

Capitolo 1 - I reattori HTR

1.1 - Considerazioni preliminari

Alla metà degli anni '50, una serie di studi sul reattore a gas ad alta temperatura sono stati iniziati in paesi differenti come il Regno Unito, gli Stati Uniti e la Germania. Essi hanno infine condotto alla costruzione di tre prototipi (*DRAGON* nel Regno Unito, *Peach Bottom* negli Stati Uniti e *AVR* in Germania). Questi reattori [1.1] sono caratterizzati da un *core* completamente ceramico e da un refrigerante neutronicamente non attivo e non corrosivo (He) in modo da poter avere alte temperature operative. Il combustibile è costituito da una miscela semi-omogenea di uranio e/o torio e/o plutonio in forma di ossidi (o, al limite, di carburi) all'interno di una struttura di grafite che svolge le funzioni di moderatore e di riflettore. E' stato possibile raggiungere un alto burnup del combustibile grazie alla diluizione del combustibile ed al migliore comportamento della grafite irraggiata rispetto al rivestimento metallico. Gli alti fattori di conversione attesi erano dovuti all'assenza di veleni neutronici nella grafite e alle proprietà neutroniche eccellenti dell' U^{233} ottenuto dalla fertilizzazione del Th^{232} . La grande capacità termica del core e la sua bassa densità di potenza costituiscono la ragione della lenta progressione dei potenziali incidenti con molto tempo a disposizione per l'intervento. La autoregolazione del reattore in seguito ad escursioni di reattività è garantita da un intrinseco coefficiente negativo di temperatura. Queste caratteristiche sono alla base dell'interesse per lo sviluppo dei reattori a gas ad alta temperatura (o HTGR, High Temperature Gas cooled Reactor, come questi reattori sono chiamati negli Stati Uniti).

1.2 - Caratteristiche del combustibile

Nei primi progetti, il combustibile (ossido o carburo di uranio) era posto semplicemente in un rivestimento di ceramica; ciò conduceva ad un rilascio molto alto dei prodotti di fissione nel circuito primario. Di conseguenza, l'AVR ed il DRAGON sono stati progettati con un doppio contenitore a pressione e con sistemi altamente specializzati di purificazione dell'elio.

L'innovazione fondamentale nel campo della tecnologia degli HTR è stata l'invenzione della particella rivestita del combustibile (CP, Coated Particle) che è stata concepita praticamente allo stesso tempo (1957-1961) dall' UKAEA in Gran Bretagna (*Huddle, Goeddel*) e da Battelle (*Oxley*) negli Stati Uniti. Nessun brevetto è stato richiesto per questa pietra miliare della tecnologia degli HTR.

Il piccolo *kernel* di combustibile fatto di carburo di uranio, di ossido di uranio o di una miscela di entrambi (ossicarburo di uranio) è ricoperto da strati differenti di grafite e carburo di silicio che vengono depositati in successione in un reattore a letto fluido tramite pirolisi di idrocarburi [1.2]. I kernel di combustibile vero e proprio sono precipitati in forma sferica da una soluzione di nitrato di torio o di uranile in un precipitante di ammoniaca usando ugelli vibranti. I kernel ad alta densità di ossido di uranio e/o torio e/o plutonio sono ottenuti dopo il lavaggio, l'essiccamento e la sinterizzazione. I kernel di carburo sono prodotti in modo simile.

Ci sono principalmente due tipi di CP:

- la particella BISO che ha uno strato poroso attorno al kernel e due strati più esterni di grafite pirolitica ad alta densità;
- la particella TRISO che possiede uno strato aggiuntivo di carburo di silicio (SiC) fra i due strati di grafite pirolitica, strato che fornisce una resistenza strutturale e serve anche come barriera altamente efficiente contro la fuoriuscita dei prodotti di fissione.

Le particelle BISO sono state prodotte in grandi quantità per i primi reattori HTR sperimentali e dimostrativi mentre le particelle TRISO (fig. 1.1 e 1.2) sono state sviluppate successivamente per gli HTR con ciclo diretto di elio in turbina che richiedono un circuito primario molto pulito.

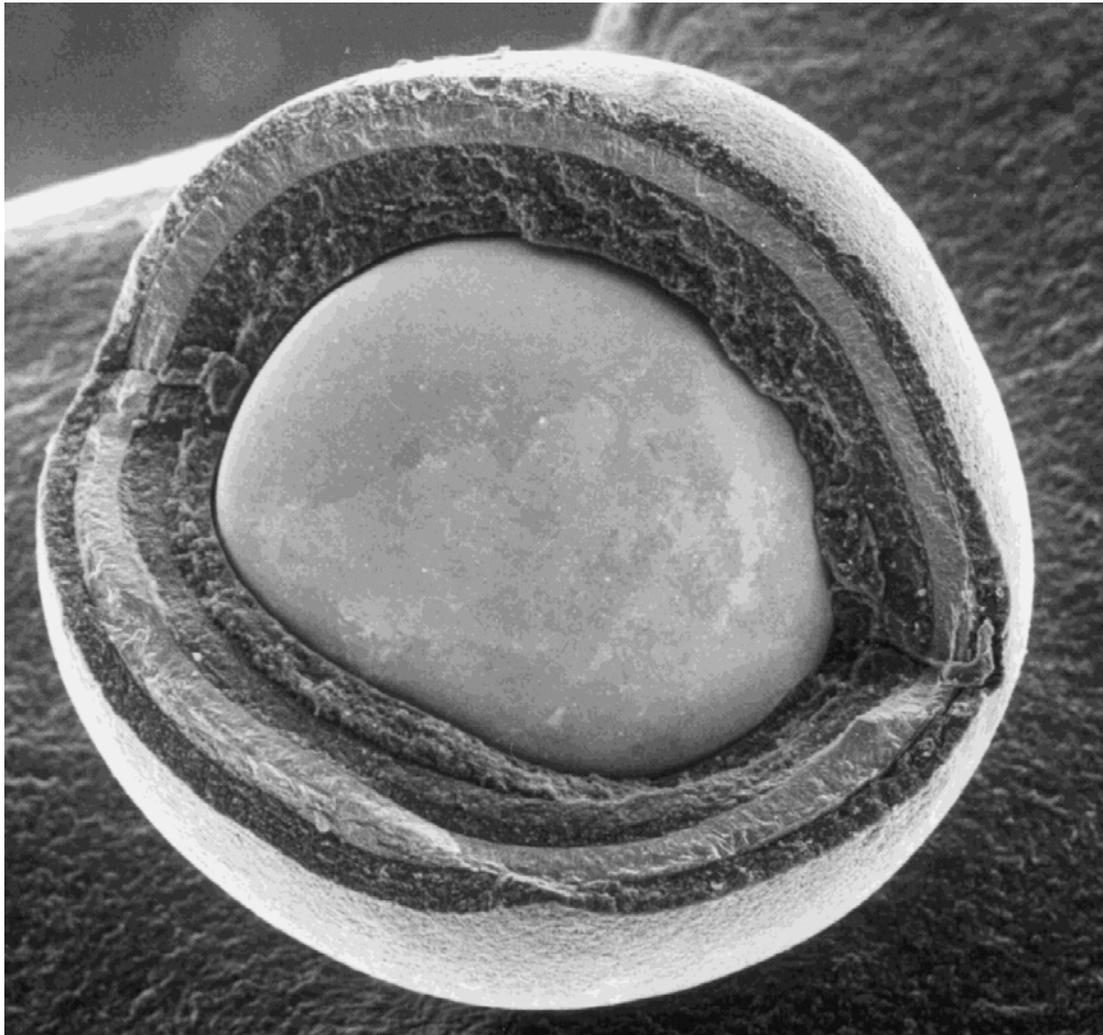


Figura 1.1 - TRISO CP

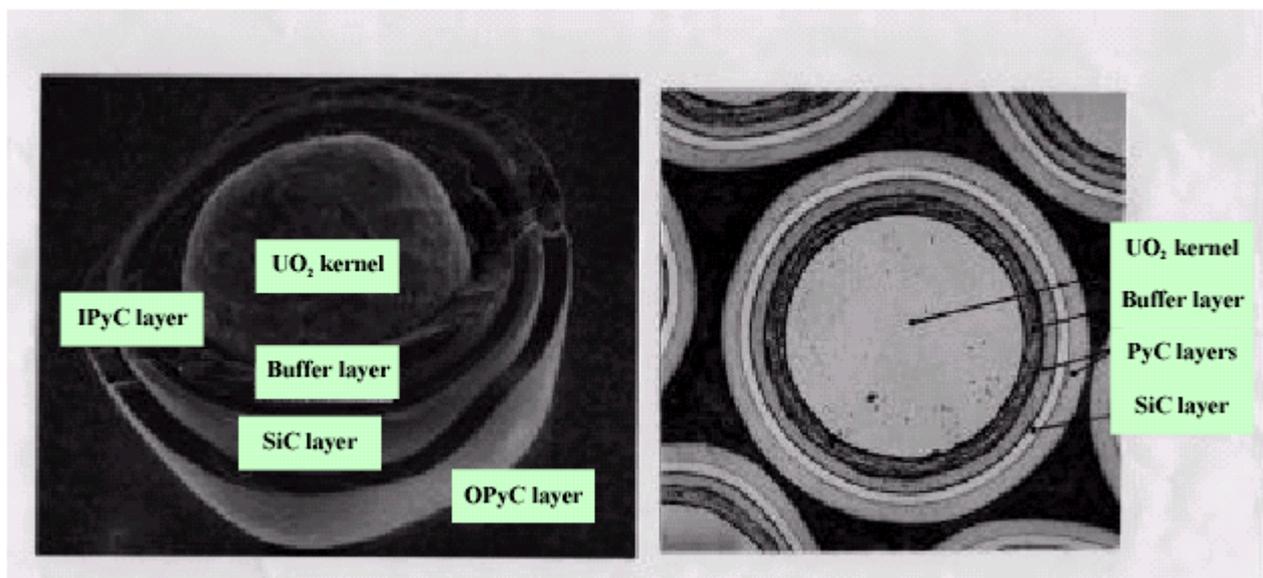


Figura 1.2 - Struttura interna della TRISO CP

Differenti tipi di elemento di combustibile sono stati sviluppati per gli HTR (fig. 1.3):

- elementi di tipo a sfera o *Pebble* (omogenea distribuzione delle CP nelle pebble stesse come mostrato in fig. 1.4);
- elementi di tipo *Block type* (CP concentrate in compact costituenti le barrette a loro volta inseriti in un matrice di grafite come mostrato in fig. 1.5);
- elementi di tipo *Pin-in-Block* (dove i compact simili ai precedenti ma forati centralmente sono incamiciati prima di essere inseriti in un matrice di grafite).

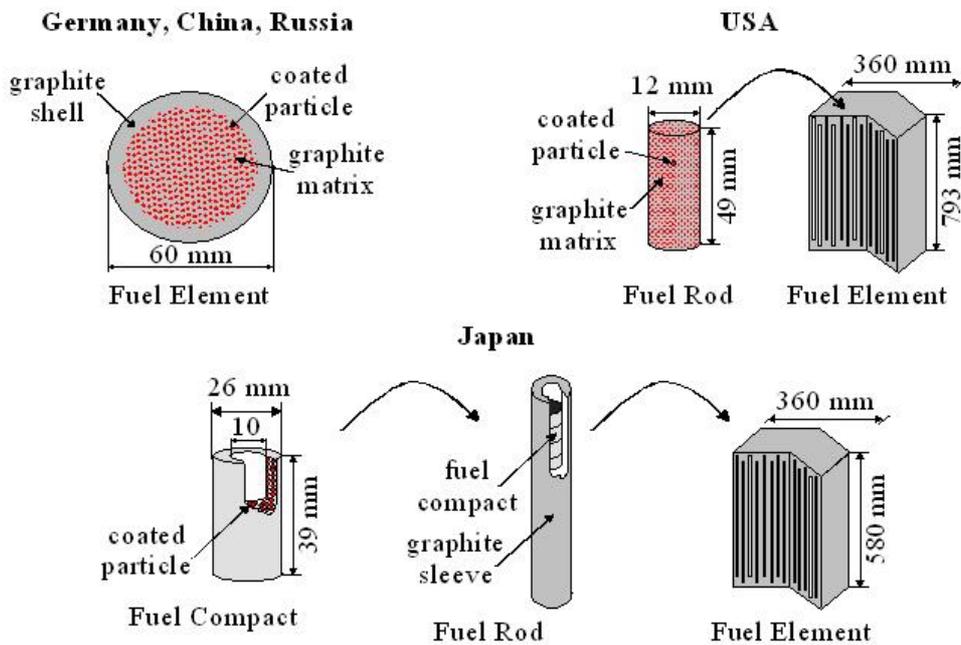


Figura 1.3 - Differenti tipi di elemento di combustibile per HTR

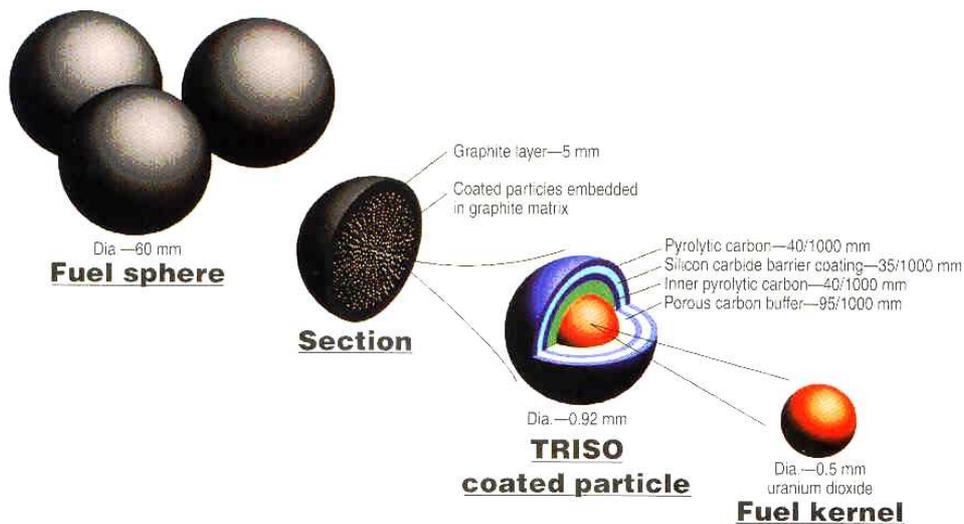


Figura 1.4 - Elementi di combustibile del tipo a pebble

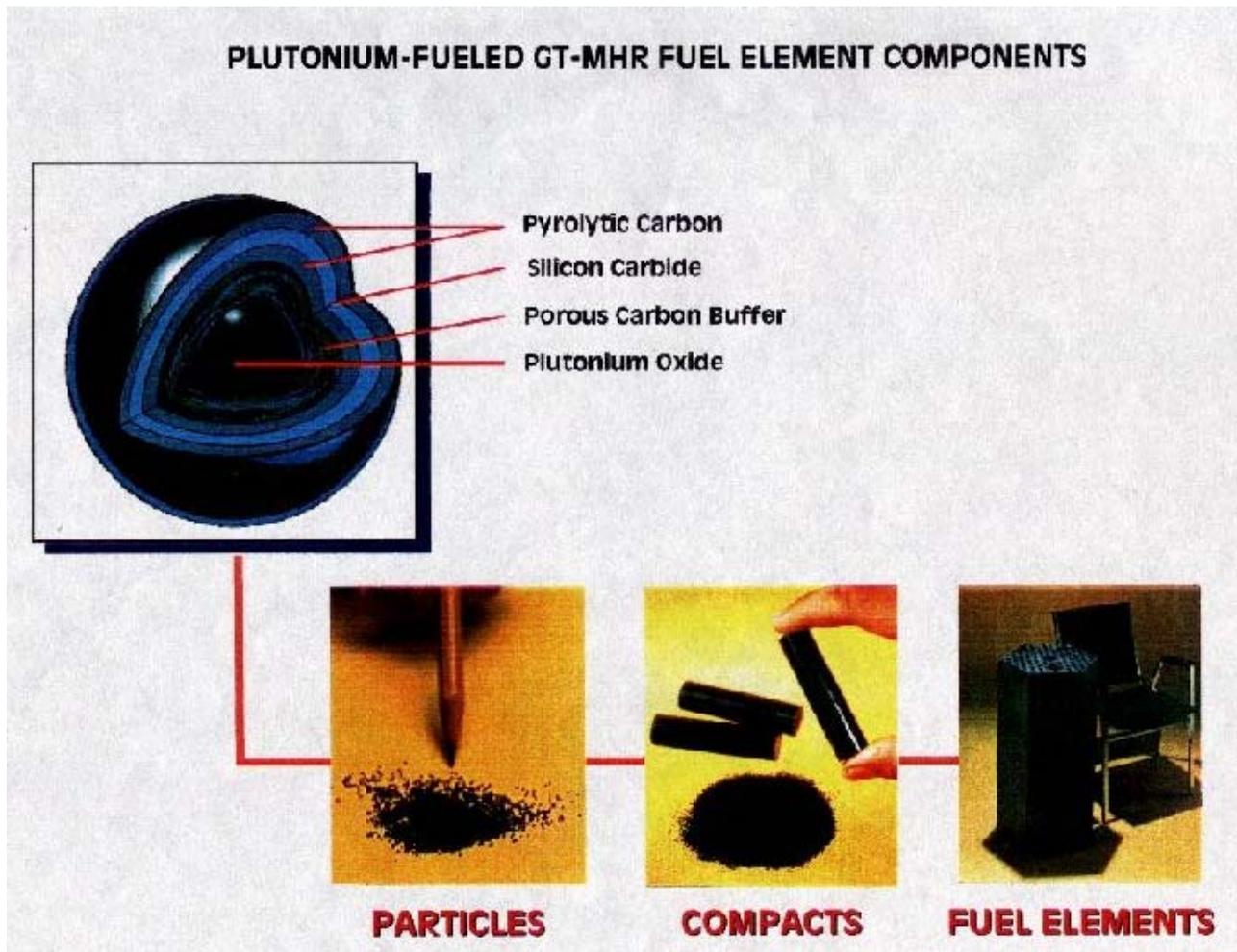


Figura 1.5 - Elementi di combustibile di tipo block type [1.3]

Il tipo dell'elemento combustibile è l'elemento determinante per il progetto del core e per lo schema di *refuelling*. Quest'ultimo può essere realizzato senza spegnere il reattore, se questo adotta un elemento di tipo pebble; in questo caso le pebble fresche possono essere inserite dalla parte superiore ed estratte da quella inferiore una volta verificato il raggiungimento del burnup previsto. Il riutilizzo multiplo delle stesse pebble (MEDUL) è prassi comune negli HTR. Questo tipo di refuelling ha ovviamente il vantaggio di non richiedere un surplus di reattività per compensare il burnup del combustibile.

