

SpinScience Open Research Archive

Publisher: Università Popolare Nikola Tesla (UniTesla)



Original submission (Zenodo DOI)

SpinScience ID: spinscience:2026.000001

Working Paper

Energia nucleare: fondamenti fisici, applicazioni energetiche e criticità ambientali

Authors:

Antonio Iadicicco

Version of record (Zenodo DOI):	https://doi.org/10.5281/zenodo.18494656
SpinScience ID:	spinscience:2026.000001
Version:	v1
Year:	2026
License:	CC BY 4.0
Record:	—

For Original submissions, UniTesla is the publisher and SpinScience is the archive; the Zenodo DOI identifies the published record.

Not peer-reviewed by SpinScience unless explicitly stated.

Curated and indexed by SpinScience.

INDICE

INDICE	1
INTRODUZIONE	2
CAPITOLO 1	
RADIOATTIVITÀ	3
CAPITOLO 2	
LA FISSIONE NUCLEARE	3
LA FUSIONE NUCLEARE	5
Reattore a fusione Tokamak	6
FUSIONE "FREDDA"	7
Confinamento muonico	7
Confinamento chimico	8
CAPITOLO 3	
PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA DA ENERGIA NUCLEARE	9
Combustibile utilizzato	10
Centrali elettronucleari	11
Reattori autofertilizzanti	12
Sistemi di sicurezza dei reattori	13
CAPITOLO 5	
PRODUZIONE ENERGIA ELETTRICA	22
Produzione energia elettrica nel mondo	22
La produzione di energia in Italia	23
CAPITOLO 6	
I COSTI	25
CAPITOLO 7	
IL NUCLEARE IN ITALIA E IN EUROPA	27
La situazione italiana	27
Il nucleare in Europa	28

LA SITUAZIONE NEI PAESI CHE SI APPRESTANO AD ENTRARE NELL'UNIONE EUROPEA	30
La chiusura degli impianti pericolosi	31
Fattori di rischio: il problema del contenimento	33
REATTORI NEL MONDO	34
CAPITOLO 8	
IMPATTO AMBIENTALE E RISCHI CONNESSI	35
Radiazioni e radioprotezione	36
GESTIONE DELLE SCORTE NUCLEARI	39
Principi ed obiettivi della gestione dei rifiuti radioattivi	40
Depositi di scorie nel mondo	43
CONCLUSIONI	45
BIBLIOGRAFIA	46

INTRODUZIONE

Com'è noto, la materia è costituita dagli atomi a loro volta composti da particelle di tre tipi: protoni e neutroni, che formano il nucleo, ed elettroni, che orbitano intorno ad esso. Gli elettroni hanno carica negativa, i protoni carica positiva e i neutroni sono elettricamente neutri. Per mantenere la neutralità elettrica, il numero di elettroni deve quindi essere pari al numero di protoni presenti nel nucleo; se ciò non avviene, l'atomo prende il nome di ione. Vedremo che è proprio in seno al nucleo, ove tra l'altro si concentra la maggior parte della massa atomica, che trovano spiegazione i fenomeni della radioattività, della fusione e della fissione nucleare. Ci si potrebbe anche chiedere come mai il nucleo, anziché essere vittima delle forze di repulsione coulombiane tra le particelle di segno uguale (i protoni), resti ben compatto. La risposta a questa domanda viene data dalla presenza di una forza nucleare attrattiva (chiamata interazione nucleare forte), diversa da quella coulombiana, che diventa predominante alle dimensioni subnucleari, che sono proprio quelle a cui si fa riferimento.

Le proprietà chimiche di un atomo non dipendono dal numero di neutroni da questo posseduti: se ad un atomo di carbonio, ad esempio, viene tolto od aggiunto un neutrone, questo rimarrà sempre un atomo di carbonio; gli atomi di uno stesso elemento che hanno un numero di neutroni diverso sono detti isotopi di quell'elemento, e sono caratterizzati da differenti proprietà fisiche ma dalle medesime proprietà chimiche.

Sempre a titolo esemplificativo, l'idrogeno ha tre possibili isotopi:

- ^1H (idrogeno-1) o idrogeno, in cui il nucleo è composto da un solo protone,
- ^2H (idrogeno-2) o deuterio, in cui il nucleo è composto da un protone ed un neutrone,
- ^3H (idrogeno-3) o trizio, in cui il nucleo è composto da un protone e due neutroni. Il

numero di massa A (indicato a sinistra del simbolo chimico) di un atomo indica il numero totale di nucleoni (ovvero di neutroni e protoni) che esso contiene, mentre il numero atomico Z ne specifica il numero di protoni.

Anche l'uranio ha tre isotopi naturali; questi sono:

- ^{238}U (uranio-238), 99.27%
- ^{235}U (uranio-235), 0.72%
- ^{234}U (uranio-234). $5.5 \times 10^{-3}\%$

Gli isotopi costituenti la materia sono talvolta instabili e tendono, con il passare del tempo a divenire stabili acquistando o cedendo neutroni, ed emettendo particelle elementari (particelle α , (β , neutroni), generalmente accompagnate da radiazioni elettromagnetiche (raggi X, raggi γ).

CAPITOLO I

RADIOATTIVITÀ

Radioattività proprietà di alcuni nuclei atomici di subire trasformazioni spontanee mediante l'emissione di particelle subatomiche o di onde elettromagnetiche estremamente penetranti. Il fenomeno fu scoperto nel 1896 dal fisico francese Antoine-Henri Becquerel, il quale osservò accidentalmente che i sali di uranio emettevano radiazioni capaci di impressionare una lastra fotografica, nonostante questa fosse protetta da uno schermo opaco ai raggi luminosi. Le ricerche iniziate da Becquerel vennero riprese dagli scienziati francesi Pierre e Marie Curie, i quali nel 1898 scoprirono che la proprietà di emettere radiazioni penetranti non dipende dallo stato chimico o fisico di un elemento, ma è intrinseca di alcuni nuclidi, e diedero al fenomeno il nome di radioattività. Per definizione, una specie nucleare (un nuclide) si dice radioattiva se subisce trasformazioni spontanee in tempi inferiori a 10^{10} anni. I nuclei stabili possono diventare radioattivi se sottoposti a opportuna sollecitazione, ad esempio, mediante il bombardamento con particelle alfa o neutroni. In questo caso, si parla di radioattività indotta o artificiale.



Figura 1: Henry Becquerel e i coniugi Curie.

Legge del decadimento radioattivo

Oggi si conoscono diversi tipi di decadimento radioattivo; differiscono per modalità di attuazione, energia e forze coinvolte, ma seguono tutti la stessa legge di decadimento. Si tratta di una funzione esponenziale, che permette di calcolare, dato un campione con un numero iniziale di nuclei instabili N_0 , il numero di nuclei decaduti $N(t)$ al tempo t :

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

Il parametro λ , chiamato costante di decadimento, è specifico per ogni nuclide e determina la velocità del processo di trasformazione.

Tempo di dimezzamento

Dalla legge del decadimento radioattivo deriva la definizione del tempo di dimezzamento, un parametro comunemente utilizzato per valutare la velocità di decadimento di una specie radioattiva. Definito come il tempo necessario perché il numero di nuclidi instabili di un campione si dimezzi, è dato da:

$$T_{1/2} = (\ln 2)/\lambda,$$

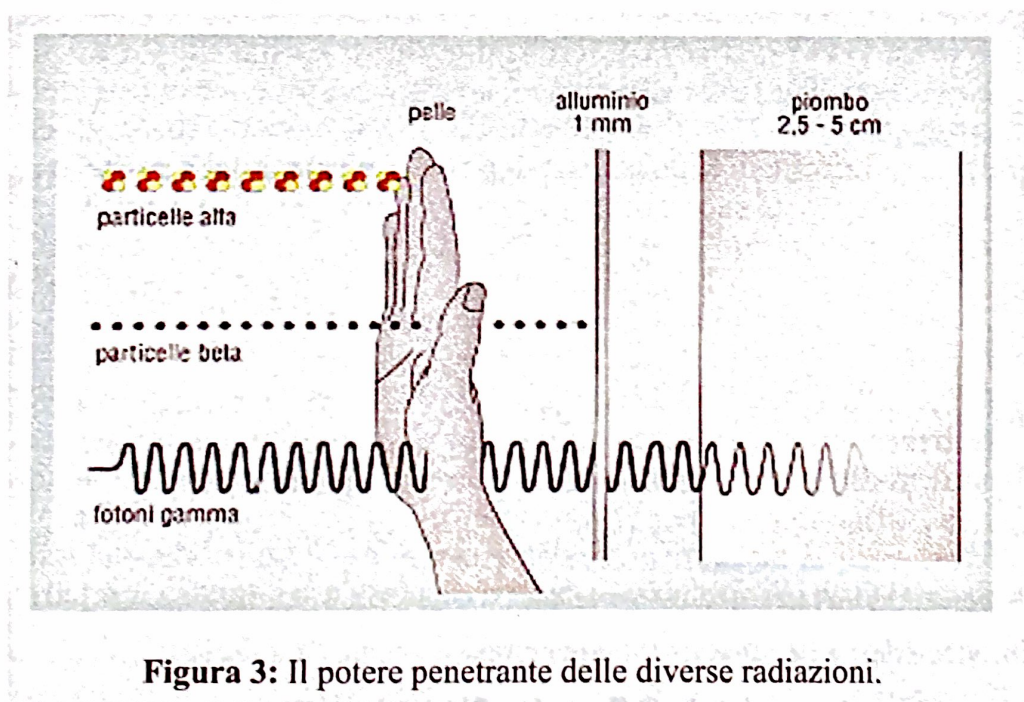
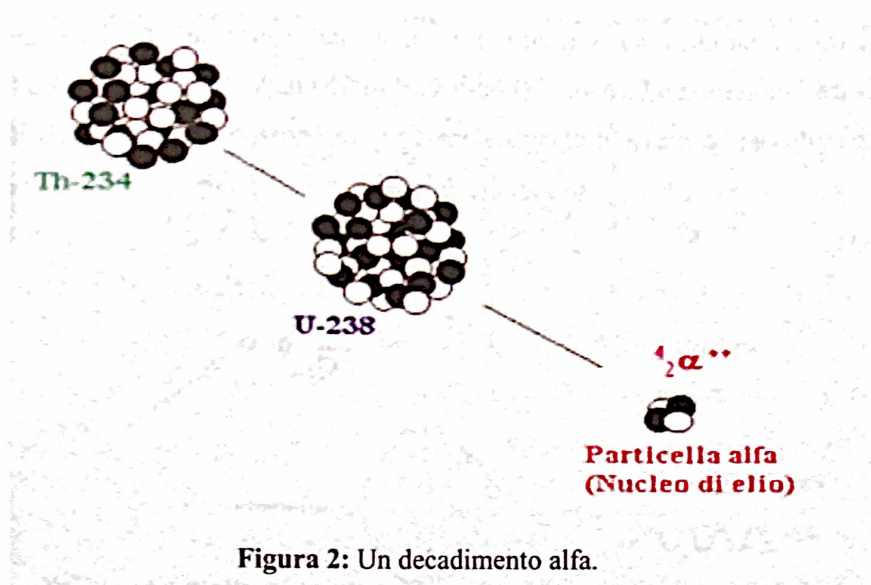
dove $\ln$ rappresenta il logaritmo naturale. Spesso, in luogo del tempo di dimezzamento, si indica la 'vita media' di un radionuclide, che equivale al periodo di tempo necessario affinché il numero di nuclei instabili si riduca a circa il 37% del suo valore iniziale.

TIPI DI DECADIMENTO RADIOATTIVO

Il decadimento radioattivo di un nucleo instabile può avvenire in diversi modi e produrre risultati differenti. Può comportare l'emissione di una o più particelle, con conseguente trasformazione del nucleo padre in un nucleo chimicamente diverso; può produrre soltanto il rilascio di una certa quantità di energia sotto forma di radiazione elettromagnetica o la scissione del nucleo in due frammenti. I principali tipi di decadimento radioattivo oggi sono quello alfa, i due tipi di decadimento beta, il gamma.

Decadimento alfa

Il decadimento alfa consiste nell'emissione, da parte di un nucleo instabile relativamente pesante, di una particella costituita da due protoni e due neutroni; in sostanza, di un nucleo di elio. Il nucleo figlio ha un numero atomico Z inferiore di due unità ($Z-2$) rispetto al nucleo padre e un numero di massa A inferiore di quattro unità ($A-4$). Ad esempio, l'isotopo dell'uranio con numero di massa 238 si trasforma nel nucleo dell'elemento con numero di massa 234, avente due protoni e due neutroni in meno: il torio 234 (Figura 2). Le radiazioni alfa, per la loro natura, sono poco penetranti e possono essere completamente bloccate da un semplice foglio di carta (Figura 3).



Il decadimento beta esiste in due versioni distinte, dette rispettivamente beta meno e beta più. La prima comporta la trasformazione di un neutrone del nucleo instabile in un protone, con emissione di una particella beta (un elettrone) e di un'altra particella estremamente leggera e sfuggente, chiamata antineutrino elettronico; in sostanza, questo tipo di decadimento trasforma il nucleo instabile di partenza in un nucleo dell'elemento successivo della tavola periodica (quello con il numero Z maggiore di un'unità). Il decadimento beta più, invece, consiste nella trasformazione del nucleo instabile in un nucleo dell'elemento precedente della tavola periodica (quello con Z minore di un'unità): fisicamente, un protone si trasforma in un

neutrone, emettendo un positrone (un elettrone positivo) e un neutrino elettronico. Un esempio è il decadimento del Cobalto-60 in Nichel-60 (Figura 4). Le radiazioni beta sono più penetranti di quelle alfa, ma possono essere completamente bloccate da piccoli spessori di materiali metallici (ad esempio, pochi millimetri di alluminio).

