

Nucleare

Introduzione

L'energia nucleare è la fonte di energia che è riuscita a conquistare in soli sessant'anni una quota superiore al 5% tra le fonti di energia primaria e a coprire oltre l'11% dei consumi mondiali di elettricità. Consideriamo però che la distribuzione di energia nei consumi energetici finali in Europa è del 23% di elettricità e del 77% di combustibili, di conseguenza, anche se tutta l'energia elettrica venisse prodotta per mezzo di centrali nucleari, avremmo coperto appena un quarto dei nostri consumi energetici.

La produzione del combustibile nucleare è un processo lungo, complesso, inquinante ed energeticamente dispendioso. Le principali miniere di uranio al mondo si trovano in luoghi remoti e l'estrazione del minerale richiede molto lavoro: per ottenere 160 tonnellate di uranio necessarie per far funzionare una centrale standard per un anno partendo da roccia granitica ricca di uranio di 1000 parti per milione, occorrono 160.000 tonnellate di materiale e lo sbancamento di quantità di roccia ancora maggiori. Infatti, dopo aver individuato la presenza di uranio nella crosta terrestre, è necessario valutare il giacimento, ovvero individuare quante tonnellate di uranio contiene e se è economicamente sfruttabile. Da vent'anni, il numero delle centrali nucleari nel mondo è sostanzialmente stabile e il numero è di circa 436 unità.

Conoscere il nucleare

Che cos'è

L'atomo è la parte più piccola di ogni elemento presente in natura che ne conserva le proprietà chimiche e che fu per lungo tempo ritenuto indivisibile (dal greco *ατομος*, *atomos*, che non si può dividere). In realtà, esso è costituito da un **nucleo** (costituito da protoni e neutroni) circondato da **elettroni** in grado di promuovere reazioni chimiche che possono produrre energia (si pensi alle reazioni di combustione). L'impiego dell'energia nucleare nasce dalla possibilità di utilizzare le grandi energie presenti nel nucleo dell'atomo, ben maggiori rispetto alle energie ottenute da reazioni chimiche dove il nucleo dell'atomo non è coinvolto. L'energia nucleare può essere prodotta sia attraverso la **fissione nucleare** (separazione dei nuclei di materiali radioattivi pesanti) sia **attraverso la fusione** (unione di nuclei di elementi leggeri). Delle due reazioni, la fissione è l'unica realizzabile e controllabile dall'uomo, con i necessari accorgimenti tecnici legati alla prevenzione degli incidenti ed alla gestione delle scorie radioattive.

Invece, per quanto riguarda la fusione, essa non è ancora realizzabile per periodi di tempo sufficienti ad una produzione continua di energia. Infatti, non esiste ancora alcun dispositivo in grado di contenere e mantenere "confinato" per un tempo sufficiente l'idrogeno alle altissime temperature che rendono possibile l'aggregazione dei nuclei.

A cosa serve

Il calore che si genera durante la fissione nucleare deriva principalmente dal rallentamento dei nuovi nuclei prodotti: è possibile quindi riscaldare un fluido (chiamato fluido termovettore) in grado di mettere in movimento una macchina operatrice (ad esempio, una turbina). L'energia meccanica viene poi convertita in elettricità da un alternatore collegato a una turbina.

I combustibili nucleari sono utilizzati, per esempio, per produrre energia nelle grandi navi e sottomarini. L'energia fornita dai motori nucleari serve sia per muovere le eliche che per tutti gli altri servizi di bordo.

In passato erano state proposte applicazioni dell'energia nucleare nel campo del teleriscaldamento e della propulsione aerea, soluzioni scartate per motivi economici o di sicurezza. Oggi sembrano invece profilarsi altri utilizzi dell'energia nucleare, quali nuovi reattori per applicazioni spaziali e per la produzione di idrogeno.

Nella produzione di energia si cerca di ottenere dei rendimenti sempre più alti per un miglior utilizzo delle risorse ed una migliore economicità del prodotto. Nel caso delle centrali nucleari è possibile ottenere calore ad una temperatura molto elevata, ma considerazioni legate al buon funzionamento della macchina ed ai limiti dei materiali coinvolti fanno sì che,

nelle usuali centrali nucleari ad oggi in funzione, il rendimento sia inferiore alle più moderne centrali a combustibili fossili.

Dove si trova

Come per le altre risorse energetiche non rinnovabili, quali carbone, petrolio e gas naturale, è necessario chiedersi 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.

Le riserve di uranio certe estraibili, al 1° gennaio 2013, al costo di circa 80 dollari al chilo sono 1,9 milioni di tonnellate. Al costo di 260 dollari ne sono disponibili altri 7,6 milioni di tonnellate, al costo di 130\$/kg 5,9 milioni di tonnellate e meno di un milione di tonnellate di uranio può essere estratto a 40\$/kg (*Fonte: Uranium 2014: Resources, Production and Demand*). Queste riserve sono sufficienti a coprire il fabbisogno di combustibile dei 440 reattori attualmente in funzione per i prossimi 100 anni. L'uranio è presente nel terreno con concentrazioni medie di 4-5 milligrammi per kg mentre nel mare ci sono 3-4 milligrammi di uranio per tonnellata d'acqua: estrarre questo uranio, però, non è economicamente vantaggioso, perchè le concentrazioni sono molto basse e i costi supererebbero i 1000\$/kg. Le maggiori riserve di uranio note economicamente estraibili sono localizzate in quattro paesi, che da soli detengono il **57,4%** delle risorse: Australia (28,9%), Kazakhstan (11,5%), Russia (8,6%) e Canada (8,4%). (*Fonte: World Nuclear Association*)

Anche il **Torio** è un elemento fissile: le sue riserve potrebbero integrare quelle dell'uranio con reattori progettati all'uopo. Tutto questo senza considerare l'impiego dei reattori "autofertilizzanti" in grado di produrre a loro volta combustibile fissile: in tal caso il combustibile nucleare diventerebbe pressoché inesauribile in prospettiva storica.

Bisogna inoltre ricordare che l'incidenza del combustibile sul costo dell'energia elettrica prodotta per via nucleare è di circa il 15%, dove petrolio e gas incidono circa per l'80% anche se i costi relativi ai 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.

Inoltre, è necessario valutare 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".

La fissione nucleare

Per fissione s'intende la **rottura del nucleo** in due o più frammenti più piccoli mediante l'azione di neutroni opportunamente rallentati su nuclei molto pesanti detti fissionabili, quali l'**uranio 235**, **torio 232**, **plutonio 239** ecc. I principali effetti di questo fenomeno sono la liberazione di una grande quantità di energia e l'emissione contemporanea di 2-3 neutroni che possono fungere da **veicolo di reazione**, provocando nuove fissioni e innescando così una **reazione a catena**.

L'energia che si libera nel corso di processi di fissione dei nuclei, se tenuta rigorosamente sotto controllo, può essere sfruttata per produrre elettricità. Alcuni di questi elementi pesanti, come l'uranio 235 (92 protoni e 143 neutroni), si trovano in giacimenti e quindi per ottenerli è necessario estrarli dal sottosuolo. Altri, come il plutonio 239 o l'uranio 233, vengono prodotti artificialmente dall'uomo.

L'uranio in natura è presente prevalentemente sotto forma di uranio 238 (non fissile) e solo in piccola parte di uranio 235 (0,71 %).

