

중·저준위방사성폐기물처분시설 안전성평가 방법론에 관한 기술적 고찰¹⁾

Technical Consideration on a Safety Assessment Methodology for Low- and Intermediate-Level Radioactive Waste Disposal Facilities

정찬우, 김기인, 석태원, 박상훈

한국원자력안전기술원
305-338 대전광역시 유성구 구성동 19

요 약

중·저준위방사성폐기물처분시설 폐쇄 후 장기적인 안전성평가에 관한 세부 기술적 요건들에 관하여 규제 관점에서 해석하고 이행하는 방안을 제시한다. 검토 항목은 (1) 처분시설 성능평가의 일반적인 특성; (2) 처분시설 성능규제 체계; (3) 성능목표 부합성 입증에 위한 접근법; (4) 성능평가 쟁점 등이다. 제시된 견해는 성능목표가 만족될 것임을 합리적으로 입증하기 위해서는 처분시설의 장기적인 안전성평가에 내포되는 불확실성을 가능한 한 분명하게 다루어야 한다는 일관된 개념에 바탕을 두고 있다.

Abstract

This paper addresses some regulatory issues concerning how to interpret and implement detailed technical requirements pertaining to long-term post-closure safety assessment for low- and intermediate-level radioactive waste disposal facilities. The considerations include: (1) general characteristics of the post-closure performance assessment (PA); (2) regulatory framework of the PA; (3) an acceptable approach for demonstrating compliance with the post-closure performance objective; and (4) policy issues regarding the PA. The views presented are based on a consistent concept that the uncertainties inherent in the safety assessment should be treated as clearly as possible to demonstrate, with reasonable assurance, that the performance objective will be met.

1) 이 논문은 과학기술부에서 시행한 원자력연구개발사업의 연구결과입니다. 제시된 의견은 저자 소속기관의 공식견해가 아니며 의견수렴(e-mail: jcw@kins.re.kr)을 염두에 둔 것임을 밝혀둡니다.

1. 서론

처분은 방사성폐기물관리의 최종 단계로서 잠재적인 다양한 피폭경로들의 분별과 잠재피폭의 용인성에 대한 입증은 전제로 한다. 이러한 분별과 입증은 체계적인 안전성평가를 통하여 달성될 수 있다. 국내 원자력법령과 과학기술부고시들은 동굴을 포함한 천층처분시설(이하, "처분시설")에 중·저준위방사성폐기물을 처분하기 위한 허가기준과 처분시설 성능요건들을 제공한다. 그러나 이 성능요건들은 성능을 측정하는 관점에서는 다소 포괄적이어서 그 세부 이행방법에 관한 추가적인 고찰을 필요로 한다.

일반적으로 "성능평가"는 시스템 또는 하부시스템의 성능을 예측하기 위한 해석을 일컫는 것으로, 그 해석의 결과를 해당 기준들과 비교하는 것을 포함한다[1]. 특별히, 성능평가의 대상이 전체 폐기물처분시스템이고 그 성능 척도가 방사선학적 영향인 경우에는 "안전성평가"라 한다. 즉, 처분시설에 대한 안전성평가는 일반대중에 대한 방사선방호의 관점에서 처분시설 폐쇄 후 성능목표가 달성될 것임을 입증하기 위해 사용된다.

처분시설의 안전성평가는 시설 운영 단계에 대하여도 수행되어야 하나 특히 폐쇄 후 장기적인 영향을 고려하는 데 중점을 둔다. 처분시설은 그 운영 단계와 폐쇄 단계 그리고 폐쇄 후 초기의 능동적인 관리기간 동안에는 원자력발전소에 적용되는 것과 유사한 방사선방호 요건들이 시설 내 작업자들과 공중의 방사선학적 보호 및 안전에 적용될 수 있다. 처분시설의 폐쇄 후에는 잠재적인 방사선학적 영향이 방벽들의 열화와 같은 점진적인 프로세스들로부터 그리고 폐기물 격리에 영향을 줄 수 있는 돌발적 사건들로부터 일어날 수 있다. 처분시설의 폐쇄 후 단계에 대한 안전성평가의 핵심은 미래의 긴 기간에 걸친 인간 피폭의 가능성을 추정하는 것인데, 장기간에 걸쳐 부지와 시설의 거동을 예측하는 데는 많은 어려움이 따르며 광범위한 불확실성의 개입을 피할 수 없다. 그러므로 처분시설에 대한 폐쇄후 안전성평가의 진정한 목표는 처분시스템 성능을 예측하는 것이라기보다 그것이 적절한 수준의 안전성을 제공할 것임을 입증하는 것이라고 할 수 있다.

이 연구의 목적은 처분시설 성능요건을 이행하는 도구로서의 안전성평가에서 심층검토와 규제 입장이 요구되는 문제들을 확인하고 그 해결방안을 찾는 것이다. 먼저, 처분시설 안전성평가와 관련이 있는 국내 요건들과 국제적인 기준들을 검토하여 이어지는 논의의 기초로 사용한다. 이어서, 해당 처분시설이 이러한 성능요건에 부합함을 입증하는 데 적용할 수 있는 하나의 통합적인 성능평가 절차를 제안한다. 마지막으로, 이 절차에 따른 성능평가 모델링과 계산에 구체적으로 반영되어야 할 기술적인 이슈들에 대하여 고찰한다. 이러한 논의는 처분시설 허가신청자에게 성능평가를 위한 상세지침을 제공하는 한편 심사지침으로도 활용될 수 있을 것이다. 처분시설의 운영 단계로부터 폐쇄 직후 능동적 관리기간까지는 원자력발전소에 적용되는 것과 유사한 방사선방호 요건들이 적용될 것이므로 여기서의 논의는 처분시설 폐쇄 후 장기적인 성능에 국한하는 것으로 한다.

