

Pyro-SFR 핵연료주기의 경제성 분석

김성기, 고원일

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

sgkim1@kaeri.re.kr

1. 서론

최적 핵연료주기 선택은 각국의 정치·경제적 상황을 고려해서 결정한다. 즉, 경제성 뿐만아니라 핵비확산성, 환경영향, 에너지 안보 등의 종합적인 평가에 의해 핵연료주기 정책이 수립된다. 따라서 우리나라는 핵비확산 정책을 만족시키기 위해 핵확산저항성이 큰 핵연료주기 중에서 가장 경제적인 핵연료주기를 선택해야 한다. 본 논문에서는 이러한 배경 하에 현재 사용후핵연료의 우라늄과 TRU를 고속로 핵연료로 재활용할 수 있는[1] 파이로 기술과 연계된 파이로-고속로 핵연료주기의 경제성을 직접처분과 비교하여 분석하였다. 분석방법으로써 파이로-고속로 핵연료주기 비용과 직접처분비용의 손익분기점을 계산하였다. 왜냐하면 아직까지 직접처분이 경제적인 방안으로 고려되고 있기 때문이다. 그러나 현재 파이로 공정의 상용시설이 존재하기 않아 비용의 불확실성에 대한 한계점이 존재한다.

2. 본론

2.1 비용산정 방법

파이로-고속로 연계 핵연료주기 비용을 산정하기 위하여 먼저 파이로시설과 관련된 비용을 파악해야 한다. 즉, 연도별 소요비용을 산출하여 전체 투자비의 비용흐름을 계산하는 것이 필요하다[2]. 파이로 시설의 개념설계에 근거하여 비용을 추정 한 결과, 그림 1과 같이 Overnight cost와 이에 대한 현재가치가 추정되었다[3].

직접처분과 파이로-고속로 주기의 경제성을 파악하기 위하여, 평균원가(average cost)의 개념인 균등원가(Levelized Unit Cost: LUC)를 사용할 수 있다. 이 방법은 식 (1)과 같이 할인된 비용흐름의 합을 PB(Present Benefit)의 합으로 나누어 계산한다.

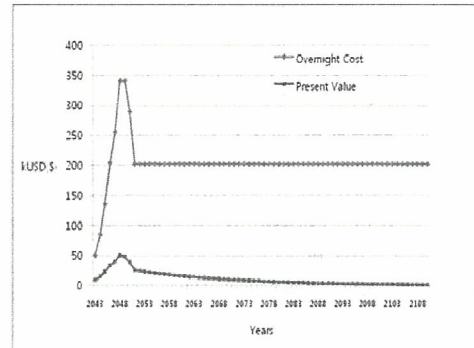


Fig. 1. Cash flow of Pyroprocessing costs.

$$LUC = \frac{PV}{PB} = \frac{\sum_{stages} \sum_{t=t_0-T_1}^{t=t_0+L+T_2} \frac{C_i}{(1+d)^{t-t_0}}}{\sum_{t=t_0}^{t=t_0+L'} \frac{Q_i}{(1+d)^{t-t_0}}} \dots\dots\dots (1)$$

여기서, PV : 현재가치(Present Value)

PB : 현재이익(Present Benefit)

C_i: 해당 연도(i)의 비용 혹은 투자비

t₀ = 기준일(가동개시일)

L = 원자로 수명

T₁ = 선행기간의 최대값(선행부문)

T₂ = 지연기간의 최대값(후행부문)

d : 할인율

i : 연도

Q_i: 해당 연도(i)에 얻어진 이익(전력생산 등)

그런데 전기는 원자로 수명기간 동안 연속적으로 생산된다고 가정하면, 연속할인(continuous discount) 방법을 사용할 수 있다. 즉, 할인율 r을 연속할인율(continuous discount rate)

R = ln(1+r) 로 대체할 수 있으며, 식 (1)의 분모는 식 (2)와 같이 표시할 수 있다.

$$\sum_{t=t_0}^{t=t_0+L} \frac{Q_i}{(1+d)^{t-t_0}} = \int_{time} \exp(-Rt) Q_i dt \dots\dots\dots (2)$$

Table 1. Input data.

