공무국외출장 결과 보고서

아랍에미리트(UAE) 이산화탄소 현무암층 지중저장 실증관련 출장 결과 보고

2025. 10.

제주연구원 제주지하수연구센터

- 목 차 -

Ⅰ. 출장 개요 ····· 1

1. 배경 및 목적 ····· 1

2. 출장 기간 ····· 1

3. 대상 국가 및 방문지 ····· 1

4. 출장자 인적 사항 및 역할 ····· 1

5. 출장 주요 일정 ····· 2

Ⅱ. 출장 주요 내용 ····· 3

1. 칼리파대학 RICH센터(아부다비) 방문 ····· 3

2. 44.01 프로젝트 오피스(두바이) 방문 ····· 6

3. 44.01 프로젝트 실증 현장(푸자이라) 방문 ····· 9

Ⅲ. 시사점 ····· 11

Ⅳ. 첨부 자료 ····· 13

I 출장 개요

1. 배경 및 목적

- 기후변화 대응을 위한 탄소중립 정책의 핵심 기술로서 이산화탄소 포집·저장(Carbon Capture and Stroage, 이하 CCS) 기술의 중요성이 급속히 증대되고 있으며, 특히 현무암층을 활용한 CO_2 지중저장 기술은 안전성과 효율성 측면에서 주목받고 있음
- 제주도는 전 지역이 현무암층으로 구성되어 있어 CCS 기술 적용에 유리한 지질학적 조건을 보유하고 있으나, 실제 적용을 위한 구체적인 기술 검증과 상용화 사례 연구가 부족한 상황임
- 아랍에미리트(UAE) 푸자이라 지역의 44.01 프로젝트는 현무암을 활용한 CO_2 지중저장 기술의 세계 최초 상용화 사례로, 연간 1,000톤 규모의 CO_2를 현무암층에 영구 저장하는 혁신적인 기술을 실증하고 있음
- 특히 44.01 프로젝트는 칼리파대학 RICH 센터와의 협력을 통해 현무암-CO_2 반응 메커니즘을 과학적으로 규명하고, 실시간 모니터링 시스템을 구축하여 저장 안전성을 확보한 선진 사례임
- 이에 따라 44.01 프로젝트 실증현장을 직접 방문하여 현무암층 CCS 기술의 핵심 원리와 운영 체계를 파악하고, 제주도 현무암층의 지질학적 특성과 비교·분석함으로써 제주도 CCS 기술 적용 가능성을 평가하고,
- 현무암 CCS 기술이 지하수 환경에 미치는 영향과 상관관계를 조사하여 제주도 지하수 보전과 탄소중립 정책의 조화로운 추진 방안을 모색하고, 향후 제주도 CCS 기술 도입을 위한 정책적 시사점을 도출하고자 함

2. 출장 기간

- 2025년 10월 19일(일) ~ 10월 25일(토) (5박 7일)

3. 대상 국가 및 방문지

- 대상국가 : 아랍에미리트(UAE)
- 방 문 지 : 칼리파 대학 RICH센터(아부다비), 44.01 프로젝트 오피스(두바이) 및 실증현장 (푸자이라)

4. 출장자 인적사항 및 역할

소 속	직 급	성 명	역 할
제주연구원 제주지하수연구센터	전문연구위원	고은희	- 현장답사 총괄 - 이산화탄소 지중저장에 따른 지하수 화학적 변화 분석 - 수질 안정성 및 환경영향 검토 - 제주 지하수 적용 연계
	전문연구위원	고창성	- 실증현장에 대한 지질특성 조사 - 광물탄산화 과정 및 영향 요소 조사 - 제주도 수리지질 통합데이터 개선방안 모색
	전문연구위원	김민철	- 지하수 모니터링 및 현장 측정방법 조사 - 이산화탄소 저장 효율 및 안전성 파악 - 제주 현무암층 대상 기술적용 검토

5. 주요 일정

일 자	출발지	도착지	방문기관	업무수행내용
‘25.10.19 (일)	제주 (07:00)	김포 (08:15)	이동	○ 제주 → 김포 → 인천 (대한항공 KE1118)
	인천 (13:25)	아랍에미리트 두바이 (18:55)	이동	○ 인천 → 아랍에미리트 두바이 (대한항공 KE951)
‘25.10.20 (월)	두바이	아부다비	칼리파대학 RICH센터	○ 칼리파대학 RICH 연구진 기술회의 - CO_2 및 수소 저장 연구실 랩투어 - 현무암 대상 CO_2 저장 연구팀 미팅 - 칼리파대학 RICH센터 부소장 Prof. Giovanni Palmisano
‘25.10.21 (화)	두바이		44.01 UAE 오피스	○ 44.01 연구팀 기술회의 - 현무암층 기반 탄소광물화 연구 내용 및 성과 공유 - 실증 프로젝트 운영 및 안전관리 방안 기술회의 - 44.01연구팀 Dr. Juerg Matter and Ehab Tasfai
‘25.10.22 (수)	두바이	푸자이라	44.01 푸자이라 실증현장	○ 현지 이동 - 두바이 → 푸자이라 ○ 44.01 현무암 실증현장 방문 - 실증현장 CO_2 주입 및 모니터링 설비 견학 - 주입 현장 수리지질특성 논의 - 44.01연구팀 Dr. Juerg Matter and Zohaib, Muaadh, Satish ○ 현지 이동 - 푸자이라 → 두바이
‘25.10.23 (목)	푸자이라	두바이		
‘25.10.24 (금) ~ 10.25 (토)	아랍에미리트 두바이 (20:55)	인천 (10:45, 25일)	이동	○ 아랍에미리트 두바이 → 인천 (대한항공 KE952)
	김포 (14:00)	제주 (15:15)	이동	○ 인천 → 김포 → 제주 (대한항공 KE1133)

II 출장 주요 내용

1. 칼리파대학 RICH센터(아부다비) 방문

1) 방문 개요

■ 칼리파대학의 RICH(Research and Innovation Center on CO_2 and Hydrogen) 센터는 2019년 설립된 UAE 최초이자 중동 유일의 CCS 및 수소에너지 전문 연구소로, 국가 'Net-Zero' 목표 달성을 위한 일환으로 설립되었음

- 주요 연구분야로는 ① CO_2 포집 및 저장, ② CO_2 활용, ③ 수소 생산·저장·유통, ④ 수소 활용 및 지속가능 연료의 4개 핵심테마 위주로 연구가 이루어지고 있음



〈 두바이 칼리파대학의 전경 〉

■ 이와 유사하게 우리나라도 2010년 탄소중립 목표를 선언하고, 2021년 '2050 탄소중립 시나리오'를 발표하여 탄소중립 이행을 위한 이정표를 마련하였음

- 해당 시나리오에는 CCS를 통해 2050년까지 5천만톤~8천만톤의 CO_2를 감축하는 목표가 포함되어 있음
- 특히, 제주도 인근 해역에서 발견된 대규모 현무암층은 대규모 CCS 상용화를 위한 새로운 가능성을 보유하고 있으며, 우선적으로 이와 유사한 지질 특성을 갖는 제주도를 대상으로 현재 실증 여부를 평가하고 있는 단계임

■ 따라서 해당 기관 방문을 통해 센터가 보유한 CCS 관련 연구 역량을 파악하고 제주도 CCS 실

증을 위해 필요한 실험실 차원의 연구 내용을 파악하고자 하였음

- 주요 조사 사항으로는 ① 저류층 특성화, ② 지화학 및 유동 모델링, ③ 실험 분석 인프라이며, 제주도 현무암층을 대상으로 한 CCS 연구 구상 단계에서 반드시 고려해야 할 핵심 요소와 기술적 난제에 대한 전문가적 통찰을 얻고자 하였음

〈 칼리파대학 RICH센터의 주요 연구내용 및 제주도 CCS와의 연관성 〉

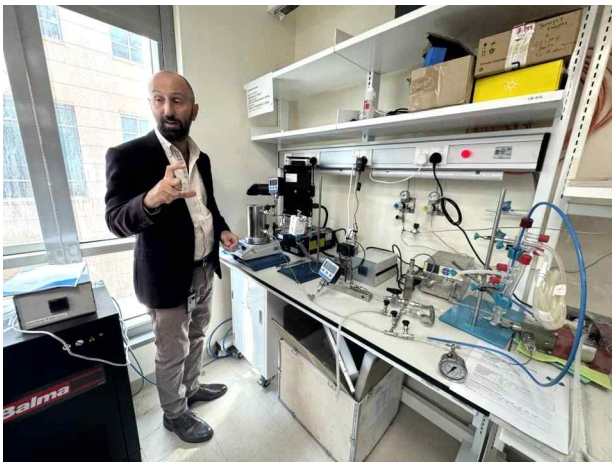
연구분야	주요 연구내용	제주도 CCS와의 연관성
CO_2 포집 및 저장(CCS)	- 신규 흡착제(e.g., MOFs, 유기용매) 및 고효율 공정 개발 - 기존 포집 기술의 성능 최적화 및 통합 - CO_2 지중저장의 효율성, 안정성, 저장 경로 평가 및 모델링	제주 현무암층의 저장 용량, 주입성, 장기 안정성을 평가하는 데 RICH의 모델링 및 평가 기술에 대한 자문이 필수적임
CO_2 활용 (CCU)	- 포집된 CO_2를 메탄올, 합성 연료 등 고부가가치 제품으로 전환 - 광화학적, 전기화학적 전환을 위한 신규 촉매 및 공정 개발	장기적으로 제주도의 풍부한 재생에너지를 활용한 '그린 CO_2 활용' 기술과 연계 가능성을 탐색할 때 참고 가능

