

2006 고준위 방사성폐기물 처분장 종합 성능 평가를 위한 주요 현안

Key Issues in the 2006 Total System Performance Assessment of a Potential High Level Radioactive Waste Repository in Korea

황 용수, 강 철형

대전광역시 유성구 덕진동 한국원자력연구소

yshwang@kaeri.re.kr

요약

한국원자력연구소는 1997년부터 10년간 국내에서 발생하는 사용후핵연료를 포함하는 고준위 방사성폐기물을 심지층 처분하기 위한 개념과 안전성 평가 체계를 연구하고 있다. 2002년 종료된 제 2 단계 연구에서는 한국형 기준 처분 개념과 확률론적 종합 안전성 평가를 위한 체계가 구축되었다. 향후 사 년 동안의 연구 기간에서는 지난 6년간 수행된 연구 결과를 근간으로 국내 지수문과 인문 사회 환경에 적합한 처분 개념과 안전성 평가 방안을 개발하여 고준위 방사성폐기물이 안전하게 영구 처분 될 수 있음을 입증하고자 한다. 이를 위해 본 논문에서는 향후 연구 기간 동안 규명되어야 할 처분장 안전성 관련 주요 현안들을 요약 하였다.

Abstract

Since 1997, KAERI has worked on the ten year long R&D project to develop the KRDC(Korean Reference Disposal Concept) and associated TSPA(Total System Performance Assessment) technologies. During the second phase of the project ended in 2002, the reference disposal option and technologies for probabilistic safety assessment were developed. In the next four years, KAERI will finalize the KRDC suitable for the Korean social and hydro-geological conditions and assure the total safety of it. To achieve this agenda, this paper summarizes what are the key remaining issues in TSPA to be further studied in the future.

1. 서론

1997 년부터 수행된 국가 원자력 중장기 연구 개발 사업의 일환으로 사용후핵연료를 포함한 고준위 방사성폐기물의 안전한 영구 격리 처분을 위해 국내 심지층 처분 암반을 이용한 처분 개념 개발을 추진하고 있다. 이를 위해 2015 년까지 국내에 준공 운영될 5 기

의 CANDU 원자로를 포함한 28 기의 원자력 발전소에서 배출될 약 36,000 톤의 사용후 핵연료를 안전하게 심지층 처분하기 위한 처분장 기본 개념이 개발되고 있으며 2015 년 이후에 준공될 원전에서 발생할 사용후핵연료는 기존 처분장을 확장함으로써 수용할 예정이다.

고준위 방사성폐기물 처분 연구에서 가장 중요한 현안은 투명하고 절차에 맞는 방법으로 처분장의 안전성을 과학적으로 입증하고 이를 각 이해 당사자들에게 알기 쉬운 방법으로 전달하여 처분장과 관련한 국민 수용성을 높이는 것이다. 이를 위해 스웨덴, 미국, 일본, 핀란드 등 세계 주요 국가들은 1950 년대 후반부터 기초 연구에 착수하여 처분 개념을 구축하고 이와 관련된 종합 성능 평가 기술을 꾸준히 연구 개발하고 있다. 1983 년 스웨덴 KBS가 발표한 KBS-3 개념은 심지층 결정질 암반에 기반을 둔 영구 처분 개념으로 많은 나라에서 채택하고 있다. 국내의 암반 조건도 스웨덴의 경우와 유사한 결정질 암반으로 이로 인하여 개략적인 처분 개념 역시 KBS-3와 유사하나 국산 벤토나이트 사용과 스웨덴과는 달리 고가의 구리 용기 대신 보다 경제적인 용기 재질을 고려하고 있는 점과 스웨덴과는 달리 대규모의 사용후핵연료를 수용해야 한다는 점에서 국내 처분 개념은 스웨덴 KBS-3 개념과 차이점을 보이고 있다.

종합 성능 평가 측면에서는 확률론적 평가를 명기한 관련 법규 체계, 스웨덴 등 북구 유럽과는 달리 산지가 발달한 국내 지형 특징 상 지하수 유동 기구가 보다 더 중요하리라 예측되며 인구 밀도가 높은 국내 현실과 수송 편의성을 고려한 연안 처분장 가능성에 기인한 생태계적 특성, 국산 벤토나이트 사용에 따른 안전성 문제, 처분 용기 수명이 스웨덴보다 짧은데 따른 안전 현안, 그리고 일천한 국내 환경 관련 경험 축적으로 인한 각 이해 당사자간 대화 부족 등이 향후 심층 연구되어야 할 주요 항목들이다.

