

Progetto e Impianti

Dopo molti anni di stasi, si ricomincia a parlare di nucleare, di un "nuovo" nucleare, più sicuro, più economico ed eco-compatibile ma, soprattutto, fortemente voluto dalle economie emergenti e dall'industria energetica.

Il nucleare possibile

di Cristiano Vergani

Il dibattito sul nucleare ha ultimamente ripreso molto vigore, non solo all'estero, ma anche in Italia, nonostante la particolare esclusione del nostro Paese da questo settore energetico. La comparsa di un approccio diverso, attraverso l'adozione di reattori più piccoli e più sicuri, potrebbe favorire il rilancio di una tecnologia potenzialmente in grado di convivere utilmente con lo sfruttamento delle energie rinnovabili.

Di fronte all'emergenza costituita dal riscaldamento globale, una determinata corrente di pensiero, sostenuta anche da alcune posizioni ambientaliste, ripropone il nucleare come l'unica soluzione in grado di conciliare lo sviluppo economico con la tutela dell'ambiente. La motivazione principale consiste nella produzione molto ridotta di anidride carbonica da parte delle centrali a fissione, tenendo conto che le energie rinnovabili coprono attualmente una percentuale trascurabile dei fabbisogni energetici e che non ci sarebbe il tempo per evitare, con lo sviluppo troppo lento delle rinnovabili, la degenerazione irreversibile del clima planetario. In realtà, le variabili del problema energetico sono in costante evoluzione, rendendo molto difficile la certezza di qualsiasi previsione. Ad esempio, in coincidenza con le recenti festività pasquali, la Spagna ha annunciato di avere coperto quasi il 45% del fabbisogno elettrico nazionale con l'energia eolica, complici i ridotti consumi in concomitanza ad una ventosità particolarmente sostenuta. Un risultato impensabile fino a poco tempo fa, indice di un grande progresso nell'integrazione dell'eolico con le reti di distribuzione elettrica. Inoltre, per rimarcare un altro dato significativo, recenti sviluppi nella tecnologia del solare fotovoltaico stanno attirando forti investimenti anche da parte di soggetti pesantemente coinvolti nello sfruttamento del nucleare (la compagnia energetica nazionale francese EDF, che ha il primato mondiale del contributo nucleare al fabbisogno elettrico, è uno dei maggiori finanziatori della società californiana Nanosolar, capostipite della rivoluzionaria tecnologia fotovoltaica a film sottile).

A proposito di solare fotovoltaico, anche in Italia si stanno conseguendo dei progressi clamorosi (moduli a film sottile in Telloruro di Cadmio, parabole dicroiche a scomposizione di spettro e celle fotovoltaiche per lunghezze d'onda specifiche) che indicano come, in tempi molto brevi, i costi industriali dell'energia fotovoltaica potrebbero diventare competitivi rispetto all'energia di origine fossile. Di fronte a questi sviluppi, diventa piuttosto improbabile una forte riproposta del nucleare basata unicamente sullo scarso impatto nei confronti del riscaldamento globale. Nei fatti, l'industria nucleare sta subendo un profondo processo di rinnovamento in seguito a ben altre cause: mentre in passato la filosofia del nucleare civile era quasi completamente modellata sulle necessità politico-militari, oggi lo scenario è completamente cambiato. I grandi reattori di un tempo dovevano innanzi tutto produrre plutonio per le armi nucleari ed energia da distribuire in modo fortemente centralizzato, mentre al nucleare del prossimo futuro si chiede, oltre a un livello di sicurezza elevatissimo, una concezione basata su maggiore semplicità degli impianti, minori dimensioni, rapidità di costruzione e facilità di gestione. Questo in base anche ad un processo di trasformazione delle reti di distribuzione, meno centralizzate rispetto al passato, ed alla necessità di fornire grandi quantità di energia in zone prive di infrastrutture, come accade spesso nelle economie emergenti o in zone geograficamente remote e disagiate. Anche la tipologia e la filiera del combustibile nucleare rispondono a criteri diversi rispetto al passato, con l'imperativo di ridurre la quantità di scorie ed il tempo di decadimento dei residui radioattivi.

