

## IV. 核燃料의 効率的 利用

金 時 煥 · 李 相 根

韓國에너지研究所 輕水爐核燃料事業部

### 1. 序 論

우리나라와 같이 에너지 賦存資源이 貧弱한 國家에서 에너지 問題는 國家經濟安定과 直結되는 중요한 問題가 되고 있다. 制限된 國內에너지資源과 저렴한 安定된 電力을 供給할 수 있는 에너지源의 確保, 環境문제 등을 고려할 때 原子力發電이 우리나라의 主 에너지源이 되는 것이 必然의이다. 原子力發電은 有望한 에너지源으로 開發되어 왔으며, 특히 1970년 初와 末에 發生한 石油危機로 因하여 石油代替 에너지의 하나로 強力하게 開發推進되어 왔다. 原子力發電이 通常의 化石燃料를 使用하는 發電에 비하여 1970년대 후반에 이르기까지 우위를 유지할 수 있었던 것은 저렴한 核燃料費에 의한 經濟的 측면에서의 잇점이 두드러졌기 때문이다. 그러나 外債의 累増 등 現在의 國內經濟與件이 相當히 어려운 狀況에 있기 때문에 原子力の 有燃炭 火力發電에 대한 경제적인 우월성의 低下는 結局 大型外資事業인 原子力發電計劃을 縮小하는 原因이 되고 있다. 특히 美國에서의 安全規制強化로 인한 建設工期의 지연과 이로 인한 建設費의 상승은 電力會社로 하여금 신규 原子力發電所에 대한 投資를 기피케 하는 주요 원인이 되고 있다. 이러한 狀況에서 今後 原子力發電에 대한 가일층의 信賴性, 經濟性 向上을 期하는 것이 매우 중요하며 이를 위한 方法을 여러가지 측면에서 강구할 必要性이 있다.

原子力發電所의 發電費를 구성하는 요소로는 크게 ㅅ서 建設費(construction cost), 運轉補修費(operation and maintenance cost) 그리고 核燃料費(nuclear fuel cycle cost)의 세가지로 구분된다. 이 가운데 核燃料費가 전체 發電費에서 ㅅ유하는 비중은 發電所利用率을 65%라고 가정할 때 약 15% 정도에 이르는 것으로 알려져 있다. 따라서 核燃料의 이용을 극대화하더라도 發電單價의 ㅅ감효과가 미미할 것으로 평가되기 ㅅ지만 發電所 수명기간에 걸친 장기 효과로 볼 때 그 ㅅ감 효과는 실로 막대하다. 더우기 核燃料의 ㅅ율적인 이

용이 發電所의 利用率 提高 혹은 ㅅ동 수명의 연장에 직접적인 영향을 미친다는 사실과 에너지 부존자원이 빈약한 우리나라 실정을 감안할 때 核燃料의 ㅅ율적 이용이야말로 ㅅ급하게 추구해야 할 ㅅ표가 되고 있다.

현재 우리나라는 加壓輕水爐가 상용가동중인 ㅅ子力發電所의 주종을 이루고 있으므로 ㅅ문에서는 加壓輕水爐에 국한시켜 核燃料의 ㅅ율적 이용방안을 제시키로 한다.

### 2. 現행 核週期の 問題點

燃料의 ㅅ율적 이용이라 함은 채광된 ㅅ위 ㅅ량량의 ㅅ료로부터 가장 ㅅ제적인 ㅅ 방법으로 ㅅ출할 수 있는 에너지를 ㅅ대로 함에 그 ㅅ적을 두고 있다. 그러나 ㅅ子力發電에 있어서는 ㅅ라늄 ㅅ원을 ㅅ약하는 ㅅ안이 있는 한편, 오히려 ㅅ라늄 ㅅ원의 ㅅ용은 ㅅ증가하여도 發電單價 자체는 ㅅ어뜨는 ㅅ안도 있으므로 ㅅ택 가능한 것이 ㅅ교적 ㅅ양하다. ㅅ라늄 ㅅ원을 ㅅ약할 수 있는 ㅅ안도 ㅅ교적 ㅅ순한 것으로부터 ㅅ주 복잡한 것까지 있으며 ㅅ약효과 자체는 ㅅ주 크지만 ㅅ제성 및 ㅅ책적인 ㅅ려로 인하여 ㅅ용이 ㅅ한을 받는 ㅅ우도 있다.

