

Il rischio fisico nel settore della bonifica dei siti industriali di origine non nucleare contaminati da radiazioni ionizzanti



Il rischio fisico nel settore della bonifica dei siti industriali di origine non nucleare contaminati da radiazioni ionizzanti

Pubblicazione realizzata da

INAIL

Dipartimento Innovazioni Tecnologiche e Sicurezza degli Impianti, Prodotti ed Insediamenti Antropici

AUTORI

Carmine Zicari

CONTATTI

INAIL - Dipartimento Innovazioni Tecnologiche e Sicurezza degli Impianti,
Prodotti ed Insediamenti Antropici
Via Roberto Ferruzzi, 38/40 - 00143 Roma
dit@inail.it
www.inail.it

© 2016 INAIL
ISBN 978-88-7484-503-3

Gli autori hanno la piena responsabilità delle opinioni espresse nella pubblicazione, che non vanno intese come posizioni ufficiali dell'Inail. Distribuita gratuitamente. Vietata la vendita e la riproduzione con qualsiasi mezzo. È consentita solo la citazione con l'indicazione della fonte.

Indice

1. Introduzione	5
2. Radiazioni ionizzanti	10
2.1 Classificazione delle attività con radiazioni ionizzanti	13
2.2 Modalità di irradiazione	16
3. Rifiuti radioattivi	18
4. Effetti sanitari	23
4.1 Effetti Deterministici	28
4.2 Effetti Stocastici	30
4.3 Effetti Ereditari	31
5. Classificazione delle attività industriali non nucleari con radiazioni ionizzanti	34
5.1 Miniere di fosfati e produzione di fertilizzanti	39
5.2 Miniere di carbone e combustione	45
5.3 Estrazione di Petroli e Gas	46
5.4 Argille, ceramiche e materiali da costruzione	48
5.5 Lavorazione di minerali	50
5.5.1 <i>Piombo</i>	53
5.5.2 <i>Stagno</i>	53
5.5.3 <i>Zinco</i>	54
5.5.4 <i>Alluminio</i>	54
5.5.5 <i>Rame</i>	55
5.5.6 <i>Ferro</i>	56
6. Identificazione del pericolo	57
7. Valutazione del rischio	60
8. Scenari Espositivi	68

9. Gestione del rischio	71
9.1 Classificazione degli ambienti di lavoro	71
9.2 Classificazione dei lavoratori	72
9.3 Dosimetria	73
9.4 Determinazione della concentrazione di radioattività	73
9.5 Gestione dei rifiuti	78
9.5.1 <i>Lo smaltimento dei rifiuti a bassa radioattività (o a vita breve)</i>	80
9.5.2 <i>Lo smaltimento dei rifiuti ad alta attività e a vita lunga</i>	81
9.6 Strategie di bonifica	82
10. Conclusioni	84
11. Glossario / Definizioni	87
12. Bibliografia	91

1. Introduzione

La contaminazione radioattiva dell'ambiente è il risultato di diversi processi, alcuni naturali altri artificiali. La radioattività naturale, di origine cosmica e terrestre, rimane la fonte di esposizione più importante per l'uomo. Le due serie radioattive, con tempi di dimezzamento estremamente lunghi, che dominano la componente radioattiva terrestre, sono quella dell' ^{238}U e quella del ^{232}Th . I radioisotopi che derivano dal decadimento delle due serie sono presenti nella crosta terrestre e rappresentano, se indisturbati, un rischio trascurabile di esposizione radiologica per l'uomo.

Nelle attività industriali non nucleari che prevedono l'utilizzo, la manipolazione e la produzione di sostanze radioattive solitamente sotto forma di residui, si parla di radioattività naturale "human enhanced". Le attività umane che sfruttano queste risorse possono portare ad un aumento delle concentrazioni di questi radionuclidi, soprattutto sotto forma di residui e/o rifiuti, con conseguente aumento delle esposizioni. Sebbene le quantità di radionuclidi nelle materie di lavorazione siano generalmente piccole, tuttavia può presentarsi un pericolo da radiazioni non trascurabile soprattutto in ambito lavorativo. È plausibile, infatti, pensare che i lavoratori possano trascorrere molto tempo in prossimità di stoccaggi di materiale contaminato o possano lavorare in aree con presenza di polveri contaminate. In queste condizioni, potrebbero ricevere dosi significative di radiazioni ionizzanti. Una stima del numero totale dei lavoratori in Europa potenzialmente esposti a contaminazione interna da radiazioni ionizzanti, in virtù della loro attività nell'industria non nucleare, varia tra 5000 e 10000⁴³.

Con NORM, acronimo inglese di Naturally Occurring Radioactive Materials, si indicano i materiali generalmente non considerati radioattivi, ma che contengono radionuclidi naturali in concentrazioni superiori alla media della crosta terrestre. I NORM costituiscono la materia prima, il prodotto o il residuo della lavorazione in numerose attività industriali, nelle quali il rischio radiologico è generalmente incidentale in relazione al processo, ma non elevato.

In Italia tutte le attività che prevedono l'impiego, la manipolazione, la detenzione di sostanze radioattive e la gestione dei rifiuti radioattivi sono regolate dal d.lgs. 230/1995¹ che, in attuazione della Direttiva Euratom 96/29² è stato integrato e modificato dal d.lgs. 241/2000³. Inoltre per ciò che attiene più specificatamente il combustibile nucleare esaurito e i rifiuti radioattivi in generale, si deve fare riferimento al d.lgs. n. 45/2014³² che attua la direttiva quadro 2011/70/Euratom⁵⁴ sulla gestione responsabile e sicura del combustibile nucleare esaurito e dei rifiuti radioattivi, oltre all'ultimo d.lgs. del 7 agosto 2015 che fornisce la nuova classificazione dei rifiuti radioattivi in applicazione proprio dell'art. 5 del d.lgs. n. 45/2014³².

La protezione dei lavoratori dalle radiazioni ionizzanti è disciplinata unicamente dal d.lgs. 230/1995¹, modificato dal d.lgs. 241/2000³, che ha aggiunto il Capo III-bis: "Esposizioni da attività lavorative con particolari sorgenti naturali di radiazioni" e l'Allegato I-bis, relativi alle radiazioni di origine naturale. Il Capo III-bis si applica a

tutte le attività lavorative in cui le radiazioni non derivano dalle materie prime o dai prodotti del processo produttivo, ma da sorgenti naturali: *“Le disposizioni del presente capo si applicano alle attività lavorative nelle quali la presenza di sorgenti di radiazioni naturali conduce ad un significativo aumento dell’esposizione dei lavoratori o di persone del pubblico, che non può essere trascurato dal punto di vista della radioprotezione”*.

I principi generali relativi agli interventi sono stabiliti negli articoli 115 bis e 126 bis del d.lgs. 241/2000³ e si applicano alle diverse fasi di una emergenza radiologica e alle esposizioni prolungate. In particolare, nei due articoli citati, sono considerate le esposizioni prolungate determinate da pratiche o attività lavorative non più in atto che abbiano lasciato contaminazioni ambientali e presenza di sorgenti di esposizione senza alcuna forma di gestione e controllo.

In relazione ai programmi di intervento per esposizioni prolungate dovute ad attività lavorative svolte in passato e ora non più in atto, è necessario riferirsi ai seguenti criteri generali:

1. Giustificazione: un intervento può essere considerato solo se la riduzione del detrimento sanitario dovuto all’esposizione alle radiazioni ionizzanti è giustificato, tenendo conto sia del detrimento stesso che del costo dell’operazione;
2. Ottimizzazione: l’intervento deve essere ottimizzato in tutte le sue fasi in modo tale da mantenere la dose da esposizione sia ai lavoratori che alla popolazione in generale, al livello più basso ragionevolmente ottenibile;
3. Devono essere rispettati i limiti di dose per i lavoratori e per la popolazione.

La crescente attenzione a questa problematica è giustificata da vari fattori come le grandi quantità di NORM contenute in rifiuti industriali ed altri materiali ed il potenziale pericolo a lungo termine derivante dal fatto che tali radionuclidi rientrano nella categoria di quelli a lunga vita media e, relativamente, ad alta tossicità.

La maggior parte dei rifiuti radioattivi esistenti in Italia, proviene, tuttavia, dalle operazioni di dismissione degli impianti nucleari di potenza, definitivamente abbandonati nel 1987. Una frazione minore è dovuta ad attività sanitarie ed industriali.

Un significativo passo avanti nella gestione dei rifiuti e dei residui è stata l’Agenda 21 (piano di azione preparato dai governi che parteciparono nel 1992 a Rio de Janeiro alla United Nations Conference on Environment and Development [UNCED]) in cui si pose l’attenzione soprattutto sulla riduzione della quantità di qualsiasi tipo di rifiuto e sulla gestione dei rifiuti finalizzata alla protezione della salute umana e dell’ambiente. Se un residuo o rifiuto NORM può essere considerato un rifiuto radioattivo allora dovrebbe essere gestito in maniera tale da fornire un accettabile livello di protezione dell’ambiente e tale da non costituire un problema per le generazioni future. Dunque, un primo passo importante per un paese è capire quando, dove e come un’attività industriale possa produrre NORM e in quali processi e soprattutto identificare le situazioni in cui le concentrazioni di NORM possano risultare maggiori per un determinato processo.

Attualmente tra i vari paesi industrializzati non c’è accordo sui livelli di concentrazio-

ne per i quali i NORM debbano essere considerati residui radioattivi, principalmente per motivi economici legati alla gestione dei rifiuti. La situazione è ancora più complicata dal fatto che la rilevanza della esposizione ai NORM dipende moltissimo da circostanze locali, da modelli comportamentali e dalle condizioni di vita.

Per identificare strategie e tecnologie adatte alle operazioni di rimedio è necessario avere conoscenza delle potenziali sorgenti dei NORM, dei processi tipici che conducono ad aumenti di concentrazione, della dispersione di NORM nell'ambiente ed infine, dei modelli di esposizione umana.

L'obiettivo di un lavoro di bonifica di un sito contaminato è di riportare l'area ad una condizione priva di vincoli legati alla radioattività rendendola disponibile per il suo futuro riutilizzo. È fondato ipotizzare che gran parte di queste aree siano compromesse dal punto di vista ambientale e che quindi il loro recupero debba essere necessariamente preceduto da approfondite indagini ambientali. Si tratta di un'attività ad alto valore sociale ed ambientale, che viene svolta con l'impiego di tecnologie avanzate e nel rispetto dei più elevati standard nazionali ed internazionali per garantire la massima sicurezza in ogni fase dei lavori. Un intervento di bonifica radiologica deve seguire un piano globale, giustificato e ottimizzato, cioè che tenga conto della minimizzazione delle dosi alla popolazione e ai lavoratori.

L'attività sempre più consistente nel campo della igiene e sicurezza sul lavoro emersa negli ultimi anni, parallelamente agli interventi di igiene ambientale, più strutturati e procedurati prima a livello regionale poi nazionale, ha evidenziato la necessità di una maggiore sistematizzazione di esperienze parziali e territorialmente circoscritte. L'attività di indagine ambientale e di bonifica ha spesso caratteristiche comuni all'edilizia (movimentazione con mezzi pesanti, scavi, trivellazioni, ecc.), ma anche aspetti peculiari specifici che portano alla necessità di uno studio del settore.

Quando si parla di "decommissioning" si parla del processo inverso del "commissioning" ovvero della "messa in esercizio" di un impianto. In senso esteso, per decommissioning si intendono tutte le operazioni necessarie:

- alla messa e mantenimento in sicurezza dell'impianto;
- alla sua decontaminazione ed al suo smantellamento (totale o parziale);
- al raggiungimento dello stato finale prestabilito, in cui il sito è bonificato da ogni vincolo radiologico.

Le possibili condizioni finali di processi di decommissioning sono:

- "Prato Verde" o "Green Field" è la condizione finale del sito che permette il suo ritorno allo stato iniziale dal punto di vista radiologico e che ne consente l'uso senza vincolo alcuno anche per usi ricreativi e residenziali;
- "Brown Field" è invece la condizione per cui il sito può essere riutilizzato a fini industriali. In questo caso devono essere garantiti controlli e monitoraggi per assicurare il mantenimento delle condizioni di sicurezza.

Dunque, le aree dismesse assoggettate ad indagine e bonifica ambientale sono per

definizione siti contaminati nei quali la presenza di rifiuti inquinanti è quantitativamente e qualitativamente molto variabile. Per questo tutte le attività che vi vengono svolte, comportano un potenziale rischio di esposizione. L'esposizione è diretta nel caso di attività su matrici contaminate come il campionamento e la bonifica di terreni e di acque o di residui industriali contenuti in fusti, serbatoi, vasche, ecc., o indiretta in caso di attività diverse, come il controllo dei collegamenti elettrici, il ritrovamento di residuati bellici e di sorgenti di radiazioni ionizzanti, svolte in vicinanza di interventi su materiali contaminati.

Per quanto riguarda l'entità e la durata di esposizione, le imprese che svolgono attività diretta su matrici contaminate operano anche per periodi prolungati ma in condizioni organizzative, di competenza e di protezione personale più appropriate: hanno pertanto una maggiore probabilità di subire esposizioni croniche. Le imprese che svolgono attività "accessorie" all'indagine, di pulizia, messa in sicurezza, verifiche impiantistiche o di fonti di rischio diverse da quello chimico, che comportano una permanenza limitata nell'area, sono più facilmente esposte a rischi acuti.

Tutti i rischi, compresi quelli dovuti ad agenti fisici, possono essere divisi in due grandi categorie:

- *Rischi per la sicurezza* che possono causare danni immediati e infortuni, essi sono intrinseci agli: impianti elettrici, apparecchi a pressione e gas compressi, gas/liquidi criogenici, ecc.;
- *Rischi per la salute* che possono produrre effetti negativi sulla salute dell'individuo esposto, malattie professionali (per alcuni agenti anche sulla progenie, per effetto genotossico e teratogeno).

Il d.lgs. 81/2008⁴ e s.m.i, rappresenta il testo di riferimento che norma la sicurezza sul lavoro e sostituisce e integra il d.lgs. 626/1994. Esso, nel Titolo VIII, Capo I all'art. 180, definisce gli agenti fisici che possono comportare rischi per la salute e la sicurezza dei lavoratori:

- Rumore
- Ultrasuoni
- Vibrazioni meccaniche
- Campi elettromagnetici
- Radiazioni ottiche artificiali
- Microclima
- Atmosferiche iperbariche.

Anche le radiazioni ionizzanti devono essere annoverate tra quegli agenti fisici che possono comportare elevati rischi per la salute e la sicurezza dei lavoratori, ma esse non rientrano nel campo di applicazione del d.lgs. 81/2008⁴ perché sono già oggetto di una normativa specifica di settore come il d.lgs. 230/1995¹ e s.m.i.

La normativa italiana non stabilisce, se non per le emergenze, soglie di dose efficace per gli interventi e i relativi livelli di azione per la popolazione. In questo modo, non si hanno gli strumenti necessari per stabilire quando un intervento è assolutamente

richiesto o consigliabile o quando esso non deve essere preso in considerazione. In mancanza di specifiche regole, si deve far riferimento a raccomandazioni e standard internazionali. In questo caso, le Raccomandazioni ICRP n. 82⁵ indicano che se i membri della popolazione ricevono una dose efficace annuale superiore a 10 mSv, allora un intervento è quasi sempre giustificato. Infine, se le dosi efficaci stimate per i lavoratori e per la popolazione nel suo insieme risultano maggiori dei livelli di azione (1 mSv/y e 0,3 mSv/y per i lavoratori e per la popolazione, rispettivamente), i gestori hanno l'obbligo di adottare programmi di intervento per la riduzione dell'impatto radiologico del sito contaminato.

2. Radiazioni ionizzanti

I rischi per la salute dei lavoratori esposti e della popolazione, come “rischio specifico” provengono anche dalla esposizione a radiazioni ionizzanti, sia naturali che artificiali. Quando l'energia delle onde elettromagnetiche (EM) o radiazioni è sufficientemente alta, essa è in grado di rimuovere gli elettroni dagli atomi e/o dalle molecole della materia (ionizzazione) e si parla, allora, di radiazione ionizzante. Non tutte le onde EM causano ionizzazione. Infatti quelle di lunghezza d'onda superiore a circa 100 nm, equivalenti ad un'energia inferiore a 12 eV, cioè tutte le radiazioni la cui frequenza sia minore di quella del vicino ultravioletto, sono radiazioni non ionizzanti. Le radiazioni ionizzanti dunque, causano ionizzazione ed eccitazione delle molecole inducendo, così, un danno agli organismi viventi. Quando un sistema biologico viene esposto ad un campo di radiazioni ionizzanti, diviene sede di una serie di processi chimici, fisici e biologici, originati dal trasferimento di energia da parte della radiazione, che possono indurre un effetto sanitario sull'organismo stesso. Il problema fondamentale, è quello di riuscire a trovare una correlazione tra effetto sanitario e caratteristiche fisiche del campo di radiazione.

Per i nuclei leggeri la configurazione nucleare risulta stabile in quanto il numero di protoni uguaglia quello dei neutroni. Al crescere del numero di protoni, quello di neutroni necessari a garantire la stabilità aumenta. Tale andamento è ben descritto dalla cosiddetta curva di stabilità. Un nucleo instabile in un dato istante tenderà a trasformarsi in un nucleo stabile (dopo una o più trasformazioni) attraverso un dato processo radioattivo. È impossibile prevedere quando un dato nucleo si trasformerà; si può solamente definire una certa probabilità di trasformazione. Questa probabilità è la stessa per tutti i nuclei di un dato nuclide e si mantiene costante nel tempo ed è detta costante radioattiva; essa si esprime in sec^{-1} e si indica con λ . Indicando con N il numero di nuclei instabili, λN rappresenterà il numero di nuclei che decadono nell'unità di tempo ed è chiamata Attività della sostanza radioattiva: $A = A_0 \exp(-\lambda t)$ dove A_0 rappresenta l'attività all'istante iniziale. Il Periodo di dimezzamento τ di una sostanza radioattiva è il tempo necessario affinché questa si riduca della metà ed è inversamente proporzionale a λ . Il Becquerel (Bq), esprime la quantità di radioattività e corrisponde ad una disintegrazione al secondo.

Tabella 1: radioisotopi di origine terrestre

Radio nuclide	Tempo di dimezzamento (anni)	Abbondanza naturale (%)	Radiazione principale ed energia (MeV)
⁴⁰ K	1.26 · 10 ⁹	0.012	β 1.33 (89%), γ con CE 1.46 (11%)
⁵⁰ V	6 · 10 ¹⁵	0.25	γ avec β 0.78 (30%), γ avec CE 1.55 (70%)
⁸⁷ Rb	4.8 · 10 ¹⁰	27.9	β 0.28 (100%)
¹¹² In	6 · 10 ⁶⁸	95.8	β 0.48 (100%)
¹²² Te	1.2 · 10 ¹³	0.87	CE
¹³⁷ La	1.12 · 10 ¹¹	0.089	β* 0.21 (80%), γ con CE (0.81 1.43) (70%)
¹⁴² Ce	> 5 · 10 ¹⁶	11.07	(α)
¹⁴⁴ Nd	2.4 · 10 ¹⁵	23.9	α 1.83
¹⁴⁷ Sm	1.05 · 10 ¹¹	15.1	α 2.23
¹⁴⁸ Sm	> 2 · 10 ¹⁴	11.27	-
¹⁴⁶ Sm	> 1 · 10 ¹³	13.82	-
¹⁵² Gd	1.1 · 10 ¹⁴	0.20	α 2.1
¹⁵⁴ Dy	> 1 · 10 ¹³	0.052	-
¹⁷⁴ Hf	2 · 10 ¹³	0.163	α 2.5
¹⁷⁶ Lu	2.2 · 10 ¹⁰	2.6	β 0.43, γ 0.089, 0.203, 0.306
¹⁸⁰ Ta	> 1 · 10 ¹²	0.012	-
¹⁸⁷ Re	4.3 · 10 ¹⁰	62.9	β 0.003
¹⁹⁰ Pt	6.9 · 10 ¹¹	0.013	α 3.18

Tabella 2: radioisotopi generati dai raggi cosmici

Radio nuclide	Tempo di dimezzamento	Concentrazione troposferica (μCi/kg aria)	Radiazione principale ed energia massima per β (MeV)
³ H	12.33 anni	3.2 · 10 ²	β 0.0186
⁷ Be	53 giorni	0.28	γ 0.477
¹⁰ Be	1.6 · 10 ⁶ anni	3.2 · 10 ⁸	β 0.555
¹⁴ C	5730 anni	3.4	β 0.156
²² Na	2.6 anni	3.0 · 10 ⁵	β*, 0.545, γ 1.28
²⁴ Na	15 ore	-	β, 1.4, γ 1.37, 2.75
³² P	14 giorni	6.3 · 10 ³	β 1.71
³³ P	24 giorni	3.4 · 10 ³	β 0.246
³⁵ S	88 giorni	3.5 · 10 ³	β 0.167
³⁶ Cl	3.1 · 10 ⁵ anni	6.8 · 10 ⁹	β 0.714
³⁸ S	2.87 ore	-	β, 1.1, γ 1.88
³⁸ Cl	37 minuti	-	β, 4.91, γ 1.6, 2.17
³⁹ Cl	55 minuti	-	β, 1.91, γ 0.25, 1.27, 1.52

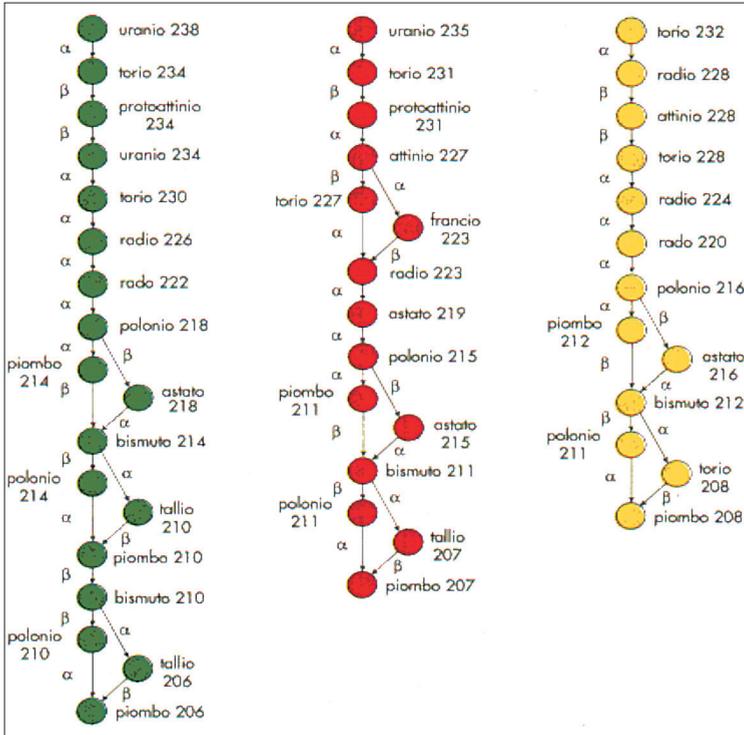
Un radionuclide può raggiungere la stabilità attraverso differenti modalità: decadimento α , decadimento β , emissione γ e X, cattura elettronica, conversione interna e via dicendo. La radioattività naturale è costituita principalmente da radioisotopi di origine terrestre con tempi di dimezzamento confrontabili con l'età dell'Universo (tabella 1) e da radionuclidi isolati generati dalle interazioni dei raggi cosmici con l'atmosfera (tabella 2) e dalle tre famiglie radioattive naturali (figura 1) i cui radionuclidi capostipiti, con tempi di dimezzamento confrontabili con quello della terra, decadono dando origine a nuclei instabili che decadendo a loro volta, creano le catene o serie radioattive:

Famiglia del ²³⁸U (abbondanza isotopica = 99.28 %) ($\tau = 4.490 \times 10^9$ anni)

Famiglia del ²³²Th (abbondanza isotopica = 100 %) ($\tau = 1.045 \times 10^9$ anni)

Famiglia del ²³⁵U (abbondanza isotopica = 0.72 %) ($\tau = 7.100 \times 10^9$ anni)

Figura 1: Serie di decadimento delle tre famiglie radioattive naturali



La serie dell'Uranio ha come capostipite ^{238}U che emette particelle α trasformandosi in ^{234}Th . L'elemento gassoso è il ^{222}Rn (Radon). L'elemento stabile della serie è il ^{206}Pb . A causa della sua bassa attività specifica (circa 12 kBq/g), l'Uranio naturale è più temibile per la sua tossicità chimica (sul rene) che per la pericolosità delle radiazioni emesse. Nel corpo umano sono presenti circa 90 microgrammi di Uranio naturale. La serie del Torio ha come capostipite il ^{232}Th che emette anch'esso particelle α , trasformandosi in ^{228}Ra . L'elemento gassoso è il ^{220}Rn (Thoron). Il Polonio non ha isotopi stabili ma oltre 50 isotopi instabili: è estremamente tossico e radioattivo e si trova, in quantità di una parte su 10^{10} , nei minerali di Uranio. L'elemento stabile della serie è il ^{208}Pb (Thorium D). Il Torio naturale è fortemente radiotossico come il ^{226}Ra che nel corpo si accumula nelle ossa e da cui viene rimosso molto lentamente nel tempo. L'ultima serie (dell' ^{235}U) non verrà presa in considerazione in quanto nessuno dei radionuclidi appartenenti ad essa è presente nelle sostanze di origine industriale. Di ogni sorgente radiante è importante avere informazioni di carattere chimico-fisiche dell'elemento di appartenenza che condizionano il destino del radionuclide nell'ambiente esterno ed è altrettanto importante conoscere gli aspetti generali del comportamento metabolico e la loro radiotossicità. È fondamentale anche avere informazioni puntuali sulle operazioni, lavorazioni ed eventuali incidenti con rischio di contaminazione.

L'esposizione alle radiazioni ionizzanti può comportare due forme di rischio separate a seconda che si tratti di sorgenti sigillate (irradiazione esterna) o di sorgenti non sigillate (irradiazione esterna ed interna). Le prime si presentano sotto forma di solidi compatti non friabili oppure sono incapsulate in materiali metallici inattivi; le seconde sono invece costituite da sostanze radioattive utilizzate nello stato fisico e chimico nel quale si trovano (polveri, liquidi, gas) senza nessun incapsulamento e, quindi, facilmente disperdibili. Gli accorgimenti da adottare per evitare irradiazioni di entità non trascurabile, sono schermature, tempo minimo di manipolazione, distanza sufficiente dalle sorgenti e adozione di opportune ed idonee procedure di lavoro. Gli effetti dannosi sull'organismo sono funzione dell'energia che viene ceduta, trasferita, depositata ed assorbita dall'organismo (o da un suo organo o tessuto). È di fondamentale importanza, quindi, riuscire a risalire ad una valutazione della dose assorbita per poter stimare il danno biologico ed il conseguente ed eventuale detrimento sanitario.

2.1 Classificazione delle attività con radiazioni ionizzanti

Le applicazioni delle radiazioni ionizzanti nell'industria, nella ricerca e nella medicina sono multiformi e di vaste proporzioni.

Tutte le attività in cui sono utilizzati o manipolati materiali radioattivi generano rifiuti radioattivi. Fra queste attività le più significative sono:

- il ciclo del combustibile nei reattori nucleari di potenza;
- la produzione e l'uso di radioisotopi (medicina, industria ecc.);
- le decontaminazioni;
- la disattivazione degli impianti nucleari.

Un consistente contributo alla radioattività totale è dovuto ai rifiuti provenienti dalla disattivazione delle installazioni nucleari. Le sorgenti di radiazione utilizzate in ambito sanitario (terapia e diagnostica medica) sono svariate. Un breve elenco delle principali attività, che esula dalle finalità del presente lavoro, è riportato di seguito:

- radiologia;
- radioterapia;
- radioterapia con sorgenti per brachiterapia;
- medicina nucleare;
- laboratori RIA (Radio ImmunoAssay).

Al momento la fonte principale di rifiuti è costituita dall'impiego medico delle radiazioni, provenienti dalla medicina nucleare, dalla RIA, dalla brachiterapia, da acceleratori lineari, betatroni e sincrotroni, ed infine sorgenti "orfane" o "dimenticate" e rottami metallici. In questi casi, i radionuclidi sono generalmente a breve e media emivita.

Anche la ricerca farmacologica e biomedica utilizza radioisotopi soprattutto come traccianti, allo scopo di identificare il metabolismo o il percorso biologico di partico-

lari molecole nel processo vitale di assimilazione. Le materie radioattive impiegate contengono frequentemente nuclidi a vita media - lunga e a bassa - media attività. Il d.lgs. 230/1995⁷ e s.m.i., indica una serie di categorie riferibili ad attività lavorative nelle quali la presenza di sorgenti di radiazioni naturali può condurre ad un significativo aumento dell'esposizione dei lavoratori o delle persone del pubblico e che non può essere trascurato dal punto di vista della radioprotezione.

