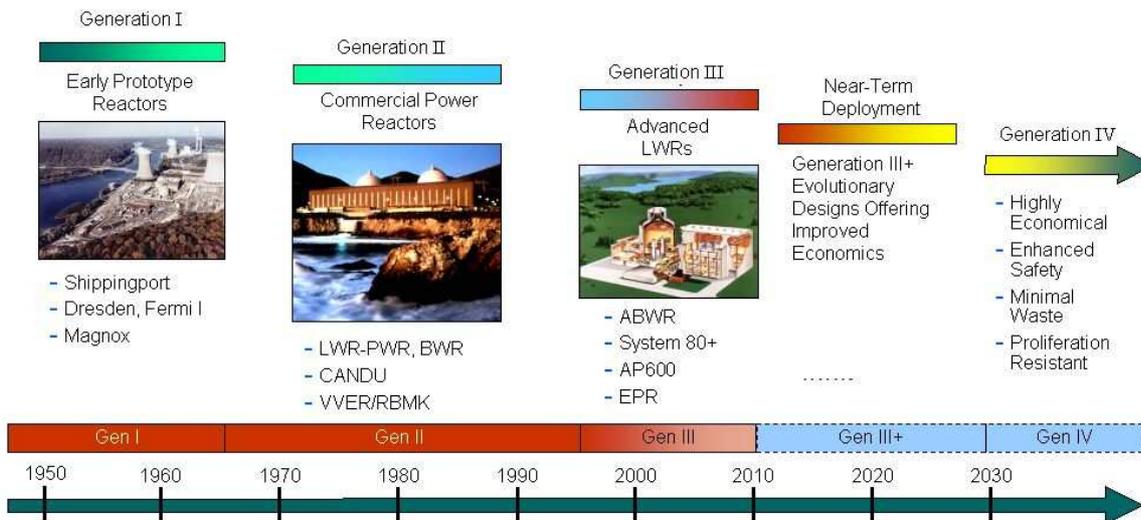


# I reattori di nuova generazione

D. Maisto -C Ginelli- N. Sparacia

classe 4A

**Generation IV:** Nuclear Energy Systems Deployable no later than 2030 and offering significant advances in sustainability, safety and reliability, and economics



# La storia del nucleare

La storia del nucleare inizia alcuni milioni di anni fa in una miniera di Uranio situata nei pressi del fiume Oklo in Africa. La particolare conformazione geologica del terreno e l'elevata concentrazione dell'isotopo Uranio235 fecero sì che si innescasse la prima reazione di fissione. Le misure dei decadimenti radioattivi dei prodotti della reazione stessa sono la prova dell'avvenuta reazione.

Il 22 ottobre del 1934 Enrico Fermi e i suoi collaboratori (i ragazzi di via Panisperna) bombardarono l'Uranio con neutroni rallentati da paraffina accendendo in laboratorio una nuova reazione di fissione nucleare. Il gruppo pensò erroneamente di aver scoperto due nuovi elementi, furono successivamente i chimici tedeschi Hahn e Strassman ad interpretare correttamente la scoperta.

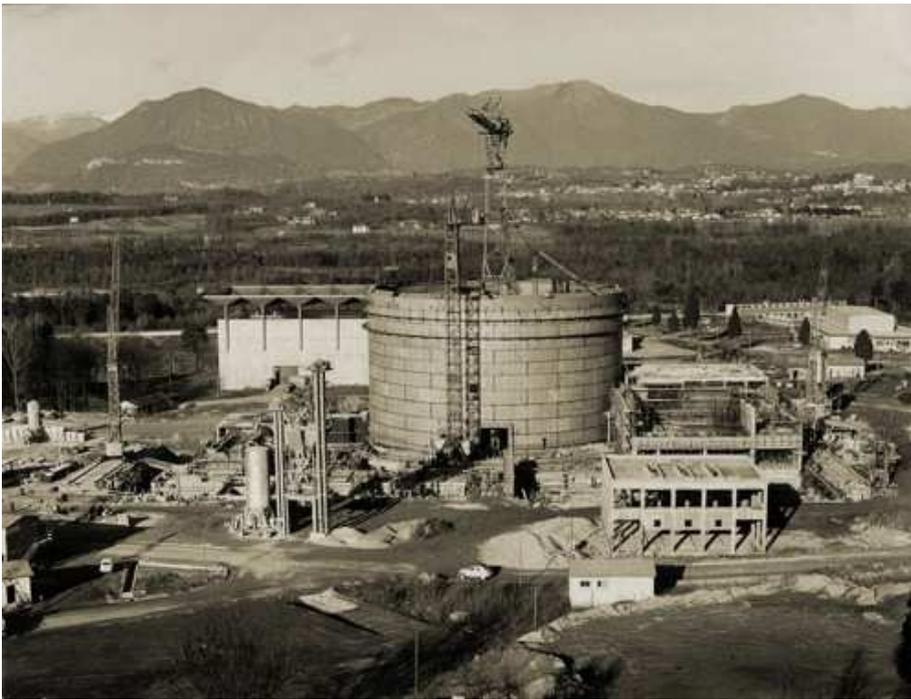
Fermi si trasferì poi negli USA e costruì la prima pila atomica la "Chicago Pile Number One" e insieme a Robert Oppenheimer diresse il progetto Manhattan portando al compimento delle prime bombe atomiche sganciate poi su Hiroshima e Nagasaki nel 45.



