

# Reattori di nuova generazione

Maurizio Cumo  
Universit di Roma "La Sapienza"

*Ricerca Scientifica ed Energia del Futuro*

*Senigallia, 16 settembre 2005*

Un recente volume di un' Agenzia dell' OCSE, la NEA, raccoglie i dati forniti da una quindicina di paesi sui costi di produzione dell'elettricit  da essi stimati sulla base delle loro esperienze con tre tipologie di centrali di potenza alimentate a carbone, a gas naturale con ciclo combinato e a combustibile nucleare. Da questi dati, valutati nel 2004, quando il costo del petrolio era di 30 \$ al barile, emerge una sostanziale equivalenza del costo del chilowattora, anche senza una tassa sulla CO2 emessa che, una volta imposta anche a livelli di 20 /MWh, favorirebbe il nucleare. Le attuali ricerche sulle tecnologie nucleari possono dividersi in due filoni, uno a breve e media scadenza, che i tecnici indicano con il termine "Generation 3rd+", riferendosi alle filiere di reattori interessati, e l'altro con il termine "Generation 4th", a lunga scadenza, vale a dire a partire dal 2030 per l'inizio commerciale. Nel primo filone si vuole valorizzare al massimo il prodotto dei reattori attuali, molti dei quali hanno gi  ultimato, o sono prossimi a farlo, il periodo, per lo pi ventennale, di ammortamento dei capitali impegnati per costruirli. Delle tre componenti del costo del KWh nucleare quella di gran lunga prevalente   il costo capitale, mentre il costo del combustibile   molto minore e paragonabile a quello di esercizio e manutenzione. In pratica, dopo lammortamento il costo del KWh si dimezza e le societ  elettriche cominciano a guadagnare sensibilmente. Vi   quindi un grande interesse a prolungare la vita operativa dei reattori ben oltre i trenta anni inizialmente previsti nei progetti. In genere ci    possibile con la sostituzione di alcuni componenti (ad es. i generatori di vapore nei reattori ad acqua pressurizzata (PWR), con un ammodernamento della strumentazione, e con una verifica approfondita dello stato di conservazione dell'impianto. Negli USA, ad esempio, una ventina dei 103 reattori hanno avuto dall'autorit  di controllo NRC un prolungamento di licenza di 20 anni e praticamente tutti gli altri sono intenzionati a ripetere questa procedura. Un altro obiettivo   quello di produrre pi  energia per unit  di combustibile, il che presenta due benefici: ricariche del combustibile pi  dilatate nel tempo (si   passati da un anno ad un anno e mezzo e si conta di arrivare a due o pi  anni) con un aumento quindi del fattore di utilizzazione delle centrali e maggiore energia prodotta con un combustibile appena di poco pi  caro perch  pi  arricchito in fissile (uranio 235 o plutonio). Si sta affermando nel mondo la adozione del ciclo chiuso del combustibile con ritrattamento di quello esaurito e recupero dell'uranio non fissionato e del plutonio prodotti nell'irraggiamento. Si sono cos  affermati i combustibili ad ossidi misti (MOX) che vengono introdotti sempre pi 

