Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 19, No. 2, pp. 185-191, 2025
https://doi.org/10.23042/radin.2025.19.2.185

Original article

교육기관내 방사성동위원소 사용시설 사고시 주변 주민 방사선량 평가

이동규[1] · 이신동[1] · 김재현[1] · 김광표[1,*]

[1]경희대학교 원자력공학과

Radiation Dose Assessment Around an Educational Radioisotope Facility in Case of Radiation Emergency

Dong Gyu Lee[1], Shin Dong Lee[1], Jae Hyeon Kim[1], and Kwang Pyo Kim[1,*]

[1]Department of Nuclear Engineering, Kyung Hee University, 1732 Deogyeong-daero, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 17104, Republic of Korea

ABSTRACT IAEA recommends a graded approach to emergency response based on the characteristics and potential risk of nuclear facilities. However, in Republic of Korea, regulations related to radiation emergency response are primarily structured around NPP, and the same regulatory framework is applied uniformly to facilities with significantly different characteristics and risk profiles. To establish a graded emergency response system for non-nuclear power facilities, it is essential to comprehensively consider both the environmental impact of radioactive material releases during radiation emergency and the frequency of such accidents occurring. In this study, we assessed radiation doses to residents surrounding a radioisotope facility located within an educational institution, which is categorized as a non-nuclear power facility. A conservative accident scenario involving a fire was assumed, and the corresponding source term was defined. Exposure scenarios were set reflecting the characteristics of the surrounding area, and exposure pathways were set based on the characteristics of the assumed accident. 16 directions from the facility were set as assessment groups, and radiation doses were calculated for residents in each group. The source term was assumed to involve the release of gaseous radioactive materials due to the fire. Exposure scenarios were defined by age group 1-year, 10-year and adult. Exposure pathways considered in this study included 1) external exposure from radioactive plumes, 2) internal exposure via inhalation. Radiation dose assessments were conducted using models presented in Regulatory Guide 14.2 of the Korea Institute of Nuclear Safety. Radiation dose assessments were performed for each of the 16 directional sectors around the facility. Among all assessment groups, the highest dose was calculated for 1-year-old residents located to the south of the facility, with a value of 1.06×10^{-3} mSv. This value was assessed to be significantly lower than the lowest emergency protective action decision level of 10 mSv specified in the Enforcement Rules of the Act on Measures for the Protection of the Public in Radiation Emergencies The results of this study are expected to serve as foundational data for developing a graded emergency response plan for non-nuclear power facilities in the future.

Key words: Radiation emergency, Residents around facility, Radiation assessment, Radioisotope facility, Non-nuclear facility

1. 서 론

국제원자력기구(IAEA; International Atomic Energy Agency)에서는 원자력 이용시설의 특성과 그 위험도에 따라 비상대응 조치를 차등적으로 적용할 것을 권고하고 있다. 그리고 원자력발전소 이외의 다양한 원자력 이용시설에서 발생할 수 있는 사고의 위험 수준을 고려하여 방사선 방호 목표를 달성하기 위한 비상대책 범주를 분류하고 있다[1]. 그러나 국내의 방사선 비상대응과 관련된 규제는 원자력발전소를 중심으로 구성되어 있으며, 원자력발전소 이외의 교육기관내 방사성동위원소 사용시설, 핵연료 주기

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

Copyright© 2025 by Korean Society of Radiation Industry

***Corresponding author:** Kwang Pyo Kim
Tel: +82-31-201-2560, Fax: +82-31-273-3592, E-mail: kpkim@khu.ac.kr

Received 10 June 2025 **Revised** 30 June 2025 **Accepted** 2 July 2025

시설, 방사성폐기물 처분시설 등과 같은 원자력 이용시설의 특성 및 위험이 원자력발전소와 상이한 시설에도 동일한 방사선 비상 대응 규제가 적용되고 있다. 이에 원자력안전위원회 역시 제3차 국가방사능방재계획을 통해 원자력 이용시설별 특성에 맞는 방사능 방재 규제 체계 수립 계획을 밝힌 바 있다[2].

