JOURNAL OF RADIATION INDUSTRY

Original article

17(4) : 457-469 (2023)
https://doi.org/10.23042/radin.2023.17.4.457

RESRAD-RECYCLE 전산코드를 활용한 금속폐기물 내 우라늄 자체처분 허용농도 예비 평가

이선우[1,2], 홍정환[2], 박정석[2], 김광표[1,*]

[1]경희대학교 원자력공학과, [2]한전원자력연료

Preliminary Evaluation of Clearance Level of Uranium in Metal Waste Using the RESRAD-RECYCLE Code

SunWoo Lee[1, 2], JungHwan Hong[2], JungSuk Park[2] and KwangPyo Kim[1,*]

[1]Department of Nuclear Engineering, Kyung Hee University, 1732 Deokyoungdae-ro, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 17104, Republic of Korea
[2]KEPCO Nuclear Fuel, 242, Daedeokdae-ro 989 beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon 34057, Republic of Korea

Abstract The clearance level by nuclide is announced by the Nuclear Safety and Security Commission. However, the clearance level of uranium existing in nature has not been announced, and research is needed. Therefore, the purpose of this study was to evaluate the clearance level of uranium nuclides appropriate to domestic conditions preliminary. For this purpose, this study selected major processes for recycling metal wastes and analyzed the exposure scenarios and major input factors by investigating the characteristics of each process. Then, the radiation dose to the general public and workers was evaluated according to the selected scenarios. Finally, the results of the radiation dose per unit radioactivity for each scenario were analyzed to derive the clearance level of uranium in metal waste. The results of the radiation dose assessment for both the general public and workers per unit radioactivity of uranium isotopes were shown to meet the allowable dose (individual dose of 10 μSv y^{-1} and collective dose of 1 Man-Sv y^{-1}) regulated by the Nuclear Safety and Security Commission. The most conservative scenarios for volumetric and surface contamination were evaluated for the handling of the slag generated after the melting of the metal waste and the direct reuse of the contaminated metal waste into the building without further disposal. For each of these scenarios, the radioactivity concentration by uranium isotope was calculated, and the clearance level of uranium in metal waste was calculated through the radioactivity ratio by enrichment. The results of this study can be used as a basic data for defining the clearance level of uranium-contaminated radioactive waste.

Key words: Metal waste, Clearance level, Exposure scenarios, RESRAD-RECYCLE

1. 서 론

자체처분이란 방사성폐기물 중 핵종별 농도가 자체처분 허용농도 미만임이 확인된 것을 「원자력안전법」의 적용대상에서 제외하여 방사성폐기물이 아닌 폐기물로 소각, 매립 또는 재활용 등의 방법으로 관리하는 것을 말한다[1]. 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency; IAEA)에서는 개인선량 10 μSv y^{-1} 및 집단선량 1

http://www.ksri.kr/
Copyright © 2023 by
Korean Society of Radiation Industry
***Corresponding author.** KwangPyo Kim
Tel. +82-31-201-2560 Fax. +82-31-273-3592 E-mail. kpkim@khu.ac.kr
Received 6 December 2023 **Revised** 19 December 2023 **Accepted** 20 December 2023

Man-Sv y^{-1} 를 만족하는 방사선원은 규제해제 될 수 있다고 규정하고 있다[2]. 또한 IAEA SRS-44 평가 방법론에 따라 개인선량(realistic parameter 10 μSv y^{-1}, low probability 1 mSv y^{-1})을 기준으로 IAEA GSG-18에서 자연 방사성 핵종 및 257개 인공 핵종에 대한 자체처분 허용농도를 제시하였다[3]. 국내의 경우 이를 도입하여 원자력안전위원회 고시 제2023-7호[별표 1]에 자체처분 허용농도를 핵종별로 제시하였다[4]. 이에 따라 자체처분 사업자는 방사성폐기물 자체처분을 수행 중이며, 방사성폐기물 특성에 따라 방사선학적 안전성을 입증하고 있다[8].

국내외 다양한 기관에서 방사성폐기물의 종류별 자체처분시 안전성을 입증하기 위해 다수의 연구를 수행하였다. IAEA 및 미국 원자력규제위원회(United States Nuclear Regulatory Commission; U.S NRC)에서는 철재, 알루미늄, 구리, 콘크리트 폐기물 자체처분에 따른 주요 피폭시나리오와 방사선량 평가 결과 및 규제해제 농도 등을 제시하고 있다[5-7]. 국내의 경우 홍윤정 등은 목재류, 플라스틱류, 철재류 등 자체처분 대상 방사성폐기물 처분 사례 연구를 수행하였다[9]. 최영환 등은 원전 해체 후 규제해제 대상 금속폐기물에 대한 자체처분 안전성평가를 수행하였다[10]. 설증군 등은 우라늄 오염 폐기물 중 콘크리트 폐기물 대상으로 자체처분을 위한 잔류방사능 조사, 방사선량 평가를 수행하였고[11], 이민호 등은 폐활성탄 자체처분에 대한 연구를 수행하였다[12].

이처럼 국내외에서 다양한 방사성폐기물 자체처분에 관한 연구가 수행되어 왔다. 그러나 원자력발전소에서 발생하는 핵종 이외에 순수 우라늄에만 오염된 방사성폐기물의 자체처분에 관한 연구는 상대적으로 미미한 실정이다. 그리고 국내 규정상 우라늄 자체처분 허용농도의 부재로 자체처분시 방사선학적 안전성을 입증하기 위해 검증된 기술이 항시 요구된다. 즉 국내 법령상에서 정의한 자체처분과 상이하게 우라늄 오염 방사성폐기물은 종류별로 자체처분 허용농도가 아닌 허용선량을 만족함을 보이거나, 유효한 허용농도를 별도로 유도하여 규제기관의 승인을 받아야 자체처분을 할 수 있다. 따라서 자체처분을 위한 다양한 방사선학적 안전 평가 및 이 결과에 대한 자체처분 신고자의 자의적 해석 등에 따라 핵종별 허용농도가 혼재될 수 있기에 해당 기준이 마련되어야 할 필요가 있다.

본 연구의 목적은 우라늄의 자체처분 허용농도(안)을 예비 평가하는 것이다. 이를 위해 금속폐기물을 국내 제강공장에서 재활용하는 경우를 고려하여 피폭시나리오를 수립하고 주요 입력인자를 분석하였다. 그리고 RESRAD-RECYCLE 전산코드를 활용해 시나리오별 방사선량을 평가하였다. 이를 바탕으로 최종적으로 금속폐기물 내 우라늄의 자체처분 허용농도(안)를 계산하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 금속폐기물 재활용에 따른 피폭시나리오 및 주요 입력인자 분석

금속폐기물을 재활용하기 위한 유통경로에서 방사선원에 노출될 수 있는 일반인과 각 공정 작업자의 피폭경로 및 작업환경을 분석하였다. 각 공정별 특성 조사는 세부적인 방사선량 평가를 위해 시나리오를 수립하기 위한 절차이다. 이는 국내 제강공장의 현장조사 및 국내외 관련 문헌을 기반으로 수행하였다. 이를 바탕으로 금속폐기물을 국내 제강공장으로 운반, 재용융 및 소비재 유통 등을 단계별로 분류하여 세부 공정별 피폭 시나리오를 수립했다[10]. 또한 시나리오별 일반인 및 작업자의 방사선량 평가를 위해 금속폐기물 제강 및 생산품 유통과정에서의 작업특성별 노출시간, 호흡/섭취률 및 오염 먼지 부하량 등 평가를 위한 주요 입력인자에 대해서도 파악하였다.