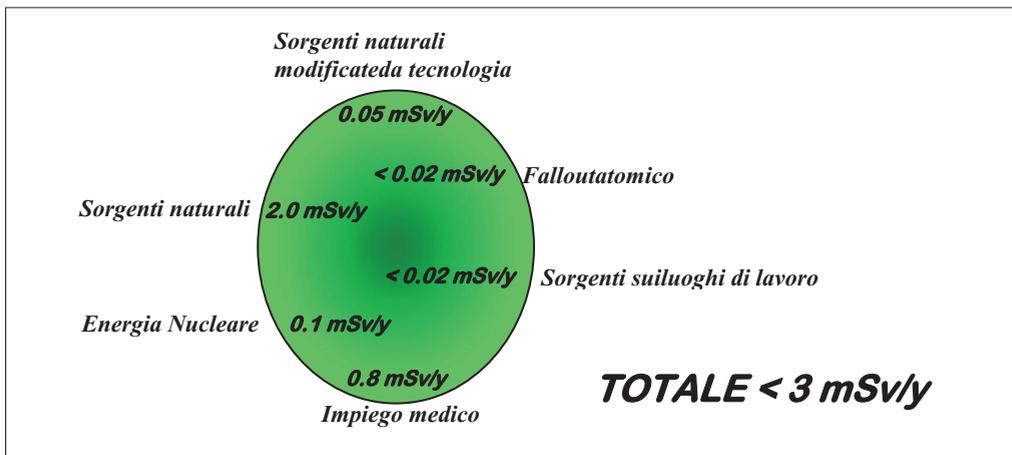
Queste attività industriali che nelle loro lavorazioni non sfruttano le proprietà radioattive fissili o fertili dei radioisotopi naturali presenti nelle materie in ingresso ai cicli produttivi, non rientrano nella definizione di "pratiche", ma nell'elenco delle "attività lavorative con sorgenti naturali di radiazioni ionizzanti". Esse comportano comunque un potenziale rischio radiologico e sono regolamentate dalla normativa italiana di protezione dalle radiazioni ionizzanti, il d.lgs. 230/1995⁷ come modificato dal d.lgs. n. 241/2000⁸. In particolare, quest'ultimo prevede l'esecuzione di controlli dell'esposizione alle radiazioni ionizzanti per un certo set di attività lavorative che implicano l'impiego o la produzione di NORM.

Queste attività sono individuate nell'Allegato I-bis dello stesso decreto richiamato all'art.10 ter:

1. industria che utilizza minerali fosfatici e depositi per il commercio all'ingrosso dei fertilizzanti;
2. lavorazione di minerali nella estrazione di stagno, ferro-niobio da pirocloro e alluminio da bauxite;
3. lavorazione di sabbie zirconifere e produzione di materiali refrattari;
4. lavorazione di terre rare;
5. lavorazione ed impiego di composti del torio (elettrodi per saldatura, produzione di lenti, reticelle per lampade a gas);
6. produzione di pigmento al biossido di titanio;
7. estrazione e raffinazione di petrolio e estrazione di gas.

Le stime di dose da radiazione ai lavoratori in tali attività sono relativamente basse ma fortemente imprevedibili a causa della grande variabilità nei livelli dei rifiuti NORM e delle specifiche procedure adottate dai lavoratori⁷⁸. Nella figura 2 vengono riportati i maggiori contributi di dose dovuti ai vari tipi di esposizione dell'uomo.

Figura 2: Contributi di dose della popolazione nel suo insieme



Dunque, le attività di bonifica di siti industriali dove in passato siano stati processati e/o stoccati grandi quantità di materiali contenenti radionuclidi naturali ricadono in quelle normate dal capo III bis del d.lgs. 230/95¹ e s.m.i., quali attività lavorative. L'art. 10 - bis del Decreto di cui sopra, individua le tipologie di attività che, tra quelle di interesse per il presente documento, comprendono:

1. attività lavorative durante le quali i lavoratori e, eventualmente, persone del pubblico sono esposti a prodotti di decadimento del radon o del toron, o a radiazioni gamma;
2. attività lavorative implicanti l'uso o lo stoccaggio di materiali abitualmente non considerati radioattivi, ma che contengono radionuclidi naturali e provocano un aumento significativo dell'esposizione dei lavoratori e, eventualmente, di persone del pubblico;
3. attività lavorative che comportano la produzione di residui abitualmente non considerati radioattivi, ma che contengono radionuclidi naturali e provocano un aumento significativo dell'esposizione di persone del pubblico e, eventualmente, dei lavoratori.

Le attività umane possono causare un aumento delle concentrazioni di NORM anche in virtù della metodologia di rilascio e delle tecniche utilizzate per il trattamento dei rifiuti. Il problema assume maggiore gravità se si considera il fatto che nelle attività umane i NORM possono subire cambiamenti dal loro stato naturale. La concentrazione o la dispersione di radionuclidi sono caratterizzate, infatti, dalle loro proprietà chimico-fisiche in relazione alle condizioni ambientali. Di seguito, vengono riportati alcuni tra i processi umani più rilevanti di perturbazione dello stato chimico-fisico dei radionuclidi^{6,7}:

- Estrazione delle acque di falda (cambiamenti chimici);

- Processi di combustione che volatilizzano alcuni radionuclidi ed altri no (radio ad es.);
- Disgregazione fisica;
- Sedimentazione.

I NORM, dunque, costituiscono la materia prima, il prodotto o il residuo della lavorazione in numerose attività industriali, nelle quali il rischio radiologico è generalmente incidentale in relazione al processo e non elevato in confronto a quello derivante dall'esposizione ad agenti chimici. È comunque necessario identificare e porre sotto sorveglianza tali processi industriali.

2.2 Modalità di irradiazione

La gravità del tipo di contaminazione è associata al tipo di evento, alla capacità di penetrazione delle radiazioni e quindi alla loro energia e al tipo di radiazione, alla radiotossicità dei radionuclidi e alla radiosensibilità del tessuto colpito. Di ogni sorgente radiante è importante avere informazioni di carattere chimico-fisiche dell'elemento di appartenenza che condizionano il destino del radionuclide nell'ambiente esterno ed è altrettanto importante conoscere gli aspetti generali del comportamento metabolico e la loro radiotossicità. È fondamentale anche avere informazioni puntuali sulle operazioni, lavorazioni ed eventuali incidenti con rischio di contaminazione. Analizzando le diverse capacità di penetrazione in acqua dei vari tipi di radiazione, ci si rende subito conto che le radiazioni α e β rappresentano un pericolo maggiore per irradiazione interna a differenza di quanto succede per fotoni e neutroni che, invece, sono in grado di attraversare notevoli spessori quasi senza depositare energia.

L'irradiazione esterna comprende l'irradiazione da macchine radiogene, l'irradiazione da sorgenti e materiali radioattivi, l'irradiazione da impianti nucleari, da rifiuti radioattivi, da nubi radioattive, da suolo, da acque contaminate e via dicendo.

D'altra parte, le modalità di irradiazione interna, sono sostanzialmente tre: ingestione, inalazione e assorbimento cutaneo, soprattutto attraverso ferite. Fortunatamente, i radionuclidi incorporati, seguendo il destino delle sostanze chimiche degli elementi di appartenenza, seguono le loro stesse vie di eliminazione, vale a dire espirazione, urine, feci, sudore e latte.

Il rischio da esposizione a radiazioni ionizzanti, dunque, può presentarsi in vari modi: in seguito alla contaminazione di siti industriali e/o sanitari, in seguito a smarrimento di sorgenti e/o abbandonate (sorgenti "orfane"), in seguito ad interventi di bonifica e alle attività antropiche che sfruttano i materiali contenenti radioattività naturale (NORM⁶, attività minerarie, combustione di fossili combustibili, produzione di gas naturali ed oli, ecc.).

Per la successiva analisi degli aspetti legati all'identificazione, valutazione e controllo del rischio per la salute connesso all'esposizione a radiazioni ionizzanti, in relazione al tipo di interazione con la materia vivente è ragionevole affermare che:

- *Radiazioni α , γ , β e neutroni* sono responsabili sostanzialmente di irradiazione esterna (esposizione del corpo intero o parte di esso);
- *Radiazioni α e β* sono responsabili sostanzialmente di contaminazione interna (esposizione di organi interni del corpo umano).

Nell'ambito delle operazioni di bonifica dei siti contaminati, i rischi per la salute dei lavoratori legati all'esposizione a radiazioni ionizzanti, sono da ritenersi presenti qualunque sia la tipologia di sito contaminato (discarica, area industriale, ecc.) e qualunque sia la fase della bonifica. Sempre riguardo le fasi della bonifica, è importante evidenziare che la gestione del rischio è particolarmente importante nelle operazioni di identificazione dell'area potenzialmente contaminata, di allestimento del cantiere e di caratterizzazione, ossia nelle fasi in cui non è ancora stata definita la tipologia, l'entità e la distribuzione spaziale della contaminazione.

3. Rifiuti radioattivi

I rifiuti radioattivi, spesso denominati scarti di lavorazione, provengono, da impieghi energetici ed industriali, dalla ricerca e da impieghi medici¹⁷. Sono definiti rifiuti radioattivi quei materiali di scarto che contengono o sono contaminati da radionuclidi e la cui concentrazione o attività specifica è maggiore di un valore di soglia individuato dalle normative nazionali.

Le tre caratteristiche principali inerenti i rifiuti radioattivi, che ne influenzano la corretta gestione sono: le loro proprietà chimico-fisiche (soprattutto i loro tempi di dimezzamento), i radionuclidi contenuti e il loro volume. Essi possono variare da valori di radioattività elevata a valori modesti e possono essere generati sotto forma di liquidi, solidi e gas. Inoltre, alcuni di loro possono richiedere un trattamento specifico prima del definitivo stoccaggio o deposizione. La separazione e la trasmutazione dei radionuclidi a lunga vita in radionuclidi con caratteristiche più favorevoli (ad es. breve tempo di dimezzamento), potrebbero ridurre il pericolo a lungo termine dei rifiuti radioattivi. In ambito internazionale, il rifiuto radioattivo è un *“qualsiasi materiale che contiene o è contaminato da radionuclidi a concentrazioni o livelli di radioattività superiori alle “quantità esenti” stabilite dalle Autorità Competenti, e per i quali non è previsto alcun uso”*¹⁵. Invece, per quanto riguarda la normativa italiana, il rifiuto radioattivo è *“qualsiasi materia radioattiva, ancorché contenuta in apparecchiature o dispositivi in genere, di cui non è previsto il riciclo o la riutilizzazione”*, di cui al d.lgs. 230/1995¹ e al d.lgs. 241/2000³.

I rifiuti radioattivi sono classificati in base alla loro attività e al loro tempo di dimezzamento. Allo stato attuale non esiste una classificazione armonizzata a livello europeo. L'IAEA⁸ classifica i rifiuti radioattivi in:

- rifiuti a bassa attività (LLW, low level waste) il loro livello di radioattività è al di sopra dei limiti che permetterebbero loro di essere smaltiti come rifiuti convenzionali;
- rifiuti ad attività intermedia (ILW, intermediate level waste) il loro livello di radioattività supera il limite stabilito per le scorie di basso livello e richiedono la schermatura nelle manipolazioni o un adeguato contenitore di stoccaggio.
- rifiuti ad alta attività (HLW, high level waste) il loro elevato livello di radioattività richiede la protezione del personale, la schermatura, la remotizzazione delle operazioni e la considerazione degli effetti termici, dovuti alla interazione delle radiazioni con la materia, nella progettazione delle strutture di stoccaggio e di smaltimento.

In Italia, la classificazione dei rifiuti era contenuta nella Guida Tecnica⁹ n. 26 emanata nel 1987 dall'ENEA-DISP, oggi ISPRA. Secondo questo documento i rifiuti erano classificati in tre categorie, ciascuna delle quali prevedeva una diversa modalità di gestione e di smaltimento:

- rifiuti di prima categoria: vi appartengono i rifiuti radioattivi che richiedono tempi di decadimento dell'ordine di mesi, sino ad un tempo massimo di alcuni anni;
- rifiuti di seconda categoria: vi appartengono rifiuti che richiedono tempi di decadi-

mento variabili da qualche decina fino ad alcune centinaia di anni per raggiungere concentrazioni di radioattività dell'ordine di alcune centinaia di Bq/g (Becquerel/grammo).

- rifiuti di terza categoria: vi appartengono tutti i rifiuti che non sono riconducibili alle due categorie precedenti. In particolare i rifiuti radioattivi di detta categoria richiedono tempi di decadimento dell'ordine di migliaia di anni ed oltre.

Recentemente è stato emanato un decreto dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (MATTM), d.lgs. 7 agosto 2015⁴⁵ "*Classificazione dei rifiuti radioattivi ai sensi dell'art. 5 del d.lgs. 4 marzo 2014 n. 45*", con il quale viene stabilita la nuova classificazione dei rifiuti radioattivi solidi condizionati che sostituisce quella definita nella Guida Tecnica⁹ n. 26 di cui sopra. Il presente decreto però, non si applica ai rifiuti radioattivi aeriformi per i quali è previsto lo smaltimento nell'ambiente sotto forma di effluenti né ai residui contenenti radionuclidi di origine naturale provenienti dalle attività lavorative disciplinate dal capo III-bis del d.lgs. 230/1995⁷ che saranno oggetto di specifica disciplina di attuazione della Direttiva 2013/59/Euratom da recepire obbligatoriamente entro il 6 febbraio 2018.

Secondo il decreto, i rifiuti sono classificati in (Tabella 3):

- rifiuti radioattivi a vita molto breve, quelli con tempi di dimezzamento inferiori a 100 giorni, che richiedono fino ad un tempo massimo di 5 anni per arrivare ad un'attività inferiore a quelle previste nel d.lgs. 230/95⁷ in particolare nell'allegato I;
- rifiuti radioattivi di attività molto bassa, quelli con livelli di concentrazione di attività che non soddisfano i criteri stabiliti per i rifiuti esenti, ma comunque inferiori a 100 Bq/g di cui al massimo 10 Bq/g per gli alfa emettitori a lunga vita;
- rifiuti radioattivi di bassa attività, quelli che non soddisfano i criteri stabiliti per i rifiuti esenti e che ai fini dello smaltimento necessitano di un confinamento e di un isolamento per periodi dell'ordine delle centinaia di anni: ≤ 5 MBq/g per i radionuclidi a vita breve, ≤ 40 kBq/g per gli isotopi a lunga vita del Nichel, ≤ 400 Bq/g per i radionuclidi a lunga vita;
- rifiuti radioattivi di media attività, quelli con concentrazioni di attività superiori ai valori indicati per i rifiuti di bassa attività, tali comunque da non richiedere, durante il deposito e lo smaltimento, l'adozione di misure per la dissipazione del calore generato;
- rifiuti radioattivi di alta attività, quelli con concentrazioni di attività molto elevate, tali da generare una significativa quantità di calore o elevate concentrazioni di radionuclidi a lunga vita o entrambe le caratteristiche e che richiedono un grado di isolamento e di confinamento dell'ordine di migliaia di anni e oltre. Per tali rifiuti è previsto lo smaltimento in formazioni geologiche.

Tabella 3: Nuova classificazione dei rifiuti radioattivi (d.lgs. 7 agosto 2015)

Categoria	Condizioni e/o Concentrazioni di Attività	Destinazione finale
Esenti	Art. 154 comma 2 D. Lgs. 230/95 Art. 30 o art. 154 comma 3-bis d.lgs. 230/95 $T_{1/2} < 100$ giorni	Rispetto delle disposizioni d.lgs. 152/2006
A vita media molto breve	Raggiungimento in 5 anni delle condizioni: Art. 154 comma 2 D. Lgs. 230/95 Art. 30 o art. 154 comma 3-bis d.lgs. 230/95	Stoccaggio temporaneo (art. 33 d.lgs.230/95) e smaltimento nel rispetto delle disposizioni del d.lgs. 152/2006
Attività molto bassa	≤ 100 Bq/g (di cui ≤ 10 Bq/g)	Raggiungimento in $T \leq 10$ anni della condizione: Art. 30 o art. 154 comma 3-bis D. Lgs. 230/95 Non raggiungimento in $T \leq 10$ anni della condizione: Art. 30 o art. 154 comma 3-bis D. Lgs. 230/95
Bassa Attività	Radionuclidi a vita breve ≤ 5 MBq/g $Ni59 - Ni63 \leq 40$ kBq/g Radionuclidi a lunga vita ≤ 400 Bq/g	Impianti di smaltimento superficiali o a piccola profondità, con barriere ingegneristiche (Deposito Nazionale D. Lgs. 31/2010)
Media Attività	Radionuclidi a vita breve ≤ 5 MBq/g $Ni59 - Ni63 > 40$ kBq/g Radionuclidi a lunga vita > 400 Bq/g No produzione di calor	Radionuclidi alfa-emettitori ≤ 400 Bq/g e beta-gamma emettitori in concentrazioni tali da rispettare gli obiettivi di radioprotezione stabiliti per l'impianto di smaltimento superficiale
Alta Attività	Produzione di calore o di elevate concentrazioni di radionuclidi a lunga vita o di entrambe tali caratteristiche	Impianto di immagazzinamento temporaneo del Deposito Nazionale (D. Lgs. 31/2010) in attesa di smaltimento in formazione geologica

La gestione dei rifiuti radioattivi comprende tutte le attività amministrative e operative che riguardano la manipolazione, la raccolta, il trattamento, il condizionamento, il trasporto, lo stoccaggio e lo smaltimento definitivo dei rifiuti radioattivi stessi.

I rifiuti radioattivi devono essere:

- gestiti in maniera tale da garantire un adeguato livello di protezione della salute dell'uomo e dell'ambiente;
- gestiti in maniera tale da tener conto dei possibili effetti sulla salute dell'uomo e sull'ambiente al di fuori dei confini nazionali;
- gestiti in maniera tale che i prevedibili impatti sulla salute delle future generazioni non siano superiori ai livelli di impatto oggi ritenuti accettabili e che comunque non impongano carichi indebiti alle future generazioni;
- la produzione dei rifiuti radioattivi deve essere limitata al minimo possibile;
- la sicurezza degli impianti e delle infrastrutture dove si effettua la gestione dei rifiuti radioattivi deve essere assicurata durante tutto il loro periodo di vita previsto.

I rifiuti radioattivi, qualora rispettino le seguenti condizioni: tempo di dimezzamento < 75 giorni e concentrazione ≤ 1 Bq/g, possono essere smaltiti nell'ambiente, conferiti a terzi e riciclati o riutilizzati, come rifiuti speciali. È prevista, tuttavia, una valutazione dell'esposizione e della dose efficace individuale e collettiva prima dello smaltimento definitivo, nel rispetto dei seguenti criteri:

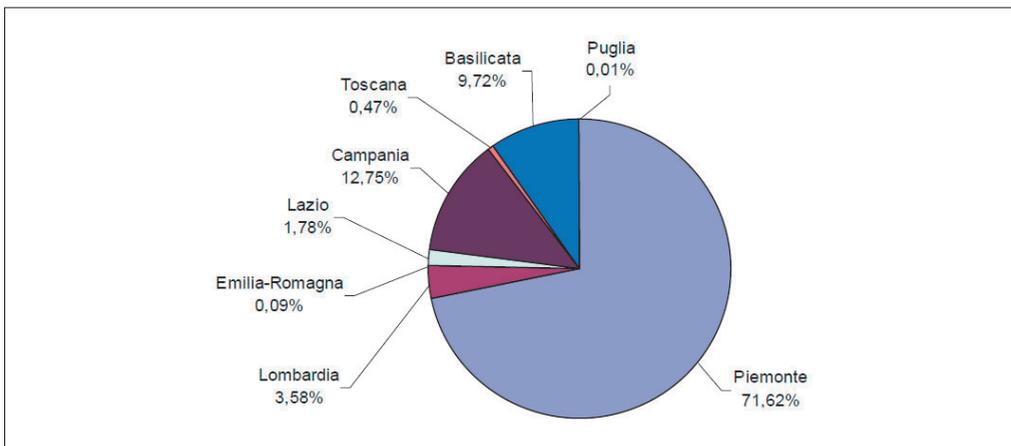
- dose efficace individuale $\leq 10 \mu\text{Sv/y}$;
- dose efficace collettiva $\leq 1 \text{ Sv} \times \text{persona/anno}$.

Accanto ai rifiuti censiti vi sono quelli provenienti da impieghi industriali. Un'altra attività che produce rifiuti radioattivi è quella agroalimentare^{10,11} che si occupa dell'irradiazione di alimenti deperibili per la distruzione di insetti, muffe e batteri ai fini della conservazione o per finalità antigerminative. In Italia esiste un solo impianto di questo tipo che, peraltro, per tutto il 2010 non è stato utilizzato.

Dopo essere state impiegate, le materie radioattive vengono trattate come rifiuti, confinate temporaneamente nel sito di produzione e raccolte periodicamente da società autorizzate.

In figura 3 viene mostrata la distribuzione regionale in Italia dei rifiuti radioattivi in termini di attività (fonte ISPRA al 2011).

Figura 3: Distribuzione regionale dei rifiuti radioattivi in termini di attività – anno 2011 (fonte ISPRA)



La direttiva 2011/70/Euratom⁵⁴ adottata dal Consiglio europeo il 19 luglio 2011 istituisce un quadro giuridico comunitario relativo alla gestione responsabile e sicura del combustibile nucleare esaurito e dei rifiuti radioattivi derivanti da attività civili. La direttiva prevede altresì che gli Stati membri debbano provvedere all'istituzione di un'autorità di regolamentazione competente in materia di sicurezza della gestione dei materiali pericolosi. L'Italia si ritrova oggi a dover procedere allo smaltimento di rifiuti, che produrranno circa 55.000 metri cubi di scorie radioattive, senza avere ancora un deposito nazionale e con un tessuto sociale letteralmente contrario a tutto ciò che contenga la parola nucleare. Il d.lgs. 45/2014³² in attuazione della Direttiva 2011/70/Euratom⁵⁴, impone la costituzione di una nuova autorità italiana: l'Ispettorato Nazionale per la Sicurezza e la Radioprotezione (ISIN) che dovrà occuparsi della gestione e sicurezza del combustibile nucleare esaurito e dei rifiuti radioattivi sul territorio nazionale e svolgere funzioni e compiti di autorità nazionale in materia di sicurezza nucleare e radioprotezione. Il nuovo decreto è dunque, destinato a risistemare la materia della gestione dei rifiuti radioattivi, operando diverse abrogazioni e apportando modifiche estese ad alcuni provvedimenti, quali la legge 31 dicembre 1962, n. 1860 ("Impiego pacifico dell'energia nucleare"), il d.lgs. 17 marzo 1995, n. 230' (sull'attuazione delle direttive europee in materia di radiazioni ionizzanti) e il d.lgs. 15 febbraio 2010, n. 31⁵⁵ che disciplina la tematica relativa alla localizzazione, realizzazione ed esercizio nel territorio nazionale di impianti di produzione di energia elettrica nucleare, di impianti di fabbricazione del combustibile nucleare, dei sistemi di stoccaggio del combustibile irraggiato e dei rifiuti radioattivi.

Attualmente, si stimano circa 90.000 metri cubi di rifiuti radioattivi, distribuiti in 23 siti di undici regioni. In realtà, la succitata Direttiva europea imporrebbe di realizzare un unico sito nazionale. In Italia si dovrebbe innanzitutto procedere allo smantellamento delle centrali nucleari, degli impianti di produzione del combustibile nucleare e degli impianti di ricerca del ciclo del combustibile nucleare; così facendo si parlerebbe di 54.800 metri cubi di rifiuti radioattivi, di cui 10.400 ad alta attività e 44.400 a bassa attività. A marzo 2014, è stato costituito l'Osservatorio per la chiusura del ciclo nucleare, un organismo indipendente promosso dalla Fondazione per lo sviluppo sostenibile in collaborazione con Sogin, la società del ministero Economia e Finanze incaricata del *decommissioning*, che nel 2001, diventa l'operatore nazionale incaricato della raccolta, del condizionamento e dello stoccaggio temporaneo dei rifiuti e delle sorgenti radioattive provenienti dalle attività sanitarie e di ricerca scientifica e tecnologica. Sogin gestisce inoltre, i rifiuti radioattivi prodotti dalle attività di bonifica dei siti nucleari. Ai 90.000 metri cubi di rifiuti radioattivi di cui sopra, se ne aggiungerebbero altri 36.000 da impieghi medicali, di ricerca e industriali. E questi ultimi sono in crescita: agli attuali 15.000 metri cubi se ne aggiungono 500 in più ogni anno. Il deposito nazionale, di una capienza da 90.000 metri cubi sufficiente per una quarantina di anni, dovrebbe essere dunque realizzato in superficie, in un parco tecnologico. Ma le scorie a più lunga vita verrebbero mandate a depositi europei, che comunque stanno già custodendo quelle italiane, nell'attesa di poterle rimandare come materiali vetrificati.

4. Effetti sanitari¹²

Per quanto riguarda l'esposizione alle radiazioni ionizzanti, tutti quelli che sono gli effetti e le conseguenze sull'uomo si rifanno all'osservazione su ciò che avviene a seguito di incidenti o infortuni nucleari e radiologici perchè normalmente l'esposizione del lavoratore a radiazioni ionizzanti comporta esposizioni basse, sovrapponibili al fondo naturale. Di conseguenza, le relative stime del rischio da danno indotto, sono ottenute da studi epidemiologici.

Le radiazioni possono interagire a livello biologico con la cellula ed il DNA e si possono innescare una serie di modificazioni alle volte tenute sotto controllo dai nostri sistemi di autoriparazione cellulare. La ionizzazione provoca la formazione di nuove entità chimiche, a volte molto reattive, come nel caso dei radicali liberi derivanti dalla ionizzazione dell'acqua; in questi casi possono avvenire reazioni chimiche capaci di modificare il contenuto della cellula stessa e quindi in grado di produrre un effetto biologico dipendente dallanatura del danno, dai componenticellulari danneggiati e dalla specificafunzione della cellula interessata. Gli stati in cui può trovarsi una cellula sono:

- 1) Stato chimico-fisico: con formazione di molecole reattive.
- 2) Stato chimico: con possibili alterazioni a livello cellulare.
- 3) Stato biologico: con eventuale insorgenza di manifestazioni cliniche.

Tutta la radiologia si fonda su principi di minimizzazione delle dosi proprio per assicurare una adeguata radioprotezione e tali principi si basano sul modello lineare senza soglia: le reazioni senza soglia possono essere correlate anche a dosi bassissime. Gli effetti tissutali o stocastici non hanno una dose soglia al di sotto della quale non è richiesta radioprotezione.

Il grado di rischio derivante dall'esposizione alle radiazioni ionizzanti non è solo proporzionale alla dose assorbita, ma è anche strettamente legato al tipo di radiazione incidente e alla radiosensibilità dei vari organi e tessuti irradiati.

L'interazione delle radiazioni sulla materia può avvenire a livello:

- molecolare (DNA, RNA enzimi);
- subcellulare(sulle membrane e organuli);
- cellulare(le fasi mitotiche);
- tessuti e organi;
- popolazioni animali e mutazioni genetiche.

Poiché la cellula è assimilabile ad una soluzione acquosa, gli effetti che si producono sono conseguenti a:

- azione diretta sulle molecole;
- azione indiretta conseguente all'interazione dei prodotti derivati dalla radiolisi dell'acqua con le molecole del soluto.

I primi si esplicano direttamente sulle molecole sensibili (denaturazione di proteine,

rottura dei filamenti degli acidi nucleici, ecc.) mentre i secondi, dipendono dalle specie radicaliche che vengono prodotte dalla interazione della radiazione con l'acqua cellulare (radiolisi dell'acqua). Spesso è molto difficile distinguere gli effetti diretti da quelli indiretti ma, per come sono costituite le cellule, è plausibile affermare che questi ultimi siano più probabili e rilevanti. La radiolisi porta alla formazione di specie radicaliche estremamente reattive:

Esempi di radiolisi ionizzativa:



In assenza di O_2 e di biomolecole (es. irradiazione di acqua pura), i radicali interagiranno tra loro secondo tutte le possibili combinazioni producendo "prodotti molecolari": H_2O , H_2 e H_2O_2 , questo ultimo fortemente ossidante. Se nel mezzo irradiato è presente, in sufficiente concentrazione O_2 , questo, per l'elevata elettroaffinità, catturerà radicali H dando luogo alla formazione del radicale HO_2 ad alto potere ossidante. L' O_2 , di per sé, è in grado di sottrarre elettroni alle biomolecole ossidandole e, con ciò è possibile capire come nei substrati biologici l'effetto indotto, a parità di radiazione, sia circa 2-3 volte maggiore in presenza di O_2 (effetto ossigeno). Le cellule ipossiche o anossiche sono poco radiosensibili. I radicali liberi (complessi ad alta reattività) che si formano hanno vita breve (10^{-5} secondi) ma sono causa di lesioni a carico delle membrane cellulari e di alcuni "organuli" citoplasmatici come i mitocondri e i ribosomi. I radicali liberi interagiscono con le molecole della cellula finché non riacquistano una configurazione elettronica stabile.

Il danno a carico del DNA può portare alla rottura delle catene molecolari con la conseguente perdita di intere "sequenze", oppure la modificazione della sequenza del messaggio con lesioni a carico dei geni. I geni sono responsabili delle informazioni necessarie a controllare fondamentali funzioni cellulari come la crescita, la divisione e la differenziazione. Generalmente, il controllo delle normali funzioni di cellule di mammifero richiede un gran numero di geni (da 60.000 a 70.000). È il comportamento del DNA nelle diverse fasi del ciclo mitotico a condizionare le variazioni di radiosensibilità delle cellule. In generale, i processi enzimatici di riparazione comportano la riparazione del DNA ed il ritorno alla normale funzionalità della cellula. Se la riparazione non avviene o è incompleta o imprecisa, allora la cellula può andare incontro alla morte oppure, evidenziare gravi alterazioni e perdite di informazioni genetiche, come mutazioni e aberrazioni cromosomiche³³. Alterazioni o perdite di questi processi di riparazione e controllo possono comportare gravi e seri danni alle cellule e agli individui.

