Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 19, No. 4, pp. 523-531, 2025
https://doi.org/10.23042/radin.2025.19.4.523

Technical article

펠티어 냉각을 이용한 고온 환경 중성자·감마 동시 검출기 열안정성 연구

이래현[1] · 공태영[2] · 신용주[1,*] · 김병우[1] · 신승수[1] · 이홍연[1]

[1](주)알엠텍, [2]조선대학교

Feasibility Study of Neutron-Gamma Coincidence Measurement Technology Using a High-Temperature Scintillation Detector

RaeHyun Lee[1], TaeYoung Kong[2], Yongju Shin[1,*], Byoungwoo Kim[1], Seungsu Shin[1], and Hongyeon Lee[1]

[1]RMTEC, 25, Hanamsandancheonbyeonjwa-ro, Gwangsan-gu, Gwangju 62215, Republic of Korea
[2]Chosun University, 309, Pilmun-daero, Dong-gu, Gwangju 61452, Republic of Korea

ABSTRACT Precise measurement of neutron-gamma mixed fields is essential for safety monitoring in high-temperature nuclear facilities (e.g., power plants, spent-fuel storage, and SMRs). Conventional detectors optimized for room temperature suffer gain drift, noise increase, and degraded pulse-shape discrimination (PSD) under heat. This study develops and validates a compact scintillation system that preserves simultaneous neutron-gamma detection up to 80°C. A CLLBC ($Cs_2LiLa(Br,Cl)_6:Ce$) scintillator was coupled to a silicon photomultiplier (SiPM) and integrated with temperature-aware scintillation characterization, a thermal-management package using aluminum/polyurethane multilayer insulation with optional Peltier cooling, and a digitally optimized PSD algorithm robust to temperature-induced pulse variation. The prototype was evaluated from 20 to 80°C in 10°C steps using a 10 μCi ^{137}Cs source at 20 cm, comparing uncooled passive shielding, multilayer insulation, and insulation plus cooling. Performance metrics included dose-rate stability, energy resolution at 662 keV, signal-to-noise ratio, and PSD figure of merit (FOM). The combined passive-and-active thermal design maintained detector temperature within ±1°C and suppressed SiPM dark-current growth, yielding over 30× lower thermal sensitivity than the uncooled case. Energy-resolution degradation was limited to ~20% (3.4 to 4.1%), and PSD FOM remained ≥0.97 at 80°C. Passive insulation delayed heat ingress, while Peltier cooling prevented gain drift. These results demonstrate a practical high-temperature neutron-gamma monitoring framework and provide a basis for AI-assisted PSD and autonomous mixed-field sensing in extreme nuclear environments.

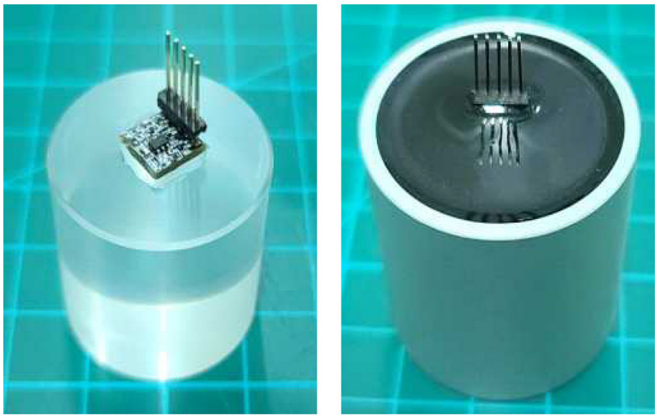
Key words: CLLBC Scintillator, High-Temperature Radiation Detection, Neutron-Gamma Discrimination, Pulse Shape Discrimination, Peltier Cooling

1. 서 론

원자력발전소 및 사용후핵연료 저장시설과 같은 고온·복합 방사선 환경에서는 감마선(Gamma-Ray)과 중성자(Neutron)가 동시에 존재하며, 두 선종의 실시간 동시 계측은 핵연료 거동 평가, 방사선 안전관리, 그리고 핵비확산 감시 등 다양한 분야에서 필수적인 기술로 요구된다. 특히 원전 해체, 소형모듈원자로(Small Modular Reactor, SMR) 운전, 고준위 폐기물 저장 및 이송 단계에서는 방사선장이 시간과 공간적으로 급격히 변화하는 특성을 보이기 때문에, 감마선과 중성자의 플럭스(Flux)를 동시에 정량화할 수 있는 고신뢰성 검출 기술의 확보가 중요하다.

기존의 방사선 검출기는 일반적으로 감마선과 중성자를 각각의 독립된 검출기로 분리하여 측정하는 방식에 의존해 왔다. 그러나 이러한 이중 검출기 방식은 신호 간섭(Cross-Talk), 공간적 비일치(Spatial Mismatch), 계측 시간차에 따른 비동기성(Asynchrony) 문제를 야기하여, 복합 방사선장에서의 정확한 실시간 분석이 어렵다. 또한 대부분의 섬광 검출 시스템은 실험실 수준의 온도(약 20~25°C)에서 최적화되어 있으며, 70°C 이상의 고온 환경에

ISSN 1976-2402 http://www.ksri.kr/
Copyright© 2025 by Korean Society of Radiation Industry
*Corresponding author: Yongju Shin
Tel: +82-62-236-6740, Fax: +82-62-236-6741, E-mail: dydwn185@rmtec.co.kr
Received 19 November 2025 Revised 2 December 2025 Accepted 18 December 2025



(a) CLLBC Crystal (b) Detector Fabricated using SiPM

Fig. 1. Fabrication of Detectors Using CLLBC Crystals and SiPMs.

서는 섬광체의 발광 효율 감소, 전자 회로의 기준 전압 드리프트(Drift), 광검출기의 암전류(Dark Current) 증가 등으로 인해 신호 품질과 판별 성능이 급격히 저하되는 한계를 가진다[1].

이에 따라 본 연구에서는 고온 환경에서도 안정적으로 작동 가능한 단일 검출기 기반 중성자-감마 동시 검출 시스템을 개발하기 위해, CLLBC($Cs_2LiLa(Br,Cl)_6$:Ce) 섬광체와 실리콘 광증배기(Silicon Photomultiplier, SiPM)의 조합을 채택하였다. CLLBC 결정은 리튬(^{6}Li)을 함유하여 (n, α) 반응을 통해 중성자 감응성을 가지며, 동시에 높은 광수율(>40,000 photons MeV^{-1})과 우수한 에너지 분해능(약 3~4% @ 662 keV)을 유지하여 감마선 검출에도 탁월하다. 또한 브롬(Br)과 염소(Cl)의 조성비 조절을 통해 열적 안정성을 개선할 수 있어, 고온 방사선장에 적합한 차세대 복합 섬광체로 주목받고 있다.

