



Ricerca di Sistema elettrico

Indagini Radioecologiche Relative alla Localizzazione in Sicurezza del Deposito Nazionale

P. Bartolomei, B. Ferrucci, A. Rizzo, C. Telloli

INDAGINI RADIOECOLOGICHE RELATIVE ALLA LOCALIZZAZIONE IN SICUREZZA DEL DEPOSITO NAZIONALE

P. Bartolomei, B. Ferrucci, A. Rizzo, C. Telloli - ENEA

Settembre 2016

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2015

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto: Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare e collaborazione ai programmi internazionali per il nucleare di IV Generazione

Obiettivo: Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare

Responsabile del Progetto: Felice De Rosa, ENEA

Titolo

Indagini radioecologiche relative alla localizzazione in sicurezza del deposito nazionale

Descrittori
Tipologia del documento:
Collocazione contrattuale: Accordo di programma ENEA-MSE su sicurezza nucleare e reattori di IV generazione

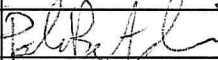
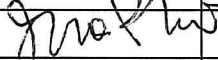
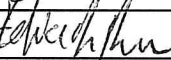
Argomenti trattati: ciclo del combustibile

Sommario

Nell'ambito dell'AdP MSE-ENEA, l'ENEA contribuisce alla discussione sulle problematiche connesse alla chiusura del ciclo nucleare.

ENEA sintetizza lo stato della situazione italiana per quello che riguarda la normativa sullo smaltimento dei rifiuti radioattivi e mette in luce i punti critici nei quali sono necessarie indagini radioecologiche approfondite.

Note
Autori: Paolo Bartolomei, Barbara Ferrucci, Antonietta Rizzo, Chiara Telloi

2			NOME			
			FIRMA			
1			NOME			
			FIRMA			
0	EMISSIONE	23/09/16	NOME	P. Bartolomei	F. Padoani	E. De Rosa
			FIRMA			
REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDAZIONE	CONVALIDA	APPROVAZIONE	

Sommario

Premessa	2
1. Prima parte: il contesto normativo	4
1.1. La necessità di un deposito	4
1.2. La localizzazione del deposito nazionale	5
1.3. La classificazione dei rifiuti radioattivi	9
2. Seconda Parte: il Deposito	16
2.2. Il ruolo dello stato zero	18
2.3. Potenziali indici di rilascio e monitoraggio	19
2.4. Monitoraggio della Zona Non Saturata	20
2.5. Monitoraggio delle acque sotterranee.....	22
2.6. Monitoraggio delle acque superficiali	23
2.7. Monitoraggio dei contaminanti rilasciati all’atmosfera	24
2.8. Monitoraggio di altre matrici ambientali	25
Conclusioni	27
Bibliografia	28

Premessa

Nell'ambito delle attività connesse con gli impianti nucleari e le radiazioni ionizzanti è necessario garantire la sicurezza e la protezione sanitaria degli addetti ai lavori e della popolazione. La disciplina che si occupa di quest'attività è la radioprotezione. Quando si parla di radioecologia, nel sentire comune, ma anche in buona parte degli addetti ai lavori, spesso la si confonde con la radioprotezione. In realtà le due discipline, pur avendo punti in comune, impiegano metodologie differenti e vengono utilizzate in due ambiti separati:


- *“La radioprotezione è volta a preservare lo stato di salute e di benessere dei lavoratori, degli individui della popolazione e della loro progenie, e in alcune accezione degli organismi viventi in generale.”*
- *“Ramo dell'ecologia che studia l'azione delle radiazioni, naturali o provocate, sia dal punto di vista dei loro effetti (occupandosi, per es., degli inquinamenti radioattivi, dell'accumulo degli elementi radioattivi in particolari organismi), sia da quello delle loro possibili applicazioni, come quella dei radioisotopi usati come traccianti nello studio del ciclo naturale di certi elementi, in quello del metabolismo minerale di animali e piante, in quello dei movimenti delle acque, dei sedimenti ecc.”*

Normalmente la strumentazione usata per la radioecologia è molto più sensibile poiché è necessario rivelare concentrazioni molto basse di radionuclidi essendo oggetto di investigazione, non solo i radionuclidi prodotti nelle attività umane, ma anche quelli primordiali e quelli cosmogenici.

Spesso nella radioecologia, si ricorre a unità di misura differenti; ad esempio quando si parla di radiocarbonio in un contesto geologico-ambientale si usa quantificarlo in termini di *“percentuale del moderno”* (PCM) dove per moderno si intende la concentrazione di ^{14}C in atmosfera nel 1950. Quando invece, si ha a che fare con impianti nucleari, vengono imposti dei vincoli radioprotezionistici, e in questo caso la radioecologia offre un approccio scientifico importante per raggiungere quegli obiettivi.

Nel caso del deposito nazionale per i rifiuti radioattivi, le indagini radioecologiche possono offrire un valido supporto fin dall'inizio, nella fase dell'individuazione del sito e della sua caratterizzazione geologica; in questo caso sono da collocare all'interno della geochimica isotopica.

Lo studio della migrazione dei nuclidi nei suoli, del trasferimento agli acquiferi, delle interfacce suolo-aria e suolo-pianta sono importanti per valutare le conseguenze dei rilasci di esercizio e di eventuali situazioni incidentali durante l'esercizio del deposito. Questa caratterizzazione radiologica è importante anche per la fase post-

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP1 - 085	0	L	4	29

esercizio del deposito, nella quale la tenuta delle barriere artificiali non è più garantita e quindi si può fare affidamento solo su quelle naturali.

Si tratta quindi di uno spettro di attività molto vario e articolato che ovviamente hanno delle specificità in funzione della tipologia di deposito (geologico o superficiale), dell'inventario e della tipologia di rifiuti radioattivi che verranno conferiti.

Nel corso di questa annualità dell'accordo di programma tra ENEA e Ministero dello Sviluppo Economico si è proceduto all'analisi del contesto progettuale e normativo del deposito previsto nel nostro Paese, mettendo in luce gli aspetti nei quali sono opportune/necessarie indagini radioecologiche.

1. Prima parte: il contesto normativo

1.1. La necessità di un deposito

Il quadro della situazione dei rifiuti radioattivi può essere così sintetizzato:

- in termini volumetrici, il problema “rifiuti radioattivi” non appare particolarmente rilevante, specie se confrontato con quello proprio dei paesi che hanno intrapreso in termini più incisivi del nostro la scelta elettroneucleare;
- dal punto di vista qualitativo, viceversa, vi sono elementi di indubbia complessità legati alla presenza di una gamma estremamente diversificata di rifiuti radioattivi a differenti stadi di trattamento e condizionamento. Anche il combustibile irraggiato, per le caratteristiche differenziate e la situazione in cui versa, delinea problemi non meno complessi;
- i rifiuti ad alta attività, quelli a lunga e media vita e gli elementi di combustibile irraggiati (anche se costituiscono una minima percentuale del totale in volume e in peso), sono quelli che contengono la maggior parte della radioattività totale;
- solo una parte dei rifiuti di alta attività è presente attualmente sul territorio nazionale; la parte più consistente infatti è situata presso impianti di trattamento situati all'estero, ma è comunque destinata a rientrare prima o poi nel territorio nazionale;
- i rifiuti radioattivi presenti nel territorio nazionale sono conservati presso gli impianti che li hanno generati, in qualche caso presso centri di raccolta autorizzati (ciò vale in particolare per alcuni rifiuti provenienti dalla pratica ospedaliera e industriale) o sono sparsi presso diversi altri utilizzatori. Questa situazione è ben lontana dal potersi giudicare soddisfacente dal punto di vista radiologico, poiché la dispersione delle sorgenti radioattive spesso immagazzinate in siti e depositi non ottimali e certamente non progettati e licenziati per permanenze di lungo periodo, aumenta i rischi futuri per le popolazioni e per l'ambiente;
- assai variegata è la forma chimico-fisica nella quale i rifiuti si trovano attualmente. Parte di essi si trova immagazzinata in forma liquida, altra in forma solida con vari modi di condizionamento. In sostanza, solo una parte di essi rispetta gli standard di trattamento e condizionamento fissati dall'autorità di sicurezza;
- particolarmente delicata è la persistenza di importanti quantità di sostanze radioattive sotto forma liquida, che rende meno remota la possibilità di eventi accidentali capaci di dar luogo alla contaminazione di ecosistemi attigui ai luoghi di stoccaggio [1].

Negli ultimi anni sono stati fatti molti passi in avanti nella messa in sicurezza degli impianti e dei materiali, ma complessivamente il sistema gestionale in atto non è sicuramente soddisfacente [1]. Il nodo fondamentale è che l'opera di condizionamento produce una notevole volumetria di manufatti che devono essere rimossi dagli impianti e conferiti a idonee strutture.

