

KAERI/TR-3928/2009

핵연료주기시스템의 핵확산저항성 분석

Analysis of Proliferation Resistance of
Nuclear Fuel Cycle Systems

KAERI

2009. 11

한국원자력연구원

제 출 문

한국원자력연구원장 귀하

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

2009. 11



KAERI

주 저 자 : 장 홍 래
공 저 자 : 고 원 일
김 호 동

목 차

1. 서론	1
2. 핵연료주기 시나리오	2
2.1 핵연료주기 개요	2
2.2 핵연료주기 시나리오 선정	4
3. 핵연료주기 시나리오별 물질흐름 및 시설분석	6
3.1 물질흐름	6
3.2 시설공정 및 전용대상 핵물질 분석	11
3.2.1 시나리오 별 핵심시설	12
3.2.2 시나리오 별 전용대상 핵물질	14
4. 핵확산저항성 평가 방법	18
4.1 핵확산저항성 평가를 위한 이론적 배경	18
4.1.1 다요소효용함수이론	18
4.1.2 계층화분석법	20
4.2 핵확산저항성 평가기준	24
4.2.1 물질특성에 따른 핵확산저항성 인자	25
4.2.2 기술 및 시설 특성에 따른 핵확산저항성 인자	36
4.2.3 제도적 차원의 핵확산저항성 인자	44
5. 핵연료주기 시나리오별 핵확산저항성 분석종합분석	48
5.1 핵확산저항성 평가인자에 대한 쌍대비교 및 가중치 분석	49
5.2 핵연료주기 시나리오 별 핵확산저항성 평가	51
5.3 핵확산저항성 평가인자의 가중치에 대한 민감도 분석	52
6. 결론	56
참고자료	58

표 목 차

표 1. 핵확산저항성 평가 기준 및 인자	5
표 2. 검토대상 핵연료주기	6
표 3. 원자로 특성	6
표 4. 사용후핵연료 처리과정에서의 발생 고준위폐기물	7
표 5. 대상핵연료주기에서의 전용가능 핵물질 및 검토대상 전용핵물질	16
표 6. 전용대상 핵물질의 물리화학적 특성	17
표 7. 핵확산저항성 평가기준 및 효용범위	24
표 8. 전용대상 핵물질의 Pu농도 및 단위 SQ 또는 다발 당 방사선 준위(rem)	26
표 9. 탐지성에 대한 효용함수	28
표 10. 대안 핵연료주기에 대한 탐지성 방벽의 효용함수 추정치	28
표 11. 전용대상 핵물질의 Pu농도 및 1 SQ 에 해당하는 핵물질 질량	29
표 12. 화학적 방벽에 대한 효용 값	30
표 13. 대안 핵연료주기에 대한 화학적 방벽의 효용함수 값	31
표 14. 원자로 노형별 핵물질의 비율	32
표 15. 동위원소방벽의 효용입력변수에 대한 값	35
표 16. 대안 핵연료주기들의 시설 비 매력성에 대한 효용함수 값	37
표 17. 시설 접근성에 대한 효용입력 변수	39
표 18. 1 TWh 전력생산에 필요한 핵연료주기별 핵물질 가용량	40
표 19. 핵연료주기 별 시설탐지성에 대한 효용함수 값	42
표 20. 민감기술 습득에 대한 효용함수 값	43
표 11. 핵확산저항성 평가를 위한 기본 자료	43
표 21. 핵연료주기에 대한 시간에 대한 효용함수 값	43
표 22. 안전조치성에 대한 효용함수 값	45
표 23. 접근통제 및 물리적 방호에 대한 효용함수 값	46
표 24. 위치에 대한 효용함수 값	47
표 25: 제 1차 단계의 핵확산저항성 방벽의 중요도에 대한 쌍대 비교	50
표 26. 제 2 단계의 핵확산저항성 방벽의 중요도에 대한 쌍대 비교	50
표 27. 동위원소방벽 효용함수(u_5)에 대한 평가인자에 대한 중요도 비교	50
표 28. 시설접근성 효용함수(u_7)에 대한 평가인자의 중요도 비교	50
표 29. 덧셈독립성을 가진 핵확산저항성 평가식(7)의 가중치 값	51

그림 목 차

그림 1. 상용화된 핵연료주기	3
그림 2. 시나리오 1 (직접처분주기)의 물질흐름	7
그림 3. 시나리오 2 (습식재처리주기)의 물질흐름	8
그림 4. 시나리오 3 (DUPIC 핵연료주기)의 물질흐름	9
그림 5. 사나리오 4 (파이로-고속로 핵연료주기)의 물질흐름	10
그림 6. 시나리오 5 (선진습식처리-고속로 핵연료주기)의 물질흐름	11
그림 7. 직접처분주기 공정도	12
그림 8. 습식재처리주기의 공정도	13
그림 9. DUPIC 핵연료 제조공정	13
그림 10. Pyroprocessing 공정개념도	14
그림 11. UREX+1a 공정 개념도	15
그림 12. 방사선조사선량 계산을 위한 전용대상 핵물질의 기하학적 사양	17
그림 13. 방사선방벽에 대한 효용함수	27
그림 14. 핵물질 가용량에 대한 효용함수질량 및 체적에 대한 효용함수	40
그림 15. 평가계층구조	48
그림 16. 제2단계 평가인자에 대한 가중치에 따른 핵연료주기 시나리오 별 PR지수 ..	53
그림 17. 물질특성방벽의 가중치를 80%로 증가시켰을 때의 핵연료주기 시나리오 별 PR 지수	54
그림 18. 제2단계 평가인자의 가중치 변화에 따른 동적민감도 추세	55

1. 서론

최근 전 세계적으로 원자력은 중장기적인 에너지원으로서 새로운 관심의 초점이 되고 있으며, Generation IV International Forum (GIF) 과 International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (IAEA-INPRO), 그리고 미국이 중심이 되어 추진이 되고 있는 Global Nuclear Energy Partnership (GNEP) 등의 프로그램들을 이용하여 향후 개발이 추진되는 원자력시스템이 지속가능성 (Sustainability), 안전성 (Safety and Security), 환경친화성(Environmental Friendliness), 핵확산저항성 (Proliferation Resistance), 경제성(Economics)등 여러 분야에 있어서 기본 충족조건 규명에 노력이 경주되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 우리나라의 원자력발전 현황 및 현재 추진되고 있는 원자력진흥종합계획 등을 고려하여 향후 우리나라에 적용 가능하다고 판단이 되는 다섯 가지 핵연료주기 시나리오에 대하여, 정량적으로 핵확산저항성을 비교 분석하였다. 여기에서 핵확산저항성이라 함은 ‘어떤 국가가 핵무기제조를 위하여 핵물질을 전용하거나 비밀리에 핵물질을 생산 또는 전용하거나 민감 기술을 오용하는 것을 방지하는 원자력시스템의 특성’을 나타내며 (IAEA STR-332, December 2002), 핵확산저항성을 나타내기 위해 핵확산방벽(Proliferation Barrier) 개념을 도입하였다. 핵확산방벽이 크다는 것은 경우에 따라 다르지만 핵무기를 제조하는 과정에서 핵물질 전용이 기술적으로 어렵거나 또는 실패를 유발할 확률이 크고, 경비가 많이 든다거나 시간이 많이 걸린다는 의미를 가질 수 있다. 즉 핵무기제조과정에서 극복해야 하는 방벽이 높다는 의미로 해석을 할 수 있다.

각 핵연료주기에 대한 장기적인 핵확산저항성은 물질적 특성, 핵물질 전용을 위한 시설의 접근성 및 기술적 특성, 그리고 안전조치 등 시설에 적용되는 제도적 장벽 등 크게 세 가지 분야에 대하여 평가가 이루어질 수 있는데, 이 연구에서는 지금까지 세계적으로 검토된 것 중 가장 포괄적이라 여겨지는 TOPS Report 에 보고되어 있는 인자들을 사용하였으며 표1에서 보는바와 같이 물질적 특성에 대해서는 다시 다섯 가지의 인자로, 시설의 기술적 특성은 시설의 비 매력성, 시설 접근성, 핵물질의 가용량, 전용 탐지성, 민감 기술의 습득, 시간 등 여섯 가지의 인자로, 제도적 장벽은 안전조치, 접근 통제 및 보안, 그리고 시설의 위치 등 세가지 인자들로 나누어 정량적인 평가를 시도하였다. 그러나 이들 14가지 핵확산저항성 인자는 서로 다른 척도를 가지며, 각각의 중요도도 각기 다를 수 있고, 또한 핵확산저항성의 경향이 상호 배반적으로 나타날 수 있기 때문에, 그 결과 각각의 핵연료주기 핵확산저항성 정도의 우열성을 쉽게 비교하지 못하게 된다.

따라서, 본 연구에서는 향후 우리나라에 적용 가능한 다섯 가지의 핵연료주기 시나리오에 대하여 핵확산저항성을 비교 분석하기 위하여 평가기준이 다수이며 상호 배반적인 대안들에 대한 체계적인 평가를 지원하는 의사결정기법 중의 하나인 다요소효용함수이론(MAUT: Multi-Attribute Utility Theory)과 계층화분석법(AHP: Analytic Hierarchy Process)을 도입하여 각 핵연료주기 시나리오 별 비교분석을 수행하였다.

표 1. 핵확산저항성 평가 기준 및 인자

PR 분야	핵확산저항성 내용	설명	평가방법	
물질	방사선 방벽	전용되는 물질의 방사선 준위	정량평가	
	탐지성	안전조치에 의한 탐지성 : 방사선신호를 탐지하는 과정에서 감시장비가 수동형이나 능동형이냐의 여부	정성평가	
	질량과 체적	전용물질의 질량과 물리적인 형태(크기)	정량평가	
	화학적 방벽	전용물질의 화학적 조성 : 플루토늄 금속으로의 전환의 어려움 정도	정성평가	
	동위원소 방벽	임계질량 : Pu, U235 혹은 U233		정량평가
		농축도 : U235 혹은 U233		정량평가
		자발중성자 발생량 : Pu240, Pu242		정량평가
		열 발생률 : Pu238		정량평가
	방사선발생량 : Pu내의 Pu240, Pu242 조성, U233내의 U232의 조성		정량평가	
시설의 기술적 특성	시설의 비 매력성	시설의 용량, 개조비용, 개조시간, 안전성	정성평가	
	시설 접근성	운전형태 (수동, 자동, 원격운전)	정성평가	
		접근을 위한 특정한 장비의 필요성	정성평가	
		핵연료 교체주기 등과 같은 접근 횟수	정성평가	
	핵물질의 가용량	시설의 연간 핵물질 사용량	정량평가	
	전용 탐지성	Item counting 혹은 bulk counting 여부, 측정 불확실성, 시설 MUF	정량평가	
	민감기술의 습득	핵무기프로그램에 응용 가능한 민감기술의 습득정도	정성평가	
시간	핵물질이 잠재적 전용자에게 노출되는 시간	정성평가		
시설의 제도적 장벽	안전조치	안전조치의 효율성 : 탐지제한성, 탐지기 혹은 감시기의 반응시간	정성평가	
	접근통제 및 보안	접근절차, 물리적 방호 등	정성평가	
	위치	동일부지(collocation), 수송시간 등	정성평가	

2. 핵연료주기 시나리오

2-1. 핵연료주기 개요

현재 상용화되어 있는 핵연료주기는 경제적이고 환경친화적이며 안전한 에너지를 구축하려는 지난 반세기 동안의 개발의 결과라 할 수 있다. 초기의 핵연료주기 개발은 핵물질의 군사적인 이용에 의해 주도되었으나, 그 후에는 민간 이용을 위한 원전의 유형에 따라 주도되었다.

1950년대 초반에 많은 원자로개념이 도입되었으며, 대부분의 OECD 국가에서는 경수로형이, 그리고 캐나다에서는 중수로형이 가장 주요한 노형으로 부상하였다. 가스냉각로나 고속로와 같은 다른 원자로형도 건설되었지만 상업적 이용은 제한적이었다. 주로 정치적인 선택에 의해 사용후핵연료의 처리에 있어서 근본적으로 다른 두 가지 다른 핵연료주기 대안이 개발되었다. 하나는 사용후핵연료를 폐기물로 취급하는 직접 처분주기이며, 다른 하나는 사용후핵연료를 재처리하여 플루토늄을 회수하여 경수로에 재활용하는 재활용 핵연료주기이다. 이 두 가지 핵연료주기 기술은 개발을 통해 모두 성숙 단계에 이르러 있다. 그림 1이 현재 세계적으로 상용화된 핵연료주기를 보여주고 있다.

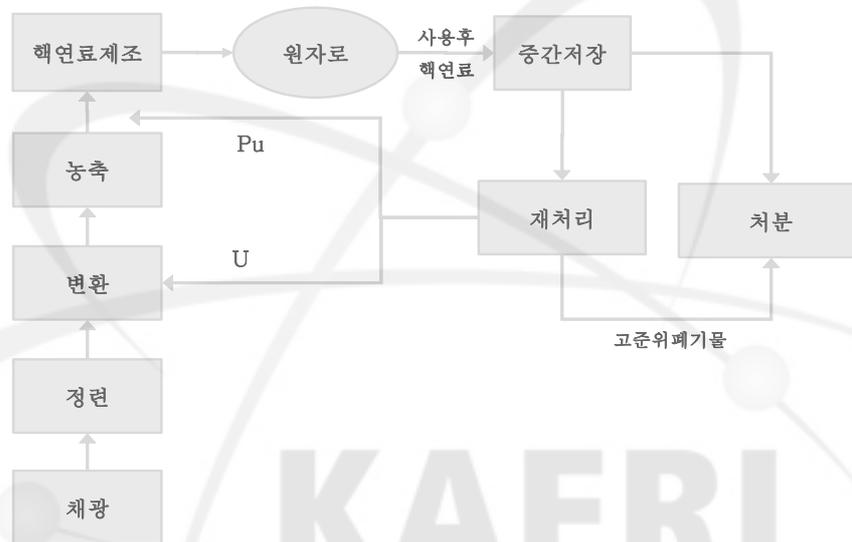


그림 1. 상용화된 핵연료주기

이러한 핵연료주기는 크게 채광/정련, 변환, 농축, 가공을 포함하는 선행핵연료주기와 저장, 수송, 재처리 등을 포함하는 후행핵연료주기로 구분하고 있다.

모든 핵연료주기의 시작은 우라늄 같은 핵분열이 가능한 원료물질을 채굴하는 것으로 시작이 되며, 정련과정을 거쳐 최종산물인 약 70%의 우라늄을 함유하고 있는 『Yellow Cake (U_3O_8)』로 생산되어진다. 변환과정에서는 『Yellow Cake』가 농축공정에 사용되는 육불화우라늄(UF_6)의 형태로 변환되거나, 농축이 필요없는 Magnox나 CANDU형 원자로의 경우에는 금속우라늄이나 UO_2 형태로 변환된다.

우라늄 농축은 천연우라늄의 두 가지 중요한 방사성동위원소인 ^{235}U 와 ^{238}U 를 부분적으로 분리하여 ^{235}U 의 비율이 천연우라늄에서의 비율(0.711wt%)보다 높은 농축 우라늄과 'tail'이라 불리는 감손우라늄으로 만드는 과정이다. 초기의 농축은 핵무기의 원료물질로 사용하기 위해 거의 순수한 ^{235}U 를 만드는 과정이었으며 이를 위해 많은 공정

이 고려되었었다. 제2차 세계대전 이후 우라늄 농축의 주된 방법은 기체확산법이었으며 원심분리법의 경우 비록 1940년 초반부터 관심을 받아왔지만 기술적, 공학적 문제로 인해 70년대에 와서야 상용화되었다. 현재는 전 세계적으로 기체확산법과 원심분리법이 주로 사용되고 있다.

현재 원자력발전비용의 약 20%가 핵연료주기 관련비용인데, 핵연료주기비용 가운데 약 15%가 핵연료 성형가공비용이다. 따라서 성형가공비용은 전체 원자력발전비용 가운데 단지 3%에 불과하다. 그러나 이렇게 전체 비용에서 차지하는 비중이 작음에도 불구하고 핵연료 설계와 성형가공이 원자력발전의 전체적인 경제성에 미치는 영향은 상당하다. 핵연료집합체의 신뢰도를 개선하는 것은 발전소 이용률 향상으로 이어질 수 있으며 그 결과로 총 발전비용 가운데 핵연료주기와 관련이 없는 다른 비용을 줄일 수 있다. 특히, 인출연소도의 증가는 일정한 에너지 생산에 필요한 핵연료집합체와 천연우라늄의 수요를 줄이게 되므로 핵연료 공급 및 처분량에 모두 영향을 미친다. 각국의 상황에 따라 다르긴 하지만, 이러한 인출연소도의 증가를 통해 상당한 경제적 비용을 절감할 수 있다.

원자력 산업계는 비록 일부 원자로에서 적은 양이 이용되고 있긴 하지만 경수로에서 발생하는 사용후핵연료에서 재처리된 우라늄(이하 RepU)을 재활용하기 위한 설비도 갖추고 있다. 현재 러시아와 네덜란드가 원심분리법을 사용하여 RepU의 농축을 시행하고 있으며, 최근에는 RepU의 새로운 재활용방법이 부각되고 있는데 이는 RepU와 고농축우라늄을 섞어 농축 RepU 에서의 ^{236}U 의 양을 줄이는 것이다. 이렇게 하면 중성자 흡수를 줄일 수 있고 RepU 재활용의 경제성이 향상되는 것으로 알려져 있다.

2-2. 핵연료주기 시나리오 선정

핵연료주기는 지구환경과 우리사회에 미치는 영향을 종합적으로 고려하여 결정하는 것이 중요한데, 우리나라도 이러한 핵연료주기와 우리사회, 그리고 핵연료주기와 환경간의 연결고리를 잘 파악하여 최종적인 선택을 하는 지혜가 필요하다 하겠다. 본 연구에서는 국내의 연구개발 현황과 국제적인 추세 등을 고려하여 표2에서 표시된 바와 같이 향후 우리나라에 적용될 가능성이 있는 다섯 가지의 핵연료주기 시나리오를 선정하였다.

표 2. 검토대상 핵연료주기 시나리오

직접처분(Direct disposal)주기	중간저장 후 직접처분 (Once-through Fuel Cycle)
부분 재순환주기 (Partial recycling)	습식재처리주기 (Thermal MOX Fuel Cycle)
	듀픽핵연료주기 (DUPIC Fuel Cycle)
완전재순환주기 (Full recycling)	파이로건설핵연료주기(Pyro-SFR Fuel Cycle)
	선진습식핵연료주기 (Wet-SFR Fuel Cycle)

시나리오는 크게 사용후핵연료의 직접처분 및 재활용 여부, 그리고 재활용의 경우 사용후핵연료를 부분적으로 재활용하는 경우와 완전재활용하는 경우를 상정하여 검토하였다. 그리고 소내 사용후핵연료의 저장용량이 2016년에 포화되는 점을 가정하여 모든 시나리오에서 중간저장시설이 필요하다고 다음과 같이 가정하였다.

○ 시나리오 1 (중간저장후 직접처분주기: Once-through Fuel Cycle)

PWR 사용후핵연료를 중간저장 후 재활용하지 않고 영구 처분하는 '직접처분주기'로서 최근에는 일정 시점까지 모니터링한 후 회수 가능한 형태로 처분장을 설계하고 있는 것이 최근의 추세이다.

○ 시나리오 2 (습식재처리주기: Thermal Mox Fuel Cycle)

이 경우는 PWR 사용후핵연료를 중간 저장한 후 국내에서 습식재처리(PUREX)한 후, 분리된 플루토늄을 MOX 핵연료로 가공하여 경수로(PWR)에 재사용하고 재처리에서 회수된 우라늄은 일정기간 저장한 후에 재농축하여 경수로에 재활용한다. 그리고 재처리과정에서 발생하는 고준위폐기물은 유리고화 후 심지층에 처분하며, MOX 사용후핵연료도 영구처분하게 된다.

○ 시나리오 3 (DUPIC 핵연료주기: DUPIC Fuel Cycle)

PWR 사용후핵연료를 DUPIC 핵연료로 가공하여 CANDU에서 재사용하고 DUPIC 사용후핵연료는 영구처분하는 경우이다. DUPIC 핵연료제조공정에서 발생하는 고준위 폐기물과 DUPIC 사용후핵연료는 심지층처분하게 된다. 이 경우 처분대상 PWR 사용후핵연료가 없어지면서 CANDU 원자로에서 DUPIC 핵연료의 고연소가 가능하기 때문에 처분대상 핵연료의 양이 크게 감소할 것으로 예상된다.

○ 시나리오 4 (파이로-고속로 핵연료주기: Pyro-SFR Fuel Cycle)

PWR사용후핵연료를 고온전해분리(Pyroprocessing)를 통하여 금속핵연료로 만들어 고속로(SFR)에서 재사용하고, 또한 SFR에서 태워진 SFR 사용후핵연료를 다시 고온전해분리를 통하여 다시 금속핵연료를 만들어 고속로에서 다시 태움으로서 고독성 핵종을 소멸시키는 경우이다. 또한 전해정련으로 회수된 우라늄의 일부는 고속로에서 사용되고 나머지는 향후 사용을 위하여 저장 된다. 또한 고발열핵종인 Cs 과 Sr을 분리하여 독립적으로 관리 (저장 및 자연붕괴) 한다는 가정을 하였다.

○ 시나리오 5 (선진습식-고속로 핵연료주기: Wet-SFR Fuel Cycle)

PWR 사용후핵연료를 선진습식재처리(NEXT, COEX, UREX 등) 한 후 금속핵연료를 만들어 SFR에서 재사용한 후, 다시 SFR 사용후핵연료를 선진 습식재처리하여 완전재순환하는 경우이다. 또한, 선진습식핵연료주기에서 회수된 우라늄은 중저준위폐기물로 분류가 가능한 것으로 가정하였으며, 고발열 핵종인 Cs과 Sr은 분리하여 독립적으로 관리 (저장 및 자연 붕괴) 한다는 가정을 하였다.

3. 핵연료주기 시나리오별 물질흐름 및 시설분석

3-1. 물질흐름

후행핵연료주기에 관한 국가의 정책을 수립하기 위하여서는 향후 우리나라에 적용 가능한 핵연료주기 시나리오를 설정하고, 이를 지속가능성·환경친화성·핵확산저항성·경제성·기술성 등 여러 가지 측면에서 평가하는 작업이 선행되어야 한다. 이러한 작업을 위하여서는 핵연료주기에 대한 물질흐름의 평가가 필수적이다. 따라서 이 장에서는 위에서 설정한 총 5가지 핵연료주기 시나리오에 대하여 핵확산저항성을 평가하기 위하여 1 TWh 전력생산량 당 평형상태에서의 물질흐름(1TWh 기준) 및 특성을 분석하였다. 아래 표 3은 물질흐름분석 및 계산을 위하여 사용한 원자로의 특성을 나타내고 있다. PWR와 CANDU 원자로에 대해서는 우리나라에서 가동 중인 대표원자로의 특성치를 사용하였으며, 고속로의 경우 전환율 0.6을 갖는 연소로로 가정하였다.

