

불확실성 관리를 이용한 방사성폐기물 처분시설의 폐쇄 후 안전성평가 시나리오 개발 방법론 소개

정미선^{1,*}, 정강일¹, 서명환¹, 김수진¹, 정재열¹, 조서연¹

¹한국원자력환경공단

Introduction of the Scenario Development Methodology with the Uncertainty Management for the Post-Closure Safety Assessment in the Radioactive Waste Disposal Facility

Mi-Seon Jeong^{1,*}, Kangil Jung¹, Myunghwan Seo¹, Soo-Gin Kim¹, Jae-Yeol Cheong¹ and Seoyeon Jo¹

¹KORAD, 174 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34129, Republic of Korea

Abstract It is necessary to conduct the post-closure safety assessment which is identified the radiological effect from the radioactive waste disposal facility to human or environments. The start point of the post-closure safety assessment is the scenario development. In this paper, it was introduced the procedure of the scenario development methodology using the uncertainty management of the top-down method instead of the FEP list with the bottom-up method. And also it was shown the application of the 2nd LILW disposal facility in Gyeongju for the each steps. And also it was suggested the improvement when it will be applied this methodology in the high-level radioactive waste disposal facility.

Key words: Radioactive waste disposal, Post-closure safety assessment, Scenario development, FEP list, Uncertainty management

1. 서론

일반적으로 방사성폐기물 처분시설은 원자력발전소와는 달리 처분시설을 폐쇄한 이후에도 처분된 방사성폐기물이 계속 잔존해 있으므로, 처분시설의 폐쇄 후에도 방사선적으로 안전함이 보증되어야 한다. 이를 위하여 처분시설 폐쇄 후 처분시설과 그 주변에서 발생 가능한 물리·화학적 현상들을 분석하여야 한다. 그러나, 모든 현상들을 예측하는 것은 불가능하므로, 처분시설에서 예측가능한 장기적인 현상들을 분석하고 그 결과를 반영하여 방사성

핵종 이동 및 피폭 시나리오를 개발한 후, 이를 수확모델로 구현하여 방사선적 안전성을 확인한다.

이러한 폐쇄 후 안전성평가를 위한 시나리오의 경우 정상 및 비정상, 인간 침입 시나리오로 구분할 수 있다[1]. 이 중에서 정상 시나리오는 처분시설로부터 정상적인 방사성 물질의 누출과 이동을 통해 궁극적으로 발생할 수 있는 모든 잠재적인 사건과 과정을 고려한 시나리오이고, 비정상 시나리오의 경우 발생 확률이 낮으나 그에 따른 영향이 클 것으로 예상되는 사건을 고려한 시나리오이다. 또한 인간 침입 시나리오는 처분시설의 폐쇄 후 관리기간

<http://www.ksri.kr/>

Copyright © 2022 by
Korean Society of Radiation Industry

*Corresponding author. Mi-Seon Jeong

Tel. +82-42-601-5341 Fax. +82-42-601-5389 E-mail. jeongms@korad.or.kr

Received 22 August 2022 Revised 25 October 2022 Accepted 3 November 2022

이후 부주의한 인간 침입에 따른 방사선적 영향을 고려하기 위한 시나리오이다.

앞에서도 언급한 바와 같이 장기간 관리가 필요한 방사성폐기물의 특성상 안전성평가 시나리오 고려시, 처분시설을 구성하는 시스템의 장기적인 물리·화학적 특성을 고려해야 하므로 이를 추정하는데 불확실성이 존재한다. 처분시설에서는 처분시설의 불확실성을 관리하고 안전성을 확보하기 위하여 Safety Case 체계를 구축하도록 권고하고 있다[2]. 처분시설에서 Safety Case를 수행한다는 것은 처분시설에서 일어날 불확실성을 미리 확인하고, 그 불확실성을 어떻게 저감 및 지연시키도록 관리할 것인지에 대한 전략을 수립하는 것이다. 이러한 Safety Case 체계에 따라 처분시설의 안전성을 확보하기 위한 전략(최적화, 강건성, 심층방어 등)을 이행함으로써, 이해당사자들에게 처분시설의 안전성을 확인시키고 신뢰성을 증가시키는 역할을 한다.

처분시설 안전성 증진을 위해 방사성폐기물 처분 연구를 통해, 불확실성을 줄이기 위한 노력을 지속적으로 시도하고 있으며, 이는 시나리오에 대해서도 마찬가지이다. 기존에는 각 나라별 가지고 있는 FEP 목록을 이용하여 ‘Bottom-Up 방식’을 적용한 시나리오를 개발하였으나[2], 본 논문에서는 Safety Case의 전체적인 맥락에서 불확실성을 관리하는 일환으로, 처분시설에서 발생 가능한 현상들을 분석을 토대로 불확실성을 도출하고 이를 관리하기 위한 ‘Top-Down 방식’을 준용하여 시나리오를 도출하는 방법론을 설명하였다[3,4]. 이는 한국원자력환경공단의 Safety Case 체계에 따라 중·저준위 방사성폐기물 처분시설에 적용하였으며[5], 이 체계를 준용한 시나리오 개발 방법론을 중·저준위처분시설에 적용한 사례들을 소개하였다[6]. 또한, 중·저준위 방사성폐기물 처분시설보다 불확실성이 더 많이 존재하는 고준위 방사성폐기물 처분시설의 적용시 개선해야 할 사항들을 결론으로 간략히 제시하였다.

2. 불확실성 관리 방법론을 이용한 시나리오 개발 방법론

IAEA ISAM에서 제시한 방법의 경우, 1단계 중·저준위 방사성폐기물 처분시설 계획단계에서 시나리오 개발 방

법론으로 채택되었으며, 이는 ‘Bottom-Up 방식’으로, FEP 목록을 기반으로 시나리오 도출하고 있다[7]. 이후, IAEA SSG-23에서 언급된 ‘Top-Down 방식’의 경우 시나리오 개발 외에 처분시스템의 안전기능들이 어떻게 발생 가능한 현상들과 물리화학적 과정들에 영향을 받는지에 대한 기능 분석과 현상 분석을 강조하고 있다.

