

Improvement of Safety Approach for Accidents During Operation of LILW Disposal Facility : Application for Operational Safety Assessment of the Near-surface LILW Disposal Facility in Korea

중·저준위 방사성폐기물 처분시설의 운영 중 사고에 대한 평가체계 개선 :
한국의 중·저준위 방사성폐기물 표층처분시설의 운영 중 안전성평가 적용사례

Hyun-Joo Kim*, Minseong Kim, and Jin Beak Park

Korea Radioactive Waste Agency, 168 Gajeong-ro, Yuseong-Gu, Daejeon, Republic of Korea

김현주*, 김민성, 박진백

한국원자력환경공단, 대전광역시 유성구 가정로 168

(Received March 17, 2017 / Revised April 26, 2017 / Approved June 16, 2017)

To evaluate radiological impact from the operation of a low- and intermediate-level radioactive waste disposal facility, a logical presentation and explanation of expected accidental scenarios is essential to the stakeholders of the disposal facility. The logical assessment platform and procedure, including analysis of the safety function of disposal components, operational hazard analysis, operational risk analysis, and preparedness of remedial measures for operational safety, are improved in this study. In the operational risk analysis, both design measures and management measures are suggested to make it possible to connect among design, operation, and safety assessment within the same assessment platform. For the preparedness of logical assessment procedure, classification logic of an operational accident is suggested based on the probability of occurrence and consequences of assessment results. The improved assessment platform and procedure are applied to an operational accident analysis of the Korean low- and intermediate-level radioactive waste disposal facility and partly presented in this paper.

Keywords: Operational accident analysis, Safety function analysis, Hazard analysis, Risk analysis, Operational accident classification criteria

*Corresponding Author.

Hyun-Joo Kim, Korea Radioactive Waste Agency, E-mail: esther@korad.or.kr, Tel: +82-42-601-5323

ORCID

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

Minseong Kim <http://orcid.org/0000-0002-8933-735X>

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

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

중·저준위 방사성폐기물 처분시설의 운영 중 사고로 인한 방사선적 영향을 평가하기 위해서는 운영 중 발생 가능한 사고에 대한 타당성이 입증되어야 한다. 본 논문에서는 처분시설의 운영 중 사고분석 체계를 처분시설의 구성요소에 대한 안전기능분석, 잠재위험요소분석, 위험도분석, 그리고 향후 조치대안으로 사고평가체계를 개선하였다. 이를 위하여 위험도분석에 필요한 설계대안과 관리대안을 추가하여 설계-운영-평가가 연계되도록 하였다. 또한 운영 중 사고의 발생확률과 평가결과의 심각성에 따라 운영중 사고에 대한 분류기준을 제안하여 처분시설 운영 중 대표 사고시나리오에 대한 정당성을 확보하였다. 본 논문의 개선된 평가체계를 우리나라의 2단계 중·저준위 방사성폐기물 표준처분시설에 대한 처분시설 운영 중 사고분석의 사례에 대해 적용하였다.

중심단어: 운영 중 사고분석, 안전기능분석, 잠재위험요소분석, 위험도분석, 운영 중 사고분류기준

1. 서론

우리나라는 원자력발전소 26기를 비롯하여 경주 중·저준위 방사성폐기물 처분시설이 운영 중에 있으며 원자력관련시설의 운영개시 전에 운영 중 정상조건 및 사고조건으로부터 발생할 수 있는 일반인과 작업자에 대한 피폭을 고려하여 시설의 방사선적 안전성을 확보할 수 있도록 시설 설계 및 안전운영에 대비하고 있다. 일반적으로 산업계에서는 공정설계상 및 운영상 문제점을 파악하여 불량률과 사고를 최소화하기 위해 HAZOP (Hazard and Operability)과 HAZID (Hazard Identification)의 위험도분석방법론을 사용하고 있다.

이미 처분시설을 운영하고 있는 국가들의 경우 HAZOP 및 HAZID와 같은 정성적 위험도분석방법론을 적용하여 잠재위험요소분석(hazard analysis)을 통해 처분시설 운영 중 사고분석(accident analysis)을 수행하고 있다. 미국[1-2]과 영국[3-5]의 경우 사건(event)을 유발하는 잠재위험요소를 도출하고 사건발생확률과 평가결과의 심각성에 따라 사건을 선별하고 사고분석을 통해 방사선적 영향을 평가한다. 프랑스[6]의 경우 처분시설 운영 중 발생 가능한 사건을 도출하고 사건을 방지할 수 있는 관리방안과 설계안전장치에 따라 사건의 위험수준을 분류하고 사건발생확률을 고려하여 운영 중 사고분석을 수행하고 있다.

현재 우리나라에서 운영중인 1단계 동굴처분시설에 대한 운영 중 사고분석에서는 정성적 위험도분석법(HAZOP)을 도입하여 잠재위험요소와 사고유형에 따른 사건발생확률과 심각성을 고려하여 대표 사고시나리오를 도출하고, 선량평가를 통해 일반인이 받는 방사선적 영향을 평가하였다[7].

그러나, 처분시설 운영경험이 부족한 우리나라의 경우 사건 발생확률을 미국[1] 및 영국[3]의 기준을 적용하였으며 결과의 심각성에 대한 정량적인 선별기준이 없어 대표 사고시나리오에 대한 타당성 확보가 충분히 이루어지지 못하였다.

본 논문에서는 처분시설 운영 중 사고분석 시 처분시설 구성요소 별 운영 중 안전기능분석(Operational Safety Function Analysis)을 추가하고, 운영 중 잠재위험요소분석(Hazard Analysis)시 설계대안과 현장운영을 고려한 관리대안을 추가함으로써 설계-운영-평가의 상호연계를 통해 안전목표에 부합하는 처분시설 개발이 가능하도록 평가체계를 개선하였다. 또한, 운영 중 사고발생확률과 결과의 심각성을 고려한 사고분류기준을 제시하고 2단계 표준처분시설의 운영중안전성평가에 적용함으로써 사고시나리오에 대한 정당성을 확보하고자 하였다.

