Journal of Radiation Industry 14(2) : 173~177(2020)

수중 방사선모니터링 시스템의 성능평가를 위한 계측기의 수중 내 농도환산인자 및 최저검출농도 산출

박장근[1] · 정성희[1,*] · 문진호[1] · 강성원[2] · 오대민[2] · 김영석[2]

[1]한국원자력연구원 중성자·동위원소응용연구부, [2]한국건설기술연구원 환경·플랜트연구소

Determination of Activity Conversion Factor and Minimum Detectable Activity for Underwater Radiation Monitoring System

Jang-Guen Park[1], Sung-Hee Jung[1,*], Jinho Moon[1], Sungwon Kang[2], Daemin Oh[2] and Youngsug Kim[2]

[1]*Radioisotope Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute, 111, Daedeok-daero 989 Beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon 34057, Republic of Korea*
[2]*Environmental and Plant Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283, Goyang-daero, Goyang-si, Gyeonggi-do 10223, Republic of Korea*

Abstract - An underwater radiation monitoring system has been developed using a NaI (Tl) detector for the potential radioactive contamination of drinking water by ^{137}Cs and ^{131}I radioisotopes. In this study, experiments and simulations were carried out using the detector to evaluate the minimum detectable activity (MDA) and conversion factor (converting counts into Bq·L^{-1}) of radioisotopes ^{137}Cs and ^{131}I. For the experiments, a waterproof system with the detector was located at the center of a water tank into which ^{68}Ga was homogeneously diffused instead of ^{137}Cs and ^{131}I due to a radwaste problem, and detection counts were recorded for every 5 min. Monte Carlo simulations were carried out for ^{68}Ga with the same geometry as the experiment to compare with the experimental energy spectrum to obtain simulation calibration value, and simulations were then performed for ^{137}Cs and ^{131}I to calculate the conversion factor. From the simulations, the conversion factors were 1.74×10^{-2} and 1.30×10^{-2} (Bq·L^{-1})/count for ^{137}Cs and ^{131}I, respectively. From underwater radiation background data and the conversion factors, the MDA of ^{137}Cs and ^{131}I for the system were found to be 0.77 and 0.89 Bq·L^{-1}, respectively.

Key words : Underwater radiation monitoring system, Radioactive contamination, Conversion factor, Minimum detectable activity

서 론

우리나라는 매장 자원이 매우 부족하여 에너지 생산을 위한 원료 대부분을 수입에 의존하고 있으며, 대기오염을 발생시키는 화석연료의 사용에는 한계가 있기 때문에 원자력 발전이 필수적이다. 체르노빌 사고와 후쿠시마 사고에서 알 수 있듯이, 중국이나 일본 등의 인근 국가 혹은 국내 원자력 발전소 등에서 사고가 발생하여 대량의 방사능 낙진이 발생

* Corresponding author: Sung-Hee Jung, Tel. +82-42-868-8057, Fax. +82-42-868-8448, E-mail. shjung3@kaeri.re.kr

되는 경우, 계절풍 등에 의한 기류를 따라 우리나라 대기가 오염되고, 중력 또는 강우 등에 의해 수원이나 토양에 낙하한 방사성물질이 수원으로 유입되어 수계가 오염될 수 있다 (OECD-NEA 2002; NISA/METI 2011). 국내 원자력 발전소에서 사고로 인해 방사성물질이 누출될 경우에는 지하수 등을 통해 주변 수원으로 방사성물질이 유입되어 수계 오염 상황이 초래될 수 있다. 하지만 기존의 연구는 대부분 인근 국가 내 사고에 의한 대기/해양 이동예측 기술이나, 모바일 통신 기술이 접목된 휴대용 방사능 측정기술에 초점이 맞춰져 있으며, 음용수와 관련된 용수전용 하천/지천에 대한 방사선 모니터링 시스템에 관한 연구개발은 수행된 바가 없다(오 등 2017).

우리나라는 하천에서 물을 취수하는 비율이 36.1%로 다른 국가들에 비해 높은 수준이며, 특히 좁은 국토에 많은 인구가 모여 살며 강우의 변동성이 커 물관리가 어려운 조건에서 재난 및 유사시에 대비하여 물안보를 확보하는 것이 절대적으로 필요하다. 이에 수계 방사능 오염 상황이 발생하였을 때 초기에 초동 대응 조치가 필수적이며, 신속한 초동 대응 조치를 위하여 수계 방사능 오염 상황이 발생하였을 때 이를 즉각 인지하고 대처할 수 있는 수중 방사선 측정장치 및 이를 이용한 방사능 오염 대응 시스템의 필요성이 대두된다.

