

원전해체후 규제해제 콘크리트 방사성 폐기물의 자체처분을 위한 안전성 평가

최영환[†] · 고재훈 · 이동규 · 김해웅* · 박광수* · 손희동*

(주)코네스코퍼레이션, *두산중공업(주)

(2020년 2월 12일 접수, 2020년 2월 27일 수정, 2020년 2월 28일 채택)

Safety Assessment for the self-disposal plan of clearance radioactive waste after nuclear power plant decommissioning

YoungHwan Choi[†] · JaeHun Ko · DongGyu Lee · HaeWoong Kim* · KwangSoo Park* · HeeDong Sohn*

Korea Nuclear Engineering & Service Corporation, *Doosan Heavy Industries & Construction

(Received 12 February 2020, Revised 27 February 2020, Accepted 28 February 2020)

요 약

영구정지 후 해체가 계획된 고리 1호기 원자력발전소는 해체 과정에서 다양한 종류의 방사성폐기물이 대량으로 발생할 것으로 예상되고 있다. 이 중 가장 많은 발생량을 차지할 것으로 예상되는 콘크리트 방사성폐기물에 대하여 기존 폐기물의 처분 현황 및 법적 제한사항등을 분석하여 적절하고 효율적인 처분방법을 마련하는 것은 중요한 사안일 것으로 판단된다. 콘크리트 방사성폐기물은 다양한 준위의 폐기물들이며, 이 중 규제해제 준위에 해당되어 자체처분이 가능한 폐기물은 바이오실드 콘크리트이다. 본 논문에서는 방사화 평가 결과를 바탕으로 자체처분이 가능한 폐기물을 자체처분 평가 코드인 RESRAD 코드 프로그램을 이용하여 자체처분 안전성 평가를 수행하였다. 대상 폐기물의 자체처분 시나리오를 선정하고 자체처분시 개인별 피폭선량을 계산하여 국내 원자력안전법에서 규정하는 자체처분 기준 제한치의 만족 여부를 판단하였다. 평가 결과, 전체적으로 상당히 낮은 결과 값을 보이며 기준 제한치를 만족하는 결과를 나타내었다. 이러한 자체처분 안전성 평가 결과를 바탕으로 규제해제 대상으로서 자체처분 가능한 바이오실드 콘크리트 폐기물에 대한 적절한 처분방법을 제시하였다.

주요어 : 원전 해체, 방사성 바이오실드 콘크리트, RESRAD, 피폭선량, 규제해제 폐기물

Abstract - The Kori-Unit 1 nuclear power plant, which is scheduled for decommissioning after permanent shutdown, is expected to generate a large amount of various types of radioactive waste during decommissioning process. For concrete radioactive waste, which is expected to occupy the most amount, it is important to analyze the current waste disposal status and legal limitations and to prepare an appropriate and efficient disposal method. Concrete radioactive waste is waste of various levels, of which the clearance level is bioshield concrete. In this paper, clearance radioactive waste safety evaluation was performed using the RESRAD code, which is a safety evaluation code, based on the activation evaluation results for the wastes with the clearance level. The clearance scenario of the target radioactive waste was selected and the individual's exposure dose was calculated at the time of clearance to determine whether the clearance criteria limit prescribed by the Nuclear Safety Act was satisfied. As a result of the evaluation, the results showed significantly lower results and satisfied the criteria value. Based on the results of this clearance safety assessment, the appropriate disposal method for bioshield concrete, which are the clearance wastes of subject of deregulation, was suggested.

Key words : Decommissioning, Bioshield concrete, RESRAD, Exposure dose, Clearance wastes

[†]To whom corresponding should be addressed.

Tel : +042-825-4903 E-mail : sarn2000@kones21.com

1. 서론

고리 1호기 원자력발전소는 국내 전력 공급을 위해 1978년 처음 상업운전을 시작하여 2008년 원자력안전위원회의 계속운전 승인을 받아 10년간 계속 운전을 실시하였고, 총 40년간의 운전을 마치고 2017년 영구정지가 되었다. 원자력진흥위원회는 영구정지가 들어간 고리 1호기 원전을 즉시해체 하는 것으로 결정하였고, 약 2022년 이후부터는 본격적인 해체 단계에 들어갈 것으로 예상되고 있다.[1][2] 원전 해체시 발생하는 방사성폐기물의 물량은 원전 운영시에 발생하는 물량보다 훨씬 많을 것으로 예상되고 있으므로 이는 안전하고 효율적인 방법으로 처분이 이루어져야 할 것으로 예상하고 있다. 국제 원자력안전기구인 IAEA에서 발표한 보고 자료에서는 1,000 MW 기준 가압경수로 원전 1기를 해체할 경우 발생하는 방사성폐기물량은 약 6,200 톤으로 예상하고 있으며, 국제 경제협력 개발기구인 OECD/NEA를 비롯한 주요 선진국에서는 원전 해체후 발생하는 방사성폐기물의 적절한 처분을 방사성폐기물 관리의 핵심기술로 보고 활발하게 연구를 진행하고 있다[3]. 원전 해체과정에서 발생하는 방사성 폐기물은 폐수지, 폐필터, 원자로 압력용기 내부구조물과 같은 중준위 폐기물 및 잡고체, 콘크리트류 및 금속류 등의 다양한 유형의 저준위, 극저준위 폐기물이 될 것으로 예상하고 있다. 두산중공업(주)에서 발표한 고리 1호기 해체시 발생 폐기물 방사화 평가 논문에 따르면 고리 1호기의 해체과정에서 발생하는 콘크리트 조각 및 스키프링 콘크리트 폐기물의 경우 저준위 및 극저준위의 방사성폐기물로 분류하고 있다. 이 중 규제해제 대상에 해당되는 폐기물은 바이오실드 콘크리트에서 발생되며, 해당 폐기물은 금속류를 제외하고 가장 많은 양을 차지하는 것으로 발표하고 있다[4]. 자체처분 안전성 평가를 위해 해당 콘크리트 폐기물에서 발생된 핵종별 비방사능 (Bq/g)을 본 평가에서도 적용하였으며, 콘크리트 해체폐기물은 폐수지 및 농축폐액과 같은 운영폐기물 및 금속류 해체폐기물에 비하여 오염도가 상당히 낮고, 대량의 발생량을 보이는 것으로 나타났다. 이러한 콘크리트 폐기물을 적절하게 처분하기 위한 방안이 2009년에 원자력연구원의 연구로 폐로사업을 통해 연구되기는 하였으나, 상업용 원전 해체의 폐기물 적용에 대해서는 그 적합성 여부를 판단할 필요가 있다. 처분방법 시나리오는 규제해제 대상 폐기물에 대해 적절한 시나리오로서 가장 폭넓게 적용될 수 있는 매립(landfill) 방법을 선정하였으며, 평가에 사용된 전산코드는 RESRAD Ver. 7.2를 사용하였다. 해체후 바이오실드 콘크리트 폐기물의 매립처분에 따른 안전성평가를 통해 매립장

작업자와 매립장 폐쇄후 거주하게 될 일반인을 대상으로 예상 피폭선량을 계산하여 국내 원자력법령의 자체처분 제한치인 연간 개인선량 10 μSv를 만족함을 입증하였다. 이러한 평가를 바탕으로 해체 후 바이오실드 콘크리트의 자체처분 폐기물에 대한 적절하고 효율적인 처분방법을 제시하고자 한다.