I reattori HTR basati sull'elemento di combustibile a blocchi devono necessariamente prevedere la fermata dell'impianto per il refuelling. In questo caso è anche necessario prevedere un sistema di compensazione della perdita di reattività con il burnup basato sulla movimentazione delle barre di controllo e/o sull'uso di veleni bruciabili.

1.3 - Aspetti di sicurezza

L'elemento fondamentale della sicurezza per i reattori HTR è costituito dal fatto che gli esperimenti di surriscaldamento per simulare situazioni incidentali hanno indicato che i prodotti di fissione sono trattenuti praticamente del tutto (in assenza di acqua e di aria) nelle particelle TRISO per temperature inferiori a 1600 °C (fig. 1.6 e 1.7).

Inoltre la bassa densità di potenza tipica di questi reattori (qualche KW/l) fa sì che anche questa temperatura non venga mai raggiunta.

Uno dei più importanti contributi alla dimostrazione sperimentale della sicurezza intrinseca dei reattori HTR è stata fornita nel 1988 con la simulazione di un incidente di perdita completa del refrigerante per il reattore AVR. Questa simulazione ha dimostrato che, durante il transitorio di LOCA, le temperature del combustibile e dei componenti rimangono sotto i limiti di rischio e che il coefficiente di temperatura si conserva negativo. E' anche opportuno sottolineare che in questa esperienza il calore è stato rimosso dal nocciolo esclusivamente con mezzi passivi, così come dovrebbe accadere negli attuali HTR. L'importanza di questo esperimento risiede nel fatto che è stato dimostrato sperimentalmente il possesso da parte degli HTR delle caratteristiche di sicurezza intrinseca in caso di LOCA, confermando i risultati ottenibili ed ottenuti per via teorica con opportuni codici di calcolo.

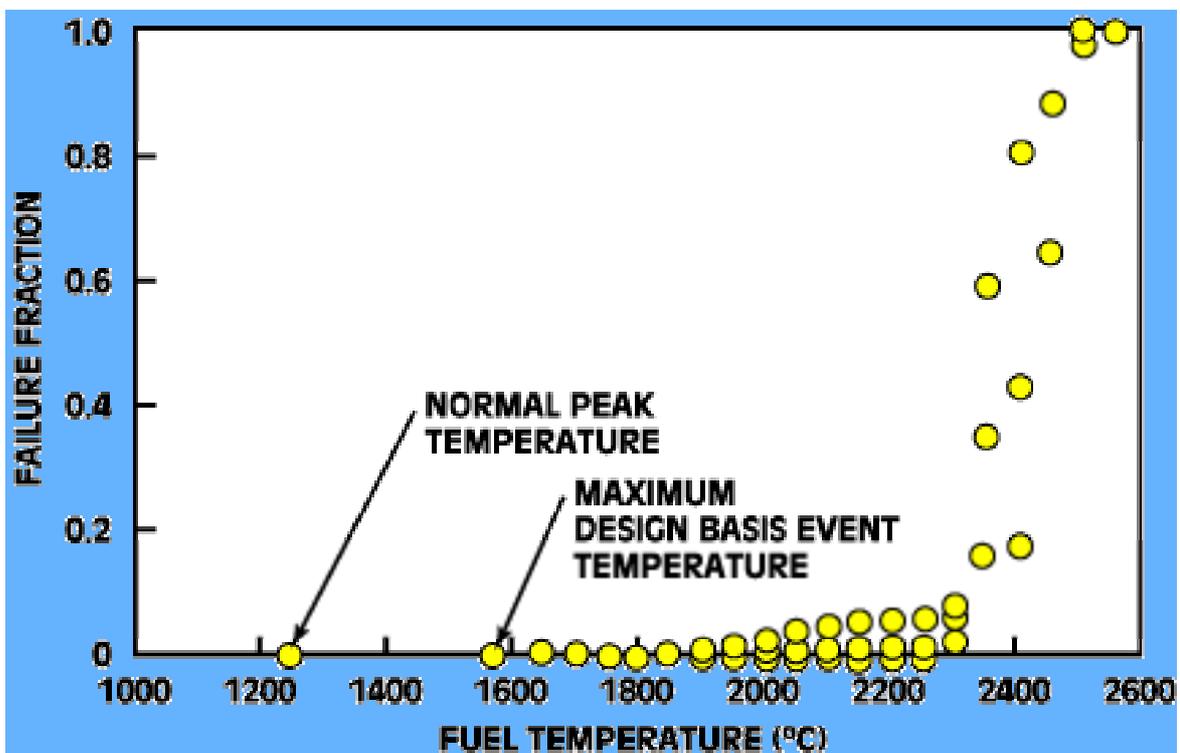


Figura 1.6 - Frazione di rottura delle microsferi in funzione della temperatura (in assenza di acqua e di aria)

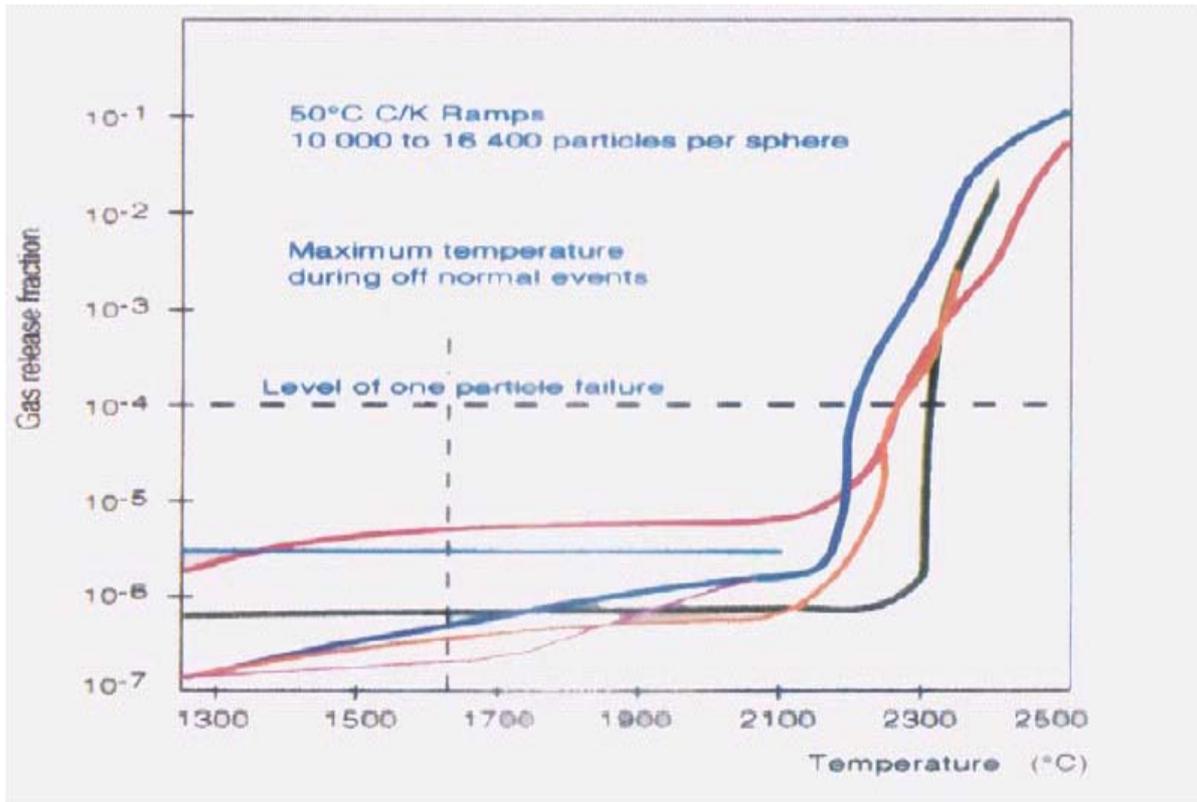


Figura 1.7 - Frazione di rilascio dei prodotti di fissione gassosi in funzione della temperatura (in assenza di acqua e di aria)

Un passo fondamentale ai fini della sicurezza, oltre che dell'economia, è stato il passaggio al ciclo diretto, escludendo la possibilità di ingresso di acqua nel nocciolo ed apportando notevoli semplificazioni impiantistiche. La fig. 1.8 indica gli elementi dell'impianto che sono stati eliminati.

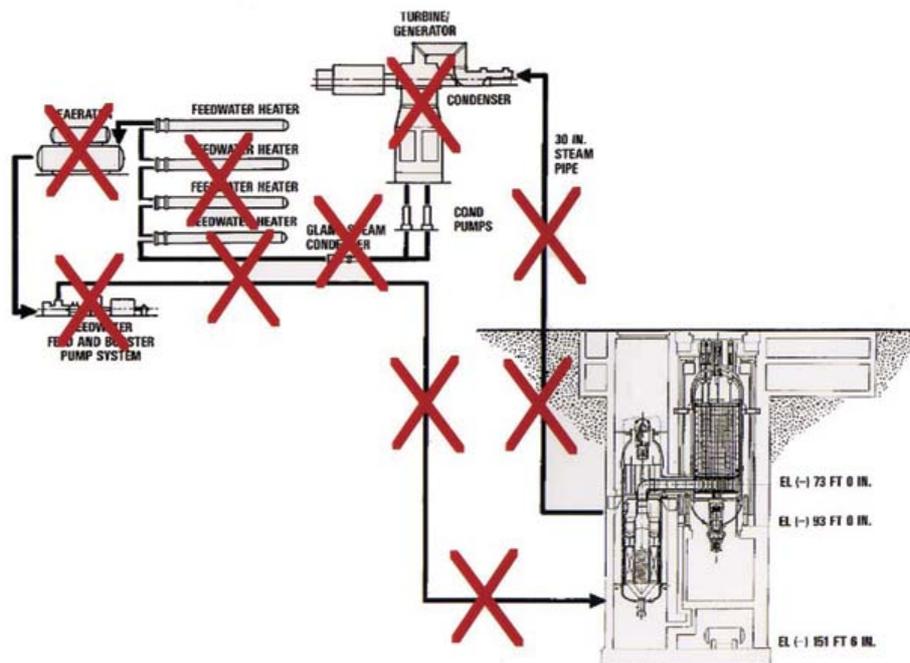


Figura 1.8 - Semplificazioni apportate nel progetto GT-MHR rispetto ad un LWR (classico)

Questa possibilità ha condotto quindi allo sviluppo dei reattori a temperatura elevata modulari (MT-HTR) che sono progettati (densità di potenza bassa e più alto rapporto di altezza/diametro del core) in modo che questa temperatura non possa essere oltrepassata, neppure nel caso di depressurizzazione, sfruttando la rimozione passiva di calore di decadimento (fig. 1.9). Tutte le simulazioni numeriche di transitori sviluppate dalla General Atomics, dalla Framatome, dalla JAERI, dal progetto HTR-L e dalla CEA (fig. 1.10) hanno confermato che in nessun caso in nessun punto del core la temperatura di 1600 °C viene mai raggiunta.

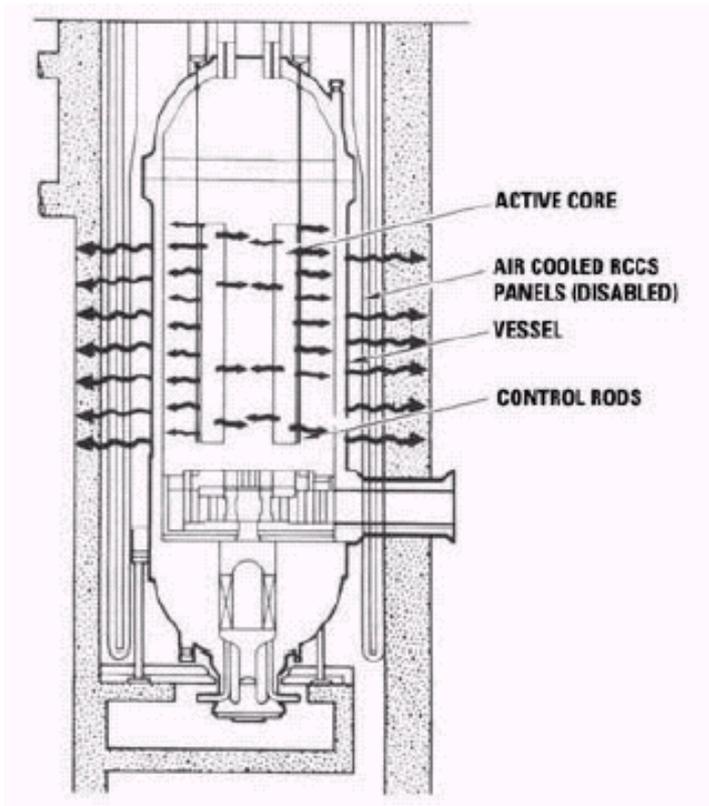


Figura 1.9 - Irraggiamento e conduzione passivi al contenimento

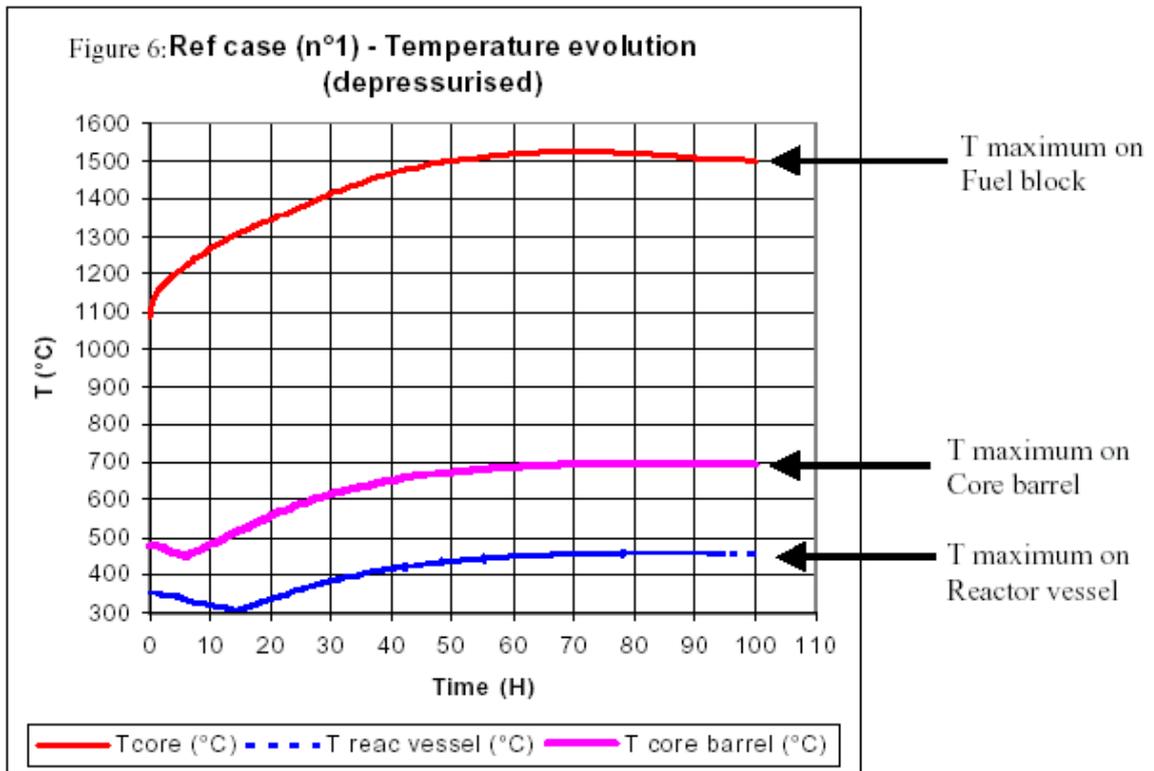


Figura 1.10 - Temperatura massima in funzione del tempo durante il transitorio di depressurizzazione [CEA]

Dal punto di vista della sicurezza, l'introduzione del ciclo diretto ha, di fatto, eliminato la possibilità dell'incidente conseguente all'ingresso di acqua nel core.

Diversa è la situazione relativa al secondo tipo di transitorio incidentale: l'ingresso di aria nel core ad alta temperatura può dar infatti luogo a reazione fra essa e la grafite [1.4]. Per ciò che concerne l'interazione con le CP, oltre alla già citata reazione con la grafite, si può sviluppare una reazione con lo strato di carburo di silicio con formazione di ossido di silicio. Il tasso di questa reazione è legato alla diffusività dell'ossigeno nell'ossido di silicio che si viene formando. Tale diffusività raggiunge valori considerevoli per temperature superiori ai 1250°C (figura 1.11).