2. 운영 중 사고평가의 적용

운영 중 사고평가는 처분시설의 건설/운영과 관련된 모든 잠재적 위험들을 파악하고, 이를 통해 운영 중 사고시나리오 및 평가모델을 수립하여 운영 중 사고로 인한 작업자 및 일반인의 방사선적 영향을 평가함으로써 처분시설의 운영 중 안전성을 입증하는데 그 목적이 있다.

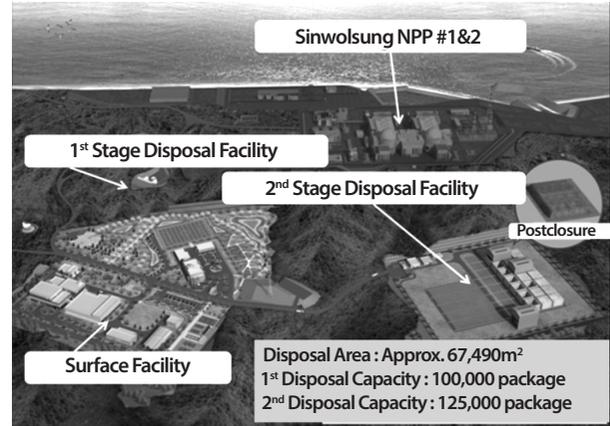
중·저준위 방사성폐기물 80만 포장을 대상으로 하는 전체 처분시설 개발계획[8]에 따라 1단계 동굴처분시설과 2단계 표준처분시설의 개념도를 Fig. 1에 제시하였다. 2단계 표준처분시설의 운영기간은 표준처분고의 건설부터 폐기물

적치 후 밀봉하는 표층처분고 운영기간, 처분덮개를 설치하는 부분폐쇄기간 및 1단계 동굴처분시설을 포함하여 전체처분시설이 폐쇄되는 전체폐쇄시점까지 기간이 해당된다. 처분덮개가 설치된 부분폐쇄 이후에는 표층처분고 및 처분덮개 성능을 모니터링 하기 위해 지하점검로를 운영하고 전체 부지가 폐쇄되는 시점에 지하점검로를 폐쇄할 계획이다(8-9). 2단계 표층처분시설의 운영에는 폐기물 운반, 인수, 검사, 처리, 저장, 정치, 처분고 내부채움, 밀봉, 덮개설치 및 전체부지의 폐쇄전 관리활동 등이 고려된다. 운영 중 사고평가는 안전기능분석, 잠재위험요소분석을 통해 운영기간 동안 예상되는 사건을 도출하고 위험도분석을 통해 처분시설의 방사선적 안전성을 확인한다.

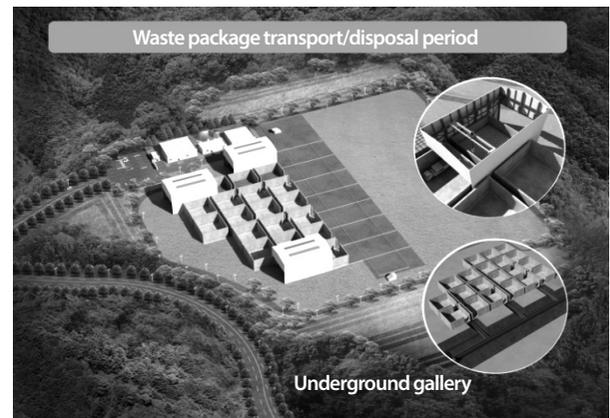
2.1 운영 중 안전기능분석

1단계 동굴처분시설의 안전성평가[10]는 IAEA 안전지침 [13-16]에 따라 처분시설 ‘Safety Case 종합프로그램’ [11~12]의 안전성확보체계에 따라 건설, 운영 및 폐쇄를 포함한 처분시설의 개발 단계별 평가기반 구축을 통해 운영중안전성평가를 수행하였다. 처분시설의 운영 중 ‘Safety Case 종합프로그램’ [11] 이행을 위한 심층방어전략은 처분시설의 정상운영, 예측된 운영상황 및 사고상황에서 방사성물질과 작업자, 일반인 또는 환경 사이에 위치하는 물리적/관리적 방벽의 유효성을 유지하기 위해 다양한 장치 및 절차를 논리적으로 배치하는 것을 의미한다. 처분시설 운영 중 사고분석을 위한 절차를 Fig. 2에 제시하였다. Fig. 2와 같이 처분시설 구성요소의 안전기능분석, 평가기반의 구축, 설계 및 안전성평가의 반복수행을 통해 처분시설 운영중안전성평가를 수행한다.

운영 중 안전기능분석은 처분시스템을 구성하는 인위적, 자연적, 행정적 요소들을 구성기기로 정의하고 구성기기에 대한 안전기능을 설정하여 각 구성기들이 처분시설 안전성에 미치는 영향, 역할 및 상호작용을 분석하는데 목적이 있다. 처분시설 안전기능은 심층방어전략에 따라 주요구성기기 중 다중안전기능을 가지거나 보완기능을 가지도록 구성하였다. 한 개의 안전기능 상실 또는 안전행위 미이행이 처분시설의 안전목표 달성을 어렵게 하는 것이 아니라 다른 안전기능 또는 안전행위로 인해 안전목표를 달성하는 개념이다[11]. 2단계 표층처분시설의 운영 중 사고분석을 위해



(a) Development of 1st and 2nd stage disposal facility



(b) Operation of the 2nd stage near surface disposal facility : radioactive waste transport, disposal in the vault and radiation monitoring in underground gallery



(c) The 2nd stage near surface disposal facility after closure : monitoring for cover system and disposal vault performance

Fig. 1. Development plan for the 1st and 2nd stage of Wolsung Low- and Intermediate-level radioactive waste disposal facility in Korea [8].