예를 들어 ㅅ재의 輕水爐에서 연소된 ㅅ用後 核燃料를 ㅅ학적으로 ㅅ처리하여 ㅅ용가능한 ㅅ라늄과 플루토늄을 회수하고, 이를 ㅅ시 輕水爐 혹은 ㅅ速增殖爐에 ㅅ순환시키면 ㅅ라늄 ㅅ원의 ㅅ감 ㅅ과는 실로 ㅅ대하다고 할 수 있다. 그러나 ㅅ速增殖爐는 ㅅ증한 建設費 ㅅ담과 ㅅ른 여러가지 ㅅ인으로 인하여 ㅅ발이 ㅅ출한 ㅅ면이며, 輕水爐에의 플루토늄 ㅅ순환은 ㅅ술 자체는 이미 ㅅ립되어 있다고 할지라도 ㅅ처리에 ㅅ요한 ㅅ비가 ㅅ직은 ㅅ싸고 ㅅ올려 核武器 ㅅ산에 대한 ㅅ려로 인하여 ㅅ용화가 ㅅ극히 ㅅ지부진한 ㅅ면이다.

따라서 ㅅ用後 核燃料를 ㅅ處理하므로써 ㅅ용가능한 ㅅ라늄과 플루토늄을 회수하는 것이 ㅅ제로서는 ㅅ극히 ㅅ률명한 ㅅ장이며 ㅅ올려 ㅅ제 核燃料 ㅅ용에 대한

세계적인 추세도 一週型 核燃料 週期(Once-through Fuel cycle)를 전제로한 연구에 집중되고 있다. 여기서도 一週型 核燃料 週期를 대상으로 하여 核燃料의 효율적 이용방안을 제시하고자 한다.

### 3. 核燃料의 效率의 利用 方案

一週型 核燃料 週期를 전제로 했을 경우 加壓輕水爐에서 核燃料를 효율적으로 이용하기 위한 方案으로는

- (1) 爐心設計 및 管理 技術의 向上
- (2) 長週期 運轉
- (3) 利用率 提高

의 세가지가 현재로는 가장 타당한 것으로 알려져 있다. 이들은 서로 독립적이라기 보다는 매우 유기적으로 연관이 되어 있다. 이들중 첫째번 방안에서는 효과적인 爐心設計와 管理를 통하여 우라늄 資源을 절감할 수 있는 방법을 주로 기술하였으며, 두번째와 세번째 항목에서는 우라늄 자원에 대한 需要는 증가하지만 發電單價는 줄일 수 있는 방법이다.

#### 가. 爐心設計 및 管理技術의 向上

여기서 爐心設計 및 管理技術의 向上이라 함은 오늘날 實제적으로 채택하고 있는 爐心管理 技法과의 차이라는 뜻을 내포하고 있다. 따라서 여기서는 현재 研究·開發 단계에 있는 것으로부터 다른 일부 국가 및 電力會社에서는 이미 실시하고 있지만 우리나라에서는 아직 채택하고 있지 않은 것을 포함한다.

##### ① 廢棄燃燒度 增加

현재 우리나라 加壓輕水爐에서의 使用後 核燃料에 대한 평균 廢棄燃燒度는 약 33,000MWD/MTU이다. 그리고 核燃料集合體의 구조물 변경(Inconel spacer grid→Zircaloy spacer grid)으로 인한 中性子 寄生吸收(parasitic absorption)의 감소 및 H/U 비율의 최적화에 의한 이른바 最適核燃料集合體의 도입으로 廢棄燃燒度를 약 39,000MWD/MTU로 증가시키는 방법을 골 채택할 예정이다.

廢棄燃燒度의 向上은 주로 두가지 측면에서 제한을 받는다. 즉 廢棄燃燒度의 증가는 核燃料가 原子爐 內에 裝전되어 있는 시간을 연장시키며 이로 인하여 被覆管 外부의 酸化度 증가와 內부의 核分裂 生成物 누증에 따른 內壓의 상승을 초래한다. 이 問題를 해결하기 위한 實證實驗이 현재 활발하게 진행중에 있으며 현재의 核燃料 技術로도 1990년도에 이르러서는 加壓輕水爐의 평균 廢棄燃燒度를 45,000MWD/MTU로 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

이와 같이하여 현재의 평균 廢棄燃燒度 33,000MWD/

MTU를 45,000MWD/MTU로 상승시키면 우라늄 자원의 節約효과는 약 7%에 달할 것으로 평가된다.

