特輯

유럽의 高速炉開發과 計劃

1. 序　論

유럽에서의 高速爐開發 다음 단계(實證段階)는 이탈리아 및 英國이 참가하는 大型長期産業協力에 의해서 數基(아마 2基 또는 3基)의 商業規模 發電所와 이에 관련되는 核燃料週期 플랜트를 건설하는 것이다. 그 목적은 이 단계의 마지막에 가서 각국의 電力會社가 「共通모델」設計에 의해서 완전한 商業爐를 시리즈로 發注할 수 있도록 하는 것이다.

유럽의 先進國들은 약30년간에 걸친 개발의 결과 이 단계에 도달했다. 이 개발은 제로出力爐에 의한 基礎研究, 酸化物燃料의 공급과 低出力爐에서의 나트륨冷却設計의 엔지니어링的 妥當性의 實證, 좀 더 擴大하면 商業規模가 되는 규모의 콤포넌트를 사용해서 25~30萬KWe 정도 出力의 原型動力爐를 과거 10년전후 건설·운전해온 가장 최근의 활동에 이르기까지 잘 알려진 각 단계를 통해서 행해져 왔다. 불과 2, 3년의 原型爐 경험에서 시작한 이와 같은 최초의 움직임은 DeBeNe(서독, 벨기에, 네덜란드 3國), 프랑스, 이탈리아의 共同事業인 Creys-Malville의 120萬KWe SPX1 發電所가 送電을 개시한 것이었다. 넓은 의미에서는 日本, 소련 및 美國과 並行해서 추진된 이 秩序整然하면서도 비교적 천천히 행해진 개발의 결과 현재 유럽에서는 나트륨冷却高速爐의 엔지니어링 및 운전과 충분히 확립된 産業基盤에 대한 큰 신뢰가 있다. 지금에 와서는 高速爐의 大型商業計劃의 요구를 만족시킬 수가 있다.

그러나 넓은 의미에서 電力會社의 현재의 생각은 우라늄의 코스트와 供給力을 보아서 21세기 초까지는 高速爐發電所를 대규모로 건설하는 것을 바라지 않고 있다는 것이다. 이것은 발전소와 核燃料週期의 코스트를 더욱 내려 實證爐와 核燃料週期 플랜트의 건설을 통해서 다음과 같은 點들을 實證하기 위해 아직도 약 20~25년의 期間이 있음을 의미한다.

○코스트와 商業爐까지 擴大할 능력에 대한 확실한 경험.

○核燃料週期를 신뢰할 수 있도록 운전하여 경제적인 코스트 레벨이 달성된다는 保證.

○商業플랜트가 이미 熱中性子爐, 즉 PWR에서 사용되고 있는 基準에 合致시켜 라이센스가 얻어진다는 自信.

○高稼動率을 달성하기 위한 全體的인 성능 및 能力에 관한 信賴.

確實한 것은 이들 목적을 가능한한 경제적으로 달성할 필요가 있다는 것으로서 이것은 국내의 設計, R & D資源 및 계획에서 불필요한 重複을 排除하여 合理化하는 것을 중요한 목적으로 할 필요가 있다는 것을 뜻한다. 마찬가지로 實證爐의 코스트를 부담하는 電力會社는 이와 같은 爐가 이미 확립되어 있는 것에 대한 만족할만한 代替物이며, 그 이외에서는 얻을 수 없는 데이터나 경험을 제공한다는 확신이 있으면 추진할 것이다.

本稿에서는 유럽의 設計·R&D 共同計劃의 진전과 장래의 계획에 대해서 검토하며, 특히 上記의 목적과 전력회사가 장래의 플랜트 코스트와 신뢰성에 대해서 自信을 가질 수 있는 베이스에 주의한다.

2. 유럽의 協力

유럽大陸에서의 큰 産業協力은 프랑스, DeBeNe 및 이탈리아의 電力會社와 設計·R & D 機關이 참가해서 1970년대에 확립되어, 특히 프랑스의 슈퍼피닉스 1 (SPX 1)과 西獨의 SNR2 (모두 商業規模인 約120萬KWe의 LMFBR 發電所)를 차례로 건설하게 되었다는 것은 잘 알려져 있다. 최근 SPX 1이 운전개시에 성공한 것은 이 大型協力計劃에 대한 훌륭한 功積이다.

高速爐協力의 현재 단계는 英國을 포함해서 범위가 넓혀졌으며, 1984년 1월 10일자 政府間覺書(MOU)에 의해서 시작된 것이다. 參加國은 英國, 프랑스, 西獨, 이탈리아, 벨기에(네덜란드는 後에 署名)이며 그 주된 동기는 資源의 分散 및 重複을 최소로 함으로서 高速爐시스템의 앞으로의 개발 및 商業化의 工業的, 經濟的 및 財政的 危險을 최대로 줄이려는데 있다. 이 MOU는 「안브레러」協定으로서 기능을 하며 각각의 국가기관이 각각의 분야에서 協定을 체결한다는 것이다. 그것은 長期베이스로 核燃料週期를 포함해서 高速爐 開發에서의 넓은 協力을 고려하고 있으며, 구체적으로는 다음 내용을 포함하고 있다.

○R & D 計劃의 調整

○産業界의 協力

○電力界의 協力

그것은 高速爐 安全性의 중요성을 강조함과 함께 유럽의 협력을 日本 및(또는) 미국도 포함시킬 것인가 혹은 兩國과도 協力하는가에 관심이 있음을 명백히 하고 있다. 이 覺書는 어떤 정부도 高速爐를 단독으로 개발한다는 政策으로 되돌아갈 가능성이 없다는 것을 명백히 하고있는 점에서 특히 중요한 의미를 가지고 있다.

여기에는 현재 다음과 같은 協定이 있다.

○核燃料週期 플랜트의 설계와 R & D

○原子爐의 設計와 R & D

○電力會社間의 決定

政府間覺書에서 생각하고 있는 일반적인 목적을 다시 상세하게 규정지운 것 중에서 중요한 것은 다음과 같다.

i. 목적을 달성하는 가장 효율적인 방법은 共同으로 서독, 프랑스 및 영국에 1基씩 實證爐 3基(현재 유로 1, 2, 3號機라고 부르기 시작하고 있다)를 차례로 건설하는 계획을 실시하는 것이다. SNR 2發電所는 이중 1基이며 프랑

經濟協力開發機構 (OECD)

歐洲經濟協力機構(OEEC)가 歐洲經濟의 부흥과 함께 경제정책과 開發途上國 원조의 조정이 필요함에 따라 발전적으로 發足된 것이 經濟協力開發機構(OECD :Organization for Economic Co-operation and Development)로 1961年 9月30日에 正式으로 發足되었다.

