

# 안전하고 경제적인 CCS 를 위한 새로운 개념

타케시 츠지

도쿄 대학교

공학부

[tsuji@sys.t.u-tokyo.ac.jp](mailto:tsuji@sys.t.u-tokyo.ac.jp)



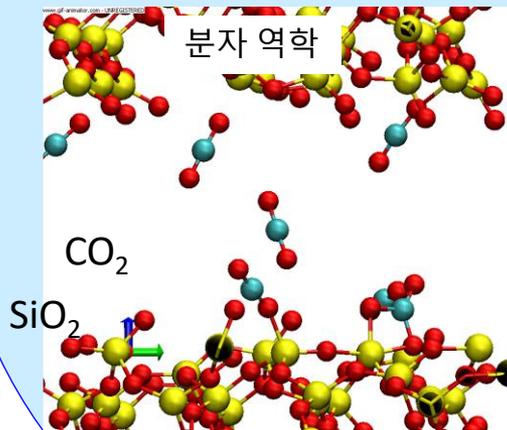
# 랩 내 CCS 관련 프로젝트

## 프로젝트 1

분자 규모(nm- $\mu$ m)

주요 활동:

- CO2 광물화
- 저순도 CO2 저장



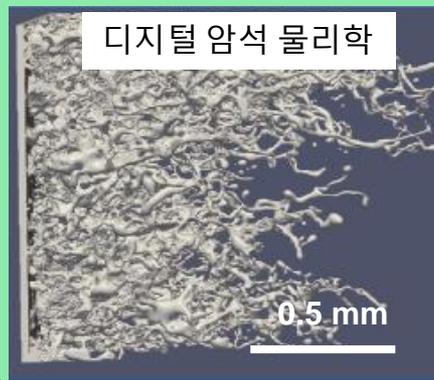
리양 외, 2017년 화학 연구 기술

## 프로젝트 2

기공 규모( $\mu$ m-m)

주요 활동:

- 최적의 CO2 저장 조건
- 유압, 내진 및 전기적 특성 간의 관계



츠지 외, 2016년 수자원 분야의 발전

## 프로젝트 3

저장소 규모(m-km)

주요 활동:

- 지속적 모니터링 시스템
- 모니터링을 위한 소형 지진원 시스템
- 분산형 음향 감지 개발



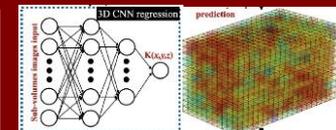
츠지 외, 2022년 지구물리학 국제학술

## 프로젝트 4: 다중 스케일 현상의 연계

- 슬립 유동(slip flow)의 영향 평가
- 업스케일링을 위한 머신 러닝

싱 외, 2017년 물리학 리뷰E

장 외, 2023년 WRR



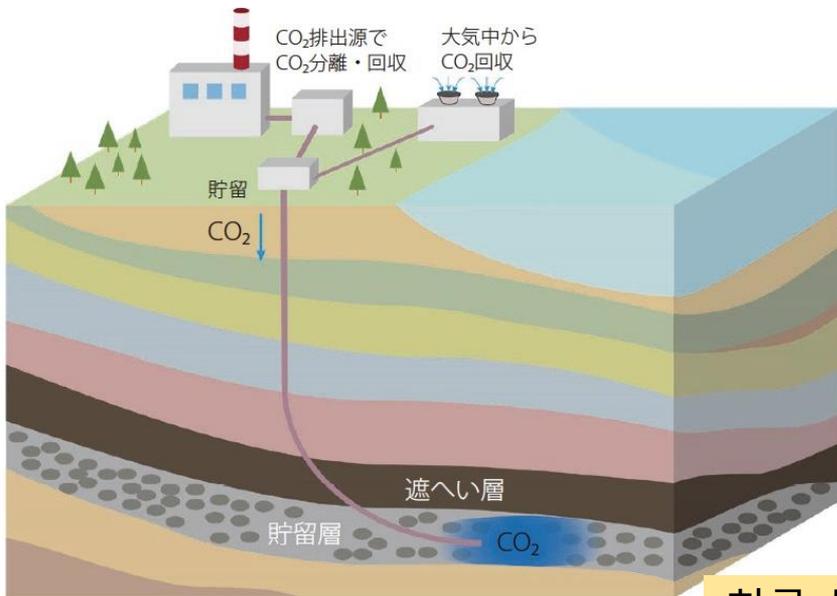
# 탄소 포집 및 저장

지하 저수지에 CO2를 주입하여 CO2 배출량 감축

- 단기적 영향
- 엄청난 잠재력

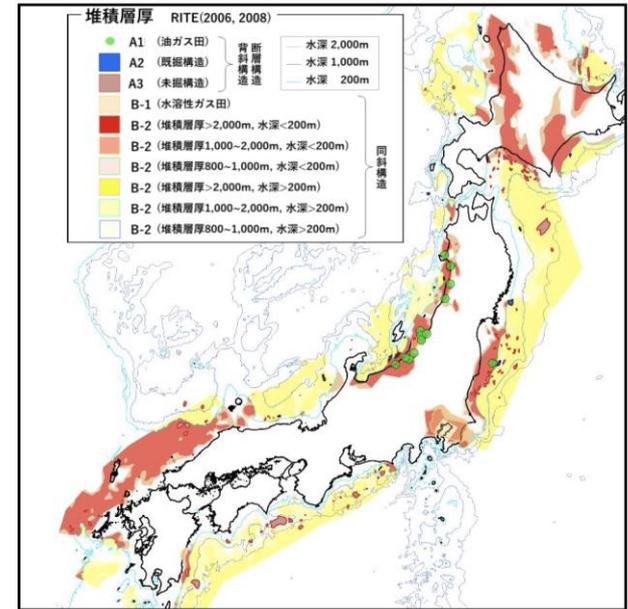
- 비용?
- 안전성?

