Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 18, No. 3, pp. 249-253, 2024
https://doi.org/10.23042/radin.2024.18.3.249

Technical article

습식 저장시설 내 사용후핵연료 연소도 측정을 위한 감마선/중성자 검출기 개발

박혜민[1,*] · 김태영[1] · 이인호[1] · 장대헌[1] · 송양수[1] · 이운장[1] · 함철민[2]

[1](주)오리온이엔씨, 서울특별시 성동구 성수이로 22길 37, 1307호
[2]기초과학연구원 중이온가속기연구소, 대전광역시 유성구 국제과학로 1

Development of a Gamma/Neutron Detector to Measure the Burnup Profile of Spent Fuel in Wet Storage Facility

Hye Min Park[1,*], Tae Young Kim[1], In Ho Lee[1], Dae Heon Jang[1], Yang Soo Song[1], Un Jang Lee[1], and Cheol Min Ham[2]

[1]ORION ENC, 37, 22 Gil Seongsui-ro, Seongdong-gu, Seoul 04798, Republic of Korea
[2]Rare Isotope Science Project, Institute for Basic Science, 1, Gukjegwahak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34000, Republic of Korea

ABSTRACT For the safe management and disposal of spent fuel, it is essential to accurately determine the quantities of nuclides present within the spent fuel. In this study, a Gamma/Neutron detection system was developed as a part of basic research to measure the burnup profile of spent fuel, and a performance was evaluated using major nuclides. The prototype of the Gamma/Neutron detection system consisted of a CZT sensor and a ^{3}He chamber. For quantitative evaluation, studies were conducted using calibrated ^{137}Cs, ^{134}Cs, ^{154}Eu and ^{252}Cf sources. In the performance evaluation, a field applicability was verified by analyzing the detection characteristics according to the nuclide.

Key words: Spent Fuel, Detector, Waterproof, Neutron, Gamma

1. 서 론

2022년 기준 국내에서 발생된 사용후핵연료는 515,000다발(18,000톤)이며, 그중 경수로 사용후핵연료는 21,000다발(8,900톤)이 습식저장조에 보관 중이고, 중수로 사용후핵연료는 494,000다발(9,300톤)이 습식저장조와 원전 내 건식저장시설·맥스터에 보관되고 있다. 국내 원전별 사용후핵연료의 저장량은 고리원전 내 6,901다발(포화율 85.9%), 한빛원전 내 6,824다발(포화율 75.7%), 한울원전 내 6,475다발(포화율 82.5%), 새울원전 내 496다발(포화율31.8%), 신월성원전 내 726다발(포화율 75.8%), 월성원전 내 49만3868다발(포화율 75.1%) 등으로 집계됐다[1]. 이처럼 사용후핵연료의 저장량이 증가함에 따라 핵연료의 안전한 관리 및 저장을 위해 핵연료의 방사능 측정 및 분석과 평가의 기술이 중요하다. 특히 사용후핵연료의 핵임계 안전성 평가를 위해서는 핵연료의 연소도 분석이 필요하다[2]. 사용후핵연료에서는 핵분열에 의해 다양한 핵종들이 생성되며, 사용후핵연료를 구성하는 핵종은 아래와 같이 그룹 3개로 분류할 수 있다[3].

· 미연소된 잔류 핵연료 원료물질: ^{235}U 및 ^{238}U
· 핵변환된 초우라늄원소:
  - 플루토늄(^{238}Pu, ^{239}Pu, ^{240}Pu, ^{241}Pu, ^{242}Pu 등)
  - 마이너 악티나이드(^{237}Np, ^{241}Am, ^{243}Am, ^{242}Cm, ^{244}Cm 등)
· 핵분열 생성물: ^{90}Sr, ^{134}Cs, ^{137}Cs, ^{154}Eu, ^{129}I, ^{99}Tc 등

