

**A Study on the Clearance Level(draft) for the Steel Scrap
from the KRR-1 & 2 Decommissioning**

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

Sang-Bum Hong, Bong-Jae Lee and Un-Soo Chung

Korea Atomic Energy Research Institute, 150 Daejeon-Dong, Yuseong-gu, Daejeon
sbhong@kaeri.re.kr

홍상범, 이봉재, 정운수

한국원자력연구소, 대전시 유성구 덕진동 150번지

(Received December 11, 2003 / Approved March 5, 2004)

Abstract

The exposure dose form recycling of a large amount of the steel scrap from the KRR-1&2 decommissioning activities was evaluated, and also the clearance level(draft) 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 μ Sv per year and 0.11 man · 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(Co^{60} , Cs^{137}) is less than 1.14×10^{-1} Bq/g to comply with the clearance criterion(maximum individual dose : 10 μ Sv per year, collective dose : 1 man · Sv per year) provided for Korea Atomic Energy Act and relevant regulations.

Key words : Clearance Level, Steel Scrap, KRR-1&2, Individual dose, Collective dose

요약

연구로 1,2호기 해체과정에서 발생하는 많은 양의 철재폐기물 중 자체처분대상 철재폐기물을 대상으로 재활용하는 경우에 대해서 피폭방사선량을 평가하고, 규제해제농도기준(안)을 도출하였다. 평가도구는 RESRAD-RECYCLE ver 3.06을 이용하여 ICRP60에서 제

시하고 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 철재폐기물에 대한 RESRAD-RECYCLE 전산코드의 평가결과 개인최대선량 및 집단선량은 23.9 μ Sv/y, 0.11 man·Sv/y이다. 최종적인 핵종별 규제해제농도기준은 일반평가방법과 세부평가결과를 종합하여 가장 보수적인 평가결과를 추출하여 결정하였다. 그 결과 Co^{60} , Cs^{137} 핵종에 대한 규제해제농도기준은 1.14×10^{-1} Bq/g미만이 되어야 국내 원자력법에서 정하고 있는 처분제한치(최대개인선량 : 10 μ Sv/y, 집단선량 : 1 man·Sv/y)를 만족할 수 있다.

중심단어 : 규제해제농도기준, 철재폐기물, 연구로1,2호기, 개인선량, 집단선량

I. 서론

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 방사성 폐기물에 대한 적극적인 검토가 필요하며, 특히 연구로 1,2호기의 해체활동 과정에서 다량의 금속성 방사성폐기물이 발생되고 있다. 이러한 금속성폐기물은 특별한 처리방안 없이 절단하여 드럼처리하고 있는 실정이다. 그러나 해체과정에서 발생한 금속성폐기물은 모두 폐기물로 처분할 대상이 아니므로 이를 재사용 및 재활용을 통해 경제적인 이득을 얻을 수 있다. [1-3]

본 논문은 연구로 1,2호기 해체과정에서 발생이 예상되는 금속성 방사성폐기물 중에서 철재류를 대상으로 선정하였다. 연구로 1,2호기가 현재 해체활동 중에 있으며, 해체과정에서 발생하는 금속류의 양은 약 700 Ton 정도 일 것으로 추산된다.[3] 그러나 이러한 수치는 철재, 알루미늄, 구리 등 여러 가지가 금속류가 혼합되어 있어 철재만을 대상으로 선정하기 위해 100 Ton의 철재폐기물로 가정하였다.

현재까지 발생된 철재폐기물에 대한 분석과정에서 주요 검출되는 핵종은 Co^{60} , Cs^{137} 이며, 오염도는 0.4 Bq/g인 경우에 대하여 대상을 선정하였다. 자체처분 방법으로 재활용하는 경우에 대하여 안전성평가를 통해 예상 피폭 방사선량을 평가하였다. 평가도구는 기본적으로 RESRAD-RECYCLE 전산코드를 이용하였고, 해외의 자체처분대상 방사성 금속성폐기물의 재활용 및 재이용에 대한 연구사례인 NUREG-1640과 IAEA Safety Series 111-P-1.1을 적용하여 그 결과를 비교 평가하였다. 평가된 결과를 바탕으로 국내 원자력법에서 정하고 “방사성 폐기물 자체처분에 관한 규정”의 처분제한치를 만족하기 위한 허용기준 “개인에 대한 연간 피폭방사선량이 10 μ Sv 미만이고 집단에 대한 총 피폭방사선량이 1 man·Sv 미만인 것이 입증되는 농도”에 만족하기 위한 규제해제농도기준(안)을 도출하였다.

