

인터랙티브한 FEAS 프로그램을 이용한 고준위 방사성 폐기물 처분장
안전성 평가 방안
황용수, 서영운, 김성기, 강철형
한국원자력연구소

FEAS, Interactive Communication Tool to Understand Performance
Assessment Approaches on Permanent HLW Disposal
Yong Soo Hwang, Yung-Wung Seo, Sungki Kim, and Chul-Hyung Kang

요약

한국원자력연구소에서는 고준위 방사성폐기물 처분 시스템의 안전성을 투명하게 평가하기 위한 방안의 하나로 처분 안전성 관련 시나리오와 구성 요소들인 FEP, 그리고 각 시나리오 별 안전성 평가 방안들을 종합한 프로그램인 FEAS를 개발하고 있다. 고준위 방사성 폐기물 처분 연구는 관련 전문가 뿐 아니라 일반 국민들도 안전성에 대해 많은 관심을 표명하고 있는 바 현재 국내에서 고려하고 있는 처분 개념은 무엇이며 처분장 안전성 평가를 위해서 고려하고 있는 제 사건들은 무엇이며 이들 시나리오를 구성하는 세부 사건들은 무엇인가에 관한 합의를 도출하고 이와 관련된 기록들을 보존하고 각각 세부 사건들에 대해 현재의 평가 방안과 데이터 수집 현황 그리고 해외 사례 등을 체계적으로 정리하는 일은 중요하다. 현재 개발되고 있는 FEAS는 이와 같은 역할을 수행할 뿐 아니라 이 프로그램과 동시에 개발되고 있는 입력 자료 데이터 시스템, 웹을 기반으로 한 품질 보증 체제 및 안전성 평가 방안 등과 향후 연계되어 모든 국민들이 방사성 폐기물 처분장의 안전성을 쉽게 이해할 수 있는 수단으로 확장될 예정이다.

1. 서론

현재 국내에는 총 16기의 상용 원자력 발전소가 운영 중이며 2015년까지 총 28기의 원자력 발전소가 건설될 예정이며 이외에도 2기의 원자력 발전소가 북한에 건설 중이다. 원자력은 현재 국내 전기 에너지 발전의 40%를 차지하고 있는바 이러한 원자력 발전은 중저준위 및 고준위 방사성 폐기물을 부산물로 발생한다. 한국원자력연구소는 지난 80년대 중반부터 중저준위 방사성폐기물을 처분하는데 필요한 기술을 국산화하기 위한 연구 개발을 수행해 왔으며 1997년부터는 “국가 원자력중장기연구개발사업”의 일환으로 고준위 방사성폐기물을 영구 처분하는데 필요한 요소 기술을 개발하여 이를 근간으로 2040 년경 고준위 방사성 폐기물 영구 처분장을 국내에 건설 운영할 예정이다.

2006년까지 계속될 1단계 연구에서는 국내 인문 사회 및 지질 수문 환경에 적합한 처분 개념을 도출하고 있다. 즉 높은 인구 밀도, 국토의 70%를 점하는 산악 지형, 가압 경수로(PWR)과 중수형 가압 경수로(PHWR)이 동시에 존재하는 독특한 원자로 배치 전략 등을 고려하여 최적 처분 개념을 도출하고 있다. 현재까지 연구 결과는 2015년까지 운영이 시작될 원자로들로부터 약 36,000 톤의 사용후핵연료가 발생하고 이들 중 약 50%는 PWR 형의 원자로에서 나머지는 PHWR에서 발생하는 바 이들을 오랜 기간 동안 안전하게 인간 생활권으로부터 격리하기 위해서는 잠 300-700 미터 깊이의 화강암반과 같은 결정질 암반에 수평 동굴을 굴착하고 각 처분 동굴에 6 미

터 간격으로 수직 처분공을 굴착하여 용기에 포장된 사용후핵연료를 거치하고 그 주위를 30-50 cm의 벤토나이트로 충전하는 것이다. 이와 같은 처분 방식은 처분 용기 및 벤토나이트 방벽 뿐 아니라 투수율이 낮은 주변 결정질 암반이 다중으로 방사성 핵종의 유출 및 이동을 제어하므로 그 안전성이 뛰어나다고 알려져 있다[1.]