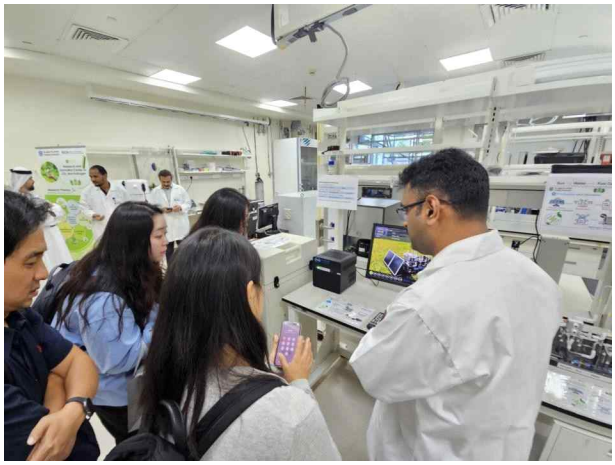
2) 방문 결과

■ 칼리파대학 RICH센터의 CCS 관련 연구실을 방문하였으며, 실험 및 분석 설비를 확인함

- 연구실은 크게 CO_2 포집 및 활용 연구실, 첨단 소재 합성 및 특성 분석 연구실로 구분되며, CCS와 직접적으로 관련된 CO_2 포집 및 활용 연구실에서는 모델링 역량을 뒷받침하고 검증하기 위한 첨단 실험 설비를 갖추고 있음
- 주요 장비로는 Micromeritics 3-Flex와 같은 흡착분석기, 고온/고압 반응기 등은 CO_2-암석 반응 실험을 위한 것으로 소개됨








〈 칼리파대학 RICH센터 CO_2 포집 및 활용 실험실에 대한 설명 〉

■ RICH센터의 부소장인 Prof. Giovanni Palmisano과 CCS 관련 연구진과의 회의를 통해 제주도 CCS 잠재력 평가와 더불어 저류층 특성화 및 지화학 및 유동 모델링 방법, 실험 및 분석 인프라의 제반 사항에 대해 파악하였음

〈 RICH센터 CCS 관계자들과의 회의내용 요약 〉

주제	회의 내용	RICH센터 의견/제안
제주도 현무암층의 CCS 잠재력	- 제주도 현무암층의 다공성 (15-25%) 및 투과성 특성 검토 - 44.01 프로젝트 대비 제주도 현무암의 광물학적 유사성 확인 - 연간 저장 가능 용량 추정 논의	- 제주도 현무암은 44.01프로젝트의 대상 지층인 오피올라이트와 유사한 높은 CCS 잠재력 보유 - 현무암-CO_2 반응속도가 빠르며 안전한 광물화 가능 - 지질학적 격리 조건 우수 평가
저류층 특성화	- 3D 지질모델링 기법 및 시추조사 방법론 논의 - 현무암층 내 균열 네트워크 분석 기법 검토 - 저류층 용량 평가를 위한 물리검층 방법	- 고해상도 지진파 탐사와 전자기 탐사 병행 필요 - 코어 분석을 통한 암석물리학적 특성 파악 중요 - 다중 스케일 특성화 접근법 적용 권고
지화학 및 유동 모델링	- PHREEQC, TOUGHREACT 등 지화학 모델링 소프트웨어 활용 방안 - CO_2-물-암석 반응 메커니즘 모델링 기법 - 장기 안전성 평가를 위한 수치모델링 방법론	- 44.01 프로젝트에서 검증된 반응 경로에 대한 소개 - 실시간 모니터링 데이터와 연계한 모델 보정 중요 - 불확실성 정량화를 위한 몬테카를로 시뮬레이션 권고
실험 및 분석 인프라	- 고압 반응기 등 분석 장비 사양 논의 - 연구 인프라 구축 비용 및 운영 예산 검토	- 기본 실험실 구축비 : 약 50억원 (고압 반응기, XRD, SEM 등) - 연간 운영비: 약 10억원 (인건비, 소모품 등)

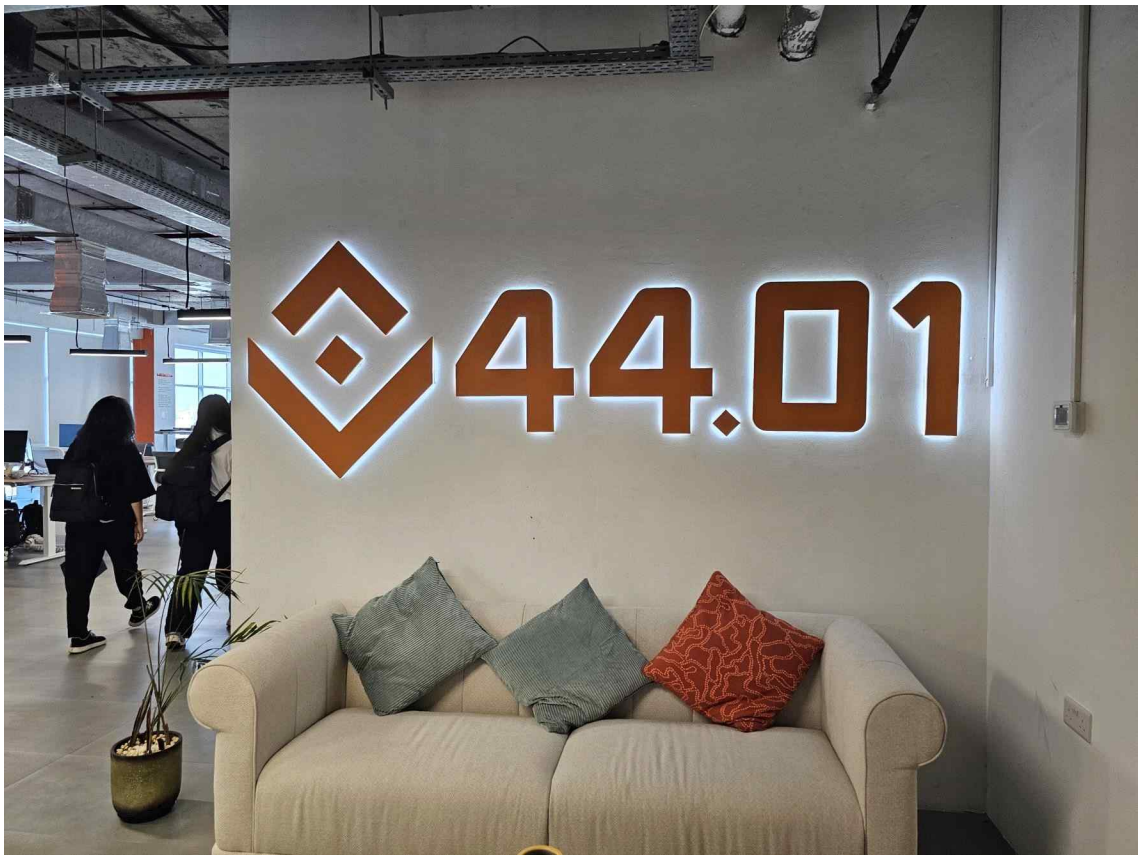



〈 RICH센터 CCS 관계자들과의 회의 모습 〉

2. 44.01 프로젝트 오피스(두바이) 방문

1) 방문 개요

■ 44.01 프로젝트 현장실증 내용에 대한 구체적인 내용을 파악하기 위해 해당 프로젝트를 수행 중인 오피스를 방문하여 관련자들과의 회의를 진행하였음



〈 두바이 44.01 프로젝트 오피스 〉

■ 이 프로젝트는 2019년 시작된 세계 최초의 현무암층 대상 CCS 적용 사례이며, 아랍에미리트 푸자이라(Fujaira) 지역의 오피올라이트(ophiolite) 현무암층을 활용해 연간 1,000톤 규모의 CO_2를 영구적으로 광물화하여 저장하는 혁신적인 기술을 실증하고 있음

