

고준위 방사성 폐기물 처분장의 성능 평가를 위한 FEP 연구
A Study on Features, Events, and Processes for TSPA of a HLW Repository

서 은진, 황 용수, 강 철형
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

방사성폐기물 처분장에서 유출된 방사성 핵종들은 공학적, 천연 방벽을 거쳐 생태계로 이동한 후 다양한 섭생 경로를 통하여 최종적으로 인간에 영향을 주게 된다. 고준위 폐기물 처분장의 TSPA(Total System Performance Assessment)를 위해서 FEP, 시나리오에 대한 시스템적 평가가 수행되어야 한다. 한국원자력연구소가 개발한 FEP 목록은 두 차례의 보완 및 전문가 평가에 의해 수정되었다. 선별된 FEP들은 Base, Scenario Defining, Dependent FEP으로 분류되었다. Base FEP은 잠재적 처분 안전성 분석에서 기본 시나리오를 구성하며 Scenario Defining FEP은 Dependent FEP과 함께 대안 시나리오를 생성한다. 도출된 개별 시나리오별로 RES 개념을 적용하여 물리적인 핵종 이동 단계별로 대응 행렬이 도출되었으며 이 결과는 향후 각 시나리오에 대한 평가 개요 및 평가 방법론 도출에 활용될 예정이다.

Abstract

Radionuclides released from radioactive waste repository affects residents at the biosphere through transfer and transport in near and far fields. For the total system performance assessment of a potential high-level radioactive waste repository in Korea, the systematic database for FEP's, and scenarios is developed. The KAERI FEP list was constructed and solidified through two independent expert elicitation exercises. The screened in FEP's are grouped into base, scenario defining, and dependent ones. The base FEP's form the reference scenario in assessing the safety of a potential repository. The scenario defining FEP's in association with dependent FEP's create the alternative scenarios. For each scenario, the corresponding matrix from the application of RES is developed considering physical barriers of a repository system. Results from this study will be applied for development of an assessment context and an assessment method flowchart for each scenario.

1. 서론

고준위 방사성폐기물의 영구 처분 관련 시나리오 연구의 목적은 처분장에서 발생 가능성이 높은 단위 FEP들을 선별 조합하여 처분장 방사성폐기물 종합 성능 평가에 고려할 시나리오의 개발에 있다. 수집된 FEP들로부터 처분 성능 평가에 중요한 FEP들을 선별하기 위해서는 객관적인 선별 기준이 필요하다. 일반적으로 FEP 선별을 위한 기준으로는 FEP 발생에 따른 위해도 발생 영향, 발생 확률, 그리고 부지 특성 등과 같은 기준이 고려된다. 본 연구에서는 국내외 여러 사례들을 참조하여 FEP 목록을 확장하고, 이를 전문가 의견 수렴법에 의거하여 선정하고 또한 선정된 FEP들에 관하여 우선 순위를 설정한 후, 유사한 FEP들을 독립적인 특성을 가지는 FEP 모임으로 그룹화하였다. 그룹화된 FEP들은 RES 행렬의 LDE(Leading Diagonal Element), ODE(Off Diagonal Element)로 활용되었다. 이와 같이 특정 시나리오 별로 작성된 RES matrix를 연결하여 시나리오 평가 개요(Assessment Context)가 작성되어 RES 행렬 요소 별로 종합 성능 평가(TSPA: Total System Performance Assessment)를 위한 프로그램, 입력 데이터, 담당자, 향후 연구 개발 계획 등이 도출되어 일목요연한 성능 평가 연구 체계를 갖추는데 활용될 예정이다.

2. FEP 목록 개발 및 평가

한국원자력연구소의 FEP 목록의 초안은 고준위 폐기물에 관한 NEA[1], NIREX[2], SKB[3]의 연구 및 중저준위 폐기물 처분에 대한 기존 KAERI 연구의 FEP 데이터[4]를 이용하여 1999년 작성되었다. 이 FEP 목록은 국내 전문가들에 의해 선별되었고 보다 다양한 FEP들을 고려하기 위하여 최근 SKB TR[5], BIOMOVs II[6] 보고서들에 수록된 일부 FEP들이 추가된 후 선별되었다. KAERI FEP 리스트는 처분 과정의 물리적 방벽 순서, 즉 폐기물, 용기, 공학적 방벽, 자연 방벽, 생태계, 환경 영향 등으로 대 분류되었고 이와 같은 대 분류 하위에 각 방벽별 상세한 FEP들이 각 FEP들의 영향과 특성 등이 고려되어 세분화되었다.

