

Uncertainty Cases in Economic Evaluation of Back-End Nuclear Fuel Cycle

후행 핵연료주기 경제성 평가의 불확실성 사례

Hyung-Joon Kim, Chun-Hyung Cho and Kyung-Ku Lee

Nuclear Engineering and Technology Institute(KHNP), 25-1 Jang-Dong, Yuseong-gu, Daejeon

khjoon@khnp.co.kr

김형준, 조천형, 이경구

한국수력원자력(주) 원자력발전기술원, 대전시 유성구 장동 25-1

(Received March 3, 2008 / Revised April 29, 2008 / Approved May 2, 2008)

Abstract

Due to the uncertainties resulting from cost projection, evaluation over long term period, and adequacy of applied discount rate, the economic assessment for back-end fuel cycle is different from each organizations or individuals. In this paper, the features and limitations of some noticeable economic evaluations were investigated and analysed to contribute for the public participation and back-end fuel cycle policy related researches. As a result of analysis, we found that the reprocess and recycling is more economical than direct disposal option, but the result includes high uncertainty that depends on the input parameters..

Key words : back-end fuel cycle, economic evaluation, levelised unit cost, uncertainty

요 약

후행 핵연료주기 경제성 평가는 추정 비용의 불확실성, 평가 대상기간의 장기성, 적용 할인율에 따른 계산결과의 변동성 등 많은 불확실성을 내포하고 있기 때문에 평가기관 또는 평가자에 따라 그 결과가 서로 상이하다. 본고에서는 지금까지 수행된 주요 경제성 평가 연구들을 조사/분석하여 그 특징과 한계를 알아봄으로써 현재 국내에서 추진되고 있는 사용후핵연료 공론화 및 후행 핵연료주기 정책연구 추진에 기초자료로 활용될 수 있도록 하고자 하였다. 분석 결과 사용후핵연료 재활용 옵션에 비해 직접처분 옵션이 유리하나, 입력 자료로 사용된 파라미터 값에 따라 결과의 불확실성이 많이 나타나 이 부분에 대한 추가적인 연구가 필요하다는 사실을 알 수 있었다.

중심단어 : 후행 핵연료주기, 경제성 평가, 평준화 단위비용, 불확실성

I. 서론

원자력 르네상스의 도래와 함께 한동안 위축되었던 후행 핵연료주기 정책개발에 대한 각국의 관심도 다시 높아지고 있다. 후행 핵연료주기 정책의 핵심은 원전에서 발생하는 사용후핵연료를 직접처분 할 것인지 아니면 재처리하여 원전의 연료로 재활용할 것인지를 결정하는 데에 있다. 특히 2006년 2월 미국이 그동안의 사용후핵연료 직접처분 정책에서 재처리 및 재활용 정책으로 전환하는 것을 골자로 하는 '세계원자력 에너지파트너십' (GNEP) 정책 구상을 발표하자 각국은 GNEP이 자국의 원자력 정책에 미치는 영향을 검토하면서 옵션별 후행 핵연료주기 경제성을 평가하기 위해 기존의 연구 결과들을 면밀히 분석하고 있다.

후행 핵연료주기 경제성평가에는 추정 비용의 불확실성, 평가기간의 장기성, 적용 할인율에 따른 계산 결과의 변동성 등 많은 불확실성이 내포되어 있기 때문에 평가기관 또는 평가자에 따라 그 결과가 서로 상이하다. 이에 따라 후행 핵연료주기 경제성 평가에 대한 많은 연구가 이루어져 왔음에도 불구하고 평가 결과의 상이성으로 인한 혼란이 계속되고 있다.

이에 본 연구에서는 지금까지 수행된 주요 경제성 평가 사례연구들을 조사 및 분석하여 그 특징과 한계성을 파악함으로써 현재 국내에서 추진되고 있는 사용후핵연료 공론화 논의 및 후행 핵연료주기 정책연구 수행에 기초 자료로 활용될 수 있도록 하고자 하였다.

이를 위해 먼저 경제성 평가 방법론에 대해 간략히 살펴본 다음, 주요 연구사례별 전제사항, 비교옵션, 평가결과, 결과분석 및 한계점 등에 대하여 논의하였다.

