

KAERI/TR-3413/2007

핵연료주기 시스템 분석 (II)

Nuclear Fuel Cycle System Analysis (II)

KAERI


2007. 4

한국원자력연구원

제 출 문

한국원자력연구원장 귀하

본 보고서를 “핵연료주기 시스템 엔지니어링 기술개발” 과제
(세부과제: “핵연료주기 시스템 분석 연구”)의 기술보고서로 제출합니다.



2007. 4

주 저 자 : 고 원 일

공 저 자 : 권 은 하

윤 지 섭

박 성 원

목 차

1. 서론	1
2. 핵연료주기 시나리오	2
3. 핵연료주기 시나리오별 물질흐름	3
3.1 직접처분주기	3
3.2 DUPIC 핵연료주기	3
3.3 열중성자 재활용주기	4
3.4 GEN-IV 핵연료주기	5
4. 핵연료주기 시나리오별 분석	6
4.1 지속가능성 측면	6
4.2 환경친화성 측면	7
4.2.1 처분대상 사용후핵연료	7
4.2.2 처분대상 마이너 악티나이드	8
4.2.3 고준위폐기물 지하처분장 굴토량	9
4.3 핵확산저항성 측면	11
4.4 경제성 측면	12
4.4.1 비용 분석	13
4.4.2 민감도 분석	18
4.5 기술성 측면	25
4.5.1 기술의 성숙도	25

4.5.2 인허가의 난이도	25
4.6 소결	26
5. 종합분석	28
5.1 종합분석을 위한 이론적 틀	28
5.1.1 다요소효용함수이론	28
5.1.2 계층화분석법	31
5.2 종합분석	35
6. 결론	42
참고자료	43

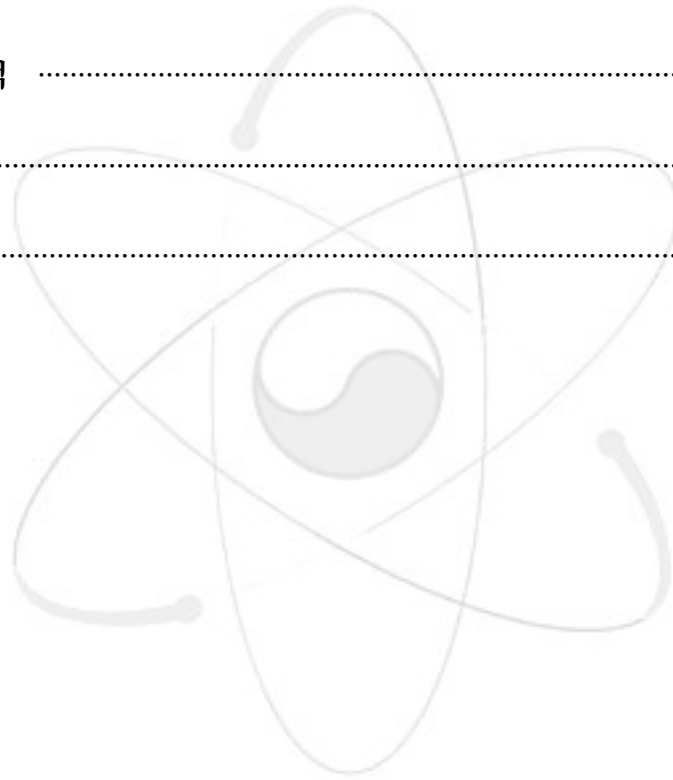


표 목 차

표 1. 경제성 평가를 위한 적용단가	14
표 2. 기준값에 대한 핵연료주기 비용	16
표 3. 몬테카를로 시뮬레이션 결과	17
표 4. 쌍대비교의 척도	32
표 5. 핵연료주기의 요소별 평가 I	36
표 6. 핵연료주기의 요소별 평가 II	37
표 7. 쌍대비교의 결과	39

그림 목 차

그림 1. 핵연료주기 시나리오	2
그림 2. 직접처분주기	3
그림 3. DUPIC 핵연료주기	4
그림 4. 열중성자 재활용주기	5
그림 5. GEN-IV 핵연료주기	5
그림 6. 천연우라늄 소비량	6
그림 7. 처분대상 사용후핵연료	8
그림 8. 처분대상 마이너 악티나이드	9

그림 9. 지하처분장 굴토량	10
그림 10. 플루토늄 재고량 (장기 핵확산저항성)	12
그림 11. 상대 핵연료주기비용	16
그림 12. 몬테카를로 시뮬레이션 결과	17
그림 13. 우라늄가격 민감도 분석	19
그림 14. 우라늄가격 변화 추이	20
그림 15. 고온전해분리 공정비용 민감도 분석	20
그림 16. 금속핵연료 제조비용 민감도 분석	21
그림 17. 금속핵연료 고온전해분리 공정비용 민감도 분석	21
그림 18. 직접처분주기비용의 회귀민감도	23
그림 19. DUPIC 핵연료주기비용의 회귀민감도	23
그림 20. 열중성자 재순환주기비용의 회귀민감도	24
그림 21. GEN-IV 핵연료주기비용의 회귀민감도	24
그림 22. 평가계층구조	35
그림 23. 천연우라늄 소요량의 효용함수	38
그림 24. 처분대상 사용후핵연료량의 효용함수	38

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 환경적으로 안전하게 처리할 수 있는가? - 환경친화성 측면, 셋째 핵무기의 확산을 어떻게 방지할 것인가? - 핵확산저항성 측면, 넷째 다른 에너지원과 비교하여 경제성이 있는가? - 경제성 측면, 다섯째 기술적으로 개발가능한가? - 기술성 측면 등이다. 따라서, 핵연료주기에 관한 국가의 정책을 수립할 경우에도 이러한 측면에서의 평가를 통하여 원자력 발전을 지속시킬 수 있는 방향으로 정책이 마련되어야 할 것이다.

핵연료주기에 관한 국가의 정책을 수립하기 위해서는 향후 우리나라에 적용가능한 핵연료주기 시나리오를 설정하고, 이를 평가하는 작업이 선행되어야 한다. 이러한 평가작업을 위하여 본 연구에서는 우리나라의 원자력발전 현황 및 현재 추진되고 있는 원자력진흥종합계획 등을 고려하여 향후 우리나라에 적용가능한 네 가지의 핵연료주기 시나리오를 설정하고, 각각의 시나리오를 지속가능성 측면 · 환경친화성 측면 · 핵확산저항성 측면 · 경제성 측면, 그리고 기술성 측면에서 각각 분석하였다.

그러나, 모든 정책결정이 그러하듯이 하나의 특정 핵연료주기가 지속가능성 · 환경친화성 · 핵확산저항성 · 경제성 · 기술성 등 모든 측면에서 우수할 수는 없으며, 그 결과 핵연료주기별 우열의 비교가 쉽지 않음이 예견된다. 이러한 점을 감안하여, 본 연구에서는 의사결정의 목표, 또는 평가기준이 다수이며 복합적인 경우의 상호 배반적인 대안들에 대한 체계적인 평가를 지원하는 의사결정기법 중의 하나인 다요소효용함수이론(MAUT: Multi-Attribute Utility Theory)과 계층화분석법(AHP: Analytic Hierarchy Process)을 이용하여 향후 우리나라에 적용가능한 네 가지의 핵연료주기 시나리오를 종합적으로 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 재사용하고 DUPIC 사용후핵연료는 영구처분하는 ‘DUPIC 핵연료주기’, 셋째 PWR 사용후핵연료를 습식재처리(PUREX)한 후 분리된 플루토늄은 MOX 핵연료로 가공하여 PWR에 재사용하고 MOX 사용후핵연료는 영구처분하는 ‘열중성자 재활용주기’, 넷째 고온전해분리(pyroprocessing)를 통하여 금속핵연료를 만들어 고속로(SFR)에서 재사용하면서 고독성 핵종을 소멸시키는 ‘GEN-IV 핵연료주기’가 그것이다(그림 1 참조). 또한, GEN-IV 핵연료주기에서는 전해정련(refining)을 통하여 회수된 우라늄은 중저준위폐기물로 분류가 가능한 것으로 가정하였으며, 또한 고발열 핵종인 Cs과 Sr을 분리하여 독립적으로 관리(저장 및 자연 붕괴)한다는 가정을 하였다.

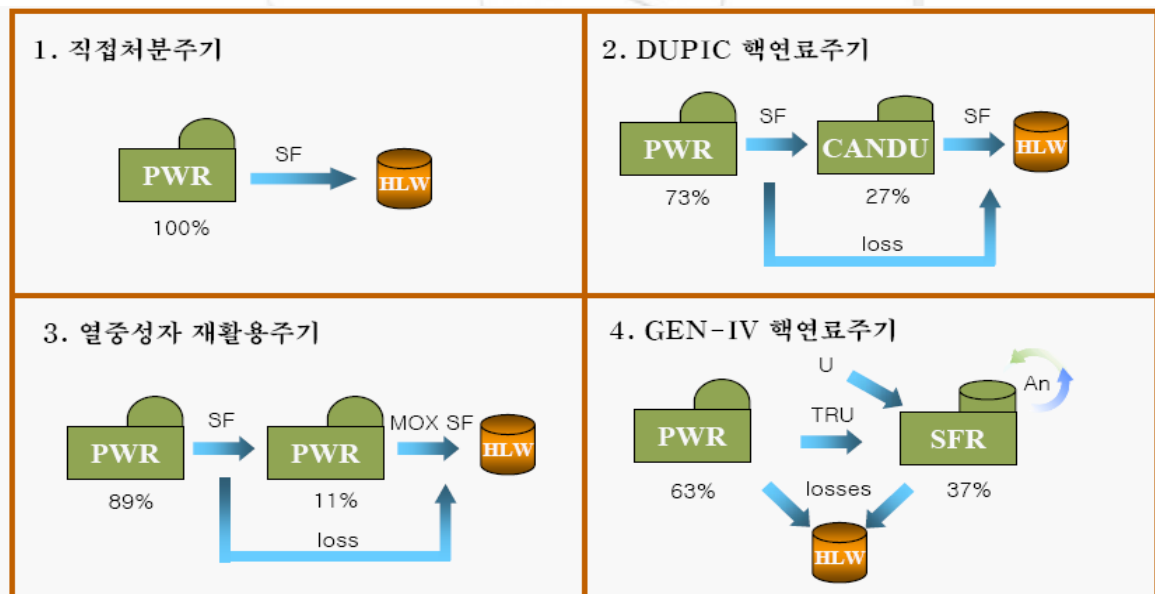


그림 1 핵연료주기 시나리오

3. 핵연료주기 시나리오별 물질흐름

위에서 언급한 바와 같이, 핵연료주기에 관한 국가의 정책을 수립하기 위해서는 향후 우리나라에 적용가능한 핵연료주기 시나리오를 설정하고, 이를 지속가능성 · 환경친화성 · 핵확산저항성 · 경제성 · 기술성 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 다음 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.

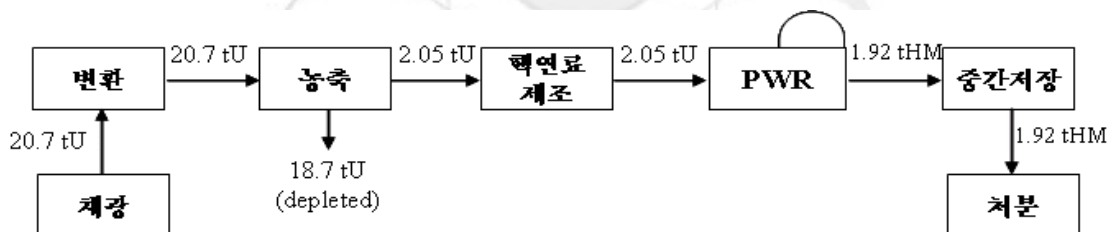


그림 2 직접처분주기

3.2 DUPIC 핵연료주기

DUPIC 핵연료주기에서는 PWR 사용후핵연료를 OREOX 공정을 통하여 CANDU 핵연료로 재가공하여 활용한다. PWR 핵연료의 경우, 초기농축도는 3.5 wt.%, 방출연소도는 35 GWd/MtHM로 가정하였으며, CANDU 원자로에서의 연소도는 15 GWd/MtHM로 가정하였다. OREOX 공정에서의 물질유실

량은 1%로 가정하였다. 이 때 발생하는 고준위폐기물은 일정기간 저장한 후 영구처분하고, DUPIC 사용후핵연료는 재활용하지 않고 영구처분하는 것으로 가정하였다(그림 3 참조).

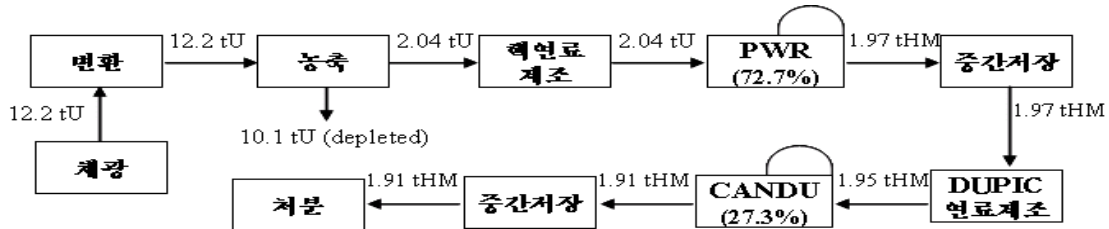


그림 3 DUPIC 핵연료주기

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 이는 단위전력 생산량당 평가되는 물질흐름에서 상대적으로 불리하게 작용될 수 있다[1].

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(그림 4 참조).

한편, 원자로시스템은 직접처분주기에서의 것과 동일하다. PWR 핵연료의 경우, 직접처분주기와 동일하게 초기농축도 4.9 wt.%, 방출연소도 60 GWd/MtHM로 가정하였다.