La fusione nucleare

La fusione nucleare è il processo con cui da tempo immemorabile si sprigiona energia nel Sole e nelle stelle per le reazioni di fusione tra **nuclei di idrogeno**.

Nel caso della reazione di fusione, si parte da nuclei molto leggeri, fino a provocare la loro aggregazione. Fondendosi, i nuclei diventano più pesanti e cedono energia durante il processo di fusione: ad esempio, un miscuglio di nuclei di idrogeno (1 protone), deuterio e trizio (1 protone e rispettivamente 1 e 2 neutroni) può portare all'innescò di una reazione che, attraverso vari passaggi, porta a costruire nuclei di carbonio. Affinché la reazione avvenga, le due particelle reagenti

devono essere dotate di energia cinetica sufficiente a superare la barriera repulsiva dovuta alla carica elettrica dei nuclei e ciò significa che si devono raggiungere temperature altissime, alle quali la materia si trova allo **stato di plasma**. La più studiata fra le reazioni possibili, perché meno difficile, è la "deuterio più trizio" con temperatura di innesco dell'ordine di 100 milioni di gradi centigradi. Il deuterio è un isotopo dell'idrogeno, il cui nucleo è costituito da un protone più un neutrone; esso è presente nell'acqua nella proporzione di 1 su 7.000 atomi di idrogeno normale, quindi praticamente inesauribile. Il trizio è un altro isotopo dell'idrogeno, costituito da un protone più due neutroni; è **radioattivo** con tempo di dimezzamento di 12 anni e viene prodotto bombardando litio con neutroni. Il litio è dunque indirettamente la materia prima energetica.

La radioattività

La radioattività è un fenomeno fisico per cui nuclei instabili si trasformano in nuclei di altri elementi o in **isotopi** (nuclei di atomi identici dal punto di vista chimico ma con una massa diversa, dovuta a un diverso numero di neutroni) dei nuclei di partenza, emettendo particelle. I diversi nuclei radioattivi possono decadere verso stati più stabili con tempi che variano da pochi milionesimi di secondo a diversi miliardi di anni. La radioattività, presente naturalmente nell'ambiente terrestre, ha effetti biologici sull'uomo a causa delle sue proprietà ionizzanti. Questi effetti sono sfruttati nella diagnostica medica (radiografie, scintigrafie, Tac, Pet ecc.) e nelle terapie antitumorali (radioterapia, terapia neutronica con cattura di boro, adroterapia) ma possono essere nocivi se non attentamente somministrati. Infatti, oltre un certo limite, le radiazioni possono diventare molto pericolose per la salute umana anche in relazione alla durata dell'esposizione. La radioattività è pericolosa soprattutto se caratterizza elementi con un "**tempo di dimezzamento**" (trasformazione in altri nuclei) che può durare millenni e in grado di fissarsi stabilmente nel corpo umano o di altre specie viventi.

La radioattività è utilizzata anche per sterilizzare e per indagare le proprietà ed i difetti dei materiali da costruzione.

La produzione di scorie nucleari, generando elementi radiotossici, è estremamente importante e delicata nel ciclo di produzione dell'energia nucleare e grande attenzione deve venire posta affinché nessuna situazione possa mettere in contatto elementi radioattivi con persone umane.

Un po' di storia

E' difficile trovare una scoperta scientifica che abbia avuto un impatto più grande sulla popolazione e sulla politica mondiale di quello dell'energia nucleare. L'umanità ha preso coscienza di questa nuova forma di energia il 6 agosto 1945 quando si diffuse nel mondo la drammatica notizia dell'esplosione di una bomba nucleare sulla città giapponese di Hiroshima (80.000 morti immediati).

Nel corso del XX secolo, poi, sono state compiute le ricerche fondamentali che hanno portato alla fissione dell'atomo.

Innanzitutto, quelle dei coniugi Curie che, nel 1934, hanno rilevato il primo caso di radioattività artificiale.

In realtà le scoperte scientifiche che portarono alla possibilità di utilizzare l'energia nel nucleo atomico risalgono al 1895 con la scoperta della radioattività naturale in alcuni elementi da parte di Henry Bequerel. Nel 1932 fu l'anno in cui J. Chadwick ottenne la conferma sperimentale dell'esistenza del neutrone, di fondamentale importanza per indurre il processo di fissione con successiva liberazione di energia che venne intuito solo nel 1938 da Lise Meitner, leggendo assieme al nipote Otto Frish una comunicazione inviata da Otto Hahn. Queste scoperte permisero a Fermi di avviare, alle 15.50 del 2 dicembre 1942 il primo "reattore nucleare", con una potenza di circa mezzo watt e dimostrare che la reazione di fissione era attuabile e controllabile. Nel novembre del 1943, a meno di un anno dalla prima macchina di Fermi, entrò in funzione a Clinton, nello stato del Tennessee, il primo reattore al mondo, con una potenza di 3.5 megawatt termici; nel settembre de 1944 fu la volta del reattore di Hanford, nello stato di Washington, di potenza pari a 250 megawatt termici. Tra il 1940 e il 1945 venne compiuto negli Stati Uniti un balzo senza precedenti. Anche se l'obiettivo fu la costruzione della bomba atomica, questo immenso sforzo scientifico, tecnologico e industriale ebbe grandi ricadute sulle applicazioni pacifiche dell'energia nucleare. Dopo il conflitto mondiale, nel 1954, in Unione Sovietica, entrò in funzione la prima centrale elettroneucleare, anche se di modesta potenza (5 megawatt elettrici). La prima centrale nucleare finalizzata alla produzione di energia elettrica da immettere sul mercato risale, invece, al

1956 ed è stata realizzata presso Calder Hill, in Inghilterra.

Per quasi tutta la seconda metà del secolo scorso, la produzione di energia elettrica da combustibile nucleare è cresciuta, fino a coprire oltre l'11% della produzione di energia elettrica mondiale. I dati aggiornati a ottobre 2014 indicano che nel mondo vi sono 436 centrali nucleari attive e 70 in costruzione. In termini di contributo in percentuale dell'energia nucleare alla produzione di energia elettrica domestica vi è in testa la Francia (76,1%), Ucraina (45,4%), Corea (28,3%) e Regno Unito (19,5%).

La nascita dell'energia nucleare come fonte concreta di energia si può far risalire verso la metà degli anni sessanta, quando se ne dimostrò la competitività economica. Lo sviluppo fu inizialmente assai accelerato ma successivamente ebbe un rallentamento legato a forti contestazioni sugli aspetti di sicurezza che determinarono crescenti difficoltà di ordine finanziario a causa dei ritardi nel concedere le autorizzazioni per il funzionamento degli impianti da parte degli organi nazionali per la sicurezza. In alcuni casi, gli stessi organi, imposero delle sostanziali modifiche agli impianti in servizio o addirittura delle chiusure definitive. L'incidente di Three Mile Island (1979), Chernobyl (1986) e l'incidente nella centrale di Fukushima in Giappone (marzo 2011) hanno rinfocolato le polemiche nei confronti dell'opzione nucleare. Quest'ultimo incidente è stato di gran lunga più grave e per questo ha avuto un notevole impatto sull'opinione pubblica. In Italia, a seguito di un nuovo referendum popolare (dopo quello del 1987, a seguito dell'incidente di Chernobyl, le centrali nucleari presenti sul territorio italiano erano state chiuse), nel giugno del 2011, l'impiego dell'energia nucleare per la produzione di energia elettrica è stato nuovamente abbandonato.