2.2. 금속폐기물 자체처분 시나리오별 피폭선량 평가

금속폐기물 내 우라늄 자체처분 허용농도 계산을 위해선 세부 시나리오별 방사선량을 평가하고 가장 보수적인 결과를 활용해야 한다. 따라서 세부적인 방사선량 평가 및 피폭경로에 따른 핵종별 영향 분석을 선행하기 위해 본 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 RESRAD-RECYCLE (ver 3.10) 전산코드를 이용하여 금속폐기물의 재활용 시나리오별 세부 방사선량을 평가했다. 본 전산코드는 규제 해제된 철재와 알루미늄의 재활용 및 재이용 과정에서 사람에게 미치는 방사선량을 평가하기 위한 목적으로, 미국 에너지부(U.S Department of Energy; US DOE)의 지원하에 아르곤 국립연구소(Argonne National Laboratory; ANL)의 환경평가부서(Environmental Assessment Division; EAD)에서 개발하였다. RESRAD-RECYCLE 전산코드는 금속폐기물의 수집·운반·처리 작업자(Worker)와 소비재 및 공공재를 이용하는 일반인(Public)에 대하여 총 41개의 피폭경로와

54개의 핵종에 대해 잠재 방사선량 및 위해도를 평가하도록 고려되었다. 해당 전산코드는 개인선량, 집단선량 및 누적선량(Cumulative Dose)을 계산할 수 있다[15,16].

자체처분 대상 폐기물은 핵연료가공시설에서 발생한 금속폐기물로 종류는 Stainless steel, 탄소강 및 고철로 이루어진다[17]. 오염원은 발생지의 특성에 따라 우라늄 동위원소(^{234}U, ^{235}U, ^{238}U)이며, 발생량은 오염된 철재 300 ton으로 가정하였다. 금속폐기물의 발생부터 최종 처분까지 전체 시나리오에 대해 선원항의 거동에 따라 피폭된 작업자 및 일반인을 평가대상으로 선정하였다. 이때 작업자 및 일반인의 수, 오염원으로부터의 노출 시간 등 주요 변수는 한국원자력연구원의 문헌자료를 참고하였다[14].

RESRAD-RECYCLE 전산코드는 ICRP-26 개념에 근거하여 총 유효선량당량을 계산하도록 개발되었다. 하지만 국내 원자력관계법령에서는 ICRP-60 개념에 근거한 유효선량을 적용하고 있기에 금속폐기물 자체처분에 대한 방사선량 평가를 위해 이를 보정해주었다[11,16]. 내부피폭의 경우 호흡과 섭취에 대해서 작업자는 ICRP-72의 선량환산인자를 적용하였고, 일반인의 경우 연령군별 선량환산인자의 차이를 보정하기 위해 ICRP-72의 선량환산인자의 2배를 호흡과 섭취에 대하여 적용하였다[14,21]. 호흡에 대한 선량환산인자는 ICRP-68에 근거하여 1μm의 AMAD (Active Median Aerodynamic Diameter) 입자크기를 적용하였고, 보수적인 평가를 위해 Particle type은 S (Slow)를 사용하였다. 외부피폭의 경우 유효선량 및 유효선량당량에 근거한 외부피폭선량 평가결과가 큰 차이가 없음이 확인되어 RESRAD-RECYCLE에서 제시한 EPA FGR No.12를 준용하였다[15]. 국내 제강공장에서 금속폐기물 용융 시 방사성물질에 오염되지 않은 금속과 혼합하여 처리하나, 본 연구에서는 보수적인 평가를 위해 혼합에 의한 희석효과는 고려하지 않았다. 또한 금속폐기물 용융으로 발생하는 강괴(Ingot), 분진(Baghouse) 및 슬래그(Slag)의 질량 및 원소분리계수는 한전원자력연료의 자체처분 계획서를 참고하였다[17].

2.3. 금속폐기물 내 우라늄 동위원소 규제해제 농도 도출

IAEA Safety Series 111-P-1.1 및 NUREG-1640 간행물에서는 방사성물질의 재활용 및 재사용에 적용할 수 있는 규제해제 기준을 개발하기 위한 방법론을 제시하고 있다. 상기 보고서에서는 100 ton의 금속 방사성 폐기물을 재활용하는 경우 발생되는 피폭 예상 경로를 고려하여 단위 방사능농도당 방사선량(Sv y^{-1} per Bq g^{-1} 또는 Sv y^{-1} per Bq cm^{-2})을 계산한 후 그 값을 통해 연간 자체처분 허용선량(개인 10 μSv y^{-1}, 집단 1 Man-Sv y^{-1})을 넘지 않는 최대 허용농도를 구하였고, 이를 규제해제 농도(안)으로 도출하였다[5-7].

RESRAD-RECYCLE 전산코드를 통해 방출시점에서 결정집단에 대한 각 핵종별 단위 방사능농도당 방사선량(Unit dose)을 체적오염(Volume contamination) 및 표면오염(Surface contamination)으로 제시하였고, 해당 값과 아래 식 (1)을 이용하여 자체처분 유도농도를 도출하였다[15].

$$DC = \text{Dose criterion} \div \text{Unit dose} \quad (1)$$

DC (Derived Concentration): 자체처분 유도농도 (Bq g^{-1} or Bq cm^{-2})
Dose criterion: 연간 개인선량한도(10 μSv y^{-1})
Unit dose: 단위방사능농도당 방사선량(μSv y^{-1} per Bq g^{-1} or Bq cm^{-2})

선원항인 우라늄은 농축도에 따라 특정한 동위원소의 질량 및 방사능 비를 나타낸다. 따라서 우라늄 동위원소는 혼합하여 존재하기에 이를 고려하여 최종 우라늄 핵종에 대한 자체처분 허용농도(안)을 유도하여야 한다. 본 연구에서는 아래 식 (2)를 이용하여 우라늄 동위원소가 혼합된 우라늄의 자체처분 허용농도(안)을 천연, 3.5 w/o, 5.0 w/o에 대하여 각각 유도하였다[11].

$$\frac{1}{CL} = \sum_i \frac{U_i\text{의 방사능비}}{DC_i} \quad (2)$$

CL (Clearance level): 자체처분 허용농도(Bq g^{-1} or Bq cm^{-2})

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 금속폐기물 내 우라늄의 자체처분 허용농도(안) 예비 평가에 관한 연구를 수행하였다. 이를 위해 금속폐기물이 국내 제강공장에서 재활용하는 경우를 고려하여 피폭시나리오를 구성하고 주요 입력인자를 분석

하였다. 그리고 RESRAD-RECYCLE 전산코드를 활용해 시나리오별 방사선량을 평가하였다. 최종적으로, 가장 보수적으로 평가된 방사선량을 기반으로 금속폐기물 내 우라늄의 자체처분 허용농도(안)를 계산하였다.

3.1. 금속폐기물 재활용에 따른 피폭시나리오 및 주요 입력인자 분석

Table 1에 금속폐기물을 재활용하기 위한 유통경로에서 방사선원에 피폭될 수 있는 각 공정 작업자 및 일반인의 피폭경로 및 입력인자를 나타냈다. 공정조사 결과 철강 제조공정이 자동화되어 작업자에 대한 피폭은 없거나 매우 미미할 것으로 나타났으나[17], 보수적인 접근방법으로 금속폐기물이 재활용되는 과정을 총 9단계의 대분류 및 35개의 소분류로 나누어 세부 공정별 피폭 시나리오를 수립했다[10]. 작업자에 대한 피폭시나리오는 금속폐기물이 발생지에서 처분지로 운반되는 과정, 제강공장 내에서 용융, 주조, 가공 및 슬래그 처리 등의 취급 과정 그리고 최종 생산품을 일반환경으로의 유통 과정 등으로 23개의 세부 피폭시나리오를 구성하였다. 일반인에 대한 피폭시나리오는 재활용된 금속 및 슬래그를 주차장, 방/사무실, 가정용구 등 소비재와 도로포장, 철근 및 교량 등의 공공재로 사용되는 경우를 고려하였다. 또한 최초의 금속폐기물을 별도의 용융과정 없이 건물 및 도구에 바로 재이용하는 상황을 포함하여 총 12개의 세부 피폭시나리오를 도출하였다.

