

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale
Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

Relazione per la prova finale
***Propulsione nucleare nel settore navale:
impieghi e problematiche relative ai veleni
prodotti dalla fissione***

Tutor universitario: Prof. Bertani Roberta

Laureando: *Zambon Fabio*

Padova, 15/07/2022

L'utilizzo della propulsione nucleare in ambito navale (soprattutto nella realizzazione di sottomarini) ha radicalmente mutato le capacità tattiche e tecniche delle principali potenze mondiali

Lo USS Nautilus, il primo sottomarino nucleare della storia (1954)



Il primo sottomarino nucleare sovietico, il K-3 Leninskiy Komsomol (1958)

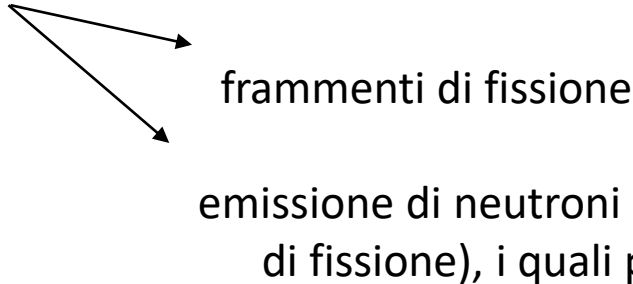


Vengono utilizzate due tipologie di reattore:

- Reattori nucleari ad acqua pressurizzata (PWR);
- Reattori nucleari raffreddati a metallo liquido (LMFR), per lo più come oggetto di studio

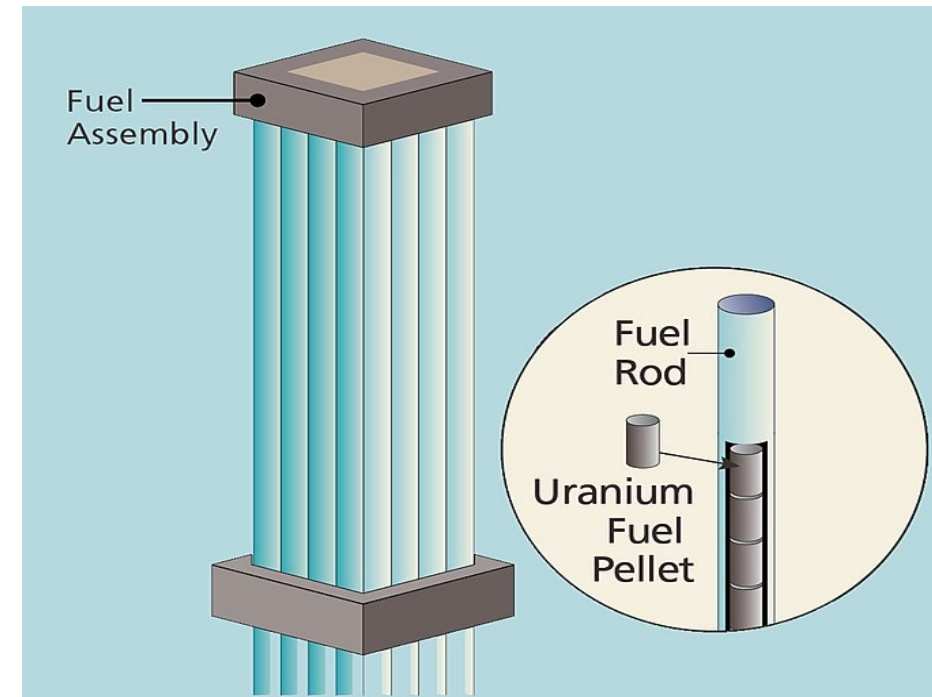
Dal processo di fissione vengono prodotti nuclei radioattivi dannosi (**veleni**), i quali influenzano negativamente il numero di neutroni richiesto per il prosieguo della reazione a catena: sostanzialmente si ha una diminuzione della reattività nel reattore che potrebbe addirittura causare lo spegnimento dello stesso.

- Descrivere il generale funzionamento di un reattore nucleare;
- Delineare le caratteristiche fondamentali dei reattori PWR;
- Definire le principali differenze tra impianti PWR navali e terrestri;
- Trattare il tema dei veleni di fissione:
 - Isotopo ^{135}Xe ;
 - Isotopo ^{149}Sm .

- ❖ La fissione nucleare viene indotta quando un neutrone libero viene assorbito in alcuni nuclei pesanti instabili, quali l' ^{235}U e il ^{239}Pu ;
- ❖ La fissione si definisce quindi come la reazione a catena generata all'interno del combustibile: essa consiste nella scissione dell' ^{235}U in 
 - **Il combustibile;**
 - **Le barre di controllo;**
 - **Il moderatore.**

IL COMBUSTIBILE

- Dopo l'estrazione dell'uranio seguono i processi fondamentali di conversione e soprattutto di arricchimento, in quanto meno dell'1% dell'uranio naturale è fissile.
L'uranio è costituito quasi integralmente dall'isotopo ^{238}U , ma nella stragrande maggioranza dei reattori nucleari attualmente in esercizio si utilizza l' ^{235}U come combustibile.
- Il combustibile utilizzato nei reattori è generalmente in forma di pellets, i quali vengono poi inseriti in tubi di lega di zirconio (*zirconium alloy*). Si formano quindi le barre di combustibile nucleare.