국내외에서는 원자력 이용시설내 비상 사고에 따른 주변 주민 및 작업자 방사선량 평가가 다수 수행된 바 있다. 미국 원자력규제위원회(NRC; Nuclear Regulatory Commission)에서는 미국의 Three Mile Island에서 발생한 노심 용융 사고에 대한 시설 주변 주민 방사선량 평가를 수행하였다[3]. Henry K. Obeng 등은 가나의 연구용 원자로 (GHARR-1)를 대상으로, 가상의 테러 공격 발생을 가정하여 시설 주변 주민 방사선량 평가를 수행한 바 있다[4]. M. Abobakr Mohamed는 이집트의 가압형 경수로에 냉각재 손실 사고와 증기 발생기 튜브 파열 사고 상황을 가정하여 시설 주변 주민에 대한 방사선량 평가를 수행하였다[5]. 한국원자력연구원(KAERI; Korea Atomic Energy Research Institute)에서는 하나로 연구용 원자로 비상계획구역을 설정하기 위하여 사고 시 주민 방사선량 평가를 수행하였다[6]. Akira Endo는 일본 도카이무라의 JCO 우라늄 처리 시설에서 발생한 임계사고에 대해, 시설 주변 주민 및 작업자에 대한 방사선량 평가를 수행하였다[7]. Camila Moreira Araujo de Lima는 브라질의 비파괴 검사 시설에서 발생한 방사선비상 사고에 대해, 주변 주민에 대한 방사선량 평가를 수행하였다[8]. Mujuni Rweyemamu는 산업용 방사선 시설에서 가상 사고를 가정하여 작업자에 대한 방사선량 평가를 수행하였다[9]. HITACH 원자력 에너지 사에서는 대표인 개념을 적용하여 영국의 ABWR 노형에서 방출되는 유출물로 인한 시설 주변 주민 방사선량 평가를 수행하였다[10].

이와 같이 원자력 이용시설 운영 중에 사고가 발생하면 시설 주변에 거주하는 주민은 유출된 방사성물질로 인해 방사선에 의한 영향을 받을 가능성이 있다. 그리고 영국의 원자력규제청(ONR; Office for Nuclear Regulation)에서는 원자력 이용시설에 대한 차등적 비상대응 체계 수립을 위해 사고시 방사성물질의 방출로 인한 주변 환경 영향과 사고 발생 빈도를 종합적으로 고려할 것을 권고하고 있다[11]. 따라서 원자력발전소 이외의 원자력 이용시설에 대한 차등적 규제 체계 수립을 위해서는 원자력 이용시설 사고에 따른 주변 주민 방사선량 평가가 필요하다. 특히 교육기관의 경우 효율적인 방사선 안전관리에 애로사항이 있다[12]. 이에 본 연구에서는 비원전 원자력 이용시설인 교육기관내 방사성동위원소 사용시설에 대한 방사선 비상시 주변 주민 방사선량 평가를 수행하였다.

본 연구의 목적은 교육기관내 방사성동위원소 사용시설 사고에 따른 시설 주변 주민의 방사선량을 평가하는 것이다. 이를 위해, 본 연구에서는 교육기관내 방사성동위원소 사용시설에서 발생 가능한 보수적인 사고를 가정하였으며, 이에 따른 선원항을 설정하였다. 그리고 시설 주변의 특성을 반영한 피폭시나리오를 설정하였으며, 가정한 사고의 특성을 반영하여 피폭경로를 설정하였다. 방사선량 평가 대상은 시설을 중심으로 16방위로 나누어 각 방위별 주민에 대한 방사선량을 계산하였다.

2. 재료 및 방법

본 연구에서는 교육기관내 방사성동위원소 사용시설의 방사선 비상 사고 발생에 따른 시설 주변 주민 방사선량 평가를 수행하였다. 이를 위하여, 시설내 방사선 비상 사고에 따른 1) 선원항 설정, 2) 피폭시나리오 및 피폭경로 설정, 3) 방사선량 평가 대상 선정, 4) 방사선 비상에 따른 주변 주민 방사선량 평가를 수행하였다.

2.1. 선원항 설정

본 단계에서는 교육기관내 방사성동위원소 사용시설의 방사선 비상사고에 따른 선원항 설정을 수행하였다. 원자력 이용시설내 방사선 비상 사고에 따른 주변 주민 방사선량 평가를 위해서는 선원항 설정이 필요하며, 선원항은 사고의 종류 및 특성에 따라 상이하게 설정할 수 있다. 미국 원자력규제위원회에서 발간한 NUREG-1717에서는 밀봉선원 화재 발생에 따라 선원의 파손으로 내부 방사성물질의 누설 가능성을 언급하고 있다[13]. 본 연구에서는 방사성동위원소 사용시설의 방사선 비상 사고시 보수적인 사고인 화재 사고를 평가 대상 사고로 선정하였다.

화재 사고에 따른 선원항은 평가 대상인 교육기관내 방사성동위원소 사용시설의 핵종재고량을 바탕으로 설정하였다. 이에 따라, 실제 교육기관의 방사성동위원소 사용시설에서 사용 중인 핵종의 목록과 방사능량을 참고하였으며, 보수적인 사고 특성을 반영하기 위해 시설 내 핵종이 모두 유출된다 가정하여 선원항으로 설정하였다. 그리고 앞서 설정한 사고의 특성을 반영하여, 기체상 방사성물질이 주로 방출된다고 가정하였다. 최종적으로, 불활성기체, 아이오딘과 같은 입자성 물질 등을 선원항으로 설정하였다.

