

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

Reattori raffreddati a gas - GCR

Si tratta di reattori nucleari termici eterogenei moderati a grafite e refrigerati a gas, anidride carbonica CO₂ oppure elio He. I **GCR-Gas Cooled Reactor** di prima generazione utilizzavano uranio naturale metallico come combustibile e lega di magnesio per l'incamiciatura.

Gli impianti successivi utilizzavano combustibili a ossido di uranio a basso arricchimento in un'incamiciatura di acciaio inossidabile.

Il moderatore era costituito da un blocco di mattoni di grafite attraversati dai canali del combustibile.

La grafite, molto diffusa e a basso costo, è caratterizzata da buoni valori di potere di rallentamento dei neutroni e da una bassa sezione d'urto di assorbimento dei neutroni, il che la rende una valida alternativa all'acqua leggera e pesante.

A causa dei valori piuttosto bassi della densità di potenza del nocciolo (dell'ordine di 1 MW/m³), il tipico reattore moderato a grafite è molto meno compatto di un reattore moderato ad acqua leggera di pari potenza.

Nel corso dello sviluppo tecnologico questa tipologia di reattori, si è passati dalla versione originaria **MAGNOX (Magnesium Non-OXidizing)**, che prende il nome dalla lega di magnesio-alluminio sviluppata per incamiciare le barre di combustibile ad uranio naturale, a quella avanzata **AGR - Advanced Gas-cooled Reactor**, che rappresenta una versione sviluppata a partire dal precedente. Entrambi raffreddati ad anidride carbonica, utilizzano combustibili diversi: uranio naturale il primo, uranio leggermente arricchito il secondo, incamiciato in una guaina di acciaio inossidabile.

I GCR offrono potenziali vantaggi operativi e di sicurezza rispetto ai reattori raffreddati ad acqua.

Dal punto di vista operativo, consentono di ottenere una migliore efficienza di conversione dell'energia, da termica a elettrica, dovuta ad una più alta temperatura di esercizio del refrigerante senza peraltro aumentare di molto la pressione operativa.

Infatti, mentre i reattori raffreddati ad acqua raggiungono un'efficienza di conversione energia termica-elettricità di circa il 32-34%, un GCR può operare a temperature del gas fino a circa 650°C con pressioni del gas inferiori a 1 Mpa e produrre un'efficienza di conversione dell'energia superiore al 40% se si utilizza una turbina a vapore o fino al 50% se si utilizza una turbina a gas avanzata.

Le limitate pressioni di esercizio rendono inoltre meno costosa la realizzazione del contenitore a pressione.

Dal punto di vista della sicurezza, per la tipologia di combustibile e incamiciatura utilizzati, a differenza degli LWR, vengono evitate in condizioni incidentali le reazioni chimiche vapore acqueo-zirconio che possono rilasciare idrogeno gassoso esplosivo.

I primi MAGNOX ad essere collegati alla rete elettrica furono i quattro reattori di Calder Hall (oggi Sellafield), costruiti nel 1956 sulla costa occidentale della Cumbria a 130 km a nord-ovest di Manchester, UK. Erano reattori a duplice uso, ossia producevano sia plutonio che energia elettrica.

Calder Hall è stato il primo sito nucleare al mondo in grado di produrre energia elettrica su scala industriale: 35 MWe netti per reattore, 140 MWe totali.

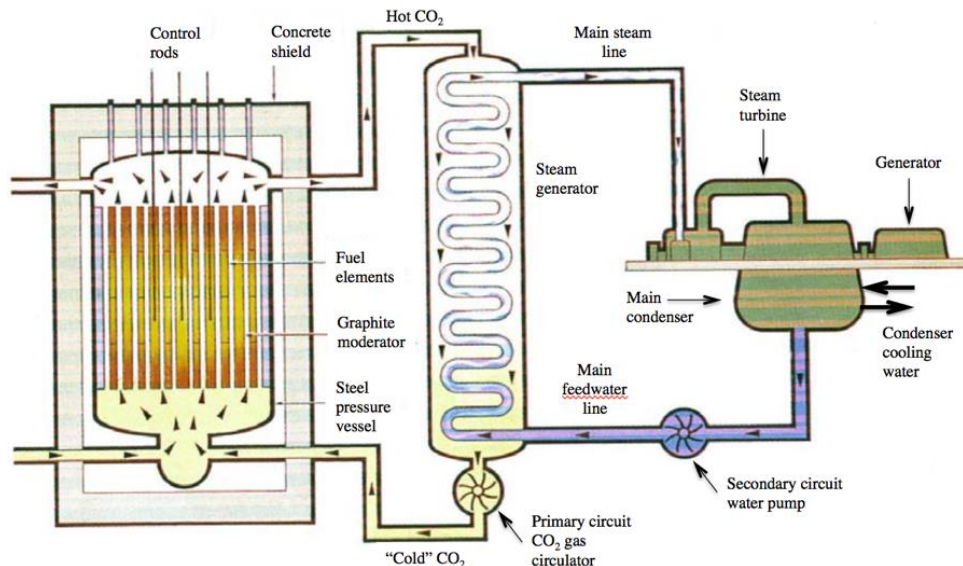
Anche in Italia è presente un reattore MAGNOX: la centrale nucleare di Latina da 220 MWe, operativa dal 1962 al 1986.