2. 처분시설 성능규제체계

그림 1은 처분시설에 관한 국내 요건들을 처분시설의 성능과 관련이 있는 조항들을 중심으로 요약한 것이다. 이들 요건 가운데 안전성평가 방법론과 직결되는 사항들을 고찰하기로 한다.

원자력법 제77조는 처분시설이 위치·구조·설비 및 성능 면에서 방사성물질에 의한 위해를 방지할 수 있어야 한다고 규정한다. 방사선방호등의 기술기준에 관한 규칙²⁾(이하, “방호규칙”) 제54조는 처분시설이 기상, 수문, 지질, 지진, 생태, 기타 제반 환경여건이 적합한 곳에 위치하도록 하고 있으며, 그 세부사항은 과학기술부고시 제96-9호[2]에 제시되어 있다. 방호규칙 제61조는 방사성물질의 이동을 최대한 억제하고 폐쇄시까지 기능이 유지되도록 처분시설을 설계·건설할 것을 요구한다. 고시 제91-9호에 제시되어 있는 상세 설계기준은 특히 공학적 방벽의 성능요건과 설계 단계를 포함한 처분시설의 모든 단계에서 안전성평가의 필요성을 제기한다. 방호규칙 제75조는 방사선장해 방지를 위하여 처분시설 운영관리, 폐쇄시 안전조치 및 폐쇄 후 관리 등 처분시설 단계별로 지켜야 할 사항들을 규정하고 있다. 고시 제98-12호의 제19조 제2항은 방사선 위해 방지를 위하여 처분시설 운영시 주변 환경에서의 선량을 원자력발전소의 경우와 동일하게 제한한다. 한편, 처분시설 폐쇄기준(고시안)은 처분시설을 폐쇄할 때 적용하여야 할 세부 안전조치 사항들을 열거하면서 폐쇄 시점에서 처분시설에 대한 안전성평가의 갱신과 폐쇄계획서의 작성 및 규제기관에 의한 승인의 필요성을 제기하고 있다. 또한, 고시 제96-31호는 처분시설이 주변환경에 미치는 방사선 영향 또는 그 성능을 환경조사를 통해 확인하기 위한 요건을 규정한다.

원자력법 제84조 제4항은 처분되는 방사성폐기물의 상태가 해당 인도기준에 적합하도록 하고 있다. 동법 시행규칙 제90조는 폐기물을 종류 및 방사능 농도에 따라 분류하고 처분장의 처분요건에 적합하도록 할 것 등을 요구하며, 보다 자세한 기준은 고시 제96-10호에 육지처분시설에서 방사성폐기물의 수용기준으로 제시되어 있다.

원자력법 제78조는 처분시설의 설치·운영, 방사성폐기물의 처분에 관한 검사 요건을 규정하고, 동법 시행령 제221조의2와 제223조는 처분시설의 성능이 운영전, 운영중, 폐쇄후 전 단계에 걸쳐 과학기술부장관이 정하는 기준을 충족하도록 하고 있으며, 방호규칙 제65조는 처분시설의 구조물, 인공방벽, 계통 및 기기 등이 건전성을 유지하고 그 기능을 발휘하도록 하고 있다. 고시 제96-11호[3]는 처분시설의 성능을 구체적으로 정의한다. 특히, 처분시설 성능목표치에 관한 기준으로서, 처분된 방사성폐기물에 의한 위험이 현세대에서뿐만 아니라 후세대에서도 허용 가능한 수준일 것; 후세대의 방사선위험을 현재의 방사선방호와 같은 수준으로 제한하되 장기간의 제도적 관리에만 의존하지 말 것; 결정집단의 개인에 미치는 방사선에 의한 예상 연간위험확률(성능목표치)이 10^{-6} 이하가 되도록 할 것; 성능 평가 기간은 1000년으로 하되 예측되는 위험이 이 기간에 최고치에 도달하지 않을 때에는 이후에 환경으로 방사성핵종의 누출 속도가 급격하게 증가하지 않을

2) 이 논문 작성 시점의 원자력법 시행규칙 개정안을 인용하였음.

것임을 보일 것; 피폭시나리오의 발생확률을 정량적으로 제시할 것; 예상 방사선위험도는 결정론적 경로분석을 통하여 계산된 연간 개인유효선량 값으로 평가하거나 확률론적 분석을 하여 계산된 연간 개인유효선량 분포의 산술평균값으로 평가하되 피폭시나리오의 발생확률과 $5.0 \times 10^{-2} \text{Sv}$ 의 위험도 환산인자를 적용할 것; 전체 위험도에 큰 영향을 미치는 피폭시나리오에 대하여 불확실성평가를 수행할 것; 위험도 계산결과와 신뢰도를 높이기 위하여 입력변수의 수집 및 적용, 모델링, 세부계산 및 종합적 평가 등 성능평가의 전 단계에 걸쳐 품질보증프로그램을 운용할 것 등을 규정한다. 이 성능목표치 기준은 비록 그 근거가 처분시설 사용전검사의 성능지표로서 마련되었으나 처분시설의 폐쇄 후 장기적인 성능목표치로서 시설의 설계 단계부터 적용되어야 할 핵심 기준으로 인식되어야 한다.

이러한 국내 규제요건 이외에 처분시설에 적용하여야 할 것으로 IAEA의 "Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management"가 있다. 이 협약은 IAEA 방사성폐기물관리 안전기준(RADWASS) 체계의 최상위 문건[4]에 기초하여 작성된 것으로, 현세대에 허용되는 것 이상의 영향을 후세대에 부과하지 말 것, 처분시설의 건설 전에 폐쇄 이후 기간에 대하여도 체계적인 안전성평가를 수행할 것 등을 요구한다. 이러한 IAEA 협약과 안전기준은 앞서 검토한 바와 같이 국내 법령과 기술기준들에 이미 내포되어 있다.