2. 2006 종합 성능 평가 주요 현안

본 절에서는 2006 년 TSPA를 위해 추진되어야 할 안전성 평가 관련 주요 연구 항목들을 도출해 보고자 하였다.

가. 평가 방법론 구축

처분장 TSPA에서 가장 중요한 항목은 각 분야의 세부 연구 항목들을 어떻게 선정하고 그 결과물들을 처분 안전성 입증에 위해 종합하는가이다. 따라서 세계 각국들은 TSPA 연구가 고준위 방사성폐기물 처분 연구 각 분야들을 총괄(steering) 할 수 있도록 하고 있으며 국내에서도 중장기 연구에서 TSPA 연구가 이와 같은 기능을 담당하도록 요구하고 있다.

원활한 종합 성능 평가를 위해서는 일반적인 이해 당사자들 뿐 아니라 처분 연구 사업

에 실제 참여하고 있는 연구원들이 처분장과 관련된 어떤 중요도를 가지는 특정 프로세스들을 자신들이 연구하는가를 이해하는 일이 필수적이다. 이를 위해서는 기존의 KAERI FEP(Features, Events, Process) 리스트가 보완되어 보다 다양한 분야의 전문가들로부터 중요도 평가를 받아 최종적으로 FEP 백과사전 형식으로 확장되어야 한다. 한편 기존의 방식으로는 각 개별 FEP으로부터 시나리오 구성을 위한 RES matrix가 도출되기 힘들므로 제 2 단계 연구에서 수행한 바 있는 Integrated FEP 개념을 적용하여 FEP과 RES matrix 사이의 연결 고리를 확보해야 한다. 도출된 RES matrix를 이용해서 용기 파손, 지하수 유동, 핵종 이동 등 각 sub 시나리오들이 도출되고 이를 기반으로 최종적으로 전체 사건 시나리오가 도출되어 평가 시 사용되는 처분장 안전성 평가 관련 시나리오들의 투명성이 보다 증진될 수 있을 것이다. 완성된 시나리오를 구성하는 각 RES matrix element 별 정량적 평가를 위한 방법론을 기술하는 AMF(Assessment Method Flowchart)도 평가 전에 사전 작성되어 이에 의거하여 평가 코드 체계 정립 및 입력 데이터 확보와 평가 연구가 수행되어야 한다.

이와 같은 평가 방법론에 관한 투명성을 제고하기 위한 또 하나의 방법이 품질 보증 시스템을 적극적으로 활용하는 것이다. 2 단계 연구 결과 완성된 웹 기반 KAERI QA 시스템은 프로젝트 베이스로 연구 주요 결과물들을 기록 보관하도록 되어 있는 바 이를 이용하여 FEP 선정 및 선별, 시나리오 개발 및 AMF 도출까지의 전 과정이 보다 투명하게 이루어 질 수 있도록 QA 시스템을 개량해야 한다.

TSPA를 위한 평가 코드 확보를 위해 기존의 1 차원 MASCOT-K와는 다른 다차원 확률론적 평가가 가능한 코드 체계 개발 연구가 수행되어야 한다. 기존의 MASCOT-K는 수학적 특성상 선형적인(linear) 문제 해석만 가능하여 자연 재해, 기후 변화와 같은 external event 평가가 불가능하였다. 기존의 AMBER와 같은 구획 모델링에 기반을 둔 평가 코드는 선형적인 문제 뿐 아니라 일부 비선형적인 문제를 해결할 수 있으나 벤토나이트 완충재 층과 단열층을 해석하는데 문제가 있다. 또한 MASCOT-K와 AMBER 모두 1 차원 모델의 특성 상 비교적 물질 전달 유효 면적이 큰 벤토나이트 층으로부터 주변 미세 단열로의 핵종 이동을 모사함에 있어서 유효 면적이 무엇이냐는 문제에 대해 근원적인 해결책이 없다. 따라서 이러한 차원 단순화 문제 및 선형 비선형을 둘러싼 논란을 해결하고 생태계로의 정확한 유출량을 평가하면서도 일반 이해당사자들에게 핵종 이동에 관한 결과물을 가시화(visualization)하기 위해서는 다차원 확률론적 평가 코드 개발이 요구된다. 현재 KAERI에서는 이러한 관점에서 다년 계획으로 다차원 코드를 개발하고 있는 바 2006 년 TSPA에서는 기존의 MASCOT-K와 AMBER를 근간으로 평가 연구를 수행하되 일부 시나리오에 대해서는 다차원 코드를 이용 상세 평가를 수행할 예정이다.