Funzionamento

Il funzionamento a regime di un impianto Magnox è schematizzato nella seguente figura.

Nel primario costituito da un circuito chiuso in acciaio, la circolazione forzata di CO₂ trasferisce il calore generato nel nocciolo ad un circuito secondario, in cui l'acqua, lato tubi, viene riscaldata e convertita in vapore. Questo aziona la turbina collegata ad un alternatore per produrre elettricità.

Il vapore scaricato dalle turbine viene condensato nei condensatori principali e restituito ai generatori di vapore. Un sistema di circolazione dell'acqua trasferisce il calore residuo dai condensatori a delle torri di raffreddamento o ad uno specchio d'acqua.

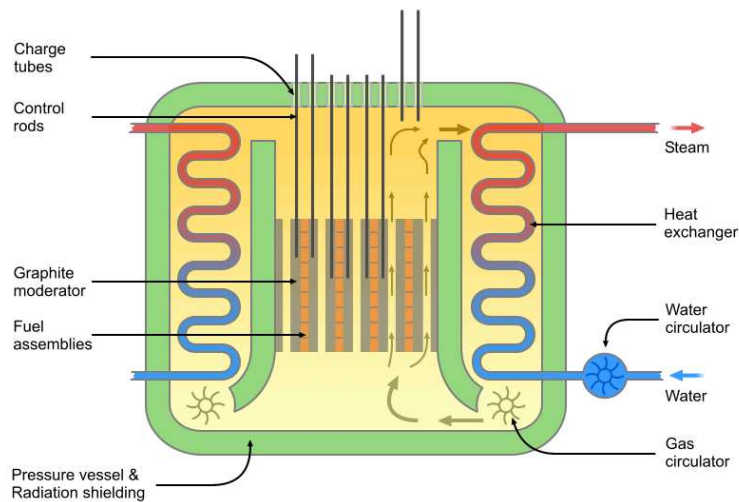


Gli AGR rappresentano l'evoluzione tecnologica dei Magnox. Grazie all'utilizzo di ossido di uranio leggermente arricchito come combustibile nucleare, essi possono funzionare ad una temperatura del refrigerante più alta rispetto a quella del loro ascendente, raggiungendo i 650°C, migliorando in tal modo l'efficienza termica (~40%) e rendendola comparabile con quella di un impianto convenzionale.

La maggiore temperatura di esercizio richiede un rivestimento del combustibile in acciaio inossidabile, caratterizzato da una sezione d'urto di cattura neutronica più elevata rispetto alla lega di magnesio.

Per questo motivo è necessario arricchire il combustibile, che è pertanto costituito da pellet di ossido di uranio arricchito al 2,5-3,5%.

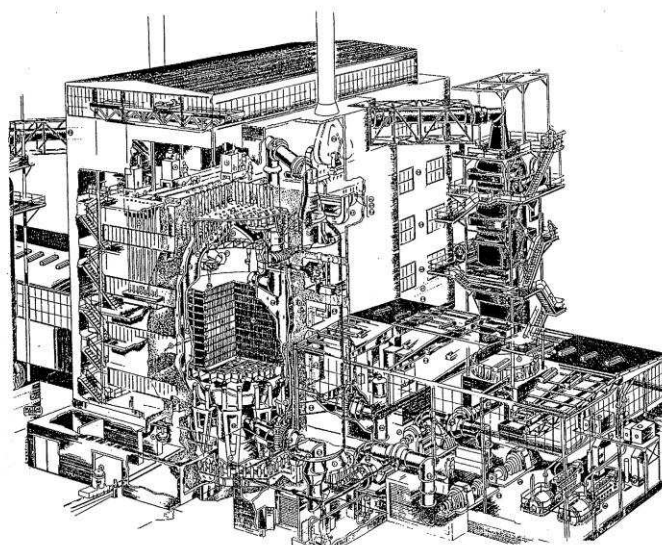
La temperatura della grafite non supera mai i 400°C. Le barre di controllo penetrano nel moderatore dall'alto e un sistema di spegnimento secondario prevede l'iniezione di azoto nel refrigerante.



