

SOCIETÀ
DEGLI INGEGNERI E DEGLI ARCHITETTI
IN TORINO

ATTI E RASSEGNA TECNICA

Anno 120

XLI-11-12

NOVEMBRE
DICEMBRE 1987

POLITECNICO DI TORINO
SISTEMA BIBLIOTECARIO

PER
15
3059

BIBLIOTECA DI INGEGNERIA

N U O V A S E R I E

DIBATTITO SU
**IL RUOLO DEL NUCLEARE
NEL SETTORE DELL'ENERGIA**

Torino, 28 novembre 1986

SPEDIZIONE IN ABBONAMENTO POSTALE - GR. III/70 - MENSILE

Spedito luglio 1988



RESTAURO DEL CASTELLO DI RIVOLI

BORINI COSTRUZIONI S.p.A

IMPRESA GENERALE DI COSTRUZIONI

STUDIO DI INGEGNERIA

SEDE SOCIALE: 10121 TORINO - VIA BELLINI 2

TELEFONO (011) 55.461

ATTI E RASSEGNA TECNICA

DELLA SOCIETÀ DEGLI INGEGNERI E DEGLI ARCHITETTI IN TORINO

RIVISTA FONDATA A TORINO NEL 1867

NUOVA SERIE - ANNO XLI - Numero 11-12 - NOVEMBRE-DICEMBRE 1987

SOMMARIO

DIBATTITO SU

«IL RUOLO DEL NUCLEARE NEL SETTORE DELL'ENERGIA»

P. C. POMA, R. ROSCELLI, <i>Premessa</i>	pag.	295
M. RASETTI, <i>Fusione nucleare: prospettive e problemi</i> ...	»	297
A. ARIEMMA, P. FORNACIARI, <i>Panoramica sui reattori nucleari: il progetto unificato nucleare</i>	»	299

TAVOLA ROTONDA

G. DEL TIN, <i>L'energia nucleare è e continuerà ad essere una fonte energetica</i>	pag.	317
P. FORNACIARI, <i>Valutazioni dell'incidente di Chernobyl ai fini della sicurezza per le centrali dell'ENEL</i>	»	320
C. MUSSA IVALDI, <i>Crisi tecnologica del nucleare</i>	»	326
F. ALBERT, <i>In attesa della fissione nucleare</i>	»	328

Direttore: Roberto Gabetti

Vice-direttore: Elena Tamagno

Redattore-capo: Francesco Barrera

Comitato di redazione: Giovanni Bardelli, Guido Bonicelli, Giuseppe Camoletto, Vera Comoli Mandracchi, Rocco Curto, Giorgio De Ferrari, Mario De Giuli, Marco Filippi, Piero Gastaldo, Gian Federico Micheletti, Vittorio Nascé, Franco Pennella, Mario Federico Roggero, Cristina Sertorio-Lombardi, Giovanni Torretta, Giuseppe Varaldo, Anna Maria Zorgno Triscioglio.

Comitato di Amministrazione:

Presidente: Giuseppe Fulcheri

Segretario: Laura Riccetti

Vice Segretario: Emanuela Recchi

Tesoriere: Giorgio Rosental

Sede: Società degli Ingegneri e degli Architetti in Torino, Corso Massimo d'Azeglio 42, 10125 Torino, telefono 011 - 6508511

ISSN 0004-7287

Periodico inviato gratuitamente ai Soci della Società degli Ingegneri e degli Architetti in Torino.



NELLO SCRIVERE AGLI INSERZIONISTI CITARE QUESTA RIVISTA



MACIOTTA

Costruttori dal 1895

**IMPRESA COSTRUZIONI
ING. GIOVANNI MACIOTTA S.P.A.
CAPITALE SOCIALE 1.500.000.000**

**10129 TORINO - CORSO G. FERRARIS 120
TEL. (011) 59 46 26 RIC. AUT. - TELEX 214143 MACTO I**

DIBATTITO SU

IL RUOLO DEL NUCLEARE NEL SETTORE DELL'ENERGIA

TORINO, 28 NOVEMBRE 1986

A pochi giorni dalla chiusura o sarebbe meglio dire dal naufragio della conferenza nazionale sull'energia che, al non esperto, è parsa trascinarsi tra noia e indifferenza, non ci sembra che i pressanti interrogativi sul nostro futuro energetico siano stati risolti.

Con questo non si vuole affermare che ogni problema posto dall'utilizzo di particolari fonti di energia possa oggi essere sempre presentato in forma compiuta, poiché la ricerca fondamentale ed applicata è in molti settori ancora ad uno stadio iniziale e non tutte le conseguenze che derivano dalla messa in produzione di una certa fonte di energia possono essere simultaneamente quantificate, per ragioni teoriche, economiche, di valutazione di rischio e d'impatto sull'ambiente fisico.

Si tratta insomma, al di là di ogni considerazione politica e culturale, di questioni molto complesse, che dovrebbero essere affrontate con prudenza ed obiettività, mettendo in ordine i dati a disposizione, le metodologie utilizzate, i risultati — parziali o definitivi — della ricerca, che si producono spesso ad uno stadio di ipotesi o di carattere sperimentale.

Lo scegliere tra energia nucleare, petrolio, carbone ed energie alternative continua anche per questo ad essere un problema arduo: certo la conferenza nazionale sull'energia non ha contribuito a determinare una maggiore chiarezza, né tantomeno a presentare i problemi aperti con una autentica imparzialità, scientificamente fondata. Anche alcuni uomini di scienza, che pure dovrebbero essere servitori di una disciplina, in qualche misura, neutrale, non hanno saputo liberarsi dall'influenza dell'ambiente circostante, come è apparso dalle recenti polemiche degenerare — a volte — in vere e proprie risse «politico dottrinarie».

In questo contesto la tavola rotonda preparata dalla Società degli Ingegneri e degli Architetti in Torino rivendica una sua singolarità, pro-

prio perché pensata ed organizzata allo scopo di fornire un contributo d'informazione quanto più corretto possibile, anche se delimitato e circoscritto: e questo per ovvie ragioni organizzative.

Lo scopo che volevamo raggiungere era quello di fornire una informazione a chi, tecnico o non tecnico, fosse comunque digiuno di cultura nucleare (e tra costoro senza vergogna ci collochiamo anche noi), ma volesse formarsi una propria opinione, il più possibile priva di condizionamenti.

Il nostro grazie va ai conferenzieri che, anche quando sono usciti dagli stretti limiti tracciati dal campo delle affermazioni strettamente scientifiche, sempre lo hanno dichiarato, mantenendo una misura di correttezza ed obiettività ormai sempre più rare.

Pier Carlo POMA (*)
Riccardo ROSCELLI (**)

(*) Ingegnere, Consigliere della Società degli Ingegneri e degli Architetti in Torino.

(**) Architetto, Professore straordinario di Estimo ed esercizio professionale, Dipartimento Casa-Città, Politecnico di Torino, Consigliere della S.I.A.T.

Fusione nucleare: prospettive e problemi

Mario RASETTI (*)

Iniziata negli anni Settanta sulla base di tre considerazioni importanti (i risultati di rilievo conseguiti con progressione impressionante dalla ricerca sul confinamento magnetico dei plasmi, la evidente vulnerabilità del mondo industrializzato di fronte alle fluttuazioni di costo di natura politica ed oggettiva dei combustibili fossili e la sempre più chiara consapevolezza dei limiti di disponibilità e di utilizzo di tali combustibili), la ricerca relativa allo sfruttamento dell'energia da fusione nucleare, dopo varie vicende che l'hanno vista oscillare fra grandi entusiasmi e una sostanziale stagnazione nei primi anni Ottanta, ha avuto una ripresa di interesse vertiginosa a seguito dei tragici effetti dell'incidente di Chernobyl.

La stampa, quella stessa che spesso aveva moralisticamente castigato gli investimenti relativi, ha enfaticamente inserito la fusione nucleare fra le fonti energetiche «alternative» e «pulite». Ora, mentre — da fisico praticante — non posso che compiacermi di qualsiasi voce si levi a sostenere una più coerente e consapevole politica di investimento in quelle ricerche che, pur collocandosi ancora nell'area della ricerca di base o fondamentale, si prestano plausibilmente a ricadute applicative a breve termine, temo sia doveroso da parte mia smorzare un poco gli entusiasmi di questi nuovi paladini della fusione nucleare, facendone una analisi succinta delle prospettive e dello stato di avanzamento, in vista soprattutto di quelle doti di «alternativa» e «pulita» che le sono state attribuite.

Nata all'inizio degli anni Cinquanta come naturale evoluzione della ricerca relativa alla fisica della materia nel suo stato di plasma⁽¹⁾, la ricerca relativa al confinamento entro un volume finito appunto di un plasma — confinamento che non può realizzarsi con un normale contenitore a pareti materiali, ma deve essere effettuata con pareti «inesistenti» che sono le linee di forza di un intenso campo magnetico — portò presto all'ipotesi di un possibile utilizzo delle tecniche relative per la produzione di energia elettrica.

(*) Fisico, Professore ordinario di Meccanica Statistica presso il Dipartimento di Fisica del Politecnico di Torino.

(1) Un plasma è un gas costituito da una mistura — globalmente elettricamente neutra — di particelle cariche, che si trova in natura soltanto nella materia stellare, e i primi studi miravano semplicemente a riprodurre in laboratorio condizioni che consentissero agli astrofisici di capire ciò che avviene all'interno di una stella come il sole.

L'idea è molto semplice. Se si produce un plasma esattamente simile a quello che si trova in una stella, a partire da ioni di due particolari isotopi dell'idrogeno, il deuterio — il cui nucleo ha massa doppia dell'idrogeno naturale ed è fatto di un protone e un neutrone — e il tritio — che ha massa tripla, un protone e due neutroni —, entrambi carichi positivamente, e lo si riesce a portare a una temperatura abbastanza elevata (58 milioni di gradi), l'agitazione termica può far sì che questi ioni riescano a urtarsi, superando la repulsione elettrostatica che deriva dal fatto che entrambi hanno carica positiva⁽²⁾, con energia sufficiente a innescare una reazione nucleare. In tale reazione, che è detta appunto fusione, i due ioni si «fondono» dando luogo ad una particella alfa — che ha massa quattro volte maggiore di quella dell'idrogeno consueto ed è formata da due protoni e due neutroni —, ad un neutrone ed a una quantità di energia elettromagnetica⁽³⁾. Essendo privo di carica elettrica il neutrone sfugge dal plasma, mentre i fotoni e le particelle alfa (queste ultime per rallentamento, attraverso una serie di urti con gli ioni) cedono presto la loro energia al plasma stesso e contribuiscono a mantenerne alta la temperatura. Se poi il plasma è abbastanza denso, cioè se il numero di ioni per unità di volume è sufficientemente alto⁽⁴⁾, le reazioni di fusione avvengono in quantità tale da rendere la combustione nucleare in grado di autosostenersi senza che si debba spendere altra energia oltre a quella impiegata per il riscaldamento che ha avviato l'ignizione.

Il confinamento — se si riesce a portare la densità oltre al valore critico di circa $3,10^{14}$ ioni per centimetro cubo per almeno un secondo — può addirittura rendere allora il sistema un generatore di energia, nel senso che l'energia messa a disposizione dai neutroni può superare, anche di molto, quella spesa; con un guadagno netto che in linea di principio può diventare addirittura infinito: innescata la fusione, se si continua ad immettere deuterio e tritio nel sistema, questo può

(2) Gli elettroni a queste temperature non sono più legati ai nuclei e si muovono liberamente e indipendentemente nel plasma.

(3) Come la fisica moderna ci insegna, l'energia elettromagnetica è fatta di fotoni, quanti di energia che completano il bilancio energetico della reazione rendendo conto, secondo la equazione famosa della relatività Einsteiniana, $E = mc^2$, della massa m che nella reazione è sparita dal gioco.

(4) Si dice in tal caso che il plasma è «confinato».

produrre energia per fusione sostanzialmente indefinitamente.

Uno schema logico molto bello, compatibile con i principi della fisica moderna, che promette una fonte inesauribile di energia con una proprietà straordinaria; il combustibile è di fatto quasi privo di costo ⁽⁵⁾.

I primi consistenti studi sulla fattibilità di un reattore basato su questi principi, risalgono agli inizi degli anni Settanta e fu presto chiaro che i problemi ingegneristici sarebbero stati altrettanto formidabili di quelli fisici.

Innanzitutto, a regime l'intero sistema è immerso in un flusso enorme di neutroni di altissima energia, che sottopone tutti i materiali della struttura a un danneggiamento irreversibile (ad esempio l'acciaio diventa fragile e si deforma) in tempi relativamente brevi. Il creare e mantenere gli intensi e complessi campi magnetici che confinano il plasma sottopone le strutture di supporto a sforzi e tensioni di natura sia termica sia meccanica non mai verificate prima nell'ingegneria: occorrono nuovi acciai speciali capaci di sopportare sia le altissime temperature dell'ambiente circostante il plasma, sia quelle prossime allo zero assoluto che sono necessarie per il funzionamento dei magneti superconduttori e al contempo gli sforzi dovuti a un campo magnetico (50.000 gauss) grosso modo centomila volte più intenso di quello terrestre. Inoltre la presenza di tritio e il fatto che i neutroni possono rendere radioattivi molti dei materiali che costituiscono la struttura del reattore rendono necessario schermare l'intero sistema in modo molto sofisticato. E infine c'è il problema più difficile: oltre quattro quinti dell'energia prodotta per fusione, sono disponibili per la conversione, e si ritrovano tutti nell'energia nei neutroni: occorre realizzare la trasformazione in una forma di energia utilizzabile.

L'idea su cui i tecnici stanno lavorando è di circondare il reattore con un mantello di acciaio capace di recuperare — operando come scambiatore di calore — l'energia dei neutroni e nello stesso tempo di produrre il combustibile necessario per la fusione, il tritio. Per fare ciò sulla parete interna del mantello, che ha uno spessore dell'ordine di 60-80 centimetri, verrebbe fatto colare con continuità uno strato di litio liquido: il litio (o meglio il suo isotopo di massa 6) è in grado di catturare neutroni di qualsiasi energia, con una reazione che

produce tritio e particelle alfa, oltre ad una quantità di energia radiante che è praticamente l'intera energia dei neutroni e che si ritrova in forma di calore. Il tritio viene successivamente separato per elettrolisi dal litio fuso e può essere quindi immesso in ciclo come combustibile: il reattore si autoalimenta. In tutte le fasi del ciclo del combustibile è indispensabile garantire il contenimento sicuro del tritio, nel reattore, a causa della sua elevata radioattività: si calcola che per assicurare che la dispersione di radioattività non superi i 10 curie al giorno, la perdita massima consentita ad un reattore in esercizio non dovrebbe superare una parte su cento milioni.

Quale è lo stato della ricerca in questo complesso e certo bellissimo schema concettuale?

La più avanzata è la fisica: si può, forse un po' ottimisticamente, ritenere che entro la fine degli anni Novanta possa venire dimostrata, con una serie di esperimenti, la fattibilità scientifica di un reattore a fusione nucleare. Molto più arretrate, rispetto allo schema generale descritto, sono invece la tecnologia dei materiali per l'ingegneria strutturale, quella delle basse temperature per i grandi magneti superconduttori, del sistema di contenimento del tritio gassoso, del controllo della percolazione del metallo liquido sulla parete del mantello. Si prospetta una strada lunga e difficile, al termine della quale (possiamo fare una congettura: una trentina d'anni?) rimane in parte lo stesso inquietante interrogativo dei reattori a fissione: il sistema non è del tutto «pulito». La radioattività, quella indotta come quella del combustibile e l'enorme flusso di neutroni da una parte e la intrinseca instabilità strutturale del complesso dell'altra, fanno pur sempre di un impianto di questo genere un punto nell'ambiente ad altissimo rischio (sia pure non confrontabile con quello degli impianti a fissione che per di più hanno il problema drammatico delle scorie).

Dovremo dunque rinunciare anche a questa così promettente fonte di energia? Certamente no, e per questo riprendo il mio tema d'apertura, ribadendo la soddisfazione nell'apprendere come la ricerca nel settore venga ripresa con nuovo impegno. Infatti, lontano nel tempo, al termine di questa grandiosa impresa intellettuale e tecnologica una speranza esiste: sono i cosiddetti reattori «candidi». Ancora una volta il principio è semplice: se si sostituisce nello schema che abbiamo descritto, al tritio l'elio 3 ⁽⁶⁾, tutto quanto avverrebbe in modo perfettamente analogo nella ciambella del plasma, salvo una importante variante. La reazione di fusione darebbe ancora una particella alfa

⁽⁵⁾ La materia prima è idrogeno, che si trova in natura in quantità praticamente illimitate, soprattutto nell'acqua: in effetti qui c'è un problema, perché mentre l'acqua normalmente contiene deuterio — nella forma della cosiddetta acqua pesante — in quantità rilevanti, il tritio praticamente non esiste in natura e attualmente viene prodotto con un processo costosissimo: vedremo fra breve come questo problema possa venire superato.

⁽⁶⁾ L'elio 3 è un isotopo non troppo raro nell'elio, il cui nucleo è costituito da due protoni e un solo neutrone.

e fotoni, ma al posto di neutroni, protoni — cioè particelle cariche.

Questa semplice differenza a livello microscopico indurrebbe enormi variazioni sul piano macroscopico. I protoni infatti, contrariamente ai neutroni, non riescono a penetrare la materia, da cui sono facilmente fermati, e il rischio di radioattività indotta sarebbe facilmente eliminato (mentre sarebbe del tutto evitata la presenza del tritio). Ma c'è di più, il flusso di protoni potrebbe essere rallentato facendoli lavorare — sono particelle cariche — contro un campo elettrico, così convertendo direttamente la loro energia in nobile energia elettrica, senza passare attraverso la trasformazione in calore (forma meno pregiata di energia, perché esso deve essere a sua volta riconvertito, con efficienza necessariamente bassa, in energia elettrica) inevitabile per l'energia dei neutroni.

Dove sta la difficoltà, e perché non si tenta di sviluppare direttamente questo straordinario progetto? Perché l'ignizione della reazione a deuterio-elio richiede temperature e densità iniziali enormemente più elevate di quelle necessarie per la miscela deuterio-tritio e il traguardo è assai più lontano.

Non è un sogno però, ma una sfida: una sfida che non si può non pensare di raccogliere se non si vuole rinunciare a un modello di sviluppo della nostra società che combini una sempre più alta qualità di servizi (e la disponibilità di energia è ingrediente essenziale per questo), con la migliore qualità della vita, assicurata questa soprattutto con la riduzione per quanto possibile completa non soltanto dei rischi di incidenti, localizzati o distribuiti, ma dei danni che il sistema di produzione può creare nell'ambiente, nella sua globalità.

Panoramica sui reattori nucleari: il progetto unificato nucleare

Antonio ARIEMMA - Paolo FORNACIARI (*)

Panoramica sui principali tipi di reattori

Un reattore nucleare è, in linea generale, costituito da combustibile (contenente materiali fertili e fissili) che sviluppa energia, un materiale assorbitore di neutroni (ad es. barre di controllo), un fluido refrigerante, mantenuto in circolazione per asportare l'energia termica generata dalla fissione e, per i reattori termici, un moderatore che rallenta i neutroni prodotti dalla fissione: oltre a ciò vi saranno materiali strutturali con il compito di mantenere i vari componenti secondo determinate geometrie.

