



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia
e lo sviluppo economico sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Il monitoraggio ambientale nei depositi di rifiuti radioattivi per le valutazioni di impatto ambientale e di Safety Assessment

*M. De Salve, R. Testoni, P. Bartolomei, R. Levizzari, A. Luce, E. Nava, A. Rizzo,
F. Troiani*



Report RdS/2012/031

IL MONITORAGGIO AMBIENTALE NEI DEPOSITI DI RIFIUTI RADIOATTIVI PER LE VALUTAZIONI DI IMPATTO AMBIENTALE E DI SAFETY ASSESSMENT

M. De Salve, R. Testoni – CIRTEN Politecnico di Torino, P. Bartolomei, R. Levizzari, A. Luce, E. Nava, A. Rizzo, F. Troiani - ENEA

Settembre 2012

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Area: Governo, gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale

Progetto: Nuovo nucleare da fissione: collaborazioni internazionali e sviluppo competenze in materia nucleare

Responsabile del Progetto: Paride Meloni, ENEA

Titolo

Il monitoraggio ambientale nei depositi di rifiuti radioattivi per le valutazioni di impatto ambientale e di *Safety Assessment*

Descrittori

Tipologia del documento: **Rapporto Tecnico**
 Collocazione contrattuale: **Accordo di programma ENEA-MSE: tema di ricerca "Nuovo nucleare da fissione"**
 Argomenti trattati: **Trattamento e stoccaggio dei rifiuti radioattivi**

Sommario

Nel presente rapporto vengono delineati gli aspetti propedeutici allo sviluppo di un programma di monitoraggio ambientale relativo ad un deposito di rifiuti radioattivi; questi aspetti includono la valutazione di impatto ambientale e la Safety Assessment.

Viene inoltre definita la strategia per affrontare il tema del monitoraggio di un deposito di rifiuti radioattivi quali i differenti obiettivi del monitoraggio nelle diverse fasi di realizzazione del sistema di smaltimento, le matrici ambientali che è necessario monitorare ed i punti di campionamento essenziali da predisporre. La definizione di tali procedure e parametri è elaborata sulla base di normative tecniche internazionali IAEA e alle esperienze già sviluppate in questo settore, in ambito europeo ed internazionale.

Infine è effettuato un approfondimento su alcuni radionuclidi: ¹²⁹I, ⁹⁹Tc, ¹⁴C e ³H, gas nobili, che presentano elevata mobilità, che può risultare importante in fase di monitoraggio ambientale, per valutare eventuali fuoriuscite dal deposito. I rapporti isotopici con cui sono presenti nell'ambiente e la loro esigua concentrazione rendono la loro rivelazione un'attività tecnicamente difficile ma di primaria importanza ai fini del monitoraggio.



Note

Lavoro svolto in esecuzione della linea progettuale LP2 dell'Accordo di Programma ENEA-MSE, PAR2010-2011, obiettivo E.

Autori: M. De Salve, R. Testoni,

P. Bartolomei, R. Levizzari, A. Luce, E. Nava, A. Rizzo e F. Troiani

Copia n.

In carico a:

REV.	DESCRIZIONE	DATA	NOME	REDAZIONE	CONVALIDA	APPROVAZIONE
2			NOME			
			FIRMA			
1			NOME			
			FIRMA			
0	EMISSIONE	18/08/12	NOME	A. Rizzo	P. Meloni	P. Meloni
			FIRMA	<i>[Signature]</i>	<i>[Signature]</i>	<i>[Signature]</i>

Indice

Sommario	5
Introduzione	6
1 <i>Safety Assessment</i> e Valutazione di Impatto Ambientale	7
1.1 Concetti preliminari.....	7
1.2 Valutazione di Impatto Ambientale (VIA) e <i>Safety Assessment (SA)</i>	9
1.2.1 VIA.....	9
1.2.2 <i>Safety Assessment (SA)</i>	12
2 Monitoraggio Ambientale	16
2.1 Normativa e riferimenti internazionali	16
2.2 Obiettivo del monitoraggio e matrici ambientali da monitorare	19
2.2.1 Monitoraggio delle acque.....	20
2.2.2 Monitoraggio dell'aria	20
2.2.3 Monitoraggio del suolo	21
2.3 Monitoraggio nelle diverse fasi di realizzazione e gestione del deposito	21
2.3.1 Monitoraggio nella fase pre-operativa o caratterizzazione del sito	21
2.3.2 Monitoraggio durante la fase di esercizio o monitoraggio di routine	22
2.3.3 Monitoraggio durante la fase post-operativa	22
2.4 Il campionamento ambientale	23
2.5 Sistemi di monitoraggio adottati in depositi esistenti e negli impianti di potenza.....	27
2.5.1 El Cabril (Spagna).....	27
2.5.2 Centre de La Manche e centre de l'Aube (Francia)	29
2.5.3 Rokkasho (Giappone)	30
2.5.4 Cernavoda Nuclear Power Plant (Romania)	31
2.5.5 Qinshan Nuclear Power Plant (Cina)	33
2.6 Garanzia di qualità.....	33
2.7 Radionuclidi ad elevata mobilità.....	35
2.7.1 Cause della mobilità.....	38

2.7.2	Principali radionuclidi ad elevata mobilità	42
2.7.3	Iodio 129	43
2.7.4	Tecnezio 99	46
2.7.5	Carbonio 14.....	47
2.7.6	Trizio.....	50
2.7.7	Gas nobili	51
	Conclusioni	54
	Bibliografia	55

Indice delle figure


<i>Figura 1.</i>	Approccio generale allo sviluppo di un deposito superficiale (fonte: IAEA [8]).....	8
<i>Figura 2.</i>	Parametri fisici, chimici ed ingegneristici controllati in fase di monitoraggio (fonte: UNI 11279-3).....	19
<i>Figura 3.</i>	Matrici da monitorare, sistemi di monitoraggio e frequenza in fase di esercizio (fonte: IAEA [5]).	25
<i>Figura 4.</i>	Matrici da monitorare, sistemi di monitoraggio e frequenza in fase di emergenza (fonte: IAEA [5]).	26
<i>Figura 5.</i>	Punti di campionamento nel sito di Cernavoda (Romania) [14].	32
<i>Figura 6.</i>	Punti di campionamento nella zona 3-30 km fuori dal sito di Cernovada (Romania) [14].	32
<i>Figura 7.</i>	Campionamento ambientale nell'area entro 20 km dall'impianto Qinshan [15].	33
<i>Figura 8.</i>	Strumentazione per l'analisi dei radionuclidi per il monitoraggio [15].	33
<i>Figura 9a.</i>	Inventario dei rifiuti radioattivi provenienti da un impianto nucleare (fonte:IAEA [17]).	37
<i>Figura 9b.</i>	Inventario dei rifiuti radioattivi provenienti da un impianto nucleare	33
<i>Figura 10.</i>	Curva di solubilità.	40
<i>Figura 11.</i>	Proprietà della bentonite (fonte: JAEA [21]).	42
<i>Figura 12.</i>	Decadimento dello iodio 129 (fonte: INFN).....	45
<i>Figura 13.</i>	Decadimento in ⁹⁹ Tc a partire dal ⁹⁹ Mo.....	46
<i>Figura 14.</i>	Possibili processi di trasporto del ⁹⁹ Tc nell'ecosistema [23].	47
<i>Figura 15</i>	Linea di sintesi del benzene (processo finale) utilizzata nei laboratori ENEA	50

Indice delle tabelle

Tabella 1.	Processo VIA per stoccaggio di un deposito geologico o a lungo termine (9).....	11
Tabella 2.	Parametri di monitoraggio (fonte: UNI 11279-3).....	18
Tabella 3.	Isotopi dello iodio (28).....	43

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS – LP2 - 090	0	L	4	57

Tabella 4. C stabile e ^{14}C - campagna di monitoraggio IRSN.....	49
Tabella 5. $\delta^{13}\text{C}$ e $\Delta^{14}\text{C}$ – campagna di monitoraggio IRSN	49
Tabella 6. Energie X e gamma per il decadimento di ^{131}mXe , ^{133}Xe , ^{133}mXe e ^{135}Xe	52


 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS – LP2 - 090	0	L	5	57

Sommario

Nel presente rapporto vengono delineati gli aspetti propedeutici allo sviluppo di un programma di monitoraggio ambientale relativo ad un deposito di rifiuti radioattivi; questi aspetti includono la valutazione di impatto ambientale e la Safety Assessment.

Viene inoltre definita la strategia per affrontare il tema del monitoraggio di un deposito di rifiuti radioattivi quali i differenti obiettivi del monitoraggio nelle diverse fasi di realizzazione del sistema di smaltimento, le matrici ambientali che è necessario monitorare ed i punti di campionamento essenziali da predisporre. La definizione di tali procedure e parametri viene elaborata in base a normative internazionali IAEA e alle esperienze già sviluppate in questo settore in ambito europeo ed internazionale.

Vengono infine revisionati alcuni radionuclidi: ^{129}I , ^{99}Tc , ^{14}C e ^3H , gas nobili, i quali presentano elevata mobilità che può risultare importante, in fase di monitoraggio ambientale, per valutare eventuali fuoriuscite dal deposito. I rapporti isotopici con cui sono presenti nell'ambiente e la loro esigua concentrazione rendono la loro rivelazione un'attività tecnicamente difficile ma di primaria importanza ai fini del monitoraggio.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS – LP2 - 090	0	L	6	57


Introduzione

Il presente rapporto rappresenta la prosecuzione delle attività già intraprese nella scorsa annualità circa il monitoraggio ambientale di un deposito superficiale di rifiuti radioattivi, nell'ambito dell'Accordo di programma ENEA-MSE, *Ricerca di Sistema Elettrico* (1) (2) .

Oltre agli aspetti di monitoraggio ambientale, è parso utile estendere lo studio anche ad alcuni concetti descrittivi sulla **Valutazione di Impatto Ambientale** (di seguito VIA) e sulle attività di **Safety Assessment** (di seguito SA). In entrambi i casi, il contesto di lavoro rientra nell'ambito delle attività propedeutiche alla progettazione e realizzazione del deposito, quindi anche alla successiva fase di monitoraggio ambientale, di cui possono costituire un utilissimo contributo, soprattutto in termini di caratterizzazione del sistema che si dovrà monitorare. Infatti lo sviluppo delle attività riguardanti VIA e SA permette di ottenere le informazioni di input per definire un programma di monitoraggio specifico e accurato, definendo ad esempio le vie preferenziali di migrazione dei radionuclidi ed i punti fondamentali di campionamento delle diverse matrici ambientali.

Per il monitoraggio ambientale si è cercato di delineare i punti principali da sviluppare nel momento in cui sarà necessario definire un programma di misure specifiche sul terreno, analizzandone gli argomenti principali per l'impostazione del programma e facendo riferimento in primo luogo alle **direttive internazionali** proposte dalla IAEA ((3), (4), (5), (6) (7)) e alle **normative nazionali** (UNI 11279-3). Sono state effettuate alcune ipotesi sulle possibili vie di esposizione in caso di rilascio di radionuclidi dal deposito e la tipologia di misurazioni da effettuare. Sono state prese in considerazione le diverse fasi di vita di un deposito e per ognuna di esse si è cercato di capire gli obiettivi del monitoraggio e i punti cardine che è necessario analizzare. A completamento e supporto di questi concetti generali, è stata svolta una ricerca bibliografica sull'applicazione del monitoraggio ambientale sia in depositi superficiali esistenti in Europa e nel Mondo, sia in impianti di potenza.

Nell'ambito della VIA sono stati definiti gli aspetti fondamentali imposti dalla normativa e l'approccio generale nel caso specifico di deposito di rifiuti radioattivi. Per quanto riguarda la SA si è fatto esplicito riferimento alla **metodologia ISAM** (*Improvement Safety Assessment Methodologies*) della IAEA, ampiamente utilizzata nel contesto internazionale.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS – LP2 - 090	0	L	7	57

1 *Safety Assessment* e Valutazione di Impatto Ambientale

1.1 Concetti preliminari

L’impatto di un deposito superficiale di rifiuti radioattivi di seconda categoria è riconducibile agli aspetti di emissione radiologica nelle matrici ambientali: atmosfera, suolo e corpi idrici superficiali, sottosuolo (con particolare riferimento alle acque sotterranee che potrebbero essere il principale veicolo di trasferimento della radioattività). Questi comparti ambientali non rappresentano sistemi chiusi, ma bensì sistemi aperti, in intima e stretta relazione tra di loro grazie ai reciproci scambi di massa ed energia. Per questo motivo è sicuramente importante caratterizzare le singole matrici ambientali, ma anche definire con estremo dettaglio i rapporti esistenti tra le stesse, per identificare nel dettaglio i fenomeni di scambio e poterli modellizzare dal punto di vista concettuale e matematico, per giungere ad una valutazione quantitativa dell’impatto radiologico del deposito. Un esempio su tutti è costituito dai rapporti di interscambio tra i corpi idrici superficiali e quelli sotterranei, in particolare le falde freatiche; queste relazioni devono essere definite dal punto di vista qualitativo e quantitativo, tenendo conto delle loro evoluzioni nel tempo, visto che i rapporti di alimentazione e drenaggio dei sistemi idrogeologici variano nel tempo, così come i fenomeni di infiltrazione ed evapotraspirazione delle acque nel suolo.

Per opportuna completezza, si deve evidenziare che l’impatto del deposito non è riconducibile solo ad aspetti radiologici, ma bensì anche a quelli convenzionali, quali ad esempio gli effetti ambientali durante le fasi di cantierizzazione e realizzazione del progetto.

La necessità di caratterizzare il sistema indagato per le finalità richieste nelle procedure di VIA o nelle attività di SA offre utilissime argomentazioni tecniche circa la futura impostazione della rete di monitoraggio ambientale di un deposito. Queste attività sono propedeutiche alla fase di progettazione, realizzazione ed esercizio, ma sono oltremodo fondamentali per poter definire le strategie e gli aspetti applicativi delle successive attività di monitoraggio, finalizzate alla prevenzione di potenziali rilasci ed alla sorveglianza istituzionale.

La progettazione e realizzazione di un deposito di rifiuti radioattivi comprende tre fasi principali che coprono differenti tipi di attività e considerano i requisiti di specifiche strategie, politiche decisionali, risorse umane e tecniche:

- fase pre-operativa;
- fase di esercizio o operativa (incluso la chiusura);;
- fase post-operativa.

In Figura 1 è riportato uno schema che rappresenta l’approccio generale relativo al ciclo di vita di un deposito superficiale (8). Questo tipo di approccio è generico: alcuni fattori seguono legislazioni internazionali comuni, altri come ad esempio l’inventario radiologico, la caratterizzazione del sito o le condizioni socioeconomiche variano nei diversi Paesi.

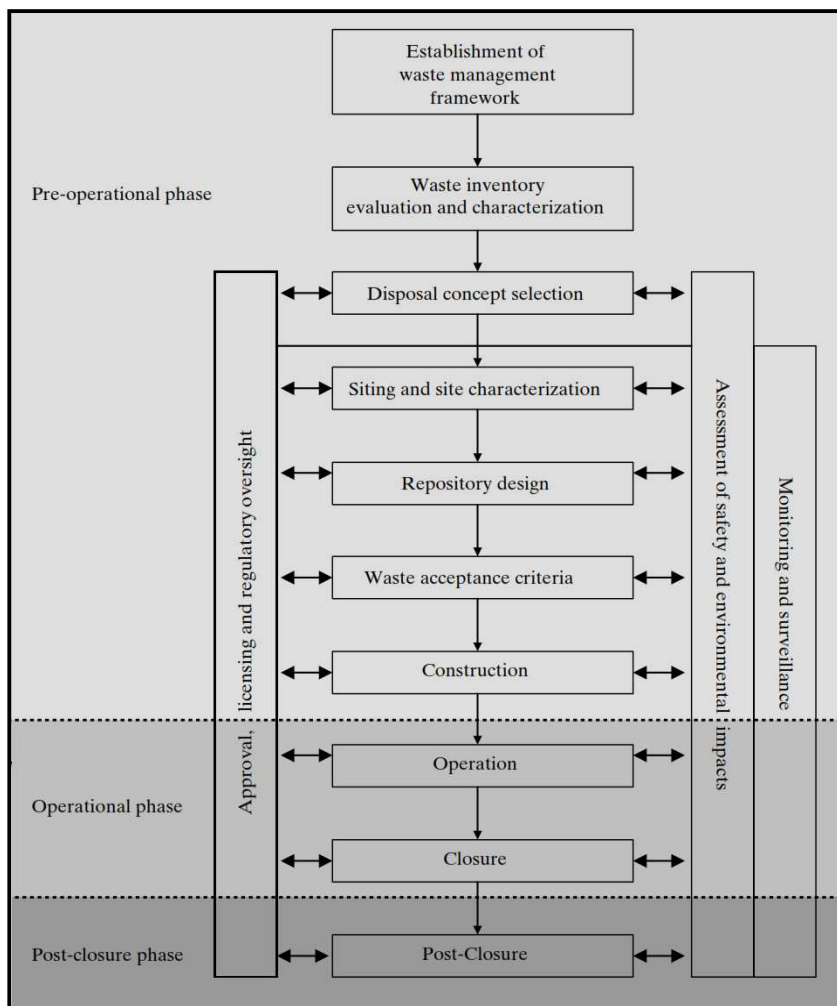


Figura 1. Approccio generale allo sviluppo di un deposito superficiale (fonte: IAEA (8)).

E' opportuno definire brevemente la differenza tra i seguenti termini:

- *siting*;
- caratterizzazione del sito;
- monitoraggio ambientale.

L'attività di **siting** consiste nell'individuare l'area ottimale in cui ubicare il deposito, sulla base di informazioni di carattere territoriale e geologico ambientale, nonché di tipo socio-economico, soprattutto in riferimento al grado di accettabilità da parte della popolazione. Per raggiungere questo scopo è necessario definire dei criteri generali per la selezione del sito, che si possono concretizzare in alcuni parametri da considerare per la scelta o l'esclusione di un'area; tra questi ad esempio:

- sito favorevole dal punto di vista idrogeologico;
- esclusione delle aree di particolare interesse culturale o ecologico;
- (...).

Dopo la scelta del sito, è opportuno eseguire una serie di indagini di dettaglio per caratterizzare l'area (**caratterizzazione del sito**) al fine di determinare lo **stato zero ante operam**, cioè definire le

condizioni di tutti i parametri ambientali al fine di verificare in futuro se la costruzione e l'esercizio del deposito abbiano avuto un impatto rilevante sull'ambiente e sulla popolazione. In questa fase si individuano le principali potenziali vie di trasporto di radionuclidi ed i principali recettori.

Il **monitoraggio ambientale** serve per verificare che il livello di radioattività non sia superiore a quanto previsto nella fase di progettazione e che non si abbiano sensibili variazioni al fondo ambientale, al fine di non mettere a rischio la salute della popolazione e dell'ambiente.

Il monitoraggio dovrà essere realizzato sulla base delle informazioni che provengono dalla caratterizzazione del sito; in questo modo sarà possibile indirizzare i campionamenti e le analisi in precisi punti bersaglio, in cui la presenza e/o l'accumulo di eventuali radionuclidi sarebbe indice di un malfunzionamento del sistema di contenimento dei rifiuti.