Le nuove esigenze

Il nucleare tradizionale, basato sulle grandi centrali da 1000 MW ed oltre, commercialmente parlando, segna il passo da molti anni: chi ha la minima possibilità di sfruttare altre risorse energetiche, evita di ricorrere a dei "mostri" che richiedono investimenti ingentissimi e problematiche infinite per l'individuazione dei siti, la concessione delle licenze, la ricerca del consenso da parte delle popolazioni, la gestione del combustibile ed il riprocessamento e lo stoccaggio delle scorie. Per questi motivi, gli enti di ricerca e le industrie del settore stanno cercando da tempo di sondare strade diverse, cercando le nicchie di applicazione più promettenti e rispolverando linee di sviluppo un tempo abbandonate perché ritenute poco funzionali alle strategie allora in voga. Nel 1999 il DOE (Department of Energy) statunitense ha lanciato il programma "Generation IV", al fine di mettere a punto dei reattori che finalmente potessero conciliare

sostenibilità ambientale, sicurezza e convenienza economica. Un panel di esperti dei Paesi partecipanti ha selezionato le tipologie di reattore in grado di soddisfare questi requisiti, indicando un primo traguardo per i sistemi realizzabili in tempi più recenti (sistemi di generazione III+, entro il 2015) e sistemi di quarta generazione veri e propri, con realizzazione prevista tra il 2015 e il 2025-2030. Complessivamente si tratta di una ventina di possibili tecnologie, delle quali almeno sei rappresentano un salto generazionale, mentre le rimanenti consistono in varie evoluzioni degli odierni impianti. Tra tutte queste tecnologie, impossibili da esaminare in questa sede, una in particolare riveste un grande interesse: si tratta del reattore PBMR (*Pebble Bed Modular Reactor*) o a "letto di sfere". Il reattore PBMR, per le sue caratteristiche, ha polarizzato l'attenzione di alcuni Paesi che, per motivi diversi, hanno delle esigenze energetiche pressanti da soddisfare (Cina, Sud Africa). La Cina sta fronteggiando uno sviluppo economico tumultuoso, che richiede un incremento altrettanto rapido nella produzione di energia. Sul fronte nucleare, i Cinesi hanno varato un piano ambiziosissimo, che prevede l'installazione di nuove centrali per un totale di almeno 160 GW entro il 2030. In un primo tempo, saranno utilizzate grandi centrali di tipo tradizionale ma, se sarà possibile, l'intenzione è quella di disseminare piccole centrali nucleari da 100-200 MW in prossimità di tutti i distretti industriali o addirittura di singoli impianti produttivi particolarmente esigenti dal punto di vista energetico. Il Sud Africa invece, oltre alla generazione di energia elettrica, conta su questi impianti come fonte di calore di processo, per rendere più economica la sintesi dei carburanti sintetici (un'industria localmente molto sviluppata e strategica). Inoltre, le autorità sudafricane, convinte della assoluta validità del progetto, ne stanno pianificando la produzione in serie per l'esportazione, come fonte di valuta negli scambi con l'estero.

Anche grandi soggetti privati, come le grandi compagnie petrolifere, sono fortemente interessati a promuovere reattori di piccola taglia ed intrinsecamente sicuri: ciò non deve stupire, in quanto molti analisti sono convinti che l'uso del nucleare potrà estendere per moltissimo tempo lo sfruttamento dei giacimenti di petrolio. Infatti, al contrario di quanto si ritiene comunemente, non ci stiamo avvicinando ad una penuria di petrolio in termini assoluti, ma solo al termine della facilità d'estrazione dell'olio grezzo in forma liquida. Esistono enormi riserve di idrocarburi fossili assorbiti in sabbie e rocce bituminose, che attualmente possono essere estratti solo ricorrendo a trattamenti termici con vapore. Il vapore necessario viene prodotto bruciando gas naturale, con il dispendio di una quota energetica che si avvicina al 40% del totale ricavabile dal greggio estratto. Per di più, si brucia un combustibile pregiato (il gas naturale) per ottenere un olio ancora da raffinare.

