



Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma

Commissione Gestione Impianti Nucleari

Area Nucleare

Webinar

Combustibile nucleare irraggiato: dal “rifiuto” alla risorsa

La storia del nucleare italiano e presupposti di ripartenza

Il ciclo del combustibile nucleare. Tipologie di reattori nucleari a fissione e loro funzionamento

2ª parte - Tipologie di reattori nucleari a fissione e loro funzionamento

Ing. Alessandra Di Pietro

Giovedì, 13 febbraio 2025

Indice

- **Gli isotopi dell'uranio e la reazione nucleare di fissione**
- **La reazione di fissione a catena**
- **I prodotti e i frammenti di fissione**
- **Il fattore di moltiplicazione e il controllo della reazione nucleare di fissione**
- **La sezione d'urto e la probabilità di interazione del neutrone con il nucleo**
- **Le condizioni per mantenere una reazione a catena nei reattori: il ruolo dei neutroni e del moderatore**
- **Gli elementi essenziali del reattore nucleare**
- **La classificazione dei principali reattori nucleari**
- **I reattori nucleari termici e il ruolo del moderatore**
- **Classificazione dei reattori nucleari in base all'arricchimento del combustibile**
- **I reattori nucleari ad acqua leggera – *Light Water Reactor***
- **Reattore nucleare PWR – struttura e funzionamento**
- **Reattore nucleare BWR – struttura e funzionamento**
- **Reattore nucleare CANDU – struttura e funzionamento**
- **Layout di una centrale nucleare ad acqua pressurizzata PWR**
- **Il circuito primario di un impianto nucleare con reattore ad acqua pressurizzata PWR**
- **Reattore nucleare refrigerati a gas: principali caratteristiche tecnologiche**
- **Reattore nucleare refrigerati a gas: principali caratteristiche tecnologiche**
- **Reattore nucleare SMR a gas HTR-PM (pebble bed)**
- **Reattori SMR a metalli liquidi: principali caratteristiche tecnologiche**
- **Reattori SMR a sali fusi: principali caratteristiche tecnologiche**
- **Aspetti ingegneristici e di sicurezza nella progettazione del reattore nucleare a fissione**
- **La sicurezza negli impianti nucleari: la difesa in profondità**
- **Aspetti di rilevante importanza di un impianto nucleare per la produzione di energia elettrica nel contesto energetico**
- **Bibliografia essenziale - Iconografia**



Gli isotopi dell'uranio e la reazione nucleare di fissione

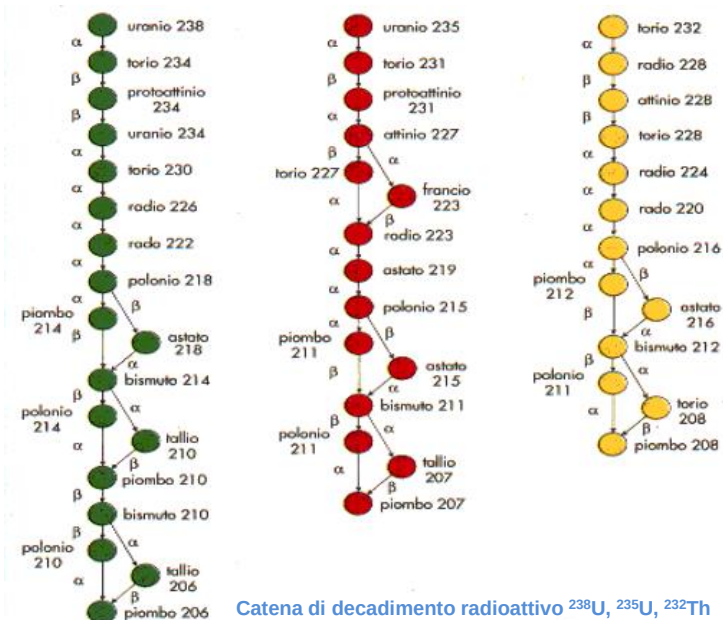
La reazione nucleare di fissione, alla base del funzionamento del reattore nucleare a fissione, consiste nella **scissione di un nucleo sotto «bombardamento» neutronico**.

Tutti i nuclei di elementi pesanti, se colpiti da neutroni di energia elevata, possono essere fissionati, ossia «divisi».

Gli elementi definiti **fissili**, invece, **possono essere fissionati da neutroni di tutte le energie**.

L'unico elemento fissile presente in natura è l'**Uranio (U)**, costituito da una miscela di isotopi: ^{238}U , ^{235}U , ^{234}U tutti con numero atomico (numero di protoni) pari a 92.

Di questi tre isotopi, solo l' ^{235}U è fissile (fissionabile con neutroni di tutte le energie), mentre l' ^{238}U (presente in natura per circa il 99,28%) **subisce fissione soltanto con neutroni veloci**. Altri isotopi **fissili** possono essere creati **artificialmente**, come il **Plutonio**, nelle due forme isotopiche ^{239}Pu , ^{241}Pu per conversione dell' ^{238}U a seguito di cattura neutronica, o l' ^{233}U per conversione del Torio ^{232}Th .



Un isotopo è un **atomo di uno stesso elemento chimico avente lo stesso numero atomico Z (protoni) e differente numero di massa (somma dei protoni e dei neutroni che costituiscono il nucleo)**.

Gli atomi di uno stesso elemento possono avere un diverso numero di neutroni, dando origine a diversi isotopi dello stesso elemento. Se l'isotopo è radioattivo (non è stabile), si parla di radioisotopo o anche di radionuclide.

La reazione di fissione a catena

Questa reazione può essere considerata **una successione di reazioni di fissione di nuclei**. **Si realizza** se esistono le condizioni «favorevoli», affinché il processo a catena riesca ad autosostenersi, ossia se **uno dei neutroni generati da una fissione sarà in grado di fissionare un ulteriore nucleo di ^{235}U** .

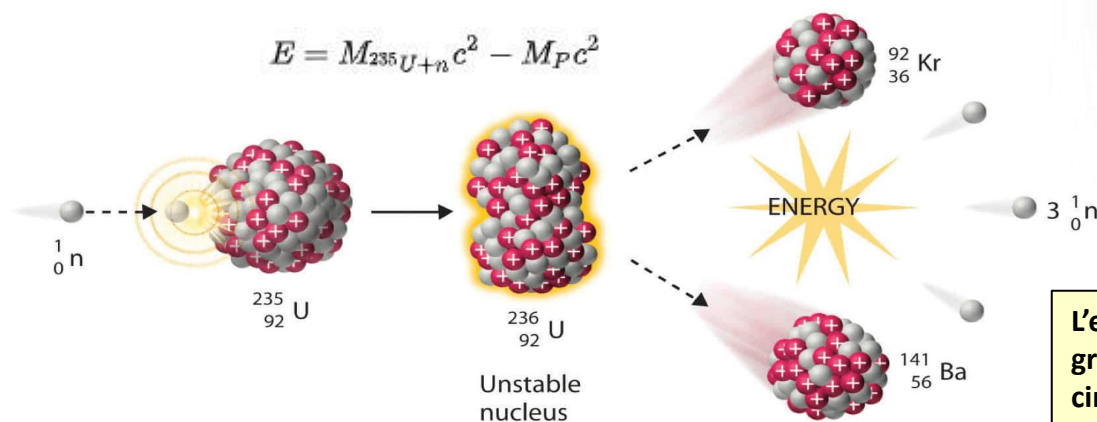
Ad esempio, **un nucleo di ^{235}U , «colpito» da un neutrone**, si spezza in **2 nuclei più leggeri**, aventi masse diverse ma simili (chiamati **frammenti di fissione**), che a loro volta emetteranno per decadimento altre **radiazioni (beta, gamma, etc.)**, dando origine ai **prodotti di fissione**.

Verranno emessi anche 2 o più neutroni (in media, circa 2,5).

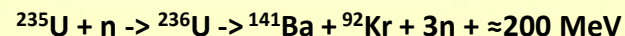
Dalla reazione si libera una notevole energia.

Per ogni fissione sono rilasciati circa 200 MeV di energia (pari a $3,2\text{E-}^{11}$ Joule).

Esempio di reazione nucleare di fissione



~ 178 MeV: frammenti di fissione;
~7 MeV: radiazioni β ;
~6 MeV: radiazioni γ ;
~10 MeV: neutroni ed altre radiazioni.

