



Carlo Di Leo

## ABSTRACT

L'uso di una nuova generazione di reattori nucleari di piccola taglia, a sicurezza intrinseca e passiva e costruiti a moduli prodotti in fabbriche centralizzate, potrebbe contribuire a far uscire questa fonte energetica dall'attuale fase di stallo. Si può dunque senz'altro ritenere che l'energia nucleare sia alla vigilia di una nuova era di sviluppo: ne scaturisce l'esigenza di costruire nuovi reattori che facilitino l'accettabilità sociale di questa fonte energetica e permettano l'elaborazione di una nuova filosofia della sicurezza.

## Introduzione

I reattori nucleari attualmente in esercizio generano più del 10% dell'energia elettrica mondiale. Nazioni come la Francia od il Giappone (alle quali si stanno aggiungendo nazioni emergenti come la Cina e l'India ed alcuni paesi dell'Europa del Nord e dell'Est), che



# I moderni reattori nucleari a sicurezza intrinseca e passiva

hanno già fatto forte assegnamento sull'energia nucleare ne stanno pianificando un ulteriore sviluppo. E lo stesso sta facendo la maggior parte dei paesi dell'Europa Orientale insieme al altri stati meno industrializzati. Eppure, negli Stati Uniti, dove i reattori ad acqua naturale (LWR), dai quali viene erogata la maggior parte dell'energia nucleare mondiale furono messi a punto per primi, e dove ne è stato costruito il numero di gran lunga più elevato, l'energia atomica ha subito una flessione. Le compagnie elettriche statunitensi che all'inizio degli anni Settanta avevano dato il via con entusiasmo a svariati progetti nucleari,

dieci anni dopo hanno per lo più abbandonato l'idea di costruire altre centrali. Attualmente, malgrado l'incombenza di una grave crisi energetica, e la necessità di produrre energia da fonti *alternative* rispetto a quella prodotta bruciando idrocarburi, l'energia nucleare stenta a ridecollare. Il petrolio ed il gas naturale pur presenti in abbondanza in alcune aree della superficie terrestre (non in Italia) stanno sempre diventando più costosi ed inquinanti. Il carbone (addirittura più sporco) è difficile da bruciare in modo *pulito* e costerà sempre più caro limitare le piogge acide e controllare gli altri sottoprodotti della combu-



**I mutamenti climatici e l'assottigliamento del buco di ozono sono due tra i temi ambientali di attualità più trattati**

stione, attualmente causa di gravi danni all'ambiente, mentre l'anidride carbonica liberata dalla combustione potrà avere gravi effetti sul clima. Del resto i mutamenti climatici e l'assottigliamento del buco di ozono sono due tra i temi ambientali di attualità più trattati. La possibilità poi che le tecnologie elettriche solari e quelle eoliche siano economicamente competitive, al di fuori di un ristrettissimo campo di località favorevoli o di usi specifici, è ancora tutta da dimostrare.

Alla luce di queste considerazioni, una totale rinuncia all'energia nucleare (come è stato fatto in Italia) sarebbe una scelta sicuramente errata. Tuttavia, in alcuni paesi del mondo, questa fonte si trova di fronte ad ostacoli così ardui (ostacoli di carattere politico, dovuti ad impedimenti burocratici e ad una opposizione di certe frange della popolazione guidate da personaggi tutt'altro che scientificamente preparati) che sarebbe difficile prospettare un rilancio non accompagnato da significative innovazioni, sia nell'organizzazione delle industrie che nella stessa tecnologia. Paradossalmente però, gli attuali guai dell'industria nucleare, e le deprimenti prospettive possono costituire una spinta e quindi un'occasione per riesaminare vecchie decisioni e tentare nuove iniziative.

In America, un episodio che ha influito pesantemente nella *penalizzazione* dell'energia nucleare è stato l'incidente avvenuto nella centrale nucleare di Harrisburg, in Pennsylvania. Infatti la parziale fusione del nocciolo del reattore, nel 1979, dell'impianto di Three Mile Island, è comunemente ritenuta il *giro di boa* delle sorti dell'industria nucleare. Le conseguenze sulla salute umana furono praticamente nulle, ma il fatto stesso che avvenne e le azioni che le autorità intrapresero dopo l'accaduto, talvolta senza il giusto tatto, diedero un brutto colpo alla fiducia che la gente aveva nei confronti della sicurezza della tecnologia adottata.

Ma soprattutto, colpendo duramente le finanze della società proprietaria dell'impianto, l'incidente richiamò l'attenzione dei produttori di energia elettrica sui rischi connessi con gli investimenti nel settore nucleare. Chi volesse approfondire le proprie conoscenze sull'incidente occorso alla centrale di Harrisburg può leggere l'articolo apparso nel Giugno 2021 sul numero 119 di Power Technology intitolato: *L'incidente di Three Mile Island, quarant'anni dopo*.

Comunque oggi, sotto la pressione di una crisi energetica mondiale, il discorso sul nucleare pacifico si è riaperto in numerosi paesi del mondo e la prospettiva di costruire reattori modulari più piccoli, ma anche più economici e sicuri, sta destando notevole interesse, soprattutto tra le aziende interessate ad investire in questo settore.

### **Rapporto tra l'energia nucleare e le altre fonti energetiche**

Come è stato detto nel precedente paragrafo, l'energia prodotta dalla fonte nucleare sta attraversando in alcuni paesi una fase di stallo. Vi sono nazioni come la Francia dove con tale fonte si produce la maggior parte dell'energia elettrica (circa il 75,2%), tanto che il presidente Emmanuel Macron dopo aver promesso oltre al potenziamento di parchi eolici e solari, un investimento di 50 miliardi per costruire sei nuove centrali nucleari, ha dichiarato, non senza una punta di orgoglio nazionalistico, che il suo paese è forse l'unico al mondo a produrre quasi tutta l'energia di cui ha bisogno con emissioni di anidride carbonica ed altri gas tossici praticamente pari a zero (infatti le centrali, pur producendo scorie non rilasciano gas tossici nell'atmosfera). Vi sono poi paesi come il Regno Unito (che produce il 20% della energia totale con impianti nucleari) dove la disponibilità di combustibili fossili e la scelta politica di privatizzare il settore, hanno aumentato la spinta verso

altre fonti energetiche, oppure come gli Stati Uniti (che produce più del 20% con il nucleare) dove, la struttura delle aziende produttrici di energia elettrica piccole e poco integrate, l'assenza di una politica razionalizzatrice del settore ed il continuo aggiornamento delle normative di autorizzazione hanno reso il prodotto nucleare finanziariamente rischioso. Infine, vi sono paesi come la Svezia, la Germania e l'Italia, dove l'opposizione ambientalista ha imposto un arresto della produzione di energia da fonte nucleare, se pur con diversi effetti. Infatti, mentre la Svezia produce la metà dell'energia di cui ha bisogno con impianti nucleari e la Germania ne produce un terzo, in Italia le cose vanno decisamente peggio in quanto a seguito di due referendum abrogativi, tutte le centrali sono state chiuse e non si produce più energia da fonti nucleari. Il Giappone, invece, continua senza ripensamenti, la strada *nucleare*, come pure la Corea del Sud. Tale situazione di crisi, o per lo meno di stasi, che in ogni paese trova giustificazioni più diverse, viene però genericamente addebitata dall'opinione pubblica, o meglio dai mass-media alla non accettabilità dei rischi associati e cioè a quello che comunemente si chiama il problema della sicurezza dell'energia nucleare. In realtà non è vero che l'energia nucleare sia poco sicura, o più correttamente che sia meno sicura di altre fonti alternative, perché semmai è vero proprio il contrario. È noto tuttavia da tempo che l'uomo inconsciamente preferisce rischi assai più elevati, purché più diffusi e meno tangibili. E così si preferisce produrre energia con i combustibili fossili che generano una miriade di sostanze dannose per l'ambiente e pericolose per l'uomo, tra cui molte sostanze riconosciute carcinogene.