Uranio

L'elemento e le sue proprietà

L'uranio venne scoperto nel 1789 da M. H. Klaproth analizzando il **minerale pitchblenda** (ritenuto un ossido misto di ferro, zinco e tungsteno) a cui diede il nome di Urano per celebrare la scoperta, fatta in quegli anni, del nuovo pianeta del sistema solare. Nel 1789 venne scoperto anche lo zirconio, elemento di fondamentale importanza per la tecnologia dei reattori nucleari.

L'uranio, in condizioni standard, è un metallo radioattivo, duro, dal colore bianco-argenteo, malleabile e duttile. In natura è piuttosto diffuso ma è difficile trovarlo in concentrazioni elevate e in media è presente nella crosta terrestre in una proporzione di circa 3 grammi di uranio per tonnellata di crosta terrestre (chiamata anche parte per milione, ppm): poiché la crosta terrestre è stimata in 3×10^{19} tonnellate si hanno a disposizione circa 10^{13} tonnellate di uranio (10000 miliardi di tonnellate) quantità maggiore rispetto a quella dell'argento, dell'oro o del molibdeno.

L'uranio è costituito da diversi **isotopi** (atomi dello stesso elemento chimico, con lo stesso numero atomico, ma con differente numero di massa) presenti in percentuale diversa nella crosta terrestre:

- 238U 99.2745%
- 235U 0.72%
- 234U 0.0055%

Esistono in natura circa 200 minerali conosciuti che lo contengono, rari allo stato isolato e più comunemente presenti in rocce di vario tipo, fra cui in particolare i graniti (rocce acide) e le rocce silicee; concentrazioni minori si hanno nei basalti nonché nelle rocce sedimentarie.

Usi dell'uranio

L'uranio, prima della scoperta dell'energia nucleare, venne utilizzato principalmente per colorare i vetri. Oggi l'uranio viene principalmente utilizzato come combustibile nelle centrali nucleari in cui il materiale fissile è costituito dall'isotopo 235U.

Un giacimento infinito?

Dopo aver individuato la presenza di uranio nella crosta terrestre, è necessario valutare un giacimento, ovvero

individuare quante tonnellate di uranio contiene. Il giacimento deve essere considerato sfruttabile, altrimenti si potrebbe affermare che la crosta terrestre è un “enorme giacimento” perché in essa troviamo 3 grammi/tonnellata di uranio, ma non abbiamo a disposizione una tecnologia in grado di permetterne l'estrazione a costi contenuti.

Un giacimento di uranio viene detto **sfruttabile** una volta che è stato definito un limite economico, cioè una soglia che permetta una classificazione: la valutazione dei giacimenti è un problema di normativa internazionale.

Risorse uranifere

Quando si parla di uranio “recuperabile” significa che è possibile estrarre il minerale da un giacimento e renderlo disponibile per un elemento di combustibile, ad un determinato costo che viene espresso in dollari. Analizzando la mappa mondiale dei giacimenti e conoscendone la natura è possibile stabilire la quantità di uranio estraibile formando delle fasce di costi: fino a 40 \$, tra 40 \$ e 80 \$ e fra 80 \$ e 130 \$. Ovviamente i più economici sono quelli sfruttati per primi.

Tutte le zone dove c'è una comprovata presenza di uranio vengono denominate **Risorse Ragionevolmente Sicure** (Reasonably Assured Resources, RAR). Una volta noti i giacimenti ragionevolmente sicuri, attraverso analisi corredate da opportune misure di radioattività, si possono individuare luoghi simili da un punto di vista geomorfologico che possono dare indicazioni su giacimenti simili a quelli sfruttati. Tali giacimenti si considerano stimati e fanno parte delle **Risorse Addizionali Stimate** (Estimated Additional Resources, EAR, anche chiamate Inferred Resources, IR). Tali risorse aggiuntive sono classificate in due categorie: **EAR-I** ed **EAR-II**; le EAR II sono meno certe delle prime. Esiste poi un'altra categoria chiamata delle Risorse Speculative (SR), che sono il frutto di una ulteriore estrapolazione delle caratteristiche geomorfologiche di terreni che potrebbero contenere uranio.

Le risorse del tipo RAR sono quelle di sfruttamento più facile, e come tale meno costoso; sono disponibili in quantità che vanno da 507.400 t a 4.587.200 t a seconda di quanto si è disposti a spendere per l'estrazione.

I dati relativi alle Risorse Addizionali Stimate del secondo gruppo (EAR-II) sono molto più precisi rispetto a quelli sulle Risorse Speculative e si stima un quantitativo di uranio di circa 2.200.000 di tonnellate ad un costo compreso fra 80 \$ e 130 \$.

Le Risorse Speculative comprendono anche l'uranio presente nei fosfati e si possono stimare in circa 22.000.000 di tonnellate di uranio. Se aggiungiamo anche l'uranio presente nelle acque degli oceani si arriva ad un quantitativo di uranio di circa 4 miliardi di tonnellate!

La tecnologia di estrazione di uranio dai fosfati è sostanzialmente matura: la si utilizza già in Belgio e negli Stati Uniti. Tuttavia ha diffusione limitata perché ha ancora costi non convenienti: si stima che un progetto di estrazione di 100 tU/anno avrebbe un costo nel range 60-100 \$/kgU (considerando inclusi i costi di investimento).

Per quanto riguarda invece l'estrazione dell'uranio dall'acqua di mare, sono state effettuate ricerche in Giappone con esito incoraggiante: tuttavia, si tratta ancora di una tecnologia sperimentata solo su scala di laboratorio con costi estremamente alti, stimata intorno ai 300 \$/kgU.

Il ciclo del combustibile nucleare

Il combustibile nucleare è soggetto ad un vero e proprio ciclo durante la sua vita. Preliminari sono ovviamente tutte le operazioni di miniera a cui segue tutta una serie piuttosto lunga e complessa di vari processi di purificazione, aventi in primo luogo l'obiettivo di eliminare gli elementi che assorbono i neutroni. I neutroni sono particelle in grado di avviare il processo di fissione rompendo il nucleo di ^{235}U con successiva liberazione di energia: se sono presenti elementi che assorbono i neutroni, questi non possono produrre reazioni di fissione (“**veleni neutronici**”). Le operazioni effettuate in questa prima parte del ciclo del combustibile sono prevalentemente di tipo chimico e portano alla produzione di un composto gassoso dell'uranio (esafluoruro di uranio, UF_6) che permette il processo di arricchimento dell'isotopo ^{235}U . Questa fase è necessaria poiché la maggior parte dei reattori nucleari utilizza il combustibile composto da uranio arricchito: mediamente l'arricchimento è attorno al 3% di ^{235}U , contro lo 0.72% di ^{235}U nell'uranio che si trova in natura. Se mandiamo il composto gassoso di esafluoruro di uranio in una centrifuga è possibile discriminare la diversa massa di

dell'isotopo ^{235}U rispetto all'isotopo ^{238}U ed è possibile concentrare un isotopo rispetto all'altro. Le ultracentrifughe gassose costituiscono gli impianti di arricchimento: sono possibili anche altri procedimenti di arricchimento tramite gli impianti di diffusione gassosa oppure tramite la separazione isotopica selettiva a mezzo di laser.

