터널과 지하공간, 한국암반공학회지
제13권 제4호, 2003년 8월, pp. 270~278

TUNNEL & UNDERGROUND SPACE, Vol. 13, No. 4, 2003, pp. 270-278
Journal of Korean Society for Rock Mechanics

FEAS 프로그램 개발을 통한 방사성폐기물 처분장 종합 성능 평가(TSPA) 투명성 증진에 관한 연구

서은진[1)]*, 황용수[1)], 강철형[1)]

Building Transparency on the Total System Performance Assessment of Radioactive Repository through the Development of the FEAS Program

Eun-Jin Seo, Yong-Soo Hwang and Chul-Hyung Kang

Abstract Transparency on the Total System Performance Assessment (TSPA) is the key issue to enhance the public acceptance for a permanent high level radioactive repository. Traditionally, the study on features, events, and processes (FEPs) and associated scenarios has been regarded as the starting point to open the communicative discussion on TSPA such as *what to evaluate, how to evaluate and how to translate outcomes into more friendly language that many stakeholders can easily understand and react with.* However, in most cases, it has been limited to one way communication, because it is difficult for stakeholders outside the performance assessment field to assess the details on the story of the safety assessment, scenario and technical background of it. Fortunately, the advent of the internet era opens up the possibility of two way communication from the beginning of the performance assessment so that every stakeholder can *exchange* their keen opinions on the safety issues. To achieve it, KAERI develops the systematic approach from the FEPs to Assessment methods flow chart. All information is integrated into the web based program named FEAS (FEp to Assessment through Scenario development) under development in KAERI. In parallel, two independent systems are also under development, the web based QA(Quality Assurance) system and the PA(Performance Assessment) input database. It is ideal to integrate the input data base with the QA system so that every data point in the system can be checked whenever necessary. Throughout the next phase R&D starting from the year 2003, these three systems will be consolidated into one unified system.

KeyWords: Total System Performance Assessment, FEP, Scenario, Assessment Methods, FEAS

초 록 고준위 방사성폐기물 처분 연구 사업이 대중의 동의를 얻기 위해서는 처분 사업의 안전성에 대한 신뢰성 획득이 중요하다. 이를 위해서 투명하게 공개될 수 있는 종합성능평가(TSPA, Total System Performance Assessment)의 수행이 필요하다. 종합성능평가 수행에서 무엇을 평가할 것인가, 어떻게 평가할 것인가 그리고 각 이해 당사자들이 쉽게 이해할 수 있는 용어로 평가 결과들을 어떻게 전달할 것인가 등과 같은 의견전달 논의의 시발점이 된 것이 FEP(Features, Events, and Processes)시나리오 관련 연구라고 할 수 있는데 지금까지는 평가 영역 외부의 이해 당사자들이 평가 관련 상세 정보를 접하는 것이 쉽지 않은 일이었기 때문에 대부분의 경우 일방향(One-way communication) 의견 전달에 한정되어 왔다. 그러나 인터넷의 출현으로 성능 평가 등에도 쌍방향(Two-way communication) 의견 전달의 가능성이 높아지게 되었다. 본 연구에서는 FEP으로부터 AMF(Assessment Methods Flow chart)까지의 형성 전 과정을 체계적으로 연결하여 웹 상에 나타내는 방법을 개발했다. 평가 관련 모든 요소들은 웹 기반 프로그램인 FEAS(FEp to Assessment through Scenario development) 내에서 시스템적 구성을 이루게 된다. 2003년부터 시작되는 연구에서는 FEAS 프로그램과 현재 개발 중에 있는 웹 기반의 품질보증(QA, Quality Assurance) 및 성능 평가(PA, Performance Assessment) 입력 자료 시스템을 하나의 시스템으로 통합하는 연구를 수행함으로써 든 이해 당사자들이 "처분장에서 생태계에 이르는 핵종들의 이동 경로에 대한 시나리오는 어떠한 것이며, 그 관계 결과들과 연구에 이용되는 실제 데이터들은 어떤 것인지"에 대해 쉽게 이해할 수 있도록 할 것이다.

핵심어: 종합성능평가, FEP, 시나리오, 평가방법(Assessment Methods), FEAS

[1)]한국원자력연구소
*교신저자(Corresponding Author): ex-dimpark@kaeri.re.kr
접수일: 2003년 3월 28일
심사 완료일: 2003년 8월 14일

1. 서 론

고준위 방사성폐기물 처분장 종합성능평가(TSPA, Total System Performance Assessment)는 오랜 기간에 걸쳐 반복적인 과정을 통해 처분장 안전성을 입증하는 것이다. TSPA의 각 평가 단계에서 처분 사업에 대한 불확실성을 감소시켜 나감으로써 각 이해 당사자의 처분 연구에 대한 신뢰성을 증가시키고자 한다. 현재 우리 나라 고준위 폐기물 처분장은 2030년대 중반 완공을 목표로 계획되어 있다. 우리나라는 이미 중저준위 처분장 건설에서 심각한 NIMBY(Not In My BackYard) 현상을 경험했었다. 몇몇 이해 당사자들의 처분 사업에 대한 공포와 불확실성은 대부분이 처분 시스템에 대해 친숙하지 못한 것에서 기인했다 할 수 있다. 이를 극복하여 서로 다른 이익과 배경을 가진 각 이해 당사자간의 처분연구에 대한 신뢰성 회복을 위해서는 서로간에 체계적인 대화가 필요하다.

