JOURNAL OF RADIATION INDUSTRY

Original article

17(1) : 11-17 (2023)
https://doi.org/10.23042/radin.2023.17.1.11

방사성 금속폐기물의 방사능 오염도 측정 및 오염 여부에 따른 자동 분류 시스템 개념설계 및 개발

권순범[1], 김보길[1], 염정민[1], 이경모[1], 이홍연[1,*], 한상준[1]

[1](주)알엠택

Conceptual Design and Development of an Automatic Classification System According to Radioactive Contamination Level Measurement and Contamination of Radioactive Metal Waste

Sun Beom Kwon[1], Bo Gil Kim[1], Jeong Min Yeom[1], Gyeong Mo Lee[1], Hong Yeon Lee[1,*] and Sang Jun Han[1]

RMTEC Co., Ltd., 25, Hanamsandancheonbyeonjwa-ro, Gwangsan-gu, Gwangju 62215, Republic of Korea

Abstract Waste generated during the dismantling of nuclear power plants is not only diverse in types such as metal, concrete, soil, but also in a large amount, requiring systematic and efficient management. It is very important to quickly and accurately measure radioactive contamination of wastes generated simultaneously at the decommissioning site, classify them by level, and make decisions so that they can be disposed of in accordance with related laws and regulations. In this paper, for the technical and economic aspects of recycling of radioactive metal waste generated during the dismantling of nuclear power plants, we propose a management system that can measure the radioactive contamination by shape of metal waste at the decommissioning site and automatically classify it according to the presence or absence of contamination. Accordingly, a system for collecting information on metal samples such as weight measurement and shape acquisition of metal waste, measurement of radioactive contamination and identification of nuclides, and an automatic classification system according to radioactivity measurement results were described.

Key words: Nuclear decommissioning, Radioactive metal waste, Radiological measuring, Classification system

1. 서 론

전 세계적으로 약 440기의 원자력발전소가 가동 중이며, 이 중 30년 이상 가동 중인 원전은 300기 이상이다. 사실상 세계 원전 시설이 노후화 단계에 접어들면서 원전 해체를 계획하고, 실제 영구 정지된 약 200기의 원전 중 20기의 원전이 해체되었다. 우리나라도 고리 원전 1호기의 영구 정지를 시작으로 원전 해체가 본격적으로 진행될 계획이다[1,2].

원전 해체 시 발생되는 폐기물은 금속, 콘크리트, 토양 등 종류도 다양할 뿐만 아니라 발생량 또한 방대하다. 향후 원전 해체 시 발생되는 폐기물의 양은 수천만 톤 정도가

http://www.ksri.kr/

Copyright © 2023 by
Korean Society of Radiation Industry

***Corresponding author.** Hong Yeon Lee
Tel. +82-62-236-6740 Fax. +82-62-236-6741 E-mail. lhy1030@rmtec.co.kr

Received 8 November 2022 **Revised** 16 March 2023 **Accepted** 22 March 2023

Fig. 1. Metal waste measurement and classification system.

될 것으로 추산되고 있으며, 원전 해체폐기물의 처리 및 처분비용은 해체비용의 큰 비중을 차지하고 있으므로 체계적이고 효율적인 관리가 필요하다. 특히, 금속류의 경우 상당 부분이 부가가치가 높은 재료이므로 재활용 시 많은 경제적 이득이 예상된다[3,4].

하지만, 원전 해체에서 발생한 폐기물은 대부분 다양한 준위의 방사성 오염이 예상되며, 이러한 방사성폐기물은 제염 등의 처리 과정을 거친 후에 방사선학적으로 위해도가 기준치 미만으로 판명되어야만 재활용하거나 자체적으로 처분이 가능하다. 원전 해체 현장에서 동시다발적으로 발생하는 폐기물에 대해서 신속·정확하게 방사능 오염을 측정하고, 준위별로 분류하여 관계 법령 및 규정에 따라 처리·처분할 수 있도록 의사결정을 하는 것이 매우 중요하며, 이를 위한 기술개발 및 기술 자립화가 요구된다[5-7].

