

原子力 回生の 妙藥?



趙 滿

〈韓國에너지研 · 高速爐研究室長〉

〔回 生〕

再處理, 우라늄·플루토늄混合酸化物 核燃料 成型加工工場施設 等 核燃料週期施設을 原子力 發電所敷地內에 設置하여 核擴散抵抗性을 強化 하고, 1次冷却系統과 같이 放射能을 띤 部分 모 두를 原子爐容器內에 收容할 수 있는 풀형(탱크 型)高速増殖爐를 採擇함으로써 中間熱交換系統 과 BOP를 安全系統에서 分離할 수 있게 하여 原子爐級 QA/QC를 要하는 現場作業을 大幅 減小시키고, 工場製作後 바-지船이나 鐵道에 依한 運送이 可能하고, 낮은 電力需要伸張에 適應하기 쉬운 電氣出力 13만내지 25만킬로와트級 中/小型原子爐를 모듈化(module)시켜 建設工 期를 33個月로 短縮시키는 등 最近 美國의 高 速増殖爐開發은 大變革을 이룩하고 있다.

1979年 以來 新規發注를 전혀 받지 못한 原 子力産業界가 美國에너지省의 要請으로 最近 10 年間 美國의 電力事業者, 특히 原子力發電所에 期待를 갖고 發注한 電力事業者를 困境에 處하 게 한 일들 가운데 現在 實用화된 原子力發電 技術이 갖는 缺陷에 연유된 것은 없는가에 對한 徹底한 分析을 行한 것이다.

미국은 방대한 量의 科學的, 工學的 技術資料

와 經驗을 蓄積하였으면서도 Super Phenix-I 과 같은 大型實驗爐建設面에서 10餘年 뒤쳐져 버렸다. 이를 挽回하기 위하여는 뭔가 革新的인 技術을 採擇하여 참신한 이미지를 가진 高速増 殖爐를 내놓아야 한다. 이때 先發大型爐市場에 서의 競爭보다는 中/小規模의 電力事業者가 많 은 美國 國內市場의 需要에 適應할 수 있는 高 速増殖爐의 開發이 바람직할 것이다.

産業革命의 主導國이었던 英國이 機械工業化 에서 제일 落後된 나라가 되듯 原子力時代를 開 幕한 美國이 原子力産業의 落後國이 될 수 없다 는 危機意識이 根本적인 挽回策을 강구하기에 이른 것이다.

電力會社의 規模가 작은 美國에서는 中/小型 爐가 將次的 낮은 電力伸張需要에 對處하기가 쉽다는 點을 들 수 있다.

期間의 大型化趨勢는 階段式 投入方法일 수 밖에 없어 需要曲線에 맞추기 위하여 他社와의 어려운 共同出資를 不可避하게 하였다. 또한 工 期の 長期화와 原子爐級 QA/QC를 要하는 現 場作業의 增大를 招來하였다.

工期の 長期化는, 工期遲延에 따라 膨大한 金 利가 電力會社의 資金負擔을 크게 壓迫하고 投

資額の増資が不可避하며 小額出資者が 많은 電力會社에서도 資金動員力の 限界를 넘는 것이 었다. 뿐만 아니라 資金의 回收期間도 長期化 하고 長期需要豫測의 어려움이 企業性을 더욱 不安하게 한다.

특히 原子力設備과 같이 社會的流動性에 敏感한 投資는 에너지政策, 保障措置, 環境問題, 工業技術力, 地域住民의 受用力, TMI事故후와 같은 世界的 連帶性을 갖는 規制의 強化 등을 勘案하여야 하고 이것은 工期가 長期化하면 할 수록 建設事業에 蹉跌을 가져올 危險性을 增大시키고 境遇에 따라서는 電力會社로써 감당하기 어려운 處地에 놓여 수수방관 時期를 기다릴 수 밖에 없게 만든 적이 한 두번이 아니었다. 또한 立地地域住民의 意識變化와 地方政府의 政爭에 影響받을 危險性도 增大되었다.

現場에서 製作建設하는 部分의 物價上昇率이 터빈發電機와 같이 工場에서 製作組立되는 部分에 比하여 월등히 높다는 것이 밝혀진 現場作業量의 增大는 未熟練作業者의 大量投入과 長期化를 수반하고 地域社會와의 摩擦危險을 크게 하고 있었다.

酷寒, 暴雪, 暴雨, 異常乾燥 第 自然環境에 따른 作業環境의 變化, 自動化되고 잘 整備된 工場施設을 利用하지 못하는데서 오는 作業의 非能率 등이 原子爐級 QA/QC를 要하는 作業을 어렵게 만들고 이것이 또다시 工期의 遲延을 가져온 것들이 主要要因으로 作用하고 있었다.

또한 完工 後에도 定期檢査와 補修를 위하여 放射能汚染地域에서의 作業을 不可避하도록 하는 現在 實用爐는 放射線區域從事者의 被曝線量 增大를 가져와 갖은 爭議에 시달리게 만들었다.

