

GIUSEPPE MARSOTTO (INGiuseppe)

IMPIANTI NUCLEARI DI POTENZA [2]

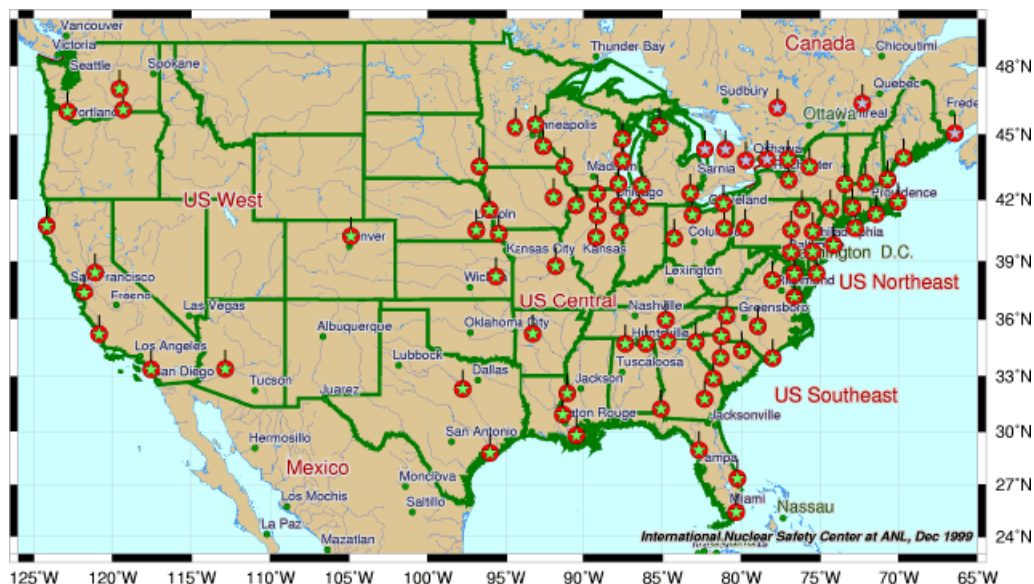
25 August 2012

Dopo aver visto le basi dell'Energia Nucleare, l'articolo scorso, vediamo quali sono stati (ormai sessant'anni fa..), i primi reattori nucleari fatti dall'uomo. "Le robe vecie xè sempre quee che va mejo" (le robe vecchie sono sempre quelle migliori) dicevano gli anziani del mio paesetto. In effetti, vedremo che uno dei "vecchi" reattori, è tutt'oggi sul banco dei ricercatori di tutto il mondo, in quanto è semplicemente fantastico!

Ma vedremo oltre le tipologie, anche le basi per lo studio dei reattori, introduzione necessaria perché altrimenti non si comprende quali tipi di reattore sia più o meno adatto all'impianto stesso (non composto solo dal Reattore), ed il tutto, nel parco energetico nazionale e/o comunitario.

Anche se la storia della Fisica Nucleare ha avuto inizi proprio in Italia con Enrico Fermi ed i Ragazzi di via Panisperna (anche a Chicago), la Russia e gli Stati Uniti, e successivamente l'Inghilterra, sono state le prime Nazioni ad implementare la fissione nucleare voluta in una regione **finita** come un reattore nucleare, a scopi energetici. Seguirò questo indice, inizialmente per spiegare il ruolo del componente, e poi verificando questi per ogni tipologia di reattore:

- **Componenti del Reattore nucleare e materiali**
- **Tipologie di Reattori moderati a grafite**