IL MODERATORE

- La moderazione consiste nel processo di rallentamento dei neutroni: infatti, affinché i neutroni prodotti in un processo di fissione possano costituire 'proiettili' utili per indurre un nuovo processo di fissione, è necessario che la loro velocità venga diminuita. Questo poiché la probabilità con cui un neutrone urtante un nucleo fissile può indurre la fissione dipende marcatamente dalla velocità stessa del neutrone.
- I moderatori più efficaci sono quelli che presentano un numero di massa atomica relativamente basso: tra di essi si annoverano l'acqua (H_2O), l'acqua pesante (D_2O) o la grafite.

LE BARRE DI CONTROLLO

Le barre di controllo intervengono nel processo di reazione a catena e sono fabbricate con materiali (generalmente cadmio e boro) che hanno una grande sezione d'urto dei neutroni termici.

Hanno tre scopi principali:

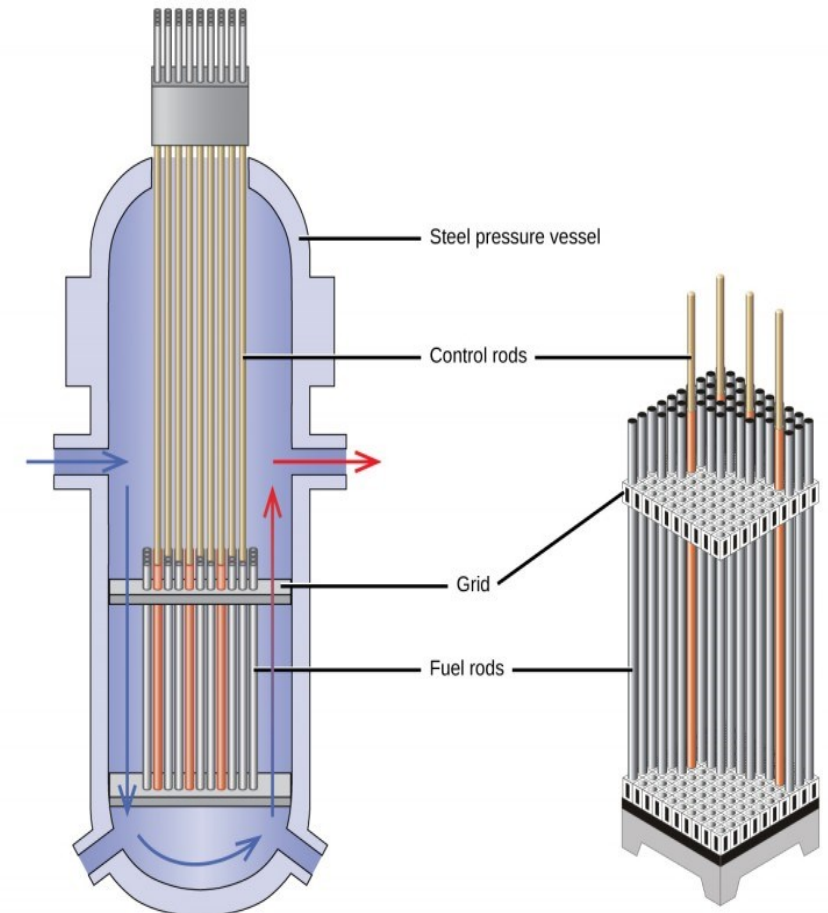
- Modificare le condizioni di funzionamento del reattore;
- Modulare la produzione energetica;
- Eseguire un arresto di emergenza, se necessario.

Le barre di moderazione regolano la moltiplicazione di neutroni mediante l'inserimento delle stesse in alternanza alle barre di combustibile.

Viene introdotto il fattore di moltiplicazione effettivo:

$$k_{eff} = \frac{N_{i+1}}{N_i},$$

dove N_i è il numero di neutroni nel sistema e N_{i+1} è il numero dei neutroni termici generati dopo il successivo evento di fissione.