초기 중·저준위 방사성폐기물 처분시설에 적용된 방법론의 경우, 안전성 평가 결과를 통해 시스템 최적화, 즉, 시스템의 성능 및 강건성 향상의 기반 제공 위주의 안전성 분석이며, 실제 처분시설 개발의 현실성을 모두 반영하는 데는 한계가 존재하였고 불확실성 관리에 대한 추적의 어려움이 존재하였다. 반면, 현재 제시하고 있는 방법론의 경우 한국원자력환경공단의 Safety Case 체계에 따라 이러한 한계사항 및 어려움을 극복하고자, 처분시설 구성기기의 안전기능 분석과 처분 시스템 진화와 연관된 과학적/기술적 처분시설 현상분석을 통하여 처분시설 불확실성 관리를 통한 처분시설의 최적화를 목표로 하고 있다.

한국원자력환경공단의 처분시설 Safety Case 체계에 따라 폐쇄 후 안전성평가용 시나리오 개발 단계에서 불확실성을 저감 및 제거하고 추적이 용이한 관리 방법론에 의해 도출하였다. 이는 처분시설의 구성기기, 구성기기의 안전기능, 처분시설의 시공간적 현상분석 그리고 정성적 안전성평가의 절차로 이루어져 있으며, Fig. 1과 같이 이러한 절차를 통해 시나리오를 도출하였다[6].

우선, 처분시설의 구성기기는 처분 부지 환경의 특성 및 폐기물의 종류 및 형태 등을 고려하여 설정하며, Safety Case의 심층방어전략(defense-in-depth)에 의해 폐쇄 후 처분시설의 구성기기에 다중 안전기능을 할당하여 폐쇄 후에도 처분시설의 안전성을 유지하도록 할당된 안전기능에 따라 처분시설을 설계 및 구성한다[3].

또한, 처분시설은 시간이 지남에 따라 진화 및 열화되므로, 이에 대한 처분시설의 계획단계에서 가용한 평가기반을 근거하여 처분시설의 시공간적 진화에 대해 분석이 필요하다. 이를 위해 처분시설을 시간에 따른 상황별로 분할하고 공간적으로 발생 가능한 현상에 대한 분석하였다.

처분시설의 안전기능과 처분시설의 시공간적 물리·화학적 현상 분석을 토대로 도출된 불확실성을 분석 및 도출하고, Safety Case 체계에서 제시한 불확실성 관리방안[4]에 의해 불확실성을 관리하기 위하여 정성적 안전성 분석을 수행하였다.

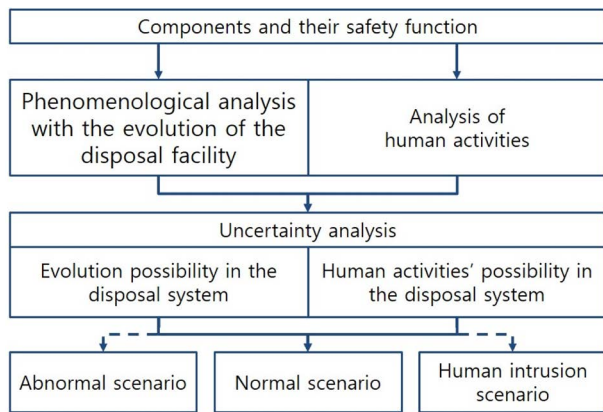


Fig. 1. The Concept of the Scenario Development using the Uncertainty Analysis.

서론에서 언급한 바와 같이 폐쇄 후 안전성평가 시나리오의 정상, 비정상 및 인간 침입 시나리오로 구분된다[1]. 원안위 고시에서는 발생가능성에 의해 시나리오를 구분하였지만 여기에서는 발생가능성뿐만 아니라 안전기능과 연계하여 시나리오로 정의하였다. 정상시나리오는 설계 단계에서 구성한 구성기기의 예상 성능이 제대로 구현되어 안전기능을 유지한다는 가정 하에서 도출된 시나리오로 재정의하였으며, 비정상 시나리오는 정성적 안전성 분석을 통하여 도출된 불확실성을 관리하는 일환으로 처분 시설에서 사건 및 물리·화학적 과정 등의 불확실성으로 인하여 안전기능이 손상되는 시나리오로 재정의하였다.

또한, 처분시설 폐쇄 후 처분시설 및 환경에서 발생 가능한 인간 활동을 분석하고, 폐쇄 후 관리기간 종료 이후 처분시설의 존재를 모르는 인간의 부주의한 활동에 의해 발생 가능한 인간 침입 시나리오를 도출하였다. 인간 침입 시나리오의 경우, 미래 발생 가능한 인간의 활동 유형에 대해 불확실성이 매우 커서 정형화된 방법론을 사용하지 않고, 여기에서는 특별히 언급하지 않았다.

2.1. 구성기기

처분시설은 방사성폐기물을 영구처분하기 위한 시설로 장기적인 안전성을 확보하여야 하며, 이를 위해 처분시설은 공학적 방벽과 천연 방벽으로 이루어진 다중방벽 개념을 도입하고 있다[3].

공학적 방벽은 폐기물 처분시설로부터 폐기물 및 방사성 핵종의 이동을 지연시키거나 제한할 수 있는 인공 구조물을 일컬으며, 천연 방벽은 처분장의 지표 및 지하구조

로서 방사성핵종의 이동을 지연시키고 인간 생활권으로부터 격리시킬 수 있는 자연적인 방벽으로 토양 및 암반 등을 말한다.

공학적 방벽의 형태 및 종류는 처분대상 폐기물과 사회적 요건 등을 고려하여 결정된다. 중·저준위 방사성폐기물 처분시설의 경우 방사성 준위에 따라 지상 및 천부 지하에 존재하는 천연 처분시설의 형태가 되며, 고준위 방사성폐기물 처분시설의 경우 처분터널 형태로 구성된 심층 처분시설이 될 것으로 예측된다.

처분시설에서는 일반적으로 공학적 방벽인 (i) 폐기물 포장물, (ii) 처분용기, (iii) 완충재 및 뒷채움재와 암반 및 지질을 포함하는 (iv) 천연방벽, 그리고 (v) 완충지대 (제한 구역 경계 내부)를 설정하여 처분시설의 기능을 유지하기 위한 주요 구성기기를 크게 다섯 개의 구성기기로 분류하고, 각 구성기기의 하부 구성기기 및 특성을 기술하여 설계요건 및 성능요건을 설명하여 구체화하고자 하였다.

