

감마핵종 In-Situ 측정 연구 동향 분석 및 방사능 측정 효율 민감도 평가

라현준¹, 김혁재¹, 이성연¹, 곽민우¹, 김광표^{1,*}

¹경희대학교 원자력공학과

In-Situ Gamma Spectrometry Research Analysis and Radiation Efficiency Sensitivity Evaluation

Hyun Jun Na¹, Hyeok Jae Kim¹, Seong Yeon Lee¹, Min Woo Kwak¹ and Kwang Pyo Kim^{1,*}

¹Department of Nuclear Engineering, Kyung Hee University, 1732 Deokyoungdae-ro, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 17104, Republic of Korea

Abstract Since a large amount of radioactive waste is expected to be generated due to permanent shutdown of many nuclear power plants, it is necessary to prepare efficient management methods for radioactive waste. Therefore, there is a need for a based study to apply the In-Situ gamma spectrometry, which can simplify the measurement procedure. The purpose of this study is to analyze research cases of In-Situ gamma spectrometry and to analyze the sensitivity of measurement according to influencing factors on In-Situ gamma spectrometry. Research cases of five institutions, including the CERN and the Imperial College Reactor Centre (ICRC), were selected as the institutions to be investigated. Research on the In-Situ gamma spectrometry was conducted on the satisfaction of the acceptance criteria for radioactive waste and the analysis of residual radioactivity in the site. In-Situ Objective Counting System (ISOCS) was used as a major measuring device. Sampling and computer code were used to verify the analysis results. For evaluation of measuring sensitivity according to influencing factors on In-Situ gamma spectrometry, the thickness of the measurement target, the distance between the detector and the target, the angle of the collimator, and the contamination location were performed using ISOCS's Geometry Composer. In every case, based on 122 keV, the efficiency decreased as the energy increased in the high energy region, and the efficiency decreased as the energy decreased in the low energy region. As the target thickness increased, the efficiency decreased, and as the distance between target and detector increased, the efficiency decreased. As the distance between contamination and detector increased, the efficiency decreased, and as the angle of the collimator increased, the measurement efficiency increased. However, when simulating the measurement situation using Geometry Composer, the background is not considered, and the probability of incident in the background increases as the angle increases, so further research needs to be conducted in consideration of these. This study can be utilized when applying the In-Situ gamma spectrometry of radioactive waste clearance in the future.

Key words: Gamma nuclide, In-Situ gamma spectrometry, ISOCS, Clearance

<http://www.ksri.kr/>

Copyright © 2023 by
Korean Society of Radiation Industry

***Corresponding author.** Kwang Pyo Kim

Tel. +82-31-201-2560 Fax. +82-31-273-3592 E-mail. kpkim@khu.ac.kr

Received 13 February 2023 **Revised** 21 February 2023 **Accepted** 13 March 2023

1. 서론

자체처분이란 원자력안전법에 따라 방사성폐기물 중 핵종별 농도가 자체처분 허용농도 미만임이 확인된 폐기물에 대하여 방사성폐기물이 아닌 폐기물로 소각, 매립, 재활용 등의 방법으로 관리하는 것이다 [1]. 국내에서는 운영 중인 다수 원자력발전소의 영구정지 시기가 임박함에 따라, 자체처분 폐기물을 비롯한 대량의 해체폐기물이 발생할 것으로 예상되고 있다 [2,3]. 이에 따라 자체처분 폐기물 등의 방사성폐기물에 대한 신속하고 적절한 관리 방안 마련이 시급한 상황이다.

국제원자력기구(IAEA, International Atomic Energy Agency)에서는 방사성폐기물 관리 시 인간 및 환경의 안전을 확보하고, 현재뿐만 아니라 미래에도 안전을 확보하여 후손에게 부당한 부담을 전가시키지 않을 것을 권고하고 있다 [4]. 독일에서는 1984년 원자력발전소 철거공정에서 발생한 방사성폐기물에 대하여 시료채취법을 이용해 자체처분 기준치 미만임을 확인하고 처분하였다 [5,6]. 스웨덴의 Studsvik 사에서는 스웨덴과 독일에서 발생한 방사성 금속폐기물에 대하여 제염작업을 수행하고 자체처분 기준 이하임을 입증하고 처분하였다 [7]. 영국의 British Steel Corporation (BSC)에서는 원자로에서 발생한 방사성 폐기물에 대하여 제염을 수행하고 재사용가능여부 파악을 위하여 시료채취법을 이용해 핵종 분석을 수행하였다 [8]. 프랑스의 Jacquet-Francillon에서는 원자로 해체과정에서 발생한 방사성폐기물을 제염하였으며 시료채취법을 이용해 방사능 준위를 파악하였다 [9]. 러시아의 ECOMET-S에서는 원자력시설에서 발생한 방사성폐기물에 대하여 시료채취법을 이용해 재사용 가능 여부를 밝히고 운반작업을 수행하였다 [10]. 한국원자력연구원에서는 2015년에 약 40 ton의 해체폐기물을 자체처분하였다 [11]. 해당 과정에서 스메어법을 통해 시료를 채취하였으며 전알파/베타 계수기를 통해 표면오염도를 측정하였다. 하나검사기술(주)에서는 국내 원자력발전소에서 발생한 약 25ton의 철재폐기물 자체처분하였으며 해당 과정에서 시료채취법을 사용하여 자체처분 기준을 만족함을 입증하였다 [12].