I materiali ai quali si è accennato possono essere diversi e, a seconda delle combinazioni scel-

te, si hanno diversi tipi o «filieri» di reattori nucleari. La presenza di diverse filiere sul mercato internazionale trae la sua origine, essenzialmente, dalla disponibilità o meno, presso i paesi costruttori, di uranio arricchito. Gli Stati Uniti, ad esempio, dove dopo la seconda guerra mondiale erano disponibili impianti di arricchimento dell'uranio, si orientarono verso le realizzazioni di unità ad uranio arricchito per le quali l'acqua naturale, comunemente detta «leggera», è idonea sia come moderatore che come refrigerante, e svilupparono reattori del tipo sia ad «acqua in pressione» che ad «acqua bollente». Nei Paesi presso i quali non erano in funzione impianti di arricchimento, la scelta cadde su tecnologie che permettevano l'utilizzazione di uranio naturale: in Canada si è sviluppato un reattore ad uranio naturale raffreddato e moderato ad acqua pesante (dal quale è derivato il Cirene, moderato ad acqua

(*) Ingegneri, Direzione delle Costruzioni, ENEL, Roma.

pesante, ma raffreddato con vapor d'acqua leggera); in Gran Bretagna ed in Francia, utilizzando sempre l'uranio naturale, si sono adottati la grafite come moderatore e un gas (anidride carbonica) come refrigerante. In URSS si sono affermate due diverse filiere, una ad acqua leggera in pressione, ed una (tipo Chernobyl) che usa la grafite come moderatore e l'acqua leggera bollente come refrigerante (RBMK).

In tempi più recenti anche in Europa si sono costruiti impianti di arricchimento isotopico in modo da non soggiacere a regimi di monopolio per l'arricchimento dell'uranio: in tal modo è notevolmente diminuito l'incentivo verso i reattori ad uranio naturale, che hanno una bassa resa energetica per il combustibile adoperato.

Reattori a gas-grafite

Nella descrizione dei vari tipi di reattori inizieremo dalla filiera gas-grafite (fig. 1) alla quale appartiene la prima unità nucleare entrata in servizio in Italia presso Latina. Il nocciolo è costituito da un cilindro realizzato in blocchi di grafite, attraversato da canali verticali, all'interno di ciascuno dei quali è posizionato il combustibile; quest'ultimo è costituito da barre di uranio sotto forma metallica contenute in una guaina di lega al magnesio (magnox). Il gas utilizzato come refrigerante è anidride carbonica che, dopo aver attraversato il reattore, viene inviata in generatori di vapore per la produzione di vapore d'acqua.

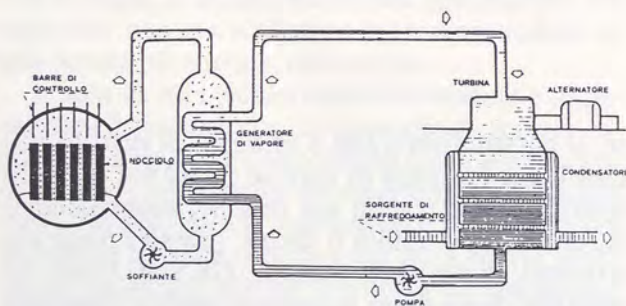


Fig. 1 - Reattore a gas-grafite uranio naturale (MAGNOX).

Le temperature raggiungibili in questa filiera sono relativamente modeste, per il basso punto di fusione del magnox. L'utilizzo di leghe al magnesio è, d'altro canto, imposto dalla necessità di avere bassi assorbimenti neutronici, poiché si opera con uranio naturale.

Le unità di questo tipo sono anche caratterizzate da un sistema di ricambio continuo del com-

bustibile, con reattore in esercizio, tramite una particolare macchina di carico e scarico.

Il vapore prodotto in questo tipo di filiera raggiunge temperature e pressioni relativamente modeste. Per ottenere caratteristiche migliori del vapore la filiera si è evoluta nei tipi AGR (reattore avanzato a gas) e HTGR (reattore a gas ad alta temperatura).

Pur non essendo i gas tra i migliori refrigeranti per quanto riguarda le caratteristiche termiche, si ha il vantaggio di assenza di cambiamento di fase e variazioni di pressione o temperatura non sono in grado di provocare inserzioni sensibili di reattività. Le potenze specifiche di questi reattori sono relativamente modeste, le barre di combustibile sono alettate per favorire lo scambio termico con il gas. In caso di rottura del circuito di refrigerazione e di perdita del gas, tale perdita non è mai completa, ma si arresta, come minimo, quando si raggiunge l'equilibrio tra la pressione interna e quella esterna cioè a circa 1 atm, e il gas continua a circolare svolgendo le sue funzioni di raffreddamento del nocciolo.

Reattori ad acqua leggera

Acqua in pressione. È di questo tipo, in Italia, il reattore della centrale di Trino Vercellese (270 MWe) in esercizio dal 1964, e quello scelto per le future centrali unificate dell'ENEL (2×1000 MWe). In una centrale con reattore ad acqua in pressione (PWR) l'acqua, che circola in un «circuito primario» ed è mantenuta ad una pressione di circa 155 kg/cm^2 , rimuove il calore generato nel nocciolo e lo scambia, in generatori di vapore, con l'acqua di un «circuito secondario» che si trasforma in vapore. L'acqua del circuito primario svolge le funzioni sia di refrigerante sia di moderatore. Uno schema generale semplificato di una centrale con reattore PWR è riportato in fig. 2. I principali componenti del circuito primario sono: il recipiente in pressione o «vessel», (che contiene il nocciolo), i generatori di vapore, il pressurizzatore, le pompe.

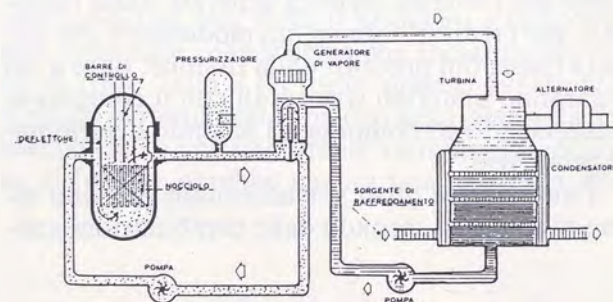


Fig. 2 - Reattore ad acqua in pressione (PWR).

Per una unità da circa 1000 MWe, come quella scelta per il PUN alla quale faremo riferimento nel seguito, il recipiente in pressione è costituito da un cilindro in acciaio (mantello) di spessore pari a circa 25 cm, chiuso inferiormente da un fondo emisferico, e superiormente da una testa anch'essa emisferica e imbullonata al mantello, in modo da poter essere rimossa per le operazioni di ricarica del combustibile. L'altezza totale ed il diametro esterno del recipiente sono pari rispettivamente a circa 13 m e circa 5 m. All'interno del recipiente in pressione sono contenuti: il nocciolo, le relative strutture di sostegno e un secondo cilindro in acciaio (deflettore) posto tra il recipiente in pressione ed il nocciolo allo scopo di orientare opportunamente il percorso del refrigerante. Il mantello del recipiente in pressione è poi provvisto, nella parte superiore, di bocchelli per l'attacco delle tubazioni di collegamento agli altri componenti del circuito primario. L'acqua, proveniente dalle pompe di ricircolazione, entra nel recipiente in pressione ad una temperatura di circa 290° C, fluisce quindi verso il basso nello spazio anulare tra il mantello esterno ed il mantello deflettore, inverte la direzione sul fondo ed attraversa il nocciolo, dal basso in alto, lambendo la superficie esterna delle barrette di combustibile (dalle quali asporta il calore generato dalle fissioni) e raggiungendo una temperatura di circa 325 °C. Il nocciolo è costituito da 157 elementi di combustibile, ciascuno formato da un fascio a sezione quadrata di barrette di ossido di uranio arricchito al 3% circa, incamiciate in Zircaloy.

In questo tipo di reattore le barre di controllo sono formate da tubicini cilindrici contenenti materiale assorbitore di neutroni, tenuti insieme da una crociera a razze alla sommità, che scorrono verticalmente all'interno di posizioni lasciate vuote negli elementi di combustibile. Oltre che con le barre di controllo, variazioni lente di reattività vengono ottenute sciogliendo boro nell'acqua del primario (il boro è un forte assorbitore di neutroni): se è necessario aumentare la concentrazione di boro viene immessa nel circuito primario una certa quantità di acqua con una concentrazione di boro molto elevata, e scaricata un'uguale quantità di acqua dal primario: se è necessario diluire la concentrazione di boro si immette nel primario, con le stesse modalità, acqua demineralizzata. In questo modo si realizza, sull'intero nocciolo, un controllo uniformemente distribuito che presenta alcuni vantaggi rispetto a quello delle barre, realizzato, viceversa, solo in punti ben individuati.

La regolazione di potenza per questo tipo di reattore viene realizzata mantenendo costante la portata del refrigerante e facendo variare il salto di temperatura che l'acqua subisce nell'attraversare il nocciolo.

Dal recipiente in pressione si possono dirama-

re, a seconda della potenza del reattore, tre o quattro circuiti chiusi o «loops», ciascuno con un generatore di vapore ed una pompa (nel caso del PUN questi «loops» sono 3), inoltre un «pressurizzatore» mantiene l'acqua del primario ad una pressione tale (circa 155 kg/cm²) da impedirne la ebollizione. Il pressurizzatore è un recipiente cilindrico, di notevoli dimensioni, chiuso con due calotte emisferiche, e collegato con una tubazione ad uno solo dei «loops» del circuito primario. Nel pressurizzatore, utilizzando riscaldatori elettrici, si mantiene dell'acqua, praticamente non in circolazione, in equilibrio con il proprio vapore ad una temperatura maggiore di quella che viene raggiunta dall'acqua di refrigerazione che circola nei vari «loops». La pressione che così si stabilisce nel pressurizzatore (e viene quindi trasmessa attraverso la tubazione di collegamento a tutto il sistema primario) è più alta di quella che permette l'ebollizione dell'acqua di refrigerazione che, quindi, circola restando sempre in fase liquida.

L'acqua che lascia il recipiente in pressione viene convogliata ai generatori di vapore dove, circolando all'interno di tubi esternamente ai quali si trova acqua del circuito secondario a temperatura più bassa, cede calore a quest'ultima facendola evaporare. L'acqua che si trova nel «lato secondario» del generatore è infatti ad una pressione (circa 50-60 kg/cm²) nettamente inferiore a quella del primario e può evaporare a temperature dell'ordine di 280 - 290 °C. L'acqua primaria, che lascia i generatori di vapore, viene ripresa dalle pompe di circolazione e inviata nuovamente al recipiente in pressione.

La ricarica del combustibile per questo tipo di reattore è discontinua: il reattore viene spento, raffreddato e successivamente vengono rimossi i bulloni che assicurano la testa del recipiente in pressione al recipiente stesso. La zona sovrastante il reattore viene allagata (è difatti necessario provvedere ad una conveniente schermatura con acqua per la protezione contro le radiazioni), la testa viene rimossa ed è così possibile accedere, con appositi dispositivi a telescopio, agli elementi di combustibile dotati di vere e proprie «maniglie» poste sulla piastra superiore dell'elemento.

Sempre sotto battente d'acqua, il combustibile irraggiato viene estratto dal reattore e portato nelle piscine di decadimento mentre il combustibile fresco viene posizionato nel nocciolo. Le «ricariche» vengono fatte, mediamente, una volta ogni anno e mezzo e viene sostituita una parte (un terzo-un quinto) dell'intero quantitativo di combustibile nel reattore.

Il nocciolo del reattore ad acqua in pressione è molto compatto e presenta potenze specifiche piuttosto elevate; questo tipo di reattore si è sviluppato dapprima per propulsione navale e successivamente per impianti di terra.

Acqua bollente. Il reattore ad acqua bollente, come quello in esercizio a Caorso e i due in costruzione a Montalto di Castro, può immaginarsi come un «pressurizzato» che assommi, nel recipiente in pressione del reattore, anche la funzione di generatore di vapore (fig. 3). Infatti la produzione di vapore avviene direttamente nel nocciolo, il vapore viene deumidificato ed essiccato all'interno del recipiente in pressione e da esso direttamente inviato in turbina, la «pressione» all'interno del primario viene mantenuta dalla presenza di acqua in equilibrio con il vapore all'interno del nocciolo, e viene regolata al valore voluto dalle valvole di ammissione in turbina.

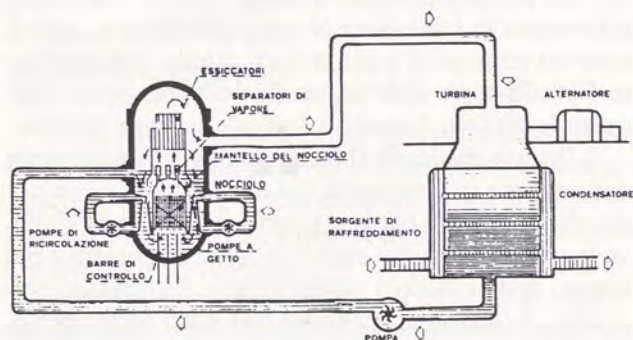


Fig. 3 - Reattore ad acqua bollente (BWR).

A parità di potenza, il recipiente in pressione di un «bollente» è notevolmente più grande di quello di un «pressurizzato» (per 1000 MWe circa 20 m di altezza e 7-8 di diametro, contro i 13 m e 5 m, rispettivamente, di un pressurizzato).

Va inoltre tenuto presente che mentre in un reattore ad acqua in pressione il vapore inviato in turbina ha una radioattività molto modesta (legata ad eventuali perdite primario-secondario nei generatori di vapore), in un impianto con reattore ad acqua bollente la radioattività trascinata dal vapore, che, ricordiamo, si produce direttamente nel nocciolo, è più elevata e porta, come conseguenza, il dover schermare le tubazioni vapore e la stessa turbina, oltre ad un controllo delle ventilazioni all'interno dell'edificio turbina che risulta molto più «appesantito» dell'analogo edificio per un reattore pressurizzato.

Reattori ad acqua pesante e Reattori veloci

Altri tipi di reattore sono quello ad acqua pesante tipo CANDU (fig. 4) e quello «veloce» (fig. 5) raffreddato al sodio.

Il primo è raffreddato e moderato con acqua pesante, e l'acqua con funzione di «moderatore»

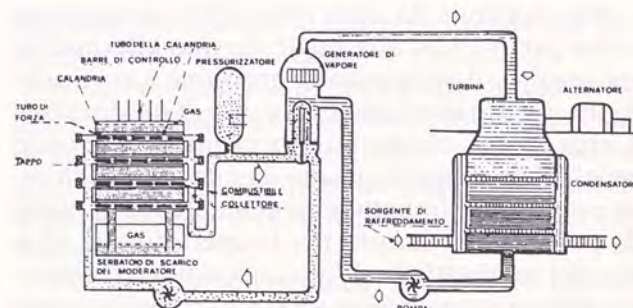


Fig. 4 - Reattore CANDU.

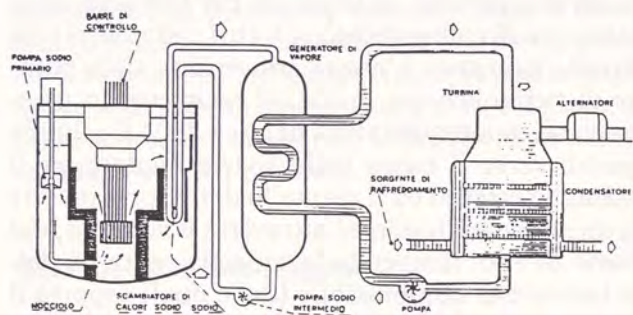


Fig. 5 - Reattore veloce al sodio.

è tenuta fisicamente separata da quella con funzione di «refrigerante»: questo va sottolineato perché, in caso di necessità, il reattore può essere spento, oltre che con le barre di controllo, anche con lo «svuotamento» rapido del moderatore, mentre il combustibile continua ad essere raffreddato dal refrigerante.

Il secondo tipo di reattore è quello «veloce» al sodio: questo reattore non ha moderatore, è raffreddato con sodio fuso, produce vapore con caratteristiche ottime di pressione e temperatura e, soprattutto, trasforma del materiale «fertile» in «fissile» in quantità maggiore del «fissile» che consuma, permettendo così non solo di «autoalimentarsi» ma anche di produrre nuovo fissile per altri reattori.

RBMK

Un cenno, infine, ad alcuni aspetti del reattore russo RBMK (fig. 6): questo reattore è moderato a grafite e raffreddato ad acqua bollente e questo porta a pensare ai reattori tipo Magnox per il moderatore, ai reattori ad acqua bollente per il refrigerante, ai CANDU per la separazione fisica tra il moderatore ed il refrigerante.

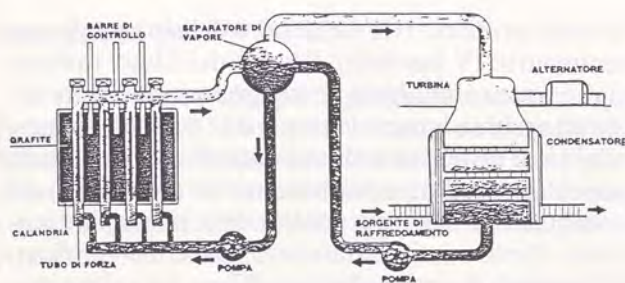


Fig. 6 - Reattore RBMK.

Se pensiamo al reattore Magnox dobbiamo ricordare che l'RBMK è raffreddato ad acqua e questo permette di avere, come in effetti ha, densità di potenza elevate, come quelle tipiche di un reattore ad acqua bollente, che devono essere paragonate a quelle molto più modeste dei reattori Magnox; inoltre l'acqua nel nocciolo cambia fase, e questo può portare ad inserzioni sensibili di reattività. Cioè in un reattore di questo tipo un aumento di potenza, portando ad una maggiore produzione di vapore, si autoesalta perché al diminuire della densità dell'acqua, diminuiscono i neutroni assorbiti; questo è praticamente l'unico effetto che il reattore risente e che lo rende instabile. Viceversa in un reattore ad acqua (moderato e raffreddato ad acqua) ad un aumento della potenza ceduta all'acqua corrisponde una diminuzione di reattività (diminuzione della costante di moltiplicazione neutronica) perché l'effetto dovuto alla diminuzione dei neutroni assorbiti è più che compensato dall'effetto di diminuzione della moderazione, e questo rende il reattore intrinsecamente stabile.

A questo punto si può pensare che le osservazioni di cui sopra valgono anche per un reattore CANDU moderato ad acqua pesante, stante la separazione fisica tra il «moderatore» ed il refrigerante: una produzione di vapore nel refrigerante fa diminuire i neutroni assorbiti, con inserzione di reattività. Peraltro l'acqua pesante, che funge da moderatore, può essere rapidamente drenata dal nocciolo e portare in questo modo allo spegnimento del reattore (sistema alternativo di arresto rapido), contrariamente alla grafite dell'RBMK che non può certo essere rimossa.

L'incidente occorso a Chernobyl è stato, come è noto, originato dallo scatto delle pompe di circolazione del reattore con un rapido aumento del vapore prodotto e quindi inserzione di reattività; violazioni ripetute di procedure ed esclusione di dispositivi di sicurezza hanno fatto degenerare il transitorio nel noto incidente.

Impatto di una centrale nucleare

A conclusione di questa panoramica sui diversi tipi di reattore, esaminiamo brevemente quello che è l'impatto di una centrale nucleare sull'ambiente, verso il quale una centrale nucleare ha effetti diversi da quelli di una centrale convenzionale e tali effetti, in generale, non sono sommabili; si può parlare cioè anche di una diversificazione dell'impatto ambientale.

Limitiamoci a considerare gli effetti legati alla radioattività, prendendo ad esempio le centrali ENEL. L'obiettivo di progetto adottato dall'ENEL è quello di un valore di dose efficace di 10 mrem/anno al gruppo di popolazione più esposto (gruppo critico) a seguito dagli scarichi liquidi e gassosi di normale esercizio. A fronte di questo obiettivo e tenendo conto dei sistemi di trattamento degli scarichi sia liquidi che gassosi, è stata valutata una dose efficace al gruppo critico inferiore ad 1 mrem/anno.

