

A Study on the Assessment of Source-term for PWR Primary System Using MonteCarlo Code

MonteCarlo 코드를 이용한 PWR 일차 계통 선원항 평가에 관한 연구

Jong Soon Song, Sang Heon Lee, and Seung Su Shin*

Chosun University, 309 Pilmun-Daero, Dong-Gu, Gwangju, Republic of Korea

송종순, 이상현, 신승수*

조선대학교, 광주광역시 동구 필문대로 309

(Received April 17, 2018 / Revised June 12, 2018 / Approved July 10, 2018)

The decommissioning of nuclear power plants is generally executed in five steps, including preparation, decontamination, cutting/demolition, waste disposal and environmental restoration. So, for efficient decommissioning of nuclear power plants, worker safety, effects compared to cost, minimization of waste, possibility of reuse, etc., shall be considered. Worker safety and measurement technology shall be secured to exert optimal efficiency of nuclear power plant decommissioning work, for which accurate measurement technology for systems and devices is necessary. Typical In-Situ methods for decommissioning of nuclear plants are CZT, Gamma Camera and ISOCS. This study used ISOCS, which can be applied during the decommissioning of a nuclear power plant site without collecting representative samples, to take measurements of the S/G Water Chamber. To validate the measurement values, Microshield and the GEANT4 code was used as the actual method were used for modeling, respectively. The comparison showed a difference of 1.0×10^1 Bq, which indicates that it will be possible to reduce errors due to the influence of radiation in the natural environment and the precision of modeling. Based on the research results of this paper, accuracy and reliability of measurement values will be analyzed and the applicability of the direct measurement method during the decommissioning of NPPs will be assessed.

Keywords: Decommissioning, In-situ technique, ISOCS, MonteCarlo code, GEANT4

* Corresponding Author.

Seung Su Shin, Chosun University, E-mail: tmdsoo@naver.com, Tel: +82-62-230-7165

ORCID

Jong Soon Song
Seung Su Shin

<http://orcid.org/0000-0001-9162-7631>
<http://orcid.org/0000-0001-5349-6044>

Sang Heon Lee

<http://orcid.org/0000-0002-5203-3029>

원전 해체는 일반적으로 5단계로 준비, 제염, 절단 및 철거, 폐기물 처리, 환경 복원으로 진행된다. 효율적인 원전 해체를 위해서는 작업자의 안전, 비용 대비 효과, 폐기물 최소화, 재사용 가능성 등이 고려되어야 한다. 또한, 작업자의 안전 및 측정 기술이 확보되어야 원전 해체 작업의 최적 효율을 낼 수 있으며 이를 위해서는 계통 및 기기의 정확한 측정 기술이 필요하다. 원전 해체 시 현장에서 사용할 수 있는 대표적인 In-Situ 방법으로는 CZT, Gamma Camera, ISOCS 등이 있다.

본 연구에서는 대표 시료 채취 없이 원전 해체 시 현장에서 적용될 수 있는 ISOCS를 이용하여 S/G Water Chamber 지점에 대하여 측정을 수행하였다. 측정 방법은 ISOCS의 HPGe 검출기를 증기 발생기 수실 하부 중앙을 향해 위치하였으며, 이때 검출기는 주변 방사선장 감소를 위해 납 차폐체를 장착하였다. 차폐체 두께는 5 cm인 원통형 납 차폐체를 장착하였으며, 검출기 전면에는 30도 콜리메이터를 장착하여 측정을 수행하였다. 측정값에 검증을 위해 실제 측정 방법과 동일하게 Microshield를 이용하여 측정값과 GEANT4 코드를 이용하여 모델링 하였다. 비교 결과 $1.0 \times 10^1 \sim 1.0 \times 10^2$ Bq 정도 차이를 보였으며, 이는 측정 시 주변 방사선의 영향, 모델링의 정밀도 등으로 오차를 줄일 수 있을 것으로 보인다. 본 논문의 연구 결과를 바탕으로 측정값의 정확도 및 신뢰도를 분석하고 향후 해체 작업 시 직접 측정 방법의 적용성에 대한 신뢰도를 높이고자 한다.

