Technical Paper

이동형 방사화학 분석시설에서의 해체 금속폐기물 전처리작업자 피폭 평가 연구

이상헌[1] · 이민호[1] · 안홍주[2] · 송종순[1,*]

[1]조선대학교 원자력공학과, [2]원자력연구원 방사성폐기물 처분연구부

A Study on the Evaluation of Radiation Exposure Dose for Treatment Worker of Decommissioning Metal Wastes in Mobile Radiochemistry Analysis Facility

Sang-Heon Lee[1], Min-Ho Lee[1], Hong-Joo Ahn[2] and Jong-soon Song[1,*]

[1]*Nuclear Engineering, Chosun University, 309 Pilmun-daero, Dong-gu, Gwangju 61452, Republic of Korea*

[2]*Radioactive Waste Disposal Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute, 111, Daedeok-daero 989 Beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon 34057, Republic of Korea*

Abstract - Radioactive waste generated by nuclear facilities has various shapes and levels, so accurate source terms must be derived. In the case of nuclear power plants, metal and concrete wastes account for a large proportion of the decommissioning waste. In addition, since the waste subject to clearance accounts for more than 90%, rapid radiochemical analysis is required. This study to preliminarily evaluate the external exposure of pretreatment workers in a mobile radiochemical analysis facility to analyze wastes generated when decommissioning a nuclear power plant. In pre-treatment work, the point source method and point kernel method were used to evaluate external exposure. Preliminary evaluation results were derived by using the input factors (source term, sample size, time, etc.) expected to be applied at the mobile radiochemical analysis facility.

Key words : Radioactive metal waste, Radiochemistry, External exposure, Point kernel method

서 론

국내에서는 총 26기의 상용 원자력발전소를 운영한 경험을 보유하고 있으며 현재 2기는 해체를 위한 준비를 수행 중에 있다. 해체대상 원전인 고리 1호기는 영구정지 운영변경허가를 통해 영구정지를 결정하였으며 해체를 준비 중에 있다. 월성 1호기는 정부 정책에 따른 영구정지 결정으로 인하여 영구정지 운영변경허가를 승인완료한 상황이다.

원전 해체 시 발생하는 방사성폐기물은 운영 중 발생하는 방사성폐기물과는 달리 단기간에 대량으로 발생하는 차이점이 있으며 자체처분 여부, 처분시설의 확보, 폐기물 분류 등에 따라 방사성폐기물 발생량 및 처분비용 산정에 영향을 미친다. 해체 방사성폐기물은 방사선 방호 최적화 관점에서의 작업자 피폭관리 방안이 요구되며 핵종분석 시 장시간 소요에 따른 준위별 방사성폐기물 교차오염 방지를 위해 이동형 신속분류 시스템의 확보가 필요하다. 현재 국내에서는 방사능

* Corresponding author: Jong-soon Song, Tel. +82-62-230-7165, Fax. +82-504-390-4899, E-mail. jssong@chosun.ac.kr

측정기술 개발과 관련된 기업은 다수 존재하나 이동형 방사성폐기물 분석시설이 개발된 경험이 전무하다.

이동형 분석시설은 제약된 공간 내에서 다수의 작업을 수행하며 크게 출입관리, 시료관리, 전처리공정, 핵종분리공정, 계측/분석공정으로 나뉠 수 있다. 각각의 공정은 작업자의 피폭관리를 수행해야 하며 피폭관리를 위한 중요한 단계는 전처리단계이며 이 구역에서는 분석대상 시료에 대해 복잡한 과정을 거치게 된다. 주요 전처리방법으로는 알칼리 용융법, 습식산화법, 음이온교환수지법, 발연질산법, AMP 공침법 등이 활용된다.

전처리단계에서의 주요 역무는 분석시료의 부피를 줄이거나 용액화를 수행하는 단계로 볼 수 있다. 분석대상 시료의 수분과 기름 등을 제거하기 위한 시료의 건조단계가 수행된다. 또한, 가연성과 같은 분석시료는 회분율을 계산하기 위하여 회화단계를 수행한다. 최종적으로 생성된 시료는 다양한 전처리방법을 활용하여 용액화를 수행한다(연 2017).

본 연구에서는 전처리작업자의 피폭최소화를 위한 관리방안으로 ICRP 103에서 제시하는 상황 기반의 방호접근법을 적용하기 위해 평가대상의 선정, 선원항, 평가방법, 입력자료 등을 도출하여 계획피폭 상황에서의 외부피폭에 대한 개인선량을 예비평가를 수행하였다.