광검출기로 사용된 SiPM(Silicon Photomultiplier)은 기존 광전자증배관(Photo Multiplier Tube, PMT)에 비해 소형화, 내충격성, 저전력 구동, 그리고 자기장 비의존성 등의 장점을 갖는다. 특히 SiPM은 5V 수준의 낮은 전원으로도 안정적인 동작이 가능하며, 고온 조건에서 발생할 수 있는 PMT의 이득 불안정 문제를 구조적으로 제거할 수 있다. 그러나 SiPM 역시 고온 영역에서 열잡음 증가와 전류 누설에 따른 신호 열화를 피할 수 없기 때문에, 본 연구에서는 이를 보완하기 위한 열 차폐(Thermal Shielding) 및 펠티어(Peltier) 냉각 기반 능동 온도 제어 기술을 결합하였다.

따라서 본 연구의 목적은 고온 환경(최대 80°C)에서 CLLBC-SiPM 복합 검출기의 온도 안정성(Thermal Stability)과 신호 품질(Signal Fidelity)을 평가하고, 펄스형태판별(Pulse Shape Discrimination, PSD) 성능의 유지 가능성을 실험적으로 검증하는 것이다. Fig. 1은 본 연구에서 제작된 CLLBC 결정-SiPM 일체형 검출기의 외형을 나타내며, 이 모듈은 향후 고온 환경용 중성자-감마 동시 계측 시스템의 핵심 구성 요소로 활용될 수 있다.

2. 재료 및 방법

2.1. 검출기 구성 및 전자회로

본 연구에 사용된 검출기는 직경 25 mm, 두께 25 mm의 CLLBC($Cs_2LiLa(Br,Cl)_6$:Ce) 단결정과 3 × 3 mm^2 크기의 SiPM 어레이를 조합하여 제작하였다. CLLBC 결정은 Ce^{3+} 도핑을 통해 고속 발광 특성과 높은 광수율(>40,000 photons MeV^{-1})을 보이며, ^{6}Li 함유로 중성자(n, α) 반응에 민감하게 응답한다. SiPM은 PMT에 비해 저전력·소형화 및 자기장 비의존성 등의 이점을 지니며, 특히 CLLBC 결정과 같은 고광출력 섬광체와 결합할 경우 높은 검출 효율을 나타낸다. 두 소자 사이의 광학 결합은 굴절률 n = 1.46의 실리콘 광학 겔을 사용하여 계면 반사를 최소화하였으며, 외부 표면은 알루미늄 반사막으로 차광 처리하여 광손실을 억제하였다[2].

검출기에서 발생한 광 펄스는 SiPM의 ANODE 출력단을 통해 미세 전류 형태로 전송되며, 이 신호는 전치 증폭기(Pre-Amplifier)에서 1차 전하 증폭과 임피던스 정합이 이루어진다. 본 연구에서 제작된 전치 증폭기(Fig. 3)는 ±15 V 이중 전원으로 구동되며, 입력단에는 잡음 저감을 위한 LC 필터(LC Filter)와 ESD 보호 회로(Electrostatic Discharge Protection Circuit)가 구성되어 있다. 증폭기의 핵심 소자는 저잡음 고속 연산 증폭기(Low-Noise High-Speed Operational Amplifier)는 OP27로 선정되었으며, 이 증폭단은 피드백 저항과 커패시터 조합을 통해 전하 이득과 주파수 대역을 조절하도록 설계하였다. 또한 출력단에는 버퍼 단계(Buffer Stage)가 추가되어 후단 형상 증폭기(Shaping Amplifier) 입력 임피던스와의 정합을 유지하고 선형성을 향상시켰다. 이러한

1	2	3	4	5	6	7	8
Power In (PWRIN)	Anode Signal Input (ANODE)	AC Coupling / High-pass	Input Bias / Termination	Input Protection / Clamping	1st Amplifier & Shaping	2nd Amplifier / Buffer	Output (PAOUT)
Power Input	SiPM/PMT Anode Pulse Input	DC Component Blocked by an Input Capacitor Network	Input via a Resistor Network	Overvoltage Suppression Using Diodes	First-stage Operational Amplifier	Second-stage Operational Amplifier	Final Pulse Signal Output

Fig. 2. Signal Processing Electronics Workflow.

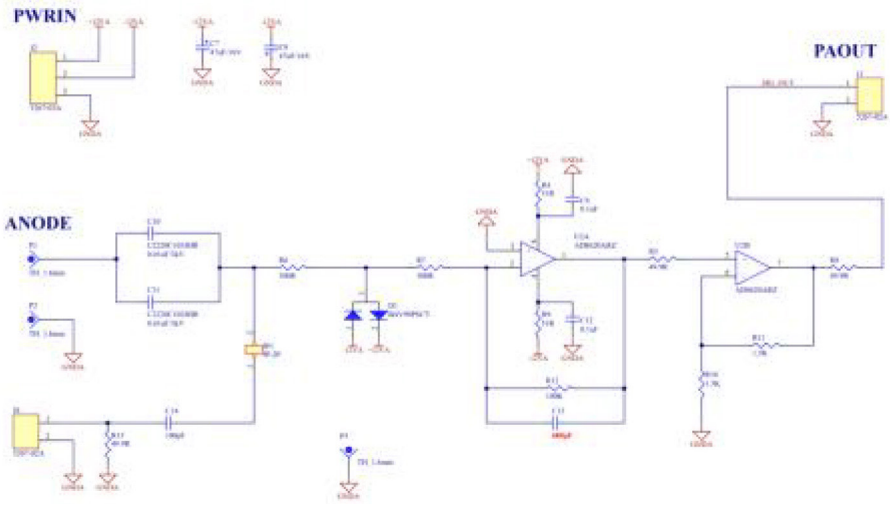


Fig. 3. Preamplifier Layout.

