

STEELMASTER 2003

**RADIOATTIVITA' E RADIOPROTEZIONE
NELL'INDUSTRIA SIDERURGICA**

Relatore Dott. Ferrari S.

**Tesina di
Barbieri N.**

Indice

Introduzione	pag. 2
1. La radioattività	pag. 4
1.1 La struttura della materia	pag. 4
1.2 Definizione di radioattività	pag. 5
1.3 Disintegrazioni nucleari e radiazioni ionizzanti	pag. 6
1.4 Famiglie radioattive naturali	pag. 8
1.5 Effetti delle radiazioni ionizzanti sull'uomo	
1.5.1 Definizione di dose	pag. 8
1.5.2 Effetti nocivi acuti (effetti di tipo deterministico)	pag. 11
1.5.3 Effetti nocivi a lungo termine (effetti di tipo stocastico)	pag. 12
1.5.4 Dose effettiva in relazione al cancro ed ai danni genetici	pag. 12
1.5.5 Fattori d'incertezza nel calcolo di dosi ed effetti	pag. 13
2. Radioprotezione	pag. 14
2.1 Decreto legge 230/95	pag. 15
3. Impiego di sostanze radioattive	pag. 18
3.1 Impiego di sostanze radioattive in ambito medico	pag. 19
3.2 Impiego di sostanze radioattive in ambito industriale	pag. 19
3.3 Impiego di sostanze radioattive nel settore della ricerca	pag. 20
4. Radioattività nell'industria siderurgica	pag. 22
4.1 Il ciclo del rottame	pag. 22
4.2 Sorgenti radioattive potenzialmente presenti nei rottami metallici	pag. 24
4.3 Impatti della contaminazione radioattiva nell'industria	pag. 24
4.4 Prevenzione nelle acciaierie e fonderie	pag. 25
4.5 Procedura da seguire nel caso di fusione di una sorgente radioattiva	pag. 28
5. Conclusioni	pag. 30

Introduzione

Negli ultimi anni il problema della contaminazione associato al riciclaggio di materiale radioattivo ha interessato sempre più da vicino la moderna industria siderurgica. L'utilizzo intensivo di sorgenti radioattive nell'industria, in campo medico e nei prodotti di uso comune, la mancanza di procedure per la corretta separazione del materiale radioattivo e la sempre maggiore conoscenza dei rischi associati all'esposizione degli individui a sorgenti radioattive sono state alcune tra le cause che hanno portato il problema della contaminazione radioattiva all'attenzione dell'industria siderurgica.

I primi incidenti di contaminazione radioattiva in ambito industriale che hanno causato la sovraesposizione di parecchi individui a radiazioni ionizzanti risalgono agli anni '50 ma, mentre in molti casi il pericolo di contaminazione fu prontamente rilevato e pertanto circoscritto al solo ambiente di lavoro in cui fu rilevato, in altri casi passò inosservato e portò così alla distribuzione di materiale contaminato sul mercato. Da un punto di vista prettamente economico, i costi di bonifica, la fermata degli impianti e con la mancata produzione, la riduzione delle vendite e della fiducia da parte dei clienti hanno comportato un'ingente perdita per tutti quegli impianti in cui inavvertitamente è stato utilizzato un materiale radioattivo tra le materie prime.

Alcuni esempi significativi possono essere estrapolati dalla letteratura e qui riportati per dare un'idea delle dimensioni del problema. Gli incidenti occorsi nelle acciaierie di Auburn (1983), NY, USA, e di Juarez (1983), Mexico, in cui venne riciclata una sorgente di ^{60}Co proveniente da un impianto industriale di radiografie nel primo caso e un'unità per la terapia contro il cancro nel secondo caso; i due incidenti consecutivi occorsi alla Newport Steel (1992 e 1993) in cui furono fuse entrambe le volte sorgenti di ^{137}Cs ; l'incidente occorso alla Fundia AB (1996), Svezia, in cui fu fusa una sorgente di ^{60}Co , sono solo alcuni dei casi più importanti portati all'attenzione del pubblico. L'incidente avvenuto a Taiwan (1982-1983) in cui acciaio contaminato fu distribuito sul mercato può essere considerato un esempio significativo dei danni che si possono causare: più di 100 complessi residenziali oltre che scuole pubbliche e

private presentarono elevati livelli di radiazioni γ provenienti dall'acciaio contaminato con ^{60}Co utilizzato per la loro costruzione. Solo agli inizi del 1996 si riportò che più di 4000 persone, tra cui anche giovani studenti, avevano ricevuto più di 1 mSv/anno in più rispetto al normale valore locale per più di 12 anni. L'accresciuta consapevolezza del problema per effetto degli esempi sopra citati non evitò tuttavia altri incidenti in vari paesi del mondo tra cui anche l'Italia con il caso dell'Alfa Acciai nel 1997.

La sempre maggiore consapevolezza dei rischi associati al riciclo di materiali ferrosi e la promulgazione del decreto di legge 230/95 sono stati il motore per lo sviluppo nell'industria siderurgica di procedure finalizzate alla tutela della popolazione contro i rischi di contaminazione radioattiva.

1. La Radioattività

1.1 La struttura della materia

Tutte le sostanze sono costituite da *atomi*, ossia da miriadi di particelle tanto minuscole da essere indiscernibili ad occhio nudo. Ogni atomo è costituito a sua volta da una porzione centrale quasi sferica chiamata *nucleo* e da una nuvola di *elettroni* che lo circonda. Il nucleo costituisce la parte più pesante dell'atomo ed è formato da varie particelle, dette *nucleoni*, tra le quali le più importanti sono i *protoni* e i *neutroni*. I protoni hanno carica elettrica positiva mentre i neutroni sono elettricamente neutri. Il nucleo è perciò carico positivamente. Gli elettroni, circa mille volte più leggeri dei nucleoni, hanno carica elettrica negativa. Poiché l'atomo nel suo complesso deve essere elettricamente neutro, il numero dei protoni è sempre uguale a quello degli elettroni. Tale quantità, definita *numero atomico*, può variare. Gli atomi con diverso numero atomico presentano caratteristiche diverse e vengono suddivisi e classificati in elementi che prendono il nome dal materiale che si ottiene riunendo atomi con lo stesso numero atomico: l'idrogeno, con un solo protone nel nucleo, costituisce l'elemento chimico naturale più leggero mentre l'uranio, con 92 protoni nel suo nucleo, è il più pesante. L'atomo, nel suo insieme, rappresenta la più piccola parte di un elemento che conserva tutte le proprietà chimiche dell'elemento stesso. Tutti gli elementi sono riportati in ordine crescente di numero atomico nella Tavola Periodica degli Elementi o Tavola di Mendeleev.

Se il numero degli elettroni è superiore o inferiore al numero dei protoni presenti nel nucleo, l'atomo nel suo insieme presenta una carica elettrica rispettivamente negativa o positiva. In questo caso si dice che l'atomo è ionizzato. Uno *ione* è pertanto un atomo in cui il numero di elettroni è diverso da quello dei protoni presenti nel nucleo.

Quando due o più atomi si uniscono si forma una *molecola*.