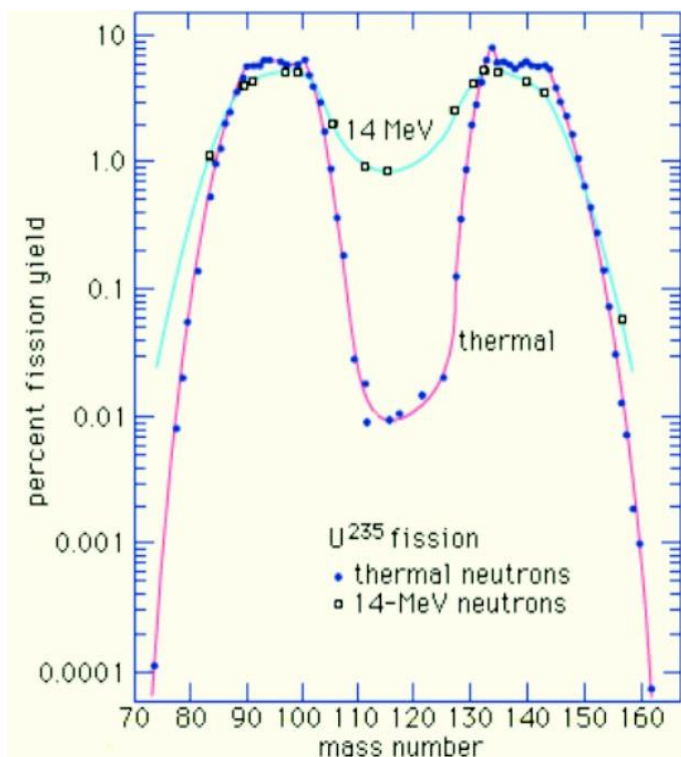


L'energia «generata» per ogni fissione sarà rilasciata in gran parte istantaneamente, soprattutto come energia cinetica, in parte sarà «immagazzinata» come energia potenziale, per i decadimenti successivi.

I prodotti e i frammenti di fissione

Possono esserci **diverse possibili reazioni di fissione**, che possono verificarsi sia con **neutroni termici** che con **neutroni veloci**.

Sono stati finora identificati circa **80 frammenti di fissione** e circa **200 prodotti di fissione** generatisi dalle reazioni di fissione.



Spettro di massa dei frammenti di fissione da U²³⁵ rispettivamente per fissione di neutroni termici e neutroni veloci

Il controllo dei frammenti e dei prodotti di fissione è di fondamentale importanza nella fisica del reattore nucleare a fissione.

Dei 200 MeV di energia liberata dalla sola fissione di un nucleo, l'85% è data dai frammenti di fissione sotto forma di energia cinetica e il 15% dai neutroni emessi, dalle radiazioni beta e gamma.

La massima parte dell'energia prodotta nel reattore si manifesta come energia termica, utilizzabile per la produzione di vapore e quindi di energia elettrica.

I probabili frammenti di fissione che si generano nella fissione nucleare hanno numeri di massa (somma dei protoni e dei neutroni) che cadono in preferenza negli intervalli compresi fra 85-105 e 130-150.

Il fattore di moltiplicazione e il controllo della reazione nucleare di fissione

Il **processo di fissione si genera** nel reattore nucleare (in inglese *vessel*), più precisamente al suo interno, **nel nocciolo** (in inglese *core*) **dove è alloggiato il combustibile** nucleare (parte in rosso in figura).

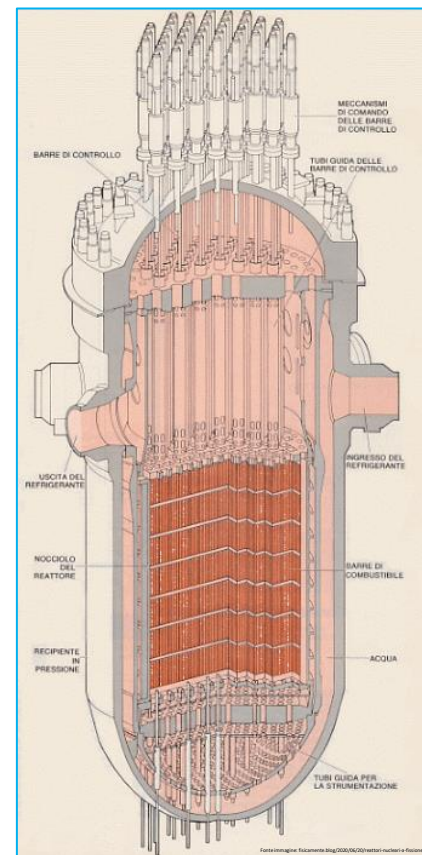
Un ruolo fondamentale viene svolto dai neutroni che, oltre a consentire la reazione a catena, hanno il ruolo di **autosostenerla**. Se si riesce a tenere il numero dei neutroni presenti in una generazione uguale a quello dei neutroni della generazione precedente, il processo di fissione risulta stabile.

➤ **La stabilità del sistema** si verifica quando la **quantità di materiale fissile**, la **geometria** e i **materiali di tutti i componenti** del reattore, **consentono, in sicurezza**, la massima efficienza nello sfruttare i neutroni generati e **di raggiungere la massa critica**, in corrispondenza della quale la reazione riesce ad autosostenersi.

➤ **K è il fattore di moltiplicazione ed è il fattore di controllo della reazione di fissione.**

Espresso come il **rapporto tra i neutroni presenti in una generazione e i neutroni presenti nella generazione precedente**.

Il suo valore **deve essere circa pari a 1 affinché ci sia il controllo della reazione a catena e dunque della potenza del reattore**.



Schema reattore nucleare

$k < 1$ la reazione si ferma
 $k = 1$ la reazione è stazionaria
 $k > 1$ la reazione è divergente

La sezione d'urto e la probabilità di interazione del neutrone con il nucleo

La probabilità che la fissione avvenga è legata al fatto che il neutrone possa interagire con il nucleo e fissionarlo.

La sezione d'urto rappresenta l'area di interazione che offre il nucleo al neutrone e quindi è strettamente legata a questa probabilità di interazione.

La probabilità che un neutrone possa essere assorbito generando fissione è tanto più elevata quanto più l'energia del neutrone e quindi la sua velocità diminuiscono.

- Il neutrone rallentato riesce a rimanere per più tempo vicino al nucleo fissile e la probabilità che possa interagire con esso generando fissione è più elevata.

Per i **neutroni termici** che hanno un'energia più bassa, quindi, **la probabilità che possano essere assorbiti e dare luogo a fissione è più elevata** in quanto hanno un tempo maggiore per interagire con il nucleo.

INTERAZIONE NEUTRONE-NUCLEO

Per basse energie la sezione d'urto di fissione dell' ^{235}U cresce.

Per energie intermedie si hanno picchi di assorbimento di risonanza.

Per alte energie le sezioni d'urto si riducono fortemente.

La fissione di ^{238}U diventa possibile soltanto ad energie dell'ordine del MeV.

SEZIONE D'URTO

La **sezione d'urto** (σ) rappresenta la sezione apparente di un determinato nucleo per un certo fenomeno nucleare e **si misura in barn** ossia in 10^{-24} cm^2 e **determina la probabilità che avvenga un certo processo nucleare.**

È pari a 580 barn per i neutroni termici che hanno energie tra i 0,025-0,625 eV e a 1,4 barn per quelli veloci che hanno energie di 0,8 MeV.

Neutroni «termici»: 0,025-0,625 eV - Neutroni «epitermici»: 0,625 eV - Neutroni «veloci»: 0,8 MeV

Le condizioni per mantenere una reazione a catena nei reattori: il ruolo dei neutroni e del moderatore

Per favorire il processo di fissione è necessario rallentare i neutroni emessi dalla fissione la cui energia è molto elevata, circa 2 MeV.

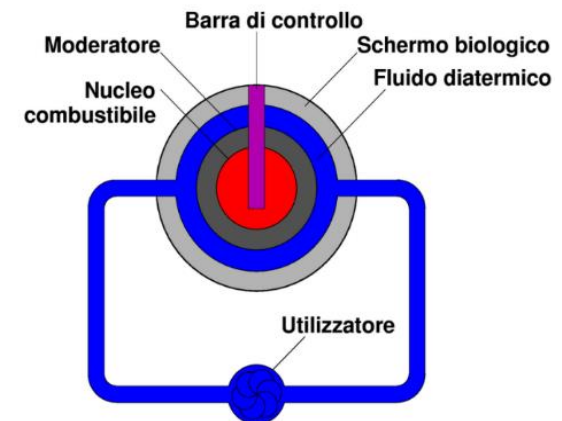
Il processo di rallentamento si ottiene mescolando al materiale fissile un materiale detto **moderatore** (ad esempio; **acqua leggera, acqua pesante, grafite**), con isotopi a basso peso atomico, che assorba il meno possibile i neutroni; è il caso dei reattori termici.