사용후핵연료의 연소도를 비파괴적 방식으로 결정하기 위하여, 이러한 핵종들에서 발생하는 주요 감마선과 중성자를 측정하여 핵연료의 연소도를 분석 할 수 있다[4,5]. 이에 본 연구에서는 사용후핵연료의 연소도 측정 및 분석을 위해 원전 내 습식 저장시설에서 사용가능한 감마선/중성자 측정 시스템을 제작하고, 주요 핵종 측정을 통해 검출성능을 평가 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 감마선/중성자 측정 시스템 개발

2.1.1. 감마선/중성자 측정 검출부 설계 및 제작

사용후핵연료 집합체로부터 발생하는 고준위 방사선 환경 하

ISSN 1976-2402 http://www.ksri.kr/

Copyright© 2024 by Korean Society of Radiation Industry

*Corresponding author: Hye Min Park
Tel: +82-2-3414-2038, Fax: +82-2-3414-2031, E-mail: hmpark@orionenc.com
Received 31 May 2024 Revised 19 June 2024 Accepted 22 August 2024

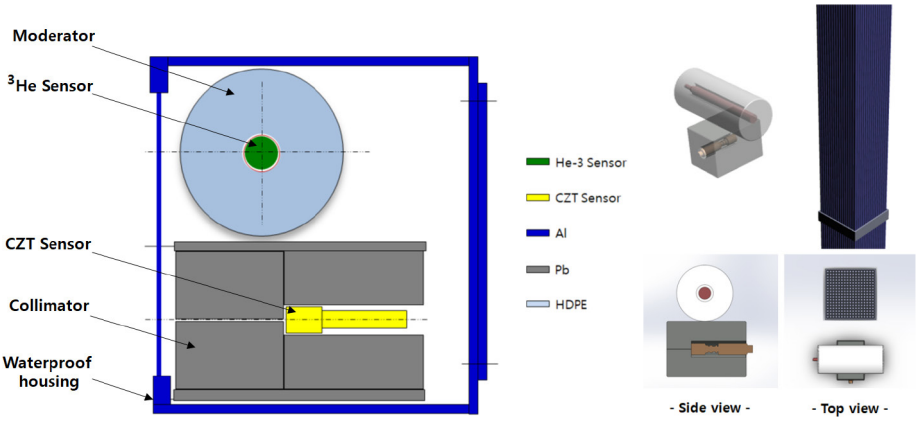

Fig. 1. Design model of Gamma/Neutron detection system

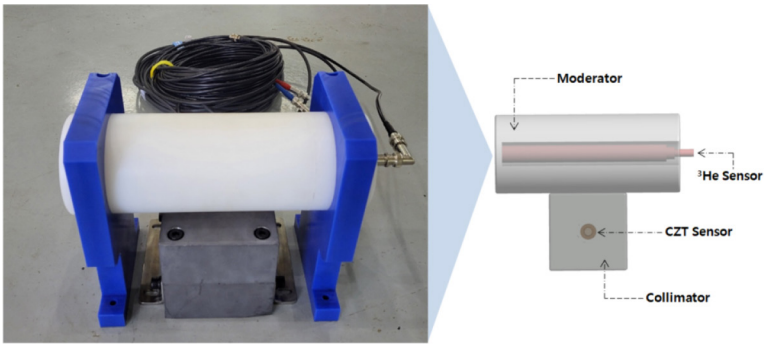

Fig. 2. Prototype model of Gamma/Neutron detection system

에서 감마선과 중성자의 측정 및 분석을 위하여 반도체 검출기인 CZT (Cadmium Zinc Telluride) 센서와 가스형 검출기인 ^{3}He 챔버를 감마선/중성자 측정 시스템의 검출부로 구성 하였다. CZT 센서는 Quasi-hemispherical 타입의 CZT 500S (Ritec SIA)를 사용하였으며, 검출 영역은 5 × 5 × 5 mm^{3}이며, 구동전압은 ≤1500 V이다[4]. ^{3}He 챔버는 원통 형태의 ^{3}He-2528 (LND)을 사용하였고, 검출 영역은 203.2 mm이며, 검출효율은 28 cps nv^{-1}, 구동전압은 ≤1250 V이다[5]. Fig. 1은 감마선/중성자 측정 시스템의 설계모델을 보여준다.