우선 이해 당사자 집단의 특성을 명확히 이해하고 그 특성에 맞추어 목표 지향적인 대화 방식을 개발해야 할 것이다. 한 예로, 젊은 층을 주요 대상으로 한다면, 인터넷에 기반을 둔 쌍방향 대화 프로그램을 개발함으로써 안전성에 관한 신뢰성 증진을 기대할 수 있을 것이다. 일반적으로 사람들은 방사성 폐기물에 관해 막연한 공포를 가지고 있고 또 핵종 유출을 얼마나 다른 관점에서 보느냐에 따라 처분 시스템 안전성에 관한 인식 또한 달라질 수 있는 것이므로, 각 이해 당사자가 대화를 통해 토론 및 정보교환을 이루어 불확실성을 해소할 필요가 있다. 결국 처분 연구의 신뢰성을 높이고 안전성에 관한 이해를 증진시킬 수 있는 새로운 접근법이 필요한 것이다. 본 연구에서 수행해 왔던 처분장 핵종 유출의 경로를 묘사한 이야기인 시나리오에 관한 연구가 이 접근법의 시발점이 될 것이라 기대한다.

지금까지의 FEP/시나리오 연구에서는 많은 FEP들이 세계에서 유일하게 PWR형과 CANDU형 핵연료를 대상으로 하는 우리 나라 현실에 부합되지 못한 측면이 있었다. 그리고 FEP에서 시나리오까지의 도출 과정에 있어 투명하지 못한 부분도 다소 존재하고 있었다. 이의 개선을 위해 본 연구에서는 1990년대 중반부터 일반적인 고준위 폐기물 처분장에 대한 NEA[1], NIREX[2], SKB[3]의 연구와 중저준위 폐기물 처분에 대한 기존 KAERI 연구의 FEP (Features, Events, and Processes) 데이터[4] 등을 이용하여 처분장에서 핵종 유출의 단위현상(Features), 사건(Events), 그리고 공정(Processes)들로 구성되는 기본적인 FEP들 뿐만 아니라 Table 1과 같이 각 나라마다 처분 개념이 상이하므로 우리 나라 현실에 부합될 수 있는 FEP들을 수집하여 전체 FEP 목록을 작성하였다. 이러한 FEP의 조합이 처분장에서 생태계까지의 핵종 유출의 이야기인 시나리오를 구성해 나가는 것이다. 또한 IFEP(Integrated FEP)이란 개념을 도입하여 FEP에서 시나리오까지의 도출 과정을 좀 더 구체적으로 보여 줌으로써 도출 과정의 투명성도 증진시켰다. 특정 FEP의 중요도에 대한 의견은 처분 연구 전문가들 사이에서도 다를 수 있다. 그러므로 FEP 목록을 작성하는 것 뿐만 아니라 우리 현실에 맞는 중요한 FEP 들을 선별할 수 있는 합리적이고 객관적인 기준도 이해할 수 있게 모든 정보가 투명하게 공개될 필요가 있다. 좀 더 구체적으로 표현하자면, FEP에서 시나리오까지의 도출 과정과 각 시나리오에 대한 평가체계, 평가 방법 적용 등의 전 과정이 일관된 원칙에 의해 수행되고 이 모든 과정 및 결과가 QA(Quality Assurance, 품질 보증) 프로그램에 기록될 수 있는 통합시스템이 필요한 것이다. 이 전 과정이 일관되게 수행될 수 있다면 public acceptance를 위한 안전성 평가의 투명성 증진에 크게 기여할 수 있다고 생각한다.

본 연구에서 개발한 FEAS (FEp to Assessment through Scenario development) 프로그램은 바로 이러한 요구를 충족시키는데 중요한 역할을 할 것이다. 본 연구에서는 전술한 바와 같이 FEP 목록을 작성하고 해외 기타 관련 연구들과 전문가 조언 등을 바탕으로 우리 나라 현실에 부합되는 FEP 목록을 확장시켰다[3, 5-7]. 이 FEP 목록으로부터 기준 시나리오와 대안 시나리오를 도출하였고 각 평가 요소들을 서술한 평가개요와 평가 프로그램 현황, 관련 데이터베이스, 평가 수행자 등의 내용을 담은 평가방법 흐름도를 작성하였다. 또한 이 평가방법 흐름도가 고준위 폐기물 처분장 안전성 평가의 청사진 역할을 할 수 있을 것으로 기대한다. 전술한 FEP과 시나리오에 관한 연구 결과는 본 FEAS 프로그램에 모두 포함되어 있다.

2. FEP/시나리오 연구

2.1 FEP 개발 및 평가

본 2단계 한국원자력연구소 TSPA 연구의 목표는 고준위 폐기물 처분장의 성능 평가에 있어 확률론적 안전성 평가의 성능을 향상시키고 폐쇄 후 장기간에 걸쳐, 제안된 처분 개념의 방사선적 안전성을 평가하는 것이다. 한국원자력연구소의 연구 결과 기준 처분 개념은 완전 포화 상태 결정질 암반 내의 수직 처분공에 용기에 밀봉된 36,000 MTU(PWR 20,000, CANDU 16,000 MTU)의 사용후 핵연료를 처분하는 것으로 제시되었다.

