

Safety Evaluation of Clearance of Radioactive Metal Waste After Decommissioning of NPP

원전해체후 규제해제 대상 금속폐기물에 대한 자체처분 안전성 평가

Young-Hwan Choi^{1,*}, Jae-Hun Ko¹, Dong-Gyu Lee¹, Young-Hwan Hwang², Mi-Hyun Lee², Ji-Hoon Lee², and Sang-Bum Hong³

¹Korea Nuclear Engineering & Service Corp., 798-1, Yuseong-daero, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea

²Korea Hydro & Nuclear Power Central Research Institute, 70, Yuseong-daero 1312beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea

³Korea Atomic Energy Research Institute, 111, Daedeok-daero 989beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea

최영환^{1,*}, 고재훈¹, 이동규¹, 황영환², 이미현², 이지훈², 홍상범³

¹(주)코네스코퍼레이션, 대전광역시 유성구 유성대로 798-1

²한수원(주)중앙연구원, 대전광역시 유성구 유성대로1312번길 70

³한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

(Received January 28, 2020 / Revised May 11, 2020 / Approved July 6, 2020)

The Kori-Unit 1 nuclear power plant, which is scheduled to be decommissioned after permanent shutdown, is expected to generate large amounts of various types of radioactive waste during the decommissioning process. Among these, nuclear reactors and internal structures have high levels of radioactivity and the dismantled structure must have the proper size and weight on the primary side. During decommissioning, it is important to prepare an appropriate and efficient disposal method through analysis of the disposal status and the legal restrictions on wastes generated from the reactors and internal structures. Nuclear reactors and internal structures generate radioactive wastes of various levels, such as medium, very low, and clearance. A radiation evaluation indicates that wastes in the clearance level are generated in the reactor head and upper head insulation. In this study, a clearance waste safety evaluation was conducted using the RESRAD-RECYCLE code, which is a safety evaluation code, based on the activation evaluation results for the clearance level wastes. The clearance scenario for the target radioactive waste was selected and the maximum individual and collective exposure doses at the time of clearance were calculated to determine whether the clearance criteria limit prescribed by the Nuclear Safety Act was satisfied. The evaluation results indicated that the doses were significantly low, and the clearance criteria were satisfied. Based on the safety assessment results, an appropriate metal recycle and disposal method were suggested for clearance, which are the subject of the deregulation of internal structures of nuclear power plant.

Keywords: Decommissioning, RV/RVI, Exposure dose, Clearance wastes, RESRAD-RECYCLE

* Corresponding Author.

Young-Hwan Choi, Korea Nuclear Engineering & Service Corp., E-mail: sarn2000@kones21.com, Tel: +82-42-825-4903

ORCID

Young-Hwan Choi

<http://orcid.org/0000-0001-7450-9908>

Jae-Hun Ko

<http://orcid.org/0000-0002-6834-3697>

Dong-Gyu Lee

<http://orcid.org/0000-0002-7165-9334>

Young-Hwan Hwang

<http://orcid.org/0000-0002-6627-4763>

Mi-Hyun Lee

<http://orcid.org/0000-0002-4805-9250>

Ji-Hoon Lee

<http://orcid.org/0000-0002-8394-9777>

Sang-Bum Hong

<http://orcid.org/0000-0002-4424-7457>

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

영구정지후 해체가 계획된 고리 1호기 원자력발전소는 해체과정에서 다양한 종류의 방사성폐기물이 대량으로 발생될 것으로 예상되고 있으며, 이 중 원자로 및 내부구조물은 방사능 수치가 높으므로 1차측에서 적절한 크기와 중량으로 해체된다. 고리 1호기 해체시 원자로 및 내부구조물에서 발생하는 방사성폐기물에 대하여 기존 폐기물의 자체처분 현황 및 법적 제한 사항 분석 등을 통해 적절하고 효율적인 처분방법을 마련하는 것은 중요한 사안일 것으로 판단된다. 원자로 및 내부구조물에서 발생하는 폐기물은 중준위에서부터 자체처분까지 다양한 준위의 폐기물들이 발생되며, 이 중 자체처분 준위에 해당되는 폐기물은 방사화 평가 결과, 원자로 상부 헤드와 상부 헤드 인슐레이션에서 발생하는 것으로 나타났다. 본 논문에서는 방사화 평가 결과를 바탕으로 자체처분 준위에 해당되는 폐기물을 자체처분 평가 코드인 RESRAD-RECYCLE 코드를 사용하여 자체처분 안전성 평가를 수행하였다. 대상 폐기물의 자체처분 시나리오를 선정하고 자체처분시 개인 및 집단별 최대선량을 계산하여 국내 원자력안전법에서 규정하는 자체처분 기준 제한치의 만족 여부를 판단하였다. 평가 결과, 전체적으로 상당히 낮은 결과값을 보이며 기준 제한치를 만족하는 결과를 나타내었으며, 핵종별 자체처분 허용농도를 도출하였다.

중심단어: 원전 해체, 원자로 및 내부 구조물, 피폭선량, 규제해제 폐기물, RESRAD-RECYCLE

1. 서론

국내 원자력 발전은 1978년 고리 1호기의 상업운전을 시작으로 현재 고리, 월성, 한빛, 한울에서 총 24기가 운영되고 있다. 이 중 고리 1호기 원전은 2008년 원자력안전위원회의 계속 운전 승인을 받아 10년간 계속 운전을 실시하여 총 40년간의 운전을 끝내고 2017년 영구정지가 되었다. 원자력안전위원회는 영구정지에 들어간 고리 1호기를 즉시해체 하는 것으로 결정하였고, 약 2022년 이후부터는 본격적인 해체 단계에 들어갈 것으로 예상되고 있다[1,2]. 원전 해체시 발생하는 방사성폐기물량은 운영시에 발생하는 양보다 훨씬 많을 것으로 예상되고 있으므로 안전하고 효율적인 방법으로 처분되어야 한다. 국제 원자력안전기구인 IAEA에서 발표한 보고서에서는 1,000 MW 기준 가압경수로 원전 1기를 해체할 경우 발생하는 방사성폐기물량은 약 6,200톤으로 예상하고 있다[3]. 경제협력기구 산하 원자력기구(OECD/NEA)를 비롯한 선진국에서는 해체후 발생하는 방사성폐기물의 적절한 처분을 방사성폐기물 관리의 핵심기술로 보고 활발하게 연구를 진행하고 있다[4].

본 논문에서는 원자로 및 내부구조물의 구성품에서 발생한 폐기물 중 오염도가 낮아 규제해제 대상, 즉 자체처분이 가능한 폐기물을 선정하여 해당 폐기물의 자체처분 안전성 평가를 실시하였다. 두산중공업(주)에서 발표한 고리 1호기 원전 구조물의 방사화 평가 논문에 따르면 원자로 및

내부 구조물에서의 규제해제 대상 폐기물은 금속류인 원자로 압력용기 상부 헤드와 상부 헤드 인슐레이션에서 발생되며, 고리 1호기의 약 30년 운전후 연장 운전 당시 교체되어 사용되었다[5]. 해당 구성품에서 발생한 폐기물의 핵종별 비방사능($Bq \cdot g^{-1}$)을 본 안전성 평가에 적용하였으며, 금속류의 경우 처분방법 시나리오로서 가장 적절하게 적용될 수 있는 재활용 방법을 선정하였다[5]. 평가에 사용된 전산코드는 RESRAD-RECYCLE 프로그램을 사용하였으며, 해체후 고리 1호기의 원자로 압력용기 헤드 및 헤드 인슐레이션에서 발생하는 폐기물의 재활용처분에 따른 안전성평가를 통해 재활용 작업 시나리오별 피폭 대상에 대하여 예상 피폭선량을 계산하여 국내 원자력법령의 자체처분 제한치인 연간 개인선량 $10 \mu Sv$ 및 연간 집단선량 $1 man \cdot Sv$ 를 만족함을 입증하였다. 이러한 평가를 바탕으로 고리 1호기 해체후 원자로 및 내부구조물에서 발생하는 규제해제 대상인 자체처분 폐기물에 대한 효율적인 처분방안을 제시하고자 한다.

