

L'energia nucleare, i reattori nucleari a fissione e le loro principali caratteristiche

Il reattore nucleare a sali fusi – Molten Salt Reactor MSR

Il concetto di reattore nucleare con combustibile a sali fusi risale alla fine degli anni '40, quando nei laboratori di Oak Ridge (ORNL) nel Tennessee (USA) si cominciò a pensare alla propulsione nucleare per bombardieri a lungo raggio.

Il primo reattore di questo tipo, l'Aircraft Reactor Experiment (ARE), entrò in funzione nel 1954 utilizzando un combustibile fatto di sale di Na-Zr-U pompato attraverso blocchi di berillio.

Questa esperienza suggerì agli scienziati dell'ORNL di poter realizzare un reattore nucleare commerciale per la produzione di energia basato sullo stesso principio.

Nacque così nel 1965 il reattore nucleare a sali fusi, il Molten Salt Reactor Experiment MSRE.

In un reattore a sali fusi il combustibile nucleare può essere disciolto in un liquido che funge anche da refrigerante.

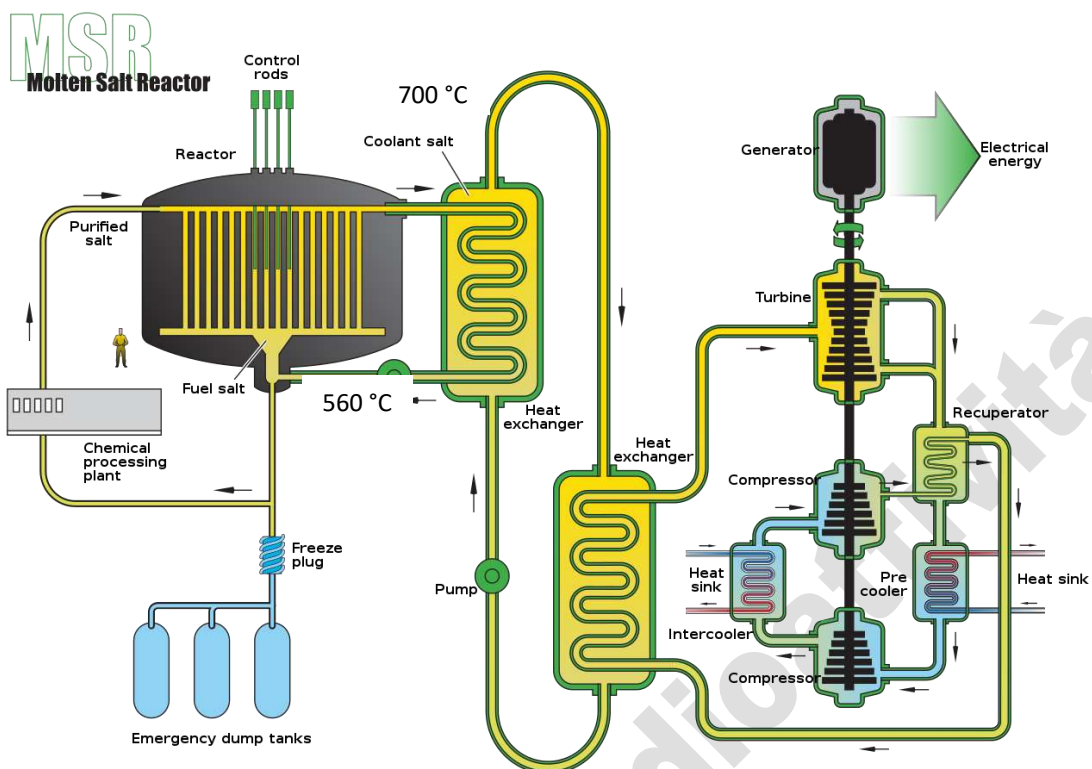
In molti progetti il combustibile nucleare è costituito da fluoruri, in particolare il tetrafluoruro di uranio UF_4 a basso arricchimento in U-235 o in U-233 disciolto in fluoruro di berillio BeF_2 e fluoruro di litio LiF , $UF_4-LiF-BeF_2$, noto come Flibe, che dunque ha la duplice funzione di vettore del combustibile nucleare e di refrigerante primario.

Questa miscela, caratterizzata da un basso assorbimento neutronico, stabilità termica ad alta temperatura, non reattiva a contatto con aria ed acqua, chimicamente compatibile con i materiali strutturali, consente di ottenere un migliore rendimento termodinamico rispetto ai reattori refrigerati ad acqua, operando ad una temperatura media superiore, circa $700^\circ C$, pur rimanendo a pressioni molto prossime a quella atmosferica.

Il funzionamento a bassa pressione riduce significativamente lo stress meccanico sui componenti del nocciolo consentendone una progettazione semplificata, con sensibile riduzione del rischio di guasto e miglioramento della sicurezza del sistema.

Il moderatore è generalmente grafite non incamiciata, attraverso la quale fluisce il Flibe.

Il calore generato dalle reazioni nucleari nel sale fuso primario viene trasferito ad un circuito secondario anch'esso a Flibe, che tramite uno scambiatore di calore sali di fluoruro-acqua trasforma l'acqua in vapore che va ad azionare un gruppo turboalternatore producendo energia elettrica.



Le successive implementazioni del MSRE hanno previsto l'utilizzo di nuovi materiali strutturali, in particolare una lega modificata di Hastelloy-N per fronteggiare i problemi di corrosione.

L'U-235 è stato sostituito dall'U-233 sfruttando la conversione del torio nel ciclo uranio-torio.