I neutroni, in presenza del moderatore, vanno ad urtare contro i nuclei perdendo energia e quindi velocità per via di collisioni elastiche. I neutroni **diventano così «termici»**, ossia con energia dell'ordine di quella di agitazione termica delle molecole.

CONDIZIONI PER MANTENERE UNA REAZIONE A CATENA

(nei reattori ad Uranio naturale o uranio leggermente arricchito in ^{235}U)

- ❑ I **neutroni** emessi dalla fissione **devono essere rallentati** con un **moderatore** per favorire la probabilità di fissione dell' ^{235}U .
- ❑ **Moderatore, refrigerante e i materiali strutturali** devono essere scelti in base al **principio della massima economia neutronica**.
- ❑ L'**economia neutronica** viene favorita dalla **configurazione di reattore eterogeneo**, che ha gli elementi di combustibile, ad esempio sotto forma di barrette, separati dal moderatore (tale configurazione evita l'assorbimento dei neutroni nella zona di risonanza dell' ^{238}U (Effetto Doppler)); e il caso dei reattori termici.
- ❑ La **dimensione del nocciolo** del reattore deve essere tale da evitare che i neutroni possano sfuggire dalla superficie esterna.



Schematizzazione di reattore termico eterogeneo

Gli elementi essenziali del reattore nucleare

Il reattore nucleare a fissione, come accennato, è **un sistema tecnologico** facente parte di un impianto nucleare a fissione (centrale nucleare), **dove si innesca, alimenta e controlla la reazione nucleare di fissione a catena**.

Il rilevante quantitativo di energia e quindi di calore generato al suo interno viene utilizzato, ai fini civili, per la produzione, nell'impianto nucleare, di energia elettrica e/o energia termica.

ELEMENTI DEL REATTORE NUCLEARE (a titolo esemplificativo ed in generale)

- ❑ **Combustibile;** Il combustibile nucleare è costituito da elementi fissili ^{235}U , ^{233}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu ed elementi fertili che possono trasformarsi in fissili in seguito a reazioni nucleari all'interno del reattore, ad esempio ^{238}U (fertile). In genere si trova nella forma di barre, comprendente il materiale fissile in cui si generano i neutroni atti a innescare e a mantenere la reazione di fissione.
- ❑ **Moderatore;** preposto al rallentamento dei neutroni (se si usa materiale fissile).
- ❑ **Refrigerante;** preposto alla rimozione del calore generato (un liquido, un vapore, una miscela bifase liquido-vapore o un gas).
- ❑ **Riflettore;** preposto, soprattutto nel caso dei reattori veloci (a neutroni veloci) a reindirizzare all'interno del nocciolo i neutroni che tendono a sfuggire.
- ❑ **Barre di controllo;** preposte al controllo della reattività ovvero della potenza (contengono materiale che assorbe i neutroni) e nella configurazione classica del reattore (ad esempio il reattore ad acqua pressurizzata - PWR) poste nella parte superiore del reattore.
- ❑ **Materiale strutturale;** garantisce la integrità fisica del reattore.

L'equilibrio di tutti gli elementi presenti nel reattore (vessel e core), il loro controllo e la loro regolazione, permettono il mantenimento e il controllo del processo di fissione.

La classificazione dei principali reattori nucleari

I reattori nucleari a fissione possono classificarsi in relazione all'energia dei neutroni che provocano la fissione.

REATTORI TERMICI

Utilizzano **neutroni lenti** ovvero «termici», **uranio naturale** o **arricchito** come combustibile ed un **moderatore**; appartengono a questa tipologia la maggior parte dei reattori.

Tra i reattori termici si distinguono:

- Reattori **refrigerati e moderati ad acqua leggera** **PWR** (Pressurized Light-Water Reactor) e **BWR** (Boiling Water Reactor) con recipiente in pressione;
- Reattori tipo **CANDU** (*Canadian Deuterium Uranium*): reattori nucleari **ad acqua pesante (deuterio)** pressurizzata e uranio naturale o **RBMK** (Reattore di grande potenza a canali) con tubi in pressione (ogni gruppo di barre di combustibile è dotato di un circuito di refrigerazione indipendente ad acqua leggera o pesante);
- Reattori **refrigerati a gas**, in cui il refrigerante è un gas inerte (elio, azoto, CO_2), il moderatore **grafite**.

REATTORI VELOCI

Utilizzano **neutroni veloci**, ovvero ad **alta energia**, per sostenere la reazione a catena, **combustibile arricchito** e possono essere concepiti in modo da risultare autofertilizzanti ossia in grado di produrre più materiale fissile di quello che consumano con evidente vantaggio in termini di economia del combustibile. Per questi reattori, che non hanno moderatore, non si può usare l'acqua come refrigerante per le sue elevate capacità di moderazione dei neutroni; **si utilizzano sostanze come i metalli liquidi ad elevato numero atomico che garantiscono un elevato scambio termico.**

Fonte immagine: tecnodroid.it/2021/08/24

I reattori nucleari termici ad acqua e il ruolo del moderatore

I reattori termici presentano il vantaggio di una maggiore flessibilità di progetto dovuta alla configurazione di **reattore eterogeneo** ovvero costituito da una più ampia scelta di materiali: **combustibile, moderatore, refrigerante**.

TIPOLOGIA E CARATTERISTICHE DEL MODERATORE E DEL REFRIGERANTE

Nei reattori termici ad acqua viene utilizzato come refrigerante e moderatore acqua.

Nella fattispecie:

- **Acqua leggera** se viene utilizzato come **combustibile uranio arricchito**;
 - il motivo è legato alla esigenza di mantenere l'economia neutronica. Infatti l'acqua leggera **possiede ottime capacità di moderazione dovuta ai nuclei di H, ma è anche in grado di assorbire neutroni sottraendoli alla reazione a catena** di fissione ovvero ha un'elevata sezione di cattura neutronica. **Utilizzando uranio arricchito si ovvia a questo problema poiché si aumenta la produzione di neutroni per unità di massa.**
- **Acqua pesante (deuterio)** se viene utilizzato come **combustibile uranio naturale**;
 - il motivo è legato al fatto che **il deuterio (D_2O) ha una minore sezione di assorbimento rispetto all'idrogeno.**

Questi reattori bruciano in situ una quantità di materiale fertile convertito quasi pari alla quantità di materiale fissile di partenza e lasciano nel combustibile scaricato una quantità di materiale fissile pari all'80% di quello contenuto nel combustibile fresco. Questa economia neutronica nell'uso del combustibile iniziale, insieme all'assenza di arricchimento isotopico, fa sì che l'incidenza dell'uranio naturale sul costo dell'energia risulti veramente minima.

Fonte immagine: scenari-economici.it/nucleare

Classificazione dei reattori nucleari in base all'arricchimento del combustibile

I reattori termici ad acqua leggera, che forniscono ad oggi la maggiore produzione di energia da nucleare a livello mondiale, utilizzano, come accennato, uranio arricchito.

L'arricchimento isotopico dell'ossido di uranio compensa la perdita dei neutroni che invece di partecipare alla reazione di fissione vengono assorbiti dalle molecole del moderatore o da altro materiale diverso dal fissile.

L'arricchimento del combustibile

Nell'uranio naturale ^{238}U la percentuale dell'isotopo dell' ^{235}U è pari a circa 0,7.

Il combustibile utilizzato dai reattori nucleari è una miscela di isotopi fertili e fissili in una determinata proporzione; **nella maggior parte dei reattori di potenza deve avere una percentuale di ^{235}U maggiore rispetto a quella presente nell'uranio naturale.**

Un arricchimento minimo in ^{235}U migliora notevolmente la capacità di moltiplicazione dei neutroni del combustibile.

Il rapporto fra la quantità di uranio naturale e di prodotto arricchito dipende dal valore finale dell'arricchimento richiesto.

