



ISPRA

*Istituto Superiore per la Protezione e
la Ricerca Ambientale*

Dipartimento Nucleare, Rischio Tecnologico e Industriale

Rapporto Tecnico ai sensi del DPCM 10 febbraio 2006 contenente le “*Linee guida per la pianificazione di emergenza per il trasporto di materie radioattive e fissili, in attuazione dell'articolo 125 del decreto legislativo 17 marzo 1995, n. 230 e successive modifiche ed integrazioni*”

Aprile 2009

INDICE

1. INTRODUZIONE	1
2. LA SICUREZZA DEI TRASPORTI E LA PIANIFICAZIONE DI EMERGENZA	3
3. IL TRASPORTO DI MATERIE RADIOATTIVE E FISSILI IN ITALIA	9
3.1 Statistiche sul trasporto delle materie radioattive	9
4. SCENARI INCIDENTALI DI RIFERIMENTO PER LA PIANIFICAZIONE DELL'EMERGENZA.....	17
5. CONSEGUENZE RADIOLOGICHE ASSOCIATE AGLI SCENARI INCIDENTALI DI RIFERIMENTO	21
5.1 Trasporto stradale.....	21
5.2 Trasporti per via aerea.....	23
5.3 Trasporti per via ferroviaria e per via marittima.....	23
6. MEZZI PER IL RILEVAMENTO DELLA RADIOATTIVITÀ NELL'AMBIENTE	25
7. CONCLUSIONI E CONSIDERAZIONI OPERATIVE PER LA PIANIFICAZIONE.....	29
7.1 Trasporto stradale.....	29
7.2 Trasporto per via aerea.....	31
7.3 Trasporto per via ferroviaria	31
7.4 Trasporto per via marittima.....	32
7.5 Estensione territoriale degli scenari incidentali	32
8. DEFINIZIONI E TERMINOLOGIA.....	35
9 . RIFERIMENTI	37
ALLEGATO I - TIPOLOGIE E CARATTERISTICHE DEGLI IMBALLAGGI	39
ALLEGATO I BIS - NUMERI ONU (UN NUMBER) DELLE MATERIE RADIOATTIVE	45
ALLEGATO II - LIVELLI DI INTERVENTO IN CASO DI EMERGENZE NUCLEARI E RADIOLOGICHE.....	47
ALLEGATO III - IPOTESI DI RILASCIO IN CONDIZIONI INCIDENTALI DI TRASPORTO E STIMA DELLE CONSEGUENZE RADIOLOGICHE	51
APPENDICE 1 - LA REGOLAMENTAZIONE NAZIONALE ED INTERNAZIONALE SUL TRASPORTO DELLE MATERIE RADIOATTIVE	101

1. Introduzione

Il decreto legislativo 17 marzo 1995, n. 230, e successive modifiche, prevede, all'art. 125, che i casi e le modalità di applicazione alle attività di trasporto di materie radioattive delle disposizioni del capo X del decreto stesso, relative all'attuazione degli interventi, siano stabiliti con decreto del Ministro per il coordinamento della protezione civile, di concerto con altri ministeri, sentita l'ISPRA.

In attuazione delle succitate disposizioni è stato emanato il DPCM 10 febbraio 2006, contenente le linee guida per la pianificazione di emergenza. Tale decreto prevede, al paragrafo 3.2, che il prefetto competente predisponga un piano di emergenza provinciale sulla base del rapporto tecnico elaborato dall'ISPRA, previsto al paragrafo 4 delle linee guida stesse, che dovrà recare i seguenti elementi:

- a) l'esposizione analitica, per ciascuna modalità di trasporto (via mare, aereo, su strada e ferroviario), delle presumibili condizioni ambientali pericolose per la popolazione e per i beni, derivanti dai singoli incidenti nel corso del trasporto e delle prevedibili loro localizzazioni ed evoluzioni nel tempo;
- b) la descrizione dei mezzi necessari per il rilevamento e la misurazione della radioattività nell'ambiente circostante l'area dell'incidente nel corso del trasporto, e delle loro modalità di impiego;
- c) gli incidenti le cui conseguenze attese siano circoscrivibili nell'ambito provinciale o interprovinciale e quelli che eventualmente debbano richiedere misure protettive su un territorio più ampio.

Il presente documento costituisce il rapporto previsto dal DPCM sopra citato. In esso, ai fini di una più efficace individuazione delle presumibili conseguenze radiologiche di incidenti nel corso del trasporto di materie radioattive e fissili, viene presentato un quadro descrittivo dei diversi aspetti che caratterizzano la sicurezza dei trasporti, come regolamentati dalla normativa nazionale ed internazionale vigente in materia. Vengono altresì forniti i risultati di una serie di elaborazioni statistiche dei dati sui trasporti effettuati nel territorio nazionale, svolte sulla base dei riepiloghi trasmessi all'ISPRA dai soggetti autorizzati al trasporto.

Il rapporto definisce poi gli scenari incidentali da assumere a riferimento nella pianificazione di emergenza per le diverse modalità di trasporto e presenta i risultati delle valutazioni sulle conseguenze radiologiche ad essi associate. I suddetti scenari sono definiti considerando in modo conservativo le statistiche sui dati dei trasporti nazionali disponibili nella banca dati dell'ISPRA.

Ai fini della definizione dei provvedimenti di tutela della popolazione, da prevedere nella pianificazione d'emergenza per gli scenari incidentali assunti a riferimento, sono adottati i livelli di intervento previsti dall'Allegato XII del D.L.vo n° 230/1995 e successive modifiche e, per quanto attiene alle concentrazioni massime ammissibili di radionuclidi negli alimenti, i livelli stabiliti dai regolamenti Euratom vigenti.

Il rapporto fornisce altresì le indicazioni di cui alle precedenti lettere b) e c) e, sulla base dei risultati delle analisi condotte, vengono in esso svolte, per le diverse modalità di trasporto, alcune considerazioni operative ai fini delle attività di pianificazione.

Il DPCM 10 febbraio 2006 prevede che i piani di emergenza vengano riesaminati almeno ogni tre anni. Pertanto, il presente rapporto sarà oggetto di una periodica revisione, al fine di verificare la validità delle basi tecniche definite a fronte di eventuali mutamenti delle esigenze di sicurezza e della normativa del settore, nonché delle statistiche dei trasporti che si effettuano in Italia.

2. La sicurezza dei trasporti e la pianificazione di emergenza

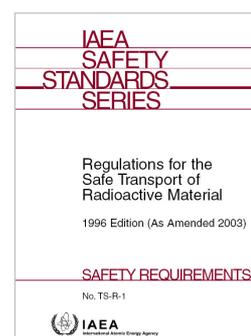
Il trasporto delle materie radioattive è un'attività funzionale all'uso di tali materie in vari campi (industriale, medico, ricerca scientifica) nonché allo sfruttamento delle proprietà delle materie fissili ai fini della produzione di energia da fonte nucleare. Questa attività rientra nel più vasto campo del trasporto delle "merci pericolose" come definite, in ambito internazionale, dalle "Recommendations on the Transport of Dangerous Goods" il cosiddetto "Orange Book" delle Nazioni Unite. Le materie radioattive costituiscono la classe 7 di tali merci pericolose.

Nell'ambito delle attività di trasporto di materie radioattive si individuano due aspetti connessi con la protezione dei lavoratori, della popolazione e dell'ambiente dai rischi derivanti dall'esposizione alle radiazioni ionizzanti. Tali aspetti si riferiscono in particolare:

- alla sicurezza delle operazioni di trasporto nel loro complesso, in termini di provvedimenti posti in atto per assicurare che, in condizioni normali, l'esposizione dei lavoratori e della popolazione resti entro i limiti previsti dalla normativa vigente e, in caso di incidenti, anche gravi, si determini un limitato impatto radiologico, sia per quanto riguarda i livelli d'irraggiamento all'esterno degli imballaggi di trasporto, sia per le quantità di sostanza radioattive eventualmente rilasciate all'ambiente;
- alla pianificazione dell'emergenza riguardante le predisposizioni da prevedere per la gestione di situazioni incidentali particolarmente gravose - comportanti il degrado delle caratteristiche di sicurezza dell'imballaggio ed il conseguente rilascio delle materie radioattive - al fine di limitare le conseguenze radiologiche per la popolazione e l'ambiente.

Per garantire elevati standard di sicurezza è stato stabilito, sia a livello internazionale che nazionale, un insieme di norme tecniche ed amministrative rivolte alla protezione dei lavoratori, della popolazione e dell'ambiente. Una descrizione dettagliata del quadro normativo che governa le attività di trasporto è riportata in Appendice 1.

Le norme tecniche, che stabiliscono l'insieme di disposizioni e requisiti di sicurezza applicabili al trasporto internazionale delle materie radioattive, sono contenute nella "Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material" TS-R-1[1] pubblicata dall'Agenzia Internazionale dell'Energia Atomica (IAEA) di Vienna. Tale regolamentazione è stata adottata per la classe 7, dalle diverse organizzazioni internazionali incaricate, in virtù di accordi e/o convenzioni internazionali, di stabilire standard e requisiti di sicurezza per il trasporto delle merci pericolose per ciascuna modalità di trasporto (strada, ferrovia, aereo, mare ed acque interne). Tutti i regolamenti internazionali modali (ADR, RID, ADN, IMDG Code, ICAO TI), contenenti i requisiti e le disposizioni applicabili al trasporto delle merci pericolose, come pure la regolamentazione IAEA, sono soggetti ad un ciclo di revisione periodico.



Le norme tecniche affidano la sicurezza del trasporto essenzialmente alle caratteristiche degli imballaggi. Le suddette normative richiedono infatti che il trasporto delle materie radioattive sia effettuato utilizzando contenitori adeguati alla quantità, all'attività e allo stato fisico e chimico del contenuto, oltre che ad eventuali proprietà fissili.

La Regolamentazione IAEA definisce diversi tipi di collo (imballaggio + contenuto radioattivo) in relazione alle caratteristiche della sostanza che viene trasportata.

Nell' Allegato I del presente rapporto sono descritte le tipologie e le caratteristiche degli imballaggi utilizzati nelle attività di trasporto (colli esenti, imballaggi industriali, colli di tipo A, collo di tipo B e di tipo C).

In particolare i contenitori devono garantire, sia nelle condizioni normali di trasporto che nelle condizioni incidentali previste nelle norme tecniche, adeguati livelli di schermaggio dalle radiazioni, di contenimento dei materiali radioattivi, di sufficiente smaltimento del calore e, nel caso di materie fissili, di sottocriticità. Le caratteristiche ed i requisiti tecnici dei contenitori sono graduati in relazione ai quantitativi del materiale radioattivo trasportato. Con l'aumentare dei quantitativi i requisiti imposti alle caratteristiche di resistenza, di tenuta e di schermaggio divengono via via più stringenti. Allo stesso modo, sulla base delle caratteristiche tecniche, sono stabiliti limiti ai quantitativi di materiale che può essere trasportato in un singolo imballaggio. In particolare, la Regolamentazione IAEA definisce limiti per ciascun radionuclide: alla forma fisica più pericolosa corrisponde un valore più basso. Questo è definito come A_1 per i materiali in forma speciale (cioè non disperdibile) ed A_2 (negli altri casi). Per un particolare tipo di collo (tipo A) il quantitativo massimo di attività che può essere trasportato in un singolo imballaggio è pari ad A_1 per materiale radioattivo in forma speciale e ad A_2 per materiale radioattivo in altre forme. Ad esempio, per l' Americio-241 l' A_1 è pari a 10 TBq e l' A_2 è pari a 10^{-3} TBq.



Gli imballaggi sono progettati per resistere alle condizioni normali ed incidentali di trasporto come definite nella Regolamentazione IAEA. Tali condizioni sono simulate attraverso un insieme di prove alle quali vengono sottoposti gli imballaggi reali, con il contenuto radioattivo simulato, oppure, nel caso di imballaggi di notevoli pesi e dimensioni, prototipi in scala.

A seguito del complesso delle prove, l'imballaggio deve rispettare specifici limiti in termini di capacità di schermaggio delle radiazioni e di rilascio dei contenuti radioattivi, tali

da garantire un limitato impatto radiologico già nelle immediate vicinanze del punto d'incidente.

Alcune tipologie di imballaggi (tipo B o per il trasporto di materie fissili) devono essere certificati dall'autorità competente del paese in cui l'imballaggio è stato progettato e/o di origine del trasporto e tale certificazione deve essere convalidata dalle autorità competenti degli altri paesi attraversati dalla spedizione.

La Tabella I riporta le più comuni tipologie di imballaggi con l'indicazione dei limiti di attività ammessi e delle prove di qualificazione previste.

Tabella 1 – Limiti di attività per i contenuti e prove di qualificazione degli imballaggi

Categoria del collo	Limiti di attività per i contenuti		Prove di qualificazione
	forma speciale	altre forme	
Esente	$10^{-3} A_1$	$10^{-3} A_2$	Non sono richieste prove di qualificazione, ma il rispetto di requisiti generali tali da assicurare un livello di dose massima sulla superficie del collo di $5 \mu\text{Sv/h}$
Industriale	-----	$2 \times 10^{-3} A_2/g$ l'attività totale per collo o collezione di colli è limitata dal massimo livello di radiazione ($< 10 \text{ mSv/h}$ a 3 m dal materiale non schermato)	Non sono progettati per resistere agli incidenti gravi, ma devono resistere a piccoli incidenti che si verificano durante le operazioni di carico, scarico e magazzinaggio. Le prove cui devono resistere sono: - esposizione ad una violenta pioggia (5 cm/h per 1 h); - caduta su bersaglio rigido da un'altezza dipendente dalla massa del collo (max. 1,2 m); - compressione con una massa pari a 5 volte la massa del collo; - penetrazione attraverso la caduta di una barra standard di acciaio sul collo dall'altezza di 1 m. A seguito delle prove non ci deve essere fuoriuscita del contenuto e l'aumento del livello di dose sulla superficie del collo deve essere minore del 20%.
Tipo A	A_1	A_2	
Tipo B e Fissile	fino all'attività massima consentita dal certificato di approvazione di modello di collo $> A_1$	fino all'attività massima consentita dal certificato di approvazione di modello di collo $> A_2$	Sono progettati per mantenere le funzioni di contenimento, schermaggio e, per i materiali fissili, di sottocriticità in condizioni di incidente molto severo. Queste condizioni di incidente sono rappresentate dalle seguenti prove: - caduta su bersaglio rigido da un'altezza di 9 m; - caduta da 1 m su punzone in acciaio; - fuoco con temperatura di fiamma di 800°C per $1/2 \text{ h}$; - immersione a profondità di 15 m d'acqua per 8 h (200 m per combustibile irraggiato, ma in questo caso la durata è di 1 h). A seguito delle prove il collo deve mantenere una capacità di schermaggio tale da assicurare un valore di dose non superiore a 10 mSv/h ad 1 m dalla superficie ed una perdita dei contenuti inferiore a $10 A_2$ per ^{82}Kr ed inferiore ad A_2 in una settimana per tutti gli altri radionuclidi.
Tipo C (trasporto aereo)	3000 A_1 fino all'attività massima consentita dal certificato di approvazione di modello di collo	3000 A_2 fino all'attività massima consentita dal certificato di approvazione di modello di collo	Sono progettati per mantenere le funzioni di contenimento, schermaggio e, per i materiali fissili, di sottocriticità in condizioni di incidente <u>aereo</u> molto severo. Queste condizioni di incidente sono rappresentate dalle seguenti prove: - caduta su bersaglio rigido da un'altezza di 9 m; - caduta da 3 m su punzone in acciaio; - fuoco con temperatura di fiamma di 800°C per 1 h; - immersione a profondità di 200 m per 1 h. A seguito delle prove il collo deve mantenere una capacità di schermaggio tale da assicurare un valore di dose non superiore a 10 mSv/h ad 1 m dalla superficie ed una perdita dei contenuti inferiore a $10 A_2$ per ^{85}Kr ed inferiore ad A_2 in una settimana per tutti gli altri radionuclidi.

Oltre alle intrinseche caratteristiche di sicurezza delle varie tipologie di colli, progettati per limitare le conseguenze di eventi incidentali più o meno gravi, ma con bassa probabilità di accadimento, come evidenziato dall'esperienza operativa, le disposizioni che disciplinano il trasporto di materie radioattive impongono una serie di atti autorizzativi che garantiscono nel complesso elevati standard di sicurezza per le spedizioni.

Occorre in primo luogo ricordare l'art. 5 della legge 1860/1962, come modificato dal D.P.R. 1704/1965, ove è stabilito l'obbligo che il trasporto delle materie radioattive sia effettuato da vettori autorizzati con decreto del Ministro dello Sviluppo Economico di concerto con il Ministero dei trasporti. Tale obbligo è ribadito dall'art. 21 del D.L.vo n. 230/1995 che prevede che il decreto sia emanato sentiti anche il Ministero dell'Interno e l'ISPRA il quale, al fine di esprimere il parere di competenza, svolge una specifica istruttoria tecnica.

Altre norme nazionali prevedono inoltre che trasporti di materie fissili e sorgenti radioattive di elevata attività siano effettuati a seguito dell'emissione di specifici atti autorizzativi (ad esempio, per il trasporto stradale attestato di sicurezza dell'ISPRA e certificato di sicurezza del Ministero dei Trasporti), rilasciati a valle di valutazioni tecniche riguardanti, ad esempio: la verifica della struttura di ammassaggio dei contenitori al mezzo di trasporto, dell'itinerario della spedizione, della corretta etichettatura e categorizzazione del contenitore, dell'organizzazione della spedizione (presenza di scorta tecnica equipaggiata con strumentazione radiometrica idonea, presenza di adeguati mezzi antincendio), limitazioni di velocità, di orari nei quali effettuare il trasporto etc.

Va infine tenuto presente che, come tutte le attività a rischio radiologico, il trasporto di materie radioattive è soggetto alle norme generali di radioprotezione dei lavoratori e della popolazione contenute nel D.L.vo n. 230/1995 e successive modifiche.

E' il caso di evidenziare che l'adozione dei requisiti di sicurezza previsti dalle norme tecniche per gli imballaggi di trasporto e delle procedure autorizzative sopra citate ha assicurato che negli anni le attività di trasporto venissero condotte in condizioni di sicurezza ottimali. L'esperienza operativa sin qui maturata non ha infatti fatto registrare alcun evento incidentale con conseguenze radiologiche degne di nota.

Nell'attività di trasporto di materie radioattive, come in tutte le altre attività nucleari, viene internazionalmente adottato il principio della difesa in profondità, in base al quale, oltre all'adozione di stringenti misure di prevenzione e di più barriere di tipo ingegneristico nei confronti del rilascio incidentale di materie radioattive all'ambiente vengono previste, nell'ambito di specifiche pianificazioni d'emergenza, opportune predisposizioni atte a limitare le conseguenze radiologiche per la popolazione nel caso di gravi incidenti la cui probabilità di accadimento è estremamente bassa.

Le finalità di tale pianificazione sono pertanto quelle di assicurare la previsione di adeguati provvedimenti protettivi e la predisposizione di un quadro organizzativo efficace per la loro attuazione.

3. Il trasporto di materie radioattive e fissili in Italia

Il trasporto di materie radioattive può essere suddiviso in due ambiti distinti ma correlati fra di loro, tenendo conto o delle sole caratteristiche radioattive o delle caratteristiche radioattive e fissili di tali materie:

- trasporti che avvengono nell'ambito del ciclo del combustibile nucleare e, più in generale, ai fini dell'esercizio di impianti nucleari. Tali trasporti coinvolgono in particolare materie quali minerali di uranio, polveri di uranio, esafluoruro di uranio, elementi di combustibile non irraggiato, elementi di combustibile irraggiato, rifiuti provenienti dal riprocessamento del combustibile irraggiato;

- trasporti che avvengono nell'ambito degli usi medici, industriali e di ricerca e che coinvolgono materie quali sorgenti in forma speciale per irraggiamento di prodotti e per gammagrafie in campo, sorgenti per prospezioni geologiche, sorgenti per controllo di processi industriali, sorgenti per uso diagnostico e terapeutico in forma non speciale, rifiuti provenienti dalle relative installazioni.

Tenuto conto della realtà italiana, nella quale le attività di tipo nucleare riguardano la disattivazione delle installazioni e la gestione dei rifiuti radioattivi, i trasporti nell'ambito del ciclo del combustibile sono numericamente limitati, essendo riconducibili alle operazioni di trasferimento all'estero del combustibile nucleare irraggiato a fini di ritrattamento o di alienazione del materiale fissile, operazione peraltro in fase di completamento nei prossimi anni. Vi è poi un numero limitato di operazioni di trasferimento di rifiuti radioattivi di bassa o media attività presso siti di trattamento. Una diversa situazione potrà determinarsi quando sarà disponibile il deposito nazionale dei rifiuti radioattivi.

La gran parte dei trasporti di materie radioattive effettuati sul territorio nazionale riguarda pertanto sorgenti utilizzate in campo industriale, nella ricerca e, soprattutto in campo medico.

La disponibilità dei dati sui trasporti, ottenuti in base ai riepiloghi trimestrali inviati all'ISPRA dai vettori autorizzati secondo quanto stabilito all'art. 21, comma 3 del D.L.vo n.230/1995, raccolti nella banca dati TRARAD che l'ISPRA stessa ha realizzato, consente di definire in modo dettagliato la realtà del trasporto di materie radioattive nel nostro paese, realtà che viene nel seguito descritta.

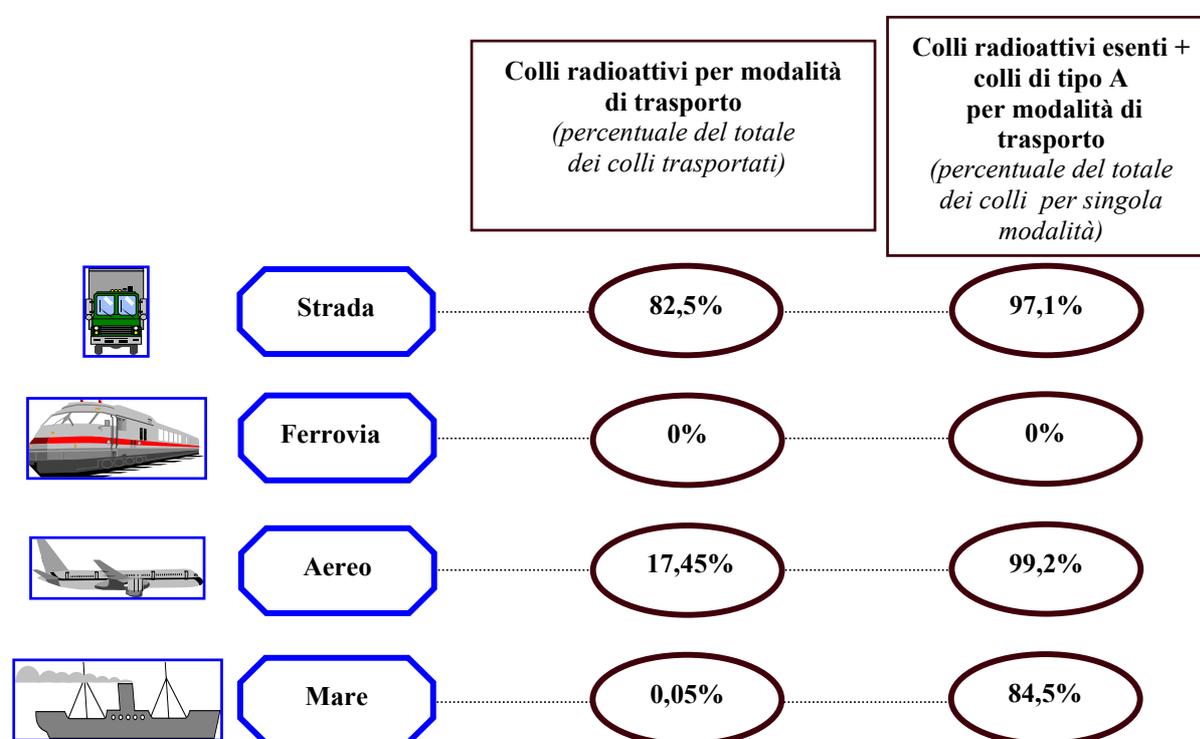
3.1 Statistiche sul trasporto delle materie radioattive

I dati disponibili evidenziano, come già detto, che la gran parte dei trasporti di materie radioattive riguarda il loro uso in campo medico. La maggior parte dei radioisotopi utilizzati in campo diagnostico e terapeutico risulta di provenienza estera, non essendo presenti sul nostro territorio impianti per la produzione di tali isotopi (I-131, Mo-99, Tl-201, ecc.) ad eccezione del F-18 che viene prodotto anche in Italia. L'importazione di queste materie radioattive avviene prevalentemente attraverso spedizioni stradali ed aeree aventi come luoghi di destinazione alcuni centri di raccolta e smistamento dei colli. Da questi centri partono le spedizioni stradali per la consegna diretta ai destinatari finali oppure verso altri aeroporti nazionali, per essere poi trasportati alla destinazione finale.

La modalità di trasporto stradale risulta essere quella più utilizzata per il trasporto di colli contenenti materie radioattive (82,5%). La modalità aerea è la seconda in termini di colli trasportati (17,45%). Quest'ultima modalità è utilizzata in particolare per il trasporto di radioisotopi con tempo di dimezzamento molto breve. Il trasporto di colli radioattivi via mare risulta molto limitato e riguarda sia il trasporto di sorgenti utilizzate su piattaforme petrolifere off-shore che i trasporti fra la penisola e le due isole maggiori Sicilia e Sardegna. Il trasporto ferroviario di colli radioattivi è praticamente inesistente. I trasporti ferroviari effettuati nel periodo 2006 - 2008 hanno riguardato unicamente spedizioni di colli contenenti elementi di combustibile irraggiato dagli impianti Sogin agli impianti di riprocessamento di Sellafield (UK) e La Hague (Francia).

La fig.1 riassume le percentuali dei colli trasportati per modalità di trasporto e per tipologia limitatamente ai colli esenti e colli di tipo A.

Fig. 1 - Tipologia dei colli trasportati con le diverse modalità di trasporto (Anno 2007)



La Tabella 2 riporta i dati complessivi nel triennio 2005-2007 relativi ai trasporti stradali in termini di numeri di colli trasportati e di spedizioni effettuate.

Tabella 2 – Dati complessivi sul trasporto di materie radioattive (modalità stradale)

	2005	2006	2007
No. colli	238000	310000	292000
No. spedizioni	95000	87000	85000

**Tabella 3 - Numero di colli per tipologia
(Anno 2007 - modalità stradale)**

Tipo di collo	Numero di colli	% sul totale dei colli trasportati
Collo esente	164688	56,4
Tipo A	118844	40,7
Collo industriale	292	0,1
Tipo B	8176	2,8

Totale colli trasportati 292000

I dati riportati in Tabella 3, relativi all'anno 2007, evidenziano che la maggior parte dei colli trasportati, circa il 98% su un totale di 292000, riguarda colli esenti (56,4%) e colli di tipo A (40,7%). Entrambi i tipi sono caratterizzati dalla limitata attività che è possibile trasportare in relazione alla forma fisica del materiale radioattivo.

I colli di Tipo A rappresentano il 40,7% del totale dei colli trasportati, pari a circa 119.000 colli (2007) e sono in gran parte utilizzati per il trasporto di sorgenti radioattive per uso medico ed industriale. Le spedizioni per le quali è prevista la comunicazione preventiva sono quelle nelle quali, l'attività trasportata in colli di tipo A, è superiore a 3A₁ o 3A₂. Nella Tabella 4 è riportato il numero delle spedizioni stradali di colli di tipo A, contenenti sorgenti sia in forma speciale che in forma non speciale che sono state oggetto di comunicazione preventiva con l'indicazione del numero totale delle spedizioni effettuate nei rispettivi anni di riferimento.

Tabella 4: Spedizioni di colli di tipo A per le quali è stata effettuata la comunicazione preventiva alle autorità

	2005	2006	2007
N° di spedizioni di colli di tipo A contenenti sorgenti in <u>forma speciale</u> di attività superiore al limite di comunicazione preventiva (> 3A ₁)	0	0	0
N° di spedizioni di colli di tipo A contenenti sorgenti in <u>forma non speciale</u> di attività superiore al limite di comunicazione preventiva (> 3A ₂)	28	26	25
<i>Spedizioni totali</i>	<i>95000</i>	<i>87000</i>	<i>85000</i>

I colli di Tipo B rappresentano il 2,8% del totale dei colli trasportati, pari a 8176 colli (2007) e sono in gran parte utilizzati per il trasporto di apparecchiature contenenti sorgenti radioattive in forma speciale, per l'esecuzione di gammagrafie in campo aperto. C'è da considerare che, nel numero totale dei colli di tipo B trasportati, sono comprese le spedizioni di una stessa apparecchiatura per gammagrafia, movimentata dalla sede della società

operante, in questo settore, al cantiere di lavoro e viceversa. Le sorgenti in forma speciale utilizzate in questo tipo di apparecchiature, certificate come colli di tipo B, contengono radionuclidi quali Ir-192, Cs-137, Se-75 e Yb-169 con attività massima come sotto indicato:

Radionuclide	Attività max della sorgente per gammagrafia in forma speciale (TBq)	A₁ (TBq)	Limite di notifica per spedizioni in colli di tipo B (> 30A₁) (TBq)
Ir-192	2	1	30
Cs-137	0,5	2	60
Yb-169	3,7	4	120
Se-75	5,55	3	90

Le spedizioni riguardanti queste apparecchiature non sono soggette a comunicazione preventiva ai sensi del paragrafo 8 del DPCM 10 febbraio 2006 in quanto le attività delle sorgenti trasportate, come risulta dai dati sopra riportati, sono al di sotto dei limiti di 30 A₁.

Le spedizioni per le quali è prevista la comunicazione preventiva sono quelle nelle quali l'attività trasportata in colli di tipo B è superiore a 30 A₁ o 30 A₂. Nella Tabella 5 è riportato il numero delle spedizioni stradali di sorgenti di Cs-137 e Co-60, di attività > 30A₁ in forma speciale in colli di tipo B come pure il numero delle spedizioni di sorgenti in forma non speciale sempre in colli di tipo B, che sono state oggetto di comunicazione preventiva con l'indicazione del numero totale di spedizioni effettuate nei rispettivi anni di riferimento.

Tabella 5: Spedizioni di colli di tipo B per le quali è stata effettuata la comunicazione preventiva alle autorità

	2005	2006	2007
N° di spedizioni di colli di tipo B contenenti sorgenti in <u>forma speciale</u> di attività superiore al limite di comunicazione preventiva (> 30 A ₁)	13	14	15
N° di spedizioni di colli di tipo B contenenti sorgenti in <u>forma non speciale</u> di attività superiore al limite di comunicazione preventiva (> 30 A ₂)	0	0	0
<i>Spedizioni totali</i>	<i>95000</i>	<i>87000</i>	<i>85000</i>

Le spedizioni in colli di tipo B oggetto di comunicazione preventiva hanno riguardato sia trasporti di sorgenti in forma speciale, per impianti di irraggiamento industriale, sia spedizioni di elementi di combustibile irraggiato.

Come visto in precedenza il trasporto aereo risulta essere la seconda modalità più utilizzata, circa il 17,5% dei colli trasportati, per un totale di circa 40000 colli nel 2007. Nel totale dei colli trasportati il 99,2% è rappresentato da colli esenti e colli di tipo A contenenti prevalentemente radioisotopi con tempi di dimezzamento molto brevi per uso in campo medico. Lo 0,8%, circa 400 colli, è costituito da colli di tipo B e colli industriali. Tenuto conto dell'assenza sul territorio nazionale di impianti di produzione di tali radioisotopi, tranne che per il F-18, il trasporto aereo, come quello stradale, riguarda l'importazione di colli

dall'estero e la loro successiva distribuzione sia via strada che per aereo. Dall'analisi dei dati emerge che un solo scalo nazionale, Orio al Serio (BG), è interessato da un notevole traffico di colli radioattivi in arrivo (circa 35000/anno). Gli altri scali nazionali, abilitati al traffico di materie radioattive, sono interessati da un transito molto inferiore, complessivamente pari a circa 5000 colli/anno.

Il trasporto ferroviario non è attualmente utilizzato per le spedizioni di materie radioattive, tranne che per il trasporto di elementi di combustibile irraggiato. Una delle ragioni del mancato uso di questa modalità di trasporto è che risulta poco adatto, a causa della sua rigidità, alla spedizione di radioisotopi con brevi tempi di dimezzamento, come quelli utilizzati in campo medico, che costituiscono la grossa percentuale di quanto trasportato in Italia.

Il trasporto marittimo riguarda una minima percentuale di colli, circa lo 0,05%, ed è costituito in particolare da: trasferimento di sorgenti radioattive dalla terraferma alle piattaforme off-shore con imbarcazioni dedicate; trasporto di apparecchiature per gammagrafia presso i cantieri di lavoro effettuato con automezzi caricati a bordo di navi traghetto; trasporto di rifiuti di tipo ospedaliero tra la terraferma e le isole. L'attività media per spedizione risulta di gran lunga inferiore a quella relativa ad una spedizione di materie radioattive via strada.

L'elaborazione dei dati sul tipo di materie radioattive trasportate con tutte le tipologie di colli conferma che la maggior parte di essi contiene radioisotopi utilizzati in campo medico. Il grafico della Fig. 2 indica, in percentuale sul totale dei colli, i 20 radioisotopi più frequentemente trasportati nel triennio 2005-2007. Il numero di colli che contengono i primi 20 radioisotopi rappresenta il 98% del totale dei colli trasportati. Considerando ad esempio solamente i primi tre radioisotopi I-131, I-125 e Mo-99 si nota che essi rappresentano circa il 70% dei colli trasportati.

Anni 2005 - 2006- 2007 - i 20 radionuclidi più trasportati pari al 98,3% del totale dei colli trasportati -

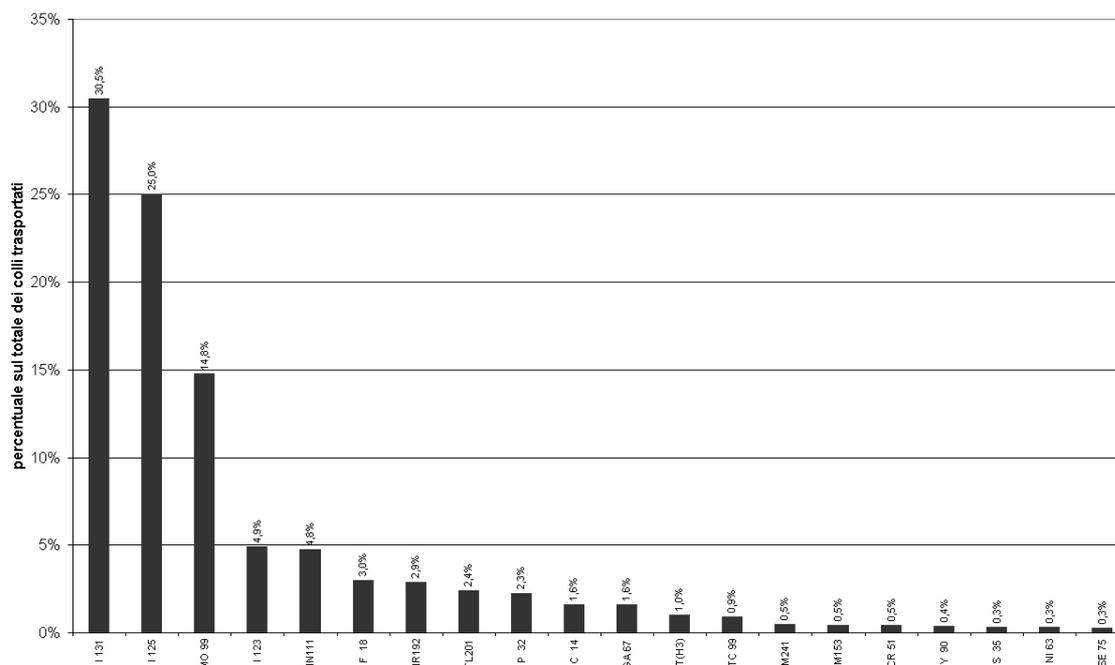


Fig. 2 - Percentuale dei colli contenenti i 20 radioisotopi più trasportati riferita agli anni 2005-2007

Altro elemento che caratterizza il trasporto di materie radioattive è il contenuto in attività effettivamente trasportato nel singolo collo in rapporto all'attività massima consentita dalla normativa. Considerando ad esempio i colli di tipo A, per i quali l'attività massima trasportabile per materiale in forma non speciale è A_2 , l'analisi dei dati evidenzia che il contenuto di attività trasportata nel singolo collo risulta molto inferiore al limite massimo di A_2 . Il grafico di Fig. 3 rappresenta la percentuale dei colli di tipo A il cui contenuto in attività è compreso negli intervalli $A_2 - 1/10 A_2$, $1/10 A_2 - 1/1000 A_2$ e $< 1/1000 A_2$.

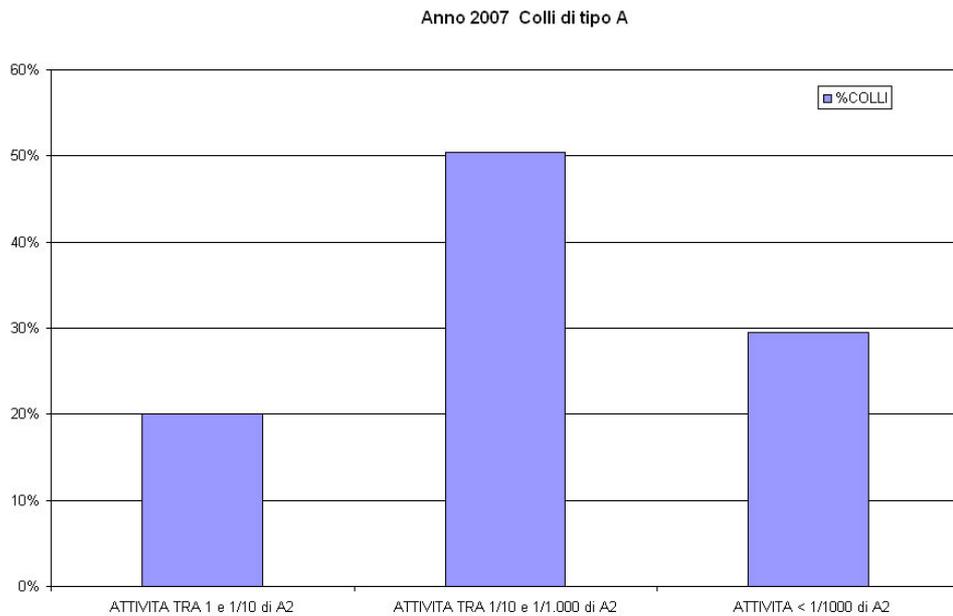


Fig. 3 - Contenuto di attività nei colli di Tipo A (2007)

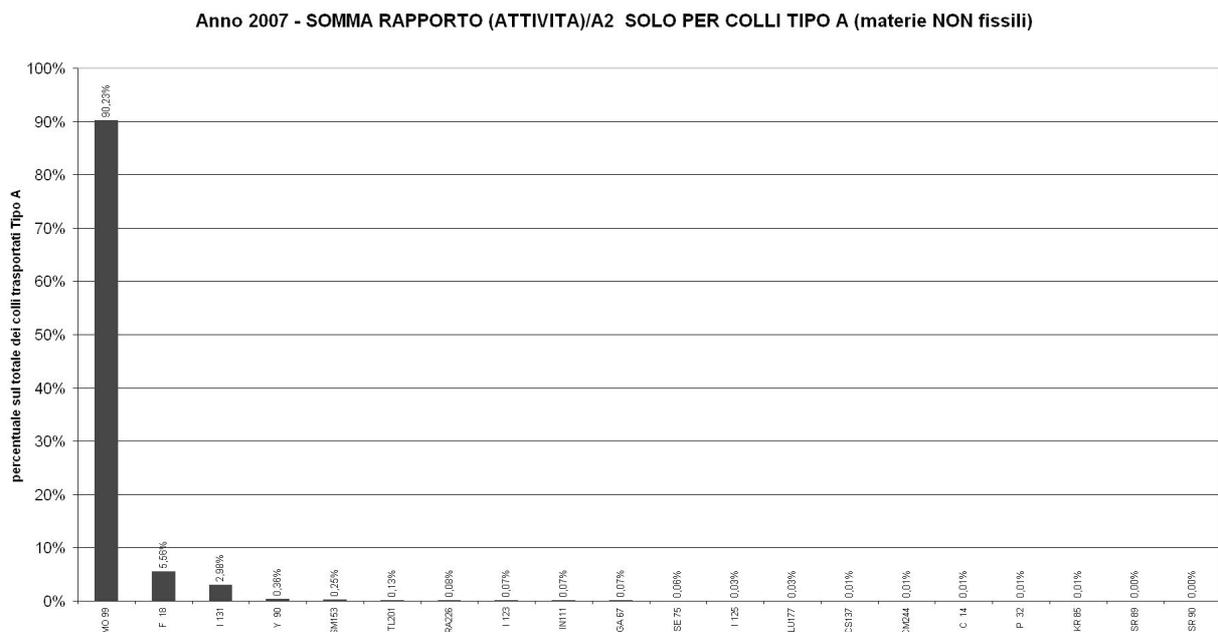


Fig. 4 – Percentuale dell'attività trasportata in colli di tipo A, rapportata al valore di A_2 , per i 20 radionuclidi più frequentemente trasportati

Dall'esame della Fig. 4 risulta che il Mo-99 è il radionuclide più trasportato in termini di attività. Questo significa che i colli contenenti Mo-99 contengono attività, per singolo collo, vicine al valore massimo di A_2 , pari a 0,6 TBq, che può essere trasportato in un collo di tipo A.

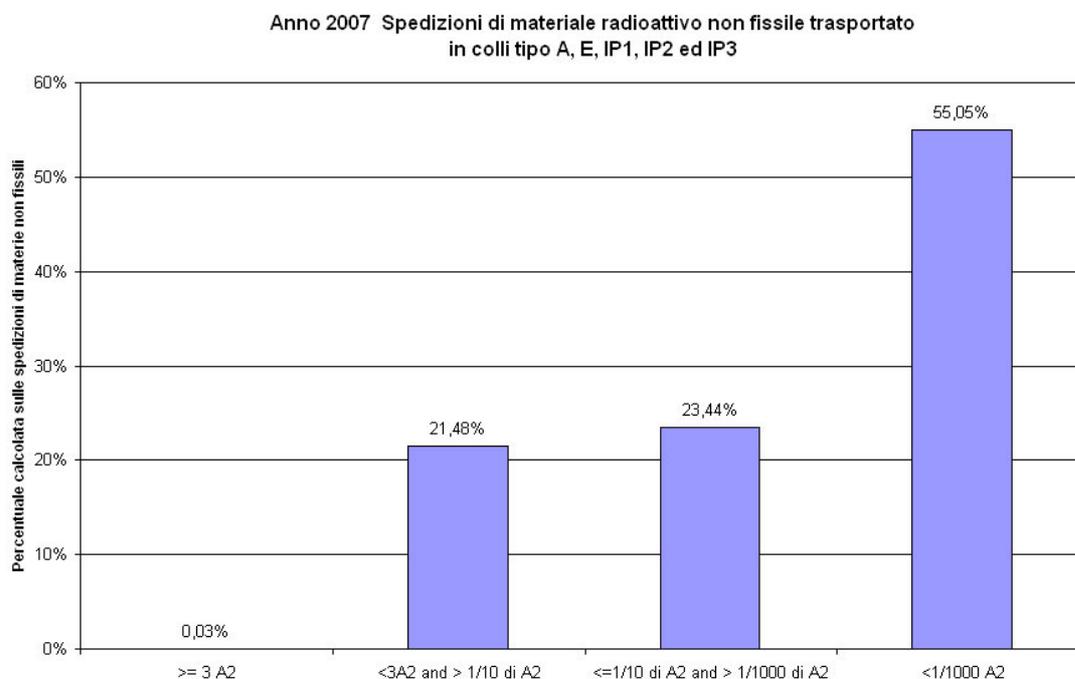


Fig. 5 – Attività totale trasportata nelle spedizioni (2007)

La Figura 5 mostra la distribuzione percentuale delle frazioni di A_2 trasportate per singole spedizioni nell'anno 2007. Si evidenzia, in particolare, che per le materie in forma non speciale, solo lo 0,03% del totale delle spedizioni superano il livello fissato dal DPCM 10 febbraio 2006 per la comunicazione preventiva della spedizione alle autorità, livello pari, per i colli di tipo A, a 3 volte A_1 o A_2 , a seconda della forma fisica della materie trasportate (per le materie in forma speciale la percentuale risulta ancora più bassa). Dalla figura si evince altresì che oltre il 55% delle singole spedizioni coinvolge quantità di materie radioattive inferiori a $1/1000 A_2$.