Tuttavia questa spiegazione non soddisfa completamente, perché, altre fonti energetiche, come quella idraulica, o altre tecnologie, come quelle relative alla produzione

di sostanze chimiche di elevata tossicità, hanno le stesse caratteristiche per quanto concerne la struttura del rischio e non per questo vengono radiate o costantemente messe sotto accusa. Nei sistemi urbanamente popolati, eventi incidentali di modesta entità possono trasformarsi, attraverso una sequenza sempre più improbabile di situazioni avverse, in una catastrofe di immani proporzioni. Esiste tuttavia un'altra ragione, solo in parte legata al problema della sicurezza, che ha provocato, soprattutto in certi paesi, la crisi del settore e cioè la complessità del sistema nucleare.

Si parla non solo di complessità tecnologica, ma anche di complessità industriale, organizzativa e programmatica. Il sistema nucleare è un megasistema complesso, realizzabile correttamente solo in paesi ad elevata cultura industriale: esso richiede la creazione di strutture industriali appositamente organizzate per produrre questo tipo di energia, cioè in modo tecnologicamente avanzato da coordinare tra loro, così da rispettare la reciproca interdipendenza ed i tempi di attuazione del progetto complessivo. Tutto ciò deve essere programmato per periodi molto lunghi che mal si accordano con le esigenze del sistema politico. Ad esempio l'industria che cura tutti gli aspetti relativi al combustibile nucleare, il cosiddetto *ciclo del combustibile* richiede uno sforzo industriale di vastissima portata che se non è eseguito nei modi e nei tempi necessari, può destabilizzare un programma relativo alla costruzione di centrali nucleari. In Italia per fare un caso concreto, è successo l'opposto, nel senso che una volta realizzata l'industria del *ciclo del combustibile*, coerentemente con il programma di costruzione di centrali nucleari, tutto è stato poi vanificato dall'annullamento del programma stesso, con danni economici terribili, di cui l'opinione pubblica non è totalmente al corrente.



**Il sistema nucleare è un megasistema complesso, realizzabile correttamente solo in paesi ad elevata cultura industriale**

Sicuramente le normative, sempre più stringenti, imposte nel corso degli anni dagli organi di sicurezza nazionali, motivati dalla indiscutibile esigenza di garantire un elevato grado di sicurezza del prodotto nucleare hanno avuto non pochi effetti nel determinare tale complessità, ma anche alcune scelte di fondo, fatte inizialmente dai progettisti e mai più poste in discussione, vi hanno contribuito in modo apprezzabile. Questa complessità non è stata facile da gestire ed alcuni paesi tra cui proprio la nostra nazione, non si sono dimostrati all'altezza della situazione e le loro classi dirigenti, scoraggiate dalle difficoltà, non hanno insistito in tale direzione. Si è così creato un circolo vizioso tra accettabilità sociale e complessità, per cui non è possibile individuare quale dei due fattori abbia maggiormente influenzato tale stato di crisi del settore nucleare. Tuttavia si può ragionevolmente ritenere che l'energia nucleare sia alla vigilia di una nuova era di sviluppo, poiché essa si porrà sempre più in alternativa con le fonti energetiche tradizionali. Il successo di una fonte energetica è legato sostanzialmente a tre fattori: competitività dei costi, disponibilità elevata ed impatto ecologico-ambientale. Nei confronti delle altre fonti energetiche, quella nucleare, risulta avvantaggiata su tutti e tre i fattori.

Mentre però nel passato, i sostenitori insistevano maggiormente sui primi due, oggi, sembra proprio il terzo elemento ad apparire il più vincente. È chiaro che l'impatto ambientale dell'energia nucleare, giudicata sulla base di razionali considerazioni, tecnologiche e non di sensazioni emotive, risulta sicuramente inferiore a quello causato dalle altre fonti energetiche, come è implicitamente dimostrato dal cambiamento di atteggiamento di numerosi gruppi ambientalisti nei confronti dell'energia nucleare. A ciò va aggiunto che l'umanità non ha praticamente davanti a sé nessuna altra alternativa a breve e media

scadenza per alleviare il problema energetico, perché l'unica altra possibile di entità significativa sarebbe quella del risparmio energetico, che è meno facile di quanto comunemente si pensi. Per quanto riguarda quest'ultimo discorso è indispensabile un piccolo chiarimento.

Spesso siamo indotti a pensare che l'unico tipo di energia che adoperiamo sia quello che usiamo direttamente ad esempio quando mettiamo in funzione un qualsiasi congegno elettrico o quando viaggiamo in automobile e non ci rendiamo immediatamente conto che la maggior parte dell'energia di cui abbiamo bisogno, è invece quella impiegata per l'estrazioni di minerali (metallici e non) per la loro lavorazione, per la produzione di alimenti, per le lavorazioni industriali, per il trasporto e la distribuzione delle merci e per moltissime altre attività di carattere economico su cui si regge tutta una nazione. L'energia spesa per questi usi rappresenta il 60-70% delle nostre necessità energetiche e non possiamo certo risparmiarla come facciamo con la luce elettrica della nostra abitazione che viene accesa solo quando ce ne è bisogno. Pertanto se ognuno di noi si impegnasse seriamente nel tentativo di limitare i consumi (per esempio radendosi la barba con un rasoio a mano per risparmiare la corrente che verrebbe consumata da un rasoio elettrico, oppure costruendo gli edifici con un isolamento termico tanto efficiente da evitare dispersioni di calore) l'energia risparmiata dalla comunità sarebbe inferiore al 10% del totale. È un grossolano errore credere pertanto, che un impegno di tutti in questo senso possa ovviare alla necessità di ricorrere alle cosiddette tecnologie *dure* come petrolio, carbone, gas naturale, energie rinnovabili, nucleare ecc. Pertanto, un grande sforzo di contenimento dei consumi energetici su scala nazionale provocherebbe solo una lievissima diminuzione della percentuale di energia necessaria e poiché il prezzo



**L'energia nucleare sia alla vigilia di una nuova era di sviluppo, poiché essa si porrà sempre più in alternativa con le fonti energetiche tradizionali**

del petrolio è estremamente sensibile alla domanda, in termini economici, ciò rappresenterebbe un'efficace manovra politica a breve termine. In nessun caso, però il risparmio può rappresentare la soluzione a lungo termine dei nostri problemi energetici. Pertanto l'energia necessaria ad evitare il collasso economico di qualsiasi paese ed in particolare della nostra nazione deve essere prodotta, per cui il problema non sta non sta nello stabilire quanta produrne, ma piuttosto come produrla. Nel caso specifico dell'energia nucleare, per un eventuale nuovo decollo di questa fonte, è opportuno migliorare il prodotto e ciò è agevolato dal periodo di stasi a cui si accennava all'inizio che ci porta ad un ripensamento critico di quanto si è fatto finora. Da qui l'esigenza di concepire nuovi reattori nucleari, non eccessivamente diversi da quelli esistenti, ma che migliorino l'accettabilità sociale di questa fonte energetica, convincendo anche i più scettici della non pericolosità di essa.

### Problematiche inerenti la sicurezza intrinseca e passiva

I problemi legati alla sicurezza hanno assunto, fin dalle prime applicazioni dell'energia nucleare ai fini pacifici un'importanza primaria a causa dell'enorme pericolo potenziale derivante dall'accumulo di ingenti quantità di prodotti radioattivi nel combustibile. Infatti, un accidentale rilascio nell'atmosfera di una parte di questi prodotti potrebbe avere gravi conseguenze per le popolazioni. L'ammontare totale della radioattività accumulata in un reattore dipende dal tempo e dal livello di potenza di funzionamento. Il combustibile fresco è solo debolmente radioattivo, ma durante la fissione si produce un enorme aumento di radioattività. La maggior parte di questa radioattività scaturisce dai prodotti di fissione veri e propri, il resto dai transuranici, mentre una piccola quantità è dovuta ai materiali del nocciolo non

appartenenti al combustibile, attivati da catture neutroniche. Scopo primario della sicurezza è quello di salvaguardare l'incolumità della gente contro il pericolo di rilascio dei prodotti radioattivi. Non vi è nessun altro pericolo, tanto meno la possibilità che si verifichino situazioni lontanamente confrontabili con quelle di un'esplosione nucleare. Ovviamente deve essere salvaguardato anche il personale addetto all'impianto, come avviene in condizioni di funzionamento normale. Ma bisogna sottolineare, che in casi di emergenza, tale personale è più preparato, rispetto alla popolazione a fronteggiare situazioni critiche. Nel quadro generale dei problemi di sicurezza, sono da considerare oltre alle centrali nucleari di potenza, anche tutti gli impianti necessari per il ciclo del combustibile a cominciare dall'estrazione dell'uranio, fino al trattamento del combustibile esaurito e all'immagazzinamento dei prodotti di fissione in esso contenuti.