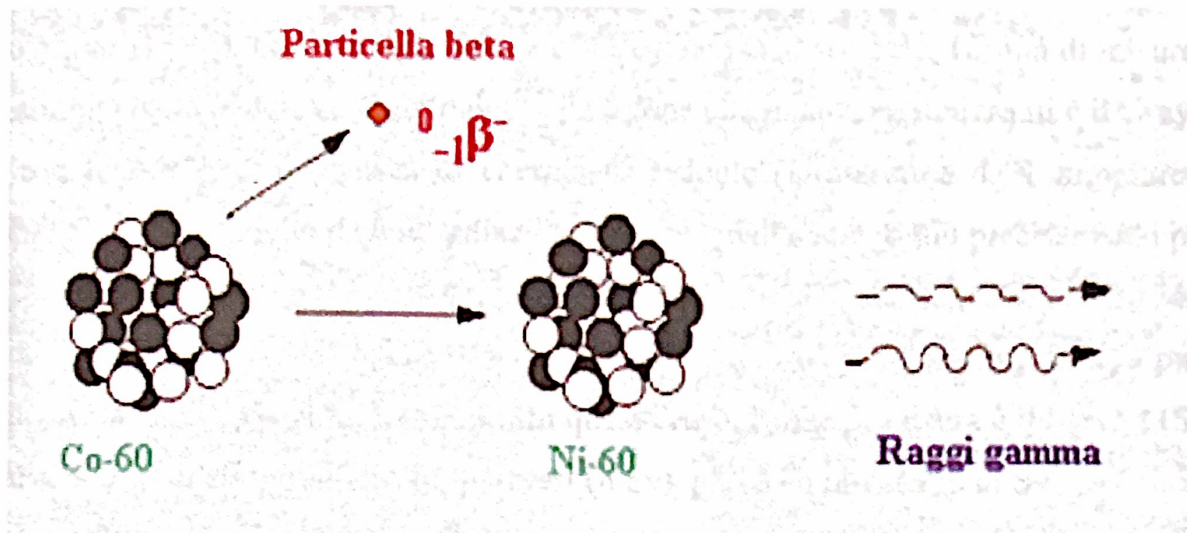


Figura 4: Un decadimento beta con successivo decadimento gamma del nucleo

Decadimento gamma

Il decadimento gamma consiste nell'emissione di radiazione elettromagnetica ad alta frequenza. Si può verificare quando un isotopo esiste in due diverse forme, chiamate isomeri nucleari, che hanno numero atomico e numero di massa identici, ma differente energia. L'emissione di raggi gamma accompagna la transizione dell'isomero di alta energia a quello di energia minore. La radiazione gamma accompagna solitamente una radiazione alfa o una radiazione beta. Infatti, dopo l'emissione alfa o beta, il nucleo è ancora eccitato perché i suoi protoni e neutroni non hanno ancora raggiunto la nuova situazione di equilibrio: di conseguenza, il nucleo si libera rapidamente del surplus di energia attraverso l'emissione di una radiazione gamma. Per esempio il cobalto-60 si trasforma per disintegrazione beta in nichel-60, che raggiunge il suo stato di equilibrio emettendo una radiazione gamma (Figura 4). Al contrario delle radiazioni alfa e beta, le radiazioni gamma sono molto penetranti, e per bloccarle occorrono materiali ad elevata densità come il piombo (Figura 3).

Unità di misura

La prima unità di misura introdotta per esprimere l'attività di una sostanza radioattiva fu il *curie (Ci)*: corrisponde all'attività di circa 1 g di radio, e vale 37.000 miliardi di disintegrazioni al secondo. Nel Sistema Internazionale, in luogo del curie si adotta il più pratico *becquerel (Bq)*, che corrisponde a 1 disintegrazione al secondo. L'unità di misura della dose assorbita dalla materia a seguito dell'esposizione alle radiazioni ionizzanti è il Gray (Gy). 1 Gy corrisponde a una quantità di energia di 1 Joule (J) assorbita da 1 kilogrammo di materia. Per la misura delle dosi di radiazioni assorbite dall'uomo, o più precisamente per una misura degli effetti biologici dovuti alla dose di radiazioni assorbita, è stato introdotto il concetto di equivalente di dose, che tiene conto della dannosità più o meno grande, a parità di dose, dei vari tipi di radiazioni ionizzanti. In questo caso, l'unità di misura è il Sievert (Sv). Di uso più comune è il sottomultiplo millisievert (mSv), pari a un millesimo di Sv.

CAPITOLO 2

LA FISSIONE NUCLEARE

E' risaputo che i nuclei di molti atomi sono stabili cioè rimangono inalterati nel tempo. Questi costituiscono la maggior parte degli elementi naturali. Altri nuclei sono instabili, cioè si frammentano in un tempo brevissimo di circa 1 milionesimo di milionesimo di secondo. Questi nuclei sono assenti in natura: appena se ne forma uno per un qualunque motivo, subito esso "scompare" per fissione nucleare. Altri nuclei sono semi-stabili: cioè tendono a rompersi in un tempo relativamente lungo, da qualche secondo a qualche milione di anni. Questi nuclei esistono in natura, sebbene in piccole quantità e vengono chiamati "debolmente radioattivi". Per stimolare i nuclei debolmente radioattivi bisogna, in qualche modo, modificarli. Uno di questi modi è la fissione. In tale processo, un nucleo pesante, solitamente di uranio, torio o plutonio, colpito da un neutrone, si spezza in due frammenti la cui massa complessiva è inferiore alla massa del nucleo di partenza e la massa scomparsa ricompare sotto forma di energia, secondo la relazione relativistica

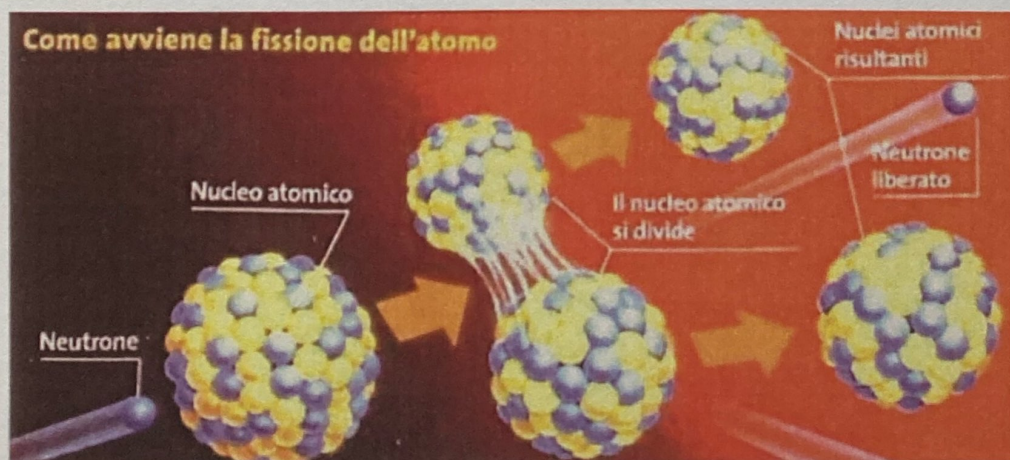
$$\Delta E = \Delta m c^2$$

dove:

ΔE rappresenta la differenza d'energia

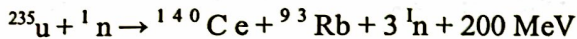
Δm rappresenta la differenza di massa

c rappresenta la velocità della luce ($3 \cdot 10^8$ m/s)



Nella figura un neutrone bombarda il nucleo dell'isotopo 235 dell'uranio, presente nell'elemento naturale nella proporzione dello 0,7%. Il nucleo di U235 assorbe il neutrone e, dopo un tempo brevissimo, si divide in due frammenti, cioè in due nuclei di massa più piccola dell'uranio, i quali si allontanano l'uno dall'altro con un'energia complessiva di 200 MeV.

Quindi dalla fissione del nucleo ^{235}U , indotta dall'assorbimento di un neutrone,

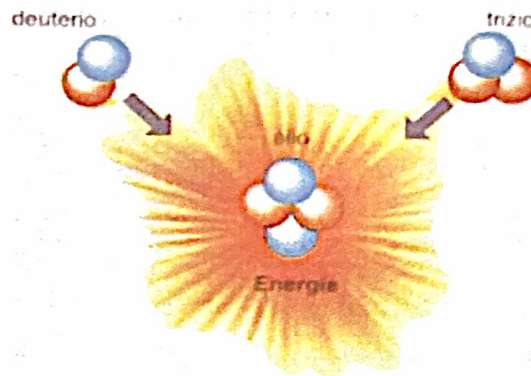


si ottiene invece cesio 140, rubidio 93, tre neutroni e un'energia nucleare di 200 MeV. L'energia liberata dalla fissione di un solo nucleo è praticamente nulla sulla scala delle energie che interessano l'uomo, ma, se si fa subire la reazione di fissione a 1 kg di uranio 235, si libera un'energia pari a $25 \cdot 10^6$ kWh. La massa corrispondente a questa energia, secondo la relazione relativistica, è di circa 1 g; dunque nella reazione di fissione di un kg di uranio circa 1 g, cioè l'1 per mille della massa, scompare per convertirsi in energia. Una caratteristica interessante delle reazioni di fissione è che, in media, dal nucleo che si divide in due escono due neutroni e mezzo: ciò significa che nella grande maggioranza dei casi escono due o tre neutroni, talvolta solo uno, oppure quattro o più. Questi neutroni hanno un'energia molto elevata e possono a loro volta bombardare altri nuclei di uranio, provocandone così la fissione. Quando questo avviene in modo efficace nell'interno di una massa di U 235 puro, si dice che ha avuto luogo una reazione a catena, cioè una reazione che procede a velocità elevatissima perché viene accelerata proprio in proporzione alla sua stessa velocità.

CAPITOLO 3

LA FUSIONE NUCLEARE

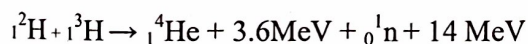
La fusione nucleare di nuclei leggeri in nuclei più pesanti, è un processo in grado di liberare energia in quanto il nucleo prodotto è lievemente più leggero dell'insieme dei due nuclei di partenza e il difetto di massa Δm si trasforma in energia.



La fusione è un fenomeno frequente in natura. Tutte le stelle sono composte in larghissima percentuale di idrogeno e elio. La materia stellare si trova in condizioni estremamente diverse a quelle noi abituali, con valori elevatissimi di pressione e temperatura. Queste altissime temperature e pressioni sono in grado di realizzare ciò che alle nostre condizioni è difficilissimo realizzare ovvero comprimere i nuclei l'uno così vicino all'altro, lavorando contro le forze di repulsione elettrica, tanto da permettere la fusione. Affinché essa avvenga, il gas reagente deve essere riscaldato fino a una temperatura di 50 milioni di gradi kelvin.

Il gas reagente è costituito dagli isotopi pesanti dell'idrogeno, deuterio e trizio.

Ogni evento di fusione:



rilascia un'energia pari a 17,6 MeV, che si manifesta dapprima come energia cinetica del nucleo di elio 4 e del neutrone prodotto, quindi si trasforma in energia termica, determinando un rapido riscaldamento del gas circostante. Per temperature superiori ai 100.000 °C, gli atomi degli isotopi dell'idrogeno sono completamente ionizzati. Il gas reagente si trova nello stato della materia detto plasma, che consiste in una miscela di cariche libere positive e

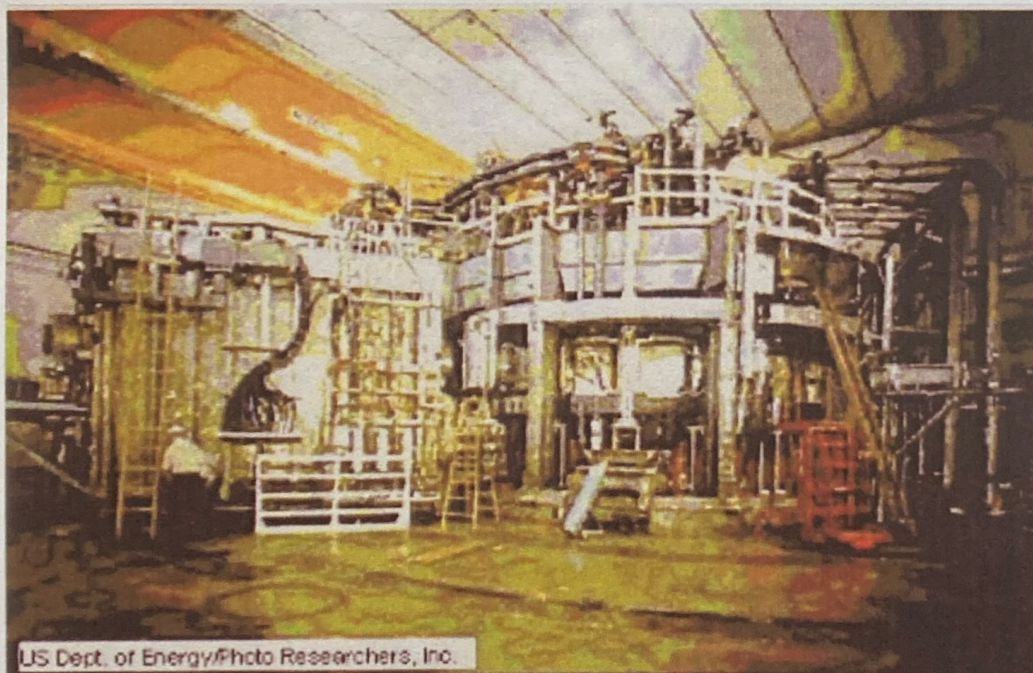
negative, complessivamente neutra. Affinché il processo sia vantaggioso, è necessario confinare il plasma entro uno spazio ridotto, così da aumentare il più possibile il numero degli eventi di fusione. Gli attuali reattori per fusione sono chiamati tokamak.

