

革新的環境技術シンポジウム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

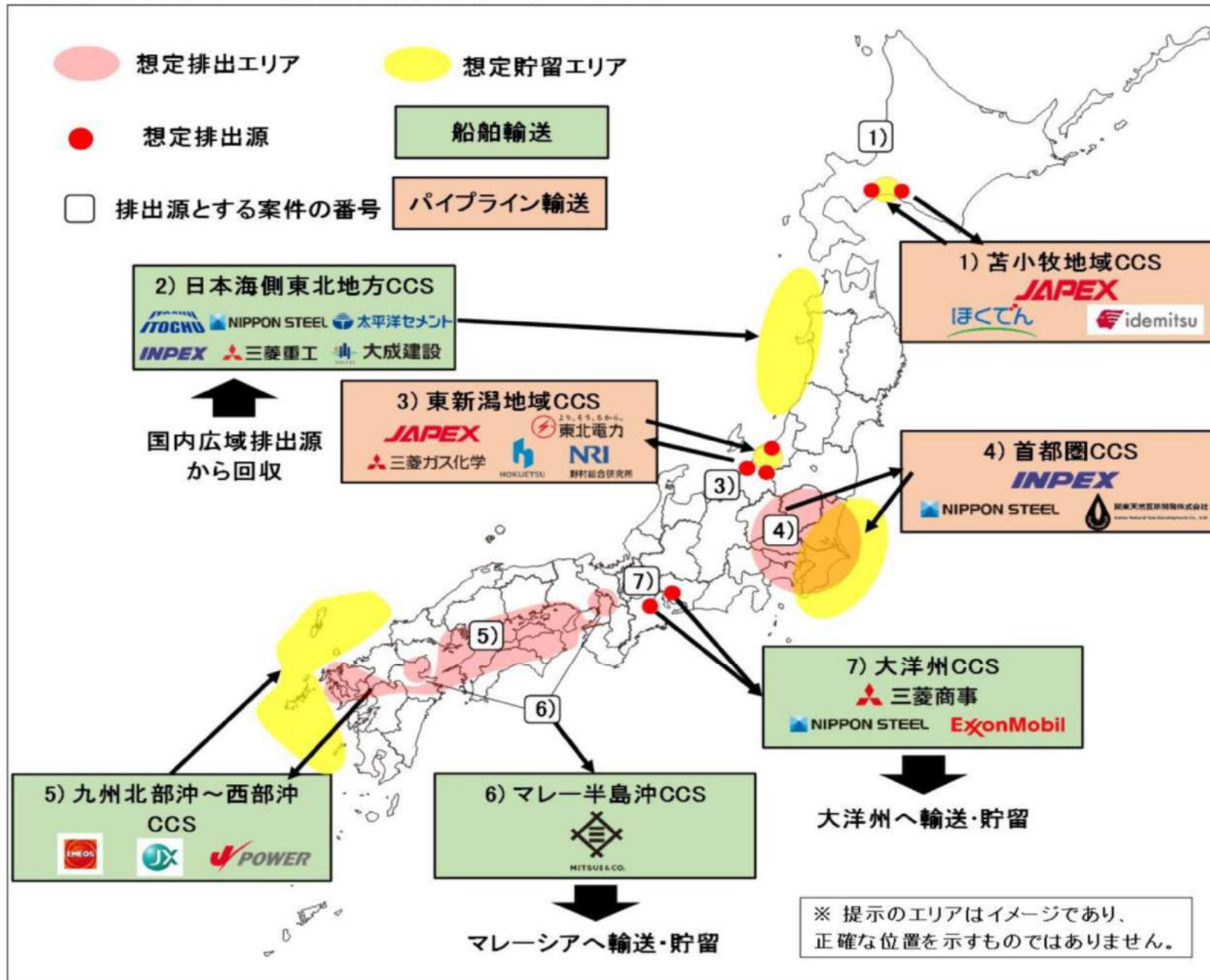
せつ じきゅう

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・圧倒的コスト削減

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！

2021-2023年度のNEDO事業(技術研究組合)

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

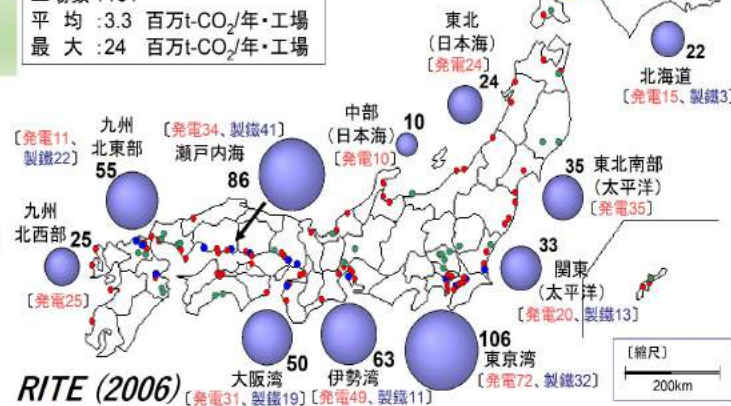
排出源マップ

- ✓ 排出源タイプ
- ✓ 排出量(規模)

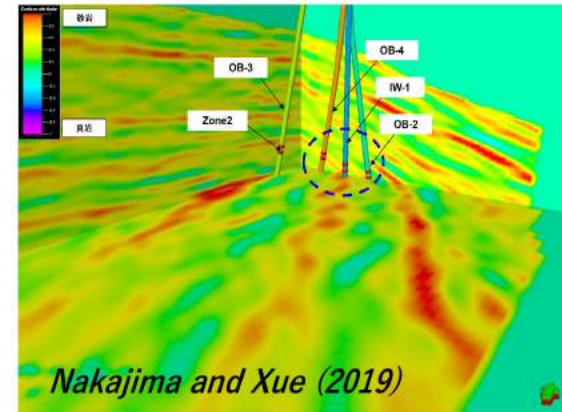
全国の主な大規模排出源(数字は推定排出量 百万t-CO₂/年)

● 火力発電所 ● 一貫製鉄所 ● セメント工場

合計: 539 百万t-CO₂/年
工場数: 161
平均: 3.3 百万t-CO₂/年・工場
最大: 24 百万t-CO₂/年・工場



RITE (2006)



Nakajima and Xue (2019)

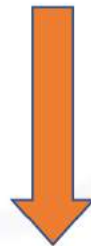
サイト地質評価

- ✓ 貯留規模
- ✓ 安全性



潜在的リスク評価
リスク低減対策

輸送距離



輸送手段

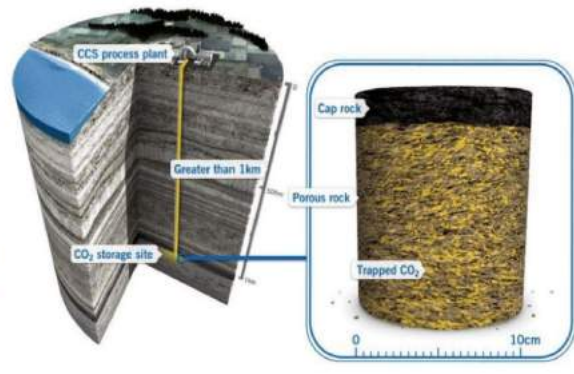
貯留サイト選定

- ✓ 深さ
- ✓ 位置
- ✓ 貯留可能量

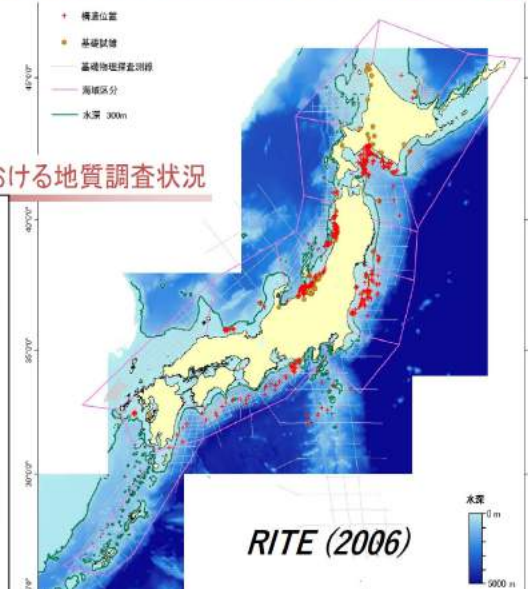
国内のサイト
選定基準

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

Source: GCCSI



国内における地質調査状況



RITE (2006)

既存調査データ

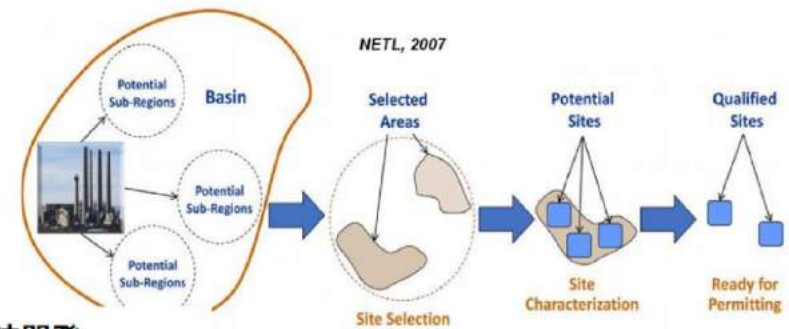
- ✓ 基礎試すい
- ✓ 民間企業
(限られたデータ)



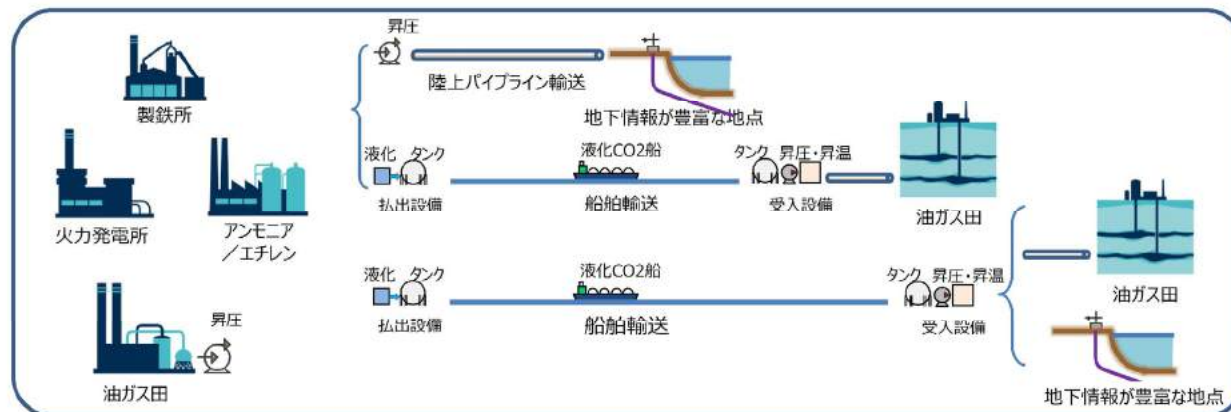
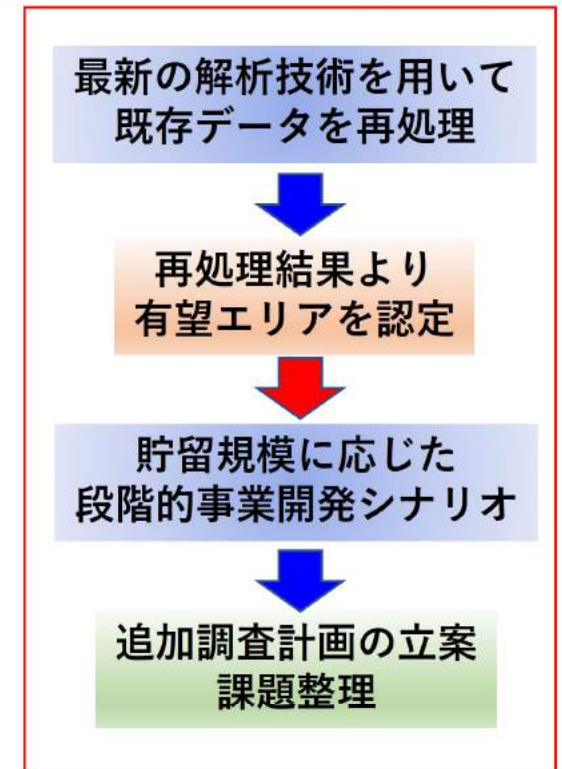
課題整理
追加データ取得