I reattori di potenza possono, in generale, essere classificati a seconda del contenuto di materiale fissile ^{235}U nell' ^{238}U o del tipo del materiale fertile in:

- reattori ad uranio naturale (0,71% di ^{235}U);
- reattori ad uranio arricchito (> di 0,71% di ^{235}U).

I reattori nucleari ad acqua leggera – *Light Water Reactor*

I reattori ad acqua leggera sono reattori eterogenei, **raffreddati e moderati ad acqua** (H_2O). Si dividono in due tipologie: **reattori pressurizzati ad acqua** – Pressurized Water Reactor (**PWR**) e **reattori bollenti ad acqua** – Boiling Water Reactor (**BWR**). Le differenze principale tra i due reattori consiste nello stato fisico in cui si trova l'acqua all'interno del nocciolo.

Reattore PWR

La **pressione dell'acqua** è tenuta al di sopra della tensione di vapore **a circa 150 bar** in modo che non cambi di fase.

L'acqua **viene fatta circolare ad alta pressione all'interno del nocciolo** del reattore.

La pressione elevata e un maggior grado di sotto raffreddamento all'ingresso del nocciolo permettono **all'acqua di rimanere allo stato liquido**.

Il circuito primario è connesso, pertanto, ad un **pressurizzatore** e all'uscita del nocciolo l'acqua viene inviata ad un **generatore di vapore** dove il calore viene trasferito all'acqua del circuito secondario ad una pressione più bassa e si genera vapore da inviare in turbina.

Reattore BWR

La **pressione dell'acqua** è a **circa 70 bar**.

L'acqua cambia di fase all'interno del reattore ovvero comincia a bollire prima di completare il percorso all'interno del nocciolo.

Per tale motivo si definisce il core di questo reattore «**core bollente**».

Il vapore si genera direttamente nel core del reattore.

Non ci sono sia il pressurizzatore sia il generatore.

Reattore nucleare PWR – struttura e funzionamento

Il **reattore PWR**, in generale, come accennato, è schematicamente costituito da un **contenitore in acciaio a pressione (vessel)** di forma cilindrica con estremità emisferiche e con testa flangiata rimovibile per le operazioni di ricarica del combustibile.

Al suo interno si trova il **nocciolo (core)** ove avvengono il **processo di fissione nucleare** e la **generazione di potenza termica**.

Il **nocciolo** è costituito essenzialmente da **elementi di combustibile di Uranio** (^{238}U arricchito in ^{235}U mediamente circa al 3 - 5% nella formulazione di ossido di uranio per favorire maggiormente il processo di fissione), in generale parti modulari identiche ovvero barrette dell'ordine delle centinaia e può avere un **diametro dell'ordine dei metri**, all'incirca uguale all'altezza.

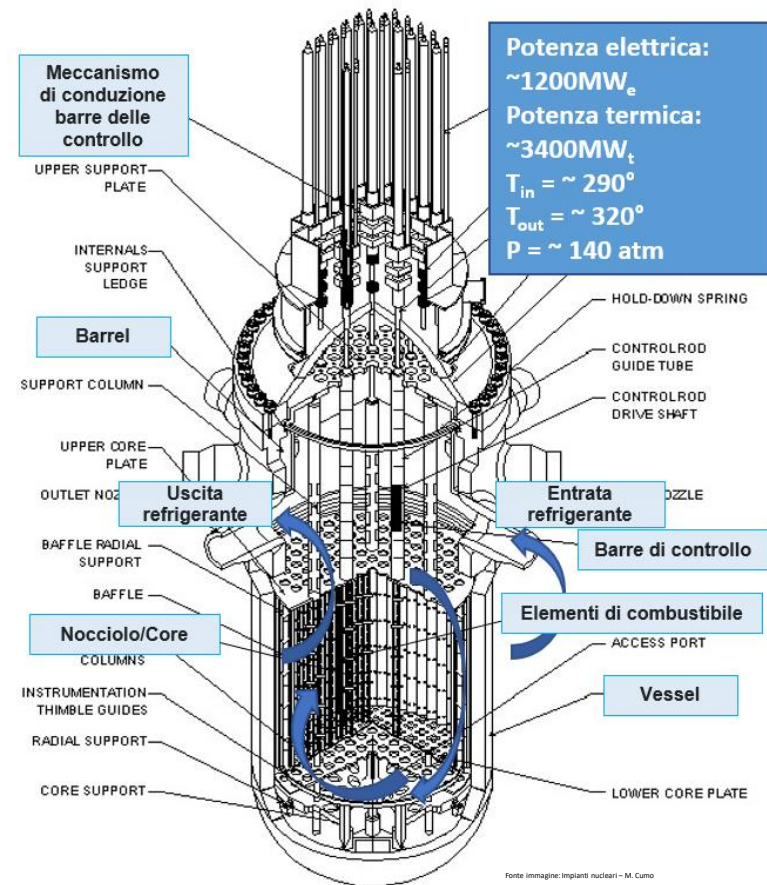
Al numero di elementi di combustibile è proporzionale la potenza termica ed elettrica del reattore

Il **nocciolo** è sommerso in maniera distribuita dal **fluido refrigerante** (in questo caso, acqua) **che può fungere anche da moderatore**.

Uno **schermo termico**, tra il core e il vessel, attenua i **raggi gamma** e il **flusso neutronico veloce di fuga dal nocciolo** e protegge il vessel dallo **stress termico** e dagli effetti delle **radiazioni**.

Il **fluido refrigerante del circuito primario** entra dai **bocchelli di ingresso in flusso discendente** tra il vessel e il barrel, si raccoglie nel plenum inferiore del reattore e **attraversa il nocciolo**, quindi gli elementi di combustibile, **in flusso ascendente fino ad arrivare alla parte superiore** dove esce dai bocchelli di uscita **asportando il calore generato dalla fissione** per andare nel circuito secondario.

Le barre di controllo, contenendo materiale che assorbe i neutroni, svolgono l'azione di **regolazione della potenza del reattore** ossia della sua **reattività** e sono, in questo caso, regolate da un meccanismo posto nella parte superiore del vessel.



Schema di un reattore ad acqua pressurizzata PWR. Questa tipologia di reattore rappresenta la più diffusa nella progettazione nucleare

Reattore nucleare BWR – struttura e funzionamento

Il reattore BWR, in generale, è schematicamente costituito da un **contenitore in acciaio a pressione (vessel)** di forma cilindrica con testa rimovibile per le operazioni di ricarica del combustibile.

Al suo interno si trova il **nocciolo (core)** ove avvengono il **processo di fissione nucleare**, la **generazione di potenza termica e l'ebollizione dell'acqua**.

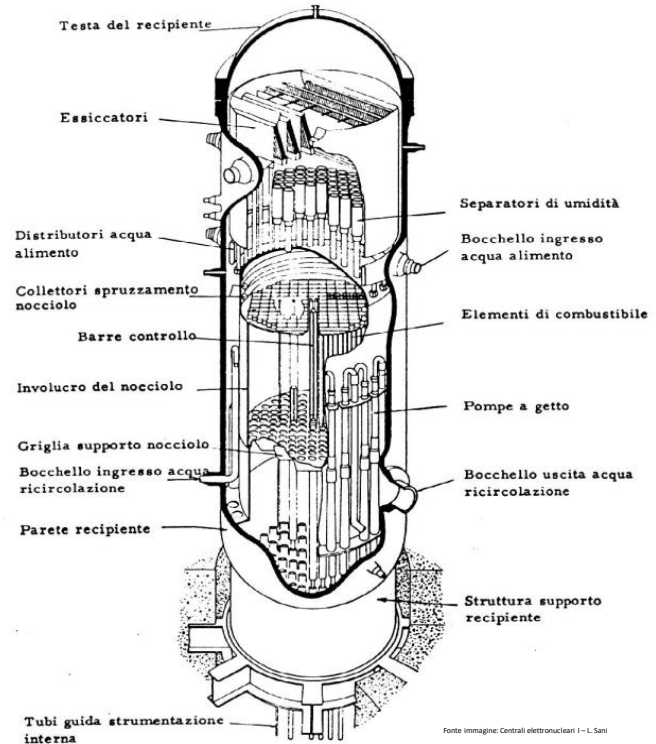
La **miscela acqua-vapore** prodotta all'interno del nocciolo passa attraverso i **separatori di umidità** e **gli essiccatori**, posti nella parte superiore del vessel, **per abbassare la componente di umidità prima di uscire dal bocchello per andare direttamente in turbina**.