Experimental results on TRISO-cp behaviour in air:

Failure fraction of fuel particles within fuel spheres during heating in air at 1300 °C and of 10 intact, unbonded particles at 1500 °C

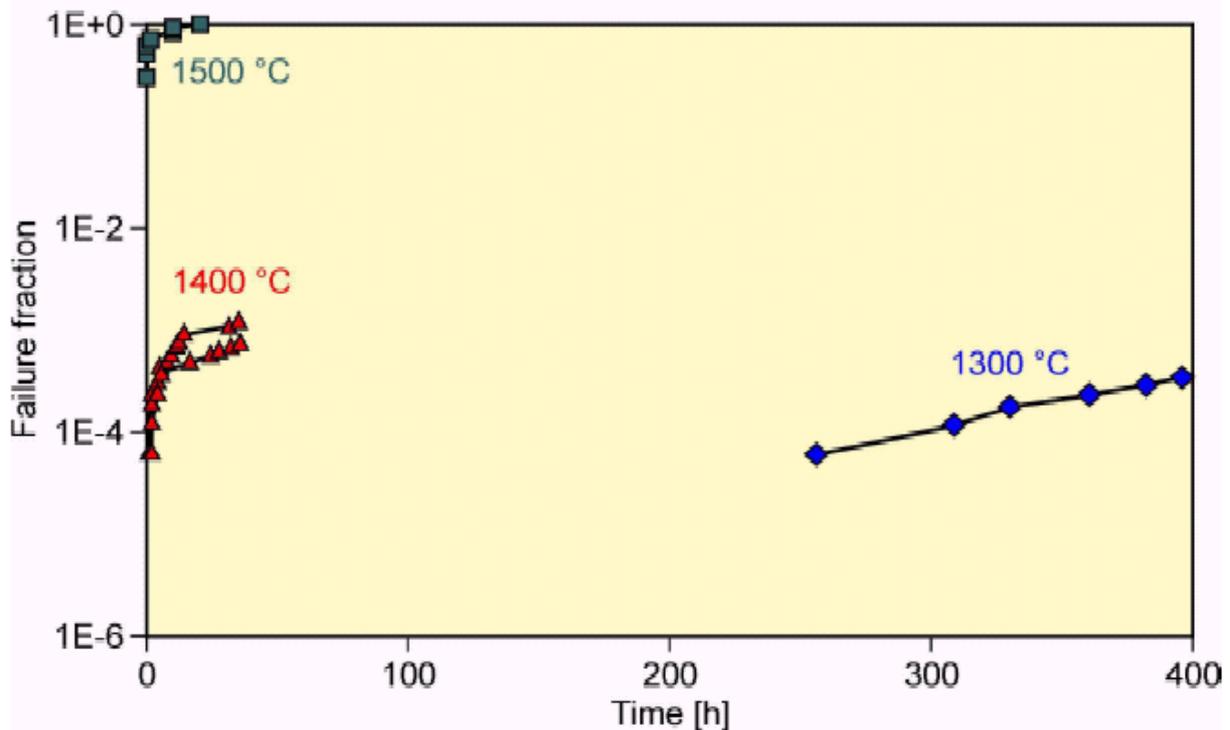


Figura 1.11 - Valutazione sperimentale della frazione di rottura delle CP in aria a diverse temperature in funzione del tempo

In conclusione l'incidente di LOCA non costituisce un problema per questo tipo di reattore anche in assenza di sistemi di refrigerazione ausiliari (che comunque sono sempre presenti). L'unico vero incidente serio da evitare (avendo escluso con l'adozione del ciclo diretto la possibilità di ingresso di acqua nel core) è l'ingresso di aria. In questo caso il core deve essere mantenuto refrigerato poiché la degradazione del combustibile (con il consistente aumento del rilascio dalle CP) inizia a temperature (inferiori a 1600 °C) raggiungibili in caso di asportazione del calore dal vessel per sola conduzione ed irraggiamento. Nell'ipotesi di interazione diretta fra la CP e l'aria (nell'ipotesi conservativa che lo strato esterno di grafite non fornisca alcun tipo di protezione) la temperatura deve essere limitata sotto i 1300°C.

Un ultimo aspetto importante da rimarcare nell'ambito delle analisi di sicurezza dei reattori HTR è quello relativo al problema (presente praticamente soltanto nei reattori del tipo a pebble) delle polveri. La polvere che si forma negli HTR del tipo a pebble è costituita principalmente da grafite. La sua formazione è dovuta principalmente all'erosione meccanica delle pebble ma una piccola quantità può formarsi a seguito della *carburizzazione*. Dal punto di vista quantitativo si può

prevedere nel circuito primario la formazione di 0.1 Kg/MW_t a fine vita. A causa della grande superficie specifica della grafite e dalla sua elevata capacità di assorbimento, le polveri possono assorbire prodotti gassosi di fissione portando ad una relativamente elevata quantità della concentrazione degli stessi nei punti di deposizione. Nella tab. 1.1 sono riportati le attività di alcuni importanti prodotti di fissione nelle polveri del reattore AVR. Fino ad ora non esiste un modello di calcolo completo per valutare il comportamento delle polveri negli HTR: tale problema è trattato principalmente su base empirica.

Nuclide	Attività [GBq/Kg]
Ag ^{110m}	5 - 40
Cs ¹³⁷	10 - 100
I ¹³¹	< 0.1 - 3.5

Tabella 1.1 - Attività dei principali prodotti di fissione gassosi nelle polveri del reattore AVR

1.4 - Lo stoccaggio del combustibile esausto

Dal punto di vista dello stoccaggio del combustibile esausto, è importante rilevare che la matrice di grafite, al cui interno sono contenute le CP, costituisce già di per sé un'ottima barriera (anche a lungo termine) al rilascio dei prodotti di fissione.

In aggiunta ad essa, anche il solo rivestimento delle CP fornisce un'ulteriore protezione contro il rilascio. Nell'ipotesi di CP esposte agli agenti atmosferici senza ulteriori protezioni, dopo tempi dell'ordine dei diecimila anni, la quantità[#] di kernel che si trova esposta all'ambiente esterno è pari a 10^{-8} (figura 1.14).

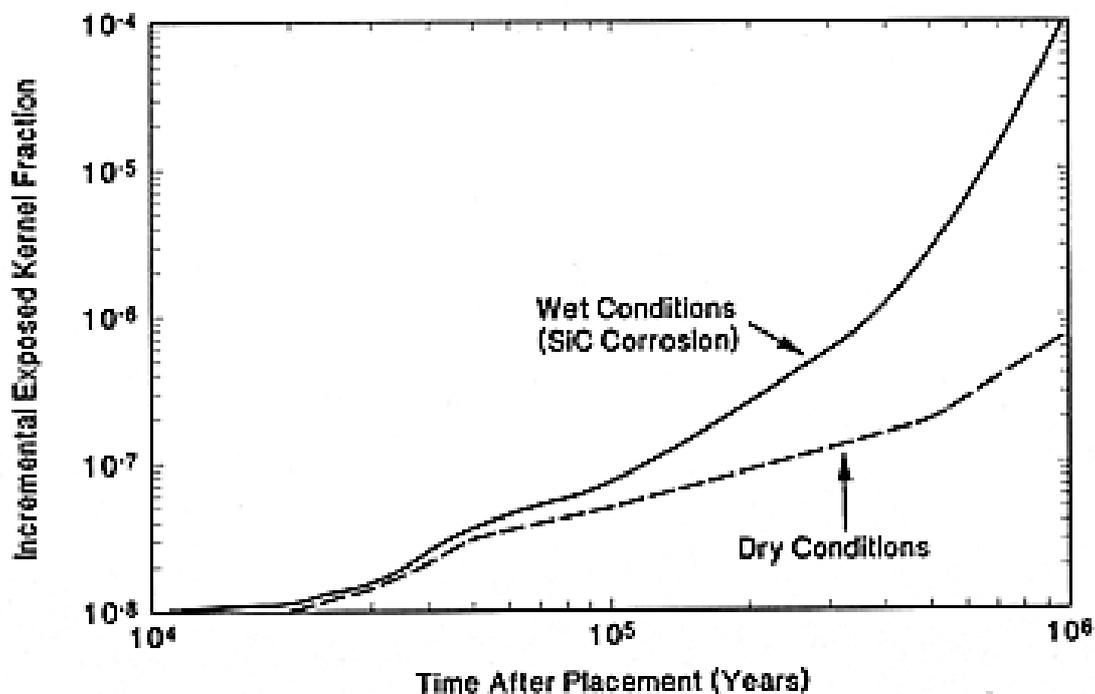


Figura 1.14 - Frazione di kernel che si trova esposta all'ambiente esterno [1.5]

[#]frazione di quelli iniziali

1.5 - L'evoluzione storica dei reattori a gas ad alta temperatura

Nonostante il mancato decollo della commercializzazione dei reattori a gas ad alta temperatura (HTR), l'evoluzione storica [1.6] di tali reattori ha continuamente seguito quella delle conoscenze tecniche e dei cambiamenti che si sono avuti nelle richieste industriali e sociali, soprattutto in virtù della sostanziale validità del concetto. Si sono avuti notevoli investimenti nella R&D, senza un rientro economico; ciò nonostante la ricerca in tale campo è proseguita.

L'evoluzione storica di tali reattori è sostanzialmente classificabile in quattro fasi:

- La prima fase di sviluppo degli HTR (AVR, DRAGON, Peach Bottom) ha provato la fattibilità della produzione di un fluido refrigerante alla temperatura di 950 °C in combinazione con una bassa contaminazione del circuito primario ed un'alta resistenza alle condizioni più estreme (AVR). Queste eccellenti esperienze operative in combinazione con livelli di sicurezza elevatissimi sono state alla base delle ulteriori attività di ricerca e sviluppo di questa filiera
- La seconda fase è stata caratterizzata dall'obiettivo di ottenere impianti commerciali a ciclo diretto di taglia superiore ai 300 MW_e, utilizzabili anche per la produzione di calore ad alta temperatura per processi chimici ed industriali. Questo ha richiesto la realizzazione di concetti di impianto che differivano sostanzialmente da quelli della prima fase. Nonostante tali sviluppi potessero apparire piuttosto ambiziosi, gli impianti dimostrativi da 300 MW_t (THTR 300 in Germania e Fort St. Vrain negli USA) hanno entrambi provato l'operatività a piena potenza e le positive caratteristiche della filiera. Il carico finanziario legato al carattere prototipico di tali impianti senza un adeguato supporto di infrastrutture industriali e, ultimo ma non meno importante, la perdita del supporto politico a seguito dell'incidente di Chernobyl hanno fermato questi progetti
- La terza fase ha preso le mosse dall'idea rivoluzionaria di ottimizzare il progetto per piccoli e medi reattori modulari invece di seguire il *trend* imperante verso impianti di taglia sempre più grande. I maggiori incentivi che hanno spinto verso tale concezione sono stati:
 - la realizzazione di caratteristiche di sicurezza intrinseca;
 - la possibilità di utilizzare principi di progettazione provati nella prima e nella seconda fase;
 - i vantaggi economici conseguenti al taglio ottimale dell'impianto ed alla possibilità della fabbricazione in serie;

- la semplificazione dei sistemi con conseguente facilitazione dell'accesso per le riparazioni.

In questo campo Siemens, ABB e GA (General Atomics) hanno realizzato progetti industriali, ma non ci sono state ancora realizzazioni pratiche a causa dell'avversa situazione generale dell'energia nucleare e dei bassi costi delle fonti energetiche fossili caratteristici dell'epoca. Il Giappone e la Cina che hanno in seguito proseguito lo sviluppo dei reattori HTR, hanno operato scelte progettuali per i loro reattori prototipici HTTR ed HTR-10 basate sul concetto modulare

- La quarta fase è quella tuttora in corso. Essa è caratterizzata dai seguenti aspetti:
 - adozione sistematica dei più alti standard di sicurezza, che richiedono l'esclusione di qualsiasi impatto sulla salute pubblica, persino nel caso di eventi con probabilità bassissima (analoghi allo scenario di core fuso per i LWR);
 - adozione delle più recenti tecnologie per le turbine a gas e per i cuscinetti (magnetici);
 - sforzi per minimizzare i rifiuti radioattivi;
 - ottimizzazione della capacità di bruciare Pu;
 - progettazione mirata alla competitività economica dell'impianto.

L'ampio numero di differenti concezioni proposte per gli HTR ha spesso nascosto le fasi successive dell'evoluzione di questo tipo di reattori. L'inclusione dell'esperienza operativa, le specifiche innovazioni delle tecnologie di base (come ad esempio le microsferi) che non erano state ancora inventate quando i primi HTR furono progettati, i costanti miglioramenti nei materiali ceramici e metallici consentono oggi a tale filiera di poter essere considerata una risposta innovativa per le richieste odierne del mercato mondiale dell'energia e per le auspicabili richieste future per la produzione di idrogeno e per gli impianti di desalinizzazione. Purtroppo, nonostante l'interazione tecnologica continua fra i differenti programmi nazionali sugli HTR e l'ampio trasferimento di tecnologia su base internazionale, lo sviluppo di tale filiera ha avuto spesso scarsa diffusione al di fuori di una stretta cerchia di addetti ai lavori. Però, questo diffuso scambio passato di "know-how", congiuntamente all'uso delle più recenti tecniche informatiche che sta favorendo una migliore collaborazione fra i gruppi addetti alla progettazione e alla R&D su scala globale, offre, insieme ai risultati che si attendono dai nuovi reattori sperimentali in Giappone ed in Cina e all'esperienza disponibile da altri reattori raffreddati a gas, un fondamento tecnologico sicuro per un uso commerciale futuro.

1.6 - I più recenti sviluppi della filiera HTR

1.6.1 - Considerazioni generali

Negli anni '90 gli HTR hanno subito un importante sviluppo [1.7], quando, tornando all'originaria concezione, è stata eliminata la presenza dell'acqua (esistente nei vecchi reattori come da fig. 1.15), impostando il ciclo diretto di elio in turbina come esemplificato nella fig. 1.20 e 1.21.

Ciò è stato possibile grazie ai nuovi materiali resisi nel frattempo disponibili ed in particolare i nuovi acciai per la turbina che rendono possibile l'uso di elio oltre i 900°C.

Questa modifica ha portato una serie di rilevanti vantaggi:

- aumento della sicurezza, con l'esclusione della possibilità di ingresso di acqua nel nocciolo;
- aumento del rendimento dal 30-35% a circa il 50% con lo sfruttamento dell'elevata temperatura di uscita del refrigerante dal nocciolo (fig. 1.16);
- notevole semplificazione impiantistica con conseguenti vantaggi in termini di sicurezza e di costi (fig. 1.8);
- diminuzione dei costi di impianto (fig. 1.17).

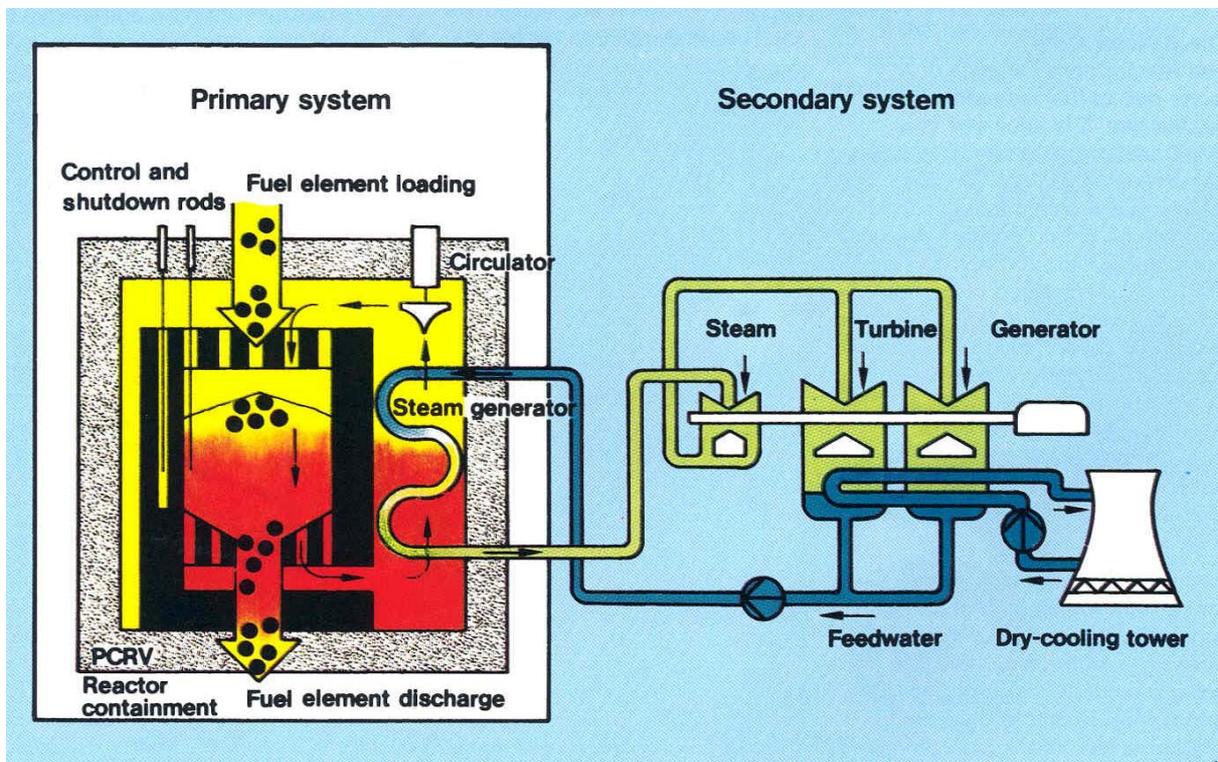


Figura 1.15 - Schema di un HTR con elementi di combustibile del tipo a pebble e ciclo indiretto a vapore