Per questo motivo, l'industria petrolifera sostiene e finanzia il nucleare di nuova generazione, confidando di poter disporre in tempi brevi di reattori adatti ad essere utilizzati come generatori di vapore a basso costo per fini estrattivi. In questo modo, si calcola che il petrolio estratto da sabbie e scisti possa diventare economicamente molto più competitivo rispetto ai costi attuali. Ad ogni modo, questo aspetto dovrebbe rappresentare una preoccupazione per coloro che credono di sostenere il nucleare come alternativa al consumo dei combustibili fossili: in realtà, il nucleare rischia di diventare un indispensabile grimaldello per estendere lo sfruttamento del petrolio almeno per un'altra era industriale. D'altra parte, lo sviluppo del nucleare come fonte di calore di processo, rappresenta anche una grande speranza per una produzione abbondante ed economica del vettore energetico più importante del prossimo futuro: l'idrogeno. Infatti, diversi reattori nucleari di nuova generazione, compreso il PBMR, sono del tipo ad alta temperatura, con il fluido di raffreddamento che esce dal nocciolo a temperature superiori a 900°C. Queste temperature sono ideali per sostenere il cracking termico dell'acqua, e la conseguente formazione di idrogeno ed ossigeno gassosi in grande quantità.

Il reattore PBMR

Fondamentalmente si tratta di un reattore moderato a grafite e raffreddato a gas, uno schema di funzionamento che risale agli albori dell'era atomica. L'innovazione consisterebbe nell'utilizzo di combustibile fissile confinato all'interno di moltissime sfere di grafite, accumulate nel nocciolo fino al raggiungimento della massa critica necessaria ad iniziare il processo di fissione. Il principio del reattore a letto di sfere non è comunque nuovo, ma risale ad un progetto tedesco della fine degli anni '50 (reattore AVR, *Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor*). Il primo reattore moderno di questo tipo fu realizzato dalla Siemens negli anni '80 (HTGR-100, High Temperature Gas cooled Reactor, da 100 MW), dimostrando ottime doti di sicurezza, affidabilità e buon funzionamento.

Gli attuali reattori PBMR sono perciò considerati di classe III+, cioè delle evoluzioni di filiere esistenti: tuttavia, in passato non hanno avuto impiego commerciale, quindi la loro applicazione effettiva costituisce una novità. Cina e Sud Africa hanno stabilito un accordo di collaborazione per la realizzazione di alcuni impianti pilota, ed hanno dato il via ad un programma di sviluppo molto ambizioso, che prevede l'installazione di decine di centrali in tempi molto contenuti.

L'impiego di un reattore letto di sfere presenta indubbiamente numerosi vantaggi:

- il combustibile e i prodotti di fissione rimangono costantemente confinati e protetti, facilitando le operazioni di manipolazione e riducendo il rischio di contaminazione;
- il livello della reazione viene facilmente controllato aggiungendo alla massa quantità più o meno grandi di sfere composte di sola grafite con funzione di moderatore;
- le sfere nel reattore sono costantemente rinnovate, riducendo lo stress termico del materiale e permettendo di controllarne periodicamente l'integrità;
- la reazione nucleare è auto limitata al crescere della temperatura, in base alla dilatazione termica della grafite che ne altera le proprietà di interazione con i neutroni. Anche in completa assenza del flusso refrigerante, la temperatura si stabilizza ad un livello insufficiente a danneggiare le sfere e la struttura di contenimento del reattore in materiale refrattario, dotato di un sistema di dissipazione del calore per convezione naturale.