I vantaggi dell'energia ricavata dalla fusione, nell'eventualità di trovare una strada per produrla in modo utilizzabile sono:

1. una fonte inesauribile di combustibile (il deuterio dell'oceano);
2. un basso rischio di incidente all'interno del reattore, che conterrebbe quantità minime di combustibile;
3. residui molto meno radioattivi di quelli della fissione.

Reattore a fusione Tokamak

Negli attuali reattori per fusione, detti tokamak, la camera di confinamento è di forma toroidale, con il diametro minore di circa 1 m e il diametro maggiore di circa 3 m. Il campo magnetico applicato, di intensità pari a 5 tesla, induce una corrente longitudinale di diversi milioni di ampère all'interno del plasma e le linee del campo magnetico risultante producono il confinamento del plasma.



Nel 1993 il reattore a fusione Tokamak dell'università di Princeton (New Jersey) produsse una reazione di fusione controllata in cui la temperatura raggiunse un valore superiore al triplo di quella del nucleo del Sole. In questo tipo di reattori le condizioni di pressione, temperatura e densità necessarie, perché avvenga la fusione tra protoni, vengono ricreate confinando un

plasma di idrogeno caldo (gas completamente ionizzato) in un campo magnetico generato da potenti calamite. Il problema sta non solo nel realizzare la reazione di fusione, ma nel ricavarne un'energia maggiore di quella spesa per ottenerla. Questo è solo un prototipo sperimentale attraverso il quale è stato possibile dimostrare che si può ottenere energia mediante fusione di nuclei di elementi leggeri, ma non esistono ancora delle centrali a fusione nucleare. In oltre 40 anni di ricerca, sono stati compiuti molti passi avanti: i laboratori europei hanno messo a punto la macchina sperimentale "Jet" (Joint European Tokamak) ed è stato progettato l'Iter: International Tokamak Experimental Reactor nato dall'accordo fra sette grandi partner (Unione Europea, Giappone, Russia, Cina, Corea, India e Stati Uniti) per un totale di 3.500 ricercatori di 140 istituti di ricerca di 34 Paesi.. La costruzione di ITER comincerà a fine anno nel Sud della Francia, a Cadarache e sarà il primo reattore a fusione nucleare ad avere dimensioni paragonabili a quelle di una centrale elettrica. Si prevede un investimento di 5 miliardi di euro soltanto nella fase di costruzione, che durerà 8 anni, più una spesa compresa fra 200 e 250 milioni di euro l'anno per condurre gli esperimenti e perfezionare la macchina. Soprattutto ITER avrà il compito di dimostrare la fattibilità della fusione. Sulla base delle informazioni raccolte da ITER, nei primi anni di attività (almeno 5) si potrà passare alla realizzazione di un dimostratore, che permetterà di ottimizzare il progetto e quindi, presumibilmente nel 2030, tutto sarà pronto per realizzare un vero e proprio reattore a fusione destinato a produrre energia su larga scala.

FUSIONE "FREDDA"

Nel 1989 due elettrochimici, Martin Fleischmann e Stanley Pons, annunciarono la scoperta della fusione "fredda". Anche in questo tipo di fusione è indispensabile avvicinare i nuclei di deuterio e trizio a distanze tali da poter permettere le reazioni a fusione, che però vengono accelerate dai cosiddetti catalizzatori. A seconda del processo di catalisi che viene utilizzato, si parla di fusione fredda prodotta mediante CONFINAMENTO MUONICO O CHIMICO.

Confinamento muonico

Il muone è una particella che ha una massa circa 200 volte quella dell'elettrone e da una vita media di 2,2 milionesimi di secondo. Dato che nel disintegrarsi, il 99,5% della massa del muone si trasforma in energia, si è pensato di utilizzarlo come catalizzatore nelle reazioni

nucleari. In effetti il muone riesce a far avvicinare i nuclei di deuterio e trizio a temperatura ambiente e pressione atmosferica, tuttavia la possibilità che tale processo possa avere delle applicazioni nell'ambito della produzione energetica su scala industriale è legata al fatto che tale particella prima di "morire", può catalizzare almeno un migliaio di reazioni. Questo perché altrimenti non sarebbe sufficientemente produttivo il bilancio energetico (cioè l'energia fornita al sistema sarebbe superiore a quella prodotta dallo stesso). Oggi, le ricerche, su miscele di deuterio-trizio nell'intervallo di temperatura che va da -260°C a 530°C , hanno portato al risultato di non più di 200 fusioni per ogni muone. Un valore ancora troppo basso visto che duecentocinquanta reazioni per muone rappresentano il limite minimo per compensare l'energia fornita al reattore muonico dall'esterno con quella liberata dalla reazione stessa.

Confinamento chimico

La fusione fredda basata su tale tipo di confinamento, è caratterizzata dalla proprietà che ha il Palladio (oro bianco) di impregnarsi di Idrogeno e dei suoi isotopi. L'apparato è costituito da una soluzione liquida a base di deuterio in cui sono immersi due elettrodi (anodo e catodo), uno costituito da Palladio e l'altro da Platino. Fornendo dall'esterno energia alla cella elettrolitica, collegando i due elettrodi ad una batteria, si ha il passaggio di una corrente da un elettrodo all'altro attraverso la soluzione elettrolitica che, sensibilizzata dal passaggio di corrente, dà origine a diversi prodotti da "elettrolisi": Elio, Trizio, neutroni, raggi Gamma e raggi X. Inoltre si registra una quantità di calore prodotto che, tradotto in termini energetici, risulta essere maggiore di quella immessa nella cella attraverso la batteria. Secondo gli studiosi è dovuto alle particolari proprietà del Palladio che, fungendo da catalizzatore, costringe i nuclei degli atomi di Deuterio a stare tanto vicini da fondersi. Infatti, si ipotizza che l'eccesso di calore prodotto non era attribuibile a una reazione chimica nota e poiché la soluzione elettrolitica conteneva deuterio considerarono plausibile la fusione di due nuclei dello stesso. I risultati principali degli esperimenti furono che le celle elettrolitiche avevano prodotto una potenza di 4 Watt contro 1 Watt fornito, con un rendimento quindi del 400% e che i neutroni erano stati prodotti con un ritmo di circa 40.000 al secondo; (per i detrattori della fusione fredda, per poter parlare di vera e propria fusione, i neutroni prodotti per secondo dovrebbero essere almeno mezzo miliardo).

I "fusionisti caldi" sostengono che nella fusione fredda si producono un numero di particelle nucleari troppo basso per poter giustificare il calore prodotto. Mentre, per i "fusionisti freddi"

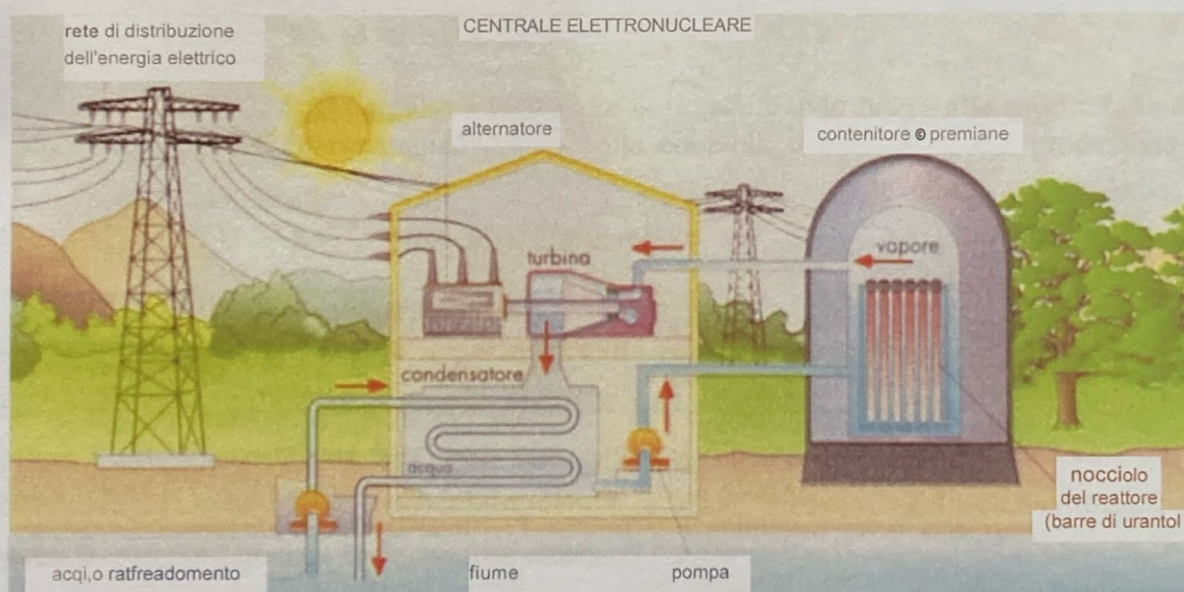
la sola presenza di calore basta a ipotizzare una reazione nucleare. Ancora oggi il problema più immediato della fusione "fredda" resta quello della riproducibilità, non solo per un fatto di applicazione dell'eventuale potenzialità tecnologiche, ma ancor più per un miglior studio del fenomeno. Ma se da un punto di vista sperimentale, la questione sembra giunta ad un livello conclusivo, con la constatazione in diversi esperimenti di un eccesso di calore, da un punto di vista teorico sono numerose le controversie sulla natura e sui meccanismi degli effetti della fusione "fredda".

CAPITOLO 4

PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA DA ENERGIA NUCLEARE

Il principio di funzionamento delle centrali nucleari è simile alle centrali termoelettriche.

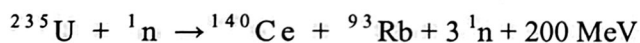
La differenza sostanziale è la modalità di produzione del vapore. Nelle centrali nucleari la produzione del vapore per azionare la turbina si compie nel reattore nucleare. La parte fondamentale di quest'ultimo è il nocciolo, costituito da contenitori nei quali viene inserito il combustibile nucleare, i cilindretti di uranio. All'interno del nocciolo viene innescato il processo di fissione nucleare controllato che produce il calore necessario a scaldare l'acqua e trasformarla in vapore ad alta pressione. Il vapore viene convogliato sulla turbina che ruotando trasmette la sua energia meccanica all'alternatore che a sua volta la trasforma in energia elettrica grazie al fenomeno dell'induzione elettromagnetica.



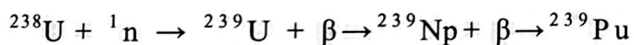
Il controllo del processo di fissione avviene attraverso le barre di controllo, le quali si inseriscono nel reattore per regolarne la potenza e, all'occorrenza, per spegnerlo. Il reattore deve avere una struttura in grado di non lasciar fuoriuscire le sostanze radioattive che si sprigionano durante il processo di fissione. Il reattore è inserito in un cilindro d'acciaio inossidabile posto all'interno di un contenitore in cemento armato dello spessore di almeno un metro. Anche l'edificio che contiene il reattore è fatto di una solida struttura in cemento armato.