##### ② 低漏出 裝填 模型

加壓輕水爐에서는 전통적으로 再裝填時 爐心의 가장 자리에 있던 核燃料를 중앙부근으로 옮기고 새로운 核燃料를 가장자리에 삽입하여 왔다. 그러나 爐心設計技術의 改善와 可燃性毒物質의 개선 활용(예 : Gadolinia를 포함한 燒結體 및 硼素 塗布 燒結體의 개발), 그리고 運轉制限條件의 完화는 새로운 核燃料를 爐心 內부에 배치하므로써 核燃料를 보다 효율적으로 이용할 수 있는 가능성을 제시하고 있다.

이 방법은 그간 原子爐 壓力容器的 熔接 부위에 대한 高速中性子 被曝量을 감소시키므로써 壓力容器的 健全성을 유지시키는 한편, 나아가 原子爐의 實제가동 수명을 연장시키기 위한 수단으로 일부 활용되고 있었다. 그러나 앞으로 기술할 原子爐의 長週期 運轉(예 : 18개월 週期)과 관련하여 核燃料集合體의 수가 爐心 가장자리에 裝전하기에는 너무 많고 아울러 경제적인 요인으로 인하여 低漏出 裝填 模型의 채택이 불가피하다.

이 방법을 활용할 경우 우라늄 소요량의 변화는 가동 주기에 따라 다르지만(出力 尖頭因子 및 減速材 溫度係數의 제한으로 인함.) 대략 4% 정도의 節約효과를 기대할 수 있다.

##### ③ 블랭킷(Blanket) 物質 活用

發電用 原子爐에서 中性子束은 原子爐心의 上端部 및 下端部 부근에서 급속하게 줄어든다. 따라서 核燃料集合體의 전체 길이에 걸쳐 같은 濃縮度의 우라늄을 사용하기 때문에 같은 投資로 단위 길이당 에너지생산이 줄어드는 것과 같은 효과를 가진다. 그러므로 核燃料集合體의 上端部와 下端部에 裝입되는 濃縮우라늄을 天然우라늄으로 대체시키면 여기에 상응하는 우라늄資源 節約효과를 기대할 수 있다.

이 방법은 沸騰水型原子爐에서는 이미 상당 수준 활용되고 있지만 加壓輕水爐에는 아직 널리 활용되고 있지 않다. 이는 爐心 上端部와 下端部에서 내는 出力이 현재에 비해서 약간 줄어드는 반면, 爐心 中央部에서 出力을 약간이나마 상승시키기 때문에 運轉制限條件을 完화시킬 경우 더욱 유력한 방법이 될 수 있다. 爐心의 上端部와 下端部에 天然 우라늄으로 된 블랭킷을 사용하던 현재에 비하여 약 3% 정도의 우라늄 資源節約 효과가 있을 것으로 기대된다.

##### ④ 軸方向 出力調整

核燃料棒의 높이에 따라 다른 濃縮度의 우라늄을 사용하거나 可燃性 毒物質의 양을 核燃料의 높이에 따라

다르게 조절하면 보다 나은 軸方向 出力分布를 가지게 할 수 있다. 後者의 경우 沸騰水型原子爐에 대하여 스웨덴의 ASEA-ATOM이 이미 활용하고 있으며 우리나라 절감효과도 약 3%에 이른다고 보고하고 있지만 加壓輕水爐에 이 技術을 활용하는 것은 장래가 불투명할 뿐만 아니라 우리나라 절감효과도 평가하기가 아주 어렵다.

더우기 이 방법은 成型加工費의 상승이 불가피하다는 결점을 지니고 있지만 沸騰水型原子爐와 유사한 우리나라 資源 절감효과가 기대된다.