만일 장기간에 걸쳐 처분 용기가 부식 등에 의해 손상되면 처분 용기 내로 지하수가 침투하여 고체 상태의 방사성 물질들을 용해하고 용해된 방사성 핵종들은 오랜 기간에 걸쳐 확산, 이류 및 흡탈착 등을 겪으면서 벤토나이트 층과 단열을 따라 외부 암반으로 유출된 후 궁극적으로 인간 생활권에 도달하게 된다. 따라서 이러한 핵종 유출이 발생할 경우라도 인간에 미치는 영향은 미미하다는 것을 증명하는 것은 인허가 뿐 아니라 처분장이 위치할 지역 주민 및 일반 국민들을 위해서도 매우 중요하다. 현재 원자력연구소에서는 이와 같이 고준위 방사성 폐기물 처분장의 안전성을 종합적으로 규명하는 TSPA(Total System Performance Assessment) 연구를 수행[2]하고 있다.

TSPA 연구의 첫 단계는 과연 핵종들이 어떠한 사건과 경로를 통해 심부 암반에 위치한 처분장으로부터 인간 생태계까지 이동하는가를 규명하는 것인데 이를 시나리오 연구라고 한다. 모든 전문가 및 일반 국민들이 이해할 수 있는 방사선적 안전성 규명을 위해서는 우선 모든 사람들이 동의하는 시나리오 구축 작업이 요구된다. 방사성 핵종들의 유출부터 최종적인 인간 생태계로의 도달까지 긴 여정을 기술하는 시나리오는 작은 여러 개의 현상, 사건, 공정들(Features, Evenets, and Processes)의 조합으로 구성되어 있다. 즉 처분 용기가 어떻게 손상되는가 하는 일련의 사건, 지하수가 처분장 주변을 어떻게 유동하면서 용기 내부로 침투하는가하는 공정, 침투 지하수에 어떻게 고체 상태이던 방사성 핵종들이 용해되는가 하는 현상 등 일련의 FEP들이 모여서 하나의 사건을 구성하는 것이다. 이렇게 구성된 시나리오는 절대 유효한 하나의 시나리오만 존재하지 않고 여러 개의 다양한 형태들로 존재한다. 가령 처분장 주변으로 유출된 핵종들이 처분장 주변에 위치할 우물물로 회석 흡입된 후 이 지하수를 주민들이 음용하는 경우를 “우물 시나리오”라고 부르며, 지하수가 해양 생태계로 유입되는 경우는 “해양 시나리오”로 구별하여 각기 다른 방법으로 안전성을 평가하게 된다[3].

2. 본 론

2.1 FEP 및 시나리오 개발

처분장의 안전성 혹은 성능을 평가하거나, 처분장을 설계건설 하는 단계에서 시나리오의 개발이 필요하다. 시나리오(Scenario)란 단위 사건들의 조합으로 핵종이 유출을 시작해서 궁극적으로 인간에게 섭취되는 과정을 설명하는 것이다. 시나리오의 개발의 첫 번째 단계는 FEP을 도출하는 작업이다. FEP이란 현상(Feature), 사건(Event), 공정(Process)으로 방사성 폐기물 처분장에서 발생 가능하고 처분 안정성에 영향을 미치는 단위 사건을 뜻한다. KAERI에서는 OECD/NEA FEP 리스트 등 해외 FEP 목록들을 분석하고 또한 국내 인문 사회 및 지수문 환경을 고려한 FEP들을 추가하여 KAERI FEP 리스트를 작성하였다. 이와 같은 KAERI FEP들을 (1) 발생 확률, (2) 처분 안전성에 미치는 영향, 그리고 (3) 일반인들이 생각하는 중요도 등의 기준을 근거로 전문가 의견 수렴을 거쳐 2000-2001년에 걸쳐 선별하였으며 또한 선별된 FEP들의 중요도를 0-5 점의 가중치로 평가하였다. 이와 같이 선별된 FEP들을 조합하여 국내 처분 환경에서 발생 가능한 수 백 여가지의 시나리오들을 도출하였으며 전문가 판단 방법에 의해 2001년 현재 십 여개의 주요 시나리오들을 도출하였으며 향후에도 시나리오들을 도출하여 약 40-50 개의 평가 시나리오들을 최종적으

로 선별할 예정이다.