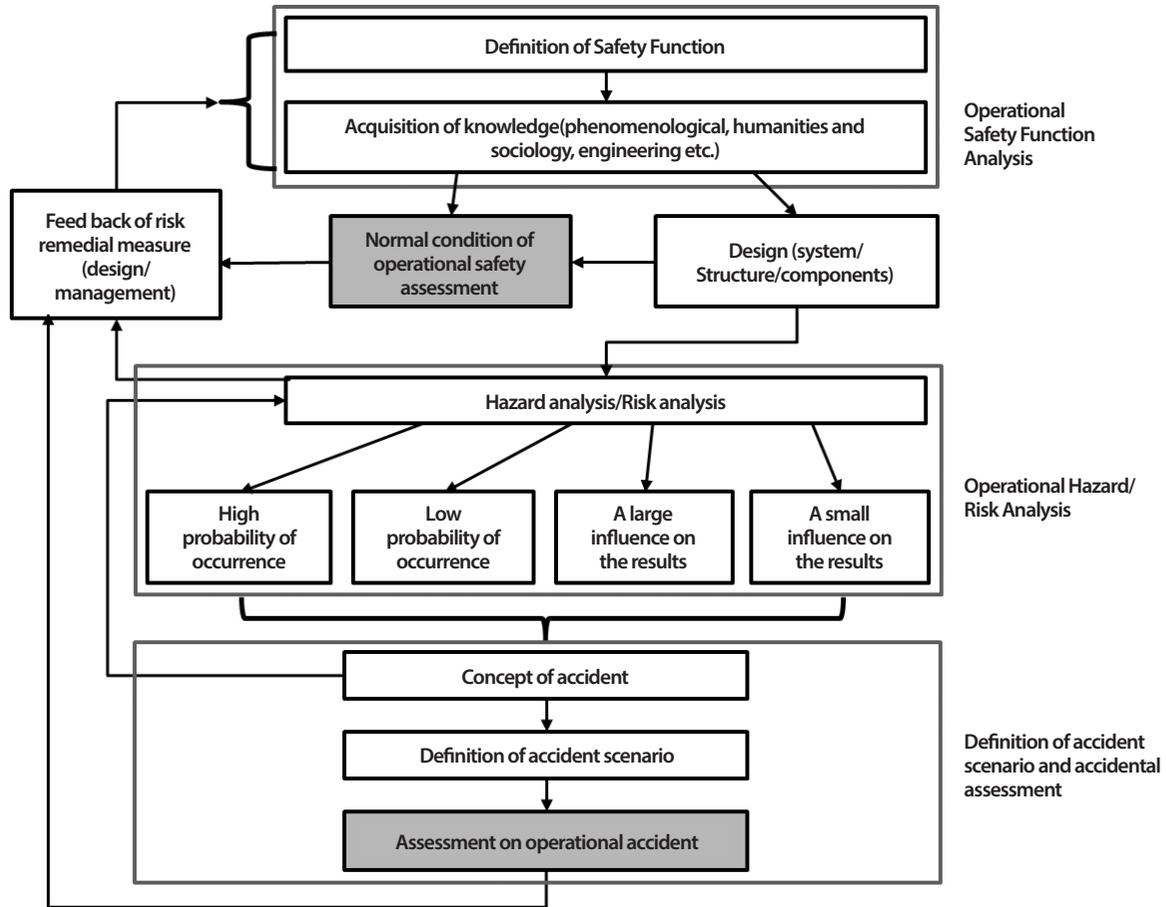


Fig. 2. Procedure of operational safety assessment based on Safety strategy [11].

구성기기의 역할 및 안전기능을 분석하였으며 다음과 같이 크게 3개의 안전기능(Safety Function, SF)으로 분류하였다[17].

- SF 1: 처분대상 방사성폐기물 핵종재고량 관리
- SF 2 : 방사선위해로부터 현재 및 미래의 환경과 인간 보호
- SF 3 : 방사성폐기물과 공학적방벽의 보호

처분시설 안전기능은 IAEA[13-16]에 따라 작성된 것으로 안전기능 별 목적에 맞게 세부항목으로 재분류된다. 안전기능 SF 1(처분대상 방사성폐기물 핵종재고량 관리)의 경우 해당 목적을 달성하기 위해 폐기물포장물 인수, 검사, 처분준비, 이동, 밀봉, 방사선 영향감시 등 10개의 안전기능으로 세분화하였다. 안전기능 SF 2(방사선위해로부터 현재 및 미래의 환

경과 인간 보호)의 경우 방사선환경, 공기의 이동경로 및 물의 이동경로에 따른 오염물질로부터 인간 및 환경보호 등 5개로 분류하고 항목별로 세분화하였다. 안전기능 SF 3(방사성폐기물과 공학적방벽의 보호)의 경우 시간경과에 따른 열화, 외부 자연현상, 동식물 및 인간활동에 의한 폐기물 및 공학적방벽 성능보호로 분류하고 각 항목별로 목적에 맞게 세분화하였다.

안전기능분석에 대한 상세내용은 2단계 표충처분시설 안전성분석보고서[17]에 기술되어 있으며, 본 논문에서는 운영 중 안전기능분석 중 ‘SF 2.5 물의 이동경로에 따른 오염물질로부터 인간과 환경보호(SF 2.5 Protect people and environment from contamination by water pathways)’ 부분을 발췌하여 기술하였다. Table 1에서는 해당 안전기능의 목적을 달성하기 위해 필요한 처분시설 구성요소와 담당기능을 제시하였다. 운영 중 안전기능분석결과, 운영 중에는