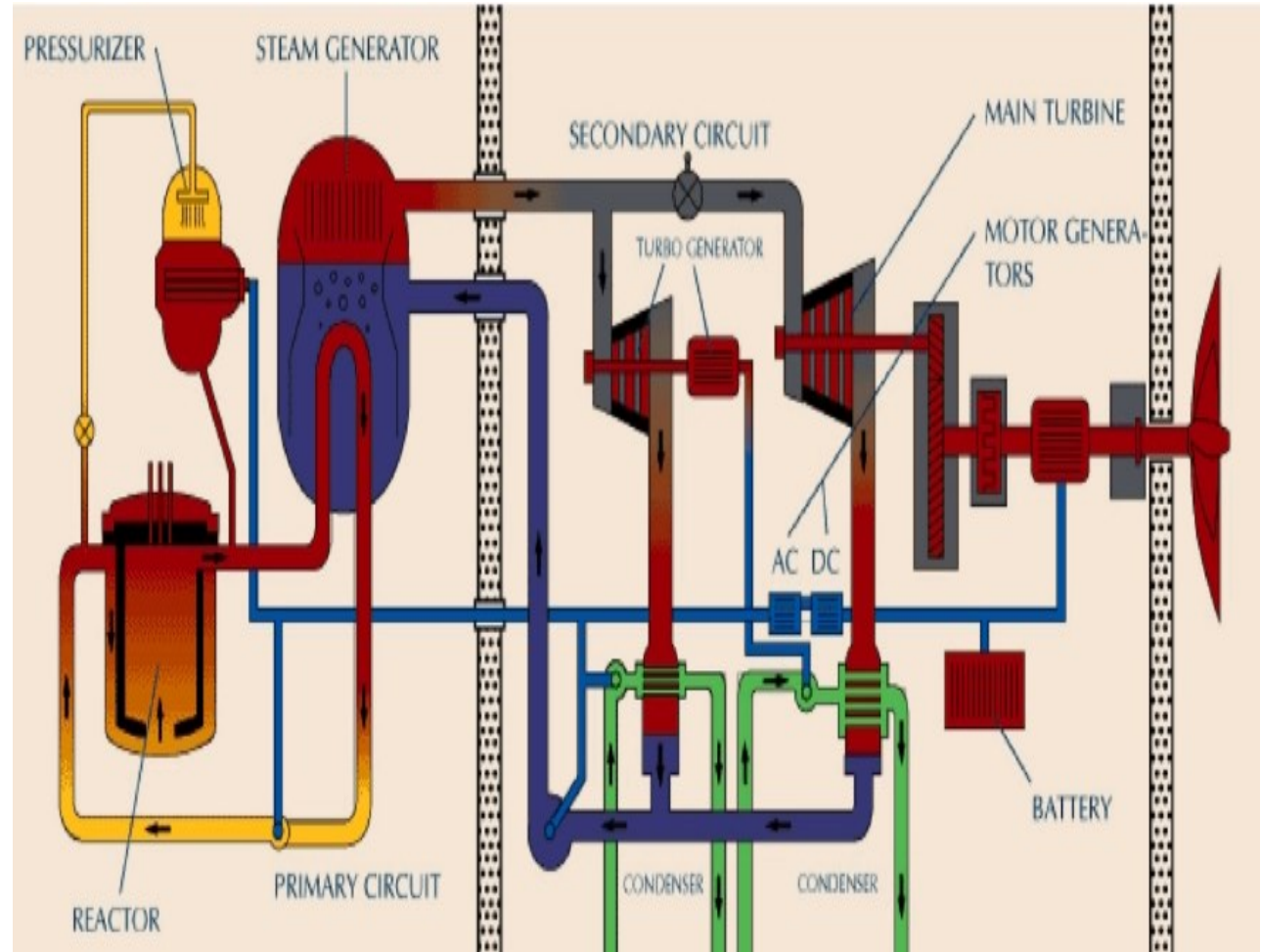


I reattori PWR costituiscono la stragrande maggioranza dei reattori utilizzati nel mondo sia per la produzione di energia elettrica sia nelle imbarcazioni.

Vengono impiegati due circuiti principali:

- Il **circuito primario**, dove l'acqua viene riscaldata pompandola attraverso il nocciolo del reattore;
- Il **circuito secondario**, in cui i generatori di vapore scambiano calore dal liquido di raffreddamento primario a quello secondario, creando appunto quel vapore che servirà ad attivare la turbina per l'azionamento dell'elica della nave.

I contaminanti radioattivi sono confinati solamente all'interno del circuito primario. Inoltre lo stesso refrigerante primario funge anche da moderatore di neutroni.