이와 같이 작성된 FEP들을 조합하면 처분장 안전성에 미치는 사건 시나리오들을 도출할 수 있다. 그러나 실질적으로 모든 FEP들을 조합할 경우, 성능 평가 시 의미가 없는 사건 시나리오가 도출될 수 있다. 따라서 적절한 기준에 의거하여 주요한 FEP를 선별하고 이를 적절히 조합하여 시나리오를 구성하는 연구가 필요하다. 본 연구에서는 미국, 스웨덴, 핀란드와 OECD/NEA의 FEP 선별 사례에 의거하여 다음과 같은 선별 기준을 적용하였다.

- (1) 발생 확률: FEP이 발생할 확률이 낮을 경우 그 FEP은 선별에서 제외한다.
- (2) 영향: FEP이 미치는 영향이 낮은 경우 제외된다.
- (3) 특정 부지 연관성: 만약 특정 FEP이 처분장과 연관이 없다면 제외한다.
- (4) 규제: 처분장 부지 선정 기준에 의거하면 처분 부지는 안전성 확보를 위하여 특정

사건이 발생할 확률이 있을 경우 부지로서의 자격이 없다. 가령 고준위 방사성폐기물 처분장의 경우 활발한 단층 활동이나 화산 활동이 있는 부지는 처분장 후보 부지로 적당하지 않다. 따라서 어느 특정 부지가 처분장 후보 부지로 선정되었다는 말은 이러한 활성 단층이나 화산 영향과 관련된 FEP들의 발생 확률이 미미하다는 것을 의미한다. 따라서 이러한 규제 기준에 의거하면 FEP 리스트에 등재된 일부 FEP들은 FEP 선별을 통하여 제외되어야 한다. 본 연구에서는 40CFR197[7], 10CFR63[8], 10CFR60[9], YVL 8.4[10], 그리고 Flag Book[11]와 국내 관련 기술기준 및 시안들을 이용하여 FEP을 선정하였다.

그림 1은 위와 같은 선별 기준을 개념적으로 도시한 것이다. 이와 같은 4 가지 선별 기준 이외에도 FEP 선정 시 고려해야 할 사항의 하나가 일반 대중들의 처분장 안전성에 관한 개념이다. 예를 들어 활성 단층의 경우 발생 확률은 미미하므로 인허가를 위한 평가 시에는 중요한 고려 대상이 아니다. 그러나 일반 대중들에게는 활성 단층으로 인한 지진은 사고 발생으로 인한 영향이 심대하므로, 실질적인 중요성은 낮더라도 처분장 안전성을 입증하기 위한 방안의 하나로 정량적인 영향 평가가 요구될 수 있다. 따라서 시나리오 도출 단계에 이러한 FEP들을 발생 확률이 미미하다고 제외하는 방안보다는 이들을 자연 재해 FEP(External FEP)으로 따로 분류하여 이들로 인해 발생하는 사건 시나리오들을 도출하는 것이 바람직하다. 따라서 본 연구에서는 이러한 자연 재해와 관련된 FEP들을 SDF(System Defining FEP)로 구분하고 이러한 SDF로 인한 상호 반응 사건들을 DF(Dependent FEP)으로 분류하였으며 향후 연구를 통하여 이들의 조합으로 대안 시나리오(Alternative Scenario)들을 개발하고자 한다.