A supporto di queste valutazioni si cita l'esperienza di esercizio della centrale di Caorso: la dose efficace al gruppo critico è risultata inferiore ad 1 mrem/anno. A titolo di confronto si ricorda che le dosi di fondo medie delle diverse regioni italiane oscillano da un minimo di circa 50 mrem/anno in Val d'Aosta, agli 85 del Piemonte, ai 175 della Campania. Si sottolinea che le concentrazioni dei radionuclidi nelle coltivazioni circostanti le centrali nucleari presentano valori enormemente più bassi (oltre 10.000 volte) di quelli per cui sono stati decisi interventi protettivi durante il caso Chernobyl.

Dopo aver esaminato l'impatto in normale esercizio, passiamo ad alcune considerazioni sulla prevenzione degli incidenti e, nel caso essi avvengano, sulla mitigazione delle conseguenze. I principali incidenti che si prendono di norma come eventi di riferimento per valutare le potenziali conseguenze da radiazioni all'esterno della centrale, sono:

- perdite di refrigerante primario per uno spettro di rotture che include il tranciamento completo di una tubazione principale del circuito primario;
- transitori di potenza conseguenti ad inserzioni di reattività (ad es. espulsione rapida di una barra di controllo dal nocciolo);
- perdite di vapore per uno spettro di rotture che include il tranciamento delle condotte principali di vapore del circuito secondario;
- caduta di un elemento di combustibile durante le operazioni di ricarica.

I sistemi di sicurezza, al fine di garantire la loro funzione, vengono realizzati secondo criteri ben definiti, in particolare:

- elevata affidabilità intrinseca dei componenti;
- ridondanza dei sistemi e dei componenti, per

- assicurare che i sistemi assolvano alla loro funzione di sicurezza anche in caso di guasto o indisponibilità di un singolo componente;
- separazione fisica dei sistemi e dei componenti ridondanti;
 - diversificazione dei segnali che determinano l'intervento dei sistemi di sicurezza;
 - indipendenza e separazione fisica dei circuiti per l'azionamento dei sistemi;
 - alimentazione elettrica garantita sia per le esigenze di potenza sia per quelle di comando;
 - riserva d'acqua garantita per i sistemi di raffreddamento di emergenza del nocciolo e per i sistemi di spruzzamento del contenitore (a tal fine sono previsti appositi serbatoi d'acqua progettati con gli stessi criteri dei sistemi che da essi attingono);
 - garanzia di smaltimento del calore verso l'esterno (ad esempio il sistema di emergenza di smaltimento del calore può essere costituito da bacini d'acqua e da torri di raffreddamento);
 - possibilità di esecuzione, ad intervalli di tempo sufficientemente frequenti, di prove funzionali dei componenti e dei sistemi.

La ridondanza, la diversificazione e la separazione dei sistemi in «treni» o «divisioni» sono criteri fondamentali per un elevato livello di sicurezza. La ridondanza, cioè la disponibilità di un numero di sistemi superiore a quello strettamente necessario, permette di elevare il grado di affidabilità dei sistemi che potrebbero essere chiamati a funzionare nel caso di ipotetico incidente. La diversificazione consiste in modalità differenti di svolgere la stessa funzione; ad esempio la refrigerazione del nocciolo del reattore è ottenuta mediante l'invio di acqua da accumulatori senza parti in movimento oppure da un sistema di iniezione costituito da pompe.

Per evitare che sostanze radioattive contenute nel combustibile vengano rilasciate all'esterno della centrale esiste una serie di «barriere» fisiche:

- *la prima barriera* è rappresentata dalle pastiche di combustibile ad ossidio di uranio sinte-
rizzato; si tratta di materiale ceramico capace di trattenere nella propria matrice, fino ad alta temperatura, i prodotti di fissione che vi si formano; il combustibile stesso, quindi rappresenta il primo ostacolo alla fuoriuscita di prodotti di fissione;
- *la seconda barriera* è costituita da tubi metallici a chiusura ermetica in cui sono contenute le pastiche di combustibile;
- *la terza barriera* è rappresentata dal circuito primario vero e proprio;
- *la quarta barriera* è il sistema di contenimento esterno al circuito primario.

Le prime due barriere (combustibile + tubi metallici) trattengono i prodotti di fissione praticamente ove si producono. Nel caso di guasto del

circuito primario (III barriera) o del sistema di contenimento (IV barriera), l'entità dei rilasci radioattivi è ancora modesta se vengono mantenute sostanzialmente integre le prime due barriere; la possibilità di dispersione di radioattività rimane legata soprattutto ad un anormale surriscaldamento del combustibile e ad una perdita delle prime due barriere. Detto surriscaldamento potrebbe verificarsi a seguito di un sensibile squilibrio fra calore prodotto nel nocciolo e calore rimosso dal refrigerante primario. In un tal caso, dovuto ad esempio a guasti di componenti o a rottura di tubazioni, occorre, oltre che arrestare immediatamente la reazione a catena, impedire il surriscaldamento del combustibile rimuovendo il calore di decadimento radioattivo dei frammenti di fissione che, si ricorda, dopo un'ora dallo spegnimento del reattore è ancora dell'ordine dell'1,5% della potenza nominale e decade lentamente nel tempo.

Per quanto riguarda il sistema di contenimento è stato adottato per il PUN il criterio di una doppia barriera, con le seguenti caratteristiche: il primo contenitore (interno) rappresenta una barriera praticamente ermetica contro il rilascio di prodotti radioattivi: la eventuale perdita di sostanze radioattive dal primo contenitore può essere comunque raccolta nell'intercapedine, recuperata e trattata attraverso un apposito sistema di filtrazione prima di essere rilasciata all'esterno. Il contenitore esterno rappresenta, inoltre, una protezione passiva contro eventi esterni.

Il verificarsi di una fusione parziale o totale del nocciolo non implica necessariamente conseguenze gravi per l'ambiente esterno. Il sistema di contenimento, infatti, anche se progettato esplicitamente per far fronte agli incidenti base di progetto, costituisce una barriera efficace in molti casi di fusione del nocciolo, come ha dimostrato l'incidente di Three Mile Island. In tale incidente il nocciolo parzialmente fuse, liberando nel contenitore rilevanti quantità di prodotti di fissione; ciononostante il contenitore esistente, pur essendo di tipo semplice e non doppio come quello dei moderni impianti italiani, consentì di limitare il rilascio dello iodio all'ambiente a meno di un milionesimo di quello rilasciato dal combustibile (la maggior parte rimase nella fase liquida o depositata sulle pareti e, di quello presente nell'atmosfera del contenitore, fuoriuscì circa l'1%).

Per quanto concerne il contenitore dell'impianto di Chernobyl occorre ricordare che il principio base sul quale è stato progettato era solo la protezione verso l'esterno dalla rottura di grosse tubazioni del circuito primario. Il contenimento, pertanto, lasciava completamente non protetto il reattore per quanto concerneva un incidente di grave danneggiamento del nocciolo dovuto, ad esempio, ad una forte inserzione di reattività, come si è purtroppo verificato.

Descrizione del PWR-PUN

Il reattore adottato per il progetto nucleare unificato dell'ENEL è un pressurizzato da circa 1000 MWe, con tre «loops» del tipo di quello che è già stato descritto. È utile ricordare quelli che sono i miglioramenti introdotti e le particolari caratteristiche della centrale:

- doppio sistema di contenimento (il doppio sistema di contenimento non è normale in USA, ed anche in Francia esso è adottato solo per gli impianti più recenti, mentre 28 impianti da 900 MWe hanno un contenimento singolo);
- completa separazione delle isole produttive delle due unità;
- platea unica di fondazione per gli edifici nucleari di ciascuna unità;
- segregazione spinta dei sistemi di emergenza ridondanti;
- progettazione antisismica con una accelerazione di 0,24 g e spettro a banda larga. Si ricordi, a questo proposito, che il sito del Piemonte è

- caratterizzato, per uno spettro di tale tipo, da valori di accelerazione inferiore a 0,8 g;
- progettazione dell'impianto tale da resistere ad eventi causati dall'uomo quali la caduta d'aereo e l'onda piana di pressione;
- adozione di sistemi di sicurezza aggiuntivi rispetto al più generale standard;
- adozione di pezzi forgiati per il recipiente in pressione del reattore, per evitare saldature in zona nocciolo;
- aumento del numero dei generatori elettrici di emergenza;
- adozione di un sistema di protezione avanzato, basato sull'uso di microprocessori;
- adozione di una sala manovre di emergenza che consente di portare l'impianto in condizioni di arresto a freddo in caso di perdita della sala manovre principale;
- potenziamento dei sistemi di controllo della chimica dell'acqua lato primario e secondario;
- particolare cura posta all'aspetto ergonomico nella progettazione di sale manovre.

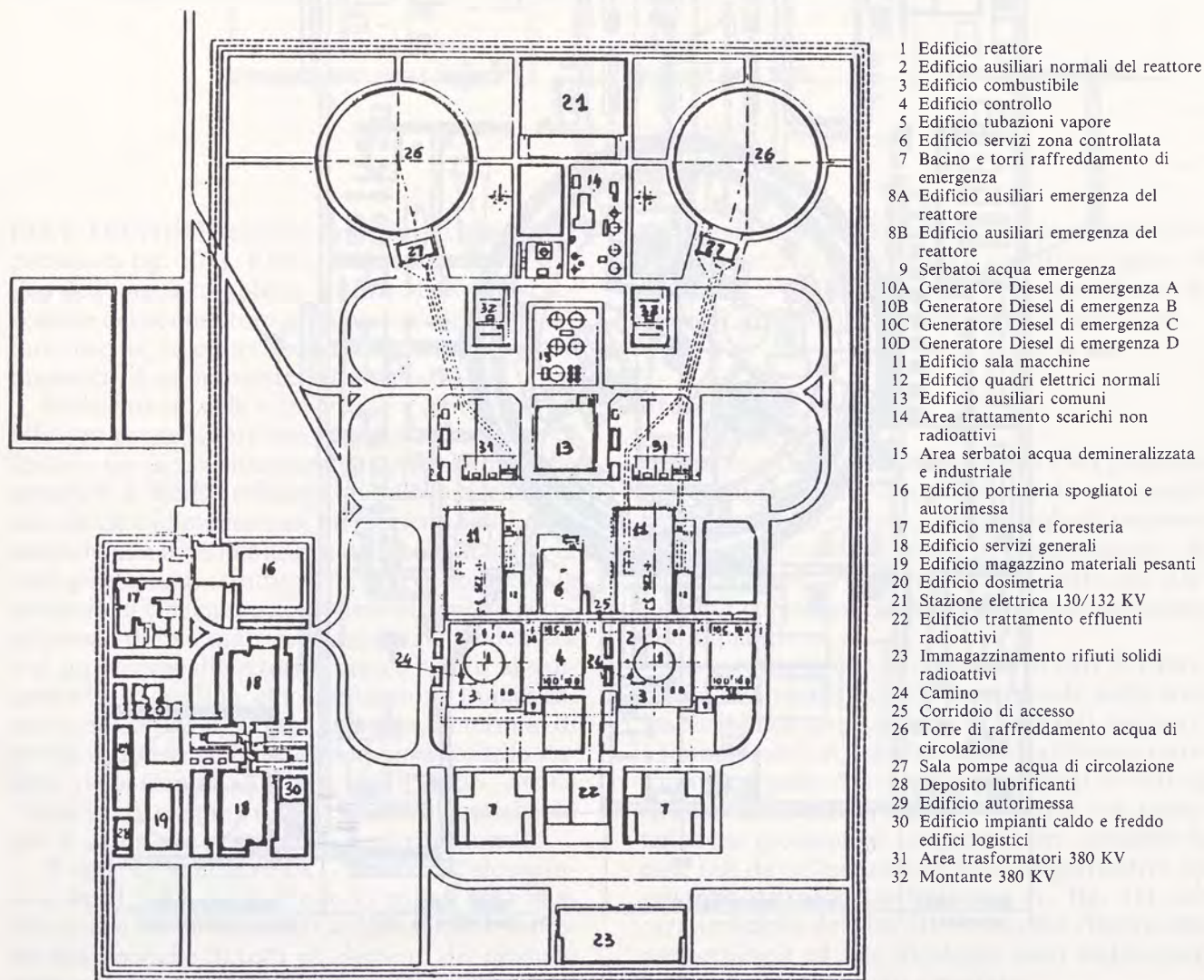


Fig. 7 - Impianto per un reattore, planimetria generale.

Lo studio probabilistico di sicurezza condotto per il Progetto Nucleare Unificato ha ottenuto per la probabilità di danneggiamento del nocciolo, un valore di 8×10^{-6} /anno: in pratica grazie ai miglioramenti su accennati questo numero si colloca tra i migliori a livello mondiale. In figure 7, 8, 9 sono riportate la planimetria generale della centrale, ed una pianta e sezione dell'edificio di contenimento.

Progettazione civile

Organizzazione della progettazione

La progettazione civile degli edifici nucleari principali (RAF), che comprende anche la struttura di contenimento del reattore, viene sviluppata dall'ENEL, dall'ANSALDO DIVISIONE IMPIANTI (ADI), dall'ISMES e dal raggruppamento

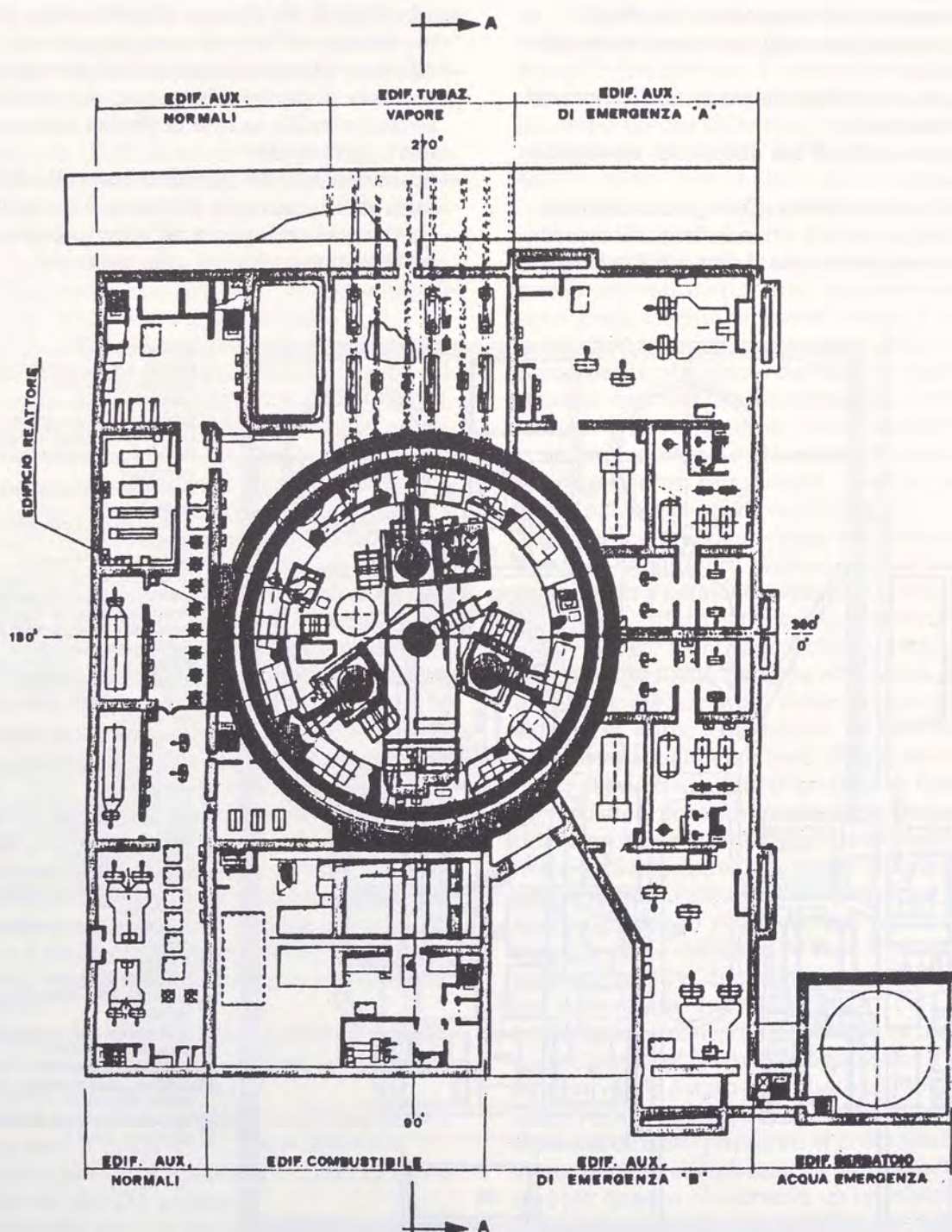


Fig. 8 - Edifici nucleari principali - Vista in pianta el. + 800.

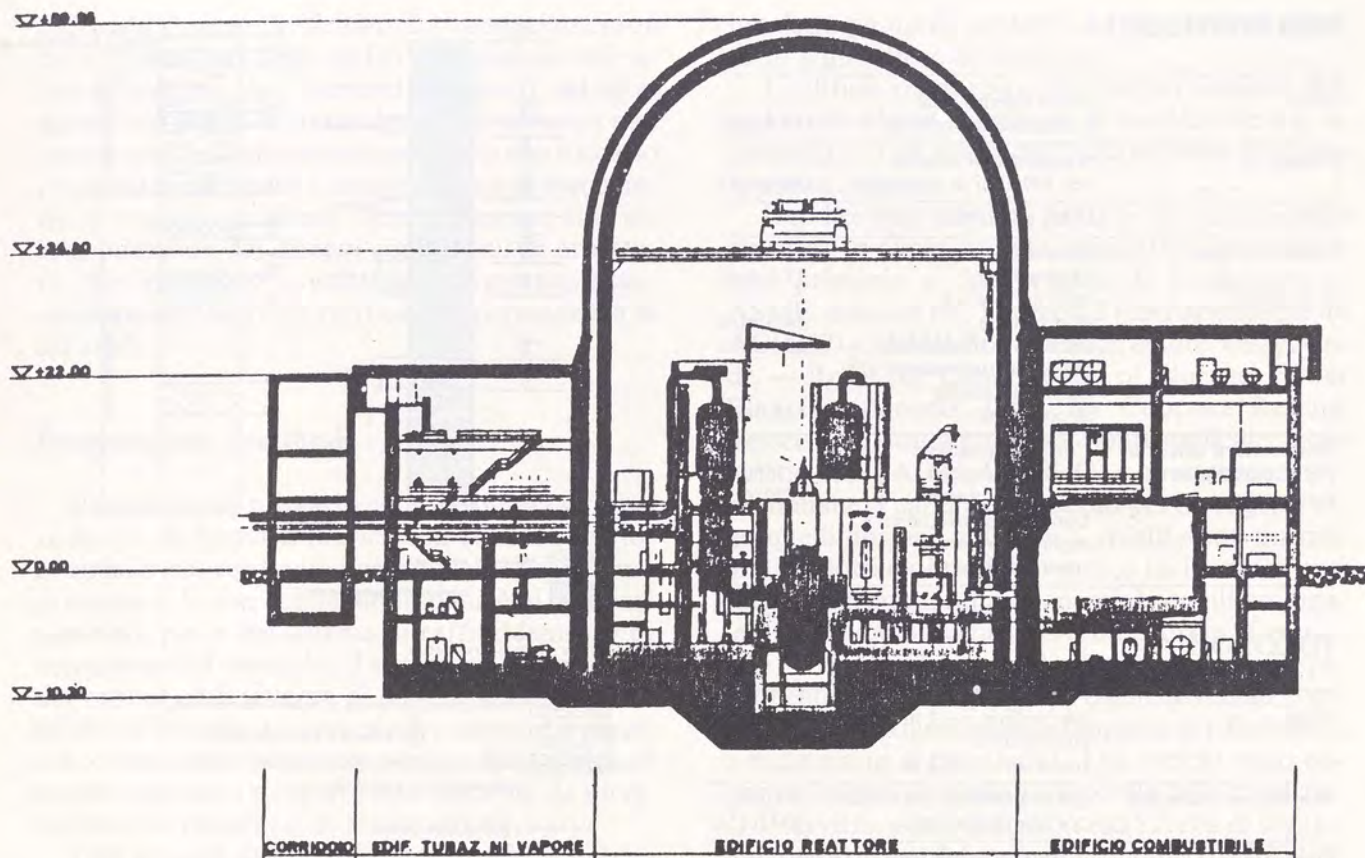


Fig. 9 - Edifici nucleari principali - Sezione A-A.

