



ENTE PER LE NUOVE TECNOLOGIE, L'ENERGIA E L'AMBIENTE

ISBN 88-8286-074-4

DOSSIER 1999

LA RADIOPROTEZIONE IN ITALIA

LA SALVAGUARDIA DELLA POPOLAZIONE E DELL'AMBIENTE

INDICE

PRESENTAZIONE.....	7
SINTESI DEL DOCUMENTO	13
PRIMA PARTE: ORIGINI ED EFFETTI DELLA RADIOATTIVITÀ	34
LA RADIOATTIVITÀ.....	34
La radioattività nella storia	34
La struttura della materia: atomi e isotopi	35
I radioisotopi e la radioattività	36
L'irraggiamento radioattivo nella materia	36
L'irradiazione del corpo umano	37
Dosi individuali e dosi collettive	39
Le grandezze radioprotezionistiche	39
LE APPLICAZIONI DELLA RADIOATTIVITÀ E DELLE RADIAZIONI IONIZZANTI	40
La produzione di energia elettronucleare.....	40
Le applicazioni mediche.....	40
Le applicazioni agrobiologiche	41
Le applicazioni industriali	41
Le applicazioni ambientali	41
Archeologia e datazione	42
Geologia e prospezione mineraria	42
Applicazioni relative alla sicurezza	42
Ricerca scientifica e tecnologica	43
L'ESPOSIZIONE ALLA RADIOATTIVITÀ NATURALE	43
Le sorgenti naturali di radiazioni ionizzanti	43
La radiazione cosmica	44
La componente dovuta ai radioisotopi cosmogenici	44
La radiazione terrestre	45
L'ESPOSIZIONE A SORGENTI ARTIFICIALI	51
L'irraggiamento da pratiche medico-diagnostiche	51
Il <i>fall-out</i> radioattivo degli esperimenti nucleari in atmosfera	52
La componente dovuta alla produzione di energia	53
GLI EFFETTI BIOLOGICI DELLE RADIAZIONI.....	61
L'esposizione alla radioattività	61
Effetti sulle cellule e sui tessuti biologici	62
Effetti somatici e genetici	62
Effetti deterministici e stocastici	63
La riconoscibilità degli effetti delle radiazioni	65
Gli effetti delle basse dosi	66
Gli effetti psicologici e psicosomatici.....	66
SECONDA PARTE: LA RADIOPROTEZIONE	68
LE BASI E I PRINCIPI DELLA RADIOPROTEZIONE.....	68
Le basi scientifiche e i principi cardine.....	68
La determinazione dei limiti di dose	69
Significato dei limiti di dose e dosi "ammissibili"	70
LA RADIOPROTEZIONE OPERATIVA	71
Gli strumenti	71
L'organizzazione	72
Le strategie operative.....	72
Le aree di intervento	73
PROGETTAZIONE DI IMPIANTI E ATTREZZATURE	75
Generalità.....	75

Localizzazione e struttura di impianti e apparecchiature	75
Disposizione funzionale	76
Schermature biologiche e controllo dell'atmosfera	76
Conoscenza della genesi e del trattamento di rifiuti ed effluenti radioattivi	77
Monitoraggio dei locali e controllo degli accessi	77
ORGANIZZAZIONE E GESTIONE.....	78
Generalità.....	78
Organizzazione di radioprotezione	78
Procedure di sicurezza	79
Informazione, formazione e responsabilità	79
Accertamento di qualità	80
Accreditamento e certificazione	80
LIMITAZIONE E CONTROLLO DELL'ESPOSIZIONE DEI LAVORATORI E DEL PUBBLICO	81
Generalità.....	81
Sistemi di salvaguardia, controllo degli accessi, equipaggiamenti protettivi	81
Monitoraggio degli ambienti e sistemi di segnalazione o di allarme.....	82
Valutazione delle dosi: dosimetria esterna e interna	83
Controllo degli effluenti e monitoraggio esterno	83
PIANIFICAZIONE E GESTIONE DELLE EMERGENZE	84
Generalità.....	84
L'oggettivazione del rischio nucleare	85
Sviluppo dei piani di intervento in condizioni di emergenza	86
Pianificazione della gestione dell'emergenza all'interno dell'impianto	87
Pianificazione della gestione dell'emergenza all'esterno dell'impianto	88
Piano nazionale di emergenza.....	89
LA GESTIONE DELLA STRUMENTAZIONE	90
Generalità.....	90
Idoneità della strumentazione	90
Calibrazione della strumentazione	91
Manutenzione della strumentazione	92
LA GESTIONE DEI RIFIUTI RADIOATTIVI.....	92
Origine dei rifiuti radioattivi.....	92
Classificazione dei rifiuti radioattivi	93
Modalità di gestione dei rifiuti radioattivi	94
La radioprotezione e i rifiuti radioattivi	95
Limitazione della quantità e della varietà di rifiuti ed effluenti.....	95
Raccolta, caratterizzazione e condizionamento dei rifiuti	96
TERZA PARTE: IL SISTEMA DI RADIOPROTEZIONE IN ITALIA	99
STRUTTURA E FUNZIONI DEL SISTEMA DI RADIOPROTEZIONE	99
Caratteristiche generali	99
I riferimenti tecnico-scientifici	100
I riferimenti normativi	101
RUOLO E FUNZIONI DELL' AGENZIA NAZIONALE PER LA PROTEZIONE DELL'AMBIENTE, ANPA	102
Generalità.....	102
Attività di vigilanza.....	103
Attività istruttorie.....	105
Attività di radioprotezione.....	105
Monitoraggio della radioattività ambientale	106
Preparazione alle emergenze	106
Normativa tecnica e documentazione (banche dati).....	107
Controlli di salvaguardia.....	107
Sviluppo di conoscenze e competenze.....	108
Rapporti internazionali	108
RUOLO E FUNZIONI DELL'ISTITUTO SUPERIORE DI SANITÀ, ISS	109
Generalità.....	109
Ricerche di biofisica delle radiazioni e di radiobiologia.....	110
Studio della radioattività ambientale	110

Studio della contaminazione nucleare	111
Radioprotezione del paziente	111
Dosimetria	112
RUOLO E FUNZIONI DELL'ENEA-ISTITUTO PER LA RADIOPROTEZIONE, IRP	113
Generalità.....	113
Sorveglianza fisica della protezione e tecniche radiometriche	114
Ricerca e innovazione tecnologica	115
Accertamento di qualità	115
Qualificazione dei servizi di radioprotezione.....	115
Necessità di codifica delle procedure di qualificazione.....	117
Esigenze operative.....	117
RUOLO E FUNZIONI DEGLI ESERCENTI DI IMPIANTI NUCLEARI.....	118
La radioprotezione in ambito ENEA	118
La radioprotezione in ambito ENEL	119
CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE PER L'OTTIMIZZAZIONE DEL SISTEMA DI RADIOPROTEZIONE..	121
I vincoli esterni	121
L'aggiornamento del quadro normativo e operativo	121
Operatività degli esercenti	122
Attività di ricerca.....	123
Ricambio generazionale e formazione.....	123
Reti di rilevamento e informazione.....	124
APPENDICE	126
I RIFERIMENTI DELLA RADIOPROTEZIONE	126
Gli operatori internazionali	126
Gli operatori nazionali	126
Le convenzioni internazionali.....	127
I riferimenti normativi.....	128
La radioprotezione in Internet	129
UNITÀ DI MISURA, MULTIPLI, SOTTOMULTIPLI E PREFISSI	131
BIBLIOGRAFIA	132

PRESENTAZIONE

Nell'ambito della Conferenza Nazionale Energia e Ambiente (Roma, novembre 1998) è risultata evidente l'opportunità di rendere disponibile in Italia, come già avviene nella maggior parte dei paesi europei, un documento di sintesi sulla protezione dell'uomo e dell'ambiente dalle radiazioni ionizzanti (radioprotezione).

La motivazione principale nella preparazione del documento è stata quella di rendere disponibile da un lato ai depositari della responsabilità decisionale e gestionale - a livello centrale e locale - e dall'altro agli operatori professionali dell'informazione, uno strumento di approfondimento delle problematiche proprie del settore, in relazione sia al programma di disattivazione del nucleare pregresso che il Paese sta avviando che alle esigenze di protezione poste dai seguenti aspetti:

- *la vasta diffusione nei settori produttivi, nella ricerca scientifica e nel campo sanitario di tecniche che utilizzano radiazioni ionizzanti;*
- *la crescente importanza riconosciuta alle esposizioni di origine naturale ed a quelle motivate da ragioni sanitarie;*
- *la costante evoluzione resa indispensabile dall'aumento delle conoscenze che la ricerca produce, dalle nuove applicazioni delle radiazioni ionizzanti frequentemente proposte e dall'evoluzione delle metodiche e delle normative specifiche di radioprotezione. Per quest'ultimo aspetto ci si riferisce in particolare all'obbligo per l'Italia del recepimento entro il 13 maggio 2000 della Direttiva 96/29 Euratom, che stabilisce le norme fondamentali di sicurezza relative alla protezione sanitaria della popolazione e dei lavoratori contro i pericoli derivanti dalle radiazioni ionizzanti, e della Direttiva 97/43 Euratom riguardante la protezione sanitaria delle persone contro i pericoli delle radiazioni ionizzanti connesse ad esposizioni mediche.*

L'ENEA pertanto ha promosso l'iniziativa affidando all'Ing. Ugo Spezia, giornalista esperto in comunicazione scientifica, la preparazione di un dossier di sintesi degli studi analitici e propositivi elaborati nell'ultimo periodo dai diversi enti operativi aventi competenze nel settore, con particolare riguardo all'autorità di controllo incaricata della vigilanza a livello nazionale (ANPA), all'ENEA/Istituto per la Radioprotezione (IRP), all'Istituto Superiore di Sanità (ISS) ed agli esercenti di impianti nucleari (ENEA, ENEL), sulla base di documenti analoghi prodotti in diversi Paesi europei. Nella preparazione del dossier si è anche tenuto conto dei compiti e delle attribuzioni che la normativa assegna ad altri organismi centrali.

Per la revisione del testo si è poi tenuto conto delle osservazioni e dei suggerimenti di un gruppo di esperti composto da Roberto Mezzanotte (ANPA), Giovanni Frascchetti (ENEA IRP), Franco Lucci (ENEA IRP), Severino Alfieri (ENEL SGN), Antonio Garofalo (ENEL SGN), Eugenio Tabet (ISS). La necessaria opera di coordinamento è stata svolta da Giuseppe Tarroni (ENEA IRP).

Il dossier si riferisce allo stato attuale delle conoscenze e, soprattutto, alle normative e ai riferimenti in vigore nel 1999: è pertanto previsto un suo aggiornamento in presenza di una consistente evoluzione delle conoscenze e delle norme. Il corpo principale del Dossier è preceduto da una sintesi, che si sviluppa da pag. 11 a pag. 28, che si presenta come un documento, in sé completo ed autosufficiente, capace pur nella forma scarna e necessariamente povera di dati e di approfondimenti, di fornire al lettore non specialista un primo rapido ma non superficiale approccio alla materia.

Nonostante gli sforzi e la cura dedicati alla preparazione del dossier ed alla sua revisione, con l'intento di fornire un servizio al Paese, non si può escludere la presenza di errori, imprecisioni o

refusi di stampa. Si è pertanto grati fin da ora a quanti vorranno segnalarli o comunque fornire commenti e suggerimenti indirizzandoli a:

Giuseppe Tarroni

ENEA - Istituto per la Radioprotezione

Via dei Colli, 16 - 40136 Bologna - fax 051/6098003 - e-mail: "tarroni@irpmai.bologna.enea.it"

Roma, 13 dicembre 1999

***il coordinatore per la documentazione di
radioprotezione per CNEA***

Giuseppe Tarroni

INTRODUZIONE

L'esistenza di un sistema di radioprotezione efficiente, affidabile e trasparente è preconditione indispensabile in ogni paese industriale perché le attività a rischio radiologico possano essere svolte nel rispetto dei principi basilari e della normativa vigente in tema di tutela dei lavoratori, della popolazione e dell'ambiente.

La chiusura delle centrali nucleari e delle installazioni del ciclo del combustibile nucleare non ha attenuato in Italia la suddetta esigenza, che permane intatta in considerazione della necessità di gestire l'eredità del nucleare pregresso, dell'estensivo sviluppo dell'uso delle radiazioni in diversi settori industriali, medico-sanitari e della ricerca, e infine della necessità di assicurare un dispositivo adeguato a fronteggiare il traffico illecito di materiali nucleari e rifiuti radioattivi e le possibili situazioni di emergenza che potrebbero derivare da incidenti nucleari di portata transfrontaliera. Nei prossimi anni il sistema nazionale di radioprotezione dovrà confrontarsi con alcuni importanti vincoli esterni:

- la necessità di provvedere alle esigenze del trattamento dei rifiuti radioattivi, del combustibile irraggiato e dei materiali nucleari derivanti dalle dismesse attività energetiche;
- la necessità di provvedere alle esigenze della disattivazione e dello smantellamento (decommissioning) degli impianti nucleari realizzati dagli anni Cinquanta ad oggi e definitivamente chiusi per effetto delle decisioni di politica energetica;
- i tempi lunghi ipotizzabili per la realizzazione di un deposito nazionale per lo stoccaggio dei rifiuti radioattivi;
- la non chiara individuazione delle responsabilità e dei ruoli a livello nazionale in tema di radioprotezione;
- la numerosità degli attori coinvolti, con conseguenti ritardi nell'adozione dei provvedimenti autorizzativi;
- la progressiva perdita di personale qualificato;
- il permanere di una situazione di diffidenza da parte dell'opinione pubblica e delle autorità locali per le attività nucleari di tutti i tipi.

A fronte di quelle che sono vere e proprie sfide tecnologiche e gestionali, perché il sistema di radioprotezione possa offrire ai lavoratori, alla popolazione e all'ambiente garanzie di efficienza ed affidabilità ai fini del controllo e della minimizzazione dei rischi è necessario che esso sia chiaramente individuato, correttamente strutturato, unitario (pur nell'articolazione di competenze, funzioni e responsabilità), autorevole sul piano tecnico-scientifico e trasparente sul piano dell'informazione.

Il presente dossier costituisce un tentativo di diffondere, nell'ottica sopra indicata, la conoscenza delle problematiche della radioprotezione in quanto disciplina tecnico-scientifica, nonché delle caratteristiche, delle funzioni, dell'articolazione e della missione del sistema nazionale di radioprotezione operativa in rapporto alla necessità di dare una risposta sistematica e affidabile a quelle problematiche.

L'intento originale che ha motivato lo sforzo di sintesi di cui il presente documento è frutto è stato quello di rendere disponibile da un lato ai depositari della responsabilità decisionale e gestionale - a livello centrale e locale - e dall'altro agli operatori professionali dell'informazione uno strumento di approfondimento delle problematiche proprie di un settore che va assumendo in Italia un rilievo particolare. In questo ambito occorre sottolineare le connessioni con il tema della gestione dei rifiuti radioattivi e dello smantellamento degli impianti nucleari, tema che ha assunto una sempre maggiore importanza nel Paese a valle della recente Conferenza Nazionale Energia Ambiente.

Nel dossier sono anche evidenziati i problemi che possono condizionare l'efficienza e l'efficacia del sistema nazionale di radioprotezione, e sono richiamate le condizioni operative indispensabili per il miglioramento dell'affidabilità e della trasparenza del sistema stesso.

SINTESI DEL DOCUMENTO

ASPETTI GENERALI

Dalla scoperta dei raggi X nel 1895 e della radioattività nel 1896 una consistente mole di conoscenze si è accumulata negli anni, dando luogo ad una continua estensione delle applicazioni delle radiazioni ionizzanti e ad un costante miglioramento della efficacia dei metodi per evitare o minimizzare i loro effetti indesiderati, i cosiddetti danni da radiazioni. Le prime proposte di applicazione delle radiazioni ionizzanti e le prime informazioni sui danni prodotti risalgono entrambe al 1896.

Le applicazioni delle radiazioni ionizzanti sono attualmente vastissime: dalla ricerca in diversi campi, alle applicazioni mediche sia diagnostiche sia terapeutiche, alla produzione di energia elettrica per via nucleare da fissione ed infine alle applicazioni industriali, sia come metodo di analisi sia per gli effetti propri delle radiazioni ionizzanti.

In Italia tutte le applicazioni sono massicciamente presenti, con la sola eccezione della produzione di energia elettrica da fissione nucleare.

Applicazioni delle radiazioni

Le applicazioni che fanno uso della radioattività sono innumerevoli:

- in medicina, sia in diagnostica (raggi X, TAC, RIA, scintigrafie, ecc.), permettendo di ottenere, con elevati livelli di accuratezza e di dettaglio, informazioni altrimenti non raggiungibili, che in terapia (con acceleratori e con grosse sorgenti radioattive, terapia endocavitaria e teleirradiazione ecc.) con metodi sempre più selettivi di distruzione dei tessuti patologici;
- nella produzione di energia elettrica da fissione nucleare. Questa fonte di produzione, che attualmente copre il 17% dell'energia elettrica prodotta in tutto il mondo, non è attualmente presente in Italia. Tuttavia in Italia è in programma una consistente attività relativa al trattamento e condizionamento dei rifiuti radioattivi in precedenza prodotti ed allo smantellamento degli impianti relativi al ciclo del combustibile e dei reattori stessi;
- in campo industriale: controlli non distruttivi; misure di livello, spessore, densità ed umidità finalizzati al controllo computerizzato dei diversi processi di produzione industriale; impianti per sterilizzazione di prodotti e presidi medico-chirurgici ecc.;
- nel campo della ricerca: universitaria, industriale nonché medico-sanitaria; studi relativi alle nuove fonti di energia (fusione nucleare controllata; Accelerator Driven System, ecc.); studi su sistemi avanzati di gestione delle scorie radioattive a lunga vita; studi sul comportamento di strutture, tessuti, cellule, microrganismi ecc. sotto l'influsso di campi di radiazioni ionizzanti; ricerca di base in fisica nucleare e subnucleare;
- in agrobiologia permettendo lo sviluppo di nuove tecniche antiparassitarie e di fertilizzazione a rilascio controllato;
- nello studio e protezione dell'ambiente, nell'archeologia, in geologia e prospezione mineraria mediante l'utilizzo della radioattività naturale od artificiale come traccianti.

In aggiunta alle vere e proprie applicazioni delle radiazioni, vanno infine considerati i problemi di protezione posti dalla presenza, negli ambienti di vita e di lavoro, di sorgenti di radiazioni naturali che conducono spesso ad un significativo aumento della esposizione di lavoratori o di individui della popolazione che non può essere trascurato dal punto di vista della radioprotezione.

La larga diffusione delle metodiche basate sulle radiazioni è spesso legata alla disponibilità di metodi e strumenti caratterizzati da livelli di versatilità, efficacia e sensibilità (che raramente si realizzano con altri metodi) e disponibili a costi molto contenuti.

Misura delle radiazioni

La dosimetria, genericamente intesa, è la disciplina che si occupa della misura e della valutazione della quantità di energia depositata dalle radiazioni ionizzanti nell'unità di massa del materiale attraversato. La dosimetria radioprotezionistica, allo scopo di valutare i rischi sanitari derivanti dalla esposizione del corpo umano e suoi organi alle radiazioni ionizzanti, utilizza il concetto di dose efficace che tiene conto anche del tipo di radiazione e della diversa radiosensibilità di organi e tessuti.

La dose efficace si misura in Sievert (Sv) e viene spesso sinteticamente indicata col termine "dose". Per studi statistici ed epidemiologici è inoltre utilizzato il concetto di dose collettiva, espressa in Sievert-uomo (Sv-uomo), che si ottiene sommando le dosi individuali assunte dai singoli individui costituenti il gruppo o la popolazione considerata.

Radioattività naturale

La radioattività è una componente naturale dell'ambiente in cui viviamo ed ha accompagnato lo sviluppo dell'ecosistema terrestre e del genere umano fin dalla sua origine.

Le radiazioni naturali, presenti ovunque nell'ambiente, sono originate da tre componenti fondamentali:

- raggi cosmici, costituiti da radiazioni emesse dai corpi stellari, che raggiungono la terra. L'intensità dei raggi cosmici che può raggiungere l'uomo dipende dall'altitudine sul livello del mare e varia moderatamente con la latitudine;
- radioisotopi cosmogenici, prodotti dalla interazione dei raggi cosmici con l'atmosfera e con la superficie terrestre (principalmente C-14);
- radioisotopi naturali già presenti all'epoca di formazione del sistema solare, che lentamente decadono con l'invecchiamento della terra (radioisotopi primordiali). Questi radioisotopi sono ubiquitari, cioè presenti in ogni materia, vivente e non vivente. La loro concentrazione varia molto con le caratteristiche geomorfologiche dei terreni. Particolare menzione merita il gas radon perché è inalato ovunque e dà il maggior contributo alla dose da sorgenti naturali.

In termini di dose da radiazione all'uomo la componente raggi cosmici provoca irraggiamento esterno; la componente radioisotopi cosmogenici provoca essenzialmente irraggiamento interno, prevalentemente da ingestione; la componente radioisotopi primordiali provoca irraggiamento sia esterno che interno.

Nella tabella seguente sono indicati i valori tipici delle dosi annue individuali, mediate rispettivamente a livello mondiale e a livello nazionale¹:

¹ I dati sono stati desunti da:

- Sources and effects of ionizing radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation- UNSCEAR 1993 Report to the General Assembly, UN, New York, 1993.
- F Bocchicchio, G. Campos Venuti, C. Nucciatelli, S. Piermattei, S. Risica, L. Tommasino, G. Torri (ANPA, ISS), "Results of the representative Italian national survey on radon indoors", Health Physics, 71, pg. 721-748, 1996.
- G. Campos Venuti, S. Piermattei, "Il radon indoors: stato ed evoluzione della normativa", Rapporto ISTISAN 98/3, ISS, Roma, 1998.

Dosi efficaci annuali da sorgenti naturali, per individui adulti			
<i>Sorgente</i>	<i>Tipo di esposizione</i>	<i>Dose efficace (media mondiale) (mSv/anno)</i>	<i>Dose efficace (media italiana) (mSv/anno)</i>
Raggi cosmici	Esterna	0,39	0,30
Radioisotopi cosmogenici	Interna (ingestione)	0,01	0,01
Radioisotopi primordiali	Esterna	0,46	0,58
	Interna (escluso radon)	0,23	0,23
	Interna da radon	1,3	2,0
Totale	Esterna, interna	2,4	3,1

I valori relativi alla situazione italiana sono stati desunti da stime basate sulle misure sin qui effettuate. Nel valutare i dati presentati in tabella occorre tenere nel debito conto le notevolissime fluttuazioni su base geografica, specie per quanto riguarda il contributo dei radionuclidi primordiali. Limitandosi al solo territorio nazionale, i valori tipici dei contributi ad essi dovuti variano fortemente in relazione alla conformazione geomorfologica dei terreni, alla tipologia delle abitazioni ed ai materiali da costruzione utilizzati, risultando grossolanamente compresi tra 0,3 e 1,2 mSv/anno, per il solo irraggiamento esterno, e tra 0,3 e 2,5 mSv/anno, per la sola esposizione al radon.

La dose media mondiale individuale è pertanto stimata pari a 2,4 mSv/anno, mentre la media nazionale si colloca attorno a 3,1 mSv/anno.

Significativi incrementi alle dosi medie individuali possono derivare dai voli, interessando sia gli equipaggi sia i passeggeri. L'intensità di dose efficace cresce al crescere delle quote di volo: si passa infatti da un valore medio dell'ordine di 0,003 mSv/h ad 8000m sul livello del mare a circa 0,013 mSv/h a 15000-16000m. Pur trattandosi di valori significativi a livello individuale, le dosi collettive corrispondenti non sono tuttavia tali da alterare i valori medi sopra indicati.

Esposizione a sorgenti artificiali

Le numerose tecnologie che fanno uso delle radiazioni ionizzanti comportano per l'uomo un contributo di dose aggiuntivo a quello dovuto alle sorgenti naturali che chiameremo, per meglio distinguerlo, esposizione a sorgenti artificiali. Il contributo più elevato alla esposizione media è rappresentato dalle pratiche medico-diagnostiche comportanti una dose media individuale pari a circa 1 mSv/anno (media dei paesi sviluppati).

A questa sono da aggiungere i contributi dovuti rispettivamente all'esposizione alla contaminazione residua derivante dalle esplosioni nucleari in atmosfera, all'uso di televisori e computer e, infine, alle altre esposizioni tecnologiche, che assommano ciascuno a circa 0,01 mSv/anno.

La produzione di energia elettrica da fissione nucleare comporta una dose individuale media annua per i membri più esposti del pubblico compresa fra 0,001 e 0,02 mSv/anno.

Anche le fonti fossili di produzione energetica forniscono un contributo alla dose per i membri della popolazione a causa della dispersione in ambiente di radioisotopi naturali. In tal caso i dati disponibili sono riferiti alla dose collettiva per quantità di energia prodotta, espressa in gigawatt-anno (Gwa)².

² Il Gwa è un'unità di misura dell'energia particolarmente adatta per esprimere la produzione o il consumo di energia elettrica su vasta scala. 1 Gwa equivale all'energia totale prodotta da un impianto da 1 GW, funzionante ininterrottamente per un intero anno. Passando alla corrispondente unità a tutti ben nota perché impiegata per i consumi domestici, 1Gwa = 8,76 miliardi di kWh.

I valori medi riferiti alle principali fonti energetiche sono così riassumibili:

- da energia nucleare: 200 Sv-uomo/GWa
- da carbone: 20 Sv-uomo/GWa
- da torba: 2 Sv-uomo/GWa
- da geotermia: 2 Sv-uomo/GWa

I valori indicati si riferiscono all'intero ciclo produttivo. Nel caso dell'energia nucleare da fissione, ad esempio, sono compresi anche i valori stimati dei contributi dovuti alle attività minerarie, al riprocessamento ed allo smaltimento dei rifiuti radioattivi.

Il passaggio dalla dose collettiva alla distribuzione delle dosi individuali medie in larghi gruppi di popolazione non è semplice perché dipende da numerosi fattori quali le caratteristiche del combustibile e dell'impianto, il controllo delle emissioni e tipi di filtro utilizzati, la situazione demografica (densità e dislocazione della popolazione, abitudini di vita ed alimentari, ecc.). Questo corpo di informazioni in genere è disponibile solo per la fonte nucleare di produzione energetica, per obblighi imposti a tale fonte da leggi e regolamenti.

L'esposizione professionale media mondiale per tutti i lavoratori sottoposti a monitoraggio in quanto soggetti alle norme di radioprotezione è pari a 1,1 mSv/anno (considerando tutte le occupazioni: mediche, di ricerca, industriali incluso il nucleare ecc.).

Considerazione a parte meritano quei lavoratori attualmente non sottoposti in modo generalizzato a controlli dosimetrici individuali, ma che per particolari condizioni lavorative (esempio addetti a miniere non uranifere, equipaggi degli aerei, addetti alle industrie che utilizzano sabbie zirconifere, ecc.) sono sottoposti ad incrementi significativi di dose da radiazioni naturali che possono raggiungere, nelle varie situazioni, valori da 1 a 10 mSv/anno. Per queste categorie di lavoratori le informazioni disponibili non permettono stime sufficientemente accurate dei livelli medi di esposizione. Il problema potrà tuttavia essere meglio affrontato, almeno a livello europeo, con il completo recepimento della "Direttiva 96/29 Euratom del Consiglio del 13 maggio 1996, che stabilisce le norme fondamentali di sicurezza relative alla protezione sanitaria della popolazione, e dei lavoratori contro i pericoli derivanti dalle radiazioni ionizzanti", estendendo esplicitamente il proprio campo di applicazione ad attività di questo tipo, nel caso che conducano "ad un significativo aumento dell'esposizione di lavoratori, o di individui della popolazione, che non può essere trascurato dal punto di vista della radioprotezione".

Incidenti

Si ricordano sinteticamente gli incidenti più gravi coinvolgenti la popolazione nelle diverse applicazioni³.

- Nel settore delle applicazioni militari:
 - l'incidente di Kyshtym (URSS), 1957, comportante una dose collettiva stimata in 2500 Sv-uomo ed una dose individuale media al gruppo più esposto stimata in 500 mSv;
 - l'incidente di Windscale (Inghilterra), 1957, comportante una dose collettiva stimata in 2000 Sv-uomo.
- Nel settore della produzione energetica:

³ La definizione di dose efficace limita il campo di applicazione di questa grandezza a dosi individuali che non superino largamente i livelli di esposizione riscontrabili nelle normali condizioni lavorative ed i relativi limiti di esposizione. La sua applicazione per descrivere le conseguenze di irradiazioni accidentali che superano, anche di diversi ordini di grandezza, i valori indicati deve essere perciò considerata impropria. In questa sede si è tuttavia ritenuto preferibile incorrere in questa inesattezza, piuttosto che introdurre l'intero arsenale delle grandezze dosimetriche appropriate ai vari casi in un documento destinato a un pubblico non specialistico.

- l'incidente di Three Mile Island (USA), 1978, comportante una dose collettiva stimata in 40 Sv-uomo ed una massima dose individuale stimata come non superiore a 1 mSv;
 - l'incidente di Chernobyl (URSS), 1986, comportante una dose collettiva stimata in 600.000 Sv-uomo e dosi individuali che hanno largamente superato 1 Sv.
 - l'incidente di Tokaimura (Giappone), 30/9/1999, un evento di criticità in un impianto industriale di trattamento di combustibile nucleare, comportante irraggiamento di 69 persone e dose massima di 20 Sv (dati preliminari).
- Nel settore delle applicazioni mediche o industriali:
- questi incidenti, sono causati da mancata custodia di sorgenti radioattive di elevata attività, quali quelle impiegate in teleterapia o in radiografie industriali. Esempio l'incidente di Goyania (Brasile), 1987, che ha comportato la morte di 4 persone e l'irradiazione o la contaminazione di altre 245. Le dosi individuali hanno raggiunto un valore massimo di 5 Sv.

L'analisi degli incidenti avvenuti nel passato insegna ad utilizzare tutte le metodologie e le tecniche, per altro oggi disponibili, per ridurre al minimo la possibilità di incidenti che comportino rischio per i lavoratori e gli individui della popolazione. Molti dei suddetti incidenti, specie nel settore delle applicazioni mediche o industriali, hanno riguardato i paesi tecnologicamente meno evoluti; ciò non fa tuttavia venir meno l'esigenza di disporre nel Paese di presidi tecnici ed organizzativi adeguati, sia per evitare il verificarsi di incidenti di questa natura sul territorio nazionale, sia per fronteggiare rischi dovuti all'illecita o fortuita introduzione di sorgenti, ad esempio nel commercio di rottami metallici.

I rifiuti radioattivi

Materiali di scarto e rifiuti radioattivi hanno origine da tutte le attività che comportano l'uso e la manipolazione di sorgenti e sostanze radioattive. L'uso di sorgenti e materiali radioattivi è infatti diffuso, per gli scopi più diversi, in molti settori industriali sanitari, di ricerca: ognuno di questi utilizzi genera rifiuti radioattivi. Fra queste attività hanno un ruolo preminente nella produzione di rifiuti quelle relative alla produzione di energia nucleare, alle pratiche radiodiagnostiche e biomediche ed alla ricerca scientifica. Isotopi radioattivi naturali sono inoltre presenti in tracce anche nei materiali più usuali, e possono subire effetti di concentrazione e dispersione nell'ambiente come risultato dei cicli di fabbricazione e utilizzo.

È quindi urgente affrontare il problema della corretta gestione dei rifiuti radioattivi al fine della salvaguardia dei lavoratori, delle popolazioni e dell'ambiente.

Dose collettiva agli individui della popolazione mondiale

In sintesi una stima delle dosi collettive alla popolazione mondiale dovuta a 50 anni di attività o a tutti gli eventi singoli verificatisi dal 1945 al 1992, riportata nel citato rapporto UNSCEAR93, fornisce i seguenti valori espressi in milioni di Sv-uomo:

- da sorgenti naturali	650
- da esposizione medica (diagnosi e terapia)	165
- da test nucleari militari in atmosfera	30
- dal ciclo completo del nucleare energetico	2,4
- da incidenti severi	0,6
- da esposizione professionale	0,6

Effetti delle radiazioni ionizzanti

Attraverso il processo di ionizzazione le radiazioni possono danneggiare i costituenti cellulari. Alle basse dosi i meccanismi biologici di riparazione, sempre presenti, possono porre rimedio al danno evitando o riducendo le conseguenze a carico della cellula colpita; in caso contrario la cellula può morire o risultare modificata, perdendo la capacità di riprodursi oppure continuando a farlo, dando però luogo a una discendenza di cellule modificate. Alle dosi più elevate i danni cellulari crescono ed i meccanismi di riparazione risultano sempre più inadeguati. Alle alte dosi il danno cellulare può estendersi fino ad interessare vaste regioni del tessuto colpito, pregiudicandone la funzione.

Gli effetti prodotti dalle radiazioni ionizzanti sull'organismo si possono distinguere in:

- effetti somatici che interessano le cellule che costituiscono i tessuti dell'individuo che è stato irradiato. Gli effetti somatici sono distinti in:
 - effetti somatici immediati, che si manifestano entro breve tempo dalla esposizione, la gravità dei quali aumenta con la dose assorbita (proporzionalità) e che si manifestano al di sopra di un certo limite di esposizione (effetto a soglia).
 - In relazione alla loro riconducibilità alle cause iniziali gli effetti somatici immediati sono anche classificati come effetti deterministici caratterizzati da sintomi organici evidenti di tipo acuto ed in stretto rapporto con l'esposizione.
 - Effetti somatici tardivi, che si possono manifestare anche molti anni dopo l'esposizione quali le malattie degenerative fra cui il cancro. Per questi effetti si suppone che il legame fra la dose e la probabilità di manifestazione sia di tipo proporzionale e, cautelativamente, senza soglia.
 - Le forme morbose rientranti in questa categoria non sono distinguibili per sintomi clinici o esami di laboratorio da quelle spontanee. Anche in relazione a questa loro non riconducibilità alle cause iniziali, gli effetti somatici tardivi vengono pure classificati come effetti stocastici (o probabilistici) in quanto hanno soltanto un rapporto di probabilità con la esposizione, sono cioè dominati dalla probabilità di evento.
- Effetti genetici che interessano il corredo genetico delle cellule riproduttive che viene trasmesso alle progenie, alla prima generazione od alle successive. Sono sempre, evidentemente, effetti di tipo tardivo.
 - In relazione alla loro non riconducibilità alle cause iniziali, gli effetti genetici sono anch'essi effetti stocastici (o probabilistici) in quanto legati con l'esposizione soltanto da un rapporto di probabilità.

Gli effetti stocastici delle radiazioni non sono distinguibili, come detto, da quelli determinati da altre cause, i cosiddetti casi spontanei; inoltre la loro incidenza in larghi gruppi di individui esposti si mantiene sempre modesta, almeno se confrontata con quella dei casi spontanei. Queste circostanze comportano difficoltà oggettive nel discriminare, anche su base epidemiologica, gli effetti stocastici delle radiazioni, specie nel campo delle basse dosi, che in definitiva è quello che maggiormente interessa in radioprotezione. Da tutti gli studi eseguiti su larghi gruppi di individui

esposti, e in particolare sui sopravvissuti dei bombardamenti atomici di Hiroshima e Nagasaki, è risultato evidente un aumento statisticamente significativo della frequenza di tumori in gruppi esposti a dosi efficaci dell'ordine di alcune centinaia di mSv, con probabilità crescente al crescere della dose. Per dosi inferiori, dell'ordine ad esempio delle decine di mSv, non è stato invece finora possibile, neanche con le tecniche epidemiologiche più raffinate, dimostrare, né ovviamente escludere, che vi sia un incremento delle patologie investigate, essendo ogni eventuale effetto dell'irradiazione nascosto dalle fluttuazioni statistiche dei casi spontanei. In particolare non è stato possibile stabilire se vi sia una soglia di dose al di sotto della quale si possa ragionevolmente escludere il verificarsi di danni stocastici. Come conseguenza, per consentire di valutare a fini di prevenzione i rischi delle esposizioni a basse dosi, è stata cautelativamente adottata, in radioprotezione, la ipotesi della linearità senza soglia; si è cioè ipotizzato che a qualsiasi dose, per quanto piccola, sia associata una probabilità diversa da zero che si manifesti un danno di tipo stocastico e che questa probabilità sia proporzionale alla dose efficace.

L'ipotesi di linearità senza soglia ha permesso di determinare coefficienti di rischio specificamente destinati alle valutazioni "a priori" ai fini dell'applicazione dei principi della radioprotezione di cui si tratterà nel seguito (giustificazione, ottimizzazione e determinazione dei limiti di esposizione). Tuttavia l'utilizzazione degli stessi coefficienti per calcolare "a posteriori" l'effetto di esposizioni a basse dosi, deve essere considerata con cautela, poiché le ragioni alla base dell'ipotesi di risposta lineare senza soglia, sulla cui base i detti coefficienti sono stati ricavati, sono ancora in attesa di validazione sperimentale.

Si ricordano infine, fra le conseguenze sanitarie di incidenti, gli effetti sociali, psicologici e psicosomatici, ben documentati in occasione dei maggiori incidenti nucleari (Windscale, Three Mile Island, Chernobyl).

Le basi scientifiche e i principi cardine della radioprotezione

La radioprotezione è la disciplina applicata alla protezione dell'uomo e dell'ambiente dagli effetti dannosi delle radiazioni, che si estrinseca in una serie di principi, raccomandazioni, requisiti, prescrizioni, tecnologie e modalità operative, verifiche volti a proteggere la popolazione (individui in generale, lavoratori, soggetti sottoposti a pratiche mediche di diagnosi e cura facenti uso delle radiazioni ionizzanti).

La protezione dagli effetti delle radiazioni si fonda a livello generale sull'isolamento delle sorgenti radioattive dall'ambiente e dal contatto con l'uomo, e a livello particolare sull'adozione di soluzioni progettuali, costruttive e tecnologiche, nonché sull'individuazione di comportamenti e prescrizioni atti a ridurre l'esposizione individuale e collettiva della popolazione in misura appropriata. La determinazione dei criteri e delle procedure da applicare a questo scopo è oggetto di studio da parte di numerosi organismi nazionali ed internazionali, fra i quali il più autorevole è la *International Commission for Radiological Protection* (ICRP), una commissione scientifica autonoma fondata nel 1928 della quale fanno parte alcuni dei massimi esperti internazionali del settore.

L'assunzione fondamentale sulla quale si basano le raccomandazioni dell'ICRP è che non esista dose per quanto piccola alla quale non sia associato un rischio. Da questa assunzione deriva la necessità di un sistema di protezione concettualmente complesso. L'ICRP raccomanda infatti limiti di esposizione individuali, determinati in relazione ai rischi normalmente accettati nell'industria convenzionale ed al coefficiente nominale di rischio da essa valutato, ma il rispetto dei predetti limiti non può soddisfare le esigenze di prevenzione, dal momento che non può escludere la possibilità di danni stocastici, ancorché non rilevabili neanche su base statistica, né garantire che la loro incidenza sia ridotta in misura ragionevole.

La radioprotezione si estrinseca secondo tre principi generali: il *principio di giustificazione*, il *principio di ottimizzazione* e, solo in ultima istanza, il *principio di limitazione del rischio individuale*.

Il Principio di giustificazione

Il principio di giustificazione è lo stesso che si dovrebbe applicare a tutte le attività umane comportanti rischi per gli individui, le popolazioni e l'ambiente. Esso stabilisce che l'esposizione dell'individuo e della popolazione a dosi aggiuntive di radiazione è giustificabile solo se i benefici derivanti dalle pratiche che generano le dosi aggiuntive sono superiori all'insieme degli effetti negativi statisticamente prevedibili.

Il Principio di ottimizzazione

Il principio di ottimizzazione stabilisce che - una volta comprovata la giustificazione - l'esposizione della popolazione deve essere mantenuta la più bassa ragionevolmente ottenibile (principio ALARA = *As Low As Reasonably Achievable*) tenendo anche conto di fattori economici e sociali.

Il Principio di limitazione del rischio individuale

Il principio di limitazione del rischio individuale si pone a valle dei due principi precedenti e afferma che le dosi individuali, anche se ammissibili sulla base dei principi di giustificazione e di ottimizzazione, non devono comunque eccedere specifici limiti determinati in relazione all'intera vita sulla base dei coefficienti nominali di rischio ed in confronto con i rischi accettati nella industria convenzionale.

I limiti individuali di dose, raccomandati dall'ICRP in termini di dose efficace complessiva, sono recepiti dalla legge base italiana di radioprotezione (DLgs 230/95) in:

- per individui della popolazione in generale: 1 mSv/anno
- per lavoratori esposti per motivi professionali: 100 mSv in 5 anni con un massimo di 50 mSv/anno

Per definizione, i limiti di dose vanno confrontati con la somma delle dosi provenienti dalle varie sorgenti di esposizione, con esclusione di due termini: il fondo naturale e le dosi di carattere medico-sanitario (diagnosi e terapia).

I limiti di dose raccomandati dalla ICRP vanno interpretati come strumenti per assicurare una protezione adeguata anche a livello individuale. In presenza di un rischio che per definizione si considera sempre non-nullo, i soli principi di giustificazione ed ottimizzazione potrebbero infatti non essere sufficienti a garantire una sufficiente accettabilità del rischio sul piano personale, considerate soprattutto la diversa distribuzione dei rischi derivanti da una pratica rispetto a quella dei corrispondenti benefici.

È importante ribadire che i limiti per le dosi ritenute "ammissibili" fissate dalla ICRP e recepite dalle normative nazionali, pur avendo funzioni di tutela dei lavoratori e degli individui della popolazione, non indicano soglie di danno; in altri termini affermazioni del tipo "*sopra il limite di dose c'è danno, sotto no*" sono del tutto errate. I limiti di dose hanno soprattutto il carattere di livelli operativi, da tenere presenti come ultimo strumento di garanzia personale, e come tali recepiti nelle norme positive. Tuttavia, se si verifica occasionalmente l'esposizione di uno o più individui a dosi superiori a quelle ammissibili, questa circostanza deve essere valutata soprattutto come un indice dell'insufficienza delle misure preventive, e non necessariamente come un indice di danno biologico. D'altra parte il ruolo primario per la limitazione dei rischi da radiazioni per le attività già "giustificate" è demandato a una corretta ottimizzazione della protezione, che comporta di norma l'adozione di criteri di progetto, di sistemi di protezione e procedure operative tali da contenere le dosi individuali entro valori sostanzialmente minori dei predetti limiti.

Gli strumenti

Attraverso un continuo processo di adeguamento finalizzato a conseguire obiettivi sempre più avanzati di tutela della popolazione e dei lavoratori, la radioprotezione ha sviluppato nel tempo molteplici strumenti tecnici e concettuali, divenuti sempre più elaborati ed efficaci, che si raggruppano in 4 grandi categorie:

- gli strumenti concettuali, dati dai principi fondamentali che stanno alla base della materia radioprotezionistica, e definiscono la cosiddetta *radioprotezione generale*. Si tratta in particolare dei principi di giustificazione, ottimizzazione e limitazione già ricordati;
- gli strumenti tecnici, dati dall'insieme dei dispositivi di protezione e della strumentazione di misura delle radiazioni (schermature, sistemi di confinamento statico e dinamico dei radioisotopi, mezzi di protezione personale, procedure di collaudo o d'intervento, tecniche di misura delle radiazioni, dosimetria, ecc.) che coinvolgono le scienze fisiche, le scienze biologiche e naturali, la medicina e la sanità pubblica, l'ingegneria, l'organizzazione del lavoro e le scienze ambientali;
- gli strumenti normativi, che coinvolgono l'elaborazione e l'aggiornamento di norme che comprendono direttive comunitarie, raccomandazioni, leggi nazionali, guide e norme tecniche, regolamenti, prescrizioni autorizzative, istruzioni e procedure operative.

- i controlli e le verifiche ispettive.

Nel loro insieme, queste ultime tre categorie di strumenti definiscono la *radioprotezione operativa*, che ha affinato enormemente nel tempo le proprie metodiche, a partire da quelle elementari degli anni trenta aventi per oggetto la protezione dalle sole sorgenti di raggi X contro il rischio dei soli danni deterministici allora conosciuti fino al complesso sistema di protezione da tutte le fonti naturali e artificiali messo a punto dall'ICRP, che costituisce il riferimento di tutte le normative nazionali e internazionali.

L'organizzazione

In tutti i paesi sviluppati i concetti fondamentali della radioprotezione sono attuati attraverso un efficace sistema che include leggi e normative, un efficiente sistema di controllo e un complesso ben strutturato di esperti, laboratori e attrezzature specializzate. A valle dello sviluppo di una adeguata cultura della sicurezza, l'attuazione delle pratiche radioprotezionistiche è basata su un sistema di laboratori, attrezzature di misura e metodi di indagine (tecniche di misura, modelli ambientali, metodi di controllo e modellazione, hardware, software, ecc.) che costituiscono complessivamente la tecnologia della radioprotezione. Questi strumenti sono soggetti a continuo miglioramento sulla base degli avanzamenti che interessano i settori tecnologici, scientifici e industriali correlati. La radioprotezione è infatti una disciplina dinamica, la cui continua evoluzione è fondata sul progresso delle conoscenze scientifiche e sulla messa a punto di nuove metodiche e di nuovi strumenti tecnologici.

Le aree di intervento

La radioprotezione operativa estrinseca la propria azione in favore della sicurezza intervenendo in una serie di aree specifiche, ciascuna caratterizzata da diverse problematiche e peculiarità. Queste aree sono identificate e individuate seguendo un percorso che va dalla singola applicazione all'impatto che questa ha sui lavoratori che vi sono coinvolti e sulla popolazione in generale. All'interno di questo percorso ne viene seguito un secondo di tipo gerarchico e organizzativo, finalizzato a identificare univocamente le responsabilità e a indicare i comportamenti di ciascun soggetto.

- Progettazione degli impianti e delle attrezzature. È il livello che opera più vicino alla sorgente, e quindi quello nel quale possono essere adottati gli accorgimenti più efficaci ai fini della minimizzazione dell'impatto sanitario e ambientale.
- Organizzazione e gestione. È il livello gerarchicamente più elevato nel quale intervengono le azioni della radioprotezione operativa.
- Informazione e formazione. A valle degli accorgimenti di tipo strutturale (progettazione) e gestionale (organizzazione) volti a minimizzare l'impatto delle applicazioni della radioattività, esiste la sfera dei comportamenti individuali, che devono fondarsi sulla consapevolezza dei singoli, e quindi su un intenso programma di informazione e formazione.
- Limitazione e controllo dell'esposizione dei lavoratori. Una volta assicurati gli strumenti strutturali e organizzativi, e una volta indotti i giusti comportamenti individuali e collettivi, il livello di intervento della radioprotezione si trasferisce al controllo e alla limitazione dell'esposizione, attraverso l'uso estensivo di accorgimenti operativi (delimitazione delle aree, controllo degli accessi), tecniche e dispositivi di limitazione dell'esposizione (schermature, sistemi di confinamento dinamico -cappe, scatole a guanti ecc. - equipaggiamento protettivo, sistemi di monitoraggio e di allarme) e tecniche di controllo delle dosi (dosimetria esterna e interna).
- Limitazione e controllo dei rifiuti radioattivi. Nell'economia generale della radioprotezione si dedica un'attenzione particolare alla produzione e alla gestione dei rifiuti radioattivi, che costituiscono forse uno dei principali veicoli attraverso il quale l'esposizione alla radioattività può interessare i lavoratori e soprattutto il pubblico.
- Limitazione e controllo dell'esposizione del pubblico. Lungo il percorso che parte dall'applicazione, è il livello di intervento più prossimo alla popolazione in generale.
- Pianificazione e gestione delle emergenze. In ogni installazione e da ogni apparecchiatura che facciano uso di sostanze radioattive possono scaturire condizioni di emergenza con potenziali conseguenze all'interno di un impianto (emergenza interna) o all'esterno di esso (emergenza esterna). A livello progettuale vengono individuati possibili (anche se improbabili) incidenti di riferimento per i quali vengono pianificate le azioni e definite le responsabilità in caso di emergenza.

- Predisposizione e gestione della strumentazione. La corretta esecutività di un programma operativo di radioprotezione si fonda necessariamente sulla disponibilità, sulla corretta disposizione e sull'efficienza di un complesso sistema di strumenti e apparecchiature di sorveglianza e di misura, che richiede intensi programmi di selezione, installazione, controllo funzionale, calibrazione, manutenzione e verifica di efficienza.

Un sistema efficiente di radioprotezione è dunque indispensabile per assicurare che la gestione di tutte le attività con rischio da radiazioni ionizzanti avvenga nelle condizioni di adeguata sicurezza e, nello stesso tempo, per garantire un dispositivo atto a fronteggiare possibili situazioni che coinvolgano il territorio.

Il sistema radioprotezione deve offrire ai lavoratori, alla popolazione e all'ambiente garanzia di controllo e di riduzione dei rischi a livelli tecnicamente, socialmente e scientificamente accettabili. È inoltre necessario che l'articolazione funzionale e strutturale dell'intero sistema sia chiaramente individuata, correttamente strutturata ed unitaria, pur nella molteplicità delle competenze, funzioni e responsabilità dei diversi attori a vario titolo preposti. L'intero sistema deve essere infine caratterizzato da un elevato grado di trasparenza in modo da offrire alla opinione pubblica la garanzia di efficienza, affidabilità ed indipendenza oltre che un'immagine di autorevolezza tecnico-scientifica.

IL SISTEMA NAZIONALE DI RADIOPROTEZIONE

Caratteristiche generali

In ogni paese industriale, l'esistenza di un sistema di radioprotezione efficiente, affidabile e trasparente, cui concorrano in modo integrato le diverse strutture tecnico-scientifiche e di sorveglianza, è preconditione indispensabile perché le attività a rischio radiologico possano essere svolte nel rispetto dei principi basilari e della normativa vigente in tema di tutela dei lavoratori, della popolazione e dell'ambiente. Con riferimento specifico alla situazione attuale dell'Italia, la chiusura delle centrali nucleari e delle installazioni del ciclo del combustibile nucleare non ha annullato né attenuato la suddetta esigenza, che permane intatta in considerazione:

- della necessità di gestire l'eredità del nucleare pregresso (disattivazione degli impianti nucleari, combustibile irraggiato, rifiuti radioattivi, materiali nucleari, ecc.);
- del fatto che l'utilizzo di radioisotopi e macchine radiogene è notevolmente sviluppato e diffuso in diversi settori industriali, medico-sanitari e della ricerca;
- della necessità di assicurare un dispositivo adeguato a fronteggiare possibili situazioni di emergenza derivanti da eventi nucleari che possono anche avere portata transfrontaliera;
- delle sempre più pressanti esigenze di protezione dalle esposizioni da sorgenti naturali, in special modo da radon.

Le attività proprie di un sistema nazionale di radioprotezione sono articolate in due settori fondamentali:

- attività normativa, di vigilanza e di ispezione, la cui responsabilità è demandata alle autorità pubbliche nell'ambito delle competenze ad esse attribuite;
- attività operativa di sorveglianza nei confronti dei lavoratori, degli individui della popolazione e dell'ambiente esposti a rischi da radiazioni, rientranti tra le responsabilità proprie degli esercenti-datori di lavoro, che esercitano le attività da cui originano i rischi stessi.

Nel sistema di radioprotezione rientrano inoltre, quali prerequisiti o strumenti funzionali, indispensabili principalmente per la sorveglianza ma anche per le attività di vigilanza, numerose attività di natura tecnico-scientifica, raggruppabili nelle seguenti categorie:

- attività di ricerca e qualificazione;
- attività di dosimetria interna ed esterna;
- attività di controllo e taratura della strumentazione.