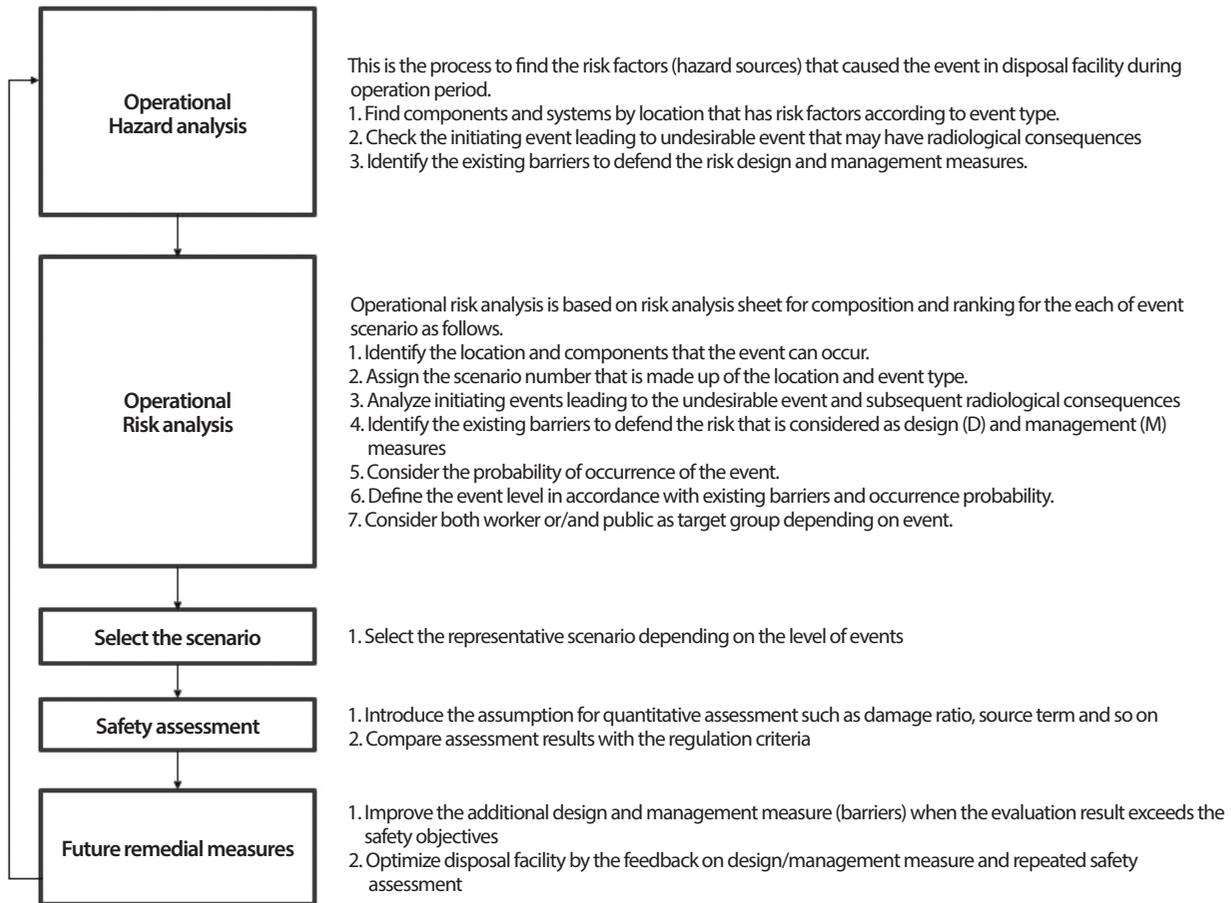


Fig. 3. Detailed procedure of operational safety assessment.

작업자와 일반인 보호를 위한 운영지침 및 절차 준수가 중요한 역할을 담당한다. 또한, 2단계 표층처분시설의 경우 운영 중 강우와 방사성폐기물의 접촉을 최소화하기 위해 이동형크레인쉘터(MCS: Mobile crane shelter)의 차수기능, 그리고 지하점검로의 방사성배수계통 및 공기조화계통으로부터 방사성물질 누출에 대한 감시가 중요한 안전사항으로 고려되었다.

2.2 운영 중 잠재위험요소분석

Table 1에서는 처분시설 안전기능분석을 통해 운영 중 안전성에 영향을 미치는 구성기기/계통/구조물을 파악하였다. Fig. 2의 절차에 따라 이 구성기기들이 폐기물 취급, 운반, 처분하는 과정 동안 유해한 수준의 방사선적 피폭을 초래

할 수 있는 인위적 및 자연적 잠재위험요소를 확인하였다. 운영 중 사고시나리오에 대한 안전성평가를 통해 방사선적 영향을 경감하거나 제어할 필요가 있는 경우에는 추가적인 설계대안 또는 관리대안을 수립하여 운영 중 안전성을 확보해야 한다. 처분시설 구성요소 별 운영 중 잠재위험요소 분석을 통해 설계 및 관리방안을 확인하고, 운영 중 위험도 분석을 통해 대표 사고시나리오를 선정하는 자세한 절차를 Fig. 3에 제시하였다.

잠재위험요소는 처분시설 운영 중 사고를 유발할 수 있는 원인으로 미국의 경우, 전기적요인, 열적요인, 가연성물질, 불꽃, 인화성물질, 폭발성물질, 위치에너지, 운동에너지, 핵임계, 외부사건, 자연현상 등으로 분류할 수 있다[18]. 운영 중 처분시설과 관련된 사고 및 비정상조건은 크게 자연적인

사고와 인위적인 사고로 나눌 수 있으며, 자연적인 사고에는 산사태, 지진, 홍수, 태풍 등이 해당하며 인위적인 사고에는 인간의 부주의한 활동과 기기/계통/구조물 결합에 의한 사건이 해당한다. 이러한 잠재위험요소로부터 화재, 폭발, 밀폐/격납기능 상실, 직접피폭, 핵임계, 외부사건, 자연재해와 같은 사건이 발생할 수 있다.

잠재위험요소분석의 목적은 시설운영 중 구성물/계통/기기를 통해 발생될 수 있는 위험요인을 도출하고 이러한 위험요인이 사고로 연계되는 것을 방지하는데 있으며, 이를 위해 관리대안과 설계대안 항목을 추가함으로써 구성요소들이 고유의 안전기능을 달성할 수 있도록 개선하였다.

