

Uncertainty Management on Human Intrusion Scenario Assessment of the Near Surface Disposal Facility for Low and Intermediate-Level Radioactive Waste: Comparative Analysis of RESRAD and GENII

중저준위방사성폐기물 표층처분시설의 인간침입 시나리오 평가에 대한 불확실성 관리: RESRAD와 GENII의 비교분석

Minseong Kim*, Sung-Wook Hong, and Jin Beak Park

Korea Radioactive Waste Agency (KORAD), 169 Gajeong-ro, Yuseong-Gu, Daejeon, Republic of Korea

김민성*, 홍성욱, 박진백

한국원자력환경공단, 대전광역시 유성구 가정로 168

(Received July 25, 2017 / Revised August 18, 2017 / Approved September 18, 2017)

In order to manage the uncertainty about the evaluation and analysis of the human intrusion scenario of the Gyeongju Low and Intermediate Level Radioactive Waste(LILW) disposal facility, the calculation result by the GENII code was assessed using the RESRAD code, which was developed to evaluate the radiation effects of contaminated soil. The post-drilling scenario was selected as a human intrusion scenario into the near-surface disposal facility to analyze the uncertainty of the modeling by identifying any limitations in the simulation of each code and comparing the evaluation results under the same input data conditions. The results revealed a difference in the migration of some nuclides between the codes, but confirmed that the dose trends at the end of the post-closure control period were similar for all exposure pathways. Based on the results of the dose evaluation predicted by RESRAD, sensitivity analysis on the input factors was performed and major input factors were derived. The uncertainty of the modeling results and the input factors were analyzed and the reliability of the safety evaluation results was confirmed. The results of this study can be applied to the implementation ‘Safety Case Program’ for the Gyeongju LILW disposal facility.

Keywords: Near surface disposal facility, Human intrusion, RESRAD, Safety case, Post-drilling scenario

* Corresponding Author.

Minseong Kim, Korea Radioactive Waste Agency (KORAD), E-mail: mskim86@korad.or.kr, Tel: +82-42-601-5326

ORCID

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

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

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·저준위방사성폐기물 표층처분시설 인간침입시나리오의 ‘평가/해석에 대한 불확실성’의 관리를 위해 GENII를 이용한 평가결과를 오염도양에 대한 방사선영향평가를 위해 개발된 RESRAD를 이용하여 검증하였다. 중저준위방사성폐기물 표층처분시설의 인간침입시나리오로 시추후거주시나리오를 선정하여 각 코드의 현상 모사에서 발생하는 한계점을 파악하고 동일한 입력데이터 조건에서 두 코드의 평가결과를 비교분석함으로써 모델링의 불확실성을 분석하였다. 평가결과 각 코드에서 일부 핵종의 거동모사에 대한 차이는 있었으나 폐쇄후관리기간 이후 선량평가 결과 모든 피폭경로에 대한 경향이 유사함을 확인하였다. 또한 RESRAD에서 확인한 선량평가 결과를 바탕으로 입력인자에 대한 민감도 분석을 수행하고 주요입력인자를 도출하였다. 이를 통해 모델링 결과 및 입력인자에 대한 불확실성을 분석하고 안전성평가 결과에 대한 신뢰성을 확인하였다. 본 연구의 결과는 중저준위방사성폐기물 처분시설의 Safety Case 구축에 활용될 수 있다.

중심단어: 표층처분시설, GENII, 인간침입, RESRAD, Safety case, 시추후거주시나리오

1. 서론

경주 중저준위방사성폐기물 처분시설은 1단계 동굴처분시설을 2014년 완공하여 중저준위 방사성폐기물을 처분하고 있으며, 2단계 표층처분시설 건설을 계획하고 있다. 계획된 표층처분시설은 지상에 콘크리트 구조물로 구성된 공학적방벽을 설치하는 Vault 타입으로 건설될 예정이며 처분이 완료된 처분고는 원자력안전위원회 고시[1]에 따라 상부에 처분덮개를 설치하고 폐쇄된다. 폐쇄 후 300년의 폐쇄후관리기간동안 부지감시와 환경감시 등을 통해 처분시설의 장기안전성을 확인하고 폐쇄후관리기간 이후에는 모든 관리활동이 종료된다.

폐쇄후관리기간 이후 처분시설부지에서 일반인의 침입을 제한하는 안전기능은 더 이상 존재하지 않으므로 처분시설의 존재를 인지하지 못한 인간의 침입활동을 고려할 수 있다. 따라서 처분시설은 주변 환경과 미래의 인간활동을 고려한 인간침입시나리오를 설정하고 원자력안전위원회 고시 [2] 제10조(인간침입에 대한 방호)에 따라 일반인의 선량한도($1\text{ mSv} \cdot \text{yr}^{-1}$) 이하로 제한할 수 있도록 설계되어야 한다.

GENII [3]와 GOLDSIM [4]은 1단계 동굴처분시설의 인간 침입시나리오 평가코드로 사용되었다. 핵종이동 특성에 따라 토양오염모델은 GENII로 평가하였으며 지하수 오염모델은 GOLDSIM으로 수행하였다. 본 논문에서는 토양오염모델 시나리오 평가를 수행한 GENII 평가 결과에 대한 불확실성 분석을 위해 RESRAD-ONSITE 7.2 [5]코드를 이용하여 인간 침입시나리오 평가 결과를 검증하고자 하였다. RESRAD는

오염된 토양의 상부 거주자에 대한 방사선 영향을 평가하기 위해 미국 DOE의 지원하에 Argonne National Laboratory에서 개발한 코드로서 토양의 방사능오염을 기본 모델로 하고 있다. 미국 환경청에서 방사능에 오염된 부지복원을 위한 안전성평가 코드로 활용하고 있으며 국내에서는 처분시설의 처분농도제한치 도출 및 원자력발전소 해체 후 부지 재활용을 위한 안전성평가를 위한 코드로서 활용되고 있다.

이를 위해 대표 인간침입시나리오를 설정하고 동일한 시나리오에 대해 RESRAD와 GENII의 모델링 방법 및 입력인자 적용의 차이점을 비교하고, 평가결과와 분석과 검증을 통해 GENII를 통해 도출된 인간침입시나리오 평가 결과에 대한 불확실성을 관리하였다. 또한 RESRAD를 이용한 평가결과를 바탕으로 입력인자의 민감도 분석을 수행함으로써 주요 입력인자를 도출하고 관리방안을 제시하였다.

