

2018 추계 한국원자력학회
“원자력시설 해체기술 개발 현황과 전망 ”

미생물용출법을 활용한 원전해체 부지 토양 내 Co와 Cs의 용출

고명수, 김영광, 김 경 웅

목 차

- I. 연구과제 소개
- II. 원전 부지 내 방사성 원소의 거동 특성
- III. 생물용출법을 활용한 토양 내 Co와 Cs 용출
- VI. 결론 및 제언

연구과제 소개



원자력환경선진연구센터

Advanced Nuclear Environment Research Center (ANERC)

폐기물저감 연구팀 (제1세부)

- 금속제염 기술
- 방사성 폐액 내 핵종 제거 기술
- 방사성 폐기물관리

고화체 개발 연구팀 (제2세부)

- 폐기물 유리화
- 유리 세라믹
- 산화물 유리

처분안정성평가 연구팀 (제3세부)

- 방사성 폐기물 관리
- 핵종 지화학 거동 특성 평가
- 해체폐기물 처분안전성 평가

부지복원 환경영향평가 연구팀 (제4세부)

- 미생물용출법을 활용한 토양 내 중금속 용출
- 토양오염 생태영향평가 기술 개발

“미생물용출법을 활용한 토양 내 핵종 제거 및 복원토양의 환경평가 기술 개발”

원전해제 부지조사

- 대상 부지 현장조사
- 토양 특성을 반영한 복원 전략 수립



미생물용출법 개발

- 핵종원소 용출 조건 도출 및 최적화
- 토양 특성에 따른 핵종원소 용출 특성 평가



부지환경평가 기술 개발

- 핵종원소의 생태독성 평가
- 토양 특성에 따른 생물축적
- 생태영향평가 모델 개발



세부과제 별 연계 가능성 검토

- 화학적 제염과 연계한 미생물 용출법 적용성 평가

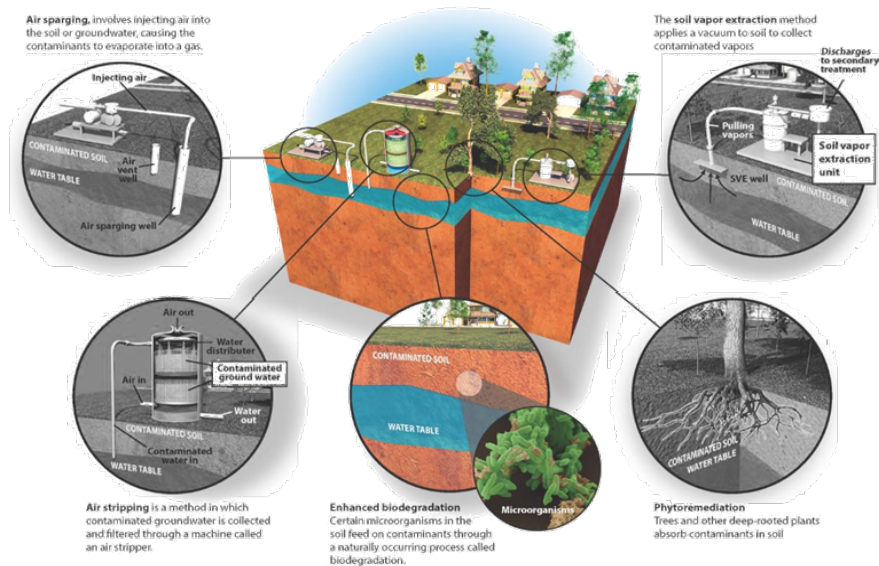


과제 소개

핵심연구 내용

1. 미생물학적 용출법을 활용한 토양 내 방사성 핵종 제거 기술을 개발하고 실제 원전해체 부지 토양 복원에 적용
2. 생태독성평가를 기반으로 원전해체 부지의 복원 검증과 부지환경평가 방법 제시
3. 화학적 제염과 연계한 미생물 용출법 적용을 통해 원전해체 부지 복원 효율 향상 연구

5 ways scientists can pull contaminants out of the ground



(Argonne National Lab.)

생물학적 부지 복원 (ex. 미생물학적 용출법)

- 대표적인 토양 복원 방법 중 하나
- 친환경적인 복원 방법
- 미생물용출법에 의한 U(VI) 제거 사례 보고
(Abhilash and Pandey, 2012)
- 핵종원소 최적 용출 조건 도출