Nella metà degli anni 50 si ebbe una applicazione in campo pacifico del nucleare e in USA ed in URSS nacquero le prime centrali atomiche per la produzione di energia elettrica.

# Nucleare in Italia

In Italia verso la fine degli anni 50 la ricerca del nucleare ebbe un grandissimo impulso sotto la



guida dell'ingegnere e geologo Felice Ippolito. Nacquero le centrali di Carso, di Trino Vercellese, del Garigliano, di Latina e di **Ispra** (1959) dove risiede il reattore Essor, sviluppato dal centro Euratom per condurre studi di ricerca nucleare. Gli interventi furono tali che nel 1966 si giunse a produrre energia elettrica

con l'atomo per 3,9 miliardi di kW, portando l'Italia ad essere il terzo paese produttore del mondo. La diffidenza verso questa forma di energia, ritenuta pericolosa e poco conosciuta, portò alla nascita di una campagna giornalistica che sollevò molti dubbi sull'operato del CNEN (comitato nazionale per l'energia nucleare). Furono scoperte delle irregolarità ed Ippolito fu arrestato e condannato a 11 anni di carcere. Con l'uscita di scena di Ippolito si ebbe un progressivo disinteresse italiano per il nucleare.

Il 26 aprile del 1986 a Chernobyl, per una serie di incredibili errori umani e manovre sbagliate, esplose il reattore quattro della locale centrale nucleare. In seguito all'esplosione, provocata dall'idrogeno che si era sviluppato dall'acqua di raffreddamento per un anomalo ed eccessivo surriscaldamento del nocciolo, il coperchio di acciaio e cemento del reattore volò via ed il nocciolo semifuso rimase scoperto. Furono rilasciate radiazioni 200 volte superiori a quelle che si svilupparono dall'esplosione dell'atomica lanciata su Hiroshima che investirono Ucraina e Bielorussia, lambirono Danimarca e Scandinavia e perfino l'Italia. Il nocciolo del reattore in seguito al calore sviluppatosi dalla reazione sprofondò per oltre 4 metri nel terreno avvelenando completamente il territorio circostante.

La ripercussione nel mondo per tale disastro fece nascere un forte sentimento di sfiducia nei confronti dell'energia atomica. Sfiducia che in Italia sfociò nel referendum sul nucleare (8 novembre 1987) che sancì l'abbandono del ricorso dell'Italia all'energia atomica per produrre energia elettrica. Abbandono che negli ultimi tempi è stato rimesso in discussione infatti recentemente è stato annunciato un accordo tra Italia e Francia per la costruzione di quattro centrali atomiche di ultima generazione.

Il terribile terremoto che in questo periodo ha colpito il Giappone hanno però riaperto le polemiche sul nucleare. A Fukushima il terremoto ha provocato, infatti, problemi agli impianti di raffreddamento dei reattori, in particolare il numero 4, con conseguente aumento della pressione negli edifici di contenimento e guasti alle apparecchiature. L'idrogeno, originato dalla reazione chimica con l'acqua di raffreddamento delle barre di uranio sovrariscaldate, ha interagito poi con l'ossigeno atmosferico causando esplosioni che hanno a loro volta danneggiato le strutture di contenimento dei reattori. Si è cercato di ridurre la temperatura dei noccioli surriscaldati utilizzando camion con cannoni ad acqua e acqua di mare e si è cercato di seppellire i reattori sotto una coltre di cemento, ma le alte concentrazioni di radioattività hanno ostacolato tutte queste operazioni di intervento.

# Combustibile nucleare

Il combustibile nucleare è costituito da materiale fissile che sotto forma di piccole pastiglie (pellets) di biossido di uranio è incapsulato all'interno di barre di zircaloy (lega a base di zirconio).

A loro volta le barre di combustibile sono raggruppate in schiere costituendo così il singolo elemento di combustibile.



Circa duecento di questi elementi, distribuiti geometricamente in modo opportuno, formano il **nocciolo del reattore**.

L'efficienza della reazione è fortemente influenzata dalla disposizione geometrica degli atomi.

La massima efficienza si ottiene con una configurazione a forma di sfera ma generalmente si opta per una

cilindrica che rende più agevole l'estrazione delle barre.

Nelle reazioni di fissione il consumo del combustibile è molto lento, una carica del nocciolo dura anche diversi anni. Le operazioni di carica e scarica, invece, sono estremamente complesse a causa della radioattività del materiale, causata dai prodotti di fissione generati dalla reazione.

Tale radioattività è estremamente alta per le barre di combustibile esausto che pertanto vengono prima raffreddate per un anno in speciali piscine d'acqua e poi confinate in speciali siti.

# Funzionamento del reattore nucleare

Quando un neutrone colpisce un nucleo di uranio 235 (composto cioè da 92 protoni e 143 neutroni) ne provoca la **fissione**, ossia il nucleo si frantuma in due costituenti più leggeri con l'emissione di due o tre neutroni. Questi nuovi neutroni emessi possono colpire altri nuclei di  $^{235}\text{U}$ , provocando altre fissioni e innescando quindi la **reazione a catena**, oppure possono essere assorbiti da materiale inerte come il cadmio o sfuggire dal perimetro del nocciolo e in entrambi i casi non generano altre reazioni di fissione e quindi non contribuiscono al sostentamento della reazione a catena.

