

A Comparative Study on the Economics of Reprocessing and Direct Disposal of Nuclear Spent Fuel

Seongku Kang, Jongsoon Song*
Korea Electric Power Company, *Chosun University

사용후 핵연료의 재처리와 직접 처분의 경제성 비교 연구

강성구, 송종순*
한국전력공사, *조선대학교

(2000년 4월 10일, 2000년 6월 9일 채택)

Abstract - Nuclear fuel cycle choices and costs are important in considering energy policies, fuel diversity, security of supply and associated social and environmental impacts. Particularly, the nuclear spent fuel is very important in view of high activity and the need of long term management. This study focuses on the comparison of reprocessing and direct disposal of nuclear spent fuel in terms of cost, safety and public acceptability. The results of the study show that the direct disposal is about 7% more economical than the reprocessing. In terms of safety, the results show that the risk of vitrified HLW (high-level radioactive waste) is less than directly disposed spent fuel. For the public acceptability, both of the methods are not well understood and therefore they are not accepted. In conclusion, it is necessary to guarantee the safety of the both spent fuel processing methods through continuous development of associated technology and to have a fuel cycle policy which should consider not only the economics but also social and environmental impacts.

Key words: spent fuel, reprocessing, direct disposal, economics

요약 - 원자력 정책에서 안전성과 운영실적, 환경보전, 경제성 등은 매우 중요한 인자이다. 핵주기의 선택은 에너지정책, 연료의 다양성, 공급의 안정과 관련된 모든 사회적, 환경적 영향에 있어 매우 중요하다. 특히, 원전의 고준위 방사성폐기물인 사용후 핵연료 관리는 높은 방사선준위 뿐만 아니라 장기적인 관리기간이 소요되는 어려운 사업이다. 본 연구는 사용후 핵연료 관리방안인 재처리와 직접 처분의 비용분석, 안전성, 대국민 용인 측면을 살펴보았다. 직접 처분이 재처리에 비해 약 7%정도의 경제성이 있고, 직접 처분의 사용후 핵연료는 재처리폐기물보다 높은 위험도를 갖는다. 대국민 용인측면에서는 두 가지 처리방법 모두 찬성하지 않는다. 결론적으로, 사용후 핵연료관리는 모든 사회/환경적 영향과 경제성을 고려한 핵주기 정책과 병행하여 지속적인 기술개발을 통한 안전성확보가 필요하다.

중심어: 사용후 핵연료, 재처리, 직접 처분, 경제성

서론

먼저, 사용후 핵연료의 특성을 알아보면, 원자력 발전소의 핵연료집합체는 보통 12~15 ft 길이의 피복재관 (보통 지르칼로이, 스테인레스, 인코넬 사용)에 산화우라늄(UO₂) 펠렛이 내장된 연료봉을 16개 또는 17개씩 (16×16, 17×17) 배열, 조립한 형태로 제작/장전된다. 3~4년간의 운전후 인출된 핵연료는 94% 정도의 U²³⁸과 1% 정도의 U²³⁵, 1% 정도의 Pu를 함유하고, 적은 량 (1%)의 초우란 (TRU) 원소와 3~4%의 핵분열생성물로 이루어진다. 원자로에서 반출된 사용후 핵연료는 상당량의 핵분열물질과 잠재 핵분열성 물질을 함유하고 있어 핵분열생성

물들의 붕괴로 인해 대략 10 Ci/g의 강한 방사능과 함께 많은 붕괴열을 방출한다. 따라서 사용후 핵연료는 보통 일정기간 발전소 부지내의 냉각 저장조에 저장하여 방사능과 붕괴열을 감소시킨다.

사용후 핵연료의 관리방안에는 재처리와 직접 처분의 두 가지가 있을 수 있다. 먼저, PWR (Pressurized Water Reactor) 사용후 핵연료는 보통 1.15 w/o의 Pu, 94.3 w/o의 U, 4.55 w/o의 폐기물 생성물로 구성되는데, 상용화된 재처리 (Reprocessing)는 사용후 핵연료로부터 U를 추출, 농축하여 재사용하고, Pu는 MOX (Mixed Oxide) 연료가공에 이용하는 방법이다 [1]. 이 경우, 보통 초기연료의 20~30%에 해당 하는 에너지의 재이용이 가능하다. 재처리 공정은:

- 핵연료집합체 해체 및 절단 후 강질산에 용해시켜 고체/액체를 분리 후
- 제염공정을 거쳐 분열생성물들과 U, Pu을 분리하고
- U, Pu의 상호분리 공정을 거쳐
- U, Pu의 제염 후 증발/농축시키는 과정으로 이루어진다.