이와 같은 分析을 土台로 하여 4個 原子力機 資材製作社와 7個엔지니어링會社가 作成提出한 設計가운데 美 에너지省이 採擇한 開發支援 議題는 前述한 15~35만 전기출력, 폴型 高速增 殖爐를 모듈화하여 工場製作後 바-지船이나

鐵道로 運送하였다가 通常의 工業規格으로 製作된 中間熱交換器와 BOP를 現場設置하는, GE社의 PRISM (Power Reactor Inherently Safe Module)爐와 Rockwell International社의 SAFR (Sodium Advanced Fast Reactor)爐이다.

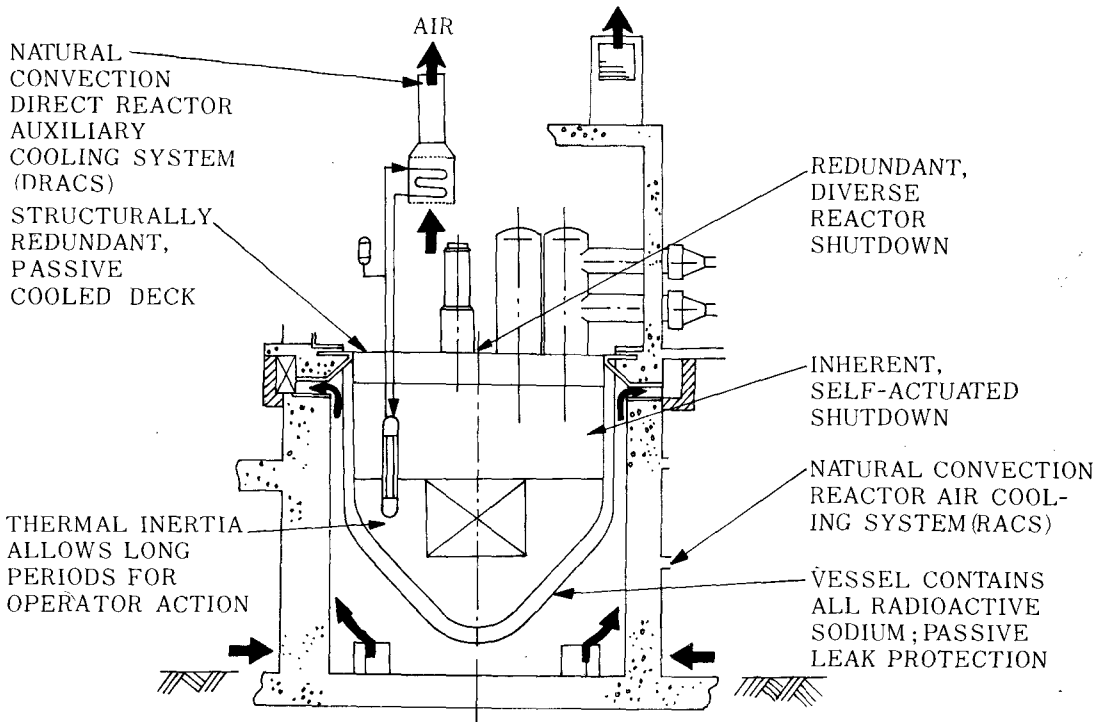
Rockwell社의 設計를 中心으로 살펴보면,

SAFR爐는 35萬KWe의 中型모듈을 基本單位로 하여 이것을 複數基設置하므로써 必要한 發電所容量을 얻도록 하고 있다. 또한 使用後核燃料의 再處理施設과 플루토늄核燃料成型加工工場, 廢棄物工場도 부지내에 收容하고 있다.

하나의 Power Pak은 35萬KWe의 出力을 갖는 原子爐모듈 하나와 2個의 Induser Pump, 4個의 中間熱交換器, 2個의 Rockwell社 特有的 Booster tube, Hockey stick 蒸氣發生器로 이루어져 있다. 爐心은 EBR-II에서 使用되어 安全性과 經濟性이 立證된 金屬核燃料과 混合核燃料中 選擇하여 使用할 수 있게 되어있다.

中間熱交換系統과 BOP를 安全系에서 分離시킬 수 있었던 것은 高沸騰點, 底蒸氣, 강한 自然對流特性을 갖는 나트륨特性을 最大로 살린 폴型爐를 採擇하였기 때문이다. 더우기 그림 1에서 볼 수 있는 바와 같이 Super Phenix-I, II 등 유럽의 폴型高速爐에서 널리 채택되고 있는, 스텐레스스틸 原子爐容器와 安全容器 壁面에서 일어나는 熱輻射放出에 의한 冷却效果를 利用한 RACS (Reactor Air Cooling decay heat removal System)과 나트륨熱交換器를 直接 原子爐容器에 넣어주고 이것과 外部空氣冷却式 冷熱交換器를 直結한 DRACS (Natural Conection Direct Reactor Auxiliary Cooling System)을 積極 導入하여 過渡時 熱衝擊을 완화하고 爐停止時 崩壞熱 除去機能을 갖도록 한 靜的 (Passive) 安全特性을 具備하고 있는 것이다. 또한 原子爐 停止系統에도 Super Phenix에서 채택되기 始作한 Curie 熱이 700℃内外가 되는 特殊合金으로 爐緊急停止 棒를 保持하고 있는 電磁石을 製作하여 原子爐

(그림 1) Power Pak Elevation



냉각材溫度가 740°C가 넘으면 自動落下하여 原子爐를 緊急停止시키는 SASS (Self Actuated Shutdown System) 를, 通常의 爐緊急停止信號에 依하여 作動되는 爐緊急停止棒 以外로 追加시키는 等 靜的爐停止機能을 強化시키고 있다.