자체처분 시 감마핵종 분석을 통해 자체처분 인수기준 이하임을 입증하는 것이 필수적이다. 감마핵종 분석 시 In-Situ 측정을 활용할 경우 측정의 절차를 간소화할 수 있고 직접적으로 모든 시료에 대한 분석이 가능하다는 장점이 있다. 현재 우리나라는 자체처분 시 감마핵종 분석에

대하여 시료채취법을 주로 사용하고 있으며 In-Situ 측정에 대한 적용사례 및 연구가 미비한 실정이다. 국내 발생 방사성폐기물의 증가가 예상되고 있는 상황에서 적절한 자체처분 폐기물에 대한 관리방안을 마련하기 위해서는 감마핵종 In-Situ 측정의 도입을 위한 기반연구를 수행할 필요가 있다.

따라서 본 연구의 목표는 자체처분 폐기물에 대한 감마핵종 In-Situ 측정법 적용을 위한 기반자료를 구축하는 것이다. 이를 위해 국내·외 감마핵종 In-Situ 측정 연구사례를 조사하였다. 그리고 In-Situ 측정 영향인자에 따른 측정 효율 민감도 분석을 수행하였다. 본 연구의 결과는 향후 자체처분 폐기물에 대한 감마핵종 In-Situ 측정 적용 시 활용될 수 있을 것이다.

2. 재료 및 방법

2.1. 감마핵종 In-Situ 측정 연구 사례 분석

본 연구에서는 국내·외 방사성폐기물에 대한 감마핵종 In-Situ 측정 연구 동향을 조사·분석하였다. 조사 대상 기관으로는 유럽 입자 물리 연구소, 영국 Imperial College Reactor Centre (ICRC), 미국 Oak Ridge Institute for Science and Education (ORISE), 한국원자력연구원, 고리 원자력발전소 총 5개 기관의 연구사례를 선정하였다. 각 기관에서 수행한 선행 연구사례를 분석하였다. 선행 연구사례의 목적, 사용한 측정기기, 분석 대상 핵종 등을 중심으로 조사하였다. 감마핵종 In-Situ 측정법으로는 In-Situ Objective Counting System (ISOCS)가 존재한다. ISOCS는 측정 대상물이 대형이거나 표준선원 제작이 불가능한 이유로 교정을 수행할 수 없는 경우에 대하여 활용할 수 있는 시스템이다. 다양한 형태의 측정 대상물에 대하여 적용이 가능하며 다음과 같은 모델을 통해 방사능 분석을 수행한다 [13]. ISOCS를 이용한 감마핵종 In-Situ 측정 시 전산코드를 이용하여 측정 효율을 도출한다. 그러나 해당 도출 효율에 대한 검증이 필요하다는 한계가 존재하며 이를 보완하기 위하여 실험, 전산코드 등을 통한 검증 과정이 필요하다.

$$C = \frac{S}{V \times \epsilon \times y \times T \times U \times K_c \times K_w}$$

C = 선원 체적 대비 방사능

S = 스펙트럼 피크 면적

- V=선원 체적
- y=에너지 피크 방출확률
- T=스펙트럼 측정 시간
- U=단위 환산 계수
- K_c=측정 시간 동안 방사능 붕괴 보정인자
- K_w=선원 기준일에서 측정 시작일까지 방사능 붕괴 보정인자

2.2. 감마핵종 In-Situ 측정 영향인자에 따른 민감도 평가

일반적인 감마핵종 분석의 경우, 일정한 기하학적 구조를 설정하고 교정선원을 제작하여 측정 효율을 도출할 수 있다. 그러나 In-Situ 측정의 경우, 측정상황에 적합한 기하학적 구조로 교정선원을 제작하는데 어려움이 있다. Canberra 사에서는 ISOCS를 이용한 감마핵종 In-Situ 측정 시 활용할 수 있도록 몬테카를로 방법론을 기반으로 측정 효율을 계산할 수 있는 Geometry Composer 프로그램을 제공하고 있다[14,15]. 따라서 본 연구에서는 계측 시스템의 민감도를 평가하기 위하여 Geometry Composer를 이용하여 측정 상황을 모사하고, 측정 효율을 도출하였다. 그리고 대표적인 감마핵종인 ¹³⁷Cs, ⁶⁰Co의 에너지대인 662 keV, 1117 keV, 1332 keV를 중심으로 분석하였다. 측정 상황 모사 시 측정 대상물의 재질은 Cellulose로 가정하였으며 밀도는 0.45 g cm⁻³로 가정하였다.

2.2.1. 측정 대상물 두께에 따른 민감도

측정 대상물 두께에 따른 민감도 분석을 수행하기 위해 측정 대상으로 방사성폐기물을 가정하였다. 방사성폐기물의 면적은 40×40 cm²로 가정하였으며 전체가 균일하게 오염된 것으로 설정하였다. 계측기와 측정 대상물 간의 거리는 30 cm로 설정하였으며 콜리메이터의 두께 및 각도는 각각 25 mm, 90°로 가정하였다. 측정 대상물의 두께는 10 cm를 시작으로 40 cm까지 5 cm씩 증가시키며 측정 효율을 도출하였다.