L'es fluoruro arricchito viene successivamente convertito in polvere di biossido di uranio (UO_2), che viene assemblata in pastiglie che, opportunamente incamiciate, andranno a costituire l'elemento di combustibile vero e proprio.

Il combustibile nucleare viene poi inserito nei reattori nucleari e produce energia fino al termine della sua vita. A questo punto l'elemento di combustibile è diventato radioattivo e viene messo in piscine, poste solitamente nei pressi del reattore, per ridurre il livello di radioattività.

A questo punto il combustibile esaurito ha due sorti differenti: il deposito definitivo in luoghi aventi opportune caratteristiche geologiche oppure il riprocessamento.

Durante la permanenza in reattore non tutto ^{235}U viene bruciato (ne rimane circa 1%) e nel frattempo, a causa delle reazioni nucleari, sono nati altri nuclidi che possono dare un processo di fissione nucleare: i nuclei fissili come il plutonio, ^{239}Pu , nato dal ^{238}U tramite il processo chiamato di "fertilizzazione". Questi possono essere utilizzati a loro volta come combustibili nucleari, mentre la restante parte del combustibile deve essere stoccata in depositi definitivi.

La via del riprocessamento, seguita da alcuni paesi come la Francia e il Regno Unito, ha alcuni vantaggi: innanzitutto consente un più razionale sfruttamento del combustibile, permettendo non solo di recuperare l' ^{235}U rimasto ma anche il ^{239}Pu formatosi che rappresenta una risorsa importantissima perché discende per fertilizzazione dall' ^{238}U e rappresenta la quasi totalità dell'uranio presente in natura.

In secondo luogo il riprocessamento permette di ridurre considerevolmente il volume dei prodotti altamente radioattivi da stoccare a lungo termine. Infine riutilizzare combustibile già irraggiato riduce sensibilmente il rischio di proliferazione rendendo il combustibile ritrattato non più adatto per la produzione di armi nucleari.

Uno sguardo al futuro

L'attuale ciclo del combustibile sfrutta, con i reattori attuali, solo una piccola parte dell'energia estraibile dall'uranio presente in miniera e lascia l'eredità di scorie che devono essere confinate per lunghi periodi di tempo. E' evidente che, per chiudere davvero il ciclo e per sfruttare al massimo le potenzialità del combustibile nucleare disponibile in natura, sono necessari non solo reattori termici con elevati tassi di bruciamento ma anche reattori di tipo "veloce", dove i neutroni non subiscono un processo di rallentamento per avviare la reazione di fissione. Tali reattori sono in grado di sfruttare molto meglio il combustibile che si trova in natura con una produzione di scorie nettamente diversa e assai meno problematica rispetto ai reattori attuali.

Al ritmo attuale di produzione di energia da fonte nucleare le riserve di uranio si traducono in una disponibilità di energia per circa 65 anni con il consumo dei reattori attuali di circa 66.000 tonnellate/anno. Tuttavia lo sfruttamento delle Risorse Aggiuntive Stimate del secondo gruppo (EAR-II) garantirebbero energia per altri 260 anni senza alcun processo di ritrattamento. Considerando anche le Riserve Speculative e trascurando l'uranio contenuto negli oceani si avrebbero altri 360 anni di produzione di energia.

Attualmente l'approvvigionamento di uranio si basa per il 50-60% sull'estrazione da miniera, il resto deriva da:

- stock di uranio naturale e/o arricchito di origine civile e militare. Negli anni precedenti è stato estratto più uranio di quanto effettivamente servisse: ciò ha portato negli anni ad un suo accumulo, dovuto in parte anche ad uno sviluppo della produzione di energia per via nucleare che è stato più limitato rispetto alle previsioni;
- riprocessamento del combustibile esaurito;
- utilizzo di ^{235}U di derivazione militare proveniente dallo smantellamento di testate nucleari.

Le centrali nucleari

Le centrali nucleari

Una centrale nucleare consente di produrre vapore senza utilizzare combustibili fossili. Il reattore nucleare si comporta come una qualunque caldaia e il vapore così generato può essere utilizzato per azionare una turbina connessa a un generatore di elettricità.

In particolare, il "cuore" del reattore di una centrale nucleare a fissione si dice "**nocciolo**" e, di solito, ha forma cilindrica. Il nocciolo è immerso in un fluido, per esempio acqua, ed è formato da **barre di uranio**, anch'esse cilindriche, lunghe circa 3 metri e con un diametro di qualche centimetro. Intervallate ad esse, vi sono delle barre di controllo movimentabili meccanicamente capaci di assorbire neutroni proporzionalmente al loro inserimento nel nocciolo. In questo modo la reazione a catena viene controllata e, se necessario, può essere anche arrestata. Nei reattori di tipo più comune l'acqua contenuta nel nocciolo, riscaldata dalla fissione dell'uranio, viene fatta circolare da una pompa fino a uno scambiatore di calore in cui si raffredda producendo del vapore che, a sua volta, fa girare la turbina della centrale.

Un reattore si caratterizza per tipo di combustibile, di refrigerante e per l'architettura interna del nocciolo. Ad esempio, si parla comunemente di **reattori ad acqua leggera** e **ad acqua pesante**.

Reattori ad acqua leggera

Nei reattori ad acqua leggera, il combustibile è costituito da barrette del diametro di circa 1 cm di ossido di uranio arricchito in uranio 235 (arricchimenti di circa il 3%). L'acqua, circolando tra le barrette di combustibile, svolge sia la funzione di **moderatore**, rallentando i neutroni nati veloci dal processo di fissione, sia quella di **refrigerante**, asportando l'energia ceduta all'atto della fissione.

Tutto il nocciolo è contenuto in un recipiente a pressione d'acciaio, in cui vi sono aperture per l'ingresso e l'uscita del refrigerante. Intorno al recipiente e alle parti attive del reattore sono predisposti degli schermi per assorbire le radiazioni: lo schermo termico, in metallo, assorbe prevalentemente le radiazioni gamma, quello biologico, in calcestruzzo, i neutroni. Naturalmente hanno grande importanza i sistemi di sicurezza e di emergenza necessari per far fronte agli eventuali incidenti d'impianto.

Reattori ad acqua pesante

I reattori ad acqua pesante impiegano come combustibile l'**uranio naturale**, non arricchito. Esistono inoltre reattori di concezione più avanzata, detti "veloci", che vengono raffreddati con metallo liquido e funzionano con combustibile fortemente arricchito convertendo l'uranio 238 in plutonio senza utilizzare un moderatore che rallenti i neutroni. Il reattore francese *Superphenix*, produce 1.200 megawatt elettrici con un rendimento complessivo del 40%. Tali impianti sono molto attraenti per la loro capacità di produrre nuovo combustibile fissile ma mostrano (ad ora) delle complessità tecnologiche superiori a quelle dei reattori ad acqua ed un costo dell'energia superiore.

Passato e futuro dei reattori

I reattori nucleari possono essere ricondotti a quattro generazioni in base ad alcune caratteristiche comuni e in base all'epoca in cui sono stati progettati e costruiti.