I prodotti di fissione contenuti nel combustibile sono separati dall'ambiente esterno da tre barriere: la guaina dell'elemento di combustibile, il circuito di ricircolazione ed il contenitore. Si definisce incidente quell'evento non intenzionale che riduce l'integrità di una o più barriere al di sotto dei livelli ammessi in sede di progetto. Un incidente non implica necessariamente un pericolo, ma tale evento deve essere corretto prima che l'impianto possa riprendere il suo naturale funzionamento. Gli eventi che determinano un incidente possono essere di origine interna o esterna. Quelli interni sono definibili come malfunzionamenti o rotture dell'impianto ed interventi non corretti da parte degli operatori. Gli eventi esterni, sono invece quelli naturali, come sismi, tornado, allagamenti, come pure l'impatto con la centrale di aerei o missili e l'esplosione di nubi di gas o vapori infiammabili fuoriusciti da serbatoi. Inoltre, i fenomeni che possono aggravare l'evoluzione di un incidente sono sostan-



**L'ammontare totale della radioattività accumulata in un reattore dipende dal tempo e dal livello di potenza di funzionamento**



**Un incidente può aggravarsi per effetto di reazioni chimiche esotermiche, del tipo metallo-acqua**

zialmente due. Un reattore nucleare infatti anche quando è spento, produce sempre potenza, a causa delle emissioni radioattive dei prodotti di fissione accumulati nell'elemento di combustibile. Questa potenza decade nel tempo molto lentamente, ed in valore assoluto vale qualche per cento e poi qualche per mille della potenza nominale: se nel nocciolo non fosse operante un sistema di raffreddamento, anche di efficacia limitata, si potrebbe arrivare alla fusione del combustibile con la fuoriuscita da esso dei prodotti di fissione accumulati. L'altro fenomeno consiste nella possibilità che il reattore possa crescere di potenza, cioè divenire transitoriamente sovracritico, sia a causa del malfunzionamento di un sistema di controllo, che a causa degli effetti dovuti a variazioni non volute di diversi parametri del fluido termovettore come pressione, temperatura e grado di vuoto. In questo caso si possono avere rilasci pericolosi per l'integrità del nocciolo del reattore.

Nella sua evoluzione, inoltre, un incidente può aggravarsi per effetto di reazioni chimiche esotermiche, del tipo metallo-acqua ( $U-H_2O$ ,  $Zr-H_2O$ ,  $Na-H_2O$ ). In condizioni normali, tali reazioni non si verificano, perché le due sostanze sono fisicamente separate o sono a temperature tali da non reagire tra loro ( $Zr-H_2O$ ). Tuttavia nel corso di un incidente, queste condizioni possono venire meno. In sostanza, quindi, un incidente nucleare è quella situazione in cui si determina uno squilibrio tra la potenza generata dal combustibile e quella che il sistema è in grado di asportare. Alla lunga ciò provoca la rottura della guaina e quindi il rilascio, al di fuori del combustibile dei prodotti radioattivi. È questa una condizione di potenziale pericolo per l'ambiente e la salute pubblica. Un approccio più immediato ai problemi di sicurezza nucleare è quello di progettare l'impianto in modo tale che non si verifichino queste condizioni di pericolo. Si parla così di

sicurezza intrinseca, che consiste nell'eliminare specifiche condizioni di pericolo e non limitarsi a svolgere nei loro riguardi pure e semplici azioni di controllo. Così, ad esempio, impiegare in un impianto materiali non infiammabili elimina ogni pericolo di incendio. Se nel nocciolo di un reattore, un accidentale aumento di temperatura causa, per effetto di fenomeni fisici ad essa collegati una diminuzione di densità neutronica e quindi della potenza generata, si è realizzato un meccanismo di controreazione in grado di limitare intrinsecamente ogni ulteriore aumento di temperatura. In questo caso, però, tale meccanismo agirebbe inizialmente in senso opposto, qualora la temperatura dovesse accidentalmente diminuire. Utilizzare all'interno del contenitore un'atmosfera inerte (azoto al posto dell'aria) rende l'impianto intrinsecamente sicuro contro esplosioni dell'idrogeno, eventualmente formatosi con reazioni metallo-acqua, in seguito ad un incidente; ciò però nei limiti in cui può essere garantita l'integrità del contenitore stesso.

Questi ed altri esempi evidenziano che le singole caratteristiche di sicurezza intrinseca possono si eliminare specifiche condizioni di pericolo, ma non sempre completamente ed in certi casi con un'efficacia condizionata dal corretto funzionamento di altri sistemi. Se poi si osserva che non è possibile eliminare l'accumulo dei prodotti radioattivi all'interno del nocciolo, si conclude che un impianto intrinsecamente sicuro non è di fatto realizzabile. Ciò non significa che non sia molto importante concepire un impianto con il maggior numero di caratteristiche di sicurezza intrinseca, purché si chiariscano le specifiche condizioni di pericolo eliminate ed i limiti in cui ciò si manifesta. Per tutte le altre condizioni di pericolo, è necessario ricorrere a sistemi di protezione appositi, che hanno lo scopo di prevenirle e di attenuarne le conseguenze.

Un sistema di protezione si definisce *passivo* se entra spontaneamente ed automaticamente in funzione senza interventi esterni e l'impianto si definisce dotato di caratteristiche di sicurezza passiva rispetto alla specifica condizione di pericolo fronteggiata dal sistema. Per intervento esterno si intende apporto di energia, elettrica o meccanica, di segnali *intelligenti* e di azioni umane. Pertanto le funzioni di sicurezza passiva sono ottenute sfruttando le leggi naturali e le proprietà dei materiali impiegati.

### Approfondimenti sul concetto di sistema passivo

I sistemi passivi con le funzioni di protezione verso potenziali pericoli, sono sempre stati utilizzati negli impianti industriali. Volendo fare un esempio un po' curioso, si può citare il sistema proposto da Leonardo da Vinci che avrebbe dovuto evitare il pericolo di bruciare le carni allo spiedo. L'autore affermava che: *questo è il vero modo di cuocere gli arrostiti imperò che, secondo che'l fuoco è temperato o forte, l'arrostito si svolge adagio o presto*. Tornando agli impianti nucleari, quelli esistenti fanno già largo uso di sistemi di sicurezza passiva. Ad esempio il circuito primario, che racchiude il nocciolo del reattore, e comprende tutte le apparecchiature per trasferire al sistema utilizzatore il calore generato nel nocciolo stesso, costituisce una tipica protezione passiva contro il rilascio di materiali radioattivi, eventualmente fuoriusciti dal nocciolo. In caso di guasti del circuito primario, un'ulteriore barriera di tipo passivo, è costituita dall'edificio che racchiude tutto il sistema nucleare (il cosiddetto contenitore); in questo caso, però non sempre la sua funzionalità è completamente assicurata senza l'intervento di altri sistemi che non sono passivi (e che pertanto sono detti sistemi attivi). Negli impianti ad acqua in pressione tipo PWR, l'importante funzio-

ne di iniezione del refrigerante nel circuito primario, in caso di una sua rottura, è effettuata da un sistema passivo, basato su un accumulatore idraulico tenuto in pressione con azoto. Tuttavia il loro impiego può essere sostanzialmente accresciuto come si sta cercando di fare per i reattori di nuova concezione. Prima però di illustrarli, bisogna considerare che le diverse tipologie di sistemi passivi, non hanno lo stesso livello di passività nel senso che possono essere più o meno soggetti, in linea di principio, a guasti o interferenze umane. Un Comitato di esperti dell'IAEA (*International Atomic Energy Agency*) ha proposto di classificare i sistemi passivi secondo tre livelli ai quali se ne è aggiunto in seguito un quarto, per cui si è giunti a classificare i sistemi passivi nelle seguenti quattro categorie:

1. Sistemi di tipo completamente statico, (ad esempio l'irraggiamento termico di due superfici);
2. Sistemi che provocano il movimento dei fluidi (ad esempio mediante la circolazione naturale di fluidi);
3. Sistemi che provocano sia il movimento dei fluidi che quello degli organi meccanici (ad esempio mediante la circolazione naturale attivata da valvole unidirezionali);
4. Sistemi che provocano sia il movimento di fluidi che quello di organi meccanici, questi ultimi attuati da sistemi di controllo azionati da sorgenti di energia dedicate (ad esempio mediante la circolazione naturale attivata da valvole elettriche o pneumatiche).

