Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 20, No. 2, pp. 123-127, 2026
https://doi.org/10.23042/radin.2026.20.2.123

Original article

로봇청소기를 활용한 바닥 표면의 방사성 오염 제거 가능성 평가

최영민[1,2] · 이수형[1] · 한만석[3,*] · 김상록[1,*]

[1]한국원자력의학원 방사선안전관리팀, [2]강원대학교 보건의료과학과, [3]강원대학교 방사선학과

Evaluation of the Feasibility of Removing Radioactive Surface Contamination from Floors Using a Robot Vacuum Cleaner

Youngmin Choi[1,2], Suhyoung Lee[1], Manseok Han[3,*], and Sangrok Kim[1,*]

[1]Radiation Safety Section, Korea Institute of Radiological and Medical Sciences, Seoul 01812, Republic of Korea
[2]Department of Health Medical Science, Graduate School, Kangwon National University, Samcheok 25949, Republic of Korea
[3]Department of Radiological Science, Kangwon National University, Samcheok 25949, Republic of Korea

ABSTRACT Radioisotopes are used in various fields, and handling mistakes can cause radioactive liquid contamination on laboratory floors. Such contamination requires rapid decontamination; however, conventional manual decontamination is labor-intensive and poses a radiation exposure risk to workers. Therefore, this study aims to evaluate the feasibility of decontaminating radioactive surface contamination using a robot vacuum cleaner. Surface contamination levels in the contaminated area were confirmed using a portable survey meter with an external detector, and decontamination was performed in the mopping mode of a pad-replacement robot vacuum cleaner; after mapping the contaminated area, the designated zones were cleaned repeatedly. After each cycle, the used cleaning pad was collected and measured for 10 min with a gamma counter, and decontamination was repeated until no further decrease in pad radioactivity was observed. The contaminating radionuclides were identified as ^{177}Lu and ^{131}I. After repeated decontamination, radioactivity decreased from 1,472 to 21 Bq in Zone A after 20 cycles (98.57%), from 51,485 to 38 Bq in Zone B after 100 cycles (99.93%), and from 10,826 to 66 Bq in Zone C after 150 cycles. In all three zones, the decontamination effect was pronounced during the early cycles, and the magnitude of reduction gradually became more modest in later cycles. Although the contamination level could not be reduced to below the regulatory limit for allowable surface contamination, an average decontamination rate of 98.5% was achieved after approximately 20 cycles, confirming a measurable contamination-reduction effect. Therefore, a robot vacuum cleaner could be considered a practical option for repeated decontamination of radioactive contamination on laboratory floors, potentially substituting for manual decontamination.

Key words: Decontamination, Surface contamination, Radioisotope, Robot vacuum cleaner, Gamma counter

1. 서 론

방사성동위원소는 신소재 개발, 생물의학 연구, 질병의 진단 및 치료 등 다양한 분야에서 활용되고 있다. 2024년 12월 말 기준 국내 산업, 의료, 연구, 교육, 군사, 공공기관에서 방사성동위원소를 사용하는 기관은 총 2,395개이다[1].

연구에서 사용되는 방사성동위원소는 대부분 액체형 주사제 형태이므로[2] 주사기 또는 피펫으로 취급 중 실수하여 실험실 바닥에 방사성 오염이 발생할 수 있다. 이러한 오염은 바닥에만 국한되지 않고 연구자들이 착용하는 신발, 의류, 기타 물품을 통해 2차적으로 확산될 수 있다[3]. 특히 2차 오염원이 재비산되어 오염된 먼지가 공기 중에 부유할 경우 흡입을 통해 방사성 물질이 체

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

Copyright© 2026 by Korean Society of Radiation Industry

*Corresponding authors
Sangrok Kim
Tel: +82-2-970-1346, Fax: +82-2-978-2005, E-mail: kim@kirams.re.kr
Manseok Han
Tel: +82-33-540-3383, Fax: +82-33-540-3389, E-mail: angio@naver.com
Received 22 January 2026 **Revised** 7 April 2026 **Accepted** 7 April 2026

