

Confidence Improvement of Disposal Safety by Development of a Safety Case for High-Level Radioactive Waste Disposal

고준위방사성폐기물 처분 Safety Case 개발을 통한 처분안전성 신뢰도 향상

Min Hoon Baik*, Nak-Youl Ko, Jongtae Jeong, and Kyung-Su Kim

Korea Atomic Energy Research Institute, 111, Daedeok-daero 989beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea

백민훈*, 고낙열, 정종태, 김경수

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

(Received September 5, 2016 / Revised November 9, 2016 / Approved November 14, 2016)

Many countries have developed a safety case suitable to their own countries in order to improve the confidence of disposal safety in deep geological disposal of high-level radioactive waste as well as to develop a disposal program and obtain its license. This study introduces and summarizes the meaning, necessity, and development process of the safety case for radioactive waste disposal. The disposal safety is also discussed in various aspects of the safety case. In addition, the status of safety case development in the foreign countries is briefly introduced for Switzerland, Japan, the United States of America, Sweden, and Finland. The strategy for the safety case development that is being developed by KAERI is also briefly introduced. Based on the safety case, we analyze the efforts necessary to improve confidence in disposal safety for high-level radioactive waste. Considering domestic situations, we propose and discuss some implementing methods for the improvement of disposal safety, such as construction of a reliable information database, understanding of processes related to safety, reduction of uncertainties in safety assessment, communication with stakeholders, and ensuring justice and transparency. This study will contribute to the understanding of the safety case for deep geological disposal and to improving confidence in disposal safety through the development of the safety case in Korea for the disposal of high-level radioactive waste.

Keywords: High-level radioactive waste, Deep geological disposal, Disposal safety, Safety case, Confidence improvement

* Corresponding Author.

Min Hoon Baik, Korea Atomic Energy Research Institute, E-mail: mhbaik@kaeri.re.kr, Tel: +82-42-868-2089

ORCID

Min Hoon Baik <http://orcid.org/0000-0003-0104-9183>

Jongtae Jeong <http://orcid.org/0000-0001-7802-9370>

Nak-Youl Ko <http://orcid.org/0000-0001-8279-6652>

Kyung-Su Kim <http://orcid.org/0000-0002-0399-2653>

고준위방사성폐기물 심층처분에서 처분안전성의 신뢰도를 향상시킬 수 있는 방안으로 그리고 처분 프로그램 개발 및 인허가를 위해 많은 나라들에서 자국에 적합한 safety case를 개발하고 있다. 본 연구에서는 방사성폐기물 처분을 위한 safety case의 의의, 필요성, 개발과정들을 정리하고 소개하였다. 그리고 처분안전성을 safety case의 다양한 측면에서 논의하였다. 아울러 스위스, 일본, 미국, 스웨덴, 핀란드 등 해외의 safety case 개발 현황과 현재 KAERI에서 개발 중인 safety case의 개발 전략을 간략히 소개하였다. 고준위방사성폐기물 처분안전성의 신뢰도 향상을 위해 safety case 기반 하에서 어떤 노력들이 필요한지를 분석하였다. 그리고 국내 상황을 반영하여 신뢰할 수 있는 정보자료의 구축, 안전성 관련 과정들의 이해, 안전성 평가의 불확실성 저감, 이해당사자와의 의사소통, 공정성과 투명성 확보 등의 실행 방안을 제안하고 논의하였다. 본 논문에서 제시된 내용들은 심층처분 safety case를 이해하고, 국내에서 개발하고 있는 고준위방사성폐기물 처분 safety case 개발을 통한 처분안전성 신뢰도 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

중심단어: 고준위방사성폐기물, 심층처분, 처분안전성, Safety case, 신뢰도 향상

1. 서론

방사성폐기물의 지층처분은 많은 전문가들에 의해 가장 안전한 장기 관리전략으로 인식되어 왔으며[1-4], 이 기술은 기본적으로 피동적(passive) 안전성에 기초하여 정의되고 방어된다. 최근에 방사성폐기물의 지층처분에서 안전성의 개념이 정량적인 안전성평가 결과의 신뢰도를 향상하고 보완하기 위하여 다양한 범위의 증거와 논거들을 포함하는 것으로 확장되었으며, 이러한 확장된 작업들을 지칭하기 위해 보다 광의의 개념인 “safety case”라는 용어를 사용하고 있다. 일반적으로 safety case는 처분시설의 폐쇄 후뿐만 아니라 시설의 신뢰할 수 있는 관리기간 이후에도 처분시설이 안전할 것이라는 주장을 정량화하고 입증할 수 있는 증거, 해석 및 논거들의 총합으로 정의된다[5].

한국원자력연구원(KAERI: Korea Atomic Energy Research Institute)은 2007년 이후로 경수로 사용후핵연료의 파이로프로세싱(pyroprocessing)으로부터 발생하는 방사성폐기물을 심층처분하기 위한 처분시스템을 개발하고 [6], 이러한 처분시스템의 안전성평가 연구를 수행하여 왔다[7]. 최근에 원자력안전위원회(NSSC: Nuclear Safety and Security Commission)에서 ‘고준위방사성폐기물 심층처분 시설에 관한 일반기준’을 고시하였다[8]. 해당 고시의 ‘제2장 고준위방사성폐기물의 처분에 따른 방사선위해 방지기준’의 ‘제7조 (신뢰성 구축)’에 따르면 “안전성평가 결과가 안전목표치에 부합함의 판단은 선량 및 위험도의 확률론적

분포특성에 관한 분석, 평가 불확실성의 분석, 자연유사물 및 보조안전지표를 이용한 비교평가, 심층방어 증거의 확보 등 다중의 논거에 의해 뒷받침되어야 한다”고 명시함으로써 safety case에 의해 처분안전성이 확보되어야 함을 요구하고 있다. 따라서 KAERI에서는 KAERI 연구부지 내에 위치하는 지하처분연구시설인 KURT (KAERI Underground Research Tunnel)에서 획득한 다양한 지질 자료와 KURT 환경을 근거로 획득한 핵종거동 자료들을 바탕으로 파이로공정폐기물의 심층처분에 관한 safety case를 개발하고 있다.

Safety case는 과학적 및 사회적 인자들에 존재하는 불확실성을 감소시킴으로써 여러 이해당사자들에게 안전성을 확신시키는 방법의 하나라 하겠다. 방사성폐기물 처분에서 safety case는 순수하게 과학기술적인 것만이 아니며 사회문화적인 측면까지 고려되는 전이과학적인(trans-scientific) 것이라 하겠다[9]. 안전성에 관한 대중의 인식은 점진적으로 변화하고 있으며, 규제적 안전성만으로 충분하지 않다는 것이 인정되고 있다. 아울러 고준위방사성폐기물 처분은 장기적으로 추진해야 할 과제이므로 단계적으로 신뢰성을 확보해 나가는 전략의 마련이 필수적이다. 따라서 미래의 고준위방사성폐기물 처분안전성을 확보하고 신뢰성을 향상하기 위해서는 safety case에 근거한 다양하고 실질적 노력들이 필요하다.

본 연구에서는 고준위방사성폐기물 처분안전성을 safety case의 다양한 측면들에서 고찰하고, 해외의 safety case 개발 현황과 함께 현재 KAERI에서 개발 중인 safety case의 개발 전략을 간단히 소개하고자 한다. 아울러 고준위방사성폐기물

처분안전성의 신뢰도 향상을 위해 safety case 기반 하에서 어떤 노력들이 필요한지를 살펴보고 몇 가지 실행 방안을 제안하고자 한다.

2. 처분안전성과 Safety Case

2.1 처분안전성과 safety case 개념

방사성폐기물의 처분은 방사성폐기물 관리의 최종 단계이고, 처분시설은 안전성을 확보하기 위해 필요한 수준의 격리(isolation)와 격납(containment)을 제공하도록 설계되고, 운영되고, 폐쇄되어야 한다. 처분(disposal)이란 방사성폐기물을 회수할 의도가 없이 어떤 시설 또는 위치에 정치하는 것을 말하는 것이며, 사실 회수가 불가능하다는 것을 의미하지는 않는다. 처분안전성의 기본적인 목적은 방사선의 위험한 영향으로부터 인간과 환경을 보호하는 것이며, 기본적인 것은 현 세대에 발생된 방사성폐기물은 미래세대에 부담이 되지 않도록 현 세대에서 관리되어야 한다는 것이다[10]. 따라서 방사성폐기물을 발생한 세대들은 그것의 장기관리를 위해 안전하고 실질적이며 환경적으로 수용 가능한 해법을 찾아 적용해야 한다.

처분시설의 운영은 안전성을 우선적으로 고려해야 하며 시설의 안전성을 평가하고 시설의 설계와 운영이 안전성의 요구사항에 부응함을 입증해야 한다[11]. IAEA (International Atomic Energy Agency)에서 제시한 방사성폐기물 처분 안전성 요구사항들은 특별히 안전성평가와 함께 safety case가 개발되어야 함을 요구하고 있다[12]. 앞에서 정의된 바와 같이 safety case는 처분시설의 안전성 지원을 위한 과학적, 기술적, 행정적, 관리적 논거들과 증거들의 총합이다. 이러한 safety case는 부지의 적합성과 처분시설의 설계, 운영, 폐쇄 등을 포함하며, 또한 방사선 위험도의 평가, 처분시설의 모든 안전성 관련 작업들의 적정성과 품질보증 등을 포함한다. 안전성평가는 safety case의 통합적인 한 부분으로서 방사선 위험의 체계적인 평가에 의해 이루어지며, safety case의 중요한 구성요소이다. 따라서 safety case와 이를 지원하는 안전성평가는 안전성 입증과 처분시설 인허가의 기초가 된다. 이들은 처분시설의 개발과 함께 진화하며 부지선정, 설계, 운영 등과 관련된 주요 결정들을 돕고 안내하는 역할도

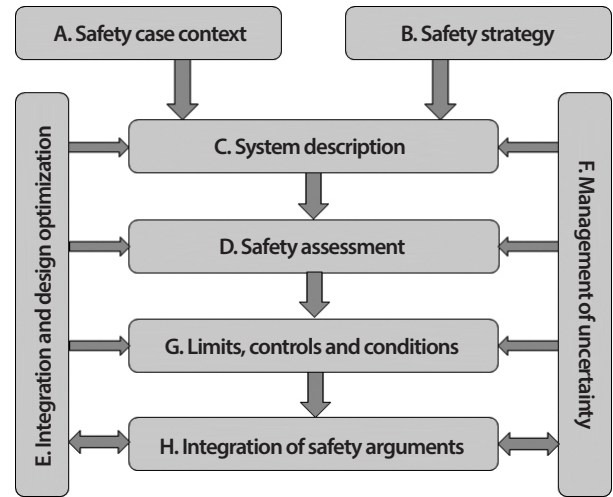


Fig. 1. Component of the safety case [12].