Struttura delle sfere

La sfera contenente il combustibile rappresenta il cuore del sistema, ed è un elemento che ha richiesto un grande lavoro di ricerca e sviluppo. La sicurezza del reattore è basata principalmente sulla capacità delle sfere di contenere efficacemente al proprio interno sia il combustibile fissile, sia i prodotti di reazione, solidi e gassosi, per tempi molto prolungati ed in condizioni di temperatura molto elevate (oltre 1600°C). La struttura è composita, nel senso che ogni sfera è in realtà composta da una massa contenente una grande quantità di microsferule (particelle TRISO - *Tristructural-isotropic*) inserite in una matrice di grafite, confinata all'esterno da una "buccia" compatta ad alta densità. Il materiale costituente principale è una grafite ad elevata purezza, che viene depositata intorno al nucleo attivo delle microsferule con modalità differenziate secondo la funzione da svolgere: il primo strato interno, deposto intorno al granulo di materiale fissile (avente diametro di 0,3 mm), ha la funzione di assorbire e trattenere i prodotti di reazione, quindi possiede una struttura soffice e ramificata, in grado di ospitare e trattenere le molecole residue dalla fissione. Lo strato immediatamente più esterno è molto più compatto, in quanto deve fornire un primo contenimento meccanico. Più esternamente, troviamo uno strato di carburo di silicio, un materiale ceramico estremamente duro e compatto, che ha la funzione di sigillare ermeticamente la zona "contaminata" della microsfera, impedendo ogni possibile fuga di

Cristiano Vergani

"Il nucleare possibile"

sostanze radioattive. La struttura della microsfera è completata esternamente da un guscio protettivo, sempre in grafite compatta. Il materiale fissile utilizzato per il granulo centrale è in genere Uranio diossido, ma possono essere utilizzati anche dei carburi di Uranio o di Uranio e Plutonio, oppure il MOX (ossidi misti di Uranio e Plutonio) o il Torio in combinazione con Uranio e/o Plutonio.

Reattori sigillati portatili

I reattori portatili, anche se non costituiscono una novità assoluta, rappresentano forse l'ultima frontiera del nucleare, la concretizzazione del un sogno un po' utopistico della disponibilità di grandi quantità di energia sempre e dovunque, come in un racconto di fantascienza. In realtà, li abbiamo avuti sempre intorno a noi, anzi, nei nostri mari, perché i sottomarini nucleari sono la dimostrazione della fattibilità di un nucleare "tascabile". Tuttavia, il passaggio da un reattore progettato per usi militari ad un impiego civile non è affatto semplice e scontato: i reattori militari sono concepiti con priorità diverse da quelle della assoluta sicurezza e dell'economicità di esercizio indispensabili nelle applicazioni commerciali. Inoltre, il controllo della filiera del combustibile può diventare un incubo con tanti piccoli reattori dispersi sul territorio, senza pensare alle implicazioni legate ad attività criminali e terroristiche. Per questi motivi, pur esistendo da tempo delle tecnologie impiegabili per loro costruzione, non sono mai stati proposti dei reattori portatili, o destinati a mezzi semoventi civili, con l'eccezione della nave mercantile americana Savannah, smantellata nel 1972 dopo pochi anni di esercizio perché ritenuta antieconomica (mancò per poco la crisi petrolifera dell'anno seguente, che l'avrebbe salvata). Ad ogni modo, l'inconveniente più grave che impedì il proliferare dei piccolissimi reattori consisteva nella necessità di sistemi di controllo sofisticati e di personale fortemente specializzato per la loro gestione. In pratica, la conduzione di un micro-reattore o di una mega-centrale comportava dei costi molto simili, il che rendeva assolutamente antieconomica la filosofia del piccolo nucleare, se non per impieghi strategici (sottomarini e portaerei militari).

Negli ultimi anni, il continuo aumento dei costi dei combustibili fossili e la disponibilità di nuovi materiali e tecnologie più avanzate, hanno portato ad una riconsiderazione del problema, anche in seguito alle pressioni di alcuni settori industriali che necessitano di grandi quantità di energia, spesso in località remote e poco strutturate.