이와 같은 鈍화된 靜的安全性確保機能은 標準化도 同時に 施行하므로써 認許可를 쉽게 하여 주고 安全한 것으로 만들어 줄 수 있다. 現在까지 NRC로부터의 反應은 相當히 好意的인 것으로 받아들여지고 있다.

또한 이와 같은 原子爐系統의 採擇은 中間熱交換系統과 BOP部分의 安全系에 미치는 影響을 極小化시켜 이들을 安全系에서 分離시킬 수 있게 하였다. 從來 BOP部分에 연유된 故障로 惹起된 原子爐停止를 大輻 減小시켜줄 뿐만 아니라 現場에서는 工場에서 製作 組立된 機資材를 通常時 商業規格에 따른 据置作業으로 설치할 수 있게 되며 工期의 短縮은 勿論 原子爐

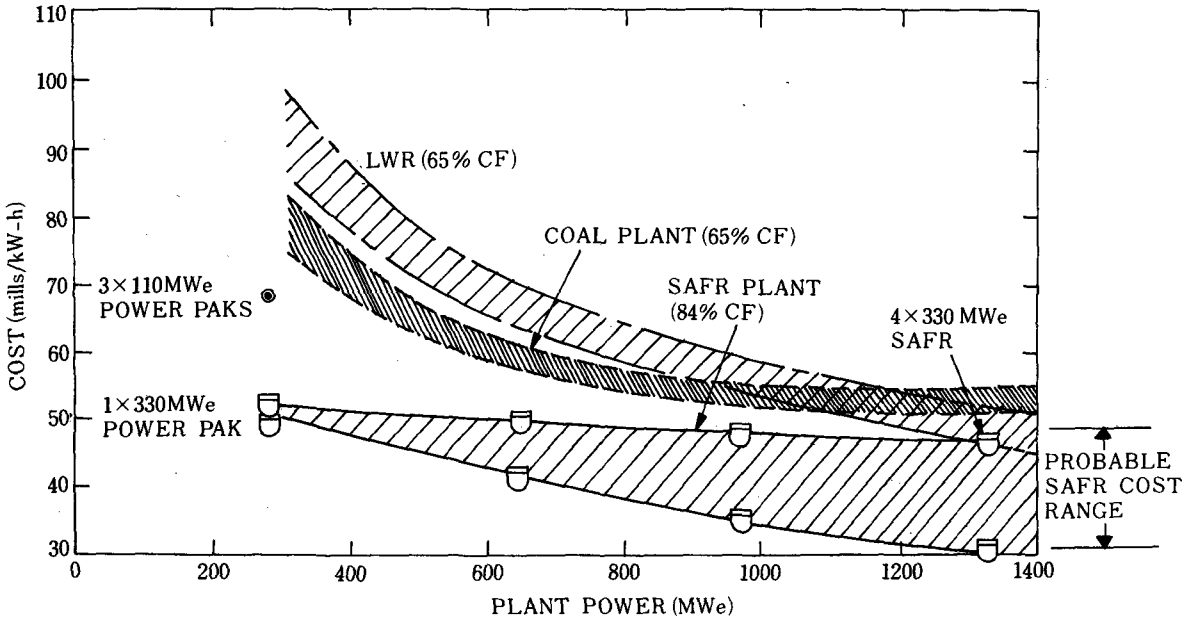
級 QA/QC를 要하는 作業量을 大輻 減小시킨 效果를 가져왔다.

安全系를 極小化시키고 工場製作·組立된 部分의 極大化를 이룩한 것은 自然히 建設費의 節約을 낳아 中/小型爐에서는 輕水型爐보다 發電單價面에서 有利하다고 그림 2와 같은 試案을 낳기에 이르렀다.

2000년까지의 中長期底成長需要에는 이상의 中/小型 모듈화된 靜的安全性機能을 갖는 原子爐로 充當하고 서기 2000년 以後의 傳統의인 大型 爐路線으로 復歸하도록 한다고 미국 에너지省의 基本方針에 따라 美國電力中央研究所 (EPRI)가 主導하여 徹底한 機器의 簡素化와 標準化를 통한 建設費 底減戰略이 풀型大型高速爐의 設計 作業에서 同時に 進行되고 있다.

高速增殖爐의 活路찾기가 原子力發電爐의 活路 찾기로 發展한 結果 原子力發電所의 回生에는 中/小型 高速增殖爐의 開發이 時急하다는 結

〈그림 2〉 Bus-Bar Energy Costs Comparisons



論에 이르러 버린 것이다.

