



Special Review on “In Memoriam of the Late Prof. Kyoung-Woong Kim, the Former President of the KSEEG: Current Issues and Prospect on the Contamination of Geoenvironments”

Research Trends in Environmental Remediation Technologies for Domestic and International Nuclear Facility Sites

In-Ho Yoon*

Nuclear Facility Cleanup Technology Division, Korea Atomic Energy Research Institute

*Corresponding author : ihyoon@kaeri.re.kr

ARTICLE INFORMATION

Manuscript received 19 January 2026

Received in revised form 24 February 2026

Manuscript accepted 24 February 2026

Available online 27 February 2026

DOI : <http://dx.doi.org/10.9719/EEG.2026.59.1.65>

Research Highlights

- MARSSIM-based site characterization and DCGL establishment for nuclear facility remediation
- Physical, chemical, and biological technologies for radioactive soil remediation reviewed
- Digital twin, AI prediction, and modular systems as emerging decommissioning solutions

ABSTRACT

Site remediation of nuclear facilities represents the final stage of decommissioning and is crucial for both environmental safety and economic value creation. This study systematically analyzes radioactive contaminated soil remediation technologies and site remediation strategies. The regulatory framework including Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual (MARSSIM) methodology and Derived Concentration Guideline Level (DCGL) establishment procedures are examined, comparing unrestricted release and restricted use strategies. Remediation technologies are classified into physical, chemical leaching, and biological methods, each selectively applied based on soil characteristics and contaminating radionuclides. Cesium(Cs)-137 removal is particularly challenging due to its strong binding with clay minerals, prompting development of innovative technologies using cationic polymers and magnetic nanoparticles. International cases including Hanford (USA) and Gundremmingen (Germany) are analyzed alongside domestic cases such as Kori Unit 1. Emerging technologies including digital twin modeling, Artificial Intelligence (AI)-based contamination prediction, Unmanned Aerial Vehicle (UAV) surveying, and modular remediation systems are presented. For upcoming domestic nuclear decommissioning projects, securing safe and economical remediation technologies is essential. Key future directions include waste volume reduction and transition to resource circulation models. The study emphasizes the importance of site-specific technology selection through decision-support models, integrated treatment for complex contamination, and ecological function recovery assessment. Successful site remediation can transform decommissioned nuclear sites into renewable energy hubs or industrial complexes, contributing to regional economic development and social acceptance of nuclear energy.

Keywords : environmental remediation, radioactive contaminated soil, soil remediation technology, nuclear facility site, cesium removal

Citation: Yoon, I.-H. (2026) Research Trends in Environmental Remediation Technologies for Domestic and International Nuclear Facility Sites. *Korea Economic and Environmental Geology*, v.59, p.65-77, doi:10.9719/EEG.2026.59.1.65.

✉ Journal homepage: <http://www.kseeg.org/main.html>

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided original work is properly cited.

pISSN 1225-7281; eISSN 2288-7962/©2026 The KSEEG. Printed by Hanrimwon Publishing Company. All rights reserved.

해설 (“고 김경웅 교수(전임 회장) 추모: 지중 환경 오염의 현안” 특별호)

국내외 원자력시설 부지의 환경복원 기술 연구 동향

윤인호*

한국원자력연구원 원자력시설청정기술개발부

*책임저자 : ihyoon@kaeri.re.kr

요 약

원자력시설 부지복원은 원전 해체의 최종 단계로서 환경 안전성 확보와 부지 재이용을 통한 경제적 가치 창출 측면에서 매우 중요하다. 본 연구는 방사성 오염토양 정화 기술과 부지복원 전략을 체계적으로 분석하였다. 부지복원의 규제적 틀로서 Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual (MARSSIM) 방법론과 Derived Concentration Guideline Level (DCGL) 설정 절차를 고찰하였으며, 무제한 이용과 제한적 이용의 전략을 비교하였다. 정화 기술은 물리적, 화학적, 생물학적 방법으로 분류되며, 각 기술은 토양 특성과 오염 핵종에 따라 선택적으로 적용된다. 특히 세슘(Cs)-137은 점토광물과 강하게 결합하여 제거가 어려워 이를 극복하기 위해 양이온성 고분자 및 자성 나노입자를 활용한 선택적 분리·탈착 기반의 혁신적 정화 기술이 최근 주목받고 있다. 미국 헨포드, 독일 군드레밍겐 등 해외 사례와 국내 고리 1호기 사례를 분석하였으며, 디지털 트윈, AI 기반 오염 예측, 드론 조사, 모듈형 정화 시스템 등 4차 산업혁명 기술과 접목된 최신 기술 동향을 제시하였다. 본 연구는 부지별 맞춤형 기술 선정에 위한 의사결정 모델, 복합 오염에 대한 통합 처리, 생태적 기능 회복 평가의 중요성을 강조한다. 성공적인 부지복원을 통해 원전 부지를 재생에너지 단지나 산업단지로 전환함으로써 지역 경제 발전과 원자력에 대한 사회적 수용성 향상에 기여할 수 있다. 향후 국내 원전 해체 확대에 대비하여 안전성과 경제성을 동시에 확보할 수 있는 정화 기술의 확보가 필수적이며, 단순한 오염 제거를 넘어 폐기물 부피 감용과 자원 순환형 부지복원 전략으로의 전환이 요구된다.

주요어 : 환경복원, 방사성오염 토양, 토양정화기술, 원자력시설 부지, 세슘제거

1. 서 론

부지복원(Site Remediation)은 원자력시설(Nuclear Facilities) 해체의 최종 단계로서, 환경 안전성 확보와 경제적 가치 창출의 핵심 과정이다 [Yoon et al., 2020]. 환경 안전성 확보 측면에서 볼 때, 토양에 잔류하는 방사성 핵종은 강우나 지하수 흐름을 통해 확산되어 인근 수계나 생태계를 오염시킬 수 있다. 특히 반감기가 긴 핵종들은 수세대에 걸쳐 환경적 위험이 될 수 있으므로, 이를 규제 기준 이하로 정화하여 생태적 안전망을 구축하는 것은 타협할 수 없는 필수적인 전제 조건이다 [Hemming, 2023].

한편, 원자력시설 부지는 풍부한 냉각수원, 견고한 지반, 기구축된 송·변전 인프라를 갖춘 전략적 입지라는 점에서 높은 잠재적 가치를 지닌다. 이러한 부지를 방치하지 않고 재이용 가능한 상태(Greenfield 또는 Brownfield)로 복원함으로써, 재생에너지 단지나 산업단지로 전환할 경우 상당한 경제적 부가가치를 창출할 수 있다. 독일 군드레밍겐(Gundremmingen) 원자력발전소(Nuclear Power Plant, NPP) 부지가 배터리 저장 시설 등으로 전환된 사례는 이러한 경제적 잠재력을 실증한다 [GRS, 2013]. 이는 부지복원이 단순한 정화를 넘어 지역 경제 재생의 기

회임을 보여준다. 이는 향후 신규 원전 건설이나 계속 운영을 위한 사회적 합의에도 긍정적인 영향을 미칠 수 있다.

원전 부지 내 토양 오염은 운영 기간 중 발생한 배관 누설, 저장조의 균열, 중대사고 시 대기 중으로 방출된 방사성 물질의 침적, 또는 오염수 유출 등 다양한 경로를 통해 발생한다. 주요 오염 핵종으로는 세슘-137(¹³⁷Cs), 스트론튬-90(⁹⁰Sr), 코발트-60(⁶⁰Co) 등이 있으며, 핵연료 주기 시설이나 우라늄 변환 시설의 경우 우라늄(U) 오염이 주를 이룬다 [Alwaeli & Mannheim, 2022; IAEA, 2022, OECD NEA, 2020]. 이러한 오염 핵종들은 각기 다른 화학적 특성과 토양 결합 메커니즘을 가지고 있어, 효과적인 정화를 위해서는 핵종별 특성을 고려한 맞춤형 기술 선정이 필수적이다.

플루토늄(Pu)과 아메리슘(Am) 등의 방사성 핵종은 토양 입자에 강하게 흡착되어 입자성 형태로 이동하는 특성을 보인다 [Clark et al. 2006; Kersting 2013]. 부지 특성평가 과정에서는 방사능 측정 결과를 기반으로 오염 토양을 굴착하며, 굴착된 토양은 대형 구조물 내에 임시 보관된다. 굴착 방식은 방사성 오염 토양 처리에 있어 효과적인 정화 방법으로 평가되나, 최종 처분장까지의 운반 비용을 포함한 전체 정화 비용은 방사성 오염 토양의 발생량에

따라 크게 달라진다. 특히 방사성 폐기물의 발생량이 다량 발생할 경우, 부피 감용 기술의 적용이 필수적이다.