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！

実想定サイトの検討結果の一例



- **深部塩水帯水層（残留トラップ）のサイト特性評価精度向上と貯留資源量の不確実性評価手法開発**
 - 既存坑井や弾性波探査を用いた遮蔽層・貯留層や断層などの認定精度向上（最新の弾性波探査再処理技術、シーケンズ層序学的堆積システム解析技術の適用）
 - 岩相分布・性状の不均質性・不確実性を考慮した複数地質シナリオのモデル構築手法（地質統計学的手法による層序フォワードモデリングと坑井データの統合手法の開発）
- **サイト特性評価やリスクアセスメントを踏まえたサイト選定手法（CRSマッピングの適用）**
 - サイト特性評価：貯留ポテンシャルマップや圧入性を踏まえた有望な開発エリアの認定
 - リスクアセスメント：遮蔽能力、超臨界条件、断層、既存坑井などを考慮した開発リスクエリアの認定
- **CO2挙動シミュレーションに基づく圧入計画の最適化による貯留層有効活用とコスト低減手法**
 - サイト特性（地質構造、貯留層分布・層準、陸海域の条件）に応じた坑井配置、掘削・仕上デザイン（傾斜井や仕上げ区間による圧入性検討）などの最適化
- **事業フェーズ・貯留規模に応じた最適な開発エリアの選定と事業開発シナリオの構築**
 - CO2供給・貯留規模に応じた段階的な事業開発シナリオの構築（沿岸CO2供給からのオンサイト圧入> 陸上パイプライン輸送による貯留エリア拡大）と各事業化シナリオについての経済性評価ツールを用いたコスト試算
- **サイト特性の不確実性・リスクを低減するための効果的な追加調査計画の立案**
 - 浅海～沿岸域における弾性波探査手法や試掘等の坑井における追加データ取得計画
- **モニタリング計画の最適化とコスト低減手法**
 - 陸から海域への傾斜圧入井を想定した沿岸域でのモニタリング計画（CO2挙動、温度圧力測定等）の策定

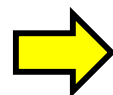


技術研究組合が描いているCCS事業イメージ

複数の実想定サイトを対象とするSRM検討成果総括について

～知見集約・課題整理～

- **貯留対象層の差異**: 深部塩水性帯水層、水溶性ガス地層、生産性低下ガス田
- **地域特性の差異**: 堆積盆規模、既存データ・情報量 & 品質



国内の未調査地域／既存データが乏しい地域(基礎調査対象外)の貯留サイト調査、対象サイトでの追加データ取得への知見提供および**課題整理**(断層安定性評価など)

SRM検討の目標



開発シナリオ

How do we provide investment assurance?

How do we get adequate capacity with minimal cost of characterization and development?

(知見集約・活用)

国内CCS実用化への支援

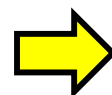
CCS技術事例集に反映

(2024年度以降も継続)

CO₂回収・輸送・貯留トータルシステムの

コスト試算ツール作成中

(石炭火力、ガス火力、製鉄所など)



CCS事業の経済性評価(排出源データベースほか)
ビジネスモデル検討(地元メリット、インセンティブほか)

(2024年度以降も継続)

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。

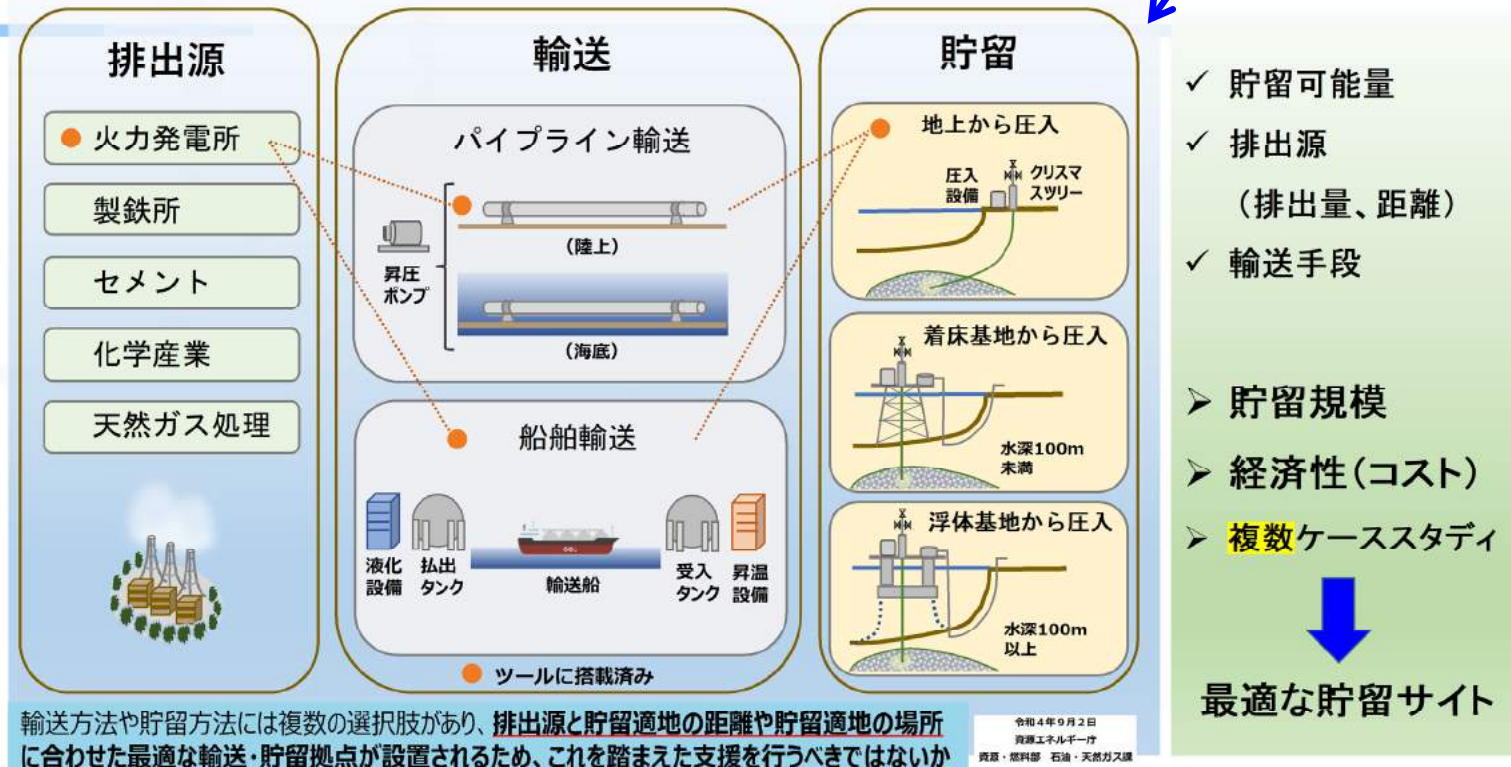
想定されるCO2の回収源、輸送方法、CO2貯留地域のパターン

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

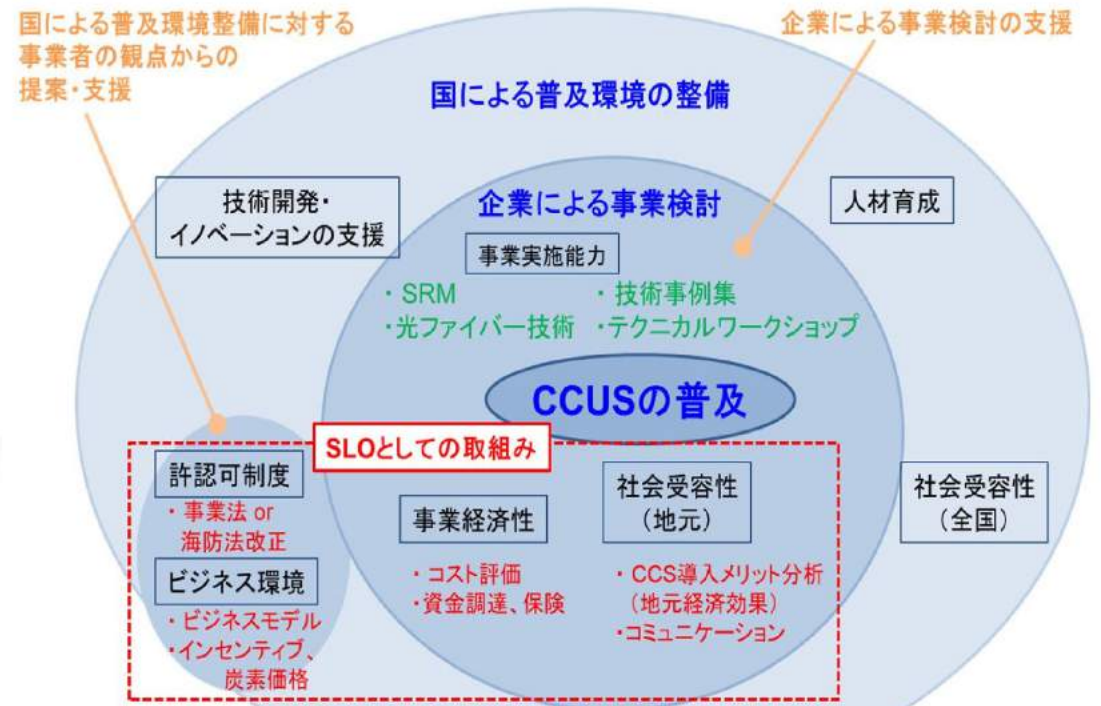
社会合意形成 (SLO)

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。

CO₂地中貯留技術事例集の作成・英訳・公開

CCS 技術事例集

Phase 01
基本計画

Phase 02
貯留サイト選定

Phase 03
サイト特性評価

Phase 04
実施計画

Phase 05
設計・建設

Phase 6
操業・管理

Phase 7
サイト閉鎖

Phase 8
閉鎖後管理

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

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)