Table 2에는 국외 문헌과 국내 제강사의 금속물 재활용, 제조 일반공정 조사를 통해 금속폐기물 용융에 따른 질량분리계수와 원소분리계수를 나타냈다[17-20]. 국내 제강공장별로 취급하는 전기로에 따라 금속폐기물의 질량분리계수가 상이하게 나타났으나, 금속폐기물이 강괴(Ingot), 슬래그(Slag), 분진(Baghouse)으로 분배되는 경향은 유사하게 나타났다. 실제 자체처분시, 금속폐기물의 처분 경로에 있는 제강공장의 질량 및 원소분리계수를 사용하는 것이 합리적이나, 본 연구에서는 국내 실정에 맞추어 조사된 값 중 가장 보수적인 값을 방사선량 평가에 적용하였다.

3.2. 금속폐기물 자체처분 시나리오별 피폭선량 평가

Table 3에 금속폐기물 자체처분(재활용)에 따른 시나리오별 개인 및 집단에 대한 단위 방사능농도당 방사선량 결과를 나타냈다. 개인에 대한 방사선량 평가 결과 작업자의 경우 1.55×10^{-5}~5.34 μSv y^{-1}으로 나타났다. 주요 단계 중(1) 금속폐기물 용융, (2) 금속폐기물 운반, (3) 생산품 유통, (4) 최종가공, (5) 초기 가공, (6) 강괴 운반 순으로 방사선량이 높게 나타났다. 특히 금속폐기물 용융 작업 중, 슬래그 취급 작업자가 5.34 μSv y^{-1}로 가장 높은 방사선량을 나타났으며, 이는 용융 후 생성된 슬래그의 농축된 방사능농도 영향인 것으로 나타났다. 일반인의 경우 방사선량 평가 결과 9.70×10^{-5}~9.33 μSv y^{-1}으로 나타났다. 소비재 및 공공재로 이용하는 경우보다 건물로 직접 재이용하는 경우 방사선량이 9.33 μSv y^{-1}로 전체 시나리오 중 가장 높게 나타났다. 집단에 대한 방사선량은 개인선량에 작업자 및 일반인의 수를 가중함으로써, 6.87×10^{-11}~6.68×10^{-4} Man-Sv y^{-1}으로 평가되었다. 집단선량은 일반인이 방사선원에 쉽게 피폭될 수 있는 소비재, 공공재, 재이용 등의 단계에 높게 평가되었다. 이는 작업으로 피폭되는 인구수에 비해 재활용된 가공품을 사용하는 일반인의 수가 상대적으로 많기 때문으로 나타났다. 최종적으로 금속폐기물 내 ^{234}U, ^{235}U, ^{238}U의 단위 방사능농도(1 Bq g^{-1} or 1 Bq cm^{-2})를 선원항으로 평가했을 때, 국내 고시에 정의된 자체처분 허용선량(개인에 대한 10 μSv y^{-1} 및 집단 1 Man-Sv y^{-1})을 모두 만족하는 것으로 나타났다.

3.3. 금속폐기물 내 우라늄 동위원소 규제해제 농도 도출

Table 4에는 시나리오별 방사선량 평가 결과를 선원항별로 세분화하고, 그에 따른 우라늄 자체처분 유도농도를 나타냈다. 해당 농도는 각 시나리오별 자체처분 허용선량을 만족할 수 있는 핵종의 방사능농도 최대값으로, ^{234}U, ^{235}U, ^{238}U에 대하여 각각 $4.27\sim1.01\times10^{10}$, $2.24\sim7.49\times10^{5}$, $3.96\sim4.62\times10^{6}$ Bq g^{-1} (또는 Bq cm^{-2})의 범위를 나타낸다. 그리고 식 (2)를 통해 계산한 우라늄의 자체처분 허용농도는 우라늄의 농축도가 천연의 경우 $4.06\sim8.14\times10^{6}$, 3.5 w/o의 경우 $4.11\sim1.47\times10^{7}$, 5 w/o인 경우 $4.12\sim1.53\times10^{7}$ Bq g^{-1} (또는 Bq cm^{-2})로 나타냈다. Table 5에 작업자 및 일반인의 보수적 피폭 시나리오에서 우라늄 동위원소의 자체처분 유도농도와 국외 문헌에 기재된 규제해제농도 등을 비교하였다. 비교 결과 슬래그 작업과 같은 체적오염인 경우의 자체처분 최대허용농도는 ^{234}U, ^{235}U, ^{238}U에 대해서 각 8.52, 3.87, 6.32 Bq g^{-1}로, 국외

Table 1. Metal waste recycling scenarios and major inputs for RESRAD-RECYCLE

Scenario		Source type	Dilu fraction	Exp time	Dust load	Respiratory protection factor	Inh rate	Ing rate	Pop time	No. of people	Mass distribution
				hr	10^{-4} g m^{-3}	-	m^3 hr^{-1}	10^{-3} g hr^{-1}	hr	#	%
Scrap delivery	Scrap cutter	Volume	1	36	5	0.1	1.2	6.25	12	3	100
	Scrap loader	Volume	1	12	5	0.1	1.2	6.25	4	2	100
	Scrap truck driver	Volume	1	12	0	0.1	0	0	4	5	100
Scrap smelting	Scrap processor	Volume	1	36	1	0.1	1.2	6.25	12	3	100
	Smelter yard worker	Volume	1	240	1	0.1	1.2	6.25	80	10	100
	Smelter loader	Volume	1	12	10	0.1	1.2	6.25	4	5	100
	Furnace operator	Volume	1	15	10	0.1	1.2	6.25	5	3	100
	Baghouse processor	Volume	1	3	10	0.1	1.2	6.25	1	1	100
	Refinery worker	Volume	1	15	10	0.1	1.2	6.25	5	3	100
	Ingot caster	Volume	1	7.5	10	0.1	1.2	6.25	2.5	2	100
	Small objects caster	Volume	1	150	10	0.1	1.2	6.25	50	2	100
	Slag worker	Volume	1	75	10	0.1	1.2	6.25	25	1	100
Ingot delivery	Ingot loader	Volume	1	6	0	0.1	0	0	2	2	100
	Ingot truck driver	Volume	1	15	0	0.1	0	0	5	5	100
Initial fabrication	Storage yard worker	Volume	1	120	0	0.1	0	0	40	10	100
	Sheet maker	Volume	1	3	1	0.1	1.2	6.25	1	15	100
	Coil maker	Volume	1	3	1	0.1	1.2	6.25	1	1	100
Final fabrication	Sheet handler	Volume	1	3	0	0.1	0	0	1	20	100
	Coil handler	Volume	1	240	0	0.1	0	0	80	5	100
Product distribution	Product loader	Volume	1	60	0	0.1	0	0	20	2	100
	Product truck driver	Volume	1	24	0	0.1	0	0	8	5	100
	Sheet assembler	Volume	1	60	0	0.1	0	0	20	20	100
	Warehouse worker	Volume	1	2,000	0	0.1	0	0	2,000	15	100
Consumer product	Parking lot	Volume	0.01	62	0	0.1	0	0	62	3,000	100
	Room/Office	Volume	1	2,000	0	0.1	0	0	2,000	1,140	100
	Appliance	Volume	1	730	0	0.1	0	0	730	12,900	100
	Automobile	Volume	1	730	0	0.1	0	0	730	2,400	100
	Office furniture	Volume	1	2,000	0	0.1	0	0	2,000	21,000	100
	Home furniture	Volume	1	3,650	0	0.1	0	0	3,650	18,000	100
	Frying pan	Volume	1	180	0	0.1	0	4.12	180	123,000	100
Public product	Pavement	Volume	0.01	6	0	0.1	0	0	0.0074	24,600,000	100
	Building with rebars	Volume	1	2,000	0	0.1	0	0	2,000	492	100
	Bridge	Volume	1	1	0	0.1	0	0	0.002	24,600,000	100
Reuse product	Tool reuse	Surface	0.01	2,000	0.01	0.1	1.2	1,000	2,000	1	100
	Building reuse	Surface	0.01	2,000	0.01	0.1	1.2	1,000	2,000	4	100