○目 的

(1) 재정금융상의 安定을 유지하면서 되도록 高度의 經濟成長을 지속할 것과 고용의 증대 및 生活水準의 向上을 도모.

(2) 經濟發展途上에 있는 여러 地域의 건전한 經濟成長에 기여(低開發國 원조).

(3) 국제적 의무에 따라서 다각적, 무차별 기초위에 세계무역의 擴大에 기여.

○加盟國 : 오스트레일리아, 오스트리아, 벨기에, 카나다, 덴마크, 핀란드, 프랑스, 西独, 그리스, 아이스랜드, 아일랜드, 이탈리아, 日本, 룩셈부르크, 네덜란드, 뉴질랜드, 노르웨이, 포르투칼, 스페인, 스웨덴, 스위스, 터키, 英國, 美國 (26個國)

○準加盟國 : 유고슬라비아(일정한 범위의 活動에 參加)

스(SPX2)와 영국의 설계(CDFR라고 불리고 있다) 중 하나가 2號機가 된다. 특히, 설계의 개량, 코스트의 削減 및 운전경험을 쌓는 것에 중점이 두어지고 있다.

ii. 특정 프로젝트에 대한 유럽 電力會社의 相互出資에 관한 특별한 合意規定이 있다.

iii. 설계, R & D 및 出資를 분담하는 共同프로젝트로 實證爐計劃을 지원하기 위한 實證再處理工場이 유럽에 하나 필요하다. 동시에 현재 가다라쉬에 있고 프랑스와 이탈리아가 공동으로 운영하고 있는 核燃料加工工場은 이들 原子爐의 수요를 충족시키는데 충분한 능력을 가지고 있다.현재 다수의 委員會가 운영되고 있다.

이와 같이 종합적이고 또한 長期의 협력은 유일한 것이며 어떤 면에서도 대단한 의미를 갖는 것이다. R & D분야에서는 모든 協力機構가 공동의 調整이 취해진 歐洲計劃을 수립하겠다는 목적을 위해서 기능이 잘 발휘하고 있는데, 産業面에서는 電力會社가 1973년의 프랑스-DeBeNe協定보다 더욱이 범위가 넓은 새로운 協力體制를 구축할 필요가 있다. 이것은 기본적으로 최초의 實證發電所 時期와 사이트에 관한 議論이다. 설계면에서는 엔지니어링會社가 콘소시엄을 형성하는 방향으로 움직이고있다.

歐洲共同委員會는 이 새롭게 擴大된 協力을 환영하고 있다. 이 委員會는 原子力計劃(1985년 5월)에서 21세기 초까지 우라늄 輸入에 대한 依存度를 引下하고 우라늄의 가격상승 가능성에 대해서 妥當한 上限을 설명한다는 것을 목표로 해서 2010년까지 少數(약 4基)의 高速爐發電所와 再處理施設을 건설해야 한다는 생각을 명백히 하고 있다.

3. 技術 및 엔지니어링의 現況

이들 大型實證플랜트에 대한 投資는 電力會社가 이와 같은 플랜트가 신뢰할 수 있는 것이며, 예정된 기간과 코스트로 건설할 수 있다고 믿는 것에 달려있다. 현재 이미 피닉스와 PFR에서 많은 경험이 얻어져 있다. 이 2基의 爐는 10년이상 운전을 계속하고 있으며, SPX1도 여기에 참가했고 또 1986년말에는 SNR300도 참가하였다. 이밖에 소련의 BN350과 600, 미국의 FFTF 및 일본의 常陽에서도 많은 경험이 얻어지고 있다. 이들의 경험은 모두 장래의 투자에 대해서 대단히 意義가 있는데 특히 다음과 같은 點이 강조되고 있다.

이 운전경험은 우수한 설계로 건설하여 운전을 잘하면 商業規模의 發電所도 熱中性子爐의 最良의 것이 達成한 가동율 및 신뢰성에 匹敵 혹은 그 이상의 것이 될 수 있음을 명백히 하고 있다. 중요한 콤포넌트 및 制御·防護시스템의 고장율이 낮고 計劃外運轉停止로 부터의 復歸도 대개의 경우 短時間이다. 발전소는 制御하기가 쉽고 운전원의 誤操作에 대한 余裕度도 크다.

核燃料의 취급은 현재 운전중인 많은 商業原子力發電所와 마찬가지로 運轉停止中에 행해지는데 PWR/BWR과는 달리 운전정지후 2, 3일로 취급이 가능하며 爐心의 1/2에서 1/3을 약 10일정도로 연료교환할 수 있는 常設機器를 이용한다. 장래의 原子爐 機器의 상세한 機械的 엔지니어링은 조금 다를지 모르겠으나 피닉스와 PFR에서 많은 경험이 얻어졌고 더욱이 현재 SNR300과 SPX1로 부터도 경험이 축적되기 시작하고 있어서 이와 같은 작업을 신뢰할 수 있어 목표로 하는 取扱率을 달성할 수 있을 것이다. 가장 주의할 특징은 計劃燃料交換의 간격인데, 일부의 商業爐의 仕樣에서는 적어도 年1回 요구하고 있는데 대해 PFR이나 피닉스에서는 그보다 약 100일 길다. 그러나 연료의 爐內滯留期間은 이미 500相當全出力日(efpd)이므로 後者는 基本的 制約이라기 보다 주로 이들 爐에 대해 작은 batch사이즈를 선택한다는 특정의 설계상 판단에 의한 바가 크다. 商業發電所에 대해서는 보다 큰 batch 사이즈가 채택되게 될 것이다(즉, 각 연료교환시에 爐心의 1/2 또는 1/3씩 교환하는 2 batch 또는 3 batch 시

스템). 이것은 目標燃燒度가 150~200GWD/T이므로 이미 연료교환의 간격은 1년이상이다. SPX1은 이미 2 batch 시스템을 채택하고 있으며 가까운 장래에 이 특성을 實證할 예정이다.