- 두 처리방법에 대한 대국민 용인측면에서 두 가지의 후행 핵주기 방안을 비교하였다.

직접 처분 (Direct disposal)은 보통 30~50년 정도의 냉각기간을 거친 사용후 핵연료를 원격 조절장치로 해체하거나 바로 처분용기에 포장하게 된다 [2]. 포장용기(Canister)는 구리, 티타늄 또는 세라믹 등의 재질로 이루어지고 포장된 용기는 완전 밀봉용접 된다. 포장된 사용후 핵연료는 고준위 폐기물(HLW)로 취급되고 지하수 침투로부터 보호될 수 있도록 방벽역할을 하는 되메움재 (Backfill Material)로 채워지는 심층 지하처분장에 영구처분 된다. 영구처분장은 지질학적/열수력학적으로 안정된 부지를 선정하여, 지하 수백 미터 아래 수평 터널을 파서 사용후 핵연료를 넣고 밀봉하여 생태계로부터 격리하는 개념이다.

경제성 비교에서는 각 방법에 따른 균등화 비용을 계산하였는데, 계산 모델은 기존에 개발된 것을 사용하였지만, 핵물질 자료를 국내 영광 3호기의 운전자료를 사용하여 분석 방법의 적용 가능성을 높였으며, 또한 민감도 분석을 통하여 각 구성 인자의 변화가 총 비용에 미치는 영향을 분석하고, 주요 지배인자를 도출하였다. 안전성과 대국민 용인 측면의 분석은 기존의 문헌을 요약, 제시하는 수준이지만 포함하여서, 비교 연구의 완전성을 보여주는 방법론을 제안하였다.

경제성비교

비용분석 조건과 일반사항

사용후 핵연료에 대한 경제성 분석은 1995년에 수행된 OECD/NEA의 "THE ECONOMICS OF NUCLEAR FUEL CYCLE" 에서 사용한 후행 핵주기 단위비용의 계산 모델을 이용하여 재처리와 직접 처분의 비용을 추산/비교하였다 [3]. 계산에 필요한 입력자료는 영광 3호기의 운전자료를 사용하였는데, 비용분석의 조건과 일반사항은 다음과 같다:

원자력 정책의 결정에서 비용 외에 환경 영향, 대중의 용인수준 등은 함께 고려되어야 한다. 원전의 고준위 방사성폐기물인 사용후 핵연료 관리 는 높은 방사선준위 뿐만 아니라 장기적인 관리기간이 소요되는 어려운 사업이다. 특히, 현재 우리나라에서 운영중인 대부분의 원전에서 사용후 핵연료 저장능력이 포화될 시점이 가까워지고 있다. 따라서, 사용후 핵연료의 관리정책의 수립과 시행은 하루 빨리 이루어져야 하며 충분한 기술적 배경과 의견수렴을 통하는 힘든 사업이 될 것이다.

- 열출력 2815MW (전기출력 1000MWe)의 PWR, 80% 부하로 30년 운영
- 1~4주기 장전량은 영광 3호기의 값을 이용하였고, 나머지 장전/방출량과 농도는 평균값 사용, 일반적인 할인을 5% 적용 (0%, 2%, 8%, 10%, 12%, 15%에 대해서도 비교분석 수행) [4]

선행 핵주기의 시장은 넓고 다양하지만, 후행 핵주기의 경우 영국, 프랑스, 일본 등 일부 국가에서 제한적인 재처리를 하고 있다. 원자력 선진국인 미국은 경제성을 이유로 1980년대부터 직접 처분을 위한 연구를 수행하고 있으나, 많은 비용과 시간을 소비하고도 아직까지 부지의 적절성 평가가 완료되지 못한 실정이다. 당연히 대부분의 국가들은 폐기물의 처분장소 등과 관련한 후행 핵주기 시설이 부담이 되고 있다. 국내의 사용후 핵연료 실정을 감안하면 후행 핵주기 정책이 하루빨리 추진되어야 하며, 이러한 관점에서 본 연구는

최근 운영중인 영국 Sellafield의 THORP와 프랑스 La Hague의 UP3 재처리 시설을 기초로 비용을 예상하였는데, 운영비용은 임금/보수유지비용, 처리율과 보험 등을 모두 포함하며 이러한 조건으로부터 할인율에 따른 재처리와 HLW 처분비용은 다음과 같다.