2. 시나리오 설정

인간침입시나리오는 폐쇄후관리기간이 종료된 후 처분시설의 존재를 알지 못하는 인간의 부주의한 침입을 가정하며, 미국 NCRP[6]에 의하면 일반적으로 초기 방사성폐기물에 의해 단시간에 발생하는 급성(acute)피폭시나리오와 오랜기간동안 처분시설 부지에서의 영구거주 등에 의한 만성(chronic) 피폭시나리오로 분류할 수 있다. 급성피폭시나리오는 건설(Construction), 시추(Drilling), 발굴(Discovery)을 고려하며, 만성피폭 시나리오로는 거주(Resident, Non-

agriculture), 농경시나리오(Agriculture), 시추후거주 (Post-drilling)를 고려하고 있다. 또한 놀이공원(Playground) 시나리오 등 부지특성과 환경에 맞게 다양한 인간침입시나리오를 고려할 수 있다[7].

본 논문에서는 가능성 있는 다양한 인간침입시나리오 중 처분시설의 부지특성을 고려하여 시추후거주시나리오를 대표 시나리오로 설정하였다.

시추후거주시나리오는 처분시설을 관통하는 시추작업으로 인해 방사성폐기물이 지표로 유출되며 시추부지 내에 장기간 일반인이 거주하는 경우에 피폭영향을 고려하는 시나리오로서 보수적으로 강우에 대한 영향 등 자연적 현상은 배제하고 인간침입활동에 의해 발생하는 피폭현상만을 고려한다. 시추작업으로 인해 방사성폐기물은 원계지역을 거치지 않고 바로 지표면으로 유출되며 거주민들은 오염된 토양으로부터 외부 피폭, 부유물질 흡입과 농작물 경작활동과 가축사육 등을 통한 먹이사슬을 통해 2차 피폭이 발생할 수 있다. 본 논문의 대표시나리오는 처분부지 내 농지는 가축을 사육할 수 있을 정도로 면적이 넓지 않고 농작물 중 곡류 또한 재배하지 않으므로 가축과 곡류는 외부지역에서 공급하여 섭취한다고 가정하였다[8]. 시추거주시나리오의 개념모델은 Fig. 1에 제시하였다.

3. 모델링 수행

3.1 피폭경로

시추후거주시나리오에서는 시추 작업으로 인해 오염된 부지 내에서 장기간 거주하는 일반인의 영향을 평가하며, 이로 인한 피폭경로는 오염된 토양에 의한 외부피폭과 부유물질의 흡입을 통한 내부피폭, 그리고 오염토양에서의 농작물 경작활동에 의한 음식물 섭취를 통한 내부피폭을 고려하였다.

RESRAD에서 선량평가를 위해 적용하는 수학적 모델은 다음과 같다[5].

$$H_E = \sum_{i,p} DCF_{i,p} \cdot ETF_{i,p} \cdot S_i, \quad (1)$$

여기서,

H_E : 연간 유효선량 [$\text{mSv} \cdot \text{yr}^{-1}$],

$DCF_{i,p}$: 핵종*i*, 피폭경로*p*에 대한 선량환산인자(Dose Conversion Factor) [$\text{mSv} \cdot \text{Bq}^{-1}$, $\text{mSv} \cdot \text{yr}^{-1}$ per $\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}$],
 $ETF_{i,p}$: 핵종*i*, 피폭경로*p*에 대한 방사성물질 이동인자 (Environmental Transport Factors) [$\text{g} \cdot \text{yr}^{-1}$],
 그리고 S_i : 핵종 *i*에 대한 초기농도 [$\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}$] 이다.

시추후거주시나리오에서 고려하는 피폭경로에 대한 방사성물질 이동인자(ETF_p)는 외부피폭(ETF_{ext}), 호흡으로 인한 피폭(ETF_{inh}), 섭취로 인한 피폭(ETF_{ing})으로 구분되며 각각 다음과 같이 도출된다.

$$ETF_{(ext)i}(t) = FO_1 \cdot FAS(t) \cdot FCD_1(t), \quad (2)$$

여기서,

FO_1 : 거주 및 차폐인자(Occupancy and shielding factor) [-],

$FAS(t)$: 오염면적 및 형태인자(Area and shape factor) [-], 그리고

$FCD_1(t)$: 오염토양의 자체흡수 및 차폐 고려인자 [-] 이다.

$$ETF_{(inhi)i}(t) = ASR \cdot FO_2 \cdot FA_2(t) \cdot FCD_2(t) \cdot FI, \quad (3)$$

여기서,

ASR : 공기와 토양 농도비 [$\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$]로서 공기중의 오염 토양입자의 평균 질량과 동일하며,

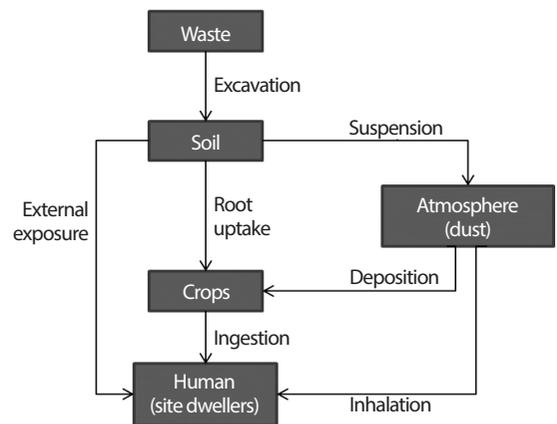


Fig. 1. Simplified conceptual model for the Post-Drilling scenario in this study.

Table 1. Concentration of radioactive waste in engineered vault in GENII

Nuclides	Waste Concentration (Bq·m ⁻³)
³ H	4.07×10 ¹⁰
¹⁴ C	7.03×10 ⁹
⁵⁵ Fe	2.33×10 ¹¹
⁵⁸ Co	3.48×10 ¹⁰
⁶⁰ Co	5.92×10 ¹⁰
⁵⁹ Ni	2.07×10 ⁹
⁶³ Ni	1.44×10 ¹¹
⁹⁰ Sr	2.00×10 ⁸
⁹⁴ Nb	4.81×10 ⁶
⁹⁹ Tc	4.81×10 ⁷
¹²⁹ I	2.15×10 ⁴
¹³⁷ Cs	8.14×10 ⁹
¹⁴⁴ Ce	4.07×10 ⁷
Gross alpha	4.44×10 ⁷

