

## 연구로 1,2호기 해체 금속폐기물의 재활용에 따른 피폭방사선량 평가에 관한 연구

홍상범\* · 정운수\* · 박재우\*\*

\*한국원자력연구소 재염해체기술연구개발부 305-353

대전광역시 유성구 덕진동 150

\*\*제주대학교 공과대학 에너지공학과 690-756

제주시 아라1동 1번지

### A Study on the Radiological Dose Assessments for the Clearance of Concrete Waste from the KRR-1 & 2 Decommissioning

Sang-Bum Hong\* · Un-Soo Chung\* ·  
Jae-Woo Park\*\*

\*Division of Decommissioning Technology  
Development, Korea Atomic Energy Research  
Institute, 150 Daejeon, Korea 305-353

\*\*Department of Nuclear and Energy and Engineering,  
Jeju National University, Jeju, Korea 690-756

#### Abstract

The exposure dose of recycling and reuse on a large amount of the steel scrap from the KRR-1 & 2 decommissioning activities was evaluated. The maximum individual dose and collective dose were evaluated by using international technical criterion and recommendation for NUREG-1640 and IAEA Safety Series 111-P-1.1 and modifying internal dose conversion factor which was based on the concept of effective dose in ICRP 60, applied to the RESRAD-RECYCLE(Ver. 3.06) computing code as the assessment tool. The exposure dose were ultimately determined by extracting the most conservative value

from the results of the generic assessment and specific assessment methodologies. The result of assessment for individual dose and collective dose is 23.9  $\mu$ Sv per year and 0.11 man·Sv per year respectively. The result of clearance level for radionuclides( $Co^{60}$ ,  $Cs^{137}$ ) is less than 0.167 Bq/g to comply with the clearance criterion provided for Korea Atomic Energy Act and relevant regulations.

**Key words** : steel scrap, RESRAD-RECYCLE, maximum individual dose, collective dose

#### 1. 서 론

전세계적으로 산재해 있는 수만은 원자력시설은 한계 수명에 도달하게 되고 궁극적으로 해체단계를 맞이하게 된다. 이때 해체시 발생하는 폐기물은 금속, 콘크리트 등 종류도 다양하며 발생량 또한 방대하다. 실제로 OECD/NEA 자료에 의하면, 향후 50년동안 원자력시설 해체시 발생하는 금속폐기물(또는 금속조각)의 양은 약 3,000만 톤 정도가 될 것으로 추산된다. 한편 사용 가능한 저준위 폐기물 처분장은 현재 전세계적의 원자력시설 해체시 발생될 금속폐기물을 수용하기에는 부족하다. 뿐만 아니라 새로운 폐기물 처분시설의 부지선정과 인허가는 여러 가지 문제에 봉착해 왔고, 처분관련 비용 또한 계속적으로 증가추세에 있다. 그래서 금속폐기물에 대한 재활용방안에 대한 심도 있는 고찰이 필요하다. 해외 선진국에서는 이미 각종 원자력시설로부터 발생하는 다량의 금속성 방사성폐기물을 재사용(Reuse) 및 재활용(Recycle)하기 위한 연구와 방안에 대해 활발히 논의되고 있고, 일부국가에서는 이미 기준이 마련되어 체계적인 재활용을 하고 있다. 우리나라도 원자력발전 선진국에 진입한 이상 원전에서 발생하는 다량의 금속성 방사성폐기물에 처리대환 적극적인 검토가 필요하다. 국내적으로도 연구로 1,2호기의 해체활동 과정에서 발생하는 금속폐기물은 구조재, 배관재 등을 포함하여 수십톤 이상이 될 것으로 예상되며, 대부분의 금속폐기물은 적절한 재염처리만 한다면 사시 재활용해도 무방할 것으로 예측하고 있다.(김희령 외, 2002)

본 논문은 금속성 방사성폐기물 재활용에 따른 자체처분의 안전성평가를 위해서 연구로 1,2호기 해체시 발생하는 금속성 방사성폐기물을 대상으로 예상 피폭방사선량