Presso i siti attuali sono presenti o sono in allestimento depositi temporanei di rifiuti radioattivi, che però non hanno la volumetria sufficiente per ospitare tutti i rifiuti prodotti durante il decommissioning. Aumentare la volumetria e mantenere i rifiuti presso i siti attuali non è la strada corretta: un sito idoneo per ospitare una centrale non è sicuramente l'ideale per ospitare rifiuti radioattivi per tempi lunghi a causa della presenza di acqua (necessaria per le centrali, ma deleteria per i depositi), in più la proliferazione di queste strutture sul territorio nazionale, oltre ad essere fortemente antieconomica, aumenta i problemi di gestione e le problematiche di sicurezza e di protezione fisica.

1.2. La localizzazione del deposito nazionale

La strategia italiana per la gestione dei rifiuti radioattivi è stabilita dal D. Lgs. n. 31 del 2010: "*Disciplina della localizzazione, della realizzazione e dell'esercizio nel territorio nazionale di impianti di produzione di energia elettrica nucleare, di impianti di fabbricazione del combustibile nucleare, dei sistemi di stoccaggio del combustibile irraggiato e dei rifiuti radioattivi, nonché misure compensative e campagne informative al pubblico, a norma dell'articolo 25 della legge 23 luglio 2009, n. 99*" ed è basata sulla realizzazione di un Deposito nazionale, costituito da un impianto per lo smaltimento dei rifiuti a bassa e media attività e da un deposito per lo stoccaggio provvisorio di lungo termine dei rifiuti ad alta attività e del combustibile irraggiato.

Il contesto politico di quell'anno, però, era quello nel quale si voleva proporre la svolta energetica del ritorno al nucleare e le norme emanate in quel periodo (che sono quelle ora vigenti) risentono pesantemente di quell'*imprinting*. In particolare i tempi per l'attuazione dei vari adempimenti appaiono molto stringenti e il procedimento di localizzazione del sito segue un approccio top-down che deriva proprio da quel periodo. È quindi prevista una procedura che parte dall'individuazione di criteri di esclusione per poi passare, attraverso una serie di passaggi con tempi rigidamente predefiniti, alle consultazioni locali, all'ottenimento delle intese regionali, fino ad arrivare alla scelta definitiva del sito con un decreto del Ministero dello Sviluppo Economico. Nel corso del tempo questa rigidità si è notevolmente attenuata e ci sono stati importanti aggiornamenti normativi e procedurali.

Timeline per il Deposito Nazionale - D.Lgs. n. 31/2010

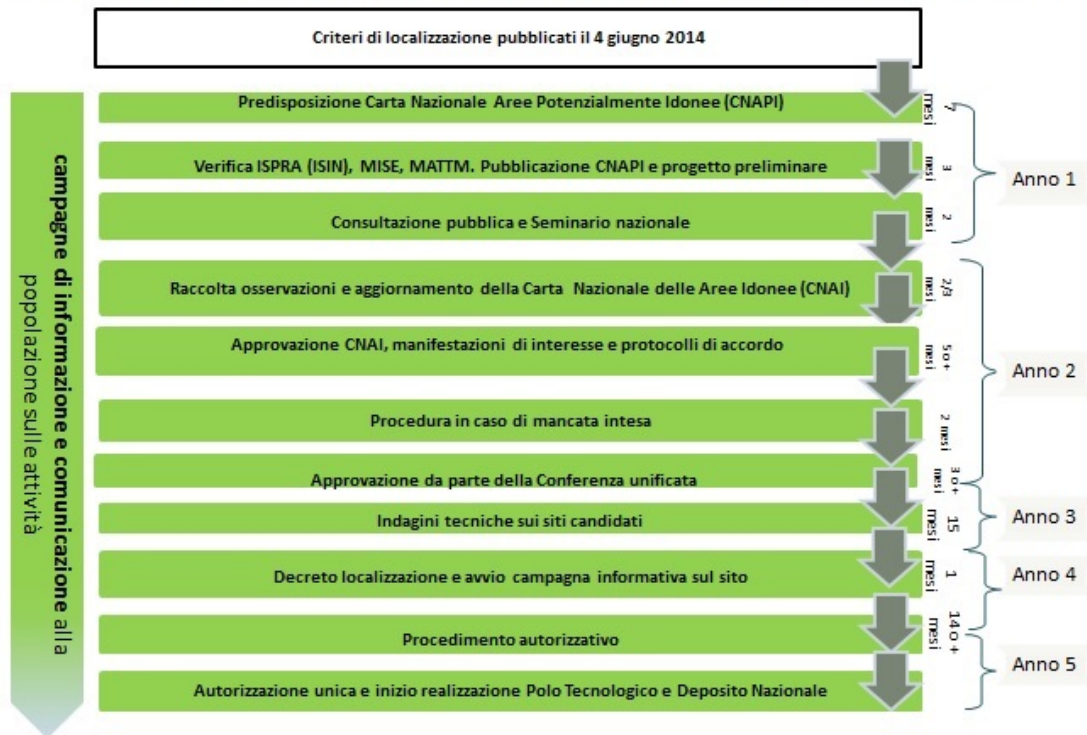


Figura 1: Timeline per il deposito nazionale.

La

Figura 1 sintetizza le fasi della procedura autorizzativa e il punto di partenza è la redazione della Carta Nazionale delle Aree Potenzialmente Idonee (CNAPI), un compito demandato alla SOGIN, l'organizzazione nazionale di gestione dei rifiuti radioattivi.

Prima dell'emanazione di questo atto, l'autorità nazionale di sicurezza (attualmente l'ISPRA tramite il proprio Dipartimento nucleare) ha emanato le linee guida per la redazione della carta all'interno della Guida Tecnica 29 pubblicata nel giugno del 2014 [2]. In questa guida vengono individuati dei criteri assoluti di esclusione che servono per la prima redazione della mappa dei siti, e dei criteri di approfondimento che servono per l'affinamento della carta e come ausilio per la scelta definitiva.

Le aree di esclusione previste dalla Guida Tecnica 29 comprendono:

- aree che presentano apparati vulcanici attivi o quiescenti (Etna, Stromboli, Vesuvio, etc.);
- aree contrassegnate da sismicità elevata (valore previsto di picco di accelerazione "PGA" al substrato rigido pari o superiore a 0,25 g);

- aree interessate da fenomeni di fagliazione (catalogo ITHACA “ITaly HAZard from CApable faults” e nel database DISS “Database of Individual Seismogenic Sources”);
- aree caratterizzate da rischio e/o pericolosità geomorfologica e/o idraulica di qualsiasi grado e le fasce fluviali (per valutare il rischio di frane e di inondazioni);
- aree contraddistinte dalla presenza di depositi alluvionali di età olocenica: l’esclusione di tali aree è un ulteriore elemento precauzionale per la minimizzazione del rischio idraulico;
- aree ubicate ad altitudine maggiore di 700 m s.l.m.: i processi morfogenetici di tipo fluvio-denudazionale e gravitativi di versante sono più intensi con l’aumentare della quota;
- aree caratterizzate da versanti con pendenza media maggiore del 10%: Tali versanti possono esporre il deposito a fenomeni di erosione superficiale, trasporto ed accumulo riferiti al dilavamento delle acque di precipitazione meteorica;
- aree sino alla distanza di 5 km dalla linea di costa attuale oppure ubicate a distanza maggiore ma ad altitudine minore di 20 m s.l.m.: queste aree possono essere soggette ad ingressioni marine; sono, inoltre, caratterizzate dalla presenza di falde acquifere superficiali e di cunei salini, foci e delta fluviali, dune, zone lagunari e palustri. Gli effetti corrosivi del clima marino possono avere un impatto sulla resistenza alla degradazione delle strutture del deposito. Le aree in prossimità della costa sono, in generale, turistiche e densamente abitate;
- aree interessate dal processo morfogenetico carsico o con presenza di sprofondamenti catastrofici improvvisi (sinkholes);
- aree caratterizzate da livelli piezometrici affioranti o che, comunque, possano interferire con le strutture di fondazione del deposito: La prossimità di acque del sottosuolo, nelle loro variazioni di livello stagionali e non stagionali conosciute, può ridurre il grado di isolamento del deposito e favorire fenomeni di trasferimento di radionuclidi verso la biosfera. Per lo stesso motivo sono da escludere le aree con presenza di sorgenti e di opere di presa di acquedotti;
- aree naturali protette identificate ai sensi della normativa vigente;
- aree che non siano ad adeguata distanza dai centri abitati;
- aree che siano a distanza inferiore a 1 km da autostrade e strade extraurbane principali e da linee ferroviarie (eventuale impatto sul deposito legato a incidenti che coinvolgono trasporti di merci pericolose);
- aree caratterizzate dalla presenza nota di importanti risorse del sottosuolo;

- aree caratterizzate dalla presenza di attività industriali a rischio di incidente rilevante, dighe e sbarramenti idraulici artificiali, aeroporti o poligoni di tiro militari operativi.

