



## 4. Accenni sulle tecnologie nucleari

### 4.1 Excursus storico

Comincia tutto con la conferenza di Ginevra del 14 ottobre 1955, con l'ormai celeberrima frase del presidente americano Eisenhower "atoms for peace", a sancire che l'atomo poteva essere utilizzato in un altro modo rispetto a quello ammirato ad Hiroshima e Nagasaki: poteva essere utilizzato per produrre energia elettrica. Questo diede il via a un vero e proprio boom della ricerca sul nucleare, che durerà fino agli anni '60, e porterà l'Italia all'avanguardia nel settore per capacità di controllo di questa tecnologia (secondo paese in europa, terzo nel mondo). Era l'Italia delle imprese private, e ognuna di queste svilupperà un diverso impianto nucleare.

A Trino Vercellese la centrale fu costruita su iniziativa dell'Edison, che favorì la costituzione della società SELNI S.p.A. ("Società ELettroNucleare Italiana", fondata da Fiat e Montecatini e partecipata da EdisonVolta, SADE, Romana, SELT-Valdarno, SGES (Società Generale Elettrica della Sicilia), SME, SIP, Terni, Trentina e, dal 1957, anche da Finelettrica con il 15%), in accordo con la società statunitense American Machine & Foundry (Westinghouse).

La centrale di Garigliano venne realizzata ad opera della Società Elettronucleare Nazionale S.p.A. (SENN S.p.A., ai tempi parte del gruppo IRI-Finelettrica e compartecipata anche da Finmeccanica e Finsider) sotto l'egida del CNRN (Comitato Nazionale per le Ricerche Nucleari) e con tecnologia della società americana General Electric.

In seguito alla creazione dell'Enel, venne ceduta a quest'ultima dalla Società Elettronucleare Nazionale S.p.A.

Infine la centrale di Latina, realizzata dalla SIMEA S.p.A. (della quale erano azionisti al momento della realizzazione Agip Nucleare con il 75% e IRI con il 25%) con tecnologia della società inglese The Nuclear Power Group LDT, che fu la prima centrale nucleare ad entrare in funzione in Italia e, all'epoca dell'entrata in servizio, era anche il reattore più potente d'Europa. Anche questa, in seguito alla creazione dell'Enel, è passata sotto la proprietà di quest'ultima.

Seguì uno stop incomprensibile degli investimenti e delle ricerche che culminò con l'accusa di uno dei manager di spicco di questo settore, Felice Ippolito, imputato di peculato.

Nel frattempo negli stati Uniti cresce la disaffezione nei confronti del nucleare, per via dei danni



sanitari dovuti al funzionamento di routine degli impianti. I costi dovuti alla necessità di rispettare le garanzie di sicurezza fanno impennare il prezzo del kilowattora. Nel 1978 (prima degli incidenti di Chernobyl -'86- e Three Miles Island -'79-) cessa ogni ordinativo di nuovi impianti nucleari negli U.S.A.: solo ultimamente sono stati ordinati nuovi reattori in Georgia. General electric e Westinghouse dovranno continuare a vendere i loro impianti in paesi con un buon livello di cultura industriale, tra cui l'Italia.



Figura 4.1: La centrale nucleare di Borgo Sabotino (Latina)

A metà degli anni '70 riparte quindi la corsa al nucleare in Italia, sospinta dal ministro Donat Cattain: l'obiettivo era quello di raggiungere i 10.000 Mw di potenza, da raddoppiare entro breve. Ben presto si comprende il perché di questa schizofrenia negli investimenti: lo stop degli anni '60 era motivato da un accordo tra gli USA e l'Italia, secondo il quale i primi avrebbero concesso a quest'ultima l'apertura al primo governo di sinistra in cambio dell'uscita dalla ricerca nucleare e da tutto ciò che non riguardasse il petrolio. Saranno gli anni del decollo dell'ENI e della cessione della Olivetti alla General Electric.