Table 2. Comparison of mass and radionuclide partitioning factors

Category	Mass partitioning factors					Radionuclide partitioning factors			
	Ingot	Slag	Bag house	Emission	Sub total	Ingot	Slag	Bag house	Sub total
NUREG-1640	0.9~0.91	0.13	0.015	0.006~0.0009	1.051~1.056	0.0~0.01	0.95~1.0	0.0~0.05	0.95~1.06
RESRAD-RECYCLE (Default)	0.9	0.1	0.01	0.00003	1.01	0	0.99	0.00997	0.99997
KINS/RR-144	0.9	0.1	0.01	–	1.01	0	0.99	0.01	1
KINSAR-756	0.99	0.25	0.02	–	1.26	0.01	1	0.05	1.06
KOPEC Report (2000)	0.870	0.095	0.035	–	1.00	0.01	0.939	0.05	0.999
KNF Report (2013)	0.861	0.124	0.015	–	1.00	–	–	–	–
KNF Report (2009)	0.822	0.164	0.014	–	1.00	–	–	–	–
Applied value	0.870	0.095	0.035	0.00003	1.00	0.01	1	0.05	1.06

의 우라늄 동위원소별 규제해제농도보다 최대 8.52배 높았다. 이는 국내 제강 환경에 맞는 질량 및 원소분리계수 등을 평가에 적용함에 따라 발생한 차이로 나타났다. 건물 재이용과 같은 표면오염의 경우 자체처분 유도농도가 ^{234}U, ^{235}U, ^{238}U에 대해서 각각 4.27, 2.24, 3.96 Bq cm^{-2} 이었다. 표면오염에 대한 국외 문헌의 규제해제농도는 본 연구와 평가 시나리오가 상이하여 직접적인 비교가 제한적이나, European Commission (1988)에서 제시한 규제해제농도(1 Bq cm^{-2})보다 2.24~4.27배 높은 것으로 나타났다. 결과적으로 국내 제강공장에서 금속폐기물 자체처분시, 체적 및 표면오염에 의한 ^{234}U, ^{235}U, ^{238}U의 자체처분 유도농도는 국외 준용자료보다 모두 높게 나타났다.

본 연구에서는 가장 보수적인 시나리오의 자체처분 유도농도와 농축도별 우라늄 동위원소의 방사능 비율을 통해 우라늄의 자체처분 허용농도(안)을 계산했으며, 농축도별 체적 및 표면오염에 대해 각각 7.23~7.94 Bq g^{-1} 및 4.06~4.12 Bq cm^{-2}로 나타났다. 즉 해당 값 미만의 방사능농도에 대해서 국내 제강공장에서 금속폐기물 재활용시, 모든 작업자 및 최종 가공품을 사용하는 일반인의 방사선학적 안전을 확보할 수 있는 것으로 나타난다.

4. 고 찰

본 연구에서는 국내 제강공장에서 금속폐기물을 자체처분시, 우라늄 농축도(천연, 3.5 w/o, 5.0 w/o)에 따라 체적오염의 경우 7.23, 7.85, 7.94 Bq g^{-1}, 표면오염의 경우 4.06, 4.12, 4.12 Bq cm^{-2}를 우라늄 자체처분 허용농도(안)으로 계산하였다. 해당 값은 시나리오별 방사선량 평가 결과에 따라 상이하게 나타나며, 타당한 평가를 위해 작업자 및 일반인에 대한 피폭시나리오를 종합적으로 고려해줘야 한다. 본 연구에서는 가장 높은 방사선량이 나타난 시나리오를 통해 방사선량에 영향을 미치는 주요인자와 우라늄 동위원소별 방사선량 기여율을 분석하였다. 또한 계산한 우라늄의 자체처분 허용농도(안)에 대한 유효성 및 타당성을 검토하였다.

4.1. 금속폐기물 자체처분 시나리오별 방사선량 비교분석

Fig. 1에 금속폐기물 자체처분(재활용)에 따른 시나리오별 개인에 대한 단위 방사능농도당 방사선량 결과를 나타냈다. 개인에 대한 방사선량은 (1) 재이용(건물), (2) 재이용(도구), (3) 금속폐기물 용융(슬래그 작업자) 등의 순서로 높게 평가되었다. 재이용(건물, 도구)의 경우 금속폐기물을 제강공장에서 용융하는 것이 아닌, 표면오염이 있는 상태에서 건물 또는 도구로 직접 재이용한 것으로, 금속폐기물을 용융 및 용융 후 생산품 등을 취급되는 체적오염 시나리오보다 약 10^2배 정도 높게 평가되었다. 이는 오염원이 희석 또는 분배되지 않고 표면 오염된 금속폐기물을 직접 재이용하는 평가모델식의 차이로 인한 결과이다. 세부적으로 표면오염원에 대한 섭취율과 노출시간이 민감하게 영향을 끼치는 것으로 확인되었다. 금속폐기물 용융 후 슬래그 작업자의 경우, 제강 및 생산품 유통과정에서 타 공정 작업자의 노출시간, 호흡/섭취율 및 오염먼지 부하량 등은 유사하지만, 취급하는 물질의 방사능농

Table 3. Results of individual and collective dose assessments by unit radioactivity

Scenario		Individual dose [μSv y^{-1}]				Collective dose [Man-Sv y^{-1}]
		Inhalation	Ingestion	External	Total	
Scrap delivery	Scrap cutter	5.59×10^{-2}	3.45×10^{-2}	2.29×10^{-3}	9.27×10^{-2}	2.78×10^{-7}
	Scrap loader	1.86×10^{-2}	1.15×10^{-2}	3.24×10^{-3}	3.34×10^{-2}	6.67×10^{-8}
	Scrap truck driver	0	0	2.90×10^{-3}	2.90×10^{-3}	1.45×10^{-8}
Scrap smelting	Scrap processor	1.12×10^{-2}	3.23×10^{-2}	2.31×10^{-3}	4.58×10^{-2}	1.37×10^{-7}
	Smelter yard worker	7.46×10^{-2}	2.15×10^{-1}	2.00×10^{-2}	3.10×10^{-1}	3.10×10^{-6}
	Smelter loader	5.33×10^{-2}	1.77×10^{-2}	3.84×10^{-3}	7.48×10^{-2}	3.74×10^{-7}
	Furnace operator	6.66×10^{-2}	2.21×10^{-2}	1.38×10^{-2}	1.03×10^{-1}	3.08×10^{-7}
	Baghouse processor	1.33×10^{-2}	4.43×10^{-3}	9.29×10^{-4}	1.87×10^{-2}	1.87×10^{-8}
	Refinery worker	6.66×10^{-2}	2.21×10^{-2}	1.59×10^{-4}	8.89×10^{-2}	2.67×10^{-7}
	Ingot caster	2.68×10^{-4}	8.91×10^{-5}	8.06×10^{-5}	4.38×10^{-4}	8.75×10^{-10}
	Small objects caster	5.36×10^{-3}	1.78×10^{-3}	7.93×10^{-3}	1.51×10^{-2}	3.01×10^{-8}
	Slag worker	2.45×10^{0}	8.16×10^{-1}	2.07×10^{0}	5.34×10^{0}	5.34×10^{-6}
Ingot delivery	Ingot loader	0	0	4.26×10^{-5}	4.26×10^{-5}	8.51×10^{-11}
	Ingot truck driver	0	0	9.57×10^{-5}	9.57×10^{-5}	4.78×10^{-10}
Initial fabrication	Storage yard worker	0	0	1.51×10^{-4}	1.51×10^{-4}	1.51×10^{-9}
	Sheet maker	1.07×10^{-5}	3.09×10^{-5}	1.55×10^{-5}	5.71×10^{-5}	8.57×10^{-10}
	Coil maker	1.07×10^{-5}	3.09×10^{-5}	2.70×10^{-5}	6.87×10^{-5}	6.87×10^{-11}
Final fabrication	Sheet handler	0	0	1.55×10^{-5}	1.55×10^{-5}	3.10×10^{-10}
	Coil handler	0	0	2.16×10^{-3}	2.16×10^{-3}	1.08×10^{-8}
Product distribution	Product loader	0	0	4.26×10^{-4}	4.26×10^{-4}	8.51×10^{-10}
	Product truck driver	0	0	1.53×10^{-4}	1.53×10^{-4}	7.66×10^{-10}
	Sheet assembler	0	0	3.10×10^{-4}	3.10×10^{-4}	6.21×10^{-9}
	Warehouse worker	0	0	2.16×10^{-3}	2.16×10^{-3}	3.25×10^{-8}
Consumer product	Parking lot	0	0	1.59×10^{-1}	1.59×10^{-1}	4.78×10^{-4}
	Room/Office	0	0	4.21×10^{-2}	4.21×10^{-2}	4.80×10^{-5}
	Appliance	0	0	1.14×10^{-3}	1.14×10^{-3}	1.47×10^{-5}
	Automobile	0	0	3.45×10^{-2}	3.45×10^{-2}	8.28×10^{-5}
	Office furniture	0	0	1.97×10^{-2}	1.97×10^{-2}	4.13×10^{-4}
	Home furniture	0	0	3.71×10^{-2}	3.71×10^{-2}	6.68×10^{-4}
	Frying pan	0	2.40×10^{-3}	7.21×10^{-4}	3.13×10^{-3}	3.85×10^{-4}
Public product	Pavement	0	0	1.54×10^{-2}	1.54×10^{-2}	4.67×10^{-4}
	Building with rebars	0	0	9.72×10^{-4}	9.72×10^{-4}	4.78×10^{-7}
	Bridge	0	0	9.70×10^{-5}	9.70×10^{-5}	4.77×10^{-6}
Reuse product	Tool reuse	1.63×10^{-2}	5.64×10^{0}	7.85×10^{-1}	6.44×10^{0}	6.44×10^{-6}
	Building reuse	9.37×10^{-1}	5.69×10^{0}	2.70×10^{0}	9.33×10^{0}	3.73×10^{-5}