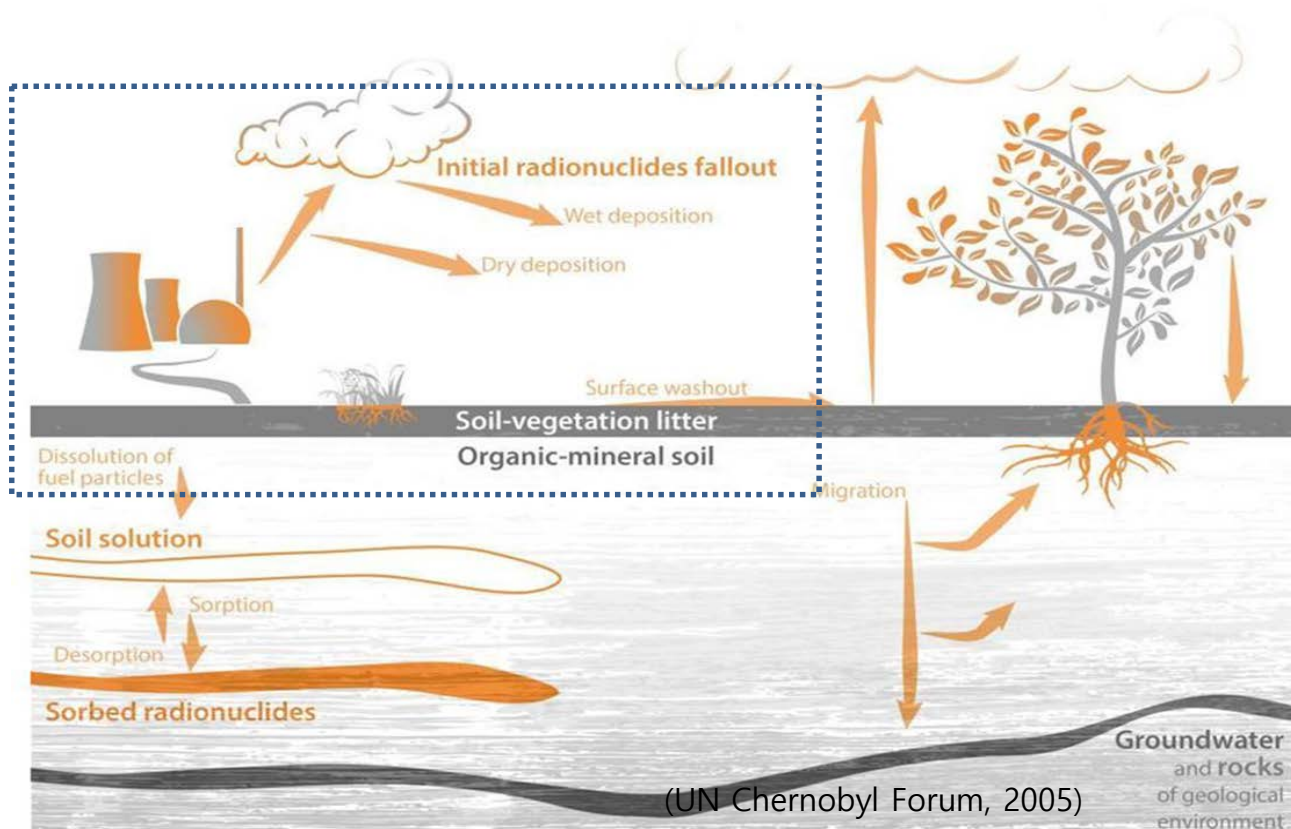
원전해체 부지 토양 환경평가

- 핵종의 생태영향 파악 (독성, 축적량)
- 생태영향 예측 모델을 활용하여 대상부지 복원 검증에 활용

원전 부지 내 방사성 원소의 거동



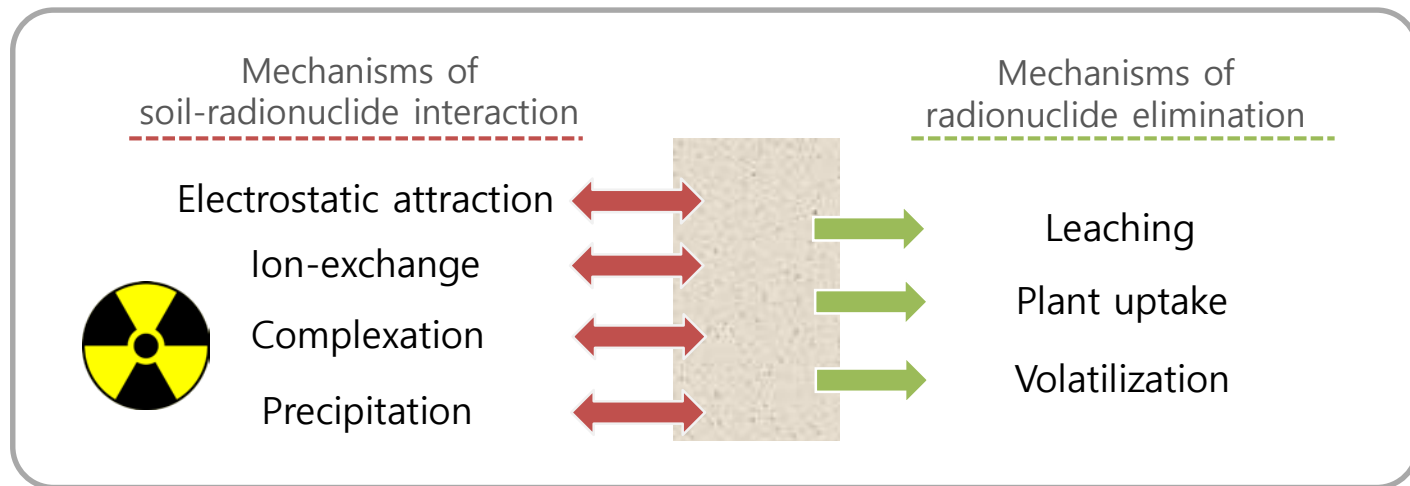
토양의 방사성 원소 확산



- 방사성 원료물질 저장고 및 발전과정에서 방사성원소의 확산
- 방사성 폐기물 저장시설에서 액체 및 고체폐기물의 누출























토양 내 방사성 원소의 거동

- 토양 내 방사성 원소의 거동은 다양한 반응을 따라 진행됨
- 방사성 원소의 존재 형태(i.e. ion, colloids, particles, oxidation state)에 따라 상이한 거동 특성
- 토양 구성물질 (광물, 수분, 유기물, 기체, 미생물)이 방사성 원소의 거동에 영향



