

Comparison of Radionuclide Inventory Between Predicted and Measured Activity of Dry Active Waste From Korea Nuclear Power Plant

국내 원자력발전소 잡고체폐기물의 예측방사능량과 실측방사능량의 비교분석

Kang Il Jung*, Jin Hyeong Kim, Noh Gyeom Jeong, and Jin Beak Park

Korea Radioactive Waste Agency (KORAD), 174 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea

정강일*, 김진형, 정노겸, 박진백

한국원자력환경공단, 대전광역시 유성구 가정로 174 기술연구소

(Received August 1, 2017 / Revised August 21, 2017 / Approved September 12, 2017)

The inventory management of radionuclides is essential for the safe management of disposal facilities. In this study, we compared the activity of dry active waste predicted using the generated waste data and that measured for the accepted waste in the disposal facility. For very low level waste, the measured activity was higher than the predicted activity for ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{99}Tc and ^{129}I . In low level waste, the predicted activity was higher than the measured activity for all radionuclides. We also evaluated the variation in the predicted quantity and total activity of each level of dry active waste through a sensitivity analysis on a scaling factor. This result will contribute to the construction of a Safety Case and safe operation of disposal facilities.

Keywords: Dry Active Waste (DAW), Radioactive Inventory, Scaling factor, Sensitivity analysis

*Corresponding Author.

Kang Il Jung, Korea Radioactive Waste Agency (KORAD), E-mail: kangile@korad.or.kr, Tel: +82-42-601-5327

ORCID

Kang Il Jung <http://orcid.org/0000-0002-4655-3060>

Noh Gyeom Jeong <http://orcid.org/0000-0002-2270-221X>

Jin Hyeong Kim <http://orcid.org/0000-0003-0531-1951>

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

핵종재고량 관리는 처분시설의 안전한 관리를 위해서는 필수적이다. 본 논문에서는 원자력발전소의 잡고체폐기물에 대하여 기존 발생된 폐기물 자료를 반영한 예측방사능량과 실제 처분시설을 운영하면서 인수되어 처분검사까지 완료된 실제방사능량을 비교분석하였다. 극저준위방사성폐기물에서는 ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{99}Tc 그리고 ^{129}I 핵종이 예측방사능량보다 실제방사능량이 높게 평가되었으며, 저준위방사성폐기물에서는 모든 핵종에서 예측방사능량이 실제 방사능량보다 높게 평가되었다. 또한 척도인자에 의한 예측방사능량의 민감도 분석을 통해 준위별 수량 및 총방사능량의 변화추이를 분석하였다. 향후 중저준위방사성폐기물 처분시설의 안전한 운영과 Safety Case 구축을 위한 기초자료로 활용될 것으로 판단된다.

중심단어: 잡고체 방사성폐기물, 핵종재고량, 척도인자, 민감도분석

1. 서론

우리나라는 중저준위방사성폐기물의 처분을 위한 경주 1단계 동굴처분시설을 운영중이며 2단계 표층처분시설의 건설을 계획하고 있다. 향후 국내에서 발생하는 중저준위방사성폐기물의 핵종재고량과 기존 처분시설 등의 운영여건을 고려하여 처분시설의 효율성 증진을 위해 다양한 처분방식이 공존하는 복합처분시설(80만 포장물)로 개발할 계획이다[1].

중저준위방사성폐기물 처분시설의 설계와 운영을 위해서는 처분대상 방사성폐기물의 핵종재고량이 우선적으로 규명되어야 하며, 처분시설 운영측면에서 핵종재고량을 고려한 방사성폐기물의 인수계획과 정치방안 설정이 필요하다.

경주 처분시설의 운영 이후 인수 합격된 방사성폐기물은 2017년 4월 기준으로 총 9,248개 포장물이며, 처분검사까지 완료된 방사성폐기물은 7,770개 포장물이다. 대부분 월성, 한빛, 한울원자력발전소에서 인수된 잡고체 폐기물이며, 방사성동위원소(RI)폐기물, 한국원자력연구원(KAERI)폐기물도 포함하고 있다. 처분이 완료된 방사성폐기물의 방사능량을 기반으로 처분시설의 핵종재고량을 관리하고 있다.

향후 발생하는 방사성폐기물의 예측핵종재고량은 현재까지 발생된 방사성폐기물의 방사능량 정보와 원자력발전소 해체를 고려한 장기발생예측량을 기반으로 예측하고 있다.

본 논문에서는 잡고체 방사성폐기물을 대상으로 전체처분부지(80만 포장물)에 대한 장기안전성 예비평가[1]를 위해 산출된 포장물당 예측방사능량과 처분시설로 인수되어 처분검사가 완료된 잡고체방사성폐기물의 포장물당 실제방사능량을 비교분석 하였다.

또한, 잡고체 방사성폐기물의 예측방사능량에 대해 척도인자에 대한 민감도분석을 통하여 준위별 농도 및 수량의 변화추이를 분석함으로써 향후 처분시설 운영을 위한 기초자료로 제시하고자 한다.

2. 예측방사능량의 평가방법과 결과

예측방사능량은 척도인자와 DTC (Dose-To-Curie) 환산 프로그램[2]을 통해 평가하였다. DTC평가방법은 ISO [3]에서 핵종재고량 평가방법으로 감마핵종 분석방법과 함께 표준방법으로 규정하고 있으며, 미국 DOE의 TRU폐기물의 방사능 분석 및 스페인, 핀란드에서도 DTC평가방법을 사용하고 있다. 다만 중수로 폐수지의 경우는 방사화학분석법으로 주요 핵종의 비방사능을 구한 후 전체 폐수지가 균질하다는 가정을 적용하여 방사능량을 예측하였다[4].

DTC환산프로그램은 방사성폐기물 포장물의 표면선량률과 무게를 입력하면 감마핵종 존재비를 적용하여 포장물별 개별 감마핵종의 핵종재고량이 계산되며, 그 중 감마 Key 핵종(^{60}Co , ^{137}Cs)의 척도인자를 이용하여 알파 및 베타핵종의 핵종재고량을 산출하게 된다. 산출된 개별 포장물의 무게를 나누어 비방사능량($\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}$)을 산출하고, 예측된 포장물별 비방사능을 바탕으로 중저준위방사성폐기물(이하 중저위), 저준위방사성폐기물(이하 저준위), 극저준위 방사성폐기물(이하 극저준위)로 분류하여 핵종재고량을 예측한다[4].

본 논문에서는 예측방사능량을 평가하기 위해 적용된 잡고체의 표면선량률 데이터는 총 40,340개(14년 12월 기준)[5]이며, 각 드럼 당 무게에 대한 정보는 기술되어 있지

Table 1. Predicted average specific activity and activity of DAW for each NPPs : Wolsong 1 and 2

(Predicted value : up to Dec 2014)

Nuclides	Wolsong 1 (200 L)				Wolsong 2 (200 L)			
	Specific activity		Activity		Specific activity		Activity	
	VLLW (Bq·g ⁻¹)	LLW (Bq·g ⁻¹)	VLLW (Bq)	LLW (Bq)	VLLW (Bq·g ⁻¹)	LLW (Bq·g ⁻¹)	VLLW (Bq)	LLW (Bq)
³ H	6.29×10 ³	2.53×10 ⁵	1.06×10 ⁹	4.28×10 ¹⁰	5.88×10 ³	1.69×10 ⁵	9.93×10 ⁸	2.86×10 ¹⁰
¹⁴ C	2.28	9.20×10 ¹	3.86×10 ⁵	1.56×10 ⁷	5.75×10 ⁻¹	1.66×10 ¹	9.72×10 ⁴	2.80×10 ⁶
⁵⁵ Fe	1.46×10 ¹	5.88×10 ²	2.46×10 ⁶	9.93×10 ⁷	9.41	2.71×10 ²	1.59×10 ⁶	4.58×10 ⁷
⁵⁸ Co	1.60×10 ⁻²	6.45×10 ⁻¹	2.70×10 ³	1.09×10 ⁵	3.70×10 ⁻²	1.07	6.26×10 ³	1.80×10 ⁵
⁶⁰ Co	8.78×10 ⁻¹	3.54×10 ¹	1.48×10 ⁵	5.98×10 ⁶	1.03	2.96×10 ¹	1.74×10 ⁵	5.00×10 ⁶
⁵⁹ Ni	4.60×10 ¹	1.85×10 ³	7.77×10 ⁶	3.13×10 ⁸	1.30×10 ¹	3.76×10 ²	2.21×10 ⁶	6.36×10 ⁷
⁶³ Ni	1.18	4.74×10 ¹	1.99×10 ⁵	8.02×10 ⁶	2.12×10 ⁻¹	6.10	3.58×10 ⁴	1.03×10 ⁶
⁹⁰ Sr	6.82×10 ⁻³	2.75×10 ⁻¹	1.15×10 ³	4.65×10 ⁴	1.20×10 ⁻³	3.46×10 ⁻²	2.03×10 ²	5.85×10 ³
⁹⁴ Nb	1.56×10 ⁻²	6.30×10 ⁻¹	2.64×10 ³	1.06×10 ⁵	2.27×10 ⁻²	6.54×10 ⁻¹	3.84×10 ³	1.11×10 ⁵
⁹⁹ Tc	6.18×10 ⁻³	2.49×10 ⁻¹	1.04×10 ³	4.21×10 ⁴	9.82×10 ⁻³	2.83×10 ⁻¹	1.66×10 ³	4.78×10 ⁴
¹²⁹ I	6.27×10 ⁻⁵	2.53×10 ⁻³	1.06×10 ¹	4.27×10 ²	4.73×10 ⁻⁵	1.36×10 ⁻³	8.00	2.31×10 ³
¹³⁷ Cs	2.14×10 ⁻²	8.62×10 ⁻¹	3.61×10 ³	1.46×10 ⁵	1.62×10 ⁻²	4.66×10 ⁻¹	2.73×10 ³	7.87×10 ⁴
¹⁴⁴ Ce	0	0	0	0	3.06×10 ⁻²	8.81×10 ⁻¹	5.16×10 ³	1.49×10 ⁵
Gross a*	6.88×10 ⁻³	2.78×10 ⁻¹	1.16×10 ³	4.69×10 ⁴	8.06×10 ⁻³	2.32×10 ⁻¹	1.36×10 ³	3.92×10 ⁴
Total activity			1.07×10 ⁹	4.33×10 ¹⁰			9.97×10 ⁸	2.87×10 ¹⁰
Total number of waste package	48	2,417			135	2,450		

