

KAERI/TR-3267/2006

핵연료주기 시스템 분석 (I)

Nuclear Fuel Cycle System Analysis (I)

KAERI

2006. 12

한국원자력연구소

제 출 문

한국원자력연구소장 귀하

본 보고서를 “사용후핵연료 이용·관리 기술개발” 과제 (세부과제 “사용후핵연료 특성계량화 기술개발”)의 기술보고서로 제출합니다.



2006. 12

주 저 자 : 고 원 일

공 저 자 : 권 은 하

김 호 동

윤 지 섭

박 성 원

목 차

1. 서론	4
2. 핵연료주기 시나리오	4
3. 핵연료주기 시나리오별 물질흐름	5
3.1 직접처분주기	5
3.2 DUPIC 핵연료주기	6
3.3 열중성자 재활용주기	6
3.4 GEN-IV 핵연료주기	7
4. 핵연료주기 시나리오별 분석	8
4.1 지속가능성 측면	8
4.2 환경친화성 측면	8
4.2.1 처분대상 사용후핵연료	9
4.2.2 처분대상 Minor Actinide	10
4.2.3 고준위폐기물 지하처분장 굴토량	11
4.3 핵확산저항성 측면	12
4.4 경제성 측면	13
4.4.1 비용분석	13
4.4.2 민감도 분석	16
5. 종합분석 및 결론	20
참고자료	21

표 목 차

표 1. 경제성 평가를 위한 적용단가	14
표 2. 기준값에 대한 핵연료주기 비용	14
표 3. 몬테카를로 시뮬레이션 결과	16

그림 목 차

그림 1. 핵연료주기 시나리오	5
그림 2. 직접처분주기	6
그림 3. DUPIC 핵연료주기	6
그림 4. 열중성자 재활용주기	7
그림 5. GEN-IV 핵연료주기	7
그림 6. 천연우라늄 소비량	8
그림 7. 처분대상 사용후핵연료	9
그림 8. 처분대상 Minor Actinide	10
그림 9. 지하처분장 굴토량	11
그림 10. 플루토늄 재고량 (장기 핵확산저항성)	13
그림 11. 상대 핵연료주기비용	15
그림 12. 몬테카를로 시뮬레이션 결과	16
그림 13. 우라늄가격 민감도 분석	17
그림 14. 우라늄가격 변화 추이	17
그림 15. Pyroprocessing 비용 민감도 분석	18
그림 16. 금속핵연료 제조비용 민감도 분석	19

1. 서론

에너지 공급의 측면에서 원자력이 다른 에너지공급원보다 우수하다는 것은 이론의 여지가 없으나, ‘원자력’을 논의할 때 항상 거론되는 몇 가지 문제점이 있다. 즉, 첫째 유한한 우라늄자원을 어떻게 효율적으로 사용할 것인가? - 지속가능성 측면, 둘째 발생하는 폐기물을 어떻게 처리할 것인가? - 폐기물처분성 측면, 셋째 환경적으로 안전한가? - 환경친화성 측면, 넷째 핵무기의 확산을 어떻게 방지할 것인가? - 핵확산저항성 측면, 다섯째 타에너지원과 비교하여 경제성이 있는가? - 경제성 측면 등이다. 따라서, 핵연료주기에 관한 국가의 정책을 수립할 경우에도 이러한 측면에서의 평가를 통하여 원자력발전을 지속시킬 수 있는 방향으로 정책이 마련되어야 할 것이다.

핵연료주기에 관한 국가의 정책을 수립하기 위해서는 향후 우리나라에 적용 가능한 핵연료주기 시나리오를 설정하고, 그리고 이를 평가하는 작업이 선행되어야 한다. 이러한 평가작업을 위하여 본 연구에서는 우리나라의 원자력발전 현황 및 현재 추진되고 있는 원자력진흥종합계획 등을 고려하여 향후 우리나라에 적용 가능한 네 가지의 핵연료주기 시나리오를 설정하고, 각각의 시나리오를 지속가능성 측면, 고준위폐기물 처분에 미치는 영향을 보기 위한 환경적인 측면, 핵확산저항성 측면, 그리고 경제성 측면에서 각각 분석하였다.

2. 핵연료주기 시나리오

국내의 연구개발 현황과 국제적인 추세 등을 고려하여, 본 연구에서는 향후 우리나라에 적용될 가능성이 있는 네 가지의 핵연료주기 시나리오를 설정하였는데, 이는 다음과 같다. 즉, 첫째 PWR 사용후핵연료를 중간저장한 후 재활용하지 않고 영구처분하는 ‘직접처분주기’, 둘째 PWR 사용후핵연료를 DUPIC 핵연료로 가공하여 CANDU에서 재이용하고 DUPIC 사용후핵연료는 영구처분하는 ‘DUPIC 핵연료주기’, 셋째 PWR 사용후핵연료를 습식재처리(PUREX)한 후 분리된 플루토늄은 MOX 핵연료로 가공하여 PWR에 재이용하고 MOX 사용후핵연료는 영구처분하는 ‘열중성자 재활용주기’, 넷째 고온전해분리(pyroprocessing)를 통하여 금속핵연료를 만들어 고속로(SFR)에서 재이용하면서 고독성 핵종을 소멸시키는 ‘GEN-IV 핵연료주기’가 그것이다. 또한, GEN-IV 핵연료주기에서는 refining을 통하여 회수된 우라늄은 중저준위폐기물로 분류가 가능한 것으로 가정하였으며, 또한 고발열 핵종인 Cs과 Sr을 분리하여 독립적으로 관리(저장 및 자연 붕괴)한다는 가정을 하였다.

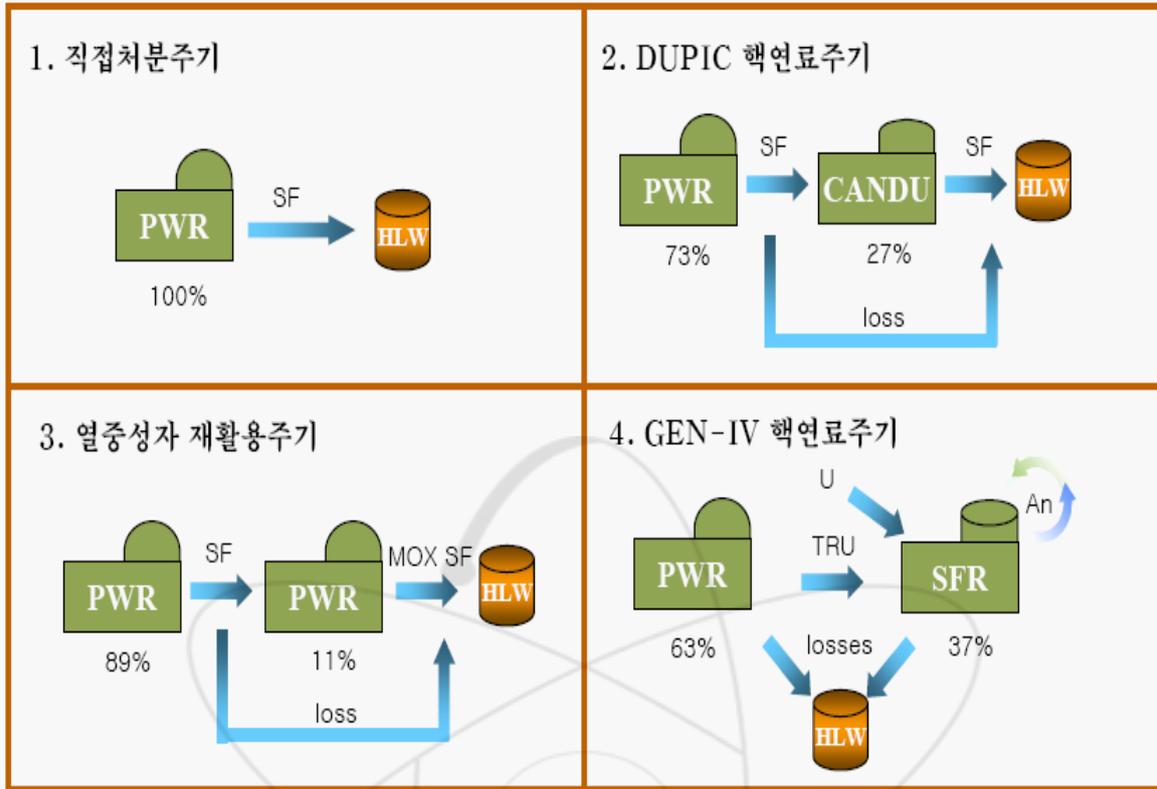


그림 1 핵연료주기 시나리오

3. 핵연료주기 시나리오별 물질흐름

위에서 언급한 바와 같이, 핵연료주기에 관한 국가의 정책을 수립하기 위해서는 향후 우리나라에 적용 가능한 핵연료주기 시나리오를 설정하고, 이를 지속가능성·폐기물처분성·환경친화성·핵확산저항성·경제성 등 여러 측면에서 평가하는 작업이 선행되어야 한다. 이러한 작업을 위해서는 핵연료주기에 대한 물질흐름의 평가가 필수적이다. 따라서, 이 장에서는 위에서 설정한 네 가지 핵연료주기 시나리오에 대하여 평형상태에서의 물질흐름(1 TWh 기준) 및 특성을 분석하였다.