Esistono attualmente diverse proposte di reattore nucleare portatile, accomunate da una impostazione che prevede la completa autonomia del dispositivo dal punto di vista della

gestione e della manutenzione: in pratica, si tratta di dispositivi completamente sigillati, fatta salva la conduzione del calore all'esterno, che non richiedono regolazioni o ricariche di combustibile, comportandosi come delle grandi caldaie a perdere. Nascono infatti come generatori di calore, da trasportare sul posto, attivare e sfruttare per un tempo predeterminato; terminata la vita operativa, devono essere ritornati al costruttore per essere smantellati o ricondizionati. Per il loro esercizio non è previsto l'intervento di personale particolarmente specializzato, perché l'attivazione, l'eventuale disattivazione ed il controllo dei parametri di funzionamento sono previsti in remoto da parte del costruttore, per mezzo di un collegamento satellitare permanente. In ogni caso, si tratta di reattori a sicurezza intrinseca, incapaci di incorrere in una reazione nucleare incontrollata.

L'esempio attualmente più avanzato è rappresentato dal reattore SSTART, proposto dal Livermore Laboratory statunitense: è dotato di un nucleo di combustibile fissile di forma cilindrica, attivato da un riflettore di neutroni posto esternamente al cilindro e libero di scorrere progressivamente verso il basso, interessando progressivamente nuove sezioni di combustibile (per un tempo massimo di scorrimento pari a circa 30 anni). Il dispositivo può essere realizzato in taglie variabili da 10 a 100 MW, e può essere trasportato ovunque per via marittima e terrestre.

Questa tipologia di reattori, potenzialmente molto interessante, è in attesa di ricevere una licenza di esercizio da parte delle autorità atomiche internazionali, ancora piuttosto reticenti a concederla, soprattutto a causa del clima internazionale poco favorevole alla libera e sicura circolazione di reattori nucleari.

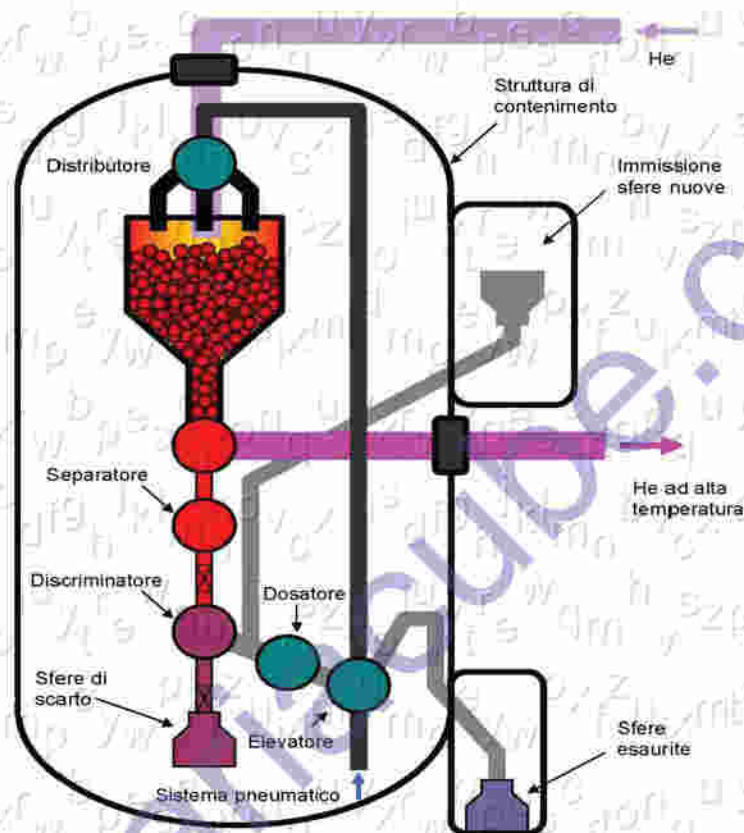


Figura 1

Nei reattori a letto di sfere (PBMR), il nucleo attivo è costituito da un contenitore in materiale refrattario ricolmo di una miscela di sfere, parte completamente in grafite e parte contenenti, sempre in una matrice di grafite, sferule di combustibile fissile circondate da strati protettivi. Un flusso di gas Elio viene fatto passare nel letto di sfere, dove raggiunge una temperatura di circa 900°C . Il gas può essere inviato ad una turbina per la conversione diretta in energia elettrica, oppure ad uno scambiatore di calore per un uso di processo. Un sistema automatico ricircola le sfere e le controlla individualmente, scartando dal ciclo gli elementi esauriti o difettosi.