Dalla descrizione sommaria di queste tre attività risalta la loro complementarietà. I dati ottenuti nella fase di *siting*, che comprendono analisi geologiche, idrogeologiche, geochimiche, sismiche, geomorfologiche e climatiche, sono utilizzabili per la caratterizzazione del sito. Inoltre le informazioni ricavate durante le fasi di *siting* e di caratterizzazione sono usate come confronto rispetto ai dati raccolti in fase di monitoraggio, al fine di aggiornare ed eventualmente modificare i criteri di sicurezza connessi all'impatto radiologico dell'infrastruttura sull'uomo e sull'ambiente esterno. In generale i dati raccolti in queste tre fasi vengono utilizzati per sviluppare simulazioni mediante codici di calcolo al fine di stabilire e aggiornare i criteri di sicurezza radiologica per la popolazione e l'ambiente.


1.2 Valutazione di Impatto Ambientale (VIA) e Safety Assessment (SA)

La VIA deve definire la compatibilità del progetto con l'insieme delle attività umane e delle risorse naturali. La VIA è imposta dalla legge italiana e segue il Decreto Legislativo 3 aprile 2006 n. 152 e ss.mm.ii. La normativa italiana impone la necessità della VIA per determinati progetti tra cui gli "impianti destinati esclusivamente allo stoccaggio definitivo o all'eliminazione definitiva dei residui radioattivi" (DPCM 377/88).

La SA relativa ad un deposito di rifiuti radioattivi è una procedura che deve valutare l'evoluzione del sistema di smaltimento, per poterne stimare le performance secondo le specifiche definite in fase progettuale. Ha come obiettivo principale definire l'impatto radiologico sull'uomo e sull'ambiente studiando la migrazione dei radionuclidi. Essa rientra nel procedimento di *licensing* del deposito e segue linee guida condivise a livello internazionale.

1.2.1 VIA

La VIA consiste nel giudizio complessivo di compatibilità delle opere e degli interventi oggetto della valutazione stessa con le modificazioni dell'ambiente, i processi di trasformazione di questo e l'uso delle risorse, che potrebbero derivare dalla loro realizzazione (Direttiva 85/337/CEE). Si potrebbe quindi riassumere come la procedura tecnico-amministrativa volta alla formulazione di un giudizio di ammissibilità sugli effetti che una determinata azione avrà sull'ambiente globale, inteso come l'insieme delle attività umane e delle risorse naturali. Nella VIA si cerca quindi di stimare le possibili modifiche, positive o negative, dirette o indirette, a breve e a lungo termine, permanenti o temporanee, indotte dalla realizzazione di un determinato progetto.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS – LP2 - 090	0	L	10	57

La procedura implica un insieme di:

- dati tecnico-scientifici sul progetto;
- dati economici del progetto;
- previsioni sull'interazione del progetto con l'ambiente;
- procedure tecnico-amministrative;
- confronto tra costo del progetto e dei suoi impatti e benefici;
- partecipazione pubblica.

Due fasi importanti nella procedura di VIA sono:

- *screening* (o verifica): è la fase di selezione, dove bisogna decidere se il progetto va sottoposto a VIA; esiste un elenco di attività, sia nella normativa internazionale che in quella nazionale, per le quali è obbligatorio lo sviluppo della VIA;
- *scoping*: fase di specificazione a monte della relazione dello Studio di Impatto Ambientale (SIA), relazione in cui si definiscono nei dettagli i contenuti del SIA. In questa fase si definiscono gli aspetti da approfondire ritenuti significativi per quanto riguarda gli impatti.

Per quanto riguarda un sistema di smaltimento di rifiuti radioattivi, nella valutazione è necessario attenersi al disposto legislativo di riferimento ed in particolare è necessario eseguire valutazioni sul breve termine (fase di esercizio) e sul lungo termine (fase dopo la chiusura). Valutazioni necessarie coinvolgono considerazioni e analisi sulle possibili vie di fuga e i processi di migrazione dei radionuclidi attraverso le barriere ingegneristiche e naturali con conseguente impatto sull'ambiente e sull'essere umano. Esistono tuttavia delle incertezze legate alle stime di dose e rischio su scala temporale molto estesa, oltre alla difficoltà di fare assunzioni sull'evoluzione dell'ambiente e del comportamento umano. Risulta quindi necessario considerare degli indicatori di sicurezza che prevedano informazioni aggiuntive riguardanti conseguenze radiologiche e non, in modo che vengano considerati anche scenari alternativi e si esegua una valutazione conservativa.

Un altro punto fondamentale della VIA coinvolge anche la partecipazione pubblica alla varie fasi di realizzazione del deposito, mediante campagne di informazione e confronti pubblici, affinché tutti i portatori di interesse possano vedere rappresentata la propria posizione nell'ambito della procedura. In Tab. 1 è riportato uno schema generale di applicazione della VIA per un deposito geologico o comunque per un deposito a lungo termine (9).

Un aspetto connesso alla VIA è la Valutazione Ambientale Strategica (VAS), la quale coinvolge il processo esaminato e valuta le possibili alternative al progetto di studio. Poiché la VAS non presuppone informazioni di carattere tecnico, le quali vengono affrontate nella VIA e che risultano fondamentali per il monitoraggio, in questo report non si approfondirà l'argomento VAS.

Tabella 1. Processo VIA per stoccaggio di un deposito geologico o a lungo termine (9).

Stages	Pre-EIA process	Concept and Planning	National and Area Survey	Site Characterization	Site confirmation
Main Activities	Establish Government Policy	<ul style="list-style-type: none"> Generic disposal/storage concept Plan for siting process 	Identification of: <ul style="list-style-type: none"> Areas for potential sites Potential sites 	<ul style="list-style-type: none"> Surface-based investigations at potential sites Determination of application by competent authority 	<ul style="list-style-type: none"> Underground investigation
EIA Process		Development and strategic appraisal of: <ul style="list-style-type: none"> Generic disposal/storage concept Plan for siting process Screening guidelines and site evaluation strategy 	<ul style="list-style-type: none"> Assessment of potential location against technical and social siting criteria EIA process in relation to drilling of boreholes at the identified potential sites (where applicable) 	<ul style="list-style-type: none"> Site specific and design specific environmental and social assessment Evaluation of alternatives and selection of preferred site development 	<ul style="list-style-type: none"> Preparation of detailed performance assessment Monitoring of compliance with conditions of development consent
Public Participation	<ul style="list-style-type: none"> Consultation by Government on radioactive waste management policy Develop public education programme (where appropriate) 	<ul style="list-style-type: none"> Undertake social profile and stakeholder analysis Develop public involvement programme Measure public support for specific proposal 	<ul style="list-style-type: none"> Prepare area and community social profile Develop mechanisms for interested communities Implement public involvement programme (at regional and local levels) 	Ongoing implementation of public involvement programme, including: <ul style="list-style-type: none"> Consultation on programme for EIA process ("scoping") Evaluation of environmental and social impacts Consultation on EIA report 	<ul style="list-style-type: none"> Continuing interaction with local community about development of final design and mitigation of environmental impacts Feedback results of ongoing investigations to local community and to interested groups at regional and national level

1.2.2 Safety Assessment (SA)

Gli studi di SA costituiscono un potente strumento previsionale, che può coadiuvare la corretta realizzazione e gestione dell'infrastruttura; infatti presentano un punto di forza notevole se sono svolte prima o contestualmente alla progettazione, visto che possono fornire indicazioni progettuali al fine di massimizzarne la sicurezza. Ma queste attività possono essere anche svolte durante l'esercizio o la gestione del deposito stesso, ad esempio per prevederne l'evoluzione in scenari non precedentemente analizzati.


Nel 1997 la IAEA ha dato avvio ad un progetto di ricerca coordinato (CRP) sul miglioramento della sicurezza dei depositi superficiali di rifiuti radioattivi, in cui sono state promosse attività di studio per migliorare e coagulare le metodologie di SA, in fase di post-chiusura, mediante analisi critica degli strumenti e delle metodiche esistenti (ISAM, *Improvement Safety Assessment Methodologies*) (10), (11).

Il risultato più importante è stato quello di creare una metodologia armonizzata per le attività di SA, che è stata poi applicata a diversi contesti, anche di depositi geologici. Le esperienze maturate nella sua attuazione hanno evidenziato l'importanza di un processo chiaro e trasparente di queste attività, supportato da una produzione documentale per dimostrare la consistenza e la sicurezza del progetto, affinché tutti i portatori di interesse possano verificare i lavori svolti nelle fasi propedeutiche alla sua realizzazione. In questo modo le varie fasi progettuali (dal *siting* fino all'analisi del *safety case* e oltre) e realizzative possono essere pienamente condivise, anche e soprattutto grazie all'intervento di revisori indipendenti; i diversi step saranno quindi anche pienamente difendibili nelle varie sedi, a dimostrazione della serietà e bontà del progetto. Esistono vari modi di procedere alla realizzazione di uno studio di SA, come hanno dimostrato le numerose esperienze pregresse alla conclusione del progetto ISAM. Quest'ultimo rappresenta sicuramente uno dei possibili modi per affrontare il processo di realizzazione, opportunamente standardizzato e armonizzato.

Uno dei punti di forza delle metodologie di SA, suggerito in particolare modo nel contesto della metodologia ISAM, risiede nella sua possibile applicazione iterativa; cioè un processo di valutazione in continuo aggiornamento, sulla base di nuovi dati e informazioni, che possono derivare da successivi approfondimenti nello studio e caratterizzazione del sito ospite o nella progettazione dell'infrastruttura. Dati interessanti possono anche derivare dagli sviluppi delle conoscenze tecniche e ambientali, che possono fornire nuovi approcci di valutazione, così come testimoniato dai risultati di vari progetti di ricerca che sono stati promossi dopo la pubblicazione della metodologia ISAM.

L'applicazione di uno studio di SA può essere fatta anche ad un contesto generale del sistema sito-deposito, cioè in un ambito territoriale non ancora definito con precisione e per un progetto di deposito non del tutto dettagliato; questo approccio permette di creare un modello concettuale approssimativo, poi ulteriormente integrabile sulla base della disponibilità dei dati, che può permettere una prima approssimativa definizione dell'impatto radiologico del deposito inserito in un certo contesto e quindi può fornire utili spunti circa la fattibilità del progetto. Il metodo ISAM prevede vengano definiti 5 componenti chiave prima di procedere alla valutazione vera e propria. Questi riguardano:

- la definizione del contesto di valutazione, identificando l'oggetto della valutazione, inserito anche nel contesto della legislazione nazionale e del contesto regolamentare

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS - LP2 - 090	0	L	13	57

internazionale, gli obiettivi che si vogliono raggiungere e le caratteristiche del deposito-sito ospite;

- la descrizione del deposito, anche se non completo e dettagliato, ma contenente comunque gli aspetti essenziali per la valutazione;
- lo sviluppo e la giustificazione degli scenari correnti e di evoluzione futura che si dovranno analizzare (lo scenario principale verrà definito nel caso in cui il deposito debba essere ancora realizzato); la definizione degli scenari comporta inevitabilmente l'introduzione di sorgenti di incertezza nel sistema oggetto di valutazione;
- la formulazione e implementazione dei modelli matematici, che permettono di tradurre matematicamente gli aspetti principali che caratterizzano il sistema di studio, mediante equazioni algebriche, differenziali o altri strumenti matematici utili allo scopo; un processo che deve oltremodo essere trasparente e chiaro per il pubblico, per poter essere quindi difendibile in ogni sede;
- analisi dei risultati e *confidence building*, mediante interpretazione dei dati di output delle simulazioni, tenendo conto della precisione richiesta nell'iterazione corrente; in questo ambito l'applicazione di un'analisi di sensitività dopo una prima fase di valutazione può fornire un contributo utile ad individuare quei parametri o quei componenti del sistema che più di altri incidono sul risultato della simulazione; anche l'attenzione alla presentazione dei risultati deve essere massima, cercando di renderli comprensibili al maggior numero di persone.

Nelle attività di SA è fondamentale definire a priori una serie di scenari di valutazione, che rappresentano lo stato del sistema in determinate condizioni. Visto che l'attività di analisi avviene in modo previsionale, è importante ipotizzare quelli che plausibilmente potranno essere gli sviluppi futuri dell'interazione deposito-sito e quindi l'evoluzione futura dei componenti del *near field* (di cui al seguito), della geosfera e della biosfera. Questi scenari saranno quindi differenti, nascendo da considerazioni al contorno e ipotesi diverse, ma scelti mediante un processo trasparente e condiviso con i diversi portatori di interesse, che quindi sia poi reso difendibile all'eventuale analisi di revisori indipendenti, come già sottolineato. Ecco che in questo ambito ha una notevole importanza l'elaborazione di un approccio sistematico, facilmente riproducibile, che garantisca trasparenza ed esaustività nella scelta degli scenari e che sia documentato in ogni passo. L'utilizzo di un approccio sistematico condiviso e trasparente per la realizzazione degli scenari non è solo finalizzato alla loro definizione, ma può rappresentare anche un primo ambito di confronto tra i diversi stakeholder che sono interessati allo sviluppo del progetto, al fine di affrontare fin da subito e risolvere le eventuali problematiche derivanti da diversi approcci e finalità nella realizzazione del deposito.

Vista la molteplicità degli elementi che possono generare uno scenario di valutazione e l'elevato numero di combinazioni, è evidente che la scelta deve avvenire in modo da tralasciare quelli non plausibili o che non rappresentano un rilevante interesse per le considerazioni circa l'impatto radiologico del deposito. Si dovrà quindi procedere ad una selezione di un numero ristretto di possibili casi di simulazione, che siano rappresentativi, ma anche esaustivi, degli aspetti chiave che rappresentano la possibile evoluzione del sistema indagato.

Nella metodologia ISAM, così come in precedenti metodologie di valutazione, è stato importante l'approccio formale per la costruzione degli scenari, utilizzando una lista di elementi o categorie di elementi che possono essere ricondotti a *caratteristiche, eventi e processi* che possono essere propri del sistema da rappresentare o esterni ad esso, raggruppati nella dizione FEP (*Features, Events, Processes*). Questi elementi possono poi essere suddivisi in *FEP interni*, quindi riferiti al dominio interno del sistema, o *FEP esterni*, cioè riferiti all'esterno dello stesso; questi ultimi agiscono sul sistema senza esserne parte integrante. La loro classificazione nei due schemi è spesso soggettiva, cioè dipendente da chi sta effettuando la valutazione, o al contrario strettamente dipendente dal modello che si vuole utilizzare per le simulazioni. I FEP nella metodologia ISAM sono raggruppati in insiemi, definiti layer:

- *layer-0*, contesto della simulazione;
- *layer-1*, fattori interni;
- *layer-2*, fattori ambientali (dominio spaziale e temporale della simulazione).

La costruzione degli scenari può procedere in modo iterativo, combinando i diversi elementi del FEP, identificando per primo il *caso-tipo* o lo *scenario-base* da cui eventualmente far discendere i successivi per analizzare particolari evoluzioni del contesto o per verificare l'evoluzione e l'impatto di certe assunzioni sulla sicurezza del deposito. Gli scenari ulteriori possono anche discendere dall'analisi dei risultati delle prime simulazioni condotte sullo scenario base, che portano alla luce aspetti del sistema o assunzioni che possono variare nel tempo, con relativa ripercussione sulla sicurezza del deposito; proprio tali assunzioni possono dare vita a nuovi scenari di valutazione.

Il modello concettuale può essere definito come un insieme di assunzioni qualitative utili per descrivere un sistema per una certa finalità, che nello specifico può essere ricondotta alla previsione dell'impatto radiologico di un deposito superficiale di rifiuti radioattivi. Si possono individuare una serie di assunzioni minime che possono generare un modello concettuale, quali ad esempio le dimensioni del dominio di studio, la sua geometria, le condizioni iniziali e le condizioni al contorno, i principali fenomeni che influiscono sul sistema. Per le finalità di previsione quantitativa dell'impatto di un deposito, le informazioni minime che caratterizzano un modello concettuale dovranno essere tali da permettere la costruzione di un modello matematico che rappresenti il sistema e le interazioni tra i suoi componenti.

Ad oggi la categorizzazione dei componenti del sistema di studio più utilizzata segue il seguente schema:

- *near field*, cioè i rifiuti nelle loro forme di manufatti, le loro caratteristiche e il sistema di deposito, le barriere ingegneristiche e i caratteri dell'infrastruttura di contenimento;
- la geosfera, che include tutti gli aspetti geologici, litologici, idrogeologici e ambientali che possono in qualche modo influenzare il sistema sito-deposito, la sua evoluzione e le caratteristiche di trasporto;
- la biosfera, costituente in primo luogo la via di contaminazione verso gli esseri viventi ed in particolare l'uomo.

Naturalmente non è solo utile definire questi componenti del sistema, ma anche le loro interazioni, come già precedentemente evidenziato, e le rispettive interfacce in cui avvengono gli scambi di massa reciproci, tenendo in debito conto di come questi possano evolvere nel futuro. In questo modo un modello concettuale non rappresenta in modo statico un certo sistema, ma ne rappresenta anche le caratteristiche dinamiche, di interazione tra i suoi componenti; in modo

concreto si può dire che un modello concettuale rappresenta, anche se in modo del tutto qualitativo, le modalità con cui i radionuclidi possono fuoriuscire dal deposito, come questi possono migrare all'interno delle matrici ambientali e tramite quali vie di esposizione possa avvenire la contaminazione degli esseri viventi. La concretizzazione delle relazioni dinamiche dei componenti del modello concettuale, così come degli altri elementi del sistema, può avvenire proprio attraverso l'implementazione di un modello matematico, mediante l'utilizzo di una formulazione che rappresenti, sebbene con una certa approssimazione, il contesto quantitativo descritto in precedenza per poi ricorrere a codici di simulazione di vario tipo, in cui implementare il modello matematico stesso.

L'approccio comporta un certo livello di approssimazione, visto che la formulazione matematica non può rappresentare la realtà precisa di tutti i fenomeni considerati; questo aspetto rappresenta una fonte di incertezza, come specificato nei successivi paragrafi, ma che opportunamente gestito, non compromette il buon esito delle valutazioni. Un ulteriore aspetto che contribuisce alla creazione di un'incertezza nel modello è costituito dai valori parametrici delle grandezze che intervengono nel sistema; il più delle volte questo deriva dalla mancanza di dati circa il parametro considerato o la disponibilità di dati approssimativi, che andrebbero oltremodo confermati. Per tale ragione spesso si adotta un approccio probabilistico all'utilizzo dei parametri, non inserendo valori fissi che li caratterizzano, ma funzioni di distribuzione di probabilità, che quantificano appunto la probabilità che un parametro assuma un certo valore. Parte dei codici di simulazione oggi impiegati implementa analisi probabilistiche con metodi avanzati tipo Monte Carlo, che hanno il vantaggio di aumentare la robustezza del modello concettuale e matematico che è stato implementato, visto che prendono in considerazione possibili variazioni parametriche dei dati di input.

Le analisi di sensitività che ne derivano contribuiscono a focalizzare l'attenzione del valutatore o del revisore sugli aspetti che più di altri incidono sulla sicurezza del deposito, ad esempio su quei componenti del sistema la cui evoluzione o il cui degrado possono comportare un aumento della migrazione dei radionuclidi dal deposito; o, al contrario, su quei componenti del sistema che possono essere ulteriormente potenziati per aumentare la sicurezza del deposito di alcuni ordini di grandezza e rispondere al meglio ai criteri regolamentari.