2. 국내 자체처분 요건

국내에서는 방사성폐기물의 분류 체계 적용과정에서 “처분 제한치 미만의 방사성폐기물”을 규제해제 대상 폐기물로 규정하고 규제해제 절차를 개정하였다. 규제해제의 기준이 되는 핵종별 농도 또는 선량은 IAEA의 안전지침서 RS-G-1.7을 도입하여 규정하고 있으며, 규제해제 폐기물은 원자력

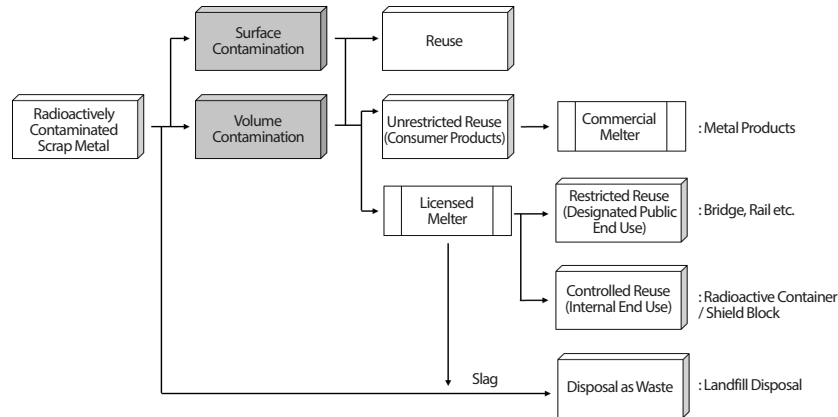


Fig. 1. A Conceptual Diagram of the Recycling Process.

안전법의 적용범위에서 제외하도록 규정하고 있다[1]. 원자력안전위원회 고시 제 2020-6호 “방사성폐기물 분류 및 자체 처분 기준에 관한 규정”에 따르면 자체처분 허용선량을 만족하는 것이 입증된 방사성폐기물과 동 고시 제107조 제3항 제 2호 “위원회가 정하여 고시하는 자체처분 허용기준 표”에 제시된 자체처분 허용농도 미만인 방사성폐기물은 자체처분이 가능하다고 규정하고 있다[6]. 자체처분 허용선량은 개인의 경우 연간 10 μSv미만이며, 집단의 경우 연간 1 man·Sv 미만이어야 한다. 또한, 혼합 핵종일 경우에는 동 고시에서 제시하는 허용농도 산출식으로 허용농도를 산출하여 해당값이 1 보다 작으면 자체처분이 가능하며, 이에 대한 식은 다음 수식 1로 나타낼 수 있다[6].

$$\sum_i \frac{C_i}{C_{L,i}} < 1 \quad (1)$$

여기에서, C_i : 방사성핵종 i 의 방사능농도($Bq \cdot g^{-1}$)

$C_{L,i}$: 방사성핵종 i 의 자체처분 허용농도($Bq \cdot g^{-1}$)

3. 자체처분 안전성 평가

3.1 평가 시나리오

고리 1호기 원자력발전소 해체시 발생하는 방사성폐기물 중 원자로 상부 헤드 및 상부 헤드 인슐레이션에서 발생하는 방사성폐기물은 금속폐기물이며, 준위 분류를 통해

규제해제 대상 즉, 자체처분 준위에 해당되는 폐기물로서 알맞은 처분 시나리오에 따라 처분이 이루어져야 한다. 자체처분 시나리오는 크게 매립, 소각, 재활용 처분 시나리오가 있으며 본 평가에서는 금속폐기물 처분 시나리오로서 가장 폭넓게 적용될 수 있는 재활용 시나리오를 선정하였다.

3.2 평가 코드 선정

자체처분시 피폭선량평가를 위해 자체처분 평가 코드인 RESRAD-RECYCLE을 사용하였다. RESRAD-RECYCLE 전산 코드는 규제해제 된 금속류(철재 및 알루미늄)의 재활용 및 재이용 과정에서 유발되는 방사선학적 영향을 평가하기 위한 목적으로 US DOE (Department of Energy)의 지원하에 ANL (Argonne National Laboratory)의 EAD (Environmental Assessment Division)에서 2003년에 개발되었다[7]. 방사성 금속폐기물의 이동과 유통에 따라 시나리오를 설정하여 작업자(Worker)와 사용자 즉, 일반인(Public)이 받는 피폭선량을 평가할 수 있다. 금속폐기물의 수집·운반·처리 작업자와 소비재 및 공공재를 이용하는 사용자에게 대하여 총 42개 시나리오와 54개 핵종에 대한 잠재적 피폭선량을 평가하도록 고려되었으며, Fig. 1은 전체적인 재활용 처분에 대한 절차를 나타낸다[7].

3.3 수학적 계산모델

RESRAD-RECYCLE 코드에 적용된 시나리오 도출, 평가

모델 및 입력인자 등은 IAEA 안전지침 Safety Series No.111-p-11에 제시된 방법론에 기초하고 있다[8]. 금속류를 재활용하는 과정에서 작업장이나 거주환경의 공기 중에 동반된 분진의 흡입을 통한 내부피폭경로를 고려할 수 있으며, RESRAD-RECYCLE 코드에서는 흡입에 의한 예탁유효등가선량을 다음과 같은 모델을 이용하여 평가한다[7,8].

$$CECD_{i,inh} = C_{i,v} \cdot IR \cdot AD \cdot ED \cdot DCF_{i,inh} \cdot F_{Decay,i} \cdot W_v \cdot RPF_i \cdot RF \cdot \frac{1}{MPF} \quad (2)$$

여기에서 $CECD_{i,inh}$: 흡입에 의한 예탁유효선량당량[Sv]
 $C_{i,v}$: 방사성핵종 i의 농도[Bq·g⁻¹]
 IR : 호흡률[m³·h⁻¹]
 AD : 공기중 분진동반계수[g·m⁻³]
 ED : 연간 피폭시간[h]
 $DCF_{i,inh}$: 흡입에 대한 선량환산인자[Sv·Bq⁻¹]
 $F_{Decay,i}$: 방사성핵종 i의 1년간 평균 붕괴계수[-]
 W_v : 오염금속의 혼합비[-]
 RPF : 호흡장구 방호계수[-]
 RF : 호흡 가능한 분진의 비율[-]

3.3.1 섭취에 따른 피폭방사선량 평가모델

철재류의 재활용 과정에 작업자 또는 일반인의 섭취에 따른 피폭경로는 손 같은 신체기관 또는 침적된 방사성물질이 부주의하게 경구로 유입되는 2차 섭취(Secondary Ingestion) 및 호흡이 가능한 크기(Respirable Size)를 초과하는 분진 입자의 호흡으로 분류할 수 있다. RESRAD-RECYCLE 코드에서는 섭취를 통한 방사선학적 영향을 예탁유효선량당량에 근거하여 다음과 같은 모델로 평가한다.

