Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 19, No. 1, pp. 107-112, 2025
https://doi.org/10.23042/radin.2025.19.1.107

Technical article

현장형 사용후핵연료 연소도 측정 시스템 개발을 위한 예비실험

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

[1](주)오리온이엔씨, [2]기초과학연구원 중이온가속기연구소

Preliminary Experiments for Developing an On-Site Spent Nuclear Fuel Burnup Measurement System

Hyemin Park[1,*], Tae Young Kim[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 With the advent of the eco-friendly energy era, the global competition to secure a market advantage in nuclear energy has intensified, leading to increased research and development efforts for the safe management of spent nuclear fuel. As a preliminary step towards developing an In-field spent nuclear fuel burnup measurement system, this study aimed to identify and develop the basic and core technologies required for the burnup measurement system. The entire system was divided into mechanical and radiation detection components, and its performance was verified through testing. A prototype development process was established through rigorous device testing and performance evaluation. Based on the experiences, foundations, and core technologies acquired in this study, further research was planned for developing an on-site spent nuclear fuel burnup measurement system.

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

1. 서 론

친환경 에너지 시대를 맞이하여 전 세계적으로 원자력에너지에 관한 시장 경쟁력 확보가 화두로 부각됨에 따라, 주요 선진국은 원전 활용 확대를 공식 추진 중이며 각국 원전 기업들의 신규 원전 건설사업 수주를 위한 경쟁이 가속화되고 있다. 국내에서도 2038년까지 신규 대형 원자력발전소 3기(1.4GW급)와 소형 모듈원전(SMR) 1기를 건설예정으로 원전발전 비중을 확대하는 중이다[1]. 이와 함께 현재 국내 사용후핵연료의 누적 발생량 또한 1990년 1,336톤에서 2023년 1만 8,925톤으로 해마다 큰폭으로 증가하고 있다[2]. 2022년 4분기 기준 국내 원전별 사용후핵연료의 저장량은 고리원전 내 7,039다발, 한빛원전 내 7,025다발, 한울원전 내 6,475다발, 새울원전 내 496다발, 신월성원전 내 794다발, 월성원전 내 497,068다발 등으로 2030년 한빛원전을 시작으로 한울원전(2031년)과 고리원전(2032년) 저장시설이 포화될 것으로 예상된다[3]. 이처럼 원전확대와 함께 사용후핵연료의 발생량이 증가함에 따라 핵연료의 안전한 관리 및 저장을 위해 핵연료의 방사능 측정 및 분석과 평가의 기술이 중요하다. 특히 주요 선진국에서는 현장에서의 사용후핵연료의 핵임계 안전성 평가를 위해 핵연료 연소도 분석기술 및 장비를 확보하고, 현장에 적용하고 있다. 그러나 국내에서는 아직 연구단계에서 현장 적용을 위한 상용화 연구가 이어지지 못한 한계를 가지고 있다.

이에 본 연구에서는 현장형 사용후핵연료 연소도 측정 시스템 개발을 수행함으로써, 현장에서의 연소도 분석에 필요한 핵심기술을 확보하고, 국내 기업의 연구 역량을 제고하고자 하였다. 본 연구에서는 이에 대한 사전 연구로, 사용후핵연료 연소도 측정 시스템 프로토타입을 설계 및 제작하고, 시험설비를 통해 성능검증을 수행하였다.

