



Carlo Di Leo

Dopo la prima parte pubblicata sul numero precedente, questa seconda sezione approfondisce i principali problemi tecnici incontrati durante la costruzione del Superphénix e ripercorre la storia operativa del reattore, fino alla sua chiusura nel 1998 e all'avvio delle operazioni di smantellamento. Un bilancio sulla prima centrale autofertilizzante realizzata su scala industriale, simbolo di un'ambiziosa stagione di ricerca nucleare.

Alcuni problemi tecnici inerenti alla costruzione del Superphénix

Un importantissimo problema tecnico riguardava la scelta del materiale per la struttura esagonale dei gruppi combustibili e per le guaine degli aghi che avrebbero dovuto soddisfare requisiti molto rigorosi. Esse avrebbero dovuto conservare una buona resistenza meccanica a temperature prossime a 650°C; inoltre la pressione



La singolare vicenda del Superphénix

interna nelle guaine degli aghi poteva raggiungere i 30 chilogrammi per centimetro quadrato a causa della formazione di prodotti di fissione gassosi. Gli aghi erano soggetti anche a considerevoli sollecitazioni termiche. Infine, ma non cosa meno importante, vi era il fatto che essi erano sottoposti ad un fenomeno singolare: sotto irradiazione prolungata da parte di neutroni veloci, si formavano delle vacanze nel reticolo cristallino le quali si accrescevano fino a formare delle piccole sacche che determinavano la dilatazione del metallo. È possibile farsi un'idea del bombardamento neutronico in un reattore a neutro-

ni veloci di elevata potenza dal fatto che ogni atomo del materiale di rivestimento degli aghi di combustibile viene colpito o almeno costretto a vibrare in media una volta ogni 100 ore per il passaggio di un neutrone o di un altro atomo proveniente dalla collisione con un neutrone. Un'altra cifra significativa riguardava il numero complessivo dei neutroni veloci che attraversavano ogni centimetro quadrato del materiale di rivestimento dopo l'irradiazione del nocciolo del reattore: si trattava quasi di un grammo di neutroni. La dilatazione delle leghe metalliche durante l'irradiazione neutronica doveva es-

(Seconda parte)



Sono state già svolte molte ricerche al riguardo ma sono necessari ulteriori approfondimenti

sere mantenuta sufficientemente bassa in modo da evitare la deformazione del gruppo combustibile, deformazione responsabile dell'insorgere di problemi di funzionamento nel reattore, specialmente nel corso della manovra di inserimento dei gruppi combustibili. Sono state già svolte molte ricerche al riguardo ma sono necessari ulteriori approfondimenti.

Nella *Tavola 3* sono mostrati alcuni schemi progettuali. La sezione verticale a sinistra mostra i gruppi combustibili del reattore Superphénix. In ogni gruppo del nocciolo attivo il combustibile era suddiviso in 271 aghi lunghi e sottili lungo i quali scorreva il sodio del circuito primario (in giallo); il materiale fissile (in rosso) occupava la

parte centrale dell'ago mentre il materiale fertile (in arancione) era collocato alle due estremità (I gruppi fertili contenevano un numero minore di aghi di dimensioni maggiori). Due progetti alternativi di nocciolo, in esame per i reattori autofertilizzanti del futuro sono rappresentati nelle sezioni trasversali a destra.

I due progetti differivano per la disposizione dei gruppi: nel progetto di nocciolo convenzionale (in alto) la zona centrale dei gruppi fissili era circondata da un "mantello autofertilizzante" esterno di gruppi fertili; nel nuovo progetto di nocciolo eterogeneo (in basso) il materiale fertile era inserito nel nocciolo sottoforma di fasci di gruppi fertili.

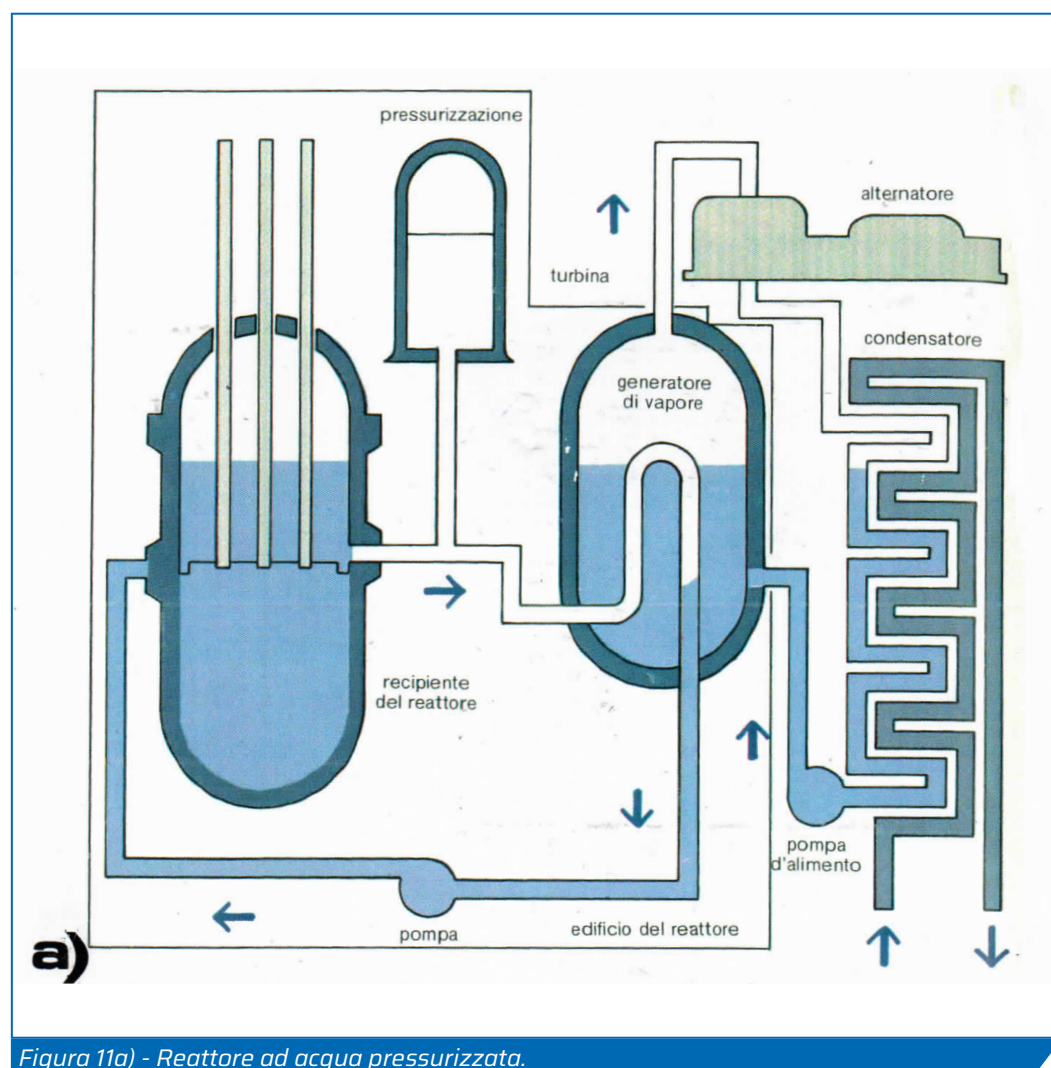


Figura 11a) - Reattore ad acqua pressurizzata.