* Gross a : Entire radionuclides that emit alpha rays included in the package and sample

Table 2. Predicted average specific activity and activity of DAW for each NPPs : Hanul 1

(Predicted value : up to Dec 2014)

Nuclides	Hanul 1 (200 L)				Hanul 1 (320 L)			
	Specific activity		Activity		Specific activity		Activity	
	VLLW (Bq·g ⁻¹)	LLW (Bq·g ⁻¹)	VLLW (Bq)	LLW (Bq)	VLLW (Bq·g ⁻¹)	LLW (Bq·g ⁻¹)	VLLW (Bq)	LLW (Bq)
³ H	8.04	2.61×10 ²	1.36×10 ⁶	4.41×10 ⁷	1.61×10 ¹	5.22×10 ³	2.72×10 ⁶	8.82×10 ⁷
¹⁴ C	4.24×10 ⁻²	1.38	7.17×10 ³	2.33×10 ⁵	8.48×10 ⁻²	2.75	1.43×10 ⁴	4.65×10 ⁵
⁵⁵ Fe	1.76×10 ¹	5.70×10 ²	2.97×10 ⁶	9.63×10 ⁷	3.51×10 ¹	1.14×10 ³	5.94×10 ⁶	1.93×10 ⁸
⁵⁸ Co	6.84	2.22×10 ²	1.16×10 ⁶	3.75×10 ⁷	1.37×10 ¹	4.44×10 ²	2.31×10 ⁶	7.50×10 ⁷
⁶⁰ Co	4.00	1.30×10 ²	6.76×10 ⁵	2.19×10 ⁷	8.00	2.60×10 ³	1.35×10 ⁶	4.39×10 ⁷
⁵⁹ Ni	9.96×10 ⁻²	3.23	1.68×10 ⁴	5.46×10 ⁵	1.99×10 ⁻¹	6.47	3.37×10 ⁴	1.09×10 ⁶
⁶³ Ni	3.62	1.18×10 ²	6.12×10 ⁵	1.99×10 ⁷	7.24	2.35×10 ³	1.22×10 ⁶	3.97×10 ⁷
⁹⁰ Sr	1.59×10 ⁻³	5.16×10 ⁻²	2.69×10 ²	8.72×10 ³	3.18×10 ⁻³	1.03×10 ⁻¹	5.38×10 ²	1.74×10 ⁴
⁹⁴ Nb	6.36×10 ⁻³	2.06×10 ⁻¹	1.08×10 ³	3.49×10 ⁴	1.27×10 ⁻²	4.13×10 ⁻¹	2.15×10 ³	6.98×10 ⁴
⁹⁹ Tc	3.41×10 ⁻³	1.11×10 ⁻¹	5.76×10 ²	1.87×10 ⁴	6.82×10 ⁻³	2.21×10 ⁻¹	1.15×10 ³	3.74×10 ⁴
¹²⁹ I	3.85×10 ⁻⁵	1.25×10 ⁻³	6.51	2.11×10 ²	7.71×10 ⁻⁵	2.50×10 ⁻³	1.30×10 ¹	4.23×10 ²
¹³⁷ Cs	9.88×10 ⁻²	3.21	1.67×10 ⁴	5.42×10 ⁵	1.98×10 ⁻¹	6.41	3.34×10 ⁴	1.08×10 ⁶
¹⁴⁴ Ce	0	0	0	0	0	0	0	0
Gross a*	7.60×10 ⁻²	2.47	1.28×10 ⁴	4.17×10 ⁵	1.52×10 ⁻¹	4.93	2.57×10 ⁴	8.34×10 ⁵
Total activity			6.17×10 ⁶	2.00×10 ⁸			1.37×10 ⁷	4.43×10 ⁸
Total number of waste package	956	2,038						

* Gross a : Entire radionuclides that emit alpha rays included in the package and sample

Table 3. Predicted average specific activity and activity of DAW for each NPPs : Hanul 2

(Predicted value : up to Dec 2014)

Nuclides	Hanul 2 (200 L)				Hanul 2 (320 L)			
	Specific activity		Activity		Specific activity		Activity	
	VLLW (Bq·g ⁻¹)	LLW (Bq·g ⁻¹)	VLLW (Bq)	LLW (Bq)	VLLW (Bq·g ⁻¹)	LLW (Bq·g ⁻¹)	VLLW (Bq)	LLW (Bq)
³ H	1.53×10 ⁻¹	1.02×10 ³	2.59×10 ⁶	1.73×10 ⁸	3.06×10 ¹	2.05×10 ³	5.17×10 ⁶	3.46×10 ⁸
¹⁴ C	1.76×10 ⁻¹	1.18×10 ¹	2.98×10 ⁴	1.99×10 ⁶	3.52×10 ⁻¹	2.36×10 ¹	5.96×10 ⁴	3.99×10 ⁶
⁵⁵ Fe	1.95×10 ¹	1.31×10 ³	3.30×10 ⁶	2.21×10 ⁸	3.91×10 ¹	2.62×10 ³	6.61×10 ⁶	4.42×10 ⁸
⁵⁸ Co	3.46	2.31×10 ²	5.84×10 ⁵	3.91×10 ⁷	6.91	4.63×10 ²	1.17×10 ⁶	7.82×10 ⁷
⁶⁰ Co	3.10	2.08×10 ²	5.24×10 ⁵	3.51×10 ⁷	6.21	4.16×10 ²	1.05×10 ⁶	7.02×10 ⁷
⁵⁹ Ni	4.68×10 ⁻¹	3.14×10 ¹	7.92×10 ⁴	5.30×10 ⁶	9.37×10 ⁻¹	6.27×10 ¹	1.58×10 ⁵	1.06×10 ⁷
⁶³ Ni	2.02	1.35×10 ²	3.41×10 ⁵	2.29×10 ⁷	4.04	2.70×10 ²	6.83×10 ⁵	4.57×10 ⁷
⁹⁰ Sr	2.86×10 ⁻¹	1.91×10 ¹	4.83×10 ⁴	3.24×10 ⁶	5.72×10 ⁻¹	3.83×10 ¹	9.66×10 ⁴	6.47×10 ⁶
⁹⁴ Nb	2.96×10 ⁻³	1.98×10 ⁻¹	5.01×10 ²	3.35×10 ⁴	5.93×10 ⁻³	3.97×10 ⁻¹	1.00×10 ³	6.71×10 ⁴
⁹⁹ Tc	7.85×10 ⁻²	5.26	1.33×10 ⁴	8.88×10 ⁵	1.57×10 ⁻¹	1.05×10 ¹	2.65×10 ⁴	1.78×10 ⁶
¹²⁹ I	1.59×10 ⁻⁴	1.06×10 ⁻²	2.68×10 ¹	1.79×10 ³	3.17×10 ⁻⁴	2.12×10 ⁻²	5.36×10 ¹	3.59×10 ³
¹³⁷ Cs	4.07×10 ⁻¹	2.72×10 ¹	6.87×10 ⁴	4.60×10 ⁶	8.13×10 ⁻¹	5.45×10 ¹	1.37×10 ⁵	9.20×10 ⁶
¹⁴⁴ Ce	1.05×10 ⁻²	7.00×10 ⁻¹	1.77×10 ³	1.18×10 ⁵	2.09×10 ⁻²	1.40	3.54×10 ³	2.37×10 ⁵
Gross a*	5.90×10 ⁻²	3.95	9.96×10 ³	6.67×10 ⁵	1.18×10 ⁻¹	7.89	1.99×10 ⁴	1.33×10 ⁶
Total activity			1.32×10 ⁷	6.71×10 ⁸			1.52×10 ⁷	1.02×10 ⁹
Total number of waste package	923	1,547						

* Gross a : Entire radionuclides that emit alpha rays included in the package and sample

Table 4. Predicted average specific activity and activity of DAW for each NPPs : Hanul 3 and Hanbit 1

(Predicted value : up to Dec 2014)

Nuclides	Hanul 3 (200 L)				Hanbit 1 (200 L)			
	Specific activity		Activity		Specific activity		Activity	
	VLLW (Bq·g ⁻¹)	LLW (Bq·g ⁻¹)	VLLW (Bq)	LLW (Bq)	VLLW (Bq·g ⁻¹)	LLW (Bq·g ⁻¹)	VLLW (Bq)	LLW (Bq)
³ H	1.07×10 ¹	1.10×10 ³	1.81×10 ⁶	1.87×10 ⁸	2.26	3.74×10 ²	3.82×10 ⁵	6.31×10 ⁷
¹⁴ C	1.08×10 ⁻¹	1.11×10 ¹	1.82×10 ⁴	1.88×10 ⁶	3.59×10 ⁻²	5.93	6.07×10 ³	1.00×10 ⁶
⁵⁵ Fe	2.09×10 ¹	2.15×10 ³	3.53×10 ⁶	3.63×10 ⁸	9.87	1.63×10 ³	1.67×10 ⁶	2.75×10 ⁸
⁵⁸ Co	1.42	1.46×10 ²	2.39×10 ⁵	2.46×10 ⁷	1.50	2.47×10 ²	2.53×10 ⁵	4.18×10 ⁷
⁶⁰ Co	2.70	2.77×10 ²	4.56×10 ⁵	4.69×10 ⁷	3.21	5.29×10 ²	5.42×10 ⁵	8.94×10 ⁷
⁵⁹ Ni	6.88×10 ⁻¹	7.07×10 ¹	1.16×10 ⁵	1.20×10 ⁷	6.83×10 ⁻²	1.13×10 ¹	1.15×10 ⁴	1.90×10 ⁶
⁶³ Ni	3.59	3.69×10 ²	6.06×10 ⁵	6.23×10 ⁷	3.72	6.14×10 ²	6.28×10 ⁵	1.04×10 ⁸
⁹⁰ Sr	6.44×10 ⁻⁴	6.63×10 ⁻²	1.09×10 ²	1.12×10 ⁴	3.50×10 ⁻³	5.78×10 ⁻¹	5.91×10 ²	9.76×10 ⁴
⁹⁴ Nb	2.10×10 ⁻³	2.16×10 ⁻¹	3.55×10 ²	3.65×10 ⁴	1.68×10 ⁻³	2.77×10 ⁻¹	2.84×10 ²	4.69×10 ⁴
⁹⁹ Tc	4.72×10 ⁻³	4.85×10 ⁻¹	7.98×10 ²	8.20×10 ⁴	7.10×10 ⁻²	1.17×10 ¹	1.20×10 ⁴	1.98×10 ⁶
¹²⁹ I	5.10×10 ⁻⁶	5.24×10 ⁻⁴	8.62×10 ⁻¹	8.86×10 ¹	3.54×10 ⁻⁵	5.85×10 ⁻³	5.99×10 ⁰	9.89×10 ²
¹³⁷ Cs	1.31×10 ⁻²	1.34	2.21×10 ³	2.27×10 ⁵	9.09×10 ⁻²	1.50×10 ¹	1.54×10 ⁴	2.54×10 ⁶
¹⁴⁴ Ce	7.19×10 ⁻³	7.39×10 ⁻¹	1.21×10 ³	1.25×10 ⁵	0	0	0	0
Gross a*	5.12×10 ⁻²	5.27	8.66×10 ³	8.91×10 ⁵	6.09×10 ⁻²	1.01×10 ¹	1.03×10 ⁴	1.70×10 ⁶
Total activity			1.93×10 ⁷	1.29×10 ⁹			3.53×10 ⁶	5.83×10 ⁸
Total number of waste package	455	676			1,538	3,432		

