

# 使用後核燃料管理에 관한 經濟性 分析

*Economics Assessments of Spent Fuel Management Options in Korea*

全 豊 一 〈韓國에너지研·原子力政策研究室長〉

## 要 約

현재 우리나라에는 3기의 原電이 운전중에 있으며 6기가 건설중에 있다. 즉, 2기의 加壓輕水爐(PWR)와 1기의 加壓重水爐(HWR)가 운전중에 있으며 건설중인 것은 모두 PWR이다.

현재 추진되고 있는 原電計劃을 수행하면, 1990년에는 使用後核燃料가 年間 약200톤씩 방출될 것이며, 2000년에는 500톤 정도가 방출되게 된다. 이와 같은 使用後核燃料는 현재 所內貯藏하고 있으나 '90년대 중반 부터는 所內貯藏容量이 限界에 달하게 될 것으로 전망되고 있다.

따라서 本稿에서는 이와 같은 所內貯藏 한계성에 대처할 수 있는 가능한 방안을 검토하고, 이를 경제성 측면에서 분석하고자 하였다. 使用後核燃料의 管理方案에 대한 經濟性 分析을 위해서는 장래의 原電計劃, 原子爐型 및 核燃料週期方式 등에 대한 여러가지 假定이 필요하게 된다. 原電計劃은 정부에서 발표한 「5차5개년 수정계획」에 의거하여 原電施設容量은 현재의 2G We에서 2000년에는 22GWe로, 2025년에는 44G We로 늘어나는 것으로 보았다. 이와 같은 原電計劃을 바탕으로 6가지 核燃料週期에 관한 시나리오를 설정하였다. 즉, 使用後核燃料를 非循環方式으로 운영하는 2가지 경우, 循環方式으로 운영되는 3가지 경우 그리고 FBR에 활용하는 1가지 경우에 대하여 검토하였다.

使用後核燃料의 管理方式에 따른 장기적인 안목에서의 經濟性 分析은 核燃料週期費用 뿐만 아니라 原電의 投資費도 함께 분석하는 것이 합리적이며, 따라서 本稿에서는 計劃期間 동안의 6가지 시나리오에 따른 原電 및 核燃料週期에 관한 총 투자비를 비교하였고, 1982년 價格으로 現價化한 單價도 비교·검토 하였다.

이와 같이 6가지 시나리오에 대한 經濟性을 비교해 본 결과, 核燃料週期選擇의 經濟性評價에 큰 영향을 주는 核燃料週期要素는 再處理費, 再處理時 방출되는 폐기물의 處理·處分費 그리고 使用後核燃料 貯藏方式으로 판명되었으며 6가지 시나리오에 대한 經濟性 比較評價 結果, 다음과 같은 결론을 얻었다.

短期的인 안목에서는 所內貯藏容量을 확장하는 방안이 가장 바람직하며, 中期的인 관점에서 는 所外集中貯藏設備가 필요시 된다. 그러나 국제적으로 商用再處理가 활발히 수행되는 시점에서는 使用後核燃料를 再處理하여 再活用하는 방안도 강구되어야 할 것이다.

## 1. 概 要

使用後核燃料管理方案에 대한 經濟性 分析을 위해서는 우선 原電計劃이 예측되어야 하고, 原子爐型 및 核燃料週期方式에 대한 假定이 설정되어야 하며 割引率과 같은 經濟性 評價 파라메

타가 결정되어야 하겠다.

따라서 이 研究에서는 長期的인 原電計劃을 설정하고, 계획기간중에 가능한 原子爐型 및 核燃料週期方式에 대한 시나리오를 설정한 다음, 각 시나리오에 대해서 經濟性을 비교하는 방법을 채택하였다. 또한 예민도를 분석하기 위하여, 경제성에 중요한 영향을 미치는 파라메타의 값을 하나씩 변화시켜 가면서 파라메타의 값에 따라서 각 시나리오의 經濟性이 어떻게 달라지는가를 검토하고자 하였다.