2. 자체처분 현황

국내 방사성폐기물의 자체처분은 한국원자력안전기술원에 자체처분 계획서가 제출되면 자체처분 폐기물 처분에 대한 심사 및 허가를 실시한다. 허가가 승인되면 사업자가 자체적으로 매립, 소각, 재활용 등의 방법으로 해당 폐기물의 처분을 수행할 수 있으며, 전반적인 극저준위 및 규제해제 방사성폐기물의 분류 및 처분 절차를 Fig 1에 나타내었다.

1994년 한전 원자력연료 주식회사에서 자체적으로 NaF의 자체처분을 처음 시행한 이후로 1995년부터 국내 원전에서도 발생하는 극저준위 폐기물에 대하여 규제해제 준위의 자체처분 가능한 폐기물일 경우 자체처분을 시행하고 있으며, 아직 국내에서는 해체가 완료된 원전은 존재하지 않기 때문에 해체 폐기물에 대한 처분 사례는 없으나 원전 운영 및 유지 보수 중에 발생한 자체처분 대상 폐기물을 각 사업소별로 상황에 따라 발생처, 핵종재고량, 처분 시나리오 등을 고려하여 적합성을 심사하여 알맞은 자체 처분방법 분류 및 승인을 실시하고 있다. 특히 콘크리트 폐기물의 경우에는 주로 소외에 매립을 통한 방법을 이용하여 처분하였다. Table 1은

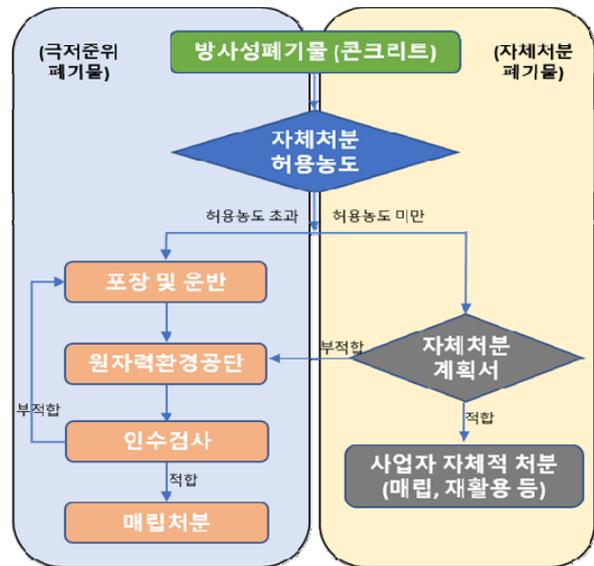


Fig 1. Disposal procedure for very low level and clearance level radioactive waste

Table 1. Self-disposal of radioactive waste of KHNP

신청일	사업소	폐기물 종류	처분방법	신청수량 [Kg 또는 L]	승인수량 [Kg 또는 L]
2002.10	고리 1,2호기	콘크리트	소외매립	144,900	144,900
2002.12	월성 1,2호기	콘크리트	소외매립	525,000	525,000
2004.05	고리 1,2호기	콘크리트	소외매립	250,226	250,226

2090년까지 국내 원전해체폐기물(616,000드럼) 준위별 분율, [%]

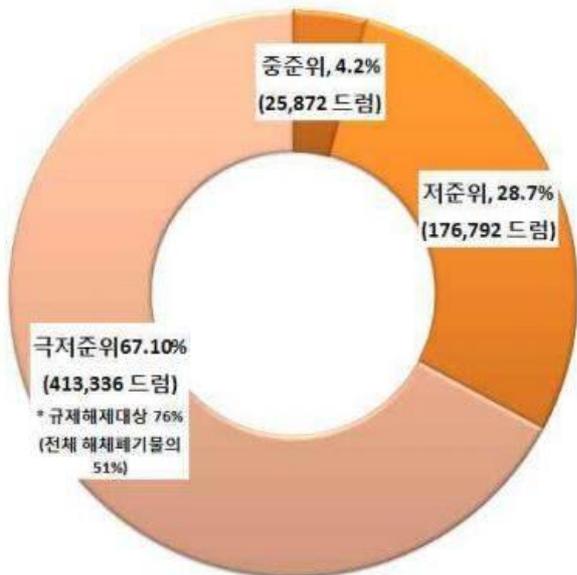


Fig 2. Incidence of NPP decommissioning wastes by 2090

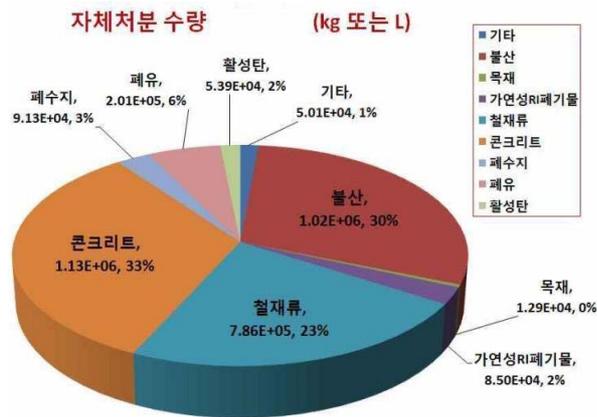


Fig 3. self-disposal quantity by waste type

2002년부터 2004년까지의 발전용 원전의 운영자인 한국수력원자력(주)에서 방사성폐기물에 대한 자체

처분이 승인된 사례이다[5].

한국원자력환경공단에서 발표한 해체폐기물 관리 방안 시나리오 분석 보고서에 따르면, 향후 2090년까지 국내에서 발생 될 원전 해체 후 방사성폐기물 량과 준위별 발생분율의 예상 추이를 Fig 2와 같이 보고하고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 극저준위 폐기물은 전체의 약 67% 이상으로 가장 많은 양을 차지하고 있으며, 이 중 규제해제 대상이 극저준위 폐기물 전체의 약 76%로 가장 많은 양을 차지하고 있으므로 규제해제 폐기물의 처분 즉, 자체처분에 대한 방안이 상당히 중요하다고 볼 수 있다[6]. 또한, 2013년에 한국원자력안전기술원에서 발표한 방사성폐기물 안전규제 제도개선 방안 정책 연구 보고서에서는 2008년부터 2012년까지 원자력 관련 시설에서 발생된 방사성폐기물의 연도 및 종류별 자체처분 수량을 보고하였으며, 이에 대한 통계는 Fig 3과 같다. 자체처분 대상 폐기물 중 콘크리트 폐기물이 전체의 33% 비중을 차지하며 가장 많이 발생하는 폐기물로 분류된다. 결론적으로 콘크리트 폐기물 중에서도 규제해제 대상 콘크리트 폐기물의 효율적인 처분방법 마련이 필요한 상황이다[7].

