

사용후 핵연료의 재처리와 직접처분의 비교 · 연구
The Comparison Study of Reprocessing and Direct Disposal
of Nuclear Spent Fuel

강성구

한국전력공사

서울특별시 강남구 삼성동 167

송종순

조선대학교

광주광역시 동구 서석동 375

요약

원자력 정책에서 안전성과 운영실적, 환경보전, 경제성 등은 매우 중요한 인자이다. 核週期의 선택은 에너지정책, 연료의 다양성, 공급의 안정과 관련된 모든 사회적, 환경적 영향에 있어 매우 중요하다. 특히, 原電의 고준위 방사성폐기물인 사용후 핵연료 관리는 높은 방사선준위 뿐만 아니라 장기적인 관리기간이 소요되는 어려운 사업이다. 본 연구는 사용후 핵연료 관리방안인 재처리와 직접처분의 비용분석, 안전성, 대국민 용인 측면을 살펴보았다. 직접처분이 재처리에 비해 약 7%정도의 경제성이 있고, 직접처분의 사용후 핵연료는 재처리폐기물보다 높은 위험도를 갖는다. 대국민 용인측면서는 두 가지 처리방법 모두 받아들여 지지 않는다. 결론적으로, 사용후 핵연료관리는 모든 사회/환경적 영향과 경제성을 고려한 핵주기정책과 병행하여 지속적인 기술개발을 통한 안전성확보가 필요하다.

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 is less than directly disposed spent fuel. For the public acceptability, both of the methods are not well understood and therefore they may not be accepted. In conclusion, It is necessary to guarantee 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.

1. 서론

원자력 정책에서 비용 외에 환경영향, 대중의 용인수준 등은 함께 고려되어야 한다. 原電의 고준위 방사성폐기물인 사용후 핵연료 관리는 높은 방사선준위 뿐만 아니라 장기적인 관리기간이 소요되는 어려운 사업이다. 특히, 현재 운영중인 대부분의 原電에서 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. 이러한 관점에서 본 연구는

- 사용후 핵연료 재처리 비용과 직접처분 비용분석을 통한 경제성 측면
- 두 처리방법의 위험성 인자들의 비교를 통한 안전성 측면
- 두 처리방법에 대한 대국민 용인측면에서 두 가지 후행핵주기 방법을 비교하였다.

2. 본론

2.1 사용후 핵연료의 특성

원자력발전소의 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, 적은량(1%)의 초우란(TRU) 원소와 3~4%의 핵분열생성물로 이루어진다. 원자로에서 반출된 사용후 핵연료는 상당량의 핵분열물질과 잠재핵분열성물질을 함유하고 있어 핵분열생성물들의 붕괴로 인해 대략 10 ci/g의 강한 방사능과 함께 많은 붕괴열을 방출한다. 따라서 사용후 핵연료는 보통 일정기간 발전소 부지내의 냉각저장조에 저장하여 방사능과 붕괴열을 감소시킨다.

2.2 사용후 핵연료의 관리방안

가. 재처리 (Reprocessing)^[1]

PWR 사용후 핵연료는 보통 1.15 w/%의 Pu, 94.3 w/%의 U, 4.55w/%의 폐기물 생성물로 구성된다. 사용후 핵연료로부터 U를 추출, 농축하여 재사용하고, Pu는 MOX(Mixed Oxide) 연료가공에 이용하면 보통 초기연료의 20~ 30%에 해당하는 에너지의 재이용이 가능하다. 재처리 공정은

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

나. 직접처분 (Direct disposal)^[2]

보통 30~50년 정도의 냉각기간을 거친 사용후 핵연료를 원격조절장치로 해체하거나 바로 처분용기에 포장하게 된다. 포장용기(Canister)는 구리, 티타늄 또는 세라믹 등의 재질로 이루어지고 포장된 용기는 완전밀봉용접 된다. 포장된 사용후 핵연료는 HLW(고준위 폐기물)로 취급되고 지하수침투로부터 보호될 수 있도록 방벽역할을 하는 되메움재(Backfill Material)로 채워지는 심층지하처분장에 영구처분 된다. 영구처분장은 지질학적/열수력학적인

로 안정된 부지를 선정하여, 지하 수 백 미터 아래에 수평터널을 파서 사용후 핵연료를 넣고 밀봉하여 생태계로부터 격리하는 개념이다.

3. 경제성비교 ^[9]

3.1 비용분석 조건과 일반사항

사용후 핵연료에 대한 경제성의 분석은 1995년에 수행된 OECD/NEA의 “THE ECONOMICS OF NUCLEAR FUEL CYCLE”에서 사용한 후행 핵주기 단위비용을 이용하여 재처리와 직접처분의 비용을 추산/비교하였다. 비용분석의 조건과 일반사항은 다음과 같다.