내로 유입되어 내부피폭을 유발할 수 있다[4,5]. 또한 오염원이 완전히 제거되기 전까지 작업자는 외부피폭 또는 내부피폭의 위험에 지속적으로 노출될 수 있다. 따라서 모든 작업자는 ALARA (As Low As Reasonably Achievable) 원칙에 따라 방사선 및 방사성 물질에 대한 노출을 합리적으로 달성 가능한 최저 수준으로 유지해야 한다[6,7]. 이에 따라 법적 기준치를 초과하는 오염이 확인될 경우 즉시 제염 작업을 수행해야 한다[8].

원자력안전위원회 고시 방사선방호 등에 관한 기준 제5조는 허용표면오염도를 알파(α) 0.4 $Bq \cdot cm^{-2}$, 비알파(β/γ) 4 $Bq \cdot cm^{-2}$로 규정하고[9], 이 수치를 초과할 경우 제염 작업을 실시해야 한다. 여기서 제염은 방사성 오염을 물리적, 화학적 또는 생물학적 과정을 통해 완전히 또는 부분적으로 제거하는 것을 의미하며 방사능 자체를 제거하는 것이 아닌 오염 물질을 다른 위치 또는 형태로 이전시키는 행위이다[10].

실험실 표면의 제염은 일반적으로 오염 영역의 바깥쪽 경계에서 안쪽으로 진행하며, 적절한 용액으로 닦아내고 세척에 사용한 재료는 교차 오염을 방지하기 위해서 자주 폐기해야 한다[11]. 초기 제염 이후에도 오염이 확인되면 오염 물질을 제거하기 위해 반복적으로 제염 작업을 해야한다. 또한 습식 방식을 사용하면 제염 효율을 높일 수 있으며, 선행 연구에 따르면 습식 제염은 건식 제염 대비 약 3~6배 정도 높은 효율을 보이는 것으로 보고 된다[12]. 다만 반복 제염 시도에도 불구하고 오염 수준이 규제 기준을 크게 초과하여 제염 작업자의 예상 피폭이 지나치게 큰 경우 오염된 구역을 일정 기간 폐쇄하여 자연 감쇠를 기다리기도 한다. 반감기가 짧은 방사성동위원소의 경우 자연 감쇠를 기다리는 것이 가능하지만 반감기가 긴 방사성동위원소의 경우 자연 감쇠에 의존하는 것은 현실적으로 거의 불가능하다.

이러한 한계를 보완하기 위해 로봇을 활용한 제염 기술이 제안되어 왔으며[13] 원전 시설 및 방사성 물질 취급 시설의 제염·해체 과정에서 로봇 시스템을 적용한 연구들이 보고된 바 있다[14]. 특히 후쿠시마 원전 건물 내부의 고선량 구역에서 원격 조종 로봇을 이용해 구조물 표면 제염을 진행한 사례도 보고되어 있다[15]. 다만 이러한 로봇 시스템은 주로 원전과 같은 대형 설비 및 고선량 환경을 대상으로 하는 특수 장비로, 소규모 연구시설의 실험실 바닥 오염 제염에 직접 적용하기에는 규모, 비용, 운용 복잡성 측면에서 제한이 있다.

이에 본 연구에서는 소규모 연구시설 바닥에서 발생한 방사성 표면오염의 제염을 목적으로 상용 로봇청소기를 제염 도구로 적용할 가능성을 평가하고자 했다. 로봇청소기는 모바일 애플리케이션 제어를 통해 오염된 구역을 일정한 패턴으로 반복 청소가 가능해 작업자의 개입을 최소화하여 인력 의존도를 낮추고 작업자와 오염원 간 접촉을 줄임으로써 피폭 위험을 현저히 줄일 수 있다. 따라서 본 연구는 로봇청소기를 이용한 실험실 바닥의 방사성 표면오염의 제염 가능성을 평가하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 제염 및 측정에 사용된 장비

