

Preparation and Management of the Input Data for the Safety Assessment of Low- and Intermediate-level Radioactive Waste Disposal Facility in Korea

중·저준위 방사성폐기물 처분시설 안전성평가를 위한 입력데이터 설정 및 관리에 대한 고찰

Jin Beak Park*, Hyun-Joo Kim, and Dong-Hee Lee

Korea Radioactive Waste Agency, 111 Daedeok-daero 989, Yuseong-Gu, Daejeon, Korea

박진백*, 김현주, 이동희

한국원자력환경공단, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

(Received November 26, 2014 / Revised December 19, 2014 / Approved December 22, 2014)

The systematic quality assurance activities on documents of the safety assessment are required for the safety case of the low- and intermediate-level radioactive waste disposal facility. In this paper, quality assurance system focused on the input data including the site characterization, groundwater flow, system design and monitoring are prepared and discussed. Rule for the input data selection is suggested and applied for the safety assessment which is based on the in-situ/experiment observations, final facility design and waste pileup plan, engineered barrier, field monitoring, recent biosphere, and radionuclide inventory. The reduction of data uncertainty will be expected to contribute to the safety of disposal facility further.

Keywords: Quality assurance system, Input data decision, Safety assessment, Low- and Intermediate-Level Radioactive Waste

*Corresponding Author.

Jin Beak Park, Korea Radioactive Waste Agency, E-mail: jbpark@korad.or.kr, Tel: +82-42-601-5322

ORCID

Jin Beak Park <http://orcid.org/0000-0003-3050-2565>

Hyun-Joo Kim <http://orcid.org/0000-0001-9455-209X>

Dong-Hee Lee <http://orcid.org/0000-0002-4388-6206>

처분시설의 개발과정에서 안전성평가 문서관리는 체계적인 품질활동이 수반되어야 하며, 본 논문에서는 중·저준위 방사성폐기물 처분시설의 건설단계에 보완된 부지특성, 지하수특성, 최종설계내용 및 모니터링 입력데이터를 포함하여 Safety Case를 위한 안전성평가 입력데이터 품질보증체계를 설명하였다. 현장/실험결과데이터, 실제 설계데이터 및 적치계획, 콘크리트 물성데이터, 지하수, 기상, 지진에 대한 현장 모니터링데이터, 생태계데이터 및 핵종재고량데이터를 입력데이터 결정원칙에 따라 선별하고 안전성평가에 적용할 수 있는 데이터 관리체계를 확보하였다. 이는 향후 처분시설 안전성평가의 데이터 불확실성 저감 및 안전성 증진에 기여할 것으로 판단된다.

중심단어: 품질보증체계, 입력데이터 결정, 안전성평가, 중·저준위 방사성폐기물

1. 서론

처분시설 Safety Case는 처분시설에 대한 이해를 목적으로 안전성평가에 의해 도출된 정보와 이에 대한 신뢰성 기술 내용 등 처분시설 안전성을 뒷받침하는 과학적, 기술적, 제도적 논거 및 근거들의 총화로서 처분시설의 부지선정에서부터 설계, 건설, 운영, 폐쇄 후 방사선 위해 평가 등 개발과정의 모든 행위에 대한 적합성과 품질보증이 포함된다[1]. 처분시설의 건설, 운영, 폐쇄 및 폐쇄 후 관리기간 동안 안전성을 입증하기 위한 문서관리는 안전성평가에 사용되는 입력데이터와 전산 프로그램에 대한 품질활동의 일환으로 수행되어야 한다.

처분시설 안전성평가에 적용되는 입력데이터는 개발과정 중 변경 사항, 처분대상 폐기물, 처분시설, 처분부지 및 주변환경 특성을 반영해야 할 뿐만 아니라 미래 변화 가능성도 예측해야 하며 특히, 입력데이터의 근거 및 기술적 타당성을 확보하는 것이 안전성평가에 대한 신뢰성을 증진하고 불확실성을 저감시키는 측면에서 중요하다. 또한, 처분시설 개발과정에서 안전기능분석-처분시설 설계-현상분석-정성적 안전성분석-처분시설 안전성평가의 반복수행, 평가기반 구축 및 갱신을 통해 입력데이터를 지속적으로 보완하고 관리해야 한다.

한국원자력환경공단(KORAD)은 중·저준위 방사성폐기물 1단계 처분시설의 안전성 증진을 위해 건설단계에서 추가 생산된 지하특성데이터, 최종설계내용, 운영 및 모니터링 데이터 등 입력데이터 축적에 따라 안전성평가를 갱신하였다. 또한, 건설단계 Safety Case의 보수성, 타당성 및 안전여유도를 확인하고 안전성평가를 위한 전산계산모델에 이

용되는 데이터 결정과정과 결과에 대한 내용을 문서화하고 Safety Case 개발을 위한 처분시설 안전원칙을 바탕으로 입력데이터 관리체계를 구축하였다.

본 논문에서는 처분시설 안전성평가 및 해석에 대한 불확실성을 저감하기 위해 안전성평가에 적용되는 입력데이터 품질보증체계와 적용에 대해 고찰하고자 한다.

2. 입력데이터 품질보증체계

2.1 개요

중·저준위 방사성폐기물 처분시설 종합성능평가(TSPA, Total System Performance Assessment)는 입력데이터 생산, 입력데이터를 이용한 안전성평가, 평가 결과 및 안전사태에 의한 인허가 취득으로 구분할 수 있다. 이러한 일련의 행위들에 대한 신뢰성 확보를 위해서는 무엇보다도 데이터의 기록 보존 및 투명성을 보장할 수 있는 품질보증체계를 수립해야 한다.

미국의 경우 SNL(Sandia National Laboratories) 국립연구소는 ISO 9001 및 ISO 9000-3과 같은 품질보증체계와 ANSI(American National Standards Institute)의 NQA(Nuclear Quality Assurance) 1/2 및 NQA 3과 같이 미국 NRC[2]에 규정된 원자력 관련 품질보증개념을 정리하여 방사성폐기물 처분연구 품질보증개념(T2R3)으로 도입하였다. 한국원자력환경공단(KORAD)은 이 T2R3 개념을 바탕으로 안전성평가 품질보증체계를 개발하였으며 품질개념은 다음과 같다.

- 투명성(Transparency): 안전성 확인에 적용된 입력데이터 및 가정 등 평가기반에 대한 내용제시가 가능하고 특정 결론에 영향을 미치는 입력데이터의 근거와 합리적 추론과정을 이해할 수 있음
- 추적성(Traceability): 다양한 이해관계자를 대상으로 안전현안에 대한 결과를 도출해 낸 논리, 계산 및 그 외 평가과정을 추적할 수 있음
- 개방성(Openness): 처분안전성에 대한 질의응답과 토론을 포함
- 평가 용이성(Reviews): 내·외부 독립검토를 통한 기술적 근거 마련 및 품질보증 관련 사항을 문서화할 수 있음
- 재현성(Reproducibility): 안전논거에 대한 평가결과를 재생산할 수 있음
- 회수성(Retrievability): 평가 문서를 체계적으로 찾거나 복구할 수 있음

또한, 품질보증체계를 구축하는 목적은 다음과 같다.