3. 자체처분 기술기준

국내에서는 방사성폐기물 분류 체계 적용과정에서 “처분 제한치 미만의 방사성폐기물”을 규제해제 대상 폐기물로 규정하고 규제해제 절차를 개정하였다. 규제해제의 기준이 되는 핵종별 농도 또는 선량은 국제원자력안전기구인 IAEA의 안전지침서 RS-G-1.7을 도입하여 규정하고 있으며, 규제해제 폐기물은 원자력 안전법의 적용범위에서 제외하도록 규정하고 있다[1]. 규제해제 폐기물로서 자체처분이 가능한 폐기물에 대한 자체처분 기준은 원자력안전위원회 고시 제2017-65호 ‘방사성폐기물 분류 및 자체처분 기준에 관한 규정’에서 정립되어있다[8]. 본 고시에 따르면 자체처분 허용선량을 만족하는 것이 입증된 방사성폐기물과 동 고시 제107조 제3항 제2호 “위원회가 정하여 고시하는 자체처분 허용기준 표”에 제시된 자체처분 허용농도 미만의 방사성폐기물은 자체처분이 가능하다고 규정하고 있다. 자체처분

허용선량은 개인의 경우 연간 $10 \mu \text{Sv}$ 이며, 집단의 경우 연간 $1 \text{man}\cdot\text{Sv}$ 미만이어야 한다. 평가 대상인 콘크리트 폐기물의 경우 혼합 핵종으로 이루어져 있으므로, 이러한 경우에는 동 고시에서 제시하는 허용농도 산출식으로 허용농도를 산출하여야 한다. 산출하여 계산된 값이 1 보다 작으면 자체처분이 가능하며, 이에 대한 식은 다음 수식 1로 나타낼 수 있다[8].

$$\sum_i \frac{c_i}{c_{L,i}} < 1 \quad (\text{수식 1})$$

여기에서, c_i : 방사성핵종 i 의 방사능농도(Bq/g)
 $c_{L,i}$: 방사성핵종 i 의 자체처분 허용농도(Bq/g)

4. 자체처분 평가

4-1. 평가 시나리오

고리 1호기 원자력발전소 해체시 발생하는 바이오실드 콘크리트 폐기물 중 준위 분류를 통해 규제 해제 대상 즉, 자체처분 준위에 해당되는 폐기물은 알맞은 처분 시나리오에 따라 처분이 이루어져야 한다. 자체처분 시나리오는 앞서 기술한대로 크게 재활용, 매립, 소각 방법이 있으며, 특히 콘크리트 폐기물의 경우에는 가장 폭넓게 적용될 수 있는 처분 시나리오로서 부지에 매립(landfill) 하는 방법이 있다. 본 평가에서도 매립 방법을 선정하였으며, 본 평가를 통하여 매립장 작업자 및 매립장 폐쇄 후 거주자의 예상 피폭 방사선량을 계산함으로써 국내 원자력관계법령에서 규정하고 있는 자체처분 제한치 만족 여부를 판단하였다. 매립 대상 지역은 국내 방사성폐기물 처분장이 위치하고 있는 경주 지역의 부지에 자체처분 또한, 실시된다고 가정하였다. 따라서 평가에서 필요한 환경학적 입력사항은

경주 지역의 기상자료 및 토양 관련 자료를 적용하였다.

4-2. 평가 프로그램

자체처분 안전성 평가를 위해 자체처분 평가 프로그램인 RESRAD Ver 7.2 코드를 이용하였다. RESRAD 코드는 방사능 오염물질에 의해 거주자가 받는 피폭선량과 위험성을 평가하기 위한 목적으로 2003년 미국 에너지부인 U.S. DOE의 지원 하에 아르곤 국립 연구소의 환경 영향 평가부에서 개발되었다. 본 코드는 방사능 오염된 부지에 대한 환경 영향 평가를 위한 DOE의 승인을 받은 코드이며, 현재 미국 원자력규제위원회인 U.S NRC에서도 원전의 해체 시설 인허가에 RESRAD 코드군을 활용한 피폭선량 평가 결과를 허용하고 있다. 또한, 이미 전 세계의 300개가 넘는 부지에 적용된 사례가 있으며, RESRAD 코드군을 국내에서도 방사화된 토양 및 콘크리트에 대한 자체처분 평가 입증을 위해 연구로 해체 콘크리트 폐기물의 매립처분에 의한 환경 영향 평가 등에 활용한 사례들이 있다[9].

본 평가에서는 이 중 ONSITE 코드군을 적용하여 평가하였으며, 본 코드군은 부지 내 피폭선량 또는 위해도 기준에 부합하는 토양에서의 방사성 물질에 대한 가이드라인, 작업자 및 거주자에 대한 피폭선량이 계산 가능하다. 또한, 지표수 또는 지하수와 같은 여러 매질에 존재하는 방사성 물질의 농도를 도출할 수 있다. 선량 제한치를 통해 잔류방사능 유도농도(DCGL)를 유도하기 위해서 피폭 경로 분석이 실행되며, 이는 오염원 분석, 환경 수송 분석, 선량 및 피폭 분석, 그리고 시나리오 분석으로 구성된다[10].

오염원 분석은 오염 구역의 기하학적 구조, 존재 핵종의 농도, 부식률, 침식 및 침출에 의한 제거율에 의해 환경으로 배출되는 잔류 방사능의 결정 문제를 다루지만 RESRAD 코드에서 직접적으로 고