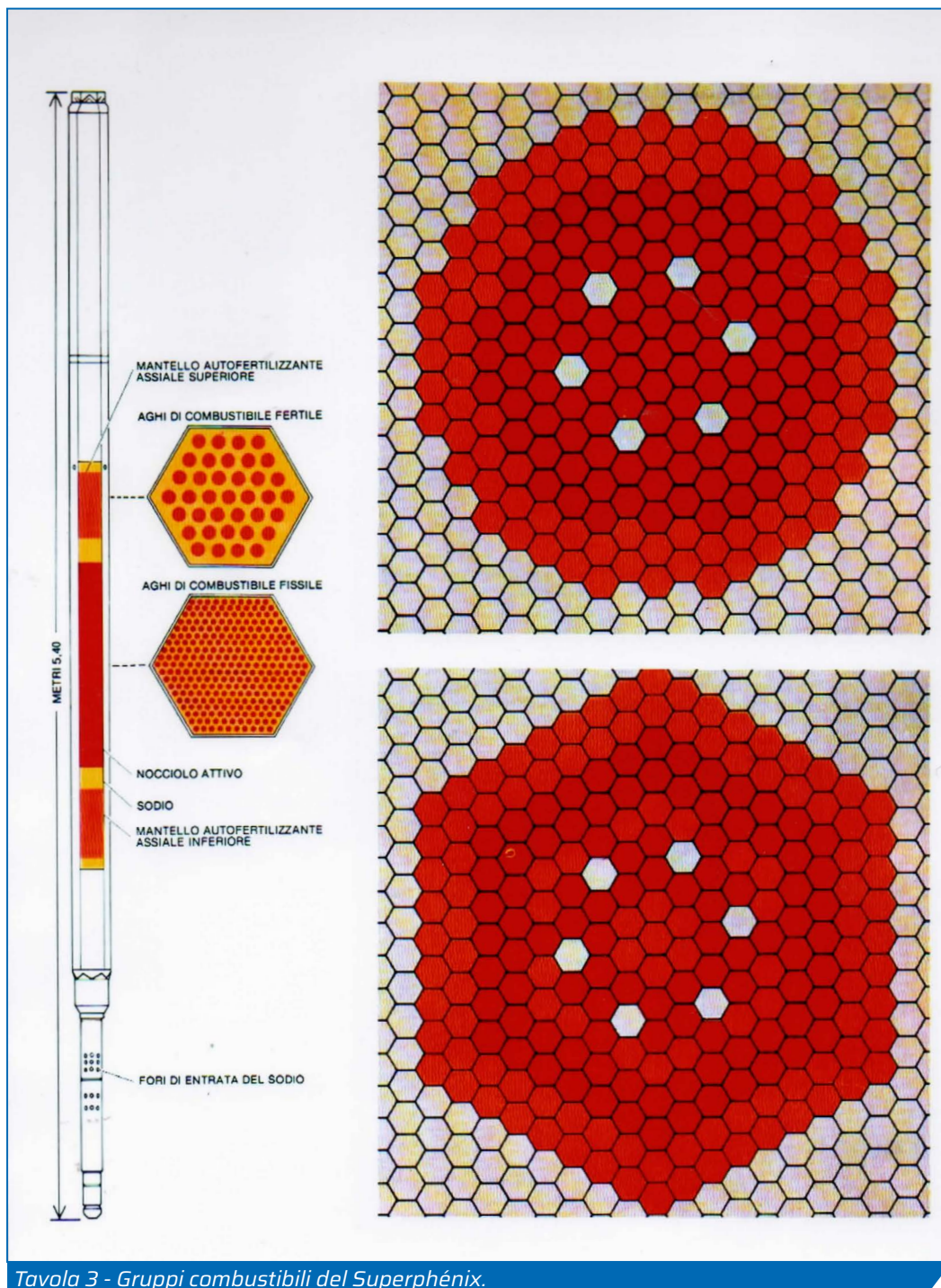


Tavola 3 - Gruppi combustibili del Superphénix.

Gli esagoni (in grigio) erano le barre di controllo. Nella realtà il nocciolo ed il mantello autofertilizzante avevano circa 600 gruppi.

In figura 11a) è mostrato lo schema di una centrale elettronucleare, tipo PWR (reattore ad acqua in pressione), mentre in fig.11b)

è mostrata una centrale autofertilizzante al sodio del tipo del Superphénix.

In a) il reattore ad acqua in pressione è essenzialmente costituito da un circuito in cui l'acqua, mantenuta allo stato liquido con elevate pressioni (dell'ordine di 150 bar) raffredda il reattore e cede il calore ad alta



I differenti tipi di reattori a neutroni veloci si distinguono soprattutto per la configurazione del circuito primario a sodio



Nel tipo a circuito solo il nocciolo del reattore si trova nella vasca mentre gli scambiatori intermedi e le pompe sono collegati al nocciolo mediante tubazioni

temperatura, tramite un generatore di vapore, al circuito in cui è inserito il turboalternatore. In *figura 11b*), il reattore autofertilizzante è costituito da un circuito primario a sodio liquido (pressione quasi atmosferica) che raffredda il reattore e cede il calore ad un secondo circuito, sempre a sodio liquido, il quale ha la funzione principale di tenere separati l'acqua ed il vapore del terzo circuito dal sodio primario che raffredda il reattore. Caratteri distintivi del sodio liquido rispetto all'acqua sono i seguenti:

- bassa pressione per le temperature richieste;
- una più alta radioattività indotta nel reattore;
- la più elevata capacità refrigerante;
- il punto di congelamento a 98°C contro gli zero gradi dell'acqua;
- la forte reattività chimica con acqua ed aria.

I differenti tipi di reattori a neutroni veloci si distinguono soprattutto per la configurazione del circuito primario a sodio. Nel tipo a piscina il nocciolo del reattore, gli scambiatori intermedi di calore e le pompe primarie del sodio sono disposti in un'unica grande vasca. Nel tipo a circuito solo il nocciolo del reattore si trova nella vasca mentre gli scambiatori intermedi e le pompe sono collegati al nocciolo mediante tubazioni.

Deve essere rilevato che i due sistemi si basano sulla stessa tecnologia, che la maggior parte del lavoro di sviluppo è comune e che le differenze tra i due tipi di reattore sono molto minori di quelle esistenti tra i reattori ad acqua bollente. Nella maggior parte delle nazioni i primi reattori realizzati sono stati del tipo a circuito poiché la separazione dei componenti rendeva più facile la costruzione, il funzionamento e la manutenzione e tale scelta era giustificata nella fase iniziale di sviluppo.

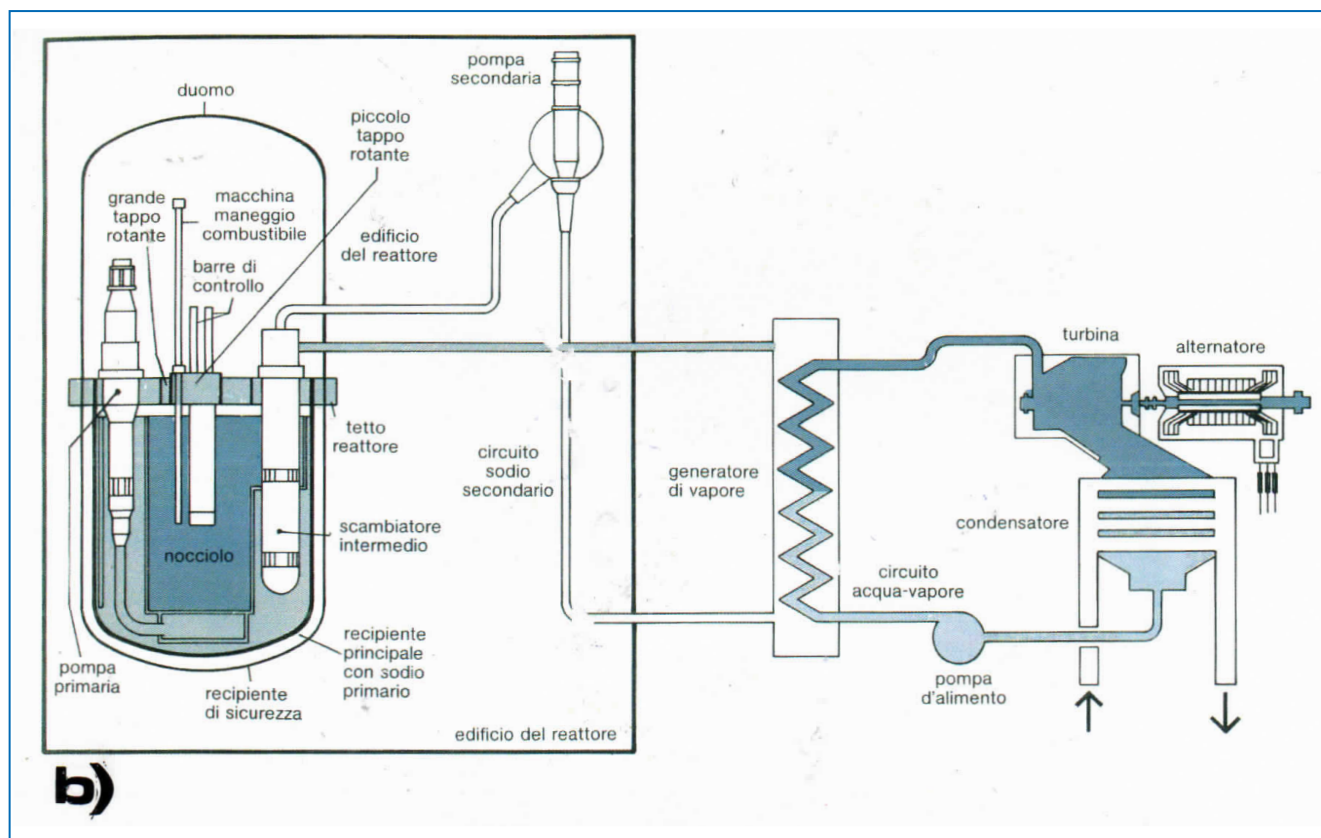


Figura 11b) - Reattore autofertilizzante a sodio liquido.