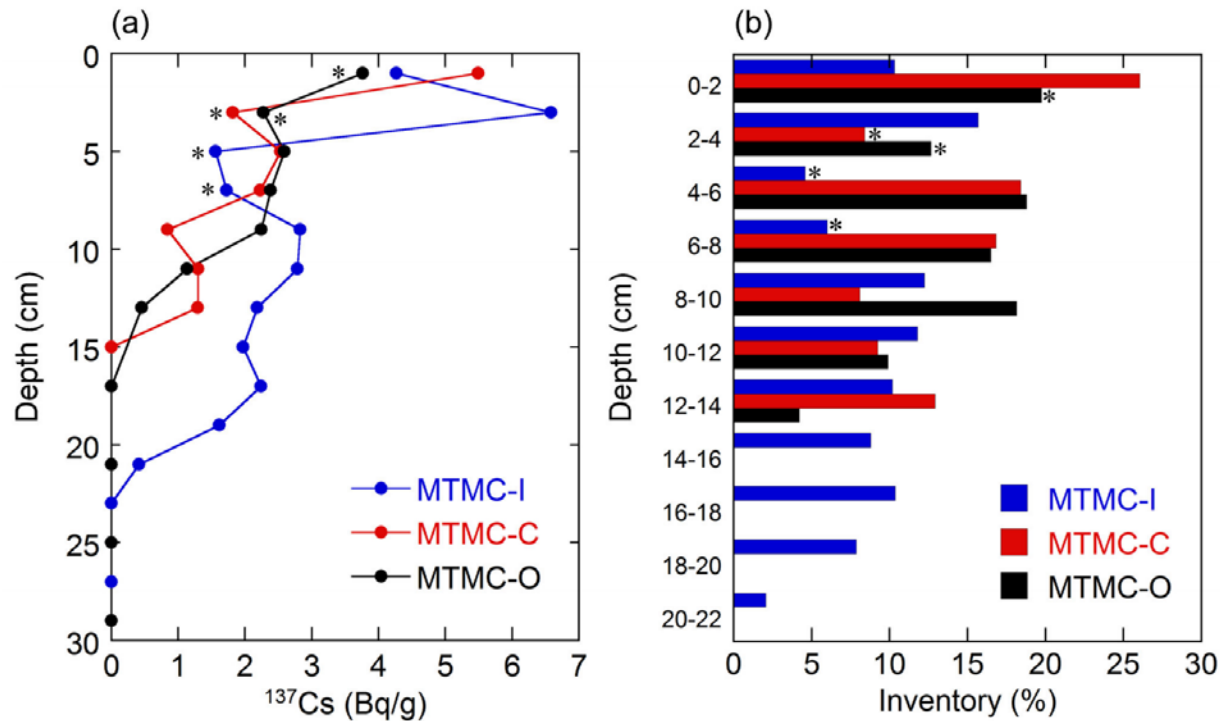
토양 내 방사성 원소의 거동

- 토양 이화학특성에 따른 방사성 핵종 이동도 변화

	Radionuclide			
	Cs, Cs ⁺	Sr, Ra, Sr ²⁺	U, Pu, PuO ₂ ²⁺	I, I ₂ , I ⁻ , IO ₃ ⁻
	Mobility			
pH decrease				
Clay content decrease				
Sand content decrease				
Humus content low	Not clear			
CEC decrease				
Aging		Weak effect		

토양 내 방사성 원소의 거동

- 후쿠시마 원전 인근 토양의 깊이에 따른 Cs 분포

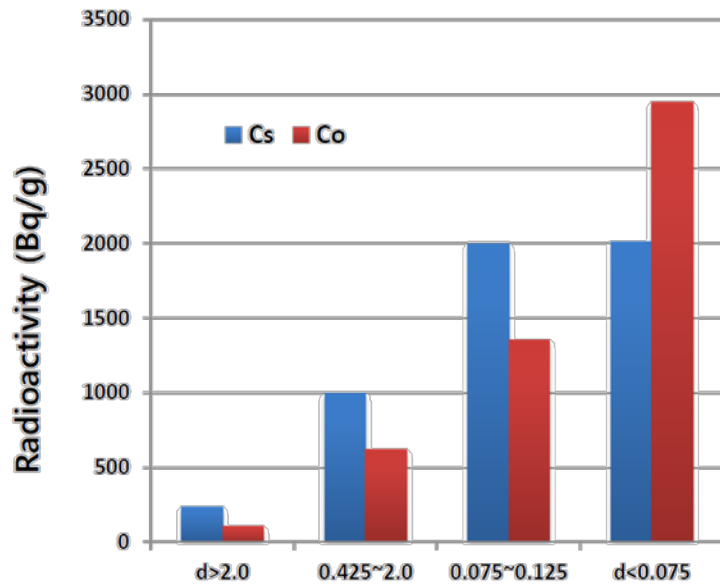


(Tanaka et al., 2013)

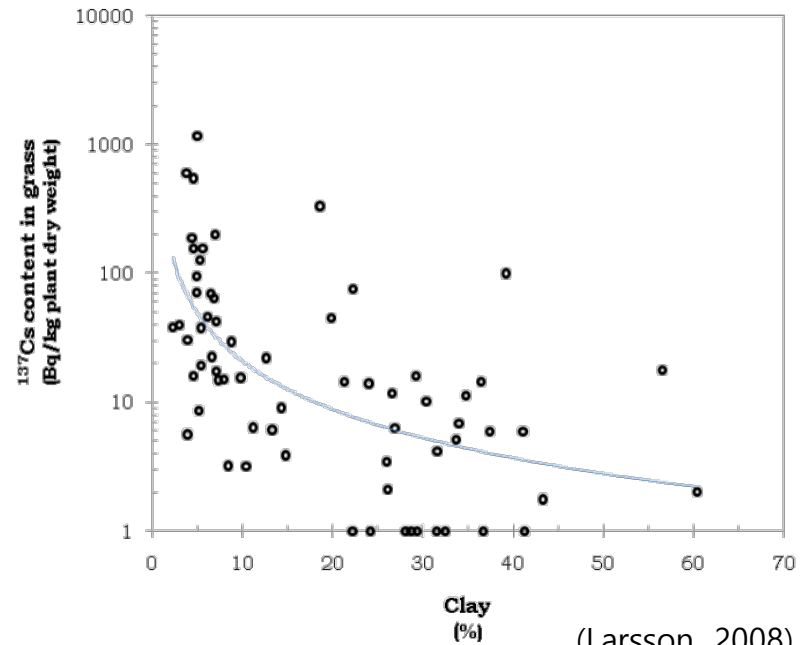
토양 내 방사성 원소의 거동

- 토양 입도에 따른 Co와 Cs의 농도분포

표면적이 넓고 음전하는 갖는 점토에서 높은 농도를 보임



(Yoon In-Ho, KAERI)