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

Copyright© 2025 by Korean Society of Radiation Industry

***Corresponding author:** Hyemin Park
Tel: +82-2-3414-2038, Fax: +82-2-3414-2031, E-mail: hmpark@orionenc.com

Received 14 February 2025 **Revised** 17 March 2025 **Accepted** 24 March 2025

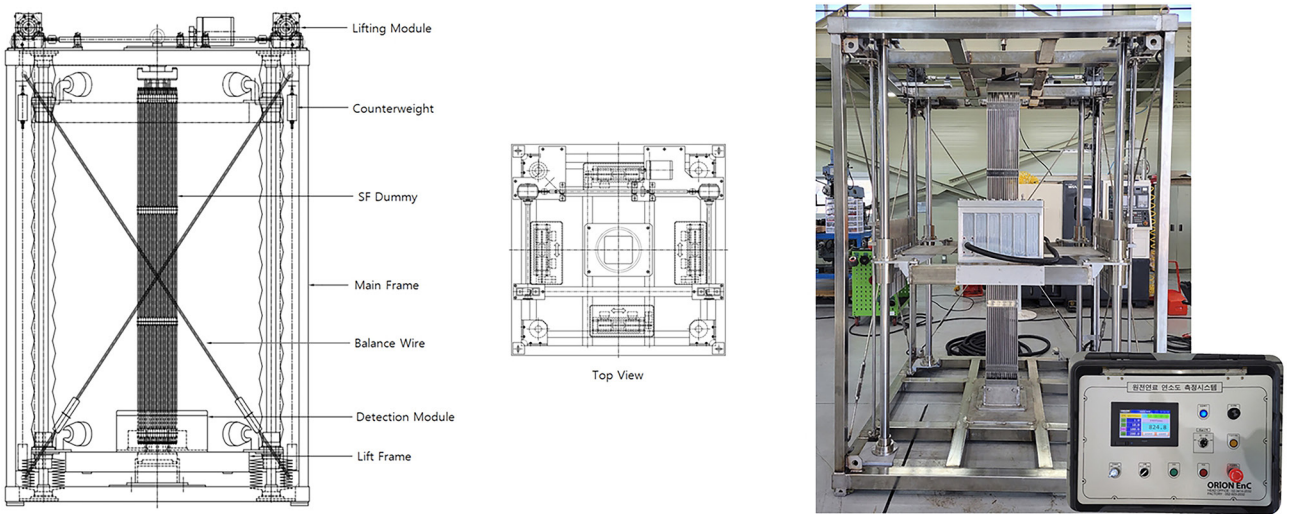

Fig. 1. Design and assembly model of control facility.

2. 재료 및 방법

2.1. 시스템 설계 및 제작

2.1.1. 제어설비 설계 및 제작

사용후핵연료의 연소도 분석을 위한 사전연구로서, 핵연료 집합체의 축방향으로 방사선을 측정할 수 있는 제어설비와 모의 사용후핵연료 집합체를 축소 모델(1/2 scale)로 설계하고 제작하였다.

Fig. 1은 설계모델과 제작된 제어설비를 보여준다.

제어설비는 고정형 마스트(Mast) 프레임, 수직 이동형 4축 리프트(Lift), 모의 사용후핵연료 집합체(WH-17 × 17)와 방사선계측 모듈로 구성되어 있다. 설비의 체적은 1,860(W) × 1,860(L) × 2.4(H) m이며, 설비 구동부(서보모터, 축베어링, 웨이트 밸런스)등은 방수 모듈로 구성되어 있다. 모의 핵연료 집합체는 웨스팅하우스형(WH) 17 × 17-ACE7 모델 제원을 고려하여 스테인레스 강(SUS304) 재질로 제작하였으며, 체적은 21.4(W) × 21.4(L) × 203.1(H) cm이다.

Table 1은 제어설비의 제원을 보여준다.

Table 1. Specification of control facility

Part		Specification
Facility Size		1.86 (W)×1.86 (D)×2.40 (H) m
Lifting Frame Size		1.36 (W)×1.36 (D)×0.11 (H) m
Frame Stroke		1.9 m
Lifting Speed		0~7 m/min
Control Range		1~100 mm
Rated Load		250 kg
Driving Motor		Servo 0.4Kw AC
Material	Frame	STS304
	Lift Frame	
	Counter Weight	

