

# 高速增殖爐開發

## 어디까지 왔나?

*Development of Commercial FBR Power Plant*



趙 滿〈韓國에너지研·高速爐研究室長〉

1984年 今年은 商用高速增殖爐發電 元年, 아니 原子力發電 元年이 되는 뜻 깊은 해가 된다. 하늘이 숨결을 불어넣듯 12個國 900餘業體가 꿈을 쫓아 이룩한 꿈의 原子爐인 高速增殖爐—"Super Phenix"가 프랑스 Crey-Malville에서 初 臨界에 도달하게 된 것이다.

에너지 資源이 貧弱하고 거의 全面的으로 輸入에너지에 依存하고 있는 우리나라로서는 原子力開發이 가장 重要한 課題임을 새삼스러이 再 論할 必要가 없다.

高速增殖爐開發을 우리나라가 서두르지 않으면 안되는 理由는

첫째, 우라늄資源을 有効하게 活用할 수 있다는 世界共通의 開發目標 以外에 高速增殖爐가 輕·重水型爐의 使用後核燃料와 濃縮廢棄物인 劣化우라늄을 資源으로 하여 電力生產을 할 수 있으며,

둘째, 天然우라늄 1gr當 生產할 수 있는 電力이 輕·重水型爐의 수십배가 된다는 事實로 부터 將次 緊張이 高調되어 世界의 어떤 곳에서 에너지供給에 蹤跌를 낳는 事件이 발생하더라도 에너지面에서 볼 때 이들에 依存하지 않고

거의 獨立的일 수 있으며,

셋째, 이것이 바로 에너지資源의 確保를 安保的 次元에서 다루어지는 에너지 시큐어리티의 解決策이 되기 때문이다.

現在 우리나라에는 3基의 原子力發電所가 運轉中에 있고 6基의 原子力發電所가 建設中에 있어 本格的인 原子力發電國으로 발돋음하고 있으며, 사다 쓰는 나라에서 만들어 쓰는 나라로 변모하고 있다. 따라서 完成된 것 가운데 좋은 것을 골라 살 줄 아는 眼目과 이들의 效率의 運營能力이 우리나라의 原子力關聯 從事者에게 要求되던 時代로부터 어떻게 만들어졌으며 어떻게 만들어야 하는가를 具體的으로 提示할 수 있는 專門科學技術者를 要求하는 世上으로 변모하고 있는 것이다.

이러한 次第에 先頭走者の 境遇를 살피면서 이 高速增殖爐가 어떻게 計劃되고 어떠한 體制下에서 어떻게 만들어지고 있는가, 어떤 어려움을 겪고 있으며 建設中에 얻은 經驗은 무엇이고 이에 덧붙여서 이 先頭走者와 比較하여 다른 나라들의 開發計劃은 어떤가를 살펴 봄으로써 世界的인 動向을 把握하여 보는 것도 뜻있는 일

이 될 것이다.

### Super Phenix란

先頭走者는 Super Phenix로서 이 Super Phenix는 프랑스, 이탈리아, 서독 三國共同 프로젝트로 建造되고 있는 高速增殖爐 實證爐이다. 프랑스 리옹 近郊의 Crey-Malville에서 1977年에 着工되어 1984年 後半期에 初臨界에 到達한 뒤 1985年 前半期에는 商業運轉에 들어 갈 豫定이다.

熱出力 3,000MWt, 正味電氣出力 1,174KWe로서 年間 利用期間 6,600時間인 탱크型爐이다. 冷却系統은 4個의 투프로 構成되어 있다. 그림 1에는 플랜트 全體의 斷面圖를, 表1에는 Super Phenix의 主要特性을 整理하였고 原子爐部分을 擴大한 것이 그림2이다.

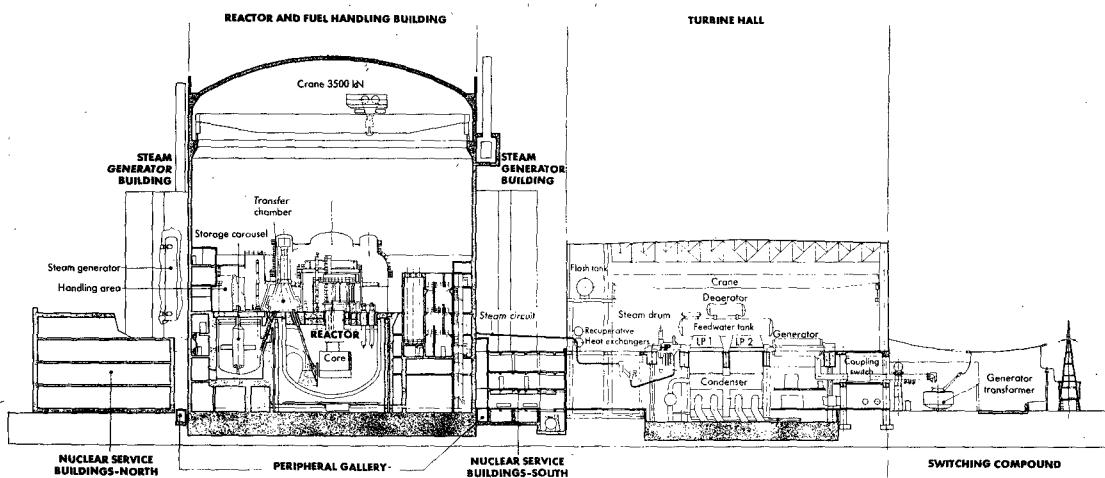
그림2에서 보는 바와 같이 原子爐容器는 스텐레스 스틸 316鋼製로 만들어진 内徑21m, 높이 19.5m의 커다란 圓筒型탱크이다. 그 内部에는 原子爐 爐心, 4個의 主冷却펌프, 8個의 中間熱交換器가 設置되어 있다. 主容器의 바깥쪽에는 安全容器가 있어 主容器의 破損에 對備 나트륨의 流出이 있어도 安全容器는 이를 받아 爐心이 冷却材인 나트륨 속에 항상 잠겨 있도록하여 原子爐 緊急停止後 崩壞熱이 除去될 수 있도록 設計되고 있다. 主容器속에는 中性子遮蔽, 爐心

支持構造物과 燃料溶融事故時 이를 받아 冷却시키는 Internal Core Catcher가 있다. 또한 탱크속의 나트륨이 爐心, 中間熱交換器, 펌프사이

〈表 1〉 Super Phenix 主要特性

熱出力	3,000MW	Back up 爐停止	3
NET 電氣出力	1,174MWe	集合體數	
GROSS電氣出力	1,242MWe	集合體를構成하는	3
年間利用時間	6,600hours	要素數	
		被覆材料	S.S
燃料			
組成	UO <sub>2</sub> -PuO <sub>2</sub>	主原子爐 탱크	
PuO <sub>2</sub> /(U, Pu)O <sub>2</sub>	内部爐心14.6% 外部爐心18.5%	形狀	
<sup>239</sup> Pu 量	4,800kg	内 徑	21,000mm
增殖率	1.24	外 徑	19,500mm
最大燃耗度(目標)	70,000:t 100,000MWD/T (oxide)	材 料	S.S
		1次系 冷 却 材	나트륨
		1次系의 나트륨量	3,250t
		流 量	4×4.2t/s
燃料集合體		中間熱交換器出口溫度	392°C (1次Na)
燃料集合體數	364	爐心入口溫度	395°C
燃料集合體當燃料	271	爐心出口溫度	545°C
要素數		中間熱交換器入口溫度	542°C (1次Na)
燃料要素直徑	2,700mm		
燃料集合體直徑	5,400mm	2次系 冷 却 材	나트륨
被覆材	S.S	2次系內의 나트륨量	1,500t
最高被覆溫度	620°C	流 量	4×3.27t/s
		蒸氣發生器出口溫度	
상행카트集合體		中間熱交換器入口溫度	345°C
상행카트集合體數	233	中間熱交換器出口溫度	
集合體當	91	蒸氣發生器入口溫度	525°C
상행카트要素數			
要素直徑	1,944mm	水蒸氣系	
集合體直徑	5,400mm	蒸氣發生器入口에서 물 測度	237°C
被覆材料	S.S	터빈 스톱밸브 애사의 蒸氣溫度	487°C
		蒸氣發生器入口에서의 물壓力	218bar
制御棒集合體		터빈스톱 밸브 에서의 蒸氣壓力	177bar
主爐停止系		流 量	4×340kg/s
制御棒集合體數	21		
集合體當要素數	31		
要素直徑	1,300mm		
被覆材料	S.S		

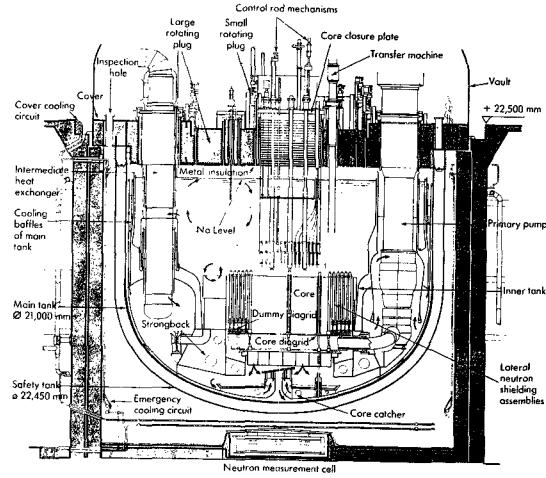
〈그림 1〉 Super Phenix 發電所 斷面圖



를 循環하는 流路를 形成토록 칸막이가 設置되어 있다.