위에서 언급한 국내 법령과 기술기준 그리고 국제적인 기준들은 대체로 최소 요건으로 되어 있어 실제 성능평가 업무에서는 보다 자세한 지침이 요구될 수 있다.

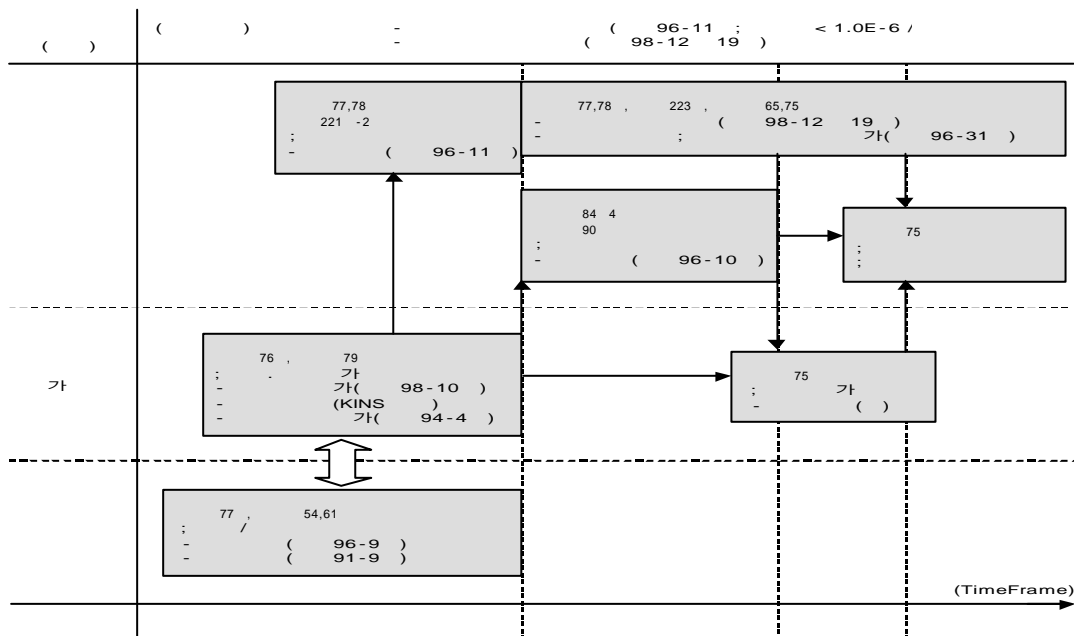


그림 1. 처분시설 단계별 성능평가의 역할과 규제체계.

3. 성능목표 부합성 평가를 위한 접근법

처분시설 건설·운영허가 신청자는 고시 제96-11호에 제시된 성능목표에 처분시설 설계가 부합함을 입증할 수 있는 방법론을 개발하고 사용하여야 한다. 성능계산을 위한 수치적인 모델로는 이미 개발되어 검증된 것들을 채용할 수 있을 것이다. 이와 관련하여, 심사 관점에서 용인할 수 있는 접근법을 예시한다. 이것은 US NRC [5]와 IAEA [1,6]의 방법에 KINS [7]의 경험을 반영한 것이다.

그림 2로 예시된 접근법은 하나의 통합적인 성능평가체계를 제공함으로써 처분시설의 모델 추정치들에 신뢰성을 구축하는 방식으로 고안되어 있다. 이 절차는 처분시설 성능을 평가하는 데 요구되는 모든 국면의 부지 데이터, 시설 설계, 폐기물 특성조사 정보들을 체계적으로 취합할 수 있게 해준다. 이 절차를 반복하는 과정에서, 파라미터와 모델 불확실성을 저감하기 위해, 부지 데이터가 보완되고, 중요한 프로세스들과 인자들을 확인하기 위한 보조해석이나 실험이 수행되고, 대안 개념모델들의 평가나 시설 설계의 개선이 이루어진다. 그러나, 처분시설 성능평가의 목표가 성능요건에의 부합성을 뒷받침하는 증거를 도출하는 것이므로 평가자는 성능목표가 만족되었음을 보이기 위해 필요한 정도의 해석과 반복을 수행하면 된다. 따라서, 그림 2에 묘사된 절차의 심도는 모델링된 처분시스템의 복잡성, 시스템 성능을 둘러싸고 있는 불확실성 그리고 추정된 위험도에 따라 적절히 조절될 수 있을 것이다. 이 절차에서 일부 단계들은 동시에 수행될 수도 있는데 특히 초기 평가시에 그러하다. 이 절차는 부지 선정과 처분시설 건설허가를 위한 안전성평가를 위주로 하여 마련되었으나, 매우 일반적이어서 처분시설의 다른 국면들과 다양한 목적에 따라 적절히 변형하여 적용할 수 있다. 또한, 이 절차가 전체시스템 성능평가에 초점을 맞추고 있으나, 하부시스템 모델들에 대한 평가들로 구성되는 까닭에 하부시스템 모델들에도 적용될 수 있다.

< Step 1 > 처분시스템의 서술에 필요한 정보의 초기 평가를 수행한다. 처분장은 수많은 천연 및 인공 특징들로 구성된 복잡한 시스템이다. 시스템의 복잡성은 다양한 폐기물 종류, 용기 및 형태들에 의하여 더욱 복잡하게 될 수 있다. 그러므로, 먼저, 자연적인 프로세스들과 사건들로부터 시간에 걸쳐 처분장에 나타나는 변화들을 포함하여 핵종 누출에 기여할 수 있는 모든 신빙성 있는 요인들을 검토하여야 한다. 이 단계에서 처분시스템 서술에 사용된 정보의 상당량은 일반적인 수밖에 없다. 처분시스템 성능에 관한 주관적 판단들도 도움이 되나, 시설에 대한 상세 개념설계 뿐만 아니라 폐기물 특성과 양에 관한 신뢰할 만한 정보가 이용 가능해야 하며, 시설의 전반적인 천연 특성을 어느 정도 기술할 수 있는 부지 및 지역 데이터가 있어야 한다.