經濟性 比較는 計劃期間동안의 原電 및 核燃料週期에 대한 총 투자비를 산정하여 비교하였으며, 이를 1982년 價格으로 現價化한 單價도 아울러 비교·검토하였다.

현재 우리나라에는 表 1에서 보는 바와 같이 2기의 PWR과 1기의 CANDU가 運轉中에 있으며 6기의 PWR이 建設中에 있다.

미래의 原電計劃設定을 위해서는 여러가지 가정이 뒤따라야 하나, 여기서는 「5차 5개년 수정계획」시에 설정된 原電計劃을 토대로 長期的인 經濟成長率을 예측하고, 이를 기초로 하여 表 2에서 보는 바와 같이 原電施設容量을 2000년에는 22GWe, 2025년에는 44GWe로 증가하는 것으로 하였다.

## 2. 原子爐 및 核燃料週期 시나리오

현재 우리나라에 도입된 9기의 原電中 8기가 PWR이며 1기가 CANDU爐이다. 따라서 使用後核燃料의 管理에 대한 장기적인 처리방안을 위

한 經濟性 分析은 PWR을 중심으로 수행하는 것이 바람직한 것으로 판단하여, 비록 앞으로 PWR과 CANDU가 상호 보완적으로 채택될 전망으로 보이기는 하나, 여기서는 단순히 經濟性의 비교를 위하여 PWR만이 운영되는 것으로 가정하였으며, 2010년경에 LMFBR이 운영되는 경우도 고려하였다.

현재 우리나라에서 건설 및 운영되는 原電의 경우 使用後核燃料를 저장하는 所內貯藏容量이 1995년경이면 限界에 달하는 것으로 분석되고 있으며, 이를 해결할 수 있는 방안으로는 Re-racking 또는 Rod Consolidation 방법으로 所內貯藏能力을 확장하거나, Monitored Retrieval Storage (MRS) 또는 所外集中貯藏設備를 설치하여 使用後核燃料를 그대로 영구폐기하거나, 또는 再處理가 가능하면 再處理工場으로 보낼때까지 장기저장하는 방안이 현재 세계적으로 공통적으로 쓰이고 있는 방안이다. 使用後核燃料를 再處理하여 회수되는 우라늄-235 또는 플루토늄은 熱中性子爐에 再循環되어지거나 LMFBR의 核燃料로 쓰여지게 된다.

따라서 使用後核燃料의 管理方案에 대한 經濟性 比較를 위하여 그림 1에 보이는 바와 같이

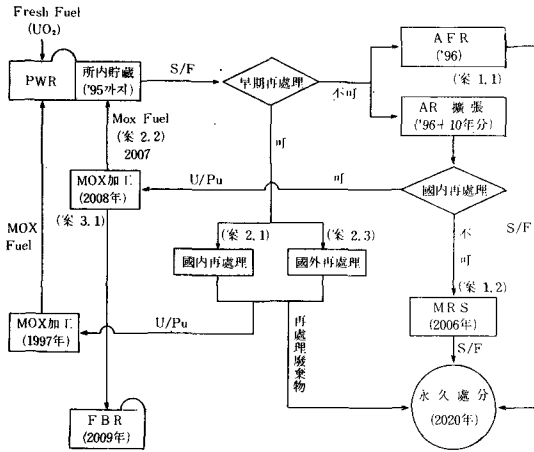
〈表 2〉 原電施設容量豫測

年 度	原 電	
	기 수	시설용량(MWe)
1983	3	1,900
1991	11	9,400
2000	22	22,600
2025	37	44,400

〈表 1〉 現在 運轉 및 建設 中인 原電現況

原電	位置	容 量 (MWe)	原子爐型	稼動年·月	供 給 者		
					NSSS	T/G	A/E
1 호기	고리	587	PWR	78.4	W	GEC	GAI
2 호기	고리	650	PWR	83.12	W	GEC	GAI
3 호기	월성	679	CANDU	83.4	AECL	HPL/CAP	CANATOM
5·6 호기	고리	2×950	PWR	84.9/85.9	W	GEC	BECHTEL
7·8 호기	영광	2×950	PWR	86.3/87.3	W	GEC	BECHTEL
9·10 호기	울진	2×950	PWR	88.3/89.3	FRAMATOME	ALSTOME	FRAMATOME