* Gross a : Entire radionuclides that emit alpha rays included in the package and sample

Table 5. Predicted average specific activity and activity of DAW for each NPPs : Hanbit 2 and 3

(Predicted value : up to Dec 2014)

Nuclides	Hanbit 2 (200 L)				Hanbit 3 (200 L)			
	Specific activity		Activity		Specific activity		Activity	
	VLLW (Bq·g ⁻¹)	LLW (Bq·g ⁻¹)	VLLW (Bq)	LLW (Bq)	VLLW (Bq·g ⁻¹)	LLW (Bq·g ⁻¹)	VLLW (Bq)	LLW (Bq)
³ H	2.03×10 ¹	1.69×10 ³	3.43×10 ⁶	2.85×10 ⁸	1.32×10 ¹	1.86×10 ³	2.23×10 ⁶	3.15×10 ⁸
¹⁴ C	2.34×10 ⁻¹	1.95×10 ¹	3.96×10 ⁴	3.29×10 ⁶	1.33×10 ⁻¹	1.87×10 ¹	2.24×10 ⁴	3.16×10 ⁶
⁵⁵ Fe	2.60×10 ¹	2.16×10 ³	4.39×10 ⁶	3.65×10 ⁸	2.57×10 ¹	3.63×10 ³	4.34×10 ⁶	6.13×10 ⁸
⁵⁸ Co	4.59	3.82×10 ²	7.76×10 ⁵	6.45×10 ⁷	1.74	2.46×10 ²	2.94×10 ⁵	4.15×10 ⁷
⁶⁰ Co	4.12	3.43×10 ²	6.97×10 ⁵	5.79×10 ⁷	3.31	4.68×10 ²	5.60×10 ⁵	7.91×10 ⁷
⁵⁹ Ni	6.22×10 ⁻¹	5.17×10 ¹	1.05×10 ⁵	8.74×10 ⁶	8.45×10 ⁻¹	1.19×10 ²	1.43×10 ⁵	2.02×10 ⁷
⁶³ Ni	2.68	2.23×10 ²	4.54×10 ⁵	3.77×10 ⁷	4.41	6.22×10 ²	7.45×10 ⁵	1.05×10 ⁸
⁹⁰ Sr	3.80×10 ⁻¹	3.16×10 ¹	6.42×10 ⁴	5.34×10 ⁶	7.92×10 ⁻⁴	1.12×10 ⁻¹	1.34×10 ²	1.89×10 ⁴
⁹⁴ Nb	3.94×10 ⁻³	3.27×10 ⁻¹	6.65×10 ²	5.53×10 ⁴	2.58×10 ⁻³	3.64×10 ⁻¹	4.36×10 ²	6.16×10 ⁴
⁹⁹ Tc	1.04×10 ⁻¹	8.67	1.76×10 ⁴	1.46×10 ⁶	5.80×10 ⁻³	8.19×10 ⁻¹	9.80×10 ²	1.38×10 ⁵
¹²⁹ I	2.11×10 ⁻⁴	1.75×10 ⁻²	3.56×10 ¹	2.96×10 ³	6.27×10 ⁶	8.84×10 ⁻⁴	1.06	1.49×10 ³
¹³⁷ Cs	5.40×10 ⁻¹	4.49×10 ¹	9.13×10 ⁴	7.59×10 ⁶	1.61×10 ²	2.27	2.72×10 ³	3.83×10 ⁵
¹⁴⁴ Ce	1.39×10 ⁻²	1.16	2.35×10 ³	1.95×10 ⁵	8.83×10 ³	1.25	1.49×10 ³	2.11×10 ⁵
Gross a*	7.83×10 ⁻²	6.51	1.32×10 ⁴	1.10×10 ⁶	6.30×10 ²	8.89	1.06×10 ⁴	1.50×10 ⁶
Total activity			1.01×10 ⁷	8.38×10 ⁸			8.35×10 ⁶	1.18×10 ⁹
Total number of waste package	1,330	3,205			773	1,403		

* Gross a : Entire radionuclides that emit alpha rays included in the package and sample

않아서 DTC 개발보고서의 기술된 잡고체방사성폐기물의 밀도($0.8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)와 200 L 드럼의 내용적($211,180 \text{ cm}^3$)을 고려하여 폐기물의 무게($169,000 \text{ g}$)[2]를 모든 폐기물 포장물에 동일하게 가정하여 개별포장물의 방사능량을 산출하였다.

예측방사능량은 원자력발전소의 호기 별로 보유하고 있는 표면선량률 데이터를 분류하여 핵종별 비방사능량($\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}$)을 계산한 후 준위 별로 분류하고, 각 준위의 핵종별 평균비방사능량과 방사능량(Bq)을 산출하였다. 각 발전소의 호기 별 포장물의 평균비방사능량과 방사능량은 Table 1~5와 같다.

3. 실제방사능량의 평가방법과 결과

실제방사능량은 원자력안전위원회고시[6][7]에 따라 2015년부터 2017년까지 발생지 예비검사, 인수저장시설 인수검사 그리고 규제기관 처분검사가 완료되어 현재 처분 시설에 처분되었거나 처분대기 중인 잡고체 방사성폐기물을 대상으로 적용하였다. 중저준위방사성폐기물 시행계획의 방사성폐기물 검사절차[8]는 Fig. 1과 같으며 월성, 한울, 한빛원자력발전소로부터 인수 후 처분검사까지 완료된 총 6,751개 포장물을 고려하였다. 예측핵종재고량의 산출방법과 달리 개별포장물의 실제내용물의 준위별 평균무게를 고려하여 개별포장물의 방사능량을 산출하였다[9].

예측방사능량 평가방법과 동일하게 분석된 비방사능($\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}$)을 기준으로 준위 별 방사성폐기물을 분류하며 각 준위의 핵종 별 포장물당 평균비방사능과 방사능량(Bq)을 산출하였다. 각 발전소의 호기 별 포장물의 평균비방사능량과 방사능량은 Table 6~10와 같다.

4. 예측 방사능량과 실제 방사능량의 비교분석

Fig. 2와 Fig. 3은 각각 월성원자력발전소의 1호기 및 2호기로 저준위에서는 예측방사능량과 실제방사능량이 유사하게 평가되었지만 극저준위에서는 ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{99}Tc 그리고 ^{129}I 핵종은 예측 방사능량보다 실제 방사능량이 약간 높게 나타났다.

DTC평가방법에서는 감마핵종인 ^{58}Co , ^{60}Co , ^{137}Cs 그리고

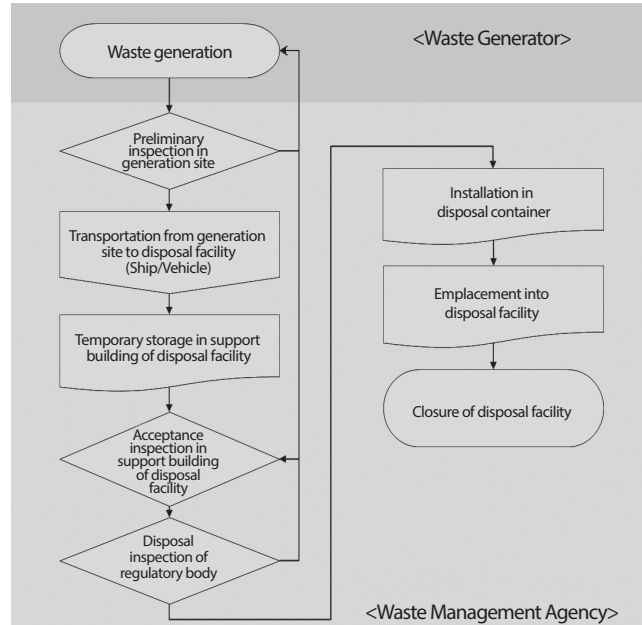


Fig. 1. General process of waste acceptance and disposal inspection of radioactive waste [8].

^{144}Ce 의 방사능량을 기반으로 나머지 알파 및 베타핵종을 예측하는데 실제방사능량에서 높게 측정된 ^{90}Sr , ^{99}Tc , ^{129}I 은 ^{137}Cs 을 대표핵종으로 개별핵종의 척도인자를 반영하여 방사능량을 예측한다. 즉 ^{137}Cs 을 대표핵종으로 방사능량을 예측하는 핵종들은 ^{137}Cs 에 의해 방사능량이 결정되는데, 예측방사능량에서는 ^{137}Cs 의 방사능량이 낮게 평가된 것으로 분석된다.