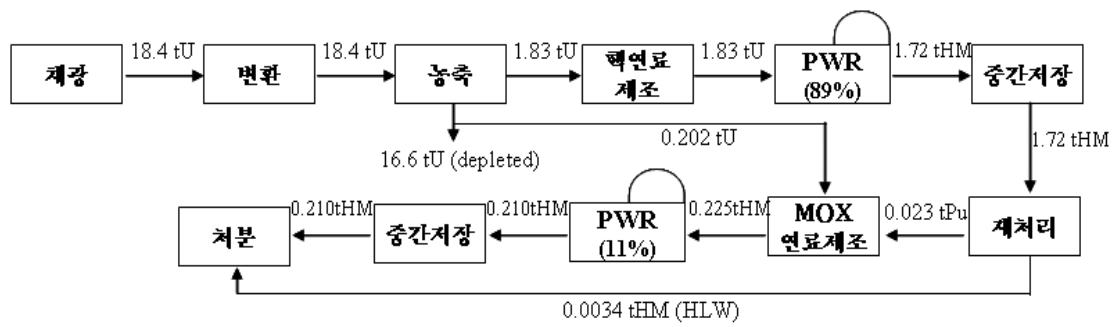


그림 4 열중성자 재활용주기

3.4 GEN-IV 핵연료주기

GEN-IV 핵연료주기에서는 다음 그림 5에서 보여주듯이, 기존의 PWR 원자로 외에 고속로(SFR)를 도입하여 PWR에서 발생한 TRU를 소멸·재활용하는 주기이다. 건식분리기술인 고온전해분리(pyroprocessing)를 이용하여 PWR 사용 후핵연료로부터 우라늄을 분리하여 중저준위폐기물로 보내고, 다시 TRU는 금속핵연료로 제조하여 GEN-IV 원자로인 고속로에서 연소하게 된다. 한편, 고속로 사용후핵연료는 역시 건식처리하여 금속핵연료로 가공 후 고속로에 재순환하게 된다.

PWR 핵연료의 경우, 초기농축도 4.2 wt.%, 방출연소도 50 GWd/MtHM로 가정하였다. 고속로는 600MWe의 TRU 소멸로로서 방출연소도 140 GWd/tHM이 사용되었다[2].

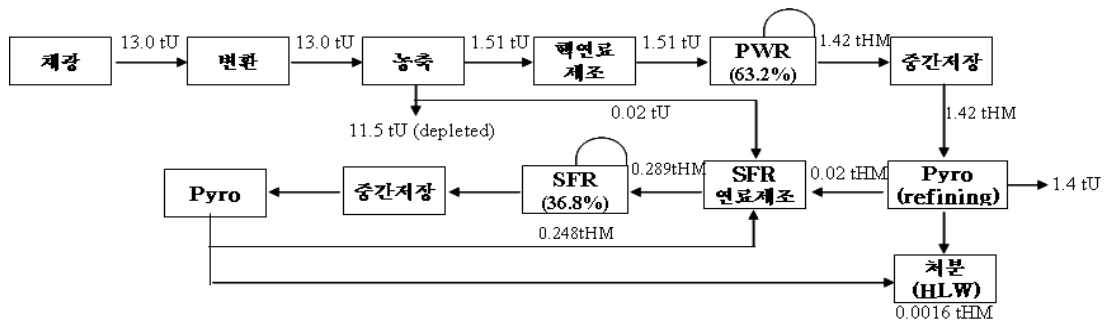


그림 5 GEN-IV 핵연료주기

4. 핵연료주기 시나리오별 분석

4.1 지속가능성 측면

원자력발전 후에는 부수적으로 불가피하게 사용후핵연료가 발생하게 된다. 이를 폐기물로 분류하여 처분하게 되면 고준위방사성을 띤 위험물질이 되나, 이에는 에너지원으로서 충분히 활용가능한 우라늄 및 초우라늄 원소가 약 96% 포함되어 있다. 따라서, 이러한 사용후핵연료의 재활용을 고려할 경우, 유한자원인 우라늄을 좀 더 효율적으로 사용할 수 있다. 본 연구에서는 다음 그림 6에서 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.

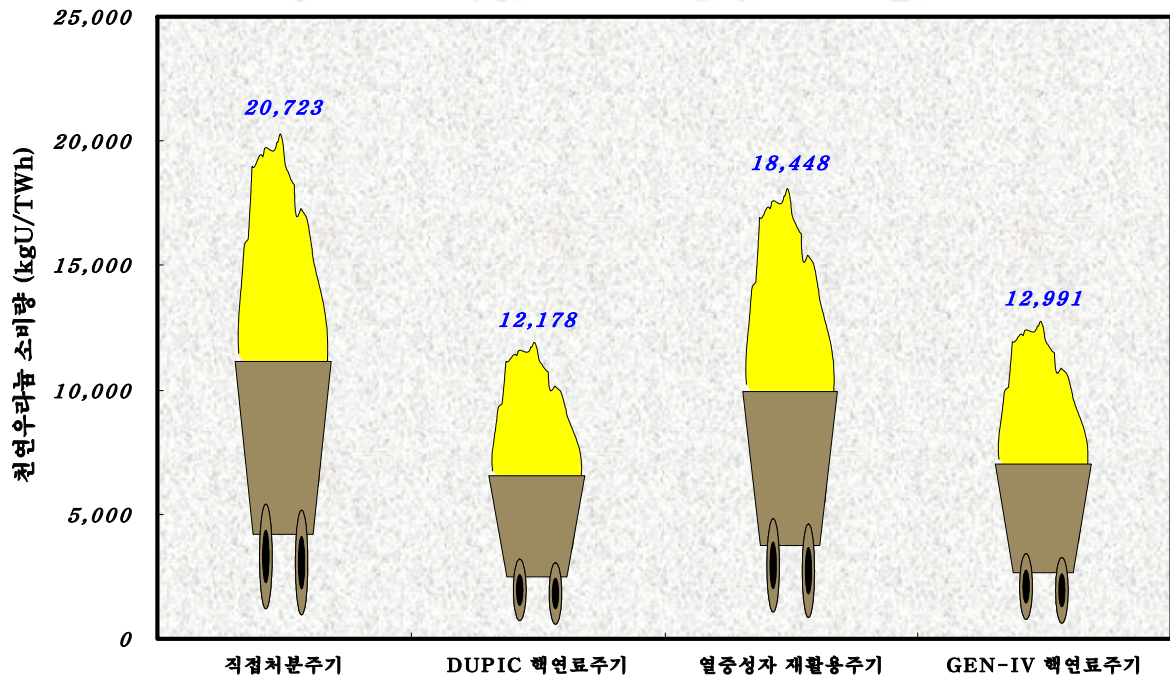


그림 6 천연우라늄 소비량

4.2 환경친화성 측면

원자력에너지의 역할 증대를 위해서는 원전에서 발생하는 방사성폐기물의 관리 및 처분성을 개선하는 데 일차적 목표를 두어야 한다. 방사성폐기물의 부피, 장기 열발생 및 방사성독성을 줄임으로써 심지층처분장의 용량을 증가시키고, 장기적으로 폐기물처분에 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 재처리시 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.

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 보인다.

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 분

리하여 독립적으로 관리할 수 있기 때문에 고준위폐기물이 처분장에 미치는 영향은 미미할 것으로 예상된다.

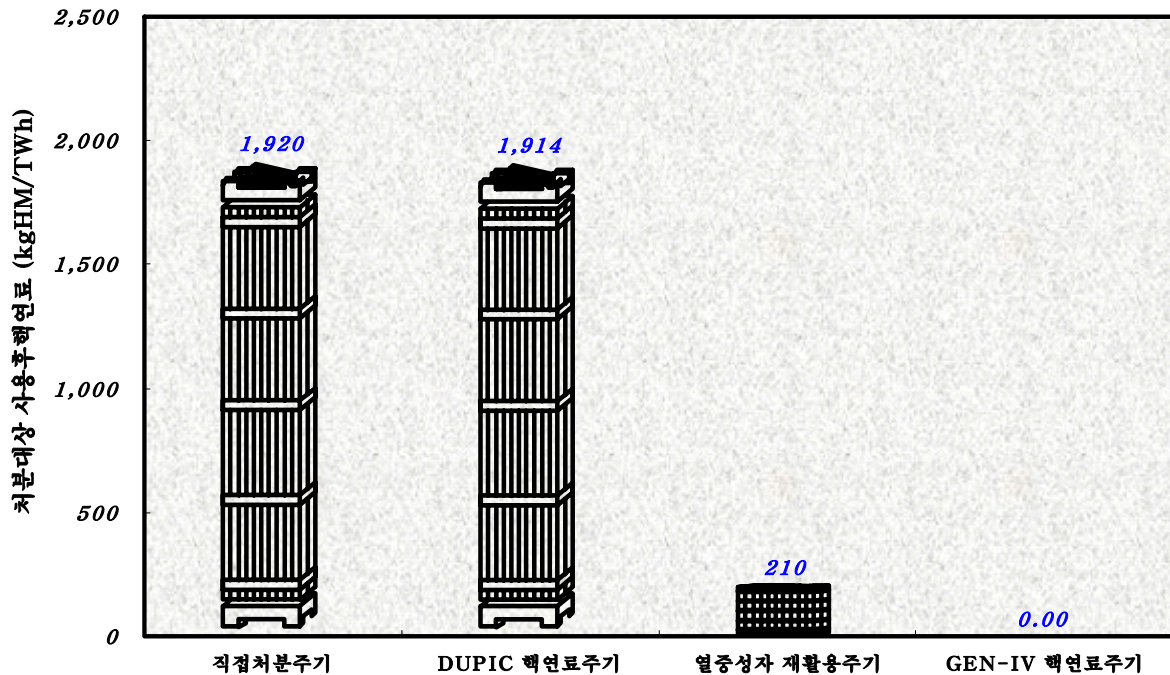


그림 7 처분대상 사용후핵연료

4.2.2 처분대상 마이너 악티나이드

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 차지한다. 그리고, 그 이후에는 악티나이드에 의하여 지배된다. 악티나이드의 원소 중 우라늄과 플루토늄은 에너지원으로 재활용이 가능하므로 여기에서는 처분대상이 되는 마이너 악티나이드, 즉 $Np \cdot Am \cdot Cm$ 만을 분석대상으로 하였다.

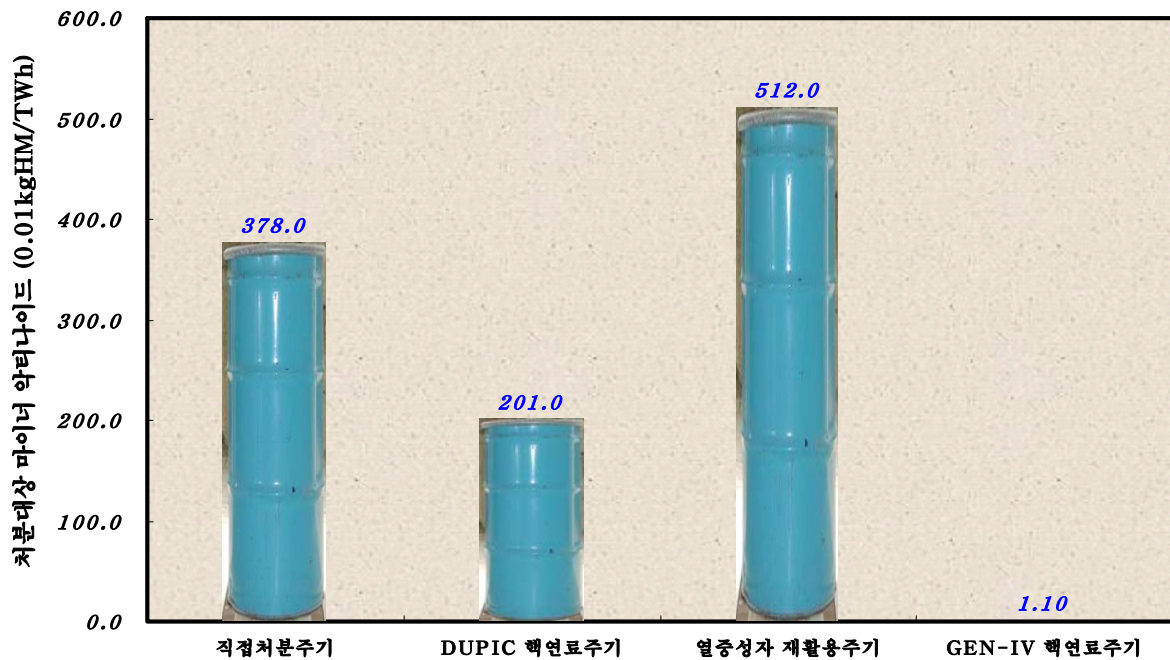


그림 8 처분대상 마이너 악티나이드

위의 그림 8에서 보여주듯이, GEN-IV 핵연료주기의 경우, 처분대상 마이너 악티나이드가 획기적으로 소멸되는 것으로 나타났다. 반면, 열중성자 재활용주기의 경우에는 재처리과정에서 발생하는 마이너 악티나이드의 양으로 인하여 처분대상이 되는 마이너 악티나이드의 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 사용하든지, 혹은 중저준위폐기물로 처분할

수 있다.

2. Pu · Np · Am · Cm 등과 같은 TRU 원소를 재활용 · 소멸하여 단위 전력생산량당 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.

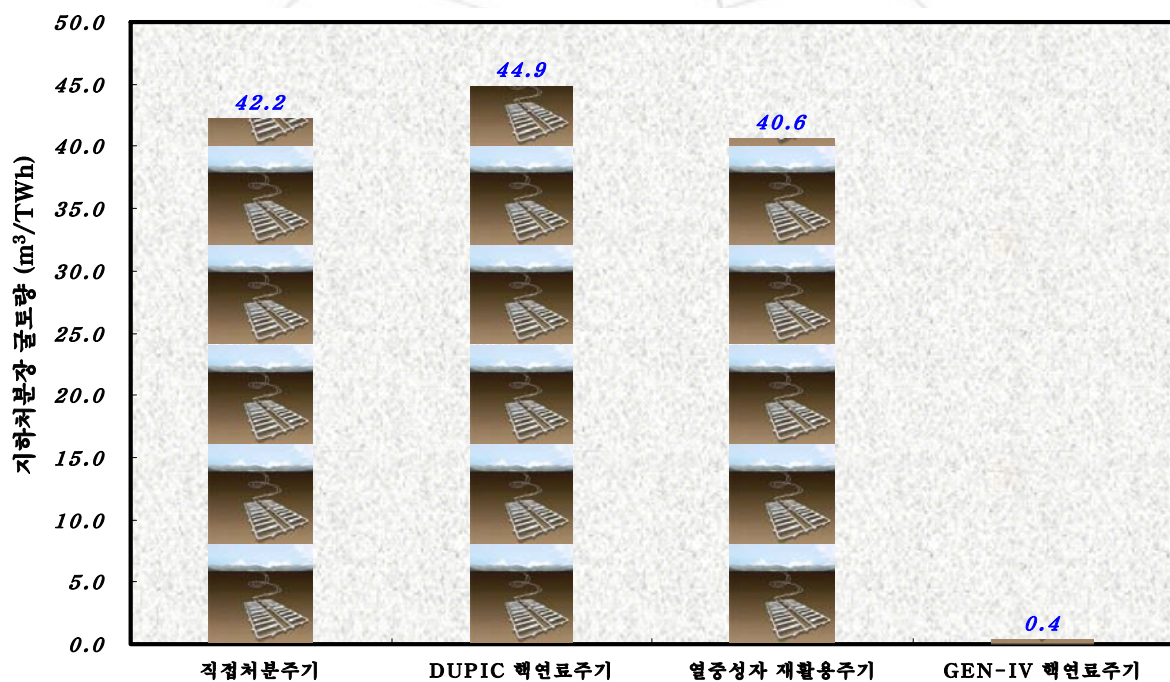


그림 9 지하처분장 굴토량

단위전력생산량당 처분대상 고준위폐기물량을 줄이고 안전성을 높이기 위해서 위의 방안들을 복합적으로 사용할 수도 있다. 본 연구에서는 GEN-IV 핵연료 주기에 위의 1·2·3항을 가정하여 분석하였다. 이를 위해서 지하처분장 굴토

량은 지하처분장 면적이 붕괴열량에 비례한다는 가정하에 처분대상 사용후핵연료, 혹은 고준위폐기물에서 발생하는 발열량(50년 냉각 후)을 평가하여 열량당 굴토량($20 \text{ m}^3/\text{kW}$)을 곱하여 계산하였다. 위의 그림 9는 핵연료주기별 지하처분장 굴토량을 나타낸 것이다.