한다. 아울러 safety case는 이해당사자들과 소통하고, 처분 시설의 안전성에 관한 신뢰를 구축하는 주요 기반이 된다.

IAEA에서는 방사성폐기물 처분에 적용되는 IAEA의 안전성 원칙들[10]과 함께 처분시설 개발의 모든 단계에 걸쳐 safety case를 적용하기 위한 요구사항들도 자세하게 제시하고 있다[12]. 일반적으로 safety case는 처분프로그램의 여러 단계(즉, 개념개발 단계, 부지조사 및 부지선정 단계, 설계 개발 및 건설 단계, 운영 및 폐쇄 단계, 폐쇄 후 기간)를 따라 진화하며, 각 단계에서 safety case의 수준은 시설의 형태와 사용된 기술들 외에 여러 다른 인자들에 의존한다. ICRP (International Commission on Radiological Protection) 또한 처분시설 개발의 각기 다른 단계들을 기술하고 다양한 피폭상황에 의존하는 각 단계에 대한 방사선적 방호원칙의 적용방안에 대해 언급하고 있다[13].

Safety case의 주요 구성요소들을 Fig. 1에 제시하였다[12]. Safety case는 safety case 배경(context), 안전전략(safety strategy), 시스템 기술(system description), 안전성 평가(safety assessment), 반복 및 설계최적화(iteration and design optimization), 불확실성 관리(management of uncertainty), 제약, 관리 및 조건들(limit, controls and conditions), 안전성 논거들의 통합(integration of safety arguments) 등의 요소들로 구성되어 있다. Safety case의 주요 구성요소인 안전성평가는 다양한 관점에서의 평가들을 포함하며 방사선량(dose)과 방사선 위험도(risk)를 평가대상으로

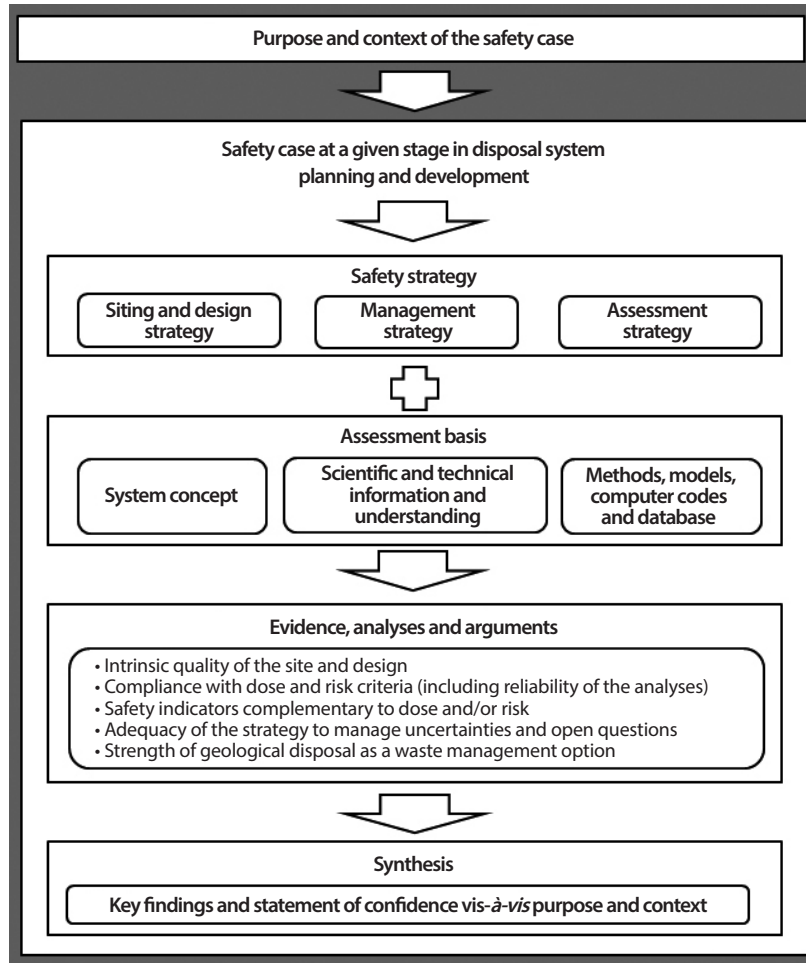


Fig. 2. Methodology for the development of a safety case proposed by NEA [5].

한다. 안전성평가는 결국 이러한 두 가지 관점에서 인간과 환경의 방사선적 영향에 관한 평가이다. 안전성평가의 다른 중요한 관점들은 부지 및 공학적 관점, 운영 안전성, 비방사선적 영향과 관리시스템 등이 있다.

아울러 방사성폐기물 처분에서 safety case의 역할은 다음과 같은 기능들을 제공하는 것으로 요약될 수 있다[9].

- 처분시설 폐쇄 후에 처분시스템의 거동과 성능을 입증하는 구조화되고, 추적가능하고, 투명한 방법으로 타당한 정보들을 통합하는 것
- 처분시스템의 거동과 성능의 불확실성을 확인하고, 불확실성의 중요도를 분석하고, 중요한 불확실성들의 관리방법 등을 확인하는 것

- 처분시설이 인간의 건강과 환경을 보호하는 성능을 잘 수행할 것이라는 확신을 제공함으로써 장기 안전성을 입증하는 것
- 처분시설 개발의 각 단계에 필요한 의사결정들을 지원하는 것
- 처분시설의 이슈들에 관한 여러 이해당사자들 사이의 의사소통을 돕는 것

2.2 Safety case 개발 방법

NEA (Nuclear Energy Agency)에서 제시한 safety case의 개발방법을 Fig. 2에 제시하였다[5]. Safety case 개발을 위해서는 개발하고자 하는 safety case의 목적과 배경이

정의되어야 한다. 이는 현 단계의 개요를 포함하며 요구되는 지질학적 특성이 어떻게 입증될 수 있는지, 공학적방벽 시스템을 어떻게 적합하게 건설할 수 있는지, 처분시설이 어떻게 건설되고 운영되며 폐쇄될 것인지에 관한 내용 등이 포함되어야 한다.

다음 단계로는 전체적인 안전전략(safety strategy)을 세우는 것이다. ICRP는 안전전략을 안전한 처분을 달성하기 위해 적용되는 고급 수준의 통합된 방법으로 정의하고 있다 [14]. 안전전략은 처분시설의 계획과 실행 및 폐쇄에 필요한 여러 가지 행위에 관한 전반적인 관리전략으로 이루어져 있으며, 이런 행위에는 부지선정과 설계, safety case 개발, 안전성평가, 부지와 폐기물의 특성화 및 연구개발 등이 포함된다. Safety case 개념개발 단계에서는 안전전략과 이를 충족할 방안을 제시하는 것이 중요하다. 그러나 이 단계에서 시설의 상세한 설명이나 평가를 실행하는 것은 불가능하며, 이것은 safety case의 반복적인 수정을 통해서 달성될 수 있다.

다음 단계는 안전성평가를 수행하는데 필요한 정보와 분석수단을 설명하는 것이며, 이들을 총괄하여 평가근거(assessment basis)라고 하는데 주요 요소는 다음과 같다.

- 공학적방벽과 지질환경, 지질상태의 안정성, 시간의 흐름에 따라 공학적방벽과 자연방벽이 어떻게 변해 갈 것이며 그것들이 어떻게 안전성을 제공해줄 수 있는지를 예측하는 내용들이 모두 포함되는 처분시설의 설계방안을 설명하는 처분시스템 개념
- 처분시스템의 예상되는 변화와 안전성 그리고 과학적인 해석에 존재하는 불확실성 등을 평가하기 위한 내용들이 포함된 처분시스템의 과학적이고 기술적인 정보와 이해
- 처분시스템을 모델링 할 때 이용되는 분석방법과 컴퓨터 프로그램, 데이터베이스

이러한 요소들의 주요 내용은 안전성평가를 수행하는 것이다. 안전성평가에는 처분시스템의 성능을 평가하고, 방사선이 인간의 보건과 자연환경에 미칠 수 있는 잠재적인 영향을 정량화하는 작업이 필요하다. 또한 안전성평가는 규제기관과 다른 이해당사자들에게 안전성평가 결과가 안전에 필요한 조건들을 충족시킨다는 확신을 주어야 한다.

다음 단계는 safety case의 신뢰성과 견고함을 증진시키는

상호보완적인 증거, 해석과 논거들을 수집하여 기술하는 것이며 주요 내용은 다음과 같다.

- 방사성폐기물관리의 선택사항으로서 심층처분의 강점에 관한 일반적인 증거
- 부지선정과 설계의 본질적인 특성에 관한 증거. 즉, 모든 처분시설의 안전성은 기반암과 지질환경, 공학적방벽 등의 구성요소들의 적합한 특성이나 고유의 특징에 의해 주로 결정되는데 이런 특성들에는 장기 건전성이나 예측가능성 등이 포함된다. 그리고 safety case에도 이러한 특성들이 강조되어야 한다.
- 상호보완적인 안전지표들. 이들은 생태계로 유출될 가능성이 있는 방사성핵종이 인간보건이나 자연환경에 미치는 영향이 작을 것이라는 사실을 지원해 줄 수 있다. 예를 들면, 방사성폐기물의 방사선적 독성(toxicity)은 자연에 존재하는 우라늄 광체와 비교하여 방사성폐기물의 위해성을 나타내는 지표로 이용될 수 있다.
- 불확실성과 해결되지 않은 문제의 관리전략이 적합한지에 관한 논거. 현재 단계에서는 해결하지 못하는 문제나 불확실성들이 많이 존재할 수 있다. 그러나 safety case는 향후 벌어질 부지특성화 및 시스템 설계의 최적화와 같은 반복적인 작업을 잘 관리할 수 있다는 전망을 보여줘야 하고, 이런 사항들을 잘 해결할 수 있는 전략도 세워야 한다. 아울러 불확실성은 항상 존재하지만 이러한 불확실성이 시설의 안전성을 악화시키지 않는 근거를 safety case가 설명해야 한다.