Se due atomi di uno stesso elemento differiscono tra loro per il numero dei neutroni presenti all'interno del nucleo si dice che i due atomi sono due *isotopi* di quello elemento. Convenzionalmente gli isotopi vengono indicati

aggiungendo al simbolo dell'elemento la somma dei protoni e dei neutroni in esso contenuti (es. ^{90}Sr , ^{134}Cs , ^{137}Cs).

1.2 Definizione di Radioattività

Il fenomeno della radioattività fu scoperto nel 1896 da Henry Becquerel nel corso di ricerche tendenti a rivelare l'emissione di raggi X da parte di sostanze fluorescenti eccitate dalla luce.

Con il termine radioattività si indica l'emissione di radiazioni da parte del nucleo di un atomo. Tale fenomeno è strettamente correlato alla instabilità del nucleo: è infatti l'instabilità l'origine del decadimento di un nucleo ossia della trasformazione di un nucleo in un altro mediante emissione di energia sotto forma di particelle o radiazioni.

La disintegrazione radioattiva non è influenzabile dall'esterno e risulta impossibile arrestarla.

I nuclei atomici instabili, detti radionuclidi per il fatto di essere radioattivi, possono essere sia di origine naturale sia prodotti artificialmente.

La maggior parte degli elementi chimici naturali è caratterizzata dal fatto di avere uno o più isotopi stabili ed un numero più o meno elevato di isotopi radioattivi (ad esempio: ^1H e ^2H sono stabili, mentre ^3H è radioattivo; il ^{12}C e il ^{13}C sono stabili, mentre il ^{14}C è radioattivo; non si conoscono isotopi stabili né del radon né del uranio, ecc.). Fino ad oggi sono stati individuati circa 2000 nuclidi differenti e di questi solo 250 sono stabili.

L'istante in cui un nucleo radioattivo inizia a disintegrarsi non è determinabile; al contrario si può determinare il periodo necessario affinché un certo numero di nuclei di una sostanza radioattiva si riduca della metà. Questo periodo, detto *tempo di dimezzamento*, è caratteristico di ogni radionuclide e varia da poche frazioni di secondo a miliardi di anni.

Il numero medio di atomi che si disintegrano nell'unità di tempo definisce l'*attività* di una sostanza radioattiva. Attualmente esistono diverse unità di misura per definire l'attività di una sostanza radioattiva; le più utilizzate sono il Becquerel (1 Bq=1 disintegrazione/secondo) e il Curie (1 Ci= $37 \cdot 10^9$ Bq).

L'attività di una sorgente viene misurata con appositi strumenti, diversi secondo il tipo di radiazione da rilevare. Il valore misurato viene indicato dagli apparecchi in c.p.s. (counts per seconds). La relazione tra il valore misurato e l'attività della sorgente dipende dalla tipologia dell'atomo e dall'apparecchio di misura utilizzato.

1.3 Disintegrazioni nucleari e radiazioni ionizzanti

Le radiazioni emesse dalle sostanze radioattive più conosciute sono i raggi α , i raggi β ed i raggi γ . Le prime due specie di radiazioni sono costituite da "corpuscoli" materiali; i raggi γ sono invece onde elettromagnetiche.

I raggi α sono nuclei di elio costituiti da due protoni e due neutroni, vengono emessi dai radionuclidi con una velocità dell'ordine di un decimo della velocità della luce, sono poco penetranti (possono percorrere qualche centimetro in aria e solo le più energetiche riescono a superare lo spessore di un foglio di carta o raggiungere le strato germinativo delle cute), ma possiedono un forte potere ionizzante. La loro pericolosità diventa perciò molto rilevante nel caso di inalazione. Raggi α vengono emessi ad esempio durante la disintegrazione di ^{241}Am .

I raggi β sono costituiti da elettroni o positroni e possiedono perciò una massa molto minore rispetto a quella delle particelle α . Le particelle β vengono emesse dai radionuclidi con una velocità prossima alla velocità della luce, sono più penetranti delle particelle α (in aria possono percorrere fino a 13 m ed attraversano facilmente piccoli spessori di materiali morbidi come carta e legno) ma possiedono un minore potere ionizzante. Raggi β vengono emessi per esempio durante la disintegrazione di ^{63}Ni e ^{62}P .

I raggi γ sono onde elettromagnetiche della stessa natura delle onde luminose e dei raggi X. Esse viaggiano perciò alla velocità della luce e non vengono deflesse da un campo elettrico o magnetico; sono meno ionizzanti ma possiedono un alto potere penetrante (attraversano anche spessori consistenti di elementi densi come il piombo o il tungsteno). L'attenuazione del rateo di esposizione decresce esponenzialmente per cui non esiste un range entro il

quale esso va a zero. La radiazione γ accompagna ad esempio la disintegrazione di ^{99}Tc e la maggior parte dei radionuclidi.

Il concetto di stabilità di un nucleo è legato in generale al rapporto tra neutroni e protoni contenuti nel nucleo. In effetti la si può considerare sotto tre diversi punti di vista, cioè considerando dimensioni e numero di particelle costituenti il nucleo, rapporto neutroni-protoni, rapporto tra massa ed energia del nucleo.

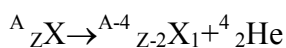
Denominazione	Posizione dell'atomo	Carica
Protone	Nucleo	+1
Neutrone		0
Elettrone	Fuori del nucleo	-1
Beta ⁻ (elettrone)	Emesse durante il decadimento del nucleo	-1
Beta ⁺ (positrone)		+1
Alfa		+2
Gamma (fotoni)		0

Tabella 1 - Particelle interessate da una trasformazione radioattiva

Quando un nucleo è instabile nei confronti delle sue dimensioni, emette particelle α . Se l'instabilità è dovuta al rapporto neutroni-protoni emette particelle β ; infine l'instabilità dovuta all'eccesso di energia determina l'emissione di tale energia sotto forma di emissione elettromagnetica (γ).

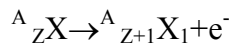
L'emissione di particelle α e β può essere analizzata in termini di peso atomico.

Quando da un nucleo X di numero atomico Z e peso atomico A (${}^A_Z\text{X}$) viene emessa una particella α esso si trasforma in un nucleo di numero atomico Z-2 e peso atomico A-4 secondo la reazione:



Questo significa che il nucleo di partenza si sposta di due posti a sinistra nella Tavola Periodica degli Elementi.

Quando invece il nucleo dell'atomo ${}^A_Z\text{X}$ emette una particella β , si sposta di un posto a destra nella Tavola Periodica degli Elementi trasformandosi in un elemento con lo stesso peso atomico:



Durante queste trasformazioni il nucleo può venire a trovarsi in uno stato energetico eccitato e cedere questa energia sotto forma di raggi γ .

Un nucleo può pertanto decadere emettendo particelle α o β , le une e le altre eventualmente accompagnate anche da emissione di raggi γ .

1.4 Famiglie radioattive naturali

Un elemento radioattivo naturale, in seguito ai decadimenti α e β , tende a trasformarsi successivamente in un altro elemento fino a raggiungere una configurazione nucleare stabile. Si forma quindi da un elemento progenitore una catena o famiglia radioattiva più o meno lunga, ogni membro della quale si trasforma in quello successivo in un tempo ben definito, caratteristico per ogni elemento. Tutti gli elementi radioattivi conosciuti sono stati raggruppati in tre famiglie, ognuna delle quali ha come elemento finale stabile il Pb. Queste famiglie hanno come capostipiti rispettivamente l'uranio, il protoattinio e il torio (cfr. tabella 2).

