Rifiuti radioattivi: parliamone, senza pregiudizi nè guerre di religione

Safety: proteggere le persone dal radwaste.
Security: proteggere il radwaste dalle persone.
Safeguards: prevenire la proliferazione di armi nucleari

Paolo Finocchiaro *Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Laboratori Nazionali del Sud, Catania, Italy*

Quando in Italia si parla di rifiuti radioattivi emergono tante paure e pregiudizi, quasi sempre per insufficiente conoscenza di concetti di base e di informazioni puntuali, a volte purtroppo anche per malafede. Molto spesso le argomentazioni scientifiche sono ignorate o vengono travisate, sull'onda di paure mai sopite e puntualmente evocate dalla parola "nucleare". In questo contributo proverò ad esporre una serie di concetti che spero possano essere utili ai meno esperti per chiarire alcuni capisaldi, indispensabili per la comprensione della problematica legata all'esistenza, produzione, gestione e smaltimento dei rifiuti radioattivi, che con un anglicismo divenuto di uso comune vengono spesso denominati come *radwaste*. In alcuni casi, per amor di chiarezza sarò costretto a ricorrere a delle semplificazioni, sacrificando un po' il rigore all'efficacia della comunicazione. Mostrerò infine alcuni recenti sviluppi della ricerca sui sistemi di monitoraggio radiologico di tali rifiuti, condotti nell'ambito di progetti europei e volti alla modernizzazione delle tecnologie ed all'informatizzazione dei processi.

Nuclei atomici

Per poter affrontare il tema oggetto di questo articolo è necessario chiarire alcuni concetti e definizioni ad esso propedeutici legati alla radioattività. Il nucleo atomico è costituito da protoni e neutroni legati assieme da una forza attrattiva

detta interazione nucleare forte [1]. I protoni sono dotati di carica elettrica positiva, i neutroni, come dice la parola stessa, sono elettricamente neutri. La forza nucleare forte a breve distanza supera in intensità la forza elettrica (detta di Coulomb o coulombiana) che tra cariche dello stesso segno è repulsiva e che tenderebbe a disgregare il nucleo a causa della repulsione tra i protoni. Il nucleo è quindi dotato di carica elettrica positiva e naturalmente attira attorno a sè un numero di elettroni pari al numero di protoni, e come conseguenza l'atomo nel suo complesso risulta neutro. Difatti la carica elettrica dell'elettrone è negativa, uguale ed opposta a quella del protone.

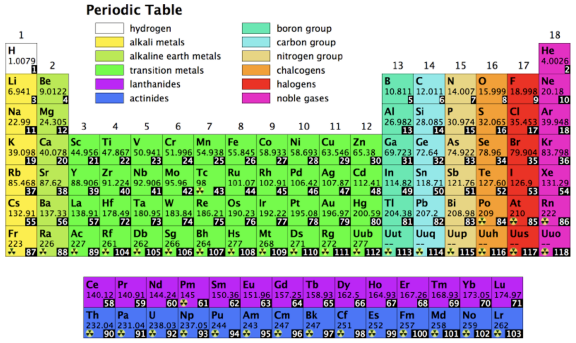


Figura 1: Tavola periodica degli elementi

Per ragioni nelle quali non mi addentro, gli elettroni si dispongono a notevole distanza dal nucleo, basti pensare al caso dell'idrogeno, l'elemento più semplice in natura costituito semplicemente da un protone ed un elettrone. In tale caso il protone ha un raggio di circa 1×10^{-15} metri (0.000000000000001) mentre l'elettrone si dispone in una regione a distanza di 0.5×10^{-10} metri. Sebbene si tratti di numeri piccolissimi vale la pena di osservare che tale distanza è $\approx$ 45000 volte il raggio del protone, come dire che se il protone fosse un pallone da calcio l'elettrone si troverebbe ad oltre 5 km.

Esistono in natura molte specie nucleari, che vengono catalogate tramite due numeri:

- Z, il numero di protoni che determina le proprietà chimiche;
- A, il numero di nucleoni, cioè il totale di neutroni più protoni detto anche numero di massa;

[1] Esiste un'altra forza nucleare, detta debole perché molto meno intensa di quella forte e responsabile del decadimento radioattivo β.

e si usa scrivere ${}^{A}_{Z}X$ dove X è il simbolo della specie chimica (ridondante, in quanto essa è già determinata dal numero Z). Ad esempio, ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$ indica il nucleo di elio, che ha quattro nucleoni e cioè due protoni e due neutroni, mentre ${}^{238}_{92}\mathrm{U}$ indica un nucleo dell'uranio con 238 nucleoni di cui 92 sono protoni. Spesso il numero Z viene omesso, in quanto corrispondente al simbolo dell'elemento chimico. Ad esempio si trova scritto ${}^{16}\mathrm{O}$ dove il numero 8 dello Z viene omesso in quanto $Z = 8$ implica univocamente l'ossigeno.

Sulla terra, in natura, esistono 92 specie chimiche (elementi), cioè con Z che va da 1 (idrogeno) a 92 (uranio) e che sono notoriamente riportate sulla tavola degli elementi (Figura 1). Ciascuna combinazione dei numeri A e Z determina una diversa specie nucleare, ma non tutte le combinazioni sono fisicamente possibili. A parità di Z ciascuno dei 92 elementi chimici può presentarsi con differente numero di neutroni, e quindi numero di massa. In tal caso si parla di isotopi. L'idrogeno, ad esempio, ha due isotopi: il deuterio ${}^{2}_{1}\mathrm{H}$ ed il trizio ${}^{3}_{1}\mathrm{H}$, che vengono anche denominati D e T con un loro simbolo specifico. Così non è per tutti gli altri isotopi per i quali si utilizza la notazione poc'anzi descritta.



Figura 2: Oggetti in una scatola, che si possono riarrangiare in una configurazione più conveniente.

Radioattività

Le specie nucleari note sono circa 1700, delle quali circa 300 sono stabili mentre le rimanenti 1400 sono radioattive. Ma cosa significa stabili o radioattive? Per chiarire questo importante con-

cetto ricorriamo ad un esempio metaforico. Immaginiamo di aver riposto degli oggetti in una scatola (Figura 2) in una certa configurazione, e poi trovare che disponendoli diversamente si ottiene una configurazione più conveniente. Bene, questo è quel che accade con i nuclei atomici, per i quali la convenienza di una configurazione dipende dall'energia. In natura tutti i sistemi tendono all'equilibrio in configurazioni di minima energia (e non sempre ci riescono).

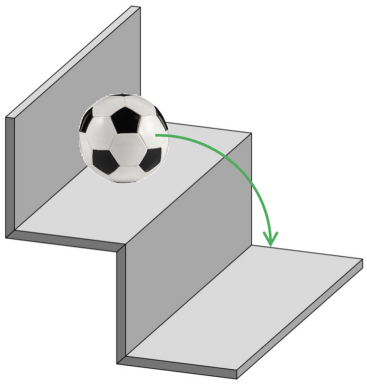


Figura 3: Una palla su uno scalino può trovare una configurazione più conveniente sullo scalino inferiore.

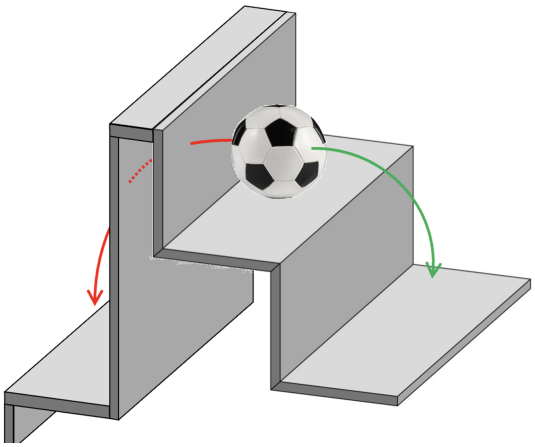


Figura 4: Esempio di una configurazione più conveniente ma non raggiungibile (freccia in rosso) per l'esistenza di una barriera. Nel mondo microscopico tali transizioni, in certe condizioni, sono possibili.

Come valutare la maggiore o minore convenienza energetica di una configurazione? Basta esaminare la massa. La celebre relazione massa-energia di Einstein, $E = mc^2$, permette di calcolare l'energia totale di un nucleo conoscendone la massa e moltiplicandola per il quadrato della velocità della luce c (3×10^8 m/s). Tale uguaglianza ci permette di esprimere la massa sia in chilogrammi che in unità di energia. In fisica nucleare risulta assai più comoda la seconda, e quindi la massa delle particelle viene usualmente espressa in MeV (mega-elettron-volt). Il numero di massa A, moltiplicato per la massa di un protone (938.3 MeV) o di un neutrone (939.6 MeV), fornisce la massa di un nucleo con una discreta approssimazione. Non entro nel dettaglio di come misurare sperimentalmente la massa dei nuclei, ma qui basti sapere che la massa di un nucleo è minore della somma delle masse dei suoi costituenti liberi. La differenza tra la massa dei costituenti e quella del nucleo legato è detta difetto di massa e rappresenta la cosiddetta energia di legame. Quindi la configurazione del nucleo legato è più conveniente rispetto a quella di tutti i suoi costituenti liberi, in virtù di una energia totale inferiore.

Una palla lasciata su uno scalino è in configurazione di equilibrio, ma una perturbazione dell'equilibrio può far sì che la palla trovi una configurazione più conveniente sullo scalino inferiore (Figura 3). In molti casi una configurazione più conveniente esiste ma non è raggiungibile, come si vede in Figura 4. Alle dimensioni microscopiche, regolate dalla meccanica quantistica, però accade qualcosa di molto particolare: configurazioni apparentemente non raggiungibili possono essere ugualmente raggiunte tramite un effetto noto come effetto tunnel. È come se la palla di Figura 4 passasse attraverso un tunnel nella barriera che la separa dal gradino di sinistra e lo raggiungesse. Per oggetti macroscopici la probabilità di un tale evento è incredibilmente bassa (a tutti gli effetti pratici zero), mentre alle dimensioni dei nuclei ciò può accadere ma in funzione dell'altezza e dello spessore della barriera.

I nuclei atomici stabili si trovano nella configurazione più conveniente alla luce di barriere troppo ardue da superare. I nuclei instabili, di contro, sono in configurazioni tali che la barriera da superare per andare a una configurazione più conveniente non è proibitiva. Tale transizione è detta decadimento, e a differenza del caso della palla per essa non è necessaria alcuna perturbazione esterna: i nuclei instabili decadono spontaneamente per pure ragioni statistiche.

La stabilità di una configurazione dipende dalla consistenza della barriera, e di conseguenza

più una configurazione è instabile e più il suo decadimento statistico sarà probabile. Dunque,

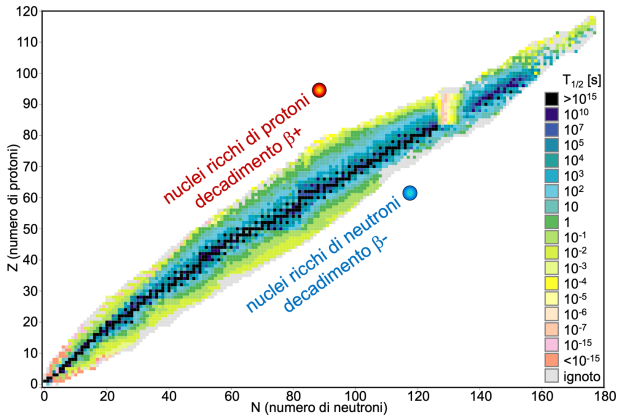


Figura 5: Tempo di dimezzamento (in secondi) in funzione del numero di protoni e del numero di neutroni, per tutte le specie nucleari note. In nero le specie stabili.

data una popolazione di nuclei instabili, la frequenza di decadimento (cioè il numero medio di decadimenti nell'unità di tempo) sarà grande. L'inverso di tale frequenza è il tempo medio per un decadimento, denominato **vita media**. Dalla vita media è facile calcolare (ma non lo faremo qui) il tempo di dimezzamento, che è il tempo necessario perchè data una popolazione di una specie instabile ne decada la metà. Tale tempo non dipende dal numero di nuclei presenti ma è una costante della specie nucleare in questione. Il grafico di Figura 5 riporta il tempo di dimezzamento (in secondi) in funzione del numero di protoni e del numero di neutroni per tutte le specie nucleari note. Le caselle nere rappresentano nuclei stabili o con tempi di dimezzamento superiori a 10^{15} secondi (circa 31.7 milioni di anni).

Ma cosa accade quando un nucleo instabile decade? Il nucleo instabile si dispone in una configurazione energeticamente più conveniente (maggior stabilità) liberandosi al contempo di una piccola parte della sua energia. Come? Emettendo particelle e/o radiazione elettromagnetica.

Ma esaminiamo più in dettaglio queste emissioni che conseguono ad una ottimizzazione della configurazione energetica dei nuclei (Figura 6). I nuclei, in particolare quelli molto massicci (A $\geq$180), possono emettere una **particella alfa**, che altro non è che un nucleo di elio ($^4_2$He), che porta via quattro nucleoni (due protoni e

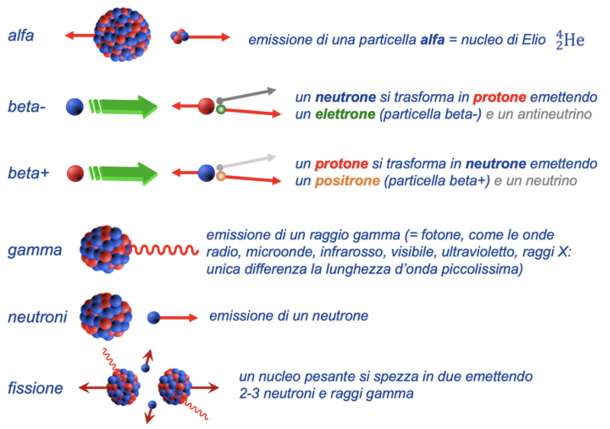


Figura 6: Le principali tipologie di decadimento radioattivo.

due neutroni) ed una quantità di energia cinetica (cioè energia di movimento). Parte della massa del sistema si trasforma dunque in energia cinetica, e la somma delle masse del nucleo residuo e della particella alfa è inferiore a quella del nucleo iniziale, cosa che rende la configurazione finale energeticamente più conveniente.

Un altro decadimento è il cosiddetto **beta**, che può essere di tipo negativo o positivo. Nel primo caso, β^- , per raggiungere una configurazione di maggior stabilità il nucleo trasforma un suo neutrone in un protone tramite l'emissione di un elettrone (e di un antineutrino, del quale non tratterò in quanto ininfluente per questa trattazione). Nel caso del decadimento β^+ si ha invece la trasformazione di un protone del nucleo in un neutrone, con l'emissione di un positrone (che è l'antiparticella dell'elettrone, cioè un elettrone con carica positiva) e di un neutrino.