nei reattori con l'obiettivo di passare dal corrente terzo di nocciolo alla metà e poi al nocciolo intero, con una contemporanea crescita del tasso di irraggiamento, passando dagli attuali 50 GWd/t a 60 GWd/t fra qualche anno e a 70 nell'arco di una decina di anni. Nel contempo si fa ricerca per risolvere, con pubblica accettazione, il problema dei rifiuti nucleari. Per i rifiuti occorre distinguere fra quelli a bassa e media radioattività, i prodotti di fissione, e quelli ad alta radioattività e lunghissima durata (centinaia di migliaia di anni), plutonio e attinidi minori (americio, curio e nettunio). I primi, dopo poche centinaia di anni sono quasi del tutto decaduti e quindi non più radioattivi: per questo i loro depositi sono superficiali o sub-superficiali (a profondità di poche decine di metri) e si prevede di sorvegliarli per un periodo di trecento anni. I secondi, che hanno un volume venti volte minore, devono essere inseriti, dopo qualche decennio di raffreddamento in depositi superficiali, in un deposito geologico profondo in particolari formazioni (argille, sali, graniti) ove per milioni di anni l'acqua, l'unico agente che può portare i pericolosi radionuclidi verso la biosfera, non è mai fluita. Sono già state trovate soluzioni soddisfacenti per immobilizzare gli attinidi in matrici di vetro al borosilicato che resistono alla azione di lisciviazione dell'acqua per 10.000 anni, e la ricerca oggi si spinge a risolvere alla base il problema con un ritrattamento del combustibile usato che separi gli attinidi minori (il plutonio viene riciclato nei reattori come combustibile) per poi trasmutarli in radionuclidi a vita molto più corta per irraggiamento neutronico in reattori veloci o in reattori sotto-critici accoppiati ad acceleratori di protoni. Questa operazione è chiamata trasmutazione, ma richiederà ancora qualche decennio perché possa essere realizzata a livello industriale. Che fare oggi in Italia? Anzitutto aderire al consorzio internazionale Generation 4th di undici paesi che si dividono i risultati di ricerca sui reattori del futuro. Questa operazione non ha una tassa di ingresso e richiede semplicemente di rendere disponibili agli altri paesi i risultati delle ricerche nucleari (poche) che si fanno in Italia, non foss'altro nell'ambito delle ricerche comunitarie Euratom. Poi, intensificare le ricerche per il deposito superficiale dei rifiuti a bassa/media radioattività (da realizzarsi in pochi anni, con accordi con le comunità locali come già avvenuto in altri paesi europei), simultaneamente alle ricerche per il deposito geologico per cui occorre una sperimentazione in profondità per almeno un decennio prima di avere la certezza di una scelta ottimale e quindi avviare una trattativa per acquisire un convinto consenso degli enti locali. Per avviare queste necessarie iniziative occorre informare da subito la popolazione sui programmi energetici degli altri paesi, sulla situazione energetica internazionale e sui costi dell'elettricità nel mondo. Nel frattempo le nostre società elettriche possono lavorare con impianti nucleari all'estero, ovviamente se lo trovano conveniente, e le nostre industrie fabbricare componenti nucleari su ordinazione.

Per quanto riguarda la costruzione di impianti nucleari nel nostro Paese molti esperti ritengono che non si dovrà far altro che attendere l'evoluzione dei prezzi del petrolio. Se questi continueranno a salire, tale opzione sarà obbligatoria, volenti o nolenti.

In questi ultimi anni si sono consolidate due principali linee di sviluppo nella progettazione di nuove centrali elettronucleari: una linea detta "evolutiva", basata su modificazioni minori per migliorare i reattori esistenti, con un approccio graduale a piccoli passi, ed una linea detta "innovativa", con modifiche sostanziali rispetto all'esistente. Vantaggi e svantaggi delle due linee possono così essere sintetizzati:

- per la prima linea si fa tesoro della preziosa esperienza maturata nel passato aumen-

tando, ove possibile, il livello di sicurezza con piccole modifiche; questi gradualmente hanno però il contrappeso di essere legati sostanzialmente a vecchi progetti;

- per la seconda linea i nuovi progetti possono beneficiare di idee e innovazioni fondamentali, ma sono indeboliti dalla carenza di esperienze pregresse e spesso necessitano perciò di passare attraverso la realizzazione di prototipi sperimentali.

Esamineremo due esempi di progetto di reattori per le due linee, e cioè il reattore EPR (European Pressurized Reactor) per la prima e il reattore MARS (Multipurpose Advanced Reactor inherently Safe) per la seconda.