FIAT-TECHINT secondo lo schema a blocchi riportato in fig. 10. L'ENEL esegue il progetto statico dell'intero complesso strutturale RAF ad eccezione del contenitore primario e delle sue strutture interne, la cui progettazione, sia statica che dinamica, è interamente affidata ad ADI.

Nella fase iniziale viene messo a punto dall'ENEL un progetto preliminare che ha lo scopo di fornire un dimensionamento «congelato» delle strutture. L'ENEL sviluppa quindi il modello statico finale tridimensionale ad elementi finiti, pervenendo alla determinazione delle sollecitazioni in tutti gli elementi strutturali. L'interazione con la struttura di contenimento avviene attraverso la costruzione di una matrice di rigidità condensata e di un insieme di vettori di carico ridotti ai «supernodi» di confine, che costituiscono l'unica interfaccia con ADI. L'input sismico, in termini di profili di accelerazione, da inserire nel modello statico, viene fornito all'ENEL dall'ISMES, che ha l'incarico di eseguire tutte le analisi dinamiche sia per il sisma che per l'impatto di riferimento.

Il raggruppamento FIAT-TECHINT riceve infine dall'ENEL, come input, i risultati delle analisi strutturali in termini di sollecitazioni e procede alle verifiche di tutti gli elementi del modello e per tutte le combinazioni dei carichi previste dalla normativa di riferimento, nonché alla esecuzione

dei disegni esecutivi di cantiere. Per particolari problemi strutturali o per analisi specifiche legate al sito reale, l'ENEL si avvale della consulenza di studi di ingegneria con competenze specifiche.

Progettazione unificata

Il «progetto unificato nucleare» è un progetto standard, realizzabile in differenti siti con caratteristiche molto diverse, che consente di ottenere vantaggi notevoli nei tempi di progettazione, di realizzazione e di approvazione da parte dell'Autorità di controllo, quando si debbano realizzare più impianti.

Le caratteristiche adottate per il sito di riferimento inviluppano quelle dei siti reali, nelle aree suscettibili di insediamento di impianti nucleari, e sono il frutto di indagini relative all'intero territorio nazionale. Sono stati individuati tre siti di riferimento (soffice, rigido, roccioso) con caratteristiche geotecniche congruenti per ciascuno di essi, tali da influenzare in modo significativo lo sviluppo del progetto unificato (v. fig. 11). Le caratteristiche del sito di riferimento riferite alla meteorologia ed alla idrologia sono sintetizzate nella tabella di seguito riportata.

Dal punto di vista strutturale la progettazione

METEOROLOGIA

Neve	carico riferito alla proiezione orizzontale	150 kg/m ²
Pioggia	precipitazione oraria per 100 anni di ritorno	140 mm/h
Vento	D.M. 12.2.1982	
Tromba d'aria	massima velocità di rotazione	73.5 m/s
(Tornado)	minima velocità di rotazione	34.5 m/s
	velocità di traslazione	24 m/s
	raggio corrispondente alla massima velocità di rotazione	45 m
Temperatura dell'aria per le pareti esterne fuori terra	Condizione estiva: superficie esterna	35°C
	superficie interna	22°C
	Condizione invernale: superficie esterna	- 16°C
	superficie interna	20°C

IDROLOGIA

Falda	sito soffice — 1 m dal piano campagna	
	sito rigido e roccioso — 2 m " " "	
Portate corsi d'acqua	portata minima garantita	12 mc ³ /s
	portata media annua	100 mc ³ /s
Inondazioni	il piano piazzale sarà situato ad una quota superiore di almeno 1m a quella di massima inondazione	

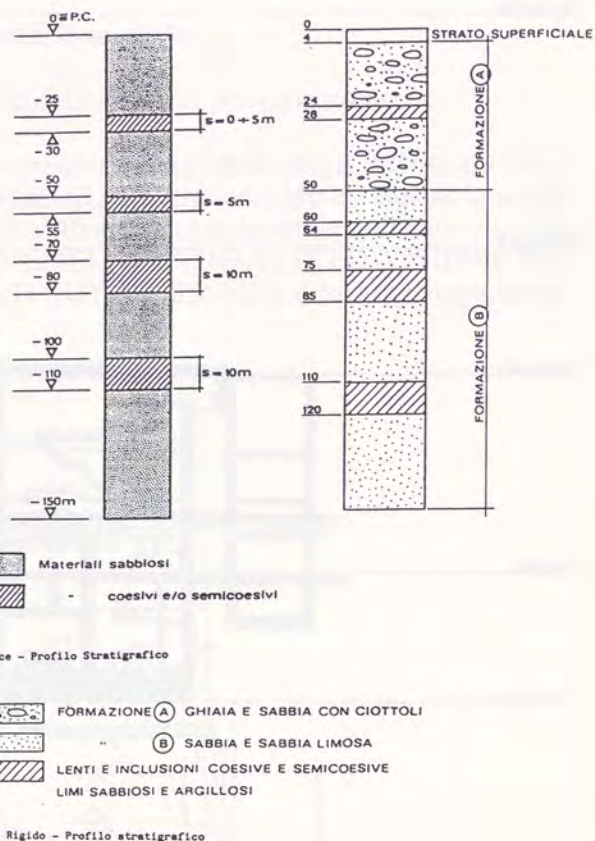


Fig. 11 - Sito soffice e Sito rigido - Profili stratigrafici.

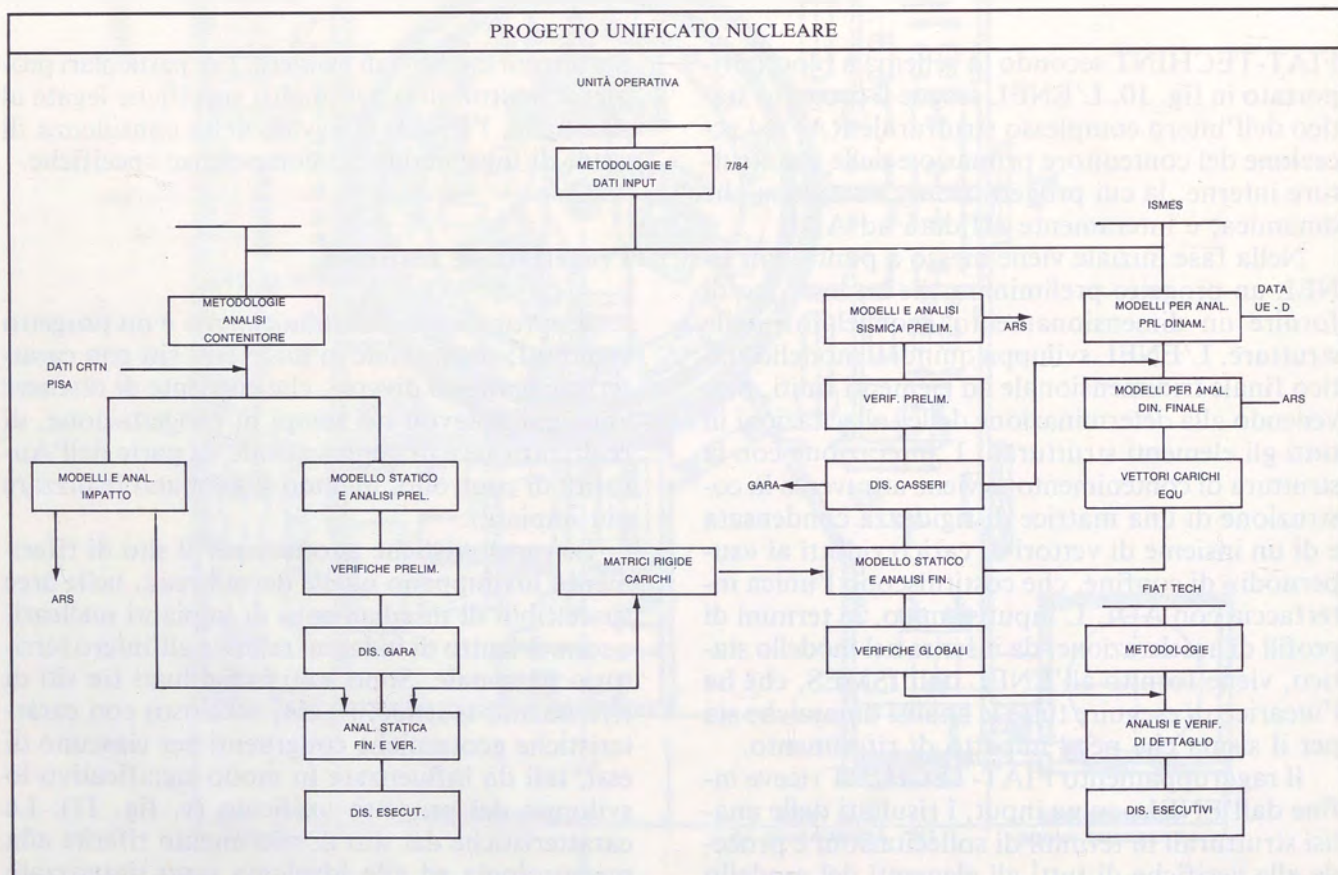


Fig. 10 - PUN - Progetto strutturale degli edifici RAF.

unificata si pone l'obiettivo del «congelamento» delle dimensioni degli edifici (dimensione dei locali e spessore degli elementi resistenti), ad eccezione della platea di fondazione il cui spessore può essere ridotto significativamente per il sito roccioso riducendo così anche i costi e i tempi di esecuzione. Il progetto unificato viene sviluppato fino alla produzione dei disegni concettuali di armatura, che rimangono invariati per i diversi siti, e successivamente ne viene verificata la rispondenza ai siti reali.

Progettazione strutturale

Il contenitore primario consiste di una struttura in c.a. di forma cilindrica con cupola superiore emisferica, ospitante i componenti del sistema primario e le sue connessioni ai sistemi ausiliari associati, parte del sistema di raffreddamento di emergenza del nocciolo, il sistema di generazione del vapore ed il sistema di maneggio del combustibile all'interno del contenitore stesso. Le pareti del contenitore e la parte superiore della platea di fondazione sono ricoperte internamente da un rivestimento metallico di tenuta (liner).

Tutt'attorno al contenitore primario si sviluppa il «contenitore secondario», anch'esso in cemento armato collegato alla base con la platea di fondazione e monoliticamente solidale con tutte le «strutture esterne» al contenitore e appartenenti al RAF. Al contrario il contenitore primario non

ha alcun punto di contatto o collegamento diretto al contenitore secondario.

L'edificio reattore è collocato in posizione centrale sulla platea principale di fondazione e si interfaccia con gli edifici dell'isola nucleare posti sulla stessa platea.

Il codice base adottato per la progettazione della struttura in conglomerato cementizio del contenitore primario e della platea di fondazione è: ASME, Section III, Division 2 (corrispondente ad ACI 359) «ASME Boiler and Pressure Vessel Code — Rules for Construction of Nuclear Power Plant Components, Code for Concrete Reactor Vessels and Containments». Sono applicate anche norme ACI, AICS, U.S.R.G. e ovviamente norme italiane. I carichi considerati per il progetto sono quelli normali e di prova, quelli «non normali» (prodotti cioè da un ipotetico incidente di rottura di tubazioni ad alta energia), quelli ambientali severi (come vento, terremoto base di esercizio) ed estremi (tromba d'aria, terremoto di spegnimento sicuro etc.) e infine quelli dovuti ad eventi speciali di origine esterna (impatto di riferimento e onda piana di pressione). Tali carichi sono opportunamente combinati a seconda delle condizioni di servizio, come indicato nella tabella di seguito riportata estratta dal codice di riferimento ACI 359, al quale si rimanda per ulteriori approfondimenti.

L'analisi statica dell'edificio RAF (compresa platea di fondazione), viene eseguita mediante un modello globale tridimensionale ad elementi finiti. Il contenitore e le strutture interne vengono ana-

Table CC-3230-1 — Load Combinations and Load Factors

Category	D	L ¹	F	P _i	P _a	T _i	T _o	T _r	E _o	E _{ss}	W	W _i	R _o	R _a	R _i	P _i	M _o
Service:																	
Test	1.0	1.0	1.0	1.0	...	1.0	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Construction	1.0	1.0	1.0	...	...	...	1.0	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Normal	1.0	1.0	1.0	...	...	...	1.0	...	...	...	...	...	1.0	...	...	1.0	...
Severe environmental	1.0	1.0	1.0	...	...	...	1.0	...	1.0	...	...	...	1.0	...	...	1.0	...
	1.0	1.0	1.0	...	...	...	1.0	...	...	...	1.0	...	1.0	...	...	1.0	...
Factored:																	
Severe environmental	1.0	1.3	1.0	...	...	...	1.0	...	1.5	...	...	...	1.0	...	...	1.0	...
	1.0	1.3	1.0	...	...	...	1.0	...	...	...	1.5	...	1.0	...	...	1.0	...
Extreme environmental	1.0	1.0	1.0	...	...	...	1.0	...	...	1.0	...	...	...	...	...	1.0	...
	1.0	1.0	1.0	...	...	...	1.0	...	...	...	...	1.0	...	...	...	1.0	...
Abnormal	1.0	1.0	1.0	...	1.5	...	...	1.0	...	...	...	...	...	1.0	...	...	...
	1.0	1.0	1.0	...	1.0	...	...	1.0	...	...	...	...	...	1.25	...	...	...
Abnormal/Severe environmental	1.0	1.0	1.0	...	1.25	...	...	1.0	1.25	...	...	...	...	1.0	...	...	...
	1.0	1.0	1.0	...	1.25	...	...	1.0	...	...	1.25	...	...	1.0	...	...	...
	1.0	1.0	1.0	...	...	...	1.0	...	1.0	...	1.0	...	...	...	...	...	...
Abnormal/Extreme environmental	1.0	1.0	1.0	...	1.0	...	...	1.0	...	1.0	...	...	...	1.0	1.0	...	...

NOTE: 1) Includes all temporary construction loading during and after construction of containment.

(Tabella estratta da ACI 359)

lizzate separatamente con propri modelli che entrano nel modello generale come sottostrutture. Nel modello globale affluiscono in input i risultati delle analisi condotte su modelli specifici, in primo luogo quelli del contenimento e strutture interne sopra citati; inoltre i risultati delle specifiche analisi geotecniche per la definizione delle condizioni al contorno della platea di fondazione; infine i risultati delle analisi dinamiche globali (un modello per il sisma, uno per l'impatto di riferimento) necessarie per la definizione dei carichi statici equivalenti. Dall'analisi del modello globale scaturiscono risultati che contemplano tutte le parti del RAF e che costituiscono essi stessi input per la definizione di condizioni al contorno per analisi specifiche su modelli parziali separati, quali quelli di solette particolarmente complesse per la configurazione geometrica e di carico e quelli delle grandi aperture del contenimento. Per queste ultime, una porzione della parete contenente la penetrazione viene isolata ed analizzata rispetto alle stesse condizioni di carico studiate nell'analisi globale. Detta porzione si estende su una zona oltre la quale gli effetti della penetrazione stessa possono considerarsi trascurabili. Si riporta in fig. 12 un quadro schematico delle principali attività relative all'analisi strutturale del RAF.

Per quanto riguarda il contenitore primario esso è descritto, come sopra accennato, mediante una sottostruttura interconnessa alla platea di fondazione tramite nodi di confine, scelti come «super-nodi» nel procedimento di condensazione della matrice di rigidezza e dei vettori di carico.

La risoluzione del sistema risultante dalla condensazione delle diverse sottostrutture costituenti il RAF, fornisce in particolare la distribuzione di spostamento all'interfaccia tra il contenitore e la platea di fondazione per le diverse condizioni di carico.

Le distribuzioni di spostamento e sollecitazioni lungo la parete del contenimento sono integrate dai risultati di un'analisi supplementare condotta con un modello di tipo assialsimmetrico che de-

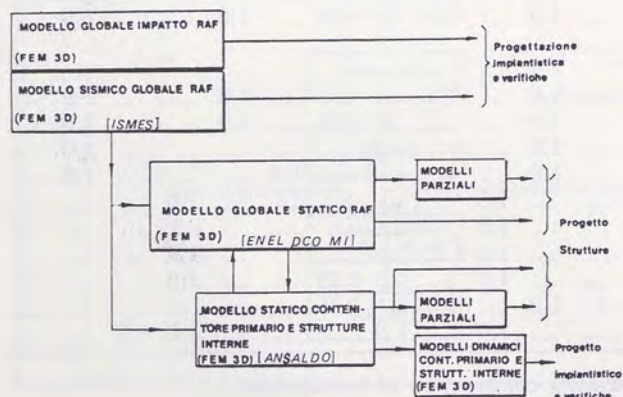


Fig. 12 - Schema delle attività di analisi strutturale del RAF.

scrive in dettaglio la parete cilindrica e la cupola e tiene conto delle condizioni al contorno dedotte dell'analisi globale tridimensionale.

Progettazione sismica

Il terremoto di sicuro spegnimento (E_{ss}), per la progettazione unificata dell'impianto, viene definito in termini di accelerazione massima e spettro di risposta associato, riferiti alla superficie libera del suolo. Per i siti «roccioso» e «rigido», l'accelerazione orizzontale e verticale di picco si assume pari a 0.24 g con spettri di risposta orizzontale e verticale uguali a quelli forniti dalla U.S.R.G. 1.60 (fig. 13). Per il sito «soffice» si assume uno spettro apposito con accelerazione di picco orizzontale pari a 0.24 g e verticale pari a $(2/3) \times 0.24$ g (fig. 13).

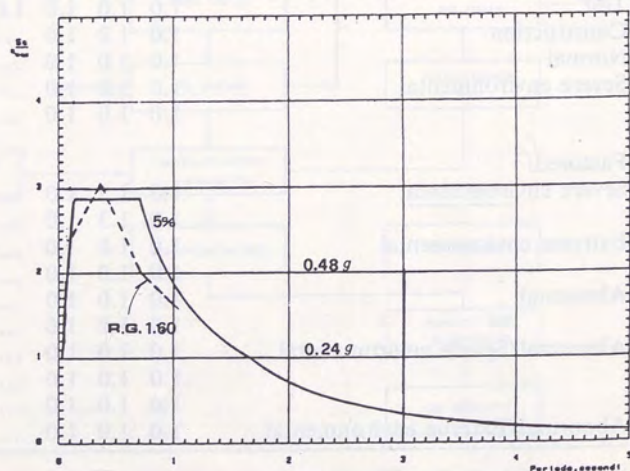
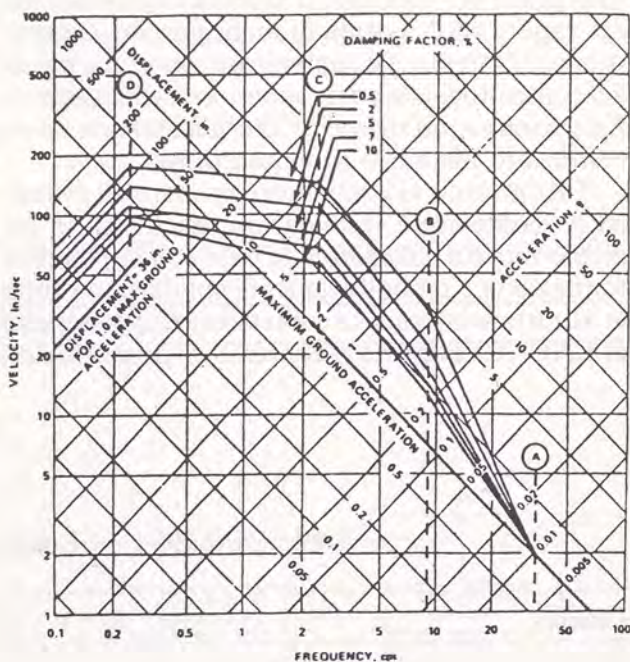


Fig. 13 - Spettro di risposta orizzontale: sito rigido e roccioso, sito soffice.