- 일본 섬 주변에서만 1,000억 톤 이상의 CO2를 주입할 수 있음 (오가와 외, 2011년)
- 일본 내 100년간 총 CO2 배출량



辻, 2023

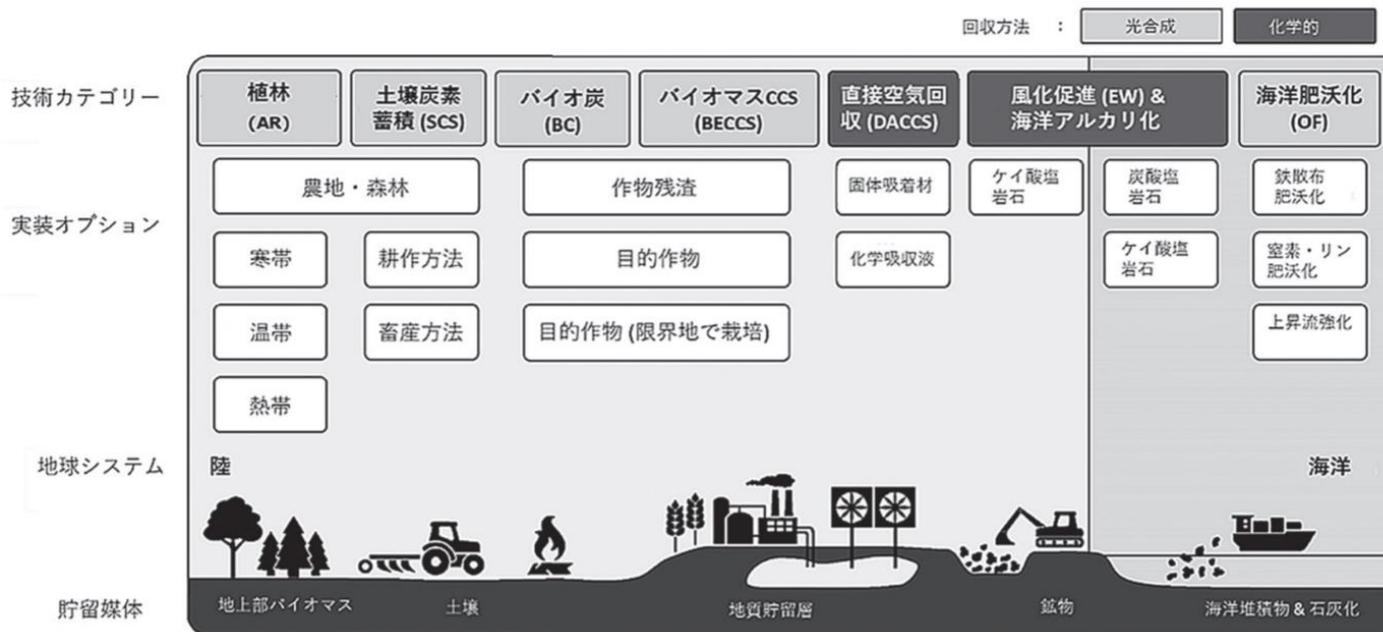
【CO<sub>2</sub>貯留層賦存量マップ (出典: RITE, 編集: JCCS)】



최근 상세한 지구물리학적 데이터를 기반으로 한 평가에서 11곳의 CO<sub>2</sub> 저장에 적합한 부지가 확인됨(METI, 2023).

# 2050년 탄소 중립 달성을 위한 네거티브 배출

- 대기 중 CO2를 포집하여 지층에 저장
- 탄소 포집 및 저장과 바이오 에너지 (BECCS)
  - 직접 공기 탄소 포집 및 저장 (DACCS)

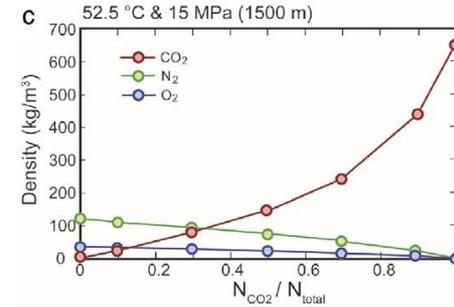


出所) 加藤悦史 (2020) 大気中CO2を除去するネガティブエミッション技術の動向〜パリ九奥底の長期目標達成のために〜, 基本エネルギー総合工学 Vol.42 No.4 2020.1

