

연구로 1,2호기 해체 금속폐기물의 규제해제농도기준(안)  
도출을 위한 연구

A Study on the Clearance Level for the Metal Waste from the KRR-1  
& 2 Decommissioning

홍상범, 이봉재, 정운수  
한국원자력연구소

요 약

연구로 1,2호기 해체과정에서 발생하는 많은 양의 금속폐기물 중 자체처분대상 금속폐기물을 대상으로 재활용하는 경우에 대해서 피폭방사선량을 평가하고, 규제해제농도기준(안)을 도출하였다. 평가도구는 RESRAD-RECYCLE ver 3.06을 이용하여 ICRP60에서 제시하고 있는 유효선량 개념에 근거한 내부피폭 선량환산인자를 수정하였고, IAEA Safety Series 111-P-1.1 및 NUREG-1640을 적용하여 예상되는 최대개인선량 및 집단선량을 평가하였다. 0.4 Bq/g의 금속폐기물에 대한 RESRAD-RECYCLE 전산코드의 평가결과 개인최대선량 및 집단선량은 23.9  $\mu\text{Sv/y}$ , 0.11  $\text{man} \cdot \text{Sv/y}$ 이다. 최종적인 핵종별 규제해제농도기준은 일반평가방법과 세부평가결과를 종합하여 가장 보수적인 평가결과를 추출하여 결정하였다. 그 결과  $\text{Co}^{60}$ ,  $\text{Cs}^{137}$  핵종에 대한 규제해제농도기준위는  $1.67 \times 10^{-1} \text{ Bq/g}$ 미만이 되어야 국내 원자력법에서 정하고 있는 처분제한치(최대개인선량 : 10  $\mu\text{Sv/y}$ , 집단선량 : 1  $\text{man} \cdot \text{Sv/y}$ )를 만족할 수 있다.

Abstract

The exposure dose form recycling on a large amount of the steel scrap from the KRR-1&2 decommissioning activities was evaluated, and also the clearance level was derived. The maximum individual dose and collective dose were evaluated by 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, IAEA Safety Series 111-P-1.1 and NUREG-1640 as the assessment tool. The result of assessment for individual dose and collective dose is 23.9  $\mu\text{Sv}$  per year and 0.11  $\text{man} \cdot \text{Sv}$  per year respectively. The clearance levels were ultimately determined by extracting the most conservative value form the results of the generic assessment and specific assessment methodologies. The result of clearance level for radionuclides( $\text{Co}^{60}$ ,  $\text{Cs}^{137}$ ) is less than  $1.67 \times 10^{-1} \text{ Bq/g}$  to comply with the clearance criterion(maximum individual dose : 10  $\mu\text{Sv}$  per year, collective dose : 1  $\text{man} \cdot \text{Sv}$  per year) provided for Korea Atomic Energy Act and relevant regulations.

## 1. 서 론

해외 선진국에서는 이미 각종 원자력시설로부터 발생하는 다량의 금속성 방사성폐기물을 재활용하기 위한 연구와 방안에 대해 활발히 논의되고 있고, 일부국가에서는 이미 기준이 마련되어 체계적인 재활용을 하고 있다. 우리나라도 원자력발전 선진국에 진입한 이상 원자력시설에서 발생하는 다량의 금속성 방사성폐기물에 대한 적극적인 검토가 필요하며, 특히 연구로 1,2호기의 해체활동 과정에서 다량의 금속성 방사성폐기물이 발생되고 있다..[1]

본 논문은 금속성 방사성폐기물 재활용에 따른 자체처분의 안전성평가를 위해서 연구로 1,2호기 해체시 발생하는 금속성 방사성폐기물을 대상으로 예상 피폭방사선량을 평가하여 관련 규제해제농도기준(안)을 도출하기 위해서 전산코드인 RESRAD-RECYCLE을 이용하여 평가하였다. 그리고 해외의 재활용 연구사례인 NUREG-1640과 IAEA Safety Series 111-P-1.1을 적용하여 비교 평가하였다. 그리고 국내 원자력법상의 자체처분규정에 만족하기 위한 규제해제농도기준(안)을 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 금속성 방사성폐기물 재활용 과정을 도시하였다.