[黎 明]

1980年代 初까지 美國의 高速增殖爐 開發은 核燃料週期事業과 함께 다음과 같이 세가지로 나누어 생각할 수 있다.

i) 1944年~1965年

原子力を 動力源으로 使用키 위하여는 널리 쓰여져도 不足함이 없는, 저렴한 原料의 供給이 뒷받침되어야 한다. 그러나 1950년까지 알려진 우라늄埋藏量은 局所的으로 偏在되어 있을 뿐만 아니라 量 또한 적다. 따라서 眞正한 뜻의 原子力平和利用을 위하여는 우라늄-238의 플루토늄 239로의 變換을 통한 우라늄 資源의 有效活用을 이룩하여야 한다.

이와 같은 認識下에 Clementine; EBR-1, EBR-II, EFFBR로 이어지는, 高增殖性을 實現하는 原子爐設計와 實驗的 檢證期.

ii) 1965年~1973年

만들기만 하면 팔린다는 經濟的 高度成長期

의 격양된 霧圍氣 속에서 輕水型爐와의 競争을 意識한 高速增殖爐 開發 擴大期, 高增殖性 追求가 退潮를 보이고 經濟性, 安全性 向上에 開發의 焦點이 옮겨가면서, 混合核燃料를 核燃料로 使用하는 電氣出力 100萬킬로와트級 大型爐의 概念設計와 이를 뒷받침하기 위한 大型研究開發設施의 擴充期.

iii) 1974年~1983年

世界的 低成長時代의 到來, 電力需要減退, 原子力市場의 消滅로 活力을 잃은 民間事業者, 擴大期의 競争을 意識한 無理한 設計가 實驗을 通하여 밝혀지고, 이의 改造가 不可避하던 時點에서 原子力安全規制가 強化됨으로서 初期投資費를 증가하는 追加費用 發生, 國立研究所의 開發行爲를 통한 技術情報, 經驗 等の 供給에 만 局限되어 餘他 主要 高速增殖爐開發國의 研究·開發費를 合計한 豫算과 맞먹는 開發投資를 行하면서도 原型爐, 實證爐建造 等の 直接的인 投資에 까지는 이르지 못하는 國家補助制度의 制限性 等이 겹쳐 活路를 찾지 못하던

混迷期.

1944年 Manhattan計劃이 本格的으로 進行되면서 大部分의 일들은 物理學者들의 손에서 Du Pont社의 技術者를 위시한 工學者들의 손으로 넘어가 있었다. 科學的原理를 究明하는 段階로부터 實質的인 物件을 만드는 段階로 進展되었기 때문이다.

Los Alamos에서 爆彈設計와 組立을 擔當한 Oppenheimer 그룹을 除外한 나머지 物理學者들, 새로운 것의 不斷한 排戰이 體質化되어 있는 이들 物理學者들은 특히 Fermi와 Zinn은 그들이 그때까지 만들어낸 플루토늄生產을 위한 熱中性子爐가 아닌, 本格的으로 電力生產을 할 수 있는 原子爐, 消耗한 核燃料보다 많은 核燃料을 만들어 내면서 同時에 火力發電所에서 쓰이는 蒸氣터빈을 회전시키는 데 필요로 하는 高溫高壓의 蒸氣를 만들 수 있는 原子爐의 開發로 그들의 關心을 옮겼다.

그들에게 있어서 高速增殖爐란 物理的으로 어려운 概念이 아니고 다만 해보지 못하였기 때문에 實驗的 確證만이 必要한 研究對像이었다.

減速되지 않은 高速中性子에 의하여도 核分裂은 일어나며, 高速中性子에 의하여 核分裂이 일어났을 때 熱中性子에 의하여 核分裂이 일어났을 때 보다도 또한 우라늄보다는 플루토늄이 放出되는 核分裂中性子が 많다는 것도 알고, 中性子を 우라늄 238에 吸收시키면 플루토늄 239가 된다는 事實도 익히 잘 알고 있었다. 이 原理를 利用한 플루토늄生產爐를, 天然우라늄을 核燃料로 使用하고 黑鉛, 或은 重水를 減速材로 使用하여, 設計·建造하여 플루토늄을 生産하고 있었다. 이 過程에서 臨界와 超臨界에 對한 感覺도 體得하게 되었다.

이들에게는 高速增殖爐로 가는 길로써 두 길 이 열려져 있었다. 熱中性子爐의 그것보다 核燃料의 濃縮도를 높이거나 再處理하여 얻어진 플루토늄 239를 天然우라늄이나 濃縮廢棄物을 減

損우라늄으로 희석하여 濃縮度換算 15% 程度의 核燃料을 만들어 黑鉛 또는 重水와 같은 減速材가 必要없는 原子爐를 만드는 길과, 原爆과 같은 高濃縮의 플루토늄을 使用하면서, 爐心表面으로부터 새어나가는 中性子數가 많아서 超臨界가 되지 못할만큼 작은 爐心으로 臨界를 만든다. 이때 새어나간 中性子を 이 爐心을 둘러싼 우라늄 238이 吸收하도록 하여 플루토늄을 만드는 것이다.