2.2. 피폭시나리오 및 피폭경로 설정

본 연구에서는 교육기관내 방사성동위원소 사용시설의 화재 사고를 가정하여, 주변 주민에 대한 방사선량 평가를 수행하였다. 원자력 이용시설에서 방출된 방사성유출물로부터 특정 개인이 받는 방사선량은 시간, 위치, 피폭대상의 특성과 피폭경로 등 여러 인자들에 영향을 받는다. 국제방사선방호위원회(ICRP; International Commission on Radiological Protection)에서는 이러한 인자들의 구체적인 조합을 피폭시나리오라고 정의하였다[14]. 합리적인 방사선량 평가를 위해서는 각 개인의 특성을 반영한 피폭시나리오 및 피폭경로를 설정할 필요가 있다.

위와 같이 정의된 피폭시나리오는 연령으로 구분하여 설정할 수 있다. 음식 섭취량, 호흡량 등과 같은 습관자료와 앞서 선정한 선원항에 대한 내부피폭 및 외부피폭에 따른 선량환산인자 또한 연령별로 상이하다. 국제방사선방호위원회에서는 방사선량 평가

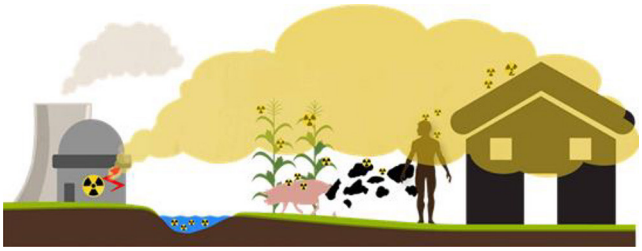

Fig. 1. Schematic of exposure pathways in the event of a radiation emergency at a nuclear facility

를 위한 연령별 피폭시나리오로 1세, 10세, 성인으로 구분하고 있다[14]. 본 연구에서는 이를 기반으로, 1세, 10세, 성인으로 구분하여 피폭시나리오를 설정하였다.

Fig. 1에 원자력 이용시설에서 방사선 비상사고시 주변 주민에 대한 피폭경로의 모식도를 나타내었다. 본 연구에서는 보수적인 평가를 위하여, 교육기관내 방사성동위원소 사용시설의 화재로 인해 개봉 및 밀봉선원 내부의 방사성물질이 시설 주변으로 방출된다고 가정하였다. 교육기관내 방사성동위원소 사용시설의 화재 사고에 따라 방출되는 방사성물질의 형태는 기체상 방사성유출물로 설정하였다. 기체상 방사성유출물에 의한 피폭경로는 외부피폭과 내부피폭으로 구분할 수 있다. 외부피폭 경로는 1) 방사성운에 의한 외부피폭, 2) 지표면 침적물에 의한 외부피폭으로 구분할 수 있다. 내부피폭 경로는 1) 방사성운 흡입으로 인한 내부피폭, 2) 음식물 섭취로 인한 내부피폭으로 구분할 수 있다.

교육기관내 방사성동위원소 사용시설에서 방사선 비상사고가 발생하면, 주변 주민은 옥내대피, 소개, 영구이주 등과 같은 대피를 해야 한다. 이러한 대피 상황을 고려하여 지표면 침적물에 의한 외부피폭 경로와 음식물 섭취로 인한 내부피폭 경로는 피폭경로로써 고려하지 않았다. 이에 따라 본 연구에서는 한국원자력안전기술원 규제지침을 반영하여, 교육기관내 방사성동위원소 사용시설 사고시 주변 주민의 방사선 피폭경로로 1) 방사성운에 의한 외부피폭과 2) 방사성운 흡입으로 인한 내부피폭 경로만을 고려하였다[15].

2.3. 시설 주변 주민 방사선량 평가 대상 선정

본 단계에서는 교육기관내 방사성동위원소 사용시설 사고에 따른 방사선량 평가 대상을 선정하였다. 본 연구에서는 선정한 교육기관내 방사성동위원소 사용시설을 중심으로 16방위로 나누었으며, 각 방위별로 가장 가까운 주거지역을 방사선량 평가 대상으로 설정하였다. 이때, 교육기관내 방사성동위원소 사용시설 주변 16방위별 주거지역의 거리는 지적편집도를 활용하여 계산하였다.

