

二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術開発事業 の概要(終了時評価用)

平成27年4月21日

経済産業省産業技術環境局環境調和産業・技術室
公益財団法人 地球環境産業技術研究機構
国立研究開発法人 産業技術総合研究所

目 次

1. プロジェクトの概要
2. 目的・政策的位置付け
3. 目標
4. 成果、目標の達成度
5. 事業化、波及効果
6. 研究開発マネジメント・体制等
7. 前回(H24)中間評価結果
8. 評価
9. 提言及び提言に対する対応状況

1. プロジェクトの概要

概 要

本事業では大規模発生源から分離回収したCO₂を地下深部塩水性帯水層に貯留する**地中貯留技術開発**において、2020年頃からの実用化に向けて、我が国の地質的・社会的実情に適した**安全性評価技術**を確立するほか、CO₂地中貯留に関する科学的知見や技術的ノウハウを事例集にまとめる。

実施期間

平成12年度～平成27年度

予算総額

122.1億円

64.74億円(補助(補助率100%))

平成14年度:7.26億円、平成15年度:7.64億円、平成16年度:8.10億円、平成17年度:8.63億円、平成18年度:8.07億円、平成19年度:8.10億円、平成20年度:6.01億円、平成21年度:5.30億円、平成22年度:5.63億円

57.36億円(委託)

平成12年度:4.54億円、平成13年度:7.65億円、平成22年度:3.71億円、平成23年度:8.31億円、平成24年度:8.55億円、平成25年度:7.00億円、平成26年度:9.48億円、平成27年度:8.12億円
(契約額)

実 施 者

公益財団法人 地球環境産業技術研究機構

*国立研究開発法人産業技術総合研究所（課題分担）

プロジェクト リーダー

薛 自求 公益財団法人 地球環境産業技術研究機構 主席研究員

*西 祐司 産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門 グループ長

2. プロジェクトの目的・政策的位置付け(1)

事業の目的：

- 本事業は、大気中のCO₂濃度の急激な上昇を抑制させるため、火力発電所や製鉄所等の大規模発生源から分離回収したCO₂を帯水層に長期的に安定かつ安全に貯留する技術を開発することを目的としている。

政策的位置づけ：

- 二酸化炭素回収貯留(CCS: Carbon dioxide Capture and Storage)の実用化に向けて、分離回収したCO₂を帯水層に長期的に安定かつ安全に貯留する技術を開発するものであり、

- ・環境エネルギー技術革新計画
- ・エネルギー基本計画
- ・エネルギー関係技術開発ロードマップ

において位置付けられている。(次ページ)

2. プロジェクトの目的・政策的位置付け(2)

環境エネルギー技術革新計画（平成25年9月13日総合科学技術会議）

2020年頃からの実用化が見込まれるCCSについては、実用化に向けた研究開発・実証と共に、社会実装への取り組みを進める。

エネルギー基本計画（平成26年4月11日閣議決定）

（高効率石炭・LNG火力発電の有効利用の促進）

2020年頃の二酸化炭素回収貯留（CCS）技術の実用化を目指した研究開発や、CCSの商用化の目途等も考慮しつつできるだけ早期のCCS Ready 導入に向けた検討を行うなど、環境負荷の一層の低減に配慮した石炭火力発電の導入を進める。

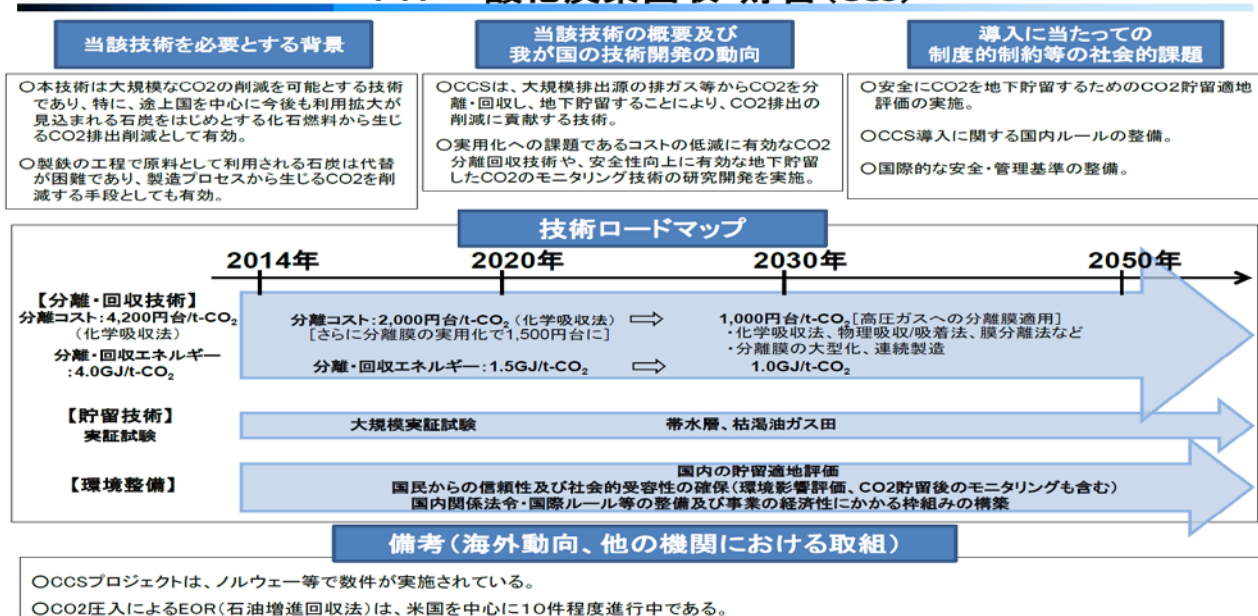
（戦略的な技術開発）

こうした徹底した効率化や水素エネルギーの活用のための取組を進める一方、それでも最終的に対応しなければならない地球温暖化などに関する課題について、例えば化石燃料を徹底的に効率的に利用した上で最終的に発生するCCSなどに関する技術開発も並行して進めていく。

2. 目的・政策的位置付け(3) 国の関与の必要性

エネルギー関係技術開発ロードマップ（平成26年12月経済産業省）

1.1. 二酸化炭素回収・貯留（CCS）



国の関与の必要性

CCSは、追加的エネルギーコストをかけてCO₂を削減するといった点において省エネルギーや再生可能エネルギーとは異なるタイプの技術である。このため、CCSの導入は経済的インセンティブが働かない温暖化対策に特化した方策であるなど、CCSの実用化に当たっては、解決すべき課題が多い。

技術開発によるコストダウンや高効率化のほか、法制度の整備、環境対応、社会的受容性の構築といった課題を解決する必要がある、国が実施する必要がある。

3. 目標(1)

貯留性能評価、貯留層内のCO₂挙動解析、貯留層外へのCO₂移行解析など安全性評価手法の開発とCCS技術事例集の作成によるCCS推進基盤の確立を目標に設定した。

項 目	目 標 (事後評価時点)	設定理由・根拠等
I. 安全評価手法の開発		
1. 貯留性能評価手法 開発	我が国特有の地質条件に対応した地質 モデリング手法を実用化する。	CCS事業の安全性、経済性を評価するためには、CO ₂ 圧入サイトの貯留性能を明らかにすることが必要である。
2. 貯留層内のCO ₂ 挙 動解析	我が国特有の地質条件に対応したCO ₂ 長期挙動予測シミュレーション技術を実 用化するとともに、海底下地中貯留に適 応可能なモニタリング技術を実用化する。	CCS事業を進めるにあたり、地下深部に圧入されたCO ₂ が長期に亘って安全に留まっていることを予測し、経済的かつ継続的に監視する必要がある。

3. 目標(2)

貯留性能評価、貯留層内のCO₂挙動解析、貯留層外へのCO₂移行解析など安全性評価手法の開発とCCS技術事例集の作成によるCCS推進基盤の確立を目標に設定した。

項 目	目 標 (中間評価時点)	設定理由・根拠等
I. 安全評価手法の開発		
3. 貯留層外部へのCO ₂ 移行解析	貯留層から海底に至るまでの移行要因について移行経路をモデル化し、移行シミュレーションを実施する技術を実用化する。上記シミュレーションで予測した移行CO ₂ に対して、海域環境影響評価を行う手法を実用化する。	海底下貯留における安全性の確保のためには、貯留層から海底付近へのCO ₂ 移行解析手法の確立、移行CO ₂ の海域での環境影響評価手法の確立が必要である。
II. CCS推進基盤の確立		
	CCS事業の推進に資するために開発した手法、技術の集大成として、CCS技術事例集の作成を行う。	CCS実用化のためには、着実な技術開発とともに、CCSを推進する基盤を確立する必要がある。

地中貯留技術開発事業の実施概要(1)

二酸化炭素地中貯留技術研究開発

二酸化炭素貯留隔離技術研究開発

二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術開発

第1回(H18年度)
中間評価(H12-16)

CO₂圧入試験(長岡での
CO₂ 10,400トンの圧入)

【基礎研究】

岩石試料へのCO₂注入試験手法の開発、現場に適用可能なモニタリング手法の検討や、貯留層内のCO₂挙動予測手法を開発

【圧入実証試験】

CO₂圧入の現場データを取得し、挙動に係る解析を実施

【賦存量基礎調査】

地中貯留候補地点選定のための全国地質情報を実施

第2回(H21年度)
中間評価(H17-20)

長岡継続モニタリング(賦存量評価とモニタリング技術開発)

【安全評価】

- 長岡モニタリング
- 基礎実験
- 地中挙動予測手法の高度化

【総合評価】

- 想定モデル地点調査
- 全国賦存量調査
- 有効性評価
- 周辺関連調査等

第3回(H24年度)
中間評価(H21-23)

基盤技術開発
(長期安全性評価技術開発)

【安全性評価】

- 貯留性能評価
地質モデル構築、広域地下水流動解析、シール層評価
- CO₂挙動解析
長期挙動予測、CO₂挙動モニタリング
- CO₂移行解析

CO₂移行に係る安全性評価、海域環境影響評価

【推進基盤確立】

- 推進基盤確立
CCS海外動向調査、CCS導入可能性評価

【挙動予測】

- CO₂長期挙動予測
- CO₂圧入時の地層影響

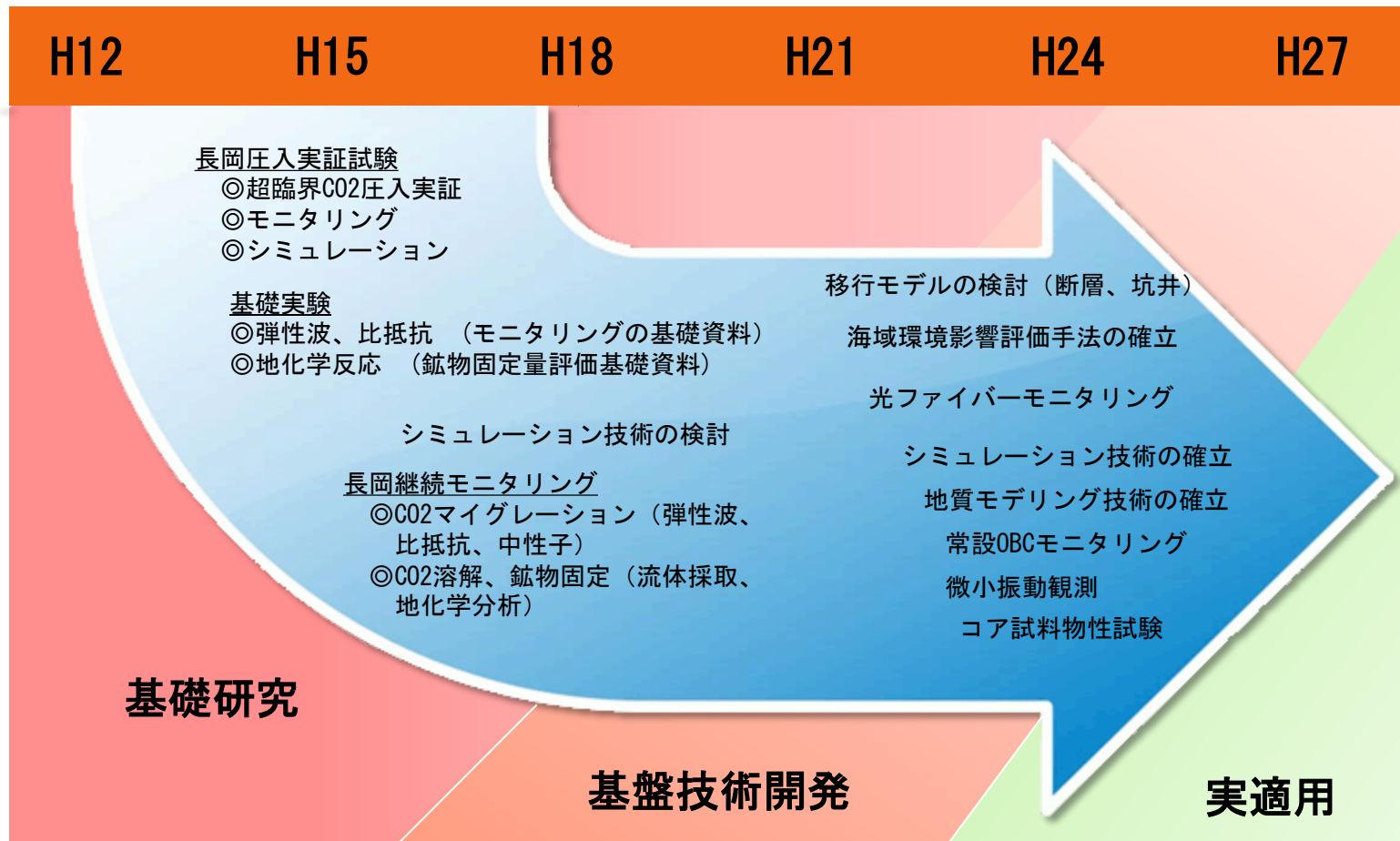
今回(H27年度)
評価(H24 -27)

実用化(大規模実証試験への適用と検証)

【安全性評価】

- 貯留性能評価
地質モデル構築、広域地下水流動解析
- CO₂挙動解析
長期挙動予測、CO₂挙動モニタリング
- CO₂移行解析
CO₂移行に係る安全性評価、海域環境影響評価
- CCS技術事例集