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

4.3 핵확산저항성 측면

재순환정책이나 직접처분정책이나의 문제는 핵확산 측면에서 오랫동안 논쟁의 핵심이 되어 왔다. 핵확산과 관련된 가장 중요한 논쟁은 핵확산의 위험을 줄이는 데에는 공감대가 형성되어 있지만, 핵연료주기의 핵확산의 위험도가 시간의 존성을 지니고 있다는 속성을 무시하는 데에서 종종 발생하고 있다. 가령 직접처분주기는 단기적인 핵확산 위험도는 줄일 수 있지만 장기적인 핵확산 위험도는 매우 크며, 위에서 본 재순환주기는 장기적인 핵확산 위험도는 줄일 수 있지만 단기적으로는 상대적으로 핵확산 위험도가 크다고 할 수 있다.

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

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

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

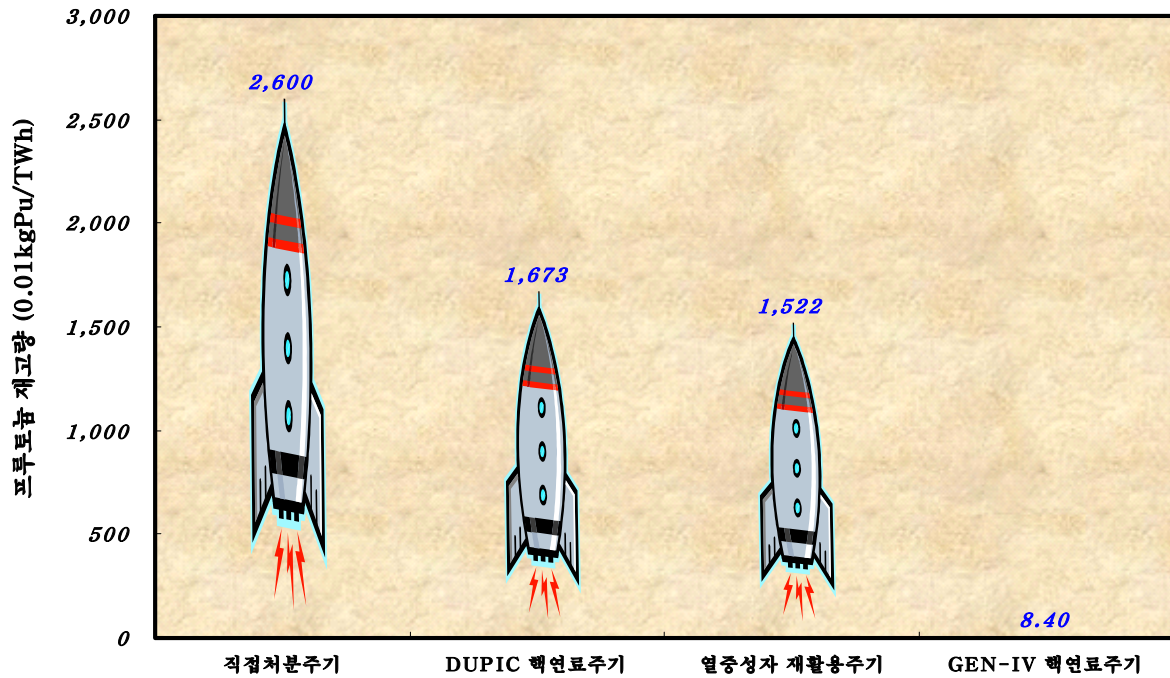


그림 10 플루토늄 재고량 (장기 핵확산저항성)

4.4 경제성 측면

핵연료주기의 경제성은 향후 원자력발전에서 고려되어야 할 필수적인 요소 중의 하나이다. 원자력산업계에서도 경쟁원리가 중요시되고 있는 현실을 감안하면, 경제성은 특정 핵연료주기를 선택하는 중요한 결정요인이 된다. 본 연구에서도 이러한 측면에서 위의 네 가지 핵연료주기 시나리오를 분석해보았다.

먼저 핵연료주기를 구성하는 각 단계별 비용단가를 가정하여 계산하였으며, 불확실성 분석을 위하여 Latin Hypercube 추출방식을 적용한 몬테카를로 시뮬레이션방법을 적용하였다. 구성부분별 비용은 최소값(a), 최대값(b) 및 최빈값(m)으로 구성된 다음과 같은 삼각분포(triangular distribution)를 따른다고 가정하

였다. 삼각분포는 대표적인 비모수분포(non-parametric distributions)로서 데이터가 많이 없으며, 이에 대한 정확한 분포를 알지 못하는 경우에 효과적이다. 주로 엔지니어링 판단에 의하여 분포를 추정한다[5, 6].

$$f(x) = \frac{2(x-a)}{(m-a)(b-m)} \quad \text{for } a \leq x \leq m \quad (1)$$

$$f(x) = \frac{2(b-x)}{(b-m)(b-a)} \quad \text{for } m \leq x \leq b \quad (2)$$

$$mean = \frac{(a+m+b)}{3} \quad (3)$$

$$standard\ deviation = \left(\frac{a^2 + b^2 + m^2 - ab - am - bm}{18} \right)^{0.5} \quad (4)$$

또한, 각 단계별 비용 중 변동성이 크다고 생각되는 우라늄가격, 고온전해분리 공정가격, 금속핵연료 제조가격에 대해서는 민감도 분석을 수행하였으며, GEN-IV 핵연료주기가 직접처분주기에 비하여 경제성이 있기 위한 손익분기점 가격이 계산되었다.

4.4.1 비용 분석

다음의 표 1은 본 연구에서의 경제성 분석을 위하여 적용한 항목별 단가이다. 주로 OECD/NEA 자료를 이용하였으나, 동 자료에 나타나 있지 않은 가격의 경우 엔지니어링 판단값을 적용하였다[7]. 우라늄의 경우에 최근 급격히 상승하고 있는 가격을 고려하여 기준값 \$150, 하한값 \$50, 상한값 \$300으로 가정하였다. 고온전해분리공정은 아직 연구개발단계에 있으므로 정확한 가격을 산정하기는 어려우나, 엔지니어링 판단을 적용하여 고속로용 금속핵연료 처리의 경우 1,700\$/kgHM, 산화물핵연료의 전해정련인 경우 1,200\$/kgHM을 기준값으로

사용하였으며, 금속핵연료제조비용은 2,000\$/kgHM을 기준값으로 사용하였다.

또한, 본 연구에서는 핵연료주기 비용에 원자로 비용을 포함하지 않았다. 즉, 전력생산량당 원자로 비용은 모두 동일하다는 전제하에서 핵연료주기 비용을 계산한 것이다. 이는 GEN-IV 원자로의 건설비용이 기존의 제 3세대 원자로 비용에 비해서 경쟁력이 있어야 한다는 GEN-IV 프로그램에서의 연구목표를 적용한 것이다.

표 1 경제성 평가를 위한 적용단가

항목	단위	기준값	하한	상한	
우라늄	\$/kgU	150	50	300	
변환*	\$/kgU	5	3	8	
농축*	\$/SWU	100	80	120	
재처리비용	UO2 PUREX	\$/kgHM	800	700	900
	UO2 Pyro (reduction/refining)	\$/kgHM	1,200	600	2,000
	SFR Metal Fuel Pyro	\$/kgHM	1,700	1,000	2,500
제조비용	UO2 Fuel*	\$/kgHM	250	200	300
	MOX Fuel*	\$/kgHM	1,250	1,000	1,500
	DUPIC Fuel*	\$/kgHM	700	500	900
	SFR Metal Fuel	\$/kgHM	2,000	1,000	3,000
저장비용*	DUPIC S/F Dry Storage	\$/kgHM	180	120	230
	UO2 S/F Dry Storage	\$/kgHM	180	120	230
	MOX S/F Dry Storage	\$/kgHM	360	240	460
	UO2 PUREX HLW Dry Storage	\$/m ³	120,000	80,000	200,000
	UO2 PYRO HLW Dry Storage	\$/m ³	120,000	80,000	200,000
	SFR Pyro HLW Dry Storage	\$/m ³	120,000	80,000	200,000
처분비용	LILW (short lived)*	\$/m ³	2,000	1,200	3,000
	LILW (long lived)*	\$/m ³	6,000	4,000	8,000
	Packing (PWR SF)*	\$/kgHM	350	250	500
	Packing (MOX SF)*	\$/kgHM	525	375	750
	Packing (DUPIC SF)*	\$/kgHM	300	230	400
	Spent Fuel (underground cost)	\$/m ³	1,200	600	2,000
	HLW (underground cost)	\$/m ³	1,200	600	2,000

*자료 : OECD/NEA, *Advanced Nuclear Fuel Cycles and Radioactive Waste Management*, 2006.

각 항목의 기준값을 이용하여 각각의 핵연료주기 비용을 계산한 결과, 직접처분

주기 6.66 mills/kWh, DUPIC 핵연료주기 6.45 mills/kWh, 열중성자 재활용 주기 7.35 mills/kWh, GEN-IV 핵연료주기 6.81 mills/kWh로 각각 나타났다 (표 2 참조).

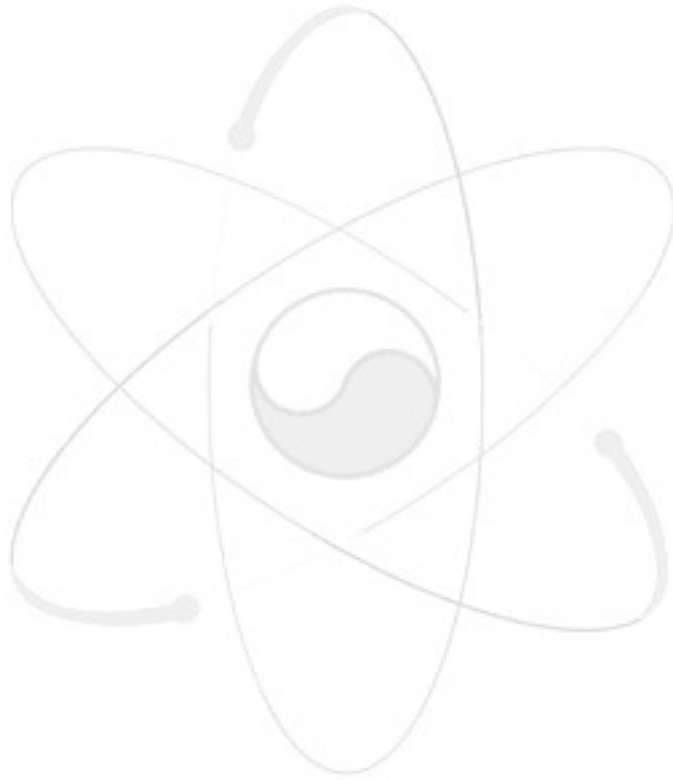


표 2 기준값에 대한 핵연료주기 비용

Indicators	직접처분주기	DUPIC 핵연료주기	열중성자 재활용주기	GEN-IV 핵연료주기
Fuel Cycle Cost (mills/kWh)	6.66	6.45	7.35	6.81

다음 그림 11은 위의 표 2의 값들을 상대적 크기로 나타낸 것이다. 직접처분주기 비용에 비하여 열중성자 재활용주기는 약 10%, GEN-IV 핵연료주기는 약 2% 높게 나타났다.

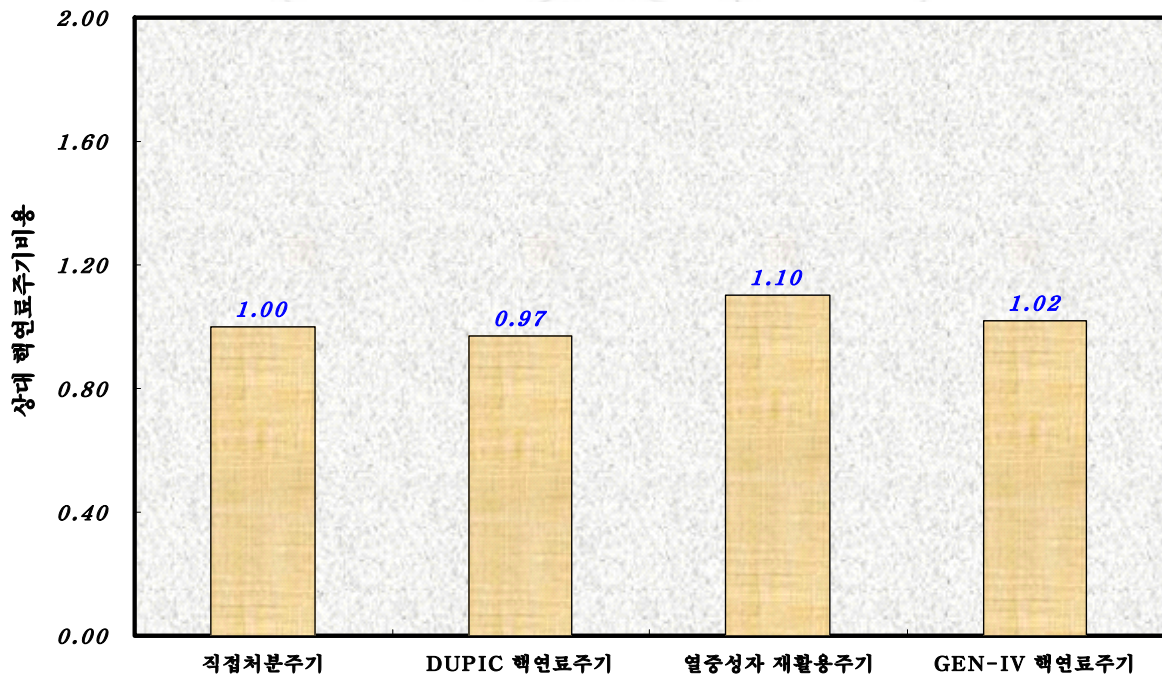


그림 11 상대 핵연료주기비용

다음 표 3과 그림 12는 몬테카를로 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 각각의 비용단가가 삼각분포를 따른다는 가정하에서 총 5,000번의 Latin Hypercube

추출을 수행한 것이다. 다음 표 3에 나타난 바와 같이, 핵연료주기비용에 대한 표준편차(SD)는 0.66 ~ 1.08 mills/kWh 범위로 나타났다. 즉, 표 2의 GEN-IV 핵연료주기와 직접처분주기의 차이인 0.15 mills/kWh는 GEN-IV 핵연료주기의 표준편차 0.81 mills/kWh, 그리고 직접처분주기의 표준편차 1.08 mills/kWh보다 작게 나타났음을 알 수 있다. 이는 GEN-IV 핵연료주기의 비용은 직접처분주기의 오차범위내에 존재한다고 해석될 수 있다.