을 도출하기 위하여 전산코드인 RESRAD-RECYCLE을 이용하여 평가하였다. 그리고 해외의 재활용 연구사례인 NUREG-1640과 IAEA Safety Series 111-P-1.1을 적용하여 피폭방사선량을 비교 평가하였다. 그리고 국내 원자력법상의 자체처분규정에 만족하기 위한 규제해제농도기준을 도출하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 평가도구

본 연구는 전산코드인 RESRAD-RECYCLE ver 3.06을 이용하여 철재 재활용 시나리오에 대해서 세부평가를 수행하였다. RESRAD-RECYCLE 전산코드는 규제해제된 철재와 알루미늄의 재활용 및 재이용 과정에서 유발되는 방사선학적 영향을 평가하기 위한 목적으로 US DOE의 지원 하에서 ANL의 EDA에서 개발하였다. Fig. 1은 RESREA-RECYCLE에서 고려한 폐금속의 재활용 과정을 도시하였다.

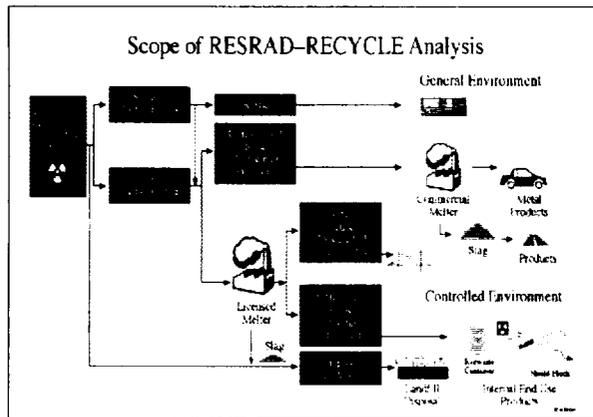


Fig. 1 A Conceptual Diagram of the Recycling Process.

RESREA-RECYCLE 전산코드에는 폐금속의 수집·운반·처리 작업자(Worker)와 소비자 및 공공재를 이용하는 일반인(Public)에 대해서 총 41개의 피폭경로와 54개의 핵종에 대해서 잠재 피폭선량 및 위험도를 평가하도록 고려되었다. 그러나 본 논문에서는 국내의 상황을 고려하여 반영하기 어려운 시나리오를 선별적으로 제외하여 총 35개 시나리오를 고려하였다. “제한적재활용” 시나리오는 차폐체나 방사성폐기물 저장용기로 재활용하는

경우 피폭대상자가 방사선작업종사자이므로 규제해제와 관련하여 고려할 필요가 없을 것으로 판단하였다. 또한 고철의 재활용 과정 중 용융공저에서 방사능 분배현상 이외에 청정금속과의 혼합에 대한 희석효과는 고려하지 않았다. 최종적인 평가결과는 개인선량(Individual Dose), 집단선량(Collective Dose) 및 누적선량(Cumulative Dose) 등으로 출력된다(ANL, 2000).

본 연구에서는 금속류 자체처분과 관련하여 해외의 연구사례를 분석하여 IAEA Safety Series 111-P-1.1과 NUREG-1640을 검토하였으며, 예상피폭방사선량 및 규제해제농도기준을 도출하였다.

### 2.2 평가대상

원자료를 운전하는 동안 철재는 여러 가지 방사성핵종으로 오염되거나 방사화 되는데, 연구로 1, 2호기의 경우 발생된 폐기물의 농도를 고려하여 다음과 같이 세 가지로 구분하여 관리하고 있으며, 향후 처리계획을 아래와 같이 제시하였다.

- MDA(최소검출하한치) 이하 : 피폭방사선량 평가 후 자체처분.
- MDA 초과~0.4Bq/g 미만 : 포장 후 대전(원자력연구소)로 이송하여 추후처리 예정.
- 0.4Bq/g 이상 : 용기에 임시보관 후 국가 중저준위처분장(원전수거물센터) 운영시 이송.

본 연구의 자체처분 대상폐기물의 핵종의 농도는 MDA 이하만을 대상으로 처리할 예정이나 보수적으로 0.4 Bq/g을 적용하여 평가하였다.



Fig. 2. Generated Steel Scrap Waste from KRR-2.