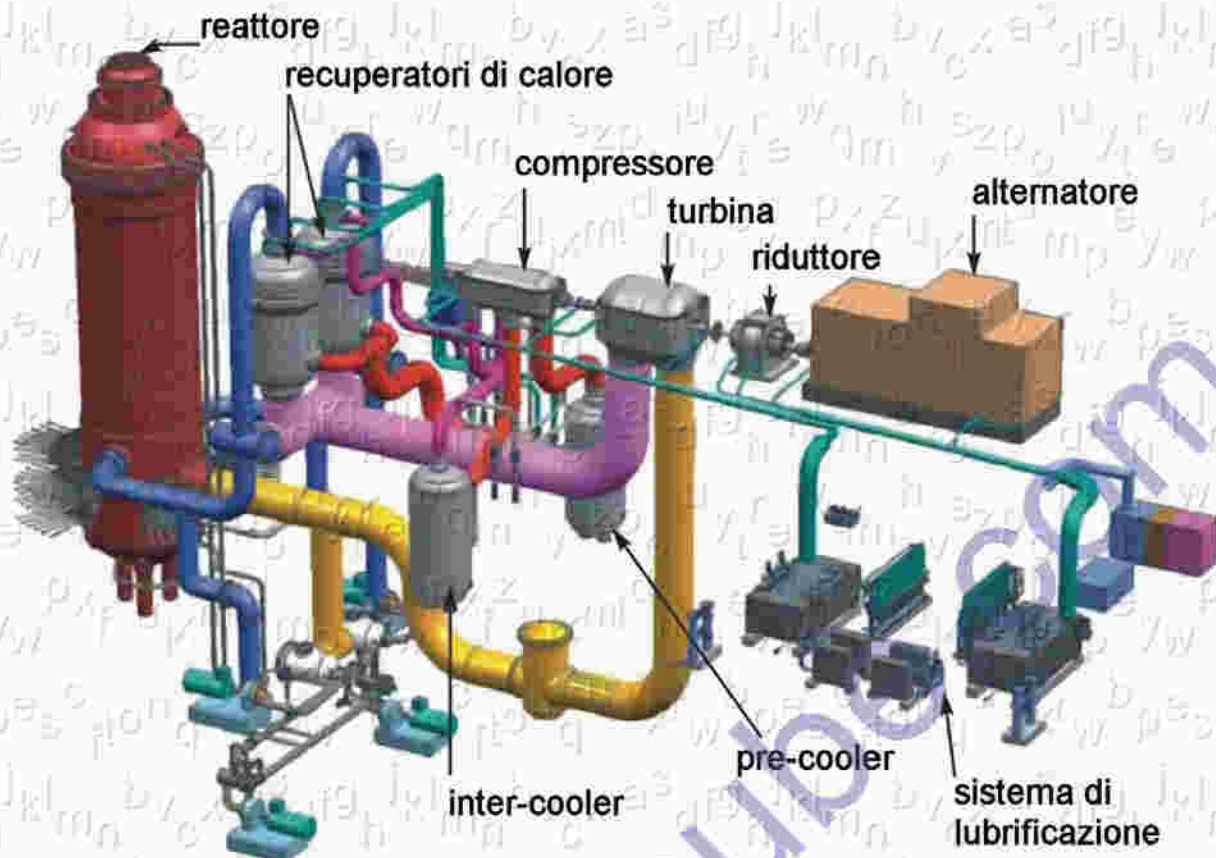


Figura 2

Layout di una unità PBMR di progettazione sudafricana. L'Elio ad alta temperatura in uscita dal reattore (tubazione di colore giallo) è inviata direttamente ad una turbina (a ciclo Brayton) per la conversione diretta in energia elettrica. Il rendimento è intorno al 40%.