- 처분시설 안전성평가의 경우 단순한 결과 도출을 넘어서 평가 전 과정(코드체계, 모델링 기법, 평가데이터)에 대한 구체적인 정보 관리를 통해 신뢰성을 확보해야 한다.
- 과거에 생산되거나 현재 갱신 보관 중인 데이터들을 공식적인 품질보증절차에 따라 관리함으로써 데이터가 축적되고 향후 인허가에 지속적으로 활용할 수 있도록 투명성을 확보해야 한다.
- 안전성평가를 수행하기 위해서는 전산코드, 평가절차, 입력데이터 등 다양한 정보가 요구되며, 체계적 관리를 통해 원하는 데이터를 쉽게 찾을 수 있도록 해야 한다.
- 관련 정보의 처리 및 관리를 지속함으로써 미래 처분장 거동을 예측하고 처분시설로 인한 방사선적 영향을 평가하여 최종적으로는 안전성평가에 활용할 수 있는 전문성을 확보해야 한다.

이러한 품질관리를 통한 데이터의 축적뿐만 아니라 정량화·입증·설명하는 논거들과 증거들을 종합함으로써 안전성평가에 대한 불확실성 저감 및 신뢰도를 높이는데 기여하여야 한다.

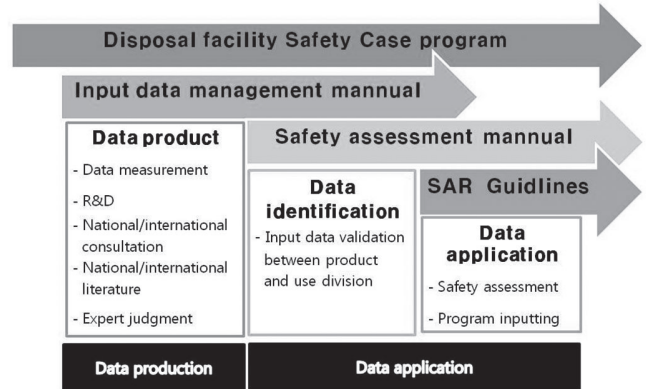


Fig. 1. The decision progress of the input data for safety assessment on the disposal facility.

2.2 입력데이터 관리

2.2.1 입력데이터 관리절차

건설단계 Safety Case의 입력데이터 생산에서부터 적용까지 일련의 절차는 안전사례 평가기반 구축을 위한 최적화와 논증가능성 전략에 근거한 품질관리행위의 한 방법이다.

Fig. 1에 제시된 것처럼 처분시설 개발을 위한 입력데이터의 생산은 데이터 측정용역, 연구개발, 국내의 자문, 국내외 문헌 및 전문가 판단의 방법을 통해 이루어지며, 입력데이터 관리절차에 따른 품질행위를 통해 데이터 생산부서에서 데이터 활용부서로 전달된다. 데이터 활용부서에서는 전달된 입력데이터를 안전성평가에 활용하기 위해 ‘안전성평가 수행 절차서’에 따라 데이터 분석을 수행하고 품질행위를 거쳐 안전성평가 입력프로그램에 적용한다. 데이터 생산, 확인 및 적용 과정은 안전사례 종합프로그램의 안전원칙, 목표 및 전략에 따라 수행되어 평가기반 구축과 단계별 안전성 확보에 기여한다.

2.2.2 입력데이터 결정원칙

계획단계 Safety Case가 제한된 정보와 보수적 가정 및 접근을 이용하여 전체 처분시설의 안전성확보 가능성을 확인하였다면, 건설단계 Safety Case에서는 계획단계 Safety Case의 유효성 확인과 불확실성 저감을 위해 안전성평가 입력데이터를 선별해야 한다. 건설단계 입력데이터 결정원칙은

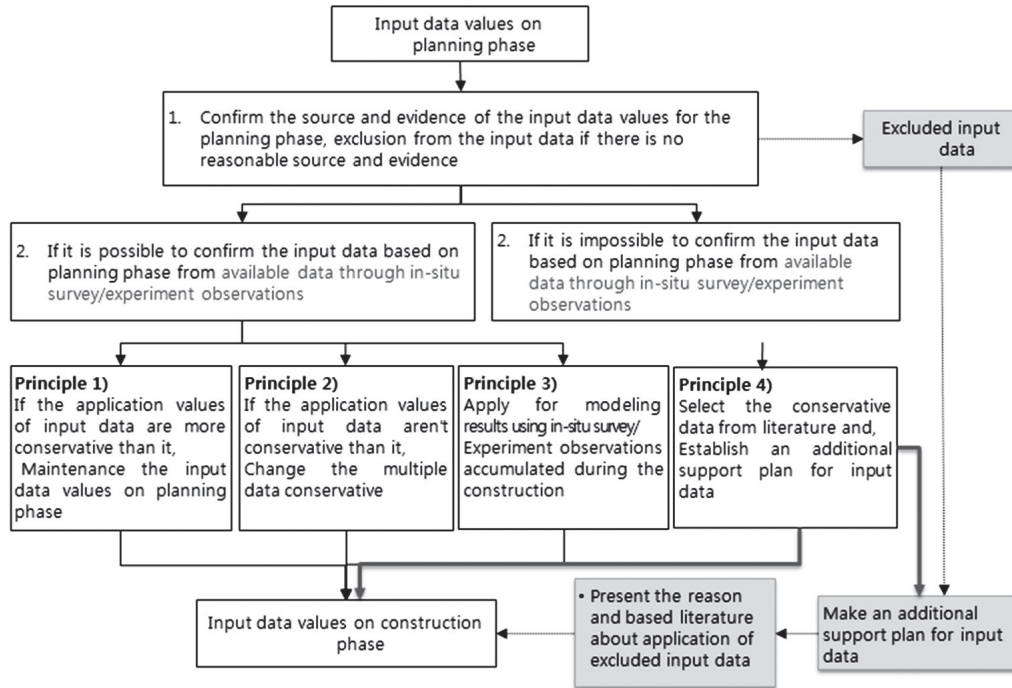


Fig. 2. The decision principle of input data for the construction phase Safety Case.

Fig. 2에 도시하였으며 아래와 같이 설정하고 적용하였다.

- ① 계획단계 입력데이터 적용 값의 출처 및 근거를 확인하고 타당한 출처 및 근거가 없을 경우 입력데이터에 서 배제
- ② 계획단계 입력데이터 적용 값의 유효성이 현장조사/ 실험데이터를 통해 확인 가능한 경우
 - 원칙 1) 계획단계 입력데이터 적용 값이 현장조사/ 실험데이터보다 보수적일 경우, 계획단계 입력데이 터 적용 값으로 유지
 - 원칙 2) 계획단계 입력데이터 적용 값이 현장조사/ 실험데이터보다 보수적이지 않을 경우, 복수의 데이 터 중 보수적인 값으로 변경
 - 원칙 3) 건설 중 현장조사/실험데이터를 이용한 추 가 모델링 결과 적용
- ③ 계획단계 입력데이터 적용 값의 유효성이 현장조사/ 실험데이터를 통해 확인 불가능한 경우
 - 원칙 4) 국제표준문헌을 이용하여 보수적인 데이 터 를 선택하며, 필요 시 해당 입력데이터 추가 보완계 획 수립

3. 입력데이터 불확실성 관리

3.1 입력데이터 범주

안전성평가에 적용되는 입력데이터들을 모델링을 기 반으로 Table 1과 같이 방사선환경정보, 부지특성정보, 부지환 경정보, 시설물관련정보로 4개의 범주로 분류하고 핵종재고 량평가 및 안전성평가 모델링(핵종이동, 기체발생 및 이동, 생태계, 운영 중, 인간침입)에 필요한 입력데이터들을 세분 화하여 목록화하였다.