- 이 프로젝트는 Climeworks(스위스), University of Southampton(영국), Columbia University(미국), 칼리파대학(UAE) 등 국제적인 연구기관들의 컨소시엄으로 추진되고 있으며, 총 투자비 500만 달러 규모로 진행됨
- 특히 현무암 내 Ca, Mg 성분과 CO_2의 반응을 통해 탄산염 광물(calcite, magnesite)로 영구 고정하는 광물탄산화(mineralization) 기술을 상용화한 세계 유일의 사례임

■ 제주도 역시 현무암이 지배적으로 형성되어 있는 지질학적 조건을 보유하고 있으며, 특히 현무암의 Ca, Mg 함량(평균 12.5%, 8.3%)이 푸자이라 현무암(13.1%, 8.7%)과 매우 유사한 특성을 나타냄

- 제주도의 경우 연간 약 419만톤(지자체 관리권한이 있는 비산업부문의 배출량)의 CO_2가 배출되고 있어(건물 분야가 53% 차지), 현무암층 CCS 기술 적용 시 상당한 감축 효과를 기대할 수 있음

■ 따라서 44.01 프로젝트 오피스 방문을 통해 세계 최초 현무암층 상용 CCS 프로젝트의 운영 경험과 기술적 노하우를 직접 조사하고, 제주도 현무암층 CCS 적용을 위한 실질적 시사점을 도출하고자 하였음

- 주요 회의 내용으로는 ① 현무암층 기반 탄소광물화 기술의 상용화 과정, ② 실증 프로젝트 안전관리 및 모니터링 체계, ③ 경제성 확보 및 사업화 전략, ④ 환경영향 최소화 방안에 대해 논의되었고, 특히 제주도에 CCS를 적용함에 있어 발생 될 수 있는 환경적 변화에 대한 사항을 중점적으로 파악하고자 하였음

2) 방문 결과

■ (CO_2 주입 및 광물화 기술) 44.01 프로젝트는 CO_2를 해수에 용해시켜 100bar 이하의 저압으로 주입함으로써, 2년 내 주입 CO_2의 95% 이상을 안정한 탄산염 광물로 전환시키는 핵심 기술을 보유하고 있음

- 이는 제주도의 다공질 천부 현무암층에 적용시, 고압 주입에 따른 유발지진 위험을 원척적으로 차단하고 영구적이고 안전한 저장을 가능하게 하는 최적의 기술로 벤치마킹의 가치가 높을 것으로 판단됨
- 다만, 실증 이전 실험실 규모의 광물화 반응 실험, 주입 가능량 모델링 등 기반 연구가 탄탄하게 이루어져야 할 것으로 제시됨

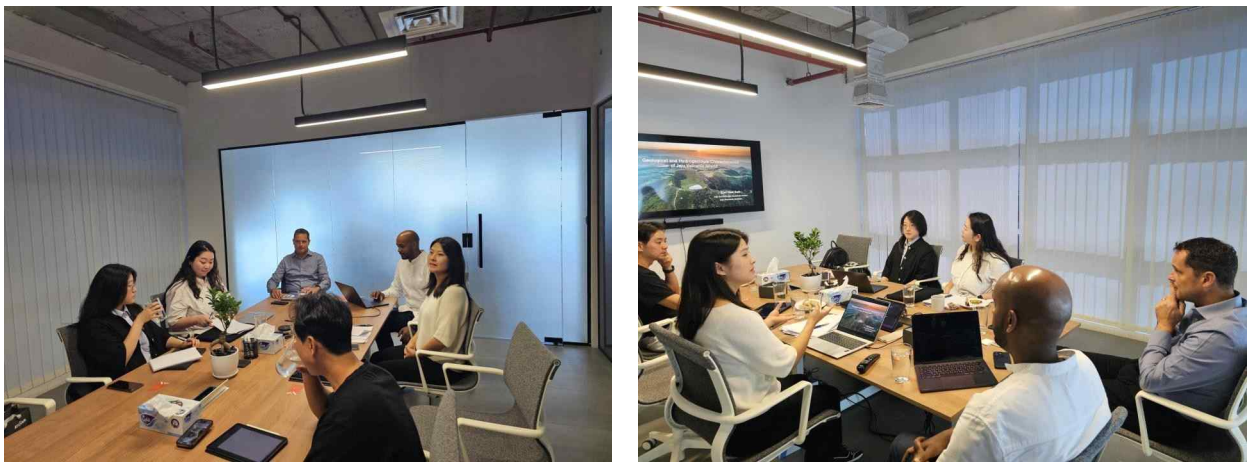
■ (모니터링 및 검증 기술) 주입정과 관측정에서 pH, 전도도, 알칼리도 등 지구화학적 인자를 실시간 모니터링하고, 동위원소 추적자($\delta^{13}C$ 등)를 활용하여 CO_2의 거동과 광물화 과정을 정밀하게 추적하고 있음

- 44.01 프로젝트의 모니터링 및 검증 기술은 지하수가 주된 수자원으로 사용되고 있는 제주도의 민감한 지하수 환경을 보호하고, 탄소저장의 안전성과 영구성을 입증하는데 우선적으로 갖추어져야 할 사항임

- 또한 제주는 지하 지질구조의 복잡성에 따라 모니터링 관측정을 좀 더 촘촘하게 배치해야 할 것으로 의견이 제시됨
- 아울러 실증을 위한 대상 지역이 해양과 인접할 경우, 조석의 영향으로 인해 주입된 CO_2가 빠르게 해양으로 유출될 수 있다는 우려의 의견도 있었음

■ (사업 모델 및 경제성 확보 전략) 44.01 프로젝트는 탄소배출권 판매(자발적 탄소시장)를 통해 수익을 창출하고, 표준화된 모듈형 설비시스템을 도입해 초기 투자비용의 절감 및 단계적 확장이 용이한 사업 모델을 구축하고 있음

- 프로젝트 관련자들은 제주 또한 탄소 중립섬이라는 비전과 연계하여, 제주도 내 탄소배출 기업(발전소, 항공사 등)을 대상으로 한 맞춤형 탄소 상쇄 모델을 개발한다면, 경제성을 확보할 수 있을 것으로 평가함



〈 44.01 프로젝트 관계자들과의 회의 모습 〉

■ (환경 및 사회적 수용성 확보 전략) 44.01 프로젝트와 마찬가지로 제주도 또한 CO_2 주입에 활용되는 물을 지하수 자원 대신 해수를 사용하는 것이 바람직할 것으로 의견이 모아짐

- 제주는 지하수 자원의 의존도가 높기 때문에 해수를 활용하여 지하수에 영향을 미치지 않을 수 있음
- 또한 CO_2 주입에 따른 지진유발, 대수층 교란 등의 문제가 나타나지 않도록 하기 위해서는, 단계별 실증(주입량, 압력조건)이 매우 중요함
- 44.01 프로젝트는 실증 이전, 해당 프로젝트의 전 과정을 지역주민에게 투명하게 공개하고 협의하였으며 현재까지도 추진 상황을 투명하게 공개하여 주민 수용성을 지속적으로 확보하고 있음

〈 44.01 프로젝트 추진 현황 및 제주도에 적용할시 고려되어야 할 사항 〉

주제	44.01 프로젝트 추진 현황	제주도 적용시
CO_2 주입 및 광물화	- CO_2를 해수에 용해시켜 저압으로 주입 - 현무암 내 Ca, Mg 이온과 반응하여 2년 내 95% 이상 탄산염 광물로 전환	- 제주도의 다공질 현무암층에 적용 시, 고압 주입에 따른 유발지진 위험을 낮추고 영구적이고 안전한 저장이 가능함
모니터링 및 검증	- 주입정 및 관측정에서 pH, 전도도, 알칼리도 등 실시간 모니터링 - 지구물리탐사 및 동위원소 추적자를 활용하여 CO_2 거동 및 광물화 과정 추적	- 제주의 민감한 지하수 환경 보호를 위해 필수적인 기술 - 44.01 프로젝트의 모니터링 및 검증체계는 제주형 모니터링 시스템 구축의 핵심 벤치마킹 모델임
사업 모델 및 경제성	- 탄소배출권 판매를 통한 수익 창출 (현재 자발적 탄소시장) - 모듈형 설비로 초기 투자비용 절감 및 단계적 확장 용이	- 제주 '탄소중립섬' 비전과 연계하여, 지역 내 탄소배출 기업(발전소, 항공사 등)을 대상으로 한 탄소 상쇄 사업 모델 개발에 적용 가능
환경 및 사회적 수용성	- 해수 사용으로 담수자원 보존 - 저압 주입으로 지진 등 지질학적 리스크 최소화 - 지역사회와의 소통을 통한 프로젝트 투명성 확보	- 지하수 보존이 최우선 과제인 제주에서 해수 활용 기술은 매우 중요하며, 44.01의 리스크 관리 및 소통 전략은 주민 수용성 확보에 중요한 참고 사례가 됨