Table 1. 각국별 고준위 처분 관련 현황.

국가	HLW 정책방향	처분부지/처분방안	처분장 계획	기준
캐나다	- S/F 직접처분 - 회수 고려 안 함 - A.R. 저장	- 처분부지 미결정 - 500~1000 m 깊이 granite층 (포화) - Ti 또는 Cu 용기 - 채움재 : clay	- 2025년 이후 가능	
프랑스	- 국내 재처리 - 재처리 공장부지에 30년간 저장	- 처분부지 미확정 - clay, granite 고려 중 (포화) - Multiple barrier 개념 설계 중	- 처분장 : 2020년	- 10,000년간 지표에서 0.25 mSv/yr
독일	- 국외 재처리와 S/F 직접처분 - 장기 저장 요구됨	- Gorleben - Salt Dome, 지하수면 위에 위치(불포화) - Hastelloy-C 용기 내 steel/cast iron 구조체 - POLLUX	- 2035년에 처분장 운영 - 시험장 건설 중	- 지표면에서 0.3mSv/yr - 용기 표면 온도 200℃ 이하
일본	- 국내외 재처리 - HLW: 30~50년간 저장 후 처분 - 4단계 계획, 현재 2단계 수행 중	- 처분부지 미확정 - Multiple Barrier 개념 설계 중 (포화) - Long-lived Engineering Barrier	- 2030~40년 처분장 건설	- 안전 기준 연구 중
스웨덴	- 중간 저장 시설 50~100 년 - 현재 CLAB에서 중간 저장	- 처분 부지 미확정 - 결정질 암반, 500 m 지하(포화) - Cu/Steel 용기(106년 격리 가능) - 벤토나이트 밀봉	- 2020년	- 0.1 mSv/yr 미만
스위스	- 외국에서 reprocessing S/F 처분	- 처분부지 미확정 - 결정암질 또는 clay 지하 400~1,000 m (포화) - 스테인레스강 처분용기	- 2000년경 결정	- 0.1 mSv/yr 이하
미국	- S/F 처분, 고화체 - Retrievable 요구됨	- Yucca Mountain - Tuff, 지하수면 위 160 m (불포화) - 냉각기간 5년 이상	- 2010년	
한국	- HLW : 심지층처분 - 처분장 운영 50년 기간 - Retrievable 요구됨	- 처분부지 미확정 - 결정질 화강암 500 m 지하	- 2030년대	- 처분장 폐쇄 후 1,000년 동안 0.1 mSv/yr 이하

고준위 방사성폐기물 처분과 관련된 체계적인 종합 성능 평가를 위해서는 처분장으로부터 최종 생태계에 이르기까지 방사성 핵종들의 이동을 기술하는 시나리오를 도출하는 연구가 필요하다. 이러한 핵종 유출 시나리오의 도출을 위해 본 연구에서는 처분장 성능 및 안전성에 미치는 영향들을 상호 독립적인 단위 현상, 사건, 공정(Features, Events, Processes; FEP)으로 구분하여 정리하였다. 1차 FEP 목록은 150 여 개 이상의 FEP 들로 구성되었는데 이 목록은 기준 시나리오를 위한 FEP 들에 초점이 맞추어져 있었다. 발생 확률이 낮은 사건에 관한 대안 시나리오에 초점을 둔 새로운 FEP 들이 1단계 목록에 첨가되어[8-9], 350 여 개 이상의 FEP 들로 이루어진 FEP 목록이 작성되었다. 이 후 전문가 평가에 의한 선별 작업을 수행하여 각 FEP들의 영향과 특성 등을 고려하여 세분화한 후 다음과 같은 내용의 FEP 목록을 도출하였다.

(1) Category
(2) Description
(3) References
(4) Link to Integrated FEP(IFEP)
(5) Base/Probabilistic FEP
(6) Relevant Scenario
(7) Indicator for LDE(처분장의 물리적 방벽, Leading Diagonal Element)/ODE(방벽간의 반응관계, Off Diagonal Element)

Category는 각 FEP이 속하고 있는 처분 과정의 8개 물리적 방벽 순서인 폐기물, 용기, 완충재, 응력교란지역 (EDZ, Excavation Disturbed Zone), 암반, 지하수, 용질, 그리고 생태계를 나타낸다.

본 연구에서는 미국, 스웨덴, 핀란드와 OECD/NEA의 FEP 선별 사례에 의거하여 발생확률, 영향, 특정 부지 연관성, 규제와 같은 선별 기준을 적용하였다. 그리고 이 4 가지 선별 기준 이외에 일반 대중들의 처분장 안전성에 관한 관념도 고려하여 FEP을 선별하였다. 예를 들면 활성 단층의 경우 발생 확률은 미미하므로 인허가를 위한 평가 시에는 중요한 고려 대상이 아니다. 그러나 일반 대중들에게는 활성 단층으로 인한 지진은 발생 확률은 미약하더라도 사고 발생으로 인한 영향이 심대하므로, 처분장 안전성을 입증하기 위한 방안으로 정량적인 영향 평가가 요구될 수 있다. 따라서 시나리오 도출 단계에 이러한 FEP들을 발생 확률이 미미하다고 제외하는 방안보다는 이들을 따로 분류하여 이들로 인해 발생하는 사건 시나리오들을 도출하도록 하였다.