Si tratta di criteri piuttosto stringenti, in particolare per quello che riguarda i requisiti antisismici dove viene richiesto un potenziale picco di accelerazione ($PGA = 0.6 \text{ g}$) inferiore a quello che viene comunemente richiesto per le centrali nucleari di nuova costruzione, ovvero 0.3 g . Per fare un esempio la centrale nucleare di Krško, in Slovenia a circa 150 Km da Trieste, è in una zona dove le recenti stime del rischio sismico hanno portato il PGA a 0.56 g .

Seguendo queste indicazioni, la SOGIN ha trasmesso il 2 gennaio 2015 a ISPRA una proposta di Carta nazionale delle aree potenzialmente idonee (CNAPI) nonché un progetto preliminare per la realizzazione del Parco stesso, quindi a decorrere da quella data parte la procedura prevista dal timeline di

Figura 1.

Tuttavia, i tempi indicati nel D. lgs 31 non sono stati rispettati a causa di ritardi procedurali. Infatti le verifiche da parte di ISPRA e Ministeri sono state più approfondite del previsto. La relazione di ISPRA relativa alle valutazioni sulla coerenza delle aree proposte con i criteri fissati e la correttezza dei dati cartografici (attraverso rilievi di carattere generale e dei rilievi specifici per ciascuna delle aree proposte), è stata trasmessa ai Ministeri a marzo 2015. Successivamente c'è stata interazione tra MISE, MATTM, ISPRA e SOGIN che ha recepito le osservazioni e ha trasmesso all'ISPRA, con varie note, l'aggiornamento della proposta di CNAPI, la relativa documentazione tecnica di supporto e la "Proposta di ordine di idoneità delle aree CNAPI e relativa procedura". Infine l'ISPRA, a seguito di ulteriori verifiche fatte anche in collaborazione con l'Agenzia Internazionale per l'Energia Atomica (IAEA), in data 20 luglio 2015 ha trasmesso al Ministero dello Sviluppo Economico e al Ministero dell'Ambiente l'aggiornamento delle valutazioni sulla revisione della CNAPI e sulla sopracitata documentazione di supporto senza formulare ulteriori rilievi.

La dilatazione dei tempi, inoltre, si è verificata a causa degli adempimenti relativi al recepimento della direttiva 2011/70/Euratom (che istituisce un quadro comunitario per la gestione responsabile e sicura del combustibile nucleare esaurito e dei rifiuti radioattivi) avvenuto con il D. lgs 4 marzo 2014, n. 45. Tra questi adempimenti c'è anche l'obbligo, per gli Stati membri dell'UE, di predisporre un Programma nazionale per l'attuazione della politica di gestione del combustibile esaurito e dei rifiuti radioattivi. Secondo questa norma, il Programma nazionale deve contenere una panoramica programmatica della politica italiana di gestione dei rifiuti radioattivi e

del combustibile nucleare esaurito e deve, inoltre, essere trasmesso alla Commissione europea così come le eventuali successive modifiche significative.

L'Italia ha quindi predisposto un documento, inviato il 22 febbraio scorso alla Commissione Europea, relativo al Programma Nazionale per la gestione del combustibile esaurito e dei rifiuti radioattivi. Il documento riassume in modo organico gli obiettivi generali della politica nazionale riguardante la gestione del combustibile esaurito e dei rifiuti radioattivi e i piani per la gestione del combustibile esaurito e dei rifiuti radioattivi dalla generazione fino allo smaltimento, ivi incluso il Deposito Nazionale.

Questo documento [3] adesso è in fase di VAS (Valutazione Ambientale Strategica) da parte del Ministero dell'Ambiente e, dopo la consultazione, dovrà essere oggetto di concertazione con la Conferenza Unificata e acquisire vari pareri, tra cui quello dell'Autorità di Regolamentazione competente e del Ministro della salute. Questo prima dell'approvazione del testo finale con decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri.

Attualmente è stata completata la fase di consultazione ristretta alle Autorità ambientali competenti e, sulla base delle osservazioni ricevute, è in corso di ultimazione il Rapporto Ambientale che verrà sottoposto a consultazione pubblica cui nell'autunno prossimo.

La procedura di consultazione della procedura è già di per sé molto articolata, inoltre, in questo caso occorre esperire anche una consultazione transfrontaliera dato che ci sono Paesi che hanno manifestato l'interesse a partecipare (per adesso, Austria, Svizzera, Francia, UK e Germania). Quindi le operazioni termineranno probabilmente nella primavera 2017 per arrivare all'approvazione definitiva del Programma Nazionale nei mesi successivi.

Molto probabilmente la pubblicazione della CNAPI e quindi la trasformazione in CNAI (carta nazionale aree idonee) avverrà quando sarà definitivamente approvato il Programma Nazionale e solo allora partirà la procedura riportata in

Figura 1.

1.3. La classificazione dei rifiuti radioattivi

Non esiste una normativa europea specifica per questo argomento e ogni Paese della Comunità ha adottato la soluzione che ritiene più idonea, in funzione dell'inventario dei propri rifiuti e soprattutto delle soluzioni che intende adottare per la gestione e lo smaltimento delle loro diverse tipologie.

Per decenni, in Italia, la materia è stata regolata dalla Guida Tecnica 26 ISPRA del 1987 che prevedeva una classificazione in tre categorie:

1° Categoria: Rifiuti radioattivi che richiedono tempi dell'ordine di mesi, sino a un tempo massimo di alcuni anni, per decadere a livelli di radioattività non considerati pericolosi;

2° Categoria: Rifiuti radioattivi che richiedono tempi variabili da qualche decennio fino ad alcune centinaia di anni per raggiungere concentrazioni di radioattività dell'ordine di alcune centinaia di Bq/g nonché quei rifiuti contenenti radionuclidi a vita molto lunga purché in concentrazioni di tale ordine;

3° Categoria: Rifiuti radioattivi che richiedono tempi dell'ordine di migliaia di anni e oltre per raggiungere concentrazioni di radioattività dell'ordine di alcune centinaia di Bq/g.

Tutta la strategia italiana sui rifiuti radioattivi è stata fatta tenendo come riferimento questo tipo di classificazione ed esisteva un rapporto biunivoco tra la categoria e la metodologia di smaltimento. Lo smaltimento dei rifiuti di prima categoria consiste nello stoccaggio in sicurezza per i pochi mesi necessari al loro decadimento, dopo di che possono essere trattati come rifiuti convenzionali. I rifiuti di seconda categoria rimangono radioattivi per 300 anni e hanno come riferimento il deposito nazionale, di cui si sta discutendo in questo periodo, e che è stato progettato proprio per questa tipologia di nuclidi. Infine per la terza categoria, che comprende l'alta attività e il combustibile nucleare esaurito, la policy attuale prevede lo stoccaggio in sicurezza per 50-100 anni, in attesa che maturino le tecnologie e le condizioni per poterli smaltire in maniera definitiva in formazioni geologiche.


Destinazione finale delle diverse categorie (non sono compresi i rifiuti contenenti radionuclidi di origine naturale, articolo 2, comma 5, del presente decreto)

Categoria	Condizioni e/o Concentrazioni di attività	Destinazione finale
Esenti	<ul style="list-style-type: none"> • Art. 154 comma 2 del D.Lgs n. 230/1995 • Art. 30 o art. 154 comma 3-bis del D.Lgs n. 230/1995 	Rispetto delle disposizioni del D.Lgs. n. 152/2006
A vita media molto breve	<ul style="list-style-type: none"> • $T_{1/2} < 100$ giorni Raggiungimento in 5 anni delle condizioni: <ul style="list-style-type: none"> • Art. 154 comma 2 del D.Lgs n. 230/1995 • Art. 30 o art. 154 comma 3-bis del D.Lgs n. 230/1995 	Stoccaggio temporaneo (art.33 D.Lgs n. 230/1995) e smaltimento nel rispetto delle disposizioni del D.Lgs. n. 152/2006
Attività molto bassa	<ul style="list-style-type: none"> • ≤ 100 Bq/g (di cui alfa ≤ 10 Bq/g) Raggiungimento in $T \leq 10$ anni della condizione: <ul style="list-style-type: none"> • Art. 30 o art. 154 comma 3-bis del D.Lgs n. 230/1995 	Impianti di smaltimento superficiali, o a piccola profondità, con barriere ingegneristiche (Deposito Nazionale D.Lgs n. 31/2010)
	Non raggiungimento in $T \leq 10$ anni della condizione: <ul style="list-style-type: none"> • Art. 30 o art. 154 comma 3-bis del D.Lgs n. 230/1995 	
Bassa attività	<ul style="list-style-type: none"> • radionuclidi a vita breve ≤ 5 MBq/g • Ni59-Ni63 ≤ 40 kBq/g • radionuclidi a lunga vita ≤ 400 Bq/g 	Impianto di immagazzinamento temporaneo del Deposito Nazionale (D.Lgs n.31/2010) in attesa di smaltimento in formazione geologica
Media attività	<ul style="list-style-type: none"> • radionuclidi a vita breve >5 MBq/g • Ni59-Ni63 > 40 kBq/g • radionuclidi a lunga vita >400 Bq/g • No produzione di calore Radionuclidi alfa emettitori ≤ 400 Bq/g e beta-gamma emettitori in concentrazioni tali da rispettare gli obiettivi di radioprotezione stabiliti per l'impianto di smaltimento superficiale.	
Alta attività	Produzione di calore o di elevate concentrazioni di radionuclidi a lunga vita, o di entrambe tali caratteristiche.	