표 3. 원자로 특성

특성 (Characteristics)	PWR	CANDU (DUPIC fuel)	SFR
용량 (MWe)	1,000	713	600
열효율 (%)	34	33	39.4
열출력 (MWt)	2,941.2	2,161	1523.4
Load Factor	0.8	0.9	0.85
PDF (Fill Power Day)	290	-	332
노심 핵연료 물질 (tHM)	69	86.6	20.3
전환율	-	-	0.6067

한편, 평형주기별로 발생하는 고준위폐기물량을 산정하기 위하여 사용후핵연료의 처리공정에서 발생하는 폐기물을 아래와 같이 가정하였다.

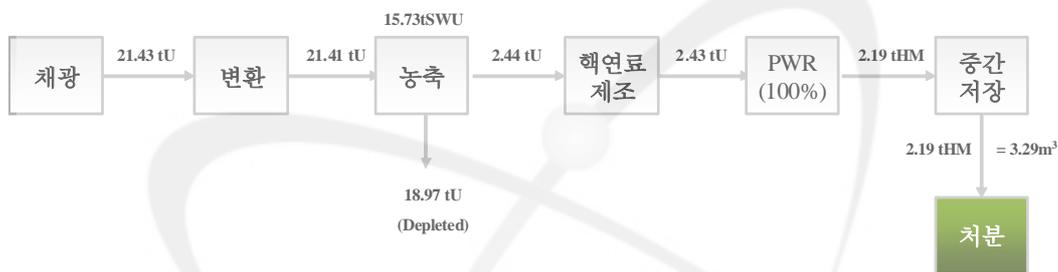
표 4. 사용후핵연료 처리공정에서의 발생 고준위폐기물

처리 공정	고준위폐기물 체적(m ³ /tHM)	참고문헌
파이로 건식처리	0.033	한국방사성폐기물학회보고서 ¹⁾
PUREX	0.115	OECD/NEA 보고서 ²⁾
OREX/AIROX	0.125	DUPIC 기술보고서 ³⁾
사용후핵연료	1.5	OECD/NEA 보고서

- 이건재 외, “원전연료 순환정책 추진방안 연구”, 한국방사성폐기물학회, (2008) : 한국원자력연구원 파이로팀에서 연구개발 중인 파이로 공정에서의 목표치를 인용하고 있다. 따라서 0.033 m³/tHM은 파이로 폐기물처리공정 연구개발이 성공하는 경우에 달성 가능한 수치라 할 수 있다.
- The Economics of the Nuclear Fuel Cycle, Organization for Economic Cooperation and Development, Nuclear Energy Agency (1993).
- 고원일 외, “Cost Evaluation of a Commercial-Scale DUPIC Fuel Fabrication Facility (Part II) - Preliminary Conceptual Design”, KAERI/TR-1373/99 (1999).

○ 시나리오 1 (중간저장 후 직접처분주기)

직접처분주기에서는 다음 그림 1과 같이 PWR의 사용후핵연료를 일정기간 중간저장한 후에 영구처분하게 된다. 계산 및 분석을 위하여 PWR 핵연료의 경우, 초기농축도를 4.30 wt.%, 방출연소도를 50 GWd/MtHM로 가정하였다. 필요 우라늄량은 21.43 tU/TWh이며, 처분대상 사용후핵연료는 2.19 tHM로서 이는 3.29 m³/TWh에 해당하는 것으로 나타났다. 계산의 단순화를 위하여 각 공정별 물질 유실량은 “0”으로 가정하였다.



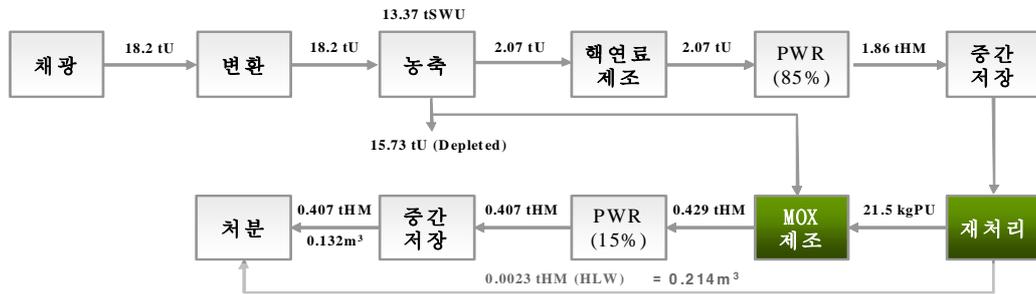
	PWR
Enrichment	
Natural uranium	0.71% 235U
Depleted uranium	0.25% 235U
Enriched uranium	4.30% 235U
Fuel Burnup	UO ₂ 50 GWd/tHM

그림 2. 시나리오 1 (직접처분주기)의 물질흐름

○ 시나리오 2 (습식재처리주기: Thermal MOX Fuel Cycle)

습식재처리 재활용주기에서는 PWR 사용후핵연료를 재처리한 후 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 2 참조).

한편, 계산과 분석을 위하여 PWR 핵연료의 경우, 직접처분주기와 동일하게 초기농축도 4.30 wt.%, 방출연소도 50 GWd/MtHM로 가정하였다. 그리고 PUREX 공정에서의 손실율을 0.1%로 가정하였으며 MOX 핵연료의 Pu 함유량을 5 wt%로 가정하였다. 1 TWh 전력생산량 당 우라늄의 필요량은 18.2 tU/TWh이며, 처분대상 사용후핵연료는 0.407 tHM/TWh으로 나타났다.



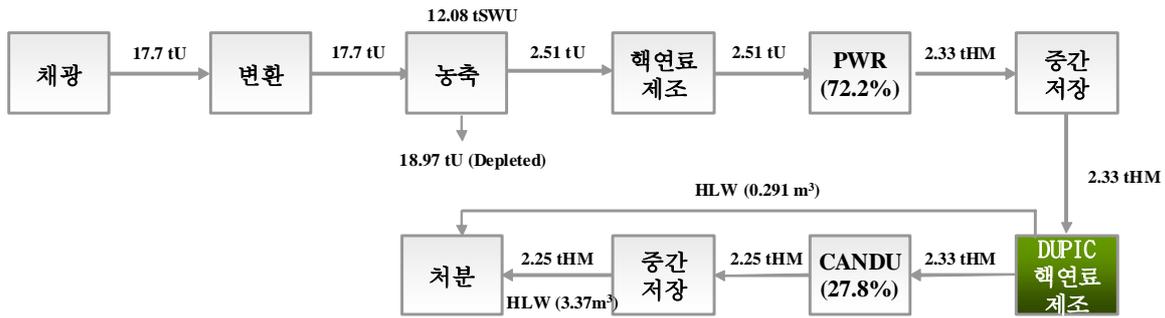
	PWR	PWR (MOX)
enrichment		
Natural uranium	0.71% 235U	
Depleted uranium	0.25% 235U	
Enriched uranium	4.30% 235U	
Fuel burnup	UO2 50 GWd/tHM	MOX 50 GWd/tHM
Pu content in fuel		7 %
reprocess	PUREX	
Loss rate	0.1%	

그림 3. 시나리오 2 (습식재처리주기) 의 물질흐름

○ 시나리오 3 (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, DUPIC핵연료를 이용한 CANDU 원자로에서의 연소도는 15 GWd/MtHM로 가정하였다. OREOX 공정에서의 물질 유실량은 0.1%로 가정하였다. 이 때 발생하는 고준위폐기물은 일정기간 저장한 후 영구처분하고, DUPIC 사용후핵연료는 재활용하지 않고 영구처분하는 것으로 가정하였다 (그림 4 참조). 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 기준 연소도로서 이는 단위전력 생산량당 평가되는 물질흐름에서 상대적으로 불리하게 작용될 수 있다.

모든 PWR 사용후핵연료가 중수로에 사용되는 평행상태를 가정하는 경우에 전력생산량은 PWR에서 72.2%, CANDU에서 27.8%인 것으로 나타났다. 즉, 동일규모의 원자로라 가정하는 경우에 PWR 대 CANDU 원자로는 약 2:1이 되어야 하는 것으로 나타났다. 물질흐름 계산결과, 우리나라의 필요량은 17.7 tU/TWh이며, 처분대상 사용후핵연료는 2.25 tHM/TWh으로 나타났다.

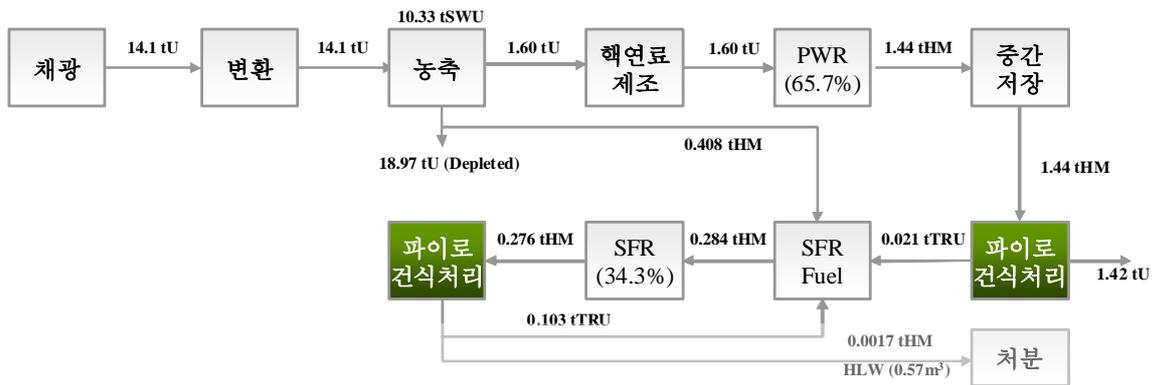


	PWR	CANDU
Enrichment Natural uranium Depleted uranium Enriched uranium	0.71% 235U 0.25% 235U 4.30% 235U	
Fuel Burnup Pu Content in fuel Pu fissile content	UO2 35 GWd/tHM	DUPIC 15 GWd/tHM 0.93 % 68%
Reprocess Loss rate Main isotopes	OREX 0.1% Kr, Xe, Cs	

그림 4. 시나리오 3 (DUPIC 핵연료주기)의 물질흐름

○ 시나리오 4 (파이로-고속로 핵연료주기)

파이로-고속로 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 사용후핵연료로부터 우라늄을 분리하여 중저준위폐기물로 보내고, 다시 TRU는 금속핵연료로 제조하여 GEN-IV 원자로인 고속로에서 연소하게 된다. 한편, 고속로 사용후핵연료는 역시 건식 처리하여 금속핵연료로 가공 후 고속로에 재순환하게 된다. PWR 핵연료의 경우, 초기 농축도 4.3 wt.%, 방출연소도 50 GWd/MtHM로 가정하였다. 고속로는 600MWe의 TRU 소멸로로 방출연소도 121 GWd/tHM이 사용되었다. 파이로공정과 고속로핵연료제조에서의 공정손실률을 0.1%로 가정하였으며, 고속로 핵연료는 금속형태로서 Pu 함유량을 33.8%라 가정하였다.



	PWR	SFR
Enrichment		
Natural uranium	0.71% 235U	
Depleted uranium	0.25% 235U	
Enriched uranium	4.30% 235U	
Fuel	UO2	Metal AcZr
Burnup	50 GWd/tHM	121 GWd/tHM
Loss rate		0.1%
Pu content		33.8%
MA content		5.6%
Reprocess	Pyroprocessing	
Loss rate	0.1%	

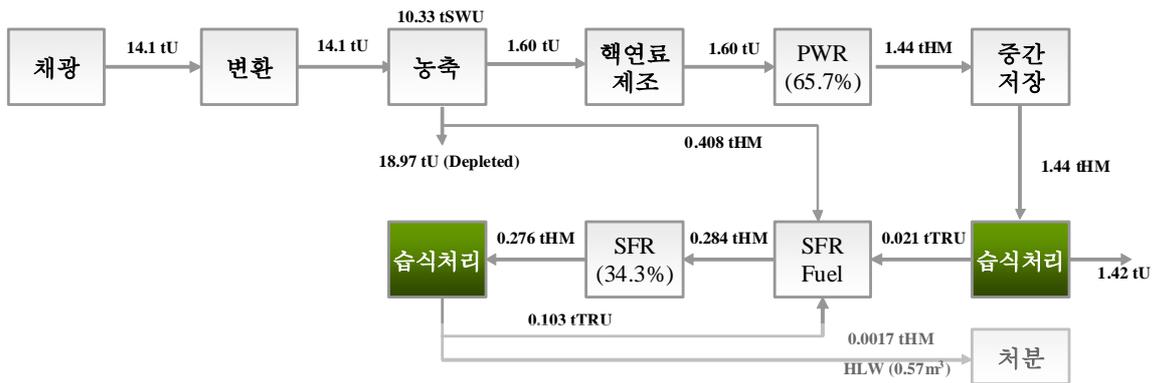
그림 5. 시나리오 4 (파이로-고속로 핵연료주기) 의 물질흐름

우라늄의 필요량은 14.1 tU/TWh이며, 모든 경수로 사용후핵연료가 고속로에 재활용됨으로써 처분대상 사용후핵연료는 없다. 다만, 처리과정에서 고준위폐기물이 발생하게 되는데, 그 양은 0.57 m³/TWh으로 나타났다.

○ 시나리오 5 (선진습식처리-고속로 핵연료주기)

모든 가정은 시나리오 4와 동일하며, 처리방법만 선진습식방법을 채택하는 경우이다. 선진습식처리-고속로 핵연료주기에서는 다음 그림 6에서 보여주듯이, 기존의 PWR 원자로 외에 고속로(SFR)를 도입하여 PWR에서 발생한 TRU를 소멸·재활용하는 주기이다. 선진습식재처리공정을 이용하여 PWR 사용후핵연료로부터 우라늄을 분리, 중저준위폐기물로 보내고, 다시 TRU는 금속핵연료로 제조하여 GEN-IV 원자로인 고속로에서 연소하게 된다. 한편, 고속로 사용후핵연료는 역시 선진습식재처리하여 금속핵연료로 가공 후 고속로에 재순환하게 된다.

PWR 핵연료의 경우, 초기농축도 4.3 wt.%, 방출연소도 50 GWd/ MthM로 가정하였다. 고속로는 600MWe의 TRU 소멸로로서 방출연소도 121 GWd/tHM이 사용되었다. 우라늄의 필요량은 14.1 tU/TWh이며, 모든 경수로 사용후핵연료가 고속로에 재활용됨으로써 처분대상 사용후핵연료가 없게 되며, 처리과정에서 발생하는 고준위폐기물은 0.57 m³/TWh으로 나타났다.



	PWR	SFR
Enrichment		
Natural uranium	0.71% 235U	
Depleted uranium	0.25% 235U	
Enriched uranium	4.30% 235U	
Fuel	UO2	TRU Oxide
Burnup	50 GWd/tHM	121 GWd/tHM
Loss rate		0.1%
Pu content		33.8%
MA content		5.6%
Reprocess	Wet reprocessing	
Loss rate	0.1%	

그림 6. 시나리오 5 (선진습식처리-고속로 핵연료주기)의 물질흐름

3-2. 시설공정 및 전용대상 핵물질 분석

위에서 설명된 5가지 대안 핵연료주기들은 그림1의 상용화된 핵연료주기에서 보는 것처럼 우라늄의 채광(mining), 정련(refining), 변환(conversion), 농축(enrichment), 그리고 핵연료제조(fabrication) 공정들이 공통적으로 구성이 되어 있으며, 특히 이중 가장 민감한 공정단계인 농축공정시설이 한국에 존재하지 않기 때문에 이 선핵연료주기에 대한 핵확산저항성분석 비교는 고려하지 않았으며, 원자로에서 방출된 이후의 후행핵연료주기에 대한 핵확산저항성이 비교 검토되었다. 그리고 후행핵연료주기 중에서도 핵확산을 위한 전용대상 핵물질을 다루는 공정 및 시설에 대하여 중점 분석이 이루어졌다. 따라서 핵확산을 위한 전용대상 핵물질을 취급하는 공정 및 시설들로는 직접처분주기의 경우 중간저장시설, 습식재처리주기의 경우 재처리공정에서 생산되는 PuO₂ 분말 (powder) 또는 MOX핵연료 제조공정에서 나오는 신 MOX 핵연료, DUPIC 핵연료주기에서는 DUPIC 핵연료제조시설에서 생산되는 Fresh DUPIC fuel, 파이로-고속로 핵연료주기에서는 파이로시설에서 생산되는 TRU ingot, 그리고 선진습식처리-고속로 주기에서는 UREX-1a 공정에서 생산되는 TRU ingot 으로 가정을 하고 각 핵연료주기 간의 핵확산 저항성을 검토하였다

3-2-1. 시나리오 별 핵심시설

○ 시나리오 1 (중간저장 후 직접처분주기)

직접처분주기에서는 PWR발전소에서 방출된 사용후핵연료를 중간저장시설에서 약 30년간 임시 보관한 연후에 영구처분장에 영구처분하게 되며, 그 흐름도가 그림7에 나타나 있다.

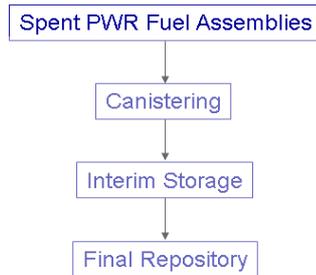


그림 7. 직접처분주기 공정도

직접처분주기에서 핵확산을 위한 전용대상 핵물질로는 PWR 원자로에서 중간저장시설로 운반되는 사용후핵연료와 그후 중간저장시설에 보관(30년간)되어 있는 사용후핵연료가 전용대상 핵물질로 가정하였다.

○ 시나리오 2 (습식재처리주기: Thermal MOX Fuel Cycle)

습식재처리주기의 후행핵연료주기는 그림3에서 보는 바와 같이 습식재처리공정과 MOX 핵연료제조 공정이 가장 민감한 시설이 된다. 이들 재처리공정과 MOX 제조공정을 그림으로 표시하면 그림8과 같으며, 재순환 된 MOX 핵연료는 PWR 원자로에서 방출된 후 더 이상 재처리하지 않고 중간저장을 거쳐 영구처분하게 된다.

○ 시나리오 3 (DUPIC 핵연료주기: DUPIC Fuel Cycle)

그림 4에 보여지는 DUPIC 핵연료주기에서는 화학적 변환공정이 없는 순수한 열공학적 방법으로 PWR 사용후핵연료에 남아있는 핵분열물질을 회수하여 CANDU 원자로에서 재사용하는 핵연료주기로서, 사용후핵연료 재순환공정인 DUPIC 핵연료제조시설이 가장 민감한 시설이 된다. 그림 9에서 보는 것처럼 PWR에서 방출된 사용후핵연료는 기계적으로 disassemble 및 dismantle 된 후 OREOX (Oxidation and REDuction of OXide fuel) 공정을 거쳐 resinterable 분말로 변환이 되는데, 이 분말은 다시 pelletization 과 일반 기계적인 공정을 거쳐 핵연료봉으로 제작이 되는데 이 모든 공정은 핵연료물질이 방사선을 포함하고 있기 때문에 핫셀 내에서 원격조작을 통하여 이루어지게 된다. 이들 공정 안에서 핵연료물질은 pellet 분말 형태로 이동이 되며, 공정 중

에서의 폐기물은 사용후핵연료로부터 나오는 기계부품들과 핵연료물질을 취급할 때 나오는 가스 및 휘발성 성분의 핵분열 물질로 이루어진다. 그리고 DUPIC 핵연료주기는 전체가 건식처리공법이기 때문에 액체폐기물은 생산이 되지 않는다.

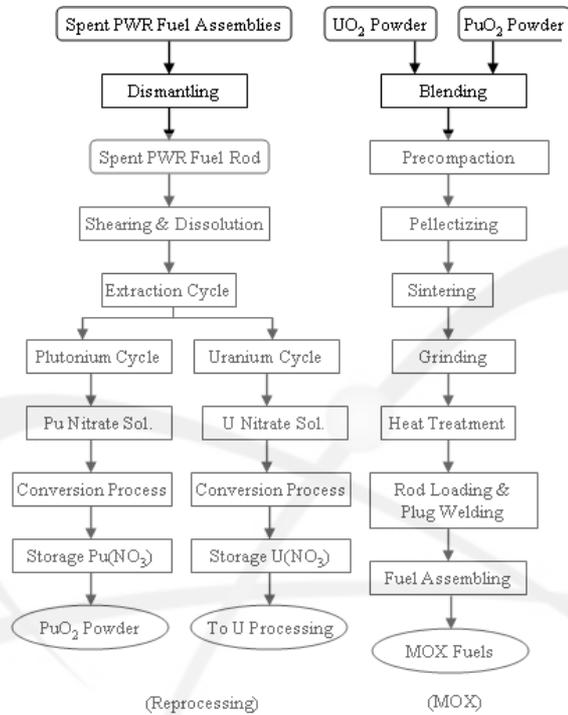


그림 8. 습식재처리주기의 공정도

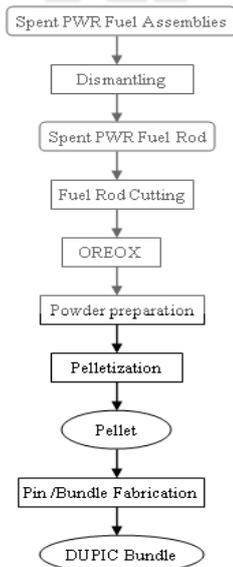


그림 9. DUPIC 핵연료 제조공정도

○ 시나리오 4 (Pyro-고속로 핵연료주기)

파이로-고속로 핵연료주기는 시나리오 2의 습식 재처리공법을 대신하여 고온전해분리(pyroprocessing)기술을 이용하여 PWR에서 생성된 TRU(Transuranic elements)를 분리하여 SFR고속로에서 소멸·재활용하는 핵연료주기로서 그림5에서 보는 바와 같이 PWR 사용후핵연료에서 분리된 우라늄은 중저준위 폐기물로 처리되고, TRU 는 금속핵연료로 제조되어 GEN-IV 원자로인 고속로에서 연소하게 된다. 한편 고속로 사용후핵연료는 다시 건식 처리되어 금속핵연료로 가공된 후 다시 고속로에 재순환하게 된다.

