

# 再循環核燃料週期の經濟性 評價

## *Economic Analysis of Fuel Recycle*

全 豊 一 〈韓國에너지研·原子力政策研究部長〉

### 1. 概 要

再循環核燃料週期와 非循環核燃料週期の 經濟性을 1,000MWe 1基의 原子力發電所(PWR)의 수명기간동안 비교하였다. 이 비교분석에서는 核週期の 費用을 각각에 대하여 계산하고 또한 핵주기의 주요비용인 우라늄정광비, 농축비, 사용후핵연료저장, 재처리 및 재처리폐기물 처리비 그리고 使用後核燃料의 영구폐기비용 등에 따른 각 핵주기의 경제성의 영향을 평가·분석하였다.

이 研究는 韓國에너지研究所와 미국에너지省이 공동으로 수행하였으며, 분석결과 재순환핵주기가 선행핵주기비용의 절감으로 비순환핵주기보다 경제성에서 다소 유리한 것으로 나타났으며, 주요 변수로는 再處理費 및 사용후핵연료 저장비 그리고 사용후핵연료의 폐기비와 재처리폐기비의 차이인 것으로 분석되었다.

그러나 계산에 사용된 核週期費用의 不確實性을 고려할때 현재로는 재순환핵주기의 경제성이 비순환핵주기보다 유리하다고만 볼 수는 없다.

### 2. 序 論

현재 韓國에서는 3基의 原子力發電所가 稼動

중에 있으며, 1基가 운전개시단계에, 그리고 5基가 建設中에 있다. 또한 2基가 곧 발주될 것으로 보인다.

韓國의 경우 우라늄은 전량 외국에서 수입하고 있으며, 비순환핵주기의 경우에 2000년까지 37,000톤, 2020년까지는 146,000톤의 우라늄을 수입해야 한다. 그리고 2000년에 原子力發電設備容量은 18,400MWe에 달할 것으로 전망되며, 사용후핵연료 발생량은 1990년에 年間 200톤에서, 2000년에는 500톤으로 증가하게 되어, 1990년대 중반이후에 使用後核燃料의 소내 저장에 대한 대책이 필요하다.

현재 세계의 우라늄가용량은 500만톤( $U_3O_8$  기준)정도로 추정되고 있으며, 한국의 경우 우라늄구매량이 세계시장에서 극히 일부에 지나지 않을 것으로 고려되고, 高速爐의 商用化가 지연되고 있는 점을 감안할 때 우라늄의 소요량을 줄이기 위해서는 재순환핵주기가 유리한 것으로 보인다.

本 研究에서는 비순환핵주기와 재순환핵주기의 경제성을 비교하기 위하여 1GWe PWR 1基를 수명기간동안 운전하는데 소요된 가중평균단가(levelized unit fuel cycle cost)를 年間 할인율 2.5%를 기준으로 계산하였다.

〈表1〉 Input for Reference Case

Parameter	Input Value
<u>Front-end Cycle</u>	
U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	\$30/lb U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>
Conversion	\$6/KgU
Enrichment	\$140/KgSWU
Fabrication(UO <sub>2</sub> )	\$200/KgU
Fabrication(MOX)	\$500/KgHM
<u>Back-end Cycle</u>	
Spent Fuel Storage	\$172/KgHM
Reprocessing	\$450/KgHM
S/F Disposal	\$400/KgHM
Reprocessing Waste Disposal	\$280/KgHM

PWR에서 재처리된 우라늄/플루토늄의 재순환으로 우라늄정광, 변환, 농축비의 절감량은 혼합핵연료(MOX) 가공비용을 포함하여 미국 에너지성에서 제안한 다음 관계식을 이용하여 계산되었다.

○ 절감된 우라늄량(kg-U)

$$S_{U_3O_8} = (5.146E - 0.473B - 0.914 + 0.0162B^2 * (1 - 0.349E + 0.0393E^2)) / 2.6$$

○ 절감된 변화량(kg-U)

$$S_{UF_6} = 0.001 \{ \frac{1553}{1+B} + 2094E - 2184 - 121.74B * (1 - 0.01162B + 0.00295E^2) \}$$

○ 절감된 농축량(kg-SWU)

$$S_{SWU} = 0.001 \{ \frac{930}{1+B} - 215 + 4.286B * (B - 14.965E) + 408.6E^2 * (1 - 0.0068B) \}$$

○ 추가할 MOX연료 가공량(kgHM)

$$S_{fab} = 0.001 \{ 1.592B^2 * (1 - 0.2981E + 0.03118E^2) + 45.63 * \frac{B}{E} * (1 - 0.05707B) \}$$

여기에서 S는 재순환에 의한 절감 및 추가량, B는 연소도(본 연구에서는 30.4MWD/kg HM), E는 초기 농축도(여기에서는 3.01w/o)이다.