1.5 Effetti delle radiazioni ionizzanti sull'uomo

1.5.1 Definizione di dose

Nelle cellule viventi, i raggi α , β e γ ionizzano o eccitano gli atomi e le molecole che incontrano lungo il loro percorso modificandone la struttura chimica. Questo processo può provocare disturbi alle funzioni delle cellule e degli organi colpiti, con eventuali effetti negativi per la salute: le radiazioni ionizzanti possono infatti provocare danni visibili sul corpo nel breve periodo (effetti acuti) o indurre a lungo termine un cancro o modifiche alla struttura genetica.

Per valutare i rischi per la salute dovuti all'irradiazione sono state introdotte due grandezze: la dose agli organi o equivalente di dose per gli effetti acuti e la dose effettiva per gli effetti a lungo termine. Entrambe le misure fanno riferimento alla quantità di energia ceduta dalla radiazione ionizzante ad un chilogrammo di corpo irradiato ed alla intensità con cui le ionizzazioni prodotte dalla radiazione durante la penetrazione nella materia si susseguono.

A parità di energia ceduta è stato infatti osservato che le radiazioni ad alta intensità ionizzante sono più nocive a livello biologico di quanto non lo siano quelle a ionizzazione meno intensa (ad esempio, i raggi α , a parità di energia ceduta, sono più dannosi a livello biologico di quanto non siano i raggi β e γ in quanto possiedono un forte potere ionizzante).

Torio naturale	Uranio	Attinio naturale
^{232}Th (Th) α ↓ 1.4×10^{10} a ^{228}Ra β ↓ 6.7 a ^{228}Ac β ↓ 6.1 h ^{228}Th α ↓ 1.9 a ^{224}Ra α ↓ 3.6 g ^{220}Rn α ↓ 55 s ^{216}Po α ($\cong 100\%$) ↓ 0.16 s β (0.014%) ↓ ^{212}Pb ^{216}At β 11 h α 10^{-4} s ^{212}Bi α (34%) ↓ 60 m β (66%) ↓ ^{208}Tl ^{212}Po β 11 h α 10^{-4} s ^{208}Pb	^{238}U α ↓ 4.5×10^9 a ^{234}Th β ↓ 24 g ^{234}Pa β ↓ 1.1 m ^{234}U α ↓ 2.3×10^5 a ^{230}Th α ↓ 8×10^4 a ^{226}Ra α ↓ 1620 a ^{222}Rn α ↓ 3.8 g ^{218}Po α ($\cong 100\%$) ↓ 3 m β (0.04%) ↓ ^{214}Pb ^{218}At β 27 m α 2 s ^{214}Bi α (0.04%) ↓ 20 m β ($\cong 100\%$) ↓ ^{210}Tl ^{214}Po β 1 m α 10^{-4} s ^{210}Pb β ↓ 22 a ^{210}Bi α ($10^{-5}\%$) ↓ 5 g β ($\cong 100\%$) ↓ ^{206}Tl ^{210}Po β 4 m α 140 g ^{206}Pb	^{235}U (AcU) α ↓ 7.1×10^8 a ^{231}Th β ↓ 25 h ^{231}Pa α ↓ 3.2×10^4 a ^{227}Ac α (1.2%) ↓ 22 a β (98.8%) ↓ ^{223}Fr ^{227}Th β 21 m α 19 g ^{223}Ra α ↓ 11 g ^{219}Pn α ↓ 3.9 s ^{215}Po α ($\cong 100\%$) ↓ 0.16 s β ($10^{-3}\%$) ↓ ^{211}Pb ^{215}At β 3.6 m α 10^{-4} s ^{211}Bi α (0.3%) ↓ 2.2 m β (99.7%) ↓ ^{207}Tl ^{211}Po β 4.8 m α 10^{-2} s ^{207}Pb

Tabella 2 – Famiglie radioattive naturali

Poiché la densità di ionizzazione, pur giocando un ruolo di primo ordine, non è una grandezza misurabile, nel calcolo della dose si tiene conto del suo effetto moltiplicando l'energia ceduta ad un chilogrammo di corpo irradiato (determinabile con un dosimetro) per un fattore caratteristico del tipo di radiazione ottenuto prendendo i raggi X e γ come riferimento. Le dosi così

calcolate hanno gli stessi effetti biologici indipendentemente dal tipo di radiazione.

Grandezza	Relazione	Definizione
Dose (D)		Energia/unità di massa
Gray (Gy)		Joule/kg (quantità di energia ceduta dalla radiazione ad un chilogrammo di corpo irradiato)
W_r		Fattore di qualità tipico della radiazione
Equivalente di dose, H (per un tessuto)	$D \times W_r$	
Sievert (Sv)	$W_r \times Gy$	
W_t		Fattore di ponderazione
Dose efficace	$\sum_t W_t \times H_t$	Si considerano i contributi dei singoli organi (t) interessati dalla radiazione

Tabella 3 - Riepilogo delle grandezze per la valutazione dei rischi associati a radiazioni

L'unità di misura della dose è il Sievert (Sv). Per i raggi γ vale la relazione $1 \text{ Sv} = 1 \text{ Joule/kg} = 1 \text{ Gy}$. Per altri tipi di radiazione, il valore della dose in Sievert, a parità di energia ceduta, risulta maggiorato dalla moltiplicazione per il relativo fattore caratteristico.

L'intensità di dose, ossia l'intensità di un campo di radiazione, può essere misurata ricorrendo ai dosimetri. Mediante l'utilizzo di questi strumenti di misura è possibile calcolare la dose accumulata da una persona rimasta esposta ad un campo di radiazione per unità di tempo.

Una dose di radiazione può essere accumulata per esposizione dell'organismo a radiazioni esterne o interne.

Una sorgente di radiazione che si trova fuori dall'organismo produce una radiazione esterna. La dose accumulata da una radiazione esterna può essere influenzata dalla durata dell'esposizione vicino alla sorgente, dalla distanza dalla sorgente e dalla schermatura della sorgente. Tutti gli organi vengono interessati dalla radiazione. All'irradiazione esterna del corpo umano

contribuiscono ad esempio la radiazione cosmica proveniente dallo spazio ed i raggi γ emessi dai radionuclidi del suolo terrestre.

Se la sorgente di radiazione penetra nell'organismo per inalazione, ingestione o attraverso la pelle, le cellule organiche vengono irradiate dall'interno. Le sostanze che penetrano nell'organismo possono esserne assorbite e quindi rimanervi fino alla loro completa disintegrazione oppure possono esserne espulse per via metabolica prima della loro completa disintegrazione. Nel caso di una irradiazione interna il pericolo d'irraggiamento può essere limitato a particolari organi. Per il calcolo della dose dovuta ad un'irradiazione interna è necessario conoscere la radioattività dei radionuclidi incorporati. La conversione da radioattività a dose viene effettuata facendo riferimento a dei fattori che tengono conto delle proprietà fisiche del tipo di radiazione, del comportamento metabolico delle sostanze incorporate e di altre variabili.

1.5.2 Effetti nocivi acuti (effetti di tipo deterministico)

Gli effetti nocivi acuti insorgono in seguito ad un'esposizione che comporta il superamento di una certa dose di radiazione detta dose soglia. La gravità dell'effetto cresce con l'aumento della dose che lo ha provocato.