Il danno indotto dalle radiazioni al DNA è rappresentato da un insieme complesso di alterazioni chimiche localizzate (cluster). Tale cluster di danno può insorgere attraverso una combinazione di danni indotti dalle tracce principali, da elettroni secondari e da specie radicaliche secondarie reattive. Le rotture del doppio o del singolo filamento (DSB e SSB) nella struttura portante del DNA, insieme ad una varietà di basi danneggiate del DNA, possono combinarsi insieme in cluster, con una elevata fra-

zione del danno totale spazialmente concentrata. Le diverse caratteristiche della riparazione delle lesioni semplici e complesse del DNA rappresentano un importante fattore nella elaborazione delle valutazioni sugli effetti sanitari delle radiazioni a basse dosi. Il danno indotto dalle radiazioni è stato studiato a livello di struttura cromosomica, e in parallelo si è sviluppata la modellizzazione biofisica dell'induzione di mutazioni geniche e cromosomiche. Esistono evidenze scientifiche^{33,34} che indicano nel DNA cromosomico il principale bersaglio cellulare per gli effetti biologici. Un elemento molto importante è l'evidenza, ormai inoppugnabile, che l'alterazione della risposta/riparo al danno del DNA e dei meccanismi di controllo del ciclo cellulare e dell'apoptosi (morte cellulare programmata) sono spesso strettamente associati con lo sviluppo del cancro. Ci sono forti correlazioni tra i processi biofisici che determinano l'induzione di lesioni complesse a doppio filamento del DNA, i processi di predisposizione all'errore nella risposta/riparazione al danno al DNA ed i tipi di mutazione geniche e cromosomiche (perdita o riarrangiamento nella sequenza del DNA) caratteristici dell'esposizione a radiazioni ionizzanti. Quando solo uno dei due filamenti di un cromosoma presenta un difetto, l'altro filamento può essere usato come stampo per guidare la correzione del filamento danneggiato. Ci sono numerosi meccanismi tramite i quali è possibile realizzare la riparazione del DNA.

Tabella 4: Stima del danno da radiazioni a carico del DNA

Tipo di danno	Resa (numero di difetti per cellula per Gy ⁻¹)
Rottura singolo filamento	1.000
Danno alle Basi	500
Rottura doppio filamento	40
Cross-links DNA Proteina	150

Simulazioni teoriche, come riportato in tabella 4, hanno dimostrato che circa il 30% di rotture del doppio filamento del DNA da radiazioni a basso LET (Linear Energy Transfer) sono complesse in virtù di rotture addizionali e che questa proporzione sale a più del 70%, e il grado di complessità anch'esso cresce, per particelle ad alto LET³⁴. Non sempre, però, è possibile distinguere alterazioni spontanee nella cellula da quelle dovute alle interazioni con le radiazioni. Solo quando la complessità del danno è sostanziale, è possibile riuscire a fare delle ipotesi fondate sulla causa del danno stesso. Attualmente, quindi, è difficile confrontare livelli di danno radio-indotti con quelli che avvengono spontaneamente nelle cellule. Le cellule non proliferanti sono in grado di mantenere le aberrazioni cromosomiche allo stato latente, anche per lungo tempo. Su questa proprietà è formulato un metodo di dosimetria biologica.

L'abilità delle cellule a crescere e formare cloni (sopravvivenza cellulare) in seguito ad irradiazione, viene comunemente usata come misura della radiosensibilità (figure 4 e 5).

Figura 4: Esempio di curva di sopravvivenza cellulare

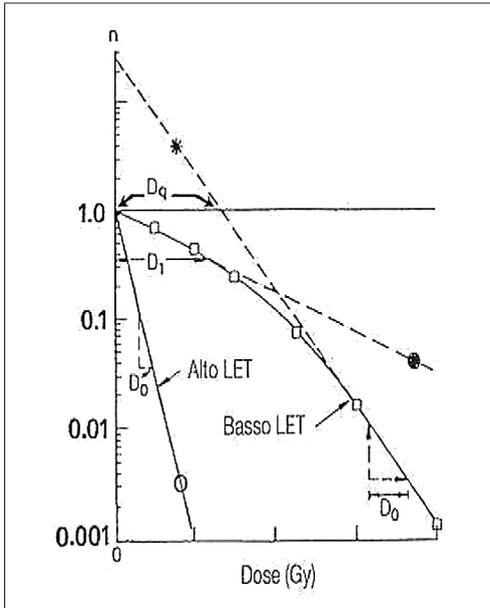
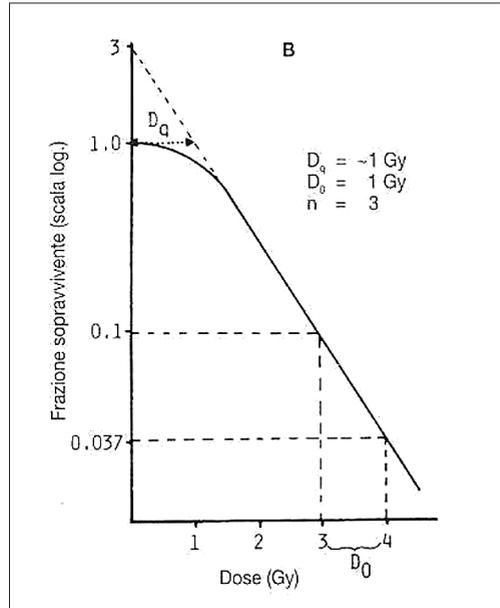


Figura 5: Andamento delle curve di sopravvivenza cellulare in funzione del LET



Nelle curve di sopravvivenza cellulare di cui alle figure 4 e 5, l'ampiezza della "spalla" è indicata dal parametro D_q (dose quasi soglia), cioè quella dose al di sotto della quale non c'è effetto. Il numero di estrapolazione $n = 3$ si ottiene estrapolando il tratto rettilineo della curva sull'asse di sopravvivenza:

- n è grande (10 - 12) quando la spalla è larga
- n è piccolo (1,5 - 3) quando la spalla è stretta.

n è correlato con la capacità della cellula di accumulare e riparare il danno subletale e rappresenta il numero di bersagli da colpire. La spalla è un importante parametro di radiosensibilità. La sua ampiezza è diversa nelle differenti popolazioni cellulari; una spalla ampia indica una capacità di recupero del danno subletale indotto dalle radiazioni; una spalla stretta indica una limitata tendenza al recupero. La pendenza della parte rettilinea della curva è determinata dalla costante D_0 che indica l'incremento di dose capace di ridurre la sopravvivenza cellulare di un fattore $1/e$ (pari a 0.37). Questa è anche indicata come dose letale media. D_0 , dunque, esprime l'incremento di dose che riduce la popolazione esistente al 37% del suo valore iniziale nel tratto rettilineo della curva di sopravvivenza.

In generale la correlazione dose-risposta¹⁶ è lineare-quadratica per radiazioni a basso trasferimento di energia (LET), e tende verso la linearità all'aumentare del LET. È stato dimostrato che gli effetti biologici delle radiazioni ionizzanti non sono correlati unicamente alla quantità di energia assorbita da organi e tessuti ma anche alla densità di ionizzazione³⁵ (numero di ioni prodotti nella materia dalla radiazione incidente).

La relazione lineare-quadratica è del tipo: $E(D) = \alpha D + \beta D^2$ dove $E(D)$ è l'effetto sulla cellula in corrispondenza ad una dose D e i coefficienti α e β dipendono dall'effetto considerato, dal tipo di cellula, dal tipo di radiazione e dalla fase cellulare in cui avviene il danno. α dipende dal tipo di radiazione e lega la letalità cellulare al danno per colpo singolo, in modo lineare, mentre β tende a decrescere per radiazioni ad alto LET e lega la letalità cellulare al danno per somma di sub-letali, in modo quadratico. Questo conferma l'ipotesi di un andamento lineare della relazione dose-risposta all'aumentare del LET³³.

La maggior parte degli effetti sulla salute conseguenti alle esposizioni alle radiazioni può essere raggruppata in due categorie generali:

- effetti deterministici (reazioni tissutali avverse) dovuti in grande parte alla morte o a disfunzioni cellulari, conseguenti a esposizione a dosi elevate;
- effetti stocastici, come, per esempio, neoplasie ed effetti ereditari che possono comportare lo sviluppo di tumori negli individui esposti a causa della mutazione di cellule somatiche, o malattie ereditarie nella loro progenie, a seguito di mutazione di cellule riproduttive (germinali).

Se le dosi sono elevate e ricevute in breve tempo, l'effetto si manifesta rapidamente con alterazioni funzionali e con lesioni organiche. In questo caso, si parla di effetti immediati delle radiazioni. Se le dosi sono di media entità o anche elevate, ma ricevute in tempi molto lunghi, il danno si manifesta solo in una piccola frazione degli individui e compare molto tempo dopo l'irradiazione. Questo effetto consiste per lo più in tumori con mortalità più o meno alta. In questo caso, si parla di effetti tardivi. Quando le dosi di radiazione sono ricevute dalle gonadi di individui che avranno prole, occorre considerare anche gli effetti ereditari sui discendenti che compariranno in tutti o in una frazione di essi, motivo per il quale alle donne in gravidanza la normativa vieta qualsiasi tipo di esposizione. Dall'assorbimento di energia fino alla manifestazione di effetti tardivi dannosi nell'uomo, possono intercorrere anche anni e decenni e la letalità dell'evento può essere più o meno immediata a seconda delle dosi ricevute, delle modalità di irradiazione ed anche dei meccanismi di difesa e delle possibilità di riparazione del danno, a livello cellulare, da parte dell'organismo. Gli effetti immediati, sono, dunque, causati da dosi molto elevate ricevute in tempi brevi. Si tratta di irradiazione acuta sia per quanto riguarda l'irradiazione esterna che quella interna. Essi si manifestano solo se, in un certo intervallo di tempo, è superato un certo valore soglia di dose caratteristico per ogni effetto e sono, per loro natura, effetti di tipo deterministico o non stocastico. Inoltre, essi sono caratterizzati da un aspetto di gradualità, nel senso che al crescere della dose, si nota un aggravamento dei sintomi.

Gli effetti tardivi riguardano essenzialmente quei tessuti a lenta proliferazione e non richiedono il superamento di un valore soglia per la loro comparsa. La loro frequenza di comparsa è piccola o piccolissima sull'insieme delle persone esposte. Questa peculiarità conferisce loro un carattere probabilistico o stocastico. Infatti, la frequenza di comparsa aumenta con le dosi assorbite. Il loro periodo di latenza va da pochi anni a decenni e non mostrano un effetto di gradualità di manifestazione, nel senso che sono del tipo si-no (tutto o niente) quale che sia stata la dose ricevuta. I danni ereditari da radiazioni sono di natura genetica e compaiono nei discendenti degli individui che sono stati irradiati sulle gonadi. I danni per la salute possono avere tempi di latenza anche di 10 o 20 anni o più, rispetto al periodo di esposizione che li ha indotti.

Tabella 5: Dosi stimate per diversi tipi di danno

Tessuto ed Effetto soglia	Dose totale ricevuta in una singola esposizione acuta (Gy)	Dose totale ricevuta in esposizioni fortemente frazionate o protratte nel tempo (Gy)	Rateo di dose annua in esposizioni fortemente frazionate o croniche per molti anni (Gy/y)
Testicoli			
Sterilità temporanea	0.15	/	0.4
Sterilità permanente	3.5 - 6	/	2.0
Ovaie			
Sterilità	2.5 - 6	6.0	> 2.0
Cristallino			
Opacità visibili	0.5 - 2.0	5.0	> 0.1
Cataratta	5.0	> 8.0	> 0.15
Midollo osseo			
Depressione dell'ematopoiesi	0.5	/	> 0.4

4.1 Effetti Deterministici

A dosi elevate, come ad esempio in situazioni di emergenza, le esposizioni a radiazioni possono provocare effetti deterministici (risposta dei tessuti). Tale danno clinicamente osservabile si presenta al di sopra di determinate dosi soglia. L'entità del danno dipende dalla dose assorbita e dal rateo di dose così come dalla qualità della radiazione e dalla sensibilità alle radiazioni del tessuto. La ragione dell'esistenza di un valore soglia sta nel fatto che il danneggiamento (morte o disfunzione grave) di una popolazione critica di cellule in un dato tessuto causato dalle radiazioni, deve essere sostanziale prima che una lesione si esprima in forma clinicamente rilevante. Al di sopra della dose soglia, la gravità della lesione, inclusa la diminuzione della

capacità di recupero del tessuto, aumenta con la dose. Per valori di dose assorbita fino a circa 100 mGy si ritiene che nessun tessuto esprima danni funzionali clinicamente rilevanti. Questa valutazione si applica sia a singole irradiazioni acute sia alle situazioni dove tali basse dosi sono assorbite nel corso del tempo come esposizioni annuali ripetute.

È scientificamente provato che la struttura dei tessuti e degli organi svolge un ruolo importante nella loro risposta all'irradiazione. Gli organi in coppia, o gli organi dove le SubUnità Funzionali (FSU) sono organizzate in parallelo invece che in serie, possono subire l'inattivazione di molte FSU senza segni clinici di lesione, a causa di una sostanziale capacità di riserva e di compensazione da parte delle FSU residue. Questa è una delle ragioni principali della presenza di una dose soglia per le lesioni clinicamente evidenti, ed in particolare per l'elevata resistenza all'irradiazione parziale del corpo.

I danni somatici deterministici possono essere riassunti in sindrome da irradiazione "total body", alterazioni ematologiche, sintomatologia generale, sintomatologia a carico di: apparato gastrointestinale, respiratorio, reni, encefalo, come riportato nella tabella 6:

Tabella 6: Danni somatici deterministici

Sindrome acuta da radiazione	Dose assorbita (Gy)	Forma clinica
	0.25	Sopravvivenza "virtualmente" certa;
	1	Soglia della sindrome (ospedalizzazione);
Forma ematologica	1 – 2	Sopravvivenza probabile;
	2 – 5	Sopravvivenza possibile;
	5 – 6	Sopravvivenza "virtualmente" impossibile;
Forma gastrointestinale	6 – 7	Soglia della sindrome gastrointestinale
Forma neurologica	10	Soglia della sindrome neurologica

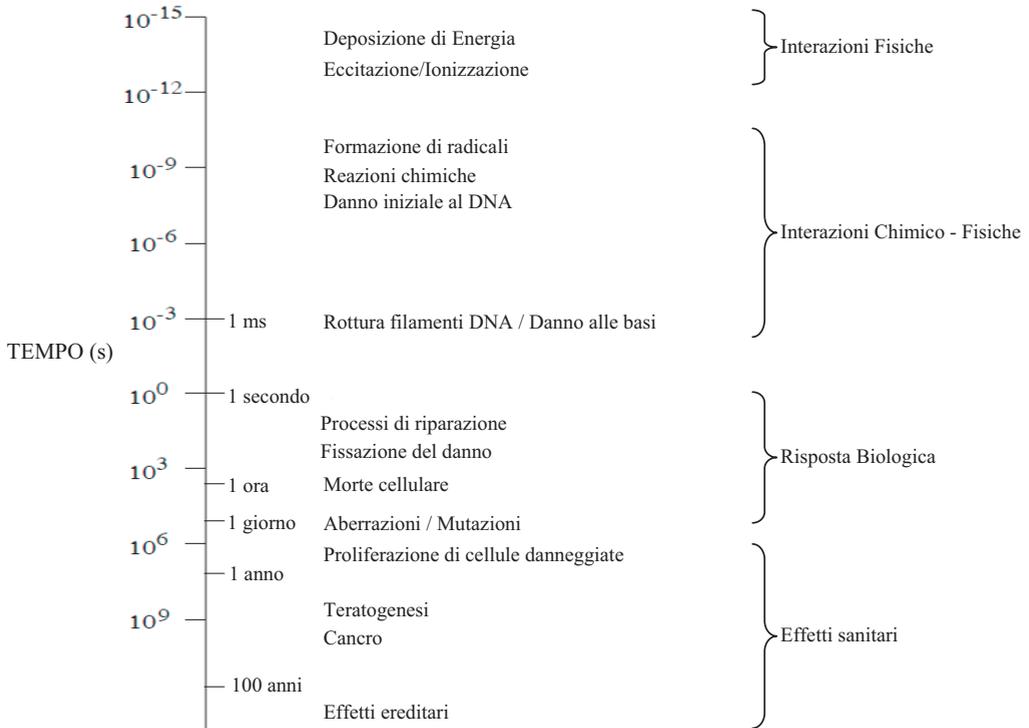
La sindrome ematologica deriva dalla riduzione del numero delle cellule ematiche della serie bianca e rossa. La morte può avvenire in seguito a possibili infezioni per caduta delle difese immunitarie per riduzione del numero delle cellule della serie bianca ed emorragie da deficit piastrinico. La depressione dell'emopoiesi compare dopo esposizione acuta di 0,5 Gy, il decesso avviene dopo esposizione di 1 - 3 Gy. La sindrome gastroenterica si manifesta dopo 7-10 giorni da un'esposizione acuta superiore a 6 Gy con dolori addominali tipo colica, diarrea ematica, vomito, gravi turbe elettrolitiche. La sua sintomatologia scaturisce dal fatto che la mucosa che ricopre il tratto digerente è estremamente vulnerabile alle radiazioni, in quanto sede di intensa attività rigenerativa. La morte avviene dopo circa dieci - quindici giorni dall'esposizione.

La sindrome neurologica è rappresentata da edema cerebrale, convulsioni, coma, morte che avviene, solitamente, entro due giorni dalla irradiazione acuta superiore a 10 Gy. La sindrome si manifesta per azione diretta delle radiazioni sulle cellule nervose e sui vasi cerebrali con un quadro di grave compromissione del Sistema Nervoso Centrale.

4.2 Effetti Stocastici

Secondo una definizione dell'ICRP³⁶, gli effetti stocastici tengono conto dei danni in cui solo la probabilità di accadimento e non la gravità è funzione della dose ed è cautelativamente esclusa l'esistenza di una dose soglia. La protezione radiologica nel campo delle basse dosi¹³ è principalmente rivolta alla protezione contro i tumori radio-indotti e i danni genetici. Questi effetti sono considerati essere intrinsecamente probabilistici, senza soglia, e soggetti ad un aumento di frequenza proporzionale alla dose di radiazione. Nella definizione e nel calcolo della dose efficace i fattori di ponderazione della radiazione raccomandati, permettono di tenere conto delle differenze nell'effetto dei vari tipi di radiazioni nel provocare gli effetti stocastici, mentre i fattori di ponderazione del tessuto, permettono di tenere conto delle variazioni nella sensibilità alle radiazioni dei diversi organi e tessuti rispetto all'induzione di effetti stocastici. Per quanto riguarda le neoplasie, gli studi epidemiologici e sperimentali forniscono, anche se con incertezze non trascurabili, evidenze di rischio connesso con l'esposizione alle radiazioni a livelli di dose di circa 100 mGy o inferiori. Nel caso delle malattie ereditarie, sebbene non ci sia prova diretta di rischi legati alle radiazioni per gli esseri umani, vi sono osservazioni sperimentali che forniscono argomenti convincenti per sostenere come tali rischi per le future generazioni dovrebbero essere inclusi nel sistema di protezione. Al di sotto di circa 100 mSv, è scientificamente plausibile assumere che l'incidenza di neoplasie o di effetti ereditari aumenti in modo direttamente proporzionale con l'aumento della dose equivalente negli organi e tessuti interessati. Questo modello dose-risposta è generalmente noto come "lineare senza soglia" o LNT (*linear non threshold*). Continua a non esservi alcuna evidenza diretta che l'esposizione dei genitori alle radiazioni possa condurre ad un eccesso di malattie ereditarie nella progenie. Tuttavia, il mondo scientifico ritiene che vi siano prove certe che l'irradiazione provochi degli effetti ereditari in animali da laboratorio. Pertanto, si continua ad includere, in via cautelativa, anche il rischio di effetti ereditari nei sistemi di radioprotezione.

Figura 6: Schema temporale relativo agli effetti stocastici



4.3 Effetti Ereditari

L'esposizione alla radiazione ionizzante, anche a dosi basse, può causare un danno al patrimonio genetico nel nucleo delle cellule che può dar luogo, a distanza di anni, allo sviluppo di tumori radio-indotti, a danni genetici nelle future generazioni e, in certe condizioni, ad alcuni effetti inerenti lo sviluppo¹⁴.

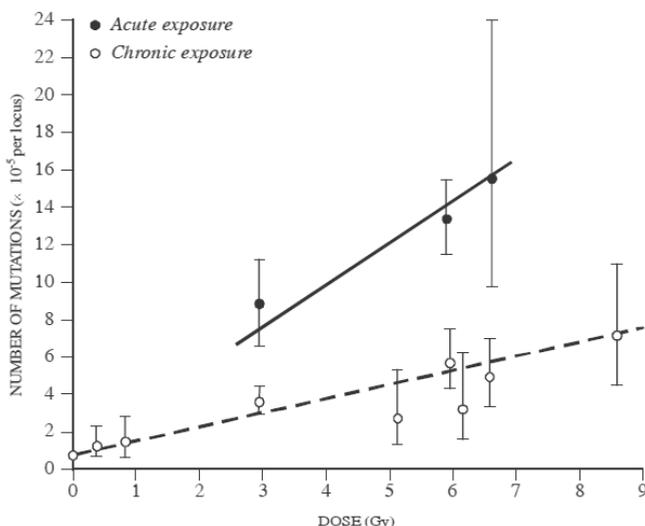
La valutazione del danno ereditario da radiazioni può essere estrapolato da dati sperimentali su studi di animali irradiati. Ciò implica necessariamente alcune assunzioni che la comunità scientifica ha ampiamente accettato³⁷:

- il danno genetico indotto da un tipo di radiazione in particolari condizioni, è lo stesso nelle cellule germinali umane e in quelle di animali usati come modelli;
- i vari fattori fisici e biologici che descrivono il danno genetico sull'uomo sono estrapolati da esperimenti su animali;
- a basse dosi e a bassi dose-rate, per radiazione a basso LET, c'è una relazione lineare tra la dose e la frequenza di effetti genetici studiati su animali.

Molti studi sui topi hanno fornito le basi principali per la stima del rischio di danno gene-

tico sull'uomo e significative relazioni dose-risposta relative all'induzione di mutazioni nelle cellule germinali degli stessi animali. In figura 7 si riporta un esempio di relazione dose-risposta relativa alla spermatogenesi di topi sottoposti ad irradiazione³⁸.

Figura 7: Mutazioni specifiche nella spermatogenesi dei topi (Fonte: Russell, W.L. and E.M. Kelly³⁸)



La differenza nella pendenza delle curve riflette il diverso dose-rate e l'opportunità di riparare il danno a bassi dose-rate (esposizione cronica o acuta). Tuttavia, gli stessi studi, concludono che una frazione sostanziale del danno al DNA, che risulta nell'induzione di effetti ereditari, non è riconducibile ad un'efficace riparazione del danno stesso a prescindere dai valori del dose-rate.

Nuovi dati confermano la suscettibilità dell'embrione agli effetti letali dell'irradiazione nel periodo di preimpianto dello sviluppo embrionale. Prima dell'impianto dell'embrione, dalla fecondazione al 9° giorno, gli effetti sono del tipo tutto o nulla (morte o nessun effetto). Nel periodo di morfogenesi, dal 9° giorno alla fine del 2° mese, i tessuti sono molto radiosensibili con elevata probabilità di induzione di malformazioni. Tali effetti sono, comunque, molto rari per dosi inferiori a 100 mGy. Per quanto riguarda l'induzione di malformazioni, studi recenti rafforzano l'opinione che ci sia una dipendenza della radiosensibilità intrauterina dal periodo di gestazione, con la manifestazione della massima sensibilità durante il periodo della organogenesi. Nella fase fetale, dall'inizio del 3° mese al termine della gravidanza, diminuiscono la frequenza del danno e la gravità delle malformazioni ma è sempre più rilevante il rischio di sviluppo difettoso del sistema nervoso centrale. La massima sensibilità del cervello fetale è tra l'8ª e la 15ª settimana. Il danno principale è un eventuale ritardo mentale. Nel periodo tra la 3ª settimana dal concepimento a fine gestazione è probabile

che l'esposizione possa determinare effetti stocastici che si esprimono in epoca post-natale (leucemie).

I risultati degli studi sugli animali non possono essere usati direttamente per ottenere stime quantitative sui rischi genetici per l'uomo a causa della differente radiosensibilità. Tuttavia, gli stessi, risultano estremamente utili per la determinazione degli andamenti delle curve dose-risposta e per la valutazione dei fattori biologici e fisici che influenzano le stesse curve. L'analisi di diversi studi sui topi, ha mostrato che il valore di dose più basso a cui si manifesta un effetto ereditario avverso, dipende da vari fattori come, ad esempio, la radiosensibilità della specie in considerazione, la frequenza di tumori spontanei e dal range di dosi utilizzato. Tuttavia, si ritiene che ci sia una vera soglia di dose di circa 100 mGy per l'induzione di malformazioni; conseguentemente, per gli scopi pratici, si ritiene che non siano attesi rischi di malformazione a seguito dell'esposizione in utero a dosi ben al di sotto 100 mGy.

5. Classificazione delle attività industriali non nucleari con radiazioni ionizzanti

L'esposizione dell'uomo alla radiazione naturale può essere sostanzialmente suddivisa in due contributi principali: raggi cosmici di alta energia incidenti sull'atmosfera terrestre e nuclidi radioattivi che hanno origine nella crosta terrestre e sono presenti dovunque nell'ambiente. Sia la contaminazione interna che l'irradiazione esterna possono essere indotte nell'uomo da queste tipologie di sorgenti.

I materiali radioattivi contenuti nel terreno e nelle rocce e usati come materie prime in alcuni processi industriali, sono quelli cosiddetti "primordiali", cioè quelli che hanno tempi di dimezzamento dell'ordine dell'età della terra e sono: ^{40}K e le catene di decadimento del ^{232}Th e dell' ^{238}U . Essi producono campi di radiazione a cui è sottoposto l'organismo umano inducendo significative esposizioni. Gli ultimi due, in particolare, sono responsabili delle esposizioni maggiori anche a causa della presenza dei cosiddetti "figli" generati dal loro decadimento radioattivo i quali, tuttavia in natura, risultano in equilibrio secolare con i loro progenitori.

L'industria estrattiva mineraria, negli ultimi anni ha subito un brusco calo nel numero di lavoratori impiegati nel settore. Fino agli anni '90 si stimavano circa 25 milioni di lavoratori nel mondo impiegati nell'industria estrattiva; già negli anni duemila, si è scesi a poco meno di 7 milioni⁴³.

Ci sono tre tipi di materiali che devono essere presi in considerazione separatamente ai fini di un significativo rischio fisico da radiazioni:

- Minerali;
- Residui;
- Prodotti.

I minerali possono contenere concentrazioni di attività che variano da qualche Bq/g a qualche decina di Bq/g. Tali materiali sono generalmente estratti e processati in grandi quantità. Le loro caratteristiche fisiche possono variare da sabbia a roccia densa e, nella maggior parte dei casi, vengono importati in Europa da Paesi in via di sviluppo. La produzione di residui può avvenire attraverso differenti processi industriali come la separazione di massa, volatilizzazione di piombo e polonio o per mezzo di reazioni chimiche. Le concentrazioni di attività di incrostazioni e residui, possono arrivare a centinaia di Bq/g per alcuni radionuclidi. Le loro quantità sono in genere minori di quelle relative ai minerali.

In alcuni casi, i prodotti industriali possono contenere elevati livelli di concentrazione di radio e/o di torio sebbene non vengano sfruttati per le loro proprietà radioattive. Anche per i prodotti, la concentrazione di attività può essere di alcune centinaia di Bq/g.

La United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), nel 2000 pubblicò un report³³ nel quale vengono riportati i ratei calcolati di produzione media globale di radionuclidi cosmogenici per unità di superficie della terra e la produzione annuale totale (tab. 7).