Il decadimento gamma consiste nell'emissione di un pacchetto di radiazione elettromagnetica, in tutto e per tutto simile alle microonde, alla luce visibile o ai raggi X, ma di frequenza, e quindi di energia, molto più elevata. Si noti che l'energia di un pacchetto di radiazione elettromagnetica è proporzionale alla sua frequenza, ed è data da $E = h\nu$, dove h è la costante di Planck (6.626×10^{34} J·s) e ν è la frequenza della radiazione. Il pacchetto, pur essendo un'onda, è allo stesso tempo anche una particella che viene denominata **fotone** (la dualità onda-particella, mistero affascinante della meccanica quantistica!)

Il decadimento per **emissione di neutroni** è in verità molto raro, ma nel caso del decadimento per fissione, che consiste nella divisione di un

nucleo tipicamente molto pesante in due grossi frammenti, in genere vengono anche emessi due o tre neutroni.

Tutti i tipi di decadimento radioattivo avvengono generalmente in sequenza. Ad esempio, un nucleo può andare incontro a un decadimento alfa, seguito da un decadimento beta, poi da un gamma, e da un altro alfa, e così via fino a raggiungere uno stato finale stabile, dando luogo a delle cosiddette catene di decadimento.

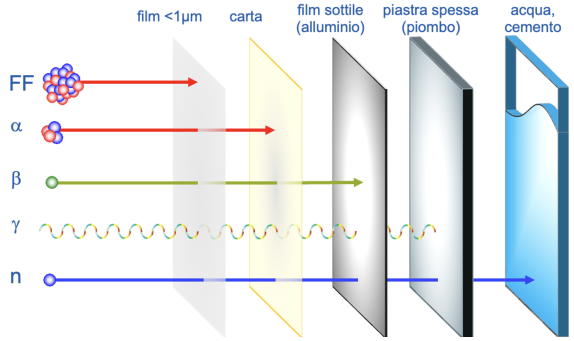


Figura 7: Esempio qualitativo della penetrazione delle varie tipologie di radiazione nella materia.

Essendo dotati di notevole energia cinetica i prodotti del decadimento radioattivo sono penetranti, ma non tutti alla stessa maniera. La capacità della radiazione di penetrare nella materia dipende principalmente dalla carica elettrica, e poi dall'energia cinetica e dalla massa. Senza addentrarci in dettagli sul frenamento della radiazione nella materia si può però fare riferimento qualitativo alla Figura 7.

I frammenti di fissione, pur essendo prodotti con grande energia cinetica, si arrestano facilmente in spessori di materia dell'ordine di 1 μm a causa della loro notevole carica e massa. La radiazione alfa si arresta facilmente nello spessore di un foglio di carta, e in genere non riesce ad attraversare lo strato esterno della pelle umana. Per arrestare la radiazione beta basta un normale foglio di alluminio da cucina. Ben diverso è il caso della radiazione gamma e dei neutroni che, essendo neutri, non risentono del frenamento elettrico (coulombiano) da parte della moltitudine di elettroni presenti nella materia e sono pertanto molto penetranti. Per arrestare la radiazione gamma occorrono dunque spessori consistenti di materiali pesanti come il piombo, mentre per i neutroni sono più efficaci spessori di acqua e/o cemento. La misura degli spessori da adottare per arrestare gamma e neutroni dipende dalla loro energia, e quindi per valutare la sicurezza di eventuali schermature è necessario conoscere più in dettaglio le energie in gioco caso per caso.

A queste bisogna aggiungere la cosiddetta radiazione cosmica, che consiste principalmente di protoni, nuclei di elio, ed elettroni, di altissima energia provenienti dallo spazio, che collidendo con i nuclei dell'atmosfera producono sciami di particelle elementari secondarie. Tali prodotti sono principalmente muoni (il muone è un gemello dell'elettrone con massa circa 200 volte maggiore), che risultano essere estremamente penetranti in quanto in grado di oltrepassare anche diversi chilometri di roccia.

Gli isotopi instabili

A questo punto la domanda che sorge spontanea è: dove, e come, vengono prodotti gli isotopi radioattivi (detti anche radioisotopi)? Per rispondere alla domanda è bene puntualizzare che vari isotopi radioattivi sono naturalmente presenti sul nostro pianeta, e sono denominati **NORM** (*Normally Occurring Radioactive Material*). I NORM appartengono principalmente a due categorie:

- quelli risalenti alla formazione del sistema solare e dotati di vita media molto lunga, una cui frazione residua è ancora presente, inclusi gli eventuali prodotti delle relative catene di decadimento;

- quelli che vengono prodotti continuamente da reazioni nucleari nell'interazione della radiazione cosmica con la materia, in particolare negli strati alti dell'atmosfera.

Tra i numerosi nuclei della prima categoria citiamo a titolo di esempio un paio di isotopi dell'uranio, ^{238}U e ^{235}U, uno del torio , ^{232}Th, e uno del potassio, ^{40}K, che hanno tempi di dimezzamento rispettivamente di 4.47, 0.70, 14.1 e 1.25 miliardi di anni.

Alla seconda categoria di nuclei radioattivi appartengono un isotopo del carbonio, ^{14}C ben noto perchè utilizzato per la datazione di reperti organici, uno dell'idrogeno, ^{3}H (trizio), ed uno del

berillio, ^{7}Be, con tempi di dimezzamento rispettivamente di 5730 anni, 12.3 anni e 53.28 giorni.

Isotopo	Simbolo	$T_{1/2}$	Produz.
Trizio	^{3}H	12.3 a	A, R
Iodio 131	^{131}I	8.04 g	A, R
Iodio 129	^{129}I	1.57×10^{7} a	A, R
Cesio 137	^{137}Cs	30.17 a	A,R,M,I
Cobalto 60	^{60}Co	1925.28 g	A,R,M,I
Stronzio 90	^{90}Sr	28.78 a	A, R
Iridio 192	^{192}Ir	73.83 g	I
Selenio 75	^{75}Se	119.78 g	I
Fluoro 18	^{18}F	109.77 m	M
Tecnezio 99	^{99}Tc	2.11×10^{5} a	M
Plutonio 239	^{239}Pu	2.41×10^{4} a	R

Figura 8: Principali radioisotopi prodotti da attività umane. Legenda: a=anni, g=giorni, m=minuti; A=armi, R=reattori a fissione, M=medicina, I=industria.

Molti altri radioisotopi sono (stati) invece prodotti da attività umane per scopi industriali, di ricerca scientifica, di diagnostica e terapia medica, come sottoprodotto della produzione di energia nei reattori nucleari a fissione, e purtroppo anche a seguito di produzione e test di armi nucleari. Alcuni hanno tempo di dimezzamento molto breve e scompaiono rapidamente, altri con grandi tempi di dimezzamento possono persistere nell'ambiente anche molto a lungo, in qualche caso per decine o centinaia di migliaia di anni. Nella tabella mostrata in Fig. 8 sono riportati i principali radioisotopi prodotti da attività dell'uomo.

Le radiazioni di cui abbiamo sin qui discusso sono dette ionizzanti, e cioè che nell'attraversare la materia possono liberare elettroni in essa inizialmente legati creando così degli **ioni** (atomi non più neutri). Se la materia in questione è organica (tessuti viventi) la ionizzazione dà luogo a rottura di legami chimici e conseguente produzione di sottoprodotti spesso incompatibili con la normale attività biochimica o addirittura tossici. In particolare le radiazioni possono danneggiare il DNA provocando delle mutazioni genetiche casuali spesso innocue, ma che in qualche caso possono dar luogo all'insorgenza di tumori. Dosi massicce di radiazioni, che comportano il rilascio di notevole energia, possono produrre gravi ustioni, la cosiddetta malattia da radiazioni e persino la morte.

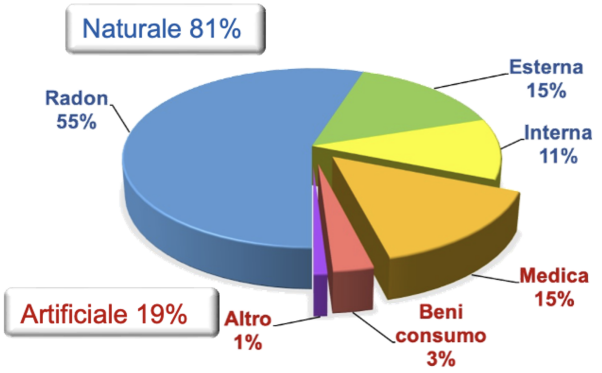


Figura 9: Suddivisione percentuale delle tipiche dosi di radiazione a cui siamo soggetti.

Ma da sempre le radiazioni fanno parte della nostra vita sul pianeta Terra, ne siamo letteralmente circondati:

- circa 30 neutroni e 120 raggi cosmici provenienti dal cielo attraversano il nostro corpo ogni secondo;
- nell'aria che respiriamo circa 10 nuclei pesanti si disintegrano ogni secondo nei nostri polmoni, rilasciando radiazione alfa, beta e gamma;
- il cibo che ingeriamo fa sì che 4500 nuclei di potassio-40 (^{40}K) producano radiazione beta e gamma nel nostro corpo ogni secondo, e che due di uranio rilascino radiazione alfa; il ^{40}K è un radioisotopo naturale, presente assieme al ^{39}K e al ^{41}K che sono stabili, e che rappresentano un elemento indispensabile per il funzionamento dei muscoli e del cuore;
- provenienti dal suolo e dagli edifici circa 56000 raggi gamma al secondo colpiscono il nostro corpo; di particolare rilievo è il radon, gas radioattivo pesante che emerge dal sottosuolo e che tende ad accumularsi nelle parti basse non sufficientemente ventilate degli edifici.

Le dosi di radiazioni alle quali siamo usualmente esposti sono mediamente di origine naturale per l'81% ed artificiale per il rimanente 19% (Figura 9).

Viene dunque definita una grandezza per fornire una prima caratterizzazione di riferimento



Figura 10: L'acqua di mare a seconda della sua salinità produce da 6000 a 10000 disintegrazioni di ^{40}K al secondo per metro cubo.

per i decadimenti di sostanze radioattive, e cioè l'attività che indica il numero (medio) di decadimenti al secondo e si esprime in Bequerel (Bq). A titolo di esempio è interessante far notare che l'acqua di mare, ricca di potassio, è anch'essa radioattiva, ed a seconda della salinità ogni metro cubo produce da 6000 a 10000 disintegrazioni di 40K al secondo, quindi 6000-10000 Bq (Figura 10).

Effetti biologici

La valutazione degli effetti biologici delle radiazioni è una disciplina complessa che non può certo esaurirsi in poche righe. Mi limiterò qui a pochi enunciati ed esempi molto generali esclusivamente a titolo illustrativo e senza alcuna pretesa di esaustività e rigore.

La dose rilasciata dalla radiazione nella materia è definita come energia depositata per unità di massa e si misura in Gray (Gy) cioè Joule/kg. Ma i vari tipi di radiazione depositano energia, e quindi producono il danno biologico, con modalità diverse. Per tenere conto di ciò si ricorre alla definizione di dose equivalente che consente di assegnare un peso diverso alle diverse radiazioni in funzione della loro energia. Si definisce poi la dose efficace, che assegna ulteriori pesi in funzione della radiosensibilità degli organi colpiti dalla radiazione, ma ulteriori dettagli esulano da questa trattazione. Dose equivalente e dose efficace si misurano in Sievert (Sv), che ha le stesse dimensioni, Joule/kg, del Gray.

Per le dosi con le quali abitualmente si ha a che fare si utilizza il sottomultiplo μSv (microsievert), e per valutare i rischi di esposizioni prolungate a radiazioni si utilizza il rateo di dose generalmente misurato in μSv/h (microsievert/ora).

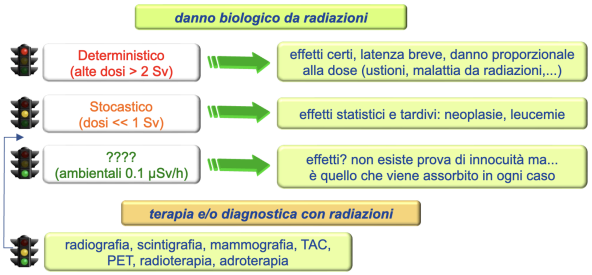


Figura 11: Schema illustrativo semplificato del danno biologico prodotto dalle radiazioni ionizzanti.

Il danno biologico da radiazioni può essere deterministico ad alte dosi assorbite (>2 Sv) oppure stocastico per dosi inferiori. Per dosi molto basse, giù fino alle dosi ambientali, non ci sono prove di innocuità in quanto dimostrare la correlazione causa-effetto è cosa ardua. Le radiazioni vengono diffusamente utilizzate anche per diagnostica medica e per terapia (Figura 11).

Per la protezione dalle radiazioni si utilizza quindi il principio di cautela **ALARA** (*As Low As Reasonably Achievable*, il minimo ragionevolmente ottenibile) e diverse soglie di riferimento a seconda della tipologia di attività che le persone svolgono: lavoratori professionalmente esposti, di varie categorie, e la popolazione.

Elenco nella tabella della Fig. 12 alcuni esempi pratici, che possono essere utili per avere un'idea degli ordini di grandezza e confrontare le dosi prodotte dall'esposizione a diversi eventi o attività.

La reazione a catena e il reattore nucleare

Per comprendere in cosa consistono e come vengono prodotti i rifiuti radioattivi è necessaria una descrizione semplificata, sommaria ma spero efficace, del processo di fissione nucleare, della reazione a catena e quindi del funzionamento di base di un reattore a fissione.

L'uranio presente oggi in natura, circa 600 volte più abbondante dell'oro, è composto per il 99.27% dall'isotopo ^{238}U e per lo 0.72% dal ^{235}U.

Attività / evento	Dose [μSv]
Dormire accanto a qualcuno	0.05
1 anno entro 80 km da una centrale nucleare	0.09
Mangiare una banana (contiene potassio)	0.1
1 anno entro 80 km da centrale a carbone	0.3
1 giorno sul Plateau del Colorado	1.2
1 giorno a Fukushima dopo l'incidente	3.5
Radiografia denti o mano	5
1 giorno normale di una persona media	10
Radiografia al torace	20
Rilascio annuo centrale nucleare	30
Volo Palermo Copenaghen e ritorno	40
Limite di rilascio annuo di centrale nucleare	< 250
Dose annua da potassio nel corpo	390
Dose massima annua per il pubblico	1000
Dose massima incidente Three Miles Island	1000
Mammografia	3000
1 anno normale di una persona media	3650
TAC al torace	5800
1 ora a Chernobyl nel 2010	6000
Dose massima annua lavoratori esposti IT	20000
Dose massima annua lavoratori esposti USA	50000

Figura 12: Alcuni esempi pratici di dosi equivalenti a seguito di attività od eventi che comportano esposizione a radiazioni ionizzanti.

Le sue principali caratteristiche fisico-chimiche sono schematizzate in Figura 13.