2.4. 방사선 비상사고에 따른 주변 주민 방사선량 평가

본 단계에서는 앞서 설정한 피폭경로를 고려하여, 피폭경로별로 시설 주변 주민에 대한 방사선량 평가를 수행하였다. 방사선량 평가를 위해 1) 방사선량 평가 모델을 선정하였으며, 2) 선정한 모델에 따른 방사선량 평가 인자를 설정하였다.

2.4.1. 방사선량 평가 모델 선정

한국원자력안전기술원(KINS; Korea Institute of Nuclear Safety)의 규제지침 14.2에 제시되어 있는 피폭경로별 방사선량 평가 모델을 활용하였다[15]. 아래 식에 방사성운에 의한 외부피폭 방사선량 평가를 위해 활용한 평가 모델을 나타내었다. 교육기관내 방사성동위원소 사용시설 화재 사고로 방출된 방사성물질이 대기에 머무르면서 주변 주민에 외부피폭을 유발할 수 있다. 방사성운에 의한 외부피폭은 반무한구름(Semi-infinite cloud)내에 있는 방사성핵종이 균일하게 분포해 있다고 가정하여 평가하였다.

$$DP = \sum_i \sum_j \left(\frac{1}{3600}\right)\left(\frac{\chi}{Q}\right)_j Q_{ij} DFP_i$$

DP: 방사성운에 의한 외부피폭선량 (mSv)

$\left(\frac{\chi}{Q}\right)_j$: 방출시간 j의 대기확산인자 ($s \cdot m^{-3}$)

Q_{ij}: 핵종 i의 방출시간 j의 선원항 (Bq)

DFP_i: 핵종 i의 외부피폭 선량환산인자 (mSv h^{-1} per Bq m^{-3})

아래 식에 방사성운 호흡에 의한 내부피폭 방사선량 평가를 위해 활용한 평가 모델을 나타내었다. 교육기관내 방사성동위원소 사용시설 화재 사고로 방출된 방사성물질은 주변 주민의 호흡에 의한 내부피폭을 유발할 수 있다. 하지만 불활성기체의 경우에는 호흡기에 침적되지 않고 혈액에도 적은 양만 흡수되므로 불활성기체에 의한 내부피폭은 평가 대상에서 제외하였다.

$$DH = \sum_i \sum_j \left(\frac{\chi}{Q}\right)_j Q_{ij} BR_j DFP_i$$

DH: 흡입에 의한 내부피폭선량 (mSv)

$\left(\frac{\chi}{Q}\right)_j$: 방출시간 j의 대기확산인자 ($s \cdot m^{-3}$)

Q_{ij}: 핵종 i의 방출시간 j의 선원항 (Bq)

BR_j: 방출시간 j의 호흡률 (m^3 sec^{-1})

DFP_i: 핵종 i의 외부피폭 선량환산인자 (mSv Bq^{-1})

2.4.2. 방사선량 평가 인자 설정

앞서 선정한 평가 모델 분석 결과, 기체상 방사성유출물에 의한 주변 주민 방사선량 평가 시에는 1) 대기확산인자, 2) 선원항, 3) 피폭경로별 선량환산인자, 4) 호흡률과 같은 인자 설정이 필요하다. 대기확산인자의 경우, 시설 주변의 환경에 적합하게 설정해야 한다. 그리고 선량환산인자 및 호흡률의 경우에는 평가 대상의 피폭

Table 1. Age-specific breathing rates used for dose assessment

Exposure Scenarios	Breathing rates (m^3/sec)	
	0-8 h	After 8 hours
Adult	3.47×10^{-4}	1.75×10^{-4}
Age 10	3.42×10^{-4}	1.73×10^{-4}
Age 1	1.11×10^{-4}	5.59×10^{-5}

경로와 연령군에 적합하게 설정할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 평가 대상 교육기관내 방사성동위원소 사용시설 부지의 특성에 맞는 대기확산인자를 평가하였으며, 호흡률 및 선량환산계수의 경우에는 평가 대상 및 피폭경로에 적합한 인자를 설정하였다.