Il valore di soglia non è di facile definizione in quanto gli individui non sono tutti uguali e i loro organismi rispondono in modo diverso alle sollecitazioni indotte dall'irraggiamento. Il valore di soglia viene perciò stabilito considerando un campione elevato di individui includendo uomini, donne, bambini ed andando ad analizzare gli effetti provocati su ciascuno di essi da una determinata dose. Le catastrofi e gli esperimenti nucleari sono state utilizzate per ottenere delle stime statistiche.

Di seguito si riportano due esempi significativi di quanto sopra detto:

- un'irradiazione di breve durata dell'occhio può provocare un offuscamento del cristallino già a partire da circa 2 Sv. Se però l'irraggiamento si protrae per circa 40 anni, sono necessari circa 10 Sv per produrre lo stesso effetto.
- un'irradiazione di breve durata da raggi γ di tutto il corpo umano con una dose tra 4 e 5 Sv fa sì che tutte le persone colpite si ammalino, nel 50% dei

casi con esito letale. L'esposizione a una dose compresa tra 7 e 8 Sv causa quasi sicuramente la morte della persona.

Altri esempi di effetti nocivi acuti sono l'eritema per irradiazione della pelle, la sterilità per irradiazione delle gonadi e le ulcerazioni per irradiazione delle mucose.

1.5.3 Effetti nocivi a lungo termine (effetti di tipo stocastico)

Gli effetti nocivi a lungo termine si manifestano con una probabilità proporzionale alla dose ricevuta. Si presume che per questo tipo di effetti non esista una dose soglia (qualunque dose, per quanto piccola, può provocare dei danni biologici anche se con una probabilità minima) e che gli effetti si manifestino anni o decenni dopo l'irradiazione. Così, ad esempio, l'insorgere del cancro o le conseguenze di modifiche alla struttura genetica possono verificarsi anche a distanza di molti anni da un'irradiazione.

La gravità dell'effetto dipende dal tipo di effetto e non dalla dose che lo ha provocato.

Tra gli esempi di effetti nocivi a lungo termine si possono annoverare la probabilità d'insorgenza della leucemia o l'accorciamento della vita a seguito di altre malattie specifiche.

1.5.4 Dose effettiva in relazione al cancro ed ai danni genetici

Non tutti gli organi ed i tessuti del corpo umano sono ugualmente sensibili alle radiazioni ionizzanti: il midollo osseo rosso, i polmoni, lo stomaco e l'intestino sono, ad esempio, gli organi maggiormente interessati dal rischio del cancro per effetto di un'esposizione alle radiazioni ionizzanti. E' stato tuttavia osservato che se l'esposizione alle radiazioni ionizzanti interessa un singolo organo, la probabilità di insorgenza del cancro per una persona è minore rispetto al caso in cui tutto il corpo riceva la stessa dose. Se l'irraggiamento colpisce, ad esempio, solo i polmoni, il rischio di cancro è circa 8 volte minore rispetto al caso in cui la stessa dose colpisca tutti gli organi del corpo. Nel caso di un'irradiazione totale del corpo umano, invece, i polmoni, così come pure lo

stomaco, l'intestino ed il midollo osseo rosso, contribuiscono ciascuno per circa 1/8 al rischio di cancro.

Tessuto o organo	Fattore di ponderazione
Gonadi	0.20
Midollo osseo rosso	0.12
Intestino	0.12
Polmoni	0.12
Stomaco	0.12
Vescica	0.05
Seno	0.05
Fegato	0.05
Esofago	0.05
Tiroide	0.05
Pelle	0.01
Superficie delle ossa	0.01

Tabella 4 - Fattori di ponderazione per la determinazione della dose efficace

Per tener conto di ciò è stata introdotta la dose effettiva, ossia una grandezza ottenuta come somma dei contributi dei singoli organi interessati alla radiazione, ciascuno dei quali a sua volta ottenuto moltiplicando la dose assorbita dall'organo per un fattore di ponderazione che tiene conto del rischio dell'organo di essere affetto da cancro o di subire danni genetici. La dose effettiva misura perciò la suscettibilità di un essere umano irradiato di essere affetto da cancro o di subire danni genetici.

1.5.5 Fattori di incertezza nel calcolo di dosi ed effetti

Poiché il calcolo di una dose si basa su numerosi assunti e modelli matematici e poiché gli effetti della radiazione variano da individuo ad individuo, ne consegue che il calcolo delle dosi e degli effetti può essere affetto da un certo margine d'errore. I valori che si ottengono possono tuttavia essere utilizzati come punto di partenza per stabilire se un'attività che induce una dose supplementare sia o meno giustificabile.

2. Radioprotezione

Gli effetti biologici dannosi associati alla contaminazione radioattiva, come visto in precedenza, possono essere sia di tipo deterministico che di tipo stocastico.

La radioprotezione ha come finalità la prevenzione totale degli effetti dannosi non stocastici e la limitazione a livelli ritenuti accettabili della probabilità di accadimento degli effetti stocastici.

Mentre la prevenzione degli effetti dannosi deterministici è assicurata da limiti di equivalente di dose individuale fissati dalla legge a valori sufficientemente bassi, tali che nessuna dose soglia venga mai raggiunta, la prevenzione degli effetti stocastici è ottenuta rispettando i principi alla base della radioprotezione, ossia:

- **principio di giustificazione:** *nessuna attività umana deve essere accolta o proseguita a meno che la sua introduzione o prosecuzione produca un beneficio netto e dimostrabile;*
- **principio di ottimizzazione:** *ogni esposizione umana alle radiazioni deve essere tenuta tanto bassa quanto è ragionevolmente ottenibile, facendo luogo a considerazioni economiche e sociali;*
- **principio di limitazione delle dosi individuali:** *l'equivalente di dose ai singoli individui non deve superare determinati limiti stabiliti per le varie circostanze.*

	LAVORATORI	PUBBLICO
Dose efficace	20 mSv/anno (media su 5 anni)	1 mSv/anno
Dose equivalente		
Cristallino	150 mSv/anno	15 mSv/anno
Cute	500 mSv/anno	50 mSv/anno
Estremità	500 mSv/anno	

Tabella 5 – Limite di dose (ICRP 60)

Questi principi sono stati ideati dall'ICRP, International Commission on Radiological Protection, la quale ha proposto che la dose annua di radiazioni di origine artificiale a cui sia esposta la popolazione normale non superi, a lungo termine, un valore medio di 1 mSv (escluse le applicazioni mediche e le dosi naturali).

2.1 Decreto legge 230/95

Il decreto legge 230/95, entrato in vigore il 1 gennaio 1996 in sostituzione del D.P.R. 185/64, recepisce tutte le direttive europee relative alla radioprotezione e fissa in 100 mSv per un tempo di cinque anni il limite di equivalente di dose per esposizione globale per i lavoratori esposti con l'ulteriore condizione che non venga superato il limite di 50 mSv/anno. Resta valido il limite di equivalente di dose globale per le persone del pubblico in 1 mSv/anno. I limiti di equivalente di dose per esposizione globale sono riportati in tabella 6.