I diversi paesi hanno adottato diversi schemi di aggregazione e attribuzione delle linee di attività citate. Nei paesi di maggiori dimensioni e in quelli nei quali esistono rilevanti impegni nei settori applicativi le diverse attività sono affidate a soggetti diversi, sempre con una univoca ed esplicita attribuzione di responsabilità e competenze. In particolare:

- in tutti i paesi esiste un organismo (Nuclear Regulatory body o Autorità nazionale per la sicurezza nucleare) che ha come missione principale - e spesso unica - quella relativa alla vigilanza, alle autorizzazioni (*licensing*), alle ispezioni e all'emanazione di norme tecniche;
- le attività di ricerca e qualificazione sono demandate ad istituzioni di carattere tecnico-scientifico le quali possono, all'occorrenza, avvalersi di altre istituzioni;
- le attività di dosimetria e taratura sono regolamentate, poste sotto vigilanza e con l'obbligo della qualificazione;
- l'attività operativa di sorveglianza è demandata alla responsabilità dei gestori dei singoli impianti e delle singole attività applicative, sotto il controllo dell'Autorità nazionale per la radioprotezione e la sicurezza nucleare.

Questo schema generale è attuato anche in Italia, dove, a livello di istituzioni nazionali:

- le funzioni dell'Autorità nazionale per la vigilanza in materia di radioprotezione e sicurezza nucleare sono esercitate dall'ANPA (Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente); mentre l'ISS svolge un ruolo di supporto tecnico-scientifico al Ministero della Sanità per la protezione della popolazione ed i problemi di

- salute pubblica; funzioni di vigilanza in materia di radioprotezione sono attribuite anche agli organi del Servizio Sanitario Nazionale (SSN) competenti per territorio ed agli Ispettorati del lavoro;
- le attività di ricerca sono a carico di diversi operatori, fra i quali l'Istituto per la Radioprotezione (IRP) dell'ENEA, l'Istituto Superiore di Sanità (ISS) e le strutture universitarie;
 - per quanto riguarda le attività di qualificazione per gli aspetti tecnico-scientifici, ed in particolare per le dosimetrie, le attività finora svolte a livello nazionale hanno avuto carattere essenzialmente volontaristico; di esse si è fatto carico principalmente l'ENEA-IRP, sia come promotore che come organizzatore. Per queste attività è previsto un regime, non ancora implementato in forma completa, che prevede l'impiego di apparecchi di misura individuali di tipo approvato; prescrive il possesso, per tutta la strumentazione, di certificati di taratura rilasciati secondo una precisa normativa; introduce uno specifico regime di vigilanza per i servizi di dosimetria individuale. Nelle predette attività sono coinvolti, ciascuno nell'ambito delle proprie competenze, diversi organismi, tra i quali in particolare l'ANPA, l'ENEA - Istituto di metrologia primaria delle radiazioni ionizzanti, l'Istituto superiore per la prevenzione e la sicurezza del lavoro (ISPESL);
 - le attività operative di sorveglianza sono affidate, sotto il controllo dell'ANPA e delle restanti autorità di controllo, agli esercenti che svolgono le attività, tra cui si segnalano, per quanto riguarda le installazioni o applicazioni tipicamente nucleari, l'ENEA e l'ENEL

Nel seguito saranno schematicamente illustrati, alla luce dei fondamentali riferimenti tecnico-scientifici e legislativi, il ruolo e le funzioni dei principali attori fin qui indicati: l'ANPA, l'ISS e l'ENEA/IRP, considerando gli aspetti più strettamente connessi al coinvolgimento di ciascuno di essi nel sistema nazionale di radioprotezione così come configurato in questo paragrafo. Una particolare attenzione sarà poi dedicata nel tratteggiare ruolo, funzioni ed esigenze operative dei principali gestori di attività nucleari (ENEL, ENEA).

I riferimenti tecnico-scientifici

La radioprotezione è soggetta a continuo aggiornamento alla luce dei risultati della prassi operativa, del progresso tecnologico e della ricerca internazionale nei campi della fisica, della radiobiologia e dell'epidemiologia. I risultati acquisiti nella ricerca, nella tecnologia ed in sede operativa portano ad una continua revisione di metodi, modelli e procedure, oltre che all'aggiornamento dei coefficienti di rischio e conseguentemente dei limiti di esposizione individuale. Le stesse norme di carattere legislativo e prescrittivo seguono una evoluzione caratterizzata da rapidi mutamenti.

Esistono in campo internazionale istituzioni di carattere tecnico-scientifico che hanno lo scopo di promuovere studi, ricerche e valutazioni producendo un continuo aggiornamento dei documenti che costituiscono poi la base per tutte le normative (UNSCEAR, ICRP, ICRU, IAEA, WHO, ILO, NEA- OCSE). Inoltre:

- l'Unione Europea promuove un consistente programma di studio e pubblica frequenti Guide e Rapporti tecnici di riferimento sulle tematiche emergenti di radioprotezione, preparati da gruppi di esperti formati ai sensi dell'art. 31 del Trattato Euratom;
- il Consiglio dei Ministri dell'Unione Europea emana regolamenti e Direttive rivolte ai governi il cui recepimento è obbligatorio per gli Stati membri; la Commissione Europea pubblica Raccomandazioni basilari per le applicazioni operative. La recente Direttiva 96/29 Euratom stabilisce le norme più aggiornate.

Di conseguenza, in presenza di un solido quadro di riferimento tecnico-scientifico internazionale, l'impegno a mantenere efficiente il sistema nazionale di radioprotezione deriva per i paesi europei, e in particolare per l'Italia, anche dagli obblighi assunti attraverso la sottoscrizione di numerosi accordi ed impegni internazionali riguardanti le attività a rischio radiologico.

I riferimenti legislativi

Il sistema nazionale per la sicurezza nucleare e la radioprotezione è stabilito e regolato da leggi e decreti specifici, che recepiscono e rendono operative le Direttive emesse dal Consiglio dell'Unione Europea. In tal senso il Decreto Legislativo n. 230 del 17 marzo 1995, che costituisce oggi il dettato di legge di riferimento per le attività con rischi da radiazioni ionizzanti svolte in Italia, ha recepito le direttive Euratom 80/836, 84/466, 84/467, 89/618, 90/641 e 92/3.

Il recepimento della nuova Direttiva 96/29 Euratom, che dovrà avvenire entro il 13 maggio 2000, costituisce

l'occasione per adeguare ulteriormente la normativa vigente in Italia agli standard di protezione più elevati. I caratteri innovativi della nuova Direttiva riguardano in particolare i seguenti aspetti:

- la Direttiva disciplina anche le attività lavorative che implicano *"la presenza di sorgenti di radiazioni naturali e conducono ad un significativo aumento della esposizione di lavoratori, o di individui della popolazione, che non può essere trascurato dal punto di vista della radioprotezione"*;
- la puntuale definizione dei livelli di eliminazione (clearance levels), ovvero dei livelli di radioattività che consentono di trattare i rifiuti e i materiali radioattivi come rifiuti e materiali ordinari. Si tratta di un aspetto fondamentale per tutte le attività connesse con la gestione dei rifiuti radioattivi e con la disattivazione delle centrali e degli impianti nucleari;
- la disciplina degli interventi, con l'estensione dei piani di emergenza e la codifica di prassi rigorose.

Il recepimento del capo IV della Direttiva per la parte che riguarda la idoneità dei servizi afferenti alla radioprotezione - in particolare i servizi di dosimetria - consentirà inoltre di elevare il livello di protezione dei lavoratori e della popolazione. A tal fine è indispensabile individuare procedure e disposizioni per il riconoscimento della idoneità dei servizi che prevedano, in particolare, la definizione di una istituzione con capacità tecniche e scientifiche atta a rendere operativa la qualificazione. A tale soggetto saranno demandate le fasi tecniche della qualificazione in modo tale che il procedimento amministrativo possa risultare agile, ripetibile nel tempo e trasparente.

Ruolo e funzioni dell'Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente, ANPA

Tra i molteplici compiti istituzionali che la Legge n. 61/94 attribuisce all'ANPA particolare rilievo rivestono quelli derivanti dalla normativa vigente nel campo dell'impiego pacifico dell'energia nucleare. In questo ambito i compiti dell'ANPA possono essere riassunti come segue:

- vigilanza e controllo sulle attività nucleari: possesso, commercio, trasporto, utilizzazione, dismissione di materiale nucleare e/o radioattivo, di radiosorgenti e di macchine radiogene;
- istruttorie per autorizzazione della disattivazione di impianti, di depositi di rifiuti, di nuove installazioni e di modifiche di impianto;
- coordinamento del monitoraggio della radioattività ambientale;
- adempimenti derivanti dagli accordi internazionali nel quadro del Trattato di non proliferazione nucleare;
- supporto nell'elaborazione e gestione dei piani di emergenza;
- elaborazione e diffusione della normativa tecnica;
- predisposizione di idonei sistemi informativi (banche dati);
- studi e valutazioni sulla sicurezza nucleare e radioprotezione;
- mantenimento e sviluppo delle competenze specialistiche;
- cooperazione internazionale su sicurezza e radioprotezione;
- supporto alle Amministrazioni centrali e periferiche ed alla Magistratura in materia di sicurezza nucleare e radioprotezione.

Ciascuna delle funzioni e delle attività elencate presenta caratteristiche peculiari e richiede la sussistenza di condizioni operative particolari, che vanno assicurate dalla strutturazione di un contesto normativo ed istituzionale adeguato.

Attività di vigilanza

L'ANPA è titolare di potere di vigilanza su tutte le attività soggette al D.Lgs. 230/95, comprese le installazioni mediche, con la sola esclusione degli aspetti relativi alla radioprotezione del paziente. In base a tale disposizione, la vigilanza deve essere effettuata, in via ordinaria:

- sugli "impianti nucleari" come definiti dal capo VII del D.Lgs. 230/95;
- sull'impatto radiologico intorno ai siti nucleari ove sono collocati tali impianti;
- sull'impiego dei radioisotopi e delle macchine radiogene;
- sulle macchine sperimentali per la fusione;
- sul trasporto delle materie radioattive;
- sulla detenzione e l'impiego di materie fissili speciali e prime fonti;

- sulle misure di protezione fisica passiva degli impianti nucleari;
- su qualsiasi altra attività o situazione che comporti un rischio significativo derivante dalle radiazioni ionizzanti.

L'attività di vigilanza dell'ANPA si estende su tutti gli aspetti della radioprotezione, e cioè sulla sorveglianza fisica e medica dei lavoratori, sulla radioprotezione della popolazione e sulla sorveglianza ambientale.

Attività istruttorie

Le istruttorie da seguire nell'ambito delle procedure di *licensing* di competenza ANPA variano da quelle, più complesse, relative al decommissioning della centrali elettronucleari e dei grandi impianti, a quelle relativamente più semplici ma non per questo meno impegnative, e comunque assai più numerose, riguardanti installazioni nucleari minori, impiego di sorgenti, radioisotopi, macchine radiogene, al trasporto di materiale radioattivo.

Monitoraggio della radioattività ambientale

All'ANPA è affidato il coordinamento tecnico delle reti di monitoraggio della radioattività nelle matrici ambientali, negli alimenti e nelle bevande. In questo ambito promuove criteri di normalizzazione e di intercalibrazione e l'installazione di stazioni di prelevamento, oltre a trasmettere alla Commissione Europea le informazioni relative ai rilevamenti effettuati.

Preparazione alle emergenze

Compito precipuo dell'ANPA è quello di predisporre tutti gli strumenti necessari per poter convenientemente e tempestivamente fronteggiare le emergenze nucleari che dovessero verificarsi sia sul territorio nazionale che al di là delle frontiere, fornendo il necessario supporto tecnico alle autorità amministrative preposte alla gestione della predetta emergenza. In questo ambito, allo scopo di controllare in tempo reale lo stato della radioattività in aria su tutto il territorio nazionale, l'ANPA ha realizzato una rete di stazioni per il prelievo e il monitoraggio opportunamente dislocate ed un centro di controllo dove sono trasmessi i dati rilevati e dove perverrebbe il segnale di allarme nel caso di presenza anomala di radioattività.

Normativa tecnica

Oltre alla normale emissione di guide e disposizioni tecniche, tipica di ogni Autorità di sicurezza nucleare, la legge ha assegnato all'ANPA un rilevante ruolo ai fini dell'elaborazione di specifici decreti applicativi.

Controlli di salvaguardia

Nonostante la cancellazione delle attività nazionali relative all'utilizzazione dell'energia nucleare come fonte energetica, in Italia è tuttora presente un cospicuo quantitativo di materie nucleari, per le quali è necessario prevedere l'applicazione del sistema di salvaguardie regolato dagli accordi internazionali in materia di non proliferazione nucleare.

Sviluppo di conoscenze e competenze

Per l'adempimento dei compiti istituzionali assegnati all'ANPA in materia di sicurezza nucleare e di radioprotezione è necessario il continuo aggiornamento delle conoscenze e competenze nel settore specifico, con particolare riferimento agli aspetti di più rilevante interesse in ambito nazionale, quali la sicurezza dei reattori, la gestione dei rifiuti radioattivi, la disattivazione degli impianti, la radioprotezione. Occorre infatti mantenere, valorizzare ed aggiornare la "cultura della sicurezza nucleare" a supporto delle attività istituzionali dovendo anche sopperire alle manchevolezze, in questo ambito specifico, del sistema nazionale di ricerca.

Rapporti internazionali

La presenza dell'ANPA in ambito internazionale è essenziale da un lato per l'aggiornamento delle competenze e dall'altro per il fatto che l'Italia è inserita in un contesto internazionale (Unione Europea, G-7, ecc.) in cui la tecnologia nucleare rappresenta tuttora un elemento importante per lo sviluppo. In quest'ambito l'ANPA partecipa attivamente ai programmi internazionali di assistenza ai paesi dell'Europa orientale impegnati nell'adeguamento dei loro impianti e del loro sistema di sicurezza nucleare.

Ruolo e funzioni dell'Istituto Superiore di Sanità, ISS

L'ISS svolge da molti anni un duplice ruolo nel campo della radioprotezione. Da un lato, in seno all'Istituto si effettuano molteplici ricerche di base e/o orientate sui meccanismi delle interazioni tra le radiazioni e i sistemi biologici, sulla distribuzione e la diffusione dei radionuclidi nell'ambiente anche in condizioni incidentali, sullo sviluppo di tecniche dosimetriche in diversi campi, sulla qualità e l'ottimizzazione nella diagnostica medica e nella terapia con radiazioni ionizzanti. Accanto a queste ricerche l'ISS, per precise disposizioni legislative o per prassi consolidata, ha in tema di radioprotezione numerose responsabilità istituzionali sia dirette sia in forma di consulenza tecnica per il Ministro della Sanità.

Ricerche di biofisica delle radiazioni e di radiobiologia

La protezione dalle radiazioni ionizzanti si fonda anzitutto sulla comprensione qualitativa e quantitativa dei rischi ad esse associate, cioè degli effetti biologici e della relativa probabilità nelle varie condizioni di esposizione. Per questo è necessaria una stretta integrazione delle conoscenze epidemiologiche con i risultati di studi sperimentali e di modelli sui meccanismi d'azione. A tal fine, presso l'ISS, e in particolare nel Laboratorio di Fisica, si svolge da vari anni una intensa attività di biofisica delle radiazioni e radiobiologia, a livello cellulare e molecolare. L'ISS partecipa inoltre ai progetti di ricerca varati dall'Unione Europea sui modelli biofisici per l'induzione dei tumori da parte delle radiazioni nell'ambito del Nuclear Fission Safety Programme (UE).

Studio della radioattività ambientale

L'attività di ricerca nel campo della radioattività ambientale presso l'ISS è stata sviluppata tradizionalmente secondo i due filoni principali di studio della radioattività naturale e artificiale. Nel settore della radioattività naturale un interesse particolare è stato dedicato negli anni al tema del radon negli ambienti chiusi, data la sua rilevanza sanitaria, e più in generale alla esposizione alle radiazioni ionizzanti della popolazione negli ambienti domestici.

Studio della contaminazione nucleare

Fino dagli anni Sessanta, in occasione delle ricadute radioattive sul territorio italiano dovute alle esplosioni sperimentali in atmosfera, l'ISS ha sviluppato indagini e ricerche connesse con le conseguenze di rilasci radioattivi in atmosfera, su varie tematiche, individuate a livello internazionale come priorità di ricerca. Esse hanno richiesto lo sviluppo di tecniche di rivelazione, la misura di grandezze fisiche, l'elaborazione di modelli di calcolo e l'individuazione di parametri che permettessero di descrivere o prevedere le possibili evoluzioni della contaminazione. In tale ambito è stato anche recentemente messo a punto un algoritmo per il calcolo delle conseguenze radiologiche di incidenti nucleari in Europa.

Radioprotezione del paziente

La protezione dalle radiazioni in campo medico è uno dei temi che l'ISS ha affrontato in modo autonomo e con una missione specifica, avendo per obiettivo la minimizzazione delle dosi in radiodiagnostica, in radioterapia e nell'uso professionale della strumentazione.

Nelle pratiche radiodiagnostiche l'ISS persegue dagli anni settanta l'obiettivo principale di ridurre al minimo indispensabile le dosi ricevute dai pazienti sottoposti ad esame, assieme a quello di elevare la qualità delle immagini. Con lo scopo di definire lo stato degli apparati radiologici in Italia, l'ISS, in collaborazione con l'ANPA, ha promosso e attuato il programma NEXT, i cui risultati hanno guidato la standardizzazione e l'ottimizzazione delle procedure radiodiagnostiche. L'ISS ha successivamente focalizzato il suo intervento sulla protezione dalle radiazioni nelle esposizioni in mammografia, data la rilevanza dell'utilizzazione di questa tecnica nella prevenzione del carcinoma della mammella.

Presso l'ISS si è costituito un Gruppo di studio sul tema "Assicurazione di Qualità in Radioterapia" allo scopo di sviluppare iniziative ed elaborare linee guida che recepiscono e completino le indicazioni europee in questo ambito. L'Assicurazione di Qualità in Radioterapia si propone come obiettivo di garantire che il trattamento effettuato corrisponda agli scopi per il quale è stato programmato per quanto riguarda la tecnica di esecuzione e la dose al tumore e ai tessuti normali circostanti.

Dosimetria

Le attività di dosimetria condotte dall'ISS hanno per oggetto lo sviluppo di metodi avanzati di dosimetria e di nuove tecnologie nell'uso delle radiazioni ionizzanti ad impatto sanitario. L'attività si articola in quattro settori:

- *Metodi dosimetrici per radioterapia*, per la realizzazione di diversi e complementari sistemi dosimetrici da utilizzarsi sia in fasci convenzionali che per terapia adronica.
- *Biosensori per misure di dose individuale*. La stima del rischio sanitario connesso con l'esposizione dei singoli individui a radiazioni derivanti da eventi accidentali presuppone la conoscenza della dose assorbita dagli organi degli individui stessi. La ricostruzione a posteriori della dose individuale come conseguenza di un evento accidentale implica, per la natura stessa del problema, che l'individuo esposto sia esso stesso il monitor dell'avvenuto irraggiamento.
- *Metodi dosimetrici e di identificazione nel settore industriale (alimenti irraggiati, sterilizzazione di presidi medico-chirurgici)*, un settore nel quale le applicazioni delle radiazioni sono in continuo aumento e fra queste alcune hanno un significativo impatto sanitario.

Ruolo e funzioni dell'ENEA-Istituto per la Radioprotezione (IRP)

L'attività ENEA nel campo della radioprotezione deriva da una tradizione pluridecennale nei campi della radioprotezione operativa per gli impianti e laboratori dell'Ente, della ricerca, della qualificazione e delle dosimetrie, attività svolte, in armonia con il ruolo pubblico del CNEN prima e dell'ENEA poi, in riferimento alle esigenze nazionali ed in collegamento con le omologhe attività svolte nei paesi Europei.

In armonia con gli orientamenti prevalenti nei paesi europei e con le indicazioni di direttive comunitarie e di leggi nazionali, l'ENEA decise nel 1993 di riunire tutte le attività di radioprotezione in una unica struttura dando vita all' "Istituto per la Radioprotezione-ENEA" (IRP ENEA) con le funzioni di:

- fornire i servizi di sorveglianza fisica ed ambientale di radioprotezione alle Unità dell'ENEA titolari di impianti e laboratori con rischio da radiazioni ionizzanti in ottemperanza agli obblighi che competono all'Ente per legge o per prescrizioni degli organismi vigilanti;
- costituire il riferimento tecnico-scientifico e di qualificazione sia per le attività operative presenti in ENEA sia per il sistema Paese, con il mantenimento e messa a disposizione di competenze e metodi di riferimento per tutti gli aspetti tecnico-scientifici che riguardano la radioprotezione, con attività di ricerca, di formazione e di qualificazione inserite in modo stabile ed adeguato nel contesto europeo.

L'insieme di competenze e mezzi dell'Istituto per la Radioprotezione si configura anche come una risorsa distribuita sul territorio (Bologna, Casaccia-Roma, Frascati, Saluggia-Vercelli, Trisaia-Matera), in grado di effettuare rapidamente interventi qualificati.

In assonanza con le soluzioni adottate in altri Paesi europei l'IRP ENEA oltre alla funzione di qualificazione per gli aspetti tecnico-scientifici è presente sul campo con attività di servizio aventi livelli di qualificazione che possano essere di riferimento, sia per avere conoscenza concreta e

diretta delle problematiche operative, sia per garantire (attraverso una propria autonomia economica) indipendenza, imparzialità e trasparenza.

Attività di sorveglianza fisica di radioprotezione

L'attività di sorveglianza fisica di radioprotezione è articolata in attività di:

- valutazioni preventive e formulazione delle indicazioni per l'implementazione di un corretto sistema di radioprotezione attorno alle sorgenti considerate;
- radioprotezione operativa e valutazioni di dose;
- sorveglianza ambientale;
- misura della contaminazione interna;
- dosimetria personale ed ambientale esterna per tutti i tipi di radiazioni;
- taratura della strumentazione di radioprotezione.

Viene inoltre svolta una consistente attività di assistenza all'esercente di impianti e laboratori con rischi da radiazioni nell'analisi di progetti, nella organizzazione del lavoro, nella preparazione dei piani emergenza per quanto attiene alla radioprotezione.

La ricerca in radioprotezione

Le attività di ricerca finalizzate alla pratica radioprotezionistica sono principalmente accentrate in ENEA-IRP, con totale integrazione nel contesto europeo e internazionale. Presso l'Istituto sono al momento attive le seguenti linee:

- miglioramento, aggiornamento delle metodiche in dosimetria personale ed ambientale esterna;
- sviluppo di modelli per radioprotezione con metodi sia stocastici (Montecarlo) che analitici in riferimento sia a dosimetria personale esterna che individuale interna;
- metodi, modelli e strumentazione per dosimetria individuale da contaminazione interna in riferimento in particolare a radioisotopi emittenti radiazioni fotoniche a bassa energia ed alla contaminazione per inalazione da radioisotopi sia naturali che artificiali;
- problematica del danno indotto dalle radiazioni ionizzanti, con particolare riferimento alla caratterizzazione di meccanismi alla base del riparo e della suscettibilità individuale;
- problemi derivanti dai progetti connessi agli studi sulla fusione nucleare;
- studio del comportamento dei radioisotopi nell'ambiente, in particolare nel sistema acquatico.

L'attività di qualificazione

Le azioni di qualificazione per migliorare e verificare nel Paese la qualità dei servizi di radioprotezione viene svolta in collaborazione con numerosi attori nazionali ed è attiva nei seguenti campi:

- sistemi dosimetrici per dosimetria personale ed ambientale esterna (Azione ENEA-EDP);
 - sistemi Whole Body Counter (WBC) per dosimetria interna (Azione MIDIA);
 - metodologie di valutazione della dose interna (in ambito EURADOS).
-

Sia le attività di ricerca che quelle di qualificazione sono basate sulla costituzione di professionalità e laboratori di riferimento, il cui compito è anche quello di intervenire nel Paese per i problemi di radioprotezione che richiedano elevata professionalità e capacità di affrontare situazioni complesse.

I riferimenti professionali

Si tratta di ricercatori dotati di elevata qualificazione professionale, stabilmente inseriti nel contesto della ricerca e qualificazione europea; attualmente sono attivi i riferimenti nei seguenti campi:

- dosimetria personale ed ambientale esterna per tutti i tipi di radiazioni ionizzanti;
- dosimetria individuale interna, metodi di misura e modelli per la valutazione di dose;
- misure e modelli per la valutazione di dose da inalazione tramite misure ambientali;
- qualificazione della strumentazione per la misura di irraggiamento esterno;
- applicazione degli strumenti di modellazione, in particolare Montecarlo, ai problemi di radioprotezione.

I laboratori di riferimento nazionale

Sono laboratori dotati della più aggiornata dotazione strumentale, gestiti ad alto livello e qualificati tramite partecipazione sistematica alle azioni europee ed internazionali di qualificazione; i laboratori attualmente attivi sono:

- dosimetria personale ed ambientale esterna;
- taratura della strumentazione;
- dosimetria interna e caratterizzazione aerosol per valutazione di dose da inalazione;
- misura diretta della contaminazione interna;
- radiometria per dosimetria interna.

A partire dall'entrata in vigore del D.Lgs. 230/95, e ancor più in vista del prossimo recepimento della Direttiva 96/29 Euratom la qualificazione in radioprotezione deve assumere anche in Italia, come nella generalità dei paesi europei, una connotazione basata su precisi adempimenti. In Italia l'attività di qualificazione e di verifica della affidabilità tecnico-scientifica dei dati dosimetrici è stata invece svolta finora sulla base di libera scelta sia da parte della istituzione che la promuoveva (l'ENEA, prevalentemente tramite l'Istituto per la Radioprotezione (IRP)) sia da parte degli utilizzatori.

In considerazione delle esigenze del Paese e degli obblighi derivanti dal recepimento della Direttiva 96/29 Euratom, è quindi ormai indispensabile inquadrare le attività di qualificazione nella normativa, anche per garantire da concorrenza sleale i servizi che si sottopongono a verifica e mantenere ad un livello adeguato le attività tecniche di radioprotezione nel Paese.

Sulla base degli studi, delle ricerche e delle esperienze operative acquisite, l'Istituto per la Radioprotezione, IRP, dell'ENEA costituisce un polo di aggregazione di competenze fondamentale per la costituzione di un riferimento tecnico-scientifico nazionale per la promozione e la verifica di qualità nel campo delle attività tecniche afferenti alla radioprotezione.

Ruolo e funzioni degli esercenti di impianti nucleari

La radioprotezione in ambito ENEA

Con la necessità di gestire i reattori TRIGA e TAPIRO (Casaccia) e gli impianti a suo tempo realizzati nel quadro degli studi sul ciclo del combustibile (EUREX a Saluggia; ITREC alla Trisaia, IPU e OPEC alla Casaccia), l'ENEA è attualmente il maggiore esercente nazionale di impianti nucleari non energetici. Il

reattore termico TRIGA e il reattore veloce TAPIRO, insieme al reattore TRIGA dell'Università di Pavia, sono attualmente gli unici in esercizio in Italia, con lo scopo di condurre attività di ricerca che interessano numerosi campi tra i quali quello sanitario nel quale sono finalizzate alla messa a punto di metodiche radioterapiche (TAPIRO) ed alla produzione di radioisotopi a vita breve (TRIGA).

I problemi di radioprotezione posti dall'esercizio dei reattori sperimentali sono quelli usuali nell'impiego di sorgenti complesse di radiazioni ionizzanti, con particolare attenzione alle nuove esigenze connesse con l'effettuazione di nuove esperienze o di nuove linee di ricerca. Analoga è la situazione per gli impianti del ciclo del combustibile, per i quali è in corso una transizione dalle problematiche di radioprotezione tipicamente connesse con l'esercizio a quelle proprie della disattivazione e del successivo smantellamento degli impianti. In queste nuove attività, così come in quelle relative alla gestione dei rifiuti risultanti da esse o dalla attività pregressa, il ruolo della radioprotezione assume un carattere di fondamentale rilevanza.

La molteplicità delle restanti attività con rischio da radiazioni ionizzanti svolta nei laboratori dell'ENEA, che coprono di fatto gran parte delle applicazioni delle radiazioni in ambiente extrasanitario, comporta un'articolazione particolarmente ricca e la disponibilità di risorse umane e strumentali atte ad affrontare le più diverse esigenze di radioprotezione, originate da sorgenti e macchine radiogene dei più diversi gradi di complessità, compresi acceleratori di particelle e impianti di ricerca per la fusione nucleare.

Gli aspetti di radioprotezione connessi con l'attività di esercente sono affrontati dall'ENEA tramite i suoi Esperti Qualificati incaricati, attraverso l'estensiva applicazione di prassi operative ampiamente validate a livello internazionale, attribuendo la massima importanza agli aspetti più sofisticati della radioprotezione, ed in particolare all'applicazione del principio ALARA (*As Low As Reasonably Achievable*).

L'attività radioprotezionistica dell'ENEA è affidata all'Istituto per la Radioprotezione (IRP) cui viene garantita la più completa autonomia. La forte connessione esistente tra l'ENEA nella sua veste di esercente e l'Istituto per la Radioprotezione, quale importante attore per le attività di promozione e qualificazione della radioprotezione a livello nazionale, costituisce una opportunità unica di sinergia tra gli aspetti operativi e quelli innovativi.

La radioprotezione in ambito ENEL

In seguito alla ridefinizione delle linee di politica energetica del paese, l'ENEL si è dotato di una apposita struttura tecnico-gestionale (Struttura Gestione Impianti Nucleari, SGN) cui sono state affidate, quale principale missione, le attività relative al decommissioning delle quattro centrali elettronucleari dismesse (Garigliano, Latina, Trino e Caorso), inclusa la definizione e l'attuazione della strategia di chiusura del ciclo combustibile.

Per ottemperare agli obblighi della sorveglianza fisica presso ciascuna centrale dell'ENEL opera un'apposita sezione che ha compiti ed organizzazione molto simili a quelli che hanno caratterizzato la fase di esercizio degli impianti. In effetti, le prescrizioni e gli altri obblighi di legge in materia di radioprotezione sono rimasti operanti nella transizione dall'esercizio alla disattivazione anche negli impianti dai quali è stato allontanato il combustibile irraggiato, pur essendosi drasticamente ridotto l'inventario di radioattività. Ciò anche in considerazione del fatto che molte operazioni caratteristiche del processo di disattivazione, quali ad esempio quelle di decontaminazione e determinazione dell'inventario di radioattività, quelle di estrazione e condizionamento dei rifiuti radioattivi di processo, risultano particolarmente delicate ed impegnative dal punto di vista radioprotezionistico.

L'organizzazione di radioprotezione ENEL impiega risorse qualificate e gestisce un sofisticato complesso di strumentazione di monitoraggio, misure radiometriche e dosimetriche, laboratori chimici e radiochimici, reti di sorveglianza locale della radioattività ambientale, apparati e mezzi mobili per fronteggiare eventuali situazioni anomale che possano avere conseguenze sull'ambiente esterno. Le attività di radioprotezione sono gestite con personale ENEL, ad eccezione dei Medici autorizzati, che sono consulenti esterni.

Considerazioni conclusive per l'ottimizzazione del sistema di radioprotezione

I vincoli esterni

La chiusura delle centrali nucleari e delle installazioni del ciclo del combustibile nucleare non ha attenuato l'esigenza di garantire l'esistenza di un sistema di radioprotezione efficiente, affidabile e trasparente. Tale esigenza permane intatta in considerazione della necessità di gestire l'eredità del nucleare pregresso, dell'estensivo sviluppo dell'uso delle radiazioni in diversi settori industriali, medico-sanitari e della ricerca scientifica, e infine della necessità di assicurare un dispositivo adeguato a fronteggiare il traffico illecito di materiali nucleari e rifiuti radioattivi e le possibili situazioni di emergenza che potrebbero derivare da incidenti

nucleari di portata transfrontaliera.

Gli impegni restano dunque di rilevante entità. In particolare:

- è necessario gestire problematiche di rilevante entità, quali la disattivazione degli impianti nucleari e la gestione dei rifiuti radioattivi;
- aumentano gli impieghi dei radioisotopi e delle radiazioni ionizzanti a scopi non energetici;
- si moltiplicano episodi di traffico illecito di materiale nucleare;
- è necessario mantenere viva nel paese la cultura della sicurezza nucleare e della radioprotezione.

Nei prossimi anni il sistema nazionale di radioprotezione dovrà inoltre confrontarsi con alcuni importanti vincoli esterni:

- la necessità di rivedere le normative nazionali di radioprotezione alla luce dei più aggiornati standard di protezione, così come precisati nella Direttiva 96/29 Euratom;
- la necessità di snellire gli iter autorizzativi;
- i tempi lunghi ipotizzabili per la realizzazione del deposito nazionale dei rifiuti radioattivi;
- la conseguente progressiva perdita di personale qualificato.

Aggiornamento del quadro normativo e operativo

Il recepimento della nuova Direttiva 96/29 Euratom, che come già detto dovrà avvenire entro il 13 maggio 2000, costituisce l'occasione per adeguare la normativa vigente in Italia. Condizione essenziale perché questo adeguamento sia effettivo è il completo recepimento nella normativa nazionale della Direttiva 96/29 Euratom in tutti i suoi aspetti più innovativi, quali in particolare i criteri di eliminazione.

Assume particolare rilevanza, per le sue implicazioni programmatiche, operative e progettuali, la predisposizione di un preciso quadro regolamentare cui possano riferirsi le attività di sistemazione dei rifiuti nucleari e di disattivazione degli impianti, in termini ad esempio di caratteristiche dei manufatti risultanti o delle modalità di deposito o di smaltimento.

Anche in considerazione degli obblighi derivanti dal recepimento della Direttiva 96/29 Euratom, è infine necessario che l'Italia si doti di una struttura di riferimento preposta, in modo formale, alla qualificazione dei servizi di dosimetria sulla base di procedure codificate. Tale azione di qualificazione servirà, oltre che a mantenere ad alto livello le attività tecniche di radioprotezione nel Paese, anche a regolare il mercato dei servizi, tutelando i più qualificati dalla concorrenza sleale. L'Istituto per la Radioprotezione (IRP) dell'ENEA si propone di contribuire in modo determinante alle iniziative per soddisfare alle esigenze del paese in questo settore.

Operatività degli esercenti

I particolari requisiti di operatività legati alla fase di *decommissioning* delle centrali e degli impianti nucleari ed al trattamento-condizionamento dei rifiuti radioattivi impongono di mantenere e se possibile esaltare i caratteri di autonomia delle organizzazioni di radioprotezione. In tale ottica è indispensabile una programmazione delle risorse e delle competenze specialistiche a breve e medio termine che tenga conto della disponibilità attuale e delle future esigenze di personale, per definire le necessarie azioni di adeguamento e formazione.

Una rilevante problematica connessa alle attività di disattivazione degli impianti è quella legata alla classificazione del materiale solido proveniente da zone controllate. Gran parte di questo materiale presenta livelli di radioattività molto bassi, spesso inferiori a quelli naturalmente presenti nei materiali comuni, con livelli di rischio sanitario molto modesti. La mancanza di chiari riferimenti normativi nei livelli di *clearance* pone tuttavia notevoli difficoltà operative.

Attività di ricerca

Per mantenere, valorizzare ed aggiornare la cultura della sicurezza nucleare e della radioprotezione è necessario il continuo aggiornamento delle conoscenze e delle competenze nei settori specifici della sicurezza dei reattori, della gestione dei rifiuti radioattivi, della disattivazione degli impianti, della radioprotezione. Si richiede quindi una sistematica attività di ricerca per lo sviluppo delle conoscenze di base

e per l'aggiornamento continuo dei metodi e dei modelli sperimentali. A questo scopo vanno salvaguardate ed incrementate sia le attività di ricerca finalizzate alla pratica radioprotezionistica, principalmente accentrate in ENEA-IRP, sia le ricerche volte alla protezione della popolazione per quanto riguarda i radionuclidi naturali ed artificiali e l'esposizione medica, alle quali l'ISS fornisce un contributo primario.

Ricambio generazionale e formazione

Il progressivo depauperamento delle risorse umane dedicate alla radioprotezione ha ormai assunto proporzioni tali da richiedere interventi urgenti. Questa tendenza, se non interrotta, potrebbe comportare la perdita di competenze strategiche difficili da ricostituire. Sarebbe questa la fine di ogni attività di largo respiro nel campo della promozione e della qualificazione, con conseguente emarginazione dagli sviluppi in ambito internazionale, non solo in campo normativo ma anche in quello tecnico operativo, creando difficoltà insormontabili per gli organismi di vigilanza, di qualificazione tecnico-scientifica e per gli esercenti di impianti e laboratori.

PRIMA PARTE: ORIGINI ED EFFETTI DELLA RADIOATTIVITÀ

LA RADIOATTIVITÀ

La radioattività nella storia

- Nel novembre 1895, mentre studia le scariche di corrente nei tubi a vuoto, il tedesco Wilhelm Conrad Röntgen osserva che ogni volta che la corrente fluisce nel tubo sono emesse radiazioni invisibili che chiama raggi X. Egli nota che queste radiazioni possono attraversare moderati spessori di materia e sono fermate da alcune sostanze più facilmente che da altre. Entro breve tempo, nel febbraio 1896, ad opera di E. Frost, i raggi X sono utilizzati in medicina per la diagnosi radiografica.
- Il 1° marzo 1896 il ricercatore francese Antoine-Henri Becquerel verifica che la peceblenda - un minerale di uranio - può causare l'annerimento delle lastre fotografiche anche in assenza di luce, e scopre in tal modo la radioattività naturale. Nel 1899 lo scienziato inglese Ernest Rutherford identifica due tipi di radiazione emessi dalla peceblenda, e li chiama raggi α e raggi β . Nel 1900 il francese Paul Villard trova fra le emissioni della peceblenda un terzo tipo di radiazione, che battezza raggi γ .
- Nel 1896 l'americano Thomas Edison riferisce di danni agli occhi causati dai raggi X. N. Tesla mette in guardia gli sperimentatori sulla necessità di evitare la permanenza in prossimità dei tubi a raggi X durante il loro funzionamento. Il dottor D.W. Gage pubblica un articolo nel quale descrive alcuni danni provocati dai raggi X: caduta dei capelli e lesioni cutanee.
- Nel dicembre 1898 Pierre Curie e Maria Sklodowska, trattando diverse tonnellate di peceblenda, riescono ad isolare e ad estrarre meno di un grammo di un nuovo elemento - il radio - cui attribuiscono la radioattività emessa dalla peceblenda. Henry Becquerel ne riceve in dono una piccola quantità, che ripone in una tasca. Giunto nel proprio laboratorio si accorge di avere la pelle ustionata in corrispondenza della tasca.
- Nel 1910 il padre gesuita Theodor Wulf effettua misure di radioattività a livello del suolo e sulla cima della torre Eiffel, scoprendo che la radiazione cresce con l'elevazione. Egli formula l'ipotesi che la radiazione ambientale abbia una componente di origine cosmica, e propone di effettuare misure ad alta quota utilizzando i palloni aerostatici. Attuando il suo suggerimento Victor Hess scopre nel 1912 i raggi cosmici.
- Nei primi anni Dieci i ciarlatani entrano nel "business" radioattivo. L'U.S. Patent Office rilascia un gran numero di brevetti per apparecchiature, sostanze e tecniche di cura "miracolose". Nel 1912 è brevettato il "Revigorator", una pozione a base di minerali di radio. Nello stesso anno si registra il decesso di un paziente che per curare l'artrite si sottoponeva a iniezioni di radio-226. Nel 1925 W.Bailey commercializza il "Radithor", una pozione a base di radio contro le disfunzioni sessuali. Nel 1932 l'industriale e *playboy* miliardario E. Byers muore in seguito all'assunzione di Radithor.
- Nel 1915 la *British Röntgen Society* propone i primi standard per la protezione dei lavoratori e della popolazione dagli effetti indesiderati delle radiazioni. Si tratta di un sistema di controlli volontari che agiscono sulla schermatura delle sorgenti, sulla limitazione delle ore lavorative e su regolari controlli sanitari. L'assenza di unità di misura standard e di dosimetri impedisce l'adozione di precisi limiti di dose.
- Durante la prima guerra mondiale è esposto alla radioattività un elevato numero di lavoratrici impiegate nella costruzione di strumenti a quadrante luminoso. Nel 1920 l'uso di vernici fluorescenti a base di sostanze radioattive si estende senza particolari controlli all'industria civile

dell'orologeria. Nel 1925 il fisiologo Martland rileva nei lavoratori coinvolti stati di anemia e patologie ossee.

- Nel 1925 inizia l'utilizzazione su larga scala della radioterapia per la cura del cancro. Negli anni successivi vengono perfezionate e descritte nelle pubblicazioni mediche e scientifiche apparecchiature e metodiche. Nel 1927, ad opera di H.Muller, appaiono i primi studi sugli effetti genetici delle radiazioni.
- Nel 1927 un medico di Boston, Herman Blumgart, fa uso per la prima volta di traccianti radioattivi per la diagnosi di stati patologici del cuore e dell'apparato cardiocircolatorio.
- Nel 1928 si tiene il primo congresso dell'*International Committee on X-ray and Radium Protection*, organismo dal quale trarrà successivamente origine l'International Commission for Radiological Protection (ICRP). Sono pubblicati i primi standard internazionali per la protezione dalle radiazioni.
- Nel 1932 Chadwick, interpretando precedenti risultati sperimentali ottenuti da Irène Curie e Frédéric Joliot, stabilisce l'esistenza di una nuova particella elementare, il neutrone, che si viene ad aggiungere alle uniche due precedentemente identificate, l'elettrone e il protone.
- Nel 1934 Irène Curie e Frédéric Joliot, bombardando con particelle α un foglio di alluminio, producono il primo isotopo radioattivo artificiale: il fosforo-30. Lo stesso anno Enrico Fermi dimostra che è possibile produrre isotopi radioattivi in grande quantità utilizzando come proiettili i neutroni in luogo delle particelle α . Pur essendosi imbattuto, durante questi studi, nella fissione nucleare, Fermi non se ne rende conto, e avvia con la sua équipe un'intensa attività sperimentale finalizzata alla produzione di isotopi radioattivi.
- Nel 1938 Otto Hanh, F. Strassmann e Lise Meitner scoprono che bombardando l'uranio con neutroni lenti si può produrre la scissione del nucleo in due o più frammenti radioattivi, con liberazione di neutroni e di energia: a questo particolare tipo di reazione viene dato il nome di fissione nucleare.
- Il 2 dicembre 1942 a Chicago un'équipe guidata da Enrico Fermi realizza la "pila" di uranio e grafite CP-1, con la quale dimostra la possibilità di indurre e sostenere in modo controllato la reazione di fissione a catena. Nasce in tal modo il primo prototipo di reattore nucleare.

La struttura della materia: atomi e isotopi

La materia è costituita di atomi, le più piccole frazioni di essa che conservano le proprietà degli elementi che la compongono. Ciascun atomo è formato da un nucleo centrale contenente protoni (particelle con carica positiva) e neutroni (particelle prive di carica) e circondato da una nube esterna di elettroni (particelle di carica negativa). In condizioni normali ogni atomo è elettricamente neutro, e la carica positiva (il numero) dei protoni è esattamente bilanciata dalla carica negativa (dal numero) degli elettroni.

Il numero degli elettroni presenti nella nube esterna - uguale al numero di protoni presenti nel nucleo - determina la specie chimica. L'atomo più semplice (e più leggero) è quello dell'idrogeno, il cui nucleo è formato da un solo protone, e la cui nube elettronica contiene quindi un solo elettrone; l'atomo più complesso (e più pesante) esistente in natura è quello dell'uranio, che conta nel nucleo 92 protoni (e quindi 92 elettroni nella nube esterna) e 146 neutroni.

Gli atomi di uno stesso elemento possono talvolta differenziarsi - a parità di protoni ed elettroni - per il numero di neutroni contenuti nel nucleo. La presenza di un diverso numero di neutroni non ha alcuna influenza sulle proprietà chimiche dell'atomo, ma ha l'effetto di appesantirlo (più neutroni) o di alleggerirlo (meno neutroni), e quindi ne influenza le proprietà fisiche. Gli atomi di uno stesso elemento chimico che differiscono solo per il numero di neutroni contenuti nel nucleo si chiamano *isotopi* di quell'elemento e si indicano associando al nome dell'elemento il numero complessivo delle particelle (protoni e neutroni) presenti nel nucleo (chiamato anche numero di massa).

L'idrogeno, ad esempio, ha tre isotopi: ^1H =idrogeno-1 o semplicemente idrogeno (il numero 1 -

numero di massa - indica la somma dei protoni e dei neutroni presenti nel nucleo), ^2H =idrogeno-2 o deuterio, ^3H =idrogeno-3 o trizio. Il carbonio e l'uranio hanno ciascuno tre isotopi naturali. Per il carbonio: ^{12}C =carbonio-12, ^{13}C =carbonio-13 e ^{14}C =carbonio-14; per l'uranio: ^{238}U =uranio-238, ^{235}U =uranio-235 e ^{234}U =uranio-234.

I radioisotopi e la radioattività

Gli isotopi costituenti la materia sono talvolta instabili, e tendono a trasformarsi spontaneamente emettendo particelle elementari (particelle α , β , neutroni), generalmente accompagnate da radiazioni elettromagnetiche (raggi X, raggi γ)⁴. Il processo di emissione radioattiva da parte di un atomo è chiamato *disintegrazione* o *decadimento radioattivo*, e gli isotopi instabili sono detti *radioisotopi*. A seguito di reazioni nucleari possono essere prodotti isotopi non presenti in natura (almeno in quantità apprezzabili). Questi isotopi, tutti radioattivi, sono indicati come *radionuclidi artificiali*.

Gli atomi che subiscono il processo della disintegrazione radioattiva perdono generalmente le caratteristiche iniziali, trasformandosi in atomi di altri elementi, che possono essere ancora instabili e decadere a loro volta. Si generano in tal modo vere e proprie catene di elementi radioattivi generati l'uno dall'altro, che danno luogo alle cosiddette *famiglie radioattive*.

La radioattività è un fenomeno molto diffuso nell'ambiente, dal momento che moltissimi radioisotopi si trovano comunemente in natura, ed entrano a far parte di quasi tutte le sostanze conosciute. La radioattività presente nell'ambiente è chiamata *radioattività ambientale*. La componente della radioattività ambientale derivante da cause naturali si chiama *radioattività naturale*, quella derivante dalle attività umane si chiama *radioattività artificiale*.

La radioattività è descritta e quantificata per mezzo di alcune grandezze fisiche fondamentali.

- Si definisce *attività* di un campione di una sostanza radioattiva il numero di disintegrazioni che in essa si producono nell'unità di tempo. L'attività si misura in *Bequerel* (Bq): 1 Bq = 1 disintegrazione/secondo. L'attività di una sostanza fornisce un'indicazione sulla frequenza media con la quale essa emette radiazioni.

Attraverso il decadimento le sostanze radioattive perdono gradualmente la loro attività. A seconda della sostanza questo processo può essere molto breve (alcuni secondi) oppure molto lungo (milioni di anni).

- Il tempo necessario perché la metà degli atomi di un isotopo radioattivo subisca il processo di disintegrazione si chiama *tempo di dimezzamento* (detto anche semiperiodo o emivita) di quel radioisotopo. Il tempo di dimezzamento T (misurato in secondi, minuti, ore, giorni o anni) fornisce quindi un'indicazione numerica sulla durata nel tempo della radioattività di una sostanza.

L'irraggiamento radioattivo nella materia

Una volta emesse, le radiazioni (particelle elementari e onde elettromagnetiche) si muovono attraverso la materia circostante ed hanno, in varia misura, la capacità di interagire con essa.

⁴ Raggi X e raggi γ sono radiazioni della stessa natura (radiazioni elettromagnetiche ionizzanti), ma originate rispettivamente da fenomeni coinvolgenti elettroni orbitali (o liberi) o da fenomeni nucleari. Raggi X e raggi γ di pari energia sono fisicamente indistinguibili. Nei casi più comuni i raggi X hanno tuttavia energia nettamente minore di quella dei raggi γ e sono perciò meno penetranti, anche se occorre tener presente che non si tratta certamente di una regola generale.

Le diverse componenti della radiazione (particelle α , β , neutroni, raggi X, raggi γ) hanno diverse modalità di interazione con la materia, con una diversa capacità di penetrazione. La componente meno penetrante è rappresentata dalle particelle α , che sono ad esempio fermate da un semplice foglio di carta, e non riescono ad attraversare lo strato superficiale (strato morto) della pelle umana. Le particelle β hanno un potere di penetrazione più marcato, riuscendo ad attraversare anche alcuni centimetri di tessuto umano. Neutroni, raggi X e raggi γ rappresentano le componenti più penetranti della radiazione. Per queste componenti non è possibile indicare una massima profondità di penetrazione, dal momento che esibiscono un assorbimento di tipo essenzialmente esponenziale, ma solo lunghezze caratteristiche delle curve di attenuazione nei vari materiali. Per attenuare fino a livelli sicuri raggi X e γ di alta energia possono essere richiesti, anche per sorgenti di media attività, consistenti spessori di calcestruzzo (alcuni decimetri) o piombo (alcuni centimetri), destinati ad aumentare anche di un ordine di grandezza per le sorgenti più significative. Analoghi spessori di calcestruzzo o di altri materiali idrogenati possono essere richiesti attorno alle sorgenti neutroniche. Attraversando la materia le radiazioni depositano in essa parte della loro energia (tutta se vengono interamente assorbite) provocando diversi effetti fisici. L'effetto più caratteristico che contraddistingue e definisce questa categoria di radiazioni - che sono perciò dette *radiazioni ionizzanti* - è la *ionizzazione*, ovvero l'allontanamento di uno o più elettroni dall'atomo o dalla molecola di appartenenza, con la conseguente separazione di cariche elettriche di segno opposto nella materia attraversata, cui può far seguito la rottura (*radiolisi*) di legami chimici fra atomi e molecole della materia stessa.

L'energia depositata dalle radiazioni ionizzanti nelle sostanze irradiate è considerata in dosimetria il parametro fondamentale per descrivere gli effetti dell'irradiazione in termini quantitativi. In particolare:

- la quantità di energia depositata dalle radiazioni nell'unità di massa del materiale irradiato si chiama *dose assorbita* e si misura in *gray* (simbolo Gy). La rapidità con cui in un determinato materiale si accumula la dose assorbita si chiama *intensità (o rateo) di dose assorbita*. Si misura in *gray/ora* (simbolo Gy/h).

L'irradiazione del corpo umano

L'esposizione del corpo umano alle radiazioni può avvenire in seguito a permanenza in un campo di radiazione esterno - e si parla in tal caso di *irradiazione o esposizione esterna* -, ma anche per accumulo di radioisotopi all'interno degli organi e dei tessuti (ad esempio, per inalazione o per ingestione): si parla in questo caso di *irradiazione o esposizione interna*.

Gli effetti biologici delle radiazioni non dipendono solo dalla dose assorbita dai tessuti, ma anche dal tipo di radiazione e dalle condizioni di irraggiamento (organi colpiti e rapidità con cui la dose è accumulata). Si è perciò venuta sviluppando, accanto alla dosimetria fisica basata sul concetto fondamentale di dose assorbita, anche una dosimetria radioprotezionistica, specificamente finalizzata alla valutazione dei rischi sanitari derivanti dall'esposizione del corpo umano e dei suoi organi alle radiazioni ionizzanti. Scopo e oggetto di questa branca della dosimetria è la quantificazione di indicatori di rischio basata da un lato sulla misura della dose assorbita nei tessuti viventi, e dall'altro sulla valutazione dei restanti fattori (tipo di radiazione, tipo di tessuto) che ne influenzano gli effetti biologici.