제염 전 방사성 오염이 의심되는 구역의 표면오염도는 휴대용 방사선 계측기인 FH 40G-L10 (Thermo Fisher Scientific, USA)에 외부 검출기인 FHZ742 (Thermo Fisher Scientific, USA)를 결합하여 측정하였다(Fig. 1). FH 40G-L10은 감마선 계측용 비례계수관을 내장한 계측기이며 FHZ742는 ZnS (Ag) 기반 플라스틱 섬광체가 내장된 표면오염 측정용 검출기로 약 125 cm^2 정도의 면적을 가져 비교적 큰 면적의 오염을 측정할 수 있다. 이 기기는 실험 6개월 전에 교정되었고 검출 효율은 ^{36}Cl 및 ^{90}Sr에 대해 각각 0.42, 0.362이다. 이후 핵종 분석을 위해 오염 부위를 흡수성이 좋은 종이필터로 닦아내었고 고순도 게르마늄(High Purity Germanium Detector, HPGe) 검출기 기반 감마분광분석기를 이용해 오염원 핵종을 확인하였다. 감마분광분석기는 한국표준과학연구원의 표준물질을 이용하여 효율 및 에너지 교정을 수행하였다. 제염에는 F10 Pro 로봇청소기(NOESIS, CHN)를 사용하였다(Fig. 2). 본 기기는 일회용 청소포 교환 방식이고 사용한 청소포의 방사능을 분석하여 제거된 방사능의 상대 평가가 가능하다. 또한 흡입과 물걸레 청소 기능을 동시에 수행할 수 있으며, 최대 청소면적은 300 m^2, 저소음 모드에서 최대 180분까지 연속 운전이 가능하여 반복 제염에 활용할 수 있다.

제염 후 청소포의 방사능 측정에는 감마카운터(HIDEX Automatic Gamma Counter, Finland)를 사용했다(Fig. 3). 감마카운터는 다량의 시료를 빠르게 측정할 수 있으며 청소포가 감마카운

Fig. 1. Portable survey meter and external detector used for surface contamination measurements.

Fig. 2. Robot vacuum cleaner used for decontamination

Fig. 3. Gamma counter used in the study.

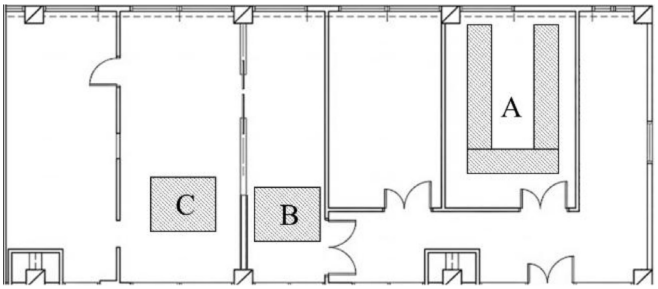

Fig. 4. Map of the measurement area.

터가 사용하는 20 mL 바이알에 들어가 측정에 편리하다는 점에서 선택하였다.

감마카운터 측정은 먼저 배경 방사능을 측정한 후 시료의 계수율을 취득하고 여기에 배경 계수율을 보정하여 순수 계수율을 산출하였고 이 값을 Bq로 환산한 결과를 활용하였다.

2.2. 실험 방법

제염은 로봇청소기의 물걸레 청소 모드로 수행하였다. 모바일 애플리케이션을 이용해 오염 구역을 지도화한 뒤 지정 구역을 설정하고 각 제염 회차마다 청소포를 교체하도록 설정하였다. 오염 제거 효율을 높이기 위해 강한 문지름을 적용하는 딥클린 기능과 최대한 많은 물 양을 이용하게 설정하였다. 제염은 오염도에 따라 실험실을 A, B, C로 구분하여 진행하였으며, 방사선 관리구역 내 표면 오염 발생 후 해당 구역에 대해 제염을 실시하였다(Fig. 4). 또한 해당 시설은 정기적인 표면오염 측정을 통해 오염이 없는 상태임을 확인해 왔으므로, 본 연구에서 확인된 오염은 기존에 지속적으로 존재하던 고착성 오염이 아니라 새로 발생한 오염으로 판단하였다.