< Step 2 > 개념모델과 파라미터 분포를 서술하고 주요 시나리오와 피폭경로들을 분별한다. 이 단계는 전체적으로 처분시스템을 정량화 하는 과정이다. 초기에 이용 가능한 모든 데이터와 정보 (Step 1)를 포함하여 자세한 처분시스템 서술은 부지-특수한 개념모델들을 개발하는 데 사용되어야 한다. 개념모델을 개발한다는 것은 시스템 서술을 수학적으로 모델링할 수 있는 형태로 추상화

하는 것이다. 여기서 평가자는 그 모델들이 중요한 처분장 특징들과 프로세스들을 어떻게 수용하고 설명하는지를 보여야 하며, 개념모델에 내포된 가정들과 그 기술적 근거들을 제시할 수 있어야 한다. 초기 단계에서, 개념모델들과 파라미터의 범위는 주어진 시스템의 불확실성을 반영하는 데 필요한 만큼 넓어야 한다. 개념모델과 파라미터 분포에 대한 서술이 어느 정도 수행되면 이어서 적절한 시나리오를 개발하고 중요한 피폭경로들을 분별하는 것이 필요하다. 특히, 시나리오는 주어진 성능평가의 방향을 결정하는 핵심 요소이므로 그 정당성을 입증하는 데 힘써야 한다.

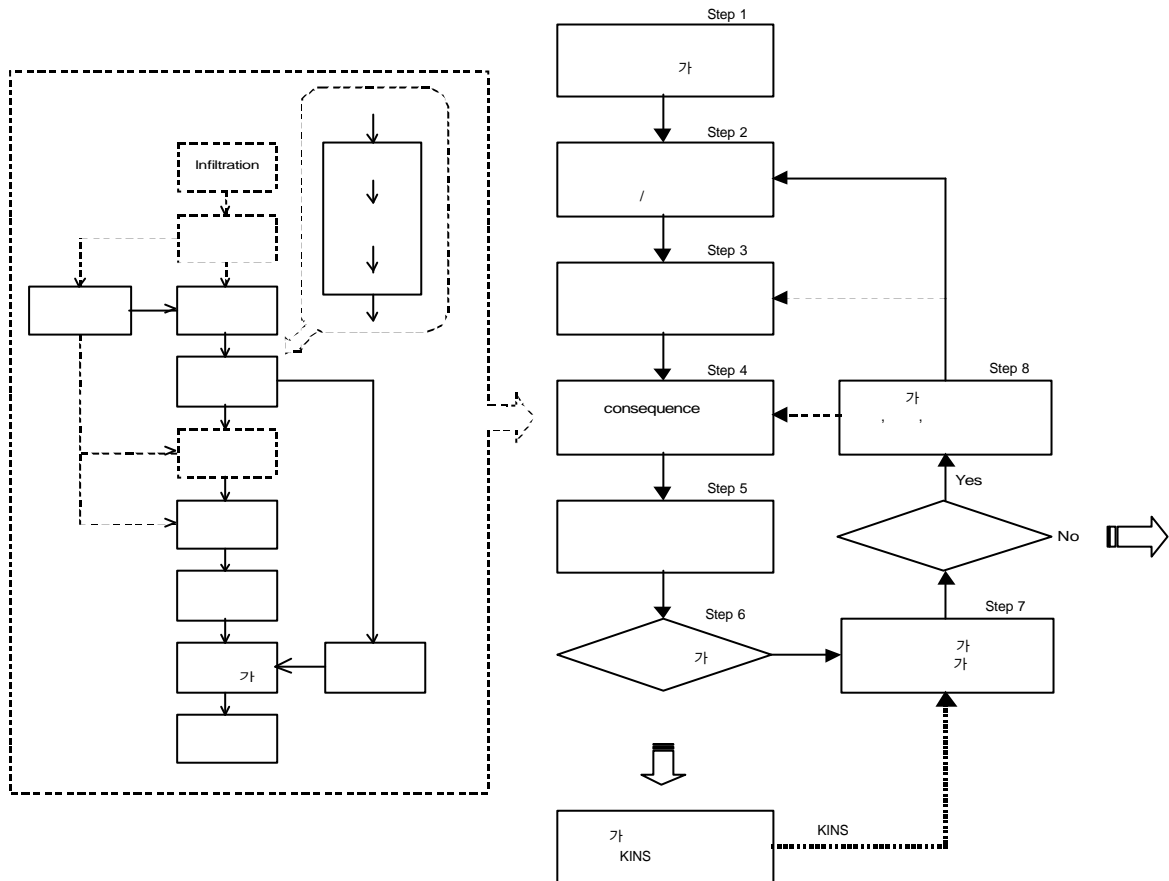


그림 2. 처분시설 성능목표 부합성 입증에 적용할 수 있는 성능평가의 반복적 접근법.

< Step 3 > 수학적 모델을 구성하고 코드를 선정한다. 이 단계에서 부지-특수한 물리적, 화학적 프로세스에 관한 고려사항들에 기초하여 앞 단계에서 분별된 시나리오와 피폭경로들을 중심으로 개념모델들의 수학적 표현을 설정한다. 수학적 모델들은 수치적인 형태나 근사적인 해석적 형태로 해결될 수 있다. 개념모델을 개발할 때처럼 평가자는 수학적 모델들과 코드들에 간직된 모든 가정들을 분별하고 서술하여야 한다. 또한, 해석에 사용된 코드들과 데이터베이스들을 엄격한 QA/QC 프로그램에 따라 적절히 검증하는 것이 중요하다.