관리조치(management measure)는 조직적(organizational) 조치와 인간활동에 의한 조치로 운영자 경험, 절차, 설명 등이 해당하며, 설계조치(design measure)는 수동적 방벽(passive barrier)과 능동적 방벽(active barrier)이 해당한다. 수동적 방벽에는 구동, 기계적 작동, 전력공급 등과 같이 외부적 요인에 의존하지 않고 기능을 작동하는 구성요소(예, 방사선방호벽, 울타리 등)가 해당하고 능동적 방벽에는 구동, 기계적 작동 또는 전원공급과 같은 외부 요인에 의존하여 기능을 작동하는 구성요소(예, 화재감지, 소화전, 자동정지장치, 위험물 감지 등)가 해당하며 모두 원자력분야 건설요건 및 표준코드 (codes of standard)를 준수해야 한다[19].

처분시설을 구성하고 있는 구조물/계통/기기의 안전기능을 분석하고 사건 발생 시 하나의 사건이 다른 구조물/계통/기기의 안전기능에 영향을 미치지 않는 범위에서 제어할 수 있도록 독립된 구획으로 구분하였다. 2단계 표층처분시설에서 사건을 유발시킬 수 있는 모든 잠재위험요소를 파악하기 위해 방사성폐기물 취급유형에 따라 처분고(IVAU; 1st vault), 지하점검로(IGAL; 1st gallery), 운반경로(ORT; On-site Route of Transportation)를 각각 독립된 구획으로 구분하였다. 처분시설 각 구획 별로 사고유형에 따라 구조물/계통/기기에 대한 잠재위험요소를 도출하였다(Table 2 참조). Table 3에 잠재위험요소 중 격납/밀폐기능 손실에 영향을 미치는 내부침수원(internal flooding source)에 대한 분석결과와 사례를 제시하였다. 구성요소 별 설계대안과 현장운영을 고려한 관리항목대안을 통해 사건 경감 및 예방조치가 가능하도록 하였으며, 주기적 점검 또는 정기정검을 통해 설비 노후화에 따른 부품 교체 시기 및 설비개선 등에 활용할 수 있도록 하였다.

Table 2. Event type and hazard source during the operation of disposal facility

Event Type	Hazard sources
Fire	Electrical
	Thermal
	Open flame
	Flammables
	Combustibles
	Explosive material
Explosion	Chemical reaction
	Electrical
	Thermal
	Open flame
	Flammables
Loss of containment/ confinement	Explosive material
	Potential (pressure)
	Chemical reaction
	Kinetic (linear and rotational)
	Potential (pressure)
	Potential (height/mass)
Direct exposure	Internal flooding sources
	Physical
	Chemical reaction
	Hazardous material
Nuclear criticality	Ionizing radiation
External hazard	Criticality
	Non-facility event
Natural phenomena	Vehicles in motion
	Natural phenomena

2.3 운영 중 위험도분석

‘Safety Case 종합 프로그램’ [11]의 이행에 따른 처분시설의 강건성(robustness)전략은 처분시스템 개별 구성요소들이 예측 가능한 외적 장애요인과 불확실성에도 불구하고,

Table 3. Hazard analysis of structure, system, and components (Details on 'hazard source of internal flooding sources')

Potential risk factors	Components and Systems	Event	Initiating event and Undesirable event	Existing barriers	
				Design measures	Management measures
Internal flooding sources					
Fire suppression piping	- Vault (yard hydrant)	Loss of containment/ Confinement	1. Flooding in the facility due to failure of fire suppression Pipe leading to breakdown of equipment and electrical equipment 2. Pump malfunction due to water buildup in the underground gallery	1. No sprinkler devices and fire suppression system 2. Temporary pump placement when open pipe is damaged for fire-fighting water	1. Periodic inspection 2. Training worker 3. Fire hydrant placement
Process water	- Underground gallery control building (pure water supply system) - Sewage / Waste water treatment system	Loss of containment/ Confinement	1. Leakage due to piping and valve failure	1. Stainless steel drainage pipe 2. temporary pump placement 3. monitoring sensor of sampling pot (2 L, 5 L)	1. Periodic inspection 2. Training worker
Strong rain	- Vault (infiltration water pipe) - MCS (mobile crane system) - Underground gallery (infiltration water pipe)	Loss of containment/ Confinement	1. Overflow 2. The roof damage from strong and a lot of rainfall	1. Tank capacity (125 ton) considering the amount of water that is full of 2 vaults volume 2. Sensor of water level in tank 3. 1% or 2% slope of drainage pipe considering plugging of pipe by floating materials	1. Periodic inspection 2. Training worker
Tank	- Underground gallery (infiltration tank, sampling pot)	Loss of containment/ Confinement	1. The sampling pot damage leading to loss of monitoring function	1. Tank capacity with 7 days storage considering the amount of day maximum rainfall during 30 years 2. Open drainage system in the gallery considering the overflowing of sampling pot installation of threshold of isolation room which is water collecting	1. Weekly inspection 2. Training worker
Sump pump	- Underground gallery (infiltration tank sump pump A 1ea, infiltration tank sump pump B 1ea, water collecting tank 1ea)	Loss of containment/ Confinement	1. Pump failure 2. The amount of water flooding that exceeds the normal level of the water tank	1. Pump capacity considering the amount of day maximum rainfall during 30 years 2. Blocking valve 3. Additional pump 4. Tank capacity	1. Weekly inspection 2. Training worker
Flooding	- Vault	Loss of containment/ Confinement	1. Concentrated rainfall in the empty vault leading to flooding and ponding 2. Damage of cover linked to the pipe at the bottom of vault and blind hole lead to ponding	1. The bottom of vault with porous concrete 2. The bottom of vault with slope for drainage connecting rainfall drainage pipe 3. Level in the tank sensor 4. The outer drainage channel	1. Weekly inspection 2. Training worker

안전기능을 유지하여 전체 처분시설에 요구된 안전목표가 달성된다는 개념이다. 처분시설의 운영 중 안전성은 처분시설 구성요소들의 기술적 활동과 관리적 활동에 근거하며, 강건성전략과 심층방어전략을 통하여 보완된다.