3.1 직접처분주기

직접처분주기에서는 다음의 그림 2와 같이 PWR의 사용후핵연료를 일정기간 중간저장한 후에 영구처분하게 된다. 계산 및 분석을 위하여 PWR 핵연료의 경우, 초기농축도를 4.9 wt.%, 방출연소도를 60 GWd/MtHM로 가정하였다. 계산의 단순화를 위하여 각 공정별 물질유실량은 “0” 으로 가정하였다.

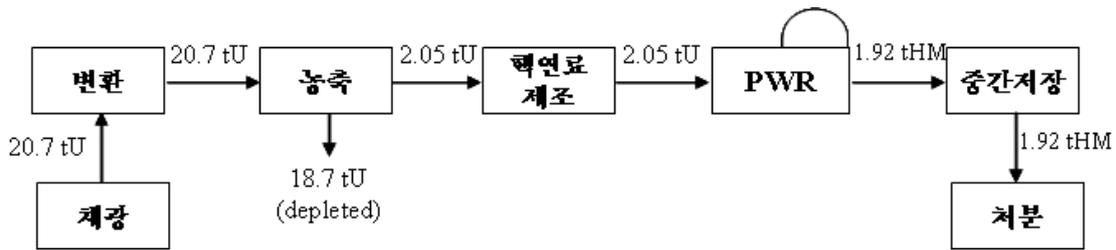


그림 2 직접처분주기

3.2 DUPIC 핵연료주기

DUPIC 핵연료주기에서는 PWR 사용후핵연료를 OREOX 공정을 통하여 CANDU 핵연료로 재가공하여 활용한다. PWR 핵연료의 경우, 초기농축도는 3.5 wt.%, 방출 연소도는 35 GWd/MtHM로 가정하였으며, CANDU 원자로에서의 연소도는 15 GWd/MtHM로 가정하였다. OREOX 공정에서의 물질유실량은 1%로 가정하였다. 이 때 발생하는 고준위폐기물은 일정기간 저장한 후 영구처분하고, DUPIC 사용후핵연료는 재활용하지 않고 영구처분하는 것으로 가정하였다.

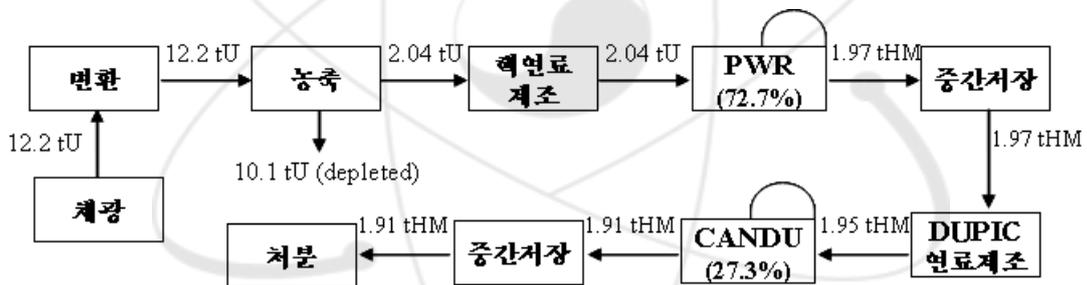


그림 3 DUPIC 핵연료주기

DUPIC 핵연료주기에서 PWR 핵연료 연소도 35 GWd/MtHM는 다른 주기에서의 PWR 연소도 60 GWd/MtHM에 비하면 매우 작다. DUPIC에서 PWR 연소도 35 GWd/MtHM는 DUPIC 프로그램에서 기준연소도로서[1] 이는 단위전력 생산량당 평가되는 물질흐름에서 상대적으로 불리하게 작용될 수 있다.

3.3 열중성자 재활용주기

열중성자 재활용주기에서는 PWR 사용후핵연료의 재처리를 통하여 MOX 핵연료로 가공하여 다시 PWR에서 이용하게 된다. 재처리는 기존의 습식재처리방식을 적용하며,

재처리시 발생하는 고준위폐기물은 일정기간 저장한 후 영구처분한다. MOX 핵연료는 재처리시 분리한 플루토늄과 감손우라늄을 사용하여 제조한다. 한편, MOX 사용후핵연료는 재활용하지 않고 처분하는 것으로 가정하였다. 한편, 원자로시스템은 직접처분주기에서의 것과 동일하다. PWR 핵연료의 경우, 직접처분주기와 동일하게 초기농축도 4.9 wt.%, 방출연소도 60 GWd/MtHM로 가정하였다.

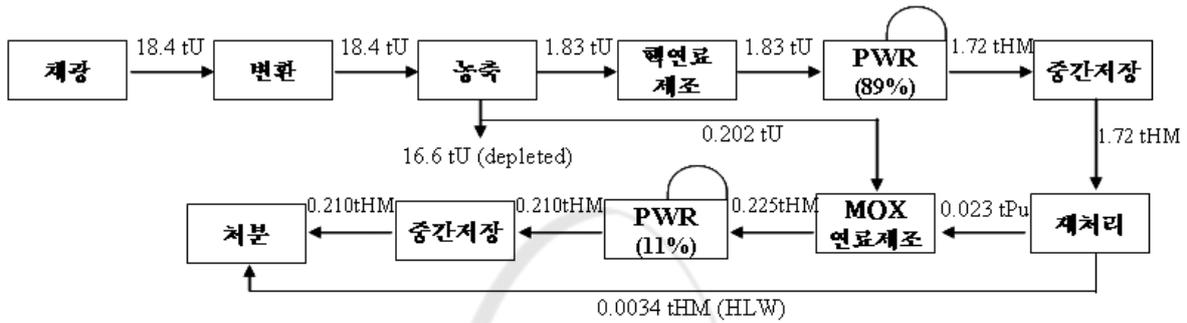


그림 4 열중성자 재활용주기

3.4 GEN-IV 핵연료주기

GEN-IV 핵연료주기에서는 그림 5에서 보여주듯이, 기존의 PWR 원자로 외에 고속로(SFR)를 도입하여 PWR에서 발생한 TRU를 소멸·재활용하는 주기이다. 건식분리 기술인 고온전해분리(pyroprocessing)를 이용하여 PWR 사용후핵연료로부터 우라늄을 분리하여 중저준위폐기물로 보내고 다시 초우라늄(TRU)은 금속핵연료로 제조하여 GEN-IV 원자로인 고속로에서 연소하게 된다. 한편 고속로 사용후핵연료는 역시 건식처리하여 금속핵연료로 가공후 고속로에 재순환하게 된다. PWR 핵연료의 경우, 초기농축도 4.2 wt.%, 방출연소도 50 GWd/MtHM로 가정하였다. 고속로는 600MWe의 TRU 소멸로서[2] 방출연소도 140 GWd/tHM이 사용되었다.