Il terremoto di sicuro spegnimento (E_{ss}) è il massimo terremoto che si ritiene possa verificarsi nel sito specifico in base alla geologia e sismologia regionale e locale. Per il terremoto base di esercizio (E_O) si intende quel terremoto che si ritiene possa verificarsi sul sito specifico nel corso della vita operativa dell'impianto (si assume pari a $1/2 E_{ss}$).

Gli smorzamenti delle strutture sono assunti in accordo con quelli della U.S.R.G. 1.61 «Damping Values for seismic Design of Nuclear Power Plants». Gli smorzamenti totali del suolo sono determinati come somma dello smorzamento geometrico per radiazione e dello smorzamento interno (isteretico) del terreno. Lo smorzamento pesato relativo ai modi orizzontali verrà sempre assunto non superiore al 20%.

Il modello di insieme per il calcolo sismico comprende i seguenti elementi:

- il sistema primario, costituito dai componenti principali, dalle tubazioni di collegamento e dai supporti;
- le strutture interne al contenitore primario, includenti il fill mat, con l'identificazione dei punti di collegamento coi supporti del sistema primario;
- il contenitore primario;
- le strutture esterne al contenitore primario e la platea di fondazione;
- i parametri di interazione suolo struttura.

Gli elementi d), ed e) sono in generale descritti mediante masse, rigidezze e smorzamenti concentrati dedotti direttamente per via analitica. Gli altri elementi sono dedotti mediante l'impiego delle sottostrutture ottenute attraverso il procedimento di condensazione di Guyan.

Gli effetti di interazione suolo struttura, sono messi in conto accoppiando il modello strutturale con il suolo di fondazione, considerando la platea di base rigida. Il suolo di fondazione viene rappresentato con parametri equivalenti concentrati in base alla teoria del semi-spazio, corretta mettendo in conto le caratteristiche del profilo stratigrafico e i livelli di sforzo di taglio indotti dal sisma.

Analogamente si procede per i fattori di smorzamento relativi a ciascuno dei vari modi di vibrare. Le rigidezze, a favore della sicurezza, sono ottenute sommando al contributo del terreno sottostruttura, il 50% della rigidezza della parte interrata della struttura. Le forze statiche equivalenti alle azioni sismiche, ottenute dalle analisi dinamiche sismiche, vengono usate come dati di carico nei modelli di calcolo statici dell'edificio RAF. In questa fase si ritiene adeguata una rappresentazione dell'interazione statica suolo struttura mediante opportune rigidezze equivalenti del suolo verticali ed orizzontali distribuite.

La risposta sismica della struttura è valutata in

generale mediante il metodo della sovrapposizione modale con la tecnica degli spettri di risposta, studiando separatamente ciascuna direzione di eccitazione. Potranno essere eseguite anche analisi con «time history» a seconda delle esigenze.

La combinazione delle risposte modali è effettuata in accordo alla U.S.R.G. 1.92, includendo l'effetto di eventuali modi ravvicinati. La sovrapposizione dei contributi di risposta dovuti ad ogni singola direzione di eccitazione è effettuata considerando il 100% di ognuno dei suddetti contributi di risposta con, simultaneamente, il 40% degli altri due contributi.

Le risultanti di accelerazione e di sollecitazione relative ai diversi casi di E_{ss} o E_O sono infine inviluppate per ciascuna direzione di eccitazione.

Gli spettri di risposta nelle varie posizioni delle strutture ove sono previsti i supporti di componenti e di tubazioni possono essere generati con due metodi distinti:

- in maniera diretta utilizzando direttamente i risultati dell'analisi modale col metodo degli spettri di risposta;
- con la tecnica delle «time history» valutando la risposta nel tempo delle strutture attraverso lo stesso modello strutturale ed il metodo della sovrapposizione modale nel dominio nel tempo; l'eccitazione è rappresentata da accelerogrammi costruiti sinteticamente in modo da risultare statisticamente indipendenti nelle tre diverse direzioni principali e tali che il loro spettro sviluppi quello di progetto.

Progettazione contro gli eventi speciali di origine esterna

Gli eventi speciali di origine esterna considerati sono un «impatto di riferimento» e una «onda piana di pressione» (vedi fig. 14).

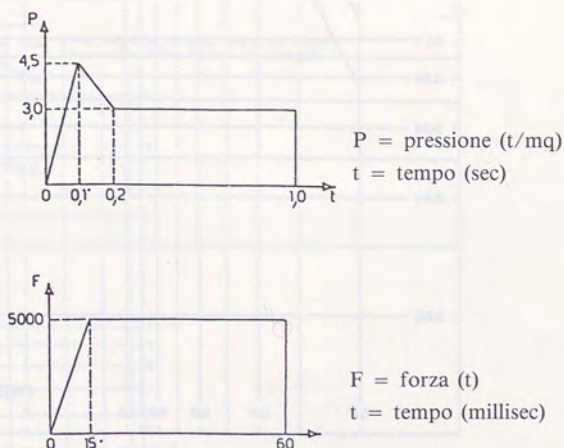


Fig. 14 - Funzione forzante: onda di pressione e impatto di riferimento.

I dati caratterizzanti l'impatto di riferimento sono i seguenti:

- peso: 2000 kg
- velocità dell'impatto normale: 150 m/s
- diametro efficace dell'area di impatto per verifiche di penetrazione: 2.6 m

L'onda piana di pressione è caratterizzata dalla funzione forzante corrispondente ad una pressione applicata ad una parete normale alla direzione di propagazione dell'onda.

L'impatto di riferimento presenta caratteristiche specifiche (applicazione localizzata dell'eccitazione con contenuto significativo a frequenze medio-alte, 30-60 Hz) tali da eccitare potenzialmente i modi di vibrare locali delle strutture; ciò rende inadatti i modelli strutturali riproducenti pre-

valentemente i modi di vibrare del tipo a «trave» normalmente usati per le analisi sismiche.

L'esigenza di descrivere i modi di vibrare del tipo a «piastra» nonché la flessibilità dei solai e della platea di fondazione, comporta l'elaborazione di modelli dinamici ottenuti da modelli statici tridimensionali, ad elementi finiti ed articolati in sottostrutture, tramite processo di condensazione dei gradi di libertà.

Gli spettri di risposta locali verranno calcolati nelle zone di ubicazione dei componenti principali e dei relativi supporti, sulla base degli accelerogrammi di risposta relativi alle varie zone di impatto.

Per ogni direzione verranno valutate le risposte nelle tre direzioni principali. Al fine di sempli-

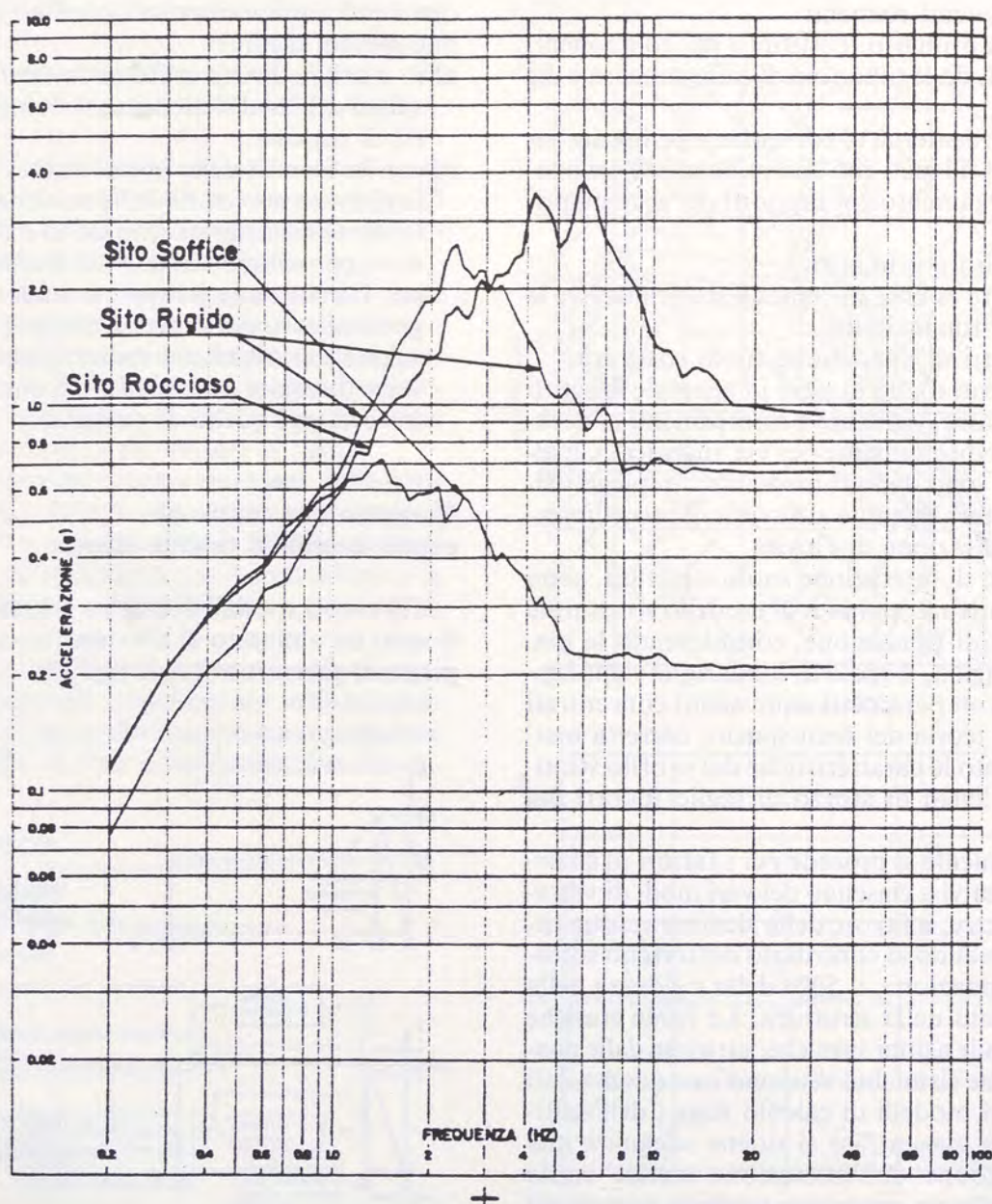


Fig. 15 - Progetto unificato: sisma orizzontale, spettri di risposta orizzontale al 5%, modello scatolare, sommità dell'edificio combustibile.

ficare la gestione dei dati di ingresso per la qualifica dei componenti, verrà anche generato, per ogni direzione di impatto, uno spettro «codirezionale» includente il contributo delle componenti «secondarie» di risposta nelle direzioni ortogonali a quelle di impatto (ottenuto con il criterio della radice quadrata della somma dei quadrati per ogni frequenza e smorzamento).

Gli edifici soggetti all'onda piana di pressione verranno adeguatamente analizzati per verificarne il mantenimento dell'integrità strutturale; saranno considerati sia gli effetti locali che potrebbero portare ad un collasso della struttura, sia la risposta dinamica globale dell'edificio.

CONCLUSIONI

I criteri ed i metodi di progetto esposti relativi alle strutture degli edifici principali, mostrano la notevole complessità della progettazione e, al contempo, gli elevati livelli di sicurezza richiesti. Va anche evidenziato il conservativismo di alcuni dati d'ingresso, in particolare per quanto riguarda gli eventi speciali di origine esterna e le caratteristi-

che dei terreni di fondazione, che consegue alla scelta dello sviluppo di un «progetto unificato nucleare».

Un peso notevole assume l'interazione con il terreno che viene considerata tenendo conto dei parametri geotecnici e sismici relativi ai tre diversi siti di riferimento (soffice, rigido, roccioso) talché di fatto le calcolazioni vengono ripetute tre volte. Per quanto riguarda il dimensionamento delle strutture, si può rilevare che questo è sostanzialmente governato: dai carichi verticali per gli elementi orizzontali (solette); dal sisma per gli elementi verticali (pareti); dall'impatto di riferimento per il guscio esterno (pareti perimetrali e solette di copertura); dalla pressione d'incidente per il contenitore primario.

Il sisma e l'impatto di riferimento sono quindi due eventi dominanti e tra loro complementari sia per i carichi statici equivalenti sulle strutture, sia per gli effetti dinamici su sistemi e componenti. Gli spettri di risposta di piano (FRS) infatti presentano picchi di risonanza per frequenze maggiori di 20 Hz e comprese tra 2 e 10 Hz, rispettivamente per l'impatto e per il sisma (figg. 15 e 16). Per quanto riguarda i carichi statici equivalenti, l'im-

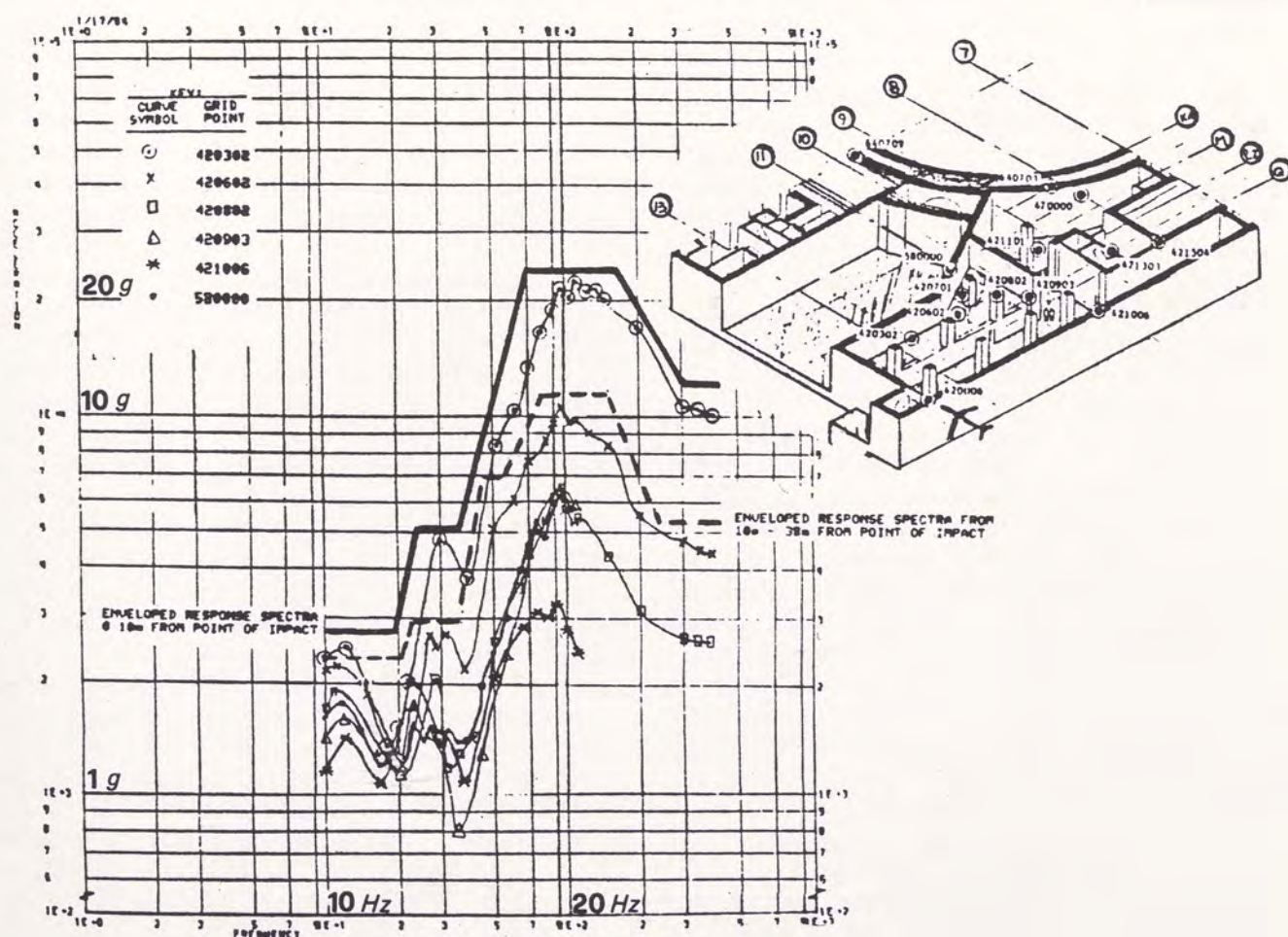


Fig. 16 - Acceleration response spectra for 5% damping at el. +13.70 m for horizontal (E-W) accident impact at grid 420006.

patto induce notevoli azioni taglienti nella direzione normale al piano delle pareti perimetrali, così da richiedere generalmente spessori non minori di m 1,20 per la resistenza alla perforazione, mentre le azioni inerziali sismiche agiscono essenzialmente nel piano delle pareti, sia esterne che interne, richiedendo spessori che dipendono linearmente dal limite imposto dalla normativa alle tensioni di taglio massime nel calcestruzzo.

Se si pensa che il peso totale delle strutture in elevazione (esclusa la platea) del RAF è di 260.000 t circa, ci si rende subito conto dell'entità rilevante delle azioni taglienti per accelerazioni medie che, per il sito roccioso, raggiungono 0.7 g.

Provvedimenti particolari sono stati adottati per migliorare la qualifica dei sistemi e componenti localizzandoli, per esempio, il più possibile lontano dalle pareti periferiche interessate dall'impatto di riferimento e/o disponendone l'installazione, ove necessario, su solette indipendenti, dotate di molle e smorzatori, con frequenze proprie di vibrazione intorno a 2 Hz. Ciò permette di tagliare completamente l'eccitazione da impatto, caratterizzato da frequenze molto più elevate, consentendo al tempo stesso di evitare la zona dello spettro di risposta sismica in cui si hanno maggiori amplificazioni.

Si vuole infine evidenziare la rilevanza dell'orditura principale del contenitore primario, dove la pressione nominale interna d'incidente raggiunge il valore di 4.2 kg/cm². Nella parete cilindrica l'orditura, costituita da barre di grande diametro, 57 mm, consiste di barre verticali su ciascuna faccia, di barre circonferenziali orizzontali su ciascuna faccia e barre inclinate di 45° in ciascuna direzione e ciascuna faccia. L'intera superficie del contenimento (pareti, platea e cupola) è inoltre rivestita con una membrana in acciaio (liner), saldata con continuità, al fine di garantire la tenuta. Lo spessore del rivestimento è di 10 mm nel cilindro e 13 mm nella cupola, mentre sulla platea è di 7 mm. L'ancoraggio alle pareti di calcestruzzo avviene mediante chiodi di tipo Nelson. Il contenitore primario è anche protetto dall'impatto diretto dalla cupola del contenitore secondario, che è progettato per resistere alla perforazione, con conseguente notevole beneficio sia per le penetrazioni che per la qualifica dei componenti interni al contenitore.

Si può certamente affermare quindi che la resistenza delle strutture progettate lascia ampi margini per eventi severi al di là degli eventi considerati nella progettazione.

TAVOLA ROTONDA

L'energia nucleare è e continuerà ad essere una fonte energetica

Giovanni DEL TIN (*)

Il nucleare ha ancora un ruolo nel settore dell'energia? La risposta a questo quesito si è fatta molto più complessa e non univoca dopo Chernobyl. Nel tentativo di formularla ci si accorge subito che le valutazioni consuete di tipo tecnico-economico limitate allo scenario nazionale non sembrano decisive; Chernobyl ha riproposto in modo nuovo e drammatico la questione dell'accettabilità sociale dell'energia nucleare, ma ha anche dimostrato la dimensione planetaria, globale, dei problemi energetici e di impatto ambientale.

