

# Safety Assessment on the Human Intrusion Scenarios of Near Surface Disposal Facility for Low and Very Low Level Radioactive Waste

## 저준위 및 극저준위 방사성폐기물 표층처분시설의 인간침입 시나리오 안전평가에 대한 고찰

Sung-Wook Hong<sup>1\*</sup>, Sangho Park<sup>2</sup>, and Jin Beak Park<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Korea Radioactive Waste Agency, 168 Gajeong-ro, Yuseong-Gu, Daejeon, Republic of Korea

<sup>2</sup> Chungnam National University, 99 Daehak-ro, Yuseong-Gu, Daejeon, Republic of Korea

홍성욱<sup>1\*</sup>, 박상호<sup>2</sup>, 박진백<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한국원자력환경공단, 대전광역시 유성구 가정로 168 KT빌딩

<sup>2</sup>충남대학교, 대전광역시 유성구 대학로 99

(Received November 25, 2015 / Revised December 14, 2015 / Approved December 22, 2015)

The second-stage near surface disposal facility for low and very low level radioactive waste's permanent disposal is to be built. During the institutional control period, the inadvertent intrusion of the general public is limited. But after the institutional control period, the access to the general public is not restricted. Therefore human who has purpose of residence and resource exploration can intrude the disposal facility. In this case, radioactive effects to the intruder should be limited within regulatory dose limits. This study conducted the safety assessment of human intrusion on the second-stage surface disposal facility through drilling and post drilling scenario. Results of drilling and post drilling scenario were satisfied with regulatory dose limits. The result showed that post-drilling scenario was more significant than drilling scenario. According to the human intrusion time and behavior after the closure of the facility, dominant radionuclide contributing to the intruder was different. Sensitivity analyses on the parameters about the human behavior were also satisfied with regulatory dose limits. Especially, manual redistribution factor was the most sensitive parameter on exposure dose. A loading plan of spent filter waste and dry active waste was more effective than a loading plan of spent filter waste and other wastes for the radiological point of view. These results can be expected to provide both robustness and defense in depth for the development of safety case further.

Keywords: Near surface disposal, Human intrusion, Waste emplacement, Institutional control period, Safety Case

\*Corresponding Author.

Sung-Wook Hong, Korea Radioactive waste Agency, E-mail: [heart@korad.or.kr](mailto:heart@korad.or.kr), Tel: +82-42-601-5321

### ORCID

Sung-Wook Hong <http://orcid.org/0000-0003-1073-1467>

Sangho Park

<http://orcid.org/0000-0002-0228-2713>

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

경주에 저준위 및 극저준위 방사성폐기물을 영구적으로 처분하기 위한 2단계 처분시설이 표층처분시설로 건설된다. 처분시설은 폐쇄 후 제도적 관리기간 동안에는 일반인의 부주의한 침입을 제한하지만, 제도적 관리기간 이후에는 일반인에 대한 접근이 제한되지 않는다. 이에 따라 거주 및 자원 탐사 등을 목적으로 한 인간침입 행위가 발생될 수 있으며, 이 경우 침입자에 대한 방사선 영향은 일반인에 대한 선량한도로 제한되어야 한다. 따라서 본 논문에서는 부지 특성을 반영하여 시추 및 시추 후 거주시나리오를 설정하고 종류 및 준위별 발생량을 고려하여 선정된 처분고내 폐기물에 대하여 평가하였다. 첫째, 시추 및 시추 후 거주시나리오의 평가결과가 모두 규제 제한치를 만족하였다. 둘째, 평가결과 시추 후 거주시나리오가 시추시나리오에 비해 중요한 시나리오임을 알 수 있었다. 셋째, 폐쇄 후 인간침입 시점과 침입자의 행위에 따라 침입자가 지배적으로 영향을 받는 핵종이 다름을 알 수 있었다. 넷째, 인간행위와 관련된 입력 자료의 민감도 분석결과 모두 규제 제한치를 만족하였다. 특히 민감도 분석결과, 토양재분배인자에 피폭선량이 가장 민감하게 변동됨을 알 수 있었다. 다섯째, 인간침입평가 측면에서 폐기물의 바람직한 정치방안을 살펴본 결과, 폐필터 폐기물은 가능한 폐수지 및 농축폐액 폐기물보다 잡고체 폐기물과 정치하며 폐필터 폐기물 비율을 낮추는 것이 개인최대 피폭선량을 줄이고 선량한도 대비 안전여유도를 높이기 위해서 바람직함을 알 수 있었다. 이러한 연구결과는 처분시설의 개발 시 인간침입을 고려한 표층처분시설의 강건성과 심층방어를 위한 Safety Case 구축을 위하여 활용하고자 한다.

중심단어: 표층처분, 인간침입평가, 폐기물 정치, 제도적 관리기간, Safety Case

## 1. 서론

경주 방사성폐기물처분시설(이하 처분시설)은 원자력안전법에 의해 중·저준위 방사성폐기물로부터 국민의 건강 및 환경상의 방사선위해를 방지해야 한다[1]. 이를 위해 처분시설의 계획단계뿐만 아니라 처분시설 완공 이후 건설 및 운영 중에 주기적인 안전평가를 필요로 한다[2-3].

우리나라 경주에 위치한 처분시설은 국내 중·저준위 방사성폐기물을 영구적으로 처분하기 위해 1단계 동굴처분시설을 2014년 12월에 완공되었으며, 2단계 처분시설은 지상 콘크리트 구조물을 이용한 표층처분시설로 계획하고 있다.

처분시설의 인간침입은 방사성폐기물 격리성능에 영향을 미쳐 방사선피폭을 야기할 수 있는 모든 인위적인 활동을 총칭하며, 처분된 방사성폐기물과 인간과의 접촉을 제한하기 위한 보수활동 등을 포함하는 관리가 계속되는 제도적 관리기간을 필요로 한다[4]. 처분시설은 제도적 관리기간을 설정하여 폐쇄 후에 장기안전성을 저해할 수 있는 환경변화에 대비하여 방사능누출을 방지하기 위한 처분시설의 보수, 관리활동 및 환경감시 등을 수행하도록 규정하고 있다[4].

