

未来社会を支える

温暖化対策技術シンポジウムin 関西 2023

国内におけるCO₂地中貯留の実用化・事業化に向けて

— 変わる研究開発と新しい役割 —

二酸化炭素地中貯留技術研究組合・技術部長

(公財)地球環境産業技術研究機構 (RITE)

CO₂貯留研究グループリーダー

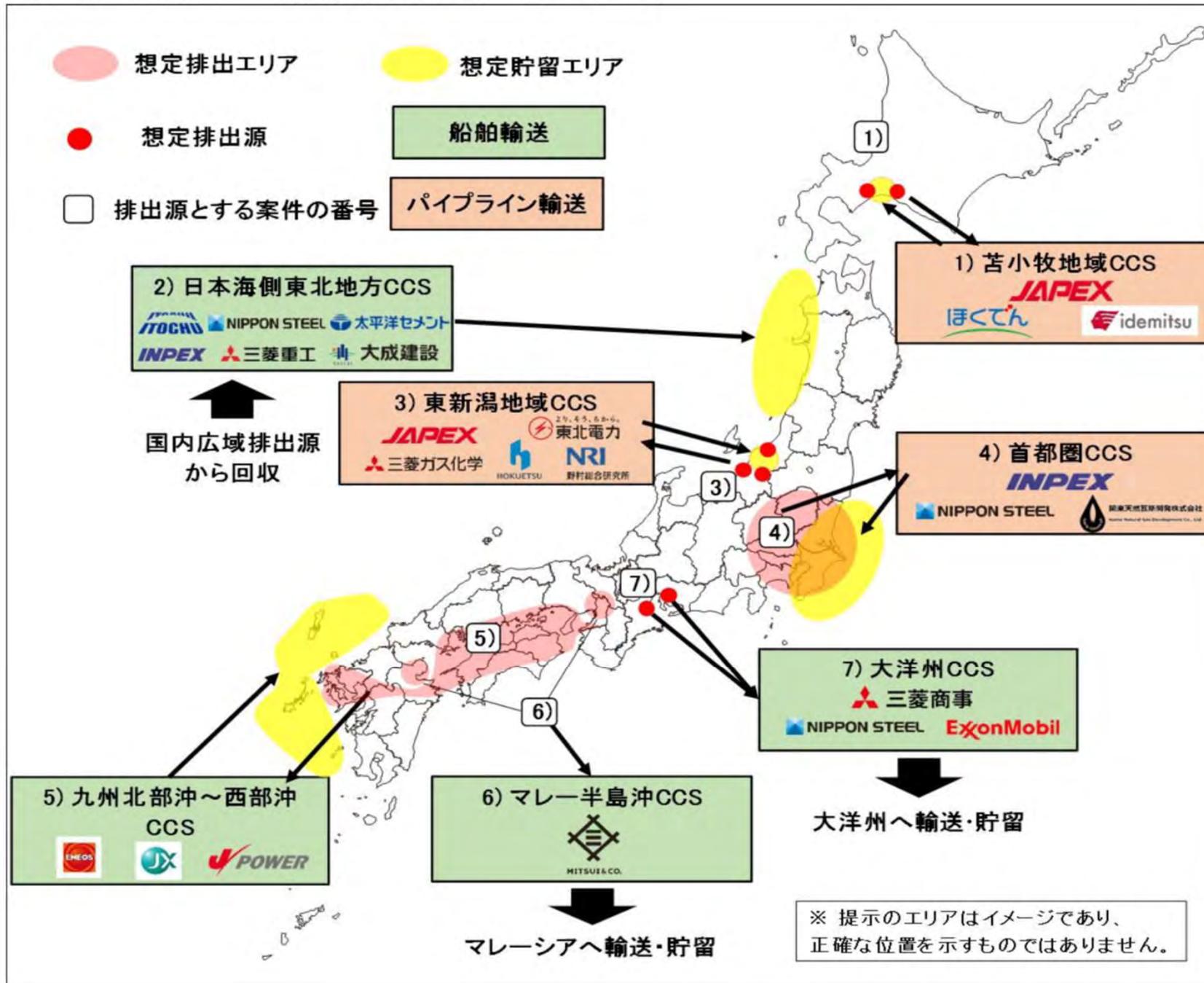
せつ じきゅう

薛 自求

Ziqiu Xue (xue@rite.or.jp)



先進的CCS事業、計7件(国内:5件;海外:2件)が採択された!



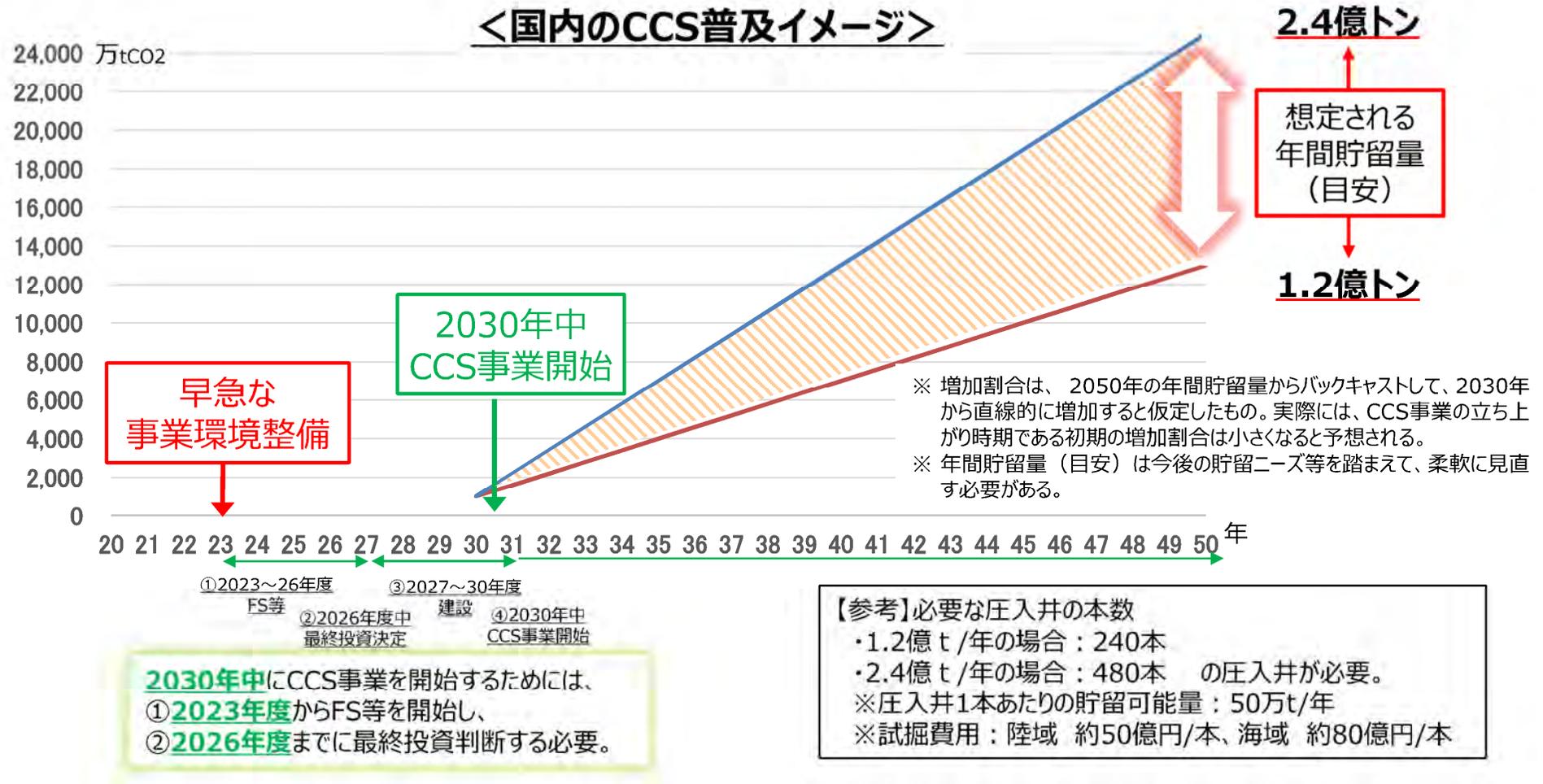
モデル性のある先進的CCS事業

- 将来のCCS事業の普及・拡大に向けて横展開可能なビジネスモデルを確立するため、2030年までの事業開始を目標とし事業者主導による「先進的CCS事業」を選定し、国により集中的に支援。
- 具体的には、CO2の回収源、輸送方法、CO2貯留地域の組み合わせが異なる3～5プロジェクトから支援を開始し、多様なCCS事業モデルの確立を目指すとともに、2030年までに年間貯留量600～1,200万tの確保にめどを付けることを目指す。
※CCSへの参入を計画する事業者の目標等に基づき設定。英国でも、2030年までに年間貯留量1,000万トンを目指している。
- モデル性としては、CO2回収源のクラスター化やCO2貯留地域のハブ化による事業の大規模化と圧倒的なコスト低減に取り組む事業とする。

- CO2発生源、輸送方法、貯留サイトの組み合わせ、高い拡張性
 - 多様なCCS事業モデルの確立
 - 事業の大規模化・圧倒的なコスト削減

2050年のCCSの想定年間貯留量の目安

- IEA試算から推計すると、我が国のCCSの想定年間貯留量は、2050年時点で年間約1.2～2.4億tが目安。2030年にCCSを導入する場合、2050年までの20年間で、毎年12本～24本ずつ圧入井を増やす必要。



2050年時点で年間圧入量が：120 Mtpa

1本の坑井の圧入能力：0.5 MTPA /well

長岡サイト(小規模) →→→ 苫小牧サイト(大規模)



実用化規模へ

苫小牧実証: 30万トン-CO₂

2016

2030

Available for Deployment

2011

貯留適地調査

基盤技術開発

基盤技術の実適用

技術研究組合の設立

1万トン-CO₂
長岡圧入実証試験

全国貯留量評価



二酸化炭素地中貯留
技術研究組合

Geological Carbon Dioxide Storage
Technology Research Association

2000 基礎研究

実用化: 圧入レート、貯留量、経済性、法整備

設立年月日

2016年4月1日



二酸化炭素地中貯留技術研究組合

組合員

- ・応用地質株式会社
- ・株式会社INPEX
- ・石油資源開発株式会社
- ・大成建設株式会社
- ・国立研究開発法人産業技術総合研究所
- ・公益財団法人地球環境産業技術研究機構
- ・JX石油開発株式会社
- ・電源開発株式会社
- ・伊藤忠商事株式会社
- ・伊藤忠石油開発株式会社

三菱瓦斯化学

関係する業界と研究組合員

CO2排出企業

電力(電源開発)、化学産業
油ガス田(三菱ガス化学)

コンサル・ エンジニアリング企業等

大成建設、応用地質

商社 (ファイナンス、 ビジネスモデル)