Safety case 개발의 마지막 단계는 주요 연구 결과물들을 통합해서 safety case를 구성하는 것이다. 남아있는 모든 불확실성의 평가 및 처분시설이 안전하다는 주장을 수치적으로 나타내고 입증하는 주요 증거와 분석, 주장 등이 이에 포함된다. 이것은 처분시설 관련 프로그램의 현재 단계에서 이용 가능한 평가근거의 내용들을 바탕으로 한 처분시스템 안전에 관한 전문가의 확신이 담긴 신뢰도진술(statement of confidence)을 통해 이루어진다.

Safety case 구성 이후에 그 내용들은 결정자들(사업자, 규제자 및 다른 관련자들)에 의해 평가되어야 한다. 제시된 safety case에 근거하여 결정자들은 다음 처분시설 개발단계로 진행하는 것이 정당하고 안전성에서 충분한 신뢰도가

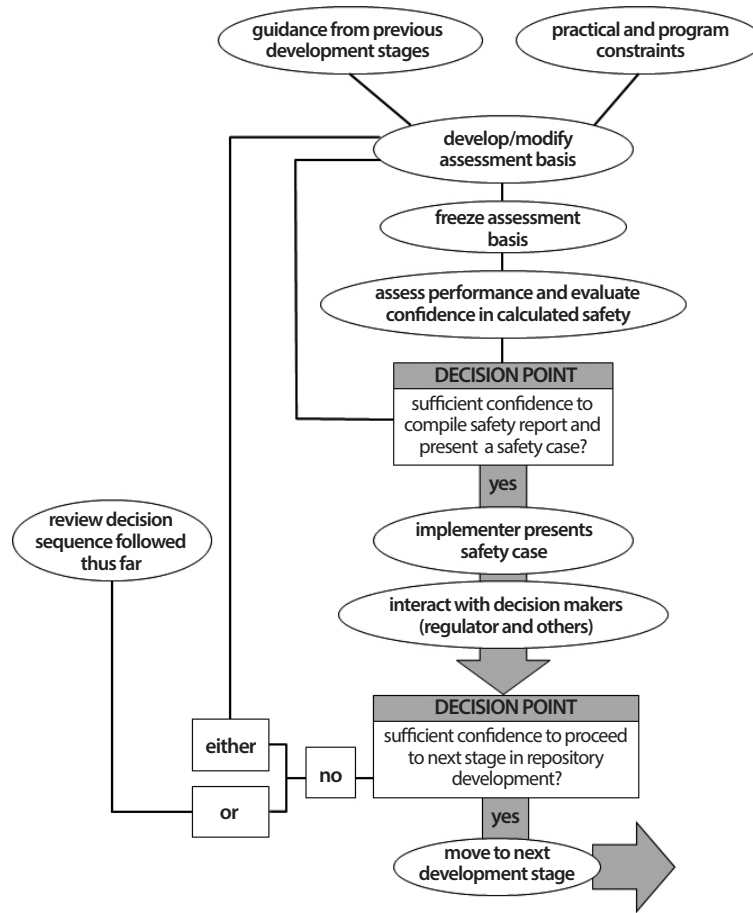


Fig. 3. The iterative steps in the development of a safety case within a repository development stage. Proceeding beyond each decision point may imply an increasing commitment of resources [9].

있다고 결론을 내리거나, 또는 평가근거가 수정되고 새로운 safety case가 구성되어야 한다고 결론을 내릴 것이다. 따라서 safety case가 개발되고 나면 개발된 safety case의 신뢰성 증진을 위해 처분시설 개발의 각 단계들에서 개발된 safety case를 반복적으로 수정해야 할 필요가 있다. 이러한 반복적인 safety case 개발과정에서 가장 중요한 요소는 개발된 safety case의 수정여부를 판단하는 결정요인들이며, safety case의 신뢰도를 증진할 수 있는지 여부가 이들 결정요인들의 주요 판단근거가 된다. 이러한 반복적 과정을 Fig. 3에 도식적으로 나타내었다[9]. Safety case의 성공적인 개발에 중요한 결정요인들(decision points)은 다음과 같다.

- 안전성평가에 따라 safety case를 구성하고 제시하는

사업자에 의한 결정으로 이 결정은 안전성평가의 일부로 수행되는 신뢰도 평가에 기초를 두고 있다.

- 제안된 safety case의 수용성을 고려한 규제자와 다른 이익집단들의 결정으로 이 결정의 결과는 safety case 내 신뢰도진술을 제공한다.

2.3 해외에서의 safety case 개발 현황

2.3.1 스위스

스위스에서는 방사성폐기물의 지층처분을 위해 Sectoral Plan에 의한 3단계에 걸친 부지선정 작업을 현재 진행 중이며 각 단계별로 safety case를 개발하여 활용하고 있다 [15]. 1단계에서는 광범위한 이해당사자들과의 협의과정을

통해 고준위방사성폐기물 처분을 위한 3개 지역과 중·저준위방사성폐기물 처분을 위한 3개 지역을 제안하였다. 이 Sectoral Plan 1단계는 2008년도에 시작하여 보고서를 완성하여 규제기관에 제출되었으며, 이는 다양한 이해당사자들의 검토를 거쳐 2011년 연방의회 승인을 받고 2단계 Sectoral Plan 수행을 확인 받았다.

2단계에서는 이해당사자들의 참여를 통해 각 지역에서의 지상시설 부지를 선정하고 안전논거(safety arguments), 피폭선량에 대한 정량적 분석, Sectoral Plan에서 정의된 안전과 기술적합성에 관한 정성적 분석 등을 통해 각각의 방사성폐기물 처분을 위한 최소 2개 지역을 선정하였다. 또한 중요한 안전관련 특성을 이용하여 각 지역들에 대해 정성적인 비교분석을 수행하였다. 2단계는 2012년에 시작하여 보고서를 완성하여 2015년에 정부에 제출하였고, 2016년 연방의회 승인을 기대하였으나 스위스 규제기관인 ENSI(Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate)에서 사업기관인 Nagra(Swiss National Cooperative for Radioactive Waste Management)에 공학적 타당성 관련 지표에 관한 추가적인 정보제공을 요청함으로써 6개월 또는 12개월 정도 지연될 예정이다.

3단계에서는 추가적인 부지조사를 수행하여 인허가를 위한 부지를 선정하고, 통합지질 해석, 시설 설계, 안전성평가 및 분석 등의 연구를 수행하고, 일반 인허가 서류를 작성하여 규제기관에 제출할 예정이다. 이러한 부지선정 단계에서 가장 지배적인 요인은 안전성과 기술 적합성 확보이며 포괄적 분석 단계인 1단계에서부터 시작하여 3단계에서는 상세 safety case 개발이 수행될 예정이다. 3단계 safety case에서는 약 30년에 걸친 연구개발 정보와 경험뿐만 아니라 부지선정 과정에 필수적인 초기의 보고서들도 함께 활용될 예정이며 현상학적 분석, 시나리오 분석, 시스템 분석, 결정론적 및 확률론적 피폭선량 평가와 함께 예비 운영 중 안전성평가도 포함될 예정이다. 이 3단계 Sectoral Plan 결과인 일반 인허가 서류는 2022년도에 정부에 제출될 예정이며 정부의 인허가는 2027년 이후에 이루어질 것으로 기대하고 있다.

2.3.2 일본

일본에서는 사용후핵연료 재처리 과정에서 발생하는 유리화 고준위방사성폐기물 처분이 주된 관심사였으며 고준위방사성폐기물 심층처분에 관한 연구개발 보고서인 H12를 발간하였다[16]. 이 보고서에서 일본에서의 고준위방사성폐기물

심층처분은 타당하며 일정 지질요건을 만족하는 부지에 대해 실질적으로 적용 가능하다는 결론을 도출하였다. 그러나 2011년 발생한 일본 대지진으로 인한 후쿠시마 원전사고 이후 사용후핵연료 직접처분에 대한 연구를 수행하여 이에 관한 safety case 보고서를 작성하였다[17]. 또한 내부검토를 위한 워크숍과 국제 전문가들을 활용한 국제 워크숍을 개최하여 이 보고서를 보완하고 있다. 이 보고서에는 사용후핵연료 직접처분에 관한 연구개발 정보, 처분개념과 연구개발 프로그램에 관한 국제동향, 공학적방벽 설계와 예비 안전성평가, 미래 연구개발 방향 등이 수록되어 있다. 사용후핵연료 직접처분에 관한 safety case 검토 결과로 기술적 적합성, 다양한 지질환경, 공학기술, 안전성평가 등에 관한 문제점 등을 해결해야 할 기술적 현안으로 도출하였다.

2.3.3 미국

미국에서는 지난 20년 동안 장반감기 방사성폐기물 처분을 위한 WIPP (Waste Isolation Pilot Plant) 시설[18]과 사용후핵연료 직접처분을 위한 유카산 처분시설[19]에 대한 종합 안전성평가(TSPA: Total System Performance Assessment)를 수행하였다. 이 종합 안전성평가는 시설의 건설과 운영을 위한 인허가 서류에서 가장 중요한 부분을 차지하며 safety case와 동일한 개념으로 활용되고 있다[19]. 그리고 WIPP과 유카산 처분사업에 대한 정량적인 안전성평가 및 분석 결과는 safety case의 매우 중요한 부분임이 확인되었다. WIPP 시설에 대해서는 매 5년마다 변화된 환경과 자료를 고려한 안전성평가를 재 수행하여 운영허가 갱신을 위한 인허가 서류를 제출하고, 6개월간의 검토과정을 거친 이후에 운영허가를 받고 다시 운영한다[18]. 사용후핵연료 직접처분을 위한 유카산 처분사업은 현재 정치적인 이유로 중단된 상태이지만 에너지성(DOE: Department of Energy)에서는 WIPP과 유카산 처분사업의 안전성평가에 관한 경험을 바탕으로 미국 내에서 가능한 처분대안에 대한 안전성평가 연구를 수행하고 있다. 이것은 다양한 처분대안의 적합성 평가의 중요한 도구로 활용될 뿐만 아니라 safety case 보고서의 중요한 요소로 활용될 예정이다.