Quando all'interno del nocciolo vengono inserite le barre di controllo, costituite da elementi che assorbono i neutroni, la reazione a catena tende ad estinguersi e la potenza termica prodotta può essere controllata fino eventualmente allo spegnimento totale del reattore.

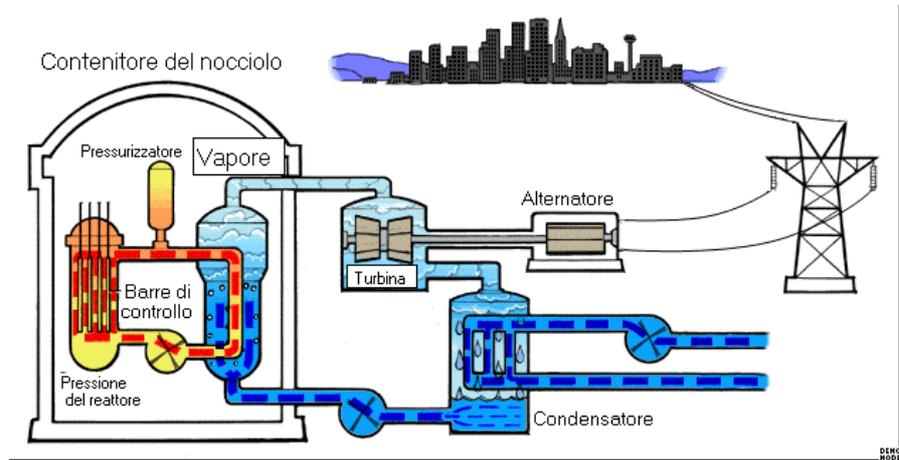
Non tutti gli isotopi dell'uranio sono però fissili per esempio l'isotopo più abbondante di questo elemento, che ha numero di massa 238 (92 protoni e 146 neutroni), non si spacca se viene colpito da un neutrone, ma si trasforma in plutonio 239, che invece è fissile. Tali isotopi sono detti **fertili**, poiché pur non essendo fissionabili, quando assorbono un neutrone, si trasformano in un isotopo fissile.

Un fattore che deve essere tenuto in considerazione per poter innescare la reazione a catena è la velocità dei neutroni. I neutroni che vengono prodotti dalla reazione di fissione hanno velocità elevatissime (superiori a 70 milioni di km/h) e in queste condizioni la probabilità che un neutrone colpisca un nucleo è bassissima e quindi è necessario diminuire la velocità della particella. A questo scopo il nocciolo è immerso in un mezzo moderatore di neutroni. In seguito alle collisioni con il moderatore il neutrone diventa termico, cioè la sua velocità si riduce e aumenta la probabilità che il neutrone durante il suo cammino incontri un nucleo fissile.

# Calore prodotto

Le reazioni di fissione producono **calore** che viene raccolto dal liquido refrigerante in cui è immerso il nocciolo.

Il calore asportato dal nocciolo del reattore aumenta la temperatura del liquido refrigerante che



fluisce per mezzo di opportune pompe nel circuito primario, dove viene convogliato in uno scambiatore di calore in cui cede il suo carico termico al fluido circolante nel circuito secondario.

In questo secondo circuito viene generato il **vapore** che farà muovere le pale della turbina, la quale trasferirà la propria energia cinetica all'alternatore che la trasformerà in energia elettrica.

# Le tre generazioni precedenti

Gli impianti nucleari sono stati suddivisi in **quattro generazioni**.

Alla **generazione I** appartengono i primi prototipi di reattore costruiti a cavallo tra gli anni 40 e 50 principalmente con lo scopo di dimostrare la fattibilità scientifica e tecnologica di un impianto nucleare per la produzione di energia elettrica.

Alla **generazione II** appartengono gli impianti di tipo LWR (cioè Reattore ad Acqua Leggera), di grande potenza (dell'ordine di 1000 MW) realizzati nelle due filiere, rispettivamente ad acqua bollente (BWR:) e ad acqua pressurizzata (PWR ). Sono di questo tipo quasi tutti gli impianti in funzione negli USA e il reattore di Corso (BWR da 860 MW).

Alla **generazione III** appartengono i reattori EPR o AP1000 - evoluzioni della filiera PWR; i reattori ABWR o ESBWR - evoluzioni della filiera BWR; i reattori CANDU-9 o ACR - evoluzioni della filiera CANDU; il GT-MHR - evoluzioni della filiera a gas.

I reattori di III generazione sono reattori di potenza che incorporano sviluppi delle tecnologie della "seconda generazione", con miglioramenti "evolativi" nel progetto.