- La grandezza radioprotezionistica che quantifica il rischio associato all'irradiazione di un singolo organo o tessuto tenendo conto del tipo di radiazione è la *dose equivalente*. Il suo valore si ottiene moltiplicando la dose assorbita dal tessuto biologico per un fattore correttivo che dipende dal tipo di radiazione, detto *fattore di peso della radiazione* (vedi tabella 1). La dose equivalente si misura in *sievert* (simbolo Sv). Una dose equivalente di 1 Sv ad un determinato organo

comporta per definizione lo stesso rischio di effetti stocastici dell'irradiazione dello stesso organo con una dose assorbita di 1 Gy di radiazione X o γ .

- La grandezza protezionistica destinata a quantificare il rischio complessivo per l'individuo irradiato, combinando gli effetti di diverse dosi in diversi organi o tessuti si chiama dose efficace. Questa grandezza tiene conto della diversa radiosensibilità dei diversi organi o tessuti e del corpo umano nel suo complesso e si ottiene sommando i contributi dovuti a ciascun organo irradiato. Il contributo di un particolare organo è pari alla dose equivalente all'organo moltiplicato per il fattore di peso indicato nella tab. 2. I fattori di peso sono determinati dalla ICRP in relazione alla sensibilità biologica dei vari organi o tessuti. La dose efficace si misura ancora in *sievert*. Una dose efficace di 1 Sv è per definizione equivalente, sotto il profilo del rischio di effetti stocastici, ad un'irradiazione uniforme dell'intero organismo con una dose equivalente di 1 Sv a ciascun organo.

Il rischio complessivo associato all'irradiazione di un individuo si misura dunque calcolando la dose efficace secondo lo schema rappresentato nella figura 1; a questo fine occorre moltiplicare le dosi assorbite dai vari organi per gli appropriati fattori di peso della radiazione (in modo da ottenere le corrispondenti dosi equivalenti) e successivamente per gli appropriati fattori di peso per i tessuti (in modo da ottenere il corrispondente contributo alla dose efficace) ed infine sommare i risultati così ottenuti.

In relazione alle due forme di irradiazione descritte in precedenza, si suole parlare di dose interna o di dose esterna riferendosi, con ovvio significato dei termini, ai contributi alle dosi equivalenti o alla dose efficace dovuti alle due vie di irradiazione.

Tabella 1 - Fattore di peso delle radiazioni per il calcolo della dose equivalente. (Fonte: ICRP)

tipo di radiazione	fattore di peso
fotoni in genere	1
raggi X	1
raggi γ	1
elettroni (particelle β) di tutte le energie	1
neutroni di energia < 10 keV	1
neutroni di energia compresa fra 10 e 100 keV	10
neutroni di energia compresa fra 100 keV e 2 MeV	20
neutroni di energia compresa fra 2 e 20 MeV	10
neutroni di energia maggiore di 20 MeV	5
neutroni di cui non si conosca l'energia	10
protoni di energia superiore a 2 MeV	5
particelle di carica unitaria e massa superiore a 1 amu	10
particelle α , particelle di carica multipla o non conosciuta	20
frammenti di fissione, nuclei pesanti	20

Tabella 2 - Fattore di peso per i diversi organi e tessuti del corpo umano per il calcolo della dose efficace (Fonti: ICRP, D.Lgs.n.230/95).

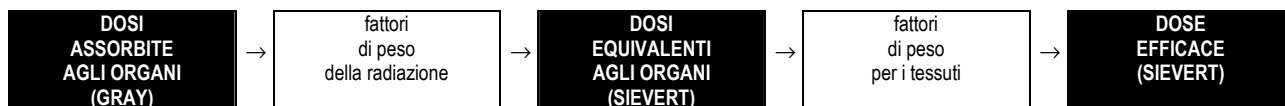
organo o tessuto irradiato	fattore di peso ICRP	fattore di peso decreto lgs n. 230/95 (*)
Gonadi	0,20	0,25
Mammelle	0,05	0,15
midollo osseo (rosso)	0,12	0,12
Polmoni	0,12	0,12
Tiroide	0,05	0,03
superfici ossee	0,03	0,03
Cute	0,01	
Colon	0,12	
Stomaco	0,12	
Vescica	0,05	
Fegato	0,05	
Esofago	0,05	
superfici ossee	0,01	
altri organi e tessuti	0,05 (**)	0,30 (***)

(*) I fattori di peso indicati nel D. Lgs. 230/95 si riferiscono in realtà al calcolo dell'equivalente di dose efficace, una grandezza radioprotezionistica analoga alla dose efficace impiegata nel predetto decreto. Essi sono qui riportati essenzialmente per mostrare il continuo progressivo affinamento dei concetti e degli strumenti tecnici impiegati in radioprotezione.

(**) Surrene, cervello, intestino crasso superiore, intestino tenue, rene, muscolo, pancreas, milza, timo e utero.

(***) Si valuta l'equivalente di dose medio per i cinque (altri) organi o tessuti più esposti (eccettuati cristallino, pelle, avambracci, mani, piedi e caviglie) utilizzando per ciascuno un fattore di ponderazione 0,06.

Fig. 1 - Schema di calcolo delle dosi equivalenti e della dose efficace.



Dosi individuali e dosi collettive

Oltre alle dosi individuali, assunte da singoli individui della popolazione, in radioprotezione ha interesse la valutazione della cosiddetta *dose collettiva* assunta dalla popolazione nel suo complesso, che si ottiene sommando le dosi assunte dai singoli individui. La dose collettiva, che si esprime convenzionalmente in sievert-uomo, è utilizzata a fini statistici ed epidemiologici per valutare, accanto all'esposizione del singolo individuo, l'esposizione della popolazione nel suo complesso. Così come la dose efficace quantifica il rischio per il singolo individuo irradiato, e cioè la probabilità che questi sia colpito da un danno biologico, la dose collettiva esprime il corrispondente rischio per la popolazione considerata, cioè la probabilità di effetti biologici attesi su base statistica a seguito dell'irradiazione dell'intera popolazione, o comunque di un consistente numero di individui facenti parte di essa.

Le grandezze radioprotezionistiche

La tabella 3 fornisce un quadro riepilogativo delle principali grandezze di interesse radioprotezionistico e delle relative unità di misura indicate dal Sistema Internazionale (SI). Per completezza sono indicate anche le corrispondenti unità speciali precedentemente in uso. Per non appesantire ulteriormente il quadro, e per evitare possibili confusioni legate a spiccate somiglianze terminologiche, non si è ritenuto utile presentare, qui e nel paragrafo precedente, grandezze protezionistiche pur importanti, quali in particolare l'equivalente di dose e le grandezze da esso derivanti, né il fattore di qualità necessario per la loro definizione o per la valutazione dei fattori di ponderazione della radiazione per nei casi non indicati nelle raccomandazioni ICRP. Sfortunatamente la normativa italiana vigente fa ancora uso - in parte - di queste ultime grandezze; il prossimo recepimento della direttiva 96/29 EURATOM comporterà tuttavia l'aggiornamento di questo aspetto della normativa. Questo complesso di circostanze ha consigliato di adottare fin d'ora in tutto il presente dossier le grandezze indicate dalla predetta direttiva.

Tabella 3 - Riepilogo delle principali grandezze di interesse radioprotezionistico.

Grandezza	Unità di misura del SI	Vecchia unità di misura	Equivalenza fra le unità
Attività	becquerel (Bq)	curie (Ci)	1 Bq = $2,7 \times 10^{-11}$ Ci
Tempo di dimezzamento	unità di tempo	unità di tempo	-
Esposizione	coulomb/chilogrammo (C/kg)	röntgen (R)	1 R = $2,58 \times 10^{-4}$ C/kg
Intensità di esposizione	röntgen/ora (R/h)	röntgen/ora (R/h)	-
Intensità di esposizione	röntgen/ora (R/h)	röntgen/ora (R/h)	-
Dose assorbita	gray (Gy)	rad (rad)	1 Gy = 100 rad
Intensità di dose assorbita	gray/ora (Gy/h)	rad/ora (rad/h)	1 Gy/ora = 100 rad/ora
Dose equivalente	sievert (Sv)	rem (rem)	1 Sv = 100 rem
Intensità di dose equivalente	sievert/ora (Sv/h)	rem/ora (rem/h)	1 Sv/ora = 100 rem/ora
Dose efficace	sievert (Sv)	rem (rem)	1 Sv = 100 rem
Intensità di dose efficace	sievert/ora (Sv/h)	rem/ora (rem/h)	1 Sv/ora = 100 rem/ora
Dose collettiva	sievert-uomo	rem-uomo	1 Sv-uomo = 100 rem-uomo

LE APPLICAZIONI DELLA RADIOATTIVITÀ E DELLE RADIAZIONI IONIZZANTI

Le attività umane e le applicazioni che implicano l'uso diretto o indiretto della radioattività sono innumerevoli. Le più significative riguardano la medicina, la produzione di energia, la ricerca scientifica e tecnologica, l'industria in senso lato, l'agricoltura e l'industria alimentare, la geologia e la prospezione mineraria, le applicazioni ambientali e l'archeologia.

La produzione di energia elettronucleare

I reattori nucleari sono basati sulla reazione di fissione nucleare a catena indotta da neutroni nell'uranio-235 e nel plutonio-239. Da questa reazione si sviluppano notevoli quantità di calore, che è utilizzato per produrre (direttamente o indirettamente) vapore e, attraverso l'espansione di questo nelle turbine di un gruppo turbo-alternatore, energia elettrica.

Durante il funzionamento del reattore si generano nel combustibile ingenti quantitativi di radioattività. Per questo motivo tutte le attività che hanno luogo all'interno di una centrale nucleare sono soggette a un rigoroso controllo e all'osservanza di stringenti pratiche di sicurezza.

In seguito alle decisioni di politica energetica assunte dal Governo e dal Parlamento, l'Italia ha rinunciato alla produzione elettronucleare, e ha deciso la dismissione delle centrali e lo smantellamento degli impianti del ciclo del combustibile esistenti sul territorio nazionale. Lo sfruttamento dell'energia nucleare prosegue tuttavia in numerosi paesi, alcuni molto vicini all'Italia. Alla fine del 1997 erano in funzione 437 centrali in 32 paesi, per una potenza installata complessiva di 352.000 MWe. L'energia nucleare fornisce attualmente il 17% dell'elettricità prodotta nel mondo, contributo che sale al 25% nella media dei paesi OCSE e al 35% nella media dei paesi dell'Unione Europea, con valori locali anche molto elevati (78% in Francia, 60% in Belgio, 46% in Svezia, 41% in Svizzera, 32% in Germania, 30% in Finlandia, 29% in Spagna e 28% nel Regno Unito). Anche nel decennio successivo al disastro di Chernobyl la potenza nucleare in funzione nel mondo è cresciuta del 40%, passando da 250.000 a 352.000 MWe e portando a 437 il numero delle centrali in funzione in 32 paesi del mondo.

Le applicazioni mediche

Le applicazioni mediche delle radiazioni appartengono a due categorie fondamentali: la radiodiagnostica e la radioterapia.

L'uso delle radiazioni nella diagnostica va dalla comune radiografia a raggi X, alla tomografia assiale computerizzata, alla scintigrafia con impiego di traccianti radioattivi, fino a tecniche di minor impatto generale ma di indubbio interesse clinico, come le analisi RIA in vitro e la MOC. Attraverso le diverse tecniche è possibile osservare l'interno dell'organismo umano e i particolari dei diversi organi con livelli di accuratezza e di dettaglio molto elevati, con la possibilità di effettuare diagnosi estremamente accurate di stati patologici altrimenti non verificabili senza intervenire chirurgicamente.

La radioterapia, che sfrutta la capacità delle radiazioni di distruggere i tessuti patologici, è ampiamente utilizzata soprattutto per la cura del cancro. L'ONU stima che nei paesi sviluppati circa il 2 per mille della popolazione sia sottoposta annualmente a pratiche di questo tipo, il che, in un paese con 50 milioni di abitanti, corrisponde in media al trattamento di 100 mila pazienti ogni anno. Negli ultimi anni si sono perfezionate tecniche radioterapeutiche molto accurate basate sull'attivazione di sostanze aventi la proprietà di concentrarsi nei tessuti patologici (ad esempio,

boroterapia). Le cellule cancerose vengono in tal modo irradiate selettivamente e dall'interno, interessando in minima parte i tessuti circostanti.

Le applicazioni agrobiologiche

L'uso delle radiazioni ha permesso lo studio e lo sviluppo di nuove tecniche antiparassitarie e di fertilizzazione che sono oggi estesamente impiegate in agricoltura e nella prevenzione sanitaria. La liberazione di insetti precedentemente sterilizzati con le radiazioni (tecnica dell'insetto sterile) consente ad esempio un efficace controllo delle mosche e di altri parassiti, minimizzando contemporaneamente l'uso - e l'impatto ambientale - di antiparassitari e insetticidi chimici. Le radiazioni sono estesamente applicate anche nell'industria agroalimentare sottoponendo a irraggiamento le derrate per la distruzione di insetti, muffe e batteri responsabili del loro deperimento o per finalità antigerminative.

Le tecniche di fertilizzazione si sono notevolmente affinate nell'ultimo decennio attraverso l'impiego di matrici a rilascio controllato. L'uso di traccianti radioattivi mescolati al fertilizzante consente di seguirne il processo di assorbimento e di metabolizzazione da parte dei vegetali e di quantificarne il rilascio, per evitare poi, nella concreta applicazione di pieno campo, l'impiego di dosi eccessive di sostanze chimiche, minimizzando in tal modo i problemi di contaminazione dell'ambiente.

Le applicazioni industriali

Le radiazioni sono impiegate in moltissimi settori industriali per gli scopi più diversi.

Un'applicazione molto diffusa riguarda l'impiego di intensi fasci di raggi X e raggi γ per radiografare componenti meccanici, per assicurare la qualità delle fusioni e delle saldature e per verificare l'integrità di componenti impiantistici di elevato spessore rilevanti ai fini della sicurezza. Una diversa categoria di applicazioni è quella dei sistemi di misura e di analisi *on-line* attraverso l'emissione di radiazioni beta e attraverso l'attivazione neutronica. Emettitori di particelle beta sono diffusamente utilizzati nell'industria cartaria per la misurazione dello spessore dei fogli di carta durante il processo di fabbricazione. Sorgenti di neutroni sono utilizzate presso gli impianti termoelettrici per quantificare in tempo reale il contenuto di silicio, ferro, alluminio, zolfo e calcio del carbone, onde valutare preventivamente l'emissione di inquinanti conseguente alla combustione. Traccianti γ dispersi nell'olio di lubrificazione dei motori di nuova progettazione e costruzione consentono, nella fase di ingegnerizzazione, di quantificarne sul banco di prova il consumo di olio attraverso la rilevazione dei traccianti nei gas di scarico.

Una diversa categoria di applicazioni riguarda la tecnologia dei materiali, dove le radiazioni sono impiegate per modificarne opportunamente le caratteristiche superficiali e di massa. Il flusso neutronico prodotto da un reattore nucleare può servire a produrre materiali semiconduttori per l'industria elettronica o ad alimentare processi di radiografia neutronica. L'irraggiamento con intensi fasci di ioni può conferire ai materiali proprietà superficiali diverse da quelle di massa. Un'altra categoria di applicazioni è legata all'impiego degli acceleratori di particelle. Gli intensi fasci di radiazioni con essi prodotti possono servire a indurre trasformazioni dei materiali irradiati. Tipiche sono le applicazioni alla produzione di materiali polimerici usati per la produzione di isolanti elettrici, nastri adesivi, *floppy-disc*, pneumatici e lenti a contatto.

Una delle applicazioni più comuni è infine la sterilizzazione di materiali sanitari e presidi chirurgici mediante impianti di sterilizzazione con sorgenti radioisotopiche o acceleratori di elettroni.

Le applicazioni ambientali

Le radiazioni hanno un campo di applicazione molto proficuo nello studio e nella protezione dell'ambiente.

L'uso dei traccianti radioattivi consente di monitorare la dispersione e la diffusione degli inquinanti. Mescolando ai combustibili piccole quantità di traccianti è possibile verificare l'efficienza dei sistemi di captazione delle ceneri e di depurazione dei fumi. Le radiazioni, così come per le derrate alimentari, trovano anche impiego nella sterilizzazione dei fanghi di risulta degli impianti di depurazione.

L'uso dei traccianti consente inoltre di studiare la mappatura delle falde acquifere e delle risorse idriche sotterranee, di analizzare e misurare l'accumulo dei sedimenti sul fondo marino, di seguire il corso delle correnti oceaniche e atmosferiche e di misurare il tasso di accumulo dei ghiacci nelle calotte polari.

Archeologia e datazione

In archeologia le radiazioni sono alla base di due importanti tecniche di datazione.

L'età di un reperto di origine organica (vegetale o animale) può essere facilmente determinata misurando il suo contenuto in carbonio-14. Gli organismi viventi, infatti, assumono e metabolizzano carbonio dall'ambiente finché sono in vita; in tal modo in essi il carbonio è ripartito fra due isotopi naturali (carbonio-12 e carbonio-14) nello stesso rapporto (costante) esistente nell'ambiente. Dopo la morte dell'organismo l'assunzione di carbonio (12+14) cessa, e il carbonio-14 precedentemente metabolizzato decade lentamente con un tempo di dimezzamento di 5.568 anni, mentre il carbonio-12 è stabile. La misura della percentuale residua di carbonio-14 permette di risalire all'età di un reperto.

Una diversa tecnica di datazione, denominata termoluminescenza, è utilizzata per determinare l'età dei manufatti ceramici. In essi sono infatti inglobati al momento della produzione diversi radioisotopi naturali contenuti nelle argille. I successivi processi di decadimento determinano l'imprigionamento di parte dell'energia delle radiazioni emesse nei cristalli minerali contenuti nell'argilla. Questa energia si manifesta con la comparsa di una debole luminescenza all'atto del riscaldamento del manufatto. La quantità di energia luminosa liberata è proporzionale al tempo trascorso dal momento della cottura del manufatto.

Geologia e prospezione mineraria

La geologia e la prospezione mineraria sono due settori nei quali le radiazioni trovano applicazioni di notevole interesse. La presenza di radioisotopi a vita lunga nei minerali consente di datare con buona approssimazione le formazioni geologiche, ricavando informazioni preziose per la ricerca di minerali. La stratigrafia per attivazione neutronica è invece una tecnica molto utilizzata nell'industria petrolifera per determinare la composizione degli strati geologici attraversati da una perforazione di sondaggio. Facendo scorrere lungo la perforazione una sorgente di neutroni e misurando successivamente la "risposta" dei materiali irradiati si ricavano infatti informazioni molto dettagliate sulla composizione degli strati attraversati.

Applicazioni relative alla sicurezza

Le radiazioni trovano un campo di impiego significativo in alcune applicazioni relative alla sicurezza. Molto diffuso è ad esempio il controllo del contenuto dei bagagli negli aeroporti, effettuato con stazioni radiografiche che impiegano raggi X a bassa intensità.

Un'altra applicazione molto diffusa soprattutto all'estero è rappresentata dai rivelatori di fumo degli impianti antincendio a camera di ionizzazione, basati sull'impiego di emettitori alfa. Essendo dotate di carica elettrica, le particelle alfa chiudono il circuito fra due elettrodi separati da una sottile intercapedine d'aria. In presenza di fumo le particelle alfa vengono arrestate dalle sostanze in sospensione e il circuito si interrompe, facendo entrare in funzione i segnali di allarme e l'impianto antincendio.

L'analisi per attivazione neutronica è utilizzata in medicina legale per determinare la presenza in un campione di parecchi elementi, fra i quali l'arsenico.

Ricerca scientifica e tecnologica

Quella della ricerca scientifica e tecnologica costituisce un'area di estesa applicazione della radioattività e delle radiazioni ionizzanti, sia come argomento di studio sia come strumento di indagine.

I fenomeni e le reazioni nucleari sono argomento di studio nella fisica nucleare e subnucleare fondamentale, con particolare riferimento alle ricerche sulla composizione intima della materia (nelle quali si fa uso estensivo di acceleratori e rivelatori di grandi dimensioni) e alle ricerche sull'utilizzazione dell'energia nucleare (sistemi a fissione e a fusione).

Ma la radioattività è impiegata estesamente anche come strumento di indagine. Alcuni esempi sono stati già citati a proposito delle applicazioni descritte in precedenza. In generale, l'uso di traccianti radioattivi consente di studiare nel dettaglio i meccanismi che presiedono ai processi chimici, chimico-fisici e biologici seguendo strumentalmente gli spostamenti e le successive combinazioni di atomi e molecole opportunamente "marcati".

Numerosi fenomeni indotti da raggi X o da elettroni accelerati fino ad energie comprese tra alcune decine ed alcune centinaia di keV sono impiegati in strumentazione impiegata per analisi soprattutto nel campo della struttura dei materiali (microscopia elettronica o a raggi X, diffrazione, analisi per fluorescenza, ecc.).

L'ESPOSIZIONE ALLA RADIOATTIVITÀ NATURALE

Le sorgenti naturali di radiazioni ionizzanti

Come già accennato, le radiazioni ionizzanti fanno normalmente parte dell'ambiente in cui viviamo, e hanno accompagnato lo sviluppo dell'ecosistema terrestre e del genere umano. Il campo di radiazioni dovuto a sorgenti naturali, presente ovunque e perciò indicato come radiazione di fondo, comprende tre componenti fondamentali:

- i *raggi cosmici*, costituiti da radiazioni primarie di origine extraterrestre, emesse dai corpi stellari e, in minor misura, dal Sole, accompagnate dalle radiazioni secondarie da esse prodotte nella stessa atmosfera, a seguito di reazioni nucleari ad alta energia;
- i *radioisotopi cosmogenici*, isotopi radioattivi che si producono per effetto dell'interazione dei raggi cosmici con l'atmosfera e con la superficie terrestre;
- i *radioisotopi primordiali*, isotopi radioattivi presenti fin dall'epoca di formazione del Sistema Solare e non ancora decaduti in forme stabili.

La radioattività naturale, comprendente appunto i radionuclidi cosmogenici e soprattutto quelli primordiali, fornisce tuttora il contributo di gran lunga più importante alla radioattività ambientale totale.

La radiazione cosmica

Un contributo fondamentale alla radiazione naturale di fondo deriva dai raggi cosmici, che raggiungono la superficie terrestre con un'intensità dipendente dalla latitudine e dall'altitudine, e che hanno due componenti distinte: la radiazione primaria e la secondaria.

I raggi cosmici primari sono costituiti prevalentemente da particelle di carica positiva, in gran parte protoni e positroni (elettroni con carica positiva). Emesse dai corpi stellari, giungendo in prossimità della Terra le particelle risentono dell'azione deviante del campo magnetico terrestre in misura legata alla loro energia; infatti solo quelle dotate di energia superiore a qualche GeV possono contribuire al fondo di radiazioni al livello del suolo, mentre quelle con energia minore sono imprigionate dal campo magnetico terrestre in zone situate a qualche migliaio di chilometri dalla superficie terrestre formando le cosiddette *cinture* (o *fasce*) di Van Allen.

I raggi cosmici secondari sono generati dall'interazione dei raggi cosmici primari con l'atmosfera terrestre. Quando le particelle ad alta energia urtano gli atomi presenti nell'aria, vengono emesse radiazioni secondarie (mesoni, elettroni, fotoni, protoni e neutroni). Le nuove particelle prima di giungere sulla superficie della Terra possono decadere, oppure creare a loro volta altre radiazioni secondarie: da un singolo raggio primario può così risultare uno sciame di milioni di particelle secondarie.

I raggi cosmici primari vengono quasi totalmente assorbiti negli strati più alti dell'atmosfera, e già a circa 20 km dal livello del mare i raggi cosmici sono quasi interamente di natura secondaria. La dose generata dai raggi cosmici aumenta dall'estremo limite dell'atmosfera - sebbene l'intensità della radiazione primaria decresca - fino alla quota di circa 20 km a causa della crescita della componente secondaria. Sotto i 20 km le particelle secondarie subiscono una progressiva attenuazione, e la dose decresce.

Nella radiazione cosmica al livello del suolo si distinguono due componenti: neutronica e ionizzante. In termini di dosi assorbite, la prima dà un contributo nettamente inferiore a quello della componente ionizzante, ma tale contributo diviene più rilevante in termini di dose efficace. Nella tabella 4 sono riportati i valori di dose efficace annua per siti che vanno dal livello del mare fino a circa 4.000 m di altitudine. Il corrispondente valore medio mondiale è di 0,38 mSv.

A causa del campo magnetico terrestre l'intensità dei raggi cosmici varia, sia pure moderatamente, con la latitudine, crescendo dall'equatore geomagnetico fino a latitudini tra i 45° ed i 50°; al di sopra dei 50° essa rimane all'incirca costante. In Italia si valuta una dose efficace annua mediata su tutta la popolazione di 0,30 mSv. Nei viaggi aerei ad una quota di 8.000 m i passeggeri sono esposti a ratei di dose efficace di circa 0,003 mSv/ora, che diventano circa 0,03 mSv/ora alla quota di 15.000 m (valori medi tipici).

Tabella 4 - Esposizione media annua ai raggi cosmici in alcune città poste a differenti altitudini

Località		Popolazione (milioni)	Altitudine (m)	Dose efficace annua (mSv/anno)		
				Ionizzante	Neutroni	Totale
Città in altitudine	La Paz, Bolivia	1,0	3.900	1,120	0,900	2,020
	Lhasa, Cina	0,3	3.600	0,970	0,740	1,710
	Quito, Ecuador	11,0	2.840	0,690	0,440	1,130
	Mexico City, Messico	17,3	2.240	0,530	0,290	0,820
	Nairobi, Kenia	1,2	1.660	0,410	0,170	0,580
	Denver, USA	1,6	1.610	0,400	0,170	0,570
	Teheran, Iran	7,5	1.180	0,330	0,110	0,440
	Livello del mare			0,240	0,030	0,270
Media mondiale				0,300	0,080	0,380

La componente dovuta ai radioisotopi cosmogenici

L'interazione dei raggi cosmici con l'atmosfera, la biosfera e la litosfera porta alla formazione di numerosi radioisotopi, le cui caratteristiche sono riportate in tabella 5. I radioisotopi cosmogenici (i più rilevanti sono il trizio, il berillio-7, il carbonio-14 e il sodio-22) inducono un irraggiamento

interno di scarsa entità dovuto per lo più al carbonio-14, quantificabile come riportato nella tabella 6. L'irraggiamento esterno è assolutamente trascurabile.

La radiazione terrestre

Un diverso contributo alla radiazione naturale di fondo deriva dai radioisotopi naturali presenti a diversa concentrazione nelle acque, nelle rocce e nei terreni. Gran parte di questi radioisotopi si originano gli uni dagli altri nel corso del processo di decadimento e vengono perciò raggruppati in “famiglie”, ciascuna originata da un radioisotopo “capostipite” e composta da tutti i radioisotopi che si generano nel decadimento del

Tabella 5 - Caratteristiche dei radioisotopi cosmogenici (generati dall'interazione dei raggi cosmici con l'atmosfera).

Radioisotopo	Rateo di produzione atmosferica (atomi/cm ² s)	Tempo di dimezzamento T	Radiazioni emesse
³ H = idrogeno-3 (trizio)	0.25	12,35 anni	Beta
⁷ Be = berillio-7	8.1×10 ⁻²	53,3 giorni	Gamma
¹⁰ Be = berillio-10	4.5×10 ⁻²	1,6×10 ⁶ anni	Beta
¹⁴ C = carbonio-14	2.5	5730 anni	Beta
²² Na = sodio-22	8.6×10 ⁻⁵	2,6 anni	beta+, gamma
²⁶ Al = alluminio-26	1.4×10 ⁻⁴	0,74 milioni di anni	beta+, gamma
³² Si = silicio-32	1.6×10 ⁻⁴	280 anni	Beta
³² P = fosforo-32	8.1×10 ⁻⁴	14.29 giorni	Beta
³³ P = fosforo-33	6.8×10 ⁻⁴	24.8 giorni	Beta
³⁵ S = zolfo-35	1.4×10 ⁻³	88.0 giorni	Beta
³⁶ Cl = cloro-36	1.1×10 ⁻³	0,301 milioni di anni	Beta
³⁷ Ar = argon-37	8.3×10 ⁻⁴	35.0 giorni	Gamma
³⁹ Cl = cloro-39	1.6×10 ⁻³	56.2 minuti	beta, gamma
³⁹ Ar = argon-39	4.0×10 ⁻³	269 anni	Beta

Tabella 6 - Introduzione annua da ingestione di radioisotopi cosmogenici e dosi efficaci per gli adulti.

Radioisotopo	Introduzione (Bq/anno)	Dose efficace annua (μSv/anno)
³ H	500	0,01
⁷ Be	1.000	0,03
¹⁴ C	20.000	12
²² Na	50	0,15

capostipite o di uno dei nuclei risultanti. La maggior parte dei radioisotopi naturali può essere in tal modo raggruppata in tre famiglie⁵:

- la famiglia dell'uranio, avente come capostipite l'uranio-238,
- la famiglia dell'attinio, avente come capostipite l'uranio-235,
- la famiglia del torio, avente come capostipite il torio-232.

L'irradiazione, interna ed esterna, del corpo umano è causata in massima parte dai radioisotopi delle famiglie dell'uranio e del torio. Nella figura 2 sono illustrati i componenti di queste due famiglie. Ai fini dell'esposizione umana i radioisotopi naturali più importanti sono il potassio-40, l'uranio-238, il torio-232 e i discendenti di questi ultimi due (specie il radio-226, il radon-220, il radon-222, il polonio-210 e il piombo-210), tutti presenti in maniera ubiquitaria nelle principali matrici ambientali e nei materiali impiegati nella costruzione degli edifici⁶. La composizione e la concentrazione della radioattività naturale nel terreno variano tuttavia largamente con le caratteristiche geomorfologiche del sito considerato. Nei materiali usati in edilizia si hanno normalmente 10 ÷ 100 Bq/kg di radio-226 e torio-232, con picchi fino a qualche migliaio di Bq/kg, come si verifica per lo scisto di allume (Svezia), per le scorie di silicato di calcio (USA) e per i residui delle miniere di uranio (USA). Il potassio-40 è presente in concentrazioni di attività per lo più comprese tra qualche centinaio ed oltre un migliaio di Bq/kg. Il tufo vulcanico è caratterizzato da concentrazioni di radio-226 e torio-232 di 100 ÷ 300 Bq/kg e di circa 1.500 Bq/kg di potassio-40.

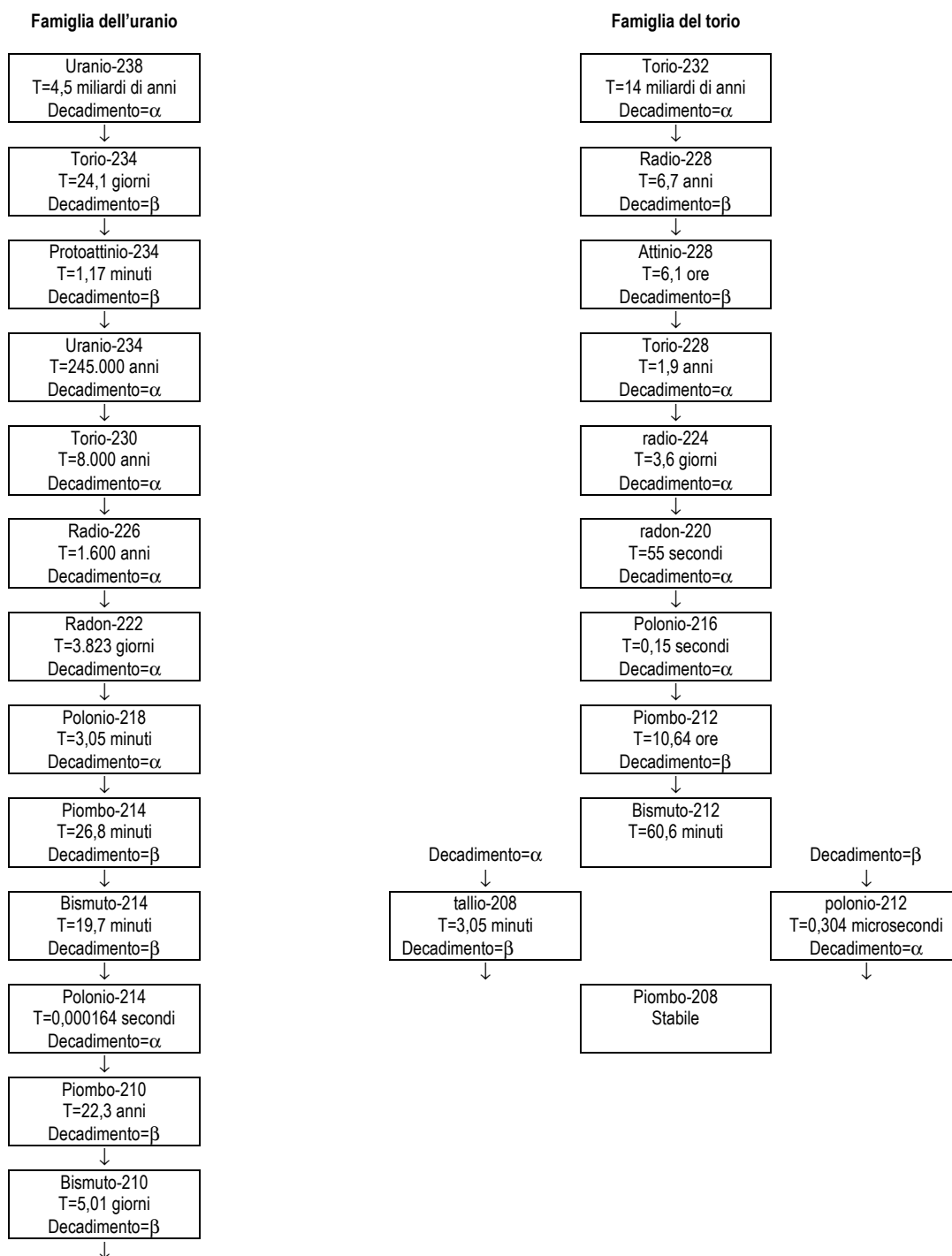
Irraggiamento esterno

⁵ Con la radioattività artificiale indotta dall'uomo nei processi e nei reattori nucleari è stata scoperta anche la famiglia del nettunio, di cui possono essere considerati capostipiti o il curio-245 (²⁴⁵Cm) con T=9,3×10³ anni o il plutonio-241 (²⁴¹Pu) con T=13,2 anni. Questa famiglia è assente in natura a causa delle brevi vite medie dei suoi componenti, almeno se considerate su scala geologica: infatti, anche se fosse stata presente all'epoca di formazione della terra, tutti i suoi membri sarebbero ormai trasformati nel termine finale stabile, il ²⁰⁹Bi.

⁶ In ognuna delle famiglie radioattive compare un radioisotopo del radon (Rn), che assume notevole importanza nella determinazione della dose ambientale, tanto da richiedere un'analisi a parte (vedi il paragrafo "L'esposizione al radon").

L'esposizione esterna (con riferimento al corpo umano) è dovuta principalmente ai raggi gamma emessi da radioisotopi naturali presenti nel suolo e nei materiali da costruzione. Essa assume valori diversi all'aperto (*outdoor*) e all'interno degli edifici (*indoor*). Il rateo di dose assorbita (in aria) *outdoor*, pesato sulla popolazione mondiale, è valutato in 57 nGy/h, dato che coincide con il valore medio italiano. In alcune zone del mondo si hanno valori anche molto più alti, come nei delta del Nilo (20÷400 nGy/h) e del Gange (260÷440 nGy/h). In un'area ricca di carbonati al torio nei pressi di Mombasa (Kenia) si sono rilevati ratei di dose fino a 12.000 nGy/h; a Ramsar (Iran) si arriva fino a 30.000 nGy/h, ed in prossimità di aree ricche di rocce uranifere in Svezia si raggiungono i 100.000 nGy/h.

Figura 2 - Famiglie radioattive naturali dell'uranio e del torio.



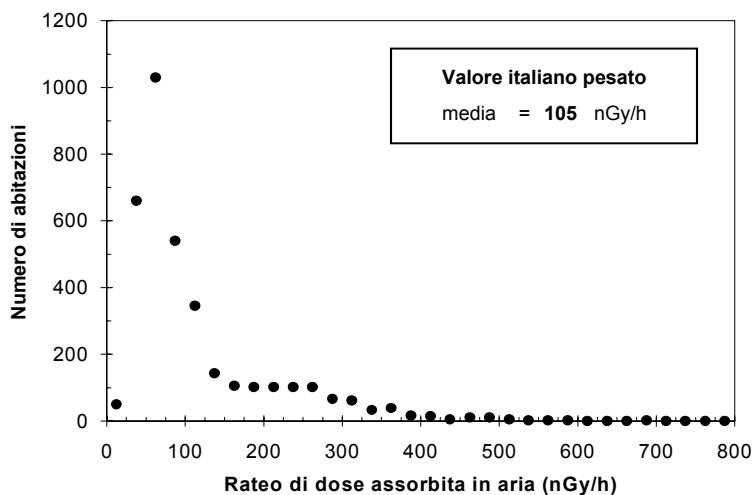
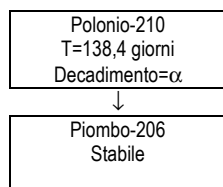


Figura 3 - Distribuzione del rateo di dose assorbita in aria dovuta alla radiazione gamma nel campione di abitazioni (detratto il contributo della radiazione cosmica). Il valore medio italiano riportato nel riquadro è stato ottenuto dai valori medi di ogni regione pesati sulla base del numero di famiglie residenti

Il rateo di dose (in aria) *indoor*, sempre pesato sulla popolazione mondiale, si aggira intorno a 80 nGy/h. Anche per questo aspetto la variabilità tra i diversi paesi e le diverse località dello stesso paese è assai elevata. Per quanto riguarda l'Italia, nell'*Indagine nazionale sulla radioattività naturale nelle abitazioni* condotta recentemente da ISS e ANPA si è determinato il rateo di dose *indoor* per radiazione gamma di origine terrestre (suolo e materiali edili) rappresentato nella figura 3; la media italiana risulta pari a 105 nGy/h.

Utilizzando il coefficiente di conversione 0,7 Sv/Gy per convertire la dose assorbita in aria in dose efficace⁷ e assumendo un fattore di occupazione *indoor* pari a 0,8, è possibile combinare le esposizioni *outdoor* (57 nGy/h) e *indoor* (105 nGy/h) per stimare in circa 0,58 mSv/anno la dose efficace media in Italia dovuta ad irradiazione esterna da radioisotopi primordiali. Questo valore può essere confrontato con il valor medio mondiale di 0,46 mSv/anno indicato nei rapporti UNSCEAR. Per neonati e bambini ambedue i valori indicati vanno maggiorati del 30% e del 10% rispettivamente.

Si è già accennato alla grande variabilità delle dosi esterne da radioattività naturale. A livello nazionale si valutano margini di variabilità, compresi fra la metà e il doppio del valore medio sopra indicato. Esistono zone del pianeta in cui si hanno dosi maggiori anche di più di un ordine di grandezza.

Irraggiamento interno

La radioattività di origine terrestre determina oltre all'esposizione esterna anche una dose interna (rispetto al corpo umano), derivante dall'ingestione, dall'inalazione e dalla metabolizzazione dei radioisotopi già indicati. I terreni agricoli, ad esempio, contengono mediamente circa 300 kBq/m³ di

⁷ Questo coefficiente utilizzato dall'UNSCEAR nel 1988 si riferisce ad adulti per l'esposizione ambientale a raggi gamma emessi da radioisotopi naturali presenti nelle rocce.

potassio-40, un radionuclide che emette radiazioni β e γ e viene metabolizzato dalle piante utilizzate per l'alimentazione animale e umana, e che ritroviamo perciò nei cibi di origine vegetale e animale in concentrazioni variabili fra i 50 e i 150 Bq/kg.

Nel corpo umano sono presenti complessivamente circa 4.000 Bq di potassio-40, oltre ai radionuclidi cosmogenici di cui si è già parlato: 4.000 Bq di carbonio-14 e 4.000 Bq di idrogeno-3 (trizio). La dose efficace annua dovuta al potassio-40 (in massima parte per le radiazioni beta) vale 0,165 mSv per gli adulti e 0,185 mSv per i bambini ed è perciò sostanzialmente maggiore di quelle derivanti dai radionuclidi cosmogenici, mostrate in tab. 6.

Radioisotopi delle serie dell'uranio e del torio, distribuiti in modo molto più disuniforme del potassio-40 e dei radionuclidi cosmogenici, vengono anch'essi introdotti nell'organismo perché presenti nei cibi, nell'acqua e nell'aria. Nel caso dell'ingestione i radioisotopi dominanti sono il piombo-210 ed il polonio-210. Per l'inalazione (escludendo il radon ed i suoi figli a vita breve) il radioisotopo dominante è il piombo-210. I radioisotopi della serie dell'uranio e del torio danno in media dosi efficaci annue pari a 0,062 mSv/anno, sempre non considerando il contributo del radon (esaminato a parte nel paragrafo che segue).

Complessivamente la dose efficace impegnata in media in un anno nel mondo per introduzione di radioisotopi primordiali in aria, cibo e acqua è stimata in 0,23 mSv, di cui 0,17 mSv derivano dal potassio-40 e 0,06 mSv da radioisotopi delle serie dell'uranio e del torio. Questi valori possono essere considerati rappresentativi anche della situazione italiana. Il contributo del radon, non compreso nel valore indicato, è trattato nel paragrafo seguente.

La notevole variabilità delle concentrazioni di attività nei cibi può portare al superamento dei valori medi, anche di ordini di grandezza. Ad esempio si riscontrano ad esempio elevati livelli di polonio-210 in *yerba maté*, una pianta largamente utilizzata nell'America Latina per produrre una bevanda. Per importanza radiologica, comunque, il maggior incremento rispetto ai livelli medi si riscontra nelle regioni artiche e sub-artiche, dove il piombo-210 e il polonio-210 si accumulano nella carne di renna e caribù che costituiscono una parte importante nella dieta degli abitanti di quelle regioni.

Esposizione al radon

Nel decadimento dei radioisotopi delle tre famiglie naturali già ricordate (uranio, torio ed attinio) vengono liberati gas radioattivi, tutti isotopi del radon (radon-219, radon-220, radon-222), che diffondono negli ambienti interni mescolandosi con l'aria e dando luogo a fenomeni di accumulo. Di preminente importanza è il radon-222 ($T=3,823$ giorni). Meno rilevante è l'emanazione di radon-220 che, in virtù del suo tempo di dimezzamento molto più breve ($T=55$ s), può decadere con maggiore probabilità nei prodotti solidi suoi discendenti prima di raggiungere l'atmosfera.

Trascurabile è l'emanazione di radon-219, sia per il brevissimo tempo di dimezzamento ($T=4,0$ s) sia per la bassa frazione del capostipite della famiglia cui appartiene, l' ^{235}U , nell'uranio naturale (0,725%).

Questi gas radioattivi sono inalati, cioè introdotti nell'organismo attraverso la respirazione, e sono responsabili in Italia di una dose efficace media di circa 2 mSv/anno, con variazioni molto sensibili a seconda delle caratteristiche geologiche della località considerata, della tipologia dei fabbricati e dei materiali impiegati nella costruzione. Si sono ad esempio valutate dosi di 0,3 mSv/anno nelle abitazioni di Torino, 1 mSv/anno a Milano, 1,5 mSv/anno a Roma e 2,5 mSv/anno a Viterbo. I risultati ottenuti nella campagna nazionale di misura della concentrazione di radon *indoor* (*Indagine nazionale sulla radioattività naturale nelle abitazioni*) condotta da ISS e ANPA sono illustrati in figura 4, ed evidenziano una concentrazione media annuale di radon di 77 Bq/m³, che può essere assunta come rappresentativa della concentrazione di radon nelle abitazioni e negli altri luoghi chiusi. Per l'aperto si può assumere come indicativo il valore di 6 Bq/m³ fornito dalla ICRP.

Le valutazioni UNSCEAR quantificano rispettivamente in 1,2 mSv/anno e 0,07 mSv/anno i valori medi mondiali della dose efficace dovuta al radon-222 e al radon-220⁸.

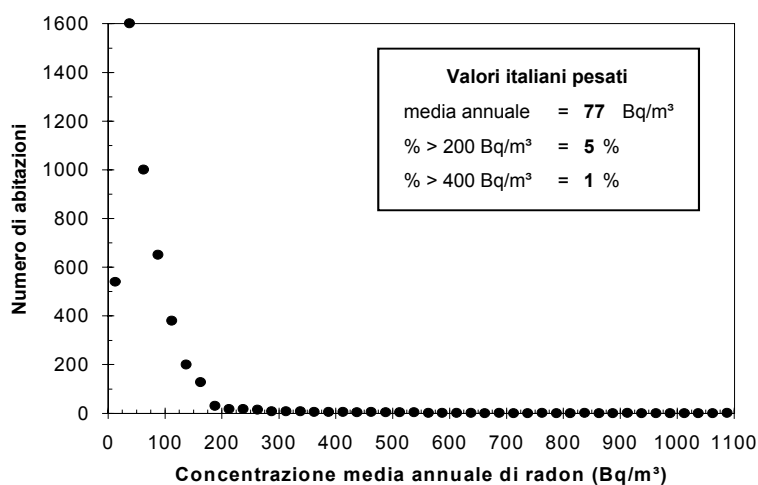


Figura 4 - Presenza di radon nelle abitazioni italiane e percentuali di case con concentrazioni maggiori rispettivamente di 200 e 400 Bq/m³. I valori medi nazionali riportati nel riquadro sono ottenuti dai valori medi di ogni regione pesati sulla base del relativo numero di famiglie residenti.

⁸ Vista la netta prevalenza del contributo del radon-222, in genere con il termine di radon ci si riferisce abitualmente a questo isotopo, trascurando quelli del radon-220 e del radon-219.

L'ESPOSIZIONE A SORGENTI ARTIFICIALI

Come si è visto nel precedente capitolo, per effetto del fondo naturale ciascun individuo assume in media ogni anno una dose variabile orientativamente fra 2 e 4 mSv, in dipendenza delle caratteristiche geomorfologiche del luogo di residenza e del tipo di vita, per il solo fatto di vivere sul pianeta Terra, che è un pianeta naturalmente radioattivo. A questa dose si aggiunge quella dovuta alle sorgenti artificiali sviluppate dalle pratiche antropiche già descritte. Ciò comporta un incremento della dose ricevuta sia dai singoli individui sia dalla popolazione presa nel suo insieme. Le dosi individuali derivanti dalle sorgenti di radiazioni artificiali variano in misura notevole ma, in genere, sono notevolmente minori di quelle derivanti dalla componente di origine naturale.

L'irraggiamento da pratiche medico-diagnostiche

Il contributo artificiale più elevato all'esposizione media individuale è rappresentato dalle pratiche medico-diagnostiche: in molti paesi del mondo le applicazioni della medicina sono responsabili della quasi totalità della dose aggiuntiva a quella naturale. Gli individui sono esposti a radiazioni durante le pratiche diagnostiche (schermografie, radiografie, somministrazione di traccianti radioattivi per scintigrafia, ecc.) e radioterapeutiche (somministrazione terapeutica di radioisotopi, brachiterapia, irraggiamento mediante sorgenti al cobalto e acceleratori).

I dati più completi sulla frequenza degli esami radiologici e sulle dosi assorbite a seguito di esposizioni mediche provengono dai paesi economicamente più sviluppati, nei quali vive meno di un quarto di tutta la popolazione del mondo. Per il resto della popolazione si hanno informazioni frammentarie.

La stima ONU⁹ della dose efficace individuale annua per pratiche di diagnostica medica è di circa 0,3 mSv per la media della popolazione mondiale, e di circa 1 mSv per la popolazione dei paesi sviluppati. Le dosi associate alle pratiche di diagnostica dentale, sempre su base annua, sono rispettivamente di 0,003 mSv per la media della popolazione mondiale e di 0,01 mSv per i paesi sviluppati (tabella 7). I contributi alla

Tabella 7 - Dosi efficaci stimate per la popolazione mondiale da esami medico-diagnostici e dentali (Fonte: UNSCEAR)

Livello sanitario	Popolazione (milioni)	Dose efficace annua per persona da diagnostica (mSv)		Dose efficace collettiva annua da diagnostica (10 ³ Sv-uomo)	
		Medica	dentale	medica	dentale
I	1.350	1	0.01	1.300	14
II	2.630	0.1	0.001	290	3
III	850	0.04	0.0003	40	0,3
IV	460	0.04	0.0003	20	0,1
Totale	5.290	-	-	1.650	17,4
Media	-	0.3	0.003	-	-

Tabella 8 - Dose efficace collettiva mondiale da esami a raggi X per diagnosi in paesi di livello sanitario I (Fonte: UNSCEAR)

Esame	Numero di esami per 1000 persone	Dose efficace per esame (mSv)	Dose efficace collettiva annua (Sv-uomo)	Contributo alla dose collettiva totale (%)
Addome	32	1,1	44.700	4
Anca / Femore	12	0,92	15.300	1
Angiografia	6	6,8	57.300	5
Colecistografia	9	1,5	18.100	1
Colonna vertebrale lombo sacrale	54	1,7	122.000	10
Cranio	40	0,16	8.560	0.7
Estremità	121	0,06	10.600	0.8
Fluoroscopia del torace	33	0,98	43.100	3
Mammografia	12	1,0	17.000	1
Pelvi	21	1,2	32.800	3
Radiografia del torace	171	0,14	31.500	2

⁹ L'ONU ha suddiviso i paesi del mondo in quattro livelli sanitari con prestazioni decrescenti. Il I° livello è attribuito ai paesi sviluppati.

Schermografia del torace	260	0,52	182.000	14
Tomografia computerizzata	39	4,3	224.000	18
Tratto gastro intestinale inferiore	11	7,2	112.000	9
Tratto gastro intestinale superiore	52	4,1	285.000	23
Urografia	14	3,1	58.200	5
Totale	887	-	1.262.000	
Media per esame	-	1,05	-	
Dose efficace media per persona	-	0,93	-	

dose collettiva dovuti ai più comuni esami diagnostici a raggi X sono raccolti in tabella 8. Dai dati si constata come più del 90% della dose efficace media associata a pratiche medico-diagnostiche nei paesi sviluppati è dovuto appunto ad esami a raggi X.

Dal computo sono escluse le dosi dovute a trattamenti radioterapeutici. La dose collettiva su base mondiale per questo tipo di esposizioni si aggira attorno a 1,5 MSv-uomo, naturalmente al netto del contributo dovuto alle dosi ai tessuti bersaglio. Occorre tuttavia tener presente che le grandezze protezionistiche difficilmente potrebbero essere impiegate per quantificare i danni stocastici legati a questo tipo di esposizione, considerato la particolarità della popolazione esposta.

Il fall-out radioattivo degli esperimenti nucleari in atmosfera

A partire dagli anni Quaranta la radioattività ambientale ha incorporato, oltre ai contributi di origine naturale (radionuclidi cosmogenici, radiazione terrestre), un nuovo contributo di origine antropica dovuto alla dispersione nell'ambiente (*fall-out*) dei radioisotopi liberati dalle esplosioni nucleari nell'atmosfera.

La sperimentazione di armi nucleari nell'atmosfera ha avuto due picchi: il primo, tra il 1952 ed il 1958, il secondo, più marcato, nel 1961 e nel 1962. Si è avuto un totale di 520 esplosioni di ordigni a fissione o fusione termonucleare per una potenza complessiva di 545 megaton (figura 5). Gli effetti sulla dieta hanno avuto un andamento strettamente correlato a quello degli esperimenti (figure 6 e 7).