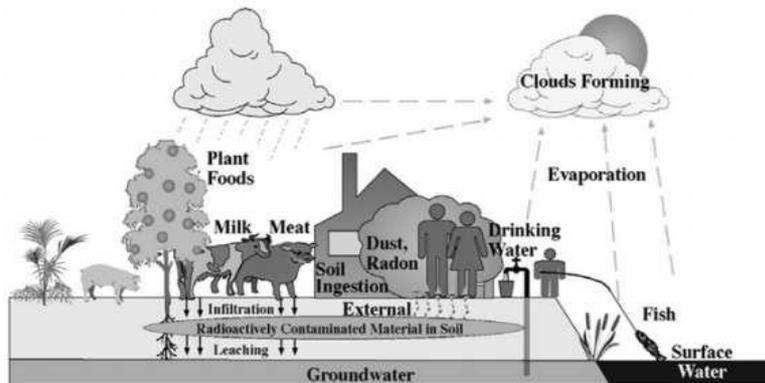


Fig 4. Pollutant source considered in RESRAD code

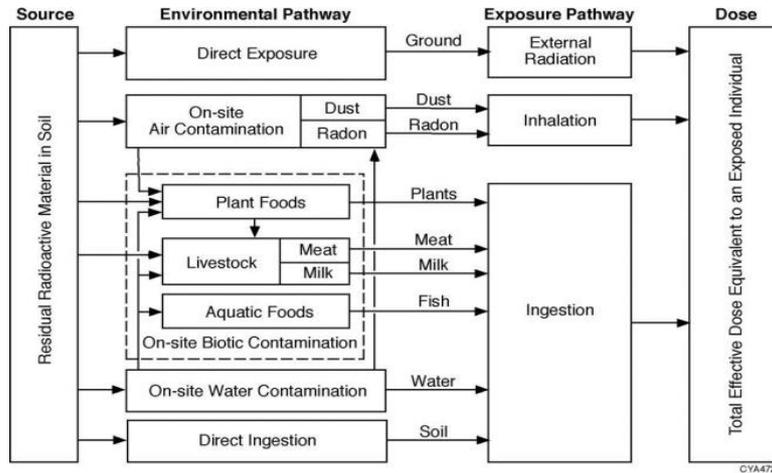


Fig 5. Exposure path schematic

려되지는 않으며 피폭 경로 및 방사성 물질의 환경 수송 분석의 영향을 반영하는 방식으로 고려된다. 환경 수송 및 피폭 경로 분석에서는 Fig 4와 같이, 오염된 토양에 노출되어 발생하는 직접 피폭을 포함하여 라돈(radon)의 딸핵종(progeny) 등의 공기 중 핵종의 호흡, 오염된 토양과 관개수로 성장한 식물의 섭취, 오염된 사료와 물로 키운 가축에서 생산된 고기와 우유의 섭취, 오염된 우물 및 호수의 물 또는 포획된 물고기의 섭취 그리고 오염된 토양의 섭취로 발생하는 내부 피폭으로 구분되어 크게 외부 방사선 피폭, 호흡, 섭취 세 가지 피폭 경로로 고려되어진다. 초기에 오염 토양에서부터 핵종이 인체로 이동되는 경로를 Fig 5에 나타내었으며, ONSITE 코드군은 부지의 환경적 조건인 풍속, 강수량, 대수층과의 깊이, 밀도 등을 적용 할 수 있는 코드로써 필요에 따라 선량 환산인자 값 변환이 가능하다. 또한, 오염 구역의 방사성 물질에서 발생하는 감마 및 베타선의 외부 방사선 피폭을 지표에서 1 m까지 떨어진 개인으로의 선량을 계산하는 방식으로 평가되며, 특히 호흡에 의한 피폭은 피폭 발생 지점에서 오염 구역과 공기 중 핵종이 이동하는 공기 중의 피폭 구역과 피폭된 개인이 공기 중 핵종을 흡입하는 관계로 고려된다[10].

4-3. 수학적 모델

RESRAD 코드는 개별핵종에 의한 피폭 경로별로 선량환산인자(Dose Conversion Factor; DCF)를 도출하고, 이를 합산하여 수학적 모델을 통해 특정 시나리오에 의한 전체 피폭선량을 계산한다. 이에 따른 전체 피폭 방사선량 계산모델은 다음과 같은 수식 2 및 수식 3으로 정리 할 수 있다[10].

$$H_E(t) = \sum_i \sum_p H_{E \cdot i \cdot p}(t) \tag{수식 2}$$

$$H_{E \cdot i \cdot p} = DCF_{i \cdot p} \cdot ETF_{i \cdot p} \tag{수식 3}$$

여기에서, $H_E(t)$: 방사성핵종 i , 피폭경로 p 에 의해 유발되는 유효선량당량
 $DCF_{i \cdot p}$: 방사성핵종 i , 피폭경로 p 에 대한 선량환산인자
 $ETF_{i \cdot p}$: 환경 이동계수

해당 부지의 오염된 토양에 의한 외부 피폭선량을 계산하기 위해서는 반지름 및 면적에 대한 함수인자를 추가로 대입하며, 이에 대한 수학적 모델은 다음 계산식 4로 정리 할 수 있다.

$$ETF_{i \cdot p} = F_o \cdot FAS \cdot FD_i(t) \cdot FC_i(t) \tag{수식 4}$$

여기에서, F_o : 거주 및 차폐인자
 FAS : 면적 및 형상인자
 $FD_i(t)$: 깊이인자(오염토양의 자체흡수 현상 보정인자)
 $FC_i(t)$: 복토인자(복토에 의한 차폐 효과 고려인자)

해당 부지의 오염된 토양에서 호흡에 의한 내부 피폭선량을 계산하기 위해서는 다음과 같은 수학적 모델로 수식 5와 같다.

$$ETF_{i \cdot p} = ASR_i \cdot FA \cdot FCD_i(t) \cdot FO \cdot FI \tag{수식 5}$$

여기에서, ARS_i : 공기 및 토양의 핵종 농도비
 FA : 면적인자
 $FCD_i(t)$: 복토 및 깊이인자
 FO : 거주인자
 FI : 연간 호흡량

해당 부지의 오염된 토양에서 생산된 음식물 섭취에 의한 내부 피폭선량 계산에 대한 수학적 모델은 다음 수식 6으로 정리 할 수 있다.

$$ETF_{ij} = FA \cdot FCD(t) \cdot \sum_k [DF_k \cdot FSR_{ik}(t)] \quad (\text{수식 6})$$

여기에서, $FSR_{ik}(t)$: 음식물 및 토양의 핵종 농도비
 FA : 면적인자
 $FCD_i(t)$: 복토 및 깊이인자
 DF_k : 연간 음식물 k 의 섭취량

4-4. 평가 입력사항

4-4-1. 방사성핵종별 농도

자체처분 피폭선량 평가를 수행하기 위해 고리 1호기의 운전 정지 후 10년 동안 냉각된 시점을 기준으로 발생한 바이오실드 콘크리트 폐기물의 방사화

Table 2. Specific activity of self-disposal nuclide

[unit : Bq/g]

핵종	비방사능 농도	핵종	비방사능 농도
Fe-55	2.49E+00	Pm-147	5.61E-12
H-3	3.06E-01	Ta-182	6.92E-13
Co-60	1.09E-02	P-32	2.20E-13
Eu-152	1.44E-03	Lu-177	9.12E-14
Mn-54	1.44E-03	S-35	8.14E-14
Cl-36	3.17E-04	Se-75	7.07E-14
C-14	2.22E-04	Ce-139	3.78E-14
Ni-63	2.00E-04	K-42	2.11E-14
Eu-154	1.97E-04	In-113m	8.73E-15
Cs-134	1.55E-04	Sn-113	8.73E-15
Nb-93m	1.53E-05	Gd-153	4.47E-15
Sm-151	1.27E-05	W-181	3.95E-15
Ca-45	5.47E-06	Sc-46	1.01E-15
Eu-155	4.59E-06	Y-90	2.24E-16
Sb-125	3.06E-06	Sr-90	2.24E-16
Ni-59	1.87E-06	Co-58	1.86E-19
Na-22	1.70E-06	W-185	1.78E-19
Nb-94	9.40E-07	Tb-160	1.17E-19
Te-125m	7.47E-07	Ce-144	2.82E-20
Mo-93	2.19E-07	Te-123m	1.12E-20
Tc-99	3.12E-08	Zr-95	8.22E-22
Zr-93	3.64E-09	Sb-124	6.40E-22
Ag-110m	3.49E-09	Cs-137	2.03E-22
Cs-135	1.29E-09	Nb-95	2.01E-23
Cd-109	1.25E-09	I-129	4.34E-25
Tl-204	4.74E-11	-	-

Table 3. Specification of landfill model

대상	Case 1	Case 2
중량 [ton]	1,437.388	
체적 [m ³]	611.655	
두께 [m]	2	1
길이 [m]	19.733	27.907

평가 시 계산된 핵종별 비방사능(Bq/g) 농도를 적용하였다. 이러한 결과 값은 자체처분 준위에 해당되는 농도이며, 총 51개의 핵종이 혼합되어 고려된다. 이에 대한 핵종별 비방사능(Bq/g) 농도에 값을 Table 2에 정리하였다[4].