중심단어: 해체, 직접 측정 기법, ISOCS, 몬테칼로 코드, GEANT4

1. 서론

국내 최초의 상업용 원전인 고리 1호기가 2017년 6월 영구 정지되었으며, 원전 해체에 대한 국내 관심이 높아지고 있다. 원전 해체의 일반적인 과정은 준비, 제염, 절단 및 철거, 폐기물 처리, 환경 복원 5단계로 진행된다. 또한, 위와 같은 해체의 일반적인 과정에서 작업 고려 사항은 안전, 효율, 비용 대비 효과, 폐기물 최소화, 재사용 가능성을 제시하고 있다. 작업자의 안전을 위한 측정기술 및 선원항 분포도가 확보되어야 원전 해체 작업의 최적 효율을 낼 수 있으며 이를

위해서는 계통 및 기기의 정확한 선원항 측정 기술이 필요하다[1].

국내·외 발전소 해체 시 또는 배관 내 핵종 분석을 위해 In-Situ 방법을 이용한 직접 측정하는 방법을 이용한 사례가 있다. 대표적인 In-Situ 방법에는 CZT, Gamma Camera, ISOCS 등이 있으며 이들에 대한 특징은 Table 1과 같다[2].

본 연구에서는 대표 시료 채취 없이 원전 해체 시 현장에서 적용될 수 있는 ISOCS를 이용하여 S/G Water Chamber 지점에 대하여 측정을 수행하였고, 측정값에 검증을 위해 실제 측정 방법과 동일하게 GEANT4를 이용하여 모델링 하였다.

Table 1. Comparison of In-Situ measurement

	CZT	Gamma Camera	ISOCS
Measurement Object	Small Detector Minimal Parts	Small Components (Pipe, Wall, etc.)	All Components (Any Size and Shape)
Measurement Range (Dose Rate)	Adjustable (Replace the Probe)	Available (Picture)	Adjustable (Distance Control, Shielding)
Nuclide Identification	Available (Spectrum, Software)	Unavailable	Available (Spectrum, Software)
Contaminated Area Discrimination	Available (Internal GM Detector)	Available (Picture)	Unavailable
Quantitative Analysis	Relative Ratio of Radionuclides	Unavailable	Available

2. 직접 측정 방법(In-Situ Method) 분석

2.1 ISOCS (In-Situ Objective Counting System)

ISOCS는 측정 대상물이 대형이거나 매우 복잡하여 표준 선원 제작이 불가능한 이유로 직접 교정을 수행할 수 없는 경우 이용할 수 있는 측정 방법이다. 하지만 신뢰성 있는 분석을 위해서는 반드시 측정하고자 하는 기하학적 구조를 정확히 알고 있어야 한다. 특히, 검출기와 대상체의 기하학적 구조뿐만 아니라, 내부의 구성 물질, 선원의 분포 등이 매우 중요하다. 따라서 ISOCS의 활용은 내부구조가 정확히 알려진 경우, 특히 선원 및 매질이 균질하고 그 구성 물질이 알려진 경우에 대하여 최적의 결과를 얻을 수 있다. 하지만 비균질하더라도 선원의 위치와 매질의 기하학적 구조를 알고 있는 경우라면 분석할 수 있다[3].

2.2 ISOCS 측정 원리

ISOCS는 대부분 제공되는 기본 Template으로 모델링이 가능하며 20개의 표준 Template으로 대상체와 가장 유사한 모델을 선택하면 된다. 적절한 Template Worksheet를 선택하여 대상체의 모든 치수를 확보하고 모든 샘플 구성물질의 적절한 2가지 형태 정보는 정확한 ISOCS Efficiency 계산에서 매우 중요하다. ISOCS는 원전 해체 시 직접 측정을 통한 선원 분석뿐만 아니라 토양 표면, 대형 평면의 표면 오염분석, 방사능 물질을 포함한 박스 형태의 용기 등에 사용될 수 있다. 또한, ISOCS의 지오메트리 설계는 MCNP 모델을 기반으로 하며 기본으로 제공되는 Template 모델을 바탕으로 지오메트리를 작성하게 된다.

ISOCS 내에서 사용하는 방사능 자체 알고리즘에 내장된 계산 식은 다음과 같다[4].

$$C = \frac{S}{V \cdot \epsilon' \cdot y \cdot T_l \cdot U_f \cdot K_c \cdot K_w} \quad (1)$$

위에 대한 계산식 인자 값은 다음과 같다.