Il progetto EPR è frutto di una collaborazione fra FRAMATOME e SIEMENS, tramite la loro consociata NPI (Nuclear Power International). La linea evolutiva è stata scelta per tre ragioni principali:

- la NPI pu basarsi sull'esperienza di un centinaio impianti nucleari costruiti o in costruzione da parte delle sue case madri, in vari paesi del mondo;
- adottando l'approccio evolutivo si possono evitare, o almeno minimizzare, i rischi dello sviluppo mantenendo un processo continuo, graduale, basato su progetti gi sperimentati;
- l'approccio evolutivo minimizza i rischi che possono sorgere in caso di progetti completamente nuovi nelle necessarie procedure autorizzative.

Per quanto attiene alla sicurezza, poi, la principale linea di sviluppo adottata da EPR soddisfa i nuovi requisiti delle società elettriche europee, European Utility Requirements, EUR. Questi sono stati elaborati con il duplice scopo di prevenire ipotetici incidenti, anche molto gravi, e di ridurre comunque le loro conseguenze. In caso di rottura del recipiente a pressione del reattore il nocciolo fuso sarebbe comunque recuperato, confinato e raffreddato alla base dell'edificio reattore per prevenire la sua perforazione ed ogni duraturo inquinamento radioattivo. A questo scopo, la base del cosiddetto "pozzo reattore" è appositamente sagomata e attrezzata per recuperare il nocciolo fuso a una temperatura di circa 2000C. Questo materiale fuso si spargerebbe per gravità su un basamento inclinato di materiale refrattario, assottigliandosi e venendo nel contempo raffreddato e gradualmente solidificato da acqua proveniente, attraverso molti condotti, da una adiacente piscina.

L'edificio reattore ha un doppio contenimento, con una parete interna in calcestruzzo armato precompresso, per resistere ad ogni possibile sovrappressione ed una parete esterna, in calcestruzzo armato, per fronteggiare ogni concepibile attacco esterno di origine sia naturale che antropica.

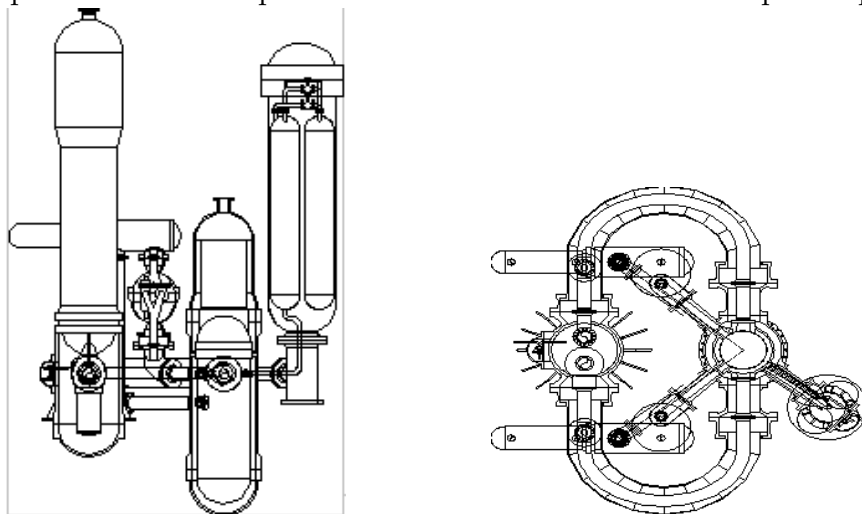
Gli European Utility Requirements che il progetto EPR soddisfa, sono basati su metodi deterministici, corroborati da metodi probabilistici per identificare i possibili incidenti. Questi sono suddivisibili in due categorie:

- incidenti inclusi nelle condizioni base di progetto (DBC, Design Basis Conditions);
- incidenti inclusi nelle condizioni estese di progetto (DEC, Design Extension Conditions):

Queste ultime condizioni sono allargate per considerare anche gli incidenti gravi (tipo fusione del nocciolo) e per mitigare i loro effetti in modo tale che la contaminazione radioattiva dell'ambiente che circonda il reattore abbia una limitata estensione temporale, senza che alcun provvedimento di evacuazione, al di fuori dell'impianto, si renda necessario.