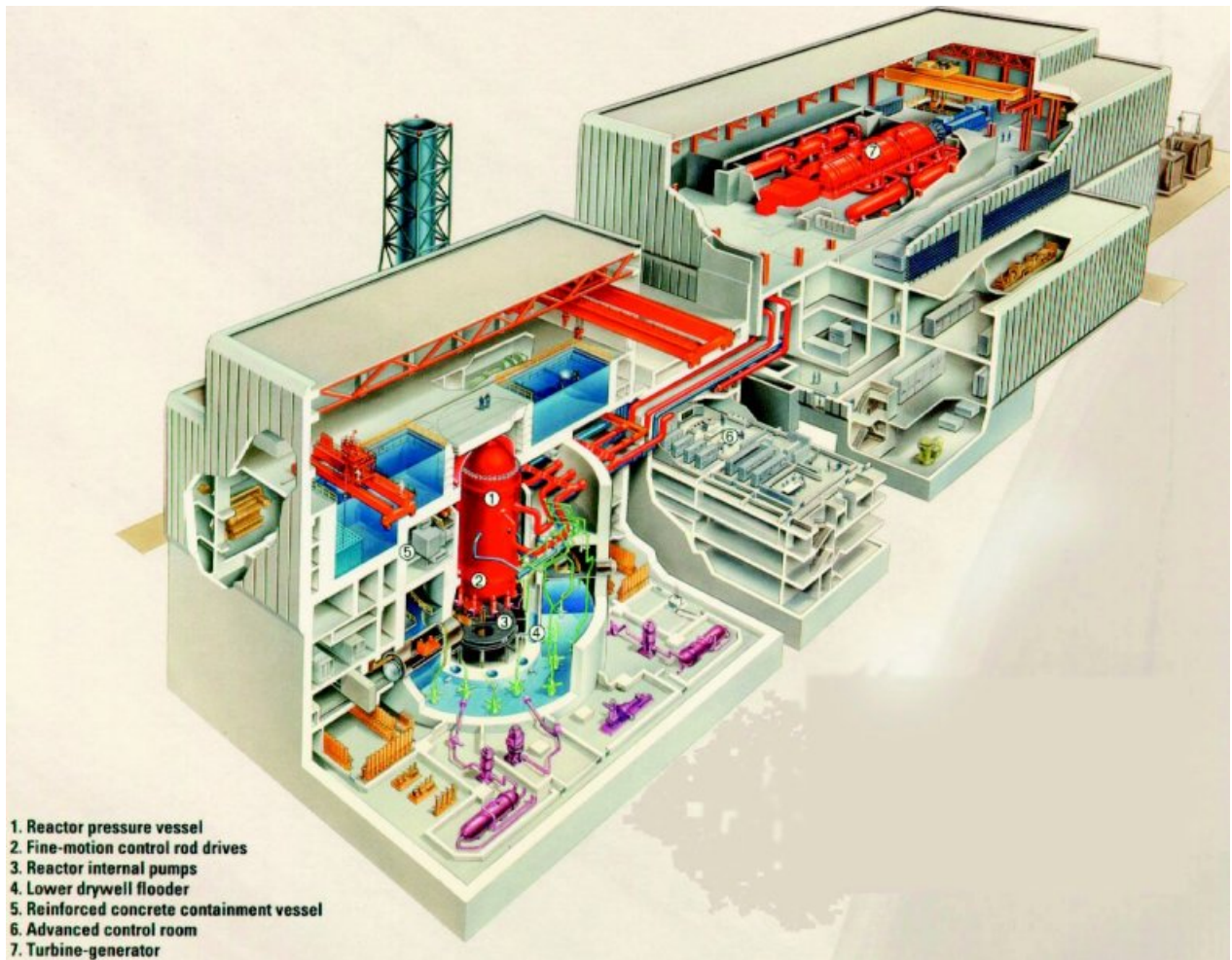


usa.gif

Componenti di un Reattore Nucleare e materiali

Il Reattore Nucleare è un dispositivo molto complesso che presenta queste componenti essenziali:

- **Nuclear fuel:** è costituito da pastiglie di ossido di uranio allo stato metallico o ceramico e sono impilate all'interno di un tubo metallico di Zr o Mg a tenuta stagna per contenere i prodotti di fissione che possono avere varia natura;
- **Moderator:** sostanza addetta al rallentamento dei neutroni veloci fino al livello necessario alla fissione; solitamente graffite, acqua leggera o pesante;
- **Reflector:** componente che evita la fuoriuscita dei neutroni dal nocciolo;
- **Control rods:** verticali o orizzontali e sono addette al controllo del numero di reazioni che avvengono nel nocciolo del reattore e quindi della potenza erogata dal reattore; sono di materiale con potere assorbente molto alto (Bo);
- **Coolant fluid:** può essere gas o liquido, fluido che *porta* all'esterno del reattore il calore prodotto dalle fissioni;
- **Shield:** involucro che contiene il reattore nucleare, composto da una schermatura termica e una biologica;
- **Strutture di sostegno e di contenimento:** dato che un reattore è una costruzione molto pesante ed impegnativa, le strutture devono essere adeguate ai carichi da sopportare; esse, così come tutte le altre parti non direttamente coinvolte nella reazione a catena, costituiscono un ostacolo per lo svolgimento della reazione stessa, in quanto catturano parte dei neutroni costringendo a progettare il reattore con un eccesso neutronico ed, eventualmente, con un arricchimento supplementare del combustibile nucleare; si vedrà che, per contenere gli effetti negativi sopra detti, si usano spesso materiali metallici aventi basso assorbimento neutronico (leghe di magnesio o di zirconio), anche se meno resistenti dell'acciaio, che ha una notevole sezione di cattura.