Schema di un impianto PWR implementato in ambito navale

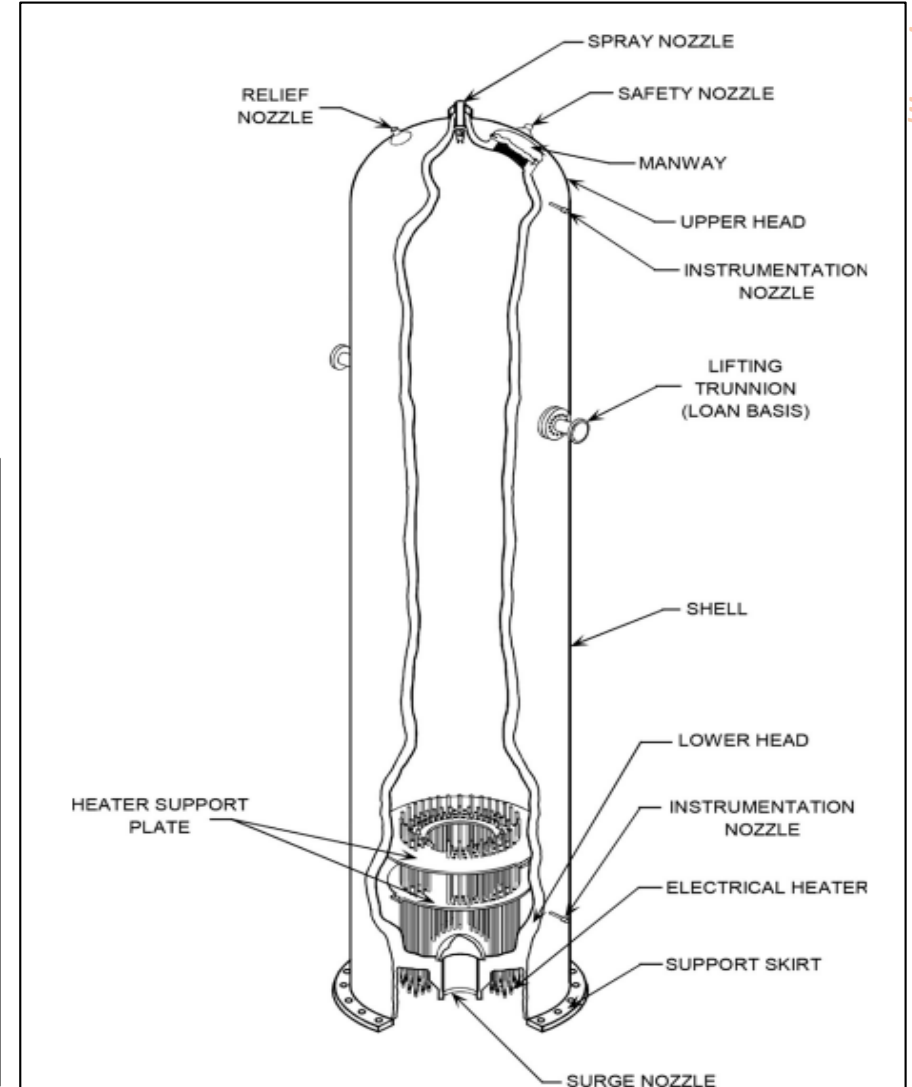
LIQUIDO DI RAFFREDDAMENTO

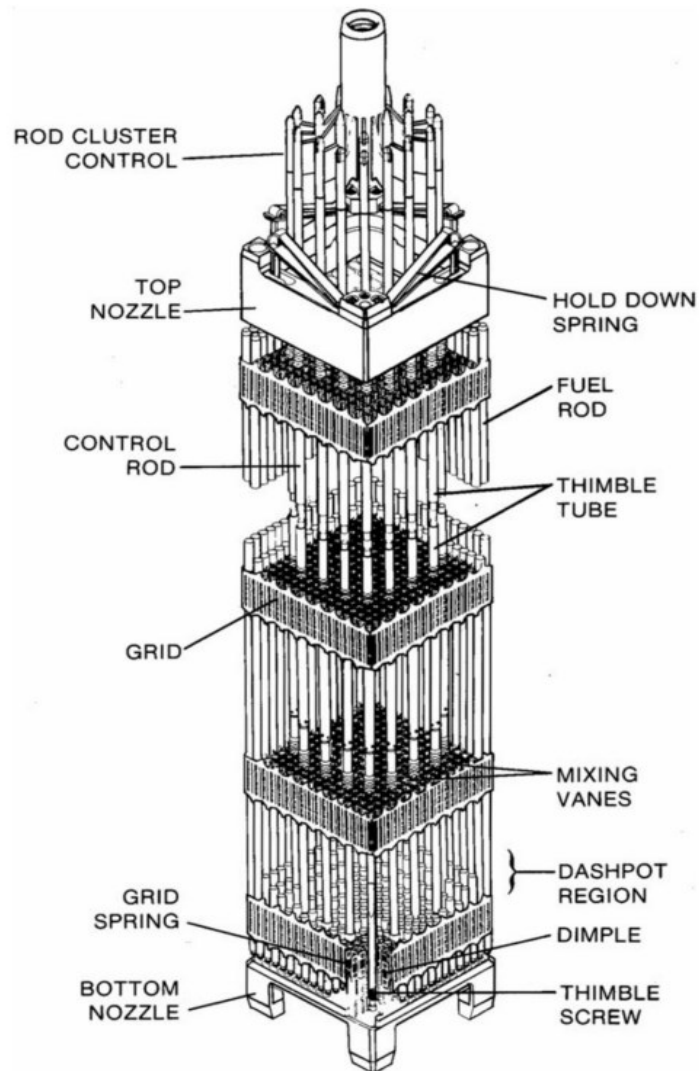
L'acqua leggera viene utilizzata come refrigerante nel circuito primario di un PWR. Quest'ultima entra attraverso il fondo del reattore a circa 275 °C e viene riscaldata attraverso il nocciolo ad una temperatura attorno ai 315 °C. L'acqua rimane liquida nonostante l'elevata temperatura a causa dell'alta pressione nel circuito del refrigerante primario, solitamente intorno a 155 bar.

PRESSURIZZATORE

Esso consiste in un recipiente che contiene acqua liquida nella sezione inferiore e vapore saturo nella sezione superiore, e viene utilizzato per regolare la pressione del refrigerante primario. Il fatto che il vapore e l'acqua allo stato liquido si trovino a contatto dimostra come l'acqua sia presente alla temperatura di saturazione allo stato stazionario.

Spruzzi d'acqua più fredda entrano dalla parte superiore mentre riscaldatori elettrici sul fondo riscaldano l'acqua liquida. Un sistema di controllo può comunque alterare la pressione modulando la potenza del riscaldatore e/o il flusso dello spray.