A 구역은 제염 면적 18 m^2, 소요 시간 13분이었으며 바닥 재질은 인조대리석이었다. B 구역은 제염 면적 4 m^2, 소요 시간 4분이었고 바닥 재질은 에폭시였다. C 구역은 제염 면적 4 m^2, 소요 시간 3분이었으며 바닥 재질은 A 구역과 동일한 인조대리석이었다. 각 제염 회차 종료 후 교체된 청소포는 20 mL 용기에 회수하여 감마카운터로 10분간 방사능을 측정하였다. 제염은 사용된 청소포의 방사능 감소가 관찰되지 않을 때까지 동일한 절차로 반복하여 진행하였다.

2.3. 평가 방법

제염 성능은 제염계수(Decontamination Factor, DF)와 제염률(%)로 정량화하였다. 제염계수는 국제원자력기구 안전 용어집[16]의 정의에 따라 식 (1)을 활용하여 제염 전 방사능과 제염 후 방사능의 비로 산출하였다.

$$DF = \frac{C_0}{C_t} \quad (1)$$

여기서 C_0는 제염 전 방사능, C_t는 제염 후(각 회차 종료 후) 방사능을 의미한다. 제염률은 제염이 얼마나 효과적으로 오염 물질을 제거했는지 나타내는 지표로 식 (2)를 활용하여 제염계수를 백분율 감소로 환산하여 계산하였다.

$$\text{제염률}(\%) = \left(1 - \frac{1}{DF}\right) * 100 \quad (2)$$

여기서 제염률은 구역별, 회차별로 산출하여 비교하였다.

3. 결 과

본 연구의 결과는 방사선 관리구역에서 표면오염이 발생한 이후 제염한 결과를 사례로 정리한 것이다. 로봇청소기로 실시한 반복 제염의 결과는 다음과 같다. 제염 전 감마분광분석을 통해 A 구역과 B 구역의 오염 핵종은 ^{177}Lu, C 구역의 오염 핵종은 ^{131}I 임을 확인하였다. A 구역은 총 20회, B 구역은 총 100회, C 구역은 총 150회의 반복 제염을 수행하였다.

1회차 제염 후 초기 방사능은 A 구역에서 1,472 Bq, B 구역에서 51,485 Bq, C 구역에서 10,826 Bq이었으며, 최종 회차에서는 A 구역에서 20회 제염 후 21 Bq, B 구역에서 100회 제염 후 38 Bq, C 구역에서 150회 제염 후 66 Bq로 감소하였다(Fig. 5-7).

반복 제염에 따른 제염률은 1회차 제염 후 측정된 값을 기준으로 산출하였다. 최종 회차에서 A 구역은 1,472 Bq에서 21 Bq로 감소하여 제염률 98.57%를 보였고 B 구역은 51,485 Bq에서 38 Bq로 감소하여 제염률은 99.93%이다. C 구역은 10,826 Bq에서 66 Bq로 감소하여 제염률 99.39%로 평가되었다. 세 구역 모두 초기 반복 제염 구간에서 제염률이 급격히 증가했으며 이후에는 감소폭이 점차 완만해지는 경향을 보였다. A 구역은 5회차에서 제염률 90%, 15회차에 98%를 최초로 초과하였고 B 구역은 4회차에서 90%, 11회차에 98%, 18회차에 99%를 초과했으며 이후 반복 제염에도 99% 이상 수준에서 점진적으로 제염되었다. C 구역은 반복 제염 과정에서 제염률의 변동을 보였으며 7회차에서 90%, 14회차에서 처음으로 98%를 초과한 후 일시적인 하락이 관찰되었다. 하지만 60회차 이후에는 제염률이 98% 이상으로 유지되었고 후반 회차에서는 99% 내외로 수렴하는 경향을 보였다. 다음 그래프는 방사능값과 제염률을 나타낸 그래프다. Fig. 5-7은 회차별 방사능 값과 제염률의 변화를 나타낸 것이다.