Il **nocciolo** è costituito essenzialmente da **elementi di combustibile ovvero barrette di Uranio** (^{238}U arricchito in ^{235}U nella formulazione di ossido di uranio per favorire maggiormente il processo di fissione). A parità di potenza ad esempio 1000 MWe il **volume del nocciolo di un BWR occupa un volume maggiore**.

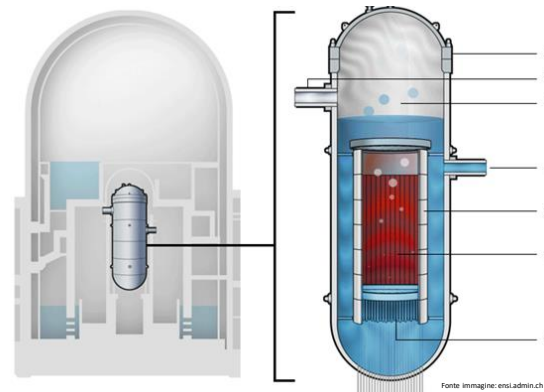
Al numero di elementi di combustibile è proporzionale la potenza termica ed elettrica del reattore

Il **nocciolo** è **sommerso** in maniera distribuita dal **fluido refrigerante** (in questo caso, acqua) **che può fungere anche da moderatore**.

Le barre di controllo, contenendo materiale che assorbe i neutroni, svolgono l'azione di **regolazione della potenza del reattore** ossia della sua **reattività** e sono, in questo caso, regolate da un meccanismo posto nella parte inferiore del vessel. Le barre di controllo entrano dal fondo del recipiente a pressione e sono azionate da un meccanismo idraulico.



Fonte immagine: Centrali elettronucleari I-L. Sani



SCHEMATIZZAZIONE DI UN REATTORE AD ACQUA BOLLENTE BWR

1. Coperchio del contenitore in pressione
2. Uscita per il vapore
3. Vapore
4. Entrata dell'acqua di raffreddamento
5. Mantello del reattore
6. Elementi di combustibile
7. Barre di controllo

Fonte immagine: emsi.admin.ch

Reattore nucleare CANDU – struttura e funzionamento

Il reattore CANDU, (CANAdian Deuterium Uranium), è un reattore nucleare **ad acqua pesante pressurizzata (PHWR)** e **uranio naturale**. Una filiera di reattori ampiamente diffusa in Canada.

Il combustibile è principalmente ossido di uranio naturale UO_2 , uranio naturale con una concentrazione di ^{235}U di circa lo 0,7%, pari a quella presente nell'uranio estratto in natura.

Può essere utilizzato anche il diossido di torio e il diossido di plutonio e miscele di ossidi di uranio ed isotopi di plutonio di varia composizione, note come MOX.

Il moderatore dei neutroni è acqua pesante (ossido di deuterio D_2O).

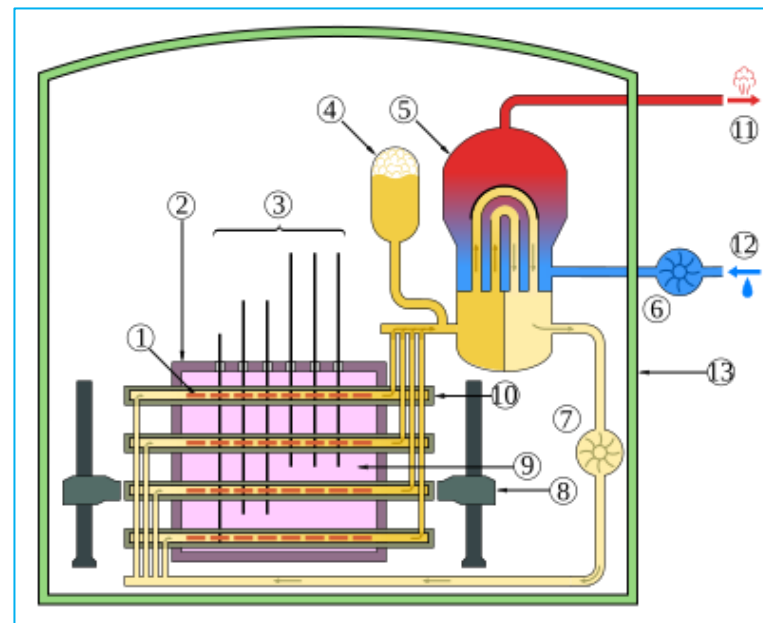
Questo reattore è concettualmente simile alla maggior parte dei tipi di reattore nucleare ad acqua leggera.

L'acqua pesante del circuito primario in pressione è contenuta in tubi orizzontali più piccoli, di diametro pari a circa 10 cm, che contengono le barre di combustibile (tubi di forza).

I tubi di forza sono coassialmente contenuti all'interno di altri tubi (tubi di calandria), saldati ad un serbatoio a bassa pressione (calandria), molto grande, che contiene la maggior parte del moderatore (acqua pesante).

L'acqua pesante calda generata nel circuito di raffreddamento primario passa dentro un generatore di vapore che riscalda l'acqua leggera del circuito di raffreddamento secondario a pressione più bassa. Il vapore che si genera va ad azionare una turbina connessa ad un generatore di corrente alternata.

Il sistema principale di controllo della reattività è costituito da barre di arresto/controllo, che attraversano verticalmente la calandria penetrando nel nocciolo.



Fonte immagine: Wikipedia

DIAGRAMMA SCHEMATICO DI UN REATTORE CANDU

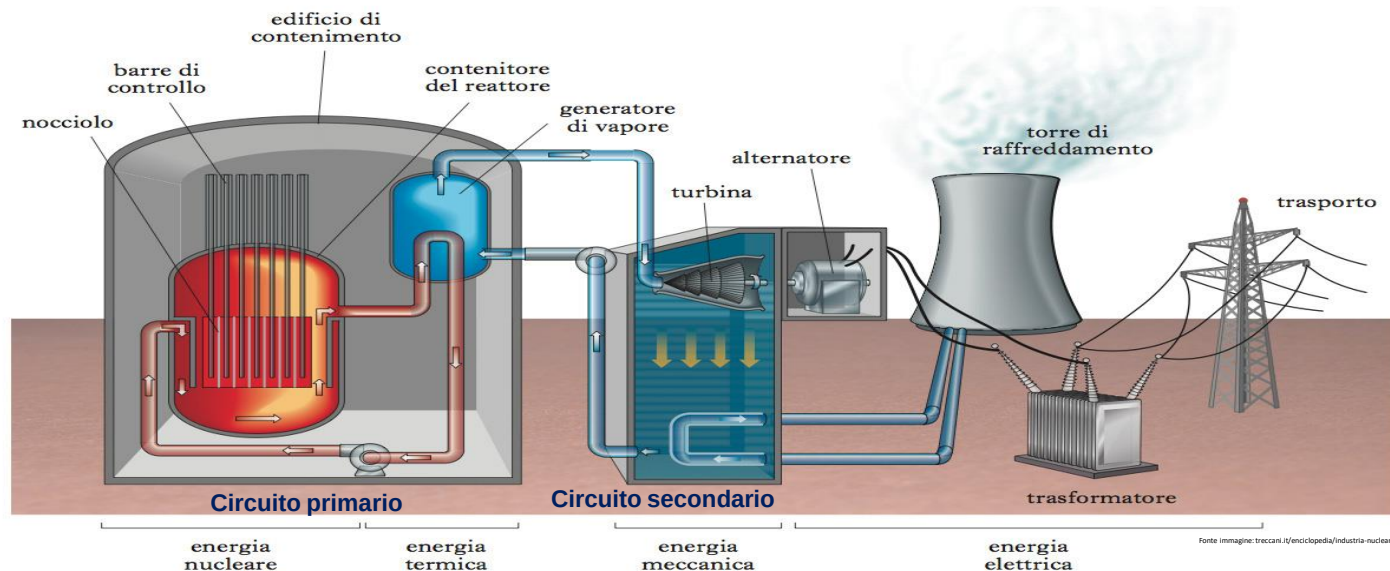
Il circuito del raffreddamento primario è di colore giallo ed arancione, il secondario è blu e rosso. L'acqua pesante contenuta nella calandria è di colore rosa; sopra la calandria e all'interno ci sono le barre di controllo (assorbitori di neutroni) parzialmente inseriti in tubi all'interno del fascio stesso.