2.2. 안전기능

처분시설의 안전기능은 원자력발전소에서 적용하고 있는 다중방벽 구성 방법론을 응용하여, 처분시설의 구성기기에 안전기능을 할당함으로써, 처분시설의 안전성을 강화하기 위한 Safety Case의 심층방어 전략의 일환으로 수행되었다. 이는 방사성폐기물의 안전 목표, 즉, 방사성폐기물의 처분에 따른 방사선위해로부터 현재 및 미래의 인간과 환경을 보호하는 것으로부터 시작되며, 스웨덴, 벨기에, 핀란드, 프랑스 등에서 이미 적용하여 사용하고 있다[4].

처분시설은 인간의 개입없이 안전성을 유지하도록 처분시설의 장기진화를 고려하여 설계하여야 하며, 처분시설의 안전성은 처분시스템을 구성하는 다양한 구성기기의 성능에 의존한다[3]. 처분시설의 안전기능은 격납(containment)과 격리(isolation), 지연(retardation)으로 크게 구분되고, 처분시설 방벽이 이러한 안전기능을 영구적으로 가질 수 없다. 따라서 처분시설의 안전성을 확보하기 위하여, 구성기기의 장기 진화 관점에서 처분시설의 안전성에 영향을 미치는 중요도를 고려하여, 다수의 안전기능을 처분 시스템의 설계에 반영하여야 한다.

이 때, 처분시설 하나의 구성기기에 하나 이상의 안전기능이 할당되어야 하며, 처분 시스템의 전체 성능은 하나의 방벽 또는 하나의 안전 기능에 지나치게 의존하지 않도록

Table 1. The safety function of each components in the low- and intermediate- radioactive waste disposal facility (some excerpts from ref. [6])

Safety function	Components	Performance criteria	Waste package	Vault				Disposal cover	Natural barrier
				Bottom slab	Vertical slab	Backfill	Upper slab		
SF_P 1.5 Protection human and their environment from the contaminants through the water pathway									
SF_P 1.5.1 Mitigation of the radionuclide migration with the rainfall									
SF_P 1.5.1.1 Limits of the rainfall penetration to the radioactive waste		The design penetration rate for the disposal cover			C		C	M	
SF_P 1.5.1.2 Containment of radionuclides in the waste packages and EBS		HIC container	M	M	M	C			C

여러 구성기기에 적절하게 할당되어야 한다. 이는 처분시설의 안전기능이 처분시설의 구성기기가 시간에 따라 진화하더라도 다중 안전 기능으로 인해 처분시설의 전체 안전성을 보장한다는 강건성의 논거들로 활용된다[3].

안전 기능 분석은 각각의 공학적 시스템들에 대해 설계요건, 성능 지표, 그리고 설계허용치를 제시하여, 설계단계에서 이와 같은 기능들을 충족시키는 처분시설 구성기기로 설계한다. 이 때, 구성기기와 세분화된 안전기능과의 상관관계에 따라 Safety Case의 평가 기반을 수행하는 각 분야 간 협의를 반복적으로 수행하면서 처분시설의 안전성이 최적화된 설계를 수행한다.

따라서 중·저준위 방사성폐기물 처분시설에서 처분시설의 구성기기의 안전기능이 처분시설을 구성하는 구성기기 중 해당 안전기능을 담당하는 구성기기에 연결되며, 하나의 안전기능에 하나 이상의 구성기기가 연결됨으로써 다중 안전 기능을 확보하여 처분시설의 안전 목표와 안전전략을 수행하도록 설정하였다. 안전 기능별 구성기기의 연계성을 쉽게 구현하기 위하여, 해당 안전 기능을 수행하는 주요 구성기기를 M (Main Component)으로 설정하고, 주요 구성기기가 안전기능을 상실하더라도 다른 구성기기가 그 안전 기능을 보완할 수 있도록 C

(Contributing Component)로 설정함으로써 해당 안전 기능을 보장하도록 하였다.

구성기기에 대한 안전 기능의 분석은 처분시설 운영주기를 고려하여, 처분시설의 감시 및 관리를 수행하는 폐쇄 후 관리기간과 자연상태 그대로 존재하도록 하는 폐쇄 후 관리기간 종료 이후로 분리되어 각 기간별로 요구되는 구성기기의 안전기능에 부합하도록 설정하였다.

Table 1은 폐쇄 후 관리기간 이후 표층처분시설의 구성기기별 안전기능 할당의 일부를 발췌한 것이다.

2.3. 처분시설의 물리화학적 현상 분석

처분시설의 장기 안전성 확보를 위해 처분시설과 처분 환경에 대한 장기 진화에 대한 분석을 필요로 한다. 처분시설의 장기 진화를 파악하는 것은 처분시설 설계와 관련하여 방사성 핵종 누출 및 이동을 제어하는 물리·화학적 과정에 대한 분석을 포함하여 체계적으로 처분시설 안전성 평가에서 고려된다.

처분시설의 장기 진화 분석을 수행하기 위해, 처분시설의 시공간적 분할을 통해 시간대별, 구성기기별 처분시설의 개별 현상들을 분석한다. 이 때, 시공간적으로 분할된 처분시설 기본 단위를 개별 상황으로 정의하고, 개별 상황

Table 2. Partial situations for the vault type disposal facility of the low- and intermediate- radioactive waste.

Situation no.	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Development situation	Initial state	Construction	Completion of the construction	Waste Disposal Transport/Emplacement Period	Sealed the first vault	Completed sealing of all vaults	Disposal cover installation	Institutional period	After institutional period

은 다양한 기간으로 정의될 수 있으며 설계 구성기기들을 반영하여 공간적으로 구분한다.

여기에서 처분시설의 개발 단계를 고려하여 처분시설의 시간을 구분하여 상황을 설정하고, 각 상황별 처분시설의 진화 현상들을 열적/수리적/역학적/화학적/방사선적/핵종이동 (Thermal-, Hydro-, Mechanical-, Chemical-, Radio-)로 구분하여 공간적 즉, 구성기기별로 고려하여 분석하였다[8].