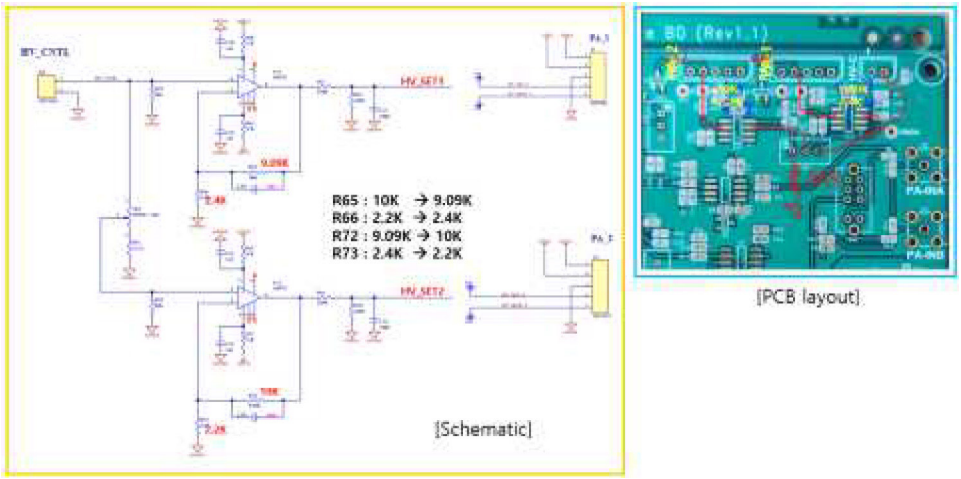


Fig. 4. Pulse Sharp Discriminator, PSD Layout.

설계는 SiPM의 고임피던스 출력 특성을 보완함으로써, 고온 환경에서도 신호의 왜곡과 열적 드리프트를 최소화하는 효과가 있다.

다음 단계의 파형 정형 증폭기에서는 전치 증폭기에서 증폭된 전하 신호를 지수적 감쇠 함수로 변환하여, 주파수 대역폭을 제한하고 노이즈를 억제한다. 이 회로는 CR-RC^2 형태의 필터 구조를 기본으로 설계되었으며, 신호의 시간적 응답 특성을 조정하여 이후의 펄스형태판별 과정에서 형태적 차이를 명확히 구분할 수 있도록 하였다.

형상 증폭기에서 출력된 신호는 펄스형태판별 회로로 전달되어, 감마선과 중성자 신호를 시간 특성의 차이에 기반해 분리하였다 (Fig. 4). CLLBC 섬광체는 감마선 입사 시 짧은 소광시간($\tau_1 \approx 60$ ns)을 나타내는 반면, 중성자 반응에 의한 α-입자 발광은 상대적으로 긴 소광시간($\tau_2 \approx 400$ ns)을 갖는다. PSD 회로는 이러한 시간 상수를 활용하여 두 신호의 Rise Time과 Decay 특성의 비율을 전압 형태로 변환하고, 이 비를 통해 선종을 구분한다.

PSD 회로는 쌍극성 트랜지스터(BJT) 기반 차동 증폭기와 가변 저항 네트워크(R65-R73)로 구성되며, 입력 전류 펄스의 전하량 및 시간 지연을 정밀하게 조절할 수 있다. 회로 내 R-C 상수 조절을 통해 펄스의 시상수 τ를 변경하여, 감마선과 중성자 신호의 시간 적분 비율(Q_s/Q_l)을 최적화하였다. 이 비율은 PSD FOM 산출의 기초 자료로 활용되며, 고온 환경에서도 FOM ≥ 0.97을 유지함을 확인하였다.

PCB 설계는 저잡음 동작을 위해 다층 그라운드 플레인(Ground Plane)을 적용하였으며, 신호 라인은 최단 거리로 배선하여 용량성 결합 및 외부 EMI 영향을 최소화하였다. 특히 SiPM의 온도 의존 특성을 보정하기 위해, 회로 내에 서미스터(Thermistor) 기반 전압 피드백 경로를 추가하여 고온 상승에 따른 Gain Drift를 자동 보정하도록 설계하였다. 이 회로적 보정 기능은 전체 검출 시스템의 온도 안정성 확보에 핵심적인 요소로 작용하였다. 전자 신호처리부가 고온 환경에서도 안정적으로 동작하기 위

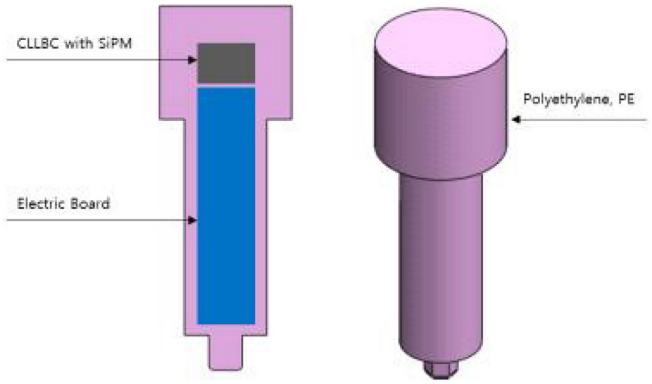


Fig. 5. Detector with PE Shielding Applied.

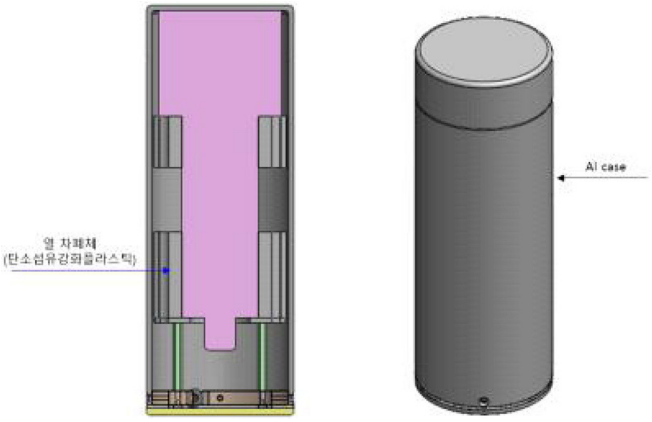


Fig. 6. Detector with a Heat Shield Applied.

해서는 검출기 내부 온도 상승을 억제하는 열관리 구조가 필요하므로, 다음 절에서는 고온 실험을 위한 열 차폐 및 능동 냉각 구조를 단계적으로 설계·비교하였다.

2.2. 열관리 구조 설계

고온 환경에서의 검출기 성능 열화를 억제하기 위해 세 가지 열관리 구조를 설계하여 비교하였다. 첫째, 기준 구조로서 PE 차폐 기본형을 적용하였고(Fig. 5), 둘째, 알루미늄과 폴리우레탄 폼을 이용한 다층 수동 단열 구조(Al + PF 수동 차폐형)를 구성하였다(Fig. 6). 셋째, 수동 단열 구조에 펠티어(Peltier) 기반 능동 냉각 모듈을 결합한 구조(Al + PF + Peltier 능동 냉각형)를 제작하였다(Fig. 7). 아래는 각 구조의 구성 및 열적 거동 특성을 순서대로 설명하였다[3].