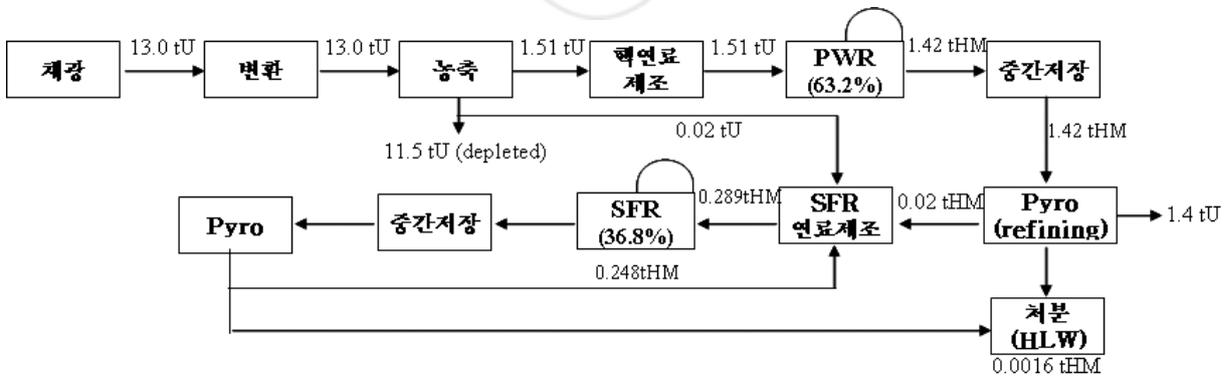


그림 5 GEN-IV 핵연료주기

4. 핵연료주기 시나리오별 분석

4.1 지속가능성 측면

원자력발전 후에는 부수적으로 필수불가결하게 사용후핵연료가 발생하게 된다. 이를 폐기물로 분류하여 처분하게 되면 고준위방사성을 띤 위험물질이 되나, 이에는 에너지 원으로서 충분히 활용 가능한 우라늄 및 초우라늄 원소가 약 96% 포함되어 있다. 따라서, 이러한 사용후핵연료의 재활용을 고려할 경우, 유한자원인 우라늄을 좀 더 효율적으로 사용할 수 있다. 본 연구에서는 그림 6에 나타낸 바와 같이 이러한 ‘자원활용성(지속가능성)’ 측면을 특정 핵연료주기를 채택함으로써 필요로 하게 되는 천연우라늄의 양으로 평가하였다. 위의 네 가지 핵연료주기의 물질흐름을 분석한 결과, DUPIC과 GEN-IV 핵연료주기의 경우에 사용되는 천연우라늄의 양이 크게 감소되는 것으로 나타났다. 이는 그들의 자원활용성(지속가능성)이 다른 두 핵연료주기에 비하여 상대적으로 우수하다는 것을 의미한다.

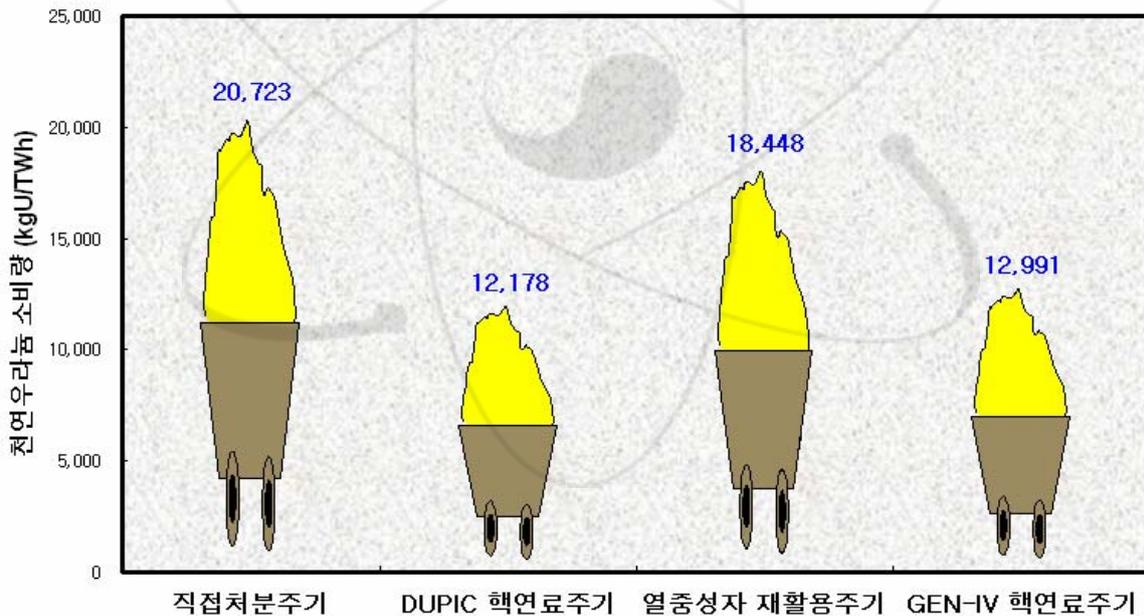


그림 6 천연우라늄 소비량

4.2 환경친화성 측면

원자력에너지의 역할 증대를 위해서는 원전에서 발생하는 방사성폐기물의 관리 및 처분성을 개선하는데 일차적 목표를 두어야 한다. 방사성폐기물의 부피, 장기 열발생 및 방사성독성을 줄임으로써, 결국 심지층처분장의 용량을 증가시키고, 장기적으로 폐기

물처분에 대한 부담을 경감할 수 있다. 본 연구에서도 이러한 관점에서 위의 네 가지 핵연료주기 시나리오를 분석하였다.

4.2.1 처분대상 사용후핵연료

그림 7은 처분대상 사용후핵연료량을 평가한 결과를 나타내고 있다. 여기에는 재처리 시 발생하는 고준위폐기물은 제외된 것이다. 평가 결과, 열중성자 재활용주기와 GEN-IV 핵연료주기에서 처분대상인 사용후핵연료가 획기적으로 감소하는 것으로 나타났다. 특히, GEN-IV 핵연료주기의 경우, 건식분리기술을 이용하여 모든 PWR 사용후핵연료로부터 우라늄을 분리하여 중저준위폐기물로 처리하고 TRU는 고속로핵연료로 제조하여 재활용함으로써 처분대상 사용후핵연료는 발생하지 않는다.

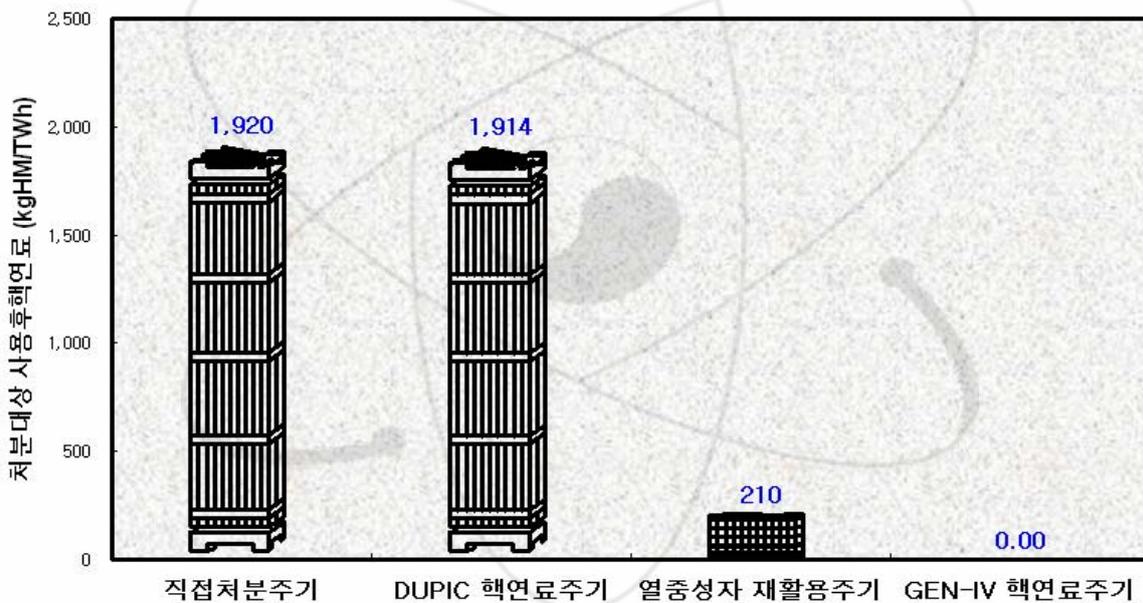


그림 7 처분대상 사용후핵연료

반면, DUPIC 핵연료주기의 경우에는 PWR 사용후핵연료를 에너지자원으로 재활용함에도 불구하고 CANDU 원자로의 특성상 발생하는 사용후핵연료의 양이 직접처분주기와 비교하여 큰 차이가 없었다. 이는 핵연료 연소도 차이에서 기인한 것으로 보인다. 즉, PWR 직접처분인 경우 연소도 60 GWd/tU를 가정한 반면 DUPIC 핵연료주기에서 PWR은 연소도 35 GWd/tU를 가정하였기 때문이다. 동일 PWR 연소도를 가정하였을 경우 DUPIC 핵연료주기의 처분대상 사용후핵연료가 직접처분에 비하여 감소할 것으로 생각된다.

한편, 열중성자 재활용주기와 GEN-IV 핵연료주기에서는 처분대상 사용후핵연료는 발생하지 않지만 재처리과정에서 고준위폐기물이 발생하게 된다. 그러나 GEN-IV 핵연료주기에서는 고준위폐기물(salt waste)에 포함된 Cs과 Sr를 분리하여 독립적으로 관리할 수 있기 때문에 고준위폐기물이 처분장에 미치는 영향은 미미할 것으로 예상된다.