처분시설 장기 진화에 대한 현상학적 분석은 현재의 과학 및 기술 지식을 바탕으로 처분시설 안전성 평가 체계상의 평가 기반에 근거하며 관련 불확실성도 함께 고려한다.

처분시설의 개별상황을 통하여 개발 시간에 따라 중·저준위처분시설의 표층처분시설에서는 다음과 같이 9개의 상황으로 구현하였다[6].

- 가. 상황 I은 현재의 상태를 나타내며 1단계 동굴처분시설 및 월성원자력발전소 1~4호기와 신월성원자력발전소 1,2호기가 운영 중에 있는 상황이다.
- 나. 상황 II은 부지정지 후 처분고 건설과정을 나타내는 상황이다.
- 다. 상황 III은 처분시설 건설 완료 후 운영대기 상황이며 처분고는 모두 비어있다.
- 라. 상황 IV은 처분시설 운영 중으로 방사성폐기물을 처분고로 운반 및 적치과정을 나타내는 상황이다. 이 때 처분고는 빈 처분고 및 운영 중인 처분고가 존재한다.
- 마. 상황 V는 처분시설 운영 중으로 폐기물이 처분고에 처음으로 적치가 완료되어 처분고 상부에 콘크리트로 밀봉하여 강우의 유입을 방지하기 위하여 방수 처리된 상황이다. 이때 처분고는 적치 완료된 처분고, 빈 처분고 그리고 운영 중인 처분고가 함께 존재한다.
- 바. 상황 VI은 처분시설의 운영 완료 후 처분시설의 폐쇄

SITUATION VIII(Institutional Period)

1. Definition of the situation

- 1.1 Time positioning
 - during 300 years after closure
- 1.2 Components
 - Vault, Disposal cover, ...
- 1.3 Hypothesis
 - Monitoring for the disposal facility
 - No human intrusion in the disposal site
 - ...

2. Processes

- 2.1 Thermal Processes
- 2.2 Hydraulic Processes
 - hydrogeological groundwater flows ...
- 2.3 Chemical Processes
 - concrete components
 - carbonation/ hydrolysis ...
- 2.4 Mechanical Processes
 - coupling with chemical evolution and consequences ...
- 2.5 Radiological Processes
- 2.6 Release and migration of Radionuclides

3. Synthesis

4. Uncertainties

Fig. 2. A Example Format of the Phenomenological Analysis.

- 대기 상황이다. 이 때 처분고는 방사성폐기물이 적치 완료된 상태로 밀봉된다.
- 사. 상황 VII은 처분시설의 폐쇄를 위하여 처분고 상부에 처분덮개를 설치하는 과정을 나타내는 상황이다.
- 아. 상황 VIII은 처분시설의 처분덮개 설치가 완료되고 폐쇄 후 관리기간을 나타내는 상황이다. 처분시설 부지 내로 일반인의 접근을 제한하고 처분시설에서 일어나는 일들을 모두 감시 및 기록한다.
- 자. 상황 IX은 처분시설의 폐쇄 후 관리기간 종료 이후를 나타내는 상황으로 처분시설 부지 내로 일반인의 접근이 가능하고 처분시설의 능동적인 관리를 수행하지 않는다.

이처럼 처분시설 운영주기를 고려하여 구분된 상황을 바탕으로, 각 상황에서 일어나는 처분시설의 진화과정 및 물리화학적 현상들을 Fig. 2에서 나타난 바와 같은 양식으로 서술하였으며, 이를 바탕으로 전문가의 의견에 따라 불확실성을 도출하고자 하였다. 이는 각 상황별 주요한 현상들을 이용하여 처분시설 진화를 묘사하고, 이들 사이의 연관성에 따라 일련의 순서로 배열하여 불확실성을 파악하는 기초자료 및 안전성평가 시나리오 설정에 반영된다.

- (1) 정의: 현재의 개별 상황을 전체적인 처분시설의 진화 관점에서 파악하기 위함이며, 개별 상황과 관련해 현 상황에서 요구되는 자연적/공학적 구성기기, 시간대 등을 정의한다. 또한, 처분시설 현상분석을 수행하는 시점에서 불확실성들을 포함하므로 분석을 위한 가정 사항들을 서술한다.
- (2) 물리적 현상: 물리적 현상 파악 시 안전성 확보 체계상 평가기반에 의한 과학적 지식을 바탕으로 수행하여야 하며, 분석 결과에 대한 가치 판단 및 안전성을 고려한 보수적 접근은 하지 않아야 한다. 개별 상황과 관련된 (1) 열적(Thermal Process), (2) 수리적(Hydrological Process), (3) 화학적(Chemical Process), (4) 기계적(Mechanical Process), (5) 방사선적(Radiological Process) 현상들과, (6) 핵종의 유출 및 이동(Radionuclide Release and Transport)을 파악하기 위해 현상들의 과정 및 서로 다른 현상들 간의 결합 현상 그리고 현상의 정도 및 특성 기간을 기술한다.
- (3) 종합 결론: 개별 현상에 대한 현상학적 상태의 종합적인 결론을 제시한다. 동적 특성, 현상의 정도, 그리고 현상의 특성 기간을 고려하여 개별 상황에서 가장 중요한 또는 지배적인 현상이 무엇인지 분석하여 기술하고, 이에 해당되는 불확실성을 기술한다.

처분시설 현상 분석에서 기술된 불확실성들은 정성적 안전성 분석에서 분석되어, 처분시설 구조물의 설계에 직접적으로 활용되는 결과를 제공하거나, 향후 처분시설의 연구 및 모니터링의 대상 선정에 대한 근거 제공 및 안전성 평가에서 사용되는 시나리오 및 모델에 활용될 수 있는 기반자료들을 제공한다.

Table 3에서는 폐쇄 후 안전성평가에서 중요하게 다루어지는 개별 상황 VIII, 즉, 폐쇄 후 관리기간에 대한 현상학적 분석 내용의 일부를 발췌하여 수록하였다[6].

2.4. 정성적 안전성 분석

정성적 안전성 분석은 처분시설의 장기 안전성 확보를 위해 처분시설 구성기기의 안전기능을 바탕으로 물리·화학적 현상들을 분석하여, 이들과 관련된 불확실성을 목록화하는 것이다. 도출된 불확실성을 바탕으로 설계 대안 및 정상 및 비정상 시나리오 도출, 연구개발 항목 도출 등 불확실성 관리 방안의 제시를 목적으로 수행하며, 이를 통해 처분시설의 최적화 및 향후 관련 불확실성 관리에 대한 추적성 및 투명성을 확보한다.