정화 기술의 발전과 처분 비용의 증가 추세에 따라, 방사성 폐기물의 부피 감량을 위한 연구가 최근 활발히 진행되고 있다 [Agnew et al. 2011]. 부피 감용을 위한 후속 분리 및 처리 공정에서는 비용 평가가 필수적이며, 해체 부지에서 발생하는 토양 폐기물에 대한 최적 처리 기술의 선정이 매우 중요하다. 향후 국내 원자력시설 해체 시 고려해야 할 주요 사항으로는 다량의 방사성 토양 발생 가능성을 들 수 있다. 우라늄(U)과 코발트(Co) 등 일부 방사성 핵종에 대한 토양 정화 기술은 상당한 진전을 이루었으나, 2:1 점토광물에 함유된 방사성 세슘(Cs)의 제거는 핵종과 토양 간의 강력하고 비가역적인 상호작용으로 인해 여전히 낮은 효율을 보이거나 높은 에너지 소비를 요구한다 (Park et al. 2017). 특히 ^{137}Cs 은 점토광물 내 Frayed Edge Site(FES)와 같은 특정 부위에 선택적으로 강하게 결합하여, 이는 현재 토양 정화 기술의 가장 큰 도전 과제 중 하나로 인식되고 있다. 기존의 방사성 오염 토양 정화 기술은 물리적, 화학적, 생물학적 접근으로 구분될 수 있으며, 각 기술은 토양의 입도 분포, 오염 핵종의 특성, 부지 조건에 따라 선택적으로 적용된다 [Fang and Achal 2019; Hussain et al. 2018; Kumbhar et al. 2021].

본 연구는 국내외 원자력시설의 성공적인 부지 복원을 위한 핵심 요소인 방사성 오염토양 정화 기술과 전략을 심층적으로 분석하는 것을 목적으로 한다. 본 연구에서는 규제 및 절차적 프레임워크 분석, 핵심 정화 기술의 메커니즘 및 효율성 비교, 국내외 사례, 그리고 미래 기술 및 전망을 다룬다. 먼저 부지 복원의 목표 기준이 되는 Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual (MARSSIM) 방법론과 Derived Concentration Guideline Level (DCGL) 설정 절차를 상세히 고찰하고, 토양 세척, 동전기 정화, 생물학적 정화 등 주요 기술의 원리와 장단점, 그리고 최신 연구개발 동향을 분석한다. 또한 미국, 독일, 영국 등 원전 해체 선진국과 한국의 사례를 비교 분석하여 시사점을 도출하며, 디지털 트윈과 인공지능 등 4차 산업혁명 기술의 접목 가능성과 국내 실정에 맞는 향후 전망을 제시한다.

2. 원자력시설 부지복원

2.1. 부지복원의 정의와 규제 체계

원자력시설 부지복원이란 원자력시설 운영으로 인해 방사성 물질로 오염된 부지(토양, 지하수, 건물 잔해 등)를 체계적으로 조사하고 정화하여, 규제 기관이 승인한

잔류 방사능 기준 이하로 낮춤으로써 부지의 재이용이 가능하도록 만드는 일련의 과정을 의미한다 [IAEA, 2025, IAEA 2026]. 이 과정은 단순한 오염 제거를 넘어, 과학적·통계적 검증을 통해 원자력시설 운영 허가를 종료 (License Termination)하는 규제 절차를 포함한다.

국제원자력기구(IAEA)의 안전 기준(Safety Standards Series)은 부지 복원이 사람의 건강과 환경을 보호하는 것을 최우선 목표로 해야 함을 명시하고 있으며, 각국은 이를 바탕으로 자국의 실정에 맞는 규제 요건을 수립하고 있다 [IAEA, 2014]. 한국의 경우 원자력안전위원회(NSSC)의 고시와 원자력안전법에 따라 해체 완료 후 부지의 잔류 방사능이 기준치를 초과하지 않음을 입증해야 한다. 다만 국가별로 허용 선량 기준, 평가 시나리오, 통계적 검증 방법 등에 차이가 존재하므로, 부지복원의 목표 수준과 전략은 초기 해체 계획 단계에서부터 규제 요건을 고려하여 설정될 필요가 있다. 이러한 규제 차이는 부지 복원 비용과 기술 선택에 직접적인 영향을 미치는 핵심 요소이다.

2.2. 부지개방 전략

부지복원의 최종 목표는 향후 부지 이용 형태에 따라 무제한 이용(Unrestricted Release) 또는 제한적 이용(Restricted Use) 전략으로 구분된다. 무제한 이용 방식은 부지 내 잔류 방사능을 자연 배경 방사능 수준이나 무시할 수 있는 수준, 즉 연간 피폭선량 25 mrem(0.25 mSv, NRC) 또는 IAEA 권고 0.1 mSv 미만까지 낮추어, 향후 부지 용도에 아무런 제한을 두지 않는 방식이다 [US NRC 1997]. 이는 주거지, 학교, 농경지 등으로 활용될 수 있음을 의미하며, 환경 안전성 측면에서 가장 보수적인 접근이나 고비용과 고난도의 정화 기술이 요구된다. 독일의 즉시 해체 (Immediate Dismantling) 및 녹지화 전략이 대표적 사례이며, 정화 비용이 제한적 이용 대비 2~5배까지 증가할 수 있고, 심부 오염이 존재할 경우 기술적 한계에 직면할 가능성이 있다 [Bärenbold et al., 2024].

반면 제한적 이용 방식은 기술적 한계나 과도한 비용으로 인해 무제한 이용 기준을 달성하기 어려운 경우, 부지의 용도를 산업 단지나 발전소 부지 등으로 제한하는 조건으로 규제를 해제하는 방식이다. 이 경우, 토지의 제한 설정이나 물리적 접근 차단과 같은 제도적 통제가 수반되어야 한다 [Seo & Sohn, 2019]. 기존의 송배전 인프라를 활용하여 에너지 저장 시스템(Energy Storage System, ESS)이나 소형 모듈 원자로(Small Modular Reactor, SMR) 부지로 재활용하는 방안이 이에 해당하며, 경제성과 현실성을 고려한 합리적인 대안으로 주목받고 있다. 다만, 제도적 통제의 장기적 유지 가능성, 토지 가치 변화, 사

회적 수용성에 대한 종합적인 검토가 선행되어야 한다.

2.3. 부지 특성평가 절차 및 MARSSIM 방법론

오염된 부지를 정화하기 위해서는 오염의 범위와 심도를 정확히 파악하는 것이 필수적이다. 이를 위해 전 세계적으로 통용되는 표준 방법론이 미국 원자력규제위원회(NRC), 환경보호청(EPA) 등이 공동 개발한 MARSSIM 이다 [U.S. EPA et al, 2000]. MARSSIM은 부지 조사의 신뢰성을 확보하기 위한 통계적 설계와 데이터 품질 목표(Data Quality Objectives, DQO) 과정을 상세히 규정한다.

부지 복원의 첫 단계는 문헌 조사와 인터뷰를 통한 역사적 부지 조사(HSA, Historical Site Assessment)이다. 운영 중 발생한 누설 기록, 오염 사고 보고서 등을 분석하여 부지를 비오염 지역과 오염 지역으로 분류한다 [U.S. EPA et al, 2000]. 비오염 지역은 방사성 물질의 사용이나 저장이 없었던 곳이며, 오염 지역은 오염 가능성이 있는 지역으로 오염도에 따라 세분화하여 조사 밀도를 달리한다. 기준치 초과가 확실한 1등급(Class 1) 지역, 기준치 초과 가능성이 있는 2등급(Class 2) 지역, 그리고 오염 가능성이 낮은 3등급(Class 3) 지역으로 구분된다. 이는 제한된 조사 자원을 효율적으로 배분하고, 과도한 조사 또는 과소 평가를 방지하는 핵심 요소이다.

오염 여부를 판별하는 기준이 되는 유도방사능농도기준(DCGL, Derived Concentration Guideline Level)은 부지 재이용 시나리오(예: 거주 농부 시나리오)에 따른 피폭 선량 한도를 토양 내 방사능 농도로 환산한 값이다 [U.S. EPA et al, 2000]. DCGL 산출 공식은 일반적으로 다음과 같다:

$$DCGL_w = \frac{\text{Release Limit (mSv/y)}}{\text{Dose Factor (mSv/y per Bq/kg)}}$$

DCGL_w는 넓은 지역의 평균 오염도를 평가하기 위한 기준값이다. 만약 좁은 구역의 고농도 오염(Hotspot)을 평가할 때는 DCGL_{EMC} (Elevated Measurement Comparison)를 별도로 산정하여 적용한다 [U.S. EPA et al, 2000]. 선량 환산 계수는 핵종별 물리화학적 특성, 토양 특성, 피폭 경로(외부피폭, 흡입, 섭취) 등을 고려하여 결정되며, RESRAD(Residual Radioactivity)와 같은 전산 코드를 이용하여 산출한다. 특히 자연계에 존재하는 우라늄(U)이나 라듐(Ra)과 같은 핵종이 오염원일 경우, 부지 고유의 배경 방사능을 통계적으로 분리해내기 위해 윌콕슨 순위합(Wilcoxon Rank Sum, WRS) 테스트와 같은 비모수적 통계 기법을 사용하여 부지 데이터와 배경 데이터를 비교한다. 이는 사업자가 자연 방사능까지 정화하는 불합리함을 방지하기 위함이다. 그러나 배경 방사능의 공간

적 변동성이 큰 경우 통계적 분리가 어려울 수 있으며, 이는 DCGL 설정의 불확실성을 증가시킬 수 있다.