Dopo l'incidente di Chernobyl tutti i paesi dell'Ocse, tranne il Giappone, escono uno dopo l'altro dalla corsa al nucleare (l'ultima, nel '91, fu la Francia). In Italia negli anni '90 ci sono le tre vecchie centrali e un'ultima piccola centrale costruita dall'Enel, a Caorso: all'epoca, questa centrale aveva totalizzato un numero di "scrum" (arresti rapidi per condizioni di anomalia) quasi pari a quello che una centrale può sopportare in tutta la sua esistenza. Infine era attivo il cantiere per la costruzione della centrale di Montalto di Castro. Chiuse le quattro centrali già attive era assurdo pensare di mantenere in vita tutto l'apparato di cui necessita la produzione di energia nucleare per un'unica centrale, per cui si optò per chiudere anche questo cantiere. Dalla fine degli anni '90 inizia quello stallo che porterà l'apporto del nucleare al fabbisogno energetico fino alla quota attuale, inferiore al 6%. Per questo nel '99 gli Stati Uniti lanciano "generation four", un progetto che avrebbe dovuto superare i problemi annosi (a livello fisico e non ingegneristico) del nucleare: dall'abbondanza dell'uranio alla realizzazione di un ciclo non proliferante (il cui processo di lavorazione non sia utilizzabile per finalità belliche). La terza generazione di cui



si comincerà a parlare non sarà nient'altro che una modifica ingegneristica di reattori come quello di Three Miles Island. Il nome "generation four" voleva indicare proprio un salto rispetto ai reattori in uso, ossia quelli di seconda generazione, ed è a tutt'oggi ben lungi dal produrre risultati ultimati.

## 4.2 Nozioni di base di fisica della fissione nucleare

Un atomo è composto da un nucleo, formato da un certo numero di protoni (di carica positiva) e di neutroni, e da elettroni, di carica uguale e opposta rispetto a quella dei protoni, che orbitano intorno a questo. Un atomo è stabile se ha un pari numero di elettroni e protoni. Un isotopo di un dato elemento ha un pari numero di protoni ed elettroni rispetto all'elemento "base", ma un diverso numero di neutroni. Poiché le proprietà chimiche di un elemento sono caratterizzate dalla nuvola elettronica, due isotopi dello stesso elemento (ad esempio i due isotopi dell'uranio, U235 e U238, dove il numero che segue la sigla dell'elemento indica la somma di neutroni e protoni, ed è detto numero di massa) hanno le medesime proprietà chimiche, ma differiscono per il numero di neutroni.

La radioattività è quel fenomeno per il quale un nucleo si trasforma emettendo tre diversi tipi di radiazioni ionizzanti, ossia un fascio di particelle che abbiano energia sufficiente da liberare o strappare elettroni dalla nuvola elettronica delle molecole che colpiscono ("ionizzanti" perché l'atomo neutro che viene colpito diventa uno ione positivo, perdendo un elettrone)

- ( $\alpha$ ) le particelle alfa, nuclei di elio, pesanti ed estremamente dannosi ma poco penetranti (appena acquisiti due elettroni, strappandoli alle altre molecole, divengono del semplice elio);
- ( $\beta$ ) le particelle beta, elettroni negativi o positivi (positroni), emessi da reazioni nucleari deboli;
- ( $\gamma$ ) i raggi gamma, fotoni di un campo elettromagnetico a frequenze molto più alte rispetto alla luce visibile;

## 4.3 Fissione nucleare, arricchimento e moderazione

La fissione riguarda gli elementi pesanti. Possiamo immaginare un nucleo tenuto insieme dalle forze nucleari come se fosse costituito da molle che uniscono i protoni e i neutroni, compresse da una cintura. Spezzando questa cintura, si può disporre dell'energia con cui le molle salterebbero fuori. Il movimento che ne scaturisce (l'energia cinetica dei nuclei appena creati) si manifesta in un forte aumento di temperatura.

Nel caso dell'U235 il nucleo, colpito da un neutrone, si spacca in due frammenti (prodotti di fissione) e libera altri due o tre neutroni, che a loro volta sono potenziali proiettili per i nuclei di uranio circostanti. Si attua quella che viene definita una "reazione a catena". Un tipico esempio delle reazioni che avvengono in un reattore è:



dove  $n$  indica un neutrone, Kr un atomo di Krypton e Ba un atomo di Bario, che sono solo due dei possibili elementi che possono derivare da reazioni di questo tipo. In realtà può essere prodotta una qualsiasi coppia di nuclei più leggeri dell'U235, ed è per questo motivo che le scorie nucleari non sono uniformi barre metalliche ma polveri della composizione più varia.



L'ottimizzazione di questo processo risiede nel porre le condizioni cosiddette critiche di densità di atomi fissili e di volume a disposizione del processo. Già riguardo l'aumento della densità ci si scontra col fatto che l'uranio utile per i reattori (e per le bombe), l' $U_{235}$ , è lo 0.7% di tutti gli isotopi di uranio esistenti in natura. Molto più disponibile è l' $U_{238}$ , circa il 99%, che però, per via dei tre neutroni in più presenti nel proprio nucleo, non è fissile. Per renderlo fissile deve essere arricchito.