- 열출력 2815MW(전기출력 1000MWe)의 PWR, 80% 부하로 30년 운영
- 1~4주기 장전량은 영광 3호기의 값을 이용하였고, 나머지 장전/방출량과 농도는 평균값 사용, 일반적인 이자율 5% 적용(0%, 2%, 8%, 10%, 12%, 15%에 대해 비교분석 수행)
- 운영비용은 임금/보수유지비용, 처리율과 보험 등을 모두 포함하며 이러한 조건으로부터 이자율에 따른 재처리와 HLW처분비용을 계산하였다. 직접처분시설의 운영비용은
- 스웨덴의 임시저장시설(CLAB)의 건설/운전경험에 기초(용량6000tU)
- 사용후 핵연료는 화강암구조 부지에 최종처분하고 되메움 가정하여 소요되는 저장과 처분비용을 계산하였다.

위의 시설비용외에, 각 핵주기에서의 단위공정이 이루어지는 핵주기 data와 단위비용, 그리고 핵물질의 투입/발생량은 표3-1, 3-2, 3-3에 나타내었다.

3.2 비용분석의 결과

각 핵연료주기단계의 시작과 함께 비용의 지출이 발생하고, 원자로운영에 따른 수입의 발생을 감안한다면, 이 총비용의 흐름과 원자로 운영기간동안의 총 전기생산량의 관계에서 각 핵주기 단위공정의 비용을 단위전기생산에서 차지하는 균일화 비용으로 표현할 수 있다. 원자로에서 생산되는 전기량은 22주기가 끝나는 30.75년 동안 80%부하율과 1000MW로부터 215496×10^6 KWh가 되며, 각 구성비용의 총액을 이 전기량으로 나눈 것이 균일화비용이 된다. 기준값의 가정 하에서 수명기간 동안의 전력생산량과 총연료주기비용을 대비시킨 균일화 비용은 재처리의 경우 6.671 mills/kwh, 직접처분의 경우 6.197 mills/kwh 로 나타난다. 따라서 본 연구의 결과는 직접처분의 경우 재처리에 비해 약 7%정도의 경제성을 갖는 것으로 나타났다. 이러한 비용의 차이는 불확실성과 전체비용기간 특히, 국가의 핵주기정책에서의 복잡한 외부의 환경적영향 등을 감안하면 크게 고려할만한 차이는 아니라고 여겨진다. (그림3-1, 표3-4, 표3-5 참조)

4. 안전성비교 ^[10]

폐기물의 대부분 위험도는 수 백년간의 기간에서 핵분열성 생성물에 의해 좌우되므로 폐기물 형태에 따른 뚜렷한 차이는 없다. 수 백 년후 사용후 핵연료의 위험도는 HLW에 비해 10~50배 가량 높다. HLW에 비해 사용후 핵연료의 높은 열 방출량으로 2.5~5배 정도의 더 많은 공간의 처분장이 요구되고 이에 따라 원치않는 지질학적 측면서 설비의 고장발생 위험성이 커진다. 화학적 작용과 도달특성 등의 불명확한 정보로 연관된 위험성의 정확한 평가는 어렵다. 두 처리방법간의 위험도는 표4-1과 같다.

5. 대국민 용인 측면^[6]

원자력산업이 다른 산업에 비해 상대적인 안전성을 갖고 있고, 기술적인 준국산 에너지인 동시에 청정에너지이지만, 일반국민들에게는 방사선노출에 대한 두려움과 불신, 핵무기를 연상시키는 막연한 두려움 등으로 원자력산업의 추진에 장애가 되고 있다. 이러한 관점에서 재처리와 직접처분에 대한 반대여론은 다음과 같이 요약된다.

1) 직접처분의 경우

- 처분장의 방사성물질의 누출 위험성 / 처분장 선정과정에 대한 신뢰성의 결여
- 처분장 지역의 경제적 손실 / 이송경로의 사고위험성 / 지역적 형평성의 결여

2) 재처리의 경우

- 핵확산의 위협 / 높은 온도의 HLW 관리위험성 / 상대적으로 낮은 경제성
- 이송경로의 사고위험성 / 부지에서의 방사성물질 누출 위험성

6. 결론

사용후 핵연료에 대한 재처리와 직접처분에 있어 본 연구의 결과로는 직접처분이 약 7% 정도의 경제성을 갖는 것으로 나타났다. 안전성은 재처리가 약간의 우위를 보이며, 두 방법 모두 대중의 용인을 얻고 있지 못하다. 이외에도 고려되어야 할 해당국가만의 고유변수와 상황들이 매우 많을 것이다. 후행핵주기 사업은 수 십 년이 소요될 장기정책이란 점에서, "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 핵주기정책과 병행하여 지속적인 기술개발을 통한 안전성확보가 필요하다.