대상 및 방법

1. 평가대상 선정

원전에서 발생하는 폐기물은 고준위방사성폐기물부터 자체처분이 가능한 폐기물까지 오염된 정도가 다양하며 원전 해체 시 발생하는 폐기물은 금속, 콘크리트, 토양, 활성탄 등이 발생하고 있다. IAEA 보고서에서 제시하는 해체 폐기물발생량을 보면 Table 1과 같이 콘크리트폐기물과 금속폐기물이 대부분을 차지함을 알 수 있다(김 2016). 본 연구에서는 원전 해체 시 발생하는 방사성폐기물 중에서 금속폐기물을 평가대상으로 선정하여 연구를 수행하였다.

Table 1. Amount of decommissioning waste generated from PWR

Classification	Amount generated		
	Weight (ton)	Volume (m^3)	Drum
Activation metal	650	92.86	546
Activation concrete	300	150.00	882
Contamination ferrite metal	2,400	500.00	2,941
Other contaminated metal	1,100	500.00	
Contamination concrete	600	300.00	1,765
Contamination lagging	150	21.43	126
Other contaminated waste	1,000	1,250.00	7,353
Total	6,200	2,314.29	13,613

2. 핵종 선정 및 선원항

본 연구의 평가를 위해 원자력안전위원회고시 제2020-11호, 중·저준위 방사성폐기물 인도규정에서 제시하는 14가지 핵종을 평가대상으로 고려하였다(원자력안전위원회 2020). 이동형 분석시설에서의 해체금속폐기물 전처리작업자의 경우 내부피폭은 주된 피폭원이 아니므로 외부피폭만을 고려하였으며 선량평가를 도출하기 위하여 감마선을 방출하는 핵종을 평가핵종으로 선정하였다. ^{58}Co 및 ^{144}Ce의 경우에는 매우 낮은 감마선 방출률을 갖고 있으며 반감기가 짧음으로 인하여 실제 해체폐기물 분석 시에는 핵종 농도값이 매우 낮을 것으로 사료되어 선원항 선정에서 제외하였다. 단, 점선원법을 활용한 평가에서는 ^{55}Fe와 ^{59}Ni의 비감마상수(Γ)를 확보하는 데 어려움이 있으므로 평가 시 제외하였다. 핵종별 선원항을 확보하기 위하여 한국원자력연구원 방사화학실험실에서의 금속폐기물 분석결과를 활용하였다. ^{60}Co과 ^{137}Cs 이외의 감마선원을 방출하는 핵종에 대한 선원항은 ^{60}Co와 ^{137}Cs 대비 핵종 농도비를 활용하였으며 핵종별 선원항은 Table 2와 같다.

Table 2. Derivation of nuclides and source terms

Nuclide	Half life	Specific radioactivity ($Bq \cdot g^{-1}$)	Emission of gamma ray
^{3}H	12.33 y	−	×
^{14}C	5,730 y	−	×
^{58}Co	70.86 d	−	×
^{60}Co	5.3 y	1.60×10^{2}	○
^{63}Ni	100.1 y	−	×
^{90}Sr	28.74 y	−	×
^{94}Nb	20,300 y	2.48×10^{-1}	○
^{99}Tc	211,100 y	−	×
^{129}I	15,700,000 y	1.79×10^{-6}	○
^{137}Cs	30.04 y	2.50×10^{1}	○
^{144}Ce	284.9 d	−	×
^{55}Fe	2.73 y	3.66×10^{2}	○
^{59}Ni	76,000 y	1.34×10^{1}	○
Gross alpha	−	−	×

3. 평가방법 및 입력자료

이동형 분석시설에서의 해체금속폐기물 전처리작업자에 대한 예상피폭선량 평가는 평가대상과 선원항이 같더라도 평가방법에 따라 입력 자료가 다르며 선원의 형태에 따른 선속밀도의 차이로 평가결과 값의 차이가 발생하게 된다. 본 연구

에서는 점선원법과 점커널법을 이용하여 원전 해체 시 이동형 분석시설에서의 해체금속폐기물 전처리작업자에 대한 예상피폭선량을 평가하였다.