수량의 경우 연구로 1,2호기 해체과정에서 발생하는 금속류의 양은 85.19m<sup>3</sup>(약 700 Ton)일 것으로 예상된다. (연구로 1호기 및 2호기 폐로사업 해체계획서, 2000) 현재 분석과정에서 주요 검출되는 핵종은 Co<sup>60</sup>, Cs<sup>137</sup>이다. 그러나 이러한 수치는 철재, 알루미늄, 구리 등 여러 가지가 금속류가 혼합되어 있어 철재만을 대상으로 선정하기 위해 100 Ton의 철재로 가정하였다. 또한 이는 IAEA Safety Series 111-P-1.1에서 제시하고 있는 단위 방사능 농도 당[Bq/g] 피폭방사선량과 RESRAD-RECYCLE 전산코드의 결과값을 비교하기 위함이다.

2.3 평가방법

RESRAD-RECYCLE 전산코드를 이용하여 자체처분 대상 금속폐기물 재활용 시나리오에 대한 자체처분 안전성평가를 위해 ICRP 60(1991)에서 제시하고 있는 유효선량의 개념을 도입하여 평가하였다. 내부피폭의 경우 호흡과 섭취에 대해서 작업자의 경우 ICRP 72의 선량환산인자를 적용하였으며, 일반인의 경우 연령군별 선량환산인자의 차이를 보정하기 위해 ICRP 72의 선량환산인자값의 2배를 호흡과 섭취에 대하여 적용하였다. 호흡에 대한 선량환산인자는 ICRP 68에 근거하여 작업자의 경우 5μ의 AMAD(Active Median Aerodynamic Diameter)입자 크기를 적용하였으며, 일반인에 대해서는 1μ의 AMAD 입자 크기를, 흡수율 Parameter는 핵종의 반감기에 따라 F(Fast), M(moderator), S(Slow)값을 각각 적용하였다. (임용규 외, 2003) 전산코드에 적용된 선량환산인자는 Table 1에 제시하였다.

Table 1. Dose Conversion Factor of Radionuclide by Public and Worker.

핵종	반감기(y)	폐쇄 후 거주자		매립작업자	
		선량환산인자 [Sv/Bq]		선량환산인자 [Sv/Bq]	
		섭취	호흡	섭취	호흡
Co <sup>60</sup>	5.27	6.80E-09	1.92E-08	3.40E-09	7.10E-09
Cs <sup>137</sup>	30.2	2.60E-08	9.60E-09	6.7E-09	1.30E-8

외부피폭 선량환산인자의 경우 ICRP 60에서 권고하고 있는 유효선량의 개념으로 평가하기 위해서는 ICRP 74

에 제시된 외부피폭에 대한 선량환산인자를 적용하여 평가하는 것이 원칙이다. 그러나 Zankl 등은 연구논문(1992)에서 대부분의 경우에 유효선량 및 유효선량당량에 근거한 외부피폭선량 평가결과의 차이는 수 퍼센트 내외인 것으로 보고한 바 있으며 국내의 연구결과도 저에너지 감마핵종인 경우에는 큰 차이가 없는 것으로 밝혀졌다. 그래서 RESRAD-RECYCLE 전산코드에서 제시하고 있는 EPA FGR No. 12 (1993)을 그대로 준용하였다(노병환 외, 2002).

IAEA Safety Series 111-P-1.1는 방사성물질의 재활용 및 재사용에 적용할 수 있는 규제면제기준을 개발하기 위한 방법론을 제시하고 있다. 상기 보고서에서는 100 Ton의 방사성물질을 재활용하는 경우 발생하는 피폭 예상경로를 고려하여 단위 방사능 농도 당 피폭선량(Sv/y per Bq/g)을 계산한 후 피폭선량 값이 연간 개인선량한도(10μSv/y)를 넘지 않는 최대허용농도를 구하여 규제면제 기준으로 제시한 값을 이용하여 피폭방사선량 및 규제해제 농도를 도출하였다. 물론 이렇게 결정된 방출방사능 농도를 함유한 물질로 유발되는 연간 집단선량 평가 결과는 집단 연간선량한도(1 man · Sv/y)를 초과해서는 안 된다. 선량의 단위는 ICRP 26에서 제시하고 있는 유효선량당량(Effective Dose Equivalent)으로서 평가하고 있다.(IAEA, 1992)