2.3.4 스웨덴

스웨덴에서는 2011년도에 KBS-3 (kärnbränslesäkerhet-3, nuclear fuel safety-3) 처분개념을 활용한 사용후핵연료

직접처분을 위한 처분시설의 건설 및 운영을 위한 인허가 서류로 안전성평가 보고서인 SR-Site를 작성하여 제출하였다 [20]. SR-Site 보고서의 주 목적은 KBS-3 처분개념의 장기 안전성을 입증하는 것이다. SR-Site 보고서와 여러 보조 문서들이 스웨덴의 처분사업을 위한 safety case 보고서를 구성하게 된다. 스웨덴에서 인허가는 단계별로 이루어지며 처분시설 건설을 위한 굴착, 폐쇄 후뿐만 아니라 운영에 관한 예비 안전성평가뿐만 아니라 시운전, 정상 운영 및 폐쇄 허가 단계 등이 포함되며 각 단계별로 safety case 보고서가 제출되고 독립 검토를 거쳐 규제기관의 허가를 받아야 한다. Safety case 보고서를 구성하는 대부분의 요소들은 NEA[5]의 정의에 따라 작성되어 수록되어 있으며 일부 요소들은 다른 보조 문서들에 포함되어 있다[21].

이들 safety case 관련 보고서들은 스웨덴 규제기관인 SSM (Swedish Radiation Safety Authority)과 Land and Environmental Court에 의해 검토되고 있으며, 인허가 결정에 관한 제안사항과 인허가 조건에 관한 보고서를 작성하여 정부에 제출할 예정이다. 또한 이 보고서들은 NEA 주관으로 국제 전문가들로 구성된 검토자들에 의해 장기 안전성 확보와 신뢰성에 관한 독립 검토가 수행되고 검토 보고서가 스웨덴 정부와 모든 이해당사자들에게 제출되었다[22].

2.3.5 핀란드

핀란드에서는 2012년 Olkiluoto 지역에 사용후핵연료 직접처분을 위한 처분시설 건설을 위해 예비 안전성평가 보고서와 장기 안전성 관련 safety case 보고서인 TURVA-2012[23] 보고서를 작성하여 규제기관에 제출하고, 2015년 건설허가를 획득하였다. 2020년에는 처분시설 운영을 위한 최종 안전성평가 보고서를 제출하고 2020년 초반에 운영을 개시할 예정이다. 핀란드에서는 safety case 보고서 작성을 위한 포트폴리오를 개발하여 활용하였으며 이 포트폴리오는 safety case 보고서와 보조문서들로 구성되어 있다. 이 포트폴리오에 의한 보고서들은 처분시설 설계, 성능 평가와 안전성평가 및 분석을 통하여 처분시설의 장기 안전성과 관련된 법적요건과 규제요건 만족 여부를 확인하는데 활용되고 있다. 비록 자료와 모델에 있어서 불확실성이 존재하며 향후 연구개발을 통해서도 일부는 이러한 불확실성이 제거되지 못할지라도 처분시스템의 건전성은 확보할 수 있으며 불확실성을 고려하더라도 안전요건의 만족여부에

관한 결론은 유지될 수 있음을 safety case 개발을 통해 확인하였다.

2.4 KAERI의 safety case 개발 현황

국내에서는 중·저준위방사성폐기물 처분시설인 월성 환경관리센터의 처분안전성을 제시하기 위해 간단한 safety case 보고서가 작성된 것이 있지만[24], 고준위방사성폐기물의 심층처분을 위한 safety case가 개발된 적은 없다. 현재 KAERI에서 파이로공정폐기물 심층처분을 위한 safety case를 개발 중에 있다.

KAERI에서는 2012년에 파이로공정폐기물 처분시스템의 심층처분에 관한 기초적인 형식을 갖춘 safety case를 KURT (KAERI Underground Research Tunnel)에서 생산된 자료들을 바탕으로 작성하였다[25]. KURT 부지에 관한 지질 및 수리지질학적 특성에 관한 현장 조사를 수행하여 획득한 부지 자료를 안전성평가 입력자료로 활용하여 가상의 처분시설 및 지표환경에 대한 처분안전성평가를 수행하였다. 수행된 과정 및 결과는 보고서로 작성되어 IAEA에서 추천한 해외전문가들의 검토(peer review)와 평가를 받았다[26]. 해당 보고서는 safety case의 형식을 부분적으로 채용하였으나 안전성평가에 관한 내용이 대부분이었다. 또한 safety case에서 제시되어야 하는 문서에 제시된 자료, 분석방법, 결과에 대한 신뢰성의 확보, 투명성 및 추적 가능성의 제시, 불확실성에 대한 평가 등에 대한 내용이 적절하게 언급되지 못하였다. 이후에 KAERI에서는 고준위방사성폐기물의 처분을 위해 해외 전문기관(Saario & Riekkola, Finland)의 자문을 받아 safety case 개발 계획 및 그 이행 방안을 수립하였다[27, 28]. 이는 IAEA 등 국제기관의 지침을 반영하여 작성되었으며, 안전요건 등을 포함한 처분시스템 설계의 기초사항, 처분부지, 폐기물 유형, 공학적방법, 처분시설 설계, FEP (Features, Events, Processes), 핵종이동 시나리오, 모델과 자료, 안전성평가, 보조적인 고려사항 등을 포함하는 종합보고서 형태로 구성되었다[28].

현재 KAERI에서는 KURT의 2단계 확장 건설이 완료되면서 획득한 KURT 현장 자료와 2012년 이후에 수행된 연구 결과들을 기반으로 파이로공정폐기물 처분시스템 개념 개발 및 개념 설정을 목표로 하는 safety case 보고서를 준비 중이다. 이 보고서는 해외 전문기관의 자문을 받아 구성된

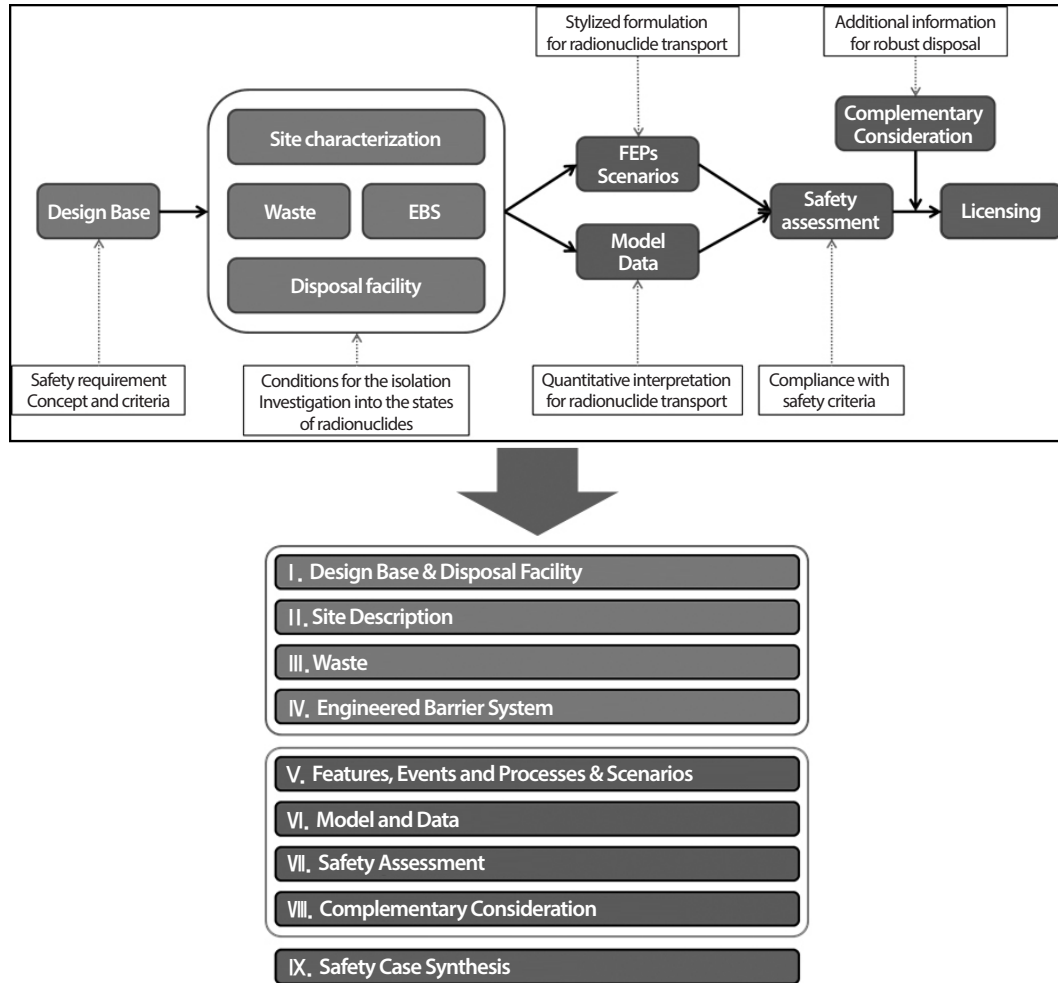


Fig. 4. Restructured safety case reports being developed by KAERI.

보고서를 기본으로 처분시스템의 안전성 확보에 관한 판단 및 평가의 근거, 자료 작성 및 해당 자료의 타당성에 대한 근거를 제시할 수 있는 특성 별로 분류하고 관련된 연구 항목 및 결과에 따라 재구성되어 Fig. 4와 같은 보고서로 작성될 예정이다. 이 보고서는 처분시설 건설 및 운영 등에 관한 인허가를 발급 받기 위해 처분 사업자에 의해 작성되는 일반적인 개념의 safety case 보고서와는 달리 연구기관에 의해 작성하는 safety case 보고서이므로 연구개발 관점에서 파이로공정폐기물의 심층처분시스템의 개념 설정과 향후에 필요한 연구 항목의 도출에 중점을 두고 있다. KAERI에서 준비 중인 safety case 보고서의 목적을 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 파이로공정폐기물 심층처분을 위한 처분시스템 개념 설정의 안전성평가 및 신뢰도 확보
- 향후 국내에서 수행될 고준위방사성폐기물 처분사업의 신뢰성 구축을 위한 R&D 차원의 방안 제시
- KAERI의 지하처분연구시설인 KURT 부지를 기반으로 이루어진 고준위방사성폐기물 처분연구 결과의 정리
- 기 수행된 연구결과와 정리를 통해 향후 수행할 필요가 있는 연구주제와 연구항목의 도출과 제안
- 안전성평가에 필요한 입력 자료의 safety case 보고서 적용 및 신뢰성 확보 방안 제시
- 방사성폐기물 처분안전성 및 신뢰도 확보를 위한 safety case 보고서 개발 방향 및 형식의 제안

3. 처분안전성 신뢰도 향상 방안

3.1 Safety case에서 신뢰도 향상

고준위방사성폐기물의 심층처분 장기 안전성에서 신뢰도는 신뢰가 획득되고 소통되는 방법과 함께 방사성폐기물 관리에서 매우 중요한 주제이다. 신뢰의 기술적 관점들(특히 모델검증의 개념)은 그 동안 많은 논쟁의 주제가 되어 왔다. 이러한 논쟁은 처분시스템의 외부환경과 인간활동에 의해 영향을 받고 완벽하게 특성화될 수도 없는 처분시설 및 주변 환경과 같은 열린계(open system)의 진화는 완벽하게 기술하는 것이 불가능하다는 사실에 기인한다. 그러나 처분시설 개발의 중요한 의사결정에서 완벽한 기술이 꼭 필요한 것은 아니다. 이것은 처분시설 개발은 단계적으로 진행되고, 처분시설 개발단계에 따라 이해의 심도와 의사결정을 지원하기 위한 다양한 기술정보들이 달라지기 때문이다. 실질적으로 의사결정에 필요한 신뢰도를 제공하고, 미래의 개발단계에서 안전을 보완하고, 기술의 불확실성을 다룰 수 있는 효과적인 전략이 존재한다는 것을 입증하는 safety case를 제공하면 되는 것이다. 따라서 safety case는 처분안전성의 신뢰도를 확보할 수 있는 가장 효과적인 방법이라 하겠다.