3.1. 점선원법

점선원법은 일반적으로 감마선을 방출하는 점선원으로부터 일정 거리에서 조사선량을 쉽게 계산하는 방법이다. 방사선의 강도는 선원으로부터의 거리에 역자승에 비례한다라는 역자승 법칙(inverse square law)에 따라 계산하며 실제의 방사선원에서 점선원이란 존재하지 않지만 계산의 편의상 사용하는 방법으로 예상피폭선량을 보수적으로 평가하는 방법이다(박 등 2018).

$$I_0(mSv/hr) = \frac{\Gamma(mSv \bullet m^2/MBq \bullet hr) \times S(MBq)}{d(m)^2}$$

점선원법에서 적용하는 입력자료인 비감마상수(Γ)는 방사선량율정수, 조사선량율정수라 불리며 핵종마다 다른 값을 가지고 있다(Table 3). 비감마상수의 정의는 1 MBq의 선원이 1 m의 거리에서 있을 때 $mSv \cdot yr^{-1}$로 선량값을 나타낸다.

Table 3. Specific gamma constant (Γ) of major nuclide

Nuclide	Specific gamma constant $(mSv \cdot m^2)/(MBq \cdot hr)$
^{60}Co	3.57×10^{-4}
^{94}Nb	2.65×10^{-4}
^{129}I	1.73×10^{-5}
^{137}Cs	8.92×10^{-5}

3.2. 점커널법

해체 방사성폐기물을 분석하는 시설에서는 폐기물의 형태를 면선원 또는 원판형선원 등과 같은 체적선원인 상태에서 전처리작업을 수행하므로 평가방법으로 점커널법을 활용할 수 있다. 점선원이 아니라 상당한 크기를 갖는 선형선원이나 면적선원 또는 체적선원에 의한 비충돌선속밀도는 선원을 작게 분할하여 각 분할 선원을 점선원으로 보아 계산하여 전체에 대해 합산하는 기법으로 산출하는 방법이다(이 2016).

$$d\phi = \frac{S_A dA}{4\pi r^2} = \frac{S_A \times 2\pi p dp}{4\pi r^2} \quad (1)$$

$$\phi = \int d\phi = \int_0^R \frac{S_A \times 2\pi p dp}{4\pi\sqrt{p^2+h^2}} = \frac{S_A}{2}\int_0^R \frac{pdp}{\sqrt{p^2+h^2}}$$

$$= \frac{S_A}{2}\left[\ln\sqrt{p^2+h^2}\right]_0^R = \frac{S_A}{2}\left[\ln\sqrt{R^2+h^2} - \ln\sqrt{h^2}\right]$$

$$= \frac{S_A}{2}\left(\ln\sqrt{R^2+h^2} - \ln\sqrt{h^2}\right)$$

$$= \frac{S_A}{2}\ln\sqrt{\frac{R^2+h^2}{h^2}}$$

$$= \frac{S_A}{2}\ln\sqrt{1+(\frac{R}{h})^2}$$

점 커널법을 활용한 평면선원에서의 핵종별 플루언스율을 구하는 방법은 식 1과 같다. 핵종의 면적당 방사능을 도출하기 위해 한국원자력연구원 방사화학실험실에서의 전처리 시 고려되는 시료의 질량 및 시료의 크기를 이용하여 도출하였다. 본 연구에서의 선원별 플루언스율은 Table 4와 같다.

핵종의 면적당 방사능을 식 1에 대입하여 산출한 선원별 플루언스율을 식 2와 같이 ICRP 74에서의 선원의 에너지 및 피폭방향에 따른 환산인자를 고려하여 선량을 계산한다.

$$I_0 = \sum \phi \times CF \quad (2)$$

Table 5에서의 노출방향(AP)에 따른 선량환산인자는 ICRP 74에서 제시하는 에너지별 환산인자를 내삽하여 도출하였다

Table 4. Particle flux density of major nuclide

Nuclide	Particle flux density (ϕ) (γ-ray/$cm^2 \cdot sec$)
^{55}Fe	4.23×10^{2}
^{59}Ni	1.55×10^{1}
^{94}Nb	2.87×10^{-1}
^{129}I	2.07×10^{-6}
^{60}Co	1.85×10^{2}
^{137}Cs	2.89×10^{1}