II. 경제성 평가 방법론 및 사례 분석

가. 평준화 단위비용 방법

옵션별 후행 핵연료주기 경제성 평가 방법에는 여러 가지가 있지만, 그 중 평준화 단위비용(levelised unit cost) 방법이 가장 많이 이용되고 있다. 이 방법은 순현재가치법에 근거를 두고 있는 투자대안의 경제성 평가방법으로서, 대안평가 시 명확한 기준을 제

시해 주기 때문에 여러 분야에서 많이 사용되고 있다 [1,4].

이 방법에서는 후행 핵연료주기 관련 시설 및 활동 비용, 즉 사용후핵연료 중간저장·수송·재처리·재활용·방사성폐기물 처분·시설 폐지 등과 관련된 총 비용을 추정한 후 적절한 할인율(discount rate)을 이용하여 현재가치(present value)로 환산하고, 이 값을 동일 기간 동안 얻어지는 총 생산량(전력생산량) 또는 총 수입(우라늄/플루토늄 크레딧)을 역시 같은 할인율을 이용하여 현재가치로 환산한 값으로 나눔으로써 단위비용이 얻어질 수 있다[3]. 그 계산된 결과는 \$/kWh 또는 \$/kg의 형태로 나타난다. 옵션별 후행 핵연료주기 평준화 비용, 즉 직접처분의 평준화 비용과 재처리/재활용의 평준화 비용 계산결과를 비교하는 방식으로 경제성이 평가된다.

평준화 단위비용 계산방법을 식으로 간략히 나타내면 다음과 같다.

$$U = \frac{\sum_{i=1}^n (C_i + O_i + D_i) / (1+r)^i}{\sum_{i=1}^n E_i / (1+r)^i}$$

여기서 U = 단위비용 (Unit Cost), [\$/kWh 또는 \$/kg]

C_i = 초기투자비 (Capital Cost), [\$]

O_i = 운영비 (Operating Cost), [\$]

D_i = 시설폐지비 (Decommissioning Cost), [\$]

E_i = 전력 생산량 (Electrical Output), [kWh]

r = 할인율, [%]

n = 당해연도

$i = 1, 2, \dots, n$

나. 경제성 평가 사례 분석

경제성 평가는 후행 핵연료주기 정책결정에 반드시 필요한 요소로서, 이에 대한 많은 연구가 이루어져 왔다. 대표적인 연구사례 및 평가결과를 살펴보면 다음과 같다.

① OECD/NEA 연구 (1994)

이 연구는 핵연료주기 경제성 평가에 관한 일종의 교본적 성격을 지니고 있다[3]. 다른 연구들과 달리

후행 핵연료주기만 따로 평가하지 않고 선행 주기를 포함한 핵연료주기 전체가 평가되고 있다. 평가에 사용된 전제사항, 비교옵션 및 평가결과, 결과분석 및 한계점 등은 Table 1과 같다.

② 하버드대학 연구 (2003)

이 연구에서는 사용후핵연료 재처리 및 재활용 비

용이 직접처분 비용에 비해 유리해지기 시작할 때의 값, 즉 우라늄 가격의 손익분기점 (breakeven uranium price)을 계산하여 비교하는 방법으로 경제성을 평가하고 있다[2]. 평가에 사용된 전제사항, 비교옵션 및 평가결과, 결과분석 및 한계 등을 요약하면 Table 2와 같다.

Table 1. The summary and result of OECD/NEA research (1994)