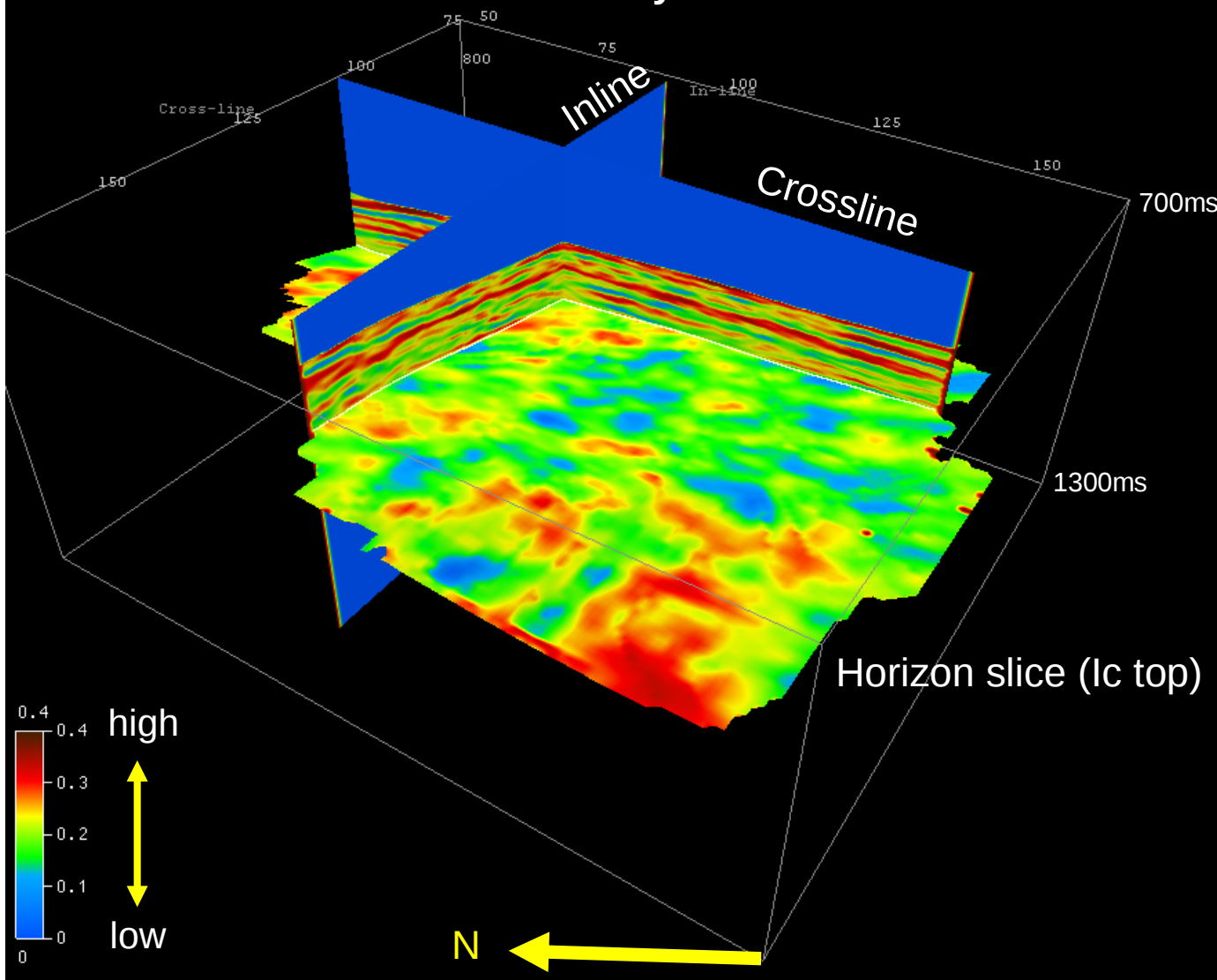
地中貯留技術開発事業の実施概要(2)



4. 成果、目標の達成度 貯留性能評価手法の開発

① 地質モデルの構築@長岡サイト(1)

Predicted Porosity Distribution



油ガス田開発に比べて

地質情報が少ない

(坑井数、物理検層)

油ガス埋蔵量推定技術

既存坑井、コア試料

3次元地震波探査

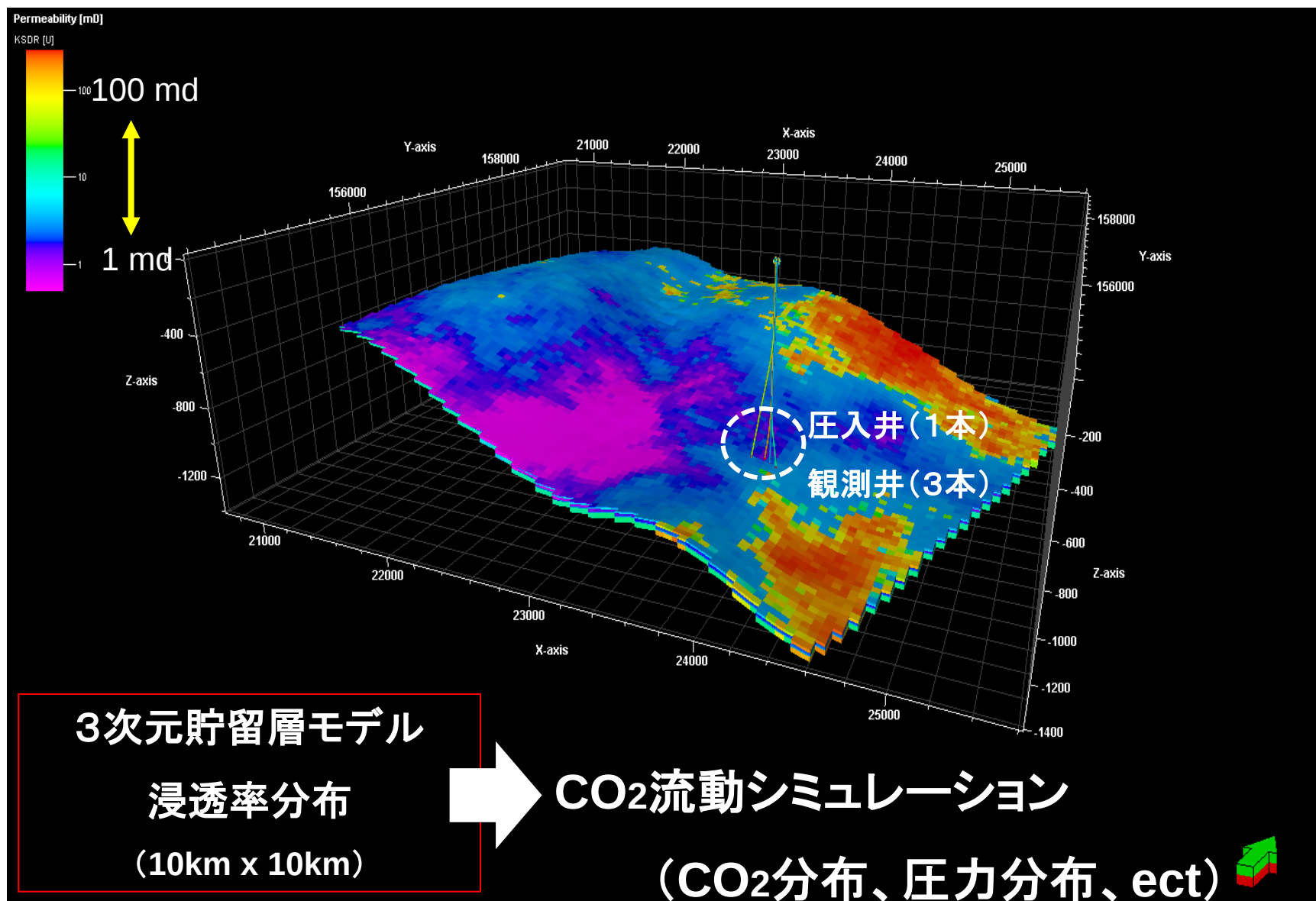
3次元貯留層モデル

孔隙率分布

(2km x 2km)

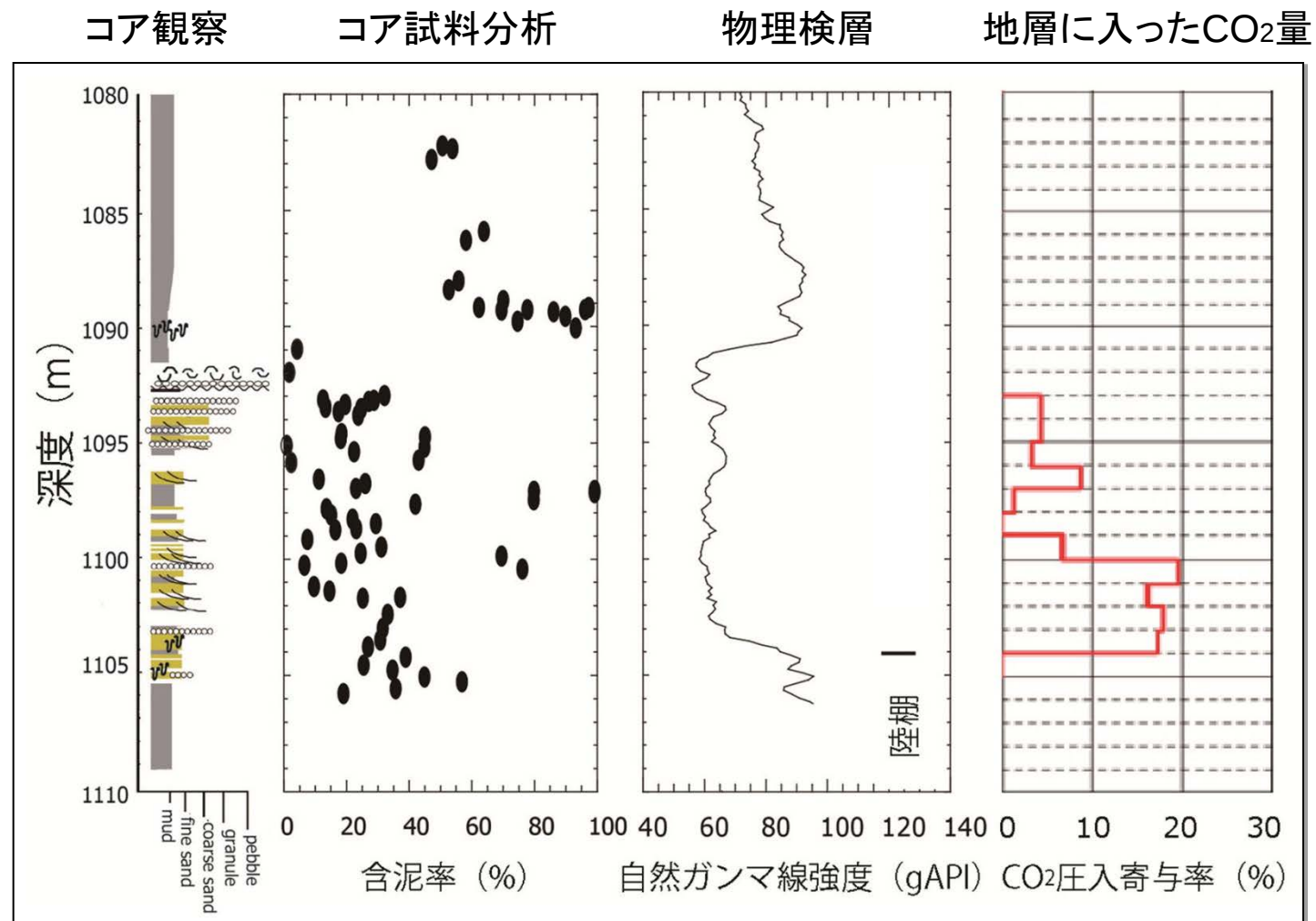
4. 成果、目標の達成度 貯留性能評価手法の開発

① 地質モデルの構築@長岡サイト(2)

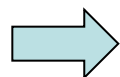


4. 成果、目標の達成度 貯留性能評価手法の開発

①地質モデルの構築@長岡サイト(3)