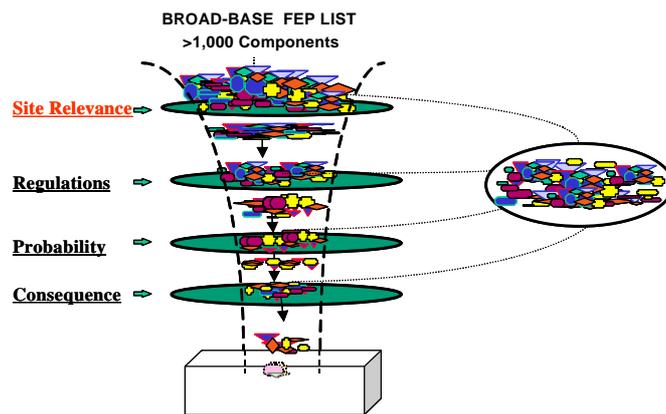


그림 1. FEP 선별을 위한 4 가지 주요 기준

이러한 일련의 연구 결과 다양한 여러 시나리오들로부터 처분장 안전성 평가에 있어서 중요한 시나리오들을 도출하기 위해 FEP 선별 단계부터 선정된 FEP들의 우선 순위를 도출하였다. 실제 FEP들을 평가할 때 각 FEP들의 중요도를 1점부터 5점까지의 가중치로서 평가하도록 하였다. 이와 같은 과정으로부터 가중치가 높은 FEP들은 시나리오를 구성함에 있어 우선적으로 고려되었고 향후 시나리오 내에서의 각 사건들의 상호 반응을 기술하는 RES 구축 연구에서 RES 구성요소들을 표현하는데 활용되었다. 표 1은 선별된 FEP 목록의 일부를 나타낸 것이다.

FEP 선별 및 조합에 의하여 시나리오들이 작성된 후 이들을 이용하여 처분장 안전성을 입증하는 구체적인 방안을 개발할 예정이다. 이를 위하여 우선 해당 시나리오로부터 RES 행렬을 도출하도록 하였다. RES 행렬은 처분장에서 발생 개연성이 있는 여러 사건들을 처분 대상 폐기물, 공학적 방법, 천연 방법 등과 같은 방법간의 상호 반응으로 도시한 것으로, 처분공(deposition hole)으로부터 방사성 물질이 유출되어 인간 생태계에 도달하는 전 과정을 일목 요연하게 정리한 것이다.

이러한 RES가 도출된 후 각 RES 행렬의 요소(element)들은 처분장 안전성에 영향을 미치는 단일 FEP이나, 여러 FEP들의 집합체로 표현된다. 본 연구에서는 이러한 RES 행렬의 요소를 구성하는 여러 FEP들의 집합체를 IFEP(Integrated FEP)으로 표기하고 선별된 FEP 목록에 수록된 FEP들이 특정 IFEP과 어떤 연계성을 가지는지 평가하였다. 이러한 일련의 연구 결과 선별된 IFEP들은 해당 시나리오에 대한 RES 행렬의 요소들과 대응 관계를 가지게 된다. IFEP은 같은 특성을 지닌 FEP들의 집합이다. 예를 들면, 아래 그림 2에서 RES 행렬 구성요소 중 하나인 선원항은 KAERI FEP 목록 중에서 연료 매트릭스 내의 용해도, 연료 표면으로의 I와 Cs의 이동, 재결정 등과 같은 개개의 FEP들로 구성된 IFEP인 것이다. 그림 2는 기본 시나리오 중 우물만 고려한 시나리오에 대한 RES 행렬을 나타내고 있다. 이 시나리오에서 인간에 대한 유일한 피폭 경로는 우물물을 음용수로 이용하는 것이다.

그리고 IFEP은 다음 두 가지로 분류된다.

- (1) LDE(Leading Diagonal Element): 이 요소들은 일반적으로 폐기물, 용기, 완충재, 충전재, 응력 교란 지역, host rock, 지하수, 용질, 그리고 생태계와 같은 물리적 방법을 나타낸다.
- (2) ODE(Off Diagonal Element): 이 요소들은 LDE 사이의 상호반응을 나타낸다.

표 1. 전문가 평가에 의해 선별된 KAERI FEP 목록(일부)