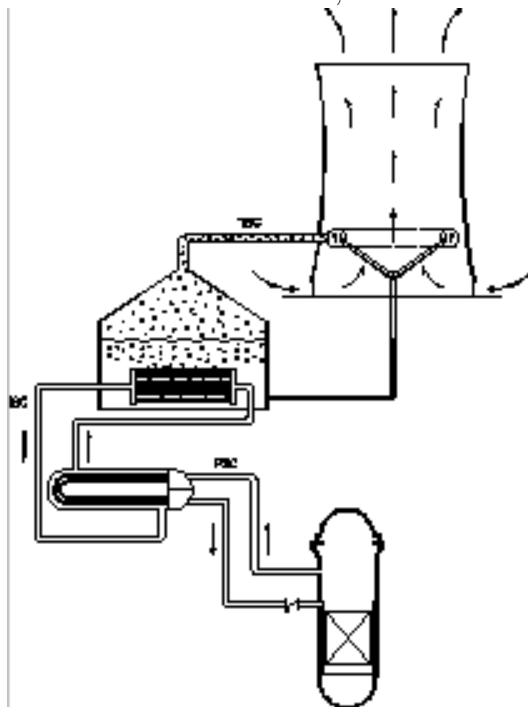
La seconda linea, innovativa, si origina dalla constatazione che nel settore nucleare, in

passato, raramente l'evoluzione tecnologica ha portato a prestazioni migliorate con costi più bassi, pagando così un costo di accresciuta complessità dei sistemi. L'esasperazione della complessità non sempre risolve il problema di garantire la sicurezza, perchè la complessità può intaccare due requisiti essenziali della sicurezza intrinseca di un impianto, e cioè la sua affidabilità e la sua semplicità. Di qui l'opportunità di adottare nuovi criteri di progetto, tipo quello della capacità autonoma dell'impianto di spegnere il reattore in condizioni anomale e di raffreddarlo anche in condizioni danneggiate del circuito primario di refrigerazione. I criteri base adottati nel progetto del reattore MARS, suggeriti da Alvin Weinberg pioniere americano dell'energia nucleare e ora Distinguished Fellow alle Oak Ridge Associated Universities, richiedono che qualsiasi nuova tecnologia nel settore energetico, per essere accettata ed estesamente utilizzata, deve rispettare la natura e i suoi equilibri. Questo, per un impianto nucleare significa che durante la sua vita produttiva l'impatto radiologico sulla popolazione circostante debba essere al massimo comparabile alla deviazione "standard" del fondo radioattivo naturale e che il peggiore incidente concepibile abbia una probabilità non maggiore di quella di essere colpiti da un meteorite che precipiti sulla terra. Il progetto del reattore MARS punta sul requisito essenziale della sicurezza intrinseca, intesa come sicurezza basata su leggi ineludibili di natura e non su sistemi di protezione che, per intervenire, abbiano bisogno di sensori e di motori alimentati da energia elettrica (cioè sistemi attivi) e/o dell'intervento di attenti operatori. Oltre alla sicurezza basata totalmente su sistemi passivi, numerose altre soluzioni progettuali innovative finalizzate alla semplicità e rapidità di costruzione ed esercizio, alla minimizzazione della produzione di rifiuti radioattivi ed alla limitazione dei costi di realizzazione ed esercizio, rendono il MARS assai interessante sotto il profilo applicativo, per la produzione di energia elettrica e di calore industriale. I componenti e sistemi utilizzati, le modalità e le tecnologie di fabbricazione previste sono ben note in Italia e ben collaudate nel mondo: questo significa che non si corrono rischi di insuccessi e di incertezze economiche sulla sua realizzazione, così come non sussiste alcun bisogno di ulteriori attività sperimentali o di un prototipo dimostrativo: si può direttamente procedere alla realizzazione di un impianto primo di serie.