Table 2. Concentration of contaminated surface soil in RESRAD

Nuclides	Soil Concentration (Bq·g ⁻¹)
³ H	5.16
¹⁴ C	8.92×10 ⁻¹
⁵⁵ Fe	2.96×10 ¹
⁵⁸ Co	4.41
⁶⁰ Co	7.51
⁵⁹ Ni	2.63×10 ⁻¹
⁶³ Ni	1.83×10 ¹
⁹⁰ Sr	2.54×10 ⁻²
⁹⁴ Nb	6.10×10 ⁻⁴
⁹⁹ Tc	6.10×10 ⁻³
¹²⁹ I	2.72×10 ⁻⁶
¹³⁷ Cs	1.03
¹⁴⁴ Ce	5.16×10 ⁻³
Gross alpha	5.63×10 ⁻³

Table 3. Comparison of input parameter values for GENII and RESRAD

GENII		RESRAD	
Parameters	Values	Parameters	Values
Waste concentration	Table 1	Soil concentration	Table 2
Soil density	1.6 g·cm ⁻³	Soil density	1.6 g·cm ⁻³
Waste thickness	9.7 m	Thickness of contaminated zone	0.15 m
Depth of Soil overburden	5.1 m	-	-
Area of contaminated zone	2,500 m ²	Area of contaminated zone	2,500 m ²
-	-	Thickness of cover material	0 m
-	-	Contaminated zone erosion rate	0 m·yr ⁻¹
Exposure time	4380 h·yr ⁻¹ (external) 3500 h·yr ⁻¹ (inhalation)	Exposure time fraction	0.5 (indoor) 0.2 (outdoor)
Dust loading	1×10 ⁻⁴ g·cm ⁻³	Mass loading factor for dust inhalation	1×10 ⁻⁴ g·m ⁻³
External gamma shielding factor	0.7	External gamma shielding factor	0.7
Breathing rate	8,400 m ³ ·yr ⁻¹	Inhalation rate	8,400 m ³ ·yr ⁻¹
Leafy veg. consumption	133 kg·yr ⁻¹	Leafy veg. Consumption	133 kg·yr ⁻¹
Root veg. consumption	87.1 kg·yr ⁻¹	Vegetables, fruits, and grain consumption	264* kg·yr ⁻¹
Fruit consumption	176.5 kg·yr ⁻¹	-	-
-	-	Precipitation rate	0 m·yr ⁻¹
-	-	Erosion rate	0 m·s ⁻¹
Irrigation rate	0 m·yr ⁻¹	Irrigation rate	1.0×10 ⁻⁸ m·yr ⁻¹

*Sum of root veg. and fruit consumption considering in GENII input data

FO_2 : 호흡에서 고려되는 거주인자 [-],
 $FA_2(t)$: 오염면적인자 [-],
 FI : 연간 호흡률 [$m^3 \cdot yr^{-1}$], 그리고
 $FCD_2(t)$: 오염토양에서의 재부유 토양입자의 비율 [-]이다.

$$ETF_{(ing)}(t) = FA_3(t) \cdot FCD_3(t) \cdot \sum_k DF_k \cdot FSR(t), \quad (4)$$

여기서,
 $FA_3(t)$: 농작물 재배 관련 오염면적인자 [-],
 $FCD_3(t)$: 오염토양에서의 식물의 뿌리 깊이 관련 인자 [-],
 DF_k : 음식물 k에 대한 연간섭취량 [$g \cdot yr^{-1}$], 그리고
 $FSR(t)$: 음식물/토양 농도비 [-]이다.

3.2 피폭선원모델

처분시설을 관통하는 시추작업으로 인해 방사성폐기물이 직접 지표면으로 노출되며 오염면적으로 설정한 상부토양에 희석되어 피폭선원으로 작용한다. GENII에서는 인간의 부지 훼손등을 통해 폐기물층(contained waste compartment)에서 오염물질이 지표(surface soil)로 이동되는 현상을 토양재분배인자(MRF, Manual Redistribution Factor)로 정의하여 모사한다[3]. 하지만 RESRAD는 처분고 즉, 공학적 방벽에서 폐기물이 누출되는 현상을 모사하지 않고[9] 토양의 잔류 방사능물질로부터의 방사선적 영향을 고려한다. 따라서 시추작업으로 인해 처분고를 관통한 시추공의 부피만큼 방사성폐기물이 오염면적으로 설정한 상부토양층에 희석된 상태로 모델링하였다.

표층처분시설 처분대상인 저준위와 극저준위 방사성폐기물에 대해 종류 및 준위 별 발생량을 고려하여 단일 처분고(18.8 m×18.8 m×9.7 m)의 핵종별 농도를 제시하였다 (Table 1 참조). 이는 GENII에서 폐기물층의 농도($Bq \cdot m^{-3}$)의 입력값으로 사용된다.

오염된 토양의 면적은 시나리오의 부지 활용측면을 고려하여 2,500 m^2 로 가정하였으며 시추 시에 직경 10 cm의 시추공을 사용하는 것으로 가정하였다[10]. 이 때 처분고 내 폐기물이 가득 찬 두께를 처분고 높이로 9.7 m로 가정할 때 총 0.076 m^3 의 방사성폐기물이 지표로 이동된다. 이를 GENII에서는 토양재분배인자로서 $3.04 \times 10^{-5} m^3 \cdot m^{-2}$ 로 설정하였다. 이와 동일한 모델링을 위해 RESRAD코드에서는 지

표로 이동된 오염물질에 의한 토양의 단위질량당 방사능량 C_{c_soil} ($Bq \cdot g^{-1}$)을 아래의 식과 같이 시추되는 방사성폐기물과 지표의 희석을 고려하여 산출하였으며, 그 결과를 Table 2에 제시하였다.

$$C_{c_soil} = \frac{C_{waste} \times V_{waste}}{M_{(waste+Soil)}} \quad (5)$$

여기서 C_{waste} 는 폐기물의 농도로 Table 1의 값을 적용하며, V_{waste} 는 지표로 유출되는 방사성폐기물의 부피에 해당한다. $M_{(waste+Soil)}$ 은 오염토양의 질량에 해당하며 이는 시추로 인한 방사성폐기물과 표면토양의 질량의 합으로 표현된다. 이 때 표면토양은 GENII에서 고려하는 표면토양의 두께와 동일하게 15 cm로 설정하였으며 밀도는 $1.6 g \cdot cm^{-3}$ 를 적용하였다.

3.3 입력자료

피폭평가를 위한 선량환산계수는 두 전산프로그램 모두 ICRP60 [11] 개념에 근거한 ICRP72 [12]의 유효선량환산계수를 적용하였으며, 피폭시간은 오염원에 노출되는 시간으로서 외부활동시간과 실내활동시간으로 구분되며 본 논문에서는 외부활동시간을 1,800시간, 내부활동시간을 4,380시간으로 설정하였다[8].