7. 참고문헌

- [1] 이한주·이철수 : 「우리늄농축/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] EPRI : "Status Report on Risk Assessment for Nuclear Waste Disposal", 1979
- [5] Public Citizen : "What's Wrong With Burying Nuclear Waste at Yucca Mountain?", 1997

<표 3-1 : 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
직접처분	
-임시저장	5년
-사용후 핵연료 포장/처분	40년
손실을	
-변환	0,5%
-조립	1,0%
-재처리	2,0%
-기타	0%

<표 3-2 : PWR FUEL CYCLE 단위비용>

구성요소	단위비용 (기본가정 포함)
U 구입	\$50/kg U
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
직접처분	
-사용후 핵연료 이송/저장	\$230/kg U
-사용후 핵연료 포장/처분	\$610/kg U

<표 3-3 : 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

<표 3-4 : 재처리 사양에서의 총 핵연료주기 균일화 비용 계산결과 >

구성요소	균일화 비용 (mills/kwh)						
	상승률(%)						
	0	2	5	8	10	12	15
우라늄 변환 농축 조립	2,708 0,166 1,490 0,713	2,810 0,171 1,519 0,720	2,960 0,179 1,560 0,731	3,158 0,187 1,609 0,741	3,270 0,192 1,639 0,748	3,397 0,197 1,668 0,755	3,580 0,205 1,711 0,765
선행핵주기 합계	5,077	5,220	5,450	5,695	5,849	6,017	6,261
사용후 핵연료 이송 재처리 및 유회 폐기물 처분	0,128 1,593 0,154	0,116 1,460 0,059	0,100 1,380 0,015	0,087 1,360 0,004	0,079 1,213 0,002	0,072 1,354 0,001	0,063 1,355 0,000
후행핵주기 합계	1,875	1,635	1,495	1,451	1,294	1,426	1,418
우라늄 이득 플루토늄 이득	-0,246 -0,123	-0,218 -0,109	-0,183 -0,091	-0,155 -0,077	-0,138 -0,069	-0,124 -0,062	-0,106 -0,053
총비용	6,583	6,528	6,671	6,914	6,936	7,257	7,520

<표 3-5 : 직접처분 사양에서의 총 핵연료주기 균일화 비용 계산결과>

구성요소	균일화 비용 (mills/kwh)						
	상승률(%)						
	0	2	5	8	10	12	15
우라늄 변환 농축 조립	2,708 0,166 1,490 0,713	2,810 0,171 1,519 0,720	2,960 0,179 1,560 0,731	3,158 0,187 1,609 0,741	3,270 0,192 1,639 0,748	3,397 0,197 1,668 0,755	3,580 0,205 1,711 0,765
선행핵주기 합계	5,077	5,220	5,450	5,695	5,849	6,017	6,261
사용후 핵연료 이송 및 저장 사용후 핵연료 포장 및 처분	0,539 0,924	0,511 0,552	0,463 0,284	0,469 0,151	0,542 0,100	0,582 0,067	0,638 0,036
후행핵주기 합계	1,463	1,063	0,747	0,640	0,642	0,649	0,674
총비용	6,540	6,283	6,197	6,335	6,491	6,666	6,935

<표 4-1 : 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 열방출량 시 좀더 위험하나 미 소 량)	정화설비 효율	같음
○ 이 송	이송수단의 사고나 화재로 대기, 지하수오염 → 위험도 매우 큼	같음 (그러나 HLW의 구조적 건정성이 상대적으로 큼)	핵종 방출될 발단 상태	같음
○ 중간저장	저장조 냉각능력 상실로 인한 방출 → 허용범위내서 위험도 큼	같음 (높은 열방출량 시 좀더 위험)	지진의 빈도와 이에 따른 구조적 건전성	같음
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 (높은 압력이나 폭발시 H ₂ 의 거동불확실)
○ 환경내이동 인간에 영향	섭취경로에 농도 축적, 암과 유전적 영향 유발	같음	선량과 선량률에 의한 암이나 유전적영향	같음
○ 임계성	높은 열 발생량과 방사화 생성물형태	상대적으로 적음	동위원소 지면 factor와 U-Pu 농도에서의 감속재 거동	
○ 폭 산	없음	Pu의 도난	없음	공정효율 높이고 안전을 위한 보호 용 절차서

[3 - 1 :]