본 연구는 수계 방사능 오염 상황이 발생하였을 때 ^{137}Cs과 ^{131}I을 신속하게 감지할 수 있는 고효율 수중방사선 상시계측 시스템의 개발을 위하여 수행되었다. 물은 대표적인 방사선 차폐 물질로서, 수중에서의 방사선 측정 시 물의 방사선 차폐 능력에 의해 계측반경과 측정효율이 상당히 제한된다. 측정효율이 낮아 계측치가 낮을 경우, 포아송 분포 원리에 의해 계측 오차 값이 커지고 측정 데이터의 신뢰성이 낮아진다. 계측치를 증가시키기 위하여 센서의 측정시간을 늘린다면 데이터의 신뢰성을 향상시킬 수 있지만 반대로 측정데이터를 얻는 주기가 길어지기 때문에 방사능 오염물질을 오염 초기에 인지하는 것이 불가능하다. 이에 계측기 가격과 효율을 고려하여 NaI (Tl) 계측기 (지름 3 inch, 높이 3 inch)가 상시계측시스템 내에 설치될 예정이며, 시스템의 성능예측을 위하여 NaI (Tl) 계측기의 수중 내 농도환산인자 및 최저검출농도를 산출하였다(김 등 2006; Tsabaris *et al*. 2008; Bagatelas *et al*. 2010; Zhang *et al*. 2015; Zeng *et al*. 2017; 박 등 2018).

전 세계 방사능 방호·방재법에 따른 음식물 내 방사성물질 농도 제한은 일반적으로 Bq·L^{-1}로 명시하고 있다. 하지만 방사선 계측기로부터 획득된 방사선은 cps 단위로 나타나기 때문에 방호·방재법에 바로 적용하기에는 한계가 있는데, 이는 방사선 계측기의 구조, 주변 환경 등의 영향으로 인해 방사선 계측시스템의 농도변환인자((cps → Bq·L^{-1})가 모두 달라지기 때문이다. 하지만 본 연구에서 개발 중인 수중 방사선 상시계측 시스템은 수중 방사선 계측을 위해 방사선 계측기가 물속에 배치될 예정이므로 주변 환경이 결정되어 해당 시스템을 위한 농도환산인자를 획득하는 것이 가능하다. 이에 본 연구에서는 ^{137}Cs 및 ^{131}I의 농도환산인자(cps → Bq·L^{-1})를 획득하고 이를 이용하여 방사선 계측시스템으로부터 획득한 초당 계측데이터를 수중 내 방사능 농도로 변환하고자 하였다. 수중 내 방사선 최소검출농도는 시스템의 성능을 평가할 수 있는 매우 중요한 정량적 인자로 시스템이 주변 배경방사선으로부터 구분해 낼 수 있는 최소한의 방사선농도를 의미한다. 즉, 최소검출농도가 낮으면 주변의 적은 농도의 방사선이 계측 가능하며, 최소검출농도가 높을 경우 방사선 계측을 위해 높은 농도의 방사선이 필요하다. 본 연구에서는 수중 방사선 모니터링 시스템에 사용되는 3인치 NaI (Tl) 계측기의 방사선 최소검출농도를 산정하기 위하여 수중 내 배경방사선 계측 실험을 수행하고 이를 기반으로 최소검출농도를 산출하였다.

재료 및 방법

1. 수중 내 ^{137}Cs 및 ^{131}I 농도환산인자 획득

농도환산인자는 시뮬레이션만으로는 획득이 불가능한 값으로, 실험만으로 획득하거나 혹은 실험과 시뮬레이션을 병행하여 계산하여야 한다. ^{137}Cs과 ^{131}I은 반감기가 각각 30년, 8일인 선원으로 직접 물에 섞어 실험을 수행할 경우 방사능 오염의 가능성이 존재하기 때문에 반감기 68시간인 ^{68}Ga을 이용하여 실험을 수행하고 동일한 조건으로 수행된 시뮬레이션 값과의 비교를 통하여 시뮬레이션 효율 값을 획득하였다. 또한, ^{137}Cs과 ^{131}I 선원에 대한 시뮬레이션 값에 효율 값을 적용하여 농도환산인자를 추정하였다.