- 사용후 핵연료 재처리와 직접 처분의 비용분석을 통한 경제성 측면
- 두 처리방법의 위험성 인자들의 비교를 통한 안전성 측면

할인율	0%	2%	5%	8%	10%	12%	15%
재처리 (\$/kg.u)	620	640	720	840	930	1040	1220
HLW처분 (\$/kg)	60	70	90	120	140	170	220

직접 처분시설의 운영비용은

- 스웨덴의 임시 저장시설(CLAB)의 건설/운영경험에 기초(용량: 5000tU)
- 사용후 핵연료는 화강암 구조 부지에 최종 처분하고 되메움 가정하여 저장과 처분비용은 다음과 같다.

할인율	0%	2%	5%	8%	10%	12%	15%
이송/저장 (\$/kg.u)	210	200	230	280	340	400	500
포장/처분 (\$/kg)	360	430	610	870	1110	1390	1920

위의 시설 비용이외의, 각 핵주기에서의 단위 공정이 이루어지는 핵주기 data와 단위비용, 그리고 핵물질의 투입/발생량은 표 1, 2와 3에 나타내었다.

Table 1. 핵주기 DATA

ITEM	기준값
농축을 위한 광석순도	0.25%
선행시간	
-U 구입	24개월
-변환	18개월
-농축	12개월
-조립	6개월
후행시간	
-사용후 핵연료 이송	5년
재처리	
-재처리	6년
-VHLW 처분	56년
직접 처분	
-임시저장	5년
-사용후 핵연료 포장/처분	40년
손실율	
-변환	0.5%
-조립	1.0%
-재처리	2.0%
-기타	0%

Table 2. PER FUEL CYCLE 단위비용

구성요소	단위비용 (기본가정 포함)
U 구입	\$ 50/kgU
변환	\$ 8/kg U
농축	\$ 110/SWU
조립	\$ 275/kg U
재처리	
-사용후 핵연료 이송	\$ 50/kg U
-재처리 (LLW,ILW의 처분/VHLW의 유리화 및 저장포함)	\$ 720/kg U
-VHLW 처분	\$ 90/kg U
직접 처분	
-사용후 핵연료 이송/저장	\$ 230/kg U
-사용후 핵연료 포장/처분	\$ 610/kg U

Table 3. 핵물질 DATA

시간	총 우라늄량 (ton)	평균 U ²³⁵ 농도 (%)	총 Pu량 (kg)	분열성 Pu량 (kg)
1. 초기노심 DATA				
1주기(15개월)	76.35	2.38		
2주기(12개월)	20.65	3.68		
3주기(15개월)	27.58	3.94		
4주기(15개월)	24.11	3.99		
2. 재장전 DATA				
5주기~19주기 (18개월)	27.0	4.24		
3. 방출 DATA				
1주기	20.31	0.53	119	83.3
2주기	27.05	0.90	221	154.7
3주기	23.46	0.64	225	157.5
4주기	27	0.95	230	161
5~19주기	26.5	1.0	235	164.5
4. 최종노심 DATA				
20~22주기	26.3	0.95	225	157.5

비용분석

먼저, 각 구성요소의 비용은 부록 1에서와 같이 표현할 수 있다. 원자로에서의 전력생산이나 지속적인 운영 전에 연료주기의 비용지출이 발생한다. 연료의 조립이나 재처리 등 핵주기 사업 비용지출의 적절한 시기선택은 핵연료 주기 선택과 각 주기 구성요소의 선행/후행 시간에 의존한다. 총 핵연료 주기의 비용 계산을 위해서는 각 구성 요소의 규모와 적절한 시간이 정확화되어야 한다. U량과 처리 규모는 각 단계에서의 허용되는 공정 손실을 조절하고 구성 요소의 비용 계산에 고려된다. 한편, 각 공정의 계산변수와 인자는 표 4에서 제시하였다.

각 핵연료주기 단계의 시작과 함께 비용의 지출이 발생하고, 원자로운영에 따른 수입의 발생을 감안한다면, 이 총비용의 흐름과 원자로 운영기간동안의 총 전기생산량의 관계에서 각 핵주기 단위공정의 비용을 단위 전기생산에서 차지하는 균등화 비용으로 표현할 수 있다. 원자로에서 생산되는 전기량은 22주기가 끝나는 30.75년 동안 80% 부하율과 1000 MW로부터 $215,496 \times 10^6$ KWh가 되며, 각 구성비용의 총액을 이 전기량으로 나눈 것이 균등화비용이 된다. 지금까지 서술된 기준값과 비용계산식을 이용하여 수행한 기준가정의 경우에서 이 균등화 비용은 표 5, 6과 같다.