RESRAD에서는 피폭시간이 비율(fraction)개념으로 적용된다. 연간 외부활동 시간비율(f_{od})과 연간 내부활동 시간비율(f_{ind})에 대해 실내에서 발생하는 피폭과 실외에서 발생하는 피폭을 차폐를 고려한 가중치를 고려한 합으로 외부피폭시간(FO_{ext}) 및 흡입피폭시간(FO_{inh})은 다음과 같이 정의한다.

$$FO_{ext} = f_{od} + (f_{ind} \times F_{sh}) \quad (6)$$

$$FO_{inh} = f_{od} + (f_{ind} \times F_{dust}) \quad (7)$$

여기서 F_{sh} 는 건물차폐효과인자로 보수적으로 최대개인 평가시 고려하는 0.7로 가정하였으며[13], F_{dust} 는 실내 먼지 흡입차폐인자로 RESRAD에서 권고하는 0.4를 적용하였다 [12]. 따라서 RESRAD에서는 실내활동시간을 0.5, 실외활동시간을 0.2로 적용하며, 실제 외부피폭시간은 4,866시간, 호흡으로 인한 내부피폭시간은 약 3,500시간에 해당한다. 반면 GENII에서는 각 피폭경로에 해당하는 시간을 입력하도록

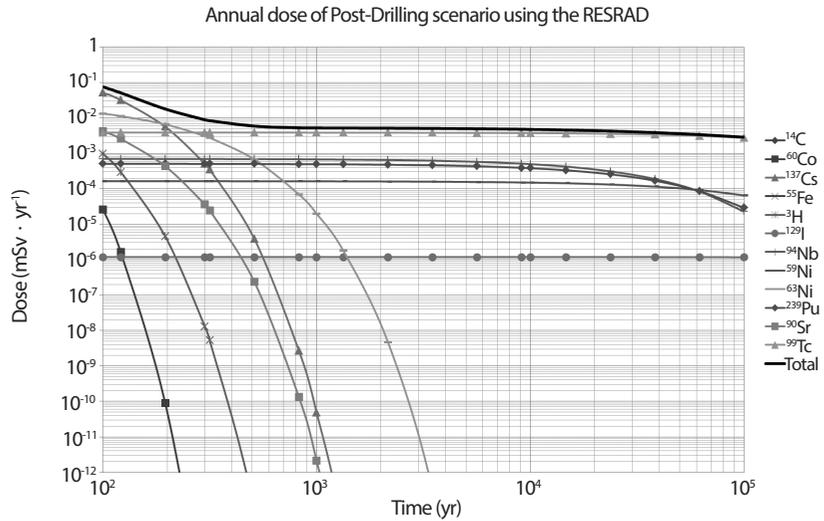


Fig. 2. Result of annual dose of Post-Drilling scenario using the RESRAD.

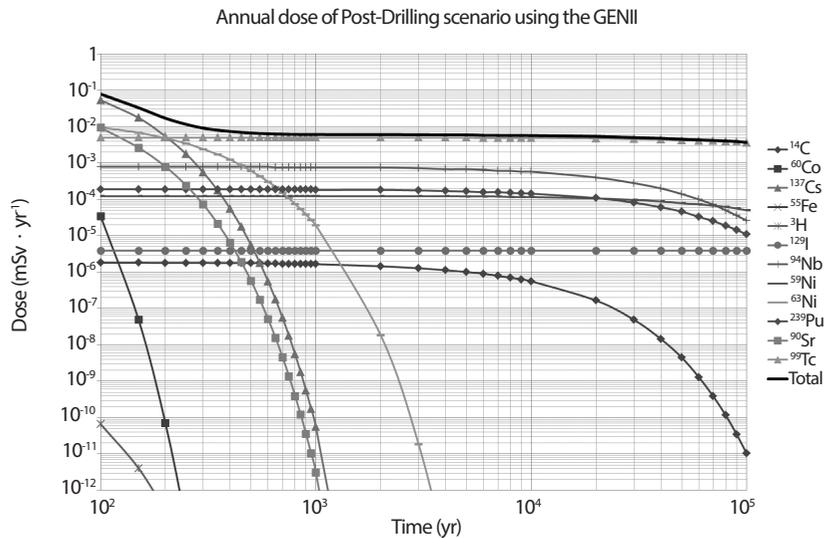


Fig. 3. Result of annual dose of Post-Drilling scenario using the GENII.

되어있으므로 이와 동일하게 적용하였다. 먼지의 질량부하 계수(Mass Loading Factor)는 대기 중 오염된 먼지의 농도로 정의되며 동일하게 $1.0 \times 10^{-4} \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 를 적용하였다[8,14].

연간 농작물 섭취는 엽채류, 뿌리작물, 과일만 이루어지며 이에 대한 연간 섭취량은 부지특성자료로써 각각 $132.9 \text{ kg} \cdot \text{yr}^{-1}$, $87.1 \text{ kg} \cdot \text{yr}^{-1}$, $176.5 \text{ kg} \cdot \text{yr}^{-1}$ 이다[8].

GENII에서는 엽채류, 뿌리작물, 과일로 각각 분류하여 입력 가능하나, RESRAD에서는 엽채류와 기타농작물로 분류되어 뿌리작물과 과일을 합한 값을 기타농작물로 고려하였다. 오염도의 침식현상 및 강우에 의한 현상 등은 고려하지 않았으며 평가에 사용된 주요 입력데이터는 GENII와 RESRAD를 비교하여 Table 3에 제시하였다.