안전성평가에서 신뢰를 구축하는 방법은 처분시설 개발 진행과정에서 취해진 결정들이 충분한 근거를 가지도록 해야 한다. 따라서 safety case는 신뢰를 구축하기 위해 도입된 원칙들과 방법들을 명확히 해야 한다. Safety case의 신뢰도 구축과 관련하여 NEA에서는 다음과 같이 내용들을 제시하였다[9].

- Safety case는 평가에 의해 지시된 안전성의 신뢰도 구축을 위해 수행되는 방법들을 명확히 해야 한다.
- 평가근거는 safety case의 주요 원소이다. 평가에 의해 지시된 안전성의 신뢰도 구축을 위해서는 평가근거 요소들(여기에서는 안전성전략, 시스템개념, 평가능력 등을 요소로 제시하고 있다)의 신뢰도가 평가되어야 한다. 평가근거 요소들은 필요 시 신뢰도 증진을 위해 수정되어야 한다.
- 신뢰도 평가와 증진은 safety case의 개발 과정에서 반복적으로 수행되어야 한다.
- 필수 불가결한 불확실성의 존재 하에서 실시된 평가에 의해 지시되는 처분안전성의 신뢰도를 평가하기 위한

방법들이 존재한다. 그리고 많은 경우에(불확실성들의 결과들이 평가되는 경우에) 안전성이 특정한 불확실성들에 의해 보완될 수 있는 지 없는지는 민감도 분석을 통해 결정할 수 있다.

- 시스템 개념을 강건하게 하고, 평가능력의 질을 향상시키고, 성능평가의 신뢰성을 증진하고, 미결의 안정성 관련 이슈들을 취급하는 안전성 전략의 적정성을 향상시킴으로써 안전성평가에 의한 처분안전성의 신뢰도는 증진될 수 있다.
- 자연적인 시스템들(즉, 자연유사물들)은 매우 장기간에 걸쳐 진화되어 왔기 때문에 처분안전성의 정성적인 평가와 신뢰도 향상에서 중요한 역할을 한다.
- 성능평가 결과들에 의해 표시되는 전체 처분안전성에서 신뢰도진술은 safety case의 한 부분이고, 정해진 결정들과 관련하여 개발된 논거들의 평가가 safety case에 포함되어야 한다.

고준위방사성폐기물의 심층처분 safety case에서 중요한 도전적 과제는 고준위방사성폐기물의 방사능이 시간의 경과에 따라 줄어들기는 하겠지만, 수만에서 수십만 년의 상당히 오랜 기간 동안 여전히 위해 하게 남아있다는 문제이다. 이렇게 긴 시간 동안 다양한 사건과 과정들이 각기 다른 많은 시간대에 걸쳐 일어나면서 처분시설과 그 주변 환경에 영향을 미치게 된다. Fig. 5에는 처분안전성평가 모델링의 다양한 원소들과 이러한 원소들의 역할, 시간에 따른 원소들의 예측가능성에 따른 영향들을 제시하였다[29]. 일반적으로 시간 경과에 따라 불확실성은 증가하게 되므로 이러한 요인들을 예측하여 처분안전성의 신뢰도를 제공하는 것은 매우 어렵다. 따라서 방사성폐기물의 처분안전성에서 시간척도(time scales)는 처분안전성을 보장하는 수준과 밀접한 관련이 있다[30].

고준위방사성폐기물의 심층처분에서 시간척도를 다루는 방법들은 윤리적 원칙들, 시간에 따른 위험도의 진화, 처분시스템의 진화에 따른 불확실성(아울러 그 불확실성이 어떻게 진화하는지), 지질학적 환경의 안정성과 예측가능성 등에 영향을 받게 된다. 역으로 말하면, 시간척도를 다루는 방법들은 처분시설 개발계획과 시행의 규제적 요구사항, 부지 결정, 처분시설 설계, safety case의 개발과 제시, 감시 요구사항 등과 같은 처분시설 폐쇄전과 폐쇄후의 관리계획과

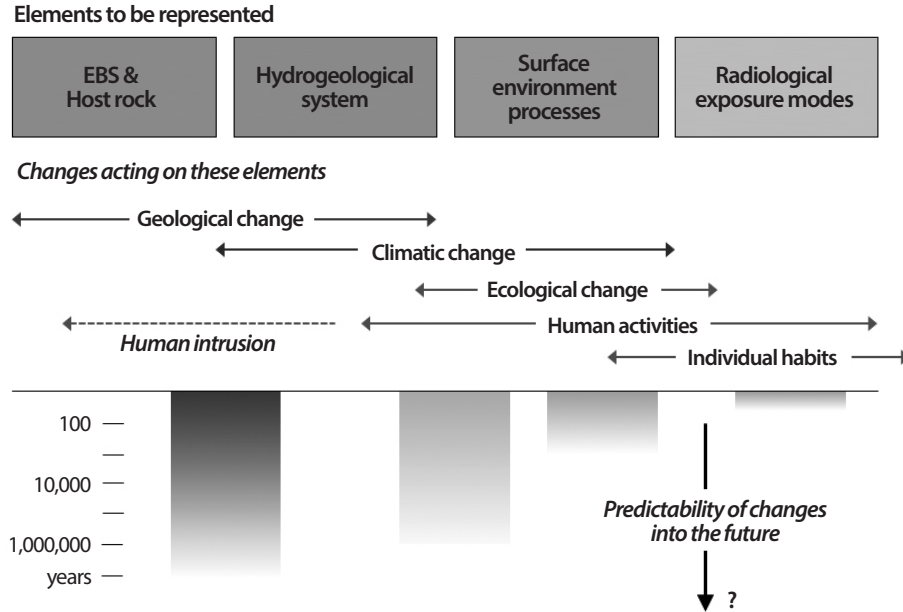


Fig. 5. Elements generally represented in safety assessment modeling, the changes that act on these elements and the impact on the predictability of the elements over time [29].

같은 다양한 국면들에 영향을 미칠 수 있다.

처분시스템의 시간적 진화에 따른 처분안전성의 신뢰도 확보와 관련하여 NEA에서는 다음과 같은 결론들을 도출하여 제시하였다[30].

- Safety case에서 처분시설 및 주변환경 거동의 진화와 관련된 예측가능성의 제약들이 언급되어야 한다.
- 안전성평가에서 평가된 선량과 위험도가 개인들에게 미칠 잠재적인 영향의 해설적 예로써 설명되어야 한다.
- 선량과 위험도에 관한 보조적인 논거들이 필요하다. 특히 정량적인 안전성평가가 지원할 수 있는 기간 이후의 시간대에서 필요하다.
- 고준위방사성폐기물 정치 후 수백 년 동안의 정보는 일반대중들의 관심이 높으므로 이들에게 제공할 것을 염두에 두고 특별한 관심을 가질 필요가 있다.

3.2 처분안전성 신뢰도 향상을 위한 제안

앞에서 이미 언급한 바와 같이 처분안전성 신뢰도를 향상하기 위해서는 매우 다양한 노력들이 필요할 것이다. 그러나

여기에서는 국내의 고준위방사성폐기물 관리 현황과 처분 safety case 개발 현황에 근거하여 처분안전성의 신뢰도 향상을 위한 실천적 방안들을 다음과 같이 선정하여 제시하고 논의한다.

- 신뢰할 수 있는 정보자료의 구축
- 안전성 관련 과정들의 이해
- 안전성평가의 불확실성 저감
- 이해당사자와의 의사소통
- 공정성과 투명성 확보

3.2.1 신뢰할 수 있는 정보자료의 구축

처분안전성의 신뢰도 향상을 위해서는 safety case에 바탕을 둔 다양한 연구들을 통해 정보자료들을 모으고, 체계적으로 구축하는 것이 필요하다. 이러한 정보자료 구축의 개념을 Fig. 6에 제시하였다. 정보 피라미드(pyramid)의 개념은 자연유사정보와 함께 언급되어야 할 질문과 이슈들의 대상을 고려하기 위한 유용한 도구로 처음 개발되었다[31]. 그러나 이 개념은 safety case에도 확장되어 적용될 수 있다. 그림에서 보이는 바와 같이 실제 안전성평가 실행자(즉, 사업자)는

다양한 데이터와 개념들에 바탕을 둔 구체화된 질문과 이슈들을 요구하고 있지만, 일반 대중과 의사결정론자는 높은 수준의 소수의 질문과 이슈들만을 요구하고 있음을 알 수 있다. 아울러 이 그림은 이들 두 그룹간의 관심 차이와 요구하는 정보의 차이를 극복하기 위해 전달자(communicator)가 필요함을 보여주고 있다. 이러한 정보 전달자의 역할은 객관적 입장에 있으면서 해당 분야에 지식과 통찰력을 가진 전문가가 수행하는 것이 바람직할 것이다.

처분안전성의 신뢰성을 확보하기 위한 자료와 정보들은 기본적으로 safety case에 근거한 실험실적 연구, 현장 연구, 지하연구시설을 활용한 연구, 자연유사연구 등을 통해 수집되어야 한다. 이러한 개념을 Fig. 7에 도식적으로 나타내었다. 특히, 일반대중이 상대적으로 쉽게 이해할 수 있는 자연적 및 인위적 유사물들에 대한 정보와 자료는 공학적방벽 구성물들의 장기안정성에 관한 증거를 제공하고, 단기적이고 소규모인 실험들에 내재된 시간적 공간적 규모의 한계들을 극복할 수 있게 한다. 이러한 유사물들은 우라늄, 유리, 구리, 철, 니켈, 벤토나이트, 시멘트 및 다양한 암석들의 장기거동에 대한 정보도 함께 제공한다. 또한 유사물들은 실험실 연구와 지하연구시설의 부지특성 및 실험실적 연구들로부터 얻어진 자료들을 보완한다.