常時設置되어 있는 機器에 의해 爐心으로 신속하게 가까히 접근할 수 있다는 것과 취급이 비교적 빠르므로 그 밖에도 利點이 있다. 즉, 保守/檢査를 위한 운전정지 이외의 연료교환 페널티는 그다지 크지 않으며 欠陷燃料도 최소한도의 페널티로 꺼낼 수가 있어서 計劃의 融通性이 크다-「깨끗한」回路와 低汚染레벨에 도움이 되는 특징이다.

가장 가능성이 큰 商業爐의 리스크는 모든 原子爐시스템과 마찬가지로 수리 또는 스페어와 교환하는데 대단히 시간이 소요되는 주요한 콤포넌트의 고장이며, 이와 같은 종류의 우려는 항상 先驅的 發電所의 경우에 크다. 피닉스와 PFR 양쪽 모두 이와 같은 경험을 하고 있다. 피닉스에서는 IHX와 再加熱모듈의 고장으로 큰 수리와 交替計劃이 필요했고, PFR에서는 보일러의 문제(1975년에 過熱器 2基와 再熱器 1基, 1981/1985에는 모든 蒸發드럼)가 발생했다.

피닉스의 IHX 해결은 1次系 콤포넌트 고장의 수리능력을 實證하고 있으며, 이에 대해서는 충분히 報告되고 있다. 설계상의 약점, 즉 예기하지 않았던 溫度差에 의한 中間 plenum上部에서의 용접의 過度스트레스는 곧바로 제거되었으나, 그 유니트를 원자로에서 떼어낼 필요가 있었다. 이와 같은 필요성은 설계단계에서 예기되고 있었으며, 機器는 기능을 잘 발휘했다. 검사와 수리를 放射能이 없는「손을 사용한다」는 조건하에서 실시할 수 있게 하기 위해서 洗淨에 의해 殘存나트륨을 除去하고 부착되어 있는 방사성물질을 제거하기 위해 除染했다. 유니트의 철거수리 및 교환을 위해 약 1개월이 소요되었다. 전체 6基의 IHX중 4基로 운전하는 것도 實證되었다—이것은 이와 같은 방법으로서 어프로치의 융통성을 명백히 하고 있다. 피닉스의 IHX를 상업규모로 확대하더라도 그다지 큰 차이는 없으며, 피닉스의 機器에 대한 개량은 이미 SPX1에 받아들여지고 있고 先行發電所에서도 받아들이게 될 것이다. 이와 같은 유니트의 설계에 있어서는 특히 熱水力學에 주의할 필요가 있는데, 현재의 R & D에는 그런 점이 잘 반영되어 있다.

마찬가지로 蒸氣發生器의 경험도 이들의 중요한 2次回路콤포넌트의 큰 수리 또는 교환이 가능하다는 것을 實證하고 있다—단, 이때 2次回路는 방사능이 없으므로 방사선이나 汚染의 복잡한 문제는 없었다. 피닉스에서는 再加熱모듈 모두를 완전히 교환하였다. PFR에서는 過熱器 1基의 수리를 위해 tube plate로 옮겼다가 그후 원위치로 되돌려 보냈다. 再熱器 1基는 새로운 설계의 것과 완전히 교환했다. 또 蒸發드럼튜브의 튜브 플레이트 용접은 모두 最初(現地에서) 수리되었으나 후에 Sleeve 加工을 위해 차례로 떼어냈다. 스페어 유니트와 3개의 2次系回路中 2개(때로는 3개중의 하나)로 운전을 계속하는 능력은 이 큰 작업중의 손실을 최소로 하기 위한 융통성이 있다는 것이다. 이들 운전의 엔지니어링은 간단하고 사람들의 放射線被曝도 없다. 이들 고장원인의 진단 및 그것을 FBR이나 앞으로의 설계에서 排除하는 것은 특히 어려운 기술이나 엔지니어링을 필요로 하는 것은 아니다. 피닉스 再熱器의 경우는 나트륨속의 튜브/튜브 용접이 start-up 中에 발생한 특수한 조건에 의해 熱的 스트레스가 해져서 10년간의 운전동안에 crack 발생에 이르렀던 것이다. 이 사고 훨씬 이전에 나트륨再熱器는 商業設計에서 제거되어 있었다. PFR의 경우는 스테인레스鋼의 材料欠陷임이 밝혀졌는데(적어도 過熱器의 tube plate설계에 대해서) 商業用보일러에 最適이라고 하여 이미 채택되고 있는 9Cr/Mo ferrite鋼은 간단하게 교환할 수가 있었다. PFR 蒸發드럼의 튜브/튜브 플레이트 용접의 클랙은 용접 스트레스를 제거시키

면 발생하지 않았을 것이다. 이와 같은 배경에 의해서 實證爐에 채택되고 있는 大型爐의 신뢰성과 성능에 대해서 대단히 신뢰할 수 있다고 생각되고 있다.

다음의 큰 진보는 SPX1 유니트, 즉 80만KW(T)의 helical型 unit 4基의 운전경험일 것이다. 유럽의 파트너는 모두 약40만KW(T)의 直線튜브 유니트를 개발하는 것을 동의하고 있다—이것은 SNR2에 대한 현재의 표준설계이다. 유럽協力의 하나의 큰 이익은 1개국에서는 너무 비용이 많이 드는 代替어프로치를 몇개의 중요한 분야로 실시할 수 있다는 것이다—보일러의 설계는 그 하나의 후보라는 것에서 合意가 성립되고 있다.

原型爐 運轉經驗에 관한 검토에서 피닉스와 PFR양쪽에서 경험한 운전요원의 總放射線被曝線量이 대단히 낮다는 것은(이것은 LMFBR의 Systematic한 특성이다) 이 분야에서 더욱 엄격한 基準이 생길 경향이 있으므로 장래의 투자에 대해서 큰 비중을 차지할 것이 틀림없다. 넓은 의미에서 피닉스와 PFR의 數値는 5～20 man·rem/年이다.

