二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術開発事業
終了時評価報告書

平成２７年７月

産業構造審議会産業技術環境分科会

研究開発・評価小委員会評価ワーキンググループ

はじめに

研究開発の評価は、研究開発活動の効率化・活性化、優れた成果の獲得や社会・経済への還元等を図るとともに、国民に対して説明責任を果たすために、極めて重要な活動であり、このため、経済産業省では、「国の研究開発評価に関する大綱的指針」（平成２４年１２月６日、内閣総理大臣決定）等に沿った適切な評価を実施すべく「経済産業省技術評価指針」（平成２６年４月改正）を定め、これに基づいて研究開発の評価を実施している。

経済産業省において実施している二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術開発事業は、地球温暖化対策の重要な選択肢の一つとして期待されている二酸化炭素回収・貯留（CCS）の実用化を図るために、我が国の地質的・社会的実情に適した CCS 安全性評価技術の確立等を平成１２年度より実施しているものである。

今回の評価は、この二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術開発事業の終了時評価であり、実際の評価に際しては、省外の有識者からなる平成２７年度二酸化炭素回収・貯留分野評価検討会（座長：宝田　恭之 群馬大学大学院　理工学府環境創生部門 教授）を開催した。

今般、当該検討会における検討結果が評価報告書の原案として産業構造審議会産業技術環境分科会研究開発・評価小委員会評価ワーキンググループ（座長：渡辺　俊也 東京大学政策ビジョン研究センター教授）に付議され、内容を審議し、了承した。

本書は、これらの評価結果を取りまとめたものである。

平成２７年７月
産業構造審議会産業技術環境分科会
研究開発・評価小委員会評価ワーキンググループ

産業構造審議会産業技術環境分科会

研究開発・評価小委員会評価ワーキンググループ

委　員　名　簿

座長	渡部　俊也	東京大学政策ビジョン研究センター教授
	大島　まり	東京大学大学院情報学環教授 東京大学生産技術研究所教授
	太田　健一郎	横浜国立大学工学研究院グリーン水素研究センター長・特任教授
	亀井　信一	株式会社三菱総合研究所人間・生活研究本部長
	小林　直人	早稲田大学研究戦略センター副所長・教授
	高橋　真木子	金沢工業大学工学研究科教授
	津川　若子	東京農工大学大学院工学研究院准教授
	西尾　好司	株式会社富士通総研経済研究所主任研究員
	森　　俊介	東京理科大学理工学研究科長 東京理科大学理工学部経営工学科教授

（座長除き、五十音順）

事務局：経済産業省産業技術環境局技術評価室

平成２７年度二酸化炭素回収・貯留分野評価検討会
委　員　名　簿

座 長	宝田　恭之	群馬大学大学院　理工学府環境創生部門　教授
	金子 憲治	株式会社日経ＢＰ クリーンテック研究所 上席研究員
	川上 浩良	首都大学東京 都市環境学部 教授
	芝尾 芳昭	イノベーションマネジメント株式会社 代表取締役
	藤井 俊英	電気事業連合会 技術開発部長
	松方 正彦	早稲田大学 理工学術院 教授

（敬称略、五十音順）

事務局：経済産業省産業技術環境局環境調和産業・技術室

二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術開発事業の評価に係る省内関係者

【終了時評価時】
（平成２７年度）
産業技術環境局　環境政策課　地球環境連携室長　永澤　剛（事業担当室長）
産業技術環境局　研究開発課　技術評価室長　福田　敦史

【中間評価時】
（平成２４年度）
産業技術環境局　環境政策課　地球環境連携・技術室長　八山　幸司（事業担当室長）
産業技術環境局　産業技術政策課　技術評価室長　岡本　繁樹

【中間評価時】
（平成２１年度）
（二酸化炭素地中貯留技術研究開発として）
産業技術環境局　環境政策課　地球環境技術室長　小澤　典明（事業担当室長）
産業技術環境局　産業技術政策課　技術評価室長　長濱　裕二

【中間評価時】
（平成１８年度）
（二酸化炭素地中貯留技術研究開発として）
産業技術環境局　地球環境技術室長　遠藤　健太郎（事業担当室長）
産業技術環境局　技術評価調査課　柴尾　浩郎

【中間評価時】
（平成１４年度）
（二酸化炭素地中貯留技術研究開発として）
平成１４年に新エネルギー・産業技術総合開発機構　技術評価委員会で実施

【事前評価時】（事業初年度予算要求時）
通商産業省環境立地局環境政策課　澁谷　隆（事業担当課長）

二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術開発事業終了時評価
審　議　経　過

○第１回中間評価検討会（平成２７年４月２１日）
・評価の方法等について
・プロジェクトの概要について
・評価の進め方について

○第２回中間評価検討会（平成２７年６月８日）
・評価報告書(案)について

○産業構造審議会産業技術環境分科会研究開発・評価小委員会
　評価ワーキンググループ（平成２７年７月１０日）
・評価報告書(案)について

目　次

参考資料

参考資料１　経済産業省技術評価指針

参考資料２　経済産業省技術評価指針に基づく標準的評価項目・評価基準

参考資料３　平成１８年度　二酸化炭素地中貯留技術研究開発　中間評価報告書概要

参考資料４　平成２１年度　二酸化炭素地中貯留技術研究開発　中間評価報告書概要

参考資料５　平成２４年度　二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術開発事業　中間評価報告書（概要版）

最終評価報告書概要

最終評価報告書概要

プロジェクト名	二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術開発事業
上位施策名	資源エネルギー・環境政策
事業担当課	産業技術環境局　環境政策課　環境調和産業・技術室

プロジェクトの目的・概要

化石燃料は今後とも我が国の主要なエネルギーソースであり、持続的な経済成長と地球温暖化防止の観点から、化石燃料の利用に伴う温室効果ガスである二酸化炭素（以下「CO_2」という。）の削減技術の研究開発が求められている中、大規模発生源から分離回収した CO_2 を地下深部の塩水性帯水層（以下「深部塩水層」という。）に貯留する技術が地球温暖化対策の重要な選択肢の一つとして期待されている。

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）が 2005 年にまとめた「二酸化炭素回収・貯留（CCS：Carbon Capture and Storage）に関する特別報告書」では、世界全体における CO_2 地中貯留のポテンシャルが約 2 兆トンと大きく、世界全体排出量の 70 年分にも相当すると見込まれている。

また、国際エネルギー機関（IEA）の「エネルギー技術展望 2014」では、CCS は、今後も長期的に極めて重要な役割を果たすとし、産業部門において大幅な CO_2 排出量削減目標の達成を可能にする有望な技術であるとしている。さらに長期的に気温上昇を2℃に抑えるシナリオにおいて、CCS は 2050 年までの CO_2 累積削減量の最大 14%を占めると試算されている。

本事業は、大気中の CO_2 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 CO_2 を深部塩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。

予算額等（委託）　（単位：千円）

開始年度	終了年度	中間評価時期	終了時評価時期	事業実施主体
平成１２年度	平成２７年度	平成（14,）18, 21, 24 年度	平成２７年度	公益財団法人地球環境産業技術研究機構 独立行政法人産業技術総合研究所
H25FY 予算額	H26FY 予算額	H27FY 予算額	総予算額	総執行額
700,000	953,000	812,000 の内数	12,828,885	11,399,787

目標・指標及び成果・達成度

(1) 全体目標に対する成果・達成度

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 CO_2 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
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、苫小牧実証地点の環境調査に活用し、その成果は海洋汚染防止法に基づく許可申請にも利用された。	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」の各ステージの技術事例集を作成した。	達成

(2) 目標及び計画の変更の有無

平成 20 年度に国内で CCS 大規模実証事業を実施する場合の候補地や技術的な可能性に関する検討が開始され、それに対応して本事業を従来の基礎研究から、2020 年頃から CCS 技術の本格導入に向けた基盤技術の開発に深化させる内容の見直しを行っている。

具体的には、大規模圧入実証事業と密接に連係して、CCS 実用化に欠かせない社会的受容性獲得や

信頼性醸成に資する、CO_2の長期挙動予測やCO_2漏洩による海域環境影響評価に関する基盤技術開発に重点的に取り組むこととなり、平成 21 年度から、我が国の地質特性を反映した安全性評価に関する基盤技術開発を目的とした、貯留層性能評価手法開発、貯留層内の CO_2 挙動解析、貯留層からの CO_2 移行解析に関する安全評価手法の開発とともに実用化に向けた CCS 推進基盤の確立にも取り組んでいる。

＜共通指標＞

論文数	論文の被引用度数	特許等件数（出願を含む）	特許権の実施件数	ライセンス供与数	取得ライセンス料	国際標準への寄与
３９	１８	４				

＊Ｈ24 年度中間評価以降を集計

評価概要

１．事業の目的・政策的位置付けの妥当性

地球温暖化への対応が叫ばれる中で、その主要な原因となっている温室効果ガスである CO2 の削減は世界共通のテーマとなっている。経済の持続的成長に欠かせない化石燃料の利用によって大量に発生する CO2 の削減への取組みは、地球温暖化対策の中でも特に重要な位置づけにある。本事業は、その CO2 削減の取り組みの一環として、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 を深部塩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。しかし、CO2 地中貯留を具体化するにはその安全性を含めた評価のもとに社会全体に受け入れてもらう必要があり、そのためにも CO2 を深部塩水層に長期的に安定かつ安全に貯留する技術を確立する必要がある。さらに国内においては、CO2 を安全に貯留しやすい石油天然ガス油田は少なく日本特有の地層環境に対して CO2 を安全に長期的に貯留する技術を確立しなくてはならない。本事業は日本独自の地質環境で安定的かつ長期的に CO2 を地下貯留するための技術開発として、重要な位置づけを持っている。

一方、CCS 技術が外部不経済とはいえ、経済性を欠いたままでは実用化は難しい。経済的な意義や具体的な経済試算が必要である。さらに、CCS の実用化には、国民合意、市民合意を得るための総合的社会技術開発が必要であり、そのための要素検討、課題抽出および実証を行う必要がある。

２．研究開発等の目標の妥当性

安全評価手法の開発については、目標と共に、目標をブレークダウンした具体的な指標が設定されており、妥当であると考える。また、CCS 事業者向けの「CCS 技術事例集」の作成が目標設定されており、将来の実施において大きな効果を発揮するとともに、成果の事業者への移転という観点からも適切な目標であると評価できる。

一方、全体的に目標が定性的であり、具体的に何をどこまで開発すると行ったところがやや不明確である。

３．成果、目標の達成度の妥当性

それぞれの開発課題で得られた知見は極めて有益であり、顕著な成果が認められる。特に、複雑な地形に対応した CCS の基本技術を確立したことは高く評価できる。また、長岡での長期モニタリングのデータは

貴重であり、今後の苫小牧での実証に有益と考えられる。事例集の作成も成果として評価できる。更に、原著論文39報、口頭発表125件など、成果の公開も十分である。
一方、目標そのものが定性的であるため、定量的にどこまで達成されたのか判断しがたい面もある。

４．事業化、波及効果についての妥当性

本事業で開発した技術は、苫小牧の大規模実証試験に様々な角度から貢献でき、事業化のための技術的基盤は確立していくものと思われる。また、本技術は、資源開発、地震対策など他分野への応用も十分期待できる。さらに、技術事例集の作成は国際標準化にも貢献できるものと期待できる

一方、他の地域あるいは地層へどれくらい適用可能かは、不明確な点がある。また、競合が予想される他の技術との性能評価やコスト計算がなされていないため、CCS 以外での波及効果がどの程度あるかは現状判断できない。また、この技術が関与できる市場はどの程度あるのかなどの調査も今後必要となる。さらに、技術事例集のほか、一般市民に対する説明資料（必要性、安全性、経済性）も必要である。

５．研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性

研究計画、実施体制や運営、資金等は適切であったと考えられる。費用対効果については、CCS 事業の経済性効果が今後の金融・税制優遇措置や CO2-クレジット価格によって大きく変わるため、現時点で経済的な評価を行うこと自体が困難であるが、地球温度上昇 2℃のシナリオにおいて、2050 年までに CCS 事業の CO2 累積削減量が 20%であることを鑑みると、その経済的な貢献は膨大であり、本事業の持つポテンシャル的な費用対効果は非常に大きいと言える。

一方、研究開発マネジメントにおいて、基礎研究段階や調査段階では、様々な不確定要素があり、研究としても探索的な研究の色合いが強く、自由闊達な意見を尊重し柔軟性の高い緩いマネジメントで進めることが望ましいが、実用化を見据えた技術開発においては、技術開発リスクをある程度評価し、技術難易度や時間・予算等を考慮したきっちりしたマネジメントに移行し運営する必要がある。しかし、体制面や運営面においても本事業を通して初期から最後まで同様のマネジメントのやり方が行われてきたようであるので、今後は研究開発のステージを意識し、それぞれのステージに応じた適切なマネジメントのやり方を実施するようにすべき。

６．総合評価

CCS 技術開発は地球温暖化対策、外交戦略などおいても我が国にとって極めて重要な課題である。得られた知見は新規性があり、苫小牧の大型実証にも貢献できるなど多くの成果が認められる。また、成果の公開やワークショップ開催など本開発技術を世界および国民に理解してもらう努力がなされていることも評価できる。また、日本の様々な複雑性を持った地層への対応と、本格的な実用への対応など、まだまだ技術的に解決すべき課題は多く存在するが、海外以上に困難な貯留条件での実用化は一方でCCS活用の範囲をグローバルレベルで格段に広める可能性も示している。日本だけでなく、将来的な国際貢献も視野に入れ、本事業での技術の高度化を目指すべき。

一方、いずれの開発技術も今後の実用化に向けて、どこまで達成すれば十分かというような定量的目標がなされておらず、また、経済的評価がやや曖昧である。

また、国内で CO2 圧入事業を本格的に実施する場合、「誘発地震」のリスクについて、周辺住民に対して

いかに説明するかが最も大きな課題になる。圧入が始まった場合、圧入中に起きた自然地震や微小振動の原因に対し、その都度、説明責任を求められる可能性が高いため、「圧入と微小振動(地震)が関連しないこと」を説明できるデータ収集や分析手法という視点も必要。

７．今後の研究開発の方向等に関する提言

今回の成果を実際に苫小牧実証事業試験へ活用し、その評価を十分に行い、必要に応じて今回の成果の見直し・バージョンアップをすべき。

大変多くの貴重な知見を有することが出来ており、更に以下の方向を目指すことを期待する。

１．当然ではあるが、長岡で行った小規模のデータと苫小牧の大規模実証との相関を十分検討し、スケールアップ指針を確立すること、

２．安全性、経済性の視点から、我が国における CCS の適地、貯留量の選定を行うことが出来るような技術とすること。

３．CO2 回収型発電システム（大崎クールジェン）などとの連携によって、より実用的な実証システムによる検証を行うこと。

４．国際的に認知されるような活動をより積極的に行うこと。

５．市民合意に向けて、地域一体化技術などの社会技術開発を検討、実施すること。

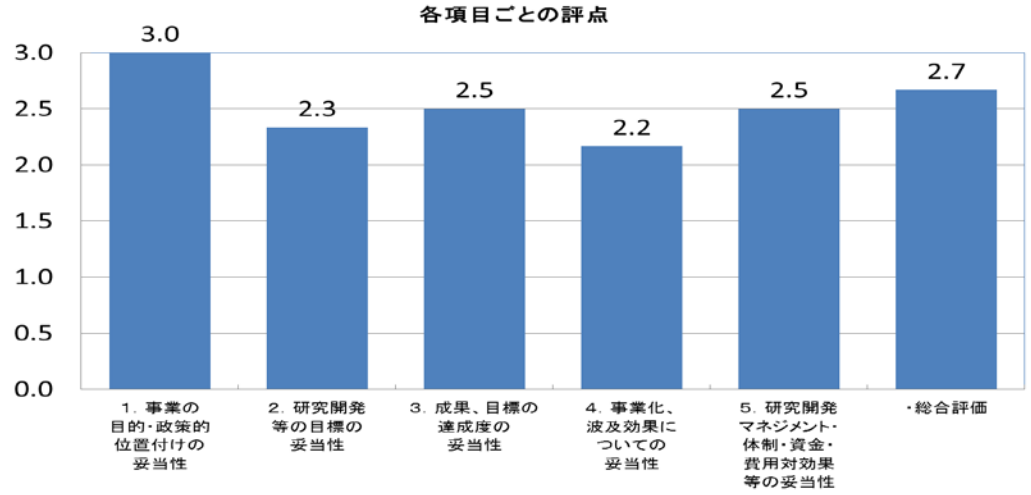
我が国独自の CCS 技術を早期に確立する事は、地球温暖化対応のみならず、産業競争力強化の視点からも重要である。今後は、海外の技術とも、完成度、コストを比較しつつ、海外にも展開力のある CCS 技術へと仕上げるべく、努力してほしい。

評点結果

評点法による評点結果

（二酸化炭素回収･貯蔵安全性評価技術開発事業）

	評点	A委員	B委員	C委員	D委員	E委員	F委員
１．事業の目的・政策的位置付けの妥当性	3.0	3	3	3	3	3	3
２．研究開発等の目標の妥当性	2.3	2	2	3	3	2	2
３．成果、目標の達成度の妥当性	2.5	2	2	2	3	3	3
４．事業化、波及効果についての妥当性	2.2	2	1	3	3	2	2
５．研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性	2.5	2	2	3	2	3	3
・総合評価	2.7	2	2	3	3	3	3



【評価項目の判定基準】
評価項目1.～5.
3点：非常に重要又は非常によい
2点：重要又はよい
1点：概ね妥当
0点：妥当でない

6. 総合評価
3点：実施された事業は、優れていた。
2点：実施された事業は、良かった。
1点：実施された事業は、成果等が今一歩のところがあった。
0点：実施された事業は、成果等が極めて不十分であった。

第１章　評価の実施方法

第１章　評価の実施方法

本プロジェクト評価は、「経済産業省技術評価指針」（平成 26 年 4 月改定、以下「評価指針」という。）に基づき、以下のとおり行われた。

１．評価目的

評価指針においては、評価の基本的考え方として、評価実施する目的として

(1)より良い政策・施策への反映
(2)より効率的・効果的な研究開発の実施
(3)国民への技術に関する施策・事業の開示
(4)資源の重点的・効率的配分への反映

を定めるとともに、評価の実施にあたっては、

(1)透明性の確保
(2)中立性の確保
(3)継続性の確保
(4)実効性の確保

を基本理念としている。

プロジェクト評価とは、評価指針における評価類型の一つとして位置付けられ、プロジェクトそのものについて、同評価指針に基づき、事業の目的・政策的位置付けの妥当性、研究開発等の目標の妥当性、成果、目標の達成度の妥当性、事業化、波及効果についての妥当性、研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性の評価項目について、評価を実施するものである。

その評価結果は、本プロジェクトの実施、運営等の改善や技術開発の効果、効率性の改善、更には予算等の資源配分に反映させることになるものである。

２．評価者

評価を実施するにあたり、評価指針に定められた「評価を行う場合には、被評価者に直接利害を有しない中立的な者である外部評価者の導入等により、中立性の確保に努めること」との規定に基づき、外部の有識者・専門家で構成する検討会を設置し、評価を行うこととした。

これに基づき、評価検討会を設置し、プロジェクトの目的や研究内容に即した専門家や経済・社会ニーズについて指摘できる有識者等から評価検討会委員名簿にある６名が選任された。

なお、本評価検討会の事務局については、指針に基づき経済産業省産業技術環境局環境政策課環境調和産業・技術室が担当した。

３．評価対象

二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術開発事業（対象期間：平成２３年度から平成２７年度）を評価対象として、研究開発実施者（公益財団法人地球環境産業技術研究機構、独立行政法人産業技術総合研究所）から提出されたプロジェクトの内容・成果等に関する資料及び説明に基づき評価した。

なお、本事業は、平成１２年度から実施してきた関連事業の終了時評価として､総まとめ的な位置付けの評価報告書となることから、別添として、過去に実施した中間評価の概要版を添付した。

４．評価方法

第１回評価検討会においては、研究開発実施者からの資料提供、説明及び質疑応答、並びに委員による意見交換が行われた。

第２回評価検討会においては、それらを踏まえて「プロジェクト評価における標準的評価項目・評価基準」、今後の研究開発の方向等に関する提言等について評価を実施し、併せて４段階評点法による評価を行い、評価報告書(案)を審議、確定した。

また、評価の透明性の確保の観点から、知的財産保護、個人情報で支障が生じると認められる場合等を除き、評価検討会を公開として実施した。

５．プロジェクト評価における標準的な評価項目・評価基準

評価検討会においては、経済産業省産業技術環境局技術評価室において平成２５年４月に策定した「経済産業省技術評価指針に基づく標準的評価項目・評価基準について」のプロジェクト評価（中間・事後評価）に沿った評価項目・評価基準とした。

１．事業の目的・政策的位置付けの妥当性

（１）事業目的は妥当で、政策的位置付けは明確か。

・事業の政策的意義（上位の施策との関連付け等）
・事業の科学的・技術的意義（新規性・先進性・独創性・革新性・先導性等）
・社会的・経済的意義（実用性等）

（２）国の事業として妥当であるか、国の関与が必要とされる事業か。
・国民や社会のニーズに合っているか。
・官民の役割分担は適切か。

２．研究開発等の目標の妥当性

（１）研究開発等の目標は適切かつ妥当か。
・目的達成のために具体的かつ明確な研究開発等の目標及び目標水準を設定しているか。特に、中間評価の場合、中間評価時点で、達成すべき水準（基準値）が設定されているか。
・目標達成度を測定・判断するための適切な指標が設定されているか。

３．成果、目標の達成度の妥当性

（１）成果は妥当か。
・得られた成果は何か。
・設定された目標以外に得られた成果はあるか。
・共通指標である、論文の発表、特許の出願、国際標準の形成、プロトタイプの作製等があったか。

（２）目標の達成度は妥当か。
・設定された目標の達成度（指標により測定し、中間及び事後評価時点の達成すべき水準（基準値）との比較）はどうか。

４．事業化、波及効果についての妥当性

（１）事業化については妥当か。
・事業化の見通し（事業化に向けてのシナリオ、事業化に関する問題点及び解決方策の明確化等）は立っているか。

（２）波及効果は妥当か。
・成果に基づいた波及効果を生じたか、期待できるか。
・当初想定していなかった波及効果を生じたか、期待できるか。

５．研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性

（１）研究開発計画は適切かつ妥当か。

- 事業の目標を達成するために本計画は適切であったか（想定された課題への対応の妥当性）。
- 採択スケジュール等は妥当であったか。
- 選別過程は適切であったか。
- 採択された実施者は妥当であったか。

（２）研究開発実施者の実施体制・運営は適切かつ妥当か。

- 適切な研究開発チーム構成での実施体制になっているか、いたか。
- 全体を統括するプロジェクトリーダー等が選任され、十分に活躍できる環境が整備されているか、いたか。
- 目標達成及び効率的実施のために必要な、実施者間の連携／競争が十分に行われる体制となっているか、いたか。
- 成果の利用主体に対して、成果を普及し関与を求める取組を積極的に実施しているか、いたか。
- 国民との科学・技術対話を効果的に実施したか、又は実施することとしているか。（ただし、公募要項に当該対話を実施することが明記されている研究開発で、３千万円以上の公的研究費の配分を受ける研究開発を実施する研究者等を対象とする。）ここで、国民との科学・技術対話とは、研究活動の内容や成果を社会・国民に対して分かりやすく説明する、未来への希望を抱かせる心の通った双方向コミュニケーション活動をいう（「国民との科学・技術対話」の推進について（基本的取組方針）（平成 22 年 6 月 19 日））。

（３）資金配分は妥当か。

- 資金の過不足はなかったか。
- 資金の内部配分は妥当か。

（４）費用対効果等は妥当か。

- 投入された資源量に見合った効果が生じたか、期待できるか。
- 必要な効果がより少ない資源量で得られるものが他にないか。

（５）変化への対応は妥当か。

- 社会経済情勢等周辺の状況変化に柔軟に対応しているか（新たな課題への対応の妥当性）。

・ 代替手段との比較を適切に行ったか。

６．総合評価

第２章　プロジェクトの概要

第２章　　プロジェクトの概要

１．事業の目的・政策的位置付け

１―１　事業の目的

化石燃料は今後とも我が国の主要なエネルギーソースであり、持続的な経済成長と地球温暖化防止の観点から、化石燃料の利用に伴う温室効果ガスである二酸化炭素（以下「CO_2」という。）の削減技術の研究開発が求められている中、大規模発生源から分離回収した CO_2 を地下深部の塩水性帯水層（以下「深部塩水層」という。）に貯留する技術が地球温暖化対策の重要な選択肢の一つとして期待されている。

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）が 2005 年にまとめた「二酸化炭素回収・貯留（CCS：Carbon Capture and Storage）に関する特別報告書」では、世界全体における CO_2 地中貯留のポテンシャルが約 2 兆トンと大きく、世界全体排出量の 70 年分にも相当すると見込まれている。

また、国際エネルギー機関（IEA）の「エネルギー技術展望 2014」では、CCS は、今後も長期的に極めて重要な役割を果たすとし、産業部門において大幅な CO_2 排出量削減目標の達成を可能にする有望な技術であるとしている。さらに長期的に気温上昇を 2℃に抑えるシナリオにおいて、CCS は 2050 年までの CO_2 累積削減量の最大 14%を占めると試算されている。

本事業は、大気中の CO_2 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 CO_2 を深部塩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。

CCS は油ガス田開発の技術を背景にしているが、温暖化対策の有効な技術として世界的に展開していくには、CO_2 地中貯留に係る安全性評価技術開発が重要な意義をもち、社会に受け入れてもらう（社会的受容性）ためにも必要である。我が国においては、2020 年頃から実用化することを目指し、国内外の研究機関や大規模実証試験と連携しながら、CO_2 地中貯留の安全性評価に関する技術開発を行う必要がある。本事業では CCS 技術の実用化に向けて、以下の 4 項目で我が国の地質的・社会的実情に適した CCS 安全性評価技術を確立するほか、CCS に関する知見やノウハウを技術事例集にまとめることとしている。

（１）貯留性能評価手法の開発

CO_2 圧入サイトでの貯留層の性能評価のため、長岡実証試験サイトの 3 次元弾性波や VSP 探査、物理検層及びコア試料の物性試験等の結果を基に、貯留層の地質モデルを構築し、複雑な地質構造及び不均質性に富む我が国特有の地質特

性を反映した地質モデリング手法を確立する。また、沿岸域の深部塩水層貯留における広域地下水流動解析手法についても検討する。

（２）貯留層内の CO_2 挙動解析

貯留層に圧入された CO_2 が安全に留まっていることを監視する技術を開発するため、常設型 OBC モニタリングシステムを用いた実海域での性能評価試験を行い、我が国の沿岸域の深部塩水層貯留における CO_2 挙動モニタリングのための課題整理や運用方法を確立する。また、常設型 OBC システムの実観測データを解析し、陸域の既存地震観測システムの観測結果との比較検討により、沿岸域の深部塩水層に適した微小振動観測手法を確立する。さらに、CO_2 圧入による地層への影響については、岩石試料を用いた室内実験ならびに現場実験により、地中埋設型の光ファイバーを用いた地層安全性評価手法を確立する。

（３）貯留層外部への CO_2 移行解析

貯留層外部への CO_2 移行を考慮した安全性評価のため、CO_2 移行シナリオ、CO_2 移行のモデリング手法並びに解析手法を検討する。この移行モデルを用いて CO_2 移行シミュレーションを実施し、海底下貯留における海域環境影響の手法等を確立する。

（４）CCS 実用化に向けた技術事例集の作成

長岡サイトでの CO_2 圧入実証試験や国内外の CCS 安全性評価技術開発の事例を収集し、CCS の実用化において事業者が参考にできる技術事例集を作成する。

１－２　政策的位置付け

本事業は、CCS の実用化に向けて、分離回収した CO_2 を深部塩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、以下のように位置付けられている。

〇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）

（中長期（2030 年頃以降）で実用化・普及が見込まれる技術）

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。

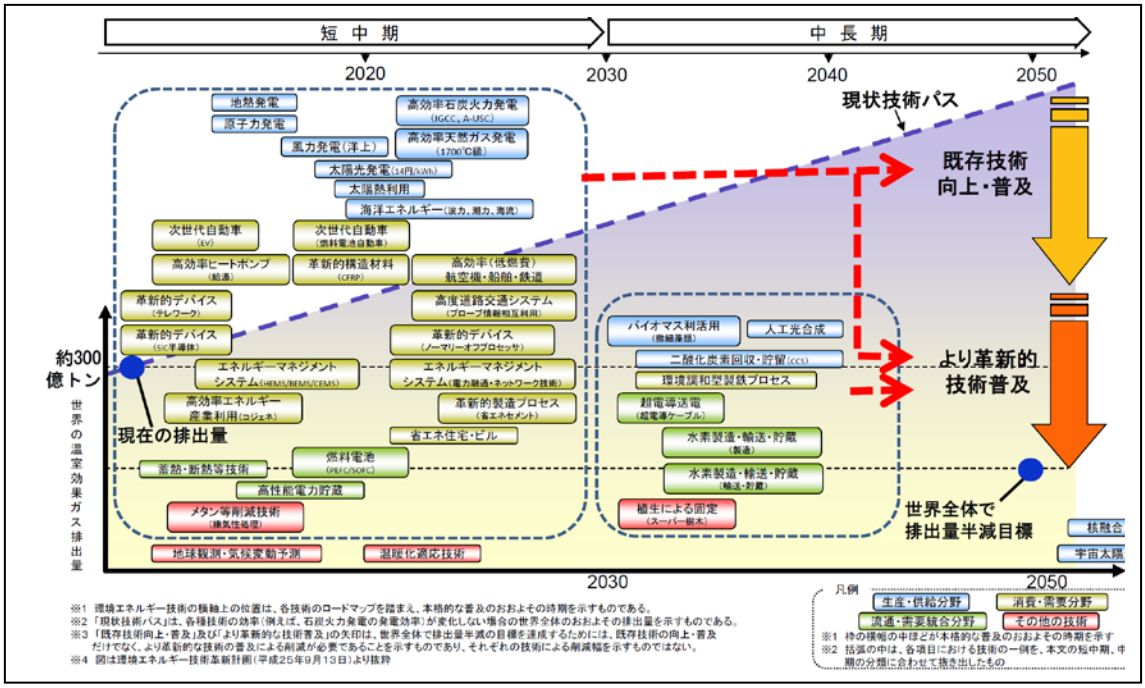


図 1-1　「革新的技術」のロードマップ

〇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 CCS などに関する CO_2 削減技術開発も並行して進めていく。

〇 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）

経済産業省においては、「環境エネルギー技術革新計画」を受け、個別技術課題のロードマップの個表を作成している。

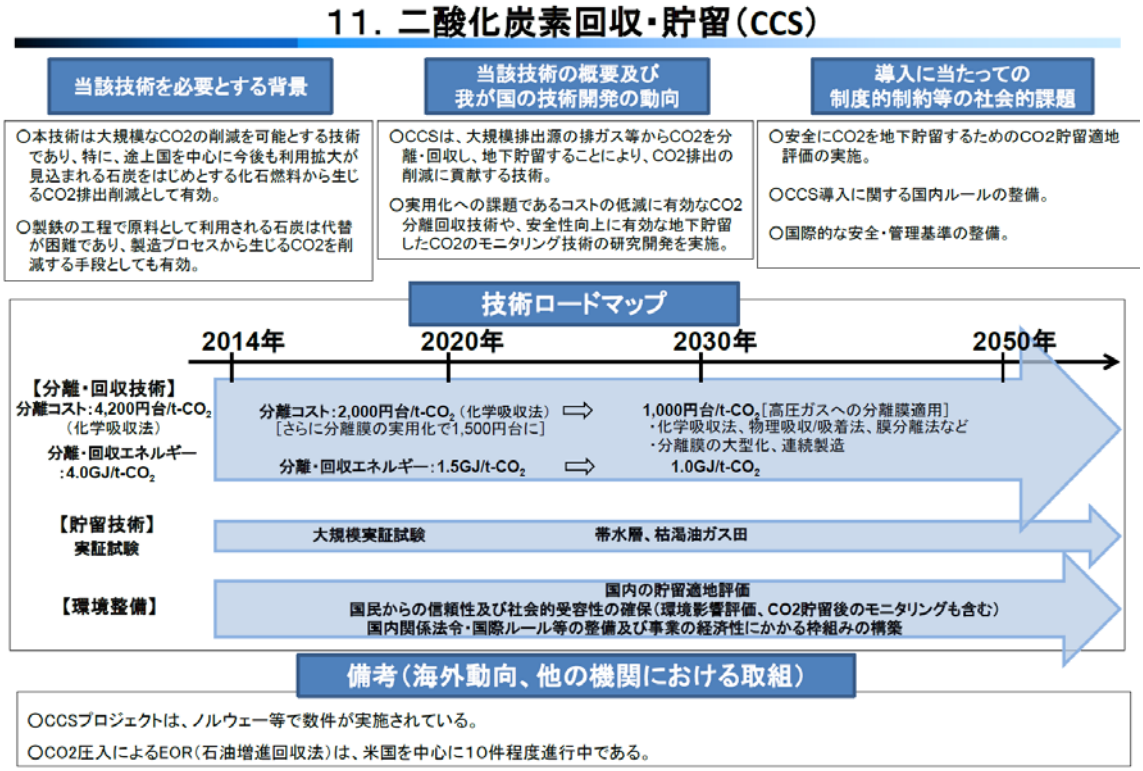


図 1-2　CCS のロードマップ

１－３　国の関与の必要性

１－３－１　背景

地球温暖化問題は、その予想される影響の大きさや深刻さに鑑み、人類の生存基盤に関わる最も重要な問題の一つとなっている。我が国は、平成 17 年 2 月に発効した地球温暖化対策のための国際的な枠組である京都議定書を締結し、1990 年比で 6%削減を達成する国際的な約束を果たすべく取り組みを進めた。さらに、将来にわたっても我が国が地球温暖化問題に着実に対応し、大幅な温室効果ガス削減に向けた努力を続ける必要がある。