2.2.2. 측정 대상물 거리에 따른 민감도

측정 대상물 거리에 따른 민감도 분석을 수행하기 위해 측정 대상으로 방사성폐기물을 가정하였다. 방사성폐기물의 부피는 40×40×10 cm³로 가정하였으며 전체가 균일하게 오염된 것으로 설정하였다. 콜리메이터의 두께 및 각도는 각각 25 mm, 90°로 가정하였다. 측정 대상물과

계측기 간의 거리는 30 cm를 시작으로 60 cm까지 5 cm씩 증가시키며 측정 효율을 도출하였다.

2.2.3. 콜리메이터 각도에 따른 민감도

ISOCS 콜리메이터 각도에 따른 민감도 분석을 수행하기 위해 측정 대상으로 방사성폐기물을 가정하였다. 방사성폐기물의 부피는 40×40×10 cm³로 가정하였으며 전체가 균일하게 오염된 것으로 설정하였다. 콜리메이터의 두께 및 측정 대상물과 계측기 간의 거리는 각각 25 mm, 30 cm로 가정하였다. 콜리메이터의 각도가 90°, 180°인 상황에서 측정 효율을 도출하였다

2.2.4. 오염원 위치에 따른 민감도

Fig. 1에 본 연구에서 가정한 오염원 위치에 따른 측정 상황 예시를 나타냈다. 측정 대상물의 오염원 위치에 따른 민감도 분석을 수행하기 위해 측정 대상으로 비균질한 방사성폐기물을 가정하였다. 콜리메이터의 두께 및 각도는 각각 25 mm, 90°로 가정하였다. 방사성폐기물의 부피는 40×40×1 cm³로 가정하였으며 해당 측정 대상물 10장을 겹치고 한 장의 대상물만 오염되었다고 가정하였다. 계측기와 측정 대상물 간의 거리를 30 cm로 설정하였으며 측정 대상물 내 오염원 위치를 계측기와 가장 근접한 부분부터 1 cm씩 계측기에서 먼 쪽으로 이동하면서 location 1~10으로 설정하였다. 그리고 location 1에서 10으로 이동하며 측정 효율을 도출하였다.

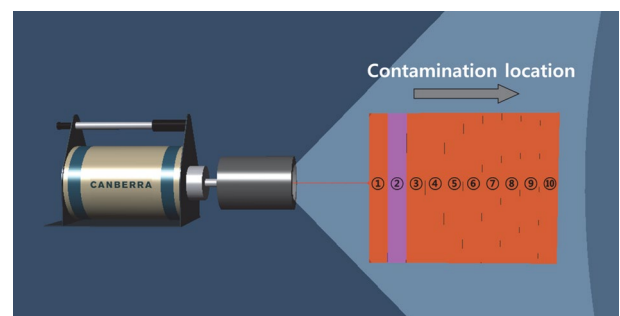


Fig. 1. Example of measurement situation according to contamination location.

3. 결 과

3.1. 감마핵종 In-Situ 측정 연구 사례 분석

유럽 입자 물리 연구소에서는 가속기 운영에 따라 발생

한 대량의 금속 폐기물에 대하여 프랑스 최종처분장 인수 기준 만족 여부 판단을 위해 감마핵종 In-Situ 측정 연구를 수행한 바 있다[16]. 가속기 운영에 의해 발생한 금속 폐기물은 대부분 극저준위 폐기물에 해당한다. 그리고 해당 폐기물을 처분하기 위해서는 인수기준 만족 여부 판단이 선행되어야 한다. 유럽 입자 물리 연구소에서는 금속 폐기물의 인수기준 만족 여부 판단을 위하여 감마핵종 In-Situ 측정을 수행하였다. 해당 연구를 위한 핵종으로 ^{22}Na , ^{60}Co , ^{207}Bi 를 선정하였으며 휴대용 HPGe를 사용하였다. 분석 결과, 금속폐기물이 프랑스 최종처분장 인수기준을 만족함을 확인하였다.

영국 ICRC에서는 연구용 원자로 CONSORT Reactor Mark II의 해체로 인해 발생한 해체폐기물의 처리 및 처분을 위한 감마핵종 In-Situ 측정 연구를 수행한 바 있다[17]. 원자로 해체 시 발생하는 해체폐기물의 경우 다양한 준위의 방사성폐기물이 발생할 수 있으며 이에 대한 처리 및 처분을 위해서는 방사능 분석 및 준위별 분류가 선행되어야 한다. ICRC에서는 해체 폐기물 분류를 위하여 감마핵종 In-Situ 측정 적용 연구를 수행하였다. 감마핵종 In-Situ 측정 대상 핵종으로 ^{152}Eu , ^{154}Eu , ^{60}Co 를 선정하였으며 해당 핵종의 표준선원 및 처분용기를 이용하여 모의 방사성폐기물을 제작하였다. 그리고 휴대용 HPGe와 분석시스템 ISOTOPIC-32 V4.1을 활용하여 해당 폐기물을 분석하였다. 분석 결과, ^{152}Eu , ^{154}Eu , ^{60}Co 의 방사능은 각각 $1.54 \times 10^6 \text{ Bq}$, $8.55 \times 10^4 \text{ Bq}$, $1.52 \times 10^{-6} \text{ Bq}$ 으로 나타났다.