(Larsson, 2008)

방사성 오염토양의 복원

In-situ remediation

- **Containment**
 - Capping
 - Land encapsulation
 - Cryogenic barriers
- **Immobilization**
 - Cement solidification
 - Chemical stabilization
- **Treatment**
 - Soil flushing
 - Electrokinetic
 - Biological treatment

Ex-situ remediation

- **Separation**
 - Dry soil separation
 - Wet separation
- **Immobilization**
 - Ex-situ solidification
- **Treatment**
 - Soil washing
 - Electrokinetic

미생물 용출에 의한 Co, Cs 제거

Co-60과 Cs-137의 특성

^{60}Co

Half life of ^{60}Co : 5.27 yr

Co is inner construction material of plant

^{60}Co is dissolved in cleaning solution of cooling pipe

^{60}Co emit two γ -ray of 1.17 and 1.33 MeV

^{137}Cs

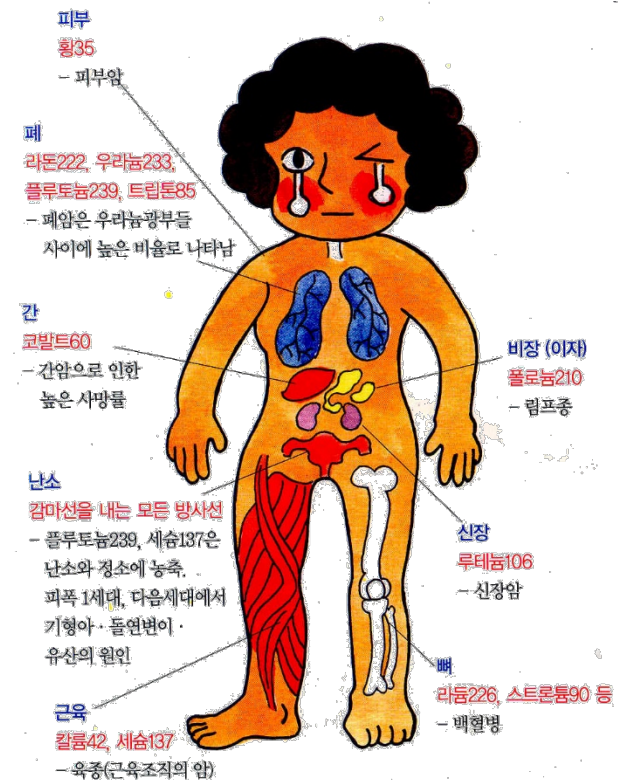
Half life of ^{137}Cs : 30.12 yr

Fission product (yield: 6.34 %)

^{137}Cs emit γ -ray of 661.66 keV

Similar to K, easily accumulated in biota

핵종원소 별 인체노출 증상



(환경운동연합, www.kfem.or.kr/?p=135610)

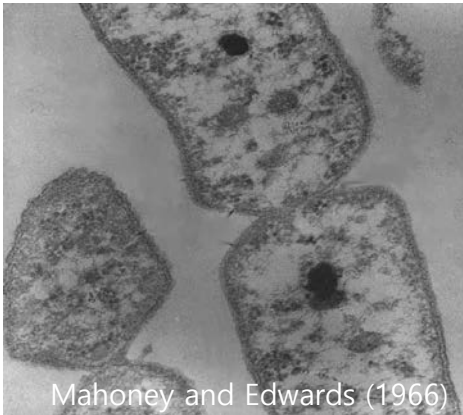
생용출을 활용한 Co와 Cs 제거



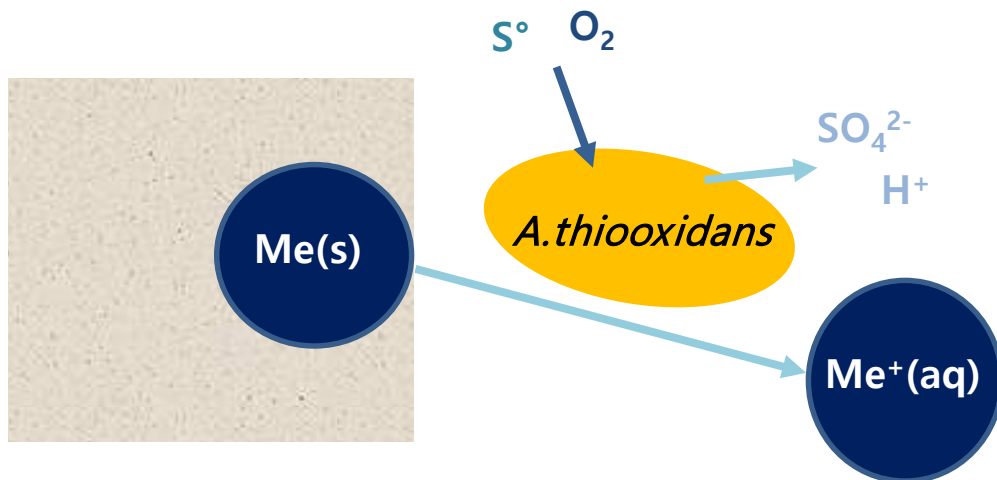
미생물 용출에 의한 Co, Cs 제거

■ 미생물 용출법

황산화균 (*Acidithiobacillus thiooxidans*)