4.2.2 처분대상 Minor Actinide

사용후핵연료는 방사성핵종들의 붕괴로 인하여 붕괴열을 방출하는 특성을 가지고 있다. 이 붕괴열은 일반적으로 사용후핵연료내에 존재하는 핵분열생성물과 악티나이드에 의하여 지배되는데, 원자로에서 배출될 당시부터 수십년동안은 반감기가 짧은 핵분열생성물에 의한 붕괴열이 전체 사용후핵연료의 붕괴열의 대부분을 차지하나, 그 이후에는 악티나이드에 의하여 지배된다. 악티나이드의 원소 중 우라늄과 플루토늄은 에너지 원으로 재활용이 가능하므로 여기에서는 처분대상이 되는 Minor Actinide, 즉 Np · Am · Cm만을 분석대상으로 하였다.

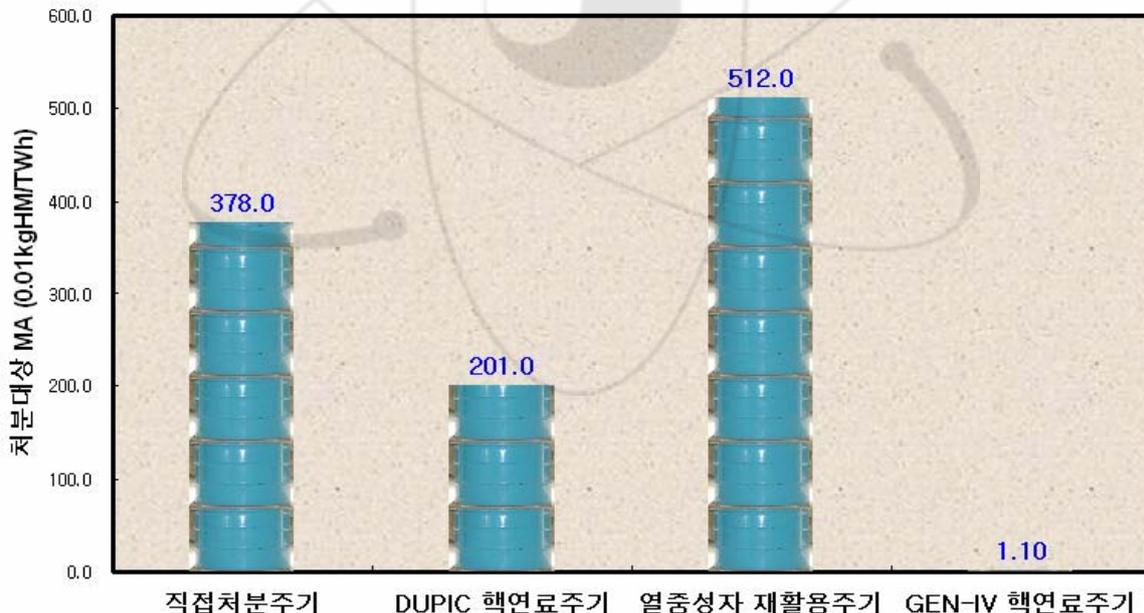


그림 8 처분대상 Minor Actinide

위 그림 8에서 보여주듯이, GEN-IV 핵연료주기의 경우, 처분대상 Minor Actinide가 획기적으로 소멸되는 것으로 나타났다. 반면, 열중성자 재활용주기의 경우에는 재

처리과정에서 발생하는 Minor Actinide의 양으로 인하여 처분대상이 되는 Minor Actinide의 총량이 가장 많이 발생하는 것으로 나타났다.

4.2.3 고준위폐기물 지하처분장 굴토량

모든 핵연료주기는 심지층처분장을 필요로 한다. 다만, 장기적으로 폐기물처분의 부담을 경감하기 위해서는 이러한 심지층처분장의 용량을 증가시켜야 하는데, 이를 위하여 여러 방안들을 고려해 볼 수 있다. 즉,

1. 폐기물의 무게와 부피를 줄이기 위하여 우라늄을 분리한다. 분리된 우라늄은 핵연료로 다시 사용하던지 혹은 중저준위폐기물로 처분할 수 있다.
2. Pu · Np · Am · Cm 등과 같은 TRU 원소를 재활용 · 소멸하여 단위전력생산량당 처분대상 악티나이드 양을 획기적으로 줄일 수 있다.
3. 주요 발열 핵종인 Cs와 Sr를 분리하여 관리함으로써 심지층처분에 필요한 폐기물 포장물의 수와 처분장 면적 및 비용을 획기적으로 줄일 수 있다.
4. ^{99}Tc · ^{129}I 와 같은 일부 장수명 핵분열생성물을 분리하여 소멸시킴으로써 심지층처분장의 안전성을 높이는 방안 등이다.

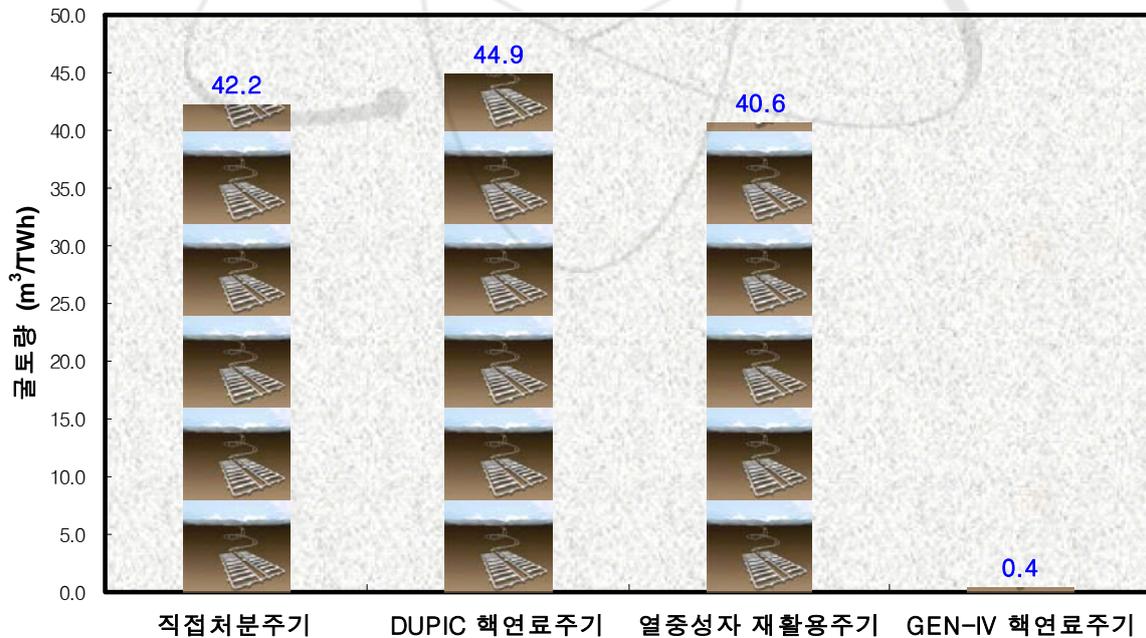


그림 9 지하처분장 굴토량

단위전력생산량당 처분대상 고준위폐기물량을 줄이고 안전성을 높이기 위해서 상기방안들을 복합적으로 사용할 수도 있다. 본 연구에서는 GEN-IV 핵연료주기에 상기 1·2·3항을 가정하여 분석하였다. 이를 위해서 지하처분장 굴토량은 지하처분장 면적이 붕괴열량에 비례한다는 가정하에 처분대상 사용후핵연료 혹은 고준위폐기물에서 발생하는 발열량(50년 냉각후)을 평가하여 열량당 굴토량($20 \text{ m}^3/\text{kW}$)을 곱하여 계산하였다. 그림 9는 핵연료주기별 지하처분장 굴토량을 나타낸 것이다.

GEN-IV 핵연료주기의 경우 직접처분주기에 비하여 지하처분장 면적을 100배이상 줄일 수 있는 것으로 분석되었다. 나머지 핵연료주기에 대해서는 큰 차이는 없는 것으로 나타났다.