도가 높은 것을 확인하였다. 즉 최초 금속폐기물(Scrap)이 용융되어 강괴, 분진 및 슬래그가 생성될 때, 원소분리계수가 크고 질량분리계수가 작은 슬래그로 우라늄의 거동이 편중되어 방사능농도가 높아지고, 이로 인해 슬래그 작

Table 4. Derived concentration and clearance level of uranium by radiation dose

Scenario		Individual dose [μSv y^{-1}]				Derived concentration [Bq g^{-1} or Bq cm^{-2}]			Clearance level [Bq g^{-1} or Bq cm^{-2}]		
		^{234}U	^{235}U	^{238}U	Total	^{234}U	^{235}U	^{238}U	0.711 w/o	3.5 w/o	5.0 w/o
Scrap delivery	Scrap cutter	3.23×10^{-2}	3.15×10^{-2}	2.89×10^{-2}	9.27×10^{-2}	3.10×10^{2}	3.17×10^{2}	3.46×10^{2}	3.25×10^{2}	3.14×10^{2}	3.13×10^{2}
	Scrap loader	1.08×10^{-2}	1.23×10^{-2}	1.03×10^{-2}	3.34×10^{-2}	9.29×10^{2}	8.13×10^{2}	9.70×10^{2}	9.44×10^{2}	9.30×10^{2}	9.29×10^{2}
	Scrap truck driver	3.12×10^{-7}	2.12×10^{-3}	7.80×10^{-4}	2.90×10^{-3}	3.21×10^{7}	4.71×10^{3}	1.28×10^{4}	2.59×10^{4}	5.82×10^{4}	6.89×10^{4}
Scrap smelting	Scrap processor	1.53×10^{-2}	1.61×10^{-2}	1.44×10^{-2}	4.58×10^{-2}	6.55×10^{2}	6.21×10^{2}	6.95×10^{2}	6.71×10^{2}	6.59×10^{2}	6.57×10^{2}
	Smelter yard worker	1.02×10^{-1}	1.11×10^{-1}	9.73×10^{-2}	3.10×10^{-1}	9.82×10^{1}	9.04×10^{1}	1.03×10^{2}	1.00×10^{2}	9.85×10^{1}	9.83×10^{1}
	Smelter loader	2.55×10^{-2}	2.62×10^{-2}	2.32×10^{-2}	7.48×10^{-2}	3.92×10^{2}	3.82×10^{2}	4.32×10^{2}	4.08×10^{2}	3.97×10^{2}	3.95×10^{2}
	Furnace operator	3.19×10^{-2}	3.93×10^{-2}	3.14×10^{-2}	1.03×10^{-1}	3.14×10^{2}	2.55×10^{2}	3.18×10^{2}	3.14×10^{2}	3.12×10^{2}	3.12×10^{2}
	Baghouse processor	6.37×10^{-3}	6.53×10^{-3}	5.77×10^{-3}	1.87×10^{-2}	1.57×10^{3}	1.53×10^{3}	1.73×10^{3}	1.64×10^{3}	1.59×10^{3}	1.58×10^{3}
	Refinery worker	3.19×10^{-2}	2.94×10^{-2}	2.77×10^{-2}	8.89×10^{-2}	3.14×10^{2}	3.41×10^{2}	3.61×10^{2}	3.34×10^{2}	3.20×10^{2}	3.19×10^{2}
	Ingot caster	1.28×10^{-4}	1.76×10^{-4}	1.33×10^{-4}	4.38×10^{-4}	7.80×10^{4}	5.67×10^{4}	7.52×10^{4}	7.62×10^{4}	7.67×10^{4}	7.68×10^{4}
	Small objects caster	2.57×10^{-3}	9.18×10^{-3}	3.32×10^{-3}	1.51×10^{-2}	3.90×10^{3}	1.09×10^{3}	3.01×10^{3}	3.30×10^{3}	3.48×10^{3}	3.50×10^{3}
	Slag worker	1.17×10^{0}	2.59×10^{0}	1.58×10^{0}	5.34×10^{0}	8.52×10^{0}	3.87×10^{0}	6.32×10^{0}	7.23×10^{0}	7.85×10^{0}	7.94×10^{0}
Ingot delivery	Ingot loader	4.17×10^{-9}	3.08×10^{-5}	1.17×10^{-5}	4.26×10^{-5}	2.40×10^{9}	3.24×10^{5}	8.53×10^{5}	1.73×10^{6}	3.93×10^{6}	4.66×10^{6}
	Ingot truck driver	1.01×10^{-8}	6.97×10^{-5}	2.60×10^{-5}	9.57×10^{-5}	9.90×10^{8}	1.44×10^{5}	3.84×10^{5}	7.76×10^{5}	1.76×10^{6}	2.08×10^{6}
Initial fabrication	Storage yard worker	1.30×10^{-8}	1.09×10^{-4}	4.23×10^{-5}	1.51×10^{-4}	7.70×10^{8}	9.20×10^{4}	2.36×10^{5}	4.79×10^{5}	1.10×10^{6}	1.30×10^{6}
	Sheet maker	1.46×10^{-5}	2.72×10^{-5}	1.53×10^{-5}	5.71×10^{-5}	6.83×10^{5}	3.68×10^{5}	6.52×10^{5}	6.58×10^{5}	6.61×10^{5}	6.61×10^{5}
	Coil maker	1.46×10^{-5}	3.35×10^{-5}	2.05×10^{-5}	6.87×10^{-5}	6.83×10^{5}	2.98×10^{5}	4.88×10^{5}	5.68×10^{5}	6.24×10^{5}	6.32×10^{5}