전제사항	<ul style="list-style-type: none"> ○ 1,390MW급 PWR (수명 30년, 이용률 75%) 기준 ○ 1991년 시점 기준, 5% 할인율 적용 ○ 적용단가: 실적치에 바탕을 둔 전문가 추정치 이용 <ul style="list-style-type: none"> - 직접처분 비용은 스웨덴 자료, 재처리 비용은 영국의 Thorp 및 프랑스의 UP3 재처리 비용 이용 										
비교옵션 및 평가결과	<ul style="list-style-type: none"> ○ 비교옵션: 직접처분, 재처리·재활용주기 ○ 평가결과 <table border="1"> <tr> <td></td> <td>직접처분 옵션</td> <td>재활용 옵션</td> </tr> <tr> <td>reference case</td> <td>5.46 mills/kWh</td> <td>6.23 mills/kWh</td> </tr> <tr> <td>sensitivity range</td> <td>4.28~6.30 mills/kWh</td> <td>5.17~7.06 mills/kWh</td> </tr> </table>			직접처분 옵션	재활용 옵션	reference case	5.46 mills/kWh	6.23 mills/kWh	sensitivity range	4.28~6.30 mills/kWh	5.17~7.06 mills/kWh
	직접처분 옵션	재활용 옵션									
reference case	5.46 mills/kWh	6.23 mills/kWh									
sensitivity range	4.28~6.30 mills/kWh	5.17~7.06 mills/kWh									
결과분석 및 한계점	<ul style="list-style-type: none"> ○ 분석: 직접처분 옵션이 재활용주기 옵션에 비해 다소 유리하게 평가되었으나, 옵션 간 의미 있는 비용 차이라고는 볼 수 없음 ○ 한계 <ul style="list-style-type: none"> - MOX 연료 처리방안을 고려하지 않음 - 우라늄 가격의 변동성을 고려하지 않음 - 사용후핵연료 직접처분 시의 처분시점과 재처리 시의 고준위폐기물 처분시점에서 차이 발생 - 사업 물량, 시점, 부지 등 현실적인 사업추진환경을 감안하지 않음 										

Table 2. The summary and result of Havard University research (2003)

전제사항	<ul style="list-style-type: none"> ○ 평가방법: 다음과 같은 공식에 의거하여 우라늄 손익분기점 산정 <ul style="list-style-type: none"> - 직접처분 비용 = (재처리비용-U/Pu Credit) × 우라늄 가격 ○ 재처리 가격: \$1,000/kgHM (Thorp 및 UP3 실적치 참고) ○ 사용후핵연료 직접처분 비용: \$400/kgHM(DOE 및 SKB 추정치 반영) ○ 고준위폐기물 처분비: \$200/kgHM (SF 직접처분비의 50% 가정) 																
비교옵션 및 평가결과	<ul style="list-style-type: none"> ○ 비교옵션: 직접처분, 재처리·재활용주기 ○ 평가결과 <ul style="list-style-type: none"> - 우라늄 가격 손익분기: \$370/kgU (370달러 이상일 때 재처리 유리) - 기타 파라미터의 기준값 및 손익분기 값 <table border="1"> <tr> <td>파라미터</td> <td>기준값</td> <td>손익분기 값</td> </tr> <tr> <td>- 처분비용 차이 (*)</td> <td>\$200/kgHM</td> <td>\$630/kgHM</td> </tr> <tr> <td>- 사용후연료 중간저장</td> <td>\$200/kgHM</td> <td>\$780/kgHM</td> </tr> <tr> <td>- 농축</td> <td>\$100/kgHM</td> <td>\$1,200/kgHM</td> </tr> <tr> <td>- 재처리</td> <td>\$1,000/kgHM</td> <td>\$420/kgHM</td> </tr> </table> <p>(*) 사용후연료 직접처분비와 고준위폐기물 처분비의 차이</p>		파라미터	기준값	손익분기 값	- 처분비용 차이 (*)	\$200/kgHM	\$630/kgHM	- 사용후연료 중간저장	\$200/kgHM	\$780/kgHM	- 농축	\$100/kgHM	\$1,200/kgHM	- 재처리	\$1,000/kgHM	\$420/kgHM
파라미터	기준값	손익분기 값															
- 처분비용 차이 (*)	\$200/kgHM	\$630/kgHM															
- 사용후연료 중간저장	\$200/kgHM	\$780/kgHM															
- 농축	\$100/kgHM	\$1,200/kgHM															
- 재처리	\$1,000/kgHM	\$420/kgHM															
결과분석 및 한계점	<ul style="list-style-type: none"> ○ 분석: 재처리에 비해 직접처분이 경제적으로 훨씬 유리한 것으로 평가되었으나, 다음과 같은 여러 가지 상황에 따라 그 격차는 좁혀짐. <ul style="list-style-type: none"> - 최근의 우라늄 원광가격 급등 - 유카마운틴 처분장 건설비가 당초 예상보다 훨씬 증가 - 재처리 및 MOX 제조시설 건설·운영 경험에 따른 비용감소 ○ 한계: 입력 값으로 사용된 파라미터 값들에 물량에 따른 규모의 경제성이 반영되지 못하고 있고, 특정 사업추진환경도 고려되지 못함 																