*nuclear_power_plantcut1.gif*

Soffermiamoci sul peculiare ed importantissimo componente: il **moderatore**.

La maggior parte dell'Uranio presente nel reattore è di tipo U^{238} non fissile; questo dato, legato al fatto che la maggior parte dei neutroni prodotti dalla reazione sono "veloci", rende sfavorevole la possibilità che un neutrone prodotto da una reazione fissa un altro nucleo, producendo energia, in quanto gli atomi di U^{235} , richiedono per la fissione un'energia cinetica dei neutroni dell'ordine del termico (bassa). Per permettere l'autosostentamento della reazione è necessario che i neutroni prodotti siano di innesco ad altre reazioni, e quindi, per ovviare alle condizioni sfavorevoli sopraelencate, è necessario che nel reattore sia presente un componente che favorisca il rallentamento dei neutroni in modo che questi si adattino alla velocità necessaria alla fissione dei nuclei di U^{235} e non finire assorbiti dai nuclei di U^{238} .

Il 70% dei neutroni prodotti hanno una velocità media pari a circa 10000-50000 [Km/s], mentre il livello termico necessario alla fissione è circa 2,2 [Km/s]; questi si chiamano rispettivamente neutroni veloci e termici e tra di loro vi sono i neutroni epitermici con velocità intermedia tra loro. Le tipologie di moderatori scoperti ed utilizzati sono:

- H₂O (acqua comunissima: in Gabon miliardi di anni fa esisteva un reattore nucleare completamente naturale, in una vallata dove vi era alta concentrazione di materiale fissile ed un ruscello. In effetti la natura anticipa di molto la scoperte e le applicazioni antropiche!)
- D₂O (acqua con deuterio, isotopo dell' Idrogeno)
- C (grafite)

Similitudine e massa critica

La massa critica è quella massa che, una volta raggiunta con la progressiva carica degli elementi, garantisce autostentamento delle reazioni nucleari. Determinare una similitudine geometrico - funzionale per i reattori è impossibile perché le variabili di funzionamento in gioco sono molte e variabili nel tempo; ad esempio la carica si esaurisce man mano con il funzionamento del reattore e questo esige, per avere una stazionarietà nel funzionamento, di un continuo ed impercettibile movimento delle barre di controllo. Questo spiega perché non sia fisicamente possibile garantire la stazionarietà nel funzionamento del reattore nucleare, come avviene invece nelle comuni camere di combustione. Un importante parametro: Multiplicator factor K

$$K = \frac{n_u}{n_a}$$

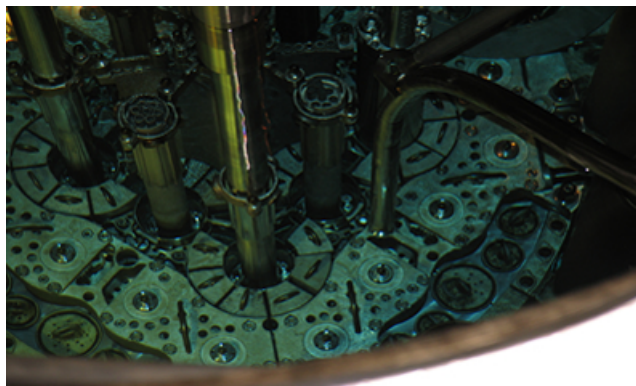
con n_u numero di neutroni uscenti da una reazione (prodotti) e n_a neutroni assorbiti per reazione, entrambe medie; se risulta maggiore di 1 la reazione si autosostiene, altrimenti si spegne.

Power physical form : i neutroni fissano gli atomi fissili e i prodotti hanno una energia cinetica molto elevata e inoltre, una massa elevata ($A= 90/130$); l'energia termica prodotta è sotto forma di energia cinetica dei prodotti che si muovono nella massa del reattore con certe lunghezze d'onda, essendo di fatto calore trasmissibile.

I campi di funzionamento del reattore sono, in base alla carica:

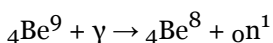
- Enriched fuel : 3% to 0,9%
- Natural fuel: 0,7% to 0,3%

I prodotti di fissione sono poi contenuti nelle stesse barre di controllo che devono essere a tenuta stagna per evitarne la fuoriuscita.