こうした状況の下、二酸化炭素回収・貯留（CCS）技術は、大規模に地下の深部塩水層に CO_2 を貯留する手法として、世界各国で注目され、実証試験や実用化検討が行われており、わが国でも 1,461 億トンの概算貯留可能量※、世界全体では 2 兆トンの貯留可能量※が算出されている有望な CO_2 削減技術と位置づけられている。

※それぞれ平成 17 年度 RITE 試算及び 2005 年 IPCC レポート

１－３－２　CO_2地中貯留に対する国の関与の必要性

CCS は、追加的エネルギーコストを掛けて CO_2 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温暖化対策に特化した技術であり、CCS の導入には経済的インセンティブが働かない。また、CCS の実用化に当たっては、技術開発による安全性向上やコストダウンのほか、制度的、社会的課題を解決する必要があり、実用化時点でのビジネスモデルも明確になっていない現時点では、民間企業には技術開発のインセティブが働きにくく、国が主導し、実用化に向け産学の力を結集し事業を進めていく必要がある。

２．研究開発等の目標

２－１　研究開発目標

本事業は、大気中の CO_2 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 CO_2 を深部塩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。

本事業は平成 12 年に開始され、長岡サイトでの CO_2 圧入実施試験のほかに、CO_2 挙動モニタリングに関する基礎研究も実施した。CO_2 貯留メカニズムや CO_2 長期挙動に関する多くの知見を集積して、圧入終了後 CO_2 挙動モニタリングを継続している。また、国内の基礎試験等の調査結果を用いて、全国の CO_2 貯留ポテンシャルを評価した。その知見は、現在も広く活用されている。

さらに平成 20 年度には、CCS 実用化に向け、CO_2 地中貯留の安全性や環境影響評価技術を確立する事業として本事業は位置付けられた。それを具体化するため、研究開発の大きな柱として「貯留性能評価」「CO_2 挙動解析」「CO_2 移行解析」が設定され現在に至っている。また、CCS 事業者が参照することを想定した「CCS 技術事例集」の作成を平成 24 年度に開始した。

平成 24 年度の中間評価では、その研究開発目標の設定は妥当であると評価され、また研究の実施内容、進捗状況についても高く評価され、実用化に向け技術開発を進めるよう指示された。

今回の終了時評価では、平成 24 年度に設定した「事後評価時点の目標・指標」を研究開発目標として踏襲し、その成果・達成度を評価することとする。

なお、研究項目の変遷を図 2-1、図 2-2 に示す。

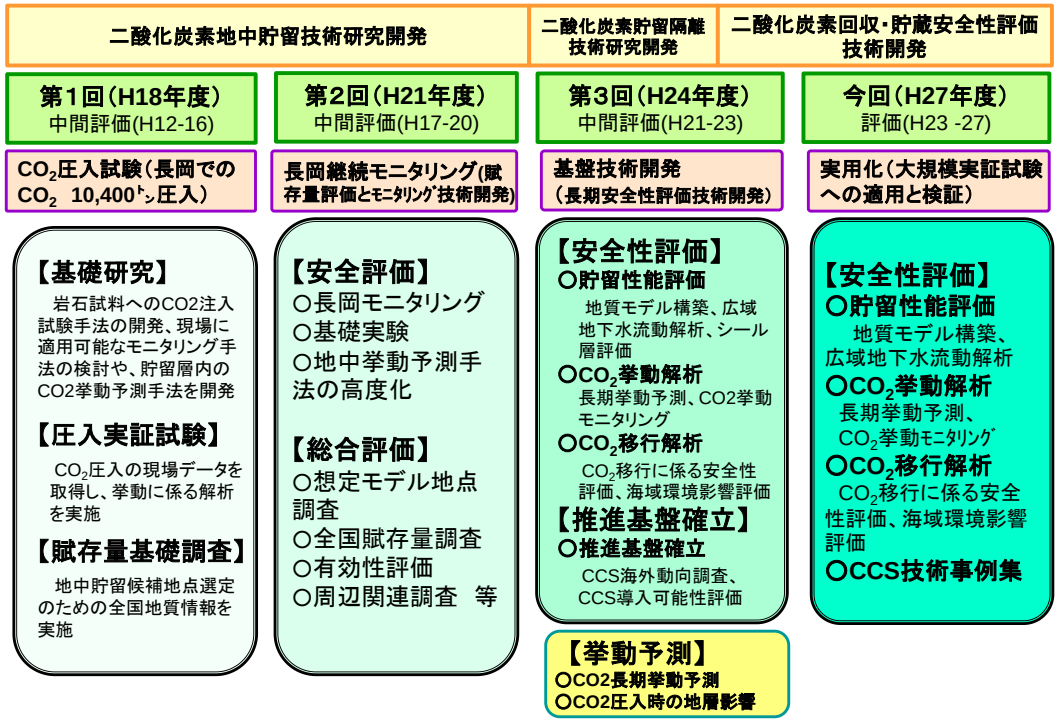


図2-1　研究項目の変遷１

図2-2　研究項目の変遷２

２－１－１　全体目標設定

全体目標を表 2-1 に示す。

表 2-1　全体目標

項目	目標 （終了時評価時点）	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 が長期に渡り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．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 事業者が参照できる技術事例集の整備が必要である。

２－１－２　個別要素技術の目標設定

個別要素技術の目標を表 2-2 に示す。

表 2-2　個別要素技術の目標

要素技術		目標・指標 （終了時評価時点）	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	①地質モデルの構築	（目標） 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。 （指標） １）砂泥互層を対象にした地質モデリング手法を実用化する。 ２）貯留層の不均質性を考慮した貯留性能評価手法を実用化する。 ３）地化学反応を考慮した広域地下水流動解析手法を確立し実用化する。	CCS 事業においては、限られた地質情報を用いて、我が国特有の地質特性を反映した地質モデルを構築する手法が必要である。 また、我が国で主流となる沿岸域深部塩水層貯留においては、陸域の豊富な地下水データを基にして、海域を含めた広域地下水流動解析手法を確立する必要がある。
2．貯留層内の CO_2 挙動解析	①長期挙動予測手法の開発	（目標） 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。 （指標） 地化学反応を考慮した長期挙動予測シミュレーション手法を実用化する。	CCS 事業を進めるにあたっては、深部塩水層に圧入された CO_2 が長期に渡って安全に貯留層に留まっていることを経済的に監視するため、長期的な予測技術を実用化する必要がある。
	②CO_2 挙動モニタリング手法の開発	（目標） 我が国に適応した CO_2 挙動モニタリング手法を実用化する。 （指標） １）常設型 OBC システムによる沿岸域モニタリング手法を実用化する。 ２）CO_2 圧入に伴う微小振動発生に関する評価手法を確立し、観測システムを構築する。 ３）データ取得のための信号源を要する弾性波探査に対し、それを補完するための受動的信号を用いた多面的モニタリング手法を確立する。 ４）光ファイバーによる埋設型地盤変形監視システムを実用化する。 ５）ジオメカニクスを考慮した岩石力学—流体流動連成シミュレーション手法を確立する。	CCS 事業を進めるにあたっては、深部塩水層に圧入された CO_2 が長期に渡って安全に貯留層に留まっていることを確認し、継続的に監視していく必要がある。

要素技術		目標・指標 （終了時評価時点）	設定理由・根拠等
3．貯留層外部への CO_2 移行解析	①CO_2 移行に関する安全性評価手法の開発	（目標） 貯留層から海底に至るまでの移行について移行経路をモデル化し、移行シミュレーション技術を実用化する。 （指標） １）移行経路をモデル化する技術を実用化する。 ２）底質や流況等を考慮した CO_2 移行シミュレーション手法を実用化する。	沿岸域深部塩水層貯留における安全の確保のためには、貯留層内の CO_2 の移行に関してその経路および移行量を予測する手法が必要である。
	②海域環境影響評価手法の開発	（目標） 上記シミュレーションに基づいて予測した移行 CO_2 に対して、海域環境影響評価手法を実用化する。 （指標） 潜在的移行経路から海底付近に到達する CO_2 を対象として、浅部地層を含む海底および海中における効率的な CO_2 モニタリング手法、海底生態系への CO_2 影響評価手法を確立する。	海底下貯留の実施にあたっては、上記シミュレーション手法とあわせて、移行 CO_2 が海底の生態系にどの程度影響を与えるのかを評価する手法、および移行 CO_2 を計測、監視する手法が必要である。
II. CCS 推進基盤の確立			
		（目標） 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。 （指標） １）長岡実証試験および個別技術開発項目に関する技術事例集を作成する。	CCS 実用化のためには、着実な技術開発とともに、CCS 事業者が参照しうる技術事例集の整備が必要である。

３．成果、目標の達成度

３－１　成果

３－１－１　全体成果

前章で紹介した目標・指標に基づき研究を進め、CCS の安全性・信頼性の構築に必要な基盤技術として、貯留性能評価、貯留層内の CO_2 挙動解析、貯留層外への CO_2 移行解析に係る技術を確立し、また CCS 実用化に向けた技術事例集（第１章基本計画～第４章実施計画）を作成した。

（１）貯留性能評価手法の開発

CO_2 圧入サイトの貯留性能評価は、CO_2 貯留の長期安全性や経済性の観点から重要であり、それを実現するために「砂泥互層や不均質な地層に対応する地質モデルの構築」、「地下水流動の解析手法の開発」を行った。

地質モデルの構築では、長岡実証試験サイトの CO_2 流動シミュレーションと CO_2 挙動モニタリング結果とのヒストリーマッチングにより、我が国の地質条件に適した地質モデル構築手法を確立した。

地下水流動解析手法の開発では、沿岸域の CO_2 貯留サイト特有の陸域と海域をつないだシームレスの水理地質モデルを構築し、さらに地化学反応を考慮し、広域地下水流動解析手法を確立した。

（２）貯留層内の CO_2 挙動解析

貯留層に圧入された CO_2 の挙動を把握し、その長期挙動を予測することは地中貯留の安全性を評価するのに不可欠であるが、その鍵となる技術として、「CO_2 長期挙動予測評価手法」と「CO_2 挙動モニタリング手法」を確立した。

CO_2 長期挙動予測評価手法ついては、長岡実証試験サイトでの物理検層や室内試験結果をもとに、地化学反応を考慮した CO_2 長期シミュレーション手法を確立した。また、CO_2 挙動モニタリング手法については、以下の技術を確立した。

・常設型 OBC（Ocean Bottom Cable：海底受振ケーブル）

常設型 OBC を開発しを開発し、苫小牧実証地点で実適用している。

・微小振動評価

米国クランフィールド等の CO_2 圧入サイトにおける微小振動観測結果を総合評価し、CO_2 圧入と微小振動の関連性をとりまとめた。また、苫小牧実証試験サイトで得られた常設 OBC 等の観測データを基に、CO_2 圧入管理手法（TLS: Traffic Light System）の基本機能を確立した。

・弾性波補完モニタリング

弾性波モニタリングを補完する受動的な信号を用いる多面的モニタリング手法を確立した。

・地層の力学的安定性監視

深度方向に連続して地層変形を計測できる光ファイバー測定技術を開発し、実坑井の現場測定試験よりその実用性を検証した。

・遮蔽層性能評価

CO_2 圧入に伴う地層の力学的応答を評価するための岩石力学－流体流動連成シミュレーション手法を確立した。

（３）貯留層外への CO_2 移行解析

「貯留層外への CO_2 移行解析」は万が一の CO_2 漏出を想定する解析であり、「CO_2 移行・拡散シミュレーション技術の開発」、「漏出 CO_2 検出技術の開発」、「生物影響評価モデルの開発」を行った。

CO_2 拡散シミュレーション技術開発では、CO_2 が地下から移行するモデルを設定し、海洋漏出後の拡散を予測する CO_2 海中拡散シミュレーターを開発した。

漏出 CO_2 検出技術の開発では、漏出 CO_2 気泡を音響探査で検出する技術および海水中の CO_2 濃度変化で CO_2 漏出を検知する手法を確立した。

生物影響評価モデルの開発では、生物影響データベースを作成し、CO_2 漏出による生物影響を効率的に評価する手法を確立した。

（４）CCS 実用化に向けた技術事例集の作成

長岡サイトの CO_2 圧入実証試験や海外の CCS 技術事例をもとに、CCS 実用化時に事業者が参考にできる技術事例集を作成しており、CCS の「基本計画」、「サイト選定」、「サイト特性評価」、「実施計画」の計 4 冊の事例集が完成した。

３－１－２　個別要素技術成果

Ⅰ　安全性評価手法の開発

1. 貯留性能評価手法の開発

（１）地質モデルの構築

CO_2地中貯留では、石油天然ガス開発分野で培われてきた地質モデリング技術を応用している。一般的に我が国の地質は、砂泥互層や砂礫層で特徴づけられるように不均質性が著しく、その不均質性が地中のCO_2分布にも影響することが知られている。一方、安全性やコストの観点から、貯留サイトの調査井の数が限られており、少ない地質情報を基に、可能な限り精度の高い地質モデルを構築することがCO_2地中貯留事業の必要課題となっている。

本事業では、砂泥互層を対象にした地質モデリング、不均質性を考慮した地質モデリング、および地中貯留を効率的かつ安全に行うための付加技術の検討を行い、我が国の地層に適した貯留性能評価手法に資する地質モデリングの実用化に取り組んだ。

本成果は、苫小牧実証地点の地質モデル構築と貯留性能評価に活用されている。

①　砂泥互層を対象にした地質モデル構築手法の開発

我が国の地質を特徴づける砂泥互層等の不均質性は、地層の堆積環境の変化が起源となる。砂泥互層をCO_2貯留対象層に選定する場合、その堆積環境を考慮した地質モデル構築手法の開発が求められる。本事業では、長岡サイトを事例とし、貯留層の堆積環境に注目した地層解析および地質モデル構築手法の確立を行う。

長岡地域の先行研究では、サイト周辺の露頭が詳細に調査されており、本事業で扱う貯留対象層に対比される灰爪層は海成層と考えられている。また採取したコア試料からは、浅海棲の貝化石が産出することから浅海堆積物と判断される。

地層解析および地質モデル構築の手順は次の通りである。(1) コア試料の堆積相解析から堆積環境を評価、(2) コア試料の含泥率を測定し、(3) 物理検層データと統合化し深度方向に連続的データを取得、(4) 含泥率データを側方展開するため、複数の坑井データを基に地球統計学的手法を用いて、不均質性を評価する。

まず、貯留対象層から得られたコア試料の堆積相解析から、生痕化石の認められるシルト岩からなる波浪の影響が少ない部分と、斜交葉理砂岩が優勢な砂泥層の部分に分けられ、かつそれらは上方粗粒化の傾向があり、陸棚～外浜の

浅海堆積物に特有の堆積構造が見られることが分かった（図 3.I.1-1）。次に、この堆積環境解析結果と含泥率の測定値の比較から、含泥率 40%程度を閾値として両者の堆積環境が区分でき、含泥率が堆積環境を反映するパラメーターとして使えることが確認された（図 3.I.1-1）。さらに深度方向における含泥率の連続的なデータを自然ガンマ線検層と統合した。この含泥率データを側方展開するため、コア試料の採取がされていない坑井の自然ガンマ線検層を利用し、地球統計手法を用いることにより、含泥率の 3 次元モデルを作成した。得られた含泥率の 3 次元モデルは､圧入対象層下位から上位にかけて砂質堆積物が前進し、泥質堆積物が西側に分布することを示唆するものであった。この結果は、先行研究で推定される砕屑物供給系と大局的に合うことが確認された。

長岡サイトにおいては最も西側に位置する観測井が、地質構造的上位にあるにも関わらず、現時点も CO_2 が到達していない。CO_2 圧入量が少なかったことに加えて、浸透率の低い泥質堆積物によって CO_2 の移動が妨げられていることも考えられる。

このように、含泥率の分布は、圧入された CO_2 の挙動や分布の解釈に役立つことが分かった。本技術は苫小牧大規模実証試験サイトの萌別層の地質モデル作成に活用されている。

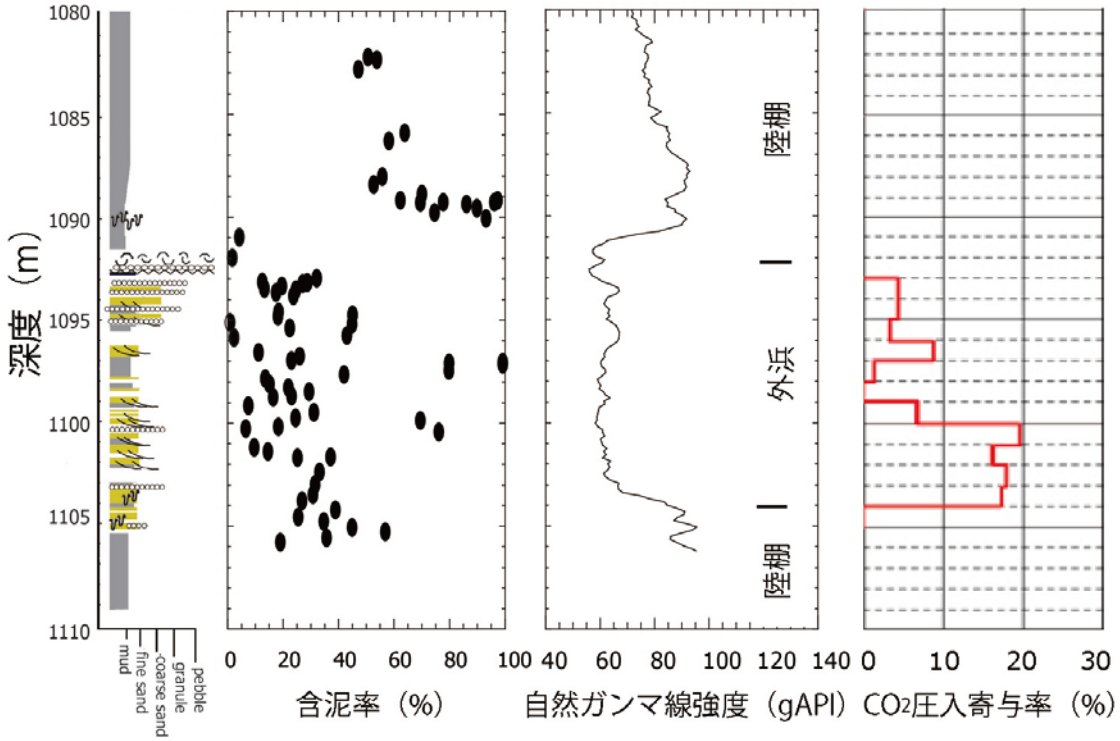


図 3.I.1-1　貯留対象層の地層解析。左から堆積相解析に基づく柱状図、含泥率の実測値、物理検層により測定される自然ガンマ線強度、CO_2 圧入寄与率。

② 不均質性を考慮した地質モデル構築手法の開発

CO_2 地中貯留において、限られた情報から作成する地質モデルでは、水平方向の不均質性をいかに評価するかが特に問題となる。本事業では、長岡サイトを例に、少ない地質情報から水平方向の不均質性を考慮した地質モデル構築手法の開発を行った。

地質モデル作成に供するデータとしては、3 次元弾性波探査結果、VSP（Vertical Seismic Profile）探査結果、および検層データである。3 次元弾性波探査結果に対しては、ノイズ抑制処理および相対振幅保存処理を施すことが重要である。次に VSP 探査結果を用いて、弾性波探査データの時間軸と深度のマッチングを行う。そして、3 次元弾性波探査結果と検層データを対比することにより、限られた坑井周辺の物性パラメーターを空間的に広げた物性分布モデルを作成する。この手法として、Self-Organizing Map（SOM）解析と Geology Driven Integration（GDI）解析を検討した結果、送受信点の組み合わせの関係により比較的ノイズが大きい弾性波探査データでは、GDI 解析の方が有効であることを確認した。

GDI 解析では、まず坑井の調査結果から、地層区分、岩相の層厚、孔隙率といった物性パラメーターを統計的に表現した地質統合モデルを作成する。この地質統合モデルによる各物性パラメーターと、弾性波探査データとの相関係数を拘束条件にして、探査範囲の任意の地点の疑似坑井における合成記録を作成する。この合成記録と坑井の地質・物性の関係を人工ニューラルネットワークによって関連づけて、疑似坑井地点での岩石物性を求める。この方法を繰り返し、弾性波探査範囲内の物性パラメーターの分布を求めていく。

この手法を、長岡サイトの弾性波探査エリア（2km×2km）に適用し、地質モデルを作成した（図 3.I.1-2）。この図は、貯留層上面における孔隙率の 3 次元分布を表しており、孔隙率の高い部分が偏在していることが分かる。このようにして作成した地質モデルの検証のため、図 3.I.1-3 に CO_2 圧入地点周辺の孔隙率分布と、CO_2 流動シミュレーションの結果を重ね合わせて比較した。流動シミュレーションより得られた CO_2 の分布域と、GDI 解析によって推定した高孔隙率の部分（青部）が良く一致しており、OB-3 付近では孔隙率が小さいため CO_2 が存在していないことも示している。これらの結果は、検層データ解析結果、および CO_2 挙動モニタリング結果ともよく一致している。

このように、長岡サイトの地質モデル構築を行ったことによって、GDI 解析を適用する際に注意すべき点が明らかになった。ひとつは、弾性波探査結果が VSP 探査等を用いて正確に深度と対応つけられていない場合には、解析結果にバイアスが生じることである。また、複数の物性値分布を求めるためには、弾性波探査を支配する音波速度（Vp）に対する相関が異なる物性に対して適用する必要があることも明らかになった。さらに、弾性波探査データを用いるため、求まる地質パラメーターの解像度は、弾性波探査で用いた周波数の制約を受ける。これらの注意点があるものの、深度＝時間対応ができている 3 次元弾性波

探査結果および検層が実施された坑井があるサイトにおいては、GDI 解析によって検層データを側方展開した地質モデルを作成できることが検証された。

本モデリング手法は、苫小牧実証に適用され、その貯留層の性能評価検討に活用されている。

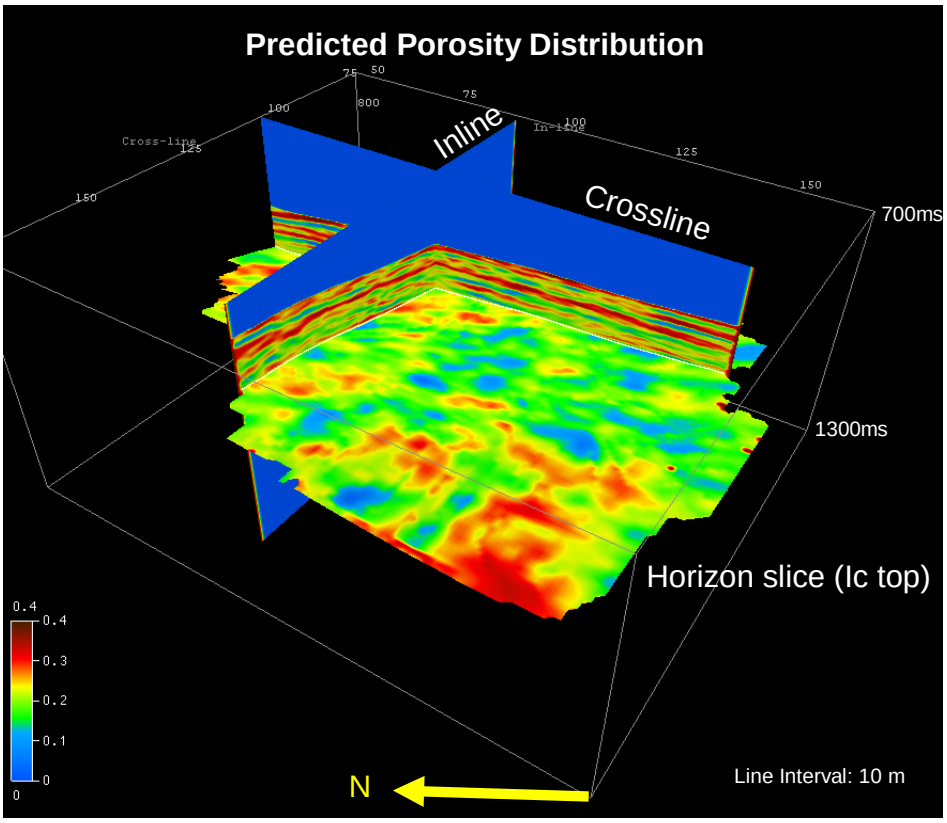


図 3.I.1-2　GDI 解析によって得られた貯留層上面における孔隙率の分布図

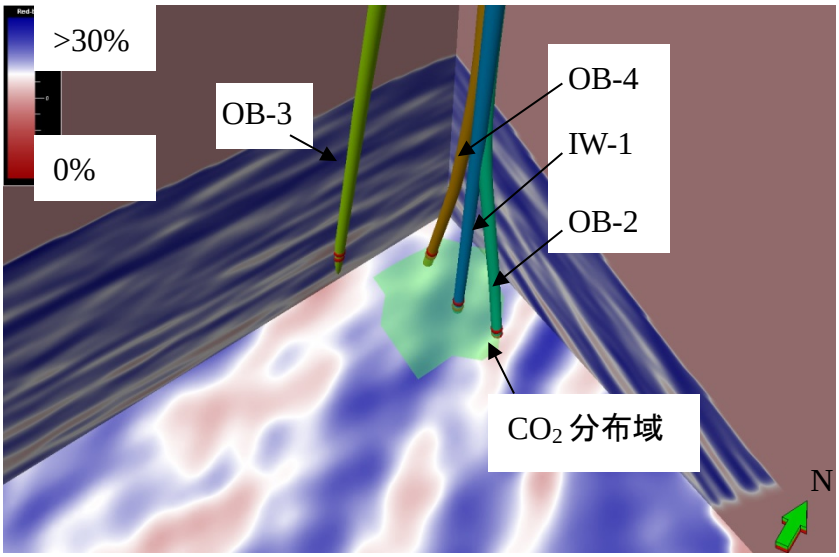


図 3.I.1-3　貯留層上面における孔隙率分布と CO_2 分布の比較

③　S 波情報を利用した地質構造解析手法の開発

本事業では、弾性波探査の際に Ocean Bottom Cable（OBC）で観測される PS 変換波成分を用いて地質モデルを構築する手法の開発を行った。

S 波は P 波よりも流体の存在に対して鈍感であるという特徴があり、S 波成分を解析することにより、多くの地下情報を抽出できることが期待されるだけでなく、CO_2 飽和度がより正確に求められることが期待される。特に、地層境界で発生する PS 変換波は、石油天然ガス相の下限をより正確に求められることが知られており、地動 3 成分を受信可能な OBC で観測しているサイトでは、弾性波探査で用いる同一の発信源を用いて P 波構造と S 波構造の両方構築可能である。このように OBC で観測した弾性波探査データから P 波構造と S 波構造を求める手順を明らかにするとともに、解析精度の確認を行った。

まず、平塚沖で OBC で観測した弾性波探査結果に対して解析を行った。通常の P 波反射波において地下の反射点を求める際には、Common Mid Point（CMP）重合を用いるが、PS 変換波の場合には P 波と S 波で速度が異なるので Common Asymptotic Conversion Point（CACP）重合を用いることが必要である。さらに反射点直上の走時に変換することによって、図 3.I.1-4 の反射面のホライゾン解釈を得た。図の縦軸は時間軸なので、PS 変換波の方が遅く出ているが、同一の反射面と解釈されるホライゾンを求めることができた。この結果から、さらに反射面の傾斜の影響を補正する重合前時間マイグレーションを行うことにより、反射面をより明瞭に示すことができることが明らかとなった。

次に、ここで用いた解析手法を、苫小牧沖で OBC で観測する弾性波探査に適用した場合に得られる地質構造を求めた。ただし、解析実施時点では、苫小牧サイトに OBC が敷設されていなかったため、苫小牧沖の地質モデルを用い、敷設予定位置に OBC が設置された場合に、観測されると予想される合成波形に対して解析を行い、元の地質モデルにどれくらい合う結果が得られるかを確認した。重合解析結果を、図 3.I.1-5 に示す。平塚沖の結果と同様に、PS 変換波の方が遅く出ているが、反射面の形状は P 波のみの場合と、PS 変換波の結果は同様に求まっている。また、PS 変換波の方が反射面での振幅が大きいことが特徴的である。この結果から求めた Vp/Vs 値とモデルとして与えた値を比較すると、5%程度の誤差で結果が得られることが確認された。

このように、平塚沖での試験的な観測結果および苫小牧沖での敷設予定の OBC で観測される弾性波探査での観測データに対して、PS 変換波解析を行う手法を明らかにしただけでなく、解析精度に関する評価も得られ、実適用性が検証されたといえる。ここで求められた平均的な S 波構造は、地中の物性の経時変化を求める際にも適用できることが期待される。

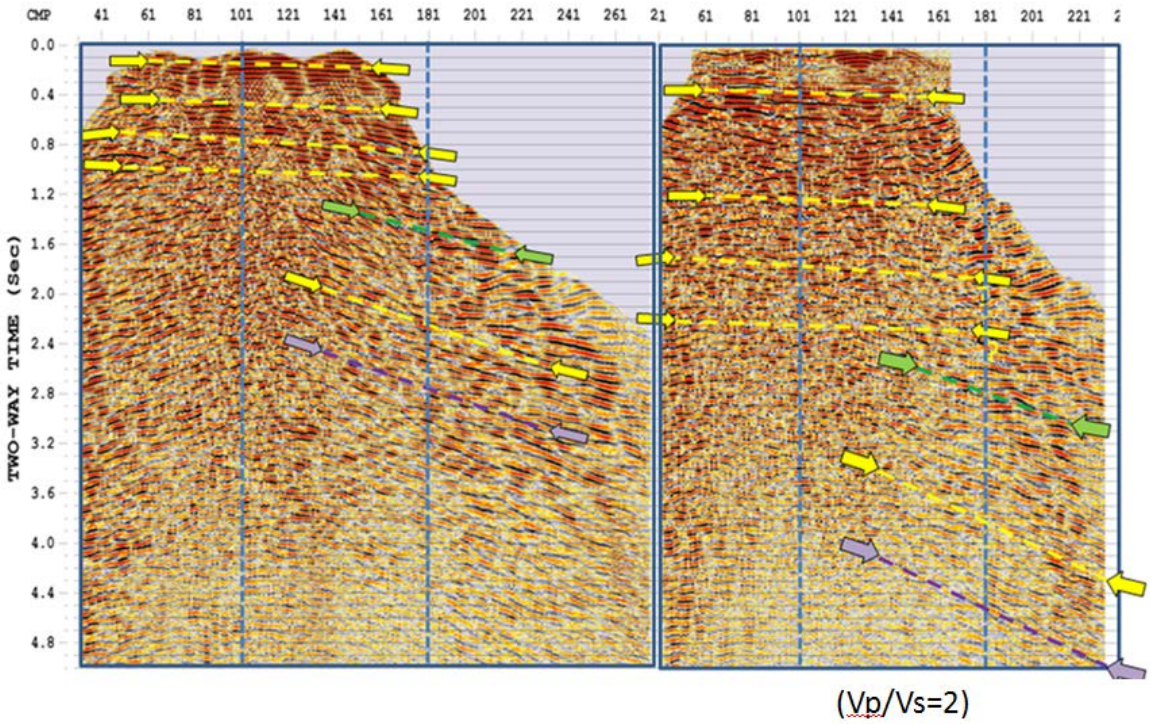


図 3.I.1-4　平塚沖 OBC データの P 波重合記録（右）と PS 変換波重合記録（左）

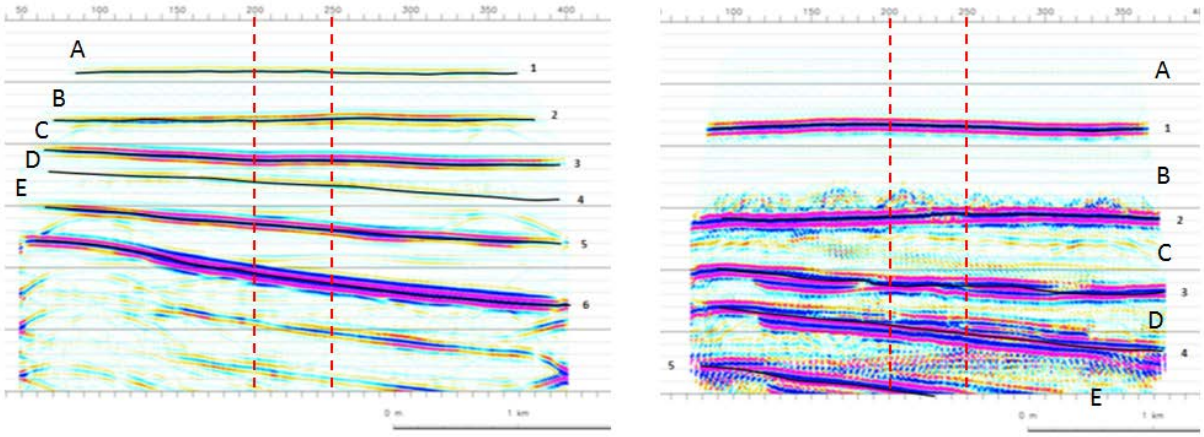


図 3.I.1-5　苫小牧沖での合成弾性波探査データによる P 波重合記録（右）
と PS 変換波重合記録(左)。アルファベットは仮定した同一地層を示す。

④　複数坑井システムの有効性検討

我が国における CCS 実用化にあたっては、100 万トン／年のような大規模貯留が可能なオプションを用意しておく必要がある。大きな圧入レートは、地層圧の上昇をもたらし、遮蔽層の力学的安定性が懸念される。その対策として、圧入井のほかに坑井を掘削し、地層水を生産することで地層圧の上昇を緩和する複数坑井システムが、豪州西北部の Gorgon サイトにおいて採用されている。

Gorgon プロジェクトでは、想定圧入レートが 340 万トンから 400 万トン／年であり、図 3.I.1-6 右下に示すように、緩和井より生産した水は CO_2 貯留層より上位地層に再圧入する計画である。