나. 공학적 방벽 성능 평가

2 단계 연구에서는 아직 처분 용기 재질을 결정하지 못하였다. 처분 용기 재질은 처분장의 역학적 안정성 뿐 아니라 방사선적 안전성에도 많은 영향을 미친다. 즉 부식을 통한 용기 수명의 장단에 따라 이산화우라늄 내에 존재하던 방사성 핵종들의 유출률이 변화할 수 있다. 만일 처분 용기 수명이 비교적 짧다면 부식된 처분 용기 내로 침투한 지하수가 방사능에 의한 분해되어(decomposition) 일부 기간 동안 산화 조건이 형성될 수도 있다. 따라서 한국형 처분 개념 설정과 이에 대한 안전성 입증에 위해서는 조속한 시일 내에 처분 용기 재질이 결정되고 이에 따라 용기 수명 평가 및 용기 부식물의 안전성 위해도 영향 및 유출 기구 평가 등 제반 연구가 수행되어야 할 것이다.

벤토나이트 공학적 방벽에 대한 물성은 1997년부터 수행된 연구를 통해 대부분 규명되었으며 확산이 국산 벤토나이트 경우에도 주요 핵종 유출 기구임이 밝혀졌다. 그러나 국산 벤토나이트의 경우 팽윤압이 MX-80에 비해 떨어지는 것으로 알려져 있는데 벤토나이트 충전재가 단열 암반에 의해 충전되는 경우 불규칙적으로 존재하는 단열 암반에서 침투하는 지하수로 인해 과연 국산 벤토나이트가 균일하게 팽윤이 일어나며 용기 수명과 비교해 비교적 빠른 시간 내에 재 포화가 일어날 수 있느냐에 대한 연구는 아직 수행되지 못하고 있다. 만일 재포화 시간이 용기 수명에 비해 크다면 현재 TSPA에서의 주요 가정인 포화 암반에서의 핵종 이동 현상이라는 가설은 더 이상 유효하지 못하고 일부 초기 시간대에 대해서는 불포화 암반에서의 핵종 이동을 다루는 새로운 평가 기법이 개발되어야 한다. 또한 균일하게 팽윤이 일어나지 못하는 경우에는 벤토나이트의 역학적 안정성에도 문제가 발생할 수 있으며 팽윤이 덜 일어난 곳에는 기존 모델에서 고려하지 못한 핵종 이동 기구가 발생할 개연성이 있다.

한편 벤토나이트 층에서의 열로 인한 THM 현상은 현재로서는 그 영향이 미미한 것으로 예상된다.

다. 천연 방벽 성능 평가

천연 방벽에서 안전성에 영향을 미치는 가장 중요한 요인은 MWCF(Main Water Conducting Feature)까지의 거리와 MCF까지 연결되는 단열 암반의 수리 특성이다. 현재 이 분야에 대한 국내 연구는 연구 비용 및 인력의 제약으로 인하여 매우 미진한 형편이다. MWCF까지의 거리를 예측하지 못하고는 처분장으로부터 지표면 생태계로의 핵종 이동 경로를 파악할 수 없으므로 다양한 심부공(deep borehole) 시추 등의 연구를 통해 이 분야 국산 데이터 생산이 요구된다. 또한 처분장 핵종 이동 경로를 단축하는 주요 요인인 sub-vertical fracture zone을 보다 정확하게 탐지하는 기술 등이 개발되어야 할 것이며 부지 지질 조사를 처분장 안전성 평가 모델링과 연결시킬 수 있는 데이터 베이스

시스템 개발이 필요하다.