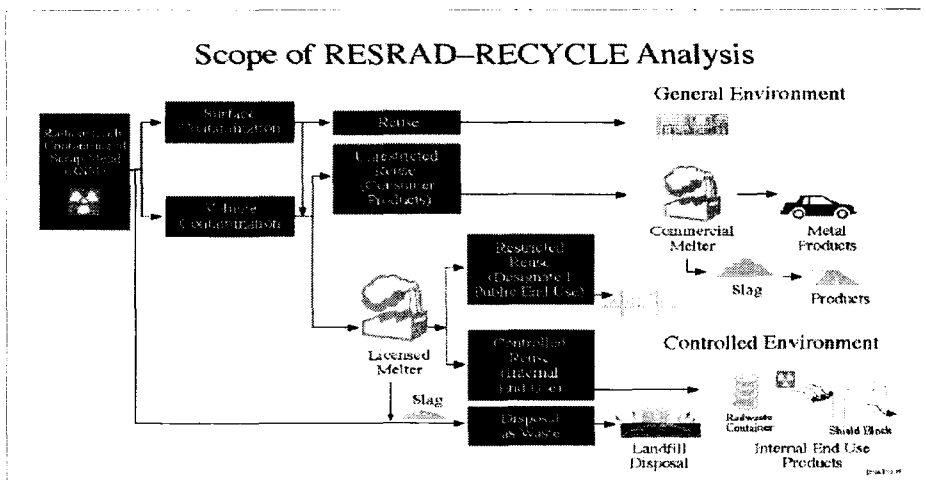


Fig. 1 A Conceptual Diagram of the Recycling Process.

RESREA-RECYCLE 전산코드에는 금속성 방사성폐기물의 수집·운반·처리 작업자(Worker)와 소비자 및 공공재를 이용하는 일반인(Public)에 대해서 총 41개의 피폭경로와 54개의 핵종에 대해서 잠재 피폭선량 및 위해도를 평가하도록 고려되었다. 그러나 본 논문에서는 국내의 상황을 고려하여 반영하기 어려운 시나리오를 선별적으로 제외시켜 총 35개 시나리오를 고려하였다. “제한적

재활용” 시나리오는 차폐체나 방사성폐기물 저장용기로 재활용하는 경우 피폭대상자가 방사선작업종사자이므로 규제해제와 관련하여 고려할 필요가 없을 것으로 판단하였다. 또한 고철의 재활용과정 중 용융공정에서 방사능 분배현상 이외에 청정금속과의 혼합에 대한 희석효과는 고려하지 않았다. 최종적인 평가결과는 개인선량, 집단선량 및 누적선량(Cumulative Dose) 등으로 출력된다.[2]

본 연구에서는 금속류 자체처분과 관련하여 해외의 연구사례를 분석하여 IAEA Safety Series 111-P-1.1와 NUREG-1640을 검토하였으며, 예상피폭방사선량 및 규제해제농도기준(안)을 도출하였다.

## 2.2 평가대상

연구로를 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~ 0.4 Bq/g 미만 : 포장 후 대전(원자력연구소)로 이송하여 추후처리 예정.
- 0.4 Bq/g 이상 : 방사선폐기물 포장용기에 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.

연구로 1,2호기 해체과정에서 발생하는 금속류의 양은 85.19 m<sup>3</sup> (약 700 Ton)으로 예상하고 있다.[3] 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 자체처분대상 금속성 방사성폐기물 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 5 $\mu$ 의 AMAD(Active Median Aerodynamic Diameter)입자크기를 적용하였으며, 일반인에 대해서는 1 $\mu$ 의 AMAD 입자크기를, 흡수율 Parameter는 핵종의 반감기에 따라 F(Fast), M(moderator), S(Slow)값을 각각 적용하였다.[4]

외부피폭의 경우 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. [5]

IAEA Safety Series 111-P-1.1는 방사성물질의 재활용 및 재사용에 적용할 수 있는 규제면제기준을 개발하기 위한 방법론을 제시하고 있다. 상기 보고서에서는 100 Ton의 금속성방사성폐기물을 재활용하는 경우 발생하는 피폭 예상경로를 고려하여 단위 방사능 농도 당 피폭선량(Sv/y per

Bq/g)을 계산한 후 피폭선량 값이 연간 개인선량한도(10 $\mu$ Sv/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 평가결과는 집단 연간 선량한도(1 man · Sv/y)를 초과해서는 안 된다. 선량의 단위는 ICRP 26에서 제시하고 있는 유효선량당량(Effective Dose Equivalent)으로서 평가하고 있다.[6]

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

$$\text{Clearance level} = \text{Dose criterion} \div \text{Dose Factor}$$

*Clearance level* = EC 단위에서 제시하고 있는 규제해제농도(Bq/g or Bq/cm<sup>3</sup>)

*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<sup>3</sup>)

동 보고서에서는 각 핵종에 따른 선량인자(Dose Factor)를 방출시점에서 체적오염 및 표면오염에 대해서 단위오염도(1Bq/g or 1Bq/cm<sup>3</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 총유효등가선량(Total Effective Dose Equivalent)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 Equivalent)로 평가하고 있다.[7,8]

### 3. 결과 및 고찰

연구로 1,2 호기 해체과정에서 발생하는 금속폐기물 중 자체저분대상 폐기물의 재활용하는 경우에 대하여 RESRAD-RECYCLE 전산코드를 이용하여 내부선량환산인자를 수정하였고, 나머지 변수는 초기값(Default Parameter)을 그대로 준용하여 평가하였다. 해외의 자체처분에 대한 연구 사례인 IAEA Safety-Series 111-P-1.1 및 NUREG-1640을 대상으로 예상피폭방사선량을 평가하여 그 결과 비교하여 Table 1에 제시하였다.