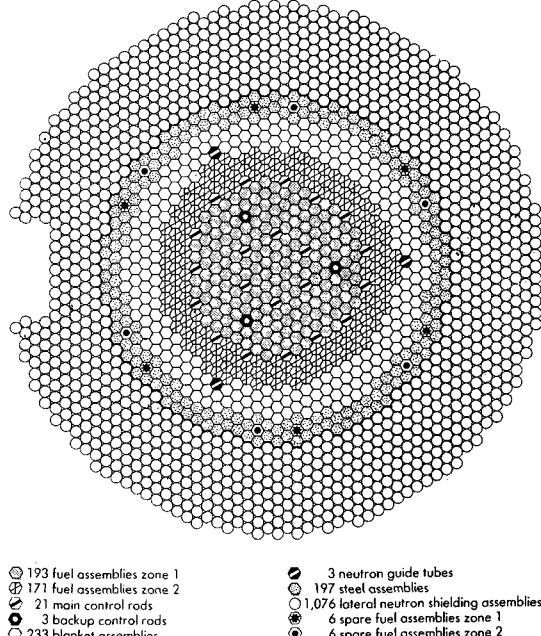
主容器의 上部에는 大小 2個의 回轉 플러그와 덮개가 있다. 이들은 生體放射線遮蔽을 兼하고 있으며 덮개는 1次系統機器 全部를 매달고 있다. 2個의 回轉플러그는 内部容器의 上部에 있으며 直徑이 각각 12.8m, 7.8m이다. 그림에는 또한 制御棒驅動裝置, 爐心上部 덮개를 圖示하고 있다. 이것은 各燃料集合體의 出口溫度測定裝置와 破損燃料位置檢出裝置로 構成되어 있는 爐心計測裝置를 받치고 있다.

〈그림 2〉 原 子 爐

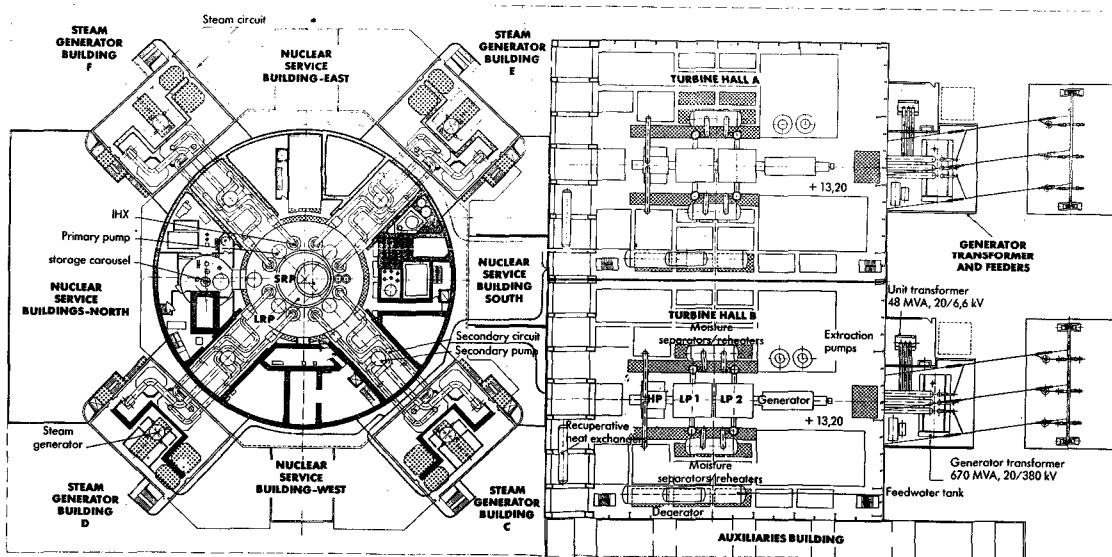


原子爐의 爐心部는 그림3과 같다. 燃料領域은 出力平坦化를 이루기 위한 2領域爐心을 채택하고 있다. 燃料領域주변에는 블랭킷(增殖部)領域이 있고 그밖으로 스텐레스 스틸棒으로 꾸며져 있는 反射體領域이 있다. 이 反射體領域밖에는 中性子遮蔽領域을 設置하였다. 制御棒은 3個의 獨立된 系統으로 되어 있다. 10個와 11

〈그림 3〉 爐心燃料配置圖



〈그림 4〉 水 平 斷 面 圖



個로 이루어져 있는 制御와 安全棒으로 쓰이는 系統과 後備爐停止系統으로 쓰이는 3個의 소세이지型 爐停止棒系統이 그것이다.

爐心燃料集合體는 對面距離가 173mm인 6角形의 나팔管속에 271個의 燃料棒이 三角格子로 配列되고 있다. 集合體의 길이는 5.4m이다. 半徑方向블랭키트集合體는 爐心燃料集合體와 같은 나팔管속에 블랭키트燃料 91個가 들어있다. 爐心核燃料棒은 316스텐레스 스틸被覆管으로 全長 2.7m, 外徑이 8.5mm이다. 中央에 混合酸化物燃料펠릿이 1m 들어있고 그 上下에 각 30cm씩 劣化우라늄으로된 酸化物블랭키트를 裝填하였다. 제일 上部에는 스프링이, 下부에는 氣體狀 核分裂生成物保持用플레넘이 85cm씩 있다. 블랭키트燃料는 全長 1.94m, 外徑이 15.8mm로 그안에 劣化우라늄펠릿이 裝填되어 있다. 爐心燃料棒, 블랭키트燃料棒 모두 코일을 감듯 Spacer Wire로 감아서 6角形 나팔管속에 넣음으로써 冷却材流路를 確保하고 있다.

冷却系統은 그림4에서 보는 바와 같이 4個의 루프로 構成되어 있다. 1次系統, 2次系統 主要機器들의 運轉條件들은 表1에서 본 바와 같다. 全長19m, 外徑2.5m인 中間熱交換器의 热交換部는 길이가 6.5m로 热交換面積 1,300m<sup>2</sup>의 平行向流型이다. 蒸氣發生器는 그림5와 같이 貫流유니트型으로 높이는 25m, 外徑은 3m이다. 나선型으로 감겨 있는 多數의 투브다발사이를 물이 下部로부터 들어와 上부에서 蒸氣로 되어 나간다. 나트륨은 上部로부터 들어와서 分配室을 흘러 下部로 흘러 나간다. 투브의 數는 357個, 길이는 87m로 热交換面積은 約 2,700m<sup>2</sup>이다.