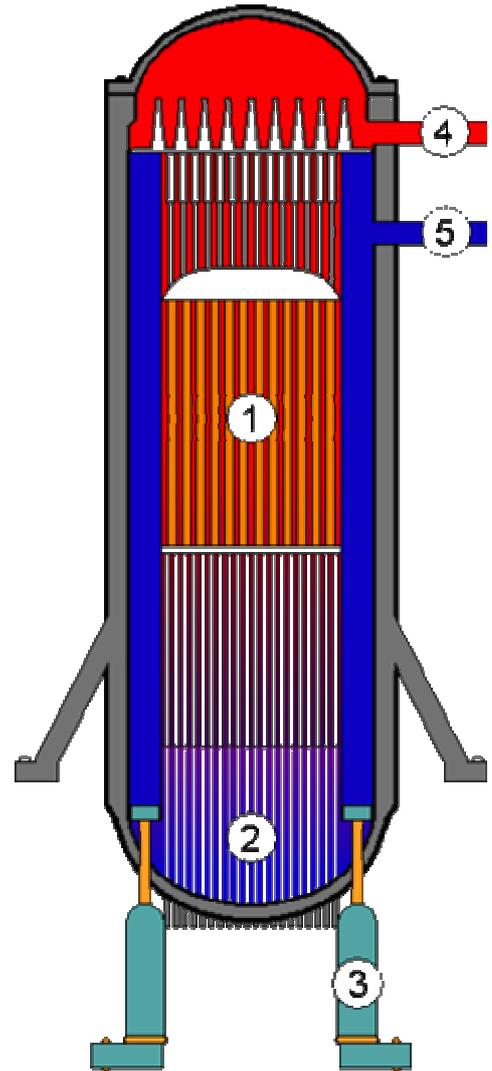
Come combustibile nucleare utilizzano l'ossido di uranio arricchito oppure miscele di ossidi di uranio e plutonio.

I processi di combustione sono più efficienti, nel senso che la massa di scorie per ogni kWh prodotto è inferiore, ma i residui risultano maggiormente radiotossici rispetto ai reattori di generazioni precedenti. Inoltre, considerata la taglia della centrale maggiore, una singola centrale produce una massa maggiore di scorie.

Hanno un doppio circuito di raffreddamento ad acqua, uno interno ad alta pressione, a contatto con il reattore ed un altro esterno ad acqua bollente, che diventando vapore d'acqua fornisce pressione a delle turbine.

Dato che necessitano di grandi quantità d'acqua per il raffreddamento dei condensatori, spesso si trovano nei pressi di laghi o in riva al mare.

Il primo reattore nucleare di III generazione entrò in servizio in Giappone nel 1996 ed è di tipo ABWR (Advanced Boiling Water Reactor), sviluppato dalla General Electric.. Genera energia elettrica usando il vapore per alimentare una turbina collegata ad un generatore.



Da più di 10 anni la ricerca mondiale ha focalizzato l'attenzione sul **nucleare di nuova generazione**

# Reattori nucleari di quarta generazione

L'espressione "reattori di quarta generazione" è stata coniata nel 2000, nell'ambito di un progetto noto come "**Generation IV Initiative**", promosso dagli Stati Uniti e a cui hanno aderito altre otto nazioni: Argentina, Brasile, Canada, Francia, Giappone, Sudafrica, Corea del Sud e Gran Bretagna. La Russia è parte attiva nei progetti che riguardano i reattori a spettro veloce.

A differenza dei reattori di II generazione e III generazione, quelli di IV generazione dovrebbero introdurre marcate differenze soprattutto nei materiali impiegati, pur continuando ad usare come "combustibile" principalmente uranio e plutonio.

Secondo i promotori, questi sistemi offrirebbero significativi vantaggi di **redditività economica, riduzione delle scorie nucleari prodotte, eliminazione del plutonio impiegabile in armi nucleari e protezione fisica sia passiva che attiva dell'impianto.**

Tuttavia i sistemi nucleari innovativi allo studio per l'utilizzo nella IV generazione richiedono nuovi strumenti per la valutazione del loro impatto economico, dal momento che le loro caratteristiche differiscono significativamente da quelli presenti negli impianti di II generazione e di III generazione e il GIF ritiene che questi prototipi non saranno disponibili per l'impiego commerciale prima dell'anno 2030.

Molti tipi di reattore sono stati considerati all'inizio del programma GIF ma fondamentalmente si perseguono due diverse filiere: i reattori nucleari termici e gli autofertilizzanti a neutroni veloci.

I **reattori termici VHTR** sono studiati per la capacità teorica di generare calore di alta qualità, mentre i **reattori autofertilizzanti a neutroni veloci FAST-BREEDERS** sono studiati perché offrono la possibilità di produrre più combustibile nucleare di quello che consumano e perché il riprocessamento e riutilizzo del combustibile nucleare esausto riduce la quantità di materiale radioattivo da stoccare in siti speciali e quindi riduce i tempi di decadimento.

Parallelamente ai reattori Generation IV si stanno facendo ricerche sui reattori a fusione (radicalmente diversi in quanto basati sul principio fisico opposto, cioè l'unione di nuclei atomici anziché la loro divisione).