Il processo di arricchimento consiste nel prendere l' $U_{238}$  e trasformarlo in un gas (esafluoruro di uranio), che viene quindi posto in una centrifuga. Nella centrifuga saranno presenti  $U_{235}$  e  $U_{238}$  e quest'ultimo, più pesante, verrà allontanato verso i bordi. Al centro della centrifuga si arriverà ad avere una parte un po' più ricca di  $U_{235}$ . A questo punto, fermandosi ad un 2.5-3% si ottiene un combustibile utilizzabile nelle centrali; arrivando invece all'85-90% è possibile utilizzarlo nella costruzione di ordigni atomici. Il controllo di questo processo è appannaggio dei rispettivi stati, che hanno ben poco interesse alla divulgazione di tali informazioni.

Per regolare, nei limiti del possibile, la reazione a catena vengono utilizzati dei moderatori. Le centrali di tipo americano sfruttano l'acqua come trasportatore di calore e come moderatore, compito assolto rallentando i neutroni. Oltre alla moderazione dell'acqua, vengono inserite nella caldaia dove ha luogo la reazione delle barre di controllo composte da materiali, come boro o berillio, che sono degli ottimi assorbitori di neutroni, che vengono perciò sottratti alla reazione. L'inserimento totale delle barre comporta lo spegnimento del reattore. È evidente che, per quanto funzionale, con questo metodo non è possibile modulare la produzione di elettricità sulla domanda quotidiana, piccata alle 11 del mattino e alle 17, poiché queste centrali hanno l'esigenza di funzionare a standard il più regolari possibili. Tornando al ruolo da moderatore dell'acqua avviene che questa, a volte, oltre a rallentare i neutroni li catturi. Questo è uno dei motivi per cui si ha l'esigenza di arricchire la miscela di uranio di cui disporre. Per ovviare a questo problema si utilizza l'acqua pesante, ossia molecole d'acqua formate legando un atomo di ossigeno e due di deuterio, un isotopo dell'idrogeno che non cattura neutroni. In questo modo si possono ottenere prestazioni più efficienti con minori concentrazioni di  $U_{235}$  nel combustibile.

## 4.4 Principali tipologie di reattori nucleari

### 4.4.1 BWR (boiling water reactor - reattori ad acqua bollente)

Un moderno reattore è composto da una caldaia (vessel), all'interno della quale ci sono decine di elementi di combustibile e pastiglie impilate di combustibile. L'acqua circola intorno agli elementi di combustibile e, in virtù della fissione, raggiunge temperature altissime. Nei BWR si crea quindi del vapore che viene incanalato verso una turbina dalla cui rotazione si genera energia elettrica. Nel frattempo il vapore viene condotto verso uno scambiatore di calore, una sorta di scatola che raccoglie acqua fredda da un corpo esterno (fiume, mare), torna allo stato liquido e viene nuovamente incanalato nel vessel. L'acqua, essendo in intimo contatto col combustibile, può trasportare elementi radioattivi e questo riduce il rendimento della macchina che, in regime ottimale, ammonta al 37% (cioè si è in grado di convertire in energia elettrica solamente il 37% dell'energia termica prodotta). Per questo motivo mano a mano è necessario scaricare quest'acqua contaminata (in forma liquida o di vapore) che, anche se diluita enormemente, favorisce quindi il trasferimento degli elementi radioattivi nell'ambiente.

### 4.4.2 PWR (pressurized water reactor - reattori ad acqua pressurizzata)

Abbiamo detto quindi che, nei BWR, l'acqua passa nella turbina, che viene a sua volta contaminata. Per evitare questo nei reattori Westinghouse, i PWR, ex-reattori di sottomarini, l'acqua non



viene vaporizzata ed inviata in turbina, bensì resta liquida, per via della forte pressione cui è sottoposta nel vessel, e raggiunge uno scambiatore di calore riscaldando un circuito che fornisce nuovo vapore alla turbina. Se in tale modello si guadagna dal punto di vista della contaminazione dell'acqua, si perde in sicurezza per via dell'altissima pressione cui questa viene sottoposta.