4-4-2. 평가 대상 및 기간

자체처분 피폭선량 평가시 대상은 해체 후 매립장 상부에 근무하는 매립장 작업자와 매립장 폐쇄 후 매립장 부지 상부에 거주하는 일반인으로 나누어 고려하였다. 매립장 작업자의 경우 폐기물에 의한 외부피폭, 분진 또는 공기로 인해 발생하는 호흡에 의한 피폭을 고려하였으며, 매립 직후부터 10년까지를 평가 기간으로 선정하였다. 매립장 폐쇄 후 매립장 부지 상부에 거주하는 일반인의 경우 매립된 폐기물에 의한 외부피폭, 분진 또는 공기로 인해 발생하는 호흡에 의한 피폭, 지하수 및 매립장 부지에서 재배된 농축산물, 수산물 섭취에 의한 피폭을 고려하였다. 또한, 매립장 폐쇄 후에는 일반인의 거주기간 동안 제한된다. 국내의 경우 환경부 폐기물 관리법 시행령 제35조에 따르면 “토지 이용의 제한기간은 폐기물매립시설의 사용이 종료되거나 그 시설이 폐쇄된 날로부터 30년 이내로 한다” 라고 규정하고 있다[11]. 따라서 평가 기간을 매립장 폐쇄 후 30년 경과된 시점부터 50년까지로 선정하였다. 또한, 매립장 폐쇄 후 30년 경과된 시점은 최소 식생대층이 조성되기까지의 충분한 기간이라고 판단되며, 해당 시점 직후부터 일반인이 거주한다고 가정하였다.

4-4-3. 매립 대상물

매립 대상물은 바이오실드 콘크리트 폐기물로 대부분 콘크리트 덩어리지만 일부는 제염과정에서 발생된 콘크리트 가루이다. 그러나 평가를 위해 보수적으로 모두 콘크리트 덩어리인 것으로 가정하였으며, 매립 대상물의 밀도는 일반 콘크리트의 밀

도인 2.3 g/cm²로 고려하였다. RESRAD 전산코드의 기본 가정 사항을 반영하여 매립 대상물의 기하학적 형상은 원기둥(Cylinder) 형상으로 매립된다고 가정하였다. 매립 대상물의 두께는 매립장에서 폐기물을 매립하는 방법에 따라 차이가 있을 수 있으나, 폐기물 운반차량으로부터 일시적 하역 및 부지 평탄화 작업등을 고려하여 두께가 일반적으로 1~3 m 내외가 될 것으로 예상되는데, 본 평가에서는 실제 해당 부지에서 매립물을 매립할때의 상황을 가정하여 두께가 1m 일 때와 2m 일 때, 각각 2가지의 형상이 다른 Case의 모델로 가정하여 결과를 비교하였다. 이는 실제 매립시 가장 고려해볼만한 제원을 가지고 있으며, 2가지 Case 형상 모델의 평가 결과 값을 비교하여 경제적이고 효율적인 측면에서 최적의 매립물 형상을 선정할 수 있을 것으로 판단된다. 2가지 Case 형상 모델의 제원은 Table 3에 정리하였으며, 2가지 Case 형상 모델의 체적은 동일하지만 두께가 다르기 때문에 지름에서도 차이가 있다. 이러한 제원은 바이오실드 콘크리트 폐기물의 중량을 근거로 체적을 계산하여 산출하였으며, 해당 모델의 대략적인 형상은 Fig 6과 같다[4].

4-4-4. 복토층 및 매립층 입력사항

복토층(Cover soil)은 매립 처분 대상물을 매립한 후 매립층을 안정화하기 위하여 매립 대상물 상부에 덮는 청정 토양층이다. 국내의 경우 작업자의 복토에 관한 환경부 폐기물 관리법 시행령을 근거로 매립장 작업자의 경우에는 작업 일일 복토요건인 15cm로 가정하였고, 폐쇄 후 거주자의 경우에는 60cm의 복토층이 최소 식생대층으로 존재하는 것으로 가정하였다[11].

매립층의 환경적 고려사항으로는 크게 해당 지역의 강수량 및 지하수 채수량을 고려할 수 있다. 강수량은 기상청에서 발표한 평가 선정 지역인 경주의 2008년부터 2017년까지의 강수량을 Table 4와 같이 평균값으로 적용하여 고려하였다[12].

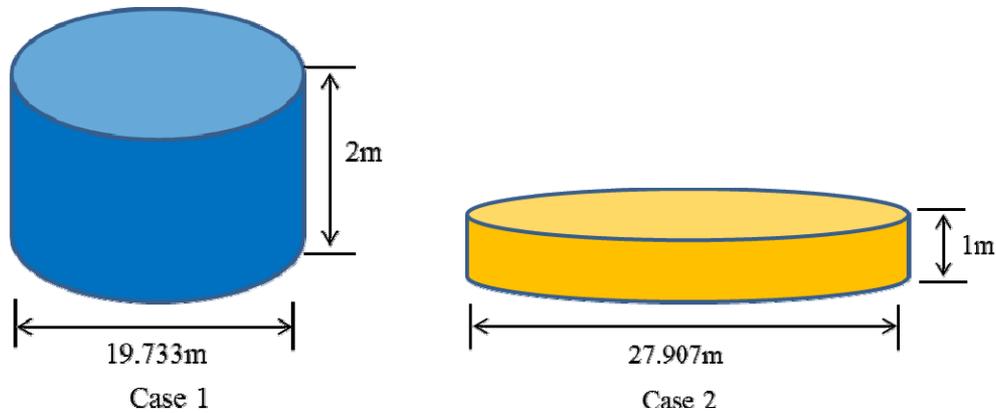


Fig 6. Geometry of landfill model

Table 4. Precipitation in Gyeongju

[unit : mm/y]

연도	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	평균
경주	1,649	921.4	693	1,015	1,198	1,796	1,864	1,027	869.1	1,559	1,259

지하수 채수량의 경우 국토교통부 지하수 조사 연보 자료를 근거로 경주지역의 총 관정수가 7,068 구역이고 연간 총 채수량이 $54,992,262.4m^3/y$ 이므로 각 관정 당 연간 채수량을 $7,780m^3/y$ 로 고려하였으며, 지하수 물의 이동현상을 적용하기 위해 RESRAD 전산코드에서는 물질수지모델인 Material Balance Model과 비분산모델인 No Dispersion Model을 주로 사용하는데, 매립층 규모가 작은 $1,000m^2$ 이하 면적의 경우에는 물질수지모델 적용을 권고하고 있어, 본 평가에서 고려된 매립층의 면적은 $1,000m^2$ 이하임을 반영하여 물질수지모델로 적용하였다[13].

