

## L'INCIDENTE NUCLEARE DI CHERNOBYL

Eleonora BOMBONI \*, Nicola CERULLO \*\*, Guglielmo LOMONACO \*\*\*, Vincenzo ROMANELLO \*\*\*\*

\* *Ingegnere Nucleare, Dottorato di Ricerca in "Sicurezza Nucleare e Industriale"*

\*\* *Già Professore Ordinario di "Reattori Nucleari Avanzati" presso l'Università di Genova; già Professore Associato di "Impianti Nucleari" e libero docente confermato in "Fisica del Reattore Nucleare" presso l'Università di Pisa*

\*\*\* *Ingegnere Nucleare, Dottorato di Ricerca in "Ingegneria Elettrica e Termica", Assistant Professor presso l'Università di Genova*

\*\*\*\* *Ingegnere Nucleare – orientamento "Impianti Nucleari Innovativi", Dottorato di Ricerca in "Ingegneria dei Materiali", ricercatore presso il Karlsruhe Institute of Technology (KIT) in Germania*

L'incidente alla centrale nucleare di Chernobyl (Чорнобиль, Čornobyl, in lingua ucraina), avvenuto il 26 aprile del 1986 (alle 01:23:58 ore locali) in Ucraina (allora Unione Sovietica) al reattore numero 4 (la Figura 1 mostra una vista recente da satellite della centrale nucleare di Chernobyl), rappresenta il più grave evento nella storia delle applicazioni pacifiche dell'energia nucleare.

L'impianto era composto da 4 reattori da 1.000 MW<sub>e</sub> ognuno, e produceva circa il 10 % dell'energia elettrica ucraina. Il primo reattore fu commissionato nel 1977, il secondo nel 1978, il terzo nel 1981, ed il quarto (quello che subì l'incidente) nel 1983. Si trattava di reattori del tipo RBMK-1000 (РБМК - Реактор Большой Мощности Канальный, ossia *Reaktor Bolshoi Moshchnosti Kanalny*, che significa 'reattore di grande potenza a canali'), prodotti solo in Unione Sovietica.



Figura 1

Fu progettato per produrre principalmente plutonio ma anche energia. Utilizzava acqua naturale per il raffreddamento e grafite come moderatore dei neutroni: in tale configurazione era possibile adoperare l'uranio naturale quale combustibile (il fatto di non richiedere né uranio arricchito né acqua pesante abbassava notevolmente i costi di costruzione ed esercizio), anche se nel caso del reattore n. 4 l'uranio era debolmente arricchito (circa il 2 %).

Tale configurazione tecnica faceva sì che il reattore presentasse un *coefficiente di vuoto positivo*, rendendolo instabile e pericoloso.

Nei reattori di tipo occidentale infatti l'acqua leggera (H<sub>2</sub>O) svolge contemporaneamente il ruolo di refrigerante del nocciolo e moderatore dei neutroni (e per tale motivo necessitano di essere alimentati con uranio debolmente arricchito). Nel caso manchi il refrigerante per qualsiasi motivo la reazione a catena tende quindi a spegnersi (mancando anche il moderatore dei neutroni<sup>(1)</sup>). Per tale motivo i reattori di tipo occidentale sono tutti *intrinsecamente* sicuri.

Poiché la sezione di cattura per assorbimento dell'acqua ordinaria è circa 100 volte maggiore di quella della grafite, ne consegue che nell'RBMK l'acqua è un 'veleno' neutronico, in mancanza del quale la reazione subisce una 'accelerazione'. Questo è il significato del termine 'coefficiente di vuoto positivo' (e si parla quindi, a differenza dei reattori occidentali, di *instabilità intrinseca*). Tale tipo di macchina non ha analoghi fra i reattori di potenza del mondo occidentale, perchè non avrebbe ottenuto mai la licenza di esercizio (*licensing*).

La scelta poi di consentire la produzione di plutonio di grado militare in un reattore adibito ad usi civili fu particolarmente infausta. Per tale fine infatti fu necessaria l'introduzione di grandi gru sopra il nocciolo del reattore per consentire la movimentazione del combustibile 'in linea' (senza spegnere il reattore). Questo portò inevitabilmente alla realizzazione di edifici di contenimento molto alti (oltre 70 metri), che fu impossibile realizzare con le dovute caratteristiche di robustezza e tenuta ai fini della sicurezza nucleare (contrariamente a quanto avveniva nel mondo occidentale). L'edificio di contenimento infatti aveva tutte le caratteristiche di una normale costruzione civile (volte a capriata, come le nostre chiese medioevali). La produzione di plutonio militare inoltre richiedeva di esercire gli impianti a temperature troppo alte per il mantenimento degli standard di sicurezza (infatti a regime la temperatura della grafite era di 600 °C, con punte di 700 °C, superiori alla soglia di reazione aria-carbonio e prossimi alla soglia della reazione acqua-carbonio).