In sintesi, l'analisi dei dati evidenzia che in Italia il trasporto di materie radioattive avviene prevalentemente per usi medici ed industriali attraverso l'uso di colli esenti e di tipo A (circa 98%). L'attività contenuta all'interno dei colli trasportati risulta molto al di sotto dei limiti massimi ammessi per tutte le tipologie di colli. Il 70% di essi riguarda 3 soli radioisotopi (I-131, I-125 e Mo-99). Nel 2007 il numero delle spedizioni che rientrano nel campo di applicazione della comunicazione preventiva alle autorità di cui al paragrafo 8 del D.P.C.M. 10 febbraio 2006 è stato di poche decine di unità su un totale di 85000 spedizioni.

4. Scenari incidentali di riferimento per la pianificazione dell'emergenza

La natura, le caratteristiche e le conseguenze degli incidenti che possono verificarsi nel corso delle attività di trasporto che coinvolgono materie radioattive e fissili dipendono da diversi fattori, fra i quali:

- il modo di trasporto;
- il tipo delle materie radioattive trasportate (radionuclidi, forma chimico-fisica etc)
- il tipo di collo;
- la severità dell'incidente ed i suoi effetti sull'integrità del collo coinvolto
- la quantità di materie radioattive coinvolte.

L'esperienza conferma che quando il materiale radioattivo è confezionato e trasportato in accordo alla Regolamentazione IAEA, i rischi per le persone, le proprietà e l'ambiente derivanti dal trasporto sono molto limitati. Tuttavia, ai fini della preparazione dei piani di emergenza, si dovrebbe tener conto di un degrado delle funzioni di sicurezza al di là delle basi di progetto dello stesso. Tale degrado potrebbe essere conseguenza di:

- un impatto estremamente severo o un incendio intenso e di lunga durata, in grado di danneggiare la schermatura o il sistema di contenimento del collo; oppure di
- un difetto nel collo, che potrebbe ridurre la capacità di resistere alle sollecitazioni per le quali esso è stato progettato.

Nel seguito vengono discusse le modalità con le quali i succitati fattori sono stati tenuti in conto ai fini della definizione degli scenari incidentali di riferimento, facendo sin d'ora presente che, per quanto attiene a un ulteriore fattore che può influenzare in modo rilevante le conseguenze, e cioè le condizioni meteorologiche, nelle valutazioni sono state assunte quelle più sfavorevoli.

Modalità di trasporto

In considerazione del fatto che la quasi totalità dei trasporti oggetto del presente rapporto vengono effettuati in Italia per via stradale e, già in percentuale molto inferiore, per via aerea, le valutazioni sono state condotte con riferimento alla modalità di trasporto stradale, svolgendo per le altre modalità specifiche considerazioni che dimostrano l'applicabilità delle conclusioni ad esse.

Tipo di materie radioattive

Le basi tecniche qui sviluppate si riferiscono in generale al trasporto di:

- materie radioattive per uso medico ed industriale;
- rifiuti radioattivi;
- materie fissili.

Tale suddivisione è funzionale per la definizione degli scenari incidentali di riferimento anche se nella realtà le materie radioattive e fissili sono classificate, ai fini del loro trasporto, in base al loro numero ONU (UN number). L'elenco dei numeri ONU relativi alle materie radioattive e fissili sono riportati nell'Allegato I bis.

Come è noto non rientrano nell'ambito del presente rapporto i trasporti di combustibile irraggiato, in quanto oggetto, ai sensi del DPCM del 10 febbraio 2006, di valutazioni specifiche per le singole spedizioni.

Per la caratterizzazione del comportamento dei materiali radioattivi in condizioni incidentali assume particolare rilevanza il fatto che essi siano sotto *forma speciale*, cioè non disperdibile, come certificato dall' Autorità Competente a seguito dei risultati di specifici programmi di prove, oppure *sotto forma non speciale*, cioè disperdibile. La forma fisica delle materie radioattive trasportate è determinante in relazione alle diverse tipologie di esposizione radiologica che possono nei due casi derivare a seguito di una degradazione delle caratteristiche di tenuta e di schermaggio dei contenitori. Nel caso di materiale in forma non speciale, a seguito dell'eventuale dispersione nell'ambiente derivante dall' evento incidentale, risulterebbero significativi i contributi di dose da inalazione e da irraggiamento da nube e dal suolo. Nel caso invece di incidente che coinvolgesse materiale radioattivo in forma speciale, risulterebbe prevalente la dose da irraggiamento diretto.

Tipo di collo

La tipologia ed il livello di qualificazione dei diversi colli hanno una significativa influenza sullo scenario incidentale. Il comportamento dei contenitori nel caso di un incidente di trasporto di particolare gravità è stato esaminato ottenendo una stima dei rilasci e delle conseguenze radiologiche associate. Tali stime, riportate in dettaglio nell'Allegato III, sono svolte considerando i quantitativi limite tipicamente permessi dalla normativa per ciascun collo.

Tipo di incidente

Per quanto attiene al tipo di incidente ipotizzato, ai fini della stima delle conseguenze radiologiche sulle quali dimensionare le predisposizioni da prevedere nella pianificazione di emergenza, è stato considerato, nel caso di **trasporto stradale**, un *incidente molto grave* che interessi il trasporto, caratterizzato dall'impatto del mezzo di trasporto con un altro mezzo e successivo sviluppo d'incendio.

Nella pianificazione di emergenza possono poi essere considerati anche eventi di minor gravità, ad esempio un *incidente grave* caratterizzato da un impatto del mezzo di trasporto senza sviluppo d'incendio e un *incidente lieve*, caratterizzato dal solo impatto di moderata entità. Le conseguenze di tali incidenti sono ovviamente ricomprese nell'ambito di quelle stimate per l'incidente molto grave, e ad essi possono applicarsi le medesime predisposizioni per l'emergenza, ovviamente graduate in maniera opportuna, in relazione all'effettiva entità dell'evento.

Nel caso del **trasporto aereo**, le valutazioni contenute nel presente rapporto fanno riferimento ad incidenti molto gravi, con sviluppo d'incendio, nelle fasi di decollo o di atterraggio che risultano statisticamente essere quelle più critiche.

Per la **modalità di trasporto per ferrovia**, come già detto attualmente non utilizzata in Italia se non per il trasporto di combustibile irraggiato, sono ipotizzabili scenari incidentali analoghi a quelli assunti per il trasporto stradale.

Per la **modalità di trasporto via mare** si considera che il materiale radioattivo resti coinvolto in scenari incidentali d'incendio nel corso delle fasi di caricamento/scaricamento o sosta del mezzo navale nell'area portuale.

Quantità delle materie radioattive coinvolte

Tenuti presenti i fattori sopra descritti, ai fini della stima delle conseguenze radiologiche per la pianificazione di emergenza sono stati individuati due scenari di riferimento, tipici di un trasporto stradale, aventi caratteristiche involuppo. Tali scenari sono stati definiti tenendo conto della statistica dei trasporti in ambito nazionale, per quanto attiene alla tipologia dei radionuclidi e degli imballaggi trasportati. Per quanto attiene alle quantità sono stati individuati due livelli, ai quali sono stati associati due diversi scenari, facendo riferimento a una spedizione con colli di tipo A di materiale in forma non speciale.

Scenario 1: *Incidente molto grave di un mezzo di trasporto (impatto più successivo incendio) con a bordo materie radioattive in forma non speciale, in colli di tipo A, con un quantitativo di radioattività pari a 3 A₂.*

Tale scenario si ritiene rappresentativo di spedizioni con:

- imballaggi di tipo A e di tipo B al di sotto dei livelli di comunicazione preventiva;
- imballaggi esenti e di tipo industriale;

Scenario 2: *Incidente molto grave di un mezzo di trasporto (impatto più successivo incendio) con a bordo materie radioattive in forma non speciale, in colli di tipo A, con un quantitativo di radioattività pari a 30 A₂.*

Tale scenario si ritiene rappresentativo di eventi incidentali relativi a spedizioni con imballaggi:

- di tipo A e di tipo B al di sopra dei livelli di comunicazione preventiva.

Nel caso di materie fissili, che ai sensi del DPCM 10 febbraio 2006 risultano comunque soggette a comunicazione indipendentemente dalla quantità (ferme restando le soglie generali di applicazione della normativa stabilite nell'Allegato I del D.L.vo n. 230/1995) ai fini del presente rapporto sono stati individuati, per ciascuna materia fissile prevista dal DPCM stesso, i seguenti valori di attività di riferimento, al di sotto dei quali sono prevedibili conseguenze radiologiche analoghe a quelle stimate per lo Scenario 1:

Radionuclide fissile	Attività (GBq)
U-233	4,5
U-235	5,09
Pu-238	0,39
Pu-239	0,36
Pu-241	18,8

La rappresentatività degli scenari di riferimento individuati rispetto ad altre possibili condizioni di trasporto è stata nel dettaglio valutata a fronte del comportamento che, in relazione al loro contenuto, le diverse tipologie di imballaggi possono avere nelle situazioni incidentali, come discusso nell'Allegato III. Considerazioni specifiche sono state inoltre svolte in merito alla rappresentatività degli scenari individuati per il trasporto stradale rispetto alle altre modalità di trasporto.

5. Conseguenze radiologiche associate agli scenari incidentali di riferimento

5.1 Trasporto stradale

5.1.1 Scenario 1

Ai fini della stima delle conseguenze radiologiche associate a questo scenario è stato cautelativamente ipotizzato un inventario di attività pari al valore limite per la comunicazione preventiva ($3 A_2$) ai sensi del DPCM del 10 febbraio 2006, relativamente ad una spedizione composta di colli di tipo A contenenti materiale sotto forma non speciale. A tali fini sono stati considerati i radionuclidi più frequentemente trasportati, sulla base delle statistiche sui trasporti nazionali, di cui alla Fig. 2, attribuendo a ciascuno un peso in termini di quantità di A_2 pari all'incidenza percentuale del numero dei colli trasportati.

Va notato che tale caratterizzazione dello scenario di riferimento ha in sé due elementi di cautela, rappresentati, da un lato, dall'aver considerato un'attività complessiva trasportata pari a $3 A_2$, laddove le statistiche indicano che l'attività massima per singola spedizione è tipicamente minore di A_2 , e, dall'altro, dall'aver attribuito ai singoli radionuclidi un peso rapportato al numero di colli e non all'attività effettiva trasportata. Alla luce dei dati statistici sui trasporti nazionali, una caratterizzazione delle spedizioni basata sulla quantità di radioattività effettivamente trasportata, rapportata al valore dell' A_2 (Fig 4), riduce significativamente il peso di alcuni radionuclidi che danno un maggior contributo alle stime di dose.

Le valutazioni di dose effettuate sono riportate in dettaglio nelle tabelle A.III.19-A.III.21 dell'Allegato III. Il contributo prevalente alla dose è dato dalla via di esposizione da inalazione (circa il 95% del totale).

Nelle Tabelle A.III.22 e A.III.23 sono riportati i risultati delle stime di contaminazione di alcuni dei principali alimenti (latte e vegetali a foglia) eventualmente prodotti nelle vicinanze dell'incidente.

5.1.2 Scenario 2

Ai fini della stima delle conseguenze radiologiche associate a questo evento è stato cautelativamente ipotizzato un inventario di attività pari 10 volte il valore della soglia di comunicazione ($30 A_2$) per una spedizione composta di colli di tipo A contenenti materiale sotto forma non speciale, considerando i radionuclidi più trasportati sulla base delle statistiche sui trasporti nazionali, già selezionati per lo Scenario 1.

Le valutazioni di dose effettuate sono riportate in dettaglio nelle tabelle A.III.19 bis - A.III.21 bis dell'Allegato III. Anche in questo caso, il contributo prevalente alla dose è dato dalla via di esposizione da inalazione, in percentuale identica a quella dello Scenario 1.

Nelle Tabelle A.III.22 bis e A.III.23 bis sono riportati i risultati delle stime di contaminazione di alcuni dei principali alimenti (latte e vegetali a foglia) eventualmente prodotti nelle vicinanze dell'incidente.

5.1.3 Analisi delle stime di conseguenze radiologiche

Per la definizione delle misure protettive per la popolazione si assumono a riferimento i livelli d'intervento previsti, nel caso di emergenze radiologiche, nell'Allegato XII del D.L.vo 230/1995 e successive modifiche. Tali livelli sono riportati nell'Allegato II del presente rapporto. In tale allegato sono inoltre riportati i livelli massimi ammissibili di radioattività per i prodotti alimentari in caso di emergenze nucleari e radiologiche, stabiliti dai Regolamenti Euratom in materia.

Dall'analisi dei risultati delle stime delle conseguenze radiologiche per i due scenari incidentali risulta quanto segue.

5.1.3.1 Scenario 1

I risultati delle valutazioni effettuate indicano, per il gruppo più esposto della popolazione rappresentato dai bambini, valori di dose efficace stimati ad una distanza di 100 metri dal punto dell'incidente pari a circa 3 mSv. Tali valori di dose efficace stimati fanno ritenere che l'eventuale adozione di una misura protettiva di riparo al chiuso, entro tale distanza, permetterebbe di evitare qualche unità di dose efficace al gruppo critico della popolazione. Tali valori di dose evitabile si collocano nell'intorno dell'estremo inferiore dei livelli d'intervento per i quali l'allegato XII del D.L.vo n. 230/1995 e successive modifiche indica di prendere in considerazione l'eventuale adozione del succitato provvedimento. Le stime di dose fanno altresì ritenere opportuno che nella pianificazione di emergenza venga previsto l'allontanamento delle persone presenti in un raggio di 50 metri dal punto dell'incidente.

Per quanto riguarda la contaminazione di alcuni dei principali alimenti eventualmente prodotti nelle vicinanze dell'incidente (latte e vegetali a foglia), le valutazioni indicano che, nel settore sotto vento, potrebbero determinarsi valori di concentrazione negli alimenti tali da comportare il superamento dei livelli massimi ammissibili fino alla distanza di 3-4 km ovvero, per il latte da somministrare ai lattanti, fino a 6 km.

5.1.3.2 Scenario 2

I risultati delle valutazioni effettuate indicano, per il gruppo più esposto della popolazione rappresentato dai bambini, valori di dose efficace stimati ad una distanza di 300 metri dal punto dell'incidente pari a circa 3,5 mSv. Tali valori di dose efficace stimati fanno ritenere che l'eventuale adozione di una misura protettiva di riparo al chiuso, entro tale distanza, permetterebbe di evitare qualche unità di dose efficace al gruppo critico della popolazione. Tali valori di dose evitabile si collocano nell'intorno dell'estremo inferiore dei livelli d'intervento per i quali l'allegato XII al D.L.vo n. 230/1995 e successive modifiche indica di prendere in considerazione l'eventuale adozione del succitato provvedimento. Le stime di dose fanno altresì ritenere opportuno che nella pianificazione di emergenza venga previsto l'allontanamento delle persone presenti in un raggio di 100 metri dal punto dell'incidente.

Per quanto riguarda la contaminazione di alcuni dei principali alimenti eventualmente prodotti nelle vicinanze dell'incidente (latte e vegetali a foglia), alcune stime preliminari indicano che, nel settore sotto vento, potrebbero determinarsi valori di concentrazione negli alimenti tali da comportare il superamento dei livelli massimi ammissibili fino ad una distanza di circa 10-15 km ovvero, per il latte da somministrare ai lattanti, fino a 20 km.

5.2 Trasporti per via aerea

Le tipologie di colli trasportati per via aerea sono le medesime di quelle utilizzate per il trasporto stradale, mentre i quantitativi trasportati nell'ambito di una singola spedizione sono generalmente inferiori, come mostrato dalle statistiche sui trasporti nazionali.

Dai risultati di un recente studio, nell'ambito del quale sono state aggiornate le stime relative alle probabilità di incidenti aerei, si evincono i seguenti elementi:

- gli incidenti si verificano essenzialmente nelle fasi di atterraggio e decollo;
- gli aerei che contribuiscono maggiormente all'incremento della probabilità di incidente sono quelli più piccoli, che difficilmente sono adibiti a trasporti del tipo in questione;
- se si assume, molto cautelativamente, che tutti i voli ospitino materiale radioattivo a bordo, la probabilità che si verifichi un incidente risulta comunque molto bassa, pari a 8×10^{-7} per volo;
- negli ultimi anni si è osservata una continua e sensibile riduzione degli incidenti aerei.

La normativa richiede prove dei contenitori rappresentative delle condizioni di incidente aereo solo per i colli di tipo C, il cui impiego non è al momento comunque rilevabile dai dati statistici nazionali. Per i colli di tipo B vi sono specifiche limitazioni sui quantitativi trasportabili nell'ambito di una singola spedizione (al massimo 3000 A₁ o 100.000 A₂ quando i materiali sono in forma speciale o, altrimenti, 3000 A₂). La ragione risiede nella particolare affidabilità del trasporto aereo, nonché nei dati di esperienza che mostrano, per i contenitori di tipo B, una robustezza in grado di offrire un buon livello di protezione.

Dalle statistiche nazionali risulta che il trasporto di materie radioattive riguarda generalmente sorgenti di uso medico in colli di tipo esente o di tipo A. Le statistiche mostrano altresì che spedizioni con quantitativi significativi, sopra 10 volte A₂, interessano solo uno specifico aeroporto. Sulla base delle valutazioni condotte nell'Allegato III si ritiene che lo Scenario 2, definito per il trasporto stradale, possa essere considerato rappresentativo, in termini di conseguenze radiologiche di riferimento, anche di un trasporto aereo. Ciò in quanto i valori di dose stimati per un incidente aereo che dovesse coinvolgere una spedizione con il maggior quantitativo di materiale trasportato su base mensile, rapportato ad A₂, sono circa un decimo di quelle valutate per lo Scenario 2.

Si deve considerare infine che le aree nelle vicinanze della zona di impatto saranno comunque oggetto di provvedimenti di soccorso e di evacuazione temporanea da parte di squadre predisposte, adeguatamente addestrate.

5.3 Trasporti per via ferroviaria e per via marittima

Sulla base dei dati statistici relativi alle attività di trasporto nazionali risulta che la modalità di trasporto per via ferroviaria viene unicamente utilizzata per il trasporto di combustibile irraggiato. Conseguentemente, alla luce dei margini di cautela adottati nella definizione degli Scenari 1 e 2 si ritiene che tali scenari possano comunque essere rappresentativi di eventi incidentali in corso di trasporto per via ferroviaria, qualora tali trasporti dovessero effettuarsi nel futuro.

Per quanto riguarda il trasporto per via marittima esso ha un'incidenza percentuale molto limitata, e sulla base dei dati statistici disponibili nonché dei margini di cautela adottati nella definizione degli Scenari 1 e 2, le conseguenze radiologiche di eventi incidentali in corso di trasporto sono ricomprese in quelle valutate per detti scenari. In particolare essi vanno riferiti alle fasi di carico/scarico e sosta dei mezzi navali nelle aree portuali.

6. Mezzi per il rilevamento della radioattività nell'ambiente

Le attività di monitoraggio radiologico da prevedere nella risposta d'emergenza a seguito di un incidente nel corso di un trasporto di materie radioattive o fissili, sono svolte al fine di:

- fornire informazioni che consentano una prima valutazione del livello di coinvolgimento delle materie radioattive trasportate;
- verificare la necessità di attuare specifici provvedimenti a protezione della popolazione;
- indirizzare al meglio le misure di contenimento della contaminazione per prevenirne lo spargimento;
- consentire le valutazioni e le azioni da intraprendere ai fini della protezione dei lavoratori e del personale d'intervento;
- fornire tempestivamente i dati necessari a valutare il rischio radiologico conseguente l'evento incidentale e l'estensione del territorio interessato dalla contaminazione;
- in assenza di specifiche informazioni, identificare i radionuclidi presenti;
- consentire la caratterizzazione radiologica delle aree contaminate mediante il prelievo e la misura di campioni dei comparti ambientali e delle matrici alimentari;
- consentire lo svolgimento di azioni di recupero e messa in sicurezza del materiale radioattivo

La dotazione strumentale a disposizione del personale d'intervento dovrà garantire l'esecuzione dei compiti descritti, con la gradualità che l'evento incidentale richiede.

Particolare rilevanza ai fini di un efficace intervento riveste l'addestramento delle squadre radiometriche.

Il livello della dotazione da prevedersi in ambito provinciale potrà comunque essere correlato al grado di interessamento delle singole province alle attività di trasporto, prevedendo, ove necessario, opportune forme di collaborazione tra gli enti deputati alle attività di monitoraggio di diverse province.

In generale, si può identificare **una fase iniziale dell'emergenza**, immediatamente successiva all'incidente e all'intervento dei mezzi di soccorso, durante la quale, accertato il coinvolgimento di materie radioattive nell'incidente di trasporto, il monitoraggio radiologico è indirizzato, in primo luogo, alla verifica dell'integrità del collo e dell'efficacia delle schermature eventualmente presenti. In questa fase, inoltre, è necessario stabilire la presenza o meno di contaminazione sulle superfici e al suolo, ovvero in aria a seguito di un rilascio in corso di sostanze radioattive all'atmosfera. Le attività radiometriche, inoltre, sono svolte a supporto degli interventi di delimitazione dell'area di sicurezza e delle attività di controllo individuale della contaminazione, sia delle persone coinvolte nell'incidente che del personale d'intervento. La dotazione strumentale delle squadre d'intervento deve, infine, comprendere le attrezzature necessarie al recupero e alla messa in sicurezza delle sorgenti radioattive che, a causa dell'incidente, hanno perso il loro contenimento.

La strumentazione radiometrica in dotazione alle squadre d'intervento dovrà, quindi, avere lo scopo di misurare l'intensità della dose gamma e/o beta indotta dalla presenza di sorgenti radioattive e dall'eventuale presenza di una nube radioattiva, nonché dalla radioattività depositata e/o dispersa al suolo e sulle superfici (suolo, pavimentazioni, veicoli, edifici, etc.). La dotazione strumentale deve inoltre consentire di monitorare i livelli di contaminazione superficiale, sia per emettitori beta che alfa. Per quanto riguarda la

contaminazione superficiale, è necessario poter valutare se sia rimovibile o meno, mediante la misura di campioni di smear-test.

La strumentazione di misura e campionamento da prevedere a corredo della squadra radiometrica d'intervento per un'emergenza conseguente un incidente a carico di un trasporto di materie radioattive dovrebbe prevedere monitori dell'intensità di dose gamma ad alto range (da 1 mSv/h a 1-10 Sv/h) con sonda telescopica, dell'intensità di dose gamma a basso range (background – 10 mSv/h), della contaminazione superficiale beta e della contaminazione da radionuclidi alfa emettitori. A corredo della strumentazione sono da prevedere sorgenti di taratura, in particolare per i rateometri a basso range e per i contaminometri. Vanno inoltre previste sistemi per campionamento su filtro del particolato atmosferico, nonché attrezzature e dispositivi per il prelievo di campioni ambientali.

Nel caso di incidenti di tipo molto grave, per i quali è possibile ipotizzare una conseguente contaminazione ambientale, si individua una **seconda fase dell'emergenza** per la quale la relativa organizzazione deve prevedere la disponibilità di capacità operative per porre in atto programmi straordinari di monitoraggio radiologico del territorio interessato dalla contaminazione radioattiva. Al riguardo, le dotazioni strumentali dovranno fare riferimento alle attività di prelievo di campioni ambientali ed, eventualmente, di matrici alimentari di specifico interesse, nonché alla loro misurazione presso strutture analitiche di riferimento nel campo della radioattività ambientale. Dette strutture, da individuare già nel corso delle attività di predisposizione dei piani di emergenza specifici per gli eventi in questione, dovranno garantire una capacità operativa adeguata alle caratteristiche dell'emergenza in atto che può, in generale, differire dalle procedure adottate per le attività di routine di sorveglianza ambientale. Ciò, non solo nei riguardi della tipologia delle matrici che sono di maggiore interesse nella caratterizzazione della situazione radiometrica ambientale conseguente un'emergenza radiologica, bensì anche in riferimento alle frequenze e alle modalità di esecuzione delle attività di campionamento, trattamento dei campioni e successive analisi. Al riguardo, particolare attenzione deve essere posta alle procedure di ricezione dei campioni e loro trattamento in quanto, a differenza dei campioni ambientali di routine, quelli raccolti a seguito di un rilascio di radioattività nell'ambiente potrebbero presentare livelli di contaminazione per i quali è necessario prevedere opportuni accorgimenti a salvaguardia dell'efficienza operativa della stessa strumentazione che dovrà, pertanto, essere opportunamente protetta (effetti di cross-contamination).

Le matrici ambientali ed alimentari che, in relazione alla tipologia dell'evento incidentale e del territorio interessato dalla contaminazione, possono risultare di maggiore interesse, riguardano:

- il particolato atmosferico,
- la deposizione umida e secca (campionamento diretto del fall-out, bioaccumulatori, campioni superficiali di suolo e di vegetazione erbosa)
- acqua potabile
- acque superficiali
- sedimenti e detrito minerale organico sedimentabile
- matrici alimentari (latte, vegetali eduli a foglia larga, foraggio, frutta di stagione)

La dotazione strumentale delle strutture analitiche individuate deve prevedere l'esecuzione delle analisi di spettrometria gamma che, per tutte le tipologie di matrici indicate

risulta essere la tecnica di riferimento per l'analisi della contaminazione da radionuclidi beta-gamma emettitori.

Di particolare importanza risulta, inoltre, la disponibilità di apparati di conteggio alfa e beta totale, che, in combinazione con la spettrometria gamma e in assenza di informazioni specifiche sul materiale trasportato, consentono di valutare la presenza o meno di radionuclidi alfa emettitori o di radionuclidi che emettono solo radiazione beta, ovvero la cui emissione gamma non rientra nel range di misura degli spettrometri gamma. La disponibilità di sistemi di conteggio a scintillazione liquida consente, inoltre, l'analisi di Trizio e C-14 e di altri emettitori beta di bassa energia.

Un'altra tecnica di misura, particolarmente efficace nella caratterizzazione radiologica della contaminazione al suolo, soprattutto nei casi in cui sono coinvolte vaste aree del territorio, è quella cosiddetta di "spettrometria gamma *in situ*" per la quale è necessario prevedere una specifica strumentazione e una adeguata preparazione degli operatori.

E' opportuno, infine, con riferimento ad eventuali condizioni di contaminazione (ad es. Pu, Sr), disporre di specifiche competenze e capacità operative nel campo della radiochimica che, se non presenti nella struttura di riferimento individuata, possono essere ricercate in un ambito più ampio di quello del territorio oggetto della pianificazione di emergenza.

Nel Manuale CEVaD [11] sono disponibili ulteriori informazioni e approfondimenti riguardanti i dati radiometrici, le indicazioni operative e le modalità di misura nel corso di un'emergenza con rilascio di sostanze radioattive nell'ambiente.

7. Conclusioni e considerazioni operative per la pianificazione

Le valutazioni svolte tengono conto dei requisiti degli standard dell'IAEA adottati per il trasporto di materie radioattive. Le prove cui sono sottoposti i contenitori ed i limiti di rilascio identificati da detti standard per le condizioni normali e incidentali costituiscono requisiti stabiliti a livello internazionale ed adottati in ambito nazionale. In particolare, i limiti di rilascio identificati per le condizioni incidentali assicurano che le conseguenze alla popolazione rimangano contenute entro valori che consentono una adeguata gestione dell'emergenza.

Nel rapporto sono stati identificati due scenari di riferimento, sulla cui base dimensionare la pianificazione dell'emergenza per le diverse modalità di trasporto. Tali scenari sono stati definiti per la modalità di trasporto stradale, tenendo presenti i dati statistici delle attività di trasporto in Italia e rappresentativi rispettivamente dei livelli di comunicazione preventiva delle spedizioni stabiliti dal DPCM del 10 febbraio 2006. Essi sono caratterizzati da un incidente molto grave, con impatto del mezzo di trasporto e successivo sviluppo d'incendio, con rilascio di materiale radioattivo da colli di tipo A fortemente danneggiati. Dalle valutazioni svolte tali scenari risultano rappresentativi delle diverse modalità di trasporto e tipologie di contenitori utilizzati. La loro adozione a fini di pianificazione di emergenza permette di assicurare un livello di protezione della popolazione rispetto agli scenari incidentali ipotizzabili per le attività di trasporto di materie radioattive e fissili, sicuramente molto elevato, senza peraltro risultare eccessivamente onerosa.

Ai fini della pianificazione di emergenza le risultanze delle valutazioni condotte suggeriscono le considerazioni che seguono.

Le misure indicate potranno essere opportunamente graduate sulla base delle evidenze che dovessero emergere sulla scena dell'incidente, delle informazioni sulla quantità e natura dei radionuclidi rese disponibili dal trasportatore autorizzato nonché sulla base dei risultati dei primi rilievi radiometrici.

7.1 Trasporto stradale

Le predisposizioni per la pianificazione sono definite sulla base di un incidente molto grave caratterizzato da un impatto del mezzo di trasporto con successivo sviluppo d'incendio.

7.1.1 Spedizioni non soggette a comunicazione preventiva ai sensi del DPCM del 10 febbraio 2006

A tale caso si applica lo *Scenario incidentale 1*.

Le risultanze delle valutazioni delle conseguenze radiologiche associabili al succitato scenario suggeriscono l'opportunità di prendere in considerazione, nell'ambito della pianificazione di emergenza, l'adozione di una misura protettiva di riparo al chiuso per la fase immediatamente successiva all'incidente in un raggio di circa 100 metri dal punto del rilascio. Dovrà essere altresì prevista la delimitazione di un'area di esclusione, con conseguente allontanamento delle persone presenti, di un raggio di 50 metri dal punto dell'incidente, riservata agli interventi di primo soccorso, ai rilevamenti radiometrici ed alle verifiche d'integrità dei contenitori.

Sulla base delle stime di ricaduta al suolo dei radionuclidi rilasciati e di contaminazione degli alimenti eventualmente prodotti nelle vicinanze del punto d'incidente, si ritiene inoltre opportuno che in sede di pianificazione venga prevista la disponibilità di adeguate capacità per:

- l'attuazione di un programma di monitoraggio radiometrico su matrici ambientali significative, entro un raggio che, in relazione allo scenario ed alla tipologia di materiale trasportato, può estendersi fino a 6 km dal punto dell'incidente, al fine di caratterizzare la contaminazione eventualmente conseguente all'evento;
- il monitoraggio radiometrico su matrici alimentari prodotte nell'area interessata dall'incidente, in un raggio analogo;
- la valutazione dell'evento incidentale e del quadro radiometrico risultante dal succitato programma a supporto di eventuali decisioni circa l'adozione di provvedimenti restrittivi sul consumo degli alimenti.

7.1.2 *Spedizioni soggette a comunicazione preventiva ai sensi del DPCM del 10 febbraio 2006*

A tale caso si applica lo *Scenario incidentale 2*.

Le risultanze delle valutazioni delle conseguenze radiologiche associabili al succitato scenario suggeriscono l'opportunità di prendere in considerazione, nell'ambito della pianificazione di emergenza, l'adozione di una misura protettiva di riparo al chiuso per la fase immediatamente successiva all'incidente in un raggio di circa 300 metri dal punto del rilascio. Dovrà essere altresì prevista la delimitazione di un' area di esclusione, con conseguente allontanamento delle persone presenti, in un raggio di 100 metri dal punto dell'incidente, riservata agli interventi di primo soccorso, ai rilevamenti radiometrici ed alle verifiche d'integrità dei contenitori.

Sulla base delle stime di ricaduta al suolo dei radionuclidi rilasciati e di contaminazione degli alimenti eventualmente prodotti nelle vicinanze del punto d'incidente, si ritiene inoltre opportuno che in sede di pianificazione venga prevista la disponibilità di adeguate capacità per:

- l'attuazione di un programma di monitoraggio radiometrico su matrici ambientali significative, entro un raggio che, in relazione allo scenario ed alla tipologia di materiale trasportato può estendersi fino a 20 km dal punto dell'incidente, al fine di caratterizzare la contaminazione eventualmente conseguente all'evento;
- il monitoraggio radiometrico su matrici alimentari prodotte nell'area interessata dall'incidente, in un raggio analogo;
- la valutazione dell'evento incidentale e del quadro radiometrico risultante dal succitato programma a supporto di eventuali decisioni circa l'adozione di provvedimenti restrittivi sul consumo degli alimenti.

7. 1.3 Spedizioni di materiale fissile

Ferme restando le soglie generali di applicazione della normativa stabilite nell'Allegato I del D.L.vo n° 230/1995, nel caso di spedizioni che coinvolgano un singolo radioisotopo valgono le seguenti considerazioni:

a) *Attività trasportata inferiore a:*

Radionuclide fissile	Attività (GBq)
U-233	4,5
U-235	5,09
Pu-238	0,39
Pu-239	0,36
Pu-241	18,8

Si applicano le considerazioni definite per lo Scenario 1.

b) *Attività trasportata superiore ai valori di cui alla lettera a) precedente*

Si applicano le considerazioni definite per lo Scenario 2.

Nel caso di una spedizione che comprenda più tipologie di materiali fissili, si possono applicare le considerazioni relative allo Scenario 1 se è rispettata la seguente condizione (dove il simbolo del radioisotopo indica la sua attività espressa in GBq):

$$\frac{U-233}{4,50GBq} + \frac{U-235}{5,09GBq} + \frac{Pu-238}{0,393GBq} + \frac{Pu-239}{0,360GBq} + \frac{Pu-241}{18,8GBq} \leq 1$$

altrimenti si applicano le considerazioni relative allo Scenario 2.

7.2 Trasporto per via aerea

Si applicano le considerazioni definite per il trasporto stradale, relativamente allo Scenario 2.

Per il trasporto di fissile, nei quantitativi superiori a quanto indicato al precedente punto 7.1.3 la prefettura della provincia di origine o di arrivo del trasporto potrà richiedere all'ISPRA una verifica che il caso in questione sia ricompreso nella pianificazione generale che verrà sviluppata sulla base del presente rapporto.

7.3 Trasporto per via ferroviaria

Si applicano le considerazioni definite per il trasporto stradale.

7.4 Trasporto per via marittima

Si applicano, alle fasi di carico/scarico e sosta dei mezzi navali nelle aree portuali, le considerazioni definite per il trasporto stradale.

7.5 Estensione territoriale degli scenari incidentali

Le risultanze delle valutazioni condotte indicano che le conseguenze e le azioni protettive da intraprendere nella fase immediatamente successiva all'evento interessano aree ristrette e, pertanto, la probabilità che sia coinvolta più di una singola provincia può essere chiaramente trascurata.

Per quanto riguarda la fase successiva dell'emergenza, caratterizzata dal monitoraggio radiometrico delle matrici ambientali significative e di quelle alimentari prodotte nell'area dell'incidente, ove l'incidente dovesse verificarsi in prossimità dei confini di provincia, le aree interessate al monitoraggio ed alla decisione circa l'eventuale adozione di provvedimenti restrittivi sul consumo degli alimenti, potrebbero avere un'estensione interprovinciale.

Sintesi delle considerazioni operative per la pianificazione

Modalità di Trasporto	Tipo di spedizione	Scenario di riferimento
Stradale	Materie radioattive non soggette a comunicazione preventiva	1
	Materie fissili al di sotto dei valori di attività di riferimento (Par. 7.1.3)	1
	Materie radioattive soggette a comunicazione preventiva	2
	Materie fissili al di sopra dei valori di attività di riferimento (Par. 7.1.3)	2
Aereo	Materie radioattive (Soggette e non a comunicazione preventiva)	2
	Materie fissili al di sotto dei valori di attività di riferimento (Par. 7.1.3)	2
	Materie fissili al di sopra dei valori di attività di riferimento (Par. 7.1.3)	Prefettura richiede valutazione specifica all'ISPRA
Ferroviaria	Si applicano le considerazioni definite per il trasporto stradale.	
Marittima	Si applicano, alle fasi di carico/scarico e di sosta dei mezzi navali nelle aree portuali, le considerazioni definite per il trasporto stradale	

8. Definizioni e terminologia

Materiale radioattivo sotto forma speciale

Per materiale radioattivo sotto forma speciale (special form) si intende:

- un materiale radioattivo solido che non si disperde;
- una capsula sigillata contenente un materiale radioattivo;

A₁ : è l'attività massima di un materiale radioattivo in forma speciale che può essere contenuta in un imballaggio di tipo A;

A₂ : è l'attività massima di un materiale radioattivo in forma diversa dalla forma speciale che può essere contenuta in un imballaggio di tipo A;

Attività specifica: è l'attività per unità di massa della materia nella quale i radioisotopi sono distribuiti in maniera uniforme;

Collo esente: un collo che soddisfa minimi requisiti di progetto specificati nella Regolamentazione IAEA;

Collo industriale : un collo, più robusto di un collo esente, che soddisfa i requisiti di progetto specificati nella Regolamentazione IAEA;

Collo di tipo A : un collo, capace di resistere alle normali condizioni di trasporto (definite nella Regolamentazione IAEA da prove che simulano lievi incidenti), che soddisfa i requisiti di progetto specificati nella Regolamentazione IAEA;

Collo di tipo B : un collo, capace di resistere a severe condizioni di incidente, che soddisfa i requisiti di progetto specificati nella Regolamentazione IAEA;

Collo di tipo C : un collo, usato nel trasporto aereo capace di resistere a condizioni di incidente molto severe, che soddisfa i requisiti di progetto specificati nella Regolamentazione IAEA;

Materiale di debole attività specifica (LSA)

Materiali radioattivi che per loro natura hanno una limitata attività specifica, o i materiali radioattivi la cui attività specifica media stimata rientra in limiti stabiliti. I materiali LSA sono classificati in tre gruppi: LSA-I, LSA-II e LSA-III;

Oggetto contaminato superficialmente (SCO)

Oggetto solido che non è radioattivo, ma sulle cui superfici è distribuito un materiale radioattivo. Gli SCO sono classificati in due gruppi SCO-I e SCO-II in relazione al livello di contaminazione presente sulla superficie;

Q-system

Modello dosimetrico adottato dalla IAEA per la determinazione dei valori di A₁ e A₂ descritto nell'Appendice I della pubblicazione "Advisory Material for the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material" No. TS-G-1.1

9 . Riferimenti

- [1] IAEA-Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material (2005 Edition) – Safety Requirements, No.TS-R-1
- [2] IAEA-Advisory Material for the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material – Safety Guide, No. TS-G-1.1 (Rev.1)
- [3] IAEA-Planning and Preparing for Emergency Response to Transport Accidents Involving Radioactive Material – Safety Guide, No.TS-G-1.2 (ST-3)
- [4] International Organization for Standardization, Packaging of Uranium Hexafluoride (UF₆) for Transport, ISO 7195:1993(E), ISO, Geneva (1993)
- [5] Proceedings of the 15th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials PATRAM 2007 October 21-26, 2007 TESTING OF PACKAGES WITH LSA MATERIALS IN VERY SEVERE MECHANICAL IMPACT CONDITIONS WITH MEASUREMENT OF AIRBORNE RELEASE
- [6] Proceedings of the 15th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials PATRAM 2007 October 21-26, 2007, Miami, Florida, USA - AIRCRAFT ACCIDENT RATES Rajesh Garg [Canadian Nuclear Safety Commission, Ottawa, Canada], Reinhard Menzel [European Aviation Safety Agency, Köln, Germany]
- [7] IAEA EPR METHOD 2003 - “Method for developing arrangements for response to a nuclear or radiological emergency – Updating IAEA-TECDOC-953”, September 2003
- [8] IAEA-TECDOC-1092 - “Generic procedures for monitoring in a nuclear or radiological emergency”, June 1999
- [9] NRPB-R326 – P.H.Burghess - “Guidance on the choice, use and maintenance of hand-held radiation monitoring equipment”, May 2001
- [10] NRPB-W7 – N.P.McColl, P.Kruse – “Technical handbook on the National Arrangements for Incidents involving Radioactivity (NAIR) – 2002 Edition”, May 2002
- [11] CEVaD - Manuale Operativo - Rev. 5 - giugno 2005
- [12] CNEN - Cuoco, Galvagni, Pucciarelli, Scaf  "Determinazione delle concentrazioni di una nube radioattiva e delle contaminazioni del suolo secondo il metodo di Pasquill-Gifford" – marzo 1965
- [13] DPCM 10 febbraio 2006 - Linee guida per la pianificazione di emergenza per il trasporto di materie radioattive e fissili, in attuazione dell'articolo 125 del decreto legislativo 17 marzo 1995, n. 230 e successive modifiche ed integrazioni
- [14] National Radiological Protection Board - NRPB-W19 “Emergency Data Handbook” – N.P. McColl, S.L. Prosser - January 2001

- [15] Eckerman K. F. and Leggett R. W. - DCFPAK - Dose coefficient data file package for Sandia National Laboratory - Oak Ridge National Laboratory - 1996
- [16] Radiation Protection Bureau of Health Canada - Recommendations on Dose Coefficients for Assessing Doses from Accidental Radionuclide Releases to the Environment - March 1999
- [17] NUREG/CR-6410 - Nuclear Fuel Cycle Facility Accident Analysis Handbook - U. S. Nuclear Regulatory Commission - March 1998

Allegato I - Tipologie e caratteristiche degli imballaggi

Il trasporto di materiale radioattivo è governato all'interno degli Stati da norme nazionali. Poiché il trasporto frequentemente può coinvolgere operazioni tra diversi Stati, sono stati sviluppati requisiti normativi internazionalmente accettati. La Regolamentazione di Trasporto IAEA No. TS-R-1 [1] e le pubblicazioni a suo supporto [2-3] è la base per il trasporto sicuro di materiale radioattivo in molti Stati in quanto i suoi principi e requisiti sono trasposti nelle varie regolamentazioni nazionali e internazionali modali di trasporto. Scopo della Regolamentazione di trasporto è quello di progettare, fabbricare e mantenere efficienti gli imballaggi in modo tale che, anche in caso di incidente, il potenziale impatto radiologico sia ragionevolmente limitato e nel caso sia coinvolto materiale fissile siano evitati incidenti di criticità.

La Regolamentazione di trasporto specifica i requisiti base di progetto per gli imballaggi, le cisterne ed i container destinati a contenere i materiali radioattivi al fine di garantire la sicurezza. Questi comprendono:

- requisiti stringenti per il contenimento dei materiali radioattivi;
- limiti sul livello di radiazione all'esterno dell'imballaggio;
- controlli sulle reazioni di criticità per qualunque materiale fissile;
- valutazioni sulla dissipazione del calore generato dai contenuti radioattivi degli imballaggi.

Poiché la Regolamentazione di trasporto è applicabile ad una larga varietà di materiali radioattivi con diversi livelli sia di radiotossicità che di forma fisico-chimica, i requisiti di progetto dei colli sono stabiliti in maniera graduale. Inoltre lo stesso approccio graduale è utilizzato nella certificazione del modello di imballaggio, nei controlli operativi dei colli e delle spedizioni e nella maniera in cui i rischi sono notificati. All'aumentare della pericolosità dei contenuti diventano parallelamente più stringenti i requisiti per il progetto, la certificazione, i controlli operativi e la notifica.

Questo allegato riporta, in modo sommario, come i requisiti degli imballaggi stabiliti della regolamentazione possano influenzare la risposta di emergenza nel caso di incidenti che coinvolgono materiale radioattivo

TIPI DI IMBALLAGGIO

In seguito sono descritti i vari tipi di imballaggio usati per il trasporto di materiale radioattivo. In funzione del tipo di imballaggio richiesto, l'approccio graduato usato nella Regolamentazione di trasporto specifica per ogni modello di collo le prove relative alle condizioni di trasporto senza incidenti (routine), alle condizioni normali ed alle condizioni incidentali di trasporto.

Colli esenti

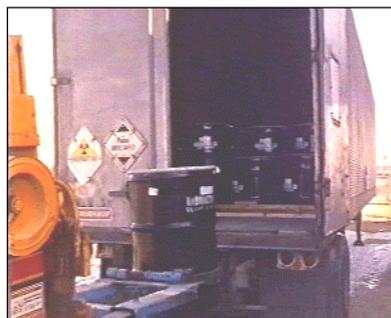
I colli esenti possono contenere soltanto piccole quantità di materiale radioattivo. Essi devono soddisfare requisiti minimi di progetto e sono esentati dalla maggior parte dei requisiti di marcatura ed etichettatura. Essi soddisfano gli stringenti requisiti di sicurezza specificati nella Regolamentazione di trasporto riguardanti i livelli di contaminazione e di radiazione per gli imballaggi (es.



vedere i para. 508 e 516 della Regolamentazione di trasporto IAEA). Esempi sono i colli che contengono alcuni tipi di orologi, rivelatori di fumo, alcuni radiofarmaci e sorgenti radioattive con livelli di attività molto bassi usate per la calibrazione degli strumenti. Generalmente i colli esenti sono fabbricati con cartone. Imballaggi vuoti, ma internamente contaminati possono essere classificati e trasportati come colli esenti purché siano rispettate le condizioni previste al para. 520 della Regolamentazione IAEA.

Colli industriali

I colli industriali possono contenere quantità relativamente elevate di materiale radioattivo. Tuttavia i materiali consentiti in questi colli possono essere dei seguenti due tipi: essi possono essere o nella forma di materiale di debole attività specifica (LSA) o essere degli oggetti superficialmente contaminati (SCO). Sono consentiti tre tipi di colli industriali (Tipo IP-1, Tipo IP-2 e Tipo IP-3). Il tipo di collo industriale consentito dipende dalle caratteristiche del materiale LSA o dal SCO da trasportare.