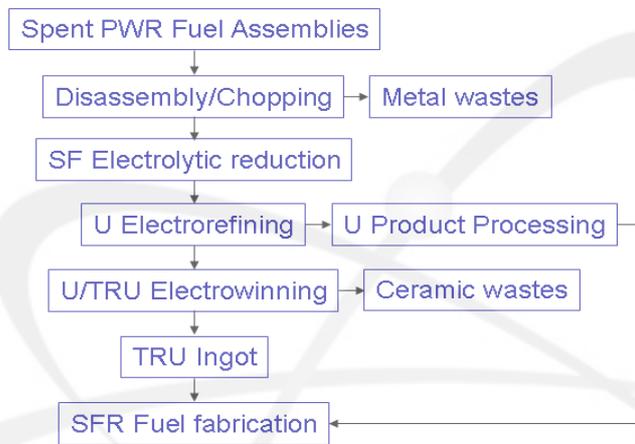


그림 10. Pyroprocessing 공정개념도

○ 시나리오 5 (선진습식처리-고속로 핵연료주기)

선진습식처리-고속로 핵연료주기의 경우도 파이로-고속로 핵연료주기와 마찬가지로 PWR 사용후핵연료의 핵분열성 물질인 TRU가 고속로의 핵연료로 재사용되는 순환 주기이지만, 단지 사용후핵연료 처리공정이 파이로 건식처리 대신에 선진습식방식으로 이루어진다. 세계적으로 COEX, NEXT, UREX 등, 여러 가지 선진형 습식처리공정이 개발되고 있으며, 본 연구에서는 미국에서 개발 중인 UREX+1a 공정을 가정하여 핵확산 저항성을 비교 평가하였다.

3-2-2. 시나리오 별 전용대상 핵물질

각 핵연료주기 시나리오에 있어서 핵확산을 위한 전용대상 핵물질을 분류하면 표 5와 같다. 그리고 핵연료주기의 모든 공정 및 시설 중에서 핵확산저항성 측면에서 가장 전용가능성이 큰 시설 및 대상핵물질에 대해서만 핵확산저항성을 비교 평가하였다.

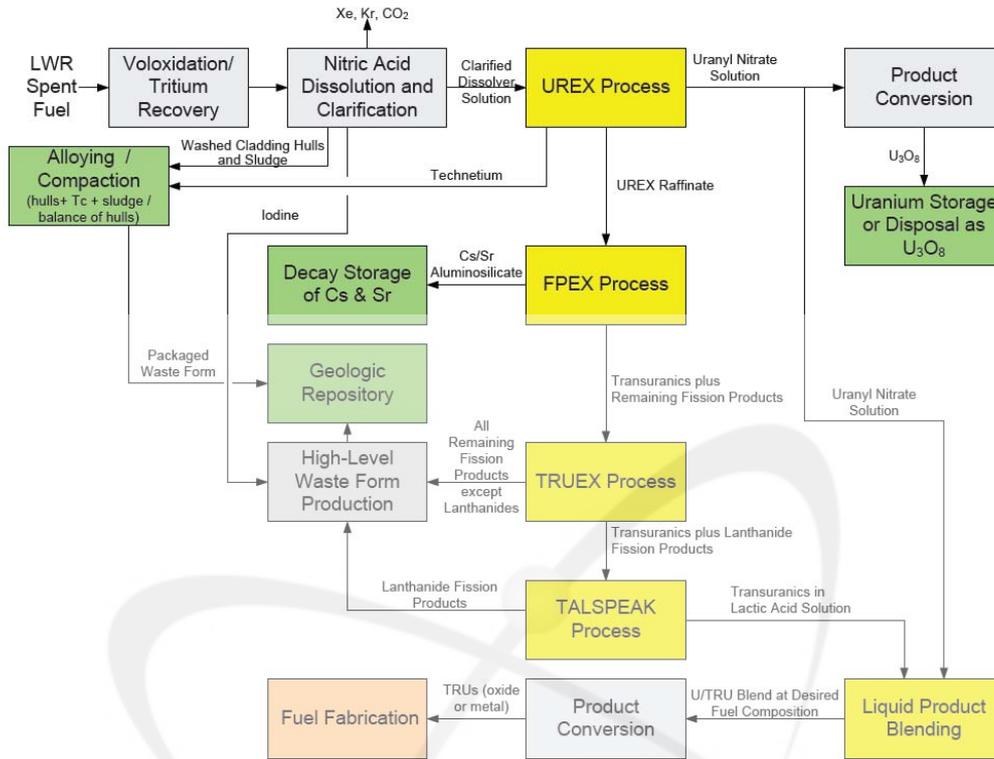


그림 11. UREX+1a 공정개념도

직접처분주기에서는 중간저장시설에 있는 사용후핵연료를 전용대상물질로 가정하였으며, 습식재처리주기에서는 재처리시설에서 제작된 MOX 신핵연료 다발, DUPIC 핵연료주기에서는 DUPIC 핵연료제조공정에서 제작된 DUPIC 신핵연료 다발, 파이로-고속로핵연료주기에서는 파이로공정에서 생산되는 TRU ingot을, 그리고 선진습식-고속로 핵연료주기에서는 TRU변환공정을 거쳐서 생산된 TRU ingot을 전용대상 물질로 가정하고 그 대상물질들의 물질특성에 따른 핵확산저항성, 시설/장치/기술 측면에서의 핵확산저항성, 그리고 제도적인 측면에서의 핵확산저항성 등이 검토되었다.

표 6에 이들 전용핵물질에 대한 Pu 농도 및 1m 거리에서의 방사선준위를 표시 하였는데, 이들 핵물질의 방사선준위는 핵연료 assembly의 설계, 발전소 안에서의 핵연료 연소도(burnup rate), 발전소에서 타고난 후의 냉각기간 등 여러 가지 인자들에 의해서 결정이 되기 때문에 본 연구에서는 습식재처리주기, DUPIC 핵연료주기, 파이로-고속로 핵연료주기, 그리고 선진습식처리-고속로 핵연료주기에 대해서는 PWR 발전소에서 방출된 후 발전소 임시저장시설에서 10년간 냉각이 된 사용후핵연료를 사용하는 것으로 가정하였으며, 직접처분주기에 대해서는 영구처분하기 전에 중간저장시설에서 50년간 저장하는 것으로 가정하였다. 방사선준위는 원자로에서 방출된 후 10년간 냉각이 된 PWR 사용후핵연료를 기본으로 하여 ORIGEN으로 계산된 결과를 보여주고 있으며, photon emission rates는 공기중에서 uniform line source로 가정 (axial dose profile은 무시)하여 계산하였다. 여기에서 사용된 각 전용대상 핵물질의 방사선 조사선량계산을

위한 기하학적 형태 및 기술적 사양은 그림 12에서 보는 바와 같다.

표 5. 대상 핵연료주기에서의 전용가능 핵물질 및 검토대상 전용가능 핵물질

핵연료주기 이름	전용가능 핵물질	전용대상 핵물질	검토대상 공정
직접처분주기	- 사용후핵연료 다발	- 사용후핵연료 다발	- 중간저장시설
습식재처리주기	- 사용후핵연료 다발 - PuO ₂ 용액 - PuO ₂ 분말 - MOX 분말 - MOX 펠렛 - MOX 신연료봉 - MOX 신연료봉 다발 - MOX 사용후연료 다발	- MOX 신연료 봉 다발	- 습식재처리 시설
DUPIC 핵연료주기	- 사용후핵연료 다발 - 사용후핵연료 분말 - DUPIC 핵연료봉 - DUPIC 신핵연료 다발 - DUPIC 사용후핵연료 다발	- DUPIC 신핵연료 다발	- DUPIC 핵연료제조시설
파이로-고속로주기	- PWR 사용후핵연료 다발 - TRU ingot	- TRU ingot	- 파이로 시설
	- SFR 신핵연료다발 - SFR 사용후핵연료 다발	- Fresh SFR fuel	- SFR 핵연료제조시설
선진습식-고속로주기	- PWR 사용후핵연료 다발 - 습식재처리공정 중의 TRU	- TRU ingot	- 선진습식재처리 (UREX+ 1a) 시설
	- TRU ingot - SFR 신핵연료 다발 - SFR 사용후핵연료 다발	- Fresh SFR fuel	- SFR 핵연료제조시설

표 6. 전용대상 핵물질의 Pu농도 및 방사선준위

핵연료주기 종류	전용대상 핵물질	Pu 농도 (wt %)	1m 거리에서의 조사선량(rem/hr)	1 SQ에 해당하는 핵물질 양(kg) ⁷⁾	Shielding/ Remote operation
직접처분 주기	사용후핵연료 다발 ¹⁾	1.1451	1,140.0	69.863	Y
습식재처리주기	PuO ₂ powder (8kg Pu) ²⁾	100.0	0.00036	9.07	N
	MOX 신핵연료 다발 ³⁾	7.0	0.00010	114.29	N
DUPIC 핵연료주기	DUPIC 신핵연료 다발 ⁴⁾	0.9	26.5	888.89	Y
파이로-고속로 핵연료주기	TRU ingot ⁵⁾	55.58	106.9	14.40	Y
선진습식처리-고속로 핵연료주기	TRU ingot ⁶⁾	50.00	106.9	16.00	Y

- 1) 직접처분주기 및 습식재처리 핵연료주기, 파이로-고속로 핵연료주기, 선진습식처리-고속로 핵연료주기에 사용되는 PWR 사용후핵연료의 초기 ²³⁵U 농도는 4.3wt%, 그리고 연소도는 50.0 GWd/t 을 가정하였음.
- 2) PWR 사용후핵연료 (초기 ²³⁵U 농도는 4.3wt%, 연소도 50.0 GWd/t)
- 3) PWR 사용후핵연료 (초기 ²³⁵U 농도는 4.3wt%, 연소도 50.0 GWd/t), MOX의 구성성분비는 7wt% Pu + 93wt% DU
- 4) DUPIC 핵연료주기에 원료로 쓰이는 PWR 사용후핵연료는 기존 우리나라의 제2세대 원자로에서 발생된 사용후 핵연료로서 35.0 GWd/t 의 연소도를 가정하였음.
- 5) 8.3 kg Pu in 15kg of heavy metal
- 6) UREX+1a 공정을 가정하였으며, 이 공정에서 나오는 TRU(U-Pu-Np) ingot 의 Pu wt%를 50으로 가정하였음.
- 7) Pu 8kg을 생산하기 위해 필요한 핵물질의 양.

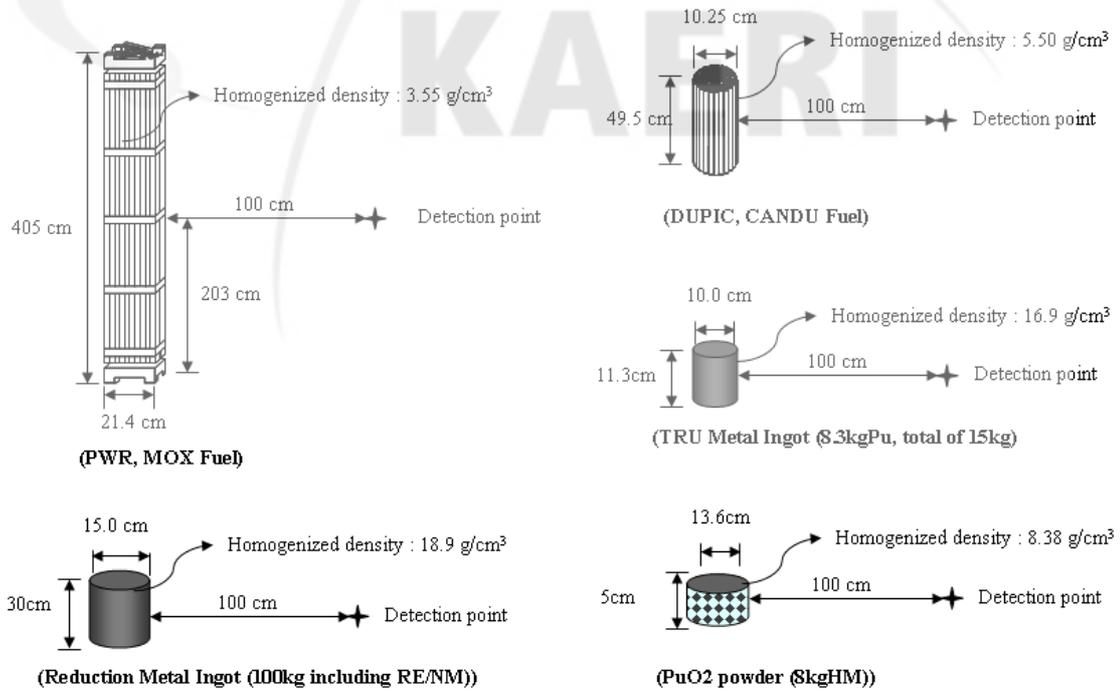


그림 12. 방사선 조사선량 계산을 위한 전용대상 핵물질의 기하학적 사양

4. 핵확산저항성 평가 방법

4.1 핵확산저항성 평가를 위한 이론적 배경

의사결정의 목표가 다수이며, 상호 배반적인 경우에 대안들의 체계적인 평가를 지원하는 의사결정기법의 하나인 다요소 효용함수이론(MAUT)과 계층화분석법(AHP), 그리고 전기회로모델을 간략히 설명하였다.

4.1.1 다요소효용함수이론 (Multi-attribute Utility Theory)

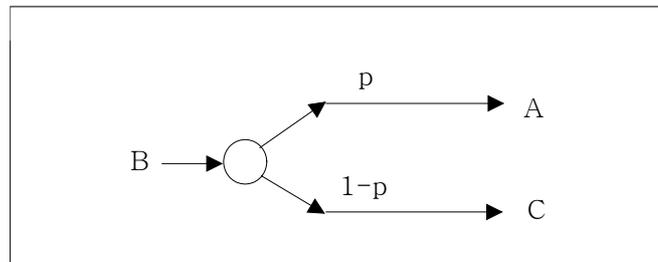
○ 효용함수 (Utility function)

Utility function 은 여러 가지 형태를 가질 수 있다. 의사결정자가 대안들 중에서 또는 각 대안의 결과값들 중에서 좋아하는 정도를 선호(preference) 관계라 하며, 결과치가 비용 요소라면 대소관계와 선호관계는 서로 반대가 된다.

특히 불확실성하에서의 의사결정(대안에 대한 선호)에 있어서의 효용은 불확실성으로 인한 위험(risk)을 수반하게 되는 대안에 대한 선호정도를 나타내기 위한 것이며, 위험선호(risk preference)라 불리기도 한다. 선호관계란 의사결정자가 대안들에 대하여 갖는 상대적인 선호도의 차이를 나타내는 관계를 말하며, 이러한 선호도를 표현하는 방법으로 효용(utility)을 들 수 있다. 효용이란 선호하는 정도(degree of preference)를 수치로 표현한 것이며, 효용함수는 화폐가치와 효용사이의 관계를 나타내 주는 함수(곡선)이다.

확실등가(certainty equivalent)의 정의는 의사결정자가 어떤 불확실한 사건과 무관계(indifference)하다고 느끼는 확실한 값(certain value) 이다. 확실등가는 의사결정자의 위험에 대한 주관적인 성향을 포함하는 것으로 주관적으로 결정된다. 확실등가는 로터리와 동등한 가치를 갖는 확실한 값으로 의사결정의 좋은 기준이 될 수 있다. 그러나 로터리나 발생 가능한 결과가 셋 이상인 로터리에 대한 확실등가는 주관적으로 결정하기가 쉽지 않다. 따라서 불확실성하에서 의사결정자의 선호관계를 나타내기 위한 효용곡선을 이용하여 기대 효용에 의한 의사결정을 내리게 된다.

의사 결정자가 결과치들 A, B, C 사이에 선호관계를 $A > B > C$ 로 표현하였다면 그림과 같이 A,C 로 구성 된 로터리의 확실 등가(EC)가 B가 되도록



확률 p 가 존재하고 이 확률을 결정할 수 있어야 된다. 즉, A와 C로 구성된 로터리와 B가 선호도에 있어서 무차별해지는 확률 p 를 결정할 수 있다는 것이다.

예를 들면, 10000원을 받을 수 있는 확률이 p 이고 $1-p$ 의 확률로 아무 것도 받지 못하는 로터리가 1000원을 확실하게 받는 것과 무차별해지는 확률 p 가 존재하며 이 확률을 정할 수 있다는 것이다. 참고로 이러한 확률 p 를 등가(probability equivalent; PE)라 부르고 확률등가를 이용하여 효용함수를 부과하기도 한다. 효용함수에는 이들 외에도 비교성 공리 (comparability axiom), 확률등가(probability equivalent)와 관련된 연속성 공리 (continuity axiom), 대체성 공리 (substitutability axiom), 단조성 공리 (monotonicity axiom), 그리고 분할성공리 (decomposability axiom) 등이 있는데 자세한 설명은 생략한다.

○ 다요소의사결정기법

다요소의사결정기법 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 사람마다 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.

$$u(x_1, x_2) = k_1 u_1(x_1) + k_2 u_2(x_2) + k_3 u_1(x_1) u_2(x_2) \tag{1}$$

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.

$$u(x_1, x_2) = k_1 u_1(x_1) + k_2 u_2(x_2) \tag{2}$$

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 아

다면 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 부과과정을 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,

$$U(CE_1)=1, U(CE_2)=0, U(CE_3)=0.5 \quad (3)$$

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, $U(CE_k)$ 를 수직축에 대응시킴으로써 점 $[CE_k, U(CE_k)]$ 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 산정방법을 사용하였다.

5) 부과된 효용함수가 의사결정자의 선호관계와 일치하는지를 검토한다.

4.1.2 계층화분석법

계층화분석법(AHP: Analytic Hierarchy Process, 이하 AHP)은 1970년대 초 펜실베이니아대학교(University of Pennsylvania)의 새티(T. Saaty) 교수가 미 국무부의 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 다요소의사결정기법들 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 또는 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.

다음의 표 5는 쌍대비교 시 흔히 사용되는 9점 척도의 어의적 표현을 보여준다.

표 5 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.

$$A = \begin{pmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & - & - & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & - & - & w_2/w_n \\ - & - & - & - & - \\ - & - & - & - & - \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & - & - & w_n/w_n \end{pmatrix} \quad (4)$$

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 행렬별로 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.

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

$$\underline{Aw} = \lambda \underline{w} \quad (5)$$

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 w 를 유도할 수 있다.

4) 일관성 검토

AHP의 마지막 단계는 분석의 일관성을 평가하는 것이다. λ_{\max} 는 n 의 추정값이 된다. 새티(Satty) 교수는 λ_{\max} 는 n 보다 항상 크거나 같으며, 값이 n 에 가까울수록 쌍대비교행렬 A는 추정치와의 편차가 작아짐을 보였다. 즉, λ_{\max} 값이 n 에 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.

$$\frac{(\lambda_{\max} - n)}{n - 1} \quad (6)$$

4.2 핵확산저항성 평가 기준

서론에서 설명된 14가지의 핵확산저항성 평가인자들이 표7에 다시 정리되어 있다.

표 7. 핵확산저항성 평가 기준 및 효용범위

PR 분야	평가 인자	PR 기호	설명	평가변수 및 단위	효과범위	평가방법 (scale)	효용함수
물질	방사선 방벽	PR ₀₁	전용되는 물질의 방사선 준위	Dose(rem/hr/unit quantity) at 1 meter	0 ~ 1,200	정량분석 (로그함수)	U ₁
	탐지성	PR ₀₂	안전조치에 의한 탐지성 : 방사선신호를 탐지하는 과정에서 감시 장비가 수동형이나 능동형이냐의 여부	방사선계측기의 형태 수동형 또는 능동형 (표준화 값)	0 ~ 1	정성분석 (선형함수)	U ₂
	질량과 체적	PR ₀₃	전용물질의 질량과 물리적인 형태(크기), 양	ISQ에 해당하는 질량,kg	0~900	정량분석 (선형함수)	U ₃
	화학적 방벽	PR ₀₄	전용물질의 화학적 조성 : Pu 금속으로의 전환에 대한 어려움 정도	U, Pu, Th (metal, oxide/solution, compound, spent fuel, waste)	0 ~ 1	정성분석 (선형함수)	U ₄
	동위원소 방벽	PR ₀₅	임계질량 : 최소 Pu양	소요되는 최소Pu 질량, kg	8 kg	상수	U ₅
농축도 : ²³⁹ Pu 및 ²⁴¹ Pu 의 농도			(²³⁹ Pu+ ²⁴¹ Pu)/Pu(wt%)	34~75	정량분석		
자발중성자 발생량 : ²⁴⁰ Pu, ²⁴² Pu			(²⁴⁰ Pu+ ²⁴² Pu)/Pu (wt%)	0~100	정량분석		
열 발생률 : ²³⁸ Pu			²³⁸ Pu/Pu (wt%)	0~100	정량분석		
		방사선발생량 : Pu내의 ²⁴⁰ Pu, ²⁴² Pu조성	concentration	0~100	정량분석		
시설의 기술적 특성	시설의 비매력성	PR ₀₆	시설의 용량, 개조비용, 개조시간, 안전성	시설/장비 개조가능성 및 소요시간, 생산량 변경 가능성,ISQ 전용시간 등	정성 분석	정성분석 (선형함수)	U ₆
	시설 접근성	PR ₀₇	운전형태	수동, 자동, 원격운전 (hot cell 또는 glove box)	수동, 수동-원격자동-원격	정성분석	U ₇
			접근을 위한 특정한 장비의 필요성	특수 장비의 필요성 유무	yes / no	정성분석	
			핵연료 교체주기 등과 같은 접근 횟수		1 ~ 50	정량분석	
	핵물질의 가용량	PR ₀₈	시설의 연간 핵물질 사용량	1 TWh 전력생산에 필요한 핵물질 처리량	0 ~ 6 tons	정량분석 (exp함수)	U ₈
	전용 탐지성	PR ₀₉	Item counting 혹은 bulk counting 여부, 측정 불확실성, 시설 MUF	계량관리 대상 핵물질의 형상 (다발, 고체, 분말)	0 ~ 1	정량분석 (선형함수)	U ₉
	민감기술의 습득	PR ₁₀	핵무기프로그램에 응용 가능한 민감기술의 습득정도	SF 취급기술,용매추출기술, 전해분리기술 등의 유무	0 ~ 1	정량분석 (이산함수)	U ₁₀
시간	PR ₁₁	핵물질이 잠재적 전용자에게 노출되는 시간	보관시간 (일, 월, 년) 및 접근의 난이도	0 ~ 1	정성분석 (이산함수)	U ₁₁	
시설의 제도적 장벽	안전조치	PR ₁₂	안전조치의 효율성 : 탐지제한성, 탐지기 혹은 감시기의 반응시간	안전조치 장비 및 기술에 대한 정성적 분석을 통한 효용함수 도출	0 ~ 1	정성분석 (선형함수)	U ₁₂
	접근통제 및 보안	PR ₁₃	접근절차, 물리적 방호 등	행정절차, 물리적 방호 시설 유무	0 또는 1	정량분석 (논리함수)	U ₁₃
	위치	PR ₁₄	동일부지(collocation), 수송시간 등	원자로와 동일부지 여부	0 또는 1	정량분석 (논리함수)	U ₁₄

종합적인 핵확산저항성을 평가하기 위하여 각 핵연료주기별로 물질특성에 관련된 핵확산저항성, 기술특성에 관련된 핵확산저항성, 제도적 차원의 핵확산저항성 등 세 분야로 나누어 평가하였으며, 각 분야는 다시 표1에서 나타난 바와 같이 방사선방벽, 탐지성, 질량과 체적, 화학적 방벽, 동위원소 방벽 (물질적 특성), 시설의 비 매력성, 시설 접근성, 핵물질 가용량, 전용 탐지성, 민감기술의 습득, 시간 (시설의 기술적 특성), 안전조치, 접근 통제 및 보안 (제도적 방벽), 위치 등 3 내지 6개의 세부요소로 나누어 평가를 하였다.