II. 본론

1. 평가도구

본 연구는 전산코드인 RESRAD-RECYCLE ver 3.06을 이용하여 철재 재활용 시나리오에 대해서 세부평가를 수행하였다. RESRAD-RECYCLE

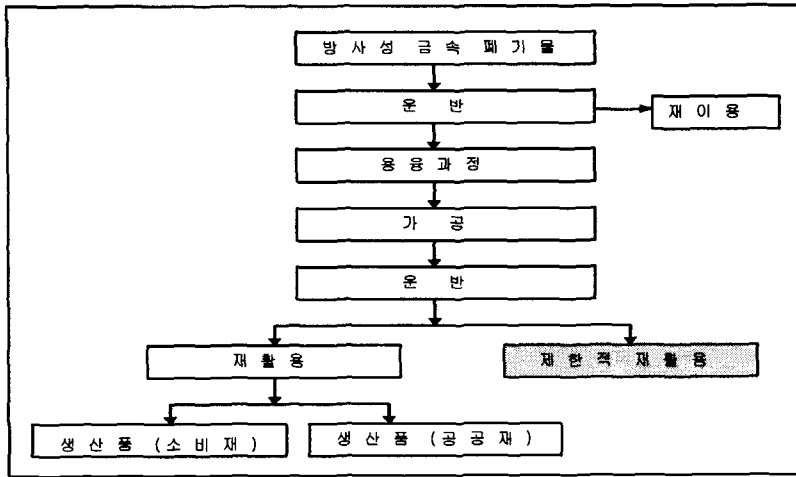


Fig. 1. A Conceptual Diagram of the Recycling Process.

전산코드는 규제해제된 철재와 알루미늄의 재활용 및 재이용 과정에서 유발되는 방사선학적 영향을 평가하기 위한 목적으로 US DOE(Department of Energy)의 지원 하에서 ANL(Argonne National Laboratory)의 EAD (Environmental Assessment Division)에서 개발하였다.

그림 1은 RESREA-RECYCLE에서 고려한 금속폐기물 재활용 과정을 도시하였다. RESREA-RECYCLE 전산코드에는 금속성 방사성폐기물의 수집·운반·처리 작업자(Worker)와 소비재 및 공공재를 이용하는 일반인(Public)에 대해서 총 41개의 시나리오와 54개의 핵종에 대해서 잠재 피폭선량 및 위해도를 평가하도록 고려되었다. [4]

본 논문에서는 국내의 상황을 고려하여 반영하기 어려운 시나리오를 선별적으로 제외시켜 총 35개 시나리오를 고려하였다. “제한적재활용” 시나리오는 차폐체나 방사성폐기물 저장용기로 재활용하는 경우 피폭대상자가 방사선작업종사자이므로 규제해제와 관련하여 고려할 필요가 없을 것으로 판단하였다. 세부 시나리오는 표 1에 제시하였다. 또한 고철의 재활용 과정 중 용융공정에서 방사능 분배현상 이외에 청정금속과의 혼합에 대한 희석효

과는 고려하지 않았다. 최종적인 평가결과는 개인선량, 집단선량 및 누적선량(Cumulative Dose) 등으로 출력된다.

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. 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 : 방사성폐기물 포장용기에 임시보관 후 국가 중·저준위폐기물 처분시설 운영시 이송.

Table 1. RESRAD-RECYCLE Scenario Applicable to Steel Scrap.

재활용단계	시나리오	고려여부	재활용단계	시나리오	고려여부	
고철운반	절단작업자	o	생산품유통	적하작업자	o	
	적하작업자	o		트럭운전자	o	
	트럭운전자	o		판매조립작업자	o	
고철취급자	o	작업장작업자		o		
철강용융	야적장취급자	o	소비재	주차장	o	
	용융로 적하작업자	o		방/사무실	o	
	용융로운전자	o		가정용구	o	
	분진여과기 취급자	o		자동차	o	
	정련작업자	o		배/보트	x	
	강피주조 작업자	o		사무용가구	o	
	소모품주조 작업자	o		가정용가구	o	
강피운반	슬래그작업자	o		프라이팬	o	
	적하작업자	o		음료수캔	x	
	트럭운전자	o		도로포장	o	
초기가공	야적장작업자	o		공공재	건물(철근)	o
	판매제조자	o			건물(동형)	o
최종가공	코일제조자	o			교량	o
	판매취급자	o	차폐체		x	
최종가공	코일취급자	o	제한적 재활용	폐기물용기	x	
			게이용	장비	o	
				건물	o	

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 m³ (약 700 Ton)으로 예상하고 있다. 현재 분석과정에서 주요 검출되는 핵종은 Co⁶⁰, Cs¹³⁷이다. 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) 피폭 방사선량과 RESRAD- RECYCLE 전산코드의 결과값을 비교하기 위함이다.

