

## Technical Standards on the Safety Assessment of a HLW Repository in Other Countries

### 고준위폐기물 처분장 안전성평가 관련 타 국가의 기술기준

Sung Ho Lee<sup>1)</sup> and Yong Soo Hwang

Korea Atomic Energy Research Institute, 1045 Daedeok-daero Yuseong-gu, Daejeon

이성호<sup>1)</sup>, 황용수

한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 1045

(Received February 20, 2009 / Revised April 06, 2009 / Approved July 20, 2009)

#### Abstract

The basic function of HLW disposal system is to prevent excessive radio-nuclides being leaked from the repository in a short time. To do this, many technical standards should be developed and established on the components of disposal system. Safety assessment of a repository is considered as one of technical standards, because it produces quantitative results of the future evolution of a repository based on a reasonably simplified model. In this paper, we investigated other countries' regulations related to safety assessment focused on the assessment period, radiation dose limits and uncertainties of the assessment. Especially, in the investigation process of the USA regulations, the USA regulatory bodies' approach to assessment period and peak dose is worth taking into account in case of a conflict between peak dose from safety assessment and limited value in regulation.

**Key words** : HLW repository, Technical standards, Safety assessment, Assessment period, Peak dose, Uncertainties

#### 요 약

고준위폐기물 처분장의 기본적인 기능은 단기간에 과도한 방사성핵종이 유출되는 것을 방지하는데 있다. 이를 위해서는, 처분시스템의 구성요소들과 관련된 많은 기술 기준이 개발되고 수립되어야 한다. 처분장 안전성평가는 합리적으로 단순화된 모델에 바탕을 두고 처분장의 미래 전개에 대한 정량적인 결과를 산출하므로 안전성평가는 기술기준의 하나로 간주되고 있다. 본문에서는 평가기간, 선량 제한치 및 평가의 불확실성 등을 중심으로 안전성평가와 관련된 주요국의 기술기준을 조사하였다. 특히, 미국의 기준을 조사하는 과정에서 안전성평가에서 도출된 peak dose가 선량 제한치를 충족하지 못하는 경우, 평가기간 및 peak dose에 대한 미국 규제당국의 접근방안은 참고할만한 가치가 있음을 알 수 있었다.

**중심단어** : 고준위폐기물 처분장, 기술기준, 안전성평가, 평가기간, 최대선량, 불확실성

1) Corresponding Author. E-mail : shlee10@kaeri.re.kr

I. 서론

원자력의 이용에 따라 발생된 사용후핵연료 및 고준위폐기물은 기술의 발전에 따라 재처리나 파이로프로세싱 등으로 일부 사용가능하지만, 최종적으로는 대다수의 폐기물들이 처분에 의해 해결될 수밖에 없다. 그러나 고준위폐기물 처분장 건설은 국내에서는 물론 다른 원자력선진국에서도 핫이슈로 간주되고 있으며 많은 난항을 겪고 있다. 최근 미국 Yucca Mountain의 고준위폐기물처분장 건설 및 인허가 진행 상황은 경주 중·저준위방사성폐기물처분시설 건설에 따른 많은 노력을 기울여 온 국내 원자력 관계자의 관심을 집중시키고 있다.

미국의 The National Academy of Public Administration (NAPA)는 1997년 보고서 “Deciding for the Future: Balancing Risks, Costs, and Benefits Fairly Across Generations” (Docket No. OAR-2005-0083-0087)를 통하여, 각 세대의 행위가 미래세대에 어떠한 영향을 미치는지를 고려해야 할 뿐만 아니라 무행동(inaction)이 어느 정도 자신의 이익에 반하는지와 미래 세대에 부정적으로 영향을 미치는지를 고려해야 한다고 언급하고 있다. 이러한 관점에서 볼 때, 고준위폐기물 처분장 건설은 현 세대뿐만 아니라 미래 세대에도 영향을 미치는 대표적인 경우라고 할 수 있으며, 무작정 처분장 건설을 차세대로 미루는 것도 좋은 해결책이 아님을 생각해 볼 수 있다. 따라서, 현세대뿐만 아니라 미래세대에게 처분장 건설이 필수적이라면, 처분장은 현 세대와 미래 세대가 공감할 수 있는 투명한 관리방법, 적절한 기술기준에 의해 건설 및 운영되어야 한다. 국내에서 경주 중·저준위방사성폐기물처분시설 건설 및 운영을 위한 인허가 과정에서 알 수 있듯이 고준위폐기물 처분장 건설에서는 더욱 엄격한 기술기준들이 요구될 것이다. 공론화 단계인 국내 사용후핵연료 정책에서 많은 옵션들이 제시되고 있지만, 궁극적으로 처분에 의한 고준위폐기물 해결방안이 필수 불가결한 만큼 고준위폐기물 처분장에 관련된 처분분야 선도국의 기술기준은 추후 국내에서 처분장 건설 및 운영에 관련된 기술기준 수립, 성능평가 과정 등에서 중요한 의미를 가지게 된다.