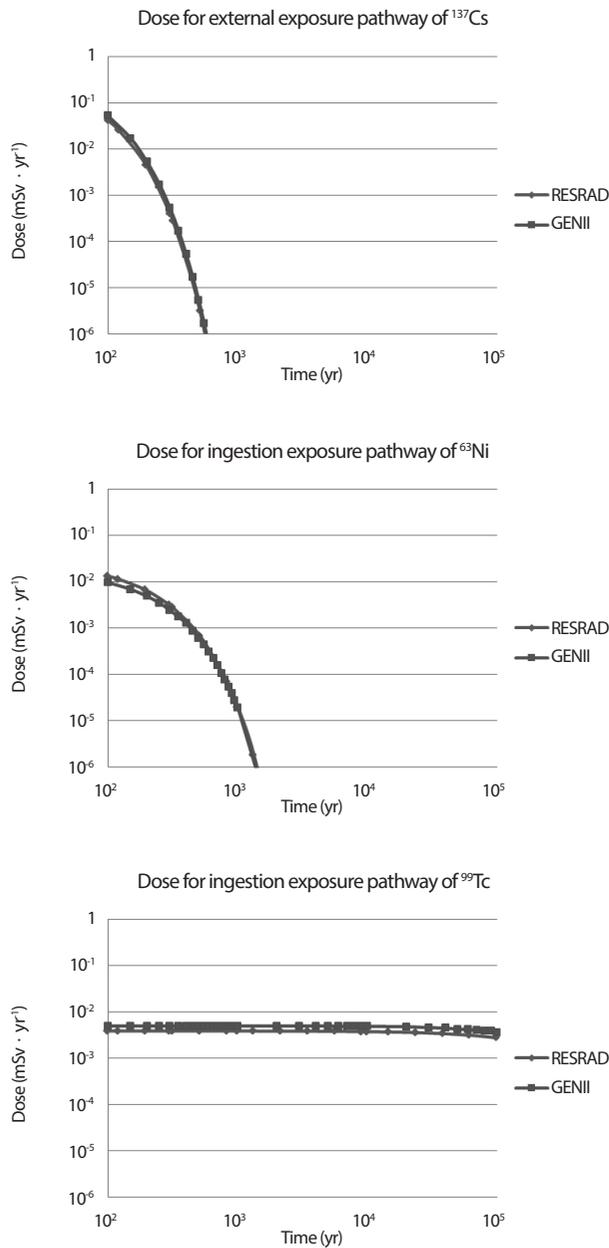


Fig. 4. Comparison of annual dose for exposure pathway of key nuclides.

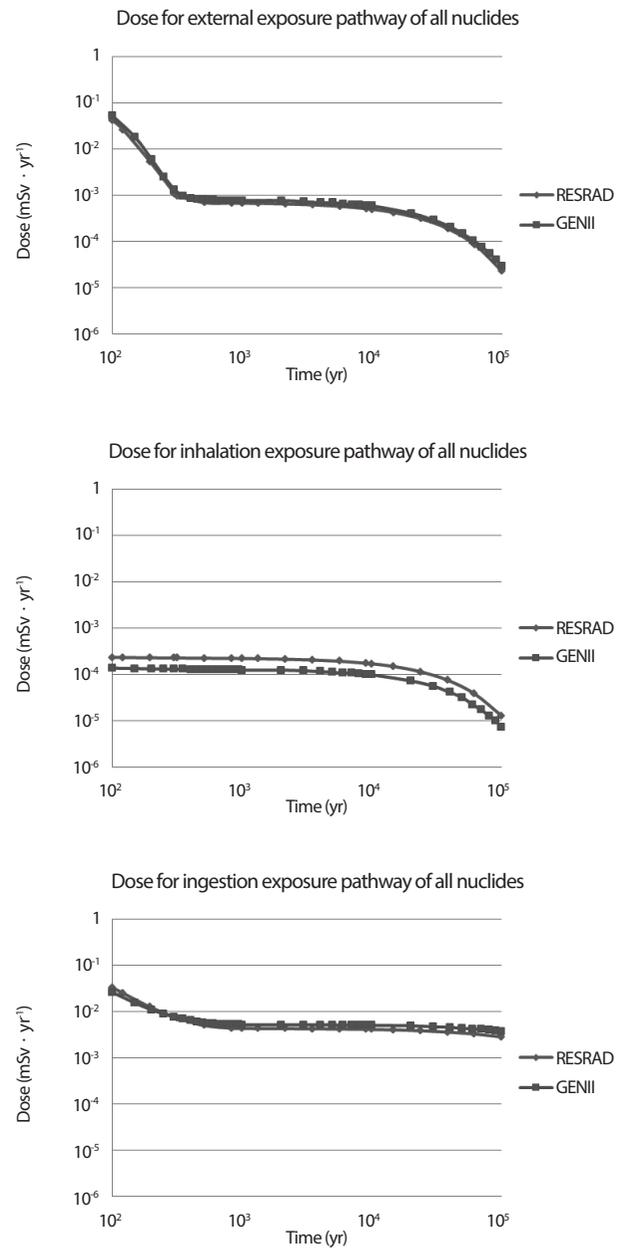


Fig. 5. Comparison of annual dose for exposure pathway of all nuclides.

4. 평가결과

시추후거주 인간침입시나리오에 대한 GENII 평가 결과에 대해 RESRAD를 통해 검증한 결과 핵종 별로 시간의 흐름에 따라 유사한 경향으로 나타났다. 표층처분

시설의 폐쇄후관리기간을 300년으로 가정할 때 RESRAD는 $8.90 \times 10^{-3} \text{ mSv} \cdot \text{yr}^{-1}$, GENII는 $9.13 \times 10^{-3} \text{ mSv} \cdot \text{yr}^{-1}$ 로 거의 동일한 피폭선량으로 성능목표치를 모두 만족함을 확인하였다.

각 전산프로그램에 의한 평가결과를 핵종 별로 Fig. 2와

Table 4. Dose comparison of key nuclide by each exposure pathway at 300yrs, RESRAD vs. GENII

Radionuclide	External exposure		Ratio (RESRAD/GENII)
	External Dose (mSv·yr ⁻¹)		
	RESRAD	GENII	
C-14	0.0	7.70×10 ⁻⁷	N/A
Cs-137	4.08×10 ⁻⁴	5.30×10 ⁻⁴	7.70×10 ⁻¹
Nb-94	6.93×10 ⁻⁴	7.90×10 ⁻⁴	8.77×10 ⁻¹
Ni-59	0.0	9.10×10 ⁻⁶	N/A
Ni-63	0.0	1.10×10 ⁻⁷	N/A
Pu-239	2.03×10 ⁻⁷	2.00×10 ⁻⁷	1.01
Sr-90	1.12×10 ⁻⁷	9.57×10 ⁻⁸	1.17
Tc-99	9.37×10 ⁻⁸	3.70×10 ⁻⁸	2.53
Total	1.10×10 ⁻³	1.33×10 ⁻³	8.28×10 ⁻¹
Radionuclide	Inhalation		Ratio (RESRAD/GENII)
	Inhalation Dose (mSv·yr ⁻¹)		
	RESRAD	GENII	
C-14	0.0	1.03×10 ⁻⁷	N/A
Cs-137	1.30×10 ⁻⁸	2.21×10 ⁻⁹	5.90
Nb-94	9.94×10 ⁻⁹	1.46×10 ⁻⁷	6.81×10 ⁻²
Ni-59	7.31×10 ⁻⁸	9.84×10 ⁻⁸	7.43×10 ⁻¹
Ni-63	1.40×10 ⁻⁶	2.03×10 ⁻⁶	6.92×10 ⁻¹
Pu-239	2.25×10 ⁻⁴	1.28×10 ⁻⁴	1.76
Sr-90	1.07×10 ⁻⁹	1.28×10 ⁻⁹	8.40×10 ⁻¹
Tc-99	2.66×10 ⁻⁸	5.10×10 ⁻⁹	5.22
Total	2.27×10 ⁻⁴	1.30×10 ⁻⁴	1.74
Radionuclide	Ingestion		Ratio (RESRAD/GENII)
	Ingestion Dose (mSv·yr ⁻¹)		
	RESRAD	GENII	
C-14	0.0	0.0	N/A
Cs-137	1.03×10 ⁻⁴	1.91×10 ⁻⁵	5.38
Nb-94	2.04×10 ⁻⁶	3.00×10 ⁻⁶	6.80×10 ⁻¹
Ni-59	1.64×10 ⁻⁴	1.14×10 ⁻⁴	1.44
Ni-63	3.11×10 ⁻³	2.40×10 ⁻³	1.30
Pu-239	2.80×10 ⁻⁴	6.22×10 ⁻⁵	4.51
Sr-90	3.62×10 ⁻⁵	7.19×10 ⁻⁵	5.04×10 ⁻¹
Tc-99	3.87×10 ⁻³	4.99×10 ⁻³	7.76×10 ⁻¹
Total	7.57×10 ⁻³	7.67×10 ⁻³	9.87×10 ⁻¹