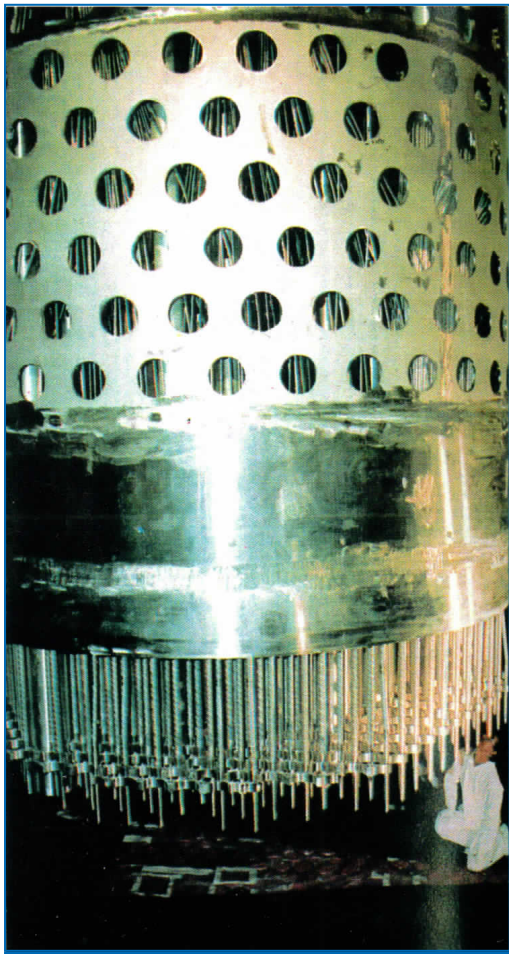


Figura 12 - Struttura di supporto interna al reattore.

Il primo reattore autofertilizzante del tipo a piscina fu costruito negli Stati Uniti. Dopo la costruzione del Rapsodie del tipo a circuito, per il Phénix venne adottato il tipo a piscina che, per le eccellenti prestazioni riscontrate, è stato mantenuto sostanzialmente invariato nel Superphénix. In *figura 12* è mostrata una struttura di supporto dei dispositivi di misura e controllo del nocciolo.

È evidente che è possibile costruire e gestire sia il sistema a piscina, sia quello a circuito e che entrambi presentano vantaggi ed inconvenienti evidenziabili solo nel corso di un lungo periodo di funzionamento. Alla base del sistema a piscina per il Phénix ed il Superphénix, vi è una considerazione di sicurezza. Si è ritenuto

che, in un grande impianto da 1000 megawatt o più, l'integrità del circuito primario a sodio potesse essere più facilmente assicurata disponendolo all'interno di un singolo recipiente di semplice progettazione, anziché disperderlo in un sistema molto complicato di tubazioni e recipienti con molte centinaia di metri di tubi aventi diametri fino ad un metro.

Il recipiente principale di un reattore del tipo a piscina, benché sia più grande di quello del tipo a circuito (diametro di circa 20 metri, invece di 10), è di progetto molto più semplice e di conseguenza la costruzione, il controllo e la manutenzione sono molto più semplici. Il più grave problema incontrato nella progettazione del tipo a piscina è stato la copertura del recipiente principale. Non si è potuta adottare la soluzione del Phénix per le dimensioni del Superphénix e si è invece deciso di sospendere il recipiente principale in acciaio direttamente alla soletta superiore in calcestruzzo ed acciaio, ponendo sotto la soletta stessa uno strato isolante termico in contatto con l'atmosfera di argo al di sopra del sodio. Le prove eseguite finora indicano che questa soluzione è del tutto soddisfacente.

L'esperienza delle centrali nucleari di tutti i tipi ha dimostrato che il generatore di vapore è un componente cruciale.

La progettazione e la costruzione dei reattori a neutroni veloci, richiedono una particolare accuratezza per prevenire qualsiasi violenta reazione chimica fra il sodio e l'acqua che potrebbe verificarsi in seguito ad una perdita negli scambiatori di calore. Il modello del generatore di vapore scelto per il Phénix, l'unico sul quale a quel tempo era stata acquisita un'ampia esperienza, fu suddiviso in 30 moduli di bassa potenza (ciascuno di 17 megawatt). La suddivisione rese possibile sottoporre tre modelli a grandezza naturale ad esaurienti esperimenti in condizioni operative simulate.

Questo modo di affrontare il problema sebbene fosse giustificato per un program-



Il primo reattore autofertilizzante del tipo a piscina fu costruito negli Stati Uniti



La ricerca per il Superphénix è stata perciò orientata verso unità di progetto differenti e di potenza unitaria più elevata (alcune centinaia di megawatt)

ma iniziale, non poteva essere applicato nel caso di una grande centrale elettrica, a causa del suo costo proibitivo. La ricerca per il Superphénix è stata perciò orientata verso unità di progetto differenti e di potenza unitaria più elevata (alcune centinaia di megawatt). Non sembra che i problemi posti dalla costruzione e dall'esercizio di queste unità aumentassero con le dimensioni, ma i grandi moduli presentavano alcuni inconvenienti, i principali dei quali, erano l'impossibilità pratica di eseguire prove su modelli a grandezza naturale prima dell'installazione definitiva.

Le prove eseguite in condizioni normali e critiche sui due isotopi, uno con tubi dritti in acciaio ferritico e l'altro con tubi Incoloy elicoidali, furono completamen-

te soddisfacenti dimostrando una buona concordanza con le previsioni di progetto. Alla fine, per il Superphénix fu scelto il modello a tubi elicoidali con un generatore di vapore della potenza termica di 750 megawatt in ogni circuito secondario. Poteva essere aggiunto uno stadio di surriscaldamento del vapore sia a sodio, sia a vapore. Il sistema a sodio venne impiegato per il Phénix portando il rendimento dell'impianto al 42% mentre il sistema a vapore fu scelto per il Superphénix, semplificando il generatore di vapore ed i circuiti associati poiché uno studio aveva dimostrato una compensazione tra il minor costo di investimento e la diminuzione di rendimento. Nella *tabella 2* vengono confrontati il Phénix ed il Superphénix. Nel

Parametri fondamentali	Phénix	Superphénix
Potenza elettrica lorda (Megawatt)	264	1240
Potenza termica (Megawatt)	590	3 000
Rendimento lordo (percentuale)	44,75	41,5
Volume del nocciolo (litri)	1 227	10 820
Lunghezza dei gruppi combustibili (metri)	4,3	5,5
Numero di aghi di combustibile per gruppo	217	271
Diametro esterno degli aghi di combustibile (Millimetri)	6,6	8,65
Massima potenza lineare (Watt per centimetro)	430	450
Velocità di consumo del combustibile (Megawatt-giorno per tonnellata)	50 000	70 000
Massimo flusso totale di neutroni (Neutroni per centimetro quadrato per secondo)	$7,2 \times 10^{15}$	$6,2 \times 10^{15}$
Rapporto di rigenerazione	1,12	1,24
Temperatura nominale del rivestimento (Gradi centigradi)	650	620
Intervallo fra le operazioni di rivestimento (Mesi)	2	12

Tabella 2 - Confronto tra i parametri principali del Phénix e quelli del Superphénix.