- 철산화균 (*A.ferrooxidans*)와 더불어 미생물용출에 주로 사용
- 그람음성균, 막대형, 독립영양균
- 호산성 : pH 1.5~3 조건에서 성장함



- pH 감소, 산화환경 조성
- 황산화균 대사활동 결과

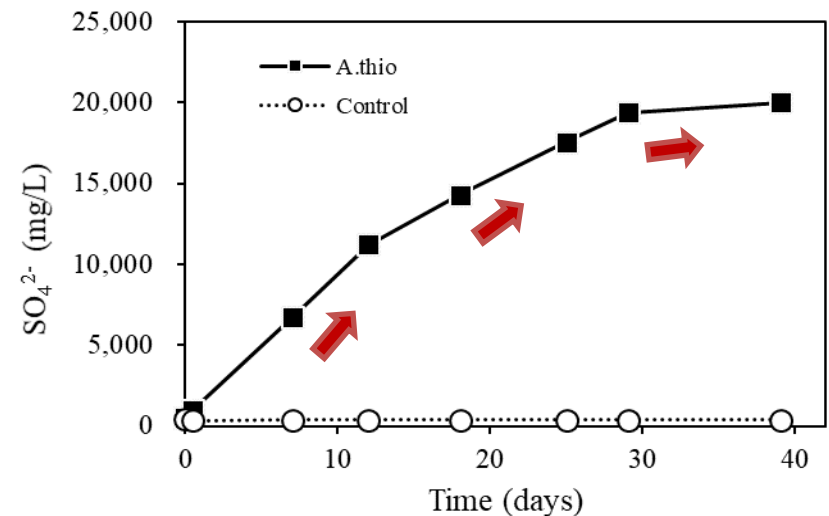
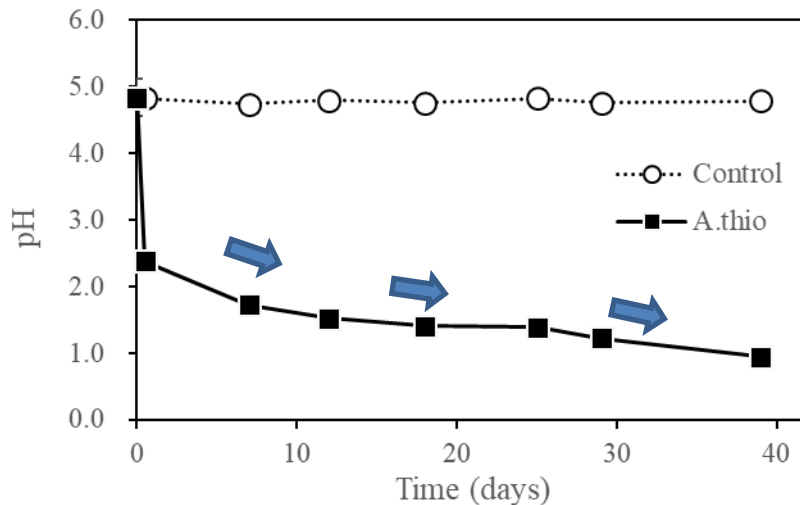
토양 내 Co와 Cs의 이동도 증가

미생물 용출에 의한 Co, Cs 제거

■ 황산화균 배양

	A.thio	Control
Medium125	100 mL	
S	1 g	
<i>A.Thiooxidans</i>	3 mL	-
Co	-	-
Cs	-	-

황산화균 배양 (3주 경과)

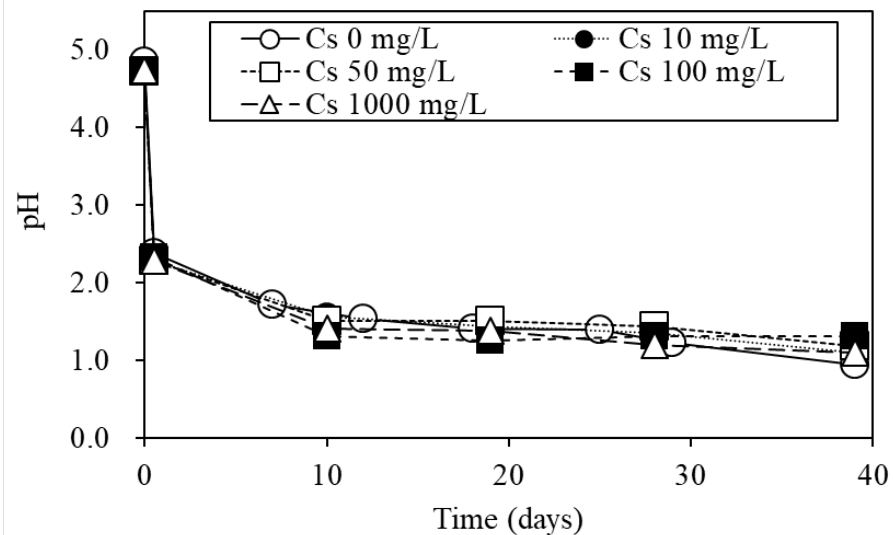
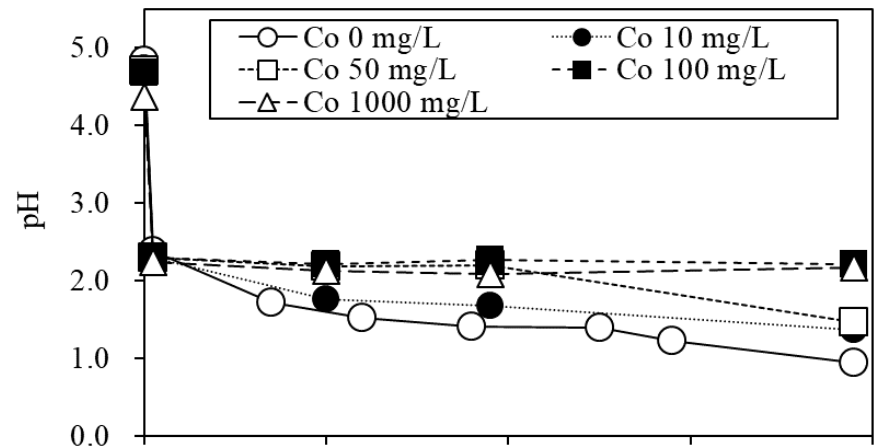