미국 ORISE에서는 원자력시설 해체 후 부지 재이용을 위한 감마핵종 In-Situ 측정 적용 연구를 수행한 바 있다[18]. 원자력시설 해체 후 부지를 재이용하기 위해서는 부지 내 잔류방사능이 유도농도기준(DCGL, Derived Contamination Guideline Level) 미만임을 확인해야 한다. ORISE에서는 원자력시설 해체 후 부지 잔류방사능 측정을 위하여 감마핵종 In-Situ 측정 적용 연구를 수행하였다. 해당 연구를 위한 핵종으로 ^{60}Co , ^{137}Cs , Th_{nat} 을 선정하였으며 해당 핵종의 표준선원을 지반에 장입하여 오염된 토양을 가정하였다. Th_{nat} 는 ^{232}Th 붕괴계열 내 10개의 자핵종을 고려한 것이다. 표준선원은 지반에 깊이별로 지표면, 7.5 cm, 15 cm 그리고 반경별로 중심, 1 m, 2 m, 3 m로 구분하여 장입했으며 ISOCS를 이용하여 해당 토양 내 감마핵종을 분석하였다. 분석 결과, 일반적으로 선원항 검출기간의 거리가 증가할수록 방사능이 낮게 평가되는 경향을 보였다. 그러나 Th_{nat} 는 지상의 천연 Th에 비해 낮은 선원 방

사능 때문에 이러한 경향이 미미한 수준으로 나타났다.

한국원자력연구원에서는 서울 연구로 1, 2호기 해체를 위해 건물 내 잔류방사능 분석 연구를 수행한 바 있다[19]. 원자력시설 해체 후 시설 및 건물을 재이용하기 위해서는 부지 내 잔류방사능이 유도농도기준 미만임을 확인해야 한다. 한국원자력연구원에서는 건물 내 잔류방사능 측정을 위하여 감마핵종 In-Situ 측정 적용 연구를 수행하고 실제 잔류방사능 측정에 활용하였다. 해당 연구에서는 1) 표준선원 분석, 2) 건물 잔류방사능 분석으로 연구절차를 구분하여 수행하였으며 ISOCS를 활용하였다. 분석 대상 핵종으로 ^{60}Co 등을 선정하였으며 해당 핵종의 표준선원을 제작 후 분석하여 측정의 신뢰도를 확인하였다. 분석결과, 표준선원의 방사능과 분석값의 오차는 약 10% 수준으로 나타났다. 건물 잔류방사능 분석 단계에서는 ISOCS를 이용하여 건물 내 감마핵종을 측정하였으며 시료를 채취해 HPGe를 이용한 측정값과 비교해 결과를 검증하였다.

고리 원자력발전소에서는 원자력발전소 해체 시 선원항 평가를 수행하기 위해 원자로헤드의 방사능 분석 연구를 수행한 바 있다[20]. 효율적인 원자력발전소 해체를 위해서는 원자로헤드 등 원자력발전소 계통 등에서 발생하는 방사능에 대한 정확한 분석기술이 필요하다. 고리 원자력발전소에서는 정확한 선원항 분석기술 개발을 위하여 감마핵종 In-Situ 측정 적용 연구를 수행하였다. 감마핵종 In-Situ 측정 대상 핵종으로 ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{95}Nb , ^{124}Sb 를 선정하였다. 그리고 측정기기로 CZT, Gamma Camera, ISOCS를 고려하였으며 편의성 및 분석의 정확성을 위하여 ISOCS를 최종선정하였다. ISOCS를 이용한 원자로헤드 감마핵종 방사능 분석값은 GENT4, Microshield 전산코드를 활용하여 검증하였다.

3.2. 감마핵종 In-Situ 측정 영향인자에 따른 측정 효율 민감도 평가

3.2.1. 측정 대상물 두께에 따른 민감도

Fig. 2에 측정 대상물 두께에 따른 민감도 평가 결과를 나타냈다. 측정 대상물 두께에 따른 민감도 평가 결과, 모든 에너지에서 측정 대상물의 두께가 두꺼워질수록 측정 효율은 감소하는 것으로 나타났다. 40 cm 두께의 측정 대상물에 대하여 122 keV에서 측정 효율은 2.06×10^{-4} 으로 가장 높게 나타났으며 662 keV, 1117 keV, 1332 keV에서 각

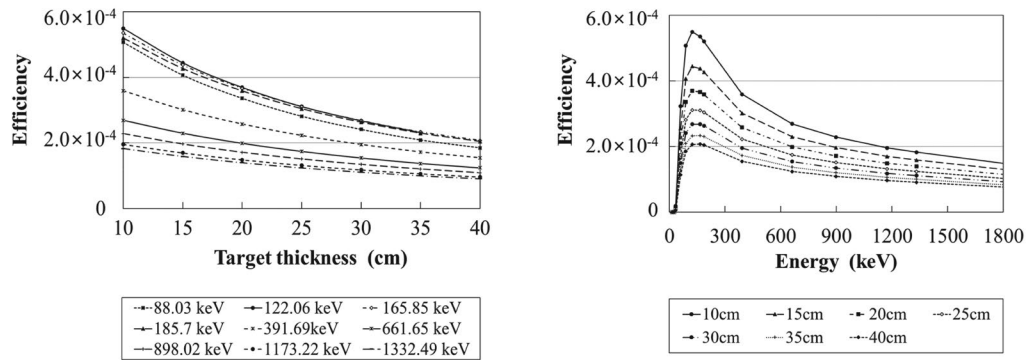


Fig. 2. Efficiency by target thickness (Left) and Efficiency by energy (Right).