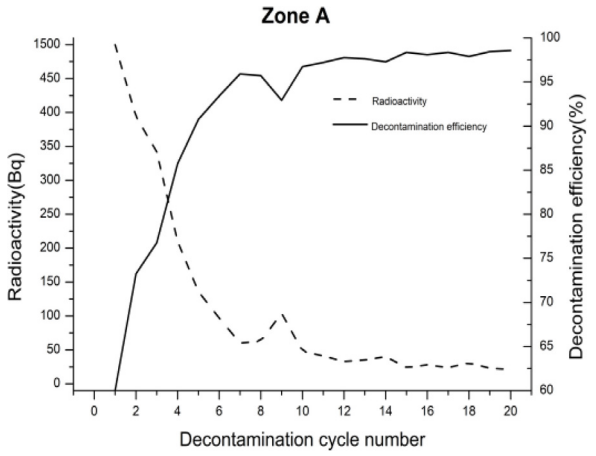

Fig. 5. Changes in radioactivity and decontamination rate in Zone A

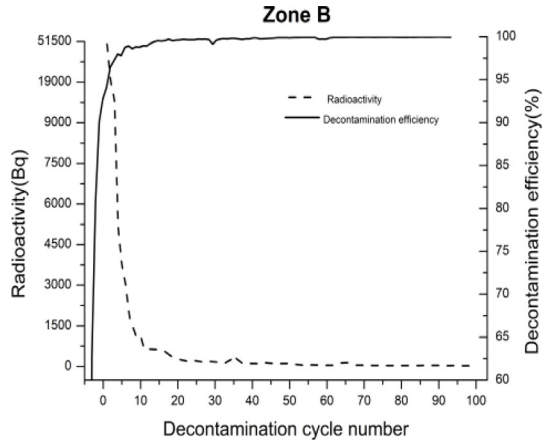

Fig. 6. Changes in radioactivity and decontamination rate in Zone B

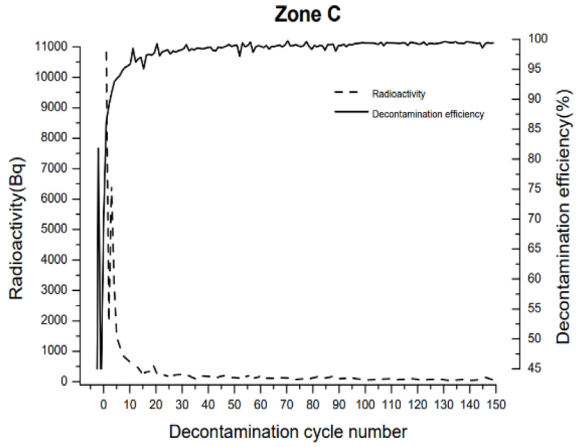

Fig. 7. Changes in radioactivity and decontamination rate in Zone C

4. 고 찰

본 연구는 상용 로봇청소기를 제염 도구로 활용하여 소규모 연구시설 바닥의 표면오염의 제염 가능성을 평가하였다. 감마분광분석을 통해 오염원 핵종이 ^{177}Lu과 ^{131}I임을 확인한 뒤 로봇청소기의 물걸레 기능을 이용해 반복 제염을 수행한 결과 A 구역은 1회차 1,472 Bq에서 20회 제염 후 최종 21 Bq까지, B 구역은 51,485 Bq에서 100회 제염 후 최종 38 Bq까지, C 구역은 10,826 Bq에서 150회 제염 후 66 Bq까지 감소하여 각각 최종 제염률은 98.57, 99.93, 99.39%의 높은 제염률을 보였다. 이는 로봇청소기를 이용한 반복적인 제염만으로도 오염 수준을 상당 부분 낮출 수 있음을 보여주며 바닥의 오염이 발생했을 경우 작업자의 피폭 없이 제염이 가능하다는 것을 보여준다.