기본적으로 처분장 안전성평가는 미래 처분장의 전개를 바탕으로 수행되므로 많은 불확실성을 가질 수밖에 없으므로 평가결과를 법적 제한치와 엄격하게 상호 비교하는 것은 무리가 있는 것으로 많은 전문가들은 지적하고 있다. 그럼에도 불구하고, 안전성평가는 미래 처분장 전개를 모델링 및 많은 데이터를 사용하여 정량화된 결과를 제시하게 되므로 처분장 인허가 과정에서 매우 중요시 되고 있다. 본문에서는 고준위폐기물처분 안전성평가 관점에서 미국, 핀란드, 스웨덴, 프랑스를 대상으

로 안전성평가 기간, 방사선량 기준 및 평가의 불확실성 등과 관련된 기술기준을 조사하였다.

II. 주요국의 안전성평가 관련 기술 기준

가. 미국

최초로 Yucca Mountain에 고준위폐기물 처분장을 건설을 추진하고 있는 미국은 처분장 건설을 위한 인허가 절차를 확립하고 있으며, 구체적으로 기술적인 제한치도 제시하고 있다. 미국의 처분장 관련 제반 사항들은 미국 Energy Policy Act of 1992에 근거하고 있으며, 동법 Section 801에는 EPA(Environmental Protection Agency)에 의해 제시된 기술 기준(standard)을 NRC(Nuclear Regulatory Commission)는 관련 규정과 일치시키도록 하고 있다. 따라서, EPA 및 NRC의 관련규정을 통하여 미국의 고준위폐기물 처분장 인허가와 관련된 기술적 사항들을 조사하였으며, 그중에서 EPA의 40 CFR Part 197 “Public Health and Environmental Radiation Protection Standards for Yucca Mountain” [1], NRC의 10 CFR Part 60 “Disposal of High-level Radioactive Wastes in Geologic Repositories” [2] 및 10 CFR Part 63 “Disposal of High-level Radioactive Wastes in a Geologic Repository at Yucca Mountain, Nevada” [3]를 주로 참고하였다. 특히, 네바다주 의회를 중심으로 2004년 추진된 Yucca Mountain 고준위폐기물 처분장 건설 관련 청원에 대한 법원 판결은 처분장 안전성평가와 관련된 기술기준의 변화에도 큰 영향을 미침을 알 수 있었다. 이는 법원이 Yucca Mountain 고준위폐기물 처분장 건설과 관련된 대다수 사안에 동의하지만, NAS(National Academy of Science)의 권고사항<sup>1)</sup>을 참고하여 EPA의 10,000년 기준의 평가에 대한 근거부족을 이유로 EPA의 40 CFR Part 197 및 NRC의 10 CFR Part 63의 관련 부분을 무효화 한다는 판결을 내렸기 때문이다.

이에 따라, EPA 및 NRC는 평가기간에 대한 과학적 근거를 마련하는 한편 평가기간 변화와 관련되는 peak dose 및 불확실성(uncertainty)에 대하여 중점적으로 검토하였다. 기존 규정에서는 peak dose<sup>2)</sup> 값이 10,000년 이후에 나타날 경우, 평가값에 대한 불확실성이 커지면서 평가값에 대한 신뢰도가 떨어질 수 있기 때문에 이를 법적 제한치에 엄격하게 비교하

1) NAS는 처분 후 10,000년 기준으로 Individual risk standard를 제한하는 것에 대하여 과학적 근거가 없으므로 지질환경의 장기 안정성에 의해 부여된 제한치 내에서 방사선량이 피크에 도달할 때 방사선을 방어할 수 있는 기준을 개발할 것을 권고.

2) Peak dose means the highest annual dose projected to be received by the reasonably maximally exposed individual.

지 않았으나, 평가기간이 확대되는 경우 확대된 기간 중에 peak dose가 나타날 때 제한치와 비교하여 엄격하게 규제할 것인지 여부가 중요해 졌기 때문이다. 이와 관련된 EPA 및 NRC의 접근은 다음과 같다.

먼저, 평가기간과 관련하여 EPA는 geologic stability 기간<sup>3)</sup>을 1,000,000년으로 간주하고 평가기간으로 1,000,000년으로 제안하였으며, 그 배경은 NEA의 “The Handling of Timescales in Assessing Post-Closure Safety” [4] 및 ICRP의 “The Optimisation of Radiological Protection” draft for consultation[5]에 근거하고 있다.

둘째, peak dose로 EPA는 3.5 mSv/yr(350 mrem/yr)를 제시하면서 그 근거를 자연방사선에 두고 있다. 즉, 선량 제한치를 도출하기 위하여 Yucca Mountain 인근지역에 대한 자연방사선량은 조사되어야 하며, 이를 위해 Amargosa Valley 주민을 RMEI (reasonably maximally exposed individual)로 결정하였다. 미국에서 자연 방사선은 지역별로 1 mSv/yr부터 10 mSv/yr까지 많은 편차가 존재지만 평균 자연방사선 수준을 3 mSv/yr로 간주하였으며, 그중 라돈의 영향을 약 2 mSv/yr로 가정하여 Amargosa Valley 지역에 라돈이 25% 더 영향을 미침을 고려한 가중치를 부여하였다. 즉, 미국 전역의 평균 라돈 영향(2 mSv/yr), Amargosa Valley에서 라돈 영향이 25% 정도 더 크게 작용(0.5 mSv/yr) 및 우주선/지각에서의 방사선 (1 mSv/yr) 영향 등을 고려하여 RMEI의 자연 방사선 수준을 근거로 peak dose 값을 제시하였다.