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

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

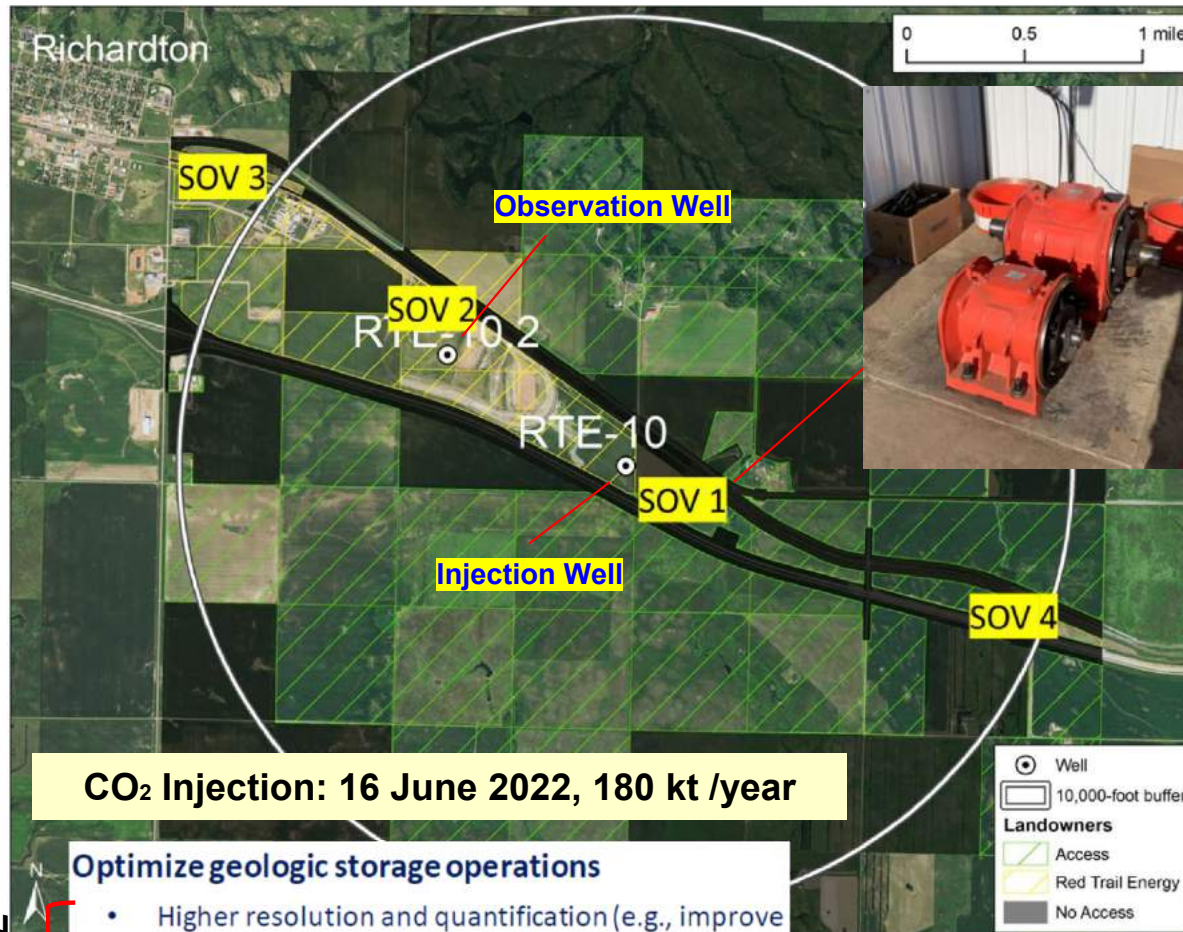
商社技術 サポート企業

伊藤忠石油開発

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*



CO₂ Injection: 16 June 2022, 180 kt /year

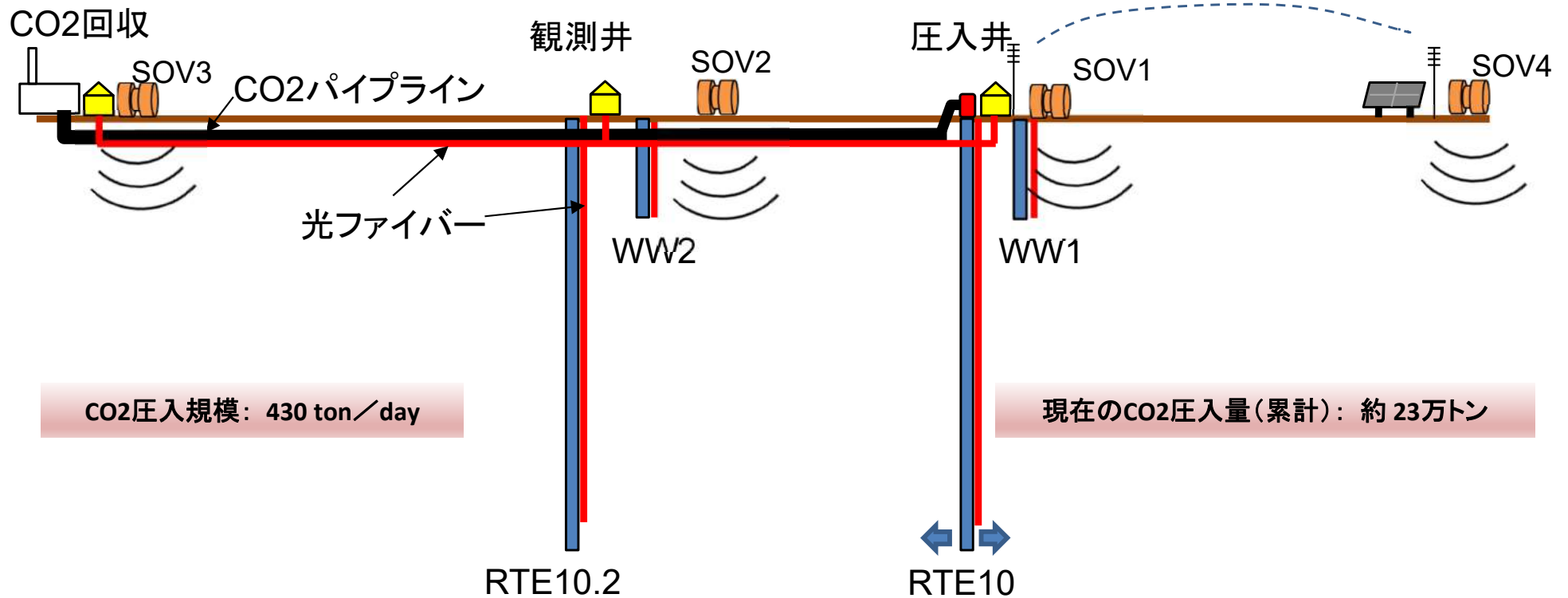
Optimize geologic storage operations

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

US/DOE

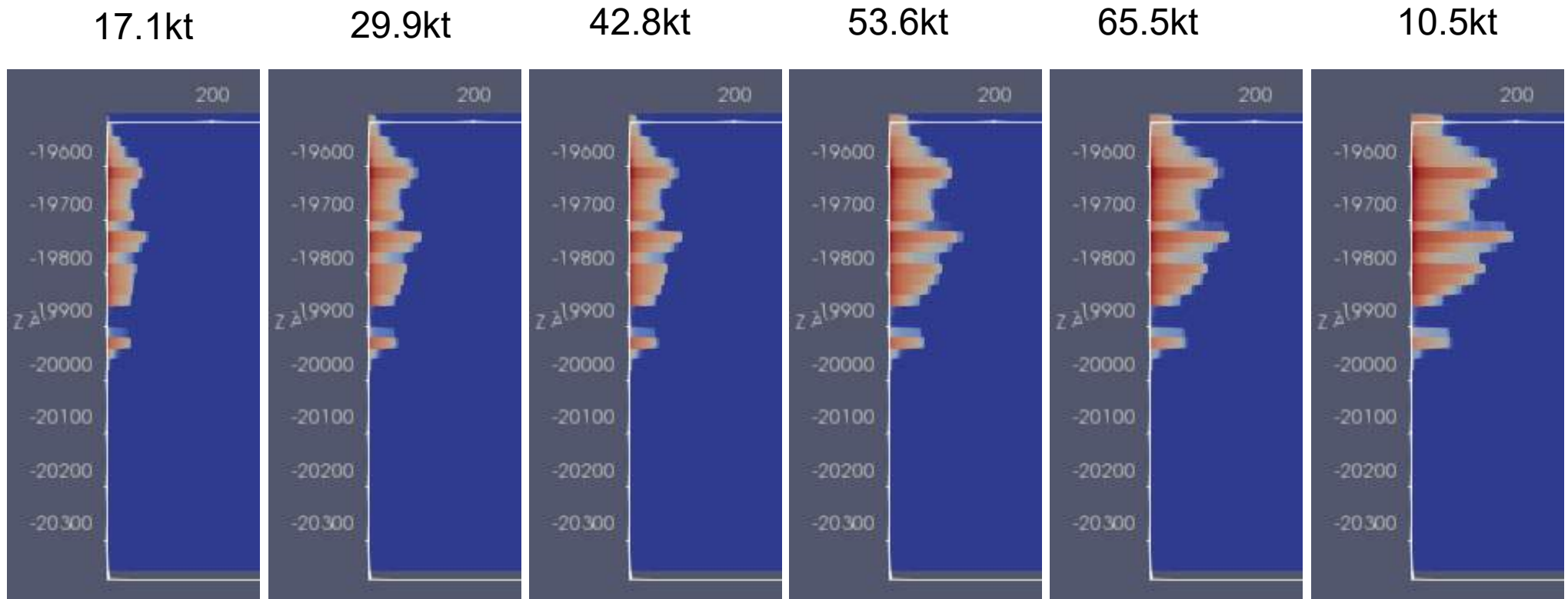
Class VI Approved
(Oct. 2021)

光ファイバーによるCO₂モニタリング

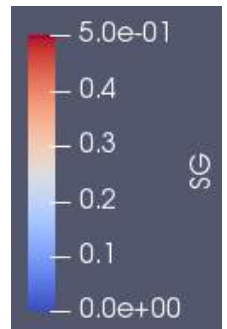


DAS (音響計測)	CO ₂ プルームの広がり把握(DAS/VSP)
DSS (ひずみ計測)	坑井健全性、貯留層/遮蔽層安定性監視、CO ₂ 挙動監視
DTS (温度計測)	坑井周辺のCO ₂ 挙動監視(坑井健全性)

Preliminary results: CO₂ distribution in Broom Creek

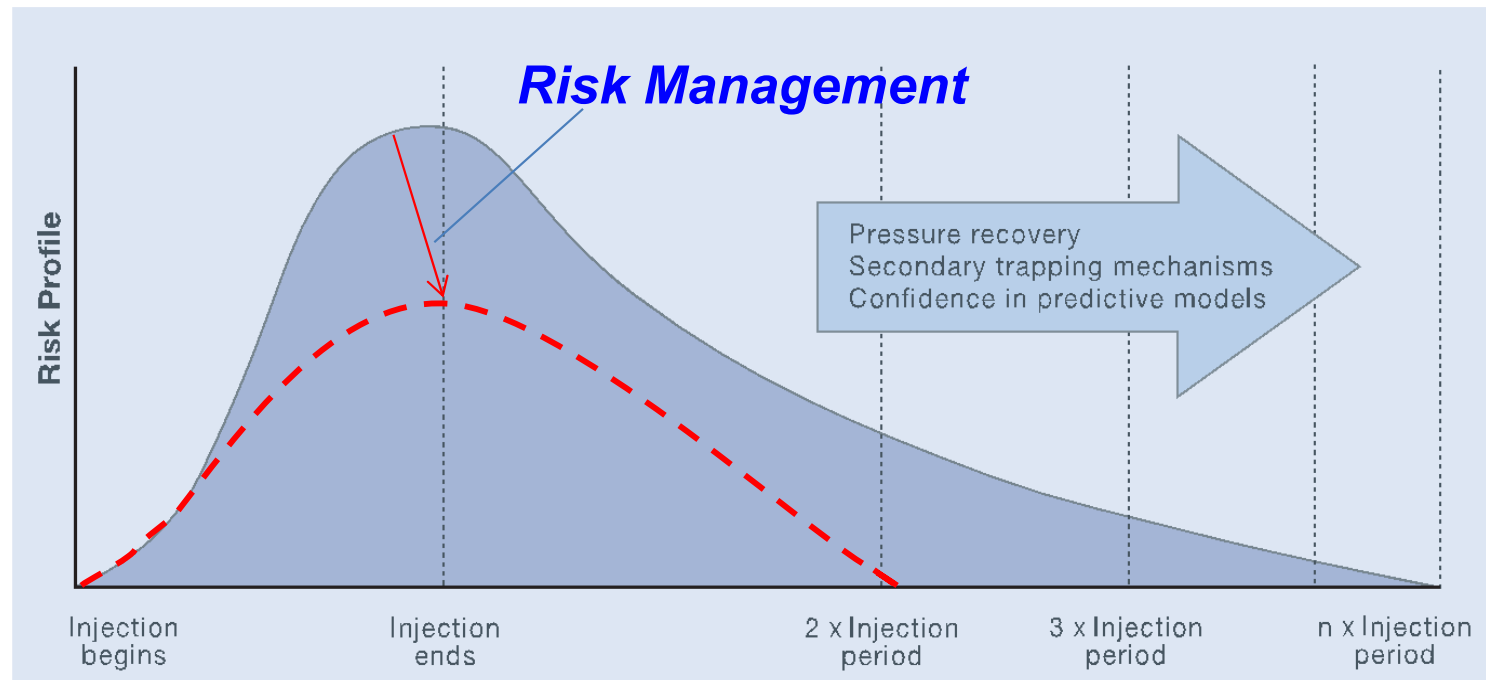


- Mainly in high permeability layers (perforated intervals)
- CO₂ plume size: 200m @Vibroseis VSP (MS1)