Tabella 7: Ratei di produzione e concentrazioni di radionuclidi cosmogenici nell'atmosfera (fonte UNSCEAR 2000)³³

Radionuclide	Production rate		Global inventory (PBq)	Fractional amount in troposphere ^a	Concentration in troposphere ^b (mBq m ⁻³)
	Per unit area ^a (atoms m ⁻² s ⁻¹)	Annual amount ^c (PBq a ⁻¹)			
³ H	2 500	72	1 275	0.004	1.4
⁷ Be	810	1 960	413	0.11	12.5
¹⁰ Be	450	0.000064	230	0.0023	0.15
¹⁴ C	25 000	1.54	12 750	0.016	56.3
²² Na	0.86	0.12	0.44	0.017	0.0021
²⁶ Al	1.4	0.000001	0.71	7.7 10 ⁻⁸	1.5 10 ⁻⁸
³² Si	1.6	0.00087	0.82	0.00011	0.000025
³² P	8.1	73	4.1	0.24	0.27
³³ P	6.8	35	3.5	0.16	0.15
³⁵ S	14	21	7.1	0.08	0.16
³⁶ Cl	11	0.00013	5.6	6 10 ⁻⁸	9.3 10 ⁻⁸
³⁷ Ar	8.3	31	4.2	0.37	0.43
³⁹ Ar	56	0.074	28.6	0.83	6.5
⁴¹ Kr	0.01	1.7 10 ⁻⁸	0.005	0.82	0.0012

a: Riferimenti 39 e 40

b: Assumendo il volume della troposfera pari a 3.62275 10¹⁸ m³; ³⁹

c: Assumendo l'area della superficie della terra pari a 5.1005 10¹⁴ m²; ⁴¹

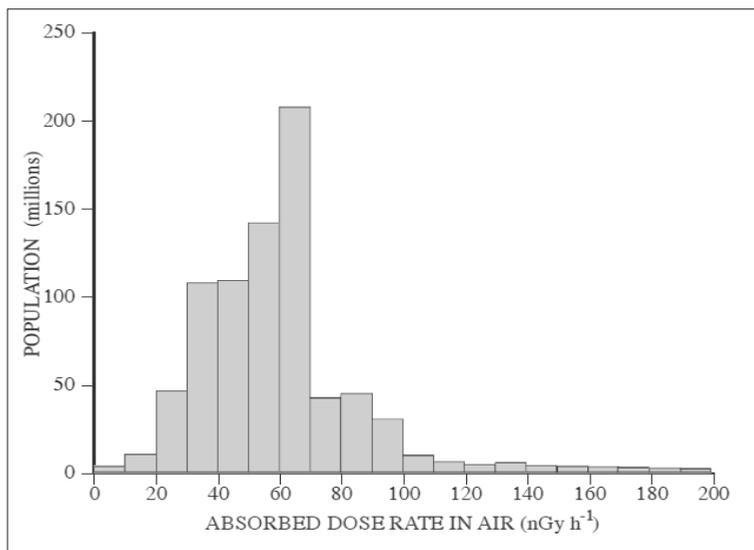
Dallo stesso lavoro della UNSCEAR di cui sopra, nella tabella 8 vengono riportati i risultati di analisi spettrometriche effettuate in diversi paesi nel corso degli anni che permettono di stimare le concentrazioni di radionuclidi naturali nel terreno:

Tabella 8: Radionuclidi naturali contenuti nel terreno (fonte UNSCEAR 2000)³³

Region / country	Population in 1996 (10 ⁶)	Concentration in soil (Bq kg ⁻¹)							
		⁴⁰ K		²³⁸ U		²²⁶ Ra		²³² Th	
		Mean	Range	Mean	Range	Mean	Range	Mean	Range
Africa									
Algeria	28.78	370	66-1 150	30	2-110	50	5-180	25	2-140
Egypt	63.27	320	29-650	37	6-120	17	5-64	18	2-96
North America									
Costa Rica	3.50	140	6-380	46	11-130	46	11-130	11	1-42
United States [M7]	269.4	370	100-700	35	4-140	40	8-160	35	4-130
South America									
Argentina	35.22	650	540-750						
East Asia									
Bangladesh	120.1	350	130-610			34	21-43		
China [P16, Z5]	1232	440	9-1 800	33	2-690	32	2-440	41	1-360
- Hong Kong SAR [W12]	6.19	530	80-1 100	84	25-130	59	20-110	95	16-200
India	944.6	400	38-760	29	7-81	29	7-81	64	14-160
Japan [M5]	125.4	310	15-990	29	2-59	33	6-98	28	2-88
Kazakstan	16.82	300	100-1 200	37	12-120	35	12-120	60	10-220
Korea, Rep. of	45.31	670	17-1 500						
Malaysia	20.58	310	170-430	66	49-86	67	38-94	82	63-110
Thailand	58.70	230	7-712	114	3-370	48	11-78	51	7-120
West Asia									
Armenia	3.64	360	310-420	46	20-78	51	32-77	30	29-60
Iran (Islamic Rep. of)	69.98	640	250-980			28	8-55	22	5-42
Syrian Arab Republic	14.57	270	87-780	23	10-64	20	13-32	20	10-32
North Europe									
Denmark [N5]	5.24	460	240-610			17	9-29	19	8-30
Estonia	1.47	510	140-1 120			35	6-310	27	5-59
Lithuania	3.73	600	350-850	16	3-30			25	9-46
Norway	4.35	850		50		50		45	
Sweden	8.82	780	560-1 150			42	12-170	42	14-94
West Europe									
Belgium	10.16	380	70-900			26	5-50	27	5-50
Germany	81.92		40-1 340		11-330		5-200		7-134
Ireland [M6]	3.55	350	40-800	37	8-120	60	10-200	26	3-60
Luxembourg	0.41	620	80-1 800			35	6-52	50	7-70
Netherlands [K2]	15.58		120-730		5-53	23	6-63		8-77
Switzerland	7.22	370	40-1 000	40	10-150	40	10-900	25	4-70
United Kingdom [B2]	58.14		0-3 200		2-330	37			1-180
East Europe									
Bulgaria	8.47	400	40-800	40	8-190	45	12-210	30	7-160
Hungary	10.05	370	79-570	29	12-66	33	14-76	28	12-45
Poland [J7]	38.60	410	110-970	26	5-120	26	5-120	21	4-77
Romania [I12]	22.66	490	250-1 100	32	8-60	32	8-60	38	11-75
Russian Federation	148.1	520	100-1 400	19	0-67	27	1-76	30	2-79
Slovakia	5.35	520	200-1 380	32	15-130	32	12-120	38	12-80
South Europe									
Albania	3.40	360	15-1 150	23	6-96			24	4-160
Croatia	4.50	490	140-710	110	83-180	54	21-77	45	12-65
Cyprus	0.76	140	0-670			17	0-120		
Greece	10.49	360	12-1 570	25	1-240	25	1-240	21	1-190
Portugal	9.81	840	220-1 230	49	26-82	44	8-65	51	22-100
Slovenia	1.92	370	15-1 410			41	2-210	35	2-90
Spain	39.67	470	25-1 650			32	6-250	33	2-210
Median		400	140-850	35	16-110	35	17-60	30	11-64
Population-weighted average		420		33		32		45	

La figura 8 (fonte UNSCEAR 2000)³³, riporta la distribuzione totale della popolazione ottenuta combinando i dati di 25 Paesi differenti, ognuno con i propri valori medi di rateo di dose assorbita in aria in siti outdoor da radiazione γ . Ogni intervallo di rateo di dose rappresenta una decade di valori di rateo di dose.

Figura 8: Distribuzione della popolazione di 25 Paesi in funzione della dose assorbita in aria all'esterno da radiazione γ (fonte UNSCEAR 2000)³³



Alcune forme di esposizione alle sorgenti naturali radioattive sono modificate dalle pratiche umane. L'industria utilizza diversi materiali grezzi che contengono elementi radioattivi. In particolare i radionuclidi possono essere rilasciati nell'ambiente durante l'estrazione e la lavorazione di minerali, nella lavorazione e produzione di fertilizzanti a base di fosfati e nella combustione di combustibili fossili. Queste pratiche, insieme ad altre di minore rilevanza radiologica, causano un indebito aumento dell'esposizione umana ai radionuclidi naturali, soprattutto ai lavoratori del settore. I principali fattori che determinano un'esposizione radiologica di un individuo, sono le concentrazioni dei radionuclidi nel terreno, il tempo trascorso all'esterno e la possibilità di schermature (all'interno di edifici, ad es.).

Un'attenzione particolare, dunque, deve essere rivolta a quei materiali a elevato contenuto di radioattività naturale utilizzati nell'industria:

- NORM (Naturally Occurring Radioactive Materials);
- TENORM (Technological Enhanced Natural Occurring Radioactive Materials).

L'esposizione a NORM e TENORM può provocare sia irradiazione esterna che contaminazione interna. Generalmente, le installazioni vengono situate lontano da aree

residenziali così da diminuire la componente dovuta ad irradiazione esterna per la popolazione residente.

Tutte le attività in cui sono utilizzati o manipolati materiali radioattivi generano rifiuti radioattivi. Fra queste attività le più significative dal punto di vista radiologico, che però esulano dagli obiettivi del presente documento, sono:

- il ciclo del combustibile nei reattori nucleari di potenza;
- la produzione e l'uso di radioisotopi (medicina, industria ecc.);
- le decontaminazioni;
- la disattivazione degli impianti nucleari.

Il d.lgs. 230/1995¹, è stato modificato nel suo testo originario dal d.lgs. 241/00³, che, recependo la Direttiva 96/29/Euratom², ha aggiunto con l'art. 5 alla formulazione originaria il Capo III-bis: *“Esposizioni da attività lavorative con particolari sorgenti naturali di radiazioni” e l'Allegato I-bis, relativi specificatamente alle radiazioni di origine naturale”*.

Il Capo III-bis si applica a tutte le attività lavorative in cui le radiazioni non derivano dalle materie prime o dai prodotti del processo produttivo, ma da sorgenti naturali. In particolare (articolo 10-bis, comma 1): *“Le disposizioni del presente capo si applicano alle attività lavorative nelle quali la presenza di sorgenti di radiazioni naturali conduce ad un significativo aumento dell'esposizione dei lavoratori o di persone del pubblico, che non può essere trascurato dal punto di vista della radioprotezione”*. L'allegato I-bis riporta l'elenco delle attività lavorative di cui all'articolo 10 bis, comma 1, lettere c) e d) che possono comportare l'utilizzo, la manipolazione e lo smaltimento di materiale radioattivo:

- a. industria che utilizza minerali fosfatici e depositi per il commercio all'ingrosso di fertilizzanti;
- b. lavorazione di minerali nella estrazione di stagno, ferro-niobio da pirocloro e alluminio da bauxite;
- c. lavorazione di sabbie zirconifere e produzione di materiali refrattari;
- d. lavorazione di terre rare;
- e. lavorazione ed impiego di composti del torio, per quanto concerne elettrodi per saldatura con torio, produzione di lenti o vetri ottici e reticelle per lampade a gas;
- f. produzione di pigmento al biossido di titanio;
- g. estrazione e raffinazione di petrolio ed estrazione di gas, per quanto concerne presenza e rimozione di fanghi e incrostazioni in tubazioni e contenitori.

Tutte le attività industriali di cui sopra, e riportate in dettaglio nei successivi paragrafi, non sfruttano le proprietà radioattive fissili o fertili dei radioisotopi naturali presenti nelle materie in ingresso ai cicli produttivi e non rientrano, pertanto, nella definizione di “pratiche” ai sensi del d.lgs. 230/1995¹ e s.m.i., ma nell'elenco delle “attività lavorative con sorgenti naturali di radiazioni ionizzanti” di cui al Capo III bis e all'Allegato 1 Bis del suddetto Decreto Legislativo.

5.1 Miniere di fosfati e produzione di fertilizzanti

Nelle attività in miniera e nel processamento di rocce fosfatiche (fosforiti), utilizzato nella produzione di acido fosforico o elementi fosforosi, sono presenti residui che contengono NORM.

Questi tipi di attività servono soprattutto per la produzione di fertilizzanti, detersivi, cibi per animali, additivi alimentari, pesticidi ed altri prodotti chimici. L'80 % di minerale fosfatico usato si presenta come fosforite o fosfati di calcio³⁷. La concentrazione tipica del fosfato (P_2O_5) nella fosforite è dell'ordine del 15 - 30% con argilla, sabbia, carbonato ed altre impurità presenti in quantità variabili. La fosforite ha una tipica concentrazione di uranio di circa 1500Bq/kg. Anche i radionuclidi provenienti dalla catena di decadimento del ^{232}Th sono presenti nelle fosforiti, ma in concentrazioni che vanno da uno a due ordini di grandezza in meno (Tabella 9).

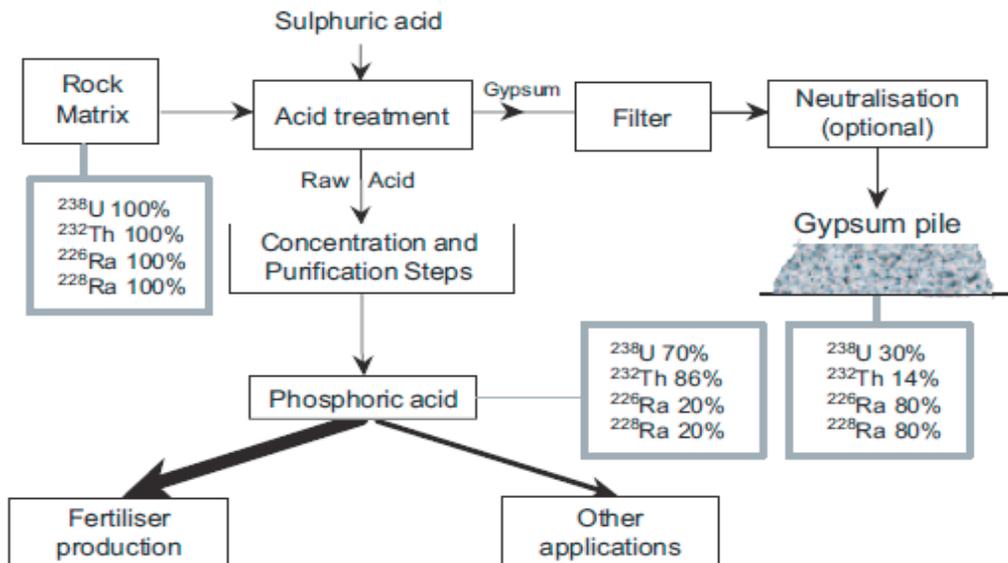
Tabella 9: Concentrazioni rappresentative di NORM nella produzione di fosfati

Prodotto	^{238}U (Bq/kg)	^{226}Ra (Bq/kg)	^{232}Th (Bq/kg)
Acido fosforico	1200 – 1500	300	/
Superfosfato	500 – 1100	110 - 1000	15 - 45
Triplo Superfosfato	800 – 2200	200 - 800	45
Fosfato mono-ammonio	2000	20	63
Fosfato di-ammonio	2300	210	< 15
Fertilizzanti PK	410	370	< 15
Fertilizzanti NP	920	310	< 30
Fertilizzanti NPK	440 - 470	210 - 270	< 15

L'uranio può essere incorporato nella fosforite sedimentata attraverso sostituzione ionica nei cristalli di carbonato. La fosforite ignosa contiene meno uranio ma più torio. Inoltre, nella catena di decadimento dell'uranio, si ha la formazione di radon(^{222}Rn), un gas nobile estremamente pericoloso e nocivo per l'organismo umano.

I principali processi industriali di lavorazione dei minerali fosfatici prevedono il trattamento termico e tecniche a "umido".

Figura 9: Processo industriale di lavorazione dei minerali fosfati (fonte IAEA 2003)^o



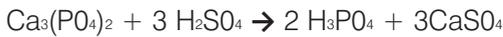
Alti contenuti di fosfato usualmente corrispondono ad elevati contenuti di uranio (50-300 ppm). Durante il trattamento, le particelle di fosfato sono separate dal resto del minerale, ma la lavorazione, tuttavia, non riduce la concentrazione di radionuclidi. Trattando la fosforite con acidi si ha la produzione di acido fosforico [H_3PO_4] che poi viene separato ed ulteriormente processato. Il trattamento con acido solforico conduce alla formazione di fosfogessi, materiale molto poco solubile nella miscela risultante dalla reazione. Se l'acido fosforico risultante non viene usato come fertilizzante, esso subisce un ulteriore trattamento di purificazione per mezzo di estrazione di solventi. In genere la produzione di 1 tonnellata di fosfato (P_2O_5) risulta nella generazione di 4-5 tonnellate di fosfogessi. Circa l'80% di ^{226}Ra , il 30% di ^{232}Th e il 14% di ^{238}U vengono rilasciati nei fosfogessi come principali rifiuti generati dalla produzione di acido fosforico. Essi si presentano sotto forma di fanghi e normalmente vengono stoccati in depositi o scaricati in fiumi o mari. L'attività del radio nei fosfogessi, varia da valori confrontabili al fondo fino a circa 2000 Bq/kg. Il rilascio di ioni del radio da fosfogessi è principalmente determinato dalla scarsissima solubilità degli stessi. La dose risultante dalla ingestione di acqua e/o cibi contaminati è generalmente di bassa entità, essenzialmente trascurabile anche in gruppi critici come le persone che vivono nelle vicinanze degli impianti. Anche l'esposizione dovuta alla inalazione di polveri e radon è generalmente bassa. Inoltre, i gessi induriscono abbastanza rapidamente quando esposti all'aria. I problemi derivanti dal deposito di fanghi di CaF_2 sono confrontabili con la potenziale esposizione dovuta ai depositi di fosfogessi eccetto che i primi contengono più uranio e radio.

La figura 10 mostra un tipico stabilimento utilizzato per la produzione di acido fosforico. Rifiuti addizionali nella produzione di acido solforico, provengono da residui depositati in piccole quantità di pompaggio e/o di filtrazione per separare i gessi solidi dagli acidi liquidi. Questo tipo di rifiuto comporta concentrazioni di attività di radionuclidi fino a 1000 volte superiori a quelle dei fosfogessi.

Figura 10: Impianto per la produzione di acido fosforico



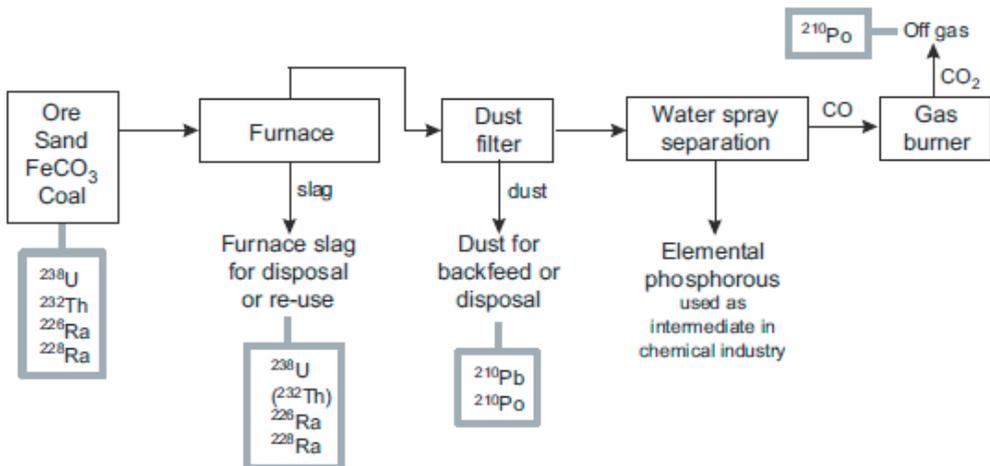
Nel processo umido, l'acido solforico H_2SO_4 viene usato nella concentrazione del 65% per produrre il 18% di superfosfato (una combinazione di acido fosforico e fosfogesso, calciumsulphate), materiale molto poco solubile che è il principale rifiuto generato dal processo umido per la produzione di acido fosforico. Il fosfogesso nasce come liquame ed è tipicamente depositato in cumuli o scaricato in fiumi o nel mare; la reazione è:



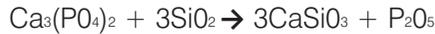
Gli isotopi di radio sono più facilmente trattenuti degli altri radionuclidi nel fosfogesso (circa l'80% della concentrazione del minerale).

Nei trattamenti termici (fornace a 1400 °C) i residui solidi (slag) formati nella fornace sotto forma di ferro-fosfori e silicati di calcio ($CaSiO_3$), contengono uranio, torio, radio ed alcuni isotopi del piombo, mentre una parte di altri isotopi del piombo e del polonio migrano dal forno sotto forma di gas.

Figura 11: Processo industriale termico di lavorazione dei minerali fosfati (fonte IAEA 2003).

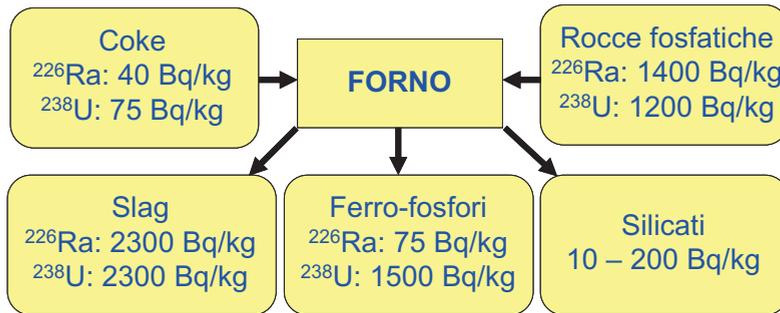


La quantità di polveri prodotte dal processo termico è minore dell'1% del minerale fosfato grezzo e contiene livelli di ^{210}Pb e ^{210}Po dell'ordine di 1000 Bq/kg. I due radionuclidi possono essere immobilizzati con il cemento. La concentrazione di ^{226}Ra nelle slag è di circa 1300-1500 Bq/kg e quella di ^{238}U si aggira intorno a 1100 Bq/kg. In questo processo il minerale fosfato è frantumato, miscelato con silicato (SiO_2 ghiaia) e coke, e riscaldato a 1500°C in una fornace elettrica. A queste temperature vengono prodotti i vapori di fosforo e di monossido di carbonio (P_2O_5 e CO). Il fosforo è condensato e rimosso come liquido o solido, e velocemente sommerso in olio per prevenire reazioni con l'umidità dell'aria. Il fosforo è spesso convertito in acido fosforico, H_3PO_4 , per la produzione di fertilizzanti. Come sotto prodotto si formano grandi quantità di silicato di calcio (CaSiO_3). La reazione chimica è:



Circa il 95% dei radionuclidi volatili a causa delle alte temperature ($\approx 1500^\circ\text{C}$) viene rilasciato in aria (Figura 12).

Figura 12: Processo termico di lavorazione dei minerali fosfati



Sebbene la maggior parte di uranio e torio (ma non radio) rimanga nei fertilizzanti, la loro applicazione e uso non contribuisce in maniera evidente alla dose generale (massimo $2\ \mu\text{Sv/y}$ per individuo). I fosfati di calcio commerciali non contengono nessun radionuclide presente nel fosfato naturale. I fosfogessi possono essere usati anche come materiali da costruzione per strade ed edifici. Negli USA, i fosfogessi vengono usati soprattutto in agricoltura mentre altri usi sono proibiti a causa delle esalazioni di radon. Le slag di fosfato vengono usate nella produzione dell'asfalto e del cemento.

Si devono considerare tre maggiori pericoli ambientali correlati con la produzione di fosfogessi:

- Il potenziale rilascio di radio e di contaminanti non radioattivi;
- Esalazioni di radon nell'atmosfera;

- Il potenziale riutilizzo di materiali sfuggiti al controllo istituzionale.

La produzione di fosfogessi comporta, inoltre, i seguenti problemi:

- Grandi volumi di rifiuti;
- Persistenza a lungo termine del potenziale pericolo dovuto alla presenza di radionuclidi a vita media estremamente lunga;
- Solubilità dei rifiuti nell'acqua.

Le attività lavorative che possono comportare un rischio per la salute sono così riassunte:

- Esposizione a cumuli di minerale fosfato;
- Trattamento dei fanghi e delle incrostazioni;
- Sezionamento e taglio dei tubi.

Durante l'estrazione e la lavorazione dei minerali fosfatici, uno dei maggiori contributi all'esposizione proviene dalle esalazioni di radon. Alcuni studi⁴² hanno fornito stime di dose pro capite da radon durante le operazioni primarie di estrazione dei minerali fosfatici che vanno da 0.6 mSv/y a 4 mSv/y. Le concentrazioni di radionuclidi sono state stimate da $2 \cdot 10^4$ a 10^5 Bq/kg di ^{232}Th . Le dosi da radiazione esterna γ e da inalazione sono risultate inferiori a 2 mSv/y.

Nei trattamenti che utilizzano tecniche a "umido", la quasi totalità di uranio e la maggior parte del torio si ritrovano nell'acido fosforico mentre il radio rimane nei fosfogessi. Tipici valori della concentrazione di attività e relative dosi esterne da fosfogessi²⁸, sono riportate nella tabella 10:

Tabella 10: Concentrazioni di Attività specifica dei fosfogessi

Attività specifica risultante dal processamento a "umido" dei minerali	^{232}Th (Bq/kg)	^{228}Ra (Bq/kg)	^{40}K (Bq/kg)	Rateo di dose assorbita in aria (10^4 Gy/h)
Germania (fosforiti)	< 5	600	110	54
UK (fosforiti)	20	800	70	68
USA (fosforiti)	7	1500	/	126
Canada (fanghi di silicato di calcio)	/	2150	/	184
UK (fanghi di silicato di calcio)	/	1300 - 1500	/	110 - 130

Inoltre, nella tabella 11, vengono riportati l'attività specifica e il rateo di esalazione di radon per alcuni tipi di gesso e fosfogessi (spessore di 10 cm)²⁸:

Tabella 11: Concentrazioni di Attività specifica dei fosfogessi e rateo di esalazione di radon e toron

Materiale (spessore di 10 cm)	²³² Th (Bq/kg)	²²⁶ Ra (Bq/kg)	Rateo di esalazione ²²² Rn (Bq/h m ²)	Rateo di esalazione ²²⁰ Rn (Bq/h m ²)
Gesso naturale	15	5	0.2	30
Pietra arenaria	10	10	1.0	170
Fosfogesso (apatite)	15	20	0.37	150
Fosfogesso (fosforite)	15	260	24.1	80

Le dosi da radiazione esterna γ indotte dai cumuli di fosfogessi sono state stimate essere variabili tra 1.5 e 2.0 mSv/y⁴². Le dosi da inalazione di radon, dovute agli intonaci realizzati con fosfogessi nelle abitazioni, invece, sono state valutate con valori di poco inferiori a 10 mSv/y²⁸.

Nella lavorazione dei minerali con processi termici, come detto, si ha la formazione di fanghi di silicato di calcio che trattengono la maggior parte dell'uranio contenuto nel minerale fosfato originario. In questo caso, i lavoratori sono esposti a radiazione γ diretta, a particolato atmosferico contaminato e a radon. A causa delle alte temperature utilizzate, quasi tutto il radon, e più del 95 % dei radionuclidi relativamente volatili (²¹⁰Pb e ²¹⁰Po), vengono rilasciati in aria. Le esposizioni dei lavoratori per inalazione hanno fornito valori massimi pari a 3.3 mSv/y mentre le esposizioni esterne da radiazione γ , valori massimi pari a 2.4 mSv/y²⁸.

Le lavorazioni dei minerali fosfati per la produzione di fertilizzanti lascia, dunque, la maggior parte del ²²⁶Ra nei fosfogessi prodotti mentre il 75 - 80 % di ²³⁸U rimane nella fase liquida. Nella successiva tabella, vengono riportate tipiche attività specifiche relative ai più noti fertilizzanti²⁸:

Tabella 12: Concentrazioni di Attività specifica dei fertilizzanti

Fertilizzante	²³² Th (Bq/kg)	²³⁸ U (Bq/kg)	²²⁶ Ra (Bq/kg)	⁴⁰ K (Bq/kg)
Superfosfato (Germania)	15	520	520	140
Superfosfato (Russia)	44	/	110	120
Superfosfato (USA)	20	740	790	/
Triplo Superfosfato (Germania)	44	800	230	52
Triplo Superfosfato (USA)	48	2100	780	/
Monoammonio fosfato (Germania)	30	920	310	41
Monoammonio fosfato (USA)	63	2000	20	/
Diammonio fosfato (USA)	15	2300	210	/
NPK (Germania)	15	410	270	5200
NPK (USA)	54	440	9	1200
NPK (Belgio)	< 15	470	210	5900

Si ritiene che la stima della dose da irradiazione esterna ai lavoratori sia, in questo caso, di circa 0.5 mSv/y mentre il rateo di dose valutato in prossimità dei magazzini di fertilizzanti sia di circa 1 μ Sv/h che, per un'attività lavorativa di circa 2000 ore l'anno, porta ad una dose massima pari a 1 mSv per anno di esposizione.

5.2 Miniere di carbone e combustione

I combustibili fossili come il carbone, contengono radionuclidi che provengono dalle famiglie dell'uranio e del torio e il ^{40}K . La concentrazione di NORM nel carbone, nelle rocce e nelle acque, dipende dalle formazioni geologiche. La concentrazione di NORM nella cenere ed altri residui è vicina a quella presente nel carbone usato come combustibile. Per poter fare una stima del materiale radioattivo in gioco nel processo che va dall'estrazione alla combustione del carbone, è importante determinare la concentrazione, la distribuzione e la forma degli elementi radioattivi nel carbone, rocce, acque, ceneri ed in altri residui. Metalli pesanti e radionuclidi sono spesso associati alle componenti solfidriche del carbone. L'estrazione del carbone comporta la produzione di notevoli aliquote di roccia di risulta e di acqua di drenaggio che possono contenere quantità non trascurabili di radioattività. La combustione convenzionale del carbone negli impianti di potenza avviene con la produzione sia di ceneri, che vengono raccolte alla base dell'impianto stesso, che di ceneri volatili che vengono emesse dall'impianto. Radionuclidi volatili come il ^{210}Pb ed il ^{210}Po si accumulano nella cenere volatile e sulle particelle più piccole emesse durante la combustione. Essi possono accumularsi anche nei camini di emissione. I radionuclidi volatili tendono a trovarsi in un rapporto inverso tra la dimensione della particella e la concentrazione di attività. Le ceneri e i gessi di risulta possono essere impiegati e riciclati per la produzione di materiali edili contribuendo, così in maniera indebita, all'esposizione della popolazione da NORM (Tabella 13).

Tabella 13: Concentrazioni rappresentative di NORM nei residui da lavorazione di carbone

Materiali	Concentrazione di attività (Bq/kg)
Ceneri volatili emesse in atmosfera	^{238}U : 10^2 ; ^{210}Pb e ^{210}Po : (2×10^2)
Ceneri da carbone bruciato	^{226}Ra : da 10^2 a circa 10^3 ; ^{40}K circa 10^3
Fanghi da carbone bruciato	^{226}Ra : circa (5×10^2); ^{40}K circa 10^3

Le attività lavorative che possono comportare un rischio per la salute sono così riassunte:

- Esposizione a ceneri volatili;
- Trattamento dei fanghi (sludge).

5.3 Estrazione di Petroli e Gas

In molte piattaforme di estrazione di petrolio e gas, le incrostazioni nelle tubazioni e nei recipienti costituiscono un significativo pericolo radiologico. Tipicamente si ha a che fare con riserve di petroli e gas formatesi in età Jurassica. Nei giacimenti petroliferi si possono riscontrare incrostazioni (dure e morbide) con la creazione di fanghi che appaiono sotto forma di rivestimenti e di sedimenti contenenti materiale radioattivo. Nei giacimenti di gas si può osservare materiale contaminato internamente con film, rivestimenti o placature di NORM concentrati.

Le incrostazioni e i fanghi che contengono NORM sono formati principalmente durante l'estrazione e la produzione, a partire dal momento in cui la miscela petrolio-gas-acqua è portata in superficie ma anche durante il processo di separazione. I grandi volumi di acqua necessari per l'estrazione di oli e gas possono contenere radionuclidi naturali, principalmente ^{226}Ra e i suoi prodotti di decadimento. I radionuclidi tendono a trovarsi in equilibrio nelle formazioni rocciose. Nell'acqua, si trovano concentrazioni più elevate di radio (e la sua progenie) che di uranio.