Tabella 1: Nuova classificazione dei rifiuti radioattivi ex DM 45 2015.

Questa situazione è stata modificata DM 7 agosto 2015, n. 45, che adotta uno schema molto articolato sul modello della proposta di classificazione IAEA [4]. In questo nuovo assetto la corrispondenza biunivoca tra singole categorie di rifiuti e tipologia di smaltimento non è più così ben definita e vengono ipotizzate diverse possibilità per la loro gestione.

Per Tabella 1 sono presentate le definizioni delle nuove categorie per la classificazione dei rifiuti.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFIS – LP1 - 085	0	L	13	29

Ⓚ Tabella 2 si fa il confronto tra la classificazione prevista dalla guida tecnica 26 g"quella del DM 45.

Guida Tecnica 26	DM 7 agosto 2015, n. 45
	Esenti (EW)
Prima Categoria	A vita media molto breve (Very Short Lived Waste - VSLW)
Seconda Categoria	Attività molto bassa (Very Low Level Waste – VLLW)
	Bassa attività (Low Level Waste – LLW)
Terza Categoria	Media attività (Intermediate Level Waste - ILW)
	Alta attività (High Level Waste -HLW)

Tabella 2: confronto tra le classificazioni GT26 e DM45.

Si vede quindi come una parte della *vecchia* seconda categoria potrebbe andare in discariche convenzionali e una parte della precedente terza categoria potrebbe essere conferita al deposito nazionale. Ciò comporterebbe una presenza nel deposito nazionale di un'aliquota maggiore, di quanto previsto precedentemente, di nuclidi a vita più lunga dei previsti 300 anni di durata dell'opera. Si tratta comunque di aliquote molto basse che non inciderebbero sui criteri di progettazione delle barriere, poiché il contenimento sarebbe comunque garantito. I problemi potrebbero sorgere nella fase post-chiusura del deposito, quando, dopo i 300 anni, le barriere non vengono considerate più in grado di contenere la migrazione dei nuclidi. A quel punto, nonostante la maggior parte della radioattività sia decaduto, rimangono le "impurezze" a lunga vita, il cui contenimento sarà affidato esclusivamente alle barriere naturali presenti nel sito.

Questo argomento ricade nell'ambito della Performance Assessment (PA) dei depositi superficiali e rappresenta una problematica ampiamente affrontata nelle esperienze internazionali. La situazione italiana, d'altro canto, risulta più problematica a causa dei molto più stringenti limiti di rilascio previsti dalla legislazione italiana rispetto al quadro normativo internazionale.

Attualmente questo aspetto è regolato dal D. Lgs. n° 235 del 1995 che prevede che ogni impianto nucleare costruito a far tempo dall'entrata in vigore di questa legge, rispetti il "limite di non rilevanza radiologica" [5], quantificato in un limite di dose alla popolazione di 10 µSv/anno. Si tratta di limiti draconiani, infatti, come si vede dalla

Figura 1, per impianti che in altri Paesi operano in regime di esenzione, in Italia è necessaria l'autorizzazione; mentre quando per gli altri scatta l'obbligo di una procedura autorizzativa, da noi vige il divieto di costruzione.

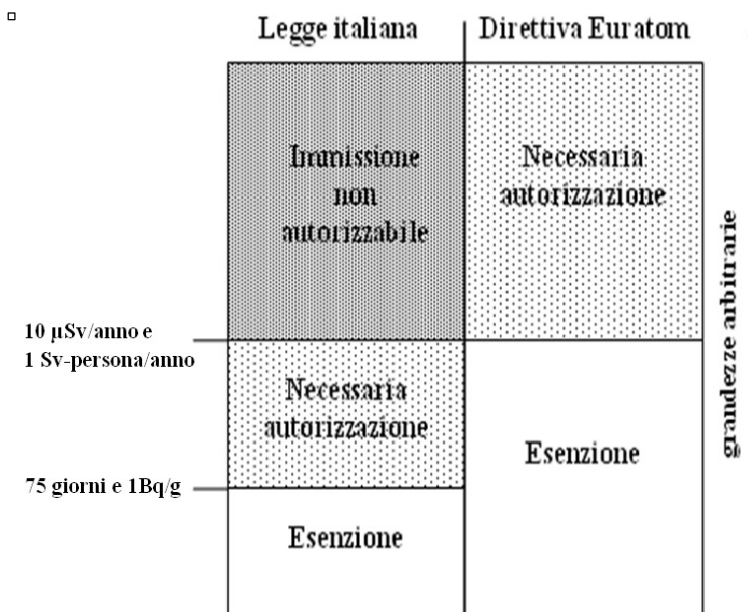


Figura 2: Limiti autorizzativi per la costruzione di un deposito: confronto fra la legge italiana e la direttive europee.

Il decreto 235 verrà cambiato entro pochi anni, poiché è stata emanata la Direttiva 2013/59/Euratom del 5 dicembre 2013, che stabilisce norme fondamentali di sicurezza relative alla protezione contro i pericoli derivanti dall'esposizione alle radiazioni ionizzanti, e che deve essere recepita nelle legislazioni nazionali entro il 6 febbraio 2018. In questa direttiva è indicato come riferimento un limite di dose alla popolazione di 1 mSv, ovvero una quantità 100 volte superiore ai limiti di legge attualmente in vigore in Italia. Ciò non vuol dire che durante il processo di recepimento l'Italia sia obbligata a innalzare i propri limiti, poiché è già stato ribadito in diversi contesti europei il diritto di ogni paese di adottare, se vuole, limiti più conservativi di quelli proposti dalla direttiva. Occorre anche notare che i legislatori italiani dopo il 1995 si sono occupati poco delle questioni relative alla radioprotezione, ma quando l'hanno fatto (come nel caso della commissione bicamerale sul ciclo dei rifiuti) hanno ribadito la validità della scelta del criterio di non rilevanza radiologica.

Dal momento che nel 2018 dovrebbe già essere iniziato l'iter di localizzazione, non appare realistico né opportuno, che si proceda ad un'operazione di allentamento della normativa. È quindi estremamente probabile che, anche dopo il recepimento della nuova direttiva UE, permanga il limite di 10 μ Sv/anno.

Per quello che riguarda l'esercizio del deposito di rifiuti radioattivi tutto sommato questo è un problema molto relativo. Infatti, già ora, diversi depositi europei (come quello dell'Aube in Francia ed El Cabril in Spagna) in ossequio al criterio di ottimizzazione ALARA (As Low as Reasonably Achievable) (ovvero tenere l'esposizione alle radiazioni al livello più basso ragionevolmente raggiungibile), sono stati progettati per garantire una dose alla popolazione molto più bassa del loro livello

di riferimento legislativo e, durante il loro esercizio, stanno abbondantemente al di sotto del livello di non rilevanza radiologica. È quindi fattibile realizzare un sistema di barriere che garantisca contenimenti anche molto stringenti.

La non rilevanza radiologica prevista dalla nostra legge vale non solo per la popolazione attuale, ma anche per quella che abiterà nella vicinanza del sito tra 300 o 1000 anni, quando non si potrà più contare sulle barriere artificiali, ma solo su quelle naturali. La progettazione del deposito non è quindi solo da affrontare dal punto di vista ingegneristico, ma anche dal punto di vista radioecologico e, data la peculiarità della legislazione italiana, questo aspetto assume un'importanza maggiore rispetto all'esperienza degli altri Paesi.

1.4. La situazione negli altri Paesi

In quasi tutti i Paesi d'Europa, anche in quelli che, come la Norvegia, non hanno mai prodotto energia elettrica da fonte nucleare, sono operativi depositi definitivi per rifiuti a bassa e media attività. In Francia il deposito di superficie di La Manche è stato riempito, raggiungendo così la fase di chiusura nel 1994, dopo decine d'anni di operatività, con circa 500 mila metri cubi di rifiuti a bassa e media attività.

Dal 1992, sempre in Francia, si è aggiunto il Deposito de L'Aube, progettato per ospitare 1 milione di metri cubi di rifiuti della stessa categoria.



Figura 3: Il deposito francese de l'Aube.