4. 設計와 開發

第2世代의 設計에는 3가지가 있다— 西獨(SNR2), 프랑스(SPX2) 및 영국(CDFR)인데 모두 1次系는 loop型이며 出力은 125～150만KWe의 범위이다. Nuclear island를 더욱 소형으로 함으로서 그전의 것보다 각각 대폭 코스트가 싸지고 있다. 이들 설계는 유럽 協力計劃의 체제에서 추진되어 實證爐를 차례로 건설하게 될 것이다—이 中心이 되는 槪念은「共通의 모델」을 만든다는 것으로 그것은 前에 協力에 의해 나온 改良點을 모두 받아들인 마지막의 것이며 완전히 商業利用할 수 있는 것이다.

改善과 코스트 삭감을 위해 설계기관은 많은 가능성에 대해서 생각하고 있다. 追求해야할 하나의 路線은 엔지니어링의 細部를 開發할 것, 제조코스트를 더욱 내릴 것, 규모를 더욱 小型化할 수 없는가, 모든 콤포넌트 및 시스템에 대해서 검토하는 것이다. 이 범주의 例로는 Vessel內 燃料貯藏, Single redan(SPX2에서와 같이), 2次系 密閉基準의 완화, 崩壞熱을 1次系回路로 集中的으로 방출시켜 補助系를 적게하고 BOP를 싸게하며(SNR2에서와 같이), 2次系回路의 배관작업을 콤팩트하게 하는 등이다. 일부 중요한 콤포넌트의 代替設計도 받아들여질 것이다—예를 들면 SPX1 및 2에서는 helical설계 대신에 直線튜브보일러를 채택하기로 되어 있어 이 분야에서 유익한 多樣性이 얻어질 것이다.

그 외에 몇가지 일반적인 목적이 있다. 그것은 플랜트 전체 및/또는 핵연료주기에 영향을 미치므로 큰 코스트 삭감으로 연결될 가능성이 있다. 그 일반적인 목적은 다음과 같다.

○發電所의 長壽命化—40年以上

○稼動率의 向上

○出力增大

이들은 모두 發電코스트의 資本코스트부분을 삭감하는 것이다.

○高燃燒度－20%이상

이것은 모든 핵연료주기의 運轉單價를 내리며 연료교환을 위한 운전정지 간격을 길게 하므로 가동율도 높아질 것이다.

○安全技術의 改良

이것은 認許可의 늦어짐을 없게 하며(큰 코스트 삭감효과), 신뢰성이 높아지고 설계자는 高速爐의 우수한 안전성 특성을 이용하게 될 것이다.

따라서 유럽에서의 R & D의 主된 역할은 이들 현실의 플랜트의 목적을 만족시킬 수 있도록 설계자와 밀접한 관계를 유지하면서 작업을 진행시켜 특히 설계개량을 위한 데이터, 分析 및 保證을 제공하는 것이다. 이것은「設計主導」의 R & D이며, 현재 이들 요구를 만족시키기 위한 共同어프로치를 수립하는데 대단히 노력을 경주하고 있다. 그러나 유럽에서 高速爐의 R&D

資源을 pool하는 것의 이익의 하나는 곧바로 가까운 장래의 설계나 프로젝트의 요구에 지배되지 않으므로 長期의 合理的인 R & D計劃을 유지하는 것이 쉬울 것이라는 것이다. 한정된 資源에서 大型프로젝트가 우선권을 얻었을 때는 그와 같이 되지 않을 것이다. 이것은 「設計主導」의 R & D를 지원하기 위한 「기술적 뒷받침」의 역할을 할 것이다.

수명 연장 및 가동율 개선은 양쪽 모두 기본적으로 구조의 強度에 관계하는 것이며, 유럽의 계획에서는 특히 이 넓은 기술분야에 우선도가 주어지고 있다. 수명의 평가에 관계하는 구조는 교환 또는 수리가 대단히 곤란 또는 불가능한 것인— 1次系탱크, 保護vessel 및 지붕, 爐心上部구조물, 爐心지지구조 및 hot/cold pool boundary이다. 잠재적 이익은 크다—즉, 발전소의 수명이 35년에서 40년으로 연장되는 것은 약5%의 자본비 삭감과 같다. 材料特性 및 劣化의 mechanism에 관한 계획은 계속되나 「特性테스트」로 向하려는 경향이 있다. 이 목적을 위한 시설의 몇종류가 이미 있다. 예를 들면, natrium pipe elbo(서독), plate shell junction (프랑스), 配管(프랑스와 이탈리아), 熱stripping (영국), 대규모의 crack傳播(영국과 서독)에 대한 테스트를 하는 시설이 있다.

資本코스트의 삭감은 1次系vessel의 직경을 대폭 늘리지 않고 플랜트의 出力을 증가시키는 것과 NSSS建物 용적의 축소 및 콤포넌트重量의 감소에 의해서 이루어지고 있다. 120萬KWe의 SPX1에서 150萬KWe의 SPX2로의 移行은 그 좋은 例이다. 出力은 증가했는데 중량은 20~30% 감소하고 있다. 기술적으로 어려운 문제가 있으며 R & D가 필요하기는 하나 또 하나의 어프로치는 溫度를 올리는 일이다. 예를 들면, LMTD(1次系에서 2次系로)가 약10℃ 상승하면 같은 규모의 플랜트라도 약20% 많은 熱이 옮겨진다(혹은 逆으로 플랜트의 규모를 축소시키는 것도 가능하다). 이것이 제기하고 있는 문제는 構造強度와 燃料의 개발이다.

5. 核燃料와 核燃料週期

유럽에서의 混合酸化物燃料의 개발은 돈레이 高速爐(DFR) 및 라프소디에서 1960년대에 시작하여 현재는 주로 피닉스, DFR 및 KNK2를 사용해서 행해지고 있다. 이들 爐의 大型實證實驗을 베이스로 하여 오늘날에는 燃燒度 약10%(약80,000MWD/T)의 상업규모 발전소用으로 충분히 신뢰성이 높은 제품을 제작할 수 있다고 생각하고 있다—예를 들면, SPX1의 初期裝塡燃料는 피닉스에서의 多年間 統計的實證에서 70,000MWD/T가 보증되고 있으며 또 後의 연료는 100,000MWD/T까지 보증을 확대하기로 되어 있었다. 燃燒度는 핵연료주기 코스트에서 가장 중요한 설계파라미터이며, 가장 높은 燃燒度가 얻어지는 것이 명백하다— 商業爐의 설계에서는 20%(또는 160,000MWD/T)가 달성가능한 목표라고 생각되고 있다. 그 이익은 크다—燃燒度의 증가와 거의 비례하고 있으며(濃縮度의 증가가 이익을 흡수해버리는 熱中性子爐와는 대조적이다), 따라서 pin被覆管과 sub-assembly의 改良材料의 加一層 개발이 앞으로 유럽計劃에서 커지는데 그 이유는 간단히 양해될 것이다. 高性能이고 安全한 연료개발의 중요성을 생각하면, 특히 이 목적을 위해 사용되는 PEC爐의 건설에 대한 유럽의 관심은 옳다고 하겠다.