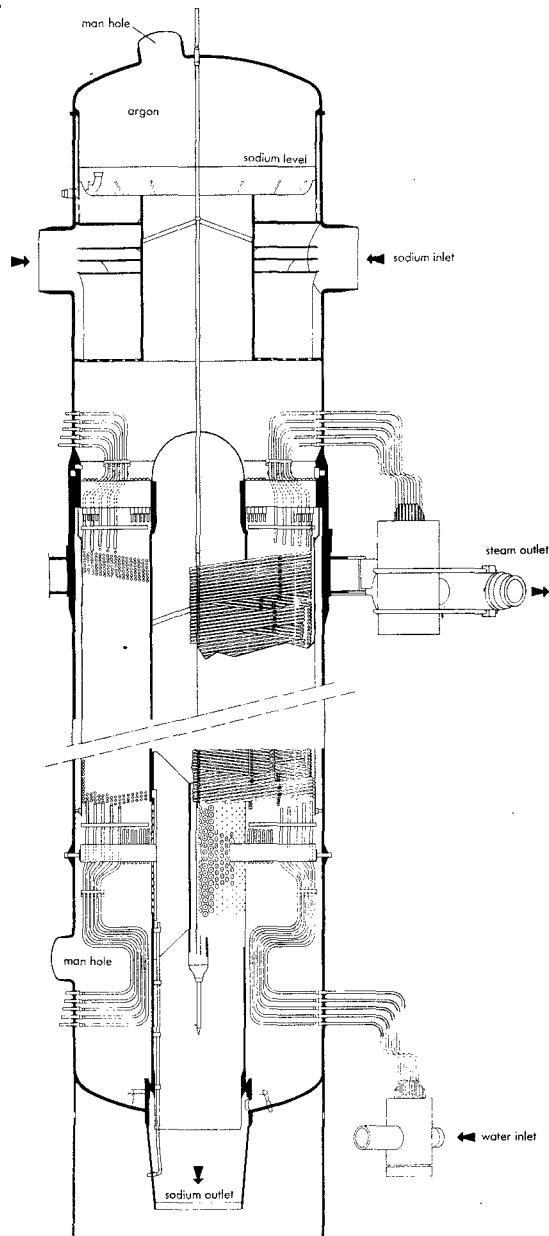
補助冷却系統으로는 물-蒸氣系統을 전혀 쓸 수 없는 境遇을 對備하여 2次系統으로부터 分岐하여 나트륨-空氣의 热交換器가 設置되어 있다. 또한 追加로 이 4個의 2次系統도 利用될 수 없는 境遇도 對備하여 2個의 崩壞熱除去系統을 準備시켜 놓았다.

하나는 原子爐 Cavity壁에 設置되어 있는 冷却水系統으로서 原子爐容器에서 輻射熱로 放出

되는 热을 吸收함으로써 原子爐系統을 冷却시키는 設備이며 또 하나는 爐內로부터 直接 热을 除去하는 4個의 獨立된, 自然對流에 依하여 動力이 없어도 冷却力を 發揮할 수 있는 나트륨-나트륨 热交換器와 爐容器밖의 나트륨-空氣 热交換器, 電磁펌프로 構成되어 있는 非常冷却系統이다.

燃料交換機構는 그림1에서 본 바와 같이 回轉

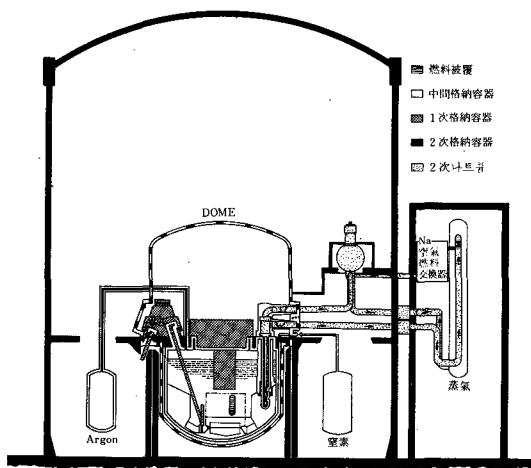
〈그림 5〉 蒸氣發生器



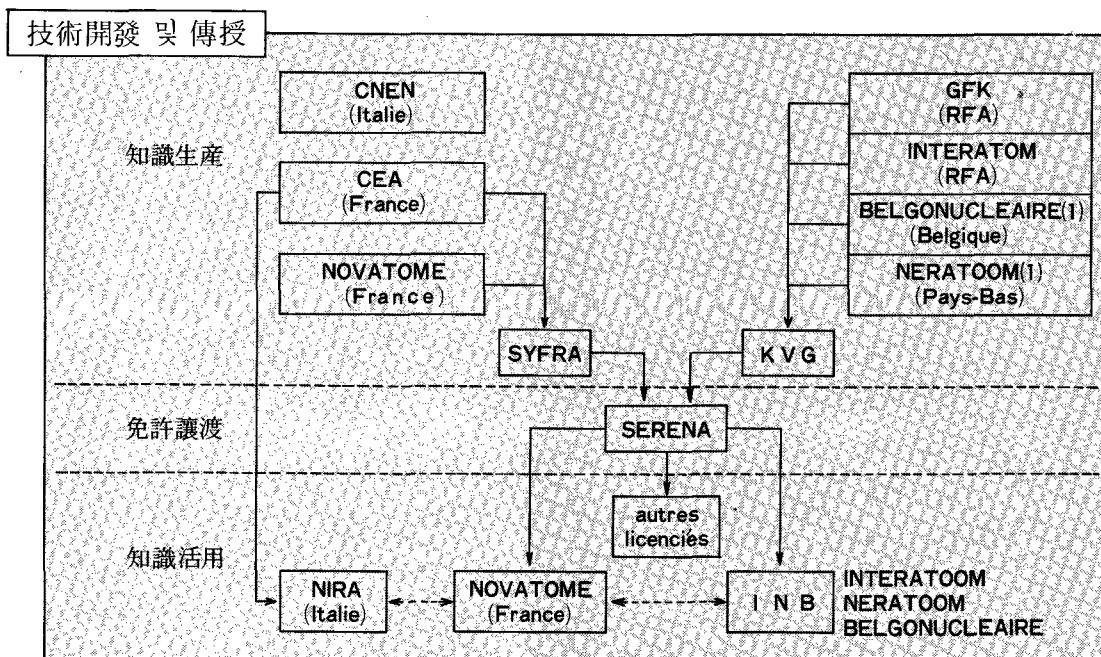
플러그위에 設置되어 있는 燃料交換器로 爐心의 燃料를 爐內의 中繼室로 옮긴다. 燃料는 여기서부터 燃料移送器에 依하여 回轉交換器로 보내진 다음 殘存放射能이 減衰할 때까지 기다렸다가 外部로 실려 나가게 된다. 새 燃料의 裝填은 위의 逆過程으로 爐內 爐心에 裝填한다.

格納系統은 3重概念을 採擇하고 있으며 그림6에서 볼 수 있듯이 中間格納系統으로 主容器

〈그림 6〉 格納容器斷面圖



〈그림 7〉 技術集團의 組織



와 上部덮개가 있다. 이들은 正常運轉時에는 1次나트륨과 아르곤가스를 格納하는 역할을 맡고 있다. 다음 1次格納系統으로 安全容器와 둠(Dome)이 있어 이들은 事故時 中間格納系統으로부터 漏出되어 나오는 放射能을 格納하는 역할을 맡으며, 同時に 2次系統의 나트륨火災가 爐上部 덮개까지 퍼지는 것을 막는다. 그 밖으로는 콘크리트 原子爐 建物이 있어 内部를 負壓으로 維持하고 있다. 原子爐建物은 높이 80m이고 内徑이 64m되는 圓筒形建物이다.

### Super Phenix建設事業

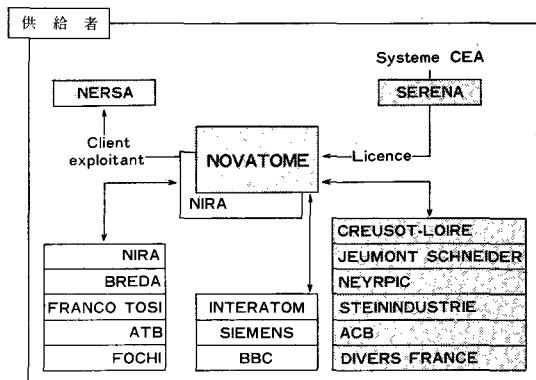
프랑스의 EdF 51%, 이탈리아 ENEL 33%, 서독, 네덜란드, 벨기에, 영국 合作의 SBK 16%로 構成되어 있는 電力會社 NERSA가 프랑스, 이탈리아, 서독 Consortium會社 NOVATOM-NIRAS · INB에 Turn-Key契約方式으로 發注하여 建設中에 있다.