4.3 핵확산저항성 측면

재순환 정책이나 직접처분 정책이나의 문제는 핵확산 측면에서 오랫동안 논쟁의 핵심이 되어 왔다. 핵확산과 관련된 가장 중요한 논쟁은 핵확산의 위험을 줄이는데는 공감대가 형성되어 있지만, 핵연료주기의 핵확산의 위험도가 시간 의존성을 지니고 있다는 속성을 무시하는데서 종종 발생하고 있다. 가령 직접처분주기는 단기적인 핵확산 위험도는 줄일 수 있지만 장기적인 핵확산 위험도는 매우 크며, 상기한 재순환주기는 장기적인 핵확산 위험도는 줄일 수 있지만 단기적으로는 상대적으로 핵확산 위험도가 크다 할 수 있다.

단기적인 핵확산저항성 측면에서는 직접처분주기, DUPIC 핵연료주기, GEN-IV 핵연료주기, 열중성자 재활용주기 순으로 핵확산저항성이 클 것으로 생각된다. 열중성자 재활용주기에서는 순수 플루토늄을 취급하기 때문에 핵확산저항성이 상대적으로 가장 취약할 것으로 보인다.

본 연구에서는 장기적인 핵확산저항성을 보기위하여 플루토늄 재고량을 평가하였다. 이는 플루토늄을 재이용하지 않고 사용후핵연료 자체를 그냥 처분하였을 경우 수백년 후에는 단반감기인 핵분열생성물들의 방사붕괴로 인하여 self-protection 기능이 소멸하여 처분장이 소위 “Pu mining” 이 될 수도 있다는 주장들에 근거한 것이다 [3,4].

플루토늄 재고량의 계산결과, 그림 10에 나타낸 바와 같이 GEN-IV 핵연료주기의 경우 직접처분주기의 3% 수준으로 나타났다.

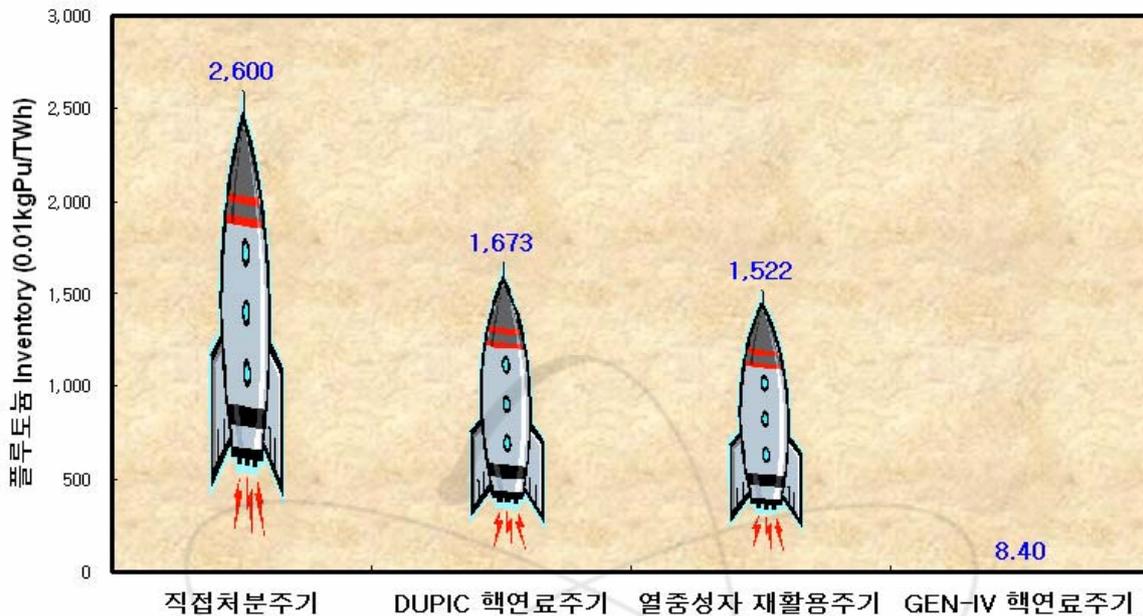


그림 10 플루토늄 재고량 (장기 핵확산저항성)

4.4 경제성 측면

핵연료주기의 경제성은 향후 원자력발전에서 고려해야 하는 필수적인 요소이다. 원자력산업계에서도 경쟁원리가 중요시되고 있는 현실을 감안하면, 경제성은 특정 핵연료주기를 선택하는 중요한 결정요인이 된다. 본 연구에서도 이러한 측면에서 위의 네 가지 핵연료주기 시나리오를 분석해 보았다. 경제성 분석은 먼저 핵연료주기를 구성하는 각 단계별 비용단가를 가정하여 계산하였으며, 불확실성 분석을 위하여 몬테카를로 시뮬레이션 방법이 적용되었다. 또한 각 단계별 비용중 변동성이 크다고 생각되는 우라늄가격, pyroprocessing 가격, 금속핵연료 제조 가격에 대해서는 민감도 분석을 수행하였으며 GEN-IV 핵연료주기가 직접처분주기에 비하여 경제성이 있기 위한 손익분기점가격이 계산되었다.

4.4.1 비용분석

다음의 표 1은 본 연구에서의 경제성 분석을 위하여 적용한 항목별 단가이다. 우라늄의 경우에 급격히 상승하고 있는 최근가격[5]을 고려하여 기준값 \$97, 하한값 \$50, 상한값 \$130으로 가정하였다. 고온전해분리(pyroprocessing) 공정은 아직 연구개발단계에 있어 정확한 가격을 산정하기 어려우나 엔지니어링 판단을 적용하여 고속로

용 금속핵연료 처리의 경우 2000\$/kgHM, 산화물핵연료의 refining인 경우 800\$/kgHM을 참조값으로 하여 민감도 분석을 수행하였다.

표 1 경제성 평가를 위한 적용단가

비용 항목		단위	기준값	하한	상한
우라늄		\$/kgU	97	50	130
변환		\$/kgU	5	3	8
농축		\$/SWU	100	80	120
재처리비용	UO2 PUREX	\$/kgHM	800	700	900
	UO2 Pyro (refining)	\$/kgHM	800	600	1,200
	SFR Metal Fuel Pyro	\$/kgHM	2,000	1,000	2,500
제조비용	UO2 Fuel	\$/kgHM	250	200	300
	MOX Fuel	\$/kgHM	1,250	1,000	1,500
	SFR Metal Fuel	\$/kgHM	2,600	1,400	5,000
저장비용	Depleted Uranium	\$/kgU	4	3	5
	Reprocessed Uranium	\$/kgU	4	3	40
	DUPIC S/F Dry Storage	\$/kgHM	100	70	150
	UO2 S/F Dry Storage	\$/kgHM	100	150	250
	MOX S/F Dry Storage	\$/kgHM	200	300	500
	UO2 PUREX HLW Dry Storage	\$/m ³	80,000	120,000	200,000
	UO2 PYRO HLW Dry Storage	\$/m ³	80,000	120,000	200,000
SFR Pyro HLW Dry Storage	\$/m ³	80,000	120,000	200,000	
처분비용	Spent Fuel (underground cost)	\$/m ³	1,200	600	2,000
	HLW (underground cost)	\$/m ³	1,200	600	2,000

상기표의 하한과 상한 값은 몬테카를로 시뮬레이션 방법을 이용하여 비용 불확실성 분석을 위한 것이다.

각 항목의 기준값을 이용하여 각각의 핵연료주기 비용을 계산한 결과, 직접처분주기 5.34 Mills/kWh, DUPIC 핵연료주기 5.34 Mills/kWh, 열중성자 재활용주기 6.17 Mills/kWh, GEN-IV 핵연료주기 5.68 Mills/kWh로 각각 나타났다.

표 2 기준값에 대한 핵연료주기 비용

Indicators	직접처분주기	DUPIC 핵연료주기	열중성자 재활용주기	GEN-IV 핵연료주기
Fuel Cycle Cost (mills/kWh)	5.34	5.34	6.17	5.68

상기 핵연료주기 비용에는 원자로 비용은 포함하지 않은 것이다. 즉, 전력생산량당 원자로 비용은 모두 동일하다는 가정을 한 것이라 볼 수 있다. 이는 GEN-IV 원자로의 건설비용이 기존의 제 3세대 원자로 비용에 비해서 경쟁력이 있어야 한다는 GEN-IV 프로그램에서의 연구목표를 적용한 것이라 볼 수 있다.

그림 11은 상기 표 2의 값들을 상대적 크기로 나타낸 것이다. 직접처분주기 비용에 비하여 열중성자 재활용주기는 약 15%, GEN-IV 핵연료주기는 약 6% 높게 나타나고 있다.