CZT 센서는 사용후핵연료 집합체의 위치별 감마에너지 스펙트럼 및 총 감마 계수율 측정이 가능하며, ^{3}He 챔버는 위치별 중성자 계수율을 측정함으로써, 집합체의 축방향에 따른 방사선 분포의 분석이 가능하다. CZT 센서에는 고방사선 차폐를 위해 50 mm 두께의 납(Pb) 플레이트에 지름 1 mm (Ø) 크기로 관통되는 원형 홀 구조의 콜리메이터를 적용하여 검출부를 구성하였으며, ^{3}He 챔버에는 열중성자 측정을 위해 3 cm 두께의 HDPE (High Density Polyethylene) 감속재를 적용하여 검출부를 구성하였다[4,5]. Fig. 2는 감마선/중성자 측정 시스템의 제작모델을 보여준다.

2.1.2. 신호처리부 설계 및 구성

신호처리부는 전치증폭기 Preamplifier-A (PA 101C, Ritec SIA), Preamplifier-B (2006, Canberra), 성형증폭기 Amplifier (570, Ortec), 다채널분석기 Multi-channel analyser (8000D, Amptek), 고전압 공급기 High voltage power supply (556, Ortec), NIM Rack (N8315, Caen)으로 구성되고, 각 센서에서 발생된 전하신호는 전치증폭기를 거쳐 전압신호로 변환되며, 20 m 케이블을 거쳐 성형증폭기를 통해 가우시안 형태로 변환 후 다채널분석기를 통해 디지털 신호로 변환된다. Fig. 3은 설계된 감마선/중성자 측정 시스템의 개요도이다.

2.2. 방수하우징 설계 및 제작

사용후핵연료 저장시설의 습식 환경을 고려하여, 저장조 내에서 방사선 측정이 가능하도록 감마선/중성자 측정 시스템의 방수하우징을 설계하고 제작하였다. 방수하우징은 습식환경에서의 부식방지를 위해 알루미늄(Al) 재질로 설계하였으며, 수밀 유지를 위해 외압형 O-ring을 적용하였고, 무게는 39.7 kg, 두께는 40 mm (T), 크기는 462 (W)×314 (L)×330 (H) mm이다. Fig. 4는 제작된 감마선/중성자 측정 시스템의 방수하우징을 보여준다.