Ciò premesso si considerino alcune tipologie di sistemi passivi. In *figura 1* è rappresentato un serbatoio da raffreddare. Tale serbatoio può essere il recipiente a pressione che contiene il nocciolo del reattore oppure il contenitore che racchiude tutto il sistema nucleare, oppure ancora, un serbatoio di servizio da cui si deve prelevare un fluido per il raffreddamento del



**Per intervento esterno si intende apporto di energia, elettrica o meccanica, di segnali intelligenti e di azioni umane**

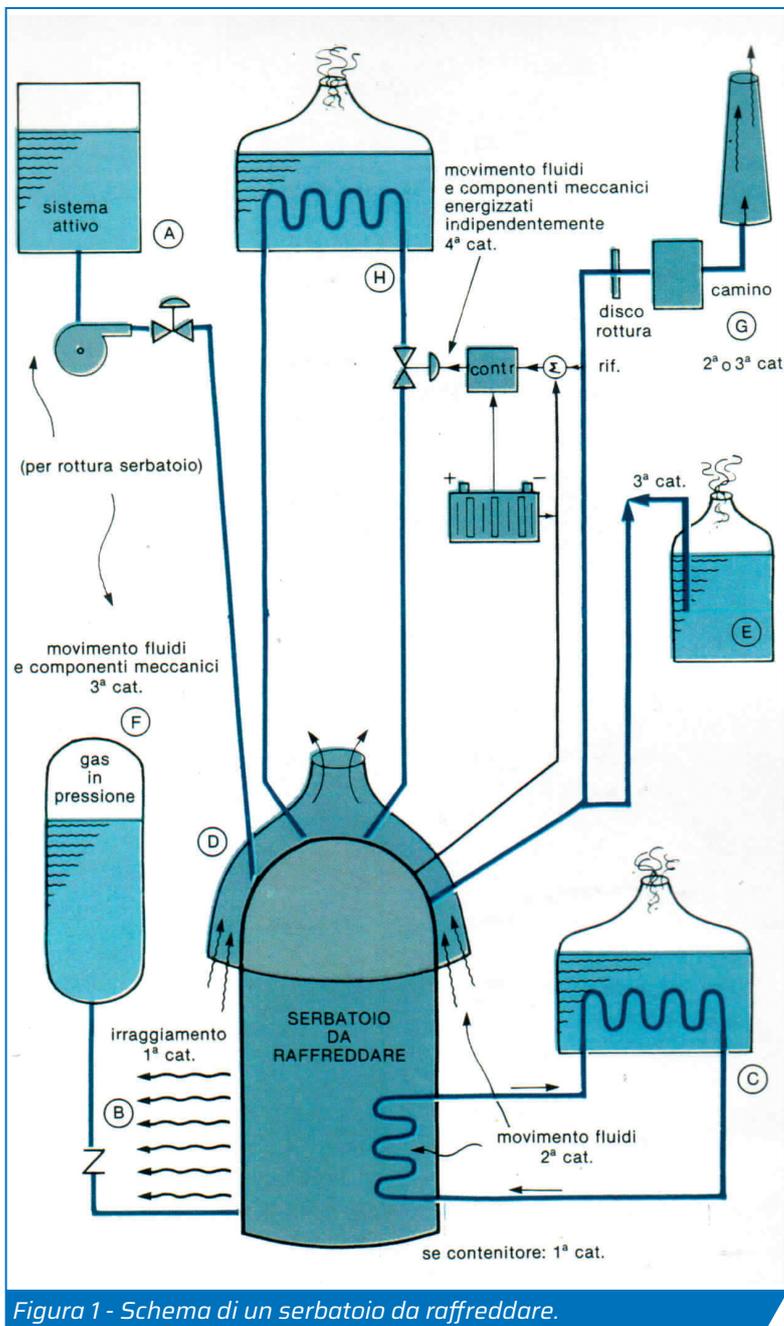


Figura 1 - Schema di un serbatoio da raffreddare.

nocciolo. L'esigenza di raffreddamento nasce da un guasto che ha posto fuori servizio il sistema principale di asportazione del calore o per arresto della pompa di circolazione (serbatoio integro) o per rottura del circuito primario (serbatoio con una perdita).

Il serbatoio da raffreddare è servito da vari sistemi. In alto a sinistra è mostrato un tipico sistema *attivo* (A) che inietta il

fluido nel serbatoio mediante una pompa, alimentata da energia elettrica di rete o prodotta da un sistema di emergenza (ad esempio basato su un motore diesel), previa apertura automatica della valvola di intercettazione che deve essere alimentata da una sorgente di energia analoga alla precedente. Tutti gli altri sono sistemi passivi di diversa categoria. Il più esente da possibili malfunzionamenti è l'irraggiamento termico verso una parete fredda e per questo appartiene alla prima categoria (B). Si hanno poi due sistemi di seconda categoria basati sulla circolazione naturale dei fluidi (C e D): il sistema C entra in funzione quando la temperatura all'interno del serbatoio da raffreddare supera quella del contenitore di acqua esterno e ciò comporta che in funzionamento normale i due serbatoi siano alla stessa temperatura onde evitare un'inutile dispersione di calore. I sistemi E, F e G sono di terza categoria perché richiedono l'apertura di un organo meccanico: una valvola per i sistemi E ed F ed un disco di rottura per il sistema G. Il loro compito è quello di evitare una pericolosa sovrappressione del serbatoio e di asportare la sua energia. Forse un disco di rottura può avere un grado di passività migliore di una valvola di sfioro e pertanto è dubbio se classificare il sistema G in categoria terza o seconda. Infine, il sistema H può essere attivato solo mediante un segnale che giunga alla valvola di intercettazione: è indispensabile che il rilevatore che invia il segnale e l'organo che comanda l'azionamento della valvola siano completamente dedicati al sistema ed in particolare siano collegati ad una fonte di energia del tutto affidabile (una batteria elettrica, nel caso rappresentato in figura, ma sono possibili anche altre soluzioni). Se tali condizioni sono garantite, si può ancora definire il sistema di tipo passivo, anche se al livello più basso e cioè di quarta categoria. In ogni caso, i sistemi passivi devono assicurare un'adeguata indipendenza dai

guasti dell'impianto e dai fattori umani, e dimostrare altresì un'adeguata capacità di eseguire le funzioni di sicurezza per un determinato insieme di eventi incidentali interni ed esterni all'impianto e per un tempo abbastanza lungo per porre termine all'incidente, senza oltrepassare i limiti delle conseguenze accettabili.