#### ⑤ 코스트다운(Coast down) 運轉

코스트다운 運轉은 週期末에 이르러 超過反應度の 여유가 거의 없을 때 冷却水의 溫度를 낮추거나 原子爐 出力準位를 내림으로써 陽의 反應度를 삼입하여 運轉週期的 長이를 연장시키는 爐心管理技法이다. 즉 發電所의 電氣出力을 적절한 出力準位에 이를 때까지 서서히 혹은 階段函數의 형태로 줄여나가는 爐心管理 技法을 말한다. 코스트다운 運轉을 하는 기간은 電力會社의 電力 그리드에 대한 전반적인 경제성을 최대로 할 때까지로 최적화할 수 있으며 경우에 따라서는 코스트다운 運轉을 할 때와 안할 때의 경제성이 같아지는 시점까지 연장할 수도 있다.

加壓輕水爐는 全出力 상태에서도 冷却水 내의 汽泡 含有量이 거의 없기 때문에 코스트다운 運轉에 있어서 제약을 沸騰水型原子爐에 비해서 많이 받는다. 그러나 經濟性을 최대로 했을 때까지의 코스트다운 運轉에 따른 우리나라 절감효과는 양자가 거의 비슷하게 약 4% 정도일 것으로 추산된다.

#### ⑥ 運轉制限條件의 완화

原子爐心에 대한 安全性 관련制限條件에 의하여 原子爐心의 設計者는 爐心 내의 出力分布가 매우 평탄하게 되도록 核燃料 裝填 模型을 구성하는 경향을 보이고 있다. 불행하게도 이는 극부적인 出力 특히 爐心 중심 부근에서의 出力이 높도록 설계된 것에 비하여 核燃料의 효율적 이용이라는 측면에서 뒤떨어진다.

여기서 우리가 하나 짚고 넘어가야 할 사항은 原子爐 개발 초기에는 技術의 미숙으로 인하여 設計에 되도록 많은 여유를 두었다는 점이다. 그러나 設計技術이 많이 향상된 오늘에 있어서 과도한 여유는 設計者 자신을 구속하여 보다 신축성 있는 爐心管理技術의 도입을 제약하고 있다.

1970년대 초부터 여러나라에서 事故條件 하에서의 原子爐心에 대한 安全性을 입증하기 위하여 실험 및 이론 프로그램을 광범위하게 수행하고 있다. 이들 프로그램을 통하여 核燃料의 局部出力에 대한 제한을 완화

하여도 적정 수준의 安全性을 유지할 수 있다는 결론이 도출되고 있다. 이러한 사실을 근거로 하여 오늘날 核燃料에 대한 制限條件이 조만간 부분적으로나마 완화될 것으로 기대되며, 이는 다시 原子爐心 내의 出力分布를 核燃料의 보다 효율적인 이용을 기할 수 있도록 개선할 수 있는 방안을 제시할 것이 기대된다.

아울러 原子爐心 내에서의 극부적인 出力分布를 감시할 수 있는 계산 모델 및 방법이 개발되었고 또한 오늘날 출력분포의 측정 및 계산에 있어서의 不確實性으로 인한 제한도 줄어들고 있는 추세에 있다.

이 두가지 인자의 결합은 核燃料를 더욱 효과적으로 이용할 수 있는 여지를 제공한다. 加壓輕水爐에서는 運轉制限條件의 완화 만으로는 우리나라 資源 절약 효과가 약 3% 정도일 것으로 추산되지만 이것이 앞에서 기술한 低漏出 爐心裝填 模型과 또 뒤에서 기술할 利用率 提高 방안과 결합될 경우에는 그 효과가 매우 클 것임을 예상할 수 있다.

#### ⑦ 核燃料 서비스

核燃料 서비스는 核燃料集合體와 原子爐 部品の 健全性を 유지하기 위하여 수행하는 核燃料의 수송, 취급, 검사 및 측정, 파손핵연료의 수리, 저장등에 관한 업무를 포함한다. 특히 재장전 기간중에는 핵연료의 손상을 신속히 검사 판정하여 원자로의 안전성 향상 및 운전정지기간을 단축하여 발전소 가동율을 제고시킨다. 통상적으로 輕水爐 核燃料은 3週期동안 爐心에 장전되도록 설계, 제작되나 核燃料 設計, 加工의 잘못 혹은 운전부주의, 원자로의 구조적 결함 또는 취급의 잘못으로 인하여 核燃料가 손상 또는 파손을 입는 경우가 발생한다. 파손핵연료의 발견시에는 응급 재장전 노심 모형 설계업무를 수행해야 하며 또한 파손핵연료의 파손원인을 규명한다. 파손핵연료의 연소도에 따라 파손핵연료를 재수리하여 미연소핵연료를 활용하므로써 우리나라 資源을 절감한다. 이들 핵연료 서비스에 관한 기술 및 장비는 核燃料集合體의 設計구조를 잘 이해한다면 국산화가 가능할 것이다.