서론에서 언급한 바와 같이, 처분시설의 불확실성은 시간이 지남에 따라 처분시설이 진화하게 되며, 미래 발생 가능한 현상을 예측하는데 있어 처분 시스템을 구성하는 구성요소와 관련된 실제 지식이나 데이터 및 발생하는 현상에 대한 이해 부족 등으로부터 발생한다.

우선 불확실성을 명확하게 하기 위해서 불확실성을 적절하게 정의할 필요가 있으며, IAEA SSG-23에서 언급하고 있는 시나리오 불확실성, 모델 불확실성 및 데이터 불확실성과 같은 일반적인 분류체계로 구분한다[3].

일반적인 분류체계를 기반으로 하여, 불확실성 관리 방안을 좀 더 명확하게 설정하기 위하여 정성적 안전성평가에서 취급하는 불확실성들은 다음과 같이 좀 더 구체화하여 분류하였다[9].

- 초기 입력데이터와 관련된 불확실성, 특히 핵종재고량 등. 이는 데이터 불확실성으로 구분된다.
- 처분시설 구성요소의 특성과 관련된 불확실성
 - ① 측정 방법 및 측정 기술의 부정확성과 연결되며, 이는 데이터 불확실성으로 구분된다.
 - ② 직접적으로 측정할 수 없는 변수와 연계되며, 이는 데이터 불확실성으로 구분되며 참고문헌에서 타당성 있는 데이터를 참조 가능하다.
 - ③ 제한된 샘플을 통해 얻어진 데이터를 처분시설의 해당 구성요소에 일반화시키는 과정에서 발생한다. 특히 지질계에 사용된 데이터는 적용되어야 하는 규모와 다른 소규모와 제한된 측정 횟수로부터 획득된 데이터를 규모를 확장시켜 전체 암반에 적용하여야 하는 불확실성이 존재하며, 이는 데이터 불확실성 및 모델 불확실성으로 구분된다.
 - ④ 변수의 정의를 뒷받침하는 모델과 연계된다. 처분시설 구성요소의 특징은 주어진 모델에 의해 정의되므로, 모델이 너무 단순해서 관련 물리적인 현상

Table 3. An Example of the Phenomenological Analysis in the Situation VIII (some excerpts from ref. [6]).

1. Definition	
1.1 Time position	During 300 years from the closure of the disposal facility
1.2 Components	Same as the previous situation + Disposal Cover
1.3 Hypothesis	<ul style="list-style-type: none"> • The 1st cavern and 2nd surface disposal facility will enter the post-closure management period at the same time. • The underground inspection will be also sealed when the disposal facility is closed. • During the management period after the closure of the disposal facility, records and signs will be installed to notify the existence of the disposal facility.
2. Phenomenological processes	
2.1 Thermal processes	<ul style="list-style-type: none"> • As the waste have not a thermal, the thermal evolution is not strongly different from the one which has been described in the previous situation. • Explain the expected monthly temperature variation by the climatic change.
2.2 Hydrological processes	<ul style="list-style-type: none"> • Explain the pathway, Darcy velocity etc. of groundwater from 1st and 2nd disposal facility. • Explain the rainfall pathway from the disposal cover to the saturated zone.
2.3 Mechanical processes	<ul style="list-style-type: none"> • Explain a structure analysis for the load of the disposal cover, vault etc.. • Explain the effect of the pressure by the gas generated from the radioactive waste and container in a vault. • Describe the soil erosion of the disposal cover.
2.4 Chemical processes	<ul style="list-style-type: none"> • Explain the degradation of the concrete vault. • Explain the gas generation by the chemical reaction.
2.5 Radiological processes	<ul style="list-style-type: none"> • Explain the gas generation by the radiolysis. • Radionuclide inventory.
2.6 Radionuclide release and transport	<ul style="list-style-type: none"> • Describe the radionuclide release form the waste package. • Describe the colloid migration.
3. Synthesis	<ul style="list-style-type: none"> • Discuss about the main processes involved during this situation and verify that the design robust.
4. Uncertainties	<ul style="list-style-type: none"> • Describe uncertainties, example as; • The uncertainties on the expectation of the monthly temperature variation by the local climatic changes. • The uncertainties on the groundwater pathway by the conceptual model, boundary conditions etc.. • The uncertainties on the occurrence of a earthquake that exceed the seismic design. • ...

을 반영하지 못한다면 관련된 변수들의 오차 범위를 재정의해야 한다. 즉, 지질계의 투수계수는 미시적 규모의 복합체로 구성된 매질에서 이루어지나 거시적 관점에서 물의 거동과 관련되어 전체적인 성질로 대변한다. 이러한 불확실성은 모델과 관련된 불확실성이다.

- 처분시설 진화를 지배하는 과정 혹은 현상과 관련된 불확실성. 처분시스템에서 현상은 매우 복잡하게 발생하나, 처분시스템 개발시 그 모든 현상들을 반영할 수 없으므로 시스템을 대표하는 최적의 현상을 모델에 단순하게 적용한다. 즉, 복잡한 현상들을 모델에 단순화시키는 과정에서 불확실성이 발생하며, 장기 거

동 예측 및 모델이 가진 제한성과 경험적 현상 및 수식으로 동일화시키는 과정에서 발생한다.

- 기술적인 불확실성. 처분시설의 장기 안전성의 관점에서 운영중 기술적인 측면은 가변적일 수 있으며, 이는 실제 운영 단계 중 기존 계획 및 건설단계에서 제시된 해결책과는 다른, 발전된 혹은 개발된 해결책들을 선택할 수 있다. 이와 관련된 불확실성들은 다음과 같다.

- ① 계획단계에서 정의된 처분시설 운영 상황과 다른 최신의 기술 존재 및 다양한 운영계획 등으로 인한 처분시설 운영 상황의 변동성으로 인한 불확실성

② 처분시설 개념에서 특정 기술을 수행하기 위한 현상에 관한 제한된 지식

- 외부 사건 발생에 관한 불확실성. 일반적으로 자연적으로 발생하는 자연 현상과 인간의 행동으로 인한 사건으로 구분되며, 이는 시나리오 불확실성으로 구분된다.