コアから得られる詳細な情報を、物理検層の利用により側方展開



苫小牧大規模実証試験サイト(萌別層)へ適用・検証

4. 成果、目標の達成度 貯留性能評価手法の開発

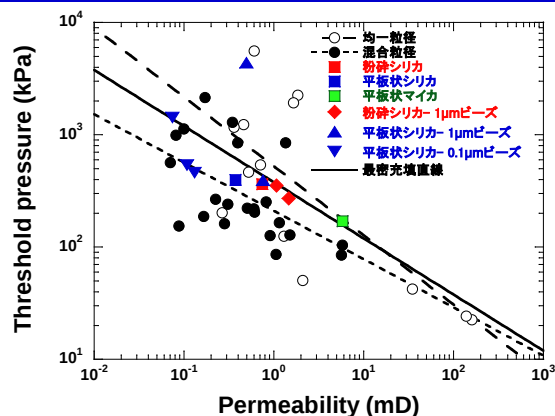
②遮蔽性能評価技術の開発

スレッシュホールド圧ー浸透率の相関性のモデル化

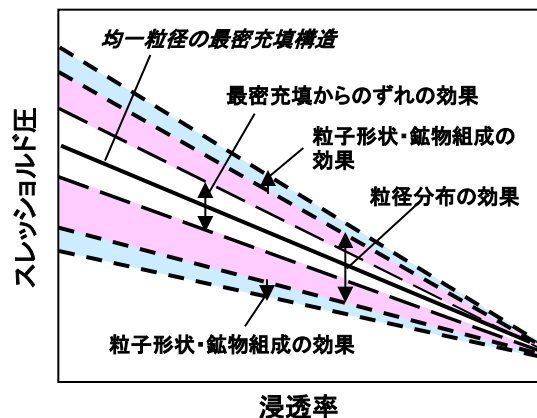
人工試料により、遮蔽性能に及ぼす
サイズ、形状、組成の効果を定量化

天然系に拡張

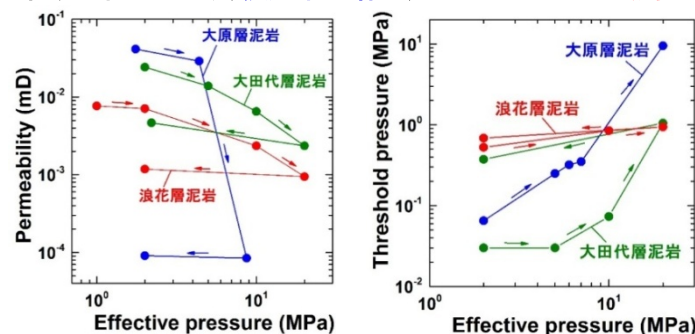
間隙圧上昇(有効圧低下)による
遮蔽性能への影響を検証



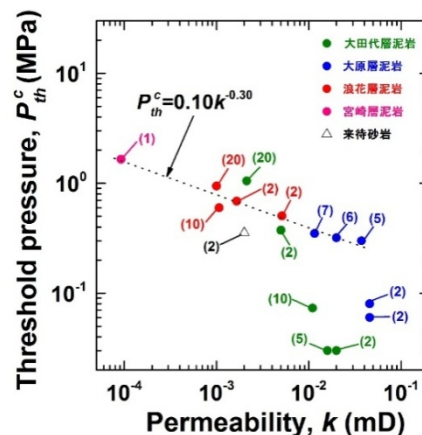
岩石のばらつきの範囲を
推定するモデルの構築



有効圧低下により、浸透率が増加、スレッシュホールド圧が減少



埋没深度条件までの載荷が
不可欠であることを確認

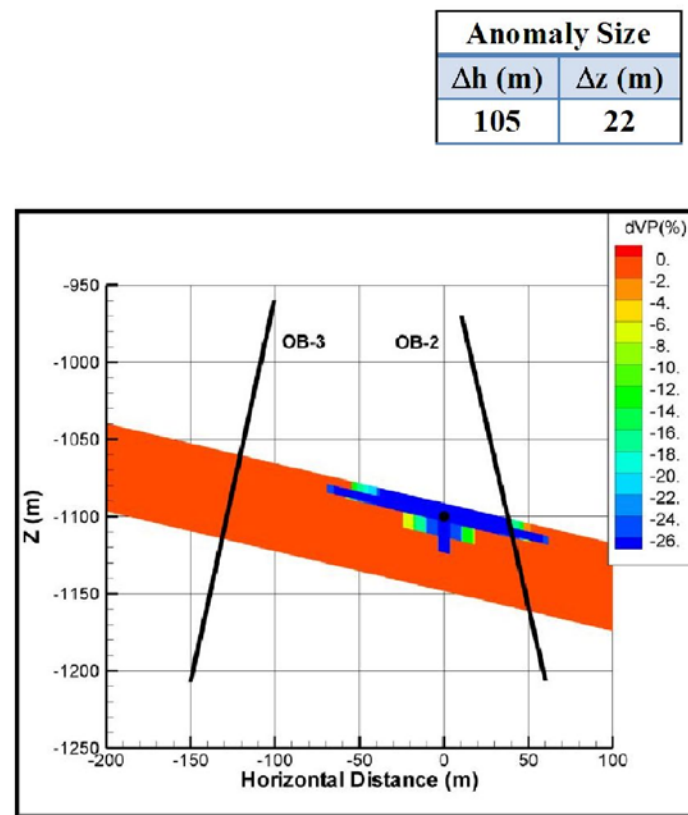
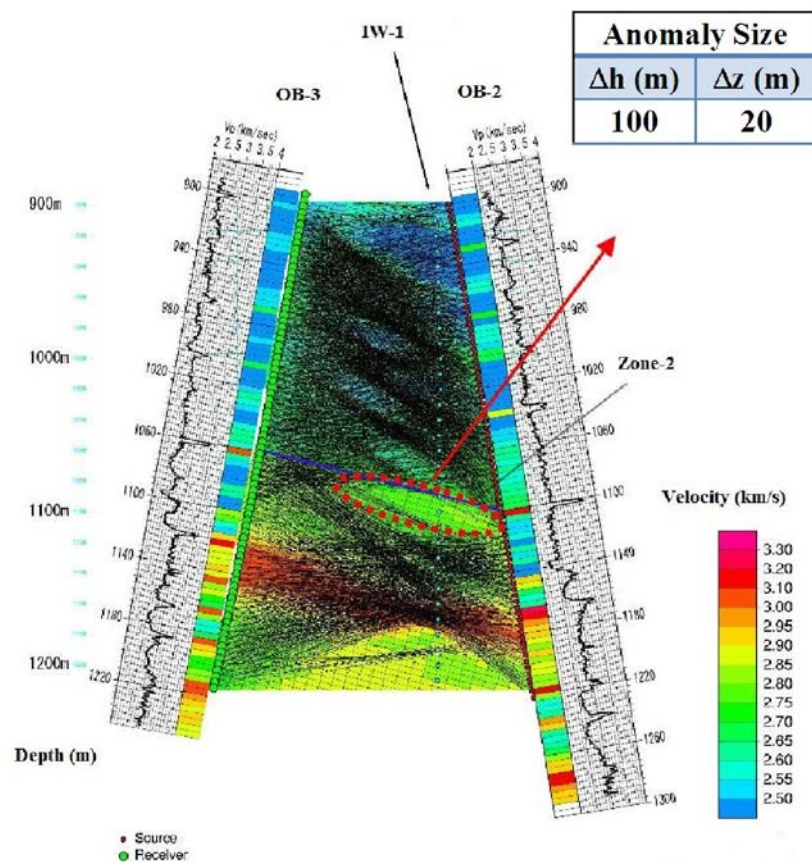


塑性変形後は岩種に
よらず一定のトレンド
上で推移

① CO₂モニタリングとシミュレーションの比較

貯留層内のCO₂分布のヒストリーマッチング

(左:坑井間弾性波トモグラフィ測定結果; 右:TOUGH2シミュレーション結果)



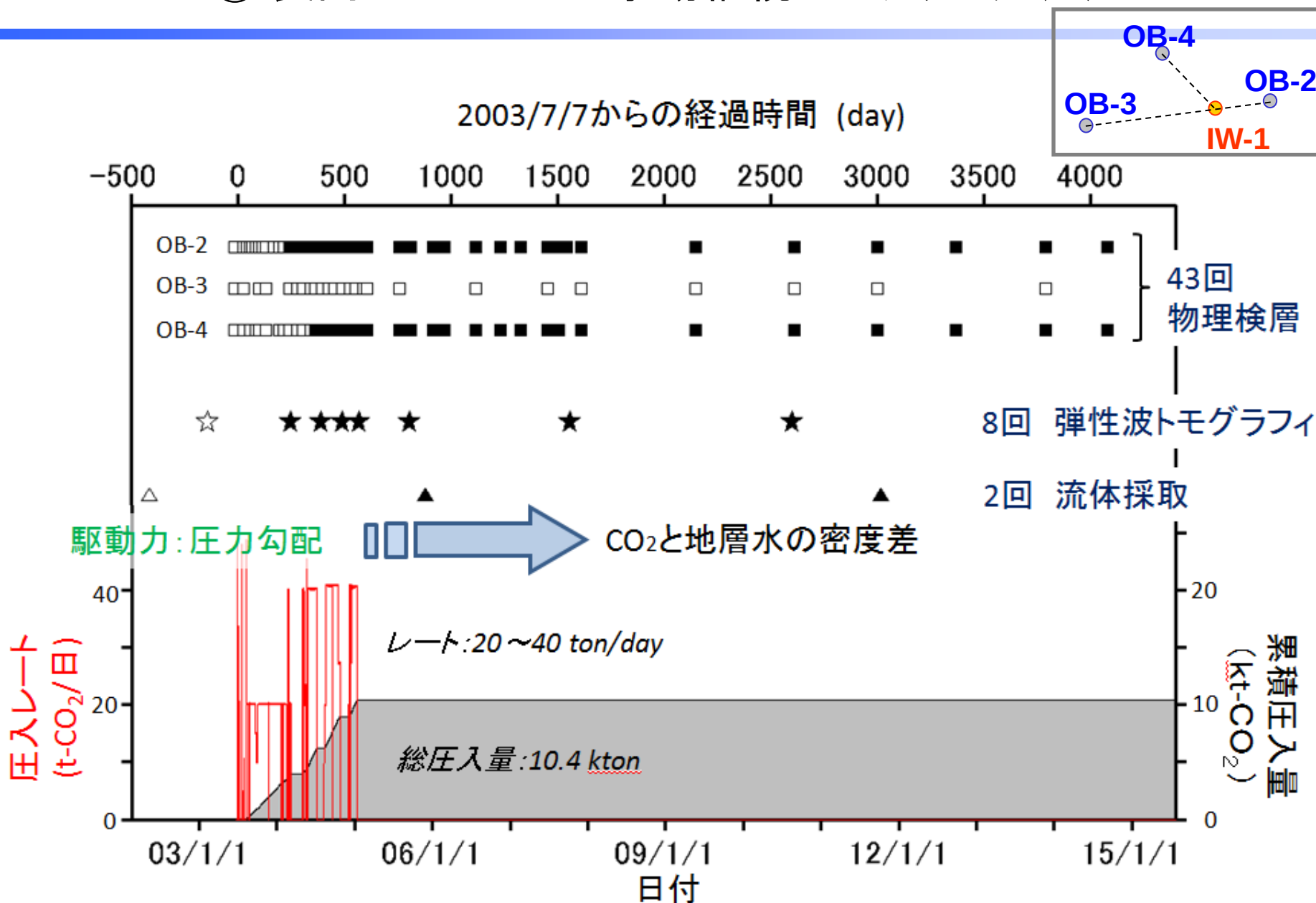
地質モデルの改良



CO₂長期挙動予測精度向上

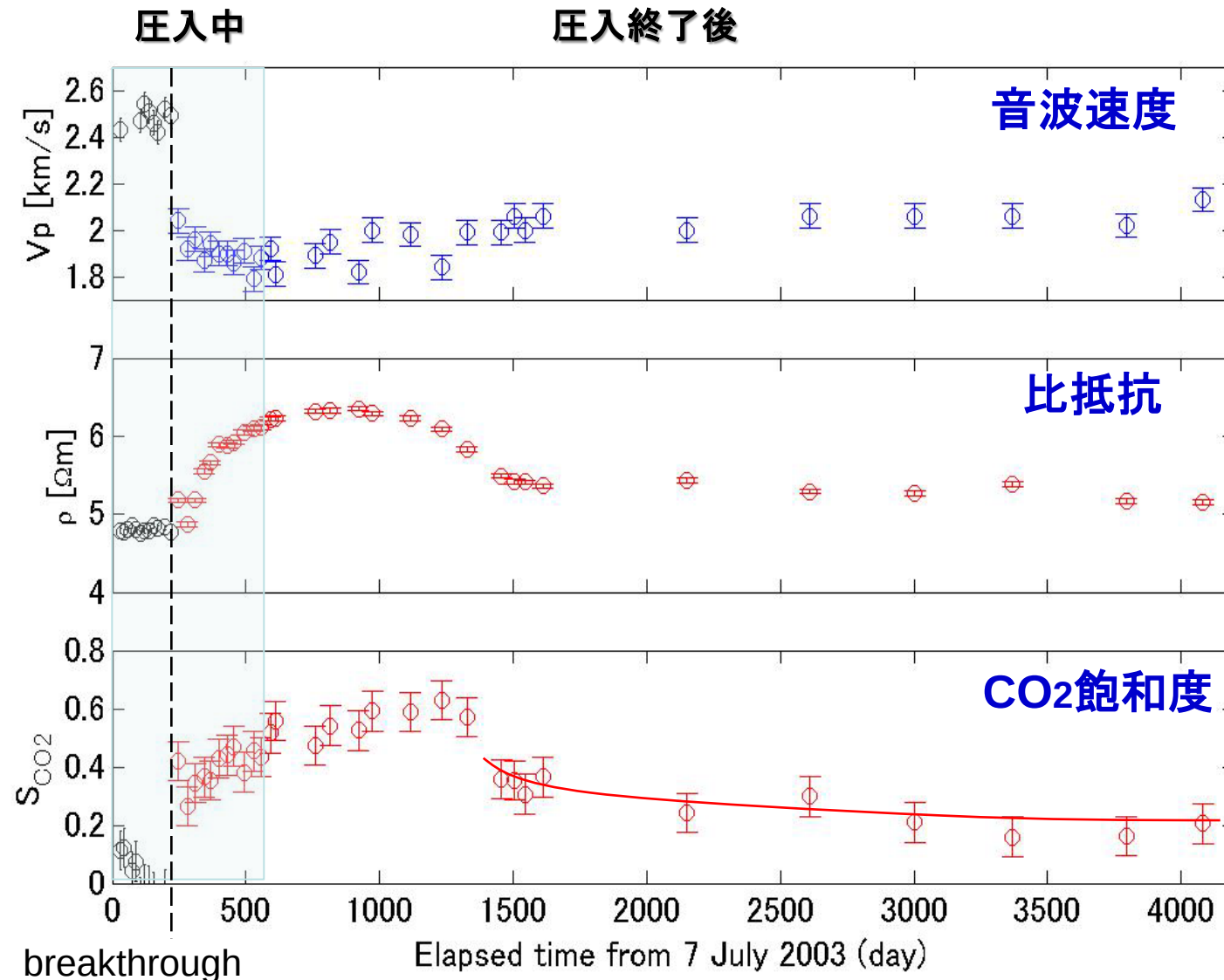
4. 成果、目標の達成度 貯留層内のCO₂挙動解析

② 長岡サイトのCO₂挙動継続モニタリング(1)



4. 成果、目標の達成度 貯留層内のCO₂挙動解析

② 長岡サイトのCO₂挙動継続モニタリング(2)



OB-2では、検層結果がほぼ一定値に収束



**CO₂が安全に
貯留されている**

CO₂飽和度

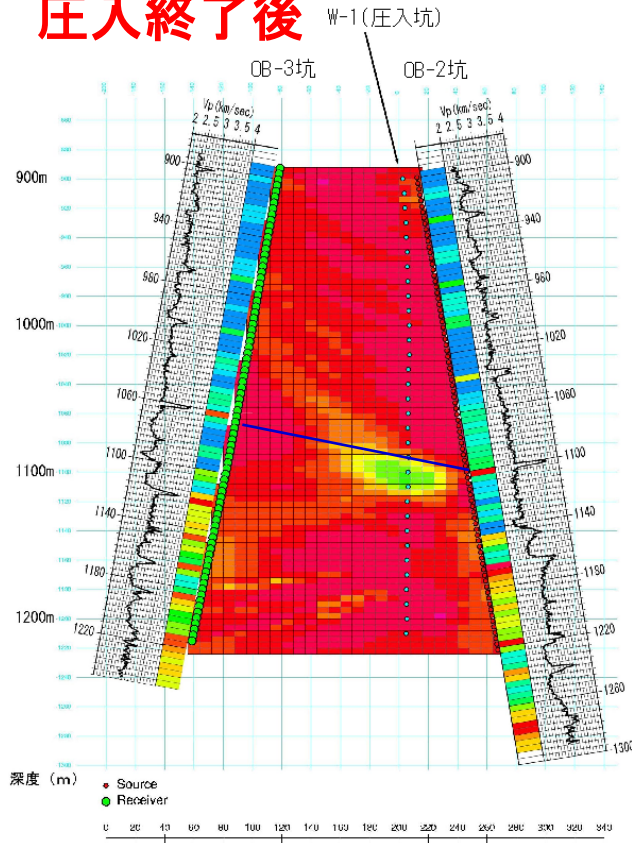
$$S_{CO_2} = \frac{\phi_{BL} - \phi_n}{\phi_{BL}}$$