본 논문에서는 원전 해체 시 발생하는 방사성 금속폐기물 자원의 재활용이라는 기술·경제적 측면을 위해 해체 현장에서 금속폐기물의 형상별 방사능 오염을 측정하고 오염 여부에 따라 자동 분류할 수 있는 관리시스템을 제안하고, 금속폐기물의 무게 측정 및 형상 취득 등 금속 시료 정보수집, 방사능 오염도 측정 및 핵종 판별, 방사능 측정 결과에 따라 자동 분류되는 시스템에 대해 기술하였다.

2. 재료 및 방법

본 개발 시스템은 크게 세 가지로 시료 정보 수집, 방사능 오염도 측정 및 핵종 판별, 분류 이송 하드웨어로 나뉘고, 이와 연동 가능한 소프트웨어 프로그램으로 구성된다.

방사능 오염도 측정부는 시료의 방사능 오염 여부 및 오염 위치를 판별하기 위해 육면체의 방사능 계측 챔버에 Plastic Scintillator (PVT)를 각 면에 배치하였고, 핵종 판별을 위해 Multi-Channel Analyzer (MCA)가 결합된 Lanthanum BromoChloride (LaBr2.85Cl0.15:Ce) Scintillator (LBC 검출기)로 구성하였다. 배경방사선 차폐를 위해서 MCNP 모사를 통해 최적의 차폐체 두께를 설계하였으며, 이를 바탕으로 기구물을 제작하였다. 또한, 시료 정보 수집을 위해 무게 측정 저울과 X·Y·Z축 측정을 통한 형상 취득 시스템을 도입하여 설계하였다.

2.1. 방사능 측정 및 핵종 판별을 위한 검출부 설계 및 제작

금속폐기물의 방사능 오염도 측정을 위해 선정된 PVT 검출기는 결합되는 Preamplifier로 인해 배치 시 형상적으로 검출기 간 이격거리가 발생하며, 이는 배경방사선의 영향과 측정 대상물의 오염도 측정 유효면적이 낮아지기 때문에 검출기 간 빈 공간을 최소화할 필요가 있다. 본 연구에서는 구조적 모델링을 통해 Fig. 2와 같이 배치하였으며, 유효 측정면적인 6개 면에 32개 검출기로 구성하였다. 검출기와 검출기 간 이격 거리를 최소화하여 배경방사선의 영향을 최소화하고 유효측정면적을 극대화할 수 있게 하였다.

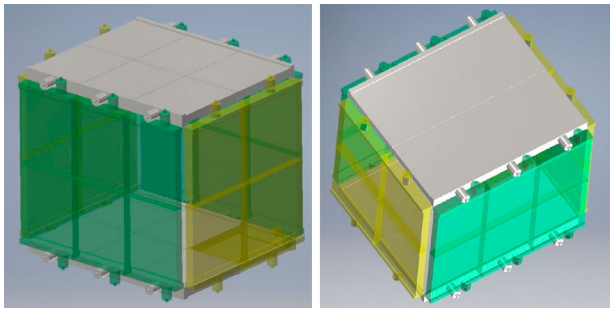

Fig. 2. Plastic scintillator 3D design layout drawing.

Table 1. Plastic scintillator physical properties

Density, g cm^{-3}	1.06
Refractive index	1.6
Absorption coefficient, cm^{-1}	0.002~0.005
Softening temperature, K	355~360
Light output, % of anthracene	56
Number of electrons per cm^3, 10^{23}	3.44
Number of H atoms per cm^3, 10^{22}	4.91
Number of C atoms per cm^3, 10^{22}	4.91
Ratio H : C atoms	1.0