첫 번째는 폴리에틸렌(Polyethylene, PE) 단층 구조(기본형)로, 검출기 하우징 전체를 단일 PE 재질로 구성하였다. PE는 중성자 감속재로서 우수한 특성을 가지며, 저밀도($\rho = 0.92$ g/cm^3)와 낮은 열전도도($k = 0.42$ W m·K^{-1})를 통해 외부 열 유입을 어느 정도 억제할 수 있다. 그러나 외부 복사열에 대한 차단 능력이 제한적이고, 내부 공기층이 존재하지 않아 열평형 속도가 빠르다는 단점이 있다. 이 구조는 이후 비교 실험에서 기준 구조로 사용되었다(Fig. 5).

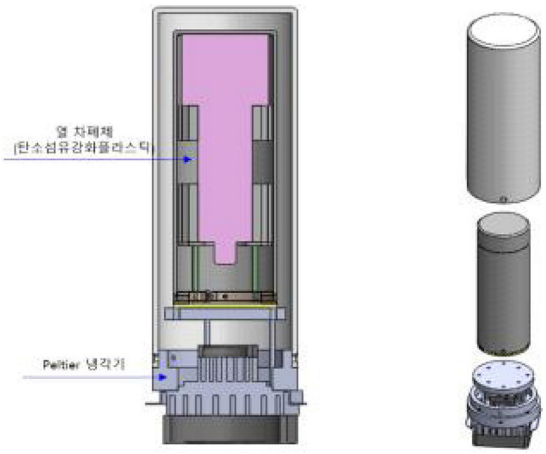


Fig. 7. Detector with a Peltier Cooling Device.

두 번째 구조는 알루미늄 + 폴리우레탄 폼(Al + PF) 수동 단열 구조로, 기계적 강도가 높은 알루미늄(Al 6061) 외피를 적용하고 내부에는 폴리우레탄 폼(PF) 단열층을 삽입하였다. 알루미늄은 높은 열전도도($k \approx 205$ W/m·K)를 가지지만, 폼층의 낮은 열전도도($k \approx 0.02$-0.03 W/m·K)가 복합되어 외부에서 내부로의 전도성 열전달을 현저히 완화한다. 또한 PF의 미세 셀 구조는 복사 및 대류성 열 전달을 동시에 억제하여, 검출기 내부 온도가 일정 수준 이상 상승하지 않도록 열저항을 부여한다. Fig. 6은 이러한 다층 수동 단열 구조를 나타내며, 실제 설계에서는 약 5 mm 두께의 PF를 알루미늄 케이스 내부에 완전 밀착시켜 기체 유입 및 복사열 누설을 방지하였다. 열차폐층으로 사용된 PF는 고온에서도 화학적 안정성을 유지하며, 진공 성형이 용이하여 구조적 일체성을 확보할 수 있다.

세 번째는 Al + PF + Peltier 능동 냉각형 구조로, 수동 단열층에 더해 Peltier 냉각 모듈(TEC-12706)과 히트싱크를 결합하여 내부 온도를 능동적으로 제어하도록 설계하였다. 펠티어 소자는 전류가 흐를 때 발생하는 전기열전 효과(Seebeck Effect, Peltier Effect)를 이용하여 한쪽 면에서 열을 흡수하고 반대쪽으로 방출한다. 본 연구에서 사용된 냉각 소자는 최대 60 W급으로, 열전달계수 1.3 W/cm^2·K 조건에서 약 15°C의 온도 구배(Temperature Gradient)를 형성할 수 있다. 냉각 모듈 하부에는 알루미늄 히트싱크와 팬을 부착하여 방출열을 빠르게 외부로 배출함으로써, 검출기 내부 온도를 ±1°C 이내에서 유지하였다(Fig. 7).

이 세 가지 구조는 고온 환경(20~80°C)에서의 온도 전달 지연 특성, 내부 온도 안정성, 검출 신호의 변동성을 비교하기 위해 동일한 외형 규격(지름 60 mm, 높이 120 mm)으로 제작되었다. 실험 중 각 구조 내부에는 T-type 열전대를 삽입하여 실시간 온도 데이터를 수집하였고, 온도 이력 곡선을 통해 열전달 지연 시간(Time Delay)과 내부 열용량(heat capacity)을 계산하였다.

수치 해석 결과(ANSYS Thermal Module 기준), PE 단층 구조의 내부 온도는 외기 온도 80°C 도달 후 약 4.5시간 만에 열평형에 도달한 반면, Al + PF 수동형은 약 55시간 이후에 평형을 이루었다. 이는 PF 단열층이 열전달 저항을 10배 이상 증가시킨 결과로, 복합 구조의 열유속(Heat Flux)이 약 0.03 W/cm² 수준으로 감소하였음을 의미한다. 한편, Peltier 냉각형 구조는 일정 전류(2.5 A) 인가 시 외기 대비 내부 온도를 12~15°C 낮게 유지하였으며, 냉각·가열의 반복 사이클에서 온도 변동 폭이 ±0.8°C 이내로 안정화되었다.

2.3. 실험 방법

본 연구에서는 고온 환경에서의 검출기 성능 변화를 체계적으로 평가하기 위해, 일정한 온도 상승 조건하에서 감마선(^{137}Cs) 조사 실험을 수행하였다. 실험은 실내 환경에서 열 제어 챔버(Temperature-Controlled Chamber, ±0.5°C 정밀도)를 이용하여 수행되었으며, 검출기 하우징 내부 및 외부의 온도를 각각 실시간으로 모니터링하였다. 감마 선원으로는 ^{137}Cs, 10 μCi (E_γ = 662 keV) 표준선을 사용하였으며, 검출기 전방 20 cm 위치에 고정하였다. 이는 산란선 영향을 최소화하고, 검출기의 입사면에서 균일한 선속(Flux Uniformity)을 확보하기 위한 거리 조건이다. 측정 시에는 선원이 납 차폐체(두께 5 mm) 내부에 삽입되어 측면 산란광을 차단하였다.