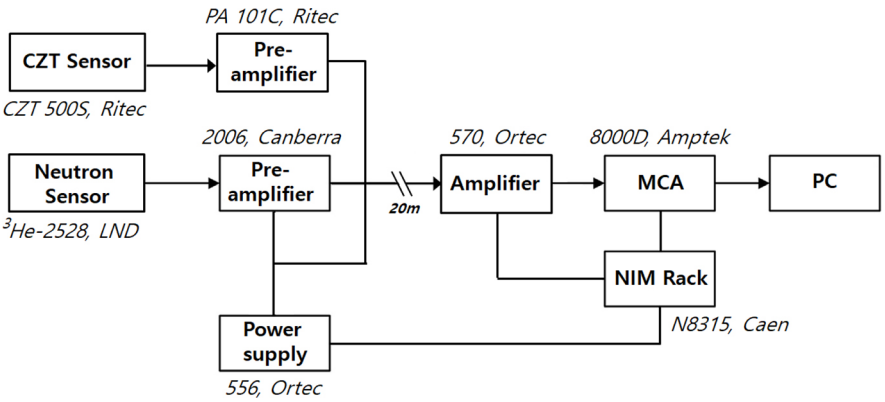

Fig. 3. Schematic diagram of Gamma/Neutron detection system

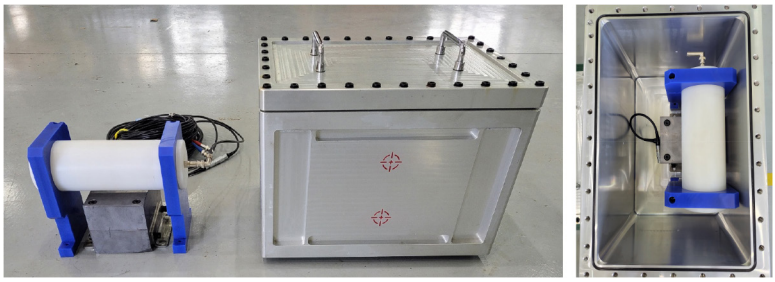

Fig. 4. Waterproof housing of Gamma/Neutron detection system

3. 결과 및 고찰

3.1. 방수성능 평가

사용후핵연료 저장조 내 환경과 유사한 조건에서 감마선/중성자 측정 시스템의 방수하우징 수밀성능 평가를 위해, 선박해양플랜트 연구소(KRISO)의 고압챔버 시설을 이용하였다. 성능평가를 위한 시험조건은 실제 저장조 수심 15 m 조건을 고려하여, 완전 침수 후 수압 1.7 bar를 유지한 채 1800초 동안 침수시험을 진행하였다(Fig. 5).

감마선/중성자 측정 시스템을 위한 방수하우징의 침수 시험 시, 방수하우징은 수심 15 m 조건에서도 내부에 수분 침투 없이 방수성능을 유지하는 것으로 평가되었다. 이에 따라 사용후핵연료 저장조의 습식 환경에서도 감마선/중성자 측정 시스템의 안정적 운영 가능성을 확인하였다.

Fig. 5. Hyperbaric chamber facility

3.2. 감마선/중성자 검출특성 평가

감마선/중성자 측정 시스템의 검출특성 평가를 위해, 사용후핵연료 연소도 분석의 주요 지표가 되는 핵종들 중 감마핵종으로는 ^{137}Cs, ^{134}Cs와 ^{154}Eu를 교정선원(85 μCi)으로 사용하고, 중성자 핵종으로는 ^{244}Cm와 유사한 중성자 교정선원 ^{252}Cf (90 μCi)를 사용하여, 감마선과 중성자의 에너지 스펙트럼을 측정 및 평가하였다[4,5]. Fig. 6은 감마선/중성자 측정 시스템의 성능평가를 위한 실험설비를 보여준다. 각 교정선원은 측정 시스템으로부터 21cm 거리에 위치해 있으며, 상온 24°C (공기) 환경에서 측정되었다.

사용후핵연료의 연소도를 분석하는 방법으로는 대표 핵종인 ^{137}Cs과 ^{244}Cm에서 발생하는 감마선과 중성자 발생량을 구하는 방식과 ^{134}Cs에서 발생하는 605 keV 감마선과 ^{137}Cs에서 발생하는 662 keV 감마선을 측정하여 두 감마선의 발생 비를 구하는 방식이 있다[2].

Fig. 7은 ^{137}Cs, ^{134}Cs, ^{154}Eu와 ^{252}Cf 각 교정선원에 대하여 300초간 측정한 에너지 스펙트럼을 보여준다.