4-4-5. 거주·호흡 및 외부피폭 입력사항

오염된 토양에서 호흡에 의한 내부피폭을 고려하기 위해서는 매립장 작업자의 호흡률을 고려해야 한다. 작업자의 호흡률은 일정 수준의 작업을 수행하는 성인 기준 호흡률을 $1.2m^3/h$ 로 가정하여 연간 작업시간을 반영하여 $2,400m^3/y$ 로 고려하였고, 폐쇄 후 매립장 상부에 거주하는 일반인의 경우에는 일반적인 방사선량 평가 시 적용하고 있는 호흡률인 $8,400m^3/y$ 로 각각 고려하였다.

또한, 매립장 환경에서 호흡 가능한 분진의 농도를 고려하여야 하는데, 분진의 농도는 국내 환경자료가 미비하므로 국내 환경과 유사한 일본에서 조사된 폐기물 매립장 상부에서의 분진의 농도로 적용하였으며, 매립장 작업자의 경우 $0.0005g/m^3$, 폐쇄 후 거주자의 경우 RESRAD 코드에서 기본 입

력사항으로 제시하고 있는 $0.0002g/m^3$ 를 적용하였다[9].

추가로 매립 부지에서의 작업자 및 거주자의 상주 및 거주 비율에 대한 적용이 필요하다. 실내거주비율은 1년 중 매립장 상부에 위치한 건물 내에서 체류하는 시간의 비율로 정의되며, 매립장 작업자와 폐쇄 후 거주자의 거주비율은 상이하다. 매립장 작업자의 경우 매립장 부지 내에서 1년간 총 작업시간을 2,000 시간으로 가정하여, 부지 내 옥내에 거주하는 기간의 비율을 1/4로 가정하면 1년 간 작업자가 건물 내에 거주하는 기간의 비율은 5.7%로 산출된다. 폐쇄 후 거주자의 경우에는 1년 중 1/2을 옥내에서 거주한다고 가정하여 50%의 비율로 적용된다. 실외거주비율은 1년 중 매립장 상부에 위치한 건물 외부에서 체류하는 시간의 비율로 정의되며, 실내거주 비율과 마찬가지로 매립장 작업자와 폐쇄 후 거주자의 거주비율은 상이할 것으로 예상된다. 매립장 작업자의 경우 매립장 부지 내에서 1년 간 총 작업시간을 2,000 시간으로 가정하여, 부지 내 옥외에 거주하는 기간의 비율을 3/4로 가정하면 1년 간 작업자가 옥외에 있는 기간의 비율은 17.1%로 산출된다. 폐쇄 후 거주자의 경우에는 1년 중 1/2을 옥내를 제외한 외부에 있다고 가정하여 비율을 50%로 적용하였다.

4-4-6. 음식물 섭취 피폭 관련 입력사항

오염된 토양에서 생산된 음식물의 섭취에 의한 내부피폭을 고려하기 위해서는 연간 음식물 섭취량을

Table 5. Annual food intake

항목	RESRAD 분류	RESRAD 기본 입력 값	적용 입력 값
식수 [L/y]	Drinking Water	510	196.3
어류 [Kg/y]	Fish	5	79.3
연체, 갑각류 [Kg/y]	Other Sea Food	0.9	33.4
해조류 [Kg/y]			
곡식, 채소류 [Kg/y]	Fruit, Vegetable and Grain	160	190
엽채류 [Kg/y]	Leafy Vegetable	14	100
우유 [L/y]	Milk	92	63
육류 [Kg/y]	Meat and Poultry	63	55

Table 6. Food storage period

[unit : day]

대상	저장기간	대상	저장기간
곡식, 채소류	14	어류	1
엽채류	1	갑각류/연체류	1
우유	1	우물 물	0.5
육류	7	가축 사료	75

고려해야 한다. 연간 음식물 섭취량은 한국원자력 안전기술원 연구 보고서인 KIN/GR-303에 명시되어 있는 성인 기준 최대 개인 음식물 섭취량을 기준으로 적용하였다[14]. 단, 매립장 작업자의 경우 매립장의 운영기간 동안 매립장 부지 상부에서 농작물을 경작하거나 식수용 지하수 우물을 설치할 가능성은 미비하므로 본 평가에서는 고려하지 않았으며, 폐쇄 후 거주자의 경우는 연간 음식물 섭취량을 Table 5와 같이 제시하였다. 적용된 입력값은 국내 섭취량 기준이므로 RESRAD 기본 입력값과 차이가 있어 이를 비교하였다.

또한, 해당 부지의 지하수 이용량을 고려해야 한다. 지하수 이용량은 전량 지하수를 식수, 가정용수, 가축용수, 관개용수로 사용한다는 상황을 기본적으로 설정하는 RESRAD 코드 체계가 구성되어 있으나 국내의 실제 지하수 이용현황을 반영하기 위해 국토교통부 지하수 조사연보 자료를 살펴보면 매립장이 위치할 수 있는 경주 지역의 지하수를 식수원으로 이용하는 경우가 $30,393,609m^3/y$ 로 약 57.06%로 조사되었다. 그 이외에 공업 및 농업에 이용되는 양이 $19,232,115m^3/y$ 로 약 36.21%, 기타 용도로 이용되는 경우가 $3,573,885m^3/y$ 로 약 6.73%로 조사되었다. 따라서 이와 같은 값을 입력값에도 적용하였다.

매립장 작업자의 경우 음식물 섭취와 마찬가지로 식수용 지하수 우물을 설치할 가능성은 미비하므로 본 평가에서는 고려하지 않았다[13].

추가로 음식물 및 식수등을 섭취하기 전까지의 저장기간은 한국원자력안전기술원의 KINS/GR-303 보고서에서 제시된 값을 준용하였으며, 이에 따라 선정된 저장기간은 다음 Table 6과 같이 정리할 수 있다[14].