伊藤忠商事

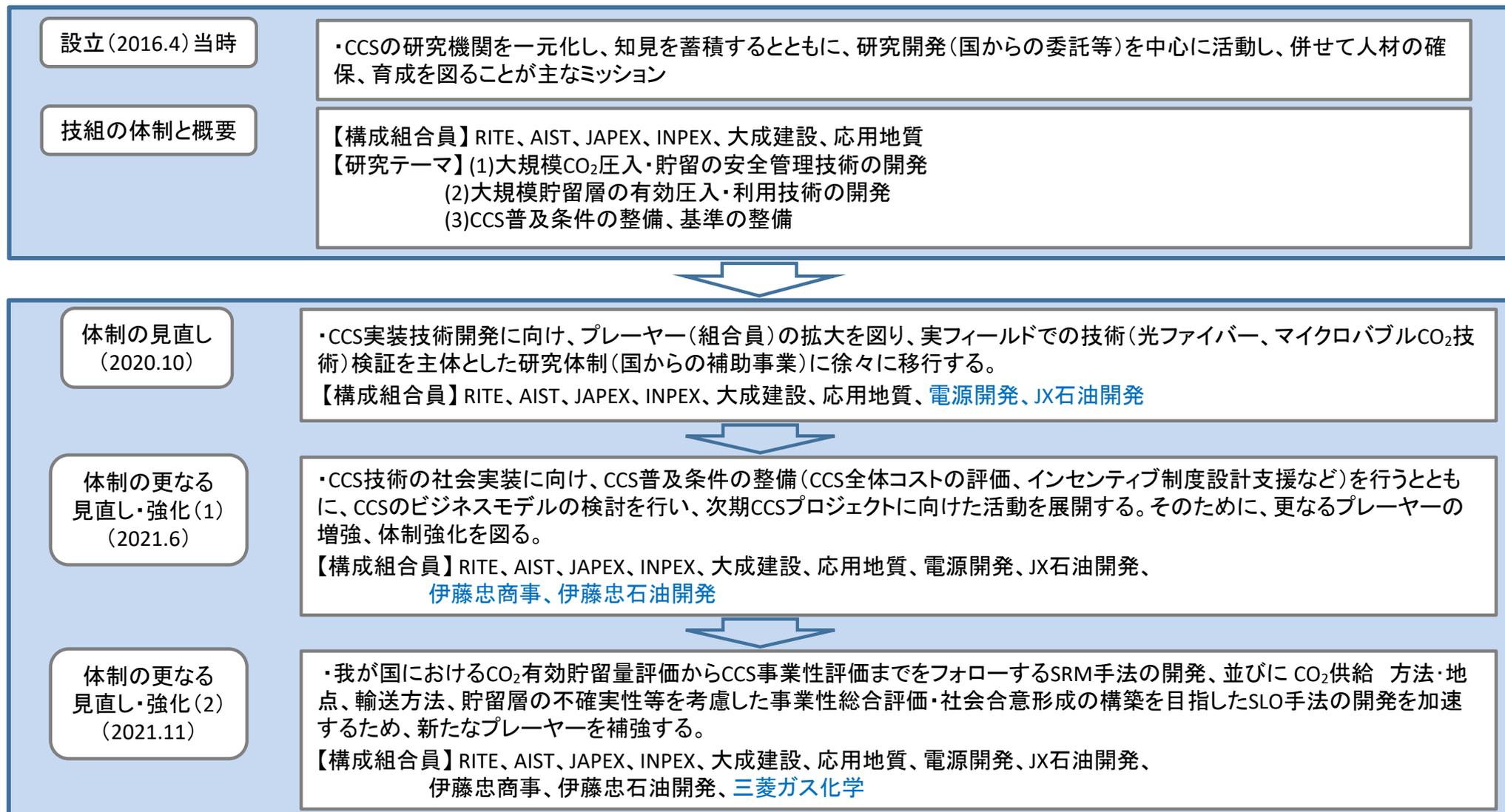
石油・天然ガス 関連企業

INPEX、JAPEX、JX石油開発

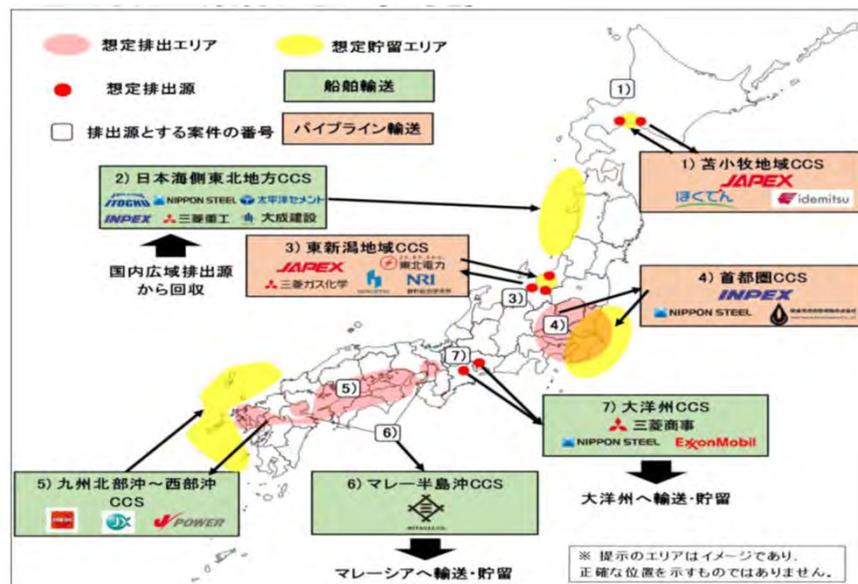
商社技術 サポート企業

伊藤忠石油開発

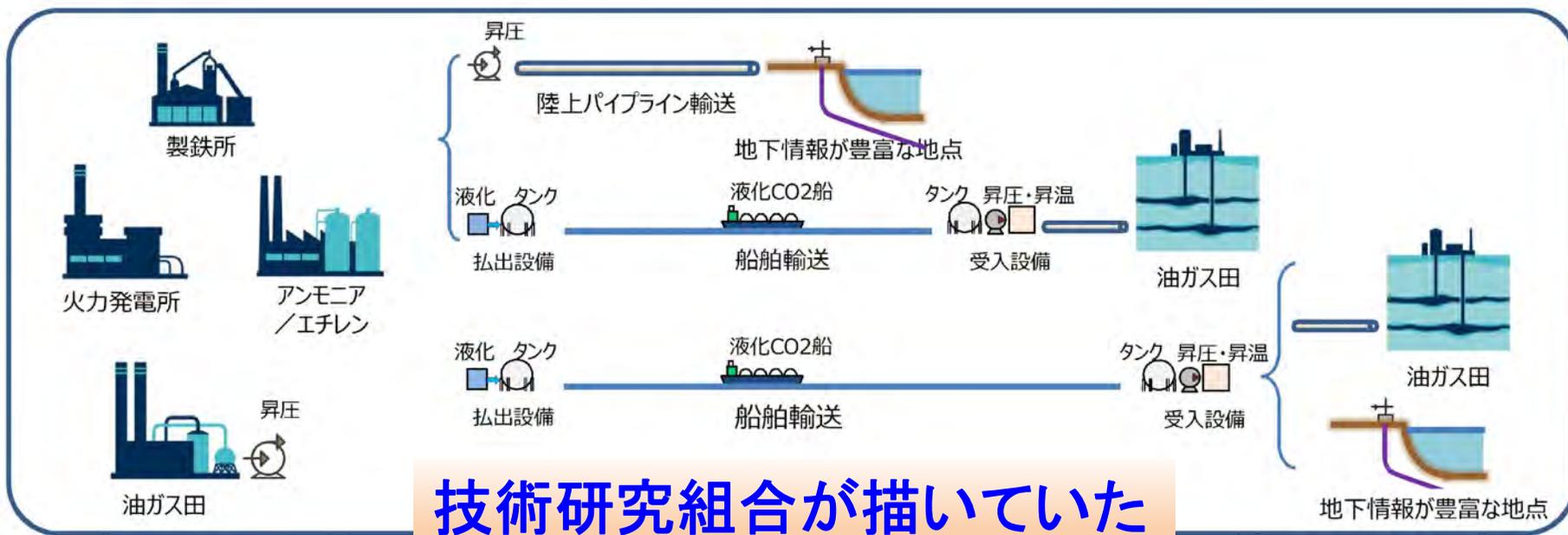
二酸化炭素地中貯留技術研究組合体制の強化



我が国は先進CCS事業として、**7件（うち輸出2件）**を選定。**事業化を加速**する。
 ※排出源・輸送システム・貯留場所について、様々なパターンへの対応が可能。
 ※加えて圧倒的なコストダウンが可能となる拡張性の高い案件を選定。



- 事業化を加速
- 事業パターン
- 大幅コスト削減
- 高い拡張性

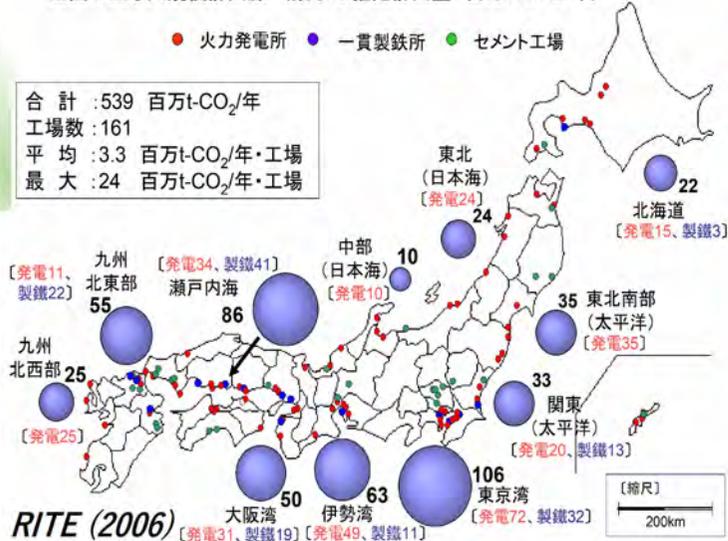


複数の実想定サイトを選定し、事業開発シナリオを検討してきた！

SRM: CO₂ Storage Resources Management (経済性評価込み)

排出源マップ
 ✓ 排出源タイプ
 ✓ 排出量 (規模)

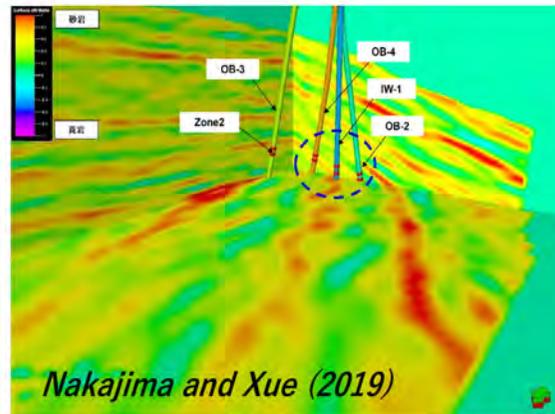
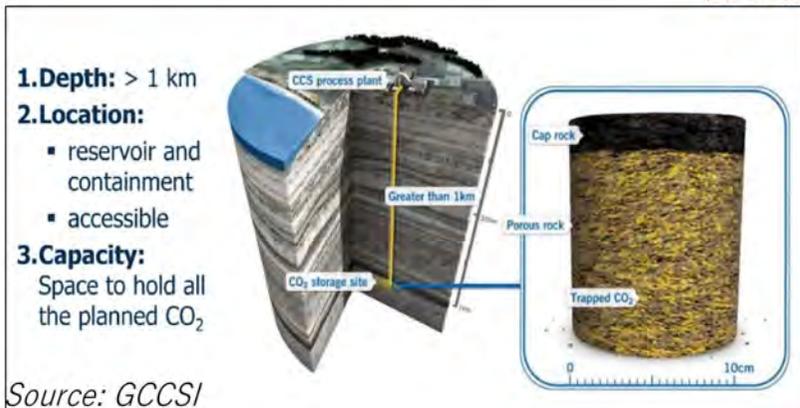
全国の主な大規模排出源 (数字は推定排出量 百万t-CO₂/年)



輸送距離 ↓ 輸送手段

貯留サイト選定
 ✓ 深さ
 ✓ 位置
 ✓ 貯留可能量

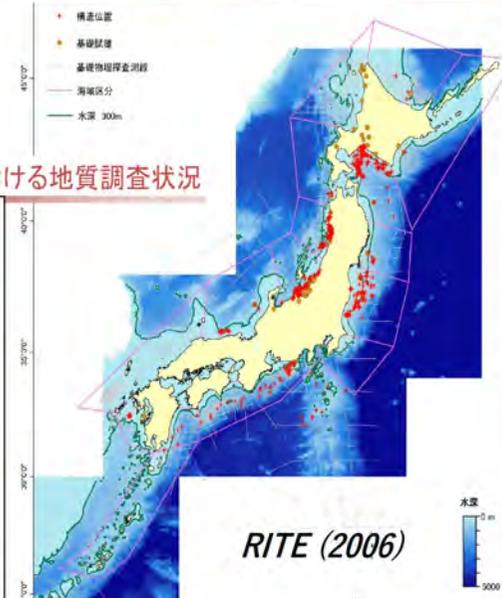
国内のサイト選定基準



サイト地質評価
 ✓ 貯留規模
 ✓ 安全性

潜在的リスク評価
 リスク低減対策

国内における地質調査状況



既存調査データ
 ✓ 基礎試すい
 ✓ 民間企業 (限られたデータ)

課題整理
 追加データ取得

貯留可能量、排出源(排出量、距離)、輸送手段、貯留規模、経済性、社会的受容性(SLO)、複数の実想定サイトを選定！

先進的CCS事業の目的・概要

<モデル性の内容のイメージ>

2030年までの事業開始、CO2回収源のクラスター化やCO2貯留地域のハブ化による事業の大規模化・圧倒的なコスト低減を目標とし、分離・回収、輸送、貯留の各プレイヤーが参画するコンソーシアムを形成し、年間CO2貯留量が50万トン以上である事業構想。以下のパターンを踏まえて、多様な組み合わせを選定。

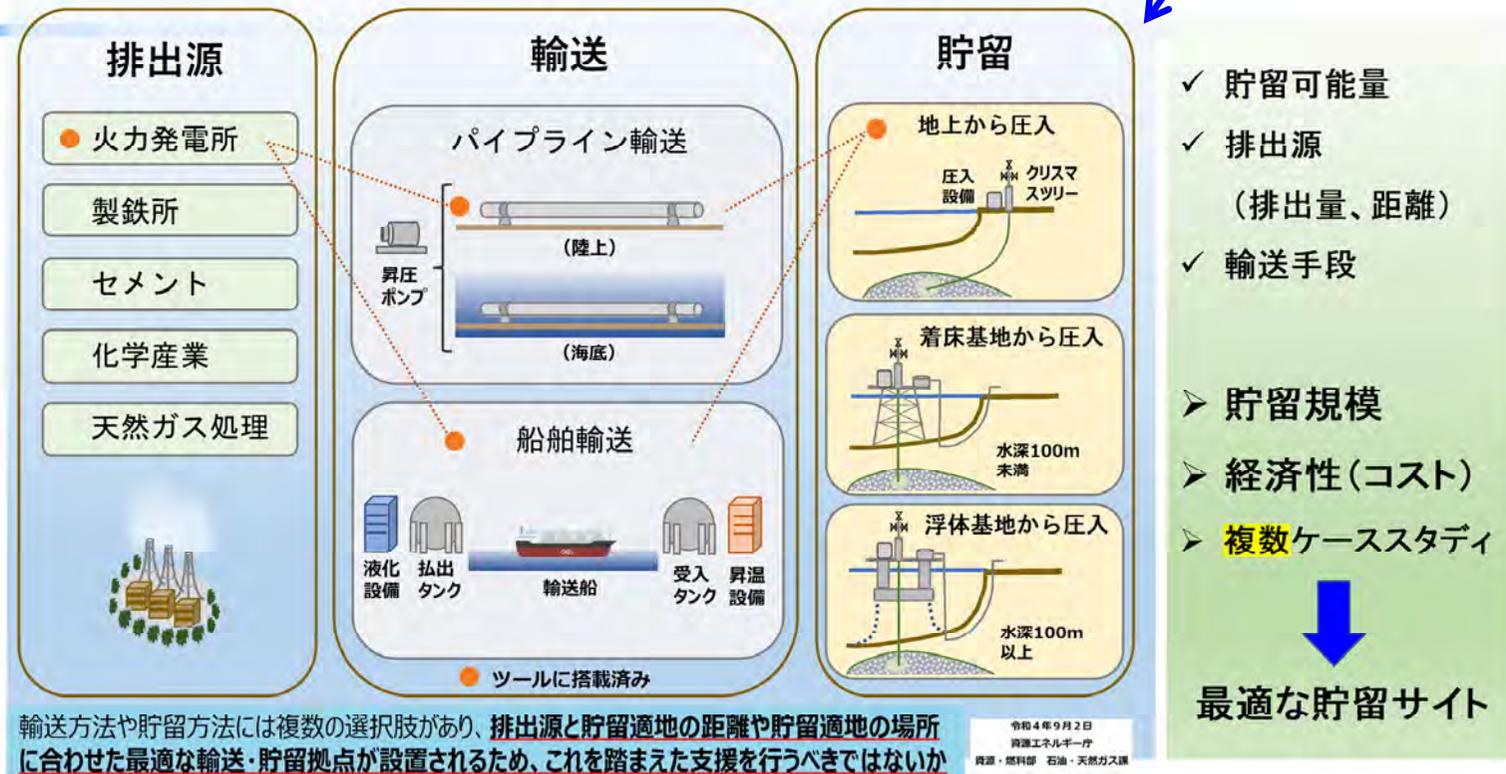
想定されるCO2の回収源、輸送方法、CO2貯留地域のパターン

CO2の回収源	輸送方法	CO2貯留地域
火力発電所 製鉄所 化学工場 セメント工場 製紙工場 水素製造工場 等	パイプライン 船舶	陸域の地下 海底下（沿岸地域） 海底下（沖合）

CCS事業コスト試算ツール

作成中

どの部分がコスト削減できるか
どう削減するか



社会合意形成 (SLO: Social License to Operate) 手法の開発, 地元市民の理解促進

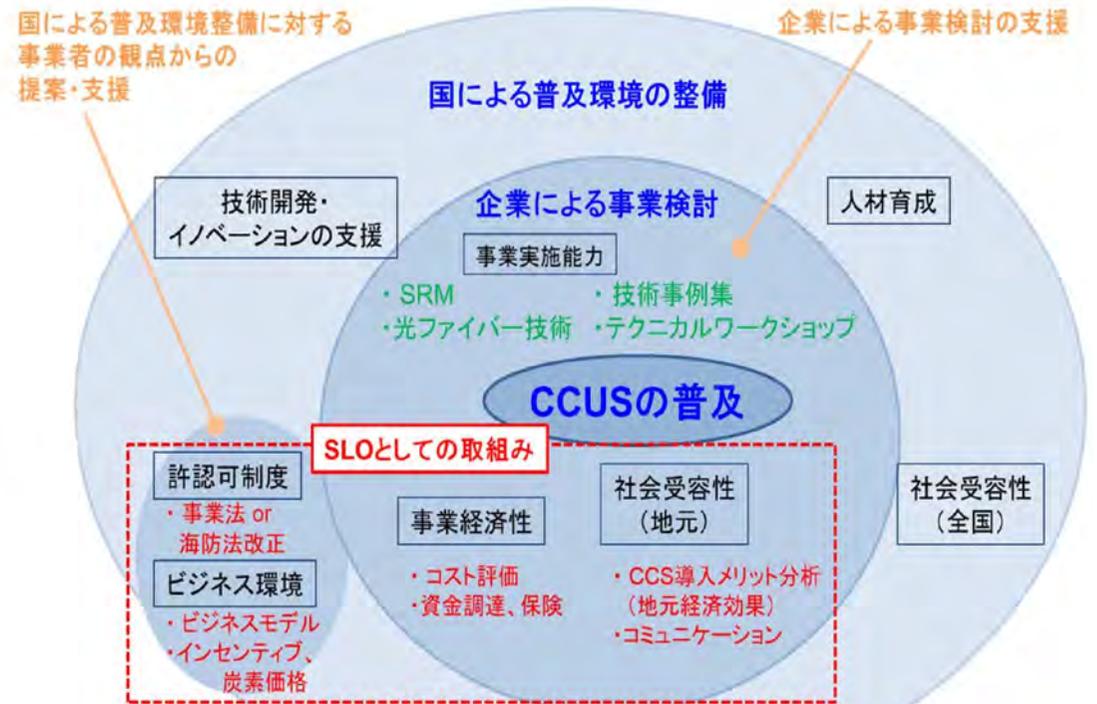
社会合意形成 (SLO)

Risk Communication

- ✓ 地元住民/一般市民との対話
- ✓ QA集作成

CCS導入メリット

- ✓ 地元経済への波及効果
- ✓ 地元雇用の創出



④ CCS事業に対する国民理解の増進

⇒ 2050年カーボンニュートラルという野心的な目標の実現を目指し、あらゆる可能性を排除せず、使える技術は全て使うとの発想に立ち、国や地方自治体、企業等が一体となり、2050年CNに向けたCCSの必要性を国民へ発信し、CCUS実施による自治体への経済波及効果等を示しつつ、国民やCCS実施地域の住民等の理解増進を図る。

社会合意形成(SLO)