2.4. 부지복원 단계별 프로세스

부지복원은 일반적으로 다음의 5단계로 구성된다: (1) 계획 수립 → (2) 특성 조사 → (3) 정화 수행 → (4) 최종 부지조사 → (5) 라이선스 종료, 계획 수립 단계에서는 목표 선량 및 부지 개방 전략을 확정하여 녹지와 같은 Greenfield 또는 산업부지와 같은 Brownfield로 용도를 정한다. 이후 MARSSIM 기반의 상세 오염 지도를 작성하는 특성 조사(Characterization Survey) 단계를 거쳐, 토양 세척 등 적절한 기술을 적용하여 오염원을 제거하는 정화 수행(Remediation) 단계로 진행한다. 정화 완료 후에는 잔류 방사능이 DCGL을 만족하는지 통계적으로 검증하는 최종 부지조사(FSS, Final Status Survey)를 실시하며, 마지막으로 규제 기관의 검증을 거쳐 라이선스를 종료(License Termination)하게 된다. 각 단계는 독립적이지 않으며, 정화 수행 결과에 따라 계획 수정이나 추가 특성 조사가 필요할 수 있다는 점에서 반복적(Iterative) 특성을 가진다. 특히 최종 부지조사에서 DCGL 초과가 확인될 경우, 해당 구역에 대한 추가 정화와 재조사가 반복될 수 있어 전체 해체 일정에 큰 영향을 미칠 수 있다. 따라서 초기 계획 단계에서 충분한 안전 마진을 고려한 정화 목표 설정과 단계별 품질 보증(QA/QC) 체계 구축이 중요하다 [Hong et al., 2011].



Fig. 1. Site Remediation Process Flowchart.

3. 원자력시설 토양 정화 기술

3.1. 방사성 오염토양의 특성

토양 방사성오염의 주 요인인 ^{137}Cs 과 같은 방사성핵종은 토양과 강하게 결합되어 효과적인 제거가 어렵다. 방사성 오염 토양은 오염의 확산에 있어 수질 및 대기 오염과 달리 이동성이 거의 없어 진행속도가 느리며, 따라

서 토양 오염 발생과 확인 시점간의 차이가 크다 [Bunzl et al., 1997]. 방사성핵종은 고유의 반감기를 가지고 있어 시간이 지남에 따라 방사능은 저감되나 방사능이 감소하는 시간이 길어 장기간 관리가 필요하다. 예를 들어, 대표적 핵종인 ^{137}Cs 의 반감기는 약 30년으로, 실질적으로 방사능이 무시할 수 있는 수준으로 감소하기 위해서는 300년 이상이 소요된다 [Sawhney, 1972].

Table 1. Classification of Radioactive Contaminated Soil Remediation Technologies

기술 분류	제거 효율	시간	비용	적용 토양	주요 제약사항	기술 성숙도	2차 폐기물 발생
물리적 정화							
굴착 (Excavation)	95-100% (완전 제거)	상대적으로 짧은 시간 (○○○)	발생량 및 장치크기에 따라 다름 (○)	모든 토양	- 대량 폐기물 발생 - 굴착 시 비산 먼지로 2차 오염 위험 - 높은 작업자 피폭 위험	완전 상용화 (○○○)	매우 높음 (100%)
습식 분리 (Wet separation)	60-90% 부피 감용 (Cs: 40-70%)	상대적으로 짧은 시간 (○○○)	중간 비용 (○○)	사질토 (점토 <30%)	- 점토 함량 >30% 시 효율 급격히 저하 - 유기물 >5% 시 세척 효율 감소 - 대량 세척수 처리 필요	상용화 (○○)	중간 (10-40%)
건식 분리 (Dry separation)	70-85% 부피 감용	상대적으로 짧은 시간 (○○○)	중간 비용 (○○)	입도 분포가 넓은 토양	- 미세 입자(<2 μm) 분리 한계 - 균질 오염 토양에는 비효율적 - 건식 분리 시 분진 발생	상용화 초기 (○○)	낮음-중간 (15-30%)
화학적 정화							
화학적 침출 (Chemical Leaching)	Cs: 40-70% Sr: 50-80% U: 80-95%	중간 시간 (○○)	상대적으로 많은 비용 (○○○)	다양한 토양 (침투성 필요)	- 토양 구조 영구 파괴 - 식생 복원 곤란 - 대량 2차 폐액 발생 - pH 극단 변화	상용화 (○○)	높음 (폐액 다량)
동전기 정화 (Electrokinetic)	U: 80-95% Cs: 30-60% Sr: 40-70%	중간 시간 (○○)	상대적으로 많은 비용 (○○○)	점토질 토양 (저투수성)	- 높은 전력 소비 - 전극 부식 - 느린 처리 속도 - 토양 수분 <10% 시 비효율	실증 단계 (○○)	중간 (전극 세척액)
생물학적 정화							
식물 정화 (Phytoremediation)	Cs: 50-80% Sr: 60-85% U: 40-75%	상대적으로 긴 시간 (○○○)	상대적으로 적은 비용 (○)	표층토 (0-50cm) 식생 가능 토양	- 매우 긴 처리 기간 - 제한된 정화 심도(뿌리 깊이) - 기후·계절 의존성 - 수확 식물체 방사성 폐기물화	실증 단계 (○○)	낮음 (바이오매스)
미생물 정화 (Microbial)	U(VI)→ U(IV) 환원: 60-85% 고정화 중심	상대적으로 긴 시간 (○○○)	상대적으로 적은 비용 (○)	투수성 토양 (혐기 조건 유도 가능)	- 환경 조건 변화 시 재용출 위험 - pH, Eh 제어 필요 - Cs, Sr에는 직접 적용 불가 - 장기 안정성 불확실	연구개발 단계 (○)	매우 낮음

방사성 오염토양 정화 기술은 두 가지 기준에 따라 분류할 수 있다. 첫째, 처리 위치에 따라 현장(In-Situ) 정화와 굴착(Ex-Situ) 정화로 구분된다. 둘째, 처리 메커니즘에 따라 물리적, 화학적, 생물학적 방법으로 분류된다. 각 기술의 선정은 (1) 오염 핵종의 종류 및 농도, (2) 토양의 물리화학적 특성(입도 분포, 점토 함량, pH 등), (3) 부지 규모 및 접근성, (4) 규제 목표 수준, (5) 경제성을 종합적으로 고려하여 이루어진다.

3.2. 물리적 정화 기술 (Physical Treatment)

물리적 정화 기술은 방사성 핵종의 화학적 형태를 변화시키지 않고, 오염된 토양 입자를 선택적으로 분리함으로써 방사성 폐기물 발생량을 저감하는 데 목적이 있다. 이들 기술은 비교적 공정이 단순하고 대규모 처리에 적합하다는 장점이 있으나, 핵종이 토양 입자에 강하게 결합된 경우 제거 효율에 한계가 있다.

3.2.1. 습식 분리 (Wet separation)

습식 분리법은 방사성 핵종, 특히 세슘(Cs)과 스트론튬(Sr)이 표면적이 넓고 이온 교환 능력이 큰 미세 입자(점토, 실트)나 유기물에 주로 흡착된다는 특성을 이용한다 [Kim et al., 2021]. 상대적으로 입자가 크고 표면적이 작은 모래나 자갈 등 조립질 토양은 오염도가 낮으므로, 물과 기계적 에너지를 이용하여 오염된 미세 토양을 씻어내고 분리함으로써 전체 폐기물 부피를 60~90%까지 감용(Volume Reduction)할 수 있다 [Benitez & Redwine, 1999]. 핵종의 토양 입자 흡착은 표면 착화(surface complexation), 이온 교환, 물리적 포획 등의 메커니즘으로 이루어지며, 습식분리 효율은 이러한 결합의 강도에 의해 결정된다.

토양 습식분리 공정은 다음의 3단계로 구성된다. (1) 전처리(Pre-treatment) 단계: 대형 체(Screen)를 통해 거대 자갈과 이물질을 제거한다. (2) 세척 및 삭마(Scrubbing/Attrition) 단계: 세척조에서 고압 수류나 교반기를 이용해 토양 입자 간의 마찰을 유도하여 표면에 부착된 오염막을 물리적으로 벗겨낸다. (3) 입자 분리(Classification) 단계: 수력학적 분리 장치나 원심 분리기(Hydrocyclone)를 이용해 깨끗한 조립토(모래)와 오염된 세립토(슬러지)를 분리한다. 조립토는 재활용하고, 농축된 슬러지는 2차 폐기물로 처리한다. 적용성 및 한계는 이 기술은 사질토(Sandy soil)에서는 높은 효율과 경제성을 보이지만, 다음의 경우 효율이 크게 저하된다: (1) 점토 함량이 30~40%를 초과하는 토양 (2) 토양 내 유기물 함량이 5% 이상일 경우 (3) 강하게 결합된 핵종(예: 점토 층간에 고착된 Cs)이다. 또한 세척수 처리 및 재순환 시스템의 운영 비용도 전체 공정 비용의 30~40%를 차지하여 경제성에 영향을 미친다.