Table 2. LBC detector features

Scintillation crystal	LBC 38 × 51 mm, standard
Photomultiplier tube	Φ 51 mm type
Housing	0.5 mm aluminum
Magnetic shielding	Solid 0.63 mm around PMT
Length, Diameter	152 mm, 58.8 mm
Connectors	14-pin JEDEC connector
Temperature range	−20°C to +60°C
Energy resolutions	< 3% FWHM @662 keV
Gain stability	< 1% over 24 h at 20°C
Typical high voltage	600~800 V

또한, 금속폐기물의 핵종 판별 및 감마선 스펙트럼 측정을 위해 LBC 검출기를 측정 챔버 내부 컨베이어 하단에 배치하였으며, 감마선 스펙트럼 분석용 MCA 회로와 FPGA, MCU 등으로 구성하였고, Preamp 소켓으로부터 SMA connector를 통해 아날로그 Preamp Signal을 받을 수 있도록 설계하였다.

각각의 PVT, LBC 검출기의 측정 데이터는 TCP-IP 통신을 통해 PC로 전송된다.

2.2. 방사선 차폐체 최적화 설계

Fig. 3과 같이 MCNP 모사로 산출된 최적의 납, 구리 및 철판 두께 설계를 바탕으로 차폐 기구물을 제작하였다. 차폐 기구물 중 오염 측정 구간은 외부 백그라운드 방사선 차폐 기능 외에 모터, 컨베이어, 검출기 등 전체적인 설비의 고정을 위해 PVT 검출기 기준 외벽에 구성하였으며, 납 차폐체 간 이격으로 인한 비차폐 공간을 최소화시켜 제작하였다. 납은 벽체, 상·하판, 입·출구판에 위치해 있으며 100 × 400 × 30 mm, 172개를 가공(Fig. 4)하였고 총 무게는 약 4.1톤이다.

2.3. 시료정보 획득 시스템

금속 방사성폐기물 시료정보 취득의 기본 개념설계는 로드셀을 장착한 무게 전자저울, 라이트 커튼센서, 모터 구동 방식의 이송 컨베이어 그리고 각 센서에서 측정된 데이터와 PC를 연결하는 Gateway PLC 및 IO-Link Master와 각종 정보를 확인하기 위한 HMI (Human Machine Interaction)로 구성되며, 측정 대상 금속폐기물의 무게 및 Fig. 5와 같은 형상정보를 취득한다.

형상 구분 센서는 초음파 센서로 측정 형상의 특징인자를 이용하여 방사성 폐기물의 형상을 구분하도록 설계하였다. 라이트 커튼 센서는 송신기와 수신기를 1세트로 하

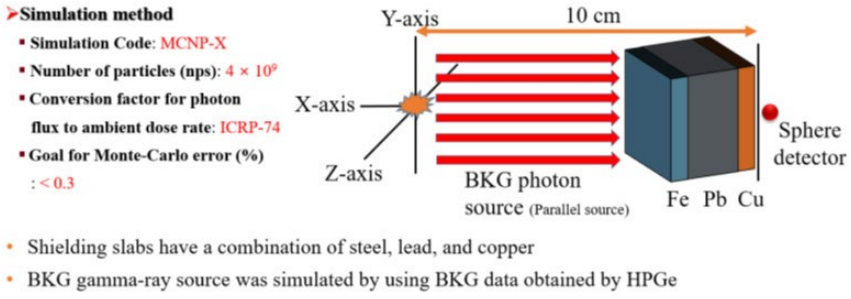

Fig. 3. Conditions, materials and structures used in MCNP modeling.

며 가로, 세로, 높이를 따로 측정하여 폐기물의 기하학적 크기를 획득하고 측정 데이터는 Gateway PLC로 전송된다.

2.4. 통합관리프로그램 S/W 구축

통합관리프로그램은 각 하드웨어 구성품(방사능 측정부, 무게 측정 장비, 형상 측정 장비, PLC 제어부 등)과 각각 통신을 하며, 시료의 정보관리, 오염도 측정, MCA 설정 등 구축된 설비를 하나로 통합·제어하는 역할을 한다.