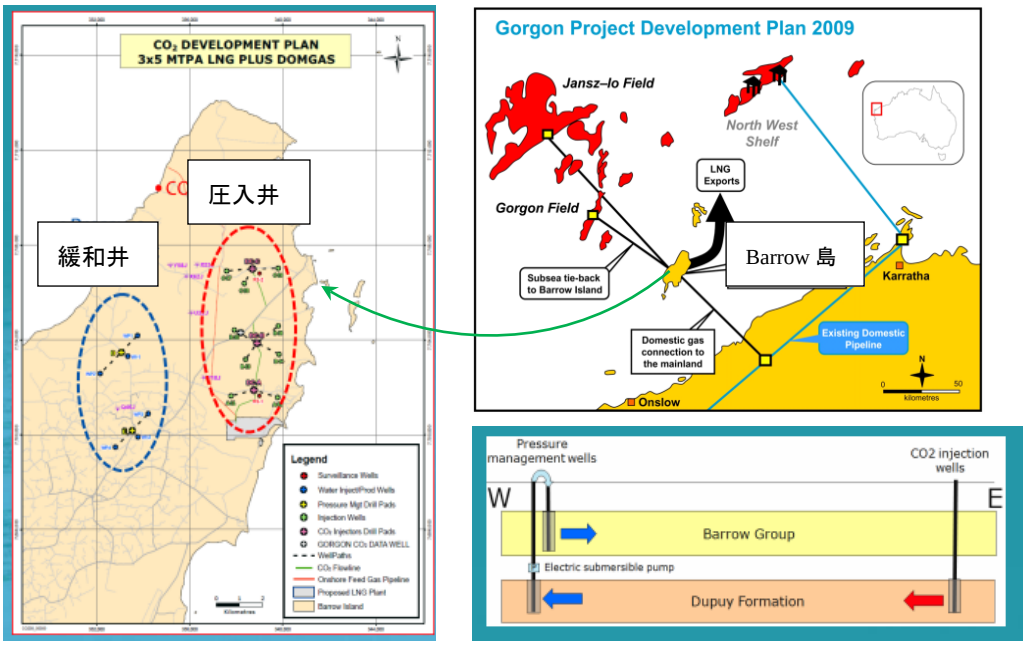


図 3.I.1-6　Gorgon プロジェクトの概要

複数坑井システムでは、水生産を行う圧力緩和井を設け、目標量の CO_2 圧入をしやすくすることを目的とする。本事業では、連続性のある均質な地層モデルにより、緩和井の本数や坑井配置などに関する数種類のケースを設定して、主に圧力緩和効果について検討した。その目的のため、苫小牧貯留層相当の連続性のある均質な地層モデルを作成し、解析コードには超臨界 CO_2 と塩水の流体特性を考慮できる二相系流体シミュレーターTOUGH2 を用い、数値シミュレーションによって圧力分布を求めた。CO_2 圧入は、100 万トン／年のレートで 50 年間の圧入実施をするものとし、モデル領域は 24km×24km の範囲を 200m 幅の格子を用い、鉛直方向は 5m 間隔の 9 層で貯留層を表現した。そのモデルにおいて、圧入井と緩和井の本数、坑井配置パターン等を変化させた感度解析を行った。シミュレーション結果の地層圧、圧入レートの比較により、複数坑井システムの有効性や坑井本数・配置を検討した。

図 3.I.1-7 に、水平圧入井（図中のピンク線）と四方に緩和井（図中の空色線）を配置して、圧入開始後 50 年後の圧力分布を示す。図では圧入井を中心とした断面も表している。これより、圧入井近傍でも圧力上昇が 4MPa 以下で、地層許容圧以内に抑えられていることが分かる。図 3.I.1-8 に緩和井の有無による圧力増加の違いを示す。緩和井がないと圧入開始から 17 年で地層許容圧を超えるのに対し、緩和井の効果により地層圧が抑えられることが示されている。

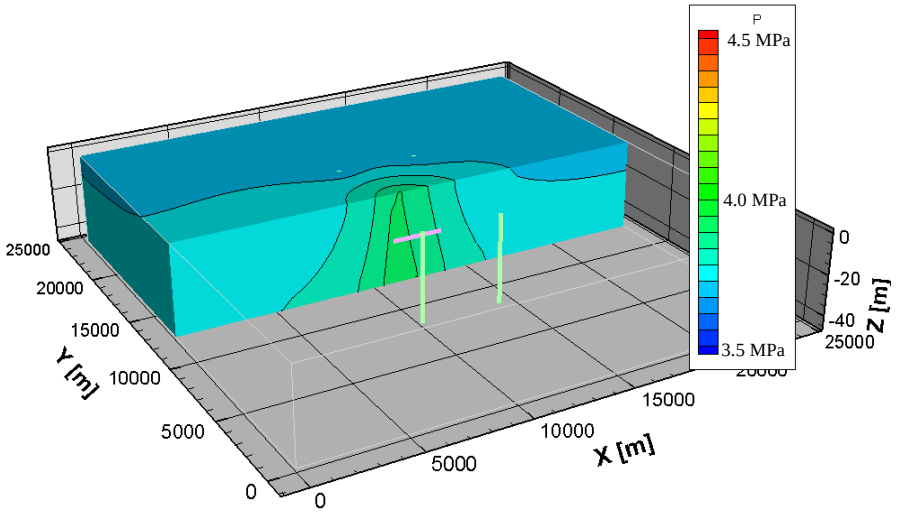


図 3.I.1-7　水平井での圧入後 50 年時点の圧力分布

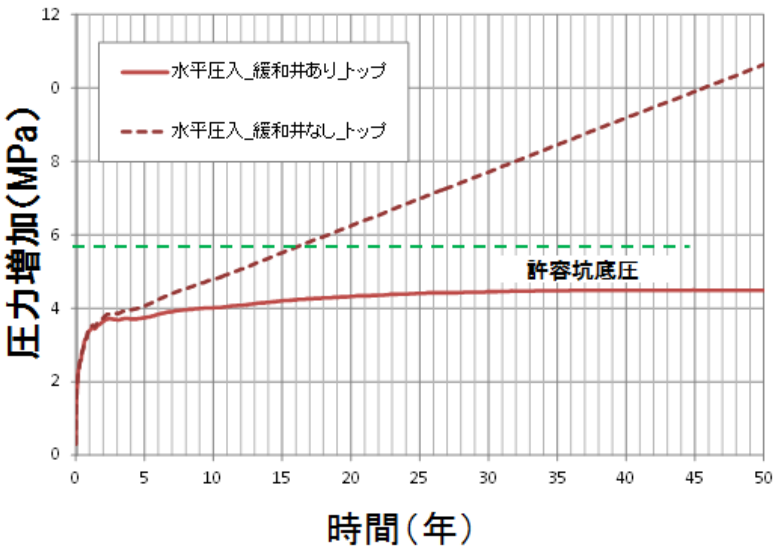


図 3.I.1-8　水平井圧入時の坑井近傍の地層圧力の経時変化

実際の貯留層への適用のためには、貯留サイトに即した地層特性での検討が必要ではあるが、大規模貯留での複数坑井システムの有効性評価のためのツールや方法論は整備されたといえる。

⑤　キャップロックの遮蔽性能評価

CO_2 地中貯留におけるキャップロックの遮蔽性能評価に関連して、地下 1,000m に相当する条件（10MPa、40˚C）において、超臨界 CO_2 に対するスレッショルド圧 P_c^{th} の測定を行った。この際に、岩石の P_c^{th} のばらつきの範囲を粒子構造から特定するモデルの構築を目指して、サイズや形状、組成を制御した焼結体を作製し、P_c^{th} と浸透率 k の関係を求めた。両者の相関性に関して、球状粒子の最密充填構造は両対数グラフ上で傾きが－0.5 の直線となることが理論的に知られている。本事業では、焼結体の測定に先立ち、スロート径が既知のキャピラリプレート試料に対する P_c^{th} を測定することにより、この直線（最密充填直線）を下記の通り決定できることに成功した。

$$P_c^{th} = 377.7\, k^{-0.5} \qquad \text{（式 1）}$$

この関数は、岩石の複雑な内部構造をモデル化していく上で基本となる。一部の温度条件については補正が必要であるが、通常は異なる深度や塩分条件においても適用可能である。

図 3.I.1-9 には、最密充填直線と併せて、全ての焼結体について P_c^{th} と k の相関性を示した。初めに、0.1、0.2、0.5、1、5 および 10μm の各球状シリカ粒子からなる均一粒径試料は、焼結助剤や焼結温度の違いに起因した粒子のパッキング状態の違いに依存して、最密充填直線の周囲に分散することが明らかとなった。これに対して、上記の球状シリカ粒子のうちサイズの異なる 2 成分からなる混合粒径試料の P_c^{th} は、サイズの組み合わせや混合比に関わらず、その大半が均一粒径試料と比較して同等あるいは低くなった。したがって、P_c^{th} は均一粒径での最密充填からのずれの効果により低下するが、粒径分布の効果によりさらに低下する。このことは、P_c^{th}－k の両対数グラフにおいて、均一粒径試料と混合粒径試料に対する近似直線の傾きの違いからも示唆された。しかしながら、後述のように、岩石の傾きは球状粒子の焼結体よりもかなり小さいことから、球状粒子の不均一性の効果だけでは岩石の傾向は説明できないことが明らかとなった。

均一粒径：$P_c^{th} = 525.6\, k^{-0.62}$　（式 2）

混合粒径：$P_c^{th} = 210.2\, k^{-0.43}$　（式 3）

同様に、粉砕シリカ、平板状シリカおよび平板状マイカとこれらに球状シリカを種々の比率で混合させた焼結体も、ほぼ全てが最密充填直線近傍、特にその下側にプロットされた。ただし、これらの焼結体の一部を除くと、式 2 や式 3 と比較して傾きの小さなトレンドが見受けられた。現状では岩石のばらつきの範囲をカバーするには至っていないが、このような非球状粒子の焼結体の結果

からは、岩石の P_c^{th}－k の相関性に対して粒子形状の効果の寄与が大きいことが示されたと言える。

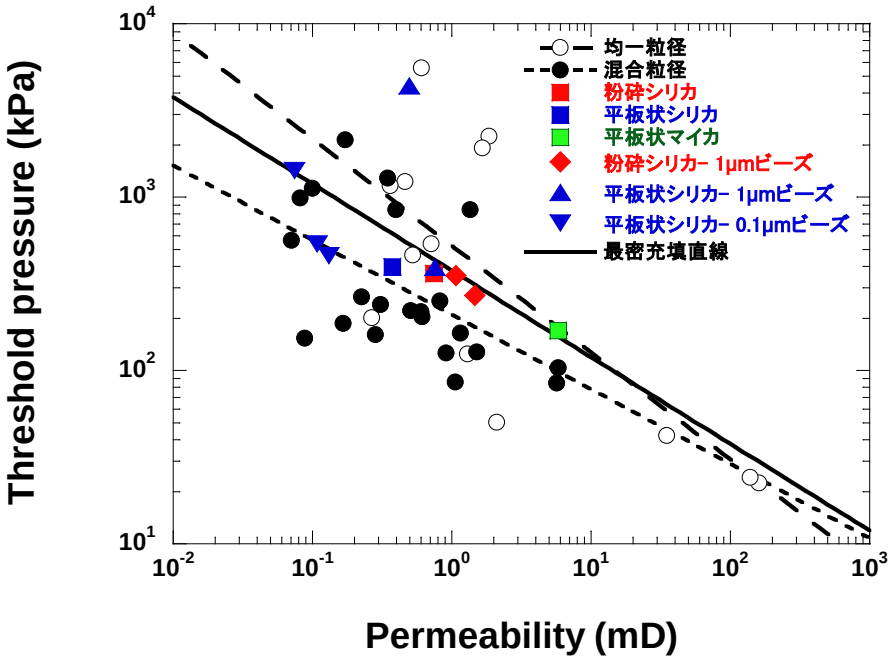


図 3.I.1-9　焼結体試料のスレッショルド圧－浸透率の相関性

次に、焼結体に基づいた相関性モデルを天然系に拡張するために、国内で産する第三紀～第四紀の岩石（泥岩および砂岩）を対象として遮蔽性能を評価した。ここでは、特に CO_2 の注入に伴う間隙圧の増加（有効応力の低下）の効果を解析するために、種々の有効応力条件において k および P_c^{th} を測定した。全般的に、有効応力の低下とともに k が増加し P_c^{th} が減少する傾向が得られたため（図 3.I.1-10）、CO_2 注入により遮蔽性能の機能が弱まる可能性が示唆された。しかしながら、この際の変化の大きさは岩石の種類により著しく異なり、その結果 P_c^{th} と k の相関性にも差異が生じることが見出された（図 3.I.1-11）。すなわち、岩石への載荷過程において、初期の弾性変形領域では岩石種に依存して P_c^{th} と k の相関性の有無に違いがあったが、その後の塑性変形領域ではいずれの岩石についても P_c^{th} と k に明瞭な相関性（両対数グラフ上での直線性）が確認された。

泥岩：$P_c^{th} = 0.1\,k^{-0.30}$　　（式 4）

なお、一度塑性変形した岩石は除荷した後もこの直線上で推移した。相関性に関するこのような変化の原因として、地下から採取された岩石（地表で得られる転石を含む）は応力が開放された空隙率が高い構造となっている点が挙げら

れるが、これらの試料を用いて地下における遮蔽性能を評価する際の方法論として、埋没深度条件までの載荷が不可欠であることが示唆された。

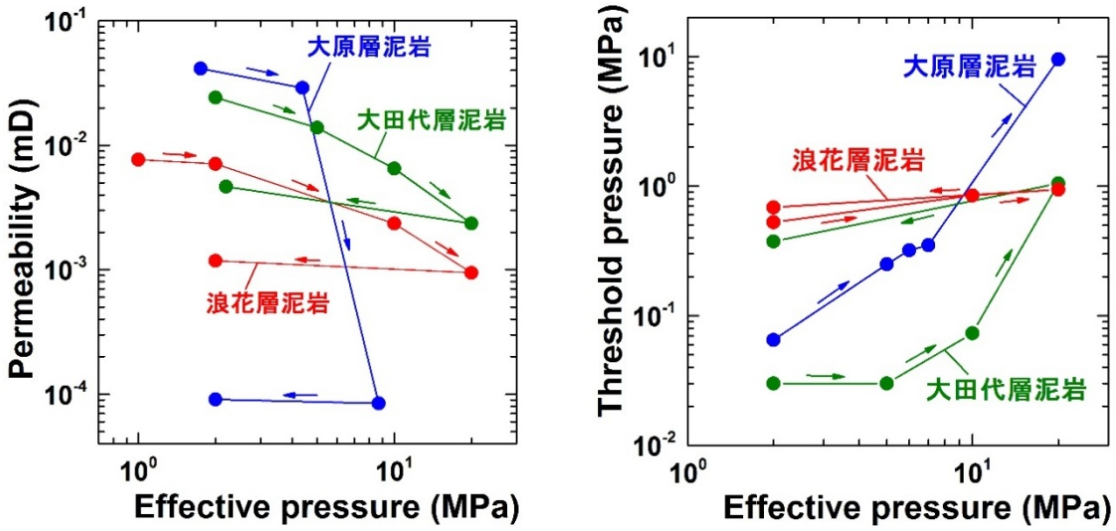


図 3.I.1-10　岩石の遮蔽性能の有効圧依存性
（左：浸透率、右：スレッショルド圧）

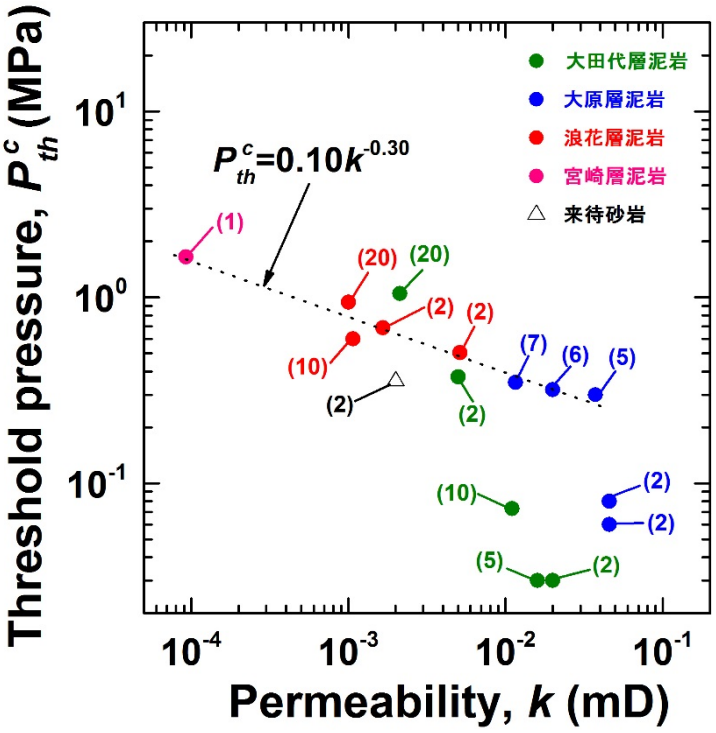


図 3.I.1-11　各有効圧条件下におけるスレッショルド圧と浸透率の関係:（ ）内は有効圧条件を示す。

本事業で得られた $P_c^{th}-k$ の相関性モデルに関して、ナノスケールのポアスロートでは流体を連続体として扱う概念が使えなくなるため、キャップロックの

ような低浸透率の試料に対して適用できなくなる可能性がある。そこで、地下1,000m の条件下での CO_2 に対するクヌーセン数を算出し、どのような岩石において CO_2 が非連続流体となるかに関して、モデルの適用性の検討を行った。その結果､最密充填構造では 100nD 以下の k において CO_2 が非連続流体となり P_c^{th} の概念が成り立たなくなるが、実際の岩石は単一ではなく様々なスロート径を有するため、より低浸透率側までモデルが適用され得ることが結論として得られた（図 3.I.1-12）。いずれにしろ、モデルの真の限界を知るためには、岩石の浸透率とポアスロート径分布の測定値を直接照合させたデータセットの拡充が不可欠であることが示唆された。

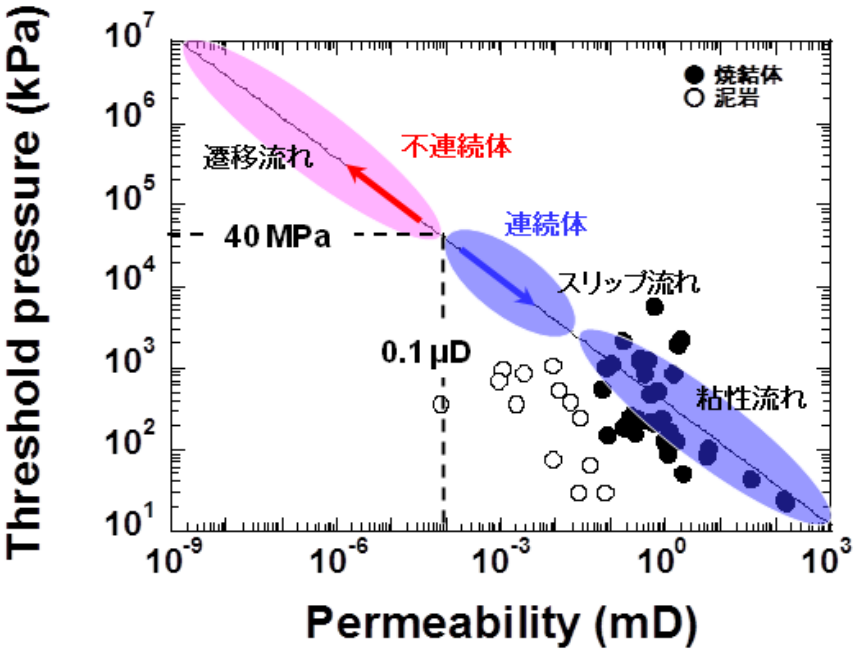


図 3.I.1-12　焼結体と岩石におけるスレッショルド圧ー浸透率の相関性の比較

（２）　広域地下水流動解析手法の開発

本事業では、沿岸域モデル地点の地質調査の公開データを収集、陸と海をつなぐ水理地質モデルの構築を通じ、広域地下水流動解析手法の開発を実施した。

沿岸域の地中貯留サイトでは、CO_2 圧入によって地下水流動場が変化する可能性が考えられ、広域地下水流動解析により塩水および CO_2 プリュームの挙動を把握する必要がある。米国環境保護局（EPA）の CCS 関連法制度では、圧入 CO_2 や深部地層水の移行により、地下飲料水の水源が危険にさらされる可能性がある圧入井周囲の領域を事前に評価することが求められている。さらに、CCS プロジェクトの期間中、定期的に評価エリア（Area of Review）を再評価することも要求されている。

我が国においても、経済産業省が平成 20 年に作成した「CCS 実証事業の安全な実施にあたって」において、地下水流動に関係した事項については、

・広域モデルを構築し、地下水流動についても可能な範囲で考慮しつつ圧入された CO_2 の影響を大局的に把握・予測し、影響の及ぶ範囲の予測・限定を行う。

・地下流体の地表湧出点がある場合には、湧出流体の流量及び化学的特性を可能な限り監視すべき。

・発生しうる異常事態の想定と優先順位の付与において、想定される影響に地下水への CO_2 漏出が含まれる。

と記されている。

これらの理由のため本事業では、苫小牧大規模実証試験を対象に、海域と陸域をつないだ海陸シームレス水理地質モデルを構築した。陸域は河川の集水域に基づいた流域境界、海域は海岸線から 30 km 沖合を含んでおり（図 3.I.1-13）、地下水の塩分濃度分布の概算値も組み込まれている。

地下水流動解析には 3 次元密度流解析コード SEAWAT を使用した。作成した水理地質モデルの境界条件、物性値を設定したした後に、非定常解析を実施し、地下水位と塩分濃度の観測値と解析結果を比較することにより、水理地質モデルの妥当性を検証した。

さらに、検証されたモデルを用いて、CO_2 圧入の影響評価の予備解析を実施した。予備解析では、文献資料の解析事例を参考にして、CO_2 の代わりに密度変換した水を圧入し、地下水流動場の変化を求めている。萌別層に 1 年間で 25 万トンの CO_2 を圧入した場合に相当する解析ケースの結果では、貯留層内で圧入地点から 1 km 離れた地点において、水平・垂直方向とも地下水流速は 1×10^{-5} m/day 以下と非常に小さく（図 3.I.1-14）、また圧入 100 年後における塩水および CO_2 プリュームの移行距離も小さいため、環境影響は無視できることが示された。

このように広域地下水流動解析手法は、苫小牧大規模実証試験における地下水への環境影響評価に適用された。今後実施すべき課題としては、これまで水

の圧入によって CO_2 圧入を模した流動解析を行っていたものを、CO_2 の圧入に変え地化学反応の影響も調べること等が挙げられる。

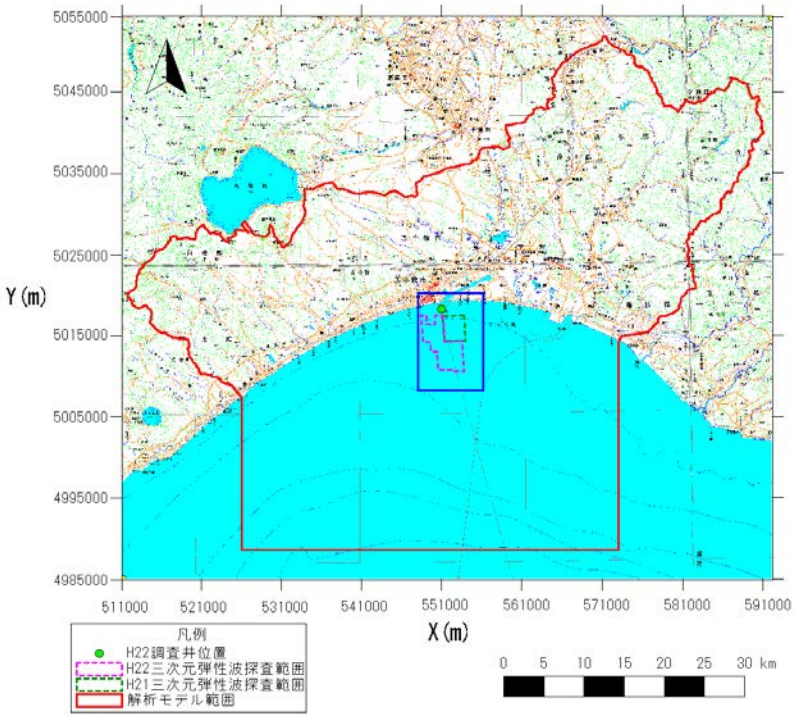


図 3.I.1-13　苫小牧大規模実証試験を対象にした広域地下水流動解析範囲

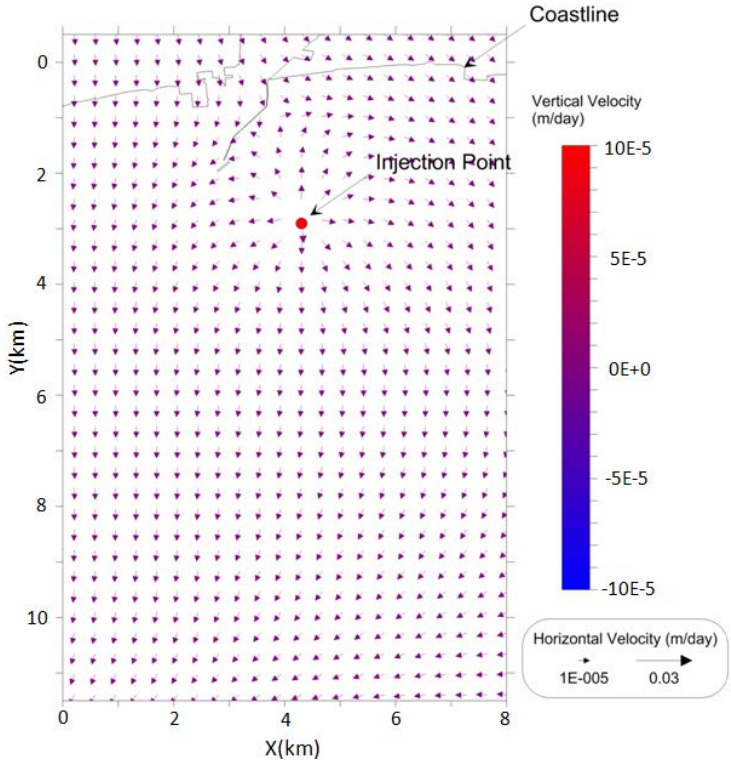


図 3.I.1-14　萌別層に年間 25 万トン圧入により変化した地下水流動場。
矢印の向きと大きさが水平方向流れを表し、色が鉛直方向流れを表す。

2. 貯留層内の CO_2 挙動解析手法の開発

（１）長期挙動予測手法の開発

CO_2 地中貯留では、圧入した CO_2 がどのような挙動をするかを予測することが重要な課題である。地中の CO_2 は、圧入直後は遮蔽層によって上昇が抑えられるが、一部は毛管圧力によって孔隙から移動できない状態になり（残留ガストラップ）、一部は地層水に溶解していき（溶解トラップ）、さらに溶解した CO_2 と岩石鉱物とが地化学反応を起こすことによって固体として沈殿（鉱物固定）していく。このように、圧入した CO_2 の分布範囲を求めるだけでなく、どのような状態になっているかを求めることが必要である。

本事業では、日本で最初の地中貯留が行われた長岡サイトでの CO_2 トラッピングメカニズムを把握すること、CO_2 の長期挙動予測を行うシミュレーターの開発を行うこと、岩石試料内での詳細な CO_2 挙動観測を行うことでアップスケーリングの手法を探ること等を通じて、CO_2 長期挙動予測の実用化に取り組んだ。

① CO_2 挙動の継続モニタリング

我が国で最初に CO_2 圧入試験が行われた長岡サイトでは、CO_2 挙動解析のため複数のモニタリング種目を継続的に実施してきた（図 3.I.2-1）。長岡サイトは海外の地中貯留サイトと比べ地層水の塩分濃度が小さく、CO_2 溶解ポテンシャルが大きく、溶解トラッピングと鉱物トラッピングが起きやすいことが期待されているだけでなく、CO_2 圧入終了後から 10 年以上の観測が実施され、各種のトラッピングが観測されている貴重なサイトであるといえる。本事業では、長岡サイトでの継続モニタリングを通じて、地中での CO_2 長期挙動に関する知見を得た。

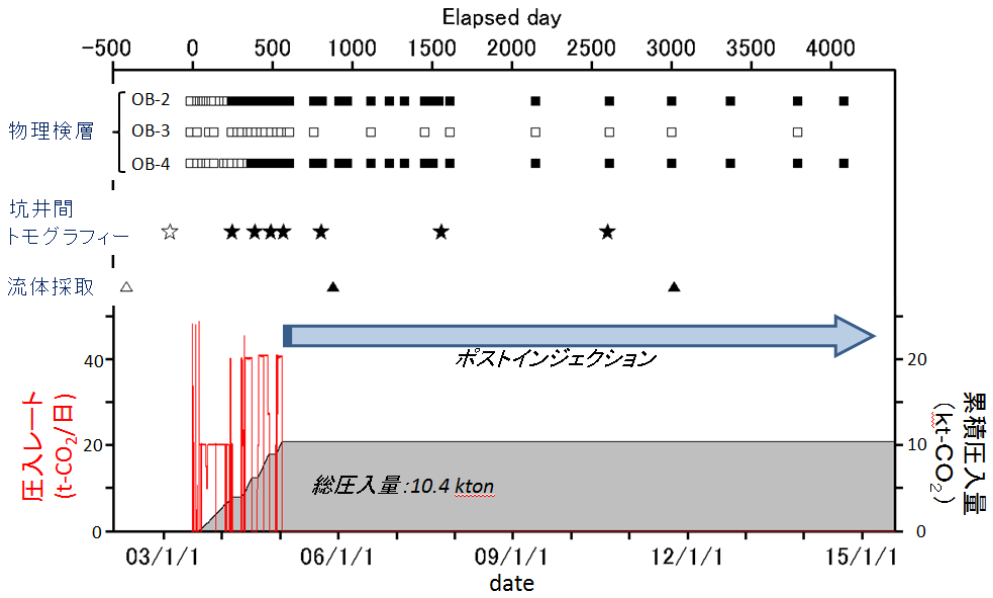


図 3.I.2-1　長岡サイトの CO_2 圧入とモニタリング観測の履歴

a. 物理検層

長岡サイトでは、観測井を利用して継続的に中性子検層、音波検層、インダクション比抵抗検層が実施されてきた。CO_2 飽和度が一番変化の大きかった深度（OB-2 で 1,116.0m、OB-4 で 1,090.1m）の各検層結果の経時変化を図 3.I.2-2 および図 3.I.2-3 に示す。このような微細な変化の検出は、同一の機器で同一の測定方法を採用したことにより可能であったといえる。

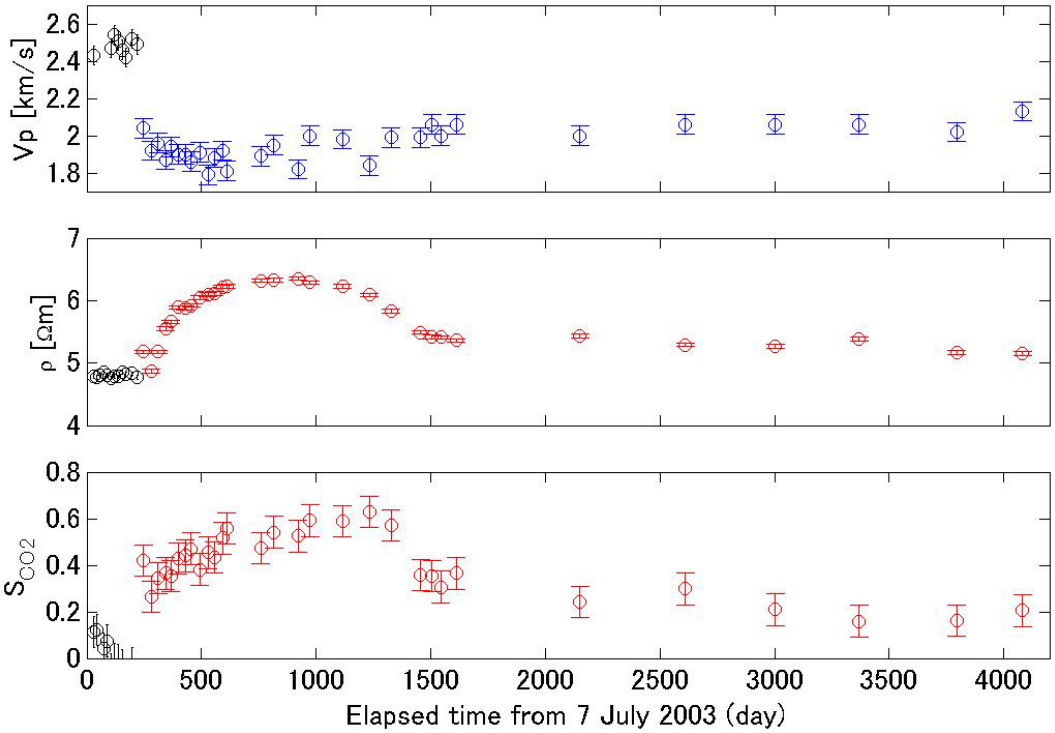


図 3.I.2-2　観測井 OB-2 深度 1,116m での音波速度（Vp）、比抵抗（ρ）、CO_2 飽和度（S_{CO2}）の経時変化

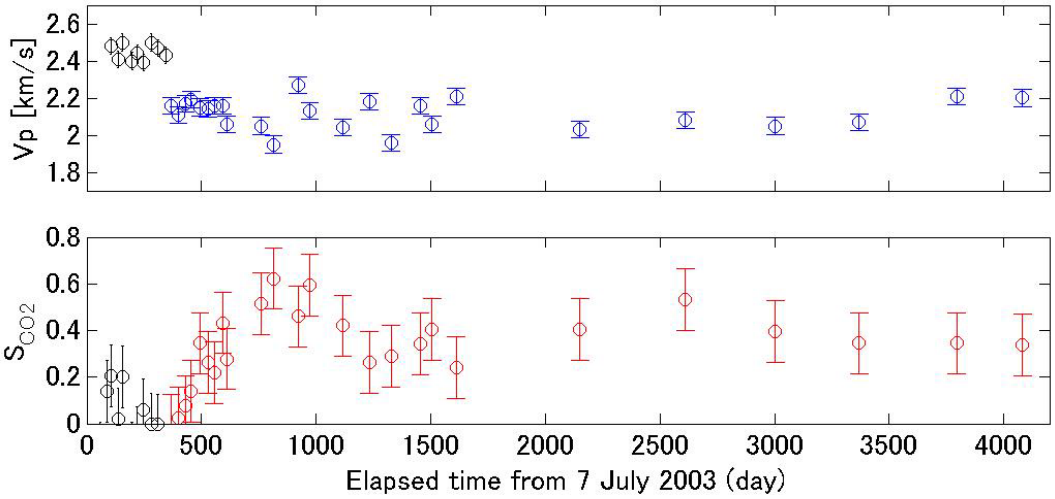


図 3.I.2-3　観測井 OB-4 深度 1,091m での音波速度（Vp）、CO_2 飽和度（S_{CO2}）の経時変化

観測井 OB-2 では CO_2 圧入終了後、飽和度が最大になった後減少に転じ、その後は徐々に減少していき、一定値に漸近していくように見える。このことから OB-2 ではインビビション過程が進行していると考えられ、漸近値は圧入対象層の残留 CO_2 トラップ量を示していると考えられる。一方、観測井 OB-4 では、圧入停止後、CO_2 飽和度が最大となったあと、その後一時減少したが、CO_2 飽和度は高いレベルにある。