Un'ulteriore sorgente di approssimazione e incertezza consiste nelle considerazioni circa l'evoluzione futura dei parametri caratterizzanti il deposito ed il sito, nonché di quelli che caratterizzano le interazioni tra i singoli comparti. Non si può ovviamente avere la certezza che le assunzioni circa la dinamica futura del deposito e dell'ambiente avvengano nel modo ipotizzato; si pensi in tal caso alle necessarie approssimazioni che fanno seguito alle previsioni climatiche future. Ulteriori incertezze possono anche nascere dalla definizione dei modelli concettuali degli scenari e dalla loro implementazione matematica, che rappresentano per definizione solo un'approssimazione della realtà fisica del sistema di studio.

2 Monitoraggio Ambientale

2.1 Normativa e riferimenti internazionali


Per monitoraggio ambientale di un deposito di rifiuti radioattivi si intende l'osservazione e la misura continua o periodica di parametri, grandezze di natura ingegneristica, ambientale e radiologica che contribuiscono a valutare l'impatto dei suoi componenti, e delle attività in esso svolte, sull'ambiente esterno e sulla popolazione (12).

Per poter definire un programma di monitoraggio è necessario seguire gli aspetti normativi. I riferimenti normativi internazionali sono quelli pubblicati dalla IAEA e riportati di seguito. Gli standard per la sicurezza dei depositi di rifiuti radioattivi sono pubblicati nel testo riportato in bibliografia (3). Il requisito 21, del documento citato, indica che un programma di monitoraggio deve essere svolto prima e durante la costruzione e l'esercizio di un deposito di rifiuti radioattivi e dopo la sua chiusura. E' necessario raccogliere e aggiornare le informazioni utili per la sicurezza dei lavoratori e della popolazione e per la protezione dell'ambiente. Si indica inoltre la necessità del monitoraggio per confermare l'assenza di condizioni, interne ed esterne al deposito, che potrebbero influenzare la sicurezza della struttura dopo la chiusura.

La IAEA ha pubblicato anche altri report relativi al monitoraggio nei quali si affronta la questione da diversi punti di vista e nei quali vengono delineate le linee guida da seguire relativamente a:

- responsabilità sulla sorveglianza e il monitoraggio, con definizione dei criteri generali da considerare, quali ad esempio la sorveglianza del deterioramento delle barriere ingegneristiche, i protocolli di campionamento, la migrazione nelle diverse matrici ambientali; inoltre vengono analizzati gli aspetti principali che coinvolgono il monitoraggio e la sorveglianza nelle diverse fasi operative (4);
- pratiche legali e responsabilità del monitoraggio da attribuire all'operatore, al corpo regolatore e ad altre autorità. Questo report definisce inoltre gli aspetti generali del monitoraggio: vie di esposizione dell'uomo, gruppi maggiormente esposti, tipi di radiazioni da monitorare. Vengono descritti gli interventi e le pratiche da attuare in condizioni di emergenza e le tecniche da adottare per il monitoraggio. Si espongono considerazioni sulla valutazione della dose e sull'interpretazione dei risultati ottenuti dal monitoraggio stesso (5);
- gestione dei rifiuti radioattivi, tra le diverse fasi considerate si fa riferimento anche al monitoraggio (6);
- insieme degli aspetti legati al progetto e ai programmi di monitoraggio ambientale e di sorgenti radioattive. Si riportano inoltre le linee principali sull'analisi degli scarichi gassosi e liquidi, sul monitoraggio specifico durante e dopo un incidente che causa rilascio nella biosfera e su aspetti generali del monitoraggio quali campionamento, laboratori di analisi, limiti di misura, incertezze e qualità dei sistemi di gestione (7).

Oltre alla normativa internazionale appena citata, ogni Paese ha stabilito delle proprie linee guida per il programma di monitoraggio ambientale di un sistema di smaltimento. Per quanto riguarda l'Italia, nell'ambito della gestione della radioattività, si fa riferimento a:

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS - LP2 - 090	0	L	17	57

- Decreto Legislativo 17 marzo 1995 n. 230 riguardante l'attuazione delle Direttive 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 92/3/Euratom e 96/29/Euratom in materia di radiazioni ionizzanti, rispettivamente relative all'informazione della popolazione sui provvedimenti di protezione sanitaria applicabili e sul comportamento da adottare in caso di emergenza radioattiva, alla protezione operativa dei lavoratori esterni esposti al rischio di radiazioni ionizzanti nel corso del loro intervento in zona controllata, alla sorveglianza e al controllo delle spedizioni di residui radioattivi tra Stati membri e di quelle verso la comunità e fuori da essa, alla protezione sanitaria della popolazione e dei lavoratori contro i pericoli derivanti dalle radiazioni ionizzanti;
- Decreto Legislativo 19 agosto 2005 n. 195 concernente l'attuazione della Direttiva 2003/4/CE sull'accesso del pubblico all'informazione ambientale, che include anche le radiazioni e i rifiuti radioattivi.

Relativamente al programma di monitoraggio vero e proprio, il riferimento principale è la norma UNI 11279-3 (2008), che descrive i parametri fondamentali da caratterizzare in fase di esercizio e post operativa.

Un ulteriore aspetto importante per gestire un efficace sistema di controllo riguarda il contesto socio-economico in cui il deposito viene inserito. Relativamente ai parametri demografici è necessario controllare le possibili modifiche demografiche e le caratteristiche di utilizzazione del territorio della zona sorvegliata, in particolare devono essere considerati i seguenti aspetti:

- la distribuzione della popolazione in funzione della distanza e della posizione rispetto al deposito;
- la descrizione, la distanza e la posizione dei centri abitati più vicini;
- la descrizione, la distanza e la posizione delle strutture pubbliche, per esempio scuole ed ospedali;
- la descrizione, la distanza e la posizione delle aree industriali;
- la descrizione dell'utilizzo del territorio, al fine di evidenziare variazioni fra gli aspetti residenziali, industriali, commerciali ed agricoli.

Tutte queste informazioni dovrebbero essere già disponibili, visto che dovrebbero costituire il bagaglio informativo su cui si basa l'attività di *siting* del deposito, nonché quella di caratterizzazione dell'area, anche se è opportuno aggiornare i dati in base al censimento della popolazione, delle imprese e delle attività produttive.

Si devono considerare i parametri geologico - ambientali e territoriali dell'area, tra cui sicuramente gli aspetti meteorologici e idrologici che vengono riportati nella Tab. 2, insieme ad una possibile frequenza di campionamento, che ovviamente deve essere funzione della specificità del sito.

Tabella 2. Parametri di monitoraggio (fonte: UNI 11279-3).

<i>Parametri</i>	<i>Dati da acquisire</i>	<i>Possibile frequenza di aggiornamento dati</i>
Meteorologici	- velocità e direzione dei venti - temperatura	annuale
	- intensità delle precipitazioni - tipo, frequenza e intensità di manifestazioni meteorologiche severe	
Idrologici	- portata dei corsi d'acqua dell'area circostante l'impianto - distanza della superficie freatica nell'area del sito, nell'area del centro abitato e nell'area di quello immediatamente più lontano - caratteristiche di drenaggio del territorio a monte del sito - inondazioni in aree circostanti il sito - frequenza dei ristagni d'acqua nell'area del deposito	biennale

Questa norma fornisce inoltre indicazioni relative alle azioni di sorveglianza, il cui obiettivo fondamentale riguarda il monitoraggio dei parametri:

- ingegneristici;
- radiologici e chimico-fisici all'interno del deposito;
- radiologici e chimico-fisici all'esterno del deposito.

Le informazioni base caratterizzanti diverse aree e/o parametri sono descritte in Figura 2, riportando la corrispondente area di prelievo e controllo, il tipo di analisi da sviluppare e la possibile frequenza di campionamento.

Area e/o parametro	Area prelievo e controllo	Tipo di analisi	Frequenza
Interno deposito	Sistemi di copertura e drenaggio	Ispezioni dirette	Annuale
	Locali deposito Misurazioni dose ambientale Misurazioni attività aria	Intensità di dose, concentrazione attività	Continua
	Liquidi dei pozzetti di drenaggio	Attività α e β totale, pH, conducibilità elettrica, attività β totale (materiale sospeso)	Settimanale
		Spettrometria γ , sostanze chimiche e tossiche (Pb, Cd, B, As, Hg)	Semestrale
Zona insatura	Pozzi	Radioattività, metalli pesanti e materiali organici Pressione, flusso acqua Campionamento gas	Semestrale
Zona satura	Gruppi pozzetti I. interno sito direzione falda II. non intercetta il flusso principale III. monte deposito IV. fuori dal sito	Spettrometria γ , attività α e β totale, pH, conducibilità elettrica, sostanze tossiche (Pb, Cd, B, As, Hg)	Mensile (gr. I) Bimestrale (gr. II) Semestrale (gr. III) Mensile (gr. IV) Campagne speciali ogni sei mesi (tutti i gruppi)
Rilasci nell'atmosfera	Postazioni prelievo - confine sito - area abitata più vicina - area lontana sito	Spettrometria γ , attività β totale, ^3H , ^{14}C	Prelievo campioni in continuo Analisi mensili
Acque superficiali	Acqua superficiale permanente - interno sito - esterno sito	Spettrometria γ , attività α e β totale, pH, conducibilità elettrica, sostanze chimiche e tossiche (Pb, Cd, B, As, Hg), solidi sospesi	Mensile
Matrici ambientali			
Vegetazione	Postazioni prelievo - confine sito - area abitata più vicina - area lontana sito	Spettrometria γ , attività β totale	Annuale
Prodotti alimentari	Prodotti alimentari locali	Spettrometria γ , attività β totale, ^{90}Sr	Annuale
Terreni	- confine deposito - centro strutture - postazione remota	Spettrometria γ , attività β totale, ^{90}Sr	Annuale
Sedimenti	Prossimità acqua superficiale - interno sito - esterno sito	Spettrometria γ , attività β totale	Annuale
Livelli di dose ed attività dell'aria	Confine sito	Dose γ ambientale, concentrazione dell'attività β - γ	Continua

Figura 2. Parametri fisici, chimici ed ingegneristici controllati in fase di monitoraggio (fonte: UNI 11279-3).

2.2 Obiettivo del monitoraggio e matrici ambientali da monitorare

Nello sviluppo di un programma di monitoraggio ambientale, gli obiettivi risultano i seguenti:

- caratterizzare la radioattività di fondo naturale prima dell'entrata in esercizio dell'impianto in esame (caratterizzazione del sito *ante operam*);

- controllare, in ogni situazione, il rilascio di radionuclidi dalla sorgente attraverso le varie matrici ambientali;
- prevenire eventuali rilasci incontrollati e conseguente contaminazione ambientale;
- intervenire nelle situazioni di emergenza.

Il monitoraggio ambientale implica il controllo delle diverse matrici ambientali, in particolar modo di aria, acqua e suolo. In base al sito da monitorare, sarà opportuno eseguire valutazioni su particolari specie di flora e fauna.

2.2.1 Monitoraggio delle acque

I radionuclidi veicolati nelle acque superficiali e sotterranee possono causare l'esposizione della popolazione alla radioattività mediante:

- ingestione di radionuclidi per via indiretta tramite alimenti entrati, a vario titolo, a contatto con l'acqua (ad es. per irrigazione);
- ingestione dell'acqua stessa;
- prodotti derivati da piante o animali in seguito a irrigazione dei campi;
- irradiazione esterna da parte di radionuclidi in sedimenti, acque, etc.

Le misure da considerare sono relative:

- alla concentrazione di radionuclidi in acqua, in quanto veicolo principale;
- alla concentrazione di radionuclidi nei generi alimentari;
- alla concentrazione di radionuclidi in organismi viventi;
- alla concentrazione di radionuclidi in aria, dovuta a ri-sospensione di aerosol o per evaporazione;
- al rateo di dose per esposizione diretta.

Il programma di monitoraggio di routine dovrebbe prevedere la raccolta di informazioni sull'andamento a lungo termine della concentrazione di attività o dei ratei di dose nelle acque, verificare i risultati delle sorgenti monitorate e raccogliere le informazioni necessarie alla valutazione della dose alla persona rappresentativa (ICRP, 2006).

2.2.2 Monitoraggio dell'aria

I radionuclidi scaricati in atmosfera possono causare l'esposizione della popolazione per:

- irraggiamento esterno, dovuto ad una nube passante e/o ri-deposizione al suolo di radionuclidi;
- irraggiamento interno per:
 - inalazione di radionuclidi da nube o particelle sospese dal terreno;
 - ingestione di radionuclidi nei generi alimentari o nelle acque;
 - assorbimento dei radionuclidi attraverso la pelle.

Le misurazioni da includere per quanto riguarda il monitoraggio dell'aria sono:

- il rateo di dose;
- la concentrazione di radionuclidi in aria e nelle precipitazioni;
- la deposizione dei radionuclidi;
- la concentrazione di radionuclidi nei generi alimentari;
- la concentrazione di radionuclidi in particolari organismi bio-accumulatori, quali licheni, muschi, ecc.

2.2.3 Monitoraggio del suolo

I radionuclidi possono essere introdotti nel terreno in seguito a deposizione di particelle dall'atmosfera o in seguito a irrigazione. Questo tipo di monitoraggio richiede siano considerate le seguenti misurazioni:

- rateo di dose;
- concentrazione dei radionuclidi nel suolo;
- la concentrazione di radionuclidi nei generi alimentari;
- la concentrazione di radionuclidi in particolari organismi bio-accumulatori, quali licheni, muschi, ecc.

2.3 Monitoraggio nelle diverse fasi di realizzazione e gestione del deposito

Il monitoraggio ambientale deve tener conto di considerazioni sia spaziali che temporali e per quest'ultimo motivo si possono quindi distinguere diversi tipi di monitoraggio (4):


- di routine (fase operativa);
- istituzionale (fase post-operativa o *post closure*);
- di emergenza, in caso incidentale;
- di post-emergenza al fine di gestire e controllare le conseguenze di un incidente.

In particolare il monitoraggio di emergenza e di post-emergenza hanno lo scopo di caratterizzare potenziali situazioni di pre-allarme ed allarme; questi due tipi di monitoraggio richiedono delle misure continue dei ratei di dose gamma e delle concentrazioni di aerosol in aria. Le informazioni così acquisite sono utilizzate per gestire l'emergenza in modo da mitigare le conseguenze dell'incidente.

2.3.1 Monitoraggio nella fase pre-operativa o caratterizzazione del sito

Gli obiettivi principali della caratterizzazione sono:

- raccogliere dati di input necessari alle valutazioni di sicurezza e alle altre attività propedeutiche alla realizzazione del deposito;
- caratterizzare le vie di migrazione dei radionuclidi;
- raccogliere campioni delle matrici ambientali;

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS - LP2 - 090	0	L	22	57

- (...) da definire durante il siting.

Il dettaglio dei parametri da misurare, la frequenza delle misurazioni, la precisione richiesta e l'accuratezza delle misure si basano sullo scopo della valutazione di sicurezza e sono specifiche per il sito considerato e il tipo di sistema da realizzare. In questa fase, la frequenza di campionamento e le misurazioni devono essere sufficienti per permettere una valutazione delle variazioni stagionali dei parametri di interesse e devono tener conto delle eterogeneità spaziali delle caratteristiche idrogeologiche ed ambientali, per determinare un adeguato modello di sicurezza. Particolare attenzione dovrà essere prestata alla rilevazione dei radionuclidi ad elevata mobilità, quali ^3H , ^{14}C .

2.3.2 Monitoraggio durante la fase di esercizio o monitoraggio di routine

Il monitoraggio di routine, durante la fase di esercizio del deposito, è importante in quanto deve:

- garantire la verifica della conformità agli standard di sicurezza;
- eseguire un'analisi a lungo termine;
- verificare l'eventuale accumulo di radionuclidi nell'ambiente.

Per questo tipo di monitoraggio risulta necessario valutare l'attività dei radionuclidi presenti in aria, nelle acque superficiali, nel sottosuolo, nel suolo, nei prodotti agricoli, ecc., o più in generale in tutti quei sistemi che possono costituire una via di contaminazione verso l'ambiente o l'uomo.

La realizzazione dell'impianto di deposito crea delle variazioni dell'ambiente locale; un esempio è la possibile generazione di vie preferenziali per la migrazione di radionuclidi nel sottosuolo dovute ai lavori di scavo o di messa in opera di particolare infrastrutture. Questi cambiamenti hanno effetto sui parametri idrogeologici misurati in fase di monitoraggio, che necessitano quindi di essere revisionati ed eventualmente aggiornati.

2.3.3 Monitoraggio durante la fase post-operativa

Gli obiettivi del monitoraggio post-operativo sono:

- ❖ ottenere dati che testino e dimostrino la conformità alla normativa e ai requisiti legali per la protezione della salute umana e dell'ambiente e agli obiettivi di radioprotezione posti in fase di progetto;
- ❖ ottenere informazioni che siano di ausilio allo sviluppo di controlli attivi.

Il programma di monitoraggio ambientale non deve limitarsi ad evidenziare il superamento dei limiti di attività definiti dalle normative nazionali ed internazionali, ma deve rilevare anche eventuali anomalie che potrebbero portare al deterioramento delle barriere ingegneristiche e quindi ad un potenziale pericolo per la popolazione e l'ambiente. Per quanto riguarda il deterioramento delle barriere ingegneristiche, il monitoraggio istituzionale nel periodo conseguente alla chiusura del deposito può essere efficacemente progettato sulla base di esperienze pregresse in contesti simili a quelli analizzati per il deposito, ed anche sulla base dei risultati di appositi studi di caratterizzazione dell'area e di simulazioni, che tendono ad evidenziare le possibili e principali vie di diffusione dei radionuclidi. In questa fase verranno ispezionati

periodicamente: il sistema di copertura dell'impianto, il sistema di drenaggio e il sistema di raccolta del percolato; verrà eseguito il controllo dell'integrità delle recinzioni e dei segnali di pericolo.

Se i risultati del monitoraggio dovessero indicare valori di concentrazione dei radionuclidi superiori a quelli di riferimento normativi o di progetto, risulterebbe necessario effettuare un'indagine per valutare le ragioni di tale anomalia. Questo potrebbe comportare un campionamento ripetuto e la possibile estensione del campionamento ad altri potenziali contaminanti per comprendere l'origine del problema e valutare la necessità di interventi di bonifica.

I possibili cambiamenti climatici possono ripercuotersi sul sistema ed è quindi utile un controllo periodico delle caratteristiche geologiche, idrologiche e geochimiche, per valutare che le assunzioni fatte al momento della realizzazione dell'impianto siano ancora valide.

2.4 Il campionamento ambientale

Il monitoraggio ambientale si basa sul campionamento di matrici ambientali su cui effettuare particolari misure di radioattività, al fine di stabilire la concentrazione di radionuclidi nel mezzo considerato ed eseguire eventualmente una valutazione di dose.

Le informazioni necessarie per definire il programma di campionamento sono:

- ❖ la lista di radionuclidi che devono essere inclusi nel monitoraggio;
- ❖ gli standard di misura, i quali possono condizionare il piano di campionamento;
- ❖ il tempo e la frequenza di campionamento;
- ❖ il luogo in cui raccogliere i campioni;
- ❖ il metodo di campionamento da applicare;
- ❖ il laboratorio di analisi;
- ❖ la registrazione dei risultati ottenuti col campionamento.