I tipi di materiale e di oggetti che è consentito trasportare in imballaggi IP-1, IP-2 ed IP-3 sono:

- *IP-1*: SCO-I ed LSA-I solidi ed LSA-I liquidi in uso esclusivo;
- *IP-2*: SCO-II ed LSA-II solidi, LSA-I liquidi non in uso esclusivo ed LSA-II liquidi e gas ed LSA-III solidi in uso esclusivo;
- *IP-3*: LSA-II liquidi e gas e materiale LSA-III non in uso esclusivo.

Sebbene l'attività specifica del materiale LSA e la contaminazione sugli oggetti SCO è generalmente bassa, l'attività totale nella spedizione potrebbe essere significativa. Esempi di materiale LSA ed SCO sono:

- *LSA-I*: minerali, uranio e torio non irraggiato, residui di lavorazione e terreno e detriti contaminati con bassa concentrazione di attività;
- *LSA-II*: rifiuti di processo del reattore, filtri fangosi, resine e liquidi adsorbiti, apparecchiature attivate, rifiuti di laboratorio e rifiuti provenienti dallo smantellamento degli impianti. Questo materiale può presentare un più basso livello di omogeneità rispetto al materiale LSA-I, e pertanto può essere presente una concentrazione localizzata di attività più alta tale da imporre requisiti più stringenti per gli imballaggi;
- *LSA-III*: liquidi solidificati, resine, filtri di separatori, materiale irraggiato. Questo materiale è essenzialmente distribuito uniformemente in una matrice solida compatta. Il materiale può anche essere distribuito in un solido o in un insieme di oggetti solidi all'interno dell'imballaggio. E' consentita una più elevata attività specifica per questo materiale che comporta requisiti più stringenti per gli imballaggi;
- *SCO-I e SCO-II*: entrambe le categorie riguardano oggetti solidi non radioattivi che hanno le superfici esterne ed interne contaminate. Gli SCO-II possono avere livelli di contaminazione più elevati rispetto agli SCO-I. Esempi di tali oggetti sono i rifiuti provenienti dallo smantellamento degli impianti nucleari come tubazioni contaminate, utensili, valvole, pompe ed altre strutture.

Tutti i colli industriali devono soddisfare i requisiti generali per i colli. I colli industriali Tipo IP-2 e Tipo IP-3 devono soddisfare alcuni requisiti di prova aggiuntivi atti a dimostrare la capacità di resistere alle condizioni normali di trasporto senza perdita o dispersione del loro contenuto o una perdita di integrità della schermatura. L'attività totale è limitata dal massimo rateo di dose a 3 m dal materiale non schermato, dall'oggetto o dalla collezione di oggetti. I colli industriali sono spesso scatole, fusti metallici, contenitori di metallo e cisterne.

Colli di Tipo A

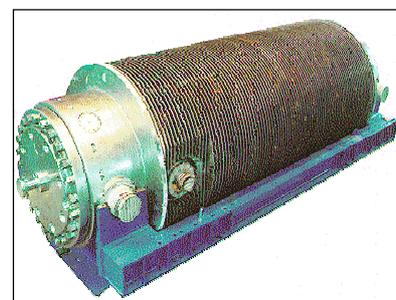
I colli di Tipo A possono contenere specifiche quantità limitate di materiale radioattivo. I limiti di attività per i colli di Tipo A sono determinati sulla base delle massime conseguenze radiologiche accettabili a seguito di una rottura e sotto determinate condizioni. Questi limiti di attività, che sono valori calcolati specificati nella Regolamentazione di trasporto IAEA per ciascun radionuclide, sono stabiliti per materiale radioattivo in "forma speciale" (capsule sigillate e materiale solido non disperdibile) e materiale radioattivo "diverso dal materiale in forma speciale". I limiti sono conosciuti rispettivamente come i valori A_1 e A_2 .

I colli di Tipo A devono soddisfare i requisiti stabiliti per le condizioni normali di trasporto senza perdita o dispersione dei loro contenuti e senza perdere un'adeguata capacità di schermatura. L'esperienza ha dimostrato che, anche in presenza di gravi danneggiamenti esterni e distorsioni, solamente una piccola frazione di colli trasportati subisce una perdita dei contenuti o un cambiamento nel livello di radiazione esterna quando impropriamente maneggiati o coinvolti in incidenti di trasporto. Le caratteristiche dei colli di Tipo A, che sono comunemente usati nel trasporto, spaziano da involucri esterni in legno, fibre o cartone con contenitori interni in vetro, plastica o metallo a fusti metallici o imballaggi in acciaio riempiti con piombo. L'uso di questi colli è in crescita e parecchi di questi colli fanno spesso parte delle spedizioni; ciò comporta che si possono avere molti colli di Tipo A trasportati insieme in un singolo mezzo di trasporto o in un sovrimballaggio o in un container. Materiali trasportati in colli di Tipo A includono radiofarmaci, radionuclidi per applicazioni industriali e rifiuti radioattivi.



Colli di Tipo B

I colli di Tipo B possono contenere materiale radioattivo in quantità maggiore di quella consentita per i colli di Tipo A. I colli di Tipo B devono essere progettati per resistere sia alle condizioni normali che alle condizioni di incidente di trasporto (es: caduta, punzonamento, impatto, prova termica e prova di immersione) [1, 2]. I colli di Tipo B possono variare nelle dimensioni da quelli con una massa lorda di pochi kilogrammi, contenenti sorgenti per radiografie, a grandi imballaggi aventi massa lorda fino a 100 tonnellate contenenti, ad esempio, combustibile nucleare irraggiato (combustibile esaurito proveniente dalle centrali nucleari di potenza).



Imballaggio di tipo B per trasporto di elementi di combustibile irraggiato



Imballaggio di tipo B per trasporto sorgenti di ^{60}Co per impianti di irraggiamento industriale (sterilizzazione di prodotti)



Imballaggio di tipo B per trasporto ed impiego di sorgenti per γ -grafia industriale

Generalmente i colli di Tipo B sono di acciaio con una notevole schermatura per le radiazioni. L'esperienza passata ha confermato la bontà della concezione progettuale di questo tipo di collo ed ha mostrato che la probabilità di perdita della schermatura o del contenimento in caso di un incidente che coinvolga questo tipo di collo è molto bassa. La Regolamentazione IAEA richiede che il modello di collo di Tipo B sia approvato dalla o dalle autorità competenti designate.

Colli di Tipo C

I colli di Tipo C sono progettati per trasportare grandi quantità di attività (es. $3000 \times A_2$) di materiale radioattivo per via aerea. Questi imballaggi devono essere progettati per resistere alle prove di caduta, punzonamento, termica e di immersione previste per i colli di Tipo B ed, in aggiunta, essere anche progettati per resistere a prove più severe, quali le prove termiche, di impatto e di immersione maggiormente gravose, intese a simulare le condizioni che si possono originare a seguito di un grave incidente aereo. Il modello di collo di Tipo C è soggetto all'approvazione dell'autorità competente dello Stato di origine del modello di collo.

Colli contenenti esafluoruro di uranio (UF_6)

L'esafluoruro di uranio deve essere imballato e trasportato in accordo con le disposizioni dello standard ISO 7195, Imballaggi per il Trasporto di Esafluoruro di Uranio (UF_6) [4], o alternative oltre a questo, e con gli specifici requisiti della Regolamentazione di trasporto IAEA [1].



Colli contenenti materiale fissile

I colli contenenti materiale fissile possono essere colli industriali o di Tipo A, colli di Tipo B o colli di Tipo C. I modelli di questi colli sono tutti soggetti all'approvazione dell'autorità competente. In aggiunta ai requisiti per i colli sopra menzionati la Regolamentazione di trasporto IAEA prevede specifiche disposizioni per i colli contenenti materiale fissile. Il materiale fissile è capace di poter sostenere una reazione neutronica a catena. Nel processo di fissione un nucleo atomico si divide nei prodotti di fissione dando origine ad un rilascio di radiazioni e di calore. Il materiale fissile è l'uranio-233, uranio-235, plutonio-239, plutonio-

241 o una qualunque combinazione di questi radionuclidi (vedere para. 222 della Regolamentazione di trasporto).

I requisiti aggiuntivi per i materiali fissili sono stabiliti per garantire la sicurezza di sottocriticità nel trasporto di questi materiali attraverso:

- la limitazione della quantità del materiale fissile e della sua configurazione geometrica;
- l'imposizione di stringenti caratteristiche di progetto del collo per garantire la sottocriticità anche nelle condizioni di prova simulanti un incidente;
- il controllo del numero di colli consentito a bordo di un singolo mezzo di trasporto o in caso di stivaggio comune durante il trasporto o nel deposito in corso di trasporto.

La Regolamentazione di trasporto prevede alcune esenzioni dai requisiti previsti per i colli contenenti materiale fissile, ad esempio se la concentrazione dell'uranio-235 è inferiore all'1% o se il collo contiene solo quantità limitate di materiale fissile. In questi casi si parla di colli "fissili esenti". In caso di trasporto di materiali fissili esenti si applicano i requisiti rilevanti relativi all'imballaggio in relazione alla natura radioattiva dei contenuti.

Allegato I bis - Numeri ONU (UN number) delle materie radioattive

UN No.	NOME APPROPRIATO DELLA SPEDIZIONE
2910	MATERIALE RADIOATTIVO, COLLO ESENTE- QUANTITA' LIMITATA DI MATERIALE
2911	MATERIALE RADIOATTIVO, COLLO ESENTE- STRUMENTI o ARTICOLI
2909	MATERIALE RADIOATTIVO, COLLO ESENTE- ARTICOLI FABBRICATI CON URANIO NATURALE o URANIO IMPOVERITO o TORIO NATURALE
2908	MATERIALE RADIOATTIVO, COLLO ESENTE- IMBALLAGGIO VUOTO
2912	MATERIALE RADIOATTIVO DI DEBOLE ATTIVITA' SPECIFICA (LSA-I) non fissile o fissile esente
3321	MATERIALE RADIOATTIVO DI DEBOLE ATTIVITA' SPECIFICA (LSA-II) non fissile o fissile esente
3322	MATERIALE RADIOATTIVO DI DEBOLE ATTIVITA' SPECIFICA (LSA-III) non fissile o fissile esente
2913	MATERIALE RADIOATTIVO, OGGETTI CONTAMINATI SUPERFICIALMENTE (SCO-I o SCO-II) non fissile o fissile esente
2915	MATERIALE RADIOATTIVO, COLLO DI TIPO A, non in forma speciale, non fissile o fissile esente
3332	MATERIALE RADIOATTIVO, COLLO DI TIPO A, FORMA SPECIALE, non fissile o fissile esente
2916	MATERIALE RADIOATTIVO, COLLO DI TIPO B(U), non fissile o fissile esente
2917	MATERIALE RADIOATTIVO, COLLO DI TIPO B(M), non fissile o fissile esente
3323	MATERIALE RADIOATTIVO, COLLO DI TIPO C, non fissile o fissile esente
2978	MATERIALE RADIOATTIVO, ESAFLUORURO DI URANIO, non fissile o fissile esente
3324	MATERIALE RADIOATTIVO DI DEBOLE ATTIVITA' SPECIFICA (LSA-II), FISSILE
3325	MATERIALE RADIOATTIVO DI DEBOLE ATTIVITA' SPECIFICA (LSA-III), FISSILE
3326	MATERIALE RADIOATTIVO, OGGETTI CONTAMINATI SUPERFICIALMENTE (SCO-I o SCO-II), FISSILE
3327	MATERIALE RADIOATTIVO, COLLO DI TIPO A, FISSILE non in forma speciale
3333	MATERIALE RADIOATTIVO, COLLO DI TIPO A, FORMA SPECIALE, FISSILE
3328	MATERIALE RADIOATTIVO, COLLO DI TIPO B(U), FISSILE
3329	MATERIALE RADIOATTIVO, COLLO DI TIPO B(M), FISSILE
3330	MATERIALE RADIOATTIVO, COLLO DI TIPO C, FISSILE
3331	MATERIALE RADIOATTIVO, TRASPORTATO IN ACCORDO SPECIALE, FISSILE
2977	MATERIALE RADIOATTIVO, ESAFLUORURO DI URANIO, FISSILE ^c

Allegato II - Livelli di intervento in caso di emergenze nucleari e radiologiche

II.1.1 Premessa

Nel caso di un rilascio di sostanze radioattive nell'ambiente i provvedimenti protettivi sono mirati a ridurre l'esposizione degli individui della popolazione.

Nella fase immediatamente successiva ad un grave incidente, sono richieste azioni tempestive volte a mitigare gli effetti di un rilascio potenziale o in atto. Le principali azioni protettive sono le seguenti:

- a) riparo al chiuso;
- b) iodiofilassi;
- c) evacuazione.

Può inoltre rivestire una notevole importanza la conoscenza tempestiva dello stato della contaminazione della catena alimentare, ai fini dell'eventuale adozione in tempi successivi del blocco del consumo degli alimenti contaminati.

II.1.2 Livelli di intervento di dose

Nell'Allegato XII del decreto legislativo n. 230/1995, e successive modifiche, sono stabiliti i livelli di intervento in caso di emergenze radiologiche e nucleari per ognuna delle azioni protettive a), b) e c) sopraindicate; tali livelli sono espressi in termini di dose evitabile a seguito dell'adozione di uno specifico provvedimento e si riferiscono ai gruppi di riferimento della popolazione interessati dall'emergenza.

In Tabella II.1 sono riportati gli intervalli dei livelli di intervento relativi alle diverse misure protettive stabiliti nel D.Lgs. n. 230/1995 ai fini della pianificazione di emergenza; essi sono analoghi a quelli raccomandati dall'Unione Europea (E. C. 1997).

Dei due riferimenti di dose indicati per ciascuna delle misure protettive considerate, il valore inferiore rappresenta il livello al di sotto del quale non si ritiene giustificata l'adozione della contromisura, mentre quello superiore indica il livello al di sopra del quale la contromisura dovrebbe essere garantita.

E' da considerare sempre giustificata l'introduzione di azioni protettive al fine di evitare effetti deterministici. In Tabella II.2 sono riportati i valori soglia di dose proiettata¹ suscettibili di produrre seri effetti deterministici, indicati nel D.Lgs. n. 230/1995.

II.1.3 Livelli massimi ammissibili di radioattività negli alimenti

Per quanto riguarda il consumo di alimenti, l'Unione Europea ha emanato diversi Regolamenti che fissano i livelli massimi ammissibili di radioattività per i prodotti alimentari (CCE, 1989a; CCE, 1989b) e per gli alimenti animali (CCE, 1990), che possono essere immessi sul mercato a seguito di un incidente nucleare o in qualsiasi altro caso di emergenza radiologica, ai fini della protezione della popolazione (Tabelle II.3 e II.4).

¹ Dose proiettata: dose assorbita ricevuta da un individuo della popolazione in un intervallo di tempo dall'inizio dell'incidente, da tutte le vie di esposizione in assenza di azioni protettive.

Tabella II.1**Livelli di intervento di emergenza per l'adozione di misure protettive (D.Lgs. 241/00)**

AZIONE PROTETTIVA	LIVELLI DI INTERVENTO (mSv)
Riparo al chiuso	da alcune unità ad alcune decine (dose efficace)
Somministrazione di Iodio stabile	da alcune decine ad alcune centinaia (dose equivalente)
Evacuazione	da alcune decine ad alcune centinaia (dose efficace)

Tabella II.2**Valori soglia di dose proiettata suscettibili di produrre seri effetti deterministici in un intervallo di tempo inferiore a due giorni (D.Lgs. 241/00)**

ORGANO O TESSUTO	DOSE PROIETTATA (Gy)
Corpo intero (midollo osseo)	1
Polmoni	6
Pelle	3
Tiroide	5
Cristallino	2
Gonadi	3
Feto	0,1

Tabella II.3

Livelli massimi ammissibili di radioattività per i prodotti alimentari in caso di emergenze nucleari e radiologiche

NUCLIDE	LIVELLO MASSIMO AMMISSIBILE (Bq kg ⁻¹ o Bq l ⁻¹)			
	alimenti per lattanti	prodotti lattiero caseari	altri prodotti ^(*)	alimenti liquidi
Isotopi dello Stronzio	75	125	750	125
Isotopi dello Iodio	150	500	2000	500
Isotopi alfa emettitori del Plutonio e di elementi transplutonici (in particolare Pu-239, Am-241)	1	20	80	20
Tutti gli altri nuclidi il cui tempo di dimezzamento supera i 10 giorni, in particolare Cs-134 e Cs-137 (**)	400	1000	1250	1000

(*) Sono esclusi i prodotti alimentari secondari, per i quali i livelli massimi ammissibili da applicare sono 10 volte superiori a quelli riportati in tabella.

(**) In questo gruppo non sono inclusi il trizio, il carbonio 14 e il potassio 40.

CCE, 1989a. *Regolamento (EURATOM) n. 944/89 della Commissione del 12 aprile 1989 che fissa i livelli massimi ammissibili di contaminazione radioattiva per i prodotti alimentari secondari a seguito di un incidente nucleare o di qualsiasi altro caso di emergenza radioattiva - Gazzetta Ufficiale delle Comunità Europee L101/17 del 13.4.1989.*

CCE, 1989b. *Regolamento (EURATOM) n. 2218/89 del Consiglio del 18 luglio 1989 recante modifica del regolamento (EURATOM) n. 3954/87 che fissa i livelli massimi ammissibili di radioattività per i prodotti alimentari e per gli alimenti per animali in caso di livelli anormali di radioattività a seguito di un incidente nucleare o in qualsiasi altro caso di emergenza radioattiva - Gazzetta Ufficiale delle Comunità Europee L211/1 del 22.7.1989.*

Tabella II.4

Livelli massimi di radioattività (Cs-134 e Cs-137) negli alimenti per animali in caso di emergenze nucleari e radiologiche^{(1) (2)}

ANIMALI	LIVELLO MASSIMO AMMISSIBILE (Bq kg ⁻¹)
Maiali	1250
Pollame, agnelli e vitelli	2500
Altri	5000

- (1) I presenti livelli costituiscono uno strumento per contribuire all'osservanza dei massimi livelli consentiti per gli alimenti; essi non garantiscono di per se stessi tale osservanza in ogni circostanza e lasciano impregiudicata la necessità di controllare i livelli di contaminazione nei prodotti animali destinati al consumo umano.
- (2) Tali livelli si riferiscono agli alimenti per animali pronti al consumo.

CCE, 1990. *Regolamento (EURATOM) n. 770/90 della Commissione del 29 marzo 1990 che fissa i livelli massimi di radioattività ammessi negli alimenti per animali contaminati a seguito di incidenti nucleari o di altri casi di emergenza da radiazione* - Gazzetta Ufficiale delle Comunità Europee L83 del 30.3.1990.

Allegato III - Ipotesi di rilascio in condizioni incidentali di trasporto e stima delle conseguenze radiologiche

In questo allegato vengono riportate le valutazioni sulle conseguenze radiologiche associate a possibili incidenti in corso di trasporto che coinvolgano imballaggi con materie radioattive o fissili.

Tali valutazioni, in termini di impatto radiologico, sono state in primo luogo svolte con riferimento al comportamento degli imballaggi in condizioni incidentali.

Sono poi valutate le conseguenze radiologiche associate agli scenari di riferimento individuati per il trasporto stradale, caratterizzati da spedizioni con colli di tipo A di materiale sotto forma non speciale, e sono svolte considerazioni circa la rappresentatività di detti scenari rispetto ad altre modalità di trasporto e tipologie di spedizioni.

L'allegato riporta infine alcune verifiche sulla rappresentatività degli scenari di riferimento individuati, rispetto ad effettive spedizioni stradali ed aeree, rappresentative della situazione nazionale.

A.III.1 Comportamento degli imballaggi in condizioni incidentali

A.III.1.1 Colli di tipo A

Il collo di tipo A riveste in questa trattazione un'importanza del tutto particolare in quanto esso rappresenta nel contesto internazionale quello più frequentemente utilizzato per le spedizioni con contenuto di attività medio – basso, in quanto relativamente economico ma nel contempo ad elevato livello di sicurezza. Per tale ragione è stato assunto a riferimento nella regolamentazione IAEA per la definizione delle quantità di attività, denominate A_1 ed A_2 , rappresentative dei carichi massimi trasportabili in imballaggi di tipo A, che sono alla base della maggior parte dei requisiti e prescrizioni in materia di sicurezza del trasporto di materiali radioattivi.

Tali valori limite di attività, espressi in *Becquerel* per ciascun radionuclide (A_1 per il materiale radioattivo sotto *forma speciale*, cioè non disperdibile sulla base dei risultati di specifici programmi di prove, ed A_2 per la forma *non speciale*, quindi disperdibile) sono stati stabiliti sulla base di considerazioni di accettabilità delle conseguenze radiologiche associabili ad un danneggiamento severo di un contenitore di tipo A.

Cenni sul modello dosimetrico dell'IAEA (Q-system)

Come è noto, per la determinazione dei valori A_1 e A_2 , il *Q-system*, adottando specifici criteri radiologici, prende in considerazione diverse vie di esposizione, sia interne che esterne, determinando per ciascuna di queste vie quella quantità di attività Q (Bq) che produrrebbe conseguenze radiologiche pari al criterio prestabilito.

I criteri radiologici stabiliti nel *Q-system* sono:

- la dose efficace e la dose efficace impegnata assunta da una persona posta nelle immediate prossimità del contenitore danneggiato non deve superare i 50 mSv;

- la dose equivalente al singolo organo ed alla cute non deve superare 500 mSv (150 mSv al cristallino).

Nelle valutazioni si assume che una persona stazioni per un tempo di 30 minuti alla distanza di un metro dal contenitore danneggiato.

Le vie di esposizione principali considerate, e le relative quantità limite di attività da esse implicate, sono le seguenti:

A) dose esterna da irraggiamento fotonico (X, gamma) del contenuto non schermato	→	Q_A
B) dose esterna da irraggiamento beta del contenuto non schermato	→	Q_B
C) dose efficace impegnata da inalazione	→	Q_C
D) dose diretta da beta emettitori depositati sulla pelle ed ingestione	→	Q_D
E) dose da sommersione (irraggiamento diretto dalla nube) da parte di gas nobili	→	Q_E

Nella valutazione delle quantità Q_A e Q_B è prevista la perdita dello schermo ma non la dispersione del contenuto dell'imballaggio; il valore minimo fra le due quantità Q_A e Q_B definisce il valore A_1 per il materiale sotto forma speciale.

La valutazione della quantità Q_C si effettua considerando che in un incidente che coinvolga il materiale radioattivo non in forma speciale (e quindi disperdibile) venga inalata una frazione pari ad un milionesimo della quantità di radioattività contenuta nell'imballaggio.

L'intervallo di distribuzione delle frazioni di rilascio da un contenitore di tipo A danneggiato, adottato attualmente nel *Q-system*, è posto pari a 10^{-3} - 10^{-2} . In questa scelta c'è la tacita assunzione che la probabilità di un grosso rilascio di materiale da tale tipo di contenitori sia molto piccola e questo approccio è supportato dal comportamento dei contenitori di tipo A sottoposti ad incidenti severi. Si assume inoltre che la massa rilasciata sia *totalmente respirabile*. L'intervallo di distribuzione del coefficiente di incorporazione è stato posto pari a 10^{-4} - 10^{-3} ; tale coefficiente è pari al prodotto fra il coefficiente di dispersione atmosferica, che rappresenta la concentrazione integrata in aria prodotta da un rilascio unitario, ed il rateo di respirazione di un adulto, valore quest'ultimo assunto dall'IAEA pari a $3,3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (corrispondente ad $1,2 \text{ m}^3/\text{h}$).

La quantità Q_D viene calcolata come il minore fra i due valori ottenuti, considerando le due vie di esposizione dovute rispettivamente alla contaminazione della pelle ed all'ingestione derivante da detta contaminazione. Per quanto riguarda l'esposizione derivante dalla contaminazione della pelle, si assume che l'1% del contenuto si sparga uniformemente sulla superficie di 1 m^2 e che la contaminazione della pelle sia pari al 10% di questo livello, per un periodo di 5 ore. Per l'esposizione derivante dall'ingestione, si assume che una persona possa ingerire tutta la contaminazione depositata su una superficie di 10 cm^2 della pelle.

La quantità Q_E viene calcolata solo per quei radionuclidi allo stato gassoso che non sono suscettibili di essere incorporati per inalazione (gas nobili, in particolare argon, krypton, xenon, radon): in tal caso si assume un rilascio istantaneo del 100% di tali gas in un ambiente chiuso di 300 m^3 con una ventilazione pari a 4 ricambi all'ora ed una esposizione di 30 minuti.

Il valore minimo fra il valore A_1 e le tre quantità Q_C , Q_D e Q_E , costituisce il valore A_2 , carico limite di attività per il materiale in forma *non speciale*, quindi disperdibile. Entrambi i valori A_1 ed A_2 sono arrotondati ad una sola cifra significativa.

Per le valutazioni di interesse per il presente rapporto, è necessario stimare le dosi a distanze maggiori rispetto a quelle poste nelle immediate prossimità del contenitore dove il contributo della via di esposizione da inalazione è prevalente. Va rilevato che l'irraggiamento diretto (x-gamma e beta) dal materiale oggetto di trasporto una volta perduto lo schermo è significativo solo nelle

immediate vicinanze del contenitore e in prima approssimazione (ipotizzando la sorgente a simmetria sferica, trascurando l'effetto di superfici riflettenti quali il terreno) si può assumere che esso diminuisca in ragione inversa del quadrato della distanza. Quindi poiché, per la definizione stessa del contenuto, l'intensità di dose efficace deve valere non più di 100 mSv/h ad un metro dal contenitore, essa varrà circa 1 mSv/h già alla distanza di 10 m e si collocherà nell'ordine delle decine di $\mu\text{Sv/h}$ alla distanza di 50 m. Tale via di esposizione riguarderà pertanto principalmente gli operatori incaricati del ripristino dalle condizioni incidentali.

Volendo indagare sulle conseguenze dei rilasci verso la popolazione posta *oltre* le immediate vicinanze del contenitore danneggiato, ad esempio da 50 metri in poi, fra le cinque vie di esposizione sopra indicate particolare importanza riveste il contributo alla dose efficace impegnata per inalazione².

Si è utilizzata, almeno in parte, la medesima metodologia del *Q-system*; in particolare, si è ritenuto opportuno assumere come frazione di rilascio dal contenitore danneggiato *l'estremo superiore* dell'intervallo di valori previsti dalla IAEA; quindi, l'1% del contenuto si assume rilasciato in atmosfera e con dimensioni del particolato tali da rendere tale rilascio totalmente respirabile³. Si ritiene che tale frazione di rilascio possa essere considerata adeguata a rappresentare il comportamento di un contenitore di tipo A in uno scenario incidentale stradale, comprensivo di incendio, pur non rientrando la prova termica fra quelle espressamente stabilite dalla IAEA per tale tipo di contenitore⁴; infatti, ad esempio, tale frazione di rilascio viene utilizzata per rappresentare *conservativamente* il comportamento di fusti per rifiuti radioattivi contenenti materiale combustibile e sottoposti ad incendio.

Conseguenze radiologiche in condizioni incidentali

Dopo queste considerazioni di carattere generale basate sulle ipotesi dell'IAEA sono state svolte delle valutazioni sul comportamento, in condizioni incidentali molto gravi, di colli di tipo A aventi un contenuto di attività pari alla quantità massima trasportabile.

Sono stati considerati nell'analisi i radionuclidi riportati nella tabella A.III.1, elaborata sulla base dei dati di trasporto in ambito nazionale (trasporto stradale ed aereo) e dell'elenco dei radionuclidi aventi rilevanza per le emergenze radiologiche, riportati nel Manuale CEVaD, le quali emergenze comprendono espressamente, fra gli eventi incidentali previsti, quelli relativi al trasporto di materiale radioattivo. È stata assunta, in prima istanza, la frazione di rilascio discussa sopra, pari a 10^{-2} , per tutti i radionuclidi. Successivamente, nell'analisi degli scenari incidentali veri e propri, per i radionuclidi allo stato gassoso (quali gas nobili e trizio) verrà assunto un rilascio totale (frazione di rilascio pari ad 1).

Le classi di età della popolazione considerate per la valutazione delle conseguenze radiologiche sono le tre previste dal manuale CEVaD: adulti (età maggiore di 17 anni), bambini (età compresa fra 7 e 12 anni) e lattanti (età inferiore ad 1 anno).

I coefficienti di dose efficace da inalazione adottati sono quelli previsti dalla tabella IV.3 del D.Lgs. n. 230/95 e riportati nel manuale CEVaD, in relazione al tipo di assorbimento polmonare⁵;

² Verrà dimostrato nel seguito come anche il contributo dovuto alla deposizione dei beta emettitori sulla pelle risulta poco significativo rispetto a quello da inalazione.

³ Diametro aerodinamico equivalente delle particelle inferiore a 10 μm .

⁴ Le prove previste sono: la prova di aspersione d'acqua, la prova di caduta libera, la prova di impilaggio e la prova di penetrazione.

⁵ Tipo F, M o S, rispettivamente per eliminazione rapida, moderata oppure lenta dai polmoni.

per i radionuclidi non presenti nel manuale CEVaD i coefficienti di dose adottati sono quelli più conservativi presenti nel suddetto Decreto, in funzione del tipo di assorbimento polmonare.

Nella tabella A.III.1, oltre ai radionuclidi considerati con il tipo di assorbimento polmonare, sono riportati i coefficienti di dose per le tre classi di età della popolazione, il valore di A_2 e, per il solo gruppo degli adulti, la dose efficace impegnata per inalazione di un milionesimo di A_2 . Esso viene riportato in quanto esprime in modo immediato la pericolosità del radionuclide dal punto di vista dell'inalazione.

Occorre osservare che, fra i radionuclidi riportati nella precedente tabella, quelli che dal punto di vista dell'inalazione risultano essere più pericolosi (ad esempio Pu-238, Am-241, Po-210) non coincidono con quelli che risultano essere più frequentemente trasportati sul territorio nazionale (ad esempio, I-131, I-125, Mo-99, ecc.). Per lo iodio-131, ad esempio, dalla tabella A.III.1 si osserva che la dose efficace derivante da inalazione di $10^{-6} A_2$ risulta pari a 5,18 mSv.

Per ciascuno dei radionuclidi riportati nella tabella A.III.1, sono state riportate in dettaglio le stime delle conseguenze radiologiche che deriverebbero da un rilascio pari all'1% di A_2 ; tale rilascio può essere interpretato, per tutti i radionuclidi tranne che per il trizio (per il quale, come si è detto si assumerà in seguito una frazione di rilascio pari ad 1), come quello da un singolo collo di tipo A riempito al limite con materiale sotto forma "non speciale" (A_2), soggetto ad un incidente di trasporto molto grave. Tale valutazione comprende i contributi di dose efficace da inalazione, irraggiamento da nube ed irraggiamento dal suolo.

Per quanto riguarda la dispersione atmosferica, per tutti i radionuclidi, tranne il trizio, è stato utilizzato il modello di Pasquill-Gifford per un rilascio *a livello del suolo* ed in presenza di deposizione della nube, con velocità di deposizione pari ad 1 cm/s; per il trizio è stato adottato sempre il modello di Pasquill-Gifford ma senza deposizione della nube. E' stata assunta una velocità del vento pari a 2 m/s con classe F di Pasquill per la stabilità atmosferica, riscontrabile tipicamente di notte con copertura nuvolosa del 40%. Con queste condizioni, sia in presenza che in assenza di deposizione, si ottiene alla distanza di 100 m un coefficiente per la concentrazione integrata a livello del suolo pari a $1,8 \cdot 10^{-2} \text{ s/m}^3$, valore circa uguale (in realtà lievemente maggiore) all'estremo superiore dell'intervallo preso in considerazione da IAEA. Il coefficiente per la concentrazione integrata al suolo fornito dal modello di Pasquill-Gifford scende, in presenza di deposizione, di un ordine di grandezza a 300 m e di due ordini di grandezza ad 1 km, rispetto allo stesso calcolato a 100 m. In assenza di deposizione tale coefficiente risulta più elevato alle maggiori distanze.

Risultati

I risultati delle valutazioni condotte sono riportati nelle tabelle A.III.2 – A.III.15.

Nella tabella A.III.2 sono riportati, per ciascuno dei radionuclidi considerati e per le distanze sotto vento da 50 m fino a 2000 m, i valori delle concentrazioni integrate in aria ($\text{Bq}\cdot\text{s}/\text{m}^3$), a livello del suolo, delle attività relative ad un *rilascio pari all'1% di un A_2* ; in testa alla tabella sono anche riportati i valori dei coefficienti di dispersione (s/m^3) previsti dal modello di Pasquill-Gifford alle diverse distanze, rispettivamente in presenza (sfondo giallo) ed in assenza (sfondo rosa) di deposizione al suolo⁶.

⁶ Valori tratti dai grafici delle figg. 13 e 16 del documento CNEN - Cuoco, Galvagni, Pucciarelli, Scafè - "Determinazione delle concentrazioni di una nube radioattiva e delle contaminazioni del suolo secondo il metodo di Pasquill-Gifford".

Nella tabella A.III.3 sono riportati i valori delle deposizioni al suolo (Bq/m^2) alle diverse distanze sotto vento, relative al medesimo rilascio, e sono desumibili (tranne ovviamente che per il trizio, per il quale sono poste a zero) dai corrispondenti valori delle concentrazioni integrate semplicemente moltiplicando per la velocità di deposizione al suolo della nube (10^{-2} m/s).

Inalazione

Nelle tabelle da A.III.4 a A.III.6 vengono riportate, per le tre classi di età della popolazione, le dosi efficaci impegnate per inalazione alle varie distanze sotto vento, ottenute moltiplicando i valori delle concentrazioni integrate per il rateo di respirazione umana e per i coefficienti di dose, riportati in tab. A.III.1. In ciascuna tabella è evidenziato il radioisotopo più critico (sfondo rosso) il quale può essere il Pu-238 (per la classe adulti) oppure il Po-210 (per le classi bambini e lattanti). Il valore massimo di dose efficace impegnata alla distanza di 100 m si registra per la classe degli adulti ed è pari a 5,09 mSv.

Nelle valutazioni sono stati assunti, per le tre classi di età prese in considerazione, i valori del volume di aria inalato al secondo riportati nel manuale CEVaD, tratti da ICRP del 1994: $3,31 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ per i lattanti; $1,77 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ per i bambini; $2,57 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ per gli adulti.

Irraggiamento diretto

Sempre per un rilascio pari all'1% di A_2 è stato poi calcolato, per lo stesso insieme di radionuclidi ed alle medesime distanze, il contributo di dose efficace relativo all'irraggiamento diretto dalla nube e quello di irraggiamento derivante dalla deposizione al suolo. I coefficienti di intensità di dose efficace da irradiazione diretta da nube per concentrazione unitaria e quelli di intensità di dose efficace da irradiazione diretta dovuta a deposizione unitaria al suolo sono quelli del Manuale CEVaD. Quelli non presenti in detto manuale sono stati tratti dal rapporto Eckerman K. F. & Leggett R. W., indicato tra i riferimenti del manuale stesso. Tali coefficienti sono riportati nella tabella A.III.7.

Applicando tali coefficienti ai valori della concentrazione *integrata* in aria ed ai valori della contaminazione *integrata* del suolo - assumendo per quest'ultima un tempo di stazionamento posto cautelativamente pari ad *un giorno* - si sono ottenuti i rispettivi valori di dose efficace da irradiazione diretta dalla nube e dal suolo.

Nella tabella A.III.8 si riportano i valori totali della dose efficace da irraggiamento esterno (nube + suolo) alle diverse distanze.

Il contributo dal suolo risulta normalmente preponderante (fino a due ordini di grandezza) rispetto al contributo di dose dalla nube. Rispetto alla dose da inalazione, il contributo dalla nube risulta quasi sempre significativamente inferiore (tranne alcuni casi), mentre il contributo dal suolo risulta in diversi casi superiore, mantenendosi normalmente nello stesso ordine di grandezza ma aumentando in qualche caso fino ad un ordine di grandezza.

I valori massimi per la dose efficace totale da irraggiamento si conseguono con il Ba-133, il quale per un rilascio pari all'1% di A_2 fornisce alla distanza di 100 m un valore di dose efficace pari a 0,183 mSv.

Il contributo da irraggiamento è pressoché nullo per il Pu-238 e per il Po-210, mentre vale circa il 10% della dose efficace da inalazione per lo I-131 per la classe bambini.

Sono state altresì effettuate delle valutazioni di dose derivante dalla deposizione sulla pelle dei beta emettitori, la quarta via di esposizione considerata nel Q-System. La metodologia usata è la medesima del Q-System ma, così come per l'inalazione, si è indagato non sulle immediate vicinanze

del contenitore (per le quali, si rammenta, è stato imposto alla distanza di 1 m un limite di dose equivalente alla pelle pari a 500 mSv) ma sulle distanze da 50 m in poi. E' stato assunto un livello di contaminazione della pelle direttamente proporzionale a quello della contaminazione del suolo e pari al 10% di quel valore. Il periodo di tempo di esposizione è stato innalzato a 24 ore rispetto alle 5 ore previste nel *Q-System*. I coefficienti per l'intensità di dose equivalente alla pelle per deposizione unitaria dovuta a contaminazione da beta emettitori sono i medesimi utilizzati nel *Q-System*. Da valutazioni effettuate risulta che il contributo derivante da tale via di esposizione è trascurabile.

Risultati di dose complessivi

Nelle tabelle da A.III.9 a A.III.11 sono riportate, per le tre classi di età della popolazione, le dosi efficaci totali relative alla fase incidentale acuta. La somma del contributo da irraggiamento non altera i valori massimi di dose efficace, relativi come si è visto all'inalazione degli alfa emettitori, ma può aumentare sensibilmente i valori di dose relativi agli altri tipi di radionuclidi. Il radioisotopo più critico continua ad essere il Pu-238 per gli adulti ed il Po-210 per i bambini ed i lattanti. Alla distanza di 100 m il massimo valore di dose efficace impegnata, considerando tutti i radioisotopi oggetto di indagine e le tre classi di età della popolazione considerate, continua a valere 5,09 mSv (Pu-238, classe degli adulti).

Contaminazione di alcuni alimenti

Per alcuni dei radionuclidi, a partire dai valori di contaminazione del suolo alle diverse distanze sottovento, sono state effettuate delle stime circa la contaminazione conseguente alla deposizione al suolo per alcuni fra i principali alimenti che possono considerarsi generalmente prodotti nelle vicinanze dell'ipotetico incidente. Gli alimenti considerati sono il latte ed i vegetali a foglia, caratterizzabili oltre che per la loro importanza anche per la rapidità con cui la contaminazione è trasferita negli alimenti (risposta pressoché immediata per i vegetali a foglia e con tempi di alcuni giorni, fino al massimo ad una settimana, per il raggiungimento del valore di picco nel latte). I coefficienti utilizzati per ottenere il valore della contaminazione di picco negli alimenti (Bq/kg) a partire dal valore della contaminazione del suolo (Bq/m²) sono tratti dall' *Emergency Data Handbook* del NRPB (National Radiological Protection Board) inglese. Molti dei radionuclidi che risultano più frequentemente trasportati sul territorio nazionale non sono riportati nella lista della NRPB a causa della brevità del loro tempo di vita.

Nelle tabelle A.III.12 e A.III.13 sono riportati i coefficienti NRPB, il tempo necessario a raggiungere il picco di contaminazione (per il solo latte) ed i livelli massimi ammissibili per i due alimenti considerati, stabiliti nei Regolamenti EURATOM, nell'ambito degli "altri prodotti" per quanto riguarda i vegetali a foglia e dei "prodotti lattiero caseari" e "alimenti liquidi" per quanto riguarda il latte; per quest'ultimo si tenga tuttavia presente che lo stesso livello massimo ammissibile andrebbe drasticamente ridotto se il latte fosse destinato ad alimento per lattanti.

Nelle tabelle A.III.14 e A.III.15 sono riportate, per i radionuclidi considerati, le contaminazioni del latte e dei vegetali a foglia, registrate alle diverse distanze sottovento rispetto allo scenario incidentale e relative ad un rilascio pari all'1% di A₂. E' stato evidenziato (sfondo verde) il valore di contaminazione alla distanza in cui esso scende al di sotto del livello massimo ammissibile (per il latte ci si è riferiti al limite per i lattanti). Si è anche evidenziato (sfondo rosso) il caso in cui la contaminazione resti, seppur di poco, superiore a tale limite alla distanza massima (2000 m) riportata in tabella: questo si verifica per lo iodio 131, per quanto riguarda il latte, e per lo stronzio 89 ed il niobio 95 per i vegetali a foglia. Si sottolinea come la contaminazione del suolo che origina questi valori riguardi un settore ristretto del terreno, quello posto sottovento rispetto al rilascio di radioattività, nell'ipotesi che il vento stesso si mantenga costante in direzione per almeno tutta la durata del rilascio relativo alla fase incidentale acuta.

A.III.1.2 Colli di tipo B

I quantitativi di attività trasportabili in colli di tipo B sono estremamente variabili. A differenza di quanto avviene per i contenitori di tipo A, i limiti di attività relativi a tale tipo di colli sono determinati dal certificato di approvazione.

I dati sui trasporti nazionali indicano che in Italia i trasporti che si svolgono utilizzando tale tipologia di contenitori coinvolgono principalmente combustibile irraggiato, materiale fissile e sorgenti sigillate (materiale in *forma speciale*) ad alta attività. Come detto, ai sensi del DPCM del 10 febbraio 2006 il trasporto di combustibile irraggiato non rientra negli scopi del presente rapporto, essendo oggetto di trattazione specifica, caso per caso.

Nel caso in cui i colli di tipo B siano adibiti al trasporto di materiali in forma *speciale* (ad esempio sorgenti sigillate ad alta attività), circostanza questa che risulta essere di gran lunga la più frequente, si ritiene di particolare importanza il fatto che il materiale contenuto sia già dotato di una protezione in grado di resistere, anche senza contenitore, a sollecitazioni particolarmente rilevanti; l'inserimento di detti materiali in colli di tipo B è essenzialmente richiesto per esigenze di schermo dalle radiazioni. Infatti, il materiale radioattivo sotto forma speciale deve superare prove meccaniche (impatto, percussione, flessione) senza rompersi o sbriciolarsi e prove termiche (800 °C per 10 minuti) senza fondersi o causare dispersione del materiale, ed infine di lisciviabilità dove il campione viene immerso in acqua portata alla temperatura di 50°C e mantenuta a tale temperatura per un periodo di 4 ore senza che nell'acqua stessa avvenga un rilascio di attività superiore 2 kBq.

Anche assumendo un rateo medio di rilascio di tale entità (vale a dire 0,5 kBq/h) protratto per il periodo di una settimana, l'attività totale rilasciata dal materiale sotto forma speciale verso la cavità del contenitore di tipo B non supera 84 kBq, valore quest'ultimo inferiore per diversi ordini di grandezza⁷ rispetto al rilascio di 10^{-2} A₂ preso in considerazione nel paragrafo relativo al collo di tipo A.

Si può pertanto affermare che le conseguenze previste per il danneggiamento di un singolo collo di tipo A involuppano ampiamente quelle relative al danneggiamento di un collo di tipo B contenente materiale sotto *forma speciale*.

Per i casi in cui sia previsto il trasporto di materiali in forma *non speciale*, le esperienze di analisi di sicurezza relative al trasporto con contenitori di questo tipo, in particolare di tipo fissile, hanno evidenziato la presenza di rilevanti margini rispetto al rilascio limite (1 A₂) imposto per le condizioni incidentali dalla normativa IAEA; infatti, il limite sopra citato (10^{-6} A₂/h) previsto per le condizioni *normali* di trasporto è risultato normalmente più stringente sul dimensionamento dell'attività specifica ammissibile, nel caso finora riscontrato di funzione di contenimento non significativamente degradata anche nelle condizioni incidentali. Il ragionamento posto alla base della suddetta considerazione è il seguente. In generale l'attività rilasciata all'esterno, espressa in A₂, è pari al prodotto del tasso di fuga dal contenitore (m³/s) per la concentrazione del particolato (g/m³) nella cavità del contenitore, per l'attività specifica del particolato (A₂/g) ed infine per il tempo in cui si osserva il rilascio (s), vale a dire un'ora per le condizioni normali ed una settimana per quelle incidentali (il tasso di fuga si assume costante in tale periodo). Nei casi esaminati, in condizioni normali la concentrazione del particolato è posta generalmente pari a 10⁻³ g/m³, mentre in condizioni incidentali essa è posta pari a 9 g/m³ nella prima mezzora successiva all'incidente e

⁷ Ad esempio, per il Pu-238 il rilascio di 10^{-2} A₂ equivale a 10⁷ Bq, superiore a 84 kBq per oltre due ordini di grandezza. Per tutti gli altri radionuclidi previsti dal manuale CEVaD il rapporto risulta maggiore o uguale a quello del Pu-238.

pari a $0,1 \text{ g/m}^3$ per il tempo restante al compimento di una settimana, il che fornisce una concentrazione media nelle condizioni incidentali pari a circa $0,127 \text{ g/m}^3$. Ricavando il valore dell'attività specifica del materiale necessaria a soddisfare le prescrizioni IAEA sui rilasci nelle due condizioni, normali ed incidentali, rispettivamente $10^{-6} \text{ A}_2/\text{h}$ ed $1 \text{ A}_2/\text{settimana}$, ed effettuando il rapporto fra tali attività specifiche, si ottiene

$$\frac{\text{att.spec.incidentale}}{\text{att.spec.normale}} = \frac{1}{\text{leak.incidentale} \cdot 0,127 \cdot 604800} \cdot \frac{\text{leak.normale} \cdot 10^{-3} \cdot 3600}{10^{-6}} \cong 47 \frac{\text{leak.normale}}{\text{leak.incidentale}}$$

Nell'ipotesi di una funzione di contenimento *non degradata* a seguito delle prove previste per il contenitore di tipo B per le condizioni incidentali (in particolare la prova di caduta da 9 m e la prova termica con esposizione per 30 minuti ad un fuoco da idrocarburi alla temperatura di 800°C), ipotesi questa che risulta normalmente confermata nei rapporti di sicurezza dei contenitori adibiti al trasporto di attività rilevanti, il tasso di fuga volumetrico in condizioni incidentali è solo di poco superiore a quello in condizioni normali, per cui l'attività specifica del materiale necessaria a soddisfare le condizioni incidentali risulta di gran lunga superiore rispetto a quella necessaria al rispetto delle condizioni normali.