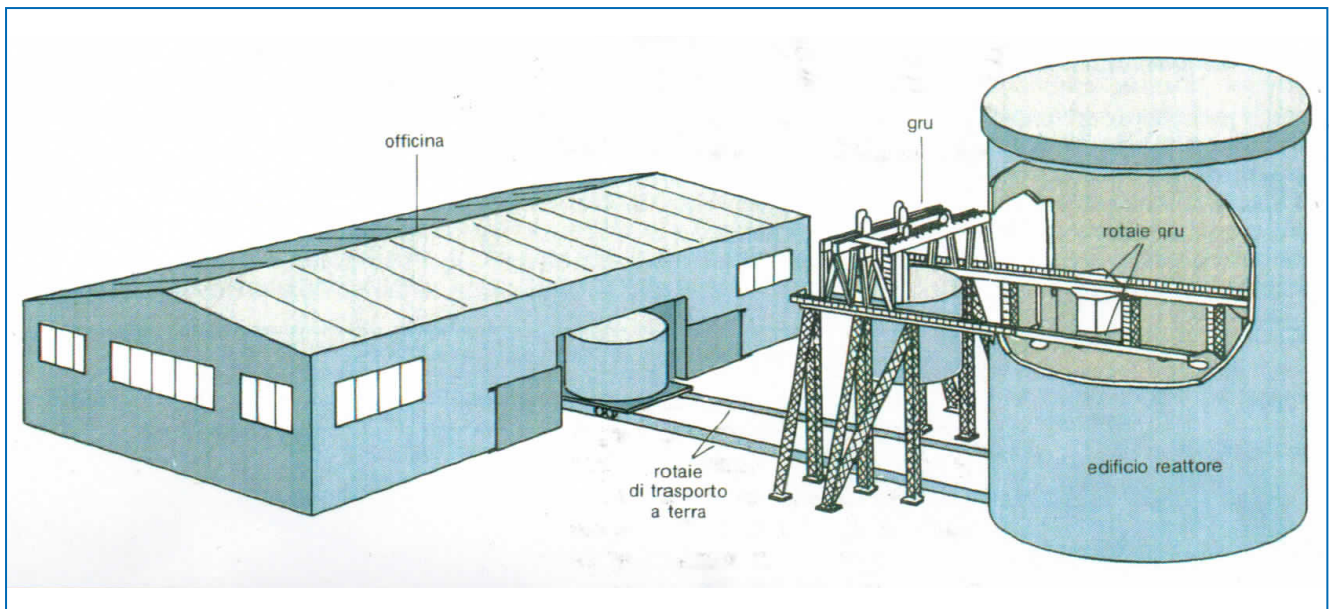


Figura 13 - Sistema per il trasporto dall'edificio al reattore.

passaggio all'impianto di maggiori dimensioni fu mantenuta, per quanto possibile, una continuità nelle scelte tecnologiche sebbene nel progetto del Superphénix fossero state introdotte diverse importanti modifiche.

In figura 13 si può vedere un disegno del sistema di trasporto dei componenti del reattore, assiemati in sito, dall'officina all'edificio del reattore.

Nella Tabella 3 sono riportate le dimensioni dei componenti assiemati in sito.

Come è noto, l'acciaio è una lega di ferro e carbonio, con tenore di carbonio inferiore all'1,8% in peso. Se la percentuale di carbonio è compresa tra il 2% ed il 6% non ci troviamo più di fronte ad un acciaio bensì ad una ghisa.

L'acciaio austenitico è un acciaio inossidabile che, oltre alla necessaria percentuale di cromo contiene una buona parte di nichel e, possibilmente di molibdeno.

L'acciaio ferritico è invece un acciaio inossidabile che contiene una buona parte di cromo senza però l'aggiunta di nichel e di altri elementi capaci di formare austenite. Ovviamente, fu importante evitare anche le più piccole perdite nei tubi che separa-

vano l'acqua dal sodio e ridurre al minimo gli effetti di qualsiasi contatto fra i due fluidi. Rivelatori ultrasensibili di idrogeno (in grado di rivelare una perdita di appena due milligrammi di idrogeno al secondo) furono collocati in punti diversi di ogni generatore di vapore. Erano anche disponibili sistemi automatici progettati per limitare le conseguenze di una reazione incipiente. Le manovre occorrenti per disporre gli elementi di combustibile all'interno del nocciolo e per rimuoverli dal reattore dopo l'irradiazione venivano effettuate esclusivamente ad impianto fermo. Le manovre venivano realizzate da una serie di dispositivi che manipolavano gli elementi mantenendoli sempre immersi nel sodio allo scopo di consentire l'eliminazione del calore residuo emesso dai prodotti di fissione. Due aste eccentriche rotanti, disposte nella soletta superiore del reattore offrivano la possibilità di sistemare il dispositivo di chiusura in corrispondenza della testa di qualsiasi gruppo di elementi nel nocciolo e nel mantello.

Tale sistema consentiva la manutenzione diretta di ogni gruppo di elementi e poteva anche far fronte ad eventuali deforma-



Fu importante evitare anche le più piccole perdite nei tubi che separavano l'acqua dal sodio e ridurre al minimo gli effetti di qualsiasi contatto fra i due fluidi

Nome del componente	Diametro (metri)	Altezza (metri)	Peso (tonnellate)	Materiale
Recipiente di sicurezza	22,4	17,4	330	Acciaio austenitico
Recipiente principale	21	15,5	350	Acciaio austenitico
Setto interno a doppia parete	20	10	350	Acciaio austenitico
Schermi di refrigerazione	20	10	150	Acciaio austenitico
Struttura di supporto del nocciolo	14	3,2	190	Acciaio austenitico
Struttura di supporto cassa distributrice sodio	6,6	1,3	37	Acciaio austenitico
Cassa distributrice sodio	6,0	1,5	80	Acciaio austenitico
Tetto del reattore	25,7	2,9	800	Acciaio ferritico
Tappi rotanti	11,5	2,4	640	Acciaio ferritico
	6	2,4	290	Acciaio ferritico
Duomo	25,5	18	750	Acciaio ferritico

Tabella 3 - Componenti del reattore assemblati in sito.



Uno dei principali inconvenienti del sodio era la sua opacità che rendeva impossibile seguire visivamente l'andamento delle operazioni di spostamento

zioni dei gruppi dovute a dilatazioni per irradiazione. Uno dei principali inconvenienti del sodio era la sua opacità che rendeva impossibile seguire visivamente l'andamento delle operazioni di spostamento. Per superare questo ostacolo furono sviluppati dei ricetrasmettitori ad ultrasuoni fondati sul principio del sonar. Questi apparati, immersi nel sodio, garantivano che durante le manovre i gruppi di elementi di combustibile potessero occupare sempre esattamente la posizione voluta senza il rischio di collidere con i dispositivi di manovra. In generale, i principi su cui è basato il controllo di un reattore a neutroni veloci sono identici a quelli di qualsiasi altro reattore. L'esistenza di neutroni ritardati dava al meccanismo operante sulla reattività del nocciolo il tempo di agire dolcemente sia per aumentare sia per diminuire sia infine, per mantenere costante la potenza dell'impianto.

Queste operazioni venivano e vengono eseguite per mezzo di barre di controllo contenenti un idoneo materiale che assorbe neutroni (veleno); inoltre esse sono mobili lungo condotti paralleli ai gruppi combustibili. Il Superphénix era dotato di

un sistema altamente ridondante di barre di controllo, divise in tre gruppi indipendenti; uno di questi era progettato in modo particolare per penetrare nel nocciolo anche nel caso estremo ed improbabile di una deformazione su vasta scala.

Il controllo ininterrotto del nocciolo del Superphénix era fornito di una serie diversificata di rivelatori le cui segnalazioni venivano elaborate e correlate in un calcolatore.

La temperatura del sodio che usciva da ogni gruppo di elementi veniva misurata da tre termocoppie che garantivano una risposta pressoché immediata. I rivelatori del sodio in ebollizione, i flussometri ed i dispositivi di rivelazione e localizzazione di qualsiasi difetto nel rivestimento erano versioni perfezionate di quelle impiegate nel Phénix.

I rivelatori di neutroni e gli strumenti elettronici per misurare la variazione della radioattività, hanno dimostrato la loro affidabilità nel corso di una lunga esperienza.

Le numerose precauzioni adottate nel progetto Superphénix furono sottoposte a particolareggiati e minuziosi esami da parte delle autorità che rilasciano le licenze prima dell'approvazione.

Queste misure di sicurezza riducono a livelli estremamente bassi la probabilità di un incidente. Le verifiche si spinsero alla considerazione del caso limite in cui l'arresto totale della circolazione forzata del sodio attraverso il nocciolo, con un reattore operante a piena potenza, non fosse accompagnato dal funzionamento di nessuno dei molti sistemi di controllo previsti per arrestare immediatamente la reazione di fissione a catena e la produzione di energia.

Persino in questo caso la considerevole inerzia termica rappresentata dalla grande massa di sodio, presente nel recipiente primario (3300 tonnellate) e l'intervallo di alcune centinaia di gradi centigradi fra la temperatura del sodio durante il funzionamento normale ed il suo punto di ebollizione, assicuravano un considerevole margine di tempo per l'intervallo manuale di emergenza.