기존 운영 중 사고분석에서는 잠재위험요소로부터 도출된 사건들의 우선순위를 발생확률과 결과의 심각성에 따라 정성적인 평가에 의존하여 운영 중 사고시나리오에 대한

정당성 확보가 어려웠다(Table 4 참조[6]). Table 4에 제시된 것처럼 사고 발생가능성과 결과의 심각성을 각각 4단계로 구분하고 위험 수준이 높은 사건을 대표 사고시나리오로 선정하는 방식[6]이며 발생확률의 경우 국내 처분시설 운영 경험이 없어 해외문헌자료를 참고하여 적용하였다. 본 논문에서는 구획화된 시설에서 발생한 사건에 대해 발생확률만으로 사고를 선별하는 것은 불확실성이 크므로 설계대안 및 관리대안의 위험방지대안을 통해 방사성물질의 유출 가능성을 판단하여 사건을 선별하였다. 발생 가능한 사건들의 위험도분석을 위해 사건 유발을 방지하는 위험방지대안과 사건 발생확률에 따라 사고위험수준을 구분하고 평가결과에 대한 척도로 작업자 및 일반인의 피폭선량에 대한 정량적인 사고분류기준을 수립하여 Fig. 4에 제시하였다.

운영 중 발생 가능한 사건(event)은 정상(normal), 경미한 사고(incident), 사고(accident), 배제사고(excluded)로 분류하며 사고(accident)는 설계기준 이하의 사고와 설계기준을 초과하는 사고로 분류하였다[1]. Fig. 4에 제시된 것처럼 경미한 사고(incident)는 사건발생확률이 $10^{-1} \sim 10^{-2}$ 이고 관리대안이 1개 이상 있는 경우로 설정하였다. 관리대안

Table 4. Qualitative risk category of operational safety assessment [1]

G \ L	L1	L2	L3	L4
G4	II	III	III	III
G3	II	II	III	III
G2	I	II	II	III
G1	I	I	II	II

L (Likelihood) : Frequency Level, G (Gravity) : Consequence Level

Risk value: I Low II Moderate III High

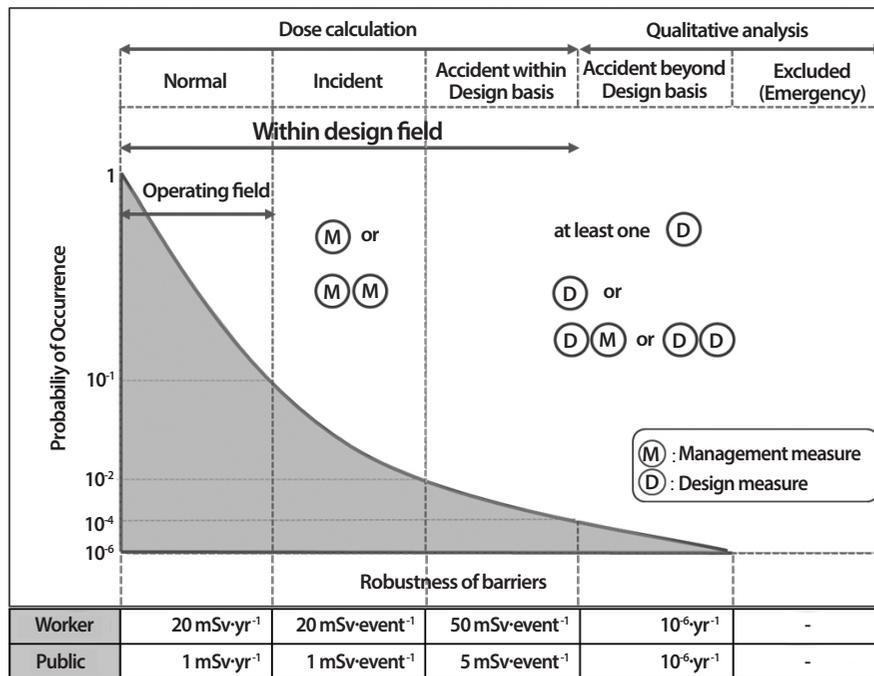


Fig. 4. The operational accident classification criteria by means of risk barriers and probability of occurrence : D (design measure-engineering activity), M (management measure-managerial activity).

Table 5. Results of operational risk analysis for accident scenarios of surface disposal vault (IVAU) in operation

Scenario number	IVAU1-1	IVAU2-1	IVAU3-2	IVAU3-4	IVAU7-1
Scenario title	Fire caused by electrical risk factors in vault	Drop caused by electric risk factors in vault	Drop and loss of containment of a disposal container due to human error	Drop and loss of containment of a disposal container due to failure of equipment	Earthquake in vault
Location	Disposal vault	Disposal vault	Disposal vault	Disposal vault	Disposal vault
Element or component	Crane (Radwaste handling system)	Crane	Crane	Crane	All component (Mobile crane shelter, Vault concrete)
Initiating event	Short circuit	Failure of equipment	Human error	Failure of equipment	Earthquake
Undesirable event/propagation	Fire	Drop and loss of containment of the drum	Drop and loss of containment of the drum	Drop and loss of containment of the drum	1. Structure destruction 2. Drop and loss of containment of the drum 3. Fire
Existing barriers (D:design measure, M:management measure)	(D) Fire protection equipment (M) Emergency response process	(D) Design of the crane for insulated and shock-absorbing cable (M) Periodic inspections	(M) Training and qualification of workers	(D) Design of the crane for drop protection (M) Periodic inspections	(D) Earthquake-resistant design (M) Emergency response process
Occurrence frequency	$1 \times 10^{-2}/\text{yr}$ [1] $2 \times 10^{-2}/\text{yr} \sim 2 \times 10^{-5}/\text{yr}$ [3] : Boundary	$1 \times 10^{-2}/\text{yr} \sim 1 \times 10^{-4}/\text{yr}$ [1]	$1 \times 10^{-2}/\text{yr}$ [1]	$1 \times 10^{-2}/\text{yr}$ [1]	$2.3 \times 10^{-4}/\text{yr}$ [17]
Event category/Consequence	Accident within Design Basis/ Low	Accident within Design Basis/ Low	Incident/ Low	Accident within Design Basis/ Low	Accident within Design Basis/ Moderate
Exposure group	Worker and public	Worker	Worker	Worker and public	Public
Screening Yes/No	Y	Y	Y, IVAU3-2 + IVAU3-4	Y, IVAU3-2 + IVAU3-4	Y