この違いは、圧入井（IW-1）と観測井の深度の違いによって生じていると考えられる。CO_2 を圧入した貯留層は圧入対象領域において 15 度の傾きがあり、同じ地層面が OB-2、IW-1、OB-4 の順に深度が浅くなっていく。OB-2 では圧入停止後、OB-2 より深部にあった CO_2 が浮力によって上昇していき、インビビション過程が進行していると考えられる。一方 OB-4 では、圧入停止後もより深部の CO_2 が移動してきていると考えられ、まだ残留 CO_2 トラップ量よりも過剰な超臨界 CO_2 が存在し、CO_2 飽和度が高い状態にあると考えられる。この状況は、CO_2 挙動シミュレーションで得られている CO_2 分布とよく合っている。

図 3.I.2-4 に、OB-2 での比抵抗検層の変化率の経時変化を示す。正に変化した所は超臨界 CO_2 が存在していることを示しており、負に変化した所は溶解 CO_2 が存在していることを示している。このように狭いインターバルで CO_2 の存在形態が異なるのは、地層の不均質性による影響である。また溶解 CO_2 の分布範囲が厚くなっていく傾向は、溶解 CO_2 の拡散や対流を表していると考えられる。

ここで得られた観測結果は、観測される物理量である音波速度や比抵抗値から、貯留に関する物理量の CO_2 飽和度を結び付ける岩石物理モデルを作成するために用いられた。音波速度では岩石の不均質性の程度を考慮すること、比抵抗に関しては溶解 CO_2 による比抵抗低下の影響を考慮してモデルを作成できることが、長岡サイトのデータを用いることによって明らかとなった。

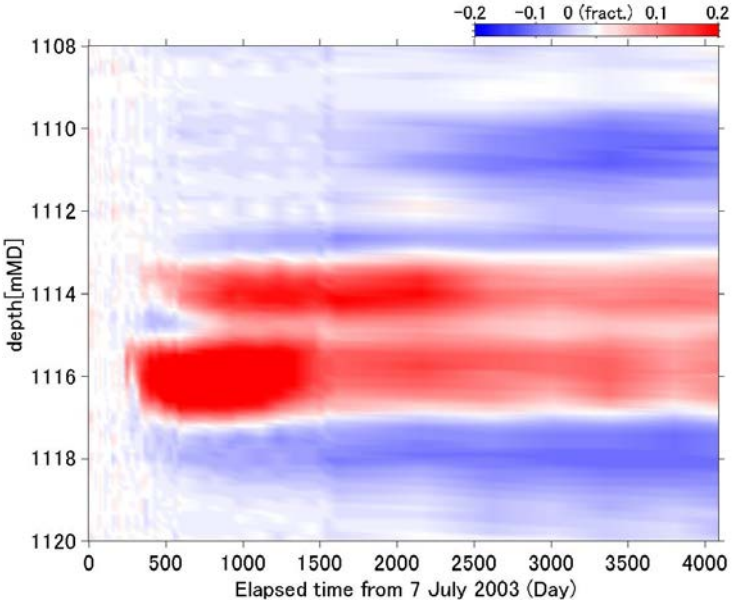


図 3.I.2-4　OB-2 での比抵抗変化率の経時変化

長岡サイトでの物理検層より、地中での微細な変化を観測するための測定法、および観測量と貯留量を結ぶ岩石物理モデル作成をするための方法論が実用化できることが示された。

b. 坑井間弾性波トモグラフィ

坑井間弾性波トモグラフィは、探査対象を取り囲むように配置した複数の観測井で測定を実施し、坑井間の速度分布を面的に把握する手法である。坑井間の速度分布を調べることにより、圧入された CO_2 の分布を速度低下域として把握することが可能である。長岡サイトでは圧入した CO_2 の挙動を経時的に、繰り返し坑井間弾性波トモグラフィによって調べた。

弾性波トモグラフィの測定は、ベースライン測定を含めて 8 回実施している（図 3.I.2-1）。CO_2 圧入前のベースライン測定（BLS）、CO_2 圧入中の約 3,200 トン、約 6,200 トンおよび約 8,900 トンの各段階でモニタリング測定（MS1～MS3）を実施し、圧入量約 10,400 トンで終了した直後（MS4）および圧入後 9 か月後、2 年 9 か月後および 5 年 9 か月後（MS5～MS7）にそれぞれ実施している。

図 3.I.2-5 は MS7 測定時の 3 つの観測井を用いた断面を示しており、CO_2 プリュームの形状もモニタリングできることを示している。特に、OB-3 近傍までには CO_2 が到達していない事が分かる。図 3.I.2-6 に圧入中の測定である MS1 から MS4 までの速度変化率断面を示す。全ての結果において、圧入位置を中心に速度低下域が認められる。MS2 では速度低下域の断面左上方への広がりが認められる。MS4 以降は分布域の変化がほとんど観測されていない（図 3.I.2-7）。また、圧入された CO_2 はキャップロックを透過して漏洩することなく，安全に貯留されていることが明らかになった。

これらの解析では波線理論を用いているが、探査に用いた弾性波の周波数に応じた影響範囲を考慮する波動理論を用いた解析も実施しており、その結果では物理検層結果と同等の速度低下量が求められている。このように、坑井間弾性波トモグラフィを長岡サイトに適用することにより、CO_2 プリュームの形状把握のために実用化された技術であることが示された。

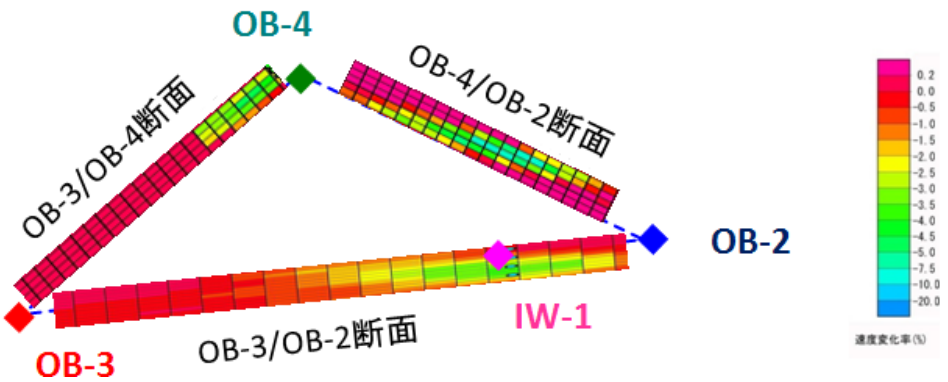


図 3.I.2-5　MS7 における 3 つの観測井を用いたトモグラフィ断面

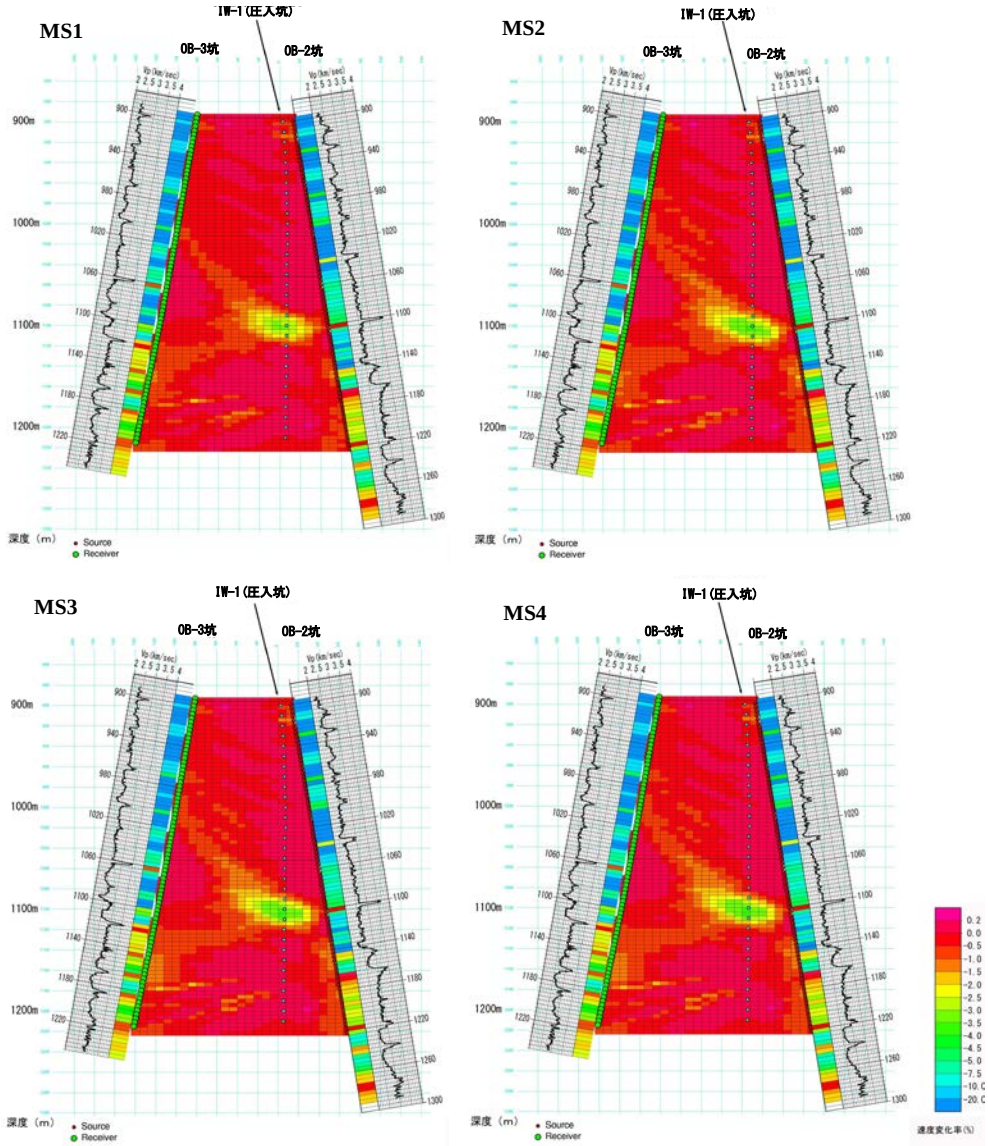


図 3.I.2-6　MS1 から MS4 における速度変化率（OB-2/OB-3 断面）

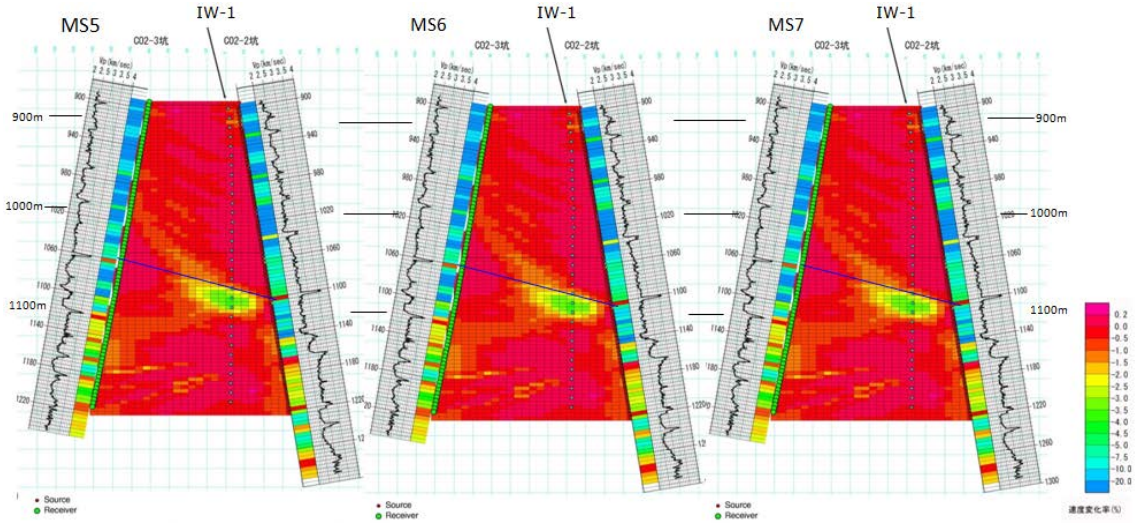


図 3.I.2-7　MS5 から MS7 における速度変化率（OB-2/OB-3 断面）

c. 流体採取ならびに地化学特性評価

長岡サイトでは貯留された CO_2 の溶解トラップの進行が確認され、鉱物固定も示唆された。これらの成果は、貯留層から流体サンプルを採取したことによって得られた。ここでは長岡サイトでの地化学反応結果を事例研究として、地化学特性評価手法の開発を行った。

CO_2 圧入前に圧入井 IW-1 からコアと地層水を採取した。CO_2 圧入後には観測井 OB-2 から Cased-Hole Dynamics Tester（CHDT）を使い、流体を 2 回採取した（図 3.I.2-8）。第 1 回流体採取により、赤で示した比抵抗値の増加深度では超臨界 CO_2 の存在が、青で示した低下深度では溶解 CO_2 の存在が確認された。第 2 回流体採取では深度 1,118.0m ではカルサイトの飽和指数が 0 より大きく、沈殿可能な条件下にあることが明らかとなった（図 3.I.2-8 右）。図 3.I.2-9 に示した経時変化においても、溶解 CO_2 濃度は増加傾向にあるが Ca 濃度は一度増加したのちに減少に転じたこともカルサイトの沈殿を示唆している。一般に貯留層条件では pH は 3 程度に低下するとされているが、本事業で開発した高圧下での pH 計測法によると pH は 5.4 であった。CO_2 溶解により地層水の pH が低下するものの、貯留層内のケイ酸塩鉱物の溶解により地層水が中和され、炭酸塩が沈殿できる環境になったと考えられる。地層水の中和は Si、Mg、Fe などの陽イオン濃度が他の深度より高いことからも示されている。

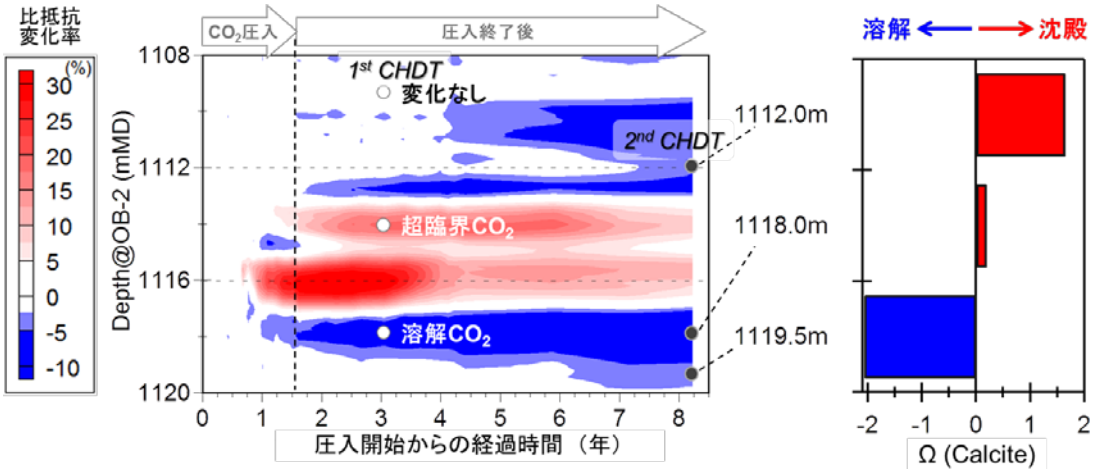


図 3.I.2-8　OB-2 における流体採取ポイントならびにカルサイトの飽和指数

○：平成 17 年度 CHDT 流体採取深度（1,108.6m, 1,114.0m, 1,118.0m）

●：平成 23 年度 CHDT 流体採取深度（1,112.0m, 1,118.0m, 1,119.5m）

② 地化学反応を組み込んだ CO_2 長期挙動シミュレーション技術の開発

CO_2地中貯留技術の実用化に当たり、CO_2影響範囲の事前予測、および圧入後の長期挙動予測のためには、貯留層の地質特性とCO_2の物理化学特性を考慮した

二相流シミュレーションが必要不可欠な技術である。本事業では、実証規模の貯留サイトにも適用可能なCO_2長期挙動シミュレーターの開発を行った。

地中での流体挙動の把握という点において、既存の石油天然ガス層シミュレーターと類似点があるが、CO_2地中貯留事業特有の課題を挙げると、

- 石油天然ガス層シミュレーションでは計算期間が50～100年であるのに対し、CO_2地中貯留では1,000年以上の長期予測計算が必要である。
- CO_2地中貯留では、地層水へのCO_2溶解が重要なトラップメカニズムのひとつとなるため、溶解現象を考慮する必要がある。
- CO_2溶解地層水と岩石生成鉱物との反応が起こりえるので、岩石鉱物の溶解・沈殿を含めた地化学反応を予測する必要がある。

これらの機能を有するシミュレーターとして、GEM-GHGとTOUGH2が海外でも良くつかわれており、この2つのシミュレーターの比較・検討を行った。GEM-GHGは、既存の商用石油天然ガス層シミュレーター（GEM）にCO_2地中貯留に特有なモジュールを追加することにより開発された。一方TOUGH2は、米国LBNLで開発された多相系シミュレーターで、地下水流動、地熱開発、放射性廃棄物の地層処分等の分野で幅広く利用されており、超臨界CO_2の流体特性が組み込まれたモジュールが開発されてから、世界各国のCCS分野でも広く使われるようになっている。

長岡サイトでのCO_2挙動を計算するために、GEM-GHGとTOUGH2の両方において、作成した地質モデルでシミュレーションを実施した。さらに、観測された坑底圧力変化やCO_2モニタリング結果とのヒストリーマッチングも実施した。図3.I.2-11にマッチング後の坑底圧の変化を示し、図3.I.2-12に坑井間弾性波トモグラフィ結果と比較したCO_2プリュームの断面を示している。このように、モニタリング結果と合うように地質モデルを修正していく手法が実適用できることを確認した。初期の地質モデルが更新され、長期挙動予測の信頼性を高めることができることも示された。

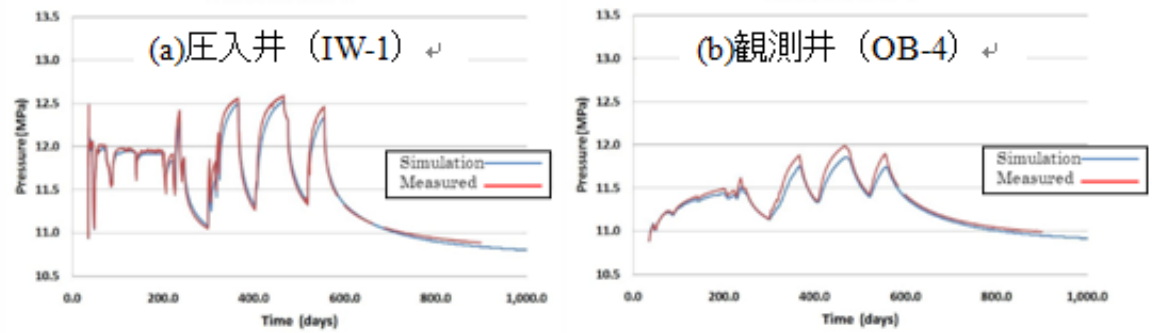


図 3.I.2-11　圧入井（IW-1）と観測井（OB-4）の圧力変化のマッチング結果

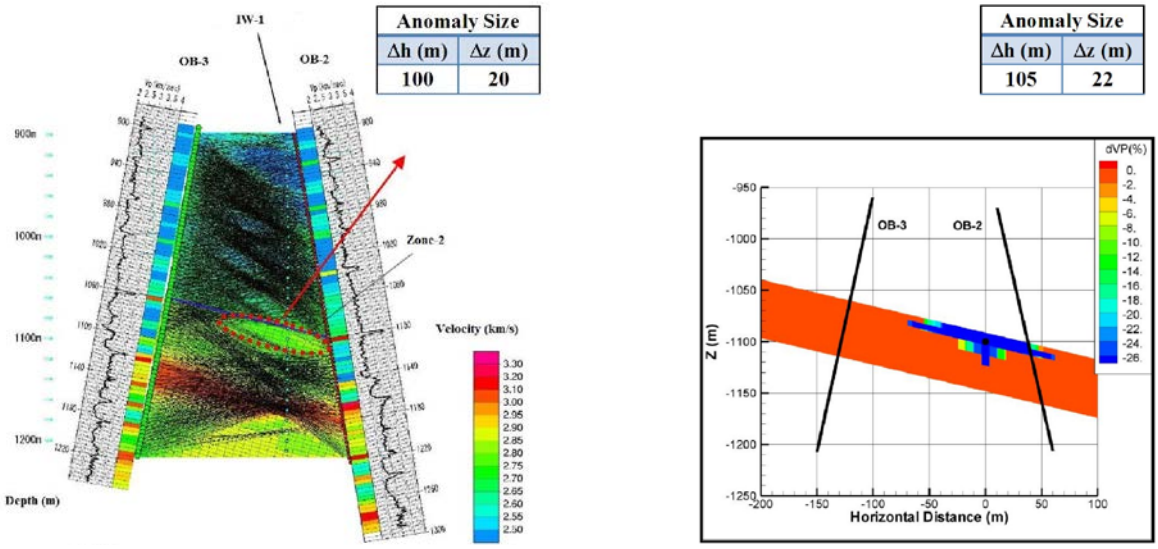


図 3.I.2-12　OB-2/OB-3 間トモグラフィ結果（左）と TOUGH2 の解析結果（右）

この比較の後、TOUGH2の方がソースコードから利用可能であり、ユーザ自身で任意のプログラムを付加することができる利点があるため、TOUGH2の使用環境の整備を進めることとした。

まずTOUGH2だけでは、任意の地質モデルの作成と計算結果を図示することができなかったため、それらのためのインターフェースを完備することとした。このツールとして、仏国BRGMで開発されたTOUGH2'LBOXを用いることとした。TOUGH2'LBOXでは、地質モデル作成の標準的なツールであるSchlumberger社のPetrelの出力データをTOUGH2の入力データに変換するとともに、モデルの修正、結果の図表示が可能である。このツールにはいくつか不具合が見つかったが、BRGMとの共同研究を通じて完成度の高いツールとなった。

次に、地化学反応を組み込んだ計算のため、TOUGH2系のシミュレーターであるTOUGHREACTコードの改良を行った。ひとつは、岩石試料の流動特性（毛管圧力曲線および相対浸透率曲線）測定で多く報告されている履歴性（ヒステリシス）特性を取り入れることである。もうひとつは、計算速度向上のために、並列化を行うことである。これらの改良を行ったコードを用いて、長岡サイトの地質モデルに適用した。図3.I.2-13は、ヒステリシスの有無によりCO_2分布がどの程度変わるかを示したものである。ヒステリシス性があることによりダウンディップ側でCO_2分布が高いことが分かり、ヒステリシスがない場合にはアップディップ側でCO_2分布が広く広がっており、圧入停止後にCO_2が浮力で上昇していく影響が強く表れている事を示している。

また、図3.I.2-14は、長岡サイトでCO_2がどのような状態になっていくかを1,000年までの長期予測したものである。超臨界のCO_2は徐々に減ってきている一方、鉱物固定されるCO_2が増えてきていることを示していて、長岡サイトで安全に貯

留されることを示している。TOUGH2系のシミュレーターで地化学反応まで取り込んだ長期挙動予測の適用性について検証できた。

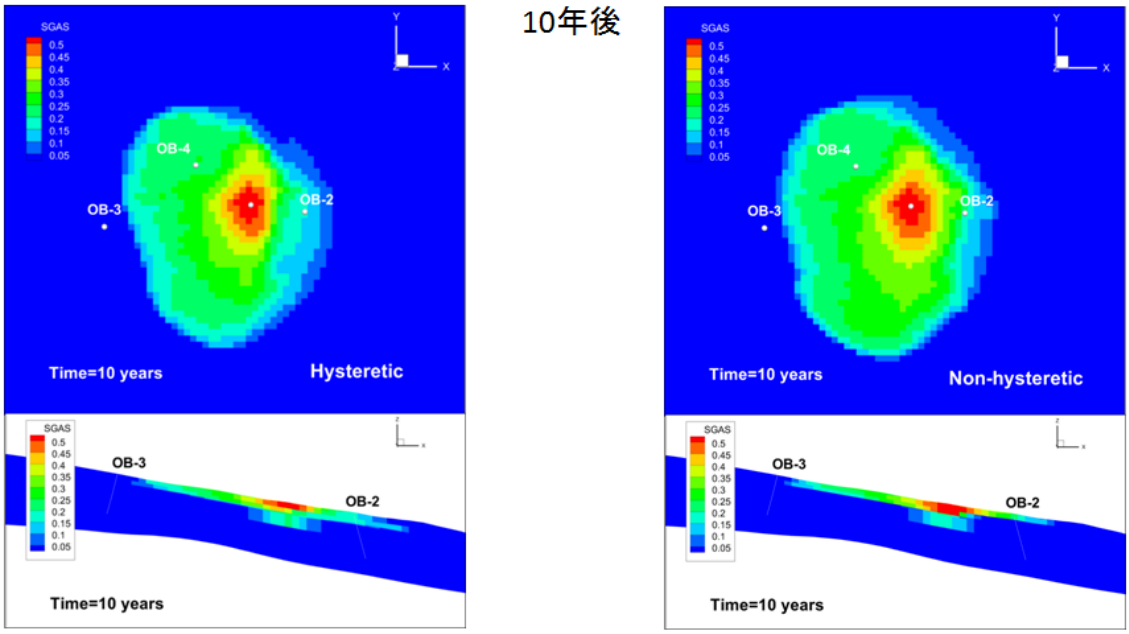


図3.I.2-13　長岡サイトの挙動シミュレーションでのヒステリシス有（左）の場合とヒステリシス無（右）の場合の圧入後10年のCO_2分布比較

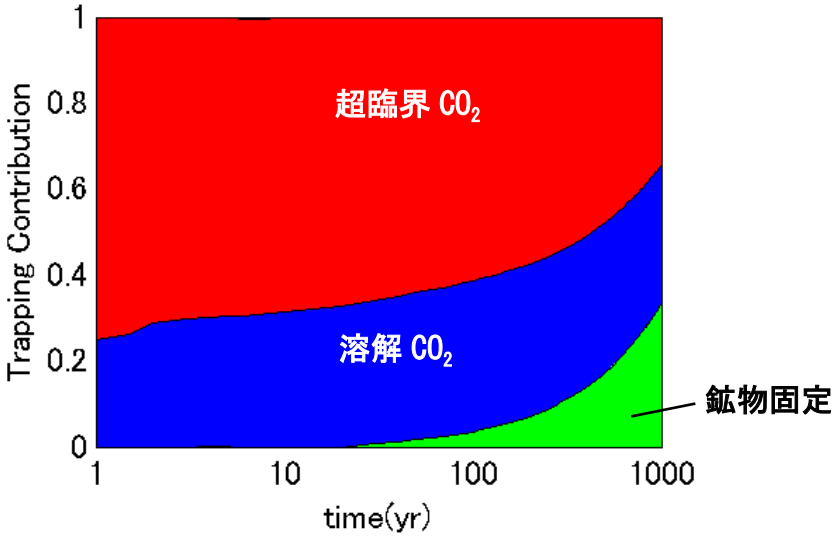


図3.I.2-14　長岡サイトでのトラッピング寄与率の経時変化

③　X 線 CT 装置を用いた CO_2 挙動解析

貯留層内部での CO_2 トラッピングメカニズムの解明は、貯留ポテンシャルの評価だけでなく、CO_2 飽和度の経年変化予測にとっても重要である。岩石試料を用いて、CO_2 が孔隙中の塩水を置換するドレネージ過程と、塩水が流れ込むイン

ビビション過程における CO_2 分布を観測すれば、貯留層での CO_2 のトラッピングと移動のメカニズムが理解できる。本事業では、医療用 X 線 CT 装置を用いて岩石内部の CO_2 と塩水の分布をリアルタイムに観測すると同時に、代表的な岩石物性である P 波速度の同時計測を行った。

まず、乾燥時と塩水飽和時の試料の CT 値から孔隙率分布が得られる（図 3.I.2-15）。次に、孔隙が CO_2 あるいは塩水で各々完全飽和されたときの CT イメージと流動実験時の CT イメージから、流動実験中の CO_2 飽和度分布が得られる。図 3.I.2-16 はドレネージ時の CO_2 分布で、浸透性の高い層を CO_2 が選択的に流れている。ドレネージの流路パターンは、キャピラリー数（CO_2 の流速×動粘性係数÷CO_2／塩水境界の表面張力）に支配される。キャピラリー数が 10^{-5} より十分大きい時、注入された CO_2 の大部分は塩水と入れ替わる。しかし実際の貯留層では、圧入井のごく近傍以外ではこの値より小さくなるので、CO_2 貯留メカニズム解明のためには低流速条件で実験を行う必要がある。本実験でのキャピラリー数は 7×10^{-8} であるが、低流速での置換実験は世界的に見ても実施例は限られおり、非常に価値のある情報を提供する。

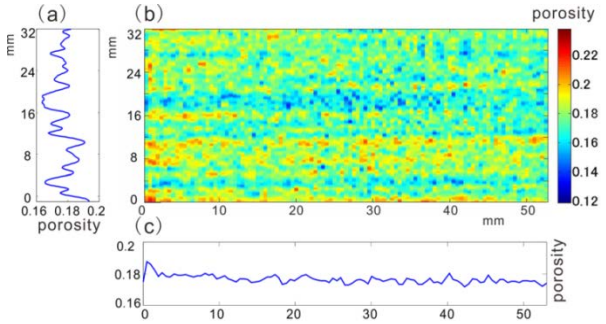


図 3.I.2-15　ベレア砂岩の孔隙率分布図

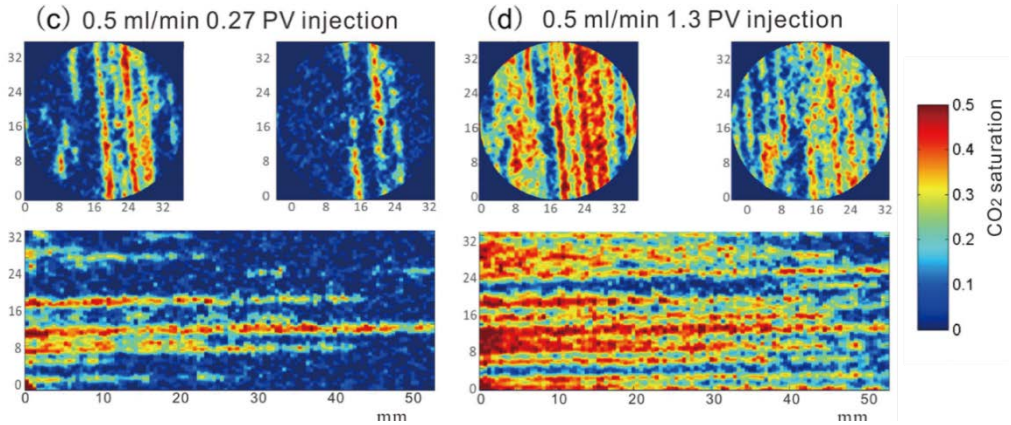


図 3.I.2-16　ドレネージにおける CO_2 飽和度分布

図 3.I.2-17 は超臨界 CO_2 のドレネージとインビビションにおける P 波速度と CO_2 飽和度との関係を示す。横軸は CO_2 飽和度、縦軸は塩水 100%状態からの相対値である。P 波速度はドレネージとインビビションで異なる値を示す。この現

象はドレネージとインビビションの際に、岩石内の高飽和度領域と低飽和度領域のサイズ分布が異なることに起因すると考えられている。ドレネージでは CO_2 飽和度の高い領域と低い領域とが大きな塊を形成するが、インビビションでは CO_2 飽和度の高い領域が塩水によって細かく分断される（図 3.I.2-18）。この差が飽和経路に違いによる P 波速度の違いの原因であることが確認された。

以上のように、(1) 低流速（低キャピラリー数）領域での超臨界 CO_2－塩水系での置換メカニズム、(2) CO_2 飽和度と P 波速度の関係と支配メカニズム、などが X 線 CT 装置によって解明された。特に後者の関係は、弾性波速度から貯留層の CO_2 量を算出するための手がかりとなるもので、CO_2 挙動解析の実用化につながる成果である。