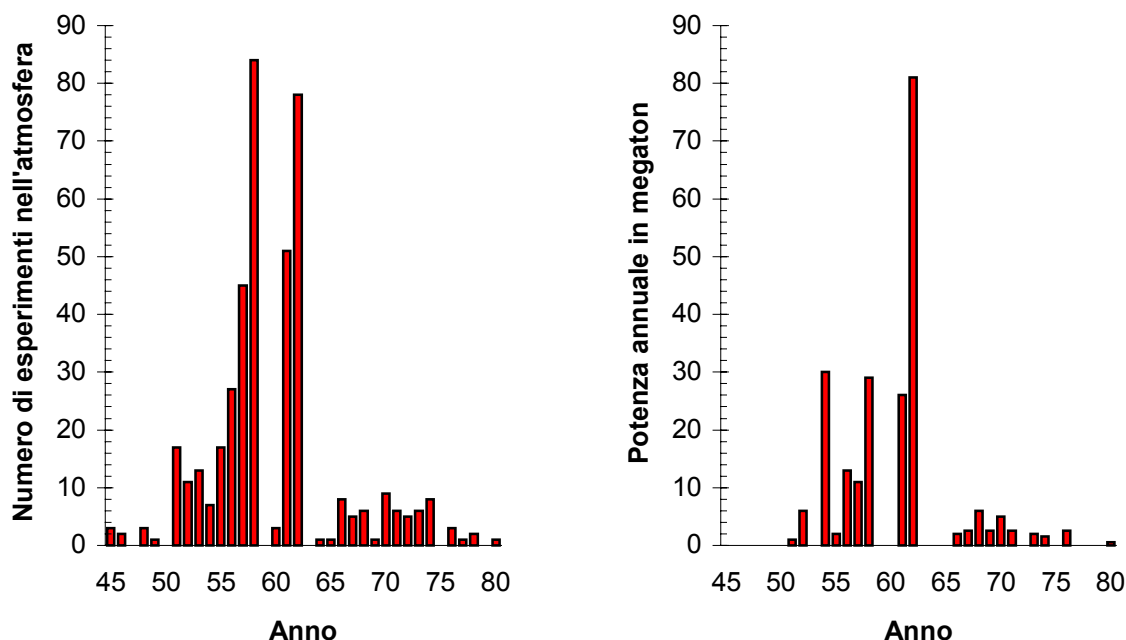


Figura 5 - Esplosioni nucleari nell'atmosfera (Fonte: UNSCEAR)

Le dosi imputabili ai radioisotopi emessi nelle esplosioni nucleari (oltre 200) vengono assorbite in tempi diversi, a seconda della loro vita media. Così, lo ^{95}Zr ($T=64$ giorni) ha già fornito tutto il suo contributo di dose; ^{137}Cs , ^{90}Sr ($T\approx 30$ anni) e ^3H forniranno la maggior parte del loro contributo entro la fine del secolo; solo il ^{14}C ($T=5730$ anni) rimarrà attivo per lungo tempo, ma con contributi di scarso rilievo.

Dal *fall-out* nucleare deriva attualmente una dose efficace media individuale di circa 0,01 mSv/anno, ma la dose equivalente collettiva associata è la più alta fra quelle provenienti dalle sorgenti prodotte dall'uomo: è infatti stimata intorno ai 30 milioni di Sv-uomo, tenendo conto del contributo di tutte le esposizioni dal momento delle esplosioni all'infinito. Le stime globali includono il contributo dovuto alle dosi assorbite dalle popolazioni dislocate in prossimità dei siti usati per i test atmosferici. A tale proposito si deve sottolineare che, sebbene i contributi su scala globale così valutati siano certamente modesti, alcune dosi locali hanno raggiunto livelli significativi.

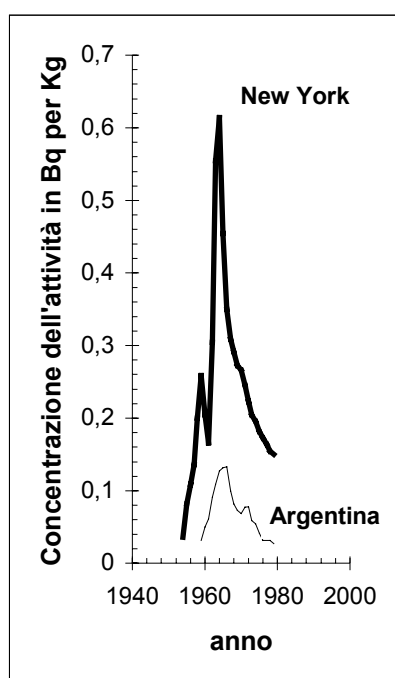


Figura 6 - ^{90}Sr nella dieta (Fonte: UNSCEAR)

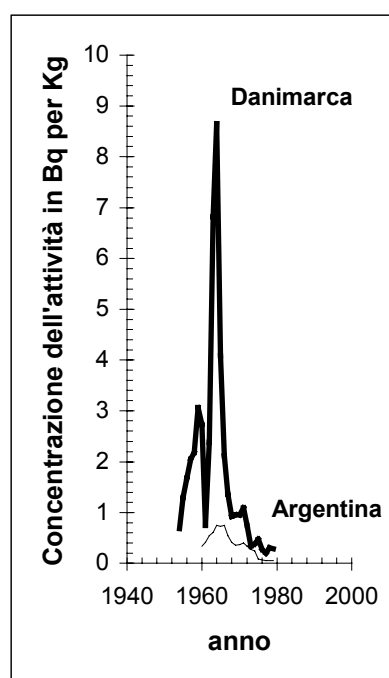


Figura 7 - ^{137}Cs nella dieta (Fonte: UNSCEAR)

La componente dovuta alla produzione di energia

L'impiego delle fonti energetiche comporta, per la maggior parte di esse, la produzione o il rilascio di radioattività, da cui derivano esposizioni alle popolazioni quantificate nella tabella 9 con riferimento alle sole fonti non nucleari. Delle fonti più conosciute, non sono naturalmente indicate quella idroelettrica e quella solare, il cui contributo alle dosi è nullo. I dati sono presentati in termini di dose collettiva per unità di energie elettrica prodotta, espressa in gigawatt-anno (Gwa), unità definita nella precedente nota 2.

La produzione di energia – nucleare e non nucleare – è forse fra le attività antropiche quella nella quale si producono i maggiori quantitativi di radioattività; ma il maggior contributo antropico alle esposizioni umane non deriva, come vedremo, da questa pratica. Si tratta comunque di attività che devono essere attentamente controllate a causa dei potenziali rischi cui espongono la popolazione e i lavoratori, soprattutto in caso di funzionamento anomalo degli impianti.

Tabella 9 - Stime di dose efficace collettiva per unità di energia elettrica di origine non nucleare (Fonte: UNSCEAR)

Fonte energetica	Dose efficace collettiva normalizzata (Sv-uomo/GWa)
------------------	---

Carbone	20
Petrolio	0.5
Gas naturale	0.03
Energia geotermica	2
Torba	2

La produzione di energia nucleare

La produzione di energia nucleare comporta la generazione di ingenti quantitativi di radioattività, ed è certamente una fonte di rischio potenziale, anche se in condizioni normali il suo contributo al fondo ambientale è pressoché trascurabile, avendo la tecnologia nucleare previsto fin dall'inizio sofisticate pratiche di isolamento, condizionamento e smaltimento di tutti i materiali radioattivi generati.

Le miniere e gli impianti di lavorazione del minerale di uranio immettono nell'ambiente materiali radioattivi naturali che altrimenti resterebbero geologicamente isolati dalla biosfera. Anche i processi di produzione del combustibile a base di uranio danno origine a limitati scarichi aeriformi e liquidi, ma le dosi relative a questo particolare momento del processo globale sono molto piccole. Durante l'utilizzazione in centrale, nel combustibile si vanno gradualmente accumulando sostanze altamente radioattive, che restano tuttavia confinate in grandissima parte all'interno degli elementi di combustibile. Inoltre, durante il normale funzionamento di un impianto nucleare si generano materiali radioattivi la cui varietà, quantità e tipologia variano notevolmente da impianto a impianto, e anche in funzione del tempo, soprattutto perché il lavoro di manutenzione (che dà luogo al maggior contributo per gli scarichi di *routine*) varia nel tempo.

Dopo essere stato utilizzato nelle centrali, il combustibile irraggiato viene immagazzinato temporaneamente nelle piscine di decadimento esistenti presso gli impianti, e successivamente avviato a un deposito di stoccaggio definitivo o in alternativa all'impianto di riprocessamento, dove si provvede ad estrarne i materiali riutilizzabili¹⁰. Il riprocessamento produce rifiuti ad alta attività che finora sono stati stoccati in depositi temporanei, anche se sono allo studio metodi di smaltimento definitivo tali da escludere ragionevolmente che la radioattività dei rifiuti possa raggiungere l'uomo e in generale la biosfera.

L'impegno di dose collettivo per unità di energia elettronucleare generata è stato stimato come mostrato nella tabella 10. Le dosi annue ai membri più esposti del pubblico, attorno a centrali elettronucleari, variano da 0,001 a 0,020 mSv/anno; per i maggiori impianti di riprocessamento a livello industriale (non presenti in Italia) questi valori sono compresi tra 0,2 e 0,5 mSv/anno. La dose individuale media derivante dalle emissioni radioattive dell'industria e dagli impianti nucleari per la popolazione italiana è valutabile in 0,001 mSv/anno.

Tabella 10 - Impegno di dosi collettive derivanti dalla produzione di energia nucleare

Sorgente	Impegno di dose efficace collettivo per unità di energia generata (Sv-uomo/GWa)
Componente locale e regionale a breve termine (1÷2 anni)	
Industria mineraria e di lavorazione del minerale	1.5
Fabbricazione del combustibile	0.003
Operazione del reattore	1.3
Riprocessamento	0.25
Trasporto	0.1
Totale (arrotondato)	3
Componente globale a lungo termine (integrata su 10.000 anni)	
Estrazione e lavorazione del minerale (rilasci in 10.000 anni)	150
Confinamento geologico dei rifiuti del reattore	0.5
Radioisotopi dispersi (riprocessamento e confinamento geologico di rifiuti solidi)	50
Totale (arrotondato)	200

L'utilizzo dei combustibili fossili e del calore endogeno

¹⁰ Attualmente meno di un decimo del combustibile irraggiato su scala mondiale viene riprocessato.

È poco nota, ma significativa, la circostanza che l'estrazione e la combustione del carbone e dei combustibili fossili in generale hanno l'effetto di accrescere la concentrazione ambientale di radioisotopi naturali, prelevandoli dai giacimenti e immettendoli nella biosfera, talvolta in modo praticamente incontrollato.

La radioattività immessa nell'ambiente in seguito alla combustione del carbone¹¹ dipende dalla concentrazione delle sostanze radioattive normalmente presenti in esso (concentrazione che può variare anche di un fattore cento da giacimento a giacimento) e di conseguenza nelle ceneri (la maggior parte delle sostanze radioattive si concentra nelle ceneri). Essa dipende inoltre dalla temperatura di combustione, dalla ripartizione fra le ceneri pesanti depositate sul fondo della fornace e le ceneri volatili trascinate dai fumi, dall'efficienza dei dispositivi di controllo delle emissioni e dalla destinazione finale delle ceneri e dei filtri. Le dosi efficaci collettive per GWa di energia elettrica generata bruciando carbone sono state valutate da 0,5 a 6 Sv-uomo a seconda del tipo di impianto; fanno eccezione gli impianti cinesi che, per la loro tipologia e per l'attività dei radioisotopi presenti nel carbone impiegato, arrivano a generare dosi efficaci collettive di 50 Sv-uomo/GWa. Questo contributo porta la dose collettiva da combustione del carbone a un valor medio mondiale di 20 Sv-uomo/Gwa, già presentato in tabella 9.

Un'altra sorgente poco nota di radioattività artificiale è data dalla pratica, in uso soprattutto nei paesi nordici, di produrre energia attraverso la combustione della torba, sostanza caratterizzata da elevate concentrazioni di radioisotopi naturali. Questi si trovano normalmente disciolti nelle acque di superficie e sotterranee, che fluendo nel sottosuolo raggiungono i giacimenti di torba, dove subiscono un processo di assorbimento superficiale e quindi di progressiva concentrazione. La successiva estrazione e combustione della torba determina l'immissione nella biosfera dei radioisotopi, con una dose efficace collettiva stimata in 2 Sv-uomo/GWa.

Anche la produzione di energia geotermica rappresenta una sorgente di esposizione alle radiazioni. Sebbene l'incidenza sulla produzione energetica globale sia piccola, molti paesi - fra i quali l'Italia - utilizzano le riserve di vapore e di acqua calda sotterranee per generare elettricità o per riscaldare gli edifici. La dose efficace collettiva proveniente dallo sfruttamento dell'energia geotermica è attualmente stimata in 2 Sv-uomo/GWa, ma l'affinamento delle tecnologie di utilizzazione del calore endogeno potrebbe elevare sensibilmente in futuro l'importanza relativa di questo contributo.

La componente di origine tecnologica e industriale

I processi industriali e le apparecchiature di uso comune che espongono i lavoratori e gli utenti a dosi di radiazione più o meno rilevanti sono molteplici.

Le esposizioni professionali

Ad esposizioni professionali sono soggette parecchie categorie di lavoratori che trattano con materiali radioattivi o sorgenti di radiazioni naturali o artificiali. Queste categorie di lavoratori sono in massima parte sottoposte a regolare controllo dagli organi della radioprotezione. Il controllo comprende sia la sorveglianza fisica e medica disposta dall' esercente sia la vigilanza da parte degli organismi pubblici ad essa preposti. Nella tabella 11 sono riportate le dosi medie annuali valutate a livello mondiale per i lavoratori controllati e le relative dosi collettive per gli anni 1985-1989. Esistono categorie di lavoratori esposti a irradiazioni di origine naturale eccedenti di gran lunga i valori tipici riscontrati nella vita normale. Esempi significativi sono dati dagli equipaggi degli aerei e dagli addetti delle miniere non uranifere. La dose efficace ai membri dell'equipaggio di un aereo di linea è compresa tipicamente tra 2 e 3 mSv/anno. Nell'industria dell'estrazione le dosi efficaci

¹¹ Problemi analoghi si presentano nella combustione del petrolio e del gas naturale, sia pure in dimensioni notevolmente più contenute.

annue oscillano tipicamente tra 1 e 2 mSv/anno per i minatori del carbone e tra 1 e 10 mSv per altri minatori. Per queste attività devono essere messi in atto adeguati controlli radioprotezionistici, nelle forme specifiche legate alle situazioni considerate. A livello mondiale questi lavoratori non sono attualmente sottoposti in modo generalizzato a controlli dosimetrici individuali e di conseguenza le informazioni disponibili non permettono stime sufficientemente accurate dei livelli medi di esposizione. Il problema potrà tuttavia essere meglio affrontato, almeno a livello europeo, con il completo recepimento della "Direttiva 96/29 Euratom del Consiglio del 13 maggio 1996, che stabilisce le norme fondamentali di sicurezza relative alla protezione sanitaria della popolazione, e dei lavoratori contro i pericoli derivanti dalle radiazioni ionizzanti", estendendo esplicitamente il proprio campo di applicazione ad attività di questo tipo, nel caso che conducano "ad un significativo aumento dell'esposizione di lavoratori, o di individui della popolazione, che non può essere trascurato dal punto di vista della radioprotezione".

Le esposizioni della popolazione

Una menzione particolare merita il contributo dovuto all'industria dei fertilizzanti a base di fosfati. Nella maggior parte dei depositi di fosfato grezzo attualmente utilizzati sono rilevabili alte concentrazioni di uranio. Durante l'estrazione e la lavorazione dei minerali grezzi si liberano notevoli quantitativi di radon, mentre l'uso dei fertilizzanti stessi può accrescere il contenuto di radioisotopi negli alimenti. Tale contaminazione è di solito scarsa, ma aumenta se il fertilizzante è introdotto nel suolo sotto forma liquida e se i prodotti a base di fosfato vengono utilizzati per l'alimentazione degli animali. Usati come aggiunta al mangime del bestiame da carne e alle mucche da latte, questi prodotti alzano notevolmente i livelli di radio nel latte stesso. L'industria dei fertilizzanti fosfatici produce annualmente un impegno di dose efficace collettiva di circa 10.000 Sv-uomo.

Un sottoprodotto dell'industria dei fosfati è il gesso fosfatico usato come sostituto del gesso naturale nei materiali edili; all'attuale produzione annua è associato un impegno di dose efficace collettiva di circa 300.000 Sv-uomo. Nell'edilizia sono anche utilizzate scorie di silicato di calcio - sottoprodotto della combustione del carbone, che presentano concentrazioni di $1.300 \div 2.200$ Bq/kg di radio-226. Esistono altre sorgenti, che danno peraltro mediamente contributi nettamente minori, quali ad esempio le vernici radioluminescenti impiegate per orologi e quadranti in genere, il torio in lenti, l'uranio in protesi dentarie, ecc. Anche televisori a colori e computer determinano dosi medie individuali dell'ordine di 0,01 mSv/anno nell'ipotesi di permanenza davanti al video per circa 4 ore al giorno.

La componente dovuta agli incidenti nucleari

I rischi connessi con lo svolgimento di attività che fanno uso di materiali e sorgenti nucleari sono generalmente ben controllati, e le misure radioprotezionistiche riducono a livelli minimi l'esposizione dei lavoratori e della popolazione. Situazioni anomale possono tuttavia insorgere in seguito all'instaurarsi di condizioni

Tabella 11 - Esposizioni professionali annue nel mondo di lavoratori controllati, periodo 1985-1989. (Fonte: UNSCEAR)

Categoria occupazionale	Dose collettiva annua (Sv-uomo)	Dose efficace media annua per lavoratore controllato (mSv)
Ciclo del combustibile nucleare		
Industria mineraria	1200	4.4
Lavorazione del minerale	120	6.3
Processo di arricchimento	0.4	0.08
Fabbricazione del combustibile	22	0.8
Operazione del reattore	1100	2.5

Riprocessamento	36	3.0
Ricerca	100	0.8
Totale (arrotondato)	2500	2.9
Altre occupazioni		
Applicazioni industriali	510	0.9
Attività della Difesa	250	0.7
Applicazioni mediche	1000	0.5
Totale (arrotondato)	1800	0.6
Tutte le applicazioni (totale complessivo arrotondato)	4300	1.1

incidentali negli impianti o alla occasionale perdita del controllo su attrezzature e materiali radioattivi. Gli incidenti di questo tipo possono talvolta tradursi nell'esposizione dei lavoratori e della popolazione, con implicazioni che possono essere anche molto gravi.

I settori nei quali si sono verificati incidenti nucleari di questo genere sono sostanzialmente tre: quello delle applicazioni militari, quello delle applicazioni energetiche e quello delle applicazioni sanitarie o industriali.

L'analisi degli incidenti avvenuti nel passato insegna ad utilizzare tutte le metodologie e le tecniche disponibili per ridurre al minimo la possibilità di incidenti che comportino rischio per i lavoratori e gli individui della popolazione. Molti dei suddetti incidenti, specie nel settore delle applicazioni mediche ed industriali, ha riguardato i paesi tecnologicamente meno evoluti; ciò non fa tuttavia venir meno l'esigenza di disporre nel Paese di presidi tecnici ed organizzativi adeguati, sia per evitare il verificarsi di incidenti di questa natura sul territorio nazionale, sia per fronteggiare rischi dovuti all'illecita o fortuita introduzione di sorgenti, ad esempio nel commercio di rottami metallici

Gli incidenti nucleari nel settore delle applicazioni militari

Nel campo delle applicazioni militari, i due maggiori incidenti conosciuti si sono registrati il primo nel settembre 1957 in un impianto militare di trattamento del combustibile nucleare situato a Kyshtym (URSS) e il secondo nell'ottobre dello stesso anno presso l'impianto nucleare di Windscale (Gran Bretagna).

A Kyshtym vi fu un'esplosione chimica con rilascio esterno di radioattività a seguito di un malfunzionamento del sistema di refrigerazione di una vasca di immagazzinamento di prodotti di fissione ad alta attività. La dose collettiva alla popolazione (stimata su 30 anni in circa 2.500 Sv-uomo) fu suddivisa in parti uguali tra gli individui abitanti nell'area ad alta contaminazione (circa 10.000 persone, che furono tutte evacuate) e quelli che rimasero nelle aree meno contaminate (circa 260.000 persone). Le dosi individuali più elevate interessarono le persone evacuate entro pochi giorni dall'incidente. La dose efficace media per questo gruppo di 1.150 persone fu di circa 500 mSv.

Nell'impianto di Windscale, utilizzato principalmente per la produzione militare di plutonio, si sviluppò un incendio nel nocciolo di un reattore a gas-grafite (GCR). I principali materiali rilasciati furono gli isotopi radioattivi di xenon, iodio, cesio e polonio, che contaminarono l'area circostante l'impianto ed entrarono nella catena alimentare (l'ingestione di latte fu la più importante via di esposizione). La dose efficace collettiva in Europa, includendo il Regno Unito, fu di circa 2.000 Sv-uomo. Le dosi individuali più elevate - fino a 100 mGy - interessarono la tiroide di bambini che vivevano in prossimità del sito; il predetto valore corrisponde a una dose equivalente alla tiroide di 100 mSv ed a un contributo alla dose efficace pari a 5 mSv¹².

Gli incidenti nucleari nel settore delle applicazioni energetiche

¹² Per le dosi da incidente riferite in questi paragrafi vedi precedente nota 3.

Fra gli incidenti occorsi nel settore della produzione di energia elettrica i più rilevanti sono quelli che interessarono nel 1978 la centrale nucleare di Three Mile Island (USA) e nel 1986 la centrale nucleare di Chernobyl (URSS).

L'incidente di Three Mile Island causò un serio danneggiamento del nocciolo del reattore, con la fusione di circa il 60% del combustibile, ma quasi tutti i prodotti di fissione furono trattiene all'interno del reattore e della struttura di contenimento. La dose efficace collettiva risultante non fu superiore ai 40 Sv-uomo. Le dosi ai singoli individui del pubblico furono basse: il valore massimo non raggiunse il mSv.

Ben più gravi furono gli effetti dell'incidente che il 26 aprile 1986 interessò il reattore n. 4 della centrale nucleare di Chernobyl. L'esplosione del reattore e il successivo incendio della grafite dispersero all'esterno una parte significativa del materiale costituente il nocciolo, che contaminò principalmente l'Unione Sovietica (Ucraina, Russia e Bielorussia) e l'Europa Occidentale. Gli effetti dinamici dell'esplosione causarono la morte immediata di un operatore. Un secondo operatore decedette per infarto. Un terzo operatore morì più tardi, nello stesso giorno dell'incidente, in seguito alle ustioni riportate nell'esplosione. Per quanto riguarda gli effetti della radioattività, il gruppo più esposto è costituito dai circa 400 addetti che operavano stabilmente nell'impianto o che vi giunsero nell'immediatezza dell'incidente (operatori della centrale, operai, vigili del fuoco, personale di soccorso, medici, scienziati e tecnici). 237 persone appartenenti a questo gruppo furono ricoverate in ospedale colpite da sindrome acuta da radiazione. Le misure di dosimetria biologica consentirono successivamente di stimare dosi interne alla tiroide comprese fra 0 e 1,2 Sv per 173 pazienti e maggiori di 11 Sv per 5 pazienti, con una dose massima di circa 20 Sv. Nei tre mesi successivi all'incidente persero la vita complessivamente 28 dei 237 ricoverati, portando a 31 il numero complessivo delle vittime per effetti acuti dell'incidente. Nessun membro della popolazione civile, invece, evidenziò sintomi di sindrome acuta da radiazioni.

L'impegno di dose efficace collettivo dall'incidente è stato stimato in 600.000 Sv-uomo. Le dosi agli individui variarono molto: solo poche persone del gruppo evacuato ricevettero dosi efficaci prossime a 0,5 Sv. La dose efficace media annua nelle zone circostanti l'area di evacuazione sottoposte a rigido controllo si ridusse da 40 mSv nell'anno seguente quello dell'incidente a meno di 10 mSv in ognuno degli anni fino al 1989. Nelle figure 8 e 9 sono rispettivamente riportate le dosi efficaci nel primo anno dopo l'incidente di Chernobyl e gli impegni di dose efficace rispettivamente in diversi paesi e in varie regioni. I valori delle dosi stimate sono stati confermati nel 1990 e nel 1996.

Per quanto riguarda le conseguenze sanitarie tardive dell'incidente di Chernobyl, la comunità scientifica internazionale è concorde nel riconoscere l'esistenza di una crescita dell'incidenza dei casi di tumore alla tiroide nei bambini minori di 15 anni e - in misura meno certa - negli adulti residenti nelle zone più colpite di Russia, Bielorussia e Ucraina. Viceversa, le stime di dose accettate dalla comunità scientifica indicano che, fatta eccezione per il tumore alla tiroide, è improbabile che l'esposizione radiologica subita possa produrre nella popolazione effetti sanitari statisticamente rilevabili. Questa previsione è coerente con i dati epidemiologici finora disponibili.

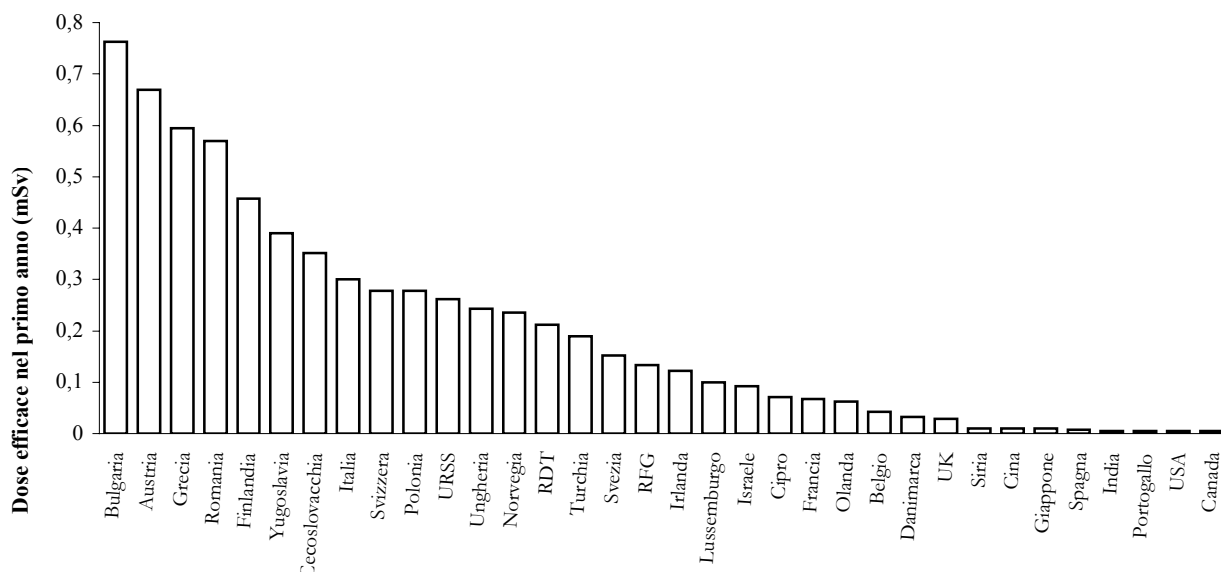


Figura 8 - Dose efficace nel primo anno dopo l'incidente di Chernobyl. Valori medi per i diversi paesi. (Fonte: UNSCEAR)

Sul recente incidente di Tokaimura (Giappone), avvenuto il 30/9/99, sono attualmente disponibili informazioni di natura preliminare. Si è trattato di un evento di criticità dovuto ad una serie di errori umani che si sono venuti ad aggiungere ad una sistematica violazione delle procedure a suo tempo studiate ed approvate e ad una grave carenza di formazione degli operatori. L'incidente ha dato luogo essenzialmente a problemi di irradiazione esterna soprattutto da neutroni.

Non sono ancora disponibili valutazioni della dose collettiva. Le persone irraggiate sono state 86, tra cui i due operatori direttamente coinvolti nell'incidente, un lavoratore che si trovava nel locale adiacente a quello dell'incidente, 59 addetti allo stabilimento o alle operazioni di soccorso, 27 lavoratori sottoposti a esposizione concordata per le operazioni di rimedio, 7 operai occupati nel montaggio di un ponteggio in un cantiere edile sito in prossimità del confine occidentale del sito. Le dosi sono risultate comprese tra 0.03 e circa 20 Sv. L'incidente non ha tuttavia compromesso l'integrità del sistema di contenimento dell'impianto e non ha dato luogo a significativi rilasci di radionuclidi nell'ambiente.

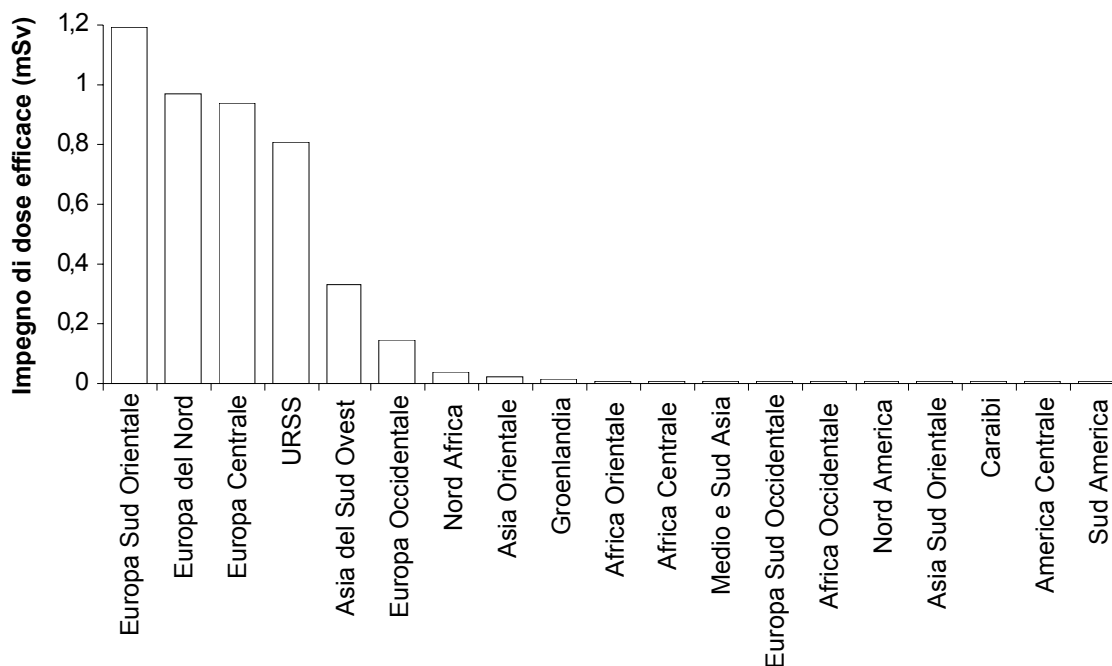


Figura 9 - Impegno di dose efficace in seguito all'incidente di Chernobyl. Valori medi per le diverse regioni. (Fonte: UNSCEAR)

Gli incidenti nucleari nel settore delle applicazioni sanitarie o industriali

Incidenti nucleari di una certa gravità hanno avuto origine anche dalla scorretta custodia di sorgenti radioattive, quali quelle impiegate per applicazioni mediche (in teleterapia) o controlli non distruttivi (gammagrafia industriale). Il più grave tra quelli relativamente recenti si è verificato a Goyania, in Brasile, nel settembre 1987, portando alla morte di 4 persone e alla contaminazione di altre 245, 28 delle quali in modo grave.

La contaminazione radioattiva si sviluppò da una sorgente per radioterapia al cesio-137 abbandonata inavvertitamente durante il trasloco delle attrezzature dell'*Istituto Goiano de Radioterapia*, e successivamente asportata e smantellata - con la liberazione dei sali di cloruro di cesio - da due operai di un campo di recupero. Due giorni dopo, in seguito a diagnosi di sindrome acuta da radiazioni nei due operai e nei loro familiari, si sviluppò un'azione di monitoraggio che portò a rivelare segni di irradiazione esterna o contaminazione interna o esterna in 249 persone. Delle 129 persone contaminate sia esternamente che internamente 9 evidenziarono dosi integrate (su una vita di 70 anni) comprese fra 1 e 7 Sv e altre 33 dosi comprese fra 0,05 e 1 Sv. Le persone ricoverate furono complessivamente 54; dieci furono giudicate in condizioni critiche; quattro di esse morirono e una quinta dovette subire gravi amputazioni.

Il monitoraggio ambientale riscontrò elevati livelli di contaminazione in 85 abitazioni (41 delle quali furono evacuate e 7 dovettero essere demolite), 45 locali pubblici e una cinquantina di autoveicoli. Il materiale proveniente dalle operazioni di decontaminazione (complessivamente 3.500 m³) è attualmente confinato in un deposito controllato appositamente costruito a 20 km dalla cittadina, contenuto in 3.800 fusti da 200 litri, 1.400 casse, 10 container e 6 bunker in calcestruzzo. La radioattività contenuta in tutto il materiale confinato è stata misurata in 1.200 Ci, a fronte dei 1.375 Ci contenuti inizialmente nella sorgente al cesio.

GLI EFFETTI BIOLOGICI DELLE RADIAZIONI

L'esposizione alla radioattività

Sommando i diversi contributi ambientali (di origine naturale e antropica) considerati nel capitolo precedente, in condizioni normali ciascun membro della popolazione italiana è esposto mediamente a una dose efficace individuale di circa 4,2 mSv/anno, cui contribuiscono grosso modo per tre quarti il fondo naturale e per un quarto le attività antropiche, quasi totalmente rappresentate dalle pratiche medico-diagnostiche (tabella 12)¹³.

Tabella 12 – Dosi efficaci medie annue da sorgenti naturali ed artificiali in Italia.

Categoria	Sorgente	Dose annuale media (mSv)
Fondo ambientale		3,1
di cui:	Raggi cosmici	0,30
	Radioisotopi cosmogenici	0,01
	Radiazione terrestre	0,58
	- esposizione esterna	0,23
	- esposizione interna escluso radon	2,0
	- esposizione interna da radon e suoi prodotti	
Attività antropiche		1,1
di cui:	pratiche sanitarie, radiologia	1,00
	Televisori e computer (4 ore al giorno)	0,01
	Impianti nucleari	0,001
	Viaggi aerei	0,002
	Altre esposizioni di origine tecnologica	0,01
	fall-out di esperimenti nucleari	0,01
Totale		4,2

Dosi acute associate ad alcuni incidenti nucleari	(mSv)
Dose individuale massima determinata dall'incidente di Three Mile Island, nella regione circostante l'impianto	0,7
Dose individuale massima determinata dall'incidente di Goyania	7.000
Dose individuale massima determinata dall'incidente di Chernobyl	20.000
Dose media nelle aree più contaminate dell'URSS dovuta all'incidente di Chernobyl (intera vita)	35,7
Dose media alla popolazione italiana derivante dall'incidente di Chernobyl (intera vita)	1,6

La dispersione di radioisotopi nell'ambiente - in seguito a eventi naturali, a carenze di controllo o a situazioni incidentali - può esporre gli la popolazione a dosi da irraggiamento esterno (contatto) e da irraggiamento interno (ingestione e inalazione) aggiuntive a quelle medie naturali, con esposizioni che possono protrarsi anche per lunghi periodi. I radioisotopi dispersi nell'ambiente possono entrare a far parte delle catene biologiche, e quindi subire processi di concentrazione che possono portarli ad accumularsi in alcune sostanze destinate all'alimentazione animale e umana, dando luogo così a condizioni di rischio particolari. Ad esempio, si è constatato che radioisotopi come il piombo-210 e il polonio-210 si concentrano nel pesce e nei molluschi, esponendo a dosi elevate chi consuma grandi quantitativi di questi alimenti. Analoghi sono gli effetti dei fenomeni di concentrazione degli stessi radioisotopi nei muschi e nei licheni, e conseguentemente nella carne degli erbivori che, come le renne, se ne nutrono, cui già si accennato in precedenza. In tal modo decine di migliaia di persone che vivono nell'estremo nord dell'Europa e che si cibano abitualmente di carne di renna subiscono normalmente dosi che superano di oltre 30 volte i livelli medi ambientali. Altri processi di accumulo della radioattività nelle catene biologiche sono stati scoperti in Australia, dove alcune popolazioni che si nutrono di carni e frattaglie di pecora e di canguro subiscono esposizioni che superano di oltre 70 volte i livelli medi normali.

¹³ I vari contributi di dose ambientale (naturale e antropica) sono posti a confronto nella tabella 12 con gli effetti determinati dagli incidenti di Three Mile Island, Chernobyl e Goyania.

La presenza dei fenomeni di concentrazione e di accumulo dei radioisotopi nelle catene biologiche complica in misura notevole la valutazione delle dosi cui la popolazione è esposta in seguito alla dispersione di radioattività nell'ambiente, e costringe gli esperti di radioprotezione a fare sistematico uso di sofisticati modelli di diffusione.

Effetti sulle cellule e sui tessuti biologici

Attraverso il processo di ionizzazione, le radiazioni determinano la temporanea alterazione degli atomi e la conseguente modificazione delle molecole e delle cellule che li contengono. In tal modo le radiazioni interagiscono con i tessuti biologici danneggiando i costituenti cellulari in genere, e tra essi il DNA.

Il danneggiamento del DNA può impedire la sopravvivenza o la riproduzione della cellula. Alle basse dosi e per limitate intensità di dose, quando i danni provocati nelle cellule sono lievi e la velocità di danneggiamento non è elevata, i normali meccanismi biologici di riparazione cellulare - sempre attivi in ogni organismo - possono porvi riparo, e non si hanno quindi necessariamente conseguenze dannose sulla funzione cellulare e sui tessuti. Talvolta la riparazione può tuttavia non essere perfetta, dando luogo a una cellula vitale ma modificata; questa potrà continuare a riprodursi generando un clone di cellule modificate, che può evolvere alla fine in un tumore. Se la cellula modificata ha la funzione di trasmettere informazioni genetiche alla discendenza, allora è probabile che possa trasmettere informazioni imprecise, influenzando sul suo corretto sviluppo. Al crescere della dose e della sua intensità i danni cellulari diventano sempre più numerosi e più gravi e tali da interferire con la funzione cellulare. I meccanismi di riparazione e rigenerazione possono rivelarsi inadeguati, e la cellula, danneggiata irreparabilmente, può morire, immediatamente o dopo un certo numero di divisioni. Alle alte dosi il danno cellulare può estendersi fino a interessare vaste regioni del tessuto colpito, pregiudicandone la funzione organica.

Effetti somatici e genetici

Gli effetti prodotti dalle radiazioni nell'organismo umano sono usualmente distinti in due categorie: *effetti somatici* ed *effetti genetici*.

- Sono effetti somatici quelli che interessano le cellule somatiche, cioè quelle che costituiscono i tessuti dell'individuo e che scompaiono all'atto della sua morte; considerando un agente fisico che non ha nulla a che fare con le radiazioni ionizzanti, ma che è a tutti ben noto, sono effetti somatici, ad esempio, le ustioni epidermiche che derivano dall'esposizione alla radiazione solare.
- Sono effetti genetici quelli che interessano invece il corredo genetico delle cellule riproduttive, che viene trasmesso alla progenie attraverso la riproduzione.

A seconda dell'epoca in cui si manifestano rispetto all'esposizione, gli effetti somatici sono classificati come effetti immediati o tardivi.

- Sono effetti somatici immediati quelli che si manifestano entro qualche giorno o al massimo entro qualche settimana dall'esposizione. Si tratta di manifestazioni tipiche di irradiazioni acute (di forte intensità e breve durata), quali quelle che si verificano nel caso di incidenti. Questi effetti si manifestano quando il danno cellulare è così esteso da pregiudicare significativamente un intero organo o tessuto e sono perciò possibili solo se viene superato, in un dato intervallo di tempo, un determinato limite di esposizione. A parte una lieve variabilità dovuta a fattori biologici individuali, sono colpiti tutti gli individui irradiati al di sopra di questo valore soglia, normalmente espresso in termini di dose assorbita all'organo considerato. La gravità dei sintomi

è inoltre crescente al crescere della dose assorbita. Appartengono, ad esempio, a questa categoria le ustioni solari già ricordate. Nel caso delle radiazioni ionizzanti gli effetti somatici immediati possono giungere anche a determinare la morte dell'individuo. Ad esempio, un'irradiazione acuta da raggi γ con una dose di 5 Gy a tutto il corpo (corrispondenti a 5 Sv) è tale da determinare la morte entro 30 giorni del 50% dei soggetti esposti, e si definisce per questo *dose letale al 50%*.

- Gli **effetti somatici tardivi** sono quelli che si manifestano a distanza anche di molti anni dall'esposizione; appartengono a questa categoria malattie degenerative di diverso tipo. Alcune di queste manifestazioni, quali la dermatite cronica, la cataratta da radiazioni, le anemie e leucopenie croniche, hanno modalità di manifestazione assimilabili agli effetti immediati precedentemente considerati, quali l'esistenza di una soglia, certamente elevata ancorché difficilmente quantificabile, in quanto fortemente dipendente dalle caratteristiche temporali delle irradiazioni. Altre, fra cui il cancro e la leucemia, esibiscono caratteristiche completamente diverse: non esiste un valore soglia per la loro comparsa, mostrano sempre la stessa gravità per qualsiasi valore della dose (tipo tutto o niente, senza alcuna gradualità con la dose), hanno frequenza di comparsa sempre relativamente bassa, ma tanto più elevata quanto maggiore è la dose.

Per questi effetti si suppone che il legame fra dose ed effetto sia sempre di tipo proporzionale senza soglia, come sarà meglio precisato nel paragrafo successivo.

Gli effetti genetici sono sempre di tipo tardivo, potendosi manifestare solo nelle generazioni successive a quella interessata dall'esposizione. Le alterazioni del corredo genetico delle cellule riproduttive possono tradursi in manifestazioni non patologiche, in manifestazioni patologiche lievi o in manifestazioni patologiche gravi. In radioprotezione si assume, a titolo cautelativo, che tutti gli effetti siano del tipo più grave, e anche per essi si assume un rapporto dose-effetto di tipo proporzionale e senza soglia.

Effetti deterministici e stocastici

Aldilà della classificazione ricordata, gli effetti biologici delle radiazioni vengono anche classificati sulla base della loro riconducibilità alle cause iniziali in *effetti deterministici* ed *effetti stocastici*.

- I danni che si producono con sintomi organici evidenti e in stretto rapporto con l'esposizione prendono il nome di effetti deterministici delle radiazioni: si tratta generalmente di manifestazioni di tipo acuto, la cui gravità dipende dalla dose di radiazione assorbita, nel senso detto in precedenza. Gli effetti deterministici si manifestano generalmente entro breve tempo dall'esposizione per effetto di dosi e intensità di dose elevate, e comprendono tutti gli effetti immediati e quegli effetti somatici tardivi che presentano caratteristiche ad essi confrontabili quanto ad esistenza di un valore soglia e gradualità di manifestazione.
- I restanti effetti somatici tardivi (essenzialmente cancro e leucemia) e gli effetti genetici, che non mostrano invece uno stretto ed evidente legame con l'esposizione, e che possono o meno manifestarsi anche a distanza di anni, sono chiamati effetti stocastici delle radiazioni: dalla dose di radiazione assorbita dipende solo la loro probabilità, ma non la gravità.

In termini sanitari gli effetti deterministici si traducono in manifestazioni immediate e certe, sempre di tipo somatico, direttamente correlabili con l'esposizione subita, e la cui gravità dipende dall'entità di questa. Gli effetti stocastici si traducono invece in manifestazioni tardive e probabili

di tipo somatico (cancro, leucemia, ecc.) o genetico, la cui probabilità, come appena detto dipende dalla dose assorbita.

Gli effetti stocastici delle radiazioni non sono dunque distinguibili da quelli determinati da altre cause, i cosiddetti casi spontanei; e la loro incidenza in larghi gruppi di individui esposti si mantiene sempre modesta, almeno se confrontata con quella dei casi spontanei. Queste circostanze comportano difficoltà oggettive nel quantificare, anche su base epidemiologica, gli effetti stocastici delle radiazioni, specie nel campo delle basse dosi, che in definitiva è quello che maggiormente interessa in radioprotezione. Da tutti gli studi eseguiti su larghi gruppi di individui esposti, e in particolare sui sopravvissuti dei bombardamenti atomici di Hiroshima e Nagasaki, è risultato evidente un aumento statisticamente significativo della frequenza di tumori in gruppi esposti a dosi efficaci dell'ordine di alcune centinaia di mSv, con probabilità crescente al crescere della dose. Per dosi inferiori, dell'ordine ad esempio delle decine di mSv, non è stato invece finora possibile, neanche con le tecniche epidemiologiche più raffinate, dimostrare, né ovviamente escludere, che vi sia un incremento delle patologie investigate, essendo ogni eventuale effetto dell'irradiazione nascosto dalle fluttuazioni statistiche dei casi spontanei. In particolare non è stato possibile stabilire se vi sia una soglia di dose al di sotto della quale si possa ragionevolmente escludere il verificarsi di danni stocastici.

Come conseguenza, per consentire di valutare a fini di prevenzione i rischi delle esposizioni a basse dosi, è stata cautelativamente adottata, in radioprotezione, la ipotesi della linearità senza soglia; si ipotizza, in altre parole, che a qualsiasi dose, per quanto piccola, sia associata una probabilità diversa da zero che si manifesti un danno di tipo stocastico e che questa probabilità sia proporzionale alla dose efficace.

Effetti somatici di un tipo particolare sono quelli legati all'irradiazione del feto nell'utero. In questa categoria sono compresi sia effetti deterministici (principalmente aborto spontaneo, malformazioni e difetti dello sviluppo, a seconda delle dosi assorbite e del periodo dell'irradiazione) sia effetti tardivi stocastici, del tutto assimilabili a quelli di un individuo già nato. La probabilità di induzione di questi ultimi effetti è ritenuta sostanzialmente più alta di quella relativa all'esposizione dell'adulto, in virtù della particolare radiosensibilità dei tessuti fetali. Giova sottolineare che, anche nel caso di malformazioni, in questo caso si tratta di effetti somatici e non di effetti genetici, essendo prodotti a partire da un danneggiamento di tessuti fetali o embrionali e non da una modificazione del corredo genetico di una cellula riproduttiva.

La riconoscibilità degli effetti delle radiazioni

L'esistenza di una soglia di induzione al di sotto della quale è possibile escludere l'insorgenza di effetti deterministici ne permette un'efficace prevenzione, limitandone il campo di interesse essenzialmente a ristrettissime categorie di lavoratori o a condizioni incidentali estreme. Questa circostanza, unitamente all'adozione dell'ipotesi di linearità senza soglia per gli effetti stocastici, fa sì che le conseguenze più temute dell'esposizione alle radiazioni consistano proprio nell'insorgenza di questi effetti, cioè di malattie degenerative (leucemia e tumore) o di mutazioni genetiche nella popolazione esposta.

Le manifestazioni patogene indotte da radiazioni sono clinicamente distinguibili come tali, a livello del singolo individuo, solo nel caso degli effetti deterministici. Si è già detto che non esiste alcuna differenza clinica tra un tumore o una mutazione genetica radioindotta e le corrispondenti patologie spontanee o indotte da altri agenti fisici, chimici o biologici. Esistono inoltre difficoltà oggettive nell'identificare, sulla base dei dati epidemiologici, gli effetti dell'irradiazione di una popolazione o di un gruppo di individui. I fattori che concorrono alle predette difficoltà sono molteplici: il tempo di latenza delle malattie radioindotte, la dimensione e l'oscillazione statistica dell'incidenza naturale delle stesse malattie, la scarsità di dati sull'incidenza naturale e l'effetto amplificatore dell'approfondimento delle tecniche diagnostiche.

- Le manifestazioni degenerative (leucemia e cancro) causate dalle radiazioni hanno un periodo di latenza che può essere anche molto lungo (tipicamente 2-3 anni per la leucemia e 5-10 anni per i tumori solidi), periodi che si riducono nei bambini a causa della velocità con la quale negli organismi giovani si riproducono le cellule. La variabilità statistica del periodo di latenza rende estremamente complesso - e sovente impossibile - correlare la comparsa di un effetto con la causa (radiazione o altro) che potrebbe averlo generato.
- In una qualsiasi popolazione esiste una incidenza spontanea della leucemia e del cancro dovuta alle cause più disparate, che va sotto il nome di "incidenza naturale", e che è di per sé molto elevata: le statistiche stabiliscono che oltre il 20% dei cittadini dei paesi industriali morirà di leucemia o di cancro per effetto dell'incidenza naturale, con ampie oscillazioni statistiche da un anno all'altro. Il numero di casi dovuti all'incidenza naturale e le oscillazioni statistiche sono tali da mascherare completamente i pochi casi "aggiuntivi" attesi come effetto (statistico) di un'esposizione alla radioattività contenuta entro valori che non superino largamente i livelli riscontrabili in condizioni normali.
- La mancanza in molti paesi di dati epidemiologici attendibili sull'incidenza naturale della leucemia e del cancro nella popolazione rende ulteriormente difficoltosa qualunque analisi mirante a discriminare i casi dovuti ad un'esposizione cronica (ad esempio, al *fall-out* radioattivo degli esperimenti nucleari militari) o acuta (ad esempio, le esposizioni medico-diagnostiche o quelle dovute a gravi incidenti nucleari).
- Il miglioramento del monitoraggio sanitario fa di per sé aumentare i casi di malattia osservati, a causa della diagnosi precoce di casi di malattia che altrimenti sarebbero passati inosservati anche per molti anni e della diagnosi di casi di decesso che sarebbero stati attribuiti ad altre cause. Un'esperienza diretta di questo effetto è stata fatta in tutti i paesi industrializzati occidentali nella profilassi del cancro alla mammella, allorché il miglioramento delle tecniche di indagine e l'ampliamento della popolazione sottoposta a *screening* evidenziò inizialmente un (apparente) aumento della frequenza di questo tipo di malattia.

Per tutti questi motivi, il riconoscimento diretto degli effetti di un'esposizione alla radioattività è problematico, a meno che non si tratti di un'esposizione tanto elevata da determinare effetti somatici immediati o effetti statistici evidenti.

Gli effetti delle basse dosi

Alle basse dosi di radiazione - quelle confrontabili con le dosi derivanti dal fondo naturale - possono determinarsi esclusivamente effetti di tipo stocastico, con probabilità che si riduce al ridursi della dose assorbita. Al diminuire della dose la probabilità che si manifestino conseguenze diventa praticamente nulla, e gli effetti dell'irraggiamento non possono essere materialmente rilevati su base scientifica.

Per avere comunque una base di valutazione - destinata più a progettare le misure di radioprotezione che a valutare i reali effetti sanitari dell'esposizione - gli organismi nazionali e sovranazionali di radioprotezione adottano l'ipotesi di proporzionalità lineare senza soglia già ricordata. Questa ipotesi ha permesso di determinare, per estrapolazione a partire dai dati ricavati per gli effetti verificati ad alte dosi¹⁴, coefficienti di rischio specificamente destinati alle valutazioni "a priori" ai fini dell'applicazione dei principi della radioprotezione di cui si tratterà nel seguito (giustificazione, ottimizzazione e determinazione dei limiti di esposizione).

Questa ipotesi di linearità porta sicuramente a sovrastimare gli effetti delle piccole dosi, e quindi agisce nel senso della sicurezza. Giova però osservare che, se questo approccio è sicuramente ragionevole in fase di prevenzione, tuttavia l'utilizzazione degli stessi coefficienti per calcolare "a posteriori" l'effetto di una determinata esposizione a basse dosi, deve essere considerata con cautela, poiché le ragioni alla base dell'ipotesi di risposta lineare senza soglia, sulla cui base essi sono stati ricavati, sono ancora in attesa di validazione sperimentale.