$$CECD_{i,ing} = C_{i,v} \cdot ED \cdot DCF_{i,ing} \cdot F_{Decay,i} \cdot W_v \cdot RPF_i \cdot \frac{1}{MPF} \times [IR \cdot AD \cdot PF \cdot (1 - RF) + IG_v] \quad (3)$$

여기에서 $CECD_{i,ing}$: 섭취에 의한 예탁유효선량당량[Sv]
 IG_v : 오염물질의 섭취율[g·h⁻¹]
 $DCF_{i,ing}$: 섭취에 대한 선량환산인자[Sv·Bq⁻¹]

해당 본 선량평가에서는 대부분의 시나리오에 대해서

US EPA (Environmental Protection Agency)의 위험도 평가 지침을 반영하여 오염물질의 섭취율을 6.25×10⁻³ g·h⁻¹로 적용한다. 소비재 시나리오 중 하나인 프라이팬 시나리오의 경우 섭취에 의한 영향을 평가하기 위하여 다음과 같이 오염물질의 섭취율을 별도로 정의하였으며, 프라이팬의 침식률은 IAEA Safety Series No. 111-p-1.1에서 제시한 기본값인 0.013 cm·y⁻¹를 준용한다[8].

$$IG_{pan} = A_{pan} \cdot CR \cdot \frac{\rho}{8760} \cdot 0.5 \quad (4)$$

여기에서 IG_{pan} : 프라이팬 시나리오내 오염물질 섭취율[g·h⁻¹]
 A_{pan} : 프라이팬 표면적[cm²]
 CR : 금속 침식률[cm·y⁻¹]
 ρ : 프라이팬 금속의 밀도[g·m⁻³]
 8,760 : 단위환산계수[g·y⁻¹]
 0.5 : 침식된 금속의 1/2를 섭취한다는 가정에 따른 보정계수[-]

3.3.2 외부피폭에 따른 피폭방사선량 평가모델

RESRAD-RECYCLE 코드에서는 작업자가 취급하는 고철, 일반인이 접촉하는 소비재 및 공공재에 의한 외부피폭을 평가하기 위해 해당 선원을 도출하고, 각 선원에 대한 외부피폭 선량환산인자(DCF)를 평가한다. 개별 선원의 기하학적 형태는 IAEA Safety Series No. 111-p-1.1의 방법론에 따라 원기둥 또는 반원기둥 형태로 고려하고 선원 종류에 따라 질량, 밀도, 두께, 반지름, 피폭지점까지의 거리, 피폭시간 등을 가정하여 각 외부 피폭과 상황에 따른 DCF를 도출하는 방법론을 채택하였다[7,8]. 외부피폭을 평가하기 위해 코드 내에서 고려하고 있는 평가모델은 다음과 같다.

$$EDE_{i,ext} = C_{i,v} \cdot ED \cdot F_{Decay,i} \cdot W_v \cdot \frac{RPF_i}{MPF} \cdot \sum_n DCF_{i,ext,n} \quad (5)$$

여기에서 $EDE_{i,ext}$: 방사성핵종 i에 의한 예탁유효선량당량[Sv]
 $DCF_{i,ext,n}$: 방사선원의 n번째 면에 의한 외부피폭 선량환산인자[Sv·h⁻¹ per Bq·g⁻¹]
 n : 방사선원의 n번째 면[Side]

Table 1. Calculated inventory of the reactor vessel top head and insulation of Kori unit 1

Reactor Vessel Top Head		Insulation (Top Head)	
Nuclide	Specific Activity	Nuclide	Specific Activity
Fe-55	3.64×10^{-2}	Fe-55	2.68×10^{-2}
Ni-63	4.24×10^{-4}	Ni-63	6.42×10^{-3}
Co-60	6.03×10^{-5}	Co-60	1.06×10^{-3}
Ni-59	3.88×10^{-6}	Ni-59	5.87×10^{-5}

[Unit : Bq·g⁻¹]

3.4 평가 입력사항

3.4.1 방사성 핵종별 농도

자체처분시 피폭선량 평가를 수행하기 위해 선정된 규제해제 대상 폐기물은 고리 1호기의 원자로 상부 헤드와 상부 헤드 인슐레이션에서 발생되는 폐기물이며, 운전 정지후 10년 동안 냉각된 시점을 기준으로 발생된 핵종별 비방사능(Bq·g⁻¹) 농도를 적용하였다[5]. 이러한 값은 자체처분 준위에 해당되는 농도이며, 고려된 핵종은 원자로 상부 헤드 총 40종, 상부 헤드 인슐레이션 총 41종이 혼합되어 고려된다[5]. 이 중 최소검출하한치 보다 낮거나 NUREG-3474에서 제시하는 원자로 압력용기 외벽에 존재 가능한 장반감기 핵종들을 고려하여 위해도가 높은 핵종들을 최종 선정할 후 평가에 반영하였으며, 이에 대한 핵종별 비방사능(Bq·g⁻¹) 농도를 Table 1에 정리하였다[9].

3.4.2 자체처분 대상물

고리 1호기의 원자로 압력용기는 저합금강 재질의 금속으로 이루어져 있으며, 반구형 하부 헤드가 달린 원통형의 하부 압력용기 부분과 몸통부분 그리고 분리 가능한 상부의 반구형 원자로 헤드 부분으로 구성되어 있다[10]. 상부 헤드 외부에는 제어봉 구동장치가 부착되어 있고, 하부 헤드에는 노심의 핵연료집합체 사이로 핵분열 감시 계측기가 지나가는 노즐이 부착되어 있다[11,12]. 측면에는 냉각재의 입구 노즐과 출구 노즐이 부착되어 있으며, 비상시 냉각수를 공급하는 노즐이 달려 있다. 또한, 용기 내부에는 서로 분리 가능한 내부구조물인 노심지지배럴과 상부안내구조물이 설치되어 있다. 이 구조물들은 핵연료 상하부를 지지하며 내부에는 핵연료 집합체를 장전할 수 있도록 하부지지 구조물과 노심

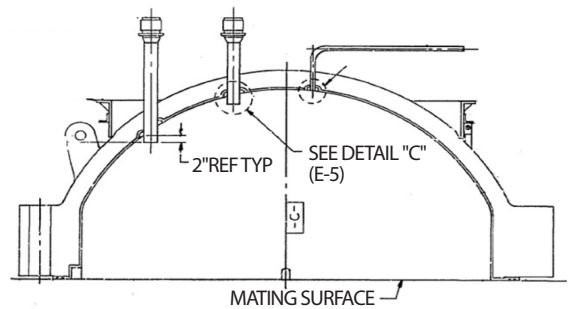


Fig. 2. Shape of Kori unit 1 reactor vessel top head.

Table 2. Specification of Recycle model weight

Specification	Reactor Vessel Top Head	Insulation (Top Head)
Weight	21.368	17.306

[Unit : ton]

슈라우드가 설치되어 있다. 용기 외부에는 노외 중성자 계측기가 부착되어 있고, 외벽은 인슐레이션이 감싸고 있다. 이 중 규제해제가 가능한 자체처분 대상물은 원자로 압력용기 상부 헤드 및 상부 헤드 인슐레이션에서 발생되는 폐기물이며, 자세한 상부 헤드의 형상은 Fig. 2와 같다[11].

평가 대상 금속폐기물의 각 구성품별 평가 대상의 중량은 원자로 압력용기 상부 헤드의 경우 21.368 ton이며, 상부 헤드 인슐레이션의 경우 17.306 ton이다[5]. 이러한 중량을 재활용 평가 입력인자에 반영하였으며, Table 2에 정리하였다[5].