3.2 입력데이터 불확실성 범위 설정

입력데이터의 불확실성은 데이터 측정자체가 가능하지 않거나 측정하더라도 정확한 측정이 가능하지 않아 평가에 사용되는 입력데이터의 불완전함에 의해 발생하는 불확실 성을 의미한다. 데이터 불확실성으로 인한 변수 값의 범위 는 확률론적 평가 및 보수적 접근방법을 사용하며, 확률론적 평가는 시나리오와 관련된 위해도를 정량화하는데 사용될

Table 1. The classification of the input data for quality management

Group	Classification	Remark
REI	WC	Waste Characterization
	EBS	Engineered Barrier System
	ER	Environmental Radioactivity
	BIO	Biosphere
	ETC	Etc.
SCI	HYD	Hydrogeology
	TRP	Transport Characterization
	GEO	Topography/Geology
	EQ/GP	Earthquake/Geophysics
	MECH	Rock Mechanics
	CHEM	Geochemistry
	ETC	Etc.
SEI	NAT	Natural Environment
	LIFE	Living Environment
	SO/EC	Social/Economic Environmental
	ETC	Etc.
FI	DESIGN	Building/Design Information
	ETC	Etc.
ETC		Etc.

수 있다. 또한 민감도 분석은 안전성평가 결과에 대한 불명확한 입력데이터의 상대적 중요도를 확인하고 평가기반에 반영하여 활용한다.

데이터 불확실성의 구체화를 위해 IAEA ISAM(Improvement of Safety Assessment Methodologies) FEP(Feature, Event, and Process)[3] 목록별로 도출된 데이터 불확실성 항목에 대하여 안전성 관련 여부를 판단하고 해당 항목별 관리방안을 적용하였다. 입력데이터에 대한 불확실성 관리방안이 합리적으로 선정되지 못한 사항은 추가보완계획을 수립하여 별도관리하였다.

4. 입력데이터 적용 사례: 건설단계

2008년 처분시설 건설인가 이후 월성 중·저준위 방사성폐기물 처분시설 건설 중에 추가된 현장데이터와 보완된 실험실데이터를 바탕으로 입력데이터 불확실성 저감 및 신뢰성 증진을 위한 품질관리를 수행하였다. 정상시나리오에 따른 핵종이동평가를 중심으로 입력데이터 중 불확실성이 크거나 민감도 분석이 필요한 데이터를 분류하고 입력데이터 결정원칙에 따라 안전성평가에 적용하였다. 건설단계에 적용된 입력데이터의 주요 보완사항은 Fig. 3에 제시하였다. Fig. 3에 제시된 것처럼 폐기물 선원항, 처분용기, 뒤채움재(쇄석), 사일로(콘크리트), 자연암반으로 구분하고, 각 방

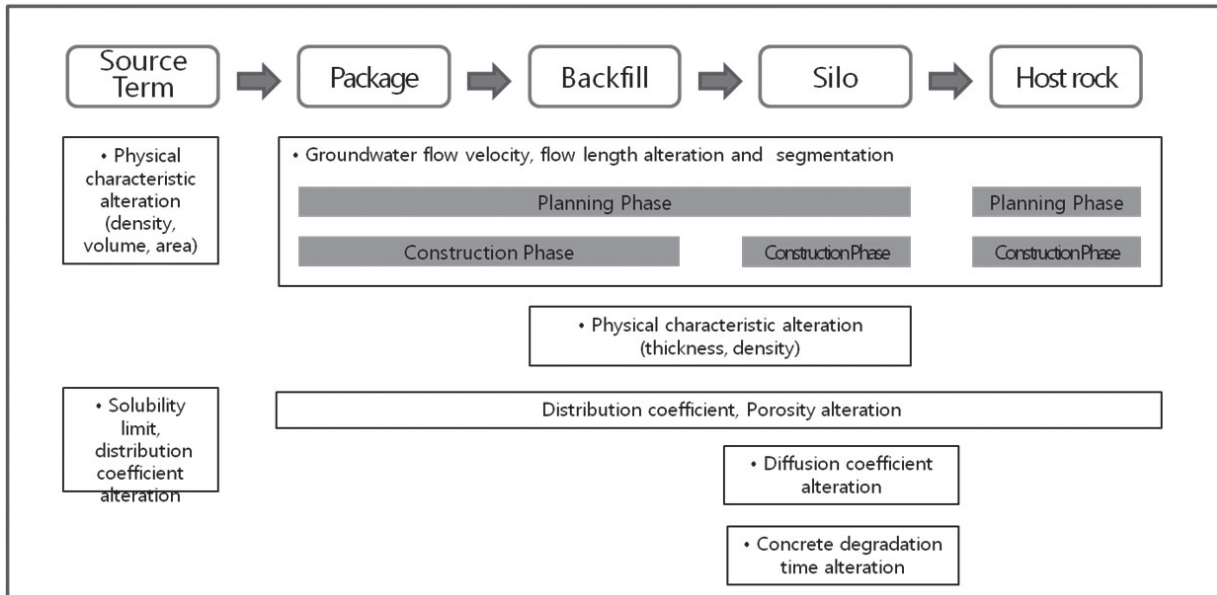


Fig. 3. The application procedure for each barrier depending on the input data decision principle.

Table 2. The thickness of engineered barriers

Engineered barriers	Planning phase Safety Case[4]	Construction phase Safety Case[6]
Container	0.10	0.10
Backfill(crushed rock)	0.15	1.50
Concrete	0.6	SILO 1
		SILO 2
		SILO 3
		SILO 4
		SILO 5
		SILO 6

벽별 입력데이터에 대하여 현장조사/실험결과 상세데이터를 입력변수 결정원칙에 따라 적용하였다.

4.1 현장데이터 반영

방사성폐기물 밀도, 체적 및 단면적에 대한 입력데이터는 건설 중 일부 보완된 폐기물 정치계획과 핵종재고량 재평가에 적용된 데이터를 활용하여 입력데이터 결정원칙 1), 2)

에 따라 적용하였다.

공학적방벽(처분용기, 쇄석 및 콘크리트 사일로방벽) 두께는 입력데이터 결정원칙 3)에 따라 실제 현장데이터로 변경하여 신뢰성을 증진하였다(Table 2). 건설단계에서는 실제 굴착과정에서 확인된 암반상태를 반영하여 설계변경된 도면을 근거로 사일로 콘크리트 벽체두께에 1.0 ~ 1.6 m 을 적용하여 평가하였다. 뒤채움재(쇄석)의 경우 처분용기와 사일로 콘크리트의 빈 공간을 채우는 부분으로, 계획단계

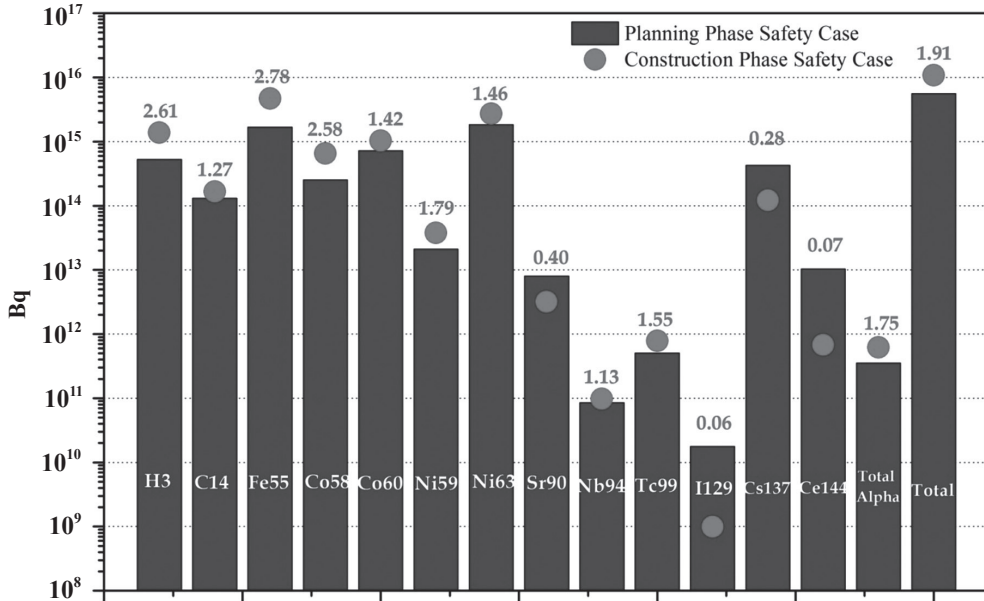


Fig. 4. The comparison between the planing phase radioactive inventory and the construction phase result.