Fig. 4에서 Fig. 8까지는 각각 한울원자력발전소 1호기, 2호기 그리고 3호기의 실제방사능량 및 예측방사능량으로 극저준위 및 저준위에 해당하는 ^{137}Cs 에 의해 결정되는 핵종들은 실제 방사능량이 예측방사능량보다는 높게 평가되었으며, ^{60}Co 에 의해 결정되는 ^3H , ^{14}C , ^{55}Fe , ^{59}Ni , ^{63}Ni , ^{94}Nb 그리고 Gross a은 예측방사능량이 실제방사능량보다 높게 평가되었다. ^{58}Co 의 경우 다른 핵종에 비해 예측방사능량과 실제방사능량의 차이가 크게 나타나고 있다. 이는 예측방사능량을 산출하기 위한 적용된 DTC프로그램 내 감마핵종 존재비 중 ^{58}Co 의 존재비가 과대평가된 것으로 판단된다. DTC프로그램 내의 감마핵종 존재비를 산출하기 위한 시료분석시 잡고체는 비닐, 먼, 종이 세 종류의 폐기물의 방사능을 평균한 값을 적용함으로써 실제방사능량과 비교시 예측 방사능량이 높게 평가되었다.

Table 6. Measured average specific activity and activity of DAW for each NPPs : Wolsong 1 and 2

(Measured value : up to April 2017)

Nuclides	Wolsong 1 (200 L)				Wolsong 2 (200 L)			
	Specific activity		Activity		Specific activity		Activity	
	VLLW (Bq·g ⁻¹)	LLW (Bq·g ⁻¹)	VLLW (Bq)	LLW (Bq)	VLLW (Bq·g ⁻¹)	LLW (Bq·g ⁻¹)	VLLW (Bq)	LLW (Bq)
³ H	5.88×10 ³	1.69×10 ⁵	8.74×10 ⁸	3.06×10 ¹⁰	4.58×10 ³	1.58×10 ⁵	6.99×10 ⁸	2.19×10 ¹⁰
¹⁴ C	5.75×10 ⁻¹	1.66×10 ¹	2.68×10 ⁵	1.31×10 ⁷	5.82×10 ⁻¹	1.99×10 ¹	8.87×10 ⁴	2.75×10 ⁶
⁵⁵ Fe	9.41	2.71×10 ²	5.34×10 ⁵	2.51×10 ⁷	3.05	1.07×10 ²	4.65×10 ⁵	1.48×10 ⁷
⁵⁸ Co	3.70×10 ⁻²	1.07	2.93×10 ³	7.39×10 ³	3.12×10 ⁻³	1.46×10 ⁻²	4.76×10 ²	2.02×10 ³
⁶⁰ Co	1.03	2.96×10 ¹	8.88×10 ⁴	3.01×10 ⁶	5.70×10 ⁻¹	1.99×10 ¹	8.69×10 ⁴	2.75×10 ⁶
⁵⁹ Ni	1.30×10 ¹	3.76×10 ²	5.58×10 ⁶	2.67×10 ⁸	1.32×10 ¹	4.51×10 ²	2.01×10 ⁶	6.24×10 ⁷
⁶³ Ni	2.12×10 ⁻¹	6.10	1.23×10 ⁵	6.41×10 ⁶	2.07×10 ⁻¹	7.10	3.16×10 ⁴	9.81×10 ⁵
⁹⁰ Sr	1.20×10 ⁻³	3.46×10 ⁻²	9.63×10 ³	1.02×10 ⁵	7.83×10 ⁻³	3.96×10 ⁻²	1.19×10 ³	5.48×10 ³
⁹⁴ Nb	2.27×10 ⁻²	6.54×10 ⁻¹	4.02×10 ³	1.14×10 ⁵	2.30×10 ⁻²	7.85×10 ⁻¹	3.50×10 ³	1.09×10 ⁵
⁹⁹ Tc	9.82×10 ⁻³	2.83×10 ⁻¹	1.48×10 ⁴	1.24×10 ⁵	7.19×10 ⁻²	3.60×10 ⁻¹	1.10×10 ⁴	4.98×10 ⁴
¹²⁹ I	4.73×10 ⁻⁵	1.36×10 ⁻³	1.22×10 ²	1.14×10 ³	3.46×10 ⁻⁴	1.73×10 ⁻³	5.28×10 ¹	2.40×10 ²
¹³⁷ Cs	1.62×10 ⁻²	4.66×10 ⁻¹	3.62×10 ⁴	3.47×10 ⁵	1.06×10 ⁻¹	5.35×10 ⁻¹	1.61×10 ⁴	7.40×10 ⁴
¹⁴⁴ Ce	3.06×10 ⁻²	8.81×10 ⁻¹	3.13×10 ⁴	7.71×10 ⁴	1.28×10 ⁻¹	4.84×10 ⁻¹	1.95×10 ⁴	6.70×10 ⁴
Gross a*	8.06×10 ⁻³	2.32×10 ⁻¹	1.54×10 ³	4.79×10 ⁴	8.15×10 ⁻³	2.79×10 ⁻¹	1.24×10 ³	3.85×10 ⁴
Total activity			8.81×10 ⁸	3.09×10 ¹⁰			7.02×10 ⁸	2.20×10 ¹⁰
Total number of waste package	135	2,450			71	488		

* Gross a : Entire radionuclides that emit alpha rays included in the package and sample

Table 7. Measured average specific activity and activity of DAW for each NPPs : Hanul 1

(Measured value : up to April 2017)

Nuclides	Hanul 1 (200 L)				Hanul 1 (320 L)			
	Specific activity		Activity		Specific activity		Activity	
	VLLW (Bq·g ⁻¹)	LLW (Bq·g ⁻¹)	VLLW (Bq)	LLW (Bq)	VLLW (Bq·g ⁻¹)	LLW (Bq·g ⁻¹)	VLLW (Bq)	LLW (Bq)
³ H	1.07×10 ¹	2.17×10 ²	1.63×10 ⁶	3.09×10 ⁷	1.33×10 ¹	1.85×10 ²	2.99×10 ⁶	3.95×10 ⁷
¹⁴ C	6.73×10 ⁻²	1.44	1.03×10 ⁴	2.05×10 ⁵	1.03×10 ⁻¹	1.44	2.30×10 ⁴	3.08×10 ⁵
⁵⁵ Fe	1.31×10 ¹	2.30×10 ²	1.99×10 ⁶	3.28×10 ⁷	7.97	1.06×10 ²	1.78×10 ⁶	2.27×10 ⁷
⁵⁸ Co	4.13×10 ⁻³	3.44×10 ⁻²	6.30×10 ²	4.91×10 ³	9.78×10 ⁻⁵	3.71×10 ⁻⁴	2.19×10 ¹	7.92×10 ¹
⁶⁰ Co	4.24	8.07×10 ¹	6.46×10 ⁵	1.15×10 ⁷	4.00	5.45×10 ¹	8.96×10 ⁵	1.17×10 ⁷
⁵⁹ Ni	1.58×10 ⁻¹	3.38	2.41×10 ⁴	4.82×10 ⁵	2.42×10 ⁻¹	3.39	5.41×10 ⁴	7.25×10 ⁵
⁶³ Ni	5.61	1.19×10 ²	8.56×10 ⁵	1.70×10 ⁷	8.38	1.17×10 ²	1.88×10 ⁶	2.51×10 ⁷
⁹⁰ Sr	1.26×10 ⁻²	3.48×10 ⁻¹	1.92×10 ³	4.97×10 ⁴	5.48×10 ⁻³	5.22×10 ⁻²	1.23×10 ³	1.12×10 ⁴
⁹⁴ Nb	1.01×10 ⁻²	2.16×10 ⁻¹	1.54×10 ³	3.08×10 ⁴	1.54×10 ⁻²	2.17×10 ⁻¹	3.45×10 ³	4.63×10 ⁴
⁹⁹ Tc	2.85×10 ⁻²	7.92×10 ⁻¹	4.35×10 ³	1.13×10 ⁵	1.37×10 ⁻²	1.30×10 ⁻¹	3.06×10 ³	2.78×10 ⁴
¹²⁹ I	3.27×10 ⁻⁴	9.09×10 ⁻³	4.99×10 ¹	1.30×10 ³	1.57×10 ⁻⁴	1.49×10 ⁻³	3.51×10 ¹	3.19×10 ²
¹³⁷ Cs	7.84×10 ⁻¹	2.17×10 ¹	1.20×10 ⁵	3.09×10 ⁶	3.43×10 ⁻¹	3.26	7.67×10 ⁴	6.97×10 ⁵
¹⁴⁴ Ce	1.26×10 ⁻¹	5.60×10 ⁻¹	1.93×10 ⁴	7.99×10 ⁴	4.10×10 ⁻²	1.84×10 ⁻¹	9.19×10 ³	3.92×10 ⁴
Gross a*	1.08×10 ⁻²	2.31×10 ⁻¹	1.65×10 ³	3.29×10 ⁴	1.65×10 ⁻²	2.32×10 ⁻¹	3.69×10 ³	4.95×10 ⁴
Total activity			5.31×10 ⁶	9.63×10 ⁷			7.72×10 ⁶	1.01×10 ⁸
Total number of waste package	573	654			147	306		

* Gross a : Entire radionuclides that emit alpha rays included in the package and sample

Table 8. Measured average specific activity and activity of DAW for each NPPs : Hanul 2

(Measured value : up to April 2017)