3. 44.01 프로젝트 실증 현장(푸자이라) 방문

1) 방문 개요

■ CO_2 포집 및 현무암층 지중저장이 실증단계로 운영되고 있는 푸자이라 지역의 실증 현장을 방문하여 구체적인 설비, 현재의 주입 현황, 향후 계획 등에 대해 파악하였음



〈 푸자이라 44.01 프로젝트 실증 현장 전경 〉

2) 방문 결과

■ 실증현장의 설비는 크게 CO_2 포집 - 용해 - 주입 시설로 구분되어 있음

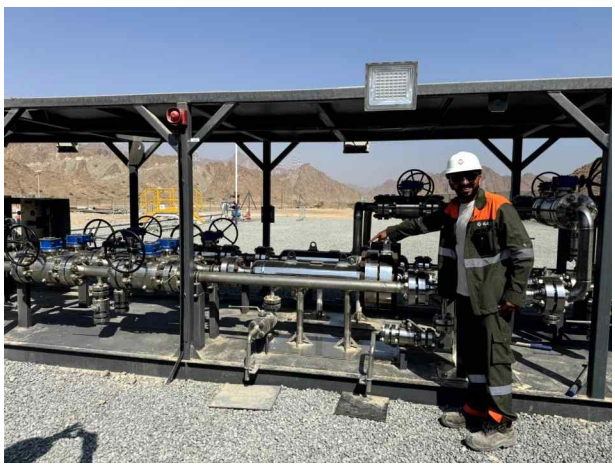



〈 푸자이라 44.01 프로젝트 실증 현장 관리자 사전 브리핑 〉

- 모든 시설은 모듈형으로 자체 개발·설치되어 있어 상대적으로 비용이 저렴할 뿐만 아니라 신규 실증지로의 이동·설치가 간편하다는 장점이 있음
- 실증 초기단계에서는 공기 중의 CO_2 포집하여 해수에 용해시킨 뒤 지중으로 주입하였으나, CO_2의 순도가 높지 않은 관계로 현재는 발전시설에서 배출된 고순도의 CO_2를 가져와 주입에 사용하고 있음
- 1일 주입되는 양은 CO_2 약 10~20톤 규모이며, 용해시키는 유체를 해수에서 하수재처리수로 바꾸고자 하고 있음
- 주입 시설의 경우 반응 면적을 최대한으로 하기 위해서, 수직 관정이 아닌 수평 경로로 관정을 개발하였으며, 주변에 모니터링 관정을 설치하여 수질 상태를 지속적으로 체크하고 있음
- 이러한 설비들은 하나의 시스템으로 구성·제어되고 있으며, 운영에 필요한 전력은 100% 태양광 에너지를 사용하고 있음

■ 향후에는 300톤 이상의 CO_2 주입 및 암석화를 목표로 하고 있음

- 지중 저장에 필요한 CO_2는 산업원천에서 확보하고, 모듈러 방식의 설비를 기반으로 보다 빠르게 확장이 가능하다는 전망




〈 모듈형으로 설비(좌) 및 이산화탄소 저장탱크와 해수 수조(우) 〉



〈 44.01 프로젝트 실증 현장 〉

Ⅲ 시사점

1. 기술적 시사점

■ CO_2 광물화 기술의 안전성·효율성 검증

- 44.01 프로젝트는 해수에 CO_2를 용해시켜 저압(100 bar 이하) 조건에서 주입함으로써 2년 내 95 % 이상을 안정한 탄산염 광물로 전환하는 데 성공하였음
- 이는 제주도 현무암층에도 적용 가능한 '저압·저위험형 CCS 기술모델' 로 평가됨

■ 제주 현무암층의 높은 반응성 및 저장 잠재력

- 칼리파대학 RICH센터 연구진은 제주도 현무암의 Ca, Mg 함량과 공극률 (15–25 %)이 푸자이라 오피올라이트와 유사하다고 평가하였음
- 이는 CO_2 광물화 반응속도가 빠르고 영구 저장에 유리함을 의미함
- 다만, 제주도 현무암층의 경우 상대적으로 두께가 얇고 발달 심도가 얕기 때문에 광물화 작용에 필요한 온도와 압력범위를 충족시키지 못할 가능성을 가지고 있기 때문에, 이에 대한 실험실 스케일의 연구·분석이 우선적으로 이루어져야 함

■ 저류층 특성화 및 지화학 모델링의 중요성

- PHREEQC·TOUGHREACT 등의 모델링 도구를 활용한 CO_2–물–암석 반응 모사와 3D 지질모델링, 코어 시험을 통한 다중 스케일 특성화가 필수적임

- 특히 현무암층의 절리·공극 네트워크 분석이 저류층 용량평가의 핵심임이 확인되었음

■ 모니터링 및 검증기술 벤치마킹 필요

- 44.01은 pH, 전도도, 알칼리도 등의 지화학인자를 실시간 감시하고 탄소 동위원소($\delta^{13}C$) 추적을 통해 CO_2 거동을 정밀 검증함
- 제주도에서는 지하수가 매우 중요한 수자원이기 때문에, 지하수 환경 보호를 위해서는 주입에 대한 실증 뿐만 아니라 모니터링 체계 또한 함께 도입되어야 함

2. 제도·운영적 시사점

■ 단계별 실증과 투명한 소통의 중요성

- 푸자이라 프로젝트는 실증 전 단계별 주입량·압력조건을 설정하고 지역사회에 과정을 공개하여 수용성을 확보하였음
- 제주도에서도 지진 유발 및 대수층 교란 우려를 해소하기 위해 투명한 정보공개와 단계적 실증 절차가 필요함

■ 해수 활용을 통한 지하수 보전

- CO_2 용해 매체로 해수를 사용함으로써 지하수 자원에 영향을 미치지 않는 방식이 제주에 적합하다는 의견이 공통적으로 제시되었음
- 해수 뿐만 아니라 재처리수를 사용함으로써, 상대적으로 이용가치가 낮게 평가되는 재처리수의 활용 방안 또한 마련될 수 있을 것으로 전망됨

■ 모듈형 시스템의 적용성

- 44.01 현장은 모든 포집·용해·주입 설비를 모듈화하여 현장 이동과 확장이 용이함
- 이는 제주 시범지구 적용 시 비용 절감 및 확장성 확보에 중요한 기술적 참고가 될 수 있음

■ 경제성 확보 방안 참고

- 푸자이라 모델은 탄소배출권(자발적 탄소시장) 거래와 모듈형 설비 표준화를 통해 비용 효율을 확보함
- 향후 제주도에 실증 및 상업화 방안을 고려하는 과정에서도 '탄소 중립섬' 비전과 연계한 탄소 상쇄형 사업 모델 구상이 필요할 것으로 판단됨

3. 정책·연구적 시사점

■ 제주 현무암 기반 CCS 연구 로드맵 필요

- 칼리파대학교 RICH센터와 44.01 프로젝트의 기술적 성과를 참고하여, 제주 현무암층을 대상으로 한 실험실 규모 - 파일럿 - 현장실증 단계의 연구 로드맵을 수립할 필요가 있음

■ 전문인력 및 인프라 확충

- 고압반응기·XRD·SEM 등 기본 장비 도입 예산이 약 50억원, 연간 운영비 10억원 수준으로 파악됨에 따라, 제주 내 관련 연구시설 구축 및 전문인력 양성이 함께 동반되어야 할 것으로 판단됨

■ 지역 특화 CCS 모델 개발

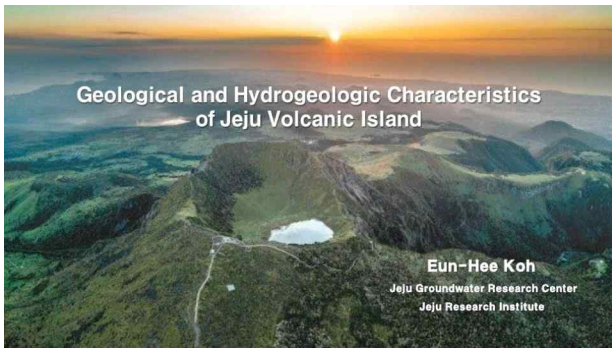
- 제주도의 지질·수리지질 특성, 지하수 보전 정책, 관광산업 구조 등을 반영한 '제주형 저탄소 CCS 모델'을 개발해야 하며, 이는 국가 탄소중립 정책의 섬 기반 적용 사례로서 의의가 있을 것으로 보여짐