C : 선원 체적 대비 방사능

S : 스펙트럼 피크 면적

V : 선원 체적

y : 에너지 피크의 방출 확률

T_l : 스펙트럼 측정 시간(Live Time)

U_f : 단위 환산 계수

K_c : 측정 시간 동안 방사능 붕괴 보정인자

K_w : 선원 기준일에서 측정 시작일까지 방사능 붕괴 보정인자

3. GEANT4 (Geometry And Tracking) 코드 분석

GEANT4는 C++를 기반으로 만들어진 범용적으로 사용할 수 있는 핵 및 입자 물리 전산모사를 수행하기 위한 툴킷이다. GEANT4의 가장 큰 특징은 C++의 객체지향 철학을 잘 따른 설계이며, 이를 위하여 각각의 기능별로 코드를 구현하여 각각의 필요한 기능만을 이용할 수 있게 설계하였다.

구현된 기능들은 전산모사를 위한 구조체를 관리하는 기하 및 물질, 물체와 입자의 상호작용, 입자의 추적, 수치화 및 상호작용한 점의 관리, 사건과 경로의 관리, 시각화 및 사용자 인터페이스로 입자 물리학의 전산모사를 위해 필요한 대부분의 기능을 구현했다. 물리적인 계산은 대부분의 물리 모델을 이용할 수 있도록 만들어졌으며, 실제 실험에서 얻은 데이터 결과를 통하여 그 정확도를 높일 수 있게 만들어졌다[5].

GEANT4에서는 전산모사를 수행하기 위해 지오메트리 정보(DetectorConstruction), 발생하는 선원의 정보(Physics-List), 반응 물리 모델 정보(PrimaryGeneratorAction)를 작성하여야 한다. 지오메트리는 GEANT4 코드 내의 기본이 되는 정보를 설정하며, 그 중 World Volume은 반드시 설계하고자 하는 지오메트리의 정보를 포함할 수 있도록 크게 설정되어야 한다. 일반적으로 간단하고 효율적인 World Volume을 만들기 위해 일반적으로 박스 형태로 이용한다.

선원의 정보는 입자의 종류, 발생 방향, 초기 에너지, 발생 장소 등을 설정해주며 정의하는 방법은 G4ParticleGun 클래스를 이용한 방식, G4GeneralParticleSource 클래스를 이용한 Macro 방식이 있다.

반응 물리 모델 정보는 입자와 물질 간의 상호작용을 적합한 에너지 영역에 따라 설정하여 계산을 수행하며, GEANT4에서는 시뮬레이션에 사용할 수 있는 다양한 물리적 요소를 제공한다. 따라서 사용자가 원하는 모델을 선정하여 사용할 수 있다. GEANT4 기본적인 Class Categories는 Fig. 1과 같다[6].

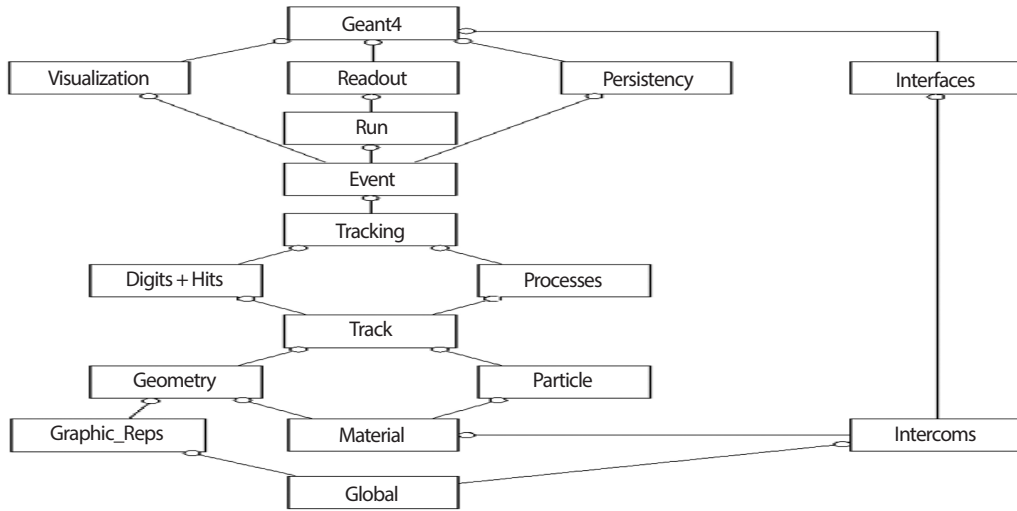


Fig. 1. GEANT4 class categories [5].

