

## REATTORI AD ACQUA LEGGERA E REATTORI A GRAFITE: UN CONFRONTO DAL PUNTO DI VISTA DELLA SICUREZZA di Carlo Bernardini

*Western Light Water Reactors (LWR) are very different, in terms of stability and security, from graphite reactors often used in Soviet Union. The Three Miles Island (USA, 1979) and Chernobyl (URSS, 1986) accidents have clearly spotted these differences. LWR plants are close to 'intrinsic security'. This short review makes a technical comparison between the two approaches.*

*Le cosiddette 'filieri' di reattori nucleari, ad acqua leggera (LWR) o occidentale e a grafite (RBMK), come gli impianti sovietici, hanno profonde differenze dal punto di vista della stabilità e della sicurezza. Dopo gli incidenti di Three Miles Island (USA, 1979) e Cernobil (URSS, 1986) queste differenze si sono concretamente manifestate: gli impianti provati LWR si possono considerare già molto prossimi alla "sicurezza intrinseca". In questa breve rassegna si confrontano le due filiere per mostrare le differenze dal punto di vista tecnico.*

### I DATI DI BASE DELLA FISSIONE

Partendo dai fatti di base più generali, bisogna sapere che i combustibili nucleari sono quelli che subiscono il processo di fissione sotto l'azione di neutroni. Essi sono i due isotopi dell'Uranio  $^{233}\text{U}$  e  $^{235}\text{U}$ , esistenti in natura; e i due isotopi del Plutonio,  $^{239}\text{Pu}$  e  $^{241}\text{Pu}$ , che non esistono in natura ma sono il risultato di particolari reazioni nucleari. Ci sono poi nuclei detti fertili, gli isotopi  $^{232}\text{Th}$  del Torio e  $^{238}\text{U}$  dell'Uranio che si trasformano, per bombardamento con neutroni, rispettivamente in  $^{233}\text{U}$  e  $^{239}\text{Pu}$ .

Il più accessibile isotopo è  $^{235}\text{U}$ , che però è solo lo 0.7% dell'Uranio naturale, per quasi il 99.3% fatto di  $^{238}\text{U}$ . L'energia media dei neutroni emessi nella fissione è di circa 2 MeV: si tratta dunque di neutroni *veloci*, per i quali la sezione d'urto (e quindi la probabilità) di fissione è relativamente piccola. Ma se i neutroni vengono *rallentati*, riducendo la loro energia fino a 0.025 eV (nel qual caso vengono detti *neutroni termici*) la sezione d'urto per fissione di  $^{235}\text{U}$  è di  $590 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2$ , mentre quella di reazione con  $^{238}\text{U}$  è di  $2.7 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2$ ; sicché il rapporto tra il numero di fissioni in  $^{235}\text{U}$  e quelle in  $^{238}\text{U}$  è  $0.7 \times 590 / 99.3 \times 2.7 = 1.5$ . Perciò, la frazione di neutroni che interagisce con  $^{235}\text{U}$  è  $1.5 / (1.5 + 1.0) = 0.6$ . Poiché in media vengono prodotti 2 neutroni per fissione allora il numero medio di nuovi neutroni prodotti in U naturale per ogni neutrone termico che è immesso nel combustibile e "vaga" in esso, è  $0.6 \times 2 = 1.2$ . Questo vuol dire che se il 17% ( $0.17 \times 1.2 = 1.0$ ) dei neutroni si perde, perché esce dal corpo del combustibile o viene assorbito in reazioni di cattura, cessa la possibilità della

moltiplicazione a catena e quindi della "combustione".