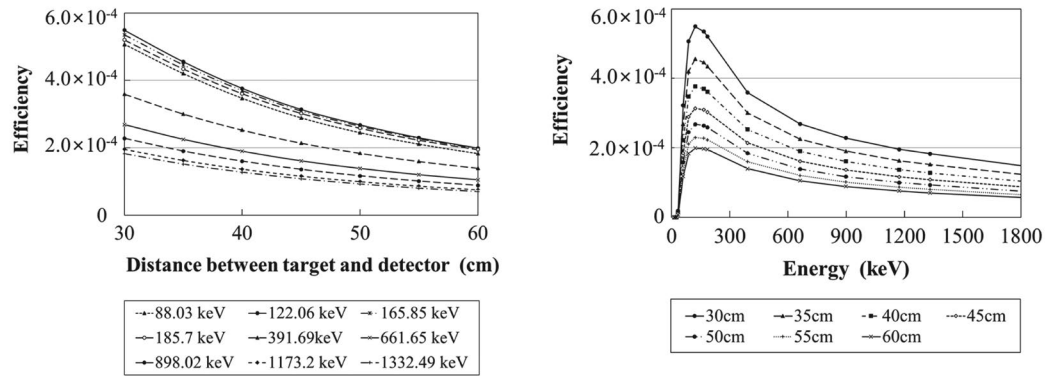


Fig. 3. Efficiency by distance between target and detector (Left) and Efficiency by energy (Right).

각 1.24×10^{-4} , 9.61×10^{-5} , 9.09×10^{-5} 으로 나타났다. 662 keV에서의 측정 효율과 1117 keV, 1332 keV에서의 측정 효율을 비교하였을 때 각각 22.29%, 26.51% 낮은 수치이다. 10 cm 두께의 측정 대상물과 40 cm 두께의 측정 대상물을 비교했을 때 분석시료의 양은 4배가 된 것에 비해 측정 효율은 662 keV에서 약 53.96% 감소하였다. 그리고 1117 keV, 1332 keV에서 측정 효율은 50.86%, 50.22% 감소하였으며 이는 662 keV에서의 측정 효율 감소율 대비 각각 3.11%, 3.74% 낮은 것으로 나타났다.

3.2.2. 측정 대상물 거리에 따른 민감도

Fig. 3에 측정 대상물 거리에 따른 민감도 평가 결과를 나타냈다. 측정 대상물 거리에 따른 민감도 평가 결과, 모든 에너지에서 측정 대상물 거리가 증가할수록 측정 효율은 감소하는 것으로 나타났다. 계측기와 측정 대상물 간의 거리가 60 cm인 경우에 대하여 122 keV에서 측정 효율은 1.99×10^{-4} 으로 가장 높게 나타났으며 662 keV, 1117 keV, 1332 keV에서 각각 1.05×10^{-4} , 7.57×10^{-5} , 7.02×10^{-5} 으로

나타났다. 662 keV에서의 측정 효율과 1117 keV, 1332 keV에서의 측정 효율을 비교하였을 때 각각 28.01%, 33.26% 낮은 수치이다. 계측기와 측정 대상물 간의 측정 대상물 거리 30 cm인 경우와 60 cm인 경우를 비교했을 때 측정 효율은 662 keV에서 60.88% 감소하였다. 그리고 1117 keV, 1332 keV에서 측정 효율은 61.31%, 61.58% 감소하였으며 이는 662 keV에서의 측정 효율 감소율 대비 각각 0.43%, 0.70% 높은 것으로 나타났다.

3.2.3. 콜리메이터 각도에 따른 민감도

Fig. 4에 콜리메이터 각도에 따른 민감도 평가 수행 결과를 나타냈다. 콜리메이터 각도에 따른 민감도 평가 결과, 콜리메이터 각도가 증가할수록 측정 효율은 증가하는 것으로 나타났다. 콜리메이터 각도가 180°인 경우에 대하여 122 keV에서 측정 효율은 8.71×10^{-4} 으로 가장 높게 나타났으며 662 keV, 1117 keV, 1332 keV에서 각각 3.58×10^{-4} , 2.44×10^{-5} , 2.25×10^{-5} 으로 나타났다. 662 keV에서의 측정 효율과 1117 keV, 1332 keV에서의 측정 효율을 비

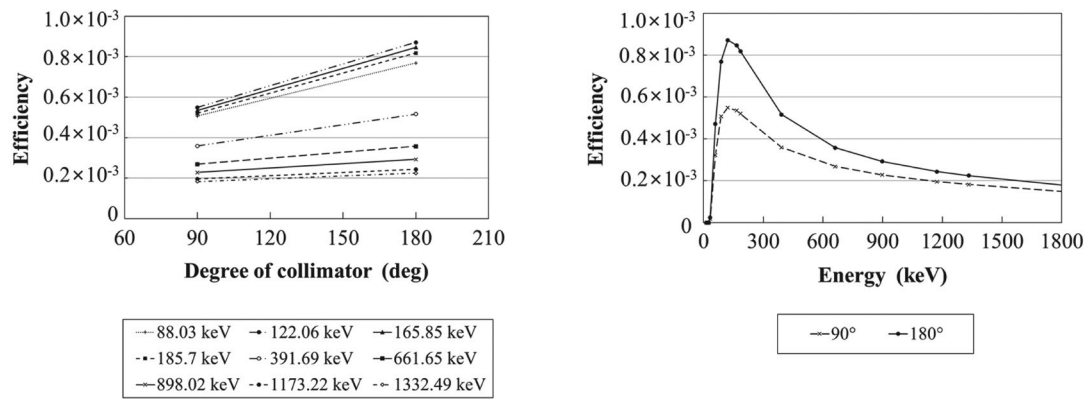


Fig. 4. Efficiency by collimator's degree (Left) and Efficiency by energy (Right).