3.2.2 안전성 관련 과정들의 이해

처분안전성평가에서는 평가를 위한 시나리오의 구성을 위해 다양한 FEP를 고려한다. 시간, 속도, 발생빈도 등에서 매우 광범위하게 변화하는 사건과 과정들은 처분시설과 주변 환경의 진화에 영향을 미치게 된다. 일반적으로 심부 지하에 처분되는 고준위방사성폐기물들은 처분용기에 포장되어 처분공에 정치된다. 처분시설 폐쇄 후에 금속 처분용기가 부식되어 기능을 상실하면 방사성폐기물에 함유된 방사성핵종들은 지하수에 용해되어 유출되고, 완충재와 같은 공학적 방벽과 균열암반에 존재하는 지하수를 따라 생태계로 이동하게 된다. 지하수를 따라 이동하는 방사성핵종들은 매질에 존재하는 다양한 구성 물질들(즉, 벤토나이트와 같은 점토 물질, 터널에 존재하는 시멘트, 암반의 구성 광물, 균열에 존재하는 이차광물 등)과 매우 복잡하고 다양한 상호작용을 하게 된다. 따라서 처분안전성평가를 포함하는 safety case 개발을 위해서는 이러한 상호작용을 모두 이해하고 이를 반영한 안전성평가 도구를 개발하고 관련 자료를 확보해야 한다.

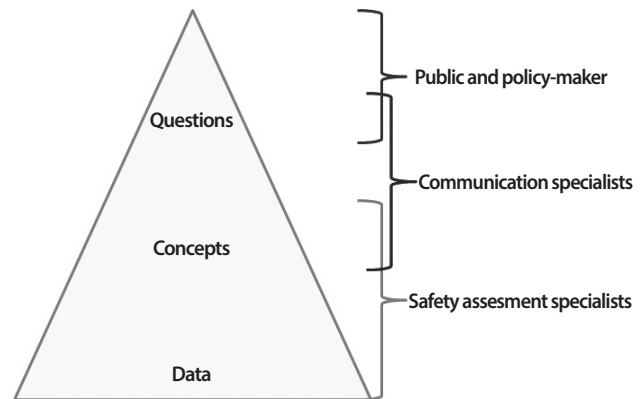


Fig. 6. Information pyramid for confidence in disposal safety [31].

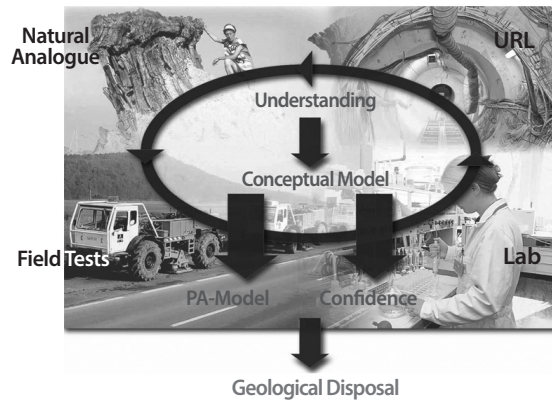


Fig. 7. Approaches for the confidence improvement in the safety for geological disposal of high-level radioactive waste.

그러나 자연에서 발생하는 모든 상호작용들을 정확하게 이해하고 safety case에 고려하는 것은 현실적으로 불가능하기 때문에 이로 인한 불확실성은 고유하게 존재하게 된다. 따라서 안전성 관련 현상에 대한 최신의 과학기술적 이해와 연구자들의 연구결과들을 바탕으로, 안전성 측면에서 타당하고 중요한 과정들을 평가하여 고려하는 것이 현실적이다. 특히 방사성핵종의 다양하고 복잡한 상호작용을 이해하기 위해 최신의 기술을 이용한 미시적 및 장기적 관점에서의 연구는 처분안전성평가 기술의 신뢰도 확보를 위해 꼭 필요한 연구라 하겠다. 이는 최신의 과학과 기술적 이해에 바탕을 두지 않은 안전성평가 결과는 이해당사자(특히 규제자)를 설득하기 어렵기 때문이다. 따라서 사업자뿐만 아니라 규제자와 정부도 이러한 연구를 처분사업 초기부터 처분시설 폐쇄

이후까지 지속적이고 지원해야 한다.

일반적으로 처분안전성 측면에서 타당한 사건과 과정들의 확인은 사업자가 해야 할 업무이지만, 때로는 규제자가 사업자와의 의사소통이나 자신들의 이해를 바탕으로 최소한 safety case에 포함되어야 한다고 하는 것을 직접 명시하는 경우도 있는데, 주로 다음과 같은 것들이다.

- 주요 기후변화(자연적 또는 인위적)
- 예외적인 수직적 지질학적 이동
- 장기 지진활동
- 화산
- 인간 활동에 의한 방사성핵종의 유출

예를 들어, 미국 유카산 처분시설의 경우에 규제지침에 따르면 사업자는 10,000년에 걸쳐 적어도 10,000번에 한번 발생하는(즉, $10^{-8} \cdot y^{-1}$ 보다 큰 확률을 가진) 사건들을 고려해야 하고, 만약 특정 FEP의 누락에 의해 최대피폭개인(maximally exposed individual)에 대한 방사선적 피폭이나 방사성핵종의 유출에 상당한 변화가 발생한다면 이를 자세히 평가해야 한다고 규정하고 있다[32].

3.2.3 안전성평가의 불확실성 저감

처분안전성평가의 불확실성은 일반적으로 안전성평가를 위한 시나리오, 평가 모델, 평가 자료와 같은 세 개의 주요 구성요소들로부터 기인한다고 알려져 있다. 그러나 처분안전성평가의 불확실성은 시간과 공간의 제약으로 인한 불확실성이 가장 근본적인 원인이라고 하겠다. 고준위방사성폐기물의 심층처분은 안전성평가의 대상 기간이 만 년에서 수십만 년에 이르기 때문에(반면 실험실이나 현장에서 얻은 자료들은 길어야 수십 년에 걸쳐 얻은 자료들이다) 이러한 오랜 시간 동안 수백 미터 심부 지하에 위치하는 처분시설의 성능과 거동을 예측하는 것에는 불확실성이 필연적이다. 아울러 소규모의 실험실이나 현장 연구로부터 얻은 자료들을 대규모의 처분시설에 적용함에 따른 공간적 불확실성 또한 극복하기 쉬운 문제가 아니다.

따라서 처분안전성평가에 필수적으로 내재되어 있는 불확실성을 극복하고 저감하는 것이 바로 safety case 개발의 이유이며 목적이라 할 수 있다. 처분안전성평가에서 불확실성을 감소하기 위해서는 먼저 불확실성의 주요 원인들을

확인하고 이를 해결하기 방법론들을 개발하여 적용하고, 안전성평가에서 이를 적용하기 위한 방법들(예를 들면, 민간도 분석) 실행하고, 그 결과들을 입증할 수 있는 증거와 해석들을 수집하여 제시하는 것이 필요하다. 특히, 처분안전성에서 불확실성을 평가하는 방법으로는 특정 시간대(time frame)에 걸쳐 발생하는 가장 민감한 변수들을 확인하는 민감도 분석 방법이 자주 사용된다. 안전성평가에서 가장 중요한 불확실성은 안전기능(safety function)에 기여하고 safety case의 기본적인 논거들을 구성하는 것들(예를 들면, 스웨덴 KBS-3 개념에서의 처분용기)의 특성과 과정들에게 확실하게 영향을 미치는 것들이라 하겠다. 안전성평가를 포함하는 safety case의 불확실성 관리의 한 예로 Table 1에는 스위스의 Opalinus Clay 프로젝트에서 확인된 불확실성들의 주요 원인들, 이러한 불확실성에 영향을 미치는 시스템 구성물들, 시스템의 교란이 발생하는 시간적도, 어떻게 이런 교란들이 안전성평가에서 취급되는지 등을 나타내었다[33].

3.2.4 이해당사자와의 의사소통

Safety case를 정의하는 핵심적인 문구는 “다중의 증거, 해석과 논거(multiple lines of evidence, analyses and arguments)” 라고 할 수 있다. 처분안전성 확보에서 안전성평가 결과 이외의 다른 다중의 증거, 해석과 논거가 필요한 이유는 바로 처분안전성이란 것이 사업자, 규제자, 연구자 등 전문가 집단뿐만 아니라 정부, 발전사업자, 환경단체와 같은 NGO (Non-Governmental Organization), 일반 대중 등 다양한 이해당사자와 관련되어 있기 때문이며 처분안전성에 신뢰성을 확보하기 위해서는 이러한 이해당사자 간의 의사소통이 필수적이기 때문이다. 특히, 처분개발 프로그램의 다양한 단계에 존재하는 중요한 결정들은 전문가 집단에 의해서만 이루어지는 것이 아니라 일반 대중이나 비전문가 집단이 참여하게 되므로 이러한 이해당사자간의 의사소통은 매우 중요할 수 있다.