Fig. 3에 제시하였다. Fig. 2와 Fig. 3에서 핵종 별 선량은 일부 차이는 있으나 시간 경과에 따른 경향은 동일하게 나타났다. 약 200년까지는 ¹³⁷Cs과 ⁶³Ni의 영향이 크게 나타났으며 그 이후에는 ⁹⁹Tc의 영향이 크게 평가되었다. ¹³⁷Cs는 외부피폭이 주요 피폭경로였으며, ⁶³Ni과 ⁹⁹Tc는 농작물섭취가 주요 피폭경로로 평가되었다.

이들 핵종의 주요 피폭경로에 대해 분석한 결과 RESRAD와 GENII의 선량은 시간에 흐름에 따라 유사하게 나타났으며 Fig. 4에 제시하였다. 또한 모든 핵종에 대해 외부피폭, 호흡, 섭취에 의한 피폭경로별 선량 또한 동일한 경향을 보이는 것을 확인하였으며 그 결과를 비교하여 Fig. 5에 제시하였다.

각 피폭경로에 대해 주요 핵종 별로 그 차이를 확인하기 위해 폐쇄후관리기간(300년) 이후의 피폭선량을 비교하여 Table 4에 제시하였다. 비교 결과 ¹⁴C핵종을 제외하고는 모두 큰 차이가 없는 것을 확인하였다.

¹⁴C의 경우 토양에 존재할 경우 대부분 대기로 날아가며 이를 식물의 광합성을 통해 흡수하게 된다. 이때 대기로 휘발되는 정도(evasion rate)를 토양의 종류에 따라 실험값으로 제시하고 있으며 또한 식물에서의 ¹⁴C 농도는 98%가 대기로 부터 흡수되며, 약 1~2%가 뿌리를 통해 토양으로부터 흡수되는 것으로 보고하고 있다[15].

RESRAD에서는 이를 반영하여 토양과 대기경로를 분류하고 토양에서의 evasion rate와 ¹⁴C의 토양과 대기로부터 식물에서의 흡수율을 고려하여 식물의 ¹⁴C농도를 평가하고 있다. RESRAD는 일반적으로 통용되거나 그게 아니라면 보수적인 값을 권고하고 있으므로 이를 그대로 적용하여 평가하였을 때는 ¹⁴C의 evasion rate에 의해 100년 이전에 모두 휘발되어 ¹⁴C에 의한 피폭영향은 없는 것으로 나타난다(Fig. 2 참조).

반면 이에 대한 효과를 배제할 경우에는 ¹⁴C은 토양에 잔류하고 있는 것으로 뿌리 흡수를 통해 2%가 식물로 농축되므로[5], ¹⁴C의 농작물 섭취피폭에 의한 영향으로 인해 Fig. 6과 같은 결과가 도출되어 폐쇄후관리기간이 종료된 300년 시점에서의 총선량은 2.71×10⁻² mSv·yr⁻¹로 증가한다. 이때 ¹⁴C에 의한 선량은 1.82×10⁻² mSv·yr⁻¹로 총선량의 약 67%를 차지하며, ¹⁴C의 토양으로부터 식물로 흡수율이 중요한 인자로 작용하게 된다. 토양으로부터 식물로 흡수율 변화에 따른 선량의 민감도 분석 결과는 Fig. 7에 제시하였다.

GENII에서도 ¹⁴C에 RESRAD와 동일하게 농작물의 ¹⁴C

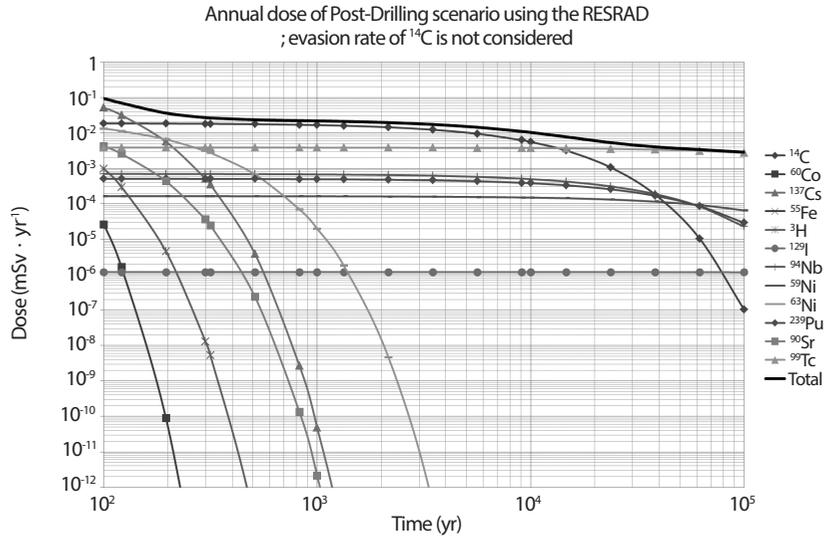


Fig. 6. Result of annual dose of Post-Drilling scenario using the RESRAD; evasion rate of ^{14}C is not considered.