각 구성품의 통신방식은 TCP-IP로 통일하였고, 프로토콜을 해석하여 정상적으로 데이터가 수신되는 것을 확인하였으며, 이후 수신된 데이터는 통합관리프로그램에 표출된다. 프로그램의 대표적인 메뉴는 메인화면, 데이터 검색, 장비제어, 환경설정으로 구성했다. 메인화면에서는 전체적인 현재시간(작업시간), 시료의 무게, 취득된 형상정보, 수치, 실시간 계수율과 스펙트럼을 확인할 수 있고, 시료의 시리얼넘버, 측정시간 설정, 계측 시작/멈춤/저장 등의 기능을 할 수 있도록 하였다. 시료의 측정 도중 정상적인 절차대로 진행되지 않을 경우를 대비하여 컨베이어를 수동조작할 수 있도록 하였다. 측정된 시료의 오염도는 측정기모니터링 탭에서 가독성이 있도록 오염 부위에 컬러를 적용하였다. 데이터 검색 화면의 경우 검사한 시료의 검사일자, 무게, 형상정보 등 이력을 확인하고 출력할 수 있도록 하였으며, 장비제어 화면은 32개의 PVT 검출기와 핵종분석을 위한 LBC 검출기의 설정값을 변경시킬 수 있도록 하였다. 환경설정 화면은 무게 측정, 형상 취득, PLC, MCA와의 연결 시 필요한 IP와 Port 번호를 입력 및 저장할 수 있도록 구성했다.

Fig. 4. Lead shielding device assembly design and manufacturing.

3. 결과 및 고찰

제작된 금속폐기물의 방사능 오염도 측정 및 분류 시스

Fig. 5. Metal waste representative shape.

Table 3. S/W program configuration

Main screen	• Hardware control - Measurement start/stop/save, etc. • Current status of metal waste measurement • Sample weight and measurement shape expression • Real-time radiation count rate (measurement of contamination) • Implementation of gamma ray spectrum
Data search	• Search and recall stored metal waste measurement data
Equipment control	• Radiation detector set value control - HV application, detector settings, etc.
Preferences	• Radiation detector and measurement equipment and communication connection and setting value adjustment

Fig. 6. Integrated management software program.

Fig. 7. Drum for preliminary testing.

Fig. 8. Radioactive metal waste measurement pilot operation.

템이 적합하게 운영되는지 임의의 방사성 금속폐기물 시료를 제작하여 시험하였다. 방사성폐기물 처분에 주로 사용되는 200 L 드럼을 예비 시료로 선정하였으며, Fig. 7과 같이 방사능 선원의 위치를 조절할 수 있도록 제작하였다. 무게 측정 및 형상 취득 장비를 통해 실제 드럼의 형상으로 측정되는지 시험하였다. 시료 내 선원의 위치에 따른 측정 결과를 비교하였으며, LBC 검출기를 이용하여 ^{137}Cs과 ^{60}Co 선원에서 방출되는 감마선 에너지 스펙트럼을 측정하였다.

시험 결과, Fig. 9와 같이 측정된 시료의 X·Y·Z축 길이정보를 이용하여 드럼의 형상으로 표출되었으며, 방사선 측정은 Figs. 10, 11과 같이 드럼 내 선원의 위치에 따라 측정 챔버 내 근접한 면의 PVT 검출기에 더 많은 방사선이 계수되는 것을 확인하였다.

LBC 검출기를 이용하여 측정된 감마선 스펙트럼은 각 선원에서 방출되는 감마선 에너지 피크가 스펙트럼에 표출되었으나, 방사선 측정은 선원으로부터 거리에 따라 지수적으로 감소하므로 LBC 검출기가 위치한 측정 챔버 하단에서 멀어질수록 에너지 피크가 저평가되는 경향을 확

Fig. 9. Shape acquisition of radioactive metal waste samples.