또한, 처분시설의 제도적 관리기간 이후 인간침입에 따른 방사선 영향은 일반인에 대한 선량한도(1 mSv) 이하로

제한되어야 하며 합리적으로 가능한 한 낮추도록 설계되어야 한다[4]. 따라서, 제도적 관리기간 이후 인간침입에 대한 평가가 이루어져야 하며 그 결과가 일반인에 대한 선량 기준치를 만족하여야 한다.

처분시설에 대한 인간침입 관련한 연구개발 현황으로 Park[5-6]은 표층처분시설의 처분제한치 설정을 위한 성능평가 방법론을 개발하였다. Park[5-6]은 설정된 표층처분 시스템과 기준 인간침입시나리오들에 대한 평가도구 GENII 프로그램을 이용한 결정론적 평가결과 및 결정론적 평가방법에서 발생하는 평가주요변수에 대한 불확실성을 평가하기 위한 확률론적 방법을 이용한 확률론적 평가를 함께 수행하였다. Park[5-6]은 핵종 별 처분제한치 결과를 중·저준위 처분시설을 운영하고 있는 외국의 처분제한치와 비교를 통하여 표층처분시설의 핵종처분 제한치 설정 방법론을 제시하였다.

Hong[7]은 처분시설의 시추 후 거주시나리오를 통하여 제도적 관리기간 및 중·저준위 방사성폐기물 종류에 따른 표층처분시설의 인간침입 성능평가를 수행하였다.

본 논문에서는 2단계 표층처분시설에 대한 인간침입 시나리오를 설정하고 종류 및 준위별 발생량을 고려하여 선정된 처분고내 폐기물에 대하여 평가하며, 시나리오별 결과에 대해 비교해 보고자 한다. 그리고 침입자가 지배적으로

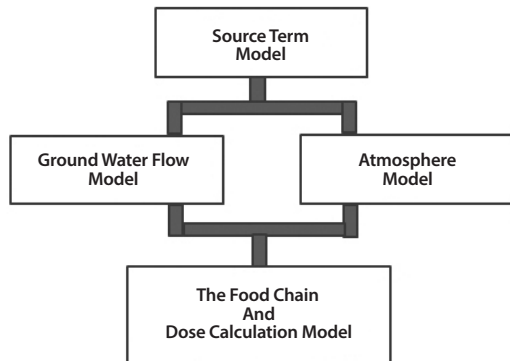


Fig. 1. Evaluation Concept of GENII Computer Program.

방사선적 영향 받는 핵종을 인간침입 시점과 침입자의 행위 별로 살펴 보고자 한다. 다음으로 인간행위와 관련된 입력변수들의 민감도 분석을 통해 인간침입 영향을 예측하고자 한다. 또한 저준위 폐기물의 종류 별, 단일 및 혼합된 정치방안에 따른 인간침입영향을 평가해보고, 방사선적 측면에서 바람직한 정치방안에 대해 도출해 보고자 한다.

인간침입 시나리오에 대한 평가는 GENII 전산코드[8]를 이용하여 결정론적 평가를 수행하였다. GENII 전산코드는 토양, 대기, 물 등 다양한 피폭경로로부터 직접 피폭, 식물물 섭취, 흡입, 지표면 혹은 지상에서 대기로 누출로 인한 피폭을 다룰 수 있으며, 선원항 모델, 지하수 유동 및 이동모델, 지표수 이동 모델, 대기 중 이동 모델, 먹이사슬 및 선량 계산 모델로 구성되어있다. GENII 평가 개념도는 Fig. 1과 같다[8]. 섭취 및 흡입에 대한 선량환산계수는 GENII 프로그램에서 사용하는 선량환산인자를 ICRP Pub. 72[9]에서 권고하는 값으로 바꾸어 계산하였다.

## 2. 인간침입 시나리오 선정

IAEA[10]는 표층 처분시설의 장기 안전성 평가 및 이와 관련된 방법론을 제공하고 있으며, 그 중 주요한 이슈가 자연현상에 의한 것이나 인간침입에 의한 파괴적인(disruptive)인 사건(events)과 과정(processes)에 대한 평가이다. IAEA[10]에서 주요하게 고려하는 인간침입 시나리오는 거주, 시추, 건설 및 농업 행위로 다음과 같다.

### 2.1 거주 시나리오

거주 활동의 주요 방사선영향은 거주자에게 이루어지며, 방사선 피폭경로는 주거 위치 및 이와 관련된 인간의 활동, 주거 시설의 건설 시 사용되는 재료와 관련된다. 거주 활동을 고려한 인간침입 시나리오에서는 오염된 토양으로부터의 직접 피폭, 오염된 토양에서 재부유된 먼지의 흡입, 오염된 토양의 부주의한 섭취 그리고 작물의 섭취를 포함한 피폭경로를 고려한다.

### 2.2 시추 시나리오

처분부지에서 발생하는 시추는 광물 자원 및 지하수 탐사 등을 위해 발생하는 행위이다. 처분 부지의 광물 자원 및 지하수 자원의 존재가 인간침입 발생 가능성에 영향을 미칠 수 있다. 시추 행위로 인한 인간침입의 결과로 초기에는 기술자, 실험실 전문가 등 소그룹의 사람들이 영향을 받으나 시추된 우물은 방사성물질의 이동경로가 될 수 있으며 방사선 물질에 의한 피폭을 증가시킬 수 있으며 시추부지 인근 마을에 방사선영향을 미칠 수 있다. 시추 활동을 고려한 인간침입 시나리오에서는 오염 물질 및 폐기물의 부주의한 섭취, 먼지의 흡입 그리고 오염 물질 및 폐기물로부터의 외부 피폭을 포함한 피폭경로를 고려한다.

### 2.3 건설 시나리오

처분부지에 도로, 건물 및 기타 시설을 위한 다양한 건설 활동과 관련되며 건설 작업자에게 방사선영향을 미친다. 지형, 기후와 같은 사회 경제적 및 다른 요인들은 방사성 폐기물 처분부지에서 발생할 수 있는 개발 유형 및 건축 활동에 영향을 미칠 수 있다. 건설 활동을 고려한 인간침입 시나리오에서는 오염 물질 및 폐기물의 부주의한 섭취, 먼지의 흡입 그리고 오염 물질 및 폐기물에서 외부 피폭을 포함한 경로를 고려한다.