C'era inoltre un difetto di progettazione nelle barre di controllo: queste infatti terminavano con degli estensori di grafite di circa un metro, che quando venivano inseriti rimpiazzavano l'acqua, aumentando quindi, seppur per pochi secondi, il tasso di produzione di energia (invece di cominciare a ridurlo immediatamente).

Tale comportamento delle barre è controintuitivo ed era ignoto agli operatori. Si aggiunga infine che l'accoppiamento di acqua e grafite risulta particolarmente pericoloso in caso di incidente: ad alte temperature infatti questi reagiscono formando miscele esplosive.

Si aggiunga che gli operatori non erano a conoscenza dei problemi del reattore e non erano opportunamente qualificati per i reattori del tipo RBMK-1000: il direttore V.P. Bryukhanov aveva esperienza su impianti a carbone, come anche Nikolai Fomin, che aveva esperienza su impianti convenzionali; anche Anatoliy Dyatlov aveva solo una limitata esperienza con i reattori nucleari, per lo più di piccola taglia per applicazioni sommergibilistiche.

L'incidente avvenne nel corso di una prova volta a verificare la possibilità di alimentare i sistemi di sicurezza durante il rallentamento del turbogeneratore in seguito a distacco dalla rete. Questa prova era stata richiesta ad altre centrali nucleari, ma avevano tutte rifiutato dato l'alto rischio. La titolarità dell'esperimento per lo più fu affidata a quello che verrà definito dalla stampa "il folle ingegnere elettrotecnico", convinto di poter trattare l'impianto in maniera del tutto convenzionale. Il direttore Bryukhanov era uno specialista di turbine, ma purtroppo ignorante in campo nucleare: era stato promosso a titolo di direttore della centrale per 'meriti di partito', e tendeva a sostituire gli esperti di centrali nucleari con tecnici provenienti da centrali termiche convenzionali. La situazione è del tutto diversa nell'impianto di *Three Mile Island* (USA): lì è presente una sala controllo da esercitazione uguale a quella vera, dove i tecnici vengono addestrati per anni, al pari di un pilota di un aereo di linea.

I reattori come quello di Chernobyl hanno due sistemi diesel di emergenza, non attivabili istantaneamente. Quello che si voleva verificare era la possibilità di alimentare le pompe grazie all'inerzia della turbina durante l'avvio dei generatori diesel. Il test era già stato condotto su un altro reattore (ma con tutti i sistemi di sicurezza attivati), con esito negativo. Fermato il turbogeneratore venne isolato il circuito di raffreddamento di emergenza, che avrebbe potuto invece abbassare rapidamente il contenuto di vapore nel circuito e forse evitare l'esplosione: si rivelò un errore madornale, dovuto a ignoranza della fisica nucleare e dei fenomeni che avvengono all'interno del reattore (o ad estrema ed ingiustificabile presunzione). Per una serie di circostanze la potenza del reattore fu ridotta a soli 30 MW<sub>th</sub>, ma si scelse comunque di non spegnere il reattore e continuare la prova: qualunque tecnico non digiuno di fisica nucleare avrebbe immediatamente capito l'estrema pericolosità della mossa.



Figura 2

Durante la fissione nucleare infatti si forma un potente veleno neutronico, lo xeno-135. Quest'ultimo ad alti regimi di potenza viene consumato dallo stesso flusso neutronico del reattore (a sua volta direttamente legato alla potenza erogata dal reattore), ma a bassa potenza tende ad accumularsi.

Per contrastare tale avvelenamento furono estratte le barre di controllo in maniera quanto meno avventata: le prescrizioni di sicurezza raccomandavano di lasciarne inserite almeno 28÷30, all'epoca dell'incidente le barre inserite si rivelò che erano solo 6÷8! Il personale, dati i ritardi con cui era iniziata la prova, aspirava a terminare presto il test (e questo contribuì a far precipitare gli eventi). Iniziò a formarsi del vapore nelle pompe, diminuendo la portata d'acqua nei canali principali, che, per i motivi visti, portò ad un aumento del tasso di reattività (ossia del rateo di fissioni nucleari, direttamente proporzionali alla potenza termica prodotta dal reattore). Si decise allora di inserire le barre di controllo precedentemente incautamente estratte, ma a causa della lentezza di inserimento (18÷20 secondi) e dei *follower* di grafite che rimpiazzavano l'acqua (vedi sopra), ci fu un aumento di reattività pari a  $0,5 \beta^{(2)}$ , ed inoltre l'inserimento proseguì per soli 2,5 metri (invece che per i 7 metri di altezza del reattore – i canali si erano ormai deformati!). Fu la goccia che fece traboccare il vaso della pazienza del reattore (la Figura 2 mostra una vista aerea dell'unità n. 4 della centrale di Chernobyl in seguito all'incidente).