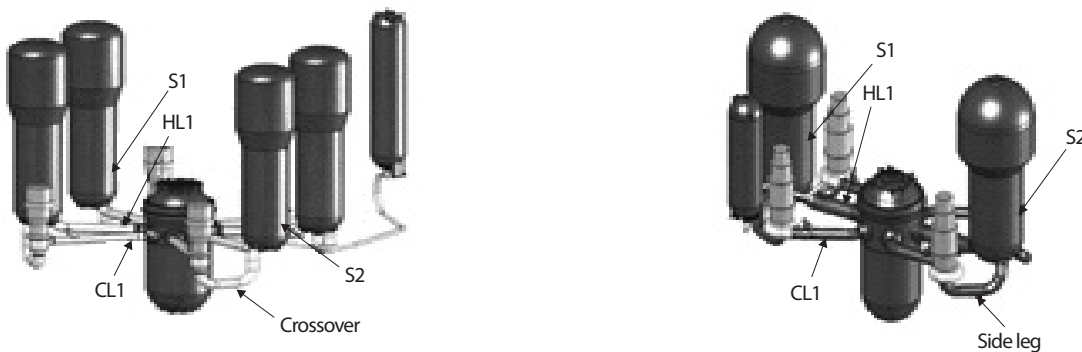


Fig. 2. Piping and steam generator survey points marked [7].

4. 계통 내 선원항 평가

4.1 방사능 측정 위치 선정

방사능 측정 위치 선정 지점은 EPRI 보고서에서 권고하는 측정 지점을 바탕으로 선정하였으며, 보고서에서 권고하는 측정 지점은 다음과 같이 나뉜다. 필수 측정 지점은 계통 제염 성능을 확인하기 위해 데이터를 확인해야 하는 지점이며, 추천 측정 지점은 필수는 아니지만, 작업자 안전과 접근성 등에 영향을 미칠 경우 측정을 수행하는 지점이다. 그리고 선택적 측정 지점은 측정 정보의 이용 필요성에 따라 선택적으로

측정을 수행하는 지점이다[7].

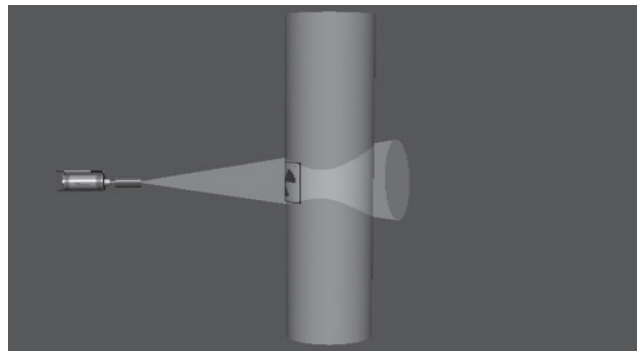
EPRI에서 권고하는 측정 지점은 Fig. 2와 같으며, 본 연구에서는 권고하는 측정 지점을 바탕으로 고리 1호기 계통 제염 전/후 방사선량률 측정 지점 26곳 선정 지점인 RCS 내 S/G Water Chamber를 측정 지점을 선정하였다.

4.2 In-Situ 측정 방법 선정

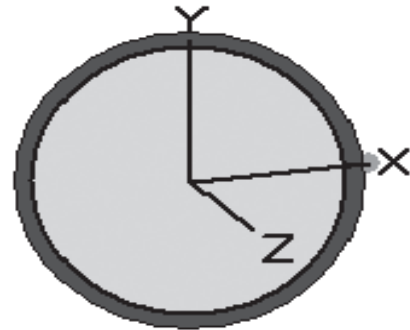
계통 및 기기에 대한 In-Situ 측정 방법 중 ISOCS를 이용한 측정 방법을 선정하였다. ISOCS는 핵종별 방사능 정량 평가가 가능하고 측정 대상체 크기 및 형상과 관계없이 직접

Table 2. S/G water chamber modeling information

Primary System	Form	Material	O.D	Thickness	Density	Measurement Distance
S/G Water Chamber	Cylinder Surface	CS	320 cm	15.2 cm	7.86 g·cm ⁻³	563 cm



(a) ISOCS measurement method [9]



(b) MicroShield measurement method



(c) GEANT4 measurement method



Fig. 3. Comparison of each measurement method.