Figura 13: Principali caratteristiche fisico-chimiche dell'uranio.

All'origine, qualche miliardo di anni addietro, il 235 era più abbondante di oggi, ma i decadimenti naturalmente occorsi ne hanno ridotto la quantità. Entrambi gli isotopi sono soggetti a decadimento alfa ma il 235 può anche decadere per fissione spontanea, sebbene con probabilità bassissima, spezzandosi in due frammenti statisticamente di varie dimensioni e liberando al contempo 2 o 3 neutroni di alta energia cinetica. I due frammenti prodotti non sono stabili e quindi per ciascuno si innesca una catena di decadimenti fino a raggiungere la stabilità. Tali decadimenti possono avere tempi di dimezzamento molto brevi ma anche lunghi centinaia di anni. La peculiarità del ^{235}U però è che la fissione può essere stimolata colpendolo con neutroni, e la probabilità che ciò accada è tanto più grande quanto più lenti sono i neutroni (Figura 14).

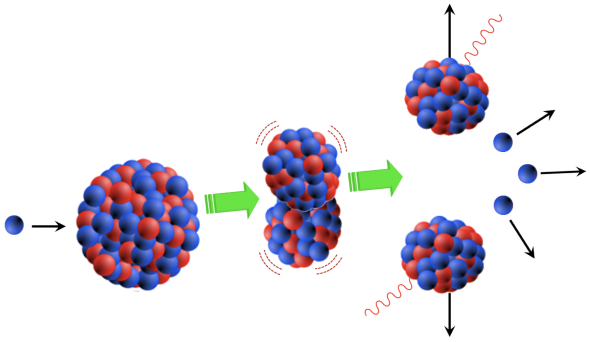


Figura 14: La fissione nucleare indotta da neutroni.

E poichè la fissione produce anche neutroni, è possibile innescare una reazione a catena autosostenuta se si riesce a impaccare una certa quantità di ^{235}U a distanza ravvicinata unitamente a qualche materiale, detto moderatore, in grado di rallentare i neutroni emessi in ciascuna fissione. L'energia cinetica dei frammenti, e parte di quella da questi rilasciata sotto forma di radiazione gamma e beta, viene immediatamente convertita in energia termica nei materiali costituenti e nel moderatore. In altre parole, il sistema comincia a scaldarsi, e se non si interviene opportunamente la reazione a catena diverge e le altissime temperature lo distruggono. In maniera estremamente semplificata abbiamo appena definito il principio operativo di base di un reattore nucleare a fissione.

È interessante notare che l'energia liberata in una fissione del ^{235}U è di circa 210 MeV (milioni di elettronvolt; per fornire un termine di confronto si osservi che un fotone di luce visibile trasporta un'energia dell'ordine di 1 eV). Confrontando tale valore con i circa 10 eV rilasciati dalla decomposizione di una molecola di TNT,

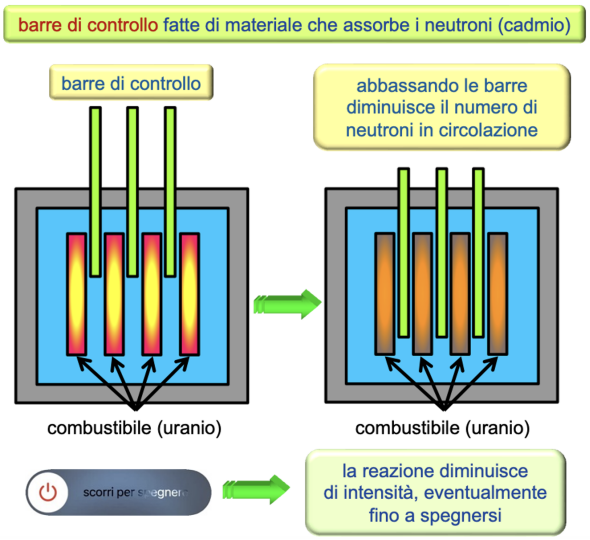


Figura 15: Schema di principio del funzionamento delle barre di controllo di un reattore nucleare.

che casualmente ha una massa molto vicina a quella di un nucleo di uranio, si vede che la densità energetica dell'uranio è circa 20 milioni di volte superiore a quella del tritolo.

L'impaccamento del combustibile ^{235}U si ottiene tramite un complesso processo detto arricchimento, che permette di aumentare la proporzione di tale isotopo nella composizione dell'uranio. Il calore prodotto viene smaltito tramite uno o più fluidi in opportuni circuiti di raffreddamento, e viene utilizzato per mettere in movimento delle turbine per la produzione di energia elettrica.

Ma come controllare il reattore, ed evitare che la reazione a catena diverga? Elemento fondamentale sono le barre di controllo, costituite di un materiale capace di assorbire drasticamente neutroni (tipicamente cadmio), che possono essere movimentate su e giù tra le barre di combustibile. Posizionandole opportunamente si può regolare la potenza del reattore mantenendo la reazione a catena in equilibrio ed eventualmente spegnerlo (Figura 15).



Figura 16: Una tipica pastiglia di ossido di uranio.

Esistono numerosi modelli di reattore, con una notevole varietà di geometrie del combustibile

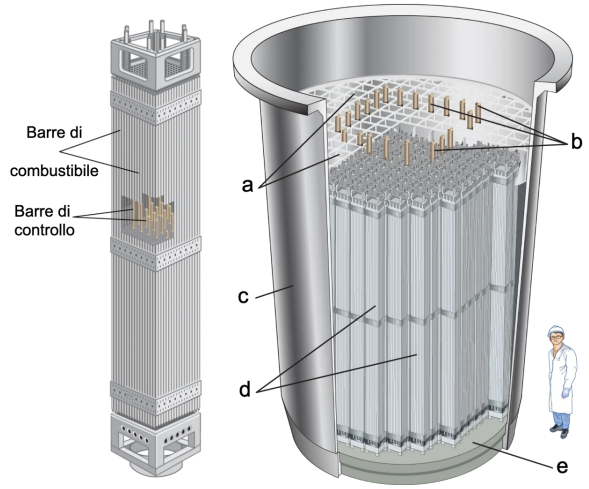


Figura 17: A sinistra: schema di un elemento di combustibile. A destra: Il core del reattore. (a) Griglia superiore per allineamento degli elementi di combustibile. (b) Barre di controllo. (c) Involucro del reattore. (d) Elementi di combustibile. (e) Griglia inferiore. Da Enciclopedia Britannica [1, 2].

(tipicamente pastiglie di ossido di uranio inserite in barre opportune, Figura 16), del moderatore (liquidi, solidi, gassosi), del fluido di raffreddamento (che può essere anche lo stesso moderatore). Ovviamente la geometria e la composizione di tutti questi elementi vanno accuratamente calcolate, progettate e realizzate per ottenere dispositivi che rispettino gli stringenti criteri di sicurezza richiesti dalle opportune agenzie nazionali ed internazionali. La Figura 17 mostra lo schema di massima di un elemento di combustibile e del core del reattore contenente un certo numero di tali elementi. In Figura 18 viene riportato lo schema semplicato di massima di una generica centrale elettronucleare a fissione. Vale la pena di sottolineare che un reattore a fis-

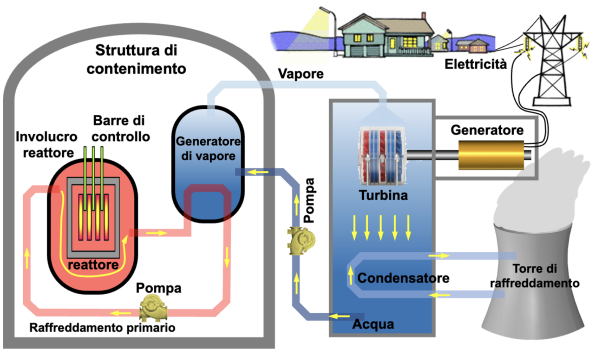


Figura 18: Schema semplificato di una centrale elettronucleare a fissione.

sione NON PUÒ dar luogo ad una esplosione nucleare: per incontrovertibili ragioni fisiche le esplosioni nucleari possono avvenire soltanto in ordigni nei quali il grado di arricchimento del combustibile è superiore al 90%. Le esplosioni avvenute a Fukushima, ad esempio, sono state di natura chimica, causate cioè dal calore non più controllato del *core* del reattore che ha dissociato l'acqua in idrogeno ed ossigeno con conseguente esplosione dell'idrogeno.

Ciò non toglie che considerevoli quantitativi di radioisotopi sono stati dispersi nell'ambiente, ma che spesso le conseguenze, certamente gravi, sono state impropriamente ingigantite dai media, corroborate da insufficiente conoscenza delle tematiche da parte dell'opinione pubblica ed amplificate dalla diffusione di notizie non veritiere (*fake news*). È interessante consultare al riguardo il saggio di Piergiorgio Pescali, protagonista e narratore del disastro giapponese [3].

Va anche ricordato che al crescere della distanza da un sito di incidente nucleare diminuisce la concentrazione dei radioisotopi (a meno di variazioni prodotte dai venti). Infine va considerato che gli incidenti più gravi nella storia non sono stati di tipo nucleare bensì biologici (pandemie, mentre i radioisotopi sono pericolosi ma non contagiosi), chimici (esplosione di un impianto a Bhopal, India, nel 1984 con circa 4000 vittime in pochi minuti, 15-20000 successivamente e mezzo milione con danni medicalmente rilevabili), meccanico-ambientali (crollo di dighe, etc.).

Produzione di rifiuti radioattivi

Adesso abbiamo gli elementi essenziali per esaminare più in dettaglio la produzione di rifiuti radioattivi. Le attività/processi principali che danno origine a specie radioattive sono i seguenti:
a) materiali NORM, come già visto;
b) materiali TENORM (*Technologically Enhanced* NORM), cioè materiali naturali che a seguito di procedimenti industriali presentano una composizione più ricca di elementi radioattivi (tipicamente attività minerarie e/o di purificazione o arricchimento);
c) produzione di radiofarmaci tramite acceleratori di particelle o reattori nucleari;
d) produzione di sorgenti gamma intense per terapie oncologiche;
e) produzione di particolari isotopi per uso industriale (ad es. radiografia industriale di saldature su paratie spesse, ricerche petrolifere);
f) ricerca;
g) produzione energetica in reattori nucleari a fissione;
h) smantellamento di installazioni nucleari (*decommissioning*).
Tutti i rifiuti prodotti dalle suddette attività vanno soggetti ad isolamento per evitare che entrino in contatto con persone o in generale vadano dispersi nella biosfera. Le barriere a tale scopo preposte dipendono dalla tipologia di rifiuti e quindi dalla loro pericolosità e durata. Le attività che danno luogo ai maggiori quantitativi di radioisotopi sono la (g) e la (h), fermo restando che comunque anche piccole quantità necessitano ugualmente di segregazione.

L'agenzia internazionale per l'energia atomica (IAEA) stabilisce criteri per la catalogazione, segregazione e gestione dei rifiuti, con una copiosa messe di documenti, direttive e guide operative [4, 5, 6]. Purtroppo spesso i criteri delle agenzie di ciascuna nazione non sono in stretta corrispondenza con quelli IAEA, generando in taluni casi delle ambiguità. Ad ogni modo una catalogazione più o meno universalmente riconosciuta prevede:

- rifiuti di alto livello (HLW, *high level waste*), principalmente ma non esclusivamente combustibile nucleare esaurito (SF, *spent fuel*);
- rifiuti di livello intermedio (ILW, *intermediate level waste*);
- rifiuti di basso livello (LLW, *low level waste*);
- rifiuti di livello bassissimo (VLLW, *very low level waste*);
- materiali esenti (*exempt*).

A parte per il combustibile esaurito, l'appartenenza ad una categoria dipende dall'attività e dalla presenza e quantità di alcune particolari specie nucleari, e in particolare degli attinidi, che occupano l'ultima riga della tavola periodica degli elementi. Gli attinidi, che decadono alfa, includono anche l'uranio e i cosiddetti elementi transuranici come nettunio, plutonio e americio

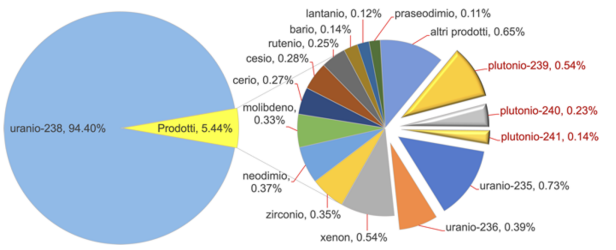


Figura 19: Esempio di composizione del combustibile dopo tre anni di funzionamento per un reattore ad acqua pressurizzata.

(Z=93, 94, 95 rispettivamente) che non esistono in natura ma si formano proprio nel combustibile nucleare a causa di reazioni secondarie (ripetute catture neutroniche e decadimenti beta). A titolo di esempio in Figura 19 è mostrato un calcolo della composizione del combustibile dopo tre anni di funzionamento per un reattore ad acqua pressurizzata, partendo da una composizione iniziale di ^{238}U al 97% e ^{235}U al 3%.

Le specie nucleari rappresentate dai settori in evidenza più a destra sono appunto attinidi, in particolare il plutonio che è un transuranico. Tali specie sono particolarmente tossiche sia per via chimica che radiologica. Le particelle alfa che emettono, come già detto, non oltrepassano la pelle umana. Ma se ingerite e/o respirate le polveri di attinidi si localizzano in vari organi (polmoni, ossa,...) dove sono in grado di produrre danni biologici gravi. E poichè i loro tempi di dimezzamento sono lunghi, ad esempio ^{239}Pu dimezza in circa 24000 anni, lo *spent fuel* necessita di essere isolato dalla biosfera per tempi molto lunghi, dell'ordine delle centinaia di migliaia di anni. Per rendere l'idea, in mezzo milione di anni, che corrispondono a quasi ventuno volte il suo tempo di dimezzamento, l'attività (e quindi la quantità) del ^{239}Pu si riduce a circa un duemilionesimo di quella iniziale ($\approx 1/2^{21} \approx 1/2000000$).

Le altre specie nucleari di Figura 19 sono i prodotti di fissione, che emettono radiazione beta e gamma con tempi di dimezzamento molto più brevi ma attività particolarmente elevate perchè presenti in quantità. Per tali specie, se separate dagli attinidi, il confinamento potrebbe essere limitato a diverse centinaia di anni. Come si opera oggi? La Francia, pressochè unica al mondo, possiede degli impianti per il ricondizionamento dello *spent fuel*, estraendone il plutonio e l'uranio



Figura 20: Piscina per la decantazione iniziale delle barre di combustibile esauste.