본 연구 결과 상용 로봇청소기를 이용해 모바일 애플리케이션으로 오염 구역을 지정하고 반복 제염을 수행함으로써 작업자의 직접적인 오염원 접촉을 최소화하면서도 높은 제염률을 달성할 수 있음을 보여준다. 이는 제염 작업에서 인력 의존도를 낮추고 작업자의 피폭을 ALARA 원칙에 더 부합하는 수준으로 줄일 수 있는 하나의 실용적인 대안이 될 수 있음을 의미한다.

그러나 방사선방호 관련 규제 기준과 비교했을 때 본 연구에서 수행한 로봇청소기 제염만으로는 허용표면오염도 수준까지 오염도를 낮추지 못했다는 점은 중요한 한계이다. 로봇청소기를 이용한 반복 제염 후에도 바닥 일부는 오염도 기준치를 초과하였고, 추가적인 수작업 제염을 시행하였으나 기준 이하로 낮추지는 못하였다. 또한 제염 회차별 방사능 변화 양상에서 일부 구간의 값이 일시적으로 증가하거나 감소 폭이 줄어드는 구간이 관찰되었는데 이는 제염이 불충분하게 이루어진 일부 영역이 후속 회차에서 청소되면서 잔류 오염이 뒤늦게 제거된 결과로 해석할 수 있다. 이러한 결과는 바닥 재질의 미세한 요철과 같은 물리적 요인과 제염 과정에서 일반 물만 사용한 화학적 요인이 복합적으로 작용했을 가능성이 있다. 또한 로봇청소기 운행 시 바퀴를 통한 오염의 전이 가능성이 존재하므로, 본 연구에서는 이를 최소화하기 위해 물리적 경계를 설정한 상태에서 실험을 수행하였다. 그러나 바퀴에 부착된 오염이 다시 바닥으로 재전이될 가능성이 있고, 반복 제염에 따른 전체적인 오염 감소 효과가 잠재적 전이에 비해 더 크다고 판단하여, 제염 후에는 사용자가 별도의 표면오염 측정을 통해 오염 확산 여부를 추가로 확인할 필요가 있다. 비록 허용표면오염도 기준까지 오염도를 낮추지 못했지만, 약 20회 정도 제염했을 때 평균 제염률은 98.5%로 나타나 오염 저감 효과 자체는 확인할 수 있었다. 따라서 반복 제염 이후에도 방사능이 높은 구역이 남는 경우, 해당 구역에 출입 금지 표시를 하고 구역을 구분하면 보다 효율적인 제염 및 관리가 가능할 것으로 판단된다.

선행 연구에 따르면 일반 물을 이용한 제염보다 제염액을 이용한 제염에서 더 효과적인 오염 제거가 보고된 바 있다[17]. 본 연구에서는 로봇청소기의 물걸레 기능에 일반 물만 사용하였으므로 제염액을 적용 시 제염 효율이 향상될 가능성이 있다. 따라서 현재 로봇청소기를 이용한 제염만으로 규제 기준치 이하까지 오염을 낮추기에는 한계가 있으므로 물 대신 제염액 활용, 다양한 바

닥 재질과 다른 핵종에 대한 검증 평가가 추가로 필요하다. 향후 이러한 요소를 보완한다면 로봇청소기는 실험실 바닥 방사성 오염에 대한 반복 제염 도구로서 수작업 제염을 대체하는 실질적인 방안으로 활용될 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구는 패드 교체형 로봇청소기를 이용하여 바닥의 방사성 오염 제거 가능성을 평가하였고 로봇청소기가 제염 도구로 이용될 수 있음을 증명하였다.

로봇청소기를 이용한 제염은 기존 방식인 사람이 문지름법을 통해 제염하는 인력을 대체하여 향후 유사 상황의 제염 작업에서도 물걸레 교체형 로봇청소기는 인력을 대체할 수 있는 좋은 방안으로 생각된다.