Durante i processi di estrazione di gas ed oli, insieme agli stessi, si portano in superficie quantità non trascurabili di NORM. Anche il radon, che diffonde dalle formazioni rocciose è presente nell'acqua nella fase di gas; inoltre è necessario tener conto del contributo alla irradiazione esterna dovuto a tutti gli altri radionuclidi. La progenie a breve tempo di dimezzamento degli isotopi del radio, in particolare del ^{226}Ra , emettono radiazioni γ in grado di penetrare le pareti delle condutture delle tubazioni e dei vessel. Dunque, la deposizione di incrostazioni e di fanghi contaminati all'interno di queste apparecchiature, produce irradiazione anche all'esterno. I valori dell'irradiazione dipendono dall'entità della concentrazione di attività dei radionuclidi e dalla capacità schermanti delle pareti delle apparecchiature.

I residui che provengono dalla estrazione degli oli possono trovarsi sotto forma di fanghi, "scales" e/o di sedimenti, mentre quelli relativi ai gas possono contaminare le stesse strutture di contenimento e manipolazione. Le concentrazioni degli isotopi del radio sono minori nei fanghi rispetto a quelle contenute negli "scales". Esattamente il contrario avviene per il piombo (^{210}Pb) che può raggiungere concentrazioni pari a 10^6Bq/kg nei fanghi e nei depositi.

I fanghi che contengono NORM si formano principalmente durante le fasi di estrazione e produzione. Gli "scales" sono tipicamente miscele di minerali contenenti carbonati e solfati. Uno di questi solfati è la "barite" (BaSO_4) che incorpora facilmente radio nella sua struttura. Con il solfato di bario si trova una concentrazione non trascurabile di isotopi del radio. Altre cause includono l'evaporazione in pozzi gassosi, cambi di pressione e diminuzioni di temperatura. Comunque, in funzione dell'età delle incrostazioni, è possibile trovare significative quantità di ^{210}Pb (tempo di dimezzamento 22.3 anni) e ^{228}Th (tempo di dimezzamento 1.9 anni). Nello stesso modo, il radon e la sua progenie, possono essere trovati nel gas e in film all'interno delle strutture di contenimento. Il radon sembra concentrarsi maggiormente in situazioni che vedono la presenza di etano e propano. ^{210}Pb e ^{210}Po , che si accumulano nei film,

sono più difficili da misurare all'interno delle tubazioni e strutture a causa della mancanza di un forte decadimento gamma. Poiché gli "scales" sono relativamente insolubili, il rilascio dei radionuclidi nell'ambiente avviene in modo estremamente lento. I fanghi accumulati nei tanks e nelle attrezzature utilizzate nell'ambito del sistema di produzione tendono ad avere concentrazioni di NORM minore degli "scales" come riportato in tabella 14.

Tabella 14: Concentrazioni rappresentative di NORM nei residui da lavorazione di gas e petroli

Materiale	Concentrazione di attività (Bq/kg)
Fanghi in tubazioni, condotte e acque	²²⁶ Ra: dal fondo a circa (1.5 x 10 ⁶)
Fanghi in macchinari di separazione e produzione	²²⁶ Ra: da 10 ⁴ a circa 10 ⁶
Fanghi in macchinari per la fornitura di gas naturale (film ad es.)	²¹⁰ Pb: dal fondo a circa (4 x 10 ⁴)
Fanghi da bacini di scarico	²²⁶ Ra: da 104 a circa (4 x 10 ⁴)

Le attività lavorative che possono comportare un rischio per la salute sono così riassunte:

- Interventi di manutenzione;
- Trasporto dei rifiuti e di apparecchiature contaminate;
- Immagazzinamento di tubi e trivellazioni;
- Trattamento delle incrostazioni (scales);
- Rimozione delle incrostazioni dai tubi;
- Sezionamento e taglio dei tubi.

Ai fini della valutazione del rischio da questo tipo di attività lavorativa, si possono considerare quattro vie di esposizione alla radiazione:

1. inalazione di polveri provenienti dalle incrostazioni delle condotte;
2. ingestione accidentale di polveri provenienti dalle incrostazioni delle condotte;
3. esposizione esterna dovuta alle condotte contaminate;
4. esposizione esterna dovuta alle polveri disperse al suolo dalle incrostazioni delle condotte contaminate.

La stima dei massimi valori di rateo di dose ai lavoratori varia da circa qualche $\mu\text{Sv/h}$ fino a circa 100 $\mu\text{Sv/h}$ (circa 1000 volte superiore al fondo naturale di radiazioni dovuto ai raggi cosmici e alla radiazione terrestre) che, per un'attività lavorativa di circa 2000 ore l'anno, porterebbe ad una dose massima pari a 200 mSv per anno di esposizione^{43,44}.

5.4 Argille, ceramiche e materiali da costruzione

Anche i materiali da costruzione possono contenere NORM. È stato evidenziato, ormai da molti anni, che i materiali da costruzione, sia di origine naturale (sabbie e pietre naturali) che quelli contenenti sottoprodotti industriali (ceneri di carbone, fosfogessi e slag da fornace), possono fornire un contributo significativo all'esposizione della popolazione alla radioattività naturale. Negli ambienti chiusi, infatti, sia la dose assorbita in aria da radiazione gamma che la concentrazione di radon generate da alcuni tipi di materiali si sono rivelate non trascurabili come da tabella 15.

Tabella 15: Concentrazioni rappresentative di NORM nei materiali da costruzione

Prodotto	⁴⁰ K (Bq/kg)	²²⁶ Ra (Bq/kg)	²³² Th (Bq/kg)
Calcestruzzo	5 - 1500	1 - 250	1 - 200
Mattoni	60 - 2000	1 - 200	1 - 200
Cemento	24 - 850	5 - 180	5 - 250
Gesso naturale	5 - 300	1 - 70	1 - 100
Pietre naturali per edilizia	1 - 4000	1 - 500	1 - 300

Nel 1999 la Commissione Europea (CE), facendo riferimento solo alla radiazione gamma, con la pubblicazione della guida tecnica Radiation Protection 112⁴⁶ ha proposto l'uso di un indice *I* ed ha fornito una griglia di valori di questo parametro in funzione dell'obiettivo di dose e dell'uso del materiale nella costruzione (materiale strutturale o di rivestimento). In essa viene suggerito di basare i controlli sulla radioattività nei materiali sulla scelta di un *livello di esenzione* e un *criterio di dose per i controlli*. *Livello di esenzione*: si suggerisce di esentare da qualsiasi restrizione i materiali da costruzione le cui emissioni gamma incrementino la dose efficace annua di un individuo della popolazione di non più di 0,3 mSv. L'incremento va valutato rispetto alla dose efficace ricevuta all'esterno dal fondo medio ambientale, stimato in 50 nGy h⁻¹. Questo valore medio per i paesi della UE, pesato sulla popolazione, era stato ottenuto dai dati medi nazionali pubblicati nel rapporto UNSCEAR 1993⁴⁷.

Criterio di dose per i controlli: viene affermato che i controlli sui materiali da costruzione dovrebbero essere basati su un criterio di dose che tiene conto della situazione nazionale nella sua completezza, ma che comunque all'interno della UE dosi efficaci superiori a 1 mSv /y dovrebbero essere tenute in considerazione da un punto di vista radioprotezionistico e dosi superiori dovrebbero essere consentite solo in casi molto particolari, per materiali ad uso locale. In conclusione, viene raccomandato che i criteri di dose scelti a livello nazionale siano compresi tra 0,3 ed 1 mSv /y, come dose gamma aggiuntiva a quella ricevuta all'esterno.

Per identificare i materiali critici, dato che diversi radionuclidi contribuiscono alla

dose, è stato considerato utile stabilire un livello di indagine nella forma del sopra citato indice di concentrazione di attività I :

$$I = \frac{C_{Ra-226}}{300\text{Bqkg}^{-1}} + \frac{C_{Th-232}}{200\text{Bqkg}^{-1}} + \frac{C_{K-40}}{3000\text{Bqkg}^{-1}}$$

ove C_x è la concentrazione di attività del radionuclide x del campione considerato. Il ^{226}Ra è usato come riferimento al posto del suo capostipite ^{238}U . Per l'indice I vengono fissati diversi valori limite a seconda del criterio di dose preso in considerazione e delle modalità di utilizzazione del materiale (Tabella 16).

Tabella 16: Valori limite per I a seconda del criterio di dose adottato e della modalità di utilizzo del materiale

Modalità di utilizzazione	Criterio di dose*mSv /y	
	0,3	1
materiali strutturali	$I \leq 0,5$	$I \leq 1$
materiali usati per rivestimento	$I \leq 2$	$I \leq 6$

*rateo di dose efficace aggiuntiva rispetto a quella ambientale esterna

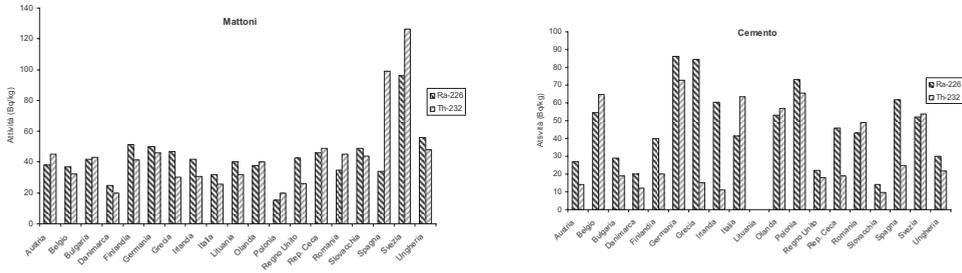
È stato stimato, nel 1996, che in Europa veniva riciclato fino al 15% di fosfogessi e che più di 2 milioni di tonnellate venivano riciclate annualmente nei materiali da costruzione.

La lavorazione delle argille (che possono contenere naturalmente uranio e altri radionuclidi) per la produzione di ceramiche e altri prodotti simili, può portare a concentrazioni di radionuclidi non trascurabili nei prodotti e nei residui. Infine, alcuni trattamenti termici, possono provocare la volatilizzazione di alcuni radionuclidi come il ^{210}Po .

Le attività lavorative che possono comportare un rischio per la salute sono così riassunte:

- Esposizione a ceneri volatili;
- Esposizione a polveri e particelle.

Figura 13: Concentrazione di attività media di ^{226}Ra e ^{232}Th nei mattoni e nel cemento, in Europa



5.5 Lavorazione di minerali

A causa della presenza di radon negli ambienti confinati, l'estrazione di molti metalli nelle miniere può comportare un pericolo radiologico non trascurabile. Inoltre, la ventilazione forzata delle miniere comporta lo scarico di aria contaminata da radon nell'ambiente con potenziale rischio radiologico per la popolazione.

Le concentrazioni di radionuclidi nei minerali pesanti possono variare da livelli molto bassi a valori apprezzabili a seconda del tipo di sorgente e dal processo di estrazione applicato. L'uranio e il torio sono generalmente strutturalmente legati nel cristallo di zirconio.

Miniere con alte concentrazioni di minerali ignei, presentano grosse quantità di Uranio e quindi alte concentrazioni di radon e dei suoi prodotti di decadimento. Movimenti convettivi di aria e di acqua che risultano da differenze di pressione tra la miniera e l'ambiente circostante, sono responsabili dell'ingresso di notevoli quantità di radon in miniera.

Il pericolo può essere associato con la produzione di ferro, zinco, stagno, niobio, alluminio, rame e qualsiasi altro minerale. Nella tabella 17, vengono riportate concentrazioni misurate di radon in alcune miniere.

Tabella 17: Concentrazioni di radon in miniera

Paese	Concentrazione di Radon (Bq/m ³)	Tipo di miniera
Cina	9000 - 20000	Sn - Cu - W
Germania	100 - 29000	Grafite - Quarzo
India	1200	Cu
Italia	100 - 2800	Fosfori
USA	100 - 2600	Zn - Fe

Molti processi industriali utilizzano i minerali estratti dalle miniere per la realizzazione di prodotti finiti. Durante queste operazioni, c'è la possibilità di esposizione ai radionuclidi naturali come ad esempio, nel processamento delle sabbie zirconifere e dell'ilmenite (per la produzione del biossido di titanio) o nell'uso del torio nel rivestimento di lenti per occhiali. Purtroppo le informazioni in questo settore sono estremamente limitate.

I più significativi materiali che contengono titanio sono ilmenite (FeTiO_3), che contiene monazite come impurità, e rutile (TiO_2). Residui dalla lavorazione di bauxite e rame possono anche essere sorgenti di titanio. Tipici valori delle attività specifiche nei minerali contenenti titanio, sono riportate in tabella 18:

Tabella 18: Attività specifica nei minerali che contengono titanio (Bq kg^{-1})

	Th^{-232}	Th^{-228}	U^{-238}	Ra^{-226}
Ilmenite	600 - 6000	180	100 - 400	150
Rutile	500 - 4000	/	100 - 700	540
Titanite	400 - 4000	/	100 - 9000	/
Ossido di Titanio	30	/	/	30

Durante il processo di produzione del pigmento di titanio, come anche nei residui della lavorazione, il torio rimane in soluzione mentre il radio, che forma un composto solfato insolubile si ritrova sostanzialmente nei residui solidi.

Le sabbie zirconifere si possono ottenere dalla lavorazione della monazite disponibile soprattutto in giacimenti lungo fiumi e spiagge. Le sabbie vengono utilizzate nell'industria estrattiva dello zirconio, nelle fonderie e nell'industria dei materiali refrattari e ceramici. Lo zirconio è usato nella produzione della ceramica fine in cui esso agisce come agente opacizzante. Nella manifattura dei componenti refrattari si usano processi termici nelle fornaci ad alta temperatura. Il processo di fusione dà luogo a ceneri volatili contenenti ^{210}Pb e ^{210}Po . L'uso delle sabbie soprattutto nelle fonderie comporta, inoltre, la produzione e l'accumulo di grandi volumi di rifiuti radioattivi di bassa attività.

In generale, questo tipo di industria utilizza processi che producono molta polvere con significativi pericoli di irradiazione da inalazione (la sabbia "grezza" generalmente ha una dimensione granulare di 100 - 200 μm , che può essere ridotta a meno di 2 μm dopo macinazione) e da irradiazione esterna da grandi cumuli di materiale. Tuttavia, in genere, non c'è mai produzione di grandi quantità di materiale, per cui il pericolo di irradiazione esterna è molto meno significativo di altre vie di esposizione. Tipici valori delle attività specifiche, sono riportati in tabella 19:

Tabella 19: Attività specifica nei minerali per sabbie zirconifere (Bq kg⁻¹)

	Th ²³²	U ²³⁸	Ra ²²⁶	Ra ²²⁸
Sabbie di zircone	400 - 40000	200 - 74000	/	/
Monazite	8000 - 3 10 ⁶	6000 - 40000	4.5 10 ⁵	3.0 10 ⁶

Dosi minori di 1 µGy(≈ 700 nGy) sono state misurate ad una distanza di circa 1 metro dalle pile di sacchi contenenti sabbie zirconifere⁴⁸.

In una industria italiana che produce materiale refrattario elettro-fuso, sono stati misurati ratei di dose assorbita in aria, prossimi ai valori di fondo in tutte le postazioni di lavoro rappresentative ma, in prossimità dei contenitori di sabbie zirconifere⁴⁹, sono stati riscontrati valori di circa 500 nGy/h. Inoltre, la concentrazione in aria di radionuclidi naturali in prossimità delle aree di lavorazione ad alte temperature (fornaci) è risultata essere di qualche frazione di Bq/m³ di ²¹⁰Po (laddove tipici valori di fondo sono pari a 0.04 Bq/m³). Con questi valori di concentrazione, la dose efficace, assumendo un'occupazione costante, può arrivare a 5 mSv/y nelle aree più contaminate⁴⁹.

Nella lavorazione dell'ossido di torio si trovano diversi minerali con alte concentrazioni di radionuclidi naturali che includono la monazite (che può contenere tra il 2.5 e il 28 % di ossido di torio), torite e torianite. Il torio si ottiene dalle miniere per lo più sotto forma di sabbia ed ha un comportamento chimico simile all'uranio.

Il torio viene utilizzato come additivo nella produzione di elettrodi di saldatura (tungsteno con torio), nelle leghe torio-magnesio usate nei sistemi aerospaziali e come nitrato di torio nelle reticelle per lampade a gas. Tipici valori delle attività specifiche nei composti del torio, sono riportati in tabella 20:

Tabella 20: Attività specifica nei composti del torio (Bq kg⁻¹)

	Th ²³²	U ²³⁸
Elettrodi di saldatura	≈ 4 10 ² - 8 10 ⁵	/
Reticelle per lampade	≈ 3 10 ⁴ - 10 ⁵	/
Leghe speciali per Jet	≈ 7 10 ⁴	/

Studi di settore⁵⁰ hanno fornito stime realistiche delle dosi assorbite da inalazione dagli operatori, durante la produzione di elettrodi al W-Th, variabili in un range (5 - 20 mSv/y). Anche la produzione di reticelle per lampade a gas fornisce stime di dose dello stesso ordine di grandezza. Inoltre, l'irradiazione esterna da radiazione γ durante il trasporto e l'immagazzinamento delle reticelle, può dar luogo a dosi fino a 3 mSv/y di dose efficace.

5.5.1 Piombo

Le miniere di piombo si trovano in molte parti del mondo. Il minerale grezzo viene trattato in vari modi: schiacciamento a secco, macinazione ad umido, precipitazione per gravità e galleggiamento ed infine viene sottoposto ad un processo termico (sinterizzazione e fornace) per la sua fusione. Circa il 40% del piombo viene usato come metallo, il 25% nelle leghe e il 35% nei composti chimici.

Attraverso alcuni studi, in Germania⁵¹ è stato possibile risalire alla misura e alla valutazione delle concentrazioni di attività presenti nel piombo e nei materiali suoi derivati come riportato in tabella 21.

Tabella 21: Attività specifica in vari materiali del piombo (Bq kg⁻¹)

Materiale	Th ⁻²³²	U ⁻²³⁸	Ra ⁻²²⁶	Pb ⁻²¹⁰	Po ⁻²¹⁰	K ⁻⁴⁰
Piombo	/	/	/	200 - 700	/	/
Saldature	/	/	/	500 - 57000	500 - 49000	/
Rifiuti di miniera	/	< 20	48	< 15	/	/
Slag di fonderia	36	< 20	265	< 15	/	200

Stime sull'esposizione di lavoratori addetti al processamento e alla lavorazione del piombo hanno fornito valori di dose efficace inferiori a 1 mSv/y sia per quanto riguarda l'irradiazione esterna che l'inalazione⁵⁰.

5.5.2 Stagno

Le operazioni di lavaggio e di separazione del minerale grezzo producono circa il 70% di concentrato di stagno che, insieme al carbone, viene sottoposto ad un primo trattamento termico in fornace a temperature <1200 °C. Lo stagno fuso viene così nuovamente trattato termicamente per ulteriore purificazione. Infine, attraverso la raffinazione elettrolitica o distillazione, si riesce ad ottenere un metallo puro al 99.9%. Anche qui, dagli stessi studi in Germania⁵¹ di cui sopra, è stato possibile risalire alla misura e alla valutazione delle concentrazioni di attività presenti nello stagno e nei materiali suoi derivati come riportato in tabella 22.

Tabella 22: Attività specifica nei prodotti derivati dalla lavorazione dello stagno (Bq kg⁻¹)

Slag di stagno	Th ⁻²³²	Po ⁻²¹⁰	U ⁻²³⁸	Ra ⁻²²⁶	Po ⁻²¹⁰	K ⁻⁴⁰
	100 - 15000	70 - 10500	250 - 5500	1000 - 1200	70 - 2100	≈ 300

La presenza di polonio deve essere costantemente monitorata durante le fasi di fusione dello stagno. La volatilizzazione di ^{210}Pb e ^{210}Po può comportare una concentrazione di quest'ultimo radionuclide nei fumi di raccolta fino a 200000 Bq/kg²⁸.

5.5.3 Zinco

Una volta macinato il minerale grezzo, per galleggiamento si ottiene il concentrato di zinco che contiene il 50 - 60% di zinco stesso. Dopo un processo termico utilizzato per rimuovere le impurità di piombo, rame e altri minerali e attraverso la fusione e quindi la raffinazione elettrolitica o distillazione, si riesce ad ottenere un'ulteriore raffinazione del minerale rendendolo quasi puro (99.9%). La sua resistenza alla corrosione dell'aria lo rende particolarmente adatto alla protezione di altri metalli esposti agli agenti atmosferici.

Anche qui, dagli stessi studi in Germania⁵⁷ di cui sopra, è stato possibile risalire alla misura e alla valutazione delle concentrazioni di attività presenti nello zinco e nei materiali suoi derivati come riportato in tabella 23.

Tabella 23: Attività specifica nei prodotti derivati dalla lavorazione dello zinco (Bq kg⁻¹)

Materiale	U- ²³⁸	Th- ²³⁰	Ra- ²²⁶	Pb- ²¹⁰	Po- ²¹⁰	K- ⁴⁰
Rifiuti di miniera	< 19	/	7	< 15	/	/
Rifiuti da elettrolisi	< 6	8	8	96	/	130
Slag	33	/	30	44	/	190

Stime sull'esposizione di lavoratori addetti al processamento e alla lavorazione dello zinco hanno fornito valori di dose efficace inferiori a 1 mSv/y sia per quanto riguarda l'irradiazione esterna che l'inalazione⁵⁰.

5.5.4 Alluminio

L'alluminio è il metallo più abbondante sulla crosta terrestre e si presenta sempre in combinazione con l'ossigeno, fluoruri, silicati ecc., ma mai nello stato metallico. La principale sorgente di alluminio è la bauxite che, solitamente, viene estratta da miniere a cielo aperto.

La produzione dell'alluminio metallico comprende due step: produzione di allumina dalla bauxite e di metallo dalla allumina stessa per riduzione. L'alluminio è utilizzato in moltissime applicazioni, dall'industria navale a quella elettrica, dall'industria edile a quella automobilistica e via dicendo.

Un serio problema ambientale nell'industria della lavorazione dell'alluminio è associato con la deposizione dei fanghi rossi (redmud), che nascono come liquami alcalini dalla purificazione della Bauxite in Allumina. Più di 70 milioni di tonnellate vengono prodotte ogni anno. Le polveri volatili sono il maggior percorso potenziale di esposizione radioattiva per quanto riguarda i fanghi rossi. Durante le operazioni, i cumuli vengono bagnati per minimizzare la polvere e, dopo, coperti. Nella tabella 24, vengono riportati i valori di attività specifica tipici associati alla bauxite e ai redmud.

Tabella 24: Attività specifica nella bauxite e nei fanghi rossi (redmud) (Bq kg⁻¹)

	Bauxite	RedMud
Radionuclidi serie dell'Uranio	10 – 9000	100 – 3000
Radionuclidi serie del Torio	35 – 1400	100 – 3000
Radionuclidi serie dell'Attinio	120 – 130	/
Potassio - 40	10 - 600	10 - 100

Stime realistiche sull'esposizione di lavoratori addetti al processamento e alla lavorazione dell'alluminio hanno fornito valori di dose efficace dell'ordine dei 6 mSv/y sia per quanto riguarda l'irradiazione da rifiuti che da fanghi⁵⁰.

5.5.5 Rame

Generalmente, il rame è distribuito in tutti i continenti e può essere estratto sia dalle miniere a cielo aperto che da quelle in profondità. Il minerale di rame, al momento della sua estrazione, è già notevolmente puro e, nelle fasi di lavorazione, viene macinato, lavato e fuso. Mediante altri processi industriali, esso viene prodotto con un grado di raffinazione pari al 99.5% e al 99.9% per uso elettrico. Altre applicazioni non elettriche includono la produzione di condutture idriche, materiali di copertura, stoviglie e attrezzi da cucina, materiale chimico e farmaceutico, oltre alla realizzazione di leghe di rame. Dagli stessi studi in Germania⁵⁷ di cui sopra, è stato possibile risalire alla valutazione delle concentrazioni di attività presenti nelle slag e nei derivati del rame come riportato in tabella 25.

Tabella 25: Attività specifica nei prodotti derivati dalla lavorazione del rame (Bq kg⁻¹)

Materiale	Th ²³²	Th ²²⁸	Th ²³⁰	U ²³⁸	Ra ²²⁶	Pb ²¹⁰	Po ²¹⁰	K ⁴⁰
Minerale di rame	122	115	152	80	30	/	/	/
Rifiuti di miniera	/	/	/	/	200 - 1000	/	/	/
Slag	100	/	/	/	400 - 2000	/	/	300 - 700

Stime realistiche sull'esposizione di lavoratori addetti al processamento e alla lavorazione del rame hanno fornito valori di dose efficace⁵⁰ dell'ordine di 1 - 2 mSv/y soprattutto a causa delle concentrazioni di ²³²Th nelle slag.

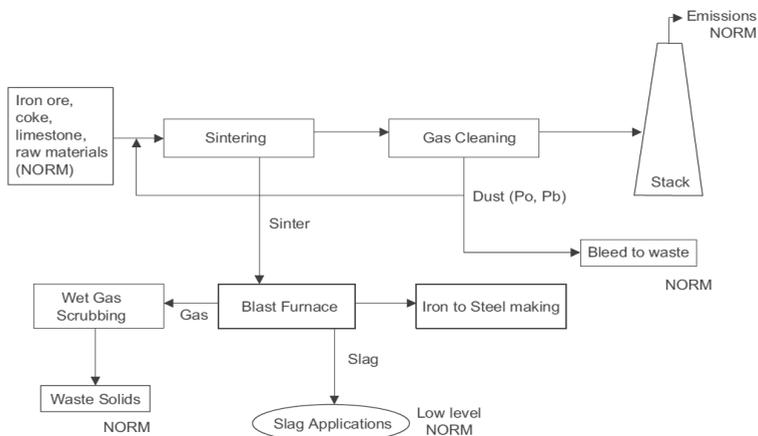
5.5.6 Ferro

Il ferro si può trovare sotto forma di vari tipi di minerale (ossidi, carbonati, silicati ecc.) e viene lavorato attraverso diversi processi come la macinazione, lavaggio, sinterizzazione, al fine di poter produrre oltre al ferro anche l'acciaio.

La caratteristica principale della produzione del ferro riguarda il processo termico in fornace, che viene caricata con ferro appunto, coke e calcare. Il ferro così prodotto contiene impurità di carbonio, che devono essere necessariamente ridotte al minimo per poter ottenere un buon metallo con cui realizzare l'acciaio. Sono tre i tipi di fornace che vengono utilizzati nell'industria del ferro: fornace aperta, forno convertitore e forno elettrico.

Le dosi efficaci da inalazione di radon, durante i processi di estrazione in miniera, sono state stimate⁵⁰ in valori che variano fra 2 e 3 mSv/y. Dosi efficaci da irradiazione esterna dovute a cumuli di rifiuti (slag heaps) con concentrazioni di ²³²Th di circa 100 Bq/kg, sono risultate inferiori a 2 mSv/y. I processi lavorativi che prevedono la macinazione e la riduzione in polvere del minerale, e il processo termico di sinterizzazione, costituiscono le attività a più elevato rischio radiologico.

Figura 14: Processo lavorativo del ferro



6. Identificazione del pericolo

L'entità dell'esposizione alle radiazioni ionizzanti dei lavoratori coinvolti nelle attività di bonifica dipende dalla durata, dalle mansioni e dalle vie e modalità di esposizione stessa.

Come riportato nel d.lgs. 81/2008⁴ e s.m.i., il concetto di pericolo è definito come "proprietà o qualità intrinseca di un determinato fattore, avente la potenzialità di causare danni". Conseguentemente, è possibile dare una definizione del rischio, inteso come "probabilità che sia raggiunto il limite potenziale di danno nelle condizioni di impiego, ovvero di esposizione, di un determinato fattore", nonché l'entità possibile del danno stesso.

Una corretta valutazione del rischio deve essere, dunque, intesa come "procedimento di valutazione della possibile entità del danno, quale conseguenza del rischio per la salute e la sicurezza dei lavoratori nell'espletamento delle loro mansioni, derivante dal verificarsi di un pericolo nel luogo di lavoro".

Nel caso delle radiazioni ionizzanti il pericolo consiste nell'eventuale danno biologico-derivante dall'esposizione la cui gravità è associata al tipo di radiazioni, quindi alla loro energia e alla loro radiotossicità, oltre che alla radiosensibilità del tessuto colpito. Di ogni radionuclide, come già detto, è importante avere informazioni di carattere chimico-fisiche dell'elemento di appartenenza ed è altrettanto importante conoscere gli aspetti generali del comportamento metabolico.

Quando i radionuclidi vengono immessi nell'ambiente¹⁹, le eventualità che più interessano sono: lo **scarico** (sotto controllo) di effluenti liquidi ed aeriformi, la **collocazione** (sotto controllo) di rifiuti solidi in formazioni geologiche ed il **rilascio** (incontrollato) di materiale radioattivo in seguito ad un problema o ad un incidente. Fenomeni fisici, chimici e biologici provocano di continuo il passaggio di particelle, di molecole, di ioni da un luogo all'altro entro e fuori organismi viventi. Fenomeni fisici sono principalmente responsabili di effetti di trasporto, dispersione, diluizione ma anche di deposito e di accumulo. Processi di adsorbimento e di scambio ionico favoriscono la fissazione di particelle e di ioni per tempi più o meno lunghi. Fenomeni biologici causano l'entrata e l'uscita dalle cellule di determinate sostanze con ricambio più o meno rapido.