Gli effetti psicologici e psicosomatici

Sulla base dei dati epidemiologici raccolti in occasione dei maggiori incidenti nucleari (Windscale, Three Mile Island, Chernobyl), gli esperti internazionali hanno riscontrato nelle popolazioni interessate conseguenze di tipo psicologico e psicosomatico legate non all'entità dell'esposizione, ma al timore circa la reale entità del rischio e allo sconvolgimento dei modi e dei ritmi di vita. Gli effetti di questo stress psicologico possono tradursi in disagi cardiaci, sindromi nervose e indebolimento del sistema immunitario.

Nella popolazione evacuata in occasione del disastro di Chernobyl è stato osservato uno stato di ansia e di stress di tipo cronico, con disturbi di vario genere, insonnia e difficoltà di apprendimento. Si tratta di disturbi che, seppure complessivamente diagnosticati come "sindrome da radiofobia", non sono direttamente correlati all'effetto delle radiazioni, ma al timore di esse ed alle pesanti conseguenze di tipo sociale dell'incidente. La quasi totalità dei disturbi denunciati dalla popolazione interessata dall'incidente di Chernobyl rientra nella casistica tipica dei disagi psicologici conseguenti alla paura provata e al trasloco forzato. L'incidente ha determinato infatti la disintegrazione degli equilibri sociali e ha sconvolto la vita quotidiana di centinaia di migliaia di persone costrette a trasferirsi in luoghi diversi da quelli nei quali vivevano. La preoccupazione per la propria salute manifestata oggi da gran parte delle persone residenti nelle aree interessate dall'incidente resta elevata, col risultato che qualsiasi malessere, non importa di quale origine, è sistematicamente attribuito dalla gente alle conseguenze dell'incidente, probabilmente anche per il

¹⁴ La base di riferimento per la valutazione è costituita dagli effetti osservati nelle popolazioni esposte ai bombardamenti atomici di Hiroshima e Nagasaki e in alcune popolazioni esposte accidentalmente ad esplosioni nucleari in atmosfera, in gruppi di pazienti sottoposti a irradiazioni terapeutiche, dal monitoraggio dei lavoratori esposti nelle attività di estrazione di minerali radioattivi e - più recentemente - nelle popolazioni esposte agli effetti del disastro di Chernobyl.

fatto che le misure di protezione in atto influiscono tuttora in modo pesante sulla dieta, sui comportamenti, sulle attività scolastiche, lavorative e ricreative.

SECONDA PARTE: LA RADIOPROTEZIONE

LE BASI E I PRINCIPI DELLA RADIOPROTEZIONE

Le basi scientifiche e i principi cardine

La radioprotezione è la disciplina applicata alla protezione dell'uomo e dell'ambiente dagli effetti dannosi delle radiazioni ionizzanti, una disciplina che si estrinseca in una serie di concetti, raccomandazioni, requisiti, tecnologie e modalità operative volti a proteggere la popolazione (individui in generale, lavoratori, soggetti sottoposti a pratiche mediche di diagnosi e cura facenti uso delle radiazioni ionizzanti).

La protezione dagli effetti delle radiazioni si fonda a livello generale sull'isolamento delle sorgenti radioattive dall'ambiente e dal contatto con l'uomo, e a livello particolare sull'adozione di pratiche, comportamenti, soluzioni progettuali, costruttive e tecnologiche atti a ridurre l'esposizione individuale e collettiva della popolazione in misura appropriata. La determinazione dei criteri e delle procedure da applicare a questo scopo è oggetto di studio da parte di numerosi organismi nazionali e internazionali, fra i quali il più autorevole è la *International Commission for Radiological Protection* (ICRP), una commissione scientifica autonoma fondata nel 1928 della quale fanno parte alcuni dei massimi esperti internazionali del settore. In seguito ad una approfondita e permanente analisi di tutti gli studi scientifici condotti in sede internazionale, l'ICRP emana periodicamente una serie di raccomandazioni la cui indiscussa autorevolezza è dimostrata dal fatto che dette indicazioni sono puntualmente recepite nella normativa internazionale e nazionale sulla radioprotezione.

L'assunzione fondamentale sulla quale si basano le raccomandazioni dell'ICRP è che non esiste dose per quanto piccola alla quale non sia associato un rischio. Poiché, d'altra parte, non avrebbe senso cercare di ridurre a zero le dosi individuali - in quanto esiste sempre almeno la dose derivante dal fondo naturale, che oltretutto può variare ampiamente dall'una all'altra zona della Terra, come si è visto - l'ICRP non si può limitare a fissare semplici limiti di esposizione, il cui rispetto non potrebbe comunque soddisfare le esigenze di protezione, dal momento che non potrebbe né escludere la possibilità di danni stocastici, ancorché non rilevabili neanche su base statistica, né garantire che la loro incidenza sia ridotta in misura ragionevole. Di qui discende la necessità di un sistema di protezione radiologica complesso, che secondo l'impostazione dell'ICRP è basato su tre principi generali: il *principio di giustificazione*, il *principio di ottimizzazione* e, solo in ultima istanza, il *principio di limitazione del rischio individuale*.

Il principio di giustificazione

Il principio di giustificazione è lo stesso che si applica - consciamente o inconsciamente - a tutti i rischi derivanti da qualsiasi attività umana. Esso stabilisce che l'esposizione dell'individuo e della popolazione a dosi aggiuntive di radiazione è giustificabile solo se i benefici derivanti dalle pratiche che generano le dosi aggiuntive sono superiori all'insieme degli effetti negativi statisticamente prevedibili. Qualunque esposizione deve essere perciò subordinata a una valutazione comparativa che tenga conto di tutti gli aspetti implicati (tecnici, sanitari, economici, sociali, ...) e che ne valuti tutte le possibili conseguenze. L'esposizione potrà essere considerata ammissibile solo se può essere formulato un giudizio di prevalenza dei benefici sugli effetti negativi. Ad esempio, la diagnostica a raggi X, pur esponendo il soggetto a dosi di radiazione talvolta elevate, ha ricadute positive (la possibilità di diagnosticare stati patologici e quindi di curarli) tali da rendere accettabile il rischio radiologico aggiuntivo cui si espongono il paziente e gli operatori sanitari. Una

determinata diagnostica a raggi X non potrà comunque essere ritenuta giustificabile se i rischi radiologici ad essa connessi superano gli eventuali benefici sanitari.

Il principio di ottimizzazione

Il principio di ottimizzazione stabilisce che - una volta comprovata la giustificazione - l'esposizione della popolazione deve essere mantenuta la più bassa ragionevolmente ottenibile (principio ALARA = *as low as reasonably achievable*) tenendo conto di fattori sanitari, economici e sociali. Tornando all'esempio della radiografia, il principio ALARA si traduce nella circostanza che l'apparecchiatura, la metodica e le procedure utilizzate devono essere sempre tali da minimizzare le dosi al paziente ed agli operatori sanitari, oppure che, se il quesito diagnostico può trovare una risposta soddisfacente tramite una differente metodica, si dovrà dare la preferenza alla tecnica non radiologica, a patto naturalmente che la scelta non comporti oneri irragionevoli. In altri termini, anche quando una dose aggiuntiva è ammessa sulla base del principio di giustificazione, essa deve essere ridotta al minimo, pur senza spingere le misure di protezione a livelli ai quali gli oneri aggiuntivi (tecnici, economici e sociali) non sarebbero più giustificati dalla ulteriore riduzione di un rischio già a livelli evanescenti.

Il principio di limitazione del rischio individuale

Il principio di limitazione del rischio individuale si pone a valle dei due principi precedenti e afferma che le dosi individuali, anche se ammissibili sulla base dei principi di giustificazione e di ottimizzazione, non devono comunque eccedere specifici limiti determinati in modo tale da garantire che i rischi per la salute del singolo individuo non raggiungano livelli giudicati inaccettabili. Il principio di limitazione del rischio individuale si estrinseca con la definizione di limiti di dose che, date le premesse di partenza e in particolare l'ipotesi di linearità senza soglia, comportano necessariamente un bilancio comparato fra il rischio radiologico e i rischi di diversa origine comunemente accettati dalla comunità nella vita sociale e nelle attività lavorative.

La determinazione dei limiti di dose

Le valutazioni volte alla determinazione dei limiti di dose sono svolte dalla ICRP sulla base di approfondite analisi comparative fra il rischio - sull'arco dell'intera vita - di danno biologico associato all'assunzione di una determinata dose e i rischi sociali e individuali cui sono esposti gli individui della popolazione nella vita normale e nelle attività lavorative.

Le informazioni dirette sui danni biologici causati dalle radiazioni sono ottenuti con riferimento specifico alle alte dosi. In particolare, la principale base di riferimento per la valutazione è costituita tuttora dagli effetti osservati nelle popolazioni esposte ai bombardamenti atomici di Hiroshima e Nagasaki. A questi studi si aggiungono quelli condotti su alcune popolazioni esposte accidentalmente agli effetti di esplosioni nucleari nell'atmosfera tra gli anni Cinquanta e Sessanta, e altri derivanti dall'osservazione di pazienti trattati con irradiazioni terapeutiche o dal monitoraggio dei lavoratori esposti nelle attività di estrazione di minerali radioattivi. Ma la massima parte dei dati disponibili è tuttora riferibile alle alte dosi e alle alte intensità di dose. Dal momento che le dosi e le intensità che interessano le applicazioni pratiche della radioattività sono di gran lunga inferiori, per valutare i corrispondenti effetti gli esperti hanno adottato l'ipotesi di proporzionalità lineare fra dosi ed effetti, un'ipotesi che, sulla base delle evidenze scientifiche esistenti, porta - come si è già visto - a sovrastimare gli effetti delle basse dosi, e quindi agisce in senso cautelativo sulle misure di protezione.

La Commissione procede all'emanazione e alla continua revisione (aggiornata sulla base delle nuove conoscenze radiobiologiche) dei limiti di dose, determinando i valori cui corrispondono rischi non dissimili da quelli che contraddistinguono le condizioni di vita e di lavoro comunemente considerate soddisfacenti. In altri termini, si considera ammissibile una dose di radiazione cui è associato un rischio potenziale di malattia o di decesso (valore statistico calcolato) analogo a quello associato agli altri fattori di rischio (valori statistici reali) cui un individuo è normalmente esposto e che di fatto normalmente accetta (si tratta di parametri a consuntivo). Ciò fa sì, ad esempio, che i limiti di dose per i lavoratori siano maggiori di quelli per gli individui della popolazione, in quanto normalmente i rischi associati alle attività lavorative sono superiori a quelli associati alla vita quotidiana lontano dai posti di lavoro (tabella 13).

Tabella 13 – Limiti di dose in aggiunta al fondo naturale e alle pratiche mediche. (Fonte: ICRP, D.Lgs. 230/95)

Categoria di persone	Limiti di dose
Individui della popolazione in generale	
- dose efficace	1 mSv/anno
- dose equivalente al cristallino	15 mSv/anno
- dose equivalente alla pelle	50 mSv/anno
- dose equivalente a mani, avambracci, piedi, caviglie	50 mSv/anno
Lavoratori esposti	
- dose efficace	100 mSv in 5 anni, con massimo di 50 mSv/anno nel periodo
- dose equivalente al cristallino	150 mSv/anno
- dose equivalente alla pelle	500 mSv/anno
- dose equivalente a mani, avambracci, piedi, caviglie	500 mSv/anno

Per definizione, i predetti limiti vanno confrontati con la somma delle dosi provenienti da tutte le sorgenti di esposizione, con l'esclusione di due termini: il fondo naturale e le dosi di carattere medico-sanitario (diagnosi e terapia).

Significato dei limiti di dose e dosi "ammissibili"

I limiti di dose fissati dalla ICRP (tabella 13) vanno interpretati come strumenti per assicurare una protezione adeguata anche a livello individuale. In presenza di un rischio che per definizione si considera sempre non nullo, i soli principi di giustificazione ed ottimizzazione potrebbero infatti non essere sufficienti a garantire una sufficiente accettabilità sul piano personale, considerate soprattutto la diversa distribuzione dei rischi derivanti da una pratica rispetto a quella dei corrispondenti benefici.

È importante ribadire che i limiti fissati dalla ICRP e recepiti dalle normative nazionali, pur avendo funzioni di tutela dei lavoratori e degli individui della popolazione, non indicano una demarcazione tra dosi "ammissibili", secondo una locuzione ormai datata ma ancora spesso utilizzata benché fuorviante, e dosi "non ammissibili" in quanto legate a soglie di danno. In altri termini, affermazioni del tipo *"sopra il limite (la dose ammissibile) c'è danno, sotto no"* sono del tutto errate. I limiti di dose hanno invece soprattutto il carattere di livelli operativi da tener presenti come strumenti di ulteriore garanzia personale e come tali recepiti nelle norme positive. In questo senso, se si verifica occasionalmente l'esposizione di uno o più individui a dosi superiori ai limiti corrispondenti, questa circostanza deve essere valutata soprattutto come un indice dell'insufficienza delle misure preventive e non necessariamente come un indice di danno biologico. La ICRP ha infatti chiarito espressamente che i lavoratori coinvolti dalle applicazioni delle radiazioni e gli individui della popolazione in genere possono occasionalmente ricevere dosi anche multiple rispetto ai limiti di dose senza che ciò comporti certezza di danni biologici.

D'altra parte il ruolo primario per la limitazione dei rischi da radiazioni per le attività già "giustificate" è demandato a una corretta ottimizzazione della protezione, che comporta di norma

l'adozione di criteri di progetto, di sistemi di protezione e procedure operative tali da contenere le dosi individuali entro valori sostanzialmente minori dei predetti limiti.

LA RADIOPROTEZIONE OPERATIVA

Gli strumenti

Il quadro di riferimento concettuale e metodologico proposto dalla ICRP costituisce la base sulla quale le organizzazioni intergovernative internazionali - come la *International Atomic Energy Agency* dell'ONU (IAEA), la *Nuclear Energy Agency* dell'OCSE (NEA), la *Food and Agricultural Organisation* dell'ONU (FAO), la *International Labour Organisation* (ILO), la *World Health Organisation* (WHO) e la Commissione Europea - sviluppano i criteri guida della radioprotezione con riferimento alle diverse applicazioni (energia nucleare, applicazioni mediche, esposizione alla radioattività naturale, ecc.). Le linee guida così emanate sono quindi trasferite nelle normative e nelle regolamentazioni internazionali e nazionali.

Attraverso un continuo processo di adeguamento finalizzato a conseguire obiettivi sempre più avanzati di tutela della popolazione, dei lavoratori e dell'ambiente, la radioprotezione ha sviluppato nel tempo molteplici strumenti, divenuti sempre più efficaci ed elaborati, che si raggruppano in tre grandi categorie:

- gli strumenti concettuali, dati dai principi fondamentali che stanno alla base della materia radioprotezionistica e definiscono la cosiddetta *radioprotezione generale*. Si tratta in particolare dei principi di giustificazione, ottimizzazione e limitazione già ricordati;
- gli strumenti tecnici, dati dall'insieme delle pratiche di intervento (schermature, sistemi di confinamento statico e dinamico dei radioisotopi, mezzi di protezione personale, procedure di collaudo o d'intervento, tecniche di misura delle radiazioni, dosimetria, ecc.) che coinvolgono le scienze fisiche, le scienze biologiche e naturali, la medicina e la sanità pubblica, l'ingegneria, l'organizzazione del lavoro e le scienze ambientali;
- gli strumenti normativi, che coinvolgono l'elaborazione e l'aggiornamento di norme che comprendono direttive comunitarie, raccomandazioni, leggi nazionali, guide e norme tecniche, regolamenti, prescrizioni autorizzative, istruzioni e procedure operative;
- i controlli e le verifiche ispettive.

Nel loro insieme, queste tre ultime categorie di strumenti definiscono la *radioprotezione operativa*, che ha affinato enormemente nel tempo le proprie metodiche, a partire da quelle elementari degli anni Trenta, aventi per oggetto la protezione dalle sorgenti di raggi X contro il rischio dei soli danni deterministici allora

conosciuti, fino al complesso sistema di protezione da tutte le fonti naturali e artificiali messo a punto dall'ICRP con la pubblicazione n. 60 (1990) e recepito in tutte le principali normative nazionali e internazionali.

L'organizzazione

In tutti i paesi sviluppati, i concetti fondamentali della radioprotezione sono implementati attraverso un efficace sistema che include leggi e normative, un efficiente sistema di controllo e un complesso ben strutturato di esperti, laboratori e attrezzature specializzate.

L'obiettivo di fondo di questa infrastruttura complessiva è quello di applicare estesamente il principio di ottimizzazione (ALARA). A tal fine il primo compito è quello di assicurare che i temi della protezione e della sicurezza ricevano la necessaria attenzione da parte di quanti hanno responsabilità a tutti i livelli, dal governo ai rappresentanti politici, dai manager ai lavoratori, dal sistema dell'informazione al largo pubblico, sviluppando la sensibilità e condizionando il comportamento dei singoli. Questa attitudine - e i comportamenti che ne derivano - sono usualmente chiamati "cultura della sicurezza", e costituiscono il presupposto fondamentale per l'esistenza di un efficace sistema di radioprotezione.

A valle dello sviluppo di una adeguata cultura della sicurezza, l'implementazione delle pratiche radioprotezionistiche è basata su un sistema di laboratori, attrezzature di misura e metodi di indagine (tecniche di misura, modelli ambientali, metodi di controllo e modellizzazione, hardware, software, ecc.) che costituiscono complessivamente la tecnologia della radioprotezione. Questi strumenti sono soggetti a continuo miglioramento sulla base degli avanzamenti che interessano i settori tecnologici, scientifici e industriali correlati. La radioprotezione è infatti una disciplina dinamica, la cui continua evoluzione è fondata sul progresso delle conoscenze scientifiche e sulla messa a punto di nuove metodiche e di nuovi strumenti tecnologici.

Le strategie operative

Le strategie operative proprie della radioprotezione sono finalizzate a

- conoscere e caratterizzare con idonee campagne di misura le sorgenti radioattive naturali e artificiali;
- introdurre e mantenere idonee misure di protezione individuale per i lavoratori e per gli individui della popolazione potenzialmente a rischio di esposizione;
- introdurre e diffondere idonee misure di protezione collettiva per la popolazione potenzialmente a rischio di esposizione e per l'ambiente.

L'intervento operativo della radioprotezione si attua a diversi livelli, che riguardano da un lato il monitoraggio dell'ambiente e della popolazione e dall'altro la sorveglianza degli impianti, delle apparecchiature e dei lavoratori potenzialmente esposti. I principali livelli operativi sono i seguenti:

- acquisizione dei parametri ambientali necessari per garantire il monitoraggio continuo delle condizioni dell'ambiente e dell'esposizione della popolazione;
- emanazione di specifiche per la progettazione di impianti e apparecchiature che possono comunque essere fonte di esposizione;
- verifica delle condizioni di sicurezza di impianti e apparecchiature in fase di realizzazione e di collaudo, con l'obiettivo di minimizzare il rischio per i lavoratori e la popolazione;
- controllo periodico della sussistenza delle condizioni di sicurezza di impianti e apparecchiature durante tutta la loro vita utile;

- delimitazione e sorveglianza delle zone ad accesso controllato, con definizione e applicazione degli accorgimenti da adottare per accedervi e permanervi;
- monitoraggio individuale dei lavoratori e delle persone in genere potenzialmente a rischio di esposizione alle radiazioni;
- massima diffusione della cultura della sicurezza e dell'informazione, allo scopo di sensibilizzare e orientare il comportamento dei decisori, dei lavoratori e del pubblico in condizioni normali e di emergenza.

Le aree di intervento

La radioprotezione operativa estrinseca la propria azione in favore della sicurezza intervenendo in una serie di aree specifiche, ciascuna caratterizzata da diverse problematiche e peculiarità. Queste aree sono identificate e individuate seguendo un percorso verticale che va dalla singola applicazione all'impatto che questa ha sui lavoratori che vi sono coinvolti e sulla popolazione in generale e sull'ambiente. All'interno di questo percorso ne viene seguito un secondo orizzontale, di tipo gerarchico e organizzativo, finalizzato a identificare univocamente le responsabilità e a indicare i comportamenti di ciascun soggetto.

- Progettazione degli impianti e delle attrezzature. Il livello della progettazione degli impianti e delle attrezzature è quello che opera più vicino alla sorgente, ed è quindi quello nel quale possono essere adottati gli accorgimenti più efficaci ai fini della minimizzazione dell'impatto sanitario e ambientale. La radioprotezione interviene con prassi operative specifiche in fase di selezione dei siti, disposizione degli impianti, progettazione dei sistemi e delle attrezzature, adozione di schermi e sistemi di protezione, gestione dei rifiuti radioattivi, monitoraggio e controllo degli accessi.
- Organizzazione e gestione. Quello organizzativo e amministrativo costituisce il livello gerarchicamente più elevato nel quale intervengono le pratiche della radioprotezione operativa. Si tratta in questo caso di integrare la struttura gestionale di ogni organizzazione coinvolta nell'uso di sorgenti (sostanze e materiali radioattivi o macchine radiogene) con le strutture interne e con le prassi operative necessarie per applicare estesamente e in modo univoco e affidabile i principi base della radioprotezione.
- Informazione e formazione. A valle degli accorgimenti di tipo strutturale (progettazione) e gestionale (organizzazione) volti a minimizzare l'impatto delle applicazioni delle radiazioni ionizzanti, esiste la sfera dei comportamenti individuali, che devono anzitutto fondarsi sulla consapevolezza dei singoli, e quindi su un intenso programma di informazione e formazione. Lo scopo è quello di fare in modo che i singoli (lavoratori, pubblico) assumano sistematicamente comportamenti individuali e collettivi idonei a minimizzare il rischio di esposizione.
- Limitazione e controllo dell'esposizione dei lavoratori. Una volta assicurati gli strumenti strutturali e organizzativi, e una volta indotti i giusti comportamenti individuali e collettivi, il livello di intervento della radioprotezione si trasferisce al controllo e alla limitazione dell'esposizione, attraverso l'uso estensivo di accorgimenti operativi (delimitazione delle aree, controllo degli accessi), tecniche e dispositivi di limitazione dell'esposizione (schermi mobili, sistemi di confinamento dinamico – cappe, scatole a guanti ecc. - equipaggiamenti protettivi, sistemi di monitoraggio e di allarme) e tecniche di controllo delle dosi (dosimetria esterna e interna).
- Limitazione e controllo dei rifiuti radioattivi. Nell'economia generale della radioprotezione si dedica un'attenzione particolare alla produzione e alla gestione dei rifiuti radioattivi, che costituiscono forse uno dei principali veicoli attraverso il quale l'esposizione alla radioattività può interessare i lavoratori e soprattutto il pubblico. In quest'area si adottano sistematicamente accorgimenti atti a limitare la quantità di rifiuti prodotti, a ridurne il volume e a facilitare idonei

interventi di condizionamento e stabilizzazione, per evitare che i rifiuti possano entrare in contatto con la biosfera.

- Limitazione e controllo dell'esposizione del pubblico. Lungo il percorso che parte dall'applicazione, questo è il livello di intervento più prossimo alla popolazione in generale. Obiettivo della radioprotezione operativa è in questo caso quello di assicurare (attraverso il monitoraggio degli effluenti e idonee misure esterne) che l'esposizione del pubblico sia il più possibile ridotta, e che comunque resti costantemente al disotto dei limiti previsti dalla normativa e dalla licenza di esercizio dell'impianto o dell'attrezzatura in armonia col principio ALARA.
- Pianificazione e gestione delle emergenze. In ogni installazione e da ogni apparecchiatura che facciano uso di sostanze radioattive in quantità non trascurabili possono scaturire condizioni di emergenza con potenziali conseguenze all'interno di un impianto (emergenza interna) o all'esterno di esso (emergenza esterna). A questi eventi è necessario prepararsi predisponendo strategie organiche di risposta e piani operativi di emergenza che tengano conto di ogni aspetto.
- Predisposizione e gestione della strumentazione. L'implementazione di un programma operativo di radioprotezione si fonda necessariamente sulla disponibilità, sulla corretta disposizione e sull'efficienza di un complesso sistema di strumenti e apparecchiature di sorveglianza e di misura, che richiede intensi programmi di selezione, installazione, controllo, calibrazione, manutenzione e verifica di efficienza.

Nei paragrafi che seguono sono esaminate nei dettagli le pratiche applicative della radioprotezione in ciascuna area.

PROGETTAZIONE DI IMPIANTI E ATTREZZATURE

Generalità

La corretta applicazione dei principi della radioprotezione si traduce in primo luogo nell'adozione di una prassi di progettazione di impianti e apparecchiature finalizzata alla sicurezza. La considerazione di ogni fonte di rischio in fase di progetto, e la conseguente adozione di tutte le salvaguardie impiantistiche del caso, non può di per sé escludere del tutto la possibilità di una contaminazione o di un'esposizione accidentale, ma è certamente il modo migliore per ridurre entro i limiti risultanti da una corretta procedura di ottimizzazione (ALARA) la probabilità che questi eventi indesiderati hanno di verificarsi. L'adozione di una prassi progettuale finalizzata alla sicurezza costituisce in effetti l'approccio più efficace per ridurre i rischi e per rendere più semplice il conseguimento e il successivo mantenimento di livelli di sicurezza elevati.

L'ottimizzazione radioprotezionistica e l'assunzione delle necessarie salvaguardie impiantistiche è assicurata in tutto il mondo dall'intervento di esperti qualificati in radioprotezione fin dalla fase di progettazione di impianti e apparecchiature. In tutti i paesi, inoltre, impianti e apparecchiature che coinvolgono l'uso e la manipolazione di sostanze radioattive sono sottoposti a procedure di autorizzazione e di licenza che operano a partire dalla fase di progetto, e che si concludono solo a valle di una approfondita verifica condotta sotto la sorveglianza dell'Autorità di controllo.

Nel caso più generale, la progettazione di un sistema o di un impianto nei quali si faccia uso di sostanze o sorgenti radioattive è soggetta a vincoli radioprotezionistici per quanto attiene ai seguenti aspetti:

- la localizzazione e disposizione dell'impianto o dell'apparecchiatura;
- l'ottimizzazione delle caratteristiche strutturali e funzionali;
- l'adozione di schermature biologiche e di sistemi di controllo dell'atmosfera;
- l'analisi dei processi che danno luogo alla produzione di rifiuti ed effluenti radioattivi, la loro quantificazione e l'individuazione degli eventuali sistemi di trattamento;
- l'individuazione e la delimitazione di aree controllate, il monitoraggio e il controllo degli accessi.

Localizzazione e struttura di impianti e apparecchiature

Un impianto o un'attrezzatura che faccia uso di sorgenti o materiali radioattivi deve essere collocato in modo da confinare la radioattività nell'ambito più ristretto possibile, e da escludere - per quanto ragionevolmente ottenibile nel senso del principio ALARA - che possano verificarsi fuoriuscite sistematiche o accidentali da tale ambito sia in condizioni normali sia in condizioni incidentali.

Nel caso dei grandi impianti nucleari (centrali elettronucleari, impianti del ciclo del combustibile, depositi di materiali e rifiuti radioattivi) il problema della localizzazione si pone in modo pressante, e può condizionare in misura determinante le scelte. Le caratteristiche del sito (assenza di crinali instabili, bassa sismicità, lontananza dai centri abitati, profondità della falda freatica, assenza di fenomeni atmosferici e idrologici violenti, lontananza dalle rotte di traffico aereo e terrestre) possono in questi casi contribuire in modo determinante alla sicurezza dell'installazione.

Nel caso degli impianti e delle attrezzature di minore importanza, il problema della localizzazione è meno pressante, mentre conserva importanza il problema della disposizione. L'obiettivo è in tal caso quello di adottare le disposizioni impiantistiche più idonee per minimizzare - a parità di altre condizioni - i rischi di contaminazione e di esposizione. Ad esempio, può essere più conveniente collocare un sistema radiologico per oncologia nei sotterranei di un ospedale piuttosto che in uno

dei piani in elevazione. A parità di altre condizioni, infatti, si limitano di molto la complessità delle schermature necessarie e i problemi strutturali connessi.

Un naturale incentivo alla localizzazione e alla disposizione ottimale di impianti e attrezzature è generalmente dato, a parità di altre condizioni, dal collegamento spesso esistente fra vantaggi di ordine radioprotezionistico - riduzione del rischio di esposizione o delle dosi - e di ordine economico - la maggiore semplicità, e quindi il minor costo, dei sistemi strutturali, di schermatura e di contenimento -.

Disposizione funzionale

Il secondo livello di intervento in fase di progettazione di un impianto nel quale si faccia uso di sorgenti e materiali radioattivi è quello dell'ottimizzazione funzionale della disposizione relativa dei locali e delle attrezzature.

Le aree di un impianto destinate ad ospitare sorgenti e materiali radioattivi e quelle destinate alla loro gestione devono essere collegate funzionalmente, in modo tale che il ciclo di utilizzo di impianti e apparecchiature avvenga all'interno di una "zona controllata", di estensione quanto più possibile limitata e non collegata con locali aventi funzione del tutto diversa. Considerando il caso dell'ospedale, una collocazione razionale è quella che vede le apparecchiature per la diagnosi radiologica collocate tutte insieme, preferibilmente nella stessa zona nella quale sono collocati gli apparecchi per radioterapia e i laboratori per la manipolazione dei radiopreparati e dei traccianti radioattivi. È invece opportuno che la mensa del personale, uffici amministrativi, aree di degenza o altre strutture non connesse funzionalmente alle attività con radiazioni trovino collocazione in altra parte del complesso.

Generalmente, nei complessi civili e industriali nei quali si fa uso di sorgenti e materiali radioattivi esiste una classificazione delle aree per livello di contaminazione (reale o potenziale) o per livello di intensità di dose. A questa classificazione si associa in genere anche una precisa collocazione geometrica dei locali. Ad esempio, è conveniente collocare uffici, sale riunioni e refettori in aree quanto più possibile lontane da quelle che ospitano le sorgenti e i materiali radioattivi, separate da zone cuscinetto (aree di livello intermedio) destinate ad esempio ad ospitare laboratori e magazzini convenzionali, depositi di apparecchiature, ecc. La disposizione delle zone convenzionali deve essere tale da rendere possibile lo spostamento dall'una all'altra di esse senza passare per le zone controllate, mentre la disposizione delle zone controllate è in genere tale da costituire una successione di "scatole cinesi", con le zone convenzionali all'esterno e quelle via via più calde annidate verso l'interno. In ciascuna area può essere prescritto l'uso di indumenti protettivi e può essere fissato un tempo massimo di permanenza per minimizzare le esposizioni.

Schermature biologiche e controllo dell'atmosfera

L'adozione di idonee schermature è una delle pratiche più diffuse e insieme più utili per il controllo dell'esposizione all'interno e all'esterno di un impianto con significativi rischi di irradiazione esterna. Un sistema di schermaggio si basa in sostanza sull'interposizione fra sorgente e ambienti frequentati da persone di barriere realizzate con adatti spessori di materiali assorbenti.

La presenza di schermature estese comporta in genere per il progetto penalizzazioni dimensionali (spessori dei materiali) e di costo. Soprattutto se la radiazione da schermare ha natura complessa (diverse componenti, diverse energie), il procedimento di calcolo può portare ad approssimazioni che devono essere sempre risolte in favore della sicurezza adottando schermature complesse (piombo, calcestruzzo baritico, ecc.) o aumentando ulteriormente gli spessori. L'aumento degli spessori degli schermi comporta la necessità di adeguare la struttura dell'edificio che ospita gli schermi stessi, e ciò comporta un ulteriore aumento dei costi.

Allo scopo di ridurre al minimo la quantità di materiale impiegato e contemporaneamente di massimizzarne l'efficacia, la schermatura deve essere disposta il più vicino possibile alla sorgente, e deve essere strutturata tenendo conto del tipo e dell'intensità delle radiazioni da schermare. Il dimensionamento delle schermature si calcola in genere avendo come obiettivo quello di attenuare l'intensità della radiazione incidente fino a ridurla ai livelli di progetto determinati nel rispetto del principio ALARA. Questi valori devono essere naturalmente compatibili con la presenza di operatori nelle aree protette all'esterno di essa, tenendo conto di eventuali limiti di permanenza nei locali immediatamente a ridosso degli schermi (zone controllate).

Una pratica di notevole importanza per limitare l'esposizione alle radiazioni nelle installazioni in cui sono presenti significativi rischi da esposizioni interne è quella del controllo e della filtrazione dell'atmosfera nelle apparecchiature e nei locali ospitanti le sorgenti. Negli impianti in cui il rischio da esposizione interna si somma a quello da esposizione esterna, i predetti sistemi vengono di norma progettati in forma integrata col sistema schermante. Lo scopo di questa pratica è quella di eliminare dall'atmosfera le componenti radioattive (polveri in sospensione, aerosol, gas radioattivi) che possono sprigionarsi da impianti e attrezzature, o quantomeno di ridurle entro valori di progetto determinati anch'essi in accordo col principio ALARA. In questo modo si arriva ad annullare o almeno a minimizzare da un lato l'irradiazione interna (da inalazione) degli addetti, e dall'altro l'immissione nell'atmosfera esterna di contaminanti radioattivi. Il controllo dell'atmosfera interna degli impianti è basato sull'adozione di barriere ingegneristiche (strutture di contenimento), di sistemi a depressione (che creano una depressione nei locali a rischio rispetto alla pressione esterna) e di sistemi di circolazione e filtrazione, il tutto sottoposto a sistemi automatici di controllo e di allarme capaci di rilevare e segnalare tempestivamente l'instaurarsi di condizioni anomale.

Conoscenza della genesi e del trattamento di rifiuti ed effluenti radioattivi

La progettazione di un impianto nel quale si faccia uso sistematico di sorgenti e materiali radioattivi deve tenere conto di tutte le possibili modalità di produzione di rifiuti radioattivi, e deve tendere a minimizzare tale produzione, sia in termini di quantità sia in termini di attività.

Negli impianti e nelle installazioni si generano normalmente piccole o grandi quantità di rifiuti radioattivi. Questi rifiuti sono generati in massima parte come residui dei processi di lavorazione o di manutenzione adottati, ma esiste almeno una componente che è sempre presente, indipendentemente dai processi adottati: quella che deriva dalle procedure di decontaminazione e di sicurezza.

Una prassi comunemente adottata per impedire l'accumulo e la possibile fuga di sostanze radioattive è ad esempio quella del lavaggio sistematico delle pareti dei locali. Il trattamento delle soluzioni di lavaggio e la filtrazione dell'atmosfera dei locali generano rifiuti radioattivi che devono essere trattati e smaltiti come tali.

In fase di progetto è possibile adottare accorgimenti tali da minimizzare la produzione di questa categoria di rifiuti. Ne sono esempio l'adozione di rivestimenti impermeabili e non porosi per le pareti, i soffitti e i pavimenti, l'eliminazione degli angoli nei quali possa ristagnare la polvere, la predisposizione di sistemi di drenaggio controllato, la separazione netta degli impianti tecnologici che servono i locali controllati da quelli che servono i locali convenzionali.

Monitoraggio dei locali e controllo degli accessi

L'adozione in fase progettuale dei sistemi di protezione attiva o passiva precedentemente descritti porta alla suddivisione dell'impianto in aree convenzionali (non soggette a rischi di contaminazione o di esposizione esterna) e in aree controllate di diverso tipo, nelle quali, in condizioni normali o incidentali, esiste un rischio potenziale di esposizione del personale.

Allo scopo di conoscere in ogni momento lo stato dell'impianto e il livello di esposizione del personale è necessario introdurre in queste aree un adeguato sistema di monitoraggio e di controllo degli accessi, subordinando l'accesso degli operatori alle effettive necessità operative e all'adozione di idonei mezzi di protezione personale. La permanenza nei locali controllati può essere inoltre subordinata all'osservanza di tempi massimi prestabiliti.

Il sistema di monitoraggio e di controllo degli accessi deve essere predisposto fin dalla fase di progetto dell'impianto o dell'installazione, sulla base della classificazione delle aree già prevedibile in quella fase. La sua rispondenza ai requisiti deve essere tuttavia assoggettata a una prassi di controllo e verifica permanente, finalizzata a controllare la sussistenza delle condizioni progettuali di sicurezza.

ORGANIZZAZIONE E GESTIONE

Generalità

A valle dell'adozione di tutti gli accorgimenti progettuali e realizzativi necessari per minimizzare il rischio associato alla gestione di sorgenti e materiali radioattivi, l'impatto della radioprotezione operativa si trasferisce sul piano dell'adozione di idonee procedure organizzative e gestionali nelle strutture coinvolte. Il livello organizzativo e gestionale è il livello più elevato nel quale si può intervenire per influenzare in senso positivo la sicurezza radiologica di un impianto una volta che esso sia stato costruito, ed è pertanto quello nel quale è necessario intervenire con maggiore impegno e determinazione.

Una corretta politica di radioprotezione si fonda sulle seguenti componenti:

- l'organizzazione di radioprotezione;
- le procedure di sicurezza;
- la formazione del personale e l'attribuzione delle responsabilità;
- l'accertamento di qualità
- l'accreditamento e la certificazione.

L'intervento in ciascuna di queste aree comporta l'applicazione e lo scrupoloso rispetto della normativa esistente in materia, e inoltre un corretto interfacciamento con le strutture nazionali e internazionali istituzionalmente preposte (autorità di controllo, enti di certificazione, strutture sanitarie, ecc.).

Organizzazione di radioprotezione

L'organizzazione di radioprotezione deve avvalersi di professionalità e di strutture che possono essere interne o esterne, ma che in ogni caso devono rispondere alla necessità di preconstituire un sistema operativo efficace e correttamente strutturato sul piano normativo.

La struttura di radioprotezione interna fa generalmente capo a un Responsabile per la sicurezza radiologica, che accentra la responsabilità complessiva dell'organizzazione. Sotto il coordinamento del Responsabile opera generalmente un Comitato per la sicurezza radiologica, composto di esperti del settore, cui compete la responsabilità di formulare gli obiettivi, i principi cardine e i dettagli operativi della politica complessiva di sicurezza radiologica, e di controllarne l'effettiva applicazione. Il Comitato ha la responsabilità di definire gli interventi e le prassi operative interne, e di predisporre e stanziare il necessario budget operativo. Il comitato coordina direttamente tutte le

attività interne inerenti alla sicurezza radiologica, che nel caso più generale saranno condotte operativamente dai responsabili di linea e dalle maestranze interne.

Data la rilevanza delle tematiche connesse con la radioprotezione e la loro trasversalità rispetto alle funzioni interne, il Comitato ha normalmente la possibilità di interloquire direttamente anche con i più alti livelli dirigenziali della struttura nel cui ambito opera. Ad esso compete anche la corretta impostazione e gestione dei rapporti con le funzioni esterne alla struttura, fra le quali preminente importanza assumono i rapporti con l'autorità di controllo, l'autorità sanitaria e le strutture di accreditamento e certificazione.

Procedure di sicurezza

Primo e fondamentale presupposto per l'implementazione di una efficace prassi di sicurezza radiologica è la chiara e univoca definizione di procedure specifiche, che di solito sono descritte estesamente in un *manuale di operazione* dell'impianto, dell'installazione o dell'apparecchiatura cui si riferiscono.

Il manuale di operazione include generalmente una descrizione complessiva della politica generale (filosofia) di sicurezza definita e adottata dal Comitato per la sicurezza radiologica, ed è finalizzato a fornire a tutto il personale coinvolto gli elementi necessari per assumere comportamenti atti a condurre impianti e attrezzature in modo idoneo a minimizzare l'esposizione alle radiazioni e ad evitare l'insorgenza di situazioni anomale (incidenti).

Nel manuale sono chiaramente indicate le procedure operative da seguire caso per caso nella gestione di impianti e attrezzature, che possono riferirsi a compiti quali l'operazione di una macchina, la manutenzione di sistemi rilevanti per la sicurezza, la manipolazione di un materiale, la calibrazione e l'uso di uno strumento, l'accesso a una determinata area, e via dicendo. Dette procedure sono generalmente descritte con un'esposizione "passo-passo", con le istruzioni necessarie per controllare l'insorgenza di eventuali situazioni anomale e i rinvii alle procedure di emergenza che potrebbe essere necessario adottare. In particolare, per ciascun compito (operazione) da svolgere, nel manuale sono incluse fra le altre le seguenti informazioni:

- la descrizione dell'operazione da svolgere;
- la descrizione dei rischi potenziali associati all'operazione;
- l'identificazione della persona responsabile del controllo di sicurezza;
- le salvaguardie che è necessario adottare per condurre l'operazione;
- il livello di qualificazione tecnica e di *training* richiesto all'operatore;
- i criteri sulla cui base giudicare il corretto risultato dell'operazione;
- la documentazione da produrre prima e dopo l'operazione;
- le azioni da compiere in caso di emergenza.

Informazione, formazione e responsabilità

Il principio base che uniforma tutte le procedure di sicurezza radiologica è che ogni addetto, a qualunque livello operi, è il primo e più diretto responsabile della propria sicurezza, nell'ambito delle proprie mansioni. Esiste tuttavia un dovere esplicito di chi ha ruoli e funzioni direttive di conferire al lavoratore una adeguata preparazione e di predisporre un ambiente di lavoro razionale e sicuro.

In ossequio a questo principio, le procedure di sicurezza radiologica si fondano su una precisa e univoca identificazione delle responsabilità, che vanno dalla periferia (singolo lavoratore) al centro (Comitato per la sicurezza e Responsabile della sicurezza), e che sono puntualmente descritte nel manuale di operazione dell'impianto e delle attrezzature. Il conferimento ai dirigenti, ai preposti e al

lavoratore di un determinato compito deve corrispondere ad una documentata presa di coscienza e accettazione delle responsabilità coinvolte. La consapevole accettazione delle responsabilità individuali deve quindi basarsi sull'informazione e sulla formazione di ciascun addetto.

Il programma di informazione e formazione deve avere un momento di preparazione orizzontale, volto ad informare i lavoratori, ma anche il pubblico, circa le caratteristiche delle applicazioni delle radiazioni ionizzanti e i relativi rischi potenziali. A questa preparazione di base deve far seguito uno specifico programma formativo, differenziato in ragione dei diversi compiti professionali e orientato alla piena comprensione degli aspetti che coinvolgono la sicurezza personale e collettiva. All'interno delle realtà lavorative che fanno uso di sorgenti e materiali radioattivi la padronanza degli argomenti relativi alla radioprotezione e alla sicurezza deve essere quindi parte integrante del processo formativo e di valutazione delle attitudini personali.

Accertamento di qualità

Il programma di sicurezza radiologica di un impianto o di un'apparecchiatura deve includere un programma di accertamento di qualità permanente, finalizzato a verificare in modo continuo il conseguimento degli obiettivi di sicurezza prefissati.

Il programma di accertamento di qualità si esplica attraverso una attività permanente di verifica dei risultati conseguiti a fronte degli obiettivi prefissati, verifica che viene usualmente condotta attraverso misure, ispezioni, sorveglianza e verifiche puntuali e statistiche. Tali attività hanno in particolare per oggetto:

- il controllo di base delle sorgenti e dei materiali radioattivi;
- il controllo della strumentazione e delle apparecchiature;
- la verifica di conformità alle norme e ai regolamenti;
- il controllo degli effluenti radioattivi e delle misure di protezione;
- il monitoraggio dell'ambiente interno ed esterno;
- lo *screening* medico-sanitario dei lavoratori e della popolazione;
- l'attività inquirente sulle situazioni anomale e su tutti gli eventuali incidenti, anche se trascurabili quanto a conseguenze;
- l'effettiva applicazione delle procedure di sicurezza;
- la formazione del personale.

Fondamentale per il mantenimento di uno standard di protezione qualitativamente elevato è il contributo conoscitivo che può derivare dall'approfondimento di ogni situazione anomala o incidentale che si verifichi nell'installazione o nella conduzione delle operazioni. Lo studio degli eventi incidentali, se condotto con la necessaria apertura critica, consente in genere di individuare punti deboli delle procedure di sicurezza e azioni correttive delle quali possono avvantaggiarsi non solo gli standard di sicurezza interni, ma anche quelli seguiti da altri operatori.

Accreditamento e certificazione

L'accertamento di qualità di un sistema di radioprotezione ha un momento fondamentale e imprescindibile nel confronto con gli standard qualitativi esterni all'organizzazione e nell'adeguamento periodico delle prestazioni del sistema allo stato dell'arte tecnico-scientifico. Questo momento passa attraverso le procedure di accreditamento e certificazione, che possono riguardare tanto la professionalità degli addetti coinvolti a tutti i livelli quanto la qualità e la rispondenza delle attrezzature e delle apparecchiature impiegate.

Ogni paese industriale ha sviluppato strutture a livello nazionale per l'accreditamento e la certificazione, capaci di assicurare l'adeguamento della preparazione dei singoli operatori e delle prestazioni di apparecchiature e attrezzature di misura e di controllo agli standard tecnici più avanzati, quali vengono a configurarsi oltre che a seguito del costante impegno nella ricerca, anche attraverso l'intensa attività di confronto e di scambio di esperienze che gli enti di certificazione conducono sistematicamente a livello internazionale.

L'adeguamento delle procedure e delle apparecchiature adottate in un determinato ambito operativo è assicurato dall'attuazione di periodici programmi di accreditamento e certificazione condotti in rapporto con enti di certificazione di riconosciuta esperienza e competenza.

LIMITAZIONE E CONTROLLO DELL'ESPOSIZIONE DEI LAVORATORI E DEL PUBBLICO

Generalità

A valle degli interventi in fase progettuale e in fase di gestione degli impianti e delle apparecchiature, lo scopo fondamentale di un programma di radioprotezione operativa - ovvero quello di limitare il più possibile l'esposizione dei lavoratori e della popolazione alla radioattività e ai suoi effetti - si consegue attraverso specifiche misure di controllo quali:

- l'adozione di sistemi di salvaguardia, il controllo degli accessi e l'uso di equipaggiamenti protettivi individuali;
- il monitoraggio degli ambienti e l'adozione di sistemi di allarme;
- la valutazione delle dosi con tecniche di dosimetria esterna e interna;
- il controllo degli effluenti e il monitoraggio esterno.

Sistemi di salvaguardia, controllo degli accessi, equipaggiamenti protettivi

Come si è già detto, il primo accorgimento per limitare l'esposizione dei lavoratori e della popolazione è dato dall'adozione di idonei sistemi di salvaguardia strutturale, basati sull'uso estensivo di schermature e di appropriate tecniche costruttive e architettoniche in fase di progettazione e realizzazione (schermi biologici, celle schermate, scatole a guanti, sistemi di sicurezza, ecc.).

La suddivisione dell'impianto in aree a diverso grado di pericolosità consente di predisporre un piano di regolamentazione e controllo degli accessi volto a minimizzare l'esposizione dei singoli. Una volta definita la delimitazione delle aree e delle zone controllate, la minimizzazione dell'esposizione degli addetti si consegue subordinando l'accesso in dette aree alle condizioni di effettiva necessità e prescrivendo, per questi casi, comportamenti adeguati e eventuali indumenti protettivi individuali.

L'uso di indumenti protettivi è finalizzato ad evitare che sostanze e polveri radioattive possano giungere a contaminare la cute, ad essere inalate o ad essere ingerite o, in alcuni casi, a proteggere l'operatore dalle irradiazioni esterne.

Gli indumenti protettivi contro l'irradiazione esterna sono efficaci in modo particolare per proteggere dalle radiazioni β e dai raggi X di bassa energia (fino a 200 keV). Si tratta in genere di maschere protettive in plastica e di indumenti realizzati in tessuto naturale o sintetico ad alta densità impregnato o laminato con composti di piombo. I sistemi per proteggere dalla contaminazione interna sono generalmente più complessi, giungendo fino all'uso di scafandri integrali che includono sistemi di respirazione capaci di impedire il contatto, l'inalazione e l'ingestione di gas,

polveri e particelle in sospensione. In presenza di rischi di contaminazione interna, il cambio degli indumenti protettivi avviene di norma in appositi spogliatoi ricavati nelle zone di transito, in modo da impedire una diffusione al di fuori delle zone controllate di polveri e sostanze radioattive inavvertitamente trasportate con gli indumenti stessi.

Monitoraggio degli ambienti e sistemi di segnalazione o di allarme

Gli ambienti nei quali può accidentalmente verificarsi l'esposizione alla radioattività sono normalmente dotati di sistemi di allarme asserviti a sistemi di monitoraggio delle condizioni ambientali e dell'atmosfera. L'accesso a questi ambienti è di regola ben segnalato e protetto, onde prevenire l'accesso casuale di personale non autorizzato. In generale, la segnaletica utilizzata nelle zone sensibili deve essere chiara ed esauriente e seguire un formato standard che include:

- un'intestazione che indica la classificazione dell'area ed eventualmente il grado di pericolo ("Attenzione" o "Pericolo");
- un'indicazione del tipo di pericolo (ad esempio, "*Presenza di sostanze radioattive*");
- il simbolo standard che indica presenza di radioattività (standard UNI-ISO);
- brevi istruzioni sul comportamento da tenere (ad esempio, "*Non oltrepassare questo limite*");
- per gli impianti più complessi o ad elevato livello di rischio, sistemi di segnalazione ottici ed acustici (lampade, tabelloni luminosi, sirene) che indicano lo stato di funzionamento dell'impianto, distinguendo le fasi a seconda delle diverse situazioni di rischio (ad esempio: "*Macchina pronta*" oppure "*Irraggiamento*") e segnalando le transizioni da una fase all'altra.

Il sistema di allarme è progettato per emettere segnalazioni acustiche e luminose nel caso che le grandezze misurate (irradiazione esterna, concentrazione in aria, ecc.) superino i livelli di guardia prefissati.

Il grado di sofisticazione dei sistemi di segnalazione e di allarme può variare da caso a caso. Nelle applicazioni più semplici la funzione di avvertimento può essere affidata a un sistema di cordoni di delimitazione e di cartelli di segnalazione. Negli impianti di maggiori dimensioni, o di maggiore rilevanza radioprotezionistica, il sistema può includere procedure computerizzate che comandano lampeggiatori e sirene, interruttori di emergenza, porte e barriere a chiusura automatica e sistemi per l'evacuazione del personale. In caso di superamento di predeterminati livelli di guardia possono essere automaticamente stabilite condizioni di interblocco che, a seconda dei casi, governino gli accessi negli ambienti interessati, segreghino eventuali locali

contaminati in modo da impedire alla radioattività di contaminare altre aree, comandino il blocco automatico di impianti ed attrezzature e la messa in sicurezza delle sorgenti.

Valutazione delle dosi: dosimetria esterna e interna

La valutazione periodica delle dosi personali ha due diversi scopi: quello di consentire un confronto oggettivo fra le dosi che interessano i lavoratori e i limiti di esposizione previsti dalla normativa, e quello di verificare la rispondenza e l'efficacia del programma operativo di radioprotezione ai fini della limitazione del rischio individuale e collettivo.

Gli strumenti attraverso i quali sono condotte le misure di dosimetria esterna includono i dosimetri personali di tipo passivo (dosimetri a termoluminescenza, dosimetri a film sensibile, ecc.) e di tipo attivo (dosimetri elettronici e camere a ionizzazione tascabili). I primi, grazie alla loro praticità ed economicità, sono utilizzati di norma come strumenti primari per valutazioni di dose individuale integrata in presenza di campi di radiazione anche complessi; i secondi sono utilizzati quando occorrono stime di dose in tempo reale. I dosimetri personali elettronici sono normalmente equipaggiati con dispositivi di allarme acustico che si attivano allorché la dose ha raggiunto un livello prefissato e, in alcuni modelli, anche quando l'intensità di dose supera un analogo valore di allarme.

L'adozione di dosimetri personali è materia di apprezzamento professionale dell'Esperto Qualificato a seconda delle condizioni di esposizione; spesso è ritenuta opportuna ogni qualvolta le condizioni ambientali siano tali da esporre i lavoratori a dosi individuali eccedenti il limite annuo di 1 mSv; se è concretamente possibile il superamento di 6 mSv (circa un terzo del limite di dose per i lavoratori esposti), è invece obbligatoria. Analogo provvedimento viene normalmente assunto anche per i visitatori quando le condizioni ambientali siano tali da esporli a dosi eccedenti un valore prefissato, spesso posto pari al 25% delle dosi ammesse per le persone del pubblico.