Attualmente sono in funzione 436 reattori che appartengono principalmente alla prima e seconda generazione, con alcune unità di terza.

La **prima generazione** include prototipi e reattori destinati alla produzione di energia elettrica o plutonio per armi nucleari, progettati e costruiti prima degli anni '70. In genere sono caratterizzati da una bassa potenza termica che per i reattori commerciali di potenza si traduce in taglie generalmente inferiori ai 300 MWe. In Italia sono presenti tre centrali nucleari (Latina - 210 MWe, Garigliano - 160 Mwe e Trino 270 MWe) che possono considerarsi di prima generazione. Gli impianti sono spenti dal 1986 e attualmente in fase smantellamento.

La **seconda generazione** comprende principalmente reattori ad acqua leggera, costruiti e utilizzati a partire dagli anni '70 e '80 e ancora operativi. In genere sono caratterizzati da una potenza elettrica compresa tra i 300 MWe e i 1000 MWe. In Italia la centrale nucleare di Caorso (860 MWe) può considerarsi di seconda generazione, anche se è attualmente spenta e in fase di smantellamento.

La **terza generazione** si riferisce a quei reattori avanzati derivanti dall'ottimizzazione, in termini di economia e sicurezza, degli attuali reattori ad acqua leggera. In generale, questi reattori sono caratterizzati da una potenza elettrica oltre i 1000 MWe. Viene anche spesso citata una generazione 3+ che include sistemi che potrebbero essere introdotti entro i prossimi 10-15 anni, quindi assai prima dei reattori di quarta generazione e allo stesso tempo risultare vantaggiosi per lo sviluppo di questi ultimi.

La **quarta generazione** comprende sistemi nucleari innovativi che probabilmente raggiungeranno maturità tecnica dopo il 2030. Tali sistemi nucleari sono concepiti in modo da provvedere alla fornitura di energia in maniera molto competitiva da un punto di vista economico, estendendo e migliorando la sicurezza in caso di incidenti, la minimizzazione delle scorie (in particolare di quelle a lunga vita), l'uso razionale delle risorse naturali (con un maggior sfruttamento dei materiali fissili e fertili), la capacità di produrre direttamente idrogeno (senza passare attraverso la produzione di energia elettrica) e l'affidabilità.

Fonte: Agi Energia

Il reattore a fusione

Il reattore a fusione funziona secondo il principio esattamente inverso a quello del reattore a fissione. Il reattore a fissione divide nuclei di atomi pesanti e il calore così liberato è utilizzato per scaldare acqua e azionare, con il vapore acqueo, una turbina che produce elettricità. Nel reattore a fusione, invece, atomi leggeri (gli isotopi dell'idrogeno deuterio e trizio) sono uniti in un atomo di elio (fusione). Nella fusione solo se due nuclei vengono posti a una distanza sufficientemente piccola interviene la forza di attrazione nucleare che li fa unire. Il problema è che questa forza agisce solo a cortissimo raggio, dell'ordine di mille milionesimi di millimetro, e poiché i nuclei che si vogliono far fondere sono entrambi carichi positivamente, quando si mettono uno vicino all'altro tendono a respingersi a causa di un'altra forza, la **repulsione elettrostatica**, che si fa sentire su distanze maggiori e ostacola il processo. Per infrangere tale barriera, i nuclei devono essere in uno stato d'eccitazione raggiungibile solo a temperature di oltre cento milioni di gradi, condizione in cui gli atomi vengono letteralmente spogliati della propria "coroteca" di elettroni: è a queste condizioni che la fusione tra atomi leggeri avviene naturalmente.

L'enorme temperatura necessaria per il **plasma** (il misto ionizzato e caldo di deuterio e trizio) di fusione ha impedito finora la realizzazione industriale di un reattore a fusione. La ricerca continua tuttavia a fare importanti progressi e l'obiettivo sembra sempre meno lontano.

La radioattività e l'uomo

La radioattività

La radioattività è il fenomeno per cui alcuni nuclei, non stabili, si trasformano in altri emettendo particelle. La radioattività è antica quanto l'Universo ed è presente ovunque: nelle Stelle, nella Terra e nei nostri stessi corpi. L'uomo, infatti, è esposto alla radioattività fin dal momento della sua apparizione sulla Terra. L'uomo ha scoperto la radioattività alla fine del 1800 grazie alle ricerche di Henry Becquerel e dei coniugi Pierre e Marie Curie, che nel 1903 ricevettero il Premio Nobel per la Fisica per l'importante contributo delle loro scoperte al mondo scientifico. Essi scoprirono che alcuni minerali avevano la proprietà di emettere spontaneamente radiazioni: questi minerali, come ad esempio l'uranio, il radio e il polonio, vennero denominati "attivi" e il fenomeno di emissione di radiazioni venne detto "radioattività".

L'atomo e la materia

La materia che ci circonda è costituita da atomi. Ogni atomo è formato da protoni e neutroni, che insieme costituiscono il nucleo dell'atomo, circondati da una nuvola di elettroni di carica negativa. All'interno dell'atomo, il nucleo è costituito da

protoni carichi positivamente e da neutroni privi di carica e perciò neutri (come dice il loro stesso nome). Gli atomi sono elettricamente neutri poiché il numero di protoni è uguale al numero di elettroni. Il numero totale di protoni nel nucleo (e quindi di elettroni nella nuvola esterna) determina di quale elemento chimico si tratta: così ad esempio l'elemento chimico con 8 protoni è l'ossigeno, quello con 26 protoni è il ferro, quello con 79 protoni è l'oro, quello con 92 protoni è l'uranio.

Gli isotopi

Un elemento chimico, oltre al numero fisso di protoni che lo caratterizza, può avere un numero variabile di neutroni: in tal caso si identificano diversi isotopi di uno stesso elemento. Il ferro presente in natura, ad esempio, è costituito da 4 isotopi, tutti con 26 protoni ma con 28, 30, 31 e 32 neutroni rispettivamente. Gli isotopi sono identificati dal nome dell'elemento e dal numero di massa (neutroni + protoni): così esiste il ferro-54, il ferro-56, ecc.

In natura esistono circa 90 elementi (dall'idrogeno, il più leggero, all'uranio, il più pesante) e circa 270 isotopi. Tra questi, una ventina sono costituiti da un unico isotopo (come ad esempio il sodio, il cobalto, l'arsenico e l'oro), mentre gli altri hanno almeno due isotopi (ad esempio: il cloro ne ha due, lo zinco ne ha cinque, lo stagno ne ha dieci). Oltre agli isotopi presenti in natura (isotopi naturali), esiste oggi un gran numero di isotopi artificiali, cioè prodotti dall'uomo, come ad esempio il cobalto-60 (27 protoni, 33 neutroni), usato in radioterapia o il plutonio-239 (94 protoni, 145 neutroni), usato come combustibile nelle centrali nucleari.