Opinione pubblica, mezzi di comunicazione di massa, governi, forze politiche e sociali si sono trovate di fronte ad una emergenza di tipo nuovo in assenza di adeguati strumenti, anche conoscitivi e culturali, per affrontarla. Le reazioni registrate a livello internazionale sono assai diversificate; certamente significativa per l'autorevolezza dei protagonisti è stata la presa di posizione assunta al vertice di Tokio, nel giugno 1986, dai sette maggiori Paesi industrializzati, con la quale si è voluto ribadire il convincimento che *«l'energia nucleare è e continuerà ad essere una fonte energetica di sempre più vasto impiego»*. Nei Paesi della Comunità Europea il dibattito sulle politiche energetiche è tuttora in pieno svolgimento, ma per la politica comunitaria non si prevedono correzioni di rotta. La risoluzione approvata il 16 settembre 1986 a Bruxelles dai ministri degli Esteri dei Dodici, conferma indirettamente l'apporto determinante della fonte nucleare agli obiettivi di politica energetica comunitaria per il 1995. Alla 13ª Conferenza mondiale dell'energia, tenutasi a Cannes nello scorso ottobre, esperti di 79 Paesi si sono trovati quasi tutti d'accordo sul fatto che i futuri fabbisogni di elettricità saranno per la gran parte soddisfatti da carbone e nucleare.

Queste prese di posizione stridono non poco con la piega concreta che il dibattito sulla questione nucleare sta prendendo in alcuni Paesi della Comunità, ed in particolare in Italia. Molto evidente è la posizione assunta dai nostri rappresentanti nelle sedi internazionali (vertice di Tokio, Comunità Europea) e l'andamento del dibattito politico in corso sulle scelte energetiche, a livello na-

zionale; ad onor del vero bisogna aggiungere che anche altri Paesi vivono contraddizioni analoghe.

Ciò detto, è opportuno dare almeno uno sguardo ai fabbisogni di energia, ai problemi di impatto ambientale, ai problemi economici per poter individuare un possibile ruolo dell'energia nucleare nel quadro energetico nazionale ed internazionale.

Il riferimento al contesto internazionale per quanto riguarda i fabbisogni attuali e le linee di tendenza è imprescindibile non solo per la natura «globale» del problema energetico ma anche in considerazione del fatto che l'Italia importa dall'estero circa l'82% del proprio fabbisogno energetico; ciò significa che il nostro Paese, più di altri, risente dell'andamento degli scambi commerciali internazionali e per ciò stesso risulta più vincolato all'evoluzione del contesto mondiale. Dal 1973 al 1985, nonostante il forte aumento dei prezzi energetici e le due gravi crisi economiche, i consumi mondiali di energia sono aumentati del 23% e quelli di sola energia elettrica del 58%. Anche nei Paesi OCSE, che hanno praticato una efficace politica di risparmio energetico, i consumi di energia elettrica, nello stesso periodo, sono saliti del 36%. In questo panorama, qual è il ruolo svolto dalla fonte nucleare? Nel 1985, nei Paesi OCSE, circa il 21% dell'energia elettrica è stata di origine nucleare: percentuale che scende al 15% con riferimento al mondo, e al 3% per l'Italia. In termini di petrolio equivalente, ciò significa 320 milioni di tep (corrispondenti a circa 6.5 milioni di barili/giorno) pari ad oltre il 40% della produzione OPEC nell'anno 1985.

E per il futuro, quali possono essere le previsioni? Alcuni elementi previsionali sono molto incerti, alcuni presentano invece una ragionevole affidabilità. Fra questi ultimi va annoverato il dato demografico. Negli ultimi 40 anni la popolazione mondiale è più che raddoppiata; nel 1985 era poco meno di 5 miliardi e, benché il tasso di crescita sia in via di rallentamento, le previsioni indicano una popolazione di oltre 6 miliardi nell'anno 2010, e di almeno 8 miliardi nel 2050; non è irrilevante notare che questo aumento avverrà nei Paesi del Terzo Mondo.

Sebbene nei Paesi industrializzati la riduzione dello spreco energetico, la razionalizzazione dei consumi, l'attuazione di processi produttivi richiedenti una minore intensità energetica possano ridurre ulteriormente il contenuto energetico del Pil

(*) Ingegnere, Professore ordinario presso il Dipartimento di Energetica e Impianti nucleari del Politecnico di Torino.

(Prodotto Interno Lordo) ⁽¹⁾, ciò non sarà sufficiente ad impedire che il consumo mondiale di energia cresca ulteriormente nei prossimi anni. Previsioni accreditate attribuiscono a questo aumento un valore intorno al 30% da oggi al 2000. La giustificazione di queste previsioni non sta soltanto nell'incremento demografico. In fondo, oggi, il 30% della popolazione mondiale (Paesi industrializzati e/o Paesi ad economia pianificata) consuma circa l'85% delle risorse energetiche. I consumi pro-capite nel mondo sono quindi fortemente sperequati: a fronte di un valore di circa 8 teg/anno per ogni cittadino USA e circa 4 teg/anno per ogni cittadino europeo, si ha una media mondiale di circa 1,5 teg/anno pro-capite e una relativa ai paesi in via di sviluppo di circa 0,4 teg/anno. Si comprende facilmente che non può sussistere a lungo, nel mondo, una simile situazione di disparità fra Nord e Sud; la drammaticità del problema è ancor più accentuata se si tiene conto dell'andamento demografico sopra menzionato.

Si può obiettare che allora conviene il modello di sviluppo; l'ampiezza del problema (che peraltro non è soltanto energetico) richiede certamente una revisione degli attuali meccanismi di sviluppo ma oggi è difficile intravedere mutamenti di indirizzo e forze atte a promuoverli, tali da creare effetti significativi nel breve-medio termine. Anzi, nei Paesi in via di sviluppo, si osservano preoccupanti fenomeni di inurbamento in conseguenza dei quali, al 2000, circa il 50% dell'umanità, vivrà in un contesto urbano. Ciò può configurare, al di là delle conseguenze sociali ed ambientali, certamente impressionanti, una domanda energetica concentrata, non troppo dissimile dalle grandi aree urbane del Nord e quindi una riduzione della potenzialità di penetrazione delle cosiddette energie diffuse e rinnovabili.

Quale potrà essere la risposta a questa enorme domanda aggiuntiva di energia? Certamente un ruolo determinante sarà svolto dai combustibili fossili: carbone, petrolio, gas naturale. Probabilmente, per queste fonti primarie non rinnovabili non si porranno problemi di scarsità fisica nel medio termine. Infatti, con riferimento al 1985 il rapporto fra riserve accertate e produzione annua è pari a 240 anni per il carbone, 34 anni per il petrolio e 55 anni per il gas. Si può ancora osservare che il rapporto citato ha subito modeste variazioni in questi ultimi anni pure a fronte dei naturali mutamenti che hanno caratterizzato sia l'entità delle riserve accertate sia la produzione.

Questa constatazione consente di rilevare, almeno nel breve-medio termine, come sia prevalente il problema della scarsità economica di una data

risorsa, espressa attraverso il costo crescente della risorsa marginale, a sua volta condizionato dagli sviluppi tecnologici che possono modificarne i costi di estrazione.

Nell'attuale situazione si può ragionevolmente ipotizzare un «trend» crescente dei costi di estrazione e dei costi ambientali; questi ultimi, in particolare, possono diventare decisivi ai fini della stessa competitività economica della fonte. Per quanto riguarda le fonti fossili, ma in particolare gli idrocarburi, è molto importante sottolineare da un lato la forte concentrazione delle riserve accertate in aree OPEC e dall'altro il ruolo che essi svolgono come materia prima non energetica, oggi difficilmente surrogabile.

Le fonti integrative di energia rinnovabile, escluso l'idroelettrico (che contribuisce per circa il 7% alla copertura dei fabbisogni mondiali), svolgono oggi un ruolo modesto, suscettibile di sviluppo, qualitativo e quantitativo, ma non nei tempi brevi inizialmente ipotizzati: oltre quindici anni di esperienze hanno dimostrato che non vi sono soluzioni facili: non è ragionevole attendersi un contributo superiore al 2% all'anno 2000.

Risparmio energetico e razionalizzazione dell'uso dell'energia, per quanto importanti sono tali da richiedere risorse economiche crescenti a fronte d'incrementi via via più ridotti dell'energia conservata.

Nei Paesi industrializzati, negli ultimi quindici anni, è stato realizzato uno sforzo consistente in questa direzione che ha portato ad una significativa riduzione dell'intensità energetica del PIL; a questo riguardo sarebbe importante disporre di dati affidabili sul trasferimento, al di fuori dell'area OCSE, di produzioni energivore. Questo trasferimento, che ha interessato in questi ultimi anni anche l'Italia, comporta un aumento delle importazioni di semilavorati che incorporano una certa parte dell'energia che precedentemente era spesa, ad esempio in Italia, per la loro fabbricazione e veniva quindi contabilizzata come tale. Oggi, questa energia non compare più nelle statistiche energetiche del Paese importatore ma è pur sempre stata consumata e quindi ricompare nel bilancio complessivo, seppure a carico di un diverso utilizzatore.

In definitiva si può concludere che nei prossimi decenni resteranno determinanti, ai fini della copertura dei fabbisogni energetici mondiali, le fonti fossili e la fonte nucleare; in particolare sarà opzione praticamente obbligata la sostituzione degli idrocarburi (petrolio e gas) con il carbone e l'energia nucleare nella produzione di energia chimica, il cui tasso d'incremento è ancora molto elevato e non ha subito variazioni tali da ridurre, neppure nei paesi a sviluppo industriale avanzato, l'intensità elettrica del PIL.

Il progressivo affrancamento dei Paesi svilup-

⁽¹⁾ Ad oggi non si è invece registrato un sensibile decremento del contenuto elettrico del Pil.

pati dal petrolio dovrebbe divenire uno degli impegni prioritari nell'ambito della cooperazione internazionale con i Paesi del terzo mondo. In questi Paesi il consumo della risorsa legno, che era già considerevole prima della crisi petrolifera degli anni 70, si è enormemente sviluppato in seguito all'aumentato costo del petrolio oltretutto all'esplosione demografica. Praticamente, si può dire che i consumi sono cresciuti in maniera straordinariamente superiore alla possibilità di ricostituzione delle scorte tanto da compromettere la rinnovabilità della risorsa biomassa. Si calcola che attualmente circa 1,3 miliardi di abitanti le regioni rurali del terzo mondo non hanno abbastanza legna per cucinare il proprio cibo, e nel 2000, questo numero sarà salito a 2,5 miliardi di persone, e non riguarderà, anche a seguito dei fenomeni di inurbamento dianzi citati, soltanto le zone rurali.

Le conseguenze sociali ed ecologiche di questa situazione e la spirale degenerativa che si instaura sono già oggi fatti estremamente concreti. Secondo valutazioni della FAO nei tropici vengono distrutti 11 milioni di ettari di foreste l'anno (un'area superiore a quella del Nord d'Italia) e diverse specie di alberi tropicali sono già interamente scomparse. Con questo ritmo di consumo i Paesi in via di sviluppo avranno perso entro il 2000, il 40% del loro patrimonio forestale con conseguente alterazione dei delicati equilibri su cui si regge l'ecosistema (desertificazione, erosione, ecc.).

Il problema energetico è quindi e soprattutto un problema del Terzo Mondo e lo sarà sempre di più; di qui la necessità di «liberare» quote crescenti di petrolio (perché di più agevole movimentazione e utilizzazione rispetto alle altre fonti) per fronteggiare l'aumento di domanda conseguente alla crescita demografica, per far fronte alle esigenze più elementari di sviluppo e per ridurre la pressione sulla risorsa legno. Il ricorso all'energia nucleare, ben gestita, può portare a qualche beneficio anche sotto il profilo ambientale, pure a fronte di un rischio residuo di incidente molto piccolo ma non nullo. È noto infatti, che circa il 90% dell'energia oggi prodotta nel mondo deriva da processi di combustione. A questi si accompagna l'emissione di vari inquinamenti (SO_x , NO_x , CO , idrocarburi particolari, CO_2 , ecc.). Il problema delle deposizioni acide, oggi molto sentito anche a livello di opinione pubblica, è una delle conseguenze dei processi di combustione che avvengono non solo per la produzione elettrica ma anche per la generazione di calore nei processi industriali e per il riscaldamento ambientale, nonché per la propulsione degli autoveicoli. I danni prodotti dalle deposizioni acide sono valutati intorno al 3 ÷ 5% del PIL dei Paesi OCSE.

Un altro problema riguarda l'effetto serra che potrebbe insorgere a seguito dell'aumento del tasso di CO_2 presente nell'atmosfera. Infatti, l'equili-

brio secolare della CO_2 è stato alterato essenzialmente da cause antropiche, da un lato per l'immissione crescente di CO_2 in atmosfera, dall'altro per la crescente deforestazione del pianeta. Si tratta, in ogni caso, di fenomeni a scala planetaria che dimostrano, ancora una volta, la non circoscrivibilità degli effetti ambientali all'interno dei confini amministrativi delle singole nazioni. Questa constatazione implica l'esigenza di adeguare gli strumenti d'intervento in modo da adattarli alla natura globale dei fenomeni in atto.

Un cenno, infine, allo specifico italiano. L'Italia ha esigenze di diversificazione delle fonti primarie più impellenti rispetto agli altri partners della Comunità Europea. L'Italia è anche il Paese industriale con la più elevata dipendenza petrolifera, soprattutto nel comparto elettrico. Una direttiva comunitaria del 16 settembre scorso prevede che nel 1995 il consumo di petrolio dovrebbe essere limitato, per l'insieme della comunità, al 40% del consumo energetico globale (attualmente è di circa il 50%) ed, in particolare, per quanto riguarda la produzione elettrica a partire dagli idrocarburi (quindi petrolio e metano) essa dovrebbe essere ridotta a meno del 15% (attualmente è del 18% in ambito comunitario e di oltre il 50% in Italia).

Per quanto attiene ai problemi di competitività economica del nucleare il problema è complesso e non privo di controversie. Recenti dati OCSE indicano che i costi del chilowattora nucleare e da carbone sono ancora competitivi rispetto al chilowattora da petrolio, pur ammettendo che quest'ultimo resti a 15 dollari al barile per tutta la durata di vita dell'impianto.

Il nucleare resta ancora competitivo nei confronti del carbone, a tassi di sconto del 5% annuo e per durata di costruzione fino a 10 anni, anche nelle zone di facile accesso al carbone; il carbone risulta invece avvantaggiato sul nucleare se il tasso di sconto è del 10%. È infine importante sottolineare che mentre i costi del combustibile incidono sul chilowattora prodotto intorno al 60 ÷ 70% per il petrolio, per il nucleare l'incidenza va da un massimo del 30% ad un minimo del 15%.

Nell'attuale clima di incertezza sulle scelte da compiere, peraltro inevitabili e urgenti (le non scelte sono in ogni caso deleterie e comunque più ancora per il sistema italiano), è necessario prima di tutto guardare al di là delle frontiere nazionali e comprendere che il contesto energetico-ambientale in cui si opera è quello mondiale. In secondo luogo è necessario procedere con realismo, senza fughe in avanti, programmando di utilizzare al meglio il complesso delle fonti esistenti perché, ad oggi, sono tutte indispensabili. Cullarsi nell'illusione che fonti nuove, quali la fusione nucleare, consentano di produrre energia pulita, in quantità illimitata ed a basso costo con orizzonti tem-

porali tali da consentirci di rinunciare definitivamente, ad esempio, al nucleare a fissione, può essere molto dannoso per un Paese povero di risorse e così vulnerabile come il nostro.

Può essere utile riflettere su un episodio emblematico, accaduto nel lontano 1947, in Francia. In occasione del progetto di una diga che avrebbe provocato la sommersione del villaggio di Tignes, un gruppo di ambientalisti si opponeva avanzando

l'argomento del prossimo avvento delle centrali nucleari. Joliot, un insigne scienziato francese, dovette spiegare alla radio che l'energia nucleare era lungi dall'essere pronta per dare il cambio alle fonti tradizionali. Anche oggi, a quarant'anni di distanza, dobbiamo fare tesoro della saggezza di Joliot, sapendo discernere fra obiettivi della ricerca — da perseguire con tenacia — e applicazioni pratiche che ne seguiranno sovente assai differite nel tempo.

Valutazioni dell'incidente di Chernobyl ai fini della sicurezza per le centrali dell'ENEL

Paolo FORNACIARI (*)

Il Presidente dell'Ente Elettrico Britannico, lord Marshall of Goring, intervenendo nei giorni scorsi a Tokyo in occasione della celebrazione del 30° anniversario della costituzione della Commissione Atomica giapponese, ha tra l'altro detto: *«L'opinione pubblica britannica ha avuto la possibilità di comprendere la natura dell'incidente di Chernobyl, le relative cause e la peculiare natura del reattore sovietico. Per queste ragioni sono ottimista sul futuro sviluppo dell'energia nucleare nel nostro Paese»*.

Credo che la situazione in Italia sia invece profondamente diversa. Una informazione inadeguata, dibattiti televisivi non obiettivi ed a volte diseducativi, frammistione di considerazioni tecniche con valutazioni politiche, interventi di scienziati anche illustri — ma competenti in altre discipline — hanno contribuito a generare confusione. Come ha scritto Giorgio Bocca su «Repubblica», fino ad ora hanno parlato tutti, politici e letterati, fisici teorici ed oncologi, qualche padre nobile della

scienza atomica e teologi, Pippo Baudo e Luciano Lama; tutti meno che gli ingegneri di impiantistica nucleare e i dirigenti delle Aziende impegnate nel settore. È poi sorprendente, e non aggiungo altro, che i tecnici dell'Enel, dell'Enea e dell'Eni siano stati esclusi dai lavori preparatori per la Conferenza governativa sull'energia che si terrà prossimamente a Venezia, pare, con la inaccettabile motivazione che questi tecnici sarebbero «di parte».

Ritornando al tema centrale dell'informazione, è mancata, a mio avviso, la descrizione obiettiva, tecnicamente precisa e facilmente comprensibile al grande pubblico, dell'incidente e delle sue cause, per cercare di capire se quell'incidente può ripetersi altrove e magari anche nelle nostre Centrali. In buona sostanza: è stato l'errore umano o è stata la macchina con le sue particolari caratteristiche, la causa prima dell'incidente? Se è stato l'uomo, è difficile ritenere che il comportamento dell'operatore, sia esso russo o americano, italiano o francese possa essere profondamente diverso, ma se invece è stata la macchina, con le sue particolari caratteristiche, allora il problema si pone in termini diversi.

(*) Ingegnere, Direttore PWR-PUN, ENEL, Roma.

Per rispondere a questo quesito e prima di entrare nel merito tecnico del problema, vorrei fare un semplice esempio. Supponiamo che ad un pilota collaudatore venga affidata un'automobile di nuovo progetto per verificarne il comportamento in caso di ebollizione dell'acqua del radiatore e che al medesimo pilota, il costruttore, nel magnificare le caratteristiche dell'automezzo, abbia detto di non scendere mai durante la prova al di sotto dei 20 km/ora. Il pilota tuttavia non sa che la macchina ha un difetto di progettazione per cui, se l'acqua bolle quando la velocità è inferiore a 20 km/ora, il motore sale improvvisamente al massimo numero di giri. Il pilota, dopo svariati tentativi, riesce a far salire la temperatura dell'acqua, tramite il prolungato impiego del freno con velocità sempre più bassa. Egli sa che non dovrebbe scendere sotto una certa velocità, ma trattandosi di un esperimento di breve durata, porta la macchina a 20 km all'ora con il radiatore in ebollizione. Improvvisamente e senza preavviso la velocità aumenta, il freno surriscaldato non funziona, la macchina esce di strada e piomba impazzita sulla folla: il pilota muore e con lui 30 persone. Ci si chiede: la colpa è del pilota che non ha rispettato le direttive o della macchina e del suo difetto di progettazione? Questo è più o meno quello che è successo a Chernobyl.