셋째, 불확실성은 평가기간 및 peak dose와 연계하여 EPA는 다음과 같은 주요 옵션사항을 검토하였다.

- ① peak dose 고려 없이 10,000년만 기준으로 0.15 mSv/yr 제한치를 유지하는 기존 규정
- ② 전구간에 대하여 0.15 mSv/yr를 유지하면서 단지 peak dose에만 적용할 수 있는 기준(전구간 0.15 mSv/yr 유지, peak dose에서 uncertainty를 증가시키는 방법)
- ③ 시간에 따른 peak dose 기준(시간의 흐름에 따라 uncertainty가 증가하므로 uncertainty를 비교 분석)
- ④ 제한치가 아닌 목표치로 표현된 기준 (uncertainty를 고려하는 방법으로 엄격한 수치 제한치보다 평가 목표치로 제시)
- ⑤ 통계분포로 기준 표현 (예를 들면, peak dose 평가결과에서 upper limit 초과는 10% 이내, lower limit은 10% 이상)

3) *Period of geologic stability* means the time during which the variability of geologic characteristics and their future behavior in and around the Yucca Mountain site can be bounded, that is, they can be projected within a reasonable range of possibilities.

이와 관련하여, DOE의 성능평가가 Individual protection standard after permanent closure 및 Individual protection standard for human intrusion을 충족시킴을 보여주기 위하여, 10,000년까지 평가에서 도출된 선량은 산술평균(arithmetic mean)을 사용하고, 10,000년 이후의 평가에서는 중앙값(median)을 사용하도록 제시하였다.

넷째, EPA는 처분이나 폐쇄 후 단계에서 뿐만 아니라 운영이나 폐쇄 전 단계에서 Individual dose를 계산할 때 DOE의 weighting factors 사용에 대하여 명시할 필요가 있음을 제시하였으며, 이에 대해 NRC는 처분이나 폐쇄 후 단계에서 뿐만 아니라 운영이나 폐쇄 전 단계에서 Individual dose를 계산을 위하여 EPA가 명시하는 weighting factors(40CFR Part 197의 Appendix A)를 채택하고 작업자에 대한 radiation dose 계산에도 동일한 weighting factors를 사용할 것을 제시하였다.

그러나 상기 제시된 내용에 대한 공시과정에서 많은 미국 내 원자력전문가들이 이견을 제시하였으며, 특히 peak dose 및 중앙값에 대한 이견이 많았다. EPA 및 NRC는 제시된 이견들을 재검토하여 peak dose 및 중앙값 사용에 대한 변경된 기술기준을 다음과 같이 제시하고 제공하였다[6].

먼저, 처분 후 10,000년부터 1,000,000년까지의 평가와 관련하여 제시된 3.5 mSv/yr(350 mrem/yr)의 peak dose 값은 기존 제한치에 비하여 지나치게 높고, 미래세대에게 불리하며, 적절하지 않은 자연 방사선을 적용하고 있다는 반대 의견에 대하여, EPA 및 NRC는 ICRP, NCRP, IAEA, UNSCEAR 등에서 제시하고 있는 의료용을 제외한 방사선원으로부터 유효 피폭선량 권고치인 1 mSv/yr를 근거로 peak dose로 1 mSv/yr를 수정 제시하였다.

둘째, DOE가 보여주어야 할 10,000년 이후 성능평가에서 중앙값(median)을 사용한다는 것은 중앙값이 본질적으로 통계분포의 최대치와 최저치의 정중앙에 위치하게 되는 분포의 상대적 특징에 의존하게 되므로 장기 처분장 성능평가에 적합할 것으로 판단하였지만, 통계작업에 항상 사용하게 되는 산술평균(arithmetic mean)을 사용하는 것으로 최종 제시하였다.

최종 제안된 내용은 제시된 이견들을 광범위하게 수렴하였으므로 별다른 이견 없이 확정되었다. Table 1 및 Table 2는 미국 Yucca Mountain 고준위폐기물처분장의 안전성평가와 관련된 세부 사항(평가기간 및 방사선 기준 등)들을 법정 판결 전후 및 최근 확정된 내용까지 10 CFR Part 63을 기준으로 요약한 것이다.