미생물 용출에 의한 Co, Cs 제거

■ 황산화균 배양 (Co, Cs 노출 조건)

	A.thio	Control
Medium125	100 mL	
S	1 g	
<i>A.Thiooxidans</i>	3 mL	-
Co	0~1000 mg/L	
Cs	0~1000 mg/L	

Co와 Cs 농도 별 황산화균 배양



미생물 용출에 의한 Co, Cs 제거

Co, Cs 오염 토양

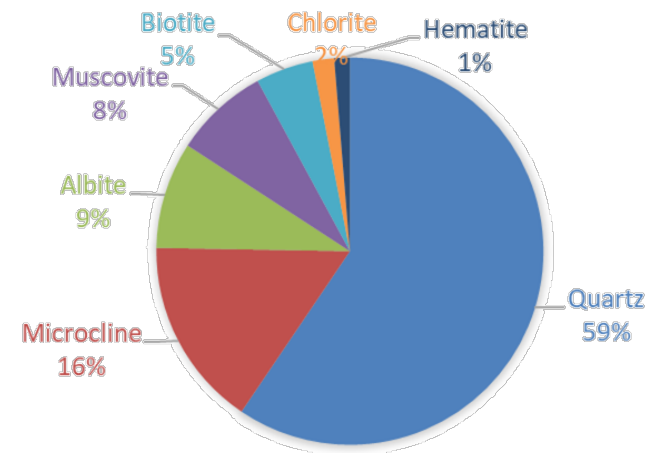
인위오염토양 조성



토양 화학 조성

SiO ₂	82.6
Al ₂ O ₃	8.9
Fe ₂ O ₃	1.6
CaO	0.9
MgO	0.3
K ₂ O	3.0
Na ₂ O	1.0
TiO ₂	0.2

토양 광물 조성



Co, Cs 농도

Elements	Co	Cs
Concentration in soil	240 mg/kg	220 mg/kg

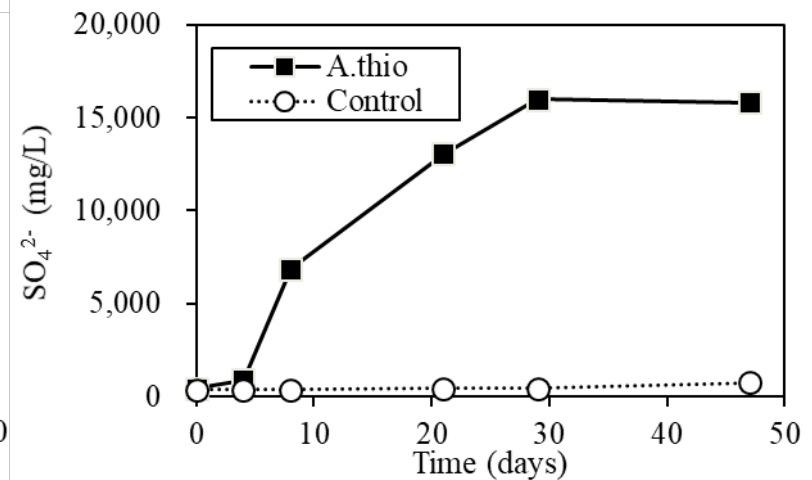
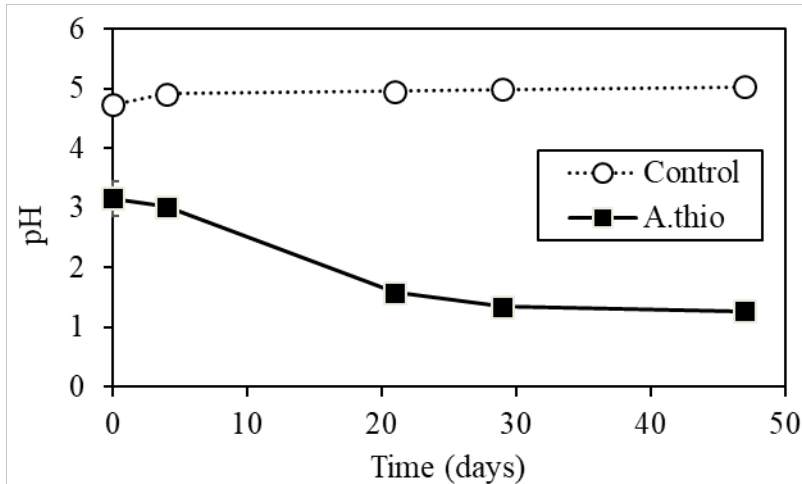
미생물 용출에 의한 Co, Cs 제거

Co 용출

용출액 pH와 SO_4^{2-} 농도 변화

	Medium 125	S	Co contaminated soil	Inoculum (v/v)
<i>A.thio</i>	200 mL	2 g	3 g	2%
Control	200 mL	2 g	3 g	0%