이들 14가지의 핵확산저항성 평가기준에 대한 효용함수 $u_i(x)$ 는 제4장 1절에서 설명된 방법에 따라 결정되어질 수 있으며, 이들 효용함수는 서로에 대하여 상호효용독립이며, 덧셈독립의 성질을 가진다. 따라서 본 연구에서의 핵연료주기 j 공정의 핵확산저항성, PR_j 는 다음과 같이 표시 될 수 있다.

$$PR_j = u_j(x, x, x, \dots, x) = \sum_{i=1}^{14} w_{ij} u_{ij}(x_{ij}) \quad (7)$$

여기에서 w_{ij} 는 j 공정에 대한 핵확산저항성인자 i 의 가중치, u_{ij} 는 j 공정에 대한 핵확산저항성인자 x_i 에 대한 효용함수, 그리고 x_{ij} 는 공정단계 j 에서의 핵확산저항성인자 i 에 대한 효용함수에 들어가는 입력 값을 나타낸다. 효용함수의 형태는 앙케트조사를 이용, 한국원자력연구원에 있는 전문가들의 의견을 수렴하여 구하였으며, 정량화가 어려운 평가인자들에 대해서는 국제적으로 흔히 사용되는 논리 값을 사용하여 표시하였다. 여기에서 i 는 1부터 14까지의 숫자를 가지며, 14가지 핵확산저항성 평가인자의 순서를 나타낸다.

4.2.1 물질특성에 따른 핵확산저항성 인자

(1) 방사선방벽 및 효용함수, $u(x_1)$

핵연료주기에서 전용대상이 되는 핵물질은 방사성동위원소를 포함하는 방사성물질이기 때문에 인체에 해로운 방사선(특히 감마선)을 방출하게 되며 취급 시 방사선차폐를 위해 방호복이나 특수 장비를 사용해야 하며, 핵무기물질을 추출해내기 위한 화학 공정 설계 및 운전이 영향을 미치게 된다. 따라서 핵물질의 방사선 준위는 핵물질전용 및 화학처리공정 설계 및 운전이 방벽으로 작용하게 되며, 방사선준위가 낮으면 핵확산저항성이 낮은 것을 의미하며, 방사선준위가 크면 핵확산저항성이 높은 것을 의미하게 되며, 이를 방사선방벽으로 정의 할 수가 있다. Pu의 경우에는 Pu중에 포함되어 있는 ^{240}Pu 과 ^{242}Pu 의 농도에 따라 변하게 되며, ^{233}U 의 경우에는 ^{232}U 의 농도에 영향을 받게 된다.

이 방사선방벽에 대한 효용함수를 결정하는 인자로는 방사선 방출 준위나 어느 정해진 양까지 방사선피폭을 받게 되는 시간, 또는 이들 물질을 취급하는데 필요한 원격 취급장비의 정도 등이 있는데, 원격장비의 경우에는 원격장비 없이 취급 가능한 경우,

부분적인 원격장비를 요구하는 경우, 글로브 박스 등 격리된 시설에 긴 팔을 이용하게 되는 경우, 또는 차폐된 시설에서 완전히 원격운전이 필요한 경우 등이 있다. 본 연구에서는 핵물질로부터 나오는 방사선준위를 효용함수의 입력변수로 사용하였다. 만약에 전용되는 물질 속에 핵물질이 존재하지 않으면 방사선방벽이 전혀 존재하지 않는 것을 의미하며 효용함수의 값은 0 이 된다. 이 방사선방벽의 효용함수는 등가선량으로 표시하였으며, IAEA의 보고에 따르면 1m 거리에서의 등가선량이 100rem/hr 이상이면 self-protecting 수준으로 규정하고 있으며, DOE 에 따르면 16 rem/hr 이상인 경우는 도난 위험이 현저하게 줄어드는 것으로 판단하여 핵확산저항성 연구에서 도난의 가능성을 배제하고 있다. 그리고 여기에서는 등가선량이 100 rem/hr 이상인 경우에도 방사선준위가 클수록 핵확산저항성이 커지는 경우를 가정하였다. 표 8은 다섯 가지 대안 핵연료주기의 전용대상물질의 방사선준위를 보여 준다.

표 8. 전용대상 핵물질의 Pu농도 및 단위 SQ 또는 다발 당 방사선 준위(rem)

핵연료주기 종류	전용대상 핵물질	Pu 농도 (wt %)	1 SQ에 해당하는 핵물질 양(kg) ⁷⁾	방사선 준위 (rem/h/SQ or bundle)
직접처분 주기	사용후핵연료 다발 ¹⁾	1.1451	698.63	1,140.0
습식재처리주기	PuO ₂ powder (8kg Pu) ²⁾	100.0	9.07	0.00036
	MOX 신핵연료 다발 ³⁾	7.0	114.29	0.00010
DUPIC 핵연료주기	DUPIC 신핵연료 다발 ⁴⁾	0.9	888.89	26.5
파이로-고속로 핵연료주기	TRU ingot ⁵⁾	55.58	14.40	106.9
	SFR TRU ingot	31.0	25.81	
선진습식처리-고속로 핵연료주기	TRU ingot ⁶⁾	50.00	16.00	106.9
	SFR TRU ingot	31.0	25.81	

¹⁾ 직접처분주기 및 습식재처리 핵연료주기, 파이로-고속로 핵연료주기, 선진습식처리-고속로 핵연료주기에 사용되는 PWR 사용후핵연료의 초기 ²³⁵U 농도는 4.3wt%, 그리고 연소도는 50.0 GWd/t 을 가정하였음.

²⁾ PWR 사용후핵연료 (초기 ²³⁵U 농도는 4.3wt%, 연소도 50.0 GWd/t)

³⁾ PWR 사용후핵연료 (초기 ²³⁵U농도는 4.3wt%, 연소도 50.0 GWd/t), MOX의 구성성분비는 7wt% Pu + 93wt% DU

⁴⁾ DUPIC 핵연료주기에 원료로 쓰이는 PWR 사용후핵연료는 기존 우리나라의 제2세대 원자로에서 발생된 사용후핵연료로서 35.0 GWd/t 의 연소도를 가정하였음.

⁵⁾ 8.3 kg Pu in 15kg of heavy metal

⁶⁾ UREX+1a 공정을 가정하였으며, 플루투늄 공정에서 나오는 TRU(U-Pu-Np) ingot 의 Pu wt%를 50으로 가정하였음.

⁷⁾ Pu 8kg을 생산하기 위해 필요한 핵물질의 양.

⁸⁾ very weak for <10kg, weak for 10~100kg, medium for 100~500kg, strong for 500~1000kg, and very strong for >1000kg

이 방사선방벽의 효용함수는 전용되는 핵물질의 방사선흡수선량으로 평가되어진 효용함수는 다음과 같이 나타내어진다.

$$u(x_1) = \frac{(0.3190 + x_1^{1.3847})}{(257.44 + x_1^{1.3847})} \quad (8)$$

여기에서 x_1 은 차폐되지 않은 핵물질로부터 나오는 방사선 방사선준위로서 rem/hr/SQ의 단위를 가지며, 그림 10에 그 효용함수의 형태를 보여주고 있다.

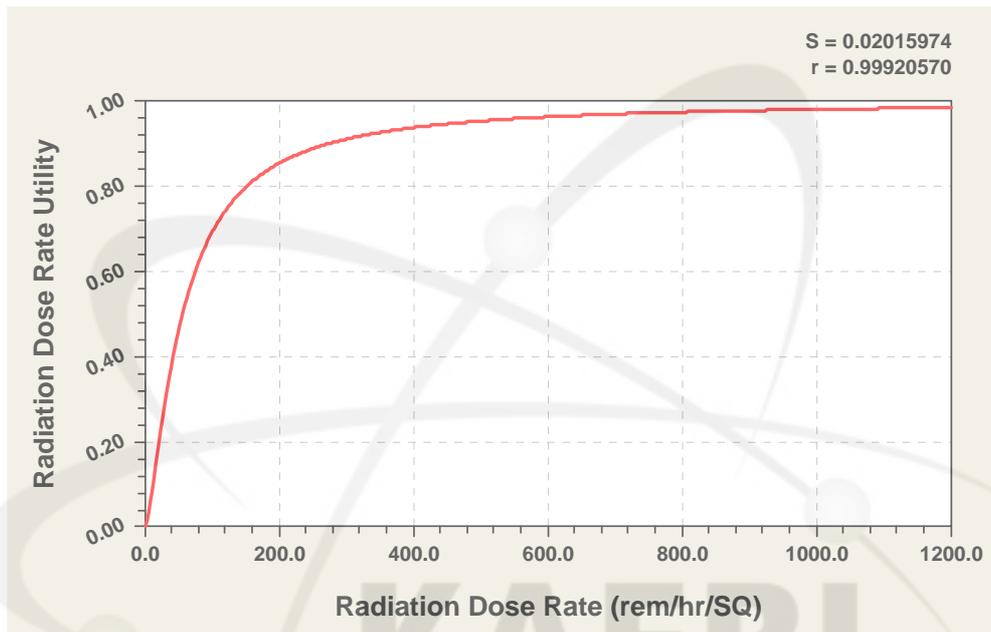


그림 13. 방사선방벽에 대한 효용함수

(2) 탐지성 방벽 및 효용함수, $u(x_2)$

핵물질은 그 자체로부터 방출되는 방사선 때문에 필연적으로 탐지가 가능하며, 이 탐지성을 이용하여 안전조치나 핵물질 방호조치를 통해 핵확산을 막을 수 있게 된다. 탐지성이 클수록 발각되지 않고 핵물질 전용을 하기가 어려워지기 때문에 핵확산저항성이 크게 된다. 위에 언급된 바와 같이 탐지성을 확보하기 위해서는 안전조치나 물리적방호 시스템이 병행되어야 한다는 조건이 가정되어야 한다.

핵물질전용에 대한 탐지성에 대한 측정인자로는 우선 이 핵물질이 탐지가능한 신호를 방출하는지가 우선 중요하며, 이 신호를 탐지하는데 자발중성자를 측정하는 수동형장비만으로 탐지가 가능한지, 또는 neutron activation 등 능동형장비를 사용해야만 탐지가 가능한지, 그리고 방사선신호가 강력하여 차폐체를 이용하여 엄폐가 가능한지 등을 따져야 한다. 따라서, 탐지성에 대한 효용함수는 1차 선형함수(risk neutral)로 나타내었으며, remote detection 을 가능하게 하는 어떤 신호를 얻을 수 없는 경우는 효용함수 x_2 와 u_2 의 값을 각각 0, active 또는 intrusive 방법으로 50% 정도의 탐지가 가능한 경우 u_2 값을 0.3, 90% 이상의 탐지확률이 있는 경우는 u_2 값을 0.5, 그리고 수동적

인 방법으로 어려움 없이 아주 정확하게 전용탐지가 가능한 경우는 u_2 값 0.8, 그리고 차폐가 불가능한 경우에 대해서는 u_2 값을 1.0 으로 표시하여 그 효용함수를 구하였으며 입력변수 x_2 의 값은 0에서 1사이로 표준화하여 표 9에 나타내었다.

이에 근거하여 대안 핵연료주기들에 대한 탐지성에 대한 입력함수 x_2 의 값을 추정해 보면 표 10에서 보는 바와 같다.

표 9. 탐지성에 대한 효용함수값

탐지성에 대한 내용	입력변수 x_2 값	효용함수 값
원격탐지 신호 없음	0.0	0.0
active 또는 intrusive 방법으로 50% 정도의 탐지가 가능한 경우	0.3	0.3
active 또는 intrusive 방법으로 90% 정도의 탐지가 가능한 경우	0.5	0.5
수동적인 방법으로 쉽게 탐지가 가능한 경우	0.8	0.8
차폐가 불가능하며 수동적인 방법으로 쉽게 탐지가 가능한 경우	1.0	1.0

표 10. 대안 핵연료주기에 대한 탐지성 방벽의 효용함수 추정치

핵연료주기	전용대상물질/ 전용시설	탐지성과 관련한 장치 및 시설의 내용	입력변수 값
직접처분주기	SF다발/SF중간저장시설	SF다발은 차폐가 거의 불가능하며 transport cask와 같은 용기가 필요함	0.9
습식 재처리주기	MOX신연료다발/ 습식재처리시설	MOX 연료는 active 또는 intrusive 방법으로도 탐지확률이 50%를 넘기가 어려움	0.2
DUPIC 핵연료주기	DUPIC신핵연료다발/DUPIC 핵연료제조시설	SF 과 같은 정도의 방사선을 갖고 있기 때문에 Hot cell 내에서만 조업이 가능하며 SF와 같은 탐지성을 가짐	0.8
파이로-고속로 주기	TRU ingot/파이로공정시설	TRU ingot 에 TRU 및 희토류 FP가 일부 포함되어 있기 때문에 수동적인 방법으로 탐지가 가능함	0.7
	SFR TRU ingot/파이로시설		0.7
선진습식-고속로 주기	TRU ingot/ UREX 공정시설	TRU ingot 에 U/Pu/Np 이 주성분이며 Am, Cm, 그리고 Ln계열 FP가 없기 때문에 파이로보다 탐지성이 떨어짐.	0.6
	SFRr TRU ingot/UREX 공정시설		0.6

(3) 질량과 체적에 대한 방벽 및 효용함수, $u(x_3)$

핵확산자가 핵무기를 제조하기 위해서는 적어도 1 SQ에 해당하는 핵물질, 즉 25kg 이상의 ^{235}U 이나 8kg 이상의 ^{239}Pu 을 획득해야 하는데, 이 1 SQ를 만들기 위해 요구되는 핵물질의 질량 또는 체적에 대한 효용함수를 나타내는 것으로, 만약에 핵물질이 희석된 상태에 있다면 전용하여 운반하고 또 화학적으로 농축을 시키는 과정에서 큰 질량 및 체적을 다루는데 어려움이 따를 것이다. 역으로, 핵물질이 농축된 상태라면 질량 및 체적에 대한 방벽은 아주 낮을 것이다. 또한 이 핵물질이 MOX 연료와 같이 다른 물질과 혼합되어 있는지도 중요한 인자가 되며, 큰 덩어리형태 또는 분말의 형태인지,

그리고 비밀스럽게 전용하고 운반하기에 어려운 형태를 취하고 있는지 등도 영향을 미치게 된다. 따라서 이런 것들을 고려하여 5가지 대안 핵연료주기에 대해 Pu 농도에 따른 전용대상물질의 질량을 표 11에 표시하였다.

이 질량 및 부피 방벽에 대한 효용함수와 관련하여서는 INPRO 핵확산저항성 평가방법론에서는 해당 핵무기용 물질이 농축이 되어있어 조그만 양 (10kg 미만인 경우) 을 쉽게 전용하여 운반할 수 있는 경우는 효용함수 값을 Very weak으로 놓았으며, 같은 조건에서 전용 및 운반이 어려운 경우, 즉 1SQ의 양이 10~100kg 인 경우는 Weak, 비슷한 조건이지만 1 SQ 를 얻기 위해서는 여러 번의 성공적인 전용을 성공해야만 하는 경우, 즉 1 SQ의 양이 100~500kg 인 경우는 Medium, 많은 양의 핵물질을 통상의 장비 및 운반차량을 이용해야만 하는 경우, 즉 1SQ의 양이 500~1000kg 인 경우 Strong, 그리고 특수 장비 및 특수 차량을 이용하여 많은 양의 핵물질을 여러 번에 걸쳐 운반해야 하는 경우, 즉 1SQ의 양이 1000kg 이상인 경우는 Very Strong으로 가정하였는데 본 연구에서는 5가지의 대안 핵연료주기에 대한 입력변수 x_3 의 값을 0.0 kg에서부터 1000kg 까지의 범위에 대하여 1차 선형함수를 이용하여 효용함수의 값을 결정하였다.

표 11. 전용대상 핵물질의 Pu농도 및 1 SQ 에 해당하는 핵물질 질량

핵연료주기 종류	전용대상 핵물질	Pu 농도 (wt %)	1 SQ에 해당하는 핵물질 양(kg) ⁷⁾	INPRO 방법론에서의 PR scale ⁸⁾	핵물질 1 ton당 핵입계질량 수
직접처분 주기	사용후핵연료 다발 ¹⁾	1.1451	698.63	weak	1.43
습식재처리주기	PuO ₂ powder (8kg Pu) ²⁾	100.0	9.07	very weak	110.25
	MOX 신핵연료 다발 ³⁾	7.0	114.29	medium	8.75
DUPIC 핵연료주기	DUPIC 신핵연료 다발 ⁴⁾	0.9	888.89	strong	1.12
파이로-고속로 핵연료주기	TRU ingot ⁵⁾	55.58	14.40	weak	69.44
	SFR TRU ingot	31.00	25.81	weak	38.74
선진습식처리-고속로 핵연료주기	TRU ingot ⁶⁾	50.00	16.00	weak	62.50
	SFR TRU ingot	31.00	25.81	weak	38.74

¹⁾ 직접처분주기 및 습식재처리 핵연료주기, 파이로-고속로 핵연료주기, 선진습식처리-고속로 핵연료주기에 사용되 는 PWR 사용후핵연료의 초기 ²³⁵U 농도는 4.3wt%, 그리고 연소도는 50.0 GWd/t 을 가정하였음.

²⁾ PWR 사용후핵연료 (초기 ²³⁵U 농도는 4.3wt%, 연소도 50.0 GWd/t)

³⁾ PWR 사용후핵연료 (초기 ²³⁵U 농도는 4.3wt%, 연소도 50.0 GWd/t), MOX의 구성성분비는 7wt% Pu + 93wt% DU

⁴⁾ DUPIC 핵연료주기에 원료로 쓰이는 PWR 사용후핵연료는 기존 우리나라의 제2세대 원자로에서 발생된 사용후 핵연료로서 35.0 GWd/t 의 연소도를 가정하였음.

⁵⁾ 8.3 kg Pu in 15kg of heavy metal

⁶⁾ UREX+1a 공정을 가정하였으며, 플루투늄공정에서 나오는 TRU(U-Pu-Np) ingot 의 Pu wt%를 50으로 가정하였음.

⁷⁾ Pu 8kg을 생산하기 위해 필요한 핵물질의 양.

⁸⁾ very weak for <10kg, weak for 10~100kg, medium for 100~500kg, strong for 500~1000kg, and very strong for >1000kg

그리고 이에 대한 효용함수는 그림 11로 표시할 수가 있다.

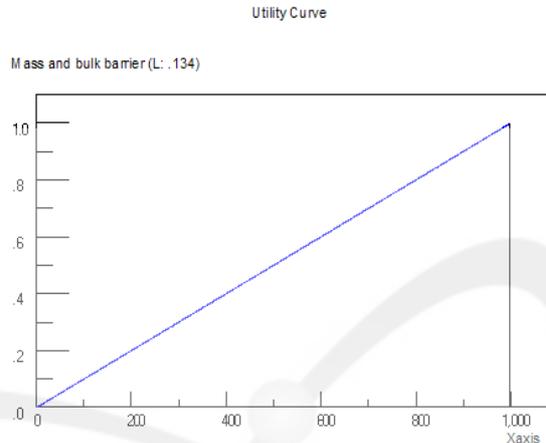


그림 11. 질량 및 체적에 대한 효용함수

(4) 화학적 방벽에 대한 효용함수, $u(x_4)$

전용된 핵물질을 이용하여 핵무기를 제조하기 위해서는 전용된 핵물질을 화학공정 등을 이용하여 불순물을 제거하고 핵무기급 Pu금속으로 변환 및 농축을 시켜야 된다. 따라서 화학적 방벽은 전용된 핵물질을 핵무기급 물질로 농축 및 변환시키는데 극복해야 할 어려움정도를 나타낸다.

이 화학적 방벽에 관계되는 속성은 INPRO에서 검토된 바와 같이 다음과 같이 분류될 수 있다. 첫째, 순수한 Pu금속일 경우는 효용함수를 0.1, 산화물, 질화물 등, 단일 원소 화합물일 경우는 순수금속으로의 전환이 쉽고 단순하기 때문에 0.3, MOX 연료같이 희석된 형태를 띠지만 핵분열물질이나 방사선방벽이 없는 물질인 경우 그 정화공정이 단순하며 간단하기 때문에 효용함수의 값을 0.5, 그리고 사용후핵연료나 유리화된 물질인 경우는 0.9로 정의하였다. 다시 말해서 INPRO PR 평가방법론에서 처럼 효용함수를 이산함수로 표시하였으며, 그 내용은 표 12와 같다.

표 12. 화학적 방벽에 대한 효용 값

전용 물질의 형태	효용 값
순수 PuO ₂	0.1
MOX (Pu + U)	0.2
MOX (TRU + U)	0.5
TRU Ingot (TRU + U + RE)	0.6
Fresh DUPIC fuel	0.8
Spent Fuel	0.9
Waste	1.0

따라서 5가지 대안 핵연료주기에 대한 효율함수의 값은 다음 표 13과 같다.