Table 4. Continued

Scenario		Individual dose [μSv y^{-1}]				Derived concentration [Bq g^{-1} or Bq cm^{-2}]			Clearance level [Bq g^{-1} or Bq cm^{-2}]		
		^{234}U	^{235}U	^{238}U	Total	^{234}U	^{235}U	^{238}U	0.711 w/o	3.5 w/o	5.0 w/o
Final fabrication	Sheet handler	7.97×10^{-9}	1.33×10^{-5}	2.17×10^{-6}	1.55×10^{-5}	1.26×10^{9}	7.49×10^{5}	4.62×10^{6}	8.14×10^{6}	1.40×10^{7}	1.53×10^{7}
	Coil handler	2.33×10^{-7}	1.58×10^{-3}	5.85×10^{-4}	2.16×10^{-3}	4.28×10^{7}	6.34×10^{3}	1.71×10^{4}	3.45×10^{4}	7.79×10^{4}	9.22×10^{4}
Product distribution	Product loader	4.17×10^{-8}	3.08×10^{-4}	1.17×10^{-4}	4.26×10^{-4}	2.40×10^{8}	3.24×10^{4}	8.53×10^{4}	1.73×10^{5}	3.93×10^{5}	4.66×10^{5}
	Product truck driver	1.62×10^{-8}	1.11×10^{-4}	4.17×10^{-5}	1.53×10^{-4}	6.19×10^{8}	8.97×10^{4}	2.40×10^{5}	4.85×10^{5}	1.10×10^{6}	1.30×10^{6}
	Sheet assembler	1.59×10^{-7}	2.67×10^{-4}	4.33×10^{-5}	3.10×10^{-4}	6.28×10^{7}	3.75×10^{4}	2.31×10^{5}	4.07×10^{5}	6.98×10^{5}	7.65×10^{5}
	Warehouse worker	3.10×10^{-7}	1.88×10^{-3}	2.87×10^{-4}	2.16×10^{-3}	3.22×10^{7}	5.33×10^{3}	3.48×10^{4}	6.07×10^{4}	1.02×10^{5}	1.12×10^{5}
Consumer product	Parking lot	5.89×10^{-5}	1.36×10^{-1}	2.34×10^{-2}	1.59×10^{-1}	1.70×10^{5}	7.37×10^{1}	4.27×10^{2}	7.63×10^{2}	1.34×10^{3}	1.48×10^{3}
	Room/ Office	1.87×10^{-5}	3.63×10^{-2}	5.75×10^{-3}	4.21×10^{-2}	5.34×10^{5}	2.75×10^{2}	1.74×10^{3}	3.05×10^{3}	5.19×10^{3}	5.68×10^{3}
	Appliance	1.02×10^{-6}	9.65×10^{-4}	1.72×10^{-4}	1.14×10^{-3}	9.85×10^{6}	1.04×10^{4}	5.81×10^{4}	1.04×10^{5}	1.84×10^{5}	2.04×10^{5}
	Automobile	2.53×10^{-5}	2.95×10^{-2}	5.01×10^{-3}	3.45×10^{-2}	3.96×10^{5}	3.40×10^{2}	2.00×10^{3}	3.55×10^{3}	6.18×10^{3}	6.80×10^{3}
	Office furniture	1.20×10^{-5}	1.69×10^{-2}	2.76×10^{-3}	1.97×10^{-2}	8.32×10^{5}	5.91×10^{2}	3.63×10^{3}	6.39×10^{3}	1.10×10^{4}	1.20×10^{4}
	Home furniture	2.23×10^{-5}	3.19×10^{-2}	5.20×10^{-3}	3.71×10^{-2}	4.49×10^{5}	3.14×10^{2}	1.92×10^{3}	3.39×10^{3}	5.82×10^{3}	6.38×10^{3}
	Frying pan	8.36×10^{-4}	1.43×10^{-3}	8.61×10^{-4}	3.12×10^{-3}	1.20×10^{4}	7.00×10^{3}	1.16×10^{4}	1.16×10^{4}	1.17×10^{4}	1.17×10^{4}
Public product	Pavement	5.70×10^{-6}	1.31×10^{-2}	2.26×10^{-3}	1.54×10^{-2}	1.76×10^{6}	7.61×10^{2}	4.42×10^{3}	7.90×10^{3}	1.39×10^{4}	1.53×10^{4}
	Building with rebars	9.93×10^{-10}	1.54×10^{-4}	8.18×10^{-4}	9.72×10^{-4}	1.01×10^{10}	6.49×10^{4}	1.22×10^{4}	2.75×10^{4}	8.71×10^{4}	1.19×10^{5}
	Bridge	1.12×10^{-8}	7.95×10^{-5}	1.75×10^{-5}	9.70×10^{-5}	8.96×10^{8}	1.26×10^{5}	5.72×10^{5}	1.07×10^{6}	2.06×10^{6}	2.32×10^{6}
Reuse product	Tool reuse	1.98×10^{0}	2.54×10^{0}	1.93×10^{0}	6.44×10^{0}	5.06×10^{0}	3.94×10^{0}	5.18×10^{0}	5.09×10^{0}	5.03×10^{0}	5.03×10^{0}
	Building reuse	2.34×10^{0}	4.46×10^{0}	2.52×10^{0}	9.33×10^{0}	4.27×10^{0}	2.24×10^{0}	3.96×10^{0}	4.06×10^{0}	4.11×10^{0}	4.12×10^{0}

Table 5. Comparison of clearance level of uranium isotopes.

Scenario		Clearance level (Bq g^{-1} or Bq cm^{-2})						Notes
		^{234}U	^{235}U	^{238}U	U			
					7.11 w/o	3.5 w/o	5.0 w/o	
Slag worker	This article	8.52	3.87	6.32	7.23	7.85	7.94	Slag worker
	IAEA SS No.111-P-1.1	–	–	1.00		N/A		Slag worker
	European commission	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	Scrap recycling
	NUREG-1620	0.714	0.714	0.769	0.737	0.721	0.719	Handling slag
Building reuse	This article	4.28	2.24	3.96	4.06	4.12	4.12	Building reuse
	IAEA SS No.111-P-1.1	–	–	4.00		N/A		Tools & equipment
	European commission	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	Direct reuse

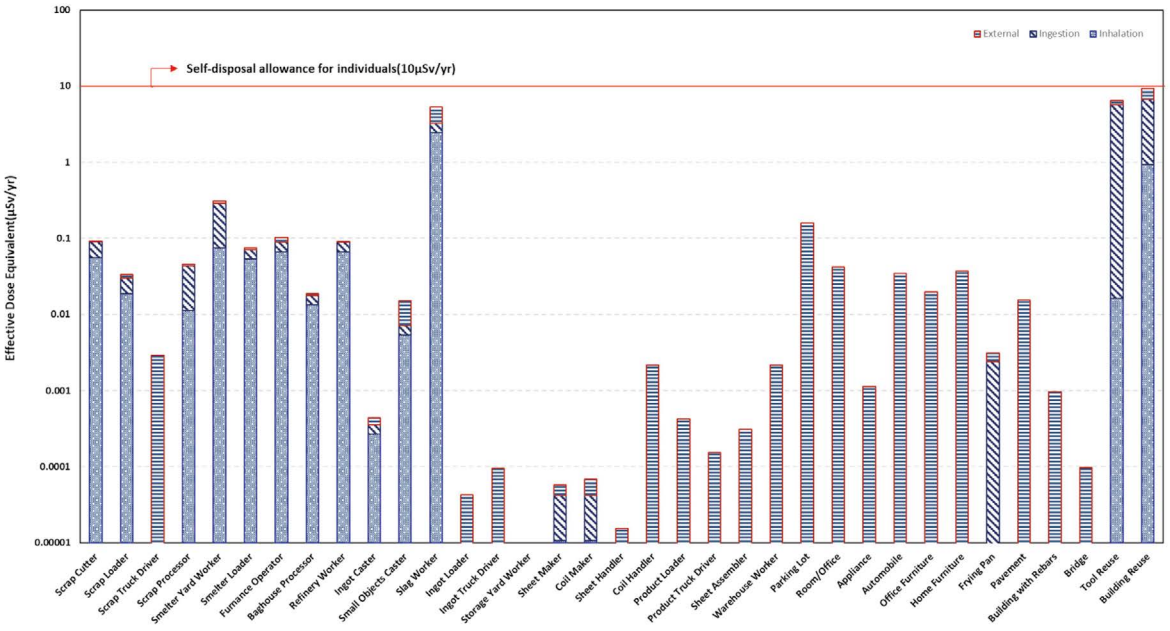

Fig. 1. Results of dose assessment for each scenario.