이와 같은 불확실성은 처분시설의 안전성에 영향을 미칠 수 있으며, 불확실성을 관리하기 위하여 우선 일반적인 분류체계에 구별하여 불확실성별로 다음과 관리 방안을 제시하였다.

첫 번째로 데이터의 불확실성의 경우 안전지표 혹은 처분시설의 영향을 정량적인 평가로 고려할 수 있다. 이는 입력데이터의 민감도 분석 및 보수적 데이터의 형태로 정상시나리오에서 불확실성을 포함하여 평가하도록 한다.

두 번째로 모델 불확실성은 불확실성을 완벽하게 제거하는 것이 불가능하며, 불확실성을 내재한 상태에서 의사 결정을 내리려야만 한다. 이를 고려하여 모델 불확실성을 저감하기 위하여, 예측된 개념모델과 실증 실험 및 대안 모델(혹은 프로그램)들 간의 내부 비교를 수행하여 검증을 하여야 한다. 가장 좋은 방법은 장기적인 예측 모델과 실험을 직접적으로 비교하는 것이나 이는 오랜 시간이 필요하므로 단기간으로는 불가능하므로, 장기 실험계획을 수립하여야 한다.

마지막으로 처분시설은 하나 이상의 안전기능을 가진 구성기기로 구성되며, 그 구성기기의 안전기능과 관련된 성능은 해당 안전기능에 영향을 미칠 수 있다. 예측된 성능보다 저하되어 해당 안전기능을 유지하는 불확실성의 경우, 안전성 평가의 정량적 평가 결과에 영향을 미칠 수 있지만 처분시설의 정상적인 진화에 크게 영향을 미치지 않는다. 또한 구성기기의 성능이 설계 성능보다 조기 손상되어 안전기능을 더 이상 유지하지 못하는 불확실성의 경우, 처분시설의 전체 성능의 손실로 이어져 정성적인 평가가 필요하다. 이러한 불확실성은 시나리오 불확실성으로 구분되며, 발생 가능성에 의해 비정상 시나리오의 범주에서 평가를 수행한다.

정성적 안전성 분석은 처분시설의 최적화 과정에서 다양한 형태의 불확실성 관리대안(설계 및 지침, 정상시나리오, 민감도분석, 추가 실험 및 모델링 검증 및 비정상 시나리오)을 고려하도록 하였으며, 이는 처분시설의 안전기

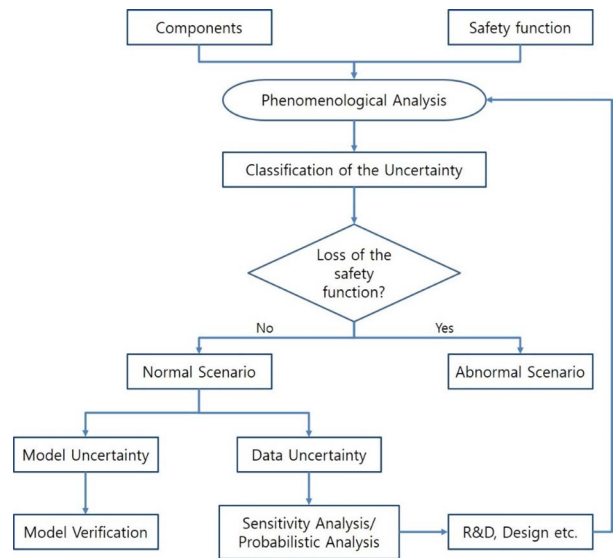


Fig. 3. The Procedure of the Qualitative Safety Analysis.

능 분석과 현상 분석에 의해, 처분시설에서 일어날 수 있는 모든 불확실성을 체계적 및 통합적으로 도출하여 분석하였다. 이러한 분석을 통해 불확실성이 설계 및 시나리오에 의해 고려되었는지를 확인하고 또한 정상시나리오와 관련 민감도 분석에 의해 불확실성을 정량적으로 확인한다. 또한, 이러한 문맥에서 미래 처분시설 진화의 잠재적 영향을 이해하기 위해 처분시스템의 안전기능 손상을 일으키는 잠재적인 불확실성을 확인하고, 예측 가능한 비정상 진화에 대해 설명하며 비정상 시나리오로 고려하였다. 이 때, 비정상 시나리오 분석 결과와 민감도 분석은 각 구성기기 혹은 방벽들의 처분시설 안전성 기여도에 대한 타당성과 강건성을 평가하도록 한다.

본 논문에서는 중·저준위 방사성폐기물 처분시설 중 표층처분시설의 경우 계획 단계에 초점을 맞추어 현상분석과 안전기능을 연계하여 분석된 불확실성의 특성과 연계하여, 불확실성을 관리방안에 대하여 심층 검토한 결과를 제시하였다. 도출된 불확실성의 경우, 향후 불확실성의 제거 및 저감 여부에 대해 확인이 가능하도록 계속해서 관리할 예정이다.

앞에서 언급한 바와 같이 불확실성 관리 방안으로는 설계 및 지침, 정상 및 비정상 시나리오, 민감도 분석, 추가 실험 및 모델링 검증으로 구분하였으며, 각각의 관리 방안에 대한 상세 내용은 다음과 같다.

- 설계 및 지침: 도출된 불확실성을 관리하기 위한 방안으로 설계 혹은 지침에 반영
- 정상시나리오: 도출된 불확실성을 관리하기 위한 방안으로 정상시나리오에 반영하여 안전성평가 수행
- 민감도 분석: 입력데이터와 관련된 불확실성을 관리하기 위한 방안으로 정상 시나리오에 반영하여 민감도 분석 수행
- 추가 조사: 현상에 대한 이해 부족 및 데이터 부족으로 발생한 모델 불확실성 및 데이터 불확실성을 저감 및 관리하기 위한 방안으로 추가실험 및 연구 수행
- 비정상 시나리오: 도출된 불확실성을 관리하기 위한 방안으로 해당 구성기기의 안전기능이 상실 혹은 변화 되었을 때 비정상 시나리오에 반영하여 안전성 평가 수행

Table 4는 정성적 안전성평가를 수행한 중·저준위 방사성폐기물 처분시설의 예시이며, 그 일부를 발췌하여 수록하였다[6].