Nell'ambito del decreto legge vengono prese in considerazione le seguenti figure:

i lavoratori

I lavoratori esposti alla radiazione, ossia tutti i soggetti che per effetto della loro attività lavorativa sono suscettibili di una esposizione alle radiazioni ionizzanti superiore ai limiti fissati per le persone del pubblico, vengono suddivisi in due categorie, A e B, in relazione alla esposizione cui sono suscettibili.

l'esperto qualificato

L'esperto qualificato rappresenta la figura di riferimento all'interno di un'azienda per tutti i temi inerenti la radioprotezione. All'esperto qualificato spetta il compito di:

- redigere per conto del datore di lavoro una relazione esaustiva contenente le valutazioni e le indicazioni di radioprotezione inerenti alle attività dell'azienda per conto della quale ha effettuato la verifica;
- effettuare l'esame e la verifica delle attrezzature, dei dispositivi e degli strumenti di protezione. Tale verifica deve essere effettuata sia prima

della messa in opera di nuove installazioni che periodicamente durante il loro esercizio;

- valutare la dose individuale per i lavoratori derivante da esposizioni esterne ed interne con opportuni strumenti;
- comunicare per iscritto con cadenza definita al medico autorizzato, per i lavoratori di classe A, e al medico addetto alla sorveglianza medica, per i lavoratori di categoria B, le valutazioni delle dosi ricevute;
- supportare il datore di lavoro in caso di incidente.

datore di lavoro, dirigenti e preposti

Il datore di lavoro, con riferimento alla relazione redatta dall'esperto qualificato ha il compito di:

- predisporre norme interne di protezione e di sicurezza adeguate al rischio di radiazione e verificare che dette norme vengano rispettate;
- rendere edotti i lavoratori dei rischi specifici cui sono esposti, delle norme di protezione sanitaria e delle conseguenze derivanti dalla mancata osservanza delle prescrizioni mediche e delle modalità di esecuzione del lavoro;
- fornire ai lavoratori i mezzi di protezione in relazione al rischio cui sono esposti e verificare che detti mezzi vengano utilizzati;
- provvedere affinché le sorgenti di radiazioni ionizzanti vengano indicate con opportuni contrassegni

Classe	Limiti di dose annua (mSv)			Dosimetria personale	Sorveglianza medica
	Corpo intero	Estremità (mani, avambracci..)	cristallino		
Categoria A	20	500	150	Obbligatoria	Medico autorizzato
Categoria B	6	150	45	facoltativa	Medico competente
Non esposti	1	50	15	-	-

Tabella 6 – Limiti di dose ai sensi del D. Lgs. 230/95

Il D. Lgs. 230/95 prevede poi ulteriori limitazioni per particolari categorie di lavoratori. Alcuni esempi sono riportati nella tabella 7.

Categoria	Limitazioni
Lavoratrici gestanti	Stessi limiti previsti per i lavoratori non esposti
Lavoratrici che allattano	Non possono svolgere attività con rischio di contaminazione
Minori di 18 anni	Non possono svolgere attività proprie dei lavoratori esposti
Lavoratrici, apprendiste, studentesse in età fertile	Ulteriore limite di equivalente di dose all'addome di 13 mSv/trimestre

Tabella 7 - Limitazioni per particolari categorie di lavoratori

3. Impiego di sostanze radioattive

Nonostante la sempre maggiore consapevolezza dei rischi connessi alla esposizione a radiazioni ionizzanti, in molti ambienti di lavoro si continuano ad utilizzare sorgenti radioattive.

La scelta di adottare una sorgente radioattiva in un determinato processo è dettata dal maggiore beneficio che questa permette di ottenere rispetto ad un qualsiasi altro dispositivo alternativo.

Le autorizzazioni all'impiego di apparecchi contenenti sostanze radioattive vengono però concesse solo se il loro uso normale comporta dosi di radiazioni irrilevanti per gli individui che si trovano ad operare con essi.

Il calcolo delle dosi per gli operatori esposti al rischio di contaminazione è a cura dell'esperto qualificato, che prende in esame le diverse fasi di lavorazione di un'azienda ed i tempi di esposizione degli operatori a sorgenti radioattive.

Nel caso di sorgenti fisse il calcolo delle dosi per gli operatori viene definito in base al tempo di permanenza degli operatori stessi nella zona a rischio.

L'utilizzo di dosimetri permette di controllare l'esattezza dei valori calcolati.

Oggi le sorgenti radioattive trovano principalmente impiego nel settore medico-sanitario, in quello della ricerca e nell'industria.



Grafico 1 – radioattività ricevuta annualmente dalla popolazione media

3.1 Impiego di sostanze radioattive in ambito medico

Le sostanze radioattive vengono giornalmente applicate negli studi medici e nelle cliniche.

L'uso degli isotopi radioattivi consiste nell'introduzione nell'organismo di un elemento radioattivato (per esempio iodio, tecnezio, ferro, ecc.) e nel seguirne l'evoluzione: ciò serve sia a scopo diagnostico (per esempio, per le malattie della tiroide, per misurazioni emodinamiche), sia a scopo terapeutico (malattie della tiroide, malattie ipofisarie, ecc.).

3.2 Impiego di sostanze radioattive in ambito industriale

Le diverse proprietà delle sorgenti radioattive trovano molteplici applicazioni in ambito industriale.

Di seguito si riportano alcune tra le principali applicazioni autorizzate di sorgenti radioattive chiuse o sigillate.

Gammagrafia industriale

La gammagrafia è un procedimento che sfrutta le proprietà di assorbimento delle radiazioni γ per studiare la struttura interna di corpi opachi senza distruggerli. Le sorgenti comunemente utilizzate sono ^{60}Co , ^{192}Ir , ^{137}Cs con attività dell'ordine di $10^2 \div 10^3$ GBq ($3 \div 30$ Ci). Poiché le attività in gioco sono elevate, vi è un pericolo di irraggiamento esterno. Le sorgenti devono perciò essere conservate in contenitori schermanti in piombo, tungsteno o in uranio impoverito.

Dispositivi di misura di livello

Le sorgenti di raggi γ più comunemente utilizzate nei dispositivi di misura di livello sono ^{60}Co e ^{137}Cs , con attività variabile da qualche GBq nel primo caso a decine di GBq nel secondo caso, in quanto hanno un elevato potere di penetrazione. L'impiego di sorgenti radioattive consente di ottenere misure più precise e rapide di un qualsiasi altro dispositivo impiegato per la stessa funzione. I dispositivi di misura di livello trovano applicazione in diversi settori industriali.

Sorgenti di ^{60}Co vengono ad esempio utilizzate nelle macchine di colata continua per il controllo del livello dell'acciaio in lingottiera.

Dispositivi di misura di spessori molto sottili

I dispositivi di misura di spessori molto sottili possono utilizzare sorgenti α (^{241}Am), β (^{90}Sr), γ (^{204}Tl). L'impiego di queste sorgenti consente di ottenere una misura continua, precisa e rapida dello spessore.

Sterilizzazione biologica (strumenti chirurgici, materiali di medicazione ecc.)