Table 4. FUEL CYCLE의 변수와 계산인자

<p>일반적인 사항</p> <ul style="list-style-type: none"> • 시간 : t • 연료 장전일 : t_c • 연료 거주시간 : T_r 	<p>핵연료주기 구성인자 i</p> <ul style="list-style-type: none"> • 총 구성요소비용 : F_i • 단위비용 : P_i • 할인율 : s_i • 물질 손실 : l_i • 총 손실인자 : f_i • 선행/후행시간 : t_i <p>여기서:</p> <ul style="list-style-type: none"> i=1 U 구입, i=2 변환, i=3 농축, i=4 조립 i=5 사용후 핵연료 이송, i=6 재처리 또는 임시저장 i=7 VHLW처분 또는 사용후 연료 포장/처분 i=8 U 이득, i=9 PU 이득 <p>그리고:</p> <ul style="list-style-type: none"> P_1 = 비용/lb U_3O_8, P_2 = 비용/kg U P_3 = 비용/SWU, P_{4-7} = 비용/kg U P_8 = 비용/회수된kg U, P_9 = 비용/kg Pu_f
<p>핵물질 사항</p> <ul style="list-style-type: none"> • U 공급량 (kg) : M_f • 원자로 장전U량(kg) : M_p • 방출광석 U량(kg) : M_r • 총 U 인출량 (kg) : M_d • 총 PU량(kg) : M_{pu} • 총 분열성 PU량(kg) : M_{puf} • 공급 U^{235} 분율 : $e_f(0.711\%)$ • 장전 U^{235} 분율 : e_p • 광석 U^{235} 분율 : $e_r(0.25\%)$ • 방출 U^{235} 분율 : e_d • 변환인자 (kg U to lb U_3O_8):a(2.6) (lb U_3O_8/ kg U) 	

Table 5. 재처리 사양에서의 총 핵연료주기 균등화 비용 계산결과

구성요소	균등화 비용 (mills/kwh)						
	할인율(%)						
	0	2	5	8	10	12	15
우라늄 변환	2.708	2.810	2.980	3.158	3.270	3.397	3.580
농축	0.166	0.171	0.179	0.187	0.192	0.197	0.205
조립	1.490	1.519	1.560	1.609	1.639	1.668	1.711
선행핵주기 합계	0.713	0.720	0.731	0.741	0.748	0.755	0.765
선행핵주기 합계	5.077	5.220	5.450	5.695	5.849	6.017	6.261
사용후 핵연료 이송	0.128	0.116	0.100	0.087	0.079	0.072	0.063
재처리 및 유리화	1.593	1.460	1.380	1.360	1.213	1.354	1.355
폐기물 처분	0.154	0.059	0.015	0.004	0.002	0.001	0.000
후행핵주기 합계	1.875	1.635	1.495	1.451	1.294	1.426	1.418
우라늄 이득	-0.246	-0.218	-0.183	-0.155	-0.138	-0.124	-0.106
플루토늄 이득	-0.123	-0.109	-0.091	-0.077	-0.069	-0.062	-0.053
총비용	6.583	6.528	6.671	6.914	6.936	7.257	7.520

Table 6. 직접 처분 사양에서의 총 핵연료주기 균등화 비용 계산결과

구 성 요 소	균등화 비용 (mills/kwh)						
	할인율(%)						
	0	2	5	8	10	12	15
우라늄 변환 농축 조립	2.708	2.810	2.980	3.158	3.270	3.397	3.580
선행핵주기 합계	0.166	0.171	0.179	0.187	0.192	0.197	0.205
사용후 핵연료 이송 및 저장	1.490	1.519	1.560	1.609	1.639	1.668	1.711
사용후 핵연료 포장 및 처분	0.713	0.720	0.731	0.741	0.748	0.755	0.765
후행핵주기 합계	5.077	5.220	5.450	5.695	5.849	6.017	6.261
사용후 핵연료 이송 및 저장	0.539	0.511	0.463	0.489	0.542	0.582	0.638
사용후 핵연료 포장 및 처분	0.924	0.552	0.284	0.151	0.100	0.067	0.036
후행핵주기 합계	1.463	1.063	0.747	0.640	0.642	0.649	0.674
총 비 용	6.540	6.283	6.197	6.335	6.491	6.666	6.935

비용분석의 결과

지금까지 사용후 핵연료의 재처리와 직접 처분에 있어 각 단위공정의 비용을 가지고 총연료주기 비용을 살펴보았다. 기준값의 가정하에서 수명기간 동안의 전력생산량과 총연료주기 비용을 대비시킨 균등화 비용은 재처리의 경우 6.671 mills/kwh, 직접 처분의 경우 6.197 mills/kwh로 나타난다. 따라서 본 연구의 결과는 직접 처분의 경우 재처리에 비해 약 7%정도의 경제성을 갖는 것으로 나타났다. 본 연구에서 참조한 1995년도의 OECD/NEA 연구결과는 직접 처분이 약 10% 경제성 우위를 보이는데, 이러한 비용의 차이는 불확실성과 전체 비용기간 특히, 국가의 핵주기 정책에서의 복잡한 외부의 환경적 영향 등을 감안하면 크게 고려할만한 차이는 아니라고 여겨진다.