Dettagli del combustibile Westinghouse
a geometria 17x17

○ Condizione di funzionamento:

- La centrale nucleare terrestre fornisce di base un servizio costante, il progetto si concentra sulla stabilità;
- In un reattore navale l'enfasi si concentra sulla flessibilità di funzionamento.

Pertanto l'efficienza termica di un reattore nucleare navale risulta inferiore rispetto al corrispettivo reattore terrestre.

○ Arricchimento del combustibile:

- I reattori terrestri utilizzano combustibile a basso arricchimento (mediamente al 3-5% di ^{235}U) e necessitano di rifornimento ogni 1/2 anni;
- Nei reattori navali ci si avvale dell'uranio ad alto arricchimento (generalmente attorno al 93%) e sono perciò progettati per un rifornimento che avviene ad intervalli superiori ai 10 anni.

○ **Scambio di calore:**

- Le centrali nucleari hanno costante bisogno di serbatoi d'acqua sempre disponibili per i circuiti di raffreddamento;
- Le imbarcazioni hanno il vantaggio di poter utilizzare l'acqua marina come dissipatore di calore.

○ **Combustibile:**

- I reattori terrestri impiegano usualmente come combustibile il biossido di uranio (UO_2);
- Nei reattori navali si utilizzano combustibili quali leghe uranio-zirconio, uranio-alluminio e combustibili metallo-ceramici.

La conformazione comune del combustibile è comunque quella dei pellets, i quali sono poi inseriti in tubi in lega di zirconio che vengono disposti in piastre dalla geometria variabile. Circa 100-200 di questi gruppi di combustibile costituiscono quindi il nucleo del reattore.

Characteristics	Nuclear Power Plant	Submarine Propulsion system
Output power (MWe)	300MW–1600MW	30MW–165MW
Fuel	UO_2 ceramic	metal-zirconium alloy
Thermal efficiency	35%	33%
Fuel enrichment	(natural)0.72%–7%	20%–96% U-235
Refueling Period (year)	1–1.5	10–33
Space Size	Big	small
Power density	Low	Very High

Alcuni nuclei radioattivi prodotti dalla fissione nucleare sono dannosi per il normale funzionamento dell'impianto poiché hanno enormi sezioni d'urto per i neutroni termici: essi vengono denominati **veleni**, in quanto influenzano negativamente il mantenimento dell'equilibrio del numero di neutroni nel reattore. Questo avviene a causa dell'elevata cross-section dei prodotti stessi, ossia l'elevata probabilità di assorbimento dei neutroni incidenti.

I principali veleni sono:

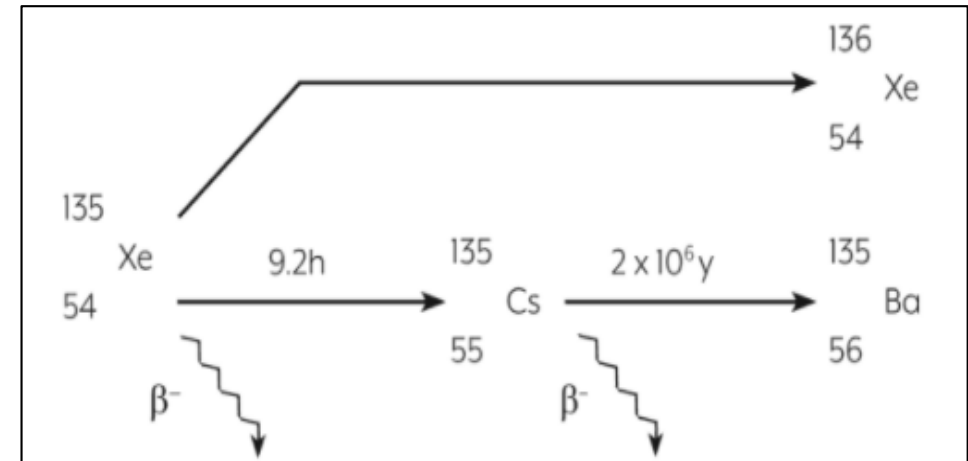
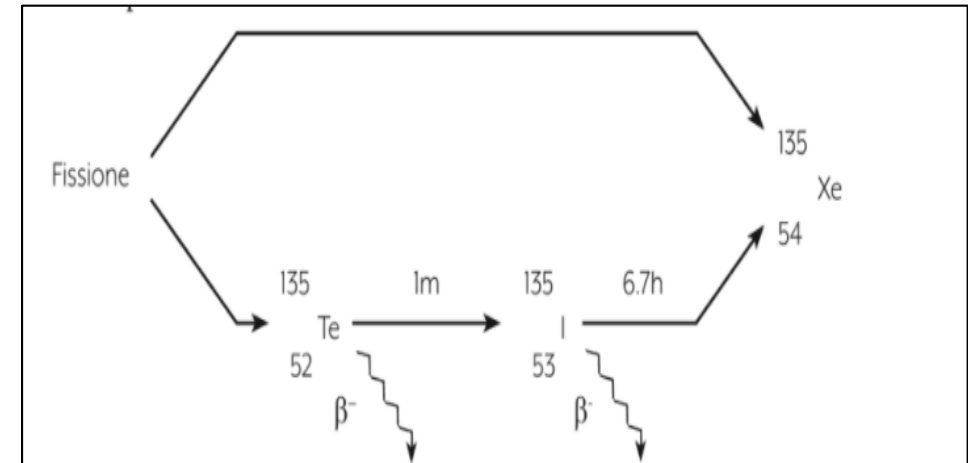
- **Xeno-135 (^{135}Xe);**
- **Samarium-149 (^{149}Sm).**