Safety Case[4]에서는 0.15 m 두께를 적용하였으나, 지하수 유동방향에 대한 위치별 쇄석영역의 두께 조사 및 사일로 중심에서 각주방향의 쇄석영역 두께를 조사하여 평균값을 적용하였다.

4.2 핵종재고량

핵종재고량은 안전성평가 시 결과에 가장 큰 영향을 미치는 주요 인자로, 개정된 척도인자와 폐기물 및 포장물 신규 입력데이터를 반영하여 입력데이터 결정원칙 3)을 적용하였다[5]. 핵종재고량 평가에 적용된 척도인자의 경우 계획단계 Safety Case와 달리 개정된 잡고체 및 폐필터 등의 최신 척도인자를 적용하여 평가하였다. 또한, 반입현황 및 중·저준위 방사성폐기물 인수계획을 반영하여 사일로별 수량을 조정하였다. 최종적으로 산출된 핵종재고량과 계획단계 Safety Case의 핵종재고량 값을 비교한 결과를 Fig. 4에 제시하였다. 핵종재고량은 총 5.63E+15 Bq이었으며, 건설단계 Safety Case[6] 이행에 따른 핵종재고량 재평가 결과 1.08E+16 Bq로 총 1.91배 증가하였다.

4.3 분배계수

처분시설 안전성평가는 핵종이동 경로에 대한 지연특성을 고려하며 특히, 핵종이 매질과의 정전기적/화학적 상호작용으로 지하매질 표면에 부착된 형태인 흡착(sorption)은 핵종이동 지연효과에 가장 큰 영향을 미치는 현상이다.

처분시설 건설단계 Safety Case에서는 계획단계 Safety Case에 적용된 분배계수의 유효성 확인과 불확실성 저감을 위해 추가 검증을 수행[7]하고, 초기 실험데이터 및 국외 문헌조사결과를 바탕으로 입력데이터 결정원칙에 따라 유효성을 확인하였다(Table 3).

Table 3에 기술된 Tc의 경우 Kd값이 상이한 이유는 산화 환원조건에 따라 반응성이 다른 흡착성이 좋은 Tc(IV)와 흡착성이 낮은 Tc(VII)의 사용여부에 따라 결과값이 달라지기 때문인 것으로 사료된다[4].

일반적으로 지하매질에 대한 Tc의 분배계수 값들은 처분 안전성평가 시 보수적인 평가를 위해 0 m³/kg의 값을 사용하는 경우가 많다. 그러나, 유기물, 미생물, 철 함유광물 등 Tc의 화학적 거동에 영향을 미칠 수 있는 복잡한 지구화학적 환경에서 Tc의 흡착거동에 대해서 일반적인 평가를 하기에는 아직까지 데이터가 부족한 실정이다.

건설단계 안전성평가에서는 쇄석의 경우 계획 단계에 적용한 값의 출처에 대한 유효성을 확인 할 수 없어 입력데이터

Table 3. The radioactive distribution coefficient of near-field and far-field

a) Distribution coefficient of waste, container and backfill (m³/kg)

Nuclides	Planning phase Safety Case			Construction phase Safety Case	
	Granite[4]	Granite mixture[4]	SAR[4]	Application value[6]	Provided by
H	-	-	0.00E+00	0.00E+00	SAR[4]
C	1.43E-03	1.50E-03	1.44E-03	1.43E-03	Granite[4]
Co	1.55E-01	1.89E-01	1.72E-01	1.55E-01	Granite[4]
Ni	1.35E-01	1.82E-02	1.60E-01	1.82E-02	Granite mixture[4]
Fe	-	-	1.60E-01	1.82E-02	Granite mixture, same as Ni[4]
Sr	1.88E-02	1.88E-02	1.88E-02	1.88E-02	Granite mixture[4]
Nb	1.27E+00	1.18E+00	1.23E+00	1.18E+00	Granite mixture[4]
Tc	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	SAR[4]
I	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	SAR[4]
Cs	1.88E-02	1.89E-02	1.89E-02	1.88E-02	Granite[4]
Pu	1.48E+01	1.26E+01	1.39E+01	1.26E+01	Granite mixture[4]

b) Distribution coefficient of concrete (m³/kg)

Nu.	Literature[8]					Planning phase Safety Case		Construction phase Safety Case	
	NIREX	UK DOE	NAGRA	TVO	SKB	KAERI ¹ [4]	SAR[4]	Application value[6]	Provided by
H	1.00E-04	0.00E+00	-	-	-	-	0.00E+00	0.00E+00	SAR (UK DOE) [4]
C	6.00E+00	1.00E+01	5.00E+00	-	1.00E+00	5.10E-02	5.00E-02	5.10E-02	KAERI[4]
Co	-	-	-	1.00E-01	-	2.26E-01	2.00E-01	2.26E-01	KAERI[4]
Ni	5.00E-02	5.00E-03	1.00E+00	1.00E+00	5.00E-01	4.99E+00	5.00E-01	4.99E+00	KAERI[4]
Fe	-	-	-	-	-	-	5.00E-01	4.99E+00	KAERI, same as Ni[4]
Sr	2.00E-03	5.00E-03	2.00E-03	1.00E-03	1.00E-03	6.00E-02	5.00E-03	6.00E-02	KAERI[4]
Nb	5.00E-02	5.00E-03	1.00E+00	-	1.00E-01	1.09E-01	5.00E-02	1.09E-01	KAERI[4]
Tc	1.00E-01	1.00E-03	(1.00E-03)	2.00E-01 (0.00E+00)	1.00E-01 (1.00E-03)	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	KAERI[4]
I	1.00E-04	1.00E-03	3.00E-02	1.00E-03	3.00E-03	1.00E-03	1.00E-03	1.00E-03	KAERI[4]
Cs	5.00E-03	1.00E-03	2.00E-03	1.00E-02	1.00E-03	5.40E-02	5.00E-03	5.40E-02	KAERI[4]
Pu	5.00E+00	-	5.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	4.27E+00	1.00E+00	4.27E+00	KAERI[4]