4. 종합 평가

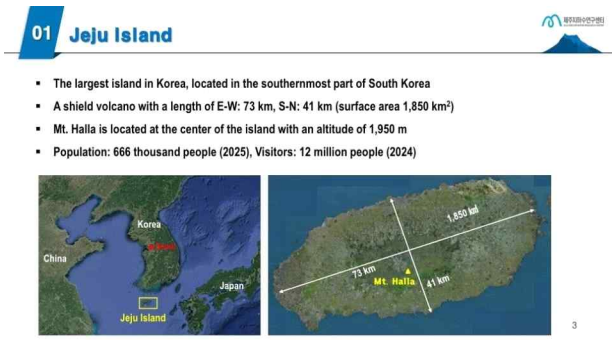
- 칼리파대학교 RICH센터와 푸자이라 44.01 프로젝트는 화산암·오피올라이트 기반 CO_2 광물화 저장기술의 실질적 성과와 운영모델을 직접 확인할 수 있는 세계 유일의 사례임
- 이번 현장 답사를 통해 제주도의 지질적 특성과 유사한 환경에서 CO_2 광물화가 단기간에 안정적으로 이루어질 수 있음을 확인하였으며, 향후 제주 CCS 기술 도입과 실증 연구의 방향성을 구체화하는 데 중요한 기초 자료로 활용될 것으로 평가됨

Ⅳ 첨부자료

- 44.01 프로젝트 관련 제주도 수리지질에 대한 센터 발표자료









02 Jeju Groundwater Research Center (JGRC)

Main Tasks

(1) Operation of groundwater monitoring network
(2) Research and investigation on hydrogeology and water quality
(3) Development of groundwater-related policies and management strategies
(4) Public education for groundwater users
(5) Establishment of national & global research networks



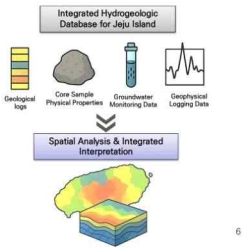


5

03 KIGAM's CCS project & JGRC

- Construction of hydrogeological DB of Jeju Island

Category	Type	Method/Source
Hydrogeologic Data	Geological log Data	- Referencing groundwater observation well reports, academic papers, and survey/research reports
	Geophysical Logging Data	- Conducting geophysical logging on wells (e.g., spectral gamma, optical image logging, downhole logging)
	Hydraulic Property Data	- Pumping test and hydrogeological investigation reports
	Core-Based Analytical Data	- Core samples from newly developed wells (hydraulic conductivity, porosity, P-wave velocity, geochemical properties, etc.)
Groundwater Monitoring Data	Groundwater Level & Water Quality Data	- Monitoring data and water quality analysis from Jeju groundwater observation network- Water quality monitoring data from Jeju Institute of Health and Environment
	Groundwater Use Data	- Groundwater use statistics and licensing data from the Jeju Special Self-Governing Province
Standardization & Spatial interpretation		- Standardization and error correction of geological, physical, and hydraulic data - Unifying measurement units and cumulative values - Structuring data for spatial analysis



6



01 Tectonic Setting and Volcanic Characteristics

- Continental shelf of the Yellow Sea, southwest of the Korean Peninsula
- Lies approximately 1,500 km west of the Japan trench
- A volcanic island formed on the continental shelf through continental intraplate volcanism

'Tectonically stable environment'

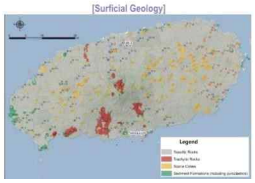


8

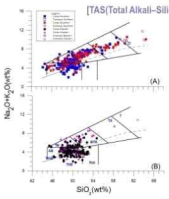
02 Young Volcanic Island

- Formed by volcanic activity from 1.8 Ma to 1,000 years ago → Formation age: very young
- Surface geology: volcanic rocks (98%), sediments (2%)
- Volcanic rocks: (1) alkali basalt group, (2) trachyte group
- Sedimentary rocks: tuff, marine deposits, interbedded sediments with volcanic rocks, recent sediments, and sand dunes

[Surficial Geology]



[TAS(Total Alkali–Silica) diagram]

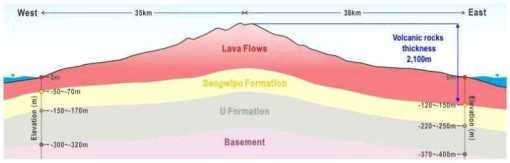


ThA: tholeiitic andesite
ThB: tholeiitic basalt
TrnB: transitional basalt
AB: alkali basalt
TB: trachybasalt
BTA: basaltic trachyandesite
TA: trachyandesite
T: trachyte

9

03 Subsurface Geologic Structure

- Subsurface geology: Volcanic rocks(lava flows), Seogwipo Formation, U Formation (unconsolidated muddy sand deposits), basement rocks (granite, welded tuff)
- Volcano edifice: about 2 km thick (above sea level 1,950 m and below sea level 150 m)
  : thinner thickness compared to other volcanic islands (Hawaiian volcanoes: Mauna Loa 17 km, Mauna Kea 18 km)

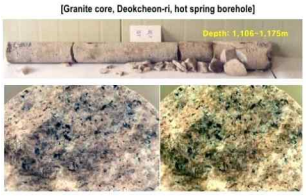


10

04 Basement rocks: granite, welded tuff

- Distributed prior to volcanic activity forming Jeju Island, similar to the rocks found along the southern coast of Korea
- Granite: 172Ma, Jurassic Bulguksa granite (quartz, orthoclase, plagioclase, and biotite)
- Welded tuff: 84-66Ma, crystal–vitric tuff, lapilli tuff, red sandstone, and rhyolitic tuff

[Granite core, Deokcheon-ri, hot spring borehole]



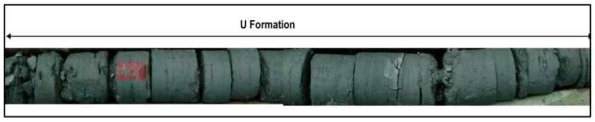
[Welded tuff core, Seongsan-eup, Ojo-ri, deep borehole]



11

05 U Formation

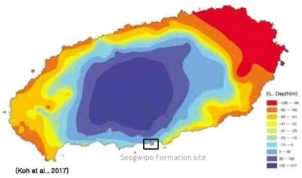
- Composed of clay and fine-grained sand and remains unconsolidated
- Koh (1997) named the U Formation after the first letter "U" of Unconsolidated
- Identified only when drilling more than 100 m below sea level, and distributed beneath the Seogwipo Formation with an average thickness of 150 m
- Poorly sorted and lacks primary sedimentary structures such as bedding
- Deposits formed in an offshore continental shelf environment deeper than the wave base



12

06 Seogwipo Formation

- Sedimentary layers consisting of conglomeratic sandstone, sandstone, sandy mudstone, mudstone, and shell fossils
- Deepest depth in the eastern region, while in the southern region, above sea level and exposed on land
- Low-permeability layer, influencing the occurrence and distribution characteristics of groundwater



[Seogwipo Formation site]
(Nationally Designated Cultural Heritage: Natural Monument No. 195)



13

07 Lava flows(Volcanic rocks)

- Pahoehoe lava flows: thin bedded (0.5-5 m) with joints, vesicles, cracks, and lava tubes
- Aa lava flows: thickness ranges from 5-15 m with clinker, massive core and vertical joints
  : clinker layers with an average thickness of 3-5 m, developed on the top and bottom of Aa lava
- Sediment deposits between the lava flows, with an average thickness 2-3 m

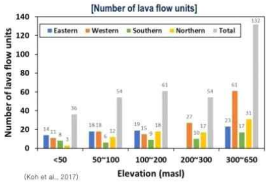


14

07 Lava flows(Volcanic rocks)

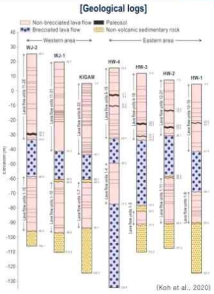
- The number of lava flow units
  : 5-61 (average 16), varying by region and elevation
- The units increase from lowlands to uplands
  → thicker lava accumulations in highlands
  → thinner sequences toward coastal lowlands

[Number of lava flow units]



(Koh et al., 2017)

[Geological logs]



(Koh et al., 2020)

15

08 Hydrogeologic characteristics of geologic units

- From a hydrogeological perspective, Jeju's subsurface consists of alternating permeable and low-permeable layers
- The thickness and lateral distribution highly spatial variability → difficult to predict groundwater flow and aquifer development