In detti casi pertanto, nei quali si è dimostrata l'assenza di una degradazione significativa della funzione di contenimento, le conseguenze attese per le condizioni incidentali risultano piuttosto contenute in quanto solo una frazione di A_2 risulterebbe rilasciata dal contenitore nella settimana successiva all'evento incidentale. In particolare, assumendo il tasso di fuga (volumetrico) nelle condizioni incidentali pari a circa il doppio rispetto a quello nelle condizioni normali, si otterrebbe un rapporto pari a circa 20 fra le attività specifiche corrispondenti al raggiungimento dei rispettivi limiti; vale a dire, il rilascio atteso in una settimana dovrebbe valere circa $1/20$ rispetto al limite per le condizioni incidentali, quindi il 5% di A_2 . Di questo rilascio inoltre, sulla base dell'andamento temporale della concentrazione del particolato, illustrato sopra, circa il 20%, vale a dire un 1% di A_2 , sarebbe da accreditare al periodo di 30 minuti in cui la concentrazione del particolato si mantiene più elevata, mentre il rimanente rilascio, vale a dire il 4% di A_2 avverrebbe nel resto della settimana. Si può quindi concludere che, in assenza di una degradazione significativa della funzione di contenimento, *degradazione normalmente esclusa a seguito delle prove per le condizioni incidentali*, il rilascio in condizioni incidentali atteso da questo tipo di contenitore risulta essere indipendente dall'ammontare dell'attività trasportata e, nella fase incidentale iniziale, dello stesso ordine di grandezza di quello massimo previsto per il contenitore di tipo A.

Per quanto riguarda l'irraggiamento diretto da questo tipo di contenitore dopo l'evento incidentale, la prescrizione IAEA richiede che, a seguito delle prove previste per le condizioni incidentali, il collo, con il massimo contenuto radioattivo di progetto, deve mantenere uno schermaggio tale da assicurare che l'intensità di dose ad 1 m dalla superficie del collo non superi 10 mSv/h . Tale livello è pari al 10 % di quanto richiesto per il collo di tipo A nel caso di perdita completa dello schermo. Quindi, anche assumendo un'intensità di dose 10 volte superiore rispetto a quella prescritta, per quanto riguarda l'irraggiamento diretto dal contenitore, resterebbero comunque valide le considerazioni già svolte per il collo di tipo A.

A.III.1.3 Colli di tipo C

I colli di tipo C, come già evidenziato, riguardano spedizioni estremamente particolari, per via aerea, attualmente non utilizzati in Italia.

A.III.1.4 Colli di tipo industriale

Per i tre tipi di colli industriali non esiste nella normativa IAEA, a differenza di quanto invece avviene per i colli di tipo A, una limitazione esplicita sull'attività massima trasportabile o sulla quantità massima di materiale LSA (Low Specific Activity) o SCO (Surface Contaminated Objects). Una prescrizione esiste invece sull'intensità di dose registrabile alla distanza di 3 m dal materiale *non schermato*, pari a 10 mSv/h, relativa ad un singolo collo o oggetto o collezione di oggetti; tale intensità di dose è di livello analogo a quella vista sopra per un singolo contenitore di tipo A che subisca la perdita dello schermo, pari a 100 mSv/h alla distanza di 1 m, per cui l'attività in termini di Becquerel dovrebbe risultare dello stesso ordine di grandezza degli A_1 , quantità che può risultare anche di diversi ordini di grandezza più elevata rispetto agli A_2 . Un'altra limitazione indiretta sulla quantità di materiale che può essere trasportata nei colli di tipo industriale deriva dai limiti espressi in termini di attività specifica, di massa oppure superficiale, a seconda che si tratti rispettivamente di materiale LSA oppure SCO. I limiti sono tali per cui il materiale radioattivo trasportato deve essere ad attività specifica relativamente *bassa* oppure distribuito sulla superficie di altro materiale; inoltre, più elevati sono i limiti applicati, maggiore certezza viene richiesta dalla normativa IAEA circa l'uniforme distribuzione del materiale radioattivo e le migliori caratteristiche di resistenza e tenuta da parte dei contenitori, con i tipi IP-1, IP-2 ed IP-3 in ordine crescente di prestazioni.

È utile ricordare che le categorie di materiali LSA e SCO sono state definite con riferimento a quantità di attività specifica o di contaminazione superficiale sufficientemente basse da poter considerare *improbabile* che, in caso di dispersione, possa essere introdotta nel corpo una massa di detto materiale sufficientemente elevata da dar luogo a problemi radiologici significativi (Advisory Material for the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material, Par. 226.1).

Per offrire un quadro numerico dei quantitativi di attività in gioco, si riportano qui di seguito, a titolo esemplificativo, i limiti applicabili ai materiali solidi trasportabili in colli di tipo industriale:

- LSA I: 30 volte i limiti di esenzione in termini di concentrazione (ad esempio, 300 Bq/g per Cs-137);
- LSA II: $10^{-4} A_2/g$ (ad esempio, 6×10^7 Bq/g per Cs-137);
- LSA III: $2 \times 10^{-3} A_2/g$ (ad esempio, 1,2 GBq/g per Cs-137);
- SCO I: contaminazione rimuovibile inferiore a 4 Bq/cm² per gli emettitori beta gamma ed alfa a bassa radiotossicità;
- SCO II: 400 Bq/cm² per i radionuclidi di cui al punto precedente.

Quindi, considerando ad esempio materiale di tipo LSA-II, sarebbe necessario inalare 10 mg di particolato per incorporare attività pari a $10^{-6} A_2$ ed ottenere di conseguenza una dose efficace pari a 50 mSv, così come stabilito nel *Q-system*; tale condizione, vale a dire la permanenza in un'atmosfera così polverosa e per un tempo così lungo tali da produrre l'inalazione di 10 mg di particolato, è ritenuta dalla IAEA estremamente improbabile.

Viceversa, per il materiale LSA-III con attività specifica al limite superiore, pari a $2 \cdot 10^{-3} A_2/g$, sarebbe sufficiente l'inalazione di 0,5 mg di particolato per incorporare $10^{-6} A_2$ e quindi ottenere la dose di 50 mSv.

Si è effettuata una valutazione involuppo per stimare le conseguenze associate ad un evento che coinvolga rifiuti condizionati. Se si considera un contenitore contenente 500 kg di rifiuti condizionati, per un'attività totale pari a $1000 A_2$, cadendo da un'altezza di 9 m, ed assumendo un densità pari a 2 g/cm^3 , trascurando la protezione offerta dal contenitore, produrrebbe un rilascio di particolato in sospensione in aria e respirabile per una frazione ⁸ pari a $[ARF] \cdot [RF] = 5,3 \cdot 10^{-5}$, corrispondente a $26,5 \text{ g}$ ed a $5,3 \cdot 10^{-2} A_2$, che corrisponde ad un rilascio superiore per un fattore 5,3 rispetto a quello assunto per il singolo contenitore di tipo A. Quindi, alla distanza di 100 m risulterebbe attesa un'incorporazione di attività da parte di un adulto pari a $5,3 \cdot 10^{-2} A_2 \cdot 1,8 \cdot 10^{-2} \text{ s/m}^3 \cdot 2,57 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} = 2,6 \cdot 10^{-7} A_2$ ($0,12 \text{ mg}$ di particolato incorporato) corrispondente ad una dose efficace di circa 13 mSv .

Le tipologie di materiali a maggiore attività, trasportate in colli di tipo industriale, sono essenzialmente i rifiuti radioattivi provenienti dai siti nucleari in fase di smantellamento. Nel limite di attività specifica previsto per LSA-III, pari a $2 \cdot 10^{-3} A_2/\text{g}$, rientrano i rifiuti di categoria II (tabelle 1 e 2 della GT 26) ed anche i rifiuti cementati di categoria III ad attività specifica più elevata tra quelli che si può prevedere debbano essere movimentati nel prossimo futuro; ad esempio, per i prodotti del sistema di cementazione dei rifiuti liquidi ad alta attività di EUREX sono attesi valori di attività specifica al di sotto di $10^{-3} A_2/\text{g}$, attestabili quindi su un valore pari a circa la metà del limite previsto per la LSA-III. Quindi, i risultati dei calcoli effettuati sopra per il materiale LSA-III con concentrazione al limite andrebbero comunque ridotti almeno della metà alla luce di quanto di più pessimistico è lecito attenderci nel futuro più o meno prossimo della realtà nazionale. Per cui, si può affermare che un *upper bound* per i possibili rilasci da un contenitore di tipo industriale si attesta sull'ordine di *qualche percento di A_2* , non considerando affatto la protezione offerta dal contenitore industriale. A questo proposito è anche utile ricordare che i requisiti dei colli di tipo industriale sono riferiti essenzialmente alla necessità di contenere e/o schermare il materiale in condizioni normali di trasporto; i colli IP-3 offrono le medesime protezioni garantite per i colli di tipo A (Advisory Material, Par. 621.1).

Inoltre, esperimenti condotti di recente su colli industriali, contenenti sia materiale volatile sia materiale compatto⁹, mostrano che le frazioni di materiale rilasciato in dimensioni respirabili sono molto basse. In particolare, nello studio citato, vengono riportati dati sperimentali relativi alla caduta di colli industriali contenenti 250 kg di polveri e 2000 kg di materiale compatto ma fragile. Le quantità integrate di materiali che può ispirare una persona che si trovi a *qualche decina di metri* dalla scena, sottovento, sono risultate dell'ordine, rispettivamente, dei $30 \mu\text{g}$ e dei $6 \mu\text{g}$, quindi vari ordini di grandezza al di sotto dei valori di 10 mg e $0,5 \text{ mg}$ dai quali ci si possono attendere dosi dell'ordine dei 50 mSv rispettivamente per materiali LSA II e LSA III.

Si può pertanto concludere che, data la forma non facilmente disperdibile dei materiali a più alta attività trasportati, considerato il limite intrinseco riguardante l'attività specifica, anche le conseguenze degli scenari di riferimento relativi a questa tipologia di collo possano essere considerate involuppate da quelle indicate per le spedizioni di colli di tipo A. Potrebbe verificarsi, nel caso di spedizioni di grossi quantitativi di attività e di incidenti di particolare severità, un problema di contaminazione al suolo particolarmente rilevante, soprattutto nelle immediate vicinanze della scena dell'incidente.

⁸ NUREG/CR-6410, 3.3.4.8 Crush Impact - Aggregate.

⁹ Proceedings on the 15th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Material - PATRAM 2007 - Testing of packages with LSA materials in very severe mechanical impact conditions with measurement of airborne release - 2007

A.III.1.5 Colli fissili

Le considerazioni relative a tale tipologia di colli si basano sulle esperienze relative al trasporto di materie fissili dai siti nucleari nazionali. Per quanto attiene alla sicurezza nucleare i provvedimenti di prevenzione sono soprattutto indirizzati ad evitare, con ampi margini, il raggiungimento di possibili condizioni di criticità. Si deve far rilevare che i margini adottati a livello di progetto dei contenitori sono mantenuti particolarmente elevati e che esistono comunque limiti fisici sulle quantità di materiali che sono necessarie per dar luogo a reazioni a catena. La natura del materiale, essenzialmente costituito da radionuclidi emettitori alfa, è tale per cui il rischio radiologico per la popolazione può essenzialmente derivare dalla eventuale inalazione del materiale stesso.

Valutazioni condotte per specifiche spedizioni, caratterizzate da quantitativi anche rilevanti di materiale trasportato in colli di tipo B fissile, hanno mostrato che, a seguito di incidenti molto gravi, si hanno valori di dose per la popolazione analoghe a quelle valutate per i contenitori di tipo A nel caso dei radionuclidi alfa emettitori. Ai fini del presente rapporto i risultati ottenuti per i colli di tipo A possono pertanto ritenersi rappresentativi anche del trasporto di materie fissili.

A.III.2 Stime delle conseguenze radiologiche per lo Scenario 1

Il DPCM 10 febbraio 2006 definisce la spedizione *non soggetta a* comunicazione preventiva sulla base del tipo di contenitore (A oppure B) e della forma del contenuto (forma speciale oppure forma non speciale). Si rendono possibili quindi quattro tipologie di spedizioni esenti, omogenee per tipo di contenitore e per contenuto, per ognuna delle quali il DPCM stabilisce un limite massimo di radioattività, riferito alla spedizione nel suo complesso:

1. contenitori di tipo A, materiale in forma speciale: limite = $3 A_1$;
2. contenitori di tipo A, materiale in forma non speciale: limite = $3 A_2$;
3. contenitori di tipo B, materiale in forma speciale: limite = $30 A_1$;
4. contenitori di tipo B, materiale in forma non speciale: limite = $30 A_2$.

Fra le quattro tipologie di spedizioni non soggette a comunicazione preventiva previste dal DPCM, il tipo che potenzialmente potrebbe dar luogo ai rilasci più consistenti in caso di incidente molto grave è sicuramente, per quanto detto sui colli di tipo B e, in generale, sul materiale sotto forma speciale, quello composto da colli di tipo A contenenti materiale in forma non speciale, per un carico complessivo della spedizione pari al valore limite previsto dallo stesso DPCM, pari a $3 A_2$. L'analoga spedizione con materiale nella stessa forma ma in contenitori di tipo B, con carico limite 10 volte superiore e pari a $30 A_2$, darebbe luogo ad un rilascio equivalente anche assumendo una frazione di rilascio inferiore di un solo ordine di grandezza rispetto a quella assunta per i contenitori di tipo A, pari quindi a 10^{-3} : considerando le caratteristiche dei contenitori di tipo B tale assunzione risulterebbe molto cautelativa.

Nella definizione delle spedizioni non soggette a comunicazione preventiva fornita dal DPCM non sono previsti i colli esenti ed i colli di tipo industriale. I colli esenti registrano un utilizzo statisticamente molto significativo sul territorio nazionale ma possono contenere solo piccole quantità di radioattività, per cui anche applicando una frazione di rilascio superiore a quella adottata per il tipo A (ad esempio, il 10%) si otterrebbe, a meno di non considerare una spedizione composta da una moltitudine di colli di quel tipo (statisticamente mai rilevata), un rilascio complessivo sicuramente invilupato dalla spedizione con i colli di tipo A identificata sopra.

Per quanto riguarda i colli di tipo industriale, essi, come si è visto, possono teoricamente contenere anche quantità cospicue di radioattività (anche molto superiori ad $1 A_2$) ma, anche in questo caso, a causa delle caratteristiche del materiale trasportato, l'eventuale massimo rilascio può essere comunque assimilato a quello calcolato per il collo di tipo A. Inoltre le statistiche nazionali registrano un utilizzo piuttosto scarso di questo tipo di collo (lo 0,1% del totale dei colli trasportati nel 2007, contro il 56,4% dei colli esenti ed il 40,7% dei colli di tipo A); sempre le statistiche del 2007, ma riferite alle spedizioni stradali (comprendenti colli esenti, colli industriali e colli di tipo A), indicano che solo lo 0,03% delle spedizioni stesse supera il valore limite di $3 A_2$, mentre il 78,49% si colloca al di sotto di $1/10$ di A_2 . Si ritiene pertanto che una spedizione di colli industriali possa essere trattata alla stregua delle altre spedizioni non soggette a comunicazione preventiva.

Si assume pertanto come spedizione "inviluppo" (di tutte le possibili spedizioni non soggette a comunicazione preventiva) la spedizione di colli di tipo A con materiale sotto forma non speciale e con il carico limite di $3 A_2$. Sul carico complessivo di tale tipo di spedizione, indipendentemente dal numero di colli da cui essa è composta, verrà conservativamente applicata la frazione massima di rilascio prevista per il singolo contenitore di tipo A, vale a dire 10^{-2} per tutti i radionuclidi in forma non gassosa. Questo scenario verrà indicato come "Scenario 1".

Per quanto riguarda la composizione radioisotopica di tale spedizione, si è stabilito di considerare i 20 radionuclidi che risultano più rappresentativi nelle statistiche relative al numero di colli trasportati nel triennio 2005-2007: sono stati in tal modo considerati oltre il 98% dei colli trasportati nel triennio. Le percentuali relative al numero di colli trasportati sono state adottate come percentuali relative alle quantità di A_2 presenti nella spedizione, in modo tale che la somma dia un totale di $3 A_2$. Tale assunzione, ancorché arbitraria, è stata effettuata nell'ottica della ricerca di uno scenario "inviluppo" che comunque non si discostasse troppo dalla realtà; tale scelta risulta poi più conservativa rispetto a quella di considerare, in modo più omogeneo, le percentuali relative alle attività effettivamente trasportate, in quanto quest'ultima scelta avrebbe visto una prevalenza di radioisotopi con caratteristiche di pericolosità decisamente inferiori. Nella tabella A.III.16 è riportato l'inventario di tale spedizione, con le principali caratteristiche dei radionuclidi presenti.

Le assunzioni che sono state utilizzate per caratterizzare lo Scenario 1, in particolare quelle relative alla dispersione atmosferica (comprendendo anche, per il trizio, il modello di Pasquill in assenza di deposizione al suolo), sono le medesime già descritte nel paragrafo relativo al collo di tipo A.

La frazione di rilascio applicata è pari ad 1 per il trizio e a 10^{-2} per tutti gli altri radionuclidi; poiché il trizio è presente nella spedizione con una percentuale dell'1%, il rilascio complessivo sarà pari a circa $6E-2$ di A_2 , di cui circa la metà è attribuibile al solo trizio.

Nelle tabelle A.III.17 e A.III.18 vengono riportati, alle diverse distanze sotto vento a partire dai 50 m, i valori della concentrazione integrata in aria (fino a 4 km) e della deposizione al suolo (fino a 6 km), per ognuno dei radionuclidi della miscela e per la miscela nel suo complesso.

Nelle tabelle da A.III.19 a A.III.21 sono riportati per le tre classi di età della popolazione previste dal manuale CEVaD i valori di dose efficace totale, derivante dalle vie di esposizione per inalazione e per irraggiamento (da nube e da suolo). Si tenga comunque presente che il contributo da irraggiamento è complessivamente di oltre un ordine di grandezza inferiore rispetto a quello da inalazione.

I valori del rateo di respirazione applicati sono quelli previsti dal manuale CEVaD e riportati precedentemente, mentre i coefficienti di dose efficace, da inalazione e da irraggiamento, sono stati riportati nella tab. A.III.16.

I dati mostrano che, fra le tre classi di età della popolazione previste, la più esposta è quella dei bambini, per la quale, alla distanza di 100 m, si registra una dose efficace pari a 2,95 mSv, dose che si porta ad 1,31 mSv alla distanza di 150 m. Circa la metà del valore di dose efficace è attribuibile al solo trizio. Il contributo da irraggiamento varia per le tre classi di età fra il 4% e l'8% della dose complessiva.

Per quanto riguarda la contaminazione degli alimenti, è stata effettuata, con l'ausilio dei coefficienti NRPB, una stima di massima considerando gli alimenti principali (vegetali a foglia e latte) eventualmente prodotti lungo la direttrice sottovento rispetto al luogo dell'incidente. Per quanto riguarda i vegetali a foglia, la stima è stata effettuata per tutti i radionuclidi della spedizione, applicando a tutti il coefficiente 0,3 [(Bq/kg)/(Bq/m²)]. Per quanto riguarda il latte, viceversa, il calcolo è stato effettuato solo per un ristretto gruppo di radionuclidi, gli iodii¹⁰ e l'americio; gli isotopi dello iodio sono comunque particolarmente significativi per l'abbondanza relativa in questa miscela (oltre il 60% in termini di A₂).

I risultati, riportati nelle tabelle A.III.22 A.III.23, indicano che la contaminazione dei vegetali a foglia scenderebbe al di sotto del livello massimo ammissibile, per ciascun radionuclide preso singolarmente, alla distanza di 3 km; raggruppando i radionuclidi per gruppi omogenei, così come definiti dai regolamenti Euratom ed estendendo il gruppo riservato agli "altri radionuclidi" anche a quelli con tempo di dimezzamento inferiore a 10 giorni, il livello di contaminazione complessivo scenderebbe al di sotto del livello massimo ammissibile alla distanza di 4 km. Un discorso analogo vale per la contaminazione del latte da parte degli isotopi dello iodio: alla distanza di 3 km i singoli isotopi scendono al di sotto del livello di contaminazione massimo ammissibile previsto per gli alimenti liquidi o i prodotti lattiero caseari (500 Bq/kg) mentre, sommando le contaminazioni attese per i singoli isotopi dello iodio, si scenderebbe al di sotto di tale limite alla distanza di 4 km. Se invece il latte venisse considerato come alimento per lattanti, applicando cioè un limite massimo ammissibile pari a 150 Bq/kg, la contaminazione complessiva da parte degli isotopi dello iodio scenderebbe al di sotto di tale limite alla distanza di 6 km.

A.III.3 Spedizioni di fissile con conseguenze radiologiche rapportabili allo Scenario 1.

Le spedizioni di materiale fissile, secondo quanto stabilito dal DPCM, sono comunque soggette alla comunicazione preventiva, ferme restando le soglie generali di applicazione della normativa. Ai fini del presente rapporto sono qui determinate quelle quantità di materie fissili le quali, sottoposte ad uno scenario di incidente molto grave, comporterebbero delle conseguenze analoghe a quelle prodotte dallo Scenario 1. Quest'ultima condizione viene resa operativa imponendo che la dose efficace *massima* alla distanza di 100 m per le tre classi di età della popolazione alla fine della fase incidentale acuta risulti pari a 2 mSv, valore che può essere definito come il livello inferiore di dose efficace per considerare l'adozione di un provvedimento di intervento. Si assume conservativamente la stessa frazione di rilascio adottata per il contenitore di tipo A, vale a dire 10⁻². Le valutazioni sono state effettuate con le stesse modalità adottate per lo Scenario 1. I coefficienti di dose da inalazione corrispondono al tipo di assorbimento polmonare *S* per l'uranio ed *F* per il plutonio, scelta che fornisce i valori massimi per gli stessi coefficienti ed è in linea con quanto previsto dal Manuale CEVaD.

I risultati, riportati nella tabella A.III.24, indicano che la classe di età più esposta risulta essere quella degli adulti.

¹⁰ Agli isotopi I-125 e I-123 è stato applicato, in mancanza di dati specifici, il coefficiente NRPB previsto per lo I-131.

Le quantità di attività delle cinque materie fissili previste dal DPCM che potrebbero essere trasportati singolarmente senza dare luogo, in caso di incidente molto grave, a conseguenze radiologiche eccedenti quelle ottenute per lo Scenario 1, sono le seguenti:

- U-233 : 4,50 GBq;
- U-235 : 5,09 GBq;
- Pu-238 : 0,393 GBq;
- Pu-239 : 0,360 GBq;
- Pu-241 : 18,8 GBq.

Il Pu-239 risulta essere la materia che a parità di attività rilasciata produce le conseguenze maggiori e per la quale quindi la quantità di attività trasportabile per rientrare nello Scenario 1 risulta essere più limitata, pari a 0,36 GBq.

Volendo definire una miscela di questi cinque fissili tale da ottenere, in caso di incidente, le medesime conseguenze radiologiche, dovrebbe essere rispettata la seguente condizione (riportando semplicemente il simbolo del radioisotopo per rappresentare la sua attività espressa in GBq):

$$\frac{U-233}{4,50GBq} + \frac{U-235}{5,09GBq} + \frac{Pu-238}{0,393GBq} + \frac{Pu-239}{0,360GBq} + \frac{Pu-241}{18,8GBq} \leq 1$$

A.III.4 Stima delle conseguenze radiologiche per lo Scenario 2

Nella definizione di una spedizione *non soggetta a comunicazione preventiva* che risultasse di involuppo per questa tipologia di spedizioni rispetto alle conseguenze radiologiche derivanti da un ipotetico incidente *molto grave*, si è stabilito di assumere a riferimento la spedizione descritta per lo Scenario 1, con un opportuno fattore di scala. Per lo scenario risultante, definito come Scenario 2, si è quindi mantenuta l'attenzione su una spedizione tipo composta da colli di tipo A, a cui applicare (con la solita eccezione del trizio) una frazione di rilascio complessiva pari a 10^{-2} . Tenendo presenti le statistiche dei trasporti stradali sul territorio nazionale, che riportano carichi complessivi massimi per le spedizioni normalmente inferiori a $10 A_2$, è sembrato adeguatamente cautelativo assumere un fattore di scala pari a 10 rispetto alla spedizione prevista per lo Scenario 1, vale a dire fare riferimento ad un carico di $30 A_2$, sotto forma non speciale, alloggiato in contenitori di tipo A. Il rilascio da questa spedizione risulterebbe pertanto pari al 30% di A_2 , senza considerare il contributo del trizio, e circa il doppio considerando anche quest'ultimo isotopo.

Un rilascio di tale portata risulta rappresentativo, ai fini della pianificazione dell'emergenza, anche di un ipotetico rilascio da un contenitore di tipo B, così come si è argomentato nel paragrafo relativo a tale tipo di contenitore.

Nelle tabelle da A.III.16 bis ad A.III.23 bis sono riportati i risultati relativi allo Scenario 2. Rispetto alle omologhe tabelle relative allo Scenario 1, tali tabelle estendono, per alcuni aspetti, la zona di indagine fino alla distanza di 20 km.

La classe di età della popolazione che risulta più esposta, quella dei bambini, registra una dose efficace complessiva (inalazione + irraggiamento) relativa alla fase incidentale acuta pari a 3,52 mSv alla distanza di 300 m e pari a 2,09 mSv alla distanza di 400 m. Va tenuto conto che oltre i 100 metri, a causa del diverso modello applicato per la dispersione atmosferica, cioè senza deposizione al suolo, il contributo del trizio ha un peso superiore al 50%, mentre, come detto, le

attività trasportate risultano percentualmente poco rilevanti, e, pertanto, le assunzioni adottate sulla quantità di trizio presente risultano molto conservative.

Il “peso” del contributo complessivo dovuto all’irraggiamento (da nube e da suolo) incide per *alcune unità percentuali* rispetto alla dose efficace impegnata totale, relativa alla fase incidentale acuta; per le distanze fino a 100 m i valori percentuali, per le tre classi di età, sono i seguenti:

- adulti, 4,95%;
- bambini, 4,24%;
- lattanti, 7,68%.

Alle distanze maggiori di 100 m tali valori percentuali tendono a diminuire. Questo effetto è dovuto alla presenza del trizio il quale, mentre fornisce un contributo nullo come irraggiamento, segue un modello di dispersione atmosferica che non prevede l’impoverimento della nube. Data la linearità delle valutazioni, le suddette considerazioni valgono anche per lo Scenario 1.

Per quanto riguarda la contaminazione dei vegetali a foglia eventualmente prodotti nelle vicinanze dell’incidente, le stime indicano che nel settore sotto vento potrebbe determinarsi il superamento del livello massimo ammissibile (2000 Bq/kg) per lo I-125 fino alla distanza di 8 km (2.33E3 Bq/kg) mentre si scenderebbe al di sotto di tale livello alla distanza di 9 km. Sommando i contributi relativi ai radioisotopi appartenenti al medesimo gruppo omogeneo, alla distanza di 15 km si scenderebbe al di sotto dei livelli massimi ammissibili previsti dai regolamenti Euratom.

Un comportamento analogo avrebbe la contaminazione del latte da parte dello I-125 (559 Bq/kg a 8 km, 428 Bq/kg a 9 km); effettuando il raggruppamento per gruppi omogenei, la contaminazione complessiva del latte da parte degli isotopi dello iodio scenderebbe alla distanza di 15 km al di sotto del livello massimo ammissibile (500 Bq/kg) previsto per gli alimenti liquidi o i prodotti lattiero caseari. Se invece il latte fosse considerato come “alimento per lattanti” si scenderebbe al di sotto del livello massimo ammissibile (150 Bq/kg) alla distanza di 20 km.

A.III.5 Calcoli di verifica su spedizioni effettive.

Nel seguito sono riportate le stime delle conseguenze radiologiche per scenari incidentali che si sono ipotizzati su alcune spedizioni, sia stradali che aeree, recentemente effettuate. Tali spedizioni si riferiscono in particolare a periodici trasporti stradali ed aerei che dall’estero trasportano in Italia radionuclidi ad uso medico.

Si è assunta una frazione di rilascio pari ad 1/100, identica a quella adottata per il singolo contenitore di tipo A nelle valutazioni precedenti, ma applicata al carico totale relativo alla spedizione nel suo complesso. Va ricordato che la frazione in questione si colloca all’estremo superiore del *range* ipotizzato dall’IAEA e, tenendo presente che le spedizioni considerate riguardano mediamente un numero di contenitori dell’ordine delle centinaia, l’assunzione appare molto cautelativa, anche per il caso di un incidente aereo. Si aggiunga inoltre che non è stata tenuta in alcun conto la capacità di ritenzione residua esercitata dal mezzo di trasporto incidentato e che, per i calcoli relativi alla dispersione atmosferica, è stato assunto un rilascio *a livello del suolo*, pur essendo in presenza di uno scenario di incendio che, specialmente per il caso dell’aereo, produrrebbe presumibilmente un significativo effetto ascensionale sulla nube, a causa delle correnti convettive, a seguito del quale i valori massimi delle dosi potrebbero risultare ridimensionati anche di ordini di grandezza.

Le conseguenze radiologiche relative alla fase incidentale acuta sono state stimate alla distanza di 300 m sottovento rispetto al mezzo incidentato; per il calcolo della concentrazione

integrata in aria a livello del suolo è stato applicato al rilascio il coefficiente $1.8E-3 \text{ s/m}^3$, relativo alla classe di stabilità F di Pasquill con velocità del vento pari a 2 m/s ed in presenza di deposizione al suolo con velocità pari ad 1 cm/s ($2.5E-3 \text{ s/m}^3$ per il trizio, in assenza di deposizione). I contributi di dose efficace considerati sono quelli da inalazione e da irraggiamento, da nube e dal suolo (con l'ipotesi di stazionamento sul terreno per un giorno). I calcoli sono relativi alle tre classi di età previste dal manuale CEVaD, con i ratei di respirazione ed i coefficienti di dose già riportati in questo allegato.

Le due spedizioni stradali, soggette a comunicazione preventiva e particolarmente rilevanti, prese in considerazione, che chiameremo 1 e 2, sono state selezionate, sulla base dell'attività complessiva e dell'indice di trasporto totale, su un insieme di 14 spedizioni avvenute nel corso dell'anno 2007 con origine Petten (Olanda) e destinazione Milano Settala. Entrambe le spedizioni avevano in inventario il medesimo insieme di 5 radionuclidi (Tl-201, Mo-99, In-111, I-131, Ga-67), tutti con tempi di dimezzamento dell'ordine di pochi giorni. La spedizione 1 ammontava a 178 colli con indice di trasporto totale pari a 103 e con attività totale pari a 18,9 TBq, corrispondente a 7,66 A_2 ; la spedizione 2 ammontava a 204 colli con indice di trasporto totale pari a 134,8 e con attività totale pari a 4,89 TBq, corrispondente a 6,41 A_2 .

Le dosi efficaci relative alla fase incidentale acuta sono riportate nella tabella A.III.25. Il contributo da inalazione e quello da irraggiamento dal suolo risultano essere dello stesso ordine di grandezza, decine di microSievert, mentre quello da irraggiamento da nube risulta essere dell'ordine del microSievert o frazioni di esso. La classe di età dei bambini registra la dose efficace maggiore in entrambi gli scenari. Le dosi efficaci maggiori si registrano nello scenario della spedizione 1, che è quella a maggior contenuto di attività (7,66 A_2), dove la classe dei bambini raggiunge 47 μSv . Da un confronto con le conseguenze radiologiche stimate per lo Scenario 2, si evince che a 300 m i valori di dose alla popolazione a seguito di un ipotetico scenario incidentale, che coinvolga una spedizione stradale rappresentativa di quelle realmente effettuate, sono ampiamente ricompresi da quelli valutati per lo Scenario 2 stesso.

Le spedizioni aeree prese in considerazione riguardano un insieme di 28 voli dedicati (cargo) tra la Germania e l'aeroporto di Orio al Serio (Bergamo) effettuati durante il mese di gennaio 2007 (circa una spedizione al giorno). Si tenga presente che la singola spedizione per questo aeroporto, relativa ad un giorno qualsiasi, rappresenta il massimo carico di colli radioattivi trasportati per via aerea in Italia provenienti dall'estero: i trasporti di colli di materie radioattive effettuati fra scali nazionali avvengono normalmente con aerei passeggeri e le quantità a bordo sono molto inferiori a quelle relative alle spedizioni analizzate nel seguito.

Il numero medio di colli trasportati in una singola spedizione risulta pari a 142, mentre il numero massimo di colli è pari a 288. L'attività media trasportata per singola spedizione è risultata pari a 3,17 TBq, corrispondente a 4,93 A_2 ; l'attività massima trasportata in una singola spedizione è risultata pari 18,4 TBq, corrispondente a 30,7 A_2 . Compiono in queste spedizioni 22 diversi radioisotopi, tutti già riportati ed analizzati precedentemente all'interno di questo allegato.

Le valutazioni effettuate fanno riferimento ad un incidente molto grave con sviluppo d'incendio nella fase di decollo o di atterraggio.

Nella tabella A.III.26 sono riportate le stime di dose efficace a 300 m relative alle tre classi di età della popolazione e ad ognuna delle 28 spedizioni; per ogni spedizione si riportano i valori complessivi, senza scendere nel dettaglio dei singoli radionuclidi. In calce alla tabella sono riportati i valori medi e quelli massimi relativi al complesso delle spedizioni.

Anche per queste spedizioni il contributo alla dose efficace dall'irraggiamento dal suolo risulta essere mediamente dello stesso ordine di grandezza rispetto al contributo da inalazione,

mentre l'irraggiamento diretto dalla nube produce effetti mediamente inferiori, per quasi due ordini di grandezza. Per la spedizione n. 18, la quale presenta il maggior carico di attività, pari a $30,7 A_2$; le conseguenze radiologiche per la classe di età dei bambini, comportano una dose efficace totale pari a $158 \mu\text{Sv}$. Da un confronto con le conseguenze radiologiche stimate per lo Scenario 2, si evince che a 300 m i valori di dose alla popolazione a seguito di un ipotetico scenario incidentale che coinvolga una spedizione rappresentativa di quelle realmente effettuate sono ampiamente ricompresi da quelli valutati per lo Scenario 2 stesso.

Tabella A.III.1

Radionuclidi considerati significativi per i trasporti

Radionuclide	Tipo di assorbimento polmonare	Coefficiente di dose efficace da inalazione per lattanti (< 1 a)	Coefficiente di dose efficace da inalazione per bambini (7-12 a)	Coefficiente di dose efficace da inalazione per adulti (> 17 a)	A ₂	1E-6 di A ₂	dose efficace adulti da inalazione di 1E-6 di A ₂
	(F = fast, M = moderate, S = slow)	(Sv/Bq)	(Sv/Bq)	(Sv/Bq)	(TBq)	(Bq)	(Sv)
H-3	S	1.20E-09	3.80E-10	2.60E-10	4.00E+01	4.00E+07	1.04E-02
C-14	S	1.90E-08	7.40E-09	5.80E-09	3.00E+00	3.00E+06	1.74E-02
F-18	S	4.20E-10	1.00E-10	5.90E-11	6.00E-01	6.00E+05	3.54E-05
Fe-55	F	4.20E-09	1.40E-09	7.70E-10	4.00E+01	4.00E+07	3.08E-02
Co-57	S	4.40E-09	1.50E-09	1.00E-09	1.00E+01	1.00E+07	1.00E-02
Co-60	S	9.20E-08	4.00E-08	3.10E-08	4.00E-01	4.00E+05	1.24E-02
Ni-63	S	4.80E-09	1.70E-09	1.30E-09	3.00E+01	3.00E+07	3.90E-02
Ga-67	M	1.40E-09	3.60E-10	2.40E-10	3.00E+00	3.00E+06	7.20E-04
Ga-68	M	4.60E-10	9.20E-11	4.90E-11	5.00E-01	5.00E+05	2.45E-05
Ge-68	M	6.00E-08	2.00E-08	1.40E-08	5.00E-01	5.00E+05	7.00E-03
Se-75	F	7.80E-09	2.50E-09	1.00E-09	3.00E+00	3.00E+06	3.00E-03
Rb-86	F	1.20E-08	2.00E-09	9.30E-10	5.00E-01	5.00E+05	4.65E-04
Sr-89	S	3.90E-08	1.20E-08	7.90E-09	6.00E-01	6.00E+05	4.74E-03
Sr-90	S	4.20E-07	1.80E-07	1.60E-07	3.00E-01	3.00E+05	4.80E-02
Nb-95	S	7.70E-09	2.50E-09	1.80E-09	1.00E+00	1.00E+06	1.80E-03
Mo-99	S	6.90E-09	1.70E-09	9.90E-10	6.00E-01	6.00E+05	5.94E-04
Tc-99m	S	1.30E-10	3.50E-11	2.00E-11	4.00E+00	4.00E+06	8.00E-05
Pd-103	S	2.50E-09	6.80E-10	4.50E-10	4.00E+01	4.00E+07	1.80E-02
Cd-109	F	4.50E-08	1.40E-08	8.10E-09	2.00E+00	2.00E+06	1.62E-02
In-111	M	1.50E-09	4.10E-10	2.30E-10	3.00E+00	3.00E+06	6.90E-04
I-123	F	8.70E-10	1.80E-10	7.40E-11	3.00E+00	3.00E+06	2.22E-04
I-125	F	2.00E-08	1.10E-08	5.10E-09	3.00E+00	3.00E+06	1.53E-02
I-131	F	7.20E-08	1.90E-08	7.40E-09	7.00E-01	7.00E+05	5.18E-03
Cs-137	S	1.10E-07	4.80E-08	3.90E-08	6.00E-01	6.00E+05	2.34E-02
Pm-147	M	2.10E-08	7.00E-09	5.00E-09	2.00E+00	2.00E+06	1.00E-02
Sm-153	M	4.20E-09	1.00E-09	6.30E-10	6.00E-01	6.00E+05	3.78E-04
Gd-153	F	1.50E-08	3.90E-09	2.10E-09	9.00E+00	9.00E+06	1.89E-02
Ir-192	S	2.80E-08	9.50E-09	6.60E-09	6.00E-01	6.00E+05	3.96E-03
Au-198	S	5.40E-09	1.40E-09	8.60E-10	6.00E-01	6.00E+05	5.16E-04
Tl-201	F	4.50E-10	9.40E-11	4.40E-11	4.00E+00	4.00E+06	1.76E-04
Po-210	S	1.80E-05	5.90E-06	4.30E-06	2.00E-02	2.00E+04	8.60E-02
Ra-226	S	3.40E-05	1.20E-05	9.50E-06	3.00E-03	3.00E+03	2.85E-02
Pu-238	F	2.00E-04	1.10E-04	1.10E-04	1.00E-03	1.00E+03	1.10E-01
Am-241	F	1.80E-04	1.00E-04	9.60E-05	1.00E-03	1.00E+03	9.60E-02
Cf-252	M	9.70E-05	3.20E-05	2.00E-05	3.00E-03	3.00E+03	6.00E-02
Na-22	F	1.30E-09	2.40E-09	9.70E-09	5.00E-01	5.00E+05	6.50E-04
P-32	M	3.40E-09	5.30E-09	2.20E-08	5.00E-01	5.00E+05	1.70E-03
P-33	M	1.50E-09	2.10E-09	6.10E-09	1.00E+00	1.00E+06	1.50E-03
S-35	S	1.90E-09	2.60E-09	7.70E-09	3.00E+00	3.00E+06	5.70E-03
Cr-51	S	3.70E-11	6.60E-11	2.60E-10	3.00E+01	3.00E+07	1.11E-03
Y-90	S	1.50E-09	2.70E-09	1.30E-08	3.00E-01	3.00E+05	4.50E-04
Ba-133	S	1.00E-08	1.30E-08	3.20E-08	3.00E+00	3.00E+06	3.00E-02
Lu-177	S	1.20E-09	1.70E-09	5.70E-09	7.00E-01	7.00E+05	8.40E-04

Tabella A.III.2

Concentrazione integrata in aria a livello del suolo (Bq·s/m³) da un rilascio pari a 10⁻² A₂