< Step 4 > 결말(consequence) 모델링을 수행한다. 이 단계의 목적은 신뢰할 만한 개념모델들에

대하여 처분장 성능을 계산하는 것이다. 모든 성능평가 계산에는 불확실성이 내포되기 때문에 모델 및 파라미터들과 연관된 불확실성이 어떻게 결말 모델링 내 불확실성으로 전이되는가를 고려할 필요가 있다. 불확실성을 취급하는 데 필요한 정보의 양과 분석의 수준은 부지 특성, 공학적 설계, 방사성핵종 재고량 사이의 심각한 차이점들 때문에 시설에 따라 다를 것이다.

< Step 5 > 민감도 분석을 수행한다. 민감도 분석은 어떤 모델들, 가정들, 파라미터들의 조합들이 결과 선량을 산출하는 데 가장 중요한가를 평가하기 위하여 결말 해석 결과들(Step 4)에 대하여 수행된다. 민감도분석은 무엇이 해석 결과들에 큰 영향을 미치는가를 나타냄으로써 불확실성을 효과적으로 저감하기 위한 특성조사 노력을 최적화하고, 성능평가 결과들을 합리적으로 정당화하며, 부합성 입증을 위한 적절한 접근방식을 선정하는 데 기여한다(4절의 항목 5 참조).

< Step 6 > 처분장 적합성을 평가한다. 즉, 성능목표가 만족되었는지를 결정하기 위하여 결말 해석(Step 4)과 처분시설 성능목표를 비교한다(4절의 항목 6 참조). 비교 결과가 성능목표의 만족으로 나타나면, 수행 결과는 허가신청서의 일부로서 문서화될 수 있다. 그러나, 비교 결과가 성능목표의 불만족으로 나타나면, Step 7로 진행하여야 한다. 이 때 평가자는 성능목표가 만족됨을 보이는 데 요구되는 심도의 해석을 추구하고 필요한 만큼 Step 7에서 8을 경유하여 반복하면 된다. 이 경우, 모델링되는 처분시스템의 복잡성, 시스템 성능을 둘러싸고 있는 불확실성, 그리고 추정 위험도에 따라 추가적인 반복의 필요성이 완화될 수 있을 것이다.

< Step 7 > 데이터와 가정들을 재평가한다. 계산된 결과들(Step 6)에 가장 큰 영향을 미치는 데이터와 가정들을 분별하기 위하여, Step 5에서 수행된 민감도분석으로부터 평가자는 추가적인 성능평가 반복에서 불확실성을 더 저감하기 위한 최선의 방법과 관련된 많은 선택사항들에 직면할 수 있다. 따라서, 이 단계에서 평가자는 불확실성을 저감하고 부합성을 입증하는 데 필요한 정보와 데이터를 얻기 위하여 자원의 최적 배당에 관심을 가져야 한다. 부지 복잡성이나 기타 요인들로 인하여 이 절차의 속행에 추가로 광범위한 데이터가 필요하다고 판단되면 그 평가대상(부지)을 배제하고 다른 대안(새로운 부지)으로 나아가는 것이 더 비용-효과적일 것이다.

< Step 8 > 새로운 정보를 수집하여 설계, 모델, 데이터를 개정하고 가정을 보완한다. 이 단계에서도 불확실성을 낮추는 데 가장 효과적인 정보에 초점을 맞추어야 한다. 대표적으로, 부지특성조사 데이터의 보완, 시설 설계의 변경 그리고 보조 모델링 연구 등을 생각할 수 있다. 이 작업에 이어 이전의 해석에 적용되었던 가정들을 최선의 것으로 한다. 이 단계에서 가정들과 개념모델들은 위에서 수행하여 획득한 새 정보나 설계 변경들에 기초하여 수정된다. 이렇게 보완된 정보를 가지고 성능평가를 반복한다. Step 2로부터 다시 시작하는 것이 일반적일 것이나, 경우에 따라서는 Step 3 또는 Step 4로부터 시작하는 것도 가능할 것이다. 반복 과정에서 모델 설정은 어떤 개념모델의 제거나 수정 또는 새 모델의 도입을 내포할 수 있다. 성능평가의 모든 계승적 반복은 새로운 정보나 개선된 개념모델들의 평가와 같은 다음 반복의 목표에 대한 이론적 근거를 제공한다.

4 성능평가 정점들에 관한 기술적 견해

처분시설 성능평가의 목적은 처분시스템의 성능을 가능한 한 정량적으로 추정하여 성능요건과 비교하는 것이다. 그러므로 처분시설에 대한 성능평가가 소기의 목적을 달성하려면 성능요건의 의미를 그 이행도구인 성능평가의 관점에서 구체적으로 정확하게 해석하는 것이 선행되어야 한다.

처분시설 성능요건의 이행에 관하여 규제 관점에서 명확한 입장이 필요하다고 판단된 문제들은 (1) 성능평가에서 시나리오의 설정; (2) 인공방벽의 성능; (3) 성능평가 기간; (4) 결정론적 또는 확률론적인 접근법의 적용; (5) 불확실성과 민감도의 취급; (6) 성능목표 부합성의 결정; (7) 처분시설 단계별 성능평가의 역할 등이다. 이들은 처분시설 성능평가에 관한 기술적 요건들의 해석과 이행에 관련된 근본적인 질문들이다. 본 연구에서는 IAEA의 권고들[1,4,6]로부터 다음 네 가지 원칙을 도출하여 위 문제들에 적용하였다: (1) 처분시설의 성능은 방사선방호의 기준에 부합하여야 한다; (2) 방사선방호의 기준은 방사성폐기물처분의 모든 시간대에 걸쳐 유지되어야 한다; (3) 처분시설 성능평가는 시간에 따라 증가하는 제반 환경의 불확실성을 고려하여야 한다; (4) 처분시설 성능평가는 불확실성을 평가하고 정당화 할 수 있는 방식이어야 한다.

