Assessment of LaBr₃:Ce and CeBr₃ scintillators for low-energy ⁵⁵Fe X-ray detection

2025 Korea Nuclear Society Spring Conference

2025.05.22. (Thu)

Jae Hyung Park, Jinhong Kim, Siwon Song, Seunghyeon Kim,

Sangjun Lee, and Bongsoo Lee

Chung-Ang University



Contents

1. Introduction

2. Materials and methods

3. Experimental results

4. Conclusion



Introduction

연구 배경





- 주요 방사성핵종 : ³H, ⁵⁵Fe, ⁶⁰Co, ⁶³Ni, etc.
- 콘크리트 등의 구성요소 내 54Fe 및 56Fe의 중성자 방사화
- despite its low energy, ⁵⁵Fe is anticipated to be a major contributor to the effective dose coefficient

Introduction

기존 측정 방법 및 본 연구 목적





Denis Glavič-Cindro et al., Appl. Radiat. Isot. 126 (2017)



laboratory-based, high cost, time consuming, pretreatment

high stability and compatibility

• 단, 대부분의 연구가 ¹³¹I, ¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs 등 고에너지 방출 선원만을 target으로 지정

✓ ⁵⁵Fe에 대한 내용은 전무하거나 단순 작동 테스트 목적에 그침

• LaBr₃:Ce의 ¹³⁸La 붕괴로 인한 주요 방출 방사선 : 5.6 keV, 37.4 keV, 1436 keV

✓ 1436 keV 감마선만 중시, 그 외 저에너지 방사선에 의한 영향 고려 X



Introduction

기존 측정 방법 및 본 연구 목적

- 연구 목적 : ¹³⁸La의 영향을 고려한 LaBr₃:Ce 및 CeBr₃ 섬광체의 ⁵⁵Fe 검출 성능 비교
 - ✓ beryllium window를 적용한 섬광체의 저에너지 X선 측정 가능성 평가
 - ✓ 다중 선원 환경에서의 5.9 keV 피크 검출 성능 평가
 - ✓ significance 및 minimum detectable activity(MDA) 분석을 통한 성능 평가



Materials and Methods

실험 장치 구성

- 섬광체 : 1"×1" 원통형 LaBr₃:Ce 및 CeBr₃ (Epic Crystal)
- 하우징 : 상단에 200 μm 두께의 beryllium window가 적용된 알루미늄 케이스
 - ✓ beryllium : 낮은 질량흡수계수로 X선의 투과율 향상
- 광검출기 : H10828 photomultiplier (Hamamatsu)
- 광전달 : EJ-560 optical pad (Eljen Technology) (scintillator-PMT 계면)
- 차광 및 assembly 결합 : polyacetal shading case



Materials and Methods

실험 장치 구성



IV power supply DT8033M scintillator-PMT assembly

digitizer DT5725

preamplifier CR-113



Materials and Methods

데이터 획득 및 실험 조건

- 신호 처리
 - ✓ preamplifier : CR-113 (Cremat Inc.)
 - ✓ digitizer : DT5725 (CAEN)
 - ✓ software : MC²Analyzer (CAEN)
 - $\checkmark\,$ trapezoidal rise time (~ shaping time) : 3 μs
- 실험 조건
 - ✓ PMT voltage : LaBr₃:Ce (-740 V), CeBr₃ (-790 V)
 - ✓ 측정 시간 : 각 1200초
 - ✓ 선원 : ⁵⁵Fe(4.077 µCi), ¹³⁷Cs(0.238 µCi), ⁶⁰Co(0.757 µCi) (disk, Spectrum Techniques)
 - ✓ 선원-윈도우 거리 5 mm, 암실 환경, 별도 외부 방사선 차폐 및 collimation X



intrinsic background 및 ⁵⁵Fe 스펙트럼 비교



CAU 중앙대학교

intrinsic background 및 55Fe 스펙트럼 비교





intrinsic background 및 ⁵⁵Fe 스펙트럼 비교

- LaBr₃:Ce의 특징
 - ✓ intrinsic background에 ¹³⁸La 붕괴로 인한 5.6 keV, 37.4 keV 피크 존재
 - ✓ LaBr₃:Ce에서는 1436 keV (¹³⁸La) 및 1461 keV (⁴⁰K) 피크가, CeBr₃에서는 1461 keV (⁴⁰K) 피크만이 관측
- 두 섬광체 모두
 - ✓ ⁵⁵Fe 선원 측정 시 5.9 keV 피크 명확히 구분
 - ✓ beryllium window 적용으로 저에너지 X선 검출 가능성 확인