표 13. 대안 핵연료주기에 대한 화학적 방법의 효율함수 값

핵연료주기 종류	전용대상 핵물질	INPRO 방법론에서의 PR scale ⁸⁾	효율함수 값
직접처분 주기	사용후핵연료 다발 ¹⁾	Spent fuel	0.9
습식재처리주기	PuO ₂ powder (8kg Pu) ²⁾	Pure PuO ₂	0.3
	MOX 신핵연료 다발 ³⁾	MOX (PuO ₂ + UO ₂)	0.5
DUPIC 핵연료주기	DUPIC 신핵연료 다발 ⁴⁾	~ spent fuel	0.85
파이로-고속로 핵연료주기	TRU ingot ⁵⁾	weak	0.6
	SFR TRU ingot	weak	0.65
선진습식처리-고속로 핵연료주기	TRU ingot ⁶⁾	weak	0.6
	SFR TRU ingot	weak	0.65

(5) 동위원소방벽, $u(x_5)$

동위원소방벽은 핵연료주기시설에서 전용을 통해 얻어진 핵물질을 핵무기제조에 적절한 형태로 변형을 시켰다고 가정할 때, 이 핵물질을 이용하여 핵무기를 제조하는 과정에서 겪어야 하는 어려움의 정도를 나타낸다. 즉, HEU나 ²³⁸Pu의 농도가 80% 이하인 순수한 Pu 혼합물들은 비록 핵무기를 설계 및 제조를 할 때 기술적으로 복잡한 단계를 거치지만 ‘직접사용가능물질’로 분류가 된다. HEU의 경우 gun-type 핵무기를 제조할 수 있으나, Pu의 경우는 implosion-type의 핵무기를 제조해야만 된다. 따라서 HEU가 Pu보다 동위원소방벽이 낮게 된다.

또한 Pu의 경우는 동위원소의 형태에 따라 핵임계질량이 다르게 된다. 알파상(alpha phase)의 핵무기급 Pu의 핵임계 질량은 11kg이지만 ²³⁹Pu 순도가 60%정도인 원자로급 Pu의 핵임계 질량은 약 13kg이 된다. 실제로 고농축 우라늄이나 순도 90%이상의 ²³⁹Pu의 경우는 거의 동위원소 방벽이 없다고 볼 수 있으나, 원자로급 Pu의 경우는 자연 방사붕괴열 및 자발중성자의 발생 때문에 핵무기 설계에 있어서 아주 해로운 영향을 미치게 된다. 이와 같이 본 연구에서 연구대상인 Pu의 경우 핵무기를 제조하기 위한 기술적 복잡성에 따라 다음과 같이 여러 가지 속성인자들이 고려되어야 한다.

1) 핵임계 질량 (critical mass): 효율 입력변수, $x_{5,1}$

전용물질을 핵무기용 물질로 처리했을 때 핵임계를 이루기 위해 필요한 최소한의 핵물질 양을 표시하며 핵 임계질량은 핵물질의 모양, 온도, 성분 및 밀도, 중성자 반사체 사용 여부, 그리고 순도에 따라 달라진다. 그리고 구 형태의 모

양이 제일 적은 양의 중성자 손실을 줄일 수 있기 때문에 제일 작은 핵 임계질량을 갖게 된다. 또한 중성자 반사체를 이용하는 경우 100%에 가까운 순도를 가지거나 핵무기급 핵물질의 경우, 즉 Pu-239의 경우 임계질량은 8kg에서 5kg으로 줄게 되며, Uranium-235의 경우 25kg에서 15kg으로 줄게 된다. 따라서 핵 임계질량은 Step 함수로 효용함수를 표시하는 것이 가장 합리적인 것으로 판단된다. 본 연구에서는 대상 핵무기물질이 공히 Pu이기 때문에 각 대안별 차이가 없기 때문에 낮은 효용함수 값, 0.2를 사용하였다. 이에 반해서 농축도 20% 이상의 순도를 갖는 HEU의 경우는 0.3, 20% 이하의 농축도를 갖는 LEU는 0.5, 그리고 NU나 DU, 그리고 Th의 경우는 1의 값을 갖는 것으로 가정하였다.

2) 동위원소의 농축도 (Pu의 순도): 효용입력변수 $x_{5,2}$

자연 상태의 우라늄 및 저농축우라늄은 직접 핵무기제조에 사용할 수가 없으며, 가스 확산법이나 원심분리농축법 등을 이용하여 농축도를 높여야 되기 때문에 자연 상태 또는 저농축우라늄은 고농축우라늄보다 동위원소방벽이 높게 된다. 또한 Pu의 경우에도 원자로에서 생산되는 원자로 급 (Reactor grade) Pu의 경우는 표14에서 보는 것처럼 Pu안에 있는 ^{239}Pu 의 농도가 60% 정도이기 때문에 90%가 넘는 핵무기급에 Pu에 비하여 더 많은 양의 Pu이 필요하게 되기 때문에 핵확산 저항성이 높게 된다.

표 14. 원자로 노형별 핵물질의 비율

	^{238}Pu (%)	$^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$	Plutonium enrichment (^{239}Pu wt %)
Weapon grade	0.01	0.062	93.9
Reactor grade	0.2	0.231	81.4
GMR	0.11	0.383	72.7
HWR	2.4	0.410	69.8
LWR	3.5	0.585	61.1
LWR/MOX	4.2	0.690	49.0
ESFR	1.0	1.058	42.8
MHTGR (deep Pu burn)			
Molten salt reactor (MSR)	3.3	3.92	14.7

(GMR =Graphite Moderated Reactor, MHTGR=Modular High Temperature Gas-cooled Reactor)

본 연구에서는 Pu의 순도에 관한 효용함수를 구하기 위한 입력변수를 ^{239}Pu 의 농도로 표시하였으며, 효용함수는 선형감소함수로 표시하였다. 다섯 가지 대안 핵연료주기에 대한 효용입력변수 $x_{5,2}$ 의 값이 표 14에 나타나 있다.

3) 자발중성자의 발생 정도: 효용입력변수 $x_{5,3}$

자발중성자의 발생은 핵물질 내에서의 자연붕괴에 의해 발생되며, 핵무기에 서 초기폭발을 야기할 수 있기 때문에 핵무기설계, 수율, 그리고 제조 후 핵무기 성능 유지에 영향을 미치게 된다. 따라서 자발중성자의 발생이 낮을수록 핵 확산방벽이 낮게 된다. 실제적으로 Pu이 자연붕괴의 주원인이 되고 있기 때문에 Pu 핵무기의 경우 ^{240}Pu 및 ^{242}Pu 등 Pu의 짝수동위원소의 농도에 크게 좌우 되기 때문에 효용함수의 입력변수 $x_{5,3}$ 는 Pu동위원소 중에서 짝수동위원소의 비율로 나타내었으며, 그 값들이 표 14에 나타나 있다.

$$x_{5,3} = \text{짝수 Pu동위원소의 양(g) / 전체 Pu동위원소의 양(g)}$$

본 연구에서는 자발중성자 발생에 대한 효용함수를 미국의 DOE주관 Blue Ribbon Committee q보고서의 기반이 된 Charlton의 식을 사용하였는데, 그 식은 다음과 같다.

$$u(x) = \begin{cases} \frac{1}{2}(1 - \exp[-3.5(x_{5,3})^{1.8}]), & 0 \leq x_{5,3} < 0.6 \\ \exp(6x_{5,3} - 4.8) + 0.07, & 0.6 \leq x_{5,3} < 0.8 \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

그리고 그림 12는 이에 대한 효용함수를 보여 준다.

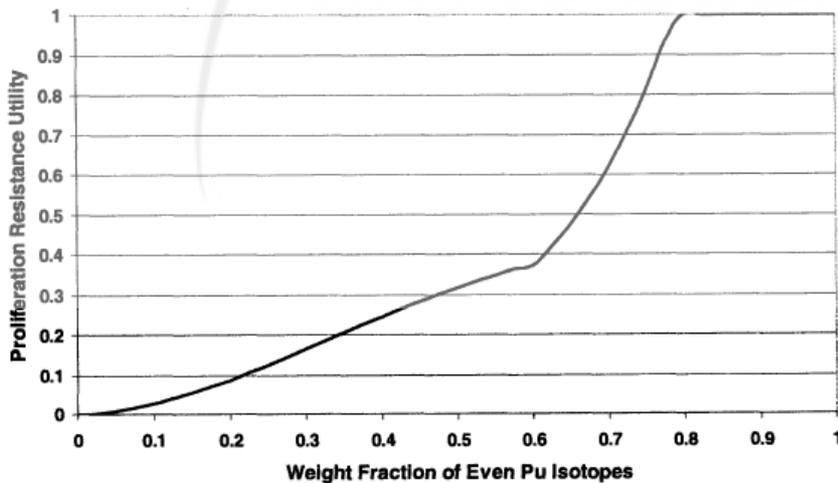


그림 12. 자발중성자 발생에 대한 효용함수

4) 자연발생열: 효용입력변수 $x_{5,4}$

핵물질 내에서 발생하는 자연붕괴열은 핵물질 취급을 어렵게 할 뿐만 아니라 핵무기장치에 열적 경화를 일으켜 핵무기의 작동에 큰 영향을 미치기 때문에 핵무기 설계 시에 세심하게 그 영향이 검토되어야 한다. 자연붕괴열이 작을수록 동위원소방벽이 작게 되며, Pu의 경우에는 ^{238}Pu 의 농도에 크게 좌우된다. 따라서 자연발생열에 대한 효용함수는 핵물질에서 발생하는 자연 발생열, 즉 Watts/kg, 에 따라 달라지며, 실제적으로 ^{238}Pu 의 경우 70 Watts/kg 의 자연 발생열을 방출한다. 본 연구에서는 이 발생열이 ^{238}Pu 의 농도에 좌우되기 때문에 핵물질내에 있는 총 Pu중의 ^{238}Pu 의 분율을 효용함수의 입력변수로 가정하였으며, 다섯 가지 핵연료주기에 대한 입력변수가 표 16에 계산되어 있다. 전문가들의 의견도출을 통해 도출된 효용함수는 식 (10)과 같으며 그림13에 효용함수가 보여진다.

$$u(x_{5,4}) = 1 - e^{-6.06x_{5,4}} \quad (10)$$

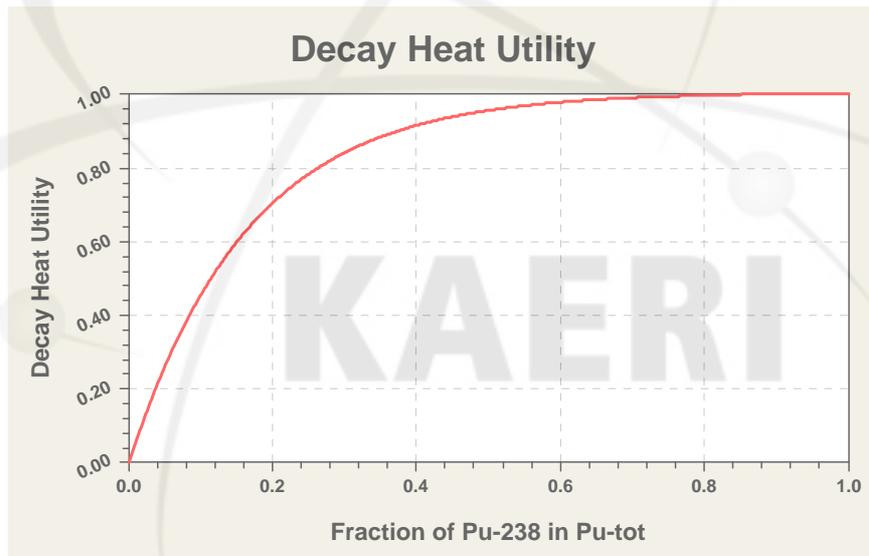


그림 13. 자연발생열에 대한 효용함수

5) 방사선방출 정도: 효용입력변수 $x_{5,5}$

여기에서 고려되는 방사선방출정도는 위에 언급된 사람에 대한 등가선량 개념이 아니라 핵무기제조에 영향을 주는 방사선의 영향을 말한다. 예를 들면, Pu의 경우 Pu속에 존재하는 ^{240}Pu , ^{242}Pu 의 농도에 따라 변하게 되며, ^{233}U 의 경우에는 ^{232}U 의 농도에 영향을 받게 된다. 따라서 Pu 내에서의 짝수번호의 Pu 동위원소 분율을 효용입력변수로 사용하였으며, 방사선 방출량은 Pu 짝수동위원소의 농도에 비례하기 때문에 1차 증가선형함수로 표시하였다.

위에 설명된 입력변수들에 근거하여 5가지 대안 핵연료주기에 대한 입력변수 값들을 정리하면 표 15와 같다

표 15. 동위원소방벽의 효용입력변수에 대한 값

핵연료주기 종류	전용대상 핵물질	핵임계질량 X5,1	동위원소 농축도, X5,2	자발중성자 발생량, X5,3	자연발열성 X5,4	방사선방출 X5,5
		²³⁹ Pu 질량 kg	Pu 순도: (²³⁹ Pu 의 농도, wt%)	짝수Pu동위원 소 비율(분율)	²³⁸ Pu 농도(%)	짝수Pu동위 원소 비율(%)
직접처분 주기	사용후핵연료 다발	8	64.37	0.356	0.0294	0.356
습식재처리주기	PuO ₂ powder (8kg Pu)	8	64.4	0.356	0.0294	0.356
	MOX 신핵연료 다발	8	64.4	0.356	0.0294	0.356
DUPIC 핵연료주기	DUPIC 신핵연료 다발	8	68.4	0.316	0.0173	0.316
파이로-고속로 핵연료주기	TRU ingot	8	75.0	0.356	0.0294	0.356
	SFR TRU ingot	8	33.0	0.410	0.0382	0.410
선진습식처리-고속로 핵연료주기	TRU ingot	8	75.0	0.356	0.0294	0.356
	SFR TRU ingot	8	33.0	0.410	0.0382	0.410

위에 언급된 동위원소방벽에 대한 다섯가지 인자 중 핵임계질량 인자를 뺀 4개의 인자들은 각각 자체적인 효용함수를 갖게 되며, 전체 동위원소 방벽은 위 네 가지 효용함수의 합으로 이루어진 효용함수로 표시 되어진다. 즉,

$$\begin{aligned}
 u(x_5) &= f(u(x_{5,1}), u(x_{5,2}), u(x_{5,3}), u(x_{5,4}), u(x_{5,5})) \\
 &= \sum_{j=5,1}^{5,5} w_j u_j(x_{i,j})
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

다시 말하면, 동위원소 방벽은 4가지 효용함수들로 이루어지며, 그 중요도를 고려하여 종합화하여 그 동위원소방벽에 대한 효용함수의 값이 구해질 수 있다.

4.2.2 기술 및 시설 특성에 관련한 핵확산저항성 인자

기술적 방벽이란 시설, 공정, 장비 등 핵연료주기에서 핵무기에 사용될 수 있는 핵물질을 획득하기 위해서 시설내의 핵물질에 대한 접근을 어렵게 하거나 시설을 사용 또는 오용하는 것을 어렵게 하는 고유한 기술적인 요소들을 의미한다. 시설의 오용은 핵무기 개발을 위하여 시설, 공정 또는 기술들을 복제하는 것도 포함을 한다. 이들 고유기술 저항방벽에는 다음과 같은 것들이 있다.

(1) 시설의 비 매력성 효용함수, $u(x_6)$

시설, 장치 그리고 공정들이 핵무기용 물질을 생산하는데 방해가 되는 정도는 아주 중요한 고유저항성이 된다. 다시 말하면, 핵무기용 물질을 생산하기 위한 시설이나 장치, 공정 들을 변경할 수 없으면 핵확산저항성이 높은 것이며 그렇지 않은 경우는 핵확산저항성이 거의 없는 것을 의미한다. 따라서 시설의 비 매력성에 영향을 주는 속성인자 들은 다음과 같은 여러 가지가 있을 수 있다.

- 특수한 장치나 물질 또는 기술들을 포함하여, 핵무기용 물질을 생산하기 위한 시설이나 장비들의 변경을 위한 과정의 복잡성과 그에 필요한 특수기술, 물질 그리고 지식 등의 입수가능성.
- 위에 언급된 시설이나 장치, 공정 등을 변경 또는 개조하는 데 필요한 시간 (weeks, months) 및 경비
- 변경에 따라서 일어날 수 있는 시설 및 공정의 안전성
- 그러한 변경을 위하여 요구되는 시간
- 시설의 생산 용량 및 생산량 변경 가능성
- 핵무기제조에 필요한 1 SQ 핵물질을 생산하는 데 필요한 시간 (weeks)
- 1 SQ 의 핵물질 전용을 위한 추정 시간 (days)
- 시설의 변경이나 오용에 따른 정보가 외부에 노출될 수 있는 가능성의 존재 및 유효성

이들 변수들을 고려하여 효용함수들의 값들을 구하기 위한 효용함수의 기준값들을 다음과 같이 정성적으로 구하였다.

$u=0.1$ 별다른 변경 없이 곧바로 핵무기를 생산할 수 있는 핵물질을 생산할 수 있는 시설이나 장치 또는 공정들 (very weak)

$u=0.3$ 곧바로 핵무기에 사용될 수 있는 핵물질을 수주의 시간 내에 쉽고 안전하게 변경시킬 수 있는 시설로서 일주일내에 1 SQ 의 핵물질을 생산할 수 있는 경우. 그리고 상당한 양의 핵물질이 생산될 때까지 이 변경된 사실이 쉽게 노출되지 않는 경우 (weak);

u=0.5 상당한 정도의 공학적인 전문성, 경험, 비용, 그리고 매월 1SQ를 생산할 수 있도록 시설 변경을 위해서 월단위의 시간이 필요한 경우로서, 시설 변경을 마치거나 또는 1 SQ를 생산하기 전에 이런 사실들이 외부에 노출될 가능성이 있는 경우 (medium).

u=0.7 시설 변경을 위해서 수개월 내지 수년의 시간이 필요하고 충분한 양의 자금, 전문성 그리고 안전선 및 생산설비 용량 등이 복합적으로 얽혀 있는 경우로서 이런 시설 변경이 쉽게 외부에 노출 되는 경우를 말한다 (strong).

u=0.9 기술적으로 시설변경이 힘든 경우로 기술적으로 복잡하고, 비용도 많이 필요할 뿐만 아니라 쉽게 외부에 정보가 노출이 되고 생산용량에도 제한이 있는 경우를 말한다 (very strong).

이들 효용함수들을 바탕으로 다섯가지 대안 핵연료주기에 대해 다음과 같이 효용함수들을 구하여 표 16에 표시하였다.

표 16. 대안 핵연료주기들의 시설 비 매력성에 대한 효용함수 값

핵연료주기 종류	전용대상 핵물질	효용입력변수 들	시설의 비매력성에 대한 효용함수 값
직접처분 주기	사용후핵연료 다발	전용을 위해서 중간저장시설 변경이 필요하나 시간이 많이 걸리고 외부에 노출될 가능성이 큼	very strong (0.9)
습식재처리주기	PuO ₂ powder (8kg Pu)	시설변경 불필요, 쉽게 1SQ 핵물질을 생산할 수 있음	very weak (0.1)
	MOX 신핵연료 다발	시설변경 불필요, 쉽게 1SQ 핵물질 생산 및 전용 가능	very weak (0.1)
DUPLIC 핵연료주기	DUPLIC 신핵연료 다발	hot cell 밖으로 핵물질전용을 위해 일부 시설변경이 필요하며, 전문적 지식과 수주 또는 수개월에 걸친 시설변경 시간이 필요함, 그리고 외부에 노출될 가능성이 큼	strong (0.7)
파이로-고속로 핵연료주기	TRU ingot	hot cell 밖으로 핵물질전용을 위해 일부 장치들 변경이 필요하며, 전문적 지식과 수주 또는 수개월에 걸친 시설변경 시간이 필요함, 그리고 외부에 노출될 가능성은 그리 크지 않음	0.6
	SFR TRU ingot		0.5
신진습식처리-고속로 핵연료주기	TRU ingot	hot cell 밖으로 핵물질전용을 위해 일부 장치들 변경이 필요하며, 전문적 지식과 수주 또는 수개월에 걸친 시설변경 시간이 필요함, 그리고 외부에 노출될 가능성은 그리 크지 않음	0.6
	SFR TRU ingot		0.5

(2) 시설의 접근성에 대한 효용함수, $u(x_7)$

핵무기용 물질을 생산하는데 필요한 시설이나 장치 등에의 접근을 방해하는 정도도 아주 중요한 고유저항성이 된다. 예를 들면, 핵물질 생산 공정이 연속식인 경우와 회분식 공정인 경우 서로 시설 내 핵물질에의 접근 가능성에 큰 차이가 있으며, 연속식 공정의 경우 핵확산저항성이 크게 된다. 그리고 수작업으로 핵연료다발을 교체하는 경우에는 원자로 수명기간 동안 핵연료 교체를 하지 않는 경우에 비하여 핵확산저항성이 적게 되며, 원격운전이나, 자동화된 공정과 운전방식인 경우는 그렇지 않은 경우에 비해 핵확산저항성이 높게 된다. 따라서 시설접근성에 영향을 주는 속성인자에는 다음과 같은 것들이 있을 수 있다.

1) 시설의 운전형태, 효용 입력변수 $x_{7,1}$

핵물질 처리시설의 접근성을 판단하는데 첫 번째 고려될 사항은 시설의 운전방식이 연속식 또는 회분식인지, 그리고 공정들이 자동화되어 있는지 아니면 수작업이 필요한지로 분류가 가능하다. 원격운전이나 자동화된 공정일 경우 manual 시설보다 핵확산저항성이 높게 되기 때문에, 이들을 입력함수로 고려하여 다음과 같이 효용함수를 도출하였다.

조건	효용함수 값
원격 장비가 필요 없는 회분식 공정	0
원격장비가 필요한 회분식 공정	0.4
수동 샘플채취방식의 연속식 공정	0.7
자동 샘플채취방식의 연속식 공정	1.0

2) 핵물질에의 접근을 위한 특수 장비의 필요성, 효용입력변수 $x_{7,2}$

핵물질 생산시설에서 전용을 위해 특수한 장비의 필요한 경우를 나타내며, Hot Cell 이나 Glove Box 등의 시설에서 운전이 되는 경우에는 핵물질에 접근을 하기 위하여 특수한 장비나 기술, 지식 등이 요구되며, 핵확산저항성이 높게 된다. 따라서 효용함수 값을 특수 장비가 필요 없는 경우 0, 특수 장비가 필요한 경우는 1로 정하여 비교 평가하였다.

3) 핵물질에의 접근회수: 효용입력변수 $x_{7,3}$

1 TWh 전력생산을 위한 조업기간 중에 핵연료 교체나 시설 정비, 또는 회분식공정작업(batch processing)을 위하여 조업자에 의하여 통상적으로 일어나는 공정중의 핵물질에의 접근 횟수와 관계가 된다. 핵물질 전용을 막기 위해서는 핵물질에의 접근 횟수가 적을수록 핵확산저항성이 높게 된다. 따라서 이 효용함수는 다음에 설명되는 핵물질 가용량에 대한 효용함수와 연관관계가 있게 된다. 그러

나 평가인자를 간단히 하기위하여 본 연구에서는 직접적인 접근횟수 대신에 다음의 세가지 경우로 분류하여 효용함수 값을 구하였다.