감사의 글

이 연구는 과학기술정보통신부 한국원자력의학원 연구운영비 지원사업의 지원을 받아 수행하였음(No.50422-2026).

참고문헌

1. Nuclear Safety and Security Commission. 2025. Chapter 1. Radiation Safety. In: Nuclear Safety and Security Commission, Seoul, Republic of Korea. Nuclear Safety Yearbook: Annual Report 2024. pp. 271.
2. National Institute of Food and Drug Safety Evaluation. 2015. Guidance for Marketing Authorization of Radiopharmaceuticals (Document No. C0-2015-2-008). Pharmaceutical Evaluation Department, Oncology Pharmaceuticals Division, Republic of Korea. p. 14.
3. International Atomic Energy Agency. 2022. Lesson 5: Surface Contamination Measurement. Training material. IAEA, Vienna.
4. Frost D and Jammet H. 1975. Radiation Hazards of Unsealed Sources. pp. 17-18. In: Manual on Radiation Protection in Hospitals and General Practice, Vol. 2, Unsealed Sources (Frost D and Jammet H eds.), 1st ed. World Health Organization, Geneva.
5. Domínguez-Gadea L and Cerezo L. 2011. Decontamination of radioisotopes. *Rep Pract Oncol Radiother* **16**(4):147-152. https://doi.org/10.1016/j.rpor.2011.05.002.
6. International Atomic Energy Agency (IAEA). 2010. Frequently Asked Questions on ALARA: Optimization of doses for occupational exposure.
7. U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC). n.d. 10 CFR Part 20—Standards for Protection Against Radiation: § 20.1003 Definitions.
8. Canadian Nuclear Safety Commission. 2025. REGDOC-2.7.1, Radiation Protection. CNSC.
9. Nuclear Safety and Security Commission (NSSC). 2025. Standards on Radiation Protection, Etc.NSSC Notice No. 2025-3 (effective April 23, 2025). Nuclear Safety and Security Commission, Republic of Korea.
10. International Atomic Energy Agency. 2023. Management considerations when selecting a decontamination methodology. pp. 2-10. In: Decontamination Methodologies and Approaches (IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.38). International Atomic Energy Agency, Vienna.
11. U.S. Environmental Protection Agency. 2012. Decontamination of laboratory surfaces and equipment. pp. 98-99. In: Guide for Radiological Laboratories for the Control of Radioactive Contamination and Radiation Exposure. Revision 0. Montgomery, AL, U.S. Environmental Protection Agency.
12. Takemoto T, Ohsawa K and Matsuda N. 2020. Cleaning Materials and Methods for Effective Removal of Indoor Radioactive Contamination. *Radiat Saf Manag* **19**:49-57. https://doi.org/10.12950/rsm.200213.
13. Seward DW and Bakari MJ. 2005. The Use of Robotics and Automation in Nuclear Decommissioning. Proc Int Symp Autom Robot Constr (ISARC). **22**:1-6.
14. Kazemi S and Gentes S. 2023. Development of a robotic system for the automation of the decontamination process of nuclear power plants. *Saf Nucl Waste Disposal* **2**:13-14. https://doi.org/10.5194/sand-2-13-2023.
15. Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. 2015. MHI-Teleoperated Robot for decontamination and concrete core sampling in Fukushima Daiichi reactor buildings. *E-Journal of Advanced Maintenance (EJAM)* **7**(1): NT69.
16. International Atomic Energy Agency. 2022. IAEA Nuclear Safety and Security Glossary: Terminology Used in Nuclear Safety, Nuclear Security, Radiation Protection and Emergency Preparedness and Response. 2022 (Interim) ed. 246 pp. IAEA, Vienna.
17. Heo JS. 2021. Evaluation of the decontamination efficiency of radioactive wastes generated during the production of 201Tl. Master's thesis. Graduate School, Korea University, Seoul, Republic of Korea.