3.2.2. 입자 분리 기술 (Particle Separation)

수력학적 분리(Hydrodynamic Separation)는 입자의 침강 속도 차이를 이용하며, 원심 분리(Centrifugal Separation)는 원심력을 이용해 미세 입자를 더욱 강력하게 분리해낸다. 최근에는 자성 분리나 부유 선풍(Flotation) 기술을 접목하여 특정 광물에 흡착된 방사성 물질을 선택적으로 제거하는 연구도 진행되고 있다 [Dermont et al., 2008]. 최근에는 자성 나노입자를 활용하여 Cs이 농축된 미세 점토 입자만을 선택적으로 회수하는 기술이 제안되고 있다 [Kim et al., 2020]. 이러한 기술은 토양 세척 공정과 결합하여 적용될 경우, 세척 오염 토양의 부피 감용과 정화 효율을 동시에 향상시킬 수 있는 잠재력을 가진다.

3.3. 화학적 정화 기술 (Chemical Treatment)

3.3.1. 화학적 침출 (Chemical Leaching)

화학적 침출 기술은 산(Acid), 알칼리(Alkali), 또는 킬레이트제(Chelating agent)와 같은 화학 용매를 사용하여 고체상에 존재하는 방사성 핵종을 액상으로 용출시킨다. 용매의 종류에 따라 다음과 같이 구분된다.

무기산 침출은 무기산인 황산(H_2SO_4)이나 염산(HCl)은 우라늄이나 중금속 제거에 효과적이거나 토양의 물리화학적 성질을 파괴하여 식생 복원을 어렵게 만들 수 있다. 산 침출의 경우 pH가 2 이하로 낮아지면서 토양 광물이 용해되고 이온 교환 부위의 결합이 파괴되어 핵종이 용출된다. 그러나 과도한 산 사용은 토양 구조를 영구적으로 변화시킬 수 있다. 염 용액 침출에서 염화칼륨(KCl) 용액은 세슘(^{137}Cs) 제거에 특화되어 있다. 칼륨 이온(K^+)이 토양 층간에 고착된 세슘 이온(Cs^+)과 이온 교환 반응을 일으켜 세슘을 용출해낸다. 이온 반경이 유사한 K^+ 와 Cs^+ 간의 경쟁적 이온 교환은 열역학적으로 유리하나, 교환 효율은 토양의 양이온 교환용량(CEC)과 기존 K^+ 농도에 의해 영향을 받는다. 일반적으로 0.5-2.0 M KCl 용액이 사용되며, 제거 효율은 40-70% 수준이다 [Yin et al., 2017]. 세슘 제거의 기술적 난제는 ^{137}Cs 이 점토광물 내 Frayed Edge Site(FES)와 interlayer와 같은 특정 부위에 가역적으로 강하게 결합하여 기존 토양정화 기술을 적용하는데 한계가 있다. 이를 극복하기 위해 최근 다음과 같은 혁신적 기술들이 개발되고 있다: (1) 양이온성 고분자를 이용한 점토 입자 선택적 분리, (2) 자성 나노입자를 활용한 오염 입자의 자기적 회수, (3) 점토 박리(exfoliation)를 통한 층간 세슘의 노출 및 탈착 [Kim et al., 2020] 기술 등이 있다. 이러한 기술들은 미세 입자 분리와 Cs 탈착을 동시에 달성하는 하이브리드 접근법으로서, 기존 기술 대비 30-50% 향상된 제거 효율을 보이는 것으로 보고되고 있다 [Kim et al., 2021].

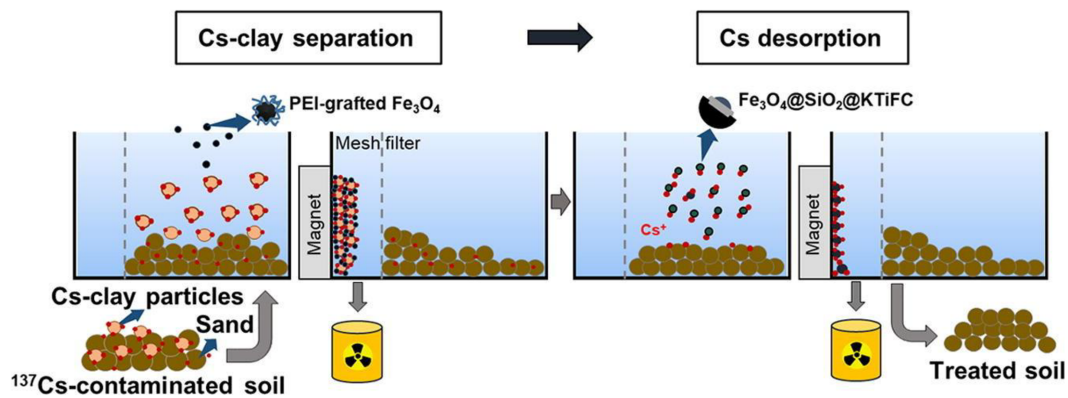


Fig. 2. Schematic diagram of Cs-contaminated clay separation and desorption process using magnetic nanoparticles [Kim et al., 2021].

3.4. 동전기 정화 기술 (Electrokinetic Remediation)

동전기 정화 기술은 토양 양단에 전극을 설치하고 직류 전압을 걸어주어, 전기적 현상을 통해 오염 물질을 이동시켜 제거한다. 이 기술은 투수 계수가 낮아 물의 흐름이 제한적인 점토질 토양(Clayey soil) 정화에 유망한 기술이다. 동전기 정화의 주요 기작으로는 다음이 있다. 전기이동(Electromigration)은 전하를 띤 이온(예: UO_2^{2+} , Cs^+)이 반대 전하의 전극으로 이동하는 현상이며, 전기삼투(Electroosmosis)는 토양 공극수의 흐름이 양극에서 음극으로 이동하며 용존 오염 물질을 운반하는 현상이다. 전기영동(Electrophoresis)은 전하를 띤 콜로이드 입자가 이동하는 현상이다. 각 메커니즘의 기여도는 토양의 pH, 이온 강도, 광물 조성 및 오염 핵종의 화학적 형태에 따라 달라진다 [Bay et al., 2025].

동전기 정화의 가장 큰 기술적 한계는 전극 부근에서 발생하는 급격한 pH 변화로 인한 오염 물질의 조기 침전과 토양 공극 막힘 현상이다. 이를 완화하기 위해 완충 용액, 킬레이트제(EDTA, citric acid), 이온교환막을 이용한 pH 제어 기법이 제안되었으나, 이러한 보조 물질의 사용은 2차 폐액 발생량과 처리 비용을 증가시킬 수 있다 [Gidudu & Chirwa, 2022]. 또한 전극 부식, 높은 전력 소비, 느린 처리 속도는 대규모 현장 적용의 주요 제약 요인으로 지적되고 있다. 따라서 동전기 정화 기술은 단독 적용보다는, 화학적 침출이나 식물 정화와 결합한 보조·강화 기술로 활용될 가능성이 높다.

3.5. 생물학적 정화 기술 (Bioremediation)

생물학적 정화 기술은 미생물이나 식물의 생리적 기능을 이용하여 오염 물질을 제거하거나 안정화하는 친환경적 기술이다. 그러나 방사성 핵종은 생물학적으로 분해되지 않으므로, 생물학적 정화는 핵종의 흡수·농축 또는 화학적 형태 변화에 따른 안정화에 초점을 둔다.

3.5.1. 식물 정화 (Phytoremediation)

식물 정화는 특정 식물 종의 금속 흡수·축적 능력을 활용하여 토양 내 방사성 핵종을 제거하는 기술이다. 주로 사용되는 식물로는 해바라기(*Helianthus annuus*)와 갯 (*Brassica juncea*) 등이 있으며, 이들은 높은 바이오매스 생산량과 금속 축적 능력을 가지고 있다 [Li et al., 2019]. 식물은 필수 영양소인 칼륨(K)과 칼슘(Ca)을 흡수하는 경로를 통해 화학적으로 유사한 세슘(Cs)과 스트론튬(Sr)을 오인 흡수한다. 세슘(Cs)은 K^+ 수송체를 통해, Sr은 Ca^{2+} 채널을 통해 식물 체내로 유입된다 [Li et al., 2019]. 우라늄의 흡수 및 정화 효율은 토양 내 우라늄의 화학적 형태(Speciation), 토양 pH, 그리고 식물 종(해바라기, 갯 등)의 특성에 따라 결정적인 영향을 받는다. 식물정화기술은 경제적 타당성이 높고 환경 교란이 적은 친환경적인 공법이나, 타 정화 기술에 비해 긴 정화 시간이 소요되며 식물의 뿌리가 도달하는 범위 내의 오염원으로 정화 대상이 한정된다는 제약이 있다. 최근에는 동전기 정화 기술과의 연계를 통해 토양 내 오염 물질의 이동성을 증진시켜 식물 흡수 효율을 35~50% 이상 향상시키는 연구 결과도 보고되고 있다 [Li et al., 2019].

3.5.2. 미생물 정화 (Microbial Remediation)

특정 미생물을 이용하여 용존 우라늄(U(VI) , +6가)을 불용성 우라늄(U(IV) , +4가)으로 환원시켜 침전시키거나, 세포벽에 흡착시켜 이동성을 제한하는 기술이다. 황산염 환원 박테리아나 철 환원 박테리아가 주로 사용되며, 혐기 조건에서 전자 공여체(예: 아세트산, 에탄올)를 제공하여 미생물 활성을 촉진한다. 이 기술은 고농도 오염 제거보다는 잔류 오염의 확산 방지 및 지하수 보호에 적합하다. 다만 환경 조건(pH, 산화환원전위, 온도)이 변화할 경우 침전된 우라늄이 재용출될 가능성이 있으며, 장기적 안정성에 대한 불확실성이 존재한다 [You et al., 2021].