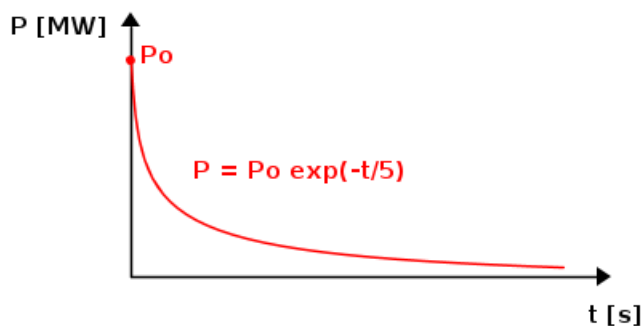
agr1.gif

Start-Up : in questa fase abbiamo che il flusso neutronico debba essere il più controllabile possibile. L'attività neutronica è sempre presente per emissioni dal Th, U e neutroni ritardati, ma per controllarne il flusso all'inizio si deve disporre di una certa potenza neutronica. Ad esempio per una power plant di $P=3$ [GW] si deve avere un flusso pari a $10^{-6}P$ cioè di 3 [KW]. La tecnologia proposta è usare una barretta di Sb che emette raggi γ che vanno a colpire l'involucro di Be che sotto questa reazione nucleare, produce un flusso neutronico.



ovviamente nella fase di avvio le barre di controllo sono adeguatamente alzate.

Stop : lo spegnimento della attività neutronica immediata all'interno del reattore è impossibile in quanto, seppur abbassando al massimo le barre di controllo rapidamente (scram), si ha un **seguirsi dell'attività fissiva all'interno delle barre combustibile** che tuttavia riscaldano il fluido termovettore. L'andamento della potenza termica nel tempo a scram avvenuto è del tipo:



Quindi la conseguenza è che, non potendo arrestare il reattore nella sua attività istantaneamente, le **misure di sicurezza** richiedono la **presenza di sistemi** che iniettino *grandi e piccole* quantità d'acqua nel nocciolo al fine di raffreddarlo, a seconda della situazione di emergenza. L'**ERRORE UMANO** di Fukushima, è stato quello di progettare l'energy supply, che era un elettrogeneratore

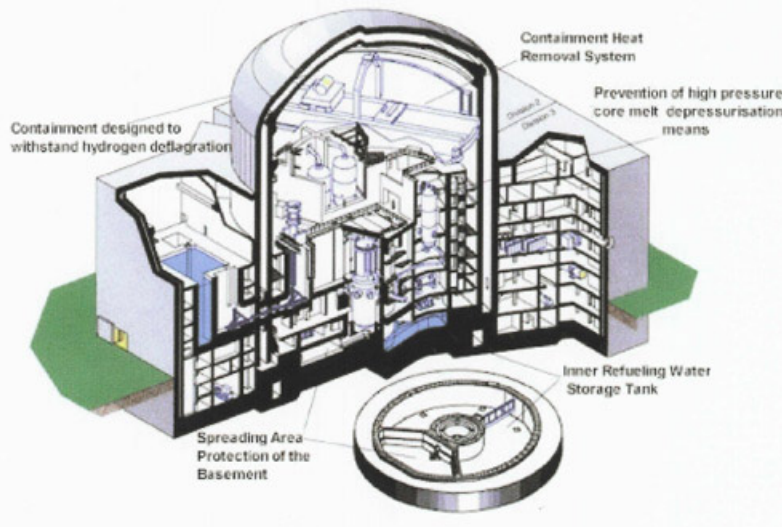
(gruppo di elettrogeneratori), **non all'altezza di sicurezza**, così è stato (ahimè) facilmente inondato dall'acqua mettendolo in avaria, e non potè più far circolare l'acqua di raffreddamento della piscina dove elementi in esaurimento stavano stazionando in procinto di ritrattamento di fine vita; l'acqua fu inesorabilmente scaldata, e successe quel che successe. Se fossero stati progettati correttamente, peraltro come due Impianti poco distanti da Fukushima (che li avevano a 5 metri d'altezza dentro containers sigillati), non ci sarebbe stato alcun disastro (in quanto l'acqua post-onda si sarebbe ritirata), e la garanzia che gli elettrogeneratori funzionassero per circa venti giorni (come dev'essere), avrebbe permesso sia di ricaricarli che di ripristinare le linee elettriche, scongiurando una catastrofe. Vi ricordo che danni zero alla struttura per per l'onda e per il terremoto, in quanto **erano state correttamente progettate su tsunami ed antisismiche**. Purtroppo per *qualcuno*, questa **non è** la mia opinione ma del referto della IAEA in molta sintesi. La mia invece è quella che un Paese come il Giappone, che sta sopra una faglia così pericolosa, non avrebbe dovuto munirsi di Sistemi Energetici come gli Impianti Nucleari, e di darsi invece ad altri tipi di Power Plants come Eolico, visto il vento che c'è in Giappone(!), tutti i tipi di Solare (FV, Termico, Termodinamico), Geotermico, e Termoelettrico tradizionale.