Risk Communication

- ✓ 地元住民/一般市民との対話
- ✓ QA集作成



CCS導入メリット

- ✓ 地元経済への波及効果
- ✓ 地元雇用の創出

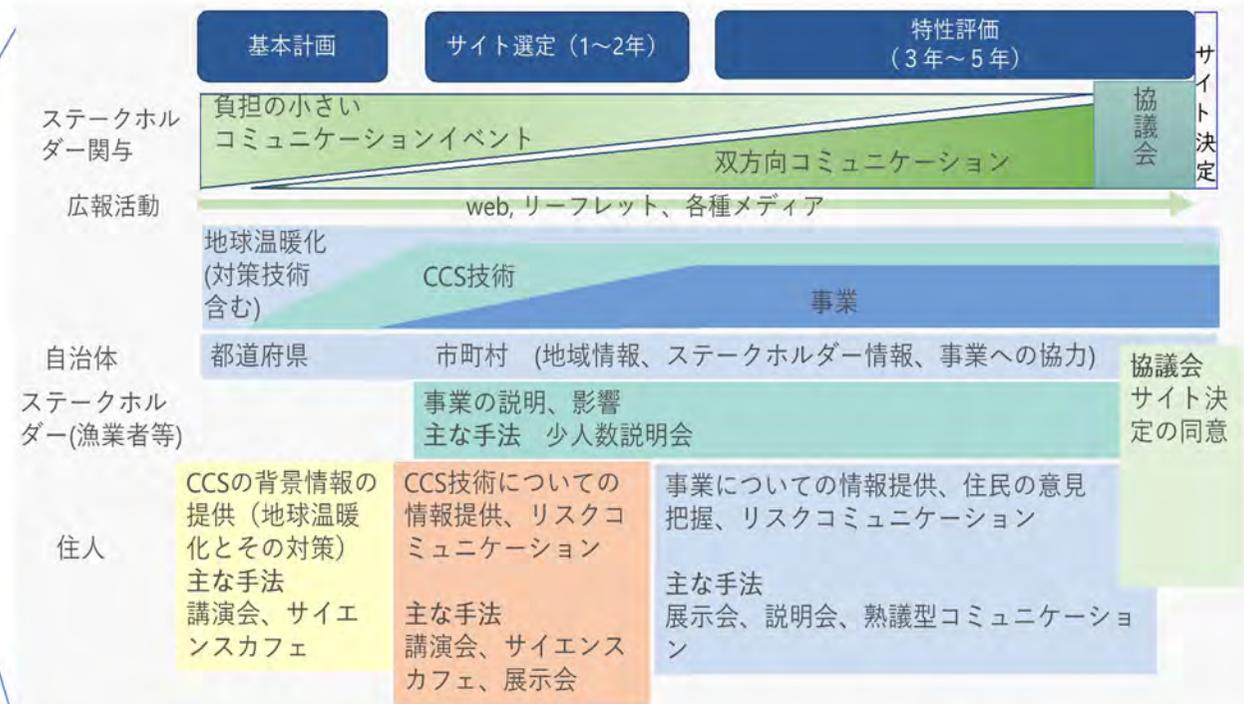
地元メリット分析



Infographic titled '【例：佐賀市】 清掃工場周辺二酸化炭素 (CO₂) 活用状況' (Example: Saitama City - CO₂ utilization status around the waste treatment plant). It shows an aerial view of the facility with labels for '清掃工場' (Waste treatment plant), 'CO₂回収装置' (CO₂ recovery device), 'CO₂貯蔵施設' (CO₂ storage facility), 'CO₂パイプライン' (CO₂ pipeline), and 'CO₂回収率' (CO₂ recovery rate). A text box on the right states:

- 二酸化炭素 (CO₂)**
- 地球温暖化の原因と言われているが、実際には炭酸飲料やドライアイスの原料、光合成で生長する野菜や柑橘類の生育促進などの役に立つ資源です。佐賀市では、清掃工場のごみ焼却時に発生する排ガスから回収したCO₂を有効活用する取組を進めています。
- 二酸化炭素分離回収事業による経済波及効果**
- 54億1,300万円**
- 2014年度~2020年度計画まで
- 設備投資による建設費(約10億2,000万円) + 運転費(約44億9,300万円)
- ※国土交通省「CO₂回収・貯蔵実証事業」の一環として実施

実地調査・ヒアリング：CCUSからCCSへ展開が期待される地域等、地元経済メリット分析



CO₂地中貯留技術事例集の作成・英訳・公開



想定読者:

- CO₂地中貯留事業者(経営層、技術者)
 - 行政機関(推進や規制、地方自治体)
 - 地元関係者(住民、漁協)や環境保護団体
- 銀行・保険会社(投融資、事業保険)
- 認証機関(排出権取引)
- 海外事業(日本企業の海外進出、日本技術の海外展開)



付録

- ・ CCS技術事例のデータ
- ・ CCSとは
- ・ 長岡実証試験事例
- ・ 用語集/略語集
- ・ CCS技術の解説
 - ・ 参考資料
 - ・ 引用文献
- ・ CCS事例データベース
- ・ DB掲載資料の概要シート

対象範囲

輸送の一部(圧入サイト内)と、地下でのCO₂貯留が対象

作成方針

長岡実証試験(陸域)、苫小牧大規模実証試験(海域)、海外の大規模圧入プロジェクトの知見を取り入れ、日本の地質的・社会的事情に適した事例集を作成

期待効果

- ・ 技術的に安全なCCS事業の実施
- ・ 法令遵守、社会合意形成、CCS普及障壁の低減
- ・ 海外への発信(国際標準化との連携)、共同研究への参画等



本事業の位置づけ : CCS長期ロードマップ（抜粋）と本事業の位置づけ

- ・ 本事業の取り組みがCCS長期ロードマップ目標と密接に関連し、事業のアウトカムとして設定済
- ・ 長期ロードマップの工程表に対応する研究開発や技術実証を展開中





本事業の位置づけ : 海外動向と本事業での研究テーマ

- ・ CCS実用化で先行する米国とノルウェーは、貯留層の不確実性や断層評価等に取り組んでいる。
- ・ 本事業では、国内の実情に適したCCS実用化の技術開発や実サイトでの技術実証を進めている。

【当事業の主要研究テーマ】

○排出源や経済性も考慮した貯留サイト開発手法

<支援ツール開発>

- ・ CCSコスト試算ツールの開発
- ・ CO2排出源データベースの構築

○光ファイバー測定技術の開発と有効性実証

○断層安定性監視や健全性評価技術の開発

○社会合意形成（SLO）手法の開発

Scopes of US-Norway CCUS Collaboration

- Characterization - new methods for cost-effective site selection decisions
- Monitoring Verification and Accounting - making it smarter and more cost-effective
- Wellbore construction, materials, integrity - smart wells, re-use of old wells, P&A technologies
- Focus on reduction of uncertainties and pressure management
- Real storage domains have complex geologies and pressure barriers
- Where to find the best sands?
- There are some faults in the area, can they cause any migration challenges?

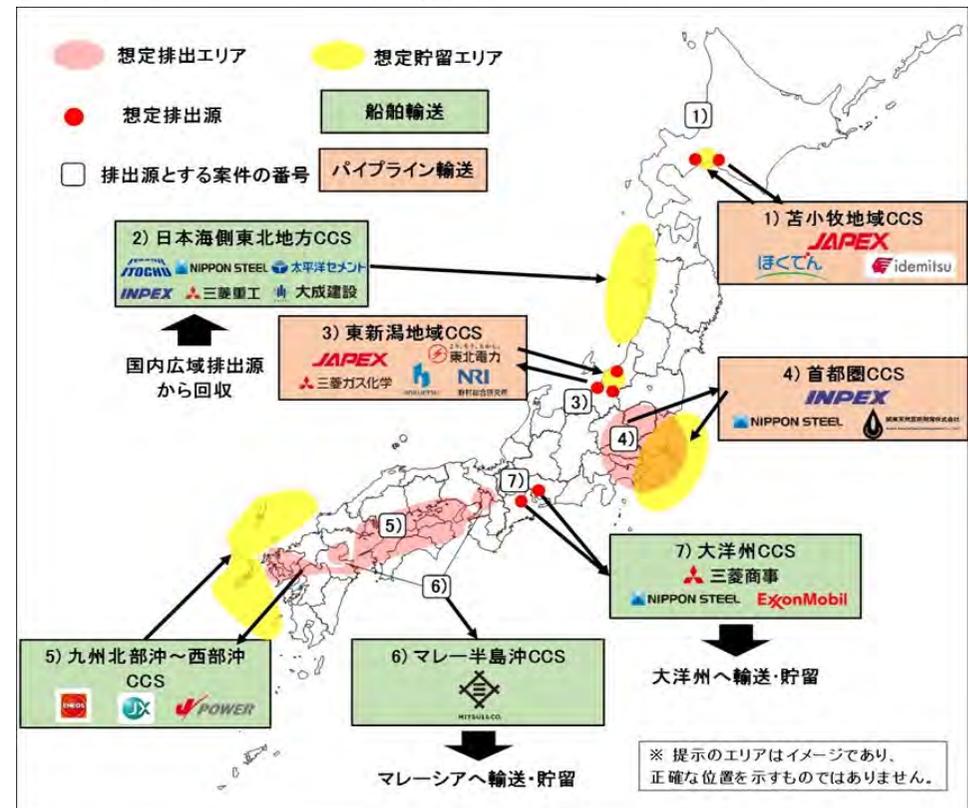
Carbon Capture and Sequestration: The Pressures of Selecting the Perfect Site



Decades of experience injecting fluids into the ground has revealed a fundamental truth: No two injection sites are the same.
 A thorough understanding of site-specific conditions is essential to ensure safe and secure long-term subsurface disposal of carbon dioxide.

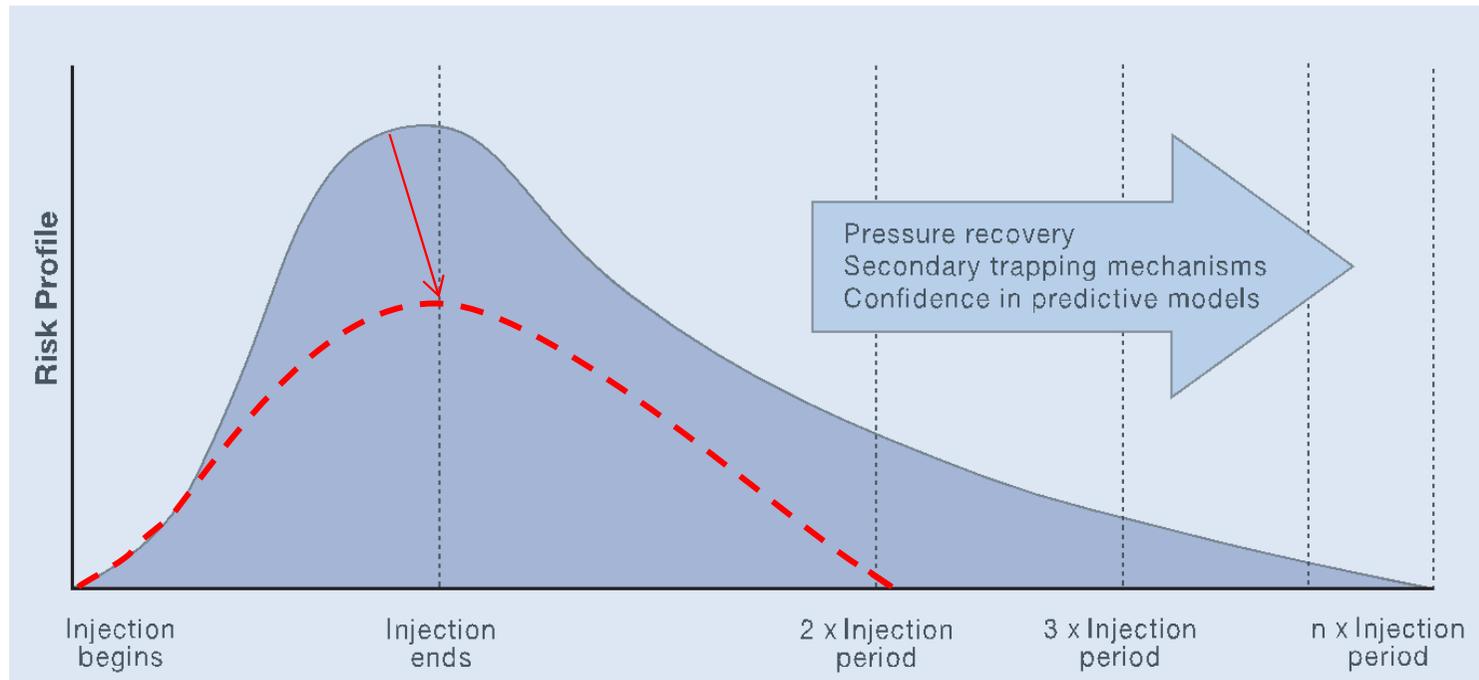
2つ同じサイトはない！

- 個々のサイト適した取り組み
- 安全性や長期安定性に対する徹底した理解が必要
- 油ガス田開発の知見あり？



地下情報の不確実性、**潜在的**リスク、リスクマネジメント

- 計画圧入量に対して、どれぐらい貯留可能量を確保すべきか
- **長期に亘る安定的圧入レートの確保(事前評価)**



Risk profile @CO₂ injection site (site-specific)

[Illustration source: Benson, 2007]

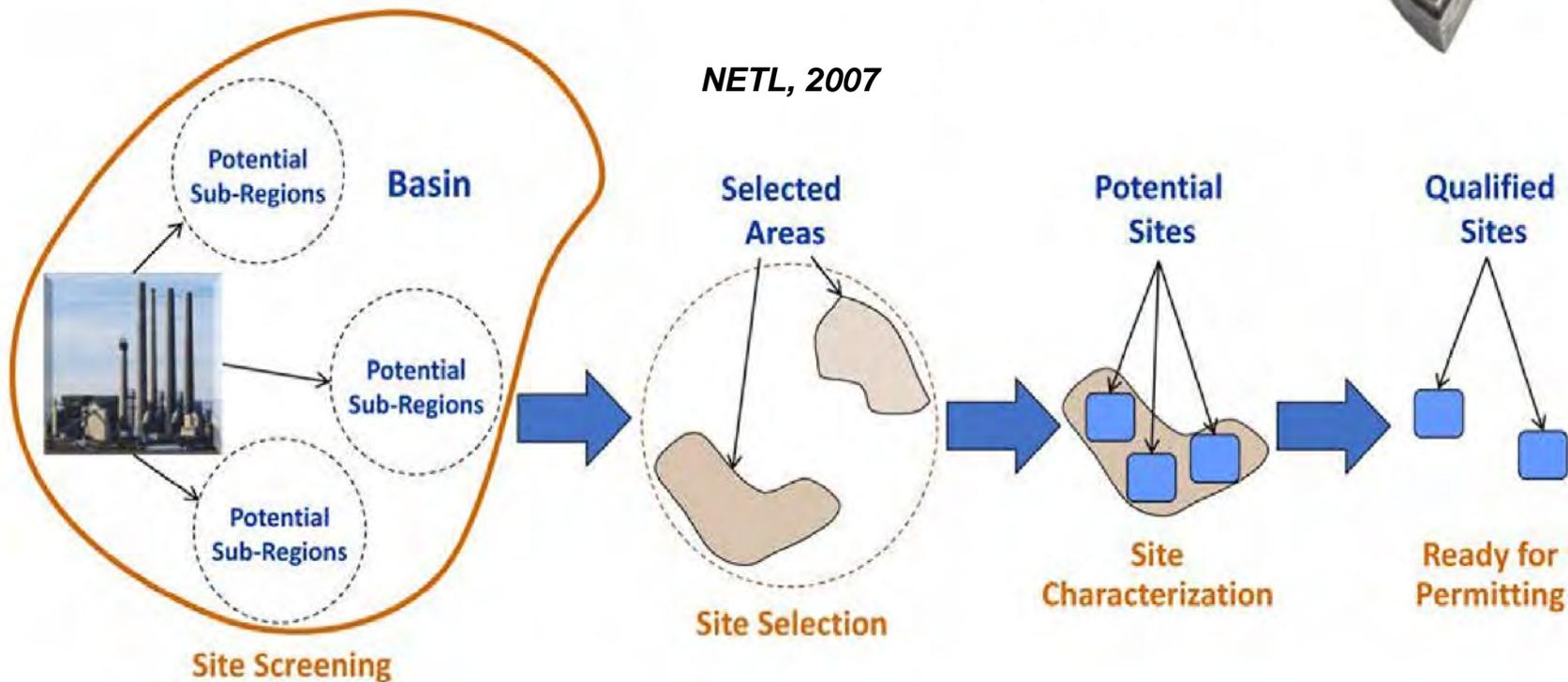
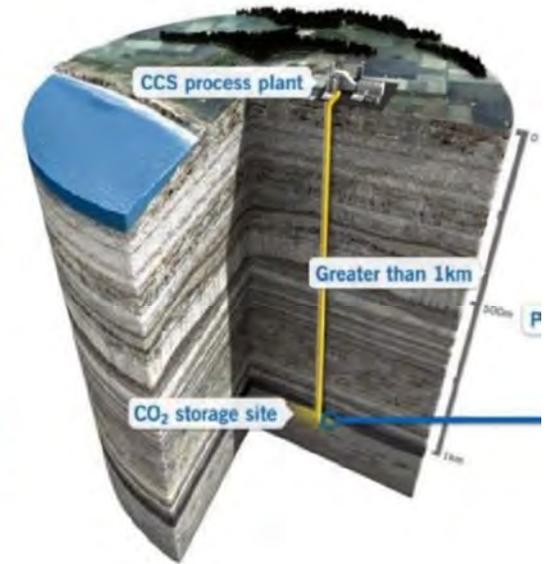
Reducing Uncertainty / Mitigating Risks to the **Manageable** Levels !