➢ 고순도 CO2 포집에는 비용이 많이 필요함

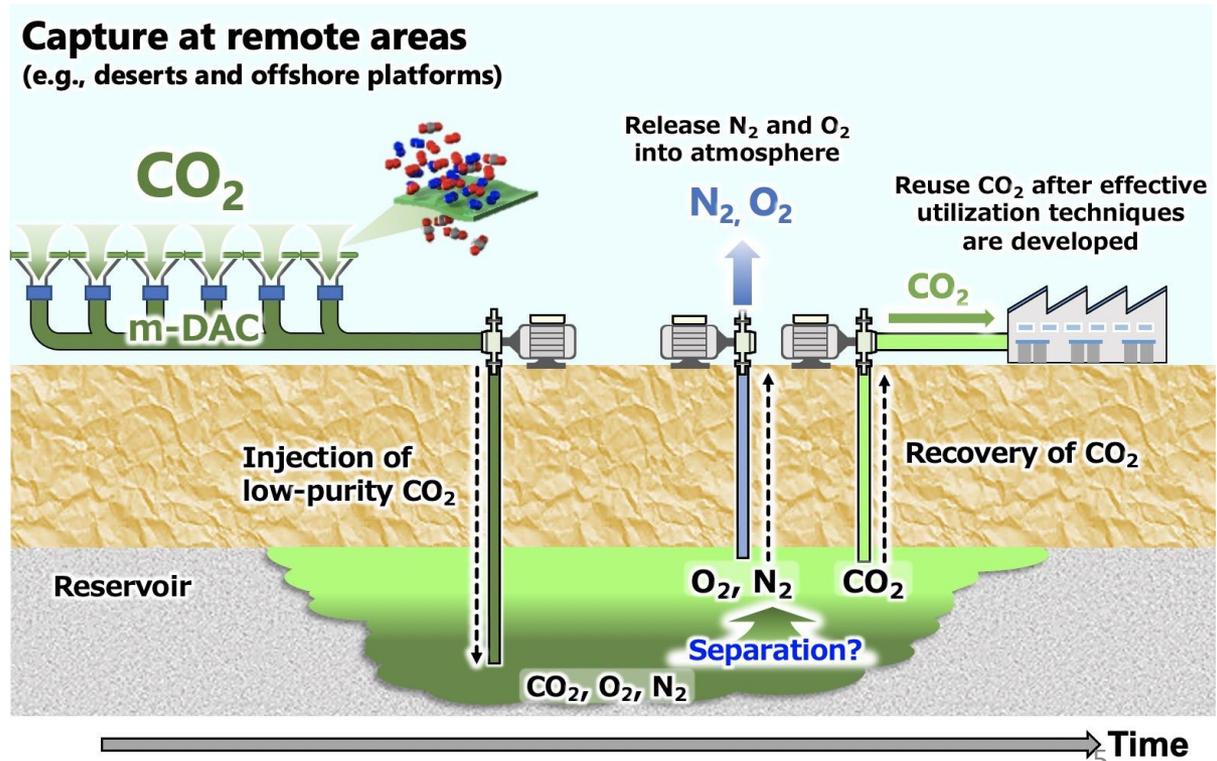
# 멤브레인 기반 DAC를 통한 저순도 탄소 저장

- 공장에서 포집된 CO<sub>2</sub>(황산화물 및 질소산화물 포함)는 반드시 고순도로 정제되어야 함
- 하지만, 멤브레인 기반 직접공기포집(DAC)를 통해 포집된 CO<sub>2</sub>는 유해하지 않은 성분(질소 및 산소)으로 구성되어 있음
- DAC를 통해 저순도 CO<sub>2</sub>를 저장하여 포집 비용 절감



이 콘셉트가 허용된다면, 장소에 구애받지 않고 구현할 수 있음

- 사막 (고갈된 석유/가스 저장소)
- 풍력 발전용 터빈이 있는 해상 플랫폼



# 잠재력과 안전성을 강화하는 콘셉트

아이슬란드 카브픽스 프로젝트

매터 외, 2016년

## 탄소 광물화

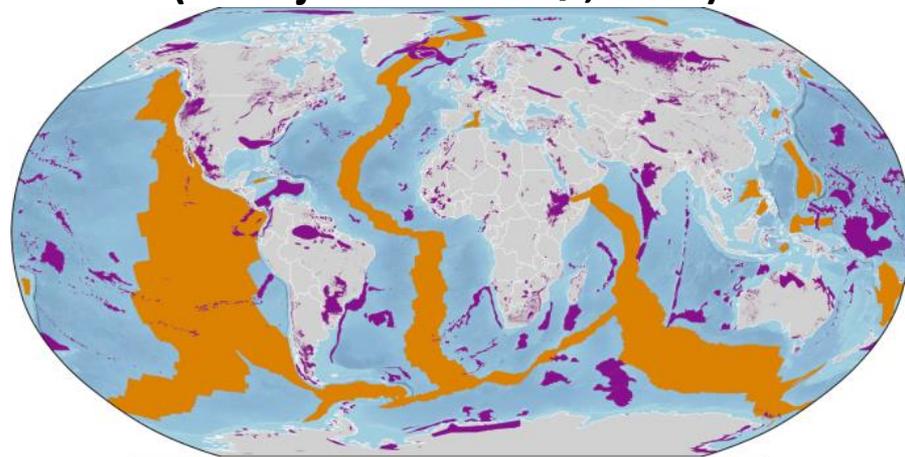
- >현무암에 주입된 이산화탄소의 95% 이상이 2년 이내에 탄산염 광물로 전환됨
- 현무암은 지구상에 흔함
- 큰 잠재력과 안전한 저장



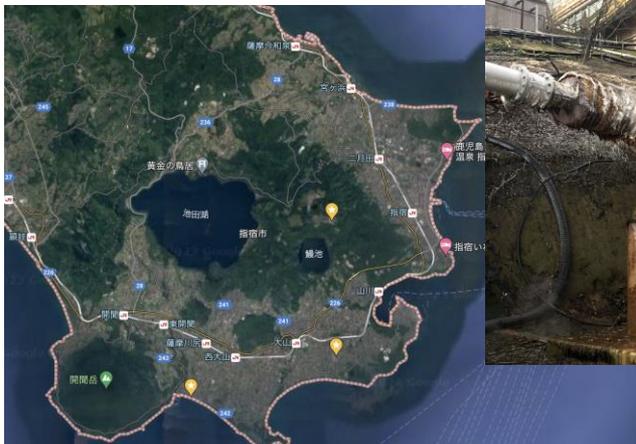
가고시마,  
남부 규슈



탄소 광물화를 위한 잠재적 부지  
(Snæbjörnsdóttir 외., 2020)



■ Oceanic igneous plateaus or continental flood basalts
 ■ Oceanic ridges < 30 Ma