4. 成果、目標の達成度 貯留層内のCO₂挙動解析

17

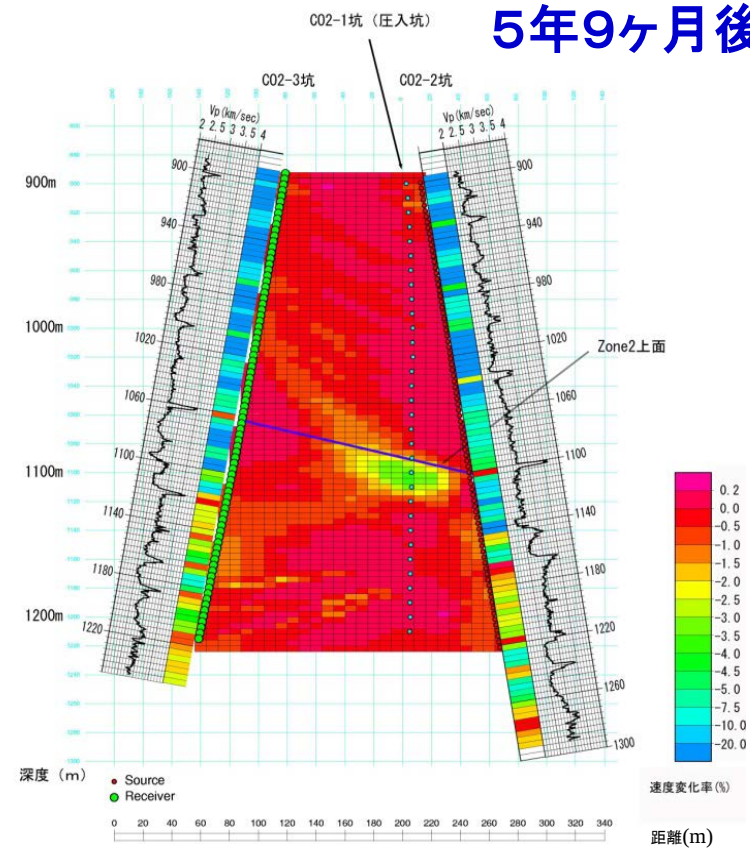
② 長岡サイトのCO₂挙動継続モニタリング(3)

圧入終了後



圧入終了

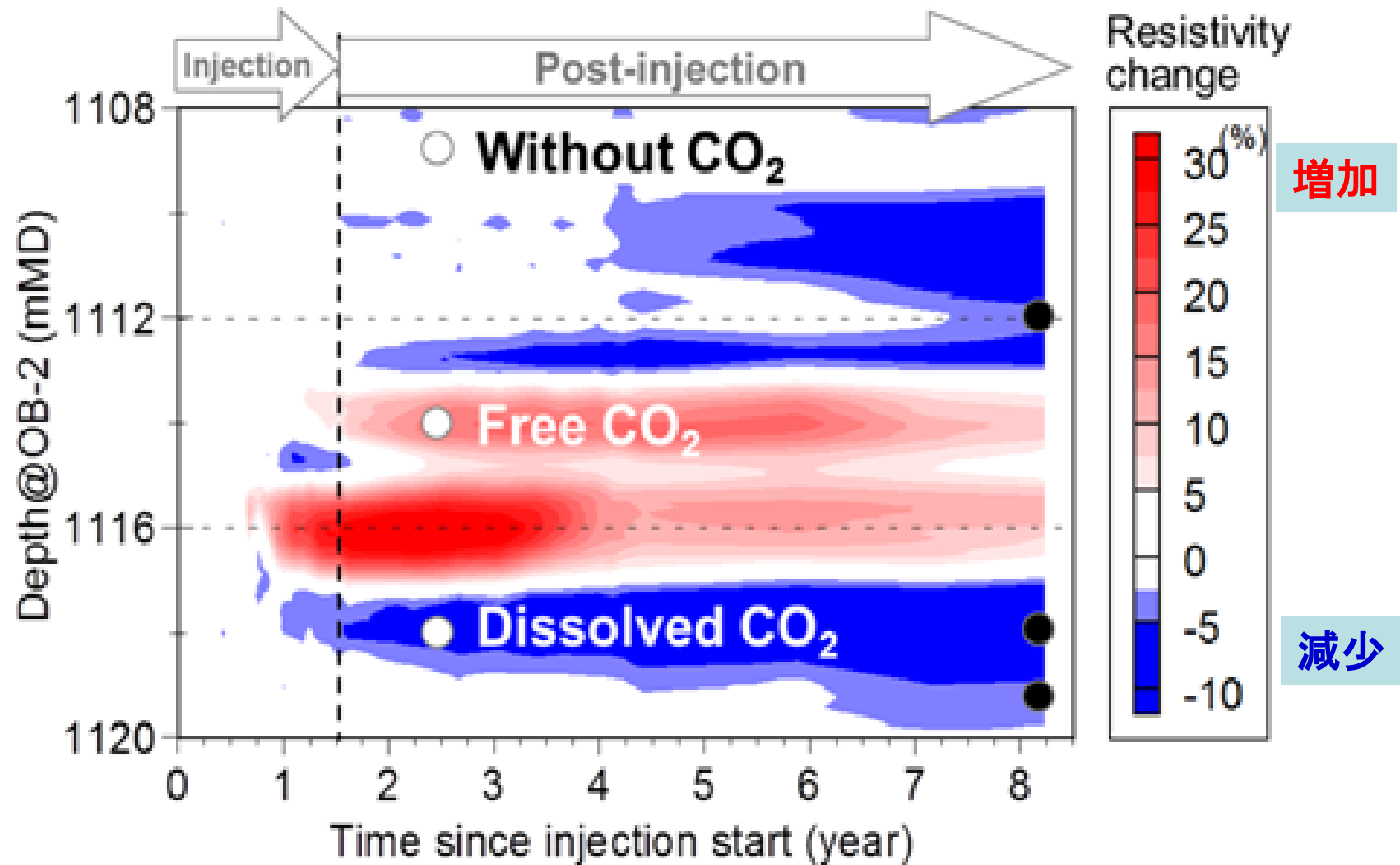
5年9ヶ月後



- ・圧入終了5年9ヶ月後に行われた坑井間(OB-2とOB-3)弾性波トモグラフィ測定結果より、CO₂は安全に貯留されていることが確認できた。
- ・中越地震(2004)や中越沖地震(2007)の影響も受けていない。

4. 成果、目標の達成度 貯留層内のCO₂挙動解析

② 長岡サイトのCO₂挙動継続モニタリング(4)

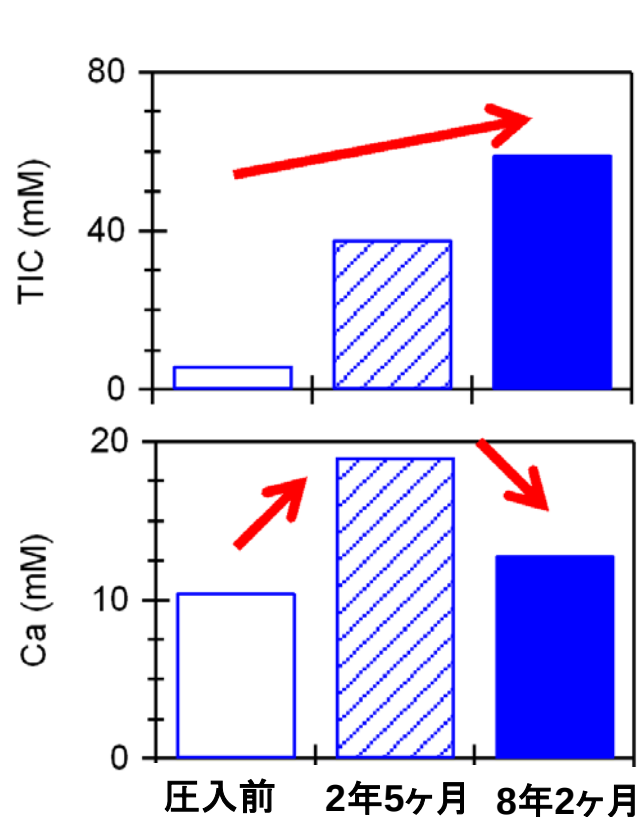


観測井OB-2近傍の比抵抗と経時変化(赤:CO₂分布域;青:CO₂溶解水分布域)

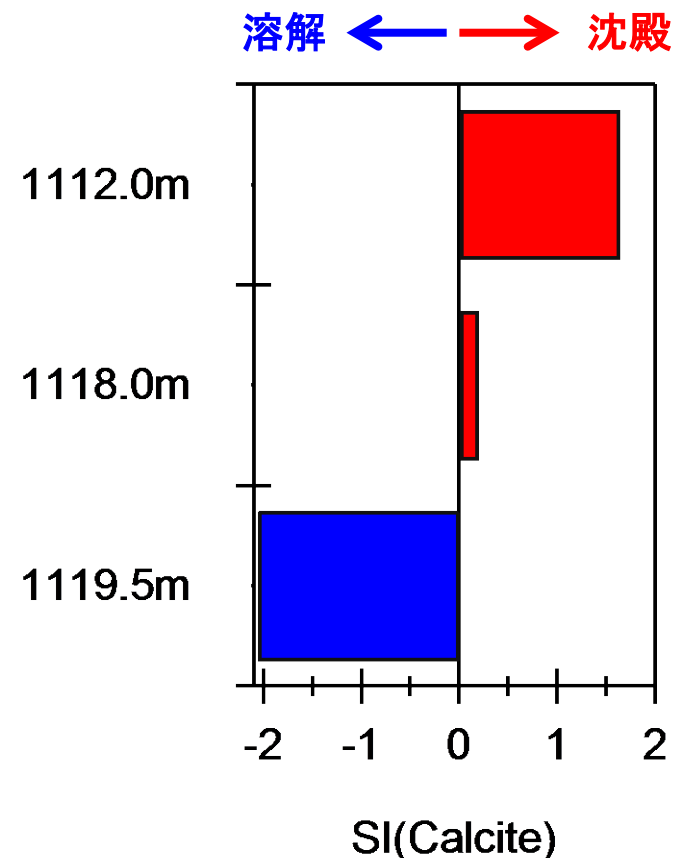
4. 成果、目標の達成度 貯留層内のCO₂挙動解析

19

② 長岡サイトのCO₂挙動継続モニタリング(5)



深度1118m付近の全炭酸と
カルシウム(Ca)の経時変化

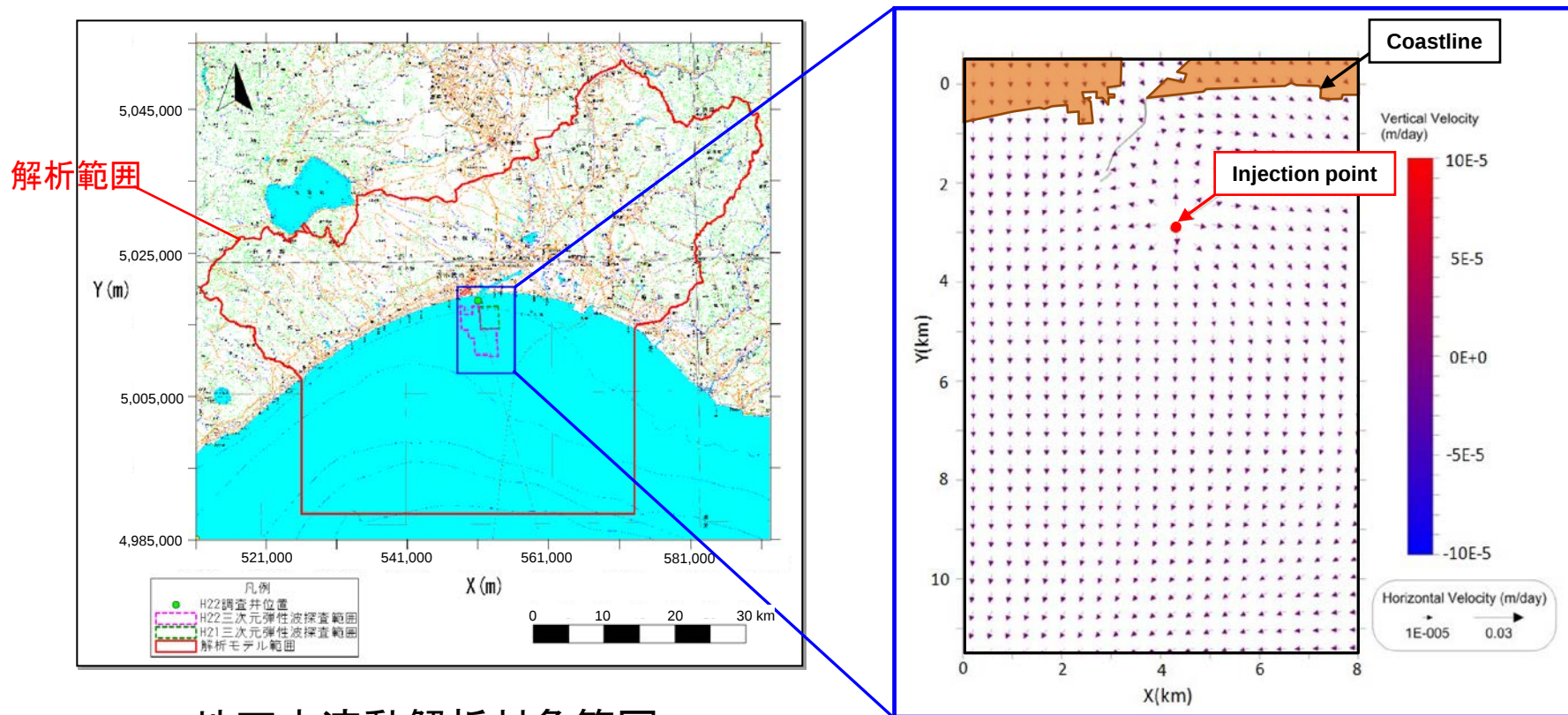


3つの深度における
カルサイトの飽和指数(SI)

CO₂溶解 → 鉱物溶解 (中和反応) → 炭酸塩鉱物の沈殿 (鉱物固定)

③ 沿岸域CO₂地中貯留サイトの広域地下水解析

- ・サイト周辺の陸域と海域探査結果を統合し、3Dシームレス地質モデルを作成
- ・水理地質モデルは、陸域坑井の地下水位マッキングで妥当性を検証



地下水流動解析対象範囲

(陸域は分水嶺で分け、海域は海岸線から30km範囲内)

萌別層に年間25万トン圧入と仮定、
地下水流動場 (1×10^{-5} m/day以下の変化)