Nell'ambito della sterilizzazione biologica vengono utilizzate sorgenti di ^{60}Co con un'attività di $10^5 \div 10^{11}$ GBq ($10^3 \div 10^6$ Ci). I vantaggi associati all'utilizzo di queste sorgenti sono rilevanti: un metodo a freddo, semplice, sicuro e con costi di esercizio inferiori ad altri metodi. L'impiego di sorgenti con così alta attività richiede però un alto grado di sicurezza in quanto un'esposizione alla sua radiazione anche solo di pochi secondi già costituisce una dose mortale.

Conservazione di derrate alimentari

Come nel caso precedente si utilizzano sorgenti di ^{60}Co con un'attività di $10^5 \div 10^{11}$ GBq ($10^3 \div 10^6$ Ci). L'irraggiamento di derrate alimentari consente la distruzione di microrganismi.

Rilevatori di fumo

L'integrazione nei segnalatori d'incendi di ^{241}Am permette di rilevare la presenza di gas prodotti dal fuoco.

3.3 Impiego di sostanze radioattive nel settore della ricerca

Numerose sono le applicazioni della radioattività nel campo della ricerca scientifica. Alcune delle principali applicazioni della radioattività sono di seguito riportate:

- la scoperta della radioattività naturale diede inizio allo studio del nucleo e della trasmutazione degli elementi;
- la scoperta della radioattività naturale permise la comprensione di alcuni meccanismi che regolano la vita del sole e delle stelle;
- la scoperta della radioattività naturale permise l'elaborazione di metodi per la determinazione dell'età degli esseri viventi del passato;
- gli isotopi radioattivi vengono utilizzati come traccianti: una volta introdotti in un determinato sistema, essi seguono esattamente lo stesso cammino o processo delle normali specie atomiche corrispondenti, ma possono essere

localizzati ed identificati facilmente in ogni fase del processo grazie alla loro radioattività.

4. Radioattività nell'industria siderurgica

L'impiego sempre più diffuso di sorgenti radioattive nel settore medico, in quello della ricerca e dell'industria e la mancanza di una pratica comune a tutti i Paesi per il loro smaltimento, hanno contribuito ad accrescere nelle aziende che operano nel settore siderurgico ed utilizzano il rottame come materia prima per il loro ciclo produttivo il timore di incorrere in un incidente di contaminazione radioattiva.

Numerosi sono i casi riportati in letteratura di utilizzo inconsapevole di materiale radioattivo e i danni derivati dagli incidenti si sono sempre rilevati molto consistenti.

L'esempio fornito da questi casi ha portato allo sviluppo di tutta una serie di procedure sia da parte di chi seleziona il rottame, sia da parte di chi lo riceve per ridurre al minimo il rischio di incidenti.

4.1 Il ciclo del rottame

La raccolta ed il riciclaggio dei rottami di materiali ferrosi costituisce una pratica comune in tutti i paesi del mondo in quanto rappresentano una materia prima di primaria importanza per le industrie trasformatrici sia per la loro qualità sia per i risparmi energetici che permettono di ottenere. Per l'Italia, ad esempio, i rottami di materiale ferroso costituiscono la materia prima indispensabile per alimentare una siderurgia al forno elettrico tra le più sviluppate al mondo.

Numerosi sono i tipi di rottami che si trovano in commercio e, in base alla loro storia ed ai loro previsti utilizzi, possono presentare un rischio più o meno elevato di contaminazione radioattiva.

Il 40% dei rottami commercializzati in Italia è costituito da **cadute nuove**, ossia da scarti che si originano nei processi produttivi basati sulla lavorazione di prodotti siderurgici a causa di difetti o fuori standard. Questi materiali, raccolti direttamente alla fonte, hanno caratteristiche di analisi chimica e di qualità certe. Il rischio che possa trattarsi di materiale contaminato è molto basso, a meno che non si consideri l'ipotesi che il materiale di partenza provenga dalla laminazione di materiale radiocontaminato.

La **raccolta nazionale** rappresenta il 20% dei rottami commercializzati in Italia ed è costituito da materiale proveniente dalla demolizione di manufatti e opifici industriali (capannoni, macchinari, impianti chimici o petroliferi ecc.). Come nel caso precedente si tratta di materiale di ottima qualità con bassissimo rischio di radiocontaminazione.

Al terzo posto nella graduatoria delle fonti di approvvigionamento dei rottami di materiali ferrosi (15%) vi è la **raccolta pesante**. E' questo il materiale più eterogeneo, che comprende tutti i materiali di spessore superiore a 3 mm che derivano dai settori diversi dai due citati in precedenza. La raccolta pesante rappresenta il materiale potenzialmente più a rischio dal punto di vista della radiocontaminazione.

Il resto del commercio di materiali ferrosi è legato alle carrozzerie delle automobili (12%), alle torniture (8%) ed ai rottami di ghisa (5%). Tutti questi materiali hanno un rischio di radiocontaminazione pressoché nullo.

Una volta raccolto il rottame viene selezionato, cernito per liberarlo da corpi estranei, suddiviso per tipologie e sottoposto ad alcuni processi di lavorazione (pressatura, cesoiatura, frantumazione ecc.) che lo rendono idoneo a soddisfare le esigenze delle industrie fusorie.

I controlli predisposti nei cantieri in tutte le fasi di selezione e raccolta del rottame dovrebbero garantire l'assenza di qualsiasi sorgente radioattiva da un qualunque carico diretto all'industria trasformatrice. In realtà questo non è sempre vero e le segnalazioni di corpi radiocontaminanti nei rottami che ancor oggi vengono registrate ne è una testimonianza.

Da statistiche effettuate risulta che lo 80% dei carichi radiocontaminati fosse trasportato su gomma, mentre il restante 20% su rotaia.

La normativa vigente prevede che i costi di smaltimento del materiale radiocontaminato spettino al cantiere che lo riceve. Il cantiere può rivalersi sul fornitore solo nel caso in cui si riesca a dimostrarne la responsabilità. La severità di questa normativa ha fatto sì che tutte le aziende siderurgiche italiane che acquistano rottame si siano dotate di sistemi di rilevazione della radioattività sempre più sensibili in modo tale da ridurre al minimo il rischio di entrata di materiale contaminato.

4.2 Sorgenti radioattive potenzialmente presenti nei rottami metallici

Dal punto di vista della fisica nucleare, sei sono i radionuclidi in commercio in quantità piuttosto significativa e con un tempo di dimezzamento sufficientemente elevato che possono essere presenti come inclusioni nel rottame metallico per il riciclo: ^{226}Ra , ^{137}Cs , ^{241}Am , ^{90}Sr , ^{192}Ir e ^{60}Co . Questi radionuclidi possono essere incorporati nel rottame metallico in diversi modi. Il rottame è un materiale che può essere reso radioattivo da un materiale radioattivo aggiunto insieme alle ferroleghie durante il processo di fabbricazione dell'acciaio o da materiali o sorgenti radioattive presente nella catasta del rottame. ^{192}Ir e ^{60}Co sono i soli radionuclidi che, se fusi, sono in grado di formare una lega con il ferro.

4.3 Impatti della contaminazione radioattiva nell'industria

L'impiego involontario di materiale radiocontaminato nel ciclo produttivo di un'impresa siderurgica ha un impatto devastante sull'impresa stessa, sui lavoratori e sul governo.