따라서 미생물 정화는 단독 기술보다는 장기 관리 전략의 일부로 활용되는 것이 현실적이다.

3.6. 현장 정화와 굴착 정화의 비교 및 통합적 적용

정화 기술의 적용 위치에 따른 구분은 비용, 일정, 방사선 안전 관리 측면에서 중요한 의미를 가진다. 현장 정화(In-situ)는 오염 토양을 굴착하지 않고 원위치에서 처리하는 방식으로, 동전기 정화, 식물 정화, 토양 세정(Soil Flushing) 등이 이에 해당한다. 이 방식은 작업자 피폭 위험이 상대적으로 낮고 굴착 비용이 들지 않으나, 정화 균질성 검증이 어렵고 처리 기간이 길어질 수 있다 [Aparicio et al., 2022].

반면 굴착 정화(Ex-situ)는 오염 토양을 파내어 별도의 시설에서 처리하는 방식으로, 토양 세척이 대표적이다. 이 방식은 오염 제거의 확실성이 높고 처리 속도가 빠르지만, 굴착 과정에서 비산 먼지로 인한 2차 오염 위험과 높은 이송·설비 비용이 수반된다. 임시 저장 시설 확보, 작업자 피폭 관리, 방사선 차폐 등 추가 안전 조치로 인해 전체 비용이 30~50% 증가할 수 있다 [Aparicio et al., 2022]. 따라서 실제 부지복원에서는 단일 기술보다는, 오염 특성·부지 조건·규제 목표를 고려한 단계적·복합적 기술 조합이 가장 현실적인 접근으로 평가된다. 최근에는 단계적 접근법(Phased Approach)이 제안되고 있다. 즉, 초기에는 굴착 정화로 고농도 오염원을 신속히 제거하고, 잔류 오염에 대해서는 현장 정화 기술을 장기 적용하는 하이브리드 전략이 비용-효과 측면에서 우수한 것으로 평가되고 있다.

4. 국내외 원자력시설 부지복원 사례

4.1. 해외 원자력시설 부지복원

4.1.1. 한포드(Hanford) 부지복원 (미국)

미국 워싱턴주에 위치한 Hanford Site는 1943년부터 1987년까지 플루토늄 생산 시설로 운영되었으며, 크롬(Cr)과 방사성 핵종(^{90}Sr , ^{99}Tc 등)이 콜럼비아 강으로 유출되는 것을 막는 것이 최우선 과제였다. 지하수 확산 차단을 위한 대규모 Pump-and-Treat 시스템이 장기적으로 운영되고 있으며, 최근에는 토양 내 잔류 크롬 제거를 위해 토양 세정(Soil Flushing) 기술이 병행 적용되고 있다 [Carroll et al., 2022]. 이 사례는 대규모 복합 오염 부지에서는 완전한 정화보다 위험 관리와 확산 차단 중심의 장기 전략이 현실적이며, 정화 기술보다 모니터링과 제로적 통제가 더 중요함을 알 수 있다.

4.1.2. 퍼널드(Fernald) 부지복원 (미국)

오하이오주 퍼널드(Fernald) 우라늄 가공 시설은 높은

점토 함량(40~60%)을 갖는 토양 특성으로 인해, 초기 검토 단계에서 토양 세척 기술의 적용이 경제적으로 불리한 것으로 평가되었다. 결국 고농도 오염토는 외부로 처분하고, 저농도 오염토는 부지 내에 설계된 처분 시설(OSDF, On-site Disposal Facility)에 매립하는 전략으로 전환하였다 [U.S. DOE, 2024; Ohio EPA, 2021]. 이 사례는 토양 물성에 대한 초기 특성 평가가 기술 선정과 비용 결정에 결정적인 영향을 미친다는 점을 알려주는 사례였다. 또한 모든 부지를 녹지와 같은 Greenfield로 복원하는 것이 항상 최적의 해법은 아니라는 점을 시사해주었다.

4.1.3. 셀라필드(Sellafield) 부지복원 (영국)

영국 셀라필드(Sellafield)는 재처리 시설과 노후 저장조에서 발생한 누설로 인해 심부 토양과 지하수가 복합적으로 오염된 고난도 현장이다. 이곳은 즉각적인 완전 정화, 녹지와 같은 Greenfield보다는 위험 기반 토지 관리(Risk-based Land Management) 전략을 채택하였다. 작업자의 피폭 위험이 높은 대규모 굴착 대신, 소닉 드릴링(Sonic Drilling)과 같은 선진 시추 기술을 이용해 오염을 정밀 모니터링하고 확산을 방지하는 데 주력하고 있다. 이는 2120년까지 장기적인 계획으로 부지를 관리하겠다는 전략을 수립하였다 [Cruickshank, 2012]. 이 사례는 심부 오염 및 고방사선 환경에서는 ‘제거’보다 ‘관리’가 합리적인 선택이 될 수 있음을 보여주는 대표적 사례이다.

4.2. 해외 원자력발전소 부지복원

4.2.1. 메인 양키 (Main Yankee) 원전 부지복원 (미국)

메인 양키 원전(900 MWe급 PWR)은 1997년 영구 정지 후 즉시 해체를 선택하여 2005년 해체 부지를 녹지와 같은 Green field 기준 (NRC 25 mrem/y 이하, 주 기준 10 mrem/y)으로 복원을 완료하였다. 주요 오염 토양은 굴착 처리되었으며, ^{90}Sr 과 ^{137}Cs 이 주 핵종으로 확인되었다. 사용후 핵연료를 임시 저장하는 Independent Spent Fuel Storage Installation (ISFSI)는 건식 저장을 위해 별도 운영 중이다 [Laraia, 2012]. 이는 미국 내 대형 원전 부지의 성공적인 복원 사례로 꼽힌다. 이 사례는 비교적 단순한 오염 특성과 명확한 규제 목표가 있을 경우, 즉시 해체와 완전 복원이 효과적으로 달성될 수 있음을 보여준다.

4.2.2. 코네티컷 양키 (Connecticut Yankee, Haddam Neck) 원전 부지복원 (미국)

코네티컷 양키 원전은 1967년 착공, 1968년 상업운전 시작한 590 MWe급 PWR로 1996년 12월 영구 정지 후 1998년 5월 해체를 착수하였다. 2007년 7월 해체 부지는

녹지와 같은 Green field 기준 (연간 25 mrem 이하)로 미국 원자력규제위원회 Nuclear Regulatory Commission (NRC) 라이선스 종료로 확인받았다. 총 해체 비용 8억 3,500만 달러 중 토양·지하수 복원에 7,500만 달러로 지하수 모니터링은 1,000만 달러가 포함 되었다. 또한 주 정부 기준 반영으로 18% 증가하여, 발생 폐기물 37,700 톤(콘크리트·토양 주요 폐기물)으로 ^{90}Sr 과 ^{137}Cs 오염이 발견되었고 굴착 방법으로 처리하였다 [Necci, 2021]. 이 사례는 해체 이전 부지 특성 평가의 불확실성이 전체 사업 비용과 일정에 중대한 영향을 미칠 수 있음을 시사한다. 특히 토양·지하수 복원 비용이 전체 해체 비용에서 상당한 비중을 차지할 수 있음을 보여준다.

4.2.3. 카브레라 (Cabrerria) 원전 부지복원 (스페인)

스페인 José Cabrera(카브레라) 원전 해체 부지에서 배관 및 시스템 누출로 인한 방사성 토양 오염이 확인되었으며, 토양 세척 시설을 통해 방사성 오염 분리(오염/비오염 분리), 입도분리(sieving), 물 세척(washing)을 적용해 폐기물 양을 줄였다고 보고하였다. 이 기술은 굴착된 토양을 현장에서 처리하며, ^{60}Co , ^{137}Cs 등 핵종 농도를 규제 기준 이하로 낮춰서 재사용하거나 또는 최종 처분을 하였다. 후쿠시마 Cs 오염토양 연구와 연계되어 국제적 폐기물 최소화 표준으로 주목받고 있다 [Revilla, 2023]. 이 사례는 굴착 토양을 현장에서 처리하는 방식이 폐기물 최소화 측면에서 유효한 대안이 될 수 있음을 보여준다.

4.2.4. 군드레밍겐 (Gundremmingen) 원전 부지복원 (독일)

독일은 원칙적으로 즉시 해체와 원전 부지의 완전한 규제 해제 및 재사용을 목표로 하는 정책을 채택하고 있다. 군드레밍겐(Gundremmingen) 원전의 해체에서는 고압 워터젯을 포함한 정밀 제염 기술을 이용하여 콘크리트와 금속 표면의 오염층을 제거했다. 다량의 자재를 규제 해제(clearance)하여 건설용 골재 등으로 재활용하는 데 중점을 두었다 [GRS, 2013]. 현재 군드레밍겐 부지는 독일 최대 규모의 배터리 저장 설비와 태양광·가스발전이 결합된 에너지 허브로 재활용되고 있어, 원전 부지의 순환 경제 모델로 주목받고 있다. 이 사례는 ‘부지복원-자원재활용-에너지 전환’을 연계한 순환 경제형 원전 해체 모델의 대표적 성공 사례로 평가된다.