표 3 몬테카를로 시뮬레이션 결과

	직접처분주기	DUPIC 핵연료주기	열중성자재활용주기	GEN-IV 핵연료주기
Min	4.36	4.89	5.31	4.76
Max	10.11	8.75	10.44	9.86
Mean	7.04	6.68	7.70	7.18
SD	1.08	0.66	0.96	0.81
Median	6.97	6.64	7.64	7.16

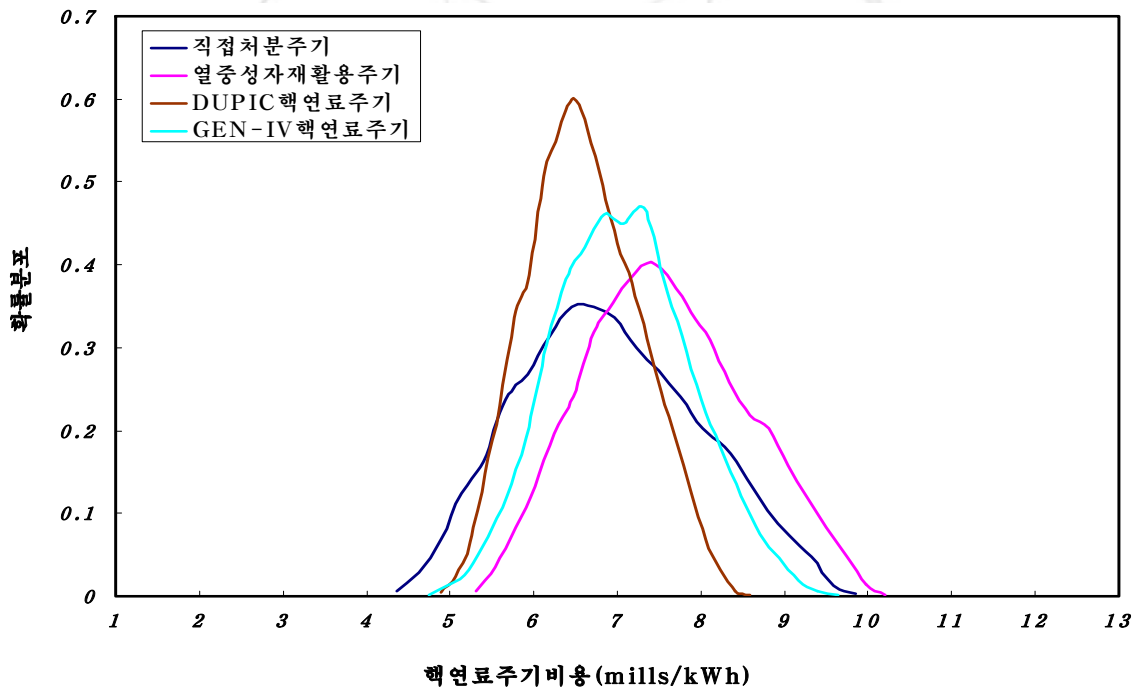


그림 12 몬테카를로 시뮬레이션 결과

4.4.2 민감도 분석

본 항에서는 우라늄가격, 고온전해분리 공정가격, 금속핵연료 제조가격에 대한 민감도 분석을 수행하였다.

우라늄가격의 민감도 분석을 수행한 결과, 직접처분주기가 다른 핵연료주기보다 우라늄가격에 민감한 것으로 분석되었다(그림 13 참조). 이는 직접처분주기의 경우, 같은 양의 에너지를 생산하기 위하여 가장 많은 우라늄이 필요하기 때문이다.

직접처분 대비 우라늄의 손익분기점가격은 DUPIC 핵연료주기 \$125/kgU, GEN-IV 핵연료주기 \$170/kgU으로 계산되었다. 다음의 그림 14는 최근 약 40년간의 우라늄가격 변화 추이를 나타낸 것이다. 2007년 3월 현재 우라늄가격은 \$247/kgU으로서 약 6년 전의 가장 낮은 가격에 비하여 약 10배 이상 상승한 것이다. 그림 14에서 보는 바와 같이 최근 우라늄가격이 급상승하는 것으로 미루어 보아, GEN-IV 핵연료주기의 경우 이미 경제성 확보된 것으로 보인다.

우라늄 이외에 현재 가격측면에서 불확실성이 상대적으로 큰 항목에 대하여 민감도 분석을 수행하였다. 예컨대, 본 연구에서 참조한 OECD 보고서에서는 고속로(SFR) 고온전해분리 공정의 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 대비 고속로용 금속핵연료 고온전해분리 공정의 손익분기점가격은 \$1100/kgHM으로 평가되었다(그림 15 참조). 이는 다른 모든 비용은 기준값을 사용하고 고온전해분리 공정비용만을 변화시키면서 직접처분주기와 같아지는 가격을 나타낸 것이다.

한편, 다음의 그림 16은 금속핵연료 제조비용을 나타낸 것으로 손익분기점가격은 \$1,500/kgHM로 계산되었다. 이 손익분기점가격은 현재의 우라늄 핵연료제

조비용인 약 250\$/kgU보다 6배 높은 가격으로서 향후 기술개발 여하에 따라 충분히 달성 가능한 가격으로 보인다.

한편, 다음의 그림 17은 금속핵연료 고온전해분리 공정비용을 나타낸 것으로 손익분기점가격은 \$1,200/kgHM로 계산되었다.