Figura 21: Decantazione secondaria (50-100 anni) di *spent fuel* in un deposito di Zwilag [7] (Würenlingen, Zurigo, Svizzera).

per produrre nuovo combustibile. Difatti, cosa forse poco nota, il ^{239}Pu sottoprodotto della fissione è un ottimo combustibile nucleare (e un modello di reattore cosiddetto autofertilizzante è in grado di produrre più combustibile di quello che si immette!). A livello internazionale però la scelta è invece quella di non ricondizionare lo *spent fuel* e di metterlo a decantare in piscina per alcuni anni, poiché appena estratto dal reattore continua a scaldare parecchio a causa delle intense emissioni da parte dei prodotti di fissione.

Una volta estratto dalla piscina viene poi inserito e sigillato in opportuni contenitori, detti ***cask***, e lasciato ulteriormente a decantare per 50-100 anni in depositi al chiuso ma ben ventilati (Figura 21) o anche all'aria aperta (Figura 22) per una ulteriore decantazione detta interim storage. I *cask* sono soggetti a normative molto stringenti, inclusa la resistenza a urti e penetrazioni verificata anche tramite caduta da diversi metri di altezza.

Al termine della decantazione i cask andranno



Figura 22: Decantazione secondaria (50-100 anni) di spent fuel in deposito all'aperto [8].

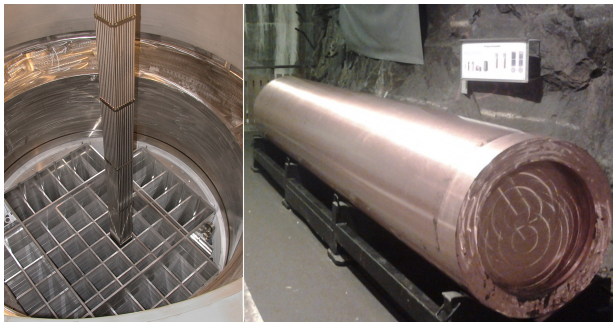


Figura 23: Le barre di spent fuel vengono inserite in speciali contenitori in rame e acciaio detti *canister* [10].

riaperti, e le barre di combustibile dovranno essere inserite in speciali contenitori in rame e acciaio, detti canister (Figura 23). Questi andranno sigillati ermeticamente con speciali saldature e poi opportunamente posizionati in nicchie orizzontali o verticali realizzate all'uopo in depositi geologici dentro caverne a 500 m di profondità con numerosi accorgimenti tecnici protettivi (Figura 24).

Il sito per un tale deposito va scelto a seguito di complessi studi di natura sia geologica che economica e sociale. Va anche studiata l'evoluzione di siti analoghi per vari aspetti (morfologia, orografia, composizione,...) nel corso di varie ere geologiche, per verificarne la supposta stabilità nei millenni a venire. La linea guida è che le specie nucleari in questione debbano rimanere segregate dalla biosfera per almeno diverse centinaia di migliaia di anni.

Senza entrare qui nell'annoso dibattito sull'efficacia o meno e sull'accettabilità etica dei depositi geologici, mi limito ad osservare che lo *spent fuel* esiste ed in qualche modo bisognerà prima o poi metterlo in sicurezza per le generazioni a venire. Aggiungo inoltre che i pochi metri cubi di *spent fuel* italiano, cioè quello prodotto dalle

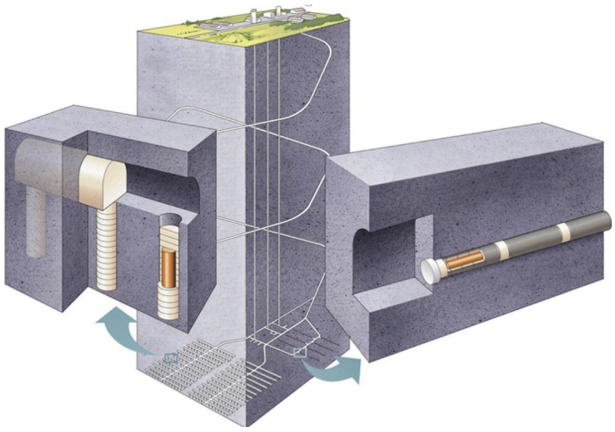


Figura 24: Schema di un deposito geologico a 500 m di profondità, con possibilità di posizionare i *canister* in nicchie sia orizzontali che verticali [10].

nostre quattro centrali nucleari nei pochi anni di operatività, da diverse decine d'anni ed a più riprese sono stati temporaneamente trasferiti in Francia ed in Inghilterra per un riprocessamento che ne diminuisca il volume. Quanto prima il nostro *spent fuel* dovrà comunque rientrare ed essere immagazzinato in un deposito interim che è purtroppo in grave ritardo (ed anche per tale rientro siamo già in ritardo pluriennale). Al momento l'unico deposito geologico al mondo, specificamente costruito per lo *spent fuel* e prossimo all'operatività, è Onkalo nei pressi di Olkiluoto (Finlandia), realizzato da POSIVA [9] in collaborazione con l'azienda svedese SKB [10] che ne sta realizzando uno a Forsmark in Svezia. Per Onkalo si attende solo il rilascio della licenza finale per l'entrata in funzione a regime, verosimilmente entro il 2024.

I rifiuti di livello intermedio (ILW) possono essere in forma solida o liquida, e contenere o meno delle moderate quantità di attinidi. A differenza di quelli ad alta attività (HLW) non producono abbastanza calore da necessitare il raffreddamento. Vengono inseriti in speciali fusti metallici (Figura 23) e/o incapsulati in matrici di cemento o di cosiddetti geopolimeri.

In passato in alcuni casi gli ILW sono stati direttamente cementati, ma al giorno d'oggi tale pratica è sconsigliata. Lo studio di tecniche avanzate per il loro trattamento ed incapsulamento è sempre in corso, poiché nuove tecnologie possono permettere l'ottimizzazione dei processi ed il miglioramento delle sicurezze. Per quanto ri-



Figura 25: Fusti da 120 litri contenenti rifiuti di livello intermedio ILW in un deposito superficiale temporaneo. Il rateo di dose a contatto è di circa 100 μSv/h [11].

guarda la destinazione finale degli ILW, in vari paesi si fanno scelte differenti: da miniere dismesse a depositi di media profondità od anche depositi geologici. Ove queste risorse non siano ancora disponibili gli ILW sono attualmente parcheggiati in depositi temporanei di superficie o subsuperficiali.



Figura 26: Un fusto da 220 litri contenente rifiuti di basso livello LLW. Il rateo di dose a contatto è di circa 1 μSv/h [12].

I rifiuti di bassa (LLW) e bassissima (VLLW) attività consistono generalmente di oggetti e materiali contaminati perché sono stati a contatto con materiali attivi, e quindi ne contengono dei residui, e/o che sono stati utilizzati durante operazioni di *decommissioning*: calcinacci, indumenti, camici, guanti, scarpe, utensili, raccorderia metallica (Figura 26). Anche interi dispositivi possono configurarsi come rifiuti nucleari, un esempio sono le scatole a guanti (glove box) che, a seconda dell'utilizzo che ne è stato fatto e delle specie nucleari con cui sono venute in contatto, possono configurarsi come ILW o come LLW. Anche i LLW ed i VLLW vengono confezionati in speciali fusti metallici, ma questi vengono immagazzinati in depositi di superficie per tempi previsti dell'ordine dei 50-100 anni, sufficienti per il decadimento pressoché totale (Figura 27).

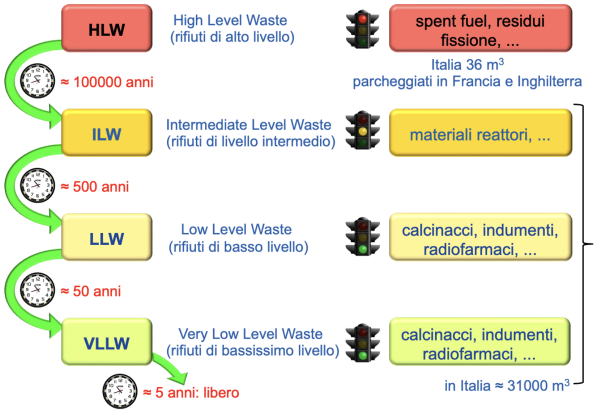


Figura 27: Schema riassuntivo semplificato della classificazione IAEA dei rifiuti nucleari.

Gestione dei rifiuti radioattivi

Quando si gestisce materiale nucleare un concetto importante è quello delle tre S: *safety*, *security* (in italiano entrambi tradotti come sicurezza), *safeguards* (salvaguardia). *Safety* riguarda la protezione delle persone dall'esposizione a pericolose radiazioni ionizzanti. In ciascun paese è disciplinata da rigorose norme di radioprotezione emanate dalle rispettive autorità nazionali. *Security* tratta della protezione del materiale e delle installazioni nucleari da azioni criminali. A tal riguardo il 26 Ottobre 1979 a Vienna presso la IAEA è stata adottata la convenzione sulla protezione fisica del materiale nucleare, che successivamente è stata firmata da 160 paesi. Nel 2017 la IAEA ha organizzato, ancora a Vienna, una conferenza internazionale sulla protezione fisica del materiale e delle installazioni nucleari, e ciò dimostra la crescente importanza di tale tematica alla luce della situazione mondiale di criminalità e terrorismo in continua evoluzione. *Safeguards* assicura che materiali e tecnologie nucleari siano utilizzati soltanto per scopi pacifici e non per lo sviluppo di armamenti. A tale scopo è stato messo a punto uno specifico trattato di non proliferazione, entrato in vigore nel 1970, che a oggi è stato firmato da 190 paesi.

La protezione del materiale e delle installazioni nucleari entra in gioco in svariate attività quali stoccaggio, manipolazione, trasporto, ispezione, verifiche, con molteplici implicazioni sulla sicurezza. In molti casi l'assenza o lo smarrimento di documentazione cartacea relativa a contenitori di vecchia data, crea il problema del cosiddetto *legacy waste* (rifiuti ereditati). A complicare le cose, tanti specialisti della vecchia generazione vanno in pensione, con una possibile perdita di competenze per ovviare alla quale è indispensabile mantenere la cosiddetta continuità della conoscenza. E resta comunque aperto il dibattito sui depositi geologici e sulla loro presunta affidabilità nel mantenersi intatti per centinaia di migliaia di anni. Ciononostante, l'attività di ricerca in tal senso procede, come è giusto che sia, anche se a parte la soluzione finlandese gli eventuali nuovi depositi sono ancora lontani dalla realizzazione.

Ad ogni modo, quale che sia la soluzione nel lungo termine, prima di chiudere e sigillare tali depositi sarà certamente necessaria una intensa attività di stoccaggio temporaneo. Nell'arco di circa 50-100 anni per tutte le categorie di rifiuti sarà necessario prevenire, individuare e reagire ad eventuali incidenti, furti, sabotaggi, accessi non autorizzati e trasferimenti illegali, ferme restando le misure per la protezione dalle radiazioni. Uno dei principali strumenti richiesti per tali scopi è il monitoraggio, per verificare l'integrità di ciascun fusto dalla produzione fino alla sua destinazione finale, sia che si tratti del deposito geologico (HLW, ILW) che del rilascio a causa del decadimento pressoché totale dei radionuclidi contenuti. Il monitoraggio dei rifiuti radioattivi finora è stato realizzato con metodi tradizionali, vale a dire tramite sensori di radioattività ambientale fissi installati all'interno ed all'esterno dei depositi e sensori portatili per controlli da parte di operatori specializzati. Nuove tecnologie oggi disponibili permettono di integrare, se non di rimpiazzare, tali metodi di monitoraggio convenzionale, e di fornire diversi benefici addizionali quali una misurazione continua e puntuale dei dati da ciascun fusto, la registrazione in forma digitale, una procedura più completa per la caratterizzazione e la valutazione del materiale nucleare e in particolare dei rifiuti. Questi ed altri obiettivi sono stati perseguiti dal progetto Euratom H2020 MICADO [13], conclusosi con successo nel 2023, mentre ulteriori affinamenti di alcune tecniche sviluppate in tale progetto sono state portate a termine nel Work Package 7 del progetto Euratom H2020 PREDIS [14], concluso nel 2024, dedicato proprio ai sistemi di monitoraggio di *radwaste*.

Sistemi avanzati di monitoraggio Radwaste

Un sistema di monitoraggio automatico, individuale e continuo renderebbe possibile mantenere la cronistoria completa e dettagliata di ciascun fusto o *cask*, con notevoli benefici in termini di sicurezza (radiologica e da azioni criminali) e di trasparenza. La necessità di intervento umano diretto verrebbe così sensibilmente ridotta, minimizzando al contempo errori e possibili azioni illegali intenzionali. Sensori di radiazione di nuova generazione, da applicare direttamente sui fusti, sono oggi in grado di monitorare i materiali nucleari sia durante lo stazionamento che durante il trasporto, individuando possibili anomalie strutturali o tentativi di diversione e prevenendo dei traffici illeciti (Figura 28).

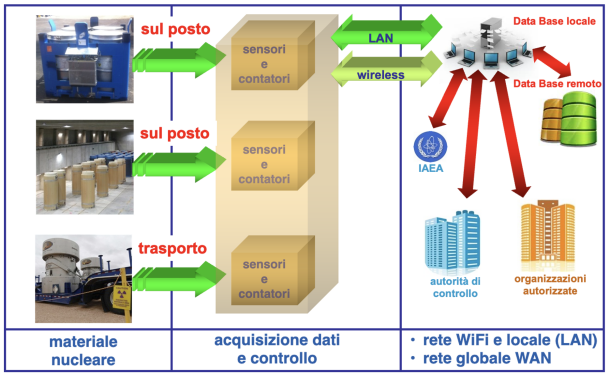


Figura 28: Schema di un possibile sistema di monitoraggio in tempo reale, connesso ad un database accessibile alle organizzazioni legalmente autorizzate. In alto e al centro: monitoraggio locale di depositi ILW ed HLW. In basso: monitoraggio durante il trasporto.

Un tale sistema potrebbe essere utilizzato sia per i siti di stoccaggio di *radwaste* che nei vari passi della filiera del combustibile nucleare, sia che questo una volta esaurito vada infine a smaltimento che nel caso di riprocessamento per la produzione di nuovo combustibile (Figura 29).

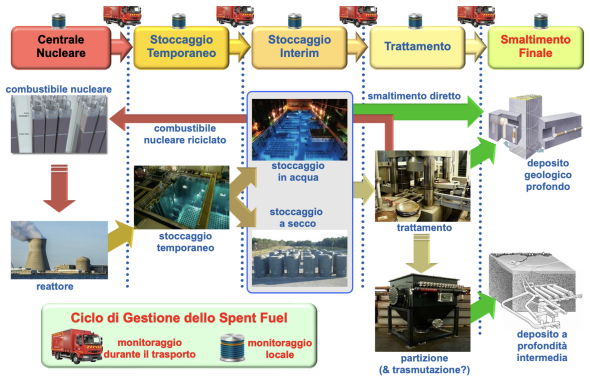


Figura 29: Il ciclo del combustibile nucleare, con possibile eventuale trattamento e riciclo, fino allo smaltimento dei rifiuti finali. In tutte le fasi il monitoraggio, indicato in alto con i simboli dell'autocarro e del fusto, può giocare un ruolo rilevante.