Ogni radionuclide ha le caratteristiche chimiche dell'elemento di appartenenza; se entra a far parte di determinate sostanze chimiche, ha le caratteristiche di queste. Di ogni radionuclide è importante avere informazioni di carattere chimico-fisiche (come la solubilità ad es.) dell'elemento di appartenenza che condizionano il destino del radionuclide nell'ambiente esterno ed è altrettanto importante conoscere gli aspetti generali del comportamento metabolico e la loro radiotossicità. I radionuclidi incorporati, seguendo il destino delle sostanze chimiche degli elementi di appartenenza, percorrono le loro stesse vie di assunzione e con percorsi più o meno complessi, possono giungere all'uomo. Il ritorno all'uomo dei radionuclidi dipende da vari fattori: dalle modalità di immissione nell'ambiente, dalle caratteristiche chimico-

fisiche dello scarico o del rilascio, dalle caratteristiche dell'ambiente ricettore che variano sia con lo spazio che con il tempo, dalla presenza e dalle abitudini di vita dell'uomo nell'ambiente considerato.

Gli scarichi e i rilasci possono essere di breve (acuti) e di lunga (cronici) durata ed in entrambi i casi, le sostanze radioattive entrano in processi che portano alla loro dispersione o viceversa al loro accumulo. La turbolenza, la diffusione, la diluizione e la diluizione isotopica, sono tutti esempi di processi chimico-fisici che portano ad una **dispersione** nell'ambiente delle sostanze radioattive. Per contro, la deposizione, la sedimentazione, la precipitazione e lo scambio ionico sono tutti processi chimico-fisici che portano ad un **accumulo** delle sostanze radioattive

I rischi per la salute, conseguenti alla semplice permanenza nell'area contaminata e durante l'esecuzione di eventuali interventi di qualsiasi tipo, possono così essere individuati:

- Rischio di irradiazione esterna;
- Rischio di inalazione e ingestione di polveri, gas, fumi, ceneri, acqua ecc;
- Rischio di assorbimento cutaneo per contatto dermico (ferite).

Come già detto, l'entità dell'esposizione a radiazioni ionizzanti dipende dalla durata e dalle vie e modalità di esposizione stessa e quindi per i lavoratori coinvolti nelle attività di bonifica dipende strettamente dalle mansioni ad essi assegnate.

Per questo motivo, è molto importante la caratterizzazione del sito ai fini dell'identificazione delle sostanze radioattive. Ciò permette di definire la contaminazione in termini di:

- tipologia (identificazione dei radionuclidi presenti);
- grado (concentrazione degli inquinanti);
- distribuzione spaziale.

La presenza di rifiuti interrati costituisce un rischio di inquinamento delle acque superficiali per dilavamento delle acque meteoriche e delle acque sotterranee per percolamento in falda attraverso i terreni, con conseguente possibile esposizione della popolazione generale²⁰.

La misura preventiva più efficace è la identificazione precoce delle sorgenti, sulla base di elementi storici della produzione e degli impianti, sul controllo delle più diffuse e note sorgenti (come rilevatori di fumo, dispositivi contro le scariche atmosferiche, rilevatori di spessore, ecc.). Occorre quindi verificare che la fase di censimento sia stata realizzata con accuratezza, e che di conseguenza siano state avviate le indagini sul campo. È infatti di primaria importanza evitare esposizioni indebite ad operatori di altre imprese, inconsapevoli e non formati al riconoscimento di potenziali fonti da radiazioni e alla propria protezione.

È opportuno verificare l'iter della valutazione del rischio da radiazioni, i criteri di esclusione dei pericoli, e se è il caso, disporre delle eventuali indagini e rilevazioni. Di seguito, vengono riassunte le necessarie modalità operative da intraprendere in un sito da bonificare:

- valutazioni radioprotezionistiche/organizzative preliminari sul piano operativo di intervento propedeutico alla pianificazione delle operazioni di movimentazione dei rifiuti e trasporto;
- verifiche puntuali, durante le attività di movimentazione e allontanamento dei rifiuti, sui fusti lavorati e sul loro contenuto;
- verifiche radioprotezionistiche conclusive, per il rilascio del sito senza alcun vincolo radiologico.

In tal modo viene assicurata la sicurezza radiologica delle operazioni di movimentazione e allontanamento dei rifiuti radioattivi presenti nel sito.

7. Valutazione del rischio

La valutazione del rischio va effettuata facendo sempre riferimento alle normative specifiche vigenti in materia e agli standard di ottimizzazione e di buona tecnica. Ai sensi del d.lgs. 230/1995¹ e s.m.i., (*Capo VIII - Protezione Sanitaria dei Lavoratori e Capo IX - Protezione Sanitaria della Popolazione*) il problema della sorveglianza fisica e quindi della valutazione del rischio da radiazioni ionizzanti rientra nelle attribuzioni della figura professionale dell'Esperto Qualificato (E.Q.). In particolare l'E.Q. effettua le valutazioni di radioprotezione per la caratterizzazione del sito con conseguente valutazione *del rischio di esposizione* dei lavoratori e, eventualmente, anche delle persone del pubblico, per conto del datore di lavoro che gestisce le operazioni di bonifica.

Il d.lgs. 241/2000³ ha introdotto al Capo III bis la tutela dei lavoratori nei confronti della esposizione derivante da attività con particolari sorgenti naturali di radiazioni che non può essere trascurata dal punto di vista della radioprotezione e prevede, tra l'altro, l'esecuzione di controlli per un certo set di attività lavorative che implicano l'impiego o la produzione di radioattività naturale.

Preventivamente alla caratterizzazione del sito, nel caso di aree industriali per le quali non siano noti i processi produttivi e quindi le materie prime utilizzate e i prodotti intermedi e finali, oppure nel caso di discariche per le quali non sia nota la tipologia di rifiuto presente, sarebbe consigliabile procedere ad un monitoraggio per una stima qualitativa della eventuale contaminazione potenziale da parte di un E.Q. o da personale tecnico qualificato. Inoltre qualora si sospetti la presenza di sorgenti orfane il Decreto Legislativo 6 febbraio 2007²¹, n. 52, art. 14 comma 3 dispone che: *“L'ENEA e le Agenzie delle regioni e delle province autonome per la protezione dell'ambiente, possono fornire consulenza ed assistenza tecnica specialistica, al fine della protezione dei lavoratori e della popolazione, a persone esercenti attività non soggette alle disposizioni di radioprotezione recate dal decreto legislativo n. 230 del 1995 e dal presente decreto, quando esse sospettino la presenza di una sorgente orfana”*.

La sicurezza nelle attività radiologiche si esplica in due momenti diversi:

1. La realizzazione di condizioni di *“sicurezza passiva”* attraverso l'ottimizzazione del sito radiologico e delle schermature fisse e mobili a protezione degli operatori mediante la valutazione dei carichi di lavoro, la valutazione delle geometrie dell'irradiazione, la valutazione dei campi di radiazione dovuti alla radiazione diretta e diffusa, la valutazione dei fattori di occupazione delle aree, la possibilità di utilizzi futuri dell'area stessa, la presenza della segnaletica di sicurezza, la corretta classificazione, ai fini della radioprotezione, delle aree e del personale, la regolamentazione degli accessi alle zone classificate ai fini della radioprotezione, la disponibilità e l'efficienza dei dispositivi di sicurezza. Disponibilità ed efficienza degli indumenti protettivi, disponibilità e presenza di norme di radioprotezione specifiche per le attività di interesse. Verifiche periodiche dell'efficienza dei dispositivi tecnici di protezione disponibili.
2. La realizzazione di un sistema di *“sicurezza attiva”* attraverso la formazione e

l'informazione specifica del personale addetto, soprattutto nelle attività che non vengono svolte da personale con una specifica preparazione radiologica. La formazione della consapevolezza, negli operatori addetti, dell'importanza del rispetto delle norme di radioprotezione e dell'utilizzo dei dispositivi tecnici di protezione, ed eventualmente di misura della dose, disponibili.

La classificazione degli ambienti di lavoro e dei lavoratori viene effettuata su indicazione del datore di lavoro delle attività che i lavoratori stessi devono svolgere e delle loro condizioni di lavoro. Attraverso i dati relativi ai carichi di lavoro è possibile, quindi, effettuare la stima dell'entità del rischio di esposizione alle radiazioni ionizzanti derivante dalla normale attività lavorativa programmata nonché dal contributo delle esposizioni potenziali conseguenti a eventi anomali che siano suscettibili di aumentare le dosi dei singoli operatori derivanti dalle normali attività.

La stima della dose efficace e/o della dose equivalente ai fini della valutazione del rischio deve avvenire attraverso metodiche di calcolo che possono essere adottate sia per la stima preventiva sia per le verifiche attraverso le misure.

In linea di principio la stima:

- deve essere effettuata mediante le corrette grandezze operative;
- deve essere effettuata ipotizzando un corretto utilizzo dei dispositivi di protezione;
- per le postazioni protette, deve essere effettuata per la posizione maggiormente esposta.

Il termine dose (o rateo di dose) indicherà genericamente la corretta grandezza operativa da utilizzare per la specifica valutazione.

Il problema della esposizione a sostanze radioattive è strettamente associato alla pianificazione della sorveglianza sanitaria degli operatori esposti. I piani di sorveglianza sanitaria, relativi alle varie mansioni di esecuzione di indagini e bonifiche ambientali, sono indirizzati alla rilevazione di alterazioni generiche dello stato di salute. La valutazione del rischio comporta la determinazione della dose globale assorbita dall'operatore; il risultato dell'indagine determina quindi la classificazione del personale, atto di formale riconoscimento delle situazioni potenziali di rischio.

L'esposizione della popolazione può avvenire sia nelle immediate vicinanze del sito come pure a grandi distanze, a causa della contaminazione di matrici ambientali quali aria, terreni, acque superficiali e sotterranee che trasportano in diversi stati fisici gli inquinanti provenienti dai siti contaminati²². Le vie di esposizione sono le stesse di quelle già descritte per i lavoratori. Nella esposizione della popolazione è inoltre presente la condizione di non conoscenza del rischio, che non consente l'adozione di cautele o misure preventive da parte della popolazione stessa.

Risulta pertanto importante l'identificazione delle sorgenti utilizzate nei cicli produttivi²⁰ o presenti come rifiuti abbandonati abusivamente nei siti e la conoscenza delle loro caratteristiche chimico - fisiche, che determinano il loro destino ambientale, nonché delle caratteristiche tossicologiche ed ecotossicologiche. Quanto sopra consente la corretta impostazione delle indagini ambientali, degli interventi di messa in sicu-

rezza e di bonifica, nonché la predisposizione di eventuali analisi di rischio per la messa in sicurezza permanente in caso di impossibilità di bonifica a norma di legge. La definizione di un piano preliminare per la caratterizzazione radiometrica dell'area contaminata prevede l'analisi dei risultati di un'indagine preventiva che avrà sostanzialmente lo scopo di verificare l'eventuale presenza di radionuclidi in termini di concentrazione di radioattività e della relativa distribuzione nell'ambiente indagato, derivante dalle pregresse attività industriali e di supportare il processo decisionale in merito alle eventuali successive attività da mettere in atto sul sito. A questo scopo devono essere indicate procedure di campionamento strettamente correlate alle tecniche di analisi che vengono suggerite. È necessario, dunque, che le fasi di campionamento siano eseguite da personale specializzato e che le fasi di trattamento e analisi dei campioni avvengano secondo procedure concordate e consolidate. A tale proposito si sottolinea la necessità di concordare in anticipo i protocolli di dettaglio delle analisi, nonché prevedere un'aliquota di analisi da eseguire in doppio per un controllo a campione da parte di laboratori pubblici. Al fine di una valutazione più completa del rischio di esposizione alle radiazioni ionizzanti è inoltre utile aver presente, per confronto, i dati relativi all'esposizione degli individui della popolazione alla radiazione dovuta al fondo naturale²³ contenuti in Tabella 26.

Tabella 26: Esposizione media di un individuo dovuta a fonti di irradiazione naturali presenti nell'ambiente

Fonte	(mSv/anno)
raggi cosmici	0.355
radionuclidi presenti in natura prodotti dalla radiazione cosmica	0.015
radionuclidi primordiali	
Irradiazione esterna	0.41
⁴⁰ K	0.18
Famiglie radioattive (²³⁸ U e ²³² Th)	1.42 (*)
Totale	2.38

(*) estremamente variabile (dipende dal contributo dovuto alla inalazione di radon emesso sia dal terreno sia dai materiali di costruzione degli edifici)

Per un più diretto confronto fra il rischio dovuto all'esposizione alle radiazioni ionizzanti ed il rischio dovuto ad altre attività lavorative, in Tabella 27 è mostrata la riduzione media della durata di vita dovuta ad incidenti in diverse attività lavorative, mentre in Tabella 28 è mostrata quella associata a varie cause di tipo non lavorativo.

Tabella 27: Riduzione media della durata di vita dovuta ad incidenti in diverse attività lavorative

Attività lavorativa	Riduzione media della durata di vita (giorni)
Commercio	27
Industria manifatturiera	40
Servizi	27
Trasporti	160
Agricoltura	320
Costruzioni	227
Valore medio	60
Esposizione alle radiazioni (5 mSv/anno)	40

Tabella 28: Riduzione media della durata di vita associata a varie cause di tipo non lavorativo

Causa	Riduzione media della durata di vita (giorni)
abuso di alcool	4000
essere celibe, vedovo o divorziato	3500
fumo (1 pacchetto di sigarette/giorno)	2250
essere nubile, vedova o divorziata	1600
essere sovrappeso (+ 20%)	1040
incidenti con veicoli a motore	207
alcool	130
incidenti in casa	74
fumo passivo	50
esposizione lavorativa alle radiazioni (5 mSv/anno)	40
cadute	28
esposizione alle radiazioni di individui della popolazione (1 mSv/anno)	18
esami RX-diagnostici	6
caffè	6

Per confronto viene indicata la riduzione media della durata di vita dovuta all'esposizione alle radiazioni ionizzanti valutata utilizzando i fattori di rischio indicati nella pubblicazione 60 della ICRP²⁴ e successive modificazioni^{25,26} e considerando che la perdita media di aspettanza di vita, in caso di tumore, risulta rispettivamente, di 13.4 anni per un individuo della popolazione e di 12.7 anni per un lavoratore. Il confronto è effettuato per una esposizione continua di 5 mSv/y; l'esposizione massima che si riscontra normalmente nei lavoratori in ambiente sanitario, è di 1 mSv/y, ovvero il limite di dose per le persone del pubblico.

I principali obiettivi delle attività di bonifica e di gestione dei rifiuti in ambito radiologico sono, dunque, quelli di proteggere l'ambiente, la popolazione e i lavoratori pre-

venendo la dispersione di radionuclidi attraverso l'acqua, il suolo, l'aria e le emissioni di polvere. Sono altrettanto importanti le metodologie da utilizzare e la caratterizzazione iniziale del sito contaminato dal punto di vista geologico, chimico e fisico, l'immagazzinamento, il trasporto, il processamento, il trattamento e le pratiche di smaltimento dal momento della loro generazione allo smaltimento finale.

L'accurata caratterizzazione dei radionuclidi richiede tecniche analitiche specializzate eseguite in laboratori qualificati da personale competente.

Oltre a vincoli di carattere tecnico, possono presentarsi problemi di tipo regolamentare e socio-economico circa la scelta dell'appropriata strategia di bonifica.

Nella valutazione del rischio nelle attività di bonifica di siti contaminati o potenzialmente contaminati l'E.Q. deve tener conto del tipo di materiale contaminato e delle procedure di lavoro. Quindi in una fase iniziale, occorrerà:

1. identificare le sostanze radioattive e stimarne, con una misura preventiva, la concentrazione;
2. individuare le proprietà chimico-fisiche, radiologiche e radiotossicologiche del materiale contaminato per valutare il tipo e la durata della potenziale esposizione degli operatori addetti alla bonifica e, eventualmente della popolazione;
3. valutare il livello di esposizione mediante misure radiometriche in campo (concentrazione, sorgenti e tempi di esposizione in relazione alle circostanze di svolgimento del lavoro (mansioni, compiti e funzioni, carichi di lavoro, attività e tecniche operative, ecc) degli operatori coinvolti nella bonifica;
4. valutare la dose personale e procedere ad eventuale classificazione dei lavoratori in base ai valori limite di dose;
5. adottare misure preventive e protettive per gli operatori e valutare l'efficacia delle precauzioni e delle procedure attuate per la sorveglianza fisica.

La valutazione dovrebbe tener conto non solo delle normali condizioni operative, ma anche di possibili casi incidentali, di errori comportamentali nelle operazioni di bonifica e di eventi anomali.

A seguito di questa fase preliminare l'E.Q. deve valutare se l'esposizione dei lavoratori coinvolti a vario titolo nell'attività di bonifica può o non può comportare il superamento dei limiti di dose²⁷, quindi:

- redige una relazione con il risultato delle valutazioni effettuate, con i livelli di esposizione dei lavoratori, con i livelli di esposizione dei gruppi di riferimento della popolazione, con le misure da adottare ai fini della sorveglianza delle esposizioni e con eventuali azioni per il controllo e la riduzione delle esposizioni;
- i Livelli di Esposizione vanno confrontati con i Livelli di Azione (LA), di cui all' allegato 1-bis, (in Equivalente di Dose Annuale, EDA) come in tabella 29;
- esegue misure di esposizione nei luoghi di lavoro e di concentrazione in aria e ripete le misurazioni se i valori riscontrati sono compresi tra 0.8 e 1 volta il LA;
- se nonostante le azioni di rimedio le grandezze misurate risultano ancora superiori ai LA si pone in atto la Sorveglianza Fisica di Radioprotezione;
- assume la sovrintendenza ai lavori di bonifica radiologica;

- nelle valutazioni iniziali effettua la caratterizzazione della fonte di rischi, la valutazione dei rischi e la loro riduzione;
- nelle valutazioni in corso d'opera, limita gli accessi all'area con segnaletiche appropriate, esegue controlli individuali ed effettua il monitoraggio della contaminazione atmosferica durante i lavori;
- nelle valutazioni finali, valuta le dosi agli operatori, il controllo finale dei mezzi utilizzati per la movimentazione di eventuale terreno contaminato ed effettua le valutazioni finali dell'intervento di bonifica.

Tabella 29: Livelli di Azione

Tipologia di attività	LA per Lavoratori	LA per le persone del pubblico
Uso e stoccaggio	1 mSv/y	0.3 mSv/y
Produzione residui	1 mSv/y	0.3 mSv/y

Nella Relazione Tecnica di Radioprotezione, l'E.Q. deve inoltre specificare i seguenti punti:

- le realtà operative considerate, articolate nei diversi ambienti fisici, con l'indicazione degli elementi del ciclo lavorativo rilevanti per l'individuazione e la valutazione dei rischi legati all'esposizione a radiazioni ionizzanti;
- gli schemi dei processi lavorativi, con riferimento sia ai posti che alle qualifiche ed alle mansioni specifiche di ogni lavoratore;
- le modalità e le varie fasi del procedimento seguito per la valutazione dei rischi;
- il grado di coinvolgimento delle componenti aziendali, con particolare riferimento ai dirigenti e preposti e al Rappresentante dei Lavoratori per la Sicurezza (RLS, figura innovativa prevista dal Decreto Legislativo 81/2008⁴ e s.m.i., che rappresenta appunto l'interfaccia tra il datore di lavoro ed i lavoratori, ed a cui bisogna dare conto del documento di valutazione dei rischi e di tutte le misure conseguenti in materia di prevenzione e protezione);
- le professionalità e le risorse sia interne che esterne cui si intende far riferimento;
- i pericoli e i rischi correlati;
- le persone esposte al rischio radiologico, con riferimento anche a gruppi particolari, cioè quelle categorie di lavoratori per i quali, rispetto alla media dei lavoratori, i rischi relativi ad un medesimo pericolo, sono comparativamente maggiori per cause soggettive dipendenti dai lavoratori stessi, evidenziati naturalmente a seguito della valutazione dei rischi (apprendisti, studenti, gruppi di riferimento della popolazione);
- i riferimenti normativi da adottare per la valutazione e la definizione del livello di riduzione di ciascuno dei rischi presenti;
- elementi di valutazione da usare in assenza di precisi riferimenti di legge (Norme di buona tecnica, codici di buona pratica, ecc.);

- le misure di prevenzione e protezione da attuare in conseguenza della valutazione dei rischi e le attrezzature di protezione da utilizzare;
- i dispositivi di protezione individuali da adottare (D.P.I.) per la protezione dei rischi da radiazioni ionizzanti.

Tutto quanto sopra detto va riportato e proposto in una matrice, i cui rischi vanno così suddivisi:

- RISCHI per l'incolumità fisica dei lavoratori;
- RISCHI per la salute dei lavoratori
- RISCHI legati a fattori gestionali di prevenzione.

Nel caso in cui le stime delle dosi efficaci individuali e delle dosi equivalenti risultassero inferiori ai limiti di dose per gli individui della popolazione stabiliti ai punti 7 e 8 dell'allegato IV del d.lgs. 230/1995⁷ e riportati in tabella 30, la classificazione del lavoratore quale "Lavoratore esposto" non sarebbe giustificabile e quindi il lavoratore dovrebbe essere classificato come "Lavoratore non esposto".

Tabella 30: Limiti di dose efficace e di dose equivalente per particolari organi o tessuti per gli individui della popolazione

Dose efficace (H):	$H < 1 \text{ mSv/y}$
Dose equivalente al cristallino (H):	$H < 15 \text{ mSv/y}$
Dose equivalente alla pelle/estremità (H):	$H < 50 \text{ mSv/y}$

Qualora non si verificano le condizioni sopra esposte e la stima della dose efficace e di quella equivalente risultino come riportato in tabella 31, allora i lavoratori dovranno essere classificati "Lavoratori esposti di categoria B";

Tabella 31: Limiti di dose efficace e di dose equivalente per particolari organi o tessuti per i lavoratori di cat. B

Dose efficace (H):	$1 \leq H < 6 \text{ mSv/y}$
Dose equivalente al cristallino (H):	$15 \leq H < 45 \text{ mSv/y}$
Dose equivalente alla pelle/estremità (H):	$50 \leq H < 150 \text{ mSv/y}$

Se, infine, la stima della dose efficace e di quella equivalente risultano come riportato in tabella 32, sarà necessaria la classificazione del lavoratore come "Lavoratore esposto di categoria A".

Tabella 32: Limiti di dose efficace e di dose equivalente per particolari organi o tessuti per i lavoratori di cat. A

Dose efficace (H):	$6 \leq H < 20$ mSv/y
Dose equivalente al cristallino (H):	$45 \leq H < 150$ mSv/y
Dose equivalente alla pelle/estremità (H):	$150 \leq H < 500$ mSv/y

Tutti i lavoratori ai quali non risulta applicabile la metodologia sopra esposta in quanto non interessati da attività lavorative che comportino l'utilizzo di sorgenti di radiazioni ionizzanti, sono assimilabili alle persone del pubblico e andranno, pertanto, classificati "Lavoratori non esposti".

8. Scenari Espositivi

Come sottolineato nel documento della Commissione Europea³¹ (pubblicazione n. 65), sono stati individuati 3 scenari espositivi generali e 24 vie di esposizione. I 3 scenari sono:

1. Uso normale di materiale radioattivo sul lavoro;
2. Eventi incidentali sul lavoro;
3. Smaltimento in discarica.

Ognuno di questi scenari può contribuire alla dose assorbita per mezzo di una sola o più vie di esposizione in modo tale che la dose totale sia la somma complessiva dei singoli contributi. Quest'ultimo è il valore da confrontare con i criteri di dose secondo i quali si rende necessario un intervento radioprotezionistico.

Più in dettaglio, per quanto riguarda i NORM, i possibili scenari di esposizione per i lavoratori, come definiti in Radiation Protection²⁸ 107, possono essere riassunti in:

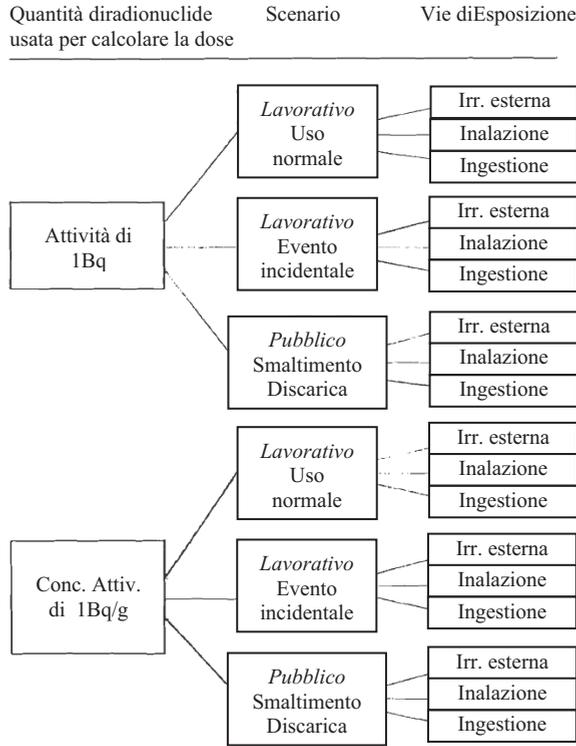
- Esposizione da “*stockpiles*”:
esposizione dovuta a grosse quantità di materiale stipate in magazzini;
- Esposizione da “*scales*” e residui:
esposizione dovuta a radionuclidi concentrati in residui ed in cui viene tenuta in conto sia la volatilizzazione del polonio (e a volte anche del piombo) nelle fornaci ad alta temperatura che l'accumulo di radio nelle tubazioni di scarico;
- Esposizione da processi e tubazioni:
il lavoratore è esposto soltanto ad irradiazione esterna da sorgenti schermate.

Nella maggior parte dei casi, gli scenari espositivi alle radiazioni ionizzanti presenti nell'ambiente si possono sintetizzare in:

- esposizione esterna alla radiazione gamma;
- inalazione del Rn²²² e della sua progenie;
- ingestione diretta di suolo e/o di polveri contaminate e inalazione delle stesse;
- contaminazione della pelle.

La dose per contaminazione della pelle si basa sul rapporto tra il rateo di dose e l'attività superficiale.

Figura 15: Schema a blocchi che mostra i possibili scenari e relative vie di esposizione



La formula generica usata per calcolare la dose è la seguente:

$$D = (A \text{ o } C) f T R U s \quad \text{Sv/y [Sievert/anno]} \quad (1.1)$$

dove:

il parametro D indica indifferentemente, a seconda della situazione, la dose efficace al corpo intero, la dose equivalente alla pelle, o la dose efficace per inalazione e ingestione;

i parametri A e C sono rispettivamente l'attività e la concentrazione di attività;

i termini f, T, U es, sono parametri che dipendono dallo scenario considerato i cui valori sono riportati nell'appendice "A" del documento Radiation Protection n. 65³⁷;

il termine R è un parametro dipendente dal radionuclide scelto i cui valori sono riportati nell'appendice "B" dello stesso documento di cui sopra³⁷.

Il termine f è la frazione di A o C che contribuisce alla dose D che risulta essere molto sensibile a questo parametro. Il termine T è il periodo di esposizione dell'individuo (h/y) alla sorgente. Il fattore U viene utilizzato per convertire A o C nelle unità di misura consistenti con quelle del fattore di dose R. Questa conversione dipende dalle pro-

prietà fisiche della sorgente e dalla sua forma al momento dell'esposizione. Il termine R è un fattore di dose che dipende dal tipo di radionuclide per una determinata via di esposizione e i suoi valori sono riportati nell'appendice "B" del documento Radiation Protection n. 65³¹. Il termine s , il cui significato viene dettagliatamente discusso nell'appendice "C" del documento di cui sopra³¹, rappresenta la probabilità di un'esposizione in un anno. Il valore di s , fissato a 10^{-2} per anno, assicura che la dose efficace individuale non superi 1 mSv, il limite di dose individuale fissato dall'ICRP²⁴ per i membri del pubblico.

Nei casi particolari delle vie di esposizione riportate in figura 15, la stima della dose annua efficace (D), si può ricavare dalle seguenti espressioni semplificate:

Esposizione esterna alla radiazione gamma:

$$D_{\lambda} = [H_{\lambda} f_{\lambda}] t_{\text{exp}} \quad (1.2)$$

dove: H_{λ} è il "gamma dose rate" (nSv/h);
 f_{λ} è il fattore di conversione dose rate - dose efficace (0.6 per gli adulti);
 t_{exp} è il tempo annuale di esposizione (h).

- Inalazione di polvere contaminata:

$$D_{\text{LLA}} = [V \Sigma g_{\text{inh},r} C_r] t_{\text{exp}} \quad (1.3)$$

dove: V è il rateo di respirazione (1.2 m³/h per gli adulti);
 $g_{\text{inh},r}$ è il coefficiente di dose da inalazione per il radionuclide r (Sv/Bq);
 C_r è la concentrazione d'attività ambientale del radionuclide r (Bq/m³);
 t_{exp} è il tempo annuale di esposizione (h).

- Ingestione diretta di suolo o polvere contaminati:

$$D_{\text{ING}} = [U_s \Sigma g_{\text{ing},r} C_{s,r}] t_{\text{exp}} \quad (1.4)$$

dove: U_s è il rateo di ingestione del suolo (kg/h);
 $g_{\text{ing},r}$ è il coefficiente di dose da ingestione per il radionuclide r (Sv/Bq);
 $C_{s,r}$ è la concentrazione d'attività del radionuclide r nella frazione fina del suolo (Bq/kg).
 t_{exp} è il tempo annuale di esposizione (h).

La dose totale annua si ottiene sommando le dosi per ogni percorso di irradiazione.

9. Gestione del rischio

Le dosi individuali e collettive alla popolazione e ai lavoratori derivanti dalla gestione di materiale e di rifiuti radioattivi devono essere ridotte al livello più basso ragionevolmente ottenibile, tenendo conto di fattori economici e sociali e dell'impatto sulle generazioni future.

L'identificazione, la valutazione e la gestione del rischio vanno effettuate facendo sempre riferimento alla normativa specifica vigente in materia ed agli standard di ottimizzazione e di buona tecnica, ed in mancanza, ai principi generali della prevenzione dei rischi, previsti in tutta la normativa europea, nel campo della sicurezza negli ambienti di lavoro.