이들이 만든 世界 最初의 原子爐 Clementine이 순수한 金屬플루토늄을 核燃料로 使用하고 反射體로 天然우라늄을 使用한 점으로 보아 後者의 길을 택한 것 같다.

Fermi와 Zinn은 1944年初 消耗한 것보다 더 많은 核燃料을 生産할 수 있고 減速되지 않은 高速中性子에 依하여 連鎖反應이 持續되는 原子爐를 高速增殖爐(Fast Breeder Reactor)라고 命名키는 하고 그해 여름에 Fermi는 Los Alamos로 Zinn은 알콘의 금속연구소로 돌아가 Clementine과 CP-4(Chicago Pile-4), 뒷날 EBR-1(Experimental Breeder Reactor-1)이라 불리우는 高速增殖爐의 設計에 着手한 것이다.

鐵을 被覆材로 使用한 35個의 金屬플루토늄核燃料은 20個의 天然우라늄 反射體로 둘러싸여 있다. 冷却材로는 液體金屬인 水銀이 쓰였고 電磁 펌프도 이때 最初로 使用되었다.

1946年 9월에 着工 그해 11월에는 初臨界에 到達하고 高速爐特性을 究明하는 各種 實驗이 行하여지면서 1949年 3月 全出力運轉에 들어갔다. 1952年 12月 核燃料被損에 의한 冷却材汚染으로 運轉停止 될 때까지 6年間 高速爐系統의 運轉이 可能함을 밝혔고 플루토늄 核燃料特性, 高速爐 爐物理, 高速中性子, 高速中性子物理, 특히 EBR-1의 建設에 쓰여진 貴重한 技術資料 提供 等の 役割을 充實히 해내었다.

이렇게 始作된 美國에 있어서의 高速增殖爐開發은 初臨界 時點에서 볼 때 소련 BR-1의 1955

年, 英國 DFR의 1955年 보다는 9년, 프랑스 Rhapsodie의 1962年 보다는 16년 앞선 成功이었던 것이다.

이 Clemantine에 이어 EBR-I, EBR-II, Enrico Fermi Fast Breeder Reactor(EFFBR)로 이어지는 美國에 있어서의 高速增殖爐 第1世代는 高濃縮金屬우라늄 또는 金屬플루토늄을 核燃料로 使用하는 外部增殖型으로 特徵지어진다.

增殖率을 높이기 위하여는 核分裂시키고 連鎖反應을 持續시키는 中性子が 減速되지 않고 即發中性子에너지分佈를 갖는 高速中性子여야 한다.

따라서 爐心에는 核分裂에 의하여 發生된 熱을 뽑아내기 위한 液體金屬冷却材 以外的 餘他異物質은 極力 排除되어야 한다.

增殖至上的이던 第1世代는 原爆과 같이 先源的으로 超臨界이어야 하는 體系 即 中性子數가 每世代마다 倍增되고 出力도 倍增되어야 하는 體系, 바꾸어 말하면 中性子數와 出力이 幾何級數의으로 늘어나는 體系에서, 即發中性子 2.45個中 하나만 連鎖反應에 쓰여지게 하며 出力은 倍增되지 않으면서 나머지 1.45個는 爐心 밖으로 새어나와 爐心을 둘러싸고 있는 우라늄에 吸收시키도록 한 것이다.

核燃料가 하나 없어질 때 새로운 核燃料가 1.45個 만들어져 增殖도 되고 出力도 내는 原子爐가 되는 것이다.

여기서 核分裂시키는 中性子の 에너지가 높으면 即發中性子數가 2.45個 보다 많아지고 따라서 새롭게 생겨나는 플루토늄도 1.45個 보다 많아지게 된다.

이와 같이 增殖는 高濃縮金屬核燃料爐心을 둘러싸고 있는 블랭킷에서 주로 일어나게 한다 하며 外部增殖型이라 불리우게 된다.

그러나 이 原子爐는 工業施設, 即 電氣를 만드는 工場인 動力發生裝置로는 많은 缺陷을 갖고 있음을 알게 된다.

[成熟과 倦怠]

出力이란 單位體積當 發生하는 熱量, 即 出力密度와 이 出力密度를 갖는 體積의 곱으로 주어진다. 出力密度는 거기에 견딜 수 있는 物質의 特性에 따라 그 上限이 決定되어지므로 出力을 높이고자 하는 者는 당연히 體積을 늘릴 수 밖에 없게 된다. 그러나 高濃縮爐心の 體積을 늘리면 새어나가는 中性子數가 상대적으로 적어져 超臨界가 되어버리고, 減速되지 않은 即發中性子分佈를 유지키 위하여는 減速效果를 갖는 異物質로 희석시킬 수도 없어, 體積은 100ℓ를 超過시키지 못하고 따라서 出力도 限界가 있게 된다. 뿐만 아니라 高出力密度의 작은 容積에서 熱을 效率的으로 除去한다는 것도 工學的으로 매우 어려운 일이다. 또한 高濃縮爐心이므로 爐心에는 우라늄 238이 없어 原子力發電所 特有的 核燃料 自動補給機能을 活用못하기 때문에, 燃燒에 의한 核燃料의 消耗가 急激하여 갖은 核燃料의 交替를 要하게 된다. 또한 도플러效果에 의한 負의 溫度效果를 期待할 수 없게되며 出力溫度異常時 靜的인 回復機能이 強하기 때문에 그만큼 運轉에 어려움을 겪게 된다.