In alcune attività è necessario che il programma di radioprotezione operativa contempli, accanto alle misure di dosimetria esterna, le operazioni e i controlli necessari per valutare l'esposizione interna dei lavoratori derivante dall'inalazione, dall'ingestione e dalla conseguente metabolizzazione di sostanze radioattive. I sistemi utilizzati per la dosimetria interna sono essenzialmente il *Whole Body Counter*, il controllo degli escreti e l'analisi dei *biomarkers*. La frequenza dei controlli necessari dipende dal tipo di impianto o di installazione e dal tipo delle attività svolte dal singolo addetto. In alcune lavorazioni può essere infine indicata l'adozione di campionatori personali della radioattività in aria allo scopo di meglio valutare le potenziali introduzioni di radionuclidi per inalazione.

Controllo degli effluenti e monitoraggio esterno

Un impianto nel quale si faccia uso di sorgenti, attrezzature e materiali radioattivi può manifestare conseguenze radiologiche anche nell'ambiente esterno attraverso due meccanismi: la presenza di livelli significativi di irradiazione esterna conseguenti al suo funzionamento e il rilascio di effluenti e materiali radioattivi. Il controllo di questi meccanismi è affidato in primo luogo alla presenza e all'efficacia delle salvaguardie di tipo ingegneristico previste all'interno dell'impianto (schermature, sistemi di contenimento, sistemi di trattamento degli effluenti), la cui efficienza è controllata da un sistema di monitoraggio esterno capace di rivelare tempestivamente ogni anomalia significativa sotto il profilo della sicurezza.

La struttura e le caratteristiche del sistema di monitoraggio esterno sono fissate sulla base del tipo e della quantità delle sorgenti e dei materiali radioattivi presenti nell'impianto e sulla base del tipo di attività in esso condotte. Negli impianti e nelle installazioni di minori dimensioni (ad esempio nei reparti di radiologia) il controllo del campo di radiazione esterno o delle contaminazioni ambientali può essere occasionale. In questi casi le sorgenti in gioco sono relativamente modeste, i sistemi di

contenimento e le barriere sono di norma ampiamente sovradimensionati rispetto al necessario e la distribuzione dei materiali è ben conosciuta e non soggetta a variazioni. Sussistono insomma le condizioni per considerare soddisfacente un controllo preventivo dell'installazione seguito da controlli periodici con frequenza tanto più ridotta quanto più modesti sono i rischi da radiazioni e le possibilità di variazioni delle condizioni di lavoro. Nei grandi impianti nucleari (centrali nucleari, impianti del ciclo del combustibile, depositi di materiali e rifiuti radioattivi) l'attività di monitoraggio e controllo dell'ambiente esterno è invece condotta in modo sistematico e programmato, e si fonda da un lato sulla misura diretta, in tempo reale, dei livelli d'irradiazione esterna e delle concentrazioni di inquinanti radioattivi negli scarichi liquidi o aeriformi, dall'altro sulla raccolta periodica e sull'esame di campioni ambientali di varia natura: acqua (di superficie, meteorica, di falda), aria, terreno, vegetali e sostanze biologiche. Le misure in tempo reale di radioattività diretta forniscono indicazioni sulla eventuale presenza di anomalie e malfunzionamenti nel sistema di schermatura e di controllo degli effluenti. Le misure sui campioni, che comportano ovviamente un inevitabile ritardo per il completamento delle procedure di laboratorio, costituiscono invece un indicatore della presenza di eventuali fenomeni di accumulo di radionuclidi nelle catene biologiche.

Sulla base dei risultati dell'azione di monitoraggio delle condizioni esterne all'impianto è possibile, da un lato, verificare la rispondenza delle prestazioni del sistema di radioprotezione alle specifiche di licenza dell'installazione e, dall'altro, avviare, nel caso si riveli la presenza di anomalie, le procedure di correzione, d'informazione o di emergenza previste dalla normativa radioprotezionistica o dalle prescrizioni contenute nella licenza d'esercizio.

PIANIFICAZIONE E GESTIONE DELLE EMERGENZE

Generalità

Nonostante la presenza di sistemi di salvaguardia efficaci ed efficienti e l'adozione di prassi operative adeguate, la possibilità che in una installazione nella quale si fa uso di radiazioni o sostanze radioattive si instaurino condizioni di emergenza non può mai essere esclusa *a priori*, ed occorre pertanto adottare le necessarie contromisure. Per questo motivo, in tutte le installazioni e negli impianti che fanno uso di sorgenti e materiali radioattivi sono di norma predisposte procedure di intervento per rispondere tempestivamente e in modo organizzato ad eventuali situazioni anomale o incidentali. Le suddette procedure sono naturalmente dimensionate sul tipo di sorgenti presenti e sui rischi prevedibili all'interno dell'installazione o, negli impianti più importanti, anche al suo esterno, con possibile coinvolgimento delle popolazioni circostanti. Si può così andare da semplici norme di tipo operativo per le sorgenti più modeste fino a complessi piani di intervento che coinvolgono molteplici autorità pubbliche, a livello locale o centrale, come i *piani di emergenza* stabiliti, in Italia, a norma del capo X del decreto legislativo n.230/95.

I piani di emergenza sono di norma predisposti sulla base delle risultanze di un'analisi di sicurezza, che individua le possibili sequenze di malfunzionamenti o errori umani e le conseguenti situazioni di pericolo per l'ambiente e per la salute dei lavoratori e della popolazione. Sulla base della quantificazione dei rilasci di radioattività possibili sono pianificate le azioni da avviare e le contromisure da adottare per minimizzare l'impatto sull'ambiente e sulla salute. Nei casi più complessi queste azioni riguardano:

- interventi sulla sorgente, volti a ridurre o arrestare le irradiazioni esterne e la dispersione di radioattività;
- interventi sull'ambiente, per ridurre il trasferimento di sostanze radioattive agli individui;

- interventi sugli individui stessi, per ridurre le esposizioni ed organizzare la cura delle eventuali vittime.

Le strutture del sistema di radioprotezione sono estesamente coinvolte, in tutte le loro articolazioni, nella pianificazione e nella gestione degli interventi d'emergenza interne ed esterne alle installazioni e agli impianti, a partire dalla fase di preparazione dei piani di emergenza, che possono essere molto semplici o molto complessi, in dipendenza della dimensione e della complessità dell'impianto e delle applicazioni che in esso si svolgono. Elementi fondamentali della fase di pianificazione sono la valutazione dei tipi di incidente che possono avere luogo, l'assegnazione delle responsabilità interne relative alla loro gestione, la preparazione dei responsabili e del personale, la predisposizione di dettagliate procedure da seguire in caso di emergenza, le necessità di interfacciamento e di coordinamento con gli organismi esterni responsabili degli interventi, le procedure permanenti di controllo e supervisione di impianti e attrezzature finalizzate alla tempestiva rilevazione delle anomalie e alla gestione dell'emergenza.

In ogni installazione nucleare, il sistema di radioprotezione deve essere anzitutto in grado di pervenire con la massima rapidità al rilevamento e all'eventuale notificazione, a termini di legge, dell'insorgere di condizioni di emergenza. Gli strumenti concettuali e tecnologici utili a questo fine sono gli stessi descritti nei paragrafi precedenti. La puntuale applicazione dei criteri e delle prassi operative descritte consente infatti di rilevare precocemente l'instaurarsi di condizioni di funzionamento anomale e di disporre le necessarie contromisure. A tal fine devono essere predisposti e continuamente validati idonei piani di intervento per la gestione dell'emergenza, cui deve uniformarsi il comportamento di tutte le persone coinvolte a tutti i livelli di responsabilità.

L'oggettivazione del rischio nucleare

Una corretta classificazione degli eventi incidentali e delle situazioni di emergenza è essenziale anche per consentire una piena comprensione degli eventi e delle contromisure necessarie da parte delle autorità e degli operatori coinvolti nella gestione dell'emergenza all'interno e all'esterno dell'impianto (Autorità di controllo, Protezione civile, forze dell'ordine, strutture medico-sanitarie). In caso di incidente la determinazione precoce della gravità e della reale portata degli eventi è di fondamentale importanza per guidare l'adozione delle misure e per attivare le procedure di emergenza più appropriate.

La predisposizione e l'implementazione di efficaci piani di emergenza può avvantaggiarsi in misura notevole di un puntuale inventariamento delle sorgenti e dei materiali radioattivi presenti in un impianto e della puntuale classificazione degli eventi possibili. Il censimento e la classificazione delle sorgenti e dei materiali può infatti agevolare la valutazione del tipo di rischio associato a un determinato evento anomalo: esposizione esterna, contaminazione della pelle, esposizione interna da inalazione o ingestione, esposizione interna da ferita, esposizione interna ed esterna per immersione, rilascio o contaminazione ambientale. Una buona classificazione degli eventi può aiutare fin dall'inizio a identificare correttamente il tipo di rischio associato agli eventi in atto per concentrarsi sulle azioni più pertinenti caso per caso, eliminando la necessità di perdere tempo e disperdere le forze per escludere tutte le conseguenze possibili sul piano meramente teorico.

I casi di emergenza nucleare con interessamento della popolazione sono stati finora pochissimi a livello mondiale, e hanno coinciso con il manifestarsi di incidenti di grosse proporzioni.

L'emergenza radiologica che ha fatto seguito in Europa al disastro di Chernobyl ha evidenziato fra le altre cose la necessità di prevedere piani di emergenza in grado di far fronte non solo a contaminazioni locali, ma anche a contaminazioni di portata transfrontaliera, e prima ancora la necessità di un coordinamento internazionale delle risposte alle emergenze di questo tipo.

Un primo contributo a una gestione delle emergenze nucleari coordinata a livello internazionale è venuto dall'Agenzia dell'ONU per l'energia atomica (IAEA) con l'adozione della *International*

Nuclear Event Scale (“scala INES”, tabella 14), che consente oggi di classificare in modo univoco gli incidenti nucleari dal punto di vista della gravità e delle conseguenze all’interno e all’esterno degli impianti.

Tabella 14 - La scala INES (International Nuclear Event Scale) definita dall'IAEA e adottata in sede internazionale per la classificazione delle emergenze nucleari.

Classe dell'evento	Denominazione convenzionale	Descrizione dell'evento
0	Deviazione	Deviazione dalla normale routine senza significato sul piano della sicurezza
1	Anomalia	Anomalia di funzionamento entro le specifiche di normale esercizio
2	Malfunzionamento	Contaminazione anomala all'interno dell'impianto e/o sovraesposizione di almeno un lavoratore
3	Malfunzionamento serio	Contaminazione significativa all'interno dell'impianto e/o danni sanitari acuti ad almeno un lavoratore. Rilasci minimi di radioattività all'esterno dell'impianto
4	Incidente senza rischi esterni	Danneggiamento significativo dell'impianto e/o delle barriere radiologiche e/o esposizione fatale di almeno un lavoratore
5	Incidente con rischi esterni	Danneggiamento grave dell'impianto e/o delle barriere radiologiche. Limitato rilascio di radioattività all'esterno, comunque tale da richiedere la parziale attivazione del piano di emergenza esterno
6	Incidente nucleare serio	Danneggiamento grave dell'impianto con rilascio di radioattività all'esterno tale da richiedere l'attivazione totale del piano di emergenza esterna
7	Disastro nucleare	Distruzione dell'impianto, grave rilascio di radioattività, gravi effetti ambientali e danni alla salute all'esterno dell'impianto

Nota: Nella originale versione inglese della scala le situazioni collocate nelle classi 2 e 3 sono definite “Incident”, qui tradotto con “Malfunzionamento”, mentre quelle collocate nelle classi 4, 5, 6 e 7 sono definite “Accident”, qui tradotto con “Incidente” per le classi 4, 5, 6, e con “Disastro” per la classe 7.

Sviluppo dei piani di intervento in condizioni di emergenza

Lo sviluppo dei piani di intervento in condizioni di emergenza è generalmente affidato a organismi tecnici collegiali dotati di competenze interdisciplinari. I piani di emergenza richiedono infatti la definizione, lo sviluppo e l'applicazione di procedure specifiche in settori diversi, quali ad esempio quelli della conduzione degli impianti, della sicurezza radiologica, del controllo medico-sanitario, della gestione degli incendi e, nei casi più gravi, dello smistamento del traffico, dell'informazione e altri ancora.

Nelle installazioni e negli impianti di maggiori dimensioni, dove i piani di emergenza assumono elevata complessità, la loro implementazione richiede la definizione di procedure specifiche, ciascuna costituita da una serie di istruzioni documentate che descrivono punto per punto tutte le azioni necessarie e i comportamenti da tenere da parte dei singoli per il conseguimento di una determinata categoria di obiettivi.

Le procedure di emergenza sono generalmente strutturate in modo gerarchico, a partire dalle azioni di basso livello necessarie per contrastare le conseguenze di un particolare evento indesiderato (ad esempio, fuga di radioattività da una zona controllata) fino alle azioni più complesse da attivare nel caso quelle di basso livello non abbiano risolto in via definitiva l'anomalia riscontrata. Ciascuna procedura include in generale i seguenti elementi:

- una descrizione completa delle finalità della procedura;
- l'identificazione di una o più persone responsabili della procedura;
- una descrizione puntuale dell'evento anomalo cui la procedura è applicabile;
- la descrizione dei soggetti da avvertire e delle tecniche di comunicazione da utilizzare;
- la descrizione dei requisiti di addestramento necessari per applicare la procedura;
- una descrizione puntuale delle azioni da svolgere per contrastare l'evento anomalo;
- una descrizione dei criteri da applicare per giudicare se la procedura ha avuto effetto;
- le azioni da intraprendere in caso positivo e in caso negativo.

E' ovviamente compito dei responsabili della sicurezza predisporre nei luoghi potenzialmente interessati dall'insorgenza di eventi anomali tutta l'attrezzatura necessaria per applicare le

procedure di emergenza. Questa attrezzatura, la cui efficienza deve essere controllata periodicamente, comprende in genere apparecchi di misura, sistemi di campionamento, mezzi informatici per la raccolta e l'elaborazione dei dati radiometrici, sistemi di contenimento, dosimetri personali, indumenti protettivi, attrezzature per la decontaminazione e apparecchiature per la comunicazione.

Pianificazione della gestione dell'emergenza all'interno dell'impianto

In caso di contaminazioni radioattive non previste o di eventi accidentali comportanti un significativo incremento dell'esposizione all'interno dell'installazione, l'esercente è tenuto, indipendentemente dal tipo di sorgente e di installazione, a prendere le misure idonee ad evitare l'aggravamento del rischio, a norma dell'art. 100 comma 1 del decreto legislativo n.230/95, garantendo altresì il rispetto dei principi generali di ottimizzazione e di limitazione delle dosi individuali. Ciò comporta la necessità di predisporre procedure di intervento specifiche, che possono concretizzarsi in documenti di vario genere.

Nelle installazioni più semplici, a livello di piccolo laboratorio o di gabinetto medico, è normalmente sufficiente inserire adeguate procedure di intervento nelle norme interne di radioprotezione o in ordini di servizio specifici. In impianti più complessi, per i quali è appropriata l'adozione di un Manuale di operazione, le procedure di intervento per i casi eccezionali sono di norma inserite nel manuale stesso; nel caso degli impianti nucleari propriamente detti, così come definiti nell'art. 7 del decreto legislativo n.230/95, il manuale di operazione è obbligatorio e deve contenere in allegato un manuale di istruzioni per le situazioni eccezionali. Per impianti di particolare complessità, o per centri ospitanti più attività oltre ad uno o più impianti nucleari, vengono adottati specifici piani di emergenza interna, finalizzati a fronteggiare le situazioni di rischio anomalo all'interno dell'intera installazione. Si tratta, in tutti questi casi, di piani di intervento la cui responsabilità è affidata a operatori interni che devono per questo ricevere una preparazione particolare. Negli impianti nucleari propriamente detti, il piano d'emergenza interna, e le sue eventuali modifiche successive, vengono elaborati dal *Collegio dei delegati di sicurezza dell'impianto* stesso, d'intesa col Comando provinciale dei VVF.

I piani di emergenza interni scattano all'instaurarsi di particolari condizioni di pericolo, che possono essere rilevate personalmente dagli addetti o segnalate in modo automatico da appositi sistemi di allarme (ad esempio, segnalazioni di alta attività a contatto, nell'aria ambiente o nei fluidi di processo), che generalmente attivano anche procedure automatiche di interblocco e di isolamento.

A valle della rilevazione delle condizioni di emergenza, i piani prevedono in primo luogo la segnalazione visiva e acustica delle condizioni di pericolo e l'adozione di contromisure quali l'evacuazione e l'isolamento dei locali interessati, la prestazione dei primi soccorsi agli eventuali infortunati, la notificazione dell'accaduto all'autorità di controllo nelle forme previste dalla legge, l'interruzione dei processi produttivi in atto, il monitoraggio della radioattività ambientale, l'analisi della situazione dell'impianto e l'intervento di squadre di emergenza interne (personale) o esterne (vigili del fuoco, protezione civile) opportunamente attrezzate.

Scopo principale di questi piani è quello di contenere all'interno di un'area la più ristretta possibile le conseguenze radiologiche del malfunzionamento o dell'incidente iniziale, minimizzandone contemporaneamente l'impatto sanitario e ambientale. L'efficacia e la rispondenza dei piani e delle strutture di intervento sono continuamente controllate, anche attraverso lo svolgimento di programmi di formazione e di esercitazioni periodiche.

Un aspetto fondamentale delle attività di gestione dell'emergenza riguarda la valutazione delle possibilità che il rischio radiologico possa estendersi anche all'esterno dell'installazione, in modo da poter avviare le dovute contromisure e procedere, a seconda dei casi, ad una delle seguenti forme di comunicazione alle pubbliche autorità:

- ove sussistano “*significativi incrementi del rischio di contaminazione dell’ambiente e di esposizione delle persone*” all’esterno del perimetro dell’installazione: immediata comunicazione dell’esercente al Prefetto ed agli organi del servizio sanitario nazionale (SSN) competenti per territorio, che a loro volta ne danno comunicazione all’ANPA (art. 100, comma 2, D.Lgs. 230/95);
- in caso di “*situazioni eccezionali*” in cui gli eventi possono comportare, sempre all’esterno del perimetro dello stabilimento, rilevante contaminazione dell’aria, delle acque, del suolo o di altre matrici, al di là dei livelli che saranno precisati in appositi decreti: immediata informazione dell’esercente al prefetto, al comando provinciale dei VVF, agli organi del SSN competenti per territorio, all’ANPA e, in alcuni casi, al comandante del compartimento marittimo e all’ufficio di sanità marittima (art. 101 D.Lgs. 230/95);
- nel caso degli impianti nucleari propriamente detti, ove si verifichi un “*qualsiasi incidente nucleare che comporti pericoli per la pubblica incolumità o per i beni*”: immediata comunicazione del direttore di impianto a prefetto, regione o provincia autonoma interessata, comandante provinciale dei VVF, ANPA, organi del SSN competenti per territorio (art. 122 D.Lgs. 230/95); quest’ultima comunicazione costituisce il primo passo per l’attuazione del piano di emergenza esterna descritto nel paragrafo successivo.

Pianificazione della gestione dell’emergenza all’esterno dell’impianto

Per ciascuno degli impianti nucleari propriamente detti, viene predisposto un piano di emergenza esterna, che prevede l’insieme coordinato delle misure per la protezione della pubblica incolumità, della popolazione e dei beni da prendersi, con la dovuta gradualità, nel caso di un incidente nucleare che comporti pericoli per la pubblica incolumità. I piani di emergenza esterna sono perciò finalizzati per l’organizzazione degli interventi allorché esista un rischio concreto che le salvaguardie impiantistiche e gestionali non riescano a contenere le conseguenze di un incidente radiologico sviluppatosi in un impianto o in un’installazione nucleare all’interno dell’impianto stesso.

Contrariamente a quanto accade per i piani di emergenza interna, la responsabilità dei piani di emergenza esterna, data la scala e la portata degli interventi richiesti, compete alle strutture pubbliche preposte agli interventi di protezione civile. La predisposizione del piano avviene sulla base del rapporto tecnico sui “*presupposti del piano di emergenza esterna*”, redatto dall’esercente, della conseguente relazione critica riassuntiva dell’ANPA e del parere della *Commissione Tecnica per la sicurezza nucleare e la protezione sanitaria*, secondo i lineamenti generali indicati dal Consiglio nazionale della protezione civile, istituito presso la Presidenza del Consiglio dei Ministri –Dipartimento della protezione civile. La responsabilità della predisposizione del piano compete al prefetto della provincia ove ha sede l’impianto considerato. L’approvazione finale, sempre da parte del prefetto, è preceduta da un esame dell’ANPA, che può formulare osservazioni, sentita la Commissione Tecnica già indicata.

Per lo svolgimento di questi suoi compiti il prefetto si avvale di un comitato operante alle sue dipendenze ove sono rappresentate tutte le strutture territoriali che potrebbero essere coinvolte nella sua attuazione (Questura, Comando provinciale VVF, organi del SSN, organi veterinari, Ispettorato provinciale del lavoro, Genio civile, Ispettorato compartimentale motorizzazione civile, comando militare territoriale, Ministero dell’industria, compartimenti marittimi), oltre a due esperti dell’ANPA e ai rappresentanti della regione (o provincia autonoma) e dell’esercente.

L’attuazione del piano di emergenza esterno avviene a seguito della comunicazione del direttore di impianto. Il prefetto avvia le azioni previste dal piano, informando immediatamente la Presidenza del Consiglio dei Ministri - Dipartimento della protezione civile e le altre autorità interessate. Il comandante provinciale dei VVF attua nel contempo i primi interventi di soccorso tecnico urgente nell’ambito del piano. Queste azioni, come le successive, vengono attuate secondo le disposizioni

della legge 24 febbraio 1992, n. 225, che specifica, tra l'altro, le modalità per la proclamazione e la revoca dello stato di emergenza e per il conseguente esercizio del potere di emanazione di ordinanze, anche in deroga alle disposizioni vigenti. In particolare il prefetto assume la direzione unitaria dei servizi di emergenza a livello provinciale, adotta i provvedimenti necessari ad assicurare i primi soccorsi, vigila sull'attuazione, da parte delle strutture provinciali di protezione civile, dei servizi urgenti, anche di natura tecnica, e può agire in qualità di delegato del Presidente del Consiglio dei ministri o del Ministro della protezione civile. Le possibilità di intervento sono molteplici e possono prevedere, a seconda della gravità dell'incidente, misure di divieto di accesso a determinate aree a rischio, interruzione o dirottamento del traffico veicolare, provvedimenti volti a limitare il consumo di determinate derrate alimentari, distribuzione e somministrazione di farmaci protettivi, inviti alla popolazione a rimanere nelle case, fino a provvedimenti di evacuazione temporanea della popolazione dalle aree interessate.

Nei casi in cui la localizzazione dell'impianto rende prevedibile l'estensione del pericolo a più province, un piano di emergenza esterna deve essere predisposto per ciascuna delle province interessate, previa intesa tra i rispettivi prefetti (*piano interprovinciale*). Il coordinamento dei piani provinciali è demandato al prefetto della provincia ove è localizzato l'impianto.

Fuori del caso degli impianti nucleari propriamente detti, gli impianti e le situazioni che possono determinare per il gruppo di riferimento della popolazione il superamento di una dose efficace di 5 mSv nell'arco di un anno, sono oggetto di valutazione ai fini della loro eventuale inclusione nei piani di intervento previsti dalla legge 24 febbraio 1992, n. 225.

Piano nazionale di emergenza

Per completare il sistema di gestione delle emergenze è necessario considerare tutti i casi in cui potrebbe determinarsi una situazione di rischio radiologico che richieda misure protettive che potrebbero riguardare a priori tutto il territorio nazionale o vaste porzioni di esso:

- incidenti non circoscrivibili in ambito provinciale o interprovinciale;
- incidenti transfrontalieri;
- situazioni incidentali comunque non correlabili preventivamente con aree specifiche del territorio nazionale.

Evenienze di questo tipo sono oggetto del *Piano nazionale di emergenza*, predisposto dalla Presidenza del Consiglio dei Ministri – Dipartimento della protezione civile, d'intesa con il Ministero dell'interno, avvalendosi degli organismi della Protezione Civile e dell'ANPA. Il piano viene elaborato sulla base dei presupposti tecnici già indicati, che nei casi di delocalizzazione della fonte di rischio vengono proposti dall'ANPA, sentita la Commissione Tecnica. Il piano è trasmesso ai prefetti interessati, i quali sono tenuti a sviluppare la pianificazione operativa e a predisporre i relativi strumenti di attuazione.

Una struttura tecnica essenziale al fine di assicurare un comune riferimento tecnico per la gestione delle emergenze radiologiche è il *Centro di elaborazione e valutazione dati*, istituito presso l'ANPA e da questa coordinato. Il Centro funge da struttura tecnica per il Ministro per il coordinamento della protezione civile e comprende esperti designati da ANPA, Corpo nazionale dei VVF, ISS, ISPESL e Servizio meteorologico dell'aeronautica militare. Possono inoltre essere chiamati a partecipare all'attività del Centro esperti di radioprotezione designati dalle regioni eventualmente interessate o facenti parte di altri Enti o Istituti qualificati. Il Centro può essere attivato dal Ministro per il coordinamento della protezione civile o, nel quadro dell'attuazione dei piani di emergenza nucleare di propria competenza, dal prefetto. Compiti precipui del Centro sono:

- effettuare le valutazioni dei livelli di radioattività e dei conseguenti livelli di esposizione e dei relativi andamenti nel tempo e nello spazio;
- fornire i predetti dati alle autorità responsabili della gestione dell'emergenza, al fine di consentire l'adozione dei necessari provvedimenti d'intervento;
- raccogliere i dati radiometrici provenienti da tutti i centri e le reti di rilevamento, anche regionali;
- formulare indicazioni di specifiche modalità operative delle reti e dei mezzi mobili di rilevamento;
- fornire alle autorità preposte alla diffusione dell'informazione alla popolazione i relativi elementi radiometrici.

La predisposizione e l'eventuale attuazione del piano nazionale di emergenza avviene secondo le modalità ed avvalendosi degli organi previsti dalla legge 24 febbraio 1992, n. 225, tra cui il Consiglio nazionale della protezione civile, in particolare per la formulazione degli indirizzi, e il Comitato operativo della protezione civile, per la direzione unitaria e il coordinamento delle attività di emergenza.

Le problematiche di emergenza connesse a incidenti su navi a propulsione nucleare in aree portuali o nel corso del trasporto, sono regolate con provvedimenti ad hoc dei ministeri competenti.

LA GESTIONE DELLA STRUMENTAZIONE

Generalità

Fattore centrale in qualsiasi organizzazione di radioprotezione è la disponibilità di idonea strumentazione di misura che consenta di condurre un efficace programma di sorveglianza e di oggettivare le condizioni di rischio per i lavoratori, la popolazione e l'ambiente in generale. Gli strumenti richiesti per l'attuazione di un sistema permanente di radioprotezione servono a diversi scopi:

- controllare le aree nelle quali le persone sono soggette al rischio di esposizione esterna;
- rilevare la contaminazione radioattiva di superfici e campioni di materiale;
- monitorare la radioattività ambientale e la presenza di radionuclidi nell'aria all'interno e all'esterno;
- documentare l'esposizione individuale dei lavoratori e della popolazione.

La corretta gestione degli strumenti di monitoraggio, oltre che dalla preparazione specifica del personale tecnico incaricato di condurre le misure, dipende dall'adozione di comportamenti adeguati in tema di selezione, calibrazione e manutenzione della strumentazione. Tutto ciò richiede un adeguamento continuo delle competenze e un continuo interfacciamento con le strutture di certificazione esistenti a livello nazionale e internazionale. Un ruolo di rilievo compete a tale proposito all'ENEA-IRP, che svolge un ruolo essenziale di riferimento nazionale per le necessità di qualificazione dei sistemi di radioprotezione e dosimetria.

Idoneità della strumentazione

La strumentazione impiegata per la sorveglianza radiologica deve essere in primo luogo idonea allo scopo al quale essa è destinata. Questa idoneità va stabilita in termini di accuratezza, precisione,

sensibilità, stabilità, durata, compatibilità, affidabilità, aggiornamento tecnologico, calibrazione e stato di manutenzione.

I fattori più importanti da considerare nel valutare l' idoneità di uno strumento non sono solo quelli relativi alle sue qualità intrinseche, ma anche quelli legati al loro rapporto con le condizioni di impiego: tipo e caratteristiche della radiazione da misurare, caratteristiche temporali del campo (continuo, pulsato, a flash), condizioni ambientali, leggibilità delle scale e degli indici nell' impiego sul campo, grandezze che si desidera misurare (intensità di dose, dose integrata, esposizione, ecc.), trasportabilità, possibilità di interfacciamento con altre apparecchiature (ad esempio un computer), sensibilità ad eventuali campi elettrici o magnetici e altro ancora.

In presenza di tante variabili è evidentemente necessario che gli operatori, oltre che su una preparazione personale adeguata, possano contare su un supporto professionale qualificato e indipendente, dotato della competenza e dell' autorità scientifica necessaria per costituire un valido riferimento operativo. Questa azione di supporto è assicurata in tutti i paesi industriali da un Ente di riferimento tecnico-scientifico con una specifica missione nel campo radioprotezionistico.

Calibrazione della strumentazione

La calibrazione di uno strumento di misura è l' operazione attraverso la quale si verifica la corretta risposta dello strumento allorché viene posto in un particolare campo di radiazione di caratteristiche note. Questa operazione serve in generale a garantire che, nelle condizioni operative reali, le indicazioni dello strumento siano effettivamente rappresentative delle condizioni reali.

Al fine di garantirne il corretto funzionamento, uno strumento deve essere sottoposto a procedure di controllo e calibrazione che assumono forme diverse a seconda delle esigenze.

- Si parla di “controllo di corretto funzionamento” quando si verifica la coincidenza della risposta dello strumento con un valore prefissato, mediante l' impiego di un' apposita sorgente radioattiva di prova, in condizione predeterminata.
- Si parla di “controllo di taratura” quando si procede ad una serie di prove allo scopo di verificare la persistenza delle caratteristiche di taratura entro le tolleranze previste.
- Si parla di “caratterizzazione completa” dello strumento quando se ne verifica la risposta variando tutti i parametri che la influenzano: tipo ed energia della radiazione, condizioni geometriche di impiego, condizioni ambientali, ecc.
- Si parla di “caratterizzazione specifica” dello strumento allorché se ne verifica la risposta in condizioni geometriche o ambientali particolari, che possono essere anche molto lontane dalle condizioni standard, per riprodurre le reali condizioni di impiego dello strumento (temperatura, pressione, umidità, ecc.).

Il primo livello di controllo di corretto funzionamento deve essere condotto presso le strutture che impiegano direttamente lo strumento, e serve per controllare periodicamente l' affidabilità e la precisione della risposta. Le attività di taratura e caratterizzazione servono invece a garantire l' affidabilità e l' accuratezza di strumenti e sistemi complessi in condizioni di impiego estreme, ed è preferibilmente condotta da parte di un Ente di qualificazione e certificazione indipendente, in grado di gestire ordinariamente procedure di interconfronto e di valutare con precisione il grado di incertezza delle misure fornite.

Manutenzione della strumentazione

A valle delle fasi di selezione e di calibrazione degli strumenti, l'affidabilità e l'efficacia del sistema di misura dipende in maniera determinante dallo stato di manutenzione degli strumenti stessi, che devono essere mantenuti al livello di efficienza più elevato possibile.

La frequenza delle operazioni di manutenzione - così come quelle di calibrazione - dipende dall'uso che si fa dello strumento e dal grado di accuratezza richiesto alle misure. Le caratteristiche degli strumenti più moderni sono tali da non richiedere un impegno particolare nelle attività di manutenzione, eccettuata la necessità permanente di controllarne il buono stato e la funzionalità.

Tuttavia, soprattutto nei casi in cui un determinato strumento di misura è l'unico disponibile, oppure nei casi in cui un funzionamento difettoso dello strumento potrebbe esporre a gravi rischi di contaminazione o esposizione, è prassi consolidata introdurre un piano di manutenzione programmata, comprendente anche una periodica verifica della calibrazione.

LA GESTIONE DEI RIFIUTI RADIOATTIVI

Origine dei rifiuti radioattivi

I materiali e i rifiuti radioattivi hanno origine da tutte le attività che comportano l'uso e la manipolazione di sorgenti e sostanze radioattive. Fra queste attività hanno un ruolo preminente quelle relative alla produzione di energia nucleare, alle pratiche radiodiagnostiche e biomediche e alla ricerca scientifica; ma l'uso di sorgenti e materiali radioattivi è diffuso in molti settori industriali per gli scopi più diversi. Isotopi radioattivi sono presenti in tracce anche nei materiali più usuali, e possono subire effetti di concentrazione e dispersione nell'ambiente come risultato dei cicli di fabbricazione e utilizzo.

- La produzione di energia nucleare comporta la generazione di notevoli quantitativi di radioattività, a partire dall'estrazione del minerale di uranio. Gli impianti di estrazione e di lavorazione del minerale, in particolare, producono scorie inerti che contengono tutti i radioisotopi naturali associati all'uranio, e che hanno l'effetto di immettere nella biosfera la radioattività che altrimenti sarebbe rimasta confinata nel minerale.
- Dagli impianti di lavorazione del minerale, l'uranio viene trasferito agli impianti di arricchimento e di fabbricazione del combustibile nucleare. La trasformazione in combustibile avviene attraverso processi che danno origine a residui radioattivi solidi, aeriformi e liquidi che, dopo un idoneo trattamento, devono essere smaltiti come rifiuti a bassa o media attività.
- Durante il normale funzionamento, le centrali nucleari generano rifiuti radioattivi sotto forma di combustibile irraggiato e di materiali di scarto provenienti dal trattamento dei fluidi, dal funzionamento e dalle operazioni di manutenzione degli impianti. Notevoli quantitativi di rifiuti radioattivi si producono inoltre all'atto dello smantellamento degli impianti nucleari giunti al termine della vita utile.
- Il combustibile irraggiato nei reattori, nel quale si accumulano sostanze altamente radioattive, viene immagazzinato temporaneamente nelle piscine di decadimento esistenti presso gli impianti, e successivamente avviato a un deposito di stoccaggio (temporaneo o definitivo) o a un impianto di riprocessamento per estrarne i materiali fissili riutilizzabili. Il riprocessamento del combustibile genera a sua volta rifiuti ad alta attività, che devono essere condizionati e smaltiti come tali.

- Un'altra importante fonte di rifiuti radioattivi è data dalle applicazioni sanitarie e biomediche. Rifiuti radioattivi si generano per effetto di pratiche diagnostiche (somministrazione di traccianti radioattivi per scintigrafia, analisi RIA, ecc.) e radioterapeutiche (irraggiamento mediante sorgenti radioisotopiche e acceleratori, somministrazione di radioisotopi per terapie oncologiche).
- Rifiuti radioattivi spesso non riconosciuti come tali si generano in molte branche dell'industria estrattiva e nell'utilizzazione delle risorse minerarie. Una menzione particolare merita la produzione di fertilizzanti a base di fosforo, dal momento che nei depositi di fosforite e fosfato grezzo sono rilevabili elevate concentrazioni di uranio e radon. Anche l'estrazione e la combustione del carbone hanno l'effetto di immettere radioattività nella biosfera, talvolta in modo praticamente incontrollato. La maggior parte delle sostanze radioattive contenute nel carbone si concentra infatti nelle ceneri, e il loro contenimento dipende dall'efficienza dei dispositivi di filtraggio dei fumi e dalla destinazione di ceneri e filtri.
- Un'altra importante fonte di rifiuti radioattivi è data dalle attività industriali che fanno uso di materiali radioattivi e sorgenti a diversi livelli nella produzione. Tipiche sono le applicazioni per la produzione di orologi luminescenti, torio per la produzione di lenti, uranio per la produzione di protesi dentarie e di sorgenti radioattive per il controllo di qualità delle saldature.
- Un'ultima importante fonte di rifiuti radioattivi è rappresentata dalle applicazioni della ricerca scientifica e tecnologica, nel cui ambito materiali e sorgenti radioattivi sono utilizzati per gli scopi più diversi. In Italia è attualmente in corso un programma di smantellamento progressivo degli impianti sperimentali e prototipali correlati al ciclo del combustibile nucleare, sorti a suo tempo con l'obiettivo di sviluppare le competenze necessarie all'attuazione del programma nucleare nazionale. Pur trattandosi per definizione di un'attività a termine, la sua ultimazione non determinerà una cessazione della produzione di rifiuti radioattivi nella ricerca scientifica e tecnologica. Basti pensare agli svariati impieghi di materiali e sostanze radioattive in centri e laboratori di ricerca delle più svariate discipline.

Classificazione dei rifiuti radioattivi

Per evitare i rischi per la salute associati alla dispersione di sostanze radioattive nell'ambiente è necessario che i materiali e i rifiuti radioattivi siano attentamente individuati, caratterizzati, controllati, condizionati e confinati. Poiché la radioattività dei rifiuti radioattivi diminuisce (attraverso il decadimento) con il passare del tempo, i rifiuti stessi devono essere confinati finché la loro radioattività non sia diminuita sino a valori equiparabili a quelli del fondo naturale. L'attività dei rifiuti può essere bassa o avere valori elevati, e i tempi di decadimento possono essere brevi, lunghi o lunghissimi; è proprio in base a questi parametri (attività, tempo di decadimento) che i rifiuti vengono suddivisi dalla normativa tecnica italiana in tre categorie (tabella 15):

- 1^a categoria: rifiuti a bassa attività, la cui radioattività decade nell'ordine di tempo di qualche mese o di qualche anno al massimo; provengono essenzialmente da attività medico-diagnostiche, industriali e di ricerca.
- 2^a categoria: rifiuti a media attività, la cui radioattività decade nel corso di alcuni secoli; provengono dall'attività delle centrali nucleari e degli impianti del ciclo del combustibile nucleare, dai reattori di ricerca, dallo smantellamento di impianti nucleari, dalle attività di ricerca, sanitarie e industriali.

- **3^a categoria:** rifiuti ad alta attività, la cui radioattività decade nel corso di migliaia di anni; includono il combustibile irraggiato non riprocessato, rifiuti vetrificati o cementati provenienti dal riprocessamento del combustibile irraggiato, rifiuti contenenti plutonio derivanti da attività energetiche e di ricerca.

Tabella 15 - Classificazione dei rifiuti radioattivi secondo la normativa tecnica italiana (Fonte: ANPA, Guida Tecnica N° 26).

Categoria	Definizione	Tipologia	Modalità di smaltimento definitivo
1 ^a	Rifiuti la cui radioattività decade in tempi dell'ordine di mesi o al massimo di qualche anno	Rifiuti da impieghi medici o di ricerca, con tempi di dimezzamento pari ad alcuni mesi	Come i rifiuti convenzionali, a decadimento avvenuto (DPR 915/82)
2 ^a	Rifiuti che decadono in tempi dell'ordine delle centinaia di anni a livelli di radioattività di alcune centinaia di Bq/g, o che contengono radionuclidi a lunghissima vita media, purché in concentrazione di tale ordine.	Rifiuti da reattori di ricerca e di potenza Rifiuti da centri di ricerca Alcune parti e componenti di impianto derivanti da decontaminazione e smantellamento di impianti nucleari	Entro strutture ingegneristiche in superficie o a bassa profondità
3 ^a	Rifiuti che decadono in tempi dell'ordine delle migliaia di anni a livelli di radioattività di alcune centinaia di Bq/g, o che non soddisfano ai limiti analitici fissati per le categorie inferiori.	Rifiuti vetrificati e cementati prodotti dal riprocessamento del combustibile nucleare; combustibile nucleare irraggiato non riprocessato; rifiuti contenenti plutonio da attività di ricerca.	In formazioni geologiche a grande profondità.

Modalità di gestione dei rifiuti radioattivi

Le metodiche e le tecnologie di trattamento dei rifiuti radioattivi, ancorché ancora oggetto di studio, sono frutto di cinquant'anni di pratica applicativa, e si ispirano alla filosofia generale di concentrare per quanto possibile le sostanze e i materiali pericolosi e di confinarli per un tempo sufficiente a far sì che la radioattività residua in essi contenuta scenda a livelli tali da consentirne lo smaltimento come rifiuti ordinari.

Questa logica trova facile applicazione nel caso dei materiali e delle sostanze debolmente contaminati e a breve vita media, per i quali è sufficiente procedere alla pressatura dei rifiuti (compattazione), all'inserimento del compattato in fusti d'acciaio e all'immagazzinamento dei fusti per qualche mese o al massimo per qualche anno in un deposito temporaneo controllato. Al termine del periodo di decadimento, effettuati i necessari controlli, i rifiuti - non più radioattivi - possono essere avviati allo smaltimento per via ordinaria. Nel caso dei rifiuti a medio-alta attività e a vita medio-lunga la filosofia di fondo è la stessa, ma la sua applicazione è certamente più complessa, e richiede tecnologie più sofisticate. La prassi in questo caso è quella di immobilizzare i rifiuti inglobandoli in matrici inerti (cemento o bitume per i rifiuti che non emettono eccessive quantità di calore, vetro negli altri casi). I blocchi così ricavati sono a loro volta inseriti in fusti d'acciaio e avviati al deposito controllato.

In particolare, con riferimento alla classificazione della Guida Tecnica n. 26, riportata nella tabella 15, i rifiuti radioattivi appartenenti a ciascuna delle tre categorie citate seguono le modalità di gestione di seguito descritte.

- I rifiuti di 1^a categoria, dopo un periodo di immagazzinamento in appositi depositi temporanei sufficiente a consentirne il decadimento e la conseguente riduzione della radioattività a livelli analoghi a quelli ambientali, sono gestiti e smaltiti come i rifiuti convenzionali.
- I rifiuti di 2^a categoria vanno sottoposti a trattamenti di riduzione del volume (compattazione per i solidi, concentrazione per i liquidi) e quindi al loro inglobamento in matrici inerti (generalmente di cemento) ed al successivo incapsulamento in fusti di acciaio a tenuta. Per lo smaltimento definitivo le soluzioni sinora adottate sono rappresentate da depositi superficiali o a bassa profondità (L'Aube, Francia; El Cabril, Spagna; Rokkasho, Giappone), ovvero in caverne a bassa-media profondità ricavate da vecchie miniere abbandonate (Konrad, Germania) o prodotte artificialmente (Olkiluoto, Finlandia). Questi depositi devono garantire l'isolamento dei rifiuti

dalla biosfera per tempi dell'ordine dei 300 anni, e ci si affida per questo alla forma e al tipo di condizionamento dei rifiuti e alle barriere ingegneristiche costruite nel deposito stesso.

- I rifiuti di 3^a categoria vanno suddivisi tra quelli che durante il decadimento della radioattività emettono grandi quantità di calore e quelli che non manifestano effetti termici significativi. I primi sono inglobati in matrici vetrose (termicamente più stabili), sigillati in fusti di acciaio e stoccati temporaneamente (circa 50 anni) in depositi ingegneristici provvisti di sistemi di rimozione del calore. I rifiuti del secondo tipo sono inglobati in matrici di cemento o bitume, sigillati in fusti di acciaio e stoccati anch'essi in depositi temporanei dotati di sistemi di captazione e trattamento delle eventuali emissioni gassose. Per entrambi i tipi di rifiuti di 3^a categoria è previsto il successivo deposito definitivo in formazioni geologiche profonde e stabili.

Sebbene lo smaltimento definitivo dei rifiuti ad alta attività e a lunga vita (3^a categoria) in formazioni geologiche profonde sia ritenuto a livello tecnico-scientifico e in sede internazionale una soluzione matura ed affidabile, depositi di questo tipo non sono finora operativi in nessun paese, anche se in diversi paesi si sono avviate apposite campagne di prospezione geologica. La soluzione finora adottata per il confinamento dei rifiuti ad alta attività e a lunga vita è pertanto lo stoccaggio temporaneo in depositi ingegneristici di superficie (il cosiddetto "*interim storage*"). Questi depositi sono progettati e costruiti per fornire le massime garanzie di sicurezza e radioprotezione, e a tal fine sono dotati di sistemi di prevenzione, protezione ed allarme analoghi a quelli delle centrali nucleari.

La radioprotezione e i rifiuti radioattivi

Ai fini del contenimento dell'impatto ambientale e sanitario di un impianto o di un'installazione nucleare, particolare importanza assume l'adozione di un corretto schema di controllo e gestione degli effluenti e dei rifiuti radioattivi che si generano dalle attività ivi condotte.

I rifiuti e gli effluenti radioattivi sono materiali che hanno origine dalle attività di routine, e che devono essere sottoposti a trattamenti di diverso tipo per renderli idonei al rilascio incontrollato come rifiuti convenzionali, oppure al rilascio controllato o allo smaltimento controllato in depositi autorizzati. Può trattarsi di materiali semplici che si generano sistematicamente come sottoprodotto del processo seguito nell'installazione (scorie di lavorazione, sottoprodotti di processo) oppure di materiali che provengono dall'applicazione delle stesse pratiche di radioprotezione (filtri, indumenti protettivi o strumenti contaminati, ecc.). Può infine trattarsi di materiali complessi e di miscele (solventi, soluzioni, reagenti chimici) derivanti dalle operazioni di decontaminazione e disattivazione.

Gli impianti e le installazioni che fanno uso di sorgenti e materiali radioattivi sono generalmente dotati di idonei sistemi di trattamento degli effluenti liquidi e gassosi che possono avere origine dalle attività e dai processi interni. Gli effluenti gassosi traggono origine, nella maggior parte degli impianti, dal sistema di controllo e di trattamento dell'atmosfera interna delle zone controllate. Le azioni di interesse radioprotezionistico finalizzate al controllo degli effluenti e dei rifiuti radioattivi afferiscono alle seguenti categorie:

- limitazione della quantità e della varietà dei rifiuti;
- raccolta e caratterizzazione dei rifiuti;
- riduzione di volume e condizionamento dei rifiuti;
- immagazzinamento e smaltimento dei rifiuti.

Limitazione della quantità e della varietà di rifiuti ed effluenti

Uno dei compiti principali del programma di radioprotezione adottato in ciascun impianto è quello di guidare all'adozione di processi e comportamenti idonei a limitare la quantità e la varietà degli effluenti e dei rifiuti radioattivi prodotti. A tal fine è utile predisporre schemi operativi e procedure in grado di mantenere per quanto possibile separati i flussi di materiali attivati o contaminati, in modo da semplificare i problemi di gestione. Una particolare attenzione deve essere dedicata ad evitare di giungere alla produzione di miscele complesse nelle quali i materiali radioattivi vengano a trovarsi combinati con sostanze pericolose sul piano chimico (prodotti infiammabili o esplosivi, acidi, ecc.).

La limitazione della quantità e della varietà dei rifiuti e degli effluenti deriva dall'estensiva applicazione di tre principi fondamentali:

- ridurre per quanto possibile alla fonte la produzione di rifiuti ed effluenti;
- promuovere il riciclo di rifiuti ed effluenti all'interno del processo;
- sottoporre i rifiuti non evitabili e non riciclabili a trattamenti di inertizzazione e riduzione di volume.

La riduzione alla fonte della produzione di rifiuti è normalmente perseguita fin dalle fasi di progettazione e di realizzazione dell'impianto, attraverso l'isolamento e la limitazione, in numero ed estensione, delle aree nelle quali possono verificarsi fenomeni di attivazione o di contaminazione. In queste aree soggette a contaminazione sono sistematicamente impiegati materiali idonei a minimizzare la produzione di scorie, nonché strumenti e attrezzature riservate all'uso in quelle aree, e comunque facilmente decontaminabili. È inoltre sistematicamente preferito l'impiego di materiali riciclabili o combustibili piuttosto che di materiali che richiedono complesse procedure di compattazione e smaltimento.

La produzione di miscele complesse di rifiuti radioattivi può essere evitata limitando al minimo l'uso di sostanze chimiche (vernici, solventi, reagenti chimici, combustibili, acidi) all'interno delle aree nelle quali le stesse sostanze possono subire processi di contaminazione o attivazione. L'uso di sostanze pericolose (combustibili, acidi, esplosivi) nei processi interni deve essere ridotto al minimo. In ogni caso, anche quando la produzione di miscele complesse di rifiuti non è evitabile, le stesse miscele devono essere tenute fra loro separate.

Un grosso contributo alla riduzione dei quantitativi di rifiuti radioattivi deriva dall'adozione estensiva di pratiche di decontaminazione e riutilizzo delle attrezzature e dei materiali recuperabili all'interno delle aree controllate. Questa soluzione può riguardare ad esempio le attrezzature di laboratorio (contenitori, strumenti, ecc.). I metodi adottati per la decontaminazione devono essi stessi tendere a minimizzare la produzione di rifiuti ed effluenti. A titolo esemplificativo, le tecniche da privilegiare saranno dunque nell'ordine la pulitura a secco, il lavaggio con acqua, il lavaggio con acqua e detergente, il trattamento con soluzioni speciali e la decontaminazione per abrasione.

Raccolta, caratterizzazione e condizionamento dei rifiuti

A valle delle pratiche di limitazione della quantità e della varietà dei rifiuti radioattivi, è comunque necessario organizzare un efficace sistema di raccolta e caratterizzazione dei rifiuti che non si è potuto evitare di produrre. Si tratta di una fase molto delicata sul piano radioprotezionistico, a causa del rischio associato ad una eventuale sottostima dei livelli di pericolosità e alla conseguente adozione di pratiche incompatibili con la sicurezza radiologica, ma anche a sistematiche sovrastime che porterebbero a una indebita lievitazione della quantità di rifiuti ed al conseguente appesantimento del sistema.

La raccolta dei rifiuti radioattivi deve essere fatta anzitutto utilizzando contenitori adatti al tipo di rifiuto (solido, liquido), colorati e contrassegnati in modo evidente per rendere chiaramente

distinguibile l'appartenenza del contenuto alle diverse categorie di rifiuti (rifiuti non radioattivi, potenzialmente radioattivi o contaminati, riutilizzabili o riciclabili, ecc.). La classificazione dei rifiuti deve essere confermata successivamente alla raccolta attraverso l'adozione di adatte tecniche di caratterizzazione e inventariamento. Il sistema più semplice è costituito dall'adozione, quando applicabile, di misuratori automatici della radioattività a contatto con la superficie esterna di ciascun contenitore.

Il successivo trattamento dei rifiuti caratterizzati e inventariati è finalizzato da un lato a conseguire la massima riduzione dei volumi da avviare allo smaltimento e dall'altro a rendere il più possibile stabile e inerte la forma finale dei rifiuti. Per i rifiuti solidi i trattamenti più diffusi sono l'incinerazione (per i rifiuti combustibili) e la compattazione ad alta pressione. Per i rifiuti liquidi si possono invece adottare tecniche di concentrazione delle soluzioni e di calcinazione o, in alternativa, di inglobamento in matrici bituminose, ceramiche, cementizie o vetrose.