In tal modo il reattore MSR è stato il primo reattore termico autofertilizzante (breeder), in grado di produrre più combustibile fissile di quello consumato.

La scelta di questo ciclo risiede nel fatto che il torio rappresenta una risorsa abbondante in natura e quando viene utilizzato in un reattore nucleare la produzione di rifiuti radioattivi a lunga vita risulta quasi nulla.

Per quanto riguarda gli aspetti di sicurezza, gli MSR hanno elevati coefficienti di reattività negativi di temperatura e di vuoto e sono progettati per spegnersi in modo sicuro quando la temperatura nel nocciolo aumenta oltre i limiti di progetto, attivando un meccanismo di sicurezza detto *tappo di fusione*.

Il meccanismo consiste in una sezione di un tubo di scarico in cui il sale viene mantenuto attivamente congelato.

In condizioni di emergenza, se viene a mancare l'alimentazione elettrica, il tappo si scioglie e la gravità fa defluire il sale del primario verso un deposito appositamente progettato e la reazione a catena si spegne automaticamente.

Questo fa sì che i MSR possano essere considerati reattori intrinsecamente sicuri, cioè la loro sicurezza non dipende da meccanismi aggiuntivi che richiedono un intervento esterno.

Un ulteriore vantaggio dei MSR è che i prodotti di fissione possono essere rimossi mentre l'impianto è operativo.

Analogamente, il rifornimento in linea di nuovo fissile per alimentare la reazione a catena è possibile con il reattore in funzionamento.

Tra gli svantaggi di questa tipologia di reattori annoveriamo il degrado dei materiali strutturali a causa della natura corrosiva dei sali.

Inoltre, la gestione dei prodotti di fissione volatili come Kr, Xe e tritio, non essendoci le barriere costituite dagli elementi di combustibile, richiede la realizzazione di involucri a doppio contenimento che incidono sui costi dell'impianto.

C'è da menzionare, infine, un ostacolo politico allo sviluppo dei MSR ed è legato alla proliferazione nucleare.

L'utilizzo del ciclo uranio-torio comporta la produzione di U-233 puro di grado militare, che potrebbe essere usato per costruire una bomba.

Negli ultimi anni, la ricerca sta rivalutando lo studio dei reattori MSR, al punto che essi rappresentano uno dei sei reattori di quarta generazione previsti come opzione a basso impatto ambientale per la produzione di energia da fissione.

Sebbene molti Stati stiano lavorando al concetto evoluto di MSR, la ricerca globale è attualmente guidata dalla Cina che ha destinato ingenti risorse finanziarie e umane allo sviluppo della tecnologia MSR.

Il TMSR-LF1, reattore sperimentale a sali fusi a combustibile liquido basato sul ciclo uranio-torio, è un impianto pilota da 2 MW termici situato nel nord-ovest del paese asiatico.

Il progetto è stato avviato nel 2011 con un costo di 450 milioni di dollari.

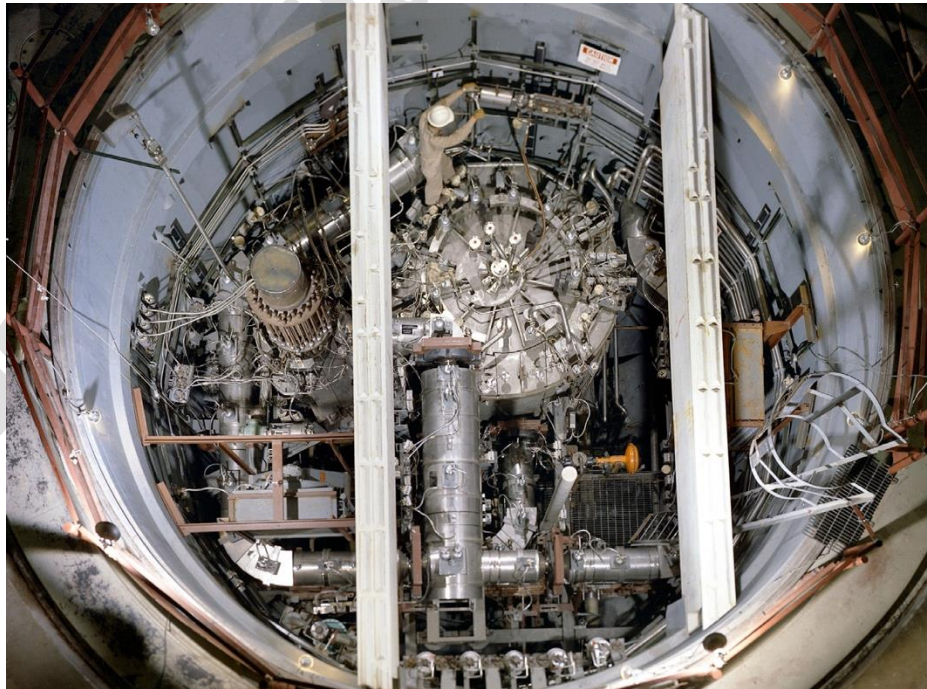
La costruzione del reattore è iniziata nel 2018 ed è stata completata nel 2021.

Nel 2022 è stato approvato il piano di messa in servizio, che prevede l'avvio per i primi 5-8 anni in modalità batch, prima della conversione in modalità continua.

Sta quindi alla Cina dimostrare che quella del torio è una via tecnica ed economica davvero percorribile. Altri ci hanno provato in precedenza, ma i progetti finora sono sempre stati abbandonati sia per difficoltà tecniche che per costi troppo alti.



L'edificio per l'Aircraft Reactor Experiment, successivamente adattato per il MSRE.



Sezione trasversale di un MSR