〈그림 1〉 核燃料週期 分析 基本概念圖



〈表 3〉 原子爐 및 核燃料週期 시나리오

시나리오	核燃料週期方式	기본 전략
1.1	非循環	1996년부터 AFR에 使用後核燃料을 저장한 후 2020년에 영구폐기
1.2		所內貯藏容量을 2005년까지 늘려 使用後核燃料을 저장한 다음 2020년까지는 MRS에 보관하고 2020년에 영구폐기
2.1	熱中性子爐에 再循環	1996년부터 國內再處理하여 再活用하고 高준위폐기물은 2020년에 영구폐기
2.2		所內貯藏容量을 2005년까지 늘려 使用後核燃料을 저장한 다음 國內再處理하여 再活用
2.3		1996년부터 外國에 委託再處理하여 再活用
3.1	高速爐에 再循環	所內貯藏容量을 2005년까지 늘려 使用後核燃料을 저장한 다음 國內再處理하여 2009년부터 高速爐에 再活用

크게 세가지 경우를 고려하였다. 즉, 使用後核燃料을 그대로 영구폐기하는 경우, 이를 再處理하여 熱中性子爐에 再活用하는 경우, 再處理하여 高速爐의 핵연료로 활용하는 경우를 검토하였다.

使用後核燃料을 영구폐기하는 경우도 所內貯藏容量을 확장하여 貯藏하거나 所外集中設備를 설치하여 貯藏하는가에 따라 經濟性이 달라질 수 있으며, 再處理하는 경우도 이를 國內에서 하는가 또는 外國에서 하는가에 따라서 經濟性이 달라질 수 있겠다. 따라서 이러한 點을 비교·평가하기 위하여 表3에 정리한 바와 같이 6가지 시나리오를 설정하였다. 즉, 非循環週期的 경우는 2가지 시나리오, 熱中性子爐에 再循環하는 경우는 3가지 그리고 高速增殖爐에 재 활용하는 한가지 시나리오를 설정하여 經濟性 分析을 하였다.

### 3. 經濟性 分析 方法

原電의 投資費는 크게 建設費와 運營費로 구분되며, 運營費의 대부분은 核燃料週期費가 차지하게 된다. 앞에서 설정한 6가지 시나리오에 대한 經濟性을 비교하기 위해서는 計劃期間 동안에 投資될 모든 費用을 산정하여 비교하는 것

이 타당하다고 하겠다.

割引된 총비용 (Discounted total nuclear project cost)은 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$* \text{割引된 총비용} = \sum (Pwf)_n \cdot (\text{경비})_n$$

여기서

$$(Pwf)_n = (1+d)^{-n} : \text{present worth factor}$$

d : 割引率 (discount rate)

n : 計劃期間

現價化한 平均單價 (Levelized unit cost)도 비교하였으며, 이는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$* \text{現價化發電單價} = \frac{\text{割引된 총비용}}{\text{割引된 총發電量}} = \frac{\sum (Pwf)_n \cdot (\text{경비})_n}{\sum (Pwf)_n \cdot (\text{發電量})_n}$$

現價化를 위해서 使用된 割引率(d)은 다음과 같이 표현된다.