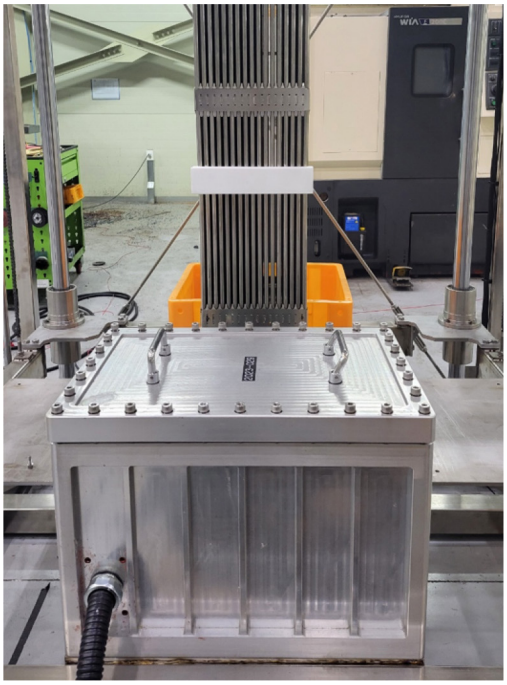

Fig. 6. Experimental geometry for Gamma/Neutron detection

교정선원을 이용한 감마선/중성자 측정 시스템의 성능평가 시, 감마선 에너지 스펙트럼 측정을 통해 사용후핵연료 연소도 분석의 지표 핵종인 ^{137}Cs (662 keV), ^{134}Cs (569, 605, 796 keV)와 ^{154}Eu (123, 248, 585, 723, 875, 998, 1274 keV)의 주요 감마선 피크를 명확히 확인할 수 있었으며, 중성자에 의한 에너지 스펙트럼 측정을 통해, ^{252}Cf의 자발 핵분열 시 방출하는 중성자와 ^{3}He 챔버 내 ^{3}He 기체와 반응하여 발생하는 0.764 MeV의 Q값 피크를 확인할 수 있었다[6].

3.3. 감마선/중성자 간섭반응 평가

감마선/중성자 측정 시스템의 감마선과 중성자간 간섭 평가를 위해, 사용후핵연료 연소도 분석의 주요 감마 지표 핵종인 ^{134}Cs 교정선원(85 μCi)과 중성자 교정선원 ^{252}Cf (90 μCi)를 사용하여, 감마선과 중성자 동시 측정 시 감마선/중성자 측정 시스템의 간섭 반응도를 평가하였다. Fig. 8은 각 검출부에서 ^{134}Cs와 ^{252}Cf 교정선원을 300초 동안 동시 측정한 에너지 스펙트럼을 보여준다.

교정선원을 이용한 감마선/중성자 측정 시스템의 감마선과 중성자간 간섭반응 평가 시, CZT 센서 검출부에서는 ^{134}Cs의 569, 605, 796 keV 감마선 피크를 명확히 확인할 수 있었으나, ^{252}Cf