Ci fu una escursione di potenza pari ad oltre 100 volte quella nominale del reattore, e si verificarono delle reazioni chimiche che portarono alla formazione di gas esplosivi (idrogeno e metano) in seguito al contatto dell'acqua con lo zirconio e la grafite. La piastra superiore, del peso di 500 tonnellate, fu sollevata e sbalzata. Il livello di radioattività (ovvero l'esposizione) nell'unità salì a 1.000-1.500 Roentgen/ora<sup>(3)</sup>, ma il personale disponeva di strumenti con fondo scala di 1 milliRoentgen/ora.

Gli strumenti con fondo scala opportuno giacevano chiusi a chiave in un edificio coperto dalle macerie. Lo scenario che ne seguì fu tragico, e solo l'eroismo delle squadre di soccorso consentì di spegnere l'incendio.



Figura 3

Bruciò il 10 % della grafite contenuta nel reattore, che causò la colonna di fumo che si levò fino a 1.200 metri di altezza, grazie alla quale le sostanze radioattive furono sparse in tutta Europa (i primi ad accorgersi dell'incidente furono gli Svedesi). Si stima ci fu un rilascio di radioattività di 50 milioni di curie (1 Curie =  $3,7 \cdot 10^{10}$  Becquerel, unità di misura della attività (ossia del numero di disintegrazioni al secondo). 1 curie equivale all'attività di 1 grammo di radio (mentre 1 Bequerel rappresenta 1 disintegrazione al secondo) (la Figura 3 mostra la foto della colata di "lava" nucleare dell'impianto di Chernobyl. Nella foto: 1 rappresenta la colata lava, 2 il calcestruzzo, 3 la tubazione del vapore, e 4 dell'attrezzatura elettrica).

Il tribunale condannò Viktor Bryukhanov, Nikolai Fomin, e Anatoliy Dyatlov<sup>(4)</sup> a 10 anni di reclusione con sentenza definitiva e senza alcuna possibilità di ricorso.

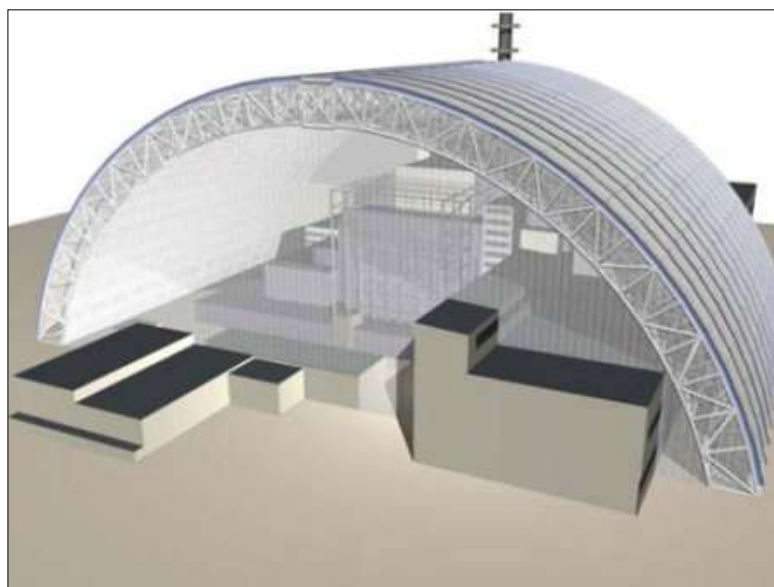


Figura 4

In seguito venne costruito un sarcofago per il ricoprimento dei resti del reattore. La sua struttura non è particolarmente solida, e si teme il tetto possa crollare in seguito ad evento sismico anche non particolarmente forte, con ulteriore rilascio di materiale radioattivo. La forte umidità presente continua ad erodere il calcestruzzo ed il ferro di costruzione. Nel 1997 è stato quindi costituito un fondo (*Chernobyl Shelter Fund*) al G7 di Denver per l'implementazione di un nuovo edificio di contenimento dell'impianto (la Figura 4 mostra la Rappresentazione del *Nuovo Confinamento Sicuro* che dovrà sostituire l'attuale sarcofago). Si stima il suo costo sarà di 768 milioni di dollari, sarà costruito ex-situ e poi fatto 'scivolare' sopra il sarcofago, e dovrebbe venire terminato (dal consorzio Bechtel-EdF) nel 2009.