Combustibile utilizzato

Il combustibile utilizzato nelle centrali elettronucleari è l'uranio; come già detto, però, nell'uranio estratto la parte utilizzabile, detta anche 'fissile', (isotopo U-235) ha una concentrazione molto bassa (0,7%). La parte rimanente (isotopo U-238) è praticamente non fissile; per ovviare a questo "problema", viene utilizzato uranio arricchito (generalmente ossido di uranio), cioè trattato opportunamente per avere una concentrazione di U-235 che si attesti intorno al 5% (percentuale tale da non avere rischio di esplosioni nucleari). Il combustibile viene ottenuto trasformando l'uranio estratto in esafluoruro (UF₆) gassoso, il quale, passando attraverso setacci molecolari, aumenta la concentrazione in U-235 (che passa più facilmente attraverso la barriera porosa). Il gas viene poi ridotto in polvere di ossido di uranio da cui si ricavano le pastiglie, che costituiscono le barre utilizzate nei reattori. L'uranio, sotto forma di barre, viene introdotto nel nocciolo del reattore e sottoposto a fissione:



Alcuni atomi di U-238 rimangono a loro volta coinvolti dando luogo alla produzione di plutonio, anch'esso fissile:



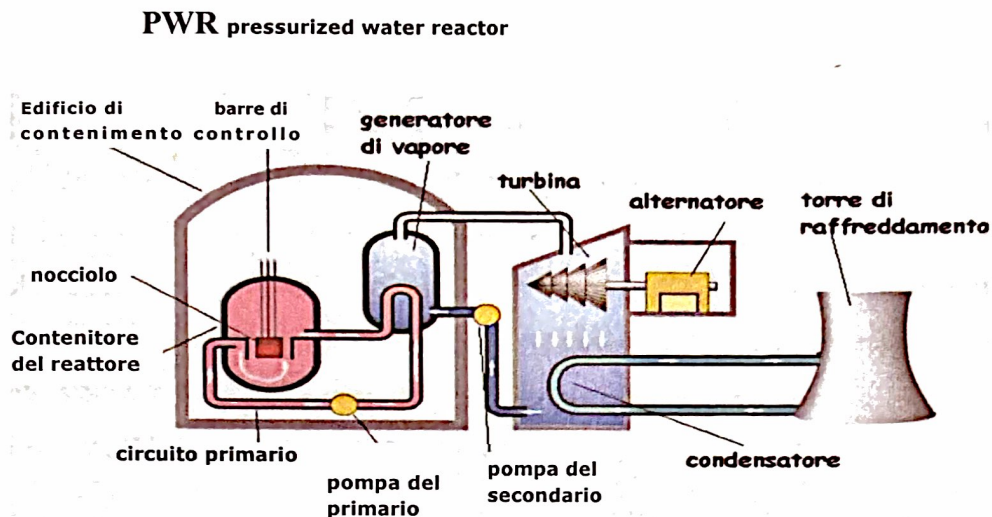
All'uscita del reattore, l'uranio impoverito dalla reazione viene inviato ad una sezione di riprocessamento, da cui si ottiene la maggior parte del plutonio, mentre il combustibile esausto viene destinato ad altri usi. L'uranio e il plutonio sono poi riutilizzati per la produzione del combustibile arricchito, mentre la parte "sfruttata" del combustibile viene stoccata in appositi depositi e con opportune cautele.

Centrali elettronucleari

I tipi di centrale elettronucleare più comuni nel mondo sono:

- centrali con reattori ad acqua bollente (Boiling Water Reactor, BWR)
- centrali con reattori ad acqua in pressione (Pressurized Water Reactor PWR)

La differenza fondamentale tra le due tipologie di reattori è che nel BWR l'acqua viene portata all'ebollizione dal calore prodotto nella fissione e quindi il vapore viene inviato tramite tubi nella turbina; nel PWR l'acqua viene scaldata dall'energia di fissione, ma tenuta sotto pressione onde evitare che giunga all'ebollizione, cosa che accade all'interno di un generatore di vapore.



Esaminando il ciclo rappresentato in figura il calore prodotto viene assorbito dall'acqua di raffreddamento del circuito primario, che esce ad una temperatura prossima ai 300 °C, ma non arriva all'ebollizione in quanto mantenuta alla pressione di 155 bar (si rammenta che la temperatura di ebollizione di un liquido è tanto più alta, quanto maggiore è la pressione dell'ambiente esterno; l'acqua alla pressione atmosferica, infatti, bolle a 100 °C). Successivamente l'acqua di raffreddamento scambia calore con altra acqua nel generatore di vapore (che lavora a pressione inferiore), da cui si ottiene vapore a circa 300 °C e 55 bar che investe una turbina la quale, per mezzo di un alternatore, genera energia elettrica. Il vapore a bassa pressione uscente dalla turbina viene raffreddato ad acqua (circuito secondario) e riciclato nel generatore; infine l'acqua del secondario viene raffreddata in apposite torri di raffreddamento (abbastanza caratteristiche per via del loro pennacchio di vapore).

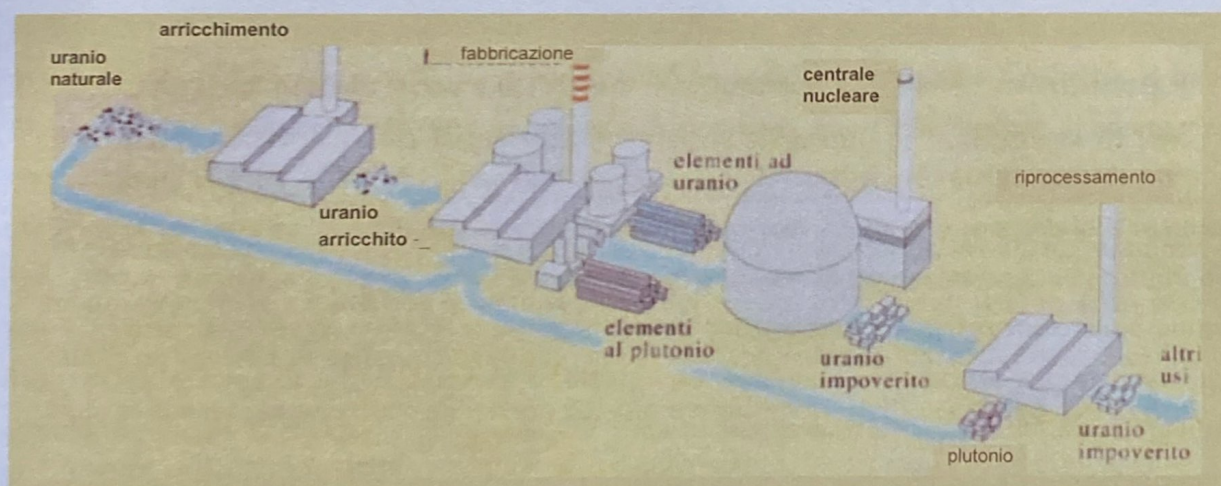
Si osserva che l'acqua del circuito secondario non viene a contatto con le zone contaminate dalle radiazioni, per cui, in presenza di opportune barriere protettive dalle radiazioni, l'unico problema risulta essere l'elevata temperatura. Altri tipi di reattori sono oggetto di studio, per poter migliorare l'efficienza e la sicurezza del processo di fissione:

- reattore avanzato liquido-metallo (ALMR), che riduce la produzione di plutonio,

- reattore asciutto raffreddato da elio ad alta temperatura (HTR), in grado di funzionare per un numero di anni superiore alla media,
- reattore autofertilizzante a neutroni veloci, in grado di utilizzare U-238 con produzione di plutonio.

Reattori autofertilizzanti

Dal 1942 sono stati progettati e messi a punto i reattori di potenza, che costituiscono l'elemento essenziale di una centrale elettronucleare, nella quale l'energia cinetica dei neutroni viene trasformata in calore, ma la disponibilità di materiali fissili in natura è limitata; i reattori di potenza utilizzano solo il rarissimo isotopo ^{235}U ; il rendimento di fissione di tale isotopo non supera l'1%; inoltre i costi di estrazione sono elevati. Le ricerche hanno individuato un altro nucleo fissile, quello del plutonio il quale può essere utilizzato nella fissione con un rendimento che sfiora il 70%. Tale scoperta ha condotto alla realizzazione dei cosiddetti reattori autofertilizzanti.



La caratteristica fondamentale di un reattore autofertilizzante è il fatto che può produrre, a partire da sostanze dette fertili (cioè non direttamente fissili, ma che possono diventare tali catturando un neutrone), una quantità di materiale fissile superiore a quella che esso consuma. Il sistema ad autofertilizzazione più diffuso in tutto il mondo usa uranio 238 come materiale fertile. L'assorbimento di un neutrone da parte di un nucleo di uranio 238 dà luogo a un processo radioattivo durante il quale il nucleo si trasforma nell'isotopo fissile plutonio 239 che viene recuperato, separandolo dalle altre scorie, e rimesso in ciclo.

Sistemi di sicurezza dei reattori

Gli impianti nucleari sono provvisti di diverse strutture di sicurezza, atte a controllare le possibili fughe radioattive e a ridurre il rischio e l'effetto di eventuali incidenti o malfunzionamenti del reattore. Nella maggior parte dei casi un sistema di schermatura impedisce che i prodotti di fissione si liberino nella biosfera, il combustibile è rivestito di materiale anticorrosivo, le pareti del sistema di raffreddamento primario del PWR sono realizzate in acciaio per formare una seconda barriera, l'acqua refrigerante stessa assorbe alcuni degli isotopi radioattivi biologicamente pericolosi, come lo iodio, infine la struttura esterna è costruita in acciaio e calcestruzzo per fornire un'ulteriore barriera. Durante il normale funzionamento di un reattore sfuggono inevitabilmente piccole quantità di sostanze radioattive, che fanno aumentare la dose annua assorbita dalla popolazione locale di qualche punto percentuale rispetto alla dose dovuta al fondo di radioattività naturale. Ben più preoccupante è il rilascio improvviso di sostanze radioattive in caso di incidenti; il maggior pericolo è costituito da una perdita nel sistema di refrigerazione, poiché in questo caso la temperatura può raggiungere addirittura il punto di fusione del combustibile. In ogni reattore è prevista una complessa e sofisticata strumentazione di controllo, che sorveglia il buon funzionamento del reattore stesso e dei sistemi di sicurezza. Nei PWR, in caso di emergenza, uno di questi sistemi effettua l'istantanea immissione all'interno del refrigerante di boro, il quale serve ad assorbire i neutroni, interrompendo la reazione a catena e spegnendo il reattore. Per i reattori ad acqua leggera, in cui il refrigerante è tenuto ad alta pressione, una rottura del condotto principale causerebbe la perdita totale del refrigerante. Questi reattori sono quindi dotati di un sistema di raffreddamento di emergenza, che entra in funzione automaticamente quando si abbassa la pressione all'interno del circuito primario. Nell'eventualità di una perdita di vapore all'interno della struttura di contenimento, intervengono automaticamente refrigeranti spray che condensano il vapore evitando che la pressione all'interno dell'edificio aumenti fino a livelli di pericolo.

CAPITOLO 5

PRODUZIONE ENERGIA ELETTRICA

Produzione energia elettrica nel mondo

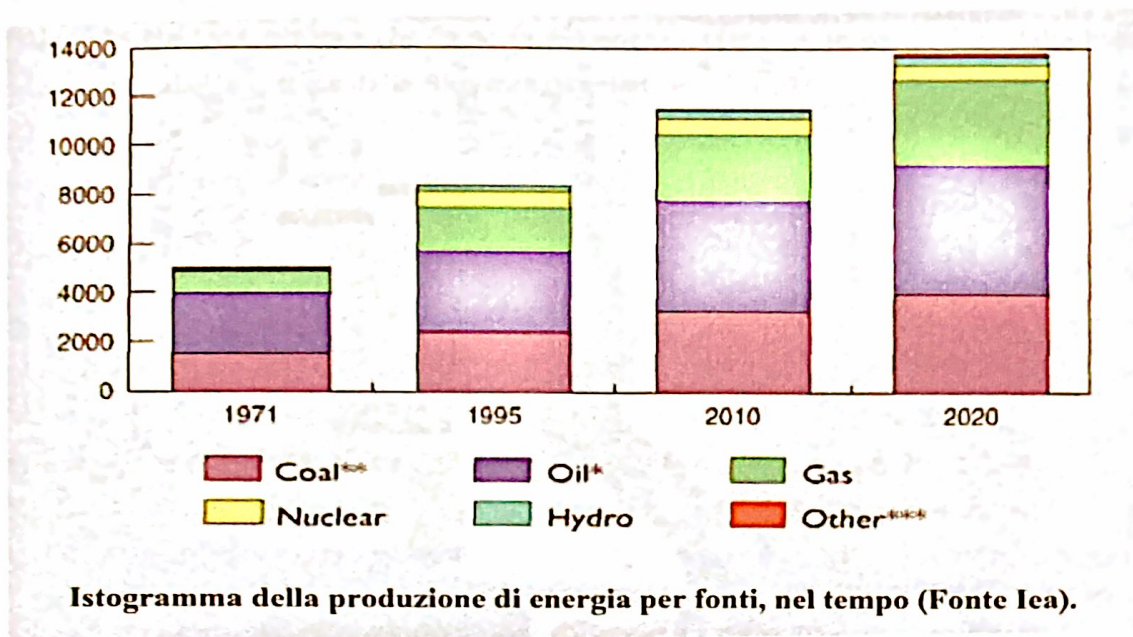
L'uranio è in grado di produrre grossi quantitativi d'energia, data l'elevatissima esotermicità del processo di fissione: da 1 Kg d'uranio si possono ottenere fino a 50.000 kWh di energia elettrica.

L'attuale produzione d'energia elettronucleare copre all'incirca al 24,9% del fabbisogno mondiale d'energia elettrica.