3.4.3 시나리오별 평가방법

RESRAD-RECYCLE 전산코드는 금속의 재활용과정을 고철운반, 철강용융, 강괴운반, 상품가공, 생산품유통, 상품사용의 여섯 단계로 구분하여 고려하고 있다. 여기서 세부

시나리오로는 재활용을 목적으로 하는 고철을 발생처로부터 용융작업, 작업장으로의 운반, 용융작업을 통한 강괴 생산, 제품 제조 작업장으로의 강괴 운반, 제품 제조, 생산품 유통까지 총 다섯 단계의 과정으로 나누어진 작업자 시나리오와 생산품을 소비재, 공공재로 나누어 재활용되는 사용자 시나리오가 있으며, 여기에 장비 또는 건물을 재이용하는 시나리오와 방사선 차폐체나 방사성폐기물 용기로 재활용하는 제한적 재활용 시나리오가 포함된다기.

본 평가에서는 전체 시나리오 중에서 국내 상황을 고려하여 현실적으로 반영하기 어려운 시나리오를 선별적으로 제외함으로써 총 35종의 시나리오를 고려하였다. 특히 제한적 재활용 시나리오는 원자력이용시설 내에서 고철을 재활용하는 사례를 평가하기 위한 것으로 이 경우 피폭대상자는 “일반인”이 아닌 “방사선 작업 종사자” 이므로 규제해제와 관련하여 고려할 필요가 없는 것으로 판단하여 제외하였다. 또한, 보수적인 평가를 위해 고철의 재활용 과정에서 용융과정의 방사능 분배현상 이외에 청정금속과의 혼합에 의한 희석효과는 고려하지 않았다. 상기 고려사항들을 반영하여 세부 시나리오를 선정하였으며, 자세한 시나리오별 평가 방법은 다음과 같다[13].

3.4.3.1 고철 운반(Scrap Delivery)

- 절단 작업자(Scrap Cutter)

절단작업자는 발생한 고철을 절단하여 적재의 용이성과 효율성을 높이는 작업을 수행한다. 본 시나리오에서는 작업자의 외부피폭, 절단 작업 중 부유 입자들의 호흡, 절단 작업 중 손에 묻은 입자의 우연한 섭취로 인한 내부피폭 등을 고려하였으며, 3명의 작업자가 12시간 동안 작업한다고 가정하였다.

- 적하 작업자(Scrap Loader)

본 시나리오에서 작업자는 절단된 고철을 용융로로 운반하기 위해 트럭에 싣는 작업을 실시하며, 일반적인 적하 기계의 사용을 가정한다. 이 과정에서 작업자가 오염 고철로부터의 외부피폭, 부유 입자의 호흡, 손에 묻은 입자의 우연한 섭취로 인한 내부피폭을 당할 위험에 대해 고려하며, 2명의 작업자가 4시간 동안 작업한다고 가정하였다.

- 트럭 운전자(Scrap Truck Driver)

고철의 적하 작업 후 트럭 운전자는 고철을 발생지로부터

용융로로 운반한다. 이 시나리오에서 운전자는 고철과 직접적으로 접촉하지 않으므로 섭취에 의한 피폭경로는 고려하지 않는다. 또한 호흡에 의한 피폭 또한 운전석과 작업장의 격리에 의해 운전자가 고철로부터 발생한 입자로부터의 피폭이 거의 없을 것으로 예상되므로 대상에서 제외하였다. 따라서 외부피폭만 고려하며, 5명의 운전자가 4시간 동안 작업한다고 가정하였다.

3.4.3.2 철강 용융(Scrap Smelting)

- 고철 취급자(Scrap Processor)

용융로로 운반된 고철은 투입의 용이성을 위해 다시 절단 및 압축 작업을 거치게 된다. 그러므로 본 시나리오에서는 절단작업자 시나리오와 마찬가지로 고철로부터의 외부피폭, 절단 작업 중 부유 입자들의 호흡, 작업 중 손에 묻은 입자의 우연한 섭취로 인한 내부피폭 등을 고려하였으며, 3명의 작업자가 12시간 동안 작업한다고 가정하였다.

- 야적장 작업자(Smelter Yard Worker)

절단 작업을 거친 고철은 용융로에 투입되기 전 야적장에서 일정기간 보관하게 된다. 이 과정에서 외부피폭을 고려해야 한다. 또한 용융 설비 근처이므로 오염 고철의 입자가 공기 중에 존재할 가능성이 크므로 호흡 및 섭취에 의한 내부피폭도 고려되었으며, 10명의 작업자가 80시간 동안 피폭된다고 가정하였다.

- 용융로 투입 작업자(Smelter Loader)

야적장에 보관된 고철은 일정 기간 후 용융로에 투입된다. 이 과정에서 고철 운반 및 투입 작업을 실행하는 작업자의 외부피폭과 호흡 및 섭취로 인한 내부피폭을 고려하여야 하며, 5명의 작업자가 4시간 동안 작업한다고 가정하였다.

- 용융로 운전자(Furnace Operator)

용융로에서 고철이 용융되는 동안 용융로 운전자는 오염 고철로부터 외부피폭과 부유 입자의 호흡 및 섭취로 인한 내부피폭을 받으며, 3명의 운전자가 5시간 동안 작업한다고 가정하였다.

- 분진여과기 취급자(Baghouse Processor)

분진여과기 취급자는 분진여과기에 물을 뿌려 호흡으로

인한 분진의 섭취를 줄인 후 집진필터백을 수거한다. 수거된 필터백은 보관실 또는 취급장으로 이동된다. 취급되는 집진필터백의 숫자는 용융로의 처리율과 질량 분할계수(Mass Partitioning Factor)에 따라 달라지며, 분진의 양은 고철 처리량의 0.2~2% 값을 가진다. 용융과정에서의 질량분할 때문에 분진여과기에 수집된 분진에서의 핵종별 농도는 오염 고철에서의 핵종별 농도보다 높아질 가능성이 있다. 본 시나리오에서는 분진여과기취급자에게 외부피폭과 호흡 및 섭취로 인한 내부피폭이 고려되며, 1명의 작업자가 1시간 동안 작업한다고 가정하였다.

- 정련 작업자(Refinery Worker)

용융과정을 거친 금속은 품질을 높이기 위해 정련과정을 거치게 된다. 이 과정에서 금속의 손실은 없다고 가정하여 추가적인 질량이나 분할 계수의 필요성을 제거하였다. 이 시나리오에는 작업자의 외부피폭과 호흡 및 섭취로 인한 내부피폭을 모두 고려하며, 3명의 작업자가 5시간 동안 작업한다고 가정하였다.

- 강괴주조 작업자(Ingot Caster)

강괴주조 작업자 시나리오는 주조 작업에서의 작업자 피폭을 모사한다. 이 시나리오에서는 작업자의 외부피폭과 호흡 및 섭취로 인한 내부피폭을 모두 고려하며, 2명의 작업자가 2.5시간 동안 작업한다고 가정하였다.

- 소품주조 작업자(Small Objects Caster)

본 시나리오에서 소품주조는 용융로 근처에서 이루어진다고 가정하므로 작업자의 외부피폭과 호흡 및 섭취에 의한 내부피폭을 고려하며, 2명의 작업자가 50시간 동안 작업한다고 가정하였다.