처분안전성과 관련된 어떤 이슈에 대해 이해당사자들의 관심과 이해의 수준은 다를 수 있다. 따라서 이러한 이슈를 해결하는 방법이나 결과에 대한 신뢰성의 수준도 다를 수 있다. 이러한 예로 Fig. 8은 처분과 관련된 몇 가지 이슈들에 대한 대중과 원자력전문가들 사이의 관심의 차이를 보여주고 있다[34]. 방사성폐기물 처분과 관련하여 전문가들은 크게 중요하게 생각하지 않는 이슈들에 대해 일반 대중은 매우

Table 1. Examples from the Swiss Project Plains Clay of some key uncertainties, the system components that these uncertainties affect, the time frames over which perturbations to the system might occur, and how these perturbations were treated in the safety assessment [33]

Source of uncertainty	System components affected (including biosphere)	Time frames when relevant	Treatment
<i>Climatic effects</i>			
Effects of glaciation	Biosphere, geosphere plus potential for transport along tunnels/ramp/shaft	> 10 ⁴ years (timescale to next glacial period)	Assumed negligible in the Reference Case. Alternative case considers glacial induced flow in host rock.
<i>Geological characteristics</i>			
Transport characteristics of confining units above and below Opalinus Clay host rock	Geosphere	> 10 ⁵ years (approximate minimum transport time through Opalinus Clay host rock)	Transport times through confining units conservatively neglected in Reference Case, but considered in an alternative conceptualization.
<i>Spent fuel (SF) and vitrified high-level waste (HLW) near field</i>			
Extent and effects of bentonite thermal alteration	Inner part of bentonite buffer	Times beyond SF/HLW canister breaching time (10 ⁴ years in Reference Case)	Assumed negligible in the Reference Case. Alternative case considers limited altered layer around canisters.
Glass dissolution rate	Waste matrix	Times beyond HLW canister breaching time up to time of complete waste form dissolution	Reference Case rate is considered realistic. Pessimistic increased rates considered in deterministic uncertainty analyses.
<i>Biosphere</i>			
Possibility of alternative discharge areas	Biosphere	Timescale of geomorphological change; i.e., times beyond about 10 ⁴ years.	Stylized-different geomorphological situations assumed to exist for all time.
<i>Human actions</i>			
Deep groundwater extraction	Biosphere plus confining unit	All times following loss of records of repository and time needed for radionuclides to break through (near field, geosphere)	Assumed not to occur in Reference Case. Possibility considered in one realization of the alternative scenario addressing release affected by human actions.

심각하게 생각하고 있음을 알 수 있다. 특히, 일반 대중들은 안전성평가의 예측평가들 자체의 특성을 이해하고 받아들이기 쉽지 않다. 보통 사람들은 어떤 예측을 수행하는 것은 보편적으로 알려진 경험들에 기초해야 한다는 시각을 가지고 있다. 따라서 매우 복잡하고 먼 미래를 예측해야 하는 safety case에서 어떠한 과학적 논쟁이나 증명도 일반 대중들에게 확신을 주기는 쉽지 않다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 방사성폐기물 처분에 포함된 모든 이해당사자들에게 처분 안전성에 대한 적절한 설명이 이루어져야 하고, 그들의 이해와

관심의 수준에 적합한 처분안전성을 입증하는 것이 필요하다. 한 예로 자연유사는 처분안전성평가에서 정량적인 정보를 제공할 뿐만 아니라 다양한 이해당사자들에게 설명적이고 비기술적인 정보를 제공함으로써 의사소통을 증진하는 역할을 할 수 있다[35].

어떤 경우에는 자연과 처분시설을 단순 비교함으로써 자연유사 정보를 다양한 대중들에게 광고와 관측용 자료로 활용하기도 한다. 그러나 자연유사 정보의 대중보급을 위한 자료로서 활용은 사실 자연유사물이 상당히 가치가 있고,

정보전달력이 좋으며, 사용된 자료들이 타당하고, 무엇보다도 정직하다는 가정 하에 활용되어야 한다. 그 동안 원자력 사업자들은 자연유사물의 의미를 솔직하게 전달하지 않고 때때로 사실을 과장하여 말하거나 과도하게 단순화하는 경향이 있었다. 과학적 자료들을 대중에게 쉽게 전달하기 위해 단순화하는 과정이 꼭 필요하지만, 단순화와 사실의 잘못된 전달에는 엄청난 차이가 있다. 지나친 단순화로 의미가 잘못 전달되는 경우의 대표적인 예는 가봉의 Oklo 자연유사부지에 관한 자연유사 정보의 전달에서 나타난다. Oklo는 처분시설의 완벽한 유사물도 아니고, Oklo 부지의 조건들은 너무 복잡하기 때문에 과학자들에게조차도 방사성폐기물 처분시설이 안전할 것이라는 명백한 증거를 제시하지도 못하는 것이 사실이다. 그럼에도 불구하고 Oklo 자연유사물은 원자력 관련 문헌들에서 처분안전성의 증거로 자주 언급된다.

자연유사물을 이용한 대중과의 의사소통과 처분안전성에 대한 설명이나 교육을 위해서는 브로슈어, 전단지, 광고뿐만 아니라 비디오(예를 들면, 여러 국가들과 방사성폐기물 처분 관련 국제기구들에 의해 공동 출자된 “Traces of the Future” 라는 자연유사 관련 비디오) 등과 같은 매체를 이용하여 관련 사실을 솔직하고 정확하게 전달하는 것이 매우 바람직하다고 하겠다. 아울러 고고학적 유물들은(예를 들면, 스웨덴의 Kronan 대포나 영국의 Hadrian's wall 등) 일반대중이 친숙하게 생각하고 관심을 가지고 있는 것들이기 때문에 설명적 자료로 활용하기에 매우 적합하다. 그러나 이러한 자료들이 어떠한 형태를 가져야 가장 효과적인지를 결정하는 것은 매우 어려운 일이며, 관련 정보와 사실들을 모호하지 않고 단순하게 그러나 과장적이지 않게 설명하는 것이 중요하다.

3.2.5 공정성과 투명성 확보

처분안전성의 신뢰도 향상과 이해당사자와의 의사소통에서 가장 기본적인 것은 과학적 입증자료, 자연유사물, 이해 가능한 해석이나 설명보다도 공정성과 투명성의 확보라고 하겠다. 단순하고 단편적인 예이지만 Fig. 9에 오래 전 유럽에서 EC (European Commission) 주도로 실시된 여러 이해당사자들에 대한 일반 대중의 신뢰도를 조사한 결과를 도표로 제시하였다[33]. 그림에서 제시된 바와 같이 일반 대중은 정부나 사업자보다 NGO와 독립적인 과학자들을 더 신뢰함을

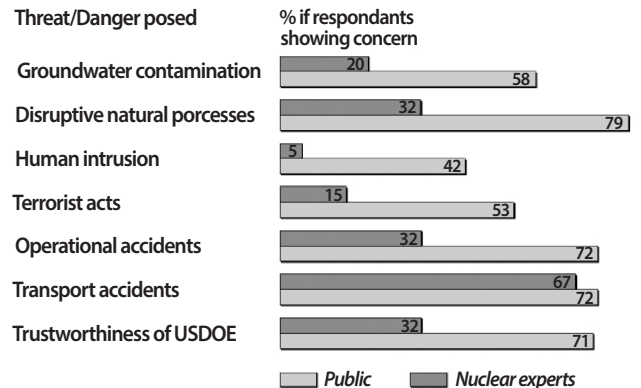


Fig. 8. Different interests between experts and public about some issues related with geological disposal [34].

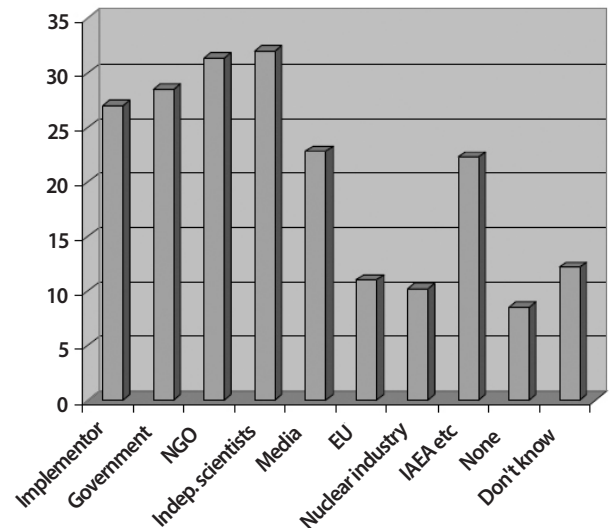


Fig. 9. Result of a poll for “Who is most trusted on radioactive waste by the public?” by European Commission in 2002 [34].

알 수 있다. 이러한 결과는 일반 대중의 관점에서 정부나 사업자보다 NGO와 독립적인 과학자들이 더 공정하고 투명하다고 생각하기 때문일 것이다.

우리나라의 경우, 국가 주도의 고준위방사성폐기물 관리사업의 착수를 위해 사용후핵연료 공론화위원회를 발족하고 이해당사자들(일반대중, 발전소 지역주민, 전문가 등)과의 공청회 및 간담회 등을 통해 다양한 의견을 수렴하여 정부에 ‘사용후핵연료 관리에 대한 권고안’ 보고서를 제출하였다[36]. 또한 이러한 권고보고서를 바탕으로 정부에서는

‘고준위폐기물 관리 기본계획’을 발표하여 고준위폐기물 관리를 위한 기본계획과 추진방향, 추진일정 등을 제시하였다 [37]. 그러나 정부의 이러한 사업 추진은 여전히 발전소 지역주민들이나 NGO 단체, 일반 대중, 심지어는 일부 전문가들의 공감대를 충분히 이끌어 내지 못하고 있다. 이것은 이러한 사업이 공정하고 투명하게 진행될 것이라는 정부와 사업자에 대한 신뢰가 충분히 형성되어 있지 않기 때문일 것이다. 따라서 정부와 사업자는 고준위폐기물 관리 프로그램에 대한 신뢰성 확보를 위해 공정성과 투명성을 바탕으로 둔 국민과의 의사소통 프로그램을 시급하게 개발하여 시행함으로써 신뢰 회복을 위한 노력을 적극적으로 실시할 필요가 있다.

4. 결론

본 연구에서는 고준위방사성폐기물 처분안전성을 safety case의 다양한 측면들에서 고찰하고, 해외의 safety case 개발 현황과 함께 현재 KAERI에서 개발 중인 safety case 개발 전략을 간단히 소개하였다. 아울러 고준위방사성폐기물 처분안전성의 신뢰도 향상을 위해 safety case 기반 하에서 어떤 노력들이 필요한지를 살펴보고 주요 실행 방안으로 1) 신뢰할 수 있는 정보자료의 구축, 2) 안전성 관련 과정들의 이해, 3) 안전성평가의 불확실성 저감, 4) 이해당사자와의 의사소통, 5) 공정성과 투명성 확보 등을 제시하고 이에 대해 구체적으로 논의하였다.

고준위방사성폐기물 처분안전성과 신뢰도 확보를 위한 safety case는 규제기관에서 제시한 방법을 근거로 이해당사자들의 다양한 논의와 요구들을 반영하여 개발되어야 한다. 또한 safety case는 처분시설 개발의 개념개발 단계, 부지조사 및 부지선정 단계, 설계개발 및 건설 단계, 운영 및 폐쇄 단계, 폐쇄 후 기간 등 여러 단계들에서 진화되어야 한다. 그리고 safety case 구성 이후에도 그 내용들은 사업자, 규제자 및 다른 관련자들로 구성된 결정자들에 의해 평가되어야 하고, 중요 결정지점에서의 다양한 요소들을 고려하여 평가되고 반복적으로 수정되어야 한다.