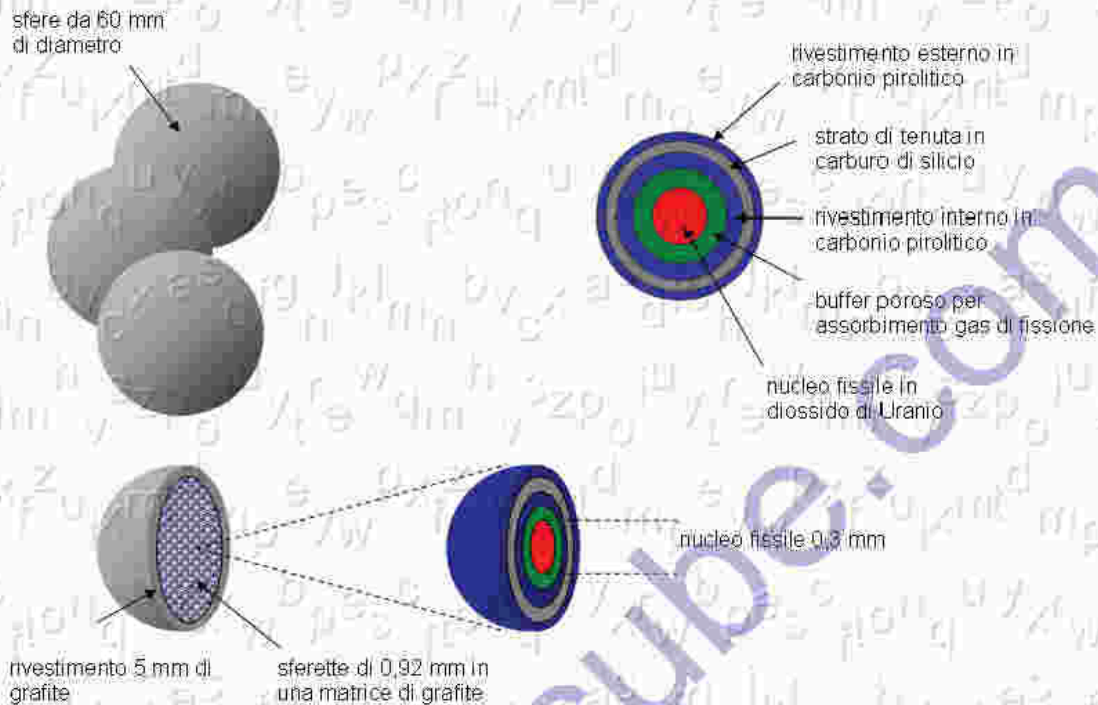


Figura 3

Le sfere usate nei reattori PBMR, della grandezza di una palla da tennis, sono formate da una matrice di grafite contenente numerosissime sferette. Ogni sferetta è formata da un nucleo di materiale fissile circondato da più strati di carbonio pirolitico, e da uno strato estremamente resistente di carburo di silicio, con la funzione di impedire la fuoriuscita dei prodotti di fissione.



Figura 4

La prima centrale sperimentale cinese dotata di un reattore PBMR, in funzione presso l'INET (Tsinghua's Institute of Nuclear and New Energy Technology). La Cina ha già pianificato la costruzione di 30 nuove centrali di questo tipo entro il 2020.



Figura 5

Le centrali che ospitano reattori PBMR non richiedono particolari strutture di contenimento esterne o le grandi torri di raffreddamento tipiche delle centrali tradizionali. Nell'immagine, l'aspetto previsto di una centrale alimentata da 4 reattori per un totale di 460 MWe.