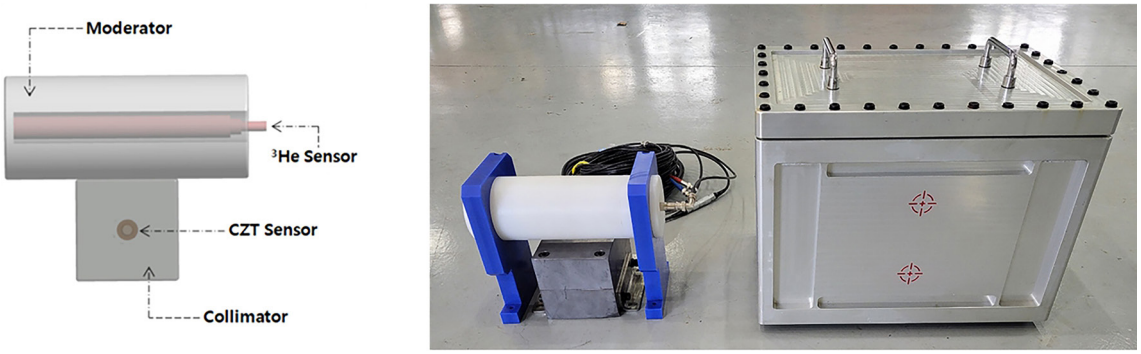

Fig. 2. Design and assembly model of radiation detection module.

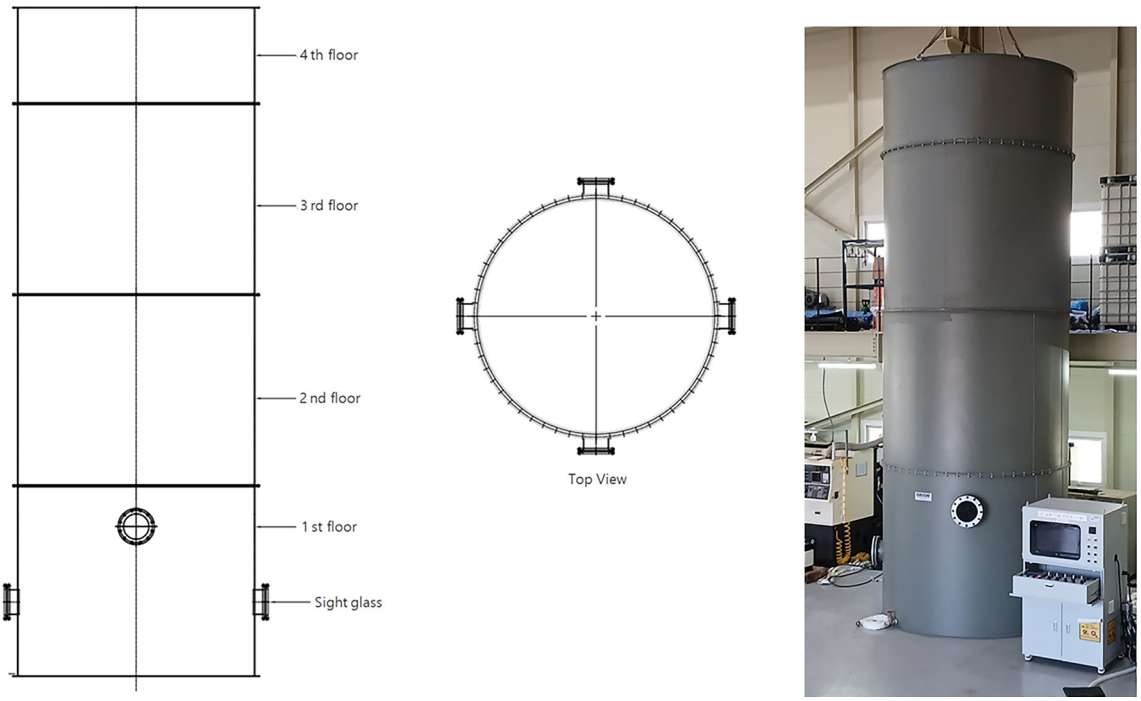

Fig. 3. Design and assembly model of water tank facility.