한편, 기준 가정 하에서 우라늄의 가격 10% 변동은 전체 핵연료주기 비용의 5% 변동으로 나타난다. 선행 핵주기 비용은 양쪽 모두 할인율 증가와 더불어 증가한다. 이는 선행 핵 주기 사업과 U 구입을 위한 선행시간이 갖는 균등화된 연료비용을 혼합한 효과이다. 참고로, 본 연구에서 비용계산에 사용된 기준 시점은 OECD/NEA의 연구에 적용한 시점과 동일한 현가화 시점을 적용하였다. 재처리와 직접 처분의 경우 총 연료주기 비용은 우라늄 가격과 농축가격에 민감한 것으로 나타난다. 직접 처분의 경우 이 비중은 어떤 다른 단위 비용의 변동에 비해 그 효과가 매우 크다. 총 연료주기 비용에서 두 처리 방법 간의 차이는 단위

공정 발생 시간과 U, Pu 회수 이득 크기에 따라 발생한다. 각 구성 요소 비용은 U과 모든 핵연료 주기 비용과 범위, 그리고, 선행시간, 광석순도, 원자로 수명 등의 기술적 변수에 의존한다. 이러한 각 구성 인자의 변동 범위와 민감도 분석은 그림 1, 2에, 각 사양에서의 총 비용효과는 그림 3, 4에 나타나 있다.

우라늄 가격이 갖는 높은 비중만을 고려하면, 앞으로 MOX 연료를 상용화하여 그 조립비용이 현저히 감소하고 활발한 재처리로 인해 신규 우라늄 구입 요구량이 줄어들면, 우라늄가격이 감소하고 이로 인한 총 핵연료주기 비용은 감소될 것이다. 나아가 우라늄과 플루토늄의 회수이득 비중이 현재보다 더 증대되면 다소 이상적이긴 하지만, 직접 처분과 재처리의 경제성 비교우위도 큰 차이가 없을 것이다. 지금까지의 본 연구에서 사용한 여러 가정과 조건 이외에도 고려되어야 할 각 변수와 조건은 매우 많을 것이며, 향후 좀 더 많은 량의 자료와 다양한 분석방법을 통해 분석하는 것이 바람직할 것이다. 또한, 본 연구에서 수행한 민감도 분석은 입력 변수의 변화 범위만을 고려하여, 결과에 미치는 영향을 분석하였는데, 각 변수를 확률론적 분포를 가지는 변수로 취급하고, 민감도 인자를 계산하는 방법도 추후에 포함할 예정이다. 그러나, 이러한 성격의 연구에서는 무엇보다도 필요한, 광범위한 database의 구축과 각 단계에서의 비용 추정이 결과의 정확도를 보장할 수 있으며, 국내에서도 이러한 방법론을 고려한 관련 자료의 확보 작업과 핵주기 관련 각 단계의 정량적 모델링이 시급하다.