$$d = \frac{1+r}{1+f} - 1 \quad \text{여기서 } r = \text{資本회수율}$$

f = 物가상승율

計劃期間의 마지막에 남는 殘存價値 (Salvage

〈表 4〉 經濟性 分析 結果

시나리오	計劃期間中 原電事業費	
	총비용 (백만弗)	發電單價 (mills/kWh)
1. 1	64, 402	18. 80
1. 2	64, 230	18. 75
2. 1	63, 065	18. 41
2. 2	62, 826	18. 34
2. 3	71, 732	20. 94
3. 1	65, 806	19. 21

〈表 5〉 銳敏度 分析에 사용한 主要 파라메타의 값

파 라 메 타	基 準 (Reference)	銳敏度分析
· 割引率 (%/年)	2. 5	0, 5
· 精鑛費 (弗/lbU <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	30	25, 50
· 濃縮費 (弗/kgSWU)	-140	80, 180
· 委託再處理費 (弗/kgHM)	1, 000	500
· 混合核燃料加工 및 再處理 方法	Remote Operation & Contact maintenance	Remote Operation & Remote maintenance

〈表 6〉 割引率에 대한 銳敏度

시나리오	Levelized Unit Generation Cost (mills / kWh)		
	0 (% / 年)	2. 5 (% / 年)	5 (% / 年)
1. 1	15. 17	18. 80	22. 80
1. 2	15. 13	18. 75	22. 74
2. 1	14. 63	18. 41	22. 58
2. 2	14. 58	18. 34	22. 48
2. 3	19. 32	20. 94	24. 89
3. 1	15. 41	19. 21	23. 30

Value)도 고려하여 계산하였으며, 주요 經濟分析 파라메타는 다음과 같다.

- 現價化 基準年度 : 1982年
- 물가상승율 : 8 % / 年
- 割引率 : 2. 5 % / 年

4. 經濟性 分析 結果

表 3 에 표시한 6가지 시나리오에 대한 計劃

期間 동안의 총비용을 총량과 發電單價概念으로 계산한 결과는 表 4 와 같다. 이때 사용된 주요 核燃料週期要素單價는 다음과 같은 값을 기본 값으로 하였다.

- 精鑛費 : 30弗/lb U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>
- 轉換費 : 6 弗/kgU
- 濃縮費 : 140弗/kgSWU
- 加工費 : 200弗/kgU
- 委託再處理費 : 1, 000弗/kgHM

이 結果를 분석해보면, 시나리오 2. 2의 경우가 가장 經濟적으로 유리한 것으로 계산되었다. 즉, 所內貯藏容量을 10년 정도 늘려서 使用後 核燃料을 장기저장하고 國內再處理하여 熱中性子爐에 재순환하는 경우가 경제적으로는 가장 유리하다고 계산되었다. 현재 再處理는 프랑스와 영국만이 商用的으로 수행하고 있으나 본 연구에서는 2000년대 이후에는 국제정치적 여건이 호전된다고 가정된 것이며 이는 어디까지나 이론적인 경제성 계산결과에 불과하다. 또한 表 4 의 結果를 볼때, 所內貯藏容量을 가능한한 확장하여 使用後核燃料을 장기적으로 저장하는 것이 경제적으로 유리함을 알 수 있겠다.

5. 銳敏度 分析

表 5 에 표시한 바와 같이 割引率, 精鑛費, 濃縮費, 委託再處理費를 하나씩 변화해가면서 經濟性이 어떻게 변화해가는가를 비교해 보았다. 混合核燃料의 加工費와 再處理費의 경우는 시설의 運營과 補修를 어떻게 하는가에 따라서 큰 차이가 있는 바, 이에 대한 銳敏度도 분석하였다.