¹ K^d value of the concrete material measured by KAERI in licensing on 1st stage

c) Distribution coefficient of host rock (m³/kg)

nuclides	Planning phase Safety Case			Additional test [7]	Construction phase Safety Case	
	Moscow ² [4]	KAERI ³ [4]	SAR[4]		Application value[6]	Provided by
H	-	-	0.00E+00	-	0.00E+00	-
C	1.60E-03	5.00E-03	1.91E-03	2.50E-03	1.60E-03	Moscow[4]
Co	1.10E-01	-	1.13E-01	-	1.10E-01	Moscow[4]
Ni	3.31E-02	3.30E-02	3.00E-02	3.50E-02	3.30E-02	KAERI[4]
Fe	-	-	3.00E-02	-	3.30E-02	KAERI same as Ni[4]
Sr	3.90E-03	4.00E-03	5.16E-03	1.10E-02	3.90E-03	Moscow[4]
Nb	3.14E-01	2.17E-01	3.43E-01	1.38E-01	1.38E-01	Additional test[7]
Tc	3.16E-01	1.00E-03	3.27E-01	0.00E+00	0.00E+00	Additional test[7]
I	-	-	0.00E+00	-	0.00E+00	-
Cs	1.71E-02	3.70E-02	1.62E-02	2.94E-01	1.71E-02	Moscow[4]
Pu	8.70E-01	-	1.18E+00	-	8.70E-01	Moscow[4]

² K^d value measured by LRC(Laboratory of Radiological Control) at Moscow University in licensing on 1st stage

³ Average K^d value measured by KAERI in licensing on 1st stage

결정원칙 1) 및 2)에 따라 초기 실험값 중 보수적인 값을 입력 데이터로 선정하였다. 콘크리트의 경우 국외문헌 값[8]과 국내 실험값을 비교하고, 자연방벽의 경우 추가 수행한 실험값과 초기 실험값을 비교하여 입력데이터 결정원칙 1) 및 2)에 따라 보수적인 값을 입력데이터로 선정하였다.

또한, 흡착실험 매질로 포함되지 않은 시멘트 고화체, 처분용기 및 열화후 콘크리트 값은 보수적 관점에서 뒤채움재(쇄석)에 대한 흡착실험결과를 적용하였다.

4.4 용해도

계획단계 Safety Case에서는 쇄석의 용해도에 대한 초기 실험데이터가 있음에도 불구하고 과도한 보수성을 부여하여 쇄석을 포함한 공학적방벽에 대한 모든 핵종의 용해도 제한이 없는 것으로 가정하였다. 건설단계 Safety Case에서는 입력데이터의 신뢰성 증진을 위해 처분시설 부지조건에 대한 검증 실험을 수행하고[9] 안전성평가를 위해 현장조사/실험데이터를 이용한 입력데이터 결정원칙 1), 2)에 따라 불확실성을 저감하였다. Table 4에 제시된 것처럼 계획단계 Safety Case에서는 KAERI[4]가 도출한 핵종별 용해도 값이

9.99E+08 mol/ m³ ~ 4.35E-02 mol/m³의 범위를 보이며, 보수적인 관점에서 쇄석 및 콘크리트와 반응한 지하수에서의 용해도를 고려하지 않았다. 건설단계에서 쇄석, 콘크리트 및 핵종 용해도는 입력데이터 결정원칙에 따라 선별하였다.

4.5 확산계수

Table 5에 제시된 것처럼 계획단계 Safety Case에서 열화 전 콘크리트에 대한 확산계수는 스웨덴 SKB[10]의 데이터에 근거하여 1.0E-11 m²/s를 적용하였으나, 이는 현장조사/실험데이터가 국외문헌결과에 우선한다는 입력데이터 결정원칙에 위배되므로 계획단계 Safety Case 적용 값은 유효하지 않다. 따라서 입력데이터 결정원칙 1), 2)에 따라 복수의 실험데이터 중 가장 보수적인 KAERI[4]의 초기실험데이터 2.6E-12 m²/s를 적용하였다. 또한 열화 후 콘크리트의 확산계수는 보수적인 평가를 위해 안전기능을 상실한다는 가정에 따라 쇄석의 확산계수 6.0E-10 m²/s를 적용하였다. 자연방벽에서 핵종거동은 지하수 유속이 빠르기 때문에 이류현상에 지배적이며, 상대적으로 확산현상은 그 영향이 미미하므로 건설단계 Safety Case에서는 계획단계 Safety Case와

Table 4. The solubility limit of nuclides for materials of engineered barrier and host rock

a) The solubility limit of engineered barriers (mol/m³)

Nu.	Solubility limit of Backfill				Solubility limit of concrete			
	Planning phase Safety Case		Construction phase Safety Case		Planning phase Safety Case		Construction phase Safety Case	
	KAERI[4]	SAR[4]	Application value [6]	Provided by	KAERI[4]	SAR[4]	Application Value[6]	Provided by
C	6.62E-03	No limit	6.62E-03	KAERI[4]	2.05E-01	No limit	2.05E-01	KAERI[4]
Ni	4.01E-03	No limit	4.01E-03	KAERI[4]	1.58E-02	No limit	1.58E-02	KAERI[4]
Nb	1.32E-03	No limit	1.32E-03	KAERI[4]	5.81E+00	No limit	8.89E+00	Modeling value[9]
Sr	4.35E-02	No limit	4.35E-02	KAERI[4]	1.16E-01	No limit	5.05E+00	Experiment value[9]
Pu	9.99E-08	No limit	9.99E-08	KAERI[4]	6.17E-05	No limit	6.17E-05	KAERI[4]

b) solubility limit of host rock (mol/m³)

Nuclide	Planning phase Safety Case		Additional test		Construction phase Safety Case	
	Moscow[4]	SAR[4]	Experiment value[9]	Modeling value	Application value[6]	Provided by
C	1.10E+01	No limit	3.10E-01	Oversaturated	1.10E+01	Moscow[4]
Ni	6.33E-04	No limit	3.00E+00	6.93E-03	3.00E+00	Experiment value [9]
Nb	5.88E-04	No limit	< 1.0E-05	3.21E-04	5.88E-04	Moscow[4]
Sr	3.08E+02	No limit	8.1E-01	8.94E-01	3.08E+02	Moscow[4]
Pu	1.12E-06	No limit	-	2.36E-07	1.12E-06	Moscow[4]

Table 5. The diffusion coefficient of near-field and far-field

a) The Diffusion coefficient for concrete and backfill (m²/s)

Material	SKB[10]		Planning phase Safety Case				Construction phase Safety Case[6]		
	Before Degrada-tion	After Degrada-tion	KAERI[4]	SAR[4]		Additional test[9]	Before Degrada-tion	After Degrada-tion	Provided by
				Before Degrada-tion	After Degrada-tion				
Backfill	6.0E-10		-	6.0E-10			6.0E-10		SKB[10]
Concrete	1.0E-11	1.0E-10	2.6E-12	1.0E-11	6.0E-10	2.4E-13	2.6E-12	6.0E-10 (backfill)	KAERI[4]

b) The Diffusion coefficient for host rock(m²/s)

Material	Literature		Planning phase Safety Case			Additional test[9]	Construction phase Safety Case	
	Sweden[11]	Finland[12]	SUBATECH ⁴ [4]	KAERI[4]	SAR[4]		value	
Host rock	1.0E-13	4.0E-13	7.4E-13	1.59E-12	-	6.0E-14	-	

⁴ The value measured by SUBATECH(Suba Technology of France) using through-diffusion method in licensing on 1st stage

Table 6. the porosity of engineered barriers and natural barrier

Material	Literature[13]	Planning phase Safety Case		Additional test	Construction phase Safety Case	
		Experiment value[4]	SAR[4]		Application value[6]	Provided by
Backfill	0.3		0.3	0.45[14]	0.45	Additional test
Before degradation concrete		0.15	0.15	0.10[14]	0.15	SAR[4]
After degradation concrete		-	0.3	0.45[14]	0.45	Additional test
Host rock	0.001	0.000378	0.3	0.02[15]	0.02	Additional test

같이 그 영향을 고려하지 않았다.