核燃料週期의 개발, 특히 재처리는 歷史가 짧다. 그것은 중요한 문제이다—새로운 協力體制下에서 유럽의 電力會社가 일치되어 행동한 최초의 움직임은 핵연료주기에 관한 수요에 대한 聲明을 공식으로 발표하는 것이었고, 그중에서도 가장 강조되고 있는 것은 再處理로서 그 중요한 점은 다음과 같다.

○實證段階는 照射된 燃料의 재처리를 포함시켜야 한다.

○豫定工場의 건설 및 운전에 관한 구체적인

推定에 따르는 종합적이고도 신뢰할 수 있는 코스트 데이터가 필요하다.

○파이로트 플랜트로 부터의 경험 및 照射된 燃料가 발생할 것이 예상됨을 고려해서 「再處理業者」는 공동으로 最適規模의 플랜트를 건설해야 할 것이다.

○電力會社는 코스트推計値에 대한 보증을 얻는데 있어서 코스트에 대해서 완전히 밝힐 것을 구하고 있다.

實證段階에 하나의 플랜트라는 개념은 주로 이들의 요구를 반영시킨 것이며, 燃料會社는 플랜트의 중요한 特性을 정하기 위한 공동작업을 추진하고 있다. 플랜트의 규모는 60~80톤/年으로서 商業爐 數基를 차례로 건설할 경우의 最適規模이다. COGEMA는 PURR計劃(200톤/年)에 대해서 연구를 한후 Marcoule에 MAR 600計劃(60톤/年)을 추진하고 있으며, 한편 영국은 EDRP(유럽實證再處理工場)이라고 칭하는 같은 규모의 플랜트 건설계획을 돈레이에서 추진하고 있다. 小規模로 나라별로 독자의 플랜트를 다수 건설한다는 것은 대단히 비용이 많이 드는 방법이라는데 주의할 필요가 있다.

한편, PFR燃料는 DNE에 있는 專用의 D1206 플랜트에서 약5년 정상적으로 재처리되고 있다. DNE는 당초에는 DFR의 금속연료用으로 사용되었던 것이다. PFR은 완전히 리사이클 플루토늄으로 운전되고 있다. 마찬가지로 피닉스의 연료는 Marcoule의 SAP시설에서 정상적으로 재처리함과 동시에 라아그에서도 熱中性子爐燃料로서 稀釋하여 재처리되고 있다. 현재까지의 경험은 다음과 같다.

○英國 : 8톤再處理

○프랑스 : SAP에서 9.5톤 재처리, 라아그에서 9.5톤 재처리

현재 일부 연료는 피닉스에서 3回 리사이클되고 있다. 피닉스 전용의 새로운 5톤/年의 플랜트(TOR)는 1986年末에 운전개시되었다.

이와 같이 高速爐燃料再處理에 관한 많은 경험이 유럽에서 급속히 축적되고 있으며 엔지니어링面에서의 妥當性, 코스트 및 신뢰성에 대한 自信을 높이고 있다. MAR600또는 EDRP의 설계·건설은 주로 旣存의 기술을 이용하였다.

6. 安 全 性

電力會社는 기본적으로 각각 자기나라에서 현재 熱中性子爐에 대해서 행해지고 있는 것과 같은 基準, 標準 및 절차를 사용해서 認許可를 取得할 수 있는 高速爐發電所를 바라고 있다. 영국에서는 공식적으로 아직 PWR의 認許可가 승인되고 있지 않으나 현재 SizewellB에서 이루어지려고 하고 있는 중이다. PFR, 피닉스, SNR300 또는 SPX1이 똑 같은 認許可를 얻었다고는 할 수 없으므로 實證時期의 중요한 목적의 하나는 이 문제에 대한 경험을 쌓는 것이다. 그 이유는 實證爐는 商業規模이며 전력회사가 熱中性子爐와 같이 所有하며 라이센스를 얻을 수 있다면 아무런 不明한 점도 없고 擴大의 필요도 없으므로 이것이 現實로 될 수 있다고 믿고 있다.

高速爐는 많은 特性을 가진 爐이나 과거에는 대단히 確率이 낮은 仮想事故의 결과를 평가하여 이에 대응하도록 설계를 조정하는 것에 不當하게 주력하였기 때문에 그점이 대단히 애매하게 되어 있었다. 현재 유럽에서 외부에 대해서 큰 영향을 줄 수 있는 사고가 우수한 설계에 의해 認許可當局의 규제에 의해 요구되고 있는 낮은 確率이 되게 하는 것에 중점을 둔 공통의 어프로치가 개발되고 있다. 이것은 종래의 仮想事故를 「設計베이스의 外」라고 하고 있다. 예를 들면 프랑스에서 SPX1은 부당하게 엄격한 基準을 채택했던 것은 확실하나 SPX2 의 詳細設計는 프랑스安全當局이 작성한 豫備安全要件을 만족시키고 프랑스의 PWR과 같은 安全레벨로 하는 것을 목표로 하고 있다. 그 하나의 성과는 爐心破壞事故가 設計베이스에 들어있지 않다는 것이다. 이것은 대량의 R & D 및 分析의 결과

이와 같은 사고의 確率은 극히 작다고 하는 주장이 받아들여졌기 때문이다.

이와 같은 배경에 의해서 설계자는 高速爐의 훌륭한 安全特性을 충분히 이용할 수가 있다. 즉, 低壓喪失이 있을 수 없다는 것, 2重密閉의 冷却材, 나트륨 풀의 큰 熱容量 및 冷却材沸騰까지의 큰 여유 및 자연순환의 능력이다.