Dalla tabella seguente si può notare che la fonte principale è ancora il carbone

Tabella - IEA Produzione Elettrica, 2001 [%]	
Non rinnovabili	
Carbone	38,0
Nucleare	24,9
Gas	16,9
Petrolio	5,1
Rinnovabili	
Idrico	13,0
Geotermale	0,3
Solare ed Eolico	0,4
Biomassa e Rifiuti	1,4

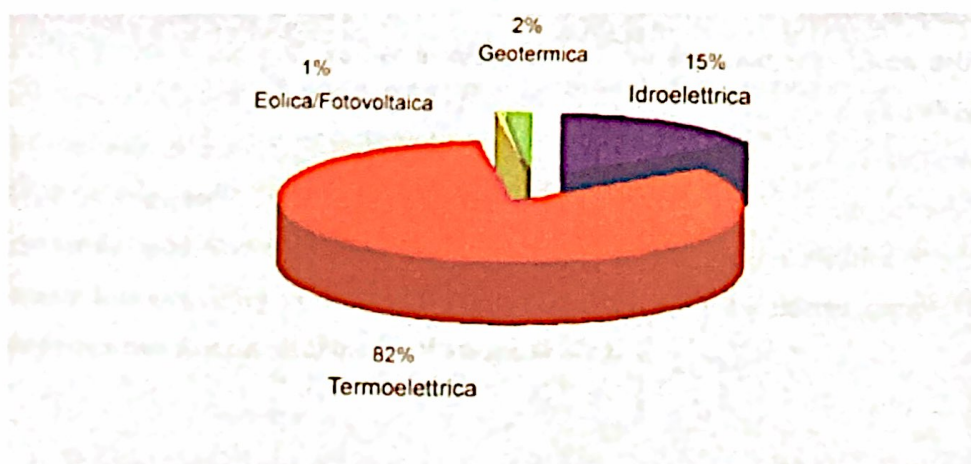
Nella figura seguente viene invece riportato un prospetto sull'utilizzo nel tempo delle varie fonti energetiche, nella produzione complessiva di energia. Si può notare come la produzione d'energia nucleare non subirà variazioni sostanziali; tuttavia un studio dell'EIA (Energy Information Administration) evidenzia in prospettiva un aumento dell'energia prodotta da fonti nucleari, grazie all'aumento di efficienza dei reattori nucleari.



In rosso sono indicate le quantità di energia prodotte da metodi alternativi a quelli tradizionali (indicate con "Other"), fra i quali ricordiamo l'energia fotoelettrica, quella geotermica e quella eolica. Queste costituiscono sicuramente delle fonti di energia pulite e rinnovabili che, però, non bastano da sole a soddisfare il bisogno energetico mondiale. Da ciò si può dedurre che l'energia eolica, fotoelettrica e geotermica, non costituiscono delle fonti sulle quali potersi basare. Restano l'utilizzo del carbone, del petrolio, dei gas (metano, etano, ecc...), dell'energia nucleare e di quella idroelettrica (che nel grafico è indicata con "Hydro").

La produzione di energia in Italia

L'Italia produce energia elettrica principalmente in centrali termoelettriche a combustibili fossili (metano, olio combustibile, carbone), in centrali idroelettriche e geotermiche.



L'Italia è la Nazione europea che importa più energia elettrica, in particolare dalla Francia, dalla Svizzera, dall'Austria e dalla Slovenia (da elettroneucleare).



Per i prossimi decenni si prevede che la domanda di energia elettrica nel mondo avrà il più alto tasso di crescita: il suo consumo dovrebbe raddoppiare nei prossimi 10 – 20 anni. Per evitare le possibilità di black-out è urgente migliorare la rete di distribuzione e aumentare la capacità di produzione di energia elettrica. D'altra parte l'Italia deve progressivamente ridurre le emissioni in atmosfera dei gas serra, essenzialmente CO₂, secondo gli impegni presi con il protocollo di Kyoto. Questo richiederebbe un oculato risparmio energetico e un maggiore uso delle fonti di energia non inquinanti. Un esempio potrebbe essere dato dall'utilizzo dell'energia solare sfruttando la tecnologia fotovoltaica. Il progetto 10000 tetti fotovoltaici dell'ENEA, e una sua estensione a un numero molto più grande, prevede l'installazione di pannelli fotovoltaici sui tetti di edifici pubblici e di abitazioni private utilizzando sovvenzioni statali, regionali, locali e fondi della Comunità Europea. Questa iniziativa è certamente positiva per incoraggiare uno sfruttamento più diffuso dell'energia solare, va però detto che spesso non ha funzionato. In alcuni casi infatti gli utilizzatori si preoccupavano di mantenere funzionanti i pannelli per il tempo appena sufficiente per ripagare la frazione del costo iniziale sostenuto dal privato. Per questo motivo è stato recentemente modificato l'incentivo trasferendolo solo nell'energia elettrica prodotta. Al momento l'energia elettrica fotovoltaica non è ancora economicamente competitiva con l'energia elettrica da combustibili fossili o nucleari.

Le speranze sul breve periodo riposte nella fusione nucleare sono state parzialmente disilluse. Mentre nel 1985 si stimava di poter installare la prima centrale elettrica a fusione nucleare nel 2015, attualmente gli scienziati del progetto ITER hanno spostato quella data al 2040. Inoltre allo stato attuale della ricerca si é ancora in dubbio circa la fattibilità stessa della messa in opera di un reattore commerciale a fusione per la produzione di energia elettrica con rendimenti continuativi accettabili. Si può notare comunque come l'Italia, nell'ipotesi ottimistica sulla fusione, potrebbe sfruttare l'assenza attuale dell'opzione nucleare a fissione per bypassare l'onerosa fase di decommissioning o conversione dei reattori. Tale fase di transizione dovrà probabilmente essere fronteggiata da paesi oggi altamente nuclearizzati come la Francia e gli Stati Uniti nell'ipotesi che tale alternativa si riveli vincente.

CAPITOLO 6

I COSTI

Come per le altre risorse energetiche non rinnovabili, quali carbone, petrolio e gas naturale, è necessario chiedersi innanzi tutto quanto combustibile nucleare sia disponibile sulla Terra e a quale prezzo. In natura è presente un'enorme quantità di uranio naturale. Gli oceani, ad esempio, ne contengono circa un miliardo di chilometri cubi. L'estrazione dell'uranio "marino" è tecnicamente possibile ma a un costo 30 volte superiore agli attuali prezzi di mercato. La quantità complessiva di uranio estraibile, invece, dalla terraferma a costi economicamente sostenibili, supera i 3 milioni di tonnellate. In particolare, esso si trova a concentrazioni più elevate nelle rocce uranifere. La quantità totale di uranio disponibile appare, dunque, molto alta, ma viene notevolmente ridimensionata una volta che la si confronti con le quantità necessarie a far funzionare un reattore. Se si tiene conto del fatto che nel mondo ci sono 441 reattori nucleari e che ognuno di essi per funzionare, richiede 8 cariche al giorno di circa 33 kg di uranio l'una, la complessiva durata della riserva di combustibile nucleare attualmente sfruttabile è pari a circa 80 anni. Questa stima dimostra come il nucleare non può essere una fonte di energia su cui si possa contare per molto tempo. Per produrre energia nucleare su vasta scala, occorre disporre di una quantità sufficiente di uranio naturale e a un costo ragionevole. In particolare, il processo di arricchimento e i relativi impianti devono avere una capacità sufficiente e i prezzi dell'arricchimento devono essere ragionevoli. E' necessario valutare, inoltre, l'economicità e l'efficacia degli impianti di riprocessamento che trattano il combustibile nucleare già utilizzato nei reattori e consentono di recuperare l'uranio non ancora "bruciato". Insomma, i costi dei reattori nucleari vanno valutati tenendo conto dell'intero ciclo dell'energia nucleare, che è molto più complesso di quello delle altre risorse energetiche. Tali costi comprendono, infatti: il ciclo intero del combustibile, la costruzione, la gestione e la sicurezza dell'impianto, compresi i casi d'emergenza, lo smaltimento delle scorie e l'eventuale smantellamento dell'impianto.

Per renderci conto dei costi di realizzazione e di produzione di una centrale nucleare, riportiamo i dati relativi alla centrale di Caorso (840 MW di potenza elettrica netta) . La centrale fu costruita fra il 1970 e il 1980.

Il costo globale di realizzazione fu di 306 miliardi di lire, pari a circa 364000 lire/ KW.

Il costo di produzione (tenendo in considerazione: il capitale, il combustibile, l'esercizio, lo smantellamento) era di circa 16 lire/KW.

Per valutare più compiutamente il significato di tali valori e' necessario confrontarli con quelli analoghi degli impianti alimentati con olio combustibile o carbone.

Tipo di impianto	Costo Lire/kWh
Caorso	40
Termoelettrico ad olio combustibile	130
Termoelettrico a carbone	80

Confronto tra i costi dell'energia elettrica in base ai combustibili

Ogni volta che si parla del costo dell' energia, si devono considerare i "costi esterni", cioè, i costi che la popolazione subisce che non sono calcolati nel prezzo giornaliero pagato dal consumatore. Questi includono gli effetti sulla salute, i fastidi di tutti i generi, le conseguenze degli incidenti nella catena di produzione e di distribuzione, l'inquinamento, l'effetto dei gas serra ed altri sono molto difficili da stimare, ma i dati riportati si possono interpretare riconoscendo la quasi totale assenza di emissioni di gas serra da parte di una centrale elettronucleare. Il più ampio rapporto di consulenza in questo settore è lo studio di ExternE, patrocinato dalla Commissione Europea, in collaborazione con il Dipartimento per l'energia degli Stati Uniti, che non è particolarmente gentile sull'energia nucleare. Per l'effetto dei gas serra, lo studio ha stabilito un costo medio di 15 Euro per una tonnellata di carbonio scaricata in atmosfera (le valutazioni variano da 10 a 25 euro per la tonnellata).

I risultati sono indicati nella seguente tabella.

Costo complessivo di produzione di energia elettrica in Eurocents per kWh			
Tecnologia	Funzionamento della tecnologia, ammortamento, e costi finanziari	Costi esterni	Totale
Carbone	5,0	2,0	7,0
Olio combustibile	4,5	1,6	6,0
Gas naturale	3,5	0,36	3,9
Vento	6,0	0,22	6,22
Idroelettrica	4,5	0,22	4,72
Nucleare	3,5	0,04	3,54

Fonte: ExternE Study of the European Commission, 1999

CAPITOLO 7

IL NUCLEARE IN ITALIA E IN EUROPA

La situazione italiana

L'Italia possedeva quattro centrali nucleari situate a:

- Corso
- Garigliano
- Latina
- Trino Vercellese.

Il nostro Paese nel decennio successivo al disastro di Chernobyl, con un referendum popolare (1° novembre 1987), ha deciso la chiusura definitiva delle proprie centrali elettronucleari.

In particolare il referendum ha vietato di costruire centrali nucleari, di finanziare gli enti che "ospitano" le centrali nucleari e, con riferimento all'ENEL, di partecipare ad impianti nucleari all'estero. Oggi in Italia tutto ciò che riguarda il nucleare fa capo alla Società Gestione Impianti Nucleari s.p.a. (SOGIN) istituita nel 1999, che ha incorporato tutte le strutture e le competenze che prima appartenevano all'Enel nell'ambito del nucleare. Presidente della SOGIN è il generale Carlo Jean che nel febbraio 2003 ha quantificato i rifiuti radioattivi presenti in Italia in: circa 50.000 m³ di scorie radioattive a bassa e media radioattività, circa 8.000 m³ di scorie radioattive ad alta radioattività. Dal 1989 in poi il cittadino italiano ha iniziato a pagare, attraverso un'addizionale sulle bollette Enel, i cosiddetti "oneri nucleari" destinati in un primo tempo a compensare l'Enel e le altre società collegate per le perdite conseguenti alla dismissione delle centrali. Dal 2001 in poi e fino al 2021 gli oneri saranno destinati alla SOGIN e finalizzati alla messa in sicurezza degli 80.000 m³ di scorie radioattive frutto dell'attività nucleare. Alla data del 2021 i cittadini avranno pagato attraverso addizionali sulla bolletta Enel la cifra astronomica di 11 miliardi di euro, pressappoco la metà dell'ultima manovra finanziaria. Con la legge 368 del 2003, contemporaneamente alla nomina del generale Jean quale Commissario con poteri speciali per il nucleare, il premier Silvio Berlusconi elenca gli impianti atomici che devono essere smantellati e dispone l'individuazione di un Deposito Nazionale nel quale le scorie radioattive dovranno essere stoccate. Il 13 novembre 2003 il Consiglio dei Ministri approva un decreto nel quale individua a Scanzano Jonico, in basilicata il sito nazionale nel quale accumulare le scorie derivanti dalla dismissione delle centrali nucleari. Il costo dell'operazione, comprensivo degli

studi necessari per valutare l'idoneità del sito e degli oneri conseguenti al trasporto dei materiali pericolosi arriva nelle previsioni a sfiorare i 2 miliardi di euro. La conseguenza di questa decisione è lo scatenarsi di una vera e propria rivolta da parte degli abitanti e delle autorità di Scanzano e dell'intera basilicata. Proteste, cortei e blocchi stradali si susseguono praticamente senza soluzione di continuità e il 27 novembre il governo si vede costretto a modificare il decreto, togliendo il nome di Scanzano ed impegnandosi ad identificare entro 18 mesi un nuovo sito nazionale che dovrà essere completato entro e non oltre il 31 dicembre 2008. Di mesi da allora ne sono passati 30 ed il 65% dei rifiuti radioattivi italiani continua ad essere conservato in una conca alluvionale in riva alla Dora Baltea, in un luogo giudicato "indifendibile" dagli stessi servizi segreti italiani, nella cittadina di Saluggia. Già durante l'alluvione del 2000 l'acqua del fiume arrivò a lambire le scorie e il premio Nobel Carlo Rubbia dichiarò che se il livello del fiume fosse stato solo di pochi centimetri più alto, avremmo assistito all'inquinamento della Dora, del Po e del Mare Adriatico, creando una catastrofe di proporzioni superiori a quella di Cernobyl. Recentemente un'ordinanza emanata dallo stesso generale Jean conferisce alla SOGIN il diritto di costruire nel sito Eurex di Saluggia due nuovi depositi per lo stoccaggio delle scorie radioattive. Tali depositi, uno per le scorie a bassa e media radioattività, l'altro per quelle ad alta radioattività, della capienza rispettivamente di 46.000 e 8.000 m³ vengono definiti sulla carta temporanei, ma tutta l'architettura dei nuovi progetti sembra antitetica a quella della loro destinazione d'uso di edifici provvisori. La costruzione dei depositi a Saluggia dimostra chiaramente che Sogin non ha alcuna intenzione di procedere all'apertura (come da legge) del deposito nazionale definitivo entro il 31 dicembre 2008 e che l'intendimento è quella di lasciare il 65% dei rifiuti radioattivi italiani stoccati a tempo indefinito nella cittadina piemontese, in una zona ad alto rischio alluvionale, a brevissima distanza dai pozzi dell'acquedotto che serve tutto il Monferrato e del tutto inadatta a questo genere di operazione. Il rischio connesso ai rifiuti radioattivi è altissimo e lo diventerà sempre più negli anni a venire in quanto la tecnologia non è assolutamente in grado di far fronte alle conseguenze mostruose di ciò che essa stessa ha ingenerato.