REAZIONI DI TRASFORMAZIONE DELLO ^{135}Xe

- Lo xeno viene generato sia direttamente come prodotto di fissione sia per decadimento di un altro prodotto di fissione, lo iodio-135. Quest'ultimo decade quindi nello ^{135}Xe con un'emivita di 6,7 ore.
- Per quanto riguarda la trasformazione, lo xeno-135 può essere rimosso sia per assorbimento di neutrone sia per decadimento a ^{135}Cs .

Durante il funzionamento a regime, la diminuzione di reattività è funzione del flusso neutronico, e raggiunge il limite massimo di circa il 5%.

Processo di produzione dello $^{135}\text{Xe}_{54}$



Rimozione dello $^{135}\text{Xe}_{54}$

STATO STAZIONARIO DELLO XENO-135

Le grandezze allo stato stazionario dello ^{135}I e ^{135}Xe sono:

$$\frac{dI}{dt} = \gamma_I \Sigma_f \Phi - \lambda_I I = 0 \rightarrow I_{ss} = \frac{\gamma_I \Sigma_f \Phi}{\lambda_I}$$

$$\frac{dX}{dt} = \gamma_X \Sigma_f \Phi + \lambda_I I - X \sigma_{aX} \Phi - \lambda_X X = 0 \rightarrow X_{ss} = \frac{(\gamma_I + \gamma_X) \Sigma_f \Phi}{\lambda_X + \sigma_{aX} \Phi}$$

Poiché lo ^{135}I si trasforma nello ^{135}Xe durante il decadimento radioattivo, il valore del suo stato stazionario rappresenta una fonte del futuro ^{135}Xe . Perciò il rapporto tra I_{ss} e X_{ss} è utile come indicatore per il venturo xeno, ed esso si esprime come segue:

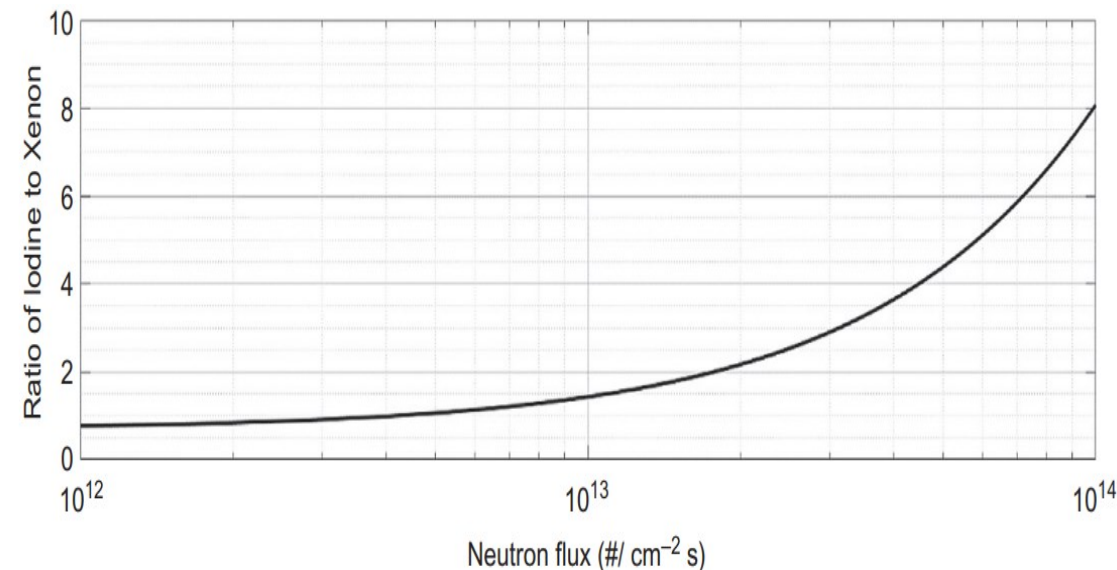
$$\frac{I_{ss}}{X_{ss}} = \frac{\gamma_I (\lambda_X + \sigma_{aX} \Phi)}{\lambda_I (\gamma_I + \gamma_X)}$$