### IL RALLENTAMENTO DEI NEUTRONI

Nel 1934 Enrico Fermi e collaboratori compresero che la reattività dei neutroni lenti era eccezionalmente alta. I neutroni veloci prodotti nelle fissioni si possono rallentare per urto impiegando un elemento "moderatore". Il rapporto tra l'energia iniziale di 2 MeV e quella finale corrispondente alla riduzione all'energia termica di 0.025 eV è di un fattore  $10^8$ . Nell'urto nucleare elastico tra un neutrone  $n$  e un nucleo di numero di massa  $A$ , il neutrone perde una frazione  $1/(A+1)$  della sua energia; così che più  $A$  è piccolo e più rapido è il processo di rallentamento. Il numero  $k$  di urti necessari alla termalizzazione si calcola dall'uguaglianza  $[A/(A+1)]^k = E_{\text{term}}/E_{\text{fiss}} \cdot 10^{-8}$  (dove  $E$  sta per "energia dei neutroni" e i suffissi sono evidenti). Il problema è che l'Idrogeno, che avrebbe un'eccellente effetto di rallentamento, cattura troppi neutroni; il Deuterio sarebbe un ottimo moderatore, ma non è così abbondante; il primo elemento di interesse pratico è il Carbonio, reperibile in forma di grafite pura. Con un moderatore di neutroni di grafite è possibile utilizzare come combustibile l'Uranio naturale (ovviamente, lo sarebbe anche con "acqua pesante",  $\text{D}_2\text{O}$ ). Se invece si vuole usare come moderatore l'acqua leggera  $\text{H}_2\text{O}$  bisogna "arricchire" di  $^{235}\text{U}$  l'Uranio naturale: dallo 0.7% almeno al 2.5%, per compensare l'eliminazione dei

neutroni per cattura. Nella pratica, i reattori ad acqua leggera (*Light Water Reactors* = *LWR*) usano arricchimenti dell'ordine del 3%. Il processo di arricchimento è molto difficile e costoso perché isotopi come  $^{235}\text{U}$  e  $^{238}\text{U}$  sono chimicamente identici e hanno una piccolissima differenza di massa (1.3%). Tuttavia, siccome la costruzione di bombe a fissione richiede arricchimenti oltre il 90%, il processo di separazione è stato sviluppato per questi usi militari e i *LWRs* sono perciò possibili

## DIGRESSIONE SULLE BOMBE E SUL PLUTONIO.

La differenza tra un combustibile e un esplosivo non sta nella quantità di energia liberata ma nei tempi dei processi di combustione e di esplosione. Perciò, una bomba è fatta quasi interamente di  $^{235}\text{U}$  in cui i neutroni veloci innescano la catena: non c'è tempo per il rallentamento. Invece, un reattore gioca sul fatto che la probabilità di fissione dei neutroni provenienti dal moderatore è enorme rispetto alla probabilità che reagiscano con  $^{238}\text{U}$ . Ma in un reattore a basso arricchimento avviene la reazione  $n + ^{238}\text{U} \rightarrow ^{239}\text{U} \rightarrow ^{239}\text{Pu}$  attraverso due decadimenti  $\beta^-$  (il Pu ha  $Z = 94$  e l'elemento intermedio con  $Z = 93$  è il Nettunio Np). Il  $^{239}\text{Pu}$  è fissile con neutroni lenti, produce un maggior numero di neutroni per ogni fissione che non  $^{235}\text{U}$  e ha proprietà chimiche diverse dall'U; così che può essere separato facilmente, chimicamente, dall'U naturale irraggiato. A parità di energia totale prodotta in un reattore, la quantità di  $^{239}\text{Pu}$  è circa inversamente proporzionale a quella di  $^{235}\text{U}$  presente. Perciò, i reattori a basso arricchimento, come quelli moderati a grafite, si dicono "plutonigeni". Il plutonio è eccellente per bombe a fissione e quindi i plutonigeni hanno rilevante interesse militare. Ma c'è un problema: se il  $^{239}\text{Pu}$  resta nel combustibile a lungo, sotto bombardamento si trasforma in  $^{240}\text{Pu}$ , che non è più fissile per azione dei neutroni e però fa "fissioni spontanee" con emissione di molti  $n$ . Perciò, se in una bomba c'è troppo  $^{240}\text{Pu}$ , l'esplosivo si "consuma" e "fa fiasco" (*fizzles*), cioè brucia invece di esplodere perché la catena si innesca in anticipo rispetto al trigger dell'esplosione che viene dato con il raggiungimento improvviso della massa critica. Per non avere troppo  $^{240}\text{Pu}$ , bisogna il combustibile sia estratto dal reattore e il  $^{239}\text{Pu}$

recuperato in tempi inferiori a 30 giorni. Nei *LWR* questo è praticamente impossibile: il ricambio del combustibile richiede circa 30 giorni e avviene perciò ogni 1 o 2 anni. Nei reattori per uso militare (Hanford, Savannah River in USA; RBMK 1000 Cernobil in URSS) le barre di combustibile vengono estratte senza fermare il reattore; l'impianto non ha coperture di contenimento per poter lavorare all'estrazione stando sopra il nocciolo. I criteri di sicurezza sono ovviamente assai diversi.