Major Category	Category	FEP	Process	Regulation	Overall Scores
1. Waste	1.1 Characteristics	1.1.1 Waste Type	Waste types vary by reprocessing and CANDU, metal, glass and other forms with SF itself can exist.	To meet this objective, high level waste must be disposed of in a way which ensures an effective and reliable containment and isolation of the radiation of the radioactive substances from the environment. (Flagbook 66)	5
	1.4 Degradation/corrosion/dissolution	1.4.3 Solubility within a fuel matrix	Solubility within a matrix refers to the solubility of species contained in the fuel matrix in the water entering the canister after it has failed. It is highly dependent on water chemistry redox potential and radiolysis.	The initial isolation is provided mainly by the canister. As fabrication defects cannot be completely excluded, even initial isolation may not be absolute. The multi-barrier approach ensures that overall safety is not jeopardized by a small of initially defective canisters. (Flagbook 132)	5
2. Canister	2.2 Corrosion /Degradation processes	2.2.1 Container corrosion	Dissolved corrodants such as chloride, sulfide transport to a waste surface through buffer. Then fitting corrosion occurs to penetrate a waste container. If local corrosion occurs in a large area, then it creates a large hole which becomes a main release area for released radionuclides.	The initial isolation is provided mainly by the canister. As fabrication defects cannot be completely excluded, even initial isolation may not be absolute. The multi-barrier approach ensures that overall safety is not jeopardized by a small of initially defective canisters. (Flagbook 132)	5
3. Near Field	3.1 Characteristics	3.1.2 Long-term physical stability	Long-term physical stability refers to the FEPs related to the maintenance of buffer/backfill's function state under repository conditions during the time period of geological control. Physical stability is important to support the waste container without the significant deformation resulting in the formation of void either under the weight of the container and other imposed loads.	After the integrity of the canister has been lost the waste matrix, the buffer material and the limited solubility of the radionuclide limit the release rate of radioactive substances. In the case of spent fuel a fraction of some radionuclides can be released from the matrix within a short period as they are accumulated in the gas gap or grain boundaries of fuel pins.(Flagbook 135)	4
	3.5 Radionuclides transport processes	3.5.2 Ground water flow; advection /dispersion (saturated conditions)	Difference in hydraulic pressure inside a buffer creates groundwater flow and consequent dispersion which deliver radionuclides outward.		5
4. Far Field	4.2 Thermal effect	4.2.1 Thermal effects on fluid pressure, density, viscosity changes	This FEP should be interpreted as the influence on all chemical equilibria (and reaction kinetics, for that matter) by changes in temperature.		2
5. Biosphere	5.1 Ecological factors	5.1.1 Plants	Plants uptake ground water contaminated by radionuclides. grasses are therefore, transport ways for contaminated nuclides.		5

							Toxicity
	Hydrostatic Pressure	Buffer/ Backfill					
			EDZ				
				Host Rock			

	5
	4
	3
	2
	1

그림 2. 소형 우물 시나리오에 대한 RES 행렬

또한 평가에서 중요한 시나리오들이 간과되지 않도록 하고 시나리오의 작성과 분석을 위해 필요한 구성을 제공하기 위해 FEP을 Base FEP과 Probability FEP으로 분류하였다. 여기서 Probability FEP은 다시 SDF(Scenario Defining FEP)과 DF(Dependent FEP)으로 분류된다. Base FEP이란 발생 확률이 1(unity)이고 그 영향이 TSPA에서 중요한 FEP을 말한다. Base FEP으로 구성되어 있는 IFEP은 기본 시나리오 (Reference scenario)를 도출하는데 사용된다. Probability FEP은 대안 시나리오 (Alternative scenario)를 구성하는 FEP으로, SDF와 DF로 구분된다. SDF란 발생 확률은 1(unity) 보다 낮지만, 독립적으로 발생 가능성이 있으며 만약 일어난다면 그 영향이 TSPA에 중요한 영향을 줄 수 있는 FEP으로 기후변화나 활성 단층과 같은 것들이다. DF는 SDF로 인해 다른 LDE들이 받는 영향을 표시하는 FEP으로 예를 들면, 지하수 흐름이라는 FEP에 대해 기후 변화가 SDF라면 이것으로 인한 영향을 기술하는 DF는 지하수면의 변화가 될 것이다.

표 2는 KAERI FEP 분류 목록의 일부를 나타낸다. 아래 표에서 SL은 Base FEP으로 그 중에서도 RES 행렬의 대각선 위치에 해당하는 LDE를 나타내고, SO는 Base FEP 중에서 ODE를 의미한다. 또한 D는 Scenario Defining FEP을 표시한 것이다. RES 행렬로부터 안전성 평가 방법론이 개발될 수 있다. 이를 위해서는 먼저 평가 대상 시나리오에 대한 평가 개요(Assessment Context)가 도출되어야 한다. 평가 개요는 RES 행렬간의 반응을 종합적으로 기술한 것으로 특정 시나리오를 종합적으로 어떻게 평가하겠다는 방안이다. 이와 같이 설정된 종합적인 평가 개요를 구체적이고 정량적으로 평가하기 위해서 향후 RES 행렬의 개별 요소들에 대한 평가 방안을 제시할 계획이다.