#### 나. 長週期 運轉

전통적으로 加壓輕水爐는 發電期間 10개월, 정기 보수 및 核燃料 교체 장전에 필요한 停止期間 2개월이라는 12개월 週期 모드로 운전되어 왔다. 그러나 작금에 이르러 運轉週期를 18개월, 혹은 그 이상으로 연장하여 發電所의 利用率을 향상시키므로써 發電單價를 상당히 절감할 수 있는 방안이 제시되어 많은 電力會社가 이러한 運轉 모드를 실제로 채택하고 있거나 심각하게 고려하고 있다.

우리나라도 原子力2號機에 이 運轉 모드(15個月 주

기)를 '87년경 부터 채택할 예정이며 다른 발전소들도 곧 18개월 주기의 長期間 運轉모드로 전환시킬 계획이 수립되어 있다. 18개월 週期的 特성을 요약하면 다음과 같다.

첫째, 12개월 週期的 경우 3년에 核燃料 교체 장전을 위하여 稼動停止가 일어나는 횟수가 세번인데 비하여 18개월 週期에서는 두번 밖에 되지 않기 때문에 發電所 利用率이 높아진다.

둘째, 같은 양의 에너지를 생산하기 위하여 보다 많은 양의 우라늄을 소모한다.

일반적으로 12개월 週期를 택할 때에는 核燃料 교체 시기를 電力需要가 가장 적은 때로 하고 있다. 그러나 先進國에서의 예에서와 마찬가지로 우리나라도 여름과 겨울의 2차에 걸쳐 電力需要가 급상승하기 때문에 18개월 週期的 채택이 더욱 바람직하다.

18개월 長週期로 운전하면 우라늄 소요량은 12개월 週期에 비하여 약 12%정도 상승된다. 그러나 長週期 운전은 필연적으로 高燃燒度 및 低漏出 裝填模型의 채택을 수반하기 때문에 전반적인 우라늄 소요량의 증가는 그리 크지 않다. 특히 우라늄 소요량이 다소 증가한다 할지라도 利用率의 향상으로 인한 發電費用의 절감 효과가 훨씬 크기 때문에 長週期 운전 模式의 채택이 필요하다.

**다. 發電所 利用率 向上**

原子力發電所의 利用率 向上도 우라늄 소요량에 있어서 증가를 초래한다. 즉 發電所 利用率이 향상되면 같은 기간에 생산되는 에너지의 양이 증가하기 때문에 우라늄 소모도 그만큼 많아지는 것이다.

原子力發電所의 利用率 向上은 크게 發電所의 運營者로서의 입장과 設計者로서의 입장 두가지 측면에서 방안 모색이 가능하다. 發電所 運營者는 가능한 한 事故停止로 인한 가동중지 횟수 및 기간의 단축이라는 측면을 강조하고 設計者는 發電所의 檢査期間 단축 방안과 出力增強에 의한 利用率 向上 방안을 강조한다. 여기서 첫번째 방안은 다른 곳에서 취급하고 있는 명제이므로 여기서는 이로 인한 核燃料 소요량의 변화에 대해서만 간략하게 설명코자 한다. 두번째 방안은 현재 세계적으로 수행되고 있는 내용을 포함하여 좀더 포괄적으로 기술코자 한다.

**① 事故停止 횟수 및 기간 단축**

유럽 및 日本에서의 原子發電所 平均利用率은 70%를 훨씬 초과하는데 비하여 美國은 60%에도 미치지 못하고 있으며 우리나라의 경우 原子力發電所의 운전 경험은 그리 많지 않지만 평균 70%에 육박하고 있다.

전세계적으로 활용되고 있는 原子力 發電技術이 근

본적으로 동일하다는 사실을 감안하면 우리나라도 1990년에 이르면 현재 日本의 수준인 平均利用率 75%에 이를 것으로 예상되며 이로 인한 추가 核燃料 소요량은 적어도 3% 이상이 될 것으로 추정된다.