그리고 FEP을 발생 확률에 따라 다음과 같이 분류하였다.

(1) Base FEP: 발생 확률이 1인 FEP
(2) Probability FEP: 발생 확률이 낮은 FEP
  - SDF(Scenario Defining FEP): Probability FEP 중 시나리오의 특성을 결정지을 수 있는 핵심 FEP
  - DFEP(Dependent FEP): Probability FEP 중 SDF 간의 반응관계를 나타내는 FEP

Base FEP과 Probability FEP들이 도출됨으로써 Base FEP을 이용한 기준 시나리오 도출 및 Probability FEP을 이용한 대안 시나리오 도출이 명확해졌으며 대안 시나리오를 생성하는 SDF들을 전문가 의견을 통해 도출함으로써 이들로 인한 구체적인 대안 시나리오들이 개발될 수 있도록 하였다. Probability FEP 분석 결과 현재까지 하나의 SDF에 의해 발생하는 single variant 대안 시나리오가 초기파손용기, 장기적 기후변화, 자연 재해 등으로 분류되어 도출되었으며 여러 SDF를 조합할 경우 multiple variant 대안 시나리오들을 도출할 수 있다[6]. 위에서 언급한 LDE와 ODE에 관한 상세 내용은 다음 절에서 다루고자 한다.

또한 FEP 분류에 따라 본 연구에서의 시나리오 구분은 다음과 같이 이루어졌다.

(1) 기준(Reference) 시나리오: Base FEP들로 구성된 시나리오
(2) 대안(Alternative) 시나리오: Probability FEP을 이용해 도출된 시나리오
  - Single variant 시나리오: 하나의 SDF에 의해 도출된 시나리오
  - Multi variant 시나리오: 두 개 이상의 SDF에 의해 도출된 시나리오

2.2 IFEP의 개발과 시나리오 구성

많은 FEP들이 선별되었지만, FEP 목록에는 여전히 삼 백여 개 이상의 FEP들이 수록되어 있다. 이렇게 많은 FEP들로부터 직접 시나리오를 도출하는데는 어려움이 있다. 그래서 본 연구에서는 FEP 목록의 "단위 FEP들"로부터 시나리오 형태로 상호작용의 결과를 추론해 내기 위해, 단위 FEP들을 서로 연결시켜 줄 수 있는 방법으로 RES(Rock Engineering System)법을 적용해 보았다.

방사성폐기물 처분 연구에서 많이 활용되고 있는 RES 방법은 단위 FEP들이 모두 상호 반응 행렬(*interactive matrix*)의 구성 요소로 표시되며, 이러한 행렬에서 핵심 요소들은 정방형 행렬의 대각선상에 표시된다. 각 FEP들의 상호반응은 대각선상에 나타난 요소들의 상호 반응으로 나타내게 된다. RES 방법은 요소간의 상호 반응을 명백하게 도시하여 이들의 조합으로 시나리오를 도출할 수 있게 한다. 또한 각 FEP들에 관한 세부 사항을 자세히 기술·검토한 결과물들의 데이터베이스와 연결될 수 있는 프로그램 개발이 이루어진다면, 검색 및 연구 결과에 대한 투명성을 증진하게 하는 장점도 가지고 있다.

그러나 RES 방법을 이용하면 표현하기에는 용이하나 보통 행렬의 크기가 제한되어 있어 상세한 정보의 표현에는 어려움이 있고, 수 백여 개의 FEP들을 하나의 RES 행렬 요소로 표현하는 것도 불가능하다. 그러나 FEP들을 각 특성에 따라 하나의 그룹으로 분류할 수 있다면 이들을 이용하여 "단위 FEP들"을 RES 행렬 요소로 쉽게 도출할 수 있을 것이며 이 행렬 요소간의 반응관계를 잘 연결하여 시나리오를 구성해 낼 수 있을 것이다. 본 연구에서는 RES 방법의 한계를 극복하고 각 요소로부터 시나리오를 구성하기 위해 IFEP (Integrated FEP)이라는 개념을 도입하였다. IFEP이란 유사한 특성을 가지는 FEP들의 집합체라고 정의하였다. "단위 FEP들"을 해당되는 RES 행렬의 요소들과 대응될 수 있게, 그 공통된 특성에 따라 IFEP으로 분류한 것이다. FEP 목록에서 하나의 단위 FEP은 반드시 RES 행렬 요소 하나에 1:1 대응하도록 하였으며 하나의 IFEP은 하나 이상의 단위 FEP을 포함하고 있는데 각 IFEP은 구성되어 있는 세부 단위 FEP들의 공통적인 성격을 대표하는 것이다. IFEP은 구성되는 단위 FEP들의 특성에 따라 RES 행렬 내에서 다음과 같이 구분된다.

(1) Leading Diagonal Elements(LDE): 이 요소들은 주로 폐기물, 용기, 완충재 그리고 뒷채움재, 응력 교란지역 (EDZ), 암반, 지하수, 용질, 그리고 생태계와 같은 물리적 방벽을 나타낸다.
(2) Off Diagonal Elements(ODE): 이 요소들은 LDE 간의 반응을 나타낸다.