Tutti questi punti hanno la medesima importanza, dato che la qualità del monitoraggio dipende dalle modalità e dalla serietà professionale con cui viene affrontata ciascuna di queste attività.

Per tutti i programmi di monitoraggio è necessario decidere la localizzazione dei punti di monitoraggio, in modo che i risultati ottenuti siano rappresentativi della situazione esistente. Il programma di monitoraggio deve essere periodicamente rivisto e aggiornato in base ai risultati e alle valutazioni ottenute dai campionamenti.

La IAEA detta le seguenti linee guida (4):

- per quanto riguarda le acque superficiali è necessario prevedere la raccolta di almeno un campione in un punto a monte e diversi campioni a valle rispetto alla direzione del flusso d'acqua; per le acque sotterranee invece il monitoraggio ha lo scopo di caratterizzare la qualità chimica e radiologica dell'acqua e rilevare potenziali fenomeni di fuoriuscita dal deposito. In quest'ultimo caso il campionamento deve essere eseguito almeno trimestralmente.
- Per il monitoraggio dell'aria è necessario considerare almeno quattro punti sul contorno del sito, un punto situato in prossimità della residenza più vicina al sito nella direzione sottovento più probabile e un punto di controllo in una localizzazione lontana dal sito. L'aria dovrebbe essere filtrata in modo continuo per preparare dei campioni settimanali su

filtro e misurare l'attività beta; dovrebbero essere raccolti campioni trimestrali da analizzare tramite spettrometria gamma, sui quali eseguire anche un'analisi radiochimica per determinare la presenza dello ^{90}Sr e la misurazione di trizio e ^{14}C .

- Considerando altre matrici ambientali generiche come ad esempio la vegetazione, per essa dovrebbero essere raccolti periodicamente (con frequenza almeno semestrale o annuale) dei campioni relativi alle specie principali della zona sotto monitoraggio. Per quanto riguarda le produzioni agricole locali, i pesci, gli animali da pascolo, ecc. si dovrebbe eseguire un campionamento annuale e analizzare principalmente la presenza di emettitori gamma, ^{90}Sr e ^{14}C .

In particolar modo per quanto riguarda le acque sotterranee, è fondamentale considerare il fatto che le condizioni idrologiche e chimiche variano nel tempo e nello spazio e che l'ambiente delle acque sotterranee è dinamico (13). Per questi motivi, la frequenza e i punti di campionamento devono essere selezionati con attenzione ed accuratezza in modo che risultino rappresentativi della distribuzione spaziale e temporale dei contaminanti nelle acque sotterranee. Anche le misurazioni del livello della falda e della conduttività idraulica devono essere eseguite in modo preciso ed accurato al fine di interpretare in modo corretto il sistema idrogeologico. Un'attenta pianificazione è fondamentale per distinguere tra la reale variabilità idrologica e chimica del sito e quella che può derivare da errori nella raccolta dei campioni, dalla manipolazione e dalle procedure di analisi degli stessi.

Per quanto riguarda la zona non satura (4), la migrazione dei contaminanti dipende sostanzialmente da quattro variabili: concentrazione del contaminante, contenuto d'acqua, tensione idrica e flusso d'acqua nel suolo. Le prime tre sono direttamente osservabili e monitorabili; la quarta, invece, non è osservabile ma può essere stimata dai cambiamenti del contenuto d'acqua e del gradiente di tensione idrica. Nei mezzi eterogenei, dove sono presenti fratture o stratigrafica variabile, i campioni vengono raccolti dove l'acqua fluisce; queste vie preferenziali di flusso possono presentare portate più veloci rispetto ai mezzi circostanti, quindi più critiche.

La zona satura, invece, viene monitorata osservando il livello della falda e la concentrazione dei contaminanti. Il livello dell'acqua è misurato per identificare la direzione del flusso della falda. Esso può essere misurato direttamente con sensori elettronici di pressione e data loggers. Le informazioni iniziali sulle caratteristiche idrauliche del sito analizzato possono essere ottenute misurando il livello dell'acqua sottoponendolo a stress mediante pompaggio o iniezione.

In generale, il campionamento delle matrici ambientali si sviluppa in funzione delle analisi che vogliono essere svolte. In Figura 3 e in Figura 4 sono riportate le principali matrici da monitorare, i costituenti che devono essere considerati (dose gamma, rateo di neutroni, aria, pioggia, suolo, etc.) e le frequenze di monitoraggio (5), rispettivamente in fase di esercizio ed in fase di emergenza.

Discharge	Monitored constituents	Frequency
Airborne	<i>External radiation</i>	
	Gamma dose rate	Continuously
	Gamma dose — integrated	Twice a year
	Neutron dose rate (if neutron radiation is foreseen)	Continuously
	Neutron integrated (if neutron radiation is foreseen)	Twice a year
	<i>Air, deposition</i>	
	Air	Continuous collection, weekly to monthly measurement
	Rain	Continuous collection, monthly measurement
	Deposition	Continuous collection, monthly measurement
	Soil	Once a year
	<i>Foodstuff and/or ingestion</i>	
	Leafy vegetables	Each month during growing season
	Other vegetables and fruits	Selected samples, at harvest
	Grain	Selected samples, at harvest
	Milk	Each month when cows are on pasture
	Meat	Selected samples, twice a year
	Drinking water and/or groundwater	Twice a year
	<i>Terrestrial indicators</i>	
Grass	Each month when cattle are on pasture	
Lichen, mosses, mushrooms	Selected samples, once a year	
Liquid	<i>Aquatic dispersion</i>	
	Surface water	Continuous sampling, monthly measurement
	Sediment	Once a year
<i>Aquatic foodstuffs</i>		
	Fish	Selected samples, once a year
	Shellfish	Selected samples, once a year
<i>Aquatic indicators</i>		
	Seaweeds, marine sponges	Selected samples, twice a year
	Benthic animals	Selected samples, twice a year

Figura 3. Matrici da monitorare, sistemi di monitoraggio e frequenza in fase di esercizio (fonte: IAEA (5)).

Release	Monitored constituents	Frequency	Remarks	
Airborne	Measurements during the passage of a cloud			
	<i>External radiation</i>			
	Gamma dose rate	Continuously	Near and far field, external dose rate map	
	Neutron dose rate (if neutron radiation is foreseen)	Continuously	Only near field, if neutrons are expected	
	<i>Air</i>			
	Air	Continuous collection, measurement every 2 h	Near and far field	
	Rain	Continuous collection, measurement every 2 h	Near and far field	
	Measurements after the passage of a cloud		In contaminated areas	
	<i>External radiation</i>			
	Gamma dose rate	Continuously	External dose rate map	
	<i>Deposition</i>			
	Soil	Once	Contamination map for relevant radionuclides	
	<i>Foodstuffs/ingestion</i>			
	Leafy vegetables	Daily	Good indicator for plant food	
Milk	Daily	Good indicator for animal food		
Other vegetables and fruits	At harvest			
Grain	At harvest			
Meat	Representative samples			
Drinking water and/or groundwater	Representative samples			
<i>Terrestrial indicators</i>				
Grass	Daily			
Lichen, mosses, mushrooms	At harvest			
Liquid	After releases		Affected areas and water bodies are limited	
	<i>Aquatic dispersion</i>			
	Surface water	Continuous sampling, daily measurement		
	Sediment	Weekly		
	<i>Aquatic foodstuffs</i>			
Fish	Selected samples			
Shellfish	Selected samples			

Figura 4. Matrici da monitorare, sistemi di monitoraggio e frequenza in fase di emergenza (fonte: IAEA (5)).

2.5 Sistemi di monitoraggio adottati in depositi esistenti e negli impianti di potenza

In base alle normative IAEA e a quelle nazionali si riportano alcuni esempi di azioni di monitoraggio ambientale durante le varie fasi di vita del deposito, relativi ad alcuni depositi attivi in Europa e nel mondo (4) e anche alcuni esempi di monitoraggio applicati ad impianti di potenza.

2.5.1 El Cabril (Spagna)

L'impianto di El Cabril è gestito da ENRESA, la compagnia nazionale spagnola che si occupa della gestione dei rifiuti radioattivi fin dal 1986. E' situato nella zona nord-est di Cordoba, a 130 km di distanza dalla capitale. Questo sito è nato come deposito temporaneo di rifiuti a bassa e media attività. Nel 1989, ENRESA ha iniziato i lavori di allargamento dell'impianto, basati su un modello di deposito superficiale con utilizzo di barriere ingegneristiche. I contenitori sono situati su piattaforme. Quando una piattaforma è piena, una lastra superiore a tenuta viene installata, seguita da una copertura impermeabile realizzata in materiale sintetico. La lastra inferiore della piattaforma raccoglie le acque che potrebbero essere filtrate attraverso la copertura e le indirizza al sistema di controllo delle infiltrazioni. Questo sistema consente di identificare la struttura dalla quale è avvenuta l'infiltrazione e quindi di andare a riparare o sostituire la copertura danneggiata. Oltre all'area adibita al posizionamento dei rifiuti radioattivi, ci sono altri edifici dedicati al controllo e ai servizi tecnici ed amministrativi; questi includono l'edificio di condizionamento ed il laboratorio di caratterizzazione della radioattività. Il processo di condizionamento produce effluenti gassosi dal sistema di ventilazione e dall'inceneritore, questi effluenti vengono rilasciati all'ambiente dopo essere stati filtrati. Gli effluenti liquidi generati durante diversi processi sono riutilizzati per generare cemento armato impiegato poi per riempire i contenitori di cemento. Per quanto riguarda la fase di esercizio, questa ha dovuto soddisfare i requisiti per l'ampliamento dell'impianto. Le informazioni ottenute sono:

- ❖ indagine geologica: l'erosione è stata identificata come uno dei maggiori rischi prevedibili, le indagini devono continuare durante la fase di esercizio, nella quale devono essere applicate anche le tecniche per prevenire questo rischio;
- ❖ indagine idrogeologica: questa ha reso possibile la collocazione dei rifiuti ben al di sopra del punto più alto raggiunto dalla falda freatica e di ottimizzare il posizionamento dei pozzi necessari per monitorare il deposito;
- ❖ indagine geotecnica: ha fornito informazioni sulla capacità portante del terreno, sulla potenziale presenza di sedimenti, sulla stabilità dei versanti;
- ❖ indagine geochimica: ha fornito le informazioni necessarie a sostenere che El Cabril ha la capacità adeguata come barriera naturale contro la migrazione di radionuclidi;
- ❖ indagine sismica: ha rilevato che non c'è stata attività sismo-tettonica di rilievo nel raggio di 25 km negli ultimi 500.000 anni;
- ❖ studi meteorologici: hanno fornito dati utilizzati nella fase operativa per posizionare i punti di monitoraggio degli effluenti gassosi.

Una volta raccolti i dati preliminari, si è passati alla fase operativa di monitoraggio durante la quale sono continuate le indagini idrologiche e geologiche, così come quelle radiologiche, con frequenza ridotta rispetto alla fase precedente.

Prima dello scarico tutti gli effluenti liquidi vengono monitorati; in particolare vengono controllati i contenuti radiologici e chimici e si confrontano coi limiti di legge.

Gli effluenti gassosi vengono campionati in continuo e analizzate l'attività alfa e beta; i filtri vengono analizzati mediante spettrometria gamma per determinare la presenza di radionuclidi e ulteriori campioni vengono presi per analizzare in laboratorio ^3H e ^{14}C .

La direzione e la velocità delle acque sotterranee è periodicamente rivalutata per incrementare informazioni di eventuali variazioni dovute a precipitazioni, utilizzo di acqua, pompaggio e altro. La stazione meteorologica viene utilizzata per misurare la direzione del vento in caso di presenza di particelle sospese in aria. Ad esempio i dati relativi alle precipitazioni sono necessari per determinare la quantità di acqua disponibile per il deflusso superficiale e la penetrazione.

Per quanto riguarda il monitoraggio delle varie matrici ambientali si può affermare che per l'aria sono state fatte le seguenti assunzioni:

- ❖ quattro punti di monitoraggio sul confine del sito;
- ❖ un punto di monitoraggio in direzione vento sull'abitazione più vicina;
- ❖ un punto di controllo in localizzazione lontana dal sito.

I campionamenti vengono eseguiti in continuo; i filtri vengono cambiati settimanalmente.

Il monitoraggio delle acque sotterranee serve a stabilire eventuali vie di fuga dei radionuclidi dal deposito; i campioni vengono raccolti dai pozzi collocati principalmente attorno all'area del deposito e dai punti rappresentativi delle vie dei flussi sotterranei tra le strutture dell'impianto e l'acqua uscente. A El Cabril ci sono almeno 12 punti di campionamento delle acque. Vi è un pozzo di controllo situato a monte dell'area del sito e un vecchio pozzo utilizzato per la raccolta e conferma dei dati storici. Per il monitoraggio delle acque superficiali i punti di campionamento sono i seguenti:

- ❖ cinque punti nell'area dove è presente acqua permanente e dove l'acqua di superficie passa attraverso o fuori dal sito;
- ❖ un punto di controllo a monte.


Si raccolgono inoltre, periodicamente, campioni vegetali delle specie dominanti al di fuori del sito che siano rappresentativi: sia per le valutazioni delle condizioni di fondo, che del potenziale impatto sull'area. Otto punti di campionamento corrispondono a quelli dell'aria, altri quattro sono stati aggiunti dove non era possibile installare campionatori elettrici per l'aria. La frequenza di campionamento è annuale e ogni sei mesi nella fase pre-operativa.

Anche suolo e sedimenti possono contenere materiale rilasciato dal deposito o trasportato dal vento o dagli effluenti liquidi. Si utilizzano quattro punti di monitoraggio sul confine del sito, uno al centro ed anche gli otto usati per aria e vegetazione; i campioni vengono raccolti annualmente.

La radiazione gamma è associata al trasporto di rifiuti radioattivi e alla contaminazione dell'aria. Le misure di radiazione gamma esterna sono eseguite sul confine del sito nei 12 punti dell'aria, dell'acqua di superficie e della vegetazione e nei 12 punti intorno all'area.

Per quanto riguarda il monitoraggio post-operativo, i punti fondamentali da considerare sono:

- ❖ ispezione delle condizioni superficiali e dei sistemi di drenaggio;
- ❖ mantenimento delle coperture;

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS - LP2 - 090	0	L	29	57

- ❖ monitoraggio delle acque sotterranee;
- ❖ sorveglianza di eventuali intrusioni.

2.5.2 Centre de La Manche e centre de l'Aube (Francia)

Il centro La Manche è stato il primo deposito di rifiuti radioattivi superficiale realizzato, è stato operativo dal 1969 al 1994; è situato in prossimità dell'impianto di riprocessamento del combustibile COGEMA nel nord della Francia. E' diretto dall'ente francese di gestione dei rifiuti radioattivi, ANDRA.

Comprende quattro differenti sistemi di drenaggio:


- ❖ deflusso dell'acqua nel sistema di raccolta: rete di condutture situate attorno e sopra la copertura e connesse a 20 pozzetti di raccolta;
- ❖ copertura del sistema di drenaggio: l'acqua potrebbe defluire attraverso lo strato di terra verso il basso sulla membrana bituminosa ed eventualmente attraverso la membrana essere drenata ai 20 pozzi nella camera di raccolta;
- ❖ volta del sistema di drenaggio: fughe da ogni unità individuale o da gruppi di unità nei pozzi è indirizzata ad un sistema di raccolta differenziato. Il percolato è indirizzato per gravità ad una serie di serbatoi, sistema accessibile attraverso una galleria di ispezione ed intervento;
- ❖ sistema di drenaggio complementare: canali di scolo lungo la base dei muri di sostegno e delle gallerie.

Un nuovo programma di monitoraggio è stato valutato nel 1998 considerando i due maggiori eventi di impatto radiologico:

- ❖ degradazione anormale della membrana bituminosa con incremento della permeabilità della copertura;
- ❖ prematuro rilascio di radionuclidi da qualsiasi parte dell'impianto a causa della degradazione degli imballaggi o delle barriere ingegneristiche o per improvviso aumento del livello della falda freatica.

Diverse tecniche sono state adottate per il monitoraggio dell'integrità della copertura:

- ❖ ispezioni visive che includono ispezioni esterne della superficie di copertura, incluse vegetazioni, fessurazioni e cedimenti dello strato superficiale di terra e le prove della presenza di animali scavatori; ispezioni interne nelle volte del sistema di drenaggio; ispezioni mediante videocamera del sistema di copertura del drenaggio;
- ❖ controlli topografici eseguiti mediante lo spostamento di markers posizionati sulla copertura;
- ❖ campionamento della membrana bituminosa e conseguenti analisi in laboratorio per verificare l'invecchiamento della membrana stessa e i cambiamenti delle proprietà quali porosità, spessore, coefficiente di diffusione rispetto al campionamento di riferimento;
- ❖ controlli idraulici utilizzati nella rete di drenaggio posizionata sotto la membrana bituminosa per rilevare eventuale aumento di permeabilità (aumento della portata d'acqua);

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS - LP2 - 090	0	L	30	57

- ❖ monitoraggio radiologico e chimico del percolato raccolto nelle volte del sistema di drenaggio e delle acque del sottosuolo per individuare la degradazione della performance della copertura.

Il monitoraggio delle acque sotterranee implica:

- ❖ la determinazione della concentrazione di radioattività e sostanze tossiche;
- ❖ la valutazione del gradiente e della direzione del flusso;
- ❖ il monitoraggio della posizione della falda freatica.

All'interno del sito, ANDRA ha realizzato: 12 pozzi lungo il flusso delle acque sotterranee tra le unità del deposito e tre flussi uscenti monitorati ogni mese, 17 pozzi che non intersecano le principali vie del flusso sotterraneo monitorati ogni 2 mesi, 10 pozzi situati a monte del deposito monitorati ogni 6 mesi.

All'esterno del sito sono stati realizzati 19 pozzi, monitorati mensilmente, per confermare la direzione dei flussi.

L'acquifero che potrebbe contenere contaminanti provenienti dal deposito è connesso a due fiumi, che necessitano di essere monitorati, per cui si è realizzato un piano di campionamento settimanale lungo gli stessi. Il monitoraggio di particelle sospese viene realizzato annualmente, quello di materiale chimico ogni sei mesi, quello di sedimenti mensilmente in tre punti.

Le operazioni di realizzazione del Centre de l'Aube sono iniziate nel 1992 quando già esisteva l'esperienza in campo di monitoraggio applicata al centro La Manche, le misure adottate in questo più recente deposito sono le medesime sopra riportate, variano in base al sito il numero di pozzi di controllo (14).

2.5.3 Rokkasho (Giappone)

Il deposito di rifiuti radioattivi di Rokkasho è situato nella prefettura di Aomori a 700 km a nord di Tokyo. Il programma di monitoraggio è stato stabilito in collaborazione tra *Japan Nuclear Fuel Ltd* (JNFL) e la prefettura di Aomori, con lo scopo di assicurare un livello di dose equivalente alla popolazione più basso del limite di dose equivalente annuale (15).


I principali obiettivi del programma di monitoraggio, iniziato nel 1989, sono:

- ❖ stima della dose equivalente alla popolazione;
- ❖ stima dell'accumulo di radioattività nell'ambiente;
- ❖ stima dell'impatto ambientale dovuto a rilasci anomali.