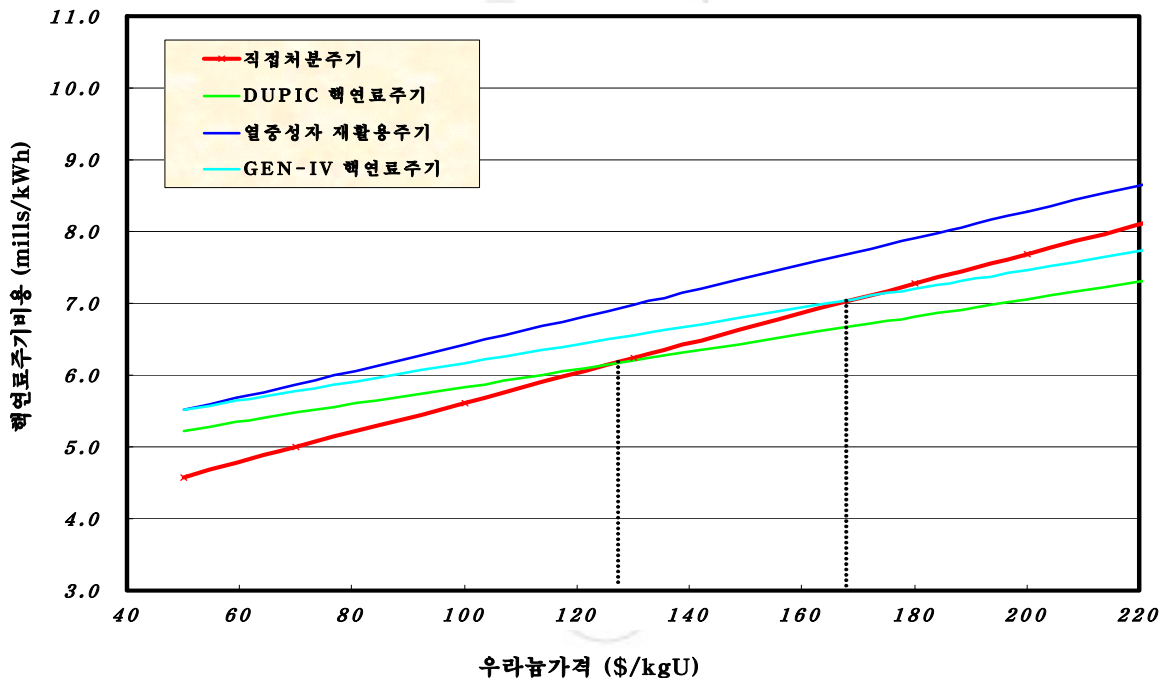


그림 13 우라늄가격 민감도 분석

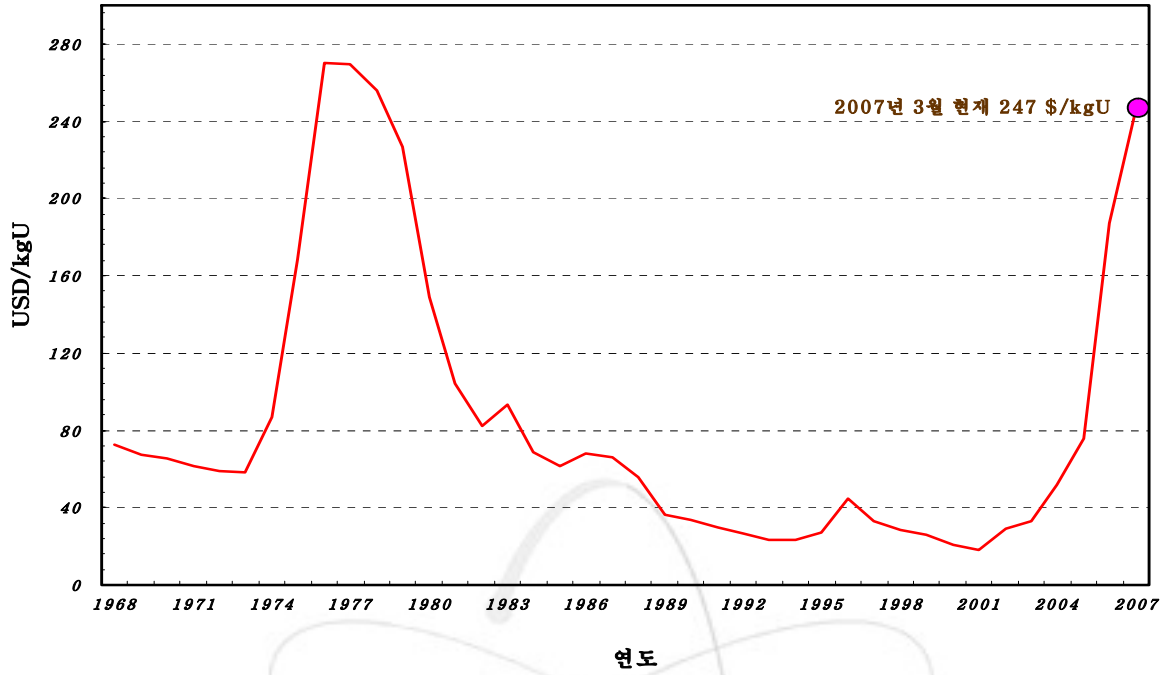


그림 14 우라늄가격 변화 추이

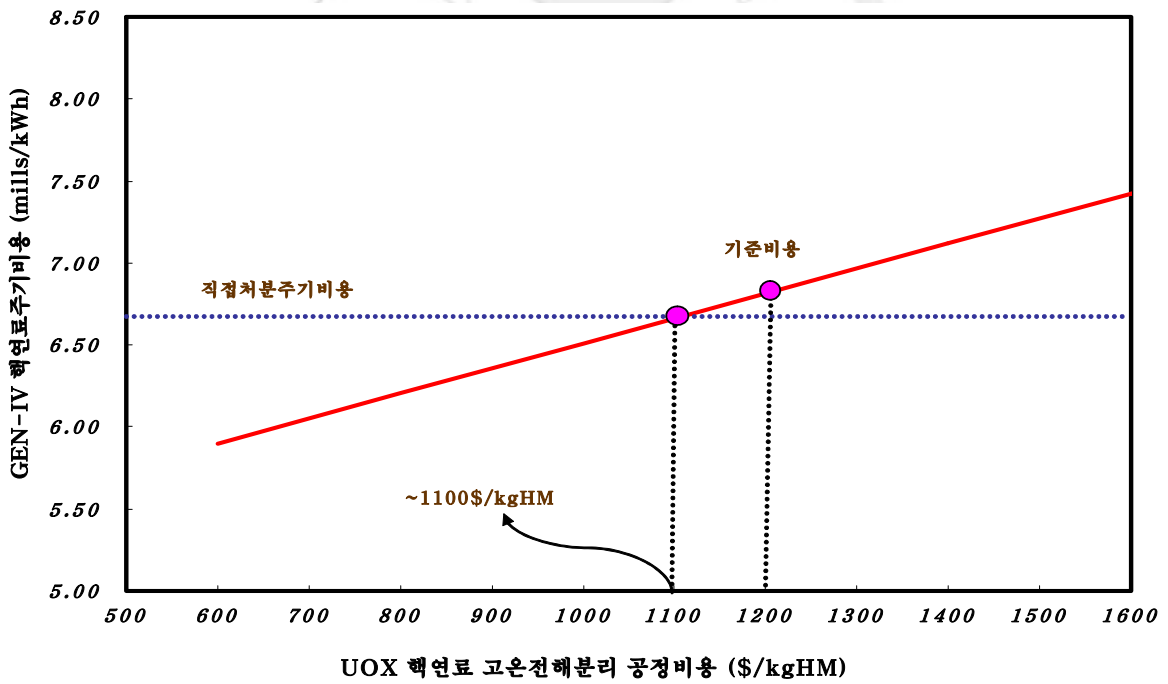


그림 15 고온전해분리 공정비용 민감도 분석

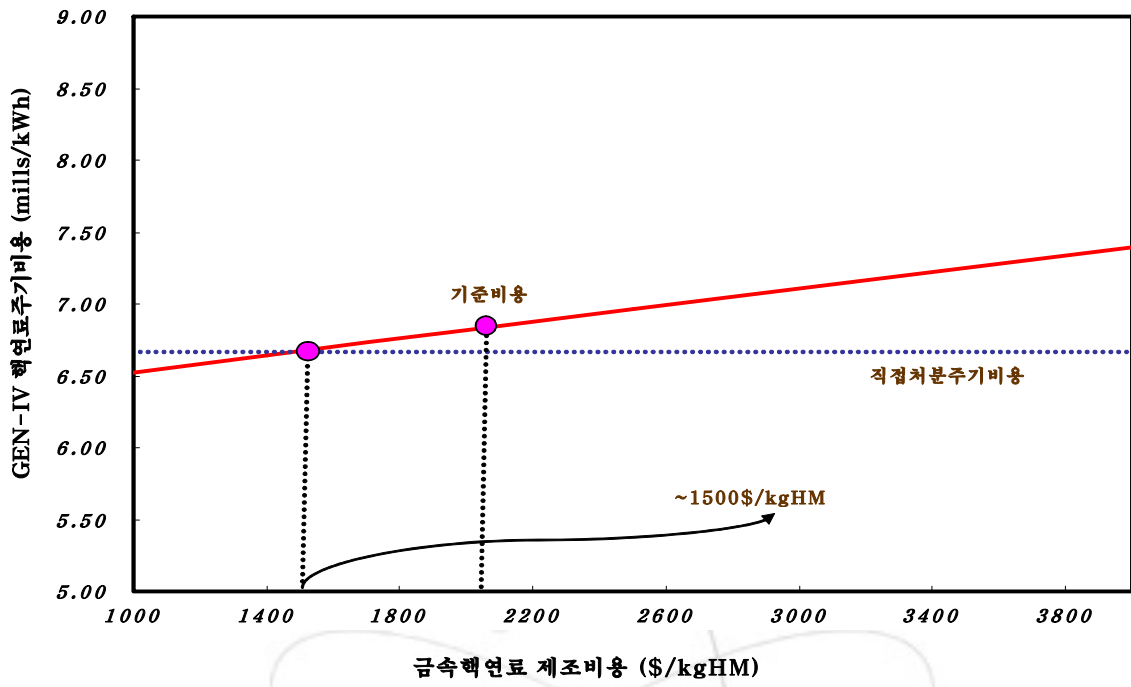


그림 16 금속핵연료 제조비용 민감도 분석

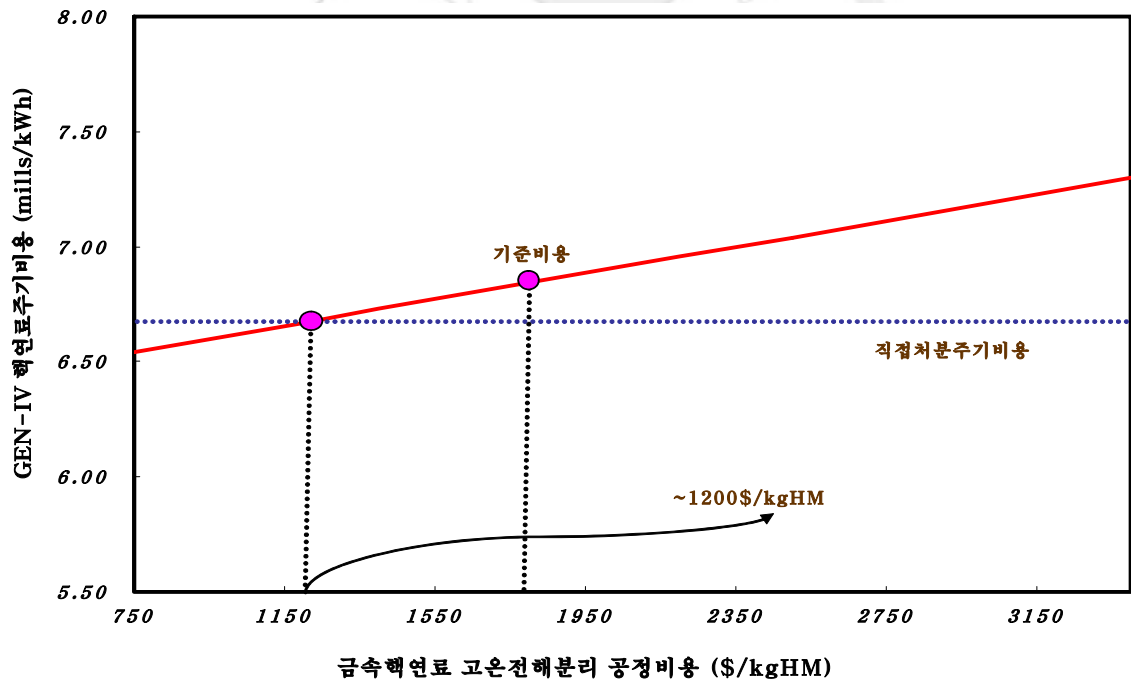


그림 17 금속핵연료 고온전해분리 공정비용 민감도 분석

다음의 그림 18 ~ 21은 회귀민감도(regression sensitivity)의 분석결과를 나타낸 것이다. 다중회귀민감도(multi-variate stepwise regression) 분석방법을 적용하였는데, 이는 다수의 입력자료들에 대한 민감도를 평가하는 데 알맞으며 회귀계수값(regression coefficient)을 산출하여 민감성 정도를 판단하게 된다. 회귀계수값이 1이면 입력변수의 1SD(standard deviation)를 변화시킬 때 결과가 1SD 만큼 변한다는 의미이다. 반대로, 회귀계수가 0이면 입력변수가 최종결과(output)에 거의 영향을 미치지 않는다.

그림 18 ~ 21에 나타난 바와 같이 전체적으로 우라늄가격이 가장 민감한 것으로 나타났다. 직접처분주기, DUPIC 핵연료주기 및 열중성자 재활용주기에서 우라늄가격의 회귀계수값은 약 0.95 ~ 0.99 범위에서 결정되었다. 그러나, GEN-IV 핵연료주기에서의 우라늄가격의 회귀계수값은 0.82를 나타내 보임으로써 GEN-IV 핵연료주기에서는 상대적으로 우라늄가격의 민감한 정도가 낮게 나타났다. 두 번째 민감성을 보이는 항목은 우라늄 농축으로 나타났으나, GEN-IV 핵연료주기에서는 우라늄 가격보다는 고온전해분리비용, 금속핵연료 제조비용 등이 농축비용보다 더 민감한 것으로 나타났다.