開發·試製品的 性格이 全部인 이 巨大한 事業을 遂行하기 為하여 프랑스가 채택한 基本指針은 完工年月日을 凍結한다는 것이다. 따라서 이 事業의 모든 段階에서 이 目標期日을 지킬

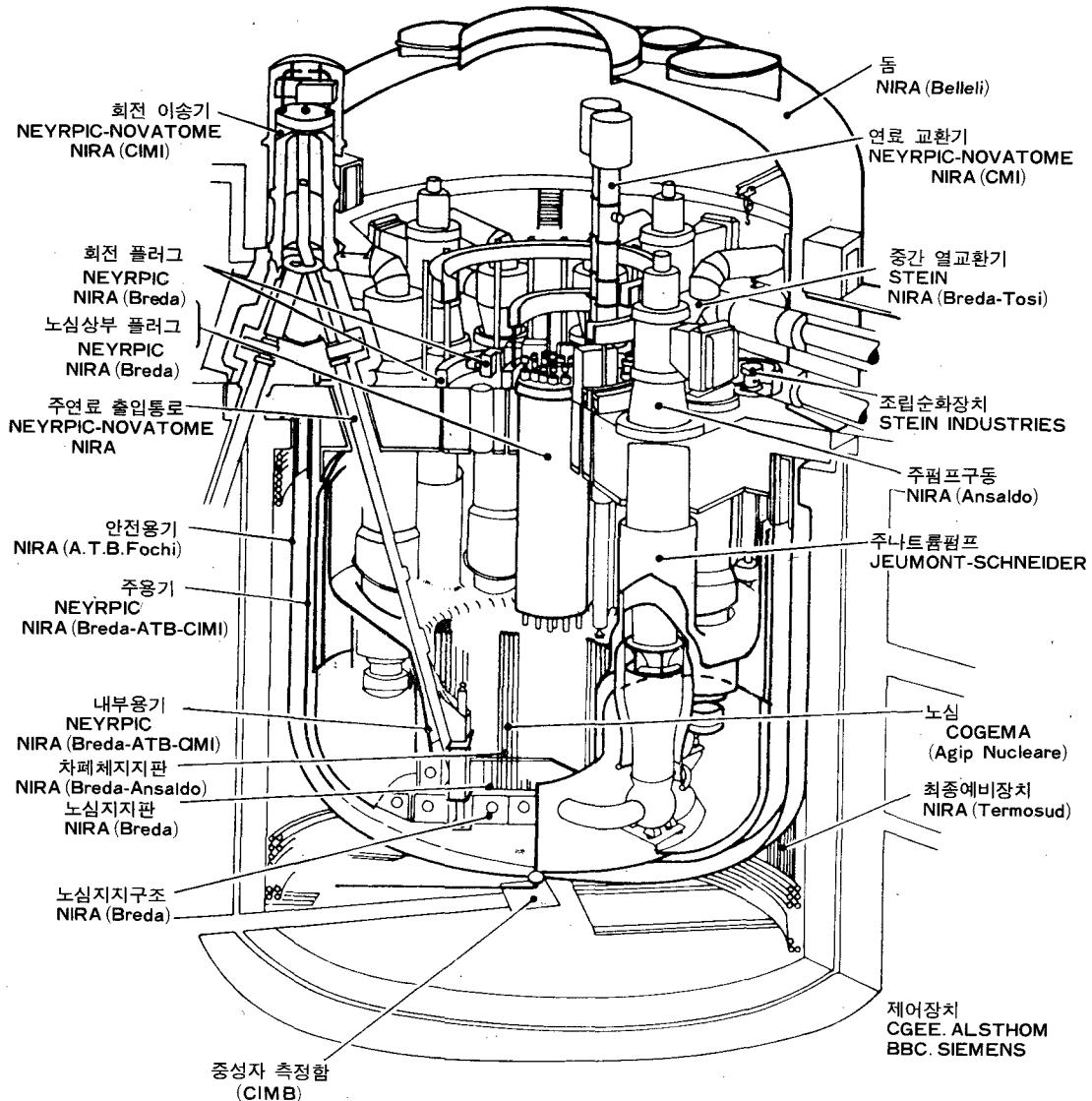
수 있는範圍內에서最善을 다한다.

이를遂行하기爲하여強力한技術集團을그림7과같이構築하였다. 유럽의大部分이參加하는頭腦集團에서生產된know-how,know why는技術풀인SERENA에모이게된다. 이SERENA에加入한業體는Super Phenix事業에쓰이는機資材生產에SERENA를技術을利用하면서參與하게된다. 또한生產過程에서언어지는새로운know-how는또다시SERENA풀에모아져서改正·再活用이되는制度的裝

〈그림 8〉供給者の組織



〈그림 9〉 Super-Phenix기관의 주요부품 가공



置로 되어 있다.

供給者로는 그림8과 같이 主契約者로 NOV-ATOM-NIRA가 되어, 이에의 參加業體는 유럽全域에 걸치는 巨大한 產業組織을 構成하였다.

作業分担은 그림9와 그림10에서 보는바와 같아 각 機資材別로 分担하였다. 各國의 作業量 할당은 NERSA에 出資한 比率이 自國의 作業으로 發注되도록 할당되었다.

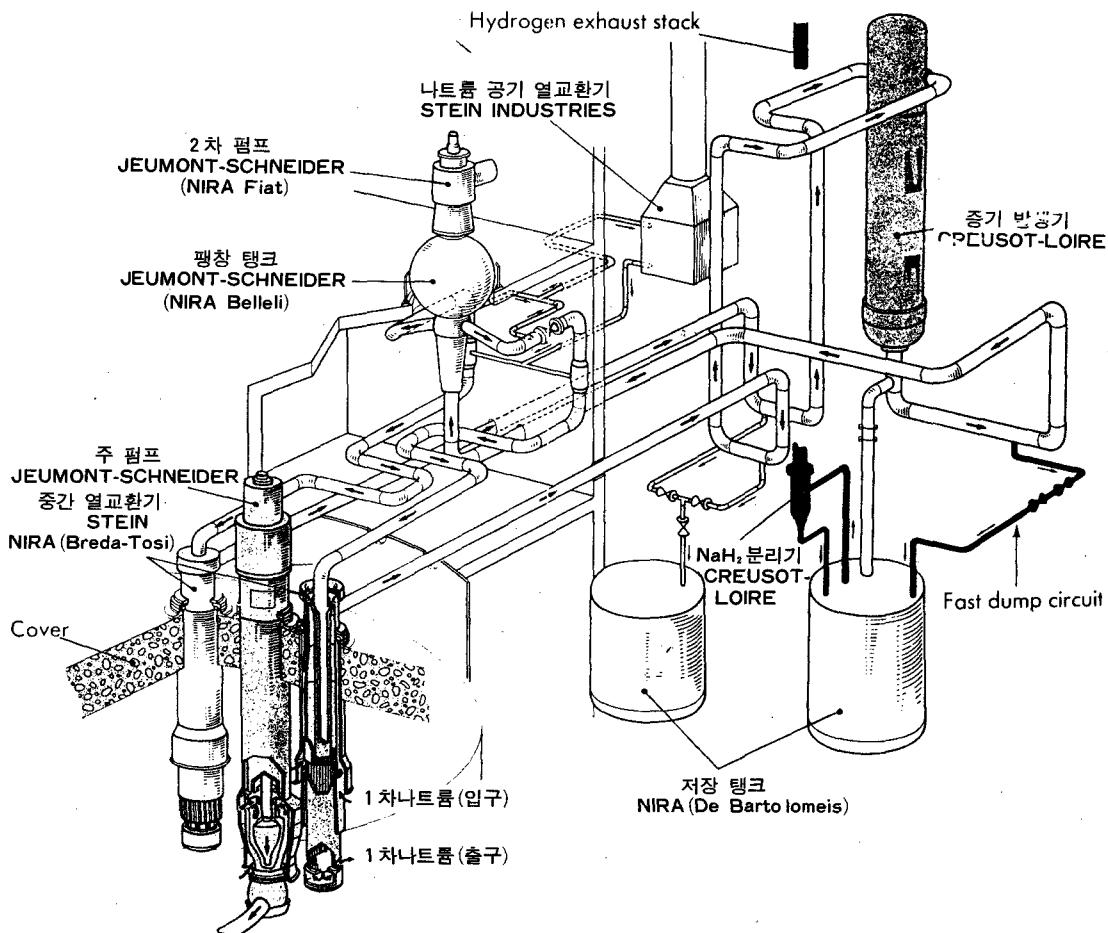
이와 같은 發注方式은 競爭原理를 活用못하여 Super Phenix의 建設費를 높이는 結果를 갖어 왔으나 危險分散을 하며 各國으로 하여금 新技術에 接할 수 있는 機會를 均等히 주고 다른

側面으로는 유럽內에 Super Phenix市場을 共同으로 開拓한다는 長點을 낳게 되어 結果的으로 큰 成果를 거둔 事業遂行方式이라고 할 수 있다.