### 2.4 농업 시나리오

처분부지의 농업 활동은 주로 먹이 사슬을 통한 섭취를 통해 방사선영향을 미친다. 그 결과 농업 및 거주하는 지역 사회에 영향을 미칠 수 있다. 건설 활동을 고려한 인간침입 시나리오에서는 오염된 토양에서 외부 피폭, 농작물의 섭취,

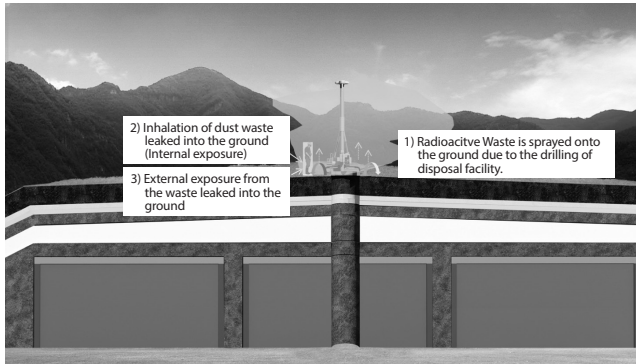


Fig. 2. Exposure Pathways of Drilling Scenario.

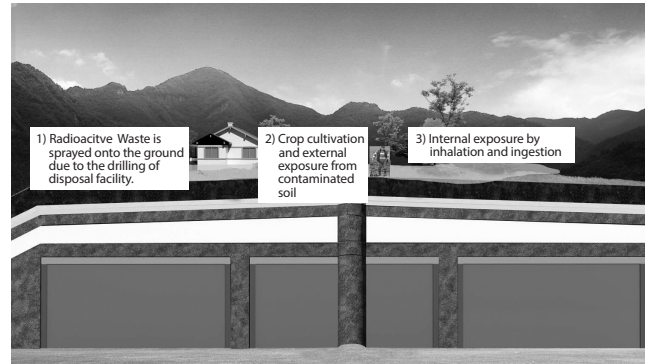


Fig. 3. Exposure Pathways of Post-drilling Scenario.

토양의 실수로 섭취 그리고 재부유 먼지의 흡입을 포함한 경로를 고려한다.

## 2.5 시나리오 선정

표층처분시설에서 가능한 인간침입 시나리오 중 경주 처분부지의 특성과 처분 깊이, 인공방벽 및 표지의 유무 및 폐쇄 후 침투시간을 종합하여 시추 시나리오 및 시추 후 거주 시나리오를 대표 인간침입 시나리오로 선정하였다.

시추 시나리오는 제도적 관리기간 이후 자원의 개발 또는 지질 조사의 목적으로 시행된 시추작업에 따른 작업자의 피폭영향을 고려하였다. 시추행위는 처분시설의 존재를 알지 못하는 상태에서 이루어지며, 이로 인해 처분고가 시추공에 의해 관통되고 방사성폐기물이 지표생태계로 유출되어 시추작업 부지의 작업자들은 오염된 토양으로부터 외부피폭과 부유입자의 호흡을 통한 내부피폭을 받게 된다[11].

처분시설을 관통하는 시추작업으로 인해 방사성폐기물이 시추한 코어의 직경과 폐기물 처분고 내의 높이만큼 직접 지표면으로 유출된다. 토양과 섞인 채 지표환경에 유출된 방사성 물질은 시추작업 부지의 작업자들에게 피폭이 일으키며 작업자들은 작업 중 오염된 토양으로부터 외부피폭과, 공기 중에 오염된 부유입자를 흡입함으로써 내부피폭을 받게 된다[11]. 시추시나리오에 의한 방사선 피폭경로는 Fig. 2와 같다.

시추 후 거주 시나리오는 처분시설을 관통하는 시추작업 이후 시추부지 내에서 장기간 거주하는 주민의 오염된 토양에 의한 외부피폭과 부유물질 흡입과 음식물 섭취에 의한 내부피폭을 고려한다. 시추 시나리오와 동일하게

Table 1. Exposure pathways both for drilling and post-drilling scenario

Exposure Pathways	Drilling Scenario	Post-drilling Scenario
Finite Plume, External	X	X
Infinite Plume, External	O	O
Ground, External	O	O
Recreation, External	X	X
Inhalation Uptake	O	O
Drinking Water, Ingestion	X	X
Aquatic Foods Ingestion	X	X
Terrestrial Foods Ingestion	X	O
Animal Product Ingestion	X	X
Inadvertent Soil Ingestion	X	X

처분시설을 관통하는 시추작업으로 인해 방사성 폐기물이 시추한 코어의 직경과 폐기물 처분고 내의 높이만큼 직접 지표면으로 유출되며 지표면에 유출된 방사성물질이 거주민에게 외부피폭을 일으키고, 공기 중 부유물질의 흡입을 통해 내부피폭이 발생한다[11].

또한 농작물의 경작과 농작물을 먹고 자란 가축들을 다시 거주민이 섭취함으로써 먹이사슬에 의한 피폭이 발생한다. 그러나 처분부지 내 농지는 가축을 사육할 수 있을 정도로 면적이 넓지는 않고, 농작물 중 곡류 또한 재배하지 않으므로, 가축과 곡류는 전량 외부지역에서 공급하여 섭취한다고 가정하였다[11]. 시추 후 거주시나리오 피폭경로는 Fig. 3와 같으며, 시추 및 시추 후 거주 시나리오의 피폭경로를 Table 1에 요약하였다.



### 3. 입력데이터 및 가정사항

표층처분시설의 제도적 관리기간은 국외 표층처분시설을 참고하여 300 년으로 설정하고 국내 방사성폐기물 인도규정의 농도규명 대상인 14개 핵종의 처분을 가정하였다. 원자력안전위원회 고시[12]에 따라 중저준위 방사성폐기물은 중준위, 저준위, 그리고 극저준위 방사성폐기물로 세분화 되었고, 표층처분시설은 저준위와 극저준위 방사성폐기물을 처분할 수 있다. 저준위와 극저준위 방사성폐기물을 종류별, 준위별 발생량을 고려하여 처분고내 폐기물로 구성하였다. 2단계 처분고 내 부피로 나눈 값을 평가대상 처분고 방사능 농도로 설정하였다. 이를 Table 2에 요약하였다.