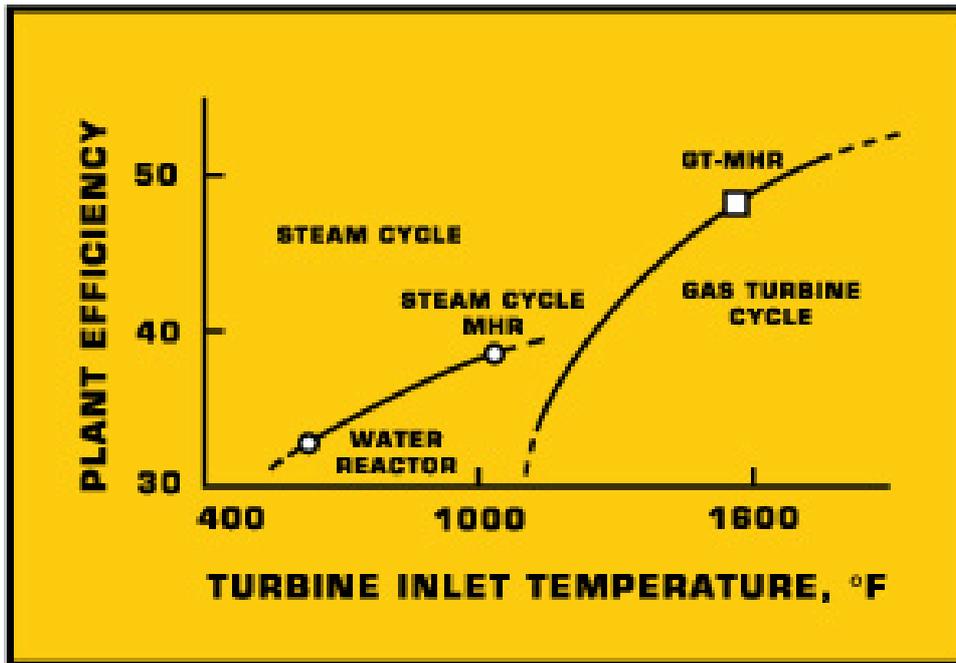


Figura 1.16 - Rendimento in funzione della temperatura e del ciclo termodinamico [1.5]

Parameter	Gas-fired Combined Cycle Plant	Water Reactor Plant	Nth GT-MHR Plant
Capital cost, \$/kWe	550	1300	975
Plant capacity, MWe	500	1150	1145
Capacity factor	85%	90%	90%
O&M cost, \$/MWh	2	5	3
Fuel cost, \$/MWh	24.5	5	7.4

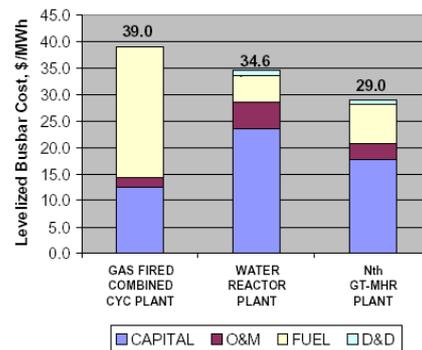


Figura 1.17 - Comparazione dei costi suddivisi per capitoli di spesa [1.5]

1.6.2 - Il reattore GT-MHR

Dal punto di vista delle attuali tendenze, sono sostanzialmente in avanzata fase di studio due tipologie di HTR:

- il reattore GT- MHR (studiato principalmente dalla General Atomics e da un consorzio russo);
- il reattore a pebble di concezione sudafricana (PBMR).

Dal punto di vista impiantistico, il primo propone probabilmente le soluzioni più interessanti, anche se il secondo è in uno stadio di sviluppo (fase finale del *licensing*) molto più avanzato. Parte delle apparenti complicazioni presenti in questo reattore sono infatti legate alla volontà di usare quanto più possibile tecnologia provata, accorciando così i tempi intercorrenti fra la sua ideazione e la sua realizzazione su scala commerciale.

Le fig. 1.18, 1.19, 1.20, 1.21, 1.22 e 1.23 illustrano il reattore GT-MHR. Questo reattore costituisce probabilmente, ad oggi, il progetto di reattore HTR "moderno" di tipo commerciale in fase più avanzata di sviluppo. Fra le sue peculiarità, va evidenziata l'estrema compattezza dell'intero impianto costituito da due soli recipienti in pressione collegati da un'unica tubazione (fig. 1.18); questo risultato è stato possibile anche grazie alla decisione di calettare la turbina, i compressori e l'alternatore su di un unico albero. Tutta una serie di componenti per questo reattore sono state sviluppate o sono in fase avanzata di studio (fig. 1.22). Molto interessante anche dal punto di vista della sicurezza è la soluzione adottata di costruire l'intero impianto completamente sotto il livello del suolo (fig. 1.23) in modo da migliorare la rimozione del calore residuo in situazioni incidentali mediante conduzione. Infine è importante rilevare la relativa semplicità del diagramma di flusso descrivente l'impianto (fig. 1.20 e 1.21) con conseguenti ovvie semplificazioni in fase di controllo e regolazione dello stesso.

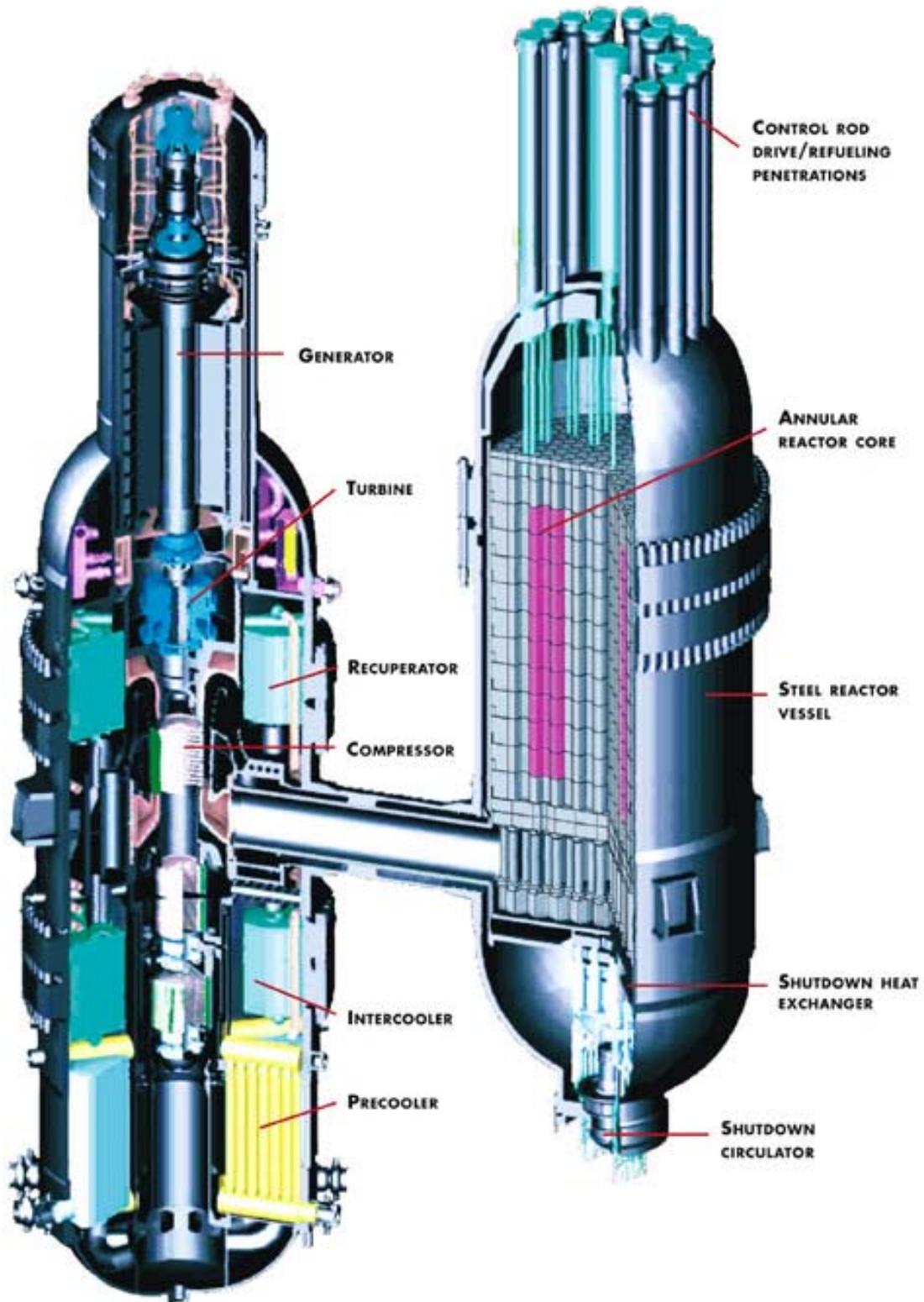


Figura 1.18 - Spaccato del reattore GT-MHR

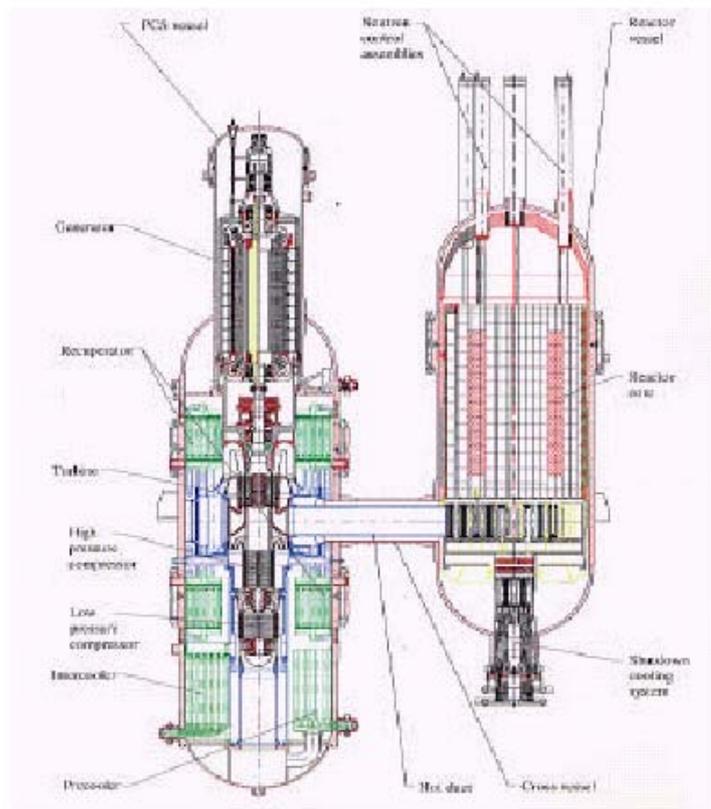


Figura 1.19 - Sezione del reattore GT-MHR

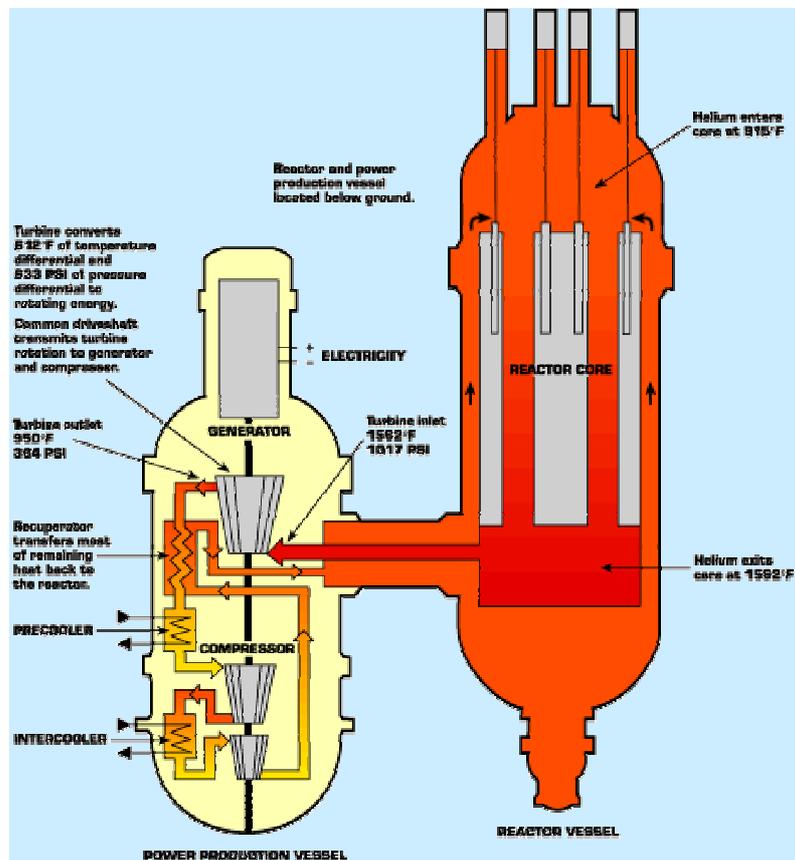


Figura 1.20- Diagramma di flusso schematico del reattore GT-MHR

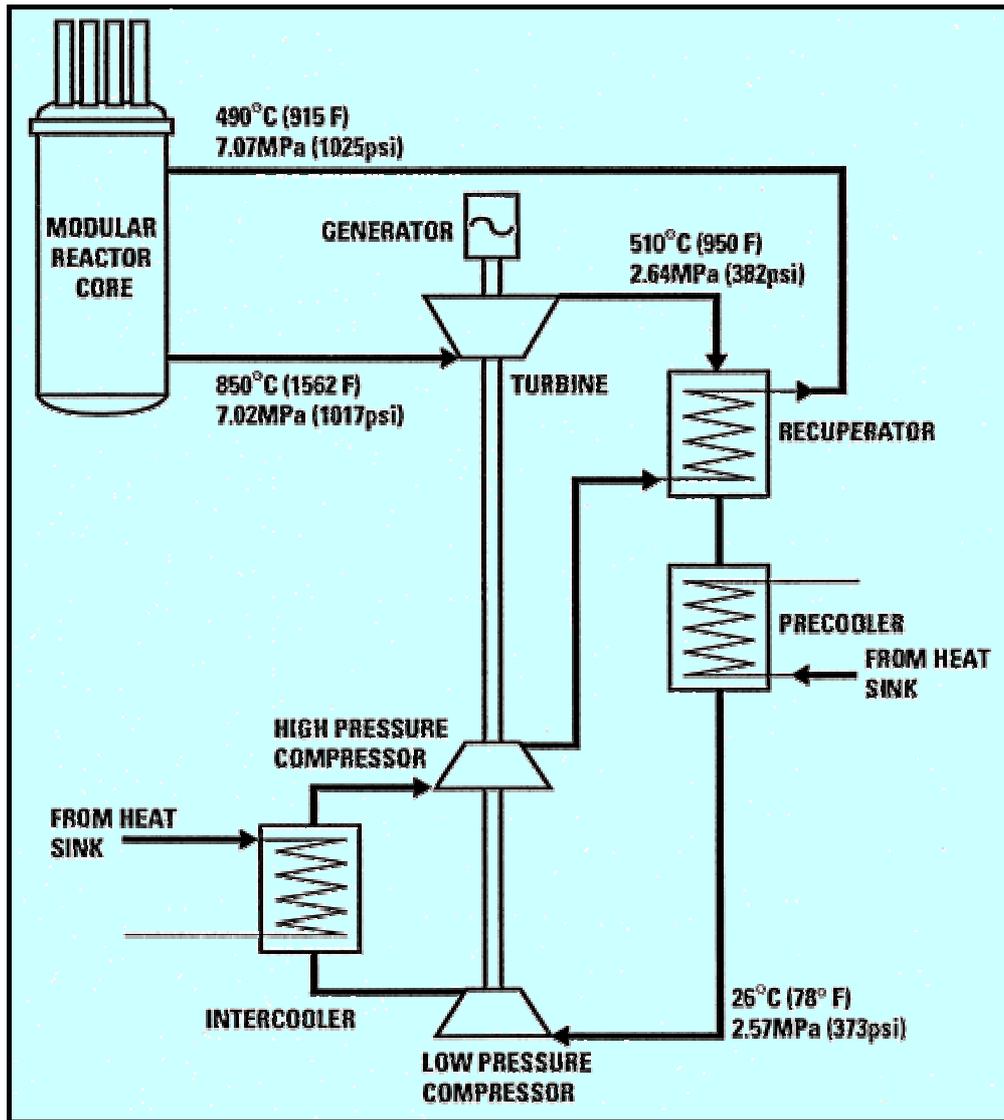


Figura 1.21 - Diagramma di flusso del reattore GT-MHR

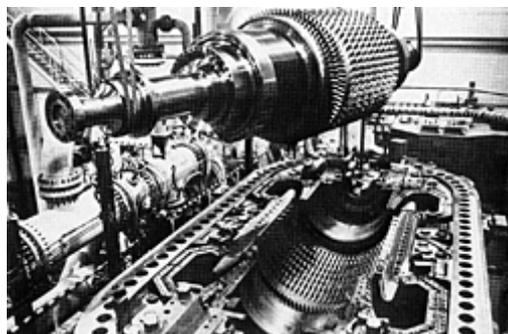


Figura 1.22 - Cuscinetto elettromagnetico, turbina a gas e recuperatore del reattore GT-MHR