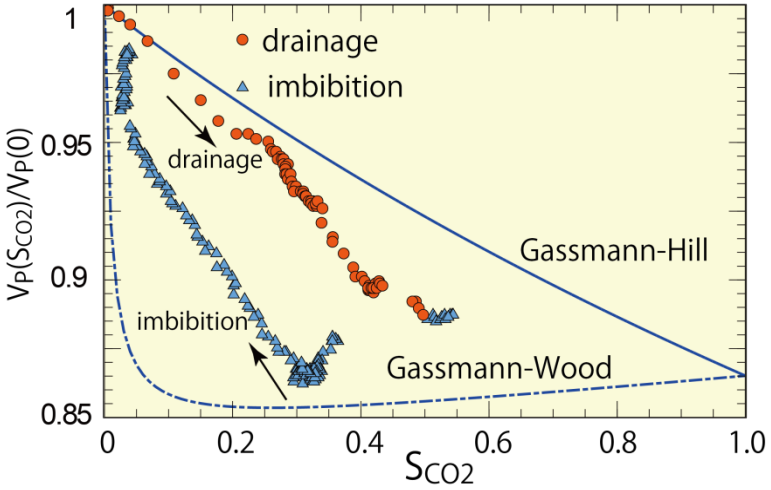


図 3.I.2-17　ドレネージとインビビションにおける P 波速度の相対変化

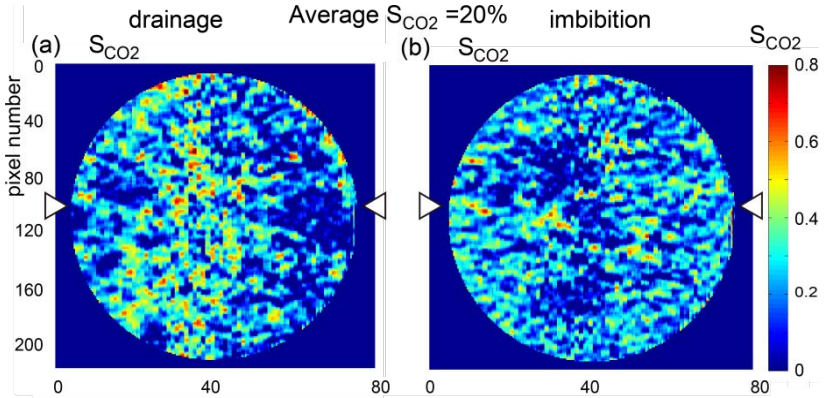


図 3.I.2-18　ドレネージ（左）とインビビション（右）における飽和度マップ

（２）CO_2挙動モニタリング手法の開発

① 常設型OBCシステムによる沿岸域モニタリング手法の開発

常設型OBCの開発は、海域CCSのモニタリングにおいて繰り返し反射法弾性波探査を高精度に実施することを目的としている。また、常時設置してデータを取得できることから、自然地震観測およびCO_2圧入に伴う微小振動観測も兼ねることができる。

本事業では、常設型OBCシステムをCCS実証試験候補サイトのひとつである北海道苫小牧市沿岸に実適用することを念頭に置き、海域CCSのモニタリングにおける実用化を目指して、システムの長期安定性と耐久性の検討を進めてきた。平成20年度に常設型OBCシステムの開発を開始し、平成22年度には浅海域用にセンサーモジュールを備えたケーブルを用いて、苫小牧沖での約2か月間の実海域試験を実施した。さらに平成23～24年度には、長期間の連続観測と繰り返し3次元反射法弾性波探査に対する実用性評価を目的として、神奈川県平塚市沖に敷設設置し、3次元反射法弾性波探査と自然地震などの微小振動の長期連続観測を行った。これらの成果を元に、平成25年度には苫小牧CCS事業の一環として、苫小牧沖に常設型OBC観測システムの現地設置が行われ、平成26年度の試験観測を経て、現在CO_2圧入前のベースライン観測が行われている。

a. 繰り返し反射法弾性波探査への適用

通常、海底下探査ではストリーマケーブル方式の反射法弾性波探査が行われているが、我が国の沿岸域では養殖漁業器具などの漁業関係施設が多く設置されており、大規模に展開するストリーマ方式の反射法弾性波探査の実施には多くの困難を伴う。一方、常設型 OBC は海底に受振器を常時設置し、必要に応じて海面で発振することにより比較的容易に反射法弾性波探査が実施できる。

常設型 OBC は、繰り返し測定の際に受信器が常に同じ位置にあることで記録の再現性を向上させることができる。また、P 波に加えて PS 変換波を取得できることから、より多くの地下情報を得ることが期待できる。

平成 23～24 年度に、平塚沖において常設型 OBC を設置し、長期間の連続観測と繰り返し 3 次元反射法弾性波探査に対する実用性評価実験が行われた。これまでの実海域実験では実用化時に直面する潮位、水温、波浪のノイズ抑制および表面波や多重反射波等の処理方法の検証も行われている。敷設した常設型 OBC 観測システムを用いて、3 回の繰り返し 3 次元弾性波探査を実施した。この解析結果例を図 3.I.2-19 に示す。

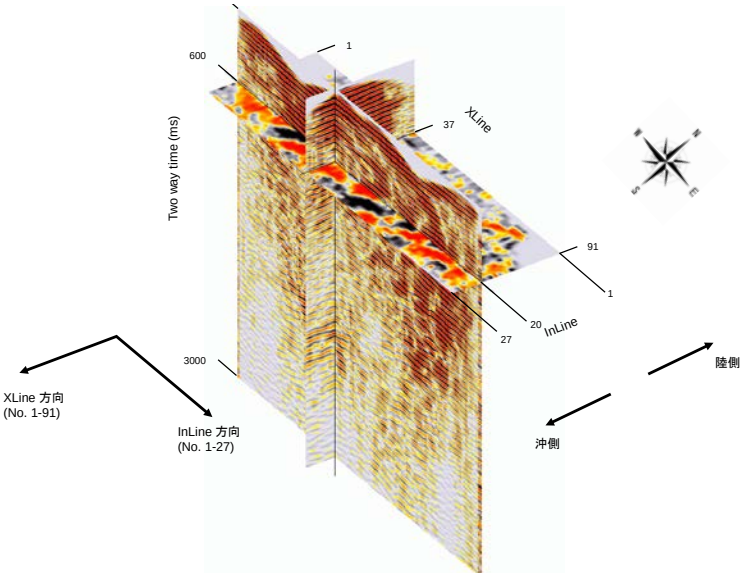


図 3.I.2-19　OBC によって得られた 3D 反射法弾性波探査解析結果

b.　自然地震観測および CO_2 圧入に伴う微小振動観測への適用

常設型 OBC で微小振動や自然地震の常時観測ができれば、陸上にある既存の地震観測網との併用によって地域防災にも貢献できる。

図 3.I.2-20 は苫小牧沖と平塚沖での自然地震の観測状況を示したものである。震源距離 150km 以内であればマグニチュード Mj＝2 以上の地震が観測できており、震源距離が 50km 以内ならマグニチュード Mj＝1 以下の微小な地震であっても、バンドパスフィルタ処理波形だけでなく原波形においても観測可能であることが判る。よって、常設型 OBC による微小振動や自然地震観測が可能であることが検証された。

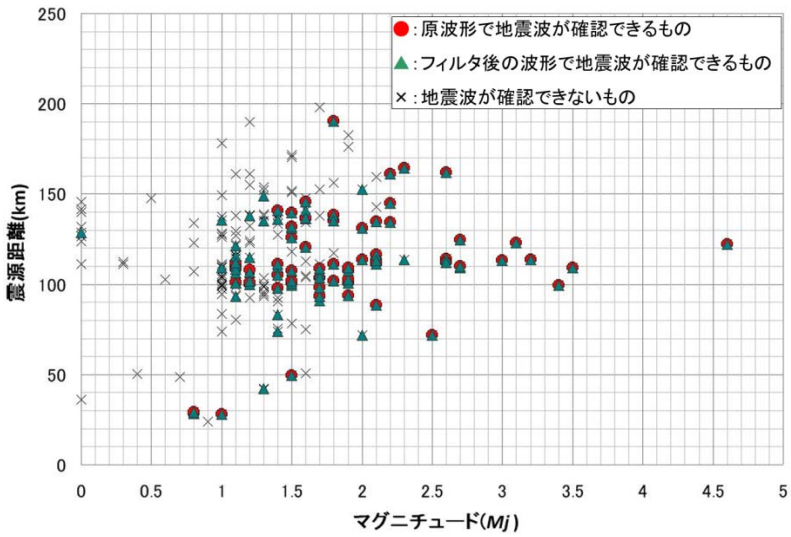


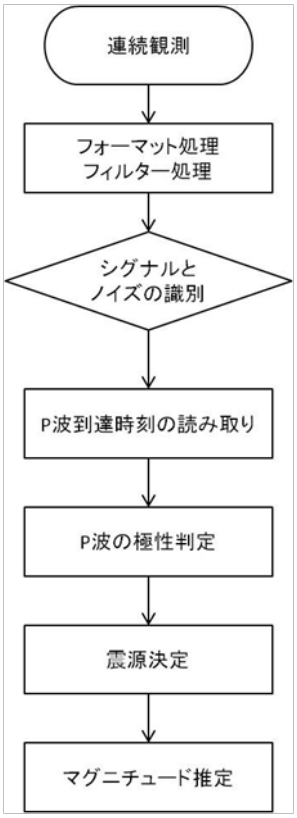
図 3.I.2-20　常設型 OBC で観測した地震のマグニチュードと震源距離の関係

c. 常設型 OBC の波形処理手法の構築

常設型 OBC で微小振動や自然地震の常時観測を行う場合、CO_2 圧入に伴う微小振動のモニタリングという観点からも、観測データを迅速に処理することが求められる。

図 3.I.2-21 に観測データの処理フローを示す。平成 25 年度までに、このフローに沿って、シグナルとノイズ区間の区別、P 波到達時刻および極性の読み取り、震源決定手法、マグニチュード推定について検討を行い、個々の処理ツールの作成を行った。平成 26 年度には、苫小牧 CCS 事業の一環として苫小牧沖に設置された常設型 OBC 観測システムの観測データに対して、構築した処理手法を適用してみた結果、観測データの自動処理が可能であることが確認できた。

図 3.I.2-22 に、自然地震に対して OBC の最大振幅から推定したマグニチュードと気象庁マグニチュードとの関係を示す。ほぼ 1:1 に近く実用に耐えるものと言える。ただし、誤差の大きいものもあり、最大振幅の求め方や観測点の地盤の影響など、さらに検討する必要がある。



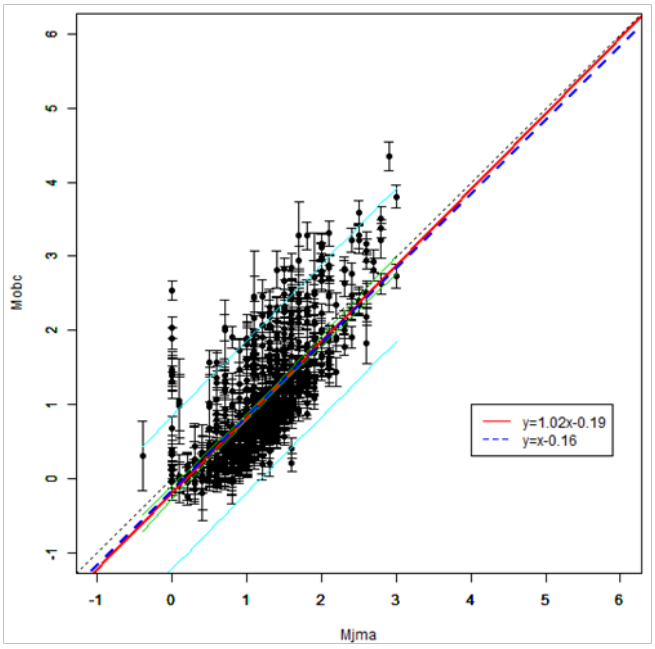


図 3.I.2-22　OBC の最大振幅から推定したマグニチュードと気象庁マグニチュードの関係

② CO_2 圧入に伴う微小振動評価手法の開発

CO_2 圧入に伴う微小振動発生の可能性についての議論がある。海外の CO_2 圧入サイトにおける観測事例では、微小振動は発生しても体に感じない程度のごく小さなもの（マグニチュード M-3～1 程度）であるが、安全性評価の観点から、社会受容性獲得や信頼醸成のために検討が必要である。

CO_2 圧入と微小振動の関連性を調べるために、米国 CO_2 圧入サイトにおいて微小振動観測を実施した。また、圧入管理手法のひとつとして地熱分野などで使われている TLS（Traffic Light System）について、主に微小振動観測に基づいた TLS の検討を行い、フレームワークを設計した。

a. 米国 CO_2 圧入サイトにおける微小振動観測

米国 LBNL およびテキサス大学と協力・連携して、米国ミシシッピ州の大規模 CO_2 圧入サイト Cranfield において、CO_2 圧入と微小振動との関連性を調べるために微小振動観測網を構築し、2011（平成 23）年 12 月～2015（平成 27）年 2 月の期間に微小振動の連続観測を実施した。図 3.I.2-23 に示すように、計 6 台の地震計を深さ 90m の観測孔内に設置した。

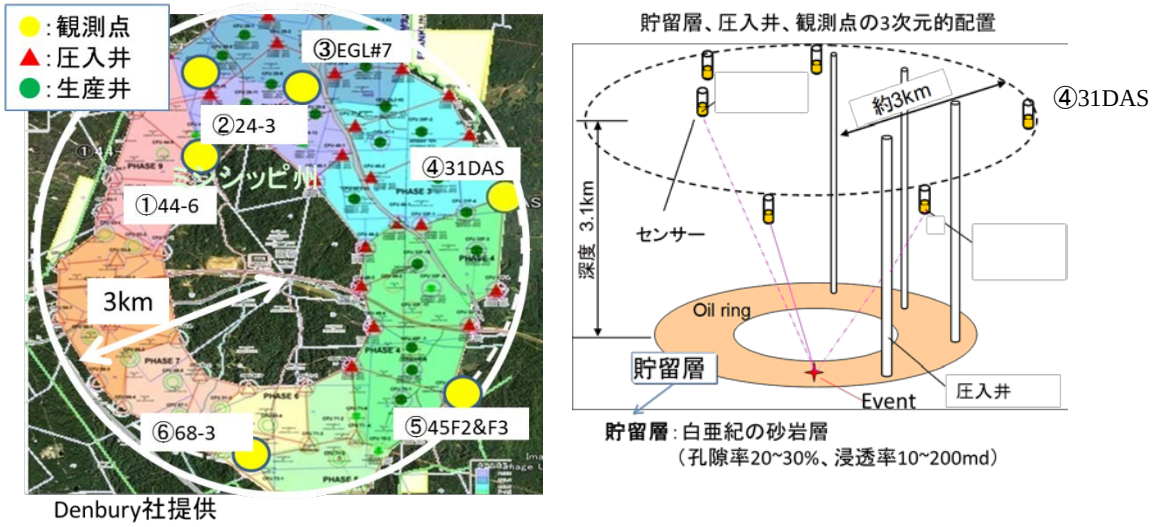


図 3.I.2-23　Cranfield における微小振動計の配置

4 年余りの期間にわたり連続観測を行い、自然地震については良好な記録が取得できた。しかしながら、CO_2 圧入に関係する微小振動については、高周波イベント、低周波イベントに分けて自動処理により抽出を行うほか、目視によるイベント抽出などを行い、複数観測点の結果を比較したが、CO_2 圧入に伴うものと考えられるイベントは確認できなかった。この要因として、CO_2 圧入に関係する微小振動が仮に発生していても、振動のエネルギーが小さく捕えられなかった可能性が考えられる。

そこで、観測点④31DAS から約 500m 離れた生産井の貯留層内（深度 3.1km）

において実施されたパーフォレーションの際の観測波形を用いて、観測可能な微小振動について検討を行った。パーフォレーションは、生産井のケーシングに爆薬を用いて穴を開けるものであり、使用したダイナマイト薬量（1620g）から換算されるマグニチュードは M1.35 程度である。パーフォレーションによる振動波形は、生産井から最も近い観測点④31DAS においてのみ観測され、図 3.I.2-24 に示すものであった。

このパーフォレーションの波形振幅とノイズレベルを用いて、観測システムの検知能力について検討した結果、検知可能な貯留層付近で発生する最小の微小振動は、マグニチュード M0.4 程度であることが判った。すなわち、CO_2 圧入に関係する微小振動が仮に発生していたとしても、その振動のエネルギーはマグニチュード 0.4 以下であったために、観測システムで振動を捕えられなかった可能性が考えられる。

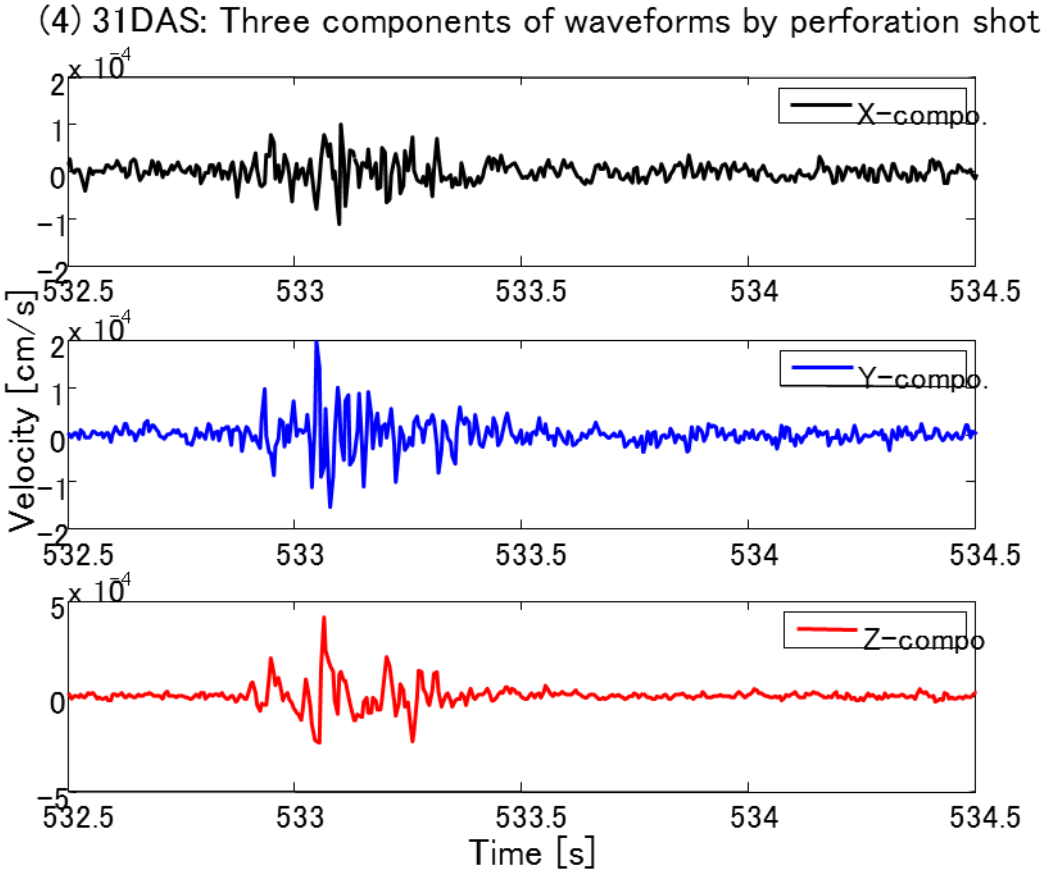


図 3.I.2-24　パーフォレーションの観測波形

b.　微小振動観測に基づく CO_2 圧入管理手法（TLS）に関する検討

CO_2 地中貯留サイトにおいては、CO_2 圧入時の各種モニタリング結果に基づいて、CO_2 の圧入管理を行うことが求められる。この圧入管理手法のひとつとして、評価結果を緑、黄、赤と信号の色で表示するトラフィックライトシステム（TLS :

Traffic Light System）と呼ばれる方法がある。この手法は、すでに高温岩体発電（EGS）サイトなどで活用されており、近年ではシェールガス生産分野でも運用が行われている。このような動向を踏まえ、CCS の実用化に備えて、特に微小振動観測結果に基づいた TLS の概念検討を行った。

圧入制御に必要なデータのうち、各種センサーによる観測結果に基づいた部分を中心とした TLS の入出力および基本処理フローを、図 3.I.2-25 に示す。フローは左側の地震計の波形や圧入装置の圧力、圧入量を入力データとして受信するところから始まる。圧入制御判定の評価項目は、(1) トリガー評価（地震計のゆれの大きさやマグニチュードなど）、(2) 統計評価（観測データとベースラインデータを入力とし、Gutenberg-Richter 則の b 値の変化や地震活動モデルなどの統計量に基づいた事前予測を含む評価）、(3) 微小振動評価（過去のデータに基づいた圧入サイト周辺の地震活動特性と、観測データの震源決定結果を比較することによる評価）、(4) CO_2 挙動解析評価（地質モデルに基づいた CO_2 挙動解析シミュレーションによる CO_2 分布予測結果を利用した評価）の 4 項目である。

基本フローに沿って TLS のプロトタイプを作成し、テストデータを用いた動作試験の結果、所定の動作をすることが確認できた。

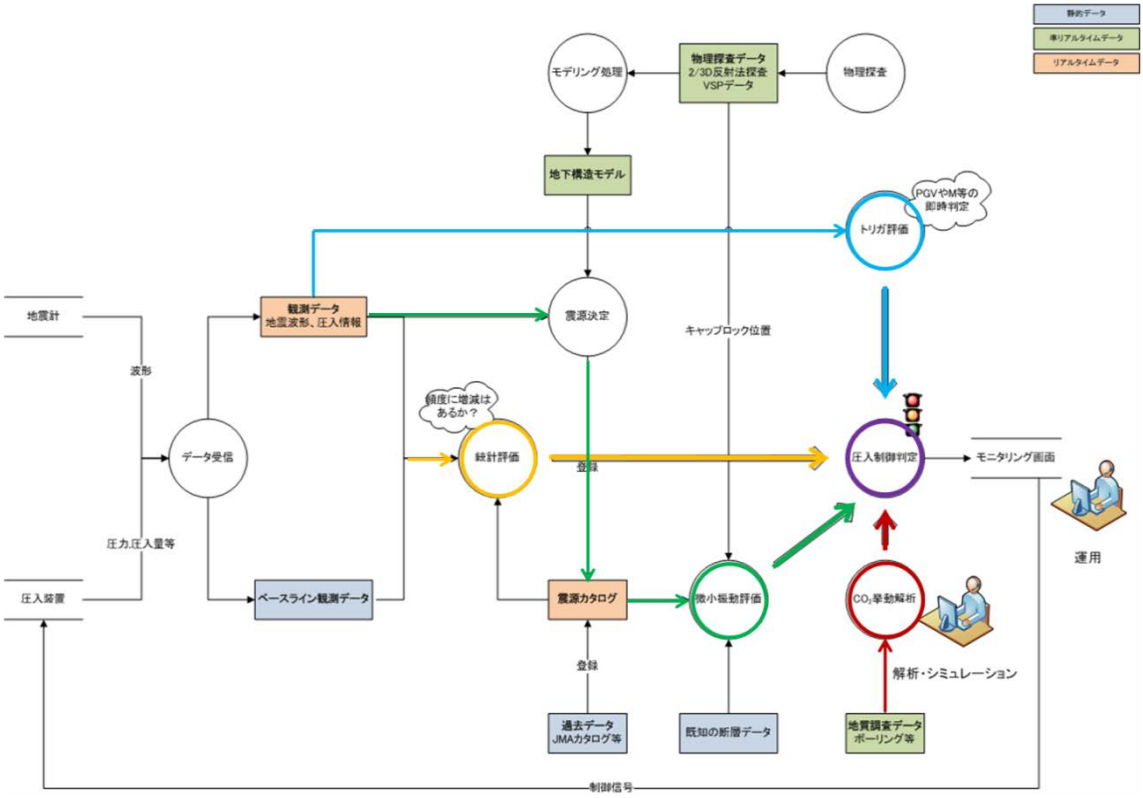


図 3.I.2-25　TLS の入出力・基本処理フロー

③　光ファイバーによる地層安定性監視技術

CO_2 圧入時の地層安定性監視には、深度方向の地層変形を連続的にモニタリングすることが望ましい。このようなモニタリングを可能とする手段として、光ファイバーセンシング技術に着目し、温度、圧力に加えて地層変形（ひずみ）も計測可能とする埋設型光ファイバー地盤変形監視システムの研究開発を実施した。

平成 22 年度～23 年度にかけて、光ファイバーで岩石ひずみが計測できるかを検証したほか、温度・圧力・ひずみを計測値から分離する手法の検討を行った。岩石試料に光ファイバーを巻き付けて試料にひずみを生じさせた結果、光ファイバーはひずみゲージとほぼ同程度の精度で岩石試料のひずみを計測可能であることが明らかとなった。

平成 24 年度からは、光ファイバーを現場に適用して地層変形が計測できるかを確かめるために、深度 300m 坑井を掘削し、ケーシングと坑井（地層）との間のアニュラスに光ファイバーを挿入・セメント固定して CO_2 を地層内に圧入する試験を行った（図 3.I.2-26）。図 3.I.2-27 に CO_2 圧入時の地層変形の計測結果を示す。CO_2 の圧入によって、圧入ポイント付近の地層にひずみが生じ、さらに圧入を継続することでそのひずみが増大していく様子を光ファイバーで計測することに成功し、本手法による地層安定性モニタリングの有効性が確かめられた。

平成 25 年度からは、観測井での地層変形モニタリングへの適用性を確認するために、光ファイバーを設置した坑井から 5.5m 離れた地点に新たに水圧入用の坑井を掘削し、水を圧入した時の地層変形を光ファイバー設置坑で計測する試験を行った。その結果、光ファイバー設置坑で水の圧入によって生じた地層が膨張する様子が計測された（図 3.I.2-28）。

平成 26 年度からは、CO_2 貯留サイトに適用した場合を想定し、880m の坑井に新規開発した光ファイバーを設置し、光ファイバー設置方法、光ロスの影響の検証、さらにはデータ計測・処理方法について検証した。

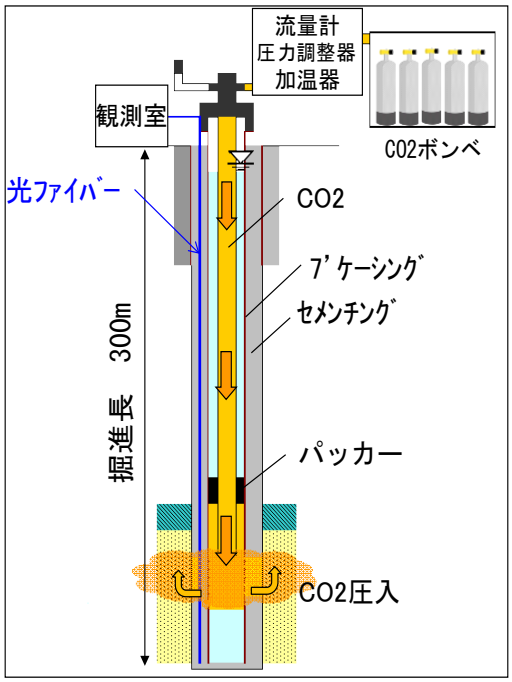


図 3.I.2-26　CO_2 圧入試験

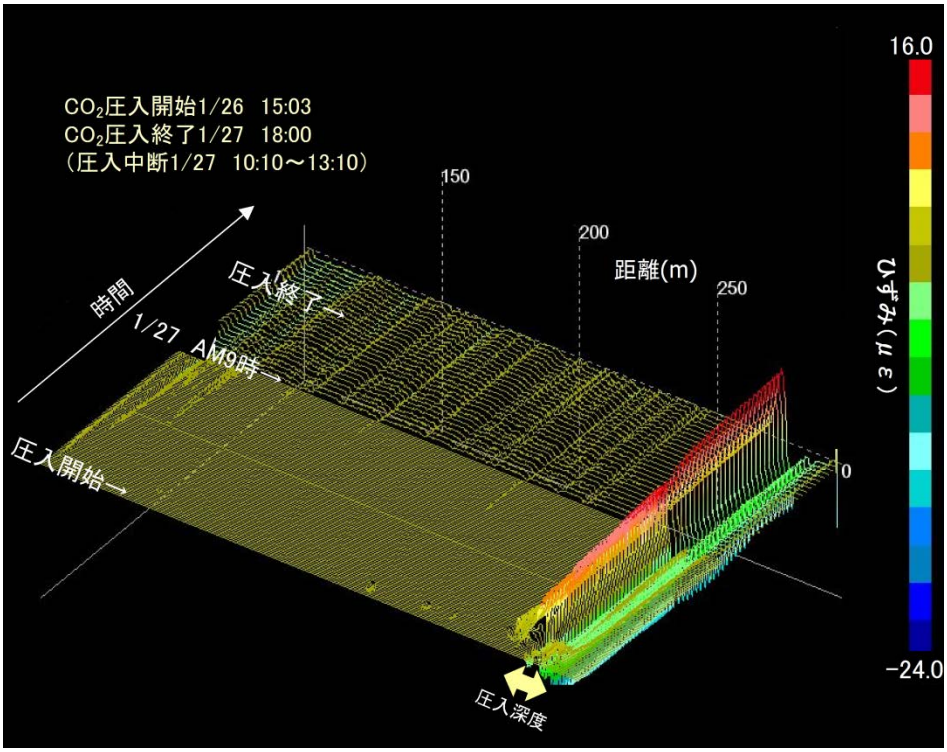


図 3.I.2-27　CO_2 圧入時の地層変形の計測結果

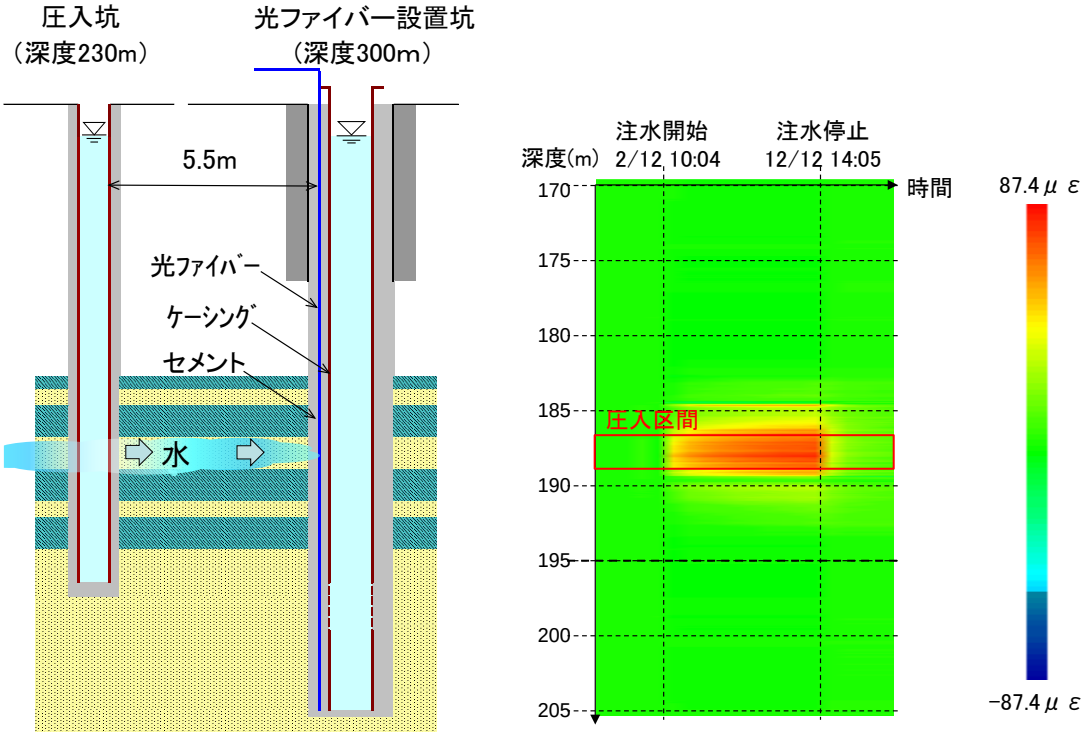
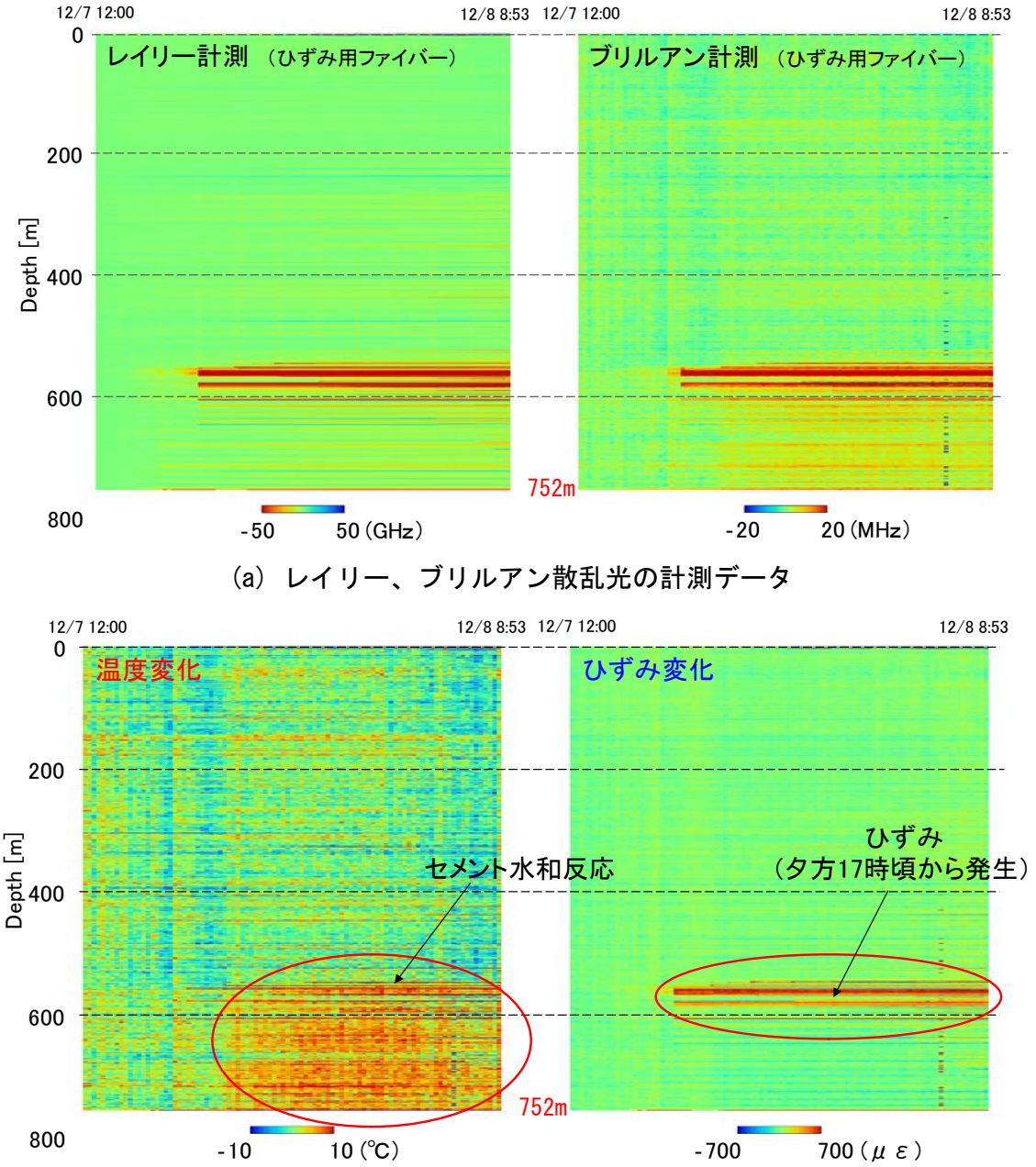