아래 식에 대기확산인자 계산을 위한 수식을 나타내었다. 대기확산인자란 방사성물질이나 오염물질이 대기 중으로 방출되었을 때, 그 물질이 주변으로 얼마나 확산되는 지를 정량적으로 나타내는 값으로써, 방사성물질의 방출원에서 방출량($Bq\cdot sec^{-1}$)에 대한 특정지점에서의 방사성물질의 농도(Bq/m^3)로 표현된다[16]. 본 연구에서는 대기확산인자의 계산을 미국 원자력규제위원회에서 개발한 비상시 대기확산인자 평가 전산코드인 PAVAN 전산코드를 활용하여, 각 방위별 방사선량 평가 대상별로 수행하였다[17]. 이때, 보수적인 평가를 위하여, 사고 이후 2시간 이내에 시설 내 모든 방사성물질이 주변 환경으로 전량 방출된다고 가정하였다.

$$x/Q = \frac{C}{Q}$$

x/Q: 대기확산인자 ($s\cdot m^{-3}$ or $s\cdot m^{-2}$)
C: 특정 지점에서의 방사성물질의 농도 ($Bq\cdot m^{-3}$ or $Bq\cdot m^{-2}$)
Q: 방사성물질의 방출량 ($Bq\cdot s^{-1}$)

본 연구에서는 방사성운에 의한 외부피폭 경로 및 방사성운 흡입에 의한 내부피폭 경로별로 선량환산인자를 설정하였다. 방사성운에 의한 외부피폭 경로의 경우에는 미국 환경청(EPA; USA Environmental Protection Agency)에서 발간한 FGR-15(Federal Guidance Report No. 15)에서 제시하는 방사성운에 의한 외부피폭 선량환산인자 값을 활용하였다[18]. 방사성운 흡입에 의한 내부피폭 경로의 경우에는 국제방사선방호위원회에서 발간한 ICRP 72에서 제시하고 있는 연령군별 내부피폭 선량환산인자 값을 활용하였다[19].

Table 1에 본 연구에서 설정한 연령군별 호흡률을 요약하여 나타내었다. 방사성운 흡입에 따른 내부피폭 방사선량 계산 시에는 방사성운에 의한 외부피폭 계산과 달리, 호흡률을 고려해야 한다. 미국 원자력규제위원회의 규제 지침에서는 방사선 비상사고 상황에서 적용 가능한 연령군별 호흡률을 제시하고 있다[20]. 본 연구에서는 해당 지침을 바탕으로, 호흡률을 연령군별(1세, 10세, 성인)로 구분하여 설정하고, 이를 방사성운 흡입에 의한 내부피폭 선량평가 시 적용하였다.

Table 2. Population distribution by exposure scenarios

Exposure scenarios	Age group		
	Adult	Age 10	Age 1
Proportion of population	89%	8%	3%

3. 결과 및 고찰

본 연구의 목적은 교육기관내 방사성동위원소 사용시설의 방사선 비상 사고에 따른 주변 주민의 방사선량을 평가하는 것이다. 이를 위해 방사성동위원소를 사용하는 교육기관 중 시설 내 핵종 재고량이 가장 많을 시설을 연구대상으로 선정하였다. 그리고 교육기관내 방사성동위원소 사용시설에서 발생할 수 있는 보수적인 화재 사고 상황을 가정하였다. 그리고 사고 상황에 맞는 선원항을 설정하였으며, 기체상 방사성유출물의 방출 상과 사고 상황을 고려하여, 방사성운에 의한 외부피폭, 방사성운 흡입에 의한 내부피폭 경로를 피폭경로로써 설정하였다. 설정한 피폭경로를 기반으로, 한국원자력안전기술원의 규제지침 14.2에서 제시하고 있는 피폭경로별 방사선량 평가 모델을 활용하여, 방위별 방사선량 평가 대상별로 방사선량 계산을 수행하였다.

3.1. 피폭시나리오 설정 결과

Table 2에 피폭시나리오 설정 결과를 나타내었다. 본 연구에서는 피폭시나리오를 1세, 10세, 성인으로 구분하였다. 전체 인구 비율 조사 결과, 성인의 비율이 총 인구수 대비 89%로 나타났으며, 10세 및 1세 지역 거주자가 각각 8, 3%의 비율을 차지하였다. 이에 따라, 본 연구에서는 피폭시나리오를 통근거주자 성인, 10세 지역 거주자, 1세 지역 거주자로 구분하여 설정하였다.

3.2. 방사선량 평가 대상 선정 결과

Table 3에 본 연구에서 설정한 교육기관내 방사성동위원소 사용시설 주변 방사선량 평가 대상 선정 결과를 나타내었다. 앞서 언급한 바와 같이, 본 연구에서는 교육기관내 방사성동위원소 사용시설을 중심으로 16방위로 나누었으며, 각 방위별로 시설을 중심으로부터 가장 가까운 주거지역을 평가 대상으로 선정하였다. 방위별 주거 지역 조사 결과, 교육기관내 방사성동위원소 사용시설 주변 16개의 모든 방위에서 주민이 거주하고 있었다. 모든 방위에서 교육기관내 방사성동위원소 사용시설을 중심으로 100 m 이상 떨어진 거리에 주민이 거주하고 있었으며, S 방위 및 NNW 방위에서 시설 중심으로부터 118 m 떨어진 가장 가까운 거리에 주민이 거주하고 있었다. 반면, W 방위에서는 시설 중심으로부터 1,140 m 떨어진 가장 먼 거리에 주민이 거주하고 있었다.