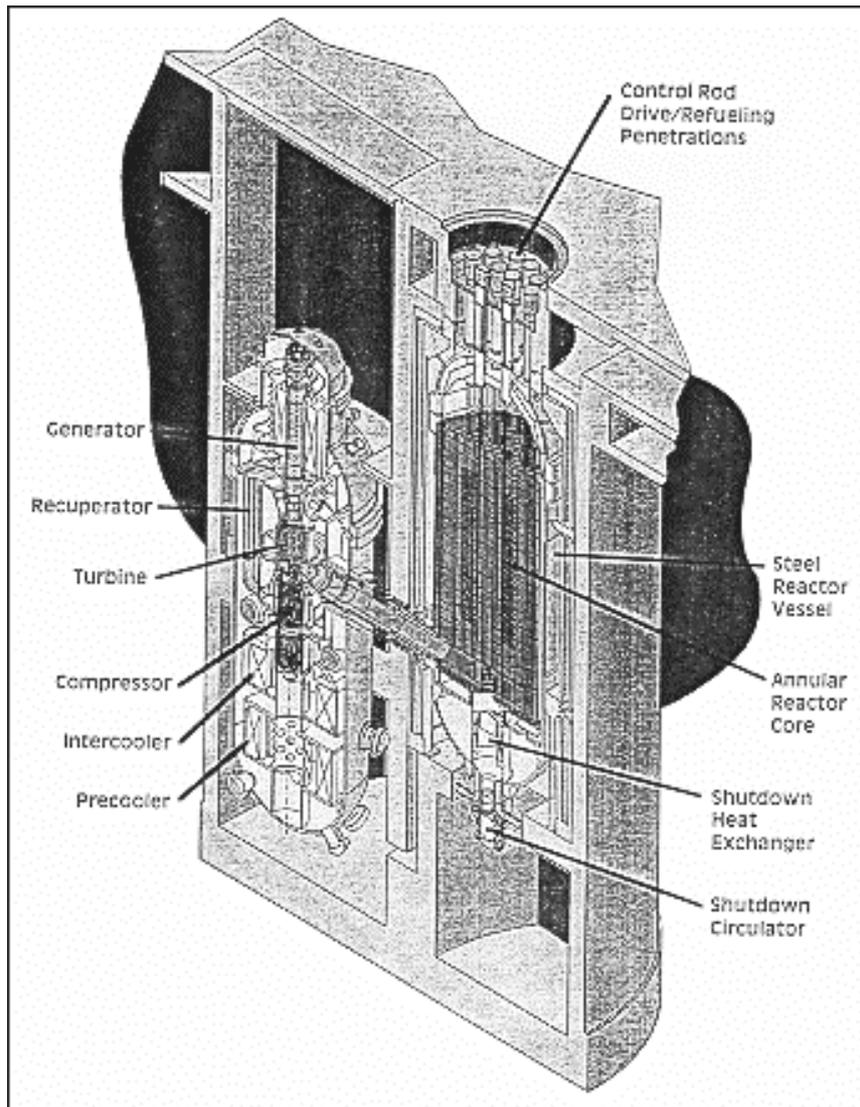


Figura 1.23 - Spaccato dell'impianto GT-MHR

1.6.3 - Il reattore PBMR

Le successive fig. da 1.24 a 1.31 rappresentano il reattore PBMR della ESKOM. In questo reattore, come già detto, alcune soluzioni progettuali adottate rappresentano una sorta di evoluzione intermedia fra i reattori "classici" e gli HTR di concezione più avanzata. In particolare è importante rilevare la presenza di tre distinti contenitori in pressione (fig. 1.24), uno per ciascuna delle turbine (di alta, media e bassa pressione). Questa soluzione, se da un lato ha permesso di limitare le dimensioni del contenitore in pressione per il gruppo turboalternatore (abbastanza più grande per reattori di concezione analoga al GT-MHR) dall'altro ha reso più complessa la disposizione impiantistica generale (fig. 1.28), con un aumento delle tubazioni presenti per collegare le varie parti dell'impianto (fig. 1.29).

In aggiunta a ciò, va altresì sottolineato che questo reattore è attualmente giunto ad uno stadio molto più avanzato nell'ambito del processo di licensing presso l'autorità di controllo sudafricana. A conferma di questo vi è il fatto che questo reattore è l'unico HTR moderno di taglia commerciale per cui ci sia stata una procedura di PRA completa [1.8] e per cui sia stato sviluppato un programma completo per il controllo dell'impianto stesso, denominato FLOWNET [1.9]. Tale programma è attualmente venduto commercialmente ed è utilizzato anche per il controllo e la regolazione di altre tipologie di reattore.