図 3.I.2-28　近接坑からの水圧入に伴う地層変形結果

光ファイバーの設置方法として、ケーシング設置時にケーシングに固定してから坑井に挿入し、その後セメントで固定する方法を確立した。この際、光ファイバーの断線・損傷を防ぎ、かつ光ファイバー締付けによる計測への影響を軽減させた光ファイバー設置器具を開発した。その上で光ロスを確認した結果、1,000m 級の坑井でも影響はほとんどないことを検証した。

この 880m 坑井での試験計測において、新規開発した光ファイバーを用いることにより、レイリー散乱とブリルアン散乱光が観測でき、単独のファイバーの計測で温度・圧力・ひずみが分離可能であることが検証された（図 3.I.2-29）。



(a) レイリー、ブリルアン散乱光の計測データ

(b) 温度、ひずみの分離結果

図 3.I.2-29　レイリーとブリルアン散乱光による温度・ひずみ分離結果

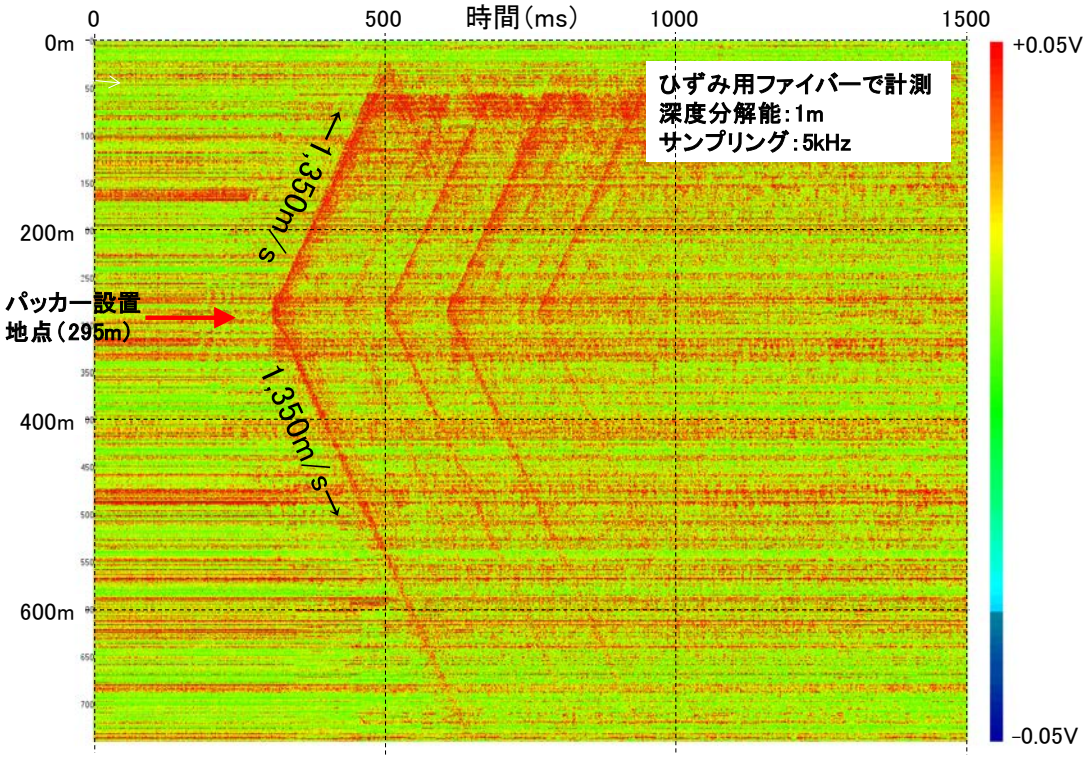


図 3.I.2-30　パッカー設置時の弾性波の計測例

さらに、坑井に設置した光ファイバーを利用して、音響（弾性波）が計測できるか否かについてテストを行った。光ファイバーによる音響計測（DAS：Distributed Acoustic Sensing）は海外でも実用化に向け研究開発が進めらている。880m 坑井で、測定条件を弾性波の観測に特化した計測を行った結果、パッカー設置時に生じたチューブウェーブと考えられる波の測定に成功した（図 3.I.2-30）。

以上、これまでの研究開発の結果、深度 1,000m 級の深部坑井において光ファイバーによる埋設型地盤変形監視システムが適用可能であり、連続的な温度・圧力・ひずみの変化に加えて、音響の計測に利用できることが確かめられた。さらなる実用化に向けては、挿入時の断線リスク軽減を目的とした強度を高めた光ファイバーケーブルの開発を行うとともに、計測・処理・解析技術の高度化を図っていく必要である。

④　多面的モニタリング手法の開発

CO_2 地中貯留のモニタリング法としては、北海 Sleipner サイトの実施例を代表として反射法や VSP 等の弾性波探査の有効性が広く認められ、我が国の大規模実証調査でも坑内センサーによる計測と反射法探査が主なモニタリング手法となっている。弾性波探査は、探査実施時点の“スナップショット”を得て地下に圧入した CO_2 の拡がりを推定することが可能な優れたモニタリング手法であるが、CO_2 の移動をモニタリングするために 2 年～数年毎に実施する必要があり、コスト・地元調整等からサイト閉鎖までの地中貯留の全期間にわたって頻繁に実施することは難しいと考えられる。このため、本研究では、弾性波以外の手法も併用する多面的モニタリングと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によって、弾性波探査の実施回数を適切な範囲に収めるとともに、弾性波探査の繰り返し実施間、及び CO_2 圧入停止後の長期的な連続監視についても有効なモニタリング・モデリング手法の構築を目的とした。このモニタリング・モデリング手法を利用することで、社会的受容性に配慮しながら長期的なモニタリングコストを低減して CCS 事業の実用化に貢献することができる。環境省における海底下 CCS 検討委員会においても連続かつ広域モニタリング技術の開発が重要視されており、当該技術開発の進捗にともなう実サイトへの適用が期待されている。

弾性波探査と併用するモニタリング手法として、比較的低コストな受動的手法である重力、自然電位、AE（Passive seismic）、比抵抗、測地等の受動的手法を検討し、このうち重力、自然電位、AE を米国の南西部炭素隔離地域パートナーシップの大規模 CO_2 地中貯留テストサイトにおいて適用試験を行なうとともに、苫小牧において補助的なデータを取得することで、モニタリング実施における問題点の抽出と改良を行った。これと並行して、モニタリング・データをモデリングに取り込むための物理量変換プログラムを整備し、このポストプロセッサを用いた例題計算によって、適用試験期間内では不可能な長期間の応答や適切な測定配置等を計算して、モニタリング手法の適用方法の検討等を行った。

本研究開発の中心となる高精度重力モニタリング法では、貯留域全体の密度変化を代表する重力を連続的な監視手段として用いる。本事業の中で継続的に改良を続けている物理量変換プログラムを用いた例題計算結果を図 3.I.2-31～図 3.I.2-32 に示す。貯留層シミュレーションにより計算される温度、圧力、CO_2 飽和度等の変化量を地球物理学的な観測量（理論計算値）に変換している。地中貯留が順調に進んだ場合と貯留開始後 1 年目に断層が開口した場合、反射法は地下の CO_2 プリュームの拡がりを的確に捉えることが出来るが、高分解能な特性故に 2 次元反射法では測線下に到達しない段階では CO_2 プリュームの検知は難しい（図 3.I.2-32）。重力モニタリングでは、断層開口の有無により重力変化に顕著な差異が生じ、しかも断層直近の測定点でなくともこの変化が検知可

能である（図 3.I.2-33）。既存の絶対重力計等の μgal レベルの測定分解能では、この差異を検知できるまで数年間以上を要するが、理論的には従来の重力計と比較して文字通り桁違いの ngal オーダーの分解能を持つ超伝導重力計を使用すれば、より早期の異常検知が期待でき、より高精度な測定が出来れば地下モデルの較正に使える可能性もある。

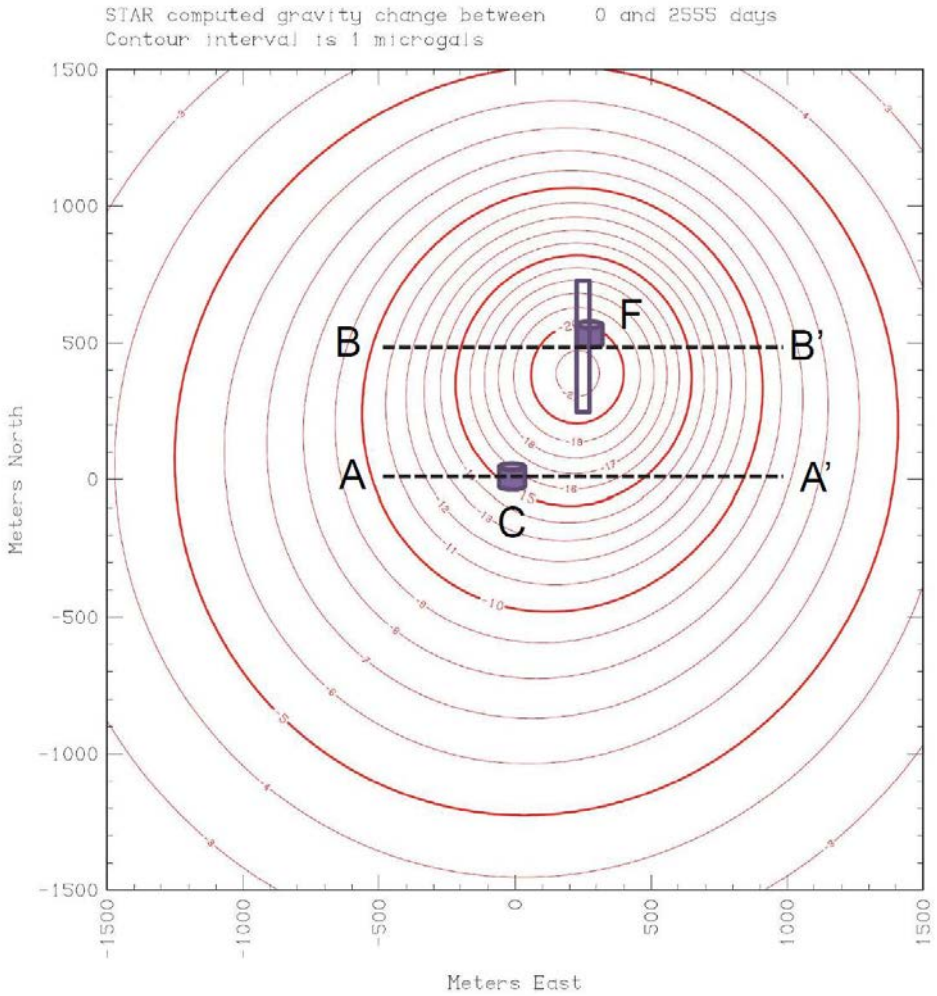


図 3.I.2-31　例題計算による圧入 7 年後の地表での重力変化の分布（3km×3km の範囲）。中心 C から圧入層深度 1,000m～1,300m へ年間 100 万トンのレートで 7 年間の CO_2 の圧入位置を実施。中心から x 方向へ 200～300m、y 方向へ 300～800m の位置の深度 100m～1,100m に断層を仮定し、圧入点直上と断層直上を x 方向に走る A-A'測線と B-B'測線における 2 次元反射法断面と、圧入点直上の C、断層の直上の F の 2 観測点での重力時間変化を計算した。

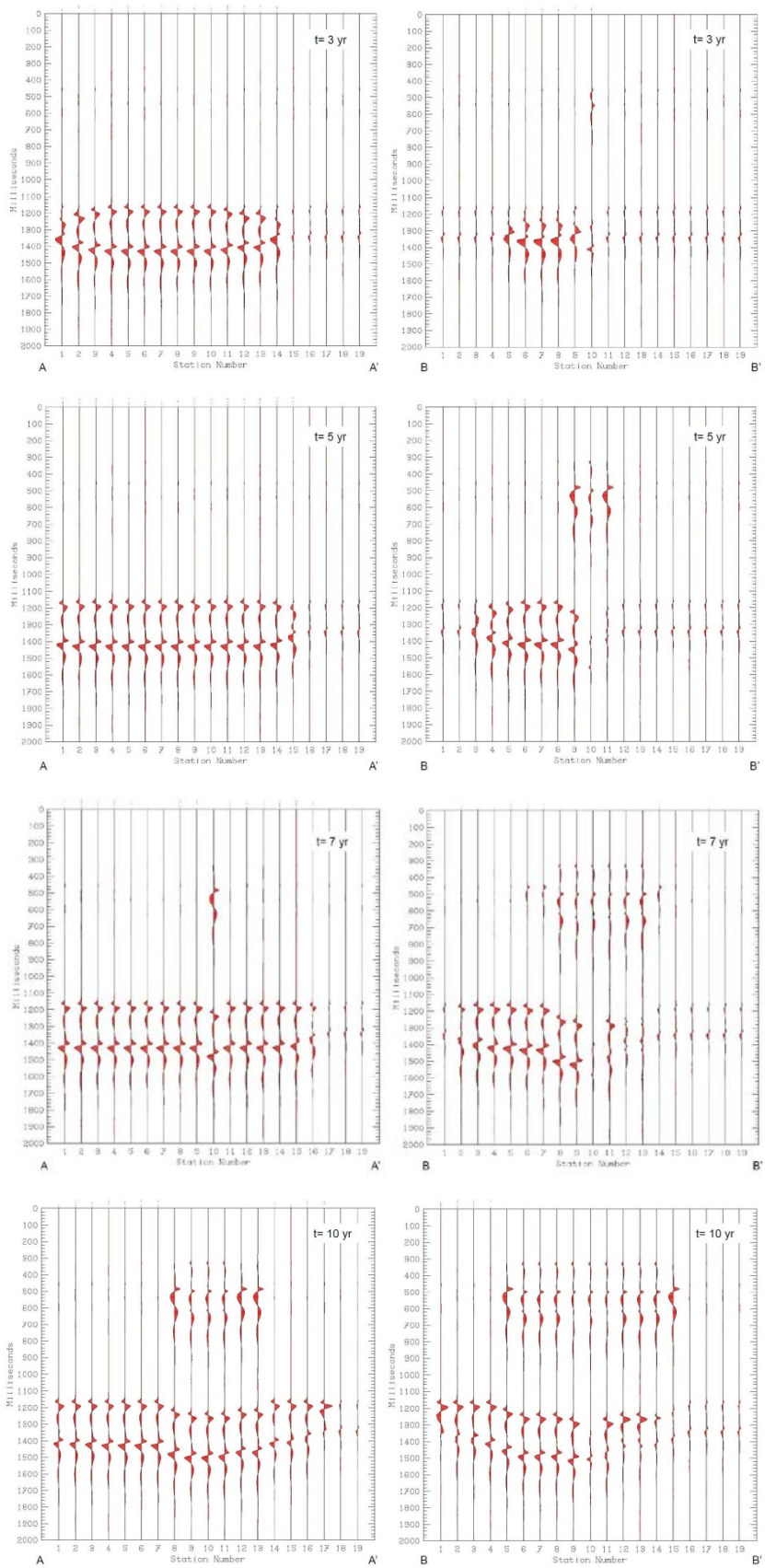


図 3.I.2-32　計算した A-A'測線（左）と B-B'測線（右）の反射法時間記録断面。上から圧入開始後 3 年、5 年、7 年（圧入停止）及び 10 年(停止 3 年後)。

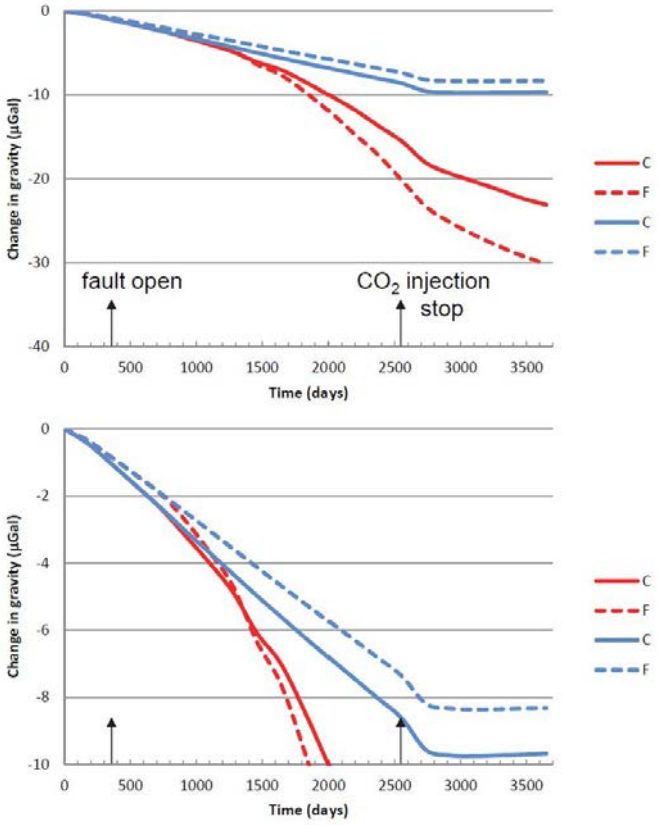


図 3.I.2-33　観測点 C、F における重力の時間変化。断層なしの結果を青色で、断層開口ありの結果を赤色で示す。下図は上図の縦軸スケールを拡大。

超伝導重力計の実用上の性能を確認し、測定方法の改良点などを探るために実施した米国テストサイトにおける適用試験では、重力計の温度特性等による個体差の影響が μgal 以下に収まっていることを確認し、サブマイクロガルの精度で重力信号を検出できることを確認できた（図 3.I.2-34～図 3.I.2-35）。この適用試験の過程において、超伝導重力計のドリフト特性や動作確認のためには当初予定していた絶対重力計との並行測定だけでは不十分なことが判明し、複数台の超伝導重力計を用いた並行測定を用いたモニタリング手法を提案することとなった。並行測定の試行結果から、絶対重力計との並行測定では困難であった高分解能な超伝導重力計のドリフト特性や温度環境特性等が取得でき、また移動による擾乱が小さいことも明らかとなり、さらに簡易収納庫（エンクロージャ）を用いた計測も試行でき、超伝導重力計による機動的な計測にとって有望なデータが得られた。苫小牧における補助データ取得からは、米国テストサイトでは得られない海洋性ノイズ等を取得している。

自然電位連続モニタリングは、改良した物理量変換プログラムによる例題計算等から、米国テストサイトにおける適用試験と苫小牧における補助データ取得では、geobattery 効果により CO_2 プリュームの到達に伴い坑口付近に発生が予

測される自然電位変化検知を主対象とし、また計算結果に基づき従来の測定に加えて鋼管ケーシングも測定対象とした連続モニタリングを実施した。これまでの測定ではケーシング電位は地表電位より安定した電位を示し、より確実なモニタリングが期待できる。AE モニタリングでは、米国側の実施する坑内アレイ観測を補完する機動的な地表観測網による観測方法をデザインし、低コストで移設可能な地表観測点を実現し、観測網内での AE の可能性があるイベントを検出している。

これらの例題計算・適用試験・補助データ取得等によって得られた知見は、平成 27 年度末に多面的モニタリングの実施指針として取りまとめられる。さらに、重力モニタリングについては、国内実証試験にて試用し、実用化段階での標準的モニタリング手法としての採用を目指している。

図 3.I.2-34　米国 FWU テストサイト AWT3 における 2 台の超伝導重力計 iGrav015 と iGrav017 による並行測定（左）と苫小牧サイトにおけるエンクロージャに納めた超伝導重力計と絶対重力計の並行測定（右）。

図 3.I.2-35　米国 FWU テストサイトにおける超伝導重力計 iGrav015 と iGrav017 の記録。挿入図は両者の差を示す。iGrav015 は 2014 年 3 月 19 日に設置。ドリフト（図中の Trend）を差し引いた残差（緑）は設置後 30 日後から 200 日にかけて減少傾向が卓越。2015 年 7 月 29 日に iGrav017 を隣接する基台に設置して並行測定開始。適当なオフセットの仮定で、時間とともに iGrav017 と iGrav015 の重力連続記録は重なり、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。iGrav017 は 2014 年 12 月 13 日に 13-10 基地に移設。

⑤　ジオメカニクスを考慮した断層モデリング手法の研究開発

深部塩水層に CO_2 を圧入すると貯留層内の間隙圧が上昇し、地層の変形、亀裂の進展、断層活動等を引き起こし、その結果、浸透率やスレッショルド圧などの水理特性が連動的に変化することが予想されている。近年、このような要素を考慮したシミュレーション技術として、「熱－水理－岩石力学連成シミュレーション」を基本とするジオメカニックモデリングが注目されている。本技術は、多孔質媒体である含水地層・岩盤中の流体流動および熱伝播に関する数値シミュレーションと、地層・岩盤の力学的応答に対する数値シミュレーションを、岩石ひずみに対する浸透率の変化を媒介して連成解析する手法である。

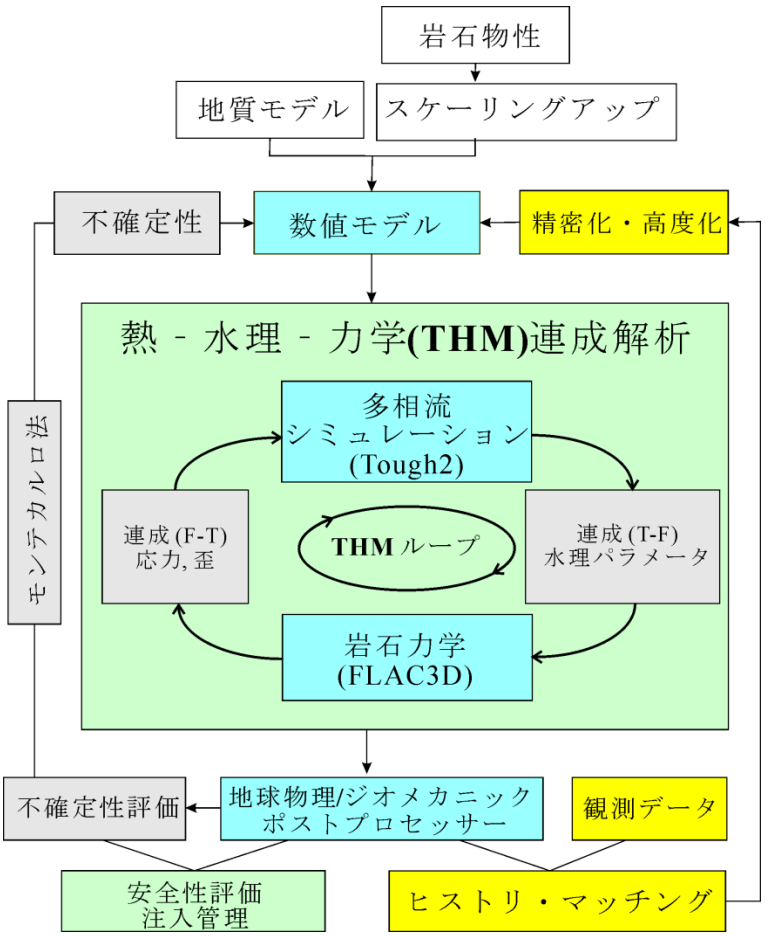


図 3.I.2-36　熱伝播－流体流動－岩石力学連成シミュレーションを中心としたジオメカニクモデリングフレームワークの概念図。

本事業では、CO_2 圧入に伴う地層・岩盤の力学的応答を事前評価し、断層活動や誘発地震のような破壊現象の発生を避けることのできる圧入条件を導くために、上述の連成シミュレーション手法を我が国の地質条件に適した形にカスタマイズする研究開発を行った。シミュレーターとして米国 LBNL の開発した多相流解析プログラム「TOUGH」と岩石力学解析のためのコマーシャルソフトウ

ェア「FLAC3D」を連成したシミュレーション手法を用いて、さらに、ヒストリー・マッチングによる数値モデルの精密化・高度化及び様々な不確定性を考慮に入れた統計的な評価を含むジオメカニックモデリングフレームワークを構築した（図 3.I.2-36）。

構築したジオメカニックモデリングフレームワークに対して、シミュレーションの妥当性を検証するためのヒストリーマッチングを行った。この際に、懸念される CO_2 圧入による地盤変形現象のナチュラル・アナログとして 1965-1967 年に起きた「松代事象」を取り上げた。松代事象では、観測された群発地震活動を岩盤破壊とその伝搬、CO_2 を伴う塩水の湧出を貯留流体の漏洩とみなすことができる。このようなナチュラル・アナログ手法を適用した理由は、対象となる破壊的現象にまで至る CO_2 圧入による地盤変形現象が CO_2 地中貯留によって起こってはならぬ性格の現象であるため、実証試験等の CO_2 地中貯留のためのコントロールされた条件下でマッチング・データを取得することができないことによる。手順として、初めに図 3.I.2-37 の地形を反映させた地質モデル上で松代事象に伴う地盤の隆起の再現を行った。また、地質モデルに与える岩石物性値等を変えてシミュレーターの作動状況と現象の再現性を検討する感度解析を実施した。次に、誘発地震の震源分布の時空間変化の再現性を改良するため、深度に依存する周応力比を導入し、注入レートを調節して最大地表隆起量のヒストリーマッチングを行った。その結果、図 3.I.2-38 の断層破砕ゾーンを細分割したモデルにより、主要な観測データを概ね説明できることが確認された（図 3.I.2-39 および図 3.I.2-40）。なお、ヒストリーマッチングの過程において、CO_2 地中貯留の安全性評価の視点からは断層がモール・クーロンの破壊に従う連続体として簡易に扱うことができることが明らかとなった。

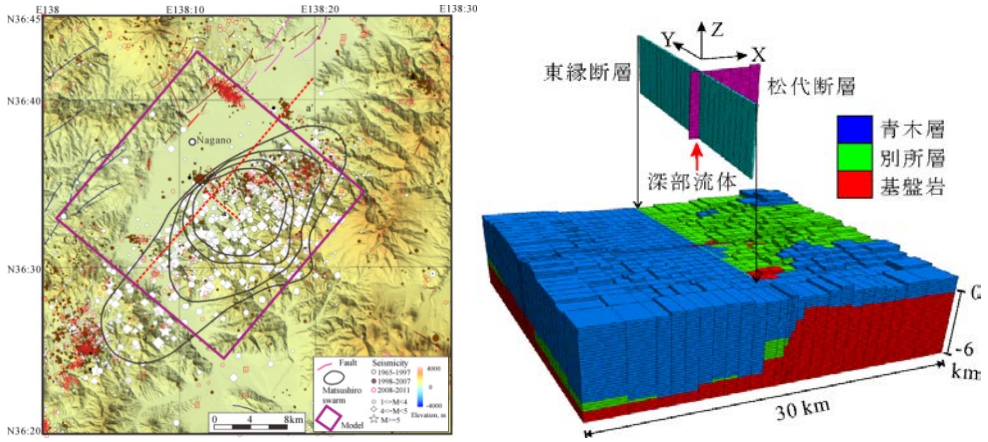


図 3.I.2-37　松代地域の地質モデル。地形の高低を最上面に色分けして示す。

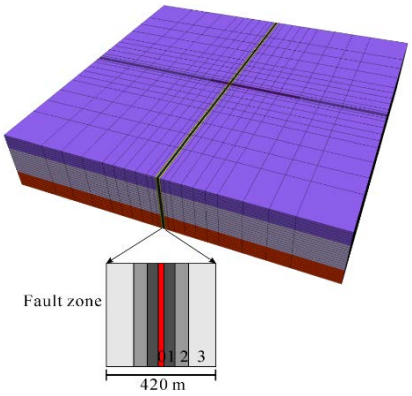


図 3.I.2-38　断層ゾーン細分割簡易モデル。断層ゾーンを 4 つのサブゾーンに分割。

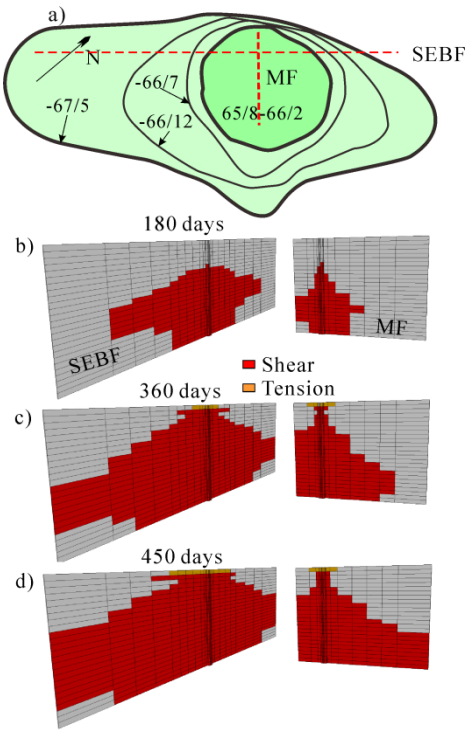


図 3.I.2-39　a) 松代群発地震の震央分布域の時間変化。実線は震央分布域：対応する「西暦下 2 桁/月」をラベルで付す。赤色破線は、東縁断層（SEB）と松代断層（MF）の位置を示す。b) 断層ゾーン細分割モデル計算された断層破壊領域の時間変化 SEBF 断面（左）及び MF 断面（右）における計算開始後 180 日、360 日、450 日後のせん断破壊域（赤色）と引張破壊域（黄色）の分布。

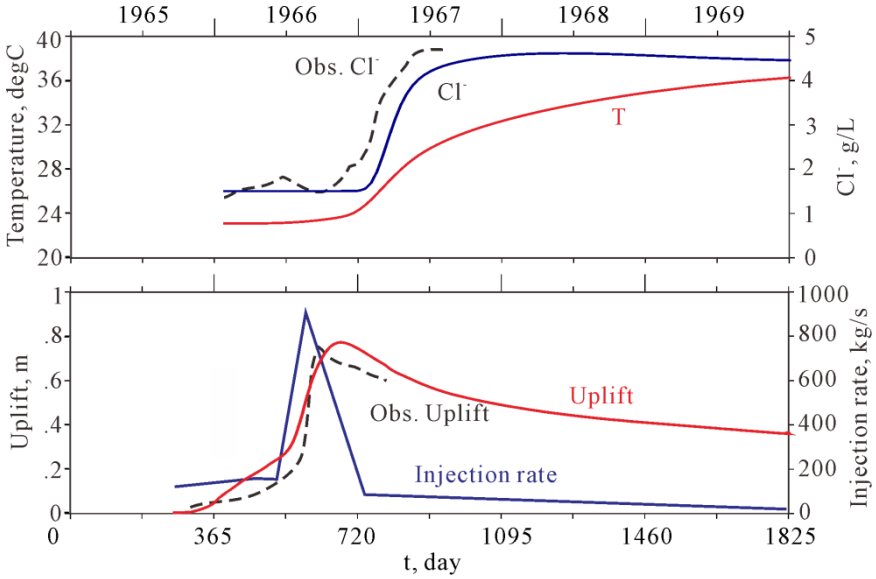


図 3.I.2-40　観測された最大地表隆起量と Cl^-濃度（modified from Noguchi et al., 1969）、 断層ゾーン細分割モデルを用いて計算された最大垂直変位と Cl^-濃度、および計算に用いた地下からの水の圧入量。

一方、我が国で一般的に想定される CO_2 地中貯留サイトは軟岩岩盤であるため、流体流動－岩石力学連成シミュレーションでの岩石変形－浸透率相互関係や、岩石破断を判定する構成則について、硬岩と比較して知見のほとんど得られていない軟岩を対象として定式化する必要がある。そこで、三軸圧縮条件下で岩石の浸透率を計測するシステムを構築し、松代地域の別所層泥岩に加えて、実証試験サイトである苫小牧地域の振老層泥岩、滝の上層砂岩、滝の上層凝灰岩を対象として、地下 1,000m に相当する環境条件下（温度 40℃、封圧 12～25MPa、間隙水圧 10.1～10.5MPa）でせん断・透水試験を実施した。その結果、図 3.I.2-41 に示すように、これらの軟岩試料はせん断破壊後の浸透率が増加から減少に転じる複雑な挙動を示し、変位に対して直線的に浸透率が増加する硬岩とは全く異なることが明らかとなった。さらに、浸透率の挙動パターンは岩種の違いによることも確認されたが、このような岩種依存性は X 線 CT による破断面の形態観察結果とも対応していた（図 3.I.2-42）。最終的に、せん断破壊後の浸透率の変化パターンを分類して新規の構成測を構築し、数値解析に取り込むことで、松代に限らず軟岩岩盤にも適応可能な形にジオメカニックモデリングフレームの一般化を図った。