현재 국내에서는 고준위방사성폐기물의 안전한 관리를 위해 정부의 기본계획을 바탕으로 관련 법률 제정을 통한 국가 정책을 준비 중이며, 이에 대한 다양한 이해당사자들의 의견들이 제시되고 있다. 현 세대에서 발생한 방사성폐기물은

현세대가 책임져야 한다는 방사성폐기물 관리의 기본 원칙 하에 safety case에 바탕을 둔 과학기술적인 처분안전성 입증 결과에 근거한 공정하고 투명한 사실과 논거들을 대상으로 이해당사자들과 원활하게 소통해야 하며 이러한 과정을 통해 이해당사자들과의 신뢰를 구축해야 할 필요가 있다.

본 논문에 제시된 내용들은 고준위방사성폐기물의 심층 처분 safety case를 이해하고 국내에서 개발하고 있는 고준위방사성폐기물 처분 safety case 개발 및 실행을 통한 처분 안전성 신뢰도 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대한다. 아울러 고준위방사성폐기물 처분사업의 실행과 신뢰성 구축을 위해 무엇이 필요한 지에 대한 기초적인 정보들도 제공할 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었음(원자력연구개발사업, No. 2012M2A8A5025589).

REFERENCES

- [1] International Atomic Energy Agency (IAEA), “Regulatory Decision Making in the Presence of Uncertainty in the Context of the Disposal of Long Lived Radioactive Waste”, in: Third Report of the Working Group on Principles and Criteria for Radioactive Waste Disposal, IAEA, Vienna (1997).
- [2] European Commission (EC), Establishing a Community Framework for the Responsible and Safe Management of Spent Fuel and Radioactive Waste, EC Report, Council Directive 2011/70/EURATOM (2011).
- [3] International Commission on Radiological Protection (ICRP), Radiological Protection in Geological Disposal of Long-Lived Solid Radioactive Waste, ICRP, Ottawa (2013).
- [4] J. Schröder, N. Rossignol, and M. Van Oudheusden, “Safety in Long Term Radioactive Waste Management: In-

- sight and Oversight”, *Safety Science*, 85, 258-265 (2016).
- [5] Nuclear Energy Agency (NEA), Post-Closure Safety Case for Geological Repositories - Nature and Purpose, NEA Report, NEA-3679 (2004).
- [6] H.J. Choi, J.Y. Lee, and J.W. Choi, “Development of Geological Disposal System for Spent Fuels and High-Level Radioactive Wastes in Korea”, *Nucl. Eng. Technol.*, 45, 29-40 (2013).
- [7] J. Jeong, Y.M. Lee, J.W. Kim, D.K. Cho, N.Y. Ko, and M.H. Baik, “Progress of the Long-term Safety Assessment of a Reference Disposal System for High Level Wastes in Korea”, *Prog. Nucl. Ener.*, 90, 37-45 (2016).
- [8] Nuclear Safety and Security Commission (NSSC), General Guideline for Deep Disposal Facility of High-Level Radioactive Waste, NSSC Notice, 2015-021 (2016).
- [9] Nuclear Energy Agency (NEA), Confidence in the Long-Term Safety of Deep Geological Repositories - Its Development and Communication, NEA, Paris (1999).
- [10] International Atomic Energy Agency (IAEA), The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste, IAEA Specific Safety Guide, IAEA-SSG-23 (2012).
- [11] European Atomic Energy Community, Food and Agriculture Organization of the United Nations, International Atomic Energy Agency, International Labour Organization, International Maritime Organization, OECD Nuclear Energy Agency, Pan American Health Organization, United Nations Environment Programme, and World Health Organization, Fundamental Safety Principles, IAEA Safety Standards Series, IAEA-SF-1 (2006).
- [12] International Atomic Energy Agency (IAEA), Disposal of Radioactive Waste, IAEA Safety Standards Series, IAEA-SSR-5 (2011).
- [13] International Commission on Radiological Protection (ICRP), Radiological Protection in Geological Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste, ICRP Publication, 122 Ann. ICRP 42(3) (2013).
- [14] International Commission on Radiological Protection (ICRP), Radiological Protection Policy for the Disposal of Radioactive Waste, ICRP Publication, 77 Ann. ICRP 27(S) (1997).
- [15] P. Zuidema and J. Schneider, “The Role of Safety Analyses in Site Selection: Nagra’s Experience from the Ongoing Swiss Site Selection Process”, *Symposium Proceedings of the Safety Case for Deep Geological Disposal of Radioactive Waste: 2013 State of the Art*, NEA, Paris (2013).
- [16] Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC), H12: Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan, Project Overview Report, Second Progress Report on Research and Development for the Geological Disposal of HLW in Japan, JNC TN1410 2000-001 (2000).
- [17] Japan Atomic Energy Agency (JAEA), Preliminary Assessment of Geological Disposal System for Spent Fuel in Japan - First Progress Report on Direct Disposal, JAEA, Tokai (2014).
- [18] R. Patterson, “WIPP – Safety Case Evolution of an Operating Repository Facility”, *Symposium Proceedings of the Safety Case for Deep Geological Disposal of Radioactive Waste: 2013 State of the Art*, NEA, Paris (2013).
- [19] P.N. Swift and W.J. Boyle, “Using Safety Assessment Techniques to Build Confidence in Repository Performance: The United States Experience”, *Symposium Proceedings of the Safety Case for Deep Geological Disposal of Radioactive Waste: 2013 State of the Art*, NEA, Paris (2013).
- [20] Swedish Nuclear Fuel and Waste Management (SKB), Long-Term Safety for the Final Repository for Spent Nuclear Fuel at Forsmark. Main Report of the SR-Site Project, SKB Technical Report, SKB TR-11-01 (2011).
- [21] A. Hedin and J. Andersson, “SKB’s Safety Case for a Final Repository License Application”, *Symposium Proceedings of the Safety Case for Deep Geological Disposal of Radioactive Waste: 2013 State of the Art*, Paris (2013).
- [22] Nuclear Energy Agency (NEA), The Post-closure Ra-

- diological Safety Case for a Spent Fuel Repository in Sweden - An International Peer Review of the SKB License Application Study of March 2011, NEA, Paris (2012).
- [23] J. Vira and M. Snellman, "TURVA-2012 Safety Case for Licensing a Spent Fuel Repository at Olkiluoto, Finland", Symposium Proceedings of the Safety Case for Deep Geological Disposal of Radioactive Waste: 2013 State of the Art, NEA, Paris (2013).
- [24] J.W. Park, J.H. Yoon, and C.L. Kim, "A Safety Assessment for the Wolsong LILW Disposal Center: As a Part of Safety Case for the First Stage Disposal", *J. Korean Radioact. Waste Soc.*, 6, 329-346 (2008).
- [25] J.W. Choi, D.S. Bae, S.H. Ji, G.Y. Kim, K.S. Kim, Y.K. Koh, J.S. Kwon, K.W. Park, J.H. Ryu, D.K. Cho, H.J. Choi, J.S. Kim, D.H. Kook, J.Y. Lee, M.S. Lee, J.H. Park, M.H. Baik, J.T. Jeong, C.H. Kang, J.W. Kim, S.S. Kim, N.Y. Ko, J.K. Lee, J.O. Lee, S.Y. Lee, Y.M. Lee, C.K. Park, and T.J. Park, Geological Disposal of Pyroprocessed Waste from PWR Spent Fuel in Korea, Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI) Technical Report, KAERI/TR-4525/2011 (2011).
- [26] International Atomic Energy Agency (IAEA), An International Peer Review of the Programme for the Deep Geological Disposal of High Level Radioactive Waste from Pyro-Processing in the Republic of Korea, IAEA, Vienna (2013).
- [27] N.Y. Ko, J.W. Choi, J. Jeong, C.H. Kang, C.K. Park, Y.M. Lee, H.J. Choi, J.Y. Lee, and D.K. Cho, Generic Safety Case Plan for KAERI, Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI) Technical Report, KAERI/TR-4497/2011 (2011).
- [28] N.Y. Ko, J.W. Choi, J. Jeong, C.H. Kang, C.K. Park, Y.M. Lee, H.J. Choi, J.Y. Lee, and D.K. Cho, Safety Case Implementation Plan for KAERI, Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI) Technical Report, KAERI/TR-4531/2011 (2011).
- [29] Nuclear Energy Agency (NEA), The Role of the Analysis of the Biosphere and Human Behaviour in Integrated Performance Assessments, OECD PAAG document, NEA/RWM/PAAG(99)5 (1999).
- [30] Nuclear Energy Agency (NEA), Considering Timescales in the Post-closure Safety of Geological Disposal of Radioactive Waste, NEA Report, No. 6424 (2009).
- [31] B. Miller, P. Hooker, J. Smellie, J. Dalton, P. Degnan, L. Knight, U. Noseck, L. Ahonen, A. Laciok, L. Trotignon, L. Wouters, P. Hernan, and A. Vela, Network to Review Natural Analogue Studies and Their Application to Repository Safety Assessment and Public Communication (NAnet), Commission of the European Communities Synthesis Report, EUR 21919 (2006).
- [32] US Nuclear Regulatory Committee (US NRC), Part 63 - Disposal of High-Level Radioactive Wastes in a Geological Repository at Yucca Mountain, Nevada, Code of Federal Regulations, Title 10, Part 63, Washington D.C., Unites States, Available from: <http://www.nrc.gov/rad-ing-rm/doc-collections/ruregs/staff/sr1804> (2001).
- [33] Swiss National Cooperative for Radioactive Waste Management (Nagra), Project Opalinus Clay: Safety Report, Nagra Technical Report, Nagra 02-05 (2001).
- [34] R. Alexander and N. Chapman, "Multiple Lines of Evidence, Analyses and Arguments", Safety Principles Course, October 24-27, 2011, Brugg, Switzerland.
- [35] M.H. Baik, T.J. Park, I.Y. Kim, and K.W. Choi, "Research status and roles of natural analogue studies in the radioactive waste disposal", *J. Korean Radioact. Waste Soc.*, 11, 133-158 (2013).
- [36] Public Engagement Commission on Spent Nuclear Fuel Management (PECOS), Recommendation Report on Spent Nuclear Fuel Management, PECOS, Seoul (2015).
- [37] Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE), Basic Plan for High-Level Radioactive Waste Management, MOTIE, Sejong (2016).