Figura 4: Il deposito spagnolo di El Cabril

In Spagna, il Deposito di El Cabril, in esercizio dal 1992, è stato autorizzato per ospitare 42.000 metri cubi di rifiuti a bassa e media attività, che in futuro potrebbero essere

Anche il Belgio e la Slovenia hanno localizzato, rispettivamente nel sito di Dessel e in quello di Vrbinja, il Deposito Nazionale per i rifiuti a bassa e media attività, per i quali è in corso la fase autorizzativa.

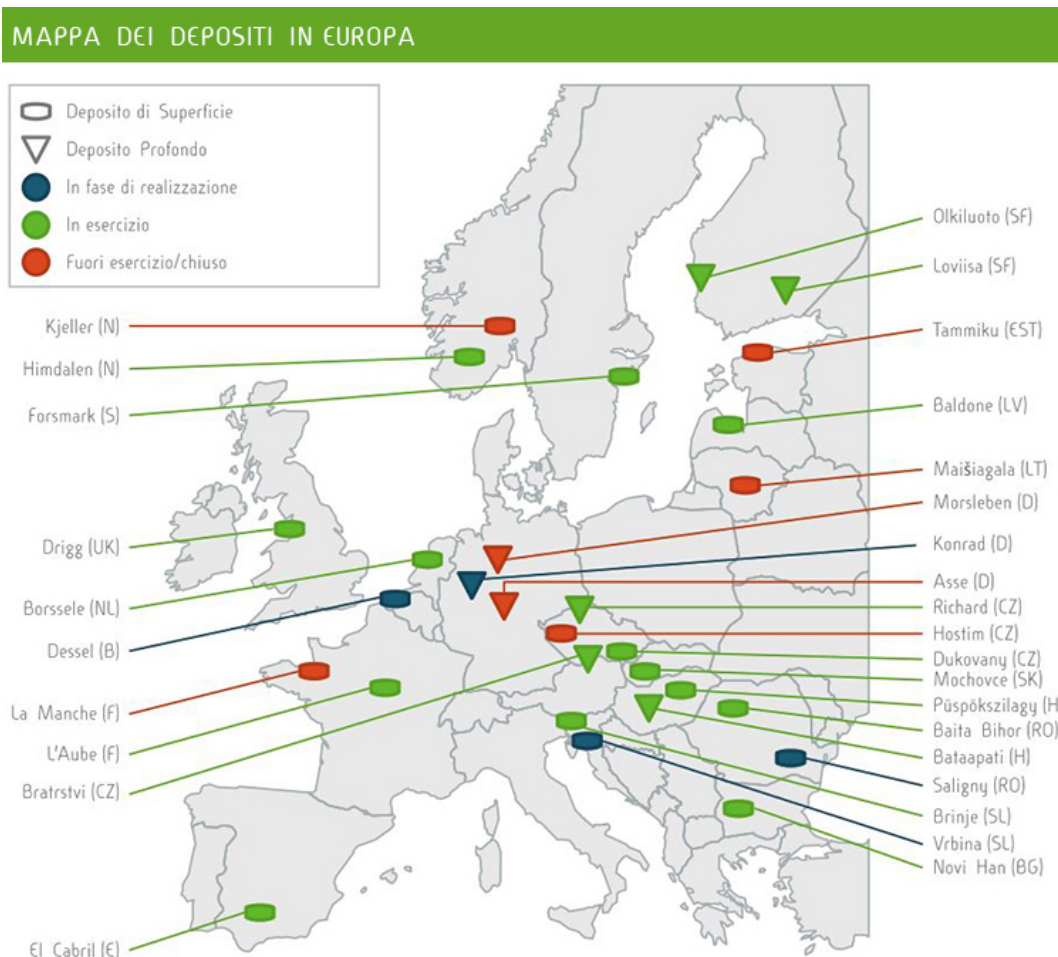


Figura 5: Mappa dei depositi Europei.

Il problema principale per la localizzazione di queste infrastrutture è l'accettabilità sociale ovvero la non disponibilità ad accettare il rischio (reale o percepito) connesso alla presenza dei rifiuti radioattivi. Tutti i Paesi hanno messo in piedi ampie forme di consultazione e partecipazione popolare, prevedendo ovviamente sistemi di garanzia e meccanismi di compensazione, ma ad oggi il sistema più complicato risulta essere quello italiano.

2. Seconda Parte: il Deposito

2.1. Deposito superficiale e deposito profondo

La differenza principale fra un deposito superficiale ed uno profondo risiede nella diversità delle barriere che vengono impiegate per isolare i materiali radioattivi dall'ambiente circostante.

Un deposito in strati geologici profondi è studiato per le formazioni geologiche stabili, nelle quali i processi e i cicli dei materiali sono estremamente lunghi (periodi che spaziano su intere ere geologiche, vale a dire su diversi milioni di anni). Questa particolare struttura nasce con l'obiettivo di sfruttare l'imperturbabilità delle barriere naturali e garantire la sicurezza del materiale stoccato per millenni. La struttura viene dotata di barriere ingegneristiche, ma, nel progetto, si tiene conto della possibile degradazione di queste ultime in un arco temporale di diversi ordini di grandezza inferiore a quello delle strutture naturali esistenti da milioni di anni, si fa quindi completo affidamento sulle barriere naturali. Queste barriere vengono sfruttate per la loro capacità di confinamento e ritenzione delle scorie radioattive. Esse hanno un funzionamento passivo, ossia non necessitano di sorveglianza o manutenzione. La sorveglianza è tuttavia necessaria nella fase di costruzione, nella fase di esercizio e nell'eventuale fase di osservazione dopo la chiusura del deposito.

È evidente che la localizzazione di un deposito di questo tipo è molto più stringente di quella di un deposito superficiale data la necessità di barriere naturali persistenti nel tempo.

Per la costruzione di un deposito profondo vengono scelte conformazioni rocciose ad alto tasso di contenimento, cioè aventi caratteristiche che ritardano notevolmente la migrazione dei nuclidi nel suolo circostante. Fino ad ora le conformazioni che sono state adottate per la costruzione rispecchianti le caratteristiche desiderate sono le miniere di sale (New Mexico) per i bassissimi livelli di umidità, le conformazioni granitiche (caratteristiche delle zone baltiche) e le zone argillose per la loro impermeabilità.

I Depositi superficiali, al contrario, fanno completo affidamento sulle barriere ingegneristiche, perché hanno il compito di restare operativi per un periodo progettuale di soli 300 anni. Nelle moderne strutture, le principali barriere ingegneristiche sono tre: la prima è il rifiuto condizionato (fusto), la seconda è il modulo di contenimento che contiene un certo numero di fusti e la terza è la cella che contiene un certo numero di moduli (*Figura 6*).



Figura 6: Organizzazione gerarchica delle strutture di contenimento.

La procedura di localizzazione mediante esclusione di aree non idonee, di fatto realizza una quarta barriera che è la scelta di un ambiente adeguato.

È da notare che in altri paesi la fiducia nelle barriere ingegneristiche è invece molto maggiore; ad esempio il deposito Belga è costruito in presenza di una falda acquifera e a poche centinaia di metri da un corso d'acqua.

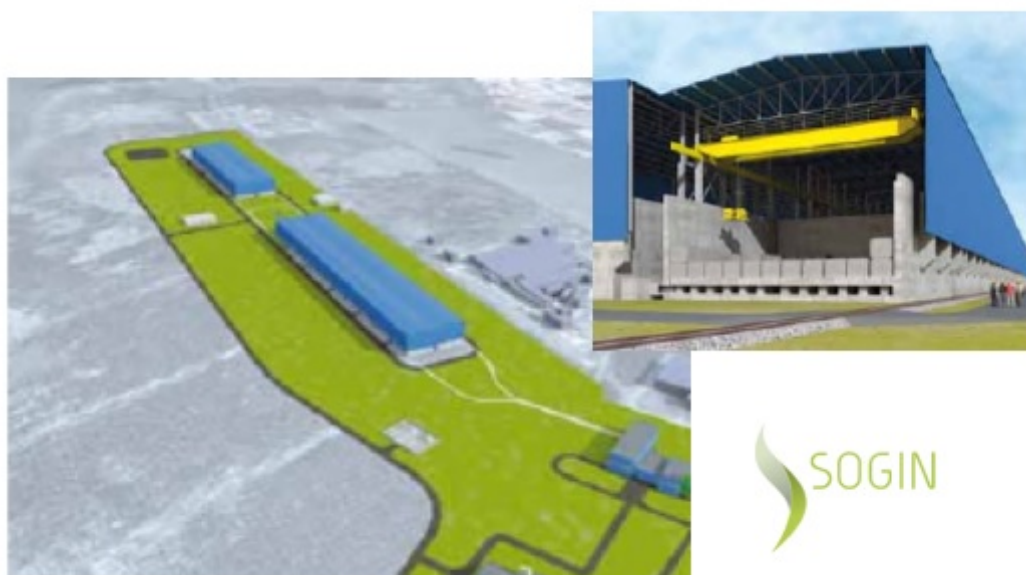


Figura 3: Dessel - Belgio, deposito nazionale [3].