圧入井深度方向のCO₂分布状況(速報)、上位穿孔区間に集中

地下情報の不確実性、**潜在的**リスク、リスクマネジメント



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**

断層・地震

CO₂漏洩・漏出

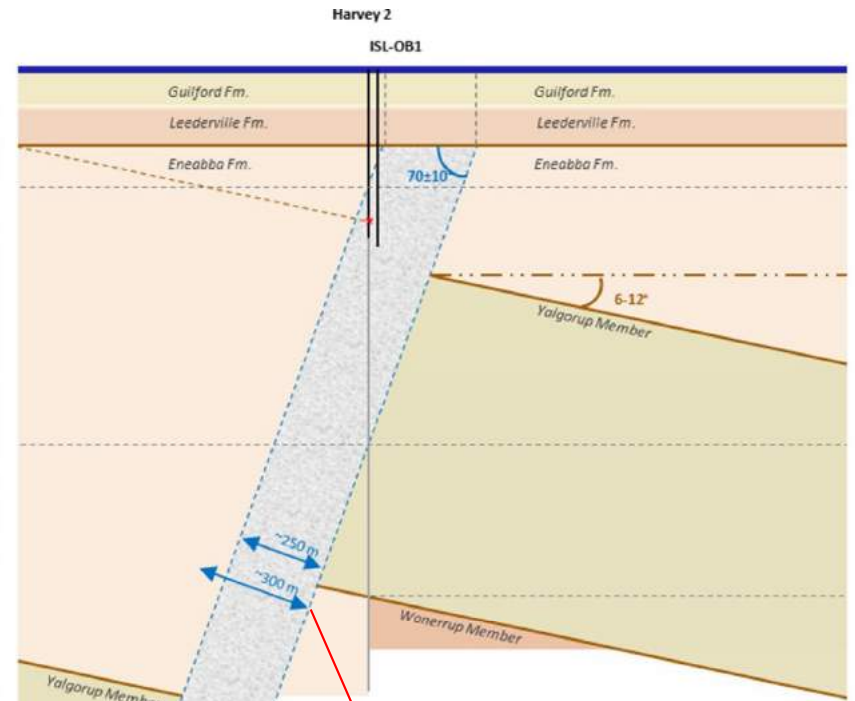
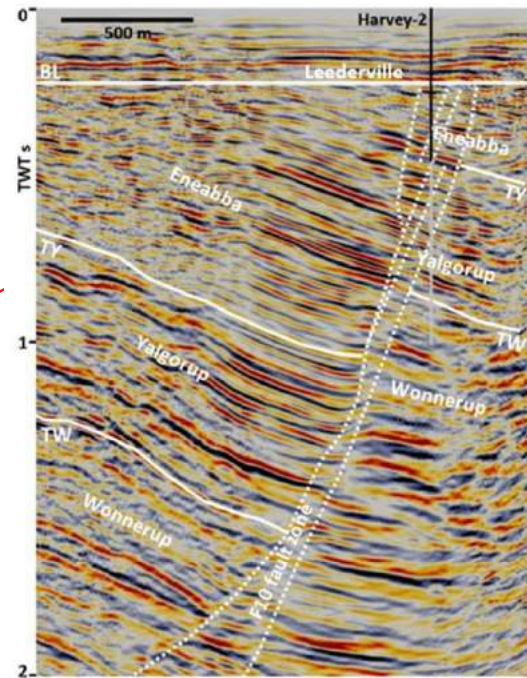
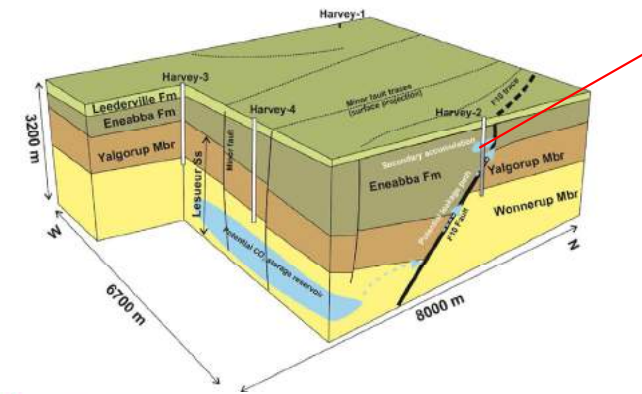


Collaborations: RITE-CSIRO

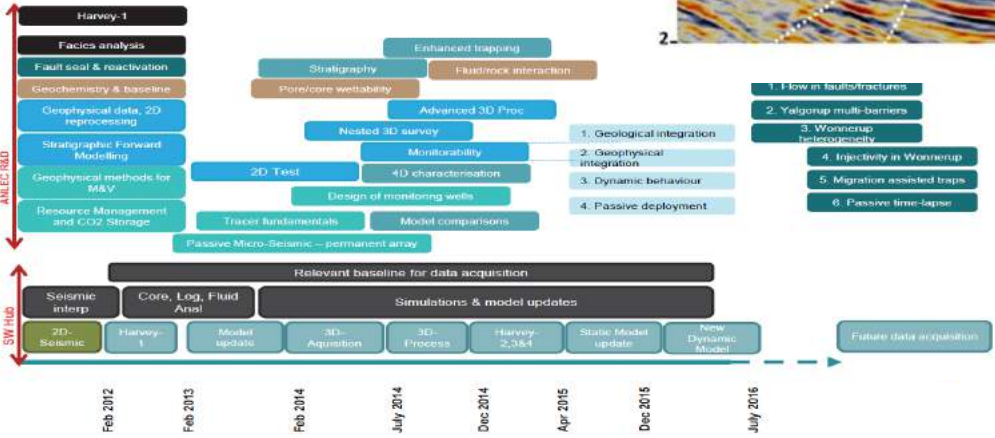
Fiber Optic Sensing for Fault Zone Mapping and Stability Monitoring

(日豪CCUS協力事業)