측정이 가능한 장점을 가지고 있다. 이러한 특징들을 바탕으로 원자로 냉각재계통의 주요 기기에 대한 방사선원을 분석하기 위하여 2016년 6월 계획예방정비기간에 ISOCS를 이용하여 직접 측정을 수행하였다.

선택적 측정 지점 중 한 곳인 S/G Water Chamber Internal Surface를 측정지점으로 선정하여 방사능 측정을 수행하였다. ISOCS의 HPGe 검출기를 증기발생기 수실 하부 중앙을 향해 위치하였으며, 이때 검출기는 주변 방사선장 감소를 위해 납 차폐체를 장착하였다. 차폐체 두께는 5 cm인 원통형 납 차폐체를 장착하였으며, 검출기 전면에는 30도 콜리메이터를 장착하여 측정을 수행하였다. 대상을 ISOCS 내 Geometry

Template을 바탕으로 모델링 하기 위해 S/G Water Chamber를 Cylinder 형태로 모델링 하였다. 재질 및 기기에 대한 모델링 정보는 Table 2와 같이 설정하였다.

4.3 코드 모델링을 통한 측정값 분석

GEANT4 코드 모델링을 이용한 측정값 비교를 위해 World Volume을 설정해주었다. 이는 실린더 모양의 배관 내부에서 발생시킨 선원에 대하여 World Volume을 벗어나면 추적을 종료하는 역할을 수행하며, 선원이 움직인 거리, 변화 등의 설정을 수행할 수 있도록 한다.

Table 3. Comparison of S/G Water Chamber Analysis [Bq]

Detected Nuclide	ISOCS	MicroShield	GEANT4
⁵⁴ Mn	1.01×10 ⁹	1.80×10 ⁹	5.26×10 ⁸
⁶⁰ Co	7.39×10 ⁹	1.80×10 ⁹	2.11×10 ⁸
⁹⁵ Nb	4.79×10 ⁸	2.31×10 ⁹	1.19×10 ⁸
¹²⁴ Sb	1.21×10 ⁹	1.79×10 ⁹	6.07×10 ⁸

World Volume의 크기는 20m³의 정육면체를 만들어 주었으며, World Volume의 내부를 Air (1 atm)로 설정하였다. 또한, S/G Water Chamber를 ISOCS로 측정 시 실린더 모양으로 모델링하여 측정하였으므로, 동일한 형태로 모델링을 수행하기 위해 Cylinder 모양을 구현할 수 있는 G4Tubs를 이용하였다. 또한, ISOCS 측정 시 S/G Water Chamber는 물이 충수 되어있는 상태로 측정을 수행하였으므로 Cylinder 내부를 충수된 상태로 설정하였다.

ISOCS의 Collimator를 모사하기 위해 GEANT4 내에서 SensitiveDetector.cc에서 Cylinder 모양을 만들어 주었으며, Collimator와 동일한 역할을 수행하도록 설정하였다. S/G Water Chamber 측정 시의 거리와 동일하게 563 cm 떨어진 곳에 Collimator를 설정하였으며, 8 cm 지름의 Collimator를 설정하였다. 비교하고자 하는 선원을 발생시키기 위하여 Macro 파일에 원자번호, 발생지점, 진행 방향 등을 설정하였다. 또한, 선원은 기기 내부 벽에서 발생하는 것으로 수행하였으며, Fig. 3과 같이 설정하였다[8].

GEANT4 결과 값을 Bq 값으로 도출하기 위해 SensitiveDetector.cc에서 Bq로 환산하는 입력문을 사용하였다. 시뮬레이션은 원전 제염 및 해체 시 고려되는 감마 핵종 및 ISOCS를 이용하여 측정되었던 핵종을 바탕으로 선정하였으며, 본 연구에서는 ⁵⁴Mn, ⁶⁰Co, ⁹⁵Nb, ¹²⁴Sb에 대한 선원을 발생시켰다. 계산 값은 선원에서 발생하는 감마선을 각각 50000번 발생시켰다. 그리고 선원에서 발생하는 감마선은 무작위 방향으로 발생시켜 설정한 Collimator에서 측정된 값의 평균을 도출하였다. ISOCS의 지오메트리 설계 방법과 GEANT4 코드가 몬테카를로 기반으로 지오메트리를 구성하기 때문에 Microshield를 이용한 측정값을 추가하여 분석을 수행하였다. 위에서 설정한 값을 바탕으로 측정된 값은 Table 3과 같다.