실험은 Fig. 1처럼 5.3톤의 물이 가득 찬 직경 1.9 m, 높이 1.9 m의 수조에 Fig. 2의 구조로 구성된 방수형 3인치 원통형 NaI (Tl) 계측기 (제조사: Amcrys)를 넣고 주입해 준 방사성물질의 농도에 대한 계측 값을 획득하였다.

^{68}Ga은 실제로 감마선 방출선원이 아닌 양전자 방출선원이지만 양전자 특성상 매우 짧은 거리 내에서 음전자와 반응하여 두 개의 511 keV 소멸감마선을 방출한다. 반감기가 짧은 선원은 실험 후 처리가 매우 용이하며, 특히 ^{68}Ga은 ^{68}Ge/^{68}Ga 발생장치로부터 쉽게 추출하여 사용할 수 있기 때문에 실험에 주로 사용된다. 발생장치에서부터 추출되는 ^{68}Ga은 ^{68}Ge의 반감기 (271일)에 따라 방사능이 지속적으로 감소되며, 본 연구에서 사용된 iTG사의 발생장치로부터 추출된 ^{68}Ga은 12.9 MBq이었다. 추출된 ^{68}Ga은 수조에 주입되고, 수조 안에 있는 펌프를 이용하여 선원이 수조 안에서 균일하게 섞이도록 해 주었다. 수조 내 평균 방사능 농도는 수조 안의 물이 5.3톤임을 고려하였을 때 2.4 kBq·L^{-1}로 계산되었다. 방사선 계측에는 ^{68}Ga 선원으로부터 방출되는 511 keV 주변의 감마선만을 선택적으로 검출하기 위하여 Gamma Pro MCA

Fig. 1. Experimental set-up for activity conversion factor.

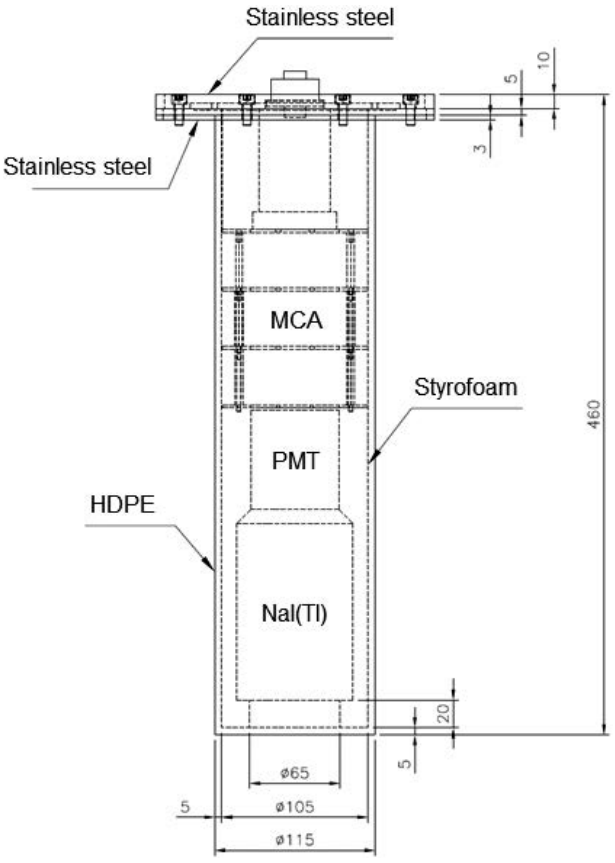

Fig. 2. Schematic diagram of waterproof NaI (Tl) detector system.

(제조사: NuCare)가 사용되었다.

실험에서 획득한 ^{68}Ga 계측 값과 전산모사 값을 비교하기 위하여 동일한 조건에 대하여 몬테칼로 전산모사를 수행하였다(Wu and Team 2009; Pelowitz 2013; Wu *et al*. 2015). Fig. 3은 MCNP6을 통해 간략하게 설계된 수조와 방수형 계측기

Fig. 3. Simulation geometry of water tank and detector by MCNP.