4.6 공극률

계획단계 Safety Case에서 사일로와 처분용기 사이 빈 공간을 채우기 위해 사용되는 쇄석의 공극률은 핀란드 VUJ 처분시설의 안전성분석보고서[13]에서 적용하고 있는 물성 값 0.3을 적용하였으나, 건설단계 Safety Case에서는 현장조사/실험데이터에 대한 입력데이터 결정원칙에 따라 쇄석의 공극률에 0.45를 적용하였다(Table 6). 콘크리트의 경우 계획단계 Safety Case 적용 값 0.15가 후속조치 검증실험데이터 [14] 0.1에 비해 보수적이므로 유효함을 확인하고 현장조사/실험데이터에 대한 입력데이터 결정원칙 1)에 따라 계획단계 Safety Case 적용 값을 그대로 사용하며, 열화 후 콘크리트에 대해서는 현장조사/실험데이터에 대한 입력데이터 결정원칙 1), 2)에 따라 쇄석 공극률(0.45)을 적용하였다. 암반의 경우 계획단계 Safety Case의 유효공극률은 현장조사에 의한 투수량계수를 이용한 관계식에 따라 산출(0.000378)하였으며, 건설단계 Safety Case에서는 후속조치 검증실험을 통해 유효공극률(0.02)을 도출하였다[15]. 따라서, 현장조사/실험데이터를 이용한 입력데이터 결정원칙 1), 2)을 적용하여 0.02를 선정하였다.

4.7 콘크리트 열화시점

콘크리트 내구성 평가결과와 수학적 모델을 적용하여 콘크리트 사일로를 열화되는 시간을 계산하였다[16]. 평가결과 주철근 직경 28.7 mm의 경우(1,645년)와 주철근 직경

43 mm의 경우(1,864년)에 대한 콘크리트 구조물 완전열화 시점에서 모두 안전성이 증진되는 결과를 제시하였으나, 충분한 안전율을 고려하여 보수적인 관점에서 접근하였기 때문에 실제 사일로 콘크리트의 열화시간은 더욱 길어질 것으로 예상할 수 있다. 콘크리트 열화시점에 대한 값은 입력데이터 결정원칙 3)에 따라 현장 실험값인 1,600년을 적용하였다.

4.8 지하수 유속 및 이동거리

Table 7에 콘크리트 열화 전·후로 지하수유속 및 이동 거리에 대한 입력데이터 결정원칙 3)을 적용하여 결정된 값을 제시하였다. Table 7에 제시된 것처럼 계획단계 지하수 유동 모델링에서는 사일로 근계지역(폐기물+처분용기+쇄석+콘크리트 사일로)의 지하수 속도를 동일하게 고려하였다. 건설단계 지하수유동 모델링에서는 근계지역을 1) (폐기물+처분용기+쇄석) 영역에서는 사일로 내부 지하수 속도와 2) 콘크리트 사일로방벽의 지하수 속도로 구분하여 불확실성을 저감하였다. 원계지역의 경우 계획단계 지하수유동 모델링은 DFN(Discrete Fracture Network) 방법에 의한 결과를 적용하였으나, 건설단계 지하수유동 모델링에서는 계획단계 DFN 방법에 CPM(Continuous Porous Medium) 방법을 추가하여 불확실성을 저감하였다[17].

5. 입력데이터 분석 결과

핵종이동평가 입력데이터를 포함하여 건설단계 Safety Case 개발을 위해 운영중 평가, 기체발생 및 이동평가,

Table 7. The groundwater velocity and flow length of near-field and far-field [17]

		Near-field (waste-container-backfill)_ groundwater velocity(m/yr)					
		Silo #1	#2	#3	#4	#5	#6
Planning phase Safety Case [4]	Before Degradation	1.34E-03	1.34E-03	1.31E-03	1.40E-03	1.31E-03	1.18E-03
	After Degradation	1.46E+00	1.69E+00	1.45E+00	1.69E+00	1.50E+00	1.91E+00
Construction phase Safety Case [6]	Before Degradation	1.36E-03	5.45E-04	9.11E-04	1.12E-03	1.03E-03	1.01E-03
	After Degradation	4.04E+00	7.56E-01	1.08E+00	1.37E+00	1.96E-02	1.46E-02
		Near-field (concrete)_ groundwater velocity(m/yr)					
		Silo #1	#2	#3	#4	#5	#6
Planning phase Safety Case [4]	Before Degradation	1.34E-03	1.34E-03	1.31E-03	1.40E-03	1.31E-03	1.18E-03
	After Degradation	1.46E+00	1.69E+00	1.45E+00	1.69E+00	1.50E+00	1.91E+00
Construction phase Safety Case [6]	Before Degradation	1.53E-03	5.46E-04	9.86E-04	1.23E-03	1.01E-03	1.01E-03
	After Degradation	3.98E+00	7.41E-01	1.05E+00	1.41E+00	1.87E-02	1.48E-02
		Far-field (host rock)- groundwater velocity(m/yr)					
		Silo #1	#2	#3	#4	#5	#6
Planning phase Safety Case [4]	Before Degradation	6.95E-01	6.47E-01	7.08E-01	7.53E-01	7.53E-01	8.05E-01
	After Degradation	8.26E-01	7.61E-01	8.31E-01	9.23E-01	9.27E-01	9.44E-01
Construction phase Safety Case [6]	Before Degradation	8.09E-01	4.38E-01	3.94E-01	3.34E-01	2.45E-02	6.95E-03
	After Degradation	9.70E-01	4.82E-01	4.35E-01	3.33E-01	2.61E-02	1.09E-02
		Far-field (host rock)- groundwater flow length(m)					
		Silo #1	#2	#3	#4	#5	#6
Planning phase Safety Case [4]	Before Degradation	564	689	475	571	399	450
	After Degradation	564	686	468	568	398	450
Construction phase Safety Case [6]	Before Degradation	445.97	534.81	392.64	461.49	258.84	318.20
	After Degradation	442.54	568.53	376.79	482.33	261.32	329.73

Table 8. The summary of decision principle of input data used in the Construction phase Safety Case