Inserendo i valori per i prodotti di fissione e le costanti di decadimento date si ottiene:

$$\frac{I_{ss}}{X_{ss}} = 0.695 + 0.738 \cdot 10^{-13} \Phi$$

I = concentrazione dello ^{135}I (numero di atomi/cm³);
 γ_I = resa di fissione dello ^{135}I (generalmente 0,063 atomi per fissione);
 Σ_f = sezione d'urto di fissione macroscopica del combustibile (probabilità d'interazione per unità di lunghezza, cm⁻¹);
 Φ = flusso di neutroni (numero di neutroni/cm²·s);
 λ_I = costante di decadimento dello ^{135}I ($2.87 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$);
 X = concentrazione dello ^{135}Xe (numero di atomi/cm³);
 γ_X = resa di fissione dello ^{135}Xe (generalmente 0,003 atomi per fissione);
 λ_X = costante di decadimento dello ^{135}Xe ($2.09 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$);
 σ_{aX} = cross-section di assorbimento dello ^{135}Xe ($3.5 \cdot 10^6 \text{ b}$ a 0.0253eV).

$$(1 \text{ b} = 10^{-24} \text{ cm}^2)$$



TEMPO MORTO DEL REATTORE

Dopo lo spegnimento del reattore la produzione dello xeno cessa, ma esso continua comunque ad accumularsi a causa del decadimento dello iodio.

Il fatto che la sezione d'urto dello xeno sia molto elevata comporta l'assorbimento di neutroni e di conseguenza impedisce il riavvio del reattore per un periodo di tempo indicato come *tempo morto del reattore*.

- Si riscrivono le equazioni della variazione di concentrazione sia dello iodio sia dello xeno, imponendo il flusso Φ uguale a 0:

$$\frac{dI}{dt} = -\lambda_I I(t) \qquad \frac{dX}{dt} = \lambda_I I(t) - \lambda_X X(t)$$

- Utilizzando la soluzione di Bateman:

$$I(t) = I_{ss} e^{-\lambda_I t} \qquad X(t) = X_{ss} e^{-\lambda_X t} + \frac{\lambda_I}{\lambda_I - \lambda_X} I_{ss} (e^{-\lambda_X t} - e^{-\lambda_I t})$$

- Sostituendo i valori di I_{ss} e X_{ss} :

$$X(t) = \frac{(\gamma_I + \gamma_X) \Sigma_f \Phi}{\lambda_X + \sigma_{aX} \Phi} e^{-\lambda_X t} + \frac{\gamma_I}{\lambda_I - \lambda_X} \Sigma_f \Phi (e^{-\lambda_X t} - e^{-\lambda_I t})$$

Tale equazione rappresenta quindi la concentrazione dello xeno nel reattore (in funzione del tempo) a seguito dello spegnimento, ed è una funzione crescente. Per questo motivo i nuclei dei reattori navali devono essere dotati di una reattività sufficiente per superare tale reattività negativa allo xeno.

Introducendo infine il parametro di reattività negativa ρ si ottiene:

$$\rho(t) = -\frac{\sigma_{aP}\Phi}{\nu\epsilon p} \left[\frac{\gamma_I + \gamma_X}{\lambda_X + \sigma_{aX}\Phi} e^{-\lambda_X t} + \frac{\gamma_I}{\lambda_I - \lambda_X} (e^{-\lambda_X t} - e^{-\lambda_I t}) \right]$$

dove:

σ_{aP} = cross-section di assorbimento dei veleni;

η = fattore di rigenerazione;

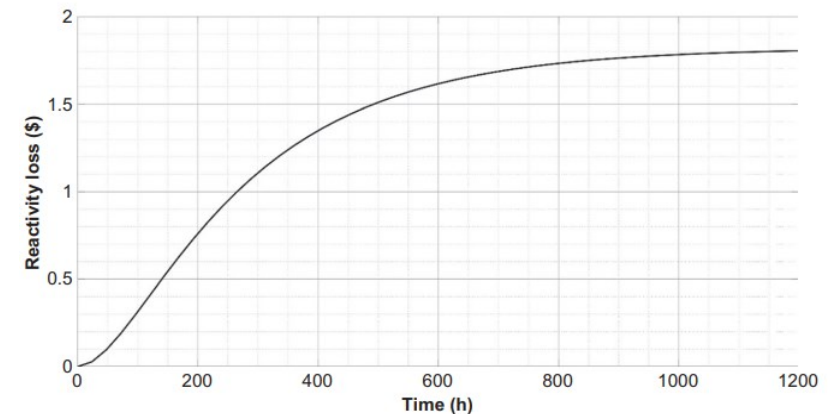
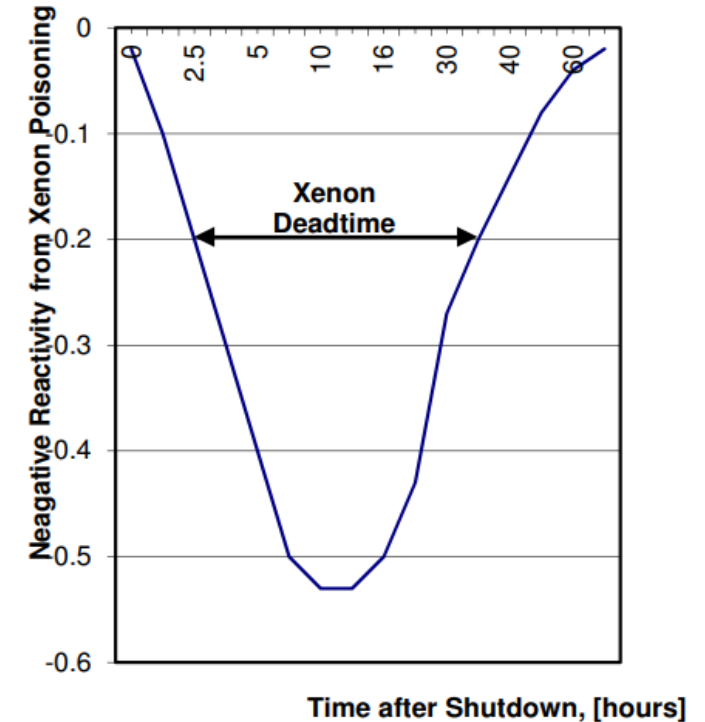
ϵ = fattore di fissione veloce;