IFEP들은 RES 행렬을 구성하는 요소가 되고 8개의 물리적 방벽들은 각 시나리오 관련 RES 행렬의 LDE가 된다. RES 방법의 적용에 대해서는 다음의 Fig.7에 나타나 있다.

2.3 평가 개요 및 평가 방법 흐름도 개발

해당 시나리오에 대한 평가 개요 및 평가 방법 흐름도가 개발되었다. 본 연구에서는 웹을 기반으로 한 프로그램 내에 TSPA 전체 개요를 구성하기 위해 IFEP, 평가 모델링 방법, 소프트웨어의 현황, 각 FEP에 대한 전문가 평가 점수, 현재 연구개발 현황, 향후 계획, 성능평가 분석가 (Performance Assessment Analysts)와 주요 연구자 (Principal Investigators) 등에 대한 각각의 데이터를 다른 데이터의 상세한 정보들과 연결시켜 통합 데이터베이스를 구성하였다.

2.4 FEAS 프로그램의 개발

FEP으로부터 시나리오까지의 구성 과정 그리고 관련 평가 방법 흐름도를 도출해 내는 것은 매우 복잡한 작업이다. 그러나 안전성 평가에 대한 신뢰성 증진을 위해 투명하게 공개될 수 있는 평가 수행이 필요하다. 본 연구에서는 웹을 기반으로 한 FEAS 프로그램을 개발하여 안전성 평가 전 과정을 인터넷상에서 나타내고자 한다. 이 프로그램은 인터넷상에서 FEP 선별과정, 각 FEP과 IFEP에 관한 상세 정보, 각 FEP에 대한 전문가 평가 점수, 각 FEP 관련 규제, SDF와 관련 대안 시나리오, 해당 시나리오의 RES 행렬, 관계 시나리오에 대한 주요 평가 개요, 시나리오 평가의 현황과 향후 계획 등의 내용을 볼 수 있도록 한 것이다.

Fig. 1의 왼쪽은 PC 기반의 FEAS 프로그램으로 초기의 한국원자력연구소 FEP/시나리오 연구에서 구성되었던 화면이다. Fig. 1의 오른쪽이 본 연구에서 개발한 FES 프로그램의 본 화면이다. 그림에서 보듯이 FEP, 관련 규제, 시나리오, 참고문헌 등의 메뉴들로 구성되어 있다. FEP은 알파벳 순서와 방벽 순서로 목록이 분류되고 base FEP, SDF 별로 목록이 구성되어 있다. 관련 규제는 국내, 국외 그리고 특정 FEP 관련 규제로 분류되어 작성되었다. 그리고 시나리오는 시나리오 개념, 기준 시나리오, 대안 시나리오 및 각 방벽별 부시나리오 항목으로 분류되어 작성되었다. 참고 문헌은 별도 목록이 구성되어 있으며 외부 문헌 사이트로도 연결되어 있다.

Fig. 2에서는 FEAS 프로그램을 구성하기 위한 데이터베이스의 구조를 나타내고 있다. List는 FEP 목록을 말하며, FEP category는 전술한 바와 같이 각 FEP이 속한 물리적 방벽을 나타낸다. RES list는 도출된 시나리오에 관련된 RES 행렬 목록을 나타낸다. 소규모 우물을 통한 음용수 채취의 경우와 단열 암반을 통한 지하수의 자연 유출이 해안 지방 생태계까지 도달하는 경우의 2가지 기준 시나리오와 초기파손용기, 장기적 기

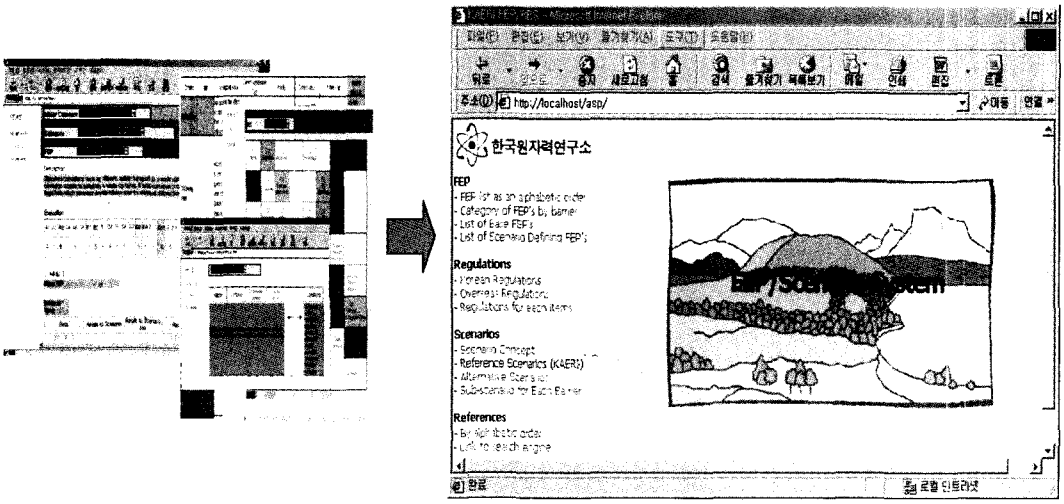


Fig. 1. Evolution in FEAS Program.