Input data category	In-situ survey and experiment results : Application value	Decision principle	Remark
Distribution coefficient by materials	Backfill : KAERI	principle 1), 2)	
	Concrete : KAERI	principle 1), 2)	
	Host rock : Additional test	principle 1), 2)	
Solubility limit by materials	Backfill : KAERI	principle 1), 2)	
	Concrete : Additional test	principle 1), 2)	
	Host rock : Additional test	principle 1), 2)	
Diffusion coefficient by materials	Backfill : -	principle 4)	Literature (SKB)[10]
	Concrete : KAERI	principle 1), 2)	
	Host rock : KAERI	principle 1), 2)	
Porosity by materials	Backfill : Additional test	principle 1), 2)	
	Concrete : Planning phases	principle 1), 2)	
	Host rock : Additional test	principle 1), 2)	
Concrete degradation	Additional test	principle 3)	
Engineered barrier thickness	Design modification	principle 3)	
Physical characteristics by source terms	Additional test	principle 1), 2)	
Related to gas generation	Temperature : site monitoring report	principle 1), 2)	
	Groundwater inflow rate : Additional test	principle 1), 2)	
	Package/waste weight : KHNP	principle 1), 2)	
	Moisture content of package : no value	Exclusion-additional supplement	Literature (KORAD report)[6]
	Reference solid waste composition :paper	principle 1), 2)	
	Reference solid waste weight : paper	principle 1), 2)	
	Container properties : KHNP	principle 1), 2)	
	Metal corrosion rate : no value	Exclusion-additional supplement	Literature (Serco, England)[18]
	Microbial degradation : site monitoring report	principle 1), 2)	
	Inventory : Additional test	principle 3)	
Related to gas migration	Gas permeability(concrete): KORAD	principle 1), 2)	
	Gas permeability(Etc.): Additional test	principle 1), 2)	
	Porosity (backfill) : Additional test	principle 1), 2)	
	Porosity (concrete) : Planning phases	principle 1), 2)	
	Porosity (host rock) : Additional test	principle 1), 2)	
	Density(backfill) : Additional test	principle 1), 2)	
	Density (concrete) : KORAD	principle 1), 2)	
	Density (host rock) : Additional test	principle 1), 2)	
	Van Genuchten parameter: no value	Exclusion-additional supplement	Literature (Nagra)[19]
Cumulative gas emission : Additional test	principle 3)		
Related to Exposure to the air	Gas outlet area : no value	Exclusion-additional supplement	Kyongju City Area
	Respiration : KHNP	principle 1), 2)	
	Penetration : Additional test	principle 1), 2)	
	Shielding factor : - no value	principle 4)	Literature (Nirex[20], FGR[21])
	Architecture specification/gas properties : no value	principle 4)	Literature (Nirex)[20]
	Dose coefficient : no value	principle 4)	Literature (ICRP)[22]

Input data category	In-situ survey and experiment results : Application value	Decision principle	Remark	
Groundwater modeling	Sea biosphere : Additional test	principle 3)		
	Well biosphere : Additional test	principle 3)		
Inventory	Additional test	principle 3)		
biosphere	Dose coefficient(internal exposure) : no value	principle 4)	Literature (ICRP)[22]	
	Dose coefficient(external exposure) : no value	Exclusion-additional supplement	Literature (ORNL)[23]	
	Food intake amount : KHNP,KAERI	principle 1), 2)		
	Concentration ratio : no value	Exclusion-additional supplement, principle 4)	Literature (H12)[24], IAEA[25])	
	Mass transfer between compartments	Penetration rate/irrigation rate : Additional test /modeling	principle 2), 3)	
		Sea water emission and solid phase migration : no value	Exclusion-additional supplement, principle 4)	Literature (H12)[24]
	Compartment medium depth(well) : no value	Exclusion-additional supplement	Additional test	
	Compartment medium depth (marine) : Planning phases	principle 1), 2)		
	Compartment medium depth (top soil, unsaturated zone, aquifer, marine sediments) : no value	Exclusion-additional supplement, principle 4)	Literature (H12) [24]	
	Compartment medium area(well) : no value	Exclusion-additional supplement	Planning phase safety case	
	Compartment medium area (Etc.) : no value	Exclusion-additional supplement, principle 4)	Literature (H12)[24]	
	Compartment medium volume (well) : no value	Exclusion-additional supplement	Additional test	
	Compartment medium volume (top soil, unsaturated zone, aquifer) : no value	Exclusion-additional supplement, principle 4)	Literature (H12)[24]	
	Compartment medium volume (marine) : no value	principle 4)	Literature (H12)[24]	
	Compartment medium volume (marine sediment) : no value	principle 4)	Literature (H12)[24]	
	Compartment medium distribution coefficient(top soil, unsaturated zone) : Moscow/no value	Exclusion-additional supplement principle 1), 2)	Literature (IAEA-Fe, H)[26]	
	Compartment medium distribution coefficient (aquifer) : Additional test	principle 1), 2)		
	Compartment medium distribution coefficient (marine sediment) : Additional test / no value	Exclusion-additional supplement principle 1), 2)	Literature (SKB-Fe, H)[27] [28]	
	Compartment medium porosity (top soil, unsaturated zone) : Planning phases	principle 1), 2)		
	Compartment medium porosity (aquifer) : Additional test	principle 1), 2)		
	Compartment medium porosity (marine, marine sediment) : no value	principle 4)	Literature (H12)[24]	
	Compartment medium density (aquifer) : Additional test	principle 1), 2)		
	Compartment medium density (Etc.) : no value	principle 4)	Literature (H12)[24]	
	Characteristics by exposure group	Respiratory rate : KHNP	principle 1), 2)	Literature(KHNP[29])
		Resident time : KHNP/no value	Exclusion-additional supplement principle 1), 2)	Literature (KHNP[29], H12[24])
		Dust and aerosol amount : no value	principle 4)	Literature (H12)[24]
		Hydraulic gradient /hydraulic conductivity: Additional test	principle 1), 2)	

인간침입평가 및 생태계 평가에 적용된 총 14개 분야 입력 데이터들을 분석하고 안전성평가에 적용하였다. 건설단계에 적용한 입력데이터의 결정원칙을 Table 8에 요약하였다. 현장조사/실험데이터를 통해 확인이 불가능한 경우 입력데이터 결정원칙 4)가 적용된 입력데이터와 입력데이터 결정 1단계에서 배제된 입력데이터들은 별도 추가보완계획을 수립하여 운영단계에서 보완할 계획이다.

6. 토의 및 결론

처분시설 Safety Case 종합프로그램의 입력데이터 결정 원칙과 절차를 수립하고 이에 따라 건설단계 입력데이터를 결정하여 안전성평가에 적용함으로써 투명성, 추적성, 개방성, 재현성, 회수성 등을 확보하였다. 또한, 내·외부 독립검토를 통한 기술적 근거 마련 및 품질보증 관련 사항을 문서화함으로써 안전성평가에 대한 신뢰도를 구축하였다. 계획단계 safety Case 대비 현장지질조사/실험결과데이터, 실제 설계데이터 및 적치계획, 콘크리트 물성 실험값, 다년간 축적한 현장 모니터링 결과값(지하수, 기상, 지진 등), 생태계 관련 최신 데이터 및 핵종재고량 등을 적용함으로써 안전성평가 결과에 대한 정확성을 높이고 불확실성을 저감하였다.

입력데이터 종류에 대해 불확실성 항목을 파악하고, 크게 입력데이터의 출처 및 정밀도에 대한 불완전함의 보완, 보수적 입력데이터의 보완 및 입력데이터 결정원칙 1) ~ 4)에 따라 입력데이터를 보완하였다. 처분시설 안전성평가에는 다양한 분야의 특성 데이터들이 사용되며 Safety Case의 입력데이터 결정원칙에 부합하지 않는 값들은 향후 지속적인 보완을 위해 입력데이터 추가보완 계획을 수립하였다. 입력데이터 추가보완 범위는 현장조사/실험데이터가 건설단계에 존재하지 않아 건설단계 입력데이터 중 추가보완계획에 포함되어야 하는 데이터들로 구성되며 다음의 2개 그룹으로 크게 구분할 수 있다.

- 건설단계에 문헌결과를 적용한 경우(원칙 4)
'입력데이터 결정원칙 4'에 해당하여 추가보완계획에 포함된 입력데이터들은 현장조사/실험데이터가 건설단계에 존재하지 않지만, 문헌의 범위에 해당하는 조사결과가 존재하여 건설단계에 적용된 내용이다. '입력데이터 결정원칙 4'에 해당되는 내용은 추가적인 문헌조사와

향후 현장조사/실험데이터 확보를 위한 상세계획을 수립하여 안전성확보체계의 '평가기반'을 지속적으로 구축할 것이다.