- Medium with Co contaminated soil

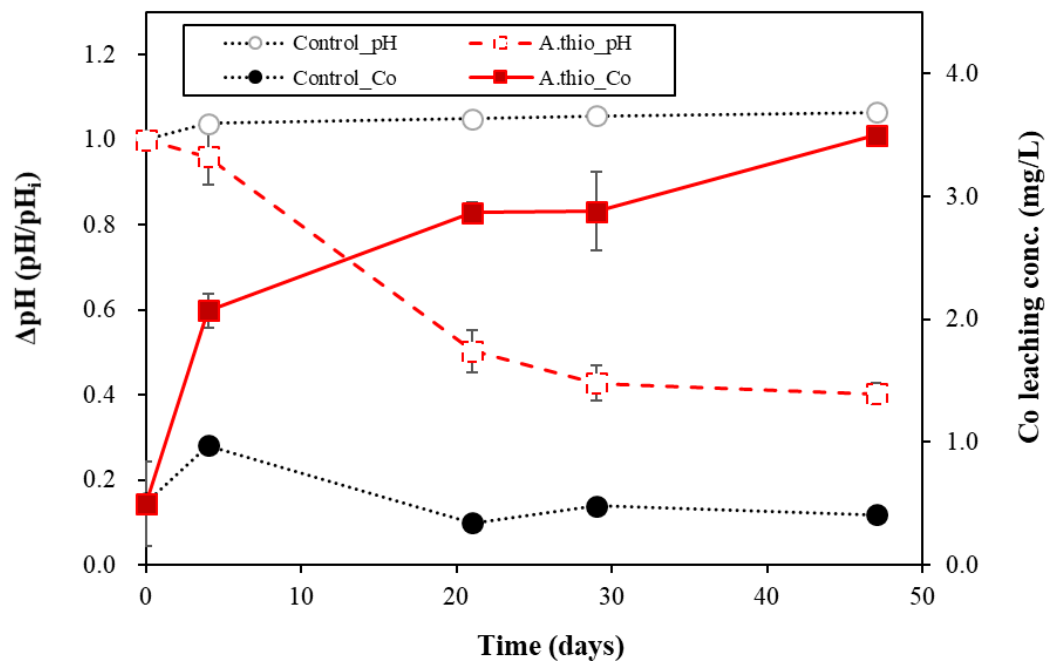


- 황산화균의 대사활동 과정에서 H_2SO_4 생성 $\text{S} + \text{H}_2\text{O} + 3/2\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4$
- pH와 황산염의 농도 변화 \longrightarrow 황산화균의 활발한 대사활동

미생물 용출에 의한 Co, Cs 제거

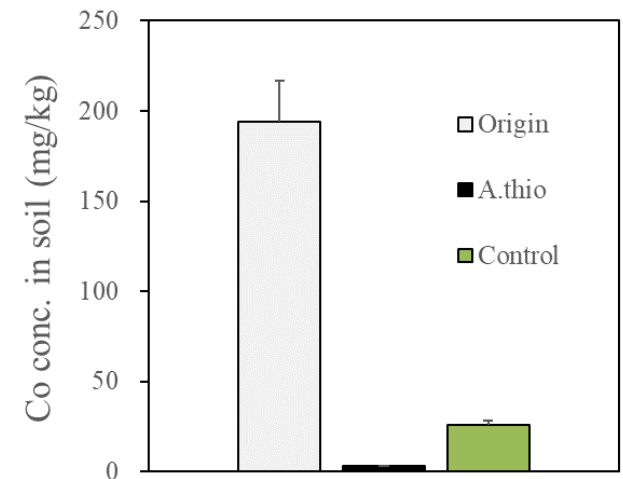
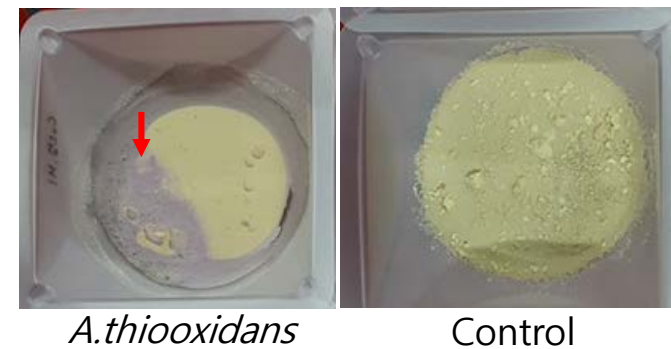
■ Co 용출