## SEQUENZA POSSIBILE DI UN LOCA

L'incidente più temuto è la perdita del refrigerante (*LOCA* = *Loss Of Coolant Accident*). Se il refrigerante non c'è più, anche se il reattore si spegne (cioè se il processo di catena neutronica si interrompe) la "brake" nucleare dovuta ai decadimenti delle scorie di fissione produce il 7% della potenza termica massima del reattore. Dunque, un reattore da 1000 Mwatt elettrici, con un rendimento termodinamico del 30% circa, produce 3000 Mwatt termici e la brake a reattore appena spento è pur sempre una fonte di oltre 200 Mwatt, sufficiente a fondere la massa metallica del combustibile ("fusione del nocciolo").

Caso dei *LWR*: l'acqua qui è sia refrigerante che moderatore, cioè serve sia a fare andare le turbine per generare elettricità che la reazione a catena. Se il refrigerante si perde (p.es., la temperatura sale e l'acqua comincia a bollire), la quantità di moderatore diminuisce e la reazione a catena rallenta; la potenza prodotta cala e la temperatura non sale più. E' una condizione di "stabilità" (controreazione). A Three Miles Island, in USA, il *LOCA* fu disastroso (distrusse l'impianto) solo per l'attività residua della brake nucleare. Non avvennero esplosioni chimiche, i controlli funzionarono, le emissioni esterne di radioattività non superarono il Curie (una dose irrilevante).

Caso di RBMK 1000, Cernobil: poiché si tratta di un reattore a U naturale, l'acqua di raffreddamento si comporta come un veleno assorbendo neutroni; il moderatore è perciò diverso dal refrigerante, è grafite. Se la temperatura cresce, l'acqua bolle e, evaporando, avvelena meno; il processo a catena accelera, la potenza prodotta aumenta, la temperatura sale incontrollabilmente. E' una condizione di "incontrollabilità": lo

spegnimento del reattore è affidato a interventi esterni.

## IL PROBLEMA DELLO XENON

Tra i prodotti di fissione delle reazioni  $n + {}^{235}\text{U}$  c'è l'Indio, come isotopo  ${}^{135}\text{I}$ . Questo isotopo decade  $\beta^-$  in 6.7 ore, in  ${}^{135}\text{Xe}$  che, a sua volta, decade  $\beta^-$  in un Cesio ( ${}^{135}\text{Cs}$ ) dopo 9.2 ore. Il fatto è che la probabilità che un  ${}^{135}\text{Xe}$  catturi un  $n$  trasformandosi in un  ${}^{136}\text{Xe} + \gamma$  è 4000 volte più grande della probabilità che quel  $n$  produca una fissione. Per fortuna, se il reattore è in funzione, i neutroni distruggono lo Xenon che non fa nemmeno a tempo a decadere. Ma se il reattore si ferma o la potenza diminuisce, l' ${}^{135}\text{I}$  continua a produrre  ${}^{135}\text{Xe}$  che si accumula e avvelena il combustibile per decine di ore, finché non decade. Perciò, i reattori nucleari sono obbligati ad andare, come si suol dire, a "tutta birra", cioè alla massima potenza, per non avvelenarsi: forse, è la nostra fortuna, i francesi o gli sloveni hanno un surplus di potenza prodotta rispetto alla domanda interna, in certe ore, e possono venderci energia elettrica a basso costo.