$u=0.1$ 민감한 물질, 장비 및 기술에의 접근이 쉽고 빠른 경우, 그리고 그런 접근이 통상적으로 일어나는 운전과정의 하나일 때 (예를 들면, 회분식 공정의 경우)

$u=0.5$ 연속식 공정의 경우에 해당하며 운전과정의 하나로서 특별한 접근허용이 필요한 경우.

$u=1.0$ 특별한 경우가 아니면 핵물질에의 접근이 허용되지 않는 경우일 때.

위의 세가지 효용함수에 대하여 다섯 가지 대안 핵연료주기에 대한 효용입력변수를 검토한 결과가 표 17에 보여진다.

표 17. 시설 접근성에 대한 효용입력 변수

핵연료주기 종류	전용대상 핵물질	시설운전형태, $X_{7,1}$	특수 장비의 필요성, $X_{7,2}$	핵물질에의 접근횟수, $X_{7,3}$
		수동/자동/원격	Y or N	1년 중 또는 정상운전 중 접근이 일어나는 정도
직접처분 주기	사용후핵연료 다발	수동/원격	Y	거의 일어나지 않음
습식재처리주기	PuO ₂ powder (8kg Pu)	수동	N	운전과정중 특별한 허가 필요
	MOX 신핵연료 다발	수동	N	운전과정중 특별한 허가 필요
DUPIC 핵연료주기	DUPIC 신핵연료 다발	수동/원격	Y	1 회분식 공정마다 1회
파이로-고속로 핵연료주기	TRU ingot	수동/원격	Y	1 회분식 공정마다 1회
	SFR TRU ingot	수동/원격	Y	1 회분식 공정마다 1회
선진습식처리-고속로 핵연료주기	TRU ingot	수동/원격	Y	1 회분식 공정마다 1회
	SFR TRU ingot	수동/원격	Y	1 회분식 공정마다 1회

(3) 핵물질 가용량에 대한 효용함수, $u(x_8)$

핵무기 제조를 위해서는 적어도 핵임계를 일으킬 수 있는 양 1 SQ의 핵물질이 필요하게 된다. 만약에 시설이나 공정 중에 핵임계에 필요한 충분한 양의 핵물질이 없는 경우 핵확산저항성이 높게 되며, 이런 핵물질의 가용량은 시설 및 공정, 그리고 사용되는 기술 등에 영향을 받으며, 또한 시설에 적용되는 물리적방호 및 안전조치에도 영향을 받게 된다. 이 핵물질 가용량 방벽은 어느 순간에 핵연료주기시설 내에 존재하는 핵물질의 양과 관련이 있기 때문에 이 방벽은 희석되거나 혼합물로 이루어진 핵물질에서 추출해 내야하는 순수 핵무기용 물질의 양과 관련이 있게 된다.

따라서 다섯 가지 대안 핵연료주기에 대해서 1년에 1 TWh의 전기생산량에 필요한

핵물질 처리시설의 시설용량 (throughput)을 나타내기 때문에 각 핵연료주기별로 전용대상 핵물질을 취급하는 공정의 시설용량을 알아야 한다. 실제적으로 1 년에 1 TWh 전기 생산을 위해 처리되어야 할 핵물질 양을 바탕으로 회분식공정 및 연속식공정의 시설규모를 도출하여야 하나, 본 연구에서는 1 TWh 전기생산량에 필요한 핵물질량을 입력변수로 하여 효용함수 값을 구하였다.

표 18. 1 TWh 전력생산에 필요한 핵연료주기별 핵물질 가용량

핵연료주기 종류	전용대상 핵물질	대상 공정	년간 처리량 (tHM)	임계질량수
직접처분 주기	사용후핵연료 다발	중간저장시설	2.19	3.135
습식재처리주기	PuO ₂ powder (8kg Pu)	PUREX 공정	0.0215	2.370
	MOX 신핵연료 다발	PUREX 공정	0.429	3.754
DUPIC 핵연료주기	DUPIC 신핵연료 다발	DUPIC 핵연료제조공정	2.33(?)	2.621
파이로-고속로 핵연료주기	TRU ingot	Pyro 회분식공정	0.021	1.458
	SFR TRU ingot	Pyro 회분식공정	0.284	11.003
선진습식처리-고속로 핵연료주기	TRU ingot	UREX+1a 공정	0.021	1.458
	SFR TRU ingot	UREX+1a 공정	0.284	11.003

핵물질 가용량 방벽의 효용함수는 다음과 같이 감소하는 exponential 함수로 표시되었는데

$$u(x_8) = \exp(-2.8766x_8) \quad (12)$$

여기에서 x_9 은 가용량방벽 효용함수에 대한 효용입력변수로서 1 TWh 전력생산에 필요한 전용대상 핵물질의 처리 용량을 표시하며, 효용함수가 그림 14에 나타나 있다.

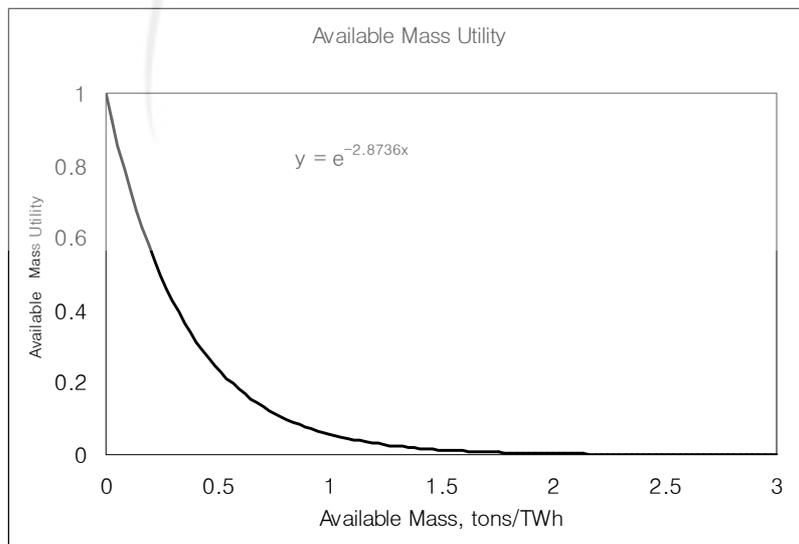


그림 14. 핵물질 가용량에 대한 효용함수

만약에 공정 중에 핵물질이 처리되지 않으면 핵확산저항성은 1이 되며, 처리 용량이 3 ton 이상인 경우는 핵확산저항성을 0으로 놓았다. 여기에서 처리 용량이 작을수록 용량증가가 핵확산저항성에 큰 영향을 미치며, 대용량에서는 용량변화가 핵확산저항성에 큰 영향을 주지 않는다는 것을 보여주고 있다.

(4) 전용탐지성에 대한 효용함수, $u(x_9)$

전용탐지성이라 함은 시설이나 처리 중에 핵물질의 전용이나 도난이 시도 될 때 그것을 발견해 낼 수 있는 가능성 정도를 나타낸다. 이 경우 핵물질의 전용에 대한 탐지성과는 달리 시설, 기술 또는 처리공정 자체가 핵물질 전용이나 도난에 대해 갖고 있는 탐지성을 나타내게 된다. 이 탐지성은 또한 전용을 막기 위해 제도적으로 시설에 적용이 되는 IAEA의 안전조치 개념과도 다르며 실제적으로 시설이나 기술, 처리공정이 고유하게 갖고 있는 탐지성을 나타내게 된다. 시설에 대한 탐지성이라 함은 시설에 변형을 주었을 때 탐지가 가능한 정도를 나타내며 시설의 비 매력성에 포함된 속성들과도 연관이 된다.

대부분의 공정이나 운전은 핵물질계량관리와 공정제어에 있어서 불확실성(uncertainty)을 수반하게 된다. 이 불확실성에 기인한 미계량물질(MUF)의 양은 공정의 처리용량과 계량관리시스템의 측정정밀도에 따라 증가 또는 감소한다. 따라서 대용량의 공정시설로서 측정오차가 큰 경우는 적은 용량의 측정오차가 적은 경우보다 핵확산저항성이 크게 된다. 그러나 고도로 정확한 계량관리시스템은 순수한 핵물질을 가지고 있는 경우에만 가능하기 때문에 전용이나 도난의 어려움 정도도 탐지성의 한 속성 인자로 보고 검토를 하기로 한다. 결론적으로 탐지성을 결정하는 인자들로:

- item 운전 등 낱개로 셀 수 있는 핵물질이나 공정의 형태, 그리고 또는 bulk 운전인 경우 계량관리를 정확하게 할 수 있는 정도
- 유사물질을 구별해낼 수 있는 검증 및 계량 장비의 불확실성

등이 있는데, 평가변수로서는 시설 내에 핵물질전용을 탐지해 낼 수 있는 장비가 시설 내에 존재 유무, 그리고 존재하는 경우 시설 운전 중에 핵물질 전용의 어려움 정도가 있다. 이와 같이 시설의 전용 탐지성 방벽은 여러 가지의 인자에 따라 결정이 되는데, 본 연구에서는 핵물질이 item counting 이 가능한지를 우선 평가지표로 결정하였으며, 핵연료 다발 등 item counting 이 가능한 경우는 핵확산저항성 효용함수를 1로 보았으며, ingot 형태인 경우에는 0.9, 그리고 분말의 경우는 0.5 로 가정하였다. 표 19는 5가지 핵연료주기에 대한 시설의 탐지성 효용함수를 보여준다.

표 19. 핵연료주기 별 시설탐지성에 대한 효용함수 값

핵연료주기 종류	전용대상 핵물질	대상 공정	효용함수 값
직접처분 주기	사용후핵연료 다발	중간저장시설	1
습식재처리주기	PuO ₂ powder (8kg Pu)	PUREX 공정	0.5
	MOX 신핵연료 다발	PUREX 공정	1
DUPIC 핵연료주기	DUPIC 신핵연료 다발	DUPIC 핵연료제조공정	1
파이로-고속로 핵연료주기	TRU ingot	Pyro 회분식공정	0.9
	SFR TRU ingot	Pyro 회분식공정	0.9
선진습식처리-고속로 핵연료주기	TRU ingot	UREX+1a 공정	0.9
	SFR TRU ingot	UREX+1a 공정	0.9

(5) 민감 기술의 습득에 대한 효용함수, $u(x_{10})$

대부분의 핵연료주기시설, 공정 그리고 운전을 위해서는 정도의 차이는 있지만, 핵무기프로그램에 응용될 수 있는 여러 가지 기술, 전문성, 그리고 지식들을 포함하게 된다. 따라서 민감기술 습득에 대한 효용함수를 결정하는데 영향을 주는 인자들로서는:

- 핵연료주기의 공정단계에 있어서 NSG의 이중 품목과 같은 특수한 기술 및 지식. 일반적으로 그러한 특별한 기술이 요구되지 않는 핵연료주기시설은 그런 기술이 필요한 시설보다 핵확산저항성이 높다고 보며 된다.
- 그러한 정보들이 핵무기개발프로그램에 직접적으로 응용이 될 수 있는 정도와 이중품목기술의 응용성 정도. 여기에서 적용성이 낮은 경우가 적용성이 높은 경우보다 핵확산저항성이 높게 된다.
- 그러한 정보들이 보편적으로 얻어질 수 있는지의 여부. 즉, 핵무기개발 프로그램을 위하여 필요한 그러한 정보를 기타 정보원으로부터 얻는 데 필요한 시간도 속성인자의 하나다 된다. 따라서 그런 정보를 기타의 정보원으로부터 손쉽게 얻을 수 있는 경우는 핵확산저항성이 낮은 것을 나타낸다. 따라서 효용함수를 결정하는 인자 및 그에 따른 효용함수들을 다음과 같이 도출하였다.

$u=0.1$ 공정, 공정기술 또는 시설이 핵무기프로그램에 직접적으로 응용될 수 있는 전문성을 제공하는 시설.

$u=0.5$ 시설 및 공정 내에 존재하는 기술들이 핵무기개발 프로그램을 지원할 수 있는 경우이거나, 교육을 통해서 그러한 전문성을 취득할 수 있는 시간을 줄일 수 있는 경우.

$u=0.9$ 시설에서 사용되는 기술들이 일반적인 산업기술이며, 일반적으로 손쉽게 얻어질 수 있는 기술들인 경우.

따라서 본 연구에서는 사용후핵연료 급 핵물질을 취급하는 기술성만을 필요로 하는 시설에 대해서는 효용함수 기본 값 0.9를 부여하였으며, 이외로 전해분리기술에 대해 0.2의 효용함수 값, 그리고 용매추출기술이 필요한 시설에 대해서는 0.4의 효용함수를 부

과하였다. 이 가정에 따라 검토 대상 핵연료주기의 민감 기술 습득에 대한 효용함수 값을 계산한 결과가 표 20에 나타나 있다.

표 20. 민감기술 습득에 대한 효용함수 값

핵연료주기 종류	전용대상 핵물질	대상 공정	사용된 기술 및 지식	효용함수 값
직접처분 주기	사용후핵연료 다발	중간저장시설	SF 취급기술	0.9
습식재처리주기	PuO ₂ powder (8kg Pu)	PUREX 공정	SF취급, 용매추출	0.5
	MOX 신핵연료 다발	PUREX 공정	SF취급, 용매추출	0.5
DUPIC 핵연료주기	DUPIC 신핵연료 다발	DUPIC 핵연료제조공정	SF 취급기술	0.9
파이로-고속로 핵연료주기	TRU ingot	Pyro 일관공정	SF취급, 전해분리기술	0.7
	SFR TRU ingot	Pyro 일관공정	SF취급, 전해분리기술	0.7
선진습식처리-고속로 핵연료주기	TRU ingot	UREX+1a 공정	SF취급, 전해분리기술	0.7
	SFR TRU ingot	UREX+1a 공정	SF취급, 전해분리기술	0.7

(6) 시간에 대한 효용함수, $u(x_{11})$

핵물질이나 시설 또는 기술들이 전반적으로 전용이 가능할 수 있도록 방치되어 있는 시간도 핵확산저항성을 결정하는 데 중요한 인자가 된다. 예를 들면, 핵물질이나 장비들의 보관시간도 핵확산위험성을 나타내며, 그 보관 시간이 길면 길수록 핵확산을 시도하는 국가나 제3자에게 전용을 할 수 있는 기회를 주게 되기 때문에 핵확산저항성이 낮은 것이 된다. 따라서 효용함수는 다음과 같은 예를 보고 결정이 될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 다음과 같이 보관기간에 따라 효용함수를 정의 하였으며, 표 21에 핵연료주기에 대한 효용함수값을 나타 내었다.

- $u=0.1$ 보관 기간이 수십년 단위일 때
- $u=0.3$ 보관 기간이 길지만 그 보관시설 안으로의 접근 가능성이 높은 경우
- $u=0.5$ 보관기간이 수년 단위인 경우이며 접근 가능성이 낮은 경우
- $u=0.7$ 보관 시간이 없거나 수일 또는 수개월의 단위이며 접근 가능성이 낮은 경우.

표 21. 핵연료주기에 대한 시간에 대한 효용함수 값

핵연료주기 종류	전용대상 핵물질	대상 공정	보관 기간	효용함수 값
직접처분 주기	사용후핵연료 다발	중간저장시설	2~50 년	0.5
습식재처리주기	PuO ₂ powder (8kg Pu)	PUREX 공정	수주일	0.3
	MOX 신핵연료 다발	PUREX 공정	수개월	0.4
DUPIC 핵연료주기	DUPIC 신핵연료 다발	DUPIC 핵연료제조공정	수개월	0.7
파이로-고속로 핵연료주기	TRU ingot	Pyro 일관공정	수주	0.7
	SFR TRU ingot	Pyro 일관공정	수주	0.7
선진습식처리-고속로 핵연료주기	TRU ingot	UREX+1a 공정	수주	0.7
	SFR TRU ingot	UREX+1a 공정	수주	0.7

4.2.3 제도적 차원의 핵확산저항성 인자

제도적 차원의 핵확산방벽이라 함은 핵연료주기에서의 물질적 특성에 관한 핵확산 방벽이나 기술적 고유 핵확산저항성의 약점을 보완하기 위하여 제도적으로 도입되는 수단, 통제 또는 협정들을 의미하며, IAEA에 의한 안전조치, 핵물질 계량관리, 효과적이고 종합적인 실시간의 핵물질 측정, 그리고 민감정보나 핵수출 통제 등 기타 조치들을 의미한다. 그 외로도 원자력시스템이 위치해 있는 지역의 정치 경제적 상황이나 그 시설을 보유하고 있는 국가의 핵비확산 관련 국제협약에의 참여등도 포함이 된다.

이들 여러 가지 인자들 중에 본 연구에서는 아음과 같이 3가지 인자를 검토하기로 한다.

(1) 안전조치에 관한 효용함수, $u(x_{12})$

안전조치는 핵물질 전용 또는 도난, 그리고 시설의 오용에 대한 감시, 탐지 그리고 억제 및 제지를 나타내는 외부적인 조치이며, 핵확산에 대한 효과적이고 직접적인 핵확산 억제책일 뿐만 아니라 투명성을 제공하고 빠른 시간 내에 불법적인 행위들을 탐지해 낼 수 있는 역할을 갖고 있다. 따라서 이를 결정짓는 인자들로는

- 관련정보의 공개성 및 접근성
- 핵물질에 대한 최소 탐지 가능량
- 침투, 예견되지 않은 장치의 이동, 또는 계획되지 않은 공정의 운전 등 불법 활동을 탐지해 낼 수 있는 가능성 또는 뚜렷한 징후
- 탐지기나 감시 장비의 반응 시간
- 핵물질 및 장비의 재고량 측정 및 통제절차의 존재, 정확도 및 빈도 수
- 시설과 공정의 설계 및 운전에 대한 안전조치 개념의 포함 정도

등이 있다. 본 연구에서는 5가지 대안 핵연료주기시설 모두에 대하여 IAEA의 포괄적 안전조치협정에 맞는 안전조치 시스템이 적용된 것을 가정하였으며, 관련정보의 공개성 및 접근성은 같은 조건을 만족하고 있으며, 장치의 이동이나 공정의 운전 중 불법 활동을 탐지해 낼 수 있도록 IAEA camera 및 seal 등 같은 수준의 격납감시 장비들이 설계 및 설치되는 것으로 가정하였다. 따라서 다섯 가지 대안 핵연료주기에 대하여 효용함수를 구하는 데는 전용대상 핵물질이 분말인 경우와 고체 즉 ingot 이나 assembly 등 개수로 셀 수 있는지의 여부 등 계량관리 관점에 주안점을 두어 다음과 같은 참고 값을 이용하였으며 그 결과가 표 22에 보여진다.

표 22. 안전조치성에 대한 효용함수 값

핵연료주기 종류	전용대상 핵물질	대상 공정	평가변수 및 단위 (주요 안전조치 기술)	효용함수 값
직접처분 주기	사용후핵연료 다발	중간저장시설	Cameras, SCAL, HSGM, OFPS	0.9
습식재처리주기	PuO ₂ powder (8kg Pu)	PUREX 공정	Cameras, Cm balance, Weighing	0.5
	MOX 신핵연료 다발	PUREX 공정	Cameras, Item counting	0.9
DUPIC 핵연료주기	DUPIC 신핵연료 다발	DUPIC 핵연료제조공정	Cameras, Item counting	0.9
파이로-고속로 핵연료주기	TRU ingot	Pyro 일관공정	Cameras, Item counting, Weighing, Cm balance	0.9
	SFR TRU ingot	Pyro 일관공정	Cameras, Item counting, Weighing, Cm balance	0.9
선진습식처리-고속로 핵연료주기	TRU ingot	UREX+1a 공정	Cameras, Item counting, Weighing, Cm balance	0.9
	SFR TRU ingot	UREX+1a 공정	Cameras, Item counting, Weighing, Cm balance	0.9

u=0.1 안전조치를 위한 계량관리 기기의 정확도가 IAEA에서 오차범위를 충족시키지 못하는 경우로서, 또한 측정변수들이 제한적인 경우. 그리고 실시간 격납감시 장비도 제한적이며 전용이 일어났는지 판별하기가 모호한 경우로서 안전조치의 오차가 커지게 된다.

u=0.5 안전조치를 위한 관련 측정변수 또는 인자들이 충분하나 일부 측정변수들의 결과값들이 IAEA 가 요구하는 균질성을 충족치 못하여 안전조치 결과에 오차가 존재 할 수 있는 경우로서 복수의 격납감시 장비들이 신뢰도를 가지고 분별이 가능한 독립적인 결과들을 나타 내는 경우. 그러나 이 경우에도 안전조치 격납감시 장비가 성능이 저하되거나 가동중단이 되는 경우에는 물질현황에 대한 불확실성이 증가하게 된다.

u=0.9 계량관리가 충분히 이루어질 수 있으며, 복수의 격납감시 장비들이 신뢰도를 가지고 분별이 가능한 독립적인 결과들을 나타 내는 경우이다. 그러나 이 경우에도 안전조치 격납감시 장비가 성능이 저하되거나 가동중단이 되는 경우에는 물질현황에 대한 불확실성이 증가하게 된다.

(2) 접근통제 및 보안, u(x₁₃)

접근통제 및 보안 방벽은 국가보다는 terrorist 나 sub-national group 인 제3자에 의한 핵물질 전용이나 도난을 방지하는데 아주 우수한 효과를 보이며 시설의 오용방지에도 효과적이다. 특히 여기에서 논의되는 접근통제 및 보안 방벽은 시설이 가지는 특성과는 달리 제도적 또는 행적적인 차원의 속성인자들로써 다음과 같은 것들이 있다.

- 핵물질에 접근하기 위하여 거쳐야 하는 행정절차 등의 유무

- 물리적 방호 및 보안조치
- 기타 backup 지원이 가능한지의 여부
- 위에 열거된 접근 방지 및 물리적 방호조치들이 얼마나 효과적으로 이행이 되고 있는지, 그리고 필요한 경우 지원을 받을 수 있는지의 여부 등이다.

따라서 국가에 의한 핵물질의 전용에 대해서는 그 효용성이 의심스러울 수밖에 없으며, 이런 이유 때문에 다섯 가지 대안 핵연료주기에 대한 접근통제 및 보안 방벽에 대한 효용 값은 표23에서 처럼 행정절차와 접근통제 및 물리적 방호 조치가 효과적으로 적용이 되고 있으며, 필요한 경우 내부 및 외부의 지원이 가능하다는 가정을 하였으며, 모든 경우에 있어서 같은 값을 갖는다고 가정하였다.