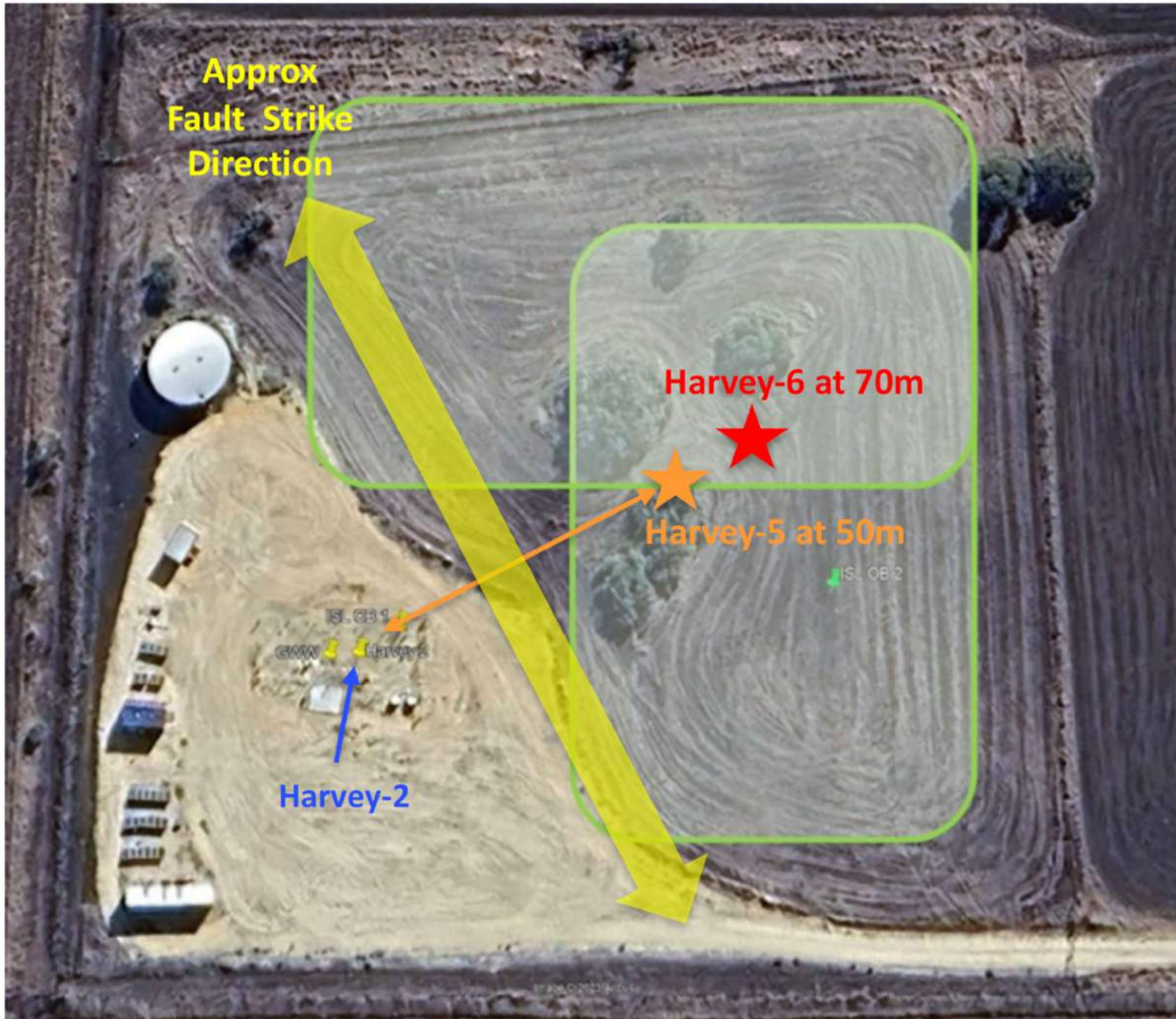
In Situ Lab / SW-Hub: South Perth



F10 – major structural feature,
 - offset of 1000 m
 - fault zone 250 m wide

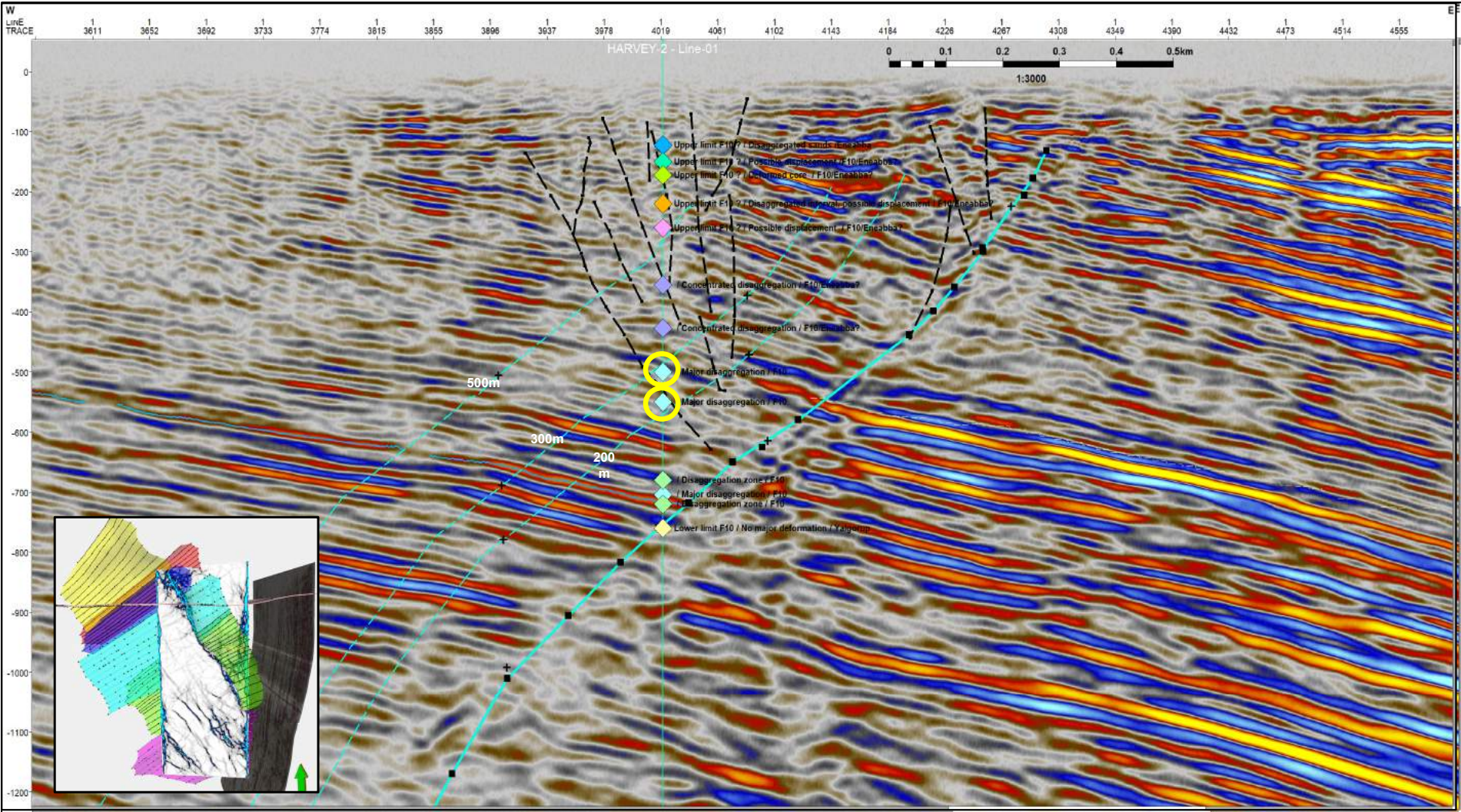


➤ Fault zone mapping and monitoring with **Strain Sensing (RITE)** coupled with temperature and acoustic sensing (**CSIRO**)

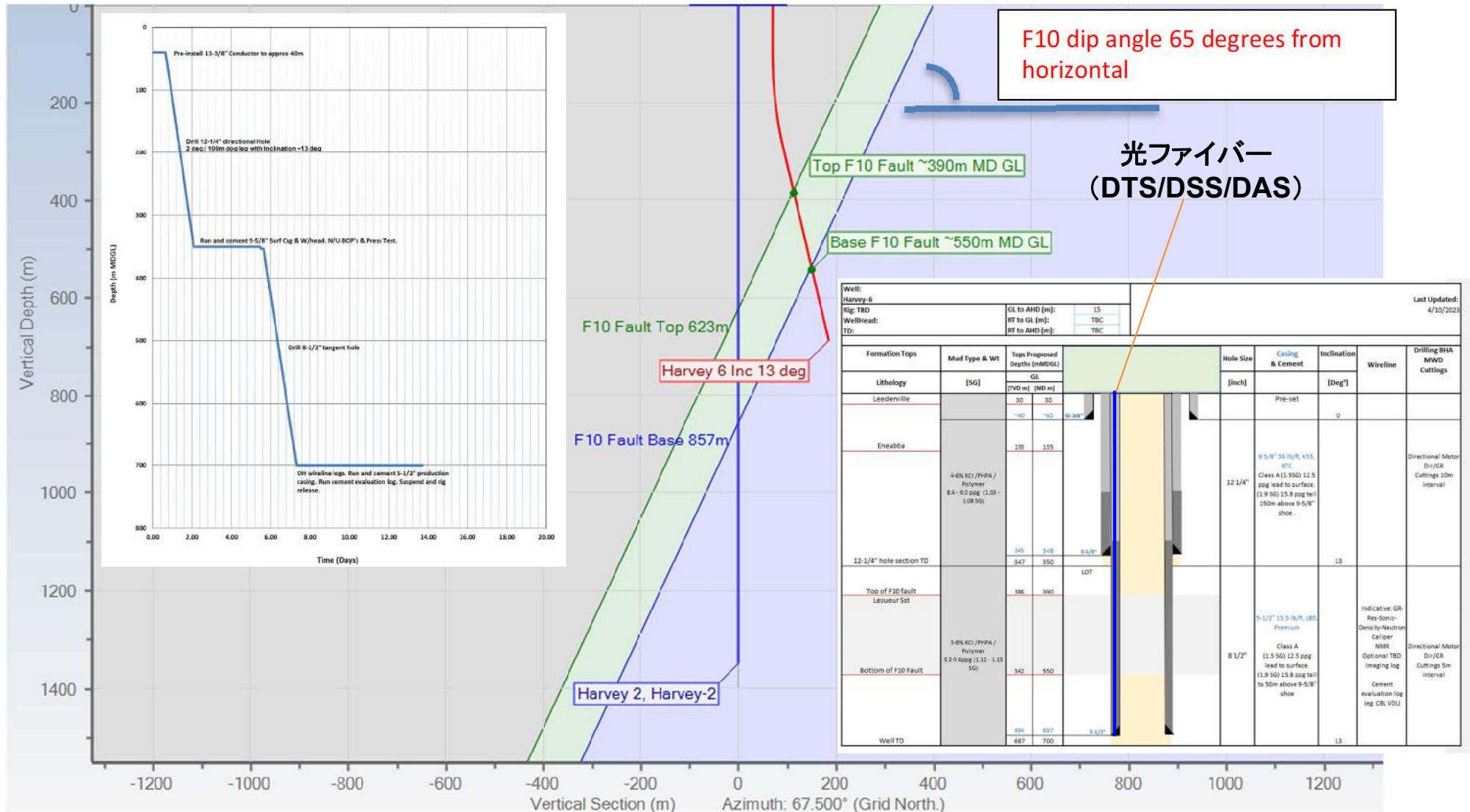


Estimating the Fault Damage Zone Envelope from Seismic

Harvey-2 Superimposed to LINE-01



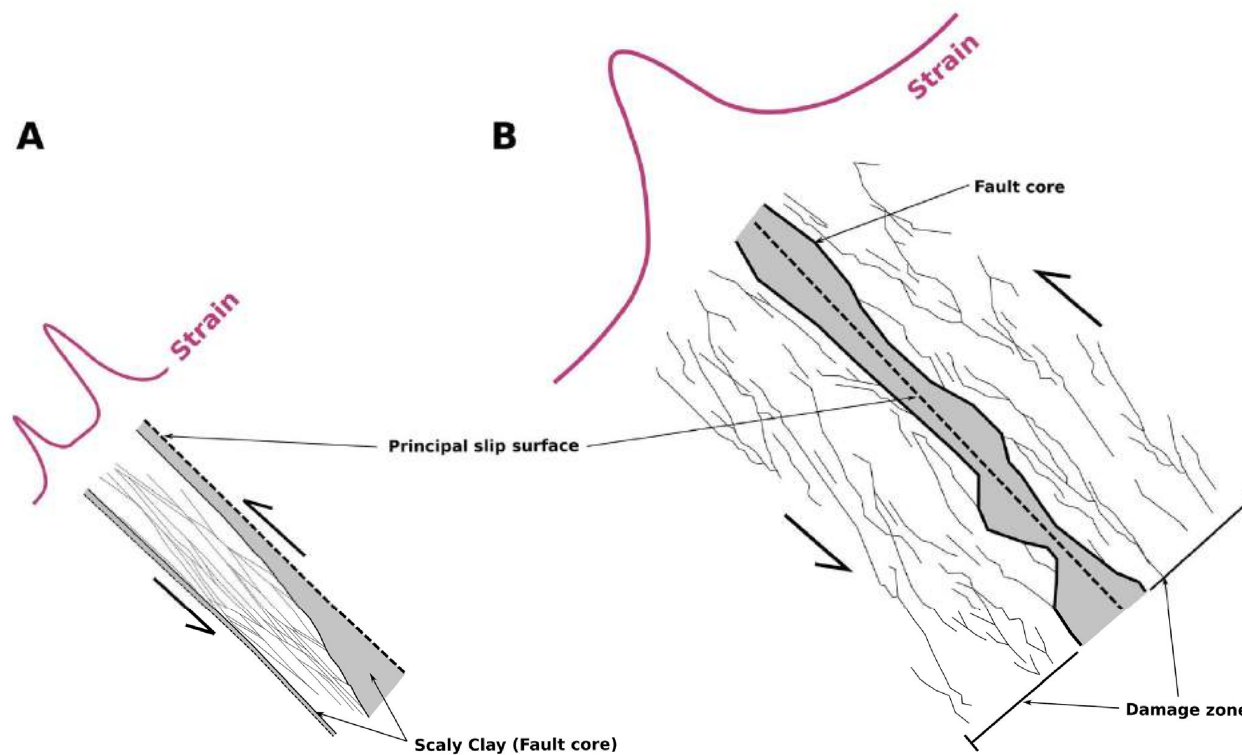
新規坑井Harvey-6 (Depth:700m)の掘削計画・仕上げ概要



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



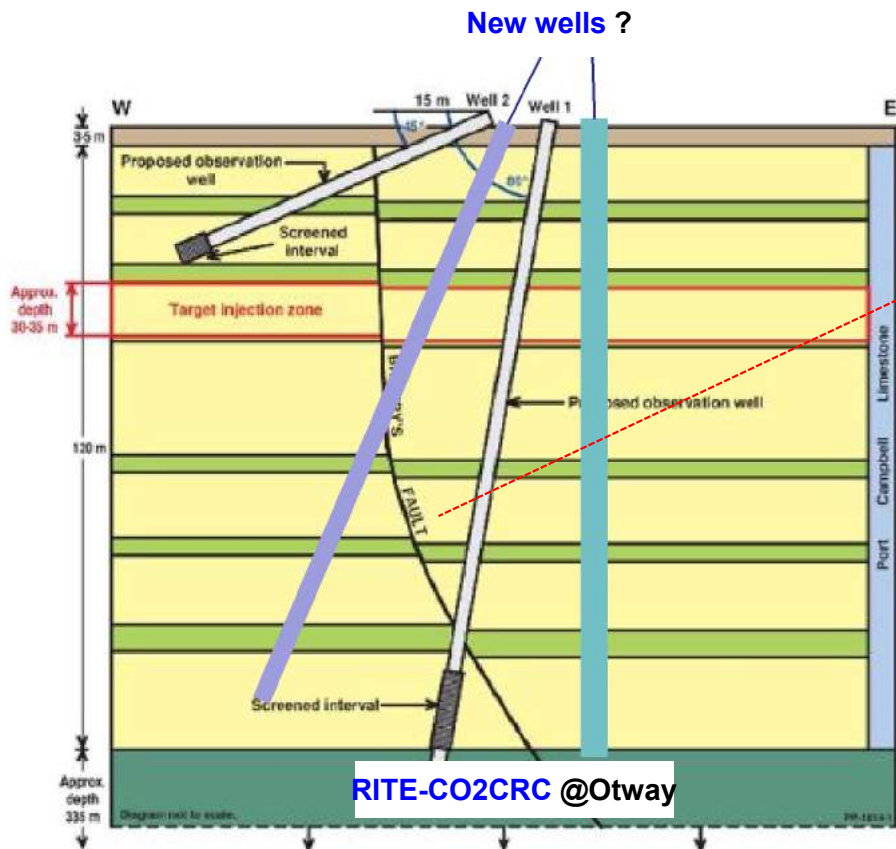
the relationship between fault core/gouge, principal slip surfaces, and the 'fault damage zone'