- 슬래그 작업자(Slag Worker)

슬래그 작업자는 선적 및 하역 장비를 이용하여 용융로로부터 생성된 슬래그를 옮긴다. 이러한 슬래그들은 냉각 후 유리재질의 고체 금속이 되는데, 그 양은 용융과정에 따라 달라지며 일반적으로 철재의 경우 용융로 처리량의 약 10%가 슬래그로 된다. 이러한 질량 분할 때문에 슬래그에서의 핵종 농도 또한, 분진여과기에서와 같이 더 높아질 가능성이 있다. 이 시나리오에서는 작업자의 외부피폭과 호흡 및 섭취에

의한 내부피폭을 고려한다. 1명의 작업자가 25시간 동안 작업한다고 가정하였다.

3.4.3.3 강괴 운반(Ingot Delivery)

- 적하 작업자(Ingot Loader)

용융로로부터 정련 및 주조과정을 통해 생산된 강괴는 가공을 위해 공장으로 옮겨지게 된다. 적하 작업자는 이러한 강괴를 트럭으로 싣는 작업을 실시하는데, 절단, 압축 등의 작업을 실시하지 않으므로 오염 강괴의 입자 생성 가능성이 낮으므로 외부피폭만을 고려하며, 2명의 작업자가 2시간 동안 작업한다고 가정하였다.

- 트럭 운전자(Ingot Truck Driver)

트럭 운전자는 적재된 강괴를 가공 공장으로 옮긴다. 이 과정에서 운전자는 적재된 강괴로부터 외부피폭을 받으며, 5명의 운전자가 5시간 동안 운반한다고 가정하였다.

3.4.3.4 초기 가공(Initial Fabrication)

- 야적장 작업자(Storage Yard Worker)

트럭에 의해 운반된 강괴들은 취급 공장의 야적장에서 하역 및 보관 작업이 이루어진다. 이 시나리오에서는 오직 외부피폭만이 고려되며, 10명의 작업자가 40시간 동안 피폭된다고 가정하였다.

- 판재 제조자(Sheet Maker)

판재는 주조 및 압연 공정을 거쳐 생산된다. 이 시나리오에서는 판재제조자의 강괴로부터의 외부피폭과 호흡 및 섭취에 의한 내부피폭이 고려되며, 15명의 작업자가 1시간 동안 작업한다고 가정하였다.

- 코일 제조자(Coil Maker)

본 시나리오는 제조된 판재를 가공하여 코일을 만드는 과정을 모사한다. 이 때 코일 제조자는 판재로부터 외부피폭과 호흡 및 섭취에 의한 내부피폭을 받으며, 1명의 작업자가 1시간 동안 작업한다고 가정하였다.

3.4.3.5 최종 가공(Final Fabrication)

- 판재 취급자(Sheet Handler)

본 시나리오에서의 판재취급자는 판재를 가공하여 최종

생산품을 만들어내며, 이 과정에서 외부피폭만이 고려되며, 20명의 작업자가 1시간 동안 작업한다고 가정하였다.

- 코일 취급자(Coil Handler)

본 시나리오에서의 코일취급자는 코일을 가공하여 최종 생산품을 만들어내며, 이 과정에서 외부피폭만이 고려되며, 5명의 작업자가 80시간 동안 피폭 받는다고 가정하였다.

3.4.3.6 생산품 유통(Product Distribution)

- 적하 작업자(Product Loader)

본 시나리오에서 작업자는 최종 생산품을 트럭으로 적재 또는 하역하는 작업을 수행하므로 외부피폭을 고려하여 선량평가를 실시하며, 2명의 작업자가 20시간 동안 작업한다고 가정하였다.

- 트럭 운전자(Product Truck Driver)

트럭운전자는 실려 있는 생산품에 의해 운반기간 동안 외부피폭을 받으며, 5명의 운전자가 8시간 동안 작업한다고 가정하였다.

- 판재조립 작업자(Sheet Assembler)

운송된 판재는 판재조립작업자에 의해 다루어지며, 이 과정에서 작업자는 외부피폭을 받으며, 20명의 작업자가 20시간 동안 작업한다고 가정하였다.

- 공작소 작업자(Warehouse Worker)

공작소에서는 소비자를 위한 가공품을 만들며, 작업자는 외부피폭을 받는다. 5명의 작업자가 2,000시간 동안 피폭 받는다고 가정하였다.

3.4.3.7 소비재로 재활용(Consumer Product)

- 주차장(Parking Lot)

고철의 용융작업 중 생성되는 슬래그는 도로용 골재로 사용되기도 하는데, 이 때 발생하는 슬래그의 전량을 아스팔트 주차장을 만들 때 이용한다고 가정하였다. 개인이 하루에 주차장에서 소비하는 시간을 10분으로 가정하면 연간 피폭시간을 62시간으로 추정할 수 있다. 또한, 차량 이동 공간의 여유를 고려하여 약 500대가 주차 가능하며, 평균적으로 차량 당 2명이 타고 있다고 가정하면 사용자 수는 약

1,000명으로 추산할 수 있다.

- 방/사무실(Room/Office)

본 시나리오의 재활용 철재로 제조된 판재를 방이나 사무실의 네 벽을 짓는데 사용하는 것을 가정한다. 개인은 하루 8시간을 사무실에서 보내며, 일 년을 50주로 봤을 때 사무실에서의 연간 피폭량은 2,000시간으로 추정할 수 있다. 또한, 상기 방을 만드는데 평균적으로 940 kg의 판재가 필요하다고 가정하면 약 96개의 방을 만들 수 있고, 한 방당 4명의 인구를 수용한다고 가정하면 약 380명이 피폭 받는다고 추산할 수 있다.

- 가정용구(Appliance)

본 시나리오의 재활용 철재로 냉장고, 스토브, 식기세척기 등의 가정용구를 만드는 것을 가정한다. 고려 대상 가정용구 중 냉장고의 크기가 가장 크므로 가장 보수적인 사용이라 볼 수 있다. 그러므로 재활용 강괴 전체를 냉장고를 만드는데 사용하였다고 가정하여 피폭선량평가를 실시한다. 연간 피폭시간은 하루 평균 2시간 냉장고 근처에 있다고 가정하여 730시간으로 추산하였다. 평균적으로 냉장고 1대당 21 kg의 강괴가 사용된다고 가정하였을 때 100 ton의 고철로부터 약 4,300대의 냉장고를 제조할 수 있으며, 이를 통해 연간 피폭자를 4,300명으로 추산하였다.

- 자동차(Automobile)

본 시나리오의 재활용 철재로 승용차를 만들었을 경우 1년 이용기간 동안의 피폭을 가정하였다. 연간 피폭 시간은 하루 평균 2시간 차량을 이용한다고 가정하여 730시간으로 추산하였다. 만약 100 ton의 고철을 모두 자동차를 만드는데 이용하였을 시 차량 당 222 kg의 강괴가 사용된다고 가정하면 총 400대 정도의 자동차를 생산할 수 있다. 따라서 한 대당 평균 2명이 이용한다고 가정하면 피폭자를 800명으로 추산할 수 있다.

- 사무용 가구(Office Furniture)

재활용 철재를 이용하여 사무용가구를 만들었을 때 일 년 동안의 피폭선량을 계산한다. 대상 사무용가구는 책상, 책꽂이, 캐비닛이며 이 중 피폭 거리와 시간을 따져봤을 때 책상이 큰 피폭선량을 유발하는 보수적인 사용법이므로

전량 책상을 만드는 경우를 가정하였다. 하루 평균 8시간 책상에서 일한다고 가정하면 연간 2,000시간 동안 피폭 받는다고 추산할 수 있다. 또한, 책상 하나 당 13 kg의 강괴가 소모된다고 가정하면 100 ton의 고철로부터 약 7,000개의 책상을 만들 수 있으므로 피폭자수는 7,000명으로 추산 하였다.