Il nucleare in Europa

L'Unione Europea affida agli Stati membri la gestione delle scorie radioattive, limitandosi a regolarne alcuni aspetti, come il loro trasporto interno alla Comunità. È inoltre vietata l'esportazione delle scorie e di altri rifiuti pericolosi dall'Unione europea verso gli oltre cento

Paesi firmatari della Convenzione di Lomé. Questo divieto è stato la risposta al timore degli Stati dell'Acp (Paesi dell'Africa, Caraibi e Pacifico) di diventare la discarica dell'Europa. Nel nostro continente esistono due impianti per il riprocessamento del combustibile esausto a elevata radioattività: La Hague in Francia e Sellafield in Inghilterra. Qui le scorie provenienti dai reattori nucleari europei sono dissolte e separate in uranio, plutonio e soluzioni altamente radioattive. Questo trattamento permette di riciclare il 97% del combustibile, lasciando solo il 3% di scorie. L'uranio e il plutonio recuperati sono rispediti alle centrali di provenienza per essere utilizzati nuovamente come combustibile, mentre le scorie rimanenti devono essere stoccate.



L'impianto di Sellafield

Finlandia e Svezia sono esempi di gestione responsabile delle scorie. La loro legislazione prevede che le scorie non possano essere né importate né esportate, riprocessamento e stoccaggio avvengono al loro interno. La maggior parte degli altri paesi dell'Unione, invece, pur possedendo legislazioni che vietano l'ingresso di rifiuti radioattivi stranieri, generalmente non ha divieti riguardo all'esportazione per lo smaltimento e lo stoccaggio. Come l'Italia, in Europa, anche Austria, Danimarca, Olanda, Portogallo, Grecia, Irlanda, Lussemburgo, Spagna e Svezia hanno scelto di non produrre energia con centrali nucleari. La Germania ha rinunciato al nucleare nel 2000: per ognuna delle 19 centrali atomiche tedesche è stata stabilita una durata di 32 anni dall'entrata in funzione, dopodiché verranno smantellate. Nel 2002 anche il parlamento belga ha deciso la chiusura dei suoi sette reattori entro il 2025.

Nella figura seguente è riportata la mappa che individua la distribuzione delle centrali nucleari in Europa.



LA SITUAZIONE NEI PAESI CHE SI APPRESTANO AD ENTRARE NELL'UNIONE EUROPEA

L'ingresso nell'Unione Europea viene ritenuto una grande opportunità per il miglioramento ambientale dei Paesi dell'Europa orientale. Tra le priorità, vi è quella di ridurre il rischio nucleare, visto che sette dei paesi che si apprestano ad entrare nell'Unione dispongono di centrali nucleari di progettazione sovietica. Dieci anni di impegno europeo, attraverso programmi di cooperazione quali PHARE e NSA (Conto per la Sicurezza Nucleare), non sono serviti a chiarire quale sia il livello di sicurezza nucleare necessario per l'ammissione nell'UE. Questo è dovuto al fatto che l'energia nucleare non fa parte dell'«acquis communautaire» cioè il complesso della legislazione comunitaria sin qui adottata dai 15 e che i nuovi membri dovranno fare proprio. A tutto oggi le uniche linee-guida riguardanti l'argomento sono state formulate nelle conclusioni del Consiglio dei Ministri di Vienna (1998). Con il documento «How Safe is Safe Enough?», presentato nell'ottobre del 2000 da cui si evince che gli standard di sicurezza sono inferiori a quelli validi per l'occidente.

Le centrali a rischio dei Paesi candidati

Paese	Impianto	Tipo	Avvio commerciale	Potenza installata (Mw)
Bulgaria	Kozlodui 1-4 Kozlodui 5-6	VVER-440 V230 VER- 1000	1974, '75, '81, '82, '88, '93	3.760
Lituania	Ignalina 1-2	RBMK-1500	1985-87	3.000
Rep. Ceca	Dukovany 1-4 Temelin	VVER-440 V213 VVER 1000	1985, '86, '87 2001	1.760
Romania	Cernavoda I	CANDU	1996	700
Slovacchia	Bohunice 1-2 Bohunice 3-4 Mochovce 1-2	VVER-440 V230 VVER-440 V213 VVER-440 V213	1979, '81 1985, '86 1998, '99	2.640
Slovenia	Krsko	PWR-664 (Westinghouse)	1983	664
Ungheria	Paks 1-4	VVER-440 V213	1983, '84, '86, '87	1.760

Fonte: Amici della Terra Europa

Reattori senza contenimento secondario sono Bohunice 1-2, Bohunice 3-4, Dukovany 1-4, Ignalina 1-3, Kozlodui 1-4, Mochovce 1-2, Paks 1-4

La chiusura degli impianti pericolosi

L'incidente di Chernobyl 4 (1986) ha reso chiaro al mondo la pericolosità delle installazioni nucleari al di là della cortina di ferro nonché il costo e l'estensione, nello spazio e nel tempo, delle conseguenze di un incidente. Nel 1992 il Vertice G7 di Monaco stabilì un programma di azione multilaterale per migliorare la sicurezza nucleare in Europa Orientale.

"La comunità internazionale rispose adottando una strategia per la sicurezza nucleare: i reattori di progettazione sovietica furono classificati secondo due categorie: quelli che potevano essere portati a standard occidentali con costi ragionevoli e quelli destinati alla chiusura. Furono stabiliti due percorsi complementari:

- *Breve termine: dovevano essere istituite agenzie per la sicurezza nucleare competenti ed indipendenti dai governi e dovevano essere realizzati interventi tecnici per rendere i reattori più sicuri...*
- *Lungo termine: i reattori meno sicuri dovevano essere rimpiazzati da fonti energetiche alternative e dal risparmio energetico". (Cfr: "Sicurezza Nucleare nei Paesi dell'Est" di Susanne Frigren, DG Ambiente della CE (3/2/2000))*

Tutti concordavano che i reattori RBMK (tipo Chernobyl) fossero i meno sicuri. (come ad es. la centrale di Ignalina in Lituania). I reattori VVER ad acqua pressurizzata erano anche considerati ad alto rischio, soprattutto la prima generazione (VVER 440/230, come le unità 12 di Bohunice in Slovacchia e delle unità Kozlodui 1-4 in Bulgaria). Tanto i RBMK quanto la prima generazione di VVER, venivano giudicati non modificabili e destinati ad essere chiusi quanto prima. A seguito dell'adozione, con l'Agenda 2000, di un programma generale per l'allargamento dell'Unione, furono stabilite le tabelle di marcia per la chiusura: 1998 per Kozlodui, 2000 per Bohunice e 2002 per Ignalina. Non potevano essere chiuse prima, si disse, perché non erano pronte alternative energetiche per sostituirle. Nel frattempo i paesi interessati hanno ricevuto fondi per apportare migliorie nel breve termine, ma le date di chiusura hanno continuato a slittare e i partner occidentali, UE inclusa, non hanno dimostrato alcuna volontà politica di far rispettare le date concordate. Alla vigilia del Vertice di Helsinki del '99, la Commissione Europea si accordò con i paesi candidati su nuove date, ma, come si può vedere dalla tabella sottostante, i nuovi termini sono ormai lontani dagli impegni presi con l'agenda 2000.

Date di chiusura stabilite e ritardate

Centrale	Reattore	Date stabilite in precedenza	Date stabilite nel 1999
Kozlodui (Bulgaria)	Unità 1 e 2	Primavera 1997	2003
	Unità 3 e 4	Fine 1998	Da stabilire
Ignalina (Lituania)	Unità 1	1998	2005
	Unità 2	2002	2009
Bohunice (Slovacchia)	Unità I e 2	2000	2006 (Un. I) e 2008

Fonte: Amici della Terra Europa

Ma i paesi candidati all'UE hanno davvero bisogno dell'energia nucleare? La verità è che tutti i paesi candidati che dispongono di energia nucleare sono esportatori netti di elettricità. Dal '92 ad oggi, la proporzione rappresentata dal nucleare nel bilancio energetico di quei paesi è aumentata, sia perché sono divenuti operativi nuovi reattori, sia perché altre fonti energetiche sono state abbandonate, o sospese perché la modernizzazione dei relativi impianti è stata ritardata. Oggi, paesi come la Bulgaria, la Repubblica Ceca, la Lituania e la Slovacchia esportano energia elettrica, soprattutto verso i paesi dell'UE.

Fattori di rischio: il problema del contenimento

E' estremamente difficile paragonare i livelli di sicurezza dei reattori occidentali con quelli dei reattori di progettazione sovietica dei paesi candidati, infatti non è stato stabilito alcun metodo per accertarlo e persino sulla terminologia non c'è chiarezza. Ai fini della sicurezza nucleare la questione più importante è quella del contenimento. La maggior parte dei reattori sovietici (RBMK e la prima e seconda generazione di VVER) non hanno contenimento alcuno o hanno un contenitore del nocciolo che non è in grado di resistere ad un incidente. Inoltre nessuno di essi dispone di un edificio di contenimento secondario e questo è il loro principale difetto di progettazione, che ha condotto alla richiesta di una loro chiusura urgente. Alcuni paesi, ad esempio la Slovacchia, hanno però recentemente preso a sostenere che tale difetto può essere compensato da altre forme di sicurezza, tanto che ora parlano di «confinamento» al posto di «contenimento». Al contrario, i pochi reattori VVER costruiti al di fuori dell'Europa orientale, ad esempio l'impianto di Loviisa in Finlandia, sono forniti di contenimento primario e secondario. Coloro che minimizzano il rischio nucleare determinato dai reattori di progettazione sovietica portano ad esempio proprio Loviisa, un VVER440 che viene paragonato ai VVER440-213 di Mochovce in Slovacchia ed anche al più recente VVER 1000 di Temelin, nella repubblica Ceca. Ma l'esempio non calza. Infatti, Loviisa è stata costruita con standard di sicurezza comparabili con quelli occidentali e i cambiamenti sono stati apportati prima della costruzione. Si trattò di un lungo processo di progettazione congiunta di tecnici sovietici ed occidentali, che durò otto anni e comportò notevoli miglioramenti, tra cui il contenimento (Contenitore + edificio). Invece, come detto, i primi due tipi di VVER non hanno un contenitore in grado di resistere ad incidenti, né un edificio esterno. Per i VVER di seconda generazione è stato adottato un sistema di trattenimento a condensazione, la cui efficacia, però, non è mai stata provata. Per la terza generazione di VVER un sistema di contenimento esterno è stato introdotto, ma non trovandosi a livello del suolo, non si può escludere che possa essere oltrepassato da una fuga radioattiva.

REATTORI NEL MONDO



Centrali nucleari nel mondo

I reattori nucleari in funzione alla fine del 2001 nel mondo erano 441, dei quali il 25% circa siti negli Stati Uniti (fonte EIA). Sebbene oggi siano costruiti un numero minore di reattori rispetto agli anni '70 e '80, la loro maggiore efficienza, figlia degli sviluppi tecnologici raggiunti, permette di ottenere quantità di energia maggiori. Oltre alle nazioni con uno sviluppo consolidato, come Stati Uniti, Francia, Germania, Regno Unito, ex Unione Sovietica, sono previsti forti incrementi di produzione di energia elettronucleare nei paesi asiatici, come la Cina (fonte EIA).

La produzione nucleare mondiale si può riassumere come segue:

- Europa: 213 reattori, 176649 MW prodotti (il 35% in Francia),
- America del Nord: 125 reattori, 117957 MW prodotti (l'87% negli USA),
- America del Sud: 6 reattori, 4321 MW prodotti,
- Asia: 95 reattori, 71087 MW prodotti (il 65% in Giappone),
- Africa: 2 reattori, 1930 MW prodotti.