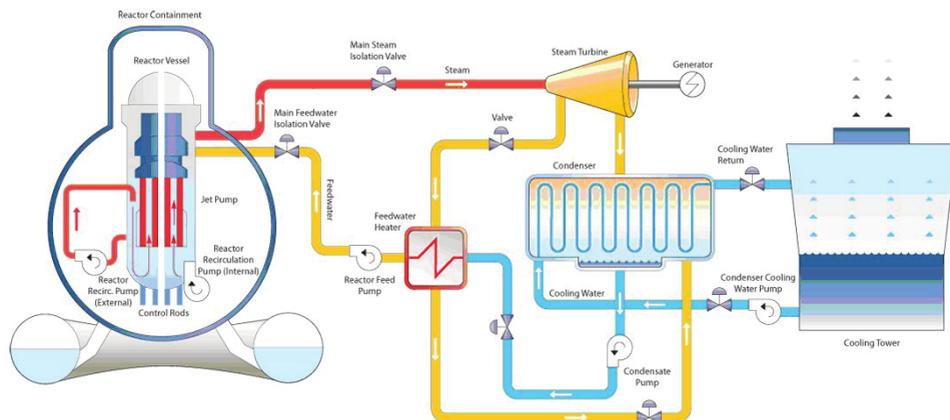


Figura 4.2: Nuclear Boiling Water Reactor (BWR) Process Diagram

#### 4.4.3 Phénix e Superphénix: i reattori francesi "autofertilizzanti"

Per via della mancata divulgazione delle tecniche di costruzione di alcuni modelli di reattori da parte degli americani, De Gaulle avviò un progetto per la realizzazione di centrali (e bombe) tutto francese.

Tale progetto si basa sull' $U_{238}$  che, come abbiamo detto, non è fissile, ma è fertile, ossia può assorbire un neutrone, trasformandosi in  $U_{239}$  e decadendo successivamente in un elemento fissile che non esiste in natura: il  $Pu_{239}$  (plutonio). Questo processo era ovviamente noto agli americani, ma fu abortito per via dei pesanti rischi ad esso collegati; basti pensare che un microgrammo di plutonio è la dose letale per inalazione. Inoltre questa reazione di fertilizzazione non è congeniale all'utilizzo dell'acqua, che trasporta calore e rallenta i neutroni, necessitando di neutroni veloci.

È importante sottolineare come anche nei reattori BWR e PWR, mentre la componente di  $U_{235}$  subisce la fissione, l' $U_{238}$  viene fertilizzato e decade in plutonio che può essere estratto. Tutto questo processo viene pagato grazie al buon rendimento garantito dall'utilizzo dell'acqua per la produzione di energia elettrica.

Al contrario i francesi preferirono utilizzare come trasportatore di calore il sodio fuso. Il sodio a pressione atmosferica liquefa a  $98\text{ }^{\circ}\text{C}$  e non bolle fino agli  $892\text{ }^{\circ}\text{C}$ , abbracciando il range di temperatura di operatività del reattore e, per questo motivo, non ha bisogno di essere pressurizzato. Il sodio, inoltre, ha un elevato calore specifico<sup>1</sup> ed è quindi un efficiente fluido per la trasmissione del calore. In questi reattori, man mano che il combustibile viene bruciato, si

<sup>1</sup> Il calore specifico di una sostanza è definito come la quantità di calore necessaria per innalzare la temperatura di una unità di massa di un grado centigrado. Più il calore specifico di una sostanza è alto, minore è la quantità di calore necessaria a farla variare di temperatura.

generano grandi quantità di plutonio, che è fissile e può essere riutilizzato nuovamente come combustibile (da qui il nome, che richiama il mitologico uccello fenice). Il grande problema di questi reattori risiede nel fatto che il sodio a contatto dell'aria o dell'acqua, esplosione. Quindi, ad esempio, in caso di anomalia non è possibile raffreddare il reattore con l'acqua. Per questo motivo nel '91 questi reattori chiuderanno (dopo circa vent'anni di "onorata carriera").

### 4.5 Riprocessamento

Dopo un certo tempo, esaurito il combustibile, l'impianto deve essere spento e deve essere sostituita tutta la "componentistica", come ad esempio le barre di combustibile. Queste vengono avviate all'impianto di ritrattamento (o riprocessamento), perché contengono una gran quantità di prodotti di fissione. Tali prodotti sono in massima parte catturatori di neutroni, che vengono fatti raffreddare in vasche apposite e poi lavorati per separare l'U235 e l'U238 ancora buono, dai rifiuti non riutilizzabili e dal plutonio formatosi. Quest'ultimo può essere utilizzato per realizzare combustibile "a ossidi misti" (ossidi di uranio o ossidi di plutonio), oppure a fini bellici. Tuttavia oggi come oggi essendo le bombe progettate per ottenere reazioni di fusione, reazione tra nuclei leggeri come gli isotopi dell'idrogeno, i tradizionali combustibili fissili come plutonio ed uranio fungono solamente da innesco; ne sono, quindi, necessarie minori quantità.