Non si può dunque non concordare con il capo della delegazione Sovietica, l'accademico Legasov, quando alla riunione IAEA di Vienna lo scorso agosto ha affermato che sono stati commessi molti errori, con incredibili, deliberate violazioni di procedure, senza le quali l'incidente non sarebbe avvenuto, ma che il coefficiente positivo di reattività per vuoti ha giocato un ruolo essenziale nell'incidente. Ne è controprova del resto, la serie di misure adottate dai sovietici dopo l'incidente di Chernobyl sui reattori RBMK dello stesso tipo, misure volte a migliorare il comportamento dinamico della macchina, eliminando o quanto meno riducendo le cause di instabilità dovute al coefficiente positivo di reattività.

Tratteremo il tema che ci è stato proposto esaminando successivamente i tre principali aspetti: funzionali, strutturali, procedurali.

Aspetti funzionali

Dobbiamo anzitutto osservare che la separazione tra le funzioni di mezzo per asportare il calore (refrigerante) — affidate all'acqua bollente — e di mezzo per rallentare i neutroni (moderatore) — affidate alla grafite — è una delle principali ragioni nel reattore di Chernobyl, unitamente al progetto geometrico della pila, del verificarsi di comportamenti instabili.

Infatti la maggior ebollizione o la perdita di re-

frigerante determina, in questo particolare tipo di reattore ⁽¹⁾, una riduzione della quantità di idrogeno presente nel nocciolo e, poiché l'idrogeno è un assorbitore di neutroni, ciò favorisce la reazione nucleare a catena. Al contrario nei reattori PWR e BWR impiegati in Occidente ed in Italia, entrambe le funzioni di refrigerante e moderatore sono assolte dall'acqua leggera. Se c'è mancanza di refrigerante, c'è anche mancanza di moderatore e dunque la reazione a catena tende a spegnersi, non ad autoesaltarsi.

Questo comportamento instabile dipende da numerosi parametri quali il grado di ebollizione, la presenza o meno di barre di controllo nel reattore, la temperatura della grafite, il grado di avvelenamento da X_e , la distribuzione assiale di flusso neutronico, il livello medio di irraggiamento, ecc. ed è particolarmente amplificato alle basse potenze, tanto da sconsigliare il funzionamento prolungato al di sotto dei 200 MWt. Infatti, al di sotto di tale valore, non solo è positivo il coefficiente di reattività per aumento dei vuoti con l'ebollizione, ma è altresì positivo il coefficiente di potenza. Cioè a maggior potenza corrisponde un incremento della reazione nucleare a catena, con processo autocatalitico fortemente divergente.

Il comportamento instabile del reattore RBMK non era fenomeno sconosciuto ai tecnici sovietici, come dimostra un articolo comparso nell'ormai lontano 1979 su una rivista tecnica russa ⁽²⁾. Ma ciò che è sorprendente è che si era ritenuto di fronteggiare la pericolosa instabilità non con automatismi od interblocchi, come sarebbe stato quanto meno necessario fare, ma con semplici procedure di tipo amministrativo. I reattori ad acqua leggera tipo PWR e BWR hanno invece coefficienti di reattività per vuoti e di potenza fortemente negativi (v. tab. 1).

TABELLA 1 - COEFFICIENTI DI REATTIVITÀ
(valori tipici per filiera)

	PWR	BWR	RBMK
COMBUSTIBILE ($\times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$)	-2,5	-2,0	-1,2
MODERATORE			
per temperatura ($\times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$)	-40	-270	+ 6
per vuoti ($\times 10^{-5}/\%$ di vuoto)	—	-150	+ 20
POTENZA			
($\times 10^{-5}/\%$ di potenza)	-10	-45	-1,6

⁽¹⁾ È bene ricordare che questo tipo di reattore esiste solo in URSS e non è neppure stato esportato nei Paesi del Comecon.

⁽²⁾ «Atomnaya Energya», Vol. 46, n. 6, giugno 1979.

Inoltre la regola, in Occidente, è fare affidamento sugli automatismi e non sull'uomo, in particolare quando i tempi di intervento e disposizione sono troppo brevi. I sovietici per contro, all'epoca del progetto, ritenevano — erroneamente — che l'uomo fosse più affidabile degli automatismi e a Vienna hanno riconosciuto che ciò è stato un «*colossale errore psicologico*».

Un secondo grave difetto del reattore sovietico è rappresentato dalla inadeguatezza del sistema di protezione a fronteggiare rapidi e rilevanti transitori di reattività. Il sistema di barre di controllo può fronteggiare al massimo iniezioni di reattività dell'ordine di 1 S (quantità di reattività per rendere critico il reattore in assenza di neutroni ritardati), e per giunta con una velocità incredibilmente lenta (40 cm/sec), circa il 10% di quella normalmente impiegata nei reattori PWR e BWR. Per contro, la reattività che si poteva introdurre in tempi brevi era di 1 S (per una improvvisa ebollizione dell'ordine del 15%) e poteva arrivare a 6-7 S per completa fuoriuscita dell'acqua da tutti i canali, come probabilmente si è verificato in concomitanza con il simultaneo tranciamento di tutti i 1700 tubi in pressione nell'istante dell'espulsione del tappo schermo superiore.

I sovietici hanno valutato che in un tempo rapidissimo, cioè in una frazione di secondo, la potenza sia salita improvvisamente dai 200 MW_t iniziali a circa 1.500.000 MW_t dando luogo alla distruzione fisica della struttura reticolare della pila — il reattore si sarebbe spento in quanto diventato «omogeneo» — e di buona parte dell'edificio che lo ospitava.

Ben diversa è stata invece la causa del danneggiamento al nocciolo del reattore della centrale americana di Three Mile Island (28 marzo '79), dovuto a carenza di raffreddamento ma con reazione nucleare a catena già spenta.

Nei reattori occidentali il sistema di arresto rapido è progettato per fronteggiare tutti i peggiori transitori di reattività che possono potenzialmente verificarsi. A questo scopo furono condotte esperienze, anche distruttive, fin dagli anni Cinquanta nei reattori sperimentali SPERT e TREAT⁽³⁾, allo scopo di determinare l'effetto di rapidi aumenti di energia specifica nel combustibile ed individuando, di conseguenza, in 280 cal/gr il limite da non oltrepassare, limite che invece è stato superato per ammissione dagli stessi sovietici nel caso di Chernobyl.

In particolare, per i reattori ad acqua bollente tipo Montalto, sono stati esaminati accuratamente in sede di progetto i seguenti incidenti e transitori di reattività:

- caduta libera di una barra di controllo;
- errore estrazione barre;
- avviamento erroneo di un circuito isolato;
- guasto del regolatore di portata (in aumento);
- guasto del sistema di regolazione chimica e di volume;
- scatto di turbina con mancata apertura del by-pass;
- perdita completa del carico elettrico;
- chiusura delle valvole principali di isolamento vapore;
- perdita dell'alimentazione elettrica esterna;
- perdita di vuoto al condensatore;
- perdita di un preriscaldatore di alimento;
- guasto al regolatore di alimento.

Analogamente per i reattori pressurizzati tipo Piemonte-Trino sono stati esaminati:

- estrazione erronea di barre: con reattore sotto-critico e a potenza;
- diluizione del boro;
- diminuzione della temperatura di alimento;
- aumento della portata di alimento;
- aumento della portata vapore;
- rottura linea vapore.

Il risultato di queste analisi ha mostrato che nei peggiori incidenti analizzati non si superano le 135 cal/gr nei BWR e le 172 cal/gr nei PWR.

Per quanto riguarda il reattore di Latina, che pure ha un coefficiente positivo per aumento della temperatura del moderatore, non è fisicamente possibile realizzare un'escursione di potenza con reattore «pronto critico» come è avvenuto a Chernobyl, perché si dovrebbe ipotizzare un improvviso istantaneo aumento della temperatura della grafite da 300 a 600 °C, cosa impossibile non esistendo alcun fenomeno fisico capace di provocare tale incremento.

Va infine ricordato che le informazioni a disposizione degli operatori sovietici non consentivano di evidenziare l'approssimarsi di situazioni pericolose⁽⁴⁾. Tale preoccupazione è stata invece sempre ben presente ai progettisti occidentali, particolarmente dopo il 1979 come conseguenza della lezione appresa con l'incidente di TMI.

Va infatti registrato che il diffusissimo scambio di informazioni su tale argomento negli ultimi sette anni e le benefiche ricadute progettuali ed operative che ne sono derivate sono state patrimonio solo della cultura nucleare occidentale. Solo a Vienna, a fine agosto, infatti i sovietici hanno riconosciuto l'importanza della collaborazione internazionale e del reciproco scambio di esperienza, da tempo già in atto in occidente attraverso apposite organizzazioni (INPO, UNIPED, AIEA, ecc.).

⁽³⁾ SPERT: Special Power Excursion Reactor Test; TREAT: Transient Reactor Test Facility.

⁽⁴⁾ Ad esempio non c'era né un segnale d'allarme né tanto meno una misura del margine di sottoraffreddamento all'ingresso reattore.

Aspetti strutturali

Si è a lungo discusso nei giorni immediatamente successivi all'incidente, sull'esistenza o meno di un sistema di contenimento del reattore sovietico. Secondo alcuni esperti, anche autorevoli ⁽⁵⁾, il reattore di Chernobyl appariva dotato di un adeguato sistema di contenimento. A tale erronea conclusione si era infatti indotti dalla presenza, che dai disegni disponibili appariva con chiarezza, di una piscina di soppressione della pressione nella parte inferiore dell'edificio. Un esame più approfondito della documentazione in nostro possesso ⁽⁶⁾ ci aveva portato a concludere che il sistema di contenimento dovesse essere quanto meno «parziale», in quanto non includeva tutto il sistema nucleare, né in particolare e soprattutto la pila di grafite del reattore.

La riunione di Vienna presso l'IAEA a fine agosto ha puntualmente confermato quanto avevamo già avuto modo di esporre per primi in un inserto pubblicitario comparso su tutti i principali quotidiani italiani a fine maggio e ribadito in un dibattito pubblico svoltosi lo scorso giugno al teatro

Eliseo di Roma: il sistema di contenimento di Chernobyl è parziale, includendo solo le tubazioni d'acqua e le relative pompe di circolazione tra i separatori di vapore e l'ingresso reattore, ma non include la grande pila di grafite del reattore che è invece esterna al sistema di contenimento (v. fig. 1).

La mancanza di un idoneo sistema di contenimento non è certo la causa dell'incidente, ma è stata determinante nel provocare il rilevante rilascio di prodotti di fissione all'atmosfera esterna. Infatti se confrontiamo le «barriere» che circondano gli elementi di combustibile, a fronte di 20-25 cm di acciaio e di 1,5-2 m di calcestruzzo, il reattore sovietico presentava 4 mm di lega Zr-Nb del tubo di forza e pochi millimetri di acciaio dell'involucro della pila di grafite. Lo schermo superiore del reattore sovietico — che peraltro fu sbalzato di posizione dalla fuoriuscita di vapore a 70 atmosfere — non può infatti essere considerato una «barriera» perché svolgeva unicamente funzioni di schermo, ma non aveva funzioni strutturali di contenimento.

La Centrale di Latina è stata indebitamente paragonata a Chernobyl, sia per la presenza di grafite che per la presunta assenza di un sistema di contenimento. La grafite anzitutto, il cui incendio a Chernobyl ha provocato per «effetto camino» la salita della nube radioattiva ad oltre 1.500 m (determinando poi, per l'effetto dei venti sempre presenti in quota, la vasta contaminazione che

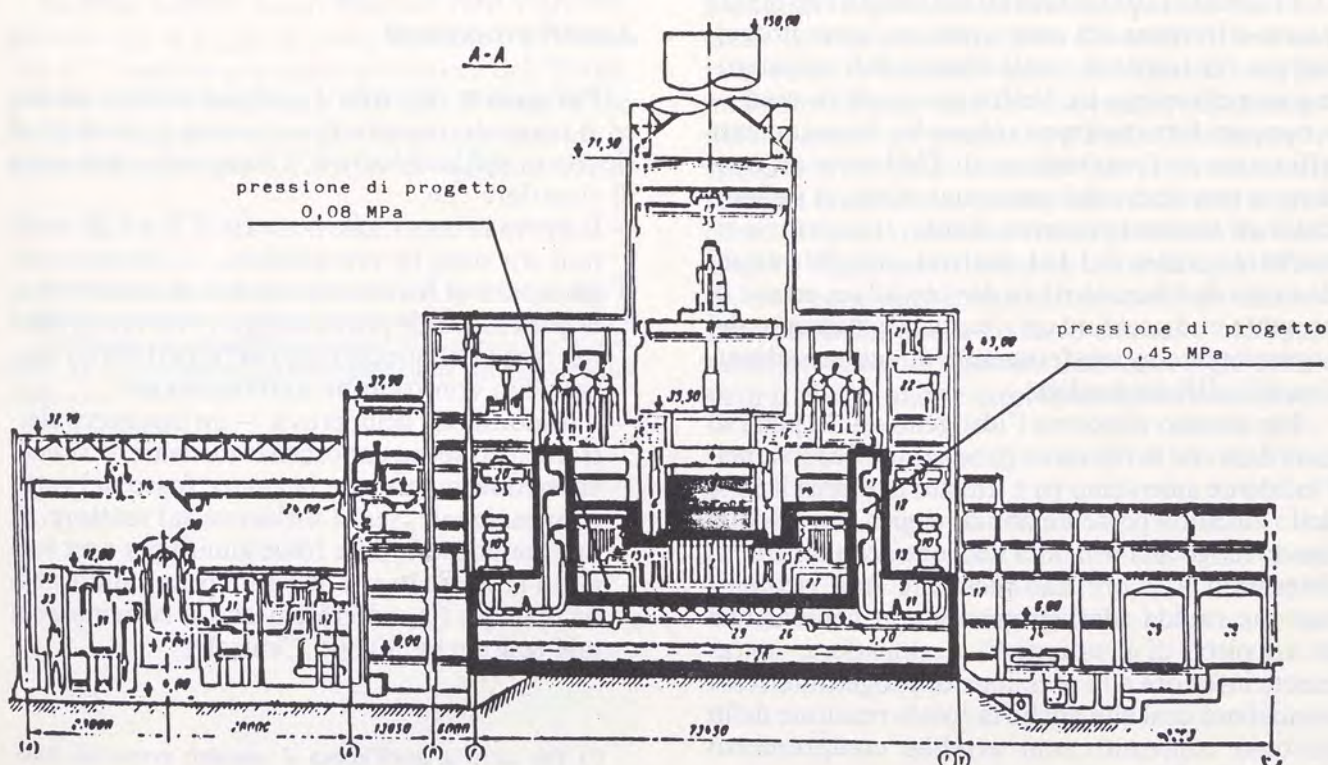


Fig. 1 - Sezione dell'edificio reattore della Centrale di Chernobyl.

altrimenti non si sarebbe verificata), funzionava nel reattore sovietico a temperature incredibilmente pericolose (700/750°C), pari o superiori alle soglie chimiche di reazione con acqua e aria. Ed aria ed acqua, separate dalla grafite della pila da pochi millimetri di acciaio e zircalloy, potevano, come poi accadde, entrare in contatto con la grafite generando miscele esplosive (H_2 e Co), alimentandone l'incendio e provocando ulteriori rilasci di sostanze radioattive per diversi giorni fin tanto che gli elicotteri militari non seppellirono il reattore con materiali inerti (sabbia, boro, piombo e argilla).

La grafite a Latina funziona invece a temperature assai più basse (300/350°C), nettamente inferiori alle summenzionate soglie, non solo, ma il refrigerante di Latina non è acqua bollente, bensì anidride carbonica che, come è noto, è un gas inerte. Inoltre il reattore non è separato dall'aria da pochi millimetri di acciaio dimensionati per una sovrappressione massima di 0.8 atmosfere, ma da circa 10 cm di acciaio corrispondenti ad una pressione di progetto di 14 atmosfere.

Infine in caso di perdita di refrigerante (LOCA), a differenza di quanto avvenne nel reattore russo (vaporizzazione dell'acqua di refrigerazione con escursione autocatalitica di potenza), la pila di grafite di Latina resterebbe in un'atmosfera di anidride carbonica (a pressione ambiente) con una riduzione sì della densità del refrigerante (circa 1/14) e della relativa capacità di asportare il calore, ma con una ben maggiore riduzione della potenza da asportare (1% dopo un'ora).

I sistemi di contenimento dei reattori ad acqua poi, a differenza del caso sovietico, sono progettati per far fronte al totale rilascio dell'acqua primaria e ciò spiega tra l'altro per quale motivo — e non per fortuna come taluno ha incautamente affermato — il contenitore di TMI resse all'incidente e non determinò sostanziali rilasci di radioattività all'ambiente esterno. Il solo, trascurabile rilascio (15 curies di I^{131} contro i circa 50 milioni di curies di Chernobyl) fu dovuto ad un errore di progetto che portò ad un ritardato isolamento del contenitore con trasferimento di acqua radioattiva all'edificio ausiliari.

Per quanto concerne l'idrogeno val la pena di ricordare che la rilevante produzione occorsa nell'incidente americano (si è stimato che circa il 50% dello zircalloy presente abbia reagito con l'acqua dando luogo alla ben nota reazione acqua-metallo) determinò a 2 ore dall'incidente una ricombinazione rapida (deflagrazione) con generazione di un picco di pressione di 2 atmosfere, nettamente inferiore alla pressione di progetto (circa 4 atmosfere) così che anche la totale reazione dello zirconio contenuto non avrebbe compromesso l'integrità del contenitore pur non progettato per tale evento.

Nei moderni reattori, quali il PUN, il volume libero del contenitore, unitamente al valore della pressione di progetto, è tale da accettare non solo il massimo incidente (fuoriuscita di tutta l'acqua primaria), ma anche la totale reazione dello zirconio delle camicie del combustibile.

Nella centrale di Montalto è previsto che l'idrogeno venga continuamente ricombinato all'atto stesso della sua eventuale formazione da un apposito sistema di ignitori, mentre a Caorso si ha in animo di provvedere a tale remoto evento con la inertizzazione (atmosfera di azoto) del contenitore, come già fatto per gli altri reattori dello stesso tipo negli USA. Tale decisione, val la pena di ricordarlo, non è del tutto ovvia, perché si tratta di valutare i pro e i contro derivanti dalla inertizzazione del contenitore, che, se annulla il rischio di eventuali ma remote esplosioni di idrogeno, determina maggiori difficoltà di ispezione e di controlli periodici.

Dal punto di vista impiantistico infine è opportuno ricordare che a Chernobyl rilevanti problemi occorsero dalla non completa separazione della unità danneggiata (n. 4) con le altre 3 unità; in particolare il reattore n. 4 aveva in comune con la unità n. 3 la sala macchine e la sala manovre. Nelle centrali italiane è invece prevalso da sempre, in sede di progetto, il criterio della completa separazione fisica tra le diverse unità presenti in uno stesso sito e ciò elimina i problemi di interferenza tra un'unità che dovesse subire un incidente e le unità adiacenti.

Aspetti procedurali

Per quanto riguarda il comportamento umano ed il mancato rispetto di numerose procedure di sicurezza nell'incidente di Chernobyl, val la pena di ricordare che:

- la prova in corso nella notte tra il 25 e il 26 aprile non era stata né precalcolata, né discussa con gli esperti di fisica del reattore, né autorizzata; la procedura di prova fu più volte modificata nel corso dell'esecuzione dell'esperimento senza alcun controllo né autorizzazione;
- il responsabile della prova — un ingegnere elettrotecnico senza conoscenze nucleari — riteneva erroneamente che la prova fosse del tutto convenzionale, senza influenza sul reattore. A tale convinzione pare fosse giunto per aver eseguito la stessa prova due anni prima sullo stesso reattore (7), ed era riuscito a convincere a tale tesi anche il capo Centrale;

(7) Per altro a quell'epoca il reattore aveva un comportamento stabile con coefficiente di reattività per vuoti negativo.