Radionuclide	distanza (m)	50	100	150	200	300	400	500	700	1000	2000
	(*)	7.00E-02	1.80E-02	7.50E-03	4.00E-03	1.80E-03	1.05E-03	7.00E-04	3.60E-04	1.80E-04	5.00E-05
	(**)	7.00E-02	1.80E-02	8.50E-03	5.00E-03	2.50E-03	1.50E-03	1.00E-03	5.60E-04	3.30E-04	1.20E-04
	rilascio (Bq)										
H-3	4.00E+11	2.80E+10	7.20E+09	3.40E+09	2.00E+09	1.00E+09	6.00E+08	4.00E+08	2.24E+08	1.32E+08	4.80E+07
C-14	3.00E+10	2.10E+09	5.40E+08	2.25E+08	1.20E+08	5.40E+07	3.15E+07	2.10E+07	1.08E+07	5.40E+06	1.50E+06
F-18	6.00E+09	4.20E+08	1.08E+08	4.50E+07	2.40E+07	1.08E+07	6.30E+06	4.20E+06	2.16E+06	1.08E+06	3.00E+05
Fe-55	4.00E+11	2.80E+10	7.20E+09	3.00E+09	1.60E+09	7.20E+08	4.20E+08	2.80E+08	1.44E+08	7.20E+07	2.00E+07
Co-57	1.00E+11	7.00E+09	1.80E+09	7.50E+08	4.00E+08	1.80E+08	1.05E+08	7.00E+07	3.60E+07	1.80E+07	5.00E+06
Co-60	4.00E+09	2.80E+08	7.20E+07	3.00E+07	1.60E+07	7.20E+06	4.20E+06	2.80E+06	1.44E+06	7.20E+05	2.00E+05
Ni-63	3.00E+11	2.10E+10	5.40E+09	2.25E+09	1.20E+09	5.40E+08	3.15E+08	2.10E+08	1.08E+08	5.40E+07	1.50E+07
Ga-67	3.00E+10	2.10E+09	5.40E+08	2.25E+08	1.20E+08	5.40E+07	3.15E+07	2.10E+07	1.08E+07	5.40E+06	1.50E+06
Ga-68	5.00E+09	3.50E+08	9.00E+07	3.75E+07	2.00E+07	9.00E+06	5.25E+06	3.50E+06	1.80E+06	9.00E+05	2.50E+05
Ge-68	5.00E+09	3.50E+08	9.00E+07	3.75E+07	2.00E+07	9.00E+06	5.25E+06	3.50E+06	1.80E+06	9.00E+05	2.50E+05
Se-75	3.00E+10	2.10E+09	5.40E+08	2.25E+08	1.20E+08	5.40E+07	3.15E+07	2.10E+07	1.08E+07	5.40E+06	1.50E+06
Rb-86	5.00E+09	3.50E+08	9.00E+07	3.75E+07	2.00E+07	9.00E+06	5.25E+06	3.50E+06	1.80E+06	9.00E+05	2.50E+05
Sr-89	6.00E+09	4.20E+08	1.08E+08	4.50E+07	2.40E+07	1.08E+07	6.30E+06	4.20E+06	2.16E+06	1.08E+06	3.00E+05
Sr-90	3.00E+09	2.10E+08	5.40E+07	2.25E+07	1.20E+07	5.40E+06	3.15E+06	2.10E+06	1.08E+06	5.40E+05	1.50E+05
Nb-95	1.00E+10	7.00E+08	1.80E+08	7.50E+07	4.00E+07	1.80E+07	1.05E+07	7.00E+06	3.60E+06	1.80E+06	5.00E+05
Mo-99	6.00E+09	4.20E+08	1.08E+08	4.50E+07	2.40E+07	1.08E+07	6.30E+06	4.20E+06	2.16E+06	1.08E+06	3.00E+05
Tc-99m	4.00E+10	2.80E+09	7.20E+08	3.00E+08	1.60E+08	7.20E+07	4.20E+07	2.80E+07	1.44E+07	7.20E+06	2.00E+06
Pd-103	4.00E+11	2.80E+10	7.20E+09	3.00E+09	1.60E+09	7.20E+08	4.20E+08	2.80E+08	1.44E+08	7.20E+07	2.00E+07
Cd-109	2.00E+10	1.40E+09	3.60E+08	1.50E+08	8.00E+07	3.60E+07	2.10E+07	1.40E+07	7.20E+06	3.60E+06	1.00E+06
In-111	3.00E+10	2.10E+09	5.40E+08	2.25E+08	1.20E+08	5.40E+07	3.15E+07	2.10E+07	1.08E+07	5.40E+06	1.50E+06
I-123	3.00E+10	2.10E+09	5.40E+08	2.25E+08	1.20E+08	5.40E+07	3.15E+07	2.10E+07	1.08E+07	5.40E+06	1.50E+06
I-125	3.00E+10	2.10E+09	5.40E+08	2.25E+08	1.20E+08	5.40E+07	3.15E+07	2.10E+07	1.08E+07	5.40E+06	1.50E+06
I-131	7.00E+09	4.90E+08	1.26E+08	5.25E+07	2.80E+07	1.26E+07	7.35E+06	4.90E+06	2.52E+06	1.26E+06	3.50E+05
Cs-137	6.00E+09	4.20E+08	1.08E+08	4.50E+07	2.40E+07	1.08E+07	6.30E+06	4.20E+06	2.16E+06	1.08E+06	3.00E+05
Pm-147	2.00E+10	1.40E+09	3.60E+08	1.50E+08	8.00E+07	3.60E+07	2.10E+07	1.40E+07	7.20E+06	3.60E+06	1.00E+06
Sm-153	6.00E+09	4.20E+08	1.08E+08	4.50E+07	2.40E+07	1.08E+07	6.30E+06	4.20E+06	2.16E+06	1.08E+06	3.00E+05
Gd-153	9.00E+10	6.30E+09	1.62E+09	6.75E+08	3.60E+08	1.62E+08	9.45E+07	6.30E+07	3.24E+07	1.62E+07	4.50E+06
Ir-192	6.00E+09	4.20E+08	1.08E+08	4.50E+07	2.40E+07	1.08E+07	6.30E+06	4.20E+06	2.16E+06	1.08E+06	3.00E+05
Au-198	6.00E+09	4.20E+08	1.08E+08	4.50E+07	2.40E+07	1.08E+07	6.30E+06	4.20E+06	2.16E+06	1.08E+06	3.00E+05
Tl-201	4.00E+10	2.80E+09	7.20E+08	3.00E+08	1.60E+08	7.20E+07	4.20E+07	2.80E+07	1.44E+07	7.20E+06	2.00E+06
Po-210	2.00E+08	1.40E+07	3.60E+06	1.50E+06	8.00E+05	3.60E+05	2.10E+05	1.40E+05	7.20E+04	3.60E+04	1.00E+04
Ra-226	3.00E+07	2.10E+06	5.40E+05	2.25E+05	1.20E+05	5.40E+04	3.15E+04	2.10E+04	1.08E+04	5.40E+03	1.50E+03
Pu-238	1.00E+07	7.00E+05	1.80E+05	7.50E+04	4.00E+04	1.80E+04	1.05E+04	7.00E+03	3.60E+03	1.80E+03	5.00E+02
Am-241	1.00E+07	7.00E+05	1.80E+05	7.50E+04	4.00E+04	1.80E+04	1.05E+04	7.00E+03	3.60E+03	1.80E+03	5.00E+02
Cf-252	3.00E+07	2.10E+06	5.40E+05	2.25E+05	1.20E+05	5.40E+04	3.15E+04	2.10E+04	1.08E+04	5.40E+03	1.50E+03
Na-22	5.00E+09	3.50E+08	9.00E+07	3.75E+07	2.00E+07	9.00E+06	5.25E+06	3.50E+06	1.80E+06	9.00E+05	2.50E+05
P-32	5.00E+09	3.50E+08	9.00E+07	3.75E+07	2.00E+07	9.00E+06	5.25E+06	3.50E+06	1.80E+06	9.00E+05	2.50E+05
P-33	1.00E+10	7.00E+08	1.80E+08	7.50E+07	4.00E+07	1.80E+07	1.05E+07	7.00E+06	3.60E+06	1.80E+06	5.00E+05
S-35	3.00E+10	2.10E+09	5.40E+08	2.25E+08	1.20E+08	5.40E+07	3.15E+07	2.10E+07	1.08E+07	5.40E+06	1.50E+06
Cr-51	3.00E+11	2.10E+10	5.40E+09	2.25E+09	1.20E+09	5.40E+08	3.15E+08	2.10E+08	1.08E+08	5.40E+07	1.50E+07
Y-90	3.00E+09	2.10E+08	5.40E+07	2.25E+07	1.20E+07	5.40E+06	3.15E+06	2.10E+06	1.08E+06	5.40E+05	1.50E+05
Ba-133	3.00E+10	2.10E+09	5.40E+08	2.25E+08	1.20E+08	5.40E+07	3.15E+07	2.10E+07	1.08E+07	5.40E+06	1.50E+06
Lu-177	7.00E+09	4.90E+08	1.26E+08	5.25E+07	2.80E+07	1.26E+07	7.35E+06	4.90E+06	2.52E+06	1.26E+06	3.50E+05

(*) coefficienti di dispersione atmosferica in presenza di deposizione al suolo

(**) coefficienti di dispersione atmosferica in assenza di deposizione al suolo

Tabella A.III.3

Contaminazione del suolo (Bq/m²) da un rilascio pari a 10⁻² A₂

Radionuclide	distanza (m)	50	100	150	200	300	400	500	700	1000	2000
	rilascio										
	(Bq)										
H-3	4.00E+11	0.00E+00									
C-14	3.00E+10	2.10E+07	5.40E+06	2.25E+06	1.20E+06	5.40E+05	3.15E+05	2.10E+05	1.08E+05	5.40E+04	1.50E+04
F-18	6.00E+09	4.20E+06	1.08E+06	4.50E+05	2.40E+05	1.08E+05	6.30E+04	4.20E+04	2.16E+04	1.08E+04	3.00E+03
Fe-55	4.00E+11	2.80E+08	7.20E+07	3.00E+07	1.60E+07	7.20E+06	4.20E+06	2.80E+06	1.44E+06	7.20E+05	2.00E+05
Co-57	1.00E+11	7.00E+07	1.80E+07	7.50E+06	4.00E+06	1.80E+06	1.05E+06	7.00E+05	3.60E+05	1.80E+05	5.00E+04
Co-60	4.00E+09	2.80E+06	7.20E+05	3.00E+05	1.60E+05	7.20E+04	4.20E+04	2.80E+04	1.44E+04	7.20E+03	2.00E+03
Ni-63	3.00E+11	2.10E+08	5.40E+07	2.25E+07	1.20E+07	5.40E+06	3.15E+06	2.10E+06	1.08E+06	5.40E+05	1.50E+05
Ga-67	3.00E+10	2.10E+07	5.40E+06	2.25E+06	1.20E+06	5.40E+05	3.15E+05	2.10E+05	1.08E+05	5.40E+04	1.50E+04
Ga-68	5.00E+09	3.50E+06	9.00E+05	3.75E+05	2.00E+05	9.00E+04	5.25E+04	3.50E+04	1.80E+04	9.00E+03	2.50E+03
Ge-68	5.00E+09	3.50E+06	9.00E+05	3.75E+05	2.00E+05	9.00E+04	5.25E+04	3.50E+04	1.80E+04	9.00E+03	2.50E+03
Se-75	3.00E+10	2.10E+07	5.40E+06	2.25E+06	1.20E+06	5.40E+05	3.15E+05	2.10E+05	1.08E+05	5.40E+04	1.50E+04
Rb-86	5.00E+09	3.50E+06	9.00E+05	3.75E+05	2.00E+05	9.00E+04	5.25E+04	3.50E+04	1.80E+04	9.00E+03	2.50E+03
Sr-89	6.00E+09	4.20E+06	1.08E+06	4.50E+05	2.40E+05	1.08E+05	6.30E+04	4.20E+04	2.16E+04	1.08E+04	3.00E+03
Sr-90	3.00E+09	2.10E+06	5.40E+05	2.25E+05	1.20E+05	5.40E+04	3.15E+04	2.10E+04	1.08E+04	5.40E+03	1.50E+03
Nb-95	1.00E+10	7.00E+06	1.80E+06	7.50E+05	4.00E+05	1.80E+05	1.05E+05	7.00E+04	3.60E+04	1.80E+04	5.00E+03
Mo-99	6.00E+09	4.20E+06	1.08E+06	4.50E+05	2.40E+05	1.08E+05	6.30E+04	4.20E+04	2.16E+04	1.08E+04	3.00E+03
Tc-99m	4.00E+10	2.80E+07	7.20E+06	3.00E+06	1.60E+06	7.20E+05	4.20E+05	2.80E+05	1.44E+05	7.20E+04	2.00E+04
Pd-103	4.00E+11	2.80E+08	7.20E+07	3.00E+07	1.60E+07	7.20E+06	4.20E+06	2.80E+06	1.44E+06	7.20E+05	2.00E+05
Cd-109	2.00E+10	1.40E+07	3.60E+06	1.50E+06	8.00E+05	3.60E+05	2.10E+05	1.40E+05	7.20E+04	3.60E+04	1.00E+04
In-111	3.00E+10	2.10E+07	5.40E+06	2.25E+06	1.20E+06	5.40E+05	3.15E+05	2.10E+05	1.08E+05	5.40E+04	1.50E+04
I-123	3.00E+10	2.10E+07	5.40E+06	2.25E+06	1.20E+06	5.40E+05	3.15E+05	2.10E+05	1.08E+05	5.40E+04	1.50E+04
I-125	3.00E+10	2.10E+07	5.40E+06	2.25E+06	1.20E+06	5.40E+05	3.15E+05	2.10E+05	1.08E+05	5.40E+04	1.50E+04
I-131	7.00E+09	4.90E+06	1.26E+06	5.25E+05	2.80E+05	1.26E+05	7.35E+04	4.90E+04	2.52E+04	1.26E+04	3.50E+03
Cs-137	6.00E+09	4.20E+06	1.08E+06	4.50E+05	2.40E+05	1.08E+05	6.30E+04	4.20E+04	2.16E+04	1.08E+04	3.00E+03
Pm-147	2.00E+10	1.40E+07	3.60E+06	1.50E+06	8.00E+05	3.60E+05	2.10E+05	1.40E+05	7.20E+04	3.60E+04	1.00E+04
Sm-153	6.00E+09	4.20E+06	1.08E+06	4.50E+05	2.40E+05	1.08E+05	6.30E+04	4.20E+04	2.16E+04	1.08E+04	3.00E+03
Gd-153	9.00E+10	6.30E+07	1.62E+07	6.75E+06	3.60E+06	1.62E+06	9.45E+05	6.30E+05	3.24E+05	1.62E+05	4.50E+04
Ir-192	6.00E+09	4.20E+06	1.08E+06	4.50E+05	2.40E+05	1.08E+05	6.30E+04	4.20E+04	2.16E+04	1.08E+04	3.00E+03
Au-198	6.00E+09	4.20E+06	1.08E+06	4.50E+05	2.40E+05	1.08E+05	6.30E+04	4.20E+04	2.16E+04	1.08E+04	3.00E+03
Tl-201	4.00E+10	2.80E+07	7.20E+06	3.00E+06	1.60E+06	7.20E+05	4.20E+05	2.80E+05	1.44E+05	7.20E+04	2.00E+04
Po-210	2.00E+08	1.40E+05	3.60E+04	1.50E+04	8.00E+03	3.60E+03	2.10E+03	1.40E+03	7.20E+02	3.60E+02	1.00E+02
Ra-226	3.00E+07	2.10E+04	5.40E+03	2.25E+03	1.20E+03	5.40E+02	3.15E+02	2.10E+02	1.08E+02	5.40E+01	1.50E+01
Pu-238	1.00E+07	7.00E+03	1.80E+03	7.50E+02	4.00E+02	1.80E+02	1.05E+02	7.00E+01	3.60E+01	1.80E+01	5.00E+00
Am-241	1.00E+07	7.00E+03	1.80E+03	7.50E+02	4.00E+02	1.80E+02	1.05E+02	7.00E+01	3.60E+01	1.80E+01	5.00E+00
Cf-252	3.00E+07	2.10E+04	5.40E+03	2.25E+03	1.20E+03	5.40E+02	3.15E+02	2.10E+02	1.08E+02	5.40E+01	1.50E+01
Na-22	5.00E+09	3.50E+06	9.00E+05	3.75E+05	2.00E+05	9.00E+04	5.25E+04	3.50E+04	1.80E+04	9.00E+03	2.50E+03
P-32	5.00E+09	3.50E+06	9.00E+05	3.75E+05	2.00E+05	9.00E+04	5.25E+04	3.50E+04	1.80E+04	9.00E+03	2.50E+03
P-33	1.00E+10	7.00E+06	1.80E+06	7.50E+05	4.00E+05	1.80E+05	1.05E+05	7.00E+04	3.60E+04	1.80E+04	5.00E+03
S-35	3.00E+10	2.10E+07	5.40E+06	2.25E+06	1.20E+06	5.40E+05	3.15E+05	2.10E+05	1.08E+05	5.40E+04	1.50E+04
Cr-51	3.00E+11	2.10E+08	5.40E+07	2.25E+07	1.20E+07	5.40E+06	3.15E+06	2.10E+06	1.08E+06	5.40E+05	1.50E+05
Y-90	3.00E+09	2.10E+06	5.40E+05	2.25E+05	1.20E+05	5.40E+04	3.15E+04	2.10E+04	1.08E+04	5.40E+03	1.50E+03
Ba-133	3.00E+10	2.10E+07	5.40E+06	2.25E+06	1.20E+06	5.40E+05	3.15E+05	2.10E+05	1.08E+05	5.40E+04	1.50E+04
Lu-177	7.00E+09	4.90E+06	1.26E+06	5.25E+05	2.80E+05	1.26E+05	7.35E+04	4.90E+04	2.52E+04	1.26E+04	3.50E+03

Tabella A.III.4

Dose efficace impegnata per inalazione (Sv) dai lattanti, da un rilascio pari a $10^2 A_2$

Radionuclide	tipo assorb. polm.	distanza (m)	50	100	150	200	300	400	500	700	1000	2000
		rilascio (Bq)										
H-3	S	4.00E+11	1.11E-03	2.86E-04	1.35E-04	7.94E-05	3.97E-05	2.38E-05	1.59E-05	8.90E-06	5.24E-06	1.91E-06
C-14	S	3.00E+10	1.32E-03	3.40E-04	1.42E-04	7.55E-05	3.40E-05	1.98E-05	1.32E-05	6.79E-06	3.40E-06	9.43E-07
F-18	S	6.00E+09	5.84E-06	1.50E-06	6.26E-07	3.34E-07	1.50E-07	8.76E-08	5.84E-08	3.00E-08	1.50E-08	4.17E-09
Fe-55	F	4.00E+11	3.89E-03	1.00E-03	4.17E-04	2.22E-04	1.00E-04	5.84E-05	3.89E-05	2.00E-05	1.00E-05	2.78E-06
Co-57	S	1.00E+11	1.02E-03	2.62E-04	1.09E-04	5.83E-05	2.62E-05	1.53E-05	1.02E-05	5.24E-06	2.62E-06	7.28E-07
Co-60	S	4.00E+09	8.53E-04	2.19E-04	9.14E-05	4.87E-05	2.19E-05	1.28E-05	8.53E-06	4.39E-06	2.19E-06	6.09E-07
Ni-63	S	3.00E+11	3.34E-03	8.58E-04	3.57E-04	1.91E-04	8.58E-05	5.00E-05	3.34E-05	1.72E-05	8.58E-06	2.38E-06
Ga-67	M	3.00E+10	9.73E-05	2.50E-05	1.04E-05	5.56E-06	2.50E-06	1.46E-06	9.73E-07	5.00E-07	2.50E-07	6.95E-08
Ga-68	M	5.00E+09	5.33E-06	1.37E-06	5.71E-07	3.05E-07	1.37E-07	7.99E-08	5.33E-08	2.74E-08	1.37E-08	3.81E-09
Ge-68	M	5.00E+09	6.95E-04	1.79E-04	7.45E-05	3.97E-05	1.79E-05	1.04E-05	6.95E-06	3.57E-06	1.79E-06	4.97E-07
Se-75	F	3.00E+10	5.42E-04	1.39E-04	5.81E-05	3.10E-05	1.39E-05	8.13E-06	5.42E-06	2.79E-06	1.39E-06	3.87E-07
Rb-86	F	5.00E+09	1.39E-04	3.57E-05	1.49E-05	7.94E-06	3.57E-06	2.09E-06	1.39E-06	7.15E-07	3.57E-07	9.93E-08
Sr-89	S	6.00E+09	5.42E-04	1.39E-04	5.81E-05	3.10E-05	1.39E-05	8.13E-06	5.42E-06	2.79E-06	1.39E-06	3.87E-07
Sr-90	S	3.00E+09	2.92E-03	7.51E-04	3.13E-04	1.67E-04	7.51E-05	4.38E-05	2.92E-05	1.50E-05	7.51E-06	2.09E-06
Nb-95	S	1.00E+10	1.78E-04	4.59E-05	1.91E-05	1.02E-05	4.59E-06	2.68E-06	1.78E-06	9.18E-07	4.59E-07	1.27E-07
Mo-99	S	6.00E+09	9.59E-05	2.47E-05	1.03E-05	5.48E-06	2.47E-06	1.44E-06	9.59E-07	4.93E-07	2.47E-07	6.85E-08
Tc-99m	S	4.00E+10	1.20E-05	3.10E-06	1.29E-06	6.88E-07	3.10E-07	1.81E-07	1.20E-07	6.20E-08	3.10E-08	8.61E-09
Pd-103	S	4.00E+11	2.32E-03	5.96E-04	2.48E-04	1.32E-04	5.96E-05	3.48E-05	2.32E-05	1.19E-05	5.96E-06	1.66E-06
Cd-109	F	2.00E+10	2.09E-03	5.36E-04	2.23E-04	1.19E-04	5.36E-05	3.13E-05	2.09E-05	1.07E-05	5.36E-06	1.49E-06
In-111	M	3.00E+10	1.04E-04	2.68E-05	1.12E-05	5.96E-06	2.68E-06	1.56E-06	1.04E-06	5.36E-07	2.68E-07	7.45E-08
I-123	F	3.00E+10	6.05E-05	1.56E-05	6.48E-06	3.46E-06	1.56E-06	9.07E-07	6.05E-07	3.11E-07	1.56E-07	4.32E-08
I-125	F	3.00E+10	1.39E-03	3.57E-04	1.49E-04	7.94E-05	3.57E-05	2.09E-05	1.39E-05	7.15E-06	3.57E-06	9.93E-07
I-131	F	7.00E+09	1.17E-03	3.00E-04	1.25E-04	6.67E-05	3.00E-05	1.75E-05	1.17E-05	6.01E-06	3.00E-06	8.34E-07
Cs-137	S	6.00E+09	1.53E-03	3.93E-04	1.64E-04	8.74E-05	3.93E-05	2.29E-05	1.53E-05	7.86E-06	3.93E-06	1.09E-06
Pm-147	M	2.00E+10	9.73E-04	2.50E-04	1.04E-04	5.56E-05	2.50E-05	1.46E-05	9.73E-06	5.00E-06	2.50E-06	6.95E-07
Sm-153	M	6.00E+09	5.84E-05	1.50E-05	6.26E-06	3.34E-06	1.50E-06	8.76E-07	5.84E-07	3.00E-07	1.50E-07	4.17E-08
Gd-153	F	9.00E+10	3.13E-03	8.04E-04	3.35E-04	1.79E-04	8.04E-05	4.69E-05	3.13E-05	1.61E-05	8.04E-06	2.23E-06
Ir-192	S	6.00E+09	3.89E-04	1.00E-04	4.17E-05	2.22E-05	1.00E-05	5.84E-06	3.89E-06	2.00E-06	1.00E-06	2.78E-07
Au-198	S	6.00E+09	7.51E-05	1.93E-05	8.04E-06	4.29E-06	1.93E-06	1.13E-06	7.51E-07	3.86E-07	1.93E-07	5.36E-08
Tl-201	F	4.00E+10	4.17E-05	1.07E-05	4.47E-06	2.38E-06	1.07E-06	6.26E-07	4.17E-07	2.14E-07	1.07E-07	2.98E-08
Po-210	S	2.00E+08	8.34E-03	2.14E-03	8.94E-04	4.77E-04	2.14E-04	1.25E-04	8.34E-05	4.29E-05	2.14E-05	5.96E-06
Ra-226	S	3.00E+07	2.36E-03	6.08E-04	2.53E-04	1.35E-04	6.08E-05	3.55E-05	2.36E-05	1.22E-05	6.08E-06	1.69E-06
Pu-238	F	1.00E+07	4.63E-03	1.19E-03	4.97E-04	2.65E-04	1.19E-04	6.95E-05	4.63E-05	2.38E-05	1.19E-05	3.31E-06
Am-241	F	1.00E+07	4.17E-03	1.07E-03	4.47E-04	2.38E-04	1.07E-04	6.26E-05	4.17E-05	2.14E-05	1.07E-05	2.98E-06
Cf-252	M	3.00E+07	6.74E-03	1.73E-03	7.22E-04	3.85E-04	1.73E-04	1.01E-04	6.74E-05	3.47E-05	1.73E-05	4.82E-06
Na-22	F	5.00E+09	1.12E-04	2.89E-05	1.20E-05	6.42E-06	2.89E-06	1.69E-06	1.12E-06	5.78E-07	2.89E-07	8.03E-08
P-32	M	5.00E+09	2.55E-04	6.55E-05	2.73E-05	1.46E-05	6.55E-06	3.82E-06	2.55E-06	1.31E-06	6.55E-07	1.82E-07
P-33	M	1.00E+10	1.41E-04	3.63E-05	1.51E-05	8.08E-06	3.63E-06	2.12E-06	1.41E-06	7.27E-07	3.63E-07	1.01E-07
S-35	S	3.00E+10	5.35E-04	1.38E-04	5.73E-05	3.06E-05	1.38E-05	8.03E-06	5.35E-06	2.75E-06	1.38E-06	3.82E-07
Cr-51	S	3.00E+11	1.81E-04	4.65E-05	1.94E-05	1.03E-05	4.65E-06	2.71E-06	1.81E-06	9.29E-07	4.65E-07	1.29E-07
Y-90	S	3.00E+09	9.04E-05	2.32E-05	9.68E-06	5.16E-06	2.32E-06	1.36E-06	9.04E-07	4.65E-07	2.32E-07	6.45E-08
Ba-133	S	3.00E+10	2.22E-03	5.72E-04	2.38E-04	1.27E-04	5.72E-05	3.34E-05	2.22E-05	1.14E-05	5.72E-06	1.59E-06
Lu-177	S	7.00E+09	9.24E-05	2.38E-05	9.91E-06	5.28E-06	2.38E-06	1.39E-06	9.24E-07	4.75E-07	2.38E-07	6.60E-08

Tabella A.III.5

Dose efficace impegnata per inalazione (Sv) dai bambini, da un rilascio pari a $10^{-2} A_2$

Radionuclide	tipo assorb. polm.	distanza (m)	50	100	150	200	300	400	500	700	1000	2000
		rilascio (Bq)										
H-3	S	4.00E+11	1.88E-03	4.84E-04	2.29E-04	1.35E-04	6.73E-05	4.04E-05	2.69E-05	1.51E-05	8.88E-06	3.23E-06
C-14	S	3.00E+10	2.75E-03	7.07E-04	2.95E-04	1.57E-04	7.07E-05	4.13E-05	2.75E-05	1.41E-05	7.07E-06	1.96E-06
F-18	S	6.00E+09	7.43E-06	1.91E-06	7.97E-07	4.25E-07	1.91E-07	1.12E-07	7.43E-08	3.82E-08	1.91E-08	5.31E-09
Fe-55	F	4.00E+11	6.94E-03	1.78E-03	7.43E-04	3.96E-04	1.78E-04	1.04E-04	6.94E-05	3.57E-05	1.78E-05	4.96E-06
Co-57	S	1.00E+11	1.86E-03	4.78E-04	1.99E-04	1.06E-04	4.78E-05	2.79E-05	1.86E-05	9.56E-06	4.78E-06	1.33E-06
Co-60	S	4.00E+09	1.98E-03	5.10E-04	2.12E-04	1.13E-04	5.10E-05	2.97E-05	1.98E-05	1.02E-05	5.10E-06	1.42E-06
Ni-63	S	3.00E+11	6.32E-03	1.62E-03	6.77E-04	3.61E-04	1.62E-04	9.48E-05	6.32E-05	3.25E-05	1.62E-05	4.51E-06
Ga-67	M	3.00E+10	1.34E-04	3.44E-05	1.43E-05	7.65E-06	3.44E-06	2.01E-06	1.34E-06	6.88E-07	3.44E-07	9.56E-08
Ga-68	M	5.00E+09	5.70E-06	1.47E-06	6.11E-07	3.26E-07	1.47E-07	8.55E-08	5.70E-08	2.93E-08	1.47E-08	4.07E-09
Ge-68	M	5.00E+09	1.24E-03	3.19E-04	1.33E-04	7.08E-05	3.19E-05	1.86E-05	1.24E-05	6.37E-06	3.19E-06	8.85E-07
Se-75	F	3.00E+10	9.29E-04	2.39E-04	9.96E-05	5.31E-05	2.39E-05	1.39E-05	9.29E-06	4.78E-06	2.39E-06	6.64E-07
Rb-86	F	5.00E+09	1.24E-04	3.19E-05	1.33E-05	7.08E-06	3.19E-06	1.86E-06	1.24E-06	6.37E-07	3.19E-07	8.85E-08
Sr-89	S	6.00E+09	8.92E-04	2.29E-04	9.56E-05	5.10E-05	2.29E-05	1.34E-05	8.92E-06	4.59E-06	2.29E-06	6.37E-07
Sr-90	S	3.00E+09	6.69E-03	1.72E-03	7.17E-04	3.82E-04	1.72E-04	1.00E-04	6.69E-05	3.44E-05	1.72E-05	4.78E-06
Nb-95	S	1.00E+10	3.10E-04	7.97E-05	3.32E-05	1.77E-05	7.97E-06	4.65E-06	3.10E-06	1.59E-06	7.97E-07	2.21E-07
Mo-99	S	6.00E+09	1.26E-04	3.25E-05	1.35E-05	7.22E-06	3.25E-06	1.90E-06	1.26E-06	6.50E-07	3.25E-07	9.03E-08
Tc-99m	S	4.00E+10	1.73E-05	4.46E-06	1.86E-06	9.91E-07	4.46E-07	2.60E-07	1.73E-07	8.92E-08	4.46E-08	1.24E-08
Pd-103	S	4.00E+11	3.37E-03	8.67E-04	3.61E-04	1.93E-04	8.67E-05	5.06E-05	3.37E-05	1.73E-05	8.67E-06	2.41E-06
Cd-109	F	2.00E+10	3.47E-03	8.92E-04	3.72E-04	1.98E-04	8.92E-05	5.20E-05	3.47E-05	1.78E-05	8.92E-06	2.48E-06
In-111	M	3.00E+10	1.52E-04	3.92E-05	1.63E-05	8.71E-06	3.92E-06	2.29E-06	1.52E-06	7.84E-07	3.92E-07	1.09E-07
I-123	F	3.00E+10	6.69E-05	1.72E-05	7.17E-06	3.82E-06	1.72E-06	1.00E-06	6.69E-07	3.44E-07	1.72E-07	4.78E-08
I-125	F	3.00E+10	4.09E-03	1.05E-03	4.38E-04	2.34E-04	1.05E-04	6.13E-05	4.09E-05	2.10E-05	1.05E-05	2.92E-06
I-131	F	7.00E+09	1.65E-03	4.24E-04	1.77E-04	9.42E-05	4.24E-05	2.47E-05	1.65E-05	8.47E-06	4.24E-06	1.18E-06
Cs-137	S	6.00E+09	3.57E-03	9.18E-04	3.82E-04	2.04E-04	9.18E-05	5.35E-05	3.57E-05	1.84E-05	9.18E-06	2.55E-06
Pm-147	M	2.00E+10	1.73E-03	4.46E-04	1.86E-04	9.91E-05	4.46E-05	2.60E-05	1.73E-05	8.92E-06	4.46E-06	1.24E-06
Sm-153	M	6.00E+09	7.43E-05	1.91E-05	7.97E-06	4.25E-06	1.91E-06	1.12E-06	7.43E-07	3.82E-07	1.91E-07	5.31E-08
Gd-153	F	9.00E+10	4.35E-03	1.12E-03	4.66E-04	2.49E-04	1.12E-04	6.52E-05	4.35E-05	2.24E-05	1.12E-05	3.11E-06
Ir-192	S	6.00E+09	7.06E-04	1.82E-04	7.57E-05	4.04E-05	1.82E-05	1.06E-05	7.06E-06	3.63E-06	1.82E-06	5.04E-07
Au-198	S	6.00E+09	1.04E-04	2.68E-05	1.12E-05	5.95E-06	2.68E-06	1.56E-06	1.04E-06	5.35E-07	2.68E-07	7.43E-08
Tl-201	F	4.00E+10	4.66E-05	1.20E-05	4.99E-06	2.66E-06	1.20E-06	6.99E-07	4.66E-07	2.40E-07	1.20E-07	3.33E-08
Po-210	S	2.00E+08	1.46E-02	3.76E-03	1.57E-03	8.35E-04	3.76E-04	2.19E-04	1.46E-04	7.52E-05	3.76E-05	1.04E-05
Ra-226	S	3.00E+07	4.46E-03	1.15E-03	4.78E-04	2.55E-04	1.15E-04	6.69E-05	4.46E-05	2.29E-05	1.15E-05	3.19E-06
Pu-238	F	1.00E+07	1.36E-02	3.50E-03	1.46E-03	7.79E-04	3.50E-04	2.04E-04	1.36E-04	7.01E-05	3.50E-05	9.74E-06
Am-241	F	1.00E+07	1.24E-02	3.19E-03	1.33E-03	7.08E-04	3.19E-04	1.86E-04	1.24E-04	6.37E-05	3.19E-05	8.85E-06
Cf-252	M	3.00E+07	1.19E-02	3.06E-03	1.27E-03	6.80E-04	3.06E-04	1.78E-04	1.19E-04	6.12E-05	3.06E-05	8.50E-06
Na-22	F	5.00E+09	1.49E-04	3.82E-05	1.59E-05	8.50E-06	3.82E-06	2.23E-06	1.49E-06	7.65E-07	3.82E-07	1.06E-07
P-32	M	5.00E+09	3.28E-04	8.44E-05	3.52E-05	1.88E-05	8.44E-06	4.93E-06	3.28E-06	1.69E-06	8.44E-07	2.35E-07
P-33	M	1.00E+10	2.60E-04	6.69E-05	2.79E-05	1.49E-05	6.69E-06	3.90E-06	2.60E-06	1.34E-06	6.69E-07	1.86E-07
S-35	S	3.00E+10	9.66E-04	2.49E-04	1.04E-04	5.52E-05	2.49E-05	1.45E-05	9.66E-06	4.97E-06	2.49E-06	6.90E-07
Cr-51	S	3.00E+11	2.45E-04	6.31E-05	2.63E-05	1.40E-05	6.31E-06	3.68E-06	2.45E-06	1.26E-06	6.31E-07	1.75E-07
Y-90	S	3.00E+09	1.00E-04	2.58E-05	1.08E-05	5.73E-06	2.58E-06	1.51E-06	1.00E-06	5.16E-07	2.58E-07	7.17E-08
Ba-133	S	3.00E+10	4.83E-03	1.24E-03	5.18E-04	2.76E-04	1.24E-04	7.25E-05	4.83E-05	2.49E-05	1.24E-05	3.45E-06
Lu-177	S	7.00E+09	1.47E-04	3.79E-05	1.58E-05	8.43E-06	3.79E-06	2.21E-06	1.47E-06	7.58E-07	3.79E-07	1.05E-07

Tabella A.III.6

Dose efficace impegnata per inalazione (Sv) dagli adulti della popolazione, da un rilascio pari a $10^2 A_2$

Radionuclide	tipo assorb. polm.	distanza (m)	50	100	150	200	300	400	500	700	1000	2000
		rilascio (Bq)										
H-3	S	4.00E+11	1.87E-03	4.81E-04	2.27E-04	1.34E-04	6.68E-05	4.01E-05	2.67E-05	1.50E-05	8.82E-06	3.21E-06
C-14	S	3.00E+10	3.13E-03	8.05E-04	3.35E-04	1.79E-04	8.05E-05	4.70E-05	3.13E-05	1.61E-05	8.05E-06	2.24E-06
F-18	S	6.00E+09	6.37E-06	1.64E-06	6.82E-07	3.64E-07	1.64E-07	9.55E-08	6.37E-08	3.28E-08	1.64E-08	4.55E-09
Fe-55	F	4.00E+11	5.54E-03	1.42E-03	5.94E-04	3.17E-04	1.42E-04	8.31E-05	5.54E-05	2.85E-05	1.42E-05	3.96E-06
Co-57	S	1.00E+11	1.80E-03	4.63E-04	1.93E-04	1.03E-04	4.63E-05	2.70E-05	1.80E-05	9.25E-06	4.63E-06	1.29E-06
Co-60	S	4.00E+09	2.23E-03	5.74E-04	2.39E-04	1.27E-04	5.74E-05	3.35E-05	2.23E-05	1.15E-05	5.74E-06	1.59E-06
Ni-63	S	3.00E+11	7.02E-03	1.80E-03	7.52E-04	4.01E-04	1.80E-04	1.05E-04	7.02E-05	3.61E-05	1.80E-05	5.01E-06
Ga-67	M	3.00E+10	1.30E-04	3.33E-05	1.39E-05	7.40E-06	3.33E-06	1.94E-06	1.30E-06	6.66E-07	3.33E-07	9.25E-08
Ga-68	M	5.00E+09	4.41E-06	1.13E-06	4.72E-07	2.52E-07	1.13E-07	6.61E-08	4.41E-08	2.27E-08	1.13E-08	3.15E-09
Ge-68	M	5.00E+09	1.26E-03	3.24E-04	1.35E-04	7.20E-05	3.24E-05	1.89E-05	1.26E-05	6.48E-06	3.24E-06	9.00E-07
Se-75	F	3.00E+10	5.40E-04	1.39E-04	5.78E-05	3.08E-05	1.39E-05	8.10E-06	5.40E-06	2.78E-06	1.39E-06	3.86E-07
Rb-86	F	5.00E+09	8.37E-05	2.15E-05	8.96E-06	4.78E-06	2.15E-06	1.25E-06	8.37E-07	4.30E-07	2.15E-07	5.98E-08
Sr-89	S	6.00E+09	8.53E-04	2.19E-04	9.14E-05	4.87E-05	2.19E-05	1.28E-05	8.53E-06	4.39E-06	2.19E-06	6.09E-07
Sr-90	S	3.00E+09	8.64E-03	2.22E-03	9.25E-04	4.93E-04	2.22E-04	1.30E-04	8.64E-05	4.44E-05	2.22E-05	6.17E-06
Nb-95	S	1.00E+10	3.24E-04	8.33E-05	3.47E-05	1.85E-05	8.33E-06	4.86E-06	3.24E-06	1.67E-06	8.33E-07	2.31E-07
Mo-99	S	6.00E+09	1.07E-04	2.75E-05	1.14E-05	6.11E-06	2.75E-06	1.60E-06	1.07E-06	5.50E-07	2.75E-07	7.63E-08
Tc-99m	S	4.00E+10	1.44E-05	3.70E-06	1.54E-06	8.22E-07	3.70E-07	2.16E-07	1.44E-07	7.40E-08	3.70E-08	1.03E-08
Pd-103	S	4.00E+11	3.24E-03	8.33E-04	3.47E-04	1.85E-04	8.33E-05	4.86E-05	3.24E-05	1.67E-05	8.33E-06	2.31E-06
Cd-109	F	2.00E+10	2.91E-03	7.49E-04	3.12E-04	1.67E-04	7.49E-05	4.37E-05	2.91E-05	1.50E-05	7.49E-06	2.08E-06
In-111	M	3.00E+10	1.24E-04	3.19E-05	1.33E-05	7.09E-06	3.19E-06	1.86E-06	1.24E-06	6.38E-07	3.19E-07	8.87E-08
I-123	F	3.00E+10	3.99E-05	1.03E-05	4.28E-06	2.28E-06	1.03E-06	5.99E-07	3.99E-07	2.05E-07	1.03E-07	2.85E-08
I-125	F	3.00E+10	2.75E-03	7.08E-04	2.95E-04	1.57E-04	7.08E-05	4.13E-05	2.75E-05	1.42E-05	7.08E-06	1.97E-06
I-131	F	7.00E+09	9.32E-04	2.40E-04	9.98E-05	5.33E-05	2.40E-05	1.40E-05	9.32E-06	4.79E-06	2.40E-06	6.66E-07
Cs-137	S	6.00E+09	4.21E-03	1.08E-03	4.51E-04	2.41E-04	1.08E-04	6.31E-05	4.21E-05	2.16E-05	1.08E-05	3.01E-06
Pm-147	M	2.00E+10	1.80E-03	4.63E-04	1.93E-04	1.03E-04	4.63E-05	2.70E-05	1.80E-05	9.25E-06	4.63E-06	1.29E-06
Sm-153	M	6.00E+09	6.80E-05	1.75E-05	7.29E-06	3.89E-06	1.75E-06	1.02E-06	6.80E-07	3.50E-07	1.75E-07	4.86E-08
Gd-153	F	9.00E+10	3.40E-03	8.74E-04	3.64E-04	1.94E-04	8.74E-05	5.10E-05	3.40E-05	1.75E-05	8.74E-06	2.43E-06
Ir-192	S	6.00E+09	7.12E-04	1.83E-04	7.63E-05	4.07E-05	1.83E-05	1.07E-05	7.12E-06	3.66E-06	1.83E-06	5.09E-07
Au-198	S	6.00E+09	9.28E-05	2.39E-05	9.95E-06	5.30E-06	2.39E-06	1.39E-06	9.28E-07	4.77E-07	2.39E-07	6.63E-08
Tl-201	F	4.00E+10	3.17E-05	8.14E-06	3.39E-06	1.81E-06	8.14E-07	4.75E-07	3.17E-07	1.63E-07	8.14E-08	2.26E-08
Po-210	S	2.00E+08	1.55E-02	3.98E-03	1.66E-03	8.84E-04	3.98E-04	2.32E-04	1.55E-04	7.96E-05	3.98E-05	1.11E-05
Ra-226	S	3.00E+07	5.13E-03	1.32E-03	5.49E-04	2.93E-04	1.32E-04	7.69E-05	5.13E-05	2.64E-05	1.32E-05	3.66E-06
Pu-238	F	1.00E+07	1.98E-02	5.09E-03	2.12E-03	1.13E-03	5.09E-04	2.97E-04	1.98E-04	1.02E-04	5.09E-05	1.41E-05
Am-241	F	1.00E+07	1.73E-02	4.44E-03	1.85E-03	9.87E-04	4.44E-04	2.59E-04	1.73E-04	8.88E-05	4.44E-05	1.23E-05
Cf-252	M	3.00E+07	1.08E-02	2.78E-03	1.16E-03	6.17E-04	2.78E-04	1.62E-04	1.08E-04	5.55E-05	2.78E-05	7.71E-06
Na-22	F	5.00E+09	1.17E-04	3.01E-05	1.25E-05	6.68E-06	3.01E-06	1.75E-06	1.17E-06	6.01E-07	3.01E-07	8.35E-08
P-32	M	5.00E+09	3.06E-04	7.86E-05	3.28E-05	1.75E-05	7.86E-06	4.59E-06	3.06E-06	1.57E-06	7.86E-07	2.18E-07
P-33	M	1.00E+10	2.70E-04	6.94E-05	2.89E-05	1.54E-05	6.94E-06	4.05E-06	2.70E-06	1.39E-06	6.94E-07	1.93E-07
S-35	S	3.00E+10	1.03E-03	2.64E-04	1.10E-04	5.86E-05	2.64E-05	1.54E-05	1.03E-05	5.27E-06	2.64E-06	7.32E-07
Cr-51	S	3.00E+11	2.00E-04	5.13E-05	2.14E-05	1.14E-05	5.13E-06	3.00E-06	2.00E-06	1.03E-06	5.13E-07	1.43E-07
Y-90	S	3.00E+09	8.10E-05	2.08E-05	8.67E-06	4.63E-06	2.08E-06	1.21E-06	8.10E-07	4.16E-07	2.08E-07	5.78E-08
Ba-133	S	3.00E+10	5.40E-03	1.39E-03	5.78E-04	3.08E-04	1.39E-04	8.10E-05	5.40E-05	2.78E-05	1.39E-05	3.86E-06
Lu-177	S	7.00E+09	1.51E-04	3.89E-05	1.62E-05	8.64E-06	3.89E-06	2.27E-06	1.51E-06	7.77E-07	3.89E-07	1.08E-07

Tabella A.III.7**Intensità di dose efficace da irraggiamento esterno per concentrazione o deposito unitari**

Radionuclide	Coefficiente di intensità di dose efficace da irraggiamento diretto dalla nube	Coefficiente di intensità di dose efficace da irraggiamento diretto dal suolo
	(Sv·m ³ ·Bq ⁻¹ ·s ⁻¹)	(Sv·m ² ·Bq ⁻¹ ·s ⁻¹)
H-3	0.00E+00	0.00E+00
C-14	2.60E-18	1.27E-20
F-18	4.56E-14	9.82E-16
Fe-55	0.00E+00	0.00E+00
Co-57	4.97E-15	1.08E-16
Co-60	1.19E-13	2.30E-15
Ni-63	0.00E+00	0.00E+00
Ga-67	6.49E-15	1.41E-16
Ga-68	4.29E-14	9.99E-16
Ge-68	1.01E-19	4.10E-20
Se-75	1.68E-14	3.61E-16
Rb-86	4.94E-15	1.67E-16
Sr-89	4.37E-16	6.86E-17
Sr-90	8.90E-16	1.12E-16
Nb-95	3.49E-14	7.28E-16
Mo-99	6.99E-15	1.78E-16
Tc-99m	5.25E-15	1.14E-16
Pd-103	5.32E-17	7.67E-18
Cd-109	2.28E-16	1.66E-17
In-111	1.68E-14	3.68E-16
I-123	6.49E-15	1.53E-16
I-125	3.73E-16	3.14E-17
I-131	1.69E-14	3.64E-16
Cs-137	2.55E-14	5.51E-16
Pm-147	8.67E-18	2.80E-20
Sm-153	2.04E-15	6.10E-17
Gd-153	3.11E-15	9.22E-17
Ir-192	3.61E-14	7.77E-16
Au-198	1.80E-14	4.10E-16
Tl-201	3.25E-15	7.96E-17
Po-210	3.89E-19	8.09E-21
Ra-226	2.84E-16	6.11E-18
Pu-238	3.50E-18	6.26E-19
Am-241	6.74E-16	2.33E-17
Cf-252	3.63E-18	5.24E-19
Na-22	1.02E-13	2.05E-15
P-32	5.36E-16	8.52E-17
P-33	1.45E-17	3.64E-20
S-35	3.11E-18	1.33E-20
Cr-51	1.38E-15	2.97E-17
Y-90	7.92E-16	1.10E-16
Ba-133	1.62E-14	3.73E-16
Lu-177	1.50E-15	3.21E-17

Tabella A.III.8

Dose efficace da irraggiamento esterno (nube + suolo) (Sv) da un rilascio pari a $10^2 A_2$