를 나타낸다. 수조 내부에는 방사성 물질이 물과 함께 균일하게 분포하여 방사선을 방출하도록 하였으며, 수조 내 방사성 물질의 종류와 농도는 실험과 동일하게 ^{68}Ga 2.4 kBq·L^{-1}로 설정하였다.

2. 수중 내 방사선 최소검출농도 산정

실험의 구조와 방사선 계측을 위해 사용된 장비는 수중 내 ^{137}Cs 및 ^{131}I 농도환산인자 실험과 동일하다. 다만, 본 연구에서는 수중 내 배경방사선 획득을 목적으로 하여 수조 내에 방사성동위원소를 주입하지 않고 방사선 계측을 수행하였다. 배경방사선 획득은 전산모사로는 모사가 불가능하여 실험을 통한 획득 및 평가가 필수적이다. 또한, 배경방사선은 농도가 아닌 시간당 계측 수로 나타나기 때문에 배경방사선 계측치를 기반으로 최소검출계측치를 획득하고 이를 앞에서 구한 농도환산인자를 통해 최소검출농도의 산정이 가능하다. 방사선 최소검출계측치는 아래 식을 통해 계산된다(Currie 1968; Knoll 2010; Zhang *et al*. 2015).

$$\text{최소검출계측치} = 4.65\sqrt{\text{배경방사선계측치}} + 2.71$$

결과 및 논의

1. 수중 내 ^{137}Cs 및 ^{131}I 농도환산인자 획득

Fig. 4는 실험과 MCNP6을 통해 획득한 ^{68}Ga 선원의 에너지 스펙트럼을 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 511 keV에서 나타나는 ^{68}Ga의 광전피크 영역이 서로 매우 유사하며, 이는 몬테칼로 전산모사가 실험 값을 정확하게 모사해 낼 수 있다는 것을 나타낸다. 다만, 150 keV 이하에서는 서로 계측 값이 크게 차이나는 것을 볼 수 있는데 이는 실험에서는 140 keV의 감마선을 방출하는 ^{99m}Tc이 섞여있기 때문이다. 하지만 본

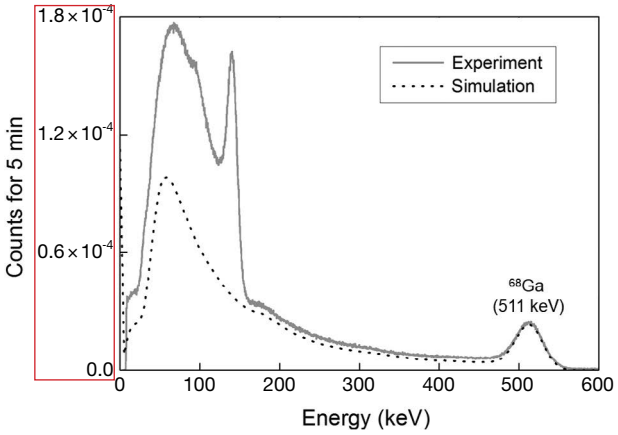

Fig. 4. Energy spectrum of ^{68}Ga source obtained by experiment and simulation.

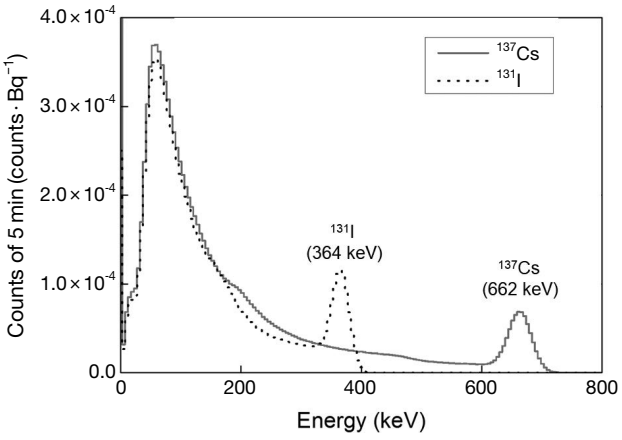

Fig. 5. Calculated energy spectrum of ^{137}Cs and ^{131}I by MCNP6.

연구에서는 ^{68}Ga의 광전피크만이 관심영역이기 때문에 ^{99m}Tc 선원으로 인한 차이는 무시하였다.