Con l'applicazione dei concetti di sicurezza intrinseca e passiva poc'anzi sommariamente discussi, unitamente ad un'opportuna scelta degli eventi di riferimento, per il progetto, si è cercato di concepire impianti nucleari per i quali un qualsiasi incidente ipotizzabile anche altamente improbabile, non richiedesse interventi umani per la sua estinzione e non comportasse conseguenze tali da rendere necessaria l'evacuazione della popolazione nelle zone circostanti l'impianto. Quanto detto dovrebbe essere facilmente comprensibile all'opinione pubblica intesa nel senso limitato di persone dotate di una cultura tecnica di base. Questi impianti potrebbero essere identificati con il termine di *impianti a sicurezza intrinseca e passiva* (*inherent and passive safety plants*) in quanto le relative funzioni essenziali per la sicurezza, quali lo spegnimento, il raffreddamento di emergenza del nocciolo ed il contenimento dei prodotti di fissione eventualmente liberati al di fuori del circuito, sono ottenute sfruttando fin dove è possibile, caratteristiche di sicurezza intrinseca ed utilizzando sistemi di sicurezza passivi. In tali impianti, le caratteristiche funzionali dei sistemi passivi devono integrarsi con quelle di sicurezza intrinseca degli impianti stessi, controbilanciandone le eventuali debolezze, dovute alle limitazioni della particolare concezione impiantistica considerata.

Molti impianti attualmente studiati da diverse organizzazioni mondiali, intendono attenersi ai requisiti sopra indicati e per tale ragione si qualificano come *impianti a sicurezza intrinseca e passiva*. Non è

possibile dimostrare a questo stadio della loro evoluzione tecnologica se questa denominazione sia corretta, ma è certo che le loro caratteristiche di sicurezza intrinseca e passiva sono più marcate rispetto a quelle dei reattori nucleari più tradizionali. Quindi dovremmo identificare questi impianti almeno con la denominazione *impianti a maggiore sicurezza intrinseca e passiva*.

### Reattori nucleari di nuova concezione

I reattori nucleari attualmente allo studio, possono essere schematicamente suddivisi in tre gruppi: reattori avanzati, reattori evolutivi e reattori innovativi.

I reattori *avanzati* rappresentano la versione tecnologicamente migliorata degli attuali reattori (sostanzialmente quelli ad acqua leggera LWR). Sono impianti standardizzati che massimizzano le potenze unitarie (1300-1500 MWe) ed utilizzano gli stessi sistemi attivi di protezione dei reattori attuali. In pratica questi reattori non introducono ulteriori caratteristiche di sicurezza intrinseca e passiva che non siano già presenti nelle attuali versioni. I loro punti di forza sono pertanto la massima valorizzazione dell'esperienza acquisita, la standardizzazione e la riduzione dei costi unitari.

I reattori *evolutivi* sono ancora basati sulla tecnologia dei reattori ad acqua (LWR), ma con modifiche assai rilevanti, quali una riduzione della potenza unitaria, un aumento dei margini di progetto ed una sostituzione dei sistemi attivi di protezione, con altri di tipo passivo, se pur di categoria elevata.

I reattori *innovativi* sono quelli che pur basati su una tecnologia acquisita, cercano di ottenere al meglio le caratteristiche di sicurezza intrinseca e passiva.

Va sottolineato che questa suddivisione è schematica e non sempre consente di collocare un concetto di reattore in modo univoco, e ciò accade soprattutto per il secondo e terzo gruppo.



**I reattori nucleari attualmente allo studio, possono essere schematicamente suddivisi in tre gruppi: reattori avanzati, reattori evolutivi e reattori innovativi**

Tra l'altro essa non è neppure universalmente accettata dai tecnici del settore, anche perché i risvolti commerciali possono avere il sopravvento su considerazioni di carattere tecnico. Appartenere alla categoria dei reattori *evolutivi* vuol dire accentuare l'elemento di continuità tecnologica con gli attuali reattori, garantendo al tempo stesso una maggiore sicurezza intrinseca e passiva: ciò permette di affermare che si possa passare direttamente alla fase esecutiva, costruendo un impianto di taglia commerciale. Appartenere invece alla categoria degli *innovativi* i cui sostenitori preferiscono chiamarli *reattori a sicurezza intrinseca e passiva* significa accentuare la rottura con il passato per ciò che concerne l'approccio alla sicurezza, ed al tempo stesso, sottolinearne la continuità per quanto riguarda la tecnologia di base, in modo da sostenere che si può accelerare al massimo il passaggio dagli studi di progetto ad una progettazione esecutiva di un impianto capostipite. I progetti dei nuovi reattori nucleari che con diverso impegno vengono attualmente studiati nel mondo da organizzazioni industriali, di ricerca o universitarie sono svariati. Di questi, una decina, tutti LWR, appartengono al gruppo dei *reattori avanzati*, un paio, un PWR (ad acqua pressurizzata) un BWR (ad acqua bollente) a quello degli *evolutivi* ed i rimanenti a quello degli *innovativi*.

Dei reattori *avanzati* si è già detto che sono versioni migliorate degli attuali reattori prodotti dalle varie industrie internazionali. Alcune di queste per progettare la versione *avanzata* si sono consorziate tra di loro come nel caso delle società Hitachi-Toshiba giapponesi e della General Electric americana per il cosiddetto *Advanced BWR* da 1356 MWe e di quello delle società Mitubishi giapponese e Westinghouse americana per il cosiddetto *Advanced PWR* da 1350 MWe.

I due reattori *evolutivi* vengono individuati da due acronimi specifici: AP-600 (Advan-

ced Passive) da 600 MWe, proposto dalla società americana Westinghouse e SBWR (dove la S sta indifferentemente per Small, Safe e Simplified) sempre da 600 MWe, proposto dalla società americana General Electric. Ambedue vengono sviluppati in collaborazione con vari enti ed industrie mondiali, tra cui quelli italiani, sotto l'egida dell'EPRI (Electric Power Research Institute), organizzazione di ricerca finanziata da tutti gli elettroproduttori americani. Infine, nella dozzina di progetti di reattori *innovativi*, sono inclusi i reattori LWR, con netta preferenza per il tipo PWR (ad acqua in pressione) sia i reattori gas-grafite nelle versioni HTGR (High Temperature Gas Reactor), sia i reattori *veloci* raffreddati a sodio liquido.

I due reattori *evolutivi* AP-600 e SBWR hanno sostituito tutti i sistemi di protezione attivi previsti nelle versioni attuali del PWR e BWR con sistemi passivi. Il livello di passività dei diversi sistemi è in genere di terza e quarta categoria. La semplificazione dei sistemi di protezione è sostanziale: per esempio mentre per i sistemi di protezione attivi di un PWR sono necessarie 25 pompe diverse, queste sono del tutto eliminate nell'AP-600. Trattasi di una semplificazione non da poco essendo ogni pompa del tipo *safety grade*, il che significa che nella progettazione, costruzione ed esercizio, vanno seguiti criteri di sicurezza così stringenti, che di fatto esse, come prodotto, non sono neppure lontanamente paragonabili ad una pompa convenzionale. Ovviamente i sistemi passivi proposti devono essere progettati in dettaglio e debitamente sperimentati, cosa questa attualmente in fase esecutiva.

Il reattore PIUS (Process Inherent Ultimate Safety) proposto dalla società ABB Atom è di concezione svedese ed ha, come esplicitamente indica l'acronimo, l'ambizione di essere un reattore a sicurezza intrinseca. Per quanto detto in precedenza conviene definirlo a sicurezza intrinseca e passiva ed



**Dei reattori avanzati si è già detto che sono versioni migliorate degli attuali reattori prodotti dalle varie industrie internazionali**

il suo livello di passività è indubbiamente superiore (seconda categoria) a quello dei sistemi *evolutivi*. Il principio di funzionamento di un PIUS (proposto e studiato in Svezia) è spiegato nella *figura 2*.

Facendo riferimento alla figura sopra mostrata in a) l'acqua scaldata dal reattore fluisce in circolazione naturale tra il recipiente ed il circuito; in b) una pompa fornisce al fluido caldo la prevalenza che bilancia la differenza di peso con il fluido freddo esterno; non vi è più circolazione con il recipiente; in c) idem con generazione e asportazione di potenza; in d) qualsiasi perturbazione della pressione interna (guasto pompa, rottura ecc.) sbilancia il sistema e l'acqua fredda e borata (che cattura i neutroni) entra nel reattore raffreddandolo e spegnendolo.

