

# 사용후 핵연료의 재처리와 직접처분의 비교·연구

The Comparison Study of Reprocessing and Direct Disposal of Nuclear Spent Fuel

강성구  
한국원자력연구소

송중순  
조선대학교

제성이 있고, 직접 처분의 사용후 핵연료는 재처리 폐기물보다 높은 위험도를 갖는다. 대국민 용인 측면서는 두 가지 처리 방법 모두 받아들여지지 않는다. 결론적으로, 사용후 핵연료 관리는 모든 사회·환경적 영향과 경제성을 고려한 핵주기 정책과 병행하여 지속적인 기술 개발을 통한 안전성 확보가 필요하다.

건 수렴을 통하는 힘든 사업이 될 것이다.

이러한 관점에서 본 연구는 ① 사용후 핵연료 재처리 비용과 직접 처분 비용 분석을 통한 경제성 측면 ② 두 처리 방법의 위험성 인자들의 비교를 통한 안전성 측면 ③ 두 처리 방법에 대한 대국민 용인 측면에서 두 가지 후행 핵주기 방법을 비교하였다.

**\* 요약 \***

원자력 정책에서 안전성과 운영 실적·환경 보전·경제성 등은 매우 중요한 인자이다. 핵주기의 선택은 에너지 정책, 연료의 다양성, 공급의 안정과 관련된 모든 사회적·환경적 영향에 있어 매우 중요하다. 특히 원전의 고준위 방사성 폐기물인 사용후 핵연료 관리는 높은 방사선 준위뿐만 아니라 장기적인 관리 기간이 소요되는 어려운 사업이다. 본 연구는 사용후 핵연료 관리 방안인 재처리와 직접 처분의 비용 분석, 안전성, 대국민 용인 측면을 살펴보았다. 직접 처분이 재처리에 비해 약 7% 정도의 경

**서 문**

원자력 정책에서 비용 외에 환경 영향, 대중의 용인 수준 등은 함께 고려되어야 한다.

원전의 고준위 방사성 폐기물인 사용후 핵연료 관리는 높은 방사선 준위뿐만 아니라 장기적인 관리 기간이 소요되는 어려운 사업이다.

특히 현재 운영중인 대부분의 원전에서 사용후 핵연료 저장 능력이 포화될 시점이 가까워지고 있다.

따라서 사용후 핵연료의 관리 정책의 수립과 시행은 하루 빨리 이루어져야 하며 충분한 기술적 배경과 의

**본 문**

**1. 사용후 핵연료의 특성**

원자력발전소의 핵연료 집합체는 보통 12~15ft 길이의 피복재관(보통 지르칼로이·스테인리스·인코넬 사용)에 산화 우라늄(UO<sub>2</sub>) 펠릿이 내장된 연료봉을 16개 또는 17개씩(16×16, 17×17) 배열·조립한 형태로 제작·장전된다.

3~4년간의 운전 후 인출된 핵연료는 94% 정도의 U238과 1% 정도의 U235, 1% 정도의 Pu를 함유하고, 적은 양(1%)의 초우라늄(TRU) 원소와 3~4%의 핵분열 생성물로 이

루어진다.

원자로에서 반출된 사용후 핵연료는 상당량의 핵분열 물질과 잠재 핵분열성 물질을 함유하고 있어 핵분열 생성물들의 붕괴로 인해 대략 10 Ci/g의 강한 방사능과 함께 많은 붕괴열을 방출한다.

따라서 사용후 핵연료는 보통 일정 기간 발전소 부지 내의 냉각 저장조에 저장하여 방사능과 붕괴열을 감소시킨다.

## 2. 사용후 핵연료의 관리 방안

### 가. 재처리(Reprocessing)

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, Pu은 MOX (Mixed Oxide) 연료 가공에 이용하면 보통 초기 연료의 20~30%에 해당하는 에너지의 재이용이 가능하다.

재처리 공정은 ① 핵연료 집합체 해체 및 절단 후 강질산에 용해시켜 고체/액체를 분리한 후 ② 제염 공정을 거쳐 분열 생성물들과 U·Pu를 분리하고 ③ U·Pu의 상호 분리 공정을 거쳐 ④ U·Pu의 제염 후 증발/농축시키는 과정으로 이루어진다.

### 나. 직접 처분(Direct disposal)

보통 30~50년 정도의 냉각 기간을 거친 사용후 핵연료를 원적 조절 장치로 해체하거나 바로 처분 용기에

포장하게 된다.

포장 용기(Canister)는 구리·티타늄 또는 세라믹 등의 재질로 이루어지고 포장된 용기는 완전 밀봉 용접 된다.