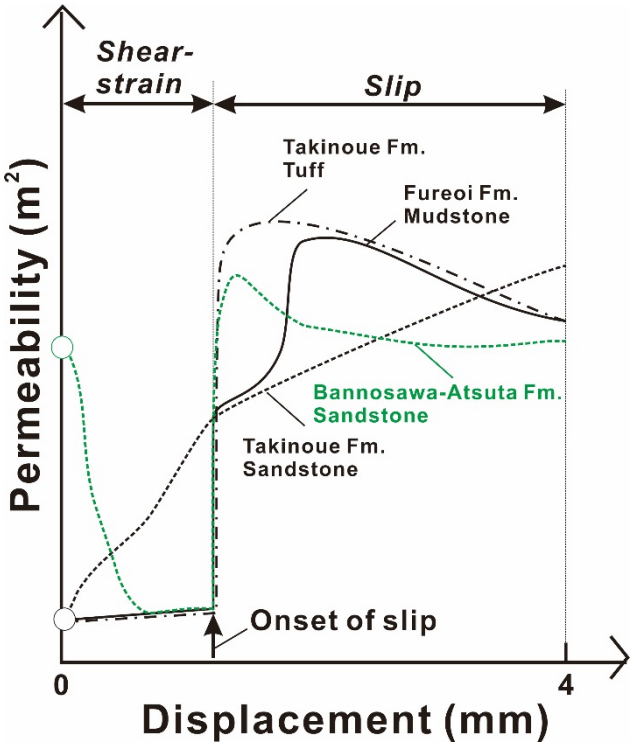
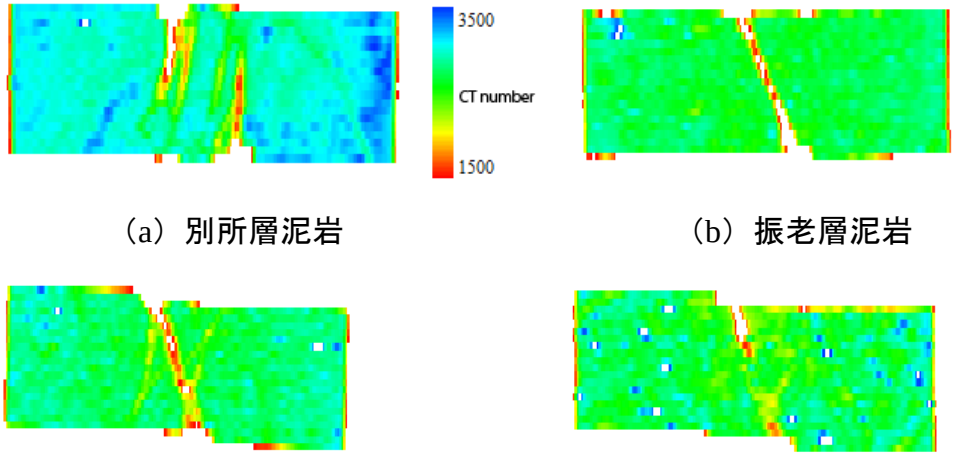


図 3.I.2-41　各種軟岩の変位に対する浸透率の変化



（a）別所層泥岩　　（b）振老層泥岩

（c）滝ノ上層砂岩　　（d）滝ノ上層凝灰岩

図 3.I.2-42　X 線 CT による岩石の内部組織観察の結果（3D 解析には GeoTaos のソフトウェアを使用）

3. 貯留層外部へのCO_2移行解析

（１）坑井からのCO_2移行解析

坑井は、貯留層から地上までを繋ぐ人工構造物であり、貯留層外部への潜在的な CO_2 移行経路となりうることから、坑井の健全性の確保が重要となる。坑井の健全性を評価するためには、セメント成分と CO_2 との化学反応に起因するセメントの劣化予測が重要であるが、従来実施されてきたセメント単体と CO_2 との反応試験では、セメントの劣化度合いを過剰に見積っていた。本事業では、実坑井に即した、ケーシング、セメント、砂岩（地層）を一体化した模擬坑井試料を作成し、バッチ試験（10MPa, 50˚C）によってセメント劣化および地化学反応を評価した。

図 3.I.3-1 は、作成した模擬坑井試料およびバッチ試験の概要図である。セメントは、既存坑井を想定して API 規格 Class A に相当する普通ポルトランドセメントとした。反応容器内の上方側は、水蒸気と超臨界 CO_2 からなる wet-CO_2 環境であり、下方側は超臨界 CO_2 飽和水溶液環境となっている。

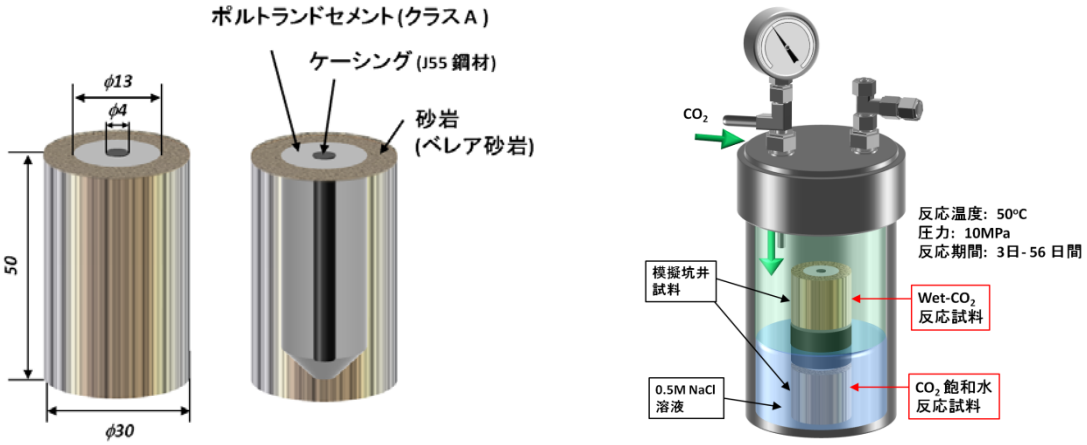


図 3.I.3-1　模擬坑井試料およびバッチ試験法の概要図

図 3.I.3-2(a)は、反応期間 56 日間における wet-CO_2 反応試料および CO_2 飽和水反応試料写真である。CO_2 飽和水反応試料と比較して、wet-CO_2 反応試料の方が炭酸塩化の進行が大きいものの、セメント内部までは反応が進行しておらず、内部のケーシングも健全に保たれていた。図 3.I.3-2(b)は、複数の模擬坑井試料を用いて 3 日～56 日間の期間で反応させ、それぞれの試料の炭酸塩化ゾーン深さをプロットしたものである。この炭酸塩化のデータを基に、Elovich 式によって推定された 30 年後の炭酸塩化深さは、CO_2 飽和水環境で 0.8mm、wet-CO_2 環境で 4.5mm であり、炭酸塩化の進行は緩やかであった。

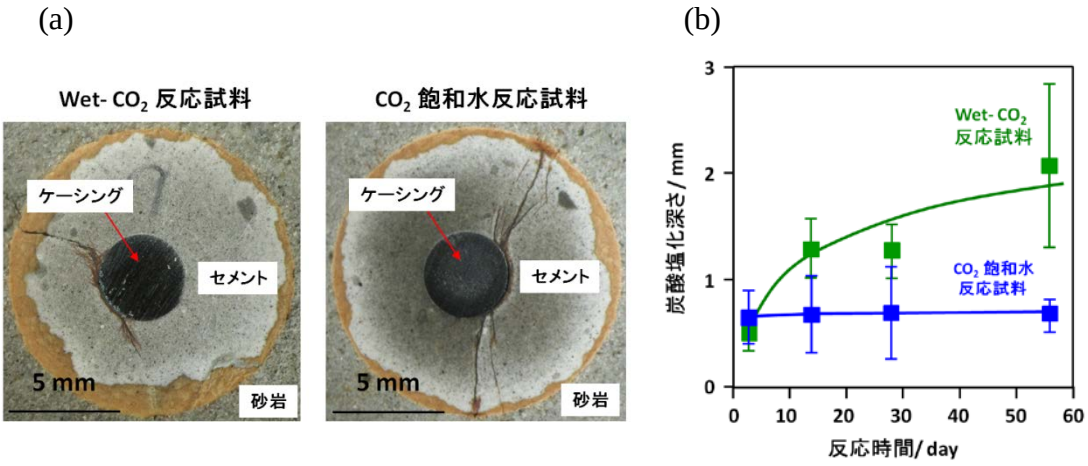


図 3.I.3-2　(a)　反応期間 56 日間における模擬坑井試料写真
（オレンジ色の変色部が炭酸塩化領域）
(b)　炭酸塩化深さの経時変化

図 3.I.3-3 は、反応期間 56 日間における模擬坑井試料のセメント-砂岩境界の拡大図とセメントの主成分である Ca の SEM-EDS マッピング像である。暖色系カラーが濃いほど Ca 量が多いことを示しており、セメントの内部に比べて炭酸塩化領域で強くなっている。セメント内部の炭酸塩化領域は、更なる CO_2 の侵入を防ぐバリアとなることから、セメント劣化が単体試料ほど進まない。また、セメント-砂岩界面から 1mm の範囲にわたって、Ca が砂岩の孔隙内に現れており、セメントから溶脱した Ca が CO_2 と結合して炭酸塩として析出し、孔隙を閉塞していることが示された。これらの相互作用により、実坑井では、セメントの劣化が抑制されることが明らかになった。

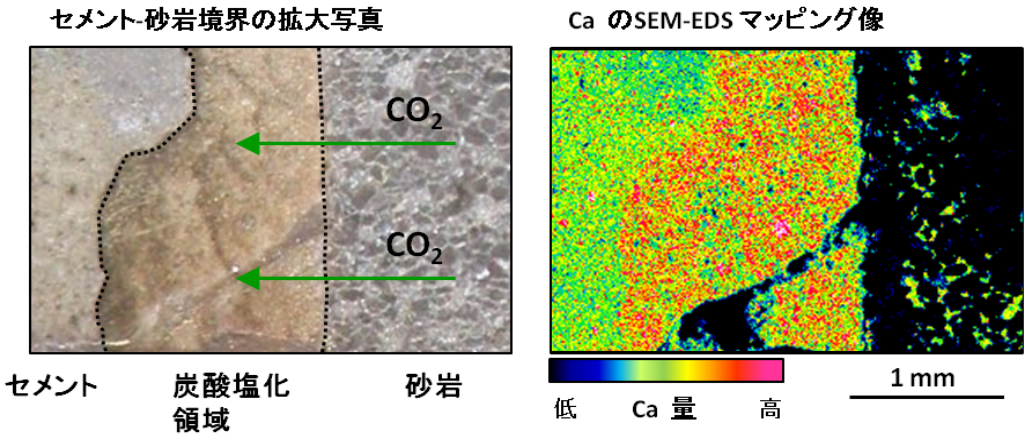


図 3.I.3-3　反応期間 56 日間における模擬坑井試料のセメント-砂岩境界の拡大図（左）および同領域における Ca の SEM-EDS マッピング像（右）

圧入した CO_2 は、浮力により上昇し、貯留層上部（遮蔽層下部）に到達する。このため、貯留層と遮蔽層の境界域が CO_2 の反応場となるうることから、貯留層と遮蔽層の境界の坑井を模した模擬坑井試料を作成し、バッチ試験によって貯留層上部の坑井におけるセメント劣化を評価した。遮蔽層と貯留層を連なる坑井を模擬するため、層構造の異なる細粒部と粗粒部の砂岩が隣接する部分を選定して試料を作成した（図 3.I.3-4 (a)）。56 日間のバッチ試験後の模擬坑井試料断面を観察した結果、セメントの炭酸塩化は、細粒部と粗粒部すなわち貯留層と遮蔽層の境界で最も進行するが、セメントの内部や遮蔽層の上部までは反応が進行せず、セメントの劣化も限定的であることが示された（図 3.I.3-4 (b) ）。

(a) (b)

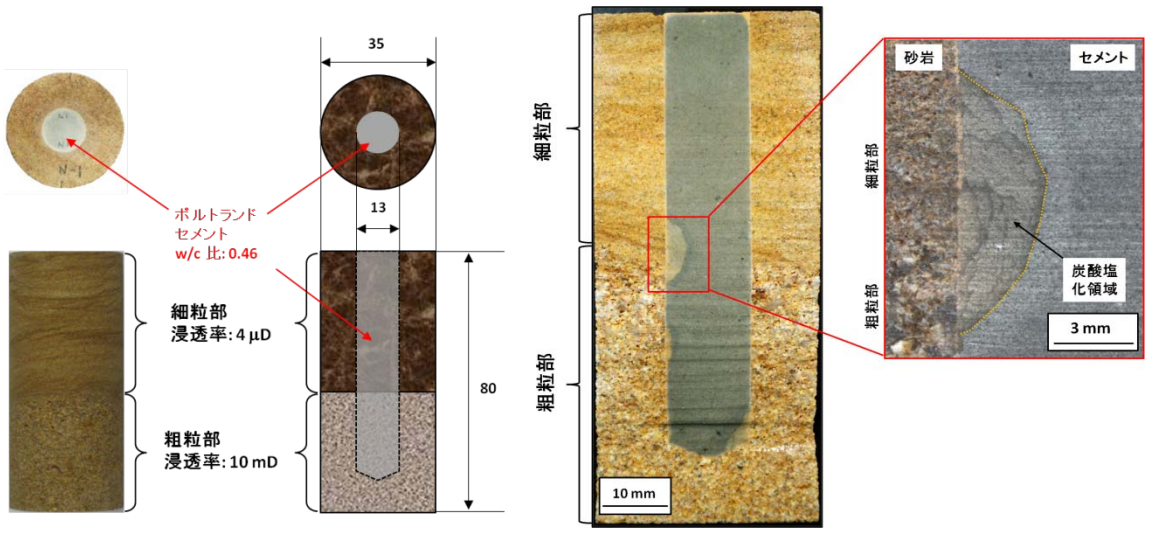


図 3.I.3-4 (a) 貯留層と遮蔽層の境界の坑井を模した模擬坑井試料の概要図
(b) 56 日間のバッチ試験後の模擬坑井試料断面写真

実適用化に向けては、個々の CO_2 貯留サイトに対応した模擬坑井試料の作成ならびに評価が必要である。また、得られた成果を CO_2 移行モデリングに供することで、貯留サイトに即した坑井健全性評価が可能となる。

（２）地中移行シミュレーション手法の開発

我が国の地中貯留のサイトでは、万が一の事象として CO_2 漏出が発生した際の漏出量を事前に評価しておくことが必要である。本事業では、地層中の CO_2 移行解析に関して、貯留層から地表／海底までの漏洩経路を想定し、移行シミュレーションにより地表／海底での CO_2 の漏出レートを求める研究開発を実施した。

貯留サイトでの弾性波探査において、断層として判定されていないフラクチャーが存在していたというシナリオを想定し、漏洩経路となるフラクチャーのモデル設定について検討を行った。弾性波探査の検知限界以下であるという条件から幅 5m、長さ 1km のフラクチャーを仮定し、また、環境影響評価のためには最大漏洩量を求めることが重要であるので、鉛直の断層を想定することにした。断層の浸透率については、モデル設定の中で最も不確定な要素が大きいが、我が国において想定される CO_2 貯留層の候補である第三紀の砂岩層で、現位置での浸透率測定結果が報告されている文献を調査し、フラクチャーの方が母岩よりも大きな浸透率となる場合には、浸透率が 1mD から 1,000mD の範囲となることが確認された。

これらの結果を基に、CO_2 プリュームの直上にフラクチャーが存在する場合の移行シミュレーションを実施した。CO_2 プリュームは、深度 1,000m、厚さ 40m、浸透率 10mD の貯留層に年間 10 万トンの CO_2 を圧入していた状態を考え、圧入直後の最も圧力が高い状態から移行が開始する場合を考えた。図 3.I.3-5 にフラクチャーの浸透率 200mD の場合の超臨界と気相の CO_2 飽和度分布の経時変化を示す。深度約 700m 地点で超臨界状態から気相状態に変化しているが、CO_2 が上昇する際には、横方向にはあまり広がっていかないことが分かる。これは CO_2 上昇の駆動力としては浮力の影響が大きく、圧入時の圧力の効果はそれほど大きくないことを示唆している。

図 3.I.3-6 に、フラクチャーの浸透率を変化させた場合の地表からの漏出レートと全漏出量の経時変化を示す。フラクチャーの浸透率が大きい方が、地表／海底での CO_2 漏出が見られるタイミングが早く、かつ瞬間的な漏出レートも大きいことが分かる。一方、全漏出量は、どの場合も約千トン以下で、全圧入量の 1%以下であった。この結果は、全漏出量をコントロールしているのは、フラクチャーの浸透率ではない事を表しており、地表までの漏出をするための浮力を得るためには貯留層内の CO_2 もフラクチャーに移行してくることが必要であることを示している。また、フラクチャーの浸透率が大きいと全漏出量が少なくなっている傾向が見られる。これは、フラクチャー内の浸透率が大きい方が、溶解拡散が積極的に起きていることを示しており、これは溶解 CO_2 分布の図からも示唆される現象である。

このように、環境影響評価のための断層／フラクチャーに沿った CO_2 移行シミュレーションの技術開発に関してはほぼ実用化の目処が立ち、貯留層内での

CO_2 分布や貯留量に応じた計算が可能となっている。本技術は、苫小牧地点における CCS 大規模実証試験の海洋汚染防止法に基づく許可申請において適用されている。

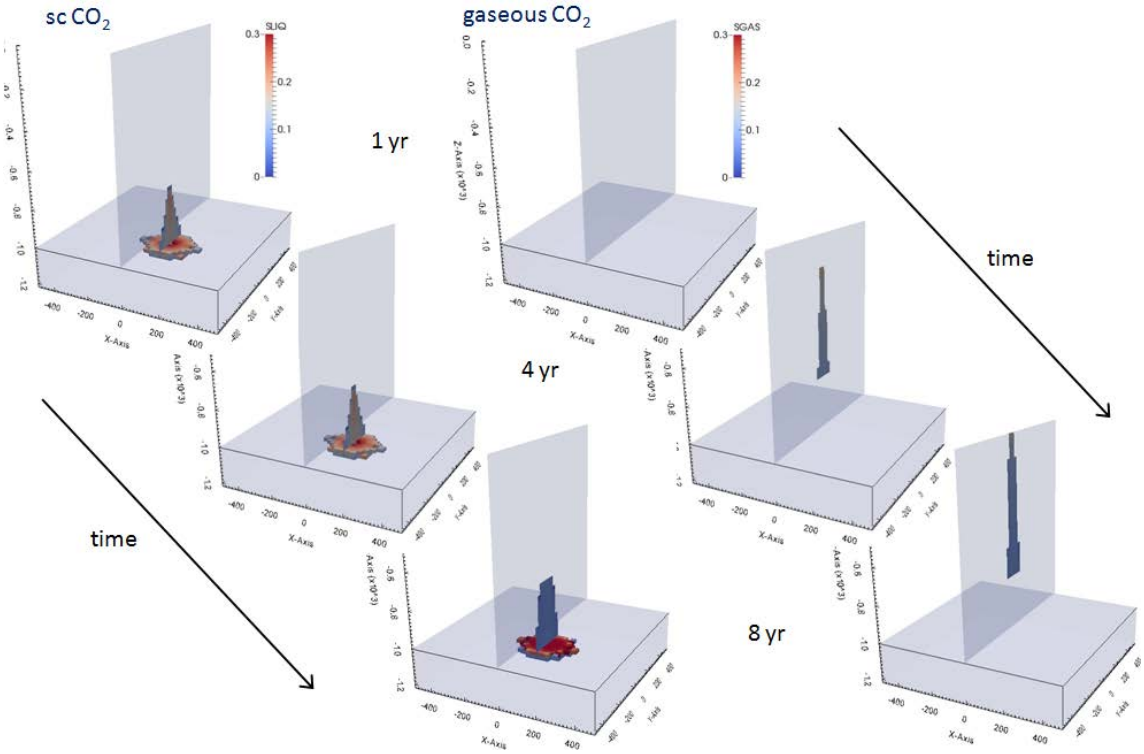


図 3.I.3-5　CO_2 移行時の CO_2 分布（移行開始後 1, 4, 8 年後）
左：超臨界 CO_2、右：気相 CO_2

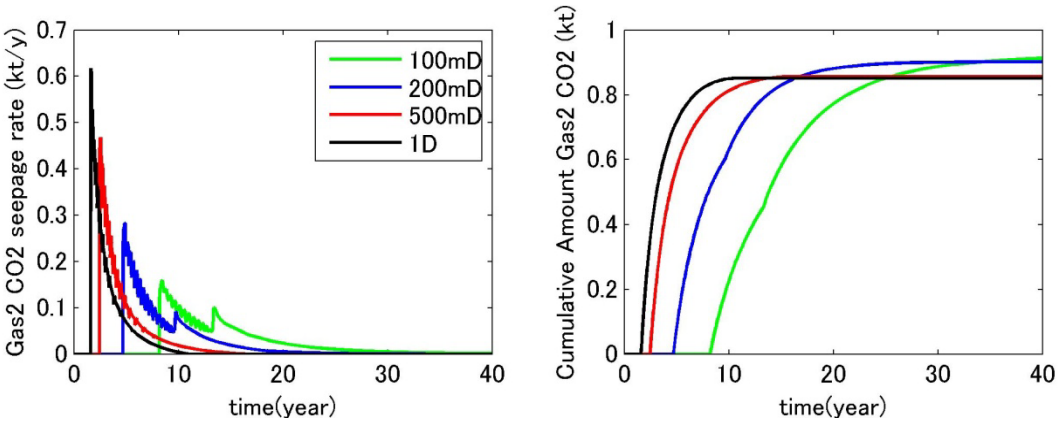


図 3.I.3-6　漏出レート（左）と、全漏出量（右）のフラクチャー浸透率依存性

（３）海中拡散シミュレーション手法の開発

海底下貯留の場合、地中を移行してきた CO_2 が海底から海へと漏出すると海水に溶けた CO_2 が拡散する。本事業では、数値モデルを用いた海水中の移行 CO_2 拡散シミュレーション手法の開発を行った。本手法により、万が一海底から貯留 CO_2 が漏出した場合、どのような範囲にどのような濃度で広がるのかをシミュレーションをすることができる。シミュレーション結果を本事業で開発した生物影響データベースと組み合わせることで、生物に影響し得る範囲が推定できる。漏出 CO_2 の広がりやその生物影響の範囲の推定は、CCS の社会受容性向上とともに、事業者の海洋汚染防止法対応に重要である。

① MEC-CO_2 二相流モデル

MEC-CO_2 二相流モデルは、海底から漏出した CO_2 の海中での広がりを 1 か月程度の期間シミュレーションするために開発されたモデルである。このモデルは静水圧モデルと非静水圧モデルがカップリングされており、非静水圧モデルに CO_2 二相流モデルが結合されており、漏出域付近を力学的にも解像度的にも詳細に計算できることが特徴である。本事業においては、MEC モデルの河川水の組み込み方法を改善し、河川水による表層の低塩分水の再現をできるようにした。また、適用例として伊勢湾を対象としたモデルを構築し漏出 CO_2 の拡散シミュレーションを行った。

図 3.I.3-7 は、94,600 トン／年という漏出率の場合のシミュレーション結果で、水深 11m での ΔpCO_2（漏出による pCO_2 の増加）の分布を示したものである。漏出点（×）から南西方向に ΔpCO_2 が広がっている。生物影響の閾値である 100～200μatm を超えるのは漏出域ごく近傍のみという結果となっている。

このシミュレーション手法は、苫小牧地点における CCS 大規模実証試験の海洋汚染防止法に基づく許可申請において用いられている。

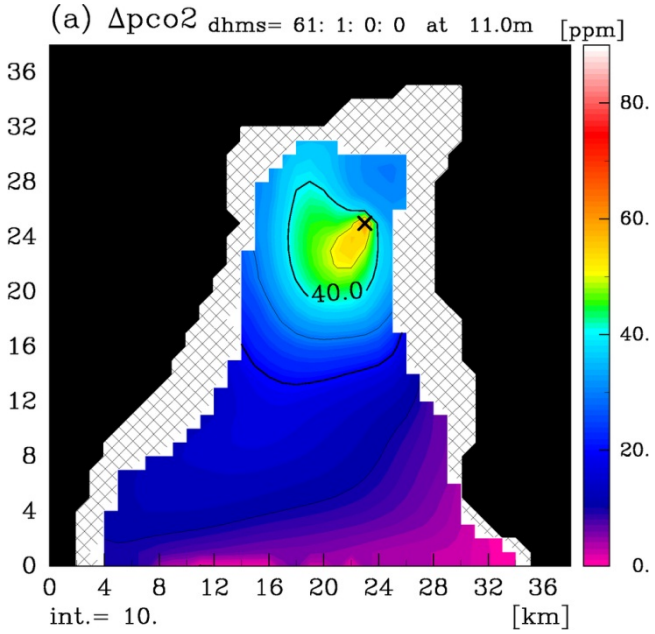


図 3.I.3-7　ΔpCO_2（漏出による pCO_2 の増加）の水平分布（シミュレーション結果）

② 長期計算用モデル

長期（季節変動を含む程度以上の期間）及び海流等の影響のある海域でのシミュレーションのために、海流や水塊変動の計算のための広域モデルと漏出域周辺を詳細に計算する狭域モデルを組み合わせるシミュレーション手法の開発を行っている。平成 26 年度までに、広域モデルについては選定と改良を行い、狭域モデルについては海水中の溶存 CO_2 の広がりを計算できるようにした。平成 27 年度には広域モデルと狭域モデルを組み合わせ、実用化に向けて CO_2 拡散シミュレーション手法を確立する。

狭域モデルで CO_2 漏出率を 250 トン／年として、秋ケースと春ケースの 2 つのシミュレーションを行った。計算期間はそれぞれ 11 月 1 日と 5 月 1 日から 60 日間とした。図 3.I.3-8 は漏出点における水温の時系列である。時間の経過とともに秋ケースでは水温が下がり成層が弱まり、春ケースでは水温が上がり成層が強まるという季節変動が表現できている。図 3.I.3-9 は漏出点付近のΔTCO_2 の鉛直分布である。流れの強さや向きによって、濃度や広がりが異なることが示されている。図 3.I.3-10 は漏出点海底におけるΔpCO_2 の時系列である。成層が強い場合には CO_2 が鉛直にかき混ぜられにくくなるため、同じ漏出率でも秋と春では海底のΔpCO_2 に大きな違いがあり、季節変化を考慮する重要性が示唆されている。

広域モデルと狭域モデルを組み合わせることで、熱的な季節変化のみならず、海流の変動や水塊の分布等の季節変化の影響を CO_2 拡散シミュレーションに組み込むことができるようになる。今後、日本では様々な海域で CO_2 の海底下貯

留が行われることになると考えられるが、本手法は、それぞれの海域の特性を考慮したシミュレーションを行うための礎となる。

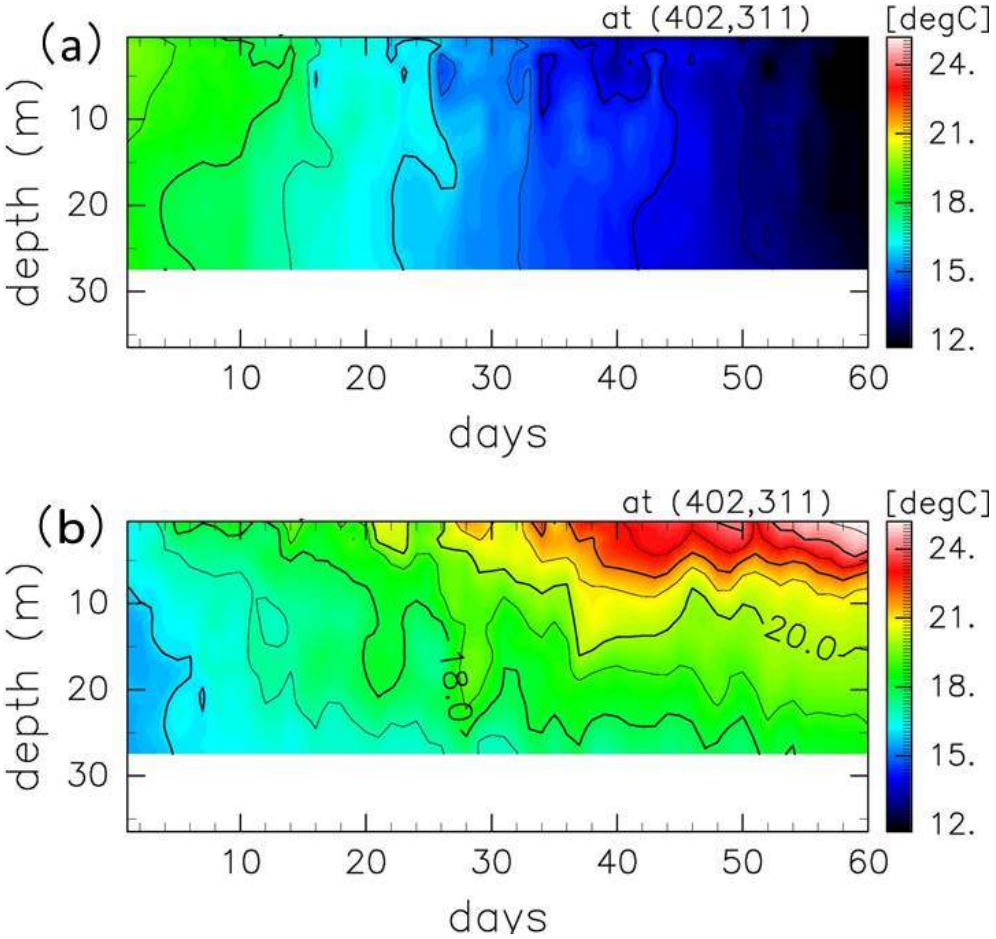


図 3.I.3-8　漏出点における水温の時系列（a: 秋ケース、b：春ケース）

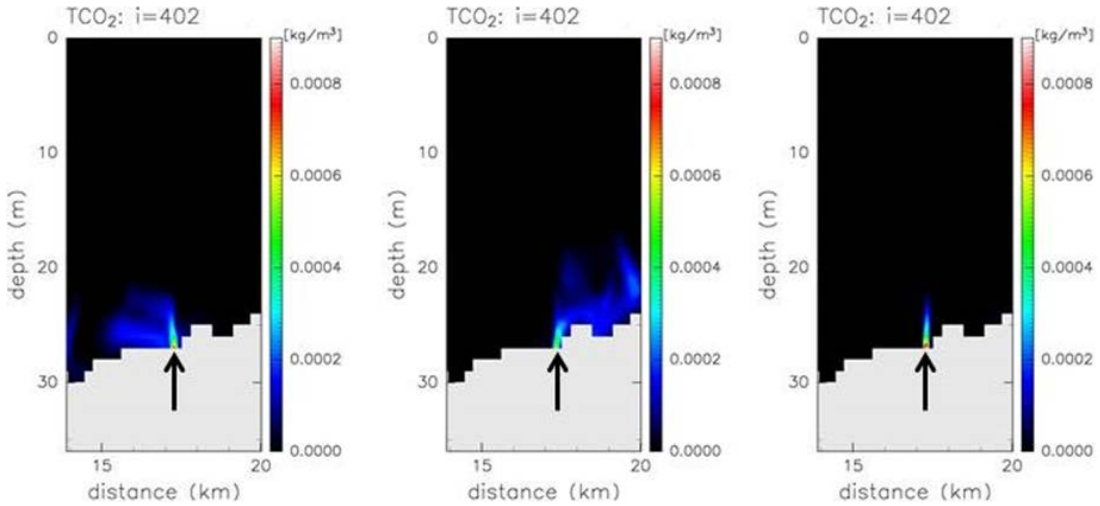


図 3.I.3-9　漏出点（矢印）付近の ΔTCO_2 の鉛直分布の例
（左から 11 月 9 日、10 日、11 日）

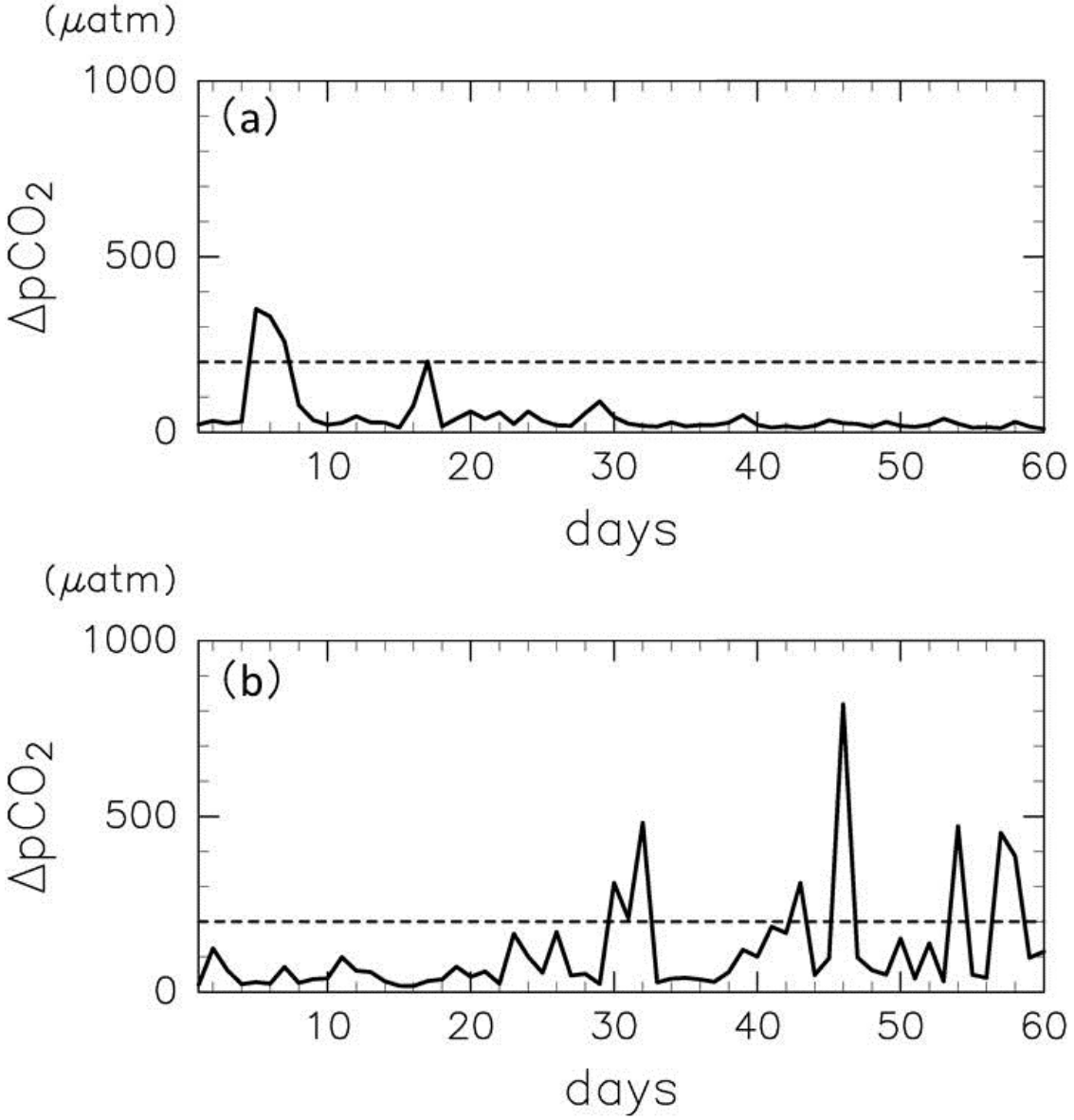


図 3.I.3-10　漏出点最下層におけるΔpCO_2の時系列（a : 秋ケース、b : 春ケース）

点線は生物影響の目安（200μatm）

（４）漏出 CO_2 モニタリング手法の開発

① QICSプロジェクトによる国際共同研究と知見の活用

貯留した CO_2 が万が一海中に漏出した際にこれをモニタリングする手法、また漏出によって環境にどの程度影響が及ぶのかを検討するために、海底浅部堆積層に CO_2 を圧入し、人為的に海底面から漏出させる実験（QICS：Quantifying and Monitoring Potential Ecosystem Impacts of Geological Carbon Storage）が英国スコットランドの実海域において実施された。