## CERNOBIL, 26 APRILE 1986

I sovietici stavano facendo un esperimento non molto innovativo. Il rischio di LOCA era legato a una possibile mancanza di potenza elettrica nell'alimentazione delle pompe dell'acqua refrigerante. Avevano pensato, perciò, di supplire a questa mancanza per il breve tempo occorrente per fare intervenire i gruppi elettrogeni diesel utilizzando un volano in grado di fornire la sua energia per circa 3 minuti. Il reattore aveva un sistema automatico di spegnimento in caso di perdita di carico elettrico: il sistema fu disattivato perché, in caso di insuccesso della prima prova, si sarebbe dovuto aspettare decine di ore per riaccendere il reattore, per colpa dello Xenon.

Alle  $1^{\text{h}}23^{\text{m}}04^{\text{s}}$  si simula la perdita di carico, le barre di controllo automatico intervengono correttamente ma la potenza sembra crescere troppo rapidamente; il direttore ordina di inserire le barre d'emergenza alle  $1^{\text{h}}23^{\text{m}}40^{\text{s}}$ , ma queste barre, che dovrebbero infilarsi per gravità nelle sedi nel combustibile, trovano queste sedi ormai danneggiate e ostruite. Il

vapore d'acqua reagisce con le camice di zirconio che avvolgono le barre e libera idrogeno. Alle  $1^{\text{h}}24^{\text{m}}00^{\text{s}}$  si odono due violente esplosioni, una delle quali certamente dovuta all'idrogeno. È la catastrofe, il controllo non è più possibile. Le scorie si diffondono, per decine di milioni di Curie, nella zona circostante e nell'atmosfera, anche a quote relativamente alte. Il grosso della diffusione di inquinanti radioattivi va avanti per circa 10 giorni, almeno sino al 6 maggio.

## QUALCHE CONSIDERAZIONE CONCLUSIVA

L'incidente di Cernobil mostra soltanto che i sistemi come RBMK 1000 adottati dai sovietici sono assolutamente inaffidabili, anche se si potrebbe sostenere che è stato un esperimento elettrotecnico a innescare il disastro, assai meno probabile nel funzionamento ordinario. Da quanto abbiamo detto, la stabilità termica dei LWR occidentali è molto vicina a quella che viene chiamata "sicurezza intrinseca". Il che non toglie che possa avvenire, a causa della "brace" nucleare, una fusione del nocciolo che distrugge il sito, ma questo non comporta danni alla popolazione. I reattori oggi in considerazione sono solo del tipo LWR. In particolare, mi è gradito citare il progetto italiano MARS (*Multipurpose Advanced Reactor inherently Safe*) disegnato dalla équipe del professor Maurizio Cumo dell'Università di Roma "la Sapienza". Credo, anzi, che tra tutti gli impianti industriali esistenti al mondo, reattori di questo tipo siano, senza dubbio, i più sicuri. Purtroppo, la cattiva informazione sulla profonda benché semplice differenza tra i reattori occidentali e quelli sovietici, pur segnalata già nel 1985 dal lavoro dello APS *Study Group* presieduto da Richard Wilson e pubblicato su *Review of Modern Physics*, vol. 57, n°3, parte II (1985), ha prodotto un drastico rifiuto popolare per l'energia nucleare, che non sembra ancora possibile recuperare.

Un buon testo di riferimento in italiano è: M. Cumo, *Impianti nucleari*, UTET, 1976.

Per l'analisi dell'incidente di Cernobil, conviene procurarsi il documento dell'IAEA (l'agenzia atomica internazionale di Vienna), *Board of Governors: Post-Accident review Meeting, Gov/2268*, 16 settembre 1986.

**CARLO BERNARDINI**

*Professore presso il dipartimento di fisica dell'Università di Roma "la Sapienza". Ha contribuito allo sviluppo dei Laboratori Nazionali di Frascati dell'INFN, in particolare alla realizzazione e diffusione degli anelli di accumulazione. E' autore di numerosi testi universitari, dirige la rivista Sapere, fa parte dell'Osservatorio sulla Ricerca.*

**Contatti:**

Univ. La Sapienza, Dip.Fisica      P.le Aldo Moro 5      00185 Roma  
Tel/Fax 06 49914348      Email Carlo.Bernardini@roma1.infn.it