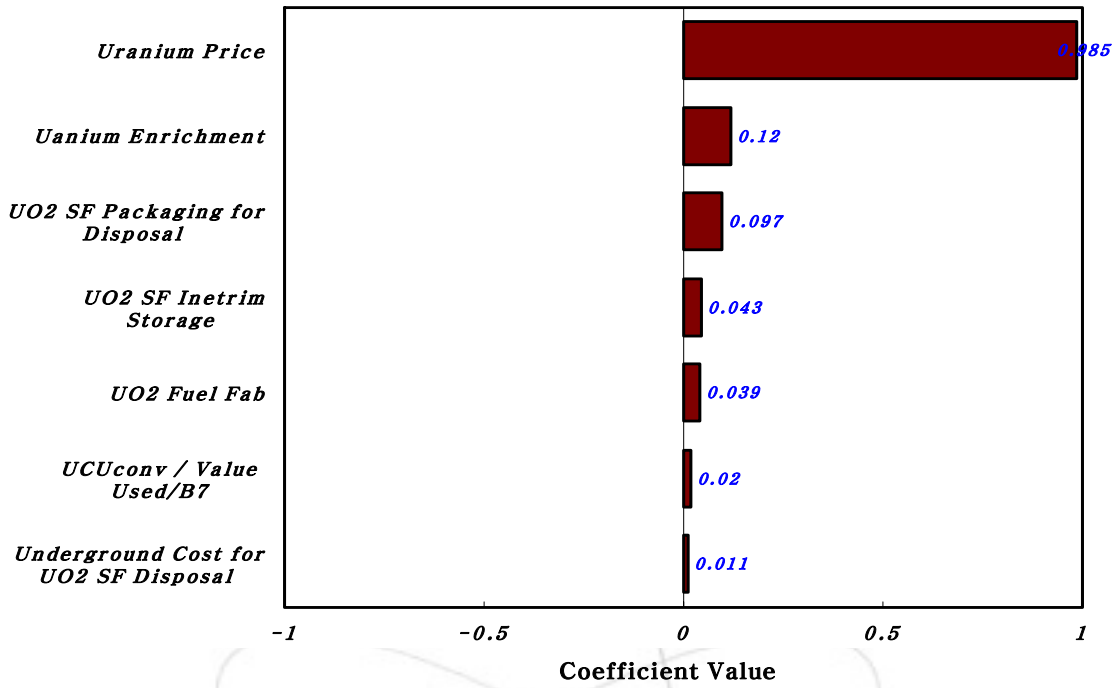


그림 18 직접처분주기비용의 회귀민감도

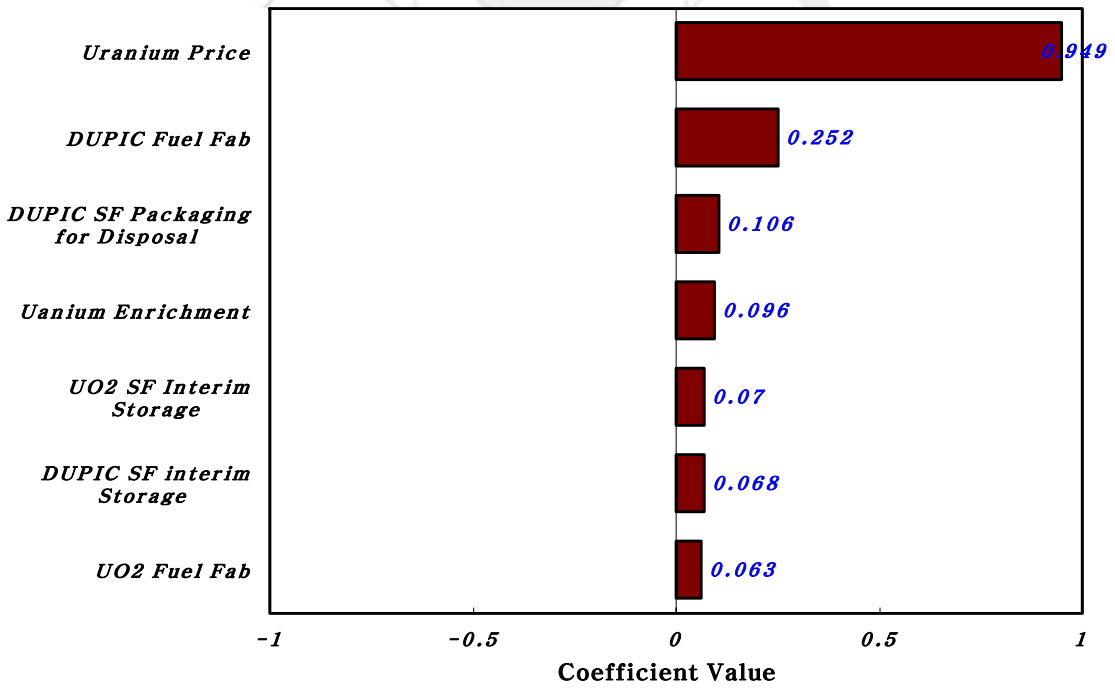


그림 19 DUPIC 핵연료주기비용의 회귀민감도

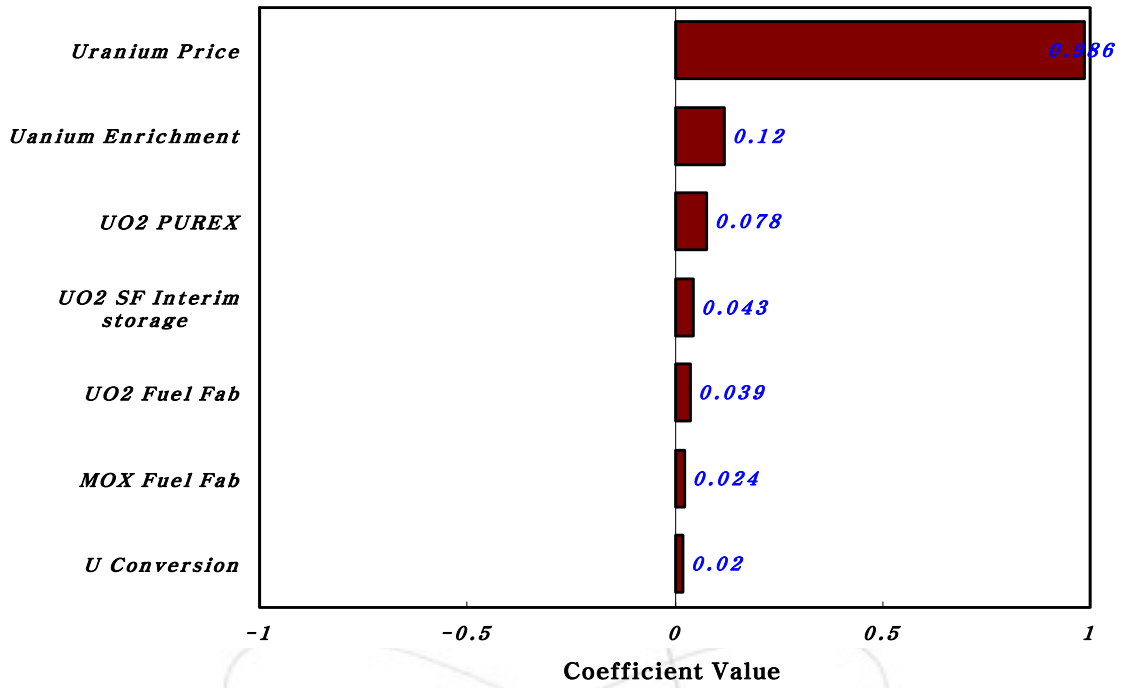


그림 20 열중성자 재순환주기비용의 회귀민감도

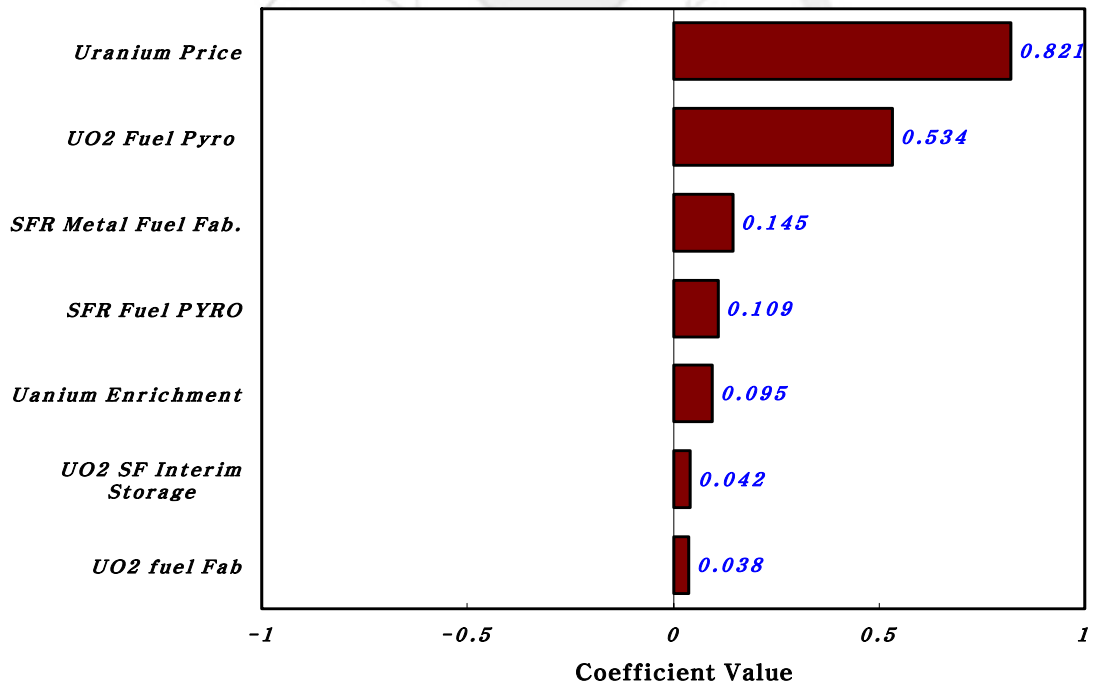


그림 21 GEN-IV 핵연료주기비용의 회귀민감도

4.5 기술성 측면

4.5.1 기술의 성숙도

기술의 성숙도 측면에서는 직접처분주기의 경우가 심지층처분의 상용화가 지연되고는 있으나, 가장 앞선 것으로 평가된다. DUPIC 핵연료주기의 경우에는 현재 실증단계에 있으며, 1991년부터 2000년대 초반까지 한·미·카 3국의 공동 연구를 통하여 경수로 사용후핵연료를 이용, DUPIC 핵연료를 만들어 실험로에서 태운바 있다. 열중성자 재활용주기는 일본·프랑스 등에서 상용화가 이루어져 있으며, 현재 산업화된 유일한 재활용주기이다. 한편, GEN-IV 핵연료주기는 고온전해분리 공정기술의 연구개발이 활발하게 진행되고는 있으나 기술적으로 해결해야 할 이슈들이 많이 남아 있는 상태로서 현재 개념정립의 단계에 있다.

따라서, 핵연료주기별 기술성숙도는 직접처분주기, 열중성자 재활용주기, DUPIC 핵연료주기, GEN-IV 핵연료주기의 순으로 될 것으로 판단된다.

4.5.2 인허가의 난이도

일반적으로 핵연료주기시설은 인허가 규정에 맞추어서 설계·건설된다. 따라서, 인허가 난이도는 원자로에 초점을 맞추어야 할 것이다.

직접처분주기와 열중성자 재활용주기에서의 경수로는 이미 상용화가 되었다고 볼 수 있다. 반면에, DUPIC 핵연료주기의 경우, 하나로 연구로에서 조사시험한 경우는 있으나, 이는 중수로 환경과 크게 다르기 때문에 실질적인 조사시험이라고 할 수는 없다. 한편, 금속핵연료는 미국의 아이다호국립연구소(INL: Idaho National Laboratory)에서 수차에 걸쳐 성공적으로 조사시험을 마친 것으로 알려져 있다.

따라서, 인허가 난이도는 직접처분주기, 열중성자 재활용주기, GEN-IV 핵연료주기, DUPIC 핵연료주기의 순으로 될 것으로 판단된다.

4.6 소결

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

○ 지속가능성 측면

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

○ 환경친화성 측면

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

한편, 재처리시에 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 170\$/kgU 이상이면 직접처분에 비하여 경제성이 있는 것으로 나타났다. 이는 최근 우라늄가격의 급상승(2007년 3월 현재 247\$/kgU)으로 이미 GEN-IV 핵연료주기의 경제성은 확보된 것으로 판단된다.

○ 기술성 측면

직접처분주기의 경우, 심지층처분의 상용화가 지연되고는 있으나 기술성 측면에서 가장 앞선 것으로 평가된다. 열중성자 재활용주기는 일본·프랑스 등에서 상용화가 이루어져 있으며, 현재 산업화된 유일한 재활용주기이다. DUPIC 핵연료주기와 GEN-IV 핵연료주기의 경우에는 기술적으로 해결해야 할 이슈들이 많이 남아 있는 상태로서 개념정립의 단계에 있다고 할 수 있다.

- 전체적으로, GEN-IV 핵연료주기가 지속가능성·환경성·장기적 핵확산저항성 측면에서 우수한 것으로 나타났다. 경제성 측면의 경우에는 현재의 우라늄가격이 유지되든지, 혹은 고온전해분리 공정비용과 금속핵연료 제조비용을 줄일 수 있다면 경제성이 확보될 것으로 예견된다.

5. 종합분석

5.1 종합분석을 위한 이론적 틀

정책결정권자가 정책을 수립·도입할 때에는 그 정책을 통하여 얻고자 하는 특정의 목표가 있기 마련이며, 대개의 경우 그 목표는 2개 이상이 된다. 핵연료주기에 관한 국가의 정책을 수립할 경우에도 이를 통하여, 첫째 유한한 우라늄자원을 좀 더 효율적으로 사용하며, 둘째 발생하는 폐기물을 보다 안전하게 처리하고, 셋째 핵무기의 확산을 최대한 방지하며, 넷째 타에너지원과 비교하여 경제성이 높고, 다섯째 기술적으로 개발타당한 핵연료주기의 도입을 꾀하게 된다.

이와 같이 하나의 정책을 통하여 추구하는 목표가 다수일 경우, 각각의 목표는 상호 배반적인 경우가 많으며, 그 결과 대안의 우열성을 쉽게 비교하지 못하게 된다. 핵연료주기에 관한 국가의 정책을 수립할 경우에도 지속가능성·환경친화성·핵확산저항성·경제성·기술성 등 여러 측면을 고려해야 하는데, 하나의 특정 핵연료주기가 모든 측면에서 우수할 수는 없다. 다만, 최소의 비용으로 그 편익을 최대화할 수 있는 핵연료주기를 추구하는 것이 이상적일 것이다.

이에 따라, 본 연구에서는 의사결정의 목표가 다수이며, 상호 배반적인 경우에 대안들의 체계적인 평가를 지원하는 의사결정기법의 하나인 다요소효용함수이론(MAUT)과 계층화분석법(AHP)을 이용하여 향후 우리나라에 적용가능한 네가지의 핵연료주기 시나리오를 종합적으로 분석해 보았다[8,9].

5.1.1 다요소효용함수이론

다요소 의사결정기법 중의 하나인 다요소효용함수(MAUF: Multi-Attribute Utility Function)는 반복질문을 통하여 도출한 의사결정자의 효용함수에 근거하여 대안을 평가하는 방법이다[8]. 17세기 영국의 실용주의 철학자에게서 유래된 ‘효용(utility)’이라는 용어는 ‘교환에서의 가치’가 아닌 ‘주관적 가치,’ 또는 ‘사용상에서의 가치’라는 의미로서, 이는 1) 확실성(certainty)하에서도 사람마

다 느끼는 가치의 개념이 다르며, 2) 불확실성(uncertainty)하에서는 위험에 대한 선호(preference)의 경향이 다름을 전제로 한다.

화폐가치(불량률 등 다른 결과치도 가능함)와 효용 사이의 관계를 나타내주는 함수로서 효용함수를 이용하는데, x_i 를 요소 X_i 의 수준이라고 하면 효용함수 $u(x_1, x_2)$ 는 요소 X_1 의 수준이 x_1 이고, 요소 X_2 의 수준이 x_2 일 때 효용을 나타낸다. 이 때, 주어진 x_2 에 대하여, 요소 X_1 의 값들에 대한 선호도가 X_2 의 특정수준과 무관하다면, 요소 X_1 은 요소 X_2 에 대하여 효용독립(UI: Utility Independence, 이하 UI)이라고 한다. 요소 X_1 이 요소 X_2 에 대하여 UI이고, 요소 X_2 가 요소 X_1 에 대하여 UI이면, 요소 X_1 과 요소 X_2 는 상호효용독립(MUI: Mutually Utility Independence, 이하 MUI)이다. 요소들 사이에 MUI가 성립할 경우에 효용함수의 형태는 다음과 같다. 여기서 k_1, k_2, k_3 는 상수로서, 요소의 상대적 중요도를 의미한다.

$$u(x_1, x_2) = k_1 u_1(x_1) + k_2 u_2(x_2) + k_3 u_1(x_1) u_2(x_2) \quad (5)$$

이때, 의사결정자가 두 로터리에 대하여 무차별하다면 이 의사결정자의 효용함수는 덧셈독립(AI: Additive Independence, 이하 AI)이라고 한다. 의사결정의 효용함수가 AI의 성질을 나타낼 경우에, 효용함수의 형태는 다음과 같이 표현된다.

$$u(x_1, x_2) = k_1 u_1(x_1) + k_2 u_2(x_2) \quad (6)$$

위의 이론에 근거하여, 두 개의 요소를 포함하는 다요소효용함수의 부과과정은 다음과 같이 요약된다.

- 1) 두 요소 X_1 과 X_2 가 MUI인지를 검토한다. MUI이면 단계 2로 넘어간다. MUI가 아니면 이 방법을 사용할 수 없다.
- 2) AI인지를 검토한다.

3) $u_1(x_1)$ 과 $u_2(x_2)$ 를 부과한다. $u_1(x_1), u_2(x_2)$ 는 단일요소에 대한 효용함수 부과 과정을 통해서 얻을 수 있다. 효용함수를 구하기 위하여 확실등가(CE), 확률등가(PE) 등의 방법이 사용되는데, 본 연구에서는 확실등가방법 중의 하나인 50-50 로터리를 이용하였다. 그 구체적인 과정은 다음과 같다.

i) 주어진 의사결정문제의 최대결과치와 최소결과치를 이용하여 표준로터리를 구성한다.

ii) $p=1, p=0, p=0.5$ 에 대하여 각각 확실등가 CE_1, CE_2, CE_3 을 결정한다. p 를 수직축에, 그리고 대응되는 CE 를 수평축에 나타냄으로써 그래프 위에 점을 찍는다. 즉,

$$U(CE_1)=1, U(CE_2)=0, U(CE_3)=0.5$$

iii) 확률 $p=0.5$ 를 갖는 새로운 로터리를 만든다. 결과치는 앞에서 결정된 CE_i, CE_j 를 이용한다.

iv) 각 로터리에 대하여 확실등가 CE_k 를 결정한다.

v) 각 로터리에 대하여 $U(CE_k)=0.5U(CE_i)+0.5U(CE_j)$ 를 이용하여 CE_k 의 효용치를 계산한다.

vi) CE_k 를 수평축에, $U(CE_1)$ 을 수직축에 대응시킴으로써 점 $[CE_k, U(CE_1)]$ 를 찍는다.

vii) 곡선의 형태가 잘 정의될 때까지 단계 3, 4, 5, 6을 반복한다.

viii) 찍혀진 점들을 연결함으로써 곡선을 그린다.

4) k_1, k_2, k_3 를 결정한다 (덧셈독립일 경우 $k_3=0$). 일반적으로 다요소효용함수이론에서는 k_1, k_2, k_3 를 구하기 위하여 각각의 효용함수를 규준화한 후 확률등가를 사용한다. 본 연구에서는 대신 계층분석과정에서의 가중치 산정

방법을 사용하였다.

5) 부과된 효용함수가 의사결정자의 선호관계와 일치하는지를 검토한다.

5.1.2 계층화분석법

계층화분석법(AHP: Analytic Hierarchy Process, 이하 AHP)은 1970년대 초 펜실베니아대학교(University of Pennsylvania)의 새티(T. Saaty) 교수가 미국무부의 무기통제 및 군비축소국에서 세계적 경제학자, 게임이론 전문가들과 협력작업을 하는 과정에서 의사결정과정의 비능률을 개선하기 위하여 개발한 의사결정기법이다[9]. 이는 분석과정이 간단할 뿐만 아니라, 정량적 요소와 정성적 요소를 동시에 고려하기가 용이하기 때문에 현재 다요소 의사결정기법들 중에서 가장 널리 응용되고 있다.

일반적으로 AHP의 분석과정은 1) 계층구조의 설정, 2) 쌍대비교행렬의 형성, 3) 가중치의 산정, 4) 일관성 검토 등의 4단계로 구성된다.

1) 계층구조의 설정

AHP의 첫 번째 단계는 복잡한 문제를 계층화하여 의사결정의 주요요소와 세부요소들로 분해하는 것이다. 즉, 의사결정의 가장 일반적인 목표가 최상위계층이 되며, 각기 복수의 주요요소와 세부요소들은 그 하위계층이 된다. 마지막으로 최하위 계층에는 대안들이 나타난다.

2) 쌍대비교행렬의 형성

AHP의 두 번째 단계는 각 계층내에 있는 요소들에 대한 의사결정자의 선호도를 평가하는 단계이다. 일반적으로 관련전문가들에게 요소간 상대적 중요도 또

는 선호도를 나타내는 쌍대비교 형태의 설문을 실시하여 쌍대비교행렬을 구하게 된다.

AHP에서는 9점 척도를 기본형으로 이용하고 있는데, 이는 1956년 밀러(G. Miller)의 심리학 실험에서 “인간은 7 ± 2 개의 대상을 혼동이 없이 동시에 비교 가능하다”는 결과에 기초하고 있다[10]. 새티(Saaty) 교수 또한 국가간 부(wealth)의 평가, 지역간 거리의 평가 등에 대한 가상적 실험결과에 실제자료를 비교한 결과 9점 척도를 이용한 의사결정의 강건성(robustness)이 가장 우수하다는 연구결과를 제시한 바 있다[9].

다음의 표 3은 쌍대비교시 흔히 사용되는 9점 척도의 어의적 표현을 보여준다.

표 4 쌍대비교의 척도

어의적 표현	계량적 점수부여
극단적으로 선호	9
매우 강하게 선호	7
강하게 선호	5
약간 선호	3
동등하게 선호	1

** (2, 4, 6, 8은 각각 1과 3, 3과 5, 5와 7, 7과 9의 중간정도의 중요도(선호도)를 나타냄)

즉, 의사결정자는 두 개의 비교대상 a와 b의 ‘중요도가 같다(선호도가 같다)’, a가 b보다 ‘조금 더 중요하다(조금 더 선호된다)’, ‘중요하다(선호된다)’, ‘상당히 중요하다(상당히 선호된다)’, ‘절대적으로 중요하다(절대적으로 선호된다)’와 같은 어의적 판단을 내린다. 그 후, 가중치 산정과정에서 각각의 어의적 판단을 이에 상응하는 1, 3, 5, 7, 9와 같은 수치적 판단으로 변환하여 입력자료로 사용한다. 만약, 중요도가 서로 반대되는 경우, 즉 b가 a보다 중요하다고 판단하는 경우에는 그 역수를 이용하여 자료를 입력하게 된다.