- 가정용 가구(Home Furniture)

재활용 철재는 사무용뿐만 아니라 침대 스프링과 같은 가정용가구로도 활용이 가능하다. 연간 피폭 시간은 하루 평균 10시간동안 가구 근처에서 지낸다고 가정하여 3,650시간으로 추산하였다. 100 ton의 고철을 모두 가정용 가구 제조에 사용하였을 때 가구당 15 kg의 강괴가 사용된다고 가정하면 총 6,000개의 가구를 생산 가능하므로 피폭자 수는 6,000명으로 추산하였다.

- 프라이팬(Frying Pan)

프라이팬 시나리오는 재활용 철재를 사용하여 프라이팬을 만들어 1년 동안 사용하는 경우를 가정한다. 연간 피폭 시간은 하루 평균 0.5시간 프라이팬을 사용한다고 가정하여 180시간으로 추산하였다. 프라이팬을 만드는데 약 2.2 kg의 철재가 소모되므로 100 ton의 고철을 모두 프라이팬 제작에 사용하면 총 41,000개가 생산 가능하다. 한 프라이팬 당 한 사람의 피폭을 유발한다고 가정하면, 피폭자 수는 41,000명으로 추산할 수 있다. 프라이팬 시나리오는 타 사용자 시나리오와 달리 부식된 프라이팬 재료의 섭취에 의한 내부피폭을 고려한다. 이 때 부식율은 $0.13 \text{ mm}\cdot\text{yr}^{-1}$ 를 적용하였다.

3.4.3.8 공공재로 재활용(Public Product)

- 도로포장(Pavement)

발생 부산물인 슬래그를 이용하여 제조한 아스팔트로 도로포장을 했을 시 일 년 동안의 피폭선량을 계산한다. 이 때 슬래그의 질량 분할계수를 10%로 가정하면 총 100 ton의 고철로부터 용융과정 중 10 ton의 슬래그가 생성된다. 도로를 지나는 자동차의 평균 속도를 $50 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 로 가정하였을 때 37,000 cm를 지나는데 0.0074시간이 소모되므로 일 년 동안 하루에 한번씩 도로 위를 왕복하면 약 5.4시간이 걸리며, 보수적으로 6시간을 연간 피폭시간으로 설정하였다. 또한 시간당 차량 통행량을 470대로 가정하고 평균적으로 2명이

한 차에 탑승한다고 가정하여 연간 피폭자 수를 약 8,200,000명으로 추산하였다.

- 건물(철근) (Building with Rebars)

본 시나리오에서는 재활용 철재를 사용하여 제조된 철근을 건축에 사용할 때 일 년간의 피폭선량을 평가한다. 개인은 하루 평균 8시간 방에서 근무하며, 연간 50주씩 근무한다고 가정하여 연간 피폭시간을 2,000시간으로 추산하였다. 또한 한 개의 방을 건축하는데 약 2.2 ton의 철근이 소모된다고 가정하여 100 ton의 고철로부터 약 41개의 방을 만들 수 있고, 한 방당 약 4명이 근무한다고 가정하여 피폭자 수를 164명으로 추산하였다.

- 교량(Bridge)

본 시나리오는 재활용 철재가 교량의 보강 빔으로 사용되는 경우를 모사한다. 도로포장 시나리오와 동일한 방법으로 교량을 통과하는 차량의 평균 속도를 $50 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 로 가정하였을 시 10,000 cm를 통과하는 데 0.002시간이 소모되므로 1년을 50주의 근무기간으로 나누어 하루에 한번씩 왕복한다고 가정하면 연간 약 1시간의 시간을 해당 교량 위에서 지내게 되므로 이를 연간 피폭 시간으로 설정하였다. 또한 시간당 차량 통행량을 470대로 가정하고 차량 당 평균적으로 2명의 탑승자를 가정하여 연간 피폭자 수를 8,200,000명으로 추산하였다.

3.4.3.9 재이용(Reuse Product)

- 장비(Tool Reuse)

본 시나리오는 표면오염 장비로 사용하는 모델을 제시하며, 장비는 1 m^2 의 총 표면적을 가진다고 가정한다. 장비 재이용자는 한사람이 하루 8시간, 연간 총 2,000시간을 소비한다고 가정한다. 흡입과 섭취에 의한 선량이 피폭경로에 포함되며, 시간당 건물 통풍율은 기본값으로 적용한다.

- 건물(Building Reuse)

본 시나리오는 표면오염된 건물로 사용하는 모델을 제시하며, 4명의 사람이 방안에서 하루에 8시간 연간 총 2,000시간을 소비하고 있다고 가정하였다. 흡입과 섭취에 의한 선량이 피폭경로에 포함되고 시간당 건물 통풍율은 기본값을 적용한다.

Table 3. Exposure dose rates result of recycle assessment

Classification		RV Top Head			RV Top Head [Insulation]		
Scenarios	Individual	Collective	Cumulative	Individual	Collective	Cumulative	
Unit	$\mu\text{Sv}\cdot\text{yr}^{-1}$	$\text{man}\cdot\text{Sv}\cdot\text{yr}^{-1}$	$\text{man}\cdot\text{Sv}$	$\mu\text{Sv}\cdot\text{yr}^{-1}$	$\text{man}\cdot\text{Sv}\cdot\text{yr}^{-1}$	$\text{man}\cdot\text{Sv}$	
Scrap Delivery	Scrap Cutter	4.69×10^{-7}	1.41×10^{-12}	1.41×10^{-12}	5.40×10^{-6}	1.62×10^{-11}	1.62×10^{-11}
	Scrap Loader	5.63×10^{-7}	1.13×10^{-12}	1.13×10^{-12}	7.62×10^{-6}	1.52×10^{-11}	1.52×10^{-11}
	Scrap Truck Driver	4.66×10^{-7}	2.33×10^{-12}	2.33×10^{-12}	6.66×10^{-6}	3.33×10^{-11}	3.33×10^{-11}
Scrap Smelting	Scrap Processor	4.68×10^{-7}	1.40×10^{-12}	1.40×10^{-12}	5.50×10^{-6}	1.65×10^{-11}	1.65×10^{-11}
	Smelter Yard Worker	4.02×10^{-6}	4.02×10^{-11}	4.02×10^{-11}	4.96×10^{-5}	4.96×10^{-10}	4.96×10^{-10}
	Smelter Loader	6.73×10^{-7}	3.37×10^{-12}	3.37×10^{-12}	9.14×10^{-6}	4.57×10^{-11}	4.57×10^{-11}
	Furnace Operator	2.33×10^{-6}	6.98×10^{-12}	6.98×10^{-12}	3.27×10^{-5}	9.80×10^{-11}	9.80×10^{-11}
	Baghouse Processor	1.10×10^{-7}	1.10×10^{-13}	1.10×10^{-13}	1.46×10^{-6}	1.46×10^{-12}	1.46×10^{-12}
	Refinery Worker	2.55×10^{-6}	7.66×10^{-12}	7.66×10^{-12}	3.59×10^{-5}	1.08×10^{-10}	1.08×10^{-10}
	Ingot Caster	1.27×10^{-6}	2.55×10^{-12}	2.55×10^{-12}	1.79×10^{-5}	3.58×10^{-11}	3.58×10^{-11}
	Small Objects Caster	5.81×10^{-5}	1.16×10^{-10}	1.16×10^{-10}	8.25×10^{-4}	1.65×10^{-9}	1.65×10^{-9}
	Slag Worker	4.42×10^{-8}	4.42×10^{-14}	4.42×10^{-14}	2.64×10^{-8}	2.64×10^{-14}	2.64×10^{-14}
Ingot Delivery	Ingot Loader	6.74×10^{-7}	1.35×10^{-12}	1.35×10^{-12}	9.64×10^{-6}	1.93×10^{-11}	1.93×10^{-11}
	Ingot Truck Driver	1.49×10^{-6}	7.47×10^{-12}	7.47×10^{-12}	2.14×10^{-5}	1.07×10^{-10}	1.07×10^{-10}
Initial Fabrication	Storage Yard Worker	2.45×10^{-6}	2.45×10^{-11}	2.45×10^{-11}	3.51×10^{-5}	3.51×10^{-10}	3.51×10^{-10}
	Sheet Maker	9.35×10^{-8}	1.40×10^{-12}	1.40×10^{-12}	1.23×10^{-6}	1.85×10^{-11}	1.85×10^{-11}
	Coil Maker	4.27×10^{-7}	4.27×10^{-13}	4.27×10^{-13}	6.01×10^{-6}	6.01×10^{-12}	6.01×10^{-12}
Final Fabrication	Sheet Handler	8.50×10^{-8}	1.70×10^{-12}	1.70×10^{-12}	1.22×10^{-6}	2.43×10^{-11}	2.43×10^{-11}
	Coil Handler	3.35×10^{-5}	1.68×10^{-10}	1.68×10^{-10}	4.80×10^{-4}	2.40×10^{-9}	2.40×10^{-9}
Product Distribution	Product Loader	6.74×10^{-6}	1.35×10^{-11}	1.35×10^{-11}	9.64×10^{-5}	1.93×10^{-10}	1.93×10^{-10}
	Product Truck Driver	2.39×10^{-6}	1.19×10^{-11}	1.19×10^{-11}	3.42×10^{-5}	1.71×10^{-10}	1.71×10^{-10}
	Sheet Assembler	1.70×10^{-6}	3.40×10^{-11}	3.40×10^{-11}	2.43×10^{-5}	4.86×10^{-10}	4.86×10^{-10}
	Warehouse Worker	4.49×10^{-5}	2.25×10^{-10}	2.25×10^{-10}	6.43×10^{-4}	3.21×10^{-9}	3.21×10^{-9}
Consumer Product	Parking Lot	0.00×10^0	0.00×10^0	0.00×10^0	0.00×10^0	0.00×10^0	0.00×10^0
	Room/Office	3.24×10^{-3}	2.63×10^{-7}	2.09×10^{-6}	5.73×10^{-2}	3.77×10^{-6}	2.98×10^{-5}
	Appliance	8.76×10^{-5}	8.05×10^{-8}	4.77×10^{-7}	1.55×10^{-3}	1.15×10^{-6}	6.82×10^{-6}
	Automobile	2.62×10^{-3}	4.48×10^{-7}	2.66×10^{-6}	4.63×10^{-2}	6.42×10^{-6}	3.80×10^{-5}