몬테칼로 전산모사를 통해 ^{137}Cs과 ^{131}I 선원의 실험 데이터를 예측하기 위하여 동일한 조건에 대하여 MCNP6 전산모사를 수행하였다(Fig. 5). ^{137}Cs과 ^{131}I은 모두 핵물질이 분열할 때 생성되는 대표 핵종으로 ^{137}Cs은 662 keV의 감마선을, ^{131}I은 스펙트럼 형태의 감마선을 방출하며 주로 364 keV의 감마선을 방출한다. 두 선원의 광전피크 영역 내 총 계측 값은 ^{137}Cs이 1.09×10^{-2} counts·Bq^{-1}, ^{131}I이 1.46×10^{-2} counts·Bq^{-1}로 나타났다. 농도환산인자(단위: (Bq·L^{-1})·count^{-1})를 구하기 위해서는 해당 값의 역수에 물의 양인 5.3톤 나누어 주어야 하며, 결국 ^{137}Cs은 1.74×10^{-2} (Bq·L^{-1})·count^{-1}, ^{131}I은 1.30×10^{-2} (Bq·L^{-1})·count^{-1}로 나타났다.

2. 수중 내 방사선 최소검출농도 산정

수중 배경방사선 데이터 획득을 위하여 이전과 동일하게 5분간 방사선계측을 수행하고 이를 Fig. 6에 나타내었다. 본 연구에서 관심있는 영역은 ^{137}Cs과 ^{131}I의 광전피크영역이며, 해당 영역은 선원이 방출하는 광전피크 에너지에 해당 에너지의 반치폭(Full width at half maximum, FWHM)을 더하고 감하여 결정된다. 즉, ^{137}Cs의 광전피크영역은 662±44.3 keV, ^{131}I의 광전피크영역은 364±32.8 keV로 계산되었다. ^{137}Cs과 ^{131}I의 광전피크 영역에 해당하는 계측치는 각각 200 counts와 81 counts로 나타났다. 이를 앞에서 획득된 농도환산인자 $(1.74\times10^{-2}$ (Bq·L^{-1})·count^{-1} for ^{137}Cs and 1.30×10^{-2} (Bq·L^{-1})·count^{-1} for ^{131}I)를 곱해주면 최소검출농도가 획득된다. 최소검출농도는 ^{137}Cs에 대해 0.77 Bq·L^{-1}, ^{131}I에 대해 0.89 Bq·L^{-1}로 나타났다.

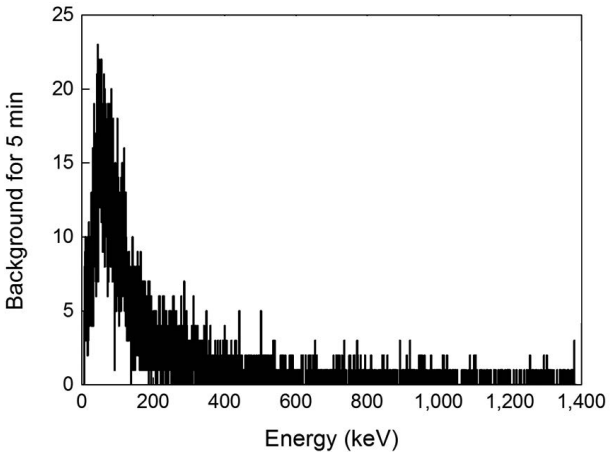

Fig. 6. Background energy spectrum in water.

결 론

본 연구는 수중 방사선 모니터링 시스템에 사용될 3인치 원통형 NaI(Tl) 계측기의 수중 농도환산인자와 최소검출농도를 평가하기 위하여 수행되었다. 방사성오염 가능성을 고려하여 ^{137}Cs 선원 및 ^{131}I 선원 대신 ^{68}Ga 선원을 사용하여 실험을 수행하고 전산모사 값을 보정하였으며, 보정된 전산모사 값을 이용하여 ^{137}Cs 선원과 ^{131}I 선원의 농도환산인자를 획득하였다. 획득된 농도환산인자는 ^{137}Cs에 대해 1.74×10^{-2} (Bq·L^{-1})·count^{-1}, ^{131}I에 대해 1.30×10^{-2} (Bq·L^{-1})·count^{-1}로 나타났다. 획득된 농도환산인자는 최저검출농도를 획득하는 데 사용되었으며, 수중 내 배경방사선 데이터를 바탕으로 ^{137}Cs은 0.77 Bq·L^{-1}, ^{131}I은 0.89 Bq·L^{-1}로 나타났다. 이는 결국 수중 내 방사능 농도가 1 Bq·L^{-1}로 매우 낮은 경우에도 모니터링 시스템을 통한 방사선 계측이 가능하다는 것을 의미한다. 또한, 수중 내 방사능 섭취제한 농도인 100 Bq·L^{-1}와 비교하였을 때 약 1/100에 해당하는 매우 낮은 수치로 수중 방사선