NUREG-1640은 US NRC의 위탁과제로 85개 핵종에 대한 규제해제농도를 도출하기 위한 연구결과로 SAIC (Science Application International Corporation)에서 1999년 발간되었다. 일반평가방법론(Specific Approach)과 세부평가방법론(Generic Approach)를 조합하여 각 시나리오별 예상 피폭선량을 평가하였다. 상기 보고서에서는 방사성물질의 재활용 및 매립하는 경우에 대해서 규제해제 농도를 도출하기 위해 선량인자(Dose Factor)를 제시하여 EC(유럽공동체)의 규제해제농도와 비교하였다.

$$Clearance\ level = Dose\ criterion \div Dose\ Factor$$

$$Clearance\ level = EC\ 단위에서\ 제시하고\ 있는\ 규제\ 해제농도(Bq/g\ or\ Bq/cm^2)$$

$$Dose\ criterion = 연간\ 개인선량한도\ (10\mu Sv/y)$$

$$Dose\ Factor = 선량\ 인자\ (\mu Sv/y\ per\ Bq/g\ or\ \mu Sv/y\ per\ Bq/cm^2)$$

동 보고서에서는 각 핵종에 따른 선량인자(Dose

Factor)를 방출시점에서 체적오염 및 표면오염에 대해서 단위오염도(1Bq/g or 1Bq/cm<sup>2</sup>)를 기준으로 결정집단(Critical Group)에 대한 결과를 제시하였다. 이러한 선량인자를 이용하여 피폭방사선량 및 규제해제농도를 도출하였다. NUREG-1640(1999)에서는 27가지 시나리오와 85개 핵종에 대한 피폭방사선량을 외부피폭에 대해서는 총 유효등가선량(Total Effective Dose Equivalents)으로 평가하고 있으며, NUREG-1640(2003)에서는 30가지 시나리오와 115개 핵종에 대한 피폭방사선량을 ICRP 60(1991)의 유효선량(Effective Dose) 및 ICRP 26(1977)의 유효등가선량(Effective Dose Equivalents)로 평가하고 있다.(NUREG-1640, 2003) 본 논문에서는 NUREG-1640(2003)을 대상으로 철재폐기물 재활용에 따른 피폭방사선량을 도출하였다.

### 3. 결과 및 고찰

연구로 1,2 호기에서 발생한 금속폐기물 중 자체처분 대상 폐기물의 재활용하여 자체처분하는 경우에 대하여 RESRAD-RECYCLE 전산코드를 이용하여 내부선량환산인자를 수정하였고, 나뭇지 변수는 초기값(Default Parameter)을 그대로 준용하여 평가하였다. 각 핵종에 대한 시나리오별 피폭방사선량을 Fig. 3에 나타내었다. 또한 해외의 자체처분에 대한 연구사례인 IAEA Safety-Series 111-P-1.1 및 NUREG-1640을 대상으로 예상피폭방사선량을 평가하여 그 결과 비교하여 Fig. 4에 제시하였다.