Figura 30: Schema delle emissioni radioattive da un fusto di materiale.

Ma cosa monitorare in particolare? Sono tanti i parametri fisico-chimici che è possibile tenere sotto controllo: pressione, temperatura, umidità, acidità, deformazione, etc., ma come visto in PREDIS [14], molti di questi parametri richiedono l'inserimento di speciali sensori all'interno dei fusti. Tale operazione, non semplice, rischia di alterare lo stato del fusto nel medio/lungo periodo, ed infatti al momento non è prevista dalle regolamentazioni in vigore. Un monitoraggio facilmente accessibile è invece quello radiologico. Come visto in precedenza (Figura 7), la radiazione gamma ed i neutroni sono molto penetranti, e quindi una frazione non trascurabile fuoriesce dal fusto e può essere utilizzata per ricavare informazioni relative al contenuto dello stesso (Figura 30).

Nell'ambito del Work Package 7 del progetto MICADO [13] sono stati sviluppati dei sensori a basso costo per gamma e per neutroni, che sono quindi stati integrati con un sistema di acquisizione dati ed un database. Tali sensori, da applicare all'esterno dei fusti, possono misurare la radiazione a intervalli di tempo predefiniti o con continuità, e un cambiamento inatteso dei tassi di conteggio sarebbe indice di un'anomalia da investigare.

Rivelatori per radiazione gamma e neutroni

Per la rivelazione della radiazione gamma è stata messa a punto una tecnica basata su due tecnologie: le fibre ottiche scintillanti in plastica (**SciFi**) ed i fotomoltiplicatori al silicio (**SiPM**) [15]. Il principio operativo del sensore, denominato SciFi, è molto semplice: una fibra scintillante, quando viene colpita da un pacchetto di radiazione gamma, produce un rapidissimo lampo di luce nel visibile della durata di pochi nanosecondi (1 ns = 10^{-9} s = un miliardesimo di secondo) e di intensità estremamente bassa (qualche centinaio di fotoni al più). Una frazione di tale luce, circa il

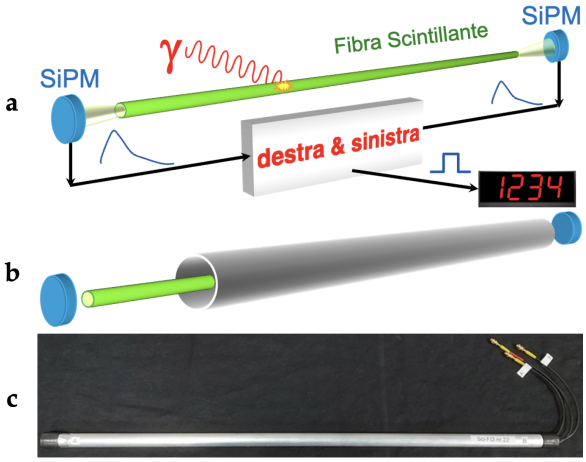


Figura 31: (a) Schema di funzionamento del sensore SciFi per la radiazione gamma. (b) Il sensore viene incapsulato in un tubo di alluminio a tenute di luce. (c) Foto di un sensore SciFi reale.

6.5%, si propaga in entrambe le direzioni lungo la fibra e raggiunge due SiPM posti alle estremità che trasformano la luce in due segnali elettrici amplificandoli di un fattore un milione. I due segnali diventano così macroscopici e possono essere trattati da una elettronica logicamente e componentisticamente elementare dai costi estremamente contenuti. Quando il segnale è presente su entrambi i SiPM l'evento viene considerato come rivelazione di un gamma e viene quindi incrementato un contatore. Segnali presenti su

un solo SiPM vengono considerati spuri (rumore elettronico) e rigettati. Lo schema di funzionamento è sinteticamente illustrato in Figura 31a. La Figura 31b mostra come fibra e SiPM siano incapsulati in un tubo di alluminio a tenuta di luce, ad evitare l'accecamento dei sensori da parte della luce ambientale esterna. In Figura 31c si vede un sensore SciFi reale, di lunghezza 80 cm. Da notare che, se necessario, il sensore può essere incapsulato in un tubo plastico flessibile anziché in alluminio, così da essere installato in geometria curva.

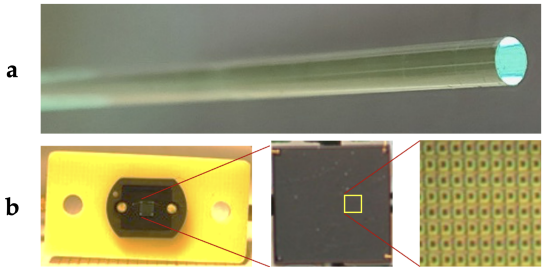


Figura 32: (a) Fibra scintillante da 3 mm di diametro. (b) Un SiPM da 3×3 mm2 costituito da 4774 fotodiodi.

È interessante spendere qualche parola sul fotomoltiplicatore SiPM, che rappresenta uno sviluppo relativamente recente degli ultimi vent'anni. Si tratta si una matrice integrata di migliaia o decine di migliaia di fotodiodi (detti anche microcelle), con dimensioni totali che nelle tecnologie attuali vanno da 1×1 a 6×6 mm^2, operanti nel cosiddetto **regime geiger**. Ciò significa che quando uno dei fotodiodi è colpito da uno o più fotoni visibili esso produce un segnale sempre uguale, molto grande, costituito da circa 10^6 elettroni. Tutti i microscopici fotodiodi sono connessi in parallelo, cosicché il segnale totale prodotto dal SiPM quando un numero n dei suoi fotodiodi è colpito sarà n volte più grande del segnale prodotto da un singolo. Questa modalità di funzionamento è detta **quasi digitale** e permette di rivelare e contare anche singoli fotoni. In Figura 32 sono riportati una foto ravvicinata di una fibra scintillante e di un SiPM 3×3 mm^2 costituito da 4774 microcelle a tre diversi ingrandimenti. Per sua natura il SiPM produce del rumore spurio, dovuto a singole microcelle che occasionalmente producono segnale anche se non colpite da fotoni, e questo è il motivo per cui il sensore SciFi richiede la coincidenza tra i due SiPM agli estremi della fibra per dichiarare la rivelazione di un gamma.

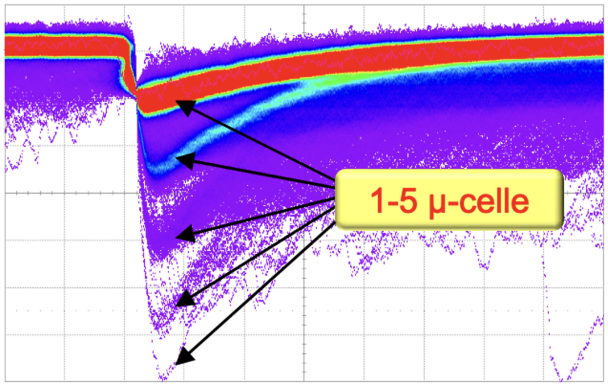


Figura 33: Segnali di buio di un SiPM analizzati all'oscilloscopio in modalità a persistenza di immagine. Si osservano chiaramente cinque bande corrispondenti all'accensione di 1-5 microcelle.

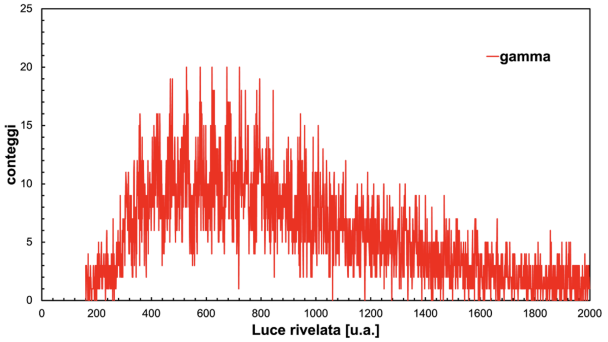


Figura 34: Istogramma della distribuzione delle ampiezze dei segnali di un SiPM quando il sensore SciFi è esposto ad una sorgente gamma.

Analizzando all'oscilloscopio, in modalità a persistenza di immagine, i segnali di buio di un SiPM, si possono facilmente osservare alcune bande corrispondenti all'accensione di 1-5 ed anche più microcelle (Figura 33). Sottoponendo un sensore SciFi a radiazione gamma, ad esempio esponendolo ad una sorgente di ^{137}Cs, si osserva un certo tasso di conteggio in coincidenza tra i due SiPM. Se si costruisce l'istogramma della distribuzione delle ampiezze di segnale (altrimenti detto spettro) di uno dei due SiPM si ottiene il grafico di Figura 34.

La curva è grosso modo una distribuzione di Poisson, ben nota in statistica, le numerose strutture strette e piccate corrispondono a numeri discreti di microcelle che hanno rivelato fotoni di scintillazione, e il numero più probabile di fotoni

rivelati è circa 11 (corrispondente al picco con il massimo numero di conteggi).

La radiazione gamma ionizza i materiali direttamente, essendo una radiazione elettromagnetica che può strappare elettroni dagli atomi, ed il processo di scintillazione nella fibra ottica è dovuto all'eccitazione e diseccitazione di stati elettronici nel materiale. Per la rivelazione dei neutroni le cose sono invece un po' più complesse, visto che il neutrone non risente del campo elettrico e quindi non interagisce per via elettromagnetica con gli elettroni atomici dei materiali.

L'unica interazione del neutrone con la materia è per via nucleare, e ciò implica che tali interazioni siano assai poco probabili poichè l'interazione nucleare è sostanzialmente di contatto. Ricordo l'esempio del pallone da calcio nella sezione sui nuclei atomici: mentre gli elettroni sono presenti a grandi distanze dal nucleo e distribuiti come delle enormi nuvole, il neutrone per interagire deve andare proprio a colpire il pallone. Se si vuole rivelare dei neutroni, quindi, si deve ricorrere a dei processi indiretti: si utilizzano dei materiali che hanno la strana proprietà di avere una predilezione per l'interazione con i neutroni (convertitori di neutroni), e che a seguito di tale interazione decadano emettendo particelle elettricamente cariche (nuclei leggeri) che possono quindi essere rivelate con sensori tradizionali.

Nel corso del Progetto Manhattan (che portò alla fabbricazione della bomba atomica), nello studiare le proprietà del ^{235}U si scoprì che la sua area efficace (la denominazione formale in fisica è **sezione d'urto**, e caratterizza la probabilità di interazione) quando bersagliato con **neutroni lenti** diventava enorme, molto più grande dell'area geometrica attesa. Qualcuno disse che diventava grande come la parete di un granaio (che in inglese si chiama *barn*). Ecco perché l'unità di misura della sezione d'urto da allora è il **barn**, che corrisponde a 10^{-24} cm^2, si indica con b, e che in sostanza rappresenta una probabilità di interazione.

La strana proprietà sopra menzionata altro non è che una grande sezione d'urto rispetto alla collisione con neutroni. In generale quando si dice "lenti" ci si riferisce a neutroni termici, cioè che hanno energia cinetica analoga a quella media delle molecole dell'aria a temperatura ambiente, corrispondente a 0.025 eV ($\langle E \rangle = k_B T$ con $T = 300$ K e $k_B = 8.617333 \times 10^{-5}$ eV / K costante di Boltzmann).

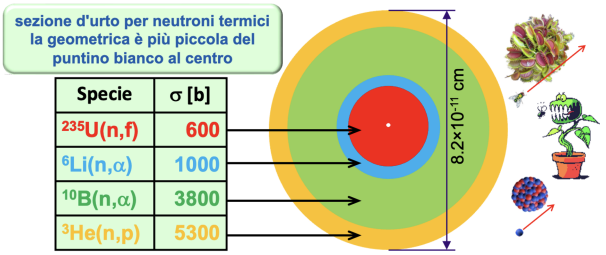


Figura 35: Sezioni d'urto di cattura per neutroni lenti dei materiali più comunemente utilizzati come convertitori. Sulla destra l'illustrazione metaforica semplificativa della cattura (si veda il testo).

Per rivelare neutroni dunque si utilizzano come convertitori dei materiali con grande sezione d'urto per neutroni che poi producano particelle cariche. Sono pochi i materiali adatti a tale scopo, principalmente ^{3}He, ^{6}Li, ^{10}B, ^{235}U. La rivelazione di neutroni è richiesta sia nel campo della ricerca fondamentale ed applicata che in diverse applicazioni industriali, mentre è sempre più importante il suo ruolo nel campo delle sicurezze e della salvaguardia nucleare. Un rivelatore di neutroni affidabile deve anche garantire una notevole insensibilità alla radiazione gamma, visto che generalmente dove ci sono neutroni sono presenti anche gamma in notevole quantità.

Il fulcro della rivelazione di neutroni è stato per parecchi anni ^{3}He, un gas prodotto artificialmente come sottoprodotto in certi reattori nucleari che, colpito da neutroni, produce un protone ed un nucleo di trizio (^{3}H) facilmente rivelabili che indicano l'avvenuta interazione di un neutrone. La sezione d'urto di tale processo è di circa 5300 b, mentre l'area geometrica del nucleo di ^{3}He sarebbe solo ≈ 0.1 b. Fintanto che ^{3}He è stato facilmente disponibile non si avvertiva la necessità di escogitare altre tecniche di rivelazione. Nel corso degli ultimi vent'anni il declino della produzione e il conseguente aumento del prezzo del ^{3}He hanno stimolato un grande sforzo internazionale alla ricerca di materiali e tecniche alternativi. Sono quindi stati esplorati metodi che sfruttano ^{6}Li, ^{10}B o ^{235}U, che hanno sezioni d'urto rispettivamente di circa 1000, 3800 e 600 b (Figura 35).

La sezione d'urto di ciascuna specie nucleare non è costante ma varia con l'energia cinetica

del neutrone incidente, essendo tanto maggiore quanto più questo è lento. Ricorro ad una metafora semplificativa per dar conto di tale effetto: immaginiamo un insetto che passi accanto ad una pianta carnivora, la probabilità di essere catturato è tanto più alta quanto maggiore è il tempo che l'insetto spende nelle vicinanze della pianta (Figura 35).

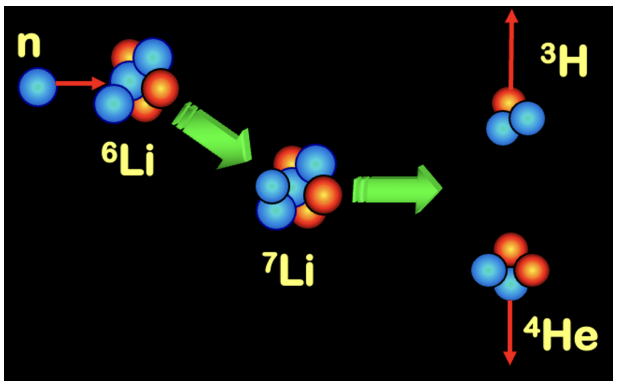


Figura 36: La reazione di cattura neutronica sul ^{6}Li.