이들이 採擇한 建設 Schedule은 그림11과 같으며 完工年月日 基準 15個月의 遲延으로 進行되고 있다.

建設地가 프랑스이기 때문에 當然히 그림12와 같은 프랑스의 認許可體制下에서 安全審查와 建設許可를 받게 되었으며 表2와 같은 安全審查項目으로 그림13과 같은 日程을 要하여 建設·運轉許可를 取得하고 있다.

(그림 10) Super-Phenix中間熱交換系統의 加工



업무는 1976년 12월에 시작했다. 주요일정표는 다음과 같다.

- 물을 제외한 원자로 건물 : 1980년 초
- 안전용기장치 : 1980년 3월
- 나트륨 주입 시작 : 1981년 초
- 연료집합체 장전 시작 : 1982년 1월
- 나트륨 충만 : 1983년 중순
- 장전 : 1983년 초
- 종료 : 1983년
- 상업가동 : 1983년 말

## 建設過程에서 얻어진 事項

모든 것이 完成될 때까지는 實證爐의 建設은 늦춘다는 原則下에 高速增殖爐開發計劃을 推進하여 몇개의 實驗爐, 大型試驗爐의 建設까지 達成한 미국과는 對照的으로 Super Phenix 開發 그룹은 주어진 期日를 지킬 수 있도록 最善을 다하는 Step By Step 方式으로 Rhapsodie, Rhapsodie-Fortissimo, Phenix, Super Phenix 를 한 치의 跛跌도 없이 計劃을 遂行하여 왔다.

그렇다고 소홀히 다루는 것이 아니라 마지막 戰爭터와 같은 緊迫感과 成就動機의 不斷한 投與로 事業을 推進하고 이를 지켜보는 一般國民은 自國의 자랑으로 이 事業을 支援하게 되고 이 뜻을 받아 政權擔當者는 이 事業을 積極 推進하는 雾圍氣가 自然的으로 造成되어 오늘에 이르렀다고 할 수 있다.

무엇인가 되어 간다는 認識을 納稅者에게 심어 준다는 것이 事業成功의 열쇠였다고 할 수 있다.

其間 이들이 겪은 試鍊과 이를 克服하여 나간

슬기들을 몇 가지 기술적 사항들의 예를 들면서 살펴보면 着工時에는 미처考慮치 못한 耐震設計가 建設이 進步됨에 따라 構造上의 缺陷으로 나타나기 始作한 것이 比較的 初期에 當面한 問題들이며

○ 自然振動數가 地震時의 共鳴피크에 너무 近接함을 알게 되어 中間熱交換器 支持構造의 再設計,

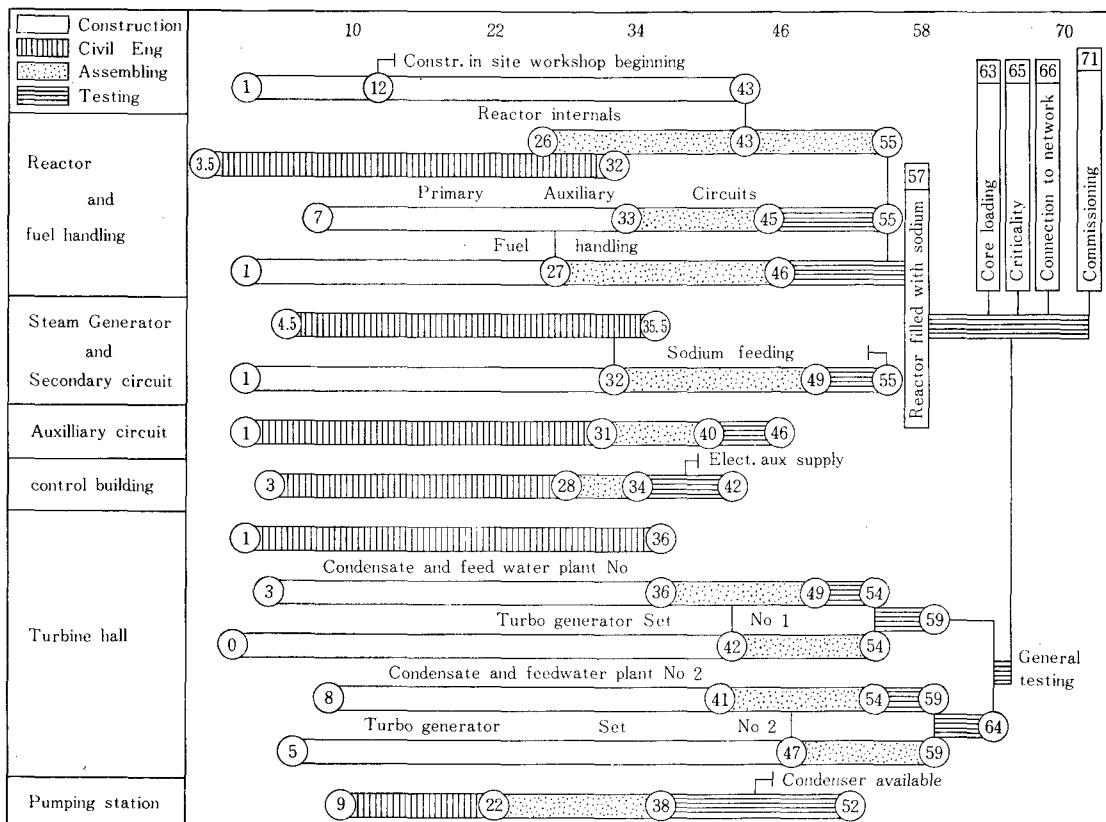
○ 薄殼構造로 되어 있는 核燃料貯藏탱크 熔接部位에 超音波検査를 위한 接近이 容易토록 再設計,

○ 爐心上部 Cover Plug에서 耐震設計와 耐熱衝擊特性 兩立을 為한 Bottom의 斷熱面 샌드 위치方式에 依한 再設計,

○ 모든 機材의 Snubber 등 支持物에 依한 補強用空間確保 등을 들 수 있다.

大部分의 境遇 簡單한 解析法을 使用하는 Computer Code로는 機械設計의 바른 評價가 困難하다. 特히 機械的, 热的 負荷의 効果를 바르

〈그림 11〉 Construction Schedule



게 다루기 위하여 非彈性歪力解析이 必要 不可缺하다.

○熱交換器의 Tube Plate와 Shell의 接合部位의 歪力解析,

○高温의 나트륨이 담기는 機器나 原子爐容器에서의 不安定性,

○1976年 Phenix의 中間熱交換器에서 發生된 故障으로 알게 된 Tube Bundle 内에서의 나트륨 流量과 温度分布解析 및 層流現象解析 등이 急하게 解決하여야 할 問題들이었다.

熔接技術 이것 또한 많은 問題를 起起시켰던 技術이었다.

○Boron含有스틸의 熔接時 에너지가 큰 境遇에는 Ferrite領域에 Boron이 析出하여 Micro Cracking의 原因이 된다는 것을 建設作業中에 알게 되었으며 그때까지 使用하던 自動熔接機를 마일더한 에너지의 熔接機로 開發·使用,

○最終的인 热處理에 앞서 油成分의 除去가 不充分한 투브의返品,

○Butt용접에 依한 變形으로 40%의 투브가 設計規格을 充足치 못하여返品等의 事態가 여러 번 發生하였다.

蒸氣發生器의 發注時까지는 투브材質로서의 Alloy 800의 物理的, 機械的 特性이 밝혀져 있지 않았기 때문에 이들材質의 Creep Limit 가 實際의 값보다 높게 되어 있었다. 이들의 特性

이 밝혀짐에 따라 티타늄이나 알미늄과 같은 微量 element의 影響이 意外로 크다는 것을 알게 되어 이들의 管理가 徹底한 生產工程에서 만들어진 투브를 찾아야 하게 되었다.