인하였다. 핵종 판별에 있어 보다 정확한 측정을 위해서는 검출기의 위치 또는 여러 대의 검출기를 Array하여 측정할 수 있는 방안에 대해서 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 시스템 연구개발에서는 원전 해체 시 발생할 수 있는 금속폐기물의 방사능 오염도를 측정하고 분류할 수 있는 시스템을 설계하고 제작하여 시범운영하였다. 제작에 앞서 방사선을 효율적으로 측정할 수 있는 대면적 검출기를

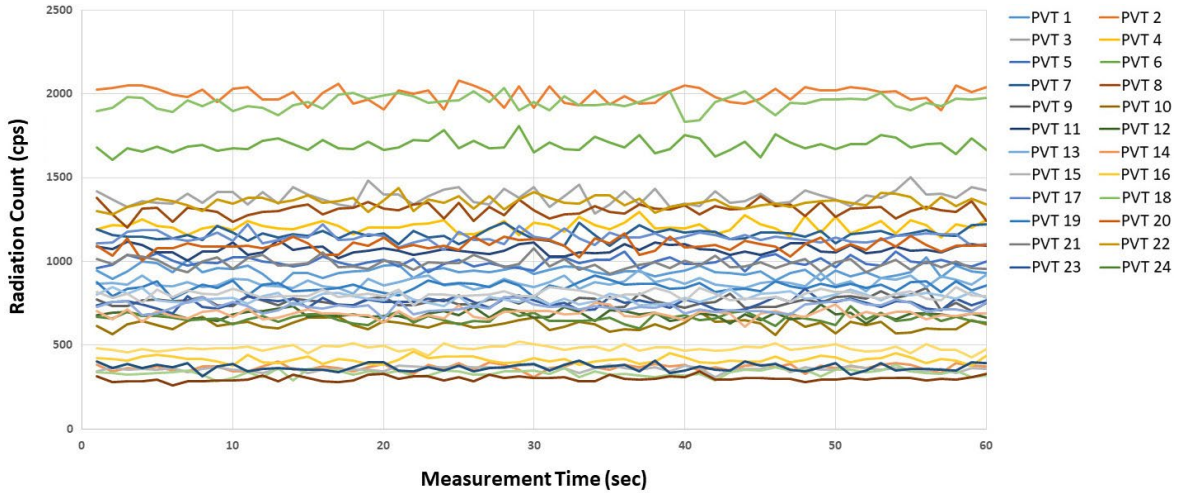

Fig. 10. Radiation measurement trend by PVT detector (top position of sample).

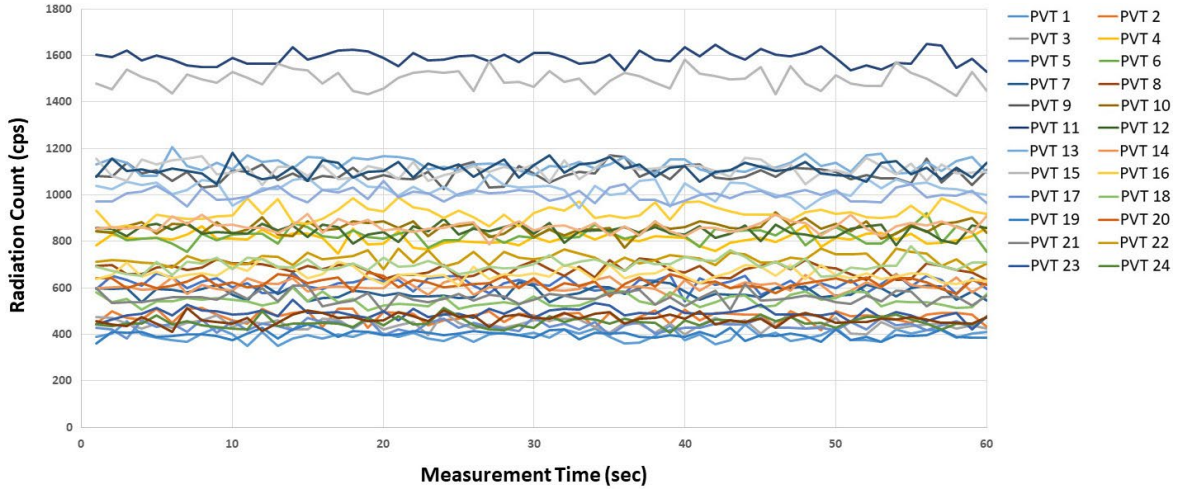

Fig. 11. Radiation measurement trend by PVT detector (position at the bottom of the sample).