시추로 인해 처분고 내부에 처분된 방사성폐기물의 지표이동을 감안하였다. 지표로 이동된 폐기물은 오염되지 않는 토양에 희석되어 시나리오에서 가정한 지역에 뿌려져서 피폭선원으로의 역할을 한다고 가정하였다. 국내외 암반시추시 탐사 목적으로 사용되는 Core 직경이 가장 큰 PQ 또는 HQ를 사용한다고 보아 직경 10 cm의 시추공을 사용하는 것으로 가정하였으며[11], 시추 시나리오에서 피폭을 받을 수 있는 면적은 100 m<sup>2</sup>, 그리고 시추 후 거주 시나리오의 피폭을 받을 수 있는 면적은 2,500 m<sup>2</sup>를 사용하였다[13].

지표로 이동된 폐기물이 가정한 지역에 골고루 뿌려질 때의 그 두께를 토양재분배인자(Manual Redistribution Factor(MRF))로 정의하며 시추 시 사용되는 직경 10 cm의 시추공과 9.7 m의 처분고 내 폐기물 두께를 가정할 때 총 0.076 m<sup>3</sup>의 폐기물이 지표로 이동된다. 시추 시나리오에서는 100 m<sup>2</sup>의 지역에 뿌려진다고 할 때 토양재분배인자(MRF)는 7.62E-04 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>이며, 시추 후 거주 시나리오에서는 2,500 m<sup>2</sup>의 지역에 주민이 거주한다고 보았을 때 3.05E-05 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>를 적용하였다.

처분된 방사성폐기물과 처분용기는 인간침입 시점에도 열화되지 않는다고 가정하였으며 처분시설의 폐기물 높이는 9.7 m이고 처분고 상부에는 5.1 m의 처분덮개층 토양이 존재하는 것으로 가정하였다.

오염된 지표 토양으로부터 발생하는 외부피폭시간은 실내에서 발생하는 피폭과 실외에서 발생하는 피폭을 차폐를 고려한 가중치의 합으로 계산하였다. 실외에서는 외부피폭에 대한 차폐를 고려하지 않으며, 실내에서 일어나는 외부피폭은 주택에 의한 차폐효과를 0.7으로 가정하였다[14].

Table 2. Radioactivity concentration for human intrusion scenario (Unit : Ci/m<sup>3</sup>)

Nuclide	Radioactivity Concentration
H-3	3.00E-01
C-14	5.50E-02
Fe-55	2.50E+00
Co-58	7.60E-01
Co-60	1.50E+00
Ni-59	4.60E-02
Ni-63	1.50E+00
Sr-90	2.10E-04
Nb-94	2.50E-05
Tc-99	1.70E-03
I-129	8.50E-08
Cs-137	1.20E-01
Ce-144	5.10E-04
Total Alpha	4.80E-03

시추 시나리오의 작업자에게 발생하는 외부피폭은 대기로부터 1 시간, 오염된 토양으로부터 40 시간을 가정하였다. 시추 후 거주 시나리오에서 오염된 공기와 오염된 지표 토양으로부터 발생할 수 있는 주민들의 거주 시 외부피폭은 실외에서 연간 1,800 시간과 실내에서 연간 4,866 시간과 차폐를 함께 고려하여 연간 4,866 시간 (1,800 hr/yr + 0.7 × 4,380 hr/yr)을 적용하였다[13-14].

흡입에 의한 피폭은 주어진 오염먼지의 농도와 흡입시간을 고려하여 설정하였다. 먼지의 흡입계수(Mass Loading Factor: MLF, g/m<sup>3</sup>)는 대기 중 오염된 먼지의 농도로 정의하였다. 대기 중 오염된 먼지의 농도는 시나리오 별 MLF를 이용한 토양의 오염농도로부터 도출하고 시추 시나리오의 경우 1 시간의 작업시간 동안 1.0E-04 g/m<sup>3</sup>의 흡입계수(MLF)를 적용하였다[13].

시추 후 거주 시나리오에서는 시간과 농도를 가중치로 흡입에 대한 피폭을 고려하였다. 연간 100 시간 동안 5.0E-04 g/m<sup>3</sup>를 흡입하며, 연간 1,700 시간 동안 1.0E-04 g/m<sup>3</sup>의 먼지를 흡입하고, 연간 4,380 시간동안 5.0E-05 g/m<sup>3</sup>의

Table 3. Input parameters for human intrusion scenarios

Drilling Scenario	Post-drilling Scenario	Parameters
Near-field Parameter		
0	1	Fraction of Roots in Deep Soil
	0	Fraction of Roots in Deep Soil
7.62E-04	3.05E-05	Manual Redistribution (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )
100	2500	Source Area for External Dose Modification Factor (m <sup>2</sup> )
Waste Form		
	0	Waste Form/Package Half-life (yr)
	9.7	Waste Thickness (m)
	5.1	Depth of Soil Overburden (m)
External Exposure		
1	4866	Plume (hr)
40	4866	Soil Contamination (hr)
Inhalation		
1	4390	Hours of Exposure to Contamination per Year (hr/yr)
1.00E-04	1.00E-04	Mass Loading Factor (g/m <sup>3</sup> )
Ingestion		
	Food Type	Consumption Rate (kg/yr)
	Leaf	132.9
	Root	87.1
	Fruit	176.5

먼지를 흡입하는 것은 연간 4,390 시간 동안 1.0E-04 g/m<sup>3</sup> 의 먼지를 흡입하는 것과 동일하다. 따라서 시추 후 거주 시나리오에서는 연간 4,390 시간 동안 1.0E-04 g/m<sup>3</sup>의 MLF로 오염된 공기를 흡입하는 것으로 설정하였다[13].

섭취량과 관련하여 시추 후 거주 시나리오에서는 엽채류, 뿌리작물 및 과일을 섭취한다. 각 농작물 섭취량은 각각 연간 132.9 kg(엽채류), 87.1 kg(뿌리작물), 176.5 kg(과일)이다[15]. 인간침입 평가에 적용된 입력데이터를 Table 3에 요약하였다.