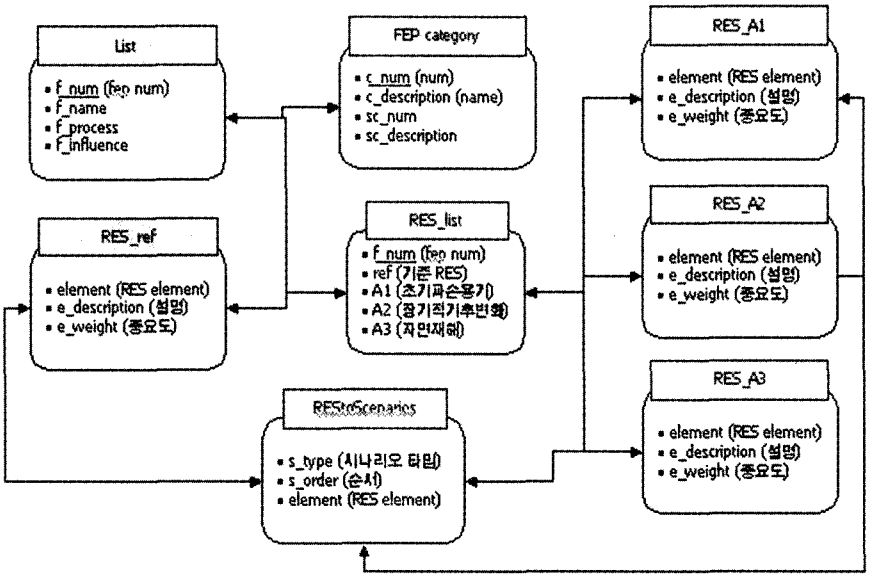


Fig. 2. Database Design in FEAS.

후변화, 자연재해의 3가지 대안 시나리오 관련 RES 행렬이 도출되었다. RES to Scenario는 순차적으로 연결되어 시나리오를 구성하는 RES 행렬 요소에 대한 정보를 포함하고 있다.

각 데이터들은 FEP, 관련 RES 등의 구성에서 관계있는 항목들이 서로 연결되어 있어 특정한 하나의 목록에서 FEP, 관련 RES 및 시나리오 정보를 검색할 수 있게 된다. 예를 들면 FEP 목록에서 특정 FEP 하나를 선택했을 경우, 그 FEP에 관계되는 RES, 시나리오, 참고문헌 등에 대한 정보를 알 수가 있고 특정 RES 화면에서 한 요소를 선택했을 경우, 그 요소에 관련된 FEP 정보들을 검색할 수 가 있는 것이다.

FEP 목록에서 선별된 FEP들은 처분 과정의 물리적 방벽 순서, 즉 폐기물, 용기, 공학적 방벽, 자연 방벽, 생태계, 환경 영향 등으로 크게 분류되었고 이와 같은 대분류 아래에 각 FEP들의 영향과 특성 등이 고려되어 각 방벽별로 상세한 FEP들이 구성되었다. FEP 목록은 해당 FEP 에 대한 설명 및 각 FEP 관련 RES 행렬 등의 내용을 포함하였다. Fig.3은 FEP의 알파벳 순서대로 나타낸 목록의 일부를 FEAS 상에서 나타낸 것이며 Fig. 4는 방벽별로 분류되어 나타나는 FEP 목록 화면으로, "폐기물" 방벽에 속해 있는 FEP 들의 목록을 보여

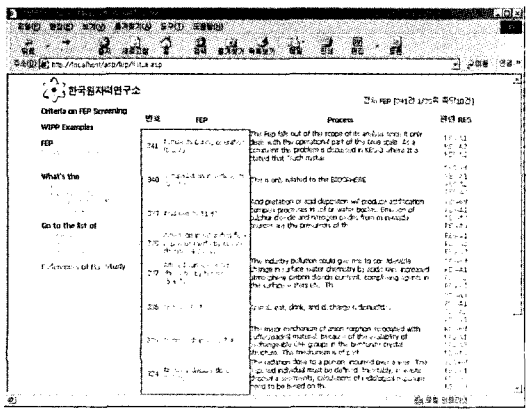


Fig. 3. Screened FEPs in FEAS.

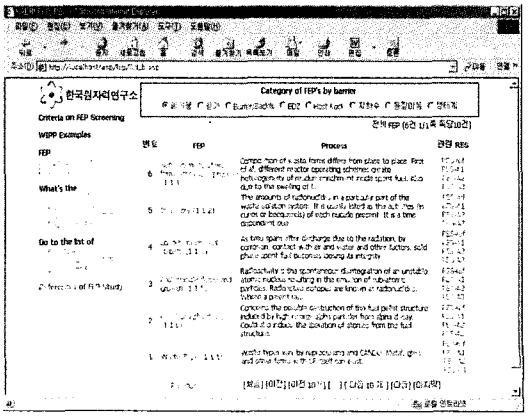


Fig. 4. Screened FEPs Listed by Barrier Types in FEAS.