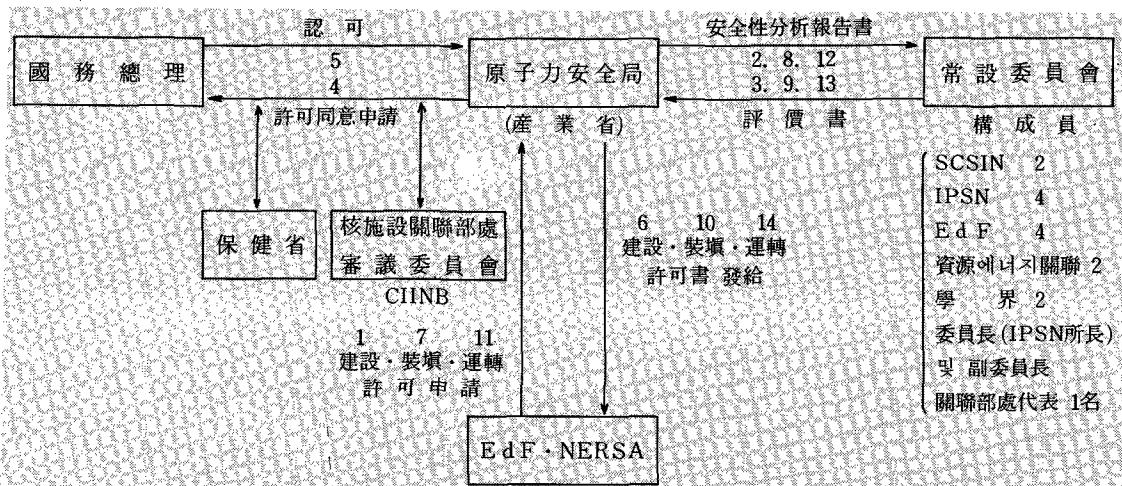
初期設計가운데 가장 널리 알려진 뼈아픈 失敗는 圓筒形 格納容器의 採擇이다. 機器設置作業을 위한 充分한 空間確保가 어려웠고, 가장 큰 어려움은 Polar Crane을 設置할 수 밖에 없어 重量物의 操作에 많은 困難을 겪었고 結局 이것이 1年餘에 걸친 作業의 遲延을 招來한 主原因이 되었다.

土木工事의 發注時에는 機器의 詳細設計나 標準化가 이루어져 있지 못하였기 때문에 앙카볼트, 페니트레이션 位置의 未定으로 適期에 土木工事 擔當業體로부터 据置擔當業體로의 作業引

〈表 2〉 常設委員會 主要評價內容

承認項目	條件附 承認項目
1.1次冷却系統의 품概念	1.主要部品의 安全等級
2.3重防禦概念의 原子爐容器	2.나트륨밸브 및 運轉停止系統의 信賴度
3.運轉停止系統의 多重性	3.技能喪失事故의 傳播可能性
4.爐心監視系統	4.爐心事故의 詳細解析
5.爐心設計	5.Na火災防止手段
6.非常冷却系統	6.S/G管破損傳播可能性
7.爐心事故解析	7.運轉員·從事者被曝線量低減對策
8.發電所立地	8.使用後核燃料施設 詳細設計

〈그림12〉 프랑스 高速炉 認許可体制



繼가圓滑치 못하여 이 또한工期遲延의原因이 되었다.

Super Phenix建設工期遲延의主原因이 이와 같이現場作業에서發生된現實的인問題點이었지假想事故의對備策을提示하라는等의추상적인問題가 아니었다는것이Super Phenix의主要特徵中의하나이다.

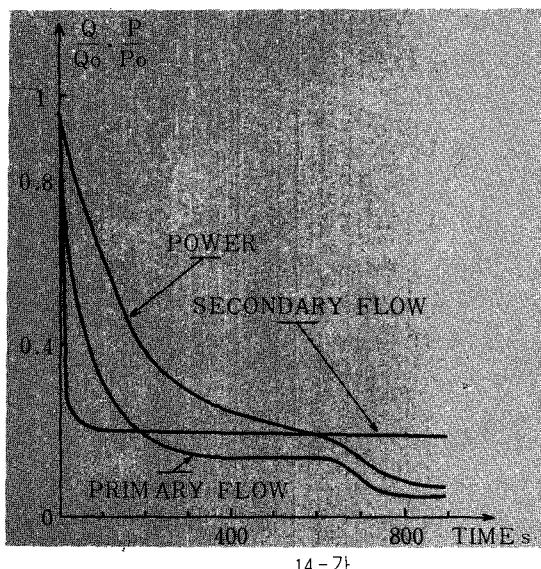
또하나Super Phenix의建設方法에서빼놓을수없는것이現場組立方式의採擇이다. 많은나라의事業者들이主契約者와가까이있어呼吸을같이하며作業擔當者は全建設工程을

〈그림13〉認許可目程

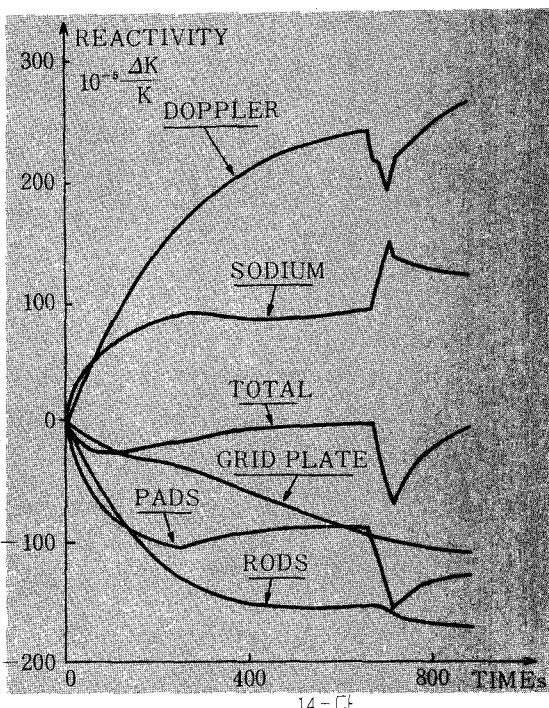
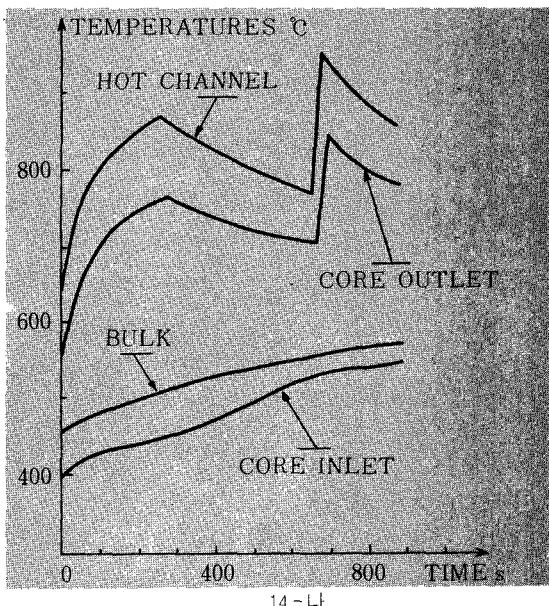
年度	09-'75	常設委員會評價書提出
共益事業申告	-8-'76	CIINB同意書提出
用水使用許可	-7-'77	保健省長官同意書提出 建設許可書發給 発電所建設
12-'72 安全性基準制定		
11-'73 EdF에安全性基準傳達	0-'84	暫定安全性分析報告書提出 核燃料裝填 運轉
10-'74 NERSA建設許可申請		
09-'75豫備安全性分析報告書提出	+1-'85	最終安全性分析報告書提出

〈그림14〉LOSS OF POWER SUPPLY WITHOUT SCFAM

- 가: Flow and power output
- 나: Temperatures
- 다: Reactivity



몸으로느끼면서作業을하게되어一體感을造成하였다는것과여러나라사람들이여러가지言語,여러가지工業基準 및熟練度의差異를갖고作業을할때千聞이不如一見이라고建設現場에서工程을보며作業을하였다는것이크게貢獻을하게된것이다.



그러나 무엇보다도 오늘날까지의 成功에 決定的 貢獻을 한 것으로는 餘他 開發國이 주저하고 있는 동안에 高速增殖爐의 仮想重大事故인 仮想爐心崩壞事故에 能動的으로 對處하여 나감으로써 이 事故를 設計基準事故로부터 除外시킬 수 있도록 한 研究開發의 成果를 들 수 있다.