Radionuclide	distanza (m)	50	100	150	200	300	400	500	700	1000	2000
	rilascio										
	(Bq)										
H-3	4.00E+11	0.00E+00									
C-14	3.00E+10	2.85E-08	7.33E-09	3.05E-09	1.63E-09	7.33E-10	4.28E-10	2.85E-10	1.47E-10	7.33E-11	2.04E-11
F-18	6.00E+09	3.76E-04	9.66E-05	4.02E-05	2.15E-05	9.66E-06	5.63E-06	3.76E-06	1.93E-06	9.66E-07	2.68E-07
Fe-55	4.00E+11	0.00E+00									
Co-57	1.00E+11	6.88E-04	1.77E-04	7.37E-05	3.93E-05	1.77E-05	1.03E-05	6.88E-06	3.54E-06	1.77E-06	4.91E-07
Co-60	4.00E+09	5.90E-04	1.52E-04	6.32E-05	3.37E-05	1.52E-05	8.85E-06	5.90E-06	3.03E-06	1.52E-06	4.21E-07
Ni-63	3.00E+11	0.00E+00									
Ga-67	3.00E+10	2.69E-04	6.93E-05	2.89E-05	1.54E-05	6.93E-06	4.04E-06	2.69E-06	1.39E-06	6.93E-07	1.92E-07
Ga-68	5.00E+09	3.17E-04	8.15E-05	3.40E-05	1.81E-05	8.15E-06	4.76E-06	3.17E-06	1.63E-06	8.15E-07	2.27E-07
Ge-68	5.00E+09	1.24E-08	3.20E-09	1.33E-09	7.11E-10	3.20E-10	1.87E-10	1.24E-10	6.39E-11	3.20E-11	8.88E-12
Se-75	3.00E+10	6.90E-04	1.78E-04	7.40E-05	3.94E-05	1.78E-05	1.04E-05	6.90E-06	3.55E-06	1.78E-06	4.93E-07
Rb-86	5.00E+09	5.22E-05	1.34E-05	5.60E-06	2.98E-06	1.34E-06	7.83E-07	5.22E-07	2.69E-07	1.34E-07	3.73E-08
Sr-89	6.00E+09	2.51E-05	6.45E-06	2.69E-06	1.43E-06	6.45E-07	3.76E-07	2.51E-07	1.29E-07	6.45E-08	1.79E-08
Sr-90	3.00E+09	2.04E-05	5.26E-06	2.19E-06	1.17E-06	5.26E-07	3.07E-07	2.04E-07	1.05E-07	5.26E-08	1.46E-08
Nb-95	1.00E+10	4.65E-04	1.20E-04	4.98E-05	2.66E-05	1.20E-05	6.97E-06	4.65E-06	2.39E-06	1.20E-06	3.32E-07
Mo-99	6.00E+09	6.75E-05	1.74E-05	7.24E-06	3.86E-06	1.74E-06	1.01E-06	6.75E-07	3.47E-07	1.74E-07	4.82E-08
Tc-99m	4.00E+10	2.90E-04	7.47E-05	3.11E-05	1.66E-05	7.47E-06	4.36E-06	2.90E-06	1.49E-06	7.47E-07	2.07E-07
Pd-103	4.00E+11	1.87E-04	4.81E-05	2.00E-05	1.07E-05	4.81E-06	2.81E-06	1.87E-06	9.62E-07	4.81E-07	1.34E-07
Cd-109	2.00E+10	2.04E-05	5.25E-06	2.19E-06	1.17E-06	5.25E-07	3.06E-07	2.04E-07	1.05E-07	5.25E-08	1.46E-08
In-111	3.00E+10	7.03E-04	1.81E-04	7.53E-05	4.02E-05	1.81E-05	1.05E-05	7.03E-06	3.62E-06	1.81E-06	5.02E-07
I-123	3.00E+10	2.91E-04	7.49E-05	3.12E-05	1.66E-05	7.49E-06	4.37E-06	2.91E-06	1.50E-06	7.49E-07	2.08E-07
I-125	3.00E+10	5.78E-05	1.49E-05	6.19E-06	3.30E-06	1.49E-06	8.66E-07	5.78E-07	2.97E-07	1.49E-07	4.13E-08
I-131	7.00E+09	1.62E-04	4.18E-05	1.74E-05	9.28E-06	4.18E-06	2.44E-06	1.62E-06	8.35E-07	4.18E-07	1.16E-07
Cs-137	6.00E+09	2.11E-04	5.42E-05	2.26E-05	1.20E-05	5.42E-06	3.16E-06	2.11E-06	1.08E-06	5.42E-07	1.50E-07
Pm-147	2.00E+10	4.60E-08	1.18E-08	4.93E-09	2.63E-09	1.18E-09	6.90E-10	4.60E-10	2.37E-10	1.18E-10	3.29E-11
Sm-153	6.00E+09	2.30E-05	5.91E-06	2.46E-06	1.31E-06	5.91E-07	3.45E-07	2.30E-07	1.18E-07	5.91E-08	1.64E-08
Gd-153	9.00E+10	5.21E-04	1.34E-04	5.59E-05	2.98E-05	1.34E-05	7.82E-06	5.21E-06	2.68E-06	1.34E-06	3.72E-07
Ir-192	6.00E+09	2.97E-04	7.64E-05	3.18E-05	1.70E-05	7.64E-06	4.46E-06	2.97E-06	1.53E-06	7.64E-07	2.12E-07
Au-198	6.00E+09	1.56E-04	4.02E-05	1.68E-05	8.93E-06	4.02E-06	2.35E-06	1.56E-06	8.04E-07	4.02E-07	1.12E-07
Tl-201	4.00E+10	2.02E-04	5.19E-05	2.16E-05	1.15E-05	5.19E-06	3.03E-06	2.02E-06	1.04E-06	5.19E-07	1.44E-07
Po-210	2.00E+08	1.03E-10	2.66E-11	1.11E-11	5.90E-12	2.66E-12	1.55E-12	1.03E-12	5.31E-13	2.66E-13	7.38E-14
Ra-226	3.00E+07	1.17E-08	3.00E-09	1.25E-09	6.68E-10	3.00E-10	1.75E-10	1.17E-10	6.01E-11	3.00E-11	8.34E-12
Pu-238	1.00E+07	3.81E-10	9.80E-11	4.08E-11	2.18E-11	9.80E-12	5.72E-12	3.81E-12	1.96E-12	9.80E-13	2.72E-13
Am-241	1.00E+07	1.46E-08	3.74E-09	1.56E-09	8.32E-10	3.74E-10	2.18E-10	1.46E-10	7.49E-11	3.74E-11	1.04E-11
Cf-252	3.00E+07	9.58E-10	2.46E-10	1.03E-10	5.48E-11	2.46E-11	1.44E-11	9.58E-12	4.93E-12	2.46E-12	6.85E-13
Na-22	5.00E+09	6.56E-04	1.69E-04	7.02E-05	3.75E-05	1.69E-05	9.83E-06	6.56E-06	3.37E-06	1.69E-06	4.68E-07
P-32	5.00E+09	2.60E-05	6.67E-06	2.78E-06	1.48E-06	6.67E-07	3.89E-07	2.60E-07	1.33E-07	6.67E-08	1.85E-08
P-33	1.00E+10	3.22E-08	8.27E-09	3.45E-09	1.84E-09	8.27E-10	4.82E-10	3.22E-10	1.65E-10	8.27E-11	2.30E-11
S-35	3.00E+10	3.07E-08	7.88E-09	3.29E-09	1.75E-09	7.88E-10	4.60E-10	3.07E-10	1.58E-10	7.88E-11	2.19E-11
Cr-51	3.00E+11	5.68E-04	1.46E-04	6.08E-05	3.24E-05	1.46E-05	8.52E-06	5.68E-06	2.92E-06	1.46E-06	4.06E-07
Y-90	3.00E+09	2.01E-05	5.17E-06	2.16E-06	1.15E-06	5.17E-07	3.02E-07	2.01E-07	1.03E-07	5.17E-08	1.44E-08
Ba-133	3.00E+10	7.11E-04	1.83E-04	7.62E-05	4.06E-05	1.83E-05	1.07E-05	7.11E-06	3.66E-06	1.83E-06	5.08E-07
Lu-177	7.00E+09	1.43E-05	3.68E-06	1.53E-06	8.19E-07	3.68E-07	2.15E-07	1.43E-07	7.37E-08	3.68E-08	1.02E-08

Tabella A.III.9

Dose efficace totale (inalazione + irraggiamento) (Sv) per i lattanti, relativamente alla fase incidentale acuta, da un rilascio pari a $10^2 A_2$

Radionuclide	tipo assorb. polm.	distanza (m)	50	100	150	200	300	400	500	700	1000	2000	
		rilascio (Bq)											
H-3	S	4.00E+11	1.11E-03	2.86E-04	1.35E-04	7.94E-05	3.97E-05	2.38E-05	1.59E-05	8.90E-06	5.24E-06	1.91E-06	
C-14	S	3.00E+10	1.32E-03	3.40E-04	1.42E-04	7.55E-05	3.40E-05	1.98E-05	1.32E-05	6.79E-06	3.40E-06	9.43E-07	
F-18	S	6.00E+09	3.81E-04	9.81E-05	4.09E-05	2.18E-05	9.81E-06	5.72E-06	3.81E-06	1.96E-06	9.81E-07	2.72E-07	
Fe-55	F	4.00E+11	3.89E-03	1.00E-03	4.17E-04	2.22E-04	1.00E-04	5.84E-05	3.89E-05	2.00E-05	1.00E-05	2.78E-06	
Co-57	S	1.00E+11	1.71E-03	4.39E-04	1.83E-04	9.76E-05	4.39E-05	2.56E-05	1.71E-05	8.78E-06	4.39E-06	1.22E-06	
Co-60	S	4.00E+09	1.44E-03	3.71E-04	1.55E-04	8.24E-05	3.71E-05	2.16E-05	1.44E-05	7.42E-06	3.71E-06	1.03E-06	
Ni-63	S	3.00E+11	3.34E-03	8.58E-04	3.57E-04	1.91E-04	8.58E-05	5.00E-05	3.34E-05	1.72E-05	8.58E-06	2.38E-06	
Ga-67	M	3.00E+10	3.67E-04	9.43E-05	3.93E-05	2.10E-05	9.43E-06	5.50E-06	3.67E-06	1.89E-06	9.43E-07	2.62E-07	
Ga-68	M	5.00E+09	3.22E-04	8.29E-05	3.45E-05	1.84E-05	8.29E-06	4.84E-06	3.22E-06	1.66E-06	8.29E-07	2.30E-07	
Ge-68	M	5.00E+09	6.95E-04	1.79E-04	7.45E-05	3.97E-05	1.79E-05	1.04E-05	6.95E-06	3.57E-06	1.79E-06	4.97E-07	
Se-75	F	3.00E+10	1.23E-03	3.17E-04	1.32E-04	7.04E-05	3.17E-05	1.85E-05	1.23E-05	6.34E-06	3.17E-06	8.80E-07	
Rb-86	F	5.00E+09	1.91E-04	4.92E-05	2.05E-05	1.09E-05	4.92E-06	2.87E-06	1.91E-06	9.84E-07	4.92E-07	1.37E-07	
Sr-89	S	6.00E+09	5.67E-04	1.46E-04	6.08E-05	3.24E-05	1.46E-05	8.51E-06	5.67E-06	2.92E-06	1.46E-06	4.05E-07	
Sr-90	S	3.00E+09	2.94E-03	7.56E-04	3.15E-04	1.68E-04	7.56E-05	4.41E-05	2.94E-05	1.51E-05	7.56E-06	2.10E-06	
Nb-95	S	1.00E+10	6.43E-04	1.65E-04	6.89E-05	3.68E-05	1.65E-05	9.65E-06	6.43E-06	3.31E-06	1.65E-06	4.59E-07	
Mo-99	S	6.00E+09	1.63E-04	4.20E-05	1.75E-05	9.34E-06	4.20E-06	2.45E-06	1.63E-06	8.41E-07	4.20E-07	1.17E-07	
Tc-99m	S	4.00E+10	3.03E-04	7.78E-05	3.24E-05	1.73E-05	7.78E-06	4.54E-06	3.03E-06	1.56E-06	7.78E-07	2.16E-07	
Pd-103	S	4.00E+11	2.50E-03	6.44E-04	2.68E-04	1.43E-04	6.44E-05	3.76E-05	2.50E-05	1.29E-05	6.44E-06	1.79E-06	
Cd-109	F	2.00E+10	2.11E-03	5.41E-04	2.26E-04	1.20E-04	5.41E-05	3.16E-05	2.11E-05	1.08E-05	5.41E-06	1.50E-06	
In-111	M	3.00E+10	8.07E-04	2.08E-04	8.65E-05	4.61E-05	2.08E-05	1.21E-05	8.07E-06	4.15E-06	2.08E-06	5.77E-07	
I-123	F	3.00E+10	3.52E-04	9.04E-05	3.77E-05	2.01E-05	9.04E-06	5.28E-06	3.52E-06	1.81E-06	9.04E-07	2.51E-07	
I-125	F	3.00E+10	1.45E-03	3.72E-04	1.55E-04	8.27E-05	3.72E-05	2.17E-05	1.45E-05	7.45E-06	3.72E-06	1.03E-06	
I-131	F	7.00E+09	1.33E-03	3.42E-04	1.43E-04	7.60E-05	3.42E-05	2.00E-05	1.33E-05	6.84E-06	3.42E-06	9.50E-07	
Cs-137	S	6.00E+09	1.74E-03	4.47E-04	1.86E-04	9.94E-05	4.47E-05	2.61E-05	1.74E-05	8.95E-06	4.47E-06	1.24E-06	
Pm-147	M	2.00E+10	9.73E-04	2.50E-04	1.04E-04	5.56E-05	2.50E-05	1.46E-05	9.73E-06	5.00E-06	2.50E-06	6.95E-07	
Sm-153	M	6.00E+09	8.14E-05	2.09E-05	8.72E-06	4.65E-06	2.09E-06	1.22E-06	8.14E-07	4.19E-07	2.09E-07	5.81E-08	
Gd-153	F	9.00E+10	3.65E-03	9.38E-04	3.91E-04	2.09E-04	9.38E-05	5.47E-05	3.65E-05	1.88E-05	9.38E-06	2.61E-06	
Ir-192	S	6.00E+09	6.86E-04	1.76E-04	7.35E-05	3.92E-05	1.76E-05	1.03E-05	6.86E-06	3.53E-06	1.76E-06	4.90E-07	
Au-198	S	6.00E+09	2.31E-04	5.95E-05	2.48E-05	1.32E-05	5.95E-06	3.47E-06	2.31E-06	1.19E-06	5.95E-07	1.65E-07	
Tl-201	F	4.00E+10	2.43E-04	6.26E-05	2.61E-05	1.39E-05	6.26E-06	3.65E-06	2.43E-06	1.25E-06	6.26E-07	1.74E-07	
Po-210	S	2.00E+08	8.34E-03	2.14E-03	8.94E-04	4.77E-04	2.14E-04	1.25E-04	8.34E-05	4.29E-05	2.14E-05	5.96E-06	
Ra-226	S	3.00E+07	2.36E-03	6.08E-04	2.53E-04	1.35E-04	6.08E-05	3.55E-05	2.36E-05	1.22E-05	6.08E-06	1.69E-06	
Pu-238	F	1.00E+07	4.63E-03	1.19E-03	4.97E-04	2.65E-04	1.19E-04	6.95E-05	4.63E-05	2.38E-05	1.19E-05	3.31E-06	
Am-241	F	1.00E+07	4.17E-03	1.07E-03	4.47E-04	2.38E-04	1.07E-04	6.26E-05	4.17E-05	2.14E-05	1.07E-05	2.98E-06	
Cf-252	M	3.00E+07	6.74E-03	1.73E-03	7.22E-04	3.85E-04	1.73E-04	1.01E-04	6.74E-05	3.47E-05	1.73E-05	4.82E-06	
Na-22	F	5.00E+09	7.68E-04	1.97E-04	8.23E-05	4.39E-05	1.97E-05	1.15E-05	7.68E-06	3.95E-06	1.97E-06	5.49E-07	
P-32	M	5.00E+09	2.81E-04	7.22E-05	3.01E-05	1.60E-05	7.22E-06	4.21E-06	2.81E-06	1.44E-06	7.22E-07	2.01E-07	
P-33	M	1.00E+10	1.41E-04	3.64E-05	1.51E-05	8.08E-06	3.64E-06	2.12E-06	1.41E-06	7.27E-07	3.64E-07	1.01E-07	
S-35	S	3.00E+10	5.35E-04	1.38E-04	5.73E-05	3.06E-05	1.38E-05	8.03E-06	5.35E-06	2.75E-06	1.38E-06	3.82E-07	
Cr-51	S	3.00E+11	7.49E-04	1.92E-04	8.02E-05	4.28E-05	1.92E-05	1.12E-05	7.49E-06	3.85E-06	1.92E-06	5.35E-07	
Y-90	S	3.00E+09	1.10E-04	2.84E-05	1.18E-05	6.31E-06	2.84E-06	1.66E-06	1.10E-06	5.68E-07	2.84E-07	7.89E-08	
Ba-133	S	3.00E+10	2.94E-03	7.55E-04	3.14E-04	1.68E-04	7.55E-05	4.40E-05	2.94E-05	1.51E-05	7.55E-06	2.10E-06	
Lu-177	S	7.00E+09	1.07E-04	2.75E-05	1.14E-05	6.10E-06	2.75E-06	1.60E-06	1.07E-06	5.49E-07	2.75E-07	7.63E-08	

Tabella A.III.10

Dose efficace totale (inalazione + irraggiamento) (Sv) per i bambini, relativamente alla fase incidentale acuta, da un rilascio pari a $10^2 A_2$

Radionuclide	tipo assorb. polm.	distanza (m)	50	100	150	200	300	400	500	700	1000	2000	
		rilascio (Bq)											
H-3	S	4.00E+11	1.88E-03	4.84E-04	2.29E-04	1.35E-04	6.73E-05	4.04E-05	2.69E-05	1.51E-05	8.88E-06	3.23E-06	
C-14	S	3.00E+10	2.75E-03	7.07E-04	2.95E-04	1.57E-04	7.07E-05	4.13E-05	2.75E-05	1.41E-05	7.07E-06	1.96E-06	
F-18	S	6.00E+09	3.83E-04	9.85E-05	4.10E-05	2.19E-05	9.85E-06	5.74E-06	3.83E-06	1.97E-06	9.85E-07	2.74E-07	
Fe-55	F	4.00E+11	6.94E-03	1.78E-03	7.43E-04	3.96E-04	1.78E-04	1.04E-04	6.94E-05	3.57E-05	1.78E-05	4.96E-06	
Co-57	S	1.00E+11	2.55E-03	6.55E-04	2.73E-04	1.46E-04	6.55E-05	3.82E-05	2.55E-05	1.31E-05	6.55E-06	1.82E-06	
Co-60	S	4.00E+09	2.57E-03	6.61E-04	2.76E-04	1.47E-04	6.61E-05	3.86E-05	2.57E-05	1.32E-05	6.61E-06	1.84E-06	
Ni-63	S	3.00E+11	6.32E-03	1.62E-03	6.77E-04	3.61E-04	1.62E-04	9.48E-05	6.32E-05	3.25E-05	1.62E-05	4.51E-06	
Ga-67	M	3.00E+10	4.03E-04	1.04E-04	4.32E-05	2.30E-05	1.04E-05	6.05E-06	4.03E-06	2.07E-06	1.04E-06	2.88E-07	
Ga-68	M	5.00E+09	3.23E-04	8.30E-05	3.46E-05	1.84E-05	8.30E-06	4.84E-06	3.23E-06	1.66E-06	8.30E-07	2.31E-07	
Ge-68	M	5.00E+09	1.24E-03	3.19E-04	1.33E-04	7.08E-05	3.19E-05	1.86E-05	1.24E-05	6.37E-06	3.19E-06	8.85E-07	
Se-75	F	3.00E+10	1.62E-03	4.16E-04	1.74E-04	9.25E-05	4.16E-05	2.43E-05	1.62E-05	8.33E-06	4.16E-06	1.16E-06	
Rb-86	F	5.00E+09	1.76E-04	4.53E-05	1.89E-05	1.01E-05	4.53E-06	2.64E-06	1.76E-06	9.06E-07	4.53E-07	1.26E-07	
Sr-89	S	6.00E+09	9.17E-04	2.36E-04	9.83E-05	5.24E-05	2.36E-05	1.38E-05	9.17E-06	4.72E-06	2.36E-06	6.55E-07	
Sr-90	S	3.00E+09	6.71E-03	1.73E-03	7.19E-04	3.83E-04	1.73E-04	1.01E-04	6.71E-05	3.45E-05	1.73E-05	4.79E-06	
Nb-95	S	1.00E+10	7.74E-04	1.99E-04	8.30E-05	4.43E-05	1.99E-05	1.16E-05	7.74E-06	3.98E-06	1.99E-06	5.53E-07	
Mo-99	S	6.00E+09	1.94E-04	4.99E-05	2.08E-05	1.11E-05	4.99E-06	2.91E-06	1.94E-06	9.97E-07	4.99E-07	1.39E-07	
Tc-99m	S	4.00E+10	3.08E-04	7.92E-05	3.30E-05	1.76E-05	7.92E-06	4.62E-06	3.08E-06	1.58E-06	7.92E-07	2.20E-07	
Pd-103	S	4.00E+11	3.56E-03	9.15E-04	3.81E-04	2.03E-04	9.15E-05	5.34E-05	3.56E-05	1.83E-05	9.15E-06	2.54E-06	
Cd-109	F	2.00E+10	3.49E-03	8.97E-04	3.74E-04	1.99E-04	8.97E-05	5.23E-05	3.49E-05	1.79E-05	8.97E-06	2.49E-06	
In-111	M	3.00E+10	8.55E-04	2.20E-04	9.16E-05	4.89E-05	2.20E-05	1.28E-05	8.55E-06	4.40E-06	2.20E-06	6.11E-07	
I-123	F	3.00E+10	3.58E-04	9.21E-05	3.84E-05	2.05E-05	9.21E-06	5.37E-06	3.58E-06	1.84E-06	9.21E-07	2.56E-07	
I-125	F	3.00E+10	4.15E-03	1.07E-03	4.44E-04	2.37E-04	1.07E-04	6.22E-05	4.15E-05	2.13E-05	1.07E-05	2.96E-06	
I-131	F	7.00E+09	1.81E-03	4.65E-04	1.94E-04	1.03E-04	4.65E-05	2.72E-05	1.81E-05	9.31E-06	4.65E-06	1.29E-06	
Cs-137	S	6.00E+09	3.78E-03	9.72E-04	4.05E-04	2.16E-04	9.72E-05	5.67E-05	3.78E-05	1.94E-05	9.72E-06	2.70E-06	
Pm-147	M	2.00E+10	1.73E-03	4.46E-04	1.86E-04	9.91E-05	4.46E-05	2.60E-05	1.73E-05	8.92E-06	4.46E-06	1.24E-06	
Sm-153	M	6.00E+09	9.73E-05	2.50E-05	1.04E-05	5.56E-06	2.50E-06	1.46E-06	9.73E-07	5.01E-07	2.50E-07	6.95E-08	
Gd-153	F	9.00E+10	4.87E-03	1.25E-03	5.22E-04	2.78E-04	1.25E-04	7.31E-05	4.87E-05	2.50E-05	1.25E-05	3.48E-06	
Ir-192	S	6.00E+09	1.00E-03	2.58E-04	1.08E-04	5.73E-05	2.58E-05	1.51E-05	1.00E-05	5.16E-06	2.58E-06	7.17E-07	
Au-198	S	6.00E+09	2.60E-04	6.70E-05	2.79E-05	1.49E-05	6.70E-06	3.91E-06	2.60E-06	1.34E-06	6.70E-07	1.86E-07	
Tl-201	F	4.00E+10	2.48E-04	6.38E-05	2.66E-05	1.42E-05	6.38E-06	3.72E-06	2.48E-06	1.28E-06	6.38E-07	1.77E-07	
Po-210	S	2.00E+08	1.46E-02	3.76E-03	1.57E-03	8.35E-04	3.76E-04	2.19E-04	1.46E-04	7.52E-05	3.76E-05	1.04E-05	
Ra-226	S	3.00E+07	4.46E-03	1.15E-03	4.78E-04	2.55E-04	1.15E-04	6.69E-05	4.46E-05	2.29E-05	1.15E-05	3.19E-06	
Pu-238	F	1.00E+07	1.36E-02	3.50E-03	1.46E-03	7.79E-04	3.50E-04	2.04E-04	1.36E-04	7.01E-05	3.50E-05	9.74E-06	
Am-241	F	1.00E+07	1.24E-02	3.19E-03	1.33E-03	7.08E-04	3.19E-04	1.86E-04	1.24E-04	6.37E-05	3.19E-05	8.85E-06	
Cf-252	M	3.00E+07	1.19E-02	3.06E-03	1.27E-03	6.80E-04	3.06E-04	1.78E-04	1.19E-04	6.12E-05	3.06E-05	8.50E-06	
Na-22	F	5.00E+09	8.04E-04	2.07E-04	8.62E-05	4.60E-05	2.07E-05	1.21E-05	8.04E-06	4.14E-06	2.07E-06	5.75E-07	
P-32	M	5.00E+09	3.54E-04	9.11E-05	3.80E-05	2.02E-05	9.11E-06	5.31E-06	3.54E-06	1.82E-06	9.11E-07	2.53E-07	
P-33	M	1.00E+10	2.60E-04	6.69E-05	2.79E-05	1.49E-05	6.69E-06	3.90E-06	2.60E-06	1.34E-06	6.69E-07	1.86E-07	
S-35	S	3.00E+10	9.66E-04	2.49E-04	1.04E-04	5.52E-05	2.49E-05	1.45E-05	9.66E-06	4.97E-06	2.49E-06	6.90E-07	
Cr-51	S	3.00E+11	8.13E-04	2.09E-04	8.71E-05	4.65E-05	2.09E-05	1.22E-05	8.13E-06	4.18E-06	2.09E-06	5.81E-07	
Y-90	S	3.00E+09	1.20E-04	3.10E-05	1.29E-05	6.88E-06	3.10E-06	1.81E-06	1.20E-06	6.20E-07	3.10E-07	8.61E-08	
Ba-133	S	3.00E+10	5.54E-03	1.43E-03	5.94E-04	3.17E-04	1.43E-04	8.31E-05	5.54E-05	2.85E-05	1.43E-05	3.96E-06	
Lu-177	S	7.00E+09	1.62E-04	4.16E-05	1.73E-05	9.24E-06	4.16E-06	2.43E-06	1.62E-06	8.32E-07	4.16E-07	1.16E-07	

Tabella A.III.11

Dose efficace totale (inalazione + irraggiamento) (Sv) per gli adulti della popolazione, relativamente alla fase incidentale acuta, da un rilascio pari a $10^{-2} A_2$

Radionuclide	tipo assorb. polm.	distanza (m)	50	100	150	200	300	400	500	700	1000	2000
		rilascio (Bq)										
H-3	S	4.00E+11	1.87E-03	4.81E-04	2.27E-04	1.34E-04	6.68E-05	4.01E-05	2.67E-05	1.50E-05	8.82E-06	3.21E-06
C-14	S	3.00E+10	3.13E-03	8.05E-04	3.35E-04	1.79E-04	8.05E-05	4.70E-05	3.13E-05	1.61E-05	8.05E-06	2.24E-06
F-18	S	6.00E+09	3.82E-04	9.82E-05	4.09E-05	2.18E-05	9.82E-06	5.73E-06	3.82E-06	1.96E-06	9.82E-07	2.73E-07
Fe-55	F	4.00E+11	5.54E-03	1.42E-03	5.94E-04	3.17E-04	1.42E-04	8.31E-05	5.54E-05	2.85E-05	1.42E-05	3.96E-06
Co-57	S	1.00E+11	2.49E-03	6.40E-04	2.66E-04	1.42E-04	6.40E-05	3.73E-05	2.49E-05	1.28E-05	6.40E-06	1.78E-06
Co-60	S	4.00E+09	2.82E-03	7.25E-04	3.02E-04	1.61E-04	7.25E-05	4.23E-05	2.82E-05	1.45E-05	7.25E-06	2.01E-06
Ni-63	S	3.00E+11	7.02E-03	1.80E-03	7.52E-04	4.01E-04	1.80E-04	1.05E-04	7.02E-05	3.61E-05	1.80E-05	5.01E-06
Ga-67	M	3.00E+10	3.99E-04	1.03E-04	4.27E-05	2.28E-05	1.03E-05	5.98E-06	3.99E-06	2.05E-06	1.03E-06	2.85E-07
Ga-68	M	5.00E+09	3.22E-04	8.27E-05	3.44E-05	1.84E-05	8.27E-06	4.82E-06	3.22E-06	1.65E-06	8.27E-07	2.30E-07
Ge-68	M	5.00E+09	1.26E-03	3.24E-04	1.35E-04	7.20E-05	3.24E-05	1.89E-05	1.26E-05	6.48E-06	3.24E-06	9.00E-07
Se-75	F	3.00E+10	1.23E-03	3.16E-04	1.32E-04	7.03E-05	3.16E-05	1.84E-05	1.23E-05	6.33E-06	3.16E-06	8.79E-07
Rb-86	F	5.00E+09	1.36E-04	3.49E-05	1.46E-05	7.76E-06	3.49E-06	2.04E-06	1.36E-06	6.99E-07	3.49E-07	9.71E-08
Sr-89	S	6.00E+09	8.78E-04	2.26E-04	9.41E-05	5.02E-05	2.26E-05	1.32E-05	8.78E-06	4.51E-06	2.26E-06	6.27E-07
Sr-90	S	3.00E+09	8.66E-03	2.23E-03	9.27E-04	4.95E-04	2.23E-04	1.30E-04	8.66E-05	4.45E-05	2.23E-05	6.18E-06
Nb-95	S	1.00E+10	7.89E-04	2.03E-04	8.45E-05	4.51E-05	2.03E-05	1.18E-05	7.89E-06	4.06E-06	2.03E-06	5.63E-07
Mo-99	S	6.00E+09	1.74E-04	4.48E-05	1.87E-05	9.97E-06	4.48E-06	2.62E-06	1.74E-06	8.97E-07	4.48E-07	1.25E-07
Tc-99m	S	4.00E+10	3.05E-04	7.84E-05	3.27E-05	1.74E-05	7.84E-06	4.57E-06	3.05E-06	1.57E-06	7.84E-07	2.18E-07
Pd-103	S	4.00E+11	3.43E-03	8.81E-04	3.67E-04	1.96E-04	8.81E-05	5.14E-05	3.43E-05	1.76E-05	8.81E-06	2.45E-06
Cd-109	F	2.00E+10	2.93E-03	7.55E-04	3.14E-04	1.68E-04	7.55E-05	4.40E-05	2.93E-05	1.51E-05	7.55E-06	2.10E-06
In-111	M	3.00E+10	8.27E-04	2.13E-04	8.86E-05	4.73E-05	2.13E-05	1.24E-05	8.27E-06	4.25E-06	2.13E-06	5.91E-07
I-123	F	3.00E+10	3.31E-04	8.52E-05	3.55E-05	1.89E-05	8.52E-06	4.97E-06	3.31E-06	1.70E-06	8.52E-07	2.37E-07
I-125	F	3.00E+10	2.81E-03	7.23E-04	3.01E-04	1.61E-04	7.23E-05	4.22E-05	2.81E-05	1.45E-05	7.23E-06	2.01E-06
I-131	F	7.00E+09	1.09E-03	2.81E-04	1.17E-04	6.25E-05	2.81E-05	1.64E-05	1.09E-05	5.63E-06	2.81E-06	7.82E-07
Cs-137	S	6.00E+09	4.42E-03	1.14E-03	4.74E-04	2.53E-04	1.14E-04	6.63E-05	4.42E-05	2.27E-05	1.14E-05	3.16E-06
Pm-147	M	2.00E+10	1.80E-03	4.63E-04	1.93E-04	1.03E-04	4.63E-05	2.70E-05	1.80E-05	9.25E-06	4.63E-06	1.29E-06
Sm-153	M	6.00E+09	9.10E-05	2.34E-05	9.75E-06	5.20E-06	2.34E-06	1.36E-06	9.10E-07	4.68E-07	2.34E-07	6.50E-08
Gd-153	F	9.00E+10	3.92E-03	1.01E-03	4.20E-04	2.24E-04	1.01E-04	5.88E-05	3.92E-05	2.02E-05	1.01E-05	2.80E-06
Ir-192	S	6.00E+09	1.01E-03	2.60E-04	1.08E-04	5.77E-05	2.60E-05	1.51E-05	1.01E-05	5.19E-06	2.60E-06	7.21E-07
Au-198	S	6.00E+09	2.49E-04	6.41E-05	2.67E-05	1.42E-05	6.41E-06	3.74E-06	2.49E-06	1.28E-06	6.41E-07	1.78E-07
Tl-201	F	4.00E+10	2.33E-04	6.00E-05	2.50E-05	1.33E-05	6.00E-06	3.50E-06	2.33E-06	1.20E-06	6.00E-07	1.67E-07
Po-210	S	2.00E+08	1.55E-02	3.98E-03	1.66E-03	8.84E-04	3.98E-04	2.32E-04	1.55E-04	7.96E-05	3.98E-05	1.11E-05
Ra-226	S	3.00E+07	5.13E-03	1.32E-03	5.49E-04	2.93E-04	1.32E-04	7.69E-05	5.13E-05	2.64E-05	1.32E-05	3.66E-06
Pu-238	F	1.00E+07	1.98E-02	5.09E-03	2.12E-03	1.13E-03	5.09E-04	2.97E-04	1.98E-04	1.02E-04	5.09E-05	1.41E-05
Am-241	F	1.00E+07	1.73E-02	4.44E-03	1.85E-03	9.87E-04	4.44E-04	2.59E-04	1.73E-04	8.88E-05	4.44E-05	1.23E-05
Cf-252	M	3.00E+07	1.08E-02	2.78E-03	1.16E-03	6.17E-04	2.78E-04	1.62E-04	1.08E-04	5.55E-05	2.78E-05	7.71E-06
Na-22	F	5.00E+09	7.73E-04	1.99E-04	8.28E-05	4.41E-05	1.99E-05	1.16E-05	7.73E-06	3.97E-06	1.99E-06	5.52E-07
P-32	M	5.00E+09	3.32E-04	8.53E-05	3.55E-05	1.90E-05	8.53E-06	4.98E-06	3.32E-06	1.71E-06	8.53E-07	2.37E-07
P-33	M	1.00E+10	2.70E-04	6.94E-05	2.89E-05	1.54E-05	6.94E-06	4.05E-06	2.70E-06	1.39E-06	6.94E-07	1.93E-07
S-35	S	3.00E+10	1.03E-03	2.64E-04	1.10E-04	5.86E-05	2.64E-05	1.54E-05	1.03E-05	5.27E-06	2.64E-06	7.32E-07
Cr-51	S	3.00E+11	7.68E-04	1.97E-04	8.22E-05	4.39E-05	1.97E-05	1.15E-05	7.68E-06	3.95E-06	1.97E-06	5.48E-07
Y-90	S	3.00E+09	1.01E-04	2.60E-05	1.08E-05	5.78E-06	2.60E-06	1.52E-06	1.01E-06	5.20E-07	2.60E-07	7.22E-08
Ba-133	S	3.00E+10	6.11E-03	1.57E-03	6.54E-04	3.49E-04	1.57E-04	9.16E-05	6.11E-05	3.14E-05	1.57E-05	4.36E-06
Lu-177	S	7.00E+09	1.65E-04	4.25E-05	1.77E-05	9.45E-06	4.25E-06	2.48E-06	1.65E-06	8.51E-07	4.25E-07	1.18E-07

Tabella A.III.12***Coefficienti di contaminazione del latte***

Radionuclide	Coefficiente NRPB riferito alla contaminazione di picco	Tempo necessario a raggiungere il picco di contaminazione	Livello massimo ammissibile	Livello massimo ammissibile per gli alimenti per lattanti
	(Bq/kg / Bq/m ²)	(g)	(Bq/kg)	(Bq/kg)
Co-60	5.10E-02	2	1000	400
Sr-89	1.10E-02	5	125	75
Sr-90	1.20E-02	5	125	75
Nb-95	2.40E-04	2	1000	400
I-131	7.20E-02	4	500	150
Cs-137	7.20E-02	5	1000	400
Pu-238	1.00E-06	7	20	1
Am-241	1.00E-06	7	20	1

Tabella A.III.13***Coefficienti di contaminazione dei vegetali a foglia***

Radionuclide	Coefficiente NRPB riferito alla contaminazione di picco	Livello massimo ammissibile
	(Bq/kg / Bq/m ²)	(Bq/kg)
Co-60	0.3	1250
Sr-89	0.3	750
Sr-90	0.3	750
Nb-95	0.3	1250
I-131	0.3	2000
Cs-137	0.3	1250
Pu-238	0.3	80
Am-241	0.3	80

Tabella A.III.14

Contaminazione del latte (Bq/kg) prodotto alle diverse distanze sottovento, derivante da un rilascio pari a $10^{-2} A_2$

Radionuclide	distanza (m)		50	100	150	200	300	400	500	700	1000	2000
	rilascio (Bq)	limite lattanti (Bq/kg)										
Co-60	4.00E+09	400	1.43E+05	3.67E+04	1.53E+04	8.16E+03	3.67E+03	2.14E+03	1.43E+03	7.34E+02	3.67E+02	1.02E+02
Sr-89	6.00E+09	75	4.62E+04	1.19E+04	4.95E+03	2.64E+03	1.19E+03	6.93E+02	4.62E+02	2.38E+02	1.19E+02	3.30E+01
Sr-90	3.00E+09	75	2.52E+04	6.48E+03	2.70E+03	1.44E+03	6.48E+02	3.78E+02	2.52E+02	1.30E+02	6.48E+01	1.80E+01
Nb-95	1.00E+10	400	1.68E+03	4.32E+02	1.80E+02	9.60E+01	4.32E+01	2.52E+01	1.68E+01	8.64E+00	4.32E+00	1.20E+00
I-131	7.00E+09	150	3.53E+05	9.07E+04	3.78E+04	2.02E+04	9.07E+03	5.29E+03	3.53E+03	1.81E+03	9.07E+02	2.52E+02
Cs-137	6.00E+09	400	3.02E+05	7.78E+04	3.24E+04	1.73E+04	7.78E+03	4.54E+03	3.02E+03	1.56E+03	7.78E+02	2.16E+02
Pu-238	1.00E+07	1	7.00E-03	1.80E-03	7.50E-04	4.00E-04	1.80E-04	1.05E-04	7.00E-05	3.60E-05	1.80E-05	5.00E-06
Am-241	1.00E+07	1	7.00E-03	1.80E-03	7.50E-04	4.00E-04	1.80E-04	1.05E-04	7.00E-05	3.60E-05	1.80E-05	5.00E-06

Tabella A.III.15

Contaminazione dei vegetali a foglia (Bq/kg) prodotti alle diverse distanze sottovento, derivante da un rilascio pari a $10^{-2} A_2$

Radionuclide	distanza (m)		50	100	150	200	300	400	500	700	1000	2000
	rilascio (Bq)	limite (Bq/kg)										
Co-60	4.00E+09	1250	8.40E+05	2.16E+05	9.00E+04	4.80E+04	2.16E+04	1.26E+04	8.40E+03	4.32E+03	2.16E+03	6.00E+02
Sr-89	6.00E+09	750	1.26E+06	3.24E+05	1.35E+05	7.20E+04	3.24E+04	1.89E+04	1.26E+04	6.48E+03	3.24E+03	9.00E+02
Sr-90	3.00E+09	750	6.30E+05	1.62E+05	6.75E+04	3.60E+04	1.62E+04	9.45E+03	6.30E+03	3.24E+03	1.62E+03	4.50E+02
Nb-95	1.00E+10	1250	2.10E+06	5.40E+05	2.25E+05	1.20E+05	5.40E+04	3.15E+04	2.10E+04	1.08E+04	5.40E+03	1.50E+03
I-131	7.00E+09	2000	1.47E+06	3.78E+05	1.58E+05	8.40E+04	3.78E+04	2.21E+04	1.47E+04	7.56E+03	3.78E+03	1.05E+03
Cs-137	6.00E+09	1250	1.26E+06	3.24E+05	1.35E+05	7.20E+04	3.24E+04	1.89E+04	1.26E+04	6.48E+03	3.24E+03	9.00E+02
Pu-238	1.00E+07	80	2.10E+03	5.40E+02	2.25E+02	1.20E+02	5.40E+01	3.15E+01	2.10E+01	1.08E+01	5.40E+00	1.50E+00
Am-241	1.00E+07	80	2.10E+03	5.40E+02	2.25E+02	1.20E+02	5.40E+01	3.15E+01	2.10E+01	1.08E+01	5.40E+00	1.50E+00

Tabella A.III.16

Inventario di riferimento per lo Scenario 1

Radionuclide	Tipo di assorbimento polmonare	Coefficiente di dose efficace da inalazione per adulti (> 17 a)	Coefficiente di dose efficace da inalazione per bambini (7-12 a)	Coefficiente di dose efficace da inalazione per lattanti (< 1 a)	Coefficiente di intensità di dose efficace da irraggiamento diretto dalla nube	Coefficiente di intensità dose efficace da irraggiamento diretto dal suolo	A ₂	A ₂	Composizione percentuale su base colli statistica triennio 2005-2007	Ricalcolo percentuale	Contenuto in A ₂	AIIII/8
I-131	F	7.40E-09	1.90E-08	7.20E-08	1.69E-14	3.64E-16	7.00E-01	7.00E+11	30.5%	31.0%	9.29E-01	6.50E+11
I-125	F	5.10E-09	1.10E-08	2.00E-08	3.73E-16	3.14E-17	3.00E+00	3.00E+12	25.0%	25.4%	7.61E-01	2.28E+12
Mo-99	S	9.90E-10	1.70E-09	6.90E-09	6.99E-15	1.78E-16	6.00E-01	6.00E+11	14.8%	15.0%	4.51E-01	2.70E+11
I-123	F	7.40E-11	1.80E-10	8.70E-10	6.49E-15	1.53E-16	3.00E+00	3.00E+12	4.9%	5.0%	1.49E-01	4.48E+11
In-111	M	2.30E-10	4.10E-10	1.50E-09	1.68E-14	3.68E-16	3.00E+00	3.00E+12	4.8%	4.9%	1.46E-01	4.39E+11
F-18	S	5.90E-11	1.00E-10	4.20E-10	4.56E-14	9.82E-16	6.00E-01	6.00E+11	3.0%	3.0%	9.14E-02	5.48E+10
Ir-192	S	6.60E-09	9.50E-09	2.80E-08	3.61E-14	7.77E-16	6.00E-01	6.00E+11	2.9%	2.9%	8.83E-02	5.30E+10
Tl-201	F	4.40E-11	9.40E-11	4.50E-10	3.25E-15	7.96E-17	4.00E+00	4.00E+12	2.4%	2.4%	7.31E-02	2.92E+11
P-32	M	3.40E-09	5.30E-09	2.20E-08	5.36E-16	8.52E-17	5.00E-01	5.00E+11	2.3%	2.3%	7.01E-02	3.50E+10
C-14	S	5.80E-09	7.40E-09	1.90E-08	2.60E-18	1.27E-20	3.00E+00	3.00E+12	1.6%	1.6%	4.87E-02	1.46E+11
Ga-67	M	2.40E-10	3.60E-10	1.40E-09	6.49E-15	1.41E-16	3.00E+00	3.00E+12	1.6%	1.6%	4.87E-02	1.46E+11
H-3	S	2.60E-10	3.80E-10	1.20E-09	0.00E+00	0.00E+00	4.00E+01	4.00E+13	1.0%	1.0%	3.05E-02	1.22E+12
Tc-99m	S	2.00E-11	3.50E-11	1.30E-10	5.25E-15	1.14E-16	4.00E+00	4.00E+12	0.9%	0.9%	2.74E-02	1.10E+11
Am-241	F	9.60E-05	1.00E-04	1.80E-04	6.74E-16	2.33E-17	1.00E-03	1.00E+09	0.5%	0.5%	1.52E-02	1.52E+07
Sm-153	M	6.30E-10	1.00E-09	4.20E-09	2.04E-15	6.10E-17	6.00E-01	6.00E+11	0.5%	0.5%	1.52E-02	9.14E+09
Cr-51	S	3.70E-11	6.60E-11	2.60E-10	1.38E-15	2.97E-17	3.00E+01	3.00E+13	0.5%	0.5%	1.52E-02	4.57E+11
Y-90	S	1.50E-09	2.70E-09	1.30E-08	7.92E-16	1.10E-16	3.00E-01	3.00E+11	0.4%	0.4%	1.22E-02	3.65E+09
S-35	S	1.90E-09	2.60E-09	7.70E-09	3.11E-18	1.33E-20	3.00E+00	3.00E+12	0.3%	0.3%	9.14E-03	2.74E+10
Ni-63	S	1.30E-09	1.70E-09	4.80E-09	0.00E+00	0.00E+00	3.00E+01	3.00E+13	0.3%	0.3%	9.14E-03	2.74E+11
Se-75	F	1.00E-09	2.50E-09	7.80E-09	1.68E-14	3.61E-16	3.00E+00	3.00E+12	0.3%	0.3%	9.14E-03	2.74E+10
									98.5%	100.0%	3.00E+00	6.95E+12

Tabella A.III.17

Scenario 1 : concentrazione integrata in aria a livello del suolo (Bq·s/m³)