**Table 1. Limits of 10 CFR Part 63 in USA**

항 목	Limits (연간선량)				
	기준 10CFR63	1차 제안 10CFR63	최종 확정 10CFR63	비 고	
Groundwater protection standard	drinking water dose to the whole body or any organ	0.04 mSv (4 mrem)	좌동	좌동	처분장 인근지역의 물 보호
	※ 세부사항	Table 2 참조	좌동	좌동	
Preclosure performance objectives	annual TEDE <sup>4)</sup> to any real member of the public located beyond the boundary of the site	0.15 mSv (15 mrem)	좌동	좌동	정상운영동안 category 1 event <sup>5)</sup> 에 대한 설계목적
	TEDE of individual located on, or beyond, any point on the boundary of the site	0.05 Sv (5 rem)	좌동	좌동	설계목적으로 category 2 event의 Numerical 목표
	sum of effective dose equivalent and the committed dose equivalent to any individual organ or tissue	0.5 Sv (50 rem)	좌동	좌동	category 2 event
	lens dose equivalent	0.15 Sv (15 rem)	좌동	좌동	category 2 event
	shallow dose equivalent to skin	0.5 Sv (50 rem)	좌동	좌동	category 2 event
Preclosure Public Health and Environmental Standards	member of the public in the general environment	0.15 mSv (15 mrem)	좌동	좌동	변경된 weight factor 사용
Postclosure Public Health and Environmental Standards	Individual protection standard after permanent closure	(1) 처분 후 10,000년 내 0.15 mSv (15 mrem)	(1) 처분 후 10,000년 내 0.15 mSv (15 mrem)	평가기간 구분 -10,000년 이내 -10,000년 이후	
		(2) 처분 후 10,000년 후 3.5 mSv (350 mrem)	(2) 처분 후 10,000년 후 1 mSv (100 mrem)	Geological stability 기간 -1,000,000년	
Human intrusion standard	Individual protection standard at or before 10,000 years after disposal	0.15 mSv (15 mrem)	0.15 mSv (15 mrem)	0.15 mSv (15 mrem)	10,000년 이내 침입의 결과
	If exposures to the reasonably maximally exposed individual occur more than 10,000 years after disposal	Y,M 환경 영향에 대한 분석 및 분석근거 포함	3.5 mSv (350 mrem)	1 mSv (100 mrem)	10,000년 이후 peak dose 가 나타나는 경우
	if the intrusion is not projected to occur before 10,000 years after disposal	상동	좌동	좌동	10,000년 이전에 침입이 없는 것으로 간주되는 경우

4) Total effective dose equivalent (TEDE) means, for purposes of assessing doses to workers, the sum of the deep-dose equivalent (for external exposures) and the committed effective dose equivalent (for internal exposures). For purposes of assessing doses to members of the public (including the RMEI), TEDE means the sum of the effective dose equivalent (for external exposures) and the committed effective dose equivalent (for internal).

5) Event sequence means a series of actions and/or occurrences within the natural and engineered components of a geologic repository operations area that could potentially lead to exposure of individuals to radiation. An event sequence includes one or more initiating events and associated combinations of repository system component failures, including those produced by the action or inaction of operating personnel. Those event sequences that are expected to occur one or more times before permanent closure of the geologic repository operations area are referred to as Category 1 event sequences. Other event sequences that have at least one chance in 10,000 of occurring before permanent closure are referred to as Category 2 event sequences.

**Table 2. Limits on Radionuclides in the Representative Volume in USA**

Radionuclide or type of radiation emitted	Limit	자연 background 포함 여부
Combined radium-226 and radium-228	5 pCi/l	포함
Gross alpha activity (including radium-226 but excluding radon and uranium).	15 pCi/l	포함
Combined beta and photon emitting radionuclides.	0.04 mSv (4mrem) per year to the whole body or any organ, based on drinking 2 liters of water per day from the representative volume.	불포함

**나. 핀란드**

핀란드 방사선원자력안전청(STUK)은 Administration of the Ministry of Social Affairs and Health에 속하여 있으며, 핀란드의 원자력 안전 및 방사선 안전에 대하여 규제하고 있다. 방사선 안전과 관련된 사항은 Radiation Act 및 Nuclear Energy Act에 근거하고 있으며, 세부적으로는 “Government Decision on the Safety of Disposal of Spent Nuclear Fuel” [7] 및 “Council of State Decision (398/1991) on the Safety of a Disposal Facility for Reactor Waste” [8]에서 처분장에 적용하게 될 기술기준을 알 수 있다. 또한, 이들 결정에 따른 요건들에 대한 지침으로 STUK는 “Long-term Safety of Disposal of Spent Nuclear Fuel, 23 May 2001” 를 통하여 명시하고 있다. 결정 및 지침에 나타난 안전성평가 관련 기술기준을 Table 3에 요약하였으며, 평가기간, 선량 제한치, 공학적 방벽의 성능, 생태계로의 핵종유출 제한치 등을 규정하고 있음을 알 수 있다.