- 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 MSV & Plume stabilisation

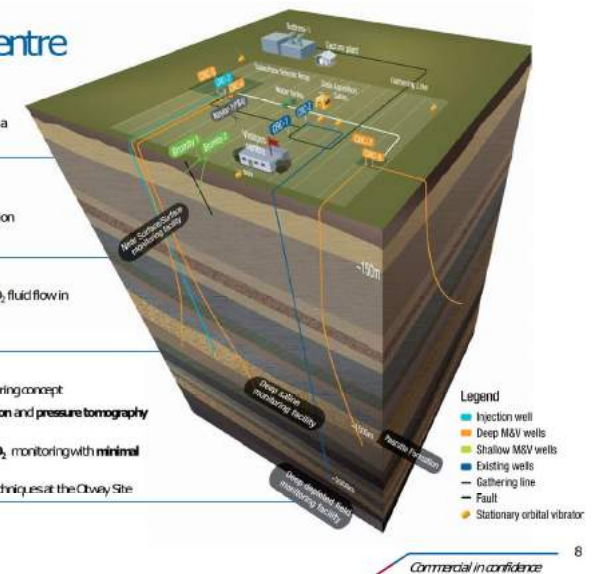
Otway Stage 3: CO₂ Migration

- ✓ Improve capability to predict the role of faults in controlling CO₂ fluid flow in the near surface;
- ✓ Improve near surface monitoring capabilities

Otway Stage 3: 2015–2022

- ✓ 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

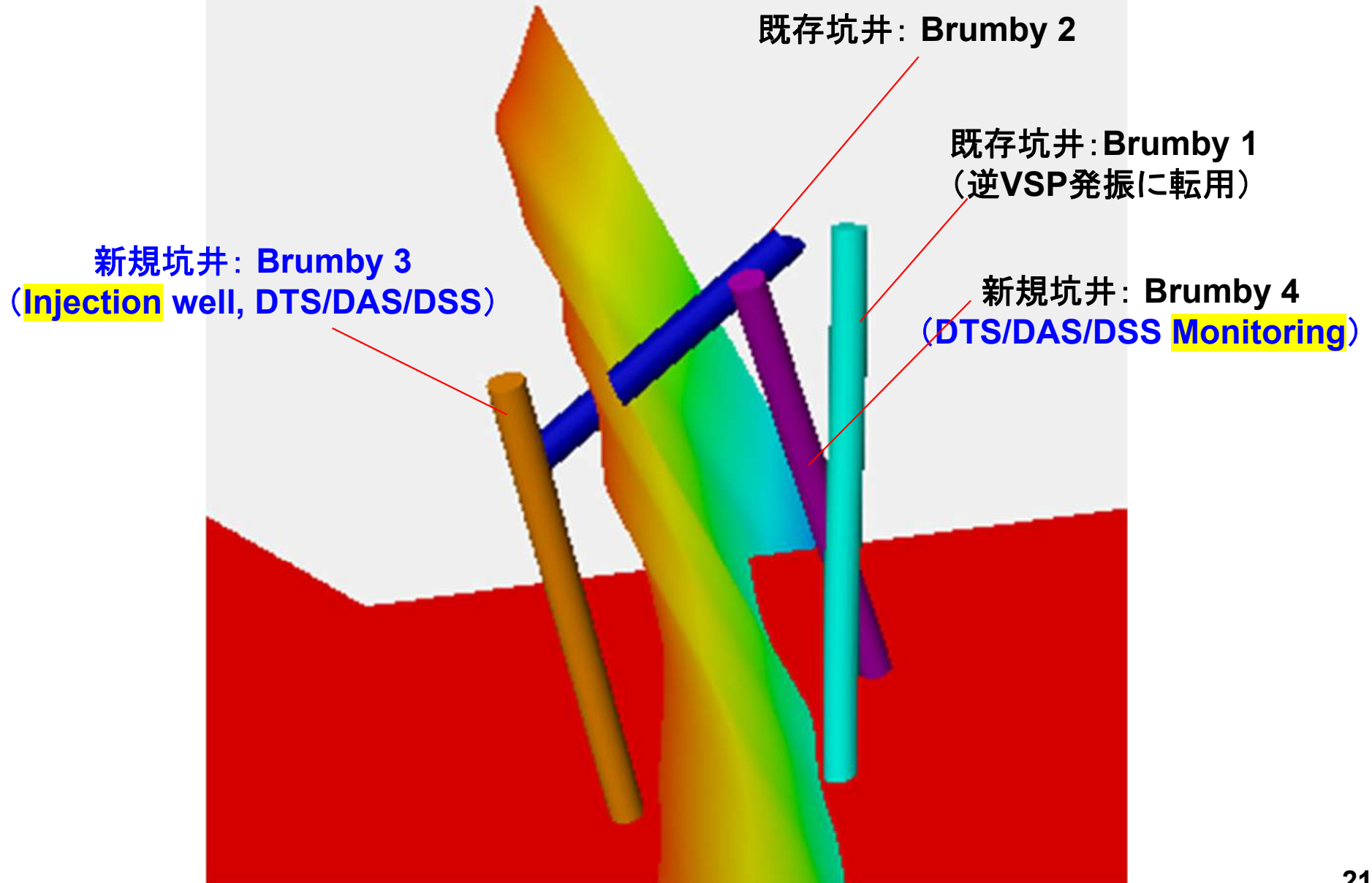
CQ2CRC
Building low-emissions future



Commercial in confidence

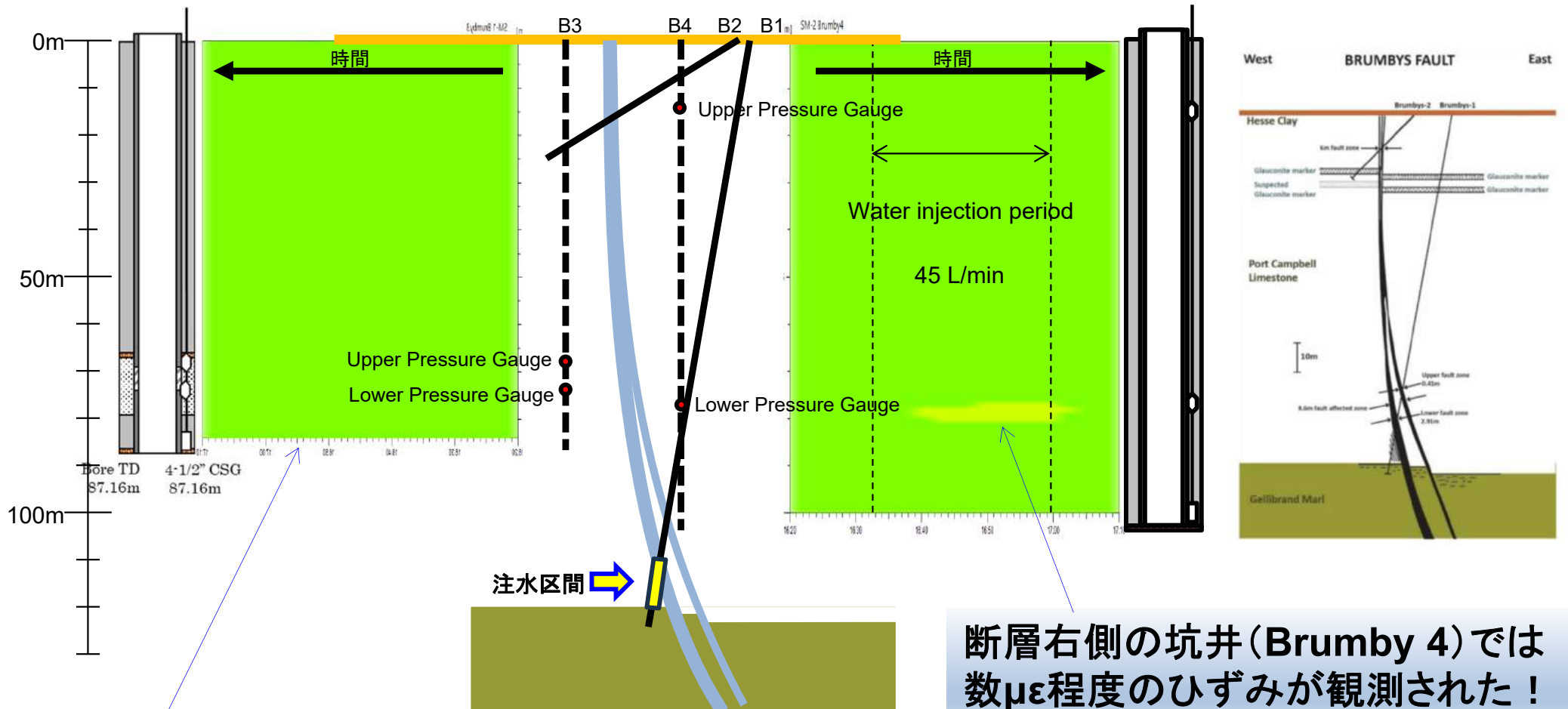
- FY2022: shallow well drilling, fiber cable installation, baseline (strain, temp) monitoring
- FY2023~: water / CO₂ injection, fault leakage detection, DAS/DSS/DTS monitoring

3D view of Brumby wells at Otway site



既存坑井Brumby 1からの予備注水試験結果

Xue et al., 投稿準備中



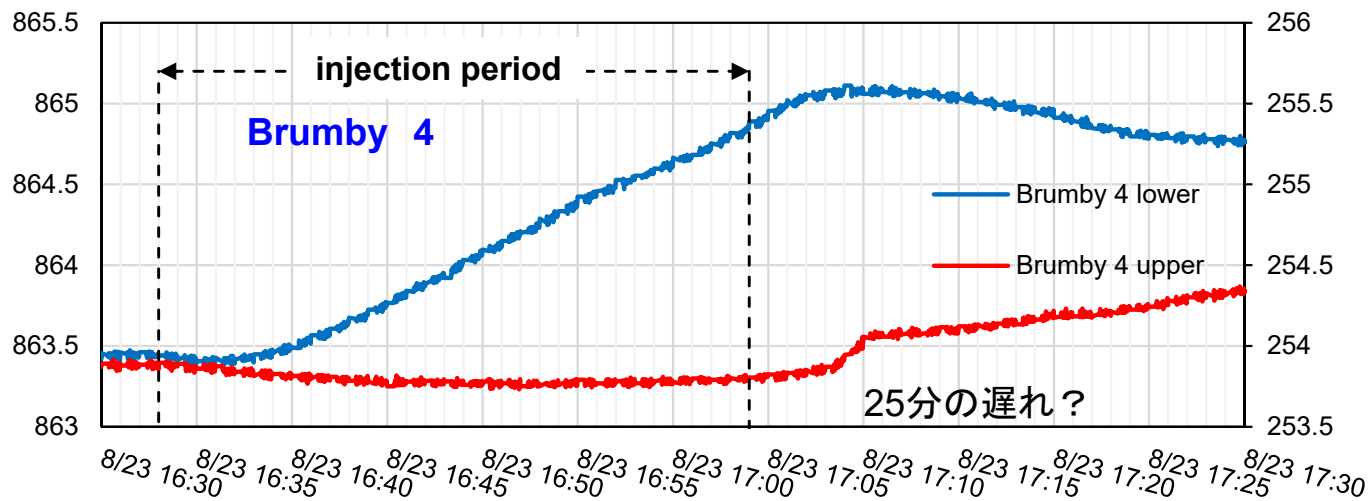
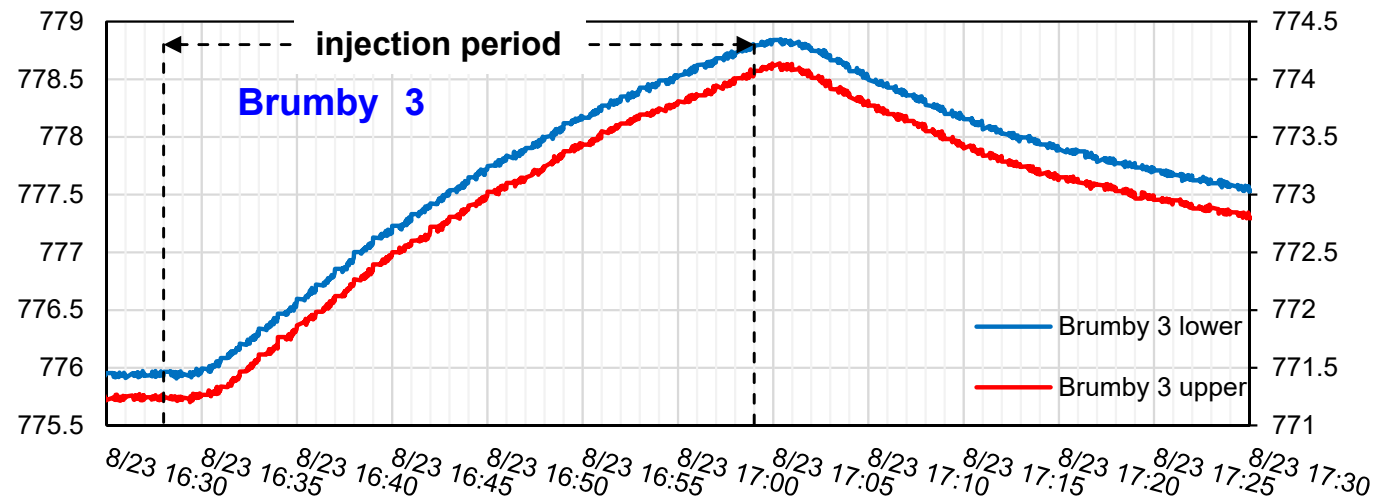
断層左側の坑井(Brumby 3)ではひずみが観測されていない！