Una questione di stabilità

Gli isotopi naturali sono quasi tutti stabili, a differenza degli isotopi artificiali, che sono instabili, ossia tendono spontaneamente a disporsi in nuove strutture nucleari energeticamente più favorevoli. La trasformazione di un isotopo in un altro si chiama disintegrazione o decadimento mentre gli isotopi instabili vengono chiamati isotopi radioattivi (radioisotopi o radionuclidi). La radioattività consiste proprio in questo processo di disintegrazione spontanea dei nuclei, durante il quale vengono emesse radiazioni ionizzanti. Le radiazioni ionizzanti sono costituite da particelle e radiazioni elettromagnetiche in grado di modificare la struttura della materia con cui interagiscono. Nel caso dei tessuti biologici questa interazione può portare a un danneggiamento delle cellule. Nella maggior parte dei casi il danno viene riparato dai normali meccanismi di difesa dell'organismo ma, in funzione anche dell'entità e della durata dell'esposizione, a volte le cellule interessate possono risultare compromesse, con conseguenze sulla salute degli individui esposti.

Il decadimento di un isotopo può completarsi in tempi brevi o estremamente lunghi. L'emivita (o tempo di dimezzamento) di un isotopo radioattivo è definita come il tempo occorrente perché la metà degli atomi di un campione puro dell'isotopo decadano in un altro elemento. L'emivita è una misura della stabilità di un isotopo: più breve è l'emivita, meno stabile è l'atomo. Ad esempio l'uranio-238 (92 protoni e 146 neutroni), uno degli isotopi presenti da sempre nella crosta terrestre, si dimezza ogni 4,47 miliardi di anni. Attualmente l'uranio-238 residuo costituisce circa la metà della quantità originariamente presente sulla Terra, che ha un'età stimata proprio intorno ai 4,5 miliardi di anni.

Come si misura la radioattività

La radioattività si misura in decadimenti per secondo e la sua unità di misura è il Becquerel (Bq), in onore del fisico Henry Becquerel che nel 1896 scoprì l'emissione spontanea di radiazioni da parte dell'uranio.

Le radiazioni prodotte dal decadimento dei radioisotopi, come detto prima, interagiscono con la materia con cui vengono a contatto, trasferendovi energia. La rilevanza e la gravità degli effetti dipendono dalla dose e dal tipo di radiazione ricevuta. Le radiazioni ultraviolette dei raggi solari, ad esempio, a piccole dosi sono innocue per l'uomo, ma esposizioni eccessive possono provocare bruciature alla pelle. L'unità di misura della dose assorbita è il Gray (1 Gy = 1 joule assorbito da un kg di materia).

Per avere una misura degli effetti biologici dovuti alle radiazioni, è stato introdotto il concetto di equivalente di dose, che, a parità di dose, permette di valutare il danno dei diversi tipi di radiazioni ionizzanti. In questo caso, l'unità di misura è il sievert (Sv). Con una radiografia al torace vengono somministrati 0,14 mSv (mSv= millisievert, ovvero un millesimo di Sv), con una mammografia 1 mSv.

L'esposizione dell'uomo

L'uomo, sin dalla sua comparsa sulla Terra, è esposto alle radiazioni naturali, a cui si è perfettamente adattato. La dose

di radioattività naturale a cui ogni organismo è esposto ogni anno è pari a 2,4 mSv. Alla radioattività naturale contribuiscono una componente terrestre, dovuta ai radionuclidi presenti nella crosta terrestre, come ad esempio il potassio-40, l'uranio, il torio, il radon (elemento gassoso che dà il maggior contributo alla radioattività naturale), e una componente extraterrestre, costituita dai raggi cosmici derivanti dallo spazio.

Alla radioattività naturale si aggiunge quella artificiale, che può essere originata in diversi modi. La più importante è l'irradiazione medica a fini diagnostici e la radioterapia. Elementi radioattivi possono entrare in atmosfera in seguito a esperimenti atomici o a incidenti alle centrali nucleari (es. Chernobyl).

L'uomo può essere esposto alla radioattività in due modi:

- per **esposizione esterna**, o irradiazione, che avviene quando la sorgente delle radiazioni è esterna all'organismo;
- per **esposizione interna**, o contaminazione interna, che avviene attraverso l'ingestione o l'inalazione di radioisotopi da parte dell'individuo

Gli effetti delle radiazioni ionizzanti sull'uomo possono essere immediati o a lungo termine. I primi si manifestano poco tempo dopo l'esposizione alla radiazione, possono essere lievi, come in caso di nausea e vomito, o più gravi, in caso ad esempio di danni al tessuto emopoietico, a seconda dell'entità della dose. I danni a lungo termine possono includere cancro e leucemia.

La radioprotezione

Una volta conosciute le conseguenze dannose che l'esposizione alle radiazioni ionizzanti può provocare, è stato necessario provvedere alla predisposizione di adeguate misure di protezione. È nata così la radioprotezione, ossia un insieme di misure destinate a garantire la protezione dalle radiazioni ionizzanti dei lavoratori, della popolazione e dell'ambiente.

Le regole più elementari della radioprotezione sono le seguenti:

- allontanarsi dalla sorgente di radiazioni, in quanto l'intensità delle radiazioni diminuisce;
- la distanza (ad esempio: le installazioni nucleari sono circondate da una "zona di rispetto" che impedisce l'insediamento di attività umane nelle immediate vicinanze);
- interporre uno o più dispositivi di schermatura tra la sorgente e le persone (ad esempio, nelle installazioni nucleari, la protezione dei lavoratori e dell'ambiente circostante è assicurata da una serie di schermi costituiti da spessori o muri di piombo, di acciaio, di cemento, di materiali speciali);
- ridurre al minimo la durata di esposizione alle radiazioni.

(Fonte A.N.P.A., oggi ISPRA)

Ambiente e territorio

I vantaggi del nucleare

A parità di elettricità prodotta, l'energia nucleare viene considerata una delle risorse a minor impatto ambientale. Infatti, non è fonte di emissioni inquinanti, quali solfuri, polveri o gas responsabili dell'effetto serra, come, ad esempio, l'anidride carbonica. Inoltre, dove utilizzata, consente di ridurre notevolmente lo sfruttamento delle riserve di combustibili fossili.

I vantaggi della fusione nucleare

Uno dei vantaggi della fusione è che il funzionamento del reattore esclude rischi di perdita di controllo poiché la quantità di combustibile usata per la reazione e presente all'interno del reattore è ridotta (solo pochi grammi) per una durata di qualche decina di secondi di combustione; la seppur minima perturbazione all'interno del reattore fa raffreddare il plasma

con conseguente arresto spontaneo delle reazioni di fusione. I reattori a fissione, invece, contengono grandi quantità di combustibile nucleare (uranio) e, in caso d'incidente, anche se la reazione a catena è arrestata, il calore prodotto all'interno può fondere il nocciolo del reattore e liberare i prodotti radioattivi con gravi conseguenze. E' per questo che oggi sono supersicuri, protetti da sempre più raffinati sistemi di sicurezza e da almeno due involucri a tenuta stagna. La fusione nucleare sarà però un'alternativa interessante alla fissione verso il 2040-2050. La possibilità di avere deuterio è quasi illimitata ma il trizio è praticamente inesistente in natura e deve essere prodotto dal litio che è presente in quantità simili a quelle dell'uranio. Un'altra possibilità molto allettante è quella di realizzare reazioni di fusione fra due atomi di deuterio ma la temperatura necessaria a questo tipo di reazione è superiore a 400 milioni di gradi! La cosa interessante è la mancata produzione di scorie a lunghissima vita: le scorie prodotte sarebbero quelle legate all'irraggiamento dei materiali strutturali del reattore a causa dei neutroni prodotti nelle reazioni di fusione.