Sebbene ^{235}U venga utilizzato in alcuni ambiti come convertitore per la rivelazione di neutroni, il suo impiego non è generalmente consentito poiché si tratta di materiale strategico potenzialmente pericoloso e dunque sottoposto a notevoli restrizioni regolate da trattati internazionali. L'attenzione si è quindi spostata sul ^{10}B e sul ^{6}Li, che presentano varie caratteristiche che rendono l'uno o l'altro più o meno vantaggioso a seconda delle applicazioni.

Non mi soffermerò sugli impieghi del ^{10}B e descriverò nel seguito la tecnica denominata SiLiF basata sul ^{6}Li che risulta più adatto per realizzare rivelatori di dimensioni medio-piccole con bassissima sensibilità alla radiazione gamma [16]. Quando il ^{6}Li cattura un neutrone il successivo decadimento, pressochè istantaneo, dà luogo all'emissione di un nucleo di trizio (^{3}H) ed uno di elio (^{4}He, anche detto particella alfa) a 180° l'uno dall'altro, entrambi di alta energia cinetica, tramite la seguente reazione (Figura 36):

$$^6\mathrm{Li} + \mathrm{n} \rightarrow ^3\mathrm{H}(2.73\,\mathrm{MeV}) + \alpha(2.05\,\mathrm{MeV}) \ .$$

La tecnica SiLiF per la rivelazione di neutroni utilizza un diodo piano al silicio, tipico rivelatore per particelle cariche, sul quale si affaccia uno strato di ^{6}LiF (fluoruro di litio-6). Il LiF è molto conveniente in quanto è un sale molto stabile, contrariamente al litio puro che è altamente igroscopico si ossida molto rapidamente ed è infiammabile. In particolare, se si utilizza un diodo doppia faccia, cioè sensibile su entrambe le facce, è possibile installare due strati di convertitore e così facendo si raddoppia l'efficienza (Figura 37).

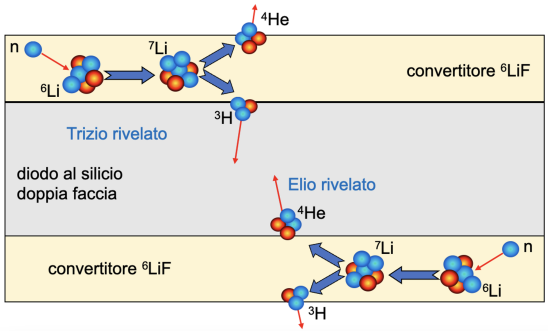


Figura 37: Schema di un rivelatore di neutroni SiLiF.

Le due particelle prodotte a seguito della cattura di un neutrone perdono parte della loro energia cinetica (cioè rallentano) attraversando il materiale convertitore, e questo limita il massimo spessore del convertitore utilizzabile: se le due particelle si fermano al suo interno non potranno poi raggiungere il silicio ed essere rivelate.

Una notevole mole di calcoli e test sperimentali ha permesso di determinare lo spessore ottimale del ^{6}LiF per ottenere il miglior compromesso tra efficienza intrinseca di rivelazione di neutroni (frazione dei neutroni incidenti che vengono rivelati) e immunità alla radiazione gamma (probabilità che un gamma venga rivelato ed interpretato come neutrone). Tale spessore è risultato essere circa 17 μm e dà luogo ad una efficienza intrinseca del 5% con una immunità ai gamma di circa 10^{-9}. In concreto: su 100 neutroni incidenti, in media 5 vengono rivelati e 95 passano indisturbati. Su un miliardo di gamma incidenti, uno viene rivelato ed erroneamente considerato neutrone.

Il sandwich ^{6}LiF-Si-^{6}LiF risulta quindi essere un buon rivelatore di neutroni ma solo per neutroni lenti, così come gli altri eventualmente basati su altri materiali convertitori. Per far sì che anche neutroni più energetici possano essere rivelati con discreta efficienza si fa ricorso a materiali moderatori (esattamente come nel caso della reazione a catena vista in precedenza), che hanno lo scopo di rallentare i neutroni incidenti in maniera che interagiscano più facilmente con

il convertitore e diventino quindi più facilmente rivelabili. La moderazione avviene per successivi rimbalzi elastici dei neutroni sui nuclei, quindi i materiali più efficienti a tale scopo sono quelli costituiti da nuclei leggeri, come evidenziato in Figura 38.

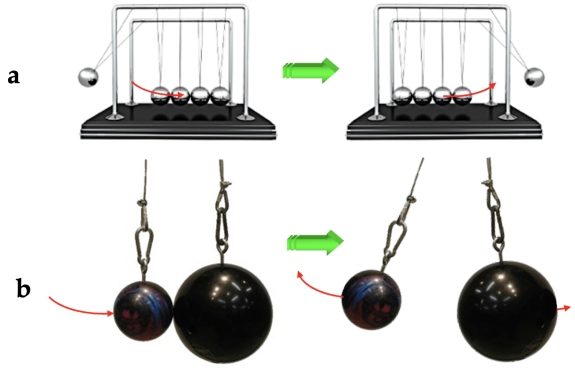


Figura 38: Moderazione. (a) La collisione con un corpo di uguale massa produce il massimo rallentamento medio, e financo l'arresto in caso di collisione frontale. (b) Collidendo con un corpo di massa molto maggiore si ottiene solo un piccolo rallentamento.

La collisione del neutrone con un nucleo di massa pressochè uguale (il protone) produce il massimo rallentamento medio e può addirittura arrestarlo in caso di collisione frontale (a), mentre collidendo con un nucleo molto pesante esso rimbalza perdendo pochissima energia cinetica (b). Poichè l'idrogeno (protoni) è gassoso, e quindi di densità bassissima, per far sì che il neutrone abbia un numero ragionevole di collisioni rallentanti se ne dovrebbero impiegare grandi volumi. Dunque è di gran lunga preferibile un moderatore solido (la densità di un gas è approssimativamente mille volte inferiore a quella di un solido). Il moderatore più comunemente utilizzato è il polietilene (PET), formula chimica $(C_2H_4)_n$, polimero costituito da idrogeno e carbonio. Calcoli analitici e simulazioni numeriche permettono di stabilire che per avere una moderazione efficace (termalizzazione) di neutroni con energia cinetica iniziale dell'ordine di diversi MeV è sufficiente un involucro in PET delle dimensioni dell'ordine di 10 cm.

In Figura 39 è illustrato lo schema di realizzazione di un rivelatore SiLiF. Il convertitore ^{6}LiF, depositato per evaporazione su un substrato in fibra di carbonio, è applicato sulle due facce di

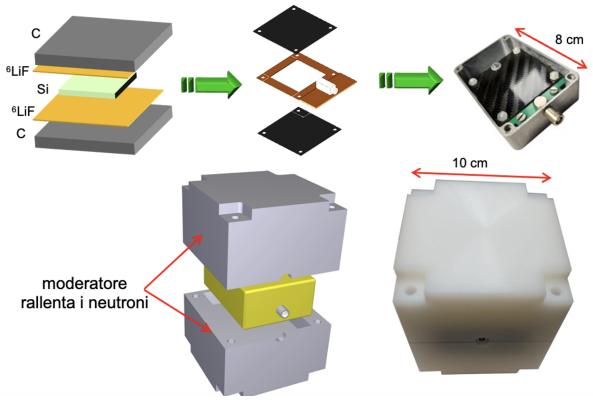


Figura 39: Schema di realizzazione di un rivelatore SiLiF.

un diodo al silicio di area 3×3 cm^2. Il sandwich è quindi assemblato all'interno di una scatoletta di alluminio che viene rachiusa dentro un moderatore cubico in PET di 10 cm di lato.

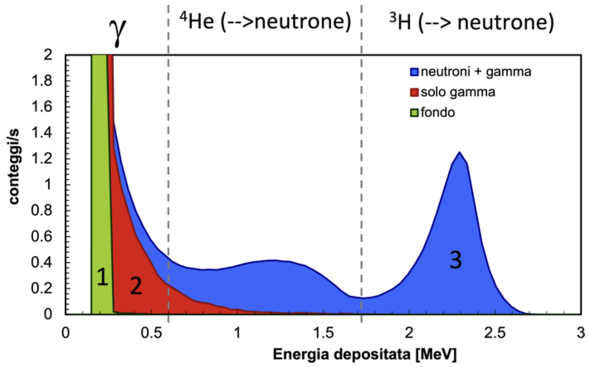


Figura 40: Spettro dei segnali prodotti dal rivelatore in tre diverse condizioni sperimentali. Si veda il testo per i dettagli.

I rivelatori SiLiF sono stati ampiamente caratterizzati utilizzando una sorgente di neutroni AmBe, cioè una miscela di ^{241}Am e ^{9}Be che tramite una particolare reazione nucleare detta $(\alpha$,n) produce sia neutroni che gamma energetici di diversi MeV. In particolare in Figura 40 si mostra lo spettro dei segnali prodotti dal rivelatore in tre diverse condizioni sperimentali:

1. acquisizione del fondo ambientale, nessuna sorgente presente;
2. acquisizione senza convertitore ma con la sorgente, che produce solo segnali dovuti a radiazione gamma;
3. acquisizione con convertitore, segnali prodotti sia da neutroni che da gamma.

A partire da 1.5 MeV in su, il contributo dei gamma diventa trascurabile, dunque si contano come neutroni solo i segnali più grandi di tale valore.

Test del sistema di monitoraggio radwaste

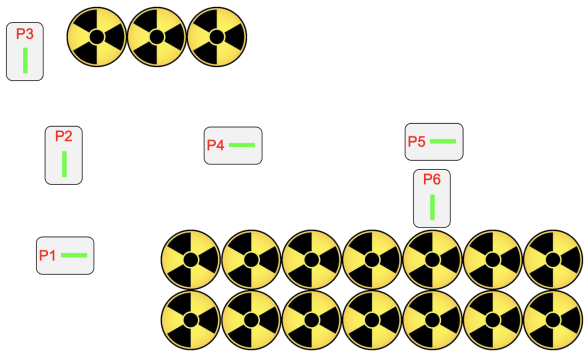


Figura 41: Test di un sensore SciFi in un deposito di ILW di SOGIN (Sessa Aurunca, Caserta).

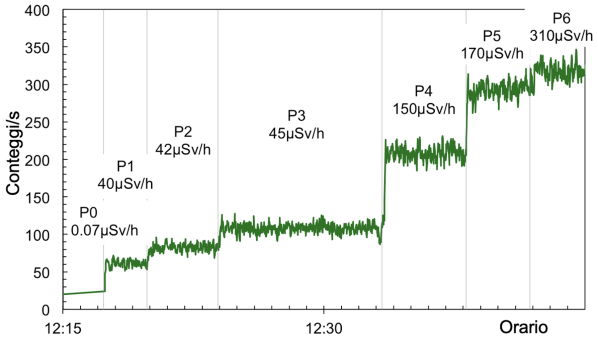


Figura 42: Tassi di conteggio e rateo di dose misurati nelle posizioni P1-P6 di Figura 41. La posizione P0 si riferisce alla misura all'esterno.

Nel corso degli ultimi anni i sensori appena descritti sono stati testati a più riprese sia con sorgenti radioattive di laboratorio che sul campo in varie configurazioni e con tutte le categorie di *radwaste*, da VLLW ad HLW e su *cask* di combustibile esaurito. In Figura 41 è riportato lo schema di una serie di misure effettuate con un sensore SciFi in un deposito di fusti di ILW. Il sensore è stato posizionato su un carrello che via via veniva spostato nelle posizioni da P1 a P6. La misura del fondo ambientale (P0) è stata effettuata all'esterno del deposito. I dati corrispondenti sono riportati nel grafico di Figura 42, assieme

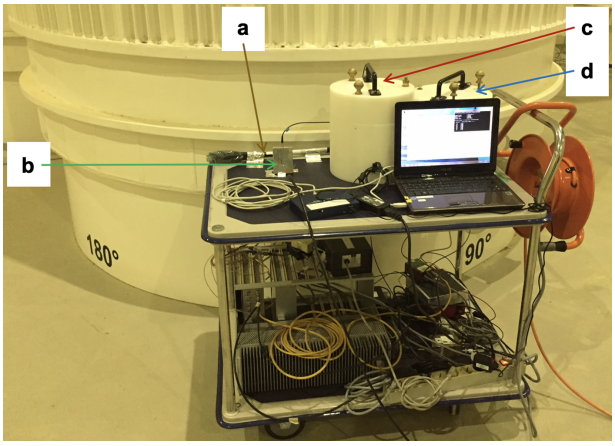


Figura 43: Configurazione dei sensori per il test su cinque *cask* di *spent fuel* nel sito di Figura 21 [7]. (a) Sensore SciFi. (b) Sensore SiLiF nudo. (c) Sensore SiLiF con moderatore di spessore 8 cm. (d) Sensore SiLiF con moderatore di spessore 4 cm.

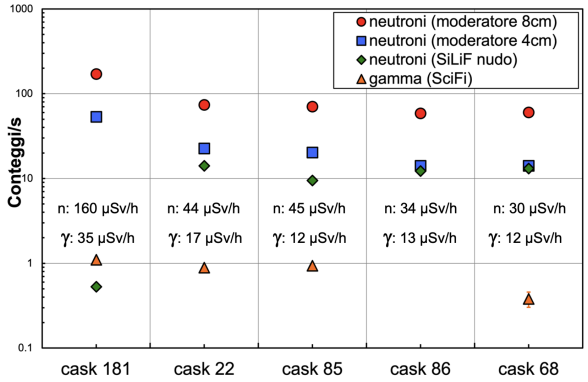


Figura 44: Tassi di conteggio misurati dai sensori di Figura 43 su cinque *cask*. Sono indicati anche i corrispondenti valori di rateo di dose di gamma e neutroni misurati con due dispositivi di riferimento.

al rateo di dose misurato con un dispositivo di riferimento.

Nel sito di stoccaggio *interim* mostrato in Figura 21 sono stati effettuati dei test su cinque *cask* di *spent fuel* con tre sensori SiLiF ed uno SciFi posizionati su un carrello. Uno dei SiLiF era nudo, gli altri due erano racchiusi in moderatori cilindrici di spessore 4 ed 8 cm (Figura 43). Sul grafico di Figura 44 sono mostrati i tassi di conteggio misurati dai sensori su ciascun *cask* e i corrispondenti valori di rateo di dose di gamma e neutroni misurati con due dispositivi di riferimento.

Nel corso del progetto MICADO [13] sono stati effettuati diversi importanti test sia con sorgenti inserite in un fusto di studio che su fusti reali di *radwaste* ILW e LLW. La configurazione prescelta

e studiata per i test è stata di 4 SciFi e 4 SiLiF attorno a ciascun fusto (Figura 45), per verificare anche eventuali asimmetrie di emissione della radiazione.