断層右側の坑井(Brumby 4)では数 $\mu\epsilon$ 程度のひずみが観測された！

- 断層と母岩(host rock)に浸透性があるか
- fault zoneに流体(水、CO₂)が浸入できるか
- 流体移動がひずみで検知できるか

圧力データ @8/23 Brumby 1 water injection

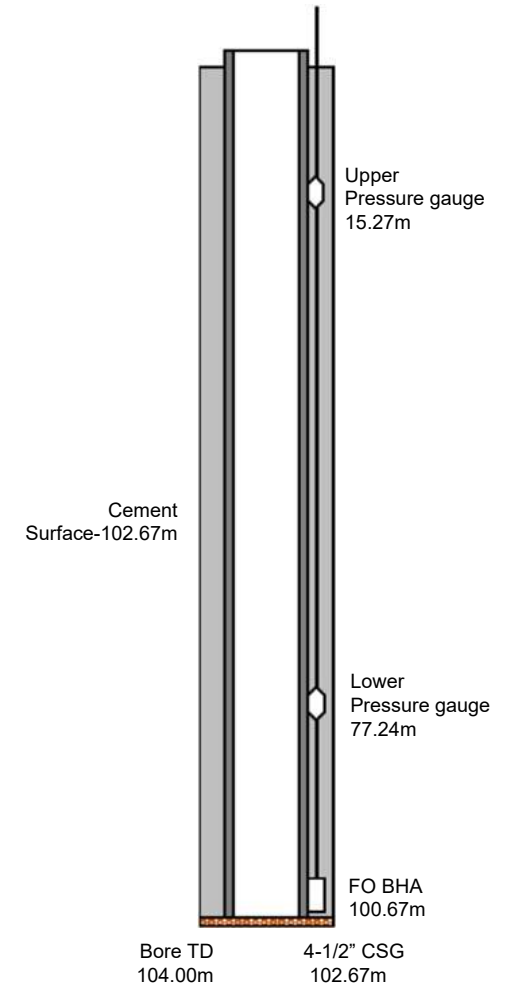
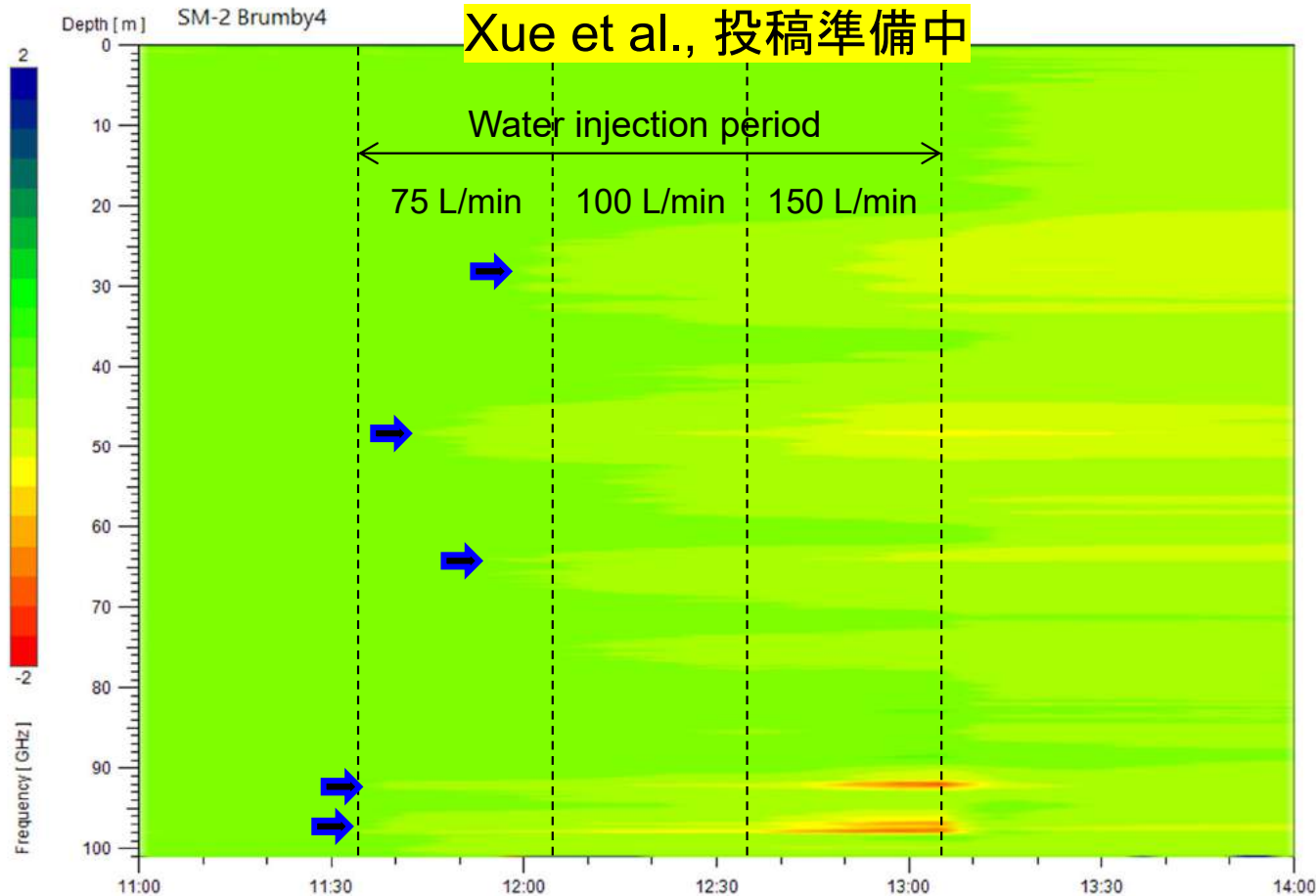
Xue et al., 投稿準備中



- 45 L/min (injection rate) では、Brumby 3の圧力計に変化 (pressure build-up) があつた
- Brumby 4の深部と浅部の圧力計には、pressure build-upの時間差 (圧力伝播) があつた

注水試験時、断層右側の坑井で観測されたひずみ分布の経時変化

Rayleigh shift at Brumby 4 in water injection @ Brumby 1

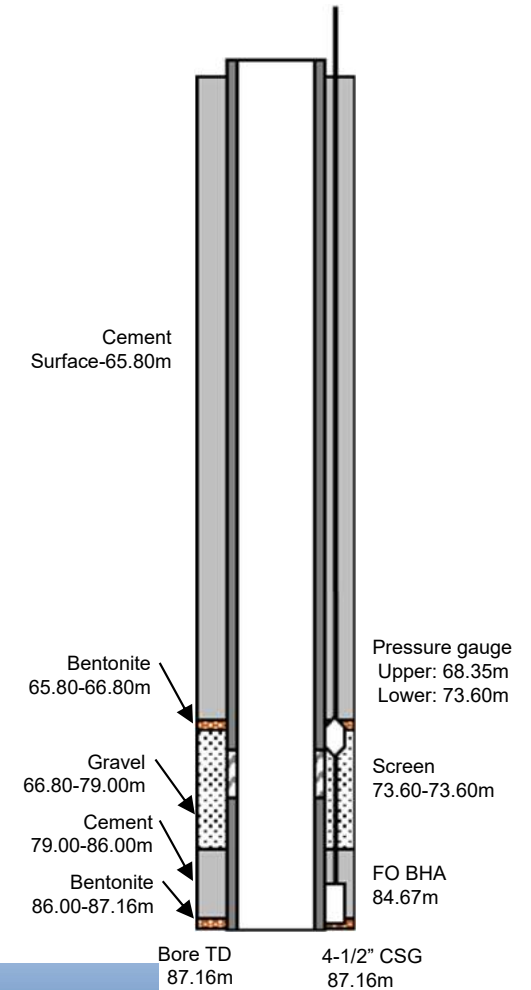
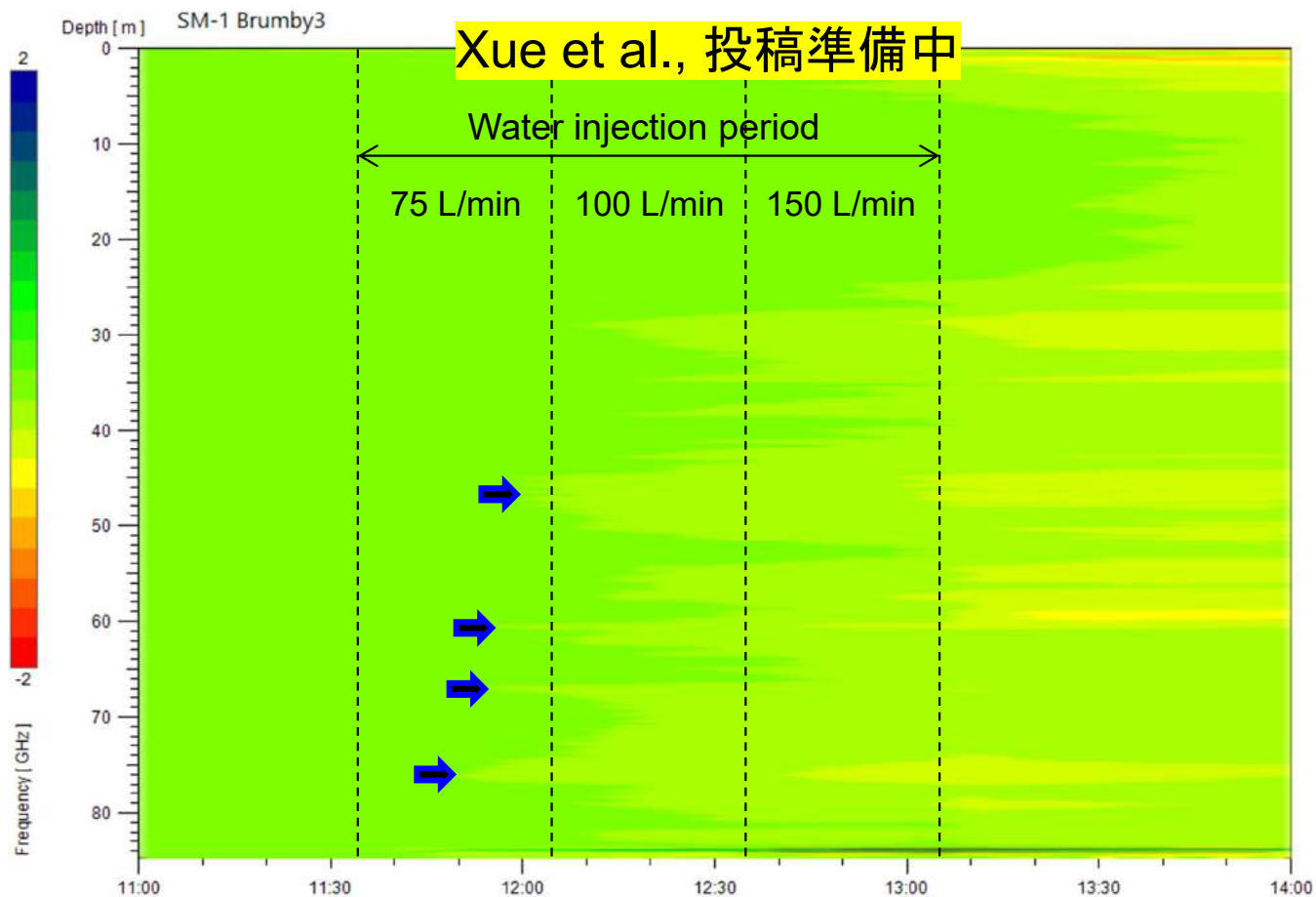