표 2. KAERI FEP 분류 목록 (일부)

Major category	Category	FEP	Process	관련 RES Element
3. Near Field	3.6 Radionuclide chemistry	3.6.3 Speciation	This is applied to the distribution of a radionuclide between the range of possible dissolved forms. An estimation of chemical speciation thus results in concentration or activity values for all the dissolved species considered. A premise for speciation calculations is generally the assumption of thermodynamic equilibrium among the dissolved species.	SO
	3.7 Specific factors	3.7.2 Inadequate design: shaft seal and exploration borehole seal failure	When shaft and borehole seals are not functioned then they will act as preferred pathways for groundwater intrusion.	D
		3.7.5 EDZ effect	Due to the thermal gradient and stress change by excavation, a so called excavation disturbed zone is generated in the vicinity rock. The typical thickness of EDZ by controlled drill and blast is 1 meter and that by TBM is 0.3 meter. In this zone depending on the direction permeability changes by 0.1 to 100.	SL

3. 결론

고준위 방사성폐기물의 영구 처분 관련 시나리오 개발 연구의 주요한 목적은 처분장에서 발생 가능성이 높은 단위 FEP들을 선별 조합하여 처분장 방사성폐기물 종합 성능 평가에 중요한 일련의 시나리오를 개발하는데 있다. 본 연구에서 구성된 FEP 목록을 이용하여 주요시나리오 도출 작업을 이후 연구에서 수행해 보고자 하는데 이 작업과정에서 투명성 확보를 위해 웹에 기반을 둔 프로그램 개발을 추진할 계획이다. 이것은 FEP 선별, 각 FEP의 상세 정보, IFEP으로의 분류방법, FEP 평가에 대한 각 전문가 의견, 각 FEP의 특성에 해당하는 규제 종류, SDF와 관계되는 시나리오들, 관계 시나리오별 주요 Assessment Context, 시나리오 분석의 현황과 향후 계획 등의 과정을 일반 대중에게 까지 투명하게 전달하는 인터넷 서비스가 될 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부가 주관하는 국가 중장기 원자력 연구 개발 사업의 일환으로 추진되었다.

참고문헌

- 1) NEA, “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, 1992.
- 2) W.M. Miller and N.A. Chapman, “Identification of Relevant Processes”, System Concept Group Report, U.K. DoE/HMIP TR-ZI-11, United Kingdom, 1992.
- 3) J Anderson et al., “The joint SKI/SKB Scenario Development Project” , SKB TR 89-35, SKB, 1989.
- 4) 강철형 외, “방사성폐기물 처분장에서의 핵종 누출 및 이동에 관한 정상 시나리오 개발” , KAERI/CR-34197/97, 한국원자력연구소, 1997.
- 5) SKB, “Template for Safety Reports with Descriptive Example”, SKB TR, 96-05, SKB, 1995.
- 6) IAEA, “Final Report of the Reference Biospheres Working Group of the BIOMOVS II Study, Development of a Reference Biospheres Methodology for Radioactive Waste Disposal”, BIOMOVSII TR No. 6, SKI, 1996.
- 7) US Environmental Protection Agency, “40 CFR PART 197: Public Health And Environmental Radiation Protection Standards For Yucca Mountain”, Federal Register, Vol. 64(166), 1999
- 8) US Environmental Protection Agency, “10 CFR PART 63, Disposal of High-Level Radioactive Waste in Geological Repository At Yucca Mountain, Nevada”, Federal Register, Vol. 66(213), 2001
- 9) US Department of Energy, “Title 10 CFR PART 60, Disposal of High-Level Radioactive Waste in Geological Repositories” , Washington DC, 1993.
- 10) STUK, “Long-Term Safety of Disposal of Spent Nuclear Fuel” , Guide YVL 8.4, 2001
- 11) The Radiation Protection and Nuclear Safety Authorities in Denmark, Finland, Iceland, Norway and Sweden, “Disposal of High Level Radiation Waste Consideration of Some Basic Criteria a Consultative Document”, Flagbook, 1989