유무와 상관없이 적어도 1개 이상의 설계대안이 있는 경우는 사고(accident)로 분류하였다. 이 중 사건발생확률이 $10^{-2} \sim 10^{-4}$ 일 경우는 설계기준 이하 사고(Accident within design basis)로, 사건발생확률이 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ 일 경우에는 설계기준 초과 사고(Accident beyond design basis)로 분류하였다. 사건발생확률이 10^{-6} 이하일 경우에는 발생 가능성이 희박한 사건으로 정량적 평가에서는 배제(Excluded)하였다. 운영 중 정상조건(normal)의 경우 원안법 시행령[20]에 따라 일반인은 $1 \text{ mSv} \cdot \text{yr}^{-1}$, 작업자는 $20 \text{ mSv} \cdot \text{yr}^{-1}$ 를 기준으로 설정하였다. 경미한 사고조건(incident)의 경우 관리대안만으로

안전기능이 확보되는 경우로 경미한 사고(incident)발생시 일반인은 1 mSv , 작업자는 20 mSv 를 기준으로 설정하였으며 설계기준 이하 사고조건(incident)의 경우 설계대안과 관리대안이 모두 필요하며 일반인은 5 mSv , 작업자는 50 mSv 를 기준값으로 설정하였다. 설계기준 이하 사고조건의 경우 일반인은 1단계 처분시설 사고평가지 적용한 5 mSv 를 성능목표치로 적용하였으나 작업자의 경우 규제기준치가 없어 1년에 한하여 최대 허용가능 선량값인 $50 \text{ mSv} \cdot \text{yr}^{-1}$ 를 사고 발생 시 한번에 받을 수 있는 선량값으로 설정하였다.

처분시설의 관리활동은 기술적 활동을 바탕으로 강건성

구현과 불확실성 저감을 달성할 수 있다. 경미한 사고(incident)의 경우 사건발생확률은 상대적으로 높으나 처분시설 운영 중 관리대안과 운영절차서, 작업자 훈련 등으로 사건방지가 가능하다. 사고(incident)의 경우 설계 시 안전조치 및 안전여유도를 고려하기 때문에 사건발생 가능성은 낮으나 사건 발생시 피해규모와 복구작업에 따른 방사선적 영향을 고려해야 한다. 그러나, 후쿠시마 지진사고와 경주 지진사고 이후 지진과 같이 사건발생확률이 낮은(10⁻⁶ 이하) 배제사건 이더라도 일반대중의 관심이 증대됨에 따라 결과의 심각성이 크거나 인문사회적 영향을 반영하여 'what if' 또는 'cliff effect' 와 같은 비정상시나리오로 고려할 필요는 있다.

앞서 기술한 운영 중 사고분석 절차에 따라 잠재위험요소로부터 발생 가능한 사건을 분류하고 위험도분석을 통해 2단계 표층처분시설에 대한 운영 중 사고분석을 수행하였다. 본 논문에서는 처분고(IVAU)에서 유발될 수 있는 위험도분석결과를 Table 5에 제시하였다.

Table 4에서 제시한 사고분류기준에 따라 Table 5와 같이 사건유형, 발생위치, 해당 구성요소, 사건 원인 및 전개, 위험방지대안, 발생확률 그리고, 선량평가결과에 따라 사고수준을 분류함으로써 사고시나리오 선별에 대한 명확한 근거를 제시하였다. 설계대안과 관리대안이 있는 사건은 모두 사고로 분류되며 이 중에서 발생확률과 평가결과의 심각성에 따라 사고선별의 우선순위를 결정하였다. 또한, 위험도분석을 통해 사건을 일으키는 원인과 그에 따른 구성기기/계통/구조물의 안전여유도 및 관리방안 유무를 확인할 수 있으며 사고예방과 사고발생시 피폭을 최소화할 수 있도록 설계 보강 또는 행정적 조치(관리체계, 운영절차서 보완 등)를 개선함으로써 안전성을 최적화 할 수 있다. 2단계 표층처분시설의 경우 사고분석결과 일반인과 작업자 모두 1 mSv를 초과하지 않는 것으로 분석되었으며[17], 이는 현재의 설계와 관리계획으로 충분히 안전성이 확보될 수 있음을 의미한다. 그러나 설비 노후화에 따른 교체와 시설보수, 모니터링 시스템 보완과 같이 지속적인 관리를 통해 안전성을 유지할 필요가 있다.

3. 운영 중 사고시나리오의 설정

일반적으로 하나의 잠재위험요소가 바로 사건으로 이어지거나 여러 잠재위험요소가 결합되어 하나의 사건 또는

동시다발적인 사건으로 전개되기도 한다. 2단계 중·저준위 방사성폐기물 표층처분시설에서 고려한 사고 발생위치는 크게 처분고(IVAU), 지하점검로(IGAL), 운반경로(ORT)로 분류되며 처분고에서 고려할 수 있는 대표 사고시나리오에는 처분고 낙하(IVAU3-2, IVAU3-4), 처분고 화재(IVAU1-1, IVAU1-2, IVAU1-3, IVAU1-4), 처분고 지진(IVAU7-1, IVAU7-1-1, IVAU7-1-2, IVAU7-1-3) 시나리오이다[17]. 대표 사고시나리오 중 처분고 지진 시나리오의 경우 지진으로 인해 표층처분고에 적치된 폐기물포장물 손상뿐만 아니라 이차적으로 이동형크레인 파손에 의한 화재, 낙하, 충돌 등이 동시에 발생할 가능성이 있으므로 복합적인 사건을 하나의 사고로 간주하였다.