#### 4. 인간침입 시나리오 평가결과

표층처분시설의 인간침입에 의한 시추 및 시추 후 거주 시나리오에 대한 개인최대 피폭선량결과를 Table 4에 요약하였으며, 침입시점에 따른 핵종별 연간유효선량 평가결과를 Fig. 4(시추 시나리오)와 Fig. 5(시추 후 거주 시나리오)에 각각 제시하였다.

폐쇄 후 제도적 관리기간(300 년) 종료시점에서 인간침입으로 인한 개인최대 피폭선량은 시추 및 시추 후 거주시나리오 모두 규제 제한치(1 mSv/yr)를 만족하였다. 시추 후 거주 시나리오의 개인최대 피폭선량은 8.82E-03 mSv/yr로 시추 시나리오보다 약 2500배 더 큰 피폭선량을 나타내었다. 시추 후 거주 시나리오가 시추 시나리오보다 더 중요함을 알 수 있었다.

Table 4. Maximum effective dose equivalent from human intrusion scenarios

(Unit : mSv/yr)

Drilling Scenario	Post-drilling Scenario	Ratio (Post-drilling/Drilling)	Regulatory Guide (1.0 mSv/yr)
3.45E-06	8.82E-03	2.56E+03	Satisfied

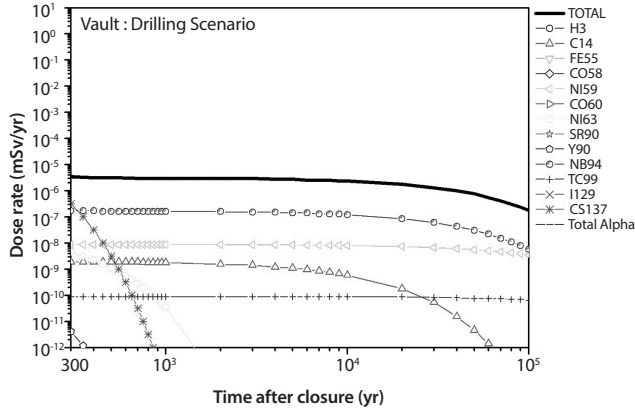


Fig. 4. Effective Dose Equivalent: Drilling Scenario.

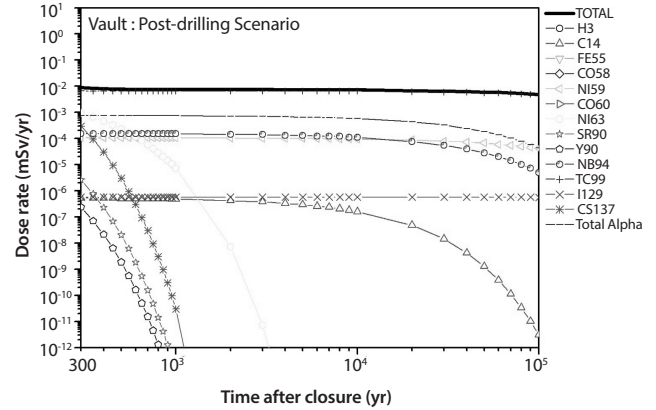


Fig. 5. Effective Dose Equivalent: Post-drilling Scenario.

시추 시나리오에서 침입자가 지배적으로 영향 받는 핵종을 살펴보면, 폐쇄 후 300 년 경과 시점에서는 전체 피폭선량 결과 중 전알파가 85.2%, 350 년에는 91.02%, 400 년에는 93.03%로 지배적이며, 시간이 흘러감에 따라 계속 전체 핵종 중 전알파의 피폭 비중이 점점 커짐을 확인할 수 있었다.

시추 후 거주 시나리오에서 침입자가 지배적으로 영향 받는 핵종을 살펴보면, 폐쇄 후 300 년 경과 시점에서는 전체 피폭선량 결과 중 Tc-99가 74.6%, 350 년에는 78.64%, 400 년에는 81.1%로 지배적이며, 시간이 흘러감에 따라 전체 핵종 중 Tc-99의 피폭 비중이 점점 커짐을 알 수 있었다. 즉, 인간 침입 행위에 따라 침입자에게 영향을 주는 핵종이 다름을 알 수 있었다.

추가적으로 제도적 관리기간이 없다고 가정하여 표층처분시설 폐쇄후 각각의 인간침입 시나리오에 대하여 전체 피폭선량에 가장 크게 기여하는 핵종을 살펴보았다. 시추 시나리오의 경우, 폐쇄 후 100~200 년 기간 동안 전체 피폭선량 중 Cs-137의 핵종이 지배적이며, 250 년 이후에는 전알파가 지배적이다. 시추 후 거주시나리오의 경우, 폐쇄 후 100~150 년 기간 동안 전체 피폭선량 중 Cs-137의 핵종이 지배적이며, 200 년 이후에는 Tc-99가 지배적이었다. 즉, 제도적 관리기간이 없다고 가정하였을 경우 폐쇄 초기에는 Cs-137과 같은 단반감기 핵종이, 초기 이후에는 전알파 혹은 Tc-99와 같은

장반감기 핵종이 전체 피폭선량에 크게 기여함을 알 수 있다. 제도적 관리기간이 존재하는 경우와 마찬가지로 제도적 관리기간 이전에도 두 시나리오 모두 폐쇄후 250 년 이후에는 인간침입 행위에 따라 지배적으로 영향을 주는 핵종이 다름을 알 수 있었다. 그리고 침입시점에 따라 침입자에게 지배적으로 영향을 주는 핵종이 다름을 알 수 있었다.

#### 4.1 주요 입력변수의 민감도 분석

##### 4.1.1 토양재분배인자 (MRF)

침입자가 직경 10 cm 규격의 시추공 대신 직경 20 cm의 시추공을 이용한다고 보는 경우 보다 많은 방사성물질이 지표로 이동될 것이며, 이에 따른 피폭선량은 증가할 것으로 판단하였다. 이에 따라 기존 MRF값에 4배를 한 값을 이용한 민감도를 분석하였다.