Le due tipologie di deposito sono quindi molto differenti, ma dal punto di vista radioecologico le indagini che devono essere condotte sono molto simili. Questo è un aspetto rilevante perché la letteratura scientifica sui depositi geologici è molto più ricca e, fatte le debite proporzioni e aggiustamenti, può essere molto utile anche nel caso del deposito italiano.

2.2. Il ruolo dello stato zero

La costruzione di una nuova struttura, in generale, porta necessariamente ad un'alterazione da un punto di vista qualitativo e quantitativo dell'ambiente (considerato come insieme delle risorse naturali e delle attività umane ad esse collegate) con cui interagisce. È quindi importante analizzare puntualmente la situazione prima dell'impatto, ovvero la definizione dello stato zero (baseline) che si articola lungo diverse direttrici [6].

Lo **stato zero sanitario** in passato veniva associato solamente al tasso di mortalità legato a tumori o malattie direttamente collegabili ad un rilascio di dose alla popolazione, attualmente invece viene tenuto in considerazione anche il tasso di morbilità (prevalenza ed incidenza) dei casi di malattia dovuti a radiazioni ionizzanti. All'interno di questa categoria sono considerati anche i fattori che possono rappresentare un impatto sul benessere psico-sociale della popolazione (fattori di stress e di percezione di rischio).

Lo **stato zero socio-economico** comprende indicatori demografici, di benessere comunitario (educazione, reti di trasporto, servizi comunitari), di economia locale e di ambito lavorativo (descrizione delle attività locali, turismo, entrate, attività in via di sviluppo, utilizzo delle terre circostanti).

Lo **stato zero ambientale** comprende indicatori sulle risorse ambientali, aree ecologiche sensibili, sulla qualità dell'aria, sulle acque superficiali e profonde, sul paesaggio e sulla presenza di siti storici o archeologici. È di fondamentale importanza per questo ambito lo studio della geologia, dell'idrologia e dell'idrogeologia del sito.

Lo **stato zero radiologico** è la determinazione della radioattività presente prima dell'avvio delle attività connesse al deposito, quindi la radioattività naturale e quella antropogenica connessa ad eventuali attività nucleari pregresse e al fall-out delle esplosioni nucleari e dei principali incidenti nucleari.

In questo contesto le tecniche di radioecologia sono utili non solo per definire lo stato zero radiologico, ma anche per la caratterizzazione degli acquiferi e la determinazione della loro vulnerabilità. I radionuclidi cosmogenici come il radiocarbonio e il trizio vengono infatti utilizzati per la valutazione dei tempi di ricarica degli acquiferi e i traccianti isotopici naturali sono importanti per l'individuazione dei percorsi attraverso i quali avviene la ricarica, e sui quali si potrebbero incanalare i nuclidi di un'eventuale fuoriuscita.

L'analisi della situazione attuale, delle vulnerabilità e delle possibili alterazioni, fornisce le conoscenze di base su come organizzare la futura rete di monitoraggio, ovvero quali parametri tenere sotto controllo, come definire la maglia dei punti di misura e la frequenza temporale delle determinazioni.

2.3. Potenziali indici di rilascio e monitoraggio

Il programma di monitoraggio [7] deve evidenziare la presenza o la non misurabilità, al di fuori del sito di deposito, di radioattività attribuibile al deposito stesso e deve tenere in considerazione:

- informazioni riguardo all'ambiente intorno al sito. Questo dovrebbe includere i diversi tipi di utilizzo del territorio (includendo i dettagli sull'agricoltura), i bacini idrici presenti, i tempi di ricarica dei bacini, i siti di accrescimento e di erosione nei fiumi e negli estuari.
- informazioni derivanti da programmi di monitoraggio preesistenti e da programmi di monitoraggio di zone simili. In particolare si dovrebbero identificare le zone di accumulo dei radionuclidi e degli agenti chimici.

La definizione del programma di monitoraggio, sia spaziale sia temporale, deve essere basata sulle assunzioni, sui modelli e sulle risultanze dell'analisi di sicurezza. In particolare, le postazioni di misurazione devono essere collocate tenendo conto delle potenziali vie di rilascio e di migrazione nell'ambiente, mentre le frequenze di campionamento e misurazione delle diverse matrici ambientali devono essere definite con riferimento alla velocità con la quale i parametri di interesse possono cambiare. I campionamenti saranno effettuati sulle principali matrici ambientali (acque superficiali e sotterranee, aria, suolo) e su matrici biologiche che possono in qualche modo rappresentare un anello della catena alimentare o un sistema naturale di accumulo dei radionuclidi, quali le radici dei vegetali.

Il sistema di monitoraggio sarà quindi suddiviso strutturalmente in due sezioni:

- dispositivi o sistemi di campionamento e analisi in grado di rilevare l'emissione di radionuclidi e quindi l'aumento del livello di radioattività nell'ambiente (detection monitoring);
- un sistema in grado di definire precisamente la tipologia di emissione e tutti gli aspetti di dettaglio relativi alla contaminazione (assessment monitoring).

Il programma di rilievo dovrà poi tenere conto anche del tempo di decadimento dei radionuclidi bersaglio. Il monitoraggio ambientale svolge anche un'altra importante funzione, cioè permette di controllare la dinamica evolutiva che può coinvolgere le singole matrici ambientali, visto che queste sono soggette a mutamenti naturali o indotti dall'esterno. L'esempio più tipico riguarda il deflusso delle acque sotterranee, che non può essere considerato costante e immutabile ma che, al contrario, va considerato in evoluzione sia a breve termine, in funzione delle variazioni stagionali, sia a lungo termine, in funzione dei mutamenti climatici, della modifica dei corpi idrici superficiali, delle opere antropiche di sfruttamento delle acque, ecc. Poiché le acque di falda, rappresentano il principale sistema di trasporto di eventuali radionuclidi, è opportuno monitorarne la loro dinamica quali-quantitativa per

prevedere il trasporto delle specie chimiche veicolate a seguito di perdite dalle barriere ingegneristiche. Il programma di sorveglianza ed il programma di monitoraggio devono complessivamente possedere le seguenti caratteristiche:

- capacità di rivelare cambiamenti delle strutture ingegneristiche e dei sistemi del deposito che ne potrebbero influenzare le prestazioni di contenimento radiologico;
- capacità di rivelare i contaminanti radioattivi di interesse;
- procedure di campionamento in grado di tenere sotto controllo le possibili variazioni delle caratteristiche radioattive, fisiche e chimiche dei contaminanti che potrebbero essere rilasciati dal deposito;
- sufficiente numero di postazioni di misurazione in grado di rivelare ogni significativa migrazione di radionuclidi verso la falda freatica;
- sufficiente numero di postazioni di misurazione in grado di rivelare ogni significativo rilascio di radioattività all'atmosfera;
- sufficiente numero di postazioni di misurazione in grado di rivelare ogni significativo trasporto di radionuclidi nelle acque superficiali in prossimità del deposito;
- misurazione dei livelli di dose ambientale all'interno e all'esterno del deposito;
- controllo di diverse matrici ambientali rappresentative (vegetali, pesci, molluschi di acqua dolce, sedimenti, piante acquatiche, terreni, ecc.);
- procedure di riferimento documentate e tenute sotto controllo;
- conservazione e analisi statistica dei dati.

In particolare i radionuclidi di interesse possono comprendere prodotti di fissione, prodotti di attivazione, uranio e transuranici. È inoltre necessario includere nei programmi di sorveglianza e monitoraggio la verifica del rilascio di metalli pesanti e di materiali organici. Se possibile è opportuno utilizzare bioindicatori e bioaccumulatori (muschi, licheni, alcune specie di funghi e piante, specie di insetti come le api) per aumentare la sensibilità di rilevazione.

Le procedure di campionamento devono tener conto dei tempi attesi per l'eventuale migrazione dei diversi radionuclidi.

2.4. Monitoraggio della Zona Non Saturata

Il monitoraggio dettagliato della Zona Non Saturata [8] (ZNS) può garantire un'indicazione tempestiva e sicura circa l'eventuale deterioramento dell'integrità e della funzionalità delle barriere ingegneristiche. Anche in questo caso, come nel precedente, la caratterizzazione del suolo, o più in generale della ZNS, è fondamentale, ad esempio, per individuare la presenza di corpi argillosi o a bassa permeabilità in grado di creare falde sospese temporanee. Inoltre bisogna considerare che la migrazione dei contaminanti in un mezzo poroso non saturo dipende essenzialmente dalla loro concentrazione, dal contenuto di acqua, dalla pressione

delle fasi gassose nel mezzo poroso e dal flusso dell'acqua nel terreno. È quindi fondamentale caratterizzare questi parametri e la loro evoluzione nel tempo, sia durante la fase di caratterizzazione che di monitoraggio.