Ciò nonostante si rese necessario garantire che, anche nel caso molto improbabile di un grave incidente, determinante la fusione del nocciolo, le conseguenze fossero controllate in modo che nessuna quantità rilevante di plutonio o dei prodotti di fissione potesse diffondersi nell'ambiente. Il sistema di sicurezza del Superphénix consisteva quindi in una serie di contenitori successivi in grado di resistere sia ad incidenti interni al reattore sia ad eventi esterni come quello di un aereo che si fosse schiantato contro l'edificio. Infine furono realizzati accorgimenti speciali per prevenire possibili incendi del sodio e per limitarne la propagazione nel caso si fossero verificati. Eventuali incendi del sodio non avrebbero messo in pericolo la sicurezza dell'impianto, ma era rigorosamente necessario prendere tutte le precauzioni per portare ad un livello massimo l'affidabilità e la disponibilità della centrale.

Un considerevole sforzo di ricerca e di sviluppo precedette il progetto e la costruzione del Superphénix in tutti i cam-

pi, primo fra tutti, quello della sicurezza. Questo programma di ricerche fu portato avanti negli anni anche durante e dopo la costruzione del reattore. Il Phénix venne costruito in poco più di quattro anni; la preparazione preliminare della località ebbe inizio nell'autunno del 1968 e prima della fine del 1972 ebbe inizio il riempimento dei circuiti primari e secondari con 1400 tonnellate di sodio.

Per il Superphénix fu adottato un programma di costruzione che si protrasse per 68 mesi. Le scadenze di realizzazione erano analoghe a quelle stabilite per altri tipi di centrali nucleari. Il fatto che i reattori autofertilizzanti non siano pressurizzati e che i loro componenti, anche quelli di maggiori dimensioni siano costruiti in lastre e tubi di acciaio inossidabile relativamente sottili, rese possibile eseguire in opera la maggior parte del montaggio finale.

In *figura 14* è riportata la foto di un particolare nocciolo del reattore veloce Phénix. Il Phénix che, come detto è stato il predecessore del Superphénix aveva una potenza di 560 MW termici e 250 MW elettrici, mentre la potenza del Superphénix era di 1200 MW elettrici.

In *figura 15* si può vedere una sezione nella quale sono tra l'altro evidenziati, oltre alla guaina, i contenimenti, e le tubazioni.

Breve storia dell'attività del Superphénix

A questo punto è opportuno vedere almeno per sommi capi cosa accadde a questo reattore nucleare e per far ciò elenchiamo brevemente gli sviluppi a cui andò in contro questo progetto dal suo concepimento fino al suo tramonto. Vengono di seguito riportate le principali date che hanno segnato la vita di questo programma.

- 13 aprile 1974: data del decreto autorizzante la creazione della NERSA (51% EDF, 33% ENEL, 16% SBK);
- 13 dicembre 1976: data d'inizio della costruzione;



Il sistema di sicurezza del Superphénix consisteva quindi in una serie di contenitori successivi in grado di resistere sia ad incidenti interni al reattore sia ad eventi esterni come quello di un aereo che si fosse schiantato contro l'edificio

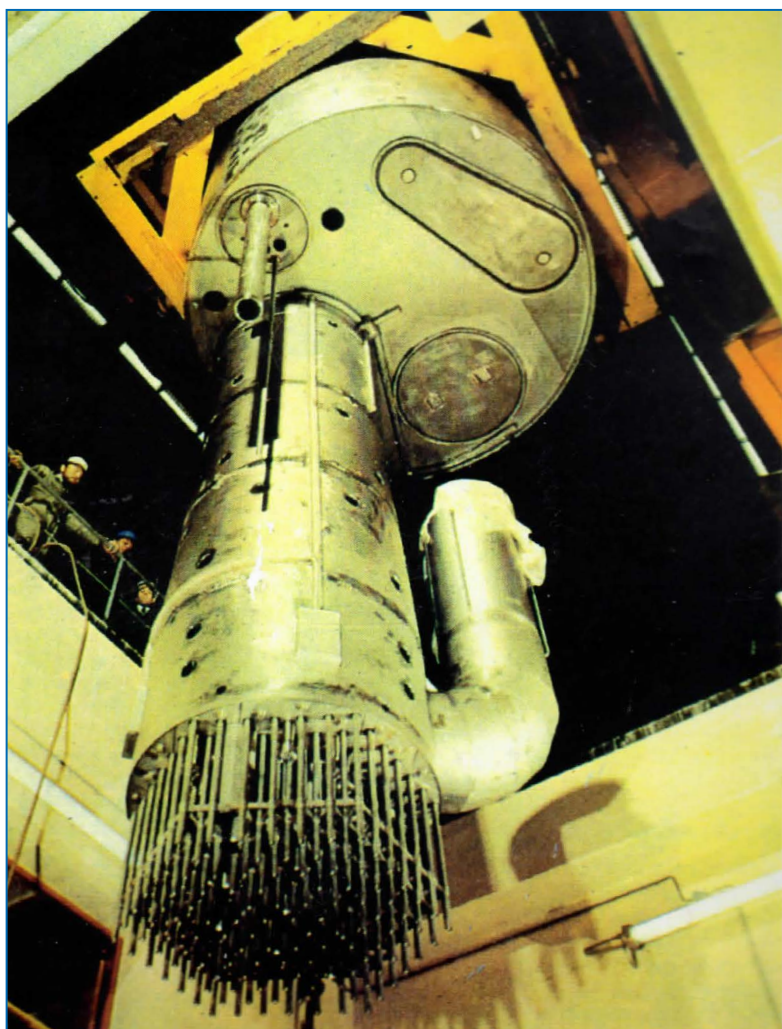


Figura 14 - Particolare del nocciolo del Phénix.



La NERSA era il frutto di una collaborazione internazionale tra EDF per il 51%, ENEL per il 33% e SBK per il 16%

- 12 maggio 1977: data del decreto che autorizzava la NERSA alla creazione dell'atelier per l'evacuazione del combustibile (APEC) della centrale;
- 7 settembre 1985: data della prima criticità;
- 14 gennaio 1986: data della connessione alla rete elettrica nazionale;
- 1° dicembre 1986: data dell'inizio delle operazioni commerciali;
- 11 luglio 1994: data del decreto che trasformò Superphénix in un reattore dimostrativo e di ricerca;
- 28 febbraio 1997: data dell'annullamento del precedente decreto;
- Giugno 1997: data della decisione di arresto del Superphénix;

- 21 dicembre 1998: data dello "shut-down" permanente;
- 30 dicembre 1998: data del decreto di arresto definitivo di Superphénix;
- 6 ottobre 2000: data del decreto di dissoluzione della NERSA;
- 20 marzo 2006: data del decreto che autorizza EDF a procedere alle operazioni di smantellamento.

Il 13 maggio 1974 fu pubblicato il decreto che autorizzava la creazione della società NERSA, che sta per "centrale nucleare europea a neutroni veloci". La NERSA era il frutto di una collaborazione internazionale tra EDF per il 51%, ENEL per il 33% e SBK per il 16%. All'origine un reattore a neutroni rapidi raffreddato al sodio lo si sarebbe dovuto costruire in ogni paese partner. Un reattore denominato Kalkar sarebbe stato costruito in Germania ed uno italiano (che si sarebbe dovuto chiamare "Prova Elementi di Combustibile") sarebbe sorto a Brasimone, in Italia.

Questi due progetti furono poi abbandonati dopo il grave incidente occorso a Chernobyl. Nell'autunno 1974 fu condotta un'inchiesta pubblica per la creazione della cosiddetta "Installazione nucleare di base Superphénix" SPX. Il 23 ottobre 1974, la stampa regionale annunciò al pubblico questo progetto ed il 2 maggio 1975 a Bourgoin-Jallieu, due associazioni ambientaliste si appellarono in tribunale per interrompere i lavori già intrapresi da EDF, invocando la qualità della vita come diritto fondamentale.

Questo tribunale si dichiarò incompetente ed il 30 maggio rigettò la domanda delle due associazioni che furono costrette a pagare le spese processuali.

In figura 16 si può vedere il reattore Superphénix ed un progetto da 1500 MW a confronto.