(1) 장래의 부지조건, 사건, 프로세스의 고려

우리의 처분시설 부지 요건[2]은 부지 안정성, 폐기물 격리 능력, 장기적인 성능 등을 강조한다. 성능목표의 성취를 위하여, 이 요건들은 지질학적 사건과 프로세스들의 빈도 및 그 정도가 처분시설의 성능에 악영향을 미치는 부지를 배제하도록 하고 있는데, 그 이면에는 처분시설의 장기적인 성능에 대한 적절한 모델링이 가능하도록 주어진 부지가 특성화 될 수 있어야 한다는 논리가 자리하고 있다. 여기서 성능평가의 목표가 장래를 정확히 예측하는 것이 아니라 가능성들의 합리적인 범위에 대하여 시설의 건전성을 테스트하는 것이라는 사실이 강조되어야 한다. 그러므로, 자연적인 사건들 및 프로세스들과 제한된 동적인 부지 거동의 변동을 포착하기 위하여, 부지 관련 가정들과 데이터의 범위는 부지에 작용하는 자연 현상의 장기적인 경향을 예측하기에 충분하여야 한다. 처분시설 성능평가에서 고려해야 할 부지 조건, 사건, 프로세스들의 범위에 제한이 있어야 하며 그 평가에서 불필요한 억측은 배제되어야 한다. 사회적인 변화의 고려도 불필요한 억측으로 귀결될 수 있으므로 성능평가에 포함하지 않는 것이 바람직하다.

(2) 공학적 방벽의 역할

처분시설에서 방사성핵종의 누출은 폐기물과 물이 접촉하면서 일어나므로, 포장용기를 비롯한 공학적 방벽들은 물의 침투와 방사성핵종의 유출을 제한함에 의해 시설 성능을 향상시키기 위해 사용된다. 그러나, 공학적 방벽들의 수명과 장기적인 열화율을 예측하고 그들의 장기적인 성능을 입증하는 데는 상당한 불확실성이 존재한다. 그들의 성능에 관한 불필요한 억측을 제한하기 위해, 공학적 방벽들에 사용되는 재질들이 그 설계 수명에 기초하여 부지 폐쇄로부터 수 백년 후에는

물리적으로 열화되는 것으로 가정하는 것이 불가피하다. 그러므로, 수 백년 이후에 공학적 방벽들은 그들의 최적 수준보다 훨씬 낮은 수준의 성능을 나타낸다고 가정되어야 하나, 구조적인 안정성과 화학적인 완충 효과에 대한 신뢰성은 더 긴 시간동안 고려될 수도 있을 것이다. 전형적인 중·저준위폐기물에 대하여, 단수명 방사성핵종들의 재고량은 대략 수 백년이 지나면 미미한 양이 된다. 수 백년보다 더 긴 시간대에 대하여는, Ni-59, C-14, Cl-36, Tc-99, I-129, Am-241, 우라늄 동위원소 및 그 자손핵종 등과 같은 장수명 핵종들의 긍정적인 누출에 영향을 미칠 만큼 오랫동안 그 성능이 유지되도록 공학적 방벽들이 설계된다고 가정하는 것은 비합리적이다.

(3) 성능평가의 시간 구도

고시 96-11호[3]는 처분시설 폐쇄 후 성능목표를 충족하기 위한 평가의 기간을 천년으로 정하고 있다. 이러한 평가기간의 지정에는 중·저준위폐기물로서 처분되는 방사성핵종들의 특성(방사능, 반감기, 이동성 등)에 대한 고려와 더불어 공학적 방벽들과 지질학적 방벽 둘 다의 성능을 평가하기 위한 시간대에 관한 고려가 반영되어 있다. 핵심 관심사는 누출 및 이동이 공학적 방벽들의 열화율과 지화학적 지연인자 등과 같은 불확실한 수많은 부지-특수 파라미터들에 민감하다는 것이다. 이러한 민감성은 부지 외부 피폭지점에서 피크 선량에 대한 예측 시점에서 매우 큰 불확실성으로 귀결될 수 있다. 성능평가에 관한 불필요한 억측을 피한다는 관점에서 천년의 기간은 대부분의 경우에 유동적인 장수명 핵종들로부터의 피크 선량을 포착하고 성능목표에 대한 부지 적합성의 관계를 입증하기에 부족하지 않은 길이라고 본다. 그러나 지하수가 매우 긴 이동시간을 갖는 경우를 포함하여 부지에 따라서는 어떤 종류의 폐기물의 처분이 장래 세대에 주목할 만큼 높은 선량으로 귀결되지 않음을 보증하기 위해 천년을 초과하는 평가가 필요할 수도 있다. 시간에 따라 평가의 불확실성이 증가한다는 점을 감안할 때, 이러한 부수적인 평가가 의미를 갖는 기간으로 만년 정도가 고려될 수 있다. 만년 이후 기간에 대한 평가도 특정 목적에 따라 수행될 수 있으나 성능목표 준수에 대한 기초로서 사용하기는 어렵다. 선량의 크기와 시점 및 연관된 불확실성을 고려한 다음, 그 결과 선량 또는 위험도가 수용 불가하게 높다는 판단에 이르면, 방사능의 재고량 제한치를 부과하거나 문제의 폐기물이 그 부지에 중·저준위방사성폐기물로서 처분에 적합치 않은 것으로 판정하여야 한다.