Le due zone di transizione caldo-freddo sono dette *valvole di densità* (*density locks*). In *figura 3* è riportato un PIUS in sezione.

Come si può vedere in questa sezione, il reattore PIUS è composto da un nocciolo e da un sistema primario di raffreddamento simili a quelli dei reattori convenzionali, ma immersi in una vasca di acqua fredda borata. La vasca ed il circuito di raffreddamento sono collegati idraulicamente in interfacce che sono naturalmente in equilibrio, poiché il liquido caldo resta al di sopra di quello più denso della vasca. Durante il normale funzionamento la pressione generata dalla pompa di circolazione fa sì che l'acqua della vasca non fluisca nel nocciolo. Se il sistema di circolazione si guasta, si avvia un processo di convezione naturale che mette in circolo anche l'acqua della vasca (frecche in nero). Il boro disciolto, assorbendo i neutroni, interromperebbe la reazione a catena ed il volume di acqua sarebbe sufficiente a raffreddare il reattore per parecchi giorni senza l'intervento di operatori o di altri sistemi di raffreddamento. In *figura 4* vi è infine una vista complessiva di un PIUS.

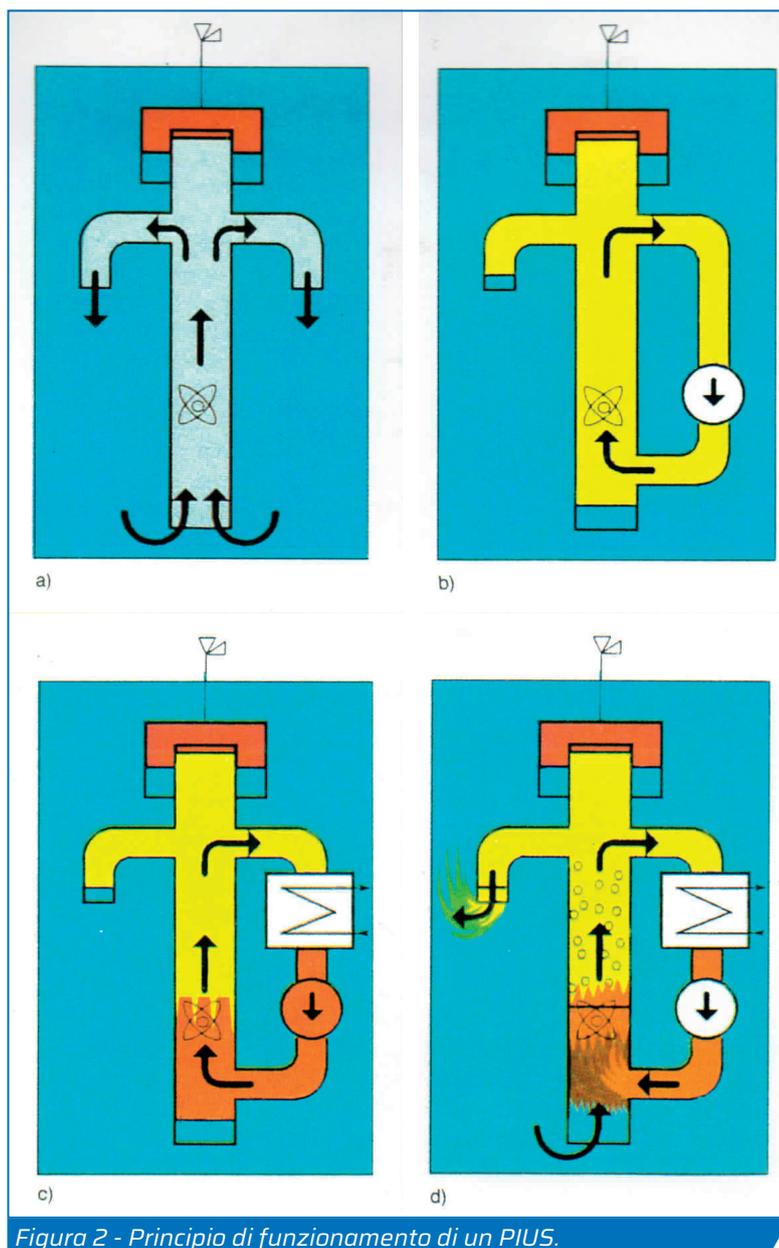


Figura 2 - Principio di funzionamento di un PIUS.

Naturalmente i concetti di progettazione di tipo modulare per la sicurezza intrinseca e passiva, non sono una caratteristica esclusiva dei PIUS ma come detto, riguardano anche altre categorie di reattori, come i reattori ad acqua in pressione, quelli ad alta temperatura raffreddati a gas ed i reattori modulari raffreddati a metallo fuso. In *figura 5* si può vedere in azione un reattore ad acqua in pressione di nuovo tipo.

Il reattore ora mostrato, condivide con i reattori pressurizzati convenzionali il

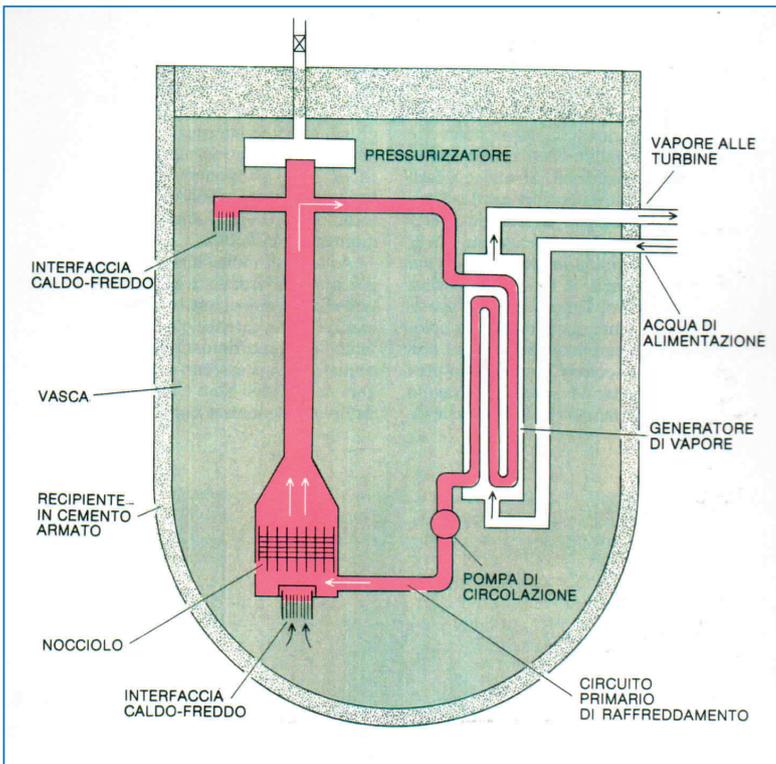


Figura 3 - Sezione di un PIUS.

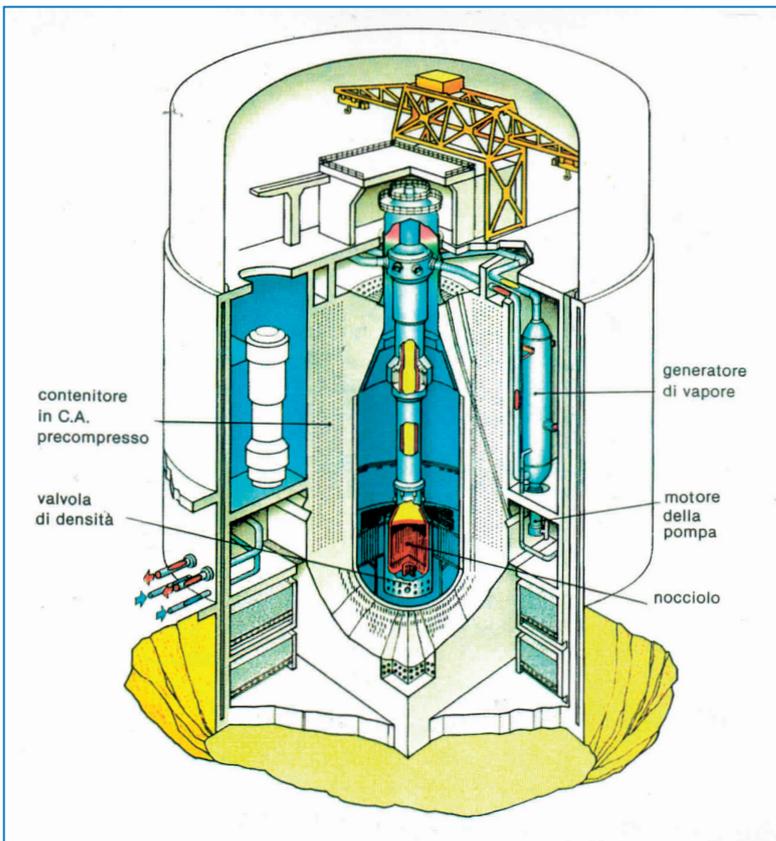


Figura 4 - Vista complessiva di un PIUS.