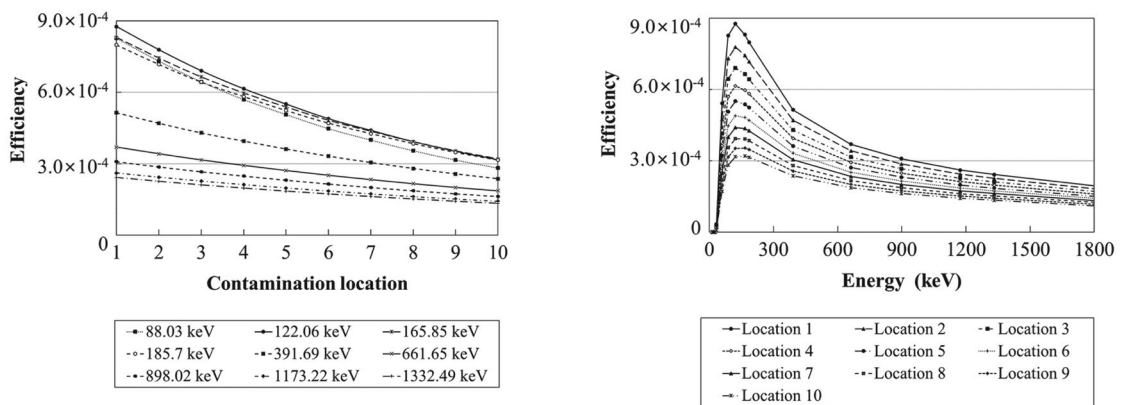


Fig. 5. Efficiency by contamination location (Left) and Efficiency by energy (Right).

교하였을 때 각각 31.90%, 37.12% 낮은 수치이다. 콜리메이터 각도 90°인 경우와 180°인 경우를 비교했을 때 측정 효율은 662 keV에서 33.08% 감소하였다. 그리고 1117 keV, 1332 keV에서 측정 효율은 24.50%, 23.13% 감소하였으며 이는 662 keV에서의 측정 효율 감소율 대비 각각 8.59%, 9.95% 높은 것으로 나타났다.

3.2.4. 오염원 위치에 따른 민감도

Fig. 5에 오염원 위치에 따른 민감도 평가 결과를 나타냈다. 오염원 위치에 따른 민감도 평가 결과, 오염원 위치와 계측기 간의 거리가 증가할수록 측정 효율은 감소하는 것으로 나타났다. 오염원과 계측기 간 거리가 가장 가까운 경우에 대하여 122 keV에서 측정 효율은 8.76×10^{-4} 으로 가장 높게 나타났으며 662 keV, 1117 keV, 1332 keV에서 각각 3.70×10^{-4} , 2.61×10^{-4} , 2.42×10^{-4} 으로 나타났다. 662 keV에서의 측정 효율과 1117 keV, 1332 keV에서

의 측정 효율을 비교하였을 때 각각 29.46%, 34.49% 낮은 수치이다. 오염원 위치와 계측기 간의 거리가 가장 가까운 경우와 먼 경우를 비교했을 때 측정 효율은 662 keV에서 49.46% 감소하였다. 그리고 1117 keV, 1332 keV에서 측정 효율은 45.60%, 44.86% 감소하였으며 이는 662 keV에서의 측정 효율 감소율 대비 각각 3.87%, 4.60% 낮은 것으로 나타났다.

4. 고찰

4.1. 감마핵종 In-Situ 측정 연구 사례 분석

Table 1에 국내·외 감마핵종 In-Situ 측정 연구 사례를 비교하여 나타내었다. 감마핵종 In-Situ 측정은 방사성폐기물 인수기준 만족여부 조사, 해체 후 부지내 잔류방사능 측정 등에 대하여 수행되고 있었다. 분석대상물로는

Table 1. In-situ gamma spectrometry research case study

Category	CERN	ICRC	ORISE	KAERI	Kori NPP
Measurement target	Metal waste	Nuclear reactor decommissioning waste	Standard source	Standard source, Building surface	Reactor head
Research purpose	Disposal	Treatment and disposal of decommissioning waste	Measurement of residual radioactivity in the site	Measurement of residual radioactivity on building surfaces	Analysis of source term
Nuclide	²² Na, ⁶⁰ Co, ²⁰⁷ Pb	¹⁵² Eu, ¹⁵⁴ Eu, ⁶⁰ Co	⁶⁰ Co, ¹³⁷ Cs, Th _{nat}	⁶⁰ Co <i>et al.</i>	⁵⁴ Mn, ⁶⁰ Co, ⁹⁵ Nb, ¹²⁴ Sb
Measurement system	Portable HPGe	Portable HPGe	ISOCS	ISOCS	ISOCS
Analysis result verification method	-	Comparison with standard source	-	Comparison with sampling analysis results	Comparison with computer code