**Loses of Injectivity, Capacity and Containment,
Induced Seismicity, Environmental Impacts**

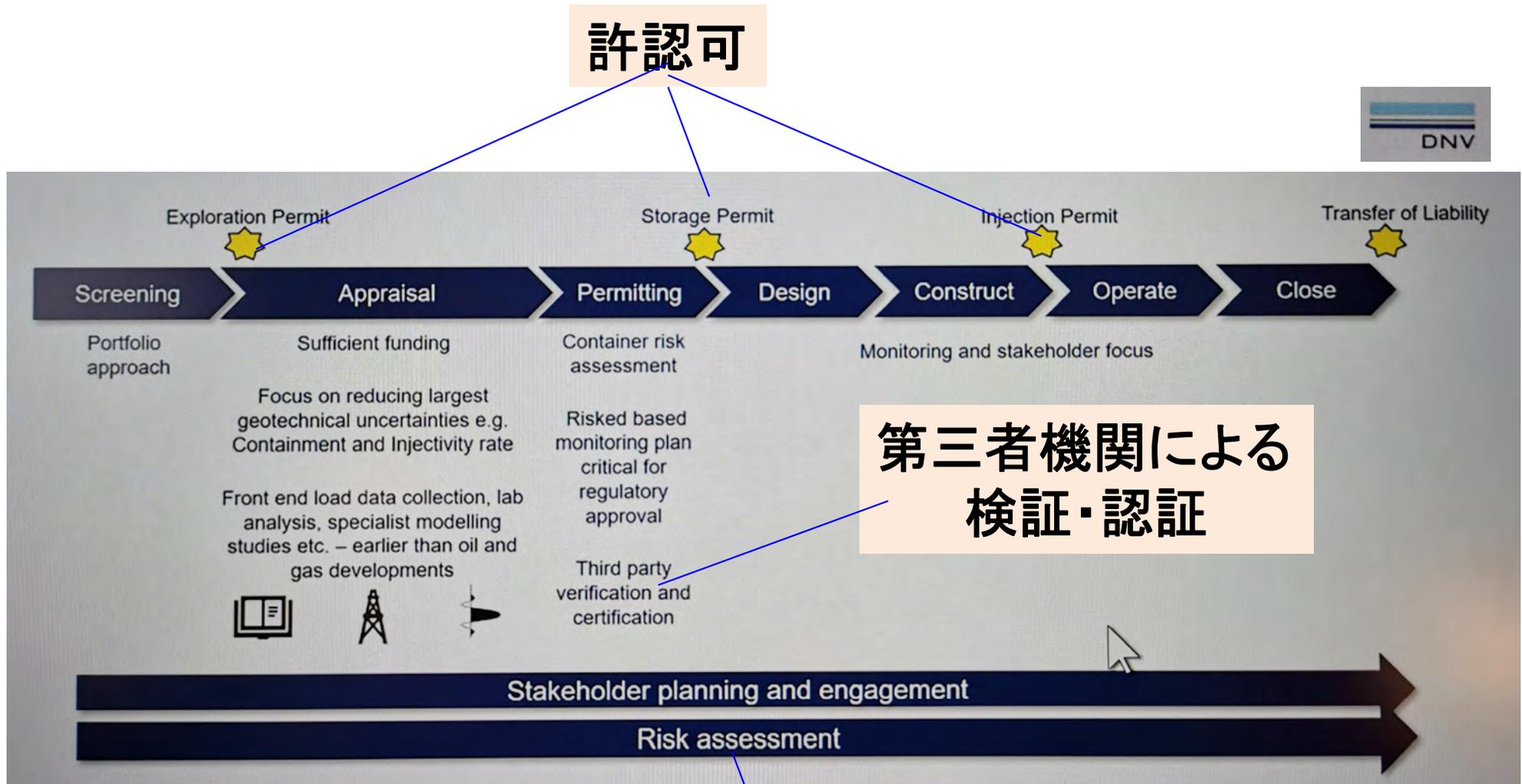
Storing CO₂ in Saline Aquifers (1/2)

Major Steps in Process of Finding and Developing Qualified Sites

- 1. Depth:** > 1 km
- 2. Location:**
 - reservoir and containment
 - accessible
- 3. Capacity:**
Space to hold all the planned CO₂



Storing CO₂ in Saline Aquifers (2/2)



Community Concern, Risk Communication →→ Public Support

Estimating Volumetric Storage Capacity

Sf: Storage efficiency

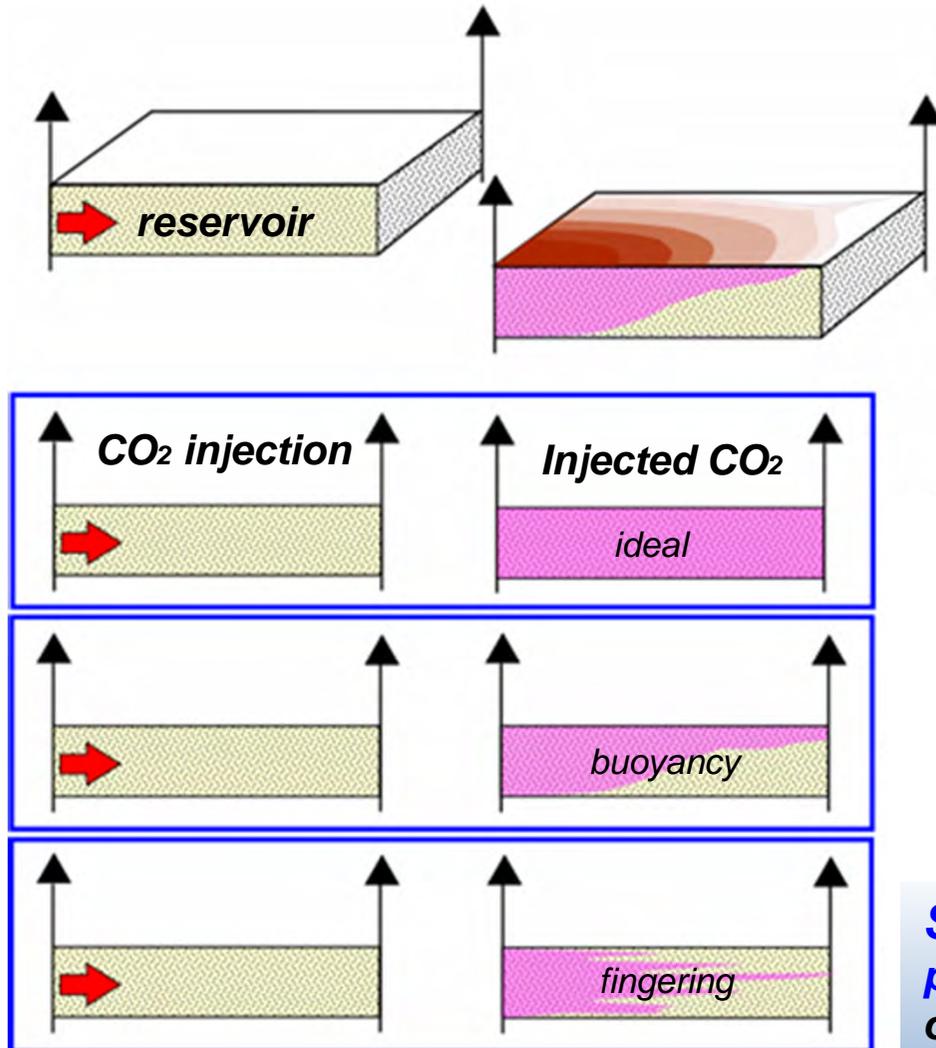
(RITE, 2006; Ogawa et al., 2011)

To calculate the CO₂ storage capacity of a deep saline aquifer, the following equation may be used:

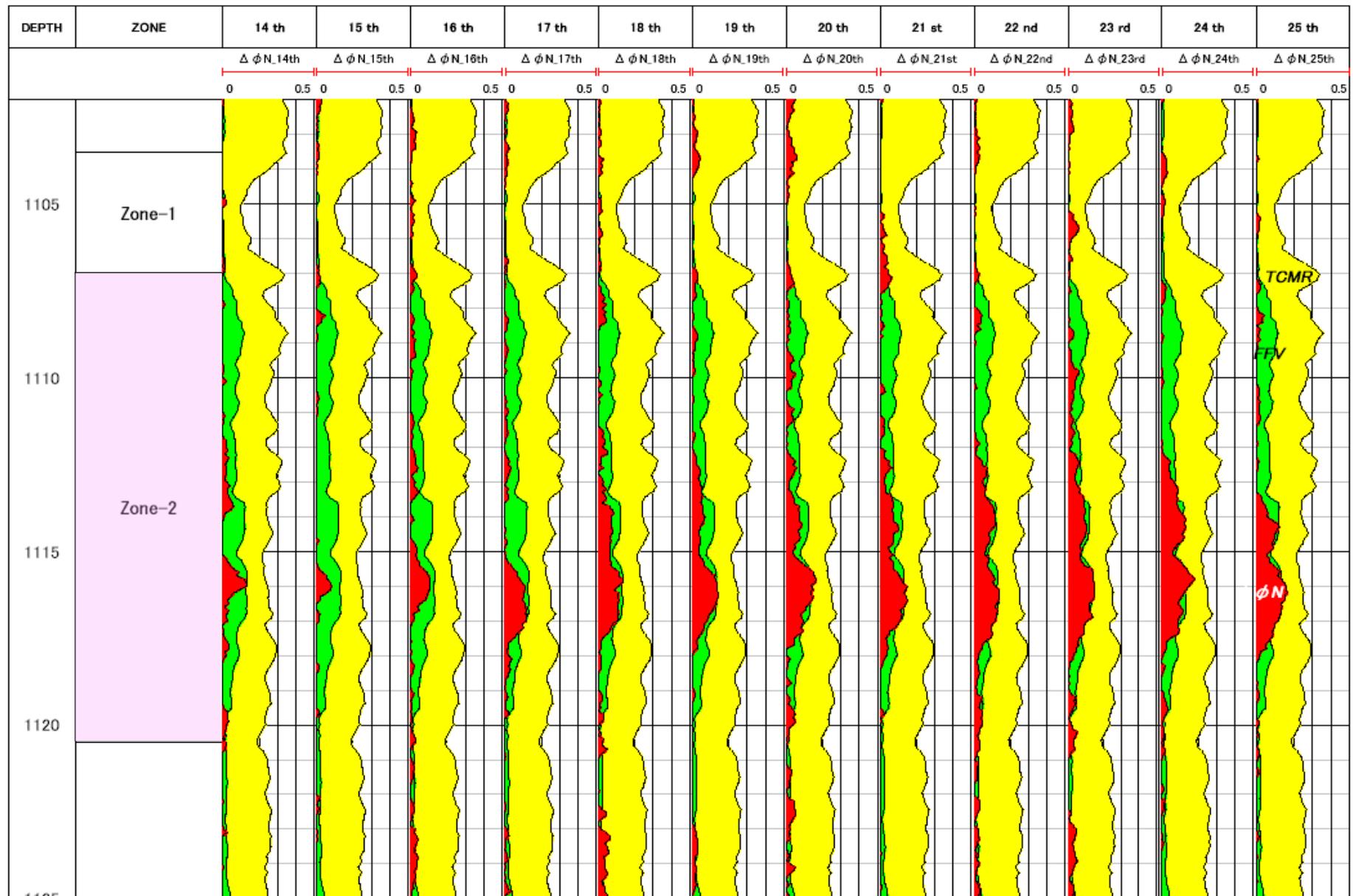
$$\text{CO}_2 \text{ storage capacity (mass)} = \frac{S_f \times A \times h \times \phi \times S_g \times \rho}{B_g \text{CO}_2}$$

where A , h and ϕ are aquifer area, effective aquifer thickness and porosity respectively, so that the product $(A \times h \times \phi)$ represents the total pore volume within the aquifer volume under consideration. S_g is the supercritical CO₂ gas-phase volume fraction in the injected CO₂ plume. ρ is CO₂ density at standard conditions (=1.976 kg/m³), and $B_g \text{CO}_2$ is the CO₂ volume factor, which depends on local pressure and aquifer temperature. Therefore, the term $(\rho/B_g \text{CO}_2)$ represents the in situ density of pure CO₂ at the local pressure and temperature. S_f represents a “storage factor”, the ratio of immiscible CO₂ plume volume to total pore volume, which incorporates the combined effects of trap heterogeneity, CO₂ buoyancy and displacement efficiency and so on. In the calculation, the entire aquifer below a depth of 800 m is considered.

S_f : a “storage factor”, the ratio of immiscible CO₂ plume volume to total pore volume, the combined effects of trap heterogeneity, CO₂ buoyancy and displacement efficiency.



中性子孔隙率(CO₂含有率)変化図 (OB-2)@長岡サイト



圧入されたCO₂が砂粒の隙間に溜まっていた地層水を押しよける様子

Storage Factors in Different Regions

Comparisons of storage efficiency factors.

0.25 0.5

(Ogawa et al., 2011)

	Efficiency*	Comments*
Australia	19 %	Geodisc, Bradshaw et al., 2004
Japan	12.5 %	$S_f \times S_g \simeq E (DOE) \text{ or } C_c (CSLF)$
Alberta	$\simeq 9 \%$	Bachu & Adams, 2003 (Dissolution)
USA	1 — 4 %	DOE Atlas, 2008 (Monte Carlo Simulation)
Norway offshore	$\simeq 4.4 \%$	Joule II, 1996

*Note: After Thibeau and Mucha (2007).

Storage potential

$$= A \times h \times S_f \times \phi \times S_g / BgCO_2 \times \rho$$

A : aquifer area

h : effective thickness

S_f : storage efficiency factor

φ : porosity

S_g : CO₂ saturation

BgCO₂ : CO₂ volume factor 0.003m³/m³, depth: 2000m, 70°C

ρ : CO₂ density 0.001976 (t/m³)

Examples to develop a *Local Screening Criterion* for CO₂ storage in Saline Aquifers (in Europe)

The screening criterion proposed for the CO₂ storage by [Chadwick et al. \(2008\)](#).