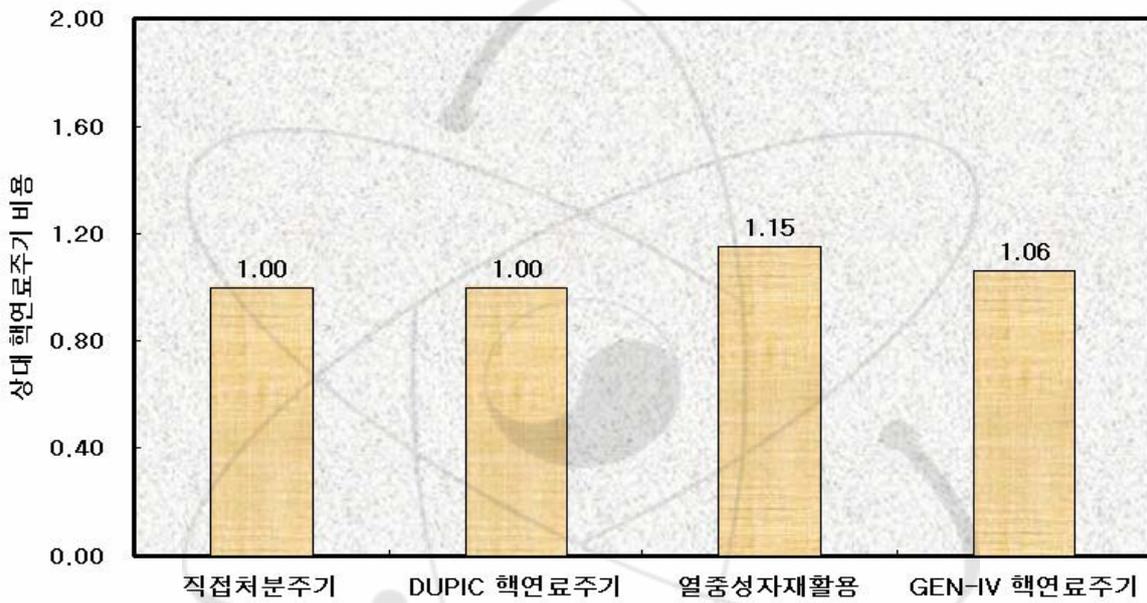


그림 11 상대 핵연료주기비용

표 3과 그림 12는 몬테카를로 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 각각의 비용단가는 표 1의 하한과 상한 값을 가지고 일정하게 분포한다고 가정하여 총 5,000번의 random sampling을 수행하였다. 표 3에 나타낸 바와 같이 핵연료주기 비용에 대한 표준편차(SD)를 보면 0.29 ~ 0.39 mills/kWh 범위를 보이는 것으로 나타났다. 즉, 표 2의 GEN-IV 핵연료주기와 직접처분주기의 차이인 0.34 mills/kWh는 GEN-IV 핵연료주기의 표준편차 0.39 mills/kWh, 그리고 직접처분주기의 표준편차 0.37 mills/kWh보다 조금 작게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 GEN-IV 핵연료주기의 비용은 직접처분주기와 오차범위 내에 존재한다고 말할 수 있다.

표 3 몬테카를로 시뮬레이션 결과

	직접처분주기	DUPIC 핵연료 주기	열중성자 재활용주기	GEN-IV 핵연료주기
Mean	5.33	5.38	6.16	5.86
Max	6.39	6.27	7.13	7.12
Min	4.16	4.40	5.13	4.65
SD	0.39	0.29	0.34	0.37
Median	5.34	5.38	6.17	5.86

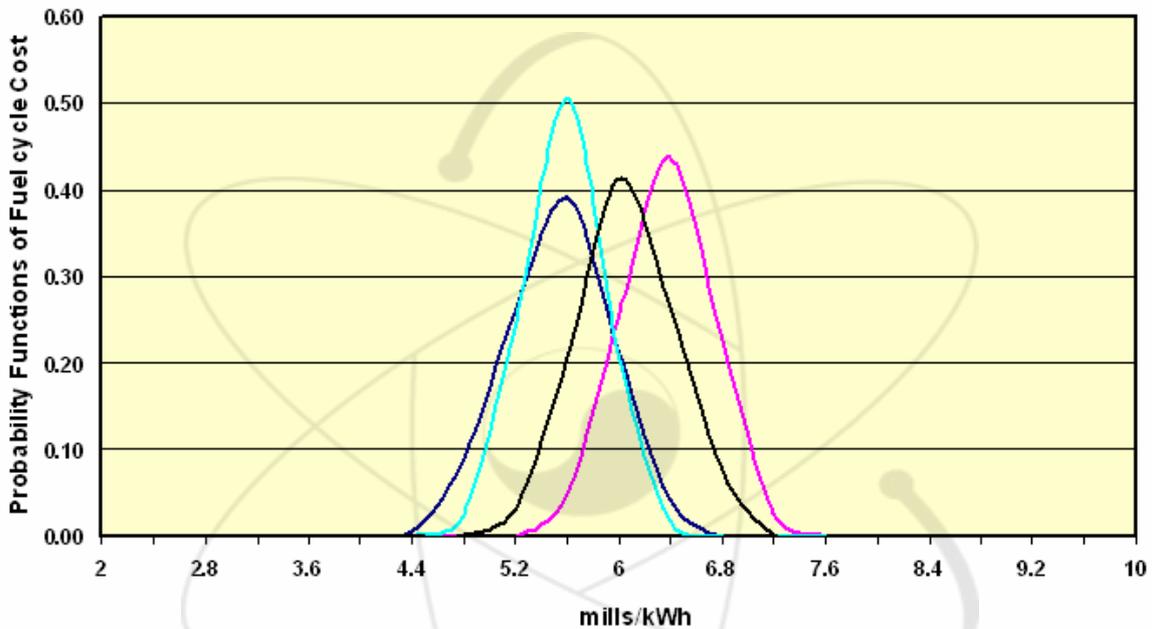


그림 12 몬테카를로 시뮬레이션 결과

4.4.2 민감도 분석

본 절에서는 우라늄가격, pyroprocessing 가격, 금속핵연료 제조 가격에 대한 민감도 분석을 수행하였다.

우라늄가격의 민감도 분석을 수행한 결과, 직접처분주기가 다른 핵연료주기보다 우라늄가격에 민감한 것으로 분석되었다. 이는 직접처분주기의 경우, 같은 양의 에너지를 생산하기 위하여 가장 많은 우라늄이 필요하기 때문이다.

직접처분 대비 우라늄의 손익분기점가격은 DUPIC 핵연료주기 \$100/kgU, 열중성자 재활용주기 \$460/kgU, GEN-IV 핵연료주기 \$140/kgU으로 계산되었다. 그림 14는 최근 약 30년간의 우라늄가격 변화 추이를 나타낸 것이다. 2006년 2월 현재 우라

높아 가격은 약 3년전의 가격에 비하여 약 3배, 그리고 6년전의 가격에 비하여 6배 상승한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 최근 우라늄가격이 급상승하는 것(2006년 2월 현재 \$97/kgU)으로 미루어 보아, GEN-IV 핵연료주기의 경우에 조만간 경제성을 확보할 것으로 보인다.