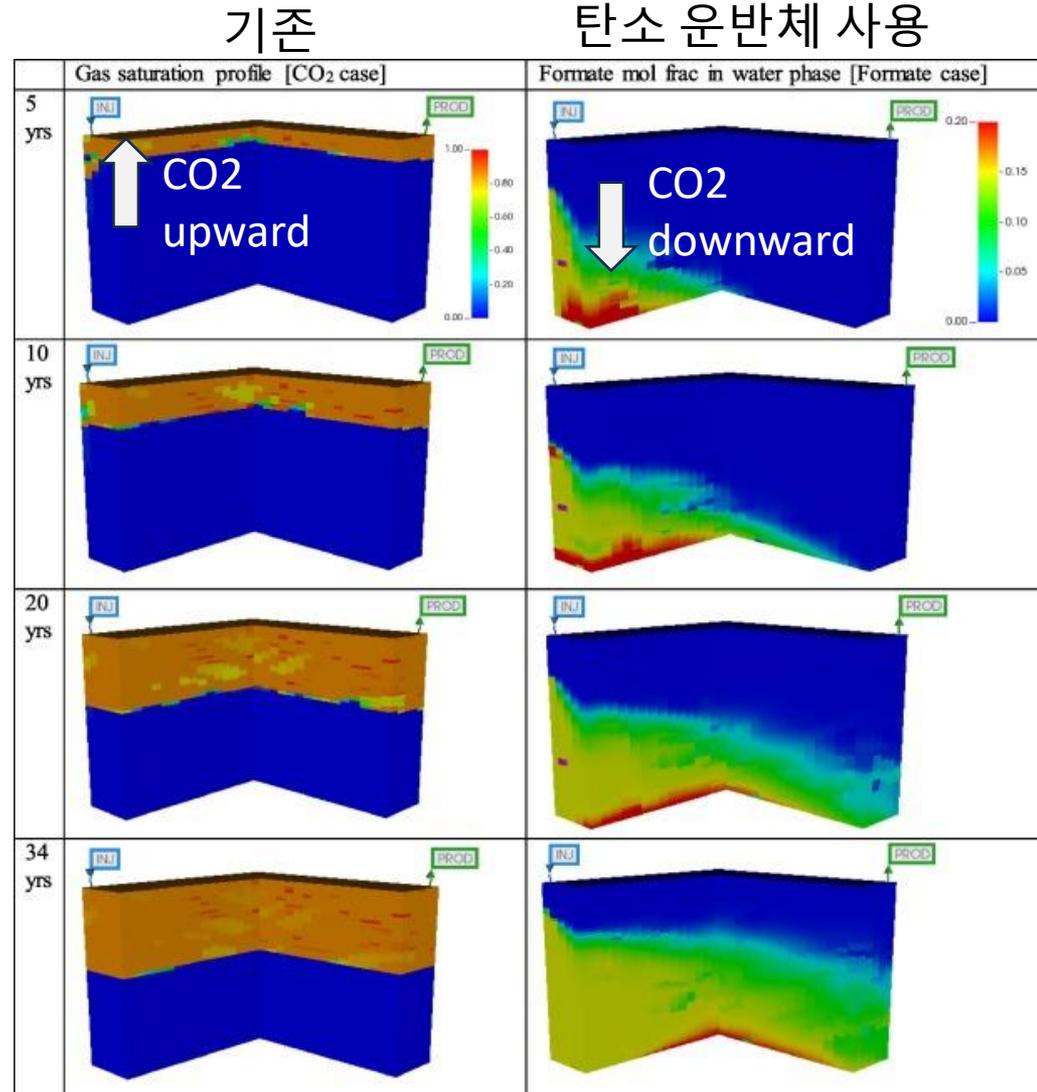


# 잠재력과 안전성을 강화하는 콘셉트

## 안전한 이산화탄소 저장을 위한 탄소 운반체 사용

- **포름산염 용액과 나노버블 이산화탄소**는 지질학적 저장을 위한 탄소 운반체로 제안됨.

- CO<sub>2</sub> 및 포름산염 주입(또는 나노버블 이산화탄소 주입)을 해도 기존의 CO<sub>2</sub> 주입과 달리 상향 부력에 의해 유동성이 증가하지 않음
- 이산화탄소 누출 감소
- 단층에 가까운 저장소에 적합한 접근 방식일까?



# 일본의 CCS 로드맵

로드맵에 따르면 2050년까지 연간 이산화탄소 저장량은 1억2000만~2억4000만 톤으로 예상됨.

- 2030년부터 2050년까지 20년 동안 새로운 CCS 프로젝트를 시작하고 연간 저장 용량을 매년 약 600만~1,200만 톤씩 늘려야 함

X10<sup>4</sup> 톤 CO<sub>2</sub>

24,000 万tCO<sub>2</sub>

22,000

20,000

18,000

16,000

14,000

12,000

10,000

8,000

6,000

4,000

2,000

0

## <国内のCCS普及イメージ>

20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50

①2023~26年度

FS等

②2026年度中

最終投資決定

2030

建設

④2030年中

CCS事業開始

2050

2030年中にCCS事業を開始するためには、  
①2023年度からFS等を開始し、  
②2026年度までに最終投資判断する必要。

【参考】必要な圧入井の本数

・1.2億 t/年の場合：240本

・2.4億 t/年の場合：480本 の圧入井が必要。

※圧入井1本あたりの貯留可能量：50万t/年

※試掘費用：陸域 約50億円/本、海域 約80億円/本

연간 2억4000만 톤

2.4億トン

想定される  
年間貯留量  
(目安)

1.2億トン

연간 1억 2000만 톤

5

일본 경제산업성(METI), 2022년

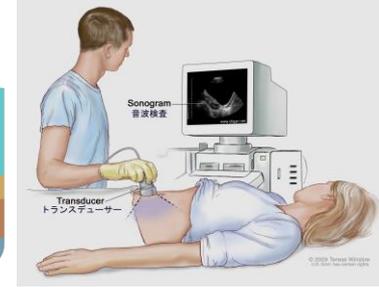
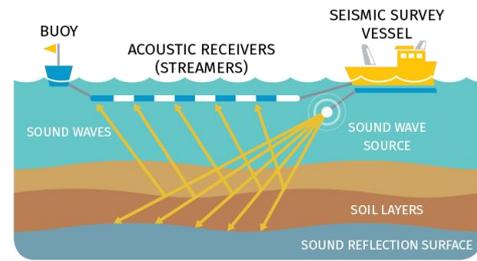
[https://www.meti.go.jp/shingikai/energy\\_environment/ccs\\_choki\\_roadmap/jisshi\\_kento/pdf/001\\_04\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/ccs_choki_roadmap/jisshi_kento/pdf/001_04_00.pdf)