2.1.2. 방사선계측 모듈 설계 및 제작

사용후핵연료 연소도 분석의 주요 지표가 되는 감마핵종과 중성자 핵종의 측정 및 분석을 위해 CZT (Cadmium Zinc Telluride) 반도체 센서와 ^{3}He 가스 챔버를 사용하여, 방사선계측 모듈을 구성 하였다. CZT 센서(500S, Ritec SIA)의 검출 영역은 5×5×5 mm^{3}이며, 구동전압은 ≤1500 V이다[4]. ^{3}He 가스 챔버(2528, LND)의 검출 영역은 203.2 mm이며, 검출효율은 28 cps nv^{-1}, 구동전압은 ≤1250 V이다[5].

Fig. 2는 설계모델과 제작된 방사선계측 모듈을 보여준다.

제작된 방사선계측모듈은 사용후핵연료 집합체의 축방향 위치별 감마/중성자에너지 스펙트럼 및 총 계수율의 동시 측정이 가능하며, 핵연료 전체 방사선 분포의 분석이 가능하다.

하우징은 수중환경을 고려하여, 내식성이 강한 알루미늄(Al) 재질로 제작하였으며, 총 무게는 40 kg, 두께는 40 mm (T), 체적은 462 (W)×314 (L)×330 (H) mm이다.

2.2. 시험설비 설계 및 제작

사용후핵연료 연소도 측정 시스템 프로토 타입의 성능시험을 위해, 핵연료 저장시설의 저장조 환경을 고려한, 수직형 수조설비를 설계하고 제작하였다. 수직형 수조설비는 4단 구조로 구성되어 있으며, 설비의 체적은 2.2(Ø)×7.12(H) m, 재질은 12 mm 두께의 탄소강 (SS400)이고, 외부에서 내부 확인이 가능한 4개의 고정형 방수창을 포함하였다.

시험설비의 안정성 평가를 위해 수조설비의 6 m 높이까지 물을 채운 후 24시간 방수시험을 수행하여 안정성을 확인하였다. Fig. 3은 설계모델과 제작된 수직형 수조설비를 보여준다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 시스템 성능평가

3.1.1. 제어설비 기능성 평가

사용후핵연료 저장조와 유사한 습식 환경에서 제어설비의 기능성 평가를 수행하기 위해, 제작된 수조설비 내 기계적 구동 실험을 수행하였다. 수조설비 내 2.4 m 높이의 제어설비 배치 및 4 m 높이까지 물을 채운 후, 방사선계측 모듈과 목업(mock-up) 모듈이 장착된 4축 리프트(Lift)를 축 방향으로 100 mm 단위 씩 이동하며, 수직하강/상승 제어를 통해 기계적 구동성 평가를 수행하였다.

Fig. 4는 수조설비 내 설치된 제어설비를 보여준다.

수중환경 내 구동성 시험 시, 제어설비는 반복된 수직하강과 상승에도 부력의 영향 및 흔들림이나 기울어짐 없이 안정적으로 위치제어가 되었으며, 방사선계측 모듈 또한 내부에 수분 침투 없이 방수성능을 유지하는 것으로 평가되었다. 이에 따라 습식 환경에서 제어설비의 안정적 운영 가능성을 확인하였다.