Le principali differenze strutturali tra il nuovo progetto e quello del Superphénix riguardano:

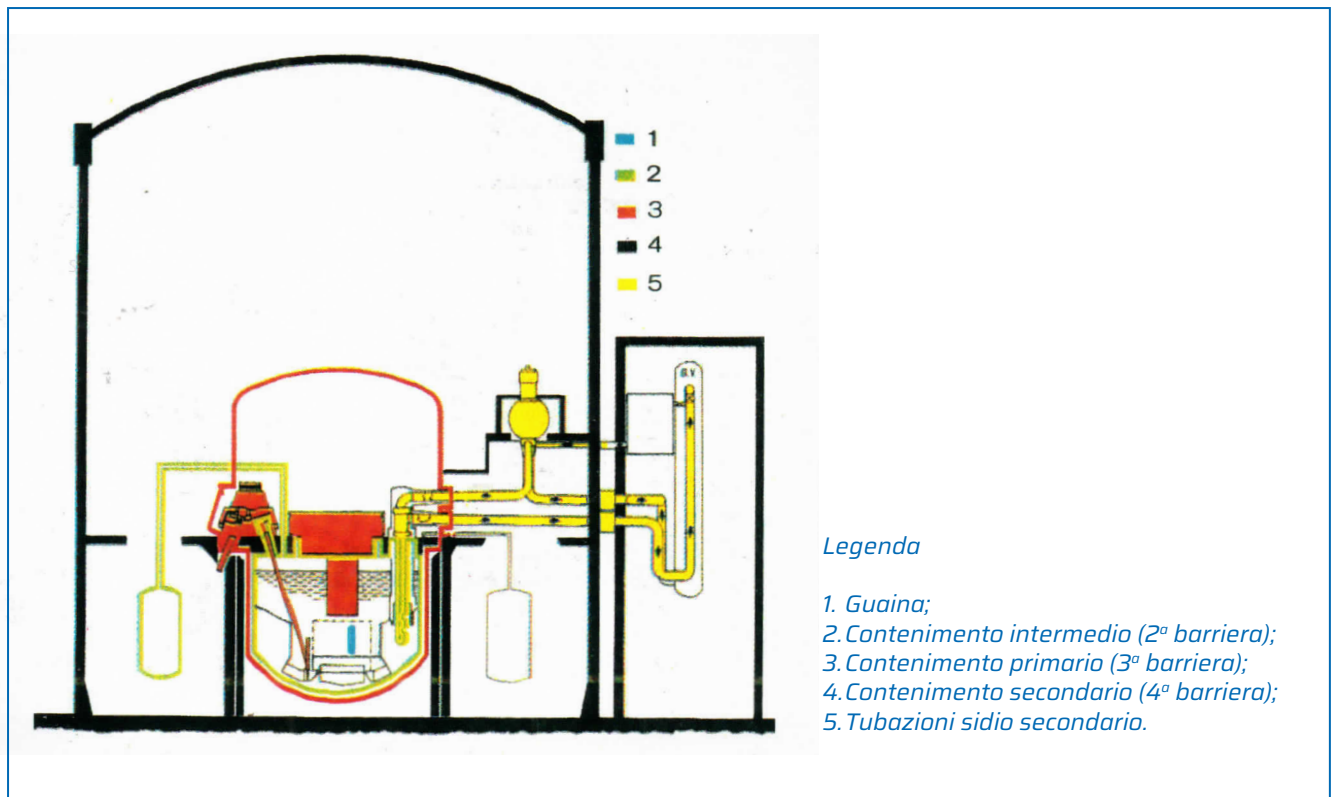


Figura 15 - Barriere di contenimento del nocciolo.

1. una diminuzione degli spessori del recipiente principale;
2. una diminuzione del peso delle nuove strutture di progetto del nocciolo;
3. una diversa concezione del tetto, ed infine;
4. l'eliminazione del recipiente di sicurezza e del duomo metallico.

Per la centrale, l'architettura è più compatta con l'edificio reattore a navata, invece che cilindrico e vi è un solo turboalternatore.

Nella Tavola 4 si può vedere in A un elemento di combustibile fissile con custodia esagonale; l'elemento si posiziona tramite il piede cilindrico nella cassa distributrice del sodio che entra da passaggi sistemati radialmente. In B è visibile la configurazione nominale del nocciolo, costituito da elementi di combustibile fissile (in tutto 364) di combustibile fertile, di controllo e

di schermatura. Infine nell'immagine C si può vedere la sistemazione delle 271 barrette dell'elemento, ciascuna costituita da una guaina di acciaio inox e dalle pastiglie di ossido di uranio e plutonio. Riportiamo di seguito la legenda dei componenti dell'elemento A della Tavola 4.

Elemento di combustibile "A".

1. Protezione neutronica superiore;
2. Barretta di combustibile (zona fertile con pastiglia di ossido di uranio);
3. Barretta di combustibile (zona fissile con pastiglia di ossido di uranio e plutonio);
4. Imbocco della griglia di supporto;
5. Orifizi di ingresso del sodio;
6. Piede e relativa sede.

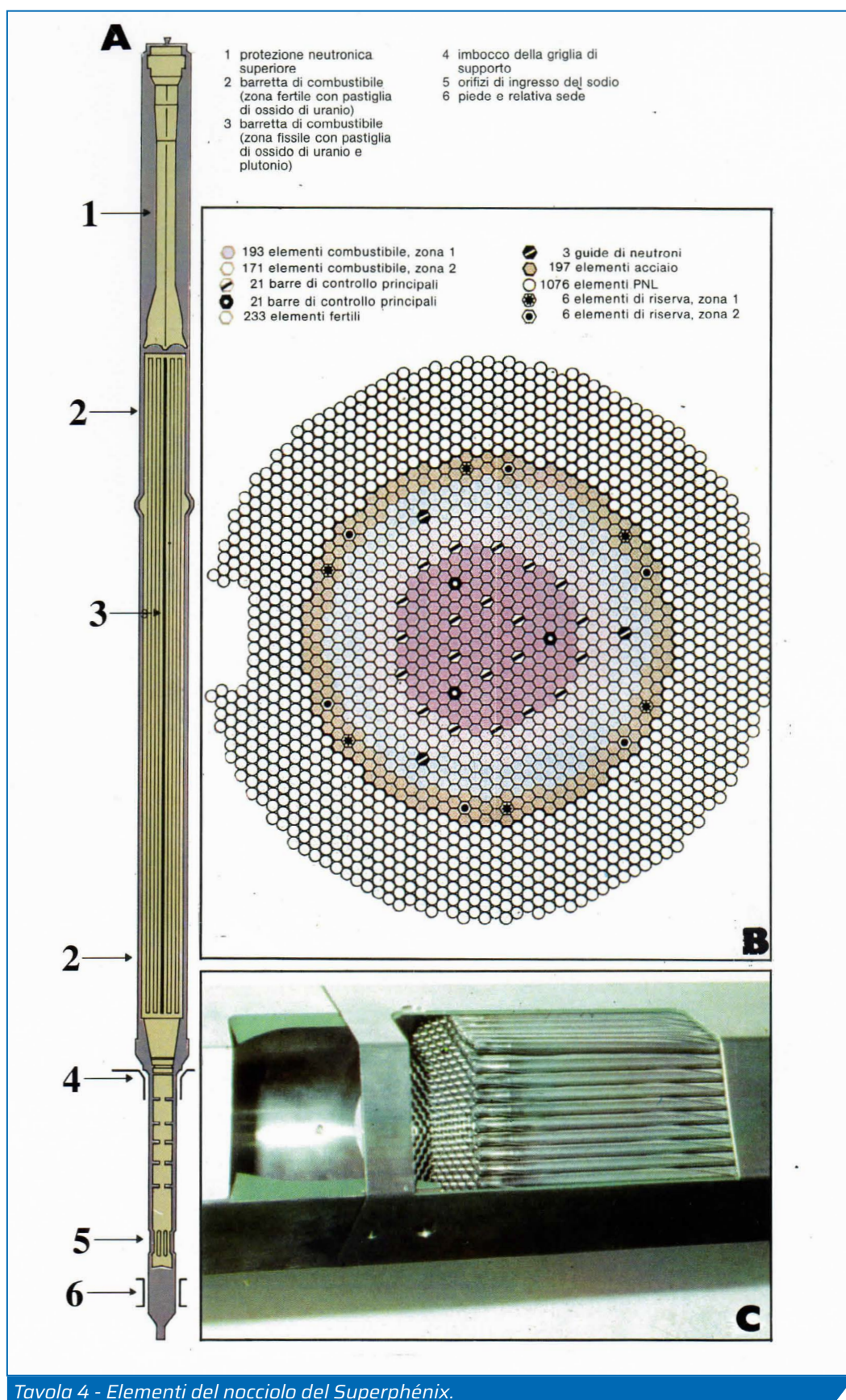
Nell'aprile 1976 l'allora primo ministro francese Jacques Chirac autorizzò la NERSA ad ordinare la costruzione del Superphénix.