다수의 이산화탄소 저장소 관리 필요

- 대중의 수용성을 얻기 위해서는 모니터링이 가장 중요함

# 일반적인 모니터링 접근법

## 시간 경과 지진 조사

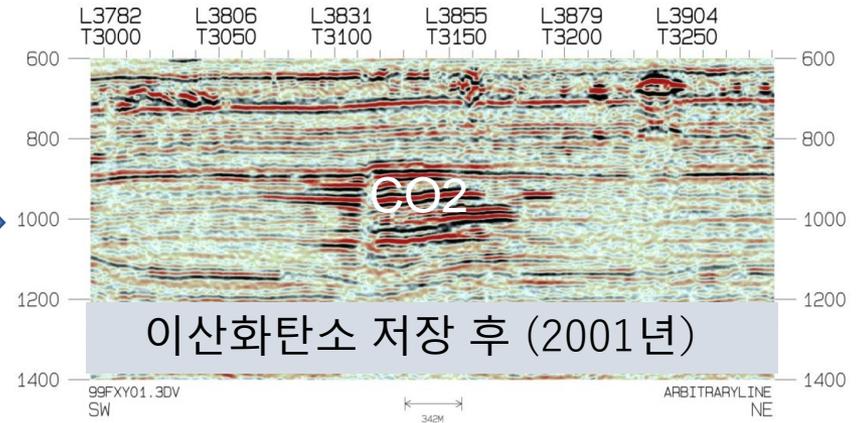
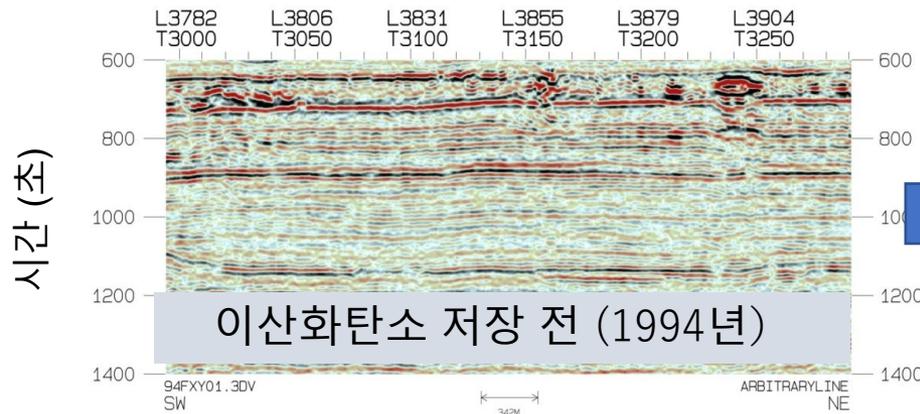


이전

이후

= CO2 주입으로 인한 지진 특성 변화

슬라이프너(Sleipner) CCS 프로젝트  
(아츠 외, 2008년)



### 고비용

- 데이터 수집에 더 긴 시간 간격(낮은 시간 해상도)
- 빠른 이산화탄소 누출을 식별하기 어려움

영구적인 모니터링 시스템 개발  
저비용

➤ 지속적

# CO2 저장소의 정확한 모니터링을 위한 영구적 활성 지진원 개발

규모: ~1m

2016년

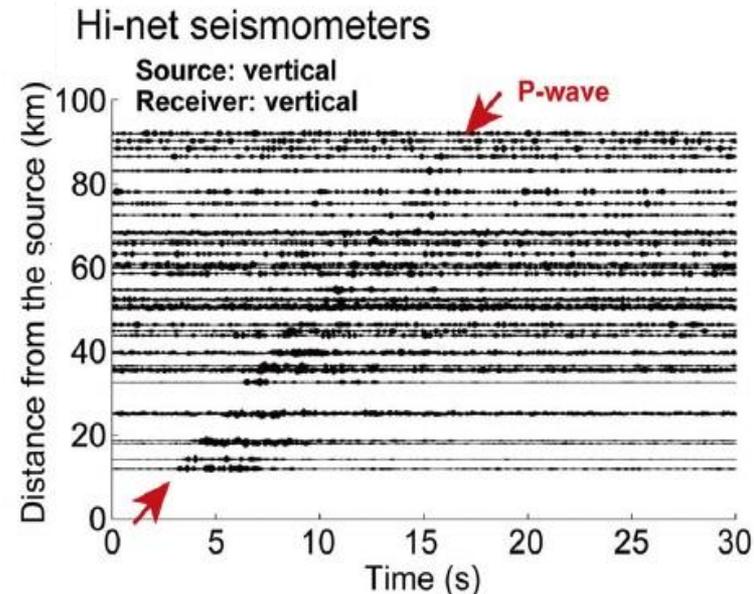
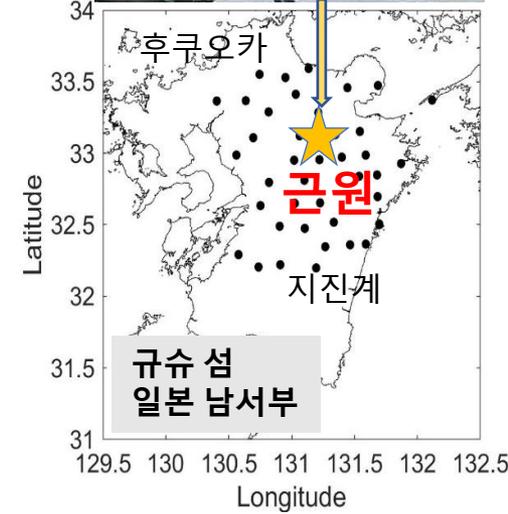
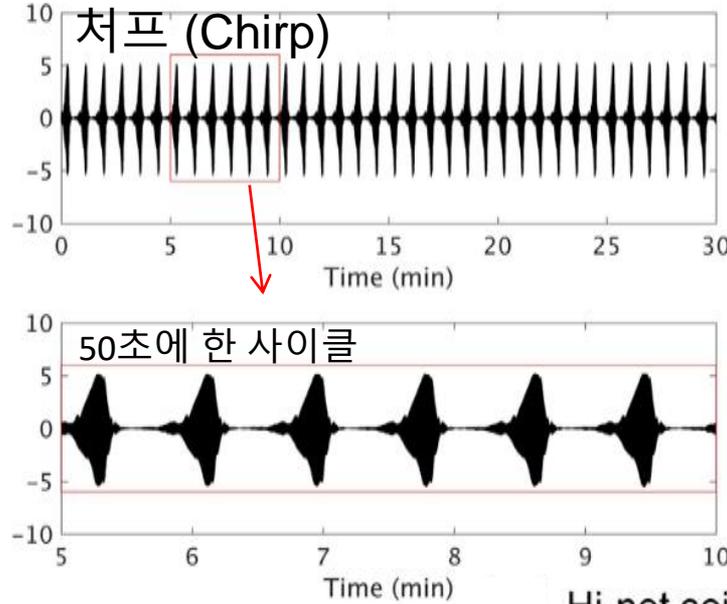