Sulle conseguenze sanitarie dell'incidente non c'è accordo fra i vari organismi che si sono occupati della tematica<sup>(5)</sup>. I morti immediati (nel corso del primo anno dall'incidente) furono 31 (di cui uno d'infarto). Stimare le reali conseguenze dell'incidente con stime realistiche è virtualmente impossibile, poiché non è possibile provare quali siano le cause che hanno originato un cancro che porta al decesso<sup>(6)</sup>. Infine vale la pena di sottolineare che, secondo l'OMS (*Organizzazione Mondiale della Sanità*), molti dei casi di tumori solidi e leucemia attesi non si sono verificati.

## NOTE

(1) La sezione di cattura dell'uranio 235 – parametro che indica il rateo di fissioni e quindi di produzione di energia-, isotopo fissile dell'uranio, è alta per neutroni 'termici', ossia rallentati ad energie dell'ordine di 0,025 eV. Alla nascita per fissione questi possiedono energie dell'ordine di 2 MeV (milioni di eV!): la sezione di cattura a tali energie è molto più bassa. Di conseguenza, se i neutroni non vengono 'moderati' la reazione a catena si 'spegne'.

(2)  $\beta$  rappresenta la frazione di neutroni ritardati nella fissione nucleare. Nonostante la grande maggioranza dei neutroni vengano emessi istantaneamente, una piccola frazione pari allo 0,65 % del totale nell'uranio 235, viene emessa nell'arco di qualche decina di secondi. Tale frazione è determinante per il controllo del reattore (che viene progettato in maniera tale da essere critico grazie al contributo dei neutroni ritardati). Una situazione molto pericolosa da evitare è quella in cui si ha un reattore 'pronto critico', ossia quando la criticità viene raggiunta indipendentemente dalla frazione di neutroni ritardati (data la moltiplicazione esponenziale delle fissioni).

(3) Il Roentgen misura l'esposizione alle radiazioni ionizzanti, ovvero la capacità di ionizzazione che può essere prodotta in seguito ad una determinata esposizione a raggi x o gamma. 1 Roentgen equivale, in unità SI, alla quantità di radiazione capace di produrre una carica di  $2,58 \cdot 10^{-4}$  coulomb in 1 Kg di aria secca. Le dosi generalmente coinvolte nelle normali operazioni sono dell'ordine dei milliRoentgen/ora. Per i tessuti molli e radiazioni elettromagnetiche è: 1 Roentgen  $\approx$  1 Rad = 1 REM. I primi effetti sul corpo umano si cominciano ad osservare per equivalenti di dose di 5 REM (0,05 Sievert).

(4) Anatolij Dyatlov fu rilasciato dopo cinque anni di prigionia. Scrisse un libro in cui sosteneva che la causa primaria dell'incidente risiedeva nel progetto sbagliato dell'impianto, non nel comportamento degli operatori. Nel 1995 morì a causa di una esposizione pari a 5,5 Sievert (550 REM) cui fu sottoposto durante l'incidente.

(5) In realtà alcune stime 'catastrofiste' si basano sul principio di linearità senza soglia. Trattasi di un principio adottato dalla prassi radioprotezionistica per motivi prudenziali, ma del tutto privo di fondamento scientifico. Sono ben noti infatti gli effetti delle radiazioni ad alti equivalenti di dose, ma è praticamente impossibile investigarne in maniera deterministica gli effetti a basse dosi. Il principio di linearità senza soglia appare del tutto irragionevole, perché non ammette il recupero da parte dell'organismo e la riparazione dei tessuti. In termini semplici equivale a dire che se distribuisco carezze a un milione di persone o pugni ad un centinaio, gli effetti sanitari sono gli stessi!

(6) Ad esempio la dose assorbita mediamente dalla popolazione italiana è stata pari a quella di una comune radiografia, ma meno pericolosa perché 'diluita' nell'arco di una settimana. La proibizione del consumo di verdure a foglia larga fu imposta per precauzione: in realtà esse presentavano una attività pari a 4 microcurie al Kg, da confrontare con la radioattività del corpo umano (del tutto naturale, dovuta agli isotopi radioattivi del potassio e del carbonio) dell'ordine del microcurie!