1950年代 水爆開發의 成功이, 濃縮工場을 施設容量過剩으로 만들어 微濃縮우라늄을 堦가로 購入할 수 있게 하였다. 이로서 열린 輕水型爐時代가 1960年代에 들어서면서 本格化되었다. 이 때 새롭게 나타난 競爭者를 意識한 高速增殖爐開發그룹은 安全性과 經濟性을 向上시킬 수 있는, 우라늄·플루토늄混合酸化물을 核燃料로 使用하는 中濃縮高速爐心을 採擇하는 内部增殖型으로 設計方針을 變更하게 된다. 高沸騰點, 底蒸氣壓, 強한 自然對流特性을 지니는 液體金屬, 特히 나트륨의 利點을 最大로 利用할 수 있는 大型高速增殖爐의 開發에 着手하게 되었다.

非加壓의 冷却材를 使用하고 容量에 따라 影響을 받지 않는 核燃料取扱系統 Cover gas系統과 같은 部分이 많기 때문에 容量增大效果가 커

킬로와트당 450~500弗의 建設費節減效果를 可能케 한다. 美國이 輕水型爐와의 競爭에 對抗 시킬 高速增殖爐로서 大型爐를 채택한 理由가 바로 이것이다. 이것 또한 世界的 趨勢이기도 하였다.

GE社와 Rockwell International社는 大型爐에 有利한 沸型爐를 固執하였으나 Westinghouse社는 PWR爐의 開發成功을 살릴 수 있는 루프型 設計를 채택하였다.

한편 美國에너지省의 前身인 美原子力委員會도 이 루프型을 開發支援課題로 채택하기에 이르렀다.

이때부터 始作한 混迷期는 結局에가서는 1983年 Clinch River原型爐의 建造中斷으로까지 惡化되는 技術의 判斷의 誤謬을 犯하게 된다. 그러나 이것이 轉禍爲福이 되어 原子力分野에서 倦土重來의 機會를 마련키 위한 潛伏期일 수도 있는 方向으로 事態는 進展되게 된다.

한편 美國을 筆頭로 하는 世界的 高度成長期에는 表 1과 같은 實驗爐를 개발하였다.

高速爐關聯 主要 研究施設을 살펴보면 다음과 같다.

Idaho National Engineering Laboratory.
(INEL, Illinois州 Idaho Falls所在)

ZPPR : Zero Power Plutonium Reactor,
4×4×3m³容積까지의 爐心을 모의할 수 있는 플루토늄爐心 高速 臨界實驗裝置.

ZPR : Zero Power Reactor,
우라늄 爐心 高速臨界實驗裝置

ETR : Engineering Test Reactor,
熱出力 175MW의 實驗爐로서 液體金屬을 冷却材로 使用하는 核燃料과 爐心設計에 있어서의 安全性 確認實驗을 行하여 왔으며, Sodium Loop Safety Facility (SLSF) Programme下에 一連의 實驗이 進行되고 있다.

EBR-II : Experimental Breeder Reactor II,
Hot Fuel Examination Facility와 함께

核燃料과 爐心 構造物의 照射試驗을 遂行하고 있다.

또한 核燃料週期完結을 위한 데몬스트레이션 역할도 擔當하고 있다.

TREAT : Transient Reactor Test Facility,
空氣冷却 非均質熱中性子爐로서 여러가지 形態의 核出力暴走와 冷却流量喪失事故下에서의 核燃料과 爐構造物의 舉動을 살피는 모의실험이 行하여지고 있다.

Hanford Engineering Development Laboratory
(HEDL, Washington州 Richland所在)

FFTF : Fast Flux Test Facility,
熱出力 400MW의 高速爐心의 核燃料과 爐材料의 照射試驗에 쓰여지고 있다.

FMEF : Fuel and Material Examination Facility,
플루토늄·우라늄混合酸化物 核燃料의 成型加工과 技術開發을 위한 設備로서 Secure Automatic Fabrication (SAF) line의 設置를 위한 것이다.

SAF는 FFTF用의 核燃料을 供給할 뿐만 아니라 核物點의 安全保障措置, 製品品質管理, 生産性向上과 經濟性檢討로 곧 이어질 商用高速爐核燃料施設의 엔지니어링 자료를 供給하게 될 것이다.

Energy Technology Engineering Center
(ETEC, California州 Santa Susanna所在)

SPTF : Sodium Pump Test Facility,
나트륨펌프, 流量計, 大型傳熱系統試驗을 위한 分當 360,000리터의 나트륨을 흐르게 할 수 있으며 격심한 熱衝擊試驗도 行할 수 있다.