주요한 설계상의 요건은 신뢰성이 높은 운전정지 및 崩壞熱除去시스템의 제공에 있다고 할 수 있다. 後者에 대해서는 유럽의 설계에서는 모두 1次系回路에 전용 崩壞熱放出(DHR) 回路(NAK 또는 NA卦入)가 있고 일부의 설계에는 強制循環을 보증하고 있는 것도 있으나, 自然循環에 의해 운전가능하다. 더구나 나트륨 풀의 熱容量이 크므로 곧바로 操作하지 않더라도 許容할 수 없는 온도가 되기까지에 많은 시간적 여유(5～10시간)가 있다—운전원이 높이 평가하는 특성—이것은 DHR에 대해서 요구되고 있는 신뢰성을 달성하는 코스트를 삭감할 수가 있다. 「設計베이스」 이상으로 認許可當局은 仮想事故의 결과에 대해서 검토할 것을 요구하는 경향이 있는데, 많은 R & D의 결과 溶融燃料와 나트륨사이의 熱反應에서 예상되는 결과는 현재 대단히 적어지고 있으며 1次系回路 및 지붕으로 충분히 견딜 수 있다는 것을 알았다.

이와 같이 운전정지 및 DHR에 대한 工學的 安全裝置가 설계자에 대해서 타당한 challenge가 될 것 같은 爐가 구상되는데, DHR에 대해서는 시스템의 고장에 대해서 큰 여유가 있어서 운전원이 급하게 조치를 취하지 않아도 좋도록 되어 있다. 유럽 풀의 설계를 自信을 가지고 기다릴 수 있으며, 熱中性子爐보다 認許可 取得이 어렵지 않을 것이다.

7. 코 스 트

實證段階의 發電所에 대해서 유럽의 電力會社가 아직 分担比率을 정하지 않고 있으나 코스트를 분담하여 자금을 낼 예정이다. 이 결정에 의해 리스크가 감소하는 것은 어느 정도 바람직하며 코스트나 다른 競合關係에 있는 시스템과의 비교에 대한 關心이 희박해 지는 것은 아니다. 實證發電所의 코스트에 대한 정확한 상세를 밝히는 것은 불가능하다—이것은 고객에게 제출하는 완전하게 코스트를 계산한 詳細設計에 의해서만 얻어질 수 있는데, SNR800과 SPX 1 다음의 새로운 발전소는 아직 이 단계에 도달하고 있지 않다. 그러나 전망은 밝다. 低코스트를 목표로 한 설계는 비교적 최근의 것이라는 것을 인식할 필요가 있다. PFR과 피닉스의 완성직후에 작성된 商業규모 발전소의 최초의 설계는 그 성능에 대한 신뢰성을 높이기 위해서 原型爐 엔지니어링面에 모험을 하는 것을 최소한도로 中止시킨 것은 이해할 수 있다. SPX1은 이 범주에 드는 것으로서 그 건설, 認許可取得 및 운전개시가 대체로 코스트와 계획면에서 예정한대로 였다는 것은 이 어프로치가 옳았다는 것을 증명하고 있다. 1977년경에 완성된 영국의 이것에 상당하는 CDFR은 건설되지 않았다. 이들을 베이스로 출발하여 기본적으로는 原型爐의 경험과 현재 추진되고 있는 R & D의 성과를 이용해서 작성된 SPX2, SNR2, CDFR(84)로 정리된 유럽의 다음 설계는 주로 小型化를 추진함으로서 대폭 코스트 삭감에 성공하고 있다. 이 프로세스에서 유럽의 설계팀은 전체의 코스트를 지배하는 요인에 대해서 뚜렷하게 해명하고 공동으로 건설할 先驅的 發電所의 계획에서 追求, 實證해야할 아직도 加一層의 코스트 삭감 가능성을 밝혔다. 또 미국과 일본에서도 같은 시기에 같은 설계·코스트의 경향이 보여진 것에 주의할 필요가 있다.

가장 관심을 끄는 것은 이미 완성된 代替物과의 비교이다. 그러나 이것은 기본적으로는 국가의 문제라는 것을 이해할 필요가 있다. 實證爐는 石炭火力 또는 石油火力플랜트의 發電코스트보다 대폭 싸다고 널리 생각되고 있다—적어도 이들 발전소는 전력회사에 있어서는 不當

한 投資가 아니라는 것을 나타내는 중요한 사실이다. 熱中性子爐와의 비교도 있다. 공표되고 있는 데이터로 다음과 같이 말할 수 있다.

i. 西獨에서는 SNR 2의 자본코스트는 BOP의 절약이 大型NSSS의 코스트를 흡수하므로 현재의 서독 LWR 자본코스트와 대단히 가깝다고 생각되고 있다. 이 개념은 BOP는 아무런 안전성 관련의 특수한 特性을 필요로 하지 않는 「在來型」이며, 본질적으로 熱效率이 높다(40% cf 30%)는 利點을 충분히 실현할 수 있다. 안전성 관계의 플랜트는 1次系回路에 密閉시켜 자연순환의 본질적인 이점과 pool설계의 큰 熱容量을 최대한으로 이용한다. 이것은 LMFBR의 안전특성이 어떻게 코스트面에서 優位性으로 轉移되어 있는가를 나타내는 좋은 例이다.

ii. 프랑스에서 SPX 2의 推定値는 자본코스트가 현재 LWR의 1.5정도라고 하고있다 —물론 이것은 한 사이트에 4基 건설하는 것 처럼 많은 플랜트가 시리즈로 發注되는 것이 전제이다. 이 시리즈발주에서 얻어지는 경제적 이익은 長期에 걸쳐 高速爐에서 얻어지는 것으로(기본적으로 경쟁력을 결정하는) 본질적인 차이가 적으며, 그외에도 코스트 삭감이 가능하다.

iii. 英國에서 CDFR (또는 UK 1)에 대해서 최근 공표된 數値는 1982년에 정부가 실시한 영국의 高速爐에 관한 정책에 대한 公式檢討에서 사용한 數値보다 상당히 좋아지고 있다. 1982年에는 최신의 AGR (현재 건설이 거의 완료되고 있는 125KWe의 Heysham 2 號機)과 차이가 22%였던 것이 제로로 되었다. 영국내의 PWR과 비교는 어렵다. 그 이유는 아직 건설경험이 없어서인데 시리즈發注 플랜트사이의 本質的 差(이것이 가장 중요한 비교)는 從來經濟性評價에서 생각된 것보다 적은 것으로 생각되는데 아마 10~20% 정도일 것이다.