**다. 스웨덴**

스웨덴의 방사선 방호는 SSM(Swedish Radiation Safety Authority)이 수행하며, SSM은 기존의 SSI(Swedish Radiation Protection Institute)와 SKI(Swedish Nuclear Power Inspectorate)의 합병으로 2008년 생겨났다. 스웨덴의 고준위폐기물 처분장 관련한 기술기준은 Swedish Radiation Protection Ordinance를 기반으로 한 기존의 방사선방호 규제기관이었던 SSI의 regulation 및 guideline으로 알 수 있었다. Table 4는 SSI 관련 regulation인 SSI FS 1998:4의 The Swedish Radiation Protection Institute's Regulations on Dose Limits at Work with Ionising Radiation에 나타나 있는 방사선 작업자의 선량 기준이다. 괄호의 숫자는 이온화 방사선 관련 업무와 관련된 16세부터 18세까지의 교육 및 훈련생에 대한 기준을 의미하며, 18세 이상의 경우 작업자 혹은 종사자로 간주한다.

**Table 3. Standards on Safety Assessment of HLW Repository in Finland**

항 목	주요 내용	근 거
Annual effective dose to the most exposed members of the public as a consequence of anticipated operational transients	0,1 mSv	Government Decision on the Safety of Disposal of Spent Nuclear Fuel - Section 4. operation of disposal facility
Annual effective dose to the most exposed members of the public as a consequence of postulated accidents <sup>6)</sup>	1 mSv	상동
In an assessment period, annual effective dose to the most exposed members of the public as a consequence of postulated accidents	1 mSv	Government Decision on the Safety of Disposal of Spent Nuclear Fuel - Section 5. long term safety
Upper bound for the annual dose to any member of the public, arising from accident conditions which are caused by natural events or human action	5 mSv	Council of State Decision (398/1991) on the Safety of a Disposal Facility for Reactor Waste - Section 3. radiation protection
Engineered barriers shall effectively limit the migration of radioactive substances	at least 500 years	Council of State Decision (398/1991) on the Safety of a Disposal Facility for Reactor Waste - Section 4. performance of barrier
Assessment period <sup>7)</sup>	adequately predictable with respect to assessments of human exposure but at least several thousands of years	Government Decision on the Safety of Disposal of Spent Nuclear Fuel - Section 5. long-term safety
Nuclide specific constraints for the activity releases to the environment	0,03 GBq/yr for the long-lived, alpha emitting radium, thorium, protactinium, plutonium, americium and curium isotopes 0,1 GBq/yr for the nuclides Se-79, I-129 and Np-237 0,3 GBq/yr for the nuclides C-14, Cl-36 and Cs-135 and for the long-lived uranium isotopes 1 GBq/yr for Nb-94 and Sn-126 3 GBq/yr for the nuclide Tc-99 10 GBq/yr for the nuclide Zr-93 30 GBq/yr for the nuclide Ni-59 100 GBq/yr for the nuclides Pd-107 and Sm-151.	Long-term Safety <sup>8)</sup> of Disposal of Spent Nuclear Fuel, 23 May 2001 -These constraints apply to activity releases which arise from the expected evolution scenarios and which may enter the environment not until after several thousands of years. -These activity releases can be averaged over 1000 years at the most. The sum of the ratios between the nuclide specific activity releases and the respective constraints shall be less than one.

고준위폐기물 처분장 안전성평가와 관련된 기술기준은 사용후핵연료 및 핵폐기물 최종 관리와 관련한 SSI FS 1998:1 및 SSI FS 2005:5에서 확인할 수 있다. SSI FS 1998:1에서는 처분장에 의한 연간 위험도(annual risk of harmful effect)가 10<sup>-6</sup>을 초과해서는 안되며, 평가기간으로 처분장 폐쇄 후 1000년 및 1000년 이상으로 구분하고

6) *postulated accident* shall mean a safety-related incident during the operational period of the disposal facility with low probability to occur during that period  
7) *assessment periods* are time periods of varying length, used in the evaluation of long-term safety  
8) *long-term safety* shall mean the safety of disposal after the operational period of the disposal facility, taking account of radiation impacts on man and the environment

**Table 4. Individual Dose Limit in Sweden**

항 목	제한치	근 거
Exposure to general public	Annual effective dose	1 mSv SSI FS 1998:4
	Annual equivalent dose to lens of the eye	15 mSv 상동
	Annual equivalent dose to the skin	50 mSv 상동
Workers in general (students and trainees aged 16-18)	Rescue work	100 mSv 상동
	Annual effective dose	50 (6) mSv 상동
	Annual dose equivalent to the lens of the eye	150 (50) mSv 상동
	Annual dose equivalent to the skin	500 (150) mSv 상동
	Annual dose equivalent to hands, forearms feet and ankles	500 (150) mSv 상동
5 consecutive years Effective dose	100 mSv 상동	