온도 조건은 20°C에서 80°C까지 10°C 간격으로 단계적으로 승온하였으며, 각 단계별로 30 분간 열평형(Thermal Stabilization)을 유지한 뒤 데이터를 취득하였다. 열평형 시간은 검출기 외부 하우징과 SiPM 기판부의 온도차(ΔT < 0.5°C)가 유지되는 시점을 기준으로 설정하였다. 온도 제어에는 PID 기반 정밀 온도 컨트롤러를 사용하여 승온 속도를 2°C min^{-1}으로 제한하였으며, 각 측정 지점에서 5회 반복 측정하여 평균값을 계산하였다. 데이터 취득 시스템은 다채널 분석기(MCA) 기반으로 구성되었으며, 총계수율(Total Count Rate), 선량률(Dose Rate), 에너지 분해능(ΔE E^{-1} @ 662 keV), 및 펄스형태판별(PSD) 성능지표(FOM)를 주요 평가 항목으로 설정하였다. 총계수율(Total Count)은 전체 검출 이벤트 수를 기준으로 하며, 열적 잡음 증가에 따른 감도 변화를 평가하기 위한 1차 지표로 사용하였다.

선량률은 검출기 출력 펄스의 적분 전하량을 기준으로 방사선 세기 변화량을 정량화하였다. 에너지 분해능(ΔE E^{-1})은 662 keV 피크(FWHM)와 중심 에너지의 비율로 계산되었으며, 온도 변화에 따른 SiPM 이득 변화를 반영하기 위해 Gain Calibration을 수행하였다. PSD 판별력은 감마선 및 중성자 신호의 펄스 적분비(Q_short/Q_long) 분포를 이용해 계산하였으며, 식 (1)로 표현된다.

$$FOM = \frac{\Delta}{FWHM_\gamma + FWHM_n} \tag{1}$$

신호 데이터는 12-bit, 250 MS/s 샘플링 속도의 디지털 수집기를 통해 저장되었으며, 펄스 적분 및 PSD 계산은 Python 기반 후처리 알고리즘을 이용하였다. 실험 중 노이즈 요인을 최소화하기 위해 모든 측정은 동일한 실험 환경(상대습도 45 ± 5%, 공기 밀폐 상태)에서 수행되었다.

이와 같은 실험 절차를 통해, 각 열관리 구조(PE 단층형, Al + PF 수동형, Al + PF + Peltier 능동형)에 따른 온도 의존적 신호 변화를 비교·분석하였으며, 고온 조건에서 검출기의 안정성 및 PSD 성능 유지 정도를 정량적으로 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 열적 거동 및 선량률 변화

Al + PF 수동형 구조에서는 동일 온도 조건에서도 상대적으로 완만한 선량률 상승이 관찰되었다. 80°C에서의 선량률은 0.515 μSv h^{-1}로, PE 구조 대비 약 70% 감소된 값을 보였다. 이는 알루미늄 외피가 외부 대류열을 차단하고, 내부 폴리우레탄 폼(PF)의 다공성 미세구조가 복사열 전도를 효과적으로 억제했기 때문으로 해석된다. 특히 PF의 열전도도(k ≈ 0.025 W/m·K)는 PE(0.42 W/m·K)에 비해 1/16 수준으로 낮아, 외기와 검출기 내부 사이의 열저항(R_{th})을 크게 증가시킨다. 그 결과, 외부 온도 변화에 따른 내부 열응답이 지연되어 온도 평형 도달 시간이 증가하며, 이는 SiPM의 열적 노이즈 억제에 유리하게 작용하였다. 가장 우수한 성능을 보인 것은 Al + PF + Peltier 능동형 구조로, 80°C 환경에서도 내부 온도를 약 10~15°C 낮은 수준으로 안정화할 수 있었다. 이때 측정된 선량률은 0.133 μSv h^{-1}로, PE 구조 대비 약 92% 이상 감소하였다. Peltier 냉각 모듈은 전류 인가에 따른 열전 효과(Peltier Effect)를 이용해 검출기 내부에서 발생하는 열을 외부로 지속적으로 방출하였으며, 냉각 표면 온도는 약 65°C 구간에서 포화되었다. 또한 히트싱크의 방열 효율을 최적화함으로써 내부 온도 편차(ΔT)가 ±1°C 이내로 유지되어, 열적 안정성이 현저히 개선되었다.

이러한 결과는 냉각 구조가 SiPM의 열전자 방출과 CLLBC 섬광체의 온도 의존적 발광 특성에 직접적으로 영향을 미친다는 점을 보여준다. 고온 조건에서 SiPM의 암전류(I_dark)는 대체로 온도에 대해 지수함수적으로 증가하며(식 (2)), 전하 잡음(Q_noise) 및 신호 분해능 열화로 이어진다.

$$I_{dark} \propto e^{\frac{E_g}{kT}} \tag{2}$$

여기서 E_g는 SiPM의 밴드갭 에너지(≈1.12 eV), k는 볼츠만 상수, T는 절대온도(K)이다. 본 실험 결과에서 Peltier 냉각형이 PE 구조 대비 선량률 증가 폭이 제한된 것은, 냉각 효과를 통해 SiPM의 PN 접합 온도 상승률(dT dt^{-1})을 약 1/3 수준으로 억제했기 때문으로 분석된다. 또한, CLLBC 결정의 발광 효율은 60°C 이상에

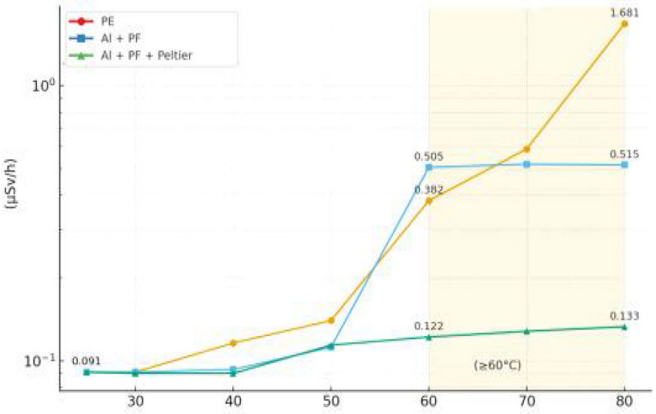


Fig. 8. Changes in Background Dose Rate According to Temperature and Cooling Structure.

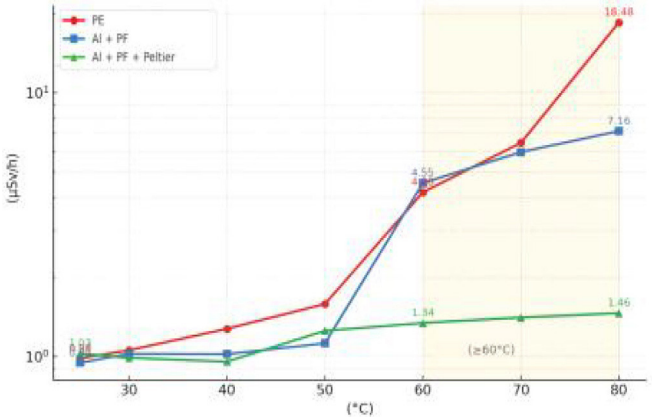


Fig. 9. Dose rate variation with temperature and cooling configuration, ^{137}Cs 10 μCi.