의사결정자가 한 수준에서 n개의 평가항목에 대하여 nC_2 회의 쌍대비교를 수행하면 상대적 가중치를 알 수 있고, 이를 이용하여 아래의 쌍대비교행렬 $A_{n \times n}$ 를 구성할 수 있다.

$$A = \begin{pmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & - & - & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & - & - & w_2/w_n \\ - & - & - & - & - \\ - & - & - & - & - \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & - & - & w_n/w_n \end{pmatrix}$$

이 때 행렬 A를 구성하는 a_{ij} 는 요소 j에 대한 I의 상대적 가중치 $\frac{w_i}{w_j}$ 의 추정치이다. 행렬 A는 $a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$, 주대각선의 원(element)의 값이 모두 1이 되는 성질을 가진 역수행렬(reciprocal matrix)이다.

3) 가중치의 산정

AHP의 세 번째 단계는 단계 2에서 얻어진 쌍대비교행렬을 이용하여 각 행렬 별로 요소들의 상대적 중요도를 구한다. 이를 계산하는 방법으로는 산술평균법 · 기하평균법 · 최소자승법 · 고유벡터법 등 여러 가지가 있는데, 본 연구에서는 고유벡터법을 사용하였다. 고유벡터법은 AHP를 처음으로 제안한 새티(Saaty) 교수에 의하여 사용되었는데, 쌍대비교행렬의 고유값(eigenvalue) 중에서 최대치에 대응하는 고유벡터를 요소의 중요도로 이용하는 방법으로, 쌍대비교행렬의 일치성의 정도를 측정할 수 있다는 장점이 있다.

행렬 A에 평가항목간 상대적 중요도를 나타내는 가중치인 열벡터 $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ 를 곱하게 되면 다음의 관계를 갖는다.

$$\begin{pmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & - & - & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & - & - & w_2/w_n \\ - & - & - & - & - \\ - & - & - & - & - \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & - & - & w_n/w_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ - \\ - \\ w_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} nw_1 \\ nw_2 \\ - \\ - \\ nw_n \end{pmatrix}$$

$$\underline{Aw} = \lambda \underline{w}$$

단, λ : 고유치(eigenvalue) w : λ 에 상응하는 고유벡터(eigenvector)

위의 수식은 일반적인 고유치 문제를 표현하는 수식으로서 쌍대비교행렬 A의 특성방정식의 해인 특성근, 또는 고유치를 산출하는 과정에서 우선순위벡터의 추정치 w를 유도할 수 있다.

4) 일관성 검토

AHP의 마지막 단계는 분석의 일관성을 평가하는 것이다. λ_{\max} 는 n의 추정값이 된다. 새티(Satty) 교수는 λ_{\max} 는 n보다 항상 크거나 같으며, 값이 n에 가까울수록 쌍대비교행렬 A는 추정치와의 편차가 작아짐을 보였다. 즉, λ_{\max} 값이 n에 근접할수록 쌍대비교시 응답의 일관성이 높다고 말할 수 있다. 이러한 성질에 착안하여 응답의 일관성지수(CI: Consistency Index, 이하 CI)를 다음과 같이 정의하여 사용한다. CI가 0의 값을 갖는다는 것은 응답자가 완전한 일관성을 유지하며, 쌍대비교를 수행하였음을 의미한다. 새티(Saaty) 교수는 CI가 0.1 이하이면 받아들일 만하다고 제안한 바 있다.

$$\frac{(\lambda_{\max} - n)}{n - 1}$$

5.2 종합분석

본 연구에서는 다요소효용함수이론과 계층화분석법을 이용하여 1) 직접처분주기, 2) DUPIC 핵연료주기, 3) 열중성자 재활용주기, 4) GEN-IV 핵연료주기 등 네 가지의 핵연료주기 시나리오를 종합적으로 분석하였다.

우리나라에 적용하기 위한 최적의 핵연료주기를 도출하기 위하여 지속가능성 · 환경친화성 · 핵확산저항성 · 경제성 및 기술성의 다섯 가지 요소를 고려하였으며, 각 요소는 다시 천연우라늄 소요량(지속가능성), 처분대상 사용후핵연료 · 처분대상 마이너 악티나이드 · 고준위폐기물 지하굴토량(환경친화성), 사용후핵연료 조성 · 플루토늄 재고량(핵확산저항성), 핵연료주기 비용(경제성), 기술개발 가능성 · 인허가 난이도(기술성) 등 1 내지 3개의 세부요소로 나누었다(그림 22 참조).

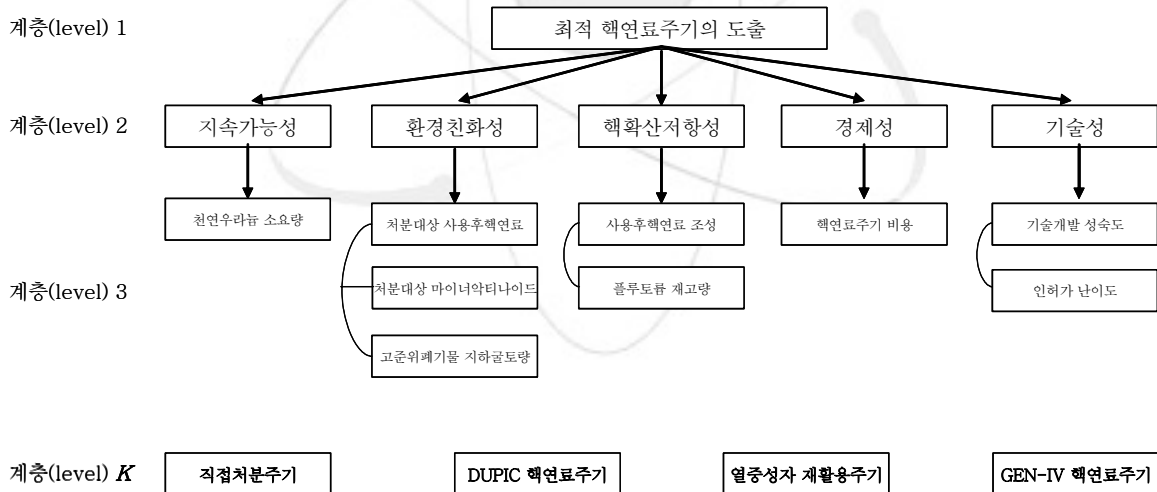


그림 22 평가계층구조

표 5 핵연료주기의 요소별 평가 I

평가항목	평가지표	평가		
지속가능성	천연우라늄 소요량 (tU/TWh)	직접처분주기	21	
		DUPIC 핵연료주기	12	
		열중성자 재활용주기	18	
		GEN-IV 핵연료주기	13	
환경친화성	처분대상 사용후핵연료 (m3/TWh)	직접처분주기	1.9 tHM	3.8
		DUPIC 핵연료주기	1.9 tHM	3.8
		열중성자 재활용주기	0.2 tHM	0.4
		GEN-IV 핵연료주기	0 tHM	0
	처분대상 마이네 악티나이드 (m3/TWh)	직접처분주기	0	
		DUPIC 핵연료주기	0.26	
		열중성자 재활용주기	0.23	
		GEN-IV 핵연료주기	0.4	
	고준위폐기물 지하굴토량 (m3/TWh)	직접처분주기	42.2	
		DUPIC 핵연료주기	44.9	
		열중성자 재활용주기	40.6	
		GEN-IV 핵연료주기	0.4	
핵확산저항성	사요후핵연료 조성	직접처분주기	1	
		DUPIC 핵연료주기	0.9	
		열중성자 재활용주기	0.5	
		GEN-IV 핵연료주기	0.7	
	플루토늄 재고량 (kgHM/TWh))	직접처분주기	16	
		DUPIC 핵연료주기	17	
		열중성자 재활용주기	15	
		GEN-IV 핵연료주기	0.08	
경제성	핵연료주기 비용 (mills/kWh)	직접처분주기	6.66	
		DUPIC 핵연료주기	6.45	
		열중성자 재활용주기	7.35	
		GEN-IV 핵연료주기	6.81	
기술성	기술개발 성숙도	직접처분주기	1	
		DUPIC 핵연료주기	0.6	
		열중성자 재활용주기	0.8	
		GEN-IV 핵연료주기	0.4	
	인허가 난이도	직접처분주기	0.5	
		DUPIC 핵연료주기	1	
		열중성자 재활용주기	0.6	
		GEN-IV 핵연료주기	0.85	

표 6 핵연료주기의 요소별 평가 II

평가항목	중요도	평가지표	중요도	범위	Objectives	Notation
지속 가능성	0.416	천연우라늄 소요량 (tU/TWh)	1	13~21	minimize	U1
환경 친화성	0.161	처분대상 사용후핵연료 (m3/TWh)	0.33	0~3.8	minimize	U2
		처분대상 고준위폐기물 (m3/TWh)	0.33	0~2.6	minimize	U3
		고준위폐기물 지하굴토량 (m3/TWh)	0.33	0.4~44.9	minimize	U4
핵확산 저항성	0.262	사용후핵연료 조성	0.5	0.5~1	maximize	U5
		플루토늄 재고량 (kgHM/TWh)	0.5	0.08~17	minimize	U6
경제성	0.099	핵연료주기 비용 (mills/kWh)	1	6.45~7.35	minimize	U7
기술성	0.062	기술개발 성숙도	0.5	0.4~1	maximize	U8
		인허가 난이도	0.5	0.5~1	minimize	U9

이들 요소는 서로에 대하여 상호효용독립이며, 덧셈독립의 성질을 가진다. 따라서, 본 연구에서의 다요소효용함수는 다음과 같이 표현된다.

$$u(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n k_i u_i(x_i) \quad (7)$$

50-50 로터리방법을 이용하여 각 요소에 대한 효용함수를 다음과 같이 부과하였다.

$$u_1(x) = 0.0017x^2 - 0.0826x + 1.0157 \quad (8)$$

$$u_2(x) = 1.028e^{-x/0.6148} - 0.0118 \quad (9)$$

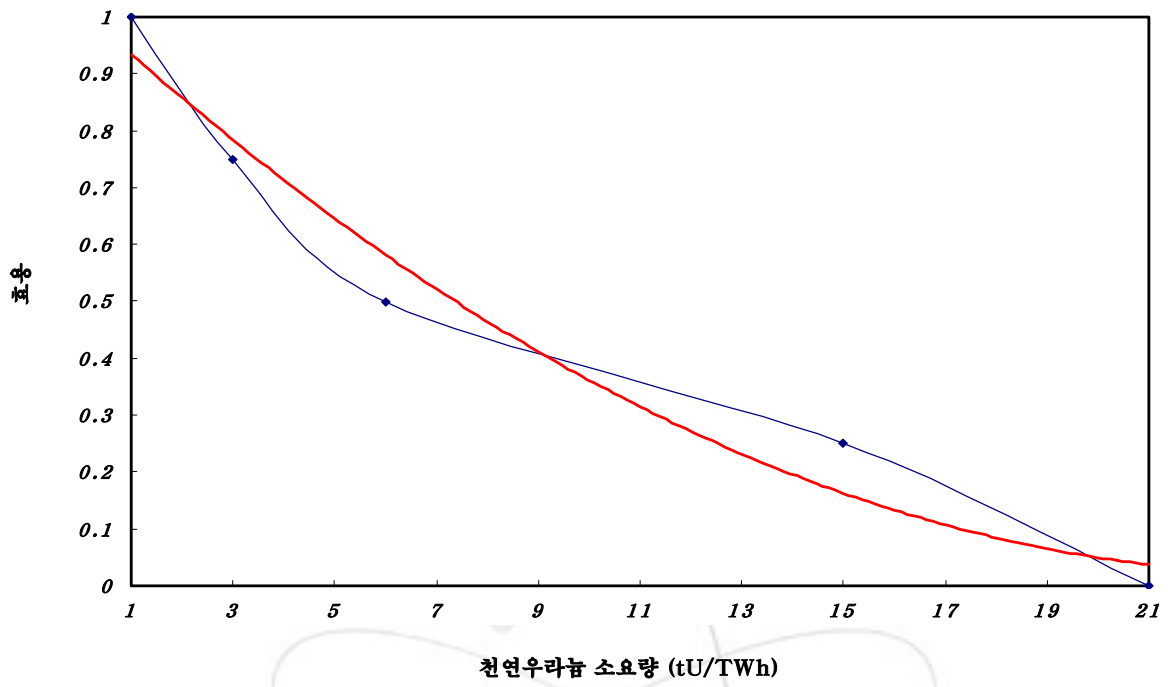


그림 23 천연우라늄 소요량의 효율함수

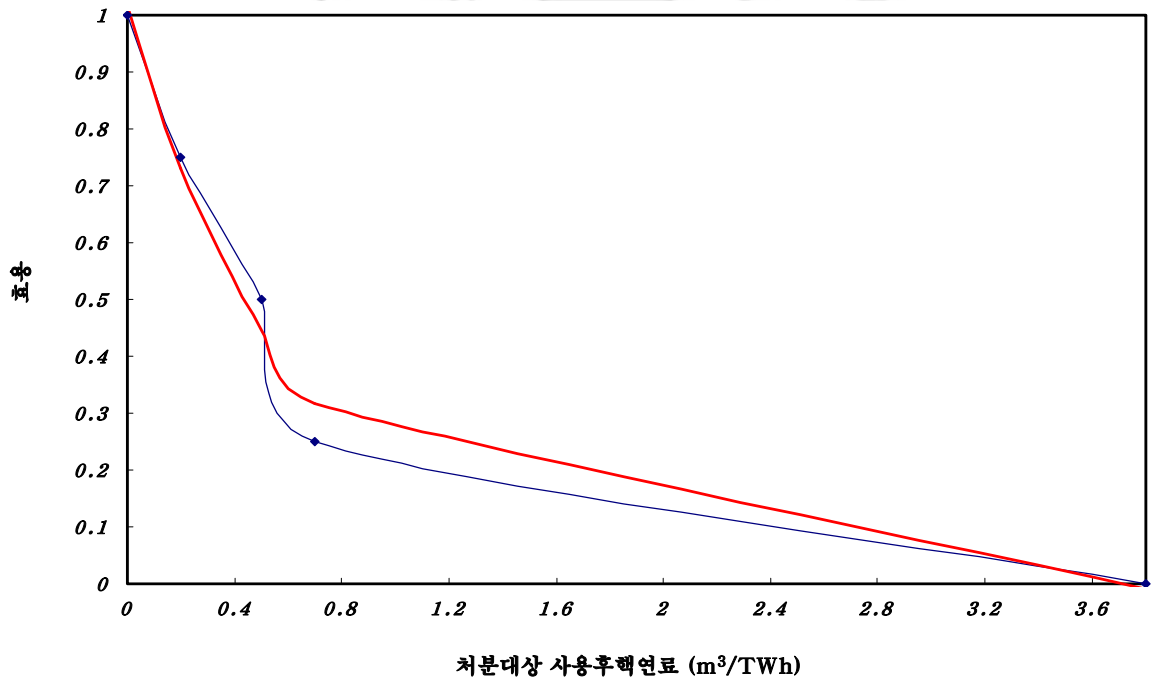


그림 24 처분대상 사용후핵연료량의 효율함수

$$u_3(x) = -2.2546x + 0.8021 \quad (10)$$

$$u_4(x) = -0.0003x^2 - 0.0074x + 1.0109 \quad (11)$$

$$u_5(x) = -4.6086x^2 + 8.8029x - 3.2047 \quad (12)$$

$$u_6(x) = -0.1956\ln(x) + 0.5579 \quad (13)$$

$$u_7(x) = 31,412e^{-x/0.64} - 0.325 \quad (14)$$

$$u_8(x) = 1.5592x^2 - 0.5557x - 0.0149 \quad (15)$$

$$u_9(x) = -3.8143x^2 + 3.7742x + 0.0653 \quad (16)$$

다음은 k_1, k_2, k_3 를 구하는 단계이다. k_1, k_2, k_3 는 상수로서, 요소의 상대적 중요도를 의미한다. 일반적으로 다요소효용함수이론에서는 k_1, k_2, k_3 를 구하기 위하여 각각의 효용함수를 표준화한 후 확률등가를 사용한다. 본 연구에서는 대신 계층분석과정에서의 가중치 산정방법(고유벡터법)을 사용하였다.