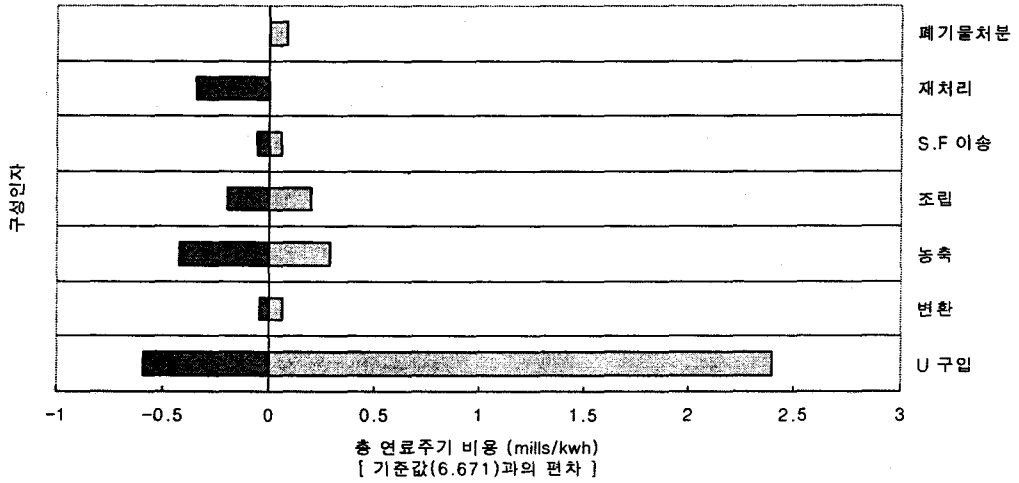


Fig. 1. 재처리 사양에서의 각 구성 인자의 민감도 범위

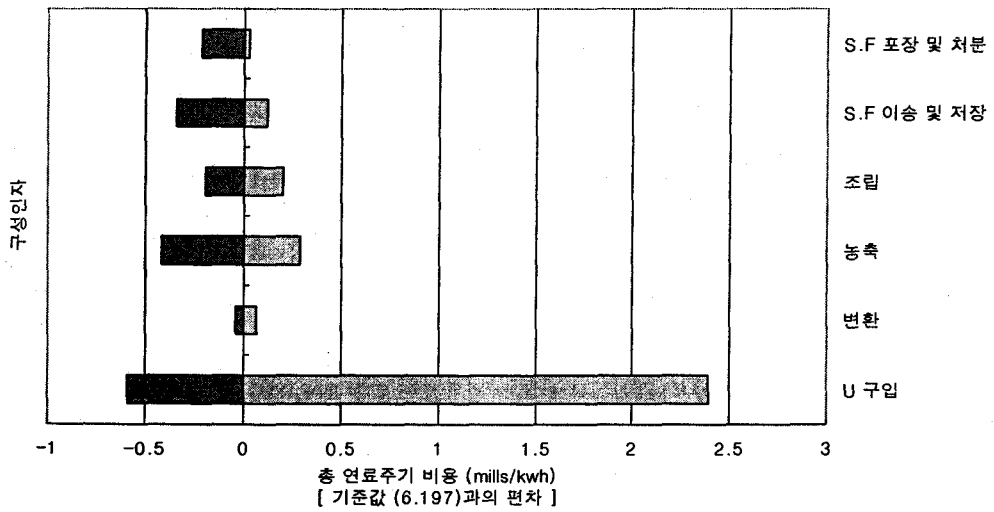


Fig. 2. 직접처분 사양에서의 각 구성 인자의 민감도 범위

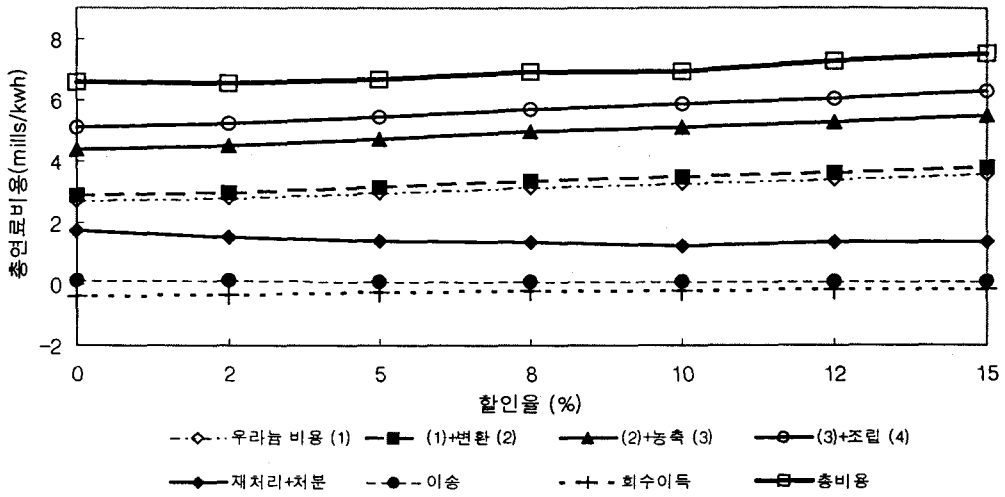


Fig. 3. 재처리 사양에서의 총비용 효과

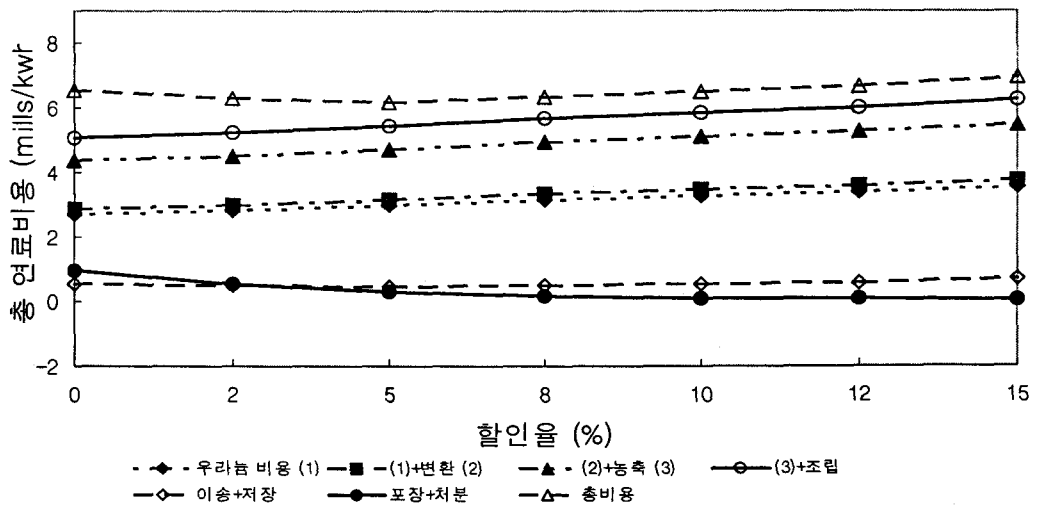


Fig. 4. 직접처분 사양에서의 총 비용 효과

안전성 비교

폐기물의 대부분 위험도는 수 백년간의 기간에서 핵분열성 생성물에 의해 좌우되므로 폐기물 형태에 따른 뚜렷한 차이는 없다. 수백 년후 사용후 핵연료의 위험도는 HLW에 비해 10~50배 가량 높다. HLW에 비해 사용후 핵연료의 높은 열 방

출량으로 2.5~5배 정도의 더 많은 공간의 처분장이 요구되고 이에 따라 원치 않는 지질학적 측면에서 설비의 고장발생 위험성이 커진다. 화학적 작용과 도달 특성 등의 불명확한 정보로 연관된 위험성의 정확한 평가는 어렵다. 두 처리방법간의 위험도는 표 7과 같다 [5].

Table 7. 사용후 핵연료와 HLW 위험요소 비교

위험요소	비 고		불확실성 제한요소	
	SF	HLW	SF	HLW
사전설비 ○ 취 급	저장용기 낙하로 인한 휘발성 가스 방출 → 위험 무시 가능	같음 (높은 열방출량시 좀 더 위험하나 미소량)	정화설비 효율	같음
○ 이 송	이송수단의 사고나 화재로 대기, 지하수 오염 → 위험도 매우 큼	같음 (그러나 HLW의 구조적 건정성이 상대적으로 큼)	핵종방출될 발단 상태	같음