# Tipi di reattori

## VHTR (Very High Temperature Reactor)

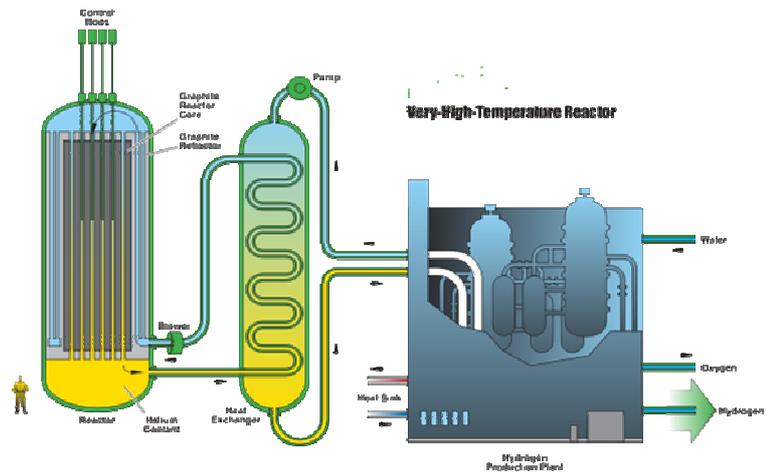
Reattore nucleare a temperatura molto alta, utilizza un nocciolo con grafite come moderatore e un ciclo di utilizzo dell'uranio a singolo passaggio (quindi il ciclo del combustibile non è "chiuso").

Per questo progetto di reattore si prevede una temperatura di uscita del refrigerante di circa 1.000 °C.

Il nocciolo del reattore può essere

sia una pila di blocchi prismatici in grafite (rivestita o no da ceramiche ad alta resistenza termica e meccanica) oppure un insieme di sfere di grafite multistrato, "pebble bed", contenente il combustibile all'interno.

Le alte temperature consentono applicazioni industriali come la produzione di "calore di processo", ovvero calore utilizzabile per usi chimici, come il cracking<sup>1</sup> o il reforming<sup>2</sup> oppure la produzione d'idrogeno tramite il ciclo termo-chimico zolfo-iodio.



1

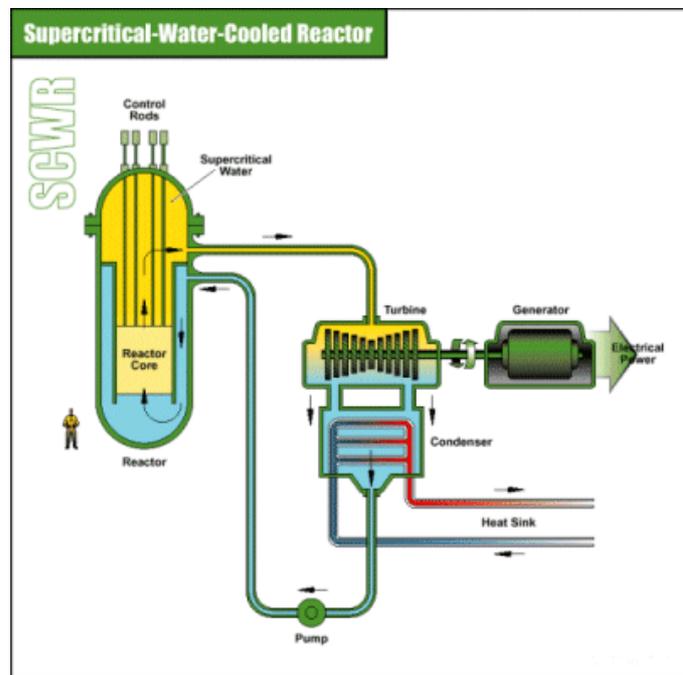
Il **cracking** in [chimica](#) è un [processo](#) attraverso il quale si ottengono [idrocarburi](#) leggeri per rottura delle [molecole](#) di idrocarburi pesanti. È pertanto un processo adottato per la produzione di idrocarburi leggeri, quali le [benzine](#), a partire da greggi medio-pesanti e pesanti, aumentando la quantità di benzina ottenibile dal [petrolio](#) greggio.

<sup>2</sup> Il reforming è sostanzialmente una reazione di sintesi di idrocarburi. Il processo consente di dosare la produzione delle varie frazioni del petrolio ([gas naturale](#), [GPL](#), [benzina](#), [kerosene](#), [gasolio](#), [olio combustibile](#), [paraffine](#)) per corrispondere alle esigenze del mercato; consente ad esempio di aumentare il [numero di ottano](#) di una benzina, migliorandone le qualità come carburante.

### SCWR( SuperCritical Water Reactor):

reattore nucleare che utilizza l'acqua supercritica come fluido di lavoro<sup>3</sup>. Sono sulla carta dei sistemi avanzati molto promettenti, perché avrebbero un maggiore rendimento termico (si stima circa il 45% contro il 33% degli attuali LWR) e permetterebbero una notevole semplificazione dell'impianto.

Il principale compito dei reattori nucleari SCWR potrà essere la produzione di elettricità. Derivano da due tecnologie ben collaudate: i reattori LWR, che sono i



reattore nucleari di potenza più comunemente impiegati nel mondo, e le caldaie a temperatura/pressione supercritica operanti con combustibili fossili, che sono impiegate in Giappone ed Europa.

Attualmente i concetti fondamentali dei reattori SCWR sono approfonditi da 32 organizzazioni in 13 paesi.