4.3. 국내 사례

국내의 경우, 한국원자력연구원(KAERI)을 중심으로 연구용 원자력 시설의 해체 및 부지 복원이 성공적으로 수행되었다. 우라늄변환시설(UCF)은 해체 후 부지 규제 해제를 통해 공학 규모의 파이로프로세싱 일관공정 시험시

설인 PRIDE(PyRoprocess Integrated inactive DEmonstration facility) 부지로 재이용되고 있다. 특히 UCF 해체 과정에서 발생한 오염 토양은 폐기물 부피 저감을 위해 세척 및 제염 처리가 수행되었으며, 관련 기술은 국내 해체 부지 복원의 핵심 원천 기술로 활용되고 있다. 서울연구용 원자로(KRR-1 & 2) 부지는 시설 해체 완료 후 MARSSIM 가이드라인에 따른 잔류 방사능 평가를 거쳐 최종현황보고서(FSSR)를 제출하였으며, 규제기관의 승인을 받아 부지 개방을 완료하였다. 발생한 오염 토양은 방사능 농도에 따라 정밀 측정 및 분리 과정을 거쳐 자체 처분 또는 경주 방폐장 이송 처분을 완료하였다 [Chung et al., 2010].

상용 원전의 경우, 최근 고리 1호기는 2024년 6월 원자력안전위원회로부터 국내 최초로 최종해체계획서(Final Decommissioning Plan, FDP)를 승인받아 본격적인 해체 단계에 진입하였다. 현재 한국수력원자력(KHNP)은 고리 1호기 부지의 재이용을 위해 부지 고유의 배경 방사능을 평가하고, 다중 시나리오를 반영한 잔류방사능 유도농도 지침치(DCGL)를 설정하는 연구를 수행 중이다 [Seo, 2019]. 2019년 영구 정지된 월성 1호기는 중수로 노형의 특성상 지하수 및 구조물 내 삼중수소(^3H)와 탄소-14(^{14}C) 오염에 특화된 특성 평가 전략을 수립하고 있으며, 이를 반영한 해체 계획이 검토되고 있다 [Sohn & Lee, 2013].

5. 최신 기술 동향

5.1. 디지털 트윈 및 AI 기반 기술

최근에는 이전 오염 데이터와 실시간 센싱 데이터를 통합한 3차원 디지털 트윈 기반 부지 모델링 기술이 도입되고 있다. 인공지능 알고리즘(예: Kriging, Bayesian Inference)은 제한된 샘플 데이터를 바탕으로 지하 오염 분포를 확률적으로 예측하고, 최적의 굴착 시나리오를 제시하여 정화 물량을 최소화한다 [Shaheen et al., 2022]. 다만 예측 정확도는 입력 데이터의 양과 질, 지질학적 불균질성에 크게 의존하며, 초기 특성 조사 단계에서 데이터가 부족한 경우 오차가 확대될 수 있다. 또한 디지털 트윈 구축에는 상당한 초기 비용이 요구되어, 소규모 부지에는 비용 효율성이 제한적일 수 있다. 그럼에도 불구하고, 대규모 부지나 복합 오염 현장에서는 폐기물 발생량과 전체 복원 비용을 절감할 수 있는 잠재력이 크므로, 향후 원전 해체 프로젝트에 적용 가능한 핵심 지원 기술로 평가된다.

5.2. 이동형 정화 시스템 (Modular System)

최근에는 대규모 고정식 처리 시설 대신, 컨테이너 기반의 이동형·모듈형 정화 시스템이 주목받고 있다. 이리

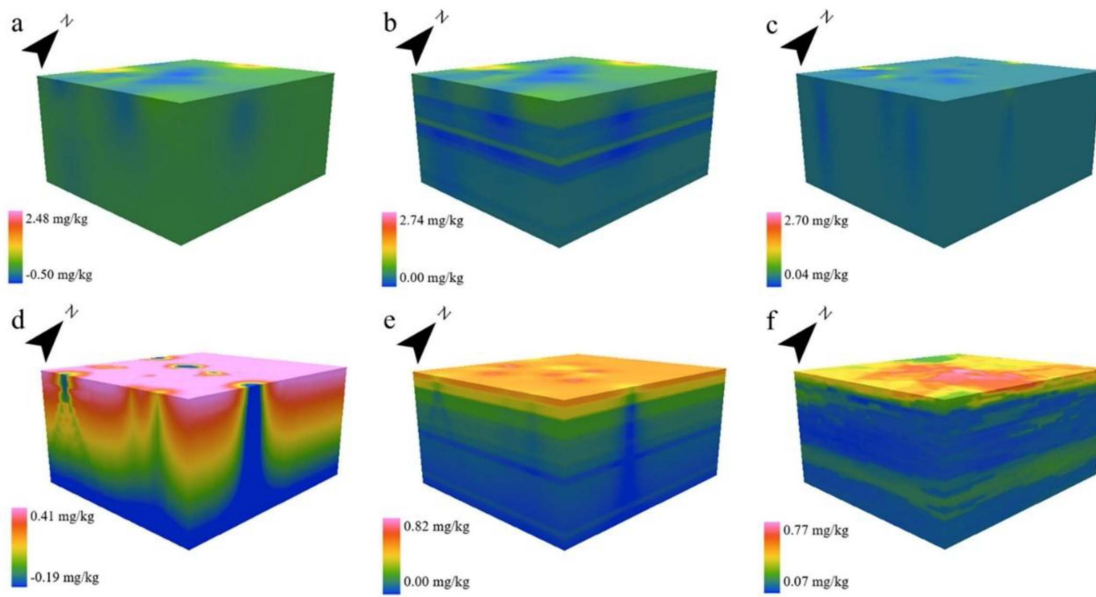


Fig. 3. Three-dimensional distribution data of soil pyrene (BaP) and anthracene (DBA) [Shaheen et al., 2022].

한 시스템은 현장으로 이동하여 정화를 수행한 후 제염을 거쳐 다음 부지로 이동할 수 있어, 다수의 원전 부지를 순차적으로 해체해야 하는 국가에 특히 유리하다. IAEA는 모듈형 시스템이 고정식 설비 대비 초기 투자 비용을 절감할 수 있다고 평가하고 있으며 [IAEA, 2014], 국내 고리·월성 등 다수 부지 해체 일정에도 적합한 대안으로 검토될 수 있다. 다만 이동성을 위한 소형화로 인

해 처리 용량이 제한적이며, 복합 오염이나 고농도 오염 부지에 대한 적용성은 추가적인 실증 연구가 필요하다.

5.3. 드론 및 로봇 기반 조사 기술

작업자의 직접적인 방사선 노출을 최소화하기 위해, 방사선 센서를 탑재한 드론(UAV)과 자율주행 로봇을 활용한 원격 조사 기술이 빠르게 발전하고 있다. 이들 기술

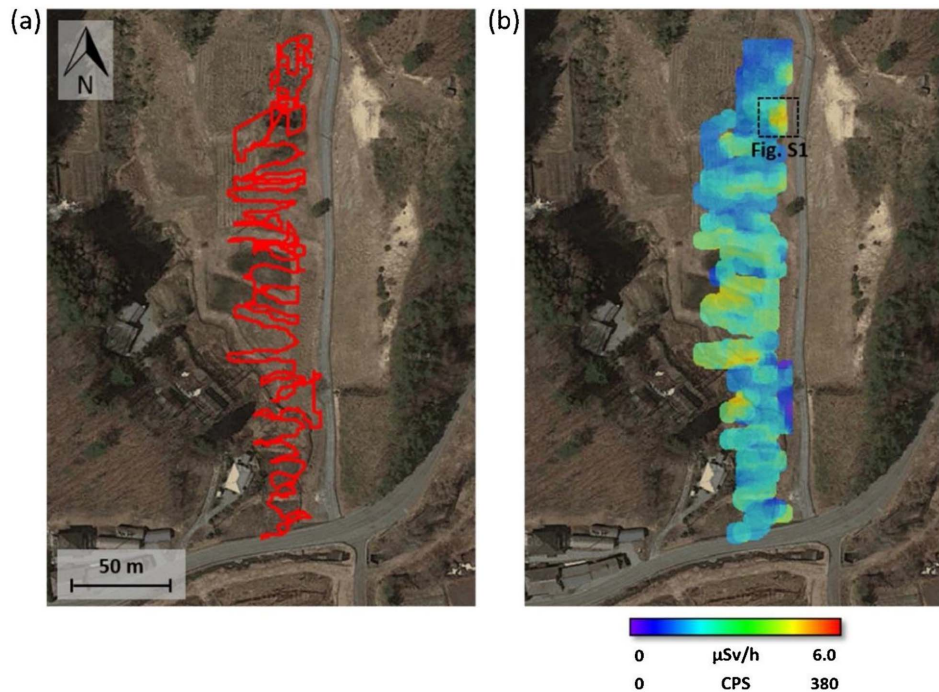


Fig. 4. (a) UAV flight path during field survey and (b) radiation distribution map including detection values normalized to 1 m height above ground surface [Sanford et al., 2016].