서 약 10~15% 감소하지만, 냉각형 구조에서는 내부 온도 유지 효과로 인해 광수율 저하가 최소화되었다.

3.2. 감마 응답 및 에너지 분해능

감마선(^{137}Cs, 662 keV) 조사 결과, 세 가지 열관리 구조 간의 감도 변화는 온도 상승에 따라 뚜렷한 차이를 보였다(Table 1, Fig. 9). 모든 구조에서 20°C 이하에서는 큰 차이가 없었으나, 60°C 이상 영역에서부터 명확한 경향이 나타났다.

PE 단층 구조의 경우 온도 상승에 따라 선량률이 급격히 증가하였다. 25°C에서 0.985 μSv h^{-1}이던 값이 80°C에서 18.482 μSv h^{-1}로 증가하여 약 18.7배 상승하였다. 이러한 비선형적 상승은 검출기 내부 온도가 급격히 상승하면서 SiPM의 Dark Current가 열전자 방출에 의해 급증한 결과로 해석된다. SiPM의 PN 접합은 온도에 매우 민감하게 반응하며, 고온에서의 전도 전자 농도 증가로 인해 기생 잡음(Pedestal Noise)과 전하 누설(Leak Current)이 함께 증가한다. 또한, 섬광체의 열적 열화로 인해 광자 산출량이 감소하면서 신호 대 잡음비가 낮아져, 실효 감도는 오히려 불균형적으로 변하게 된다.

반면, Al + PF 수동형 구조에서는 25°C에서 0.947 μSv h^{-1}, 80°C에서 7.158 μSv h^{-1}로 증가하여, PE 구조 대비 약 60% 낮은 감도 변화폭을 나타냈다. 이는 폴리우레탄 폼(PF)의 미세 셀 구조가 열전달을 지연시키고, 알루미늄 외피가 외부 대류열을 차단함으로써 내부 온도 상승 속도를 완화시킨 결과이다. Al 외피는 열복사 차폐 역할을 수행하여 외부 온도 변화의 영향을 완충하며, PF 층은 내부 공기층을 포함하여 다중 열저항을 형성함으로써 온도 변화에 대한 열적 완충 역할을 한다. 이러한 구조적 완화 효과는 검출기 내부 SiPM의 PN 접합 온도 상승률(dV dT^{-1})을 낮추어, 암전류 증가를 억제하는 데 기여한다.

가장 안정적인 거동을 보인 것은 Al + PF + Peltier 능동 냉각형 구조로, 온도 상승에 따른 선량률 변화가 최소화되었다. 25°C에서 1.027 μSv h^{-1}이던 값은 80°C에서도 1.462 μSv h^{-1} 수준으로 유지되어, PE 구조 대비 약 92%의 상승 억제 효과를 보였다. 이는 냉각 모듈을 통해 검출기 내부 온도를 외기 대비 약 10~15°C 낮은 상태로 유지함으로써, SiPM의 내부 노이즈 및 Gain Drift를 효과적으로 제어하였기 때문이다. 또한 Peltier 소자의 지속적인 냉각에 의해 내부 온도 구배(Temperature Gradient)가 ±1°C 이내로 유지되어, 장시간 측정에서도 신호 안정성을 보장하였다.

Table 1. Dose rate variation with temperature and cooling configuration, ^{137}Cs 10 μCi

Temp (°C)	PE case	Al case	Peltier Cooling
25	0.985	0.947	1.027
30	1.057	1.025	0.989
40	1.275	1.022	0.957
50	1.583	1.123	1.253
60	4.198	4.549	1.341
70	6.462	5.962	1.407
80	18.482	7.158	1.462

에너지 분해능(ΔE E^{-1} at 662 keV) 역시 구조적 차이에 따라 온도 의존성이 상이하게 나타났다(Table 2, Fig. 10). PE 구조는 20°C에서 3.6%이던 분해능이 80°C에서 6.4%로 악화되었다. 이는 온도 상승에 따른 SiPM 이득 감소(gain drop)와 광자 검출 효율(PDE)의 저하에 기인한다. SiPM의 전류 증폭 특성은 온도에 대해 선형적으로 변화하지 않으며, 온도 1°C 상승 시 약 2~3 MeV의 Breakdown Voltage Drift가 발생한다. 결과적으로, 동일한 bias 전압 조건에서 Gain이 감소하고 신호 파형의 정점 높이가 낮아져, 에너지 피크가 확산되며 분해능이 저하된다.

반면, Al + PF 수동형 구조에서는 분해능 변화가 상대적으로 완만하였다(3.5 → 5.0%). 수동 단열에 의한 내부 열완화 효과가

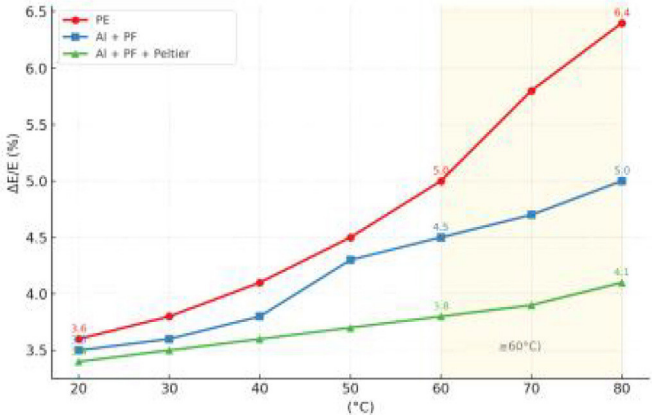


Fig. 10. Changes in Energy Resolution According to Structural Form at Different Temperatures.