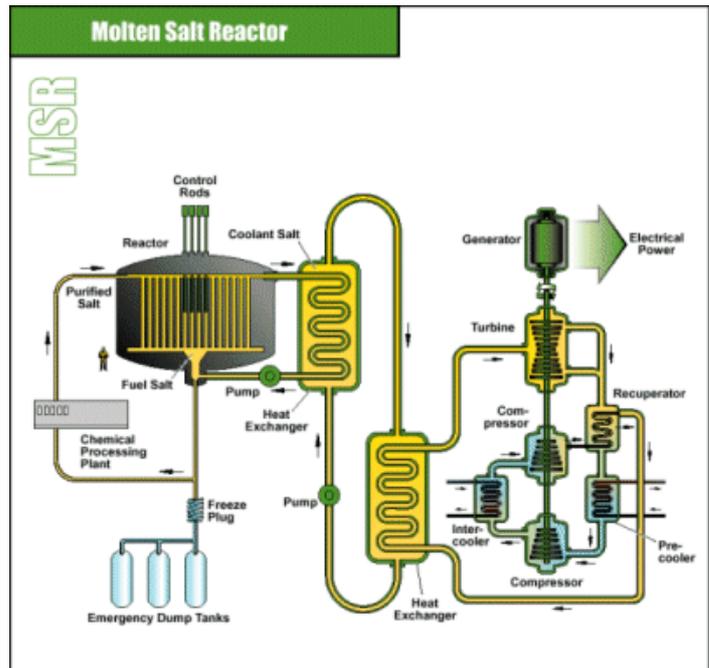
---

. Un [fluido](#) si dice essere in uno **stato supercritico** (e si dice **fluido supercritico**) quando si trova in condizioni di [temperatura](#) superiore alla [temperatura critica](#) e pressione superiore alla [pressione critica](#). In queste condizioni le proprietà del fluido sono in parte analoghe a quelle di un [liquido](#) (ad esempio la [densità](#)) ed in parte simili e quelle di un [gas](#) (ad esempio la [viscosità](#)).

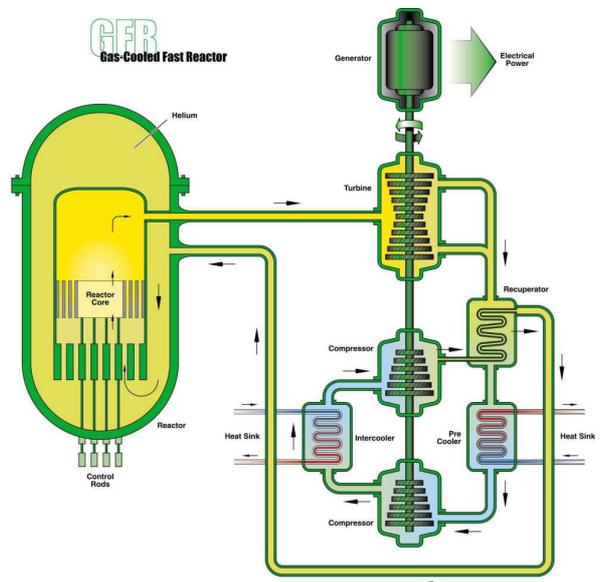
**MSR (Molten Salt Reactor):** reattore nucleare a sali fusi.

Sono stati proposti molti progetti per questo tipo di reattore, ma sono stati costruiti pochi prototipi. I primi progetti, così come molti di quelli attuali, prevedono che il combustibile nucleare venga disciolto dentro un fluoruro, come ad esempio il tetrafluoruro di uranio (UF<sub>4</sub>); il fluido raggiungerebbe la condizione critica fluendo dentro un nocciolo in grafite.

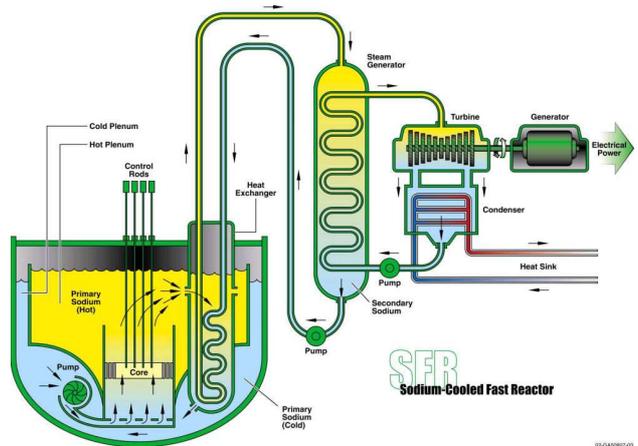
È stato sperimentato a partire dalla seconda metà degli anni '60.



**GFR (Gas-Cooled Fast Reactor):** reattore raffreddato ad elio, con una temperatura di uscita pari a 850 °C, che viene impiegato come fluido termodinamico per muovere direttamente una turbina a gas. Vari tipologie e configurazioni del combustibile (combustibili in ceramiche composite, particelle di combustibile avanzate, o capsule di composti attinidi rivestiti in ceramica) vengono studiati in base al loro potenziale per operare a temperature molto alte e per assicurare una eccellente ritenzione dei prodotti di fissione.