TERZA PARTE: IL SISTEMA DI RADIOPROTEZIONE IN ITALIA

STRUTTURA E FUNZIONI DEL SISTEMA DI RADIOPROTEZIONE

Caratteristiche generali

In ogni paese industriale, l'esistenza di un sistema di radioprotezione efficiente, affidabile e trasparente, cui concorrano in modo integrato le diverse strutture tecnico-scientifiche e di sorveglianza (enti di ricerca, enti di indirizzo e di controllo, istituti specializzati e amministrazioni centrali e periferiche), è condizione indispensabile perché le attività a rischio radiologico possano essere svolte nel rispetto dei principi basilari e della normativa vigente in tema di tutela dei lavoratori, della popolazione e dell'ambiente. Con riferimento specifico alla situazione attuale dell'Italia, la chiusura delle centrali nucleari e delle installazioni del ciclo del combustibile non ha annullato né attenuato la suddetta esigenza, che permane intatta in considerazione

- della necessità di gestire l'eredità del nucleare pregresso (combustibile irraggiato, rifiuti radioattivi, materiali nucleari, impianti dismessi, ecc.);
- del fatto che l'utilizzo di radioisotopi e macchine radiogene è notevolmente sviluppato e diffuso in diversi settori industriali, medico-sanitari e della ricerca;
- della necessità di assicurare un dispositivo adeguato a fronteggiare possibili situazioni di emergenza derivanti da incidenti nucleari che possono anche avere portata transfrontaliera;
- delle sempre più pressanti esigenze di protezione dalle esposizioni da sorgenti naturali, in special modo da radon.

Le attività proprie di un sistema nazionale di radioprotezione sono articolate in due settori fondamentali:

- attività normativa, di vigilanza e di ispezione, la cui responsabilità è demandata alle autorità pubbliche nell'ambito delle loro specifiche competenze;
- attività operativa di sorveglianza nei confronti dei lavoratori, degli individui della popolazione e dell'ambiente esposti a rischi da radiazioni, rientranti tra le responsabilità proprie degli esercenti-datori di lavoro, che esercitano le attività da cui originano i rischi stessi.

Nel sistema di radioprotezione rientrano inoltre, quali prerequisiti o strumenti funzionali, indispensabili principalmente per la sorveglianza ma anche per le attività di vigilanza, numerose attività di natura tecnico-scientifica, raggruppabili nelle seguenti categorie:

- attività di ricerca e qualificazione;
- attività di dosimetria interna ed esterna;
- attività di controllo e taratura della strumentazione.

I diversi paesi hanno adottato diversi schemi di aggregazione e attribuzione delle linee di attività citate. Nei paesi di minori dimensioni, e in generale in quelli nei quali gli impegni energetici, industriali e di ricerca non sono tali da elevare il rischio radiologico, le diverse linee di attività afferiscono tutte ad un unico operatore nazionale (Agenzia o Istituto); in alcuni casi - così come avviene ad esempio nei paesi del Nord Europa - le attività di qualificazione e ricerca sono svolte prevalentemente sulla base di collaborazioni a livello sovranazionale. Nei paesi di maggiori dimensioni e in quelli nei quali esistono rilevanti impegni nei settori applicativi d'anzi citati le diverse attività sono affidate a soggetti diversi, sempre con una univoca ed esplicita attribuzione di responsabilità e competenze. In particolare:

- In tutti i paesi esiste un organismo (*Nuclear regulatory body* o Autorità nazionale per la sicurezza nucleare) che ha come missione principale - e spesso unica - quella relativa alla vigilanza, alle autorizzazioni (*licensing*), alle ispezioni e all'emanazione di norme tecniche.
- Le attività di ricerca e qualificazione sono demandate ad istituzioni di carattere tecnico-scientifico le quali possono, all'occorrenza, avvalersi di altre istituzioni. Le attività di dosimetria personale (interna ed esterna) e taratura sono regolamentate, poste sotto vigilanza e con l'obbligo della qualificazione.
- Le attività operative di prevenzione e di sorveglianza fisica e medica sono demandate alla responsabilità dei gestori dei singoli impianti e delle singole attività applicative, con il controllo dell'Autorità nazionale per la radioprotezione e la sicurezza nucleare.

Questo schema generale corrisponde a quanto attuato anche in Italia, dove:

- le funzioni dell'Autorità nazionale per la vigilanza in materia di radioprotezione e di sicurezza nucleare sono esercitate dall'ANPA (Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente); mentre l'ISS svolge un ruolo di supporto tecnico-scientifico al Ministero della Sanità per la protezione della popolazione ed i problemi di salute pubblica; funzioni di vigilanza in materia di radioprotezione sono attribuite anche agli organi del Servizio Sanitario Nazionale (SSN) competenti per territorio ed agli Ispettorati del lavoro;
- le attività di ricerca sono affidate a diversi operatori, fra i quali l'Istituto per la Radioprotezione (IRP) dell'ENEA, l'Istituto Superiore di Sanità (ISS), il Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) e le strutture universitarie;
- per quanto riguarda le attività di qualificazione per gli aspetti tecnico-scientifici, ed in particolare per le dosimetrie, le attività finora svolte a livello nazionale hanno avuto carattere essenzialmente volontaristico; di esse si è fatto carico principalmente l'ENEA-IRP, sia come promotore che come organizzatore. Per queste attività è previsto un regime, non ancora implementato in forma completa, che prevede l'impiego di apparecchi di misura individuali di tipo approvato; prescrive il possesso, per tutta la strumentazione, di certificati di taratura rilasciati secondo una precisa normativa; introduce uno specifico regime di vigilanza per i servizi di dosimetria individuale. Nelle predette attività sono coinvolti, ciascuno nell'ambito delle proprie competenze, diversi organismi, tra i quali in particolare l'ANPA, l'ENEA - Istituto di metrologia primaria delle radiazioni ionizzanti, l'Istituto superiore per la prevenzione e la sicurezza del lavoro (ISPESL);
- le attività operative di sorveglianza sono affidate, sotto il controllo dell'ANPA e delle restanti autorità di controllo, agli esercenti che svolgono le attività, tra cui si segnalano, per quanto riguarda le installazioni o applicazioni tipicamente nucleari, l'ENEA e l'ENEL

Nel seguito saranno schematicamente illustrati, alla luce dei fondamentali riferimenti tecnico-scientifici e legislativi, il ruolo e le funzioni dei principali attori fin qui indicati: l'ANPA, l'ISS e l'ENEA/IRP, considerando soprattutto gli aspetti più strettamente connessi al coinvolgimento di ciascuno di essi nel sistema nazionale di radioprotezione così come configurato in questo paragrafo. Una particolare attenzione sarà poi dedicata nel tratteggiare ruolo, funzioni ed esigenze operative dei principali gestori di attività nucleari (ENEL, ENEA).

I riferimenti tecnico-scientifici

La radioprotezione è soggetta a continuo aggiornamento alla luce dei risultati della prassi operativa, del progresso tecnologico e della ricerca internazionale nei campi della fisica e della radiobiologia. I risultati acquisiti nella ricerca, nella tecnologia e in sede operativa portano ad una continua revisione di metodi, modelli e procedure. Le stesse norme di carattere legislativo e prescrittivo seguono una evoluzione caratterizzata da rapidi mutamenti.

Esistono in campo internazionale istituzioni di carattere tecnico-scientifico che hanno lo scopo di promuovere studi, ricerche e valutazioni producendo un continuo aggiornamento dei documenti che costituiscono poi la base per tutte le normative.

- Dal 1955 opera il Comitato delle Nazioni Unite per lo studio degli effetti delle radiazioni atomiche (UNSCEAR), il cui ultimo rapporto all'Assemblea Generale dell'ONU è del 1993, ed il prossimo è previsto per il 2000.
- Dagli anni Venti è attiva la Commissione internazionale per la protezione radiologica (ICRP), Organismo non governativo riconosciuto dall'ONU che ha pubblicato finora 76 rapporti su vari temi di radioprotezione che costituiscono la base scientifica per tutte le procedure operative.
- Dagli anni Venti opera anche la Commissione internazionale per le unità e le misure delle radiazioni (ICRU), Organismo non governativo riconosciuto dall'ONU.
- Varie Agenzie specializzate delle Nazioni Unite elaborano raccomandazioni e pubblicano rapporti; tra esse l'Agenzia Internazionale dell'Energia Atomica (IAEA), l'Organizzazione mondiale di sanità (WHO) e l'Ufficio internazionale del lavoro (ILO).
- Attenzione ai temi di radioprotezione viene pure dedicata dall'Agenzia dell'Energia Nucleare (NEA) dell'Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico (OCSE).

Sulla base di questi riferimenti, viene poi svolta un'intensa attività normativa a livello europeo e a livello nazionale.

- L'Unione Europea promuove un consistente programma di studio e pubblica frequenti Guide e Rapporti tecnici di riferimento sulle tematiche emergenti di radioprotezione, preparati da gruppi di esperti formati ai sensi dell'art. 31 del trattato Euratom.
- Il Consiglio dei Ministri dell'Unione Europea emana regolamenti e Direttive rivolte ai governi il cui recepimento è obbligatorio per gli Stati membri; la Commissione Europea pubblica Raccomandazioni basilari per le applicazioni operative. La Direttiva 96/29 Euratom stabilisce le norme più aggiornate.
- L'ANPA, sentiti gli altri enti ed organismi interessati, emana Guide Tecniche a livello nazionale, contenenti norme di buona tecnica in materia di sicurezza nucleare e protezione sanitaria.

I riferimenti normativi

In presenza di un solido quadro di riferimento tecnico-scientifico internazionale, l'impegno a mantenere efficiente il sistema nazionale di radioprotezione deriva ai paesi europei, e in particolare all'Italia, anche dagli obblighi assunti attraverso la sottoscrizione di numerosi accordi ed impegni internazionali riguardanti le attività a rischio radiologico:

- Trattato Euratom in relazione all'Atto unico europeo;
- Trattato di non proliferazione nucleare (TNP);
- Convenzione internazionale sulla sicurezza nucleare, ratificata con legge n.10/98;
- Convenzione internazionale congiunta sulla sicurezza della gestione del combustibile irraggiato e sulla sicurezza della gestione dei rifiuti radioattivi, attualmente in corso di ratifica;
- Protocollo aggiuntivo sulle salvaguardie tra paesi Euratom non aventi armamenti nucleari e IAEA, attualmente in corso di definizione presso la Commissione Europea.

Vanno anche richiamate le esigenze derivanti dagli accordi europei sulla libera circolazione dei lavoratori (Regolamento n.1612/68 CEE del Consiglio, GUCE L 257 del 19/10/1968) e dagli accordi di Schengen sulla libera circolazione dei cittadini (legge n.388/93 di ratifica della Convenzione di Schengen).

Il sistema nazionale per la sicurezza nucleare e la radioprotezione è stabilito e regolato da leggi e decreti specifici, che recepiscono e rendono operative le direttive emesse dal Consiglio dell'Unione

Europea. In tal senso il decreto legislativo n. 230 del 17 marzo 1995, che costituisce oggi il dettato di legge di riferimento per le attività con rischi da radiazioni ionizzanti svolte in Italia, ha recepito le direttive Euratom 80/836, 84/466, 84/467, 89/618, 90/641 e 92/3.

Il recepimento della nuova Direttiva 96/29 Euratom, che dovrà avvenire entro il 13 maggio 2000, costituisce una preziosa occasione per adeguare ulteriormente la normativa vigente in Italia agli standard di protezione più elevati. I caratteri innovativi della nuova Direttiva riguardano in particolare i seguenti aspetti:

- L'applicazione a tutte le attività con rischio o incremento di rischio radiologico (vedi art. 2 comma 2 e Titolo VII): La direttiva disciplina infatti anche tutte le attività lavorative che implicano *"la presenza di sorgenti di radiazioni naturali e conducono ad un significativo aumento della esposizione di lavoratori, o di individui della popolazione, che non può essere trascurato dal punto di vista della radioprotezione"*. Sia il termine *"significativo"* che l'espressione *"dal punto di vista della radioprotezione"* devono intendersi in termini di dose all'interno dei principi fondamentali di limitazione fissati dalla Direttiva stessa per i lavoratori e la popolazione..
- La puntuale definizione di livelli di eliminazione (*clearance levels*, vedi art. 5 comma 2 e Allegato I punto 3), ovvero dei livelli di radioattività che consentono di trattare i rifiuti e i materiali radioattivi come rifiuti e materiali ordinari. Si tratta di un aspetto fondamentale per tutte le attività connesse con la gestione dei rifiuti radioattivi e con la disattivazione delle centrali e degli impianti nucleari.
- La disciplina degli interventi con l'estensione dei piani di emergenza e la codifica di prassi rigorose.

Il recepimento del capo IV della Direttiva per la parte che riguarda la idoneità dei servizi afferenti alla radioprotezione - in particolare i servizi di dosimetria - consentirà di elevare il livello di protezione dei lavoratori esposti e della popolazione. Condizione indispensabile per il conseguimento di questo risultato è infatti la garanzia che i dati che sono alla base delle valutazioni di rischio godano delle caratteristiche della confrontabilità ed affidabilità, pena la perdita di fiducia da parte dei destinatari finali (lavoratori e popolazione). A tal fine sarà indispensabile individuare procedure e disposizioni per il riconoscimento della idoneità dei servizi che prevedano, in modo particolare, la definizione di una istituzione con capacità tecniche e scientifiche atta a rendere operativa la qualificazione. A tale soggetto saranno demandate le fasi tecniche della qualificazione in modo tale che il procedimento amministrativo possa risultare agile, frequentemente ripetibile nel tempo e trasparente.

L'armonizzazione delle normative a livello europeo costituisce infine una importante base normativa per la regolamentazione del traffico transfrontaliero di materiali radioattivi di qualsiasi natura.

RUOLO E FUNZIONI DELL' AGENZIA NAZIONALE PER LA PROTEZIONE DELL'AMBIENTE, ANPA

Generalità

Tra i molteplici compiti istituzionali che la legge n.61/94 attribuisce all'ANPA particolare rilievo rivestono quelli derivanti dalla normativa vigente nel campo dell'impiego pacifico dell'energia nucleare, con particolare riferimento alla legge n.1860 del 31/12/1962, al recente decreto legislativo n.230 del 17/03/95, e, per la parte di quest'ultimo non ancora regolamentata dai previsti decreti

applicativi, dal DPR 185/64. In questo ambito i compiti dell'ANPA possono essere riassunti come segue:

- vigilanza e controllo sulle attività nucleari: possesso, commercio, trasporto, utilizzazione, dismissione di materiale nucleare e/o radioattivo, di radiosorgenti e di macchine radiogene;
- istruttorie per l'autorizzazione della disattivazione di impianti, di depositi di rifiuti, di nuove installazioni, modifiche di impianto;
- coordinamento del monitoraggio della radioattività ambientale;
- adempimenti derivanti dagli accordi internazionali nel quadro del Trattato di non proliferazione;
- supporto nell'elaborazione e gestione dei piani di emergenza;
- elaborazione e diffusione di normativa tecnica;
- predisposizione di idonei sistemi informativi (banche dati);
- studi e valutazioni sulla sicurezza nucleare e la radioprotezione;
- mantenimento e sviluppo di competenze specialistiche;
- cooperazione internazionale sulla sicurezza e la radioprotezione;
- supporto alle Amministrazioni centrali e periferiche e alla Magistratura in materia di sicurezza nucleare e radioprotezione.

Ciascuna delle funzioni e delle attività elencate presenta caratteristiche peculiari e richiede la sussistenza di condizioni operative particolari, che vanno assicurate dalla strutturazione di un contesto normativo ed istituzionale adeguato. Le principali funzioni e necessità operative sono descritte nei paragrafi che seguono.

Attività di vigilanza

Ai sensi del decreto legislativo n.230/95 l'ANPA è titolare di potere di vigilanza su tutte le attività soggette allo stesso decreto, comprese le installazioni mediche, con la sola esclusione degli aspetti relativi alla radioprotezione del paziente. In base a tale disposizione, la vigilanza deve essere effettuata, in via ordinaria:

- sugli "impianti nucleari" come definiti dal capo VII del D.Lgs. 230/95;
- sull'impatto radiologico intorno ai siti nucleari ove sono collocati tali impianti;
- sull'impiego dei radioisotopi e delle macchine radiogene;
- sulle macchine sperimentali per la fusione;
- sul trasporto delle materie radioattive;
- sulla detenzione e l'impiego di materie fissili speciali e prime fonti;
- sulle misure di protezione fisica passiva degli impianti nucleari;
- su qualsiasi altra attività o situazione che comporti un rischio significativo derivante dalle radiazioni ionizzanti.

L'attività di vigilanza dell'ANPA si estende su tutti gli aspetti della radioprotezione, e cioè sulla sorveglianza fisica e medica dei lavoratori, sulla radioprotezione della popolazione e sulla sorveglianza ambientale.

Alle attività di vigilanza ordinaria possono aggiungersi, secondo le circostanze, attività di vigilanza straordinaria, quali quelle da effettuare su richiesta specifica di Autorità Giudiziaria, Ministeri, NOE, GDF, PMP, ecc., ovvero quelle di iniziativa della stessa ANPA (ad esempio, campagne di misure radioecologiche "mirate" intorno ai siti nucleari).

Una stima complessiva delle installazioni su cui l'ANPA effettua la vigilanza ordinaria è la seguente:

- Grandi impianti (reattori, impianti del ciclo del combustibile, depositi, impianti di trattamento e/o deposito di rifiuti radioattivi) su cui è sempre stata effettuata attività di vigilanza. Sono circa 30 (tabella 16).
- Installazioni riconducibili ad attività “radioisotopi e macchine radiogene”, per cui è stato espresso parere per l'autorizzazione a livello centrale ed alcune altre autorizzate a livello periferico, su cui è stata sempre effettuata attività di vigilanza. Sono circa 100.
- Installazioni a scopo medico-sanitario. È ragionevole assumere che sia presente almeno una sorgente di radiazioni in ciascuna delle circa 1900 istituzioni sanitarie (ospedali e case di cura) censite dal Ministero della Sanità. È altresì ragionevole assumere in circa 4000 il numero di studi radiologici privati e di laboratori di analisi impieganti radioisotopi.
- Impieghi non sanitari delle radiazioni ionizzanti. Sono circa 2000. Oltre alle circa 100 installazioni già citate, sono note circa 550 aziende operanti nel campo dei controlli non distruttivi. Inoltre risultano circa 1150 installazioni ove vengono impiegate sorgenti di tipo diverso.

Tabella 16 - Grandi impianti su cui l'ANPA effettua la vigilanza ordinaria.

Gestore	Impianto	Stato attuale
ENEL	Centrale nucleare del Garigliano Centrale nucleare di Latina Centrale nucleare di Trino Vercellese Centrale nucleare di Caorso	Disattivazione Disattivazione Disattivazione Disattivazione
ENEA	Impianto EUREX Impianto ITREC Stabilimento NUCLECO Impianto OPEC-1 Impianto IPU Reattore sperimentale TRIGA Reattore sperimentale TAPIRO	Esercizio - Gestione rifiuti Gestione rifiuti Esercizio Cambio destinazione Esercizio Esercizio Esercizio
FN	Fabbricazione combustibile	Disattivazione
Centro comune di ricerca di ISPRA	Deposito rifiuti Reattore sperimentale ISPRA 1 ETHEL (trizio) PERLA Deposito E39.2 Reattore sperimentale ESSOR Laboratorio Media Attività	Ristrutturazione Disattivazione Prove nucleari Esercizio Esercizio Esercizio Esercizio
CESNEF	Reattore L54M	Cambio destinazione
Gestori diversi	Reattore RB3 (Montecuccolino) Reattore LENA (Pavia) Sistema sottocritico SM-1 (Legnaro) Reattore AGN (Palermo) Reattore GALILEI (CISAM-Pisa) Deposito combustibile. AVOGADRO Deposito combustibile INFN (Legnaro) Deposito CISE	Disattivazione Esercizio Esercizio Esercizio Disattivazione Esercizio Esercizio Esercizio
Depositi di rifiuti a bassa attività	Deposito Campoverde Deposito CEMERAD Deposito CONTROLSONIC Deposito CRAD Deposito GAMMATOM Deposito PROTEX Deposito SICURAD Deposito SORIN	Esercizio Esercizio Esercizio Esercizio Esercizio Esercizio Esercizio Esercizio

Tabella 17 - Grandi impianti. Iniziative propedeutiche o collaterali all'attività istruttoria.

Stoccaggio a secco del combustibile irraggiato: analisi delle tecnologie disponibili, emissione dei criteri di sicurezza (Guida Tecnica).
Sito nazionale centralizzato per lo smaltimento dei rifiuti di II° Categoria e deposito del combustibile irraggiato e dei rifiuti di III° Categoria: emissione dei criteri di sicurezza (Guida Tecnica).

Disattivazione degli impianti nucleari: valutazione dei criteri "de minimis" (clearance levels); valutazione dei limiti di dose per le varie opzioni; valutazione delle tecnologie di smantellamento e decontaminazione; criteri di definizione per il rilascio incondizionato del sito (Guide Tecniche).
Gestione rifiuti radioattivi: revisione Guida Tecnica N° 26.
Attività per il Progetto ITER (fusione) : esercizio di <i>licensing</i> del sito.
Attività per il Progetto ADS - trasmutazione attinidi (Rubbia) : valutazione dei criteri di sicurezza.

Attività istruttorie

Le istruttorie da seguire nell'ambito delle procedure di *licensing* di competenza ANPA variano da quelle, più complesse, relative ai grandi impianti, a quelle, relativamente più semplici, e comunque assai più numerose, relative ad installazioni nucleari minori, all'impiego di sorgenti, radioisotopi, macchine radiogene, al trasporto di materiale radioattivo.

Con riferimento agli impianti più complessi, le istruttorie da seguire possono riguardare modifiche di impianti o installazioni esistenti, realizzazione di nuovi impianti o installazioni, disattivazione di impianti. Nella tabella 17 è riportato un elenco di iniziative propedeutiche o collaterali alle attività di istruttoria.

Per gli impianti riconducibili a "radioisotopi e macchine radiogene" le istruttorie possono riguardare:

- nuove installazioni riguardanti acceleratori, ovvero modifiche di condizioni di esercizio di acceleratori già autorizzati, secondo l'art. 55 del DPR 185/64;
- nuove installazioni riguardanti impianti di irraggiamento o altri impianti assimilabili, ovvero modifiche di condizioni di esercizio di impianti già autorizzati, secondo l'art. 55 del DPR 185/64;
- autorizzazioni all'impiego di sorgenti sigillate e non sigillate presso grandi ospedali, secondo l'art. 13 della Legge 1860/62;
- impianti per il commercio di cat. B di sorgenti radioattive, secondo l'art. 34 del DPR 185/64.

Per le attività relative al trasporto di materie radioattive, le istruttorie riguardano l'autorizzazione di nuovi vettori al trasporto nucleare.

Sono infine da prevedere istruttorie relative alla revisione e approvazione dei piani di protezione fisica passiva degli impianti nucleari.

Attività di radioprotezione

Sotto il termine di radioprotezione trovano collocazione diverse competenze tecnico-scientifiche che, dialogando tra loro, concorrono tutte al fine ultimo della tutela preventiva dell'uomo e dell'ambiente nell'accezione più vasta del termine. Più specificatamente, per quanto attiene l'attività dell'ANPA, gli aspetti prioritari di radioprotezione da prendere in considerazione nelle azioni di vigilanza possono essere così riassunti:

- azioni di radioprotezione fisica e medica verso i lavoratori, a qualsiasi titolo coinvolti nelle attività con radiazioni ionizzanti;
- radioprotezione fisica verso la popolazione;
- controllo e tutela dell'ambiente.

Ciò premesso, l'azione puntuale di vigilanza, fatti salvi tutti gli adempimenti "burocratico-documentali" di *routine* e periodici nonché la necessaria parte autorizzativa, è indirizzata alla verifica dei seguenti aspetti principali di organizzazione da parte dell'Esercente:

- sussistenza del sempre necessario contributo specialistico di due figure cardine, quali quella dell'*Esperto qualificato* e del *Medico autorizzato* di cui all'art. 6 del D.Lgs. 230/95, in fase preliminare e, se del caso, anche in corso di attività;
- consistenza, in termini di efficienza ed efficacia nel tempo, delle strutture per quanto riguarda mezzi, uomini e attrezzature al fine della gestione di tutto il sistema di radioprotezione;
- informazione, formazione (addestramento ed aggiornamento professionale periodici) dei vari addetti ai lavori a qualsiasi livello;
- capacità di risposta a situazioni non di *routine*, ovvero eccezionali e di emergenza, al fine di ripristinare le condizioni normali ovvero di arrestare il fenomeno del "fuori controllo" e quindi limitare le conseguenze radiologiche sanitarie ed ambientali;
- efficacia, ove previsto, del programma di sorveglianza radiologica ambientale, gestito dall'esercente, intorno al proprio sito nucleare onde verificare *a posteriori* le valutazioni e le stime radioprotezionistiche di massima fatte in fase progettuale e preoperazionale;
- costante efficienza e taratura dei diversi mezzi di misura di radiazioni sia per la sorveglianza ambientale dei luoghi di lavoro che per la sorveglianza ambientale in senso lato;
- rispetto dei principi generali di radioprotezione e dei limiti di dose per i lavoratori e la popolazione previsti dalla normativa vigente.

Monitoraggio della radioattività ambientale

Un moderno sistema di radioprotezione della popolazione e dell'ambiente non può prescindere da un complesso sistema di controllo della radioattività nelle matrici ambientali, negli alimenti e nelle bevande. In base alla normativa vigente, questo sistema è articolato in reti di sorveglianza regionale e reti di sorveglianza nazionale. Le funzioni di coordinamento tecnico di queste ultime sono affidate all'ANPA. In questo ambito l'ANPA promuove criteri di normalizzazione e di intercalibrazione e l'installazione di stazioni di prelevamento, oltre a trasmettere alla Commissione Europea le informazioni relative ai rilevamenti effettuati.

Tra le matrici ambientali più significative rientra certamente l'aria. I sistemi di misura delle concentrazioni della radioattività nell'aria hanno tuttavia una importanza rilevante anche per le problematiche dell'emergenza, specie per l'identificazione di emergenze transfrontaliere o comunque di origine non localizzabile in predeterminati impianti o localizzazioni sul territorio nazionale. Questo aspetto sarà perciò considerato nel prossimo paragrafo.

Preparazione alle emergenze

Compito precipuo dell'ANPA è quello di predisporre tutti gli strumenti necessari per poter convenientemente e tempestivamente fronteggiare le emergenze nucleari che dovessero verificarsi sia sul territorio nazionale che al di là delle frontiere, fornendo il necessario supporto tecnico alle autorità amministrative preposte alla gestione della predetta emergenza. A tale scopo, le azioni da svolgere sono elencate nella tabella 18.

Tabella 18 - Azioni di competenza ANPA per la gestione delle emergenze radiologiche.

Area	Azioni da svolgere
Gestione delle emergenze	a) organizzazione e gestione del servizio di reperibilità dell'ANPA; b) raccolta e valutazione dei dati di radioattività nell'aria, sia quelli ottenuti dal sistema automatico appena descritto, sia quelli comunicati giornalmente da stazioni dislocate sul territorio nazionale (Laboratori indipendenti); c) coordinamento e gestione delle esercitazioni per emergenze esterne agli impianti nucleari; d) revisioni dei piani di emergenza esterna agli impianti nucleari; e) partecipazione al programma INEX della NEA-OECD (esercitazioni di emergenza internazionali);
Supporto alla Protezione Civile	f) organizzazione e supporto alle attività del CEVaD;
Sistema di Pronta Notifica	g) partecipazione al Gruppo "ECURIE" dell'Unione Europea per la definizione degli standards per le istituende strutture di Pronta Notifica; h) definizione del futuro sistema italiano; i) partecipazione alle attività relative alle esercitazioni di emergenza legate al Sistema di Pronta Notifica della

In questo ambito, allo scopo di controllare in tempo reale lo stato della radioattività in aria su tutto il territorio nazionale, l'ANPA ha realizzato una rete di stazioni per il prelievo e il monitoraggio opportunamente dislocate e di un sistema centralizzato per la raccolta e l'elaborazione dei dati rilevati, dove perverrebbe il segnale di allarme in caso di presenza anomala di radioattività. Il progetto completo prevede:

- l'installazione di sette centraline automatiche per il monitoraggio della radioattività alfa, beta e gamma, di cui tre già installate (Sardegna, Friuli, Puglia), e quattro in fase di acquisizione e installazione (Piemonte, Emilia, Sicilia, Lazio);
- l'installazione di 50 punti di monitoraggio gamma su tutto il territorio nazionale (in fase di attuazione);
- la realizzazione presso la sede ANPA del sistema centralizzato di raccolta ed elaborazione dati (già operativo).

Inoltre, sono in fase di negoziazione accordi con i paesi confinanti per poter connettere le rispettive reti nazionali di rilevamento con la rete italiana, allo scopo di poter disporre di un sistema di controllo che coprirà una più vasta estensione territoriale.

Normativa tecnica e documentazione (banche dati)

Oltre alla normale emissione di guide e posizioni tecniche, tipica di ogni Autorità di radioprotezione e sicurezza nucleare, il D.Lgs. 230/95 ha assegnato all'ANPA una notevole mole di lavoro di raccolta dati tramite la realizzazione e la gestione di apposite banche dati. Inoltre, lo stesso D.Lgs., per numerosi suoi articoli, prevede l'emissione di specifici decreti autorizzativi, per i quali è previsto il parere dell'ANPA. L'attività da svolgere è elencata nella tabella 19.

Tabella 19 - Azioni di competenza ANPA per la normativa tecnica e la documentazione.

Area	Attività da svolgere
Elaborazione di normativa tecnica:	<ul style="list-style-type: none">• emissione di Guide Tecniche;• partecipazione a Gruppi di Lavoro normativi in ambito nazionale (UNI) e internazionale (ISO, NEA, IAEA, Unione Europea);
Supporto per l'emissione dei decreti applicativi del D.Lgs. 230/95	<ul style="list-style-type: none">• è previsto il parere ANPA su 37 dei 47 decreti applicativi;
Realizzazione del Sistema Informativo previsto dal D.Lgs. 230/95 (banche dati):	<ul style="list-style-type: none">• notifiche di attività di importazione di materie radioattive (art. 18)• riepiloghi di operazioni commerciali con sorgenti radioattive (art. 20)• riepiloghi di trasporti di materie radioattive (art. 21)• denunce di detenzione di materie radioattive e di macchine radiogene (art. 22)• denunce di detenzione e inventari fisici di materie fissili speciali, grezze e minerali (art.23)• comunicazioni di cessazione di detenzione di sorgenti (art. 24)• comunicazioni di smarrimento o perdita di materie radioattive (art. 25)• riepiloghi dei rifiuti radioattivi raccolti e di quelli depositati (art. 34)• riepiloghi di rifiuti ex art. 154 (rifiuti radioattivi con altre caratteristiche)• provvedimenti autorizzativi ex art. 27 e seguenti;• archivio nazionale dei lavoratori esposti;• banca dati radionuclidi;• banca dati rilevamento radioattività artificiale.

Controlli di salvaguardia

Nonostante la cancellazione delle attività nazionali relative all'utilizzazione dell'energia nucleare come fonte energetica, in Italia è tuttora presente un cospicuo quantitativo di materie nucleari, per le

quali è necessario prevedere l'applicazione del sistema di Salvaguardie regolato dagli accordi internazionali in materia di non proliferazione nucleare. Si tratta di circa 40 differenti aree di bilancio materiali, distribuite in 20 siti diversi, a cui vanno aggiunti circa 70 differenti detentori di sorgenti per gammagrafia industriale che utilizzano a scopo di schermatura l'uranio depleto. L'inventario complessivo delle materie nucleari tuttora detenute in Italia è mostrato nella tabella 20.

Tabella 20 - Inventario complessivo del materiale nucleare attualmente detenuto in Italia (aggiornamento al 31.12.1997).

<i>Materiale</i>	<i>Quantità</i>	<i>N. soggetti detentori</i>
uranio depleto	80.569 kg	93
uranio naturale	50.906 kg	33
uranio con arricchimento < 20%	335.148 kg	22
uranio con arricchimento > 20%	201.321 kg	28
torio	5.640 kg	24
plutonio	1.765 kg	25

Sviluppo di conoscenze e competenze

Per l'adempimento dei compiti istituzionali assegnati all'ANPA in materia di sicurezza nucleare e radioprotezione è necessario il continuo aggiornamento delle conoscenze e competenze nel settore specifico, con particolare riferimento agli aspetti di più rilevante interesse in ambito nazionale, quali la sicurezza dei reattori, la gestione dei rifiuti radioattivi, la disattivazione degli impianti, la radioprotezione. Occorre infatti mantenere, valorizzare ed aggiornare la "cultura della sicurezza nucleare" a supporto delle attività istituzionali di vigilanza, delle istruttorie, della radioprotezione, della preparazione alle emergenze, dovendo anche sopperire a eventuali manchevolezze in questo ambito specifico, anche in relazione al progressivo abbandono di questo tipo di attività da parte di alcuni degli organismi nazionali di ricerca. I settori da presidiare sono in particolare quelli indicati nella tabella 21.

Rapporti internazionali

La presenza dell'ANPA in ambito internazionale è essenziale da un lato per l'aggiornamento delle competenze e dall'altro per il fatto che l'Italia è inserita in un contesto internazionale (Unione Europea, G-7, ecc.) in cui la tecnologia nucleare rappresenta tuttora un elemento importante per lo sviluppo.

Tabella 21 - Sviluppo di conoscenze e competenze. Settori da presidiare.

<i>Area</i>	<i>Settori</i>
Sicurezza dei reattori nucleari	a) reattori innovativi; b) reattori transfrontalieri; c) codici di simulazione di transitori incidentali; d) studi sugli incidenti severi; e) valutazioni di sicurezza su reattori nazionali; f) valutazioni di sicurezza su reattori a fusione;
Tecnologie e tecniche nucleari	g) competenze specialistiche (sistemi termoidraulici, sistemi di contenimento, strutture meccaniche, strutture civili, sistemi elettrici, strumentazione e controlli, trattamento effluenti, metodologie probabilistiche);
Gestione dei rifiuti radioattivi	h) sistemi sottocritici alimentati da sorgenti di spallazione per trasmutazione di radioisotopi a lunga vita; i) caratterizzazione rifiuti radioattivi prima e dopo il condizionamento; j) stoccaggio a medio termine del combustibile irraggiato e dei rifiuti di III Categoria; k) sito per lo smaltimento dei rifiuti di II Categoria;
Disattivazione degli impianti nucleari	l) strategie, metodologie, tecniche per la disattivazione degli impianti nucleari;
Radioprotezione	m) progetti speciali in campo radiometrico (esposizione del personale di volo ai raggi cosmici, dosimetria di neutroni veloci); n) studi statistico-epidemiologici.

Fra le attività condotte in ambito internazionale particolare importanza assume l'assistenza prestata ai paesi dell'Est europeo per la risoluzione dei problemi di sicurezza delle loro installazioni nucleari. A tal fine l'ANPA partecipa ai programmi TACIS e PHARE della Commissione Europea,

attività che ha finora condotto l'Agenzia a partecipare alla realizzazione di 15 progetti di assistenza. Nello stesso ambito, specialisti ANPA partecipano ai gruppi di coordinamento internazionale della Commissione Europea per la definizione dei programmi e dei contenuti dei progetti di assistenza. Sono stati inoltre definiti i termini di un accordo bilaterale con l'Ucraina relativo alla sicurezza del sarcofago di Chernobyl.

Per quanto riguarda l'aggiornamento delle conoscenze e delle competenze, un contributo fondamentale deriva dai seguenti strumenti di collaborazione internazionale:

- partecipazione alle iniziative dell'IAEA sulla sicurezza nucleare e sulla radioprotezione;
- partecipazione alle iniziative della NEA-OECD sulla sicurezza nucleare e sulla radioprotezione;
- partecipazione alle iniziative della Commissione Europea in materia di sicurezza e radioprotezione;
- attivazione di accordi bilaterali con autorità nazionali di sicurezza nucleare di paesi occidentali.

Di particolare rilievo, in questo ambito, sono i compiti che derivano all'ANPA dalla firma e dalla ratifica da parte dell'Italia di trattati internazionali che riguardano la sicurezza nucleare e la radioprotezione, e tra essi

- il Trattato di non proliferazione nucleare e i relativi adempimenti connessi con il regime di salvaguardie, nonché i successivi aggiornamenti (ad esempio, il Protocollo aggiuntivo);
- la Convenzione sulla sicurezza nucleare (che riguarda i reattori di potenza);
- la Convenzione congiunta sulla sicurezza della gestione del combustibile irraggiato e sulla sicurezza della gestione dei rifiuti radioattivi.

RUOLO E FUNZIONI DELL'ISTITUTO SUPERIORE DI SANITÀ, ISS

Generalità

L'Istituto Superiore di Sanità (ISS) svolge da molti anni un duplice ruolo nel campo della radioprotezione. Da un lato, in seno all'Istituto si effettuano molteplici ricerche di base e/o orientate sui meccanismi delle interazioni tra le radiazioni e i sistemi biologici, sulla distribuzione e la diffusione dei radionuclidi nell'ambiente anche in condizioni incidentali, sullo sviluppo di tecniche dosimetriche in diversi campi, sulla qualità e l'ottimizzazione nella diagnostica medica e nella terapia con radiazioni ionizzanti. Accanto a queste ricerche l'ISS, per precise disposizioni legislative o per prassi consolidata, ha in tema di radioprotezione numerose responsabilità istituzionali sia dirette sia in forma di consulenza tecnica prestata al Ministro della Sanità. Il ruolo istituzionale che ne consegue è svolto avvalendosi delle conoscenze e dell'esperienza provenienti dalla contemporanea attività di ricerca nel settore.

Ricerche di biofisica delle radiazioni e di radiobiologia

La protezione dalle radiazioni ionizzanti si fonda anzitutto sulla comprensione qualitativa e quantitativa dei rischi ad esse associate, cioè degli effetti biologici e della loro probabilità di manifestazione nelle varie condizioni di esposizione. Per questo è necessaria una stretta integrazione delle conoscenze epidemiologiche con i risultati di studi sperimentali e di modelli sui meccanismi d'azione. A tal fine, presso l'ISS, e in particolare nel Laboratorio di Fisica, si svolge da vari anni una intensa attività di biofisica delle radiazioni e radiobiologia per determinare il legame tra la qualità della radiazione, le lesioni a livello del DNA e i danni cellulari (cambiamenti nella funzionalità cellulare come la perdita della capacità proliferativa e l'induzione di mutazioni). Dato l'ampio spettro della catena di eventi che sono coinvolti negli effetti biologici delle radiazioni, questa ricerca si avvale largamente di strategie e di competenze multidisciplinari, con collaborazioni anche di altri Laboratori dell'ISS e di istituzioni esterne quali i Laboratori Nazionali di Legnaro dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), l'ENEA e l'Istituto FRAE (CNR). In ambito internazionale l'ISS partecipa inoltre ai progetti di ricerca varati dall'Unione Europea sui modelli biofisici per l'induzione dei tumori da parte delle radiazioni nell'ambito del *Nuclear Fission Safety Programme*.

Studio della radioattività ambientale

L'attività di ricerca nel campo della radioattività ambientale presso l'ISS è stata sviluppata tradizionalmente secondo i due filoni principali di studio della radioattività naturale e artificiale. Nel settore della radioattività naturale un interesse particolare è stato dedicato negli anni al tema del radon negli ambienti chiusi, data la sua rilevanza sanitaria, e più in generale alla esposizione alle radiazioni ionizzanti della popolazione negli ambienti domestici. Ciò da un punto di vista sperimentale ha richiesto e richiede la progettazione, la realizzazione e la standardizzazione di nuove tecniche di misura, il perfezionamento e l'affinamento di tecniche già a disposizione (ad esempio la spettrometria gamma), oltre alla messa a punto e all'intercalibrazione di strumentazione tradizionale, la partecipazione a interconfronti internazionali, ecc.

Lo studio della radioattività all'interno delle abitazioni (condotto in collaborazione con l'ANPA), dopo una ricerca pilota condotta in Umbria negli anni Ottanta, ha avuto per oggetto un campione statisticamente rappresentativo di 5.000 case in 200 comuni italiani, e ha permesso di valutare la distribuzione della concentrazione di radon nelle case italiane, e quindi il valore medio a cui sono esposti gli abitanti e la relativa dose efficace. Durante la stessa indagine (in collaborazione con l'ENEA) è stata misurata anche la dose assorbita in aria, per stimare la dose media - e relativa dose efficace - per la popolazione. È tuttora in corso una indagine epidemiologica sul rischio di tumore polmonare ed esposizione al radon nelle abitazioni del Lazio, come parte di un *pool* di indagini europee e del nord America, con disegni simili e simili protocolli.

Agli studi sull'ambiente domestico si sono affiancate nel corso degli anni altre indagini nel mondo lavorativo quali, ad esempio, uno studio della radioattività naturale presente all'interno della galleria del Gran Sasso (laboratori di ricerca dell'INFN), la valutazione dell'impatto ambientale - da un punto di vista radioattivo - di centrali elettriche a carbone, una indagine sui problemi sanitari connessi con i processi lavorativi in industrie ceramiche e di materiale refrattario, ecc.

Sui temi della radioattività ambientale, sia di origine naturale che artificiale, l'ISS riveste un ruolo di primaria importanza nella consulenza al Ministero della Sanità nei settori di competenza. Ciò avviene per tutti quei problemi di tipo radioprotezionistico che coinvolgono la salute pubblica e richiede la partecipazione a commissioni, gruppi di studio, comitati di radioprotezione, gruppi di lavoro per la elaborazione di normative, raccomandazioni e guide tecniche, preparazione di pareri e relazioni.

Studio della contaminazione nucleare

Fino dagli anni Sessanta, in occasione delle ricadute radioattive sul territorio italiano dovute alle esplosioni sperimentali in atmosfera, l'ISS ha sviluppato indagini e ricerche connesse con le conseguenze di rilasci radioattivi in atmosfera, su varie tematiche, individuate a livello internazionale come priorità di ricerca. Esse hanno richiesto lo sviluppo di tecniche di rivelazione, la misura di grandezze fisiche, l'elaborazione di modelli di calcolo e l'individuazione di parametri che permettessero di descrivere o prevedere le possibili evoluzioni della contaminazione. In tale ambito è stato anche recentemente messo a punto un algoritmo per il calcolo delle conseguenze radiologiche di incidenti nucleari in Europa.

In particolare, in seguito all'incidente di Chernobyl, l'ISS ha contribuito alla gestione dell'emergenza ed alla comprensione del fenomeno fisico, con misure ambientali, valutazioni teoriche e la partecipazione a numerose commissioni e gruppi di studio sia nazionali che internazionali. Dagli studi condotti dall'ISS sull'evolversi della contaminazione a seguito dell'incidente di Chernobyl sono nati alcuni programmi di ricerca aventi per oggetto matrici alimentari particolarmente significative o per la loro importanza nella valutazione dell'impatto sanitario dell'incidente o perché buoni indicatori dell'evolversi della contaminazione ambientale. Tra i programmi di ricerca nati in quell'occasione, il più sviluppato è stato quello sulla contaminazione radioattiva del latte materno.

Più in generale nell'ISS viene svolta una attività che ha come obiettivo la valutazione dell'impatto sanitario delle diverse fonti energetiche, con particolare riguardo a quella nucleare, sia in condizioni di normale esercizio che incidentali. In seguito alla moratoria nucleare le problematiche di riferimento sono oggi quelle della gestione dei rifiuti radioattivi e della disattivazione degli impianti nucleari esistenti. Su queste l'ISS elabora pareri e raccomandazioni tecniche per il Ministero della Sanità.

Radioprotezione del paziente

La protezione dalle radiazioni in campo medico è uno dei temi che l'ISS affronta in modo autonomo e con una missione specifica, avendo per obiettivo la minimizzazione delle dosi in radiodiagnostica, in radioterapia e nell'uso professionale della strumentazione.

Radiodiagnostica

Nelle pratiche radiodiagnostiche l'ISS persegue dagli anni Settanta l'obiettivo principale di ridurre al minimo indispensabile le dosi ricevute dai pazienti sottoposti ad esame, assieme a quello di elevare la qualità delle immagini.

Con lo scopo di definire lo stato degli apparati radiologici in Italia, l'ISS, in collaborazione con l'ENEA-DISP (attualmente ANPA), ha promosso e attuato il programma NEXT, i cui risultati hanno guidato la standardizzazione e l'ottimizzazione delle procedure radiodiagnostiche.

L'ISS ha successivamente focalizzato il suo intervento sulla protezione dalle radiazioni nelle esposizioni in mammografia, data la rilevanza dell'utilizzazione di questa tecnica nella prevenzione del carcinoma della mammella. A tale scopo l'ISS ha promosso e ha partecipato al programma *Dose e Qualità in Mammografia* (DQM) in collaborazione con la Società Italiana di Radiologia Medica (SIRM) e con l'Università di Ferrara, mostrando l'importanza dei controlli di qualità e della definizione di misure idonee per la valutazione della qualità dell'immagine oltre che della dose. In anni più recenti sono state intraprese alcune iniziative per la definizione operativa di un protocollo

per il controllo di qualità in mammografia, attraverso l'attivazione di un Gruppo di studio specifico e la pubblicazione di un documento (ISS, 1995).

Il protocollo proposto dal Gruppo di studio ISS, anche se in modo non coordinato a livello centrale, è stato in questi anni sperimentato in molti centri, ponendo i presupposti per una sua revisione in tempi brevi. Studi più recenti sono stati effettuati per definire possibili forme di ottimizzazione sia di esami con elevato impatto sanitario, che comportano dosi di radiazione elevate e che si stanno rapidamente diffondendo (quali la tomografia computerizzata convenzionale e spirale), che degli esami effettuati su donne in età fertile.

Costante in questi anni è stato il supporto che l'ISS ha dato alla definizione della normativa in questo settore, a partire dalla circolare n.62 del 1984 fino alla messa a punto del decreto legislativo 230 ed infine alla elaborazione di pareri per la emanazione dei decreti applicativi del suddetto decreto relativi alla radioprotezione dei pazienti.

Radioterapia e "Assicurazione di Qualità"

Presso l'ISS si è costituito un Gruppo di studio sul tema "*Assicurazione di Qualità in Radioterapia*" allo scopo di sviluppare iniziative ed elaborare linee guida che recepiscano e completino le indicazioni europee in questo ambito.

L'Assicurazione di Qualità in Radioterapia si propone come obiettivo di garantire che il trattamento effettuato corrisponda agli scopi per il quale è stato programmato per quanto riguarda la tecnica di esecuzione e la dose assorbita dal tessuto tumorale e dai tessuti normali circostanti. L'attività deve perciò considerare non solo la parte tecnica del trattamento (che comprende le attrezzature e le procedure impiegate), ma anche gli aspetti clinici, organizzativi e di aggiornamento; deve inoltre consentire la rivelazione di errori, minimizzandone la occorrenza ed attivare i relativi meccanismi di correzione. Un primo documento contenente linee guida generali è stato elaborato alla fine del 1996 per presentare le proposte elaborate essenzialmente per la radioterapia con fasci esterni. Tale documento sta per essere accompagnato da un secondo che definirà i criteri minimi necessari ad eseguire i controlli di qualità al fine di garantire un adeguato livello di accuratezza dell'intero trattamento radiante.

La rilevanza della iniziativa intrapresa dall'ISS risiede anche nel fatto che nel Gruppo di studio sono rappresentate le diverse competenze, mediche, fisiche e tecniche che operano nel campo della radioterapia, competenze così fortemente interconnesse da rendere l'approccio complessivo all'Assicurazione di Qualità in Radioterapia necessariamente multidisciplinare.

La necessità di stabilire linee guida nazionali su questo tema è stata evidenziata sia a livello europeo, dalle indagini condotte dall'*European Society for Therapeutic Radiation and Oncology*, sia dalle numerose indagini e pubblicazioni provenienti da numerosi paesi extraeuropei a tecnologia avanzata.

Dosimetria

Le attività di dosimetria condotte dall'ISS hanno per oggetto lo sviluppo di metodi dosimetrici avanzati e di nuove tecnologie nell'uso delle radiazioni ionizzanti ad impatto sanitario. L'attività si articola in quattro settori:

- Metodi dosimetrici per radioterapia. In questo ambito l'obiettivo è la realizzazione di diversi e complementari sistemi dosimetrici da utilizzarsi sia in fasci convenzionali che per terapia adronica. L'attività comprende:

- 1) la realizzazione di un calorimetro ad acqua come sistema dosimetrico assoluto di riferimento per la calibrazione dei vari sistemi dosimetrici relativi, da utilizzarsi sia in fasci convenzionali che per la terapia adronica;
 - 2) lo sviluppo di sistemi dosimetrici innovativi (alanina/EPR, diamanti, film) per la dosimetria di transfer e clinica;
 - 3) la messa a punto di dosimetri per gamma e protoni che permettano di effettuare una dosimetria tridimensionale su sistemi fantoccio tessuto equivalenti, mediante la risonanza magnetica nucleare. Questa competenza viene inoltre utilizzata per i programmi di controllo e assicurazione di qualità previsti dalla legislazione vigente.
- Biosensori per misure di dose individuale. La stima del rischio sanitario connesso con l'esposizione dei singoli individui a radiazioni derivanti da eventi accidentali presuppone la conoscenza della dose assorbita dagli organi degli individui stessi. La ricostruzione *a posteriori* della dose individuale come conseguenza di un evento accidentale implica, per la natura stessa del problema, che l'individuo esposto sia esso stesso il *monitor* dell'avvenuto irraggiamento. Il raggiungimento di questo obiettivo sembra oggi possibile e costituisce un prioritario impegno di ricerca della comunità scientifica internazionale cui l'ISS partecipa attraverso l'adesione a programmi della Unione Europea.
 - Metodi dosimetrici e di identificazione nel settore industriale (alimenti irraggiati, sterilizzazione di presidi medico chirurgici). Le applicazioni delle radiazioni in campo industriale sono in continuo aumento e fra queste alcune hanno un significativo impatto sanitario. L'irraggiamento dei prodotti deve tuttavia avvenire presso impianti idonei e nel rispetto di rigorose norme operative. E' quindi necessario garantirsi preventivamente della capacità operativa dell'impianto (validazione dell'impianto) in relazione allo specifico trattamento richiesto (validazione del prodotto). È questo uno dei compiti affidati all'ISS, che deve inoltre accertare l'idoneità dei metodi dosimetrici da utilizzare per l'irraggiamento delle derrate alimentari.
 - Metrologia delle radiazioni X. L'ISS ha acquisito, a partire dal 1962, una solida competenza nel settore della metrologia delle radiazioni X. Questa competenza ed il notevole potenziale tecnologico presente nell'ISS sono stati utilizzati nell'ambito del Servizio Sanitario Nazionale (SSN) attraverso un ruolo di coordinamento delle attività e di riferibilità del dato dosimetrico. Inoltre, l'ISS fornisce servizi a terzi per la taratura di camere a ionizzazione, irraggiamenti di dosimetri a termoluminescenza e pellicole fotografiche per la determinazione delle rispettive curve di taratura.

RUOLO E FUNZIONI DELL'ENEA-ISTITUTO PER LA RADIOPROTEZIONE, IRP

Generalità

L'attività ENEA nel campo della radioprotezione deriva da un impegno pluridecennale nelle aree della radioprotezione operativa per gli impianti e laboratori dell'Ente, della ricerca, della qualificazione e delle dosimetrie, attività svolte - in armonia con il ruolo pubblico del CNEN prima e dell'ENEA poi - in riferimento alle esigenze nazionali ed in collegamento con le omologhe attività condotte nei paesi europei.

In armonia con gli orientamenti prevalenti nei paesi europei e con le indicazioni normative comunitarie e nazionali, l'ENEA decise nel 1993 di riunire tutte le attività di radioprotezione in una struttura unica dando vita all'*Istituto per la Radioprotezione* (ENEA-IRP) con le seguenti missioni specifiche:

- fornire i servizi di sorveglianza fisica ed ambientale di radioprotezione alle unità dell'ENEA titolari di impianti e laboratori con rischio da radiazioni ionizzanti in ottemperanza agli obblighi che competono all'ente per legge o per prescrizioni degli organismi vigilanti;
- costituire il riferimento tecnico-scientifico e di qualificazione sia per le attività operative presenti in ENEA sia per il sistema paese, con il mantenimento e messa a disposizione di competenze e metodi di riferimento per tutti gli aspetti tecnico-scientifici che riguardano la radioprotezione, con attività di ricerca, di formazione e di qualificazione inserite in modo stabile ed adeguato nel contesto europeo.