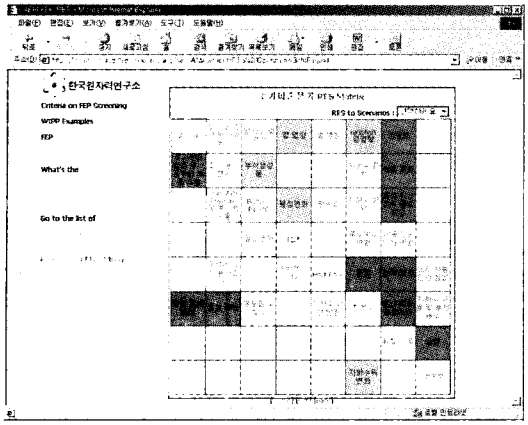


Fig. 5. Initial Defection of Canister RES Matrix in FEAS.

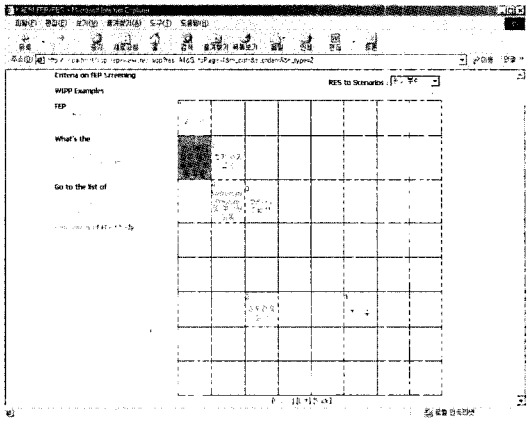


Fig. 6. RES-to Scenario Mapping in FEAS.

주고 있다.

Fig. 5는 대안 시나리오인 초기 파손 용기 시나리오 RES 행렬이 FEP과 IFEP으로부터 구성된 화면이다. 처분 용기 제작 상 엄격한 품질 보증 체계가 적용되더라도 일부 공정상의 잘못으로 용기 두껑의 용접이 잘못되었거나 파손된 용기가 방사성폐기물 처분에 사용될 가능성이 있다. 초기 파손 용기 시나리오란, 엄격한 제조 과정 및 사후 품질 보증 과정을 통하여 실제 불량 용기가 사용될 확률은 매우 낮지만 만일 이렇게 파손된 용기가 사용될 경우의 시나리오를 말한다. 이 경우 파손된 용기로부터의 핵종 유출이 기준 시나리오의 경우보다 빨라져 전체 처분 안전성에 큰 영향을 줄 수 있는 것이다.

RES 행렬 각 요소들은 관련되는 FEP을 하나 이상 포함하는 IFEP이며 각 IFEP들을 클릭하면 관련되어 있는 FEP들에 대한 정보를 얻을 수 있다.

Fig. 6은 RES 행렬 요소간의 반응관계로부터 관련 시나리오인 용기 부식 시나리오를 생성하는 체계적인 과정을 나타낸 것이다. 각 RES 요소들은 시나리오의 구성을 위해 순서대로 화면에 나타나게 된다. 각 요소들에 표시되어 있는 숫자가 구성 순서를 나타내며, 이 순서대로 핵종 유출의 시나리오가 도출된다. 이와 같이 FEP으로부터 IFEP을 구성하여 관련 RES를 작성함으로써 다른 시나리오들도 도출될 수 있는 것이다.

Fig. 7은 RES 요소들이 용기 부식 시나리오로 연결되는 과정을 좀 더 상세히 표현한 RES 행렬 화면이다. 화살표로 나타낸 순서대로 시나리오가 도출되며 FEAS 상에서는 이러한 과정이 Fig. 6과 같이 표현된다.

3. 결론 및 향후계획

종합 성능 평가에 있어 쌍방향 대화 방식은 처분 사업 관련 신뢰성 증진을 위해 필수적인 요소이다. 인터넷 시대의 도래로 성능 평가 등에도 쌍방향 대화 방식의 가능성이 높아져 처분장 안전성의 논의에 관계한 모든 이해 당사자들이 안전성에 관한 각자의 의견들을 공유(share)할 수 있는 방법 개발이 기대되고 있다. 이의 실현을 위해 본 연구에서는 웹 상에서 FEP으로부터 평가방법 흐름도까지를 보여줄 수 있는 FEAS 프로그램을 개발하고 있다.

또한 FEAS 프로그램과 연계할 수 있는 웹 기반의 품질 보증(QA)와 성능평가(PA) 입력 자료 시스템도 현재 개발 중에 있다.

처분장 종합 안전성/성능 평가에 있어서 품질 보증이란 투명성 증진의 한 방안으로 매우 중요한 요소이다. 특히 각 이해당사자들이 이해하기 쉬운 자료의 제공과 제공된 자료에 대한 품질 보증은 법률적인 인허가 절차뿐만 아니라 이해당사자들간의 상호 신뢰성 제고를 위해서도 필요하다. 현재 인터넷의 발달에 따라 웹을 기반으로 하는 품질 보증 체계의 개발이 기대되고 있다. 이 개발이 이루어진다면, 종합 성능 평가에서 실험을 통해서 얻어지는 값들 뿐 아니라 평가 결과물에 이르기까지 전 연구 과정에서 투명성이 유지된 데이터들이 향후에도 높은 신뢰성을 가지고 활용될 수 있으며 오랜 기간이 경과하더라도 종합 성능 평가에서 활용될 수 있을 것이다. 또한 웹 상에서 품질 보증 체계와 성능 평가 입력 자료 시스템이 통합 개발된다면 생산된 데이터들에 대한 신뢰성을 제고하는데 크게 기여할 것으로 기대된다.