Nuclides	Hanul 2 (200 L)				Hanul 2 (320 L)			
	Specific activity		Activity		Specific activity		Activity	
	VLLW (Bq·g ⁻¹)	LLW (Bq·g ⁻¹)	VLLW (Bq)	LLW (Bq)	VLLW (Bq·g ⁻¹)	LLW (Bq·g ⁻¹)	VLLW (Bq)	LLW (Bq)
³ H	1.35×10 ¹	1.11×10 ³	2.11×10 ⁶	1.21×10 ⁸	3.15×10 ¹	4.08×10 ²	3.06×10 ¹	2.05×10 ³
¹⁴ C	1.97×10 ⁻¹	1.57×10 ¹	3.09×10 ⁴	1.71×10 ⁶	5.38×10 ⁻¹	6.96	3.52×10 ⁻¹	2.36×10 ¹
⁵⁵ Fe	8.32	7.56×10 ²	1.30×10 ⁶	8.21×10 ⁷	1.06×10 ¹	1.39×10 ²	3.91×10 ¹	2.62×10 ³
⁵⁸ Co	7.42×10 ⁻³	1.02×10 ⁻¹	1.16×10 ³	1.11×10 ⁴	5.00×10 ⁻⁴	1.09×10 ⁻³	6.91	4.63×10 ²
⁶⁰ Co	2.03	1.75×10 ²	3.18×10 ⁵	1.90×10 ⁷	3.79	4.91×10 ¹	6.21	4.16×10 ²
⁵⁹ Ni	5.24×10 ⁻¹	4.18×10 ¹	8.21×10 ⁴	4.54×10 ⁶	1.43	1.85×10 ¹	9.37×10 ⁻¹	6.27×10 ¹
⁶³ Ni	2.19	1.75×10 ²	3.43×10 ⁵	1.90×10 ⁷	5.88	7.60×10 ¹	4.04	2.70×10 ²
⁹⁰ Sr	6.40×10 ⁻²	1.13	1.00×10 ⁴	1.23×10 ⁵	2.60×10 ⁻¹	2.30	5.72×10 ⁻¹	3.83×10 ¹
⁹⁴ Nb	3.31×10 ⁻³	2.64×10 ⁻¹	5.19×10 ²	2.87×10 ⁴	9.06×10 ⁻³	1.17×10 ⁻¹	5.93×10 ⁻³	3.97×10 ⁻¹
⁹⁹ Tc	1.91×10 ⁻²	3.39×10 ⁻¹	3.00×10 ³	3.69×10 ⁴	8.49×10 ⁻²	7.55×10 ⁻¹	1.57×10 ⁻¹	1.05×10 ¹
¹²⁹ I	3.87×10 ⁻⁵	6.86×10 ⁻⁴	6.06	7.45×10 ¹	1.71×10 ⁻⁴	1.53×10 ⁻³	3.17×10 ⁻⁴	2.12×10 ⁻²
¹³⁷ Cs	9.14×10 ⁻²	1.62	1.43×10 ⁴	1.76×10 ⁵	3.73×10 ⁻¹	3.29	8.13×10 ⁻¹	5.45×10 ¹
¹⁴⁴ Ce	1.04×10 ⁻¹	7.88×10 ⁻¹	1.63×10 ⁴	8.55×10 ⁴	2.91×10 ⁻²	1.63×10 ⁻¹	2.09×10 ⁻²	1.40
Gross a*	6.60×10 ⁻²	5.26	1.03×10 ⁴	5.71×10 ⁵	1.80×10 ⁻¹	2.33	1.18×10 ⁻¹	7.89
Total activity			4.24×10 ⁶	2.48×10 ⁸				
Total number of waste package	364	373			138	262		

* Gross a : Entire radionuclides that emit alpha rays included in the package and sample

Table 9. Measured average specific activity and activity of DAW for each NPPs : Hanul 3 and Hanbit 1

(Measured value : up to April 2017)

Nuclides	Hanul 3 (200 L)				Hanbit 1 (200 L)			
	Specific activity		Activity		Specific activity		Activity	
	VLLW (Bq·g ⁻¹)	LLW (Bq·g ⁻¹)	VLLW (Bq)	LLW (Bq)	VLLW (Bq·g ⁻¹)	LLW (Bq·g ⁻¹)	VLLW (Bq)	LLW (Bq)
³ H	1.61×10 ¹	9.67×10 ²	2.29×10 ⁶	1.19×10 ⁸	2.69	1.26×10 ²	2.85×10 ⁵	1.48×10 ⁷
¹⁴ C	2.40×10 ⁻¹	1.26×10 ¹	3.42×10 ⁴	1.55×10 ⁶	7.45×10 ⁻²	3.03	7.91×10 ³	3.57×10 ⁵
⁵⁵ Fe	1.06×10 ¹	8.95×10 ²	1.51×10 ⁶	1.11×10 ⁸	1.71	5.47×10 ¹	1.82×10 ⁵	6.44×10 ⁶
⁵⁸ Co	5.48×10 ⁻²	1.32	7.81×10 ³	1.63×10 ⁵	9.05×10 ⁻³	1.54×10 ⁻²	9.61×10 ²	1.81×10 ³
⁶⁰ Co	2.54	1.79×10 ²	3.62×10 ⁵	2.21×10 ⁷	1.81	5.21×10 ¹	1.93×10 ⁵	6.14×10 ⁶
⁵⁹ Ni	1.53	8.03×10 ¹	2.18×10 ⁵	9.92×10 ⁶	1.42×10 ⁻¹	6.63	1.51×10 ⁴	7.81×10 ⁵
⁶³ Ni	7.59	4.05×10 ²	1.08×10 ⁶	5.00×10 ⁷	7.21	1.95×10 ²	7.65×10 ⁵	2.30×10 ⁷
⁹⁰ Sr	3.25×10 ⁻³	2.28×10 ²	4.63×10 ²	2.82×10 ³	2.22×10 ⁻²	2.03	2.35×10 ³	2.39×10 ⁵
⁹⁴ Nb	4.68×10 ⁻³	2.45×10 ⁻¹	6.66×10 ²	3.03×10 ⁴	3.49×10 ⁻³	1.08×10 ⁻¹	3.70×10 ²	1.27×10 ⁴
⁹⁹ Tc	2.71×10 ⁻²	1.85×10 ⁻¹	3.86×10 ³	2.28×10 ⁴	5.73×10 ⁻¹	1.71×10 ¹	6.09×10 ⁴	2.01×10 ⁶
¹²⁹ I	2.92×10 ⁻⁵	2.00×10 ⁻⁴	4.17	2.47×10 ¹	2.86×10 ⁻⁴	9.24×10 ⁻³	3.04×10 ¹	1.09×10 ³
¹³⁷ Cs	6.62×10 ⁻²	4.65×10 ⁻¹	9.44×10 ³	5.74×10 ⁴	5.81×10 ⁻¹	1.90×10 ¹	6.17×10 ⁴	2.23×10 ⁶
¹⁴⁴ Ce	1.96×10 ⁻¹	1.01	2.79×10 ⁴	1.25×10 ⁵	2.58×10 ⁻¹	5.65×10 ⁻¹	2.74×10 ⁴	6.66×10 ⁴
Gross a*	1.14×10 ⁻¹	5.98	1.63×10 ⁴	7.39×10 ⁵	1.26×10 ⁻¹	3.59	1.34×10 ⁴	4.22×10 ⁵
Total activity			5.57×10 ⁶	3.15×10 ⁸			1.62×10 ⁶	5.65×10 ⁷
Total number of waste package	111	143			228	254		

* Gross a : Entire radionuclides that emit alpha rays included in the package and sample

Table 10. Predicted average specific activity and activity of DAW for each NPPs : Hanbit 2 and 3

(Measured value : up to April 2017)

Nuclides	Hanbit 2 (200 L)				Hanbit 3 (200 L)			
	Specific activity		Activity		Specific activity		Activity	
	VLLW (Bq·g ⁻¹)	LLW (Bq·g ⁻¹)	VLLW (Bq)	LLW (Bq)	VLLW (Bq·g ⁻¹)	LLW (Bq·g ⁻¹)	VLLW (Bq)	LLW (Bq)
³ H	3.09×10 ¹	8.37×10 ²	3.83×10 ⁶	1.12×10 ⁸	2.67×10 ¹	5.52×10 ²	3.14×10 ⁶	7.32×10 ⁷
¹⁴ C	6.26×10 ⁻¹	1.72×10 ¹	7.76×10 ⁴	2.29×10 ⁶	4.71×10 ⁻¹	8.96	5.55×10 ⁴	1.19×10 ⁶
⁵⁵ Fe	5.75	1.46×10 ²	7.12×10 ⁵	1.95×10 ⁷	7.42	2.13×10 ²	8.74×10 ⁵	2.82×10 ⁷
⁵⁸ Co	1.12×10 ⁻²	3.28×10 ⁻²	1.39×10 ³	4.38×10 ³	3.27×10 ⁻³	4.85×10 ⁻²	3.85×10 ²	6.43×10 ³
⁶⁰ Co	2.98	7.89×10 ¹	3.69×10 ⁵	1.05×10 ⁷	3.17	7.39×10 ¹	3.74×10 ⁵	9.80×10 ⁶
⁵⁹ Ni	1.67	4.56×10 ¹	2.07×10 ⁵	6.09×10 ⁶	3.01	5.72×10 ¹	3.54×10 ⁵	7.59×10 ⁶
⁶³ Ni	6.70	1.83×10 ²	8.31×10 ⁵	2.44×10 ⁷	1.46×10 ¹	2.81×10 ²	1.72×10 ⁶	3.73×10 ⁷
⁹⁰ Sr	1.02×10 ⁻¹	5.10×10 ⁻¹	1.27×10 ⁴	6.80×10 ⁴	5.23×10 ⁻³	3.88×10 ⁻²	6.15×10 ²	5.15×10 ³
⁹⁴ Nb	1.05×10 ⁻²	2.89×10 ⁻¹	1.31×10 ³	3.85×10 ⁴	9.19×10 ⁻³	1.75×10 ⁻¹	1.08×10 ³	2.32×10 ⁴
⁹⁹ Tc	3.52×10 ⁻²	1.77×10 ⁻¹	4.37×10 ³	2.36×10 ⁴	4.83×10 ⁻²	3.45×10 ⁻¹	5.68×10 ³	4.57×10 ⁴
¹²⁹ I	7.12×10 ⁻⁵	3.57×10 ⁻⁴	8.82	4.76×10 ¹	5.22×10 ⁻⁵	3.72×10 ⁻⁴	6.14	4.94×10 ¹
¹³⁷ Cs	1.47×10 ⁻¹	7.33×10 ⁻¹	1.82×10 ⁴	9.77×10 ⁴	1.07×10 ⁻¹	7.94×10 ⁻¹	1.26×10 ⁴	1.05×10 ⁵
¹⁴⁴ Ce	2.58×10 ⁻¹	7.84×10 ⁻¹	3.20×10 ⁴	1.05×10 ⁵	2.38×10 ⁻¹	7.06×10 ⁻¹	2.80×10 ⁴	9.37×10 ⁴
Gross a*	2.10×10 ⁻¹	5.74	2.60×10 ⁴	7.66×10 ⁵	2.24×10 ⁻¹	4.26	2.64×10 ⁴	5.65×10 ⁵
Total activity			6.13×10 ⁶	1.75×10 ⁸			6.60×10 ⁶	1.58×10 ⁸
Total number of waste package	82	121			125	195		