Shield: le emissioni del reattore sono:

- elettromagnetiche X e Γ ;
- corpuscolari neutroni;

Le onde elettromagnetiche vengono assorbite da nuclei “grandi” che a loro volta emettono neutroni il quale recupero riemette onde elettromagnetiche; questo complica il disegno e l'attenzione alla progettazione degli schermi.

Lo schermo biologico è in cemento armato molto spesso, e, per non perdere le sue caratteristiche di assorbimento, le sue condizioni operative devono essere tali da garantirne il miglior funzionamento nelle condizioni prestabilite, per questo, viene sempre preceduto da uno schermo termico che ha il compito di evitare che i restanti apparati della centrale siano soggetti a riscaldamento con conseguente modifica delle caratteristiche, nonché, da “economizzatore” termico, “rimettendo” il calore verso l'interno del reattore. Spesso lo schermo termico è interno allo stesso vessel.



cernobylo5.jpg

Thermal Exchange: il calore viene prodotto dagli “urti” che hanno i prodotti di fissione di massa maggiore, e vengono a coinvolgere tutte le parti del nocciolo (chiaramente incluso le particelle del fluido termovettore). I prodotti rimangono confinati all’interno della guaina e post reazione si fermano rimanendo radioattivi e formando la carica esaurita. In linea di massima si può affermare che la ripartizione della produzione di calore è la seguente:

- 90÷93% all’interno delle barrette di combustibile;
- 4÷6% nel moderatore;
- 1÷2% nel riflettore;
- 0.7÷5% nella schermatura;

Si estrae quindi calore in corrispondenza delle barrette di combustibile che hanno la maggior parte di calore prodotto dalle reazioni, distribuendole in modo tale da avere una densità di potenza prodotto quasi uniformemente distribuita. Il limite alla produzione di calore e quindi della potenza prodotta è da ricercare nella massima potenza termica trasmissibile, che per qualsiasi macchina è di 10^6 [W/m²] corrispondente alla crisi termica.

Caratteristiche del fluido termovettore:

- elevata purezza;
- basso tasso d’assorbimento neutronico;
- coefficiente di capacità termica non troppo basso;
- tensione del vapore non troppo elevata;
- nel caso fosse in ebollizione bisogna fare attenzione che il vapore non crei isolamento;

MATERIALI

Vediamo i materiali. Scattering section è la probabilità che un atomo di quel materiale tipo faccia rimbalzare un eventuale neutrone che lo urti, mentre la capture section, la probabilità

che lo assorba. Importanti questi dati per il bilancio neutronico del reattore. Tutti i materiali, salvo le barre di controllo, dovrebbero avere altissima scattering section cosicchè tutti i neutroni rimbalzano su di essi e rimangano all'interno (fantascienza.); si scelgono materiali il più possibilmente vicino a queste caratteristiche. Le Control Rods, sono barre altamente assorbenti, quindi materiali ad alta Capture section, che inserite gradualmente (controllo) o bruscamente in caso di emergenza (scrum), assorbono i neutroni evitando che questi fissino nuclei fissili producendo energia.

Type	[amu]	Capture section	Scattering section	Density [kg/l]
H ₂ O	18.016	0,66	103	1
D ₂ O	20.03	0.006	13.6	1.1
C	12.011	0.004	4.8	1.6
B	10.82	755	4	2.45
Cd	112.41	2450	7	8.65
Ga	157.26	46000	Undefined	6.95
Fe(steel)	55.85	2.62	11	7.86
Zr	91.22	0.85	8	6.4
Mg	24.32	0.069	3.6	1.67

Tipologie di reattori moderati a grafite

Magnox

*magnox.gif*

1954 Obninsk URSS, primo reattore nucleare della storia. Era in realtà un prototipo da soli 5 [MW]. Reattore moderato a grafite tipo Magnox (racchiudiamolo in questa definizione anche se non è correttissima). Partendo comunque dai concetti fondamentali dello studio di questo tipo di reattori, vediamo quali sono le caratteristiche principali.

Al tempo, non vi erano tecniche di arricchimento dell'Uranio (ci sono voluti quasi 10 anni dopo il primo reattore), almeno per tecniche applicate industrialmente, ed allora bisognava usare l'Uranio naturale, ma questo comprometteva la neutronica e le dimensioni del reattore, molto grandi, e la scelta del materiale, che ricadde sul Magnesio, da qui nome Magnox; il magnesio veniva usato per fare effettivamente la struttura che contenevano gli elementi combustibili e tutto ciò vi fosse attorno alla zona dove avvenivano le reazioni, in modo da non compromettere la già scarsa neutronica, visto che si usava naturale. Alcuni dati:

- Ciclo termodinamico indiretto, ossia il fluido termovettore **non** era lo stesso del motore.
- Uranio naturale
- Moderato e riflesso a grafite
- Cilindro Vassel da **18.2 [m]**(!!enorme!!) di diametro, altezza **9,4 [m]**
- 3164 canali di diametro di diametro 105.0 [mm], 2929 dei quali per combustibile disposti in elementi a sezione quadrata
- Nuclear fuel (barre di combustibile) da 30 [mm] di diametro, 1 910 [mm], 23426 barre!
- Temperatura massima della guaina di magnesio 465 [°C] (pochissimo!!!)
- Fluido Termovettore CO₂, T_{ing} = 180 [°C] T_{out} = **390 [°C]**

- 28 Control Rods, 12 per lo scram
- 6 circuiti termici
- Pressione vapore: 53 [bar] max , 14,5 [bar] intermedia

Come potete vedere un vapore a 53 [bar] e 390 [°C], per non saper ne leggere ne scrivere, si intuisce che non avesse molta **potenzialità** e da lì poco cominciarono i grossi problemi di corrosione del Mg a quelle temperature di vapore.

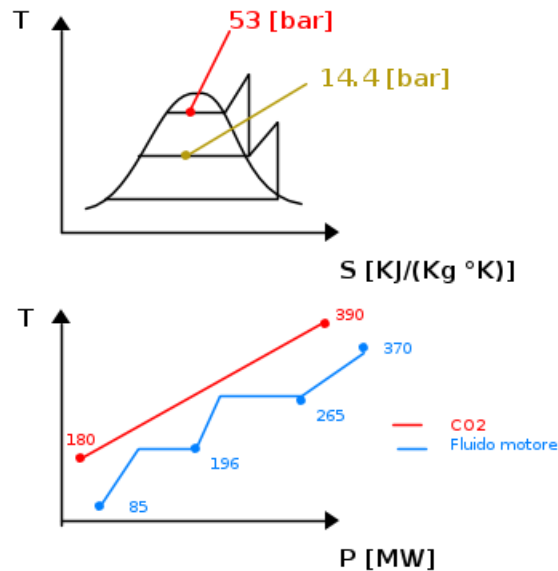
Attenzione (soprattutto agli Elettrici). Una struttura "grande", con dentro "tanto" fluido, non può sostenere una "grande" pressione dello stesso. Banalmente, ma dalla Teoria dei Gusci spessi di Costruzione meccaniche, se la pressione incontra una superficie elevata su cui scaricarsi genera tensioni (sforzi) molto elevate nel materiale stesso!

$$P = \frac{F}{A}$$

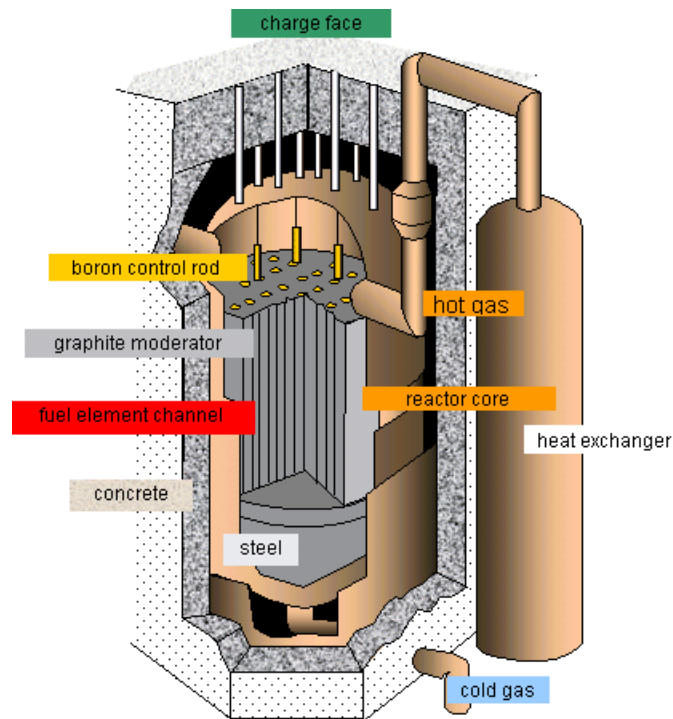
che vista al rovescio dice quello che ho appena espresso

$$F = PA$$

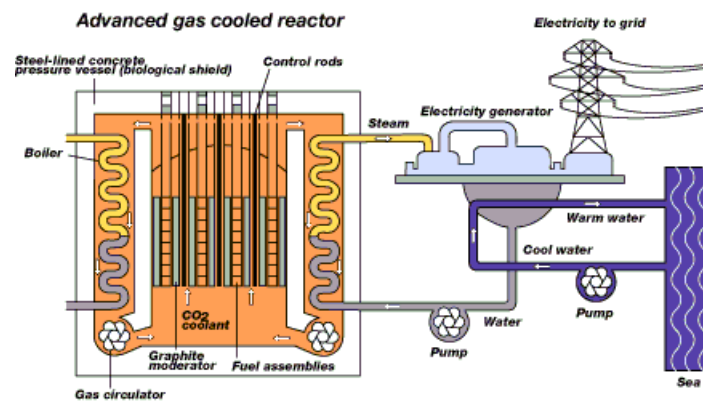
una grande superficie, a parità di sforzo, sopporta piccole pressioni.