④常設海底ケーブル(OBC)システム開発

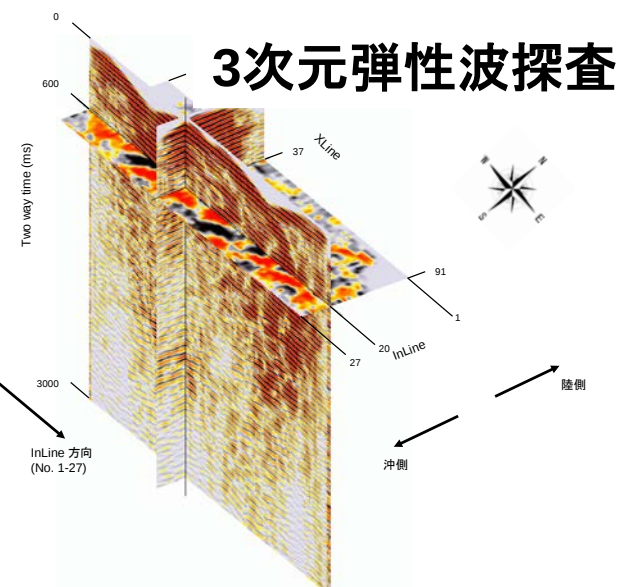
海域帯水層貯留に適した常設型OBC

3次元弾性波探査と微小振動観測

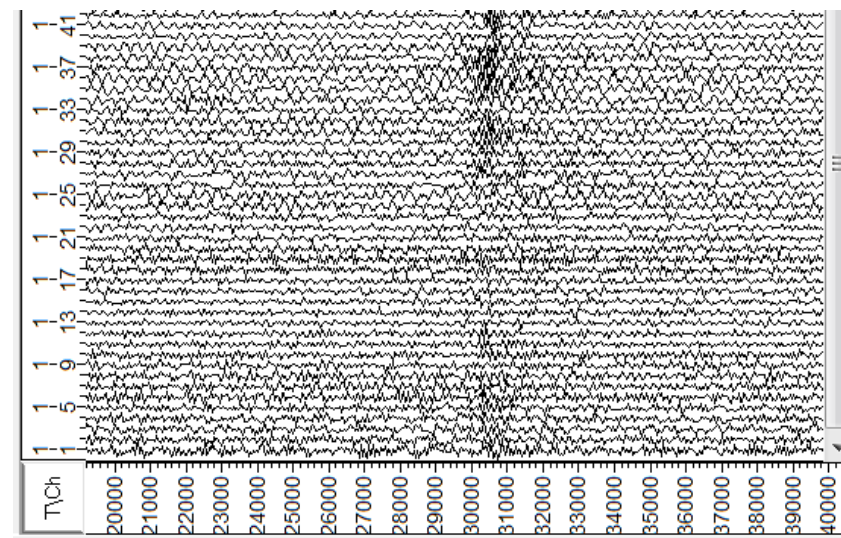
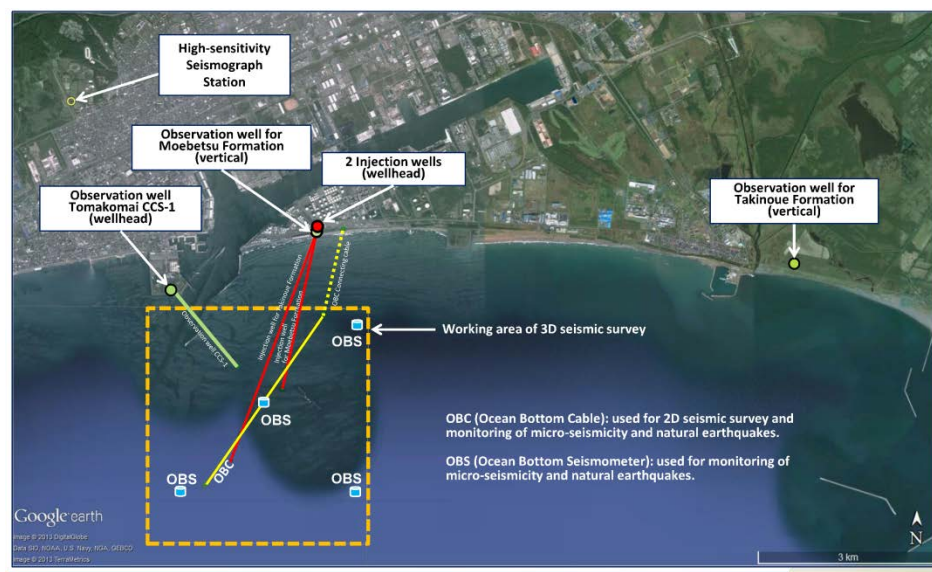


センサーモジュール(3C)
+ハイドロフォン

モジュール間隔: 50m
ケーブル総延長: 3,600m

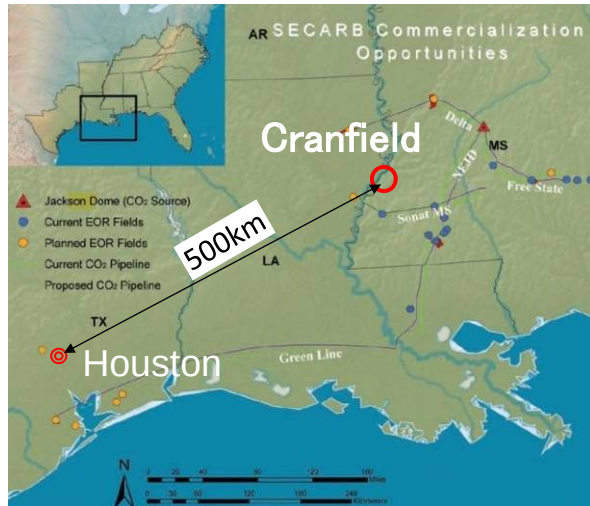


微小振動 & 自然地震観測



4. 成果、目標の達成度 貯留層内のCO₂挙動解析

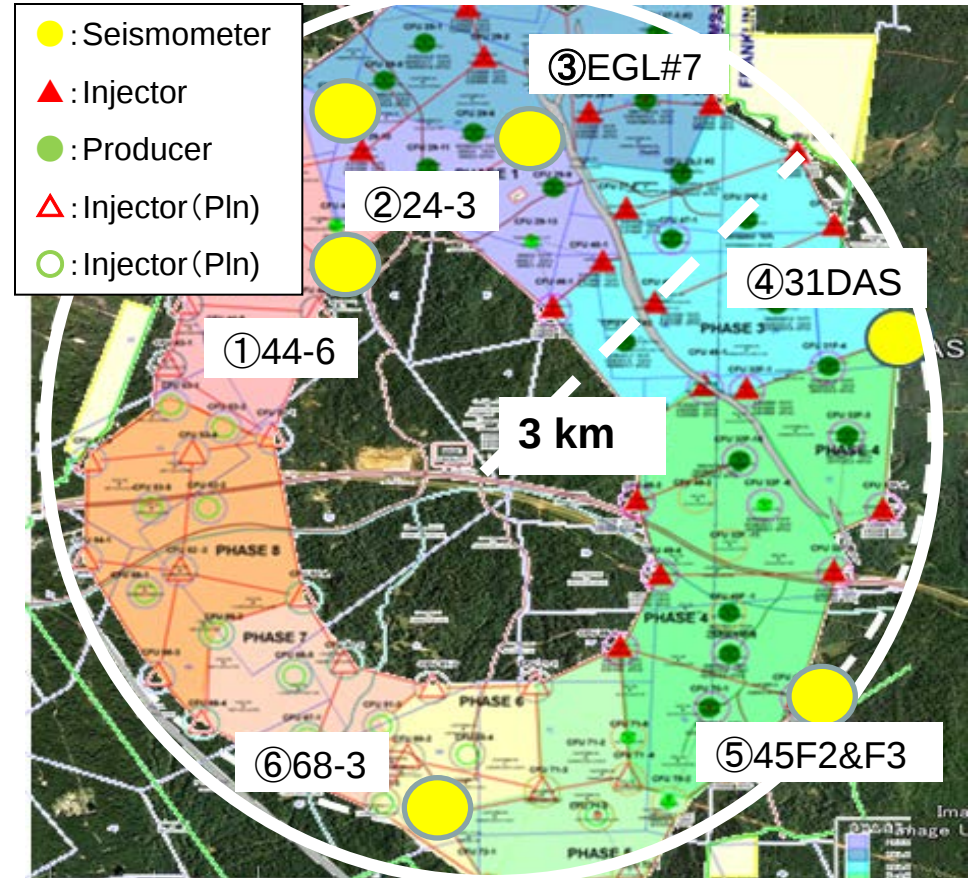
⑤大規模CO₂圧入サイトの微小振動観測(1)



試験サイト(ミシシッピ州Cranfield油田)



微小振動観測点(全6点)



2012年7月Denbury社より提供

- ・2007年～圧入開始。既に400万t圧入済(100万t/年)
- ・2011年12月より観測開始； 2015年3月観測終了

CO₂圧入量が多い、地震活動性が低い



CO₂圧入と微小振動との関連性

4. 成果、目標の達成度 貯留層内のCO₂挙動解析

⑤大規模CO₂圧入サイトの微小振動観測(2)

2011/12～2015/3の観測データ



ノイズ状況の確認



①処理・解析ツール、および
②目視確認による
微小振動イベント抽出作業

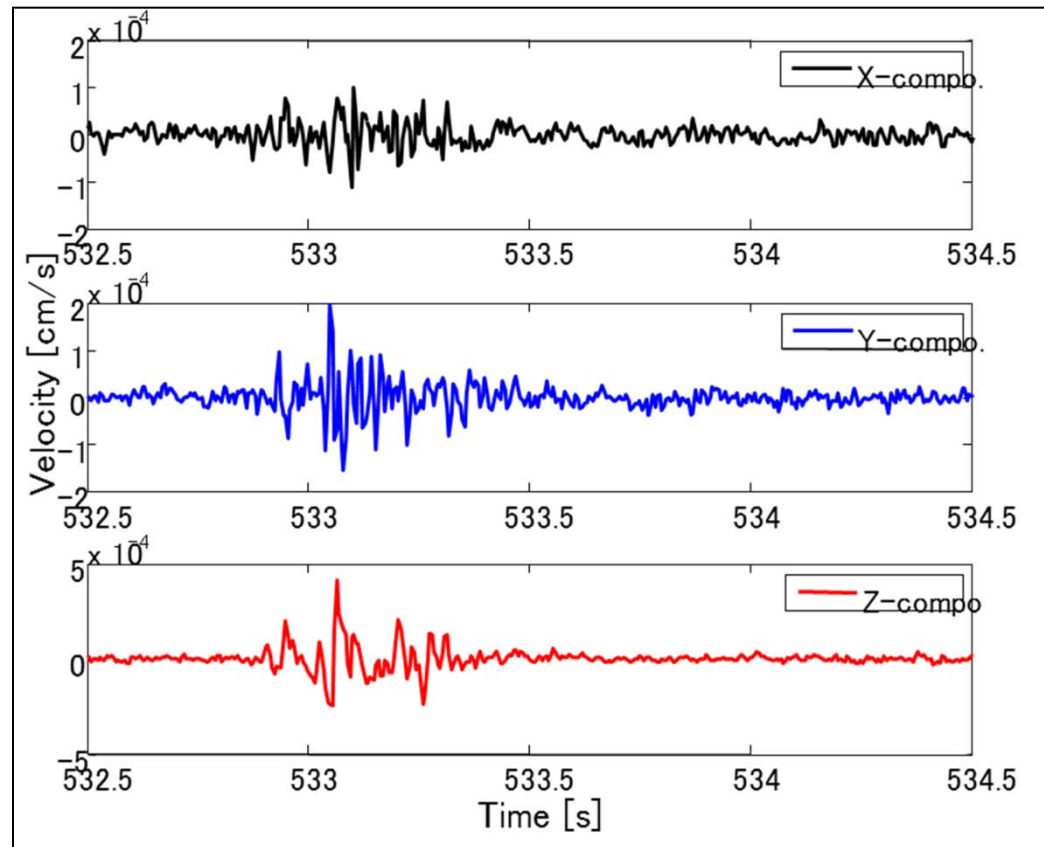


観測データ中に高周波・ごく低周波
ノイズ、落雷によるノイズ、遠地地震
などを確認

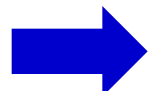


期間中に微小振動イベントは
認められなかった

✓Z成分の最大振幅より、M-0.2と推定



発破地点からもっとも近いDAS31サイトのみ観測され
た

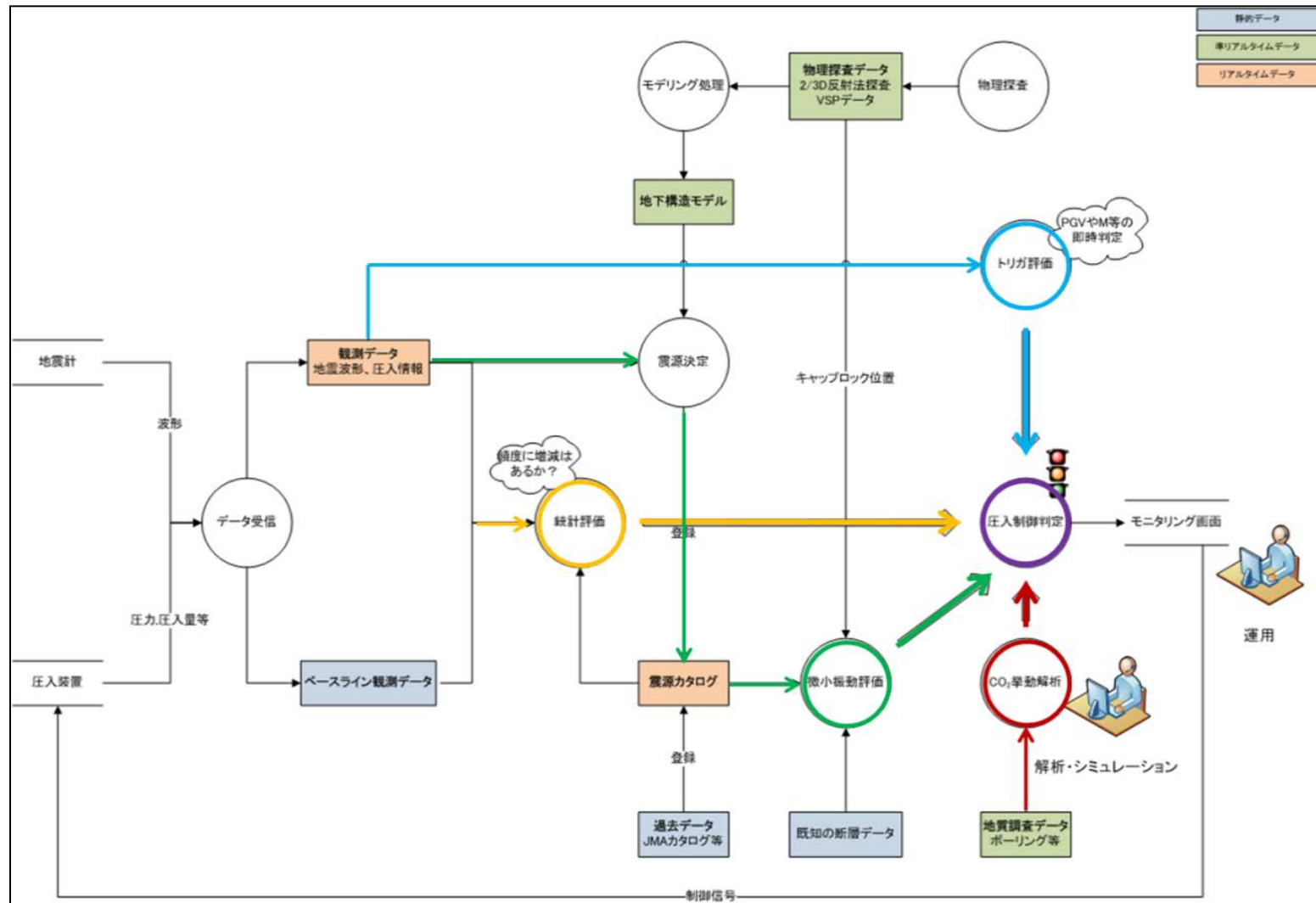


大規模実証試験や実用化への知見提供(システム構築、解析手法)