Impresa

A fronte dell'utilizzo involontario di materiale radiocontaminato, le aziende interessate dal problema subiscono un forte danno sia a livello economico che a livello d'immagine. I costi di bonifica, la fermata degli impianti e quindi la mancata produzione, la riduzione delle vendite e della fiducia da parte dei clienti hanno comportato un'ingente perdita per tutti quegli impianti in cui inavvertitamente è stato utilizzato un materiale radioattivo tra le materie prime del ciclo produttivo.

Lavoratori e popolazione

Per effetto di incidenti legati all'utilizzo involontario di sorgenti radioattive nel ciclo produttivo di un'azienda siderurgica i lavoratori dell'azienda stessa subiscono sia un danno di tipo biologico per effetto dell'esposizione alle radiazioni (sorgenti radioattive, prodotti finiti o semilavorati radiocontaminati) sia un danno di tipo economico (fermata dell'impianto per bonifica). Nei casi più gravi, gli incidenti comportano una contaminazione dell'ambiente

circostante all'azienda esponendo così tutta popolazione dell'area al rischio di contaminazione.

Governo

In tutti gli incidenti di radiocontaminazione il governo è sempre coinvolto sia in termini economico-finanziari (ad esempio sostiene i costi legati alla cassa integrazione), sia in termini d'immagine nei confronti dell'opinione pubblica.

L'incidente occorso all'Alfa Acciai nel 1997 è un esempio significativo di quanto sopra detto: la fusione involontaria di materiale contaminato causò un fermo del forno interessato dal problema di 65 giorni. La fermata del forno comportò a sua volta una mancata produzione di acciaio pari al 50% della potenzialità totale dell'azienda il che, di conseguenza, ridusse l'utilizzo dei laminatoi al 50% nonché di tutto il settore lavorazioni a freddo per il 40%. La perdita di fatturato fu stimata nell'ordine di 40 miliardi di Lire. Durante tutto il periodo di fermo si ricorse alla cassa integrazione di circa 200 dipendenti/giorno. I costi sostenuti dall'azienda, sia in termini di bonifica che in termini di costi fissi insopprimibili in mancanza di produzione, furono valutati nell'ordine di 10 miliardi di Lire. A tutto ciò deve essere aggiunto il danno d'immagine che l'incidente causò all'azienda.

4.4 Prevenzione nelle acciaierie e fonderie

In seguito all'incidente occorso a Brescia presso l'Alfa Acciai (1997), la Regione Lombardia, al fine di garantire la tutela della popolazione, dei lavoratori e dell'ambiente dal rischio di fusioni accidentali di materiale radioattivo, emanò un provvedimento che obbligava le aziende italiane al rispetto della sorveglianza radiometrica sui rottami metallici previsto dal D.Lgs 230/95. L'ordinanza impose i seguenti controlli:

- il primo controllo prevede la misura dell'irraggiamento e deve essere effettuato all'esterno di ogni *contenitore* utilizzato per il trasporto dei rottami prima che venga scaricato;
- il secondo controllo deve essere effettuato al momento dello scarico del materiale oppure nelle fasi che precedono la lavorazione e consiste almeno in

una ispezione visiva del materiale al fine di individuare eventuali sorgenti schermate o contenitori delle medesime. Questo tipo di controllo presuppone un'adeguata formazione del personale dipendente.

- il terzo controllo deve avvenire dopo la fusione, tramite verifiche radiometriche di adeguata sensibilità su tutti i provini all'atto della produzione
- il quarto controllo riguarda le scorie e le polveri derivanti dall'impianto di abbattimento dei fumi di lavorazione.

L'entrata in vigore di questa ordinanza ha rappresentato un punto di svolta nella prevenzione di incidenti associati alla fusione di materiale radiocontaminate.

Le aziende italiane si sono gradatamente dotate di un sistema di controllo in ingresso dei rottami utilizzando sistemi di misura fissi o portatili a seconda delle situazioni. Numerosi studi sono stati effettuati su portali sempre più sofisticati che permettono di rilevare sorgenti con attività sempre più basse al fine di tutelare maggiormente l'azienda, la salute degli individui e l'ambiente circostante. I portali oggi utilizzati permettono di segnalare un rateo di equivalente di dose a 0.5 m in aria inferiore a 50 $\mu\text{Sv/h}$.

I controlli previsti nelle successive fasi di lavorazione (parco rottame, forno fusorio, polveri e scorie) e la sempre maggiore formazione del personale dipendente, permettono di minimizzare i rischi di contaminazione radioattiva.

Per verificare l'adeguatezza dei provvedimenti proposti dall'ordinanza della Regione Lombardia, Fabrizio Campi (Politecnico di Milano) e Alessandro Corsini (A.I.B.) hanno effettuato una valutazione delle dosi cui sono soggetti i lavoratori di un'acciaieria nell'ipotesi che una sorgente radioattiva, che da luogo ad un rateo di equivalente di dose a 0.5 m di 50 μSv , entri nel ciclo produttivo. L'acciaieria presa in considerazione rispetta i requisiti dell'ordinanza della Regione Lombardia e quindi è dotata di un portale radiometrico all'ingresso dell'impianto, di monitori d'area nei punti critici (impianto macinatore, forno e impianto abbattimento fumi) e su tutti i provini del forno effettua l'analisi radiometrica mediante spettrometro. Nelle ipotesi di calcolo si considera un'acciaieria con un forno da 100 t, una scoria di fusione scaricata di 10 t e 1.5 t di polveri emesse dal forno.

Scenario	CESIO-137 (μSv)	COBALTO-60 (μSv)	RADIO-226 (μSv)
Ingresso impianto	-		
Parco rottame	11		
Movimentazione	0.7		
Frantumazione	0.11 (operatore) – 0.32 (movimentatore)		
Cesta rottame	0.8		
Carica forno	0.02		
Forno	1		
Siviera	0.001		
Colata Continua	0.004		
Parco billete	0.12	0.6	-
Movimentazione scoria	3.6	0.008	21
Deposito scoria	9.5	0.004	55
Impianto fumi	4		
Particolato scoria	-	-	5.6
Particolato fumi	0.003	-	-
Il limite di legge per la popolazione è 1 mSv/anno			

Tabella 8 - Valori dei massimi equivalenti di dose

Nella tabella 8 vengono riportati i valori dei massimi equivalenti di dose, calcolati con opportune approssimazioni, a cui possono essere soggetti i lavoratori nel caso in cui una sorgente radioattiva entri nel ciclo produttivo e nessuno dei presidi radiometrici previsti segnali un allarme.

Lo studio effettuato da Corsini e Campi mette in luce come il controllo radiometrico dell'acciaieria permetta di ridurre drasticamente il rischio dell'irraggiamento ai lavoratori e la sua entità. Indipendentemente dall'attività della sorgente contenuta nel carico di rottame, in caso di esito negativo ai vari controlli radiometrici previsti, le dosi inconsapevolmente ricevute dai lavoratori si mantengono inferiori a quelle previste dai limiti di legge. Da ultimo si fa notare che in caso di fusione di sorgenti radioattive, anche se tutti i controlli hanno dato esito negativo, si può avere una debole contaminazione delle polveri e/o della scoria risultanti dalla fusione.

E' perciò necessario effettuare dei controlli periodici nei siti di stoccaggio delle scorie e delle polveri in modo tale da ridurre al minimo un qualsiasi possibile rischio di contaminazione.