p = probabilità di fuga di risonanza;

Se in qualsiasi momento dopo lo spegnimento la reattività positiva disponibile rimuovendo tutte le barre di controllo è inferiore alla reattività negativa causata dallo xeno, il reattore non può essere riavviato fino a quando quest'ultimo non è decaduto.

AVVELENAMENTO DA ^{149}Sm

Il samario-149 ha anch'esso una sezione d'urto molto grande per i neutroni termici ($\sigma_a = 4,2 \cdot 10^4$ b). Esso risulta dal decadimento *beta* del promezio-149, il quale decade a sua volta dal neodimio-149. Quest'ultimo decade nel ^{149}Pm con un'emivita di 1,7 ore. Poiché l'emivita del ^{149}Pm è molto più lunga (47 ore), è accettabile trattare il promezio come prodotto di fissione diretta.



Avvelenamento da ^{149}Sm dopo l'avvio del reattore

- La tecnologia dei reattori ad acqua pressurizzata (PWR) è stata e continua a rimanere la principale soluzione adottata in ambito navale, nonostante storicamente siano state studiate e provate altre tecniche propulsive;
- Ulteriori caratterizzazioni della propulsione nucleare navale sono rappresentate dalle differenze oggettive che si notano con i reattori PWR delle centrali nucleari terrestri. Quella maggiormente significativa è rappresentata dal diverso livello di arricchimento del combustibile;
- Infine deve essere trattato il tema trasversale a tutti i reattori PWR dei veleni di fissione, i quali rappresentano appunto i prodotti stessi della fissione nucleare. Essi sono dannosi per il mantenimento della reattività desiderata nel *core* del reattore e causano quindi una diminuzione di efficienza del sistema nucleare.

- Ash, M. (1966). Chapter 1 Xenon in Nuclear Reactors. Dynamic Programming I. *Mathematics in Science and Engineering*, 1-20.
- Caldon, R., & Bignucolo, F. (2019). *Impianti di Produzione dell'Energia Elettrica. Criteri di scelta e dimensionamento*. Società editrice Esculapio.
- Carlton, J., Smart, R., & Jenkins, V. (2011). The nuclear propulsion of merchant ships: aspects of engineering, science and technology. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 47-59.
- Cummins, & Matzie, R. (2018). Design evolution of PWRs: Shippingport to generation III. *Progress in Nuclear Energy (New Series)*, 9-37.
- Fernández-Arias, Vergara, D., & Orosa, J. A. (2020). A global review of PWR nuclear power plants. *Applied Sciences*.
- Hirdaris, Cheng, Y., Shallcross, P., Bonafoux, J., Carlson, D., Prince, B., & Sarris, G. (2014). Considerations on the potential use of Nuclear Small Modular Reactor (SMR) technology for merchant marine propulsion. *Ocean Engineering*, 101-130.
- Kerlin, T. W., & Upadhyaya, B. R. (2019). Fission product poisoning. In T. W. Kerlin, & B. R. Upadhyaya, *Dynamics and Control of Nuclear Reactors* (p. 57-71). Academic Press.
- Kerlin, T. W., & Upadhyaya, B. R. (2019). Pressurized water reactors. In T. W. Kerlin, & B. R. Upadhyaya, *Dynamics and Control of Nuclear Reactors* (p. 139-166). Academic Press.
- Orlov, Zmitrodan, A., & Krivobokov, V. (2021). Methods of Removing Corrosion Product Deposits from the Primary Circuit of Light-Water Reactors under Transient Operating Conditions (Review). *Thermal Engineering*, 361-369.
- Ragheb, M. (2011). Nuclear Naval Propulsion. *Nuclear Power - Deployment, Operation and Sustainability*.
- Sarkisov, A. (2021). Some Historical Lessons from the Development of Naval Nuclear Power Engineering in the Soviet Union/Russia. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 311-326.

<https://www.sottomarininucleari.it/russia-urss/>

https://it.wikipedia.org/wiki/Reattore_nucleare_ad_acqua_pressurizzata

https://en.wikipedia.org/wiki/Neutron_temperature

https://en.wikipedia.org/wiki/Pressurized_water_reactor

https://www.agi.it/blog-italia/scienza/arricchimento_uranio_iran_come_funziona-6840480/post/2020-01-07/

<https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/storage-spent-fuel.html>

<http://www.science.unitn.it/~fisica1/fisica1/appunti/sparsi/neutroni/neutroni/>