4. 成果、目標の達成度 貯留層内のCO₂挙動解析

⑤大規模CO₂圧入サイトの微小振動観測(3)

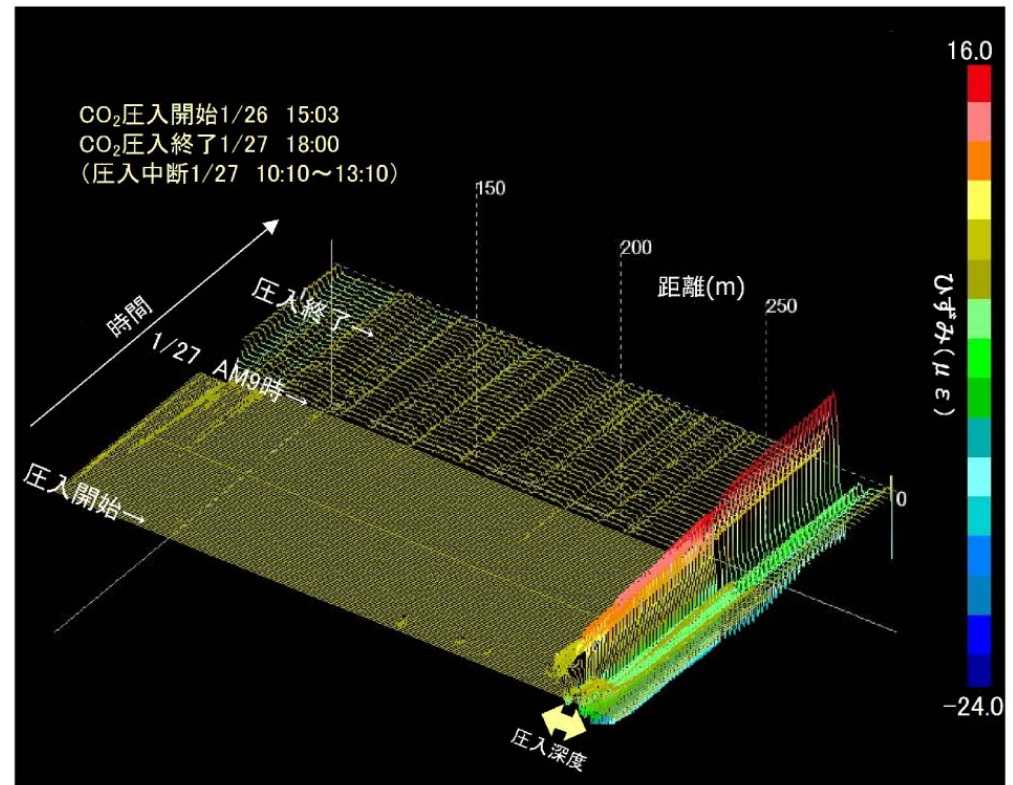
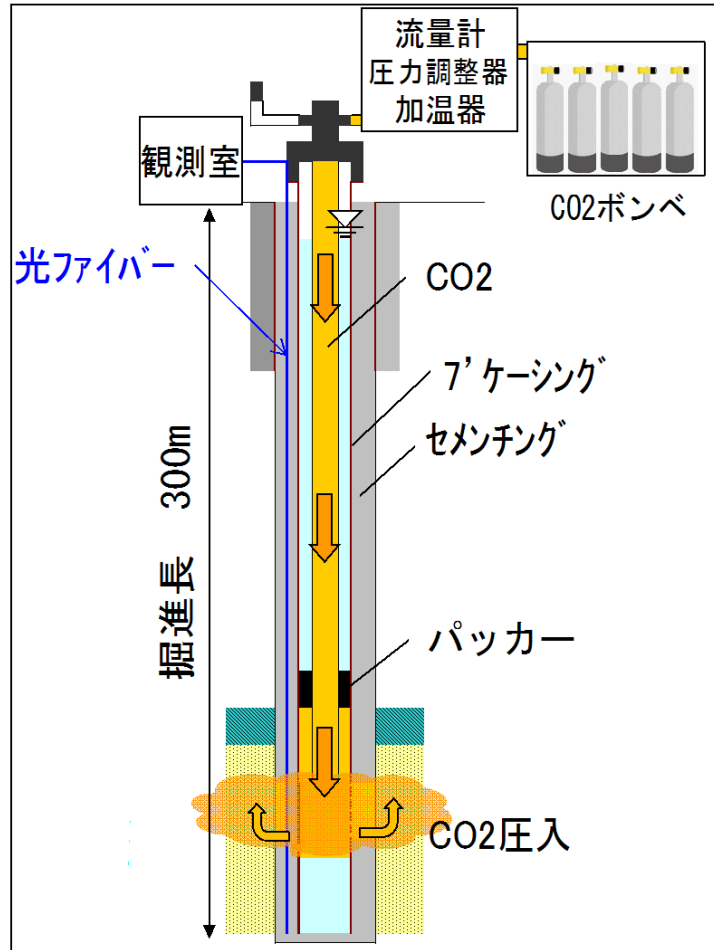
CO₂圧入安全管理システム概念図: Traffic Light System (TLS)



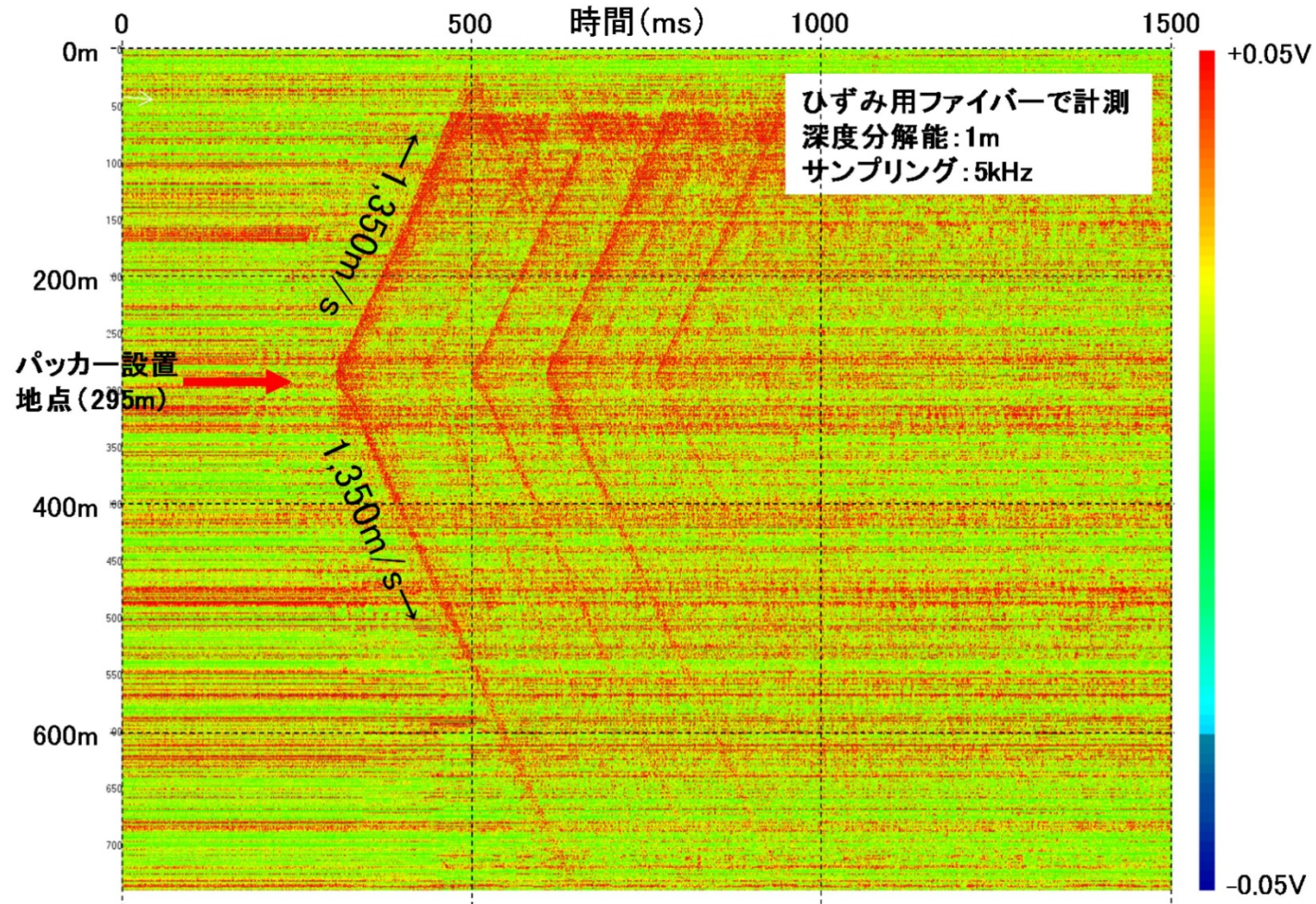
4. 成果、目標の達成度 貯留層内のCO₂挙動解析

⑥光ファイバーによるひずみ測定

光ファイバーを坑井ケーシング外側に設置し、CO₂圧入時の地層変形(ひずみ): 分布式ひずみ測定法



⑥光ファイバーによる音響弾性波測定

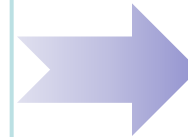


パッカー設置時の振動で生じた弾性波を光ファイバーで検知

4. 成果、目標の達成度 貯留層内のCO₂挙動解析

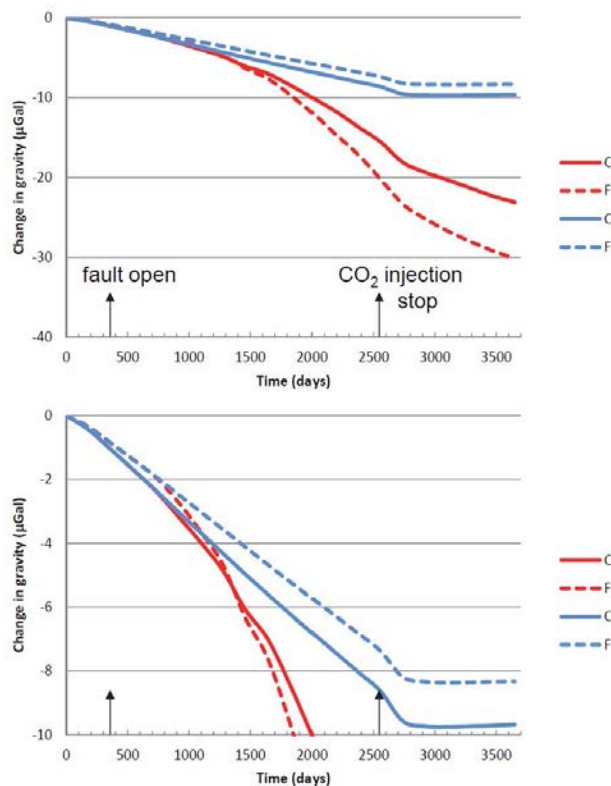
⑦多面的モニタリング手法の開発

- ・受動的地球物理手法の利用(人為的信号発生源が不要)
- ・反射法などの弾性波探査とは異なる物理量を取得
- ・地下モデルの時間的更新と検証をベースとしたモニタリング



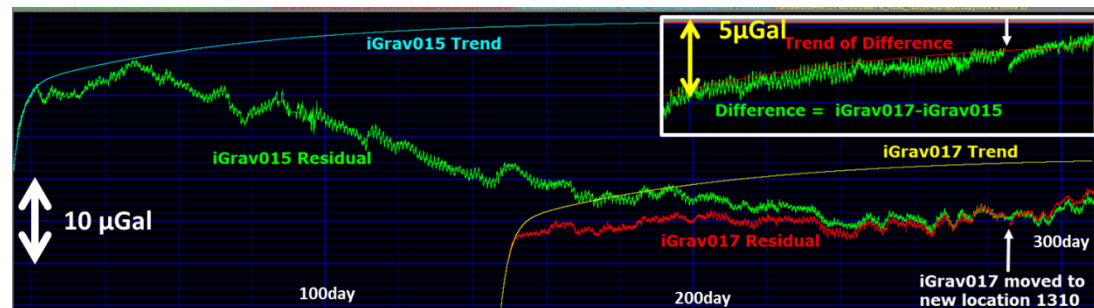
- ・連続監視手段の提供
- ・トータルコスト低減
- ・情報量の増大

- ・米国実証試験サイトでの適用試験
- ・苫小牧における補助データ取得
- ・物理量変換プログラムの整備



重力の時間変化の計算例
 青色:断層なし 赤色:断層開口あり
 観測点C:圧入点直上 F:断層直上

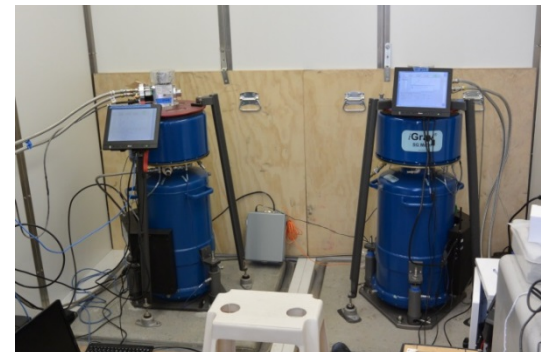
米国テストサイトにおける超伝導重力計(iGrav015とiGrav017)による並行観測