Rispettivamente sono riportati a livello qualitativo, diagramma TS e diagramma termico di un Magnox

*mag2.gif*

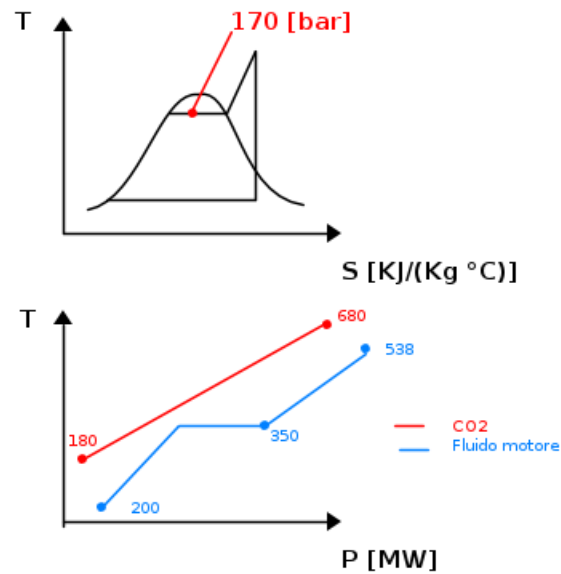
AGR Advanced Gas Reactor

*gas_reactor_cycle.gif*

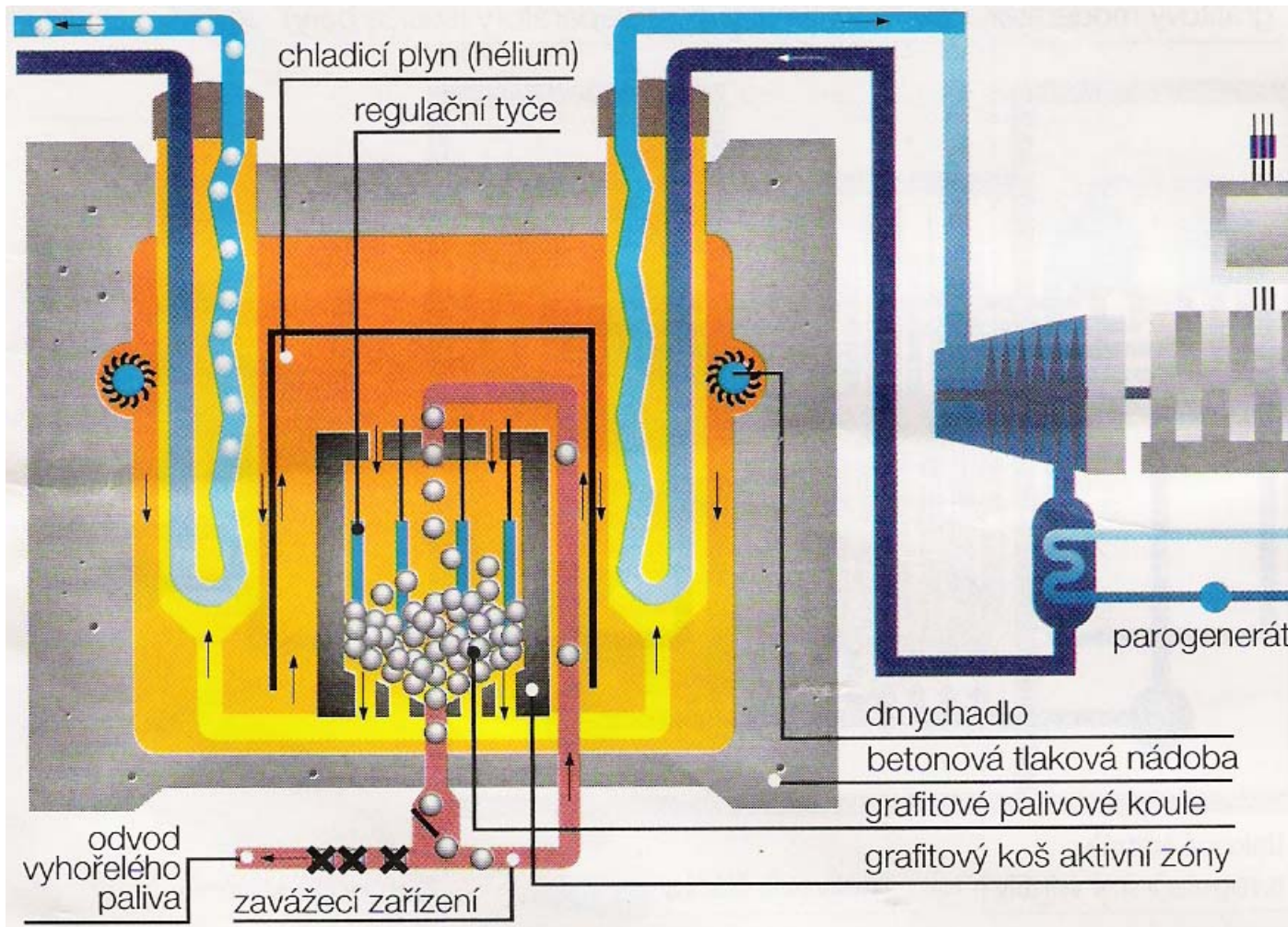
Nient'altro che l'evoluzione del Magnox. La possibilità industriale di poter arricchire leggermente il combustibile portò al possibile impiego di un materiale che resistesse di più alle temperature e spingesse di più i parametri termodinamici rendendoli più appetibili. Quindi:

