

LE CENTRALI NUCLEARI

Indice

Introduzione >

Reattori nucleari >

Reattori ad acqua leggera

Reattori ad acqua pesante

Passato e futuro dei reattori

Il reattore a fusione

Ambiente e territorio >

Il rischio di incidenti

La scala INES

Il problema delle scorie nucleari

Lo smaltimento dei rifiuti nucleari

Decommissioning

LE CENTRALI NUCLEARI

Introduzione

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.

Reattori nucleari

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 440 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 miliardesimi 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 "corteccia" 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.

Ambiente e territorio

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. È per questo che oggi sono super sicuri, 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. 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. È 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 una 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.

Testo aggiornato ad agosto 2022