Più specificatamente si deve sempre:

- a) se possibile evitare i rischi;
- b) se possibile sostituire ciò che è pericoloso con ciò che non è pericoloso o che lo è di meno;
- c) combattere i rischi alla fonte;
- d) applicare provvedimenti collettivi di protezione, piuttosto che individuali;
- e) adeguarsi al progresso tecnico;
- f) cercare un miglioramento del livello di protezione.

Detti principi vanno naturalmente integrati con indicazioni, suggerimenti ed esperienze professionali acquisite nel campo.

Nella gestione del rischio, che si avvale dell'analisi di rischio in caso di bonifiche con misure di sicurezza, è necessario che siano valutate le stime adottate nell'applicazione dell'analisi di rischio e l'efficacia delle misure di sicurezza. È necessario, inoltre, che siano considerate anche le ripercussioni dovute alle operazioni di monitoraggio del rischio residuo sulla qualità ambientale. Tali considerazioni sono importanti sia per la validità delle stime del costo della bonifica, sia per la gestione del monitoraggio, dal momento che i costi sono a carico di chi esegue la bonifica. I controlli post-operam devono essere accurati ed entrare nel merito dell'efficacia delle misure di sicurezza adottate.

Una corretta gestione del rischio prevede l'attenta adozione ed attuazione delle prescrizioni e delle procedure emanate dal datore di lavoro e redatte dall'Esperto Qualificato.

La vigilanza per la tutela dai rischi da radiazioni dei lavoratori è affidata, oltre che all'ISPRA (ex-ANPA), al Ministero del lavoro e della previdenza sociale, che la esercita a mezzo dell'Ispettorato del lavoro.

9.1 Classificazione degli ambienti di lavoro

Gli ambienti di lavoro sottoposti a regolamentazione per motivi di protezione contro

le radiazioni ionizzanti, dove si attua la sorveglianza fisica secondo le disposizioni contenute nell'allegato III paragrafo 8, d.lgs. 230/1995¹, sono classificati dall'Esperto Qualificato in:

Zona Controllata : sulla base delle preventive valutazioni dell'Esperto Qualificato, gli ambienti di lavoro dove, per i lavoratori, possono essere superati i valori che determinano la classificazione di lavoratore esposto di categoria A;

Zona Sorvegliata: gli ambienti di lavoro in cui, per i lavoratori in essi operanti, possono essere superati i pertinenti limiti di dose fissati per le persone del pubblico e che non sono "Zona Controllata".

È necessario anche regolamentare le modalità di accesso alla Zona Controllata. In ogni caso deve vigere l'obbligo che è autorizzato l'accesso solo al personale in possesso di dispositivi di protezione individuale e che solo i lavoratori autorizzati possono svolgere attività nelle immediate vicinanze della sorgente di radiazioni.

È cura, invece, del datore di lavoro predisporre un elenco del personale autorizzato con la definizione, per ciascuno, delle attività consentite e dei tempi di permanenza. Ogni lavoratore interessato dovrà controfirmare per accettazione.

Il personale non esposto può accedere ad una zona Controllata/Sorvegliata, previa autorizzazione dell'Esperto Qualificato e su richiesta del datore di lavoro, e dopo che siano state definite le modalità di accesso e le attività lavorative.

9.2 Classificazione dei lavoratori

La gestione del rischio radiologico deve essere effettuata dall'Esperto Qualificato nell'ipotesi di un corretto utilizzo dei dispositivi di protezione attivi e passivi. Ove possibile, devono anche essere considerate eventuali dosi pregresse laddove statisticamente significative.

Devono, inoltre, essere stimate le quantità di sostanze radioattive incorporabili per inalazione e ingestione e tali quantità dovranno essere confrontate con gli A.L.I. indicati nella tabella IV.1 del d.lgs. 230/1995¹.

Devono altresì essere prese in considerazione le possibilità di irraggiamento esterno da tutte le possibili fonti di rischio. In alcuni casi deve essere valutata la possibilità di irraggiamento allo strato germinale della cute a seguito di contaminazione dell'epidermide.

Ai sensi della normativa vigente, devono essere classificati come lavoratori esposti coloro che sono suscettibili di una esposizione alle radiazioni ionizzanti superiore ad uno qualsiasi dei limiti fissati per le persone del pubblico, ovvero: dose efficace di 1 mSv per anno solare, dose equivalente di 15 mSv per il cristallino, 50 mSv per la pelle, calcolato in media su 1 cm² di pelle, indipendentemente dalla superficie esposta e dose equivalente di 50 mSv per mani, avambracci, piedi, caviglie.

I lavoratori sono classificati di *Categoria A* o *Categoria B* secondo i criteri già descritti nel paragrafo 8.

9.3 Dosimetria

Per i lavoratori esposti di categoria A è obbligatoria la dosimetria personale e la trasmissione delle dosi al Medico autorizzato con frequenza almeno semestrale.

Per i lavoratori esposti di categoria B, la valutazione della dose ricevuta o impegnata (dose ricevuta da un organo o da un tessuto, in un determinato periodo di tempo, in seguito all'introduzione di uno o più radionuclidi) può essere effettuata anche solo sulla base delle dosimetrie ambientali (punto 5, art. 79, d.lgs. 230/1995'). È obbligatoria la trasmissione delle dosi al Medico competente con frequenza almeno annuale.

La dose da contaminazione interna deve essere determinata attraverso idonei metodi fisici e/o radiotossicologici.

I valori dosimetrici potranno, altresì, essere utilizzati come strumento di verifica a posteriori, della correttezza delle ipotesi prese a riferimento nella stima del rischio radiologico. Nelle Zone Controllate e Sorvegliate, i lavoratori devono operare muniti dei dosimetri personali, se prescritti dall'Esperto Qualificato e secondo le indicazioni del medesimo.

9.4 Determinazione della concentrazione di radioattività

I principali metodi analitici per misurare i livelli di concentrazione di radioattività (Bq/g) in campioni di suolo, incrostazioni, fanghi, liquidi o in altri materiali, possono essere riassunti in spettrometria gamma e spettrometria alfa. Per i radionuclidi emettitori di radiazione beta l'attività è determinabile quasi sempre tramite le misure di spettrometria gamma poiché i radionuclidi emettitori beta sono in grandissima parte anche emettitori di radiazione gamma. Esistono, d'altra parte, anche i sistemi di misura che consentono di identificare il radionuclide tramite la propria radiazione beta. Essi sono basati sulla determinazione dell'energia massima nello spettro continuo della radiazione beta, o del tempo di dimezzamento, $T_{1/2}$, del radionuclide, ma sono di uso non frequente nella pratica corrente. Per le misure di radionuclidi emettitori beta che non emettono anche radiazione gamma si usano i sistemi di conteggio.

Spettrometria gamma: la misura dell'attività di una sostanza radioattiva, contenente uno o più tipi di radionuclidi, può essere fatta mediante la spettrometria gamma in base alle informazioni contenute nello spettro degli impulsi. La parte dello spettro che a tale scopo è più conveniente utilizzare è quella relativa al picco di assorbimento totale. L'informazione contenuta in un picco fotoelettrico è infatti correlata all'energia dei fotoni emessi da uno specifico radionuclide presente nella sostanza radioattiva. Questa tecnica, misura l'energia dei raggi gamma emessi dai radionuclidi del campione in esame. Per identificare i nuclidi, vengono spesso usati rivelatori ad alta risoluzione al Germanio accoppiati ad analizzatori multicanale e l'intensità della radiazione misurata è proporzionale al livello di attività del radionuclide.

In tal modo il valore dell'attività del campione radioattivo si determina mediante la seguente espressione:

$$A = \frac{\dot{N}_p(E_\gamma)}{\varepsilon(E_\gamma)I_\gamma} \quad (1.5)$$

dove:

A è l'attività del radionuclide che emette i fotoni di energia E_γ , I_γ è la probabilità che a seguito di una trasformazione nucleare del radionuclide venga emesso un fotone di energia E_γ , $\varepsilon(E_\gamma)$ è l'efficienza dello spettrometro e N_p è la somma delle frequenze degli impulsi la cui ampiezza è compresa fra i due estremi del picco fotoelettrico relativo ai fotoni di energia E_γ .

I sistemi per spettrometria gamma più diffusi hanno in prevalenza rivelatori a semiconduttore e in misura molto minore rivelatori a scintillazione. Queste due tipologie di spettrometri hanno caratteristiche fra loro diverse e ciascuno di essi ha un impiego mirato a specifiche situazioni sperimentali.

Le principali caratteristiche dei sistemi di spettrometria gamma al Germanio iperpuro (HpGe) maggiormente utilizzati sono un'efficienza di rivelazione intorno al 30 - 40 % ed un'elevata risoluzione energetica (1.5 - 2.0 keV a 1333 keV del ^{60}Co).

Fra i rivelatori a scintillazione quelli a ioduro di sodio (NaI) sono il tipo prevalentemente usato per la spettrometria gamma. A causa del loro basso potere risolutivo, gli spettrometri con rivelatori a NaI sono, rispetto a quelli con rivelatori al germanio, un'alternativa praticabile solo quando nel campione da analizzare sono presenti radionuclidi che emettono fotoni di una sola energia o, eventualmente, con più valori di energia purché fra loro ben distanziati. L'uso degli scintillatori inorganici nella spettrometria gamma è d'altra parte necessario quando l'attività dei radionuclidi da rivelare è troppo bassa per poter essere misurata con rivelatori al germanio. Gli scintillatori inorganici (a causa del loro basso numero atomico) possono essere costruiti con dimensioni considerevolmente superiori (e quindi con maggiore efficienza) a quelle dei semiconduttori.

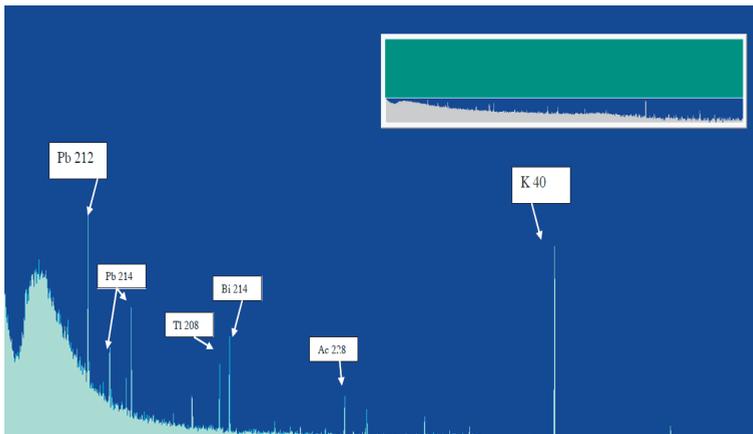
La spettrometria gamma è applicabile a gran parte dei radionuclidi NORM come ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{228}Th , ^{230}Th (solo solido) e ^{234}Th . Il ^{210}Pb decade per emissione beta e produce radiazione gamma di bassa energia e bassa intensità. Poiché la sensibilità di rivelazione del ^{210}Pb è bassa, analisi accurate richiedono aggiustamenti delle misure, come tempi di conteggio maggiori e correzioni per auto-assorbimento. Le concentrazioni radioattive di alcuni radionuclidi si possono assumere uguali ad altre per lo stesso canale di decadimento se il campione NORM è in equilibrio. Ad esempio, le attività specifiche dell' ^{238}U e ^{234}U si possono assumere uguali a quella del ^{234}Th . Analogamente quella del ^{210}Po può essere considerata uguale a quella del ^{210}Pb . I limiti di rivelazione di un radionuclide dipendono dalle dimensioni del campione e dal tempo di conteggio. Una misura accurata, ad esempio per il ^{226}Ra , richiede un tempo di attesa, tipicamente fino a 30 giorni, prima di poter eseguire l'analisi affinché si sta-

bilisca l'equilibrio tra ogni nuclide nel canale di decadimento. Nelle figure 16 e 17 si riportano rispettivamente un esempio della strumentazione utilizzata sul campo e un esempio di spettro di misura con evidenziate le righe spettrali riferite ai radionuclidi rivelati durante le misure.

Figura 16: Misuratori per Spettrometria Gamma in campo



Figura 17: Esempio di Spettrometria gamma



Spettrometria alfa: le tecniche di spettrometria alfa hanno l'obiettivo di determinare l'attività per unità di massa dei radioisotopi α -emettitori (polonio, uranio, torio) e antropici (plutonio, americio, nettunio) presenti in campioni di suolo, materiali vari (cementizi, ferrosi), o campioni liquidi, in campioni marini (acqua, sedimenti) e atmosferici (pioggia radioattiva asciutto e bagnato, aerosol atmosferici). L'obiettivo della misura può essere raggiunto mediante la misura diretta delle particelle alfa, oppure determinando la massa dell'elemento di interesse per unità di massa del campione, mediante tecniche di chimica analitica, ricavando la massa dei radionuclidi sulla base della composizione isotopica dell'elemento stesso.

I radionuclidi che nel loro processo di decadimento emettono radiazione alfa sono molto meno numerosi di quelli che emettono radiazione gamma. Infatti gli emettitori di radiazione alfa sono, come è noto, limitati agli elementi più pesanti (con $A > 209$) nei quali il rapporto fra neutroni e protoni è maggiore di circa 1,5. Per diversi di questi radionuclidi pesanti il modo più agevole di determinazione dell'attività consiste nel misurare l'energia e il numero delle particelle alfa da essi emesse.

Nella spettrometria alfa gli elementi vengono preventivamente separati e purificati chimicamente prima di essere elettrodepositati o precipitati al fine di rilevare le particelle alfa emesse.

Un sistema di misura per spettrometria alfa ha come componenti principali un rivelatore specifico per particelle alfa e il circuito elettronico di misura con la funzione di determinare l'energia e il numero delle particelle incidenti sul rivelatore. Il rivelatore di uso corrente più utilizzato è costituito da un semiconduttore al silicio del tipo a barriera superficiale o a impiantazione ionica con aree sensibili di circa 900 mm² (36 keV FWHM a 5,486 MeV). In questo caso, le misure vengono eseguite in geometria 2π .

I rivelatori come gli scintillatori al ZnS, i rivelatori a semiconduttore al Si, i contatori proporzionali, gli scintillatori liquidi, sono in grado di registrare un segnale proporzionale all'energia emessa. Questa tecnica richiede tempi lunghi ed è tipicamente utilizzata per misure di basse intensità, come per il ²¹⁰Po e il ²²⁸Th. I limiti di rivelazione sono molto più bassi di quelli tipici della spettrometria gamma. Tempi di conteggio maggiori produrranno limiti di rivelazione ancora inferiori.

Per le serie dell'²³⁸U e del ²³²Th, vengono analizzati, con spettrometria gamma, i seguenti sei radionuclidi:

- ²³⁴Th (in equilibrio con l'²³⁸U e con l'²³⁴U);
- ²³⁰Th (solo solido);
- ²²⁶Ra;
- ²¹⁰Pb (in equilibrio con il ²¹⁰Po);
- ²²⁸Th;
- ²²⁸Ra.

Nelle figure 18 e 19 si riportano rispettivamente un esempio di spettro di misura dell'uranio naturale e un esempio della strumentazione utilizzata.

Figura 18: Spettro alfa dell'uranio naturale

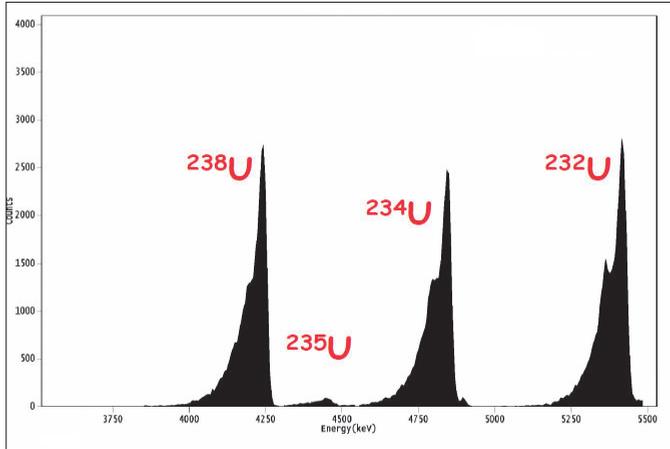


Figura 19: Misuratori per Spettrometria Alfa



Minima Attività Significativa (MSA): spesso chiamata Livello Critico, corrisponde al più piccolo segnale significativo che eccede il segnale di fondo (background) per lo specifico metodo di misura. Se, come usualmente avviene, i conteggi netti sono rappresentati da fluttuazioni random, (distribuzione normale), la MSA corrisponderà a 1.65σ , dove σ è la deviazione standard della distribuzione. Al di sotto di questo livello si può ragionevolmente affermare che il materiale radioattivo 'non è rivelabile' o che ogni attività è 'sotto il limite di rivelazione'.

Minima Attività Rivelabile (MDA): spesso chiamata Limite di Rivelazione, corrisponde al livello di attività che è necessaria ad assicurare, con la scelta dell'opportuno livello di confidenza, che il segnale netto sarà rivelato, in accordo al criterio che esso ecceda la MSA. Il segnale prodotto da un sistema per misure di radioattività può essere correlato alla presenza di una sorgente radioattiva solo se il valore di tale segnale non è inferiore a un dato limite, espresso di norma in termini di conteggi in uno specificato tempo di misura.

Se n_b è il rateo di conteggio di background, t_s e t_b sono, rispettivamente, i tempi di conteggio per il campione e per una misura associata del background, F è un fattore di calibrazione (count-rate per unità di attività del campione) e si assume l'intervallo di confidenza del 95% (i.e. $\alpha = \beta = 0.05$), allora:

$$MSA = \frac{1.65}{F} \sqrt{\frac{n_b}{t_s} \left(1 + \frac{t_s}{t_b}\right)} \quad (1.6)$$

Per misure del campione e del background con uguali tempi di conteggio, i.e. $t_s = t_b$, si ha:

$$MSA = \frac{2.33\sigma_b}{F} \quad (1.7)$$

dove $\sigma_b = \sqrt{\frac{n_b}{t_b}}$ è la "standard deviation of the background count-rate".

$$MDA = \frac{3}{Ft_s} + 2MSA \quad (1.8)$$

Il primo termine rappresenta una correzione per la non-normalità della statistica di conteggio a bassi conteggi totali (statistica di Poisson).

9.5 Gestione dei rifiuti

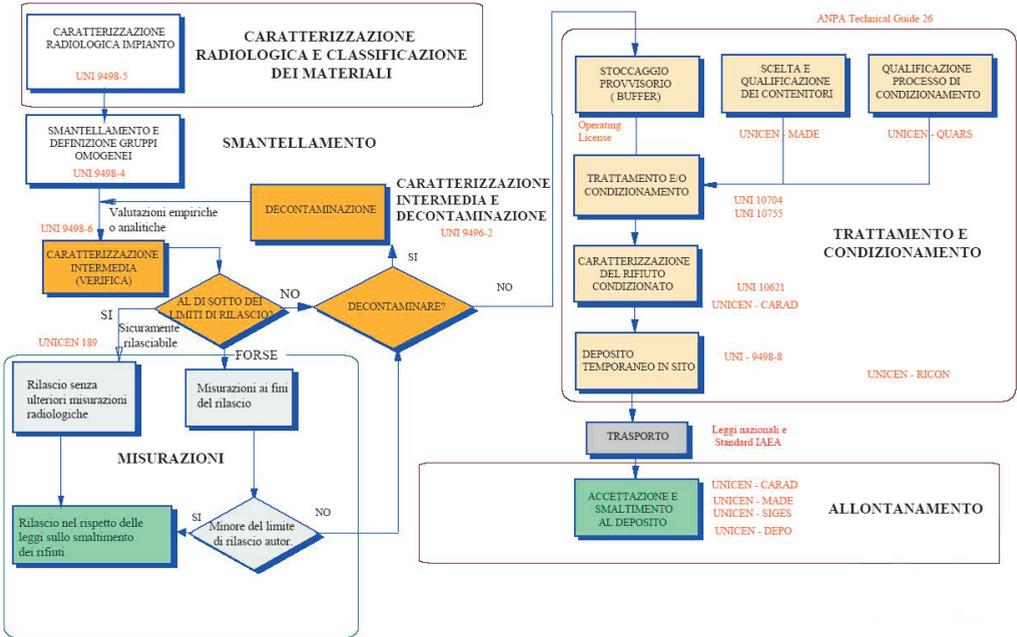
La gestione dei rifiuti radioattivi comprende tutte le attività amministrative ed operative, che riguardano la manipolazione, la raccolta, il trattamento, il condizionamento, il trasporto, lo stoccaggio, e lo smaltimento definitivo dei rifiuti radioattivi stessi. I principi fondamentali che sono alla base della gestione dei rifiuti radioattivi sono⁵² quelli individuati dal d.lgs. 230/95¹ e dal d.lgs. 241/00³ e di seguito riportati in modo schematico:

1. I rifiuti radioattivi devono essere gestiti in maniera tale da garantire un adeguato livello di protezione della salute dell'uomo e dell'ambiente;

2. I rifiuti radioattivi devono essere gestiti in maniera tale da tener conto dei possibili effetti sulla salute dell'uomo e sull'ambiente al di fuori dei confini nazionali;
3. I rifiuti radioattivi devono essere gestiti in maniera tale che i prevedibili impatti sulla salute delle future generazioni non siano superiori ai livelli di impatto oggi ritenuti accettabili e che comunque non impongano carichi indebiti alle future generazioni ;
4. I rifiuti radioattivi devono essere gestiti secondo una adeguata legislazione nazionale che includa una chiara ripartizione delle responsabilità e che preveda un organismo regolatorio indipendente;
5. La produzione dei rifiuti radioattivi deve essere limitata al minimo possibile tenendo in debito conto l'interdipendenza tra tutte le fasi della generazione e della gestione dei rifiuti;
6. La sicurezza degli impianti e delle infrastrutture ove si effettua la gestione dei rifiuti radioattivi deve essere assicurata durante tutto il loro previsto periodo di vita.

In Fig. 20⁵³ sono schematicamente riportati i principali passi procedurali, con i relativi richiami normativi e tecnici, da seguire nella gestione dei rifiuti radioattivi.

Figura 20: Gestione dei rifiuti radioattivi



Nella fase di **trattamento**, utilizzando appropriati processi fisici e/o chimici, si perseguono i seguenti obiettivi:

- Riduzione di volume;
- Predisposizione alla successiva fase di “Condizionamento”.

Nella fase di **condizionamento**, si persegue l'obiettivo di immobilizzare, all'interno di un idoneo contenitore, il rifiuto radioattivo inglobandolo in una matrice solida stabile avente resistenza fisica, chimica e meccanica tale da ottenere una forma finale idonea allo smaltimento definitivo.

Durante lo **stoccaggio temporaneo**, l'obiettivo principale è quello di conservare in sicurezza, per alcune decine di anni, i rifiuti radioattivi condizionati in modo da permetterne il successivo smaltimento definitivo.

Nell'ultima fase della gestione dei rifiuti radioattivi (**stoccaggio definitivo**) ci si prefiggono i seguenti obiettivi:

- collocazione definitiva, in apposita struttura, dei rifiuti radioattivi condizionati con l'intenzione di non recuperarli;
- protezione dell'uomo e dell'ambiente fino a quando la radioattività residua, per effetto del decadimento, non raggiunga valori paragonabili a quelli naturali;
- la dose annua alla popolazione non deve superare una frazione del valore di dose massima annua per le persone del pubblico così come definita dalla normativa vigente.

I rifiuti di seconda categoria, poiché necessitano di alcune centinaia di anni per raggiungere livelli di radioattività paragonabili al fondo naturale, vengono smaltiti in depositi superficiali o a bassa profondità. I rifiuti di terza categoria necessitano di centinaia di migliaia di anni per raggiungere livelli di radioattività paragonabili al fondo naturale e pertanto vengono smaltiti in formazioni geologiche a grande profondità.

9.5.1 Lo smaltimento dei rifiuti a bassa radioattività (o a vita breve)

Quando i rifiuti condizionati vengono depositati in un sistema di smaltimento definitivo, il loro isolamento dalla biosfera deve essere assicurato per tutto il periodo in cui dura la loro pericolosità. Tale isolamento viene realizzato tramite barriere di contenimento poste in serie, la cui funzione è di impedire la diffusione degli isotopi radioattivi verso l'esterno del deposito. La sicurezza del deposito sia nel breve che nel lungo periodo si basa quindi sull'affidabilità di queste barriere, la cui natura dipende dalla severità del contenimento richiesto e da quanto a lungo dovrà essere garantito. Nel caso di rifiuti a bassa attività, che costituiscono circa il 95% dell'intera produzione, l'isolamento deve essere garantito al massimo per qualche secolo (trecento anni è il tempo che determina un abbattimento dei livelli di radiazione di circa mille volte dei radionuclidi a vita più lunga come il ^{137}Cs o lo ^{90}Sr). Questo è un periodo di tempo durante il quale le barriere artificiali (trincee, silos, tumuli) con-

servano la loro efficacia protettiva. L'efficienza delle barriere e dell'isolamento sono continuamente controllati da sistemi e reti di monitoraggio ambientali, estesi al deposito ed alle aree circostanti, e attivi per tutto il periodo di controllo istituzionale, al termine del quale il sito viene rilasciato senza restrizioni. Esistono casi in cui il sito ha caratteristiche tali da non richiedere barriere artificiali di contenimento particolarmente severe, com'è il caso dei siti desertici, caratterizzati da una quasi completa assenza di precipitazioni e di falde significative. Centri di deposito definitivo per rifiuti a bassa attività sono in funzione o in progetto in tutti i paesi che detengono rifiuti radioattivi di questo tipo. I più moderni e avanzati si trovano in Francia, Spagna, Svezia, Giappone, Regno Unito, USA. Importanti progetti sono in stato di avanzato sviluppo in Germania, Svizzera, ed in alcuni paesi dell'Est europeo. Oltre 100 depositi sono stati o sono operativi nei Paesi membri della IAEA e circa 50 sono in fase di progetto più o meno avanzato. La maggior parte dei depositi realizzati nel mondo sono del tipo superficiale (near surface) caratterizzati da strutture di isolamento semplici. Depositati non superficiali per rifiuti a bassa attività sono realizzati o previsti in cavità artificiali (depositi scandinavi) o in miniere dismesse (soluzione proposta in Germania).

9.5.2 Lo smaltimento dei rifiuti ad alta attività e a vita lunga

Per i rifiuti ad alta attività, che mantengono livelli elevati di radiazione incompatibili con l'ambiente per migliaia o decine di migliaia di anni, il loro isolamento si potrebbe realizzare condizionandoli dapprima in matrici solide di grande durabilità, come quelle vetrose e successivamente depositandoli come manufatti in formazioni geologiche profonde (centinaia o migliaia di metri) che assicurano l'isolamento dei radionuclidi dalla biosfera per periodi dell'ordine di milioni di anni. Tali sono ad esempio le formazioni saline e quelle argillose. I depositi in profondità sono ancora nella fase di studio o di realizzazione pilota nei casi più avanzati. Laboratori sperimentali sotterranei sono in costruzione o in esercizio in Francia, Germania, Svezia. Il primo deposito commerciale potrebbe essere operativo in Europa, secondo le attuali previsioni, verso il 2030. In USA è in esercizio dal Maggio 1999 il WIPP (Waste Isolation Pilot Plant), un impianto pilota per lo smaltimento dei rifiuti a vita lunga plutoniferi prodotti nei centri del governo federale (i cosiddetti defense wastes). In attesa di disporre di un sito di smaltimento geologico, i rifiuti radioattivi a vita lunga condizionati vengono conservati in sistemi impiantistici adatti allo stoccaggio per periodi dell'ordine di qualche decennio ed oltre. A livello scientifico e radioprotezionistico acquista sempre più credibilità il ricorso ad un deposito geologico internazionale, destinato cioè ad accogliere i rifiuti a vita lunga di diversi paesi, se non di tutti, e localizzato in una delle aree più remote del pianeta, in condizioni quindi di massima sicurezza e minimo impatto ambientale. È attivo in questo senso il progetto PANGAEA, finanziato da enti internazionali, che ha individuato e proposto un sito in un'area remota dell'Australia. PANGAEA sta inoltre valutando siti alternativi in Sud America e Asia.

9.6 Strategie di bonifica

Di seguito si fornisce un elenco delle possibili strategie di bonifica relative ai siti contaminati da radioattività ambientale.

Contenimento

L'obiettivo è quello di evitare dispersione della contaminazione in acqua o in aria ed evitare la migrazione verso la zona contaminata di agenti di trasporto. Le infiltrazioni di precipitazioni atmosferiche e le esalazioni di nuclidi aeriformi sono ridotte con l'applicazione di coperture superficiali impermeabili. Accanto alle barriere fisiche, possono essere utilizzate barriere chimiche e geochimiche.

Immobilizzazione

L'obiettivo è quello di realizzare sistemi chiusi che non permettano il rilascio di materiale radioattivo. Il trattamento può essere realizzato in-situ o ex-situ. Nel primo caso, il trattamento consiste nell'immobilizzazione del materiale contaminato senza la sua rimozione mentre nel secondo caso il materiale viene portato in un impianto apposito per la decontaminazione, per poi essere riportato in situ. L'immobilizzazione in-situ è realizzata mediante due metodi, basati rispettivamente sul trattamento chimico e termico. L'immobilizzazione ex-situ prevede l'applicazione di tecniche di solidificazione del materiale contaminato che possano consentire il suo riciclo in prodotti utili come nei materiali da costruzione.

Diluizione/Dispersione

L'efficacia del metodo dipende dalla sicurezza che i contaminanti rimangano dispersi perché è stato osservato che alcuni di essi tendono a concentrarsi in vari compartimenti ambientali compreso il corpo umano. Tuttavia, nonostante questa tecnica in passato sia stata spesso utilizzata, l'attuale tendenza è di vietare qualsiasi tipo di dispersione e/o diluizione nell'ambiente.