**Table 5. Summary on SSI FS 2005:5 of Sweden**

항 목	주요 내용	근 거
Protection of human health	A repository for spent nuclear fuel or nuclear waste shall be designed so that the annual risk of harmful effects after closure does not exceed 10 <sup>-6</sup> for a representative individual in the group exposed to the greatest risk <sup>9)</sup> .	harmful effect의 probability 계산은 ICRP의 'probability coefficients' 이용
Regulation's criterion for individual risk	The risk for harmful effects for a representative individual in the group exposed to the greatest risk (the most exposed group) shall not exceed 10 <sup>-6</sup> per year <sup>10)</sup> .	ICRP의 'the factor for conversion of effective dose to risk is 7.3 per cent per sievert' 이용
	If the exposed group only consists of a few individuals, the criterion of the regulations for individual risk can be considered as being complied with if the highest calculated individual risk does not exceed 10 <sup>-7</sup> per year <sup>10)</sup> .	상동
Limitation of the risk analysis <sup>9)</sup> in time	The conditions and processes during the early development of the repository, which can affect its long-term protective capability, should be described in as much detail as possible. Examples of such conditions and processes are the resaturation of the repository, stabilisation of hydrogeological and geochemical conditions, thermal evolution and other transient events.	-1,000년의 기간은 기후나 생태계 조건 같은 factors와 관련하여 신빙성 있게 risk analysis가 수행될 수 있는 근사한 기간으로 간주됨
	Biosphere conditions and known trends in the surroundings of the repository should also be described in detail, partly to be able to characterise "today's biosphere" (see guidelines to section 5), and partly to be able to characterise the conditions applicable to a conceivable early release from the repository. Known trends here refer, for instance, to land uplift (or subsidence), any trends in climate evolution and appurtenant changes in use of land and water <sup>10)</sup> .	-이 기간 동안, 처분장과 주위 환경의 상호작용에 개발에 관한 자세한 분석 및 보고를 위하여, 이용 가능한 측정 데이터와 초기 조건에 대한 다른 지식 등이 사용되어야 함.
	Reporting should be based on a quantitative risk analysis in accordance with the guidelines to sections 5-7. Supplementary indicators of the repository's protective capability, such as barrier functions, radionuclide fluxes and concentrations in the environment, should be used to strengthen the confidence in the calculated risks <sup>10)</sup> .	-100,000년은 어렵진 않지만, 대규모 기후 변화(예, 빙하기)와 같이 처분장에 미치는 영향 및 주변환경에 미치는 영향이 설명될 수 있는 방법으로 선정되어야 함.
100,000년 이상	Climate development can be simplified as a repetition of identical glaciation cycles. A strict quantitative comparison of calculated risk in relation to the criterion for individual risk in the regulations is not meaningful. The assessment of the protective capability of the repository should instead be based on reasoning on the calculated risk together with several supplementary indicators of the protective capability of the repository such as barrier functions, radionuclide fluxes and concentrations in the environment <sup>10)</sup> .	-risk analysis는 장기적인 방벽기능 개발 및 처분장에 미치는 외부 요인(지진 및 빙하작용)의 중요성을 설명해야 함. 시간의 흐름에 따른 불확실성의 증가를 고려해 보면 인간과 환경에 미치는 선량은 기후개발, 생태계 조건 및 유출경로와 관련한 단순화된 방법으로 계산되어야 함.

9) *Risk analysis*: An analysis with the aim to clarify the protective capability of a repository and its consequences with regard to the environmental impact and the risk for human beings.

있다[9]. 또한, SSI FS 2005:5에서는 위험도를 선량으로 평가하는데 ICRP의 conversion factor를 사용하도록 언급하고 있으며, 평가기간으로 처분장 폐쇄 후 1000년, 1000년 이상 100,000까지 및 100,000년 이후로 세분하고 있다 [10]. 특히, 100,000년 이후의 calculated risk 값을 risk 규제와 관련하여 엄격하게 비교하는 것은 의미가 없다고 명시하고 있으며, 오히려 처분장 성능평가가 처분장의 성능 지표와 함께 합리적으로 risk 계산이 이루어져야 함을 언급하고 있다. 이들 규정에 나타난 안전성평가 관련 기술기준은 Table 5와 같이 요약할 수 있다.

**라. 프랑스**

프랑스 원자력 정책은 PMGMDR 2007-2009 (National Radioactive Materials and Wastes Management Plan 2007-2009)[11]에 잘 나타나 있으며, 프랑스의 경우 사용 후핵연료를 최종 방사성폐기물(ultimate radioactive waste)로 간주하지 않고, 재사용 물질로 회수를 위하여 재처리 대상으로 간주하게 됨에 따른 중간저장방안도 동시에 모색하고 있음을 알 수 있다. 따라서 사용후핵연료를 최종 폐기물에서 제외하는 방사성폐기물 분류체계는 Table 6과 같이 Activity와 Half life를 고려하여 분류하고 있으며, 그 중 고준위폐기물은 원자력발전, 원자력 연구, 방위 활동, 사용후핵연료 재처리에서 발생하고 있는 것으로 알 수 있다.

프랑스의 사용후핵연료 및 고준위폐기물에 대한 처분 기본 원칙은 “The Planing Act of 28 June 2006 on Sustainable Management of Radioactive Materials and Waste”에서 다음 세 가지 원칙을 제시하고 있다.

- 방사성폐기물의 양과 위험 감소방안을 찾아야 한다. 특히, 사용후핵연료 처리와 방사성폐기물 처리 및 포장을 통하여 찾아야 한다.
- 처리를 기다리는 방사성물질과 처분을 기다리는 방사성폐기물은 중간저장을 목적으로 설치된 시설에 저장된다.
- 중간저장 후, 최종 방사성폐기물(ultimate radioactive

waste)은 지층처분이나 shallow depth로 처분되는 것이 아니라 심지층 처분시설에 처분된다.