3. 평가방법

RESRAD-RECYCLE 전산코드를 이용하여

자체처분대상 철재폐기물의 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 μ의 AMAD(Active Median Aerodynamic Diameter) 입자크기를 적용하였으며, 일반인에 대해서는 1 μ의 AMAD 입자크기를, 흡수율 Parameter는 핵종의 반감기에 따라 F(Fast), M(Moderator), S(Slow)값을 각각 적용하였다. 외부피폭의 경우 RESRAD-RECYCLE 전산코드에서 제시하고 있는 EPA FGR No. 12(1993)을 그대로 준용하였다. [4]

IAEA Safety Series 111-P-1.1는 방사성물질의 재활용 및 재사용에 적용할 수 있는 규제면제기준을 개발하기 위한 방법론을 제시하고 있다. 상기 보고서에서 제시한 대로 외부, 흡입, 섭취 및 플룸(Plume)에 의한 풍하방향 피폭선량에 대한 수학적 모델을 근거로 계산한 결과와 동 보고서의 Appendix III에서 제시하고 있는 1 Bq/g의 농도 100톤의 철재폐기물의 재활용과정에서 핵종에 따른 각 시나리오별 피폭선량을 제시하고 있는 값이 동일한 결과를 타나냄을 확인하였고, 위 결과를 바탕으로 최대피폭 시나리오를 기준으로 피폭선량과 규제해제농도기준을 도출하였다. 본 논문에서는 위와 같은 결과를 바탕으로 100 Ton의 방사성 철재폐기물을 재활용하는 경우 도출된 피폭방사선량을 바탕으로 연간 개인선량한도(10 μSv/y)를 넘지 않는 최대허용농도를 구하여 규제해제농도를 도출하였다. 물론 이렇게 결정된 방출방사능 농도를 함유한 물질로 유발되는 연간 집단선량 평가결과는 집단 연간선량한도(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 연구결과로 SAIC(Science Application International Corporation)에서 1999년 발간되었다. 일반평가방법론(Generic Approach)과 세부평가방법론(Specific Approach)을 조합하여 각 시나리오별 예상 피폭선량을 평가하였다. 상기 보고서에서는 방사성물질의 재활용 및 매립하는 경우에 대해서 규제해제농도를 도출하기 위한 핵종별 선량인자 (Dose Factor)를 제시하였으며, 선량인자 분포의 평균값이 피폭을 받은 집단의 평균적인 구성원이 받는 선량을 대표하는 것으로 산정되었다. NUREG-1640(1999)에서는 27가지 시나리오와 85개 핵종에

대한 피폭방사선량을 외부피폭에 대해서는 총 유효선량당량(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 유효선량당량(Effective Dose Equivalents)로 평가하고 있다. [7-8]

$$\text{Clearance level} = \text{Dose criterion} \div \text{Dose Factor} \quad (\text{식1})$$

$$\text{Clearance level} = \text{규제해제농도 기준값} \quad (\text{Bq/g or Bq/cm}^2)$$

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

$$\text{Dose Factor} = \text{NUREG-1640에서 제시하고 있는 평균 선량인자 (}\mu\text{Sv/y per Bq/g)}$$

동 보고서에서는 각 핵종에 따른 선량인자 (Dose Factor)를 방출시점에서 체적오염 및 표면오염에 대해서 단위오염도(1 Bq/g or 1 Bq/cm²)를 기준으로 결정집단(Critical Group)에 대하여 제시하고 있다. 이러한 선량인자를 바탕으로 위 식(1)을 이용하여 피폭방사선량 및 규제해제농도를 각 핵종별로 도출하였다.

참고문헌[5]에 제시한 “방사성폐기물 규제해제 요건 개발” 보고서에서도 발전용 원자로를 대상으로 적용할 수 있는 규제해제기준농도의 도출을 위한 연구를 수행하였다. 상기 보고서에서는 RESRAD-RECYCLE 전산코드 적용시 과학기술부 고시 제 2001-2호 별표 3에서 제시된 기체상 물질에 대한 배출관리기준을 유도할 때 채택한 바 있는 IAEA Safety Series No. 115의 Table II-VII에 제시된 17세 이상 연령군에 대한 DCF(Dose Conversion Factor) 중에서 가장 보수적인 대사형태에 해당하는 값의 2배를 호흡과 섭취에 적용하였으나, 본 논문에서는 ICRP 60에서 제시하고 있는 유효

선량의 개념으로 평가하였다. 또한 상기 보고서에서는 방사성폐기물의 재활용, 소각, 매립 등 다양한 방안에 대하여 규제해제농도를 도출하였으나, 해외의 연구사례를 평가대상으로 활용하지 않고 단지 참고자료로 제시하고 있다. 본 논문에서는 평가시 NURGE-1640 (2003)을 추가적으로 고려하였고, 평가결과에 반영하였다. 그러나 위 보고서와 본 논문의 최종결과인 산출된 규제해제농도 결과는 큰 차이를 보이지 않았다.