**Figura 1** Circuito primario del reattore MARS e del sistema di contenimento di pressione

È prevista la smontabilità e la sostituibilità di tutti i componenti dell'impianto, financo dei componenti del circuito primario del reattore: in altri termini, l'intero impianto MARS è costruibile in officina, utilizzando tecniche collaudate e sotto i più rigorosi controlli, in tempi brevi e con costi bassi, e la sua vita è allungabile a piacere con la semplice sostituzione dei pezzi che abbiano ultimato la propria vita tecnica. Il fatto che tutto il reattore sia scomponibile in pezzi di metallo flangiati e imbullonati consente, poi, uno smantellamento finale rapido e totale sicché, a fine vita, sul sito resta solo l'edificio di contenimento in calcestruzzo, non radioattivato. Le conseguenze sulla rapidità degli interventi, sulla assoluta sicurezza per il personale e le popolazioni e sulla facile gestione dei limitati quantitativi di residui da stoccare in attesa del loro decadimento, sono assolutamente evidenti.

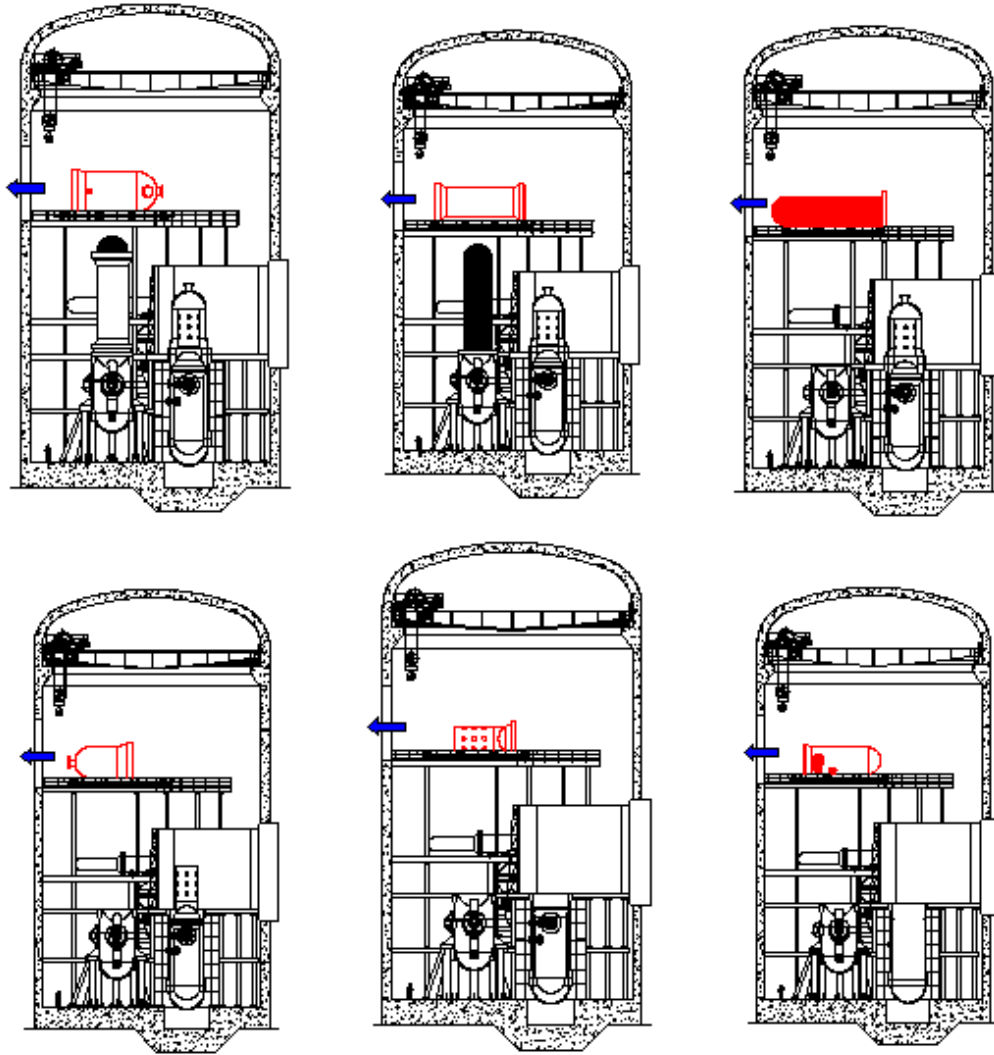


**Figura 2** Schema del sistema pasivo di refrigerazione del nocciolo

I costi di smantellamento, che per i reattori della prima generazione si stanno rivelando gravosi, con una ventina di anni di lavoro, sarebbero per il MARS molto contenuti, facilmente programmabili e certi, ripetendo all'inverso le stesse operazioni di assemblaggio, senza tagli e demolizioni complessi, lunghi e difficili. La massima parte dei pezzi metallici smontati non sarà attivata o contaminata, e questi potranno essere riutilizzati o fusi. I limitati quantitativi di materiale contaminato e non decontaminabile potranno essere stoccati dopo un facile condizionamento in aree attrezzate del deposito finale di stoccaggio, ove applicabile sotto forma di lingotti-rifiuto.

Va anche sottolineato che l'impianto MARS è concepito come modulare: la ridotta potenza di ciascun modulo, corrispondente a ca. 200 MWe, aumenta le opportunità di mercato, estendendolo anche a piccole società elettriche. La possibilità di graduare nel tempo la realizzazione di più moduli, con costi limitati, consente di aumentare gradualmente la potenza delle centrali elettriche di produzione, seguendo la domanda esterna di energia.