取得された記録。挿入図は両者の差。

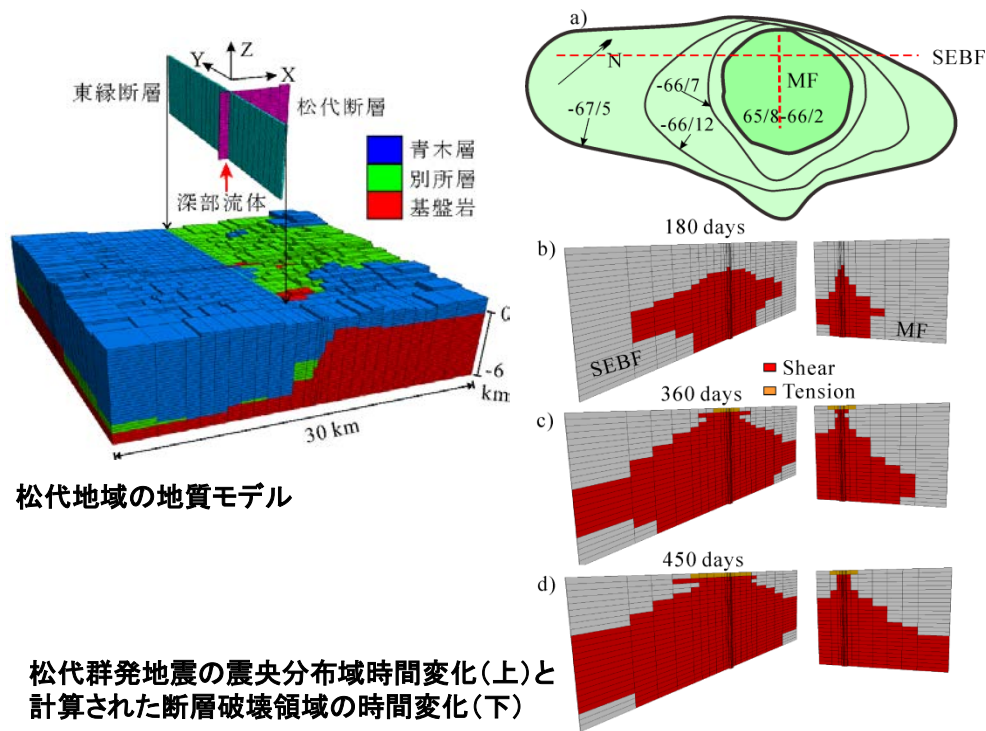
初期ドリフトの後、iGrav017とiGrav015の重力連続記録は重なり、従来型重力計では取得困難だったμgal以下の変動をどちらも精度良く記録していることが分かる。

2台の超伝導重力計による観測の様子

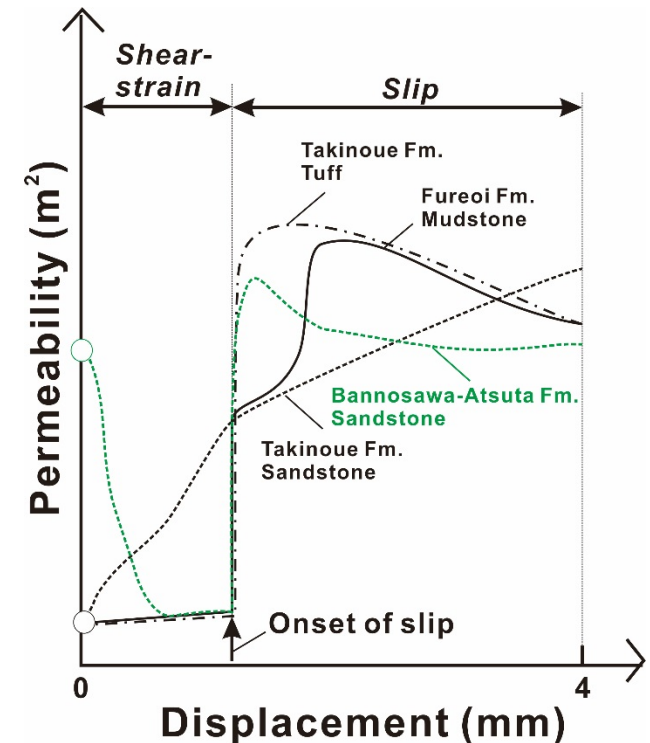


4. 成果、目標の達成度 貯留層内のCO₂挙動解析

⑧ジオメカニクスを考慮した断層モデリング手法の開発



ナチュラル・アナログを用い実証試験等で取得できない領域までCO₂圧入－地盤変形現象を再現→モデリングの妥当性を検証

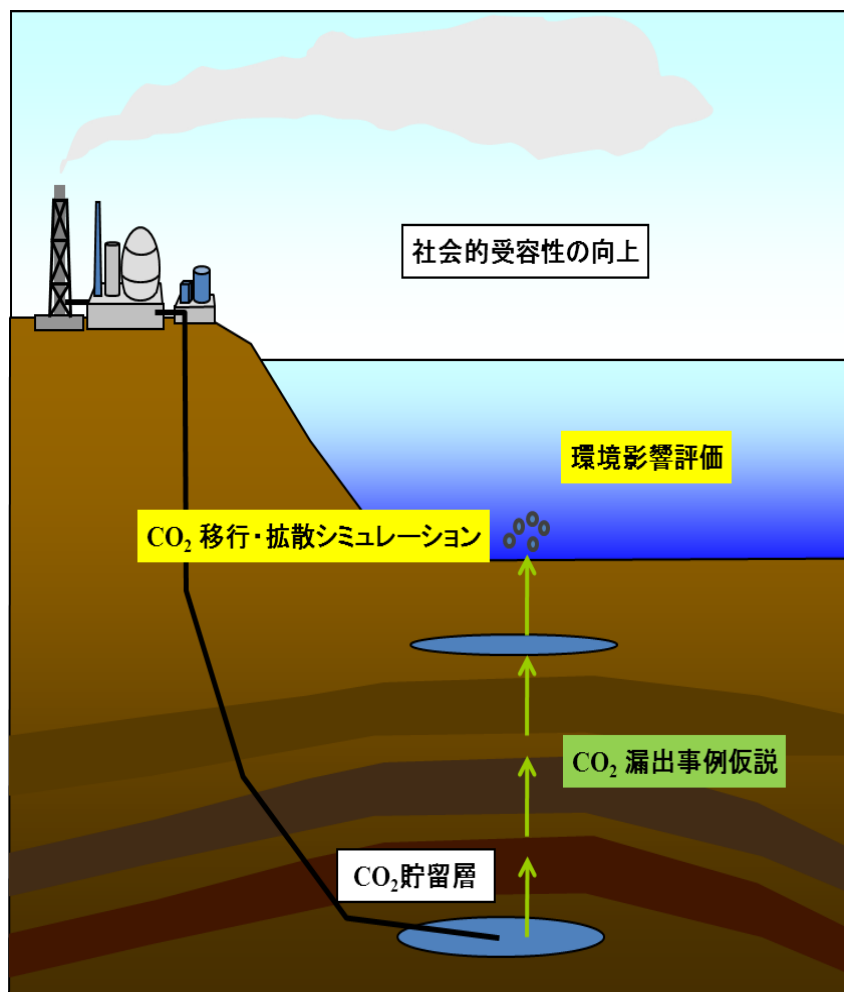


我が国貯留サイトでは軟岩岩盤が一般的
→室内実験により変形－浸透率関係を取得

「熱－水理－岩石力学連成解析」を基本とするジオメカニックスフレームワークの構築

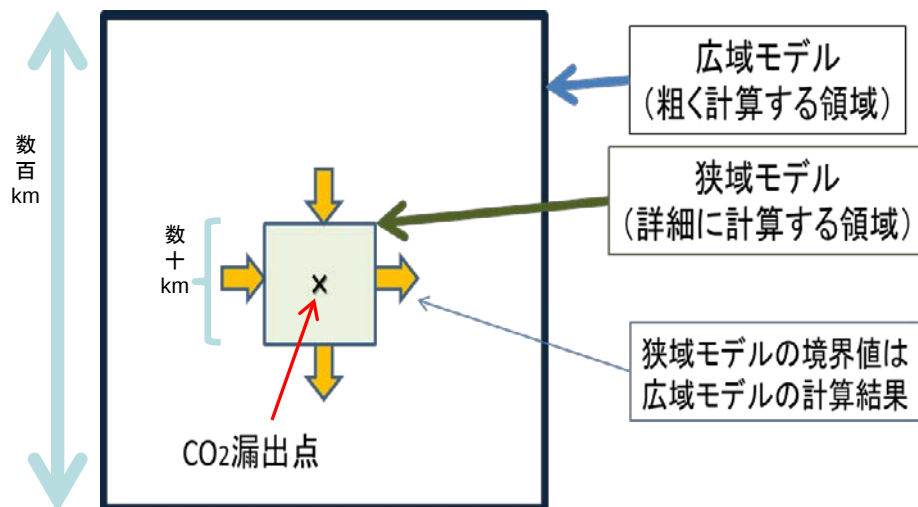
断層活動や誘発地震等の発生を回避する圧入条件

①漏出シナリオに基づくCO₂移行解析



(万一) CO₂漏出事例仮説

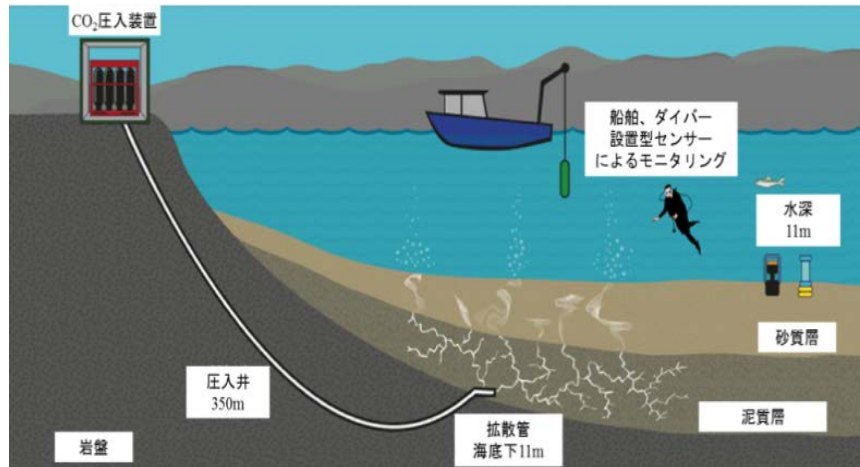
坑井・断層等からの漏洩
地層中の移行、海水中の拡散シミュレーション



4. 成果、目標の達成度 貯留層外部へのCO₂移行解析

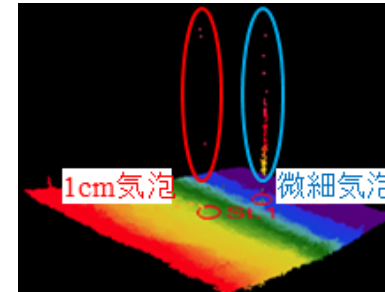
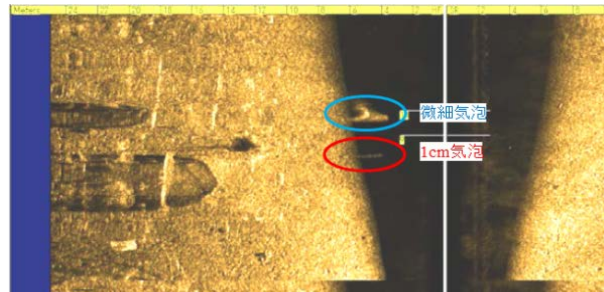
②CO₂漏出海域の環境影響評価

イギリスとの（QICS）共同研究



生物群	pCO ₂	影響
<u>石灰化生物</u> ・軟体動物(貝類) ・棘皮動物(ウニ) ・サンゴ類 ・円石藻(植物プランクトン)	$\Delta 200\text{ppm} <$	石灰化の減少
<u>非石灰化生物</u> ・魚類 ・軟体動物(イカ類) ・動物プランクトン	$\Delta 2,000\text{ppm} <$	生理的障害

スコットランドの実海域への人為的CO₂放出実験により、海域環境影響の実データを取得し、社会的受容性の獲得に寄与する



4. 成果、目標の達成度 CCS基盤推進

①CCS技術事例集作成

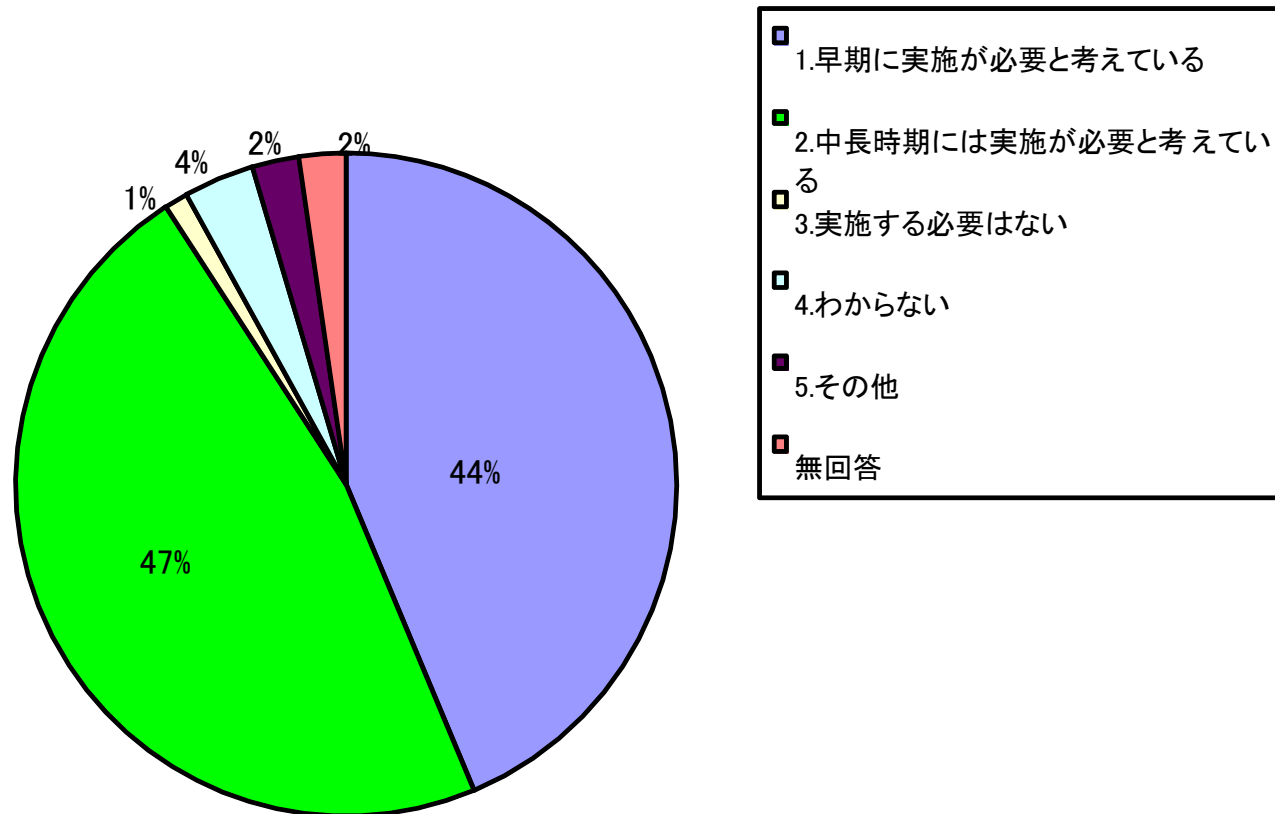
- 実用的な国内版BPMを作成のために、先行する海外のCCS関連資料を分析・評価する。わが国の地質的・社会的実状に適したCCS事例集を作成していく。