고준위 방사성 폐기물 처분 연구에서 안전성 평가를 위한 시나리오를 구성하는 방법론으로는 전통적인 수목도(fault tree)방법론과 공정 영향도(Process influence diagram) 방법론, 그리고 암반 공학적(Rock engineering system) 방법론 등이 있다. 수목도(fault tree) 방법론[4]은 핵종 유출에 직·간접적으로 관여할 수 있는 가능한 모든 FEP들을 열거한 후, 이들을 조합해가며 여러 시나리오를 도출하는 방식이다. 이 방법론은 일반적인 FEP 및 영향분석 연구에서 많이 적용되나, 각 FEP들의 관계를 보여주는 데는 한계가 있으며 FEP 별 발생 확률 및 영향이 명확히 정의되지 않고 방사성폐기물 처분과 같이 대상 평가 기간이 장구한 경우 발생 확률 및 영향이 정량적으로 명확히 분석할 수 없는 문제점이 있다.

RES 방법론[5]은 최근 방사성 폐기물 처분 연구에서 본격적으로 활용되고 있으며 목표 지향적(object-based) top-down 방식에 의거하여 문제의 현안들이 모두 포함 되도록 하고 있다. 즉 각 FEP들은 상호 반응(interactive matrix)의 구성 요소(constituent)로 표시되며, 이러한 행렬 중 핵심 요소들은 정방향 행렬의 대각선 인자로 표시된다. 각 FEP들의 상호 반응은 대각선상의 요소들의 상호 반응으로 나타난다. RES 방법론에 의해 표기된 FEP들은 서로 간의 상호 반응이 명백하게 도시될 수도 있고 이들을 조합하면 시나리오를 보다 객관적으로 개발할 수 있다. 또한 적절한 GUI(Graphic user interface)를 통하여 각 FEP들에 관한 세부 사항을 자세히 기술하고 검토한 결과물들을 기록한 데이터베이스와 연결될 수 있어 자료 검색에도 용이한 장점을 가지고 있다. 그러나 RES방법은 모든 주요 FEP들을 하나의 행렬로 표시하기에는 행렬의 규모가 상당히 커져야 하는 불편이 따르고 아직까지 상호 반응 행렬로부터 구체적으로 시나리오를 개발하는 방법론이 결여되어 있는 단점이 있다. 따라서 모든 FEP들을 하나의 행렬로 나타내기보다는 하나의 보다 작은 규모의 주제를 가진 집단으로 묶어 표현하는 것이 각 FEP들의 상호 관계가 일목 요연하게 표현될 수 있으며 이들을 잘 연결하여 부 시나리오를 개발할 수 있다.

PID방법론[6]은 시나리오를 구성하는 각 세부 사건의 영향을 다이어그램으로 표시한 것으로 수목도나 RES 방법론보다 FEP들의 상호 관계를 일목 요연하게 이용하는데 편리하고 각 FEP들 간의 영향을 평가하는 방법론을 함께 기술하기에 편리한 장점이 있으나 이들 결과로부터 시나리오를 구성하는데 어려움이 있다.

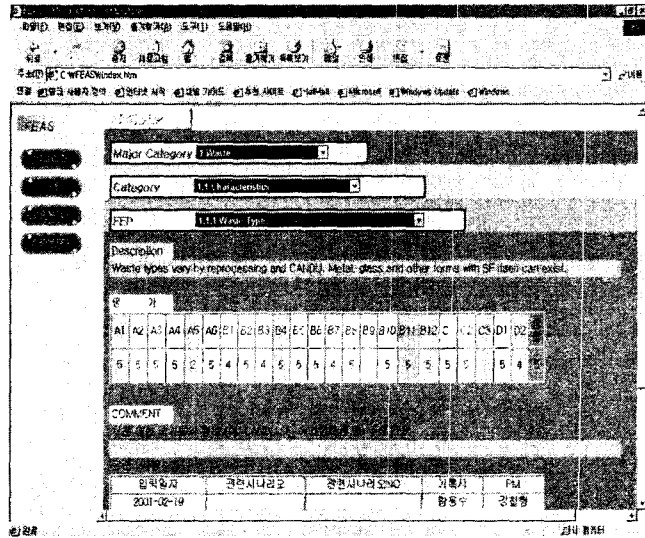
KAERI에서는 상기 3 가지 시나리오 구성 방법론 중 RES 방법을 기준 방법론으로 설정하여 2000년도 연구 기간 동안 5 개의 주요 시나리오를 2001년도 연구 기간 동안 추가로 10 여 개의 주요 시나리오를 도출하였다.