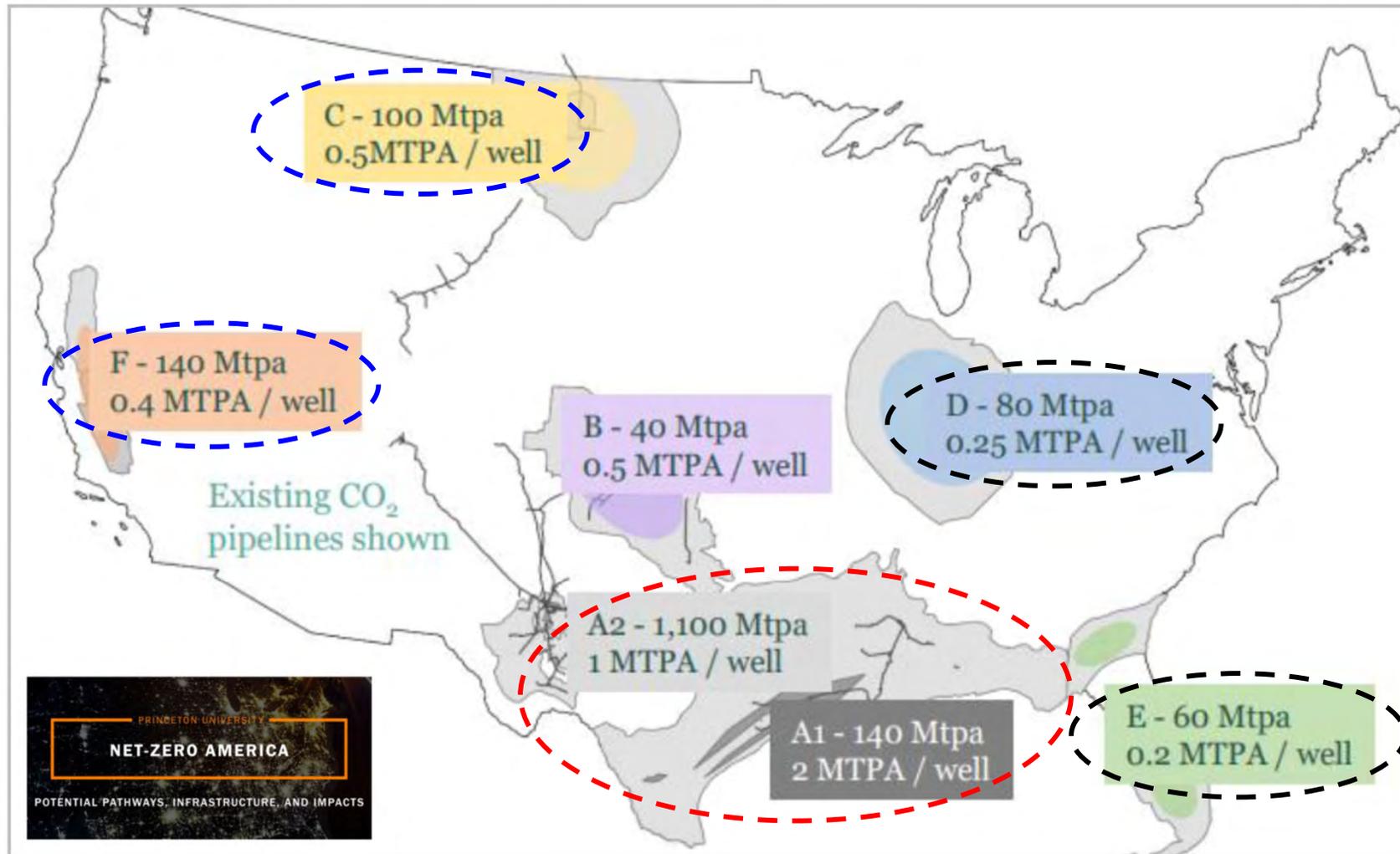
Parameters	Positive indicators	Cautionary indicators
Total storage capacity	Total capacity of reservoir estimated to be much larger than the total amount produced from the CO ₂ source	Total capacity of reservoir estimated to be similar or less than the total amount produced from the CO ₂ source
Depth	1000e 2500 m	<800 m or >2500 m
Thickness (net)	[50 m	<20 m
Porosity	>20%	<10%
Permeability	>300 mD	10e 100 mD
Salinity	>100 g/L	<30 g/L
Seal properties		
Lateral continuity	Un-faulted	Laterally variable faults
Thickness	>100 m	<20 m
Capillary entry pressure	Mush greater than buoyancy force of maximum produced CO ₂ column high	Similar to buoyancy force of maximum produced CO ₂ column height

Thresholds used for the pre-screening of CO₂ storages in Netherland ([Ramírez et al., 2010](#)).

Parameter	Threshold
Capacity	≥4 Mt for gas/oil and ≥2 Mt for aquifer
Thickness reservoir	>10 m
Depth top reservoir	≥800 m
Reservoir porosity	Aquifers: >10%
Reservoir permeability	Aquifers: an expected permeability of 200 mD or more
Thickness seal	≥10 m. Both simple seals as well as complex seal have been taken into account
Seal composition	Salt, anhydrite, shale or claystones
Reservoir composition	Aquifers: sandstone, hydrocarbon fields: limestone, sandstone, siltstone, carbonates
Initial pressure	Overpressure excluded
Salt domes	Relevant for aquifers. Traps located alongside/near salt domes/walls have been excluded because there is a high risk of salt cementation

Total storage capacity: to be **much larger** than the total amount from CO₂ source
Reservoir: depth, thickness, porosity, permeability, salinity
Caprock: lateral continuity, un-faulted, thickness, threshold pressure

米国全土が**6つの地域**に、各地域では**年間圧入量**
や坑井当たりの**圧入能力**が大きく異なる (DOE, 2022)

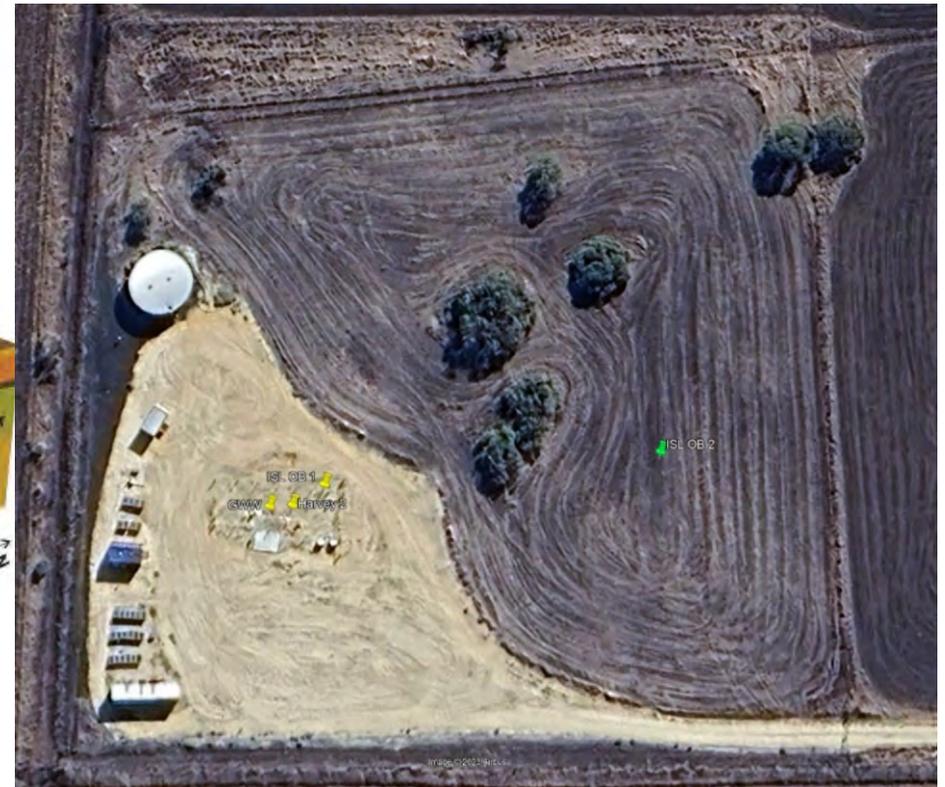
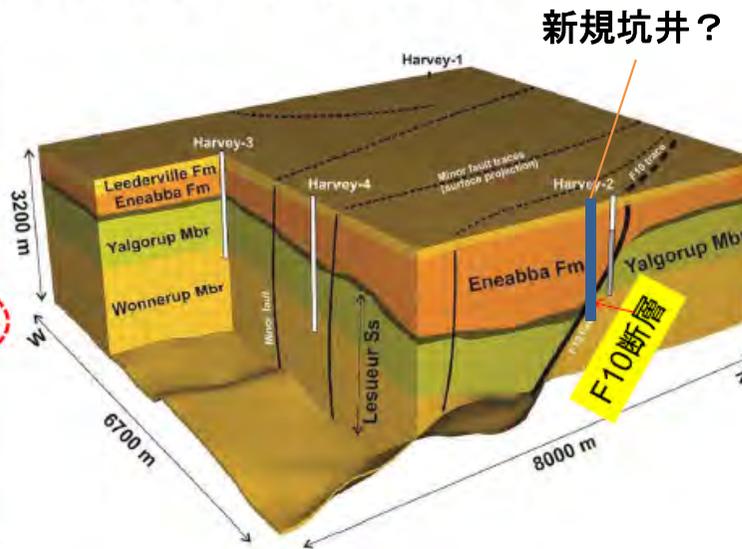
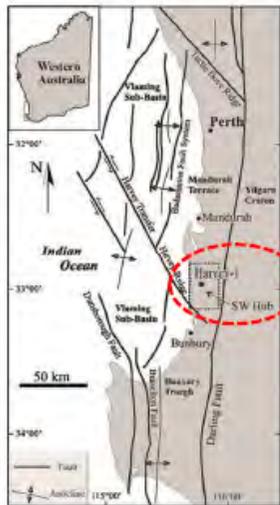


年間圧入量の合計: 1,660 Mtpa 1本の坑井の圧入能力: 0.2, 0.25, 0.4, 0.5, 1, 2 MTPA /well

日豪CCUS協力: 光ファイバーによる断層健全性監視技術開発 (CSIROとの研究協力@Perth南部サイト)

深部地層の断層安定性評価の現場試験

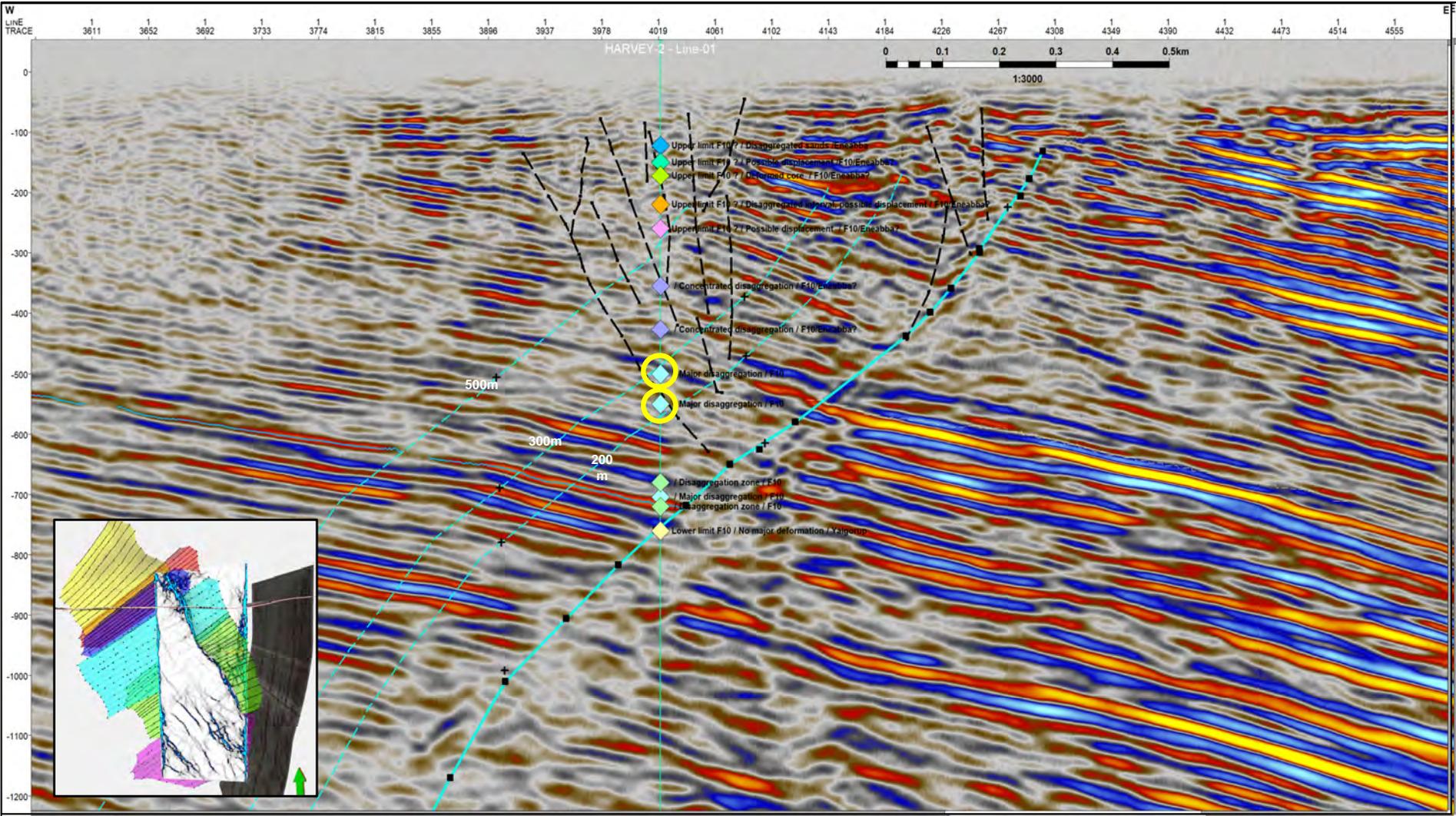
The South West Hub In-Situ Laboratory – A Facility for CO₂ Injection Testing and Monitoring in a Fault Zone