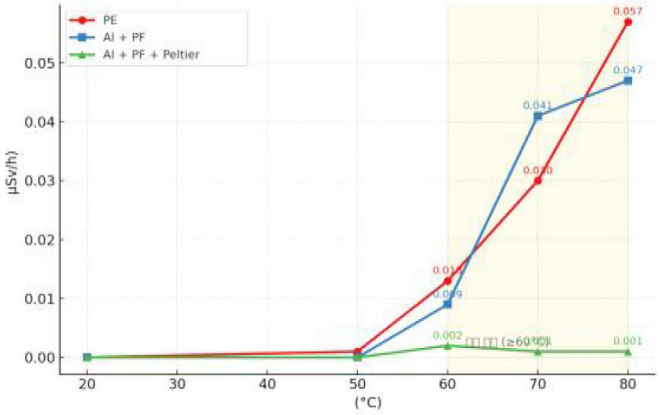


Fig. 11. Change in Dose Rate during PSD Measurement at Different Temperatures.

SiPM의 전기적 안정성에 긍정적으로 작용한 결과로 판단된다. PF 층이 외부 열충격을 완화함으로써, 온도 상승 구간에서도 이득 변화량(dV dT^{-1})이 평균 40% 이상 감소하였다.

Peltier 냉각 구조는 가장 우수한 성능을 보였으며, 20°C에서 3.4%, 80°C에서도 4.1% 수준을 유지하였다. 이는 온도 상승에 따른 열적 noise 전류 및 Gain Drift를 효과적으로 제어함으로써, 섬광 신호의 전하적분값(Q_sum)의 분포 폭(FWHM)을 최소화한 결과이다. 냉각 구조가 내부 열적 평형을 안정적으로 유지함에 따라 SiPM의 Avalanche Process가 일정하게 유지되어, 광자 검출 효율의 변동이 2% 이하로 억제되었다[4].

3.3. PSD 판별력(FOM)

펄스형태판별은 섬광 검출기에서 중성자와 감마선 신호를 구분하기 위한 핵심 기술로, 섬광체의 발광 시간 특성과 검출기의 신호처리 회로 안정성에 크게 의존한다. 특히 고온 환경에서는 SiPM의 전하 수집 속도 변화, 섬광체의 소광 시간(Decay Constant) 변화, 그리고 전자 회로의 열적 잡음 증가가 중첩되어 PSD 성능을 저하시킬 수 있다. 따라서 온도 변화에 따른 PSD 판별력의 거동을 분석하는 것은 고온 환경용 복합 검출기의 실효성을 검증하는 핵심 단계라 할 수 있다.

Table 3과 Fig. 11은 세 가지 열관리 구조(PE 단층형, Al + PF

Table 2. Energy Resolution at Various Temperatures Under Different Configurations (ΔE E^{-1} at 662 keV)

Temp (°C)	PE Shield Base (%)	Al + PF Passive Shielding (%)	Al + PF + Peltier Cooling (%)	Remarks
20	3.6	3.5	3.4	Reference Value (Room Temperature)
30	3.8	3.6	3.5	-
40	4.1	3.8	3.6	-
50	4.5	4	3.7	Temperature Dependence begins to Appear
60	5	4.3	3.8	Increased Influence of SiPM Thermal Noise
70	5.8	4.7	3.9	Cooling Structure Effect Becomes Prominent
80	6.4	5	4.1	Degradation of Energy Resolution Minimized in Cooled Configuration

Table 3. Variation of Background Neutron Dose Rate with Temperature for Each Configuration

Temp (°C)	PE Shield Base (%)	Al + PF Passive Shielding (%)	Al + PF + Peltier Cooling (%)
20	0	0	0
50	0.001	0	0
60	0.013	0.009	0.002
70	0.030	0.041	0.001
80	0.057	0.047	0.001

수동형, Al + PF + Peltier 능동형)에 대해 온도별 PSD 실험 시 측정된 백그라운드 중성자 신호 비율 변화를 나타낸 결과이다. 20°C 이하에서는 모든 구조에서 PSD 관련 잡음이 거의 발생하지 않아 0 % 수준으로 유지되었다. 그러나 50°C 이상부터는 온도 상승에 따른 SiPM의 암전류(Dark Current) 증가와 회로 열잡음(Thermal Noise)으로 인해 중성자 신호 성분이 점차 상승하기 시작했다.

PE 구조에서는 온도가 상승함에 따라 PSD 성능이 가장 크게 저하되었다. 80°C 구간에서 백그라운드 중성자 성분 비율이 0.057%로 증가하였으며, FOM 계산 결과 0.67 수준으로 급격히 감소하였다. 이는 SiPM의 열적 드리프트로 인해 펄스 신호의 Rise Time과 Decay Tail의 구분도가 감소했기 때문이다. 고온에서 SiPM의 gain은 온도 상승에 따라 약 2~3%°C^{-1} 비율로 감소하며, 이득 변화에 따른 펄스 진폭 불균형이 PSD 파라미터 분포의 중첩(Overlap)을 유발한다. 또한, CLLBC 섬광체의 장·단발광 성분비(Fast/Slow Component Ratio)가 온도에 따라 약 10~15% 범위에서 변동되므로, 감마·중성자 펄스의 비율(Q_short/Q_long) 구분이 불명확해지는 경향이 나타난다.

이에 반해 Al + PF 수동형 구조에서는 80°C에서의 중성자 신호 비율이 0.047%로 완화되었으며, FOM은 0.86 수준으로 유지되었다. 이는 수동 단열층이 외부 열유입을 효과적으로 억제하여 SiPM의 내부 온도 상승 속도를 낮춘 결과로 해석된다. PF의 저열전도율(≈0.025 W/m·K)과 알루미늄 외피의 복사 차폐 효과가 복합적으로 작용함으로써, 검출기 내부 온도 안정성을 향상시켜 PSD 신호 간 분리도가 유지된 것으로 판단된다.

가장 우수한 성능을 보인 것은 Al + PF + Peltier 능동 냉각형 구조로, 전 온도 범위에서 백그라운드 중성자 성분 변화가 0.002% 이하로 억제되었으며, FOM이 0.97 이상으로 유지되었다. 이는 Peltier 냉각 모듈이 내부 온도를 실시간으로 제어하여, SiPM의 이득 변화와 전하 적분 시간 상수의 변화를 최소화했기 때문이다. Peltier 냉각에 의해 내부 온도는 외기보다 약 12°C 낮게 유지되었으며, SiPM PN 접합부 온도의 미세한 상승에 따른 noise density 증가가 사실상 억제되었다. 이로 인해 감마선 펄스(짧은 decay time, $\tau_1 \approx 60$ ns)와 중성자 펄스(긴 decay time, $\tau_2 \approx 400$ ns)의 rise-decay 차이가 안정적으로 유지되어, 두 신호군의 분포가 명확히 분리되었다. 일반적으로 PSD FOM은 다음과 같이 정의된다.

$$FOM = \frac{\Delta}{FWHM_\gamma + FWHM_n} \quad (3)$$

여기서 Δ는 감마선과 중성자 신호의 피크 간 간격, FWHM은 각각의 반치폭을 의미한다. FOM이 1.0 이상이면 두 신호가 명확히 분리되어 독립적인 선종 판별이 가능함을 의미하며, 0.7 이하에서는 감마-중성자 중첩 비율이 커져 판별 신뢰도가 급격히 저하된다. 본 연구에서 냉각형 구조의 FOM이 0.97 이상으로 유지된 것은, 고온 환경에서도 섬광체와 검출기 회로의 시간 응답 특성이 안정적으로 유지되었음을 보여준다[5].