③ IPFM 연구 (2006)

2006년에 IPFM (International Panel on Fissile Materials)의 지원 하에 수행된 이 연구는 일본이라는 특정 국가의 상황 하에서 사용후핵연료 완전 재활용, 부분 재활용, 직접처분, 장기저장 등 4가지 옵션을

평가하고 있다[6]. 정책변경에 따라 발생 가능한 예상 비용 또는 기회비용 개념을 총 비용에 포함시켰다는 것이 특징이다. 평가에 사용된 전제사항, 비교옵션 및 평가결과, 결과분석 및 한계 등을 요약하면 Table 3과 같다.

Table 3. The summary and result of IPFM research (2006)

전제사항	<ul style="list-style-type: none"> ○ 일본의 현재 핵연료주기 사업계획을 감안 ○ 로카쇼 재처리시설의 건설비는 0.2엔/kWh 가정 ○ 제2 재처리시설의 건설비는 로카쇼 재처리시설의 50% 가정 				
비교옵션 및 평가결과	<ul style="list-style-type: none"> ○ 비교옵션 <ul style="list-style-type: none"> - 완전활용 옵션: 발생 사용후연료 100% 재처리, 로카쇼 재처리시설 초과분은 제2 재처리시설에서 재처리, 고속로 도입 가정 - 부분활용 옵션: 로카쇼 재처리시설 용량분만 재처리, 나머지는 직접 처분 가정 - 직접처분 옵션: 모든 사용후연료를 직접 처분 - 장기저장 옵션: 일정기간 장기 저장 후 재활용 가정 ○ 평가결과 				
		완전활용	부분활용	직접처분	임시저장
	핵연료주기 비용(엔/kWh)	1.6	1.4~1.5	0.9~1.1	1.1~1.2
	발전원가(엔/kWh)	5.2	5.0~5.1	4.0~4.7	4.7~4.8
	정책변경 비용(엔/kWh)			0.9~1.5	
총 비용(엔/kWh)	5.2	5.0~5.1	5.4~6.2	5.6~6.3	
결과분석 및 한계점	<ul style="list-style-type: none"> ○ 분석: 완전활용이나 부분활용이 직접처분이나 임시저장 옵션에 비해 불리하게 나왔으나, 로카쇼 재처리시설 포기로 인한 기회손실비용(정책변경비용)을 고려할 경우 반대의 결과가 발생 ○ 한계: 일본의 사업 환경이라는 특수성 				

Table 4. The summary and result of BCG research (2006)

전제사항	<ul style="list-style-type: none"> ○ 평가방법 <ul style="list-style-type: none"> - Greenfield Approach: 사용후핵연료 직접처분 옵션과 재처리/재활용 옵션의 단위비용 값을 계산하여 비교 - Implementation Approach: '유카마운틴 처분장 건설 및 재처리 시설 건설' 시나리오와 '유카마운틴 처분장 건설 및 제2 처분장 건설' 시나리오의 총 비용을 계산하여 비교 ○ 재처리/재활용 비용 자료: 프랑스 Areva사의 경험자료 이용 ○ 직접처분 비용 자료: 미국 DOE 보고서 자료 이용 ○ 할인율: 3%/년 			
비교옵션 및 평가결과	<ul style="list-style-type: none"> ○ 비교옵션: 직접처분, 재처리·재활용주기 ○ 평가결과 <ul style="list-style-type: none"> - 직접처분이 다소 유리 			
	Greenfield Approach (단위: \$/kg)		Implementation Approach (단위: 10억 달러)	
	직접처분	500	직접처분	47~50
재활용	520	직접처분+재활용	48~53	
결과분석 및 한계점	<ul style="list-style-type: none"> ○ 분석: 재활용에 비해 직접처분이 다소 유리하나, 그 차이는 매우 미미 ○ 한계: 전반적으로 재활용 옵션에 유리하게 평가 <ul style="list-style-type: none"> - 처분단가: \$700/kg, 우라늄 원광: \$80/kg, 재활용: \$630/kg - 재활용 시설 건설비가 낮게 책정되었고, 시설 수명기간도 50년으로 과다 산정 - MOX 연료 처분비용이 포함되어 있지 않음 			