### Super Phenix의 安全性確保

爐心을 包含한 1次系統 모두를 하나의 탱크속에 受容하는 탱크型을 採擇하고 있었기 때문에 3,500톤이 넘는 1次系統 冷却材와 이보다 무거운 全體 構造物의 重量이 热容量의 增大를 가져와 热慣性이 큰 시스템을 構成하고 있어 急激한 温度變化를 하지 않는 特性을 지닌다. 뿐만 아니라 高速爐에서는 爐心部의 張弛으로 密度減小를 가져오면 出力を 낮추는 特性을一般的으로 가지고 있다.

Super Phenix에서는 이 特性을 最大로 살려서 發熱과 冷却의 균형이 깨져 爐心의 温度가 上昇하면 核燃料支持板의 半徑 方向으로의 張弛를 誘發하여 出力を 낮추는 特性(Diagrid Expansion)이 나타나도록 設計하고 또한 爐心上部의 温度上昇幅이 下端보다 커짐을 利用, 爐心上端부가 下端부 보다 크게 變形되는 Pad 設計를

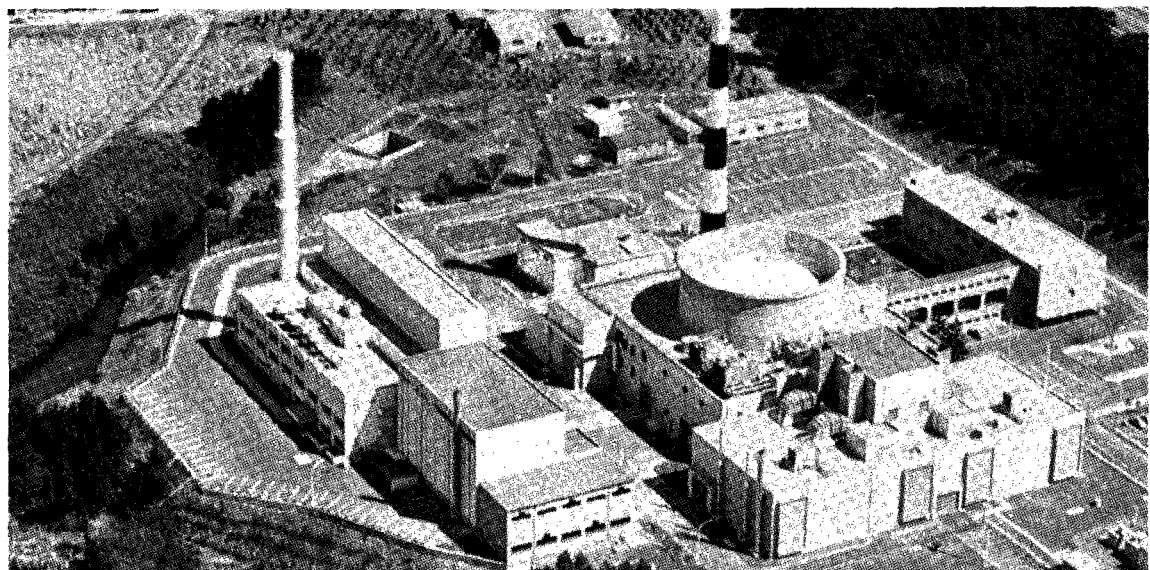
채용함으로써 密度減少效果에 依한 出力降下效果를 能動的으로 導入하였다. 뿐만 아니라 탱크型 原子爐에서는 制御棒驅動裝置와 制御棒支持機構가 爐心上部에 있어 温度上昇의 影響을 제일 먼저 받게 되어 제일 먼저 늘어나게 된다.

이에 比하여 原子爐爐心은 原子爐容器에 얹혀져 있고 이것의 温度上昇이 제일 늦기 때문에 結果的으로는 制御棒과 爐心의 相對的 位置가 變化하여 制御棒을 爐心에 插入한 效果를 낳게 된다.

高速增殖爐仮想重大事故로 想定하여 研究하고 있는 電源喪失에 依한 冷却能力減少와 同時に 自動爐停止系統의 作動失敗가 겹쳤을 경우의 各種 特性 등의 變化를 그림14의 가, 나, 다에 圖示하였다.

여기서 알 수 있는 重要한 特性은 앞서 記述한 效果들에 依하여 그림14의 가에서 볼 수 있듯이 出力이 自動的으로 減少한다는것과 그림14의 나에서 Hot Channel의 温度가 冷却材인 나트륨의 비등점인 887°C에 이르는 데까지 300餘秒의 時間的餘裕가 있음을 알려주는 일이다. 原子爐의 自動停止機能이 作動失敗한 境遇인데도 不拘하고 運轉員이 다음 行動을 取할 수 있는

〈日本의 實驗高速 增殖爐 JOYO의 全景〉



이러한 時間的 餘裕가 있는 것이다.

그러나 Super Phenix는 이에 두가지 機能을 더 첨가하였다. 그 하나는 세개의 Intrinsic Safe Shutdown System을 導入한 것이다. 또 다른 하나는 나트륨-나트륨 热交換器를 爐心部에 直接 設置하고, 나트륨-空氣 热交換器와 電磁閥

프를 連絡하여 崩壊熱除去系統을 構成하였으며 自然對流에 依한 爐心冷却能力을 補強한 것이다.

Intrinsic Safe Shutdown System이란 두가지 特性을 지니게 하여 相互補完의으로 原子爐의 自動停止機能을 強化, 完全 無缺點 것으로 하였다. 그 하나는 制御棒을 잡고 있는 電磁石

〈表3〉 世界의 試驗爐와 實驗爐概要

	EBR-II (美國)	SEFOR (美國)	FFTF (美國)	BOR-60 (소련)	BR-5 (소련)	DFR (英國)	Rapsodie (프랑스)	KNK-2 (西獨) (이탈리아)	PEC (이탈리아)	常陽 (日本)
熱出力(MW)	62.5	20	400	60	5	60	20	58	130	100(75)
電氣出力(MW)	20	—	—	12	—	15	—	21.35	—	—
建 設	1963.11臨界	1969.5臨界	1980臨界	1969臨界	1958.6臨界	1959.8臨界	1967.2臨界	1971.8臨界	1978臨界	1977臨界
運轉中	閉鎖中	運轉中	運轉中	運轉中	運轉中	1977年閉鎖	運轉中	運轉中	建設中	—
爐構造	TANK型	LOOP型	LOOP型	LOOP型	LOOP型	LOOP型	LOOP型	LOOP型	LOOP型	LOOP型
크기D(cm)	48.3	84.5	122	41	28	53	38.8	82	77	73
크기H(cm)	36.1	91	91.5	40	28	53	34	60	90	60
爐心燃料	U-Fiss合金 Na充填	UO <sub>2</sub> +PuO <sub>2</sub> He充填	18~26w/ oPuO <sub>2</sub> 74~ 82w/oUO <sub>2</sub> He充填	UO <sub>2</sub> +PuO <sub>2</sub>	PuO <sub>2</sub> NaK充填	30%濃縮 우라늄 (中空)	UO <sub>2</sub> +PuO <sub>2</sub> He充填	UO <sub>2</sub> 濃縮우라늄 酸化物 He充填	82UO <sub>2</sub> + 18PuO <sub>2</sub>	—
Pellet外徑(mm)	3.72	24.2	4.95		4.07	外徑1.77 內徑0.80	5.72	8.7	外徑5.9 內徑1.7	5.5
被覆管内厚(mm)	0.23	1	0.38	0.4	0.4	外管 外徑1.88 內徑1.78	0.49	0.3	0.4	0.35
被覆管外徑(mm)	4.42		5.85		5.07	內管 外徑0.74 內徑0.64	6.7		6.8	6.3
濃縮度(%)	49	18.7	22/26						33	
燃燒度(MWD/T)	24,000		45,000		65,000		25,000	10,000		25,023
燃料最高溫度(℃)		2,750	2,330			840	2,000/2,180	2,055	2,340	2,330
被覆材最高溫度(℃)		650	665	800	600	680	590	580	542	
1次Na入口溫度(℃)	~372	371	425	360~450	430	230	250	361		370
1次Na出口溫度(℃)	~482	437	559	600	500	330	340	551		468
2次Na入口溫度(℃)	~322	288			370		220			350
2次Na出口溫度(℃)	~472	354			470		310			450
線出力平均(W/cm)	230	180	240	350		350	260/310		400	234
出力密度平均(kW/l)	860	377	460	750	400	900	430/770	51		279
制御棒材料		Ni反射體		B <sub>4</sub> C	B <sub>4</sub> C	B <sub>4</sub> C	B <sub>4</sub> C	B <sub>4</sub> C	B <sub>4</sub> C	B <sub>4</sub> C
本數	調整棒12 安全棒2	微調整2 粗調整8		7	18	12	6	7	11~12	
增殖率	—	—	—	1.50(Pu)			1.11			1.0
1次系pump台數	2	1	3	2	6	24	2	2	2	2
燃料取扱系概要	Under the plug固定 Arm	Hot Cell 原子爐 頂蓋 開閉方式	Under the plug爐上 部機構 分割方式	回轉plug- Arm方式 경사Elev- ator方式	二重回轉plug 直動方式	二重回轉plug 直動方式	二重回轉plug 直動方式	二重回轉plug 直動方式	二重回轉plug 直動方式	二重回轉plug 直動方式