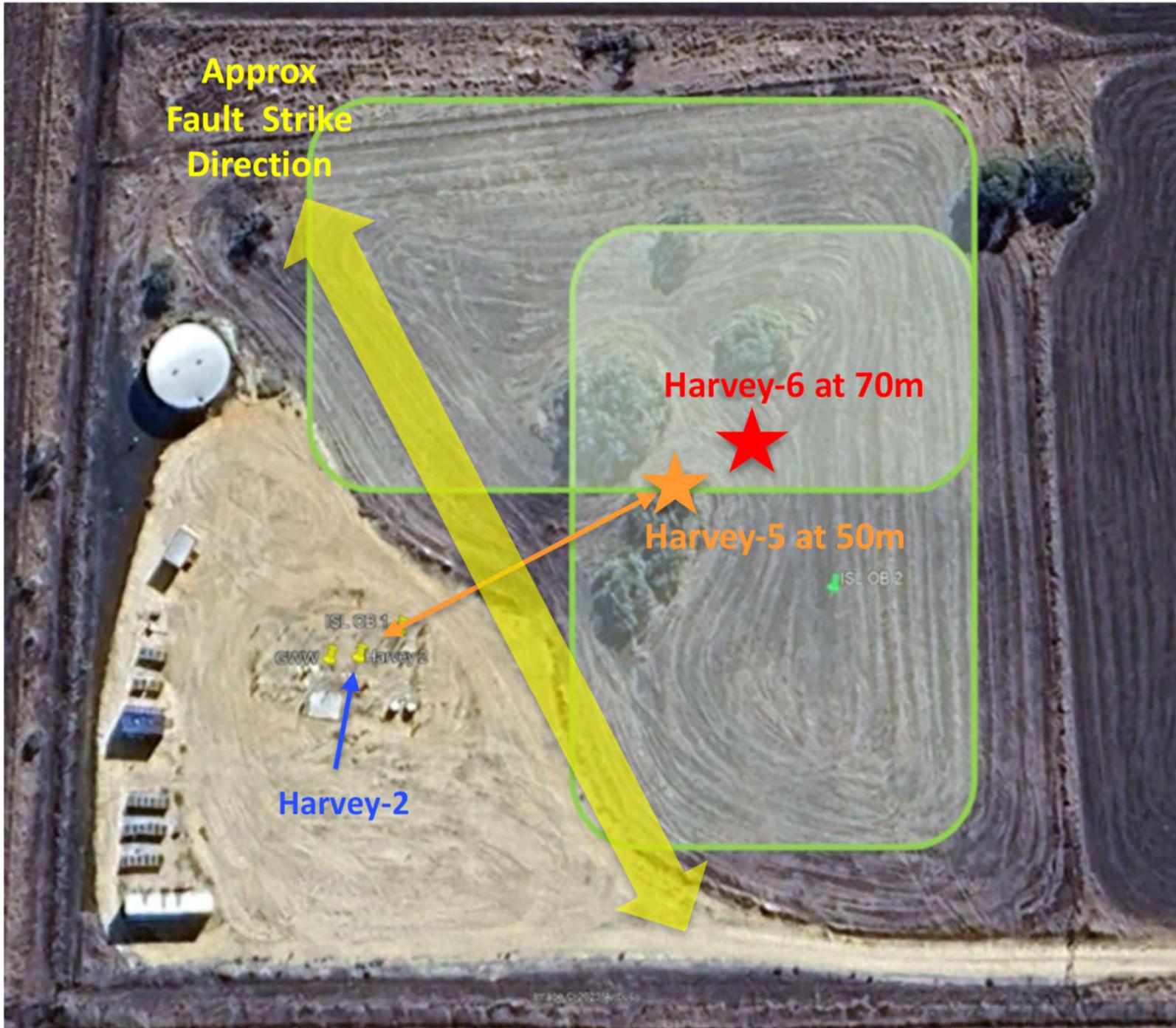


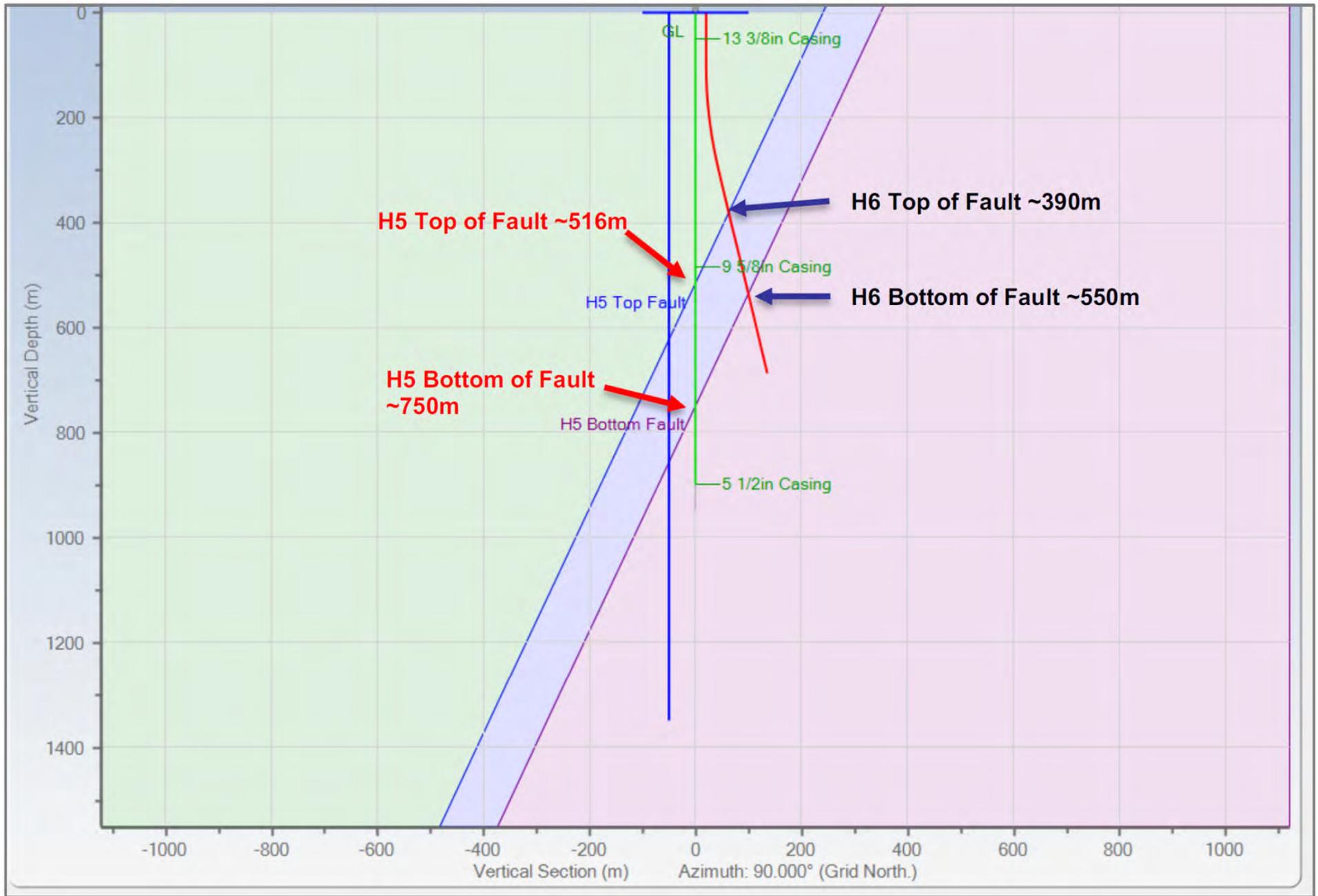
自然地震観測機器設置、2D弾性波探査(断層分布状態把握): 1月9日~20日現場作業完了

Estimating the Fault Damage Zone Envelope from Seismic

Harvey-2 Superimposed to LINE-01



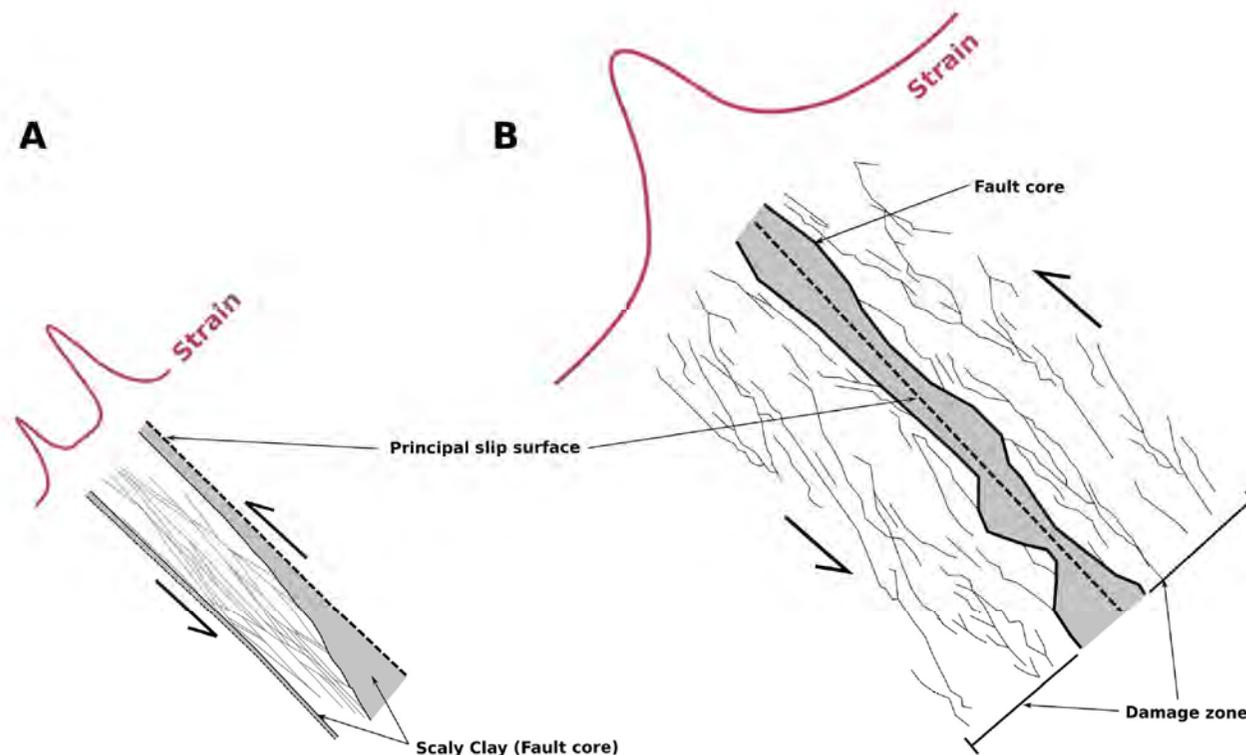




Theoretical distributed strain sensing measurements are shown in purple for slip on either type of fault

Journal of Geophysical Research: Solid Earth

10.1029/2021JB022432



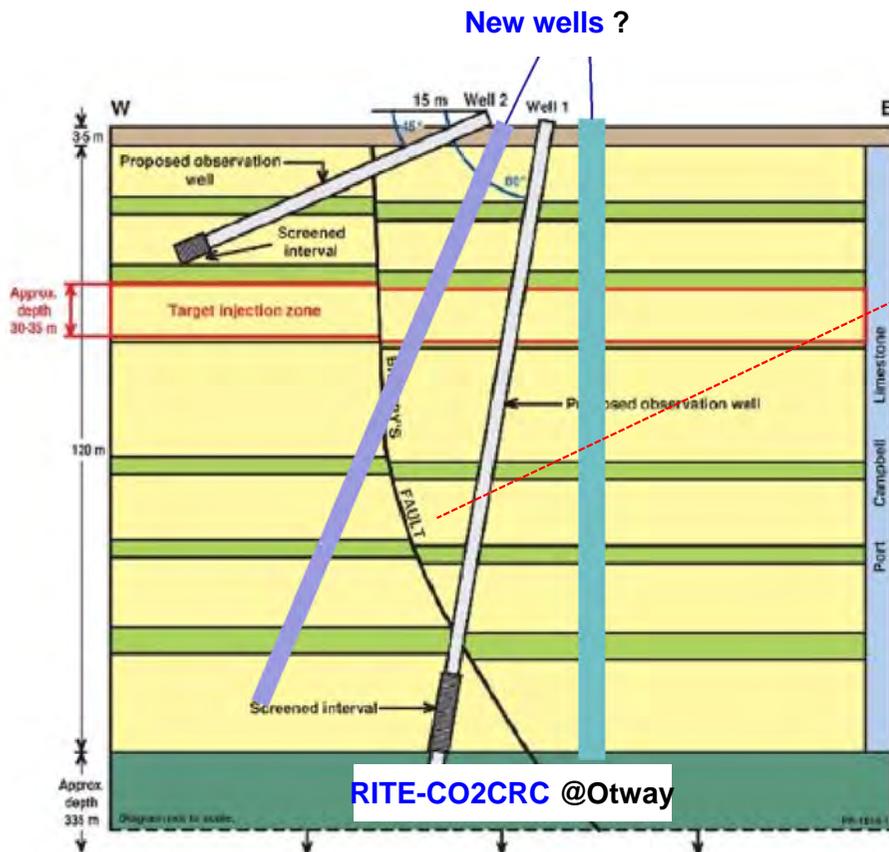
the relationship between fault core/gouge, principal slip surfaces, and the 'fault damage zone'

- FY2022: 2D seismic survey, seismometer, strain interrogator and tiltmeter deployment, water injection test
- FY2023~: new well drilling and fiber cable installation, water injection, fault zone mapping

Collaborations Between RITE-CO2CRC Fiber Optic Sensing for Fault Leakage Monitoring

DAS (Acoustic), DSS (Strain), DTS (Temperature)

(日豪CCUS協力事業)



Otway International Test Centre

Otway Stage 1 (Concept): 2004–2009

- ✓ Demonstrated safe transport, injection and storage of CO₂ into a depleted gas reservoir

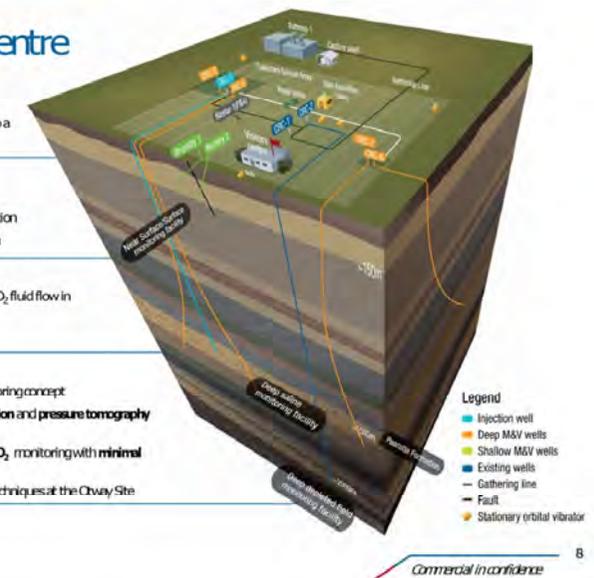
Otway Stage 2 (Risk Reduction): 2009–2019

- ✓ Demonstrate safe injection of CO₂ into a saline formation
- ✓ Stage 2B – Near well residual & solution trapping characterisation
- ✓ Stage 2C – Minimum detection, 4D M&V & Plume stabilisation

Otway Stage 3: 2015–2022

- ✓ Improve capability to predict the role of faults in controlling CO₂ fluid flow in the near surface;
- ✓ Improve near surface monitoring capabilities
- ✓ Develop an "on-demand", sub-surface and permanent monitoring concept
- ✓ Two primary technologies - sub-surface seismic data acquisition and pressure tomography (4 new monitoring wells)
- ✓ Field test the various techniques to demonstrate lower cost CO₂ monitoring with minimal surface and environmental impact
- ✓ Demonstrate regulatory and community acceptance of the techniques at the Otway Site