업자의 방사선량이 높게 평가되었다.

Fig. 2에 상위 3개 피폭 시나리오에 대한 피폭경로 및 핵종별 기여도를 나타냈다. 공통적으로 호흡과 섭취에 따른 내부피폭은 ^{234}U, ^{235}U, ^{238}U가 각각 34.8~35.9%, 32.9~33.3%, 31.1~31.9%로 유사한 기여도를 나타냈고, 외부피폭은 ^{234}U, ^{235}U, ^{238}U가 각각 0.01~1.23%, 72.8~83.6%, 15.5~27.2%로 ^{235}U가 가장 지배적인 것으로 나타났다. 이는 외부피폭에 대한 선량환산인자의 상대적인 값의 차이가 기인한 것으로 분석되었다.

4.2. 금속폐기물 내 우라늄 자체처분 허용농도(안)의 유효성 및 타당성 검토

본 연구에서는 금속폐기물 내 우라늄 동위원소별 자체처분 유도농도를 통해 우라늄의 자체처분 허용농도(안)을 계산하였다. 우라늄 동위원소별 자체처분 유도농도는 동위원소별로 자체처분 허용선량을 만족하는 방사능농도의 최대치로 나타난다. 그렇기에 금속폐기물 내 우라늄 동위원소의 방사능농도가 각각의 유도농도를 만족하더라도, 피폭에 기여하는 영향이 중첩될 경우 개인에 대한 방

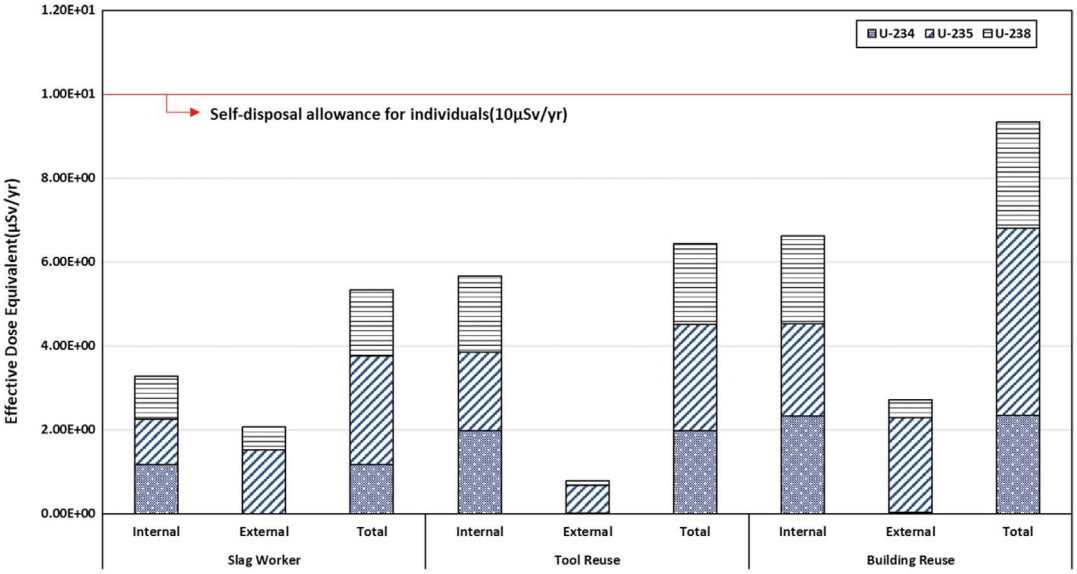

Fig. 2. Analysis of impacts by uranium isotopes and exposure pathway in maximum exposure scenarios.

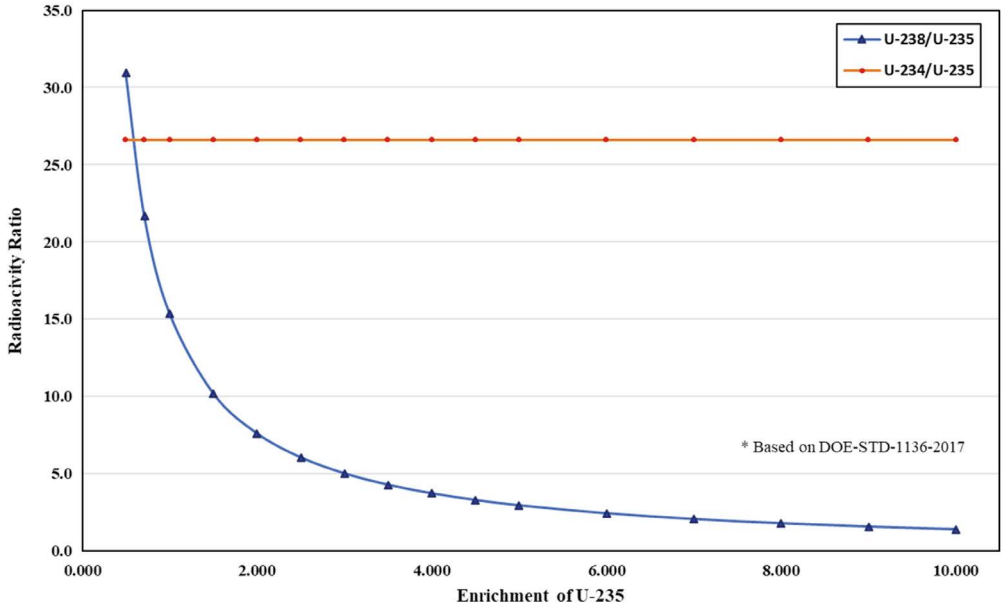

Fig. 3. Radioactivity ratios of uranium isotopes by enrichment.

사선량이 허용선량을 초과할 우려가 있다. 또한 작업자 및 일반인의 보수적 피폭 시나리오에서 ^{234}U, ^{235}U, ^{238}U의 자체처분 유도농도를 각각의 비방사능(Specific Activity)인 2.30×10^{8}, 7.93×10^{4}, 1.23×10^{4} Bq g^{-1}을 사용하여 질량비로 역산한 결과, 우라늄 농축도가 각각 8.67%, 8.08%로 나타났다. 해당 농축도는 핵연료가공시설에서 발생된 금속폐기물의 최대 오염 가능 수준인 4.65%보다 높은 값으로, 우라늄 동위원소별 자체처분 유도농도를 직접 준용하기에는 실무적으로 상이한 부분이 있다. 따라서 방사선학적 안전을 평가하기 위해 우라늄 동위원소보다 우라늄 자체의 자체처분 허용농도(안)을 활용하는 것이 유효하다고 판단된다. Fig. 3은 우라늄 농축도에 따라 ^{235}U 대비 ^{234}U, ^{238}U의 방사능 비를 나타냈다. 이를 통해 발생지의 특성에 따른 금속폐기물 내 우라늄 농축도와 측정이 용이한 우라

늄 동위원소의 방사능농도를 통해 전체 우라늄의 방사능농도를 규명할 수 있다. 규명된 값과 우라늄 자체처분 허용농도(안)을 직접 비교함으로써 자체처분에 따른 방사선학적 안전을 효율적으로 입증할 것으로 분석된다.