### 3. 經濟性分析

기준안의 경우에 핵週期費用은 表 1에 나타

〈表2〉 Recoverable Value of Spent Fuel

Item	Value(\$/KgHM)
U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> saving	143.2
Conversion saving	4.7
Enrichment saving	118.0
MOX fabrication penalty	-57.0
Total	208.9

〈表3〉 Levelized Unit Fuel Cycle Costs(Reference Case)

Fuel Cycle Components	Once-through	Thermal Recycle
<u>Front-end Cycle Cost</u>		
U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> + Conversion	2.0813	2.0813
Enrichment	2.5899	2.5899
Fabrication	0.8960	0.8960
<u>Back-end Cycle Cost</u>		
S/F Storage	0.7363	—
Reprocessing	—	1.8204
S/F Disposal	1.2766	—
Reprocessed Waste Disp.	—	0.8869
Recovered Value	—	0.8177
Total	7.5801	7.4568

나 있으며, 再循環에 의한 핵주기절감비용중 우라늄 절감비용이 表 2에서 보는 다른 부분보다 크다. 가중평균된 핵주기단가가 재순환핵주기와 비순환핵주기의 경우에 계산되었으며 表 3에 나타나 있다. 기준안의 계산결과 재순환핵주기가 비순환핵주기보다 경제성에서 다소 유리한 것으로 나타났다.

### 4. 敏感度分析

민감도분석은 우라늄정광비용, 농축비용, 사용후핵연료 저장비용, 재처리비용, 그리고 使用後核燃料과 再處理廢棄物 處理費 등 핵주기비용에 대한 변수값을 개별적으로 변화시켜 가면서 수행하였으며, 민감도분석에 사용된 입력 자료는 表 4에 나타나 있다.

〈表4〉 Input for Sensitivity Study

Parameters	Input Value	
	for Referen- ce Study	Sensivity Study
Yellow Cake Price(\$/lb U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	30	25, 50
Enrichment Charge(\$/Kg-SWU)	140	80, 180
S/F Storage Cost(\$/KgHM)	172	130, 250
Reprocessing Cost( " )	450	300, 600
S/F Disposal Cost( " )	400	300, 500
Reprocessing Waste Disposal Cost	280	200, 400

表 5 에서 보는 바와 같이 민감도분석결과 再循環核週期の 經濟性은

- (1) 우라늄값이 20 \$ / lbU<sub>3</sub>O<sub>8</sub>이하인 경우,
- (2) 濃縮費用이 120 \$ /kg-SWU이하인 경우,
- (3) 使用後核燃料 貯藏費用이 140 \$ /kgHM 이하인 경우,
- (4) 再處理費用이 440 \$ /kgHM이상인 경우,
- (5) 使用後核燃料 處分費用이 380 \$ /kgHM 이하인 경우 그리고
- (6) 再處理廢棄物 處理費用이 320 \$ /kgHM 보다 높은 경우에는 비순환핵주기보다 좋지 않다.

여기서 보면 경제성 비교에서 再處理費用, 使用後核燃料 貯藏費用과 사용후핵연료와 재처리 폐기물의 처분비용 차이가 주요변수가 됨을 볼 수 있다.

그러나 이들 변수들의 불확실성을 생각할 때 현재로는 재순환핵주기의 경제성이 유리하다고만 볼 수 없다.

### 5. 다른 文獻과 比較

독일의 Herbert Schenk는 非循環核週期和 우라늄재순환핵주기 그리고 U/Pu혼합핵연료재순환핵주기의 경제성비교를 시도하였다. Schenk는 여기에서 核燃料週期の 각단계에 필요한 商用化 技術에 대한 최고치와 최저치를 추정하

〈表5〉 Levelized Unit Fuel Cycle Cost

Case	(mills/kwh)	
	Once-Through	Thermal Recycle
• Reference Case	7.58	7.46
<u>Sensivity Study</u>		
• Yellowcake(\$/lb U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )		
25	7.23	7.23
50	8.87	8.38
• Enrichment Charges(\$/KgSWU)		
80	6.47	6.54
180	8.32	8.06
• S/F Storage Cost(\$/KgHM)		
130	7.41	7.46
250	7.89	7.46
• Reprocessing Cost(\$/KgHM)		
300	7.58	6.87
600	7.58	8.04
• S/F Disposal Cost(\$/KgHM)		
300	7.27	7.46
500	7.89	7.46
• Reprocessing Waste Disposal Cost (\$/KgHM)		
200	7.58	7.21
400	7.58	7.82

고, 그 다음 현재 확립되어 있지 않은 후행핵주기의 폐기물처분기술에 의한 비순환핵주기의 불확실성을 고려하였다.

MOX核燃料 재순환핵주기의 경우에 현재의 그 비용이 다른 두개의 核週期보다 최고치에 가까운 것으로 추정되었지만, 비순환핵주기비용과 거의 같은 수준이며 우라늄만 재순환시키는 핵주기보다는 다소 유리하다고 볼 수 있다.

그러나 현재 Pu의 再循環이나 再處理는 經濟性이 아주 유리한 것은 아니며, 조건이 호전될 수 있다고 결론지었다. 그는 또한 독일정부의 商用再處理와 再循環核週期에 대한 현재의 노력이 재순환핵주기의 經濟性에 중요한 계기가 될 것이라고 평가하였다.