표층처분고에서 제도적 관리기간 300 년일 때 20 cm의 시추공으로 인간침입시 개인최대 피폭선량은 시추 시나리오의 경우 1.36E-05 mSv/yr 그리고 시추 후 거주 시나리오의 경우 3.55E-02 mSv/yr로 예측되었으며 Fig. 6과 Fig. 7에 각각 제시하였다. 두 시나리오 모두 토양재분배인자 민감도 분석을 통하여서도 일반인의 선량한도를 만족함을 알 수 있었다.

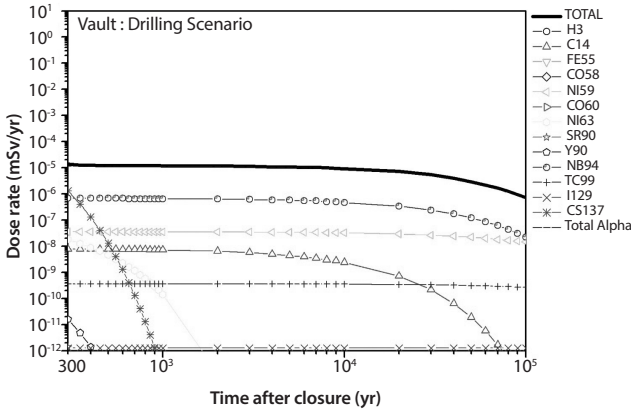


Fig. 6. Effective Dose Equivalent of MRF Modification: Drilling Scenario.

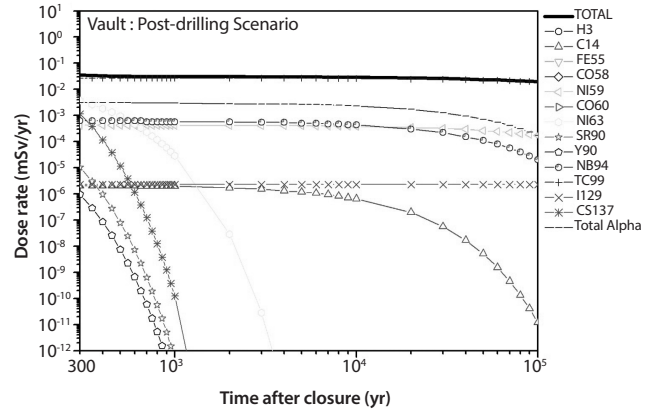


Fig. 7. Effective Dose Equivalent of MRF Modification: Post-drilling Scenario.

#### 4.1.2 외부피폭시간

침입자의 외부 활동이 증가되어 외부피폭을 더 많이 받는 경우이다. 시추 시나리오의 작업자에게 발생하는 외부피폭은 대기로부터 10 시간, 오염된 토양으로부터 400 시간의 값을 사용하였다. 시추 후 거주 시나리오에서는 대기와 오염된 토양으로부터의 외부피폭 계산시 모두 최대 피폭시간인 8,760 (24시간/일 × 365일)시간을 사용하였다.

표층처분고에서 제도적 관리기간 300 년일 때 인간 침입으로 인한 개인최대 피폭선량은 시추 시나리오의 경우 7.94E-06 mSv/yr 그리고 시추 후 거주 시나리오의 경우 9.19E-03 mSv/yr로 나타났다. 두 시나리오 모두 외부피폭시간 민감도 분석을 통하여서도 일반인의 선량한도를 만족함을 알 수 있었다.

#### 4.1.3 오염면지 흡입시간

침입자가 더 많은 외부활동으로 인하여 오염면지 흡입을 더 많이 하는 경우이다. 오염면지 흡입시간은 시추 시나리오, 시추 후 거주 시나리오에서 각각 10 시간, 최대 흡입시간인 8,760 시간(24시간/일 × 365일)을 사용하였다.

표층처분고에서 제도적 관리기간 300 년일 때 인간 침입으로 인한 개인최대 피폭선량은 시추 시나리오의 경우 3.00E-05 mSv/yr 그리고 시추 후 거주 시나리오의 경우 9.34E-03 mSv/yr로 나타났다. 두 시나리오 모두 오염면지 흡입시간 민감도 분석을 통하여서도 일반인의 선량한도를 만족함을 알 수 있었다.

#### 4.1.4 섭취량

시추 후 거주 시나리오에서 섭취하는 양을 10배로 증가시켜 연간 1,329 kg(엽채류), 871 kg(뿌리작물), 1,765 kg(과일)의 섭취량 값을 사용하였다. 표층처분고에서 제도적 관리기간 300 년일 때 인간침입으로 인한 개인최대 피폭선량은 시추 후 거주 시나리오의 경우 4.65E-02 mSv/yr로 나타났다. 섭취량 민감도 분석을 통하여서도 일반인의 선량한도를 만족함을 알 수 있었다.

#### 4.1.5 민감도 분석 결과정리

시추 시나리오에서는 토양재분배인자(MRF)가 변동비율의 0.99배 결과값이 변동되어 가장 민감한 것으로 나타났다. 그 다음으로는 오염면지 흡입시간, 외부피폭시간의 입력변수 대비 결과값이 각각 0.87, 0.23배만큼 변동되었다.

시추 후 거주 시나리오에서는 토양재분배인자(MRF)가 변동비율의 1.01배 결과값이 변동되어 가장 민감한 것으로 나타났다. 그 다음으로는 외부피폭시간, 오염면지 흡입시간, 섭취량 순으로 민감하며, 입력변수 대비 결과값이 각각 0.58, 0.53, 0.53배만큼 변동되었다. 종합해보면, 두 시나리오 모두 토양재분배인자(MRF)에 가장 민감하게 변동됨을 알 수 있었으며 Table 5에 요약하였다.