* Gross a : Entire radionuclides that emit alpha rays included in the package and sample

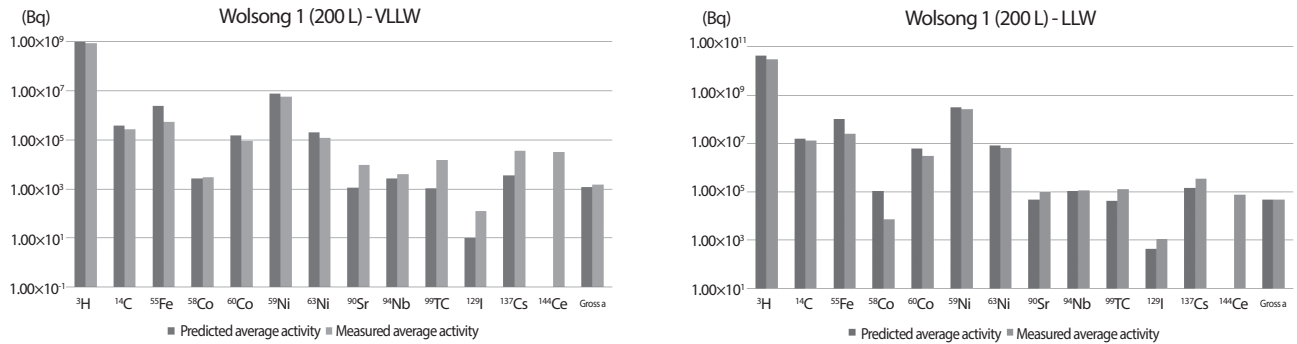


Fig. 2. Comparison of predicted average activity and measured average activity by waste classification (Dry active waste in Wolsong 1)

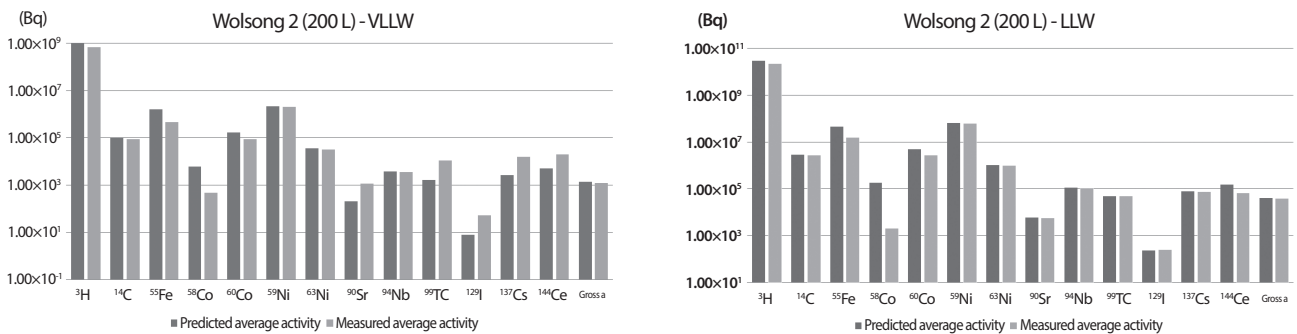


Fig. 3. Comparison of predicted average activity and measured average activity by waste classification (Dry active waste in Wolsong 2).

1호기와 2호기의 320 L 포장물은 초고압압축으로 일반 잡고체 2~3개가 초고압압축 포장되어 있으나, 대부분(전체 발생량의 약 99%) 초고압압축 포장물은 2개의 포장물이 포장되므로 예측방사능량에서는 200 L 포장물 2개가 반영된다고 가정하여 200 L 포장물의 2배의 방사능량을 적용하였다.

Fig. 9에서 Fig. 11까지는 각각 한빛원자력발전소 1호기, 2호기 그리고 3호기의 실제방사능량 및 예측방사능량으로 저준위는 대체적으로 예측 방사능량이 실제 방사능량보다 높게 평가되었으며, 극저준위의 경우 2호기를 제외한 1호기, 3호기에서는 예측 방사능량이 실제 방사능량보다 높게 평가되었다.

잡고체에 국한되어 분석되었지만, 저준위에서는 예측방사능량이 실제방사능량보다 높게 평가되었다. 극저준위에서는 ^{137}Cs 에 의해 결정되는 ^{90}Sr , ^{99}Tc , ^{129}I 핵종은 실제방사능량이 예측 방사능량보다 높게 평가되었으며, 나머지 핵종은 예측방사능량이 실제방사능량보다 높게 평가되었다.

^{58}Co 의 경우 한울원자력발전과 동일한 이유로 예측방사능량이 실제방사능량보다 높게 평가되었다. 중준위는 적용된 실제방사능량 데이터가 존재하지 않아서 배제하였다.

5. 예측방사능량의 민감도분석

잡고체의 실제방사능량과 예측방사능량의 분석결과를 기반으로 DTC 평가방법 척도인자의 영향력을 파악하기 위해 예측방사능량 산출 시 적용한 원자력발전소의 운영폐기물 정보에 대해 척도인자 민감도분석을 수행하였다. 예측방사능량을 산출하기 위해 반영된 표면선량률 데이터(40,337개)[8]를 바탕으로 척도인자 변화에 따른 준위 별 수량 및 총방사능량의 비율변화를 분석하였다. 고화형태에 따라 경수로의 일반잡고체와 차폐잡고체, 중수로의 일반잡고체와 차폐잡고체를 고려하였다. 척도인자는 주기적으로 갱신이

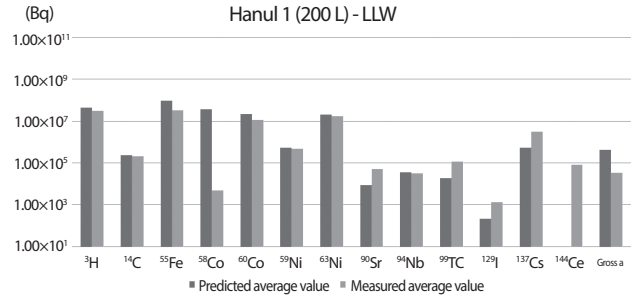
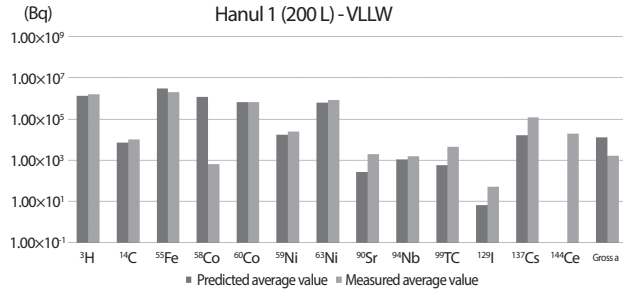


Fig. 4. Comparison of predicted average activity and measured average activity by waste classification (Dry active waste in Hanul 1).

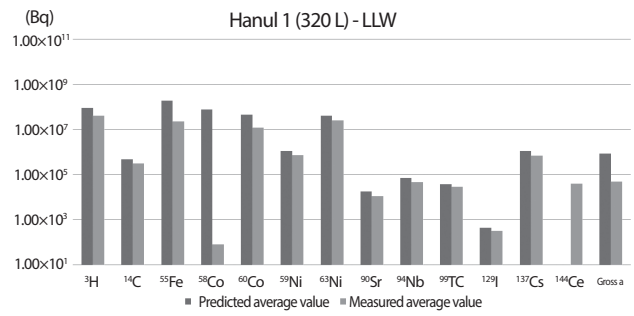
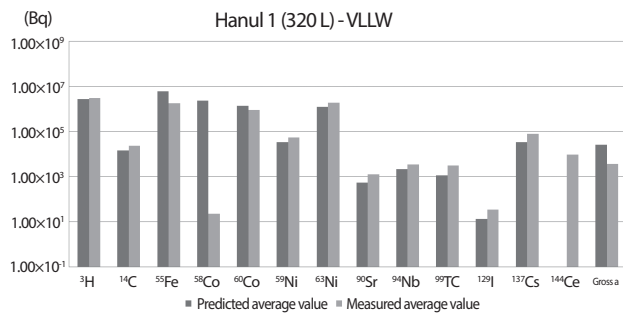


Fig. 5. Comparison of predicted average activity and measured average activity by waste classification (Dry active waste in Hanul 1).

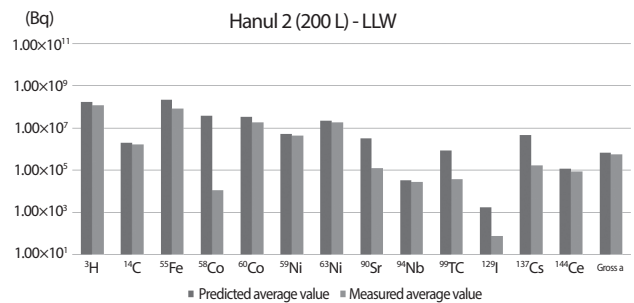
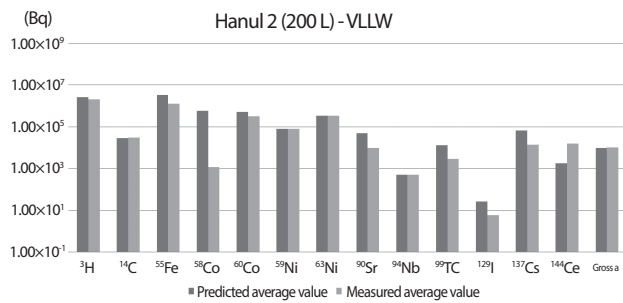


Fig. 6. Comparison of predicted average activity and measured average activity by waste classification (Dry active waste in Hanul 2).