4-5. 평가 결과

RESRAD 코드를 이용한 자체처분 안전성 평가 결과를 핵종별 매립장 작업자 및 폐쇄 후 거주자에 대한 시간대별 개인 피폭선량으로 구분하여 Table 7에 정리하였다. 평가 결과, 전체적으로 상당히 낮은 결과 값을 보였으며, 이는 대상 매립물이 극저준위 폐기물 중에서도 규제해제 대상에 해당하기 때문에 낮은 결과를 보인다고 판단된다. 핵종 중에서는 Co-60을 기준으로 평가된 피폭선량이 매립장 작업자의 경우 Case 1 모델과 Case 2 모델 모두 매립처분 직후 시점에서 연간 $1.34 \mu Sv$ 로 결과값 중 가장 큰 값을 나타냈다. 또한, 폐쇄 후 거주자 역시 Co-60을 기준으로 평가된 피폭선량이 매립장 폐쇄후 30년이 지난 시점에서 Case 1 모델은 연간 0.001μ

Sv, Case 2 모델은 연간 0.002 μ Sv로 결과 값 중 가장 큰 값을 나타내었다. 따라서 평가 시 고려된 핵종 중 가장 위해도가 큰 핵종은 Co-60이라고 판단 할 수 있으며, 결과적으로 자체처분 제한치인 연간 10 μ Sv를 모두 만족하므로 본 평가에서 고려된 대상 폐기물인 바이오실드 콘크리트는 매립 방식의 처분이 가능할 것으로 보인다. 가장 영향이 큰 핵종인 Co-60은 매립처분 직후 10년이 지난 시점부터는 방사선 세기가 서서히 떨어지는 경향을 보이며, 일반인이 거주 할 것으로 예상되는 30년이

지난 시점에서는 상당히 낮게 떨어진다.

또한, 형상 및 제원이 각자 다른 Case 1 모델 및 Case 2 모델의 매립 대상물은 결과에 있어서 크게 차이를 보이지 않았다. 따라서 최적의 매립물 선정에 있어서 매립물의 두께는 곧 매립층 깊이와 동일하므로 Case 1 모델에 비해 두께가 얇은 Case 2 모델이 부지 굴착 비용과 시간등을 절감할 수 있을 것으로 보인다. 따라서 Case 2 모델의 형상을 이용한 매립 처분을 적용하는 것이 보다 더 경제적인 측면에서도 효율적일 것으로 판단된다.

Table 7. Exposure dose rates Result of Landfill disposal assessment

[unit : μ Sv/year]

핵종 및 기간	매립장 작업자				매립장 폐쇄 후 거주자			
	매립처분 직후		매립처분 직후 10년		매립장 폐쇄 후 30년		매립장 폐쇄 후 50년	
	Case 1	Case 2	Case 1	Case 2	Case 1	Case 2	Case 1	Case 2
C-14	6.13E-07	4.62E-07	2.90E-19	1.01E-31	1.24E-14	5.72E-28	6.44E-24	0.00E+00
Ca-45	3.66E-11	3.67E-11	2.35E-17	2.39E-17	8.54E-26	1.56E-25	0.00E+00	0.00E+00
Cd-109	2.40E-12	1.67E-12	3.24E-19	5.15E-24	4.70E-28	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Ce-139	1.86E-14	1.86E-14	2.37E-22	2.37E-22	1.60E-40	3.17E-40	0.00E+00	0.00E+00
Ce-144	3.80E-20	3.80E-20	5.83E-24	5.82E-24	9.36E-33	1.72E-32	1.88E-40	3.39E-40
Cl-36	1.36E-06	1.04E-06	3.07E-09	4.35E-12	8.97E-10	1.72E-17	3.18E-15	2.06E-28
Co-58	1.90E-18	1.90E-18	6.40E-34	6.39E-34	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Co-60	1.34E+00	1.34E+00	4.04E-01	4.03E-01	1.37E-03	2.25E-03	1.11E-04	1.78E-04
Cs-134	7.42E-03	7.42E-03	2.95E-04	2.94E-04	7.36E-08	1.45E-07	9.46E-11	1.85E-10
Cs-135	9.10E-15	9.45E-15	1.02E-13	1.10E-13	1.76E-09	3.52E-09	1.87E-09	3.72E-09
Cs-137	3.76E-21	3.76E-21	3.44E-21	3.44E-21	9.02E-22	1.79E-21	6.04E-22	1.20E-21
Eu-152	4.93E-02	4.93E-02	3.31E-02	3.31E-02	1.41E-04	1.52E-04	6.27E-05	6.65E-05
Gd-152	1.32E-20	1.42E-20	3.42E-18	3.67E-18	6.57E-17	1.31E-16	8.09E-17	1.60E-16
Eu-154	1.02E-02	1.02E-02	5.26E-03	5.25E-03	1.33E-05	1.46E-05	3.44E-06	3.73E-06
Eu-155	4.14E-07	4.14E-07	1.37E-07	1.36E-07	8.41E-10	1.67E-09	5.43E-11	1.08E-10
Fe-55	6.65E-07	7.15E-07	1.12E-06	1.20E-06	5.45E-06	1.09E-05	3.39E-08	6.73E-08
Gd-153	2.51E-16	2.51E-16	9.76E-21	9.74E-21	7.11E-31	1.42E-30	6.15E-40	1.22E-39
H-3	2.45E-02	2.09E-02	1.09E-09	6.94E-17	4.24E-15	8.54E-29	7.33E-25	0.00E+00
I-129	1.14E-29	8.36E-30	4.91E-31	7.46E-34	1.83E-29	5.53E-37	6.30E-35	0.00E+00
Lu-177	8.55E-16	8.55E-16	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Mn-54	3.32E-02	3.31E-02	1.13E-05	1.13E-05	1.03E-13	1.91E-13	1.00E-20	1.83E-20
Mo-93	2.15E-13	2.31E-13	4.29E-12	4.56E-12	1.38E-06	2.66E-06	1.42E-06	2.68E-06

Table 7. continue

[unit : μ Sv/year]