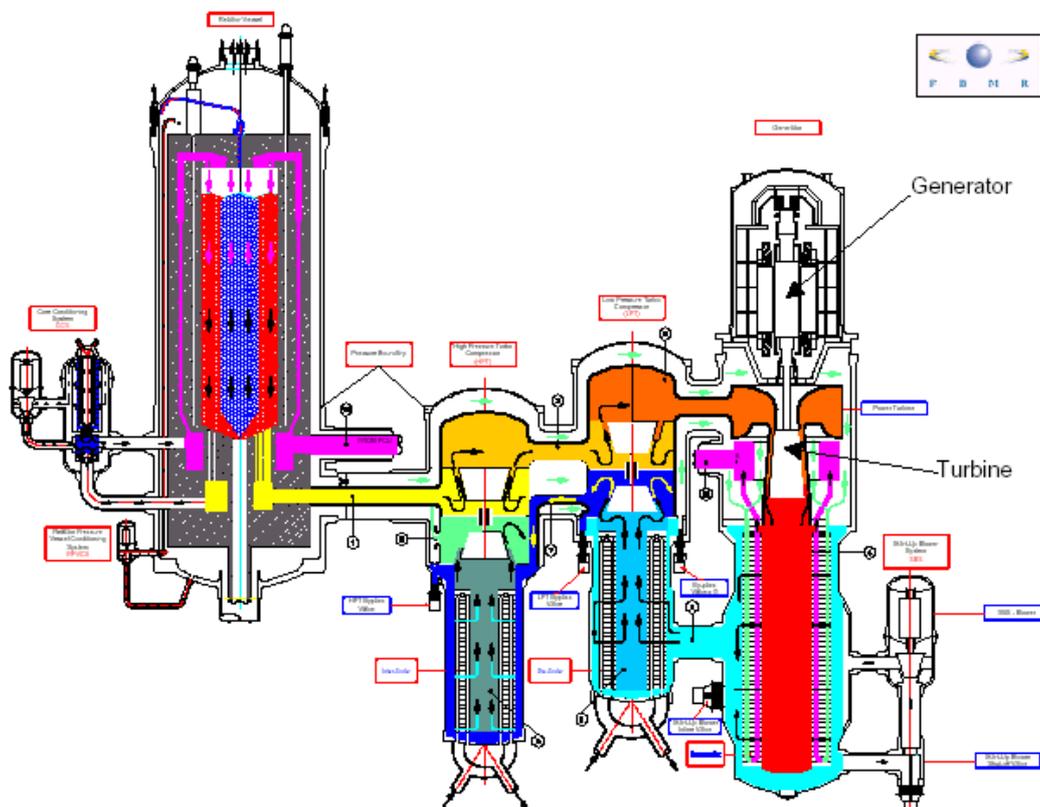


Figura 1.24 - Rappresentazione dei flussi del refrigerante nel reattore PBMR

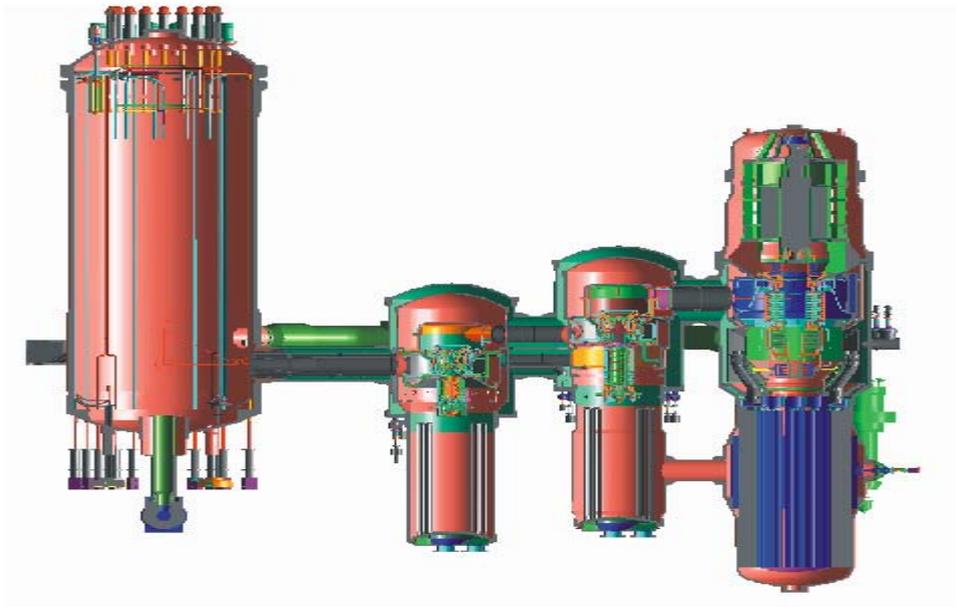


Figura 1.25 - Rappresentazione del reattore PBMR

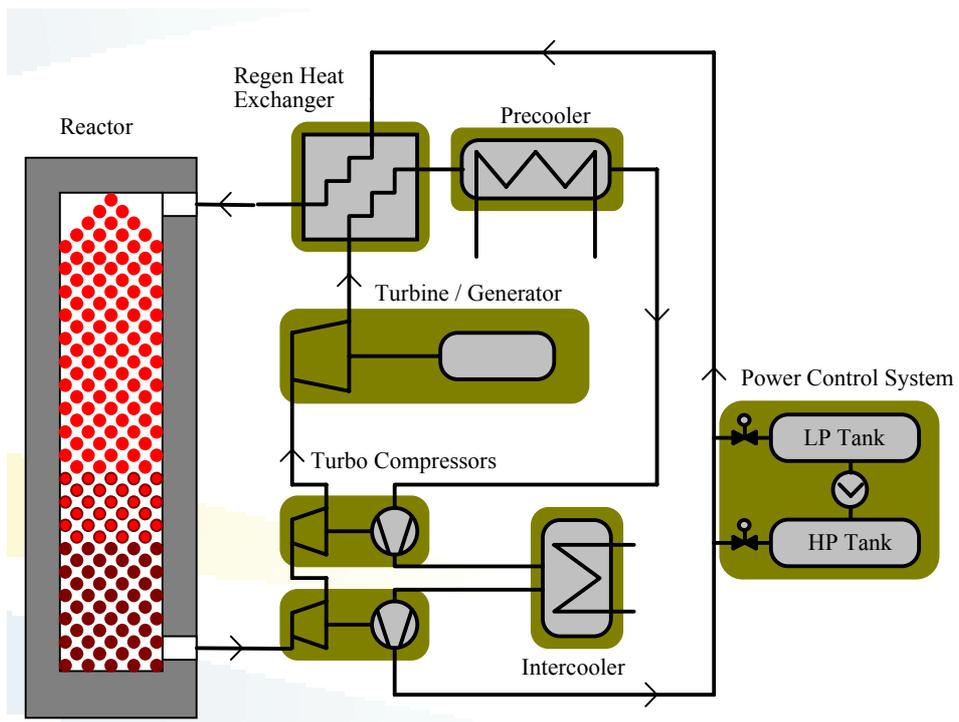


Figura 1.26 - Diagramma di flusso schematico del reattore PBMR

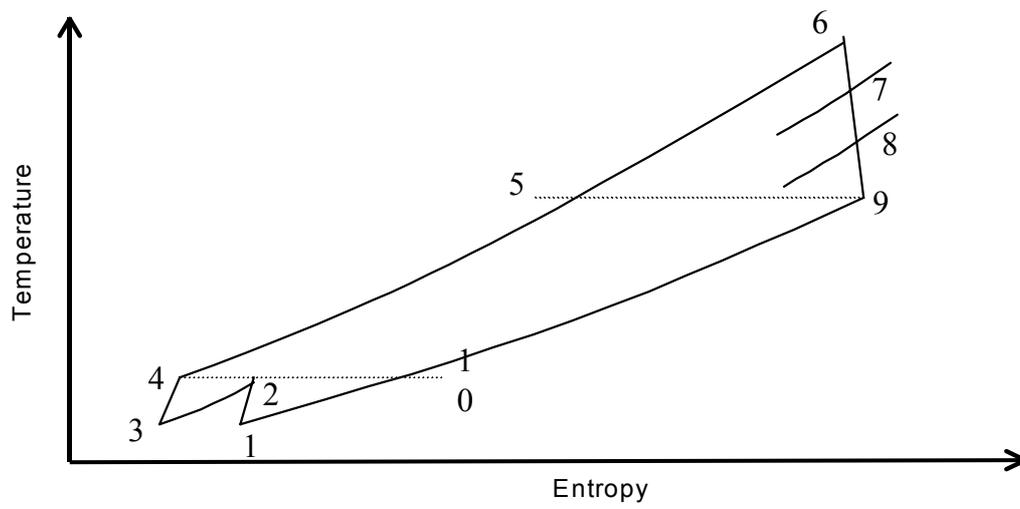


Figura 1.27 - Rappresentazione del ciclo termodinamico seguito dal reattore PBMR

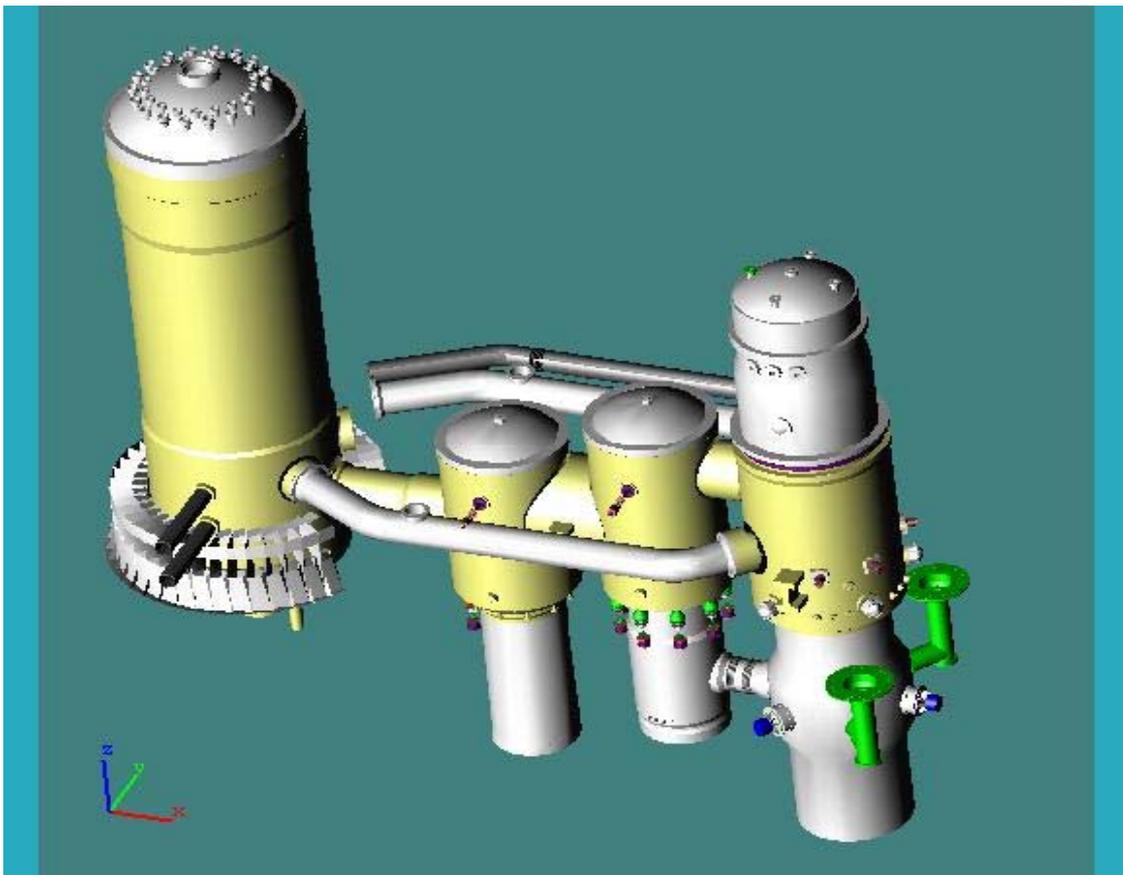


Figura 1.28 - Vista 3D del reattore PBMR

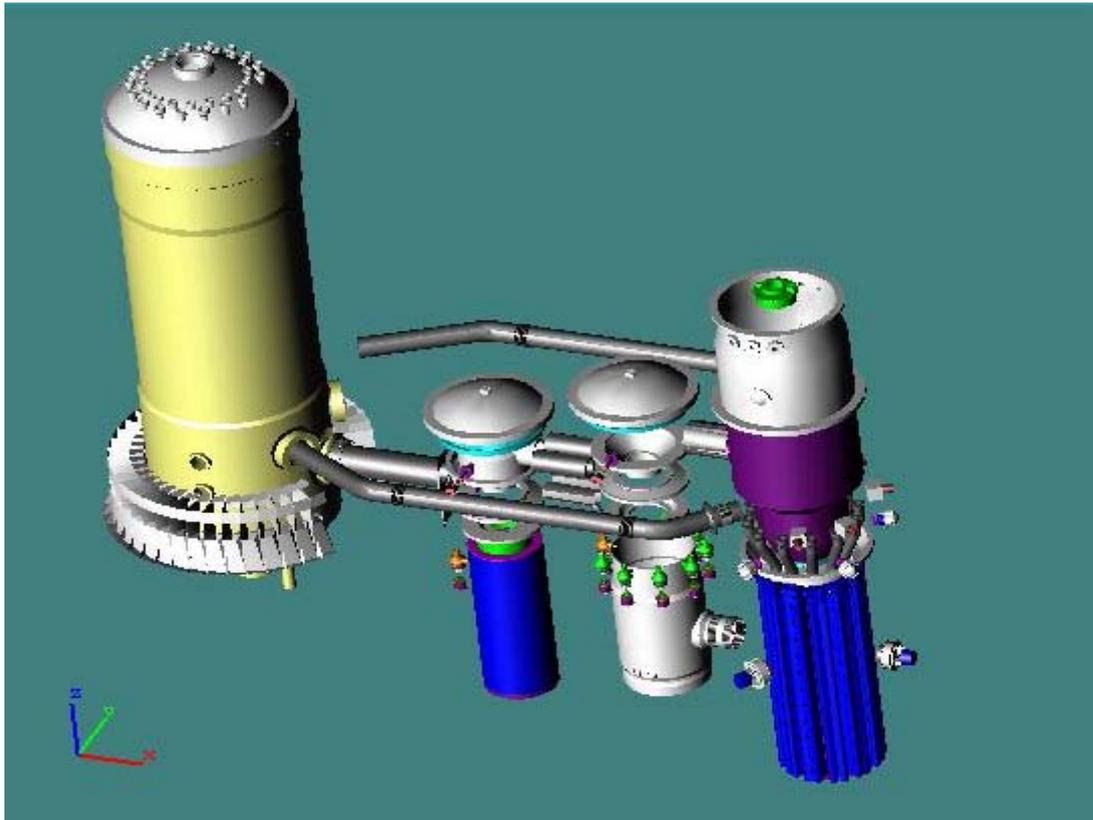
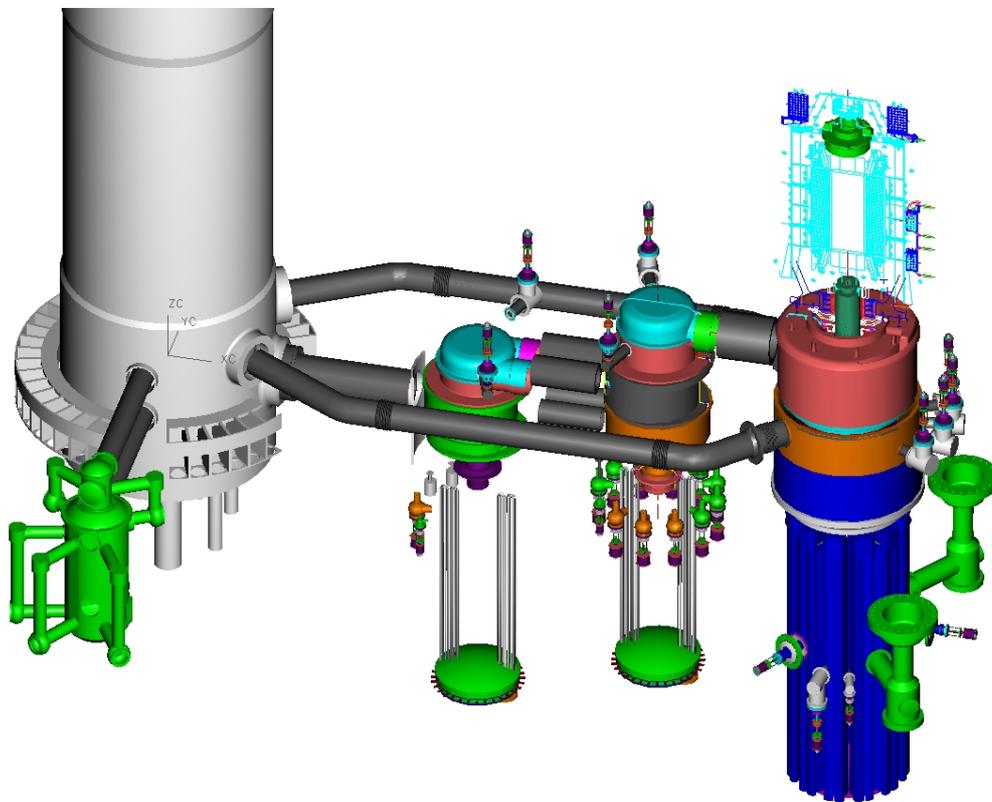


Figura 1.29 - Vista 3D (esplosa) del reattore PBMR



TOP WORK

Figura 1.30 - Vista 3D (esplosa) con alcune componenti ausiliarie del reattore PBMR

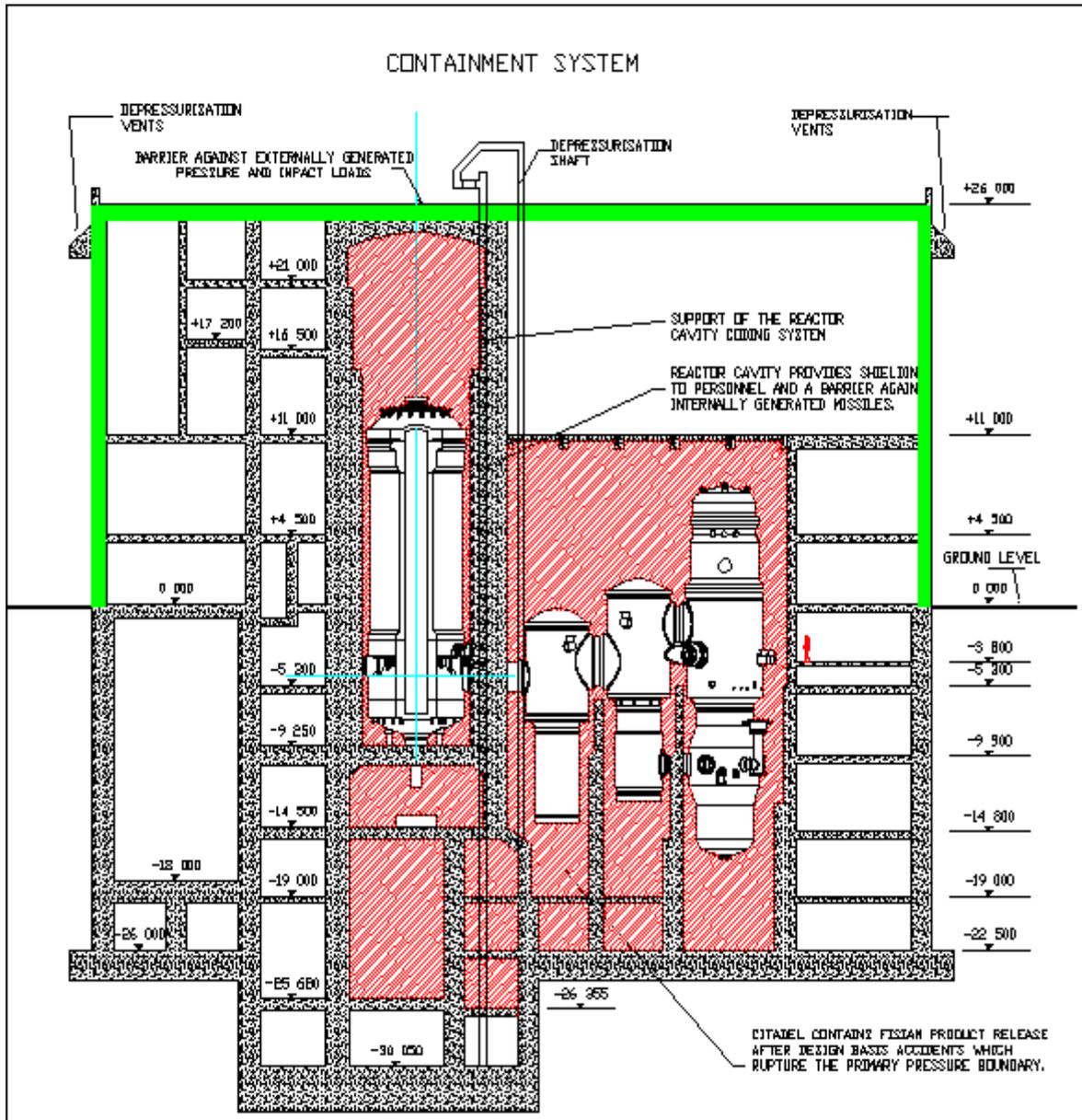


Figura 1.31- Sezione del contenimento del reattore PBMR

1.6.4 - Il reattore sperimentale HTTR

Dal punto di vista delle realizzazioni di reattori sperimentali, sono attualmente in funzione due reattori, uno di tipo a blocchi (HTTR) ed un altro di tipo a pebble (HTR-10).

La costruzione del reattore HTTR è stata voluta dalla JAERI [1.10] per migliorare la tecnologia di base degli HTR e per condurre ricerche di tipo innovativo ad alte temperature. Questo reattore è refrigerato ad elio e moderato a grafite e permette di ottenere una temperatura dell'elio in uscita dal core compresa fra 850°C e 950°C. L'elemento di combustibile [1.11] scelto per questo reattore è quello *pin in block* esagonale (fig. 1.33); ciascun elemento ha un diametro interno di 1 cm, esterno di 2.6 ed una altezza di 3.9 cm. Ciascuna barretta è costituita da 14 elementi di combustibile, ha una lunghezza di 54.6 cm ed un diametro esterno pari a 3.4 cm. Il fattore di impacchettamento delle CP è pari al 30 %. La dimensione delle CP è relativamente elevata, avendo queste ultime un diametro di 0.92 mm. Il combustibile usato è ossido di uranio con arricchimenti variabili dal 3 al 10%; è inoltre previsto l'utilizzo di veleni bruciabili (B_4C) per controllare l'eccesso di reattività iniziale.

Il reattore HTTR (*High Temperature engineering Test Reactor*, fig. 1.32), è divenuto critico alle 14:18 del 10 novembre 1998; la piena potenza è stata raggiunta nel 2001 (la JAERI ha ricevuto l'autorizzazione per la costruzione dell'impianto nel Febbraio 1990 dopo 22 settimane di revisione del progetto da parte dell'ente di controllo). E' situato a Oarai, in Giappone; la sua costruzione è iniziata nel 1991 ed è terminata nel 1998. Ha una potenza termica di 30 MW; la temperatura di uscita del refrigerante può raggiungere i 950 °C e la pressione dell'elio refrigerante è di 4 MPa. E' presente un riflettore di grafite esternamente al core.

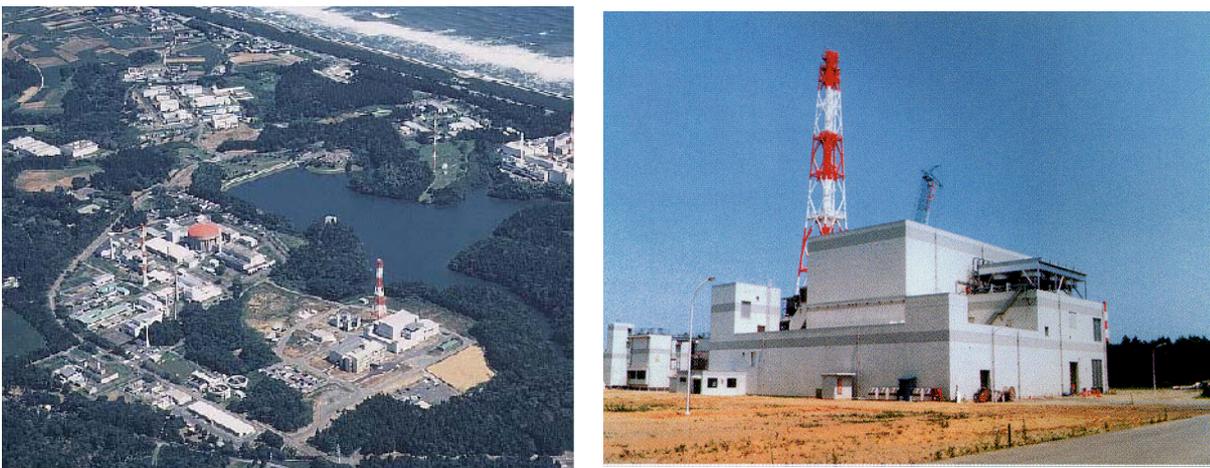


Figura 1.32 – Viste del reattore HTTR

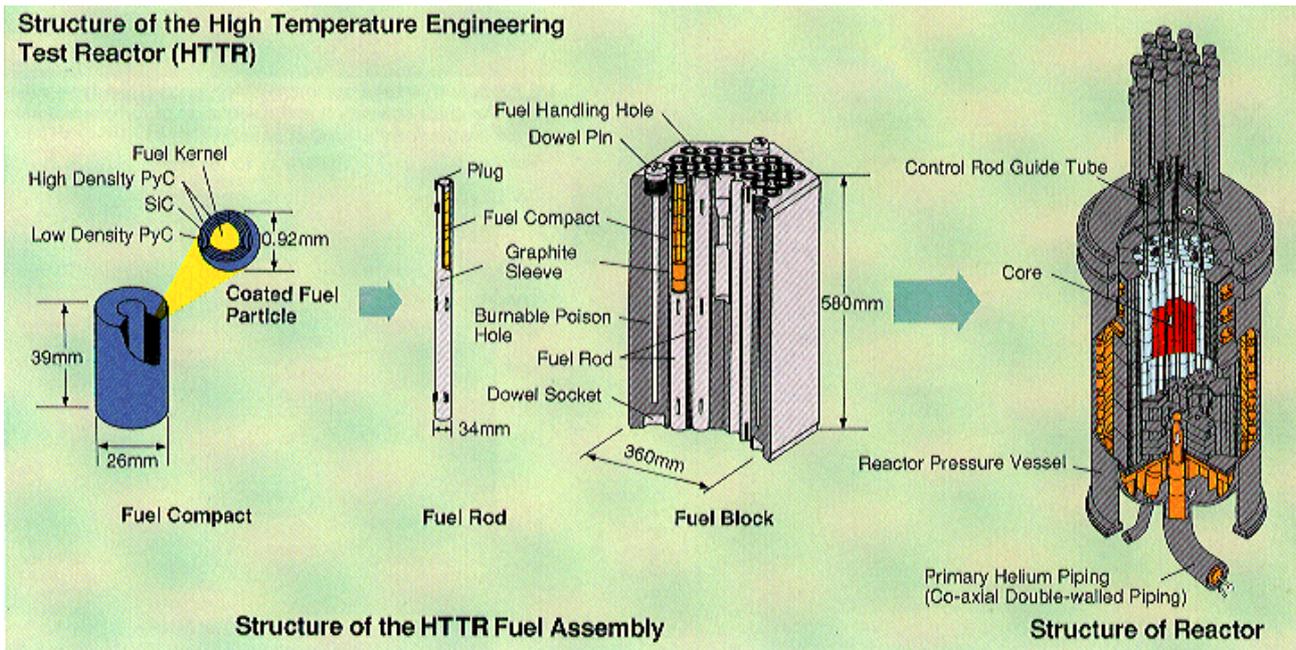


Figura 1.33 – Struttura dell'elemento di combustibile del reattore HTTR

Il reattore HTTR è stato progettato per condurre una serie di test:

- irradiazione per combustibile e per i materiali;
- assenza di rilascio di prodotti di fissione dalla CP;
- sfruttamento del calore di processo di origine nucleare.

Fra le ricerche in corso (fig. 1.33):

- sviluppo di nuovi materiali (in particolare nuovi ossidi semiconduttori che richiedono irraggiamento con neutroni per indurre i difetti cristallini ottimali);
- compositi ceramici resistenti al calore (investigati per la realizzazione delle barre di controllo; le ricerche si focalizzano sui compositi a base di fibre di carbonio);
- tecnologia della strumentazione nel nocciolo ad alta temperatura;
- chimica delle radiazioni (studi sulla decomposizione delle plastiche e gli oli pesanti, produzione di fibre al carburo di silicio di alta qualità).