이와 같은 코스트비교는 유명한 분야이며, 代替案은 「엔지니어링」을 비교하는 것이다. 잘 알려진 表現은 「高速爐는 中間(혹은 2次) 冷却回路가 있어서 비싸다」라는 것이다. 그러나 엔지니어링시스템 전체를 보는 것이 필요하다. 서독의 어프로치는 BOP를 「在來型」으로 만들면 LWR의 그것보다 싸다는 것이 좋은 例이다. 영국의 高速爐設計에서는 터빈 및 관련플랜트(전체의 50%를 占한다)는 현실로 최근의 경험을 가진 AGR발전소의 것과 같은 것이다— 따라서 이 플랜트 주요 부분의 코스트에 대해서는 不明確한 곳이 없다. 같은 結論이 土木工事(콘크리트의 m³量), 冷却材펌프, 蒸氣發生器, 制御와 計裝 및 保守施設 등에 대한 엔지니어링面에서의 비교에서도 얻어진다. 이와 같은 分析은 적절한 비교를 하면(즉 「같은 것들과 같은 것들」) 차례로 發注되는 플랜트의 코스트 차이는 종래 생각되어온 것보다 적다는 것을 示唆하고 있다. 이점에 대한 같은 결론이 미국과 일본의 연구에서도 얻어지고 있다.

高速爐核燃料週期 코스트에 대해서 현재 진행되고 있는 평가에 의하면 熱中性子爐에 대한 전통적인 利點은 아직 유지되고 있다. 高速爐는 현재의 가격예측에서도 熱中性子爐 核燃料週期의 대단히 중요한 구성요소인 우라늄의 공급이나 濃縮役務에 대한 코스트를 필요로 하지 않는다. 高速路核燃料週期 코스트의 주요한 구성요소인 加工과 再處理에 대한 예측은 근년에 와서 상당히 확실한 것으로 되었다. 原型爐 및 최근에는 商業규모의 SPX 1 연료가공에서 많은 경험이 얻어지고 있으며, 이들의 코스트는 확실한 것이다. 不確實한 부분은 비교적 적다. 그것은 유니트 코스트가 주로 운전의 인건비와 subassembly의 콤포넌트(즉, pin의 tube, 나팔 등)의 코스트로 정해지기 때문이다. 이것과는 대조적으로 플랜트의 資本코스트는 再處理의 최대의 요인인데, 파이로트 플랜트의 경험에서 많은 상업규모 플랜트의 詳細하고 완전한 코스트計算을 한 설계연구가 완료되어 이 面에서도 크게 진행되고 있다. 燃燒度를 15~20%로 仮定한 發電코스트의 데이터評價에서 高速爐의 핵연료

주기 코스트는 우라늄가격을 비관적으로 보아서 상승하지 않는다고 가정하더라도 熱中性子爐보다 상당히 싸다는 것이 명백하다.

이와 같이 有利한 코스트를 실현하려면 실제의 플랜트에서 계속하여 設計, R & D 및 實證을 하는 것이 필요하다 — 이것이 實證段階의 큰 목적이다. 그 결과는 電力에 있어서 상업적으로 매력이 있는 모델이다. 그 매력은 우라늄공급에 대해서 戰略的으로 有利하다는 것 뿐만 아니라 전통적으로 필연적이라고 생각되어 왔던 우라늄가격의 대폭 상승이 없더라도 順次로 發注되는 플랜트에 대해서 코스트面에서도 매력이 있는 것이다.

8. 結 論

유럽高速爐計劃의 進展에 대한 검토에서 현재의 技術狀況 및 코스트의 평가를 고려하면 實證爐를 순차로 건설하는 계획의 設計·建設 및 運轉에 공동으로 投資한다는 것은 21세기 初에 코스트가 싸고 성능이 높은 商業用高速爐를 이용할 수 있게 한다는 목적을 위해서 健全한 어프로치라고 강조되고 있다. 이와 함께 플랜트壽命의 연장, 稼動率의 향상, 出力密度의 增大, 高燃燒度燃料 및 低코스트燃料週期 플랜트를 실현하기 위해 構造強度에 관한 연구를 중시한 주로 設計主導의 R & D를 행하게 될 것이다.

2000年의 原子力發電과 核燃料週期

2000年까지의 燃料製造能力 推移

(톤·重金屬/年)

國 名	燃料타입	1984	1985	1990	1995	2000
벨기에	LWR	400	400	400	400	400
	MOX	5	5	35	35	35
카나다	HWR	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500
프랑스	LWR	600	600	1,100	1,100	1,100
	GCR	790	790	790	0	0
	MOX	25	25	125	125	125
西獨	LWR	1,350	1,350	1,400	1,500	1,600
	MOX	25	25	50	80	100
이탈리아	LWR	26	26	67	218	301
日本	LWR	1,300	1,400	1,500	1,500	1,500
	MOX	10	11	56	56	56
스페인	LWR	0	50	200	200	200
스웨덴	LWR	400	400	400	400	400
英國	LWR	200	200	200	300	400
	GCR	1,300	1,300	1,300	1,300	1,300
	MOX	6	6	6	6	6
美國	LWR	3,500	4,400	4,400	4,400	4,400
OECD合計		11,437	12,488	13,529	13,120	13,423

2000年까지의 年間플루토늄需要

(톤/核分裂性플루토늄)

國 名	1984	1985	1990	1995	2000
프랑스	1.5	1.5	1.5	9.5	9.5
西獨	0.6	0.5	1.7	2.5	4.0
日本	0.2	0.2	1.2	1.2	1.2
英國	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
OECD 合計	2.5	2.4	4.6	13.4	14.9

2000年까지의 再處理能力

(톤·重金屬/年)

國 名	燃料타입	1984	1985	1990	1995	2000
프랑스	LWR	220	250	600	1,750	1,750
	GCR	300	500	0	0	0
	FBR	2	5	5	5	5
西獨	LWR	35	35	35	350	350
日本	LWR	210	210	210	1,010	1,010
英國	Magnox	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500
	LWR	0	0	1,200	1,200	1,200
OECD 合計		2,267	2,500	3,550	5,815	5,815

經濟協力開發機構·原子力機關(OECD·NEA)는 原子力發電과 核燃料週期에 대한 데이터를 集計, 公表했다. 다음은 이 報告書에 수록된 原子力發電量과 우라늄濃縮 등에 대한 2000年까지의 OECD加盟國의 規模, 需給豫測 등이다(數値는 暫定値, 豫測値 등을 포함).