Il rischio di incidenti

Il problema ambientale delle centrali nucleari è costituito dai rischi di incidente e conseguente rilascio di materiale radioattivo anche con conseguenze molto gravi, come è avvenuto dopo l'incidente di Chernobyl in Ucraina o di Fukushima in Giappone.

Di dimensioni simili a quelle di una normale centrale termoelettrica, l'impatto di una centrale nucleare sul territorio non dipende tanto dalle sue effettive dimensioni, quanto dalla sicurezza degli impianti e dalla protezione della popolazione. In un reattore nucleare per la produzione di energia è presente un'attività equivalente a circa 1.000 tonnellate di radio, (nell'incidente di Chernobyl ne fuoriuscì circa l'8%). Lo sviluppo dell'energia nucleare richiede, quanto meno, che le installazioni siano lontane da zone densamente popolate. Ma spesso questo non è sufficiente perché, in caso di incidente, gli elementi radioattivi, dispersi nell'aria in quantità pericolose per l'uomo e l'ambiente, possono essere trasportati anche a migliaia di chilometri di distanza dai venti. Per questo motivo la maggior parte delle centrali sono provviste di contenitore (a volte anche di doppio contenitore) per arginare la fuoriuscita di materiale radioattivo in caso di un incidente che coinvolga il nocciolo del reattore. Nell'incidente di Three Mile Islands (USA) il contenitore di protezione evitò le gravi conseguenze che si sono invece verificate con l'incidente di Chernobyl.

La scala INES

La scala INES, (International Nuclear and radiological Event Scale - scala internazionale degli eventi nucleari e radiologici) è stata sviluppata a partire dal 1989 dall'AIEA, l'agenzia internazionale per l'energia atomica, con lo scopo di classificare incidenti nucleari e radiologici e rendere immediatamente percepibile al pubblico la gravità di tali incidenti. La scala INES comprende 7 livelli più un livello 0 al di sotto della scala ed è divisa in due parti: gli incidenti (dal 7° al 4° livello), ossia tutti gli eventi che producono danni significativi alle persone, all'ambiente o alle cose, e i guasti (dal 3° al 1°), ossia gli eventi che producono danni ritenuti di poco conto alle persone, all'ambiente o alle cose. Il livello 0 è catalogato come una deviazione. È una scala logaritmica ed il passaggio da un livello all'altro significa pertanto un aumento di danni di circa dieci volte.

Livello 7 - incidente catastrofico

Rilascio all'esterno di un impianto di grandi dimensioni di ingenti quantità di materiale radioattivo in un'area molto vasta con conseguenti effetti acuti sulla salute della popolazione esposta e conseguenze gravi sull'ambiente.

Esempi:

Disastro di Chernobyl, Ucraina, 1986. Surriscaldamento, fino a fusione, del nocciolo di un reattore nucleare scarsamente protetto, esplosione (non nucleare) del reattore e rilascio in ambiente di materiale radioattivo.

Disastro di Fukushima Dai-ichi (reattori 1, 2, 3) a seguito del Terremoto di Sendai del marzo 2011; inizialmente classificato con livello 4, al passare delle settimane è stato classificato con livello 5 e infine, a più di un mese dall'incidente, a seguito delle importanti perdite di radioattività, con livello 7.

Livello 6 - incidente grave

Significativo rilascio all'esterno di materiale radioattivo, in quantità radiologicamente equivalente a valori compresi fra 1 e

10 PBq di iodio-131, tale da richiedere la completa attuazione di pianificate contromisure facenti parte di un piano di emergenza esterno al fine di limitare gravi effetti sulla salute della popolazione.

Esempi:

Incidente di Kyshtym, Mayak, Russia, 1957. Guasto al sistema di raffreddamento di un deposito di ritrattamento di materiale nucleare, surriscaldamento ed esplosione (non nucleare) del deposito con rilascio in ambiente di materiale radioattivo.

Livello 5 - incidente con possibili conseguenze all'esterno dell'impianto

Rilascio all'esterno di materiale radioattivo, in quantità radiologicamente equivalente ai valori compresi tra 100 e 1000 TBq, richiedente una parziale attuazione di pianificate contromisure. Danni gravi al nocciolo del reattore o alle barriere protettive.

Esempi:

Incidente di Three Mile Island, Stati Uniti, 1979. Danni seri al nocciolo del reattore nucleare e alle barriere di protezione radiologica.

Incidente di Goiânia, Brasile, 1987. Contaminazione radioattiva dovuta al furto di un apparecchio per la radioterapia sottratto da un ospedale abbandonato.

Livello 4 - incidente senza conseguenze significative all'esterno dell'impianto [modifica]

Incidente con impatto esterno minore, con esposizione radiologica della popolazione circostante dell'ordine dei limiti prescritti. Danni significativi al nocciolo del reattore o alle barriere protettive. Esposizione di un lavoratore dell'impianto con conseguenze fatali.

Esempi:

Incidente all'impianto di ritrattamento di Windscale (oggi Sellafield), Regno Unito, 1973.

Incidente alla centrale nucleare di Saint-Laurent, Francia, 1980.

Livello 3 - guasto grave

Evento con impatto esterno molto lieve, con esposizione radiologica della popolazione circostante inferiore ai limiti prescritti. Grave contaminazione all'interno dell'impianto e/o conseguenze acute sulla salute dei lavoratori dell'impianto.

Livello 2 – guasto

Evento senza impatto esterno. Significativa contaminazione all'interno dell'impianto e/o sovraesposizione dei lavoratori dell'impianto.

Livello 1 – anomalia

Anomalia che supera i livelli di sicurezza del normale regime operativo.

Livello 0 - deviazione

Evento senza conseguenze sulla sicurezza.

Il problema delle scorie nucleari

Un altro rischio è connesso al normale smaltimento delle scorie radioattive. Per gli isotopi radioattivi, infatti, occorre prevedere un deposito controllato tra i 500 e i 700 anni, mentre, nel caso del plutonio, si parla di centinaia di migliaia d'anni.

I problemi principali relativi alle scorie nucleari sono legati alla localizzazione dei depositi, luoghi geologicamente stabili. Quindi, quando si decide di costruire una centrale nucleare si deve tener conto anche della necessità di avere a disposizione depositi adatti a ricevere le scorie radioattive prodotte e impianti di estrazione del plutonio dal combustibile irradiato. In realtà la quantità di scorie prodotte dal nucleare è di gran lunga inferiore a quella prodotta bruciando combustibili fossili. Una gran parte dei prodotti radioattivi del ciclo di combustibile nucleare ha una radioattività simile o

non molto superiore a quella del fondo naturale; questi rifiuti sono relativamente facili da gestire. Solo una piccola frazione è ad alta radioattività e richiede di esser isolata.

Lo smaltimento dei rifiuti nucleari

Le considerazioni generali necessarie per la classificazione dei rifiuti (scorie) nucleari, sono:

- per quanto tempo i rifiuti resteranno ad un livello pericoloso;
- qual è la concentrazione del materiale radioattivo nei rifiuti;
- se i rifiuti generano calore.

La persistenza di radioattività determina per quanto tempo i rifiuti devono esser gestiti. La concentrazione e la generazione di calore indicano come devono esser maneggiati. Queste considerazioni forniscono anche informazioni sui metodi idonei di smaltimento.