2.2 FEAS 개발

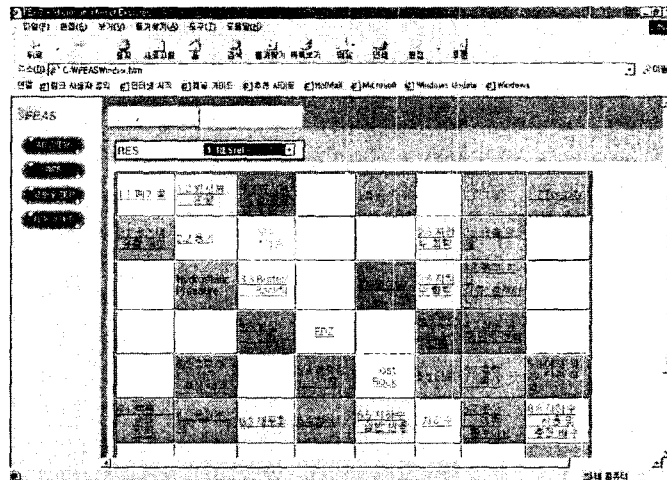
전문가뿐만 아니라 일반인들에게도 (1) 핵종의 유출 및 이동을 야기하는 FEP들은 어떤 것들이 있으며, (2) 시나리오가 어떻게 형성되었으며, (3) 시나리오를 형성하고 있는 각 FEP들의 상관관계 및 평가 방안을 쉽게 파악 할 수 있게 하고, 고준위폐기물 처분장의 안전성의 투명성을 확보하기 위하여 KAERI는 웹에 기반한 FEAS라는 프로그램을 개발하였다. FEAS에는 FEP 목록에 관한 국내 전문가 의견 검토 결과에 관한 (1) 중요도 평가 결과 및 (2) 관련 기록들이 있다. 또한 각종 방사성 폐기물이 지하 처분장으로부터 유출되는 사건 시나리오 선별 결과들을 리스트 하였다. FEASE 화면에서 원하는 시나리오를 선택하면 해당하는 시나리오에 관한 설명이 나오며 또한 FEP들을 열거하여, 각 FEP들을 선택하면 각FEP들의 설명을 보여준다.

또한 각 시나리오 별 RES를 선택할 수 있게 되어 있다. 각의 RES를 선택한 후 매트릭스 내 각 구성 FEP 항목을 선택하게 되면 해당되는 각 항목의 평가 방안을 기술한 AMF(Assessment

Method Flowchart)를 보여준다.



[그림 1] FEAS의 FEP 리스트



[그림 2] FEAS의 RES 매트릭스

3. 결론

한국 원자력연구소에서는 방사성 폐기물 처분장 안전성 평가에 중요한 방사성 핵종 유출 시나리오 및 그 구성 FEP들의 선별 결과물, 그리고 주요 시나리오들을 구성하고 있는 사건들에 대한 평가 방안을 기술한 FEAS 프로그램을 웹 환경에서 개발하고 있다. FEAS는 향후 평가 방안이 될

요한 입력 데이터베이스를 수록한 PAID 프로그램 및 평가 관련 실험 및 수치 해석 결과물 생산을 위한 품질 보증 시스템인 Web-Q 프로그램과 연결되어 국내외 전문가들 뿐 아니라 일반 국민들도 처분장 안전성에 대해 보다 쉽게 이해할 수 있게 하는 종합 평가 프로그램으로 확장될 예정이다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부에서 주관하는 국가중장기원자력연구개발사업의 일환으로 추진되었습니다

참고 문헌

1. SKB, "KBS-3, Final Disposal of Spent Nuclear Fuel", SKB Sweden, 1982.
2. 한국원자력연구소, "심지층처분시스템개발", KAERI 연구보고서 RR-2013/1999, 2000.
3. 황용수 외, "Effort toward Confidence Building in Total System Performance Assessment for a Potential HLW Disposal in Korea", to be presented at 13th Pacific Basin Nuclear Council Conference, Shenzhen, 2002.
4. J Andersson et al., "The Joint SKI/SKB Scenario Development Project", SKB TR 89-35, 1989.
5. T Vieno et al., "Application of the RES Methodology for Identifying FEPs for Near Field Analysis of Copper Canister"m YJT-94-12, VTT Energy, 1994.
6. J Anderson and L King-Clayton, "Evaluation of the Practical Applicability of PID and RES Scenario Approaches for Performance and Safety Assessments in the Finnish Nuclear Spent Fuel Disposal Program", TURVA-96-02, POSIVA, 1996.