④ BCG 연구 (2006)

2006년에 프랑스 Areva사의 용역을 받아 세계적 컨설팅 기관인 미국의 Boston Consulting Group (BCG)이 수행한 이 연구는 두 가지 평가방식을 이용하여 미국의 후행 핵연료주기 경제성을 평가하였다 [5]. 첫 번째 'Greenfield Approach'라고 불리는 방식은 다른 기존의 연구에서처럼 단순히 사용후핵연료 직접처분 옵션과 재처리·재활용 옵션의 균등화 단위비용 값을 계산하여 상호 비교하는 이론적 접근방식이다. 두 번째 'Implementation Approach'라고 불리는 방식은 현재 추진 중인 유카마운틴 처분장을 건설하면서 동시에 사용후핵연료 재처리 시설을 건설하는 시나리오와 유카마운틴 처분장 건설 및 제2처분장을 건설하는 시나리오의 총 비용을 계산하여 비교하는 방식이다. 평가에 사용된 전제사항, 비교옵션 및 평가결과, 결과분석 및 한계 등을 요약하면 Table 4와 같다.

III. 결 론

후행 핵연료주기 경제성 평가 사례를 조사하여 분석한 결과, 사용후핵연료 재처리·재활용에 비해 직접처분이 유리한 것으로 나타났다. 그러나 입력 자료로 사용된 파라미터 값에 따라 불확실성(파라미터 불확실성)이 나타나고 있으며, 또한 연구기관이나 연구자에 따라서도 불확실성(모델 불확실성)이 보이고 있다.

그리고 재활용 옵션의 경우 대체적으로 MOX 사용후핵연료의 최종관리라는 민감한 부분을 다루지 않고 있기 때문(완전성 불확실성)에 연구자의 의도에 관계없이 평가의 결과가 대체로 재활용 옵션에 유리하게 작용하고 있다.

그럼에도 불구하고 아직까지는 직접처분 옵션이 재활용 옵션에 비해 유리한 것으로 평가되고 있다. 그러나 후행 핵연료주기 경제성 평가에 큰 영향을 미치는 우라늄 원광 가격이 지금처럼 계속 가파른 상승세를 보이거나, 직접처분 옵션의 비용 추정에 거의 유일하게 이용되고 있는 유카마운틴 처분장의 건설 비용이 당초 예상보다 상당한 폭으로 높게 나타날 경

우 지금까지의 연구결과가 달라질 가능성도 있는 것으로 분석된다. 가령 Matthew Bunn 등은 우라늄 가격이 \$370/kgU 이상이 되면 직접처분에 비해 재처리·재활용이 유리하게 될 것으로 보고 있다[2].

이와 같은 사례분석 결과를 종합해 볼 때 직접처분과 재처리·재활용 옵션에 대한 보다 정확한 경제성 평가를 위해서는 MOX 사용후핵연료 관리비용을 포함시키고, 아울러 보다 현실화된 우라늄 가격 및 고준위폐기물 처분장 건설비용을 추정하여 평가에 이용해야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] Jason Andrus, Management of Used Nuclear Fuel and High Level Waste: Is GNEP the Answer?, Idaho State University(2007).
- [2] Matthew Bunn, Steve Fetter, John P. Holdren and Bob van der Zwaan, The Economics of Reprocessing vs. Direct Disposal of Spent Nuclear Fuel, Havard University(2003).
- [3] Nuclear Energy Agency, The Economics of the Nuclear Fuel Cycle, OECD/NEA(1994).
- [4] Nuclear Energy Agency, Advanced Nuclear Fuel Cycles and Radioactive Waste Management, OECD/NEA(2006).
- [5] Rich Peters and Pattabi Seshadri, Economic Assessment of Used Nuclear Fuel Management in the United States, The Boston Consulting Group(2006).
- [6] Tadahiro Katsuta and Tatsujiro Suzuki, Japan's Spent Fuel and Plutonium Management Challenges, IPFM(2006).