2000年까지의 濃縮能力과 需要

A. 濃縮能力 (톤·SWU/年)

國名	濃縮方法	1984	1985	1990	1995	2000
프랑스	擴散	10,800	10,800	10,800	10,800	10,800
URENCO 西獨, 네덜란드, 英國)	遠心分離	1,250	1,650	3,000	4,500	6,000
日本	遠心分離	50	50	250	1,200	2,800
美國	擴散	19,500	19,500	19,500	19,500	19,500
OECD合計		31,600	32,000	33,550	36,000	39,100

B. 年間濃縮需要 (톤·SWU)

國名	1984	1985	1990	1995	2000
벨기에	450	700	700	830	830
핀란드	260	260	260	320	430
프랑스	4,500	5,300	6,600	8,000	9,300
西獨	2,100	2,200	2,600	2,800	3,000
이탈리아	115	115	320	970	1,650
日本	4,700	2,800	6,200	7,700	9,500
네덜란드	70	70	70	210	350
스페인	350	714	687	757	1,171
스웨덴	800	850	850	850	850
스위스	370	370	370	370	460
터키	0	0	240	91	91
英國	660	670	730	1,190	1,640
美國	8,820	8,300	10,300	11,100	12,400
OECD合計	23,195	22,349	29,927	35,188	41,672

OECD各國의 原子力發電量豫測

(10億KWH, Net)

國名	1984			1985(暫定的			1990			1995			2000		
	合計	原子力	%	合計	原子力	%	合計	原子力	%	合計	原子力	%	合計	原子力	%
오스트레일리아	107.0	0.0	0.0	113.5	0.0	0.0	137.2	0.0	0.0	150.0	0.0	0.0	164.0	0.0	0.0
오스트리아	40.0	0.0	0.0	44.5	0.0	0.0	49.4	0.0	0.0	55.2	0.0	0.0	59.5	0.0	0.0
벨기에	51.9	26.4	50.9	54.2	32.4	59.8	59.6	33.4	56.0	58.5	33.4	57.1	71.9	41.7	58.0
카나다	412.3	49.3	12.0	446.4	57.1	12.8	493.4	93.6	19.0	537.8	108.2	20.1	601.1	109.1	18.2
덴마크	21.2	0.0	0.0	26.9	0.0	0.0	30.5	0.0	0.0	33.8	0.0	0.0	36.9	0.0	0.0
핀란드	43.3	17.8	41.1	47.1	18.0	38.2	50.0	15.7	31.4	57.0	19.1	33.5	64.0	25.8	40.3
프랑스	309.9	181.7	58.6	328.8	213.1	64.8	370.0	270.0	73.0	435.0	326.0	74.9	500.0	392.0	78.4
西獨	371.4	87.7	23.6	383.7	119.6	31.2	395.2	136.0	34.4	418.8	136.0	32.5	444.2	154.2	34.7
英國	23.1	0.0	0.0	25.3	0.0	0.0	36.6	0.0	0.0	50.2	0.0	0.0	68.8	0.0	0.0
아이스랜드	3.9	0.0	0.0	3.8	0.0	0.0	4.1	0.0	0.0	4.4	0.0	0.0	4.7	0.0	0.0
아일랜드	11.0	0.0	0.0	10.8	0.0	0.0	12.3	0.0	0.0	14.5	0.0	0.0	16.6	0.0	0.0
이탈리아	173.4	6.6	3.8	176.6	6.8	3.9	229.6	17.3	7.5	269.9	34.6	12.8	310.0	69.0	22.3
日本	611.7	126.7	20.7	602.5	157.0	26.1	685.0	190.0	27.7	810.0	290.0	35.8	955.0	375.0	39.3
룩셈부르크	0.9	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.1	0.0	0.0	1.2	0.0	0.0	1.3	0.0	0.0
네덜란드	60.3	3.5	5.8	60.3	3.2	5.3	60.3	3.5	5.8	65.0	8.3	12.8	72.5	14.3	19.7
뉴질랜드	25.5	0.0	0.0	28.3	0.0	0.0	29.9	0.0	0.0	32.6	0.0	0.0	35.8	0.0	0.0
노르웨이	100.6	0.0	0.0	103.2	0.0	0.0	104.7	0.0	0.0	111.5	0.0	0.0	120.0	0.0	0.0
포루투갈	18.6	0.0	0.0	17.9	0.0	0.0	23.0	0.0	0.0	29.4	0.0	0.0	35.8	0.0	0.0
스페인	117.0	21.9	18.7	124.4	26.7	21.5	139.0	45.7	32.9	163.0	51.8	31.8	190.5	57.9	30.4
스웨덴	120.6	48.6	40.3	132.3	55.9	42.2	133.8	63.4	47.4	135.0	63.4	47.0	135.0	63.4	47.0
스위스	49.2	17.4	35.4	53.5	21.3	39.8	55.7	21.5	38.6	59.3	21.5	36.3	63.0	26.0	41.3
터키	28.7	0.0	0.0	30.3	0.0	0.0	64.9	0.0	0.0	105.3	6.0	5.7	149.3	16.5	11.1
英國	264.2	47.3	17.9	266.0	52.0	19.5	274.0	77.0	28.1	289.0	75.0	26.0	327.0	121.0	37.0
美國	2,416.3	327.6	13.6	2,469.0	384.0	19.6	2,970.0	574.0	19.6	3,401.0	644.0	18.9	3,670.0	659.0	18.0
OECD合計	5,382.0	962.5	17.9	5,550.3	1,147.1	20.7	6,366.3	1,541,1	24.2	7,287.1	1,817.3	24.9	8,096.9	2,124.9	26.2