Per la centrale, l'architettura è più compatta con l'edificio reattore a navata, invece che cilindrico e vi è un solo turboalternatore



La decisione di costruire questo reattore fu presa senza nemmeno il consenso della commissione PEON, che era incaricata alla produzione di energia nucleare



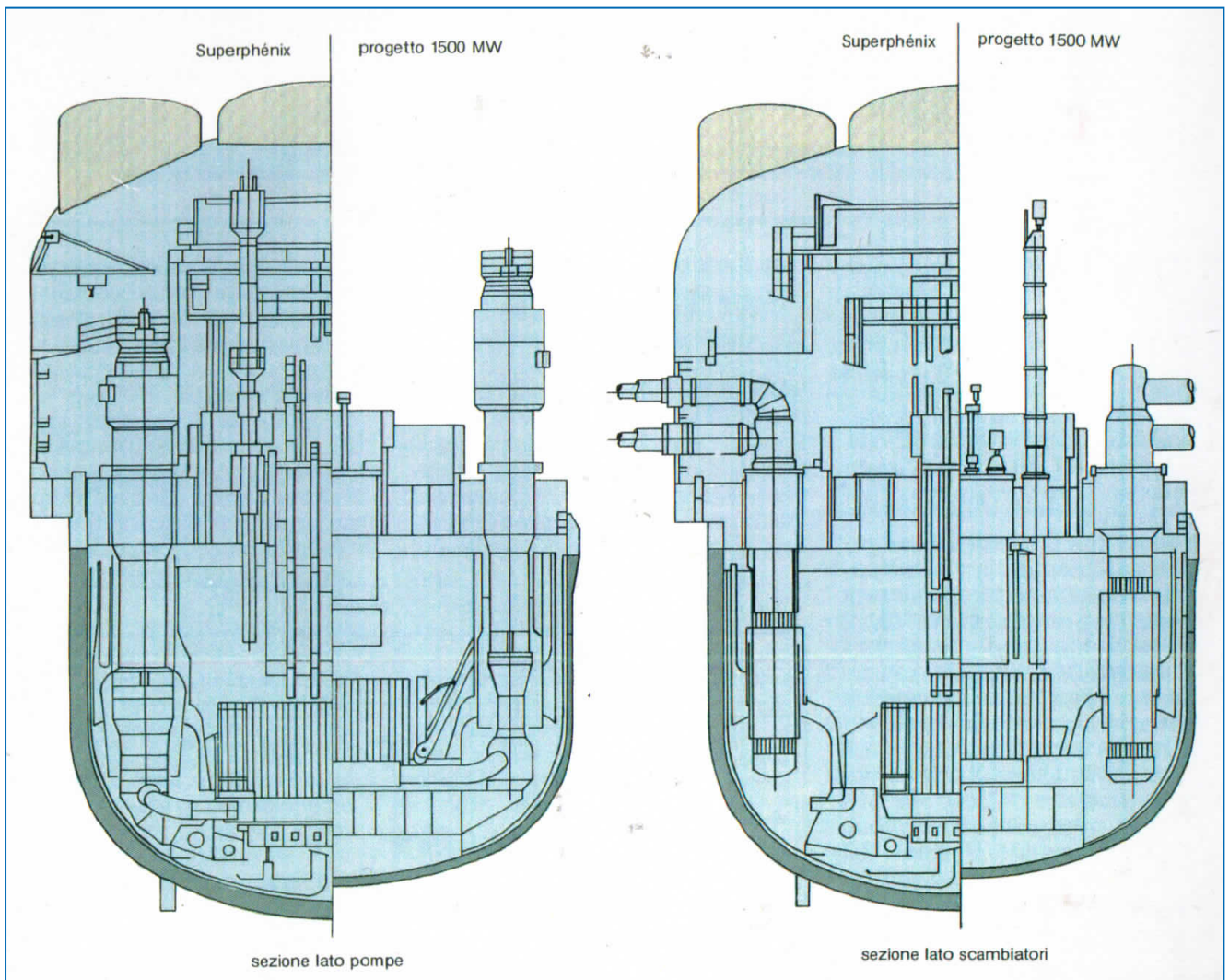


Figura 16 - Superphénix e progetto da 1.500 MW a confronto.

La decisione di costruire questo reattore fu presa senza nemmeno il consenso della commissione PEON, che era incaricata alla produzione di energia nucleare. Valéry Giscard d'Estaing, presidente della Repubblica francese, dichiarò allora *“che con questo tipo di reattore e le sue riserve di uranio, la Francia avrebbe avuto tanta energia quanto l'Arabia Saudita con tutto il suo petrolio”*.

Nel 1977 furono firmati il *“decreto di attività pubblica”* (DUP), dal primo ministro francese Raymond Barre ed il *“decreto di autorizzazione di creazione”* (DAC) dal ministro dell'industria, del commercio e dell'artigianato René Monory.

Una prima manifestazione durante l'estate 1976 permise ai manifestanti di accedere al sito. Dispersi dalle forze pubbliche, i manifestanti si rifugiarono nei paraggi, ove furono ospitati spontaneamente per diversi giorni da vari privati. Il 31 luglio 1977 una nuova manifestazione contro il progetto ebbe luogo proprio a Creys-Malville.

Questa fu una delle più imponenti manifestazioni nella storia del movimento antinucleare francese. A seguito di violenti scontri tra manifestanti e polizia perse la vita un manifestante di 31 anni e diverse altre persone tra manifestanti e forze dell'ordine rimasero ferite. Nella notte del 18 gennaio 1982 venne effettuato un attac-



Una prima manifestazione durante l'estate 1976 permise ai manifestanti di accedere al sito

co con razzi contro la centrale non ancora completata da un gruppo “eco-pacifista”. Cinque razzi vennero lanciati utilizzando un lanciatore RPG-7 di fabbricazione russa arrecando danni al nocciolo non ancora completo.

In tutti i modi, il riempimento in sodio del reattore della centrale fu effettuato nel 1984. La centrale entrò in servizio il 7 settembre 1985 con la prima reazione a catena in grado di autosostenersi, e fu collegata alla rete elettrica il 14 gennaio 1986. Secondo i dati della AIEA il reattore produsse 928,700 GWh nel 1986, poi 812,100 GWh nel 1987 con un fattore di carico annuale del 15,6% e del 7,7%. L'8 marzo 1987 si verificò una fuga di 20 tonnellate di sodio liquido in una botte di stoccaggio del combustibile nucleare.

Questa botte era un recipiente cilindrico nel quale si lasciava raffreddare il combustibile usato per un certo intervallo di tempo, in attesa di trasferirlo o verso il nocciolo del reattore o verso l'esterno.

Questa fuga fu dovuta ad un acciaio non adeguato, cosa che avrebbe comportato la fessurazione delle saldature ed una fuga di sodio. Nel seguito di un incidente classificato al livello 2 (semplice guasto) della già menzionata scala: il 26 maggio 1987, il ministro dell'industria delle poste e del turismo Alain Madelin decise di arrestare il reattore.

Il ravviamento dello stesso fu autorizzato il 12 gennaio 1989 con un decreto del primo ministro francese Michel Rocard. Secondo i dati dell'AIEA, la centrale produceva 1756,440 GWh di energia nel 1989, poi 588,340 GWh nel 1990, con rispettivamente un fattore di carico annuale del 16,7% e del 5,6%. Nel 1989 si costituì il “Comité européen contre Superphénix”, raggruppante decine di associazioni ed organizzazioni di diversi paesi europei, tra cui la Francia, la Svizzera e l'Italia. Il 26 aprile 1990, vistose manifestazioni furono organizzate in diverse città francesi, svizzere ed italiane. Il

26 aprile 1990 furono organizzate diverse manifestazioni dal titolo “Chernobyl quattro anni dopo, Malville oggi”.

Nel periodo in cui il reattore era nuovamente fermo dal 7 settembre 1989, si verificò un secondo guasto di livello 2 nella scala INES il 12 aprile 1990. Una fuga di sodio su uno dei quattro circuiti primari impose lo svuotamento immediato di tutto il circuito “critico” contenente 400 tonnellate. In effetti il sodio doveva essere mantenuto puro in ogni circostanza per evitare in particolare che delle impurità (ossidi, idruri, particelle metalliche ecc.) non venissero ad ostruire il circuito di raffreddamento.