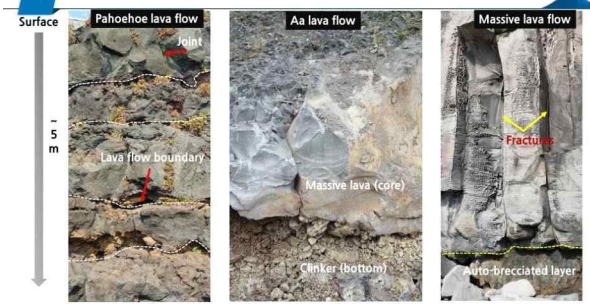


09 Hydrogeological Classification

Geology	Layer unit	Hydrogeologic classification		Ave. thickness
		Permeability layer	Low-permeability layer	
Volcanic rocks	Scoria	- Scoria		
	Pahoehoe lava flow	- Cooling joints & fractures - Lava flow contact, interflows - Lava tube (lava cave), collapsed lava tube - Spatter, tumulus, lava rise-pit etc.	- Massive lava - Welded agglomerate	7 m
	Aa lava flow	- Upper & lower Clinker layer	- Massive lava	14 m
	Hyaloclastite layer	- Breccia, joint, fracture zone	- Massive lava	
	Columnar joint zone	- Vertica(columnar) Joint, entablature	- Massive lava	30-50 m
	Lava dome	- Breccia(talus)	- Massive lava	
	Dike	- Joint, fracture zone	- Massive lava	
Sediments	Volcanic sedimentary layer(phreatomagmatic tuff)	- Joint, fracture zone	- Welded tuff -Cemented sandstone, mudstone, conglomerate	
	Non-volcanic sedimentary layer	- Unconsolidated gravel layer, shell sand layer(dune sand), gravel layer	-Semi consolidated sandstone, mudstone, conglomerate/Thermally altered sedimentary layer	2-5 m
	Seogwipo Formation	- Unconsolidated gravel layer, Unconsolidated shell sand layer	- Cemented sandstone, mudstone, conglomerate	100 m

17

10 Permeability Structures of Lava Flows

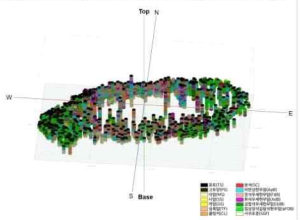


18

11 Construction of hydrogeologic DB

■ Geological logs compilation

- 1,040 boreholes data
- Lithofacies into 14 types based on mineral composition & texture



[Lithofacies of geologic logs]

Category	No.	Lithofacies (Code)
Soil	1	Topsoil (TS)
	2	Paleosol (PS)
Lava flows (Basalt)	3	Aphyric Basalt (ApB)
	4	Feldspar Dominant Basalt(FdB)
	5	Augite Dominant Basalt (AdB)
	6	Olivine Dominant Basalt (OdB)
	7	Acicular Feldspar Olivine Basalt (aFOB)
Volcanic-clastic rocks	8	Tuff (TF)
	9	Scoria (SC)
	10	Clinker (CL)
Non-volcanic sedimentary rocks	11	Mudstone (MS)
	12	Sandstone (SS)
	13	Gravelstone (GS)
Volcanic & non-volcanic sedimentary rocks	14	Seogwipo Formation (SGF)

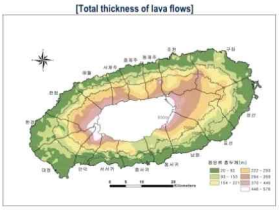
19

12 Spatial distribution of geologic units

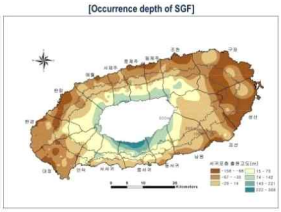
▌Spatial mapping of lava flows & SGF (Seogwipo Formation)

- Thickness of lava flows increase toward the central highlands: lowlands < 100 m, highlands 200~600 m
- SGF occurrence depth: deepest in the eastern area, above sea level in the highlands and southern area

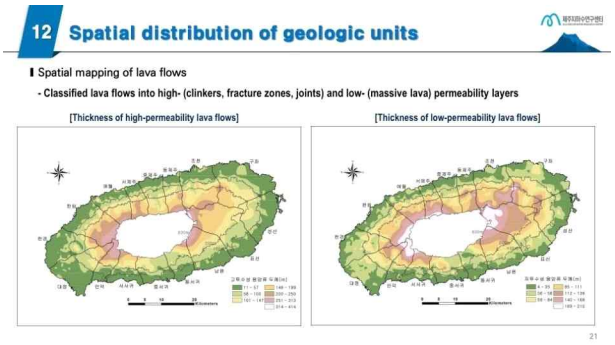
[Total thickness of lava flows]

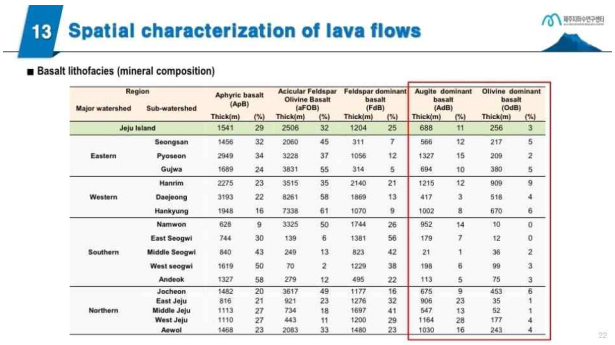


[Occurrence depth of SGF]



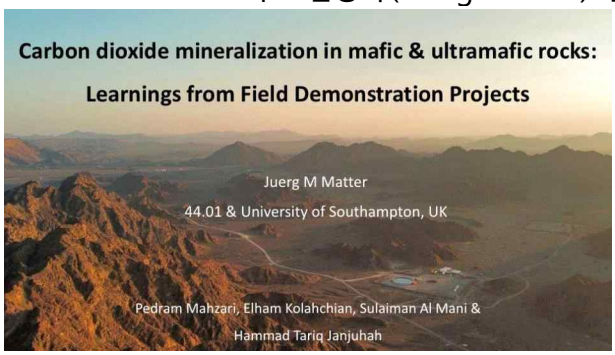
20

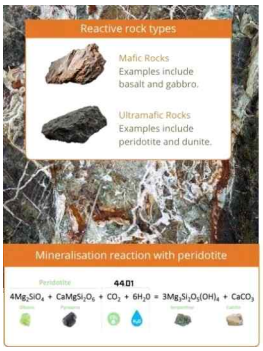


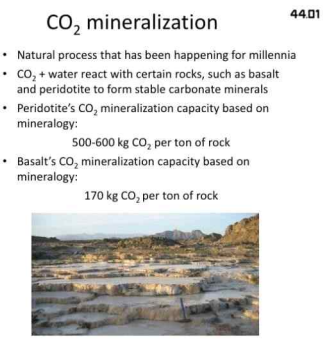


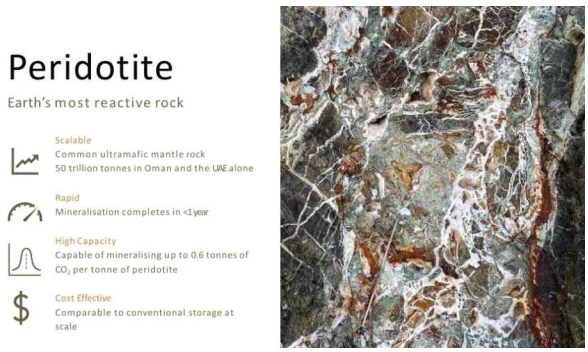
Region		Aphyric basalt (ApB)		Acicular Feldspar Olivine Basalt (aFOB)		Feldspar dominant basalt (FdB)		Augite dominant basalt (AuB)		Olivine dominant basalt (OdB)	
Major watershed	Sub-watershed	Thick(m)	(%)	Thick(m)	(%)	Thick(m)	(%)	Thick(m)	(%)	Thick(m)	(%)
Jeju Island		1541	29	2506	32	1204	25	688	11	256	3
Eastern	Seongsan	1456	32	2060	45	311	7	566	12	217	5
	Pyoseon	2949	34	3228	37	1056	12	1327	15	209	2
	Gujwa	1689	24	3831	55	314	5	694	10	380	5
Western	Hanrim	2275	23	3515	35	2140	21	1215	12	909	9
	Daejeong	3193	22	8261	58	1869	13	417	3	518	4
	Hankyung	1948	16	7338	61	1070	9	1002	8	670	6
Southern	Namwon	628	9	3325	50	1744	26	952	14	10	0
	East Seogwi	744	30	139	6	1381	56	179	7	12	0
	Middle Seogwi	840	43	249	13	823	42	21	1	36	2
	West seogwi	1619	50	70	2	1229	38	198	6	99	3
	Andeok	1327	58	279	12	495	22	113	5	75	3
Northern	Jocheon	1482	20	3617	49	1177	16	675	9	453	6
	East Jeju	816	21	921	23	1276	32	906	23	35	1
	Middle Jeju	1113	27	734	18	1697	41	547	13	52	1
	West Jeju	1110	27	443	11	1200	29	1164	28	177	4
	Aewol	1468	23	2083	33	1480	23	1030	16	243	4