편심 질량(10kg)  
20Hz에서 8000N

- 연속 진동 생성(스윙)
- 장기 신호 중합을 통한 S/N 개선

모니터링 근원에서의 신호는 4개월 중합 시  
 최대 80km에 도달  
 광범위한 지역 모니터링(다수 CO2 저장 부지)

츠지 외, 2021 과학 보고서



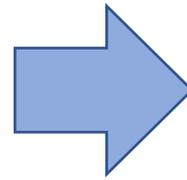
# 휴대용 활성 지진원 (PASS)



규모: ~1 m

츠지 외, 2021 과학 보고서

최대 80km 전파



소형화



규모: ~0.1 m

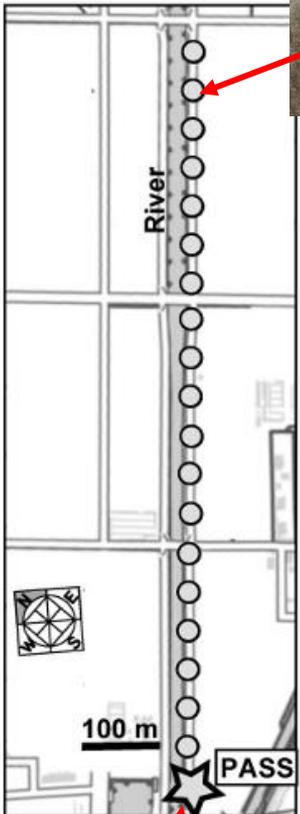
츠지 외, 2023 SRL

4 cm 모터

? m 전파

# 중합을 통한 신호 개선

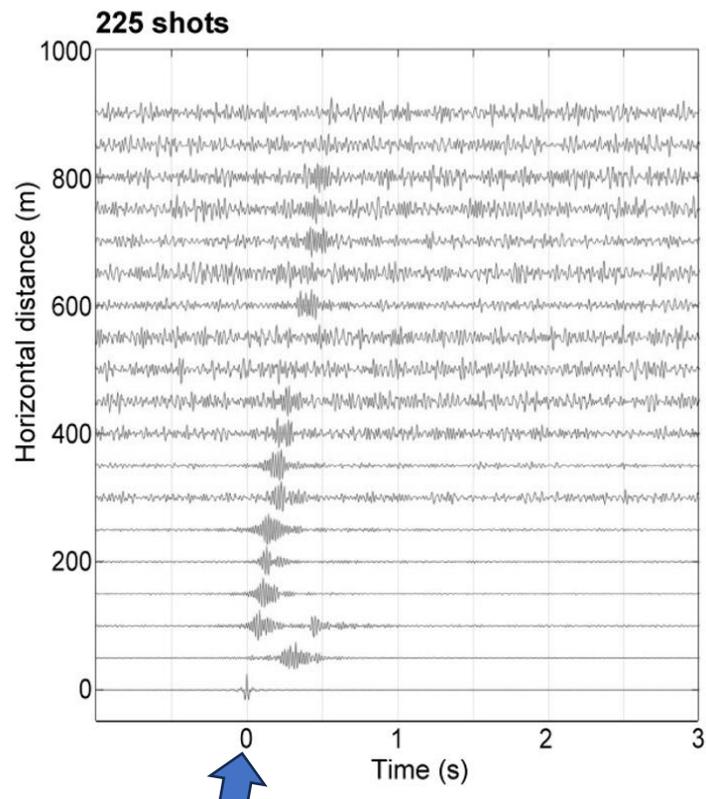
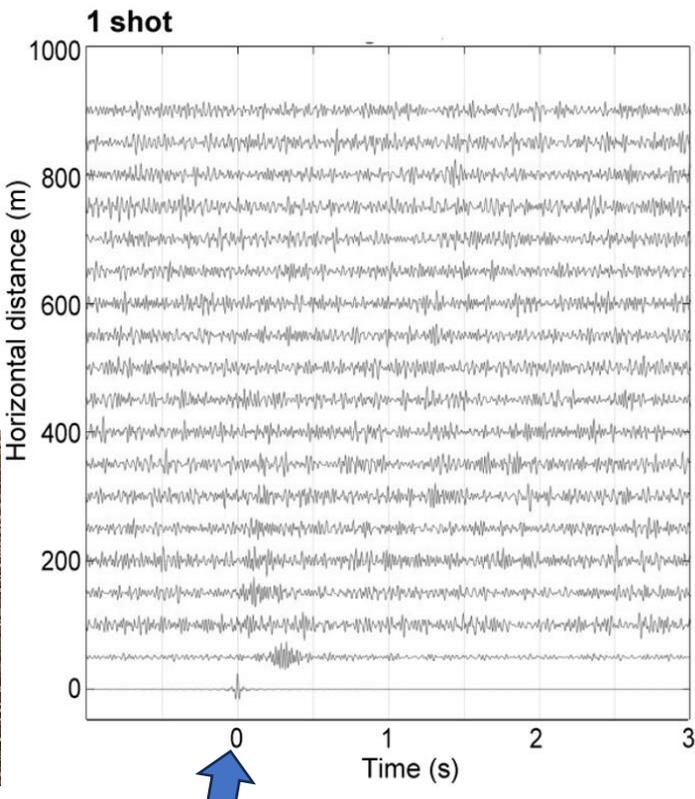
a



➤ 최대 4cm 모터가 장착된 PASS로 부터의 신호는 최대 1km까지 전파됨!