La classificazione varia leggermente da Paese a Paese, ma generalmente le categorie accettate internazionalmente sono:

- rifiuti a bassissima radioattività o non radioattivi;
- rifiuti a bassa radioattività;
- rifiuti a radioattività intermedia;
- rifiuti ad alta radioattività.

I rifiuti a bassissima radioattività o non radioattivi includono quantità trascurabili di radioattività e possono essere trattati come i rifiuti domestici.

I rifiuti a bassa radioattività includono la maggior parte dei rifiuti derivanti dal ciclo di combustibile. Comprendono carta, stracci, strumenti, vestiario, filtri e altro, che contengono piccole quantità di radioattività essenzialmente a breve vita. Non richiedono schermatura nelle fasi di maneggio e trasporto e di riduzione del volume prima dello smaltimento. Rappresentano il 90% del volume totale, ma contengono solo l'1% della radioattività complessiva.

I rifiuti a radioattività intermedia comprendono maggiori quantità di radioattività e, di norma, richiedono una schermatura. Lo schermo può essere una barriera di piombo o di acqua per proteggere dalle radiazioni penetranti come i raggi gamma. I rifiuti a radioattività intermedia comprendono essenzialmente resine, fanghi chimici, rivestimenti metallici del combustibile. Possono esser inglobati in calcestruzzo o bitume per lo smaltimento.

I rifiuti ad alta radioattività includono i prodotti di fissione e gli elementi transuranici prodotti nel reattore che sono altamente radioattivi e generano calore. Questi rifiuti rappresentano oltre il 95% della radioattività totale anche se la quantità di materiale prodotto è modesta, circa 25-30 tonnellate di combustibile spento o tre metri cubi per anno di rifiuti vetrificati per un grande reattore.

Per gestire i rifiuti ad alta attività sono utilizzate due differenti strategie: lo smaltimento profondo e quello esteso. Il primo avviene entro rocce stabili e profonde, e ha registrato progressi significativi negli ultimi dieci anni, particolarmente per quanto riguarda la comprensione, la caratterizzazione e la modellazione delle barriere di sicurezza naturali o appositamente costruite. Il secondo, invece, è considerato dalla comunità come una alternativa allo smaltimento profondo, che al più offre un rinvio allo smaltimento finale.

I rifiuti ad alta radioattività rimangono radioattivi per un lungo periodo di tempo e devono esser isolati dalle persone per migliaia di anni fino a che i loro livelli di radioattività si siano ridotti. Depositi geologici sono previsti entro formazioni rocciose stabili nei maggiori Paesi che utilizzano l'energia nucleare. E' responsabilità di ciascun Paese smaltire i propri rifiuti radioattivi, anche se alcuni Paesi (Russia e Cina) si sono dichiarati disponibili ad accogliere nel proprio territorio, dietro pagamento, i rifiuti radioattivi provenienti da altre Nazioni. Un deposito geologico definitivo viene generalmente realizzato a una profondità di 500 metri in una formazione stabile di roccia, argilla o sale. Il concetto di base è quello

delle “barriere multiple”: le scorie radioattive, in forma ceramica di ossido (combustibile irraggiato) oppure vetrificate vengono “immobilizzate”; vengono poi “sigillate” entro contenitori resistenti alla corrosione come l'acciaio inossidabile o il rame e, finalmente, vengono “sepolte” in una formazione rocciosa stabile.

Altri metodi per stabilizzare i rifiuti ad alta attività sono in fase di ricerca. Uno dei metodi più avanzati è una sostanza chiamata Synroc, un materiale ceramico comprendente tre minerali di titanio che sono geochimicamente stabili e che insieme hanno la capacità di inglobare nella loro struttura cristallina gli elementi presenti nei rifiuti radioattivi, immobilizzandoli.

Decommissioning

Sin dalle fasi di progettazione ed individuazione dei siti una centrale nucleare si presenta come un impianto molto complesso: ogni fase della realizzazione e del successivo ciclo di vita della centrale deve essere attentamente sorvegliata per garantire la massima sicurezza. Concluso il periodo di funzionamento, una centrale nucleare richiede ancora grandi attenzioni perché non è sufficiente “spegnere” una centrale nucleare per cancellare ogni rischio, il combustibile, le scorie, e l'impianto stesso continuano ad essere pericolosi in quanto radioattivi per moltissimo tempo. L'insieme di tutte le procedure da seguire per smantellare un impianto nucleare prende il nome di decommissioning; l'obiettivo finale è quello di ripristinare la situazione iniziale consentendo quindi di destinare l'area a qualunque uso. Le operazioni di dismissione di una centrale nucleare sono molto lunghe, complesse e costose e possono essere così sintetizzate:

- Fase di disattivazione dell'impianto
- Sistemazione del combustibile nucleare esaurito presente negli impianti
- Trattamento e avvio al deposito dei rifiuti radioattivi accumulati in fase di esercizio
- Decontaminazione e smantellamento delle apparecchiature, degli impianti e degli edifici
- Trattamento e avvio al deposito (se radioattivi) o allo smaltimento dei materiali derivanti dalle operazioni di smantellamento
- Caratterizzazione, riqualificazione e rilascio del sito per altri usi.

In base alla scala IAEA sono possibili le seguenti strategie generali di decommissioning:

- DECON (Decontamination) – Si procede subito, dopo la fermata dell'impianto, all'inizio dello smantellamento per completare le operazioni di decommissioning nel minor tempo possibile. In genere questa opzione viene scelta quando il sito è destinato ad ospitare una nuova centrale, o in generale c'è la necessità di rilasciare il sito per altri usi in tempi brevi
- SAFESTOR (Safe Storage) – prevede l'allontanamento del combustibile e delle scorie e il mantenimento in sicurezza dell'impianto per un periodo di alcune decine di anni, in attesa che la radioattività decada a livelli più accettabili per le operazioni di smantellamento, dopodiché si passa alla strategia DECON.
- ENTOMB (Entombment) - Le parti radioattive dell'impianto vengono confinate (ad es. inglobate in un colata di calcestruzzo) in attesa del decadimento a livelli di fondo ambientale.

Attualmente nel mondo non c'è una scelta definitiva a favore di una delle strategie Decon o Safestor, mentre la strategia Entomb non viene praticamente seguita mai per una centrale nucleare di potenza. Infatti, optare per una strategia ENTOMB equivarrebbe a trasformare ogni sito nucleare in un sito di smaltimento definitivo per rifiuti radioattivi. In alcuni

casi, ad esempio Chernobyl, l'entombment diviene l'unica scelta possibile. Finora è stato utilizzato solo per alcuni reattori dimostrativi a bassa potenza situati negli Stati Uniti, ma non è mai stato preso in considerazione per reattori di potenza. In Europa e negli USA le due strategie SAFESTOR e DECON convivono; in Germania si sono orientati preferenzialmente verso la strategia DECON, mentre in Francia e nel Regno Unito è stata di solito utilizzata la strategia SAFESTOR. In uno stesso paese si verificano cambiamenti di strategie in corso d'opera. In Italia ad esempio si è passati da una iniziale strategia di SAFESTOR a una DECON, senza peraltro riuscire a trarne le opportune conseguenze in termini di strategia di gestione dei rifiuti radioattivi.