Table 3. Radiation dose assessment group around the educational radioisotope facility

Radiation dose assessment group	Direction	Distance (m)
Group 1	S	118
Group 2	SSE	120
Group 3	SE	360
Group 4	ESE	200
Group 5	E	184
Group 6	ENE	200
Group 7	NE	160
Group 8	NNE	203
Group 9	N	173
Group 10	NNW	118
Group 11	NW	127
Group 12	WNW	270
Group 13	W	1,140
Group 14	WSW	920
Group 15	SW	508
Group 16	SSW	200

3.3. 대기확산인자 계산 결과

Table 4에 본 연구에서 설정한 교육기관내 방사성동위원소 사용시설 주변 대기확산인자 설정 결과를 나타내었다. 본 연구에서는 PAVAN 전산코드를 활용하여, 교육기관내 방사성동위원소 사용시설 주변의 대기확산인자를 계산하였다. 그리고 시설을 중심으로 16방위로 구분하여, 방사선량 평가 대상을 선정하였으며, 16개의 방사선량 평가 대상별로 사고 발생이후 2시간 후의 누적 대기확산인자를 계산하였다. 계산결과, 시설로부터 남쪽 방위의 방사선량 평가 대상 1에서 대기확산인자는 1.47×10^{-2} sec/m^{3}으로 가장 크게 계산되었다. 반면, 시설로부터 동쪽 방위의 방사선량 평가 대상 5에서 대기확산인자는 3.31×10^{-4} sec/m^{3}으로 가장 작게 계산되었다.

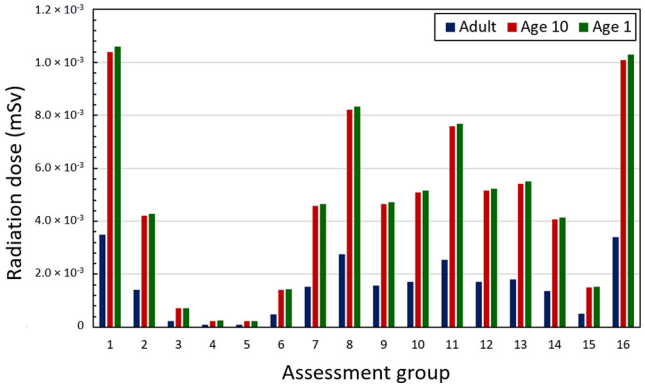

Fig. 2. Radiation dose assessment for residents around the educational radioisotope facility

3.4. 방사선량 평가 결과

Fig. 2에 교육기관내 방사성동위원소 사용시설내 화재 사고에 따른 시설 주변 주민의 방사선량 계산 결과를 나타내었다. 본 연

Table 4. Atmospheric dispersion factor by radiation dose assessment group

Radiation dose assessment group	Atmospheric dispersion factor (s/m^3)				
	0-2 h	2-8 h	8-24 h	1-4 days	4-7 days
Group 1	1.47×10^{-2}	-	-	-	-
Group 2	5.94×10^{-3}	-	-	-	-
Group 3	1.00×10^{-3}	-	-	-	-
Group 4	3.35×10^{-4}	-	-	-	-
Group 5	3.31×10^{-4}	-	-	-	-
Group 6	2.01×10^{-3}	-	-	-	-
Group 7	6.47×10^{-3}	-	-	-	-
Group 8	1.16×10^{-2}	-	-	-	-
Group 9	6.56×10^{-3}	-	-	-	-
Group 10	7.18×10^{-3}	-	-	-	-
Group 11	1.07×10^{-2}	-	-	-	-
Group 12	7.27×10^{-3}	-	-	-	-
Group 13	7.65×10^{-3}	-	-	-	-
Group 14	5.76×10^{-3}	-	-	-	-
Group 15	2.13×10^{-3}	-	-	-	-
Group 16	1.43×10^{-2}	-	-	-	-

구에서는 교육기관내 방사성동위원소 사용시설 주변을 시설 중심으로 16방위로 나누어 총 16개의 방사선량 평가 대상을 도출하였다. 그리고 기체상 방사성유출물의 방출 상을 기반으로, 1) 방사성운에 의한 외부피폭, 2) 방사성운 흡입에 의한 내부피폭 경로를 정하고, 각각의 피폭경로에 대하여 주변 주민의 방사선량을 계산하였다. 방사선량 평가 대상별로 피폭시나리오는 크게 1세, 10세, 성인으로 구분하였다. 그리고 최종적으로 각각의 평가 대상별로 방사선량을 계산하였다.