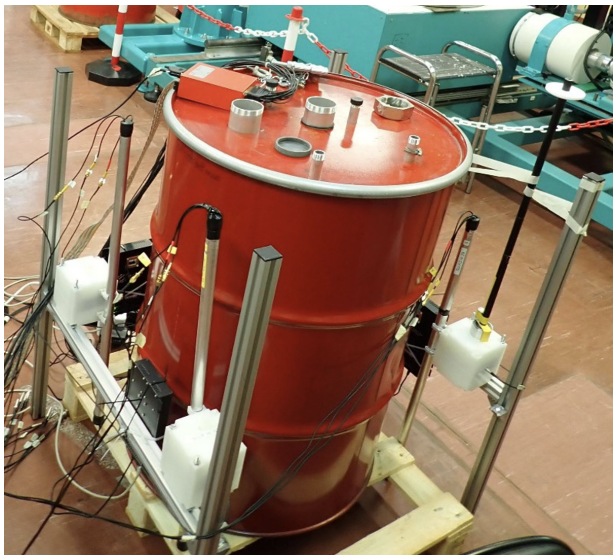


Figura 45: Il fusto di studio per il progetto MICADO nel laboratorio C43 presso ENEA Casaccia (Roma) [17]. La configurazione prescelta per i test prevedeva 4 sensori SciFi e 4 sensori SiLiF attorno a ciascun fusto.

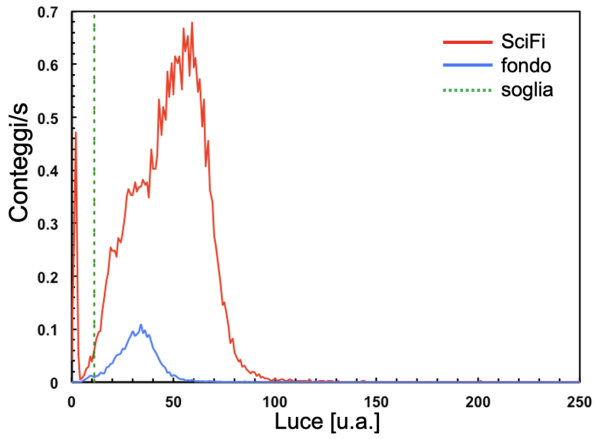


Figura 46: Spettro misurato da un sensore SciFi con una sorgente gamma di ^{137}Cs da 2 .3 MBq nel fusto di studio. In blu la misura del fondo ambientale.

In Figura 46 è riportato lo spettro misurato da uno dei sensori SciFi con una sorgente gamma di ^{137}Cs da 2 .3 MBq inserita in un alloggiamento verticale del fusto di studio. La differenza con la misura di fondo è palese. Nelle stesse condizioni, ma con una sorgente debole di neutroni da fissione spontanea (^{240}Pu, 4000 neutroni/s), si è misurato lo spettro di energia depositata in uno

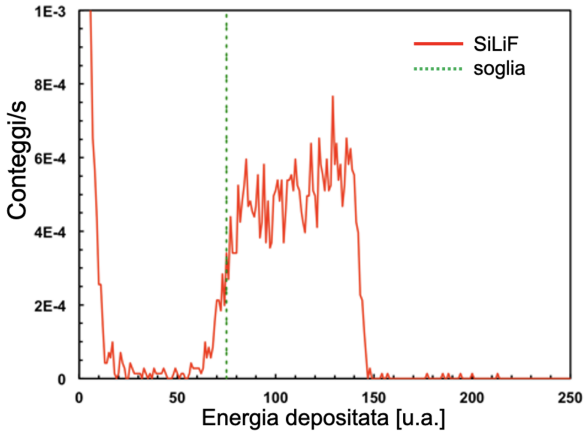


Figura 47: Spettro di energia depositata in un sensore SiLiF con sorgente debole di neutroni da fissione spontanea (^{240}Pu, 4000 neutroni/s).

dei sensori SiLiF (Figura 47). Il fondo in questo caso non era nemmeno apprezzabile. In un test

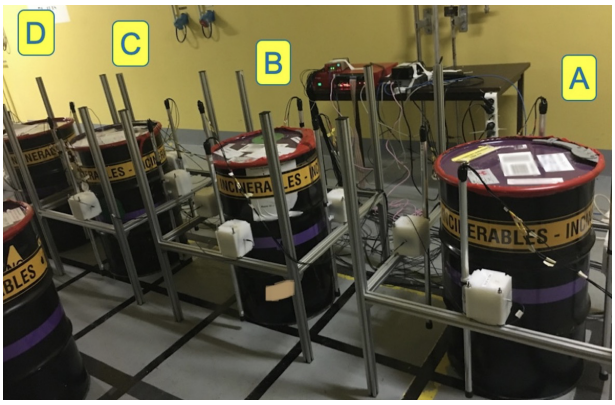


Figura 48: I 16+16 sensori SciFi e SiLiF installati intorno a quattro fusti di ILW, contenenti sia emettitori gamma che attinidi, presso un deposito di ORANO (La Hague, Francia) [11].

successivo i sensori sono stati installati intorno a quattro fusti di ILW, contenenti sia emettitori gamma che piccoli quantitativi di attinidi, soggetti a fissione spontanea e che quindi emettono neutroni (Figura 48). I risultati del test, della durata di alcuni giorni, sono riportati nei grafici di tipo radar plot di Figura 49. I sensori erano disposti in orientazione N-E-S-W (nord, est, sud, ovest). È interessante osservare che il *radwaste* nei fusti non era disposto in maniera omogenea, e questo traspare chiaramente dai grafici. In Figura 50 e Figura 51 sono riportati gli stessi dati di Figura 49 in un formato più convenzionale.

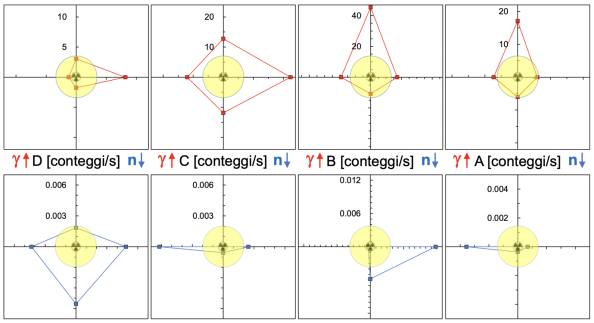


Figura 49: Radar plot con i risultati del test sui quattro fusti ILW di Figura 48. In alto i tassi di conteggio gamma, in basso i neutroni.

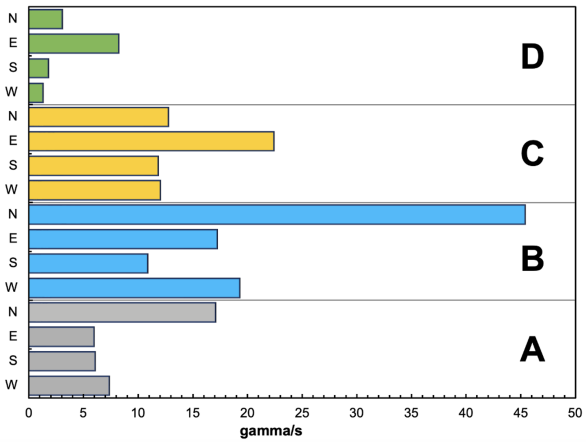


Figura 50: I dati di Figura 49 in alto, relativi ai tassi di conteggio gamma.

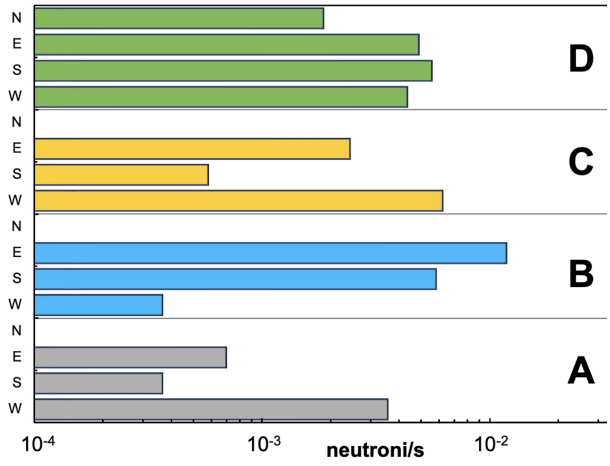


Figura 51: I dati di Figura 49 in basso, relativi ai tassi di conteggio di neutroni.



Figura 52: Il sistema di monitoraggio installato intorno a quattro fusti di LLW in un deposito di NUCLECO Casaccia (Roma) [18].

Lo stesso sistema di monitoraggio è stato poi installato intorno a quattro fusti di LLW (Figura 52) in un deposito di NUCLECO Casaccia (Roma) [18], per una acquisizione dati della durata di un mese. La Figura 53 rappresenta i radar plot relativi ai quattro fusti, i gamma a sinistra e i neutroni a destra. Come atteso i tassi di conteggio sono notevolmente inferiori a quelli relativi ai fusti di ILW. Anche in questo caso, gli stessi dati sono riportati in forma più convenzionale in Figura 54 (gamma) e Figura 55 (neutroni). La Figura 56 riassume l'andamento dei tassi di conteggio gamma per il fusto D durante il mese di misura.

Successivamente gli stessi sensori sono stati impiegati nel progetto PREDIS [14] sui rifiuti cementati, nell'ambito del quale è stato realizzato un sistema elettronico alimentato a batterie in grado di gestire una coppia SciFi+SiLiF [19]. Il sistema, comandato via connessione wireless, fornisce l'alimentazione ai sensori e provvede alla formazione dei segnali, alla loro digitalizzazione ed alla memorizzazione dei dati in una memoria locale. I dati, sfruttando la connessione wireless, vengono anche trasferiti localmente ad un computer che funge da stazione di comando e che a sua volta ne effettua una copia su un database allocato su un server remoto.

In tale configurazione i sensori possono essere programmati per effettuare una misura ad intervalli programmati, per poi passare ad uno stato di quiescenza che permette di preservare la carica delle batterie. In qualunque momento comunque i sensori possono essere risvegliati da un comando esterno tramite una connessione Bluetooth a basso consumo. La coppia di sensori e la relativa elettronica sono alloggiati su un supporto munito di ganci, che può essere installato molto rapidamente (alcuni secondi) su un fusto, riducendo i rischi radiologici per gli operatori (Figura 57).

È stato realizzato un fusto cementato di test

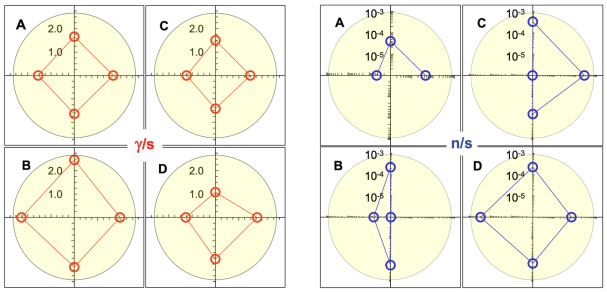


Figura 53: Radar plot con i tassi di conteggio relativi ai quattro fusti di Figura 52. I gamma a sinistra, i neutroni a destra.

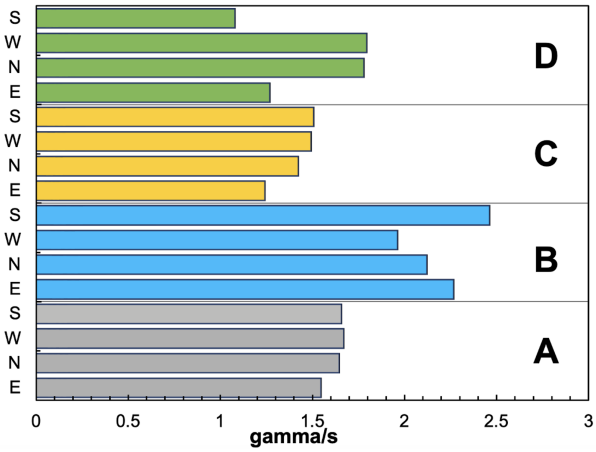


Figura 54: I dati di Figura 53 sinistra, relativi ai tassi di conteggio gamma.

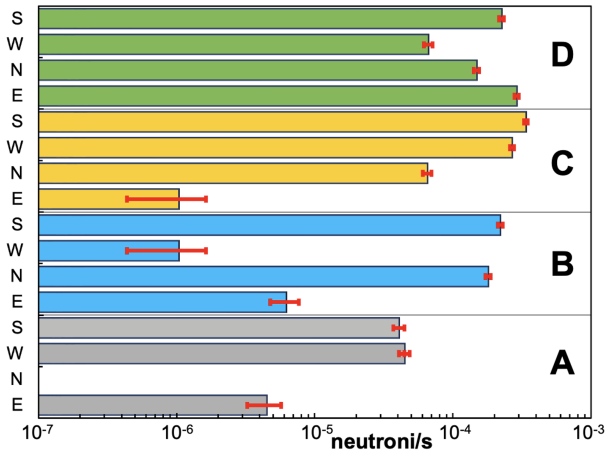


Figura 55: I dati di Figura 53 destra, relativi ai tassi di conteggio di neutroni.

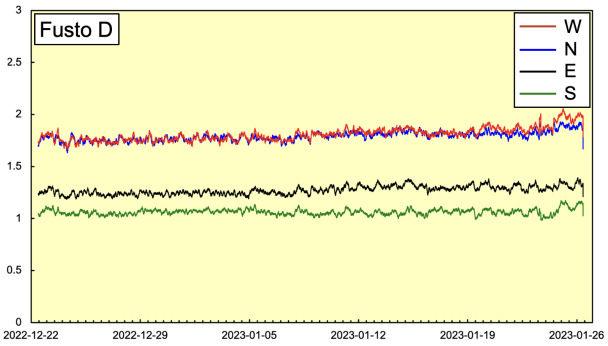


Figura 56: Andamento dei tassi di conteggio gamma per il fusto D durante il mese di misura.

con dei fori verticali, secondo lo schema di Figura 58, per poter inserire delle sorgenti di alta intensità ed ottenere delle distribuzioni non uniformi di radiazioni intorno al fusto stesso. Il fusto è stato posizionato su una piattaforma presso un deposito a UJV REZ (Praga, Repubblica Ceca) [20], equipaggiato con quattro unità wireless di sensori (Figura 59) e circondato di altri fusti cementati (Figura 60). Altri fusti, non mostrati in figura, sono poi stati disposti davanti realizzando una schermatura completa.