○ 중간저장	저장조 냉각능력 상실로 인한 방출 → 허용범위내서 위험도 큼	같음 (높은 열방출량시 좀 더 위험)	지진의 빈도와 이에 따른 구조적 건정성	같음

위험요소	비 고		불확실성 제한요소	
	SF	HLW	SF	HLW
사후설비 ○ 열경계근처	저장용기의 갈라진 틈 → 회복불능	glass matrix 파손 → 회복불능	저장용기의 온도 설계기준	저장지역 습분량 canister 부식률 비균질매질의 열전도도
○ 열경계에서 떨어진 곳	지층이동으로 인한 지하수통로발생 및 지하수의 대류	상대적으로 적은 지층이동	지층구조의 내구성에 대한 기준	같음
○ 폐기물/매질 상호작용	핵종의 빠른 도달	핵종의 빠른도달	불확실한 침투율	불확실한 침투율 (높은압력이나폭발시 H 2의 거동불확실)
○ 환경내이동 인간에 영향	섭취경로에 농도축적압과 유전적 영향 유발	같음	선량과선량률에 의한 암이나 유전적영향	같음
○ 입계성	높은 열 발생량과 방사화 생성물형태	상대적으로 적음	동위원소 지연 factor와 U-Pu 농도에서의 감속 재 거동	
○ 확 산	없음	Pu의 도난	없음	공정효율 높이고 안전을 위한 보호용 절차서

대국민 용인

원자력 산업이 다른 산업에 비해 상대적인 안전성을 갖고 있고, 기술적인 준국산 에너지인 동시에 청정 에너지이지만, 일반 국민들에게는 방사선 노출에 대한 두려움과 불신, 핵무기를 연상시키는 막연한 두려움 등으로 원자력 산업의 추진에 장애가 되고 있다. 이러한 관점에서 재처리와 직접 처분에 대한 반대 여론은 다음과 같이 요약된다 [6]:

- 직접 처분의 경우
 - 처분장의 방사성물질의 누출 위험성/ 처분장 선정과정에 대한 신뢰성의 결여
 - 처분장 지역의 경제적 손실/이송경로의 사고위험성/지역적 형평성의 결여
- 재처리의 경우
 - 핵확산의 위협/높은 온도의 HLW 관리위험성/ 상대적으로 낮은 경제성
 - 이송경로의 사고위험성/부지에서의 방사성물질 누출 위험성

결론

사용후 핵연료에 대한 재처리와 직접 처분에 있어 본 연구의 결과로는 직접 처분이 약 7% 정도의 경제성을 갖는 것으로 나타났다. 안전성은 재처리가 우위를 보이며, 두 방법 모두 대중의 용인을 얻고 있지 못하다. 이외에도 고려되어야 할 해당국가만의 고유변수와 상황들이 매우 많을 것이다. 재처리와 직접 처분에 관한 비교 연구는 경제성이나 안전성 측면의 기술적 분석뿐만 아니라 대국민 용인이나 정치적 변수, 해당 국가의 고유변수를 모두 포함하는 방법론에 의해서만 성공적으로 수행할 수 있다. 후행핵주기 사업은 수십년이 소요될 장기정책이란 점에서, 기존의 "WAIT-AND-SEE" 정책을 지양하고 중/장기적 관점에서 정책수립의 준비와 함께, 대국민 용인수준을 고려한 충분한 토론과 참여의 기회를 국민들에게 제공해야 할 것이다. 특히, 사용후 핵연료관리는 모든 사회/환경적 영향과 경제성을 고려한 핵주기 정책과 병행하여 지속적인 기술개발을 통한 안전성 확보가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 1996년도 조선대학교 학술 연구비의 지원을 받았음을 밝힌다.

참고문헌

1. 이한주, 이철수, *우라늄농축/재처리*, 한국에너지연구소, (1989).
2. Douglas G. Brookins, *Geochemical Aspects of Radioactive Waste Disposal*, 1983.
3. OECD/NEA, *The Economics of the Nuclear Fuel Cycle*, (1995).
4. 영광 3호기 1~4주기 핵설계 보고서 (*The Nuclear Design Report for YGNPP Unit 3*), 한국전력공사/한국원전연료주식회사/한국원자력연구소.
5. EPRI, *Status Report on Risk Assessment for Nuclear Waste Disposal*, (1979).
6. Public Citizen, *What's Wrong With Burying Nuclear Waste at Yucca Mountain*, (1997).

부록 1. 후행 핵주기 단위비용의 계산모델 [3]

● U 비용

$$F_1 = M_f \times a \times f_1 \times P_1 \times (1 + s_1)^t$$

$$= (e_p - e_t) / (e_r - e_t) \times M_p$$

$$f_1 = (1 + l_2)(1 + l_3)(1 + l_4)$$

모든 선행 핵주기 구성인자로부터 : $t = t_c - t_i$

● 변환 비용

$$F_2 = M_f \times f_2 \times P_2 \times (1 + s_2)^t$$

여기서 $f_2 = (1 + l_2)(1 + l_3)(1 + l_4)$

● 농축 비용

$$F_3 = S \times f_3 \times P_3 \times (1 + s_3)^t$$

여기서 S = Separative Work Unit

$$S = M_p V_p + M_r V_r - M_f V_f$$

$$M_i = M_f - M_p$$

$$V_x = (2e_x - 1) \ln(e_x / (1 - e_x))$$

$x = f, p, t$

$$f_3 = (1 + l_3)(1 + l_4)$$

● 조립 비용

$$F_4 = M_p \times f_4 \times P_4 \times (1 + s_4)^t$$

여기서 $f_4 = (1 + l_4)$

● 이송 비용

$$F_5 = M_p \times P_5 \times (1 + s_5)^t$$

모든 후행 핵주기 구성인자의 $t = t_c + T_r + t_i$

● 재처리 또는 임시저장 비용

$$F_6 = M_p \times P_6 \times (1 + s_6)^t$$

● VHLW 처분 또는 사용후 핵연료 포장/처분 비용

$$F_7 = M_p \times P_7 \times (1 + s_7)^t$$

● U 이득

$$F_8 = M_d \times P_8 \times f_8 \times (1 + s_8)^t$$

여기서 $f_8 = (1 + l_6)$

● Pu 이득

$$F_9 = M_{pur} \times f_6 \times P_9 \times (1 + s_8)^t$$