3.1.2. 방사선계측 모듈 성능평가

제어설비 내 방사선계측 모듈의 성능평가를 위해, 사용후핵연

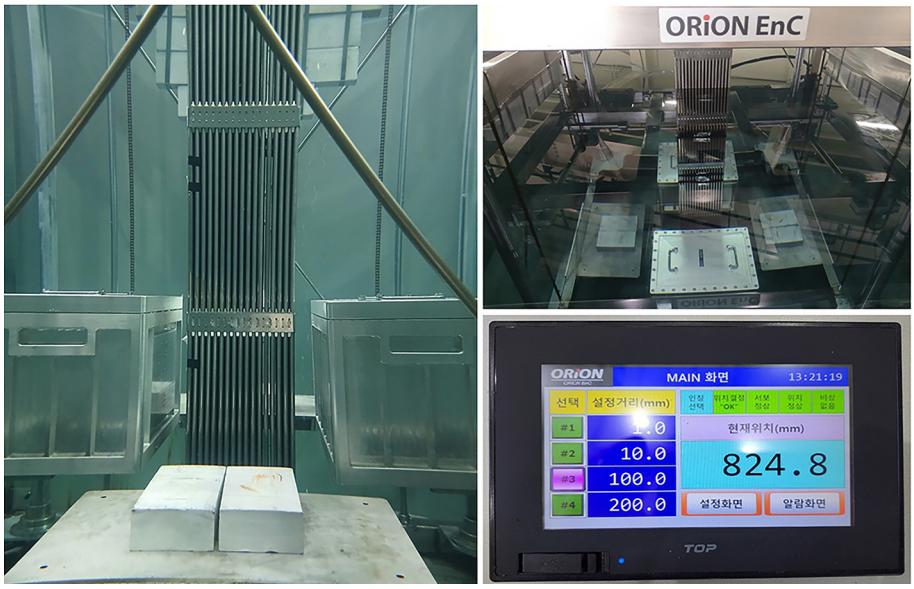

Fig. 4. Underwater test setup of control facility.

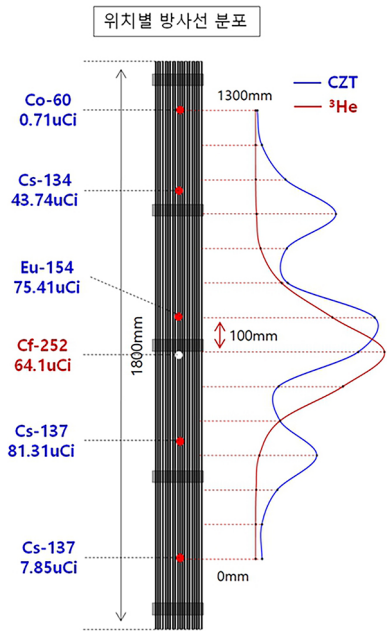

Fig. 5. Radiation distribution by position.

Table 2. Count rate by position

Axial position (mm)	γ (cps)	η (cps)
1300	29.07±1.74	0.17±0.01
1200	102.72±5.13	0.68±0.05
1100	481.85±24.09	2.59±0.20
1000	1297.43±38.92	16.91±0.84
900	505.05±25.25	81.36±3.25
800	519.93±20.79	420.82±16.83
700	1921.12±57.63	1241.42±37.24
600	1658.78±33.17	2081.03±41.62
500	372.33±18.61	1411.9±42.35
400	398.66±19.93	394.39±15.77
300	988.73±29.66	61.36±2.45
200	350.91±17.54	10.44±0.52
100	103.33±5.16	2.12±0.14
0	106.06±4.24	0.56±0.04

료 연소도 분석의 주요 지표가 되는 핵종들 중 감마핵종으로는 ^{134}Cs, ^{137}Cs, ^{154}Eu과 ^{60}Co을 사용하고, 중성자 핵종으로는 ^{244}Cm와 유사한 ^{252}Cf를 사용하여, 수중 내 모의 핵연료 집합체의 축방향 방사선 분포와 에너지 스펙트럼을 측정 및 평가하였다[6].

Fig. 5와 Table 2는 수중 내 복합선원 환경에서 방사선계측 모듈로 계측된 위치별 방사선 분포도와 계측값을 보여준다.