원자력발전소 계통, 해체폐기물, 해체 후 부지 등 시료채취가 어렵거나 발생량이 많은 방사성폐기물에 대하여 수행되고 있었다. 분석대상 핵종으로는 공통적으로 대표적인 감마핵종인 ⁶⁰Co를 포함하여 선정하였다. 감마핵종 측정기기로는 휴대용 HPGe, ISOCS를 사용하였다. 고리 원자력발전소에서는 CZT, Gamma Camera, ISOCS를 비교하여 ISOCS를 감마핵종 In-Situ 측정기기로 선정하였다. ISOCS는 방사능의 정량적인 분석이 가능하며, 고선량률 지역에서도 거리, 차폐체를 통해 사용이 가능하다는 장점 때문에 연구 시 보편적으로 사용되었다. 그리고 각 연구에서는 분석 결과를 검증하기 위해 시료채취법, 전산코드 등을 이용한 모델링을 수행하였다.

4.2. 감마핵종 In-Situ 측정 영향인자에 따른 측정 효율 민감도 평가

에너지에 따른 측정 효율은 측정 대상물의 두께, 계측기-측정 대상물 간의 거리, 콜리메이터의 각도, 오염원의 위치와 무관하게 122 keV를 기준으로 고에너지 영역에서는 에너지가 증가할수록 측정 효율이 감소하였으며 저에너지 영역에서는 에너지가 감소할수록 효율이 감소하였다. 측정 대상물의 부피 40×40×10 cm³, 계측기-측정 대상물 간의 거리가 30 cm인 경우에 대하여 측정 효율은 88 keV에서 122 keV로 증가하며 약 8.33% 증가하였다. 그리고 122 keV에서 1332 keV로 증가하며 약 220.77% 감소하였다. 측정 영향인자와 무관하게 122 keV에서 측정 효율이 가장 높게 나타났으며 1117 keV, 1332 keV에서의 측정 효

율을 비교하였을 때 유사하게 나타났다. 고에너지 구간인 662 keV, 898 keV, 1173 keV, 1332 keV에서는 영향인자에 따른 측정 효율의 변화율이 391 keV 이하의 에너지 구간에서의 측정 효율 변화율에 비해 비교적 낮은 것으로 나타났다. 662 keV, 1117 keV, 1332 keV에서의 영향인자에 따른 측정 효율 변화율은 거리에 대한 변화율을 제외한 경우에서 662 keV에서의 변화율이 높은 것으로 나타났다. 측정 대상물의 부피 40×40×10 cm³, 계측기-측정 대상물 간의 거리가 30 cm인 경우에 대하여 전체가 균질하게 오염된 경우보다 전면부 1 cm만 오염된 경우가 측정 효율이 더 높게 나타났다. 콜리메이터 각도별 민감도 평가 결과, 콜리메이터의 각도가 증가할수록 측정 효율은 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 Geometry Composer를 이용한 측정상황 모사 시 백그라운드를 가정하지 않았으며 각도가 증가할수록 백그라운드의 입사확률이 증가하므로 추후 이를 고려하여 계측상황을 설계해야 할 것으로 판단된다. 본 연구의 Geometry Composer에 의한 측정 효율 도출 결과는 실험을 통한 실측결과와 비교하여 검증할 필요가 있다. 따라서 향후 실험을 통한 효율 도출 결과 실증 연구가 추가적으로 수행되어야 할 것이다.

5. 결론

다수의 원자력발전소 영구정지가 임박함에 따른 자체 처분 폐기물 발생의 증가가 예상됨에 따라 효율적인 관리

방안이 요구되고 있다. 따라서 측정절차를 간소화할 수 있고 효율적인 측정이 가능한 감마핵종 In-Situ 측정 적용이 필요하다. 본 연구에서는 국내·외 감마핵종 In-Situ 측정 연구사례를 분석하고 In-Situ 측정 영향인자에 따른 측정 효율을 도출하였다.

국내·외 감마핵종 In-Situ 측정 연구사례는 유럽 입자 물리 연구소, 영국 ICRC, 미국 ORISE, 한국원자력연구원, 고리 원자력발전소 총 5개 기관의 연구사례를 선정하였다. 감마핵종 In-Situ 측정 연구는 방사성폐기물 인수기준 만족여부 조사, 부지 내 잔류방사능 분석 등에 대하여 수행되고 있었다. 측정 대상으로 해체폐기물, 해체 후 부지 등 시료채취가 어렵거나 발생량이 많은 방사성폐기물에 대하여 수행되었다. 주요 측정기기로 ISOCS를 사용하였으며 이에 대한 분석 결과 검증으로 시료채취법, 전산코드 등을 활용하였다.