- 308 elementi combustibili in **acciaio inox**

- Fluido moderatore e termovettore CO₂
- **Uranio leggermente arricchito 1.19/1.18 %**
- Pressione 34 [bar] (già meglio)
- 6 circuiti
- Densità di potenza: 2.4 [KW/l]
- **Temperatura del vapore 538 [°C]**
- **Presione vapore 170 [bar]**



HTGR: High Temperature Gas Reactor



HTGR.gif

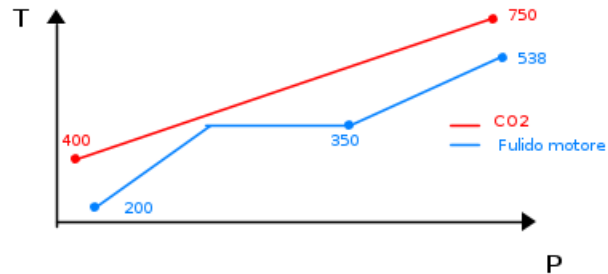
L'evoluzione dell'evoluzione. Ne esiste solo uno, mentre di Magnox e AGR ce sono stati parecchi, adesso credo commissionati. Bando alle ciance, questi reattori sono stati sempre snobbati da tutti ed adesso forse rappresenteranno il futuro dei reattori a fissione (visto il parco energetico mondiale, la disponibilità di combustibile nucleare e l'aumento della sicurezza, futuro più che certo).

Cos'hanno di così speciale? Descriviamoli:

- Fluido termovettore **Elio**
- Combustibile a forma di sferette di acciaio del diametro di 0.2 / 0.4 [mm] arricchito al **93 %**; la sferette non si rompono, perchè anche se vi sono reazioni nucleari che alzano la pressione al loro interno, la superficie dove essa si scarica è piccolissima
- sono reattori Breeder, cioè producono altro fissile, condizione favorita dall'enorme grado di arricchimento
- 675000 sferette

- struttura in grafite

Non so se vi salta all'occhio, ma la possibilità di avere un fluido termovettore così, cioè che è sempre allo stato gassoso (non buono termicamente), ma svincolato da livelli di temperatura, permette di scindere i circuiti motori (che possono essere totalmente simili ai tradizionali termoelettrici, da quello termovettore. Adesso è sotto studio, e s cerca di rifarlo per potenze molto grandi.



Conclusioni

Abbiamo visto velocemente la storia dei primi reattori nucleari, molte potrebbero essere le Vostre altre conoscenze, ma mi sono limitato alla base per lo studio di questi reattori. A parte l'HTGR, ormai nessuno si sognerebbe di fare dei reattori del genere. Vi lascio con i dati dei vari Burn-up di queste tre tipologie di reattori.

- Magnox: **3500 [Md/ton]**
- AGR: 18000 [Md/ton]
- **HTGR: 100.000 [Md/ton]**

Estratto da ["https://www.electroyou.it/mediawiki/index.php?title=UsersPages:Ingiuseppe:impianti-nucleari-di-potenza-2"](https://www.electroyou.it/mediawiki/index.php?title=UsersPages:Ingiuseppe:impianti-nucleari-di-potenza-2)