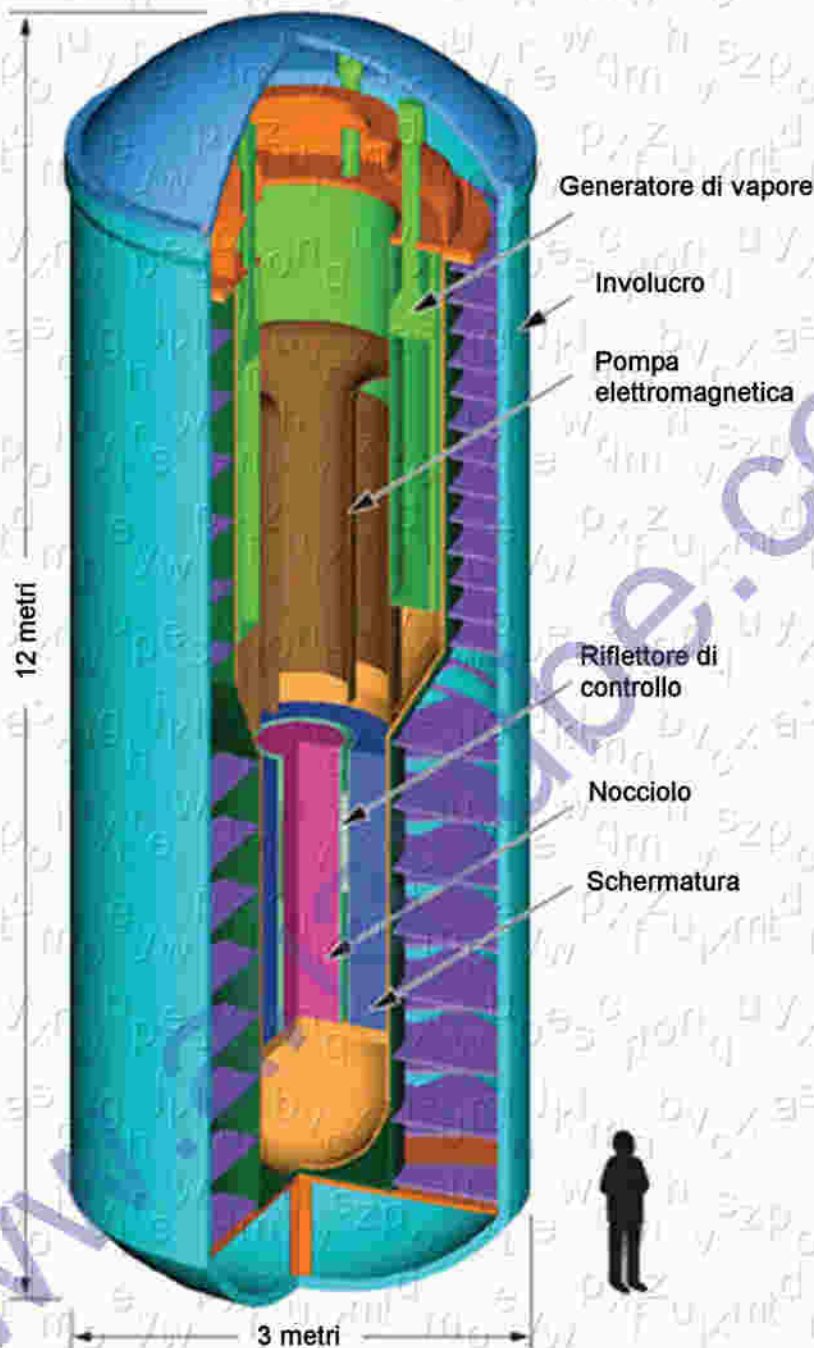


Figura 6

Schema di reattore (SSTAR – Livermore Laboratories) completamente autonomo e sigillato, da utilizzare come generatore di vapore (ad esempio per impieghi estrattivi di idrocarburi). Si tratta di un reattore veloce raffreddato a piombo fuso, in grado di erogare energia (da 10 a 100 MW) continuamente per circa 30 anni. Alla fine del ciclo di vita, il reattore viene rispedito al costruttore per lo smantellamento e la processazione del combustibile esausto.

**Figura 7**

Il reattore SSTAR è progettato in modo da potere essere trasportato in modo relativamente agevole (le dimensioni sono contenute, ma il peso è di circa 500 tonnellate). Con questo reattore si potrebbe alimentare un grande dissalatore oppure un impianto per la produzione di idrogeno virtualmente in qualsiasi luogo, in poche settimane di tempo e senza particolari infrastrutture. Il funzionamento è controllato direttamente dal costruttore via satellite (un aspetto che potrebbe risultare sgradito a molti potenziali clienti).