Il monitoraggio include la valutazione di:

- ❖ dose da radiazioni;
- ❖ radioattività nei campioni ambientali;
- ❖ osservazione meteorologica;
- ❖ monitoraggio con detector portatili.

La dose dovuta a radiazioni è continuamente misurata in 9 stazioni mediante sistemi telemetrici. Ogni tre mesi si misura la dose integrata in 37 punti di monitoraggio. Ogni stazione di monitoraggio è munita di detector NaI(Tl) per basso rateo di radioattività; camera a ionizzazione pressurizzata ad argon per alto rateo di radioattività; scintillatore ZnS per la radioattività in

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS - LP2 - 090	0	L	31	57

atmosfera. I punti di campionamento sono selezionati considerando le distanze dall'impianto, la direzione del vento, la distribuzione della popolazione, la distribuzione geografica delle fattorie agricole e degli altri centri produttivi e il possibile comportamento dei radionuclidi rilasciati dal sistema.

La polvere atmosferica è raccolta in 7 punti. Per comprendere l'accumulo a lungo termine vengono raccolti (annualmente o semestralmente) campioni di suolo, sedimenti dei laghi, sedimenti marini. Per la stima della dose equivalente alla popolazione si raccolgono ogni quattro mesi campioni di prodotti agricoli, bestiame, prodotti marini, acqua potabile.

2.5.4 Cernavoda Nuclear Power Plant (Romania)

L'impianto di Cernavoda, situato nella zona sud-est della Romania, è costituito da due unità CANDU pienamente funzionanti e da due unità in costruzione che dovrebbero essere completate nel 2014-2015. Il programma di monitoraggio è iniziato nel 1984, nella fase pre-operativa ed è stato condotto da due istituti di ricerca rumeni: Institute for Nuclear Research Pitesti e Horia Hulubei National Institute of Physics and Nuclear Engineering (Bucarest). Sono analizzati campioni di:

- acqua;
- aria (attività beta e alfa, radon, torio e progenie di decadimento, ¹³¹I);
- suolo e sedimenti;
- vegetazione naturale, colture agricole, foraggio;
- alimenti (latte, pesce, carne, uova, miele, vino).

In seguito all'incidente di Chernobyl, venne rilevata una variazione del livello di radioattività ambientale da entrambi i laboratori. Il programma del monitoraggio di routine venne approvato nel 1995 e parti l'anno successivo. Il monitoraggio di routine venne revisionato incrementando i punti e i tipi di campionamento da eseguire, venne inoltre definito un limite, che se rilevato, avrebbe portato ad un incremento del monitoraggio o della frequenza di campionamento da eseguire al fine di capire i motivi di tale variazione. Nella Figura 5 sono indicati i punti di campionamento delle varie matrici ambientali sul sito; nella Figura 6, invece, sono riportati i campionamenti nella zona 3-30 km fuori dall'impianto (16).

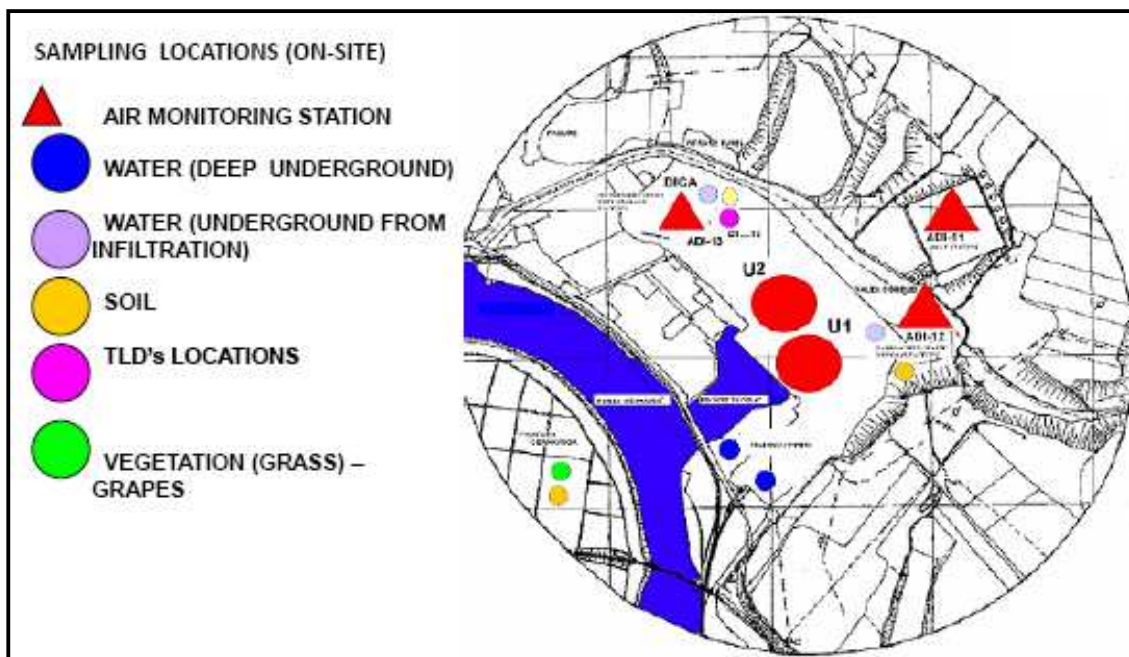


Figura 5. Punti di campionamento nel sito di Cernavoda (Romania) (16).

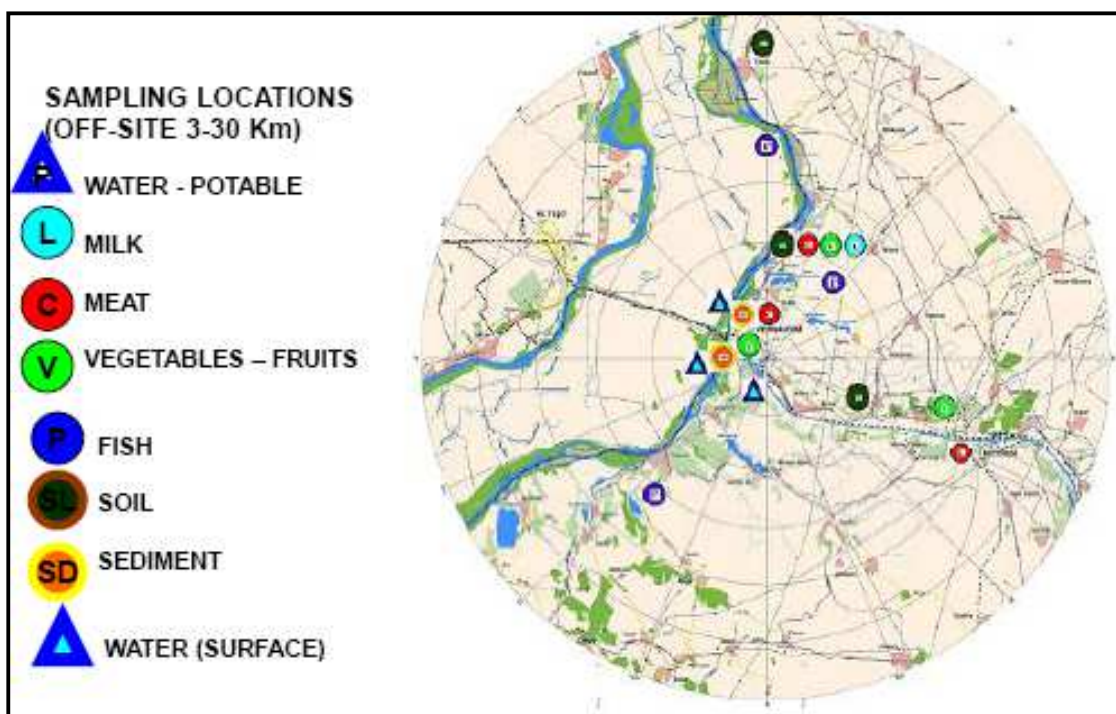


Figura 6. Punti di campionamento nella zona 3-30 km fuori dal sito di Cernavoda (Romania) (16).

I tipi di analisi eseguite sui campioni delle matrici ambientali riguardano:

- spettrometria gamma;
- scintillatore liquido per l'analisi del trizio;
- scintillatore liquido per l'analisi del carbonio 14;

- analisi beta.

2.5.5 Qinshan Nuclear Power Plant (Cina)

L'impianto di potenza di Qinshan, che si trova nella zona orientale della Cina, è costituito da 3 impianti PWR operativi. Per quanto riguarda il piano di monitoraggio ambientale, in Figura 7 è riportato l'elenco dei campionamenti, la frequenza, il luogo in cui vengono rilevati (entro 30 km dall'impianto) e i radionuclidi misurati. Nella Figura 8 sono inoltre riportati gli strumenti utilizzati per eseguire l'analisi dei radionuclidi durante il monitoraggio (17).

Samples ¹⁾	F ²⁾	Sites	Monitoring items
Drink water (3)	1-2	Qinshan Town, Wuyuan Town	⁹⁰ Sr, ¹³⁷ Cs, ³ H
Pond water (3-5)	1-2	Qinlian Village, Nanbei Pond, Yangliu Village, Xiajiawan Village	⁹⁰ Sr, ¹³⁷ Cs, ³ H
Well water (3-4)	2	Qinlian Village, Yangliu Village, Xiajiawan Village	⁹⁰ Sr, ¹³⁷ Cs, ³ H
Rain water (1-4)	12	Qianyanzhan Station, Yangliu Village, Xiajiawan Village	³ H
Sea water (1-8)	1-2	The sea area nearby the QNPP Base, Wuyuan Town and Ganpu Town	⁹⁰ Sr, ¹³⁷ Cs, ³ H
Sea water of outlet (3)	12	Outlet of the first phase of QNPP Base	⁹⁰ Sr, ¹³⁷ Cs, ³ H
Total waste water (1)	12	Sampling house of the first phase of QNPP Base	³ H
Air (4)	12	Qianyanzhan Station, Yangliu Village, Xiajiawan Village	³ H
Air (4)	12	Qianyanzhan Station, Yangliu Village, Xiajiawan Village	¹⁴ C

1) Number of sampling sites, including the reference site in Hangzhou for air and fresh water, and in Zhoushan for sea water, are given in parentheses; 2) Annual sampling frequency (times/a).

Figura 7. Campionamento ambientale nell'area entro 20 km dall'impianto Qinshan (17).


Items	Methods	Low background counters	LLD	Uncertainty
⁹⁰ Sr	Di- (2-rthylhexyl) phosphate	MPC9604 or LB4100W α/β	0.2 ~ 0.7 mBq•L ⁻¹	3.5%
¹³⁷ Cs	Ammonium phosphomolybdate-caesium iodobismuthate precipitation analysis	LB4100W α/β	0.2 ~ 0.5 mBq•L ⁻¹	$\alpha < 5\%$ $\beta < 13\%$
³ H in water	Liquid scintillation counting	LKB-1220Quantulus	0.9 ~ 1.5 Bq•L ⁻¹	2.4%
³ H in air	Liquid scintillation counting	LKB-1220Quantulus	19.6 Bq•m ⁻³ *	2.4%
¹⁴ C	C ₂ CO ₃ precipitation	LKB-1220Quantulus	0.09 Bq• (g•carbon) ⁻¹	2.0%

* :At 22 °C and in 80% humidity.

Figura 8. Strumentazione per l'analisi dei radionuclidi per il monitoraggio (17).

2.6 Garanzia di qualità

La Garanzia di Qualità (*Quality Assurance*) è definibile come un sistema integrato di attività, tecniche ed amministrative, che coinvolge la progettazione, l'implementazione, la valutazione, l'investigazione/informazione e il miglioramento della qualità per garantire che un processo o un

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS - LP2 - 090	0	L	34	57

servizio siano del tipo e della qualità richiesti e previsti. La garanzia di qualità include anche il Controllo di Qualità, cioè l'insieme di attività tecniche che misura gli attributi e le prestazioni del processo o servizio rispetto agli standard definiti per verificare che rientrino negli obiettivi dichiarati da progetto. Questo sistema di attività e controlli è utilizzato per garantire che i sistemi di misura siano mantenuti entro prescritti limiti, fornendo la protezione contro le condizioni di uscita di servizio e garantendo che i risultati siano di qualità accettabile (18).

Per quanto riguarda il monitoraggio ambientale, la garanzia di qualità è necessaria per assicurare che le misure, radiologiche e non, siano ragionevolmente valide e della qualità definita. Questa attività è necessaria per:

- identificare carenze nel campionamento e nei processi di misura ed identificare la responsabilità di tali operazioni e poter intraprendere misure correttive;
- ottenere un livello di fiducia nei risultati acquisiti e quindi garantire la loro validità agli enti regolamentati e alla popolazione.

Un adeguato programma di garanzia di qualità dovrebbe essere progettato per soddisfare almeno i requisiti generali stabiliti dall'organismo di regolamentazione per quanto concerne il campo della protezione dalle radiazioni (5).

In generale, un programma di QA dovrebbe essere sviluppato per assicurare che:

- siano definiti la struttura organizzativa, le responsabilità, i livelli di autorità e le interazioni tra i responsabili della gestione, dell'esecuzione e della valutazione di adeguatezza del lavoro;
- tutte le misure di gestione, tra cui pianificazione, programmazione e considerazione delle risorse, siano affrontate in modo specifico;
- i processi e le procedure di lavoro siano stabiliti in modo chiaro e compresi;
- i requisiti normativi relativi al monitoraggio siano soddisfatti;
- i metodi di campionamento e di misura applicati siano appropriati;
- le scelte del mezzo ambientale, la posizione del campionamento, le misurazioni e la frequenza di campionamento siano appropriati;
- i confronti tra laboratori, sia a livello nazionale che internazionale, per i metodi e gli strumenti utilizzati siano in atto;
- la sua periodica revisione/rivalutazione.

In questo contesto, l'organismo di regolamentazione dovrebbe periodicamente eseguire una revisione indipendente delle licenze e/o dei programmi di monitoraggio sia di sorgenti che ambientale.

Più nel dettaglio, la garanzia di qualità dovrebbe considerare:

- il progetto e l'implementazione dei programmi di monitoraggio, inclusi la selezione degli strumenti, la localizzazione del campionamento, le procedure da seguire e la documentazione da definire;
- la corretta manutenzione, il collaudo e la calibrazione delle apparecchiature per assicurare che funzionino correttamente;

- l'utilizzo di standard di calibrazione che siano riconducibili a standard nazionali e/o internazionali;
- meccanismi di controllo della qualità e procedure per la revisione e la valutazione dell'efficacia complessiva del programma di monitoraggio;
- analisi delle incertezze;
- la qualificazione e la formazione adeguata del personale.

2.7 Radionuclidi ad elevata mobilità

Negli studi di monitoraggio ambientale di un sistema di smaltimento dei rifiuti radioattivi, la migrazione dei radionuclidi nell'ambiente è uno degli ambiti di maggiore importanza per determinare i punti di campionamento adeguati e rappresentativi dell'area in esame. Tra i radionuclidi che costituiscono l'inventario radiologico del deposito ve ne sono alcuni che hanno caratteristiche peculiari, i quali richiedono un'analisi specifica. Questi particolari radionuclidi sono quelli che presentano un'elevata mobilità, ma sono presenti in quantità esigue per cui risulta difficoltoso riuscire a rilevarli, in alcuni casi potrebbero confondersi col fondo ambientale.

In Figura 9 è riportata una tabella che elenca i principali radionuclidi contenuti in un deposito di rifiuti radioattivi (19). In tabella vengono riportati i radionuclidi con relativo tempo di dimezzamento, tipo ed energia di decadimento e principali caratteristiche fisico-chimiche inerenti alla solubilità e alla eventuale forma cationica o anionica. Grazie a queste caratteristiche è possibile fare una distinzione preliminare tra radionuclidi ad alta o bassa mobilità e tra radionuclidi di difficile o facile rilevazione; questa distinzione sommaria potrà essere approfondita analizzando nel dettaglio i singoli radionuclidi da un punto di vista fisico-chimico e geochimico.


In seguito ad un'analisi bibliografica ((20), (21), (22)) è risultato che tra i radionuclidi, contenuti negli inventari radiologici dei depositi di rifiuti radioattivi, che presentano maggiore mobilità vi sono: trizio (^3H), carbonio 14 (^{14}C), tecnezio 99 (^{99}Tc), iodio 129 (^{129}I).

Nel rapporto ENEA della scorsa annualità (1) è stata inoltre evidenziata la possibile applicazione della misura di gas nobili (xenon in particolare) ai fini del monitoraggio.

Questi radionuclidi oltre a presentare elevata mobilità, secondo i processi definiti precedentemente, sono generalmente presenti in basse quantità, quindi hanno un impatto radiologico meno rilevante sulla popolazione e l'ambiente. La loro importanza risiede, pertanto, nel riuscire a rilevarli, potendo attribuirli con sicurezza al deposito e non avere il dubbio che siano caratteristici del fondo naturale.

La loro elevata mobilità implica che, in caso di fuoriuscita, saranno i primi ad essere rilevati, questo permetterà di identificare la fuoriuscita e quindi attuare misure mitigative o preventive nei confronti di radionuclidi meno mobili e più importanti dal punto di vista di impatto radiologico. Sarà inoltre necessario considerare l'impatto radiologico, seppur esiguo, che i radionuclidi mobili possono causare in caso di ingestione e/o inalazione attraverso acqua, colture agricole, etc..

Facendo riferimento anche all'inventario revisionato dall'ENEA dei rifiuti di seconda categoria (23), per quanto riguarda le quantità si può dedurre che il tecnezio è presente in esigua quantità rispetto a carbonio e trizio che sono presenti in quantità superiori di 2 e 3 ordini di grandezza rispettivamente.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS - LP2 - 090	0	L	36	57

Tra i radionuclidi mobili la maggior parte è presente in quantità molto basse, come lo iodio 129 e il tecnezio 99, questo implica difficoltà nel rilevarli come tali, ma la necessità di rilevarli in forma aggregata o rilevando rapporti isotopici. Un altro aspetto da considerare, oltre alla quantità, è l'intensità dell'energia emessa, che per questi radionuclidi è abbastanza esigua. Questo discorso potrà essere approfondito in futuro, mediante l'analisi dei campioni e della strumentazione utile per le misure di radioattività di questi radionuclidi.

Tra i radionuclidi meno mobili vi sono gli isotopi del plutonio, in questo caso è importante tener conto anche dei tempi di dimezzamento dei differenti isotopi. Ad esempio confrontando ^{238}Pu ($T_{1/2}=87.7$ anni) e ^{239}Pu ($T_{1/2}=24110$ anni) si nota come la quantità di ^{238}Pu diventerà irrisoria in tempi relativamente brevi, dato che il tempo di dimezzamento è basso a differenza del ^{239}Pu . Altri elementi poco mobili sono l'uranio, l'americio, il nettunio, etc..

Dopo aver revisionato le principali cause della loro mobilità, si esamineranno nei paragrafi successivi i diversi singoli isotopi e le principali tecniche per la loro rivelazione.