4. 成果、目標の達成度 CCS基盤推進

②CCSワークショップ開催による理解促進活動

CCS実施について(アンケート結果)



4. 成果、目標の達成度(1)

本事業では貯留性能評価、貯留層内のCO₂挙動解析、貯留層外部へのCO₂移行解析の基盤技術を確立し、その研究成果の一部は大規模実証試験に適用される。また、CCSワークショップ開催等の理解促進活動を通じて、CCS推進基盤を整備した。

項目	目標	成果	達成度
I. 安全評価手法の開発			
1. 貯留性能評価手法開発	我が国特有の地質条件に対応した地質モデリング手法を実用化する。	我が国固有の不均質な地層において、限定された情報に基づき精度の高い地質モデルを構築する手法を確立した。本成果は、苫小牧大規模実証試験に活用されている。	達成
2. 貯留層内のCO ₂ 挙動解析	我が国特有の地質条件に対応したCO ₂ 長期挙動予測シミュレーション技術を実用化するとともに、海底下地中貯留に適応可能なモニタリング技術を実用化する。	地化学反応解析手法やヒステリシスを組み込んだCO₂長期挙動予測手法を完成させ、苫小牧大規模実証試験の地化学反応事前評価に適用された。流体流動・岩石力学連成解析のフレームワークを構築し、中間成果が苫小牧実証試験の力学的応答性の事前評価に利用された。 弾性波探査と微小地震観測を兼ねた常設型OBCシステムを開発し、現在苫小牧実証試験で適用中である。また、深度方向に連続してひずみ等を計測可能な光ファイバー計測システムを開発し、実用深度の坑井で性能を検証した。また、高精度重力モニタリングの苫小牧実証試験への適用を可能とした。	達成

4. 成果、目標の達成度(2)

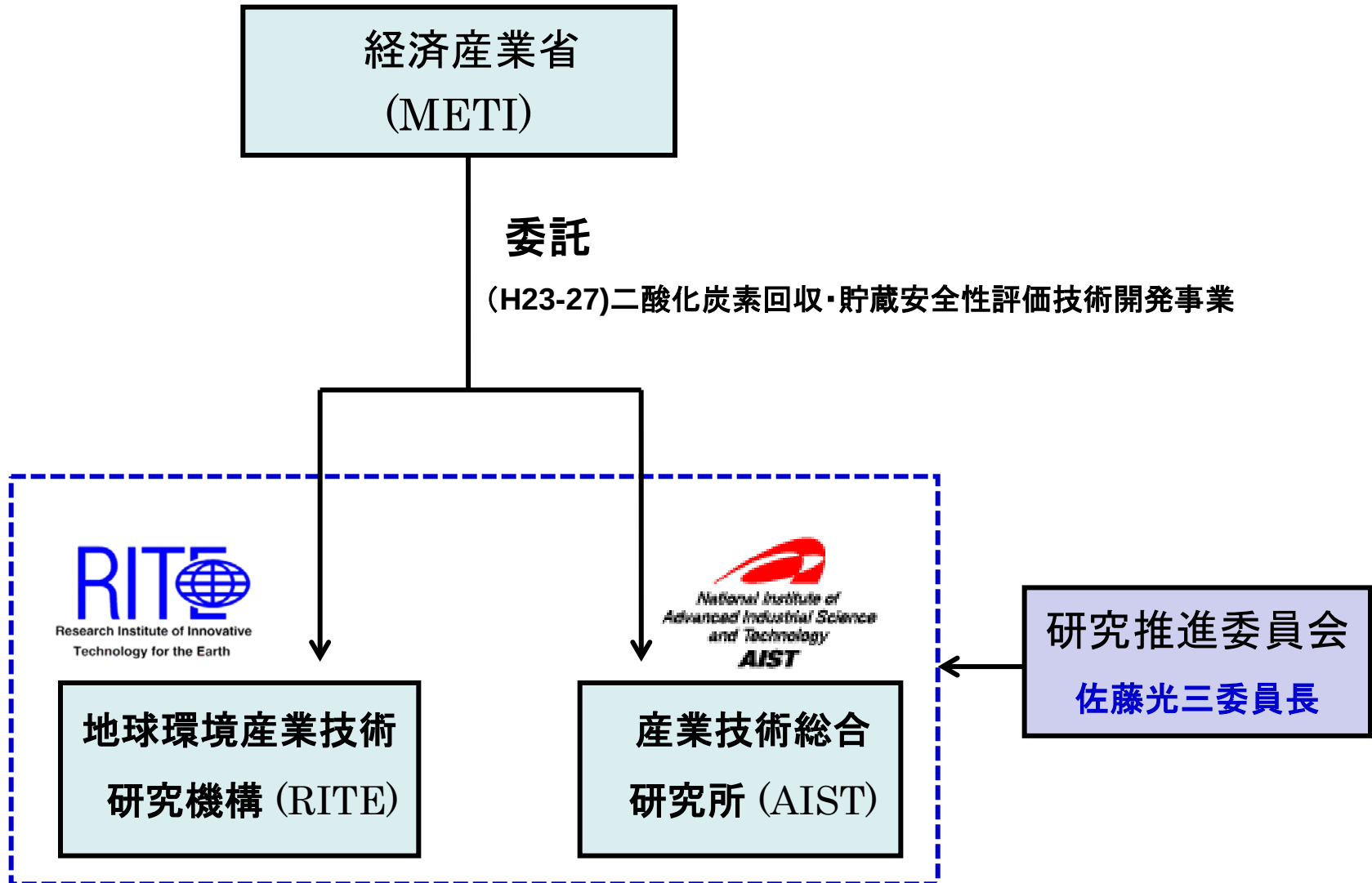
項目	目標	成果	達成度
I. 安全評価手法の開発（つづき）			
3. 貯留層外部へのCO ₂ 移行解析	貯留層から海底に至るまでの移行要因について移行経路をモデル化し、移行シミュレーションを実施する技術を実用化する。上記シミュレーションで予測した移行CO ₂ に対して、海域環境影響評価を行う手法を実用化する。	CO ₂ 移行・拡散シミュレーション技術、漏出CO ₂ 検出技術、生物影響データベースを開発し、苫小牧実証地点の分析・評価に活用し、その成果は海洋汚染防止法に基づく許可申請に利用された。	達成
II. CCS推進基盤の確立			
	CCS事業の推進に資するために開発した手法、技術の集大成として、CCS技術事例集の作成を行う。	CCSの「基本計画」「サイト選定」「サイト特性評価」「実施計画」の各段階の技術事例集を作成した。	達成

5. 事業化、波及効果

多くの関連技術が苫小牧実証事業に適用もしくは適用予定であり、その後のCCS商用化の際には実適用される見込みである。また、本事業の研究成果はCCS事業者の手引書となる事例集にとりまとめている。

- 苫小牧実証事業試験へ
 - － 地質モデリング手法
 - － 常設型OBC
 - － 地層コア分析
 - － CO₂移行解析
 - ・CO₂地下・海中移行シミュレーション解析
 - ・漏出モニタリング技術
 - ・生物影響データベース
- 2020年CCS実用化に向けて
 - － 研究成果(光ファイバー計測、微小振動観測、地質モデル構築の高度化、長岡継続モニタリングなど)をCCS技術事例集にまとめて、CCS事業者へ提供。

6. 研究開発マネジメント・体制等



7. 前回(H24)中間評価の結果（総合評価）

CCS技術はCO₂固定化の重要な技術であり、我が国としても確立しなくてはならない重要な技術である。CCSの社会的受容性の醸成のためには、CCSに対する安全性・信頼性の構築が必要であり、貯留層に圧入したCO₂の挙動解析や外部への移行解析等のデータは、地域住民の了解を取得するうえで有益である。

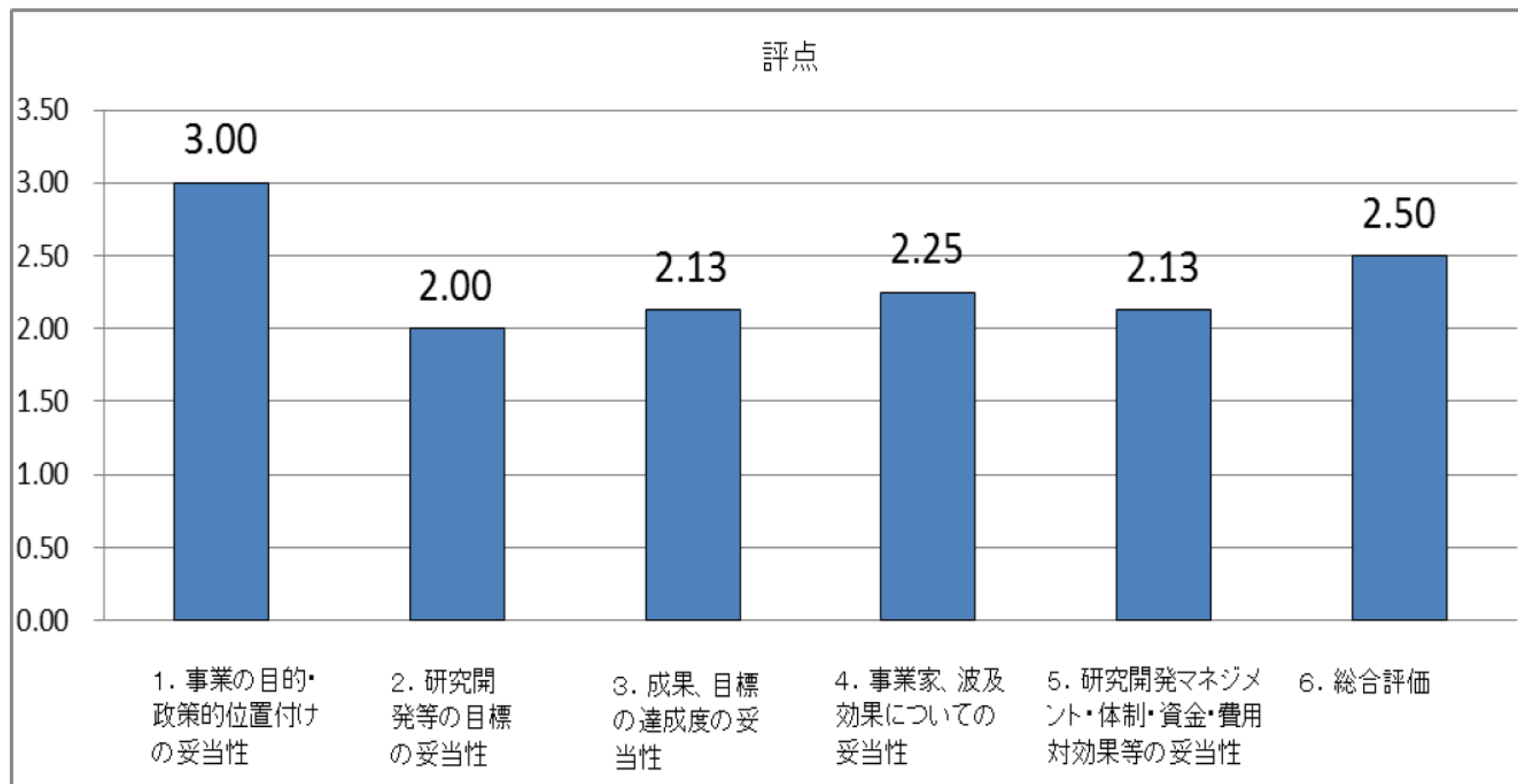
地質モデリング、CO₂の長期挙動予測、CO₂挙動モニタリング手法等広範な課題について、適切なマネジメントのもと、多くの成果が得られており、目標の達成度を含め概ね妥当である。長岡サイトで得られたCO₂挙動モニタリングの知見は、2度の大きな地震を経験したにもかかわらず安定的に地中貯留されていることを証明し、国内外のCCSの社会的受容性の獲得や世界的展開に大きく寄与している。

また、当該事業の成果は、苫小牧での大型実証試験に適用されることとなっており、国外も含めて実用化の加速が期待される。

一方、CCS実用化にむけては、技術面だけでなく、地域住民などの貯留に対する理解が非常に重要であるが、CCSの社会的認知度は未だ低く、認知度の向上を図る必要がある。

また、技術課題の位置づけをさらに明確にしたうえで、研究開発を進めるとともに、実用化を進めるうえでは国内外の民間の事業への参画による技術移転の推進に一層の努力が必要である。

7. 前回(H24)中間評価の結果（評点結果）



7. 前回(H24)中間評価の結果 (提言及び提言に対する対応状況)

今後の研究開発の方向性等に関する提言

- 個別要素技術の成果をどう生かすかはCCS推進基盤活動の成果に大きく左右されることになる。このため、個別要素技術の成果を生かすため、国際標準化における優位性の確保と、CCSの社会的受容性の向上に向けた取り組みを進めて貰いたい。
- 長期的な視点にたって地球全体のCO₂を削減することも念頭に、海外の環境対策で評価され、貢献できるよう本研究開発を推進することが望まれる。

提言に対する対応状況

CCSの国際標準化における優位性を確保するため、現在規格内容を審議しているISO/TC265において、我が国は、回収WGのコンビーナおよび貯留WGのコ・コンビーナを送り込み、主導して規格化作業を進めている。

また、社会的受容性の向上については、本事業の中で毎年シンポジウムを開催し、社会との対話を進めている。また、本事業とは別であるが、苫小牧実証事業の中で地元に対する説明会を実施し、広く一般市民にご理解いただく活動を進めている。

世界でCCSが実用化された際、日本のCO₂貯留技術による海外での貢献も念頭に入れ、さらに世界の温暖化対策をリードできるよう研究開発を進めている。