Radionuclide	Frazione di rilascio	distanza (m)											
		50	100	150	200	300	400	500	700	1000	2000	3000	4000
	(*)	7.00E-02	1.80E-02	7.50E-03	4.00E-03	1.80E-03	1.05E-03	7.00E-04	3.60E-04	1.80E-04	5.00E-05	2.30E-05	1.30E-05
	(**)	7.00E-02	1.80E-02	8.50E-03	5.00E-03	2.50E-03	1.50E-03	1.00E-03	5.60E-04	3.30E-04	1.20E-04	6.00E-05	4.00E-05
	rilascio												
	(Bq)												
I-131	1.00E-02	4.55E+08	1.17E+08	4.88E+07	2.60E+07	1.17E+07	6.83E+06	4.55E+06	2.34E+06	1.17E+06	3.25E+05	1.50E+05	8.45E+04
I-125	1.00E-02	1.60E+09	4.11E+08	1.71E+08	9.14E+07	4.11E+07	2.40E+07	1.60E+07	8.22E+06	4.11E+06	1.14E+06	5.25E+05	2.97E+05
Mo-99	1.00E-02	1.89E+08	4.87E+07	2.03E+07	1.08E+07	4.87E+06	2.84E+06	1.89E+06	9.74E+05	4.87E+05	1.35E+05	6.22E+04	3.52E+04
I-123	1.00E-02	3.13E+08	8.06E+07	3.36E+07	1.79E+07	8.06E+06	4.70E+06	3.13E+06	1.61E+06	8.06E+05	2.24E+05	1.03E+05	5.82E+04
In-111	1.00E-02	3.07E+08	7.89E+07	3.29E+07	1.75E+07	7.89E+06	4.61E+06	3.07E+06	1.58E+06	7.89E+05	2.19E+05	1.01E+05	5.70E+04
F-18	1.00E-02	3.84E+07	9.87E+06	4.11E+06	2.19E+06	9.87E+05	5.76E+05	3.84E+05	1.97E+05	9.87E+04	2.74E+04	1.26E+04	7.13E+03
Ir-192	1.00E-02	3.71E+07	9.54E+06	3.97E+06	2.12E+06	9.54E+05	5.56E+05	3.71E+05	1.91E+05	9.54E+04	2.65E+04	1.22E+04	6.89E+03
Tl-201	1.00E-02	2.05E+08	5.26E+07	2.19E+07	1.17E+07	5.26E+06	3.07E+06	2.05E+06	1.05E+06	5.26E+05	1.46E+05	6.72E+04	3.80E+04
P-32	1.00E-02	2.45E+07	6.30E+06	2.63E+06	1.40E+06	6.30E+05	3.68E+05	2.45E+05	1.26E+05	6.30E+04	1.75E+04	8.06E+03	4.55E+03
C-14	1.00E-02	1.02E+08	2.63E+07	1.10E+07	5.85E+06	2.63E+06	1.54E+06	1.02E+06	5.26E+05	2.63E+05	7.31E+04	3.36E+04	1.90E+04
Ga-67	1.00E-02	1.02E+08	2.63E+07	1.10E+07	5.85E+06	2.63E+06	1.54E+06	1.02E+06	5.26E+05	2.63E+05	7.31E+04	3.36E+04	1.90E+04
H-3	1.00E+00	8.53E+10	2.19E+10	1.04E+10	6.09E+09	3.08E+09	1.83E+09	1.22E+09	6.82E+08	4.02E+08	1.46E+08	7.31E+07	4.87E+07
Tc-99m	1.00E-02	7.68E+07	1.97E+07	8.22E+06	4.39E+06	1.97E+06	1.15E+06	7.68E+05	3.95E+05	1.97E+05	5.48E+04	2.52E+04	1.43E+04
Am-241	1.00E-02	1.07E+04	2.74E+03	1.14E+03	6.09E+02	2.74E+02	1.60E+02	1.07E+02	5.48E+01	2.74E+01	7.61E+00	3.50E+00	1.98E+00
Sm-153	1.00E-02	6.40E+06	1.64E+06	6.85E+05	3.65E+05	1.64E+05	9.59E+04	6.40E+04	3.29E+04	1.64E+04	4.57E+03	2.10E+03	1.19E+03
Cr-51	1.00E-02	3.20E+08	8.22E+07	3.43E+07	1.83E+07	8.22E+06	4.80E+06	3.20E+06	1.64E+06	8.22E+05	2.28E+05	1.05E+05	5.94E+04
Y-90	1.00E-02	2.56E+06	6.58E+05	2.74E+05	1.46E+05	6.58E+04	3.84E+04	2.56E+04	1.32E+04	6.58E+03	1.83E+03	8.41E+02	4.75E+02
S-35	1.00E-02	1.92E+07	4.93E+06	2.06E+06	1.10E+06	4.93E+05	2.88E+05	1.92E+05	9.87E+04	4.93E+04	1.37E+04	6.30E+03	3.56E+03
Ni-63	1.00E-02	1.92E+08	4.93E+07	2.06E+07	1.10E+07	4.93E+06	2.88E+06	1.92E+06	9.87E+05	4.93E+05	1.37E+05	6.30E+04	3.56E+04
Se-75	1.00E-02	1.92E+07	4.93E+06	2.06E+06	1.10E+06	4.93E+05	2.88E+05	1.92E+05	9.87E+04	4.93E+04	1.37E+04	6.30E+03	3.56E+03
		8.93E+10	2.30E+10	1.08E+10	6.32E+09	3.15E+09	1.89E+09	1.26E+09	7.03E+08	4.12E+08	1.49E+08	7.44E+07	4.95E+07

(*) coefficienti di dispersione atmosferica in presenza di deposizione al suolo

(**) coefficienti di dispersione atmosferica in assenza di deposizione al suolo

Tabella A.III.18

Scenario 1 : contaminazione del suolo (Bq/m²)

Radionuclide	distanza (m)	50	100	150	200	300	400	500	700	1000	2000	3000	4000	5000	6000
		rilascio (Bq)													
I-131		4.55E+06	1.17E+06	4.88E+05	2.60E+05	1.17E+05	6.83E+04	4.55E+04	2.34E+04	1.17E+04	3.25E+03	1.50E+03	8.45E+02	5.20E+02	3.71E+02
I-125		1.60E+07	4.11E+06	1.71E+06	9.14E+05	4.11E+05	2.40E+05	1.60E+05	8.22E+04	4.11E+04	1.14E+04	5.25E+03	2.97E+03	1.83E+03	1.30E+03
Mo-99		1.89E+06	4.87E+05	2.03E+05	1.08E+05	4.87E+04	2.84E+04	1.89E+04	9.74E+03	4.87E+03	1.35E+03	6.22E+02	3.52E+02	2.16E+02	1.54E+02
I-123		3.13E+06	8.06E+05	3.36E+05	1.79E+05	8.06E+04	4.70E+04	3.13E+04	1.61E+04	8.06E+03	2.24E+03	1.03E+03	5.82E+02	3.58E+02	2.55E+02
In-111		3.07E+06	7.89E+05	3.29E+05	1.75E+05	7.89E+04	4.61E+04	3.07E+04	1.58E+04	7.89E+03	2.19E+03	1.01E+03	5.70E+02	3.51E+02	2.50E+02
F-18		3.84E+05	9.87E+04	4.11E+04	2.19E+04	9.87E+03	5.76E+03	3.84E+03	1.97E+03	9.87E+02	2.74E+02	1.26E+02	7.13E+01	4.39E+01	3.12E+01
Ir-192		3.71E+05	9.54E+04	3.97E+04	2.12E+04	9.54E+03	5.56E+03	3.71E+03	1.91E+03	9.54E+02	2.65E+02	1.22E+02	6.89E+01	4.24E+01	3.02E+01
Tl-201		2.05E+06	5.26E+05	2.19E+05	1.17E+05	5.26E+04	3.07E+04	2.05E+04	1.05E+04	5.26E+03	1.46E+03	6.72E+02	3.80E+02	2.34E+02	1.67E+02
P-32		2.45E+05	6.30E+04	2.63E+04	1.40E+04	6.30E+03	3.68E+03	2.45E+03	1.26E+03	6.30E+02	1.75E+02	8.06E+01	4.55E+01	2.80E+01	2.00E+01
C-14		1.02E+06	2.63E+05	1.10E+05	5.85E+04	2.63E+04	1.54E+04	1.02E+04	5.26E+03	2.63E+03	7.31E+02	3.36E+02	1.90E+02	1.17E+02	8.33E+01
Ga-67		1.02E+06	2.63E+05	1.10E+05	5.85E+04	2.63E+04	1.54E+04	1.02E+04	5.26E+03	2.63E+03	7.31E+02	3.36E+02	1.90E+02	1.17E+02	8.33E+01
H-3		0.00E+00													
Tc-99m		7.68E+05	1.97E+05	8.22E+04	4.39E+04	1.97E+04	1.15E+04	7.68E+03	3.95E+03	1.97E+03	5.48E+02	2.52E+02	1.43E+02	8.77E+01	6.25E+01
Am-241		1.07E+02	2.74E+01	1.14E+01	6.09E+00	2.74E+00	1.60E+00	1.07E+00	5.48E-01	2.74E-01	7.61E-02	3.50E-02	1.98E-02	1.22E-02	8.68E-03
Sm-153		6.40E+04	1.64E+04	6.85E+03	3.65E+03	1.64E+03	9.59E+02	6.40E+02	3.29E+02	1.64E+02	4.57E+01	2.10E+01	1.19E+01	7.31E+00	5.21E+00
Cr-51		3.20E+06	8.22E+05	3.43E+05	1.83E+05	8.22E+04	4.80E+04	3.20E+04	1.64E+04	8.22E+03	2.28E+03	1.05E+03	5.94E+02	3.65E+02	2.60E+02
Y-90		2.56E+04	6.58E+03	2.74E+03	1.46E+03	6.58E+02	3.84E+02	2.56E+02	1.32E+02	6.58E+01	1.83E+01	8.41E+00	4.75E+00	2.92E+00	2.08E+00
S-35		1.92E+05	4.93E+04	2.06E+04	1.10E+04	4.93E+03	2.88E+03	1.92E+03	9.87E+02	4.93E+02	1.37E+02	6.30E+01	3.56E+01	2.19E+01	1.56E+01
Ni-63		1.92E+06	4.93E+05	2.06E+05	1.10E+05	4.93E+04	2.88E+04	1.92E+04	9.87E+03	4.93E+03	1.37E+03	6.30E+02	3.56E+02	2.19E+02	1.56E+02
Se-75		1.92E+05	4.93E+04	2.06E+04	1.10E+04	4.93E+03	2.88E+03	1.92E+03	9.87E+02	4.93E+02	1.37E+02	6.30E+01	3.56E+01	2.19E+01	1.56E+01
		1.28E+12	4.01E+07	4.30E+06	2.29E+06	1.03E+06	6.01E+05	4.01E+05	2.06E+05	1.03E+05	2.86E+04	1.32E+04	7.45E+03	4.58E+03	3.26E+03

Tabella A.III.19

Scenario 1 : dose efficace totale (inalazione + irraggiamento*) (Sv) per la classe dei lattanti, relativa alla fase incidentale acuta

Radionuclide	Tipo Ass. Polmonare	distanza (m)	50	100	150	200	300	400	500	700	1000	2000	3000	4000
		rilascio (Bq)												
I-131	F	6.50E+09	1.24E-03	3.18E-04	1.32E-04	7.06E-05	3.18E-05	1.85E-05	1.24E-05	6.35E-06	3.18E-06	8.83E-07	4.06E-07	2.29E-07
I-125	F	2.28E+10	1.10E-03	2.84E-04	1.18E-04	6.30E-05	2.84E-05	1.65E-05	1.10E-05	5.67E-06	2.84E-06	7.88E-07	3.62E-07	2.05E-07
Mo-99	S	2.70E+09	7.37E-05	1.89E-05	7.89E-06	4.21E-06	1.89E-06	1.11E-06	7.37E-07	3.79E-07	1.89E-07	5.26E-08	2.42E-08	1.37E-08
I-123	F	4.48E+09	5.25E-05	1.35E-05	5.62E-06	3.00E-06	1.35E-06	7.87E-07	5.25E-07	2.70E-07	1.35E-07	3.75E-08	1.72E-08	9.75E-09
In-111	M	4.39E+09	1.18E-04	3.03E-05	1.26E-05	6.74E-06	3.03E-06	1.77E-06	1.18E-06	6.07E-07	3.03E-07	8.43E-08	3.88E-08	2.19E-08
F-18	S	5.48E+08	3.48E-05	8.96E-06	3.73E-06	1.99E-06	8.96E-07	5.23E-07	3.48E-07	1.79E-07	8.96E-08	2.49E-08	1.14E-08	6.47E-09
Ir-192	S	5.30E+08	6.06E-05	1.56E-05	6.50E-06	3.46E-06	1.56E-06	9.09E-07	6.06E-07	3.12E-07	1.56E-07	4.33E-08	1.99E-08	1.13E-08
Tl-201	F	2.92E+09	1.78E-05	4.57E-06	1.91E-06	1.02E-06	4.57E-07	2.67E-07	1.78E-07	9.15E-08	4.57E-08	1.27E-08	5.85E-09	3.30E-09
P-32	M	3.50E+08	1.97E-05	5.06E-06	2.11E-06	1.12E-06	5.06E-07	2.95E-07	1.97E-07	1.01E-07	5.06E-08	1.41E-08	6.46E-09	3.65E-09
C-14	S	1.46E+09	6.44E-05	1.65E-05	6.90E-06	3.68E-06	1.65E-06	9.65E-07	6.44E-07	3.31E-07	1.65E-07	4.60E-08	2.11E-08	1.20E-08
Ga-67	M	1.46E+09	1.79E-05	4.60E-06	1.91E-06	1.02E-06	4.60E-07	2.68E-07	1.79E-07	9.19E-08	4.60E-08	1.28E-08	5.87E-09	3.32E-09
H-3	S	1.22E+12	3.39E-03	8.71E-04	4.11E-04	2.42E-04	1.21E-04	7.26E-05	4.84E-05	2.71E-05	1.60E-05	5.81E-06	2.90E-06	1.94E-06
Tc-99m	S	1.10E+09	8.29E-06	2.13E-06	8.89E-07	4.74E-07	2.13E-07	1.24E-07	8.29E-08	4.26E-08	2.13E-08	5.92E-09	2.72E-09	1.54E-09
Am-241	F	1.52E+05	6.35E-05	1.63E-05	6.80E-06	3.63E-06	1.63E-06	9.53E-07	6.35E-07	3.27E-07	1.63E-07	4.54E-08	2.09E-08	1.18E-08
Sm-153	M	9.14E+07	1.24E-06	3.19E-07	1.33E-07	7.08E-08	3.19E-08	1.86E-08	1.24E-08	6.37E-09	3.19E-09	8.85E-10	4.07E-10	2.30E-10
Cr-51	S	4.57E+09	1.14E-05	2.93E-06	1.22E-06	6.51E-07	2.93E-07	1.71E-07	1.14E-07	5.86E-08	2.93E-08	8.14E-09	3.75E-09	2.12E-09
Y-90	S	3.65E+07	1.35E-06	3.46E-07	1.44E-07	7.69E-08	3.46E-08	2.02E-08	1.35E-08	6.92E-09	3.46E-09	9.61E-10	4.42E-10	2.50E-10
S-35	S	2.74E+08	4.89E-06	1.26E-06	5.24E-07	2.79E-07	1.26E-07	7.34E-08	4.89E-08	2.52E-08	1.26E-08	3.49E-09	1.61E-09	9.08E-10
Ni-63	S	2.74E+09	3.05E-05	7.84E-06	3.27E-06	1.74E-06	7.84E-07	4.57E-07	3.05E-07	1.57E-07	7.84E-08	2.18E-08	1.00E-08	5.66E-09
Se-75	F	2.74E+08	1.13E-05	2.90E-06	1.21E-06	6.43E-07	2.90E-07	1.69E-07	1.13E-07	5.79E-08	2.90E-08	8.04E-09	3.70E-09	2.09E-09
		1.28E+12	6.32E-03	1.62E-03	7.25E-04	4.09E-04	1.96E-04	1.17E-04	7.77E-05	4.22E-05	2.35E-05	7.90E-06	3.87E-06	2.48E-06

* Percentuale del contributo da irraggiamento non superiore al 7,68%.

Tabella A.III.21

Scenario 1 : dose efficace totale (inalazione + irraggiamento*) (Sv) per la classe degli adulti, relativa alla fase incidentale acuta

Radionuclidi	Tipo Ass. Polmonare	distanza (m)	50	100	150	200	300	400	500	700	1000	2000	3000	4000
		rilascio (Bq)												
I-131	F	6.50E+09	1.02E-03	2.61E-04	1.09E-04	5.81E-05	2.61E-05	1.52E-05	1.02E-05	5.23E-06	2.61E-06	7.26E-07	3.34E-07	1.89E-07
I-125	F	2.28E+10	2.14E-03	5.50E-04	2.29E-04	1.22E-04	5.50E-05	3.21E-05	2.14E-05	1.10E-05	5.50E-06	1.53E-06	7.03E-07	3.97E-07
Mo-99	S	2.70E+09	7.86E-05	2.02E-05	8.42E-06	4.49E-06	2.02E-06	1.18E-06	7.86E-07	4.04E-07	2.02E-07	5.61E-08	2.58E-08	1.46E-08
I-123	F	4.48E+09	4.94E-05	1.27E-05	5.30E-06	2.82E-06	1.27E-06	7.41E-07	4.94E-07	2.54E-07	1.27E-07	3.53E-08	1.62E-08	9.18E-09
In-111	M	4.39E+09	1.21E-04	3.11E-05	1.30E-05	6.91E-06	3.11E-06	1.81E-06	1.21E-06	6.22E-07	3.11E-07	8.64E-08	3.97E-08	2.25E-08
F-18	S	5.48E+08	3.49E-05	8.97E-06	3.74E-06	1.99E-06	8.97E-07	5.23E-07	3.49E-07	1.79E-07	8.97E-08	2.49E-08	1.15E-08	6.48E-09
Ir-192	S	5.30E+08	8.92E-05	2.29E-05	9.55E-06	5.10E-06	2.29E-06	1.34E-06	8.92E-07	4.59E-07	2.29E-07	6.37E-08	2.93E-08	1.66E-08
Tl-201	F	2.92E+09	1.71E-05	4.39E-06	1.83E-06	9.75E-07	4.39E-07	2.56E-07	1.71E-07	8.77E-08	4.39E-08	1.22E-08	5.60E-09	3.17E-09
P-32	M	3.50E+08	2.32E-05	5.98E-06	2.49E-06	1.33E-06	5.98E-07	3.49E-07	2.32E-07	1.20E-07	5.98E-08	1.66E-08	7.64E-09	4.32E-09
C-14	S	1.46E+09	1.53E-04	3.92E-05	1.63E-05	8.72E-06	3.92E-06	2.29E-06	1.53E-06	7.89E-07	3.92E-07	1.09E-07	5.01E-08	2.83E-08
Ga-67	M	1.46E+09	1.94E-05	5.00E-06	2.08E-06	1.11E-06	5.00E-07	2.92E-07	1.94E-07	1.00E-07	5.00E-08	1.39E-08	6.39E-09	3.61E-09
H-3	S	1.22E+12	5.70E-03	1.47E-03	6.92E-04	4.07E-04	2.04E-04	1.22E-04	8.14E-05	4.56E-05	2.69E-05	9.77E-06	4.88E-06	3.26E-06
Tc-99m	S	1.10E+09	8.36E-06	2.15E-06	8.95E-07	4.78E-07	2.15E-07	1.25E-07	8.36E-08	4.30E-08	2.15E-08	5.97E-09	2.75E-09	1.55E-09
Am-241	F	1.52E+05	2.63E-04	6.76E-05	2.82E-05	1.50E-05	6.76E-06	3.95E-06	2.63E-06	1.35E-06	6.76E-07	1.88E-07	8.64E-08	4.88E-08
Sm-153	M	9.14E+07	1.39E-06	3.56E-07	1.48E-07	7.92E-08	3.56E-08	2.08E-08	1.39E-08	7.13E-09	3.56E-09	9.90E-10	4.55E-10	2.57E-10
Cr-51	S	4.57E+09	1.17E-05	3.01E-06	1.25E-06	6.68E-07	3.01E-07	1.75E-07	1.17E-07	6.01E-08	3.01E-08	8.35E-09	3.84E-09	2.17E-09
Y-90	S	3.65E+07	1.23E-06	3.17E-07	1.32E-07	7.04E-08	3.17E-08	1.85E-08	1.23E-08	6.33E-09	3.17E-09	8.80E-10	4.05E-10	2.29E-10
S-35	S	2.74E+08	9.37E-06	2.41E-06	1.00E-06	5.35E-07	2.41E-07	1.41E-07	9.37E-08	4.82E-08	2.41E-08	6.69E-09	3.08E-09	1.74E-09
Ni-63	S	2.74E+09	6.41E-05	1.65E-05	6.87E-06	3.60E-06	1.65E-06	9.62E-07	6.41E-07	3.30E-07	1.65E-07	4.58E-08	2.11E-08	1.19E-08
Se-75	F	2.74E+08	1.12E-05	2.89E-06	1.20E-06	6.42E-07	2.89E-07	1.69E-07	1.12E-07	5.78E-08	2.89E-08	8.03E-09	3.69E-09	2.09E-09
		1.28E+12	9.81E-03	2.52E-03	1.13E-03	6.42E-04	3.09E-04	1.84E-04	1.23E-04	6.67E-05	3.74E-05	1.27E-05	6.24E-06	4.02E-06

* Percentuale del contributo da irraggiamento non superiore al 4,95%.

Tabella A.III.22

Scenario 1 : contaminazione del latte (Bq/kg) prodotto alle diverse distanze sottovento

Radionuclidi	Coefficiente NRPB	Limite Bq/kg	Limite lattanti Bq/kg	Distanza (m)	50	100	150	200	300	400	500	700	1000	2000	3000	4000	5000	6000	
				rilascio															
				(Bq)															
I-131	7.20E-02	500	150	6.50E+09	3.28E+05	8.43E+04	3.51E+04	1.87E+04	8.43E+03	4.92E+03	3.28E+03	1.69E+03	8.43E+02	2.34E+02	1.08E+02	6.09E+01	3.75E+01	2.67E+01	
I-125	7.20E-02 (*)	500	150	2.28E+10	1.15E+06	2.96E+05	1.23E+05	6.58E+04	2.96E+04	1.73E+04	1.15E+04	5.92E+03	2.96E+03	8.22E+02	3.78E+02	2.14E+02	1.32E+02	9.37E+01	
I-123	7.20E-02 (*)	500	150	4.48E+09	2.26E+05	5.80E+04	2.42E+04	1.29E+04	5.80E+03	3.38E+03	2.26E+03	1.16E+03	5.80E+02	1.61E+02	7.41E+01	4.19E+01	2.58E+01	1.84E+01	
Am-241	1.00E-06	20	1	1.52E+05	1.07E-04	2.74E-05	1.14E-05	6.09E-06	2.74E-06	1.60E-06	1.07E-06	5.48E-07	2.74E-07	7.61E-08	3.50E-08	1.98E-08	1.22E-08	8.68E-09	
Isotopi dello iodio		500	150	3.38E+10	1.70E+06	4.38E+05	1.83E+05	9.74E+04	4.38E+04	2.56E+04	1.70E+04	8.77E+03	4.38E+03	1.22E+03	5.60E+02	3.17E+02	1.95E+02	1.39E+02	
isotopi del plutonio e di elementi transplutonici che emettono radiazioni alfa		20	1	1.52E+05	1.07E-04	2.74E-05	1.14E-05	6.09E-06	2.74E-06	1.60E-06	1.07E-06	5.48E-07	2.74E-07	7.61E-08	3.50E-08	1.98E-08	1.22E-08	8.68E-09	

(*) Coefficiente dello I-131.

Tabella A.III.23

Scenario 1 : contaminazione dei vegetali a foglia (Bq/kg) prodotti alle diverse distanze sottovento

Radionuclidi	coefficiente NRPB	limite	distanza (m)	50	100	150	200	300	400	500	700	1000	2000	3000	4000	
				Bq/kg	Bq/kg											
			rilascio													
			(Bq)													
I-131	0.3	2000	6.50E+09	1.37E+06	3.51E+05	1.46E+05	7.80E+04	3.51E+04	2.05E+04	1.37E+04	7.02E+03	3.51E+03	9.75E+02	4.49E+02	2.54E+02	
I-125	0.3	2000	2.28E+10	4.80E+06	1.23E+06	5.14E+05	2.74E+05	1.23E+05	7.20E+04	4.80E+04	2.47E+04	1.23E+04	3.43E+03	1.58E+03	8.91E+02	
Mo-99	0.3	1250	2.70E+09	5.68E+05	1.46E+05	6.09E+04	3.25E+04	1.46E+04	8.52E+03	5.68E+03	2.92E+03	1.46E+03	4.06E+02	1.87E+02	1.05E+02	
I-123	0.3	2000	4.48E+09	9.40E+05	2.42E+05	1.01E+05	5.37E+04	2.42E+04	1.41E+04	9.40E+03	4.84E+03	2.42E+03	6.72E+02	3.09E+02	1.75E+02	
In-111	0.3	1250	4.39E+09	9.21E+05	2.37E+05	9.87E+04	5.28E+04	2.37E+04	1.38E+04	9.21E+03	4.74E+03	2.37E+03	6.58E+02	3.03E+02	1.71E+02	
F-18	0.3	1250	5.48E+08	1.15E+05	2.96E+04	1.23E+04	6.58E+03	2.96E+03	1.73E+03	1.15E+03	5.92E+02	2.96E+02	8.22E+01	3.78E+01	2.14E+01	
Ir-192	0.3	1250	5.30E+08	1.11E+05	2.86E+04	1.19E+04	6.36E+03	2.86E+03	1.67E+03	1.11E+03	5.72E+02	2.86E+02	7.95E+01	3.66E+01	2.07E+01	
Tl-201	0.3	1250	2.92E+09	6.14E+05	1.58E+05	6.58E+04	3.51E+04	1.58E+04	9.21E+03	6.14E+03	3.16E+03	1.58E+03	4.39E+02	2.02E+02	1.14E+02	
P-32	0.3	1250	3.50E+08	7.36E+04	1.89E+04	7.88E+03	4.20E+03	1.89E+03	1.10E+03	7.36E+02	3.78E+02	1.89E+02	5.25E+01	2.42E+01	1.37E+01	
C-14	0.3	1250	1.46E+09	3.07E+05	7.89E+04	3.29E+04	1.75E+04	7.89E+03	4.61E+03	3.07E+03	1.58E+03	7.89E+02	2.19E+02	1.01E+02	5.70E+01	
Ga-67	0.3	1250	1.46E+09	3.07E+05	7.89E+04	3.29E+04	1.75E+04	7.89E+03	4.61E+03	3.07E+03	1.58E+03	7.89E+02	2.19E+02	1.01E+02	5.70E+01	
Tc-99m	0.3	1250	1.10E+09	2.30E+05	5.92E+04	2.47E+04	1.32E+04	5.92E+03	3.45E+03	2.30E+03	1.18E+03	5.92E+02	1.64E+02	7.57E+01	4.28E+01	
Am-241	0.3	80	1.52E+05	3.20E+01	8.22E+00	3.43E+00	1.83E+00	8.22E-01	4.80E-01	3.20E-01	1.64E-01	8.22E-02	2.28E-02	1.05E-02	5.94E-03	
Sm-153	0.3	1250	9.14E+07	1.92E+04	4.93E+03	2.06E+03	1.10E+03	4.93E+02	2.88E+02	1.92E+02	9.87E+01	4.93E+01	1.37E+01	6.30E+00	3.56E+00	
Cr-51	0.3	1250	4.57E+09	9.59E+05	2.47E+05	1.03E+05	5.48E+04	2.47E+04	1.44E+04	9.59E+03	4.93E+03	2.47E+03	6.85E+02	3.15E+02	1.78E+02	
Y-90	0.3	750	3.65E+07	7.68E+03	1.97E+03	8.22E+02	4.39E+02	1.97E+02	1.15E+02	7.68E+01	3.95E+01	1.97E+01	5.48E+00	2.52E+00	1.43E+00	
S-35	0.3	1250	2.74E+08	5.76E+04	1.48E+04	6.17E+03	3.29E+03	1.48E+03	8.63E+02	5.76E+02	2.96E+02	1.48E+02	4.11E+01	1.89E+01	1.07E+01	
Ni-63	0.3	1250	2.74E+09	5.76E+05	1.48E+05	6.17E+04	3.29E+04	1.48E+04	8.63E+03	5.76E+03	2.96E+03	1.48E+03	4.11E+02	1.89E+02	1.07E+02	
Se-75	0.3	1250	2.74E+08	5.76E+04	1.48E+04	6.17E+03	3.29E+03	1.48E+03	8.63E+02	5.76E+02	2.96E+02	1.48E+02	4.11E+01	1.89E+01	1.07E+01	
isotopi dello stronzio		750	3.65E+07	7.68E+03	1.97E+03	8.22E+02	4.39E+02	1.97E+02	1.15E+02	7.68E+01	3.95E+01	1.97E+01	5.48E+00	2.52E+00	1.43E+00	
isotopi dello iodio		2000	3.38E+10	7.10E+06	1.83E+06	7.61E+05	4.06E+05	1.83E+05	1.07E+05	7.10E+04	3.65E+04	1.83E+04	5.07E+03	2.33E+03	1.32E+03	
isotopi del plutonio e di elementi transplutonici che emettono radiazioni alfa		80	1.52E+05	3.20E+01	8.22E+00	3.43E+00	1.83E+00	8.22E-01	4.80E-01	3.20E-01	1.64E-01	8.22E-02	2.28E-02	1.05E-02	5.94E-03	
tutti gli altri radionuclidi		1250	1.24E+12	4.92E+06	1.26E+06	5.27E+05	2.81E+05	1.26E+05	7.37E+04	4.92E+04	2.53E+04	1.26E+04	3.51E+03	1.62E+03	9.13E+02	

Tabella A.III.16 bis

Inventario di riferimento per lo Scenario 2

Radionuclide	Tipo di assorbimento polmonare (F = fast, M = moderate, S = slow)	Coefficiente di dose efficace da inalazione per adulti (> 17 a) (Sv/Bq)	Coefficiente di dose efficace da inalazione per bambini (7-12 a) (Sv/Bq)	Coefficiente di dose efficace da inalazione per lattanti (< 1 a) (Sv/Bq)	Coefficiente di intensità di dose efficace da irraggiamento diretto dalla nube (Sv.m3.Bq-1.s-1)	Coefficiente di intensità di dose efficace da irraggiamento diretto dal suolo (Sv.m2.Bq-1.s-1)	A ₂ (TBq)	A ₂ (Bq)	composizione percentuale su base coll' statistica triennio 2005-2007	ricalcolo percentuale	contenuto in A ₂	attività (Bq)
I-131	F	7.40E-09	1.90E-08	7.20E-08	1.69E-14	3.64E-16	7.00E-01	7.00E+11	30.5%	31.0%	9.29E+00	6.50E+12
I-125	F	5.10E-09	1.10E-08	2.00E-08	3.73E-16	3.14E-17	3.00E+00	3.00E+12	25.0%	25.4%	7.61E+00	2.28E+13
Mo-99	S	9.90E-10	1.70E-09	6.90E-09	6.99E-15	1.78E-16	6.00E-01	6.00E+11	14.8%	15.0%	4.51E+00	2.70E+12
I-123	F	7.40E-11	1.80E-10	8.70E-10	6.49E-15	1.53E-16	3.00E+00	3.00E+12	4.9%	5.0%	1.49E+00	4.48E+12
In-111	M	2.30E-10	4.10E-10	1.50E-09	1.68E-14	3.68E-16	3.00E+00	3.00E+12	4.8%	4.9%	1.46E+00	4.39E+12
F-18	S	5.90E-11	1.00E-10	4.20E-10	4.56E-14	9.82E-16	6.00E-01	6.00E+11	3.0%	3.0%	9.14E-01	5.48E+11
Ir-192	S	6.60E-09	9.50E-09	2.80E-08	3.61E-14	7.77E-16	6.00E-01	6.00E+11	2.9%	2.9%	8.83E-01	5.30E+11
Ti-201	F	4.40E-11	9.40E-11	4.50E-10	3.25E-15	7.96E-17	4.00E+00	4.00E+12	2.4%	2.4%	7.31E-01	2.92E+12
P-32	M	3.40E-09	5.30E-09	2.20E-08	5.36E-16	8.52E-17	5.00E-01	5.00E+11	2.3%	2.3%	7.01E-01	3.50E+11
C-14	S	5.80E-09	7.40E-09	1.90E-08	2.60E-18	1.27E-20	3.00E+00	3.00E+12	1.6%	1.6%	4.87E-01	1.46E+12
Ga-67	M	2.40E-10	3.60E-10	1.40E-09	6.49E-15	1.41E-16	3.00E+00	3.00E+12	1.6%	1.6%	4.87E-01	1.46E+12
H-3	S	2.60E-10	3.80E-10	1.20E-09	0.00E+00	0.00E+00	4.00E+01	4.00E+13	1.0%	1.0%	3.05E-01	1.22E+13
Tc-99m	S	2.00E-11	3.50E-11	1.30E-10	5.25E-15	1.14E-16	4.00E+00	4.00E+12	0.9%	0.9%	2.74E-01	1.10E+12
Am-241	F	9.60E-05	1.00E-04	1.80E-04	6.74E-16	2.33E-17	1.00E-03	1.00E+09	0.5%	0.5%	1.52E-01	1.52E+08
Sm-153	M	6.30E-10	1.00E-09	4.20E-09	2.04E-15	6.10E-17	6.00E-01	6.00E+11	0.5%	0.5%	1.52E-01	9.14E+10
Cr-51	S	3.70E-11	6.60E-11	2.60E-10	1.38E-15	2.97E-17	3.00E+01	3.00E+13	0.5%	0.5%	1.52E-01	4.57E+12
Y-90	S	1.50E-09	2.70E-09	1.30E-08	7.92E-16	1.10E-16	3.00E-01	3.00E+11	0.4%	0.4%	1.22E-01	3.65E+10
S-35	S	1.90E-09	2.60E-09	7.70E-09	3.11E-18	1.33E-20	3.00E+00	3.00E+12	0.3%	0.3%	9.14E-02	2.74E+11
Ni-63	S	1.30E-09	1.70E-09	4.80E-09	0.00E+00	0.00E+00	3.00E+01	3.00E+13	0.3%	0.3%	9.14E-02	2.74E+12
Se-75	F	1.00E-09	2.50E-09	7.80E-09	1.68E-14	3.61E-16	3.00E+00	3.00E+12	0.3%	0.3%	9.14E-02	2.74E+11
									98.5%	100.0%	3.00E+01	6.95E+13

Tabella A.III.17 bis

Scenario 2 : concentrazione integrata in aria a livello del suolo (Bq·s/m³)

Radionuclide	Frazione di rilascio	distanza (m)																							
		(*)	(**)	rilascio	(Bq)	50	100	150	200	300	400	500	700	1000	2000	3000	4000								
I-131	1.00E-02	6.50E+10	4.55E+09	1.17E+09	4.88E+08	2.60E+08	1.17E+08	6.83E+07	4.55E+07	2.34E+07	1.17E+07	3.25E+06	1.50E+06	8.45E+05	1.80E-02	7.50E-03	4.00E-03	1.80E-03	1.05E-03	7.00E-04	3.60E-04	1.80E-04	5.00E-05	2.30E-05	1.30E-05
I-125	1.00E-02	2.28E+11	1.60E+10	4.11E+09	1.71E+09	9.14E+08	4.11E+08	2.40E+08	1.60E+08	8.22E+07	4.11E+07	1.14E+07	5.25E+06	2.97E+06	1.80E-02	7.50E-03	4.00E-03	1.80E-03	1.05E-03	7.00E-04	3.60E-04	1.80E-04	5.00E-05	2.30E-05	1.30E-05
Mo-99	1.00E-02	2.70E+10	1.89E+09	4.87E+08	2.03E+08	1.08E+08	4.87E+07	2.84E+07	1.89E+07	9.74E+06	4.87E+06	1.35E+06	6.22E+05	3.52E+05	1.80E-02	7.50E-03	4.00E-03	1.80E-03	1.05E-03	7.00E-04	3.60E-04	1.80E-04	5.00E-05	2.30E-05	1.30E-05
I-123	1.00E-02	4.48E+10	3.13E+09	8.06E+08	3.36E+08	1.79E+08	8.06E+07	4.70E+07	3.13E+07	1.61E+07	8.06E+06	2.24E+06	1.03E+06	5.82E+05	1.80E-02	7.50E-03	4.00E-03	1.80E-03	1.05E-03	7.00E-04	3.60E-04	1.80E-04	5.00E-05	2.30E-05	1.30E-05
In-111	1.00E-02	4.39E+10	3.07E+09	7.89E+08	3.29E+08	1.75E+08	7.89E+07	4.61E+07	3.07E+07	1.58E+07	7.89E+06	2.19E+06	1.01E+06	5.70E+05	1.80E-02	7.50E-03	4.00E-03	1.80E-03	1.05E-03	7.00E-04	3.60E-04	1.80E-04	5.00E-05	2.30E-05	1.30E-05
F-18	1.00E-02	5.48E+09	3.84E+08	9.87E+07	4.11E+07	2.19E+07	9.87E+06	5.76E+06	3.84E+06	1.97E+06	9.87E+05	2.74E+05	1.26E+05	7.13E+04	1.80E-02	7.50E-03	4.00E-03	1.80E-03	1.05E-03	7.00E-04	3.60E-04	1.80E-04	5.00E-05	2.30E-05	1.30E-05
Ir-192	1.00E-02	5.30E+09	3.71E+08	9.54E+07	3.97E+07	2.12E+07	9.54E+06	5.56E+06	3.71E+06	1.91E+06	9.54E+05	2.65E+05	1.22E+05	6.89E+04	1.80E-02	7.50E-03	4.00E-03	1.80E-03	1.05E-03	7.00E-04	3.60E-04	1.80E-04	5.00E-05	2.30E-05	1.30E-05
Tl-201	1.00E-02	2.92E+10	2.05E+09	5.26E+08	2.19E+08	1.17E+08	5.26E+07	3.07E+07	2.05E+07	1.05E+07	5.26E+06	1.46E+06	6.72E+05	3.80E+05	1.80E-02	7.50E-03	4.00E-03	1.80E-03	1.05E-03	7.00E-04	3.60E-04	1.80E-04	5.00E-05	2.30E-05	1.30E-05
P-32	1.00E-02	3.50E+09	2.45E+08	6.30E+07	2.63E+07	1.40E+07	6.30E+06	3.68E+06	2.45E+06	1.26E+06	6.30E+05	1.75E+05	8.06E+04	4.55E+04	1.80E-02	7.50E-03	4.00E-03	1.80E-03	1.05E-03	7.00E-04	3.60E-04	1.80E-04	5.00E-05	2.30E-05	1.30E-05
C-14	1.00E-02	1.46E+10	1.02E+09	2.63E+08	1.10E+08	5.85E+07	2.63E+07	1.54E+07	1.02E+07	5.26E+06	2.63E+06	7.31E+05	3.36E+05	1.90E+05	1.80E-02	7.50E-03	4.00E-03	1.80E-03	1.05E-03	7.00E-04	3.60E-04	1.80E-04	5.00E-05	2.30E-05	1.30E-05
Ga-67	1.00E-02	1.46E+10	1.02E+09	2.63E+08	1.10E+08	5.85E+07	2.63E+07	1.54E+07	1.02E+07	5.26E+06	2.63E+06	7.31E+05	3.36E+05	1.90E+05	1.80E-02	7.50E-03	4.00E-03	1.80E-03	1.05E-03	7.00E-04	3.60E-04	1.80E-04	5.00E-05	2.30E-05	1.30E-05
H-3	1.00E+00	1.22E+13	8.53E+11	2.19E+11	1.04E+11	6.09E+10	3.05E+10	1.83E+10	1.22E+10	6.82E+09	4.02E+09	1.46E+09	7.31E+08	4.87E+08	1.80E-02	7.50E-03	4.00E-03	1.80E-03	1.05E-03	7.00E-04	3.60E-04	1.80E-04	5.00E-05	2.30E-05	1.30E-05
Tc-99m	1.00E-02	1.10E+10	7.68E+08	1.97E+08	8.22E+07	4.39E+07	1.97E+07	1.15E+07	7.68E+06	3.95E+06	1.97E+06	5.48E+05	2.52E+05	1.43E+05	1.80E-02	7.50E-03	4.00E-03	1.80E-03	1.05E-03	7.00E-04	3.60E-04	1.80E-04	5.00E-05	2.30E-05	1.30E-05
Am-241	1.00E-02	1.52E+06	1.07E+05	2.74E+04	1.14E+04	6.09E+03	2.74E+03	1.60E+03	1.07E+03	5.48E+02	2.74E+02	7.61E+01	3.50E+01	1.98E+01	1.80E-02	7.50E-03	4.00E-03	1.80E-03	1.05E-03	7.00E-04	3.60E-04	1.80E-04	5.00E-05	2.30E-05	1.30E-05
Sm-153	1.00E-02	9.14E+08	6.40E+07	1.64E+07	6.88E+06	3.65E+06	1.64E+06	9.59E+05	6.40E+05	3.29E+05	1.64E+05	4.57E+04	2.10E+04	1.19E+04	1.80E-02	7.50E-03	4.00E-03	1.80E-03	1.05E-03	7.00E-04	3.60E-04	1.80E-04	5.00E-05	2.30E-05	1.30E-05
Cr-51	1.00E-02	4.57E+10	3.20E+09	8.22E+08	3.43E+08	1.83E+08	8.22E+07	4.80E+07	3.20E+07	1.64E+07	8.22E+06	2.28E+06	1.05E+06	5.94E+05	1.80E-02	7.50E-03	4.00E-03	1.80E-03	1.05E-03	7.00E-04	3.60E-04	1.80E-04	5.00E-05	2.30E-05	1.30E-05
Y-90	1.00E-02	3.65E+08	2.56E+07	6.58E+06	2.74E+06	1.46E+06	6.58E+05	3.84E+05	2.56E+05	1.32E+05	6.58E+04	1.83E+04	8.41E+03	4.75E+03	1.80E-02	7.50E-03	4.00E-03	1.80E-03	1.05E-03	7.00E-04	3.60E-04	1.80E-04	5.00E-05	2.30E-05	1.30E-05
S-35	1.00E-02	2.74E+09	1.92E+08	4.93E+07	2.06E+07	1.10E+07	4.93E+06	2.88E+06	1.92E+06	9.87E+05	4.93E+05	1.37E+05	6.30E+04	3.56E+04	1.80E-02	7.50E-03	4.00E-03	1.80E-03	1.05E-03	7.00E-04	3.60E-04	1.80E-04	5.00E-05	2.30E-05	1.30E-05
Ni-63	1.00E-02	2.74E+10	1.92E+09	4.93E+08	2.06E+08	1.10E+08	4.93E+07	2.88E+07	1.92E+07	9.87E+06	4.93E+06	1.37E+06	6.30E+05	3.56E+05	1.80E-02	7.50E-03	4.00E-03	1.80E-03	1.05E-03	7.00E-04	3.60E-04	1.80E-04	5.00E-05	2.30E-05	1.30E-05
Se-75	1.00E-02	2.74E+09	1.92E+08	4.93E+07	2.06E+07	1.10E+07	4.93E+06	2.88E+06	1.92E+06	9.87E+05	4.93E+05	1.37E+05	6.30E+04	3.56E+04	1.80E-02	7.50E-03	4.00E-03	1.80E-03	1.05E-03	7.00E-04	3.60E-04	1.80E-04	5.00E-05	2.30E-05	1.30E-05
		1.28E+13	8.93E+11	2.30E+11	1.08E+11	6.32E+10	3.15E+10	1.89E+10	1.26E+10	7.03E+09	4.12E+09	1.49E+09	7.44E+08	4.95E+08											

(*) coefficienti di dispersione atmosferica in presenza di deposizione al suolo

(**) coefficienti di dispersione atmosferica in assenza di deposizione al suolo

Tabella A.III.18 bis

Scenario 2 : contaminazione del suolo (Bq/m²)