In assonanza con le soluzioni adottate in altri paesi europei, l'IRP, oltre alla funzione di qualificazione per gli aspetti tecnico-scientifici, è presente sul campo con attività di servizio aventi livelli di qualificazione che possano essere di riferimento, sia per avere conoscenza concreta e diretta delle problematiche operative, sia per garantire (attraverso una propria autonomia economica) indipendenza, imparzialità e trasparenza.

L'ENEA-IRP è attualmente impegnato nei seguenti settori:

- sorveglianza fisica della protezione e tecniche radiometriche;
- ricerca e innovazione tecnologica in radioprotezione;
- qualificazione dei servizi di radioprotezione;
- accertamento di qualità.

L'Istituto costituisce una struttura con un ruolo ben definito, pienamente inserita con una propria impostazione nel contesto tecnico italiano ed europeo, in grado di affrontare praticamente tutti gli aspetti e i problemi connessi alla protezione ed alla salvaguardia dai rischi da radiazioni ionizzanti. L'insieme di competenze e mezzi dell'Istituto si configura come una risorsa distribuita sul territorio (Bologna, Casaccia-Roma, Frascati, Saluggia-Vercelli, Trisaia-Matera), in grado di effettuare rapidamente interventi qualificati. Il complesso dei beni strumentali in dotazione e delle misure effettuate nei siti ENEA costituisce di per sé una rete di controllo che può essere utilizzata anche per scopi generali.

Sorveglianza fisica della protezione e tecniche radiometriche

L'attività di sorveglianza fisica radioprotezionistica svolta in ambito ENEA-IRP è articolato in attività di

- valutazioni preventive e formulazione delle indicazioni per l'implementazione di un corretto sistema di radioprotezione attorno alle sorgenti considerate;
- radioprotezione operativa e valutazioni di dose;
- sorveglianza ambientale e misure radiometriche su matrici ambientali;
- misurazione della contaminazione interna mediante radiometria degli escreti;
- misurazione della contaminazione interna mediante *Whole Body Counter* (WBC);
- servizio di dosimetria esterna personale ed ambientale per tutti i tipi di radiazioni;
- taratura di strumentazione di radioprotezione al livello di centro di taratura SIT;
- qualificazione e ricerca.

Viene inoltre svolta una consistente attività di assistenza all'esercente di impianti e laboratori con rischi da radiazioni nell'analisi di progetti, nella organizzazione del lavoro, nella preparazione dei piani emergenza per quanto attiene alla radioprotezione.

Oltre all'attività di sorveglianza operativa, e in conseguenza di questa, l'IRP svolge tutte le attività di ricerca imposte dalle esigenze strumentali, dosimetriche e modellistiche relative all'adeguamento a nuovi standard di riferimento (decremento dei limiti di dose), alla definizione di nuove grandezze operative, all'utilizzo di nuove sorgenti di radiazioni ed alla estensione delle valutazioni alle

sorgenti naturali di radiazioni (ex Direttiva 96/29 Euratom) o all'incremento delle sensibilità strumentali ove esse risultano critiche in relazione ai limiti di dose o, infine, al miglioramento delle opzioni tecnologiche in relazione al miglioramento della tecnica generalmente disponibile.

Ricerca e innovazione tecnologica

L'attività di radioprotezione, sia in riferimento alla sorveglianza fisica dei lavoratori esposti, sia per quanto concerne la protezione della popolazione in generale e dell'ambiente, richiede un sistematico impegno nella ricerca, momento insostituibile per lo sviluppo delle conoscenze di base e per l'aggiornamento continuo dei metodi operativi.

Presso l'ENEA-IRP sono al momento attive le seguenti linee di ricerca e sviluppo:

- miglioramento ed aggiornamento delle metodiche in dosimetria personale ed ambientale esterna;
- sviluppo di modelli per radioprotezione con metodi sia stocastici (Montecarlo) che analitici in riferimento alla dosimetria personale esterna ed a quella interna;
- metodi, modelli e strumentazione per dosimetria individuale interna in riferimento in particolare ai radioisotopi emittenti radiazioni fotoniche a bassa energia ed alle esposizioni interne da inalazione di particolati contenenti radioisotopi sia naturali che artificiali;
- problemi di radioprotezione in funzione dei progetti connessi agli studi sulla fusione nucleare;
- studio del comportamento dei radioisotopi nell'ambiente, in particolare nel sistema acquatico.

Queste attività sono pienamente inserite nel contesto europeo e godono del collegamento con i maggiori laboratori internazionali. I risultati della attività di ricerca trovano applicazione nei servizi svolti per gli utenti sia interni all'ENEA che esterni, e nelle attività di qualificazione.

Accertamento di qualità

L'ENEA-IRP opera fin dalle origini nel settore dell'Accertamento di Qualità (*Quality Assurance*) con specifico riferimento ai seguenti settori:

- monitori di radiazioni (ENEA SIT 29/R);
- catene spettrometriche su matrici ambientali, alimentari, biologiche (partecipazione attiva alle iniziative promosse e coordinate dall'Istituto di metrologia delle radiazioni ionizzanti dell'ENEA - ENEA INMRI);
- metodologie di calcolo della dose personale da rilevazioni ambientali esterne e da matrici biologiche per dosimetria interna;
- sistemi dosimetrici per dosimetria personale ed ambientale (Azione ENEA-EDP);
- sistemi *Whole Body Counter* (WBC) per dosimetria interna (Azione MIDIA);
- metodologie di calcolo della dose interna (in ambito EURADOS);
- metodi di computo dei fattori di dose mediante dosimetria numerica (in ambito EURADOS WG4);
- modelli di trasferimento dei radionuclidi nei corpi acquatici (in ambito UE);
- nuove grandezze di riferimento in dosimetria esterna (in ambito EURADOS).

Qualificazione dei servizi di radioprotezione

A partire dall'entrata in vigore del D.Lgs. 230/95, e ancor più in vista del prossimo recepimento della Direttiva 96/29 Euratom, la qualificazione in campo radioprotezionistico non può più essere

affidata a scelte volontarie, ma deve assumere anche in Italia, come nella generalità dei paesi europei, una connotazione basata su precisi adempimenti. In tema di qualificazione e idoneità di operatori e servizi, infatti, l'art. 38 della Direttiva 96/29 EURATOM recita al comma 3:

Ogni Stato membro prende le disposizioni necessarie per riconoscere l'idoneità

- dei medici autorizzati,
- dei servizi autorizzati di medicina del lavoro,
- dei servizi autorizzati di dosimetria,
- degli esperti qualificati.

A tale fine ogni Stato membro provvede a che sia organizzata la formazione di questi specialisti.

Per servizio autorizzato di dosimetria si intende (Direttiva 96/29 Euratom, art.1):

Struttura preposta alla taratura, alle rilevazioni e all'interpretazione dei singoli dispositivi di monitoraggio o alla misurazione della radioattività nel corpo umano o nei campioni biologici o alla valutazione delle dosi la cui idoneità a tali funzioni è riconosciuta dalle autorità competenti.

Sistemi di riconoscimento della idoneità sono già implementati negli stati dell'Unione Europea, laddove sono ben identificati e riconosciuti gli enti che, in collegamento con l'ente vigilante, provvedono alla qualificazione iniziale e alla periodica verifica della qualità tecnica dei servizi di dosimetria. Nella tabella 22 sono riportati a titolo esemplificativo i dati di base relativi ai servizi di dosimetria personale esterna per corpo intero, indicando se nei diversi paesi è in atto una procedura di "approvazione".

In Italia l'attività di qualificazione e di verifica della affidabilità tecnico-scientifica dei dati dosimetrici è stata svolta finora su base volontaria sia da parte delle istituzioni che la promuovevano - prevalentemente l'Istituto per la Radioprotezione (IRP) dell'ENEA sia da parte degli utilizzatori. In tal modo la qualificazione dei servizi di dosimetria è oggi di fatto assoggettata a procedure che, pur essendo ampiamente validate sul piano tecnico-scientifico, non sono codificate né riconosciute dalla legge in vigore.

La metodica di qualificazione dei servizi basata sull'interconfronto permette di accreditare i servizi stessi in termini di precisione e accuratezza. Molti centri appartenenti alle reti di sorveglianza nazionali e locali hanno partecipato nel corso degli anni a questo tipo di qualificazione, migliorando progressivamente la qualità della rete radioprotezionistica italiana nel suo complesso.

Le principali azioni, promosse da ENEA-IRP in collaborazione con numerosi attori nazionali e internazionali, riguardano i seguenti campi:

- sistemi dosimetrici per dosimetria personale ed ambientale esterna (azione promossa da ENEA-EDP);
- sistemi Whole Body Counter (WBC) per dosimetria interna (Azione MIDIA);
- metodologie di valutazione della dose interna (in ambito EURADOS)

In particolare il Gruppo Esperti di Dosimetria Personale dell'ENEA (ENEA-EDP) ha raccolto i principali esperti nazionali, operando soddisfacentemente per diversi decenni nel campo della qualificazione dei servizi di dosimetria personale esterna. Tuttavia è ormai chiaro che un aspetto così delicato per la qualità della radioprotezione operativa non può più continuare ad essere demandato alla buona volontà di un ente o di un gruppo di esperti e alla volontarietà della adesione.

Tabella 22 – Caratteristiche dei servizi di dosimetria personale esterna per corpo intero nei paesi europei.

Paese membro	Numero servizi dosimetrici	Procedura di approvazione
Belgio	9	NO
Danimarca	3	SI
Finlandia	3	SI
Francia	7 +3 piccoli	SI

Germania	6	SI
Irlanda	1 + 2 piccoli	SI
Italia	Circa 100	NO (solo su base volontaria)
Olanda	6	SI
Regno Unito	34	SI
Spagna	2 + 20 piccoli	SI
Svezia	12	SI
Svizzera	10	SI
Austria	4	SI

Necessità di codifica delle procedure di qualificazione

In considerazione delle esigenze del Paese e degli obblighi derivanti dal recepimento della direttiva 96/29 Euratom, è ormai indispensabile inquadrare le attività di qualificazione nella normativa, anche per garantire da concorrenza sleale i servizi che si sottopongono a verifica e mantenere ad un livello adeguato le attività tecniche di radioprotezione nel Paese. La via dell'impegno volontario non è più percorribile, anche perché non permette il confronto dei dati di dose di ambienti di lavoro diversi e comporta di fatto la penalizzazione delle iniziative qualificate a vantaggio di quelle che non ritengono di sottoporsi all'onere della verifica di affidabilità.

In assonanza con quanto avviene in altri paesi europei, deve essere presente sul campo un'unità preposta alla qualificazione per gli aspetti tecnico-scientifici della radioprotezione operativa, caratterizzata, come elemento qualificante, dallo svolgimento di attività di servizio aventi elevati livelli di qualificazione che possano essere di riferimento a livello nazionale. Lo svolgimento delle predette attività di servizio permette infatti sia di avere una conoscenza concreta e diretta delle problematiche operative, sia di garantire, grazie all'autonomia così acquisibile, il necessario livello di indipendenza, imparzialità e trasparenza. L'integrazione fra la componente operativa, le dosimetrie e le attività di qualificazione e ricerca ha mostrato notevoli vantaggi sia in termini di ottimizzazione delle risorse che in termini di miglioramento complessivo delle valutazioni di dose. Va in ogni caso garantita l'autonomia e la trasparenza delle attività di riferimento in radioprotezione affinché le azioni ed i risultati godano di un elevato grado di autorevolezza ed accettabilità presso gli organismi di vigilanza, gli utilizzatori, i lavoratori ed il pubblico.

Esigenze operative

Sulla base delle competenze e delle esperienze operative acquisite, l'Istituto per la Radioprotezione IRP dell'ENEA costituisce un polo di aggregazione di competenze fondamentale per la costituzione di un riferimento tecnico-scientifico nazionale per la promozione e la verifica della qualità delle attività tecniche afferenti alla radioprotezione, nella prospettiva che la qualità nelle misure e nelle valutazioni che servono alla stima di dose sia resa obbligatoria. L'acquisizione di un nuovo ruolo richiederà tuttavia una attenta analisi della necessità di risorse soprattutto umane, che già oggi risultano sottodimensionate per i compiti di Istituto.

I principali problemi a breve e medio termine derivano dalla riduzione numerica delle risorse umane causato da numerosi pensionamenti e dalla concomitante difficoltà di acquisire nuovo personale. Ciò può comportare la perdita di competenze importanti, difficili da ricostruire, e potrebbe indurre a contrarre le attività su quanto è indispensabile di momento in momento, a scapito di una impostazione in grado di fornire risposte adeguate in tempi utili.

Tra i problemi in via di risoluzione va citato l'aggiornamento delle capacità strumentali nelle principali attività, dopo un lungo periodo di mancati investimenti nei laboratori.

I punti di forza attuali derivano dal recente accorpamento nell'Istituto per la Radioprotezione delle competenze e dei mezzi di radioprotezione disponibili nei centri ENEA, in precedenza distribuiti fra numerose e diverse strutture. Tale unificazione, consentendo di utilizzare con maggiore efficienza le

risorse disponibili, ha presentato numerosi vantaggi tecnici ed economici. Tra questi hanno rilevanza:

- una più chiara attribuzione di compiti e responsabilità, con ricadute positive sulla chiarezza e trasparenza delle attività svolte e sulla motivazione del personale;
- la possibilità di specializzare alcune attività complesse e costose in un solo Centro, che svolga le funzioni di polo qualificato di riferimento per le attività operative svolte in tutto l'Ente, evitando duplicazioni e garantendo nel contempo l'affidabilità dei dati ed i necessari collegamenti nazionali ed internazionali;
- la possibilità di ottimizzare l'utilizzazione delle risorse umane e strumentali disponibili, che vengono largamente impiegate in maniera integrata rispetto alle esigenze dei vari Centri dell'Ente.

RUOLO E FUNZIONI DEGLI ESERCENTI DI IMPIANTI NUCLEARI

La radioprotezione in ambito ENEA

Finalità e principi generali

Con la necessità di operare sui reattori TRIGA e TAPIRO (Casaccia) e di gestire gli impianti del ciclo del combustibile (EUREX a Saluggia, ITREC alla Trisaia, IPU e OPEC alla Casaccia), l'ENEA è attualmente il maggiore esercente nazionale di impianti nucleari non energetici. Il reattore termico TRIGA e il reattore veloce TAPIRO, insieme al reattore TRIGA dell'Università di Pavia, sono attualmente gli unici reattori in esercizio in Italia, con lo scopo di condurre attività di ricerca che interessano il campo sanitario, e sono finalizzate tra l'altro alla messa a punto di metodiche radioterapeutiche (reattore TAPIRO) e alla produzione di radioisotopi a vita breve (reattore TRIGA). La FN S.p.A., partecipata dall'ENEA, esercisce inoltre un impianto industriale di fabbricazione del combustibile nucleare attualmente in corso di disattivazione.

I problemi di radioprotezione posti dall'esercizio dei reattori sperimentali sono quelli usuali nell'impiego di sorgenti complesse di radiazioni ionizzanti, con particolare attenzione alle nuove esigenze connesse con l'effettuazione di nuove esperienze o di nuove linee di ricerca. Analoga è la situazione per gli impianti del ciclo del combustibile, per i quali è in corso una transizione dalle problematiche di radioprotezione tipicamente connesse con l'esercizio a quelle proprie della disattivazione e del successivo smantellamento degli impianti. In queste nuove attività, così come in quelle relative alla gestione dei rifiuti risultanti da esse o dalla attività pregressa, il ruolo della radioprotezione assume un carattere di fondamentale rilevanza.

La molteplicità delle restanti attività con rischio da radiazioni ionizzanti svolta nei laboratori dell'ENEA, che coprono di fatto gran parte delle applicazioni delle radiazioni in ambiente extrasanitario, comporta un'articolazione particolarmente ricca e conseguentemente la disponibilità di risorse umane e strumentali atte ad affrontare le più varie esigenze di radioprotezione, originate da sorgenti e macchine radiogene dei più diversi gradi di complessità, fino agli acceleratori di particelle e agli impianti di ricerca per la fusione nucleare.

Gli aspetti di radioprotezione connessi con l'attività di esercente sono affrontati dall'ENEA tramite i suoi esperti qualificati incaricati attraverso l'estensiva applicazione di prassi operative ampiamente validate a livello internazionale, attribuendo massima importanza agli aspetti più sofisticati della radioprotezione, come ad esempio l'applicazione del principio ALARA (*As Low As Reasonably Achievable*).

Organizzazione

Sul piano operativo l'attività radioprotezionistica ENEA è interamente affidata all'Istituto della Radioprotezione, IRP, cui viene garantita la più completa autonomia. L'organizzazione è articolata nelle funzioni già analiticamente indicate nel paragrafo riguardante il ruolo dell'IRP, che coprono tutti gli aspetti della radioprotezione operativa, comprese le principali tecniche complementari ad essa.

In tutti i siti ENEA è dedicata particolare attenzione alla pianificazione degli interventi connessi con le emergenze radiologiche, in modo da garantire nel modo più completo la radioprotezione della popolazione interessata e la tutela dell'ambiente. È in corso nell'Ente una forte integrazione delle risorse dedicate alla pianificazione delle emergenze, superando una separatezza forse eccessiva tra i diversi Centri che si era venuta accentuando nel passato. Questa scelta consente di valorizzare al massimo le competenze interne e di creare una risorsa da rendere disponibile al Paese anche nel caso di emergenze radiologiche non connesse con le attività dell'ENEA. La collocazione geografica dei Centri ENEA (Piemonte, Emilia, Lazio, Basilicata) offre una copertura quasi completa del territorio nazionale, anche in considerazione del fatto che le reti di sorveglianza dell'ENEA si integreranno sempre più con quelle gestite da altri operatori.

Analoga integrazione di competenze e di metodiche di misura o di valutazione è in corso nell'ambito della radioprotezione operativa dei lavoratori e della popolazione anche in condizioni normali. Con il perfezionamento di questo processo di integrazione si conta di valorizzare al massimo le risorse tecnico-scientifiche che si sono venute sviluppando nel corso degli anni nelle diverse realtà dell'ENEA, anche se in un modo forse non sempre equilibrato. Concorre a tale progetto la creazione di punti di eccellenza nelle varie discipline radioprotezionistiche, che offrano un punto di riferimento non solo agli operatori di radioprotezione all'interno dell'ENEA ma anche ad altri operatori presenti nel Paese.

La forte connessione esistente tra l'ENEA nella sua veste di esercente e l'Istituto per la Radioprotezione, nella sua veste di organo di promozione e qualificazione della radioprotezione in Italia, costituisce una opportunità unica di sinergia tra gli aspetti operativi e quelli innovativi.

La radioprotezione in ambito ENEL

Finalità e principi generali

In seguito alla ridefinizione delle linee di politica energetica del Paese, l'ENEL si è dotato di una apposita struttura tecnico-gestionale (Struttura Gestione Impianti Nucleari, SGN) cui sono state affidate, quale principale missione, le attività relative al *decommissioning* delle quattro centrali elettronucleari dismesse (Garigliano, Latina, Trino Vercellese e Caorso), inclusa la definizione e l'attuazione della strategia di chiusura del ciclo del combustibile.

L'organizzazione di radioprotezione dell'SGN è gestita da una struttura funzionale centrale avente compiti di coordinamento, indirizzo e controllo delle unità di radioprotezione delle singole centrali. Tale struttura, denominata "Sicurezza impianti", ha responsabilità nei settori della Sicurezza nucleare, della Fisica sanitaria, della Sicurezza del lavoro e della Garanzia di qualità.

Per ottemperare agli obblighi della sorveglianza fisica presso ciascuna centrale dell'ENEL opera un'apposita sezione che ha compiti ed organizzazione molto simili a quelli che hanno caratterizzato la fase di esercizio degli impianti. In effetti, le prescrizioni e gli altri obblighi di legge in materia di radioprotezione sono rimasti operanti nella transizione dall'esercizio alla disattivazione anche negli impianti dai quali è stato allontanato il combustibile irraggiato, pur essendosi drasticamente ridotto l'inventario di radioattività. Ciò anche in considerazione del fatto che molte operazioni

caratteristiche del processo di disattivazione - quali ad esempio quelle di decontaminazione e determinazione dell'inventario di radioattività, quelle di estrazione e condizionamento dei rifiuti radioattivi di processo - risultano particolarmente delicate ed impegnative dal punto di vista radioprotezionistico.

Organizzazione

L'organizzazione di radioprotezione ENEL impiega risorse qualificate e gestisce un sofisticato complesso di strumentazione di monitoraggio, misure radiometriche e dosimetriche, laboratori chimici e radiochimici, reti di sorveglianza locale della radioattività ambientale, apparati e mezzi mobili per fronteggiare eventuali situazioni anomale che possano avere conseguenze sull'ambiente esterno. Le attività di radioprotezione sono gestite con personale ENEL, ad eccezione dei Medici autorizzati, che sono consulenti esterni. La responsabilità dell'organizzazione di Fisica Sanitaria nelle centrali ENEL è affidata ad un Esperto qualificato di 3° grado che svolge i compiti previsti dal D.Lgs. 230/95 e dalle altre prescrizioni di legge in materia di sorveglianza fisica della protezione, avvalendosi della struttura dell'Area Fisica Sanitaria e Chimica. Per le funzioni attribuitegli dalla legge l'esperto qualificato gode della piena autonomia tecnico-professionale ed ha rapporti diretti con il Capo Centrale.

All'Area Fisica Sanitaria e Chimica è affidato il compito di fornire l'assistenza specialistica nel campo chimico, radiochimico e radioprotezionistico alle altre sezioni in linea, di assicurare l'esatto funzionamento dei dispositivi di protezione, di dare le istruzioni e prescrizioni necessarie a garantire la sorveglianza fisica dei lavoratori e delle popolazioni dalle radiazioni ionizzanti. L'Area sviluppa le proprie competenze nei campi della Fisica Sanitaria, della Chimica e Radiochimica e nel campo ambientale. In tale struttura opera circa il 20% del personale delle Centrali. Complessivamente operano nel campo radioprotezionistico circa 80 addetti, 9 dei quali sono laureati (tutti con la qualifica di Esperto qualificato di 3° grado) e 15 diplomati (9 dei quali in possesso del titolo di Esperto qualificato di 2° grado).

Il contesto nel quale l'ENEL si trova a gestire il processo di disattivazione delle sue quattro centrali nucleari è quello di un progressivo e rapido disimpegno di quasi tutte le strutture in grado di offrire servizi in campo nucleare. Questo scenario ha costretto l'ENEL a conservare e ad accrescere le proprie competenze specialistiche anche per far fronte alle mutate problematiche di radioprotezione, proprie del nuovo assetto degli impianti. In particolare, per l'esecuzione delle attività di disattivazione già completate e di quelle in corso, nei casi in cui è stato necessario il ricorso ad imprese esterne, è stata svolta dalla Organizzazione di radioprotezione di centrale la sorveglianza fisica degli addetti, comprendente le procedure di lavoro in zona controllata, la dosimetria personale, i controlli di eventuale contaminazione interna mediante WBC, il monitoraggio delle aree di lavoro, ecc.

Si è inoltre provveduto a migliorare e a valorizzare le risorse interne di radioprotezione con una serie di interventi mirati, tesi al raggiungimento della massima autonomia funzionale dell'Ente nel campo della radioprotezione, e nel contempo si è provveduto ad integrare ed a specializzare alcune funzioni nelle centrali. Esse hanno interessato la costituzione dei seguenti servizi qualificati :

- Servizio centralizzato di dosimetria esterna, operante presso la centrale di Latina, utilizzabile dalle quattro centrali nucleari ENEL;
- Centro di taratura e calibrazione della strumentazione di radioprotezione operante presso la centrale nucleare di Caorso;
- Centro di analisi e determinazione di radionuclidi di difficile rivelabilità, operante presso la centrale nucleare di Trino

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE PER L'OTTIMIZZAZIONE DEL SISTEMA DI RADIOPROTEZIONE

I vincoli esterni

Come già detto in precedenza, la chiusura delle centrali nucleari e delle installazioni del ciclo del combustibile nucleare non ha attenuato l'esigenza di garantire l'esistenza di un sistema di radioprotezione efficiente, affidabile e trasparente. Detta esigenza permane intatta in considerazione della necessità di gestire l'eredità del nucleare pregresso, dell'estensivo sviluppo dell'uso delle radiazioni in diversi settori industriali, medico-sanitari e della ricerca, e infine della necessità di assicurare un dispositivo adeguato a fronteggiare il traffico illecito di materiali nucleari e rifiuti radioattivi e le possibili situazioni di emergenza che potrebbero derivare da incidenti nucleari di portata transfrontaliera.

Anche se la sospensione delle attività nucleari nel settore energetico ha ridimensionato gli impegni del sistema di radioprotezione, gli impegni residui restano dunque di rilevante entità. In particolare

- è necessario gestire problematiche di rilevante entità, quali la disattivazione degli impianti nucleari e la gestione dei rifiuti radioattivi, in merito alle quali occorrerà non solo intensificare le attività di controllo, ma anche esercitare continue e pressanti azioni di stimolo per l'attuazione delle necessarie iniziative di messa in sicurezza;
- perdurano gli impieghi dei radioisotopi e delle radiazioni ionizzanti a scopi non energetici;
- si moltiplicano episodi di traffico illecito di materiale nucleare (tipici i recenti esempi di barre di combustibile ad uranio arricchito per reattori di ricerca, nonché di rottami metallici contaminati);
- è necessario mantenere viva nel Paese la cultura della radioprotezione e della sicurezza nucleare, assicurando la preparazione delle risorse umane necessarie all'assolvimento della molteplicità dei compiti in precedenza illustrati;
- appaiono sempre più pressanti le esigenze di protezione dalle esposizioni da sorgenti naturali, in special modo da radon.

Nei prossimi anni il sistema nazionale di radioprotezione dovrà inoltre confrontarsi con alcuni importanti vincoli esterni:

- la necessità di rivedere la normativa nazionale di radioprotezione alla luce dei più aggiornati standard di protezione, così come precisati nella Direttiva 96/29 Euratom;
- la necessità di snellire gli iter autorizzativi, eliminando i ritardi nell'adozione dei provvedimenti;
- i tempi lunghi ipotizzabili per la realizzazione del deposito radioattivo nazionale;
- la conseguente progressiva perdita di personale qualificato;
- il permanere della situazione di diffidenza per le attività nucleari di tutti i tipi.

L'aggiornamento del quadro normativo e operativo

Il sistema nazionale per la sicurezza nucleare e la radioprotezione è attualmente stabilito e regolato da leggi e decreti specifici, che recepiscono e rendono operative le Direttive emesse dal Consiglio dell'Unione Europea fino al 1992. Il quadro normativo dovrà tuttavia essere aggiornato, entro il 13 maggio 2000, col recepimento della nuova Direttiva 29/96 Euratom. Il necessario intervento legislativo costituisce una preziosa occasione per adeguare il quadro normativo e regolamentare nazionale agli standard tipici di altri paesi europei. Condizione necessaria perché questo adeguamento sia effettivo è che il recepimento della nuova direttiva ne trasferisca integralmente

nella normativa nazionale anche gli aspetti più innovativi, specie quelli relativi ai criteri di eliminazione.

Assume particolare rilevanza, per le sue implicazioni programmatiche, operative e progettuali, la predisposizione di un preciso quadro regolamentare cui possano riferirsi le attività di sistemazione dei rifiuti nucleari e di disattivazione degli impianti, in termini ad esempio di caratteristiche dei manufatti risultanti o delle modalità di deposito o di smaltimento. Infatti le numerose azioni in corso in questo campo conservano integra la propria natura propositiva e di ricerca, ma non possono sostituire un insieme di specifiche consolidato.

Anche in considerazione degli obblighi derivanti dal recepimento della Direttiva 96/29 Euratom, è necessario che l'Italia si doti di un Ente tecnico-scientifico di riferimento preposto alla qualificazione dei servizi di dosimetria sulla base di procedure codificate, valorizzando le attività svolte finora su base volontaristica da varie organizzazioni, tra cui principalmente l'Istituto per la Radioprotezione (IRP) dell'ENEA. La codifica delle procedure di qualificazione servirà, oltre che a mantenere ad alto livello le attività tecniche di radioprotezione nel Paese, anche a regolare il mercato dei servizi, tutelando tra l'altro i più qualificati di essi da forme di concorrenza sleale.

L'Istituto per la Radioprotezione (IRP) dell'ENEA si propone di contribuire in modo determinante alle iniziative per soddisfare alle esigenze del paese in questo settore.

E' indispensabile che all'aggiornamento del quadro normativo, regolamentare e operativo corrisponda un significativo snellimento delle procedure di autorizzazione.

Operatività degli esercenti

Con la necessità di operare i propri impianti, l'ENEA è attualmente il maggiore esercente nazionale di impianti nucleari non energetici. La necessità di mantenere una cospicua attività operativa radioprotezionistica, affidata all'Istituto per la Radioprotezione (IRP), comporta per l'Istituto stesso una opportunità unica di sinergia tra aspetti operativi e aspetti innovativi, ferma restando la garanzia della più completa autonomia.

Sulla base dei particolari requisiti di operatività legati alla fase di *decommissioning* delle centrali nucleari emerge in ambito ENEL la necessità da un lato di mantenere e se possibile esaltare i caratteri di autonomia dell'organizzazione di radioprotezione dell'SGN.

Per ambedue le realtà considerate a livello di esercente, accanto a questa esigenza di autonomia organizzativa delle strutture di radioprotezione appare evidente l'indispensabilità di una programmazione delle risorse e delle competenze specialistiche a breve e medio termine che tenga conto della disponibilità attuale del personale e delle esigenze future, per definire le necessarie azioni di adeguamento e di formazione.

Una rilevante problematica che richiede idonei interventi è quella connessa alla classificazione del materiale solido proveniente dalle zone controllate.

Normalmente il materiale solido che si trova all'interno della zona controllata di una centrale è considerato potenzialmente radioattivo, anche se frequentemente i livelli di attività risultano molto bassi, e talvolta inferiori ai livelli di attività naturale presenti in alcuni materiali di uso comune.

D'altra parte la gestione del materiale radioattivo - o classificato come tale - è soggetta a procedure molto complesse e notevolmente più onerose sul piano economico e gestionale rispetto alle procedure seguite per il materiale convenzionale. Per evitare di sostenere oneri, che solo apparentemente si possono estrinsecare in un miglioramento della protezione della popolazione, sarebbe utile riclassificare come non radioattivo il materiale solido caratterizzato da bassissimi livelli di radioattività, operazione che richiede tuttavia una preventiva definizione di livelli di radioattività (*livelli di clearance*) al di sotto dei quali il materiale può essere rilasciato senza particolari vincoli di natura radioprotezionistica.

Da vari anni è in corso presso gli organismi nazionali, comunitari e internazionali un intenso dibattito sulla definizione di valori di contaminazione superficiale o di concentrazione che possano

essere assunti come idonei a consentire il rilascio incondizionato dei materiali. Indicazioni di questo tipo non sono tuttavia ancora recepite nella normativa nazionale. La soluzione di questo nodo normativo, le cui ricadute erano già rilevanti nel periodo in cui le centrali nucleari dell'ENEL erano in esercizio, assume importanza ancora maggiore nella fase attuale, nella quale gli impianti sono avviati al decommissioning e allo smantellamento.

Attività di ricerca

Per mantenere, valorizzare ed aggiornare la cultura della radioprotezione e della sicurezza nucleare a supporto delle attività di protezione operativa è necessario il continuo aggiornamento delle conoscenze e delle competenze nei settori specifici della sicurezza dei reattori, della gestione dei rifiuti radioattivi, della disattivazione degli impianti e della radioprotezione. Questo aggiornamento può derivare solo da una continuità di impegno nelle attività di ricerca.

In particolare l'attività di radioprotezione richiede una sistematica attività di ricerca per lo sviluppo delle conoscenze di base e per l'aggiornamento continuo dei metodi e dei modelli sperimentali. A questo scopo vanno salvaguardate ed incrementate sia le attività di ricerca finalizzate alla pratica radioprotezionistica, principalmente accentrate in ENEA-IRP, sia le ricerche volte alla protezione della popolazione per quanto riguarda i radionuclidi naturali ed artificiali e l'esposizione medica, alle quali l'ISS fornisce un contributo primario.

Ricambio generazionale e formazione

Il progressivo depauperamento delle risorse umane dedicate alla radioprotezione ha ormai assunto proporzioni tali da richiedere interventi urgenti. Questa tendenza, se non interrotta, potrebbe comportare la perdita di competenze strategiche difficili da ricostituire, e potrebbe costringere a contrarre l'attività di radioprotezione. Sarebbe questa la fine di ogni attività di largo respiro nel campo della promozione e della qualificazione, con conseguente emarginazione dagli sviluppi in ambito internazionale, non solo in campo normativo ma anche in quello tecnico-operativo.

Anche se in Italia sono tuttora presenti livelli di competenza elevati e dotati dei necessari collegamenti internazionali, si continua a registrare nel settore specifico della sicurezza nucleare e della radioprotezione la perdita di personale esperto e specializzato, perdita dovuta al pensionamento, al trasferimento ad altri incarichi e alla mancanza di ricambio generazionale. È necessario evitare che il sistema si trovi nell'impossibilità di assolvere ai suoi compiti, dando slancio alle azioni di formazione per tutte le componenti di questa disciplina ed avviando un processo di reperimento di nuove leve.

La necessità di ricambio generazionale degli addetti sussiste anche per il personale tecnico addetto all'esercizio di impianti nucleari, ed assume particolare significato per le attività connesse con la sistemazione dei rifiuti e lo smantellamento degli impianti, che si svolgeranno su un arco temporale dell'ordine dei decenni.

Per ambedue le predette esigenze gli esercenti devono poter contare sulla disponibilità di un adeguato sistema di formazione in radioprotezione a livello sia di tecnici diplomati sia di laureati, che possa coprire la duplice esigenza della formazione di base e di quella permanente (mediante corsi brevi di riqualificazione),

anche con l'ausilio del sistema universitario. Analoga esigenza è sempre più avvertita anche per gli organismi di vigilanza e di qualificazione tecnico-scientifica nel campo della radioprotezione.

Reti di rilevamento e informazione

Sotto la spinta propulsiva dell'ANPA e del Ministero della Sanità è in corso l'allestimento di una articolata Rete nazionale di rilevamento della radioattività ambientale ad integrazione delle reti locali già esistenti (ENEL, ENEA, Università, ecc.), cui si affianca una Rete di allarme per il rilevamento in tempo reale di eventi anomali o incidentali. È comunque auspicabile che vengano meglio puntualizzati i problemi attinenti alla gestione ed elaborazione dei dati, che devono essere di competenza di un organismo centrale, così come ad un organismo centrale deve competere la gestione e la diffusione di un'informazione al pubblico coordinata, corretta e chiara.

APPENDICE

I RIFERIMENTI DELLA RADIOPROTEZIONE

Gli operatori internazionali

- ***International Commission for Radiological Protection (ICRP)***. Commissione scientifica indipendente formata dai massimi esperti internazionali nel campo della radioprotezione. Fondata nel 1928 sotto altra denominazione per decisione del Secondo congresso internazionale di radiologia, nel 1950 fu rifinalizzata e assunse l'attuale denominazione. La Commissione pubblicò il suo primo rapporto nel 1928, mentre il primo rapporto della serie attuale (pubblicazione n. 1) risale al 1961. L'autorevolezza della Commissione è confermata dal ruolo determinante svolto dalle sue raccomandazioni per la definizione di tutte le normative nazionali e internazionali.
- ***United Nations Scientific Committee on the Effects of the Atomic Radiation (UNSCEAR)***. Comitato permanente di esperti internazionali istituito dall'ONU nel 1955 con il compito di studiare i livelli, gli effetti e i rischi delle radiazioni ionizzanti. Il Comitato raccoglie e sottopone a revisione critica le conoscenze sulla radioattività ambientale e sugli effetti delle radiazioni, pubblicando approfonditi rapporti all'Assemblea generale dell'ONU.
- ***NEA Committee on Radiation Protection and Public Health (CRPPH)***. Comitato tecnico-scientifico istituito presso l'Agenzia nucleare (*NEA, Nuclear Energy Agency*, fondata nel 1958) dell'OCSE (l'Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico, che raggruppa i 25 paesi più sviluppati del mondo) con lo scopo di sviluppare e diffondere la cultura della radioprotezione nei paesi membri attraverso la cooperazione internazionale.
- ***International Atomic Energy Agency (IAEA)***. Agenzia specializzata dell'ONU (Organizzazione delle Nazioni Unite) istituita per promuovere e controllare a livello internazionale lo sviluppo delle applicazioni pacifiche dell'energia nucleare. Ad essa è anche attribuito il compito di sorvegliare l'attuazione delle norme del Trattato di Non Proliferazione nucleare (TNP) attraverso un'intensa e continua attività di monitoraggio e controllo delle installazioni e degli impianti nucleari di tutto il mondo.
- ***World Health Organisation (WHO)***. Agenzia specializzata istituita dall'ONU con compiti che riguardano, a livello internazionale, la promozione e la tutela della salute.
- ***International Labour Office (ILO)***. Agenzia specializzata istituita dall'ONU con compiti che riguardano, a livello mondiale, il controllo e il mantenimento delle condizioni di sicurezza delle attività lavorative.

Gli operatori nazionali

- Ministero dell'Industria
 - Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente (ENEA)
 - Ministero dell'Ambiente
-

- Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (ANPA)
- Agenzie Regionali per la Protezione dell'Ambiente (ARPA)
- Ministero della Protezione Civile
- Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco
- Ministero della Sanità
- Istituto Superiore di Sanità (ISS)
- Istituto superiore per la prevenzione e per la sicurezza del lavoro (ISPESL)
- Aziende Sanitarie Locali (ASL)
- Ministero del lavoro
- Ispettorato Provinciale del Lavoro

Le convenzioni internazionali

La dimensione internazionale del problema della radioprotezione è universalmente riconosciuta, e ha dato luogo negli ultimi vent'anni (soprattutto dopo il disastro di Chernobyl) alla definizione di numerose convenzioni e trattati che sono stati ratificati e recepiti (o in via di recepimento) in tutte le normative nazionali. Ecco i più recenti.

- *Convention on Early Notification of a Nuclear Accident* (1986). Obbliga gli stati aderenti, ospitanti impianti e attività a rischio di contaminazione radioattiva, a dare tempestiva comunicazione di ogni evento che comporti o possa comportare liberazione di sostanze radioattive e contaminazione transfrontaliera.
- *Convention on Assistance in the Case of Nuclear Accident or Radiological Emergency* (1986). Obbliga gli stati aderenti a partecipare attivamente con il loro diretto contributo operativo a riportare sotto controllo eventuali emergenze radiologiche, allo scopo di minimizzarne le conseguenze e di proteggere la salute dei cittadini, la proprietà privata e l'ambiente.
- *Convention on Nuclear Safety* (1994). Obbliga gli stati aderenti che dispongono di impianti e installazioni nucleari ad assumere in sede nazionale e a rendicontare in sede internazionale (IAEA) tutte le misure legislative, regolamentari e tecniche necessarie per garantire la sicurezza delle installazioni e il controllo di eventuali condizioni di emergenza.
- *Convention on the Safety of Spent Fuel and of the Radioactive Waste Management* (1997). Obbliga gli stati aderenti ad assumere in sede nazionale e a rendicontare in sede internazionale (IAEA) tutte le misure legislative, regolamentari e tecniche necessarie per garantire la sicurezza del combustibile nucleare irraggiato e dei rifiuti radioattivi.

Gli obblighi previsti dalle convenzioni internazionali sono stati tradotti anche in sede europea in una serie di regolamenti e direttive già recepite o in via di recepimento nei paesi membri. Sulla base

delle competenze contemplate dal trattato istitutivo della Comunità Europea dell'Energia Atomica (CEEa o Euratom) del 25 marzo 1957, il Consiglio d'Europa e la Commissione Europea stabiliscono regolamenti e direttive, prendono decisioni e formulano raccomandazioni o pareri. L'art. 161 del trattato illustra il significato dei diversi strumenti legislativi europei:

- Il regolamento ha portata generale, è obbligatorio in tutti i suoi elementi e direttamente applicabile in ciascuno degli stati membri.
- La direttiva vincola lo stato membro cui è rivolta per quanto riguarda il risultato da raggiungere, salva restando la competenza degli organi nazionali in merito alla forma e ai mezzi di attuazione.
- La decisione è obbligatoria in tutti i suoi elementi per i destinatari ad essa designati.
- Le raccomandazioni e i pareri non sono vincolanti.

I riferimenti normativi

Principali indicazioni e raccomandazioni a livello internazionale ed europeo

- Raccomandazione della Commissione del 21 febbraio 1990 sulla tutela della popolazione contro l'esposizione al radon in ambienti chiusi (90/143/Euratom) GU n. L 80 del 27 Marzo 1990, p. 26.
- IAEA "International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for Safety of Radiation Sources", Safety Series n. 115 IAEA, Vienna, 1996.
- Radioprotezione No 88: Raccomandazioni per l'attuazione del titolo VII della Direttiva europea che stabilisce le norme fondamentali, riguardante un aumento significativo dell'esposizione dovuta alle sorgenti di radiazioni naturali, Lussemburgo 1997.
- Comunicazione della Commissione riguardante l'applicazione della Direttiva 96/29/Euratom del Consiglio del 13 maggio 1996 che stabilisce le norme fondamentali di sicurezza relative alla protezione sanitaria della popolazione e dei lavoratori contro i pericoli derivanti dalle radiazioni ionizzanti. Documento COM(98)87 def. del 23 febbraio 1998

Principali normative vincolanti a livello europeo

- Trattato Istitutivo della Comunità Europea dell'Energia Atomica (CEEa o Euratom) del 25 marzo 1957.
- Direttiva 96/29/EURATOM del consiglio del 13 maggio 1996, che stabilisce le norme fondamentali di sicurezza relative alla protezione sanitaria della popolazione e dei lavoratori contro i pericoli derivanti dalle radiazioni ionizzanti (GU n. L 159 del 29/6/1996 pag. 1).
- Direttiva del Consiglio 97/43/EURATOM del 30 giugno 1997, riguardante la protezione sanitaria delle persone contro i pericoli delle radiazioni ionizzanti in connessione ad esposizioni mediche e che abroga la direttiva 84/466/Euratom (GU n. L 180 del 9/7/1997 pag. 22).

Principali norme Italiane

- Decreto Legislativo 17 marzo 1995 n. 230 "Attuazione delle Direttive Euratom 80/836, 84/467, 84/466, 89/618, 90/641, e 92/3 in materia di radiazioni ionizzanti". SO alla GURI n. 136 del 13/6/1995 n. 74. Nel D.Lgs. 230/95 è prevista l'emanazione di 40 diversi decreti ministeriali o

DPCM di attuazione; alcuni di essi, principalmente di competenza del Ministero della Sanità, sono stati già emanati.

- Legge 19/1/1998 n. 10 "Ratifica ed esecuzione della convenzione sulla sicurezza nucleare, fatta a Vienna il 20 Settembre 1994" (GU n. 28 del 4/2/1998).

La radioprotezione in Internet

Internet costituisce una fonte preziosa di contatto e documentazione sulla radioprotezione e sull'attività degli organismi nazionali e internazionali coinvolti nella radioprotezione. Una guida bibliografica particolarmente approfondita è reperibile presso il sito <http://www.radscice.com/dowd.html>. Si riportano di seguito alcuni dei riferimenti ivi proposti.

Operatori nazionali e internazionali

International Atomic Energy Agency (ONU)
<http://www.iaea.or.at/>

World Health Organization (ONU)
<http://www.who.ch/>

International Commission for Radiological Protection (ICRP)
<http://www.who.ch/programmes/ina/ngo/ngo-44.htm>

United Kingdom National Radiation Protection Board
<http://www.nrpb.org.uk/>

United States National Council on Radiation Protection and Measurement
<http://www.ncrp.com/>

RadEFX, Radiation Health Effects Research Resource (Baylor College of Medicine)
<http://radefx.bcm.tmc.edu/default.htm>

Radiation and Health Physics (University of Michigan Student Chapter of the Health Physics Society)
<http://www.sph.umich.edu/group/eih/UMSCHPS/>

American Academy of Health Physics
<http://phantom.ehs.uiuc.edu/~aahp/>

American Association of Physicists in Medicine
<http://www.aapm.org/>

American Society of Radiologic Technologists
<http://www.asrt.org/>

Canadian Radiation Protection Association
<http://www.safety.ubc.ca/crpa>

European Nuclear Society

<http://www.aey.ch/ens/>

Health Physics Society
<http://www2.hps.org/hps/>

International Radiation Protection Association
<http://www.tue.nl/sbd/irpa/irpahome.htm>

International Society of Radiographers and Radiological Technologists
<http://www.isrtr.org/>

National Registry of Radiation Protection Technologists
<http://www.nrrpt.org/>

Society of Nuclear Medicine
<http://www.snm.org/>

The American Nuclear Society
<http://www.ans.org/>

The Radiological Society of North America
<http://www.rsna.org/>

Agenzie governative statunitensi

Department of Energy Home Page
<http://www.doe.gov/>

Environmental Protection Agency
<http://www.epa.gov/>

Food and Drug Administration Home Page
<http://www.fda.gov/>

FDA Center for Devices and Radiological Health
<http://www.fda.gov/cdrh/cdrhhome.html>

Occupational Safety & Health Administration
<http://www.osha.gov/>

United States Nuclear Regulatory Commission
<http://www.nrc.gov/>

Pubblicazioni

<http://www.tue.nl/sbd/irpa/icrp.htm>

<http://www.iaea.or.at/worldatom/>

<http://www.iaea.or.at/worldatom/inforesource/bulletin/>

Radiation Research, the official journal of the Radiation Research Society
<http://www.cjp.com/radres>

University of Michigan's Student Chapter of the Health Physics Society. Natural Radioactivity
<http://www.sph.umich.edu/group/eih/UMSCHPS/natural.htm>

IAEA Bulletin 39/1 - Radiation and the environment: Assessing effects on plants and animals.
<http://www.iaea.or.at/worldatom/inforesource/bulletin/bull391/linsley.html>

NEA, Radiation Protection Today and Tomorrow
<http://www.nea.fr/html/rp/rp.html>

FDA, Food and Drug Administration. Center for Devices and Radiological Health.
<http://www.fda.gov/cdrh/>

Studi su Chernobyl

International Consortium for Research on the Health Effects of Radiation
<http://radefx.bcm.tmc.edu/icrher/icrher.htm>

Kurchatov Institute's Project "Polyn"
<http://polyn.net.kiae.su/polyn/manifest.html>

IAEA, Ten Years after Chernobyl: What do we really know?
<http://www.iaea.or.at/worldatom/inforesource/other/chernoten/index.html>

Studi su Hiroshima e Nagasaki

Radiation Effects Research Foundation
<http://www.rerf.or.jp/eigo/experhp/rerfhome.htm>

UNITÀ DI MISURA, MULTIPLI, SOTTOMULTIPLI E PREFISSI

Le grandezze fisiche sono normalmente espresse attraverso le rispettive unità di misura. Può tuttavia capitare che un dato sia molto piccolo o molto grande rispetto all'unità di misura fondamentale impiegata.

Ad esempio, esprimendo in Bequerel la radioattività contenuta nel reattore di Chernobyl al momento del disastro si ottiene il valore 280.000.000.000.000.000 Bq, ovvero 28 seguito da sedici zeri.

In casi simili, per semplificare la scrittura e per migliorare la leggibilità del dato, si ricorre alla notazione esponenziale, esprimendo il dato stesso attraverso le potenze di 10.

Con questa notazione lo stesso valore esemplificato in precedenza può essere espresso come $2,8 \times 10^{17}$ Bq: l'esponente di 10 indica il numero delle posizioni di cui occorre spostare la virgola verso destra per avere il valore esplicito del dato.

Analogamente, per esprimere valori molto piccoli rispetto all'unità di misura si impiegano le potenze di 10 con esponente negativo.

Ad esempio, l'espressione $2,8 \times 10^{-17}$ Bq sta ad indicare il valore 0,000000000000000028 Bq: l'esponente di 10 indica il numero delle posizioni di cui occorre spostare la virgola verso sinistra per avere il valore esplicito del dato.

Una ulteriore semplificazione si ottiene utilizzando in luogo delle potenze di 10 i prefissi elencati nella tabella 23 Utilizzando questa notazione il dato esaminato può essere espresso come 280 PBq = 280 peta-Bequerel = 280×10^{15} Bequerel, oppure come 0,28 Ebq = 0,28 exa-Bequerel = $0,28 \times 10^{18}$ Bq.

Tabella 23 - Prefissi utilizzati nella notazione scientifica delle grandezze fisiche

Potenze di 10	Prefisso	Simbolo	Equivalenza
10^{18}	exa-	E	1 EBq =
10^{15}	peta-	P	1 PBq = 1.000.000.000.000.000 Bq
10^{12}	tera-	T	1 TBq = 1.000.000.000.000 Bq
10^9	giga-	G	1 GBq = 1.000.000.000 Bq
10^6	mega-	M	1 MBq = 1.000.000 Bq
10^3	kilo-	k	1 kBq = 1.000 Bq
10^{-3}	milli-	m	1 mBq = 0,001 Bq
10^{-6}	micro-	μ	1 μ Bq = 0,000001 Bq
10^{-9}	nano-	n	1 nBq = 0,000000001 Bq
10^{-12}	pico-	p	1 pBq = 0,000000000001 Bq
10^{-15}	femto-	f	1 fBq = 0,000000000000001 Bq
10^{-18}	atto-	a	1 aBq = 0,000000000000000001 Bq

BIBLIOGRAFIA

1. Bocchicchio F., Campos Venuti G., Nucciatelli C., Piermattei S., Risica S., Tommasino L., Torri G. (ANPA, ISS), "Results of the representative italian national survey on radon indoors", Health Physics, 71, pg. 721-748, 1996.
2. Bocchicchio F., Campos Venuti G., Nucciatelli C., Piermattei S., Risica S., Tommasino L., Torri G. (ANPA-ISS): "Indagine nazionale sulla radioattività naturale nelle abitazioni", 1994.
3. Campos Venuti G., Piermattei S., "Il radon indoors: stato ed evoluzione della normativa", Rapporto ISTISAN 98/3, ISS, Roma, 1998.
4. Commission of the European Communities, DG XI: "Radiation and Radiation Protection", ISBN 92-826-6730-8, Luxembourg, 1994.
5. Faloci C., Lucci F., Susanna A.: "Elementi di fisica sanitaria", 1971.
6. Galli G., Mancini C. (Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Dipartimento di Ingegneria Nucleare e Conversioni di Energia): "Esposizione alla radioattività ambientale", Ingegneria Nucleare e Tecnologie Energetiche, n. 4, 1996.
7. ICRP: Annals of the ICRP n° 50, 1987.
8. ICRP: Annals of the ICRP n° 60, 1990.
9. ICRP: Annals of the ICRP n° 65, 1993.

- 10.NCRP Report n. 27: "Operational Radiation Safety Program. Recommendations of the NCRP", 1998.
 - 11.OCDE-NEA: "Radiation Protection Today and Tomorrow", 1995.
 - 12.Polvani C.: "Elementi di radioprotezione", 1993.
 - 13.Sources and effects of ionizing radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation - UNSCEAR 1993 Report to the General Assembly, UN, New York, 1993.
 - 14.Spezia U.: "Chernobyl. Dieci anni dopo il disastro", Ed. Milo, Roma, 1996
 - 15.UNEP: "Radiation: Doses, Effects, Risks", 1985, tradotto in "Radiazioni, dosi, effetti, rischi", ENEA, 1986.
 - 16.UNSCEAR: Report to the General Assembly. United Nations, New York, 1988.
 - 17.UNSCEAR: Report to the General Assembly. United Nations, New York, 1993.
-