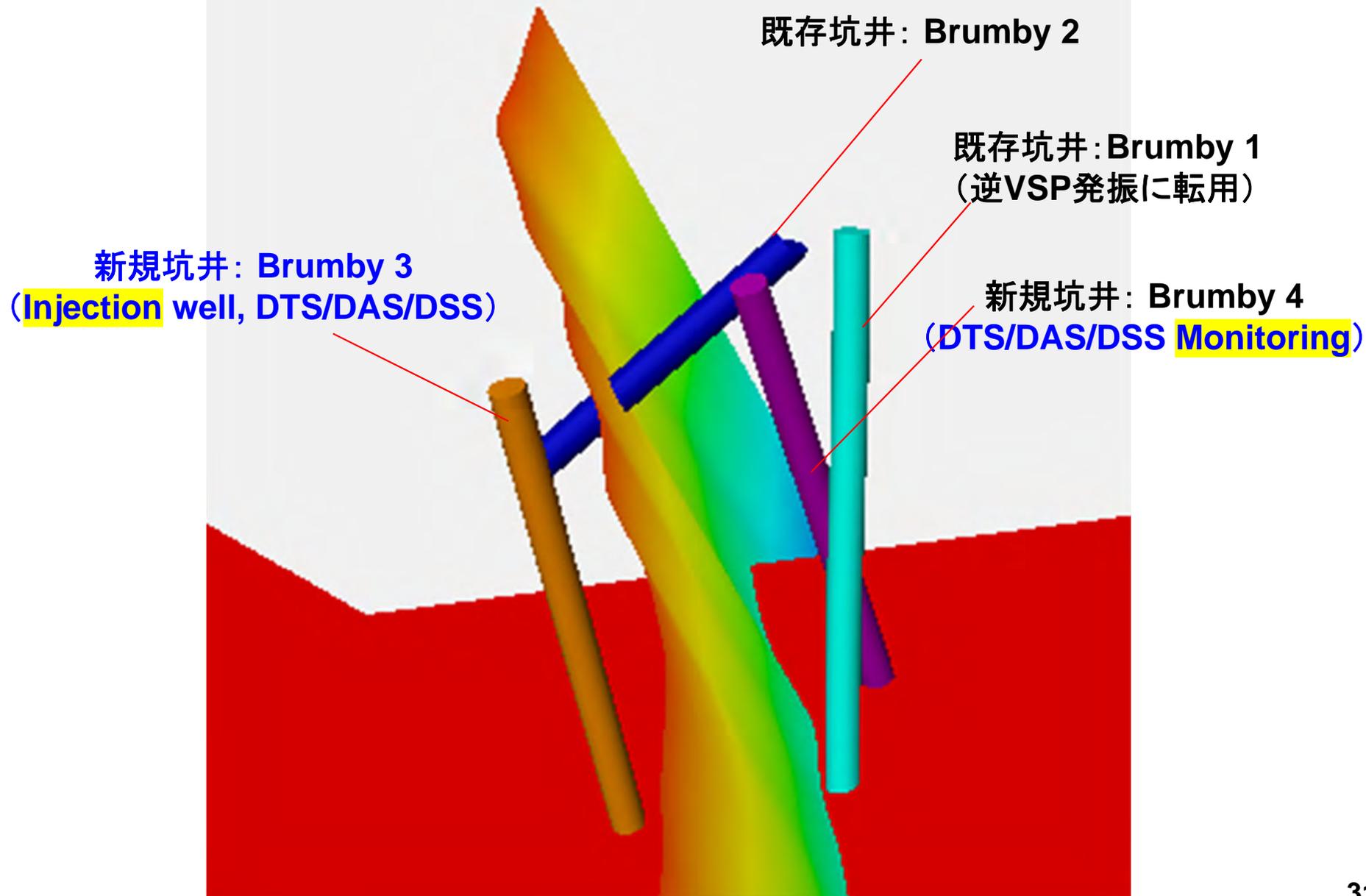
CO2CRC
Building the emissions future



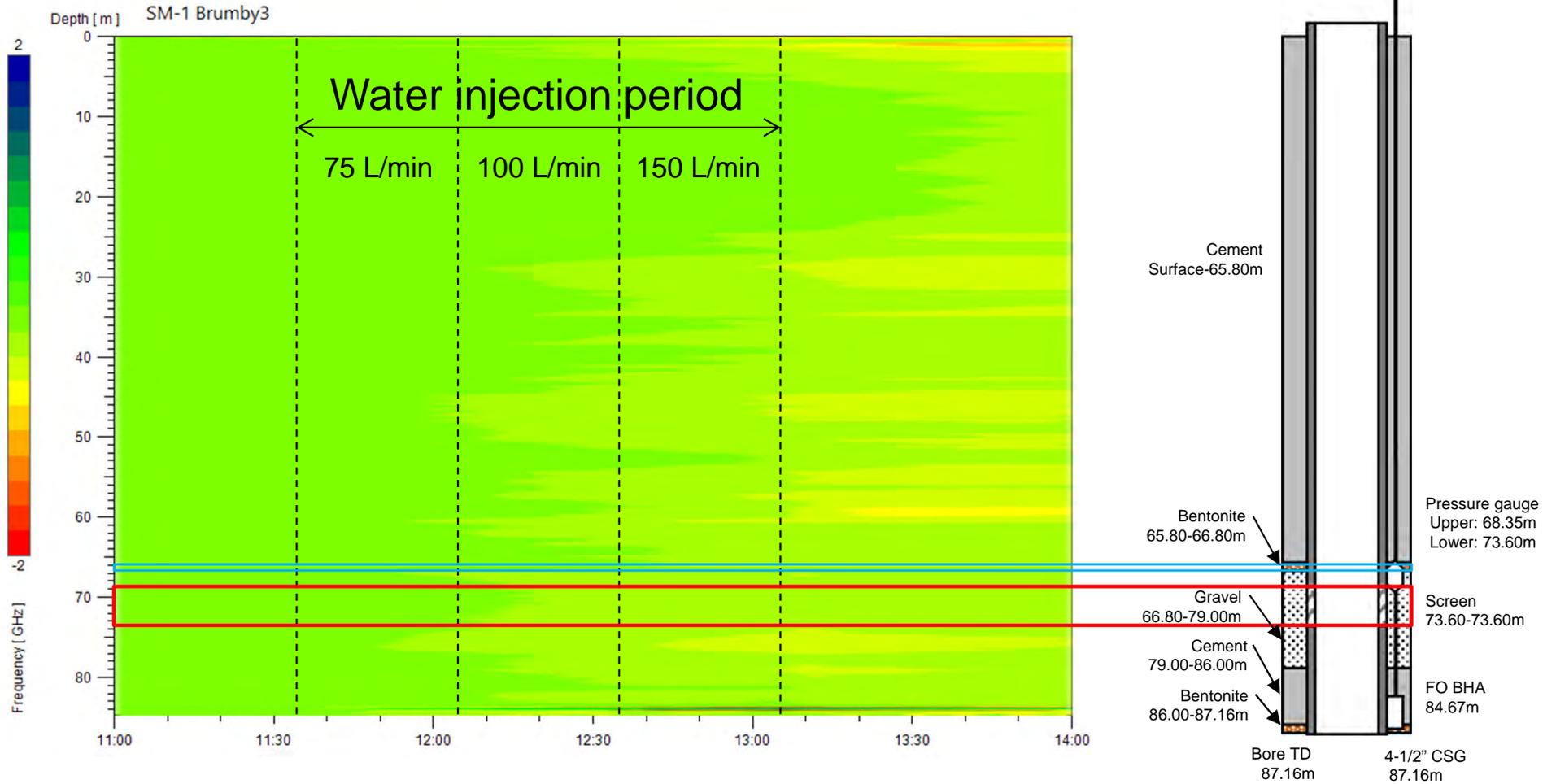
Commercial in confidence

- FY2022: shallow well drilling, fiber cable installation, baseline (strain, temp) monitoring
- FY2023~: water / CO2 injection, fault leakage detection, DAS/DSS/DTS monitoring

3D view of Brumby wells at Otway site

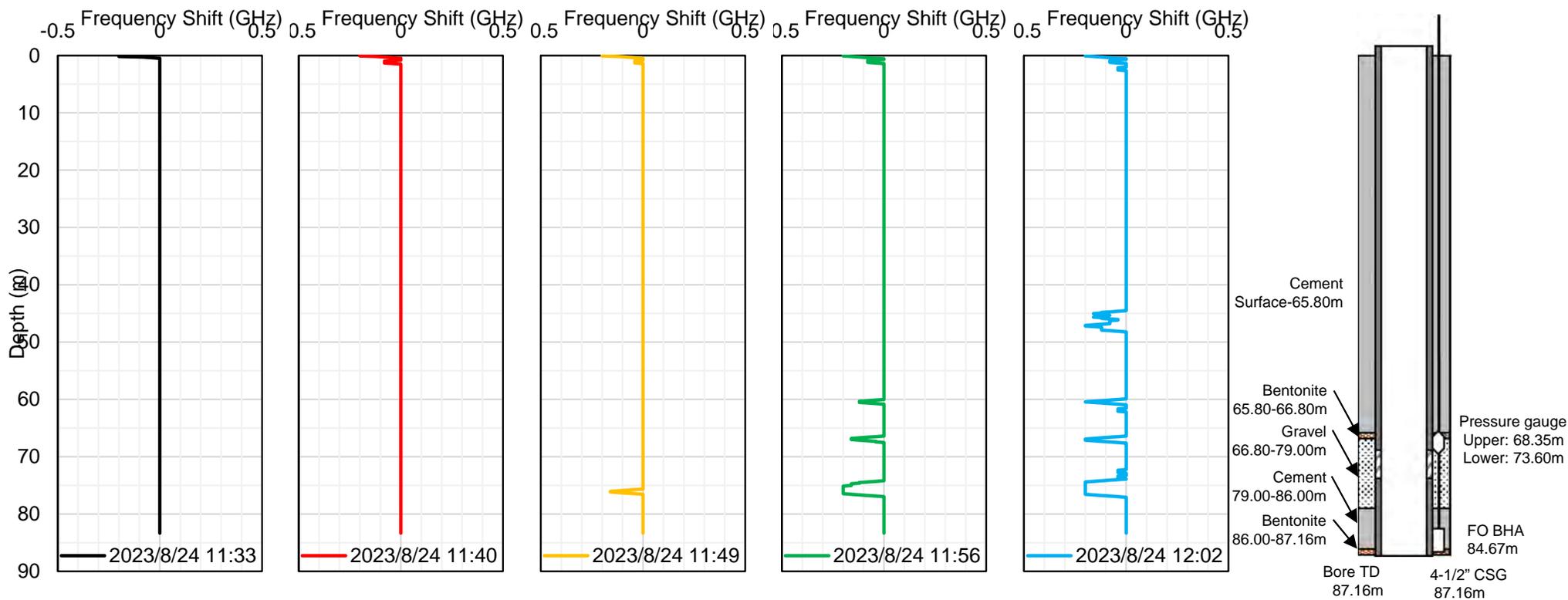


Rayleigh shift at Brumby 3 in water injection @ Brumby 1

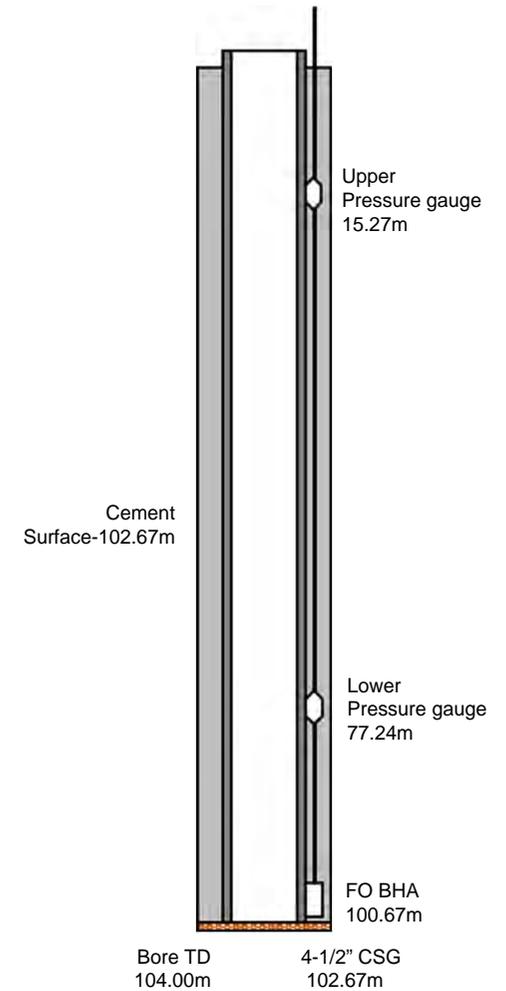
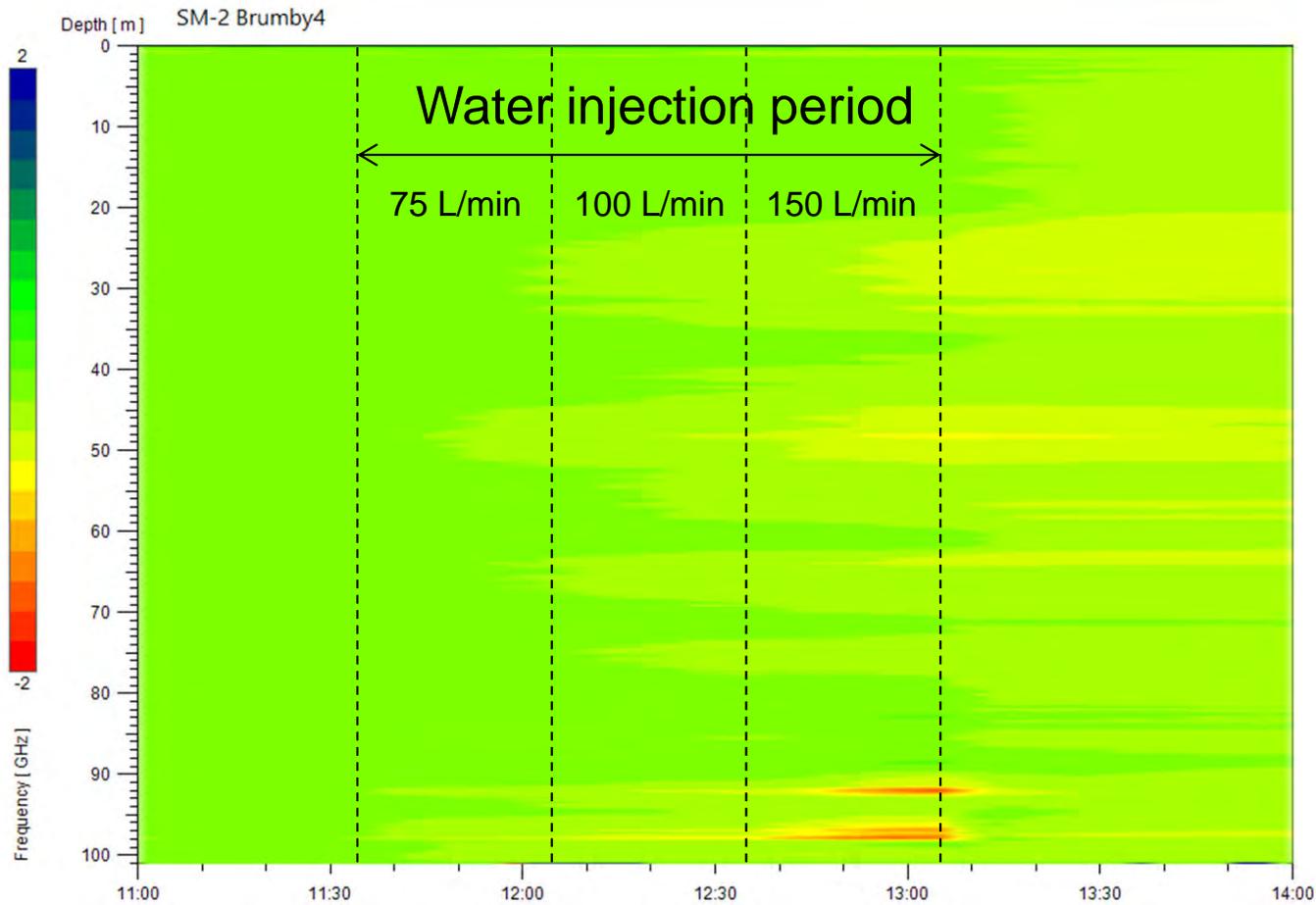


Rayleigh shift at Brumby 3 in water injection @ Brumby 1

Flow Rate 75 L/min

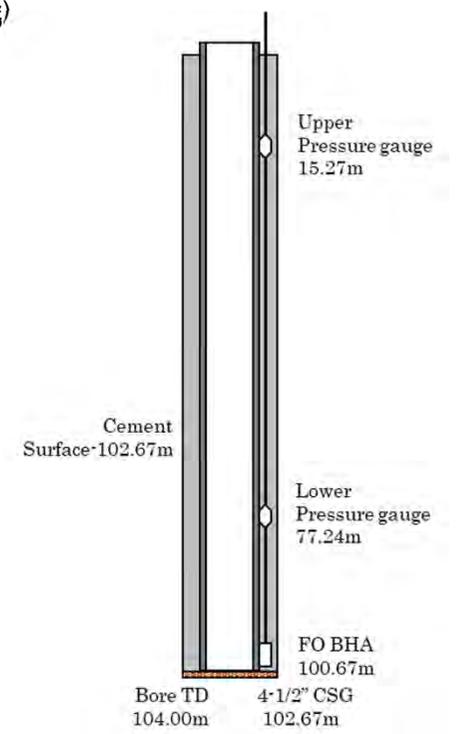
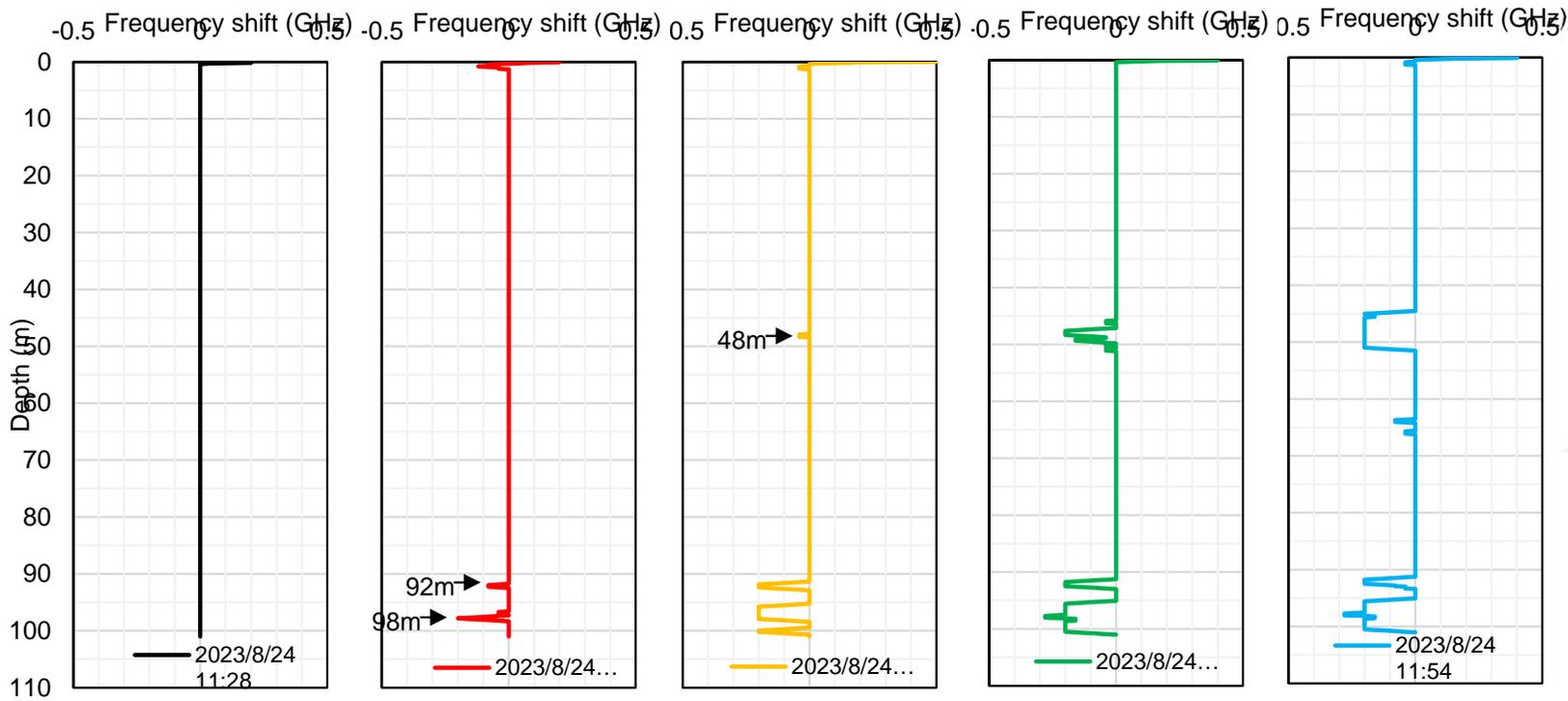


Rayleigh shift at Brumby 4 in water injection @ Brumby 1



Rayleigh shift at Brumby 4 in water injection @ Brumby 1

Flow Rate 75 L/min



Brumby4

技術開発 (technology development) から 話術 (art of conversation) への変身 (transforming)

PASSIVE SEISMIC SERIES

Geophysics Role of Non-technical Issues Integral to Full-scale CCUS Deployment



Dr. Carpenter

Full-scale deployment of CCUS in the United States today is not dependent on the advancement of technical issues alone. There are a host of integrated issues that are necessary for the full-scale industry-wide deployment of CCUS that include, but are not limited to regulatory considerations (e.g., permitting, Class VI, etc.), economic considerations (e.g., financial lending, 45Q tax credits, etc.), risk evaluation, stakeholder engagement, Environmental Social Governance (ESG), Environmental Justice (EJ), and political/policy needs.