핵종 및 기간	매립장 작업자				매립장 폐쇄 후 거주자			
	매립처분 직후		매립처분 직후 10년		매립장 폐쇄 후 30년		매립장 폐쇄 후 50년	
	Case 1	Case 2	Case 1	Case 2	Case 1	Case 2	Case 1	Case 2
Nb-93m	3.77E-15	2.98E-15	1.53E-13	8.30E-14	9.16E-08	1.10E-07	9.13E-08	1.09E-07
Nb-93m	6.27E-17	4.97E-17	2.57E-15	1.41E-15	1.53E-09	1.83E-09	1.53E-09	1.83E-09
Na-22	1.36E-04	1.35E-04	9.22E-06	7.88E-06	1.27E-09	1.41E-09	1.18E-11	2.01E-11
Nb-94	3.54E-05	2.37E-05	9.17E-10	1.40E-14	2.71E-18	1.46E-31	1.41E-27	0.00E+00
Nb-95	7.07E-23	6.27E-23	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Ni-59	6.37E-13	6.86E-13	1.34E-11	1.44E-11	9.83E-08	1.96E-07	1.04E-07	2.06E-07
Ni-63	1.63E-10	1.76E-10	3.19E-09	3.43E-09	2.01E-05	4.00E-05	1.84E-05	3.65E-05
P-32	3.81E-16	3.81E-16	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Pm-147	8.47E-17	8.54E-17	2.24E-17	2.35E-17	1.88E-17	3.74E-17	1.01E-19	1.99E-19
Sm-147	8.75E-26	9.41E-26	1.08E-23	1.16E-23	2.76E-22	5.49E-22	2.92E-22	5.78E-22
S-35	2.30E-20	1.77E-20	2.10E-36	3.78E-41	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Sb-124	1.11E-20	9.29E-21	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Sb-125	1.53E-05	1.04E-05	3.31E-11	5.15E-16	1.64E-21	0.00E+00	5.72E-33	0.00E+00
Te-125m	7.24E-12	4.37E-12	6.09E-17	9.76E-22	6.22E-22	0.00E+00	1.74E-33	0.00E+00
Sc-46	2.19E-14	1.76E-14	4.32E-32	7.89E-37	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Se-75	1.12E-13	8.58E-14	2.04E-27	3.57E-32	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Sm-151	2.08E-11	2.23E-11	4.03E-10	4.33E-10	3.99E-08	7.94E-08	3.62E-08	7.17E-08
Sn-113	1.50E-14	1.16E-14	1.13E-28	1.98E-33	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Sr-90	1.10E-19	1.11E-19	3.23E-19	3.23E-19	1.29E-14	2.20E-14	7.66E-15	1.19E-14
Y-90	1.44E-17	1.44E-17	1.33E-17	1.26E-17	8.93E-16	1.53E-15	5.32E-16	8.23E-16
Ta-182	1.19E-11	9.17E-12	8.37E-26	1.47E-30	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Tc-99	8.16E-13	5.39E-13	7.14E-17	1.14E-21	3.90E-20	1.87E-33	2.06E-29	0.00E+00
Te-123m	3.60E-21	2.77E-21	6.64E-35	1.16E-39	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Te-123	6.25E-40	3.39E-40	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Tl-204	3.79E-14	2.57E-14	1.90E-19	2.94E-24	6.49E-24	2.91E-37	8.62E-35	0.00E+00
W-181	7.04E-18	7.03E-18	9.09E-27	9.00E-27	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
W-185	1.13E-23	1.13E-23	3.44E-38	3.41E-38	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Zr-93	3.74E-14	4.02E-14	7.84E-13	8.43E-13	6.51E-11	1.30E-10	6.89E-11	1.37E-10
Zr-95	3.85E-23	3.85E-23	2.87E-40	2.87E-40	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Nb-95m	1.13E-24	1.11E-24	9.81E-42	9.81E-42	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
제한치	1.00E+01							

5. 결론

안전하고 효율적인 원전 해체폐기물의 처분 방법을 제시하기 위해 RESRAD Ver 7.2 ONSITE 코드를 이용하여 고리 1호기 원자력발전소의 해체 과정에서 발생하는 바이오실드 콘크리트 폐기물 중 자체처분 준위에 해당하는 폐기물을 매립하는 상황에 대해서 매립 작업자 및 매립장 폐쇄 후 거주자로 피폭 대상을 구분하고 각각의 개인 피폭선량을 도출하여 자체처분 안전성을 평가하였다. 매립장 작업자의 경우 매립처분 직후부터 10년까지의 개인 피폭선량을 계산하였으며, 매립장 폐쇄 후 거주자에 대해서는 매립장 폐쇄 후 30년이 경과된 시점부터 50년까지의 개인 피폭선량을 계산하였다. 이에 따라 계산된 결과를 이용하여 국내 원자력법령에서 규정하는 자체처분 기준치를 만족하는지 여부를 판단하였으며, 그 결과, 기준 제한치를 충분히 만족하였다. 또한, 최적의 매립물 선정을 위해 형상과 제원이 각자 다른 2가지 모델로 나누어 매립 대상물의 평가 결과를 비교하였다. 두께가 얇은 모델과 두께가 두꺼운 모델 모두 결과값에 크게 차이를 보이지 않았으며, 전체적으로 2가지 모델 모두 기준 제한치를 만족하는 결과를 보였다. 따라서 매립층의 깊이와 동일한 두께를 적절하게 선정하는 방법이 효율적이라고 판단되기 때문에 두께가 얇은 모델을 선정하여 처분하는 방법이 실제 매립 작업시 부지 굴착 비용과 작업 시간등을 절감할 수 있어, 경제적인 측면에서 훨씬 적절할 것으로 판단된다.

고리 1호기 원자력발전소 해체 시 발생하는 바이오실드 콘크리트 폐기물 중에서 자체처분 준위에 해당되는 방사성폐기물을 효율적으로 처분하기 위해서는 앞서 기술 한 것과 같이 대량의 폐기물을 현실적으로 단기간에 얼마만큼의 물량을 자체처분 할 수 있는가를 사전에 확인할 필요가 있다. 또한, 대량의 폐기물 자체처분을 위해 추가적으로 고려되어야 할 사항들은 국내의 매립 여건이 폐기물을 인수할 수 있을 만큼의 충분한 여유가 있는가를 확인해야 할 것이다. 현재 국내 폐기물 매립 부지 및 시설의 매립용량의 한계로 인해 국내 환경법령에서 점차 직접 매립을 제한하고 있으나 매립 부지 선정에 있어서 유관기관과의 효율적인 협의를 통해 적절한 부지 선정 및 확보가 이루어진다면 매립을 통한 자체처분은 효율적인 처분 방법일 것으로 보이며, 본 평가에서 도출된 결과가 향후 원전 해체폐기물 처분 방법을 수립하는데 있어서 참고자료로 활용될 것이다.

References

1. Chosun University, 2016, Sang Heon Lee, "A Study on the Application of Standards for Clearance of Metal Waste Generated During the Decommissioning of NPP by Using the RESRAD-RECYCLE",,
2. Korea Ministry of Trade Industry and Energy, 2019, "Nuclear power plant Decommissioning Industry Development Strategy",,
3. Pusan University, 2019, Young Jik Son, "Radiation dose and reduction plan of workers in decontamination of large metal radioactive waste of Kori Unit 1",,
4. Annals of Nuclear Energy, Doosan Heavy Industries & Construction, Hee Dong Sohn, "The Study for Activation Evaluation on Activated Structures in Nuclear Power Plant with 40 Years Operation History", 2019
5. KAERI, 2008, Report on treatment technology through deregulation of radioactive soil and concrete radwaste,,
6. KEITI, 2016, NPP Decommissioning Disposal Waste Management Trend Report,,
7. KINS, 2013, KINS/GR-542, Policy Research Report on Improvement of Radioactive Waste Safety Regulation system,,
8. Korea Nuclear Safety Commission, Notice No. 2017-65, 2017, "Regulation on Radioactive Waste Classification and Self-disposal Standard",,
9. KAERI, 2003, Un Su Jung, "Safety Assessment for the Disposal of Very Low-level Radioactive Concrete Wastes",,
10. Argonne National Laboratory, 2018, S. Kamboj, E. Gnanapragasam, C. Yu, "User's Guide for RESRAD Ver 7.2 ONSITE Code",,
11. Korea Ministry of Environment, 2019, "Waste Management Act, Enforcement Decree and Enforcement Rules of the Act",,
12. Korea Meteorological Administration, 2017, "Precipitation Statistics",,
13. Korea Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2017, Groundwater Survey of Statistics,,
14. KINS, 2005, KINS/GR-303, Report of Radiation Disaster Prevention Environmental Regulatory Technology Development,,