은 넓은 부지를 단시간 내 스캔하여 고농도 오염 구역을 식별할 수 있으며, 작업자의 피폭을 원천적으로 차단할 수 있다는 장점이 있다 [Sanford et al., 2016]. 최근 연구에 따르면 드론 기반 방사선 조사는 기존 방식 대비 조사 시간을 약 70% 단축하고, 작업자 피폭을 90% 이상 저감할 수 있는 것으로 보고되었다 [US NRC, 2022]. 그러나 배터리 수명, 센서 무게에 따른 비행 시간 제한, 악천후 시 운용 제약 등 기술적 한계도 존재하여, 정밀 조사를 위한 보조 수단으로의 활용이 현실적이다.

5.4. 폐액 처리 최적화

토양 세척 및 화학적 침출 공정 후 발생하는 2차 폐액 처리는 전체 정화 비용에서 큰 비중을 차지한다. 이를 해결하기 위해 페로시안화물, 특수 제올라이트 등 방사성 핵종 선택성이 높은 흡착제를 활용한 무방류(Zero Liquid Discharge) 시스템이 개발되고 있다. 프리시안 블루 계열 흡착제는 Cs에 대해 10^4 – 10^5 수준의 높은 분배계수를 보이며, 세척수의 반복 재사용을 가능하게 한다 [Yang et al., 2020]. 최근에는 흡착 용량 한계를 극복하기 위해 자성 나노입자 결합형 흡착제가 개발되고 있으며, 회수·재사용성 향상을 통해 폐기물 발생량을 최소화하려는 연구가 활발히 진행 중이다 [Kim et al., 2023].

6. 결론 및 향후 전망

본 연구는 국내외 원자력시설 부지복원 사례와 방사성 오염 토양 정화 기술의 연구 동향을 종합적으로 분석하였다. 해외 사례 분석 결과, 과거에는 방사성 토양 폐기물의 처분 여건이 상대적으로 양호하여 폐기물 부피 저감에 대한 기술 개발이 제한적이었으나, 최근에는 처분 비용과 운송 비용 증가로 인해 정화 기술의 경제성 평가와 폐기물 최소화 전략이 핵심 이슈로 부상하고 있다. 후쿠시마 원자력발전소 사고 이후 방사성 오염 토양 처리 기술에 대한 연구가 세계적으로 확대되었으나, 단일 기술로 모든 오염 문제를 해결할 수 있는 범용적 해법은 아직 존재하지 않는다. 이에 따라 부지 특성에 기반한 맞춤형 기술 조합과 단계적 정화 전략이 가장 현실적인 접근으로 인식되고 있다. 향후 고리 1호기와 월성 1호기를 시작으로 국내에서도 상용 원전 해체가 본격화될 예정인 만큼, 안전성과 경제성을 동시에 확보할 수 있는 오염 토양 정화 기술의 선제적 확보가 필수적이다. 특히 부지 복원은 해체 이후에만 고려할 문제가 아니라, 운영 중 부지 안전성 확보와도 연계될 수 있는 장기적 관리 전략으로 접근할 필요가 있다. 향후 원전 해체 산업의 패러다

임은 단순한 ‘폐기’ 중심에서 ‘자원 순환 및 부지 재창출’ 중심으로 전환될 것으로 전망된다. 오염 토양으로부터 우라늄이나 코발트 등 유용 자원을 회수하는 기술, 복원된 부지를 재생에너지 단지, 수소 생산 기지, 소형모듈원자로(Small Modular Reactor, SMR) 부지로 전환하는 에너지 전환 모델이 점차 확산될 가능성이 크다.

향후 국내 원전 해체에서 시급하게 필요한 연구 분야는 다음과 같다. 국내 부지 특성 맞춤형 기술 개발: 해안 사질토의 높은 염분 환경에서 효율적인 세척 제거 기술, 지하수위가 높은 조건에서의 동전기 정화 최적화 기술 등 국내 원전 부지의 지질학적·수문학적 특성을 반영한 맞춤형 정화 기술 개발이 필요하다. 중수로 특화 정화 기술: 월성 원전 등 중수로형 원전의 삼중수소(^3H) 오염 토양 및 지하수 정화를 위한 증발-응축 분리 기술, 탄소-14(^{14}C)의 선택적 추출 및 안정화 기술 등 특수 핵종에 대한 정화 기술 개발이 시급하다. 복합 오염 통합 처리 기술: 방사성 핵종과 중금속, 유기 오염물(TPH, PCBs)이 공존하는 복합 오염 토양에 대한 동시 제거 또는 순차 처리가 가능한 하이브리드 정화 공정 개발이 필요하다. 폐기물 최소화 기술: 자성 나노입자 기반 선택적 분리 기술, AI 기반 오염 분포 예측을 통한 최적 굴착 시나리오 개발, 디지털 트윈 기술을 활용한 정화 전략 최적화 등을 통해 방사성 폐기물 발생량을 최소화하는 기술 개발이 요구된다. 정량적 의사결정 지원 도구: 부지별 토양 특성, 오염 핵종, 규제 목표, 비용, 작업자 피폭선량, 사회적 수용성을 종합적으로 고려하여 최적 정화 기술을 선정할 수 있는 다기준 의사결정 지원 시스템 개발이 필요하다. 장기 모니터링 및 검증 기술: 정화 후 토양의 생태적 기능 회복 평가(양이온교환용량, 미생물 다양성, 식물 생장 지표), 잔류 방사능의 장기 거동 예측 모델 개발, 기후변화에 따른 적응적 관리 전략 수립이 요구된다.

본 연구는 문헌 기반 분석이라는 한계를 가지며, 실제 부지 적용 시 비용과 효율은 부지별로 크게 달라질 수 있다. 또한 일부 최신 기술은 장기적 안정성과 실증 데이터가 부족하다. 향후 연구에서는 실제 국내 원전 해체 프로젝트 데이터를 기반으로 한 비용-효과 분석, 복합 오염에 대한 통합 정화 기술 개발, 그리고 정화 이후 토양의 생태적 기능 회복 평가 기법에 대한 연구가 필요하다.

사 사

본 연구는 한국연구재단(National Research Foundation of Korea, NRF)의 연구비 지원[RS-2023-00243600, 2710091254]을 받아 수행되었습니다.