(4) 결정론적 접근과 확률론적 접근

성능평가의 핵심인 시나리오 및 결말 분석에서, 성능에 대한 단일 추정치에 의해 특징지어지는 결정론적 접근과 시스템 성능의 잠재적인 결과들의 분포에 의해 특징지어지는 확률론적 접근의 개별적 특성과 장·단점 그리고 상호보완적 기능에 주목하여야 한다. 성능목표치와 부합 여부를 판정하기 위하여 배타적인 평가방식이나 결과에 의존하는 것은 바람직하지 않다. 성능평가에서 결정론적 방법과 확률론적 방법의 뚜렷한 구분은 다소 인위적인 면이 있는데, 그 이유는 두 기법이 부분적으로는 상대방을 내포하고, 이산적인 사건들과 연속적인 물리적 프로세스들을 동시에 묘사하는 포괄적인 안전성평가에서 대개는 상호보완적인 방식으로 사용되며 이것이 보다 합리적이기 때문이다. 우리의 성능규정[3]은 두 접근법을 모두 허용하고 있으나 잠재피폭의 제어를 위하여 선

량제한이 아닌 위험도제한 체계를 채택함으로써 전체적으로는 확률론적 접근법의 필요성을 드러내고 있다. 시간에 따른 환경조건의 변화는 처분시설 안전성에 대한 장기예측에 상당량의 불확실성을 필수적으로 수반하게 되므로 안전규제의 목적상 폐기물 처분시스템에 관계된 불확실성을 정확히 평가하여 안전성 평가결과에 반영할 수 있는 방법론으로서 전체적으로 확률론적 접근법의 사용은 불가피하다. 그러나, 결정론적인 방법도 확률론적 접근법의 테두리 안에서 일부 특정의 분석 항목에 대하여는 그 특성을 고려하여 적용할 수 있으며, 독립적으로 확률론적 평가의 신뢰성을 높이는 방편으로 사용될 필요도 있다.

(5) 불확실성과 민감도의 취급

민감도와 불확실성 분석은 성능평가의 통합적인 부분으로서 결과 해석을 지원하거나 부합성 입증의 신뢰성을 구축하는 데 필수적이다. 그러므로, 성능평가 계산을 뒷받침하기 위하여, 형식을 갖춘 민감도 및 불확실성 분석을 수행하는 것이 바람직하다. 민감도 분석은 모델 결과에 큰 영향을 미치는 파라미터들과 가정들을 분별하는 데 사용된다. 이 분석으로부터의 식견은 성능평가 모델들과 접근방법들을 개발하고 다듬는 데 이용될 수 있다. 민감도분석 결과들은 중요한 세부내용의 손실 없이 보다 복잡한 모델에 대한 대응물로서 단순모델을 사용하는 것을 정당화하고, 데이터 획득에 대한 우선순위를 정하며, 불확실성 분석을 위한 파라미터의 수를 줄이는 데 사용될 수 있다. 한편, 모든 성능평가 계산에서 불확실성은 불가피한 것이어서 파라미터 및 모델들과 연관된 불확실성이 어떻게 성능 척도에 불확실성으로 이전되는가를 숙고할 필요가 있다. 자연계에 대한 불완전한 지식을 반영하는 파라미터 불확실성은 주요 변수들의 분포에 의하여 서술되어야 할 것이며, 시간과 공간에 걸쳐 제한적인 validation에 기인한 불완전한 지식을 반영하는 모델 불확실성은 다른 모델들의 사용; 합리적인 범위의 기본적 조건, 사건, 프로세스들에 관한 고려; 이러한 조건, 사건 또는 프로세스들을 나타내는 파라미터들의 분포 등에 의하여 서술되어야 할 것이다.

(6) 규제요건 부합성 결정

처분시설 성능목표에 부합함을 입증하는 접근법의 다양성은 다시 그 부합성을 결정하는 방법의 선정에 적절한 유연성을 요구한다. 성능목표와 부합성 결정에 관한 기준[3]은 처분 후 (천년에 걸쳐) 결정집단 개인에 대하여 다음 조건이 만족되는 것과 같다.

$$\max_j [R_j = \sum_j P_{ij} \cdot E_{ij} \cdot F] < 10^{-6}/yr$$

여기서, R_j 는 처분 후 i 번째 해에 예상되는 연간방사선위험도; P_{ij} 는 i 번째 해에 피폭시나리오 j 가 발생할 연간확률; E_{ij} 는 i 번째 해에 j 에 따른 선량(committed effective dose)으로 확률론적 접근에 대해서는 분포의 평균값; F 는 위험도인자(=0.05/Sv)이다. 잠재피폭의 관점에서, 지하수 이동과 같은 정상시나리오로부터의 방사선피폭에 개인선량제한 체계를 계속 적용하면서 부주의한 인간침입과 불확실한 확률론적 상황으로부터의 피폭도 동일 선상에서 함께 고려하기 위해서는 위험도제한체계의 적용이 불가피하다[8,9]. 즉, 처분장 시나리오들에 대한 방사선방호 기준들은 그것들이 사건의 발생확률이나 불확실성을 감안하는 방식으로 형성될 필요가 있다[6]. 처분시설 성능

목표의 부합이 결정론적인 성능추정치에 기초하는 경우, 불확실성의 정량적 분석보다는 분석의 보수적인 본성을 입증하는 데 의존하고 있는 것이므로, 그 성능추정치는 주어진 성능목표치 미만이
 어야 한다. 반면에, 형식을 갖춘 불확실성 분석이 수행되고 시스템 성능에 대한 잠재적인 결과들의 분포가 제시되는 경우에는 그 분포의 평균이 성능목표치보다 작아야 하며 부수적으로 그 분포의 95번째 percentile이 $5 \times 10^{-6}/yr$ 미만이 되도록 하는 것도 고려할 필요가 있다. 후자는 성능목표 달성의 보증과 부주의한 침입자의 보호 등을 감안한 것이다.