- 1단계 결정원칙에서 배제된 후 문헌결과를 적용한 경우(1단계배제-추가보완)

"1단계 배제-추가보완"에 해당하여 추가보완계획에 포함된 입력데이터들은 입력데이터 결정 1단계에서 계획단계 입력데이터의 출처 및 근거가 확인되지 않았거나, 계획단계에는 고려하지 않는 데이터들이 해당된다. "1단계 배제-추가보완"에 해당되는 계획단계에서 출처 및 근거가 확인되지 않은 데이터는 건설단계에서 먼저 배제하고 관련 현장조사/실험결과 또는 문헌조사결과를 건설단계에 적용한 내용이다. "1단계배제-추가보완"의 항목 중 생태계 모델링의 입력데이터인 구획매질(우물) 깊이 및 체적 항목은 건설단계에서 후속조치를 통한 현장조사/실험데이터가 확보되었으므로 향후 입력데이터 추가보완계획에서는 제외하였다.

입력데이터 항목 중 일부 핵종에 따라 출처 및 근거가 없는 경우와 "원칙 4"에 해당하는(근거는 확인이 되나 현장조사/실험데이터가 없는 경우) 핵종이 함께 포함된 입력데이터 항목은 전체를 향후 추가보완계획에 포함하고, 추가적인 문헌조사와 향후 현장조사/실험데이터 확보를 위한 상세계획을 수립하여 안전성확보체계의 '평가기반'을 지속적으로 구축할 것이다.

현재까지 구축된 입력데이터 데이터베이스를 기반으로 지속적인 입력데이터 품질관리를 통해 향후 처분시설 safety case 개발에 활용할 계획이다.

REFERENCES

- [1] International Atomic Energy Agency(IAEA), The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste, Specific Safety Guide No. SSG-23, Vienna (2012).
- [2] United States Nuclear Regulatory Commission(US NRC), Quality Assurance Criteria for Nuclear Power Plants and Fuel Reprocessing Plants, NRC Regulation 10 CFR Part 50, Appendix B, US.

- [3] International Atomic Energy Agency(IAEA), Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities, Results of A Coordinated Research Project Vol. 1, Review and Enhancement of Safety Assessment Approaches and Tools, IAEA-ISAM-1, Vienna (2004).
- [4] Korea Radioactive Waste Agency(KORAD), Safety Analysis Report for Low- and Intermediate-Level Radioactive Waste Disposal Facility on the Planning Phase (2008).
- [5] Korea Radioactive Waste Agency(KORAD), Radioactive Waste Inventory, Construction and Operation Licensing Following-up Action Report (in press) (2014).
- [6] Korea Radioactive Waste Agency(KORAD), Safety Analysis Report for Low- and Intermediate-Level Radioactive Waste Disposal Facility on Construction Phase (in press) (2014).
- [7] Korea Radioactive Waste Agency(KORAD), Verification for the Distribution Coefficient of Rock Medium, Fracture Zone, Soil, Construction and Operation Licensing Following-up Action Report (in press) (2014).
- [8] I. G. McKinley and A. Scholtis, "Compilation and Comparison of Radionuclide Sorption Databases Used in Recent Performance Assessments", Proceedings of an NEA Workshop on Radionuclide Sorption from the Safety Evaluation Perspective, Interlaken, Switzerland, Oct. 16-18 (1991).
- [9] Korea Radioactive Waste Agency(KORAD), Verification for the Solubility and Diffusion Coefficient of Silo Concrete and Backfill, Construction and Operation Licensing Following-up Action Report (in press) (2014).
- [10] M. H. Bradbury and F. A. Sarott, Sorption Database for the Cementitious Near-Field of a L/ILW Repository for Performance Assessment, PSI Report 95-06, Paul Scherrer Institute, Villigen (1995).
- [11] Y. Ohlsson and I. Neretnieks, Diffusion Data in Granite, Recommended Values, SKB TR 97-20 (1997).
- [12] E. Puukko, T. Heikkinen, M. Hakanen, and A. Lindberg, Diffusion of Water, Cesium and Neptunium in Pores of Rocks, Report YJT-93-23, 29 (1993).
- [13] V. Timo and N. Henrik, VLJ Report Safety Analysis, Report TVO-1/98, ISSN 1456-1514, July (1998).
- [14] Korea Radioactive Waste Agency(KORAD), Feasibility Study on the Engineered Barrier Materials Selected for the Low-and Intermediate-Level Radioactive Waste Disposal Facility, Construction and Operation Licensing Following-up Action Report (in press) (2014).
- [15] Korea Radioactive Waste Agency(KORAD), Effective Porosity and Distributed Index Verification for Rock Medium and Fracture Zone, Construction and Operation Licensing Following-up Action Report (in press) (2014).
- [16] Korea Radioactive Waste Agency(KORAD), Degradation Assessment for Concrete Structures of Disposal Facility, Construction and Operation Licensing Following-up Action Report (in press) (2014).
- [17] Korea Radioactive Waste Agency(KORAD), Hydrogeologic Characterization and Modeling, Construction and Operation Licensing Following-up Action Report (in press) (2014).
- [18] N. R. Smart and A. R. Hoch, A Survey of Steel and Zircaloy Corrosion Data for Use in the SMOGG Gas Generation Model, Serco Assurance Report, SA/ENV-0841, Issue 3 (2010).
- [19] R. Senger, J. Ewing, K. Zhang, J. Avis, P. Marschall, and I. Gaus, "Modeling Approaches for Investigating Gas Migration from a Deep Low/Intermediate Level Waste Repository(Switzerland)", Springer Science+Business Media B. V. (2011).
- [20] A. J. Baker, D. A. Lever, J. H. Rees, M. C. Thorne, C. J. Tweed, and R. S. Wikramaratna, An Assessment of the Post-closure Performance of a Deep Waste Repository at Sellafield, Nirex 97, Vol. 4 (1997).
- [21] K. F. Eckerman and J. G. Ryman, External Exposure to Radionuclides in Air, Water, and Soil, Federal Guidance Report No. 12, US (1993).
- [22] International Commission on Radiological Protection (ICRP), Age-Dependent Doses to the Members of the

- Public from Intake of Radionuclides – Part 5 Compilation of Ingestion and Inhalation Coefficients, ICRP Publication 72, Ann. ICRP 26(1) (1995).
- [23] ORNL, May 7 2014. “Internal Dose Factor: DFINT code.” ORNL. Accessed July 29 2014. Available from: <http://www.wise-uranium.org/rdr.html#DFACT>.
- [24] Japan Atomic Energy Agency(JAEA), H12 : Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan, JNC-TN-1410, 2000-004 (2000).
- [25] International Atomic Energy Agency(IAEA), Sediment Distribution Coefficients and Concentration Factors for Biota in the Marine Environment, IAEA Technical Reports Series No. 422, (2004).
- [26] International Atomic Energy Agency(IAEA), Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments, IAEA TRS No. 472 (2010).
- [27] S. Karlsson, U. Bergström, and Studsvik Eco & Safety AB, Element Specific Parameter Values Used in the Biospheric Models of the Safety Assessments SR 97 and SAFE, SKB R-02-28 (2002)
- [28] Svensk Kärnbränslehantering AB(SKB), Models for Dose Assessments Modules for Various Biosphere Types, SKB TR-99-14 (1999).
- [29] Korea Hydro & Nuclear Power Co., LTD (KHNP), Radiological Environment Report for Operation Licensing of the Sin-Wolsung 1 and 2 Unit, KHNP (2011).