에너지 보정 및 ¹³⁷Cs, ⁶⁰Co 스펙트럼





에너지 보정 및 ¹³⁷Cs, ⁶⁰Co 스펙트럼

- 에너지 보정
 - ✓ ¹³⁷Cs (0.238 µCi) 및 ⁶⁰Co (0.757 µCi) 측정으로부터 도출
 - ✓ 각 핵종의 주요 광전 피크 사용 (32, 661.657, 1173.228, 1332.492 keV)
- 스펙트럼 특성
 - ✓ LaBr₃:Ce : 661.657 keV (ER 3.49%), 1173.228 keV (ER 2.58%) 1332.429 keV (ER 2.56%)
 - ✓ CeBr₃ : 661.657 keV (ER 4.83%), 1173.228 keV (ER 3.39%) 1332.429 keV (ER 3.38%)
 - ✓ LaBr₃:Ce가 전반적으로 우수한 에너지 분해능 (ER) 제공



다중 방사선원 동시 측정



red line : ${}^{137}Cs + {}^{55}Fe$ / black line : ${}^{137}Cs$ only





다중 방사선원 동시 측정



red line : ${}^{60}Co + {}^{55}Fe / black line : {}^{60}Co only$





다중 방사선원 동시 측정

red line : ${}^{60}Co + {}^{55}Fe / black line$: ${}^{137}Cs + {}^{55}Fe / blue line$: ${}^{137}Cs + {}^{60}Co + {}^{55}Fe$





다중 방사선원 동시 측정

- 실제 해체 현장에는 ⁵⁵Fe만이 아닌 다양한 방사선원이 동시 존재
- ¹³⁷Cs, ⁶⁰Co 또한 해체 폐기물 및 에어로졸 샘플에 일반적으로 존재
 - ✓ ⁵⁵Fe 타겟 측정 시 background radionuclide로 존재할 가능성 높음
 - ✓ 고에너지 감마선에 의해 저에너지 영역에 넓은 continuum 형성
- 동시 측정 결과
 - ✓ 두 섬광체 모두 5.9 keV 피크 명확히 구분
 - ✓ LaBr₃:Ce : 5.9 keV(⁵⁵Fe), 32 keV(¹³⁷Cs), 37.4 keV(¹³⁸La)
 - ✓ CeBr₃ : 5.9 keV(⁵⁵Fe), 32 keV(¹³⁷Cs)
 - ✓ 고에너지 선원 존재에도 저에너지 방사선 동시 검출 및 식별 가능성 확인



Significance 분석

 Milbrath et al.(2007)이 RIID (Radio-Isotope Identification Device) 성능 평가를 위해 사용한 significance method를 적용하여 LaBr₃:Ce와 CeBr₃의 ⁵⁵Fe 검출 능력을 비교함

 \checkmark Sig_{quan} = net counts/net error

 \checkmark net error $\approx \sqrt{background + gross area}$

- significance는 net intensity와 uncertainty를 비교하여 피크의 observability를 나타내는 값
 - ✓ net count와 background가 동시에 측정되므로 significance는 측정시간의 제곱근에 비례
 - ✓ significance가 2배 더 크다면 측정시간은 4배 더 짧음
 - ✓ 검출기의 resolution이 좋을수록 gross peak 내 background가 감소하여 significance 향상
 - ✓ 검출기의 전체적인 성능을 평가 및 비교하는데 유용