Table 5. Dose conversion factor by energy at anterior-posterior

Nuclide	γ-ray energy (MeV)	Ka/ø ($pGy \cdot cm^2$)	E/Ka ($Sv \cdot Gy^{-1}$)
^{55}Fe	0.0059	7.60	6.53×10^{-3}
	0.0065		
^{59}Ni	0.0069	7.60	6.53×10^{-3}
	0.0077		
^{94}Nb	0.703	3.96	1.01
	0.871		
^{129}I	0.0298	7.60	6.53×10^{-3}
	0.0336		
	0.0396		
^{60}Co	1.17	5.47	1.00
	1.33		
^{137}Cs	0.0322	3.10	1.02
	0.0364		
	0.662		

(ICRP 1996). 이동형 분석시설에서의 특성을 고려할 때 전처리작업 시 작업자가 선원을 정방향으로 바라보고 작업하는 것이 가장 적합한 것으로 판단된다.

점선원법과 점커널법에서의 연간작업시간을 도출하기 위하여 한국원자력연구원 방사화학실험실에서의 가동 예상시간을 활용하였다. 가동 예상시간 대비 실제 전처리를 수행하는 관리시간에 대한 비율을 적용하였으며 하루 작업시간 8시간 중 실제 전처리를 수행하는 시간은 약 4.8시간으로 도출되었다. 이를 연간작업시간으로 산출하면 1,200 $hr \cdot y^{-1}$이다.

결 과

점선원법을 활용한 4가지 핵종에 대한 예상피폭선량은 총 1.43×10^{-3} $mSv \cdot yr^{-1}$이며 점커널법을 활용한 6가지 핵종에 대한 예상피폭선량은 총 1.35×10^{-3} $mSv \cdot yr^{-1}$이 도출됨을 Table 6과 같이 확인하였다. 평가결과 값은 개인에 대한 법정 선량한도인 20 $mSv \cdot yr^{-1}$에 비해 현저히 낮은 것으로 평가되었다.

본 연구에서 점선원법 및 점커널법을 활용한 평가결과 ^{60}Co이 피폭선량 평가 시 영향이 가장 많이 미치는 핵종임을 확인하였다. 점선원법은 4가지 핵종, 점커널법은 6가지 핵종에 대하여 예상피폭선량 결과를 보면 점선원법이 평가핵종이 적음에도 불구하고 점커널법에 비해 총 피폭선량이 0.08×10^{-3} $mSv \cdot yr^{-1}$이 높음을 확인할 수 있다. 이는 점선원법의 경우 점커널법에 비하여 보다 보수적으로 접근하는 평가방법이기 때문일 것으로 사료된다.

또한, 본 연구에서는 전처리작업자에 대한 예비선량평가를 기반으로 전처리 분석 시 허용가능한 최대 선원항을 도출하였다. 개인에 대한 법정 선량한도를 만족하는 선원항을 도출한 결과는 Table 7과 같다. 평가결과를 보면 점선원법은 기존 대비 약 14,000배, 점커널법은 820배를 갖는 금속폐기물 시료를 분석할 경우 법정 연간 개인선량한도에 근접하는 것을 도출할 수 있었다.

위 연구결과에서 도출된 개인별 연간피폭선량에 만족하는 배수값을 핵종별 비방사능에 대입하여 최대 선원항을 계산해 보면 Table 8과 같이 중준위 및 저준위 방사성폐기물의 방사능 농도 제한치 범주 내로 분류됨을 확인할 수 있었다.

고 찰

국내·외적으로 이동형 방사화학 분석시설에서의 해체 금속폐기물 전처리작업자의 피폭에 대한 연구사례는 많지 않

Table 6. Evaluation results of external exposure

Point source method		Point kernel method	
Nuclide	External exposure dose ($mSv \cdot yr^{-1}$)	Nuclide	External exposure dose ($mSv \cdot yr^{-1}$)
^{60}Co	1.37×10^{-3}	^{55}Fe	2.52×10^{-5}
^{94}Nb	1.58×10^{-6}	^{59}Ni	9.22×10^{-7}
^{129}I	7.43×10^{-13}	^{94}Nb	1.38×10^{-6}
^{137}Cs	5.35×10^{-5}	^{129}I	1.23×10^{-13}
	–	^{60}Co	1.21×10^{-3}
	–	^{137}Cs	1.10×10^{-4}
Total	1.43×10^{-3}	Total	1.35×10^{-3}

Table 8. Radiation level at permissible individual exposure dose limit Unit ($Bq \cdot g^{-1}$)