을 特殊合金으로 製造하여 爐心의 温度가 700°C에 이르면 Curie Point를 지나 電磁石으로서의 機能을 衰失하여 制御棒이 自動 落下토록 한 것이며, 이 制御棒을 소세이지型 3段으로 만들어 Universal Joine機能을 갖는 마디로 速絡함으로써 地震 等에 依하여 制御棒案内管이 그의 直線性을 잃더라도 制御棒의 落下에 支障을 招來치 않도록 한 것이다.

世界各國의 開發段階

高速增殖爐의 開發도 다른 型의 原子爐의 開發과 같이 普通 다음과 같은 段階로 行하여진다.  
우선 첫째 단계로 臨界實驗裝置에 依한 核的 特性의 研究開發, 나트륨루프에 依한 나트륨冷却材의 傳熱, 流動實驗, 模擬實驗에 依한 部品, 機資材 및 核燃料材料 等의 開發이 行하여진다.  
때에 따라서는 強力한 中性子源을 얻기 爲하여  
高速中性子源爐라는 特殊目的의 原子爐가 建造되기도 한다.

이를 土臺로 둘째 段階인 高速實驗爐의 設計, 建設, 運轉이 行하여진다. 이 高速實驗爐는 原子力發電所用이 아닌 原子爐로써 高速爐의 建設 및 運轉 經驗을 얻는 일과 完成後 核燃料와 原子爐 構造材의 照射實驗을 行하기 為하여 建設된다. 熱出力은 10MW로부터 100MW 程度로 建造되며 各國이 建造한 高速實驗爐의 關係資料는 表3에 整理하였다.

日本, 西獨, 美國, 이탈리아, 인도가 이 段階를 벗어났으며 日本, 西獨, 美國은 다른 段階인 原型爐建造의 具體的 事業까지 推進中에 있다.

세째段階로는 이 高速實驗爐의 經驗을 되살리면서 高速原型爐의 프로젝트가 行하여진다. 將次의 實用高速增殖爐 原子力發電所의 建設에 必要한 技術的 資料와 經濟性評價資料를 얻기 為하여 建造되어 다음의 電氣出力 1,000MW 程度의 實證爐에로의 스케일 업을 고려, 普通 電氣出力 300MW程度의 것이 建造된다. 프랑스, 영국, 소련이 이 段階를 1970年代 前半期에 넘어섰으며 일본, 西獨, 美國이 이 段階에 있는데

이를 表4에 整理하였다.

다음段階로서는 高速增殖爐의 實用化를 為하여 먼저 實證爐가 建設된다. 實證爐는 高速增殖爐의 境遇 電氣出力 1,000MW에서 1,500MW로서 高速增殖爐의 信賴性과 經濟性을 實證코자 하는 것이다. 그러나 高速增殖爐의 實用化를 為하여는 勿論 1基의 實證爐의 建設로는 不充分하여 實證爐에 이어 數基의 初期實用爐가 建設되어야 비로서 真正한 意味의 實用化가 達成된다고 생각된다.

프랑스가 實證爐의 完成段階이며 實用爐의 詳細設計를 프랑스 單獨으로 始作하였으며 소련이 着工段階 그리고 重要한 움직임은 유럽 5개국, 즉 프랑스, 서독, 벨기에, 네덜란드, 이탈리아가 프랑스의 實用爐建設에 共同參與하여 영국이 이어 新規 參加키로 決定하였으며 日本이 깊이 檢討하고 있으며 美國도 큰 關心을 보이고 있다. 表5에는 各國이 開發計劃中인 實證爐의 技術資料를 나타내었다.

〈表 4〉 世界의 高速原型爐

〈表 5〉 世界의 高速實證爐

		프 랑 스 Super Phenix	미 국 CDS	영 국 CDFR	서 독 SNR-II	소련 BN-1600
電氣出力 (發電端)	MW	1,200	1,000	1,318	1,300	1,600
“ (送電端)	MW	1,240				
熱出力	MW	3,000	2,550	3,300	3,420	4,200
爐構心造		TANK型	LOOP型	TANK型	LOOP型	TANK型
爐心		圓柱	圓柱(非均質)	圓柱	圓柱	圓柱
等價直徑 (燃料/블랭키트)	m	3.59 / 4.59	/ 5.59	(2.9 / 3.8)	4.16 / 5.08	3.35 /
높이 (燃料 /集合體)	m	1.00 / 5.4	1.02 / 5.11	(1.0 / 4.3)	0.95 /	1.0 /
爐心燃料						
毛外徑 (燃料/블랭키트)	mm	8.50 / 15.8	7.0 /	(5.8 / 13.5)	7.6 / 11.6	
被覆材		316SS	D9	(316SS)		
被覆材厚	mm	~0.4	0.37		0.5	
毛配列		三 角	三 角	(三 角)	三 角	
燃燒度						
最 大	MWD/t	70,000(第1爐心)			80,000	70,000 - 100,000
平 均	”	100,000(以後)	60,000 - 90,000	(100,000)		50,000 - 70,000
被覆材最高溫度	°C		677	670	650	
制御棒材質		B,C	B,C	B,C	B,C	
本 數		21	30	30	55	
原子爐出入口溫度	°C	545/395	510/354	540/370	540/390	550/350
出口 / 入口						
2次系IHX溫度	”	525/345	487/328	510/335	510/340	505/310
出口 / 入口						
LOOP數		4	4	4	4	4
1次系pump位置 · 數量		Cold Leg × 4	Hot Leg × 4	Cold Leg × 6	Hot Leg × 4	Cold Leg × 4
IHX臺數		8	4	8	8	
主蒸氣溫度	°C	490	452	490	490	490 - 510
壓力	kg/cm <sup>2</sup>	180	155	173	175	143
給水溫度	°C	235		(230)	250	
蒸氣發生器傳熱管型式		Helical型	Helical/直管/2重管	U Tube	直管型 or Coil型	
燃料交換系 (爐內)		二重回轉plug直動式	三重回轉plug直動式	(二重回轉plug 斜道式)	Under the Plug方式	二重回轉plug
燃料交換間隔	月	A Frame式	燃料移送Cell斜道式	(燃料移送Cell斜道式)	燃料移送 Cell 直動式	燃料移送Cell斜道式
增殖率		12	12		12	4~6
倍增時間	年	1.18	1.3	1.25	1.2 - 1.35	1.3 - 1.4
			20年以下	20		

### FFTF의 役割

지금까지는 商用高速增殖爐의 開發이라는 側面에서 實證爐에 重點을 두어 살펴 보았다.

그러나 國家의 機能이라는 側面에서 볼 때 이와는 다른 高速增殖爐 技術開發部分이 있게 된다. 原子力發電所와 같이 窮極的으로는 民需用產業技術에 있어 이의 技術開發에 있어 民間主導型의 競爭原理를 基本으로 自由市場體制를 갖는 國家에서는 이를 新規 技術開發商品이 충足시켜야 할 Code & Standard와 安全性評價能

力を完備하여야 하는 義務를 國家는 지니게 된다. 이와 같은 觀點에서 볼 때 미국의 FFTF는 高速增殖爐 開發段階에 있어 실로 重要한 役割를 담당하게 된다.

이로서 實用化 產業技術과 이의 監視 機能을 갖는 技術이 雙壁을 이루어 均衡 있는 發展을 이룩한 것이다.

이제는 各國이 共同으로 實用爐를 建造하여 經濟性 向上을 為한 努力を 할 時代가 된 것이다.