수중 내 모의 핵연료 집합체 표면에는 총 6개의 선원이 배치되었고, 표면으로부터 50 mm의 거리에서 방사선계측 모듈을 축방향 하단으로부터 100 mm 단위로 상승하며, 각 위치별로 100초간 감마선과 중성자선을 동시 계측하였다[7]. 감마선과 중성자선 계측 후, 각 선원의 거리와 위치 및 세기에 비례한 모의 핵연료 집합체의 방사선 분포 그래프가 도출되었으며, 위치별 감마선 및 중성자선의 평균 계측 오차율 분석 시 약 4.2%와 5.7%로 계산되어, 습식 환경에서도 방사선계측 모듈의 안정적인 계측성능을 확인하였다.

Fig. 6은 수중 내 ^{134}Cs, ^{137}Cs, ^{154}Eu와 ^{252}Cf 각 선원에 대하여 100초간 측정한 에너지 스펙트럼을 보여준다.

수중 내 모의 핵연료 집합체가 위치한 환경에서 핵종 측정 및 분석 시, 감마선 에너지 스펙트럼 측정을 통해 사용후핵연료 연

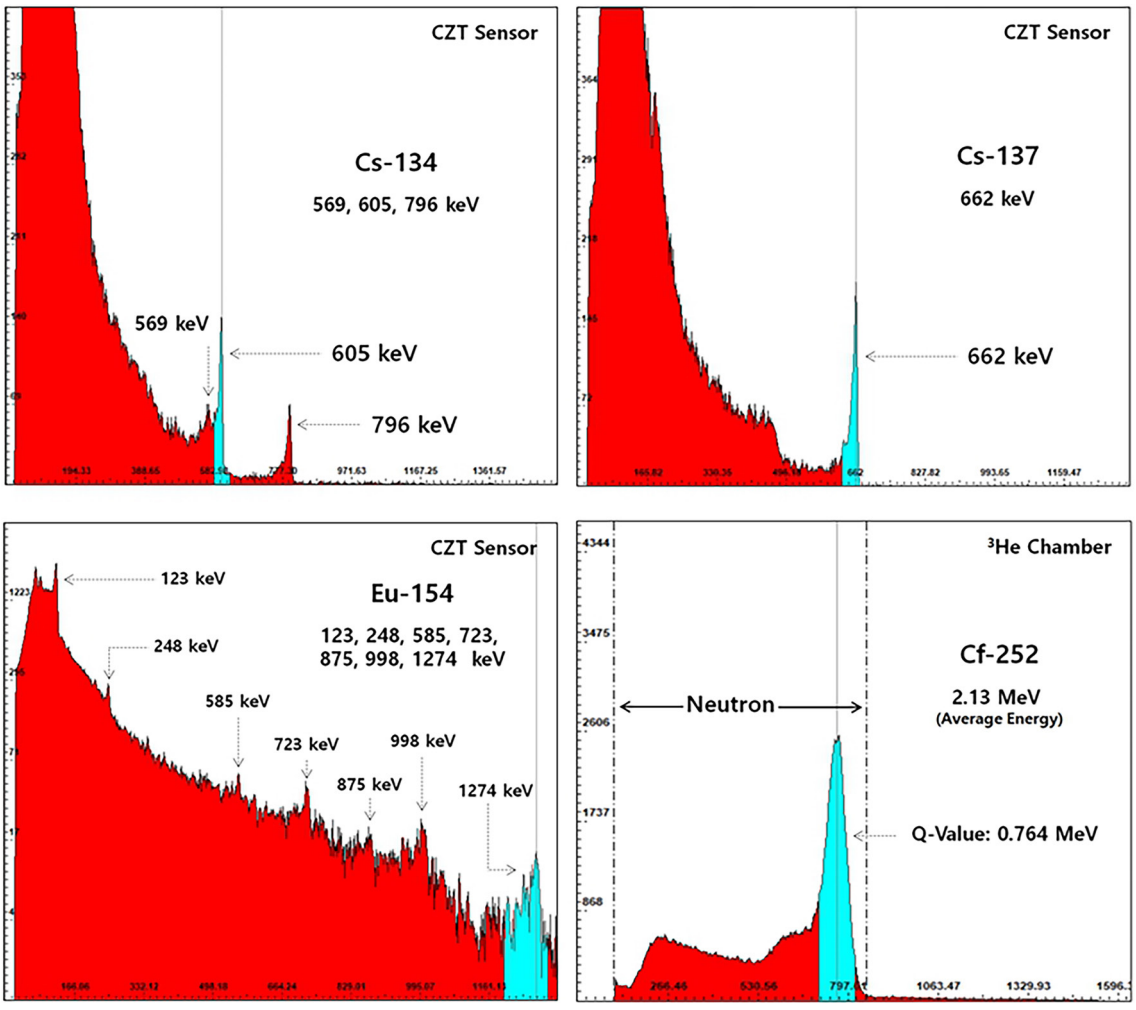

Fig. 6. Energy spectra of ^{137}Cs, ^{134}Cs, ^{154}Eu and ^{252}Cf measured with radiation detection module.

소도 분석의 지표 핵종인 ^{134}Cs (569, 605, 796 keV), ^{137}Cs (662 keV)과 ^{154}Eu (123, 248, 585, 723, 875, 998, 1274 keV)의 주요 감마선 피크들이 명확히 검출 되었으며, 감마선 분석의 주요 성능지표인 ^{137}Cs의 에너지 분해능은 2.15%로 평가되었다.

중성자에 의한 에너지 스펙트럼 측정에서도 ^{252}Cf의 자발 핵분열 시 방출하는 중성자와 ^{3}He 챔버 내 ^{3}He 기체와 반응하여 발생하는 0.764 MeV의 Q값 피크를 검출할 수 있었다[8]. 이에 따라 저장조 환경 내 사용후핵연료 집합체에서 발생하는 다양한 핵종 환경 하에서 연소도 분석을 위한 주요 지표 핵종의 실측 및 분석 가능성을 확인 하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 습식 저장시설 내 사용후핵연료의 연소도 측정 및 분석을 위해 현장형 연소도 측정 시스템 초기모델을 개발하고, 기계적 시험과 방사성 핵종의 측정 및 분석을 통해 시스템의 성능을 평가 하였다. 