SCTI : Sodium Component Test Installation,
高出力 나트륨熱交換器의 試驗施設로서 70MW (th)容量을 갖는 이 施設을 利用하여 單管型, 나선형, 코일型, 重複管型, 直營型 등 各種 蒸氣發生器의 試驗을 行할 수 있다.

SCTL : Small Component Test Loop,
나트륨벨브, 나트륨系統計裝系, 熱衝擊 및 나트륨漏出試驗을 行한다.

〈表 1〉美國의 高速增殖爐 施設現況

項 目 \ 施設名	CLEMENTINE	EBR - I	LAMPRE	EFFBR
소재지	Los Alamos, New Mexico, USA	NRTS, Idaho Falls, USA	Los Alamos, New Mexico, USA	Lagoona Beach, Michigan, USA
설 계	LASL	ANL	LASL	APDA
건 설	LASL	Bechtel Corp.	LASL	United Engineers and Constructors
소 유 주	USAEC	USAEC	USAEC	PRDC
운 전 자	LASL	ANL	LASL	Detroit Edison Co.
목 적	중성자물리연구	LMFBR의 공학, 물리 및 안전성연구, 증식 검증	용융 Pu 합금 사용연료연구	대용량 LMFBR 가동 및 전기생산 검증
출력	열 출력	25KW (th)	1.2MW (th)	200MW (th)
	전기출력	총출력 순출력	0.2MW (e) -	0 0
열전달계통	1 차	Hg	NaK	Na
	2 차	H ₂ O	NaK	Air
	3 차	-	H ₂ O steam	-
원자로심	순수 Pu로심 (금속)	고농축 U합금연료 Pu합금연료	캡슐형의 용융 Pu-Fe 합금연료	25% 농축 U납금연료
노심외포부	자연 U 반사체	자연 U 감손 U	SS 반사체	감손 U
현 상 태	철거	철거	철거	폐기
略 史	1945 설계 시작 Sep. 1946 건설시작 Nov. 1946 초기임계 Mar. 1949 정상가동 Dec. 1952 가동중지	Nov. 1945 건설허가 1946~1951 건설 Aug. 1951 초기임계 (Mark - I) 19 Dec. 1951 정상가동 20 Dec. 1951 최초 전기생산 Mar. 1954 Mark - II 설치 1957 Mark - III 설치 Nov. 1962 Mark - IV 설치 Dec. 1963 가동중지	1957 연구개발시작 1959 발전소건설 Mar. 1961 초기임계 Jul. 1961 정상가동 1965 폐기	1955 개념설계 1956 건설시작 Aug. 1963 초기임계 Aug. 1966 최초 전기생산 50ct. 1966 일부노심 용융사고 Jul. 1970 재가동 Nov. 1972 폐기결정

Sandia National Laboratory,
(New Mexico州 Albuquerque 所在)
ACRR : Annual Core Research Reactor,

高速爐에 있어서의 重大事故를 假想하여
이 酸毒한 條件속에서의 核燃料破損과
蒸氣壓急增이 미치는 影響等 安全性爐

項 目 \ 施設名	EBR - II	SEFOR	FFTF	CRBR	
소 재 지	NRTS, Idaho Falls, USA	Fayetteville, Arkansas, USA	Richland, Washington, USA	Clinch River, Tennessee, USA	
설 계	ANL의	GE	WH Hanford Co.	Project Management Corp.	
건 설	ANL의	GE	WH Hanford Co.	Project Management Corp.	
소 유 주	US AEC	US AEC, SAEA, GE, KfK	US AEC	Breeder Reactor Corp.	
운 전 자	ANL	SAEA	Batelle Pacific Northwest Lab.	Breeder Reactor Corp.	
목 적	핵주기완성검증 및 핵연료, 노재료 방사선조사시험장치	고속로 고유의 안전성 검증	핵연료 및 노재료 방사선조사시험장치	LMFBR 원형로 운전경험	
출력	열출력	62.5MW (th)	20MW (th)	400MW (th)	975MW (th)
	전기출력	총출력	0	0	380MW (e)
		순출력	16.5MW (e)	0	0MW (e)
열전달계통	1 차	Na loop형 (1)	Na 1 loop	Na 3 loop	Na - 냉각
	2 차	Na	Na	Na	loop형 3 - 병렬
	3 차	H ₂ O steam	Air	Air	회로계통
원 자 로 심	Mark I 50% U 합금연료 Mark II 67% U 합금연료	U/Pu 혼합산화물 연료 (20% Pu)	U/Pu 혼합산화물 연료	혼합산화물연료	
노심의포부	감손 U	Ni 반사체	SS 반사체	-	
현 상 태	가동중	폐기	가동중	설계, 부품 거의완성 1983 사업중단	
略 史	Jul. 1955 설계허가 Dec. 1957 건설시작 Sep. 1961 초기임계 (dry) Nov. 1963. 초기임계 (wet) Dec. 1980 열병합장치로 지명	1964~65 개념설계연구 Sep. 1965 건설허가 및 시작 May. 1969 초기임계 Jan. 1972 가동중지 및 폐기	1965~1970 개념설계연구 1970 건설시작 Jun. 1978 Sodium 장진 Feb. 1980 초기임계 Dec. 1980 초기전력검증 Apr. 1982 cycle-one 가동시작 Jul. 1983 cycle-two 가동시작	1969/70 설계 1972 협력체구성 1975 설계개념완성 1977 무기연기, 비확산 정책 1981 재허가 1983 예산 부족으로 중단됨	

心에 쓰이고 있다.