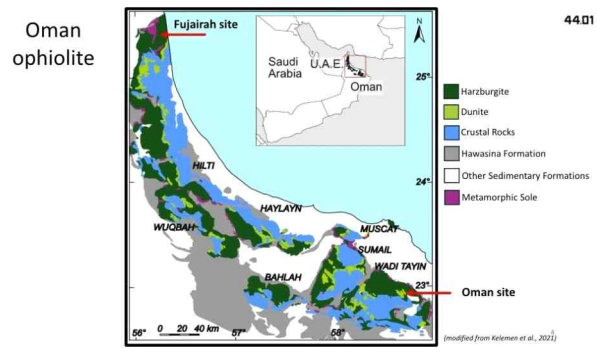
■ 44.01 프로젝트 담당자(Juerg Matter) 발표자료

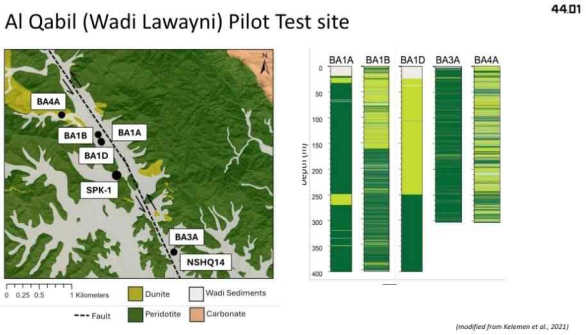










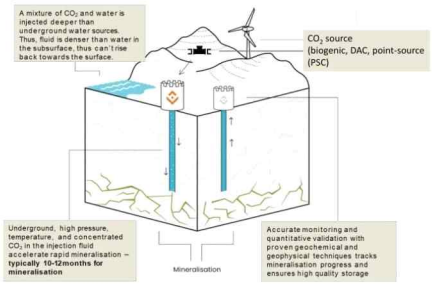






Accelerated in-situ mineralization in peridotite

44.01



Site & Reservoir Characterization

44.01

Key criteria for site characterisation:

Capacity: suitable size of the mineral storage reservoir to deliver long term commercial-scale projects

Injectivity: optimal fracture permeability for sustained injection throughout the lifecycle of a project

Reactivity: abundance of highly reactive minerals to accelerate in-situ mineralisation

Containment: requires assessment of leakage pathways through the reservoir e.g. faults and fractures

Resource management: access to land, water, renewable energy and CO_2 source



Reservoir Characterization

44.01

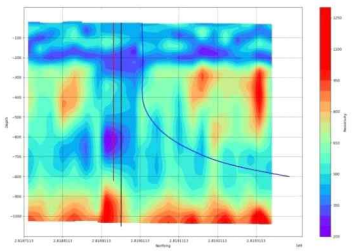


Reservoir Characterization cont.

44.01

Electromagnetic survey (TDEM)

- contrast between more and less conductive (resistive) rock
- function of rock and formation fluid properties (mineralogy, porosity, fluid composition)
- higher degree of serpentinization -> lower resistivity
- higher fracture density & higher porosity -> lower resistivity



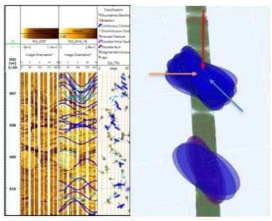
ohm.m

Borehole characterization and imaging

44.01

Value of exploration well/s, pilot tests and data collection

- Exploration well(s) in optimal location on site based on surveys to collect drill cuttings, cores, drilling parameters, reservoir pressure, borehole logs
- Logging program focuses on fracture characteristics, density, orientation
- Logging data (e.g. resistivity) used for calibration of electromagnetic survey data
- Injectivity tests and flow profiling to confirm log interpretation



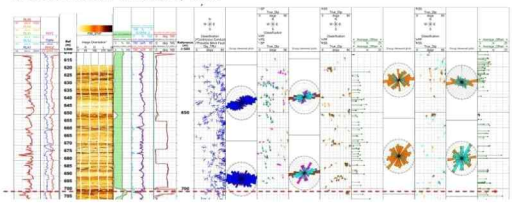
Abundance of fracture observed on FMI image with 3D visualization to highlight fracture orientation

Borehole characterization and imaging

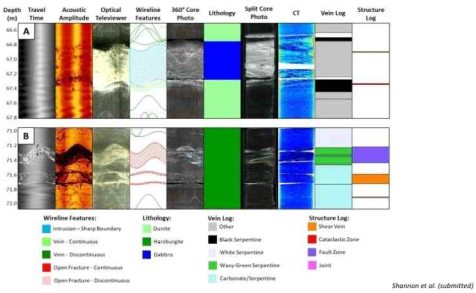
44.01

Wireline logging

- well logging indicates significant number of fractures (P10 of 10-20 fractures/m)
- continuous and discontinuous conductive fractures are dominant
- extended fracture connectivity exists

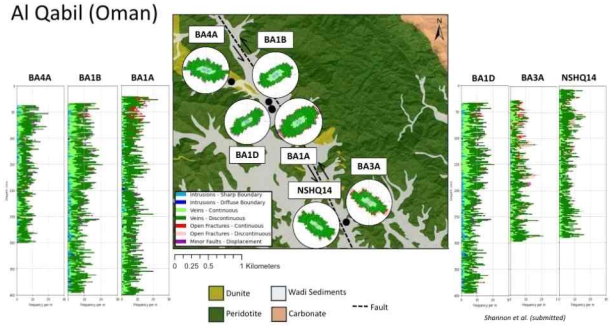


Correlation Borehole Logs – cores – CT scans – Visual logs



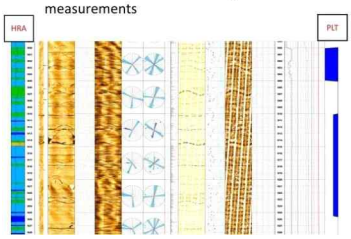
Shannon et al. (submitted)

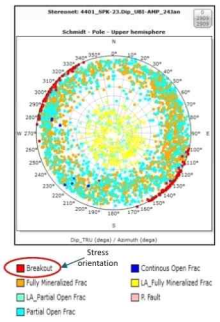
Al Qabil (Oman)



Fractures vs stress

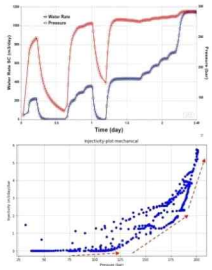
- Mechanical and chemical effects can seal fractures
- Defining direction and magnitude of principal stresses based on borehole logs and in-situ measurements

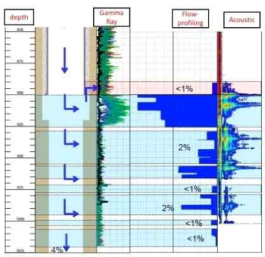


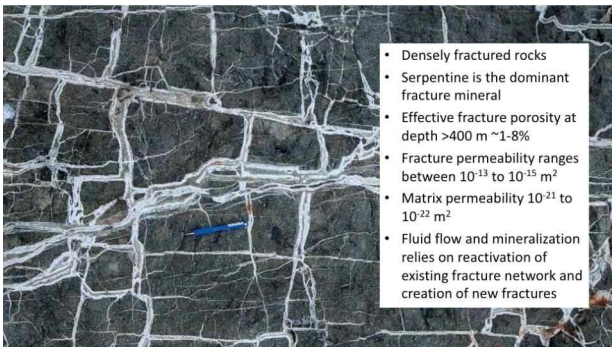


Injectivity data (step-rate water injection)

- Injection well testing (rate vs. pressure)
- Detailed flow profiling







- Densely fractured rocks
- Serpentine is the dominant fracture mineral
- Effective fracture porosity at depth >400 m ~1-8%
- Fracture permeability ranges between 10^{-13} to 10^{-15} m^2
- Matrix permeability 10^{-21} to 10^{-22} m^2
- Fluid flow and mineralization relies on reactivation of existing fracture network and creation of new fractures

Modelling approach

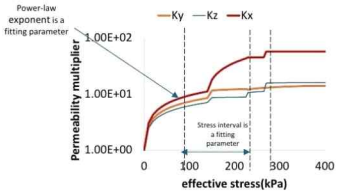
Stress-dependent permeability for calibration

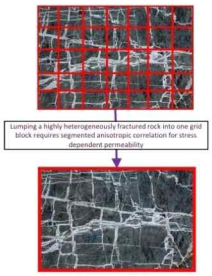
Stress-dependent fracture permeability

Stress-dependent permeability controlled by pore pressure

Piecewise power-law correlation is defined
- Stress intervals
- Power-law exponent for each segment
- 3-4 segments for x,y,z direction

$$k = k_0 {\sigma_{eff}}^{\alpha}$$

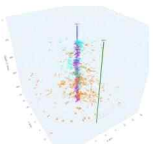


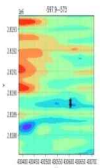


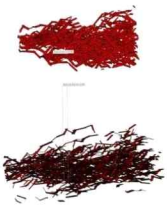
Using well log data for DFN + EM survey for 3D porosity and permeability