Radionuclide	Half-life	Principal radiation emitted	Prevalent means of production	Physical/chemical form
H-3	12.3 a	β^- ($E_{\max} = 18.6$ keV)	Li-6(n, α) H-2(n, γ) Ternary fission	Tritiated gas and water
C-14	5730 a	β^- ($E_{\max} = 156$ keV)	C-13(n, γ) N-14(n,p) O-17(n, α)	Gas and inorganic carbonate/ bicarbonate
Cl-36	3.01×10^5 a	β^- ($E_{\max} = 708.6$ keV)	Cl-35(n, γ)	Soluble, anionic
Ca-41	1.03×10^5 a	e^- (2.97 keV) X (3.31 keV) X (3.59 keV)	Ca-40(n, γ)	Soluble, cationic
Fe-55	2.74 a	X (5.90 keV) X (6.49 keV)	Fe-54(n, γ)	Mostly insoluble
Ni-59	7.6×10^4 a	X (6.93 keV) X (7.65 keV)	Ni-58(n, γ)	Mostly insoluble
Co-60	5.27 a	γ (1173.2 keV) γ (1332.5 keV)	Co-59(n, γ)	Mostly insoluble
Ni-63	100.1 a	β^- ($E_{\max} = 66.9$ keV)	Ni-62(n, γ)	Mostly insoluble
Se-79	2.95×10^5 a	β^- ($E_{\max} = 151$ keV)	Fission FP activation: Se-78(n, γ)	Soluble, anionic
Sr-90	28.9 a	β^- ($E_{\max} = 546$ keV)	Fission	Largely soluble, cationic
Nb-94	2.03×10^4 a	γ (702.6 keV) γ (871.1 keV)	Nb-93(n, γ)	Generally insoluble
Tc-99	2.11×10^5 a	β^- ($E_{\max} = 293.5$ keV)	Fission Mo-98(n, γ)Mo-99(β^-)	Soluble (+7), anionic Insoluble (+4)
Ru-106	373.6 d	γ (511.9 keV) ^a γ (621.9 keV) ^a γ (1050.4 keV) ^a	Fission	Soluble, anionic
Sb-125	2.76 a	γ (427.9 keV) γ (600.6 keV) γ (635.9 keV)	Fission Sn-124(n, γ)Sn-125(β^-)	Soluble, anionic
I-129	1.57×10^7 a	X (29.8 keV) X (29.5 keV) X (33.6 keV) γ (39.6 keV) X (34.4 keV)	Fission	Soluble, anionic and gas
Cs-135	2.3×10^6 a	β^- ($E_{\max} = 268.7$ keV)	Fission	Very soluble, cationic
Cs-137	30.08 a	γ (661.6 keV)	Fission	Very soluble, cationic
Ce-144	284.9 d	γ (133.5 keV) γ (696.5 keV) ^a γ (80.1 keV) γ (2185.7 keV) ^a	Fission	Generally insoluble

Figura 9a. Inventario dei rifiuti radioattivi provenienti da un impianto nucleare (fonte:IAEA (19)).


Radionuclide	Half-life	Principal radiation emitted	Prevalent means of production	Physical/chemical form
U-235	7.04×10^8 a	α (4.398 MeV) α (4.366 MeV) α (4.215 MeV) γ (185.7 keV) γ (143.8 keV)	Naturally occurring	Generally insoluble
Np-237	2.14×10^6 a	α (4.788 MeV) α (4.771 MeV) α (4.767 MeV) γ (29.4 keV) γ (86.5 keV)	U-235(n, γ) U-236(n, γ) U-237(β^-)	Generally insoluble
U-238	4.47×10^9 a	α (4.198 MeV) α (4.151 MeV)	Naturally occurring	Generally insoluble
Pu-238	87.7 a	α (5.499 MeV) α (5.456 MeV)	Np-237(n, γ) Np-238(β^-) Cm-242(α)	Generally insoluble
Pu-239	24 110 a	α (5.157 MeV) α (5.144 MeV) α (5.106 MeV)	U-238(n, γ) U-239(β^-) Np-239(β^-)	Generally insoluble
Pu-240	6561 a	α (5.168 MeV) α (5.124 MeV)	Multiple neutron capture	Generally insoluble
Pu-241	14.29 a	β^- ($E_{\max} = 20.78$ keV) α (4.896 MeV) α (4.853 MeV)	Multiple neutron capture	Generally insoluble
Am-241	432.6 a	α (5.486 MeV) α (5.443 MeV) γ (59.5 keV) γ (26.3 keV)	Pu-241(β^-)	Generally insoluble
Pu-242	3.75×10^5 a	α (4.902 MeV) α (4.858 MeV)	Multiple neutron capture	Generally insoluble
Cm-242	162.8 d	α (6.113 MeV) α (6.069 MeV)	Multiple neutron capture followed by Am-242(β^-)	Generally insoluble
Cm-243	29.1 a	α (5.785 MeV) α (5.742 MeV) α (5.992 MeV)	Multiple neutron capture	Generally insoluble
Cm-244	18.1 a	α (5.805 MeV) α (5.763 MeV)	Multiple neutron capture	Generally insoluble

Figura 9b. Inventario dei rifiuti radioattivi provenienti da un impianto nucleare (fonte:IAEA (19)).

2.7.1 Cause della mobilità

La mobilità dei radionuclidi nell'ambiente è legata principalmente alle seguenti cause:

- La forma chimica e fisica che presenta il radionuclide nel compartimento considerato;

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS - LP2 - 090	0	L	39	57

- lo stato fisico del mezzo in cui avviene il trasporto, in particolare sono da considerare i meccanismi di trasferimento nei mezzi in esame;
- le possibili interazioni dei radionuclidi con le barriere ingegneristiche del deposito e quelle naturali; entrambi questi sistemi possono determinare la cattura o l'adsorbimento di parte degli inquinanti;
- le possibili reazioni chimiche che coinvolgono il radionuclide durante la sua permanenza in un determinato compartimento.

Stato fisico-chimico dei radionuclidi

Uno dei concetti principali legati allo stato chimico dei radionuclidi coinvolge la solubilità, che rappresenta la massima quantità di soluto che si scioglie in una data quantità di solvente. Una soluzione è detta satura quando, in una data quantità di solvente, non è possibile sciogliere ulteriore soluto. La solubilità è un parametro che dipende fondamentalmente dal solvente utilizzato e dalle condizioni di temperatura e pressione.

La solubilità α si esprime con la seguente formula:

$$\alpha = \frac{c}{c_s} = 1 + \frac{\Delta c}{c_s}$$

in cui c e c_s sono rispettivamente le concentrazioni effettiva e a saturazione e il rapporto $\Delta c/c_s$ è la frazione di sovrasaturazione.

La curva di saturazione, riportata in Figura 10, esprime il valore della concentrazione del soluto in condizioni di saturazione, cioè la sua solubilità in funzione della temperatura. Se la solubilità cresce con la temperatura il sistema solvente-soluto è detto a solubilità diretta, mentre se al crescere della temperatura la solubilità diminuisce, il sistema è detto a solubilità inversa.

In particolare la dipendenza dalla temperatura per molti solidi disciolti in acqua fa sì che la solubilità cresca per temperature maggiori di 100 °C. In acqua liquida ad alte temperature, prossime alla temperatura critica, la solubilità di soluti ionici tende a diminuire a causa del cambiamento delle proprietà e della struttura dell'acqua.

I soluti gassosi, invece, presentano un comportamento più complesso: con l'aumento della temperatura i gas, di solito, diventano meno solubili in acqua, ma più solubili in solventi organici.

Per le fasi condensate (solidi e liquidi), la dipendenza della solubilità dalla pressione è tipicamente debole e quindi viene solitamente trascurata. Solo nei gas la pressione ha un effetto apprezzabile sulla solubilità.

Per quanto riguarda le unità di misura la solubilità è espressa generalmente in mg/l o moli/l.

Negli studi specifici relativi all'eventuale fuoriuscita di radionuclidi dal deposito di rifiuti radioattivi, si farà riferimento a temperatura e pressione caratteristiche delle acque superficiali e delle acque sotterranee della zona vadosa e di quella satura.

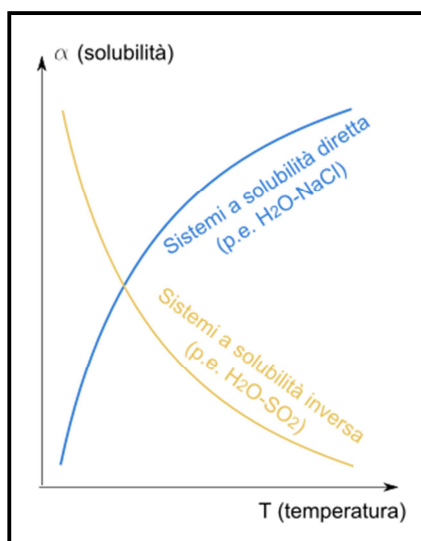


Figura 10. Curva di solubilità.

Un altro aspetto importante che determina l'elevata mobilità è legato all'eventuale stato gassoso del radionuclide stesso o di composti formati per interazione del radionuclide con l'ambiente che attraversa.

Nello stato aeriforme, infatti, le interazioni sono estremamente deboli ed ai costituenti è permesso muoversi indipendentemente, non hanno dunque forma propria e tendono ad espandersi. I radionuclidi, che riescono a fuoriuscire in questo stato, si mischiano con l'aria creando una nube radioattiva, pericolosa per la salute delle persone e per l'ambiente.

Un esempio è il carbonio 14 che negli impianti nucleari viene generato dal circuito primario e viene rilasciato in atmosfera come biossido di carbonio attraverso il sistema di ventilazione, oppure sotto forma di metano attraverso reazioni di metabolismo batterico in ambiente riducente (24).

Meccanismi di trasferimento

I meccanismi di trasferimento coinvolgono le differenti matrici ambientali. In riferimento ad un mezzo liquido, sarebbe da analizzare la cinetica del moto, in correlazione con la solubilità del radionuclide nelle acque, il grado di precipitazione e l'interazione del radionuclide con i mezzi con cui entra in contatto.

Risulta invece interessante dal punto di vista della mobilità il trasferimento diffusivo, per il quale l'elevata mobilità sarà correlata al coefficiente di diffusione D [m^2/s] del mezzo. Mediante le specifiche valutazioni sarà possibile valutare la distanza di penetrazione, noto il tempo, la quale risulta proporzionale alla radice quadrata del prodotto tra coefficiente di diffusione e tempo (25), come mostra la formula seguente:

$$x \propto \sqrt{D \cdot t}$$

dove:

- x = distanza di penetrazione [m];
- D = coefficiente di diffusione [m^2/s];

- $t =$ tempo [s].

In particolare per definire la mobilità può essere opportuno eseguire un confronto tra i tempi del fenomeno diffusivo e quelli del decadimento radioattivo.

Nota l'attività iniziale A_0 e l'attività A al tempo t di un radionuclide di interesse, di cui è nota la costante di decadimento λ , è possibile ricavare il tempo dalla seguente formula:

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{A}{A_0} \right)$$

Dalla relazione relativa alla distanza di penetrazione, sopra riportata, sarà quindi possibile determinare il tempo t^* e confrontarlo col tempo t del decadimento.

Si può quindi assumere che se t^* risultasse molto maggiore di t , l'effetto della mobilità risulterebbe poco rilevante; viceversa se t^* risultasse molto minore di t allora si potrebbe parlare di radionuclidi ad elevata mobilità.

Per quanto riguarda i meccanismi di trasferimento è fondamentale considerare anche le barriere ingegneristiche e naturali di un deposito di rifiuti radioattivi, che hanno un impatto diretto sulla mobilità dei radionuclidi. In seguito all'interazione tra i radionuclidi e queste barriere si può avere una riduzione della mobilità dovuta a processi di sorption (assorbimento e/o adsorbimento) e cattura.

L'interazione tra i radionuclidi e la matrice ambientale suolo è controllata dalla forma chimica dei radionuclidi e dalla loro speciazione, questi due aspetti hanno effetto sulla mobilità, sul tempo di residenza nelle radici delle piante e sull'assorbimento da parte delle specie animali e vegetali della regione in esame (26).

Il grado di sorption dei radionuclidi rispetto al suolo è quantificato mediante il coefficiente di distribuzione K_d , si considera quindi che il suolo trattiene l'inquinante fino al raggiungimento di un equilibrio di ripartizione tra le fasi. In particolare questo coefficiente rappresenta il rapporto tra la concentrazione di una sostanza in fase liquida e solida; quindi la capacità dell'inquinante di essere trattenuto dalle fasi solide presenti nel sottosuolo. L'approccio del K_d non considera in modo esplicito i meccanismi di sorption, ma assume che il radionuclide sulla fase solida sia in equilibrio col radionuclide in soluzione e che lo scambio tra queste fasi sia reversibile.

Per determinati radionuclidi può essere valutata l'influenza di specifici co-fattori sui valori di K_d . I co-fattori sono le proprietà del suolo coinvolto nei meccanismi di sorption; questi possono essere utilizzati per raggruppare i valori di K_d e per ridurre la variabilità di questi valori quando il raggruppamento è basato su proprietà fondamentali, come la tessitura del suolo e il materiale organico.

Per quanto riguarda le barriere ingegneristiche, noto l'inventario dei rifiuti radioattivi è necessario realizzarle in maniera apposita affinché riducano la migrazione dei radionuclidi verso l'esterno. Un accorgimento introdotto è l'utilizzo della bentonite, usata come materiale di riempimento intorno agli imballaggi. La bentonite possiede ottime proprietà impermeabili e di cattura dei radionuclidi, è inoltre caratterizzata da un'elevata plasticità, in grado di sigillare al meglio i manufatti. In Figura 11 sono riportate le funzioni assolute della bentonite (27).

	Function	Details
Function considered in design	Restriction of groundwater movement	Restrict groundwater flow passing through the disposal facility
	Mechanical stability	Maintain support at a predefined position and prevent significant subsidence on the long term
	Barrier interaction	Consider the interaction with cement materials and maintain the predefined functions on the long term
Function not considered in design but effectiveness of which is verified	Restriction of radionuclide leaching	Confine radionuclides and maintain quality of pore water in disposal tunnel, decreasing the solubility of radionuclides
	Sorption of radionuclides	Sorption of soluble radionuclides and decreasing the radionuclide concentration in pore water
	Self-sealing	Filling pore spaces generated
	Stress buffering	Stress buffering of external forces from surrounding rock
	Stability of disposal tunnel	Maintain stability of disposal tunnels wrt structural changes in the surrounding rock
	Thermal conductivity	Disperse heat from waste in order to maintain temperatures below permitted levels
	Permeability	Prevent significant barrier degradation due to pressure build-up in the disposal facility and the formation of preferred groundwater flow paths by gas percolation
	Restrict colloid migration	Restrict the migration of radio-colloids and infiltration of natural colloids

Figura 11. Proprietà della bentonite (fonte: JAEA (27)).

Riassumendo, l'interazione tra i radionuclidi e l'ambiente che li circonda, barriere ingegneristiche e naturali, in caso di fuoriuscita incidentale, può determinare meccanismi di sorption e cattura, che riducono così la mobilità e quindi la migrazione dei radionuclidi verso l'esterno. Alcuni radionuclidi però possono essere soggetti in maniera poco significativa all'effetto di questi meccanismi di interazione, risulta quindi necessario valutare le peculiarità di questi particolari radionuclidi e i motivi della loro elevata mobilità.

2.7.2 Principali radionuclidi ad elevata mobilità

In seguito ad un'analisi bibliografica ([23], [24], [25]) è risultato che tra i radionuclidi, contenuti negli inventari radiologici dei depositi di rifiuti radioattivi, che presentano maggiore mobilità vi sono: trizio (3H), carbonio 14 (14C), tecnezio 99 (99Tc), iodio 129 (129I).

Nel rapporto ENEA della scorsa annualità [1] è stata inoltre evidenziata la possibile applicazione della misura di gas nobili (xenon in particolare) ai fini del monitoraggio.

Questi radionuclidi oltre a presentare elevata mobilità, secondo i processi definiti precedentemente, sono generalmente presenti in basse quantità, quindi hanno un impatto radiologico meno rilevante sulla popolazione e l'ambiente. La loro importanza risiede, pertanto,

nel riuscire a rilevarli, potendo attribuirli con sicurezza al deposito e non avere il dubbio che siano caratteristici del fondo naturale.

La loro elevata mobilità implica che, in caso di fuoriuscita, saranno i primi ad essere rilevati, questo permetterà di identificare la fuoriuscita e quindi attuare misure mitigative o preventive nei confronti di radionuclidi meno mobili e più importanti dal punto di vista di impatto radiologico. Sarà inoltre necessario considerare l'impatto radiologico, seppur esiguo, che i radionuclidi mobili possono causare in caso di ingestione e/o inalazione attraverso acqua, colture agricole, etc..

2.7.3 Iodio 129

Lo iodio è un alogeno del V periodo della tavola periodica degli elementi. Ha numero atomico 53. L'unico isotopo stabile dello iodio è il 127, che costituisce circa il 100% dello iodio presente in natura. Come mostra la Tab.3 (28) la maggior parte degli isotopi dello iodio decade in secondi, minuti o ore, alcuni in giorni (^{131}I , ^{124}I , ^{125}I , ^{126}I), gli unici rilevanti risultano l'isotopo 127, che come detto è stabile e il 129 che presenta un tempo di dimezzamento di $1.57 \cdot 10^7$ anni.

Tabella 3. Isotopi dello iodio (28).

Isotopo	Z	N	Tipo di decadimento	Tempo di dimezzamento
108I	53	55	α , p	36 ms
109I	53	56	p	100 us
110I	53	57	$\epsilon+\beta^+$, α , ϵp , $\epsilon\alpha$	0.65 s
111I	53	58	$\epsilon+\beta^+$, α	2.5 s
112I	53	59	$\epsilon+\beta^+$, α	3.42 s
113I	53	60	$\epsilon+\beta^+$, $\epsilon\alpha$, α	6.6 s
114I	53	61	$\epsilon+\beta^+$, ϵp	2.1 s
114mI	53	61	$\epsilon+\beta^+$, IT	6.2 s
115I	53	62	$\epsilon+\beta^+$	1.3 m
116I	53	63	$\epsilon+\beta^+$	2.91 s
116mI	53	63		3.27 us
117I	53	64	$\epsilon+\beta^+$	2.22 m
118I	53	65	$\epsilon+\beta^+$	13.7 m
118mI	53	65	$\epsilon+\beta^+$, IT	8.5 m
119I	53	66	$\epsilon+\beta^+$	19.1 m
120I	53	67	$\epsilon+\beta^+$	81.0 m
120mI	53	67	$\epsilon+\beta^+$	53 m

121I	53	68	$\epsilon+\beta^+$	2.12 h
122I	53	69	$\epsilon+\beta^+$	3.63 m
122ml	53	69		80 us
123I	53	70	$\epsilon+\beta^+$	13.27 h
124I	53	71	$\epsilon+\beta^+$	4.1760 d
125I	53	72	ϵ	59.408 d
126I	53	73	$\epsilon+\beta^+, \beta^-$	13.11 d
127I	53	74		Stable
128I	53	75	$\beta^-, \epsilon+\beta^+$	24.99 m
129I	53	76	β^-	1.57E7 y
130I	53	77	β^-	12.36 h
130ml	53	77	IT, β^-	9.0 m
131I	53	78	β^-	8.02070 d
132I	53	79	β^-	2.295 h
132ml	53	79	IT, β^-	1.387 h
133I	53	80	β^-	20.8 h
133ml	53	80	IT	9 s
134I	53	81	β^-	52.5 m
134ml	53	81	IT, β^-	3.60 m
135I	53	82	β^-	6.57 h
136I	53	83	β^-	83.4 s
136ml	53	83	β^-	46.9 s
137I	53	84	$\beta^-, \beta^{\bar{n}}$	24.5 s
138I	53	85	$\beta^-, \beta^{\bar{n}}$	6.49 s
139I	53	86	$\beta^-, \beta^{\bar{n}}$	2.29 s
140I	53	87	$\beta^-, \beta^{\bar{n}}$	0.86 s
141I	53	88	$\beta^-, \beta^{\bar{n}}$	0.43 s

L'isotopo ^{129}I è presente in concentrazione di 10^{-10} rispetto al ^{127}I ; è un emettitore β , decade nello ^{129}Xe , come mostrato nella Figura 12. I valori di destra in figura rappresentano l'energia di decadimento espressa in MeV; il decadimento effettivo avviene ad un livello eccitato dello ^{129}Xe , con conseguente decadimento fondamentale.