Il campionamento delle acque interstiziali della ZNS potrà avvenire mediante coppe porose o lisimetri, della dimensione e caratteristiche più opportune per adattarsi alle specificità del suolo. In questo caso occorre tenere presente che il campionamento prevede una parziale depressurizzazione dell'ambiente di raccolta del liquido con conseguenti riflessi sull'evaporazione e sulla perdita delle specie isotopiche più leggere. Da prevedere è anche il campionamento dei gas interstiziali nel suolo, che possono costituire uno dei primi elementi di allarme in caso di emissioni dal deposito. Il campionamento può avvenire mediante specifiche sonde in acciaio inserite a diversa profondità nel terreno, collegate a pompe di superficie per il prelievo del campione. In caso di ridotta permeabilità e della conseguente incapacità di prelevare campioni di gas interstiziali, si può ricorrere a sistemi passivi inseriti alla profondità voluta e raccolti dopo alcuni giorni; i materiali presenti al loro interno, tipicamente filtri a carbone attivo o con materiali per la cattura di specifiche fasi gassose, permettono l'assorbimento dei gas interstiziali che nel frattempo si sono diffusi al loro interno. I sistemi attualmente utilizzati nel campo della bonifica dei siti contaminati sono le sonde PETREX® e GORE-SORBER®.

È importante tenere conto dei parametri meteorologici nel sito del deposito perché temperatura, dinamica dei venti e precipitazioni determinano l'alternarsi di fenomeni di infiltrazione o evaporazione all'interno del suolo, quindi definiscono in modo indiretto la migrazione di eventuali radionuclidi al di fuori del deposito.

La possibilità di individuare nella ZNS la presenza di radionuclidi provenienti dal deposito e di poterli intercettare prima che questi giungano nella falda, rappresenta sicuramente un notevole vantaggio per impedire la propagazione di eventuali contaminazioni radioattive nell'ambiente. Il monitoraggio potrebbe anche comporsi di una prima periodica fase di screening su campioni di sedimento in posizione strategica, misurando i valori alfa, beta e gamma totali; i risultati, se positivi, potrebbero indurre analisi di approfondimento, guidando i tecnici nella ricerca dei nuclidi che possono rappresentare la sorgente della contaminazione.

Per quello che riguarda il monitoraggio dei terreni in generale è importante valutare la capacità di ritenzione di un determinato radionuclide da parte del terreno attraverso cui scorre dell'acqua contaminata, che è generalmente espressa in termini di K_d o *coefficiente di distribuzione*. In altri termini, il K_d fornisce un'indicazione della velocità con cui un radionuclide si muove in relazione al flusso dell'acqua nel sottosuolo. Questi coefficienti sono specifici per ogni elemento o composto e variano in funzione della tipologia del suolo (composizione, tessitura ecc.). Esistono diversi metodi per stimare i K_d , ma la cosa migliore è la determinazione sperimentale nei terreni del sito. Questa è un'attività da effettuare contestualmente allo stato zero

eventualmente utilizzando come traccianti degli elementi con comportamento chimico analogo a quelli dei radionuclidi di interesse.

2.5. Monitoraggio delle acque sotterranee

Le acque sotterranee rappresentano la più importante via di migrazione dei radionuclidi fuoriusciti da un deposito di rifiuti radioattivi. I sistemi attraverso cui i diversi elementi possono raggiungere le acque sotterranee sono relativi alla diffusione delle fasi liquide e gassose attraverso le barriere ingegneristiche o alla lisciviazione provocata da eventuali infiltrazioni di acqua nei locali del deposito, che asportano i radionuclidi veicolandoli poi verso l'ambiente esterno.

Poiché un sistema idrogeologico è un'entità in evoluzione (il deflusso della falda può infatti subire variazioni nel tempo e di questo si dovrà tenere conto nell'attività di monitoraggio), la sua caratterizzazione è fondamentale per costruire il modello concettuale e definire con chiarezza gli aspetti quali-quantitativi della dinamica idrica nel sottosuolo, principale elemento che influenza la migrazione dei radionuclidi eventualmente immessi nell'ambiente. La conoscenza del sistema idrogeologico è la base del corretto monitoraggio delle acque sotterranee, che deve essere gestito in funzione degli acquiferi identificati nella fase di caratterizzazione. Si può sostenere che il monitoraggio dovrà essere di tipo:

- qualitativo, sulla dinamica delle acque sotterranee e sulla tipologia degli eventuali radionuclidi presenti;
- quantitativo, sull'entità dei radionuclidi che sono fuoriusciti dal deposito, nonché sull'entità delle eventuali variazioni nella dinamica idrica sotterranea che può indurre variazioni nel trasporto dei contaminanti.

Il contesto geologico di un'area prevede sempre l'esistenza, a scala locale o regionale, di diversi acquiferi, separati o talvolta intercomunicanti, che possono essere interessati dal rilascio di radionuclidi dal deposito. La rete di monitoraggio idrogeologica, dovrà riguardare i singoli acquiferi, ma anche eventuali compartimenti all'interno degli acquiferi stessi (ad esempio intercalazioni di materiali fini all'interno di sedimenti a granulometria più grossolana) in cui potrebbero depositarsi eventuali inquinanti. Allo stesso modo il monitoraggio dovrà essere effettuato a diverse profondità all'interno di ogni singolo acquifero, per tenere conto della distribuzione degli inquinanti in funzione della loro densità. In tal caso sarà preferibile ricorrere a punti di prelievo separati, ognuno per la specifica profondità; una strategia simile vale anche per la separazione dei pozzi di prelievo dagli eventuali piezometri per il monitoraggio del livello di falda. Questi ultimi dovrebbero essere dotati di un sistema automatico di rilievo, gestione e trattamento dei dati, per la successiva trasmissione, memorizzazione ed elaborazione. L'ubicazione dei pozzi e piezometri dovrà esser valutata in funzione del campo di moto della falda; di sicuro dovranno almeno essere

intercettate le acque prima e dopo il passaggio in prossimità del sito. Il numero dei punti di campionamento e misura dovrà essere scelto in funzione di vari fattori, primi tra tutti le caratteristiche di omogeneità dei materiali geologici e di complessità di quelle idrogeologiche. I campionamenti dovranno essere effettuati in rapporto al tempo di ricarica del bacino e al tempo di dimezzamento dei radionuclidi fuoriusciti. Occorre tener conto, ad esempio, che il prelievo di un campione d'acqua può non essere rappresentativo del reale sistema chimico-fisico del sottosuolo, soprattutto se consideriamo la capacità dei minerali argillosi di catturare particolari radionuclidi.

La determinazione del rapporto isotopico di particolari traccianti naturali, quali ^{18}O e ^2H (deuterio), è fondamentale per determinare la dinamica del contesto idrogeologico in cui verrà inserito il sito e quindi verrà svolta sicuramente nell'ambito della caratterizzazione. La prosecuzione di questa tipologia di analisi dovrà invece essere decisa sulla base di particolari esigenze o nel caso se ne individuasse la necessità. Lo stesso discorso è valido per il campionamento dei gas disciolti, che possono fornire utili indicazioni sul contesto geochimico delle acque sotterranee e sui potenziali redox, che potrebbe influenzare la stabilità e la durabilità dei materiali costituenti le barriere ingegneristiche.

Un ultimo aspetto da sottolineare nell'ambito del monitoraggio delle acque sotterranee riguarda l'eventuale rilevazione di radionuclidi che possono non derivare dal deposito, visto che le acque di falda sono i corpi idrici recettori di una buona parte degli effluenti di superficie. Varie attività industriali e agricole possono riversare radionuclidi nell'ambiente e in particolare in falda, sebbene in quantità ridotte; si pensi ad esempio all'ampio utilizzo di concimi chimici in tutte le pratiche agricole. Il monitoraggio dovrà quindi tenere conto anche di questi aspetti, distinguendo la provenienza degli eventuali radionuclidi indesiderati.

2.6. Monitoraggio delle acque superficiali

I corpi idrici superficiali possono rappresentare uno dei principali mezzi di trasporto dei radionuclidi, sia mediante trasporto diretto verso la popolazione, sia mediante trasporto indiretto verso altre matrici ambientali. Spesso le acque superficiali sono in stretto e diretto contatto con le falde freatiche, con le quali avvengono scambi di massa ed energia. Nella fase di caratterizzazione è quindi fondamentale individuare questi rapporti, sia dal punto di vista qualitativo che quantitativo. La programmazione del monitoraggio dovrà tenere conto del regime idrologico, per poter ottenere un quadro rappresentativo ed esaustivo dei diversi contesti stagionali. In caso di corsi d'acqua prossimi al mare, il campionamento dovrà anche tenere conto della dinamica delle maree e quindi dei rapporti tra i due sistemi idrici. La possibilità di campionare le sorgenti prossime ai corpi d'acqua superficiali offrirebbe un notevole vantaggio, visto che i campioni rappresenterebbero un aspetto importante dell'interazione tra le

acque superficiali e sotterranee. Risulta anche opportuno verificare l'eventuale presenza di radionuclidi nei sedimenti presenti nel corso d'acqua, sia di fondo che in sospensione, dato che la presenza di minerali argillosi può favorire la loro cattura e concentrazione.