Co 용출 및 토양 내 농도 변화



- 용액 내 Co 농도 증가
- 토양으로부터 약 99% Co 제거

용출실험 후 건조한 황의 색 변화



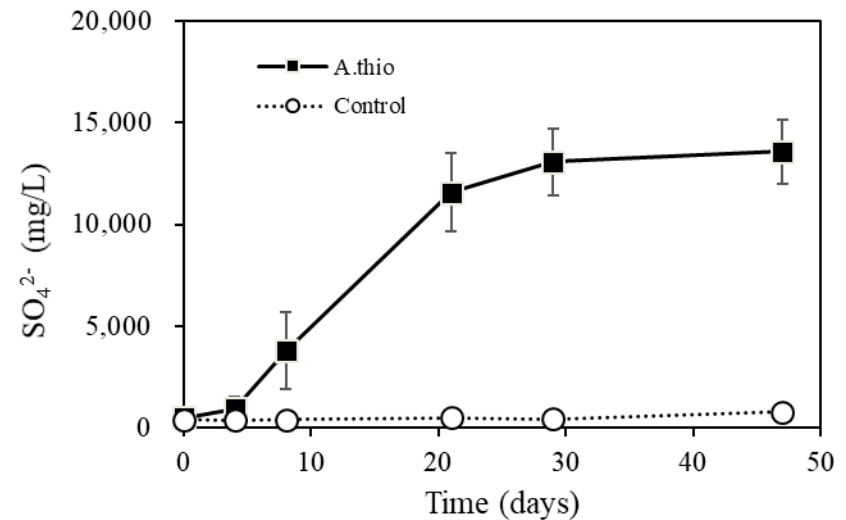
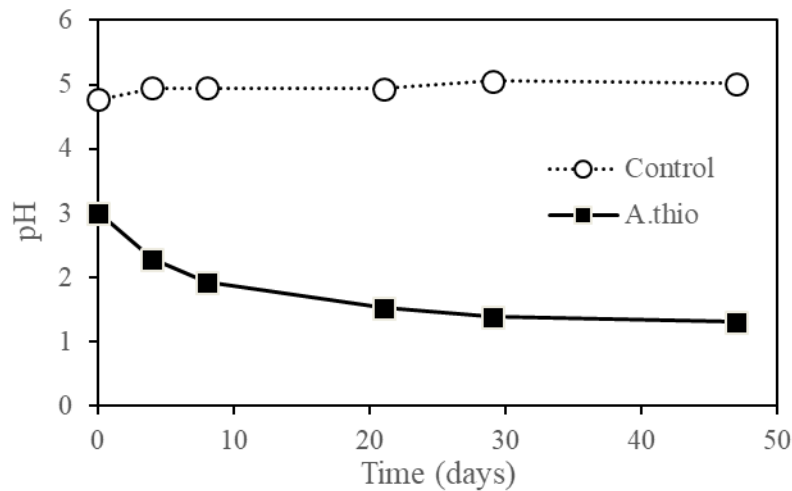
미생물 용출에 의한 Co, Cs 제거

■ Cs 용출

용출액 pH와 SO_4^{2-} 농도 변화

	Medium 125	S	Cs contaminated soil	Inoculum (v/v)
<i>A.thio</i>	200 mL	2 g	3 g	2%
Control	200 mL	2 g	3 g	0%

- Medium with Cs contaminated soil

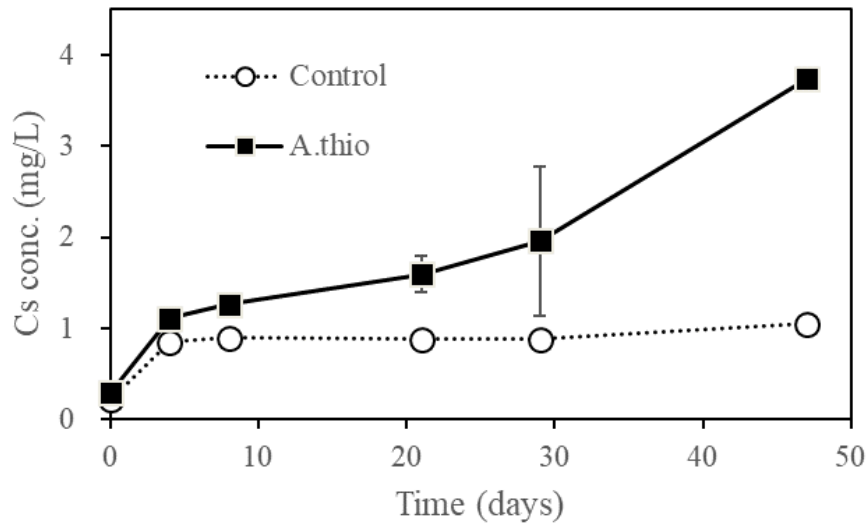


- 황산화균의 대사활동 과정에서 H_2SO_4 생성 $\text{S} + \text{H}_2\text{O} + 3/2\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4$
- pH와 황산염의 농도 변화 \longrightarrow 황산화균의 활발한 대사활동

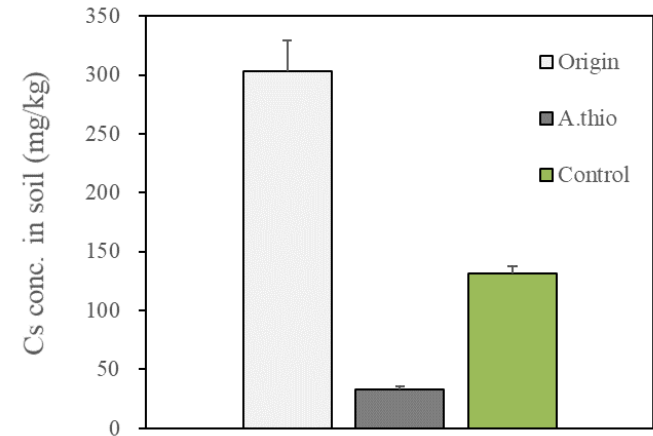
미생물 용출에 의한 Co, Cs 제거

■ Cs 용출

용액 내 Cs 농도 변화



잔류토양 내 Cs 농도



- 용액 내 Cs 농도 증가 → 미생물에 의한 Cs용출
- 토양으로부터 약 90% Cs 제거

결론 및 제언



결론 및 제언

- ▶ 토양환경에 노출된 Co와 핵종원소는 주로 표토층에 분포
- ▶ 용존된 Co와 Cs은 황산화균(*A. thiooxidans*)의 대사활동에 영향을 미치지 않음
- ▶ 그러나, 50 mg/L 이상의 Co에 노출된 경우 황산화균의 대사활동이 느려짐
- ▶ 미생물용출법을 통해 토양에 존재하는 Co와 Cs을 용출하여 제거할 수 있음
- ▶ 오랜 기간 토양에 노출되고 풍화를 받은 조건에서 생물용출제거 적용성 평가 필요
- ▶ 황산화균의 대사활동에 방사선이 미치는 영향연구 필요