다음은 각 요소의 상대적 중요도를 구하기 위하여 수행한 쌍대비교의 결과이다.

표 7 쌍대비교의 결과

	지속가능성	환경친화성	경제성	핵확산저항성	기술성
지속가능성	1	3	4	2	5
환경친화성	1/3	1	2	1/2	3
경제성	1/4	1/2	1	1/3	2
핵확산저항성	1/2	2	3	1	4
기술성	1/5	1/3	1/2	1/4	1

위의 표 7에 나타난 쌍대비교의 결과를 이용하여 각 요소의 상대적 중요도를 다음과 같이 구하였다. 각 요소에 대한 세부요소의 경우, 상대적 중요도는 서로 동일하다고 가정하였다. 일관성지수는 0.015로서 쌍대비교의 결과는 수행시 합리적인 일관성을 갖는 것으로 판단된다.

$$\underline{\underline{A}} = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 4 & 2 & 5 \\ 1/3 & 1 & 2 & 1/2 & 3 \\ 1/4 & 1/2 & 1 & 1/3 & 2 \\ 1/2 & 2 & 3 & 1 & 4 \\ 1/5 & 1/3 & 1/2 & 1/4 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\underline{\underline{A}}_{norm} = \begin{pmatrix} 0.4380 & 0.4390 & 0.3810 & 0.4898 & 0.3333 \\ 0.1460 & 0.1463 & 0.1905 & 0.1224 & 0.2000 \\ 0.1095 & 0.0732 & 0.0952 & 0.0816 & 0.1333 \\ 0.2190 & 0.2927 & 0.2857 & 0.2449 & 0.2667 \\ 0.0876 & 0.0488 & 0.0476 & 0.0612 & 0.0667 \end{pmatrix}$$

$$k_1 = \frac{0.4380 + 0.4390 + 0.3810 + 0.4898 + 0.3333}{5} = 0.4162 \quad (17)$$

$$k_2 = \frac{0.1460 + 0.1463 + 0.1905 + 0.1224 + 0.2000}{5} = 0.1611 \quad (18)$$

$$k_3 = \frac{0.1095 + 0.0732 + 0.0952 + 0.0816 + 0.1333}{5} = 0.0986 \quad (19)$$

$$k_4 = \frac{0.2190 + 0.2927 + 0.2857 + 0.2449 + 0.2667}{5} = 0.2618 \quad (20)$$

$$k_5 = \frac{0.0876 + 0.0488 + 0.0476 + 0.0612 + 0.0667}{5} = 0.0624 \quad (21)$$

위의 결과를 토대로 1) 직접처분주기, 2) DUPIC 핵연료주기, 3) 열중성자 재활

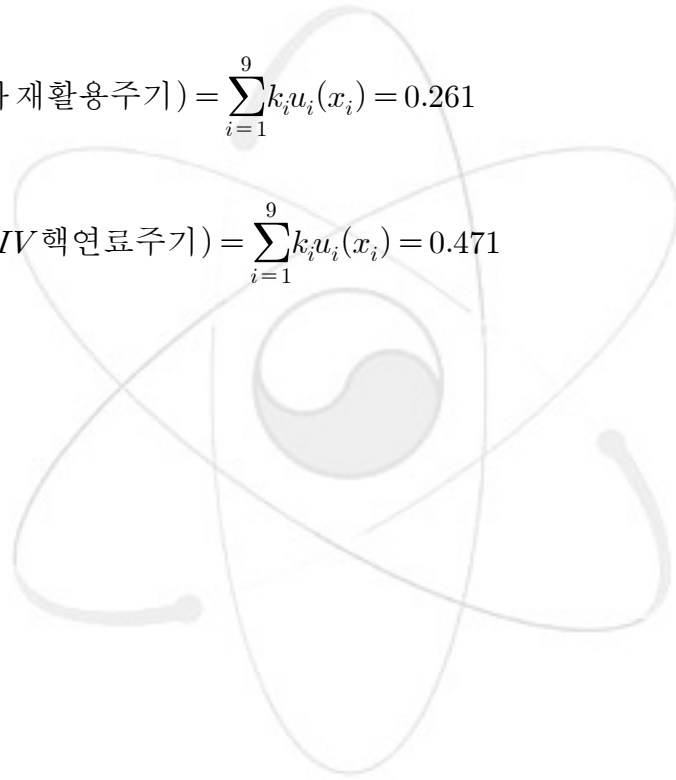
용주기, 4) GEN-IV 핵연료주기 등 네 가지의 핵연료주기 시나리오를 종합적으로 평가한 결과, GEN-IV 핵연료주기가 가장 우수한 것으로 나타났다.

$$u(\text{직접처분주기}) = \sum_{i=1}^9 k_i u_i(x_i) = 0.199 \quad (22)$$

$$u(\text{DUPIC 핵연료주기}) = \sum_{i=1}^9 k_i u_i(x_i) = 0.254 \quad (23)$$

$$u(\text{열중성자 재활용주기}) = \sum_{i=1}^9 k_i u_i(x_i) = 0.261 \quad (24)$$

$$u(\text{GEN-IV 핵연료주기}) = \sum_{i=1}^9 k_i u_i(x_i) = 0.471 \quad (25)$$



6. 결론

본 연구에서는 다요소효용함수이론(MAUT)과 계층화분석법(AHP)을 이용하여 1) 직접처분주기, 2) DUPIC 핵연료주기, 3) 열중성자 재활용주기, 4) GEN-IV 핵연료주기 등 네 가지의 핵연료주기 시나리오를 종합적으로 분석하였다.

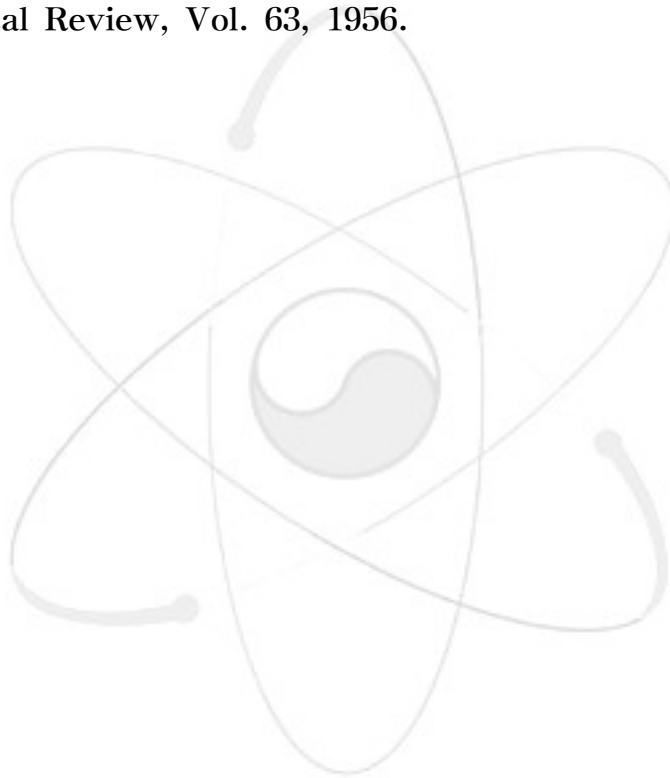
우리나라에 적용하기 위한 최적의 핵연료주기를 도출하기 위하여 지속가능성 · 환경친화성 · 핵확산저항성 · 경제성 및 기술성의 다섯 가지 요소를 고려하였으며, 각 요소는 다시 천연우라늄 소요량(지속가능성), 처분대상 사용후핵연료 · 처분대상 마이너 악티나이드 · 고준위폐기물 지하굴토량(환경친화성), 사용후핵연료 조성 · 플루토늄 재고량(핵확산저항성), 핵연료주기 비용(경제성), 기술개발 가능성 · 인허가 난이도(기술성) 등 1 내지 3개의 세부요소로 나누었다.

이 네 가지의 핵연료주기 시나리오를 종합적으로 평가한 결과, GEN-IV 핵연료주기가 가장 우수한 것으로 나타났다.

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, Vol. 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] M. EVANS, N. HASTINGS and B. PEACOCK, Statistical Distribution (2nd Edition), pp. 31-37, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1993.
- [6] A. SALTELLI and J. MARIVOET, “Performance of Non-parametric Statistics in Sensitivity Analysis and Parameter Ranking”, EUR-10851, Commission of the European Communities, 1987.
- [7] OECD/NEA, Advanced Nuclear Fuel Cycles and Radioactive Waste Management, 2006.

- [8] R.L. Keeney and H. Raiffa. *Decision with Multiple Objectives: Preference and Value Tradeoffs*. Cambridge University Press, New York, 1993.
- [9] T. L. Saaty, *Multicriteria Decision Making: The Analytic Hierarchy Process*, Vol. 1, AHP Series (extended edition), RWS Publications, 1990.
- [10] G. A. Miller, “The Magical Nuclear Seven Plus or Minus Two: Some Limits on Our Capacity for Processing Information”, *Psychological Review*, Vol. 63, 1956.



서 지 정 보 양 식					
수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드		
KAERI/TR-3413/2007					
제목/부제	핵연료주기 시스템 분석 (II)				
연구책임자 및 부서명 (TR, AR인 경우 주저자)	고원일 (선진핵주기시스템공학그룹)				
연구자 및 부서명	권은하 (선진핵주기시스템공학그룹) 윤지섭 (선진핵주기시스템공학그룹) 박성원 (지속가능원자력시스템개발본부)				
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구소	발행년	2007. 4.
페이지	51 p.	도표	있음(0), 없음()	크기	26 Cm.
참고사항					
비밀여부	공개(O), 대외비(), _ 급비밀, 소내만 공개 ()		보고서종류	기술보고서	
연구위탁기관		계약번호			
초록 (15-20줄내외)	<p>본 보고서에서는 우리나라의 원자력발전현황 및 현재 추진되고 있는 원자력진흥종합계획 등을 고려하여 향후 우리나라에 적용가능한 네 가지의 핵연료주기 시나리오-직접처분주기, DUPIC 핵연료주기, 열중성자 재활용주기, GEN-IV 핵연료주기-를 설정하고 각각의 시나리오를 지속가능성 측면, 환경친화성 측면, 핵확산저항성 측면, 경제성 측면 그리고 기술성 측면에서 각각 분석하였다.</p> <p>그러나, 모든 정책결정이 그러하듯이 하나의 특정 핵연료주기가 지속가능성·환경친화성·핵확산저항성·경제성·기술성 등 모든 측면에서 우수할 수는 없으며, 그 결과 핵연료주기별 우열의 비교가 쉽지 않음을 예상할 수 있다. 이러한 점을 감안하여, 본 연구에서는 의사결정의 목표, 또는 평가기준이 다수이며 복합적인 경우의 상호 배반적인 대안들에 대한 체계적인 평가를 지원하는 의사결정기법 중의 하나인 다요소효용합수이론(MAUT: Multi-Attribute Utility Theory)과 계층화분석법(AHP: Analytic Hierarchy Process)을 이용하여 향후 우리나라에 적용가능한 네 가지의 핵연료주기 시나리오를 종합적으로 분석하였다.</p> <p>이 네 가지의 핵연료주기 시나리오를 종합적으로 평가한 결과, GEN-IV 핵연료주기가 가장 우수한 것으로 나타났다.</p>				
주제명키워드 (10단어내외)	직접처분주기, DUPIC 핵연료주기, 열중성자 재활용주기, GEN-IV 핵연료주기, 지속가능성, 환경친화성, 핵확산저항성, 경제성, 다요소효용합수이론, 계층화분석법				

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.	
KAERI/TR-3413/2007					
Title/Subtitle		Nuclear Fuel Cycle System Analysis II			
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) 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	2007. 4.
Page	51 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 that are likely adopted by the Korean government, considering the current status of nuclear power generation and the 2nd Comprehensive Nuclear Energy Promotion Plan (CNEPP) - Once-through Cycle, DUPIC Recycle, Thermal Reactor Recycle and GEN-IV Recycle. The paper then evaluates each option in terms of sustainability, environment-friendliness, proliferation-resistance, economics and technologies.</p> <p>Like all the policy decision, however, a nuclear fuel cycle option can not be superior in all aspects of sustainability, environment-friendliness, proliferation-resistance, economics, technologies and so on, which makes the comparison of the options extremely complicated. Taking this into consideration, the paper analyzes all the four fuel cycle options using the Multi-Attribute Utility Theory (MAUT) and the Analytic Hierarchy Process (AHP), methods of Multi-Attribute Decision Making (MADM), that support systematical evaluation of the cases with multi- goals or criteria and that such goals are incompatible with each other.</p> <p>The analysis shows that the GEN-IV Recycle appears to be most competitive.</p>					
Subject Keywords (About 10 words)		Once-through Cycle, DUPIC Recycle, Thermal Reactor Recycle, GEN-IV Recycle, Sustainability, Environment-friendliness, Proliferation-resistance, Economics, MAUT, AHP			