표 23. 접근통제 및 물리적 방호에 대한 효용함수 값

핵연료주기 종류	전용대상 핵물질	대상 공정	평가변수 및 단위	효용함수 값
직접처분 주기	사용후핵연료 다발	중간저장시설	접근 행정절차 및 기록, 물리적 방호	1
습식재처리주기	PuO ₂ powder (8kg Pu)	PUREX 공정	“	1
	MOX 신핵연료 다발	PUREX 공정	“	1
DUPIC 핵연료주기	DUPIC 신핵연료 다발	DUPIC 핵연료제조공정	“	1
파이로-고속로 핵연료주기	TRU ingot	Pyro 일관공정	“	1
	SFR TRU ingot	Pyro 일관공정	“	1
선진습식처리-고속로 핵연료주기	TRU ingot	UREX+1a 공정	“	1
	SFR TRU ingot	UREX+1a 공정	“	1

(3) 위치에 관한 효용함수, $u_{14}(x)$

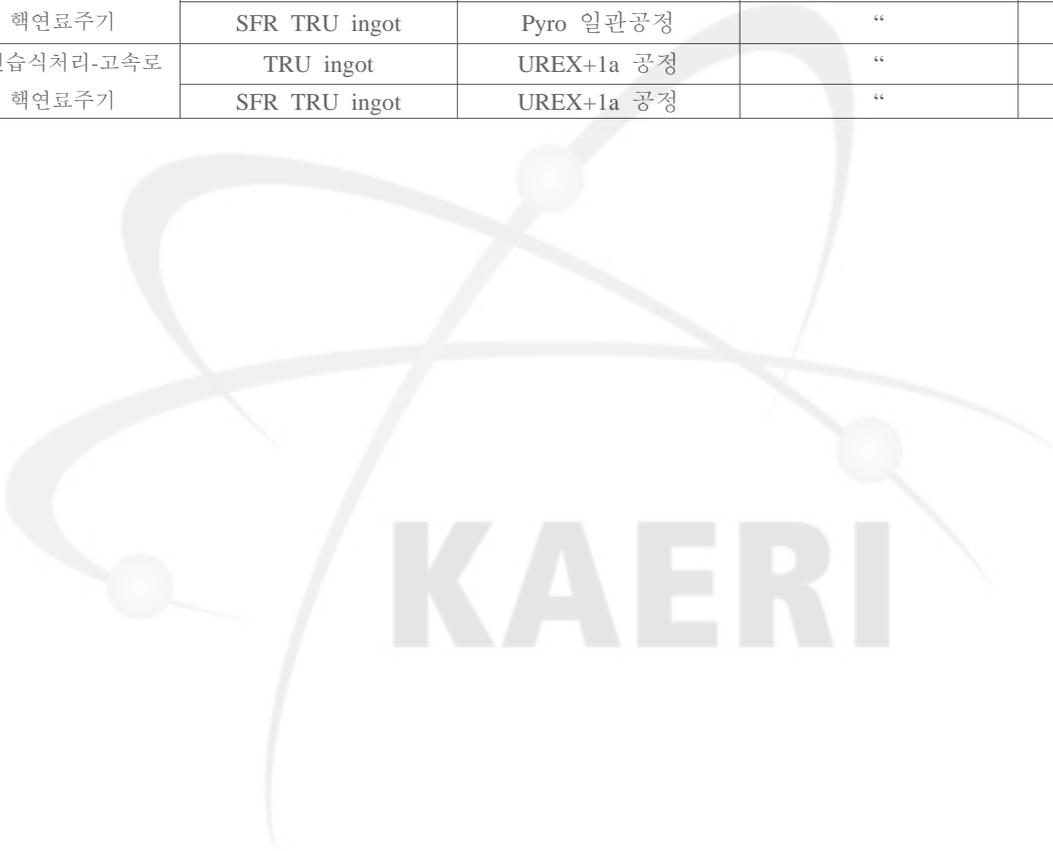
위치에 대한 효용함수는 여러 가지 측면에서 개연성이 크다. 예를 들면 시설이 원격지에 위치해 있을 경우 핵확산 시도자에게는 어려움을 제공하지만 방어하기에도 시간이 걸리고 어렵게 된다. 그리고 시설들이 여러 장소에 산재해 있는 경우 시설 간에 핵물질 운반의 필요성이 제기되며, 운반에 따른 전용 위험성이 따르게 된다. 반면에 같은 장소에 시설들이 같이 위치한 경우는 이런 부가적인 조치들의 필요성이 없어지며 핵확산 위험도가 줄게 된다.

이 위치에 대한 효용함수는 접근통제 및 보안 방벽과 마찬가지로 국가에 의한 전용의 경우 그 효용성이 낮으며, 본 연구에서는 5가지 대상 핵연료주기에 대하여 가장 핵확산 위험이 큰 전용경로에 해당하는 한 개의 시설 및 공정에 대해서 핵확산저항성을 비교하는 조건이기 때문에 원자로와의 동일부지 여부를 효용함수 값의 평가변수로 고려하였다. 즉, 건식처리공정을 이용하는 DUPIC 핵연료주기와 파이로-고속로 핵연료주기에 대해서는 원자로와 동일부지 조건을 가정하였으며, 그 외의 핵연료주기의 경우는 원자로와 별개의 중앙처리시설을 가정하여 동일부지의 경우는 효용함수값을 1, 그

렇지 않은 경우는 효용함수값을 0으로 놓고 핵확산저항성을 비교 하였다.

표 24. 위치에 대한 효용함수 값

핵연료주기 종류	전용대상 핵물질	대상 공정	평가변수 및 단위	효용함수 값
직접처분 주기	사용후핵연료 다발	중간저장시설	원자로와 동일부지 여부	0
습식재처리주기	PuO ₂ powder (8kg Pu)	PUREX 공정	“	0
	MOX 신핵연료 다발	PUREX 공정	“	0
DUPIC 핵연료주기	DUPIC 신핵연료 다발	DUPIC 핵연료제조공정	“	1
파이로-고속로 핵연료주기	TRU ingot	Pyro 일관공정	“	1
	SFR TRU ingot	Pyro 일관공정	“	1
선진습식처리-고속로 핵연료주기	TRU ingot	UREX+1a 공정	“	0
	SFR TRU ingot	UREX+1a 공정	“	0



KAERI

5. 핵연료주기 핵확산저항성 종합분석

본장에서는 전장에서 다요소 효용함수이론을 이용하여 구해진 14개 효용함수들을 이용하여 그림2에서부터 그림 6에 표시된 1)직접처분주기, 2) 습식재처리 핵연료주기, 3) DUPIC 핵연료주기, 4) 파이로-고속로 핵연료주기, 5) 선진습식-고속로 핵연료주기 등 다섯 가지의 핵연료주기 시나리오에 대해 핵확산저항성을 종합적으로 분석하였다.

또한 이상의 5가지 대안 핵연료주기가 우라늄의 채광(mining), 변환(conversion), 농축(enrichment), 그리고 핵연료제조(fabrication)의 같은 공정들로 공통적으로 구성이 되어 있고 특히 이중 가장 민감한 공정단계인 농축공정시설이 한국에 존재하지 않기 때문에 이 선행핵연료주기에 대한 핵확산저항성분석 비교는 고려하지 않았으며, 원자로에서 나온 사용후핵연료 부터 고려한 후행핵연료주기의 핵확산저항성이 비교 검토되었다. 그리고 그림 9는 5가지 대안 핵연료주기에 대한 종합적인 핵확산저항성을 평가하기 위한 14개 평가인자들을 단계별로 표시를 한 그림이다.

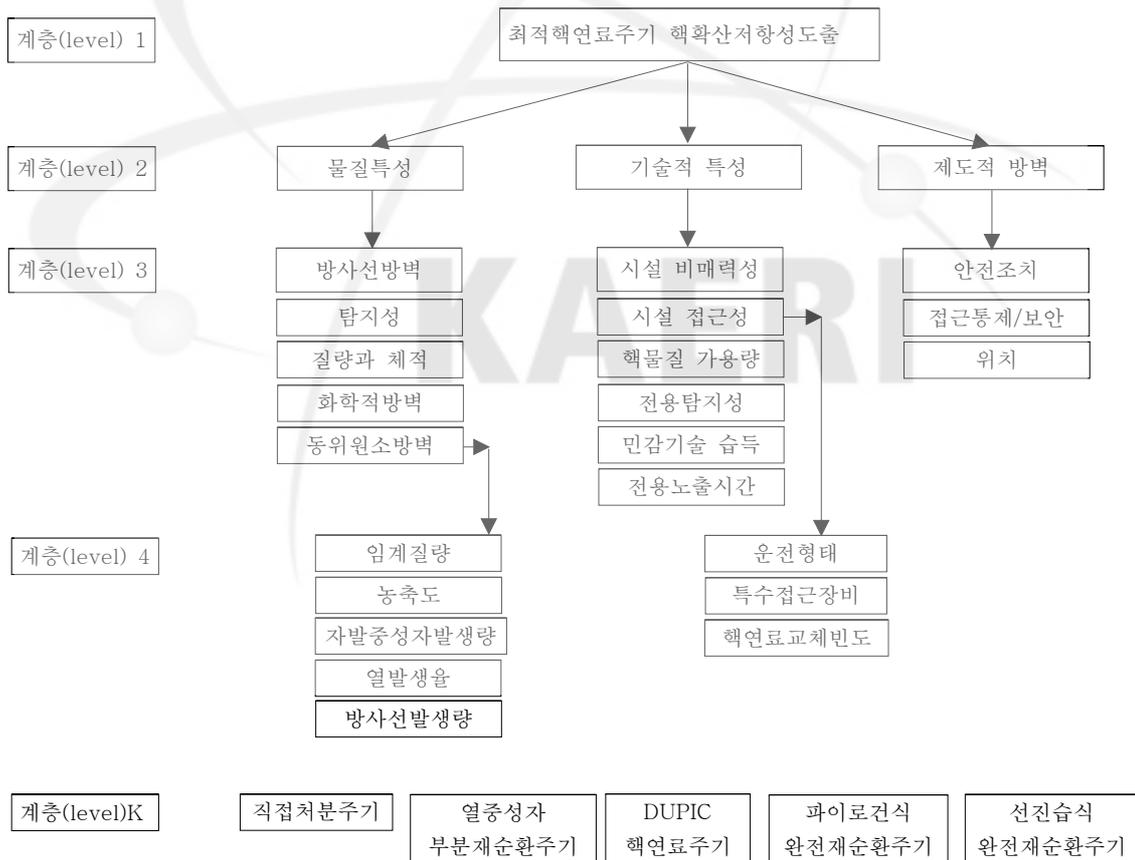


그림 15. 평가계층구조

그리고 우선 각 핵연료주기별로 가장 핵확산위험이 높은 공정을 선정하여 전용 목표가 되는 핵연료물질에 대해 1 SQ에 해당하는 양을 계산하였다. 예를 들면 PWR 사용후핵연료안에 있는 Pu의 농도가 약 1.1451 wt% 이기 때문에 실제 Pu 1 SQ 인 8kg의 Pu을 얻기 위해서는 사용후핵연료 698.63 kg을 전용해야 하는 것을 의미한다. 또한 각 핵연료주기에 대해 14개 평가인자에 대한 효용함수들의 값이 입력변수들에 따라 결정되었다.

5.1 핵확산저항성 평가인자에 대한 쌍대비교 및 가중치 분석

4장에서 구해진 효용함수를 적용하여 대상 핵연료주기의 핵심공정, 즉 j공정에 대한 핵확산저항성을 구하기 위해서는 (7) 식에 표시된 바와 같이, j 공정에 대한 효용변수들 간의 가중치 (weighting factor) w_{ij} , 즉, j 공정에 대한 $w_1, w_2, w_3, \dots, w_{14}$ 를 구해야 된다.

$$PR_j = u_j(x_1, x_2, x_3, \dots, x_{14}) = \sum_{i=1}^{14} w_{ij} u(x_{ij}) \quad (13)$$

여기에서 $w_1, w_2, w_3, \dots, w_{14}$ 는 상수로서, 요소의 상대적 중요도를 의미한다. 일반적으로 다요소 효용함수이론에서는 $w_1, w_2, w_3, \dots, w_{14}$ 를 구하기 위하여 각각의 효용함수를 표준화한 후 확률등가를 사용한다. 본 연구에서는 대신 계층분석과정에서의 가중치 산정방법(고유벡터법)을 사용하였다.

즉, a_{ij} 가 효용변수 x_i 의 효용변수 x_j 에 대한 비교 인자를 나타낸다고 가정하면 이들 간의 중요도는 쌍대비교를 이용하여

$$a_{ij} = \frac{w_i}{w_j} \quad (14)$$

의 식으로 표시할 수 가 있으며, 14개 효용변수에 대하여 (4)식에 표시된 순열 A 를 만들게 되면, 이 순열 A는 고유치 함수

$$\underline{A} \underline{w} = \lambda \underline{w} \quad (15)$$

를 만족하게 된다. 여기에서 고유벡터 \underline{w}_j ($w_{j1}, w_{j2}, w_{j3}, \dots, w_{j14}$) 는 고유치함수 (eigenvalue equation) 에서 구해지게 되는데, 표25-12는 국가에 의한 핵물질의 비밀 전용에 대한 14개의 핵확산저항성인자의 상대적 중요도를 구하기 위하여 수행한 쌍대비교의 결과이다.

우선 상위 단계인 물질특성, 시설의 기술적 특성, 그리고 시설의 제도적 특성에 대한 중요도를 표시하면 표 25와 같으며, 14개의 평가 이자에 대한 각 분야별로 중요성을 비교하면 표 23 과 같다. 최하위 단계인 동위원소 방벽 및 시설접근성에 대한 효용함수의 중요도 비교는 표 24 및 표 25에 나타나 있다.

표 25: 제 1차 단계의 핵확산저항성 방법의 중요도에 대한 쌍대 비교

	물질 특성	시설의 기술적 특성	시설의 제도적 특성
물질 특성	1	2.0	1.3
시설의 기술적 특성		1	1.5
시설의 제도적 특성			1

일관성지수 (Consistency index) = 0.00007

표 26: 제 2 단계의 핵확산저항성 방법의 중요도에 대한 쌍대 비교

	u ₁	u ₂	u ₃	u ₄	u ₅	u ₆	u ₇	u ₈	u ₉	u ₁₀	u ₁₁	u ₁₂	u ₁₃	u ₁₄
u ₁	1	1.2	2.5	1.7	1.3									
u ₂		1	2.1	1.4	1.1									
u ₃			1	1.5	1.9									
u ₄				1	1.3									
u ₅					1									
u ₆						1	1.2	2.5	1.6	1.4	1.6			
u ₇							1	2.4	1.9	1.3	1.4			
u ₈								1	4.4	1.7	1.7			
u ₉									1	2.5	2.7			
u ₁₀										1	1.2			
u ₁₁											1			
u ₁₂												1	1.6	8.1
u ₁₃													1	4.4
u ₁₄														1

u₁~u₅에 대한 일관성지수 (Consistency index) = 0.0001
 u₆~u₁₁에 대한 일관성지수 (Consistency index) = 0.00061
 u₁₂~u₁₄에 대한 일관성지수 (Consistency index) = 0.0

표 27: 동위원소방벽 효용함수(u₅)에 대한 평가인자에 대한 중요도 비교

	임계질량	Pu 순도	자발중성자 발생률	자연 열 발생율	방사선 발생율
임계질량	1	2.5	2.5	1.6	1.2
Pu 순도		1	1.0	1.5	1.9
자발중성자 발생률			1	1.6	2.0
자연 열 발생율				1	1.2
방사선 발생율					1

일관성지수 (Consistency index) = 0.00048

표 28: 시설접근성 효용함수(u₇)에 대한 평가인자의 중요도 비교

	운전형태	특수장비 필요성	접근횟수
운전형태	1	5.4	4.6
특수장비 필요성		1	1.0
접근횟수			1

일관성지수 (Consistency index) = 0.00004

그리고 이들 쌍대비교 값들을 이용하여 국가에 의한 핵물질전용에 대한 14개 핵확산저항성 평가인자들의 가중치(weighting factor) 값이 표 26에 나타나 있다.

표 29. 덧셈독립성을 가진 핵확산저항성 평가식(7)의 가중치 값

i	1단계 평가인자	가중치	2단계 평가인자	가중치, w _i	3단계 평가인자	가중치, w _{ij}		
1	물질 특성 방벽	0.441	방사선 방벽	0.278	임계질량	0.114		
2			탐지성 방벽	0.233				
3			질량 및 체적	0.111				
4			화학적 방벽	0.165				
5	동위원소 방벽	0.213		0.213	Pu 순도	0.278		
					자발중성자 발생량	0.284		
					열 발생량	0.180		
					방사선발생량	0.144		
6	시설의 기술적 특성 방벽	0.222	시설의 비매력성	0.191	운전형태	0.714		
7			시설의 접근성	0.168			특수장비 필요성	0.139
8			핵물질 가용량	0.073			접근가능횟수	0.147
9			전용 탐지성	0.318				
10			민감기술의 습득	0.132				
11			시간	0.118				
12			안전조치	0.579				
13	제도적 방벽	0.336	접근통제 및 보안	0.346				
14			위치	0.075				

5.2 핵연료주기 시나리오 별 핵확산저항성 평가

위의 가중치 값들을 바탕으로 5가지 대안 핵연료주기에 대한 핵확산저항성인자를 계산하면 다음과 같다.

$$PR_{(\text{직접처분주기})} = \sum_{i=1}^{14} w_i u_i(x_i) = 0.810 \quad (16)$$

$$PR_{(\text{습식재처리주기, PuO}_2\text{powder})} = \sum_{i=1}^{14} w_i u_i(x_i) = 0.399 \quad (17)$$

$$PR_{(\text{습식재처리주기, MOX신연료다발})} = \sum_{i=1}^{14} w_i u_i(x_i) = 0.522 \quad (18)$$

$$PR_{(\text{DUPIC핵연료주기})} = \sum_{i=1}^{14} w_i u_i(x_i) = 0.729 \quad (19)$$

$$PR_{(Pyro-SFR \text{ 핵연료주기}, TRU_{ingot})} = \sum_{i=1}^{14} w_i u_i(x_i) = 0.708 \quad (20)$$

$$PR_{(Pyro-SFR \text{ 핵연료주기}, SFR TRU_{ingot})} = \sum_{i=1}^{14} w_i u_i(x_i) = 0.750 \quad (21)$$

$$PR_{(Wet-SFR \text{ 핵연료주기}, TRU_{ingot})} = \sum_{i=1}^{14} w_i u_i(x_i) = 0.676 \quad (22)$$

$$PR_{(Pyro-SFR \text{ 핵연료주기}, SFR TRU_{ingot})} = \sum_{i=1}^{14} w_i u_i(x_i) = 0.718 \quad (23)$$

이 다섯 가지의 핵연료주기 시나리오에 대한 핵확산저항성 효용함수 값을 바탕으로 평가를 하면, 직접처분주기(0.810)가 핵확산저항성 측면에서 가장 우수한 것으로 나타났으며, 그 다음 순으로 DUPIC 핵연료주기 (0.729), Pyro 재처리-고속로 핵연료주기 (0.708~0.750) 및 선진습식재처리 핵연료주기(0.676~0.718)가 핵확산저항성이 좋았으며, 습식재처리 핵연료주기(0.399~0.522)의 경우 기타 핵연료주기의 절반 수준을 약간 상회하는 핵확산저항성을 보여주고 있었다. 특히, Pyro 재처리-고속로주기 및 선진습식 재처리-고속로 핵연료주기의 핵확산저항성이 아주 높은 핵확산저항성을 갖고 있는 것으로 알려진 DUPIC 핵연료주기의 핵확산저항성(0.729)과 비슷한 결과를 보여주는 것을 볼 때, Pyro 재처리-고속로 핵연료주기 및 선진습식재처리-고속로 핵연료주기가 기존의 재순환방식에 비하여 핵확산저항성이 큰 것을 알 수 있었으며, 어느 정도 상업화 수준에 근접하는 핵확산저항성을 보여준다는 것을 알 수 있었다. 반면에 습식재처리 핵연료주기는 화학공정을 이용하여 PuO_2 으로부터 금속Pu을 생산해 낼 수 있기 때문에 기대한 바와 같이 핵확산저항성 측면에서 취약성을 보여주고 있음을 알 수 있다.

5.3 핵확산저항성 평가인자의 가중치에 대한 민감도 분석

핵연료주기의 핵확산저항성 분석에 영향을 미치는 인자들로써 첫째, 평가인자의 선정에 있어서의 포괄성 및 적절성, 효용함수의 형태 및 정확성, 각 평가인자들 사이의 가중치 값, 핵확산주체의 기술적 경제적 능력 및 전용대상 물질의 형태 및 양, 그리고 시설 및 핵물질에 대한 안전조치 체제 등 여러 가지가 있을 수 있다. 이 중에서도 전문가들의 의견을 바탕으로 도출되는 평가인자들 사이의 가중치가 모든 효용함수를 종합적으로 합산하는 역할을 하기 때문에 정량적으로 핵확산저항성을 평가하는데 가장 큰 영향을 미치게 된다. 실제적으로 어떤 한 개의 효용함수의 값이 변하게 되는 경우 평가인자들 간의 가중치에 따라 전체적인 핵확산저항성에 영향을 미치기 때문에 가중치 분포에 의한 영향에 비해 핵확산저항성 결정에 극히 일부의 영향을 미친다고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 14개 평가인자들, 특히 제2단계의 물질특성 방법, 기술적

방법, 그리고 제도적 방법에 대한 가중치에 의한 영향을 우선적으로 분석하였다.

그림 16은 제2단계 평가인자들에 대한 기준가중치 (0.441, 0.222, 0.336)에 따른 핵확산저항성 인자를 보여주며, 그림 17은 물질특성에 따른 핵확산방벽의 가중치를 0.441에서 0.800로 증가시켰을 때(기술적 방법 및 제도적 방법의 중요도는 그에 반비례하여 중요성이 떨어짐)의 영향을 보여주고 있으며, 직접처분주기, 그리고 파이로-고속로주기와 선진습식재처리-고속로주기에서 SFR TRU ingot 을 전용하는 경우에 핵확산저항성을 증가시키지만 기타의 경우에는 오히려 핵확산저항성이 전반적으로 나빠지는 것을 보여주고 있다.