Fig. 12. Gamma-ray measurement using LBC detector (^{137}Cs, ^{60}Co check source).

선정하고, 유효측정면적을 설계하였으며, 시료에 오염된 방사능 핵종을 판별하기 위해 감마선 스펙트럼 구현이 가능한 검출기를 추가하였다. 시료의 형상에 따른 측정 데이터베이스 구축을 위해 무게 및 형상 취득 시스템을 도입하였으며, 방사능 오염 여부에 따라 분류될 수 있도록 시스템을 개발하였다.

방사성폐기물 처분에 주로 사용되는 200 L 드럼을 예비 시료로서 시범운영하였으며, 계획한 설계 의도대로 방사능 오염 위치에 따라 측정면의 방사선 카운트의 변화가 있었으나, 보다 정확한 오염 위치 판별을 위해서는 많은 측정 데이터와 시료 내 방사능 선원을 명확히 위치시킬 수 있는 검증용 시료 개발 및 제작이 필요하다. 측정된 스펙트럼을 통해 감마선 에너지 피크를 분석하여 핵종을 판별할 수 있었고, 추가적인 시스템 개선 및 후속 연구를 통해 자동화된 핵종 판별 및 정량분석 알고리즘을 개발하여 적용이 필요하다. 또한, 드럼 내 내장되는 금속폐기물은 모두 밀도가 높은 시료로서 시료 내에서 자체 흡수되어 저평가되는 요인을 염두해야 하므로 실제 폐기물 시료를 이용하여 감마선을 측정하거나, 전산모사를 통해 모델링한 데이터를 적용하는 방법 등을 추가로 개발 시스템을 개선할 계획이다.

사 사

본 연구는 산업통상자원부와 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20203210100190).

참고문헌

1. Korea Energy Economics Institute. 2021. World Nuclear Power Market Insight.
2. Lee JH, Kim DG and Kwon KH. 2018. Recent Activities in Decommissioning Technology of Nuclear Power Plants. *KSCE Magazine* **65**(11):20-26.
3. Shin JI, Park JH, Jung GJ, Baek ST, Jeong WS, Park SG, Hwang DS, Lee DK and Kim HR. 2003. The Study on Recycle Scheme of the Metallic Radioactive Wastes, Korea Atomic Energy Research Institute.
4. Min BY, Lee YJ, Yoon KS, Lee KW and Moon MK. 2014. A management plan for large-scale metal waste generated when nuclear facilities are dismantled. Proceeding of the 2014 Spring Conference of the Korea Society of Waste Management. 113-113.
5. Jung HJ, Lee HK, Lee UJ, Byun JH, Lee KH and Jeong SW. 2020. A Conceptual Design Study of Mobile Compaction Facility for Effective Volume Reduction of Nuclear Power Plant Decommissioning Waste. *J. Radiat. Ind.* **14**(4):441-446. https://doi.org/10.23042/radin.2020.14.4.441
6. Seo BK, Ji YY, Hong SB, Lee GW and Moon JK. 2013. Measurement Method of Final Residual Radioactivity of Radioactive Metallic Waste for Clearance. *J. Radiat. Prot.* **38**(4):228-233. https://doi.org/10.14407/jrp.2013.38.4.228
7. Song JY, Song GH, Bang JH, Ji SW, Do TG and Kim GP. 2018. Review Study of Radioactive Waste Classification and Waste Acceptance Criteria for Disposal of VLLW from Decommissioning of Nuclear Facilities. *J. Radiat. Ind.* **12**(3):239-247. https://doi.org/10.23042/radin.2018.12.3.239