Confronto tra MAGNOX e AGR

	Combustibile	Moderatore	Refrigerante/ Pressione MPa	Temperatura di uscita gas	Efficienza del ciclo vapore	Caratteristiche di sicurezza ed economiche
MAGNOX	U naturale metallico 0,7%; incamiciatura in lega di magnesio	Grafite	CO ₂ /1	330 - 360°C	31%	Refrigerante senza cambiamenti di fase. Refueling continuo→alto fattore di utilizzazione
AGR	UO ₂ arricchito al 2,2-2,7 %; incamiciatura in acciaio inox	Grafite	CO ₂ /4	650°C	42%	Stesse caratteristiche di sicurezza del Magnox, ma con più alte temperature e pressioni di esercizio→efficienza del ciclo più alta

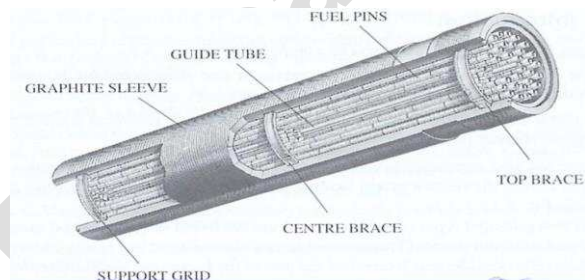
Caratteristiche costruttive e di funzionamento tipiche di un MAGNOX (Calder Hall) e AGR (Hinkley Point B)





	MAGNOX	AGR
Pressione di esercizio della CO ₂ , MPa	0,7	4
Potenza termica tipica, MWth	182	1500
Potenza elettrica, MWe	46	660
Efficienza termica, %	23	~41,1
Diametro attivo del nocciolo, m	9,45	9,1
Altezza attiva del nocciolo, m	6,4	8,3
Diametro/altezza/spessore del vessel, m	~ 11,28/21,3/0,051	19/17,7/5
Materiale del vessel	Acciaio dolce A-kill	Calcestruzzo precompresso con liner in acciaio inox
Numero di circuiti (loop)	4	4
Temperature ingresso/uscita refrigerante, °C	~ 140/336	~ 288/634
Portata di CO ₂ nel primario, Mg/s	~ 0,89	3,68
Temperatura del vapore, °C	~ 310	538
Pressione del vapore, MPa	1,4	16

Caratteristiche di un elemento di combustibile MAGNOX e AGR



	MAGNOX	AGR
Arricchimento medio pellet UO ₂ , %	0,72	2,2 – 2,7
Numero di canali di combustibile	1696	308
Numero di elementi di combustibile per canale	6	8
Diametro esterno dell'elemento di combustibile, mm	29,2	190
Lunghezza totale dell'elemento di combustibile, m	1,016	1,036
Passo medio tra elementi di combustibile, mm	203	460
Massa totale del combustibile, Mg	120	129
Numero canali barre di controllo	112	81
Combustibile	U metallico	UO ₂
Incamiciatura barrette	Magnox C	Acciaio inox
Barre di controllo	Acciaio borato	Acciaio borato

Un'ulteriore filiera appartenente al concetto di reattore raffreddato a gas è rappresentata dai reattori ad alta temperatura **HTR-High Temperature Reactor** e **HTGR-High Temperature Gas-cooled Reactor**, sviluppati in alcuni paesi, tra cui gli Stati Uniti, la Germania e il Regno Unito.

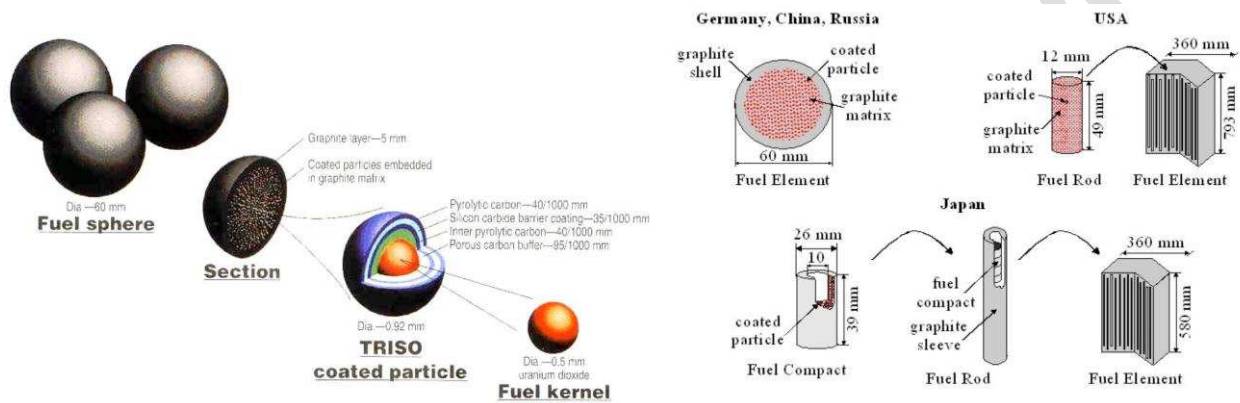
Sono reattori refrigerati a Elio, preferito alla CO₂ sia per l'ottima compatibilità chimica con i materiali strutturali che per l'elevato calore specifico.