progetto fondamentale. L'acqua del sistema primario di raffreddamento dalla tubazione di mandata fluisce nel recipiente in pressione, asporta il calore generato dal nocciolo del reattore e lo trasporta al generatore di vapore, dal quale il vapore va alle turbine della centrale.

Il pressurizzatore provvede a mantenere elevata la pressione nel circuito primario, in modo da evitare l'ebollizione dell'acqua, mentre una guardia idraulica protegge la pompa di circolazione dalle bolle d'aria. Il progetto del nuovo reattore, frutto della collaborazione tra Westinghouse Electric Corporation, Mitsubishi Company, compagnie elettriche e Governo nipponico rispetto ai reattori attuali (a sinistra) prevede un nocciolo più grande ed un recipiente più profondo.

L'aumento delle dimensioni del nocciolo riduce la densità di potenza del reattore e quindi la densità dei prodotti di fissione. In caso di guasto al sistema di raffreddamento, perciò, il calore di decadimento farebbe salire la temperatura del nocciolo più lentamente che non nei reattori attuali. Il recipiente più profondo consente di posizionare il nocciolo molto più in basso del circuito di alimentazione e della guardia idraulica cosicché la perdita di fluido refrigerante da una falla nella tubazione non scoprirebbe il nocciolo come invece potrebbe accadere in uno degli attuali impianti. Nel caso di un guasto qualsiasi al sistema di raffreddamento, il maggior volume d'acqua sopra il nocciolo impiegherebbe più tempo ad evaporare che non gli impianti attuali, dando così più tempo agli operatori per far fronte alla situazione di emergenza. Il reattore, con un rendimento leggermente più elevato di quelli attuali, presenterebbe anche altri vantaggi come costi di combustione più bassi ed una manutenzione più semplice e rapida. Poi vi sono i reattori ad alta temperatura raffreddati a gas come quello schematizzato in figura 6.

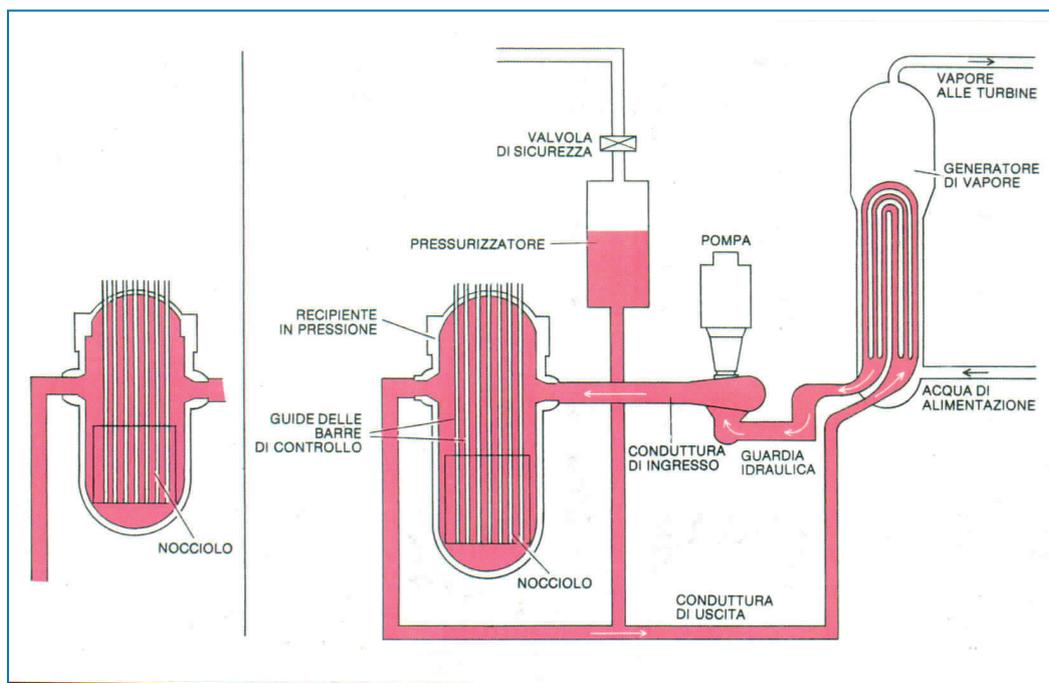


Figura 5 - Reattore ad acqua in pressione di nuovo tipo.



Per fronteggiare un incidente di black-out elettrico, causato da guasti alle linee elettriche esterne, appositi diesel elettrogeneratori sono ospitati in due edifici distanziati tra loro

Il reattore ad alta temperatura raffreddato a gas (HTGR) di concezione modulare impiega come fluido termovettore elio in pressione (in colore) che trasporta il calore dal nocciolo al generatore di vapore. In questo progetto, proposto dalla compagnia tedesca KWU/INTERATOM, il combustibile è costituito da minuscole particelle di uranio, rivestite singolarmente di grafite e carburo di silicio ed inglobate in *ciottoli* o sferette di grafite. Il nocciolo è formato da centinaia di migliaia di questi ciottoli. È possibile effettuare il rifornimento del combustibile con il reattore in funzione aggiungendo nuovi ciottoli e scaricando quelli esauriti dal fondo del recipiente. Il combustibile può sopportare temperature elevate senza subire danni. In caso di guasto al sistema di raffreddamento, grazie alla piccola potenza in gioco e all'alto rapporto superficie-volume, il passaggio di calore all'esterno del recipiente del reattore per irradiazione e raffreddamento dell'aria manterrebbe la temperatura del nocciolo a livelli di sicurezza. La potenza elettrica di un reattore del genere

si aggirerebbe intorno ai 100 megawatt ed una centrale potrebbe comprendere molti moduli di questo tipo. Infine, una menzione a parte meritano i reattori modulari raffreddati a metallo fuso come si può vedere osservando la *figura 7*.

Il reattore modulare raffreddato a metallo fuso possiede un sistema triplo di raffreddamento. Il sodio liquido del sistema primario di raffreddamento (in colore intenso) circola attraverso il nocciolo, forzato da una pompa contenuta nel recipiente del reattore; il calore generato viene ceduto mediante scambiatori di calore al sodio del circuito secondario (in colore chiaro) al quale sono collegati i generatori di vapore (non illustrati).