포장된 사용후 핵연료는 HLW(고준위 폐기물)로 취급되고 지하수 침투로부터 보호될 수 있도록 방벽 역할을 하는 되메움재(Backfill Material)로 채워지는 심층 지하 처분장에 영구 처분 된다.

영구 처분장은 지질학적/열수력학적으로 안정된 부지를 선정하여, 지하수 백 미터 아래에 수평 터널을 파서 사용후 핵연료를 넣고 밀봉하여 생태계로부터 격리하는 개념이다.

## 경제성 비교

### 1. 비용 분석 조건과 일반 사항

사용후 핵연료에 대한 경제성의 분석은 95년에 수행된 OECD/NEA의 「The Economics Of Nuclear Fuel Cycle」에서 사용한 후행 핵주기 단위 비용을 이용하여 재처리와 직접 처분의 비용을 추산/비교하였다.

비용 분석의 조건과 일반 사항은 다음과 같다.

- 열출력 2,815MW(전기 출력 1,000MWe)의 PWR, 80% 부하로 30년 운영
- 1~4주기 장전량은 영광 3호기의 값을 이용하였고, 나머지 장전/방출량과 농도는 평균값 사

〈표 1〉 핵주기 데이터

| Item            | 기준값   |
|-----------------|-------|
| 농축을 위한 광석 순도    | 0.25% |
| 선행 시간           |       |
| • U 구입          | 24개월  |
| • 변환            | 18개월  |
| • 농축            | 12개월  |
| • 조립            | 6개월   |
| 후행 시간           |       |
| • 사용후 핵연료 이송    | 5년    |
| 재처리             |       |
| • 재처리           | 6년    |
| • VHLW 처분       | 56년   |
| 직접 처분           |       |
| • 임시 저장         | 5년    |
| • 사용후 핵연료 포장/처분 | 40년   |
| 손실률             |       |
| • 변환            | 0.5%  |
| • 조립            | 1.0%  |
| • 재처리           | 2.0%  |
| • 기타            | 0%    |

〈표 2〉 PWR Fuel Cycle 단위 비용

| 구성 요소                                     | 단위 비용<br>(기본 가정 포함) |
|---|---------------------|
| U 구입                                      | \$50/kgU            |
| 변 환                                       | \$8/kg U            |
| 농 축                                       | \$110/SWU           |
| 조 립                                       | \$275/kg U          |
| 재처리                                       |                     |
| • 사용후 핵연료 이송                              | \$50/kg U           |
| • 재처리<br>(LLW, ILW의 처분/VHLW의 유리화 및 저장 포함) | \$720/kg U          |
| • VHLW 처분                                 | \$90/kg U           |
| 직접 처분                                     |                     |
| • 사용후 핵연료 이송/저장                           | \$230/kg U          |
| • 사용후 핵연료 포장/처분                           | \$610/kg U          |

용, 일반적인 이자율 5% 적용 (0%, 2%, 8%, 10%, 12%, 15%에 대해 비교 분석 수행)

- 운영 비용은 임금/보수 유지 비용, 처리율과 보험 등을 모두 포함하며 이러한 조건으로부터 이자율에 따른 재처리와 HLW 처분 비용을 계산하였다.

직접 처분 시설의 운영 비용은,

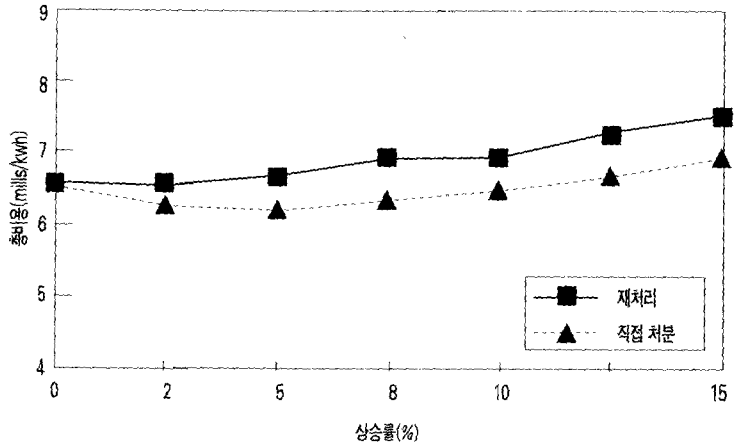
- 스웨덴의 임시저장시설(CLAB)의 건설/운전 경험에 기초(용량:5000tU)
- 사용후 핵연료는 화강암 구조 부지에 최종 처분하고 되때움 가정하여 소요되는 저장과 처분 비용을 계산하였다.