- fault zoneに流体が浸入でき、流体移動(漏洩)がひずみで検知できた
- 深度方向において、ひずみ出現のタイミングや大きさが異なる
- 一部の水が浸透性の高い地層に浸入している

地質モデルにfeedback
(検討作業中)

注水試験時、断層左側の坑井で観測されたひずみ分布の経時変化

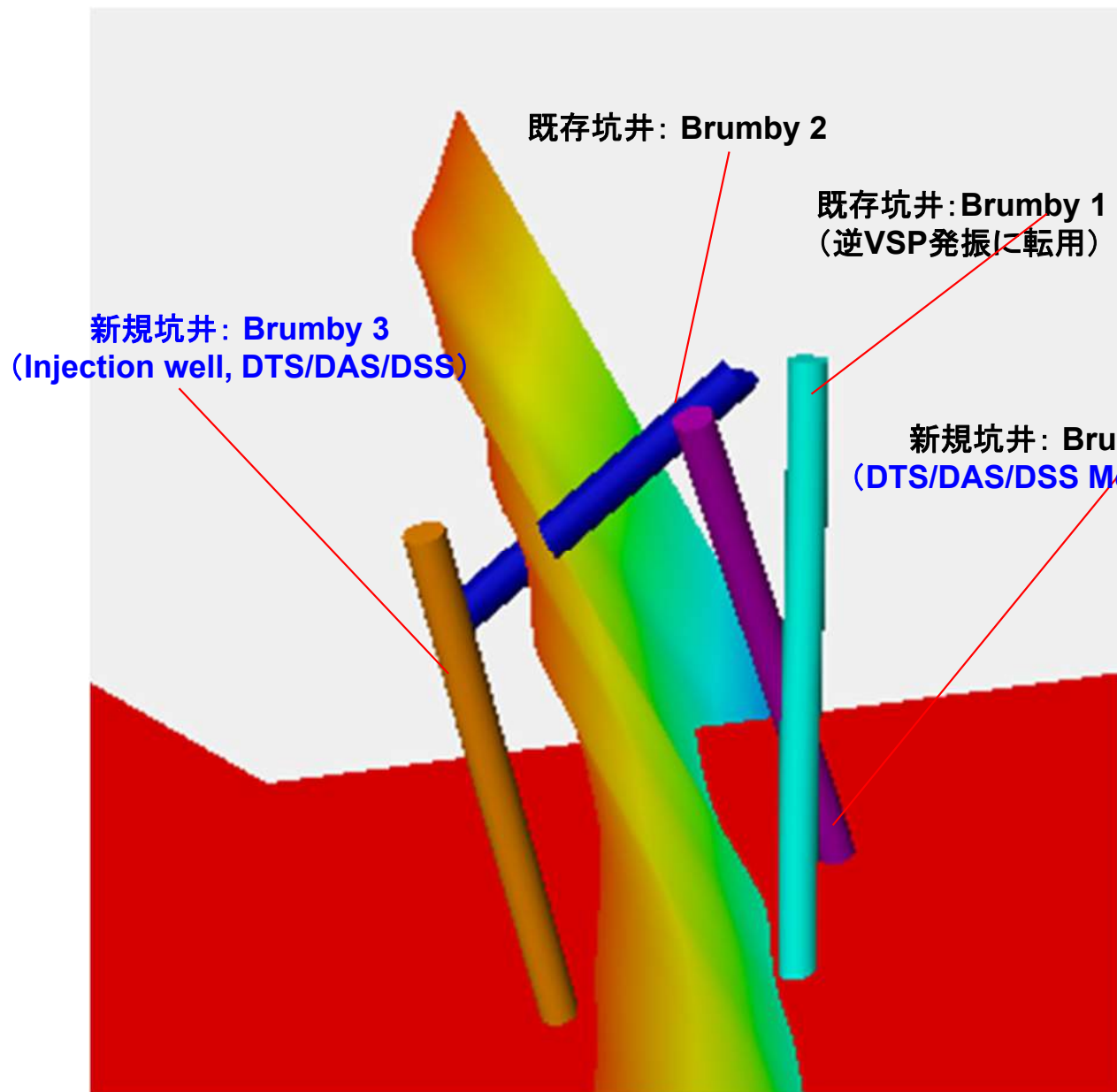
Rayleigh shift at Brumby 3 in water injection @ Brumby 1



- 深度方向において、ひずみ出現のタイミングや大きさが異なる (Brumby 4とほぼ一致)
- 一部の水が浸透性の高い地層に浸入している。Fault zoneを超える圧力干渉あり？
- 75 L/min (injection rate) では、Brumby 4に比べてひずみ出現がかなり遅い

坑井と断層の空間的配置図

3D view of Brumby wells at Otway site



CO₂圧入試験計画: 協議中

CO₂圧入許可申請中

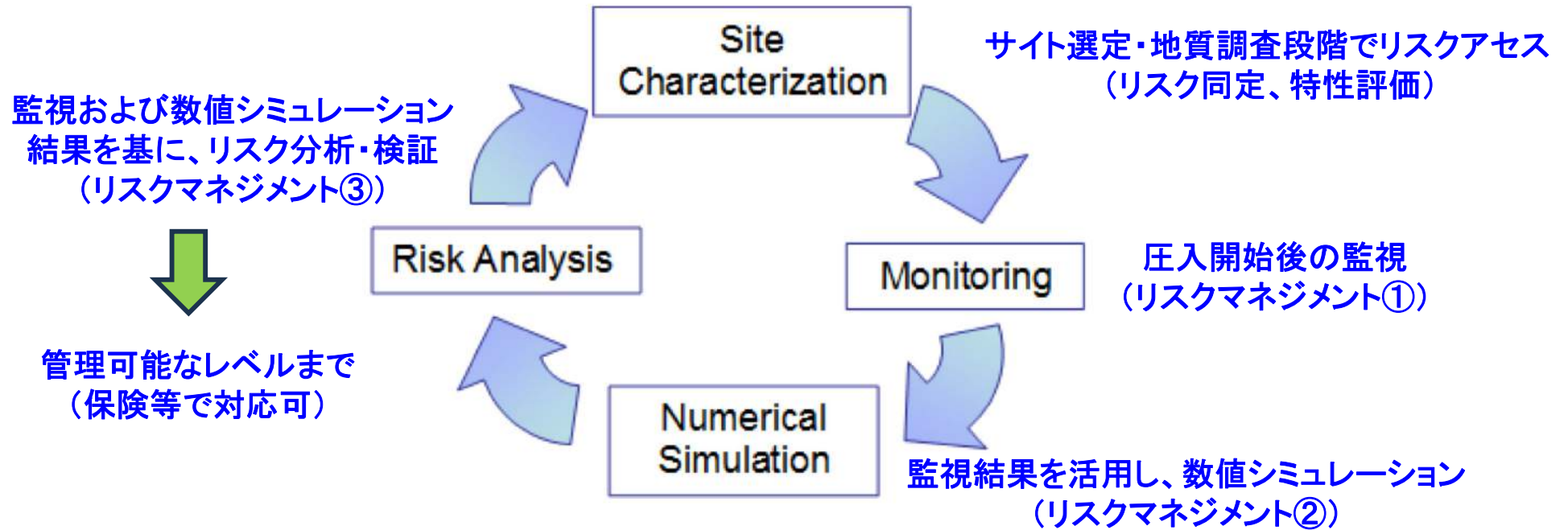
CO₂圧入試験
(Mar. 2024?)



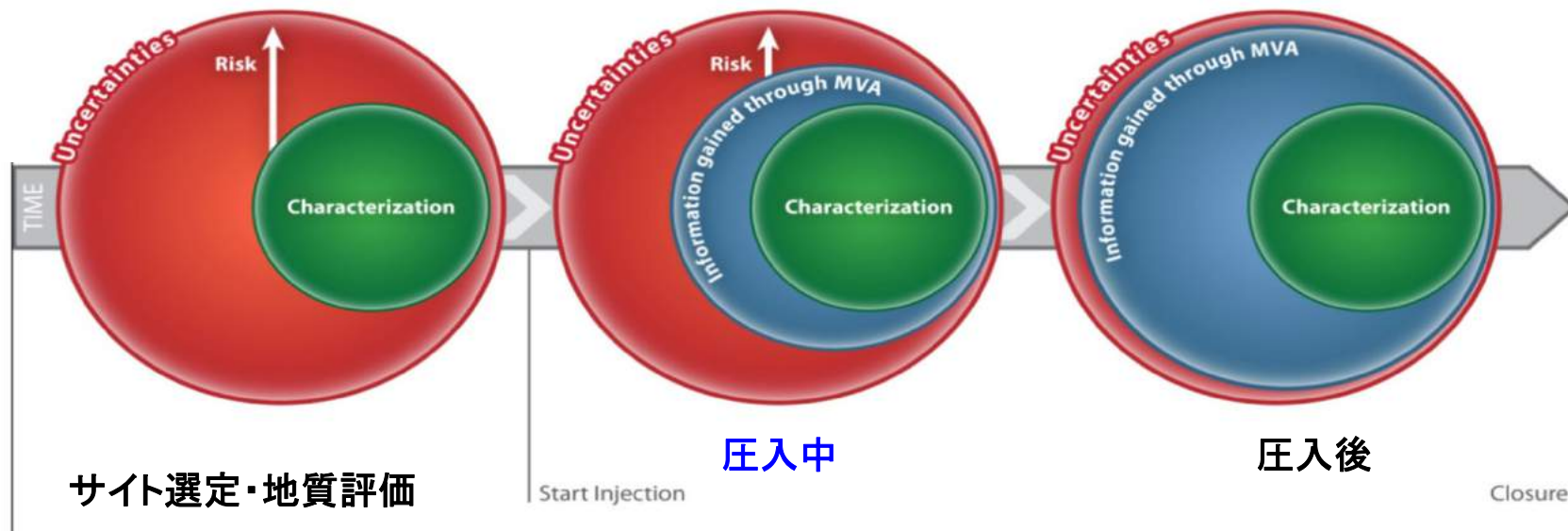
2024年度以降、漏洩 (flux)
定量的評価

数値シミュレーション
(必要あれば、追加試験も)

CCS事業のリスクマネジメント



Monitoring, Verification, and Accounting



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。