In caso di guasto alle pompe, il sodio continuerebbe a fluire attraverso il nocciolo per convezione naturale e, trattandosi di un reattore di piccola potenza, il calore residuo potrebbe essere smaltito dall'aria esterna al recipiente, evitando così danni al nocciolo e conseguente liberazione di sostanze radioattive. Il progetto, proposto dalla General Electric Company, punta ad

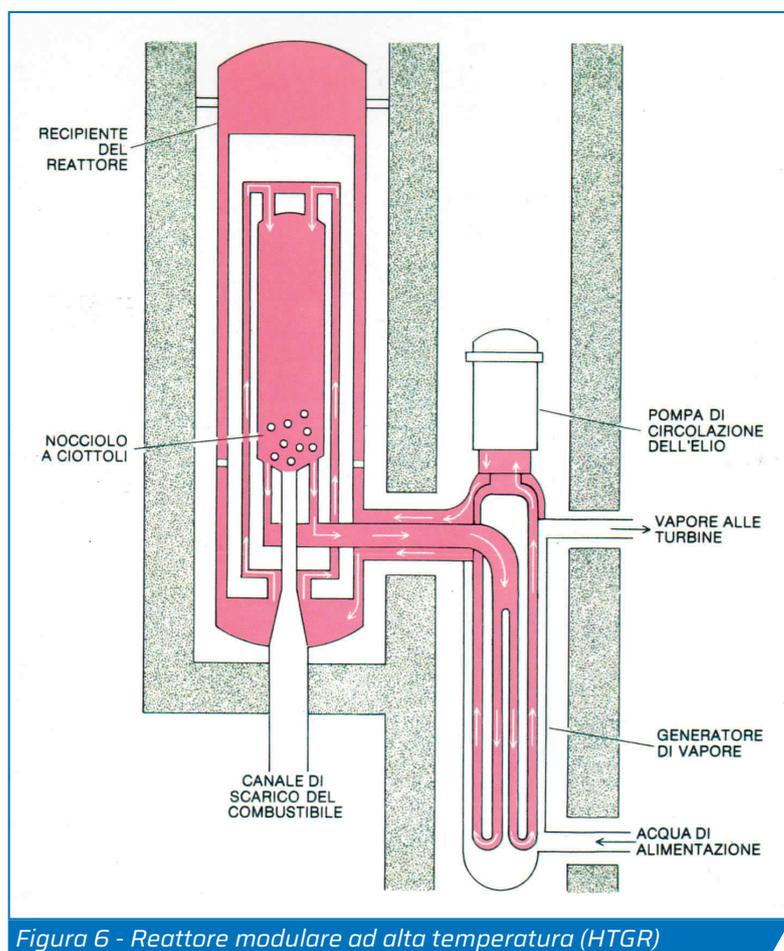


Figura 6 - Reattore modulare ad alta temperatura (HTGR)

una taglia di circa 140 megawatt elettrici. Come nei reattori convertitori a metallo liquido di grande potenza, la trasformazione dell'uranio 238 in plutonio, operata dai neutroni consentirebbe di generare nuovo combustibile nucleare in quantità rilevanti rendendo il reattore autofertilizzante.

Tornando per un attimo ai PIUS, come si può osservare andando a rivedere la figura 4, il reattore e parte del circuito primario sono alloggiati in un grande recipiente che contiene acqua alla stessa pressione del circuito del reattore. L'elemento caratterizzante del reattore è il componente definito *density lock*, che si potrebbe tradurre in *valvola di densità*. Il sistema di protezione del reattore appare indubbiamente innovativo rispetto a quelli degli attuali PWR, basato su sistemi attivi ed an-

che rispetto a quello dell'AP-600, basato su sistemi passivi. Il problema è quello di sottoporlo a tutte le verifiche del caso e di acquisire un'esperienza di funzionamento tramite un impianto prototipo o capostipite che dir si voglia.

Questo concetto ed altri, relativi ai reattori appartenenti sia al gruppo degli *innovativi* sia a quello degli *evolutivi*, dimostrano come per lo sfruttamento del processo nucleare possano esistere diverse alternative tecnologiche per la definizione del sistema impiantistico. Nella situazione precedente all'incidente di Chernobyl, invece, vi era una situazione *congelata*, per cui nessuno osava introdurre e nemmeno proporre cambiamenti anche marginali in quei pochi sistemi, che avevano dimostrato di funzionare ed avevano subito il Vaglio approfondito delle Autorità di Controllo. L'energia nucleare, che ai suoi albori aveva suscitato il fiorire di numerose proposte progettuali, le ha viste poi ridursi a poche, ben definite anche nei minimi dettagli.

### Note conclusive.

In conclusione, l'energia nucleare dopo l'attuale stasi, dovrà riprendere il cammino intrapreso per alleviare il problema energetico non solo dell'Italia, ma di numerose altre nazioni. Questo nuovo sviluppo potrà avvenire ricorrendo ad impianti diversi da quelli esistenti, nel senso che dovrebbero puntare ad una maggiore semplicità complessiva, favoriti da un aumento dei margini di progetto e da una riduzione della potenza unitaria. Ebbene, sia nell'ambito dei reattori *evolutivi* sia in quello dei reattori *innovativi* esistono già numerose proposte, meritevoli di un attento esame, ed altre possono ancora nascere. Occorre però che si coaguli intorno ad alcune di esse un consenso a livello internazionale, se non addirittura mondiale, in quanto lo sforzo di ricerca e sviluppo necessario, non potrebbe essere sostenuto da un unico paese, anche se progredito e potente.

### Referenze bibliografiche

- Cumo Maurizio, Impianti nucleari, Casa Editrice Universitaria La Sapienza, Roma, 2012.
- Di Leo Carlo, L'incidente di Three Mile Island, quarant'anni dopo, Power Technology n. 119 giugno 2021.
- Lester K. Richard, Ripensando all'energia nucleare, Le Scienze, numero 213, maggio 1986.
- Lombardi Carlo, Reattori nucleari di nuova concezione, Scienza & Tecnica, 1991-1992, Annuario EST dell'Enciclopedia della Scienza e della Tecnica, Arnoldo Mondadori Editore.
- Lo Prato E., Petrangeli G., Tononi R., Zaffiro C., Una terminologia per i futuri impianti nucleari, in Energia Nucleare, 1 (1990);
- Fiorentini P., Sarelli D., L'energia nucleare nel mondo, in Energia Nucleare 1-2 (1989);
- Working paper establishes during consultants Meeting on Description of passive safety related terms, Vienna, ottobre 1988;
- IAEA, gennaio 1989, Stato dei Programmi per lo sviluppo dei nuovi reattori a sicurezza intrinseca e passiva, ENEA/DWP, DOC/DWP (88) 2-Rev., 1° gennaio 1988.

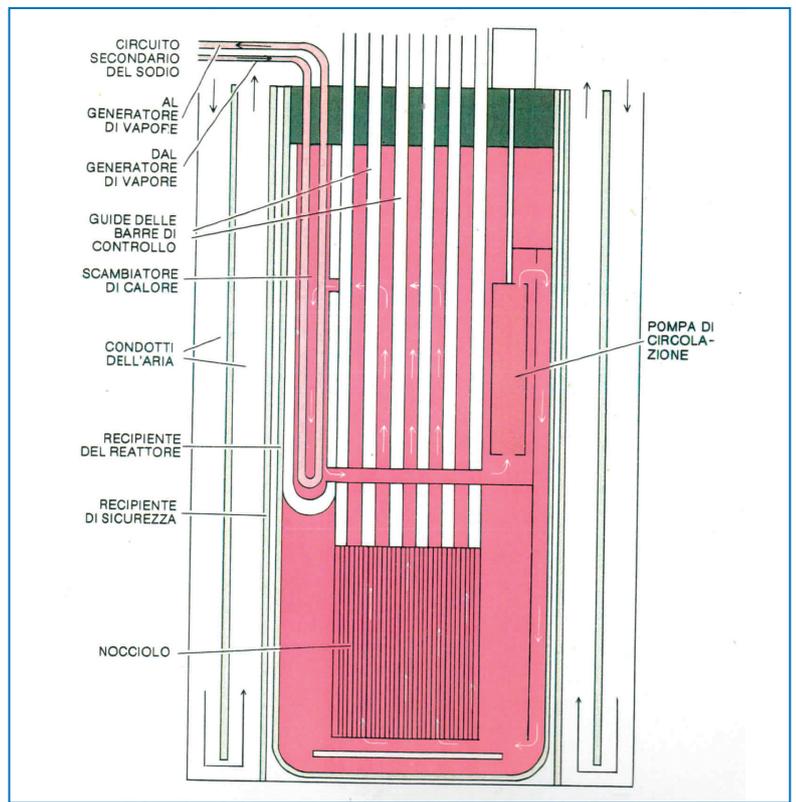


Figura 7 - Reattore modulare raffreddato a metallo fuso