농도를 공기와 토양으로부터 두 경로로 분리하여 평가하고 있으나 evasion rate는 고려되지 않으며 대기로부터 식물로의 흡수율은 45%를 적용하고, 토양으로부터 식물로 전달되는 ^{14}C 의 농도는 관개수 농도에 의해 평가한다[3]. 본 평가에서는 관개수에 의한 영향을 적용하지 않았으므로 ^{14}C 의 농도는 대기 경로에 대해서만 고려되었다. 따라서 GENII에서 평가한 모델에서는 ^{14}C 의 영향이 크지 않지만, 핵종의 거동특성을 어떻게 반영하느냐에 따라 선량평가에서 주요핵종으로 고려될 수 있으므로 모델에 대한 충분한 이해를 바탕으로 부지특성에 적합한 모델과 입력값을 적용해야 한다.

Fig. 3의 평가결과에 대한 각각의 입력인자에 대한 민감도 분석을 수행한 결과를 Fig. 8에 제시하였으며 농작물 섭취량에서 가장 큰 민감도를 보였다. 폐쇄후관리기간 이후 300년 시점에서 섭취량이 2배 증가함에 따라 피폭선량은 약 1.6배 증가하였으며 시간이 지남에 따라 토양의 방사능물질이 농작물에 축적되어 그 영향이 커지는 것으로 판단된다. 따라서 섭생데이터는 부지의 현재 특성을 반영하는 데이터로서 인간침입시나리오 피폭선량 평가 시 주요인자로 작용하며 현재의 부지특성데이터를 적용하여 평가해야 한다.

또한 인간침입시나리오에서는 인간침입활동에 의한 현상만을 보수적으로 고려하며 일반적인 자연현상에 의한 변화는 고려하지 않는 것이 일반적이지만 폐쇄후관리기간 이후에도 예측가능한 경우량이 유지된다고 가정하였을 때 평가

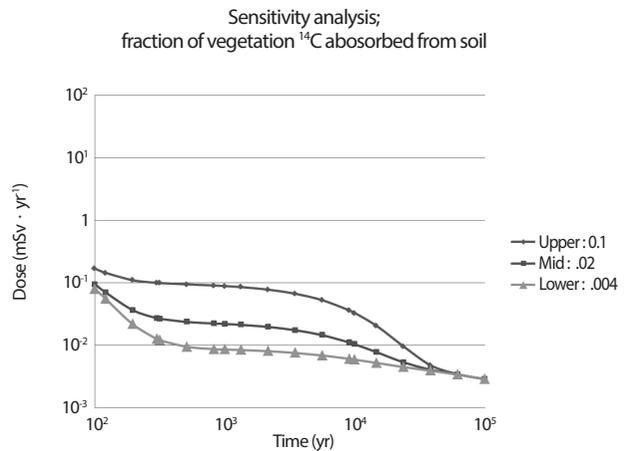


Fig. 7. Sensitivity analysis of annual dose according to variation of vegetation ^{14}C absorbed fraction from soil in RESRAD.

결과를 Fig. 8에 제시하였다. 물에 쉽게 용해되어 이동하는 ^{99}Tc 핵종의 경우 강우에 의해 침투되어 더 이상 표면토양에 존재하지 않으므로 이들 핵종에 대한 피폭영향은 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다. 폐쇄후관리기간 이후 300년 시점에서의 선량은 $2.57 \times 10^{-3} \text{ mSv} \cdot \text{yr}^{-1}$ 로 약 3배가량 피폭영향이 줄어들며 약 2만년 이후에는 피폭영향이 거의 없음을 확인할 수 있다.

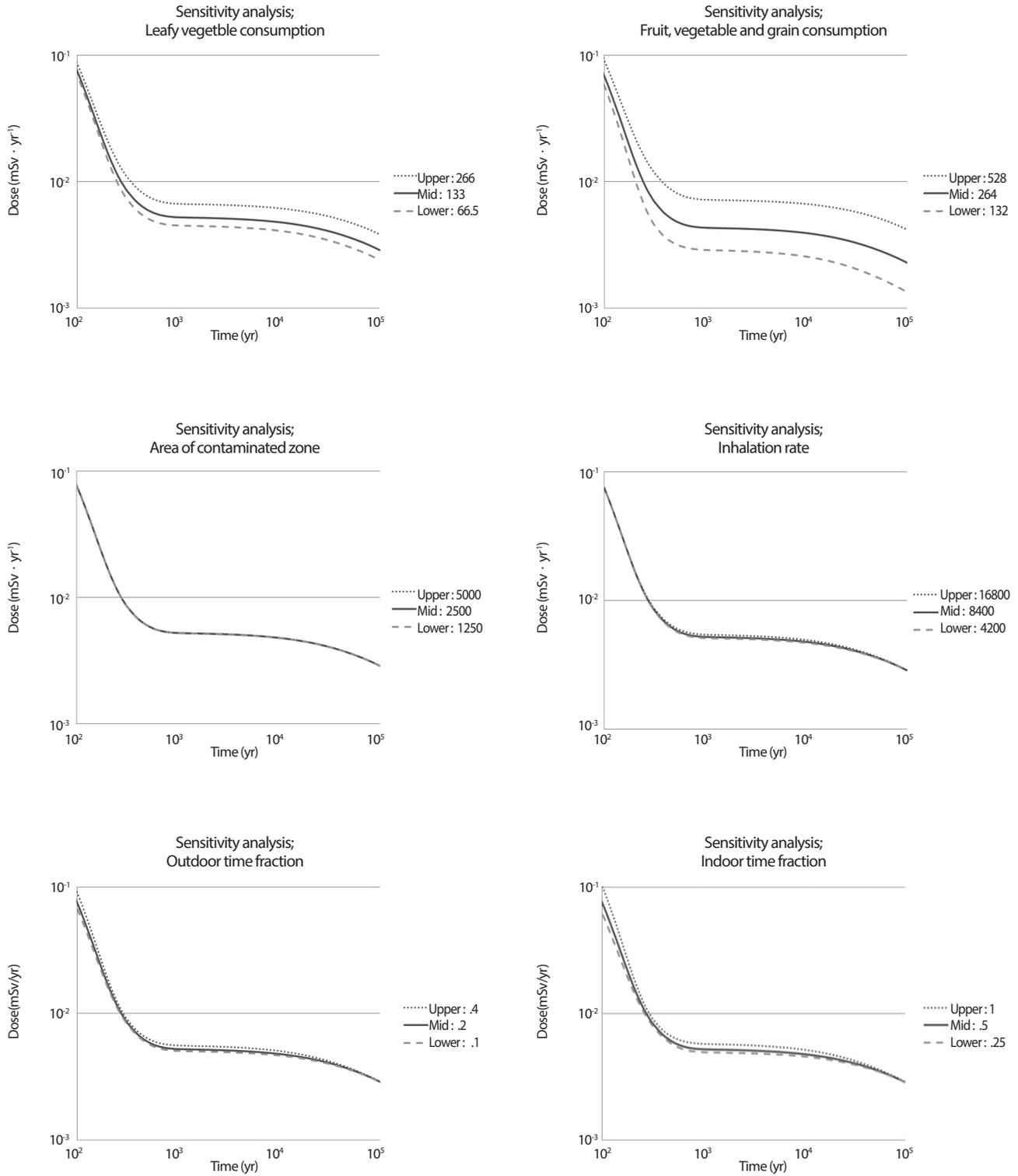


Fig. 8. Sensitivity analysis of annual dose according to variation of input data in RESRAD.