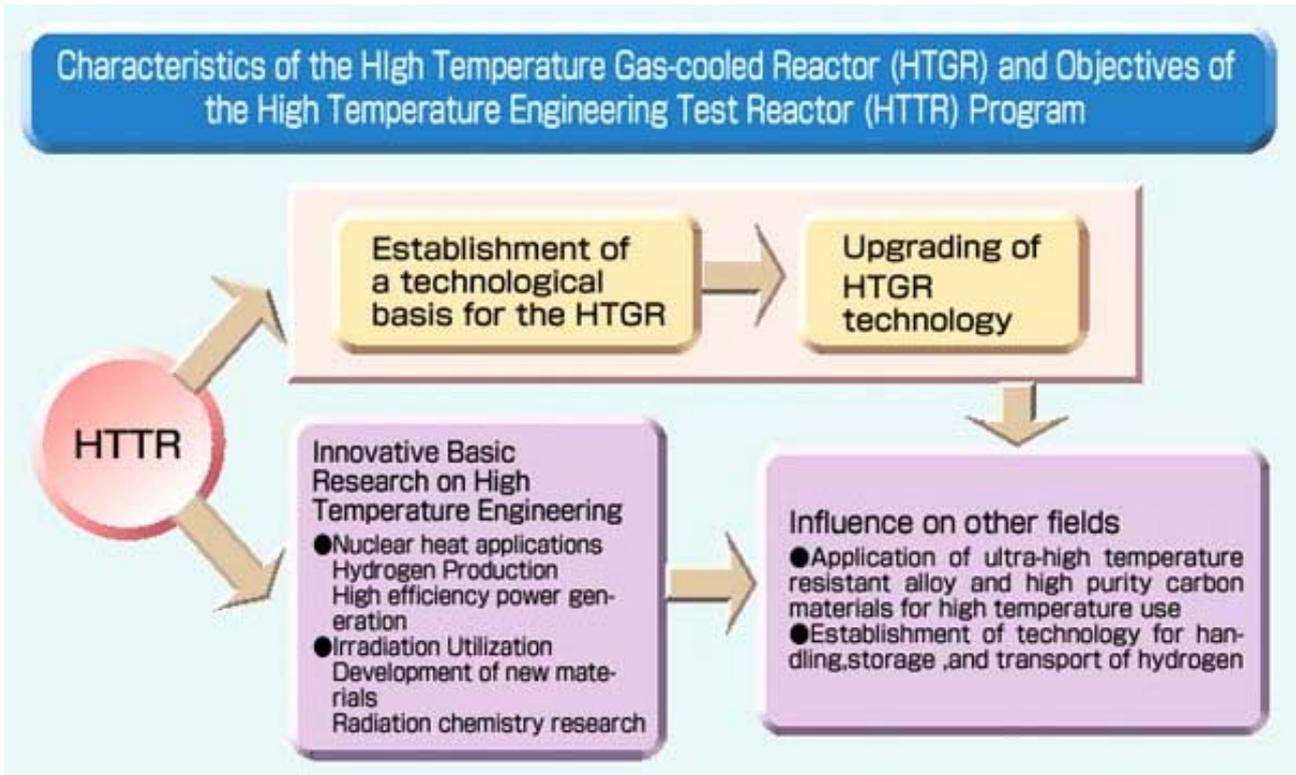


Figura 1.33 – Caratteristiche ed obiettivi del programma HTTR

Attualmente il reattore (fig. 1.34) è in funzione e già numerosi test sono stati condotti. In particolare è importante sottolineare che il reattore HTTR è stato assunto come base per lo studio della possibilità di utilizzare gli HTR per la produzione di idrogeno. Tale argomento verrà più estesamente affrontato nel capitolo 3.

La costruzione del reattore, nonché tutta la serie di test in esso svolti, sono frutto di un'ampia collaborazione internazionale (fig. 1.35) e mirano [1.12], fra le altre cose, anche alla validazione di codici neutronici.

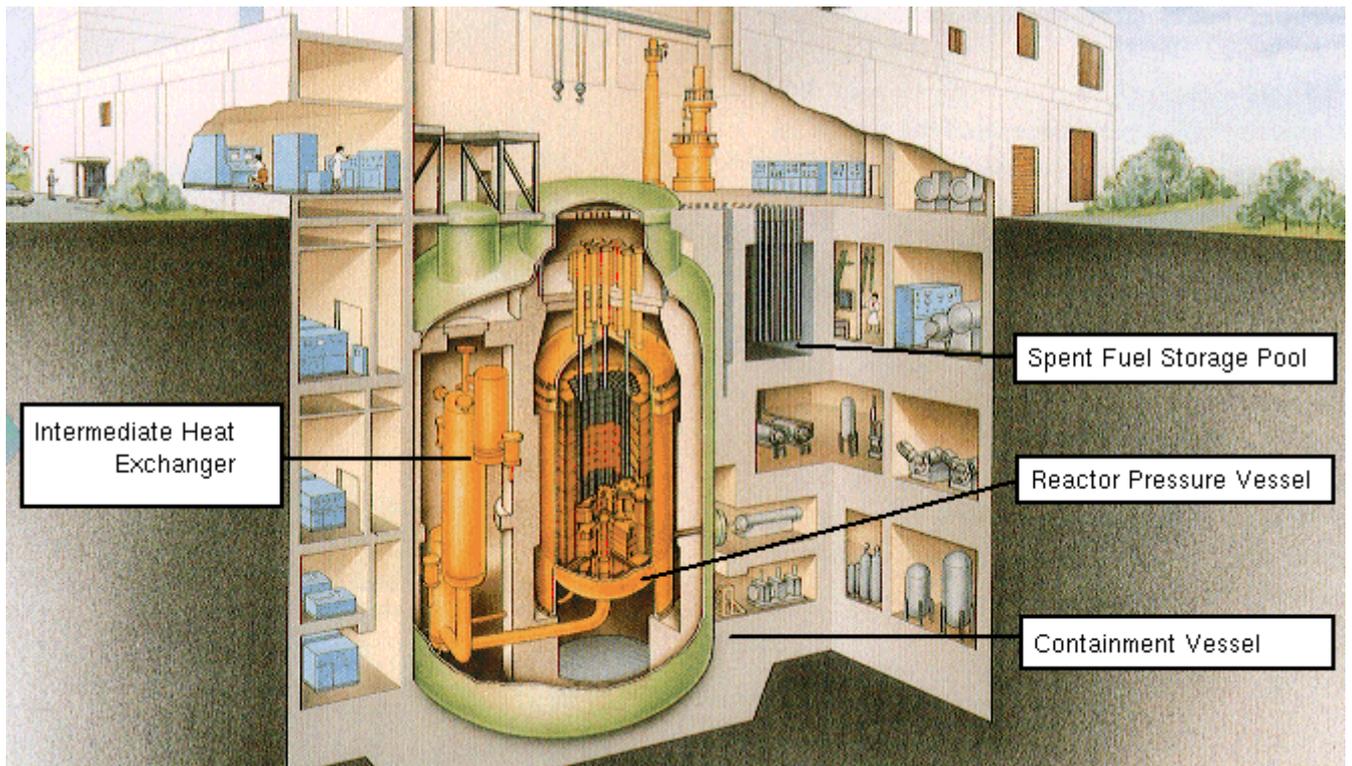


Figura 1.34- Veduta dell'edificio reattore HTTR

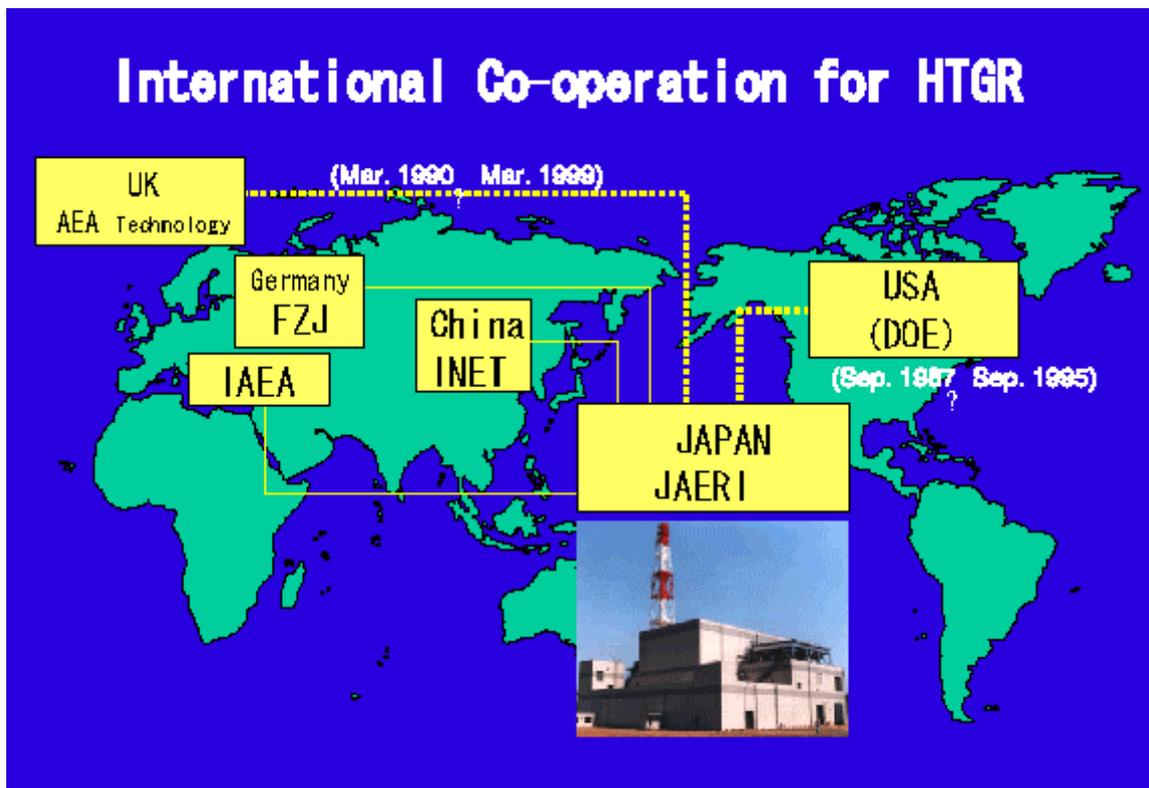


Figura 1.35 - Rappresentazione parziale e schematica delle collaborazioni internazionali per il progetto HTTR

1.6.5 - Il reattore sperimentale HTR-10

Il secondo reattore sperimentale [1.12] in avanzata fase di sviluppo è invece, come già detto del tipo a pebble. Il reattore cinese HTR-10 (*High Temperature Reactor 10 MW*, fig. 1.36 e 1.37), della potenza di 10 MW_t, è divenuto critico nel 2000. Le principali caratteristiche di tale reattore sono riportate nella tab. 1.2. Il contenimento e le dimensioni fondamentali del reattore stesso sono illustrati nella fig. 1.38.



Figura 1.36 - Veduta del reattore HTR-10

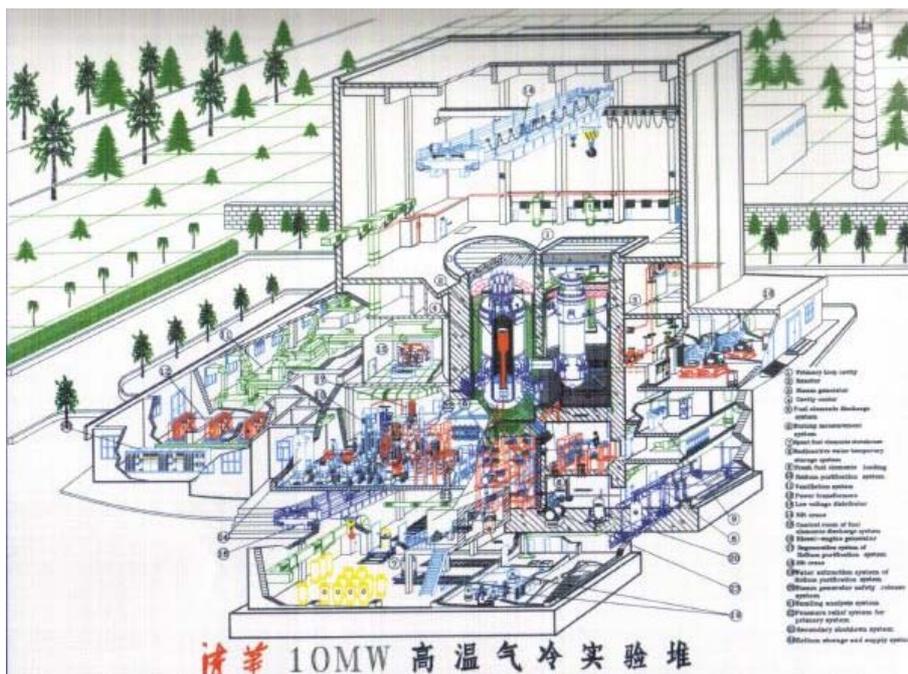


Figura 1.37 - Spaccato del reattore HTR-10

Item	Unit	Value
Thermal power	MW	10
Reactor core diameter	cm	180
Average core height	cm	197
Primary helium pressure	MPa	3.0
Average helium temperature at reactor inlet/outlet	°C	250/700
Helium mass flow rate at full power	kg s ⁻¹	4.3
Average core power density	MW m ⁻³	2
Power peaking factor		1.54
Number of control rods in side reflector		10
Number of absorber ball units in side reflector		7
Nuclear fuel		UO ₂
Heavy metal loading per fuel element	g	5
Enrichment of fresh fuel element	%	17
Number of fuel elements in core		27 000
Fuel management	Multi-pass	
Average residence time of one fuel element in core	EFPD	1080
Max. power rating of fuel element	kW	0.57
Max. fuel temperature (normal operation)	°C	919
Max. burn-up	MWd tHM ⁻¹	87 072
Average burn-up	MWd tHM ⁻¹	80 000
Max. thermal flux in core ($E > 1.86$ eV)	n cm ⁻² s ⁻¹	3.43×10^{13}
Max. fast flux in core ($E > 1$ MeV)	n cm ⁻² s ⁻¹	2.77×10^{13}

Tabella 1.2 - Principali caratteristiche del reattore HTR-10

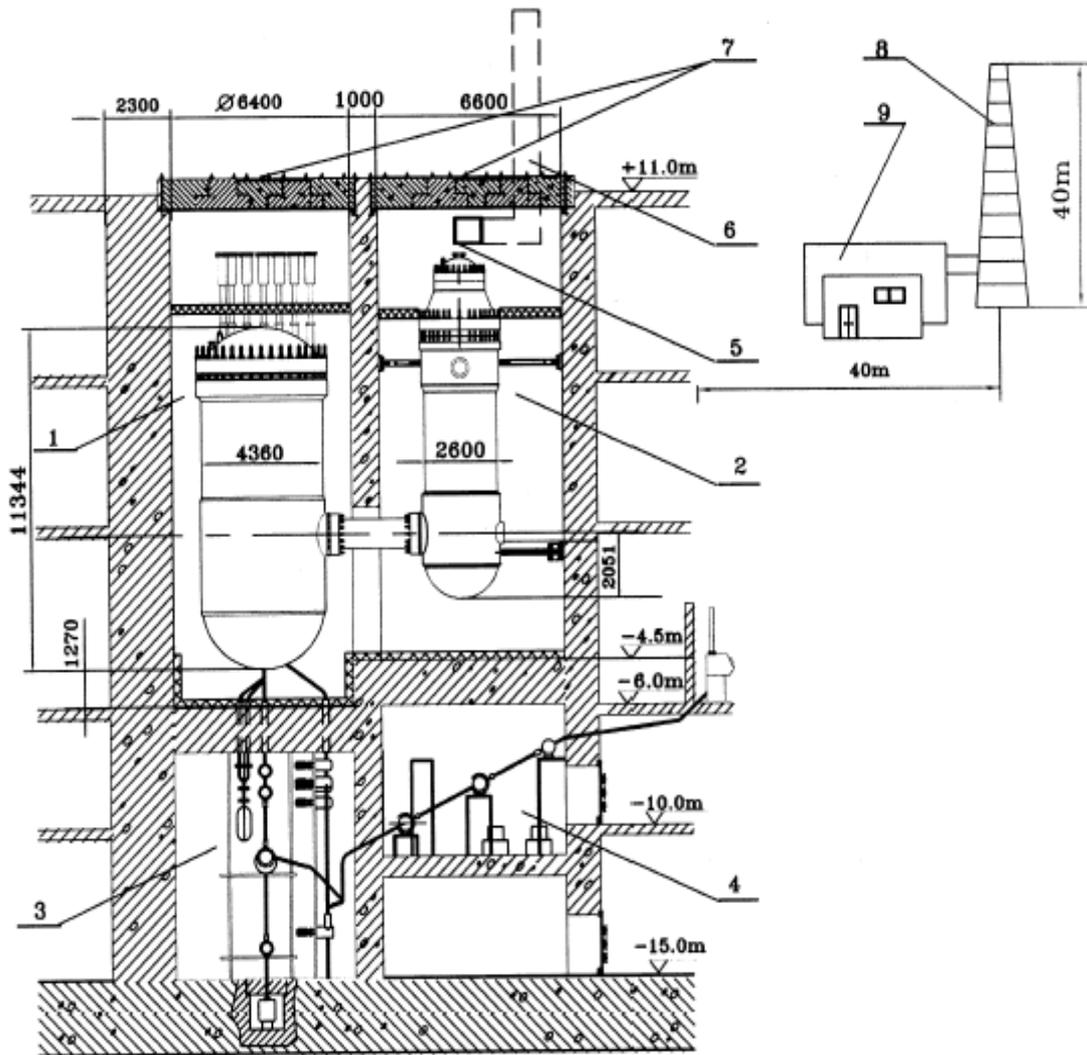


Figura 1.38 - Sezione del contenimento del reattore HTR-10

Gli obiettivi principali che il progetto HTR-10 si propone di raggiungere sono:

- 1) acquisire il *know-how* sulla progettazione, costruzione ed esercizio dei reattori HTR a pebble;
- 2) disporre di un impianto per l'irraggiamento dei materiali;
- 3) dimostrare le caratteristiche di sicurezza dei reattori HTR a pebble;
- 4) testare le tecnologie di produzione dell'energia elettrica, cogenerazione di calore ed i cicli chiusi a gas in turbina;
- 5) promuovere la ricerca e lo sviluppo di tecnologie per l'utilizzazione del calore nucleare ad alta temperatura.