세부적으로 심지층 처분과 관련된 기술기준은 1991년 Nuclear Safety Authority가 1970년대 및 80년대에 수행된 심지층 처분 관련 연구를 바탕으로 발간한 “Fundamental Safety Rule (FSR III.2.f)”에서 찾을 수 있다. RFS는 가장 엄격한 의미인 법적 규제요건을 담고 있는 것은 아니며, 처분장 기본사항, 설계원칙, 지하암반의 선택기준, 현안사항의 연구 절차 등 대한 기틀을 제공하고 있다[12]. RFS는 심지층 처분장이 방사성폐기물과 관련된 어떠한 유해한 영향에 대하여도 사람과 환경을 보호해야 하며, 어떠한 방사선적 영향이라도 합리적으로 달성 가능한 수준으로 제한해야 함을 기본 목적으로 제시하고 있다. 안전성평가와 관련하여, 첫째, 평가기간으로 10,000년을 기준으로 다음과 같이 두 가지의 평가를 권고하고 있다.

- 10,000년까지 각 원소의 거동을 설명
- 비록 불확실성이 훨씬 커지더라도, 10,000년 이후는 비관적인 값을 사용한 보수적 평가를 수행

둘째, RFS는 정상시나리오와 기후변화와 같은 자연현상 및 인간침입에 의한 대안시나리오를 고려하여야 하며, 정상시나리오에서 방사선적 영향은 0.25 mSv/yr를 초과해서는 안된다고 규정하고 있다. 이 값은 현 규제하에서 일반 대중에 대한 분기당 피폭선량 제한치에 해당한다.

그 외에도 방벽은 multi-barrier 구조를 가지고 있어야 하며, waste package, engineered barrier 및 geological barrier로 구성된 3중 barrier를 예시하였다.

RFS가 엄격한 법적 기준치가 아닌만큼 현재 원자력시설에서 범용으로 적용되는 프랑스의 기준은 Table 7과 같이 요약할 수 있다. }

**마. 검토 결과**

고준위폐기물 처분장의 안전성평가와 관련된 기술기준으로 평가기간, 방사선 제한치 및 불확실성 등을 중심으로 미국, 핀란드, 스웨덴, 프랑스에서 공식적으로 제시되고

**Table 6. Existing or Future Disposal System for the Main Solid Waste and Residues in France**

Half-life Activity level	Very short lived < 100 days	Short-lived < 30 years	Short-lived < 30 years
Very low level	Management by radioactive decay	Dedicated surface repository Recycling channels	
Low level Dedicated shallow		Surface disposal (Aube repository) except tritiated waste and certain sealed sources	Dedicated shallow depth repositories under study
Intermediate level		Channels being studied under article 3 of the 28 June 2006 Act	
High level		Channels being studied under article 3 of the 28 June 2006 Act	

**Table 7. General Protection of the Population in France**

항 목	Maximum effective annual dose (art. R.1333-8) received by a member of the public as a result of nuclear	Limits for workers over 12 consecutive months (Adult)	비 고
Effective whole-body doses	1 mSv/yr	20 mSv/yr	ANDRA 자체 규정 -0.25 mSv/yr -5 mSv/yr(작업자)
Equivalent dose for the lens of eye	15 mSv/yr	500 mSv/yr	
Equivalent dose for the skin	50 mSv/yr	150 mSv/yr	

있는 기술기준을 검토한 결과는 다음과 같다.

먼저, 평가기간과 관련하여, 미국은 10,000년의 평가 기간을 1,000,000년으로 확대하였으며, 핀란드는 평가 기간을 명시하고 있지는 않지만 최소한 수천 년 이상 평가되어야 한다고 언급하고 있으며, 스웨덴은 처분장 폐쇄 후 1,000년, 100,000년, 100,000년 이상으로 세분하고 있으며, 프랑스는 10,000년까지 엄격하게 평가하도록 규정하고 있었다. 또한, 최대 몇 년까지 평가할 것인가 여부는 국가별로 'period of geological stability' 를 몇 년으로 결정하는가에 달려있다고 할 수 있다.

둘째, 방사선량 제한치와 관련하여, 미국 Yucca Mountain 처분장 경우, EPA와 NRC는 평가기간의 확대에 따른 peak dose로 10,000년 이내는 0.15 mSv/yr 및 1,000,000년 이내는 1 mSv/yr로 이원화된 기준을 확정하였다. 핀란드는 일반인에 대한 연간 선량한도로 0.1 mSv/yr를 제시하면서 natural events 및 human action으로 야기되는 사건에 대한 상한선으로는 5 mSv/yr를 제시하고 있으며, 프랑스는 0.25 mSv/yr를 기준으로 제시하고 있다. 또한 스웨덴은 선량 개념이 아닌 위험도(risk)를 사용하고 있으며 위험도를 연간 10<sup>-6</sup> 이하로 제한하고 있음을 알 수 있다.