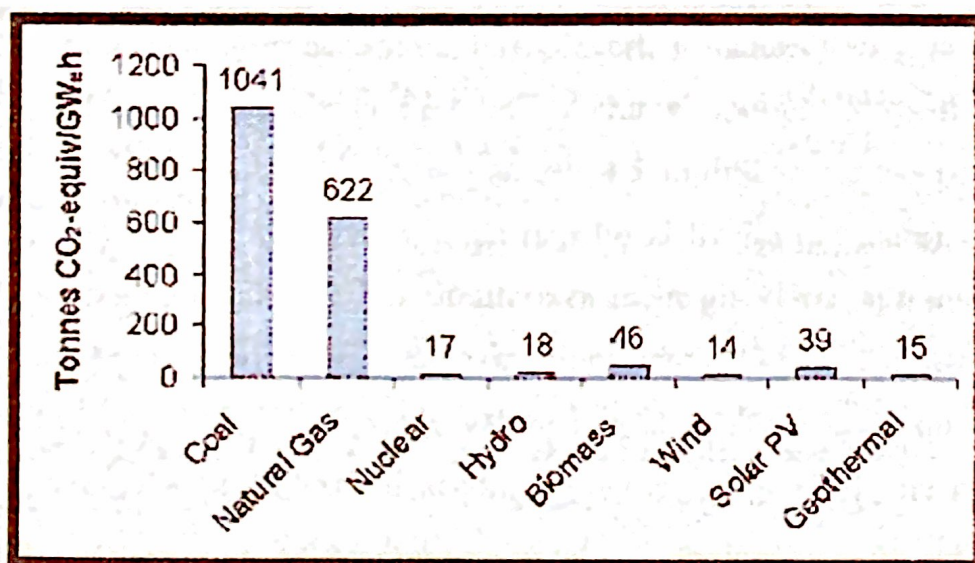
CAPITOLO 8

IMPATTO AMBIENTALE E RISCHI CONNESSI

Le centrali elettronucleari pongono grossi problemi di impatto ambientale. Essi però non sono legati alle emissioni, bensì al fatto che il processo in sé presenta dei rischi innegabili. Analizzando infatti le emissioni di un impianto nucleare confrontando la tabella con il grafico, si nota come esse siano trascurabili rispetto a quelle degli impianti tradizionali di produzione di energia elettrica.

Modalità di generazione	Emissioni di gas serra (g. equiv CO ₂ /kWh)	Emissioni di SO ₂ (mg/kWh)	Emissioni di NO _x (mg/kWh)	NM VOC (mg/kWh)	Emissioni di polveri (mg/kWh)
Idroelettrico	2-48	5-60	3-42	0	5
Carbone (impianti moderni)	790-1182	700-32321 +	700-5273+	18-29	30-663+
Nucleare	2-59	3-50	2-100	0	2
Gas naturale (ciclo combinato)	389-511	4-15000+	13+-1500	72-164	1-10+
Combustione di biomassa	15-101	12-140	701-1950	0	217-320
Eolico	7-124	21-87	14-50	0	5-35
Solare fotovoltaico	13-731	24-490	16-340	70	12-190

Confronto tra le emissioni di vari impianti per la produzione di kWh di energia elettrica (Fonte Hydropower-Internalised Costs and Externalised Benefits, Frans H. Kock, IEA, 2000)



Confronto delle emissioni di anidride carbonica equivalente in diversi impianti per la produzione di energia elettrica (fonte Life-Cycle Assessment of Electricity Generation Systems and Applications for Climate Change Policy Analysis, Pani J. Meier, University of Wisconsin-Madison, 2002)

Come detto in precedenza però, il processo nucleare è in sé comunque delicato, in quanto le reazioni nucleari necessitano di un attento controllo, sono caratterizzate dall'emissione di radiazioni e danno à luogo alla produzione di scorie radioattive. E' necessario però mettere in evidenza il fatto che le scorie radioattive, pur presentando notevoli fattori di rischio, sono localizzate in zone specifiche, mentre le emissioni in atmosfera prodotte con altre tecnologie sono ben più difficili da controllare, e sicuramente non possono essere confinate.

Il processo nucleare inoltre, storicamente non ha originato un numero elevatissimo di incidenti; i più gravi nella storia sono stati due:

- nel 1979 a Three Miles Island, in Pennsylvania, causato da una difettosità in una valvola di controllo, che non ebbe conseguenze sulla popolazione,
- nel 1986 a Cernobi l, in Ucraina (l'allora Unione Sovietica), causato secondo i rapporti ufficiali, da un esperimento fatto su un reattore che ne determinò l'esplosione, e che ebbe conseguenze molto gravi sulla popolazione locale, ma anche ripercussioni su aree distanti diverse migliaia di chilometri.

Radiazioni e radioprotezione

Le reazioni nucleari, come detto poco anzi, sono purtroppo accompagnate, oltre che da una straordinaria produzione di calore, anche dall'emissione di radiazioni ionizzanti, che sono in grado di danneggiare i tessuti biologici, con gravi danni per la salute:

- immediati, per dosi molto significative,
- a lungo termine, per dosi inferiori ed esposizioni prolungate.

Le radiazioni si misurano in milliSievert; in natura sono presenti delle fonti radioattive (il radon ad esempio), tant'è che l'uomo è sottoposto mediamente ad una dose di 2.5 milliSievert/anno. Tale dose passa a 4.5 milliSievert/anno per il personale degli aerei (la radioattività cresce con la quota rispetto al livello del mare), esposto ai raggi cosmici; una dose paragonabile a questa, caratterizza anche gli addetti agli impianti nucleari (dati del Regno Unito). Una dose fatale di radiazioni ionizzanti può invece essere ragionevolmente stimata in 5 Sievert (5.000 milliSievert), valore ben al di sopra delle quantità citate sopra. Il pericolo derivante dalle radiazioni accompagna l'intero ciclo di vita del processo di produzione di energia nucleare che va dall'estrazione del combustibile, al suo trasporto, passando attraverso la lavorazione, all'utilizzo in reattore. Queste considerazioni portano ad una sola conclusione: è indispensabile attuare un opportuno programma di radioprotezione, per cercare di limitare il più possibile i rischi derivanti dal contatto con il materiale radioattivo. Il punto di partenza è

senz'altro realizzare questi impianti lontano da zone densamente popolate. Successivamente risulta indispensabile dotare i reattori dei più sofisticati sistemi di sicurezza, che limitino le possibili fughe di materiale radioattivo. Certo, in caso di incidenti, ci possono essere situazioni di grosso pericolo, ma un opportuno piano di sicurezza, concordato con le autorità competenti, può limitare grandemente il pericolo per la popolazione.

Normalmente la procedura di sicurezza è strutturata a livelli, che entrano in funzione a seconda della criticità della situazione, si passa da un semplice intervento in loco, all'attivazione dei soccorsi pubblici, fino all'evacuazione delle popolazioni circostanti. Ricapitolando, oltre ai sistemi di controllo del processo, una centrale nucleare è dotata di una serie di barriere fisiche in grado di garantirne la sicurezza. Se, malauguratamente, ciò non fosse sufficiente, sono stabiliti piani per la gestione delle emergenze. Parallelamente a queste forme di tutela agisce il sistema di radioprotezione, atto alla tutela dell'uomo e dell'ambiente. Tale sistema si basa su tre principi:

- il principio di giustificazione, che stabilisce che l'esposizione alle radiazioni è giustificato solo se i benefici della pratica sono superiori agli effetti negativi statisticamente prevedibili,
- il principio di ottimizzazione che, comprovata la giustificazione, stabilisce che la quantità di radiazioni assorbite sia mantenuta la più bassa ragionevolmente ottenibile (principio ALARA=As Low As Reasonably Achievable),
- il principio di limitazione del rischio individuale, che si applica in ultima istanza per affermare che, anche nel rispetto dei principi precedenti, le dosi non devono superare limiti oltre i quali il rischio connesso all'esposizione sarebbe giudicato inaccettabile.

I limiti suddetti sono illustrati in tabella seguente e si basano sugli effetti osservati a seguito dei disastri di Hiroshima e Nagasaki.

Dal computo delle radiazioni totali assorbite vengono sottratti due termini:

- il fondo di radiazione naturale
- le radiazioni di carattere medico-sanitario (radiografie, ecc.).

Ciò è spiegabile considerando che sia le prime che le seconde, nell'arco della vita, sono inevitabili (in particolar modo la componente derivante dalla natura). A tal proposito occorre dare qualche definizione e fare qualche precisazione. La dose efficace quantifica il rischio complessivo per l'individuo irradiato tenendo conto della diversa radiosensibilità degli organi o tessuti e del corpo umano nel suo complesso e si ottiene sommando i contributi dovuti a ciascun organo irradiato; una dose efficace di 1 Sievert ad esempio, corrisponde ad un'irradiazione di 1 Sievert su ciascun organo del corpo umano; la dose equivalente, invece,

quantifica il rischio associato all'irradiazione di un singolo organo o tessuto, tenendo conto del tipo di radiazione.

Nella tabella sono illustrate le dosi equivalenti per alcuni organi normalmente esposti direttamente all'irraggiamento (ad esempio l'occhio, rappresentato dal valore al cristallino, una lente fondamentale per la messa a fuoco delle immagini sulla retina). Occorre invece precisare che i valori indicati sono solo strumenti per assicurare una protezione adeguata anche a livello individuale; i limiti fissati dalla ICRP non indicano una demarcazione tra dosi "ammissibili" e dosi "non ammissibili" in quanto legate a soglie di danno. In altri termini, affermazioni del tipo "sopra il limite (la dose ammissibile) c'è danno, sotto no" sono del tutto errate.

Categoria di persone	Limiti di dose
Individui della popolazione in generale	
dose efficace	1 mSv/anno
dose equivalente al cristallino	15 mSv/anno
dose equivalente alla pelle	50 mSv/anno
dose equivalente a mani, avambracci. piedi. caviglie	50 mSv/anno
Lavoratori esposti	
dose efficace	100 mSv in 5 anni, con massimo di 50 mSv/anno nel periodo
dose equivalente al cristallino	150 mSv/anno
dose equivalente alla pelle	500 mSv/anno
dose equivalente a mani, avambracci. piedi. caviglie	500 mSv/anno

Limiti di dose in aggiunta al fondo naturale e alle pratiche mediche (fonte International Commission for Radiological Protection, ICRP)

Il miglioramento delle tecniche e delle procedure di radioprotezione è deputato ad organismi **di ricerca** di carattere internazionale (in questa sede, l'Italia è rappresentata dall'ENEA) e coinvolge anche tutta la parte relativa ai dispositivi di protezione individuale, alle **corrette modalità** per svolgere operazioni interne all'impianto e ai monitoraggi delle situazioni esistenti (in termini di rischi e procedure). Infine gli organismi **che si occupano** di radioprotezione interagiscono con gli organismi deputati alla **sicurezza** per la redazione dei piani di sicurezza interni all'impianto ed esterni ad esso.

GESTIONE DELLE SCORIE NUCLEARI

Come è stato detto nel paragrafo precedente, le centrali nucleari producono rifiuti radioattivi, che rappresentano la principale fonte di impatto ambientale, nonché uno dei più grossi problemi connessi a tali attività

L'IAEA (International Atomic Energy Agency) definisce i rifiuti radioattivi come "qualsiasi materiale che contiene o è contaminato da radionuclidi a concentrazioni o

livelli di radioattività superiori alle "quantità esenti" stabilite dalle Autorità Competenti e per i quali non è previsto alcun uso". I rifiuti radioattivi provengono essenzialmente da operazioni connesse al processo nucleare cioè:

- gestione del reattore,
- ciclo del combustibile (estrazione dell'uranio, lavorazioni, riprocessamento),
- smantellamento di siti nucleari,
- decontaminazioni,

oltre alle produzioni di radioisotopi di interesse per il campo della medicina.

I rifiuti nucleari sono classificati, in base alla loro pericolosità, nel seguente modo:

- 1ª categoria: rifiuti a bassa attività, la cui radioattività decade nell'ordine di tempo di qualche mese o di qualche anno al massimo; provengono essenzialmente da attività medico-diagnostiche, industriali e di ricerca,
- 2ª categoria: rifiuti a media attività, la cui radioattività decade nel corso di alcuni secoli; provengono dall'attività delle centrali nucleari e degli impianti del ciclo del combustibile nucleare, dai reattori di ricerca, dallo smantellamento di impianti nucleari, dalle attività di ricerca, sanitarie e industriali,
- 3ª categoria: rifiuti ad alta attività, la cui radioattività decade nel corso di migliaia di anni; includono il combustibile irraggiato non riprocessato, rifiuti vetrificati o cementati provenienti dal riprocessamento del combustibile irraggiato, rifiuti contenenti plutonio derivanti da attività energetiche e di ricerca.

Le modalità di gestione dei rifiuti sono diverse in base alla classe di appartenenza, così come diversi sono i centri di stoccaggio destinati ad essi. La gestione dei rifiuti, più in generale quella di una centrale nucleare, è regolamentata da leggi e normative tecniche, di carattere internazionale; in Italia, ad esempio, vengono recepite ed applicate le leggi emanate dalla Comunità Europea.

Principi ed obiettivi della gestione dei rifiuti radioattivi

La gestione dei rifiuti può essere condotta mediante due tipi di approccio:

- Concentra e Confina (C&C), principio guida nella quasi totalità dei casi;
- Diluisci e Disperdi (D&D), utilizzato solo in casi molto particolari e limitati. A partire da questi approcci, si possono poi mettere in evidenza i principi che guidano la gestione delle scorie radioattive:
- essa deve garantire adeguata protezione per l'uomo e l'ambiente,
- si devono considerare possibili effetti su uomo e ambiente anche al di fuori dei confini nazionali,
- si devono contenere possibili impatti su persone e ambiente al di sotto dei limiti attualmente ritenuti ammissibili,
- la gestione deve evitare ripercussioni sulle generazioni future,
- deve essere svolta nell'ambito di un'adeguata normativa che stabilisca responsabilità ed un organo di controllo indipendente,
- si deve limitare il più possibile la produzione di rifiuti radioattivi,
- la sicurezza delle infrastrutture adibite allo stoccaggio deve essere garantita per tutta la vita delle scorie.