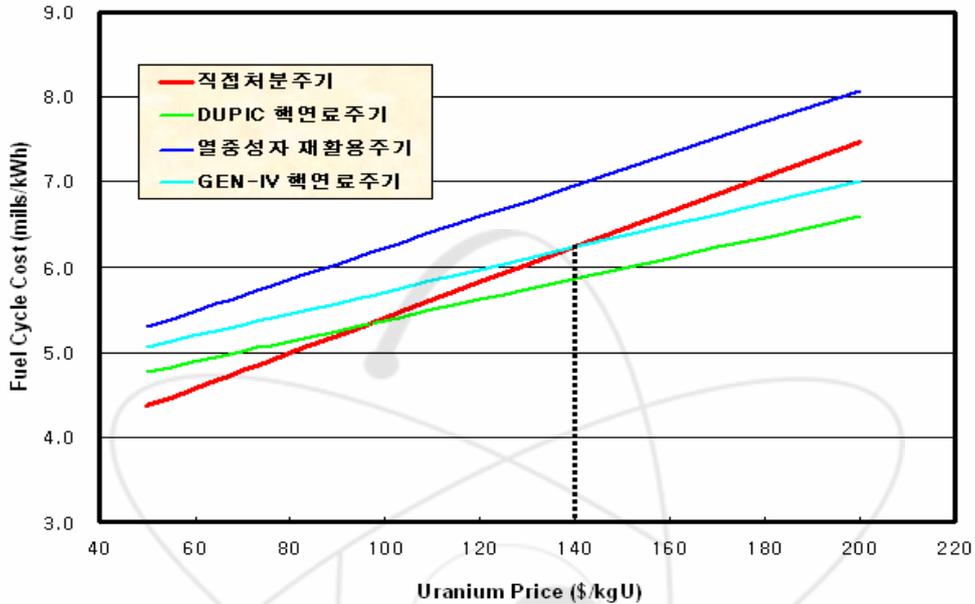


그림 13 우라늄가격 민감도 분석

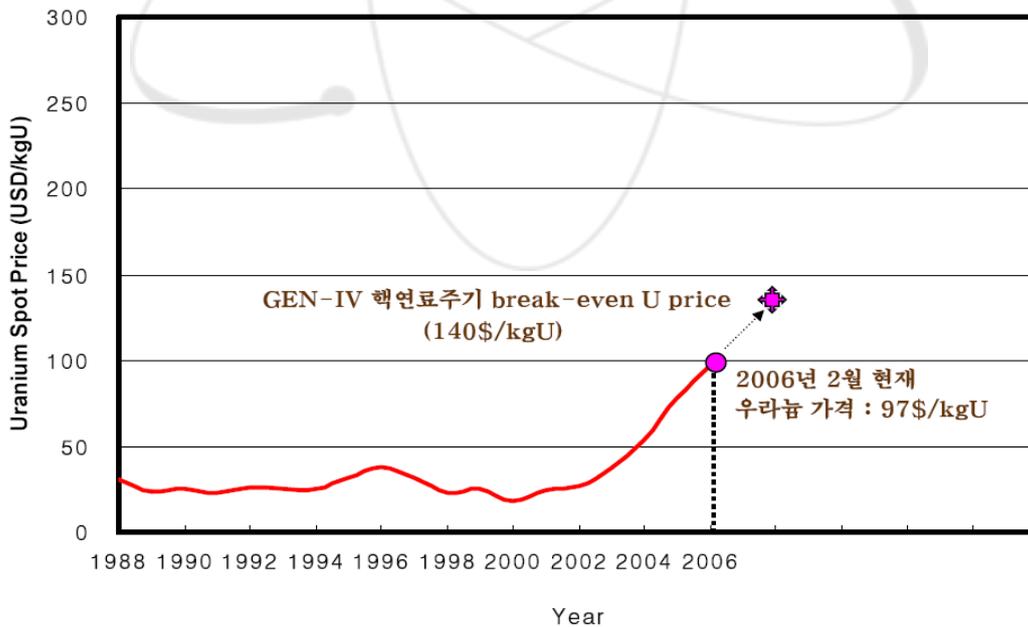


그림 14 우라늄가격 변화 추이

우라늄 이외에, 현재 가격측면에서 불확실성이 상대적으로 큰 항목에 대하여 민감도 분석을 수행하였다. 예컨대, 본 연구에서 참조한 OECD 보고서에서는 SFR pyroprocessing의 경우 그 기준값을 \$2,000/kgHM로, 금속핵연료 제조의 경우 \$2,600/kgHM로 책정하고 있는데, 이러한 기준값이 너무 크다는 의견이 많으며, 향후 기술개발의 정도에 따라 충분히 감소될 여지가 있는 것으로 판단된다.

직접처분주기비용(5.34 Mills/kWh) 대비 고속로용 금속핵연료 pyroprocessing의 손익분기점가격은 \$900/kgHM으로 평가되었다. 이는 다른 모든 비용은 기준값을 사용하고 pyroprocessing 비용을 변화시키면서 직접처분주기와 같아지는 가격을 나타낸 것이다.

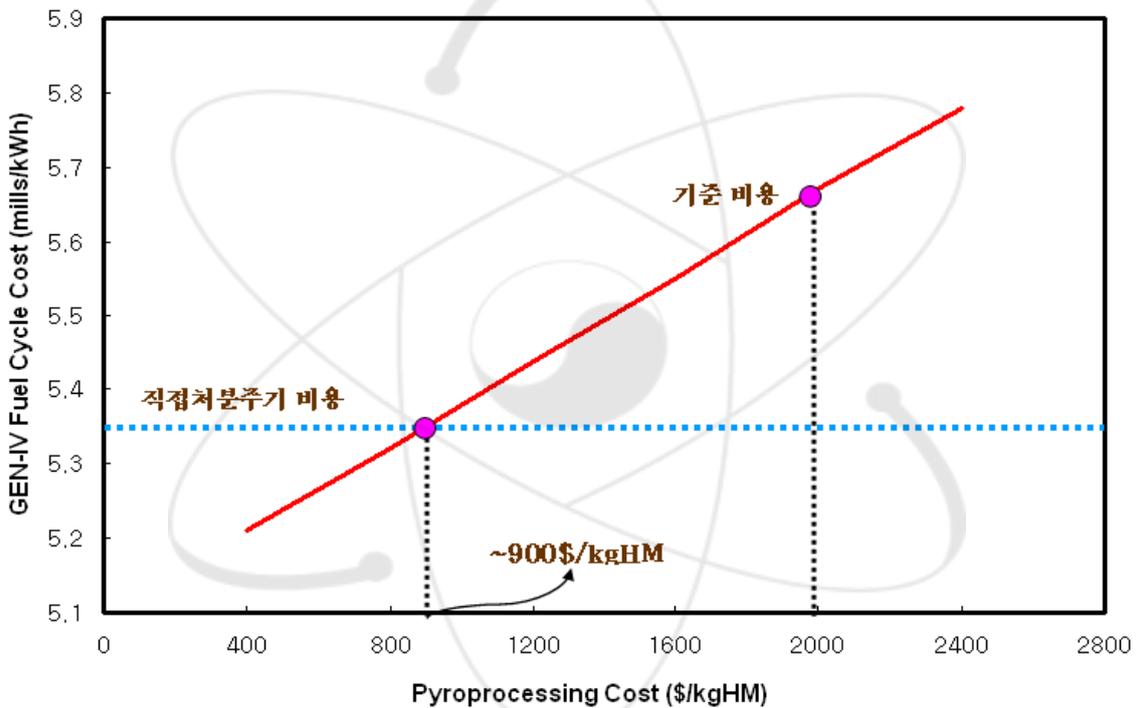


그림 15 Pyroprocessing 비용 민감도 분석

한편, 그림 15는 금속핵연료 제조비용을 나타낸 것으로 손익분기점가격은 \$1,500/kgHM로 계산되었다. 이 손익분기점가격은 현재의 우라늄 핵연료제조비용인 약 250\$/kgU보다 6배 높은 가격으로서 향후 기술개발 여지에 따라 충분히 달성 가능한 가격으로 보인다.

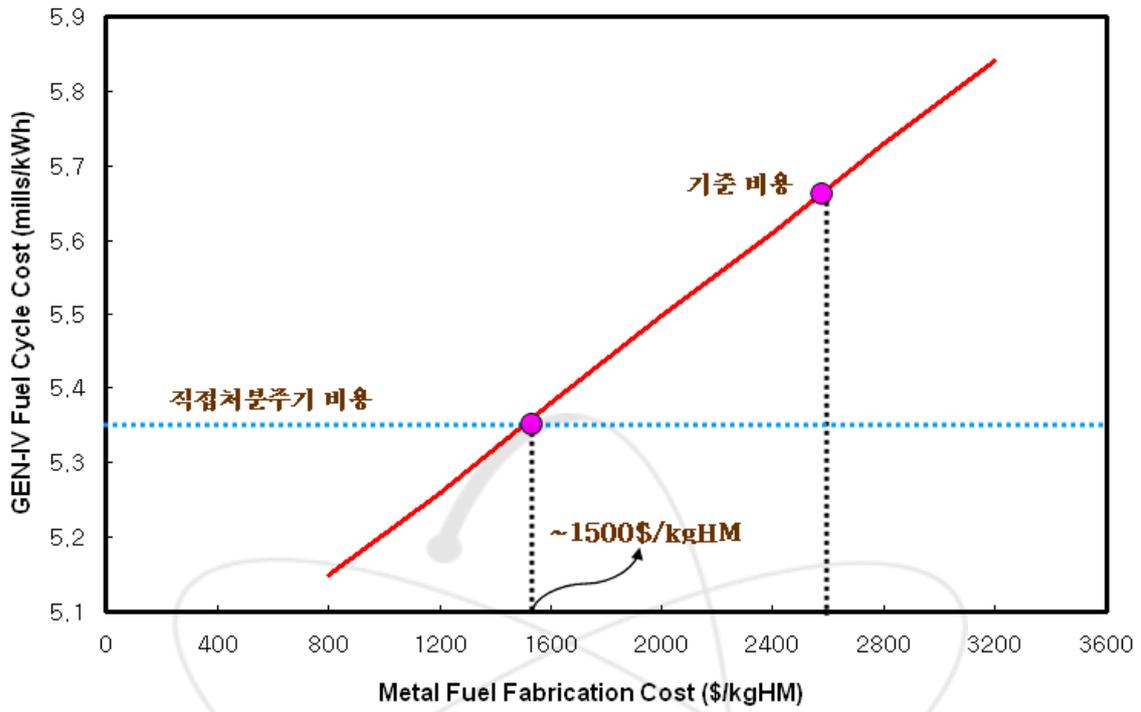


그림 16 금속핵연료 제조비용 민감도 분석

5. 종합분석 및 결론

향후 우리나라에 적용 가능한 핵연료주기 시나리오를 1) 직접처분주기, 2) DUPIC 핵연료주기, 3) 열중성자 재활용주기, 4) GEN-IV 핵연료주기 등 네 가지로 설정하고 각각의 시나리오를 지속가능성·환경성·핵확산저항성·경제성 등의 측면에서 평가한 결과, 다음과 같은 결론에 도달하였다.