Nuclide	Point source method (14,000 times)	Point kernel method (820 times)
^{60}Co	2.24×10^{6} (LLW)	1.31×10^{5} (LLW)
^{137}Cs	3.50×10^{5} (LLW)	2.05×10^{4} (LLW)
^{94}Nb	4.86×10^{7} (ILW)	1.67×10^{5} (ILW)
^{129}I	3.50×102 (ILW)	1.20 (LLW)
^{55}Fe	–	2.46×10^{8} (LLW)
^{59}Ni	–	9.02×10^{6} (ILW)

Table 7. Individual dose limit according to the number of pretreatment Unit ($mSv \cdot yr^{-1}$)

Point source method	1 times	100 times	1,000 times	10,000 times	14,000 times
	1.43×10^{-3}	1.43×10^{-1}	1.43	1.43×10^{1}	1.99×10^{1}
Point kernel method	1 times	100 times	500 times	800 times	820 times
	1.35×10^{-3}	4.07×10^{-1}	7.54	1.87×10^{1}	1.95×10^{1}

다. 이동형 방사화학 분석시설의 경우에는 분석시료의 보관, 이동, 전처리, 화학분리, 방사선/능측정, 폐기물관리 등과 같은 일련의 작업이 한정된 공간 내에서 동시에 이루어지므로 안전관리가 더욱 요구된다.

본 연구에서는 사전연구의 일환으로 일련의 과정 중에서 방사선피폭이 가장 많이 발생할 것으로 예상되는 전처리작업자에 대한 선량을 예비평가하였다. 평가결과를 기반으로 전처리작업 시 법정 선량한도를 만족하는 범위에서의 핵종별 선원항을 도출하였으며 향후 구축되는 이동형 방사화학 분석설비에 적용가능한 연간 분석가능 횟수 및 단위 공정별 작업인원수 등을 결정할 수 있는 작업자 피폭관리를 위한 의미있는 자료로서 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

결 론

본 연구는 이동형 분석시설에서의 전처리작업자의 피폭최소화 관점에서 ICRP 103에서 제시하는 피폭상황에 따른 방호접근법을 적용하기 위하여 계획피폭상황에서의 외부피폭 예비평가를 수행하였다. 평가방법으로는 점선원법과 점커널법을 활용하였으며 외부피폭 평가결과를 도출하기 위해 중·저준위 방사성폐기물 인도규정에서 제시하는 14가지 핵종 중에서 감마선 방출핵종을 평가핵종으로 선정하였다. 입력자료들은 방사화학 분석시설에서의 현장경험 및 참고문헌을 활용하여 도출하였다. 감마선 방출 핵종의 선원항은 금속폐기물에 대한 핵종 농도비를 적용하였으며 평가결과 계획피폭 시 점선원법은 1.43×10^{-3} mSv·yr^{-1}, 점커널법의 경우 1.35×10^{-3} mSv·yr^{-1}의 개인 피폭선량이 도출되었다.

이동형 방사화학 시설 구축과 관련한 연구는 지속적으로 수행하고 있으며 실제 현장에서 적용이 예상되는 작업환경을 구축하고 있다. 실제 작업환경이 구축된다면 본 연구에서 수행한 평가방법을 기반으로 실질적인 현장 데이터를 활용하여 평가결과를 보완할 수 있을 것으로 사료된다. 추가적으로, 이동형 방사화학 분설시설 내 동시에 이루어지는 작업 환경을 고려한 작업자별 피폭평가를 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 논문은 산업자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. 20191510301240, No. 20201510300130).

참 고 문 헌

김창락. 2016. 원전 해체 폐기물 관리 동향. Konetic Report. 2016-138호.

박철서, 강은보, 김쌍태, 김서융, 김종언, 이창호. 2018. RISRI 길라잡이. 1th ed. 372-403pp. NUCLEARACADEMY.

연제원. 2017. 방사성물질 화학시험. 한국원자력연구원. KAERI/RR-4323.

원자력안전위원회. 2020. 중·저준위 방사성폐기물 인도규정. 원자력안전위원회고시 제2020-11호.

이재기. 2016. 방사선방호원론. 1th ed. 254-248pp. 한국방사선진흥협회.

ICRP. 1996. Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation. ICRP Publication 74. Oxford: Pergamon Press.

Received: 1 February 2021
Revised: 14 February 2021
Revision accepted: 27 February 2021