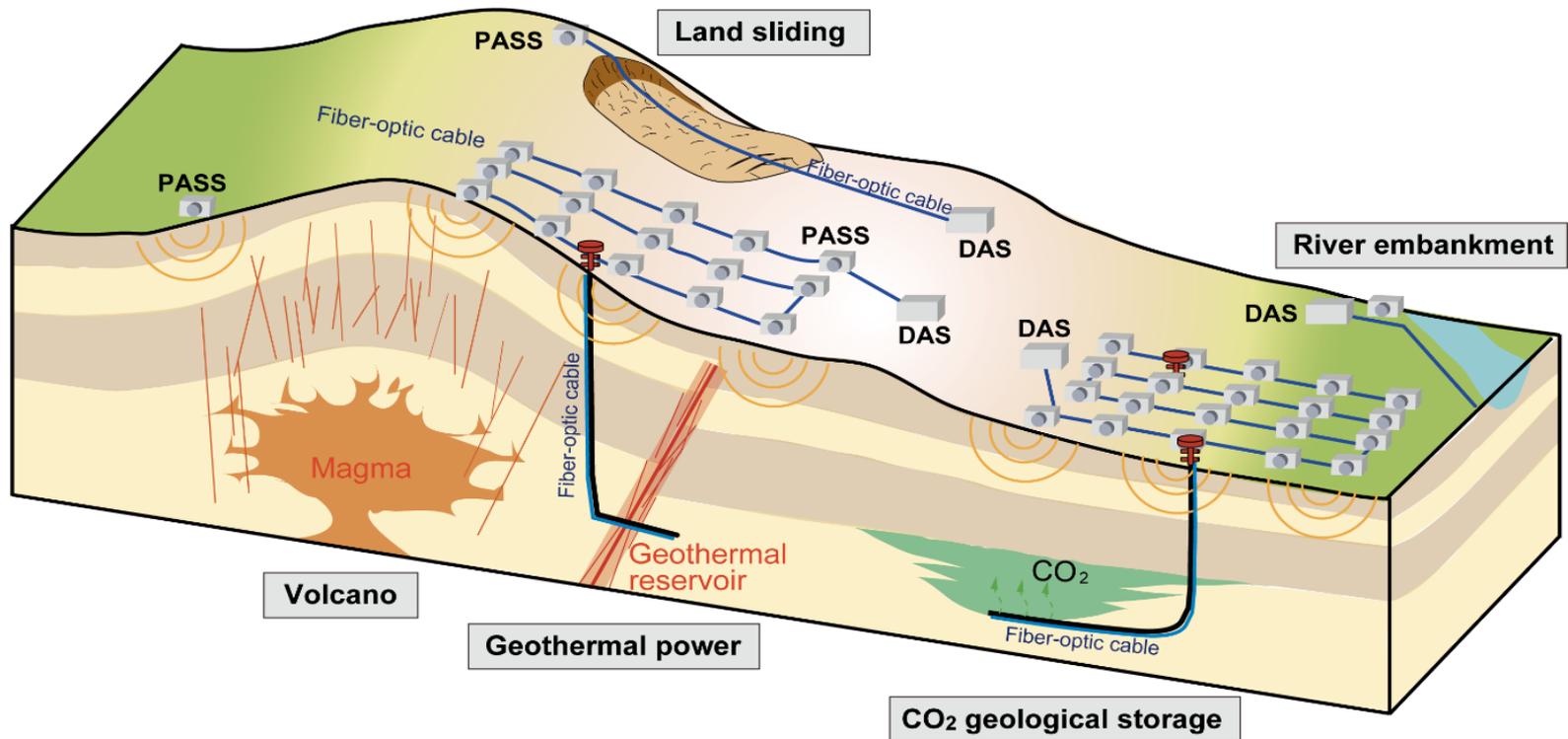
츠지 외, 2023 SRL



10cm 박스 (4cm 모터)

# 이산화탄소 저장 부지 지속적인 모니터링

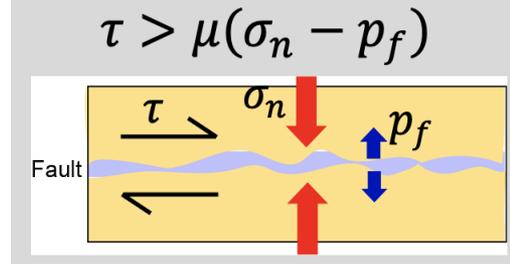
- 다수의 리시버 배포(예: DAS와 같은 새로운 유형의 리시버)
- 다수의 작은 지진원 (PASS)를 사용하여 모니터링 신호 생성
- 저비용으로 여러 이산화탄소 주입 부지를 지속적으로 모니터링



# 자연 지진과 이산화탄소로 유도된 지진 구분 방법

춘과 츠지, 2020, 지속 가능성

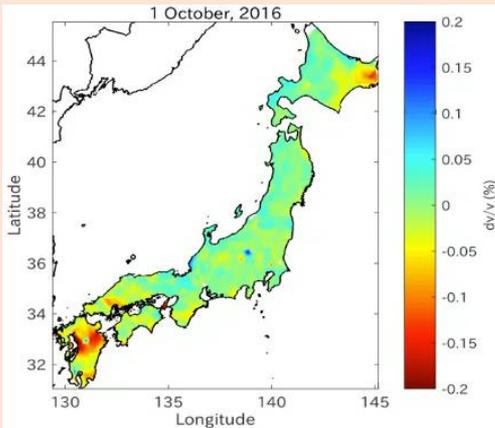
1. 모니터링을 통한 날씨 또는 원격 지진으로 생긴 자연 기공 압력 변화 측정
2. 수치 시뮬레이션을 통해 이산화탄소 주입으로 생긴 인위적인 기공 압력 변화 측정(또는 계산)