방사선량 계산 결과, 모든 피폭시나리오에서 1세의 방사선량이 가장 높게 계산되었다. 1세 아동은 세포분열이 빠르며, 장기가 미성숙하다는 점에서 타 연령대 피폭대상보다 방사선학적 감수성이 높다. 이에 따라, 타 연령대의 선량환산인자보다 1세의 선량환산인자가 높게 설정된 것이 주요한 원인으로 판단된다. 그리고 교육기관내 방사성동위원소 사용시설 중심으로부터 남쪽 방위의 방사선량 평가 대상 1에서는 성인, 10세, 1세의 방사선량은 각각 3.49×10^{-4} mSv, 1.04×10^{-3} mSv, 1.06×10^{-3} mSv로 계산되었으며, 16개의 평가 대상 중 가장 크게 계산되었다. 반면, 동 시설로부터 동쪽 방위의 평가 대상 5에서는 성인, 10세 지역거주자, 1세 지역거주자 각각 7.85×10^{-6} mSv, 2.34×10^{-5} mSv, 2.38×10^{-5} mSv로 계산되었으며, 16개의 평가 대상 중 가장 작게 계산되었다. 이는 해당 시설이 위치한 지역의 기상학적 특성이 반영된 대기확산인자의 영향에 기인한 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 교육기관내 방사성동위원소 사용시설의 방사선비상 사고에 따른 주변 주민 방사선량 평가를 수행하였다. 이를 위해, 교육기관내 방사성동위원소 사용시설에서 발생 가능한 보수적인 사고를 가정하였으며, 이에 따른 선원항을 설정하였다. 그리고 시설 주변의 특성을 반영한 피폭시나리오를 설정하였으며, 가정한 사고의 특성을 반영하여 피폭경로를 설정하였다. 방사선량 평가 대상은 시설을 중심으로 16방위로 나누어 각 방위별 인접 주거지역의 주민으로 선정하였으며, 방위별 주민에 대한 방사선량을 계산하였다.

본 연구에서는 교육기관내 방사성동위원소 사용시설의 방사선비상 사고시 보수적인 방사선량 평가를 위해, 화재 사고를 사고상황으로 설정하였다. 그리고 화재 사고에 따른 선원항은 평가 대상 교육기관내 방사성동위원소 사용시설의 핵종재고량을 바탕으로 설정하였다. 가정한 화재 사고의 특성에 따라, 사고시 방출되는 방사성물질의 방출 상은 기체상 방사성물질로 가정하였으며, 피폭경로는 사고의 특성을 반영하여 1) 방사성운에 의한 외부피폭, 2) 방사성운 흡입에 의한 내부피폭으로 설정하였다. 방사선량 계산을 위한 방사선량 계산 모델은 한국원자력안전기술원의 규제지침 14.2에서 제시하고 있는 피폭경로별 방사선량 평가 모델을 활용하였다. 방사선량 평가 대상은 시설을 중심으로 16방위별 인접 주거 지역의 주민으로 선정하였다. 방사선량 평가 인자인 대기확산인자는 PAVAN 전산코드를 활용하여, 시설 주변 16방위별로 각각 계산하였다. 최종적으로, 각 방위별 1세, 10세 지역 거주자 및 성인에 대해서 방사선량을 각각 계산하였다.

계산 결과, 16 방위의 모든 평가 대상에서 1세 지역 거주자의 방사선량이 가장 높게 계산되었다. 이는 1세의 선량환산인자가 다른 연령군에 비해 높게 설정되어 있기 때문인 것으로 판단된다. 시설 중심으로부터 남쪽 방위의 평가 대상의 방사선량이 다른 방위의 평가 대상에 비해 가장 높게 계산되었으며, 성인, 10세, 1세에 대해서 각각 3.49×10^{-4} mSv, 1.04×10^{-3} mSv, 1.06×10^{-3} mSv로 계산되었다. 반면, 시설 중심으로부터 동쪽 방위 평가 대상의 방사선량은 다른 방위의 평가 대상에 비해 가장 낮게 계산되었으며, 성인, 10세, 1세에 대해서 각각 7.85×10^{-6} mSv, 2.34×10^{-5} mSv, 2.38×10^{-5} mSv로 계산되었다.