Layout di una centrale nucleare ad acqua pressurizzata PWR

L'impianto nucleare di un reattore PWR (reattore ad acqua pressurizzata), come accennato, è schematicamente composto da **due sistemi principali**:

- ❑ **Circuito idraulico primario**: la parte dell'impianto **dove si trova il reattore** (contenitore in pressione dove è contenuto il **nocciolo**) e il **circuito di raffreddamento primario**, composto da **pressurizzatore, pompe di ricircolo e generatori di vapore**;
- ❑ **Circuito idraulico secondario**: la parte dell'impianto dove il **vapore** generato viene portato in turbina per generare energia elettrica per poi essere condensato nel condensatore. Il condensatore viene raffreddato dalle torri di raffreddamento.

Il reattore e il circuito primario sono contenuti nell'**edificio reattore**, un edificio appositamente progettato per resistere qualsiasi eventualità, anche lo schianto di un aereo o il sisma di progetto più severo.

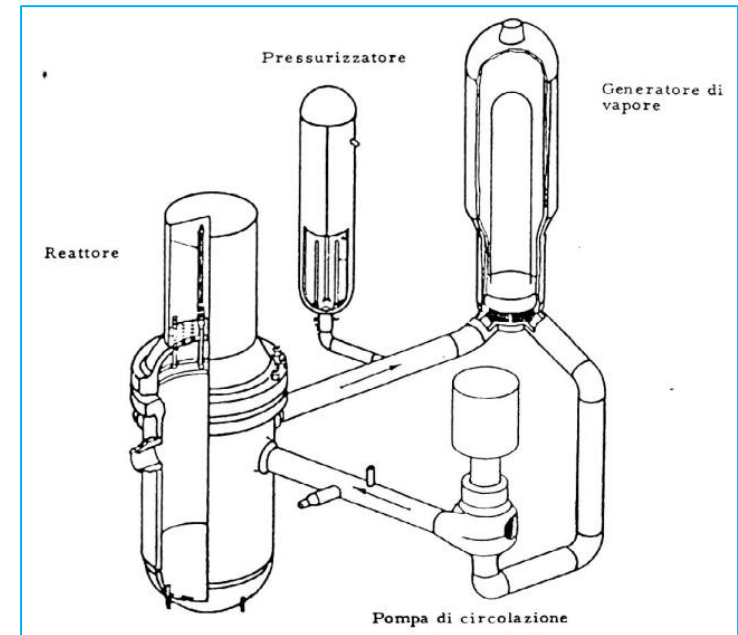
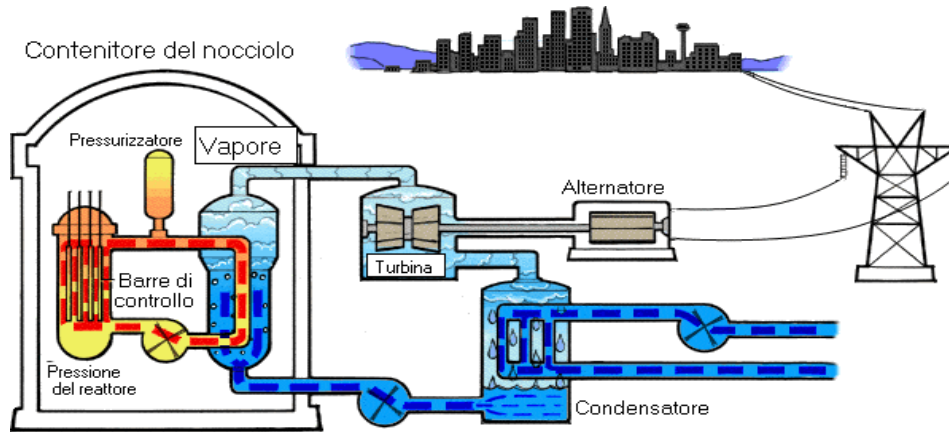


Il circuito primario di un impianto nucleare con reattore ad acqua pressurizzata PWR

Il fluido refrigerante (acqua in questo caso) che scorre nel circuito primario si trova alla **pressione** di circa **140-160 bar**, in modo da poter **mantenere l'acqua liquida** anche alla temperatura di lavoro di **circa 320°C** che è la temperatura in uscita dal vessel. La temperatura in entrata al vessel è di **circa 290°C**.

Ci sono **4 penetrazioni principali** (fino ad 8) con quattro **pompe di ricircolo**. Sono posizionate al di sopra del livello del core in modo tale che se uno dei tubi si rompesse **il nocciolo rimarrebbe comunque sommerso**. Tale geometria del progetto termoidraulico del reattore garantisce **una inerzia termica costante e i massimi livelli di sicurezza**.

Oltre alle pompe c'è un **pressurizzatore**, che ha il ruolo di mantenere costante la pressione all'interno del circuito e di regolare eventuali transitori di pressione.



Fonte immagine: Centrali elettronucleari I - L. Sani

Reattore nucleare refrigerati a gas: principali caratteristiche tecnologiche

I reattori termici di tipo **Small modular Reactor (SMR)** ad alta temperatura refrigerati a gas, *High Temperature Gas Reactors (HTGR)*, utilizzano come **refrigerante elio, anidride carbonica o azoto** e come **moderatore grafite**. Appartengono a questa tipologia di reattore, in prevalenza, progetti ancora in fase di ricerca. Solo alcuni HTGR sono già operativi, ad esempio l'HTR-PM in Cina. Utilizzano **combustibili a base di Torio (Th), Uranio (U) ad alto o basso arricchimento e/o Plutonio (Pu).**

- Hanno un **coefficiente di reattività alla temperatura negativo**: la reazione di fissione rallenta all'aumentare della temperatura (feedback di reattività).
- **Non è necessario un edificio di contenimento** poiché i prodotti di fissione rimangono all'interno delle particelle di combustibile.
- La loro **costruzione** è prevista **interrata**.
- Possono raggiungere **elevate temperature** (dell'ordine di **1000°C**) con una **efficienza termica di circa il 50%** e sono definiti ad alto rendimento termodinamico.
- Il calore prodotto può essere usato per varie applicazioni civili e industriali:
 - ✓ **produzione convenzionale di vapore** (tramite un generatore di vapore);
 - ✓ **produzione di energia elettro-nucleare** (ciclo di Brayton a gas) con circa il 50% di efficienza termica;
 - ✓ **dissalazione acqua di mare**;
 - ✓ **produzione di idrogeno** a basso impatto ambientale (con un rendimento del 36% attraverso il processo dell'elettrolisi).

Fonte immagine: associazioneitalianucleare.it

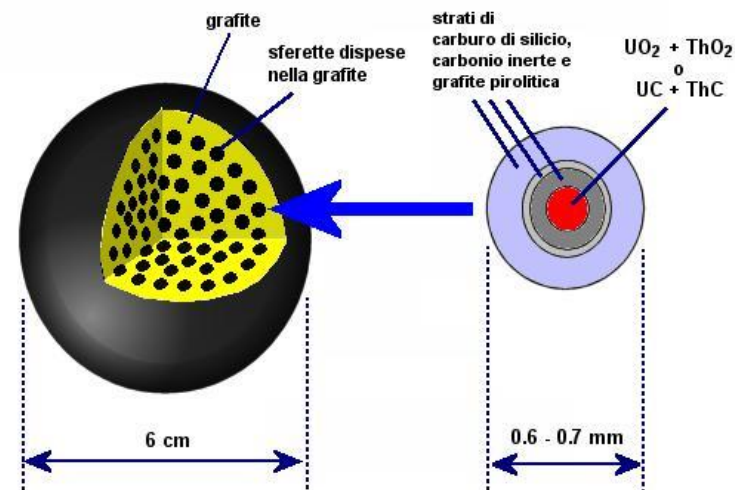
Reattore nucleare SMR a gas HTR-PM (pebble bed)

Il reattore SMR a gas HTR-PM è un reattore termico ad alto rendimento termodinamico refrigerato ad elio e dalla caratteristica configurazione a letto di sfere (pebble bed). Nel 2022 in Cina, a Shidaowan, due di questi reattori da 250 MWth che alimentano un turboalternatore da 210 MWe sono stati collegati alla rete di distribuzione di energia elettrica. In questa configurazione di impianto è possibile accorpare più moduli.

❑ Il **combustibile** è costituito da sfere di circa 60 mm di diametro con all'interno particelle di TRISO (*TRI-structural-ISotropic particle fuel*).