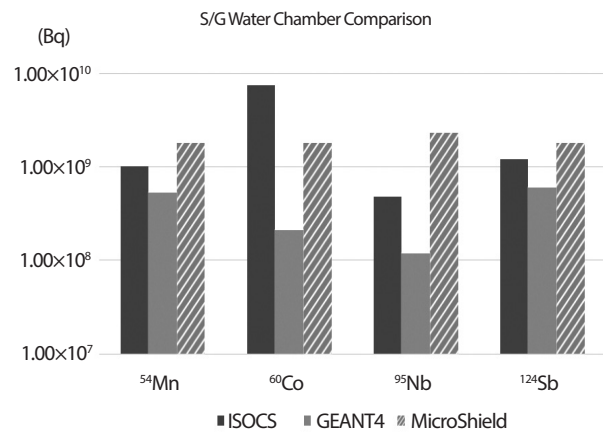


Fig. 4. Comparison of S/G water chamber calculation criteria.

5. 결과값 분석

ISOCS 및 Microshield를 이용하여 측정된 값, GEANT4 코드를 이용한 모델링 계산 값은 Table 3과 같으며 Fig. 4는 비교 결과를 그래프로 나타낸 것이다. 비교 결과 ISOCS와 Microshield의 계산 값은 ⁶⁰Co과 ⁹⁵Nb를 제외한 나머지 핵종은 비슷한 수치를 보였으며, GEANT4와 비교 결과 역시 ⁶⁰Co과 ⁹⁵Nb를 제외한 나머지 핵종은 비슷한 수치를 보였다. 이는 GEANT4 코드를 이용한 모델링이 다양한 적용성을 바탕으로 직접 측정과 선원 분석의 신뢰도 재고 면에서 활용될 수 있을 것으로 보인다[8].

향후 정밀화 정도, GEANT4 모델링을 통한 기기 모델링은 재질의 열처리 및 배관 성분비의 정확도, 직접 측정 시 주변 방사선 영향 등을 고려하여 정확한 모델링을 통해 평가를 수행한다면 더 신뢰성 있는 결과 값을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

6. 결론

직접 측정 방법인 ISOCS와 간접 측정 방법인 Microshield, GEANT4를 이용한 코드 모델링 계산 값 비교 수행하였으며, 잔류 방사능 비교 평가를 통해 직접 측정 방법의 신뢰도를 재고하였다. ISOCS와 Microshield, GEANT4를 비교 분석한 결과 약 1.0×10^1 Bq의 차이를 보였으며, 주변 방사선 영향, 모델링의 정밀화를 바탕으로 원전 해체 시 효율적인 작업을 수행하는 사전 연구가 될 수 있을 것으로 보인다. 향후 추가적인 측정을 통해 결과 값을 재고한다면 해체 시 잔류 방사능 평가 등 다양한 연구의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원으로 수행한 연구 과제입니다. (No. 20141510300310)

REFERENCE

- [1] Massaut Vincent, “Decontamination for Decommissioning Decontamination of Building and concrete”, Belgian Nuclear Research Centre, SCK CEN.
- [2] H.C. Jeong and S.Y. Jeong, “Assessment of the Radiological Inventory for the Reactor at Kori NPP Using In-Situ Measurement Technology”, J. Nucl. Fuel Cycle Waste Technol., 12(2), 171-178(2014).
- [3] J.G. Choi, “ISOCS V4.2 Calibration Software User Interface” (2015).
- [4] H.M. Jun, J.H. Kim, J.J. Song, T.U. Kang, J.C. Lee, K.H. Han, and J.S. Seo, “Radioactivity Measurement and efficacy evaluation of ^{152}Eu Radioactive Standard Source of Using the ISOCS”, Proc. of the KRS 2016 Spring Conference, 14(1), May 25-27, 2016, Mokpo.
- [5] G.J. Choi, Study of the Simulation of GEM by Geant4 (2015).
- [6] GEANT4 User’s Guide for Application Developers,

Geant4 Collaboration (2016).

- [7] Electric Power Research Institute, “Application of the EPRI Standard Radiation Monitoring Program for PWR Radiation Field Reduction”, Electric Power Research Institute Report, EPRI-1015119 (2007).
- [8] Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning, Development of Decontamination Technology of Reactor Coolant System and Dismantled Equipment for NPP Decommissioning, 20141510300310 (2014).
- [9] Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning, Assessment of the Radiological Inventory for Decommissioning of Nuclear Power Plants, 20131510300310 (2013).