평가결과 NUREG-1640(1999)가 가장 보수적인 결과를 보여주었으며, IAEA Safety Series 111-P-1.1, RESRAD-RECYCLE 및 NUREG-1640(2003)은 비슷한 결과를 보여주었다. 최종 자체처분농도준위는 현재 국내 원자력법에서 적용하고 있는 유효선량의 개념을 적용하여 평가한 NUREG-1640(2003)와 RESRAD-RECYCLE 전산코드 기준으로 비교하여 보수적인 결과를 토대로 자체처분농도준위를 도출하였다.

연구로 1,2호기 해체과정에서 발생하는 자체저분대상 금속폐기물을 재활용과정을 통하여 자체처분하는 경우 핵종 Co<sup>60</sup>, Cs<sup>137</sup>에 대해서 대상폐기물의 오염도는 1.67 $\times$ 10<sup>1</sup> Bq/g미만이 되어야 국내 원자력법에서 정하고 있는 “방사성폐기물 자체저분에 관한 규정”의 처분제한치 즉 개인에 대한 연간 피폭방사선량 10 $\mu$ Sv/y미만이고 집단에 대한 총 피폭방사선량이 1man · Sv/y미만을 만족할 수 있다.

| 대상                | RESRAD-RECY<br>CLE ver 3.06  |                      | IAEA Safety<br>Series<br>111-P-1.1           |                      | NUREG-1640<br>(1999)         |                      | NUREG-1640<br>(2003)         |                      | 연구로<br>해체금속<br>폐기물            |
|-------------------|------------------------------|----------------------|--|----------------------|------------------------------|----------------------|------------------------------|----------------------|-------------------------------|
|                   | 방사선량<br>( $\mu\text{Sv/y}$ ) | 규제해제<br>농도<br>(Bq/g) | 방사선량<br>( $\mu\text{Sv/y}$ )<br>for<br>1Bq/g | 규제해제<br>농도<br>(Bq/g) | 방사선량<br>( $\mu\text{Sv/y}$ ) | 규제해제<br>농도<br>(Bq/g) | 방사선량<br>( $\mu\text{Sv/y}$ ) | 규제해제<br>농도<br>(Bq/g) | 규제해제<br>농도기준<br>(안)<br>(Bq/g) |
| $\text{Co}^{60}$  | 최대개인<br>2.16E+01             | 1.85E-01             | 최대개인<br>8.80E+01                             | 1.34E-01             | 최대개인<br>1.00E+02             | 4.00E-2              | 최대개인<br>2.08E+01             | 1.92E-01             | 1.85E-01                      |
|                   | 집단<br>1.14E-01               |                      | 집단<br>1.50E-02                               |                      | 집단<br>1.04E+02               |                      | 집단<br>6.40E+00               |                      |                               |
| $\text{Cs}^{137}$ | 최대개인<br>2.39E+01             | 1.67E-01             | 최대개인<br>2.20E+01                             | 4.54E-01             | 최대개인<br>1.04E+02             | 3.85E-2              | 최대개인<br>6.40E+00             | 6.25E-01             | 1.67E-01                      |
|                   | 집단<br>7.02E-04               |                      | 집단<br>4.00E-03                               |                      | 집단<br>1.04E+02               |                      | 집단<br>6.40E+00               |                      |                               |

Table 1. Calculated clearance level for recycling of steel scrap.

#### 4. 참고문헌

- [1] 김희령 외, 금속성 방사성폐기물 재활용을 위한 방안연구(II), KAERI/RR-2290/2002, 한국원자력연구소, 2002.
- [2] 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.
- [3] 연구로 1호기 및 2호기 폐로사업 해체계획서, 한국원자력연구소, 2000.
- [4] 임용규 외, 원전 주 발생 방사성 금속폐기물의 자체처분 안전성평가, 한국원자력학회, 2003.
- [5] 노병환 외, 방사선폐기물 규제해제 요건 개발, 한국원자력안전기술원, 2002.
- [6] IAEA, Application of exemption principles to the recycle and reuse of Material from Nuclear Facilities, Safety Series No. 111-P-1.1, 1992.
- [7] NUREG-1640, Vol. 1 & 2, Radiological Assessment for Clearance of Equipment and Material from Nuclear Facilities, 1999.
- [8] NUREG-1640, Vol. 1, Radiological Assessment for Clearance of Equipment and Material from Nuclear Facilities, 2003.