III. 결과 및 고찰

연구로 1,2 호기 해체과정에서 발생하는 금속폐기물 중 자체처분대상 폐기물의 재활용하는 경우에 대하여 RESRAD-RECYCLE 전산코드를 이용하여 내부선량환산인자를 수정하였

고, 나머지 변수는 초기값(Default Parameter)을 그대로 준용하여 평가하였다. 해외의 자체처분에 대한 연구사례인 IAEA Safety-Series 111-P-1.1 및 NUREG-1640을 대상으로 예상 피폭방사선량을 평가하여 그 결과 비교하여 Table 2에 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 도출하여 Table 3에 제시하였다.

Table 2. The exposure dose for recycling of steel scrap.

평가대상		방사선량	Co ⁶⁰	Cs ¹³⁷
RESRAD-RECYCLE ver 3.06	방사선량	개인선량 [μSv/y]	2.16×10 ¹	2.39×10 ¹
		집단선량 [man · Sv/y]	1.14×10 ⁻¹	7.02×10 ⁻⁴
IAEA Safety Series	방사선량	개인선량 [μSv/y]	3.52×10 ¹	8.80×10 ⁰
		집단선량 [man · Sv/y]	6.00×10 ⁻³	1.6×10 ⁻³
NUREG-1640 (1999)	방사선량	개인선량 [μSv/y]	1.00×10 ²	1.04×10 ²
		집단선량 [man · Sv/y]	-	-
NUREG-1640 (2003)	방사선량	개인선량 [μSv/y]	2.08×10 ¹	6.40×10 ⁰
		집단선량 [man · Sv/y]	-	-

Table 3. Calculated clearance level for recycling of steel scrap.

대상	RESRAD-RECYCL E ver 3.06	IAEA Safety Series 111-P-1.1	NUREG-1640 (2003)	규제해제기준 산출결과
단위	Bq/g	Bq/g	Bq/g	Bq/g
Co ⁶⁰	1.85×10 ⁻¹	1.14×10 ⁻¹	1.92×10 ⁻¹	1.14×10 ⁻¹
Cs ¹³⁷	1.67×10 ⁻¹	4.54×10 ⁻¹	6.25×10 ⁻¹	1.67×10 ⁻¹

IV. 결론

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

연구로 1,2호기 해체과정에서 발생하는 자체 처분대상 금속폐기물을 재활용과정을 통하여 자체처분하는 경우 핵종 Co^{60} , Cs^{137} 에 대해서 대상폐기물의 오염도는 1.14×10^{-1} Bq/g미만이 되어야 국내 원자력법에서 정하고 있는 “방사성폐기물 자체처분에 관한 규정”의 처분제한치 즉 개인에 대한 연간 피폭방사선량 10 μ Sv/y미만이고 집단에 대한 총 피폭방사선량이 1 man · Sv/y미만을 만족할 수 있을 것으로 판단된다.

* 본 연구는 과학기술부 기관고유사업비의 지원으로 수행하고 있습니다.

V. 참고문헌

[1] A Task Group of the Co-operative Programme on Decommission, Recycling and Reuse of Scrap Metals, OECD/NEA. Paris(1996)

[2] 박진호, 정기정, 백삼태, 정운수, 박승국, 황두성, 이동규, 김희령. 금속성 방사성폐기물 재활용을 위한 방안연구(II), 한국원자력연구소, KAERI/RR-2290/2002(2002).

[3] 정기정, 백삼태, 정운수, 정경환, 박승국, 이동규, 김희령, 김종국, 양성홍, 이봉재. 연구로 1

호기 및 2호기 폐로사업 해체계획서, 한국원자력연구소, KAERI/TR-1645(2000).

[4] 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, ANL/EAD-3(2000).

[5] 정찬우, 정재학, 김영균, 김기인, 김완주, 김홍태, 문종이, 박상훈, 박원재, 석태원, 심택모, 안상면, 이윤근, 이호진, 전제근. 방사성폐기물 규제해제 요건 개발, 한국원자력안전기술원, KINS/RR-144(2002).

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

[7] NUREG-1640, Vol. 1 & 2, Radiological Assessment for Clearance of Equipment and Material from Nuclear Facilities, US NRC(1999).

[8] NUREG-1640, Vol. 1, Radiological Assessment for Clearance of Equipment and Material from Nuclear Facilities, US NRC(2003).