A ciò si aggiunge la possibilità di sfruttare il MARS per la cogenerazione di elettricità e di calore, finalità che fin dall'inizio ha costituito un importante criterio di progetto per questo impianto. Molti paesi hanno, infatti, il problema della scarsità di acqua, spettro del futuro, che si aggiunge a quello della necessità di nuova potenza elettrica installata, a costi contenuti: il MARS offre un'offerta calibrata ed ottimale, sicura ed economica, per la dissalazione dell'acqua di mare e la produzione di elettricità.



**Figura 3** Fasi di smontaggio dei principali componenti del reattore MARS

Una particolare enfasi merita l'aspetto della competitività economica dell'energia prodotta, vale a dire la redditività di impresa, senza la quale cadrebbe ogni possibilità di affermazione. Questo obiettivo è centrato mediante una grande semplicità del progetto, con la eliminazione di ridondanti sistemi di sicurezza attivi non necessari grazie all'utilizzo sistematico della sicurezza intrinseca e passiva e soprattutto con l'allungamento della vita utile dell'impianto, garantito dalla facile sostituibilità dei componenti usurati od obsoleti. Perfino il "pressure vessel", contenitore del reattore, soggetto nei lunghi tempi al dan-

neggiamento da radiazioni che limita la vita dei reattori nucleari, può essere nel MARS sostituito da uno nuovo, costruito coi più aggiornati criteri. L'allungamento della vita è un accorgimento essenziale per gli impianti nucleari che hanno, nel costo dell'elettricità, una predominante componente di costo di impianto rispetto a quella di costo del combustibile, molto più ridotta. Una volta ammortizzato il costo dell'impianto, il costo dell'elettricità prodotta crolla. Per il MARS tale costo risulta minore di 4 Euro/kWh per un ventennio di ammortamento e circa la metà per il periodo successivo, che può essere molto lungo, anche cento anni, pur mettendo in conto una completa sostituzione di tutti i componenti minori e di un componente rilevante ("pressure vessel" o generatore di vapore) ogni 30 anni. In questo senso la lunga vita degli impianti nucleari sarebbe un beneficio per le generazioni future. Il costo finale dello smantellamento, dopo una lunghissima vita di utilizzo, sarebbe, come abbiamo notato, praticamente irrilevante.

Un reattore modulare e componibile significa anche una transizione dalle lunghe e complesse costruzioni sul sito della centrale a costruzioni in fabbriche, in serie, con assemblaggi e controlli di parti trasportabili di impianto in ambienti attrezzati e in tempi brevi. Questa transizione potrebbe rappresentare un cambiamento rivoluzionario nell'industria nucleare.