- Ogni particella è costituita da un nucleo di combustibile di circa **0,5 mm di diametro**: ossi-carburo di uranio o biossido di uranio (circa 9 gr) con uranio arricchito fino al 8,5% in ^{235}U . Le particelle sono rivestite da **strati di carbonio pirolitico e carburo di silicio** e di **grafite**.
- Il **rivestimento confina i prodotti di fissione** ed è stabile fino a temperature superiori a 1600°C.
- Le sfere di combustibile vengono calate dall'alto ed estratte attraverso un apposito condotto.

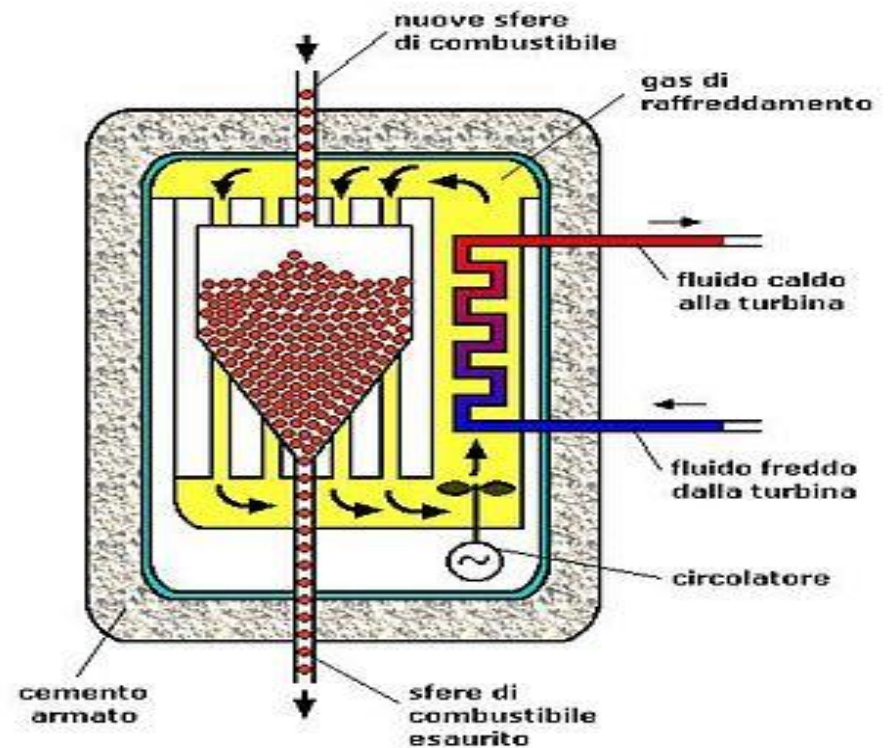
STRUTTURA DELLE SFERE DEL "PEBBLE BED"



Reattore SMR a gas HTR-PM (pebble bed): caratteristiche di sicurezza

- ❑ La rimozione del calore di decadimento avviene per conduzione del calore attraverso la grafite contenuta in uno degli strati di rivestimento delle particelle di combustibile:
 - Il rilascio di calore avviene in tempi maggiori grazie alla grande capacità termica della grafite consentendo ai sistemi passivi un ampio margine di intervento.
- ❑ la densità volumetrica di potenza è relativamente bassa e la potenza è distribuita in più moduli. Ogni modulo ha il suo sistema di emergenza.
- ❑ Il rendimento di questo reattore è di circa il 40%.
- ❑ L'elio viene riscaldato da 250°C a 750°C e la sua pressione di lavoro è di circa 70 atmosfere. Il vapore inviato in turbina ha una pressione di circa 230 atmosfere e una temperatura di 567°C.

schema di reattore "pebble bed"



Reattori SMR a metalli liquidi: principali caratteristiche tecnologiche

I reattori SMR veloci refrigerati a metalli liquidi, i Lead-cooled Fast Reactor (LFR), lavorano ad alte temperature, hanno alti rendimenti termodinamici e tempi di rifornimento del combustibile nucleare molto lunghi (fino a 20 anni). Sono ancora in fase di ricerca e per lo più allo stato concettuale.

- Il combustibile è costituito per lo più da nitrato di uranio (UN), (U, Pu) N, (U, transuranici) N, U-Zr, o (U, Pu) Zr, arricchito fino al 15-20%.
- L'utilizzo del **combustibile**, che **ha un'elevata densità**, è migliore e il **ciclo del combustibile può definirsi pressoché «chiuso»** poiché c'è la **trasmutazione di una parte significativa degli attinidi minori** con evidente vantaggio in fase di smaltimento e di decommissioning. **Non hanno moderatore.**
- Il **refrigerante** (metallo liquido: piombo, piombo-bismuto, sodio) **ha un'elevata conducibilità** e possiede un **alto punto di ebollizione** (1749°C nel caso del piombo).
- Questi reattori **lavorano a pressioni basse** rispetto alle altre tipologie, **a volte prossime a quella atmosferica** e ciò è reso possibile proprio dalle caratteristiche termodinamiche del refrigerante (elevata conducibilità e alto punto di ebollizione).
- **Le caratteristiche termodinamiche del refrigerante rendono possibile il controllo della reattività e la regolazione automatica della potenza:** la perdita di refrigerazione porta ad un aumento di temperatura che rallenta la reazione (feedback di reattività).
- **Grazie a questa caratteristica intrinseca di sicurezza passiva** in molti reattori di questo tipo è **possibile far circolare il refrigerante (metallo liquido) direttamente sfruttando il principio naturale della convezione**. La presenza di generatori diesel di emergenza in caso di arresto del reattore per il raffreddamento del nocciolo non è necessaria.
- I reattori veloci a metallo liquido che operano a **temperature alte**, prossime agli **800°C**, inoltre, potrebbero rendere possibile la **produzione di idrogeno**.

Reattori SMR a sali fusi: principali caratteristiche tecnologiche

I reattori SMR refrigerati a sali fusi, Melted Salts Reactor (MSR) hanno in generale la caratteristica di avere il combustibile disciolto nel refrigerante primario.

Appartengono a questa tipologia di reattori diversi progetti di ricerca ancora in fase concettuale.

- Il combustibile è una **miscela di sali fusi di fluoruro di berillio e litio in cui è disciolto uranio arricchito, torio o fluoruro di ^{233}U** .
Il moderatore è grafite.
- Il rapporto grafite-combustibile è regolato per avere un bilancio neutronico ottimale e uno spettro neutronico epitermico. **Lavorano a pressioni molto basse.**
- Questi reattori **utilizzando combustibile liquido** operano in condizioni stazionarie poiché **la reattività non varia particolarmente in funzione del tempo** e non c'è bisogno di caricare combustibile in eccesso allo start-up. Concetto di sicurezza intrinseca.
- **Il coefficiente di temperatura è negativo**: all'aumentare della temperatura la densità del refrigerante diminuisce e il combustibile nel refrigerante fuoriesce dal core assicurando lo spegnimento sicuro del reattore (feedback di reattività).
- **I sistemi di emergenza per il raffreddamento del core sono di tipo passivo**; in caso di surriscaldamento del sale le valvole di raffreddamento lo fanno confluire in serbatoi di stoccaggio. Il primario è posto in una hot-box sigillata ed isolata che evita il formarsi di zone fredde e il rischio di solidificazione del sale.

Aspetti ingegneristici e di sicurezza nella progettazione del reattore nucleare a fissione

Il reattore nucleare deve essere dimensionato in base alla sua potenza ovvero all'energia che si genera dalla reazione di fissione. La potenza termica prodotta deve essere rigorosamente bilanciata da quella asportata dal refrigerante.

Devono essere dimensionati, in un rapporto di equilibrio e compensazione, il combustibile nucleare (nocciolo) sorgente dei neutroni, il refrigerante preposto all'asportazione del calore generato, il moderatore (quando necessario) preposto al rallentamento dei neutroni, i sistemi di controllo della reattività e il materiale strutturale.

Dato il forte rapporto di interdipendenza e di equilibrio richiesto tra gli elementi costituenti il reattore nucleare, la tecnica adottata per i calcoli del progetto nucleare è quella della separabilità e sovrapposizione degli effetti. Il risultato viene, poi, sempre implementato da fattori di sicurezza.