본 연구는 우라늄에 오염된 금속폐기물을 재활용하기 위한 과정 중 폐기물의 수집·운반·처리 등의 작업과 최종 가공품의 제조·유통 등 일반인의 사용에 의해 유도한 결과를 제시하였다. 그러나 주요 작업과 생산된 최종 가공품을 단기간 사용하는 경우를 고려하였기에, 시간 경과에 따른 우라늄 자핵종의 피폭 영향에 대해서도 규명되어야 할 것으로 판단된다. 또한 실제 금속폐기물을 재활용을 통한 자체처분시, 본 연구에서 다룬 범위 외 금속폐기물 용융시 발생한 분진 및 슬래그 등의 2차 폐기물의 최종 처분에 대한 사항도 고려되어야 한다. 이는 우라늄의 거동 특성에 따라 2차 폐기물 내 우라늄의 방사능 농도가 증가되며, 해당 폐기물을 최종 처분시 필연적으로 작업자 및 일반인에게 방사선 피폭이 발생할 개연성이 높기 때문이다. 따라서 추가적인 연구를 통해 금속폐기물 자체처분에 따른 방사선량을 종합적으로 고려할 경우, 본 연구에서 계산한 결과보다 더 보수적으로 자체처분 허용농도(안)가 유도될 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 금속폐기물 자체처분을 위해 주요 시나리오별 방사선량 평가를 통해 우라늄의 허용농도(안)를 예비 평가하였다. 이를 위하여 첫 번째, 국내 제강공장의 금속폐기물 주요 공정을 조사하고 피폭시나리오 및 주요 입력인자를 분석하였다. 두 번째, 시나리오별 방사선량을 RESRAD-RECYCLE 전산코드를 활용해 평가 및 분석하였다. 세 번째, 국내 자체처분 허용선량을 만족하는 금속폐기물 내 우라늄의 자체처분 허용농도(안)를 계산하였다.

금속폐기물을 재활용하기 위해 제강공장에서 금속폐기물의 용융, 재이용 등 35개의 피폭시나리오를 도출하였다. 피폭시나리오별 주요 입력인자는 선원항의 노출시간, 작업자의 호흡과 섭취율, 오염 먼지 부하량, 선원항의 질량 및 원소분리계수 등으로 나타났다. 재활용 과정에서 금속폐기물 용융에 따른 2차 생산품은 강괴 및 슬래그에 질량과 방사능농도가 편중되는 것으로 나타났다. 본 연구에서 분석한 피폭시나리오 및 주요 입력인자는 국내 실정과 일부 상이한 부분으로 보수적으로 평가됨을 알 수 있다.

금속폐기물 재활용에 의한 방사선량은 1.55×10^{-5}~9.33 $\mu Sv\ y^{-1}$로 나타났다. 작업자의 경우 금속폐기물이 용융 후 슬래그 취급작업시 방사선량이 가장 높게 나타났다. 일반인의 경우 건물로 직접 재사용시 방사선량이 가장 높게 나타났다. 평가 결과 내부피폭은 우라늄 동위원소별 기여도가 유사하게 나타났으며, 외부피폭의 경우 ^{235}U 가 최소 70% 이상 기여하는 것으로 나타났다. 오염원의 형상에 따라 방사선량에 기여하는 주요인자가 상이하며, 특히 체적오염의 경우 질량 및 원소분리계수에 의해 크게 영향을 받는 것으로 나타났다.

가장 보수적인 방사선량 평가 결과를 통해 우라늄 농축도별 자체처분 허용농도(안)을 계산하였으며, 체적 및 표면오염에 대해 각각 7.23 $Bq\ g^{-1}$ 및 4.06 $Bq\ cm^{-2}$로 나타났다. 국내 제강공장으로 금속폐기물 재활용시 해당 농도 미만인 경우 자체처분 허용선량(개인에 대한 10 $\mu Sv\ y^{-1}$ 및 집단 1 $Man\text{-}Sv\ y^{-1}$)을 만족할 수 있는 것으로 나타났다

본 연구에서 금속폐기물 내 우라늄의 자체처분 허용농도(안)를 계산한 결과, 국외 문헌에서 제시하는 규제해제 농도보다 높게 평가되었다. 이는 금속폐기물 자체처분 과정 중 용융 및 최종 가공품 사용 등에 의한 평가 결과로, 2차 폐기물 처분 등을 고려할 경우 더 낮아질 것으로 판단된다. 본 연구에서 수행한 결과는 우라늄 오염 방사성폐기물의 자체처분에 관한 연구의 기반 자료로서 활용될 수 있을 것이다. 그리고 향후 국내 고시에 우라늄의 자체처분 허용농도 제정 및 원자력이용시설에서 발생될 방사성 금속폐기물 자체처분시 참고자료로 활용될 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Nuclear Safety and Security Commission. Nuclear Safety Act.
2. IAEA. 1996. International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources, Safety Series No 115.
3. IAEA. 2023. Application of the Concepts of clearance. Safety Standards. GSG-18.
4. Nuclear Safety and Security Commission. 2023. NSSC Notice No. 2023-7. Regulations on radioactive waste classification and clearance standards.
5. IAEA. 1992. Application of exemption principles to the recycle

and reuse of Material from Nuclear Facilities, Safety Series No 111-p-1.1.
6. NUREG-1640. 1999. Radiological Assessment f.or Clearance of Equipment and Material from Nuclear Facilities. Vol. 1 & 2.
7. NUREG-1640. 2003. Radiological Assessment for Clearance of Equipment and Material from Nuclear Facilities. Vol. 1.
8. KINS. 2022. Safety Evaluation of clearance of Radioactive Waste. KINS/RG-N12.08.
9. Hong YJ, Jang WH, Kim JJ and Lee JW. 2021. Case Study on Radioactive Waste Disposal for clearance. *J. Radiat. Ind.* **15**(1):85-91. https://doi.org/10.23042/radin.2021.15.1.85.
10. Choi YW, Ko JH, Lee DK, Hwang YH, Lee IH and Hong SB. 2020. Safety Evaluation of Clearance of Radioactive Metal Waste After Decommissioning of NPP. *JNFCW* **18**(2):291-303. https://doi.org/10.7733/jnfcwt.2020.18.2(E).291.
11. Seol JG, Ryu JB, Cho SJ, Yoo SH, Song JH, Baek H, Kim SH, Park SS and Park HK. 2007. Residual Radioactivity Investigation & Radiological Assessments for Self-disposal of Concrete Waste in Nuclear Fuel Processing Facility. *JNFCWT* **5**(2):91-101. https://www.kci.go.kr/kciportal/ci/sereArticleSearch/ciSereArtiOrteView.kci?sereArticleSearchBean.artiId=ART001065381.
12. Lee MH. 2020. Study on clearance of waste activated carbon using RESRAD. Master's Thesis, Chosun University.
13. Song JS, Kim DM and Lee SH. 2016. A Study on the Application of Standards for Clearance of Metal Waste Generated During the Decommissioning of NPP by Using the RESRAD-RECYCLE. *JNFCWT* **14**(4):305-320. https://doi.org/10.7733/jnfcwt.2016.14.4.305.
14. KAERI. 2011. Study to assess the safety of recycling radioactive metal waste. KAERI/RR-3275.
15. Hong SB, Lee BJ and Jung US. 2003. Proceeding of the Korean Radioactive Waste Society Vol. 1, No. 2.
16. ANL. 2020. RESRAD-RECYCLE Manual. ANL/EAD-3.
17. KNF. 2020. Completion report of recycling process investigation and exposure scenario development service for metal waste clearance.
18. KOPEC. 2000. Dose Assessment Report for clearance of Metals of KNF.
19. KNF. 2009. Dose Assessment Report for clearance of Metals.
20. KNF. 2013. Dose Assessment Report for clearance of Metals.
21. KINS. 2002. Developing radioactive waste de-regulation requirements. KINS/RR-144.
22. KAERI. 2004. State of the Technology for Melting and Recycling Radioactive Metal Waste. KAERI/AR-716/2004.