위의 시설 비용 외에, 각 핵주기에 서의 단위 공정이 이루어지는 핵주기 데이터와 단위 비용, 그리고 핵물질의 투입/발생량은 <표1><표2><표3>에 나타내었다.

## 2. 비용 분석의 결과

각 핵연료 주기 단계의 시작과 함께 비용의 지출이 발생하고, 원자로 운영에 따른 수입의 발생을 감안한다면, 이 총비용의 흐름과 원자로 운영 기간 동안의 총전기 생산량의 관계에서 각 핵주기 단위 공정의 비용을 단위 전기 생산에서 차지하는 균일화 비용으로 표현할 수 있다.

원자로에서 생산되는 전기량은 22주기가 끝나는 30.75년 동안 80% 부하율과 1,000MW로부터 215,496



(그림) 상승률에 따른 총핵연료 주기 균일화 비용

(표 3) 핵물질 데이터

| 시 간                 | 총 우라늄량(ton) | 평균 U <sup>235</sup> 농도 (%) | 총 Pu량 (kg) | 분열성 Pu량 (kg) |
|---------------------|-------------|----------------------------|------------|--------------|
| <b>1. 초기 노심 데이터</b> |             |                            |            |              |
| 1주기(15개월)           | 76.35       | 2.38                       |            |              |
| 2주기(12개월)           | 20.65       | 3.68                       |            |              |
| 3주기(15개월)           | 27.58       | 3.94                       |            |              |
| 4주기(15개월)           | 24.11       | 3.99                       |            |              |
| <b>2. 재장전 데이터</b>   |             |                            |            |              |
| 5주기~19주기 (18개월)     | 27.0        | 4.24                       |            |              |
| <b>3. 방출 데이터</b>    |             |                            |            |              |
| 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        |
| <b>4. 최종 노심 데이터</b> |             |                            |            |              |
| 20~22주기             | 26.3        | 0.95                       | 225        | 157.5        |

〈표 4〉 재처리 사양에서의 총핵연료 주기 균일화 비용 계산 결과

| 구 성 요 소   | 균일화 비용(mills/kwh) |        |        |        |        |        |        |
|-----------|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|           | 상승률(%)            |        |        |        |        |        |        |
|           | 0                 | 2      | 5      | 8      | 10     | 12     | 15     |
| 우라늄       | 2.708             | 2.810  | 2.980  | 3.158  | 3.270  | 3.397  | 3.580  |
| 변환        | 0.166             | 0.171  | 0.179  | 0.187  | 0.192  | 0.197  | 0.205  |
| 농축        | 1.490             | 1.519  | 1.560  | 1.609  | 1.639  | 1.668  | 1.711  |
| 조립        | 0.713             | 0.720  | 0.731  | 0.741  | 0.748  | 0.755  | 0.765  |
| 선행 핵주기 합계 | 5.077             | 5.220  | 5.450  | 5.695  | 5.849  | 6.017  | 6.261  |
| 사용후핵연료이송  | 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  |
| 후행 핵주기 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 |
| 총 비용      | 6.583             | 6.528  | 6.671  | 6.914  | 6.936  | 7.257  | 7.520  |

〈표 5〉 직접 처분 사양에서의 총핵연료 주기 균일화 비용 계산 결과

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

×106kWh가 되며, 각 구성 비용의 총액을 이 전기량으로 나눈 것이 균일화 비용이 된다.

기준값의 가정하에서 수명 기간 동안의 전력 생산량과 총연료 주기 비

율을 대비시킨 균일화 비용은 재처리의 경우 6.671mills/kWh, 직접 처분의 경우 6.197mills/kWh로 나타난다.

따라서 본 연구의 결과는 직접 처

분의 경우 재처리에 비해 약 7% 정도의 경제성을 갖는 것으로 나타났다.

이러한 비용의 차이는 불확실성과 전체 비용 기간, 특히 국가의 핵주기 정책에서의 복잡한 외부의 환경적 영향 등을 감안하면 크게 고려할만한 차이는 아니라고 여겨진다(그림) 〈표 4〉 〈표5〉.

#### 4. 안전성 비교

폐기물의 대부분 위험도는 수 백년 간의 기간에서 핵분열성 생성물에 의해 좌우되므로 폐기물 형태에 따른 뚜렷한 차이는 없다.

수 백년 후 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 측면에서 설비의 고장 발생 위험성이 커진다.

화학적 작용과 도달 특성 등의 불명확한 정보로 연관된 위험성의 정확한 평가는 어렵다. 두 처리 방법간의 위험도는 〈표 6〉과 같다.