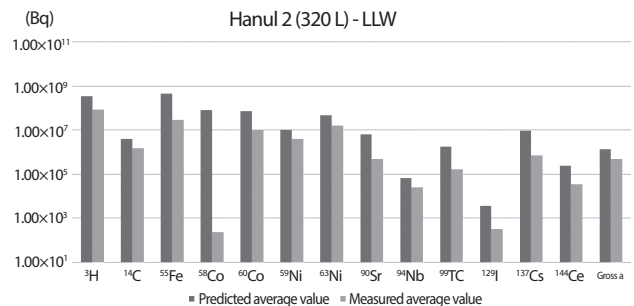
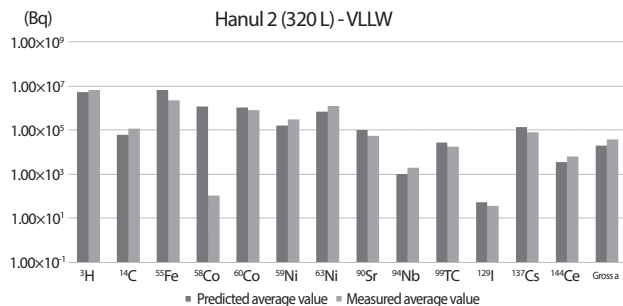


Fig. 7. Comparison of predicted average activity and measured average activity by waste classification (Dry active waste in Hanul 2).

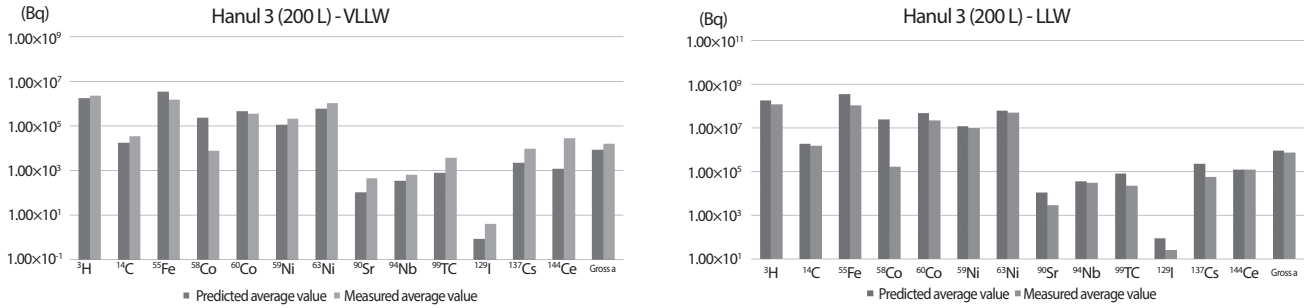


Fig.8. Comparison of predicted average activity and measured average activity by waste classification (Dry active waste in Hanul 3).

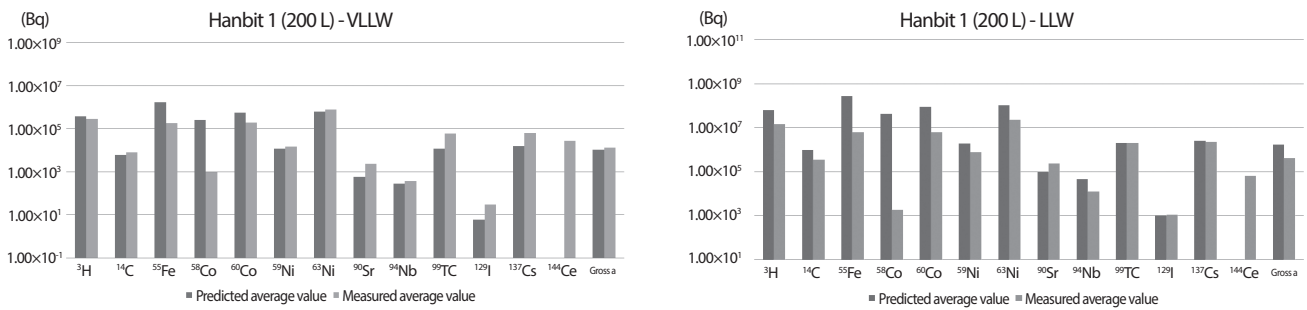


Fig.9. Comparison of predicted average activity and measured average activity by waste classification (Dry active waste in Hanbit 1).

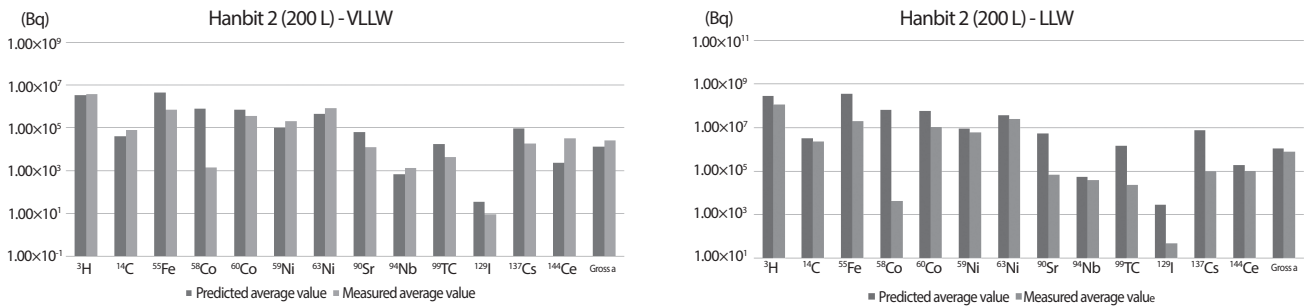


Fig.10. Comparison of predicted average activity and measured average activity by waste classification (Dry active waste in Hanbit 2).

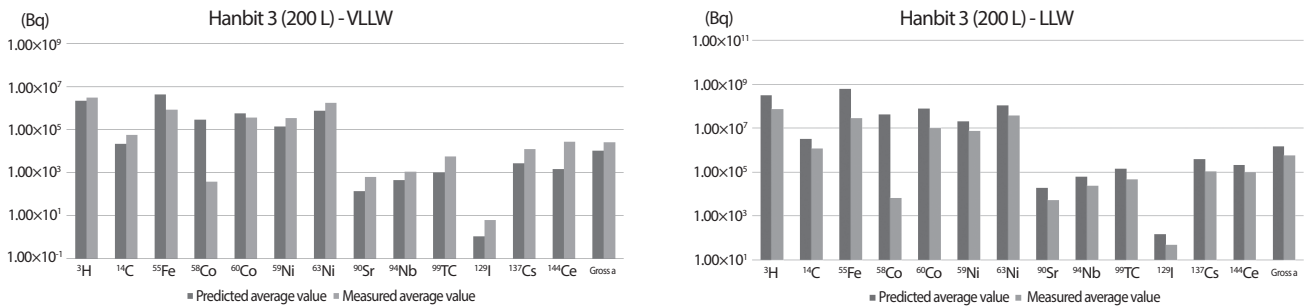


Fig.11. Comparison of predicted average activity and measured average activity by waste classification (Dry active waste in Hanbit 3).

Table 11. Scaling factor of Dry Active Waste in this study for NPPs

Nuclides	Kori 1	Kori 2	Hanbit 1	Hanbit 2	Hanbit 3	Wolsong 1	Wolsong 2,3,4	Hunul 1	Hunul 2	Hanul 3
³ H	3.51×10 ¹	7.06×10 ⁻¹	7.06×10 ⁻¹	4.93	3.98	7.16×10 ³	5.72×10 ³	2.01	4.93	3.98
¹⁴ C	5.19×10 ⁻²	1.12×10 ⁻²	1.12×10 ⁻²	5.68×10 ⁻²	4.00×10 ⁻²	2.60	5.60×10 ⁻¹	1.06×10 ⁻²	5.68×10 ⁻²	4.00×10 ⁻²
⁵⁵ Fe	2.29	3.08	3.08	6.30	7.75	1.66×10 ¹	9.16	4.39	6.30	7.75
⁵⁹ Ni	8.38×10 ⁻²	2.13×10 ⁻²	2.13×10 ⁻²	1.51×10 ⁻¹	2.55×10 ⁻¹	5.24×10 ¹	1.27×10 ¹	2.49×10 ⁻²	1.51×10 ⁻¹	2.55×10 ⁻¹
⁶³ Ni	5.62	1.16	1.16	6.51×10 ⁻¹	1.33	1.34	2.06×10 ⁻¹	9.05×10 ⁻¹	6.51×10 ⁻¹	1.33
⁹⁴ Nb	1.55×10 ⁻³	5.24×10 ⁻⁴	5.24×10 ⁻⁴	9.55×10 ⁻⁴	7.79×10 ⁻⁴	1.78×10 ⁻²	2.21×10 ⁻²	1.59×10 ⁻³	9.55×10 ⁻⁴	7.79×10 ⁻⁴
⁹⁰ Sr	9.63×10 ⁻²	3.85×10 ⁻²	3.85×10 ⁻²	7.03×10 ⁻¹	4.93×10 ⁻²	3.19×10 ⁻¹	7.44×10 ⁻²	1.61×10 ⁻²	7.03×10 ⁻¹	4.93×10 ⁻²
⁹⁹ Tc	1.40×10 ⁻²	7.81×10 ⁻¹	7.81×10 ⁻¹	1.93×10 ⁻¹	3.61×10 ⁻¹	2.89×10 ⁻¹	6.08×10 ⁻¹	3.45×10 ⁻²	1.93×10 ⁻¹	3.61×10 ⁻¹
¹²⁹ I	3.90×10 ⁻⁴	3.90×10 ⁻⁴	3.90×10 ⁻⁴	3.90×10 ⁻⁴	3.90×10 ⁻⁴	2.93×10 ⁻³	2.93×10 ⁻³	3.90×10 ⁻⁴	3.90×10 ⁻⁴	3.90×10 ⁻⁴
Gross a*	1.90×10 ⁻²	1.90×10 ⁻²	1.90×10 ⁻²	1.90×10 ⁻²	1.90×10 ⁻²	7.84×10 ⁻³	7.84×10 ⁻³	1.90×10 ⁻²	1.90×10 ⁻²	1.90×10 ⁻²

* Gross a : Entire radionuclides that emit alpha rays included in the package and sample

필요하며 발전소 운전조건 및 다양한 요인에 의한 불확실성이 존재하므로 척도인자의 적용범위를 0.2배부터 1.8배까지 순차적으로 적용하며 경향을 분석하였다.