Il solo materiale strutturale impiegato è la grafite. Nel nocciolo interamente ceramico, il combustibile nucleare è rappresentato da microsferi di diametro dell'ordine del millimetro costituite da ossidi o carburi di Uranio e di Torio con arricchimento che va dal 20 al 93% in fissile.

Le microsfele sono a loro volta incapsulate in strati concentrici di carbonio pirolitico e di carburo di silicio, in grado di assicurare la ritenzione dei prodotti di fissione anche ad alti valori del tasso di bruciamento del combustibile.

Una microsfera eroga tipicamente una potenza termica di 0,1W (10^{10} numero medio di microsfele presenti in un reattore) ad una temperatura di picco del combustibile che può raggiungere i 1250°C.

A seconda del progetto, sono stati sviluppati differenti tipi di elementi di combustibile: elementi di tipo a sfera o *Pebble*; elementi di tipo *Block type*, dove le microsfele sono inserite in una matrice di grafite; elementi di tipo Pin-in-Block, simili ai precedenti ma forati centralmente e incamiciati prima di essere inseriti in una matrice di grafite.

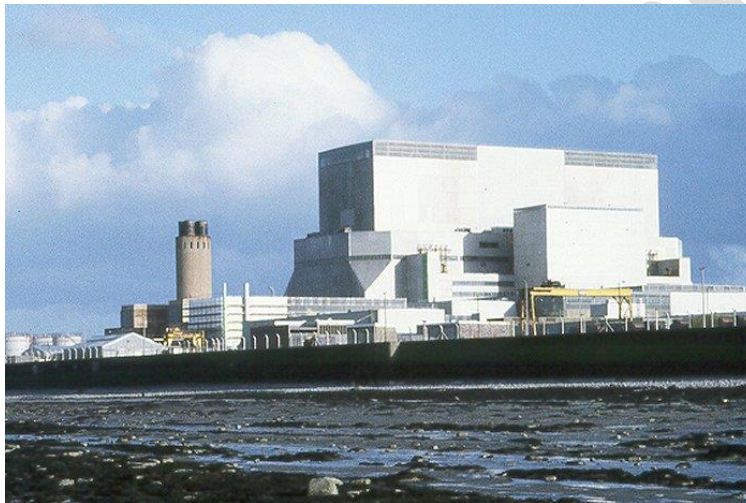


Il nocciolo di questa tipologia di reattori presenta diverse caratteristiche favorevoli:

- L'elevata temperatura degli elementi di combustibile consente il raggiungimento di temperature per l'Elio refrigerante di 750-900°C, portando a rendimenti molto elevati del ciclo termodinamico: pari al 40% nel caso di scambio termico elio-acqua-vapore a 19Mpa e 550°C e del 50% nel caso di turbine a elio a ciclo diretto;
- La struttura del nocciolo in materiali ceramici, con assenza di assorbitori parassiti come l'acciaio, consente un'ottima economia neutronica e il raggiungimento di tassi di bruciamento del combustibile molto elevati;
- L'ottima economia neutronica consente una certa flessibilità nella scelta del ciclo di combustibile. Si può pertanto utilizzare sia il ciclo U-Pu che quello U-Th;
- Impossibilità di cambiamento di fase del refrigerante o del moderatore, coefficiente di temperatura negativo (maggiore temperatura del combustibile, reattività autostabilizzante), assenza di pericoli di fusione, grande calore specifico del refrigerante, insensibilità del nocciolo a escursioni di temperatura.



Centrale nucleare MAGNOX di Latina, Italia



Reattore nucleare AGR Hinkley Point B, Regno Unito



Reattore HTGR, provincia dello Shandong, Cina