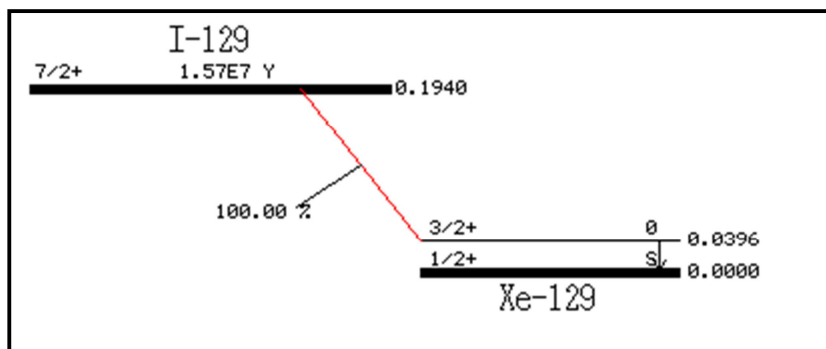


Figura 12. Decadimento dello iodio 129 (fonte: INFN).

L'industria nucleare produce e rilascia nell'ambiente sia ^{131}I che ^{129}I , questi sono stati prodotti anche durante i test di armi nucleari. Oltre alla produzione antropica, lo ^{129}I viene anche prodotto in natura da reazioni di raggi cosmici con lo Xenon e per fissione spontanea dell'uranio (20).

La lunga vita dello iodio 129 impedisce che questo radionuclide scompaia, causando il suo ingresso nell'ambiente e nei cicli geochimici dello iodio stabile. Lo ^{129}I può essere utilizzato come tracciante nell'ambiente, le sue quantità sono così esigue da non causare problemi di impatto radiologico.

Lo iodio 129 in atmosfera, idrosfera e biosfera è combinato con lo iodio 127. Più del 99% dello iodio 127 libero, stimato pari a $8 \cdot 10^{14}$ kg, si trova negli oceani e nei sedimenti oceanici, inoltre la parte presente in atmosfera e biosfera si reputa derivante principalmente da questa sorgente (29). Nel modello dosimetrico di esposizione dell'uomo allo iodio 129, è spesso conveniente fare riferimento al rapporto isotopico $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$.

Il rapporto isotopico $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ precedente all'avvento del nucleare è stimato essere dell'ordine di 10^{-13} . La concentrazione di ^{129}I ha subito, però, un incremento di diversi ordini di grandezza negli ultimi decenni a causa dell'utilizzo della fissione nucleare per scopi militari. Poiché lo ione dello ^{129}I è utilizzato anche come tracciante dei rifiuti nucleari nelle acque e come indicatore di dispersione di rifiuti nell'ambiente naturale, vengono realizzate misure sulla concentrazione di tale ione in ambito idrologico su campioni di acque sotterranee, utilizzando la tecnica AMS (*Accelerator Mass Spectrometry*).

Nel sistema naturale, lo iodio può esistere negli stati di ossidazione -1, 0, +1, +5 e +7. Di questi gli stati -1 (come I^- o *ioduro*) e +5 (come IO_3^- o *iodato*) sono le specie inorganiche più abbondanti nelle acque sotterranee. Il range di stabilità dello I^- comprende l'intera gamma di pH e Eh tipici che si riscontrano nelle acque sotterranee. In condizioni acide ($\text{pH} < 4$), $\text{I}_{2(\text{aq})}$ (stato di ossidazione 0) può essere prodotto per ossidazione di I^- o per riduzione di IO_3^- . La partizione tra specie solubile $\text{I}_{2(\text{aq})}$ e gas dissolto $\text{I}_{2(\text{g})}$ in forma volatile può portare al trasferimento in aria (29).

La presenza di questi ioni dello iodio e della sua forma gassosa lo rendono un elemento particolarmente mobile, che richiede quindi di essere considerato in questa analisi.

Lo iodio inoltre è altamente reattivo chimicamente, per cui interagisce con la materia che incontra formando composti come ad esempio lo ioduro di potassio.

2.7.4 Tecnezio 99

Il Tecnezio è un elemento di transizione appartenente al V periodo della tavola periodica degli elementi e al VII gruppo. Ha numero atomico 43, non ha nessun isotopo stabile, ogni sua forma è radioattiva.

I numeri di ossidazione più comuni sono +2, +4 e +7; i composti più importanti che forma sono: l'ossido di tecnezio (IV) TcO_2 , l'ossido di tecnezio (VII) Tc_2O_7 e il solfuro di tecnezio (VII) Tc_2S_7 . Risultano inoltre caratteristici i tectetati (VII) e i sali dell'anione TcO_4^- . L'anione tectetato (VII) possiede importanti proprietà anticorrosive e viene utilizzato a basse concentrazioni nelle leghe di ferro come protezione alla formazione di ruggine; il suo uso è però limitato in quanto possiede elevata radioattività e quindi è necessario non disperderlo nell'ambiente (21).

Tra gli isotopi con vita più lunga si hanno: ^{97}Tc ($T_{1/2}=2.6 \cdot 10^6 y$), ^{98}Tc ($T_{1/2}=4.2 \cdot 10^6 y$) e ^{99}Tc ($T_{1/2}=2.1 \cdot 10^5 y$).

Sia il ^{97}Tc che il ^{98}Tc si formano principalmente per reazioni di attivazione di neutroni o particelle cariche, tuttavia nei processi nucleari antropici sono prodotti in basse quantità, il loro quantitativo all'ambiente risulta trascurabile.

Il ^{99}Tc è prodotto in quantità rilevante come prodotto delle operazioni di reattori nucleari. La maggior parte deriva dalla fissione dell'uranio 235, una parte significativa è anche prodotta per attivazione neutronica del molibdeno 99. In aggiunta al tecnezio 99 prodotto in impianti nucleari, vi è quello prodotto per detonazione di armi nucleari (30). In Figura 13 è riportato il decadimento del ^{99}Mo in ^{99}Tc .

Il ^{99}Tc è un emettitore β puro con un energia di decadimento massima di 0.294 MeV.

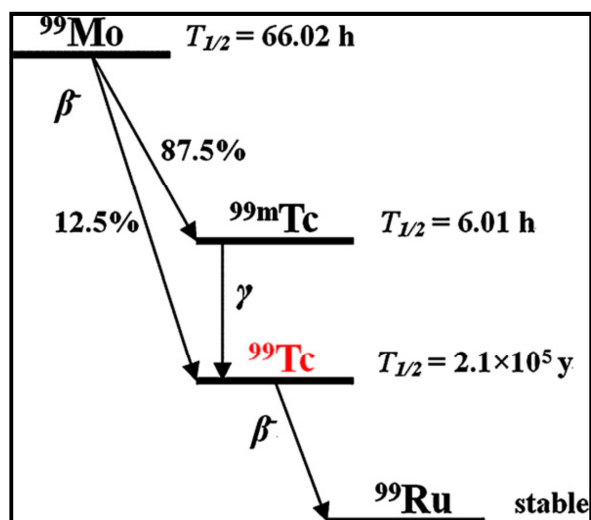


Figura 13. Decadimento in ^{99}Tc a partire dal ^{99}Mo .

L'interesse nell'investigare il ^{99}Tc nei campioni ambientali risulta in parte dall'assenza di un isotopo stabile. Il ^{99}Tc , essendo l'isotopo dominante, è l'unico utilizzabile per studiare il comportamento sconosciuto di questo elemento dal punto di vista ambientale e biologico.

La sua elevata mobilità, legata all'esistenza dell'anione TcO_4^- che lo rende altamente solubile in acqua, l'alto yield di fissione e il lungo tempo di dimezzamento rendono il ^{99}Tc uno dei principali

radionuclidi negli studi di *Safety Assessment* sulla radioattività ambientale, così come nel decommissioning e nella gestione dei rifiuti radioattivi.

La sua solubilità lo rende utile come tracciante delle masse d'acqua nel sottosuolo e superficiali.

Nella Figura 14 è riportato uno schema dei processi di trasporto del ⁹⁹Tc nell'ecosistema.

Una piccola parte di ⁹⁹Tc finisce nell'ambiente e giunge all'acqua e agli alimenti. La maggior parte si trova in prossimità di stabilimenti contaminati come in prossimità delle industrie di armi o impianti nucleari. L'esposizione al tecnezio dall'ambiente è improbabile (31).

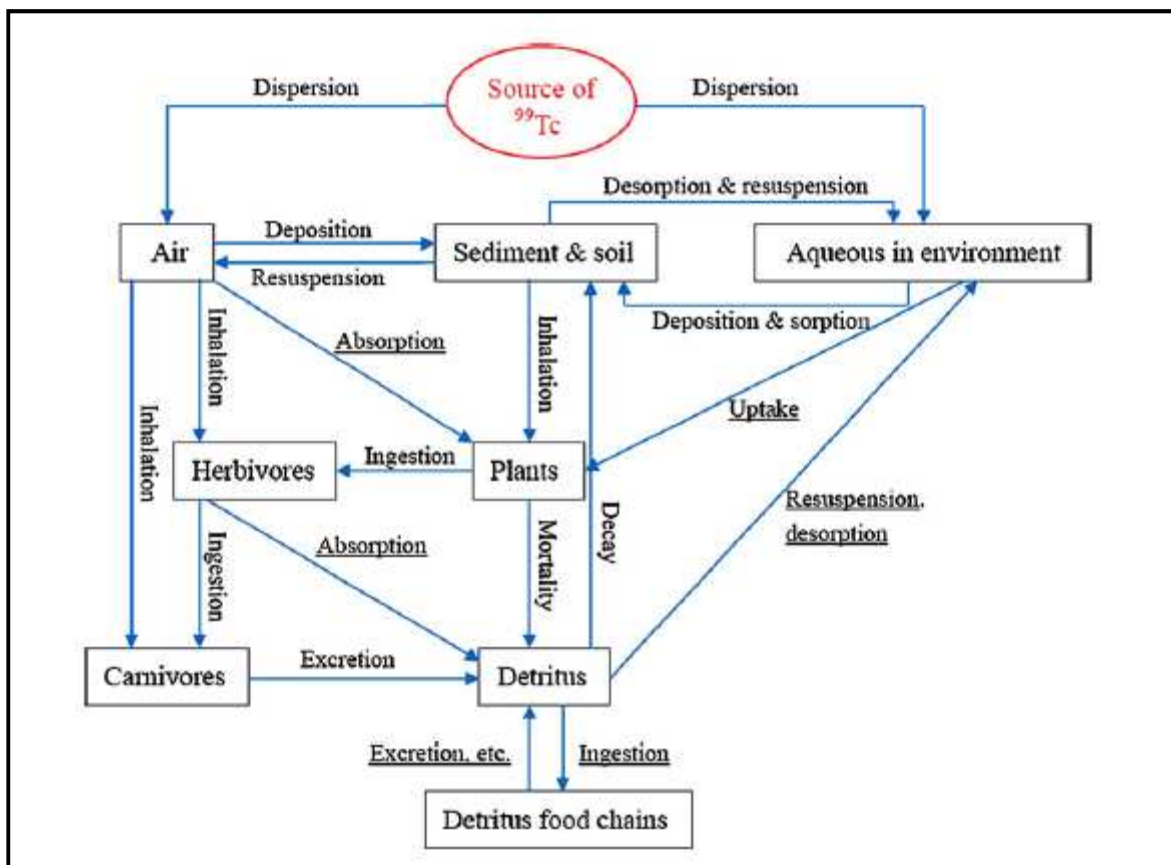


Figura 14. Possibili processi di trasporto del ⁹⁹Tc nell'ecosistema (21).

2.7.5 Carbonio 14

Per quanto riguarda il carbonio 14 si fa riferimento al report "Il ruolo del ¹⁴C nella gestione dei rifiuti radioattivi", redatto dall'ENEA nel corso della passata annualità dell'accordo di programma con il MSE (24).

Nel citato rapporto si è evidenziato come l'elevata mobilità nell'ambiente ed il lungo tempo di dimezzamento del ¹⁴C, lo rendano un radionuclide di interesse per l'analisi di sicurezza degli impianti nucleari e del deposito, in quanto viene incorporato nella biosfera attraverso i cicli biologici ed è un costituente fondamentale della vita terrestre. Esistono numerosi studi sulla caratterizzazione, migrazione e trasporto del ¹⁴C negli impianti nucleari.

E' stato inoltre sottolineato che la comprensione della chimica del ^{14}C all'interno dei rifiuti radioattivi e la conseguente valutazione dei meccanismi di rilascio dei parametri che li influenzano può essere un'attività di particolare interesse sia in termini di monitoraggio di un deposito, sia nei termini di analisi di sicurezza.

Inoltre essendo appunto il radiocarbonio uno dei radionuclidi più mobili, sarà possibile utilizzarlo come elemento target per valutazioni realistiche e conservative dei modelli matematici utilizzati nella *Performance Assessment*.

Per quanto poi riguarda il trasferimento di carbonio attraverso la biosfera esso è fondamentalmente diverso dal trasferimento di altri radionuclidi, pertanto, se si utilizza un coefficiente di trasferimento suolo-pianta empirico, come viene usato con altri nuclide, si possono ottenere risultati errati nei modelli di valutazione della biosfera. La concentrazione di C-14 ed i flussi relativi nella biosfera sono fortemente influenzati dalle concentrazioni e dai flussi di carbonio stabile pertanto occorre sviluppare modelli per descrivere l'abbondanza del nuclide nelle piante allo stato stazionario derivante dai flussi di acqua e solidi all'interno del sistema biosfera. Il ciclo del impianto => suolo => chioma determina l'assorbimento del C-14 da parte delle colture, pertanto i parametri principali determinanti saranno la produttività dell'impianto ed il tasso di scambio di carbonio tra l'aria circostante la chioma e l'atmosfera generale. La quantificazione di questo scambio di carbonio è, tuttavia, ancora un problema aperto.

Presso il laboratorio ENEA, dedicato al radiocarbonio (UTFISSM-SICCOMB) è in corso una valutazione dello stato dell'arte delle metodologie d'analisi isotopiche in matrici ambientali.

In particolare per quanto riguarda gli isotopi del carbonio sono stati revisionati i meccanismi di speciazione chimica del carbonio in rifiuti radioattivi e i fenomeni di rilascio di ^{14}C da un deposito di rifiuti radioattivi, nell'ottica di esaminare la possibilità di seguire e di monitorare il trasporto della CO_2 nei compartimenti ambientali, ai fini del monitoraggio e dell'impatto ambientale del deposito, oltre che della verifica dell'efficacia dei sistemi di contenimento utilizzati.

Il trasporto di ^{14}C da una struttura sotterranea verso un recettore esterno è controllata infatti dal movimento delle acque sotterranee e dai rilasci gassosi ed ogni fenomeno di dispersione e diluizione ne influenza la portata. In particolare sono stati evidenziati due tipologie principali di percorsi migratori: gassoso e acquoso, attraverso i quali si ha preferenzialmente formazione di CH_4/CO_2 e/o di carbonati.

Il trasporto per via acquosa viene anche influenzato da una serie di processi geochimici quali l'adsorbimento, l'immobilizzazione, la ritenzione, la diffusione e lo scambio isotopico con il C stabile presente nei suoli.

Il trasporto per via gassosa coinvolge due specie chimiche: metano e biossido di carbonio e può essere responsabile di un rilascio in ambiente molto più significativo di quello liquido (attraverso le acque sotterranee).

Dall'analisi di uno studio dell'IRSN francese (32) si è evidenziato che è importante effettuare il monitoraggio del contenuto di radiocarbonio su diverse matrici ambientali ed in diversi punti di campionamento (più o meno influenzati dal rilascio, vedi zone NI e IZ).

In tabella si riportano i risultati della campagna di monitoraggio attorno a tutti gli impianti nucleari francesi effettuata nel 2006. Nonostante l'obiettivo del monitoraggio riportato siano in effetti gli impianti nucleari di potenza, tuttavia, appare evidente come una buona campagna di monitoraggio riesca ad evidenziare percorsi preferenziali e processi di speciazione e di accumulo nella biosfera.

Tabella 4- C stabile e 14C - campagna di monitoraggio IRSN (32)

	Specific activity, stable carbon content and ¹⁴ C massic activity (mean values) by products and by zone									
	Mean specific activity (Bq kg ⁻¹ C)						g C kg ⁻¹ (f.w.)	Bq kg ⁻¹ (f.w.)		
	NI	σ	<i>n</i>	IZ	σ	<i>n</i>		NI	IZ	
Ivy leaves	245.30	2.5	11	250.80	5.5	17	125 ± 13	30.7 ± 3.2	31.4 ± 3.2	
Salad	245.56	4.4	8	249.90	5.7	12	22 ± 2	5.4 ± 0.6	5.5 ± 0.6	
Grass	246.56	2.5	22	251.72	5.8	27	116 ± 12	28.5 ± 2.9	29.1 ± 3.0	
Goat's milk	248.00	—	1	249.97	—	1	54 ± 5	13.4 ± 1.3	13.5 ± 1.4	
Oak leaves	248.99	1.2	8	250.75	4.5	8	207 ± 21	51.5 ± 5.2	51.8 ± 5.3	
Honey	249.03	2.5	4	254.00		1	332 ± 33	82.7 ± 8.4	84.4 ± 8.6	
Wheat (grain)	249.33	7.2	3	245.86	1.0	2	397 ± 40	99.1 ± 10.2	97.7 ± 10.1	
Mushrooms	249.48	1.0	2	254.20	5.8	2	36 ± 4	9.1 ± 0.9	9.3 ± 0.9	
Terrestrial moss	250.37	8.8	6	250.87	9.0	8	186 ± 19	46.5 ± 4.9	46.6 ± 5.0	
Grape juice	250.78	7.0	2	251.78	6.8	5	45 ± 5	11.3 ± 1.2	11.3 ± 1.2	
Meat (miscellaneous)	250.93	4.0	5	254.24	2.5	3	104 ± 10	26.1 ± 2.7	26.5 ± 2.7	
Fruit (miscellaneous)	250.94	0.8	4	252.33	4.8	4	76 ± 8	19.1 ± 1.9	19.3 ± 2.0	
Cow's milk	251.14	5.0	13	253.47	4.8	20	60 ± 6	15.1 ± 1.6	15.2 ± 1.6	
Vegetables (miscellaneous)	252.58	8.1	4	257.53	0.1	3	22 ± 2	5.5 ± 0.6	5.6 ± 0.6	
Goat's milk cheese	252.81	—	1	257.59	—	1	238 ± 47	60.2 ± 11.9	61.4 ± 12.1	
Corn (grain)	254.96	—	1	257.17	1.0	2	257 ± 26	65.6 ± 6.6	66.1 ± 6.7	

σ : Standard deviation; *n*: number of samples; NI: non-influenced zone; IZ: influenced zone.