- At the borehole
- Far-field fracture logging
- EM survey
- Resultant DFN model





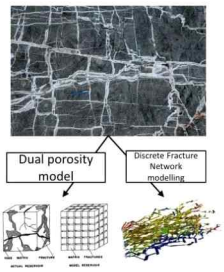




How model is built (input data and steps)

1. Reservoir boundary based on available 3D geophysical data such as electromagnetic survey
2. Using well logging data, initiating fracture distribution in vicinity of the wellbores
3. Propagating fractures based on 3D electromagnetic survey and far-field sonic boreholel logs
4. Using flow profiling tests, tuning fracture permeability and porosity
5. Testing the model on longer injection period (geomechanical calibration)

Tools (inhouse & commercial & open source):
- Well-log analysis using machine learning to identify permeable fractures (inhouse)
- DFN generation code using well log, far-field logging, and EM survey (inhouse)
- Reservoir simulation (CMG-GEM, fully coupled thermo-hydro-mechanical-chemical)
- History-matching code (CMG-CMOST)
- dfnWorks & PFLOTRAN

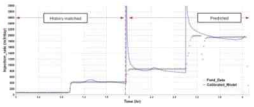


Model calibration

44.01

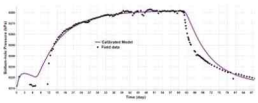
- The initial static model was calibrated to reproduce injection well testing and also interference between injection and monitoring wells
- Permeability of DFN model is stress-dependent to be able to match well testing

Injection test was matched by varying permeability of fractures around the injector



Injection well

Pressure response during CO_2 injection was matched by modifying permeability and porosity of fracture sets between injection and monitoring wells



Monitoring well

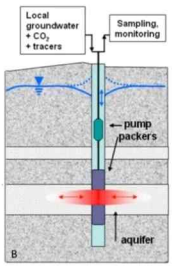
Peridotite reactivity – Project Chalk Pilot Test

44.01

Calibrated geochemical model







- dissolved CO_2 injection between 150-400 m depth
- 1.2 tCO_2 injected (in two tests)
- incubation time: 45 Tagen
- CO_2 concentration in injection fluid: 0.123 mol/kg
- pH injection fluid: 4.1
- Formation fluid pH: ~11
- conservative tracer: bromide (350 ppm)

Mixing and mass balance calculations

44.01

- Mixing between ambient reservoir fluid (BW) and injected solution (IS):

$$[Bromide]_i = X[Bromide]_{IS} + (1 - X)[Bromide]_{BW}$$

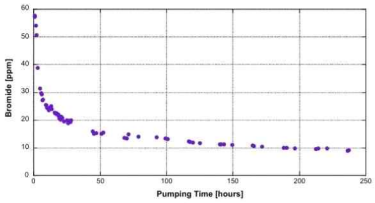
- Calcium, Magnesium & Dissolved Inorganic Carbon concentration assuming non-reactive mixing:

$$Ca_{mix} = XBr \cdot Ca_{IS} + (1 - XBr) \cdot Ca_{BW}$$
$$DIC_{mix} = XBr \cdot DIC_{IS} + (1 - XBr) \cdot DIC_{BW}$$
$$Mg_{mix} = XBr \cdot Mg_{IS} + (1 - XBr) \cdot Mg_{BW}$$

Mixing – tracer recovery

44.01

Potassium bromide (KBr) tracer recovery during pump-back phase



Background bromide concentration: 0.0 ppm

Injection bromide concentration: 350 ppm

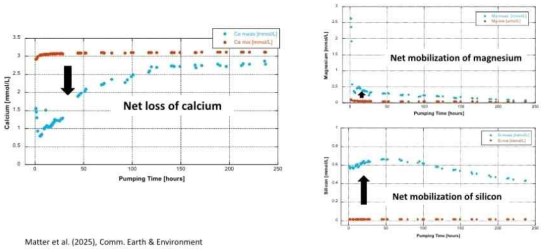
Mass of Br recovered during pull phase / mass of Br injected = 37.61%

Matter et al. (2025), Comm. Earth & Environment

Cations – CO_2-water-rock reaction

44.01

A combination of rock dissolution and cation consumption is evident

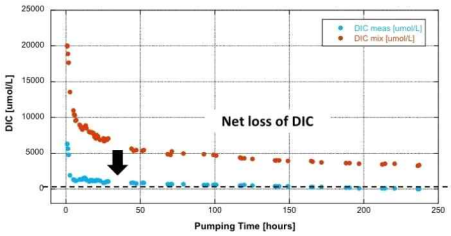


Matter et al. (2025), Comm. Earth & Environment

Mass balance – DIC

44.01

88% mineralization in 45 days



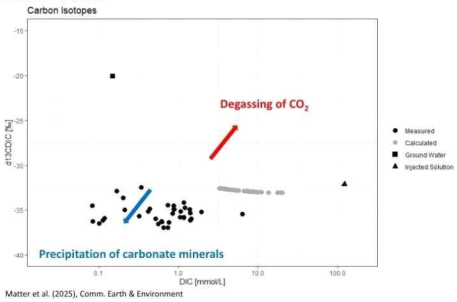
Injection fluid DIC: 122,300 µmol

Groundwater: 154 µmol/L

Matter et al. (2025), Comm. Earth & Environment

Mineralization

44.01



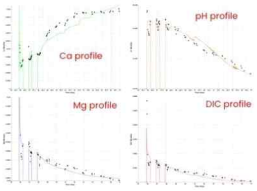
Matter et al. (2025), Comm. Earth & Environment

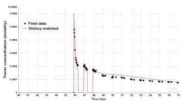
Calibrated geochemical model

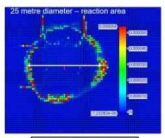
44.01

Simulation of mineralisation in a fully coupled dual porosity model

- History matching of profile of non-reactive tracer recovery to tune permeability and porosity distributions, and dispersivity
- Reactive model is CMG-GEM (implicit PHREEQC) with TST-kinetics models
- Dissolution model based on lizardite, pyroxene, and olivine controlling pH neutralisation
- Precipitation based on dolomite, magnesite, and calcite controlling DIC and cations







Delta-porosity (fracture)

44.01's progress and next steps

44.01

Technology proven on pilot and demo scale, enroute to commercial FOAK





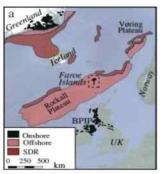
Next step pilot test – Faroe Islands

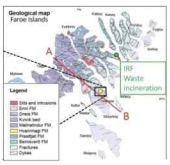
Biogenic CO_2 mineralization in basalt

JARÐFEINGI Faroese Geological Survey · equinor · 44.01 · JARÐHITI · BAKKAFROST



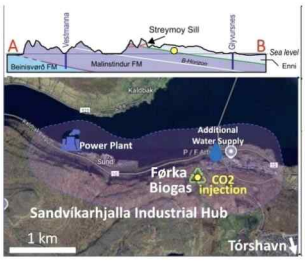
- Faroe Island Basalt Group is part of North Atlantic Igneous Province
- Stratigraphic thickness >6.5 km
- Mainly extrusive basaltic facies
- Late Paleocene to Early Eocene





Industrial hub with biogenic CO_2

44.01



- Pilot CO_2 injection of up to 2000 tons of CO_2 (dissolved injection)
- Exploratory borehole drilled and characterized in June 2025
- CO_2 source: Forka Biogas plant
- Water source: freshwater
- Drilling of injection and monitoring wells in early 2026
- Upscaling potential to ~10,000 tons CO_2/yr



Consortium to explore Faroe Islands decarbonization via CO2 mineralization in basalt

DecarbFaroe

Clean **E**nergy **T**ransition **P**artnership (CETP) application



Final remarks

- To test and prove in-situ mineralization, field demonstrations on different scales (pilot to commercial) are required. Lab experiments at reservoir conditions are complementary and are useful for calibrating reactive models and for investigating specific processes at various reservoir and operating conditions.
- Limited pre-existing reservoir data of mafic to ultramafic rocks require an extensive exploration and reservoir characterization program and an upfront investment.
- Injectivity in ultramafic rocks (peridotite) is a function of the connectivity of the fracture network and stress-dependent permeability (not all fractures contribute to the injectivity).
- Fluid flow and mineralization in peridotites rely on the reactivation of the existing fracture network and the creation of new fractures. -> state of stress and fracture filling play crucial roles.
- CO_2 mineralization assessments require fully coupled thermo-hydro-mechanical-chemical modelling.