Significance 분석



- LaBr₃:Ce가 일관되게 더 높은 significance
- CeBr₃는 동일한 significance 달성에 약 1.3 ~ 1.5배 더 긴 측정시간 필요
- 단, ¹³⁸La의 5.6 keV로 인한 LaBr₃:Ce 과대평가 가능성 존재
- intrinsic background 및 ¹³⁷Cs, ⁶⁰Co 단독 스 펙트럼을 background 스펙트럼으로서 제거
 - 후 다음과 같이 significance 재계산
- \checkmark Sig = net counts/ $\sqrt{gross area}$



Significance 분석



- LaBr₃:Ce의 significance가 감소하며 CeBr₃와
 의 성능 차이 감소
- 특히 ¹³⁷Cs 동시 측정 결과의 significance가 CeBr₃에서 크게 향상 (왜곡 피크 제거)
- 그럼에도 동시 측정 결과에서 LaBr₃:Ce가 CeBr₃보다 우수한 significance를 나타냄
- 실제 해체 현장에서는 다수의 방사성핵종이 동시에 존재할 가능성이 높으므로 LaBr₃:Ce의 현장 활용성이 더 효과적일 것으로 판단됨



5.9 keV 검출 효율 및 MDA 분석

- background subtraction을 진행한 데이터로부터 detection efficiency와 MDA를 계산
- MDA (L. Done et al.) Currie method based

✓ LaBr₃:Ce (peaked background) :
$$MDA_{peaked} = \frac{2.71+3.29\sqrt{B+B}\cdot\frac{N}{2m}}{\varepsilon \cdot p \cdot t}$$

- ✓ CeBr₃ (non-peaked background) : $MDA_{non-peaked} = \frac{2.71+3.29\sqrt{2 \cdot B}}{\varepsilon \cdot p \cdot t}$
- > *B* : background count, ε : detection efficiency, *p* : emission probability, *t* : measurement time, *N* : the number of channels in the ROI, *m* : the number of channels used for background estimation



5.9 keV 검출 효율 및 MDA 분석



- ¹³⁸La에 의한 영향을 제외해도 LaBr₃:Ce가 더 높은 검출 효율을 나타냄
- 그러나 CeBr₃가 보다 낮은 MDA를 나타냄으
 로써 방사능 측정에 더 민감할 것으로 판단됨
- 다만 측정 시간이 길어질수록 MDA 특성상 그
 차이는 수 Bq 수준으로 감소할 것으로 예상,
 모니터링과 같은 장시간 측정 시 LaBr₃:Ce가
 유효한 옵션이 될 수 있을 것으로 기대됨



Conclusion

주요 연구 결과

- 1"×1" LaBr₃:Ce 및 CeBr₃ 섬광체의 ⁵⁵Fe 검출 성능
 - ✓ 두 섬광체 모두 beryllium window 적용으로 5.9 keV 피크 검출 가능
 - ✓ 고에너지 방사선원 존재 하에서도 5.9 keV 피크 관찰 확인
- 성능 비교
 - ✓ LaBr₃:Ce : 더 빠른 5.9 keV 피크 검출 및 더 높은 검출 효율
 - ✓ CeBr₃ : 낮은 고유 배경으로 인한 더 낮은 MDA
- ¹³⁸La 배경 영향 제외 시에도

✓ 다중 선원 환경에서 LaBr₃:Ce가 여전히 우수한 성능 제공



Conclusion

응용 가능성 및 향후 연구 방향

- LaBr₃:Ce의 현장 적용 유용성
 - ✓ 시중 섬광체 중 최고의 에너지 분해능
 - ✓ 다중 방사선원 동시 측정 시 더 명확한 5.9 keV 피크
 - ✓ cost effective (CeBr₃보다 약간 저렴)
 - ✓ 단, 장시간의 측정을 통해 명확한 intrinsic background 규명 필요
- 향후 연구 방향
 - ✓ typical spectrometer size의 섬광체로도 ⁵⁵Fe와 같은 저에너지 선원 검출이 가능함을 확인
 - ✓ 실제 에어로졸 필터에 포집된 방사성 물질 검출 능력 평가
 - ✓ 다양한 환경에서의 현장 적용 가능성 검증
 - ✓ 공존하는 방사선원 및 섬광체 크기에 따른 저에너지 X선 검출 효율 변화 연구