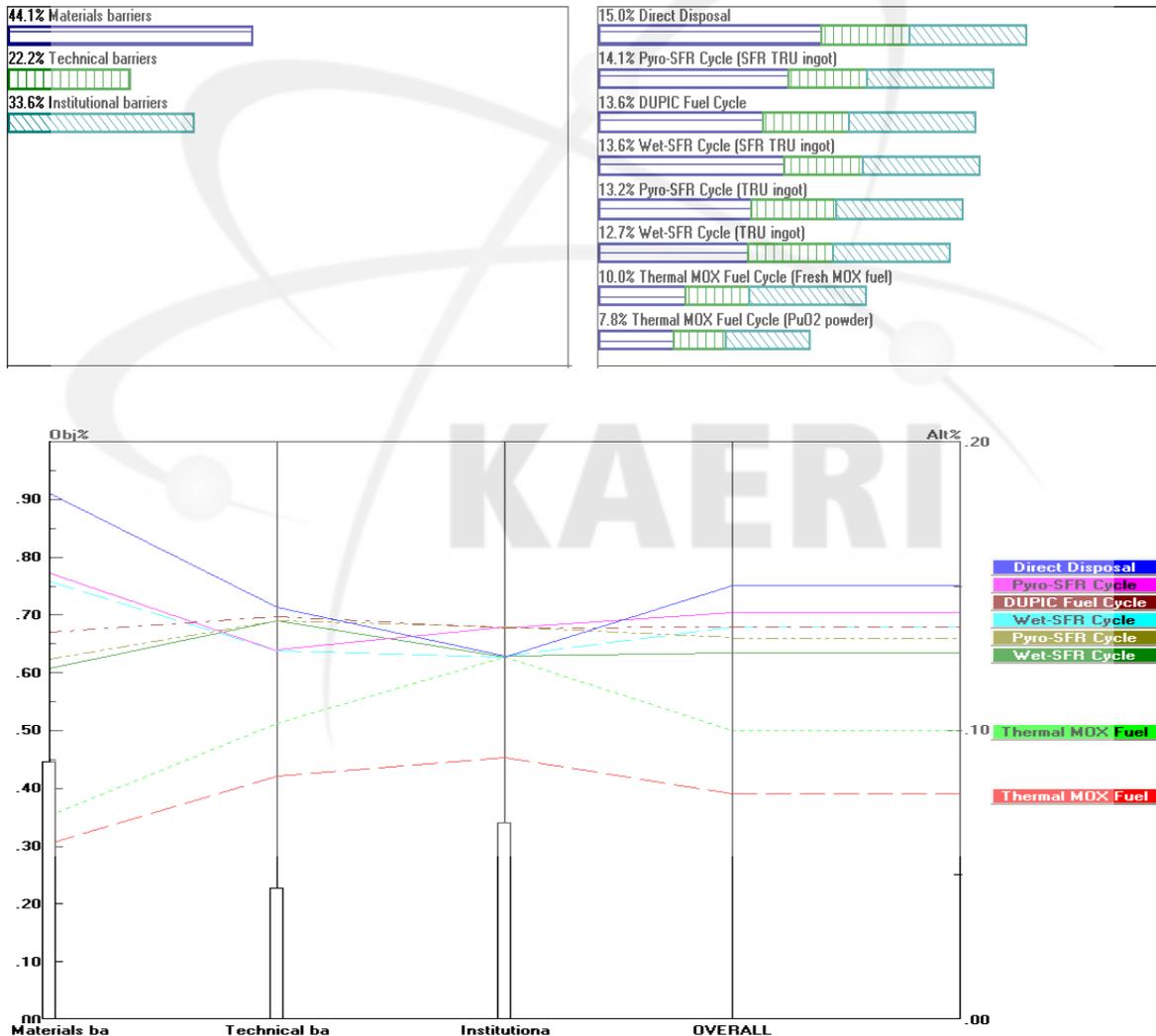


그림 16. 제2단계 평가인자에 대한 가중치에 따른 핵주기옵션 별 PR지수

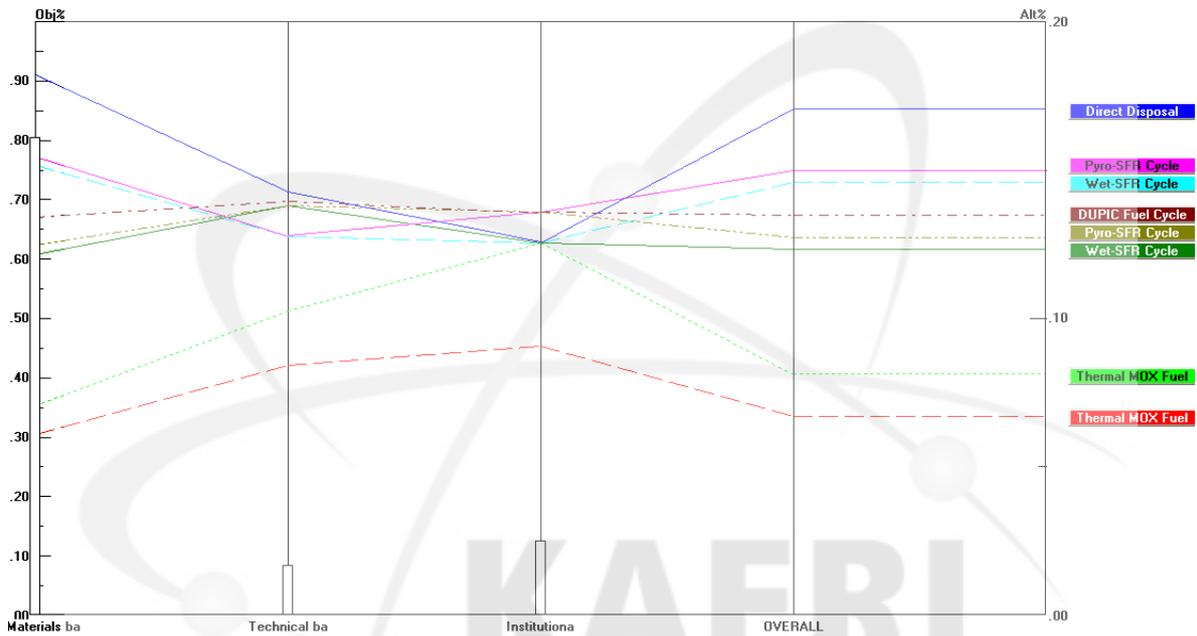
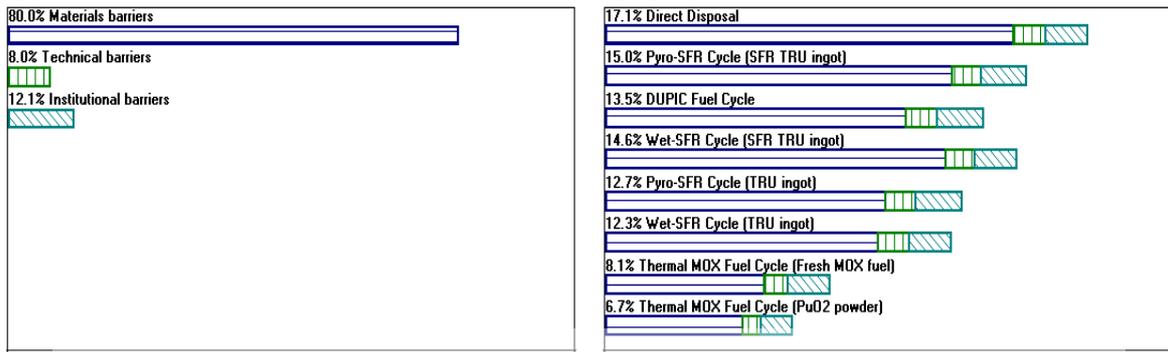


그림 17. 물질특성방벽의 가중치를 80%로 증가시켰을 때의 핵주기옵션별 PR 지수

그림18은 3가지 핵확산방벽인자, 즉 핵물질특성 방벽, 기술적 방벽, 그리고 제도적방벽의 가중치에 대한 동적민감도 분석을 위한 것으로서 실선은 기존조건에 대한 PR 지수를 보여주며, 점선으로 표시된 값은 물질특성을 0.800 으로 변화시켰을 때의 PR 지수를 보여주고 있다. 이와 마찬가지로 기술적 방벽 및 제도적 방벽에 대한 가중치를 변화시켜 그 영향을 분석해 볼 수 있으며, 마찬가지로 제3단계의 평가인자에 대한 가중치를 변화시켜서 그 영향을 검토해볼 수 있다. 또한 핵주기 시나리오옵션 별 비교 외에도 각각의 핵연료주기 시나리오에 대해서 핵확산저항성평가인자들의 가중치변화에 따른 영향을 검토해볼 수 있으나, 본 연구에서는 방법론을 확인하는 데에 중점을 두었기 때문에 기타 자세한 분석연구는 다음으로 미루었다.

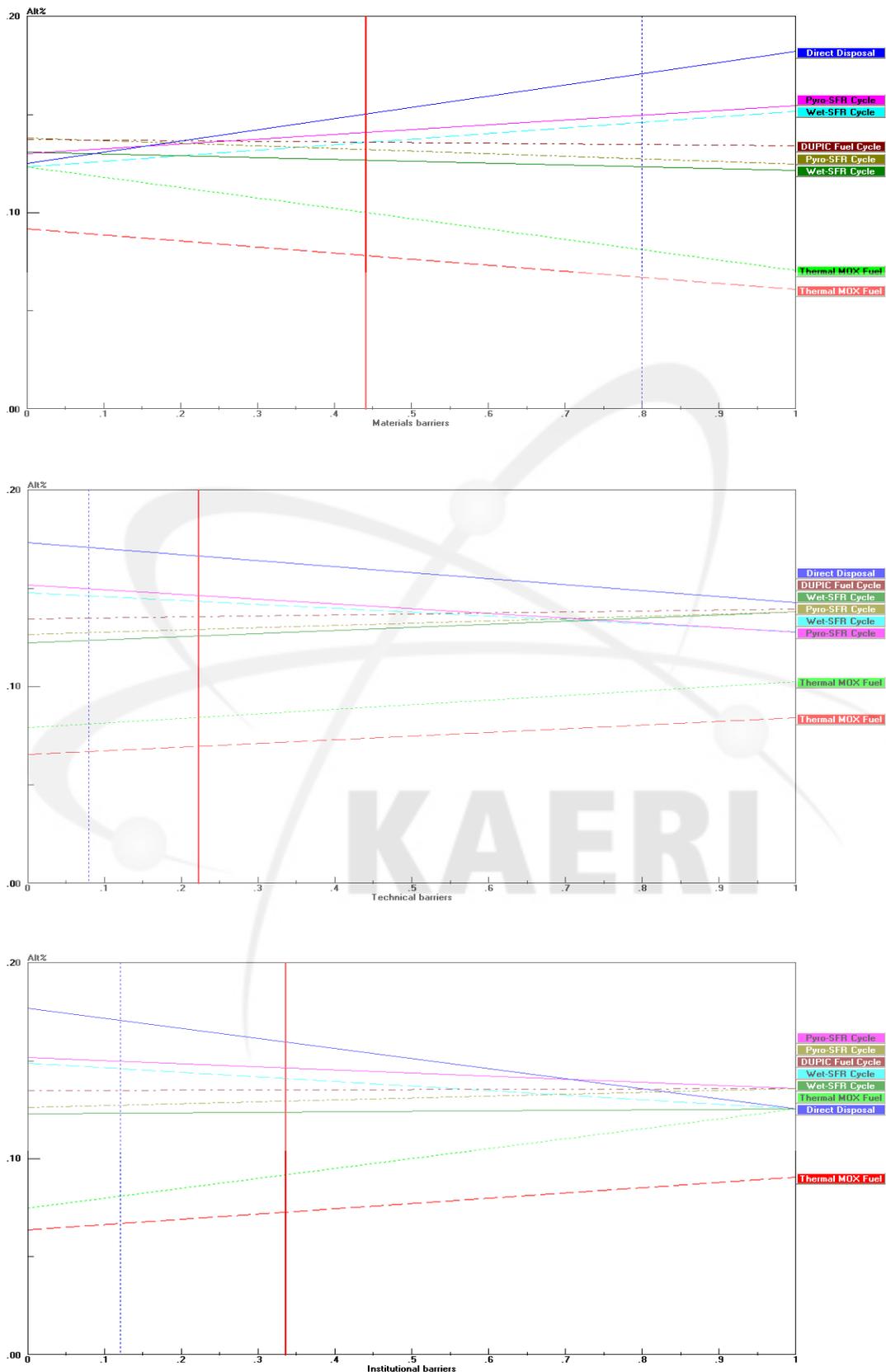


그림 18. 제2단계 평가인자의 가중치 변화에 따른 동적민감도 추세

6. 결론

재순환정책이나 직접처분정책이냐의 문제는 핵확산 측면에서 오랫동안 논쟁의 핵심이 되어 왔다. 핵확산과 관련된 가장 중요한 논쟁은 핵확산의 위험을 줄이는 데에는 공감대가 형성되어 있지만, 핵확산저항성을 정량화하여 비교·분석하는 데에는 한계가 있어 왔다. 따라서 본 연구에서는 여러 가지 핵연료주기에 대하여, 핵확산저항성 관련 인자들을 물질적 특성, 기술적 특성, 그리고 물질 및 시설에 적용되는 제도적 특성 등 세 가지 분야로 크게 구분하여 핵연료주기의 일반적인 핵확산저항성을 정량적으로 비교 분석하였다. 물질특성, 기술적 특성, 그리고 물질 및 시설에 대한 제도적 특성 등의 세 가지 상위 평가인자에 대하여, 다시 방사선방벽, 탐지성, 질량과 체적, 화학적 방벽, 동위원소 방벽 (물질적 특성), 시설의 비 매력성, 시설 접근성, 핵물질 가용량, 전용 탐지성, 민감 기술의 습득, 시간 (시설의 기술적 특성), 안전조치, 접근 통제 및 보안, 그리고 시설의 위치 (제도적 방벽) 등 3 내지 6개의 세부요소로 나누어서 다요소효용함수이론(Multiple-Attribute Utility Theory)과 계층화분석법(Analytic Hierarchy Process)을 이용하여 정량적인 핵연료주기의 핵확산저항성 평가를 시도하였다. 즉 핵확산저항성 평가인자 값을 결정하는 데에는 다요소효용함수이론(MAUT)을 이용하였으며, 각 평가인자의 중요도 선정에는 계층화분석법(AHP)을 이용하였다. 그리고 이들 방법론을 1) 직접처분주기, 2) 습식재처리주기, 3) DUPIC 핵연료주기, 4) Pyro-고속로 핵연료주기, 5) 선진습식재처리-고속로 핵연료주기 등 다섯 가지의 핵연료주기 시나리오에 적용하여 각각의 시나리오에 대하여 핵확산저항성을 정량적으로 계산하여 상대비교를 하였다.

그 결과, 다섯 가지의 핵연료주기 시나리오 중에서 직접처분주기(0.787)가 핵확산저항성 측면에서 가장 우수한 것으로 나타났으며, 그 다음 순으로 Pyro 재처리-고속로 (0.707~0.772) 및 선진습식재처리 핵연료주기(0.659~0.723)가 핵확산저항성이 좋았으며, 습식재처리 핵연료주기(0.377~0.492)의 경우 기타 핵연료주기의 절반 정도의 핵확산저항성을 보여주고 있었다. 대상핵연료주기 시나리오 중에서 습식재처리주기와 Pyro 재처리-고속로 핵연료주기, 그리고 선진습식재처리 핵연료주기-고속로 핵연료주기에서 대해서는 각각에 대하여 두 가지 전용경로를 검토하였는데 핵확산저항성이 가장 낮은 경우를 대상으로 핵확산저항성을 비교 분석할 필요가 있다. 특기할 만한 사항으로는 Pyro 재처리-고속로주기 및 선진습식재처리-고속로 핵연료주기의 핵확산저항성이 현재 높은 핵확산저항성을 갖고 있는 것으로 알려진 DUPIC 핵연료주기의 핵확산저항성 (0.737)과 비슷한 결과를 보여주는 것을 볼 때, Pyro 재처리-고속로 핵연료주기 및 선진 습식재처리-고속로 핵연료주기가 기존의 재순환방식에 비하여 핵확산저항성이 큰 것을 알 수 있었으며, 어느 정도 상업화 수준에 근접하는 핵확산저항성을 보여준다는 것을 알 수 있었다.

여기에서 특히 언급해야 될 사항은 정량적 평가방법에서 14개 핵확산저항성 평가인자들에 대한 가중치들은 관련 전문가들의 주관적 의견을 바탕으로 도출되는 값이기 때문에 근원적인 불확실성을 포함하게 된다. 하지만 핵확산저항성의 정의 자체에서부터 불확실성을 내포하고 있기 때문에 주관적인 불확실성을 최소화 하기 위하여 최근

핵확산저항성 평가방법론의 기초가 되는 Expert Elicitation 방법을 도입하여 활용하였다. 또한 Expert Elicitation 방법을 한 단계 보완하기 위하여 가중치에 대한 민감도 수행을 수행하여 그 영향을 분석하는 방법을 제시하여 그 유용성을 제시하였다.

또한 본 연구에서 사용된 핵확산저항성 평가방법 및 민감도 분석방법을 현재 개발 중에 있는 차세대 원자력시스템의 설계 단계에서부터 적용함으로써 차세대 원자력시스템에서 핵확산가능성이 있는 부분에 핵확산방벽을 보완함으로써 핵확산저항성을 높일 수 있을 것이다. 특히 차세대원자력시스템의 핵확산저항성이 낮은 공정 및 시설에 대해서는 물질특성에 따른 핵확산방벽이 충분치 못한 경우에는 기술적 특성이나 제도적 차원의 핵확산 방벽을 높일 수 있으며, 필요한 경우 IAEA 안전조치들을 보완하여 적용할 수 있는 방법들이 제안될 수 있을 것이다.



참고자료

- [1] International Atomic Energy Agency, "Proliferation Resistance Fundamentals for Future Nuclear Energy Systems," IAEA STR-332 (2002)
- [2] TOPS Task Force of the Nuclear Energy Research Advisory Committee (NERAC), "Technological Opportunities to Increase the Proliferation Resistance of Global Civilian Nuclear Power Systems (TOPS)," Department of Energy Office of Nuclear Energy, Science and Technology, Washington D.C. (2001)
- [3] 고원일 외, "Cost Evaluation of a Commercial-Scale DUPIC Fuel Fabrication Facility (Part II) - Preliminary Conceptual Design", KAERI/TR-1373/99 (1999).
- [4] Pascal Baron, et al., "An Evaluation of the Proliferation Resistance Characteristics of Light Water Reactor Fuel with the Potential for Recycle in the United States," AFCI Blue Ribbon Committee Report (2004)
- [5] J.P. Hinton, et al., "Proliferation Vulnerability Red Team Report," SAND97-8203 (1996)
- [6] M. EVANS, N. HASTINGS and B. PEACOCK, Statistical Distribution (2nd Edition), pp. 31-37, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1993.
- [7] A. SALTELLI and J. MARIVOET, "Performance of Non-parametric Statistics in Sensitivity Analysis and Parameter Ranking", EUR-10851, Commission of the European Communities, 1987.
- [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.

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET							
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.		INIS Subject Code	
KAERI/TR-3928/2009							
Title/Subtitle		Analysis of Proliferation Resistance of Nuclear Fuel Cycle Systems					
Project Manager and Dept. (or Main Author)		Chang, Hong Lae (Division of Strategic and International Studies)					
Researcher and Department		Ko, Won Il (Division of Strategic and International Studies) Kim, Ho-Dong (Division of Nuclear Fuel Cycle System Engineering)					
Publication Place	Daejeon	Publisher	KAERI		Publication Date	2009. 11.	
Page	65 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>Proliferation resistance (PR) has been evaluated for the five nuclear fuel cycle systems potentially deployable in Korea in the future using the fourteen proliferation resistance attributes suggested in the TOPS report.</p> <p>Unidimensional Utility Theory (UUT) was used in the calculation of utility value for each of the fourteen proliferation resistance attributes, and Multi-Attribute Utility Theory (MAUT), a decision tool with multiple objectives, was used in the evaluation of the proliferation resistance of each nuclear fuel cycle system. Analytic Hierarchy Process (AHP) and Expert Elicitation (EE) were utilized in the derivation of weighting factors for the fourteen proliferation resistance attributes.</p> <p>Among the five nuclear fuel cycle systems evaluated, the once-through fuel cycle system showed the highest level of proliferation resistance, and Pyroprocessing-SFR fuel cycle system showed the similar level of proliferation resistance with the DUPIC fuel cycle system, which has two time higher level of proliferation resistance compared to that of the thermal MOX fuel cycle system.</p> <p>Sensitivity analysis was also carried out to make up for the uncertainty associated with the derivation of weighting factors for the fourteen proliferation resistance attributes.</p>					
Subject Keywords (About 10 words)		Proliferation resistance, Nuclear fuel cycle system, Unidimensional Utility Theory (UUT), Multi-Attribute Utility Theory (MAUT), Analytic Hierarchy Process (AHP), Sensitivity Analysis					

서 지 정 보 양 식					
수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드		
KAERI/TR-3928/2009					
제목/부제	핵연료주기시스템의 핵확산저항성 분석				
연구책임자 및 부서명 (TR, AR인 경우 주저자)	장홍래 (국제전략연구부)				
연구자 및 부서명	고원일 (국제전략연구부) 김호동 (핵주기시스템공학그룹)				
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구소	발행년	2009. 11.
페이지	65 p.	도표	있음(O), 없음()	크기	26 Cm.
참고사항					
비밀여부	공개(O), 대외비(), — 급비밀, 소내만 공개 ()		보고서종류	기술보고서	
연구위탁기관			계약번호		
초록 (15-20줄내외)	<p>TOPS 보고서에서 제안한 14가지 핵확산저항성평가인자를 이용하여 향후 우리나라에 적용 가능한 다섯 가지의 핵연료주기 시나리오에 대한 핵확산저항성을 정량적으로 계산하여 비교·분석하였다.</p> <p>핵확산저항성 평가인자 값을 결정하는 데에는 일차원효용함수이론(Unidimensional Utility Theory)를 이용하였으며, 핵연료주기 시나리오별 종합적인 핵확산저항성은 평가기준이 다수이며 상호 배반적인 대안들에 대한 체계적인 평가를 지원하는 의사결정기법 중의 하나인 다요소효용함수이론 (MAUT: Multi-Attribute Utility Theory)을 이용하여 계산하였다. 그리고 계층화분석법(AHP: Analytic Hierarchy Process)과 Expert Elicitation 기법을 이용하여 핵연료주기에 대한 핵확산저항성 평가인자의 가중치를 계산하였다.</p> <p>다섯 가지 대안 핵연료주기 시나리오에 대하여 핵확산저항성을 종합적으로 평가한 결과 직접처분주기가 가장 핵확산저항성이 컸으며, Pyro재처리-고속로 핵연료주기도 DUPIC 핵연료주기에 버금가는 핵확산저항성을 보여주었으며 습식재처리에 비해 2배 가량 높은 핵확산저항성을 보여주었다.</p> <p>핵확산저항성 평가인자의 상대적인 가중치결정에 있어서의 불확실성을 보완하기 위한 민감도분석 방법도 제시되었다.</p>				
주제명키워드 (10단어내외)	핵확산저항성, 핵연료주기, 일차원효용함수이론, 다요소효용함수이론, 계층화분석법, 민감도분석				