- il rinvio della prova di 10 ore, richiesto dal ripartitore sovietico, provocò con l'accumulo di Xe una sostanziale modifica delle condizioni di prova, della quale nessuno pare si rendesse conto;
- la fretta a voler concludere la prova ad ogni costo durante quella notte, indusse il team di prova a bypassare numerosi segnali di arresto rapido ed a predisporre la prova ben al di fuori delle condizioni inizialmente previste (livello di potenza, margine di sottoraffreddamento, margine di shut-down).

La situazione in Occidente ed in particolare in Italia, è invece profondamente diversa e tale da non consentire quello che avvenne a Chernobyl. Nei nostri impianti, all'atto della concessione del *Nulla-Osta* all'esercizio, vengono fissate le *Prescrizioni Tecniche* ⁽⁸⁾, e viene approvato il *Manuale di operazione dell'impianto* ⁽⁹⁾, che traduce in linguaggio operativo le *Prescrizioni Tecniche di licenza*.

La legge italiana prevede inoltre, sia per il direttore della centrale sia per gli altri componenti lo staff di esercizio, precise responsabilità individuali (e le corrispettive sanzioni penali) per il rispetto dei limiti di licenza previsti nel corso di qualsiasi attività connessa all'esercizio dell'impianto. Per esplicita richiesta dell'Ente di Controllo, l'ENEL adotta poi un *Programma di Garanzia della Qualità* con lo scopo di garantire che tutte le attività, aventi rilevanza per la sicurezza dell'impianto e la protezione sanitaria del personale e delle popolazioni, siano svolte in condizioni controllate.

Sarebbe troppo lungo elencare tutti i provvedimenti che la legge, le guide tecniche dell'Autorità di Controllo e le scelte autonome dell'ENEL prevedono per assicurare non solo il rispetto dei limiti di sicurezza ma anche la pronta notifica di situazioni anomale. A titolo di esempio val la

pena di sottolineare che, nel caso della Centrale di Caorso, il Capitolo 16 del *Programma di Garanzia di Qualità per l'esercizio dell'impianto* prevede per le prove ed esperienze di carattere straordinario (e la prova che ha dato origine al disastro di Chernobyl non v'è dubbio che sarebbe rientrata tra queste):

- l'autorizzazione preventiva della Direzione di Centrale ad elaborare una proposta di prova e ad eseguire gli studi relativi;
- l'esame della proposta da parte del Collegio dei Delegati alla Sicurezza dell'impianto (organo previsto dalla legge) e l'individuazione degli eventuali o meno scostamenti dalle Prescrizioni di licenza che la proposta comporta;
- in caso affermativo, l'inoltro formale all'Autorità di Controllo di una specifica autorizzazione a fronte di condizioni di prova perfettamente definite;
- l'esecuzione della prova nel pieno rispetto delle prescrizioni specificatamente autorizzate.

Conclusioni

Per tutte le considerazioni svolte ed in piena coscienza possiamo affermare che un incidente come quello di Chernobyl non può assolutamente avvenire nelle nostre centrali. Ci auguriamo quindi che la prossima Conferenza Governativa sia un'occasione per valutazioni responsabili e non emotive. Ma per concludere, è importante dire ancora due cose. La Conferenza sarebbe inutile se lasciasse immutato il quadro istituzionale per ciò che concerne la localizzazione delle Centrali. Si sentano pure tutti, si chiedano pure tutti i pareri, ma poi una volta che si è deciso, occorre un impegno generale, anche e soprattutto a livello locale per rispettare le decisioni centrali e per poter realizzare i relativi programmi. Inoltre stiamo attenti al «nucleare piccolo»; se esso vuol significare un «nucleare a singhiozzo» con una centrale ogni 10 anni, non contribuiremmo a dare certezze alla nostra industria, quelle certezze che sono indispensabili per fare del nucleare una tecnologia seria e sicura. Forse allora sarebbe meglio rinunciare.

⁽⁸⁾ Norme che definiscono i limiti di licenza in tutte le condizioni operative incluse le manutenzioni e le prove.

⁽⁹⁾ Ampia raccolta di procedure e di istruzioni per l'esercizio, la manutenzione, la sorveglianza, la protezione sanitaria, ecc.

Crisi tecnologica del nucleare

Carlo MUSSA IVALDI (*)

They stand all across America like the fossils of an extinct race of behemoths — the stark steel and concrete frames of incompleted and abandoned nuclear reactors. Their numbers are growing...

(Si ergono in tutta l'America, come i fossili d'una estinta razza di leviatani, le rigide ossature di acciaio e cemento di reattori nucleari non finiti e abbandonati. Il loro numero continua a crescere...).

KEVIN MCKEAN, *The mounting crisis in nuclear energy*, in «Discover», Maggio, 1982.

* * *

Concordo su molte delle cose dette da Ugo Farinelli, in particolare sulle conclusioni: i nostri problemi energetici sono, almeno nel tempo breve (15 anni), risolvibili senza ricorrere all'energia nucleare. Aggiungerò alcune altre considerazioni: il previsto contributo del programma nucleare nazionale è molto modesto, equivalendo al risparmio di circa un decimo del totale di combustibili fossili importato; è stato più volte dimostrato che tale modesto contributo si può ottenere operando sulle vie maestre della razionalizzazione del consumo energetico totale, della cogenerazione, delle più convenienti tra le energie rinnovabili e della geotermia (*hot dry rocks*, oltre a quella convenzionale). Il tutto con un molto maggiore contributo all'occupazione: è indiscutibile e indiscusso che gli impianti elettronucleari sono quelli maggiormente *capital intensive* e meno *labor intensive*. Inoltre le nuove tendenze tecnologiche sconsigliano i giganteschi impianti da migliaia di megawatt elettrici concentrati in una sola località, indipendentemente dalla scelta nucleare.

Penso che la considerazione quasi esclusiva fatta finora del pericolo e del danno ecologico (argomenti la cui validità non metto in dubbio) ha portato a trascurare argomenti anch'essi validissimi sia di economia che di vera e propria tecnologia elettronucleare. Voglio ricordare come nel 1963 fui tra i difensori della sopravvivenza dell'allora CNEN (ora ENEA), cioè delle ricerche sull'energetica elettronucleare (argomento di cui un paese civile del nostro tempo non può disinteressarsi, anche se non dovrebbe dedicare ad esso circa il 90% della spesa per la ricerca energetica in tutti i campi). Difesi il CNEN soprattutto dal dichiarato disinteresse della neonata ENEL che aveva cominciato con la scelta (sbagliata) del «tutto petrolio».

(*) Ingegnere e fisico, già docente di Chimica e Fisica presso l'Università di Torino.

Ma quando l'ENEL, dopo la crisi del petrolio, pensò al nucleare chiedendo 20 centrali nucleari da 1000 MWe, mi opposi a questa scelta perché ritenni che la scelta (fatta in USA) del tipo di reattore (LWR, potenze dell'ordine di 1000 MWe) era ispirata alla ricerca di un massimo di produttività elettrica per unità di volume, a scapito della sicurezza d'esercizio. Mi ha fatto piacere sentire confermare tale giudizio dagli specialisti elettronucleari del Massachusetts Institute of Technology (MIT), da uno dei quali l'intero programma elettronucleare USA è definito un *resounding crash* (clamoroso fallimento). Altri (J. Cook, un filonucleare, su «Forbes»), lo definisce *il maggior disastro imprenditoriale della storia degli affari*. Il danno economico provocato da tale programma nucleare USA è valutato sui 100 miliardi di dollari. Insuccesso causato secondo autorevoli specialisti americani di tecnologia nucleare, oltre che da errori manageriali anche da inopportune scelte tecnologiche, quale quella suddetta ed altre.

Più che i giudizi devono contare i fatti. Da oltre otto anni non è stata più ordinata nessuna nuova centrale elettronucleare negli Stati Uniti. Dal 1970 sono state cancellate oltre 110 ordinazioni (istruttivo lo specchietto allegato della dinamica ordinazioni-cancellazioni dal 1970 al 1984); insomma, tutte quelle ordinazioni che si sono potute cancellare senza troppe perdite furono cancellate. Di circa una diecina si è preferito fermare la costruzione già avviata, pagando le relative penalità, ritenendo tale perdita inferiore a quella prevista per il completamento e la futura gestione di questi «bidoni» che ci accingiamo a costruire in 15 esemplari. E ancora: il governo federale americano ha pubblicato un inquietante elenco di centrali sotto controllo e sotto inchiesta. Da un rapporto del Worldwatch Institute fatto all'ONU si rileva che nell'ultimo decennio i costi delle centrali elettronucleari, cresciuti in Francia del 60%, sono più che raddoppiati in Germania e più che triplicati in USA. Nel '78 l'Austria ha deciso di non consentire l'entrata in esercizio dell'unica sua centrale nucleare completata. La Svezia (referendum del 1980) ha deciso di chiudere tutte le sue 12 centrali nucleari entro il 2010. La crisi (si può ormai chiamarla così) non è più limitata all'America, ha ora investito anche l'Europa. Christofer Flavin del Worldwatch Institute ⁽¹⁾, riassumendo i risultati

(1) Cfr.: «Economic Impact» N. 3, 1985.

Ordini e cancellazioni di impianti
elettronucleari negli USA

Anni	Ordini	per MW	Cancellazioni	per MW
1970	14	14.275	0	0
1971	21	20.876	0	0
1972	38	41.526	6	5.738
1973	41	46.827	0	0
1974	26	30.931	8	8.290
1975	4	4.180	11	12.291
1976	3	3.790	2	2.328
1977	4	5.040	9	9.862
1978	2	2.240	13	13.333
1979	0	0	8	9.476
1980	0	0	16	18.085
1981	0	0	6	4.811
1982	0	0	18	22.019
1983	0	0	6	6.038
1984	0	0	6	6.780

Fonti: «Financial Times», «Energy Economist», Gennaio 1985.

di un suo studio *Il futuro dell'elettricità*, dice che è venuto il tempo delle piccole potenze unitarie. Constata che i reattori nucleari sono stati afflitti da gravi insuccessi tecnici (sic!) e da sbalzi improvvisi e sempre crescenti di costi (ne abbiamo avuto anche noi una prova a Montalto!) e che anche le centrali a carbone incontrano seri ostacoli; afferma che il massimo cambiamento d'indirizzo nell'elettrogenazione negli anni Ottanta è questo: le grandi centrali elettriche non dominano più la scena. Dall'80 in poi sono stati registrati progetti (ora in gran parte eseguiti) di ben 785 impianti elettrogeni per 14.000 MWe: piccole unità (la media è di 18.000 KWe per ciascuno), per lo più eseguibili in pochi mesi. È notevole il fatto che la potenza totale uguaglia quella del nostro progetto nucleare (il primo KWh che esso potrà dare, se tutto va bene, sarà tra un decennio circa). Le fonti energetiche su cui è basato questo crescente parco di impianti piccoli sono la cogenerazione, il vento (le *wind farms* californiane), impianti idroelettrici minori, agro-energetica, geotermia (quest'ultima con maggiori potenze).

Un'altra relevantissima serie di fatti è questa: dopo Three Mile Island e poi dopo Chernobyl è andato sempre più affermandosi e generalizzandosi il concetto che non basta più una bassa probabilità di gravi incidenti (esclusi gli imprevedibili errori umani!); è chiesta ormai una «sicurezza intrinseca passiva» cioè sicurezza degli impianti nucleari non dovuta ad apparecchi di protezione (che possono sempre guastarsi) ma garantita dalla struttura stessa del reattore, anche in caso di gravi errori di esercizio. Ora sta il fatto che da oltre quattro anni si conoscono e si costruiscono reattori che

vengono proposti come dotati di sicurezza passiva e intrinseca: il tipo «HIGR-modulare-pebble bed», di cui si prepara la costruzione in serie. Reattori anch'essi più piccoli (circa dieci volte) dei reattori proposti dal nostro Programma Nazionale, costruibili non più in decenni ma in mesi. Un altro tipo di reattore a sicurezza intrinseca passiva è ora progettato in Svezia. Questi nuovi reattori sono di tipo diverso dai cosiddetti «provati» (in realtà «provati non convenienti»), ma anche i costruttori americani dei vecchi tipi LWR hanno intrapreso un ampio lavoro per la loro revisione che tende a raggiungere le condizioni di sicurezza intrinseca passiva e puntano anch'essi su dimensioni minori.

Di queste cose i responsabili del nostro sviluppo energetico non hanno, che io sappia, mai dato notizia. Anche in questa nostra riunione di ciò si è taciuto. Da anni ne parlo, non si danno risposte. Una volta sola mi si è risposto dicendo che il dichiarato fallimento americano è stato causato solo da errori manageriali degli incapaci tecnici e amministratori americani. Non commento, ma spiego invece l'evento in questo modo: i produttori elettrici USA sono privati, per essi non esiste la collettività che paga le perdite come avviene per le industrie statali, per le quali possono esser presenti altri interessi (penso alla *force de frappe* francese).

A prescindere dalla validità o meno dei nuovi tipi di reattori e da ogni considerazione di pericolo e di danni ambientali, ci sembrano indiscutibili questi fatti: la tecnologia elettronucleare, nel paese che ne ha fatta la maggiore e più lunga esperienza è giunta ad un punto critico, ad una svolta per cui sta nascendo una nuova generazione di reattori forse più convenienti, certo più sicuri, e che i reattori su cui è basato il nostro PEN sono da considerarsi superati tecnologicamente, ormai non più solo negli USA. Anche se non esistessero altre ragioni, questo basta, a nostro vedere, per concludere che si deve sospendere ogni progetto costruttivo basato su modelli ormai chiaramente e dichiaratamente superati.

In ogni modo è inammissibile che istituzioni tecniche di Stato continuino ad ignorare ufficialmente fatti come quelli qui esposti, a non tenerne informata l'opinione pubblica ed anche, per quanto mi risulta, le parti politiche responsabili delle scelte energetiche, insistendo invece su argomentazioni false come il sostenere che i problemi dell'approvvigionamento energetico possono esser risolti solo col ricorso all'energia nucleare.

Si provveda urgentemente alla stesura di un nuovo PEN in cui le altissime cifre stanziato per il nucleare e per impianti elettrogeni a combustibili fossili siano sostituite da cifre (molto minori) stanziato per impianti che utilizzano cogenerazione e fonti di energia alternative in grado di darci

(molto prima, con maggiore occupazione e minore spesa) lo stesso risparmio di combustibili fossili di importazione che si poteva prevedere ci avrebbero dato le centrali nucleari.

Non ci possiamo pronunciare sulla domanda: «È possibile un avvenire nucleare, in qualche misura non trascurabile?» né sull'energia

nucleare a fusione anziché a fissione.

Si deve tener conto dell'attuale crisi tecnologica del nucleare e non tornare più sull'argomento finché essa, col nostro contributo di ricerca, non sia risolta. Un trentennio di esperienza in questo campo non è bastato a risolvere tutti i suoi interrogativi.

In attesa della fissione nucleare

Federico ALBERT (*)

Non ho titolo per decidere «nucleare sì, nucleare no». Ho costruito grandi centrali e impianti energetici, ma non li ho progettati. Quel che non posso sentir dire è che la decisione si debba prendere a clamore di popolo, popolo che non sa niente in materia e su cui speculano giornali e partiti, obnubilando quel poco che se ne sa. Quando abbiamo una malattia grave, non chiamiamo un giornalista, ma chiamiamo un medico, e se non ne basta uno ne prendiamo due.

Per prima cosa è necessario che si esamini ancora a fondo, seriamente, a mezzo di competenze indipendenti, il problema e si agisca secondo le più recenti conquiste della tecnica: se vi sono impianti obsoleti, superati, pericolosi, si provveda con coraggio e decisione, demolendo, correggendo. A mia modesta, personale opinione di «passante», se tutti i Paesi più avanzati e più ricchi usano energia nucleare, non vedo perché proprio noi, che comperiamo tanta energia all'estero, non dovremmo farlo, classificandoci fra i Paesi sottosviluppati. In attesa della fissione, sviluppiamo subito e a scala idonea tutte le energie alternative. Introduciamo per prima cosa l'economia dei consumi cui le tariffe «giorno/notte» possono giovare, tassiamo l'energia prodotta in ragione inversa al suo inquinamento.

In secondo luogo, riordiniamo e ammoderniamo l'esistente: molte nostre centrali hanno più di

cinquant'anni; in questo lasso di tempo la tecnica ha galoppato, usiamola!

In terzo luogo dobbiamo convenire che l'energia idroelettrica è senza discussione la più pulita, anche dal punto di vista ecologico. Certamente gli impianti alterano il paesaggio. Anche a me, vecchio alpinista, piace la montagna vergine: ma allora proibiamo sci, funivie, rifugi, non apriamo gallerie stradali o ferroviarie... e muoviamoci con la diligenza!

Solo in Piemonte vi sono tanti progetti di impianti idroelettrici studiati, istruiti, approvati, sia nuovi sia di riordino, come ad esempio quelli della Val d'Ala di Stura, e della Val di Viù (con accumulo di acqua potabile). Da quarant'anni esiste anche il grande progetto di sistemazione dell'alveo del Po, da Torino alla foce, per il quale sono già stati spesi miliardi dal Ministero e dai privati; la sua realizzazione comporterebbe vantaggi irrigui, anti-piena, di trasporto fluviale (a basso costo energetico); le sue 8-10 centrali a basso salto e grande portata potrebbero fornire energia elettrica per molti milioni di kilowattora. Passiamo all'esecuzione, incominciamo subito: sono lavori che richiedono tempi di anni, molti anni; richiedono anche l'impiego di tecnici e operai, ma non è meglio spendere per remunerare il lavoro piuttosto che l'indennità di cassa-integrazione? In questi problemi il costo di produzione non è il solo criterio di valutazione: si tratta di elaborare una politica, un programma di sviluppo per l'avvenire. Siamo in ritardo, partiamo subito.

(*) Ingegnere, Socio S.I.A.T.

BIANALE DI SICUREZZA CON EXODUST

CONSIGLIO NAZIONALE DEI RITIRATI DELLO SCACCO PER IL LAVORO
SICUREZZA APPROVATO DAL MINISTERO DELL'INTERNO

INTERNAZIONALE
DEI RITIRATI

La Società degli Ingegneri e degli Architetti in Torino accoglie nella « Rassegna Tecnica », in relazione ai suoi fini culturali istituzionali, articoli di Soci ed anche non Soci, invitati. La pubblicazione, implica e sollecita l'apertura di una discussione, per iscritto o in apposite riunioni di Società. Le opinioni ed i giudizi impegnano esclusivamente gli Autori e non la Società.

Direttore responsabile: **ROBERTO GABETTI**

Autorizzazione Tribunale di Torino, n. 41 del 19 Giugno 1948

Spedizione in abbonamento postale GR. III/70 - Mensile

STAMPERIA ARTISTICA NAZIONALE - CORSO SIRACUSA, 37 - TORINO



I Sistemi di ancoraggio Halfen sono stati utilizzati per il sostegno degli impianti tecnologici nelle più importanti centrali elettronucleari, italiane e non, tra cui:
 Caorso Trino Vercellese Pec del Brasimone Montalto di Castro

L'Halfen S.r.l. Azienda Italiana leader nel settore dell'ancoraggio, è **omologata** anche dall'Enel per le forniture in regime di **G.Q.** e **C.Q.** destinate a tali centrali

I prodotti Halfen più utilizzati per il sostegno degli impianti tecnologici sono i seguenti:



Il **Centro Studi**, composto da progettisti qualificati, oltre che gli **Uffici G.Q.** e **C.Q.** che controllano periodicamente la qualità di tutta la produzione, fanno dell'Halfen l'interlocutore ideale per qualsiasi problema di ancoraggio.

Via Giotto, 5 - 10092 Beinasco (Torino) - Tel. (011) 34.98.346 - Telex 214559 Halfen I



gasenergia

Tecnologia dell'Azzurro
Via S. Ottavio, 54 - Torino

**«Un patrimonio di esperienze e tecnologie
al servizio di terzi per progettazione,
trasformazione, normalizzazione d'impianti
di produzione e distribuzione calore
e condizionamento»**