Oak Ridge National Laboratory
(ORNL, Tennessee州 Oak Ridge所在)
HEF : Hot Experimental Facility,

高速爐用 核燃料의 再處理를 위하여 設
計된 施設로서 6基까지의 高速爐 使用
後 核燃料를 再處理할 수 있으며 輕水
型爐 核燃料도 處理할 수 있도록 되어

있다.

[核燃料週期技術分野]

한편 核燃料週期技術分野를 살펴보면 高速爐開發의 旗手였던 美國은 당연히 再處理技術의 開發에도 積極적으로 投資하여 Hanford, Savana River Idaho의 3大 國立工場에서의 Manhattan 計劃 以來 蓄積되어 왔던 經驗과 이를 뒷받침하는 國立研究所의 開發能力을 結定하며 1960年初에 이미 오늘날 再處理技術의 基本方式이 되어있는 機械的 前處理(Chop Leach Process)와 Purex Process에 의한 溶媒抽出方式을 創出하여 New York州 Westvalley에 世界 最初의 商用再處理工場이 NYS社의 손으로 建設되었다. 이工場은 1966년부터 1972년까지 稼動되어 輕水爐核燃料 245톤을 包含한 計 641톤을 再處理하고 있다.

한편 AGNS社는 1971年 South Carolina州 Bownwell (Savana river 國立工場의 隣接地)에 1日 處理能力 5톤의 大規模 工場의 建設을 開始하여 1975年 完成을 보았으나 Hot試驗에까지 이르지 못하고 計劃을 中止하고 말았다.

또한 BWR의 開發者이기도 한 GE社가 再處理事業을 包含한 核燃料의 Total Service를 標하여 MFRP를 Illinois州 Morris에 建設하였다. "AQUAFLOUR"라는 斬對한 方式의 實證을 試問한 것이었으나 技術上의 어려움을 克服하지 못하고 1974年으로 計劃의 續行을 中止하게 되었다.

이와 같이 미국에 있어서 核燃料週期事業, 특히 民間再處理事業은 1974年 第1次 石油波動을 前提하여 그 計劃을 中斷하게 되었던 것이었다.

이와 같은 挫折은 60年代에서 70年代初까지 持續된 高渡成長이 電力需要의 增加로 原子力發電, 核燃料週期서비스事業의 急成長을 展望케 하며 만들기만 하면 팔린다는 격양된 霧圍氣

를 낳아 여러가지 技術적으로 過慾인 事業을 推進하게 된다.

그들은 低燃燒度の 軍用 플루토늄 生産爐燃料의 再處理經驗을 基盤으로 設計建造된 施設에서 燃燒渡가 높은 輕水型爐 核燃料를 試驗運轉한 바 여러가지 缺陷을 發見하게 되어 根本的인 設計變更이 不可避하게 되었다. 더우기 民間再處理施設로서 餘他 民間再處理 事業者와의 競爭을 意識한 값싼 再處理費의 實現을 고려하여 工場設計에 餘裕를 두지 못한 것이 設計變更과 改造의 폭을 크게 하여 費用追加가 初期投資에 對하여 相對적으로 너무나 큰 것이 되었다.

"나쁜 일은 單獨으로 오지 않는다"라는 옛말을 밝히기라도 하듯, 1974年 石油波動을 맞게 되어 設費投資費의 異常高騰과 不景氣에 依한 電力需要의 減退, DOE를 통한 國家補助는 國立研究所들의 開發行爲를 통한 技術情報經驗 등의 供給은 할 수 있어도 事業者에게 直接的인 投資를 할 수 없도록 된 風土에서 政府로서는 補助方法을 강구할 수 없었다. 여기에 오히려 "混合酸化物核燃料使用에 隨伴되는 環境影響評價(GESMO)事業"으로 委縮케 된데다가 1977年 카터大統領의 核不抗散法과 關聯 商業再處理禁止政策을 正面으로 맞게 되면서 더는 견디어 내지 못하고 쓰러져 버리고 말았다. 레이건行政府가 들어서면서 여러가지로 回生策을 강구하여 보았으나 再處理事業의 需要를 낳는 市場이 形成되지 않는 곳에서 어쩔 수 없이 1982年의 "放射性廢棄物政策法"을 立法, 使用後核燃料과 廢棄物을 原子爐立地外 貯藏施設(AFR)과 臨視, 回收可能貯藏施設(MRS)에서 當分間은 貯藏토록 되었다.

그러나 低油價時代의 再到來로 電力事業이 活氣를 찾게 되고 市場이 形成되면 民間工業의 潛在的인 對應力이 살아나 其他 蓄積된 技術力으로 一舉에 世界市場을 席卷할 能力을 갖고 있다고 보아야 할 것이다.