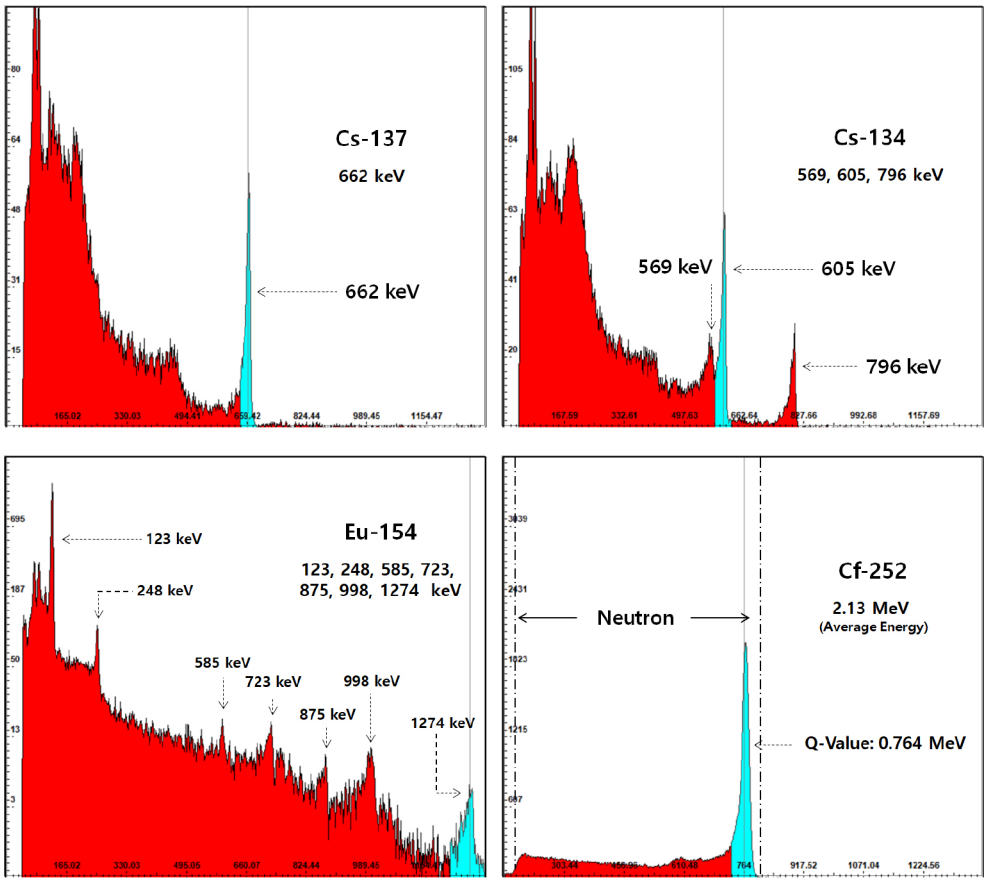

Fig. 7. Energy spectra of ^{137}Cs, ^{134}Cs, ^{154}Eu and ^{252}Cf measured with Gamma/Neutron detection system

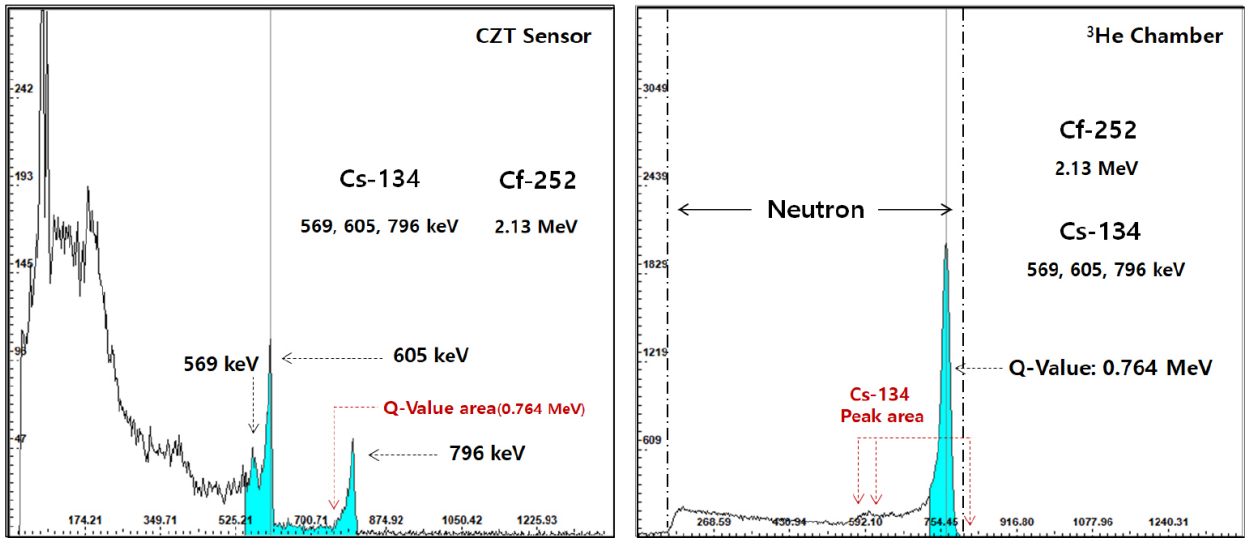

Fig. 8. Energy spectra of ^{134}Cs and ^{252}Cf measured with Gamma/Neutron detection system