방사능방재법 시행규칙 제15조에서는 유효선량을 기준으로 긴급 주민 보호조치의 결정기준을 제시하고 있으며, 이 중 가장 낮은 기준은 10 mSv이다. 또한, 원자력안전법에서 정한 일반인의 연간 선량한도는 1 mSv이다. 이 두 가지 기준을 모두 고려하더라도, 교육기관에서 발생할 수 있는 사고 중 가장 보수적으로 가정한 상황에서의 방사선량은 이들 기준보다 매우 낮음을 알 수 있다. 따라서 교육기관에서 방사선비상 사고가 발생하더라도, 일반인에 대한 방사선학적 영향은 매우 미미할 것으로 판단된다. 본 연구의 결과는 향후 비원전 원자력 이용시설에 대한 차등적 방사능 비상대응 계획 수립을 위한 기반자료로써 활용될 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 원자력안전위원회의 재원으로 한국원자력안전재단의 지원을 받아 수행한 원자력안전연구사업의 연구결과입니다 (RS-2025-02312174).

참고문헌

1. IAEA. 2015. Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency. IAEA Safety standards series No. GSR Part 7.
2. NSSC. 2024. The Third National Radioactive Disaster Prevention Plan.
3. NRC. 1979. Assessment of offsite radiation doses from the three-mile island unit 2 accident. TDR-TMI-116.
4. Henry K. Obeng, Sylvester A. Birikorang, Kwame Gyamfi, Simon Adu and Andrew Nyamful. 2021. Assessment of radiological consequences of a hypothetical accident at the Ghana Research Reactor-I facility based on terrorist attack. *Sci. Prog*. **104**(4):1-24. https://doi.org/10.1177/00368504211054986.
5. M. Abobakr Mohamed, Moamen G. El-Samrah, Mohamed Y. M. Mohsen, A. F. Tawfic and Ahmed Omar. 2025. Assessment of the consequences of hypothetical nuclear accidents in an advanced PWR, Egypt. *Sci. Rep*. **15**:10238. https://doi.org/10.1038/s41598-025-92917-6.

6. KAERI. 2004. Basic document for the fundamental emergency planning zone of the HANARO facilities. KAERI-TR/2831/2004.
7. Akira Endo. 2010. Dose assessment in the criticality accident at Tokai-mura. *Radiat. Meas*. **45**(10): 1484-1490. https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2010.05.015.
8. Camila Moreira Araujo de Lima, Tadeu Augusto de Almeida Silva, John Graham Hunt and Francisco Cesar Augusto Da Silva. 2022. Reconstructive dosimetry and radiation dose evaluation of worker and public due to a Brazilian radiological accident in industrial radiography. *J. Radiol. Prot*. **42**:011505. https://doi.org/10.1088/1361-6498/ac3e0b.
9. Mujuni Rweyemamu and Juyoul Kim. 2021. Dose Assessment to Workers from Accidents in Industrial Gamma Radiography. IRPA. T5.4-0045.
10. Hitachi-GE Nuclear Energy Ltd. 2017. UK ABWR Generic Design Assessment. GA91-9901-0028-00001, HE-GD-0005, Rev. H.
11. HSE. 2019. The Radiation (Emergency Preparedness and Public Information) Regulations 2019.
12. Lee YJ, Lee JW, Jeong GS. 2015. The Increased Use of Radiation Requires Enhanced Activities Regarding Radiation Safety Control. *Journal of Radiation Industry.*
13. NRC. 2001. NUREG-1717, Systematic Radiological Assessment of Exemptions for Source and Byproduct Materials.
14. ICRP. 2006. Assessing dose of the representative person for the purpose of the radiation protection of the public, ICRP publication 101a. Ann. ICRP 36(3).
15. KINS. 2023. Evaluation methodology and assumption of radiological impact in design basis accident. KINS/RG-N14.02.
16. Hwang WT, Kim EH, Jeong HS, Jeong HJ and Han MH. 2013. Influence of Modelling Approaches of Diffusion Coefficients on Atmospheric Dispersion Factors. *J. Radiat. Prot. Res*. **38**(2):60-67. https://doi.org/10.14407/jrp.2013.38.2.060.
17. NRC. 1982. PAVAN: An Atmospheric-Dispersion Program for Evaluating Design-Basis Accidental Releases of Radioactive Materials from Nuclear Power Stations. NUREG/ CR-2858.
18. EPA. 2019. External Exposure to Radionuclides in Air, Water and Soil. EPA-402/R19/002.
19. ICRP. 1995. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides-Part 5 Compilation of Ingestion and Inhalation Coefficients, ICRP Publication 72. Ann. ICRP 26(1).
20. NRC. 1974. Nuclear regulatory commission, assumptions used for evaluating the potential radiological consequences of a loss of coolant accident for pressurized water reactors, NRC Regulatory Guide 1.4.