을 감시하는 데 매우 적합한 것을 확인할 수 있었다. 본 연구 결과는 수중 방사선 모니터링 시스템의 개발에 사용될 예정이며, 시스템의 구성이 완료된 후에는 보다 정확한 성능평가를 위하여 시스템 구조가 고려된 농도환산인자와 최저검출농도의 산출이 이루어질 예정이다.

사 사

본 연구는 2015년 정부(미래창조과학부)의 재원으로 국가과학기술연구회 창의형 융합연구사업(No. CAP-15-07-KICT)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

김용제, 조수영, 윤윤열, 이길용. 2006. 극 저준위 액체섬광계수기를 이용한 지하수 중 라돈(^{222}Rn) 측정법 연구. 한국지하수토양환경학회지. **11**(5):59-66.

박장근, 정성희, 문진호, 오대민, 강성원, 김영석. 2018. 수중 방사선모니터링 시스템의 성능평가를 위한 검출기의 수중 내 유효검측거리 및 최저검출농도 산출. 한국방사선산업학회지. **12**(1):11-14.

오대민, 강성원, 김영석, 정성희, 문진호, 박장근. 2017. 방사성 동위원소를 이용한 제염제 혼합확산장치의 유동특성분석. 대한환경공학회지. **39**(5):282-287.

Bagatelas C, Tsabaris C, Kokkoris M, Papadopoulos CT and Vlastou R. 2010. Determination of marine gamma activity and study of the minimum detectable activity (MDA) in 4pi geometry based on Monte Carlo simulation. *Environ. Monit. Assess*. **165**:159-168.

Currie LA. 1986. Limits for qualitative detection and quantitative determination application to radiochemistry. *Anal. Chem*. **40**(3):586-593.

Knoll GF. 2011. Radiation Detection and Measurement. 4th ed. pp. 321-364. John Wiley & Sons, Inc., New York.

NISA/METI. 2011. INES (the International Nuclear and Radiological Event Scale) Rating on the Events in Fukushima Daiichi Nuclear Power Station by the Tohoku District - off the Pacific Ocean Earthquake.

OECD-NEA. 2002. CHERNOBYL: Assessment of Radiological and Health Impacts.

Pelowitz DB. 2013. MCNP6^{TM} USER'S MANUAL Version 1.0. Los Almos National Laboratory, California, U.S.A.

Tsabaris C, Bagatelas C, Dakladas T, Papadopoulos CT, Vlastou R and Chronis GT. 2008. An autonomous in situ detection system for radioactivity measurements in the marine environment. *Appl. Radiat. Isot*. **66**:1419-1426.

Wu Y and FDS Team. 2009. CAD-based Interface Programs for Fusion Neutron Transport Simulation. *Fusion Eng. Des*. **84**:1987-1992.

Wu Y, Song J, Zheng H, Sun G, Hao L, Long P, Hu L and FDS Team. 2015. CAD-based Monte Carlo Program for Integrated Simulation of Nuclear System SuperMC. *Ann. Nucl. Energy* **82**:161-168.

Zhang Y, Li C, Liu D, Zhang Y and Liu Y. 2015. Monte Carlo simulation of a NaI (Tl) detector for in situ radioactivity measurements in the marine environment. *Appl. Radiat. Isot*. **98**:44-48.

Zeng Z, Pan X, Ma H, He J, Cang J, Zeng M, Mi Y and Cheng J. 2017. Optimization of an underwater in-situ $LaBr_3$:Ce spectrometer with energy self-calibration and efficiency calibration. *Appl. Radiat. Isot*. **121**:101-108.

Received: 29 May 2020
Revised: 4 June 2020
Revision accepted: 14 June 2020