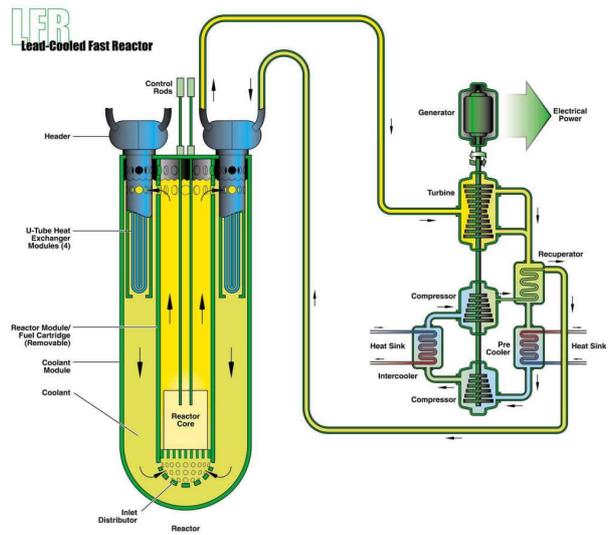
**SFR (Sodium-Cooled Fast Reactor):** reattore nucleare a neutroni veloci refrigerato a sodio. E' un progetto che si basa su altri due molto strettamente legati, lo LMFBR ed il reattore nucleare integrale veloce. Gli obiettivi sono l'incremento dell'efficienza nell'utilizzo dell'uranio grazie alle tecnologie autofertilizzanti del plutonio e la eliminazione della necessità di svuotare il reattore degli isotopi transuranici<sup>4</sup> una volta



esausto il combustibile. Il reattore utilizza un core *non moderato* con spettro neutronico veloce, progettato per *bruciare* ogni tipo di isotopo transuranico che si possa generare come sottoprodotto della reazione di cattura (ed in alcuni casi può caricare questi isotopi come combustibile iniziale). Oltre ai benefici della rimozione degli isotopi transuranici, il combustibile impiegato dallo SFR si espanderebbe quando il reattore si surriscalda, e dunque la reazione a catena rallenterebbe automaticamente. In questo modo alcuni scienziati affermano che lo si possa considerare passivamente sicuro.

<sup>4</sup> Sono detti **transuranici** (dal latino «al di là dell'uranio») gli elementi chimici con numero atomico maggiore di 92. Gli elementi con numero atomico da 1 a 92 (tranne poche eccezioni) si trovano abbastanza facilmente in natura, essendo stabili o avendo isotopi con tempi di decadimento relativamente lunghi. Gli elementi con numero atomico superiore non esistono naturalmente (tranne plutonio e nettunio che derivano dal decadimento beta  $^{238}\text{U} \rightarrow ^{239}\text{U} \rightarrow ^{239}\text{Np} \rightarrow ^{239}\text{Pu}$ ).

**LFR** (Lead cooled fast reactor) :reattore nucleare a neutroni veloci raffreddato da un metallo liquido, come ad esempio il piombo, oppure una miscela di bismuto/piombo con ciclo chiuso del combustibile nucleare. Varie opzioni includono un ventaglio di impianti che vanno da una "batteria" capace di generare da 50 a 150 MW di elettricità con un lunghissimo intervallo tra le ricariche d'uranio, ad un sistema tarato dai 300 ai 400 MW, fino ad un grosso impianto "di 1.200 MW.

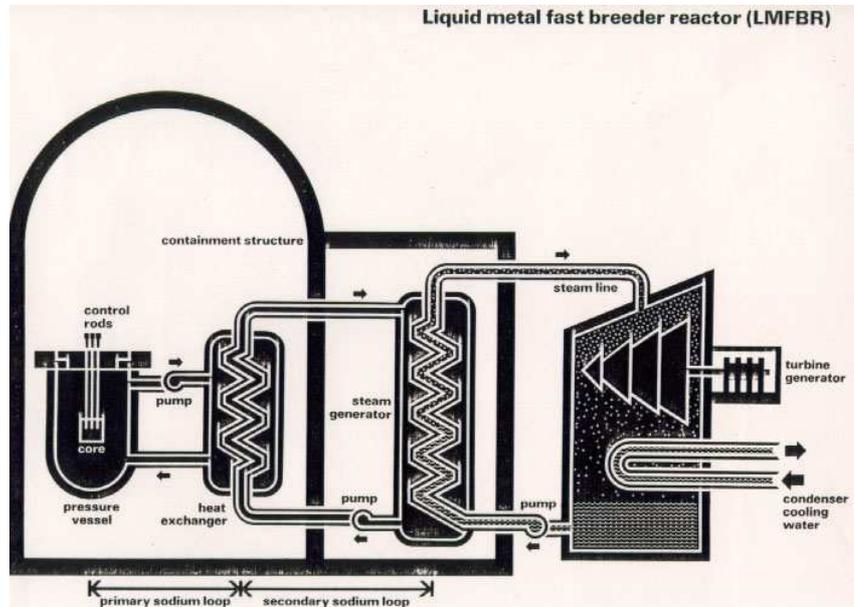


Il nocciolo del reattore nucleare LFR viene refrigerato dal meccanismo termodinamico di convezione naturale con una temperatura di uscita del refrigerante secondario dallo scambiatore di calore immerso nel reattore di circa 550 °C, che potrebbe arrivare fino a 800 °C con materiali avanzati come ceramiche. La temperatura più elevata consente la produzione dell'idrogeno, grazie a processi termochimici, utilizzabili per esempio in celle a combustione.