(7) 처분시설 단계별 성능평가의 역할

처분시설과 관련하여 성능평가를 직·간접적으로 포함하여야 할 서류들은 건설·운영허가 신청서류로서의 방사선환경영향평가서, 안전성분석보고서(부지안전성평가 포함)와 안전관리규정(폐기물 수용기준 포함); 처분시설 주변 환경조사 및 영향평가계획서; 처분시설 폐쇄허가 신청서 및 폐쇄후 관리계획서(제도적 관리기간 설정 포함) 등이다(그림 1, 3 참조). 앞서 그림 1에서 화살표는 정보의 흐름을 나타내는 것으로, 처분시설에 대한 성능평가는 단계별로 그리고 그 목적에 따라 접근방식이 다를 수 있는 반면, 서로 유기적으로 연관되어야 하며 아울러 최신의 자료로 갱신되어야 함을 강조한다. 그러므로, 처분시설의 각 단계별로 최신의 정보를 바탕으로 그 목적에 맞게 성능평가를 수행하여야 한다. 방호규칙 제75조와 처분시설 폐쇄기준(안)은 최종적인 처분부지 폐쇄 계획이 그 시설의 장기적인 안전성을 입증하도록 요구하고 있으며, 운영 기간중 획득된 장기적인 폐기물 격납에 관한 모든 부가적인 지질학적, 수문학적 또는 기타 처분 부지 데이터 및 장기적인 폐기물 격납에 관한 테스트, 실험 또는 분석들의 결과들을 포함하도록 요구한다. 이것은 새로운 정보가 처분시설 안전성에 대한 초기 평가들의 기초에 의문을 불러일으킬 때마다 성능평가를 최신의 것으로 유지할 필요성이 있음을 암시한다.

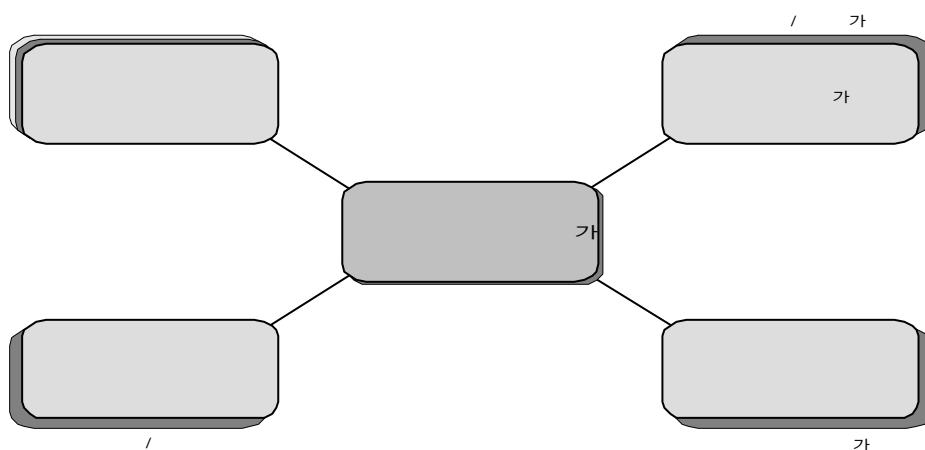


그림 3. 처분시설 단계별 안전성평가의 역할.

5. 결론

본 연구에서는 중·저준위방사성폐기물을 인간생활권으로부터 영구히 격리하기 위한 시설인 천층 처분시설의 성능이 폐쇄 후 장기적인 성능요건에 부합함을 증명하기 위하여 수행되는 안전성평가와 관련한 방법론상의 여러 쟁점들에 대하여 기술적인 견해를 피력해 보았다. 이러한 기술적인 고찰의 요점은 처분시설의 폐쇄 후 장기적인 성능평가에서 광범위하게 내포되는 불확실성을 가능한 분명하게 취급함으로써 해당 성능목표가 달성될 것임을 합리적으로 입증하는 것이다. 그러나 제시된 접근법과 해석은 일반적인 것이며 실제 문제에서는 해당 처분시스템의 특성을 고려하여 다루어져야 할 것이다. 국내 원자력법령과 기술기준 그리고 IAEA와 ICRP 등의 국제적 권고 및 경험의 토대 위에서 사업자와 규제기관 사이의 긴밀한 협의를 통하여 처분시설 성능평가에 관한 기술적 쟁점들이 원만하게 해결될 수 있으며 나아가 처분시설의 안전성을 확보할 수 있을 것이다. 이와 관련하여, 처분시설 성능평가의 정당화를 위해서는 독립적인 확인자들이 그 모델링 결과들을 추적할 수 있도록 완전한 성능평가 과정을 철저히 문서화함으로써 그것들의 재현성을 입증하여야 한다는 점을 마지막으로 강조한다.

참고문헌

1. IAEA Safety Series No. 111-G-3.3, Safety Guide for Safety Assessment for Near Surface Disposal, IAEA (1997).
2. 과학기술부고시 제96-9호, 중·저준위방사성폐기물 처분장 위치기준.
3. 과학기술부고시 제96-11호, 중·저준위방사성폐기물 처분시설의 성능등에 관한 규정.
4. IAEA Safety Series No. 111-F, Safety Fundamentals - The Principles of Radioactive Waste Management, IAEA (1995).
5. NUREG-1573, Branch Technical Position on a Performance Assessment Methodology for Low-Level Radioactive Waste Disposal Facilities, US NRC (1997).
6. IAEA Safety Series No. 111-S-3, Safety Requirements for Near Surface Disposal of Radioactive Waste, IAEA (1997).
7. KINS/AR-547, 중·저준위방사성폐기물처분 안전성검증기술개발, 한국원자력안전기술원 (1998).
8. ICRP Publication 46, Radiation Protection Principles for the Disposal of Solid Radioactive Waste, ICRP (1985).
9. ICRP Publication 60, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP (1990).