Reference

- Agnew, K., Cundy, A.B., Hopkinson, L., Croudace, I.W., Warwick, P.E., and Purdie, P. (2011). Electrokinetic remediation of plutonium-contaminated nuclear site wastes: results from a pilot-scale on-site trial. *J Hazard Mater*, 186, 1405-1414. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.12.016>
- Alwaeli, M., and Mannheim, V. (2022). Investigation into the current state of nuclear energy and nuclear waste management—a state-of-the-art review. *Energies*, 15, 22, <https://doi.org/10.3390/en15124275>
- Aparicio, J.D., Rodríguez, M.M., Benavides, M.A., Martínez, S.G., and Moreton, J. (2022). The current approach to soil remediation: A review of physicochemical and biological technologies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(2), 107141. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107141>
- Bai, Y., Zhang, Z., Jiang, G., Niu, S., Peng, Z., and Liu, L. (2025). Electrokinetic remediation technology for uranium contaminated soil: From fundamental principles to application challenges and breakthroughs. *Frontiers in Chemical Engineering*, 7, Article 1687808. <https://doi.org/10.3389/fceng.2025.1687808>
- Bärenbold, R., and Walter, F. (2024). Decommissioning of commercial nuclear power plants: Insights from a multiple-case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 201, 114621. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114621>
- Benitez, F.J., and Redwine, J. (1999). Particle size separation via soil washing to obtain volume reduction. *Journal of Hazardous Materials*, 66(1-2), 89-98. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(98\)00210-6](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(98)00210-6)
- Bunzl, K., Schimmack, W., Krouglov, S.V., and Alexakhin, R.M. (1997). ¹³⁷Cs mobility in soils and its long-term effect on the external radiation exposure. *Journal of Environmental Radioactivity*, 34(2), 141-157. <https://doi.org/10.1007/s004110050052>
- Carroll, K.C., Truex, M.J., Mackley, R.D., Murray, C.J., and Last, G.V. (2022). Soil flushing enhances in situ remediation of hexavalent chromium in the vadose zone at the Hanford Site, USA. *Groundwater Monitoring & Remediation*, 43(2), 34-5062-73. <https://doi.org/10.1111/gwmr.12570>
- Chung, W.S., Kim, J.K., Lee, B.J., and Lee, C.W. (2010). Final status of the decommissioning of research reactors in Korea. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 47(Suppl. 1), 75-84. <https://doi.org/10.1080/18811248.2010.9720990>
- Clark, D.L., Janecky, D.R., Lane, L.J. (2006). Science-based cleanup of Rocky Flats. *Phys Today* 59, 34-40. DOI: 10.1063/1.2364243
- Cruikshank, J. (2012). Findings of the Investigation of the Sellafield Contaminated Land and Groundwater Management Project and the Next Steps for the Land Quality Programme. Paper presented at the Workshop on Radiological Characterisation for Decommissioning, Studsvik, Sweden, 18 April 2012. OECD-NEA.
- Dermont, G., Bergeron, M., Mercier, G., and Richer-Laffèche, M. (2008). Soil washing for metal removal: A review of physical/chemical technologies and field applications. *Journal of Hazardous Materials*, 152(1), 1-31. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.10.043>
- Fang, C., and Achal, V. (2019). The potential of microbial fuel cells for remediation of heavy metals from soil and water—review of application. *Microorganisms* 7:697.
- Gidudu, B., and Chirwa, E.M.N. (2022). The role of pH, electrodes, surfactants, and electrolytes in the effective remediation of soil and groundwater using electrokinetics. *Molecules*, 27(21), 7381. <https://doi.org/10.3390/molecules27217381>
- GRS. (2013). Decommissioning of Nuclear Facilities. GRS-S-58, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Cologne, Germany.
- Han, J., Li, Y., Zhang, Y., Wang, X., and Liu, Y. (2024). Study on the remediation of uranium-contaminated soils by compound leaching: Screening of leaching agents and a pilot-scale application. *Journal of Cleaner Production*, 449, 141918. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141918>
- Hemming, S.D., Purkis, J.M., Warwick, P.E., and Cundy, A.B. (2023). Current and emerging technologies for the remediation of difficult-to-measure radionuclides in nuclear site groundwaters. *Environmental Science: Advances*, 2(12), 1594-1613. <https://doi.org/10.1039/D3EM00190C>
- Hong, S.B., Lee, K.W., Park, J.H., and Chung, U.S. (2011). Application of MARSSIM for final status survey of the decommissioning project. *Journal of the Korean Radioactive Waste Society*, 9(2), 107-111.
- Hussain, F., Mustafa, G., Zia, R., Faiq, A., Matloob, M., Shah, H., Ali, W.R., and Irfan, J. (2018). Constructed wetlands and their role in remediation of industrial effluents via plant-microbeinteraction—a mini review. *J Bioremediat Biodegrad* 9:1-8.
- International Atomic Energy Agency. (2014). Decommissioning of Facilities, General Safety Requirements Part 6 No. GSR Part 6. IAEA, <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1652web-83896570.pdf>
- International Atomic Energy Agency. (2014). Mobile processing systems for radioactive liquid waste (IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-3.19) https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1621_web.pdf
- International Atomic Energy Agency. (2022). Costing methods and funding schemes for radioactive waste disposal (IAEA Nuclear Energy Series No. PUB1900). IAEA. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1900_Web.pdf
- International Atomic Energy Agency. (2025). Nuclear decommissioning: Addressing the past and ensuring the future (IAEA Nuclear Energy Series No. PUB2113). IAEA. https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/PUB2113_web.pdf
- International Atomic Energy Agency. (n.d.). Meeting the challenges of decommissioning. IAEA Bulletin. Retrieved January 17, 2026, from <http://www.iaea.org/bulletin/meeting-the-challenges-of-decommissioning>
- Kersting, A.B. (2013). Plutonium transport in the environment. *Inorg Chem* 52:3533-3546.
- Kim, H.-N., Kim, J.-H., Lee, K.J., Kim, I., and Yoon, I.-H. (2023). Enhanced removal of cesium from hydrobiotite using polyacrylonitrile (PAN)-based nickel ferrocyanide beads. *Journal of Hazardous Materials*, 452, Article 131264. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131264>

- Kim, J.H., Anwer, H., Kim, Y.S., and Park, J.-W. (2021). Decontamination of radioactive cesium-contaminated soil/concrete with washing and washing supernatant - Critical review. *Chemosphere*, 280, 130419. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130419>
- Kim, J.-H., Kim, S.-M., Yoon, I.-H., and Kim, I. (2020). Application of polyethylenimine-coated magnetic nanocomposites for the selective separation of Cs-enriched clay particles from radioactive soil. *RSC Advances*, 10(35), 20732-20740. <https://doi.org/10.1039/D0RA03426F>
- Kim, J.-H., Kim, S.-M., Yoon, I.-H., Yang, H.-M., and Kim, I. (2021). Novel two-step process for remediation of Cs-contaminated soil assisted by magnetic composites. *Chemical Engineering Journal*, 424, 130554. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130554>
- Kumbhar, P., Savla, N., Banerjee, S., Mathuriya, A.S., Sarkar, A., Khilari, S., Jadhav, D.A., and Pandit, S. (2021). Microbial electrochemical heavy metal removal: fundamental to the recent development, wastewater treatment. *Elsevier*, pp:521-542.
- Li, J., Zhang, J., Larson, S.L., Ballard, J.H., Guo, K., Arslan, Z., Ma, Y., Waggoner, C.A., White, J.R., and Han, F.X. (2019). Electrokinetic-enhanced phytoremediation of uranium-contaminated soil using sunflower and Indian mustard. *International Journal of Phytoremediation*, 21(12), 1197-1204. <https://doi.org/10.1080/15226514.2019.1612847>
- Nakao, A., Thiry, Y., Funakawa, S., and Kosaki, T. (2008). Characterization of the frayed edge site of micaceous minerals in soil clays influenced by different pedogenetic conditions in Japan and northern Thailand. *Soil Sci Plant Nutr* 54:479-489. <https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2008.00262.x>
- Necci, A. (2021). The Last 5 Percent Seems to Take Forever... And Other DD&R Lessons Learned. *Nuclear News*, American Nuclear Society.
- OECD Nuclear Energy Agency. (2020). Costs of decommissioning nuclear power plants. OECD Publishing. <https://www.oecd-neo.org/upload/docs/application/pdf/2019-12/7201-costs-decom-npp.pdf>
- Ohio EPA. (2021). Fernald Site. <https://epa.ohio.gov/divisions-and-offices/environmental-response-revitalization/cleanup-and-investigation/doe-fernal-site>
- Revilla, J.L. (2023). Lessons Learned from the Decommissioning of José Cabrera NPP. In *International Conference on Decommissioning Challenges (Decom2023)*, IAEA.
- Sanford, B., Hassall, M., and Schmidt, T. (2016). 3D unmanned aerial vehicle radiation mapping for locating lost radioactive sources. *Journal of Environmental Radioactivity*, 164, 11-19. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.06.021>
- Sawhney, B. (1972). Selective sorption and fixation of cations by clay minerals: a review. *Clay Clay Miner* 20:93-100. <https://doi.org/10.1346/CCMN.1972.0200208>
- Seo, H.-W., and Sohn, W. (2019). Scenario options to calculation of Derived Concentration Guideline Levels for a multi-unit decommissioning site. *Annals of Nuclear Energy*, 133, 347-358. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2019.05.036>
- Shaheen, S., Jin, Y., Li, Z., Meriaux, C., and Liu, X. (2022). Three-dimensional empirical Bayesian kriging for soil PAHs interpolation considering the vertical soil lithology. *Catena*, 214, Article 106260. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106098>
- Sohn, W., and Lee, G.-B. (2013). Numerical simulation of tritium migration in groundwater at Wolsong Plant 1 site. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 50(11), 1099-1109. <https://doi.org/10.1080/00223131.2013.834801>
- U.S. DOE. (2024). Fernald Preserve, Ohio, Site Fact Sheet. <https://www.energy.gov/lm/articles/fernal-preserve-ohio-site-fact-sheet>
- U.S. EPA. (2007). Technology Reference Guide for Radioactively Contaminated Media. EPA 402-R-07-004, U.S. Environmental Protection Agency, <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-05/documents/media.pdf>
- U.S. EPA, DOE, DOD, and NRC. (2000). Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual (MARSSIM) (Revision 1, NUREG-1575). U.S. Environmental Protection Agency, https://www.epa.gov/sites/default/files/2017-09/documents/marssim_manual_rev1.pdf
- U.S. Nuclear Regulatory Commission. (1997). Decommissioning of U.S. facilities: Review of major regulatory programs (NUREG-1444). NRC.
- U.S. Nuclear Regulatory Commission. (2022). Drones for decommissioning: Proof-of-concept radiological survey. <https://www.nrc.gov/docs/ML2219/ML22196A040.pdf>
- Wellmann, J.P., Schulz, C.E., and Scharf, C. (2011). Recovery of uranium from mine waste by leaching with carbonate, bicarbonate and an ionic liquid. *Environmental Science & Technology*, 45(8), 3591-3597. <https://doi.org/10.1021/es2002056>
- Yang, H.-M., Park, C.W., Kim, I., and Yoon, I.-H. (2020). Hollow flower-like titanium ferrocyanide structure for the highly efficient removal of radioactive cesium from water. *Chemical Engineering Journal*, 392, Article 123713. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123713>
- Yin, X., Wang, L., Inoue, M., Takahashi, H., Minachi, Y., Enomoto, Y., Takahashi, K., and Koma, Y. (2017). Effects of NH₄⁺, K⁺, Mg²⁺, and Ca²⁺ on the cesium adsorption/desorption in binding sites of vermiculitized biotite. *Environmental Science & Technology*, 51(23), 13886-13894. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b04922>
- Yoon, I.-H., Park, C.W., Kim, I., Yang, H.-M., Kim, S.-M., and Kim, J.-H. (2021). Characteristic and remediation of radioactive soil in nuclear facility sites: A critical review. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(48), 67780-67795. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16782-2>
- You, W., Han, Z., Liu, Z., Han, X., and Li, X. (2021). Uranium bioremediation with U(VI)-reducing bacteria. *Science of the Total Environment*, 798, Article 149107. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149107>