2.5. 시나리오 도출

정성적 안전성 분석을 통해서 시나리오 불확실성, 데이터 불확실성, 모델 불확실성으로 분류하였다. 이 때 정상 시나리오는 현재 기술에 의한 처분시설의 시간의 흐름에 따른 진화가 고려된 불확실성의 집합체이며, 비정상 시나리오의 경우 시나리오 불확실성으로 분류된 불확실성 중 발생 원인 및 상실된 안전기능을 연계하여 모델의 입력데이터 등의 조건 등을 고려하였다. 이 방법론을 통해 고려된 시나리오는 정상 및 비정상 시나리오이며, 인간 침입 시나리오의 경우 정형화된 방법론을 이용하므로 이 방법론을 적용하지 않았다.

따라서, 중·저준위 방사성폐기물 표층처분시설에 도출된 시나리오는 이동 형태에 따라, 인간침입시나리오를 제외하고 정상시나리오를 포함하여 총 9개이다.

- 액체상 이동
 - ① 내진설계기준을 초과한 지진으로 인한 처분덮개 및 처분고 손상
 - ② 지진으로 인한 원계 손상
 - ③ 내진설계기준을 초과한 지진으로 인한 근계/원계 동시 손상
 - ④ 인위적 요인으로 인한 폐기물 포장물 조기 손상
 - ⑤ 인위적 요인으로 인한 처분덮개 및 처분고 손상

- 기체상 이동
 - ① 내진설계기준을 초과한 지진으로 인한 처분덮개 및 처분고 손상
 - ② 인위적 요인으로 인한 처분덮개 및 처분고 손상

중·저준위 방사성폐기물 1단계 동굴처분시설의 경우 ‘Bottom-Up 방식’으로 FEP을 이용하여 시나리오를 도출하였으며, 2단계 표층처분시설에서는 ‘Top-Down 방식’으로 불확실성 관리 방법론을 이용하여 시나리오를 도출하였다.

두 방법론을 통해 도출된 시나리오의 경우 중 가장 큰 차이를 나타내는 시나리오는 1단계 처분시설에서 도출된 시나리오 중 원계 영역 즉, 천연방벽이 완전히 상실된 경우에 대한 시나리오이다. 현재 시나리오 도출 방법론은 구성기기의 관련 안전기능의 상실 여부와 이와 관련된 현상학적 분석을 통해 수행되므로, 원계가 완전히 상실되는 사건은 모델링 및 현재의 지식으로 일어나지 않을 것으로 판단되므로 이를 시나리오로 고려하지 않았다. 이처럼 하나의 방벽이 완전히 상실되는 경우는 처분시설 해당 구성기기의 개별 성능을 평가하기 위해서는 고려될 수 있지만, 이를 비정상 시나리오로 구분하여 고려하기엔 어려움이 있다.

또한 1단계 처분시설은 폐쇄 후에 지하수로 포화되며, 처분시설의 깊은 심도를 고려하면 인위적 또는 자연적 요인에 따라 방벽 성능이 상실되더라도 시설 내부의 포화 상태는 변하지 않을 것으로 판단된다. 이에 따라 기체상 방사성 핵종 이동 시나리오에서 비정상적인 요인에 의한 기체발생량 및 기체이동 특성 변화는 없을 것으로 판단되어 비정상 시나리오로 도출하지 않았다. 그러나 2단계 처분시설은 1단계 처분시설과 달리 폐쇄 이후에 물에 의해 처분시설 내부가 포화되지 않음을 모델링으로 예측하였으며, 처분시설이 지표면 인근에 위치함으로 인해 인위적 또는 자연적 요인에 따른 방벽 성능 상실에 따라 기체 발생량 및 이동 특성이 변동 가능한 것으로 판단하였다. 이에 따라 2단계 처분시설은 방벽 상실에 의한 현상을 분석하여 비정상 시나리오를 도출하였다.

기준에 많이 이용하던 FEP 목록을 이용한 방법론의 경우 이해당사자들의 신뢰성을 위하여 많은 국가에서 이용하고 정당성을 확보하였다. 그러나 본 논문에서 소개한 시나리오 방법론의 경우 새로운 방법론이므로 타당성 및 정당성에 의문을 가질 수 있다. 해당 방법론에 대한 타당성

Table 4. An Example of the Qualitative Safety Analysis(some excerpts from ref. [6]).

No.	Component	Affected safety function	Type of uncertainty factor	Related uncertainty in the phenomenological analysis	Brief summary on management of uncertainties	Management
A-1	Waste package	SF_P 1.5.1.2 Containment of Radionuclide inside the waste package and EBS system	Inventory	[I.2.5.2 Radionuclide Inventory of the 1 st cavern disposal facility & IV/V/VI/VII/VIII 2.5.2 & IX.2.5.1 Radionuclide Inventory of the disposed waste packages] Uncertainty of the difference between the expected inventory and the measured inventory for the operation	Apply the expected inventory in normal scenario of the assessment	Normal scenario
A-2	Waste package	SF_P 1.5.1.2 Containment of Radionuclide inside the waste package and EBS system	Inventory	[I.2.5.2 Radionuclide Inventory of the 1 st cavern disposal facility & IV/V/VI/VII/VIII 2.5.2 & IX.2.5.1 Radionuclide Inventory of the disposed waste packages] Uncertainty of the difference between the expected inventory and the measured inventory for the operation	Implement additional investigation for the operation of the disposal facility	Additional investigation
B-19	Vault	SF_P 1.5.1.1 Limit of the rainfall infiltration into the waste package	Infiltration rate	[VIII/IX.2.2.4 Flow in the disposal cover and vaults of the 2 nd surface disposal facility] Uncertainty of the rainfall infiltration rate inside the EBS system	According to the results modeled with uncertainties, a infiltration rate meets the design criteria. Apply the design criteria in the normal scenario of the assessment	Normal scenario
B-20	Vault	SF_P 1.5.1.1 Limit of the rainfall infiltration into the waste package	Infiltration rate	[VIII/IX.2.2.4 Flow in the disposal cover and vaults of the 2 nd surface disposal facility] Uncertainty of the rainfall infiltration rate inside the EBS system	According to the results modeled with uncertainties, a infiltration rate meets the design criteria. Implement the sensitivity analysis in the normal scenario	Sensitivity analysis
B-21	Vault	SF_P 1.5.1.1 Limit of the rainfall infiltration into the waste package	Infiltration rate	[VIII/IX.2.2.4 Flow in the disposal cover and vaults of the 2 nd surface disposal facility] Uncertainty of the rainfall infiltration rate inside the EBS system	Implement the demonstration experiment for the disposal cover until the closure of the disposal facility	R&D
B-22	Vault	SF_P 1.5.1.1 Limit of the rainfall infiltration into the waste package	Infiltration rate	[VIII.2.2.4 Flow in the disposal cover and vaults of the 2 nd surface disposal facility] Uncertainty of the rainfall infiltration rate by the quality control in the construction phase	Rainfall exceeding the design criteria of the disposal cover may penetrate by the human error such as the quality control in the construction phase Apply as abnormal scenario by the human error	Abnormal scenario (Human error)