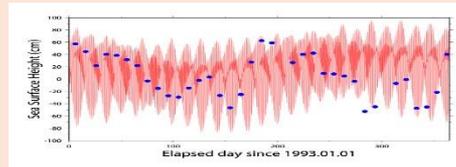
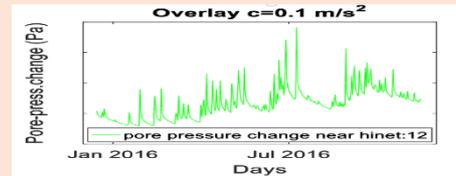
- 만약 (1) 자연적 기공 압력 변화가 (2) 인위적 기공 압력 변화보다 훨씬 크다면, 지진은 자연적인 것일 수 있음.

## 1. 날씨와 원격 지진으로 인한 자연 기공 압력 변화

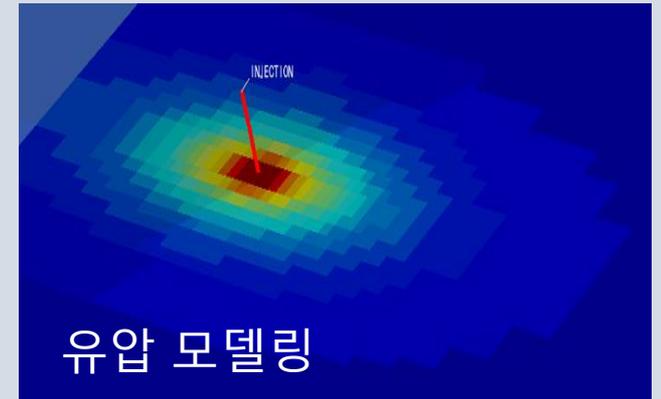
### 지진 속도



### 유압 모니터링

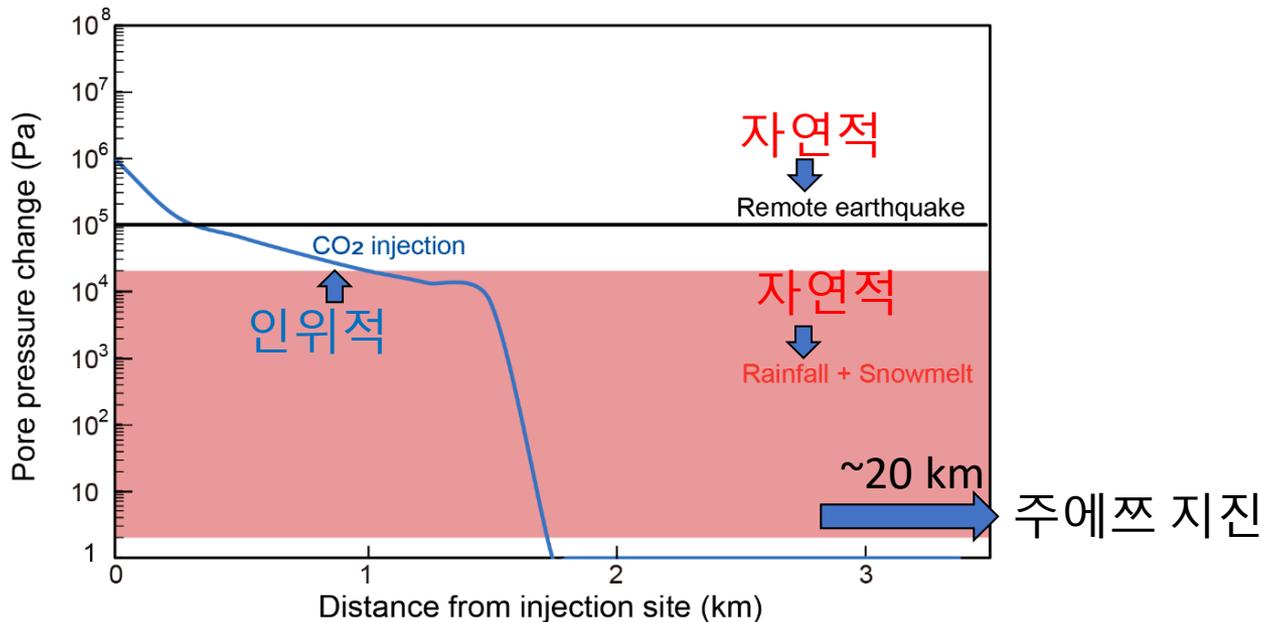


## 2. 이산화탄소 주입으로 인한 인공 기공 압력 변화



# 자체 평가 방법을 사용해 나가오카 CCS 부지 인근에서 발생한 주에프 지진(Mw6.8)을 평가

- 이산화탄소 주입 지점에서 1km 이상 떨어진 곳에서는 이산화탄소 주입으로 인한 인위적 기공 압력 변화보다 자연 기공 압력 변화가 더 컸음
  - 주에프 지진의 진앙은 주입 지점에서 최대 20km 떨어진 곳에 있었음
- 주에프 지진은 자연 지진일 수 있음



춘과 츠지,  
2020 지속가능성

➤ 지진을 분류하는 과학적 접근 방식을 제공

# 요약

CCS/CCUS 기술은 탄소 중립 세계를 위한 핵심 기술이 될 수 있음

- 일본 정부와 민간 기업은 새로운 CCS 프로젝트를 시작하고 연간 저장 용량을 늘리려고 시도하고 있음
- 안전하고 저렴한 이산화탄소 저장을 고려해야 함
- 저순도 이산화탄소 저장
  - 탄소 광물화
  - 탄소 운반체 사용 (예시: 포름산염 용액)
  - 새로운 모니터링 시스템 (장비와 방법)
    - 새로운 지진원 (PASS)
    - 자연 지진과 이산화탄소 주입으로 인한 지진 구별
    - 기타