Economic data	Discount rate	5.0 [%/year]
	Escalation rate	1.2 [%/year]
	Base year of cost data	2001
PWR Reactor	Life time	40 years
	Thermal power	2921 MWt
	Electrical power	1000 MWe
	Capacity factor	85%
	Thermal Efficiency	34.23 %
	Annual loading	16.479 tU
	Annual discharge	15.55 tHM
	Burnup	55,000 MWd/tHM
	No. of batches	4
Enrichment data	Annual electricity gen. of PWR	7,446 GWh
	²³⁵ U content in natural uranium	0.7 wt%
	Enrichment of feed	0.71 w/o
	Enrichment of product	4.5 w/o
Loss factors	Enrichment of tails	0.25 w/o
	Conversion	0.1 %
	Fabrication	0.1 %
Lead time [unit: months]	Reprocessing	0.1 %
	Purchase	24
	Conversion	18
	Enrichment	12
Lag time [unit: months]	Fabrication	6
	Transportation	60
	Reprocessing	72
	Final Disposal	480

2.2 파이로 손익분기점

파이로의 경제성을 파악하기 위해 표 1의 자료를 이용하여, 핵연료주기 비용을 계산한 결과, 직접처분(direct disposal)과 Pyro-SFR 핵주기의 비용은 각각 6.71 mills/kWh, 6.60 mills/kWh로 계산되었다. 또한 파이로의 경제적 타당성을 확인하기 위해, 파이로의 손익분기점을 계산한 결과, 손익분기점은 약 \$800/ kgHM으로 계산되었고, 이러한 결과는 다른 모든 비용은 고정시키고, 파이로 비용만 변화시키면서 파이로-고속로(Pyro-SFR) 핵주기비용(nuclear fuel cycle cost)과 직접처분(direct disposal) 비용이 같아지는 비용을 손익분기점으로 도출한 것이다. 결국, 파이로 비용이 \$800/kgHM 이하 일 경우, 직접처분에 비해 경제성이 존재하는 것으로 해석할 수 있다.

3. 결론

파이로의 경제성을 파악하기 위해 먼저 파이로 시설의 개념설계에 근거하여 파이로 처리 비용을 계산한 결과, 종합파이로시설(KAPF+)의 투자비는 2009년 말 불변가(constant value) 기준으로 약 1,706 MUSD, 연간운영비는 약 194 MUSD, 제염 및 해체비는 약 515 MUSD가 소요될 것으로 추정되었으며, 균등원가(LUC)는 781 USD/kgHM로 계산되었다.

또한 직접처분과 파이로-고속로 연계주기의 시나리오에 대한 핵연료주기 비용을 산정한 결과, 각각 6.71 Mills/kWh, 6.60 Mills/kWh로 계산되었다. 그러므로 파이로-고속로 연계 주기가 약간 더 경제적인 것으로 해석할 수 있다. 이러한 결과는 OECD/NEA의 보고서를 참조하여, 고속로의 건설 투자비와 운영비가 기존의 경수로에 비해 20% 더 증가되는 것으로 가정한 결과이다[4].

또한 구체적으로 PWR-SFR연계 핵연료주기를 고려한 파이로 비용이 직접처분에 비해 어느 정도 경제성을 가질 수 있는지를 파악하기 위해, 직접처분에 대한 파이로처리 비용의 손익분기점을 계산한 결과, 약 \$800/kgHM 으로 산정되었다. 따라서 파이로 처리비용이 \$800/ kgHM 이하일 경우 경제성이 존재한다고 해석할 수 있다.

4. 감사의 글

본 연구는 교육과학기술부의 원자력증강기 연구개발비의 지원으로 수행하였습니다.

5. 참고문헌

- [1] Laidler, J. J., Battles, J. E., Miller, W. E., Ackerman, J. P., and Carls, E. L., 1997, Development of Pyroprocessing Technology, Progress in Nuclear Energy, Vol. 31, No. 1/2, pp. 131-140.
- [2] Park, H.R., Oheu, B.G., 2003, The Fundamentals of Economics, Accounting & Business Press, pp. 12-29.
- [3] Park, Y.T., 2008, An Introduction to Engineering Economics, Cheungmungag Press, pp. 169-179.
- [4] OECD/NEA, 2006, Advanced Nuclear Fuel Cycles and Radioactive Waste Management, OECD Publishing, Appendix L. 243-244.