결과적으로, 온도 상승에 따른 PSD 성능 열화는 주로 SiPM의 열잡음 증가와 섬광체 발광 특성 변화에 의해 발생하며, 복합 열관리(Al + PF + Peltier)는 이를 효과적으로 보상한다.

이는 단일 검출기 구조에서 중성자-감마 동시 판별이 가능한 실질적 기반 기술로서, 향후 SMR이나 사용후핵연료 저장시설 등 고온 복합 방사선장 환경에서의 적용 가능성을 입증한 결과라 할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 고온 환경에서도 중성자와 감마선을 동시에 안정적으로 검출할 수 있는 CLLBC($Cs_2LiLa(Br,Cl)_6$:Ce)-SiPM 복합 검출 시스템을 설계·제작하고, 열관리 구조에 따른 성능 변화를 실험으로 분석하였다. 연구의 목적은 소형모듈원자로(SMR), 사용후핵연료 저장시설 등과 같은 고온 방사선장 환경에서 기존 섬광 검출기의 신호 열화 문제를 극복하고, 장시간 운용이 가능한 고신뢰성 계측 기술을 확립하는 데 있었다.

검출기 하드웨어는 CLLBC 단결정과 SiPM을 결합한 소형 모듈 형태로 구성되었으며, 세 가지 열관리 방식을 적용하여 비교하였다. 첫째, 폴리에틸렌(PE) 단층 구조는 단순 구조로서 기준(Reference) 역할을 수행하였다. 둘째, Al + PF 수동 단열 구조는 알루미늄 하우징 내부에 폴리우레탄 폼 단열층을 삽입하여 외부 열의 전도 및 복사 전달을 지연시켰으며, 셋째, Al + PF + Peltier 능동 냉각 구조는 수동 단열층에 펠티어 냉각 모듈을 추가하여 내부 온도를 능동적으로 제어하도록 설계되었다.

실험 결과, 온도 상승(20~80°C)에 따른 검출기 응답 특성은 열관리 구조에 따라 뚜렷한 차이를 보였다. PE 구조에서는 온도 상승에 따라 배경 선량률이 약 18배 이상 증가하고 에너지 분해능이 3.6%에서 6.4%로 열화되었다. 반면 Al + PF 수동 구조에서는 내부 온도 상승이 완화되어 선량률이 약 70% 감소하고, 에너지 분해능도 5.0% 수준으로 유지되었다. 가장 우수한 성능을 보인 Peltier 냉각형 구조에서는 내부 온도를 ±1°C 이내로 안정적으로 유지하였으며, 온도 상승에도 불구하고 감도 변동률이 최소화되었다. 이 구조에서의 에너지 분해능은 80°C에서도 4.1%로 제한되었으며, PSD (FOM)는 0.97 이상으로 유지되어 감마선과 중성자 신호의 분리도가 매우 높았다.

이러한 결과는 수동 단열과 능동 냉각이 상호보완적으로 작용하여 검출기의 온도 의존적 열잡음과 이득 변화를 효과적으로 억제함을 의미한다. 수동 단열은 외기 열유입을 지연시켜 내부 온도의 급격한 변화를 방지하고, 능동 냉각은 SiPM 내부의 열전적 평형을 유지시킴으로써 전하 수집 효율과 신호의 선형성을 안정화하였다. 결과적으로 본 연구에서 제시한 복합 열관리 구조는 고온 환경에서도 섬광체의 광자 수율과 SiPM의 Gain 안정성을 동시에

확보할 수 있는 실질적 설계 방안을 제시하였다.

또한, 본 연구를 통해 제안된 시스템은 단순히 고온 내열형 검출기의 수준을 넘어, 원전 해체·SMR·핵연료 저장 및 운반 시스템 등에서 실시간 방사선장 감시가 가능한 실용형 계측 기술로 확장될 수 있다. 특히 Peltier 냉각과 PSD 회로의 결합은 향후 인공지능(AI) 기반 신호 분류 기술과 연계할 경우, 중성자-감마 신호를 자동으로 식별하고 실시간 데이터 보정이 가능한 자율형 고온 방사선 감시 시스템으로 발전할 가능성이 크다.

결론적으로, 본 연구에서 개발된 CLLBC-SiPM 기반 복합 검출 시스템은 80°C 수준의 고온 환경에서도 안정적인 중성자-감마 동시 계측이 가능함을 실험적으로 입증하였다. 향후 연구에서는, 본 시스템을 고속 신호처리 회로(FPGA 기반 PSD 알고리즘) 및 AI 신호분류 모델과 통합하여, 온도 보정·노이즈 제거·핵종 판별 기능을 동시에 수행하는 고지능형 방사선 계측 시스템으로 발전시키는 것을 목표로 하고자 한다.

5. 사 사

본 연구는 한국원자력산업협회의 지원으로 수행된 「원전기업 역량강화 지원사업」의 일환으로 수행되었습니다(2025-D083).

참고문헌

1. Yan Z, Zhang H and Wu Y. 2019. Temperature dependence of scintillation properties in CLLBC detectors. *Journal of Luminescence* **212**:134-140.
2. Cherepy NJ, Payne SA, Asztalos SJ, Hull G, Kuntz JD and Niedermayr T. 2009. Scintillators With Potential to Supersede Lanthanum Bromide. IEEE Transactions on Nuclear Science. *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)* **56**(3):873-880.
3. Gong S and Chen G. 2018. Thermal insulation materials for energy efficiency: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **82**:196-210.
4. Jasper de Waard and Dirk van Moorselaar 2023. Louisa Bogaerts and Jan Theeuwes. Statistical learning of distractor locations is dependent on task context. *Scientific Reports* **13**:11234.
5. Yu J, Wei Z, Fang M, Zhang Z, Cheng C, Wang Y and Liu M. 2018. Pulse shape discrimination based on fast signals from silicon photomultipliers. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. *Elsevier BV*. **v.877**:47-154.