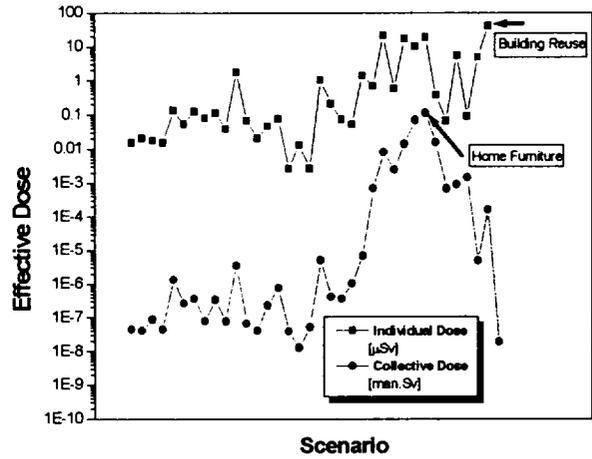


Fig. 3. Scenario Ranking for Individual and Collective Dose

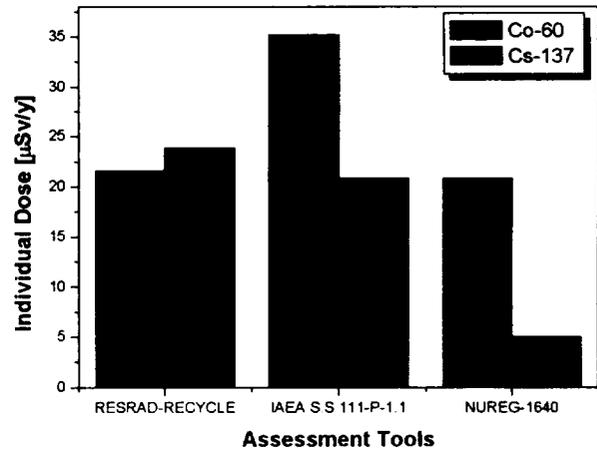


Fig. 4 Comparison on Individual Dose for Assessment Tools.

Table 2. Calculated exposure dose and clearance level for recycling of steel scrap.

대상	RESRAD-RECYCLE ver 3.06		IAEA Safety Series 111-P-1.1		NUREG-1640(2003)	
	방사선량 (μSv/y)	규제해제농도 (Bq/g)	방사선량(μSv/y) for 1Bq/g	규제해제농도 (Bq/g)	방사선량 (μSv/y)	규제해제농도 (Bq/g)
Co <sup>60</sup>	최대개인선량 2.16E+01 집단선량 1.14E-01	1.85E-01	최대개인선량 8.80E+01 집단선량 1.50E-02	1.34E-01	최대개인선량 2.08E+01	1.92E-01
Cs <sup>137</sup>	최대개인선량 2.39E+01 집단선량 7.02E-04	1.67E-01	최대개인선량 2.20E+01 집단선량 4.00E-03	4.54E-01	최대개인선량 6.40E+00	6.25E-01

피폭방사선량 평가결과 RESRAD-RECYCLE, NUREG-1640(2003), IAEA Safety Series 111-P-1.1은 비슷한 결과를 나타내었으며, Table 2에 제시하였다. 최종 자체처분농도준위는 현재 국내 원자력법에서 적용하고 있는 유효선량의 개념을 적용하여 평가한 NUREG-1640(2003)과 RESRAD-RECYCLE 전산코드 기준으로 비교하여 보수적인 결과를 토대로 자체처분농도를 도출하였다. 연구로 1,2호기 해체과정에서 발생하는 자체처분대상 금속폐기물을 재활용과정을 통하여 자체처분하는 경우 두 가지 핵종  $Co^{60}$ ,  $Cs^{137}$ 을 모두에 대해서 국내 원자력법에서 정하고 있는 "방사성폐기물 자체처분에 관한 규정"의 처분제한치 즉, 개인에 대한 연간 피폭방사선량  $10\mu Sv/y$ 미만이고 집단에 대한 총 피폭방사선량이  $1man \cdot Sv/y$ 미만을 만족하기 위한 대상폐기물의 오염도는  $1.67 \times 10^{-1} Bq/g$ 미만이 되어야 한다.

#### 4. 참고문헌

김희령 외, 금속성 방사성폐기물 재활용을 위한 방안연구 (II), KAERI/RR-2290/2002, 한국원자력연구소, 2002.

ANL, EAD-3, 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. 2000.

연구로 1호기 및 2호기 폐로사업 해체계획서, 한국원자력연구소, 2000.

임용규 외, 원전 주 발생 방사성 금속폐기물의 자체처분 안전성평가, 한국원자력학회, 2003.

노병환 외, 방사성폐기물 규제해제 요건 개발, 한국원자력안전기술원, 2002.

IAEA, Application of exemption principles to the recycle and reuse of Material from Nuclear Facilities, Safety Series No. 111-P-1.1, 1992.

NUREG-1640, Vol. 1, Radiological Assessment for Clearance of Equipment and Material from Nuclear Facilities, 2003.