셋째, 불확실성과 관련하여, 안전성평가결과를 선량 기준과 상호 엄격하게 비교하는 것은 비합리적임을 많은 안전성평가 전문가들은 주장하고 있다. 이는 처분장에 대한 안전성평가에 많은 불확실성을 포함될 수밖에 없으며, 불확실성을 해결하는 방안으로 보수적으로 접근하게 되는 특징을 고려해 보면, 평가결과로 나타나는 연간 선량은 방사선 기준을 충족시키기 힘들 수 있으며 평가기간이 길어질수록 불확실성은 더욱 커지게 되기 때문이다. 미국은 처분 후 10,000년 이후 기간에 대한 평가 시 중앙값을 사용하는 것을 제안하기도 하였으나 최종적으로는 기존의 산술평균을 적용기로 결정하였으며, 이는 중앙값 사용은 평가결과를 낮추려는 인상을 줄 뿐만 아니라 통계작업에는 기본적으로 산술평균을 사용하기 때문이다. 핀란드는 데이터 및 모델에 대한 신뢰성을 높이도록 명시하고 있으나 자세한 방안이나 제한치는 제시하지 않고 있으며, 프랑스는 불확실성이 높을지라도 10,000년 이후의 평가기간에 대하여 비관적인 값을 사용한 보수적인 평가를 권고하고 있다.

그 외에도 핀란드의 경우 공학적 방법이 방사성물질의 이동을 효과적으로 제한할 수 있도록 성능 유지기간으로 500년을 명시하고 있었으며, 프랑스는 다중방벽(multi-barrier) 체제를 유지할 것을 요구하고 있다.

### III. 결 론

고준위폐기물 처분장 안전성평가는 미래 처분장 전개를 예측하여 각종 데이터를 사용하여 정량적인 평가결과를 제시하게 된다. 이러한 평가 결과는 법적 제한치와 상호 비교될 수밖에 없으며, 비교 결과가 법적 제한치를 충족시키지 못할 경우도 생겨날 수 있다. 안전성평가결과가 법적 제한치를 충족시키지 못하는 경우는 기본적으로 처분장의 성능 부족에 기인할 수 있지만 안전성평가 시 불확실성으로 인한 과도한 보수적 접근 때문 일수도 있으므로 평가결과를 법적 제한치와 엄격하게 비교하는 것은 무리임을 많은 안전성평가 전문가들은 주장하고 있다. 스웨덴은 100,000년 이후의 평가결과를 법적 제한치와 엄격하게 비교하는 것은 무의미함을 공식화하고 있는 반면, 미국은 Yucca Mountain 처분장의 안전성평가기간 확대 과정에서 안전성평가에 포함된 불확실성에도 불구하고 평가결과를 법적 제한치에 엄격하게 비교하기로 결정하였다. 이러한 상반된 결과에 대하여, 방사성폐기물에 대한 일반인의 우려, 미래세대에게도 동등한 기준 적용 및 최신 기술기준이라는 면 등을 고려해 보면, 평가에 포함된 불확실성에도 불구하고 장기 안전성평가 결과를 법적 제한치와 향후에는 보다 엄격하게 비교하게 될 가능성이 커 보이며 평가의 불확실성을 줄일 수 있는 모델링 기법에 대한 연구가 강화될 필요가 있다.

### 참고문헌

- [1] US EPA, 40 CFR Part 197, "Public Health and Environmental Radiation Protection Standards for Yucca Mountain"
- [2] US NRC, 10 CFR Part 60, "Disposal of High-level Radioactive Wastes in Geologic Repositories"
- [3] US NRC, 10 CFR Part 63, "Disposal of High-level Radioactive Wastes in a Geologic Repository at Yucca Mountain, Nevada"
- [4] NEA "The Handling of Timescales in Assessing Post-Closure Safety" 2004, Docket No. OAR-2005-0083-0046
- [5] ICRP "The Optimisation of Radiological Protection" draft for consultation, 2005, Docket No. OAR-2005-0083-0052
- [6] US EPA, Federal Register of 40 CFR Part 197, "Public Health and Environmental Radiation

Protection Standards for Yucca Mountain; Final Rule", October 15, 2008

- [7] Council of state, Finland, "Government Decision on the Safety of Disposal of Spent Nuclear Fuel" 1999
- [8] Council of state, Finland, "Council of State Decision (398/1991) on the Safety of a Disposal Facility for Reactor Waste" 1991
- [9] Sweden SSI, "The Swedish Radiation Protection Institute's Regulations on the Protection of Human Health and the Environment in connection with the Final Management of Spent Nuclear Fuel and Nuclear Waste", SSI FS 1998:1, September 28 1998
- [10] Sweden SSI, "The Swedish Radiation Protection Authority's guidelines on the application of the regulations (SSI FS 1998:1) concerning protection of human health and the environment in connection with the final management of spent nuclear fuel and nuclear waste", SSI FS 2005:5, September 5 2005
- [11] France, National Radioactive Material and Waste Management Plan (2007 - 2009)
- [12] France, ANDRA, "Dossier 2001 Agrile", December 2001