4.5 Procedura da seguire nel caso di fusione di una sorgente radioattiva

Come visto in precedenza, per effetto dei controlli sempre più sofisticati previsti nelle diverse fasi del ciclo produttivo delle imprese siderurgiche, il rischio di caricare nel forno fusorio una sorgente radioattiva è oggi molto basso, ma tuttavia non nullo. Per questo motivo le imprese siderurgiche, avvalendosi di un esperto qualificato, devono definire delle procedure atte a gestire un qualsiasi incidente.

Una volta rilevato il pericolo di radiocontaminazione attraverso l'analisi del provino del forno fusorio, è responsabilità dell'esperto qualificato, dell'addetto alla vigilanza radiometrica e del responsabile dell'impianto la decisione delle azioni da intraprendere per far fronte all'incidente.

Le postazioni interessate dal pericolo sono il forno, le postazioni da trattamento intermedio e le postazioni di colata.

Nei casi più gravi (valori rilevati superiori a 100 Bq/g o 3000 cps) il forno deve essere svuotato completamente e tutti gli operatori che presidiano le diverse postazioni della fabbrica, muniti di tutti i dispositivi di sicurezza previsti dalla situazione, devono prestare attenzione a non causare spargimenti anche minimi di acciaio. L'acciaio, dopo essere stato travasato in una siviera, deve essere colato nella postazione di colata che permette il minor spargimento di materiale e la minore esposizione degli operatori al rischio di contaminazione.

Il prodotto contaminato deve essere appartato in zone opportunamente delimitate e segnalate per poi essere smaltito tramite appositi organismi e secondo specifiche regole.

Una volta ultimato il processo l'esperto qualificato e l'addetto alla vigilanza radiometrica decidono le azioni da intraprendere. Le zone contaminate devono essere opportunamente delimitate e si deve procedere alla loro bonifica.

Le scorie provenienti dalla colata inquinata, come pure tutta l'attrezzatura utilizzata, devono essere appartate e monitorate dall'esperto qualificato ed eventualmente bonificate o smaltite come rifiuti.

Le varie imprese siderurgiche devono poi definire procedure d'emergenza anche per i casi in cui la radioattività venga rilevata nelle scorie o nelle polveri di lavorazione.

5. Conclusioni

A partire dagli anni '80, l'utilizzo sempre più diffuso di sorgenti radioattive nell'industria, in campo medico e nei prodotti di uso comune, la mancanza di procedure per la corretta separazione del materiale radioattivo e la sempre maggiore conoscenza dei rischi associati all'esposizione degli individui a sorgenti radioattive sono state alcune tra le cause che hanno portato il problema della contaminazione radioattiva all'attenzione del mondo siderurgico.

Con il decreto legge. 230/95 l'Italia definì il limite di equivalente di dose per esposizione globale per i lavoratori e le responsabilità in termini di radioprotezione all'interno di un'azienda. In questo decreto la figura dell'esperto qualificato assunse maggiori compiti e responsabilità rispetto al precedente decreto del '64.

Furono tuttavia l'incidente occorso all'Alfa Acciai del 1997 e la successiva promulgazione dell'ordinanza della Regione Lombardia che indussero le aziende siderurgiche italiane a adottare una seria politica in materia di radioprotezione.

La consapevolezza dei danni economici, dei danni d'immagine e soprattutto dei danni legati alla salute pubblica derivanti da un incidente di radiocontaminazione hanno indotto tanto i cantieri di raccolta e separazione dei rottami di materiali ferrosi quanto le aziende che acquistano il rottame per alimentare il loro ciclo produttivo a adottare procedure specifiche e strumenti sempre più sofisticati per la rilevazione di eventuali sorgenti radioattive. Il tutto con la finalità di ridurre al minimo i rischi per l'impresa, per la salute dei lavoratori e per l'ambiente.

Nonostante la maggiore attenzione da parte di tutti, continuano tuttavia le segnalazioni di carichi contenenti sorgenti radioattive e di incidenti di radiocontaminazione.

Bibliografia

- ◆ YUSKO, J. G., 1998, “Radioactivity in recycling: an international problem”, *La radioattività nei rottami metallici: conseguenze e soluzioni*, Conferenza internazionale, Brescia 23 giugno 1998
- ◆ BONFADELLI, G., 1998, “Conseguenze della fusione accidentale di una sorgente radioattiva. Due casi reali. – Un caso italiano: l’incidente di Alfa Acciai”, *La radioattività nei rottami metallici: conseguenze e soluzioni*, Conferenza internazionale, Brescia 23 giugno 1998
- ◆ BOYLE, J., 1998, “Conseguenze della fusione accidentale di una sorgente radioattiva. Due casi reali. – Un caso americano: gli incidenti di Newport Steel”, *La radioattività nei rottami metallici: conseguenze e soluzioni*, Conferenza internazionale, Brescia 23 giugno 1998
- ◆ BANDINELLI, W., 1998, “Il ciclo del rottame”, *La radioattività nei rottami metallici: conseguenze e soluzioni*, Conferenza internazionale, Brescia 23 giugno 1998
- ◆ CAMPI, F. – CORSINI, A., “Distribuzione della contaminazione conseguente ad un incidente nelle acciaierie e fonderie. Criteri per la valutazione dei rischi.”, *La radioattività nei rottami metallici: conseguenze e soluzioni*, Conferenza internazionale, Brescia 23 giugno 1998
- ◆ MARSEGUERRA, M. – ZIO, E., “Rilevazione di sorgenti gamma in carichi differenti di rottame: valutazioni teoriche”, *La radioattività nei rottami metallici: conseguenze e soluzioni*, Conferenza internazionale, Brescia 23 giugno 1998
- ◆ APOSTOLI, P. – BRUNELLI, E., “Aspetti sanitari della contaminazione. Radioattività degli impianti”, *La radioattività nei rottami metallici: conseguenze e soluzioni*, Conferenza internazionale, Brescia 23 giugno 1998
- ◆ CAMPI, F. – CORSINI, A., “Campagna di prova e qualificazione di sistemi di monitoraggio fissi e portatili”, *La radioattività nei rottami metallici: conseguenze e soluzioni*, Conferenza internazionale, Brescia 23 giugno 1998

- ◆ ANVERSA, A. – CARRERI, V., “Provvedimenti regionali in tema di prevenzione dei rischi di contaminazione dei rottami metallici”, *La radioattività nei rottami metallici: conseguenze e soluzioni*, Conferenza internazionale, Brescia 23 giugno 1998
- ◆ BAGGESTONS, M. – GRAF, H. – HUBER, O. – LOOSLI, H.H., ZELLER, W., “Radioattività e radioprotezione”, Berna, dicembre 1990
- ◆ ALCHIERI, G. – MERISI, F. – NASSUATO, D., “La radioattività: un fenomeno naturale ed artificiale”, 1997
- ◆ CAMPOLEONI, M., “Radiazioni ionizzanti e loro impiego in ambiente industriale. Normativa nazionale”, Associazione italiana degli igienisti industriali per l’igiene industriale e per l’ambiente, Milano 6 marzo 1996
- ◆ CROZZOLO, G. – NAVA, D., “Corso sulla radioprotezione in acciaieria”, Dalmine, gennaio 2003
- ◆ AAVV, *Grande dizionario enciclopedico*, UTET, vol. XV, pp. 537-539