# Altri reattori innovativi non "IV Gen"

**LMFBR(Liquid Metal Fast Breeder Reactor )**: reattore autofertilizzante a Plutonio 239 è

comunemente chiamato Reattore Autofertilizzante Veloce, in esso la funzione di refrigerante e di veicolazione del calore è svolta da un metallo allo stato liquido. Generalmente i due metalli più usati sono il Sodio ed il Litio, ma il Sodio liquido ha la prevalenza in quanto è un elemento di gran lunga più abbondante. A temperatura ambiente il sodio è un solido che si liquefa a 98 °C,

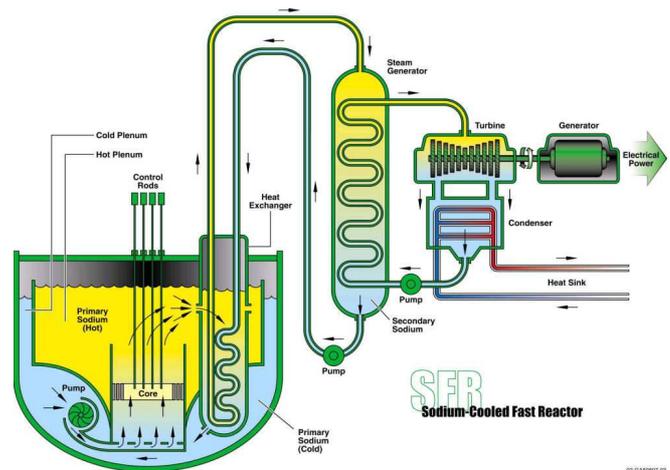


ma giunge ad ebollizione solo a 892 °C questo permette che il metallo liquido possa essere utilizzato nei reattori in un circuito non pressurizzato. Vi è inoltre il vantaggio che il sodio liquido ha un valore di calore specifico molto alto e quindi è un liquido ad alta efficienza di trasferimento del calore, cioè da un lato svolge molto meglio il compito di refrigerante del nocciolo e dall'altro svolge molto meglio il compito di generazione di vapore nel ciclo secondario necessario ad azionare le turbine.

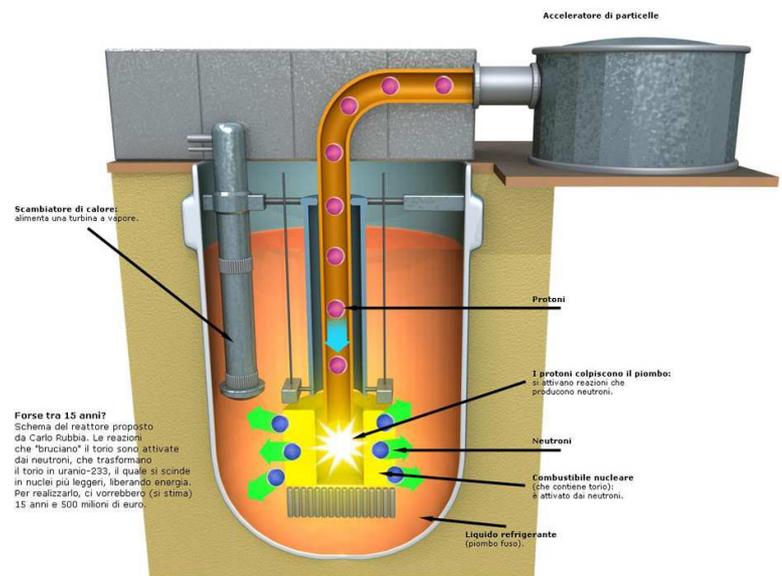
In Europa il primo reattore ad Autofecondazione Veloce (LMFBR) di grande potenza fu costruito in Francia, il Super Phenix. Sul Mar Caspio esiste un reattore simile di potenza minore, il BN-600, destinato alla produzione di energia elettrica e desalinizzazione dell'acqua.

In questo tipo di reattori è possibile sfruttare il 75-80% dell'energia potenziale immagazzinata nel combustibile nucleare a fronte del solo 1% sfruttabile attraverso i reattori LWR e HWR.

**IFR (Integral Fast Reactor):** reattore nucleare con un ciclo di raffreddamento specializzato. Il reattore è raffreddato con il sodio e alimentato da una lega metallica di uranio e plutonio. Il combustibile è contenuto in un rivestimento "spaziato" (*cladding*) in acciaio con sodio liquido che riempie lo spazio tra il combustibile ed il rivestimento.



**Reattore subcritico:** si tratta di un reattore con una massa di combustibile inferiore a quella necessaria a mantenere autonomamente la reazione a catena e che perciò necessita una fonte esterna di neutroni. Tipicamente la fonte esterna è un acceleratore di particelle, per cui si parla di ADS (Accelerator-Driven System) o Rubbiatron, dal nome del fisico italiano Carlo Rubbia a cui l'idea è attribuita.



## FONTI

<http://www.energia360.org/>

[http://www.torinoscienza.it/dossier/reattori\\_nucleari\\_di\\_nuova\\_generazione\\_4034](http://www.torinoscienza.it/dossier/reattori_nucleari_di_nuova_generazione_4034)

[http://it.wikipedia.org/wiki/Reattore\\_nucleare\\_a\\_fissione](http://it.wikipedia.org/wiki/Reattore_nucleare_a_fissione)

[http://www.fmboschetto.it/didattica/materiale\\_didattico.htm](http://www.fmboschetto.it/didattica/materiale_didattico.htm)