Il 1° settembre 1990 fu svolta una nuova marcia antinucleare davanti al Superphénix. Questa marcia, chiamata “Pellegrinaggio Internazionale per la Pace” durò un mese e mezzo, raggruppò 70 persone di 12 paesi differenti e terminò a Saintes-Maries-de-la-Mer, nelle Bocche del Rodano, il 15 ottobre 1990. Il 9 dicembre 1990 una parte del tetto della scala delle turbine cedette sotto il peso di 80 centimetri di neve e questo crollo avrebbe necessitato della ricostruzione della superstruttura della metà dell'edificio.

Il reattore quel giorno era all'arresto. L'edificio dell'alternatore e del reattore erano tra loro separati per cui il crollo non avrebbe comportato delle gravi conseguenze (almeno secondo i portavoce di EDF). E così, tra pause, interruzioni e avarie, non senza proteste, l'attività del Superphénix sarebbe stata chiusa.

Il governo prese la sua decisione ed un decreto ministeriale del 30 dicembre del 1998 condusse all'arresto definitivo del Superphénix. Le ragioni invocate influenzate dalla pressione dell'opinione pubblica furono che il debole prezzo dell'uranio non giustificava più degli investimenti in questa filiera. Nel gennaio 1998, il Consiglio dei Ministri, confermò che il Superphénix non sarebbe stato più riavviato.



La centrale entrò in servizio il 7 settembre 1985 con la prima reazione a catena in grado di autosostenersi, e fu collegata alla rete elettrica il 14 gennaio 1986

I critici argomentarono che la decisione di Jospin fosse dovuta più al desiderio di contentare i suoi alleati politici che non a considerazioni tecniche. Comunque, il reattore non produsse elettricità per buona parte del tempo per malfunzionamenti e, per molto più tempo a causa di impedimenti di carattere politico e amministrativo. Le attività legate alla cessazione della funzione del reattore, ebbero inizio nel 1999.

Tra quest'ultimo anno ed il 2007 vennero effettuate delle attività volte all'eliminazione dei rischi nucleari ed allo smantellamento della parte non nucleare della centrale con riferimento allo svuotamento del combustibile, allo smantellamento della sala macchine ed agli altri equipaggia-

menti non radioattivi ed, infine, alla costruzione delle installazioni necessarie per il proseguimento dello smantellamento.

In conclusione, indipendentemente dal fatto che si sia favorevoli o contrari al Superphénix, non si può non ammettere che i reattori veloci autofertilizzanti rappresentino un'assicurazione per il futuro: un'inesauribile fonte energetica, dipendente più dalle capacità tecnologiche delle nazioni che dalla disponibilità di materie prime e dalla loro ubicazione geopolitica. La centrale autofertilizzante Superphénix è comunque stata la prima realizzazione a scala industriale di una centrale di questo tipo, dopo decenni di sperimentazione preindustriale.



Le attività legate alla cessazione della funzione del reattore, ebbero inizio nel 1999

Bibliografia

Per quanto riguarda in modo specifico i reattori veloci autofertilizzanti si possono consultare i seguenti lavori:

- Camplani Angelo e Zambelli Angelo, *Centrali elettronucleari e reattori autofertilizzanti: Superphénix in esercizio*, *Annuario di Scienza & Tecnica EST*, Milano, Mondadori, 1986-1987.
- Vendryes A. Georges, *Il Superphénix*, *Le Scienze*, n.07, Luglio 1977.
- Bethe H.A. *L'energia da fissione è ancora indispensabile*, *Le Scienze* n.93, maggio 1976.
- The Breeder: *When and Why*, in *"EPRI Journal"*, 1, n.2, marzo 1976.
- Seaborg Glenn e Bloom Justin, *I reattori convertitori veloci*, *Le Scienze* n.30, febbraio 1971.
- Thompson T.G. e Berkeley (a cura), *The Technology of Nuclear Reactor Safety*, vol.1: *Reactor Physics and Control*, The MIT Press.
- Yevick John G. (a cura), *Fast Reactor Technology: Plant Design*, The MIT Press.
- Cislser W.L. *I reattori veloci autofertilizzanti*, *Scienza & Tecnica* 1976, Milano, Mondadori.

Sempre sull'energia nucleare, ma di carattere più generale sono le seguenti opere:

- Ameglio Paolo, *Introduzione ai principi di ingegneria nucleare ed all'analisi dei reattori nucleari*, E.C.I.G. editore, 1981, Genova.

- Bandini Buti Alberto, *Teoria e funzionamento dei reattori nucleari*, Sandit, Albino (BG), 2007.
- Boffi Vinicio, *Fisica del reattore nucleare*, vol.1 e 2, Patron, Bologna, 1974.
- Casarelli Giancarlo, *Fisica ed ingegneria del reattore nucleare*, Edizioni Riata.
- Cumo Maurizio, *Impianti nucleari*, Casa editrice Università La Sapienza, Roma, 2012.
- Di Leo Carlo e Lucarelli Giorgio, *La fusione nucleare controllata, confinamento magnetico, confinamento inerziale e fusione fredda*. Terza edizione, Editoriale Delfino, Milano, 2024.
- Errico Giovanni, *Pensiero Atomico*, SUSIL Edizioni.
- Forgione Nicola, Oriolo Francesco, *Principi di ingegneria nucleare: generazione e trasporto del calore*, Tipografia Editrice Pisana (TEP), Pisa, 2014.
- Leonardi Renzo, *L'ABC dell'energia nucleare*, Lantana editore, aprile 2011.
- Loizzo Paolo, *Le centrali nucleari, ovvero il diavolo che non c'è*, Monteleone, Vibo Valentia, 1994.
- Lombardi Carlo, *Impianti nucleari*, Polipress, Milano, 2012.
- Mainardi Enrico, *Impieghi dell'energia nucleare*, Editoriale Delfino, Milano, 2008.
- Maizza Vito, *Centrali elettronucleari, macchine ed impianti*, Laterza, Bari, 1984.



Che si sia favorevoli o contrari al Superphénix, non si può non ammettere che i reattori veloci autofertilizzanti rappresentino un'assicurazione per il futuro

- Mazzoleni Francesco, *Introduzione all'ingegneria nucleare*, Liguori, Napoli, 1988.
- Milano Guido, *Energia nucleare, fissione, fusione, sicurezza e ambiente*, Aracne, Roma 2011
- Novelli Antonio, *Elementi di controllo dei reattori nucleari*, Clup, Milano 1988.
- Paci Sandro, *Introduzione ai sistemi nucleari*, Edizioni Università di Pisa, dicembre 2002.
- Quartieri Giuseppe, *Introduzione alla sicurezza dei sistemi nucleari*, Istituto Bibliografico Napoleone, Roma 2010.
- Sani Luciano, *Centrali elettronucleari*, Edizioni Sistema, Roma, 1984.
- Zanobetti Dino, *Energia nucleare, un dossier completo*, Società editrice Esculapio, Bologna, 2008.
- Zorzoli Giovanni Battista, *Fisica sperimentale dei reattori nucleari*, Feltrinelli, Milano 1971
- Häfele Wolf, *Energia dal nucleare*, rivista *Le Scienze*, n.267, novembre 1990;
- Parlangeli Andrea, *Atomo o non atomo?* Rivista *Focus*, n.380, Giugno 2024;
- Marchetti Cesare, *Geoengineering and Energy Island in Secnd Status Report of the IIASA Project on Energy Systems*, a cura di Wolf Häfele et altri, International Institute for Applied Systems Analysis RR – 76 – 1, 1975.
- *Energy in a Finite World*, volumi 1 e 2, International Institute for Applied Systems Analysis, Ballinger Publishing Co, 1981;
- Weinberg Alvin M, *Nuclear Energy and Proliferation: A Longer Perspective in The Nuclear Connection: A Reassessment of Nuclear Power and Nuclear Proliferation*, a cura di Alvin Weinberg et altri, Washington Institute Press, 1985.
- Holdren John et altri, *Exploring the Competitive Potential of Magnetic Fusion Energy: The Interaction of Economics with Safety and Environmental Characteristics in "Fusion Technology"* 13, n.1, gennaio 1988.
- Häfele Wolf, *Technical Safety Measures and Rules in the Nuclear Field in "Atomwirtschaft, Atomtechnik"*, novembre 1989.