Radionuclide	distanza (m)	50	150	300	700	1000	2000	3000	4000	5000	7000	9000	10000	15000	20000
	rilascio (Bq)														
I-131	6.50E+10	4.55E+07	4.88E+06	1.17E+06	2.34E+05	1.17E+05	3.25E+04	1.50E+04	8.45E+03	5.20E+03	2.80E+03	1.69E+03	1.37E+03	5.53E+02	2.60E+02
I-125	2.28E+11	1.60E+08	1.71E+07	4.11E+06	8.22E+05	4.11E+05	1.14E+05	5.25E+04	2.97E+04	1.83E+04	9.82E+03	5.94E+03	4.80E+03	1.94E+03	9.14E+02
Mo-99	2.70E+10	1.89E+07	2.03E+06	4.87E+05	9.74E+04	4.87E+04	1.35E+04	6.22E+03	3.52E+03	2.16E+03	1.16E+03	7.03E+02	5.68E+02	2.30E+02	1.08E+02
I-123	4.48E+10	3.13E+07	3.36E+06	8.06E+05	1.61E+05	8.06E+04	2.24E+04	1.03E+04	5.82E+03	3.58E+03	1.95E+03	1.16E+03	9.40E+02	3.81E+02	1.79E+02
In-111	4.39E+10	3.07E+07	3.29E+06	7.89E+05	1.58E+05	7.89E+04	2.19E+04	1.01E+04	5.70E+03	3.51E+03	1.89E+03	1.14E+03	9.21E+02	3.73E+02	1.75E+02
F-18	5.48E+09	3.84E+06	4.11E+05	9.87E+04	1.97E+04	9.87E+03	2.74E+03	1.26E+03	7.13E+02	4.39E+02	2.36E+02	1.43E+02	1.15E+02	4.66E+01	2.19E+01
Ir-192	5.30E+09	3.71E+06	3.97E+05	9.54E+04	1.91E+04	9.54E+03	2.65E+03	1.22E+03	6.89E+02	4.24E+02	2.28E+02	1.38E+02	1.11E+02	4.50E+01	2.12E+01
Tl-201	2.92E+10	2.05E+07	2.19E+06	5.29E+05	1.05E+05	5.29E+04	1.46E+04	6.72E+03	3.80E+03	2.34E+03	1.26E+03	7.60E+02	6.14E+02	2.49E+02	1.17E+02
P-32	3.50E+09	2.45E+06	2.63E+05	6.30E+04	1.26E+04	6.30E+03	1.75E+03	8.06E+02	4.55E+02	2.80E+02	1.51E+02	9.11E+01	7.36E+01	2.98E+01	1.40E+01
C-14	1.46E+10	1.02E+07	1.10E+06	2.63E+05	5.26E+04	2.63E+04	7.31E+03	3.36E+03	1.90E+03	1.17E+03	6.29E+02	3.80E+02	3.07E+02	1.24E+02	5.85E+01
Ga-67	1.46E+10	1.02E+07	1.10E+06	2.63E+05	5.26E+04	2.63E+04	7.31E+03	3.36E+03	1.90E+03	1.17E+03	6.29E+02	3.80E+02	3.07E+02	1.24E+02	5.85E+01
H-3	1.22E+13	0.00E+00													
Tc-99m	1.10E+10	7.68E+06	8.22E+05	1.97E+05	3.95E+04	1.97E+04	5.48E+03	2.52E+03	1.43E+03	8.77E+02	4.71E+02	2.85E+02	2.30E+02	9.32E+01	4.39E+01
Am-241	1.52E+06	1.07E+03	1.14E+02	2.74E+01	5.48E+00	2.74E+00	7.61E-01	3.50E-01	1.98E-01	1.22E-01	6.55E-02	3.96E-02	3.20E-02	1.29E-02	6.09E-03
Sm-153	9.74E+08	6.40E+05	6.85E+04	1.64E+04	3.29E+03	1.64E+03	4.57E+02	2.10E+02	1.19E+02	7.31E+01	3.95E+01	2.38E+01	1.92E+01	7.77E+00	3.65E+00
Cr-51	4.57E+10	3.20E+07	3.43E+06	8.22E+05	1.64E+05	8.22E+04	2.28E+04	1.05E+04	5.94E+03	3.65E+03	1.96E+03	1.19E+03	9.59E+02	3.88E+02	1.83E+02
Y-90	3.65E+08	2.56E+05	2.74E+04	6.58E+03	1.32E+03	6.58E+02	1.83E+02	8.41E+01	4.75E+01	2.92E+01	1.57E+01	9.50E+00	7.68E+00	3.11E+00	1.46E+00
S-35	2.74E+09	1.92E+06	2.06E+05	4.93E+04	9.87E+03	4.93E+03	1.37E+03	6.30E+02	3.56E+02	2.19E+02	1.18E+02	7.13E+01	5.76E+01	2.33E+01	1.10E+01
Ni-63	2.74E+10	1.92E+07	2.06E+06	4.93E+05	9.87E+04	4.93E+04	1.37E+04	6.30E+03	3.56E+03	2.19E+03	1.18E+03	7.13E+02	5.76E+02	2.33E+02	1.10E+02
Se-75	2.74E+09	1.92E+06	2.06E+05	4.93E+04	9.87E+03	4.93E+03	1.37E+03	6.30E+02	3.56E+02	2.19E+02	1.18E+02	7.13E+01	5.76E+01	2.33E+01	1.10E+01
	1.28E+13	4.01E+08	4.30E+07	1.03E+07	2.06E+06	1.03E+06	2.86E+05	1.32E+05	7.45E+04	4.58E+04	2.46E+04	1.49E+04	1.20E+04	4.87E+03	2.29E+03

Tabella A.III.19 bis

Scenario 2 : dose efficace totale (inalazione + irraggiamento*) (Sv) per la classe dei lattanti, relativa alla fase incidentale acuta

Radionuclide	Tipo Ass. Polmonare	distanza (m)	50	100	150	200	300	400	500	700	1000	2000	3000	4000
			rilascio (Bq)											
I-131	F	6.50E+10	1.24E-02	3.18E-03	1.32E-03	7.06E-04	3.18E-04	1.85E-04	1.24E-04	6.35E-05	3.18E-05	8.83E-06	4.06E-06	2.29E-06
I-125	F	2.28E+11	1.10E-02	2.84E-03	1.18E-03	6.30E-04	2.84E-04	1.65E-04	1.10E-04	5.67E-05	2.84E-05	7.88E-06	3.62E-06	2.05E-06
Mo-99	S	2.70E+10	7.37E-04	1.89E-04	7.89E-05	4.21E-05	1.89E-05	1.11E-05	7.37E-06	3.79E-06	1.89E-06	5.26E-07	2.42E-07	1.37E-07
I-123	F	4.48E+10	5.25E-04	1.35E-04	5.62E-05	3.00E-05	1.35E-05	7.87E-06	5.25E-06	2.70E-06	1.35E-06	3.75E-07	1.72E-07	9.75E-08
In-111	M	4.39E+10	1.18E-03	3.03E-04	1.26E-04	6.74E-05	3.03E-05	1.77E-05	1.18E-05	6.07E-06	3.03E-06	8.43E-07	3.88E-07	2.19E-07
F-18	S	5.48E+09	3.48E-04	8.96E-05	3.73E-05	1.99E-05	8.96E-06	5.23E-06	3.48E-06	1.79E-06	8.96E-07	2.49E-07	1.14E-07	6.47E-08
Ir-192	S	5.30E+09	6.06E-04	1.56E-04	6.50E-05	3.46E-05	1.56E-05	9.09E-06	6.06E-06	3.12E-06	1.56E-06	4.33E-07	1.99E-07	1.13E-07
Tl-201	F	2.92E+10	1.78E-04	4.57E-05	1.91E-05	1.02E-05	4.57E-06	2.67E-06	1.78E-06	9.15E-07	4.57E-07	1.27E-07	5.85E-08	3.30E-08
P-32	M	3.50E+09	1.97E-04	5.06E-05	2.11E-05	1.12E-05	5.06E-06	2.95E-06	1.97E-06	1.01E-06	5.06E-07	1.41E-07	6.46E-08	3.65E-08
C-14	S	1.46E+10	6.44E-04	1.65E-04	6.90E-05	3.68E-05	1.65E-05	9.65E-06	6.44E-06	3.31E-06	1.65E-06	4.60E-07	2.11E-07	1.20E-07
Ga-67	M	1.46E+10	1.79E-04	4.60E-05	1.91E-05	1.02E-05	4.60E-06	2.68E-06	1.79E-06	9.19E-07	4.60E-07	1.28E-07	5.87E-08	3.32E-08
H-3	S	1.22E+13	3.39E-02	8.71E-03	4.11E-03	2.42E-03	1.21E-03	7.26E-04	4.84E-04	2.71E-04	1.60E-04	5.81E-05	2.90E-05	1.94E-05
Tc-99m	S	1.10E+10	8.29E-05	2.13E-05	8.89E-06	4.74E-06	2.13E-06	1.24E-06	8.29E-07	4.26E-07	2.13E-07	5.92E-08	2.72E-08	1.54E-08
Am-241	F	1.52E+06	6.35E-04	1.63E-04	6.80E-05	3.63E-05	1.63E-05	9.53E-06	6.35E-06	3.27E-06	1.63E-06	4.54E-07	2.09E-07	1.18E-07
Sm-153	M	9.14E+08	1.24E-05	3.19E-06	1.33E-06	7.08E-07	3.19E-07	1.86E-07	1.24E-07	6.37E-08	3.19E-08	8.85E-09	4.07E-09	2.30E-09
Cr-51	S	4.57E+10	1.14E-04	2.93E-05	1.22E-05	6.51E-06	2.93E-06	1.71E-06	1.14E-06	5.86E-07	2.93E-07	8.14E-08	3.75E-08	2.12E-08
Y-90	S	3.65E+08	1.35E-05	3.46E-06	1.44E-06	7.69E-07	3.46E-07	2.02E-07	1.35E-07	6.92E-08	3.46E-08	9.61E-09	4.42E-09	2.50E-09
S-35	S	2.74E+09	4.89E-05	1.26E-05	5.24E-06	2.79E-06	1.26E-06	7.34E-07	4.89E-07	2.52E-07	1.26E-07	3.49E-08	1.61E-08	9.08E-09
Ni-63	S	2.74E+10	3.05E-04	7.84E-05	3.27E-05	1.74E-05	7.84E-06	4.57E-06	3.05E-06	1.57E-06	7.84E-07	2.18E-07	1.00E-07	5.66E-08
Se-75	F	2.74E+09	1.13E-04	2.90E-05	1.21E-05	6.43E-06	2.90E-06	1.69E-06	1.13E-06	5.79E-07	2.90E-07	8.04E-08	3.70E-08	2.09E-08
		1.28E+13	6.32E-02	1.62E-02	7.25E-03	4.09E-03	1.96E-03	1.17E-03	7.77E-04	4.22E-04	2.35E-04	7.90E-05	3.87E-05	2.48E-05

* Percentuale del contributo da irraggiamento non superiore al 7,68%.

Tabella A.III.22 bis

Scenario 2 : contaminazione del latte (Bq/kg) prodotto alle diverse distanze sottovento

Radionuclide	coefficiente NRPB	limite lattanti	limite (Bq/kg)	distanza (m)	50	150	300	700	1000	2000	3000	4000	5000	7000	9000	10000	15000	20000	
					(Bq)	(Bq/kg)	(Bq/m ²)	(Bq/kg)	(Bq)	(Bq/kg)	(Bq/m ²)	(Bq/kg)	(Bq)	(Bq/kg)	(Bq/m ²)	(Bq/kg)	(Bq)	(Bq/kg)	(Bq/m ²)
I-131	7.20E-02	500	150	rilascio															
				6.50E+10	3.28E+06	8.43E+04	1.69E+04	8.43E+03	2.34E+03	1.08E+03	6.09E+02	3.75E+02	2.01E+02	1.22E+02	9.83E+01	3.98E+01	1.87E+01		
I-125	7.20E-02 (*)	500	150	2.28E+11	1.15E+07	1.23E+06	2.96E+05	5.92E+04	2.96E+04	8.22E+03	3.78E+03	2.14E+03	1.32E+03	7.07E+02	4.28E+02	3.45E+02	1.40E+02	6.58E+01	
I-123	7.20E-02 (*)	500	150	4.48E+10	2.26E+06	2.42E+05	5.80E+04	1.16E+04	5.80E+03	1.61E+03	7.41E+02	4.19E+02	2.58E+02	1.39E+02	8.38E+01	6.77E+01	2.74E+01	1.29E+01	
Am-241	1.00E-06	20	1	1.52E+06	1.07E-03	1.14E-04	2.74E-05	5.48E-06	2.74E-06	7.61E-07	3.50E-07	1.98E-07	1.22E-07	6.55E-08	3.96E-08	3.20E-08	1.29E-08	6.09E-09	
isotopi dello iodio		500	150	3.38E+11	1.70E+07	1.83E+06	4.38E+05	8.77E+04	4.38E+04	1.22E+04	5.60E+03	3.17E+03	1.95E+03	1.05E+03	6.33E+02	5.11E+02	2.07E+02	9.74E+01	
isotopi del plutonio e di elementi transplutonici che emettono radiazioni alfa		20	1	1.52E+06	1.07E-03	1.14E-04	2.74E-05	5.48E-06	2.74E-06	7.61E-07	3.50E-07	1.98E-07	1.22E-07	6.55E-08	3.96E-08	3.20E-08	1.29E-08	6.09E-09	

(*) Coefficiente dello I-131.

Tabella A.III.23 bis

Scenario 2 : contaminazione dei vegetali a foglia (Bq/kg) prodotti alle diverse distanze sottovento

Radionuclide	coefficiente NRPB	limite	distanza (m)	rilascio (Bq)													
				50	150	300	700	1000	2000	3000	4000	5000	7000	9000	10000	15000	20000
I-131	0.3	2000	6.50E+10	1.37E+07	1.46E+06	3.51E+05	7.02E+04	3.51E+04	9.75E+03	4.49E+03	2.54E+03	1.56E+03	8.39E+02	5.07E+02	4.10E+02	1.66E+02	7.80E+01
I-125	0.3	2000	2.28E+11	4.80E+07	5.14E+06	1.23E+06	2.47E+05	1.23E+05	3.43E+04	1.58E+04	8.91E+03	5.48E+03	2.95E+03	1.78E+03	1.44E+03	5.82E+02	2.74E+02
Mo-99	0.3	1250	2.70E+10	5.68E+06	6.09E+05	1.46E+05	2.92E+04	1.46E+04	4.06E+03	1.87E+03	1.05E+03	6.49E+02	3.49E+02	2.11E+02	1.70E+02	6.90E+01	3.25E+01
I-123	0.3	2000	4.48E+10	9.40E+06	1.01E+06	2.42E+05	4.84E+04	2.42E+04	6.72E+03	3.09E+03	1.75E+03	1.07E+03	5.78E+02	3.49E+02	2.82E+02	1.14E+02	5.37E+01
In-111	0.3	1250	4.39E+10	9.21E+06	9.87E+05	2.37E+05	4.74E+04	2.37E+04	6.58E+03	3.03E+03	1.71E+03	1.05E+03	5.66E+02	3.42E+02	2.76E+02	1.12E+02	5.26E+01
F-18	0.3	1250	5.48E+09	1.15E+06	1.23E+05	2.96E+04	5.92E+03	2.96E+03	8.22E+02	3.78E+02	2.14E+02	1.32E+02	7.07E+01	4.28E+01	3.45E+01	1.40E+01	6.58E+00
Ir-192	0.3	1250	5.30E+09	1.11E+06	1.19E+05	2.86E+04	5.72E+03	2.86E+03	7.95E+02	3.66E+02	2.07E+02	1.27E+02	6.84E+01	4.13E+01	3.34E+01	1.35E+01	6.36E+00
Tl-201	0.3	1250	2.92E+10	6.14E+06	6.58E+05	1.58E+05	3.16E+04	1.58E+04	4.39E+03	2.02E+03	1.14E+03	7.02E+02	3.77E+02	2.28E+02	1.84E+02	7.46E+01	3.51E+01
P-32	0.3	1250	3.50E+09	7.36E+05	7.88E+04	1.89E+04	3.78E+03	1.89E+03	5.25E+02	2.42E+02	1.37E+02	8.41E+01	4.52E+01	2.73E+01	2.21E+01	8.93E+00	4.20E+00
C-14	0.3	1250	1.46E+10	3.07E+06	3.29E+05	7.89E+04	1.58E+04	7.89E+03	1.01E+03	5.70E+02	3.51E+02	3.51E+02	1.89E+02	1.14E+02	9.21E+01	3.73E+01	1.75E+01
Ga-67	0.3	1250	1.46E+10	3.07E+06	3.29E+05	7.89E+04	1.58E+04	7.89E+03	1.01E+03	5.70E+02	3.51E+02	3.51E+02	1.89E+02	1.14E+02	9.21E+01	3.73E+01	1.75E+01
Tc-99m	0.3	1250	1.10E+10	2.30E+06	2.47E+05	5.92E+04	1.18E+04	5.92E+03	1.64E+03	4.28E+02	2.63E+02	2.63E+02	1.41E+02	8.55E+01	6.91E+01	2.80E+01	1.32E+01
Am-241	0.3	80	1.52E+06	3.20E+02	3.43E+01	8.22E+00	1.64E+00	8.22E-01	2.28E-01	1.05E-01	5.94E-02	3.65E-02	1.96E-02	1.19E-02	9.59E-03	3.88E-03	1.83E-03
Sm-153	0.3	1250	9.14E+08	1.92E+05	2.06E+04	4.93E+03	9.87E+02	4.93E+02	6.30E+01	3.56E+01	2.19E+01	2.19E+01	1.18E+01	7.13E+00	5.76E+00	2.33E+00	1.10E+00
Cr-51	0.3	1250	4.57E+10	9.59E+06	1.03E+06	2.47E+05	4.93E+04	2.47E+04	6.85E+03	3.15E+03	1.78E+03	1.10E+03	5.89E+02	3.56E+02	2.88E+02	1.16E+02	5.48E+01
Y-90	0.3	750	3.65E+08	7.68E+04	8.22E+03	1.97E+03	3.95E+02	1.97E+02	5.48E+01	2.52E+01	1.43E+01	8.77E+00	4.71E+00	2.85E+00	2.30E+00	9.32E-01	4.39E-01
S-35	0.3	1250	2.74E+09	5.76E+05	6.17E+04	1.48E+04	2.96E+03	1.48E+03	4.11E+02	1.89E+02	1.07E+02	6.58E+01	3.54E+01	2.14E+01	1.73E+01	6.99E+00	3.29E+00
Ni-63	0.3	1250	2.74E+10	5.76E+06	6.17E+05	1.48E+05	2.96E+04	1.48E+04	4.11E+03	1.89E+03	1.07E+03	6.58E+02	3.54E+02	2.14E+02	1.73E+02	6.99E+01	3.29E+01
Se-75	0.3	1250	2.74E+09	5.76E+05	6.17E+04	1.48E+04	2.96E+03	1.48E+03	4.11E+02	1.89E+02	1.07E+02	6.58E+01	3.54E+01	2.14E+01	1.73E+01	6.99E+00	3.29E+00
isotopi dello stronzio		750	3.65E+08	7.68E+04	8.22E+03	1.97E+03	3.95E+02	1.97E+02	5.48E+01	2.52E+01	1.43E+01	8.77E+00	4.71E+00	2.85E+00	2.30E+00	9.32E-01	4.39E-01
isotopi dello iodio		2000	3.38E+11	7.10E+07	7.61E+06	1.83E+06	3.65E+05	1.83E+05	5.07E+04	2.33E+04	1.32E+04	8.12E+03	4.36E+03	2.64E+03	2.13E+03	8.62E+02	4.06E+02
isotopi del plutonio e di elementi transplutonici che emettono radiazioni alfa		80	1.52E+06	3.20E+02	3.43E+01	8.22E+00	1.64E+00	8.22E-01	2.28E-01	1.05E-01	5.94E-02	3.65E-02	1.96E-02	1.19E-02	9.59E-03	3.88E-03	1.83E-03
tutti gli altri radionuclidi		1250	1.24E+13	4.92E+07	5.27E+06	1.26E+06	2.53E+05	1.26E+05	3.51E+04	1.62E+04	9.13E+03	5.62E+03	3.02E+03	1.83E+03	1.47E+03	5.97E+02	2.81E+02

Tabella A.III.24

Calcolo delle attività di materiali fissili con conseguenze radiologiche potenziali assimilabili a quelle dello Scenario 1

Radionuclide	Attività (Bq)	Tipo di assorbimento polmonare (F = fast, M = moderate, S = slow)	DOSE EFFICACE INALAZIONE			COEFFICIENTI INTENSITA' DOSE EFFICACE IRRAGGIAMENTO		DOSE EFFICACE TOTALE A 100 M					
			Coefficiente di dose efficace da inalazione per adulti (> 17 a)	Coefficiente di dose efficace da inalazione per bambini (7-12 a)	Coefficiente di dose efficace da inalazione per lattanti (< 1 a)	Coefficiente di intensità di dose efficace da irraggiamento diretto dalla nube	Coefficiente di intensità di dose efficace da irraggiamento diretto dal suolo	adulti	bambini	lattanti			
U-233	4.50E+09	S	9.60E-06	1.20E-05	(Sv/Bq)	(Sv/Bq)	(Sv·m ² ·Bq ⁻¹ ·s ⁻¹)	(Sv·m ² ·Bq ⁻¹ ·s ⁻¹)	(Sv)	2.00E-03	1.72E-03	(Sv)	9.12E-04
U-235	5.09E+09	S	8.50E-06	1.10E-05	3.00E-05	3.40E-05	1.42E-17	6.46E-15	2.00E-03	2.00E-03	1.78E-03	2.00E-03	9.09E-04
Pu-238	3.93E+08	F	1.10E-04	1.10E-04	2.00E-04	2.00E-04	3.50E-18	6.26E-19	2.00E-03	2.00E-03	1.38E-03	2.00E-03	4.68E-04
Pu-239	3.60E+08	F	1.20E-04	1.20E-04	2.10E-04	2.10E-04	3.48E-18	2.84E-19	2.00E-03	2.00E-03	1.38E-03	2.00E-03	4.51E-04
Pu-241	1.88E+10	F	2.30E-06	2.40E-06	2.80E-06	2.80E-06	6.33E-20	1.72E-21	2.00E-03	2.00E-03	1.44E-03	2.00E-03	3.14E-04

Tabella A.III.25

Stima delle conseguenze radiologiche, alla distanza di 300 m, per due spedizioni stradali

Radionuclide	Attività spedizione (Bq)	A ₂ (Bq)	Contenuto in A ₂ della spedizione (A ₂) (Bq)	Rilascio (Bq)	DOSE EFFICACE INALAZIONE			DOSE EFFICACE IRRAGGIAMENTO			DOSE EFFICACE TOTALE		
					Dose a 300 m adulti (Sv)	Dose a 300 m bambini (Sv)	Dose a 300 m lattanti (Sv)	Dose irraggiamento da nube a 300 m (Sv)	Dose irraggiamento dal suolo a 300 m (Sv)	Dose efficace a 300 m adulti (Sv)	Dose efficace a 300 m bambini (Sv)	Dose efficace a 300 m lattanti (Sv)	
Tl-201	1.68E+13	4.00E+12	4.20E+00	1.68E+11	3.42E-06	5.03E-06	4.50E-06	9.83E-07	2.08E-05	2.52E-05	2.68E-05	2.63E-05	
Mo-99	2.03E+12	6.00E+11	3.38E+00	2.03E+10	9.30E-06	1.10E-05	8.35E-06	2.55E-07	5.62E-06	1.52E-05	1.69E-05	1.42E-05	
In-111	4.86E+10	3.00E+12	1.62E-02	4.86E+08	5.17E-08	6.35E-08	4.34E-08	1.47E-08	2.78E-07	3.45E-07	3.56E-07	3.36E-07	
I-131	4.41E+10	7.00E+11	6.30E-02	4.41E+08	1.51E-06	2.67E-06	1.89E-06	1.34E-08	2.50E-07	1.77E-06	2.93E-06	2.15E-06	
Ga-67	6.35E+09	3.00E+12	2.12E-03	6.35E+07	7.05E-09	7.28E-09	5.30E-09	7.42E-10	1.39E-08	2.17E-08	2.19E-08	2.00E-08	
	1.89E+13		7.66E+00	1.89E+11	1.43E-05	1.88E-05	1.48E-05	1.27E-06	2.70E-05	4.25E-05	4.70E-05	4.30E-05	
Tl-201	1.14E+12	4.00E+12	2.85E-01	1.14E+10	2.32E-07	3.41E-07	3.06E-07	6.67E-08	1.41E-06	1.71E-06	1.82E-06	1.78E-06	
Mo-99	3.59E+12	6.00E+11	5.98E+00	3.59E+10	1.64E-05	1.94E-05	1.48E-05	4.52E-07	9.94E-06	2.68E-05	2.98E-05	2.51E-05	
In-111	6.91E+10	3.00E+12	2.30E-02	6.91E+08	7.35E-08	9.03E-08	6.18E-08	2.09E-08	3.95E-07	4.90E-07	5.07E-07	4.78E-07	
I-131	7.70E+10	7.00E+11	1.10E-01	7.70E+08	2.64E-06	4.66E-06	3.30E-06	2.34E-08	4.36E-07	3.10E-06	5.12E-06	3.76E-06	
Ga-67	1.33E+10	3.00E+12	4.43E-03	1.33E+08	1.48E-08	1.53E-08	1.11E-08	1.55E-09	2.92E-08	4.55E-08	4.60E-08	4.18E-08	
	4.89E+12		6.41E+00	4.89E+10	1.94E-05	2.46E-05	1.84E-05	5.64E-07	1.22E-05	3.22E-05	3.73E-05	3.12E-05	

Tabella A.III.26

Stima delle conseguenze radiologiche, alla distanza di 300 m, per ventotto spedizioni aeree

N.ro spedizione	N.ro totale di colli della spedizione	Attività totale spedizione (Bq)	Contenuto in A ₂ della spedizione (A ₂)	Rilascio (Bq)	DOSE EFFICACE INALAZIONE			DOSE EFFICACE IRRAGGIAMENTO			DOSE EFFICACE TOTALE		
					Dose a 300 m adulti (Sv)	Dose a 300 m bambini (Sv)	Dose a 300 m lattanti (Sv)	Dose irraggiamento da nube a 300 m (Sv)	Dose irraggiamento dal suolo a 300 m (Sv)	Dose efficace a 300 m adulti (Sv)	Dose efficace a 300 m bambini (Sv)	Dose efficace a 300 m lattanti (Sv)	
1	48	3.68E+12	6.12E+00	3.68E+10	1.80E-05	2.20E-05	1.66E-05	4.7E-07	1.03E-05	2.88E-05	3.28E-05	2.74E-05	
2	89	4.88E+11	8.24E-01	4.88E+09	5.75E-06	9.16E-06	6.63E-06	7.91E-08	1.66E-06	7.49E-06	1.09E-05	8.37E-06	
3	257	7.52E+12	1.24E+01	7.52E+10	6.72E-05	8.04E-05	5.58E-05	1.01E-06	2.19E-05	9.02E-05	1.03E-04	7.88E-05	
4	287	3.39E+12	5.51E+00	3.39E+10	3.05E-05	4.62E-05	3.35E-05	5.17E-07	1.08E-05	4.18E-05	5.75E-05	4.49E-05	
5	21	5.11E+10	1.67E-01	5.11E+08	3.71E-07	4.64E-07	4.00E-07	7.27E-10	8.63E-08	4.58E-07	5.51E-07	4.87E-07	
6	65	3.88E+12	6.46E+00	3.88E+10	1.79E-05	2.12E-05	1.61E-05	4.89E-07	1.07E-05	2.91E-05	3.24E-05	2.73E-05	
7	183	1.39E+12	2.24E+00	1.39E+10	1.53E-05	2.41E-05	1.74E-05	2.28E-07	4.70E-06	2.02E-05	2.91E-05	2.23E-05	
8	111	6.77E+12	3.16E+00	6.77E+10	5.76E-05	7.98E-05	4.76E-05	1.95E-06	3.64E-05	9.60E-05	1.18E-04	8.60E-05	
9	264	8.35E+12	1.38E+01	8.35E+10	5.66E-05	7.94E-05	5.83E-05	1.16E-06	2.49E-05	8.27E-05	1.05E-04	8.43E-05	
10	278	3.25E+12	5.24E+00	3.25E+10	3.53E-05	5.56E-05	4.01E-05	5.31E-07	1.10E-05	4.68E-05	6.71E-05	5.16E-05	
11	8	1.03E+11	2.46E-01	1.03E+09	6.45E-07	7.24E-07	5.75E-07	2.13E-09	1.14E-07	7.61E-07	8.40E-07	6.91E-07	
12	91	4.09E+12	6.78E+00	4.09E+10	2.04E-05	2.53E-05	1.90E-05	5.24E-07	1.15E-05	3.24E-05	3.73E-05	3.10E-05	
13	154	2.56E+12	4.16E+00	2.56E+10	2.23E-05	3.35E-05	2.43E-05	3.86E-07	8.11E-06	3.08E-05	4.20E-05	3.28E-05	
14	115	2.67E+12	4.35E+00	2.67E+10	5.82E-05	6.38E-05	4.05E-05	3.92E-07	8.30E-06	6.69E-05	7.25E-05	4.92E-05	
15	236	2.79E+12	4.50E+00	2.79E+10	3.02E-05	4.74E-05	3.40E-05	4.51E-07	9.35E-06	4.00E-05	5.72E-05	4.38E-05	
16	234	8.84E+11	1.31E+00	8.84E+09	2.36E-05	4.12E-05	2.93E-05	2.29E-07	4.36E-06	2.82E-05	4.58E-05	3.38E-05	
17	17	9.06E+08	8.66E-04	9.06E+06	9.84E-09	9.99E-09	6.80E-09	6.58E-12	5.01E-10	1.04E-08	1.05E-08	7.30E-09	
18	288	1.84E+13	3.07E+01	1.84E+11	8.70E-05	1.05E-04	7.91E-05	2.33E-06	5.12E-05	1.41E-04	1.58E-04	1.33E-04	
19	26	6.00E+11	9.98E-01	6.00E+09	3.08E-06	3.86E-06	2.90E-06	7.75E-08	1.69E-06	4.85E-06	5.63E-06	4.67E-06	

(segue)

(continua) Stima delle conseguenze radiologiche, alla distanza di 300 m, per ventotto spedizioni aeree

N.ro spedizione	N.ro totale di colli della spedizione	Attività totale spedizione (Bq)	Contenuto in A ₂ della spedizione (A ₂)	Rilascio (Bq)	DOSE EFFICACE INALAZIONE			DOSE EFFICACE IRRAGGIAMENTO			DOSE EFFICACE TOTALE		
					Dose a 300 m adulti (Sv)	Dose a 300 m bambini (Sv)	Dose a 300 m lattanti (Sv)	Dose irraggiamento da nube a 300 m (Sv)	Dose irraggiamento dal suolo a 300 m (Sv)	Dose efficace a 300 m adulti (Sv)	Dose efficace a 300 m bambini (Sv)	Dose efficace a 300 m lattanti (Sv)	
20	133	2.53E+12	4.13E+00	2.53E+10	2.14E-05	3.20E-05	2.33E-05	3.78E-07	7.97E-06	2.98E-05	4.03E-05	3.16E-05	
21	136	4.28E+11	6.55E-01	4.28E+09	2.89E-05	3.12E-05	1.91E-05	8.78E-08	1.73E-06	3.07E-05	3.30E-05	2.10E-05	
22	270	6.81E+12	1.12E+01	6.81E+10	4.46E-05	6.18E-05	4.55E-05	9.37E-07	2.01E-05	6.57E-05	8.29E-05	6.66E-05	
23	254	3.03E+12	4.98E+00	3.03E+10	2.77E-05	4.19E-05	3.04E-05	4.55E-07	9.59E-06	3.77E-05	5.19E-05	4.04E-05	
24	19	4.04E+08	3.90E-04	4.04E+06	3.46E-09	3.70E-09	2.75E-09	1.86E-12	2.54E-10	3.72E-09	3.96E-09	3.00E-09	
25	1	5.00E+09	1.67E-03	5.00E+07	1.18E-07	1.75E-07	5.96E-08	3.36E-11	2.44E-09	1.20E-07	1.78E-07	6.21E-08	
26	96	3.86E+12	6.41E+00	3.86E+10	1.97E-05	2.46E-05	1.84E-05	4.98E-07	1.09E-05	3.10E-05	3.60E-05	2.98E-05	
27	158	6.07E+11	9.47E-01	6.07E+09	9.89E-06	1.65E-05	1.18E-05	1.19E-07	2.38E-06	1.24E-05	1.90E-05	1.43E-05	
28	138	5.60E+11	8.57E-01	5.60E+09	4.37E-05	4.45E-05	2.65E-05	1.04E-07	2.09E-06	4.59E-05	4.67E-05	2.87E-05	
valore medio	142.04	3.17E+12	4.93E+00	3.17E+10	2.66E-05	3.54E-05	2.49E-05	4.79E-07	1.01E-05	3.72E-05	4.60E-05	3.54E-05	
valore massimo	288	1.84E+13	3.07E+01	1.84E+11	8.70E-05	1.05E-04	7.91E-05	2.33E-06	5.12E-05	1.41E-04	1.58E-04	1.33E-04	

Appendice 1 - La regolamentazione nazionale ed internazionale sul trasporto delle materie radioattive

1. Regolamentazione internazionale del trasporto di materie radioattive

Ai fini del loro trasporto le materie radioattive sono classificate come Classe 7 delle merci pericolose. Il trasporto di tutte le merci pericolose, comprese le materie radioattive, è regolamentato a livello internazionale da una serie di raccomandazioni e regolamenti (vedere Fig.1).

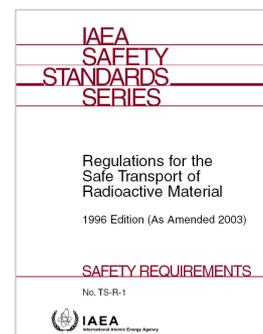
Il rischio da radiazioni ionizzanti, associato al trasporto delle materie radioattive, al contrario di tutte le altre merci pericolose, si manifesta anche in condizioni normali di trasporto, cioè in assenza di incidenti. Questa caratteristica delle materie radioattive, unita al fatto che il loro trasporto avviene in luoghi frequentati dalla comune popolazione, ha comportato, fin dall'inizio dell'uso pacifico delle tecnologie nucleari, la necessità di stabilire a livello internazionale standard e requisiti di sicurezza atti a garantire un adeguato livello di protezione per le persone, i beni e l'ambiente. Per garantire elevati standard di sicurezza sono state elaborate norme tecniche che affidano la sicurezza del trasporto delle materie radioattive essenzialmente alle caratteristiche degli imballaggi.

Le norme tecniche che governano il trasporto internazionale di materie radioattive sono stabilite nella *“Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material” TS-R-1* pubblicata dall'Agenzia Internazionale dell'Energia Atomica (IAEA) di Vienna. Questa regolamentazione è adottata da tutte le organizzazioni internazionali modali di trasporto responsabili di stabilire standard e requisiti di sicurezza per il trasporto di tutte le merci pericolose comprese le materie radioattive. Tutti i regolamenti internazionali (ADR, RID, ADN, IMDG Code, ICAO TI) come pure la regolamentazione IAEA, sono soggetti ad un ciclo di revisione biennale.

La regolamentazione IAEA, nello stabilire i limiti di applicazione, i livelli di radiazione ammissibili sulla superficie dei colli o dei mezzi di trasporto, i valori di rilascio dei colli in condizioni normali ed incidentali di trasporto, nonché i limiti per la contaminazione sulla superficie dei colli, tiene conto, per gli aspetti di radioprotezione, dei principi definiti nella pubblicazione IAEA No. 115 *“Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources”* edizione 1996. Questi principi risultano in linea con quelli definiti, per gli stessi aspetti, dalla *“Direttiva 96/29/Euratom del Consiglio del 13 maggio 1996”* che stabilisce le norme fondamentali di sicurezza relative alla protezione sanitaria della popolazione e dei lavoratori contro i pericoli derivanti dalle radiazioni ionizzanti”.

Ulteriori norme, che trovano applicazione nel trasporto nazionale ed internazionale di materie radioattive, riguardano gli aspetti di protezione fisica delle materie nucleari e la responsabilità civile in caso di incidente in corso di trasporto delle materie nucleari. Tali norme sono riportate nella:

- **Convention on the Physical Protection of Nuclear Material** introdotta nell'ordinamento italiano con la **Legge 7 agosto 1982, n. 704** “ Ratifica ed esecuzione della convenzione sulla protezione fisica dei materiali nucleari, con allegati, aperta alla firma a Vienna ed a New York il 3 marzo 1980”; e



- **Convention on Third Party Liability in the Field of Nuclear Energy** introdotta nell'ordinamento italiano con la **Legge 12 febbraio 1974, n.109** “ Ratifica ed esecuzione delle convenzioni sulla responsabilità civile nel campo dell'energia nucleare, firmate a Parigi il 29 luglio 1960 e a Bruxelles il 31 gennaio 1963 e dei protocolli addizionali alle dette convenzioni, firmati a Parigi il 28 gennaio 1964” e con la legge 5 marzo 1985, n. 131, di ratifica dei due Protocolli del 1982 di modifica delle Convenzioni sopra citate.

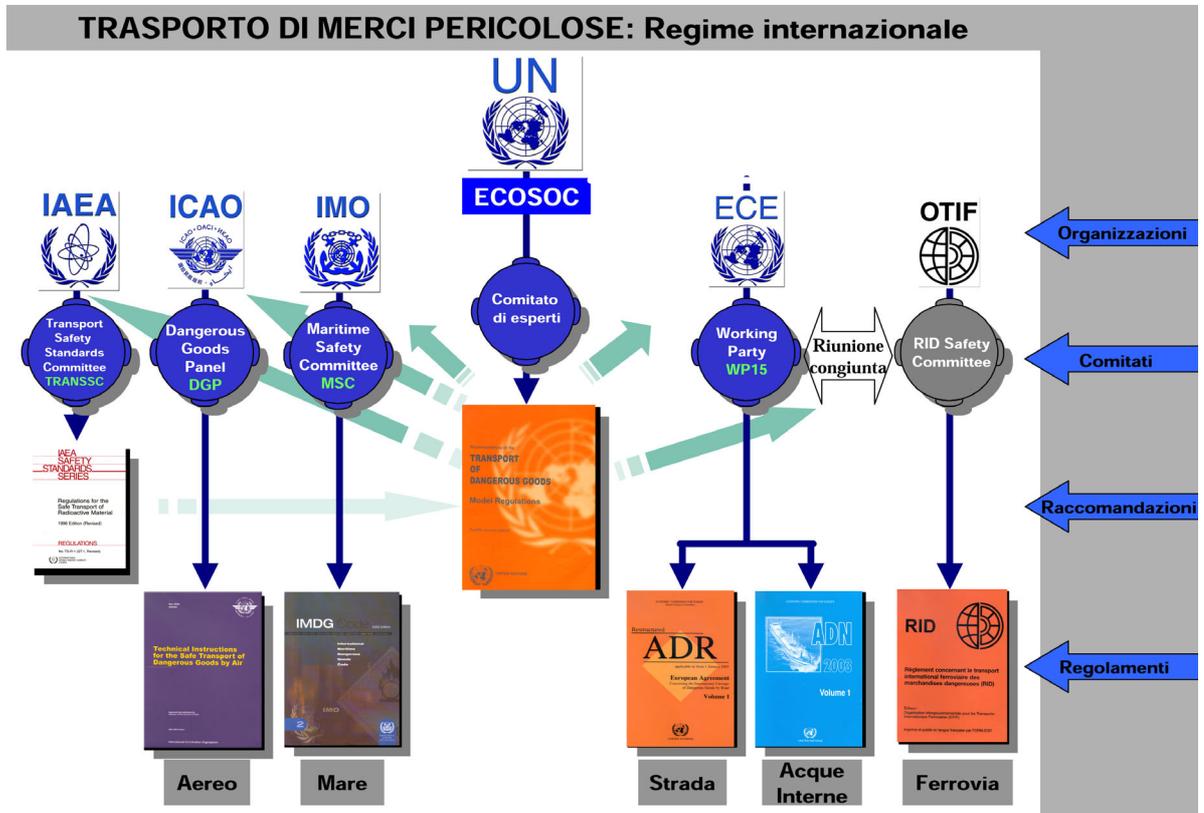
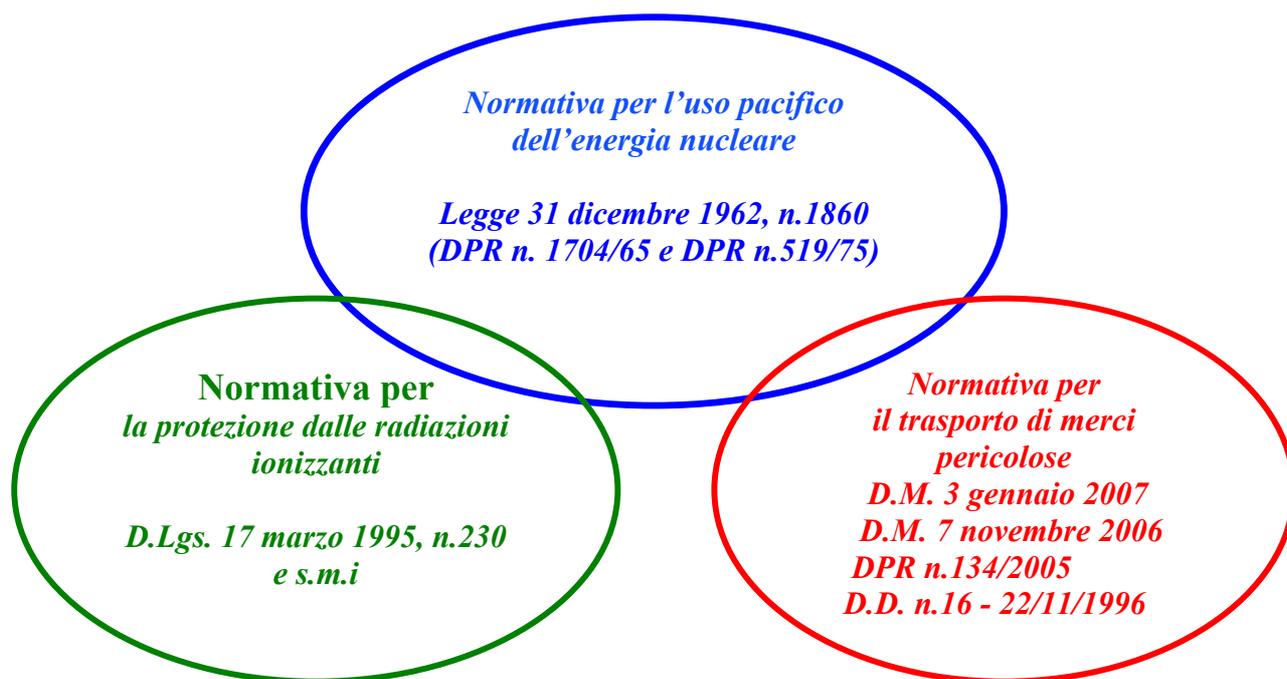


Fig.1 - Lo schema illustra il regime internazionale che governa il trasporto di merci pericolose, di cui le materie radioattive costituiscono la Classe 7, ed indica in che modo la regolamentazione IAEA No. TS-R-1 è recepita nelle UN “Recommendations on the Transport of Dangerous Goods” e successivamente nei diversi regolamenti modali di trasporto (ADR, RID, ADN, IMDG Code, ICAO TI)

2. Regolamentazione nazionale del trasporto di materie radioattive

Il trasporto delle materie radioattive è regolamentato, a livello nazionale, per i diversi aspetti autorizzativi, di radioprotezione e tecnici da un insieme di norme che trovano applicazione anche in altre attività riguardanti l’uso pacifico dell’energia nucleare. Le disposizioni applicabili al trasporto delle materie radioattive, fanno parte di tre diversi ambiti normativi tra di loro strettamente connessi.



2.1 Normativa per l'uso pacifico dell'energia nucleare

L'art.5 della legge 31 dicembre 1962, n.1860 (come modificata dai DPR n. 1704/65 e n. 519/75) stabilisce che il trasporto delle materie radioattive deve essere effettuato da vettori terrestri, aerei e marittimi autorizzati. Lo stesso articolo prevede che possano essere effettuati, senza autorizzazione, singoli trasporti occasionali di materie radioattive nelle quantità stabilite dal D.M. 27 luglio 1966 (come modificato dal D.M. 18 luglio 1967) e singoli trasporti di materie fissili nelle quantità stabilite dal D.M. 15 dicembre 1970.

Il decreto di autorizzazione al trasporto di materie radioattive è rilasciato dal Ministero dello sviluppo economico di concerto con l'autorità responsabile per la relativa modalità di trasporto [Ministero dei trasporti (strada e ferrovia), Comando Generale del Corpo delle Capitanerie di Porto (mare) ed ENAC (aereo)].

Per gli aspetti di protezione fisica e di responsabilità civile relativi al trasporto di materie nucleari trova applicazione quanto stabilito rispettivamente dalla *Legge 7 agosto 1982, n. 704* e dalla *Legge 12 febbraio 1974, n.109*.

2.2 Normativa per la protezione dalle radiazioni ionizzanti

Il trasporto delle materie radioattive è soggetto alle disposizioni del Decreto legislativo 17 marzo 1995, n.230 e successive modifiche ed integrazioni quando i valori di attività trasportata sono superiori ai limiti di applicazione riportati nell'Allegato I allo stesso decreto.

L'art. 21 del D.Lgs. 230/95 ribadisce quanto riportato dalla Legge 1860/62, riguardo l'autorizzazione al trasporto delle materie radioattive, e stabilisce che il decreto di autorizzazione sia rilasciato sentito l'ISPRA ed il Ministero dell'interno. Lo stesso art. 21 fa obbligo ai vettori autorizzati di inviare all'ISPRA un riepilogo dei trasporti effettuati con l'indicazione delle materie trasportate. Le modalità ed i termini di trasmissione dei riepiloghi sono riportate nel Decreto 18 ottobre 2005 del Ministero delle attività produttive.

2.3 Normativa per il trasporto di merci pericolose

La normativa tecnica per il trasporto di materie radioattive, classe 7 delle merci pericolose deriva dalla regolamentazione IAEA “Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material” No. TS-R-1. Questa regolamentazione è applicata in Italia attraverso i regolamenti modali ADR, RID, IMDG Code, ICAO TI. I regolamenti ADR (stradale) e RID (ferroviario) sono adottati attraverso il recepimento di direttive dell’Unione Europea. Nella tabella sono riportati i provvedimenti attuativi con i quali i vari regolamenti internazionali modali di trasporto sono stati introdotti nella struttura normativa nazionale

Modalità di trasporto	Regolamento internazionale	Provvedimenti attuativi nazionali
stradale	ADR	D.M. 3 gennaio 2007
ferroviaria	RID	D.M. 7 novembre 2006
via mare	IMDG Code	DPR n. 134 del 6 giugno 2005
aerea	ICAO TI	Decreto Dirigenziale n. 16 del 22 novembre 1996