**② 出力增強에 의한 利用率 提高**

현재 전세계에서 운전되고 있는 대부분의 原子力發電所는 기존의 定格出力을 증강시킬 수 있는 잠재력을 지니고 있다. 실제로 스웨덴과 핀란드에서는 보유하고 있는 沸騰水型原子爐의 定格出力을 조만간 6% 정도 증강시킬 계획으로 있으며, 불란서에서도 독자적으로 제작한 加壓輕水爐의 出力을 약 4%정도 증강시킬 가능성에 대하여 검토하고 있다. 여기서 하나 짚고 넘어가야 할 사항은 原子力發電所의 出力增強이 核燃料 소요량의 증가를 가속시킬 개연성을 지니고 있다는 점이다. 그러나 앞에서 기술한 爐心管理技術의 도입과 核燃料에 대한 制限條件의 완화와 결부시켜야만 核燃料 이용을 최적화 시키면서 동시에 發電所 出力增強이 가능할 것이다.

原子爐의 定格出力을 4% 정도 증강시키면 우라늄 소요량은 약 6% 정도 증가할 것으로 예상된다.

**4. 結 論**

核燃料를 효율적으로 이용함으로써 發電費用을 절감할 수 있는 방안을 다각적으로 검토하였다. 發電費用을 구성하는 여러 요소 가운데 核燃料費는 독자적 혹은 建設費 및 運轉補修費와 結合하여 發電費用에 크게 영향을 미치며 아울러 우라늄소요량의 증가로 인한 核燃料費의 상승이 반드시 發電單價를 상승시키는 요인이 아니라고 판단된다. 核燃料의 효율적 利用에 관한 여러가지 방안에 따른 核燃料 소요량의 변화를 표 1에 요약하였다. 核燃料를 效率的으로 利用할 수 있는 最

**표 1. 각 방안에 따른 우라늄 소요량 변화추정(加壓輕水爐)**

항	목	소요량 변화(%)
폐기 연소도 향상		-7
저누출 장전 모형		-4
블랭킷 물질 활용		-3
축방향 출력 조정		-2
코스트다운 운전		-4
핵연료 제한 조건 완화		-3
장주기 운전		+12
이용율 향상		+3
출력증강		+6

適의 方案을 채택하게 되면 核電力單價가 상당히 節減될 수 있음을 보여 주고 있다. 韓國電力公社에서는 核燃料의 效率的 利用을 위하여 現在 저누출 재장전 모형, 코우스트다운 운전은 이미 적용하고 있으며 장주기 운전도 이미 계획을 수립하여 두고 있는 것으로 알려져 있다. 앞으로 고리 1,2호기에 대한 출력증강, 핵연료 재장전후, 시운전 기간단축, 운전제한조건 완화, 파손 핵연료의 수리 및 재조립 기술의 國産化, 事故停止회수 및 기간단축등을 통하여 發電所의 利用率을 더욱 증가시킬수 있을 것으로 판단된다.

### 參 考 文 獻

1. 전풍일, 최병태, 이한명, 양맹호, "원자력발전과 유연탄 화력발전과의 경제성 및 환경영향 비교," 원자력학회지, 제17권, 제 3 호 (1985).
2. 제 4 회 전력그룹협력회 Workshop결과 보고서 (1985).
3. S. Sandklef, "Effect of Improvements in Reactor and Fuel Performance on Uranium Demand," Tenth Annual Symposium of Uranium Institute, London, Sept. 1985.
4. R.H. Koppe and E.A. Olson, "Why Don't US Reactors Perform Better," Nuclear Safety News, Vol. 4, No. 7 (1985).
5. Exxon Nuclear Fuel Seminar, Republic of Korea December 1983.
6. Babcock & Wilcox, "Quarterly Digest-Nuclear Fuel Services," Vol. 3, 1985.
7. R.P. Harris et al., "Gadolinium Rod and Assembly Designs for PWR Extended-Burnup Cycles," TIS-6977 (1981).
8. R.A. Matoie and H.R. Freeburn, "Uranium Resource Utilization Improvements in Pressurized Water Reactors," Sixteenth Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, August 1981.
9. H.W. Graves, Jr., "Nuclear Fuel Management," John Wiley & Sons (1979).