Consumer Product	Office Furniture	1.51×10^{-3}	2.26×10^{-6}	1.34×10^{-5}	2.67×10^{-2}	3.23×10^{-5}	1.91×10^{-4}
	Home Furniture	2.84×10^{-3}	3.65×10^{-6}	2.16×10^{-5}	5.02×10^{-2}	5.22×10^{-5}	3.09×10^{-4}
	Frying Pan	6.10×10^{-5}	5.35×10^{-7}	3.10×10^{-6}	1.01×10^{-3}	7.14×10^{-6}	4.23×10^{-5}
Public Product	Pavement	0.00×10^0	0.00×10^0	0.00×10^0	0.00×10^0	0.00×10^0	0.00×10^0
	Building with Rebars	8.45×10^{-4}	2.96×10^{-8}	2.35×10^{-7}	1.49×10^{-2}	4.24×10^{-7}	3.36×10^{-6}
	Bridge	1.37×10^{-5}	4.79×10^{-8}	3.80×10^{-7}	2.41×10^{-4}	6.85×10^{-7}	5.43×10^{-6}
Reuse Product	Tool Reuse	1.20×10^{-2}	1.20×10^{-8}	5.22×10^{-8}	3.39×10^{-2}	3.39×10^{-8}	1.94×10^{-7}
	Building Reuse	1.35×10^{-2}	5.41×10^{-8}	2.88×10^{-7}	5.81×10^{-2}	2.33×10^{-7}	1.89×10^{-6}
Total		3.69×10^{-2}	7.38×10^{-6}	4.43×10^{-5}	2.93×10^{-1}	1.04×10^{-4}	6.28×10^{-4}

Table 4. Comparison of calculation results and acceptance criteria

Classification	The specific activity for calculation [Bq·g ⁻¹]	The calculated individual dose [μSv·yr ⁻¹]	The specific activity for limit [Bq·g ⁻¹]
RV Top Head	6.03×10^{-5}	3.24×10^{-3}	1.86×10^{-1}
RV Top Head [Insulation]	1.06×10^{-3}	5.73×10^{-2}	1.85×10^{-1}
Acceptance criteria [μSv·yr ⁻¹]	1.00×10^1	1.00×10^1	1.00×10^1

3.5 평가 결과

RESRAD-RECYCLE 코드를 이용한 대상 구성품 폐기물별 피폭 선량평가 결과를 Table 3에 정리하였다. 평가 시 고려된 핵종은 Fe-55, Ni-63, Co-60, Ni-59로서 원자로 상부 헤드 및 상부 헤드 인슐레이션 동일하며, 평가 결과, 각 구성품별 피폭 대상 시나리오 모두 전체적으로 상당히 낮은 결과값을 나타내었다. 이러한 결과는 평가 대상물이 극저준위 폐기물 중에서도 규제해제 대상에 해당하기 때문인 것으로 보인다. 먼저 원자로 압력용기 상부헤드에서 발생된 폐기물의 경우 개인의 최대 선량은 재이용 시나리오로서 건물로 사용할 경우의 피폭선량인 $1.35 \times 10^{-2} \mu\text{Sv}\cdot\text{yr}^{-1}$ 로 나타났으며, 집단 최대선량은 가정용 가구로 재활용될 때의 집단 선량인 $3.65 \times 10^{-6} \text{man}\cdot\text{Sv}\cdot\text{yr}^{-1}$ 인 것으로 나타났다. 상부 헤드 인슐레이션에서 발생된 폐기물에서의 개인 최대선량은 상부 헤드와 동일하게 재이용 시나리오로서 건물로 사용할 경우의 피폭선량인 $5.81 \times 10^{-2} \mu\text{Sv}\cdot\text{yr}^{-1}$ 로 나타났고, 집단 최대선량은 가정용 가구로 재활용될 때의 집단선량인 5.22×10^{-5}

$\text{man}\cdot\text{Sv}\cdot\text{yr}^{-1}$ 로 나타났다. 이러한 결과들은 앞서 기술한 자체처분 기준 제한치인 연간 개인선량 10 μSv 및 집단선량 1 man·Sv 미만을 모두 만족하므로 본 평가에서 고려된 원자로 상부 헤드 및 상부 헤드 인슐레이션에서 발생하는 폐기물은 충분히 재활용 시나리오로서 처분이 가능할 것으로 판단된다.