L'istituto responsabile della progettazione, costruzione ed esercizio è l'INET (*Institute of Nuclear Energy Technology*) dell'Università di Tsinghua; il sito prescelto per la costruzione del reattore è situato a nord-est della città di Beijing. L'HTR-10 presenta le caratteristiche di un HTR modulare; il nocciolo ed il generatore di vapore sono posti all'interno di due recipienti in pressione in acciaio, collegati da un canale a gas caldo (*hot gas duct*), come da fig. 1.41. Gli elementi di combustibile

utilizzati sono sferici, del diametro di 60 mm con microsferi; il nocciolo ne contiene 27000 che formano un letto di 180 cm di diametro e 197 di altezza. Per il carico e scarico del combustibile è usato un sistema pneumatico (fig. 1.43).

Il reattore è progettato per dissipare in maniera totalmente passiva il calore di decadimento, per conduzione ed irraggiamento.

Sono previste esperienze di *steam reforming* con il metano sfruttando le temperature di uscita del refrigerante dell'ordine di 900°C.

Anche esso, come il precedentemente descritto HTTR, è frutto di un'ampia collaborazione internazionale e si pone come obiettivi l'effettuazione di una serie di test per validare (ed eventualmente migliorare) le attuali conoscenze sia sugli HTR (comprendendo anche i codici di calcolo comunemente usati nelle simulazioni numeriche) sia sul comportamento dei materiali ad alta temperatura. Una illustrazione schematica del reattore è riportata nelle seguenti fig. 1.39÷1.43.

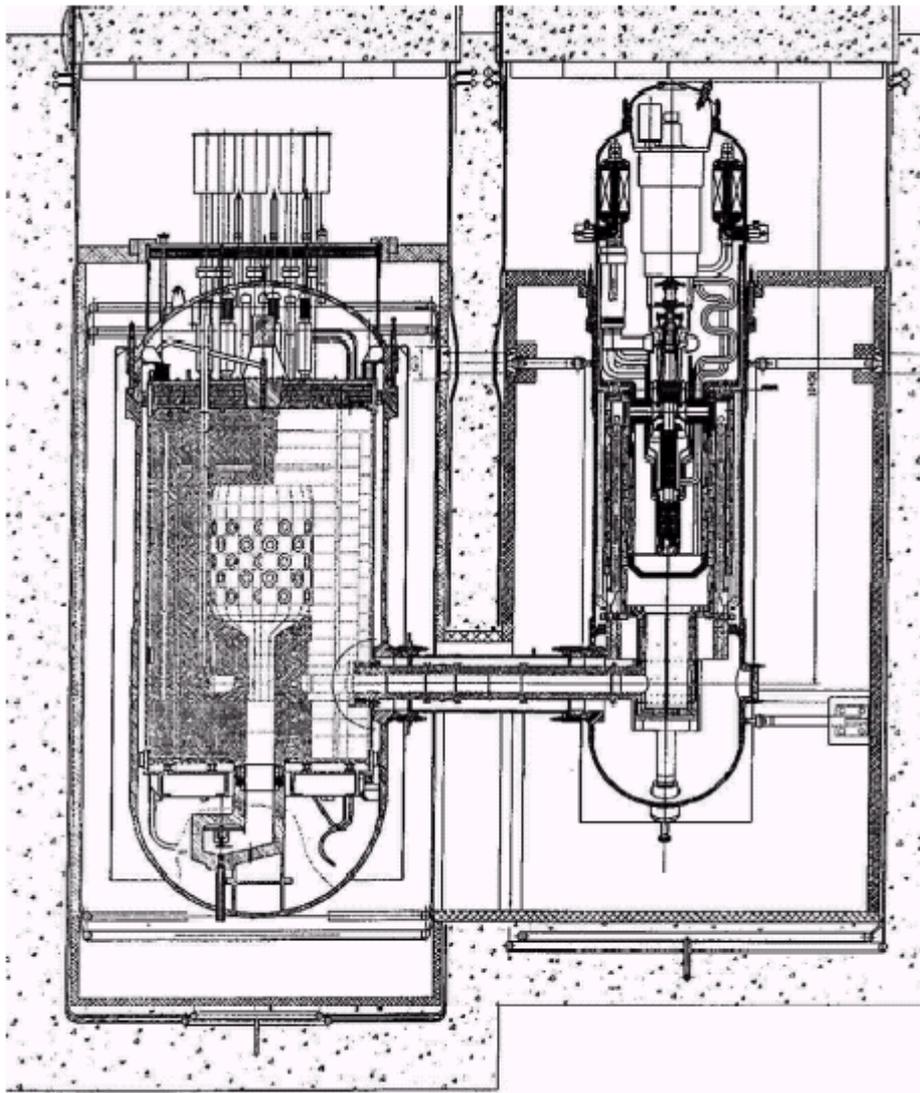


Figura 1.39 - Sezione del reattore HTR-10

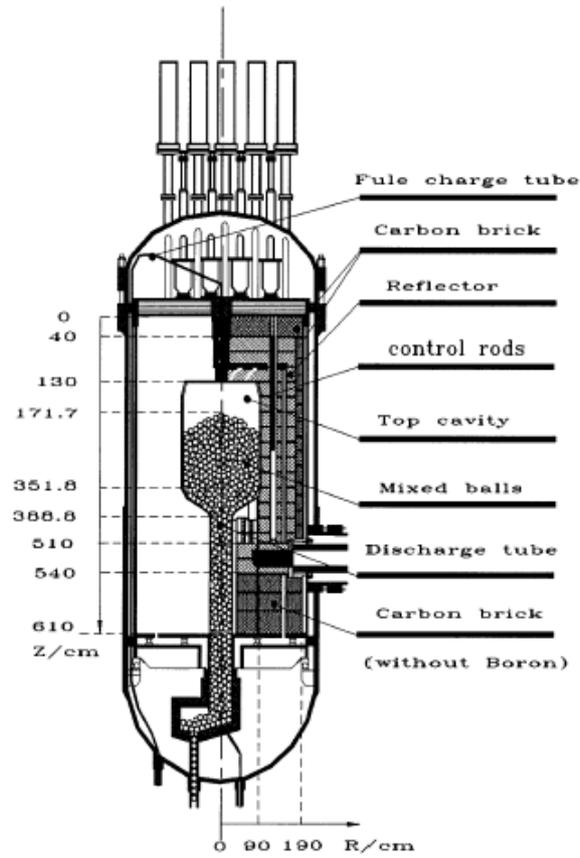


Figura 1.40 - Sezione del core del reattore HTR-10

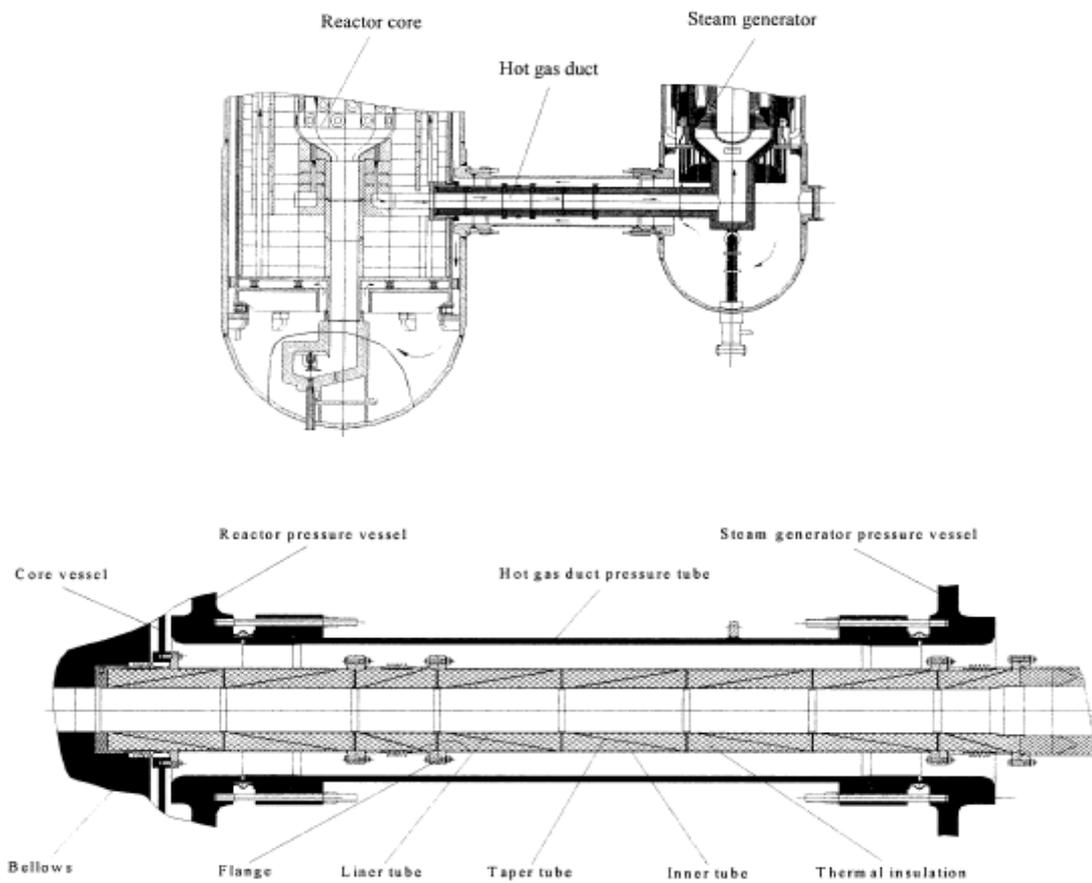


Figura 1.41 - Hot Gas Duct del reattore HTR-10

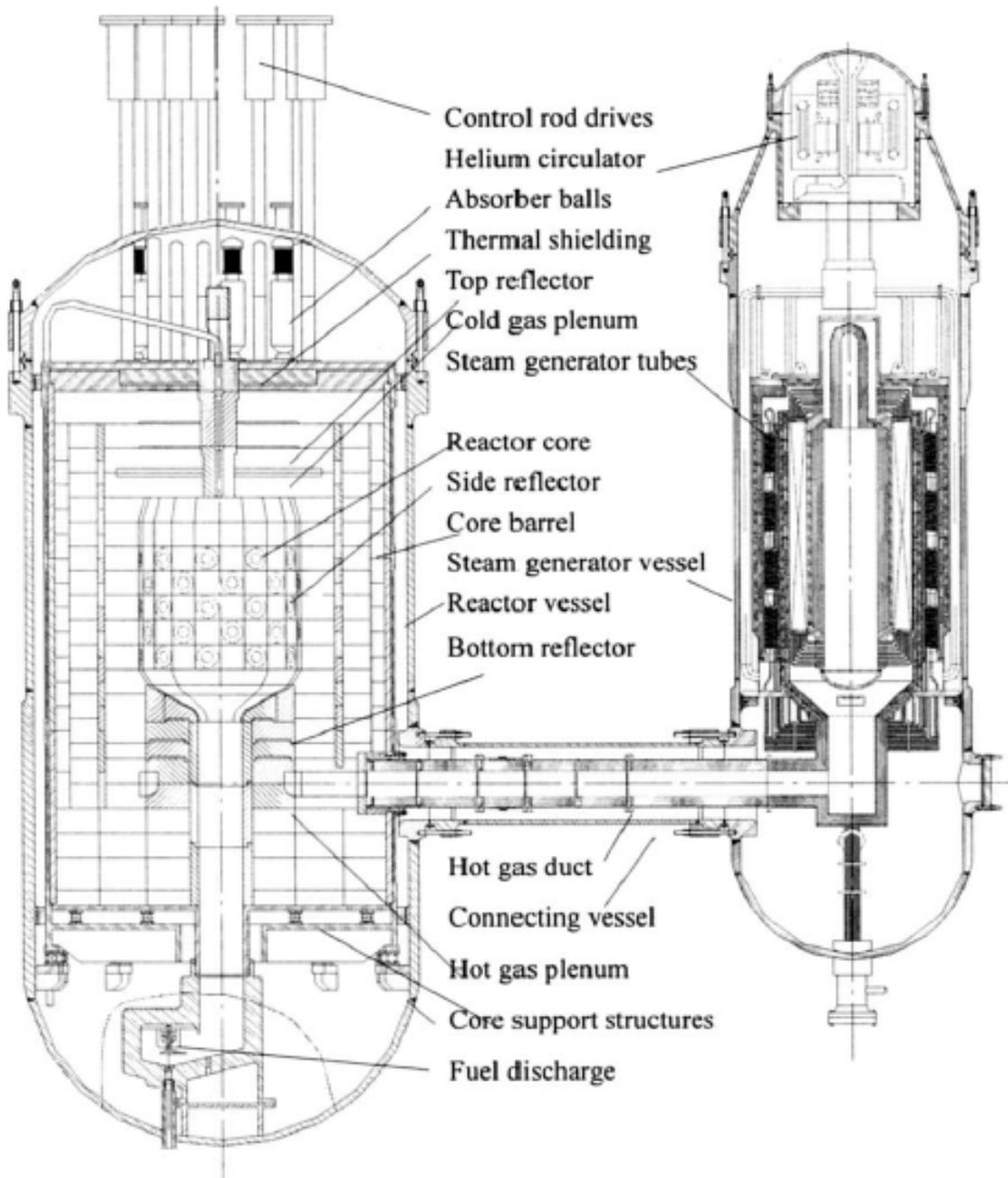
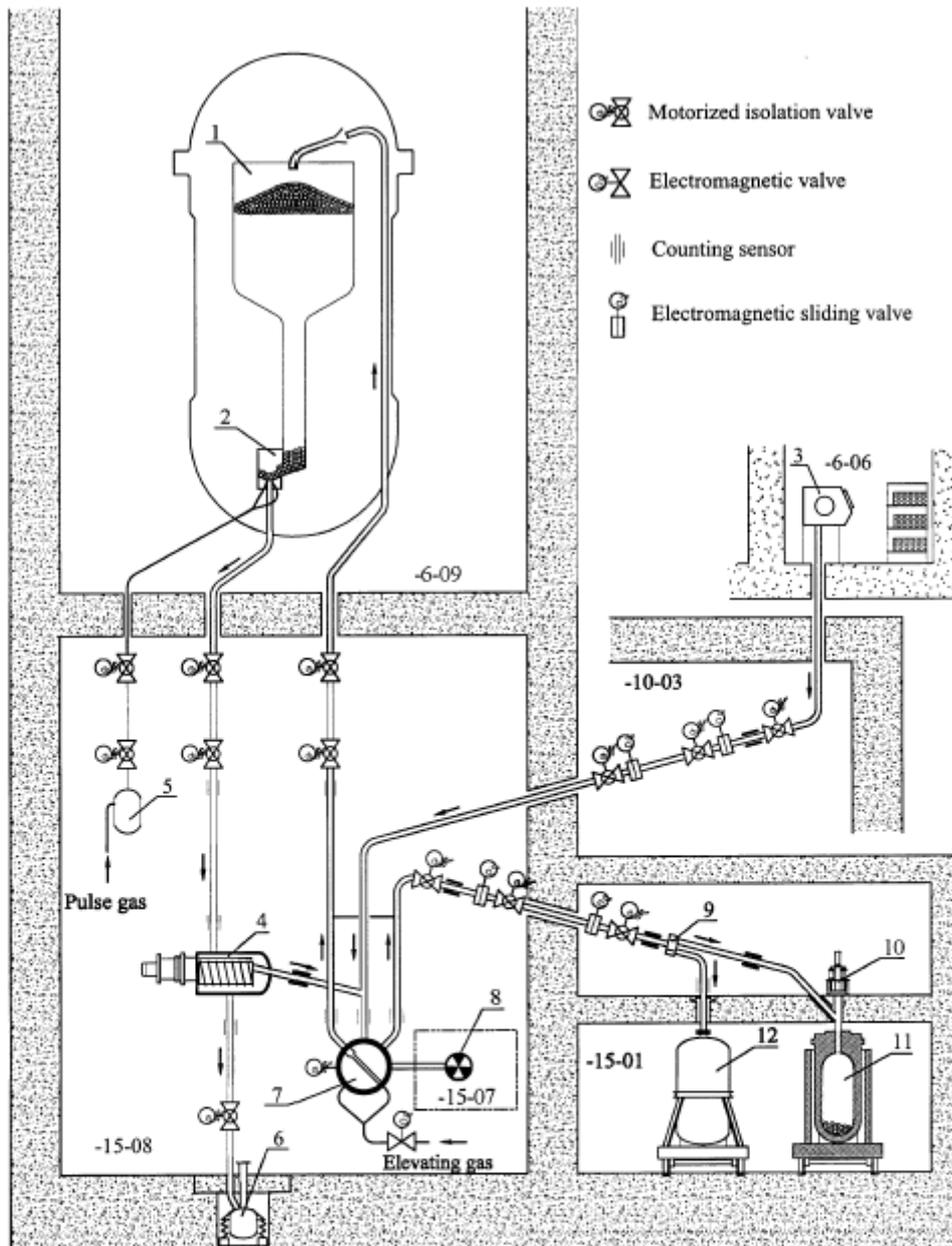


Figura 1.42 - Indicazione dei componenti principali del reattore HTR-10



- | | |
|----------------------------|--|
| 1. Reactor core | 10. Seal mechanism for the cover of spent fuel shipping cask |
| 2. Reducer | 11. Spent fuel shipping cask |
| 3. Glove box | 12. Graphite element container |
| 4. Failed fuel separator | -6-06 New fuel elements charging room |
| 5. Pulse airflow generator | -6-09 Reactor cavity |
| 6. Failed fuel cask | -10-03 Operation valve cavity |
| 7. Elevator | -15-01 Spent fuel storehouse |
| 8. Burnup measuring device | -15-07 Burnup measurement room |
| 9. Distributor | -15-08 Fuel handling room |

Figura 1.43 - Sistema di movimentazione delle pebble del reattore HTR-10