Gli obiettivi che si devono raggiungere con la gestione dei rifiuti radioattivi sono due:

- protezione delle presenti e future generazioni da esposizione alle radiazioni,.
- protezione delle presenti e future generazioni dal riciclo nella biosfera di radionuclidi.

Tali obiettivi sono perseguiti attraverso l'applicazione del concetto di protezione multibarriera. In pratica i rifiuti sono circondati da una serie di barriere (artificiali e naturali) che impediscano il loro rilascio nella biosfera e fungano da schermo per le radiazioni ionizzanti emesse. Le fasi della gestione dei rifiuti sono quattro:

- trattamento,
- condizionamento,
- stoccaggio temporaneo,
- smaltimento definitivo.

Nella fase di trattamento i rifiuti subiscono una riduzione del volume e sono "preparati" alla fase di condizionamento.

In tabella sono riportati i processi di trattamento più comunemente utilizzati

Processo	Tipologia	Scopo	Campo di applicazione
Evaporazione	Chimico – Fisico	concentrare la radioattività nel residuo dell'evaporazione	Rifiuti liquidi acquosi a bassa, media e alta attività
Filtrazione	Fisico	Separare la radioattività contenuta nel corpo solido	Rifiuti liquidi torbidi, sospensione
Ultrafiltrazione	Fisico	Separare microparticelle in cui è concentrata la radioattività	Rifiuti liquidi acquosi a bassa e media attività
Precipitazione Flocculazione	Chimico	Aggiunta di un reattivo che insolubilizza la componente radioattiva separandola dalla soluzione acquosa	Rifiuti liquidi acquosi a bassa, media e alta attività
Incenerimento	Chimico – Fisico	Bruciamento del rifiuto con concentrazione della sua componente radioattiva nelle ceneri	Rifiuti solidi combustibili a bassa e media attività
Supercompattazione	Fisico	Schiacciamento a pressioni elevatissime di rifiuti solidi per diminuire al massimo il volume senza trattamenti chimici	Rifiuti solidi comprimibili a bassa e media attività

Trattamento più comunemente utilizzati per i rifiuti radioattivi (fonte ANPA).

La fase di condizionamento ha lo scopo di immobilizzare, all'interno di un idoneo contenitore, il rifiuto radioattivo, inglobandolo in una matrice solida stabile che soddisfi i requisiti di resistenza fisica, chimica e meccanica (definiti dalle norme tecniche ANPA), in modo da ottenere una forma finale idonea allo smaltimento definitivo. La matrice utilizzata per l'immobilizzazione deve avere proprietà chimico-fisiche ben precise:

- compatibilità fisica e chimica con il rifiuto da immobilizzare,
- insolubilità in acqua e impermeabilità all'acqua (resistenza alla lisciviazione),
- resistenza meccanica,
- resistenza agli agenti esterni,
- resistenza agli sbalzi termici,
- resistenza alle radiazioni,
- stabilità nel tempo.

I rifiuti a media e bassa attività sono di solito condizionati tramite l'utilizzo di cemento, si ha la cosiddetta cementazione. Quelli ad alta attività sono immobilizzati in una matrice di vetro borosilicato, ossia sottoposti a vetrificazione (ad esempio il combustibile esausto subisce questo trattamento). La fase di stoccaggio temporaneo permette di mantenere in sicurezza, per alcune decine di anni, i rifiuti condizionati; scopo di questa fase è ottenere:

- che si verifichi un congruo abbattimento dell'emissione di calore, per effetto del progressivo decadimento dei radionuclidi a breve-media vita (caso tipico: combustibile irraggiato, rifiuti ad alta attività vetrificati),
- che sia realizzato il sito nazionale centralizzato per lo smaltimento definitivo (caso tipico: rifiuti a bassa e media attività cementati),
- che sia possibile adottare nuove strategie di gestione rese disponibili.

Infr.2 lo smaltimento definitivo si caratterizza per i seguenti obiettivi: collocazione definitiva, in apposita struttura, dei rifiuti radioattivi condizionati, con l'intenzione di non recuperarli (anche se si sta diffondendo l'idea del possibile recupero dei rifiuti per destinarli a sedi più idonee), protezione dell'uomo e dell'ambiente fino a quando la radioattività residua, per effetto del decadimento, non raggiunge valori paragonabili a quelli naturali, la dose annua alla popolazione non deve superare una frazione del valore di dose massima annua per le persone del pubblico definita dalla vigente normativa.

Nella tabella sono riportate le modalità di smaltimento definitivo per i rifiuti in base alla classificazione secondo la Guida Tecnica n° 26 dell'ANPA (Agenzia Nazionale per la Protezione Ambientale).

Categoria	Definizione	Tipologia	Modalità di smaltimento
1 ^a	Rifiuti la cui radioattività decade in tempi dell'ordine di mesi o al massimo di qualche anno	Rifiuti da impieghi medici o di ricerca, con tempi di dimezzamento pari ad alcuni mesi	Come i rifiuti convenzionali, a decadimento avvenuto (DPR 915/82)
2 ^a	Rifiuti da reattori di in tempi dell'ordine delle centinaia di anni, o che contengono radionuclidi a lunghissima vita media, purché in concentrazione di tale ordine	Rifiuti da reattori ricerca e di potenza Rifiuti da centri di Ricerca. Alcune parti e componenti di impianto derivanti da decontaminazione e smantellamento di impianti nucleari	
3 ^a	Rifiuti che decadono in tempi dell'ordine delle migliaia di anni o che non soddisfano ai limiti analitici fissati per le categorie inferiori.	Rifiuti vetrificati e cementati prodotti dal riprocessamento del combustibile nucleare; combustibile nucleare irraggiato non riprocessato; rifiuti contenenti plutonio da attività di ricerca	In formazioni geologiche a grande profondità

Smaltimento definitivo dei rifiuti in base alla classe di appartenenza.

Depositi di scorie nel mondo

Nel mondo la gestione dei rifiuti radioattivi viene effettuata in maniera diversa da paese a paese. I rifiuti di 1^a e 2^a categoria, o a bassa radioattività, devono essere conservati "solo" per qualche secolo; ne consegue che, dopo un opportuno condizionamento, barriere artificiali adeguatamente progettate possono garantire l'isolamento dalla biosfera. Rifiuti di questo tipo, che rappresentano circa il 95% della produzione totale, sono perciò stoccati, nella maggior parte dei casi, in manufatti realizzati in calcestruzzo e di tipo superficiale.

Le barriere che vengono utilizzate per queste strutture sono di solito:

- la matrice di condizionamento,
- l'eventuale materiale di riempimento (backfilling),
- le strutture di calcestruzzo delle unità di deposito,
- sistemi di raccolta e drenaggio delle acque,
- le difese naturali del sito.

I depositi superficiali (con strutture semplificate, DESS, o ingegneristiche complesse, DESI) sono stati realizzati in Francia, Spagna, Svezia, Giappone, Regno Unito, USA e sono oggetto di studio in Svizzera, in Cina e in alcuni paesi dell'Est Europa, dell'America Centrale, dell'Africa e dell'Asia; nei paesi scandinavi si fa ricorso anche a cavità sotterranee artificiali (deposito in cavità sotterranee, DEC), mentre in Germania si è ipotizzato l'uso di miniere (DEC). Laddove sia stato messo in preventivo di realizzare un sito per rifiuti di 3^a categoria, si pensa di utilizzare depositi geologici (DEG), adatti per radioattività anche molto elevate, anche per i rifiuti a bassa radioattività.

Da un'indagine del 1998 della IAEA, la distribuzione dei vari tipi di deposito per rifiuti di 1^a e 2^a categoria risulta essere la seguente:

- il 20% sono depositi superficiali con barriere semplici,
- il 70% sono depositi con barriere multiple realizzati in superficie,
- il 7% sono depositi in cavità sotterranee,
- il 3% sono depositi in formazioni geologiche profonde.

Per quanto riguarda i rifiuti di 3^a categoria, o ad alta radioattività, sono necessari depositi in grado di garantire stabilità e resistenza, sì da impedire fuoriuscita di radiazioni nella biosfera, per decine di migliaia di anni. È evidente che barriere artificiali, anche se progettate ad Hoc e di notevole complessità, non possano rispettare questi standard, si pensa perciò a formazioni geologiche stabili profonde centinaia o migliaia di metri.

Questo tipo di strutture sono ancora in fase di studio o al massimo in via di sperimentazione pilota; i primi ad occuparsi della questione sono stati i paesi scandinavi, la Svezia, ad esempio, ha un deposito geologico sottomarino e uno sulla terra ferma. Negli Stati Uniti, dopo diversi anni di studio, è stato realizzato il WIPP (Waste Isolation Pilot Plant), primo deposito geologico al mondo, ma non destinato a rifiuti ad alta radioattività in quanto il sale utilizzato non sembra garantire la massima sicurezza. Dubbi restano anche sullo Yucca Mountain, deposito scelto dopo quasi 20 anni di studi; la sua collocazione è ideale (nel bel mezzo del deserto), ma sulla resistenza nel tempo non si hanno ancora certezze. Infine anche la miniera di sale di Gorbelen, in Germania, non sembra dare garanzie sufficienti per ospitare rifiuti di 3a categoria (il sale non assorbe abbastanza le radiazioni ionizzanti).

Il concetto di deposito geologico è al centro di discussioni di carattere tecnico e sociale; le discussioni tecniche sono focalizzate principalmente su due aspetti:

- la recuperabilità dei rifiuti in un periodo transitorio definito (ad esempio qualche secolo),
- le barriere artificiali da concepire e mettere in opera per gestire il periodo transitorio.

Sicuramente il problema più grosso da risolvere resta quello del consenso popolare alla realizzazione (o meglio alla scelta) di un deposito localizzato in una ben precisa zona. Ecco perché sembra prendere piede l'ipotesi di realizzare una struttura artificiale, altamente ineccepibile. In attesa che maturino le condizioni per realizzare un sito geologico. Inoltre, soprattutto negli ambienti della IAEA, la convinzione più diffusa è quella di avere un unico deposito internazionale, posto in una delle aree più remote del pianeta, avente condizioni di **massima** sicurezza e minimo impatto ambientale.

In questa direzione il progetto PANGAEA aveva indicato alcune zone dell'Australia, del Sud America e dell'Asia, anche perché una scelta di questo tipo potrebbe essere quella più sicura in un'ottica planetaria.

CONCLUSIONI

In futuro dunque occorrerà migliorare le modalità di stoccaggio dei rifiuti, allo scopo di trovare una reale destinazione che possa dare le necessarie garanzie di sicurezza; gli studi in proposito continuano e non è da escludere che una soluzione venga trovata. La stessa Comunità Europea ha recentemente previsto l'entrata in vigore di norme che obbligano i paesi membri a "mettersi in regola", realizzando un opportuno piano per la gestione dei rifiuti radioattivi. In particolare da Bruxelles, per i rifiuti di terza categoria, viene indicata come via da seguire quella della realizzazione di impianti di stoccaggio geologici in profondità, che potranno essere localizzati in un paese UE o extra-UE, ma che dovrà essere consenziente.

In Italia invece bisognerà risolvere un problema impellente e cioè lo smantellamento delle centrali dismesse, parallelamente, però, anche nella nostra nazione bisognerà trovare un luogo idoneo allo stoccaggio delle scorie radioattive, con uno studio attento per capire quale possa essere una soluzione ottimale. Se è vero che non vi sono più centrali attive, è allo stesso modo vero che i rifiuti radioattivi sono prodotti anche in ambito industriale e medico.

BIBLIOGRAFIA

<http://www.paciolo.com/ambiente/nucleare/nucleare.htm>
<http://www.nei.org/>
http://www-news.uchicago.edudenni/Group17/efenni_website/concetti/enucl.htm
<http://www.iea.org/>
http://www.ecolo.org/documents/documents_in_italian/itenergia_nucleare.htm <http://www.eia.doe.gov/fuelnuclear.html>
<http://www.nuc.berkeley.edu/>
<http://www.enea.it/>
<http://www.sinanet.anpa.it/>
<http://www.ambientediritto.it/Legislazione/nucleare/nucleare.htm>
<http://www.externe.info/>
http://www.italia.attac.org/spip/stampa.php3?id_article=1063
http://www.ilrasoiodioccam.it/articoli/scorie_nucleari.html#art2
<http://www.amicidellaterrait/PRESS/Sicurezzahmitata.doc>
<http://www.zonanucleare.com/>
http://www.Ings.infn.it/Ings_infn/index.htm?mainRecord=http://www.Ings.infn.it/Ings_infn_contents/Ings_it/public/educational/physics/radioactivity/www.sapere_it_tca/MainApp?srv=vr&url=/5/442_1-wu_ambientediritto.it/dottrina/Politiche%20energetiche%20ambientali/politiche%20e_numeri_dinamica_epshtein.htm
[http:// www_scienza..criovane.unibo.it/pannelli/1-energia-elettrica.html](http://www_scienza..criovane.unibo.it/pannelli/1-energia-elettrica.html)