1.1폐기물	1.2방사능 영향 및 내부 부식	1.3방사능 열 영향	1.4열 영향	1.5열 영향	1.6radiolysis 열 영향	1.7선원항	
2.1용기내 유출 제한	2.2용기	2.3부식생성물			2.6지하수화학	2.7핵종 유출	
	3.2Hydrostatic Pressure 및 부식원 이동	3.3Buffer/Backfill	3.4물성병화	3.5팽윤압	3.6지하수화학	3.7흡착 확산 이류 콜로이드	
		4.3밀도변화	4.4EDZ		4.6투수 계수변화	4.7이동기구 인자변화	
	5.2응력에 의한 용기 파손		5.5역학적인자	5.5Host Rock	5.6단열	5.7흡착 확산	5.8대지 사용 인간 침입
6.1핵종 용해 침전	6.2용기 부식	6.3재포화 및 침식	6.4	6.5지하수 암반반응	6.6지하수	6.7분산 이류콜로이드 기타	6.8지하수 사용 및 충전 배수
		7.3	7.4		7.6	7.7용질 이동	7.8오염
					8.6지하수위 변화		8.8생태계

Fig. 7. RES-to Scenario Mapping (Erosion of Canister Scenario).

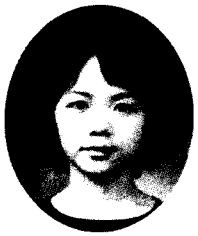
2003년부터 시작되는 향후 연구에서는, 사용자가 필요할 때마다 평가 내부의 모든 정보들에 접근이 가능하도록 FEP으로부터 시나리오까지의 도출 과정, 관련 시나리오 평가 체계, 적용 평가 방법을 보여줄 수 있는 FEAS 프로그램과 이 모든 과정을 기록할 수 있는 QA 프로그램, 성능 평가 입력 자료 시스템, 그리고 성능 평가 프로그램을 하나의 시스템으로 통합할 계획이다. 이의 통합으로, 모든 이해 당사자들이 "처분장에서 생태계에 이르는 핵종들의 이동 경로에 대한 시나리오는 어떠한 것이며, 그 관계 결과들과 연구에 이용되는 실제 데이터들은 어떤 것인지"에 대해 쉽게 이해할 수 있도록 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 2002년도 과학기술부 원자력중장기 개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. NEA, 1992, Systematic Approaches to Scenario Development: Safety Assessment of Radioactive Waste Repositories, Report of the NEA Working Group on the Identification and Selection of Scenarios for the Safety Assessment of Radioactive Waste Disposal, NEA/OECD.
2. Miller, W. M. and Chapman, N. A., 1992, Identification of Relevant Processes, System Concept Group Report, U. K. DoE/HMIP TR-ZI-11, United Kingdom.
3. Anderson, J. et al., 1989, The Joint SKI/SKB Scenario Development Project, SKB TR 89-35, SKB.
4. 강철형 외, 1997, 방사성폐기물 처분장에서의 핵종 누출 및 이동에 관한 정상 시나리오 개발, KAERI/CR-34197/97, 한국원자력연구소.
5. Locke, J. et al., 1998, Modeling Requirements for Future Assessments Based on FEP Analysis, NIREX Science Report s/98/012.
6. Bilington, D. E. et al., 1998, Development and Application of a Methodology for Identifying and Characterizing Scenarios, NIREX Science Report s/98/013.
7. Stenhouse, M. et al., 1993, Scenario Development FEP Audit List Preparation: Methodology and Presentation, SKI Technical Report 93:27.
8. Vieno T. et al., 1996, Interim Report on Safety Assessment of Spent Fuel Disposal TILA-96, POSIVA 96-17.
9. Vieno T. et al., 1999, Safety Assessment of Spent Fuel Disposal in Hastholmen, Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara TILA-99, POSIVA 99-07.



서 은 진

1997년 경북대학교 공과대학 환경공학과 공학사
2001년 경북대학교 공과대학 환경공학과 공학석사

Tel: 042-868-2230
E-mail: ex-dimpark@kaeri.re.kr
현재 한국원자력연구소 방사성폐기물처분연구부

강 철 형

1977년 서울대학교 공과대학 원자핵공학과 공학사
1983년 워싱턴 대학교 대학원 원자핵공학과 공학석사
1989년 캘리포니아대학교 대학원 원자핵 공학과 공학박사
Tel: 042-868-8914
E-mail: chkang@kaeri.re.kr
현재 한국원자력연구소

황 용 수

1983년 서울대학교 공과대학 원자핵공학과 공학사
1985년 캘리포니아 대학교 대학원 원자핵공학과 공학석사
1992년 캘리포니아 대학교 대학원 원자핵공학과 공학박사
Tel: 042-868-2034
E-mail: yshwang@kaeri.re.kr
현재 한국원자력연구소