라. 생태계 성능 평가

처분장 생태계는 평가 대상 핵종이 원전 사고 시 평가하는 핵종들과는 다르며 원전 사고 시에는 공기를 타고 이동하던 핵종들이 지상으로 침전하여 이동하는 경로를 해석하는데 비해 처분장 관련 연구에서는 심부 지하수를 타고 이동한 방사성 핵종들이 지표수와 지표 토양 등을 통해 관계. 축산, 어업 등 다양한 생활 환경으로 이동한다는 점에서 차이가 있다. 2 단계 연구를 통해 국내 연안 생태계를 평가하기 위한 평가 방법론은 H-12와 같은 해외 연구 결과물들과 AMBER와 같은 우수한 코드 확보를 통해 기반이 구축되었으므로 향후에는 국내 생태계의 특성을 고려한 섭생 자료 및 물질 전달 계수 확보를 위한 연구가 수행되어야 할 것이다.

마. 이해 당사자

이해당사자 수용성 문제는 80년대 중반부터 수행해 온 중저준위 처분장이 지역 주민들의 극력한 반대로 인해 난항을 겪는 데서도 알 수 있듯이 방사성폐기물 처분 연구 사업의 난제 중의 하나이다. 수용성 증진을 위한 체계적인 연구는 기존의 2 단계 연구까지에서 수행되지 못했는데 3 단계 연구에서는 우리가 다루고자 하는 처분장 안전성 관련 문제가 과연 다양한 이해당사자들에게는 어떻게 받아들여지는가에 대한 기초 연구부터 이해당사자 수용성 증진을 위해서 필요한 방법론들을 정립하고 일방적 수용성 증진 캠페인 방식을 지양하고 정보 제공 및 이를 통한 쌍 방향 의견 교환을 통해 장기적으로 고준위 방사성폐기물 처분장 수용성을 증진하기 위한 방법을 모색해야 할 것이다.

바. Negative Alternatives

최근 일상적으로 겪고 있는 단기적인 기후 변화, 콜로이드를 통한 핵종 이동 가속화, 지진과 해일 등으로 인한 피해 등과 같은 사건들은 심지층 처분장에서 발생 개연성은 낮으나 일반인들의 관심은 매우 높으며 발생 시 안전성에 영향을 줄 수 있는 사건들이다. 따라서 이와 같은 악 영향을 주는 사건들을 평가하는 해외 동향을 추적함으로써 저 비용으로 이러한 문제 평가를 위한 국내 기반을 갖추는 노력이 2006 TSPA를 위해서 요구된다.

사. 안전성 실증

안전성에 대한 본격적인 실증 문제는 2006년 처분 연구 최종 목표가 기준 처분 개념

설정 및 안전성 확인인 점에 비추어 보아서는 시급한 문제는 아니다. 하지만 2006 년 이후 한국형 기준 처분 개념 및 다양한 대안에 대한 안전성 실증 연구가 착수되어야 하므로 그 기반을 구축하는 연구가 필요하다. 이를 위해서는 외국에서 이미 수행하고 있는 일반적인(generic) 실증보다는 국내 단일 암반에 맞는 그리고 국산 벤토나이트를 이용한 실증 연구가 본격적으로 준비되어야 할 것이다.

3. 결론

2006 년 KRDC 개발 및 이와 관련된 안전성 평가를 위해서는 남은 4 년 기간 동안 TSPA와 관련된 제반 연구를 수행함에 있어 해외 연구 사례의 반복을 지양하고 국내 공학적/ 천연 방벽 특색에 맞는 연구 항목들에 대한 우선적인 집중 투자가 선행되어야 할 것이다. 또한 연구 결과가 향후 연구 사업에서도 적극적으로 활용되기 위해서는 투명한 계획 수립 및 연구 수행 문서화 등 연구 전 과정에 걸친 QA 시스템 적용이 필수적이며 전체적인 TSPA 연구의 근간인 FEP 시나리오 AMF 도출 연구에서는 특히 투명성 증진을 위한 다양한 방법론이 모색되어야 한다. 또한 결정질 암반 및 벤토나이트 완충재 및 생태계에서의 핵종 이동을 보다 정확히 모사할 수 있는 평가 툴의 개발이 시급하며 국산 생태계 평가를 위한 데이터 베이스 확충 노력도 따라야 할 것이다.

감사의 글

본 논문은 과학기술부가 주관하는 원자력 중장기 연구 개발 사업의 일환으로 추진된 연구 결과입니다