Nello stesso studio viene riportata anche la valutazione del frazionamento isotopico effettuata tramite la misura del contenuto di ¹³C. Poiché la respirazione microbica produce CO₂ depleta in ¹³C questa misura permette anche di valutare l'influenza relativa del metabolismo microbico nella mobilizzazione del radiocarbonio.

Tabella 5 $\delta^{13}C$ e $\Delta^{14}C$ – campagna di monitoraggio IRSN (32)

Values of $\delta^{13}C$ and of $\Delta^{14}C$ in samples				
		<i>n</i>	$\delta^{13}C$ (‰)	$\Delta^{14}C$ (‰)
Non-influenced zone	Leaves (miscellaneous)	8	-28.2 (σ = 2.1)	107.1 (σ = 8.1)
	Ivy leaves	2	-31.0 (σ = 0.8)	105.9 (σ = 2.3)
	Grass	7	-29.5 (σ = 1.6)	95.1 (σ = 5.8)
	Cow's milk	5	-20.7 (σ = 5.6)	105.2 (σ = 8.1)
	Vegetables (miscellaneous)	3	-29.0 (σ = 0.8)	87.5 (σ = 15.3)
	Fruit (miscellaneous)	3	-26.7 (σ = 1.3)	106.4 (σ = 3.9)
	Honey	1	-25.0	95.1
	Meat (poultry)	3	-24.3 (σ = 0.2)	95.5 (σ = 9.2)
	Meat (cow)	1	-18.2	120.5
	Influenced zone	Oak leaves	2	-28.8 (σ = 0.6)
Ivy leaves		4	-30.4 (σ = 1.7)	127.9 (σ = 14.2)
Grass		4	-29.8 (σ = 1.5)	122.8 (σ = 21.4)
Cow's milk		1	-15.1	110.9
Vegetables (miscellaneous)		1	-26.4	128.1
Fruit (miscellaneous)		1	-25.6	109.4
Honey		1	-25.7	118.5
Meat (duck)		1	-20.7	119.0
Meat (rabbit)		1	-28.0	115.1

Nel laboratorio ENEA è operativa da anni una linea di analisi del radiocarbonio attraverso spettrometria beta in scintillazione liquida. Tale tecnica prevede una combustione ossidativa, seguita da una riduzione e da una reazione di trimerizzazione: si trasforma così la matrice originaria da analizzare in benzene di cui viene misurato il contenuto di ^{14}C tramite la scintillazione liquida. La Minima Attività Rilevabile calcolata su 5 ml di benzene (4,395 g di carbonio estratto dal campione) è attualmente 2,0 e-5 Bq/g.

Nel 2012 è stata progettata ed è ora in corso di realizzazione una nuova linea innovativa che utilizza il metodo diretto dell'assorbimento di CO_2 in soluzioni assorbenti idonee.



Figura 15 Linea di sintesi del benzene (processo finale) utilizzata nei laboratori ENEA

2.7.6 Trizio

Il trizio (^3H) è un isotopo radioattivo dell'idrogeno; il nucleo del trizio contiene un protone e due neutroni. Ha tempo di dimezzamento di 12,3 anni, è un debole emettitore beta.

Il trizio è presente nell'ambiente come risultato sia di sorgenti naturali che antropiche. La produzione naturale di ^3H avviene, in piccole quantità, per interazione dei raggi cosmici con l'azoto nell'alta atmosfera. Il quantitativo di trizio presente nell'ambiente è aumentato considerevolmente in seguito ai test atmosferici di armi nucleari. E' inoltre prodotto nei reattori nucleari dove il deuterio dell'acqua pesante usata come moderatore può assorbire un neutrone prodotto nel reattore. Altre reazioni che possono portare alla formazione di trizio coinvolgono il litio 6 e il boro 10 bombardati con neutroni (22).

Per quanto riguarda le caratteristiche fisiche, il trizio è un gas a temperatura e pressione standard, ma la forma più comune è quella liquida, poiché il trizio reagisce con l'ossigeno per formare acqua. Il trizio rimpiazza uno degli idrogeni stabili presenti nella molecola d'acqua H_2O , formando la cosiddetta acqua triziata, HTO. Come l'acqua, l'HTO è incolore e inodore (31).

Il trizio è difficile da confinare, così come l'idrogeno, in quanto permeabile ai materiali conosciuti. Esso può contribuire alla contaminazione radioattiva, tuttavia il suo breve $T_{1/2}$ (12,3 anni) previene l'accumulo in atmosfera. Il trizio può essere usato come tracciante per eseguire indagini idrologiche; la formazione di acqua triziata gli permette un'elevata mobilità in caso di fuoriuscita,

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS - LP2 - 090	0	L	51	57

quindi la sua determinazione può essere utile per valutare eventuali fuoriuscite, tenendo conto però della difficoltà che presenta il suo confinamento.

Il possibile trasporto da un deposito avviene tramite formazione di acqua triziata (liquida o vapor acqueo) o di metano triziato ($\text{CH}_n\text{T}_{4-n}$) o di altri composti chimici presenti nel terreno e che scambiano idrogeno con l'acqua, come ad esempio gli acidi organici naturali.

Come il radiocarbonio il trizio entra nel ciclo della vita, per cui è necessario poter determinare la sua presenza nelle acque superficiali e/o sotterranee. Le matrici da monitorare sono le acque meteoriche, l'acqua interstiziale della zona insatura e le acque della zona satura.

Il laboratorio di radiometria ambientale dell'ENEA (UTS Tecnologie fisiche avanzate) effettua la determinazione del trizio in campioni acquosi ed ha elaborato in tale ambito un manuale di procedura in qualità che prevede due modalità operative: con e senza arricchimento elettrolitico. La quantificazione del trizio viene effettuata tramite spettrometria beta in scintillazione liquida a basso fondo (strumentazione Quantulus 1220).

2.7.7 Gas nobili

Come discusso nel rapporto ENEA della scorsa annualità (1) anche i gas nobili rappresentano una delle tipologie di elementi più mobili presenti in natura e più in grado di permeare attraverso anche minime fratture. In particolare, era stato sottolineato il maggiore interesse del radioxeno rispetto al radon ai fini del monitoraggio di un deposito, in quanto quest'ultimo nuclide, presente naturalmente nel sito del deposito, può essere dello stesso ordine di grandezza, se non superiore, a quello proveniente dai rifiuti radioattivi, rendendone così impossibile l'utilizzo per il monitoraggio.

Era stata quindi studiata l'opportunità e la fattibilità del monitoraggio del radioxeno, che è principalmente generato come prodotto di fissione in reattori nucleari, impianti per la produzione di radioisotopi ad uso medicale ed industriale e test nucleari, ma anche attraverso la fissione spontanea di alcuni isotopi transuranici come ad esempio il plutonio-240 che è presente nell'inventario nazionale italiano (23) con attività pari a circa 200 GBq.

Era stato osservato che gli isotopi radioattivi dello xeno rappresentano un indicatore significativo della produzione nucleare a causa del fondo naturale inferiore rispetto a quello degli isotopi stabili. Gli isotopi Xe-133 ($T_{1/2}$ pari a circa 5 giorni) e Xe-135 ($T_{1/2}$ pari a circa 9 ore) sono quelli di maggiore interesse per il monitoraggio ambientale dei rifiuti transuranici, in quanto, a causa della loro breve emivita, sono indicativi di fissione spontanea attiva *in situ*.

Inoltre, le analisi di xeno e altri gas nobili (ad esempio krypton) possono trovare applicazione anche nelle valutazioni sull'eventuale danneggiamento a elementi di combustibile durante le operazioni presso i reattori nucleari e nelle attività di riprocessamento del combustibile esaurito. La misura della concentrazione di attività di alcuni isotopi radioattivi dello Xeno (^{131m}Xe , ^{133}Xe , ^{133m}Xe e ^{135}Xe) contenuti nell'atmosfera riveste un ruolo fondamentale anche nella verifica dei trattati sulla non proliferazione nucleare per fornire la prova di eventuali test nucleari clandestini.


Lo stato dell'arte dei sistemi di misura per gas nobili messi a punto a partire da metà degli anni '90 prevede alcune soluzioni che si basano su strumentazioni automatiche e fisse, altre soluzioni mobili e trasportabili utili per le campagne di monitoraggio.

I sistemi di misura del radioxeno presente nell'aria atmosferica sono generalmente accomunati da alcuni fondamentali principi di funzionamento: assorbimento su carboni attivi, estrazione dello xeno attraverso separazione dei gas, purificazione e concentrazione, misura delle concentrazioni di attività attraverso spettrometria gamma ad alta risoluzione o attraverso metodi di coincidenza beta-gamma. Nel caso della spettrometria gamma i radioisotopi dello xeno di interesse sono identificati dalle principali emissioni X e gamma (Tabella 6).


Tabella 6 Energie X e gamma per il decadimento di ^{131m}Xe , ^{133}Xe , ^{133m}Xe e ^{135}Xe (33), (34)

	<i>Decay energy (keV)</i>	<i>Branching ratio (%)</i>
^{131m}Xe		
X-rays	29.46	15.4
	29.78	28.6
	33.60	10.2
	34.61	1.85
Gamma rays	163.93	1.95
^{133}Xe		
X-rays	30.62	14.1
	30.97	26.2
	35.00	9.4
	36.01	1.7
Gamma rays	80.99	37.0
^{133m}Xe		
X-rays	29.46	16.1
	29.78	29.8
	33.60	10.6
	34.61	1.9
Gamma rays	233.2	10.0
^{135}Xe		
X-rays	30.62	1.45
	30.97	2.69
	35.00	0.97
	36.01	0.185
Gamma rays	249.8	90
	608.2	2.90

Presso i laboratori ENEA sono in corso alcune attività sperimentali al fine di ottenere un laboratorio per la misura di gas nobili, in particolare radioxeno. Per una descrizione dettagliata di queste attività si rimanda al rapporto "Tecniche analitiche....." della corrente annualità dell'AdP. Lo stato delle attività svolte è stato presentato all'*International Noble Gas Experiment Workshop 2011* (Indonesia, 6-10 dicembre 2011) in un poster dal titolo "*On Going Activities On Noble Gas*

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS - LP2 - 090	0	L	53	57

Measurements At Enea (Italy)” e nell’articolo *“The ENEA noble gas laboratory: status of implementation”* (E. Nava et al.) in corso di pubblicazione sulla rivista J Radioanal Nucl Chem (DOI 10.1007/s10967-012-1952-2).

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS – LP2 - 090	0	L	54	57

Conclusioni

L'approccio metodologico per la valutazione dell'impatto di un deposito di rifiuti radioattivi, i relativi studi di sicurezza e il conseguente monitoraggio ambientale dell'opera sono attività molto complesse, in quanto coinvolgono differenti conoscenze ed attività, che è necessario sviluppare in modo accurato e specifico.

Le fasi di VIA e SA, oltre a costituire un obbligo nelle procedure di *licensing*, sono fondamentali per definire le ricadute dell'infrastruttura sull'ambiente, ma sono altresì propedeutiche alla fase di monitoraggio, per cui necessitano di essere sviluppate anche in funzione di questa attività. Queste attività forniscono infatti utili elementi tecnici di caratterizzazione del sistema ambientale, che costituiranno la base primaria di informazioni per il successivo monitoraggio del deposito; proprio per la loro importanza strategica dovrebbero essere considerate con la massima attenzione dai tecnici di settore e dovrebbero meritare importanti investimenti in termini di risorse umane e finanziarie.


Una volta eseguite le attività propedeutiche al monitoraggio ambientale, quest'ultimo potrà essere sviluppato con maggiore consapevolezza alla luce dei risultati sviluppati ed ottenuti nelle fasi precedenti. Il monitoraggio interessa differenti attività tecnico-scientifiche, che coinvolgono le diverse fasi di realizzazione del deposito e le diverse matrici ambientali. E' opportuno quindi poter definire i punti principali da sviluppare al fine di convogliare le risorse umane e finanziarie in modo attento e sistematico, al fine di ottenere risultati rappresentativi dell'area in esame.

Tra le attività di rilievo nello sviluppo del monitoraggio vi è lo studio della migrazione di radionuclidi nell'ambiente. Tra i radionuclidi presenti nell'inventario radiologico di un sistema di smaltimento ve ne sono alcuni con caratteristiche peculiari, quelli denominati nel report radionuclidi ad elevata mobilità e generalmente difficile rilevabilità. Questi ultimi necessitano di studi approfonditi in quanto risulta necessario raccogliere dei buoni campioni e misurare i rapporti isotopici caratteristici. Riguardo a questo aspetto uno studio futuro potrebbe portare a definire gli strumenti più adeguati per la misurazione di questi particolari radionuclidi.

Bibliografia

1. **Bartolomei P., Levizzari R., Lorenzelli R., Nava E., Rizzo A., Salvi S., Taglioni A., Troiani F.** *Approccio metodologico al monitoraggio dei depositi di rifiuti radioattivi*. s.l. : ENEA, 2011.
2. **De Salve, M.** *Stoccaggio e smaltimento dei rifiuti radioattivi*. Torino : CERSE-POLITO RL 1270/2011, 2011.
3. **IAEA.** *Disposal of radioactive waste Specific Safety Requirements No.SSR-5*. Vienna : IAEA, 2011.
4. —. *Surveillance and Monitoring for Near Surface Disposal Facilities for Radioactive Waste Safety Reports Series No. 35*. Vienna : IAEA, 2004.
5. —. *Environmental and Source Monitoring for Purposes of Radiation Protection Safety Guide No. RS-G-1.8*. Vienna : IAEA, 2005.
6. —. *Predisposal Management of Radioactive Waste General Safety Requirements Part 5 No. GSR Part 5*. Vienna : IAEA, 2009.
7. —. *Programmes and Systems for Source and Environmental Radiation Monitoring Safety Reports Series No. 64*. Vienna : IAEA, 2010.
8. —. *Considerations in the Development of Near Surface Repositories for Radioactive Waste Technical Report Series No.417*. Vienna : IAEA , 2003.
9. **O'Sullivan, P., et al., et al.** *Environmental Impact Assessment and Geological Repositories for Radioactive Waste*. Londra : s.n., 2000.
10. **IAEA.** *Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities, Volume 1: Review and enhancement of safety assessment approaches and tools*. Vienna : IAEA, 2004.
11. —. *Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities, Volume 2: Test cases*. Vienna : IAEA, 2004.
12. —. *Monitoring of geological repositories for High Level Radioactive Waste-TECDOC-1208*. Vienna : IAEA, 2001.
13. **Michael, J., et al., et al.** *Practical guide for groundwater sampling*. Champaign, Illinois : ISWS Contract Report 374, 1985.
14. *Andra's Centre de l'Aube: design, construction, operation of a state of the art surface disposal facility for low and intermediate level waste*. **Potier, J.M.** 1998, IAEA-SM 357/27.

15. **Tanabe, H., et al., et al.** Environmental monitoring program around Rokkasho nuclear fuel facilities. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. August 1997, p. Vol 226,79-83.
16. **Rodna, A.** *Radiological environmental monitoring at NPP Cernavoda*. Vienna : IAEA/NENP - Technical Meeting on environmental issues in New Nuclear Power Programmes, March 2012.
17. *Radioactivity monitoring in environmental water and air around QNPP*. **Xiang, Y., et al., et al.** 5, 2007, Nuclear Science and Techniques, Vol. 18, p. 316-320.
18. **NRC, US -**. *Quality Assurance for monitoring programs (inception through normal operations to license termination) - effluent stream and the environment*. s.l. : US - NRC Regulatory Guide 4.15, 2007.
19. **IAEA**. *Determination and use of scaling factors for waste characterization in nuclear power plant No. NW-T-1.18*. Vienna : IAEA, 2010.
20. **Muramatsu, Y., et al., et al.** AMS analysis of 129I in Japanese soil samples collected from background areas far from nuclear facilities. *Quaternary Geochronology*. 2008, p. 291-297.
21. *Determination of technetium-99 in environmental samples: a review*. **Shi, K., et al., et al.** 2012, Analytica Chimica Acta, p. 1-20.
22. *3He mass spectrometry for very low-level measurement of organic tritium in environmental samples*. **Jean-Baptiste, P., et al., et al.** 2010, Journal of Environmental Radioactivity, p. 185-190.
23. **Capone M., Cherubini N., Dodaro A., Falconi L.** *Revisione Critica dell'Inventario Nazionale dei Rifiuti Radioattivi ai fini dello Smaltimento - documento NNFISS-LP4-014, AdP ENEA-MSE 2009-2011*. s.l. : ENEA , 2010.
24. **Rizzo A., Bartolomei P., Nava E., Lorenzelli R., Salvi, S.** *Il ruolo del carbonio 14 nella gestione dei rifiuti radioattivi*. s.l. : ENEA, 2011.
25. **Kessel, D.S.** *Update analysis of characteristic time and length scales for mixing processes in the WIPP repository to reflect the CRA-2004 PABC technical baseline and the impact of supercompacted mixed wastes and heterogeneous waste emplacement*. s.l. : Sandia National Laboratories - EPA, 2006.
26. **IAEA**. *Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments Technical Reports Series No. 472*. Vienna : IAEA, 2010.
27. **JAEA**. www.jaea.go.jp/04/be/docu/tru_eng/detailed_version/Chapter3.pdf. [Online]
28. **Chu, S.Y.F., Ekstrom, L.P. e Firestone, R.B.** <http://nucleardata.nuclear.lu.se/nucleardata/toi/>. [Online] LBNL (Berkley, USA); Department of Physics, Lund University (Sweden).

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS - LP2 - 090	0	L	57	57

29. *On the analysis of iodine-129 and iodine-127 in environmental materials by accelerator mass spectrometry and ion chromatography.* **Schmidt, A., et al., et al.** 1998, *The Science of the Total Environment*, p. 131-156.

30. **EPA.** *Monitored natural attenuation of inorganic contaminants in groundwater.* Cincinnati, Ohio : EPA/600/R-10/093, 2010.

31. —. <http://www.epa.gov/rpdweb00/radionuclides/index.html>. [Online]

32. *Distribution of carbon 14 in the terrestrial environment close to French nuclear power plants.* **S. Roussel-Debet et al.** 2006, *J. Environ. Radioactivity*, Vol. 87, p. 246-259.

33. *Ten Years of Development of Equipment for Measurement of Atmospheric Radioactive Xenon for the Verification of the CTBT.* **Auer M., Kumberg T., Sartorius H., Wernsperger B., Schlosser C.,** 2010, *Pure Appl. Geophys.*, Vol. 167, p. 471-486.

34. **ENSDF.** *Evaluated Nuclear Structure Data File.*

ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI

CRP = Progetto di Ricerca Coordinato

FEP = Features, Events, Processes

IAEA = International Atomic Energy Agency

ICRP = International Commission on Radiological Protection

ISAM = Improvement Safety Assessment Methodologies

QA = Quality Assurance

SA = Safety Assessment

SIA = Studio di Impatto Ambientale

VIA = Valutazione di Impatto Ambientale

VAS = Valutazione Ambientale Strategica