2.7. Monitoraggio dei contaminanti rilasciati all'atmosfera

La degradazione delle sostanze organiche presenti nei rifiuti radioattivi può produrre anidride carbonica e metano che possono contenere radiocarbonio e possono rappresentare un rischio radiologico. Il ^{14}C ha un alto tasso di produzione nei reattori nucleari, ha una lunga emivita (5730 anni) ed elevata mobilità nell'ambiente. Il ^{14}C prodotto nei reattori si trova nel combustibile nucleare esaurito, nei materiali strutturali o nei moderatore di grafite, nonché nel refrigerante dei reattori stessi. Un'importante quantità di ^{14}C prodotta nelle centrali nucleari viene catturata dalle resine a scambio ionico, che vengono normalmente conferite in depositi superficiali per la bassa radioattività e costituiscono la fonte principale di generazione di emissioni gassose radioattive; in alcuni casi l'inventario di questo nuclide è il fattore limitante per il soddisfacimento dei requisiti normativi.

Per quello che riguarda i rifiuti di alta attività nei depositi geologici i meccanismi sono differenziati, ma in ogni caso i prodotti sono comunque l'anidride carbonica ed il metano. Anche nel caso dei depositi di alta attività il radiocarbonio è l'unico nuclide i cui rilasci gassosi possono avere importanza anche dal punto di vista radioprotezionistico in condizioni di esercizio normale. È quindi importante il monitoraggio del radiocarbonio gassoso nei depositi di rifiuti. La tecnica di raccolta può essere quella classica usata per il monitoraggio degli impianti nucleari che consiste nel far precipitare la CO_2 sotto forma di carbonato mediante gorgogliamento in soluzione basica, mentre per il metano è necessaria una fase di ossidazione in forni catalitici prima della precipitazione come carbonato. I campioni così raccolti sotto forma di carbonato vengono portati in laboratorio per essere trasformati di nuovo in CO_2 mediante attacco acido e quindi procedere alla determinazione dell'attività. Le tecniche di conteggio sono varie ed esistono in letteratura esempi di utilizzo di tutte le tecniche di determinazione di radiocarbonio, ovvero la tecnica gas proportional, quella in scintillazione liquida con le due varianti di conversione in benzene e di assorbimento diretto, fino all'utilizzo della spettrometria di massa con acceleratore.

Questa varietà di approcci è semplicemente dovuta al fatto che il monitoraggio di questo tipo negli impianti nucleari, finora, è stato effettuato perlomeno nel corso di campagne estemporanee, quindi le misure sono state affidate ai laboratori di radiocarbonio esistenti, che hanno utilizzato le stesse tecniche usate per la radio datazione. Nel momento in cui si intende invece procedere a monitoraggi continui

nell'arco di anni, decenni o più, le tecniche di misura più adatte appaiono quelle più semplici, come la scintillazione liquida con assorbimento diretto oppure addirittura la vecchia tecnica *gas proportional*. Probabilmente, però, la tecnica migliore per questo tipo di monitoraggio è la spettrometria laser nella variante “*enhanced cavity ring down*”. Attualmente, però, questa nuova metodologia è disponibile solo in fase prototipale. Per quello che riguarda il trizio occorre tenere conto che questo nuclide è presente nei depositi prevalentemente sotto forma di acqua triziata assorbita in diverse matrici, quindi occorre monitorare eventuali fuoriuscite gassose di vapore di acqua. Tuttavia, vista la possibile presenza di rifiuti di origine biologico-ospedaliera e vista la complessità dei processi di corrosione e degradazione, conviene, per il monitoraggio, prevedere la possibilità di campionamento delle diverse forme gassose possibili per questo nuclide, cioè HTO, HT e CnTHm. Il campionamento dei vapori d'acqua può avvenire mediante sistemi di assorbimento tipo silica gel e successiva estrazione dell'acqua assorbita e conteggio mediante scintillazione liquida (LSC). La discriminazione dalle acque di origine meteorica è un problema non banale, per il quale non sono sufficienti i necessari accorgimenti meccanici di protezione del sistema di campionamento dalle piogge. È infatti opportuno procedere parallelamente al campionamento della deposizione meteorica e all'analisi del suo contenuto di trizio. Su entrambe le tipologie di campioni vanno valutati i rapporti isotopici degli isotopi stabili dell'ossigeno e dell'idrogeno, per cercare di identificare l'origine del campione di vapore assorbito. Sostanzialmente occorre evitare di interpretare come fuoriuscite di trizio quelle che sono invece normali fluttuazioni del trizio cosmogenico presente nelle piogge.

2.8. Monitoraggio di altre matrici ambientali

Occorre definire un apposito programma di prelievo e misurazione delle matrici ambientali ritenute maggiormente significative da due punti di vista.

Il primo riguarda la valutazione delle dosi al gruppo critico per quello che riguarda le emissioni “normali” e soprattutto nel caso si verificassero eventi di rilasci importanti nell'ambito di scenari, quali intrusioni nel deposito o altri eventi di questa natura. Quindi devono essere oggetto di monitoraggio le produzioni agro-alimentari entro un opportuno raggio per essere in grado di valutare le conseguenze sulla catena alimentare di queste tipologie di rilasci. È importante in questo contesto la determinazione di diversi parametri radioecologici, come ad esempio l'entità del trasferimento suolo-pianta in funzione dei diversi nuclidi.

Il secondo punto di vista è quello di individuare delle matrici ambientali [9] in base alla loro capacità di accumulo selettivo della radioattività, quali per esempio vegetali, prodotti alimentari locali, pesci, piante acquatiche, molluschi di acqua dolce, acqua,

sedimenti, ma anche e soprattutto bioindicatori e/o bioaccumulatori. Lo scopo in questo caso è, invece, quello di affiancare alla rete strumentale una rete di rilevazione nella quale i nuclidi possono essere individuati con maggiore sensibilità grazie ai meccanismi biologici naturali.

Conclusioni

La normativa di radioprotezione italiana è estremamente stringente: siamo l'unico Paese che ha adottato il criterio di non rilevanza radiologica per autorizzare l'esercizio degli impianti nucleari. Sono sufficienti rilasci dello stesso ordine di grandezza dei nuclidi già presenti normalmente nell'ambiente per superare questo limite. È quindi molto importante caratterizzare puntualmente lo stato zero preesistente alla costruzione del deposito, per evitare che situazioni di accumulo naturale di nuclidi possono essere scambiate per rilasci accidentali. Ad esempio è noto che nei terreni ad elevato tasso di erosione si osserva un impoverimento della presenza del ^{137}Cs proveniente dall'incidente di Chernobyl, mentre si verifica un aumento di questa stessa concentrazione nelle zone di accumulo del terreno eroso.

Per evitare di confondere eventi estranei al deposito con rilasci, causando quindi allarmi ingiustificati, sono fondamentali una caratterizzazione ambientale molto approfondita e delle misure preliminari altrettanto approfondite nelle diverse matrici ambientali. Particolare attenzione va espressa nei confronti del sistema degli acquiferi.

Bibliografia

1. G.d.L. Governo-Conferenza Stato Regioni. Rapporto Finale . dicembre 2001
2. Guida Tecnica 29 ISPRA (Criteri per la localizzazione di un impianto di smaltimento superficiale di rifiuti radioattivi a bassa e media attività), giugno 2014
3. [Programma Nazionale per la gestione del combustibile esaurito e dei rifiuti radioattivi, Documenti procedura di Valutazione Ambientale Strategica avviata in data 18/03/2016](http://www.va.minambiente.it/it-IT/Oggetti/Documentazione/1610/2701)<http://www.va.minambiente.it/it-IT/Oggetti/Documentazione/1610/2701>
4. IAEA Safety Standards GSG-1, Classification of Radioactive Waste, 2009
5. IAEA Safety Series n.89, Principles for the Exemption of Radiation Sources and Practices from Regulatory Control, 1988
6. Elisabeth Leclerc, P. L. (2012). *Guidelines for geological radioactive waste disposal environmental zero-state and subsequent monitoring definition.*
7. UNI 11279-3 Deposito ingegneristico per manufatti di rifiuti radioattivi di Categoria 2 Parte 3: Criteri base di sorveglianza e monitoraggio - Luglio 2008
8. ENEA NNFISS-LP4-019 P. Bartolomei, et Al. (2011) - *Approccio metodologico al monitoraggio dei depositi di rifiuti radioattivi.*
9. ENEA NNFISS-LP4-031, A. Rizzo et Al (2011) *L'utilizzo degli analoghi naturali a supporto della modellazione del trasporto dei radionuclidi nell'ambiente e della "performance assessment" del deposito.*