결과에서도 확인할 수 있듯이 각 평가 결과값은 자체처분 기준 제한선량 보다 훨씬 낮은 값을 나타낸다. 따라서 결과에 대한 효율성을 높이기 위해 개인선량에 대하여 평가 시 고려된 핵종들의 방사능 농도에 대한 결과값 중 최대선량을 기준으로 역산하여 자체처분 기준 제한선량을 초과하지 않는 범위내의 최대 허용 농도를 추가로 산출하였다[14]. 고려된 핵종 중 최대선량은 원자로 상부 헤드 및 상부 헤드 인슐레이션 동일하게 Co-60핵종에서 발생되며, 최대 허용 농도는 원자로 상부 헤드의 경우 $1.86 \times 10^{-1} \text{Bq}\cdot\text{g}^{-1}$ 미만, 상부 헤드 인슐레이션의 경우 $1.85 \times 10^{-1} \text{Bq}\cdot\text{g}^{-1}$ 미만이어야 자체처분 기준 제한선량인 연간 10 μSv를 만족할 수 있는 것으로 나타났다. Table 4에 계산에 적용된 방사능 농도 및 선량을 역산하여 산출된 최대 허용 방사능 농도와 비교하여 정리하였다.

4. 결론

안전하고 효율적인 원전 해체폐기물의 처분 방법을 제시하기 위해 고리 1호기 원자력발전소의 해체 과정에서 발생하는 폐기물 중 원자로 압력용기 헤드 및 헤드 인슐레이션의 자체처분 준위에 해당하는 폐기물을 재활용하는 상황에 대해서 고려될 수 있는 시나리오들을 선정하여 각각의 개인 및 집단 피폭선량을 도출하여 자체처분 안전성을 평가하였다. RESRAD-RECYCLE 코드를 이용하여 재활용 세부 시나리오별 입력인자를 적용하여 개인 및 집단 피폭선량을 계산하였으며, 이에 대한 결과를 분석하여 국내 원자력법령에서 규정하는 자체처분 기준 제한치를 만족하는지 여부를 판단하였다. 그 결과, 자체처분 기준 제한치를 만족하여 대상 폐기물은 재활용으로의 처분이 적절하다는 결과를 도출해내었다. 또한, 도출해낸 결과를 토대로 기준 제한치를 초과하지 않는 범위내의 방사능 농도를 산출해내었다. 본 평가에서 수행한 RESRAD-RECYCLE코드의 시나리오별 입력인자는 국내 실정과 일부 상이한 부분으로 인해 보수적으로 평가됨을 알 수 있다. 향후 국내 조건에 맞는 합리적인 입력인자를 구축하여 보수성을 재고한 후 평가를 수행한다면 해체 시 발생하는 금속폐기물의 자체처분 가능여부를 더욱 효율적이고 정확하게 평가할 수 있을 것으로 사료된다.

고리 1호기 원자력발전소 해체 시 발생하는 원자로 및 내부구조물 폐기물 중에서 자체처분 준위에 해당되는 방사성 폐기물을 효율적으로 처분하기 위해서는 대량으로 발생하는 폐기물을 단기간에 얼마만큼 자체처분 할 수 있는가를 사전에 확인할 필요가 있다. 국내에서는 방사성금속폐기물의 재활용 처분 시 작업자에 대한 규정 외에 처리방법에 대한 명확한 규정이 아직 정해지지 않았다. 이에 따라, 국내기준에 알맞은 재활용 처분기준을 명확화하기 위해 지속적으로 연구할 필요가 있을 것으로 판단되며, 본 평가의 결과가 향후 원전 해체시 발생될 방사성금속폐기물 재활용 처분시 참고자료로 활용될 것으로 기대한다.

Acknowledgement

본 연구 및 논문은 산업통상자원부가 주관하는 산업기술혁신사업의 방폐물관리 기술개발과제(20161510300430) 일환으로 수행되었으며, 한국원자력연구원 해체기술연구부의

지원으로 작성되었습니다.

REFERENCES

- [1] J.S. Song, D.M. Kim, and S.H. Lee, "A Study on the Application of Standards for Clearance of Metal Waste Generated During the Decommissioning of NPP by Using the RESRAD-RECYCLE", *J. Nucl. Fuel Cycle Waste Technol.*, 14(4), 305-320 (2016).
- [2] Korea Ministry of Trade Industry and Energy, Apr. 17 2019. "Nuclear power plant Decommissioning Industry Development Strategy", MOTIE Report, 19-9-0, Accessed Aug. 5 2020. Available from: https://www.motie.go.kr/common/download.do?fid=bbs&bbs_cd_n=81&bbs_seq_n=161554&file_seq_n=3.
- [3] International Atomic Energy Agency, Managing Low Radioactivity Material from the Decommissioning of Nuclear Facilities, IAEA Technical Reports Series No. 462, 10-13 (2008).
- [4] Y.J. Son, "Radiation dose and reduction plan of workers in decontamination of large metal radioactive waste of Kori Unit 1", Master Dissertation, Pusan University, Busan (2019).
- [5] H.D. Sohn, K.S. Park, H.W. Kim, C.W. Kim, Y.H. Hwang, and J.Y. Yoon, "The Study for Activation Evaluation on Activated Structures in Nuclear Power Plant with 40 Years Operation History", *Ann. Nucl. Energy*, 141, 107305 (2020).
- [6] Korea Nuclear Safety Commission, Regulation on Radioactive Waste Classification and Self-disposal Standard, Notice No. 2020-6 (2020).
- [7] J.J. Cheng, B. Kassas, C. Yu, D. Lepoire, J. Amish, E.S. Dovel, S.Y. Chen, W.A. Williams, A. Wallo, and H. Peterson, RESRAD-RECYCLE : A Computer Model For Analyzing the Radiological Doses and Risks Resulting from the Recycling of Radioactive Scrap Metal and the Reuse of Surface-Contaminated Material and Equipment, Argonne National Laboratory, 23-52, ANL/EAD-3 (2000).

- [8] International Atomic Energy Agency, Application of exemption principles to the recycle and reuse of Material from Nuclear Facilities, IAEA Safety Series No. 111-P-1.1 (1992).
- [9] J.C. Evans, E.L. Lepel, R.W. Samnders, C.L. Wikerson, W. Siker, C.W. Thomas, K.H. Abel, and D.R. Robertson, Long-lived activation products in reactor materials, United States Nuclear Regulatory Commission Report, NUREG/CR-3474 (1984).
- [10] B.S. Lee, H.J. Lee, M.C. Kang, J.H. Yoon, S.D. Park, K.B. Kim, M.W. Kim, B.C. Kim, C.S. Yoo, and J.H. Hong, TLA Evaluation Report of Irradiation Embrittlement of Reactor Pressure Vessel Related to the Application for Continued Operating Licenses of KORI Nuclear Unit-1, Korea Atomic Energy Research Institute Report, KAERI/CR-238/2006 (2006).
- [11] Y.J. Choi, S.C. Lee, and C.L. Kim, "Evaluation on Radioactive Waste Disposal Amount of Kori Unit 1 Reactor Vessel Considering Cutting and Packaging Methods", J. Nucl. Fuel Cycle Waste Technol., 14(2), 123-134 (2016).
- [12] Materials Data Portal for Nuclear Application, Oct. 12 2015. "Main Structure of Reactor Vessel", Korea Atomic Energy Research Institute. Accessed Aug. 5, 2020. Available from: <http://mdportal.kaeri.re.kr/d20150025/>.
- [13] K.W. Lee, K.S. Jeong, and G.N. Kim, Development of Volume Reduction and Self-Disposal Technology for Large Metal Wastes including Steam Generator produced from the Nuclear Power Plants, Korea Atomic Energy Research Institute Report, KAERI/RR-3478 (2010).
- [14] S.-B. Hong, B.J. Lee, and W.S. Jung, "A Study on the Clearance Level for the Metal Waste from the KRR-1 & 2 Decommissioning", Proc. of the Korean Radioactive Waste Society, Vol. 1, 660-664, November 27-29, 2003, Jeju.