분석결과 총방사능량이 1.00×10⁵~1.00×10¹⁵ Bq 범위에 고르게 분포하며, 대체적으로 1.00×10⁵~1.00×10⁸ Bq은 극저준위, 1.00×10⁸~1.00×10¹¹ Bq은 저준위, 1.00×10¹¹ Bq 이상은 중준위에 해당하였다. 척도인자에 0.2배 적용 시에는 1.00×10⁶~1.00×10⁸ Bq 범위에 전체수량의 50%이상 분포하며, 1.8배 적용 시에는 총방사능량이 1.00×10⁷~1.00×10⁹ Bq 범위에 분포하였다.

현재의 척도인자는 Table 11과 같으며 현재의 척도인자를 적용시 극저준위는 18,491개(45.8%), 저준위 20,054(49.7%), 극저준위 1,792(4.4%)에서, 0.2배 적용시의 극저준위 범위의 수량은 26,748개(66.3%), 저준위는 13,201개(32.7%), 중준위는 388개(1%)가 분포하였으며, 1.8배로 적용시에는 극저준위가 14,645개(36.3%), 저준위는 23,114개(57.3%), 중준위는 2,578(6.4%)개로 분포가

변화하였다. 준위 별 총 수량의 변화는 Fig. 12와 같으며, 준위별 비율은 Fig. 13와 같다.

고화형태에 따라 잡고체는 4개의 형태로 구분되며 경수로의 일반잡고체(32,831개)의 경우 현재의 척도인자 적용시 극저준위 8,999개(27.41%), 저준위 23,823개(72.56%), 중준위 9개(0.03%)에서, 0.2배 및 1.8배 척도인자 적용시 극저준위는 17,962개(54.71%)에서 4,981개(15.17%)로 감소하였으며, 저준위는 14,869개(45.29%)에서 27,831개(84.77%)로 증가하고, 중준위 0(0%)개에서 19개(0.06%)로 증가하였다.

경수로의 차폐잡고체의 경우 현재의 척도인자를 적용시 저준위 1,032개(65.86%), 중준위 534개(34.08%)에서, 0.2배 및 1.8배 척도인자 적용시 저준위는 1,460개(93.17%)에서 781개(49.84%)로 감소하였으며, 중준위는 97개(6.19%)에서 786개(50.16%)로 증가하였다.

중수로 일반잡고체의 경우 현재의 척도인자를 적용시 극저준위는 183개(3.1%), 저준위는 4,867(82.51%), 중준위는

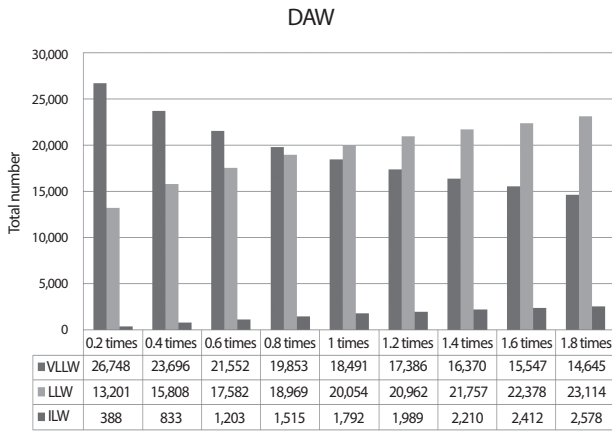


Fig. 12. Result of scaling factor sensitivity for predicted activity in DAW (Total number).

849개(14.39%)에서, 0.2배 및 1.8배 척도인자 적용 시 저준위는 4,354개(7.81%)에서 4,556개(77.23%)로 증가하며, 중준위는 87개(1.47%)에서 1,315개(22.29%)로 증가하였다. 중수로 차폐잡고체의 경우 대부분 중준위에 해당되기 때문에 수량변화의 차이는 거의 없었다.

다른 방사성폐기물의 종류는 기하평균과 선형회귀를 모두 적용하지만 잡고체의 경우 대부분의 핵종을 기하평균으로만 산출되기 때문에 준위 별 수량변화에 비해 총방사능량의 변화폭은 크지 않았다.

6. 결론 및 향후계획

경주 중저준위방사성폐기물 처분시설은 2014년 12월에 사용전검사 합격한 뒤 처분시설 사업개시 이후로 2015년부터 폐기물 인수검사 및 처분검사를 거쳐 방사성폐기물을 처분하고 있다.

본 연구에서는 2015년부터 2017년 2차까지 처분검사가 완료된 원자력발전소(월성, 한울, 한빛) 잡고체에 대하여 전체처분시설 종합개발계획을 위해 예측 방사능량과 실제로 처분검사를 통해 취득한 실제 방사능량을 비교분석하였다.

분석결과 극저준위에 해당하는 폐기물 경우 ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{99}Tc 그리고 ^{129}I 에서는 실제방사능량이 예측방사능량보다 높게 평가되었으며, 저준위에 해당하는 폐기물은

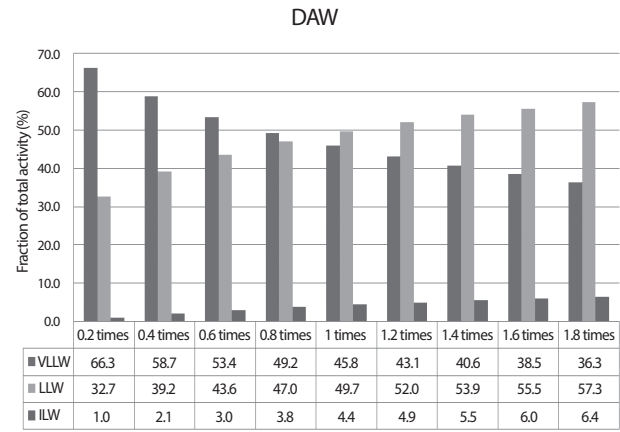


Fig. 13. Result of scaling factor sensitivity for predicted activity in DAW (Fraction of total activity).

예측방사능량이 실제방사능량보다 높게 평가되었다. 높은 준위의 예측방사능량이 실제방사능량보다 높게 평가된 이유는 예측방사능량을 평가시 적용한 DTC평가방법과 척도인자의 보수성에 의한 것으로 판단된다.

한울 및 한빛원자력발전소의 ^{58}Co 경우 실제방사능량과 예측방사능량의 차이도 DTC평가방법에 적용되는 감마핵종 존재비에 의한 영향으로 판단된다. 특히 실제방사능량을 평가할 때는 해당포장물의 개별핵종의 비방사능($\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}$)을 기반으로 준위별로 분류한 후 준위별 포장물의 실제 평균무게를 적용하였으나, 예측방사능량은 준위별 포장물의 무게를 설계값으로 적용함으로써 예측방사능량에 적용된 무게가 실제 포장물의 무게보다는 크게 적용되어 예측방사능량이 실제방사능량보다 높게 평가되었다.

추가적으로 예측방사능량을 산출 시 적용한 표면선량률 데이터를 바탕으로 척도인자에 대해 민감도 분석을 수행한 결과, 척도인자가 커질수록 높은 준위의 수량이 증가하였지만 DTC평가 방법 중 기하평균을 사용하는 잡고체에서는 총방사능량 측면에서는 큰 증가폭은 나타나지 않았다.

처분시설의 안전한 운영을 위해서는 실제 인수된 방사성 폐기물의 방사능량과 예측폐기물의 방사능량 비교분석을 통해 방사능량을 반영한 폐기물 인수 및 처분계획이 수립되어야 하며, 비교결과를 바탕으로 안전성 측면에서 큰 영향을 끼치는 폐기물 및 핵종에 대해서는 사전 관리를 통하여 방사능량 저감기술 개발이나 포장물의 개선 등 처분시설의 안전성

증대를 위한 방법을 강구할 필요성이 있다.

본 연구결과는 향후 인수될 원자력발전소 잡고체의 방사능량 검증을 위한 기초자료 및 잡고체의 척도인자 선정을 위한 자료로 활용될 것이며, 처분시설의 안전한 운영과 처분 시설 안전성 최적화를 위한 Safety Case 구축에 기여할 것으로 판단된다.

향후 추가적으로 인수되는 폐기물에 대해 지속적인 모니터링을 통해 관리할 것이며, 다른 종류의 폐기물의 방사능량도 처분시설로 인수가 이루어질 때마다 지속적으로 관리하면서 검증할 계획이다.

7. 감사의 글

본 논문에는 우리나라 중저준위방사성폐기물의 발생자 데이터가 사용되었으며, 이들 데이터들을 수집, 가공 및 제공하여 주신 한국수력원자력(주) 담당자분의 수고에 깊이 감사를 드립니다.

REFERENCES

- [1] K.I. Jung, J.H. Kim, M.J. Kwon, M.S. Jeong, S.W. Hong, and J.B. Park, "Comprehensive Development Plans for the LILW Disposal Facility in Korea and Preliminary Safety Assessment, JNFCWT, 14(4), 383-410 (2016).
- [2] Korea Hydro and Nuclear Power Co., Ltd., Development of a Computer Program for Evaluating Radioisotope Inventory of Radioactive Waste from Nuclear Plants : Appendix 2:User Guide, 2010-50003339-0168TR (2010).
- [3] International Organization for Standardization, The Scaling Factor Method Determine the Radioactivity of Low- and Intermediate- Level Radioactive Waste Packages Generated at Nuclear Power Plant, ISO/Tc85/SC5/WG5, IOS/DIS 21238 (2005).
- [4] 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", JNFCWT, 14(1), 63-78 (2016).
- [5] Korea Hydro and Nuclear Power Co., Ltd., Surface Dose of Low- and Intermediate-Level Radioactive Waste (2014).
- [6] Nuclear Safety and Security Commission, Acceptance Criteria for Low- and intermediate- Level Radioactive Waste, Notice No. 2015-04 (2015).
- [7] Nuclear Safety and Security Commission, Criteria for Disposal Inspection of Low- and intermediate Level Radioactive Waste, Notice No. 2014-65 (2014).
- [8] Korea Radioactive Waste Agency, Management plan for Low- and Intermediate- Level Radioactive Waste (2017).
- [9] Korea Radioactive Waste Agency, Activity of Approved Radioactive Waste from Disposal Inspection (2017).