Attenuazione naturale

Questa tecnica è simile alla dispersione/diluizione per quanto attiene ad eventuali ri-accumuli in alcuni compartimenti ambientali. A causa dei cambiamenti temporali dei sistemi naturali e della nostra incompleta comprensione dei fenomeni naturali, nella maggior parte dei casi l'utilizzo di questa tecnica richiederebbe continui monitoraggi della sua efficacia per tempi anche maggiori di qualche millennio. L'incorporazione da parte dell'ambiente del materiale contaminato, piuttosto che il

Separazione

suo isolamento, può comportare fenomeni come l'assorbimento, la precipitazione e la dispersione o la diluizione nel terreno come nelle falde acquifere.

L'obiettivo è quello di separare i NORM dai rifiuti in modo da minimizzarne il volume. Lo scioglimento di metalli di risulta può essere usato per separare i radionuclidi che si accumulerebbero nelle incrostazioni e nelle polveri dei gas di combustione.

Per proteggere gli operatori durante le attività lavorative con materiali radioattivi, in linea di massima, si devono adottare i seguenti accorgimenti:

- Fornire adeguata formazione, informazione;
- Fornire le procedure di sicurezza relative alle attività che si svolgono con materiali radioattivi nell'area contaminata;
- Seguire adeguate misure di igiene quali ad esempio il divieto di fumare, bere e mangiare nelle aree
- Utilizzare i DPI in dotazione;
- Disporre schermature come protezione dall'irradiazione diretta.
- Applicare le procedure relative alle attività lavorative;
- Usare appropriata segnaletica per consentire un accesso limitato e controllato ai lavoratori nell'area contaminata;
- Istituire un programma di monitoraggio e di valutazione delle dosi da radiazioni sia ambientale che individuale;
- Istituire un programma di monitoraggio e di valutazione delle dosi da radiazioni successivamente ai lavori di bonifica e riqualificazione ambientale.

10. Conclusioni

Diversi tipi di radionuclidi sono presenti in natura nella biosfera, altri sono prodotti artificialmente. Il campo di radiazione generato da una sorgente radioattiva può, in certe condizioni, essere caratterizzato mediante la misura di grandezze di campo o di grandezze dosimetriche. In molte situazioni tuttavia questo tipo di misure è di difficile attuazione. Si ricorre quindi, in questi casi, alla misura dell'attività di una sorgente radioattiva. Le misure di attività sono necessarie in tutti i casi in cui si voglia determinare il grado di contaminazione radioattiva. Si ha contaminazione radioattiva quando l'esposizione di una persona alle radiazioni ionizzanti è dovuta a sostanze radioattive. La contaminazione radioattiva può interessare anche oggetti di vario genere - solidi, liquidi e gassosi - quando in essi sono presenti radionuclidi.

Nelle situazioni più frequenti in cui si verifica una contaminazione radioattiva, questa non è mai tanto elevata da produrre campi di radiazione estremamente intensi. In generale, le misure di attività sono l'unica alternativa normalmente praticabile ogni qualvolta si voglia determinare l'entità della radioattività presente in una sostanza o in un organismo biologico.

Nel campo della radioprotezione, le misure di attività dei radionuclidi hanno lo scopo di determinare le grandezze, come la dose equivalente e la dose efficace, con cui si quantificano i limiti di esposizione delle persone alle radiazioni ionizzanti.

Per le esposizioni da attività industriali che prevedono l'utilizzo e la produzione di rifiuti radioattivi e NORM, sembra essere orientati, a livello europeo, verso valori limite di concentrazione di 1 Bq/g per le serie dell'Uranio e del Torio e 10 Bq/g per il ^{40}K . Questi potrebbero essere utilizzati per verificare se l'esposizione ai NORM debba o non debba considerarsi sottoposta ad una regolamentazione di radioprotezione. Al di sopra di questi valori, le decisioni potrebbero basarsi su criteri legati ad una dose efficace di 1 mSv/y e comunque andrebbero analizzate caso per caso.

La Figura 21 mostra un esempio di come si potrebbe realizzare un processo di gestione dei rifiuti radioattivi identificandone i vari aspetti decisionali.

Figura 21

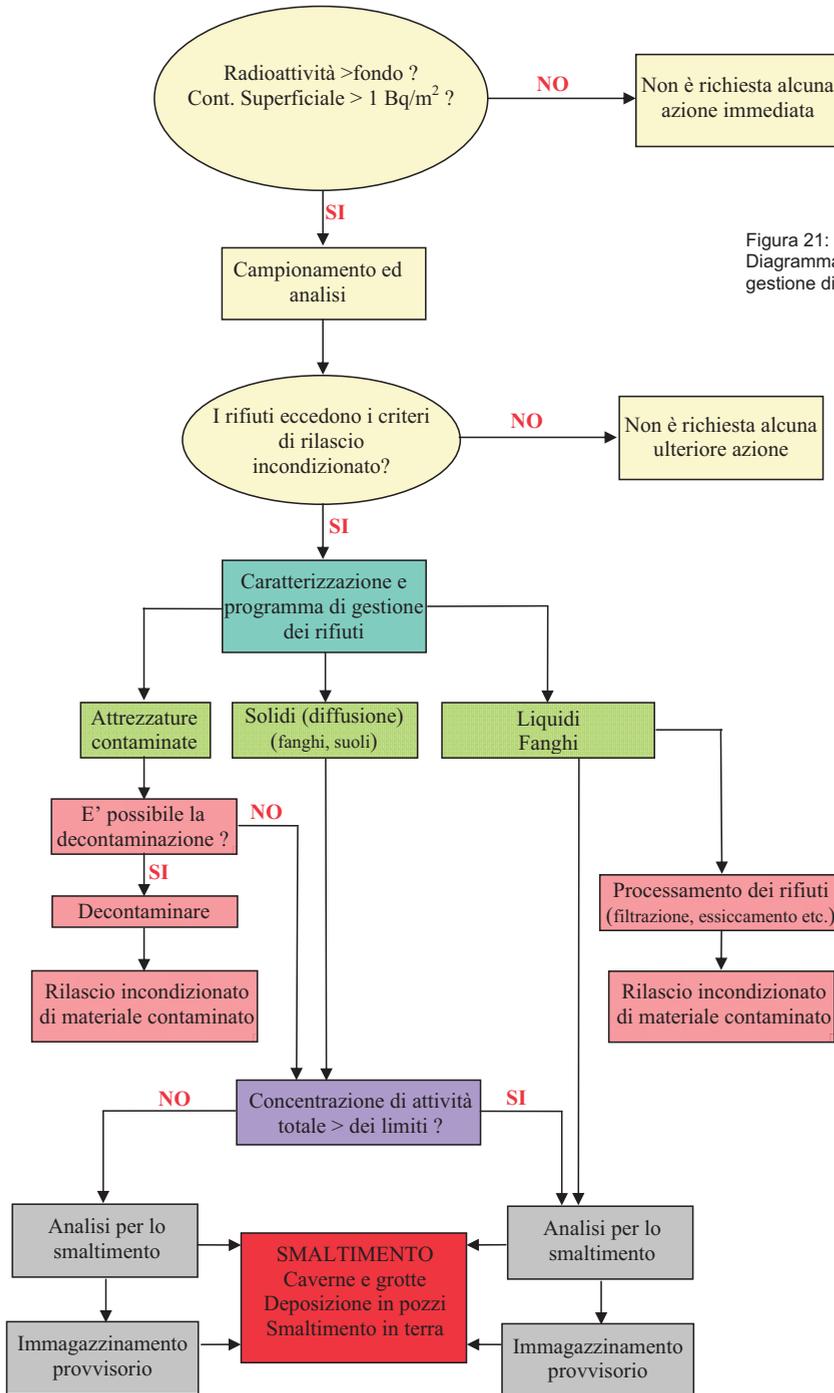


Figura 21:
Diagramma di flusso per la gestione di rifiuti radioattivi

Secondo la Direttiva EURATOM 96/29², alla quale si è ispirato il d.lgs., 241/2000³, il riciclo, il riutilizzo e lo smaltimento di materiali contenenti sostanze radioattive derivanti da pratiche soggette a comunicazione o ad autorizzazione debbono essere preventivamente autorizzate, *a meno che* i livelli di radioattività non siano conformi a quelli di allontanamento stabiliti dalle autorità nazionali, secondo criteri fissati dalla Direttiva stessa.

In Italia tutte le attività che prevedono l'impiego, la manipolazione, la detenzione di sostanze radioattive e la gestione dei rifiuti radioattivi sono regolate dal d.lgs., 230/1995⁷ e s.m.i. Per le attività lavorative di cui all'art. 10 bis, comma 1, lettere c) e d), l'art. 10-ter e l'art. 10-quater del decreto di cui sopra, è previsto un livello di azione pari a 0,3 mSv/y per le persone del pubblico e 1 mSv/anno per i lavoratori. In caso di superamento dei suddetti livelli di azione deve essere applicato un adeguato sistema di radioprotezione.

Il problema radioprotezionistico correlato ad una corretta gestione dei rifiuti radioattivi di origine industriale merita particolare attenzione per quanto riguarda i lavoratori, mentre può risultare di scarsa rilevanza per la popolazione nel caso di corrette e controllate procedure di decommissioning e successivo rilascio nell'ambiente. Sono fondamentali, dunque, adeguati e dettagliati programmi di radioprotezione nelle attività industriali che utilizzano e/o generano materiale radioattivo e nelle attività di bonifica di siti industriali dimessi.

Le maggiori difficoltà consistono nella gestione dei rifiuti radioattivi con tempi di dimezzamento estremamente lunghi. Per affrontare in modo efficace il suddetto problema, il Consiglio Europeo ha fortemente raccomandato la realizzazione di depositi di smaltimento per i rifiuti a media e bassa attività entro il 2013 (ma non ancora realizzati!) e la pianificazione di depositi di smaltimento geologico per i rifiuti ad alta attività entro il 2018. La raccomandazione è valida per tutti i paesi facenti parte della Comunità ed il progetto è attualmente in discussione presso il Consiglio.

Lo stato delle conoscenze è abbastanza elevato sia in Europa che negli Stati Uniti ma è decisamente scarso per i Paesi in via di sviluppo. In Europa e negli Stati Uniti si dispone di procedure e sistemi di radioprotezione decisamente avanzati, sia per i siti industriali ancora in essere sia per quanto riguarda le operazioni di bonifica di quelli dimessi ormai da tempo. Generalmente, nei Paesi in via di sviluppo è tuttora difficile effettuare un adeguato censimento delle attività industriali che utilizzano o producono materiale radioattivo e il quadro normativo risulta ancora più confuso. La situazione è resa ancora più difficile dal fatto che una grande quantità di attività minerarie vengono svolte proprio in questi Paesi.

Concludendo, è lecito affermare che l'impatto radiologico delle attività industriali che utilizzano e/o producono materiale radioattivo, sia sull'ambiente che sull'uomo, è assai contenuto se confrontato con altre attività come il nucleare e il settore sanitario. È comunque importante, soprattutto per i lavoratori, avere un quadro normativo che fissi regole precise e che nel loro ambito sia possibile definire e delineare procedure e sistemi radioprotezionistici efficienti ed efficaci ricorrendo, se possibile, alle soluzioni tecnologiche più all'avanguardia.

11. Glossario/Definizioni

Attività (A): quoziente di dN diviso per dt , in cui dN è il numero atteso di transizioni nucleari spontanee di una determinata quantità di un radionuclide da uno stato particolare di energia in un momento determinato, nell'intervallo di tempo dt .

Becquerel (Bq): nome speciale dell'unità di attività (A); un becquerel equivale ad una transizione per secondo: $1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$.

Contaminazione radioattiva: contaminazione di una matrice, di una superficie, di un ambiente di vita o di lavoro o di un individuo, prodotta da sostanze radioattive.

Dose assorbita: rapporto della frazione di energia ceduta all'unità di massa dm del mezzo considerato.

Dose Efficace (E): somma delle dosi equivalenti nei diversi organi o tessuti, ponderate nel modo indicato nei provvedimenti di applicazione; l'unità di dose efficace è il sievert (Sv).

Dose Equivalente (H_T): dose assorbita media in un tessuto o organo T, ponderata in base al tipo e alla qualità della radiazione nel modo indicato nei provvedimenti di applicazione; l'unità di dose equivalente è il sievert.

Esperto Qualificato: persona che possiede le cognizioni e l'addestramento necessari sia per effettuare misurazioni, esami, verifiche o valutazioni di carattere fisico, tecnico o radiotossicologico, sia per assicurare il corretto funzionamento dei dispositivi di protezione, sia per fornire tutte le altre indicazioni e formulare provvedimenti atti a garantire la sorveglianza fisica della protezione dei lavoratori e della popolazione.

Esposizione: qualsiasi esposizione di persone a radiazioni ionizzanti. Si distinguono:

- 1) **esposizione esterna:** esposizione prodotta da sorgenti situate all'esterno dell'organismo;
- 2) **l'esposizione interna:** esposizione prodotta da sorgenti introdotte nell'organismo;
- 3) **l'esposizione totale:** combinazione dell'esposizione esterna e dell'esposizione interna.

Fondo naturale di radiazioni: insieme delle radiazioni ionizzanti provenienti da sorgenti naturali, sia terrestri che cosmiche, semprechè l'esposizione che ne risulta non sia accresciuta in modo significativo da attività umane.

Gray (Gy): unità di misura della dose assorbita: $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J kg}^{-1}$.

Sievert (Sv): unità di misura della dose equivalente o di dose efficace. Se il prodotto dei fattori di modifica è uguale a 1: $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J kg}^{-1}$.

Livello di Intervento: valore di dose oppure valore derivato, fissato al fine di predisporre interventi di radioprotezione.

Materia radioattiva: sostanza o insieme di sostanze radioattive contemporaneamente presenti.

Smaltimento: collocazione dei rifiuti, secondo modalità idonee, in un deposito, o in un determinato sito, senza intenzione di recuperarli.

Sorgente di radiazioni: apparecchio generatore di radiazioni ionizzanti (macchina radiogena) o materia radioattiva, ancorché contenuta in apparecchiature o dispositivi in genere, dei quali, ai fini della radioprotezione, non si può trascurare l'attività, o la concentrazione di radionuclidi o l'emissione di radiazioni.

Sorgente naturale di radiazioni: sorgente di radiazioni ionizzanti di origine naturale, sia terrestre che cosmica.

Sorgente artificiale: sorgente di radiazioni diversa dalla sorgente naturale di radiazioni.

Sorgente non sigillata: qualsiasi sorgente che non corrisponde alle caratteristiche o ai requisiti della sorgente sigillata.

Sorgente sigillata: sorgente formata da materie radioattive solidamente incorporate in materie solide e di fatto inattive, o sigillate in un involucro inattivo che presenti una resistenza sufficiente per evitare, in condizioni normali di impiego, dispersione di materie radioattive superiore ai valori stabiliti dalle norme di buona tecnica applicabili.

Rischi generici (tradizionali): rischi associati alle attività tipiche dei cantieri temporanei o mobili [Titolo IV d.lgs. 81/2008 e s.m.i.].

Rischi specifici: rischi peculiari delle attività di bonifica dei siti contaminati.

Rischi per la sicurezza: rischi legati a danni acuti e fatti esterni che agiscono rapidamente sulla persona e costituiscono un nesso di causa/effetto con la lesione.

Rischi per la salute: rischi legati a danni progressivi e cronici provocati da fattori esterni che agiscono lentamente sulla persona addetta alle specifiche lavorazioni pericolose.

Rischi trasversali (organizzativi, gestionali ed ergonomici): rischi che derivano da un'inefficiente organizzazione del lavoro, sia in termini gestionali, che in termini metodologici e operativi.

Infortunio sul lavoro: Evento fortuito avvenuto in occasione di lavoro che abbia provocato una lesione fisica o psichica (UNI 7249: 2007).

NOTA: Definizione adottata da EUROSTAT (in essa sono compresi le intossicazioni acute, gli atti intenzionali da parte di altre persone, gli infortuni occorsi durante il lavoro ma all'esterno dell'impresa anche se provocati da terzi; ne sono esclusi le lesioni deliberatamente autoprocurate, gli infortuni in itinere, le malattie professionali e gli infortuni dovuti esclusivamente a cause mediche).

Malattia professionale: alterazione dello stato di salute di un lavoratore originata da cause inerenti allo svolgimento della prestazione di lavoro. Elenco delle malattie per le quali è obbligatoria la denuncia (d.m. 10/06/2014):

Gruppo 1- Malattie da agenti chimici

Gruppo 2- Malattie da agenti fisici

Gruppo 3- Malattie da agenti biologici

Gruppo 4- Malattie dell'apparato respiratorio

Gruppo 5- Malattie della pelle

Gruppo 6- Tumori professionali

Gruppo 7 - Malattie psichiche e psicosomatiche da disfunzioni dell'organizzazione del lavoro

Avvelenamento da radiazione: malattia acuta da radiazione o più propriamente, sindrome da radiazione acuta, designa un insieme di sintomi potenzialmente letali derivanti da una esposizione dei tessuti biologici di una parte considerevole del corpo umano ad una forte dose di radiazioni ionizzanti.

Danni somatici deterministici: si manifestano nell'individuo irradiato; la frequenza e la gravità variano con la dose; il periodo di latenza è solitamente breve.

Danni somatici stocastici: si manifestano nell'individuo irradiato; sono di tipo probabilistico; non richiedono il superamento di una dose-soglia per la loro comparsa; la frequenza di comparsa aumenta con la dose; hanno lunghi periodi di latenza.

Danni genetici stocastici: si manifestano nella progenie dell'individuo irradiato.

Agente cancerogeno (art. 234 d.lgs. 81/08):

- 1) una sostanza che risponde ai criteri relativi alla classificazione quali categorie cancerogene 1 o 2, stabiliti ai sensi del decreto legislativo 3 febbraio 1997, n. 52, e successive modificazioni;
- 2) un preparato contenente una o più sostanze di cui al numero 1), quando la concentrazione di una o più delle singole sostanze risponde ai requisiti relativi ai limiti di concentrazione per la classificazione di un preparato nelle categorie cancerogene 1 o 2 in base ai criteri stabiliti dai decreti legislativi 3 febbraio 1997, n. 52, e 14 marzo 2003, n. 65 e successive modificazioni;
- 3) una sostanza, un preparato o un processo di cui all'ALLEGATO XLII, nonchè una sostanza od un preparato emessi durante un processo previsto dall' ALLEGATO XLII.

Agentemutageno (art. 234 d.lgs. 81/08):

- 1) una sostanza che risponde ai criteri relativi alla classificazione nelle categorie mutagene 1 o 2, stabiliti dal decreto legislativo 3 febbraio 1997, n. 52, e successive modificazioni;
- 2) un preparato contenente una o più sostanze di cui al punto 1), quando la concentrazione di una o più delle singole sostanze risponde ai requisiti relativi ai limiti di concentrazione per la classificazione di un preparato nelle categorie mutagene 1 o 2 in base ai criteri stabiliti dai decreti legislativi 3 febbraio 1997, n. 52, e 14 marzo 2003, n. 65 e successive modificazioni.

Agente biologico (art. 267 d.lgs. 81/08): Qualsiasi microrganismo anche se geneticamente modificato, coltura cellulare ed endoparassita umano che potrebbe provocare infezioni, allergie o intossicazioni.

Agenti fisici (art. 180 d.lgs. 81/08): Per agenti fisici si intendono il rumore, gli ultrasuoni, gli infrasuoni, le vibrazioni meccaniche, i campi elettromagnetici, le radiazioni ottiche, di origine artificiale, il microclima e le atmosfere iperbariche che possono comportare rischi per la salute e la sicurezza dei lavoratori.

12. Bibliografia

1. DECRETO LEGISLATIVO 230/1995 del 17 marzo 1995: Attuazione delle direttive Euratom 80/836, 84/466, 89/618/, 90/641 e 92/3 in materia di radiazioni ionizzanti. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana -Supplemento ordinario n. 136 del 13-6-1995 (1995).
2. EUROPEAN UNION. COUNCIL DIRECTIVE 96/29/Euratom of 13 May 1996 laying down basic safety standards for the protection of the health of the workers and the general public against the dangers arising from ionizing radiation. Official Journal of the European Communities L159, 29.6.96 (1996).
3. DECRETO LEGISLATIVO 241/2000 del 26 maggio 2000: Attuazione della direttiva 96/29/EURATOM in materia di protezione sanitaria della popolazione e dei lavoratori contro i rischi derivanti dalle radiazioni ionizzanti. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana - Supplemento ordinario della Gazzetta Ufficiale n. 203 del 31-8-2000 (2000).
4. DECRETO LEGISLATIVO 81/2008 del 9 aprile 2008: Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana n. 101 del 30 aprile 2008, Supplemento ordinario n. 108.
5. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Protection of the public in situation of prolonged radiation exposure, ICRP Publication 82, Annals of ICRP 29/1-2 (2000).
6. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Extent of Environmental Contamination by Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) and Technological Options for Mitigation, Technical Reports Series No. 419, IAEA, Vienna (2003).
7. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Remediation of Areas Contaminated by Past Activities and Accidents, Safety Standards Series No. WS-R-3, IAEA, Vienna, (2003);
8. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Classification of radioactive waste; A safety guide Safety Series 111-G-1.1, 1994, Vienna, IAEA;
9. (ENEA-DISP) ex ANPA (ora ISPRA), Guida Tecnica n. 26, Gestione dei rifiuti radioattivi, Sicurezza e Protezione, n. 14, 1987.
10. WHO Technical Report Series 890; High-Dose Irradiation: wholesomeness of Food Irradiated with Doses above 10 kGy. Report of a Joint FAO/IAEA/WHO Study Group; Geneva 1999.
11. DECRETO LEGISLATIVO 94/2001 del 30 gennaio 2001 Attuazione delle direttive

- 1999/2/CE e 1993/3/CE concernenti gli alimenti e i loro ingredienti trattati con radiazioni ionizzanti. Gazzetta Ufficiale n. 79 del 4 aprile 2001 - Supplemento Ordinario n. 72.
12. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Publication n. 103; The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Annals of the ICRP Volume 37/2-4, 2008.
 13. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, 2005d. Low dose extrapolation of radiation-related cancer risk. ICRP Publication 99. Ann. ICRP 35 (4).
 14. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, 2003a. Biological effects after prenatal irradiation (embryo and fetus). ICRP Publication 90. Ann. ICRP 33 (1/2).
 15. First Italian National Report, Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, aprile 2006.
 16. T.E. Schultheiss, "Radiation dose-response models", Radiation Therapy Physics edited by A. Smith (Spring-Verlag, New York, 1995).
 17. E. Bemporad, M. Mariani e C. Zicari, "Classificazione e tecniche procedurali per la gestione dei rifiuti radioattivi", Ambiente e Sicurezza - Il Sole 24 ore - N. 13, 03 luglio 2007.
 18. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Naturally occurring radioactive materials (NORM IV), IAEA-TECDOC-1472, Proceedings of an international conference held in Szczyrk, Poland, 17-21 May 2004, October 2005.
 19. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Publication n. 81; Radiation protection recommendations as applied to the disposal of long-lived solid radioactive waste, 1999.
 20. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Decommissioning of small medical, industrial and research facilities, Technical Reports Series No. 414, 2003.
 21. DECRETO LEGISLATIVO 52/2007 del 6 febbraio 2007: Attuazione della direttiva 2003/122/CE Euratom sul controllo delle sorgenti radioattive sigillate ad alta attività e delle sorgenti orfane. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana n.95 del 24-4-2007.
 22. Radiation Protection n. 129, European Commission, Guidance on the realistic assessment of radiation doses to members of the public due to the operation of nuclear installations under normal conditions, 2002.
 23. Radiation Protection n. 122, European Commission, Practical Use of the Concepts of Clearance and Exemption - Part II: Application of the Concepts of Exemption and Clearance to Natural Radiation Sources, 2001.

24. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Publication n. 60; 1991. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21(1-3).
25. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Publication n. 116; Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures. Ann. ICRP 40(2-5), 2010.
26. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Publication n. 119; Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60. Ann. ICRP 41(Suppl.), 2012.
27. Radiation Protection n. 134, European Commission, Evaluation of the application of the concepts of exemption and clearance for practices according to title III of Council Directive 96/29/Euratom of 13 May 1996 in EU Member States, Volume 1: Main Report; 2003.
28. Radiation Protection n. 107, European Commission, Establishment of reference levels for regulatory control of workplaces where materials are processed which contain enhanced levels of naturally occurring radionuclides; 1999.
29. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Publication n. 65; Protection Against Radon-222 at Home and at Work. ICRP Publication 65. Ann. ICRP 23 (2); 1993.
30. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Publication n. 46; Radiation Protection Principles for the Disposal of Solid Radioactive Waste . ICRP Publication 46. Ann. ICRP 15 (4); 1985.
31. Radiation Protection n. 65, European Commission, Principles and Methods for Establishing Concentrations and Quantities (Exemption values) Below which Reporting is not Required in the European Directive; 1993.
32. DECRETO LEGISLATIVO 45/2014 del 04 marzo 2014 Attuazione della direttiva 2011/70/EURATOM, che istituisce un quadro comunitario per la gestione responsabile e sicura del combustibile nucleare esaurito e dei rifiuti radioattivi. Gazzetta Ufficiale serie generale n. 71 del 26 marzo 2014.
33. UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), Sources and Effects of the Ionizing Radiations, UNSCEAR 2000, Vol. I and II.
34. Goodhead, D.T. and H. Nikjoo, Clustered damage in DNA: estimates from track-structure simulations. Radiat. Res. 148: 485 - 486; 1997.
35. Burnet, N.G., J. Nyman, I. Turesson et al, The relationship between cellular radiation sensitivity and tissue response may provide the basis for individualizing radiotherapy schedules. Radiother. Oncol. 33: 228 - 238; 1994.

36. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Publication n. 118, ICRP Statement on Tissue Reactions / Early and Late Effects of Radiation in Normal Tissues and Organs - Threshold Doses for Tissue Reactions in a Radiation Protection Context. Ann. ICRP 41(1/2), 2012.
37. UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, UNSCEAR 1988 Report to the General Assembly, with annexes. United Nations sales publication E.88.IX.7. United Nations, New York, 1988.
38. Russell, W.L. and E.M. Kelly. Mutation frequencies in male mice and the estimation of genetic hazards of radiation in man. Proc. Natl.Acad. Sci.U.S.A. 79: 542-544, 1982.
39. Lal, D. and B. Peters. Cosmic-ray produced radioactivity on the earth. in: Encyclopaedia of Physics, Vol. XLV1/2 (Cosmic Rays). Springer Verlag, New York, 1967.
40. Lal, D. and H.E. Suess. The radioactivity of the atmosphere and hydrosphere. p. 407-434 in: Annual Review of Nuclear Science, Vol. 18 (E. Segrè, J. Robb Grover and H. Pierre Noyes, eds.). Annual Reviews, Inc., Palo Alto, CA, 1968;
41. Lide, D.R. (ed.). CRC Handbook of Chemistry and Physics, 73rd edition. CRC Press, Boca Raton, 1992-1993.
42. Scholten L.C., Roelofs L.M.M., Van der Steen J., A survey of potential problems for non nuclear industries posed by the implementation of new EC standards for natural radioactivity, KEMA Nuclear report 40059 NUC 935203, 1993.
43. UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), Sources and Effects of the Ionizing Radiations, UNSCEAR 2008, Vol. I.
44. Testa C., Desideri D., Meli M.A. et al., Radiation protection and scales in oil and gas production; Health Phys. 67 (1): 34 - 38, 1994.
45. DECRETO LEGISLATIVO 7 agosto 2015: Classificazione dei rifiuti radioattivi ai sensi dell'art. 5 del d.lgs. 4 marzo 2014 n. 45. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana - Serie generale n. 191 del 19-8-2015.
46. Radiation Protection n. 112, European Commission, Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of building materials, 1999.
47. UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), Sources and Effects of Ionizing Radiation. New York: UNSCEAR Report to General Assembly, with Scientific Annexes, United Nations Publ. (1993).
48. Boothe G.F., Stewart-Smith D., Wagstaff D. et al., The radiological aspects of zircon sand use. Health Phys. 38, pag. 393 - 398, 1980.

49. National Group for Studying Radiological Implications of the Use of Zircon Sand. Radiation protection aspects of the use of the zircon sand. *Sci. Total Environ.* 45, pag. 135 - 142, 1985.
50. Scholten L.C., Roelofs L.M.M., Van der Steen J., A survey of potential problems for non-nuclear industries posed by the implementation of new EC standards for natural radioactivity, KEMA Nuclear Report 40059-NUC 93-5203, 1993.
51. Reichelt A, Röhrer J., Lehmann K. ., Anthropogene Stoffe und Produktemit natürlichen Radionukliden, Teil 1a, Strahlungseigenschaften von Roh- und Reststoffen, Literaturrecherche, TÜV Bayern, 1994.
52. Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, First Italian National Report, Aprile 2006.
53. G. Bolla (SOGIN) "Smantellamento degli impianti nucleari e gestione dei rifiuti radioattivi", *l'Energia per il futuro: Nucleare e Fonti Rinnovabili*, Milano 7-8 novembre 2006.
54. UNIONE EUROPEA. DIRETTIVA del CONSIGLIO, 2011/70/Euratom del 19 Luglio 2011, Gestione combustibile nucleare esaurito e dei rifiuti radioattivi, *Gazzetta Ufficiale Unione Europea* del 2 agosto 2011 n. L199.
55. DECRETO LEGISLATIVO 15 febbraio 2010, n. 31: Disciplina della localizzazione, della realizzazione e dell'esercizio nel territorio nazionale di impianti di produzione di energia elettrica nucleare, di impianti di fabbricazione del combustibile nucleare, dei sistemi di stoccaggio del combustibile irraggiato e dei rifiuti radioattivi, nonché misure compensative e campagne informative al pubblico, a norma dell'articolo 25 della legge 23 luglio 2009, n. 99. *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana* dell'8 marzo 2010, n. 55 - Supplemento Ordinario n. 45.