가. 割引率에 대한 銳敏度

割引率을 年間 2. 5%에서 0%로 감소시켜보고, 2. 5%에서 5%로 증가시켜 가면서 6가지 시나리오의 경제성에 대한 예민도를 비교해 보았으며 表 6 에 표시한 바와 같이, 어느 경우에도 所內貯藏容量을 10년간 확장하여 國內再處理하여 재활용하는 시나리오 2. 2가 가장 經濟

〈表 7〉 精鑛費에 대한 銳敏度

시나리오	Levelized Unit Generation Cost (mills / kWh)		
	25弗/lbU <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	30弗/lb U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	50弗/lbU <sub>3</sub> O <sub>8</sub>
1. 1	18. 45	18. 80	20. 19
1. 2	18. 40	18. 75	20. 14
2. 1	18. 20	18. 41	19. 25
2. 2	18. 11	18. 34	19. 26
2. 3	20. 73	20. 94	21. 78
3. 1	18. 94	19. 21	20. 30

〈表 8〉 濃縮費에 대한 銳敏度

시나리오	Levelized Unit Generation Cost (mills / kWh)		
	80弗/kgSWU	140弗/kgSWU	180弗/kgSWU
1. 1	17. 63	18. 80	19. 58
1. 2	17. 58	18. 75	19. 53
2. 1	17. 53	18. 41	18. 99
2. 2	17. 40	18. 34	18. 97
2. 3	20. 06	20. 94	21. 52
3. 1	18. 28	19. 21	19. 83

〈表 9〉 委託再處理費에 대한 銳敏度

시나리오	Levelized Unit Generation Cost (mills / kWh)	
	500弗 / kgHM	1000弗 / kgHM
1. 1	18. 80	18. 80
1. 2	18. 75	18. 75
2. 1	18. 41	18. 41
2. 2	18. 34	18. 34
2. 3	19. 43	20. 94
3. 1	19. 21	19. 21

〈表 10〉 再處理 및 混合核燃料加工費에 대한 銳敏度

시나리오	Levelized Unit Generation Cost (mills / kWh)	
	Semi-remote	Fully-remote
1. 1	18. 80	18. 80
1. 2	18. 75	18. 75
2. 1	18. 41	19. 03
2. 2	18. 34	18. 85
2. 3	20. 94	21. 22
3. 1	19. 21	19. 80

的인 것으로 분석되었다.

나. 精鑛費에 대한 銳敏度

表 7에 보이는 바와 같이, 精鑛費가 50弗/lb U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> 이상으로 증가하면, 조기에 再處理하여 熱中性子爐에 再循環하는 경우가 경제적으로 가장 유리한 것으로 분석되었다.

다. 濃縮費에 대한 銳敏度

表 8에 보이는 바와 같이, 濃縮費가 증가할 수록 國內再處理의 經濟性이 향상되는 것을 알 수 있다.

라. 委託再處理費에 대한 銳敏度

委託再處理費가 상당히 내려간다고 해도 使用後核燃料 및 高準位폐기물의 海上 輸送費의 과다로 國內再處理하는 경우에 비하여 경제적 이 되지 못하는 것으로 계산되었으며, 이 결과를 表 9에 표시하였다.

마. 再處理 및 混合核燃料加工費에 대한 銳敏度

再處理 및 混合核燃料加工에 대한 운영 및 보

수가 모두 원격조작으로 되어야 한다면, 非循環核燃料週期方式이 경제적인 것으로 분석되었다 (表 10 참조).

6. 結 語

使用後核燃料를 再處理하여 再活用할 것인가, 아니면 이를 그대로 영구폐기할 것인가에 대한 經濟性 分析에 가장 큰 영향을 미치는 核燃料週期要素는 再處理費 및 使用後核燃料貯藏方式으로 분석되었다. 6가지 시나리오에 대한 여러가지 경우의 經濟性을 계산·비교해 본 결과, 현재와 같이 再處理에 관한 여건이 불투명한 시점에서는 經濟性의 관점에서만 볼 때, 所內貯藏容量을 가능한 한 확장하여 使用後核燃料를 오랜 동안 저장하는 방안이 短期的으로 바람직하며, 所外集中貯藏設備를 마련하여 使用後核燃料를 저장하고 再處理에 대한 국제적인 여건의 변화에 따라 적절히 대처하는 것도 中·長期的으로 바람직한 것으로 분석되었다.