○ 지속가능성 측면

GEN-IV 핵연료주기의 우라늄 이용률은 직접처분주기의 약 60% 수준인 것으로 나타났다.

○ 환경적 측면

GEN-IV 핵연료주기에서는 PWR에서 발생하는 모든 사용후핵연료를 SFR Bunner 인 고속로에서 연소 가능하기 때문에 처분대상 사용후핵연료는 발생하지 않는다. 또한 고준위폐기물에 포함된 MA도 GEN-IV 핵연료주기는 직접처분주기의 약 1/400 수준인 것으로 나타났다.

한편, 재처리시 발생하는 고준위폐기물을 포함한 지하처분장 굴토량은 GEN-IV 핵연료주기의 경우에 직접처분주기의 약 1% 수준인 것으로 나타났다.

○ 핵확산저항성 측면

장기적 핵확산저항성 평가지표인 플루토늄의 재고량 계산결과, GEN-IV 핵연료주기는 직접처분주기의 약 3% 수준인 것으로 나타났다.

○ 경제성 측면

GEN-IV 핵연료주기는 우라늄가격이 140\$/kgU이상이면 직접처분에 비하여 경제성이 있는 것으로 나타났다. 이는 최근 우라늄가격의 급상승(2006년 2월 현재 97\$/kgU)으로 멀지 않은 장래에 경제성이 확보될 것으로 예상된다.

전체적으로, GEN-IV 핵연료주기가 지속가능성·환경성·장기적 핵확산저항성 측면에서 우수한 것으로 나타났다. 다만, 경제성 측면의 경우, 현재의 우라늄가격이 더욱 상승하던지 혹은 pyroprocess 비용과 금속핵연료 제조비용을 줄일 수 있다면 경제성이 확보될 것으로 예견된다.

참고자료

- [1]W. I. Ko, H. B. Choi and M. S. Yang, “Economic Analysis on Direct of Spent Pressurized Water Reactor Fuel in CANDU Reactors(IV) - DUPIC Fuel Cycle Cost”, Nuclear Technology, Vol. 134, May (2001)
- [2]M. Cometto et al., “A comparative physics study of alternative long term strategies for closure of the nuclear fuel cycle”, Annals of Nuclear Energy 31 (2004)
- [3]Committee on International Security and Arms Control, National Academy of Sciences, Management and Disposition Excess Weapons Plutonium, Reactor-Related Options, National Academy Press, Washington, D. C. pp. 15 (1995)
- [4]Jensen, R. et al., “Accelerator-Based Conversion(ABC) of Reactor and Weapons Plutonium”, In Proceedings of the International Conference and Technology Exposition on Future Nuclear Systems: Global 93, Seattle, Washington, September 12-17, pp. 833 (1993)
- [5]Historical Industry Average Uranium Spot Price (<http://www.cameco.com/>) (2006)

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET							
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.		INIS Subject Code	
KAERI/TR-3267/2006							
Title/Subtitle		Nuclear Fuel Cycle System Analysis (I)					
Project Manager and Dept. (or Main Author)		Ko, Won Il (Div. of Spent Fuel Technology Development)					
Researcher and Department		Kwon, Eun Ha (Div. of Spent Fuel Technology Development) Kim, Ho Dong (Div. of Spent Fuel Technology Development) Yoon, Ji Sup (Div. of Spent Fuel Technology Development) Park, Seong Won (Dept. of Nuclear Fuel Cycle Development)					
Publication Place	Daejeon	Publisher	KAERI		Publication Date	2006. 12.	
Page	23 p.	Ill. & Tab.	Yes(O), No ()		Size	26 Cm.	
Note							
Classified	Open (O), Restricted (), __ Class Document, Internal Use Only ()			Report Type	Technical Report		
Sponsoring Org.				Contract No.			
Abstract (15-20 Lines)		<p>As a nation develops strategies that provide nuclear energy while meeting its various objectives, it must begin with identification of a fuel cycle option that can be best suitable for the country. For such a purpose, this paper takes four different fuel cycle options - Once-through Cycle, DUPIC Recycle, Thermal Reactor Recycle and GEN-IV Recycle, and evaluates each option in terms of sustainability, environment-friendliness, proliferation-resistance and economics. The analysis shows that the GEN-IV Recycle appears to have an advantage in terms of sustainability, environment-friendliness and long-term proliferation-resistance, while it is expected to be more economically competitive, if uranium ore prices increase or costs of pyroprocessing and fuel fabrication decrease.</p>					
Subject Keywords (About 10 words)		Nuclear Fuel Cycle, Once-through Cycle, DUPIC Recycle, Thermal Reactor Recycle, GEN-IV Recycle, Sustainability, Environment-friendliness, Proliferation-resistance, Economics					

서 지 정 보 양 식					
수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드		
KAERI/TR-3267/2006					
제목/부제	핵연료주기 시스템 분석 (I)				
연구책임자 및 부서명 (TR, AR인 경우 주저자)	고원일 (사용후핵연료기술개발부)				
연구자 및 부서명	권은하 (사용후핵연료기술개발부) 김호동 (사용후핵연료기술개발부) 윤지섭 (사용후핵연료기술개발부) 박성원 (핵연료주기기술개발단)				
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구소	발행년	2006. 12.
페이지	23 p.	도표	있음(O), 없음()	크기	26 Cm.
참고사항					
비밀여부	공개(O), 대외비(), _ 급비밀, 소내만 공개 ()		보고서종류	기술보고서	
연구위탁기관			계약번호		
초록 (15-20줄내외)	<p>핵연료주기에 관한 국가의 정책을 수립하기 위해서는 향후 우리나라에 적용 가능한 핵연료주기 시나리오를 설정하고, 이를 평가하는 작업이 선행되어야 한다. 본 보고서에서는 우리나라의 원자력발전 현황 및 현재 추진되고 있는 원자력진흥종합계획 등을 고려하여 향후 우리나라에 적용 가능한 네 가지의 핵연료주기 시나리오를 설정하였는데, 즉, 첫째 PWR 사용후핵연료를 중간저장한 후 재활용하지 않고 영구처분하는 ‘직접처분주기’, 둘째 PWR 사용후핵연료를 DUPIC 핵연료로 가공하여 CANDU에서 재이용하고 DUPIC 사용후핵연료는 영구처분하는 ‘DUPIC 핵연료주기’, 셋째 PWR 사용후핵연료를 습식재처리(PUREX)한 후 분리된 플루토늄은 MOX 핵연료로 가공하여 PWR에 재이용하고 MOX 사용후핵연료는 영구처분하는 ‘열중성자 재활용주기’, 넷째 고온전해분리(pyroprocessing)를 통하여 금속핵연료를 만들어 고속로(SFR)에서 재이용하면서 고독성 핵종을 소멸시키는 ‘GEN-IV 핵연료주기’가 그것이다. 각각의 시나리오를 지속가능성 측면, 환경친화성 측면, 핵확산저항성 측면, 그리고 경제성 측면에서 분석한 결과, 전체적으로 GEN-IV 핵연료주기가 지속가능성·환경친화성·장기적 핵확산저항성 측면에서 우수한 것으로 나타났다. 경제성 측면의 경우에는 현재의 우라늄가격이 더욱 상승하던지, 혹은 고온전해분리의 처리비용과 금속핵연료의 제조비용을 줄일 수 있다면 경제성이 확보될 것으로 예견된다.</p>				
주제명키워드 (10단어내외)	핵연료주기, 직접처분주기, DUPIC 핵연료주기, 열중성자 재활용주기, GEN-IV 핵연료주기, 지속가능성, 환경친화성, 핵확산저항성, 경제성				