의 자발 핵분열을 통해 방출하는 중성자에 의한 에너지 피크는 측정되지 않았으며, ^{3}He 챔버 검출부에서는 ^{252}Cf의 중성자에 의한 Q값(0.764 MeV) 피크는 감마선 영향 없이 검출 되는 반면, ^{134}Cs에 의한 569, 605, 796 keV 감마선 피크는 검출되지 않았으므로 감마선/중성자 측정 시스템 각 검출부에서 감마선과 중성자 측정 시 측정 간섭효과를 주지 않는 것으로 확인되었다. 이에 따라 사용후핵연료 집합체에서 발생하는 다양한 핵종에 의한 중성자 및 감마선 환경 하에 감마선/중성자 측정 시스템의 안정적 운영성과 연소도 분석을 위한 주요 지표 핵종의 측정 및 분석 가능성을 확인 하였다.

4. 결 론

본 연구는 습식 저장시설 내 사용후핵연료의 연소도 측정 및 분석을 위해 감마선/중성자 측정 시스템을 제작하고, 주요 지표 핵종의 측정과 분석을 통해 시스템의 성능을 평가 하였다. 감마선/중성자 측정 시스템은 CZT 센서, ^{3}He 챔버, 신호처리 모듈, 방수하우징으로 구성되었으며, 사용후핵연료 연소도 분석의 주요한 핵종인 ^{137}Cs, ^{134}Cs, ^{154}Eu와 ^{252}Cf을 측정하고 분석하였다. 지표 핵종들의 에너지 스펙트럼 측정 결과 각 핵종에 대한 주요 감마선 에너지 피크와 중성자에 의한 에너지 피크의 명확한 검출을 확인하였으며, 감마선과 중성자 동시 측정 시 측정 시스템의 간섭 반응도 안정적인 것으로 확인 되었다. 또한 감마선/중성자 측정 시스템의 방수하우징 수밀성능 평가 통해, 수심 15 m 조건에서도 측정 시스템이 방수성능을 유지하는 것으로 평가되었다. 이에 따라 본 연구를 기반으로 후속 연구를 통해 모의 사용후핵연료 저장조 시설을 구축하고, 사용후핵연료 연소도 실증 평가를 위한 연구에 적용할 계획이다.

사 사

본 연구는 한국에너지기술평가원 재원으로, 원전 안전운영을 위한 핵심소재, 부품, 장비 국산화 기술개발사업 '사용후핵연료 연소도 측정 설비 기술개발(과제번호: 20222B10100060)'에 의해 수행 되었으며, 그 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. MOTIE. References on High-Level Radioactive Waste. https://www.motie.go.kr/kor/article/ATCL3f49a5a8c/166780/view
2. Park SH, Eom SH , Shin HS, Lim HI, Ha JH and Kim HS. 2010. Fabrication of ionization chamber to measure the burnup of spent fuel. *J. Radiat. Prot. Res*. **35**(1):21-25. https://www.jrpr.org/journal/view.php?number=722
3. Choi JW, Ko WI, Lee JS and Park HS. 1996. Study on decay characteristics change of spent fuel materials by dupic fuel cycle. *J. Radiat. Prot. Res*. **21**(1):27-39. https://www.jrpr.org/journal/view.php?number=277
4. Park HM, Kim TY, Song YS, Lee UJ and Ham CM. 2023. Spectroscopic properties of gamma-ray detector to measure the burnup of spent nuclear fuel. *J. Radiat. Ind*. **17**(1):119-125. https://doi.org/10.23042/radin.2023.17.1.119
5. Park HM, Kim TY, Lee IH, Jang DH, Song YS, Lee UJ and Ham CM. 2023. A study on performance characteristics of neutron detector to measure the burnup profile of spent fuel in NPP. *J. Radiat. Ind.* **17**(3):293-297. https://doi.org/10.23042/radin.2023.17.3.293
6. Choi JB, Park JS, Son JB and Kim YK. 2019. Study of n/γ discrimination using ^{3}He proportional chamber in high gamma-ray fields. *Nucl. Eng. Technol*. **51**(1):263-268. https://doi.org/10.1016/j.net.2018.08.013