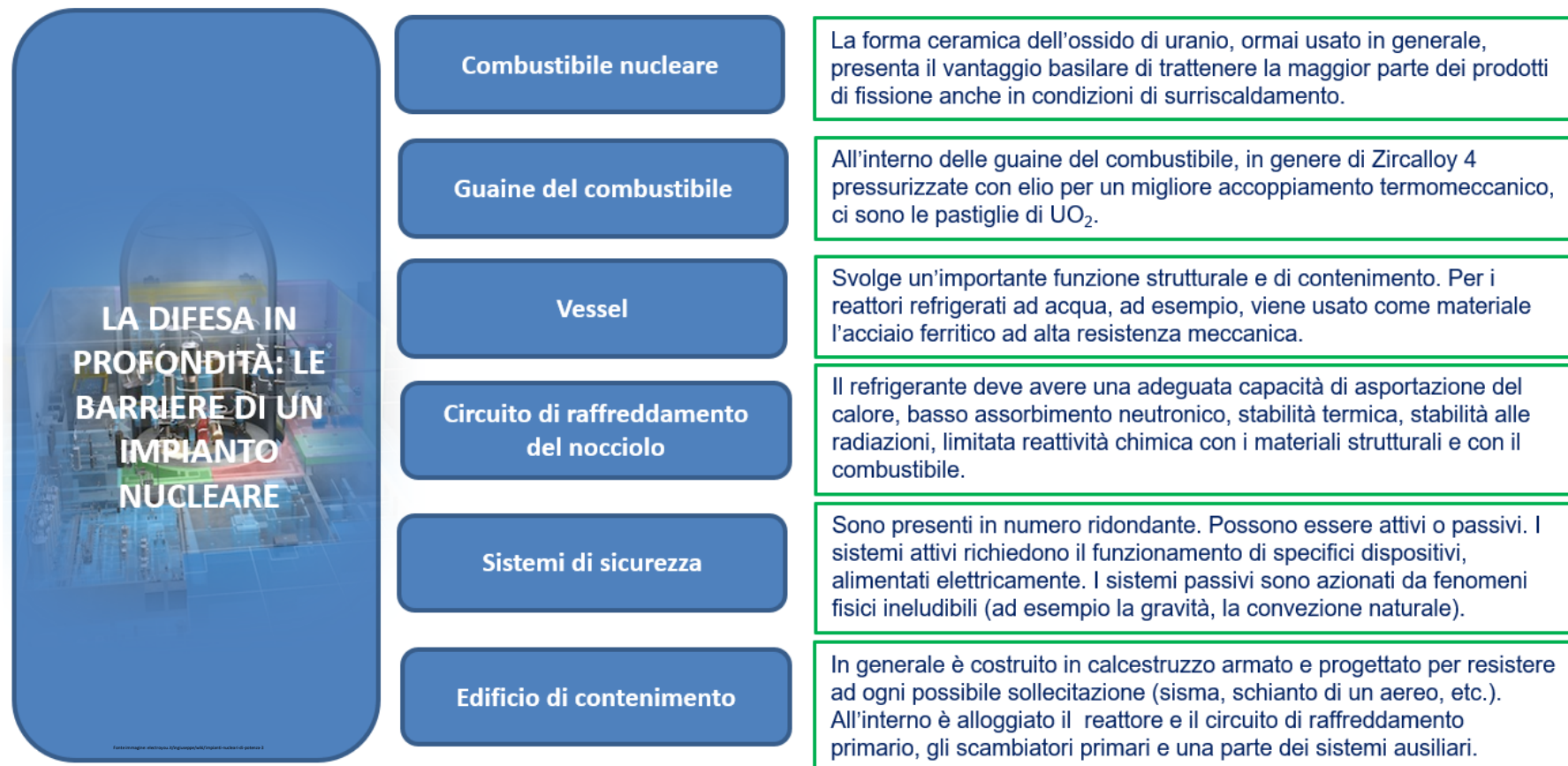
- ❑ **Mantenimento della reazione a catena** nel processo di fissione (controllo dei neutroni liberati durante il processo di fissione).
- ❑ **Calcolo e controllo della concentrazione isotopica** all'interno del reattore (prodotti di fissione e materiale fissile).
- ❑ **Calcolo e controllo del flusso neutronico** generato in relazione al volume di combustibile e quindi della **potenza termica**.
- ❑ **Controllo della reattività** (attraverso il calcolo del fattore di moltiplicazione K , che esprime il rapporto tra il numero di neutroni presenti in una generazione e quello della generazione precedente);
- ❑ **Feedback di reattività**.
- ❑ **Scelta dei materiali** e loro **dimensionamento** per lo **scambio termico**: combustibile, refrigerante, moderatore, etc..
- ❑ **Scelta dei materiali** per gli **elementi strutturali** del reattore (vessel) in grado di resistere a elevati stress termici e alla esposizione alla radioattività.

La sicurezza negli impianti nucleari: la difesa in profondità

Numerose barriere, almeno quattro, **ed un certo numero di sistemi che si frappongono tra il reattore e il circuito primario e l'esterno**. Il concetto di sicurezza di difesa in profondità è insito in tutte le tipologie di reattore.

Scopo della sicurezza nucleare, è quello di preservare, attraverso l'applicazione di normative riconosciute al livello internazionale, da eventi, anche estremi, sia l'interno che l'esterno dell'impianto nucleare.

Le strutture e i sistemi rilevanti sono realizzati in modo da mantenere integra la loro funzione anche dopo il peggior terremoto prevedibile assunto come «terremoto di progetto».



Aspetti di rilevante importanza di un impianto nucleare per la produzione di energia elettrica nel contesto energetico

I **numerosi vantaggi**, caratteristici della tecnologia nucleare preposta alla produzione di energia elettrica, comuni a tutte le tipologie di impianti nucleari, rendono questa tecnologia **ampiamente utilizzata nel mondo** con positive ripercussioni dal punto di vista sociale ed economico.

ASPETTI TECNICI ED ECONOMICI DI UN IMPIANTO NUCLEARE

Elevati standard di sicurezza

Sono garantiti dall'elevato livello di qualità che contraddistingue la progettazione e la costruzione di questi impianti e da attente valutazioni di impatto ambientale e da valutazioni ambientali strategiche.

Immissioni dirette di inquinanti in atmosfera pressoché nulle

Nel quadro generale della sicurezza nucleare si colloca la radioprotezione, il cui obiettivo è quello di assicurare, in ogni caso, attraverso un insieme di misure adeguate, la protezione sanitaria della popolazione e dei lavoratori.

Fattore di capacità di circa il 90%

Massima resa in termini energetici con il minor impiego di combustibile. Il fattore di capacità di un impianto nucleare, non è legato alle condizioni climatiche e geomorfologiche del territorio.

Ridotto impiego di superficie

Come ordine di grandezza, una centrale nucleare occupa qualche decina di ettari di terreno e lavora in sinergia con la grande rete di distribuzione di energia elettrica.

Durevolezza della tecnologia e basso costo del kW/h

La vita media di questa tecnologia è di circa 40-60 anni con un costo del kW/h competitivo rispetto ad altre tecnologie.

Processo tecnologico pianificato

Ogni step che porta alla realizzazione di un impianto nucleare è pianificato in fase progettuale: dal ciclo combustibile, alla fase di esercizio e manutenzione, al deposito per i rifiuti radioattivi.

Bibliografia essenziale

- Impianti Nucleari - Autore: Maurizio Cumo.
- Centrali Eletttronucleari I - Autore: Luciano Sani.
- Quaderno Io Roma N.1/2019 - Tecnologie nucleari innovative: i reattori SMR: prospettive di utilizzo - Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma.
- Aspetti ingegneristici della fissione nucleare – Autore: Alessandra Di Pietro – Seminario «La Ricerca di frontiera per l'energia nucleare sostenibile. Le tecnologie più innovative per la produzione di energia decarbonizzata» Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma
- La fisica del reattore nucleare. Principi di sicurezza e funzionamento - Autore: Alessandra Di Pietro Convegno «L'Energia per l'idrogeno. L'utilizzo dell'energia nucleare e non nucleare per la sua produzione. Rendimenti a confronto e ambiti di utilizzo» Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma

Iconografia

Le immagini sono prese da Internet (Wikipedia, siti, pubblicazioni) e dai Quaderni Io Roma in bibliografia e si intendono qui utilizzate per puri fini personali e non commerciali.



Grazie per l'attenzione

Contatti

Ing. Alessandra Di Pietro

Cell. 347.9926381

alessandra.dipietro@hotmail.it

info@geovaldi.com

www.geovaldi.com