### 4.2 폐기물 정치방안에 따른 인간침입 영향 평가

원자력발전소에서 발생하는 저준위 방사성폐기물의 단일



Table 5. Results of the sensitivity analysis

Scenario	Name	Value (a)	Value for Sensitivity Analysis (b)	Result (mSv/yr) (c)	Sensitivity Analysis Result (mSv/yr) (d)	Value Ratio (e)= (b)/(a)	Result Ratio (f)= (d)/(c)	Ratio (g)= (f)/(e)
Drilling Scenario	MRF (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	7.62E-04	3.05E-03	3.45E-06	1.36E-05	4	3.94	0.99
	External Exposure Time (hr)	1(Plume) 40(Soil Contamination)	10(Plume) 400(Soil Contamination)	3.45E-06	7.94E-06	10	2.30	0.23
	Inhalation Time (hr)	1	10	3.45E-06	3.00E-05	10	8.70	0.87
Post-drilling Scenario	MRF (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	3.05E-05	1.22E-04	8.82E-03	3.55E-02	4	4.02	1.01
	External Exposure Time (hr)	4866(Plume) 4866(Soil Contamination)	8760(Plume) 8760(Soil Contamination)	8.82E-03	9.19E-03	1.8	1.04	0.58
	Inhalation Time (hr)	4390	8760	8.82E-03	9.34E-03	1.99	1.06	0.53
	Consumption Rate (kg/yr)	Leaf 132.9 Root 87.1 Fruit 176.5	Leaf 1329 Root 871 Fruit 1765	8.82E-03	4.65E-02	10	5.27	0.53

Table 6. Emplacement plan for near surface disposal facility

Disposal Unit	Number of Emplacement Plan (200t)
1	6390 of Spent Resin
2	6390 of Waste Concentrate
3	6390 of Spent Filter
4	6390 of Dry Active Waste(DAW)
5	5112 of Spent Filter + 1278 of Dry Active Waste(DAW)
6	5112 of Spent Filter + 1278 of Spent Resin
7	5112 of Spent Filter + 1278 of Waste Concentrate
8	3834 of Spent Filter + 2556 of Dry Active Waste(DAW)
9	3834 of Spent Filter + 2556 of Spent Resin
10	3834 of Spent Filter + 2556 of Waste Concentrate
11	2556 of Spent Filter + 3834 of Dry Active Waste(DAW)
12	2556 of Spent Filter + 3834 of Spent Resin
13	2556 of Spent Filter + 3834 of Waste Concentrate
14	1278 of Spent Filter + 5112 of Dry Active Waste(DAW)
15	1278 of Spent Filter + 5112 of Spent Resin
16	1278 of Spent Filter + 5112 of Waste Concentrate

및 혼합 정치방안을 구성하여 이에 대한 인간침입영향을 평가해보고, 방사선적 영향을 고려할 때 바람직한 정치방안에 대해 도출해보았다.

표층처분시설의 정치를 200 l 포장물로 설정하고 잡고체의 경우 일반잡고체, 차폐잡고체, 중수로 일반잡고체 및 중수로 차폐잡고체, 농축폐액 폐기물의 경우 시멘트고화 및 농축폐액 고화 폐기물, 폐수지의 경우 시멘트고화 및 건조 폐수지, 그리고 폐필터 폐기물의 경우 콘크리트라이닝 및 중수로 콘크리트라이닝 폐수지를 고려하였다. 표층처분시설의 포장물은 발전소 별 발생수량을 고려하여 핵종 별 가중평균 방사능 값을 구하고 각 포장물 별 발생수량에 대한 핵종 별 가중평균을 하여 드럼당 방사능량을 각각 선정하였다.

표층처분시설의 처분고 정치방안은 Table 6에 요약하였다. 처분고 1~4까지는 단일 폐기물만으로 정치하며 처분고 5~7까지는 폐필터 폐기물의 비율을 전체 폐기물 중 80%로 설정하였다. 처분고 8~10까지는 폐필터 폐기물의 비율을 전체 폐기물 중 60%로 설정하였다. 처분고 11~13까지는 폐필터 폐기물의 비율을 전체 폐기물 중 40%로 설정하였다. 처분고 14~16까지는 폐필터 폐기물의 비율을 전체 폐기물 중 20%로 설정하였다.

이러한 16개의 처분고에 대하여 제도적 관리기간 300 년

Table 7. Effective dose equivalent per disposal unit (Institutional control period 300 years)

Disposal Unit	Waste Type	Drum Ratio (Spent Filter/Total)	Effective Dose Equivalent (mSv/yr)	Regulatory Guide (1.0 mSv/yr)
1	Spent Resin	-	8.89E-04	Satisfied
2	Waste Concentrate	-	6.93E-04	Satisfied
3	Spent Filter	1.0	2.84E-03	Satisfied
4	Dry Active Waste	-	2.87E-04	Satisfied
5	Spent Filter + Dry Active Waste	0.8	2.33E-03	Satisfied
6	Spent Filter + Spent Resin	0.8	2.45E-03	Satisfied
7	Spent Filter + Waste Concentrate	0.8	2.41E-03	Satisfied
8	Spent Filter + Dry Active Waste	0.6	1.82E-03	Satisfied
9	Spent Filter + Spent Resin	0.6	2.06E-03	Satisfied
10	Spent Filter + Waste Concentrate	0.6	1.98E-03	Satisfied
11	Spent Filter + Dry Active Waste	0.4	1.31E-03	Satisfied
12	Spent Filter + Spent Resin	0.4	1.67E-03	Satisfied
13	Spent Filter + Waste Concentrate	0.4	1.55E-03	Satisfied
14	Spent Filter + Dry Active Waste	0.2	7.97E-04	Satisfied
15	Spent Filter + Spent Resin	0.2	1.28E-03	Satisfied
16	Spent Filter + Waste Concentrate	0.2	1.12E-03	Satisfied

후에 시추 후 거주시나리오를 고려하였고 처분고 별 개인최대 피폭선량을 Table 7에 요약하였다.

저준위 폐기물로만 구성되었을 때도 중준위 폐기물까지 고려된 Hong[7]의 결과처럼 처분고가 단일 폐기물로 구성된 처분고 1~4 중 폐필터 폐기물로만 정해진 처분고 3의 개인최대 피폭선량이 가장 컸다. 폐필터 폐기물로만 구성된 처분고의 개인최대 피폭선량이 다른 폐기물로 구성된 처분고에 비해 높으므로 이를 기준으로 폐기물을 혼합하여 처분고를 구성한 것은 타당함을 알 수 있었다. 또한 전체 처분고의 폐필터 폐기물의 비율이 감소할수록 개인최대 피폭선량이 점점 작아짐을 알 수 있었다. 폐필터 폐기물의 비율이 20%인 처분고 14~16의 경우 폐필터 폐기물로만 구성된 처분고 3의 개인최대 피폭선량이 절반이하로 줄어들었음을 확인하였다. 또한, 처분고에서 폐필터 폐기물이 동일 비율일 때 잡고체 폐기물이 정해진 처분고가 개인최대 피폭선량이 낮음을 알 수 있었다.