4. 결론

Safety Case 종합프로그램의 안전성확보체계에 따라 처분시설의 운영 중 안전기능분석에 근거한 시설의 구획화, 잠재위험요소분석, 위험도분석을 통해 운영 중 대표 사고시나리오를 도출하였으며, 사고시나리오 선별의 정당성을 확보하고자 하였다.

안전하고 지속적인 처분시설 개발을 위해서는 기술적 활동과 관리활동이 상호 보완되어야 하며, 위험도분석에 설계대안과 관리대안을 추가하여 설계-운영-평가가 연계되도록 하였다. 또한, 발생확률과 결과의 심각성에 따른 사고분류기준을 제안하여 대표 사고시나리오에 대한 정당성을 확보하였다. 이는 Safety Case 안전전략인 논증가능성, 강건성, 심층방어, 최적화에 부합하는 것으로 계획단계, 건설단계, 운영단계, 폐쇄후 단계로 구성된 처분시설 개발 단계별 안전성의 최적화를 통해 신뢰성 증진에 기여할 것으로 기대된다.

그러나, 운영중안전성평가의 사건 선별을 위한 사고분석이 객관적으로 이루어지기 위해서는 처분시설의 고유 특성을 반영한 사건 발생빈도와 사건범위에 대한 분석결과가 필요하며, 이는 처분시설 운영경험과 다양한 사고 시뮬레이션 및 모델링을 통해 확보해야 한다. 설계안전장치와 현장운영 활동이 사고를 효과적으로 경감시킬 수 있도록 제도화할 필요가 있으며, 처분시설 운영으로 인한 작업자 및 일반인에 대한 방사선적 영향의 심각성을 판단할 수 있는 규제기준이 뒷받침될 필요가 있다. 작업자에 대한 피폭관리는 처분시설의

운영 중 철저한 감독 및 적절한 작업절차 그리고 방사선비상 계획 및 비상훈련을 통해서 사전에 예방하거나 만약 사고 시에도 최소한의 피폭만 받도록 처분시설 운영 개시 전 모든 대비를 완료해야 한다.

REFERENCES

- [1] Waste Isolation Pilot Plant Contact Handled(CH) Waste Documented Safety Analysis(DSA), DOE/WIPP-95-2065 (2009).
- [2] Implementation Guide for Use in Developing Technical Safety Requirements, DOE G 423.1-1, October 24 (2001).
- [3] Generic Operational Safety Assessment, Part 1 Operational Safety Report, Nirex Report N/079 (2003).
- [4] Generic Operational Safety Assessment, Part 2 Fault and Hazard Schedule, Nirex Report N/079 (2003).
- [5] Generic Operational Safety Assessment, Part 3 Design and Basis Accident Analysis, Nirex Report N/079 (2003).
- [6] Operational Safety in a Sub-surface disposal, DMR/SE/12-0045, Andra (2013).
- [7] Korea Radioactive Waste Agency(KORAD), "Section 8.1 Additional Analysis of Operational Accident", Construction and Operation Licensing Following-up Action Report, KORAD-TR-2015-004 (2015).
- [8] K.I. Jung, J.H. Kim, M.J. Kwon, M.S. Jeong, S.W. Hong, and J.B. Park, "Comprehensive Development Plans for the Low- and Intermediate-Level Radioactive Waste Disposal Facility in Korea and Preliminary Safety Assessment", 14(4), 385-410 (2016).
- [9] K.I. Jung, N.G. Jeong, Y.P. Moon, M.S. Jeong, and J.B. Park, "Prediction of Radionuclide Inventory for the Low-and Intermediate-Level Radioactive Waste Disposal Facility by the Radioactive Waste Classification", J. of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology, 14(1), 63-78 (2016).
- [10] Korea Radioactive Waste Agency (KORAD), Safety Analysis Report for Low- and Intermediate-Level Radioactive Waste Disposal Facility on Construction Phase of 1st Stage (2016).
- [11] J.B. Park, J.T. Jeong and J.W. Park, "Development of the Safety Case Program for the Wolsung Low- and Intermediate-Level Radioactive Waste Disposal Facility in Korea", J. of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology, 12(4), 335-344 (2014).
- [12] Korea Radioactive Waste Agency(KORAD), "Section 7.1 Safety Case Program", Construction and Operation Licensing Following-up Action Report, KORAD-TR-2015-001 (2015).
- [13] International Atomic Energy Agency (IAEA), Safety Standards for Protecting People and the Environment, Fundamental Safety Principles, SF-1 (2006).
- [14] International Atomic Energy Agency (IAEA), The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste SSG-23 (2012).
- [15] International Atomic Energy Agency (IAEA), Disposal of Radioactive Waste, SSR-5 (2011).
- [16] International Atomic Energy Agency (IAEA), Safety Assessment for Facilities and Activities, SGR Part 4 (2009).
- [17] Korea Radioactive Waste Agency (KORAD), Safety Analysis Report for Low- and Intermediate-Level Radioactive Waste Disposal Facility on Planning Phase of 2nd Stage (2016).
- [18] Hazard Categorization and Accident Analysis Techniques for Compliance with DOE Order 54800.23, Nuclear Safety Analysis Reports, DOE-STD-1027-92 (1997).
- [19] International Atomic Energy Agency (IAEA), IAEA Safety Glossary, Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection (2007).
- [20] Enforcement Decree of Nuclear Safety Act, Article 2(4) (2016).