In-Situ 측정 영향인자에 따른 측정 효율 민감도 평가의 경우 측정 대상물의 두께, 계측기-측정 대상물 간 거리, 콜리메이터의 각도, 오염원의 위치에 대하여 ISOCS의 Geometry Composer를 이용하여 수행하였다. 공통적으로 122 keV를 기준으로 고에너지 영역에서는 에너지가 증가할수록 측정 효율이 감소하였으며 저에너지 영역에서는 에너지가 감소할수록 측정 효율이 감소하였다. 측정 대상물의 두께가 두꺼울수록 측정 효율이 감소하였으며 계측기-측정 대상물 간 거리가 증가할수록 측정 효율이 감소하였다. 오염원과 계측기 간의 거리가 증가할수록 측정 효율이 감소하였으며 콜리메이터의 각도가 증가할수록 측정 효율이 증가하였다. 그러나 Geometry Composer를 이용한 측정상황 모사 시 백그라운드를 가정하지 않았으며 각도가 증가할수록 백그라운드의 입사확률이 증가하므로 추후 이를 고려하여 추가 연구를 수행할 필요가 있다. Geometry Composer에 의한 측정 효율 도출 결과는 실험, 전산모사 등을 통한 검증 과정이 필요하다. 따라서 향후 실험을 통한 효율도출 결과 실증 추가 연구가 필요하다. 본 연구의 결과는 향후 자체처분 폐기물에 대한 감마핵종 In-Situ 측정 적용 시 활용될 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 원자력안전위원회의 재원으로 한국원자력안전재단의 지원을 받아 수행한 원자력안전연구사업의 연

구결과입니다(No. 2106041).

참고문헌

1. NSSC. 2022. Enforcement Decree Of The Nuclear Safety Act Article 107 Paragraph 1.
2. MOTIE. 2020. Korean 2nd Basic Plan for the Management of LILW.
3. KORAD. 2020. Implementation Plan for the Management of LILW in 2020.
4. IAEA. 1997. Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management. INFCIRC/546.
5. Sappok M. 1987. Results of Metallic Waste Treatment by Melting, Siemplekamp Gtiesserei GmbH & Co, CONF-874048, Westinghouse Handford, October, Vol 1:115-127.
6. Mies HP and Stang W. 1991. Decommissioning of Nuclear Power Plant Gundremmingen Unit A, Company Report-Kernkraftwerke Gundremmingen Betriebsgesellschaft.
7. Menon S, Hernborg G and Andersson L. 1990. Melting of low-level contaminated steels, Studsvik AB, Sweden in Decommissioning of Nuclear Installations, Elsevier Applied Science.
8. Gomer CR and Lambley JT. 1985. Melting of contaminated steel scrap arising in the dismantling of nuclear power plants, British Steel Corporation, for Commission of the European Communities, Final Report Contract No. DED-002-UK.
9. Jacquet-Francillon N, Jouan A, Moncouyoux JP and Sombret C. 1991. Melting-A Promising Technique for Processing Metallic Decladding Materials from Irradiated Nuclear Fuels, ICCN 91, Bombay, India.
10. Gelbutovskiy AB, Kishhkin SA, Mochenov MI, Troshev AV, Cheremisin PI and Chernichenko AA. 2006. CJSC ECOMET-S facility for reprocessing and utilization of radioactive metal waste-operating experience. *J. Nucl. Sci. Technol.* **2**(1-2):31-41. <https://doi.org/10.1504/IJNEST.2006.010645>.
11. Sin GB, Gang IS, Jang WH and Hong DS. 2015. Self-Disposal Process of Steel VLLW by KAERI. Abstracts of Proceedings of the Korean Radioactive Waste Society AUTUMN 2015:425-426.
12. Joe HT, Lee KH, Kim JC, Kim HC and Lee ED. 2011. Establishment and Execution Method of Self Disposal Procedure for Iron Radioactive Waste at Uljin 3 Nuclear Power Plant. Abstracts of Proceedings of the Korean Association For Radiation Protection SPRING 2011:114-115.
13. Jun HM, Kim JH, Song JJ, Kang TU, Lee JC, Han KH and Seo JS. 2016. Radioactivity Measurement and efficiency evaluation of ^{152}Eu Radioactive Standard Source of Using the ISOCS. Abstracts of Proceedings of the Korean Radioactive Waste Society SPRING 2016:345-346.

14. Mirion Technologies. 2013. Model S573 ISOCS Calibration Software.
15. Mirion Technologies. 2008. In Situ Gamma Spectroscopy with ISOCS™, an In Situ Object Counting System.
16. Frosio T, Bertreix P, Magistris M, Mena N, Michaud R, Rimlinger M, Theis C, Ulrici L and Zaffora B. 2020. An enhanced characterization process for the elimination of very low level radioactive waste in particle accelerators. *Applied Radiation and Isotopes* 166. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2020.109312>.
17. Shuhaimi AIM. 2016. Characterisation of Imperial College Reactor Centre Legacy Waste Using Gamma-Ray Spectrometry. AIP Conference Proceedings 1704. <https://doi.org/10.1063/1.4940099>.
18. Chapman JA, Boerner AJ and Abelquist EW. 2006. Spatially-Dependent Measurements of Surface and Near-Surface Radioactive Material Using In situ Gamma Ray Spectrometry (ISGRS) For Final Status Surveys.
19. Hong SB, Ju MS, Jung KH, Lee GW and Jung US. 2008. Evaluation of Residual Radioactivity in Buildings Using ISOCS. Abstracts of Proceedings of the Korean Radioactive Waste Society May 2008:55-56.
20. Song JS, Lee SH and Shin SS. 2018. A Study on the Assessment of Source-term for PWR Primary System Using MonteCarlo Code. *J. Nucl. Fuel Cycle Waste Technol.* **16**(3):331-337. <https://doi.org/10.7733/jnfcwt.2018.16.3.331>.