따라서 폐필터 폐기물은 폐수지 및 농축폐액 폐기물보다 가능한 잡고체와 함께 정치하며 폐필터 폐기물의 비율을 낮추는 것이 인간침입 측면에서 개인최대 피폭선량을 줄이고 선량한도 대비 안전여유도를 높이기 위해서 바람직함을 알 수 있었다.

## 5. 결론

경주에 저준위 및 극저준위 방사성폐기물을 영구처분하기 위한 2단계 표층처분시설을 계획하고 있다. 본 논문에서는 부지 특성을 반영하여 시추 및 시추 후 거주시나리오를 설정하고 종류 및 준위별 발생량을 고려하여 선정된 처분고 내 폐기물에 대하여 평가하였다. 그 결과 시추 및 시추 후 거주시나리오의 평가결과가 모두 규제 제한치를 만족하였다.

그리고 시추 시나리오보다 시추 후 거주 시나리오가 개인

최대 피폭선량이 약 2500배 큰 더 중요한 시나리오임을 알 수 있었다.

폐쇄 후 인간침입 시점과 침입자의 행위에 따라 침입자가 지배적으로 영향 받는 핵종이 다를 수 있었다. 제도적 관리기간이 없다고 가정하여 살펴본 결과, 두 시나리오 모두 폐쇄초기에는 단반감기 핵종인 Cs-137이, 시추시나리오는 폐쇄후 250 년부터 전알파, 시추 후 거주시나리오에서는 폐쇄후 200 년부터 Tc-99가 지배적으로 영향을 미쳤다.

또한 침입자의 행위와 관련된 주요 입력변수인 토양재분배인자(MRF), 오염먼지 흡입시간, 섭취량 등에 대한 민감도 분석 수행 결과 모두 규제 제한치를 만족하였다. 두 시나리오 모두 토양재분배인자(MRF)에 가장 민감하였다.

인간침입평가 측면에서 폐기물의 정치방안을 살펴본 결과, 폐필터 폐기물은 가능한 폐수지 및 농축폐액 폐기물보다 잡고체 폐기물과 정치하며 폐필터 폐기물 비율을 낮추는 것이 개인 최대 피폭선량을 줄이고 선량한도 대비 안전여유도를 높이기 위해서 바람직함을 알 수 있었다.

이러한 연구결과는 향후 처분시설 개발 시 인간침입을 고려한 표준처분시설의 강건성(Robustness) 및 심층방어(Defense in depth)를 위한 Safety Case 구축의 일환이 될 것으로 기대된다.

## REFERENCES

- [1] Nuclear Safety and Security Commission, Nuclear Safety Act, Enforcement Date 26. Oct (2011).
- [2] Nuclear Safety and Security Commission, "Guidelines for Preparation of Safety Analysis Report for Low and Intermediate-Level Radioactive Waste Disposal Facilities", Notice No. 2014-64 (2014).
- [3] Nuclear Safety and Security Commission, "Technical Requirements for the Operation and Control of Low and Intermediate-Level Radioactive Waste Disposal Facilities", Notice No. 2014-63 (2014).
- [4] Nuclear Safety and Security Commission, "Radiological Protection Criteria for Long term Safety on Low and Intermediate-Level Radioactive Waste Disposal", Notice No. 2014-56 (2014).
- [5] J.B. Park, J.W. Park, E.Y. Lee, and C.L. Kim, "Statistical Approach For Derivation of Quantitative Acceptance Criteria For Radioactive Wastes To Near Surface Disposal Facility", J. of Korean Nuclear Society, 35(5), 387-398 (2003).
- [6] J.B. Park, S.M. Park, J.W. Park, E.Y. Lee, C.G. Lee and C.L. Kim, Quantitative Acceptance Criteria For Radioactive Wastes To Near Surface Disposal Facility, Korea Hydro & Nuclear Power, Technical Report, TR.01NC03.C2003.2 (2003).
- [7] S. W. Hong, J. B. Park, and J. H. Yoon, "Study on the Institutional Control Period through the Post-drilling Scenario of Near Surface Disposal Facility for Low and Intermediate-level Radioactive Waste", JNFCWT, 12(1), 59-68 (2014).
- [8] B. A. Napier, R.A. Peloquin, D. L. Strenge, and J. V. Ramsdell, GENII-The Hanford Experimental Radiation Dosimetry Software System, Volume 1: Conceptual Representation, PNL- 6584 Vol. 1 (1988).
- [9] International Commission on Radiological Protection, "Age-dependent Dose to Members of the Public from Intake of Radionuclide", ICRP Publication 72, Annals of the ICRP, 1996.
- [10] International Atomic Energy Agency, Application of Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities (ASAM) - Assessment of Disruptive Events and Processes, Vienna (2006).
- [11] Korea Radioactive Waste Agency, "Low and Intermediate-Level Radioactive Disposal Facility Safety Analysis Report", Chapter 6 (2010).
- [12] Nuclear Safety and Security Commission, "Regulations for Classification and Clearance of Radioactive Waste", Notice No 2014-003 (2014).
- [13] R. L. Aaberg, W. E. Kenedy, and V. W. Thomas, "Definition of Intrusion Scenarios and Example Concentration Ranges for the Disposal of Near-surface Waste at the Hanford Site", PNL-631 (1990).
- [14] C. Yu, A.J. Zielen, J.J. Cheng, D.J. LePoire, E. Gnanapragasam, S. Kamboj, J. Arnish, A. WalloIII, W.A. Wil-

liams, and H. Peterson, User's Manual for RESRAD Version 6, ANL/EAD-4 (2001).

- [15] Korea Hydro & Nuclear Power, "Sinwolsung 1, 2 Unit Radiation Environmental Impact Assessment for Operating Permit", 5.2-2 (2011).