연소도 측정 시스템은 제어설비와 방사선 계측 모듈로 구성되어 있으며, 제어설비는 수조설비 내에서 기계적 구동성 시험 시, 수중에서도 안정적인 위치 제어가 가능하였고, 설비운영 중 내부 수분 침투 없이 방수성능을 유지하는 것으로 평가되었다. 방사선계측 모듈은 연소도 분석의 지표 핵종인 ^{134}Cs, ^{137}Cs, ^{154}Eu와 ^{252}Cf를 사용하여 모의 핵연료에 대한 방사선 계측 시험 시, 안정적인 감마선/중성자 계측 재현성과 핵종 분석 성능을 확인하였다. 이에 따라 본 연구를 기반으로 후속 연구를 통해 현장형 연소도 측정 시스템 시제품을 개발하고, 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 의

해 수행 되었으며, 그 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. MOTIE. References on 11th Basic Plan for Supply and Demand of Power. https://www.motie.go.kr/kor/article/ATCL3f49a5a8c/169132/view.
2. K Indicator. References on High-Level Radioactive Waste. https://www.index.go.kr/unity/potal/indicator/IndexInfo.do?popup=Y&clasCd=2&idxCd=5106.
3. KORAD. References on Spent nuclear fuel generation. https://www.korad.or.kr/webzine/202304/sub2-4.jsp.
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. 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.
7. Park HM, Kim TY, Lee IH, Jang DH, Song YS, Lee UJ and Ham CM. 2024. Development of a Gamma/Neutron Detector to Measure the Burnup Profile of Spent Fuel in Wet Storage Facility. *J. Radiat. Ind*. **18**(3):249-253. https://doi.org/10.23042/radin.2024.18.3.249.
8. 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.