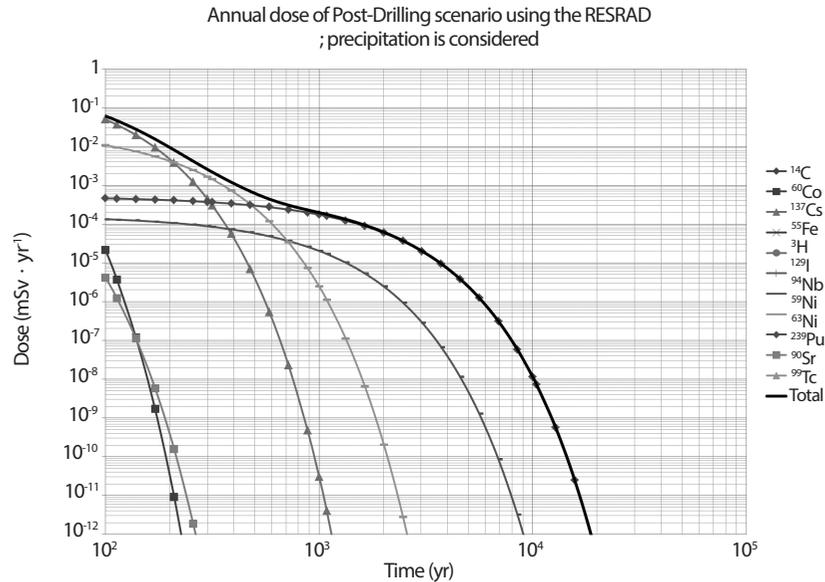


Fig. 9. Result of annual dose of Post-Drilling scenario using the RESRAD; precipitation is considered.

5. 결론

처분시설 안전성평가에 대한 불확실성은 발생요인에 따라 특정데이터나 처분시설 주요기 특성에 대한 지식 및 정보부재에서 발생하는 ‘평가/해석에 대한 불확실성’ 과 먼 미래에 처분시스템에서 발생하는 현상에 대한 ‘시스템에 대한 불확실성’ 으로 구분할 수 있다[16].

본 논문에서는 인간침입시나리오에 대한 평가/해석에 대한 불확실성 분석을 위해 GENII에 대한 결과를 RESRAD 코드를 통해 검증하였다. 이를 통해 안전성평가 결과에 대한 신뢰성 확보뿐만 아니라 경주 중저준위방사성폐기물 표층처분시설 Safety Case 구축의 일환으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

일반적으로 인간침입시나리오에서는 인간침입 활동에 의한 영향만을 고려하여 일반적으로 발생가능한 자연현상은 배제하고 보수적으로 단순화시켜 모델화한다. 하지만 폐쇄후관리기간 이후 인간침입활동 이외의 예측 가능한 일반적인 경우에 의한 자연현상 등을 현재상태와 동일하게 반영하여 GENII에서 고려되지 않는 자연현상에 대해 RESRAD를 통해 구현한다면, 모델 구축과정 시 도입되는 단순화 과정에서 발생하는 시스템에 대한 불확실성을 저감할 수 있을 것이라 판단된다.

REFERENCES

- [1] Nuclear Safety and Security Commission, Guidelines for the Operation of Low and Intermediate-Level Radioactive Waste Disposal Facilities, Notice No.2016-26 (2016).
- [2] Nuclear Safety and Security Commission, Guidelines for Radiation Hazard prevention of Low and Intermediate-Level Radioactive Waste Disposal Facilities, Notice No.2016-25 (2016).
- [3] Oak Ridge National Laboratory, Documentation for CCC-601/GENII 1.485 Code Package (1997).
- [4] GoldSim Technology Group LLC, User’s Guide GoldSim Version 11.1 (2014).
- [5] C. Yu, A.J. Zielen, J.J. Cheng, D.J. LePoire, E. Gnanaprasam, S. Kamboj, J. Arnish, A. Wallo III, A. Williams, and H. Peterson, User’s Manual for RESRAD Version 6, ANL/EAD-4 (2001).
- [6] National Council on Radiation Protection and Measurements, Report No. 152, Performance Assessment of Near-surface Facilities for Disposal of Low-level Radioactive Waste, Chapter 6 (2006).

- [7] Korea Hydro & Nuclear Power Co., “Development of performance Assessment Methodology for Establishment of Quantitative Acceptance Criteria of Near-Surface Radioactive Waste Disposal”, TR-01NC03-C2003-2 (2003).
Following-up Action Report, KORAD-TR-2015-001 (2015).
- [8] Korea Radioactive Waste Agency, Low and Intermediate-Level Radioactive Disposal Facility Safety Analysis Report, Chapter 6 (2015).
- [9] E.R. Faillace, J.J. Cheng, and C.Yu, RESRAD Benchmarking Against Six Radiation Exposure Pathway Models, ANL/EAD/TM-24 (1994).
- [10] S.W. Hong, S.H. Park, J.B. Park, “Safety Assessment on the Human Intrusion Scenarios of Near Surface Disposal Facility for Low and Very Low Level Radioactive Waste”, J. Nucl. Fuel Cycle Waste Technol, 14(1), 79-90 (2016).
- [11] International Commission on Radiological Protection (ICRP), 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60 (1991).
- [12] 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 (1996).
- [13] U.S. Nuclear Regulatory Commission, Calculation of Annual Doses to Man from Routine Releases of Reactor Effluents for the Purpose of Evaluating Compliance with 10 CFR Part 50, Regulatory Guide 1.109 (1977).
- [14] C. Yu, S. Kamboj, C. Wang, and J.J. Cheng, Data Collection Handbook to Support Modeling Impacts of Radioactive Material in Soil and Building Structures, ANL/EVS/TM-14/4 (2015).
- [15] Sheppard MI, Sheppard SC, Amiro BD., “Mobility and Plant Uptake of Inorganic C-14 and C-14-Labelled PCB in Soils of High and Low Retention”, Health Physics, 61, 481-492 (1991).
- [16] Korea Radioactive Waste Agency, “Section 7.1 Safety Case Program”, Construction and Operation Licensing