#### 5. 대국민 용인 측면

원자력 산업이 다른 산업에 비해 상대적으로 안전성을 갖고 있고, 기술적인 준국산 에너지인 동시에 청정 에너지이지만, 일반 국민들에게는 방사선 노출에 대한 두려움과 불신, 핵무기를 연상시키는 막연한 두려움 등

(표 6) 사용후 핵연료와 HLW 위험 요소 비교

| 위험 요소          | 비 고                                     |                                   | 불확실한 제한 요소                       |   |
|----------------|---|-----------------------------------|----------------------------------|---|
|                | SF                                      | HLW                               | SF                               | HLW   |
| <b>사전 설비</b>   |   |                                   |                                  |   |
| 취급             | 저장 용기 낙하로 인한 휘발성 가스 방출<br>→ 위험 무시 가능    | 같음<br>(높은 열방출량시 좀 더 위험하나 미소량)     | 정화 설비 효율                         | 같음  |
| 이송             | 이송 수단의 사고나 화재로 대기, 지하수 오염<br>→ 위험도 매우 큼 | 같음<br>(그러나 HLW의 구조적 건전성이 상대적으로 큼) | 핵종 방출될 발단 상태                     | 같음  |
| 중간 저장          | 저장조 냉각 능력 상실로 인한 방출<br>→ 허용 범위 내서 위험도 큼 | 같음<br>(높은 열방출량시 좀 더 위험)           | 지진의 빈도와 이에 따른 구조적 건전성            | 같음  |
| <b>사후 설비</b>   |   |                                   |                                  |   |
| 열경계 근처         | 저장 용기의 갈라짐 등<br>→ 회복 불능                 | glass matrix 파손<br>→ 회복 불능        | 저장 용기의 온도 설계 기준                  | 저장 지역 습분량 canister 부식을 비균질 매질의 열전도도           |
| 열경계에서 떨어진 곳    | 지층 이동으로 인한 지하수 통로 발생 및 지하수의 대류          | 상대적으로 적은 지층 이동                    | 지층 구조의 내구성에 대한 기준                | 같음  |
| 폐기물/매질 상호 작용   | 핵종의 빠른 도달                               | 핵종의 빠른 도달                         | 불확실한 침투율                         | 불확실한 침투율(높은 압력이나 폭발시 H <sub>2</sub> 의 거동 불확실) |
| 환경 내 이동 인간에 영향 | 섭취 경로에 농도 축적, 임과 유전적 영향 유발              | 같음                                | 선량과 선량률에 의한 임이나 유전적 영향           | 같음  |
| 임계성            | 높은 열 발생량과 방사화 생성물 형태                    | 상대적으로 적음                          | 동위원소 지연 factor와 U-Pu농도에서의 감속재 거동 |   |
| 확산             | 없음                                      | Pu의 도난                            | 없음                               | 공정 효율 높이고 안전을 위한 보호용 질 처서                     |

뢰성의 결여

② 처분장 지역의 경제적 손실, 이송 경로의 사고 위험성, 지역적 형평성의 결여

나. 재처리의 경우

① 핵확산의 위험, 높은 온도의 HLW 관리 위험성, 상대적으로 낮은 경제성

② 이송 경로의 사고 위험성, 부지에서의 방사성 물질 누출 위험성

**결 론**

사용후 핵연료에 대한 재처리와 직접 처분에 있어 본 연구의 결과로는 직접 처분이 약 7% 정도의 경제성을 갖는 것으로 나타났다.

안전성은 재처리가 약간의 우위를 보이며, 두 방법 모두 대중의 용인을 얻고 있지 못하다. 이외에도 고려되어야 할 해당 국가만의 고유 변수와 상황들이 매우 많을 것이다.

후행 핵주기 사업은 수 십년이 소요될 장기 정책이란 점에서, 「Wait-And-See」 정책을 지양하고 중·장기적 관점에서 정책 수립의 준비와 함께, 대국민 용인 수준을 고려한 충분한 토론과 참여의 기회를 국민들에게 제공해야 할 것이다.

특히 사용후 핵연료 관리는 모든 사회·환경적 영향과 경제성을 고려한 핵주기 정책과 병행하여 지속적인 기술 개발을 통한 안전성 확보가 필요하다.

으로 원자력 산업의 추진에 장애가 되고 있다.

이러한 관점에서 재처리와 직접 처분에 대한 반대 여론은 다음과 같이

요약된다.  
가. 직접 처분의 경우

① 처분장의 방사성 물질의 누출 위험성, 처분장 선정 과정에 대한 신