Nel foro centrale del fusto è stata inserita una sorgente gamma intensa di ^{137}Cs (165 MBq), ed il sistema è stato posto in acquisizione per oltre due mesi, effettuando una misura ogni 6 ore, e tutte le funzioni di controllo sono state effettuate via rete internet da 1500 chilometri di distanza. La Figura 61 mostra il plot relativo ai tassi di conteggio gamma nel corso del test, mentre la misura di neutroni, come atteso, non ha dato risultati. Il test dei sensori di neutroni è stato effettuato successivamente utilizzando una sorgente di PuBe, ed ha prodotto i risultati mostrati in Figura 62.

I sensori SciFi e SiLiF che sono stati anche testati e calibrati con successo presso laboratori internazionali come il CERN di Ginevra (Svizzera) [21] ed il PTB di Braunschweig (Germania) [22], hanno dimostrato di essere adatti per monitorare i materiali nucleari. Tale tipologia di monitoraggio presenta diversi vantaggi: riduce i rischi dell'esposizione alle radiazioni per il personale che opera nei depositi; aumenta il livello di sicurezza dei materiali nucleari, in quanto qualsiasi tentativo di manomissione, sia dei fusti che dei dispositivi, provoca un cambiamento nella risposta dei sensori; migliora la ripetibilità ed uniformità delle procedure periodiche di misura sui fusti, diversamente da quanto si ottiene con misure manuali effettuate in posizioni e distanze non definite con precisione; permette di avere una cronistoria dettagliata delle misure radiologiche sui fusti direttamente in forma digitale; i dati sul database, direttamente accessibili alle istituzioni

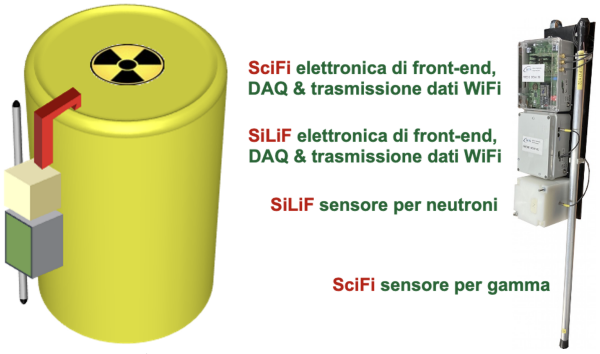


Figura 57: Schema di aggancio sul fusto (a sinistra) del sistema WiFi SciFi+SiLiF+elettronica alimentato a batteria (a destra).

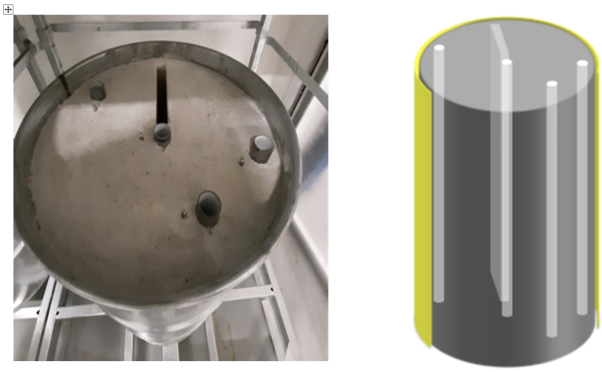


Figura 58: Fusto cementato di test con dei fori verticali per l'inserimento di sorgenti di alta intensità.

responsabili e/o debitamente autorizzate, incrementano il livello di trasparenza e permettono di effettuare agevolmente ed automaticamente delle analisi numeriche comparate.

Il deposito nazionale italiano

Da molti anni ormai si discute in Italia del Deposito Nazionale [23], infrastruttura nella quale dovrebbero essere convogliati tutti i rifiuti attualmente sparsi in varie località della penisola, all'interno di siti a volte non perfettamente idonei allo scopo (Fig. 63).

Per una descrizione completa del progetto del deposito e del Parco Tecnologico annesso si rimanda alla referenza [23], un disegno di massima recuperato sul sito web di Sogin qualche anno addietro è riportato in Figura 64. Mi preme però riportare qui alcune considerazioni che ritengo importanti. I primi passi per il deposito nazionale risalgono al 2003, ma i primi passi concreti si fecero nel 2014 con l'emissione della Guida



Figura 59: Il fusto posizionato su una piattaforma ed equipaggiato con quattro unità wireless di sensori.



Figura 60: Il fusto sulla piattaforma circondato di altri fusti cementati. Altri fusti, non mostrati, sono poi stati disposti davanti per una schermatura completa [20].

Tecnica n.29 di ISPRA [25]. Sogin pubblicò un grafico, che riporto in Figura 65 con l'aggiunta di alcune mie indicazioni, che sintetizza la procedura per giungere alla realizzazione. Il grafico ci dice che per avanzare di 10 mesi sono stati necessari 8 anni! I passi successivi, più rapidi, hanno portato ad un avanzamento complessivo di 18 mesi in 10 anni, e sempre stando al grafico di Figura 65 la realizzazione del deposito sarebbe dovuta iniziare nel 2018.

Purtroppo ad oggi in Italia pronunciare la parola "nucleare" suscita paure mai sopite, che ai piani alti della politica evocano scenari di perdita

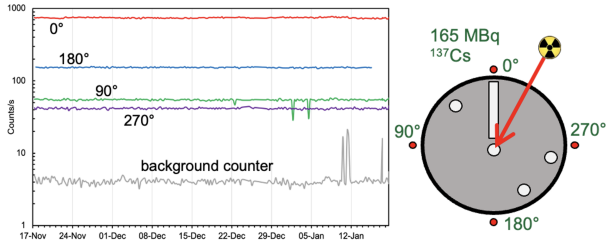


Figura 61: Tassi di conteggio gamma misurati ogni sei ore nel corso dei due mesi di test.

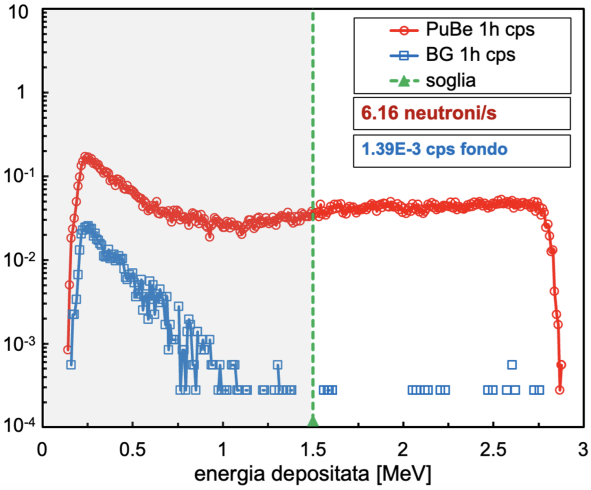


Figura 62: Test di un sensore wireless di neutroni esposto ad una sorgente di PuBe.

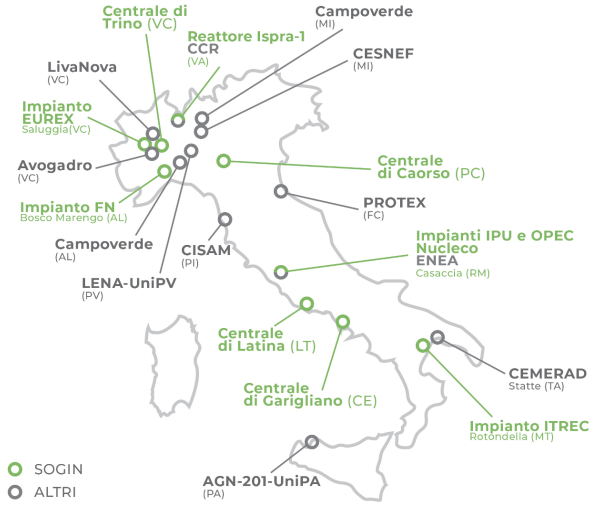


Figura 63: Centri italiani che producono e/o detengono rifiuti radioattivi (fonte [24]).

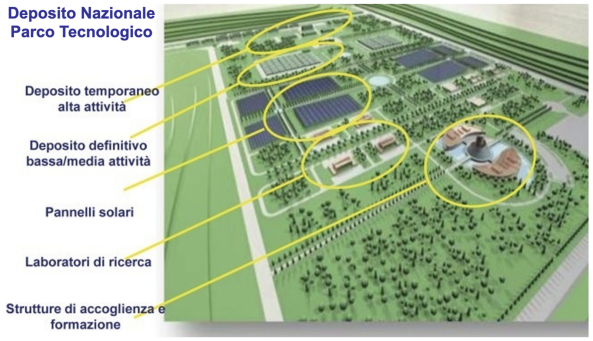


Figura 64: Disegno di massima del Deposito Nazionale e del Parco Tecnologico annesso, come riportato alcuni anni addietro sul sito web di Sogin.

di consenso. Questo sfortunatamente si traduce in inammissibili rallentamenti su un'opera di notevole urgenza e necessità, un'opera che sarebbe di grande impatto positivo per il paese e per la località destinata ad ospitarla. Infatti: gestire, sorvegliare e monitorare radiologicamente tutto il *radwaste* in un'unica infrastruttura tecnologicamente avanzata è certamente preferibile ad averli dispersi su una ventina di siti notevolmente differenti tra loro, con modalità di sicurezza differenti, con personale di esperienza e formazione diversa, con tecnologie diverse (o magari senza tecnologie); il parco tecnologico che dovrà sorgere assieme al deposito nazionale sarà necessariamente una struttura ad alto contenuto tecnologico e di ricerca, con ampie ricadute in termini di occupazione e di indotto tecnico-economico; la pericolosità dei rifiuti radioattivi è per molti versi sovrastimata, e comunque utilizzando tecniche e tecnologie avanzate oggi disponibili è possibile gestirli in maniera sicura ed affidabile.

Mi fermo qui, osservando che alla luce dei pesanti ritardi nella procedura per la realizzazione del deposito nazionale, che peraltro accordi internazionali ci obbligano a costruire, la messa in sicurezza dei nostri rifiuti di alto livello HLW in un deposito geologico rischia di avere tempi di realizzazione anch'essi geologici.

Ringraziamenti

Qui di seguito un elenco di persone che devo certamente ringraziare per il supporto e la collaborazione negli ultimi quindici anni sui temi esposti in questo saggio. Spero di non aver omesso qualcuno, se così non fosse me ne scuso anticipatamente. Gianni Ricco, Emilio Migneco, Marcello Lattuada, Marco Ripani, Eugenio Nappi, Luigi Cosentino, Alfio Pappalardo, Gianfranco Vecchio, Sergio Scirè, Massimo Barbagallo, Carlotta Scirè, Carmela Greco, Stefania Grillo,



Figura 65: Schema della procedura per giungere alla realizzazione del deposito nazionale di rifiuti radioattivi, come riportato alcuni anni addietro sul sito web di Sogin.

Martina Giuffrida, Carmelo Marchetta, Antonio Massara, Pietro Litrico, Giuseppe Passaro, Fabio Longhitano, Gaetano Elio Poma, Simone Amaducci, Gabriel Frei, Stefano Caruso, Federica Pancotti, Monica Sisti, Nadia Cherubini, Giuseppe Marzo, Luigi Lepore, Giada Gandolfo, Nicolò Ratto, Sergio Lo Meo, Matias Simonetto, Quentin Ducasse, Mauro Romoli, Michele Di Giovanni, Paolo Di Meo, Antonio Pandalone, Claudio Principe, Ernst Niederleithinger, Sabah Ben Lagha, Karel Prchal, Jakub Zaruba, Coralie Chapuzet, Thibaut Hemedinger, Eric Breuil, Maugan Michel, Camille Theroine, Anna Paola Caricato, Gianluca Quarta, Marcella Marra, Chiara Provenzano, Chiara Failla.

[1] https://www.britannica.com/technology/nuclear-reactor/Fuel-types

[2] https://www.britannica.com/technology/nuclear-reactor/Thermal-intermediate-and-fast-reactors

[3] P. Pescali: *Capire Fukushima: la lotta del Giappone, il nucleare oltre gli stereotipi.*, Lekton, Acireale (CT) (2021).

[4] https://www.oecd-nea.org/brief/brief-06.html

[5] https://www.isinucleare.it/en/radioactive-waste-management

[6] https://www.iaea.org/publications/15478/radioactive-

[7] https://www.zwilag.ch/en

[8] https://holtecinternational.com/waste-management

[9] https://www.posiva.fi/en/index.html

[10] https://skb.com/

[11] https://www.orano.group/en

[12] https://www.sogin.it/it

[13] MICADO Project. Available online: https://www.micado-project.eu/ (accessed on 23 February 2024).

[14] PREDIS Project, Euratom H2020, GA No. 945098. Available online: https://predis-h2020.eu/ (accessed on 23 February 2024).

[15] L. Cosentino, M. Giuffrida, S. Lo Meo, F. Longhitano, A. Pappalardo, G. Passaro, P. Finocchiaro: *Gamma - Ray Counters to Monitor Radioactive Waste Packages in the MICADO Project*, Instruments, 5 (2021) 19. https://doi.org/10.3390/instruments5020019

[16] L. Cosentino et al.: *SiLiF Neutron Counters to Monitor Nuclear Materials in the MICADO Project.*, Sensors, 21 (2021) 2630. https://doi.org/10.3390/s21082630

[17] https://www.casaccia.enea.it/

[18] https://www.nucleco.it/it/

[19] M. Romoli at al.: *A Wireless Gamma-Ray Monitoring System for Cemented Radwaste Drums*, Sensors, 24 (2024) 2332. https://doi.org/10.3390/s24072332

[20] https://www.ujv.cz/en

[21] https://home.cern/

[22] https://www.ptb.de/cms/en.html

[23] https://www.depositonazionale.it/

[24] https://www.depositonazionale.it/rifiuti-radioattivi/pagine/quanti-sono-i-centri-italiani-che-producono-rifiuti-radi aspx

[25] https://www.isprambiente.gov.it/it

Paolo Finocchiaro: dirigente tecnologo dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Laboratori Nazionali del Sud, Catania. Ha condotto per alcuni decenni esperimenti di fisica nucleare con ioni pesanti, e la sua attività, oltre che ai LNS, si è svolta al laboratorio GANIL presso Caen (Francia) ed al GSI di Darmstadt (Germania) dove ha coordinato la realizzazione di un grande multirivelatore a scintillazione per la misura di tempi di volo di particelle emesse in reazioni tra ioni pesanti. Da sempre dedito allo sviluppo di sistemi di rivelazione di radiazione, con circa 350 articoli pubblicati su riviste internazionali ed altrettante presentazioni a conferenze e scuole internazionali, da circa quindici anni si occupa di monitoraggio di rifiuti radioattivi, ed in tale ambito ha sviluppato rivelatori di radiazione gamma e neutroni a basso costo. Alcuni di tali rivelatori

vengono anche utilizzati nell'ambito del progetto NUMEN, altri sono anche possibili candidati per diagnostica medica. Parallelamente è membro della collaborazione n_TOF nella quale si occupa della misura di sezioni d'urto con fasci di neutroni al CERN di Ginevra (Svizzera).