및 정당성을 확보하기 위해서, IAEA ISAM에서 제시하는 FEP 목록[7]과 현재 도출된 불확실성의 비교 검토[6]를 수행하였다.

3. 결론

현재 국내 방사성폐기물 처분시설은 중·저준위 방사성

폐기물 처분시설로, 운영 중인 동굴처분시설과 건설 중인 표층처분시설이 존재하고 있다. 처분시설의 경우 폐쇄 후에도 장기적으로 안전성을 확보하여야 하며, 방사선적 안전성을 확인하기 위하여 시나리오 수립을 통한 안전성평가를 수행하여야 한다. 또한, 처분시설의 경우, 먼 미래에 대해 예측을 하여야 하므로, 이로 인한 불확실성이 발생하며 이를 잘 관리하는 것 또한 중요하다. 따라서, 처분시설의 안전성을 확보하기 위하여 이러한 불확실성을 확인하고 이를 저감 및 제거하는 처분시설의 불확실성 관리의 일환으로 시나리오 개발 단계에서 불확실성을 고려하여야 한다.

처분시설의 시나리오는 처분시설의 구성요소 및 이들의 물리화학적 특성에 대한 현상들을 기반으로 발생가능한 현상 및 사건 등의 가정사항의 집합체로 이뤄진다. 현재까지 많이 이용되는 시나리오 개발 방법론은 FEP 목록을 이용하여 시나리오로 도출하는 방법론이나, 본 논문에서는 처분시설에서 발생가능한 불확실성들을 분석하여 이를 관리하는 방안의 하나로 시나리오로 도출하는 방법을 적용한 예를 설명하였다.

불확실성 관리 방법론을 통한 시나리오 개발 방법론은 처분시설에서 발생 가능한 불확실성을 도출하여 관리함으로써 불확실성을 저감하거나 제거한다는 것에 큰 의의가 있으며, 이를 통해 향후 추적성이 가능하다. 그러나, 불확실성 관리를 통한 시나리오 개발 방법론에서는 현재 가용 가능한 지식 등이 한정적이고 정성적으로 고려되어, 해외 문헌에서 고려하는 시나리오 및 정성적으로 고려되는 불확실성들을 모두 고려한 시나리오들을 모두 고려하였다. 중·저준위 처분시설의 경우 이러한 모든 시나리오들을 고려하여도 시나리오의 개수는 많지 않다.

그러나, 이러한 방법론을 정성적으로 고준위 방사성폐기물 심층처분시설에 적용하게 되면 고준위 방사성폐기물 심층처분시설에 대한 현상의 복잡성 등으로 인해 고려되어야 하는 시나리오 수가 많아지고 이에 대한 정당성 확보가 어려워질 것으로 예측된다. 그러므로, 정성적으로 평가되는 시나리오에 정량적인 항목을 대입하여 조금 더 객관화하여 타당성을 확보할 필요가 있다. 특히 심층처분시설의 경우 위험도 기반의 시나리오를 도출하여 안전 목표를 달성하도록 되어 있으므로, 선량 평가뿐만 아니라 반

드시 발생확률도 고려하여야 한다. 이를 고려하여야 하는 만큼 재해에 의한 시나리오의 발생 확률은 상대적 발생 빈도로부터 유도하거나, 정량적인 분석기술을 사용한 최적 평가기법 또는 공학적 판단을 이용하여 적절한 수치로서 제시될 필요가 있다.

현재 언급된 방법론은 처분시설의 최적화를 위하여 시나리오 개발조차도 그에 대한 하나의 일환으로 수행되는 새로운 방법론이긴 하나, 어떠한 방법론을 쓰더라도 향후 계속해서 불확실성을 분석하고 관리하여 처분시설의 안전성에 대하여 신뢰성 및 객관성을 확보할 필요가 있다.

사 사

이 논문은 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 사용후핵연료관리핵심기술개발사업단의 지원을 받아 수행된 연구사업임(No. 20210401003C).

참고문헌

1. NSSC. 2012. A General Guideline for the High-Level Radioactive Waste Disposal Facility, Nuclear Security and Safety Committee Notice (Radiation Safety division), No. 2021-21.
2. NEA. 2019. International Features, Events and Processes (IFEP) List for the Deep Geological Disposal of Radioactive Waste, 3rd edition, NEA/RWM/R(2019)1.
3. IAEA. 2012. The safety case and safety assessment for the disposal of radioactive waste, SSG-23.
4. NEA. 2012. Methods for safety assessment of geological disposal facilities for radioactive waste - Outcomes of the NEA MeSA Initiative, NEA No. 6923.
5. Park JB, Jeong JT and Park JW. 2014. Development of the Safety Case program for the Wolsong Low- and Intermediate- Level Radioactive Waste Disposal Facility in Korea. KRS 12(4):335-344.
6. KORAD. 2022. Safety Analysis Report for the Low- and Intermediate- Radioactive Waste Disposal Facility, 2nd ed.
7. IAEA. 2004. Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities - Results of a co-ordinated research project.
8. ANDRA. 2005. Phenomenologic Evolution of a Geological Repository, Dossier 2005 Argile Tome.
9. ANDRA. 2005. Tome Safety analysis of a geological repository, Dossier 2005 Granite.