In many cases, technologists such as reservoir engineers, chemical engineers, geologists, geoscientists, etc., either overlook or are not exposed to these non-technical considerations. This presentation will discuss and illuminate the integrated nature of these issues and provide some insights for technologists to become more literate and therefore more valuable and engaging to their teams advancing CCUS projects.

Risk Communications Approaches

Uncertainties in Subsurface Characterization (Geology, Science and Technology), Policy and Regulation

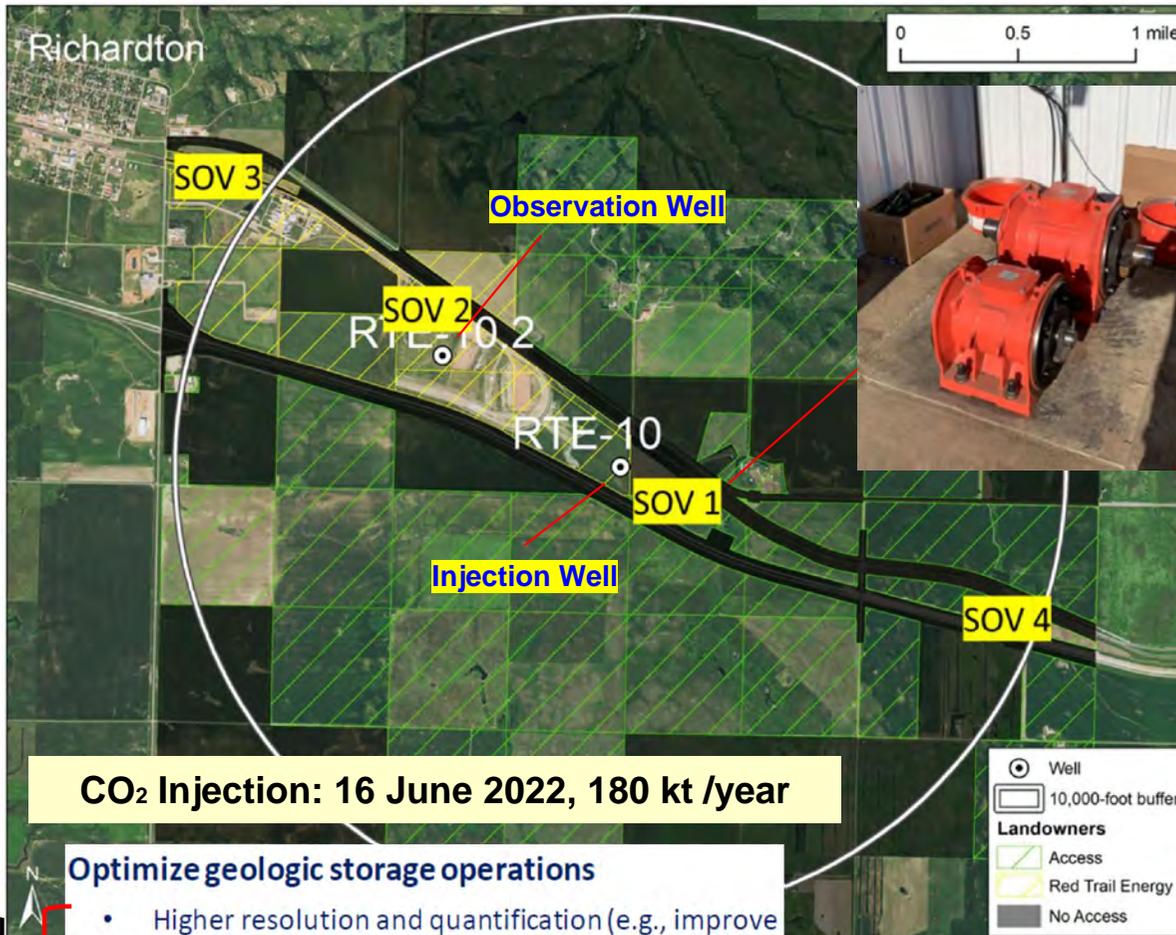
→→ **Public Concerns** over **Potential Risks** →→ **Sending Experts** into the Community & **Building**

Relationships and Trust!

Fiber Optic Sensing for **Multi-purpose** Data Acquisition (DTS, DAS, **DSS**) and **Permanent Monitoring** for CO₂ Storage, North Dakota, United States (日米CCUS協力事業)

米国North Dakotaサイトでの技術実証試験

- *Optic fiber cables (designed by RITE) installed behind casing of two deep wells (Injection & Observation: 2.1 km) and two ground water wells (depth: 600 m).*
- *SOV-DAS/VSP for CO₂ plume monitoring (180kt/year x 20 years)*
- *Coupled analysis of InSAR and DSS from the shallow water wells*
- *Which depth & how much the deformation occurs in subsurface and how it migrates to surface*



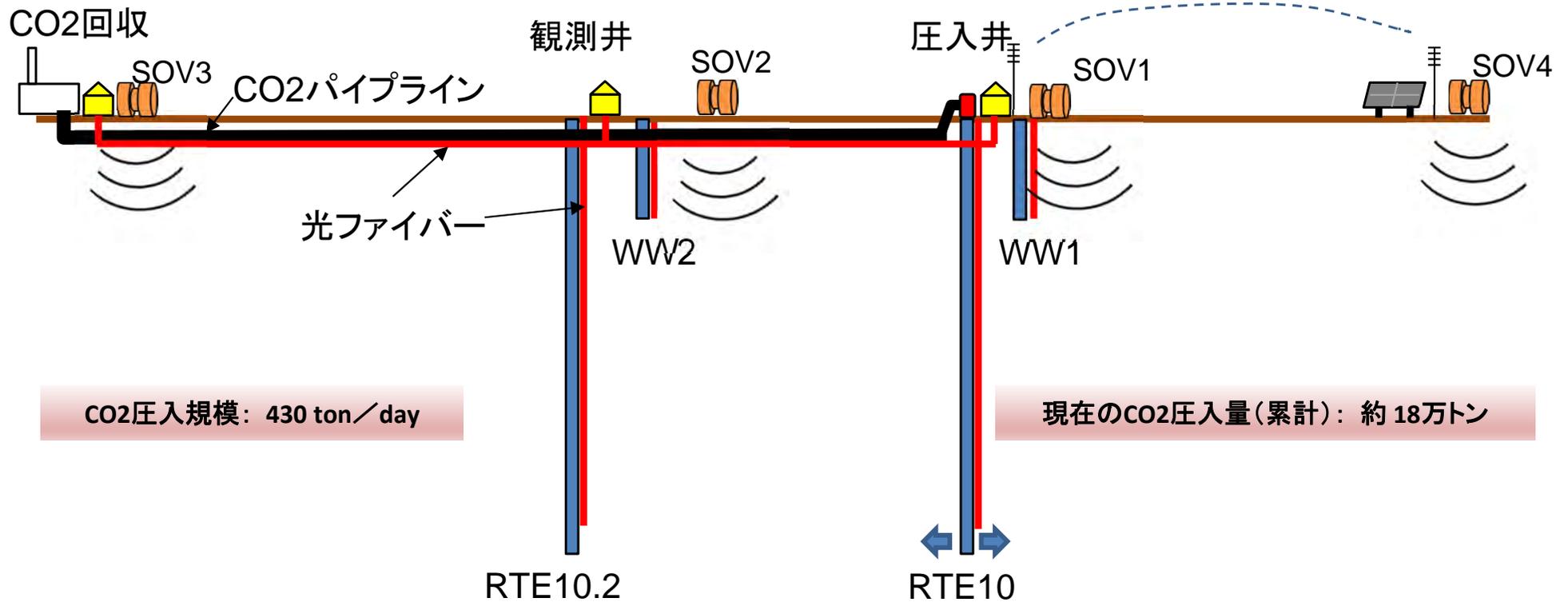
Optimize geologic storage operations

- Higher resolution and quantification (e.g., improve characterization of faults and fractures)
- Geomechanics (pressure and state of stress)
- Enabling real-time decision making

Class VI Approved
(Oct. 2021)

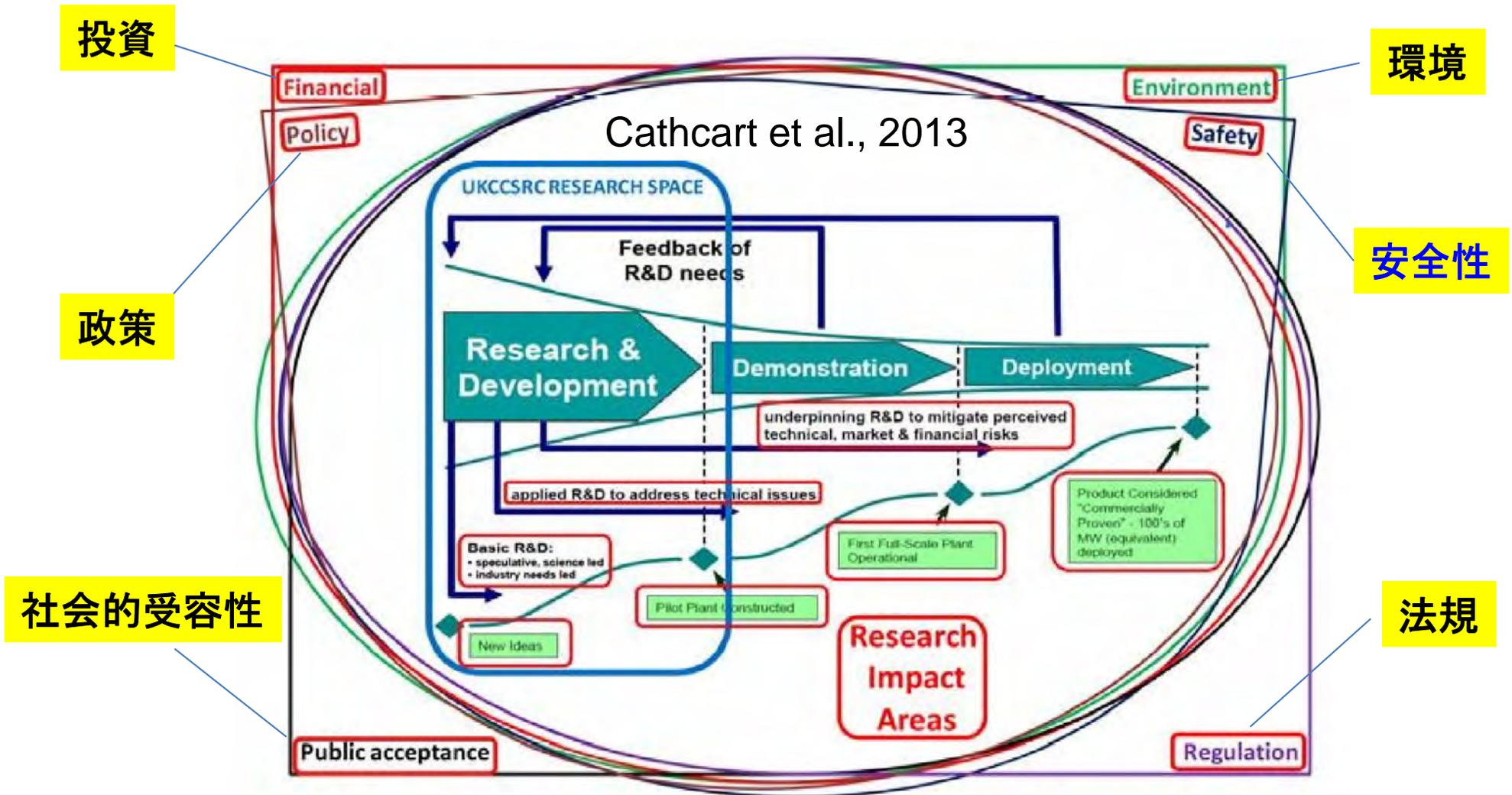
US/DOE

光ファイバーによるCO₂モニタリング



DAS (音響計測)	CO ₂ プルームの広がり把握(DAS/VSP)
DSS (ひずみ計測)	坑井健全性、貯留層/遮蔽層安定性監視、CO ₂ 挙動監視
DTS (温度計測)	坑井周辺のCO ₂ 挙動監視(坑井健全性)

CO₂地中貯留技術の実用化・事業化へ



技術開発や知見の提供

Research & Development → *Demonstration, Deployment*

Iterative Process towards Deployment

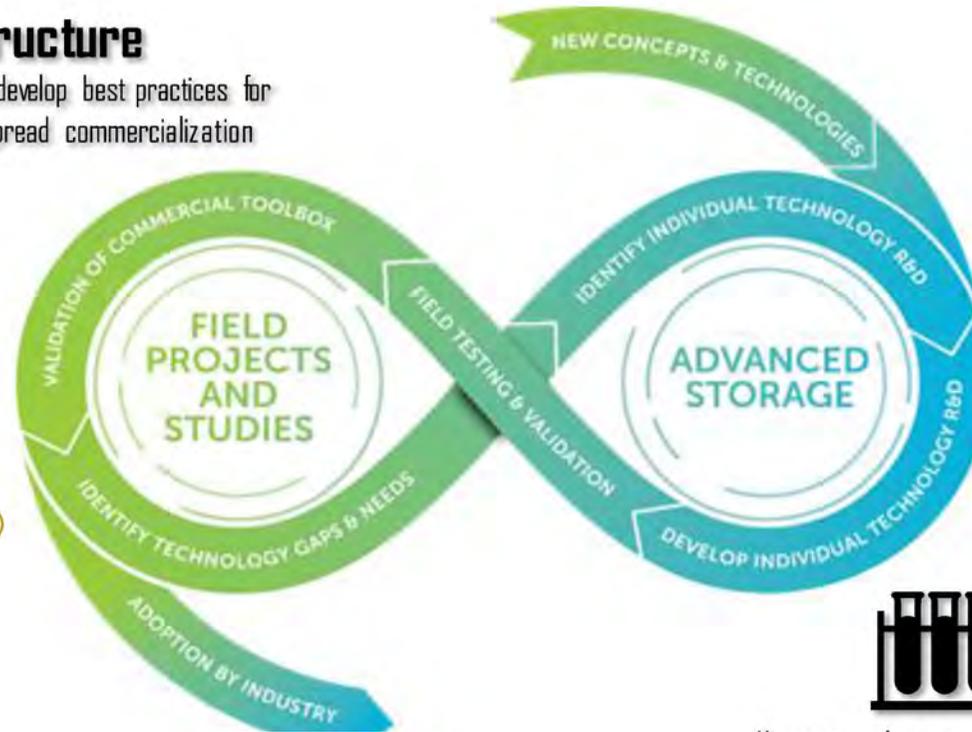


Storage Infrastructure

Large-scale field projects to develop best practices for industry and facilitate wide-spread commercialization

Storage Infrastructure Focus

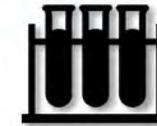
- CarbonSAFE
- Regional Initiatives
- Offshore Storage
- Brine Extraction Strategy Test (BEST)
- Associated Storage (CO₂ EOR)



Advanced Storage Focus

- Well Integrity and mitigation
- Monitoring, verification, and accounting
- Storage complex efficiency and security
- SMART: Science-Informed Machine Learning for Accelerating Real Time Decisions
- NRAP: National Risk Assessment Partnership

US/DOE (2021)



Advanced Storage

Harness early-stage storage concepts to technology demonstration

Subsurface stress

- improved capability to forecast risk of induced seismicity & compromise of seal integrity

Wellbore integrity

- Find & assess legacy wells and novel materials/techniques for remediation

Secure storage

- Improve AZMI tools

Plume detection and storage efficiency

- Locate plume margins & pressure increase; improve use of pore space)

Site characterization

- Map reservoir & seal heterogeneities and deep faults

Regional resource estimates

- filling the data gaps & realistic basin-scale storage estimates)

Transformational sensing

- Micro/nano and optical fiber sensing capabilities; wireless power/telemetry systems; edge computing to enable intelligent monitoring systems

AOI 1: Fault Detection, Characterization, and Hazard Assessment

Focused on developing new characterization methods for providing high-fidelity data on faults, fault slip or potential fault slip, assessment of faults during active injection, criteria for cost-effective methods for assessing and choosing a site, and other related research

謝 辞

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務の結果得られたものです。