本プロジェクトは平成 22 年度に英国より日本側に紹介があった。当時日本の海域で CCS を実施する場合、万一の CO_2 の漏出の検知、生物への影響評価をどのように検証するかが課題であったが、QICS は、さまざまなモニタリング手段の評価や生物影響評価を英国の先進的知見を得ながら実施できるため、日本にとり極めて有益なプロジェクトであった。

そこで、RITE は平成 23 年度の計画段階より QICS に参加し、平成 24 年度の漏出実験において生物影響モニタリング手法の検証を実施した。

CO_2 の放出は平成 24 年 5 月～6 月にかけて 36 日間実施され、その後 3 か月間の回復期間を設けて、様々なモニタリング手法が検証され（図 3.I.3-11）、以下の成果を得た。

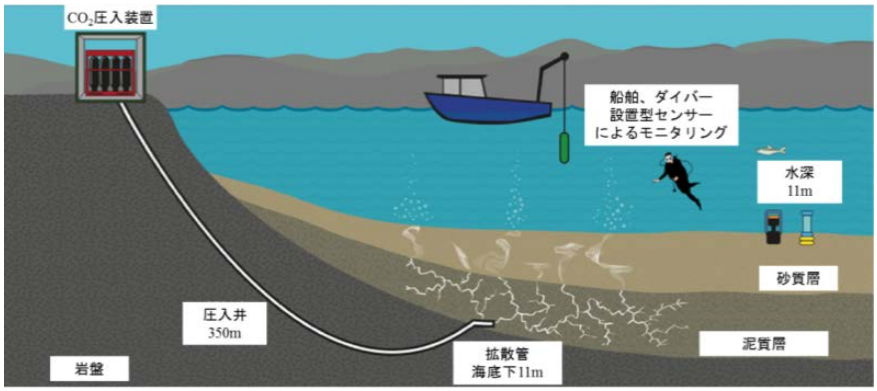


図 3.I.3-11　QICS 実験の模式図

1)音響探査技術によって、浅部堆積層中の CO_2 移行および海水中の CO_2 気泡拡散の状況をモニタリングできることが確かめられた。

2)海中音波モニタリング手法を活用することによって CO_2 気泡漏出量を定量的に把握できることが確かめられた。

3)既存のセンサー技術を活用することによって、堆積物中および海水中の化学的環境変化を把握できることが確かめられた。

4)遺伝子解析、カメラ観察および生理学的調査によって、生物影響は漏出点極近傍の狭い範囲でのみ検出されること、漏出を止めると速やかに影響が回復すること、が確かめられた。

前述の成果の 1)、2)は、CO_2 漏出を音響探査により、定量的に把握できることを示すものである。

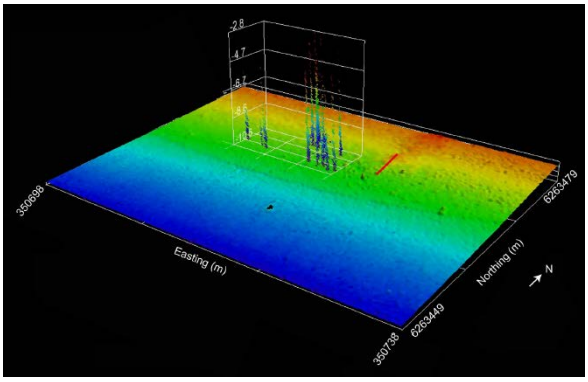


図 3.I.3-12　マルチビームソナーによる漏出 CO_2 気泡の観測例

図 3.I.3-12 は、音響探査技術の一つであるマルチビームソナーによる CO_2 気泡検知を示す図であり、海底面から水中に CO_2 気泡が漏出している様子を捉えている。本成果を日本の海域に当てはめるべく検討を進め、「音響技術適用による漏出 CO_2 検知手法の開発」に発展させた。

さらに、3)の知見から、海水中の溶存 CO_2 を検出することで、CO_2 の漏出を判断できることが明らかになった。RITE はその知見をもとに、さらに適用手法の検討を行い、「海水の化学的分析による漏出 CO_2 検知手法の開発」へと展開させた。

また、4)に関連する成果例を紹介する。図 3.I.3-13 は、CO_2 が放出されている地点でも、カニ類、ヒトデ類、魚類が影響なく行動していることを示している。

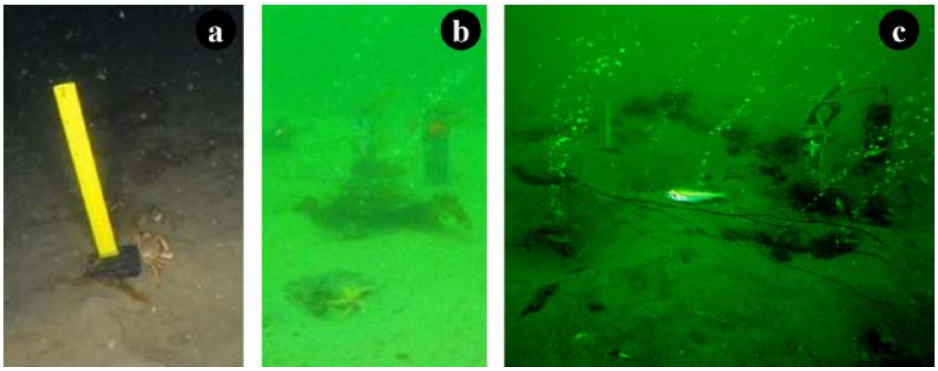


図 3.I.3-13　CO_2 放出点における底生の大型生物の行動

図 3.I.3-14 は、底生の小生物への影響は、CO_2 放出点極近傍の狭い範囲でのみ検出されること、漏出を止めると速やかに影響が回復すること表している。

Zone1 は放出点であり、CO_2 放出（青の四角部：36 日間の放出）により海底生物数が一時的に減少するものの、放出終了後すぐに回復することを示している。また Zone2 は放出点から 25m 離れた地点であり、CO_2 の放出に影響なく、生物数が自然変動していることを示している。

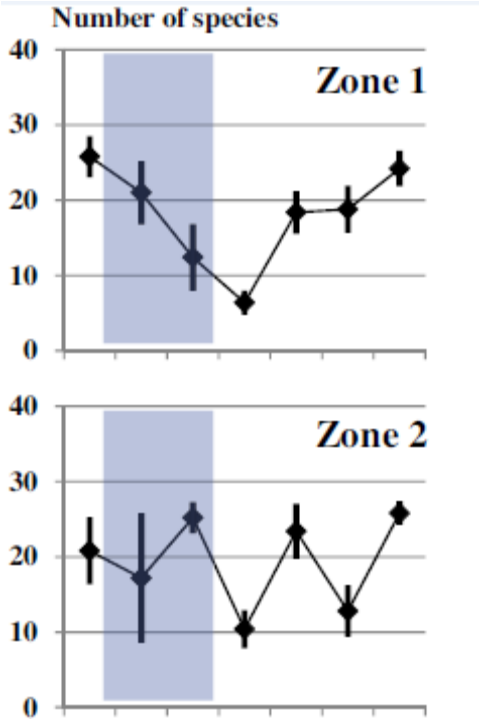


図 3.I.3-14　CO_2 放出点（Zone1）とそこから 25m 離れた地点（Zone2）における底生の小生物の堆積数の変化

以上の知見は、CO_2 漏出の生物への影響評価が限定的であることを示すものであり、RITE で進めている「生物影響データベースの開発」に反映させている。

② 音響技術適用による漏出CO_2検知手法の開発

気泡として漏出する CO_2 の検出手法として、サイドスキャンソナーやマルチビームソナーなどの音響探査機器の適用性を検討している。

平成 26 年度は、これら機器の気泡検出感度を明らかにするため、人為的に漏出した気泡の観測実験を行った。さらに、音響カメラを用いて気泡の漏出状態を詳細に観測する手法についても検討した。この結果、サイドスキャンソナーおよびマルチビームソナーの検出下限は、100ml/min であると推定された（図 3.I.3-15）。

機器の特性を検討した結果、通常時に行う監視ではサイドスキャンソナーにより気泡漏出の有無を監視し、気泡の漏出が疑われた場合の懸念時監視ではマ

ルチビームソナーを用いて気泡漏出位置の特定を行うことを提案した。さらに、異常時監視において漏出状態を把握するために定点監視が必要となった場合には、音響カメラの利用が有効であることを明らかにした。

本成果は、苫小牧地点における CCS 大規模実証試験の海洋汚染防止法に基づく許可申請に活用されている。

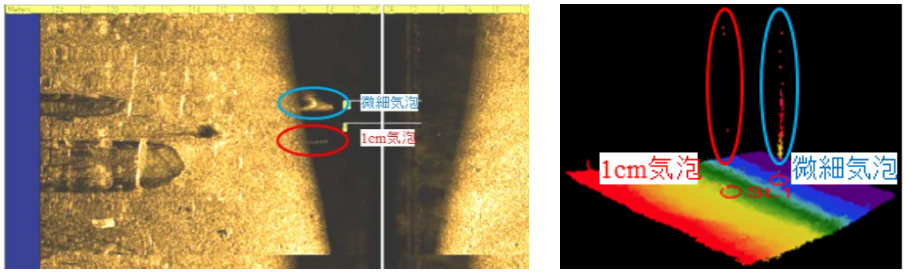


図 3.I.3-15　サイドスキャンソナー（左）とマルチビームソナー（右）による気泡検出画像

③　海水の化学的分析による漏出CO_2検知手法の開発

万が一の CO_2 漏出を海域でモニタリングする手法を実用化するために、漏出が生じていることを類推させる異常値の検出手法を開発している。海水中の CO_2 濃度は自然環境の変化に応じて大きく日周・季節変動するので、この変動から漏出によるシグナルを検出しなければならない。これまでに、伊勢湾の公表データを収集し、海水中の全炭酸量と溶存酸素量との関係の解析を行った。その結果、溶存酸素量（観測値）と全炭酸量（算出値）との間には有意な相関があり、この関係を用いることによって漏出による異常値を高い精度で検出できることを示した。

この検知手法の日本近海での汎用的な適用性を検証することを目的として、新潟県柏崎沖の海域をモデルサイトとして実海域調査を実施し、海水の炭酸系物質の測定・解析を行った。この結果、沿岸域底層の二酸化炭素分圧は、短期間で大きく自然変動することが明らかとなった（図 3.I.3-16）。また、全アルカリ度と塩分の間に、高い相関関係を認めた。さらに、多項目水質計で得た観測値から求めた全炭酸量計算値と採水による全炭酸量分析値の間にも、高い相関関係を認めた。このことから、汎用の多項目水質計を用いることにより、海水中の炭酸系を解析できる可能性が示された。また、pH センサーの校正方法を工夫することにより、海水中の炭酸系をより高精度に解析できることが示唆された。この調査で得られた溶存酸素濃度と全炭酸量の関係は、上述の自然変動と予想される範囲内に収まっていた（図 3.I.3-17）。

溶存酸素量と全炭酸量との関係をさらに精度よく解析し異常値を検出するためには、水塊構造や季節変化などに着目してデータを揃える必要があったため、実海域調査を実施し、本手法の有効性を確認した。

本成果は、苫小牧地点における CCS 大規模実証試験の海洋汚染防止法に基づく許可申請に活用されている。

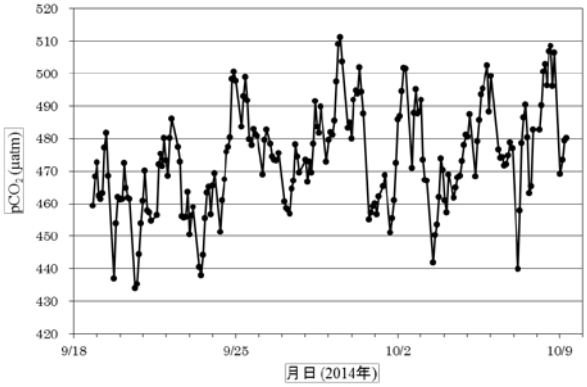


図 3.I.3-16　新潟県柏崎市沖の水深 50m における pCO_2 連続観測の結果
数日間で 50～70μatm 程度変化することが示されている

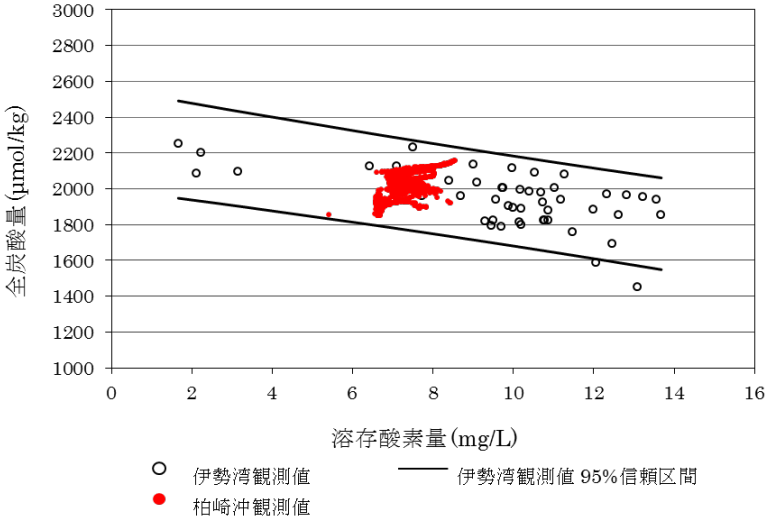


図 3.I.3-17　溶存酸素量と全炭酸量との関係
95%信頼区間を上側に外れる値は、漏出による異常値と判断することができる

（５）生物影響データベースの開発

貯留した CO_2 が万が一海中に漏出した際に生物にどの程度影響が及ぶのかを推定するために、広範な生物分類群について文献資料を収集し、生物影響データベースを構築した。

生物は多種多様な分類群から構成され、生物種により CO_2 による影響の受けやすさが大きく異なる。また、生物影響は、致死、成長・発育阻害、増殖への影響など短期・長期の影響に分かれる。さらに、一つの種においても卵から成体までの成長段階で CO_2 に対する感受性が異なることが知られている。

本調査では、調査の目的に該当する文献を文献検索によって収集し、その内容を解析して、データベースの元資料とした。データベースに収録した生物種数は、21 門 33 綱 84 目 143 科 246 種であった。

本データベースの特徴は、生物を生活史段階で区分し、さらには、実験に用いた CO_2 分圧（pCO_2）値にその条件下の pH の値を付記したことによって、海底下に貯留した CO_2 の漏出に対する生物影響試験を実施する場合や CCS の環境影響評価を実施する場合などに、より簡便にデータベースを利用できるように整理したことである。

生物影響データベースを解析した結果、石灰質殻を持つ底生生物種（サンゴ類、ウニ類、貝類など）は、石灰質殻を持たない遊泳生物種（魚類、イカ・タコ類など）より高 CO_2 環境に対する耐性が低いことが推察された。また、同一種でも生活史段階によって影響に差があることが明らかとなり、CO_2 漏出による生物影響を調査する場合、感受性の高い生活史段階での実験が必要であることも推察された。

高 CO_2 環境への曝露時間と致死影響の関係を解析したところ、生物影響がほぼ認められない CO_2 分圧の増加量（ΔpCO_2）は、100～200μatm であることが明らかとなった（図 3.I.3-18）。この値は、万が一の CO_2 漏出に対する生物影響を評価する場合、無影響の閾値として用いることができる。

開発したデータベースは、苫小牧地点における CCS 大規模実証試験の海洋汚染防止法に基づく許可申請において用いられている。

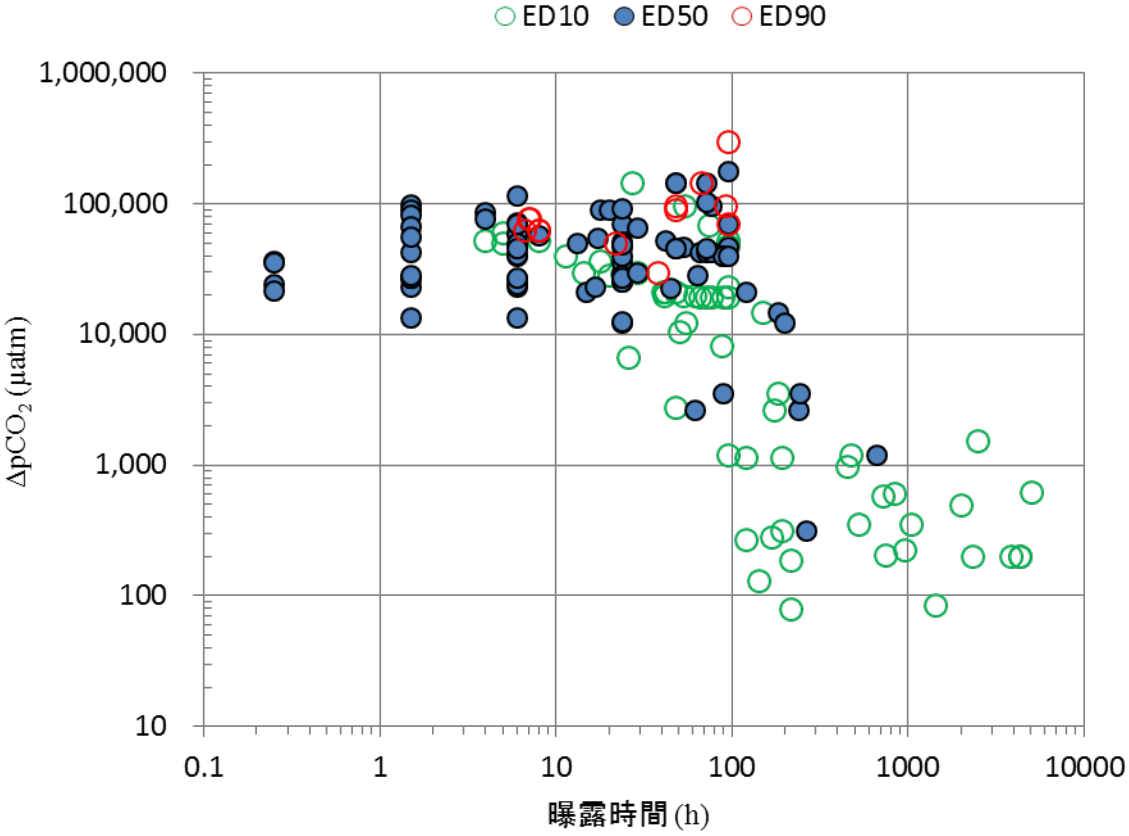


図 3.I.3-18　曝露時間と ΔpCO_2 の関係

ED90：90%の生物が影響を受けると推定される ΔpCO_2

ED50：50%の生物が影響を受けると推定される ΔpCO_2

ED10：10%の生物が影響を受ける（無影響）と推定される ΔpCO_2

Ⅱ　CCS 推進基盤の確立

1. CCS 技術事例集

本事業では将来、CCS 実施事業者が利用できる「CCS 技術事例集」の作成を平成 24 年度より開始した。CCS 事業関連技術の専門家で構成された「CCS 技術事例集検討 WG」の助言を受けつつ事例集の作成を進めている。

CCS 技術事例集作成の目的とイメージは次の通りである。

【目的】

① 技術的に安全かつ経済的なCCS事業の実施

・経済性、安全性、法令遵守（コンプライアンス）、合意形成の担保

・CCSの普及障壁の低減

② 日本の技術力の海外への発信・展開・普及の支援

・海外での事業展開、国際共同研究への参画

・国際標準化活動、国際機関との連携

【イメージ】

◇誰が使うか：　CCS実施事業者

◇使われ方：　CCSを実施する際に技術的に参考とする手引書として

◇形　態：　わが国が保有するCCS技術開発成果を集約、海外事例も参考とする

海外の CCS 事業のライフサイクルを参考にして CCS 技術事例集の構成案を検討し、全体を以下の 8 章に分けている。この他に、巻頭に「SPM（要旨）」、「はじめに」を、巻末に「用語集」・「略語集」などの付録を掲載する（図 3.II.1-1）。

図 3.II.1-1　CCS 技術事例集の構成

表 3.II.1-1 は事例集作成のスケジュールを示している。

平成 27 年度末までに、第 1 章「基本計画」～第 4 章「実施計画」を完成させ、その後、平成 32 年度までに、第 5 章「設計・建設」～第 8 章「閉鎖後管理」を完成させる計画である。

表 3.II.1-1　CCS 技術事例集の作成スケジュール

年度	平成 23 年 (2011 年)	平成 24 年 (2012 年)	平成 25 年 (2013 年)	平成 26 年 (2014 年)	平成 27 年 (2015 年)	～平成 32 年 (2020 年)
中長期計画	▲海外文献調査	△全体構成決定 △個別案件事例集作成開始 △長岡 PJ 実証試験事例集		△個別案件事例集作成開始 (第 1 章～第 4 章まで)	△個別案件事例集作成開始 (第 5 章～第 8 章まで)	
実証試験事業 (JCCS)		◇大規模実証試験開始				
国際標準化活動						

第 1～4 章の概要を以下に示す。

第1章【基本計画】

CCS 事業の概要、基本的な考え方を明示し、かつ、事業を成功させるためにサイト選定以降のフェーズでどのような内容の検討、作業をどのようなスケジュールで実施するかを記載するものである。事業実施の可否を決定する要因とその決定のタイミングも含む基本計画は基本計画書としてまとめられ、事業者側関係者、出資者、地域住民を含む利害関係者に提示されるべきものである。従って、具体的な計画ではないが、事業に関するエグゼクティブ・サマリー的な要素をもっており、CCS 事業の基本的な理解に役立つ内容を持っていなければならない。このため、CCS の技術的概念や、CCS 事業の概要を示し、リスク要因を明らかにしておくことも必要である。

第2章【サイト選定】

CO_2地中貯留に係る技術は、地層中の孔隙とそこにおける流体を取り扱うという点で、石油鉱業に類似する。しかし、本来地層中に存在していた地層流体を置換してCO_2を貯留するという点で、石油鉱業の技術をそのまま適用できるものではない。また、CO_2圧入に伴うある程度のリスクは存在し、当然最大限のリスク低減が必要であり、十分な安全性の確保はCO_2地中貯留（CCS）事業の遂行に必須である。リスク低減の決め手はいくつかあろうが、適切なサイト選定が基本的な手段である。地質状況は地域によって極めて多様であるが、対象とする堆積盆地において貯留システム構成要素の評価を適切に行うことによって最

良サイトの選定が可能となる。CO_2貯留サイトとしての要件を明らかにし、既存資料を使用しての広域評価とサイト選定作業の手順、利用される地質データの種類と入手手段、評価項目と評価基準などを記載し、1か所あるいは2か所の最終サイト候補を選定する作業のための手引き書とする。

第3章【サイト特性評価】

サイト特性評価フェーズは、海外での様々な CCS に係るガイドブックなどで提案している「Site Characterization」フェーズにおおむね相当する。サイト選定で 1 か所あるいは 2 か所の最終サイト候補が選定された後の段階に、それらのサイト候補が、CCS にとって適切かどうかを更に詳細に評価する段階である。多くのケースではサイト選定フェーズでは地下地質データの新規取得は行われず、既存資料によってサイト候補が選定されるが、サイト特性評価フェーズでは、貯留能力に関してサイトとしての適合性が、新規に取得されるデータを利用して評価される。

技術的な要件だけからではなく、リスク評価や社会的、経済的といった非技術的な面でも、新たな検討を追加し、CCS 実現性を評価する。

規制当局に対して CCS 事業許可申請がなされる際、規制当局は、サイトの安全性を保障する詳細な地質情報、地質モデルと CO_2 挙動に関するシミュレーション結果、更にリスク評価や日技術的評価結果を求めるのが一般的であるため、その点を十分意識して、特性評価を実施する必要がある。

第4章【実施計画】

各 CCS プロジェクトにおいて、貯留サイトは技術的、非技術的に独自性を有している。実施計画においても、サイト選定、サイト特性評価段階で明らかになったサイト特有の技術的、非技術的特徴に対応した実施計画を立てることが安全な CCS 実施の重要な要素である。

CCS 事業は圧入開始から圧入終了、サイト閉鎖、さらには閉鎖後管理に至る非常に長い継続時間を有し、そのすべてのフェーズについての計画を当初から実施計画として、明確にしておくことは、経済性を含めた事業成功のために不可欠である。規制当局に提出する CCS 事業許可申請には、事業の全体を網羅してそれぞれのフェーズでの長期間の安全性とそれを証明するための方法、それを可能にする資金的な裏付け、などを示す実施計画書添付の必要性もある。また、実施計画は、単に想定された量の CO_2 を安全に貯留実現するため、あるいは規制当局に提出する書類上の必要性や PA、PO に係るだけでなく、圧入が終了し、最終的には責任を移行させるまでの計画を取扱わなければならないため、プロジェクトのライフタイム全体を見据えた長期的視野に立った計画が極めて重要である。

３－１－３　特許出願状況等

本事業において得られた研究成果は、随時とりまとめを実施して、国内外の技術論文誌に投稿している。国内外の高い水準の論文誌への掲載により、本事業の成果が国際的にも価値のある成果であることを示している。論文の他にも、国内外の学会における口頭発表や各種出版物への投稿、寄稿などにより、研究成果を広く社会に周知し、還元している。

特許については前回の平成 24 年度中間評価以降、光ファイバーセンシング技術、X 線 CT 装置を用いた CO_2 挙動解析において、出願件数は 4 件となり、幅広く本技術を応用した内容となっており、今後も本技術の実用化においてキーとなる重要な技術である。

前回の平成 24 年度中間評価以降の論文、口頭発表、特許等に関する成果の状況について、表 3-1-3-1、表 3-1-3-2、表 3-1-3-3 に示す。

表 3-1-3-1　研究項目別論文、口頭発表、特許、その他出版物の件数一覧

	論文	口頭発表	特許	その他出版物等	合計
Ⅰ安全性評価手法の開発	39	125	4	9	177
ⅡCCS 推進基盤の確立	0	0	0	0	0
合計	39	125	4	9	177

表 3-1-3-2　年度別論文、発表、特許、その他出版物の件数一覧

	平成 24 年度	平成 25 年度	平成 26 年度	合計
論文	9	12	18	39
口頭発表	43	38	44	125
特許	1	2	1	4
その他出版物等	0	2	7	9
合計	53	54	70	177

表 3-1-3-3 論文、口頭発表、特許、その他出版物リスト

◆原著論文

RITE

	タイトル	研究者	掲載先
1.	Reconstruction of paleoceanographic conditions in the northwestern Pacific Ocean over the last 500 ky based on calcareous nannofossils and planktic framiniferal assemblages	Shun Chiyonobu, Motoyoshi Oda, Yuko Mori	Marine micropaleontology, Vol. 96-97, p29-37, 2012
2.	Unconformity between the Late Miocene-Pliocene accretionary complex and Pliocene trench-slope sediments, central Japan	Yuzuru Yamamoto, Shun Chiyonobu, Lislie Gadenne, et al.	Island Arc, Vol. 21, p231-234, 2012
3.	Middle-Upper Miocene calcareous nannofossil biostratigraphy in the southern Boso Peninsula, central Japan: implications for basin evolution and fault tectonics in the subduction-accretion system	Shun Chiyonobu, Yuzuru Yamamoto, Saneatsu Saito	Tectonophisics, submission, 2012
4.	多孔質砂岩中に存在する低孔隙率の葉理面が超臨界 CO_2 流動に与える影響： 弾性波速度による検討	北村圭吾，薛自求，千代延俊，山田達也，西澤修	Journal of MMIJ, Vol. 128, p511-518, 2012
5.	Analysis of Momentum Transfer in a Lid-Driven Cavity Containing a Brinkman-Forchheimer Medium	Duoxing Yang, Ziqiu Xue, Simon A. Mathias	Transport in Porous Media, Vol. 92, No.1, p101-118, 2012
6.	Effect of formation water compositions on predicting CO_2 behavior case study at the nagaoka post-injection monitoring site	Saeko Mito, Ziqiu Xue, Tatsuya Sato	Applied Geochemistry, Volume 30, Pages 33-40 . March 2013
7.	Effects of elevated pCO_2 on reproductive properties of the benthic copepod Tigriopus japonicus and gastropod Babylonia japonica	Jun Kita, Takashi Kikkawa, Takamasa Asai, Atsushi ishimatsu	Marine Pollution Bulletin. 73, 402–408, 2013.

	タイトル	研究者	掲載先
8.	Effect of CO_2 on benthic biota: AN in situ benthic chamber wxperiment in Strfjorden (Norway)	Hiroshi Ishida, Lars G. Golmen, Julia West, Martin Kuger, Patricia Coombs, John Arthur Berge, Tatsuo Fukuhara, Michimasa Magi, Jun Kita	Mallin Pollition Bulletin. 73, 443–451, 2013.
9.	Evaluation of a resistivity model derived from time-lapse well logging of a pilot-scale CO_2 injection site, Nagaoka Japan	Takahiro Nakajima, Ziqiu Xue	International journal of Greenhouse Gas Control 12 , 288-299, 2013
10.	The potential of Vs and Vp-Vs relation for the monitoring of the change of CO_2-saturation in porous sandstone	Keigo Kitamura, Ziqiu Xue, Tetsuya Kogure, Osamu Nishizawa	International journal of Greenhouse Gas Control 25, 54-61, 2013 ,2014
11.	Study on temperature measurement in water saturated porous media using MRI,	Y.C. song, L.L. Jiang, Y. Liu, M.J. Yang, Y.C. Zhao, B.L. Dou, Z.Q. Xue	Journal of Porous Media, 17-4, 347-358,2014
12.	Study of the fluid flow characteristics in a porous medium for CO_2 geological storage using MRI	Y.C. song, L.L. Jiang, Y. Liu, M.J. Yang, Y.C. Zhao, B.L. Dou, A. Abuliti, Z.Q. Xue	Magnetic Resonance Imaging, 32,5,574-584,2014
13.	長岡 CO_2 圧入実証試験サイトにおける VSP の適用	坂下晋、信岡大、青木直史、東宏幸、薛自求	物理探査, 66、261-275,2013
14.	Flow behaviour of supercritical CO_2 and brine in Berea sandstone during drainage and imbibition revealed by medical X-ray CT images	Yi Zhang, Osamu Nishizawa, Tamotsu Kiyama, Shun Chiyonobu, Ziqiu Xue	Geophysical Journal International. , 197 (3), p1789-1807, 2014

	タイトル	研究者	掲載先
15.	CCS 分野における含泥率の三次元地質モデル構築とその意義：長岡の CO_2 実証試験サイトの例	伊藤拓馬、中島崇裕、千代延俊、薛自求	地質学雑誌，査読中
16.	Simulation of high concentration of iron in dense shelf water in the Okhotsk Sea	Keisuke Uchimoto, Tomohiro Nakamura, Jun Nishioka, Humio Mitsudera, Kazuhiro Misumi, Daisuke Tsumune, Masaaki Wakatsuchi	Progress in Oceanography, 126, 194-210
17.	Effects of temporal variation in tide-induced vertical mixing in the Kuril Straits on the thermohaline circulation originating in the Okhotsk Sea	Tomohiro Nakamura, Yuuki Takeuchi, Keisuke Uchimoto, Humio Mitsudera, Masaaki Wakatsuchi	Progress in Oceanography, 126, 135-145
18.	Saturation-path dependency of P-wave velocity and attenuation in sandstone saturated with CO_2 and brine revealed by simultaneous measurements of waveforms and X-ray CT images	Yi Zhang, Osamu Nishizawa, Tamotsu Kiyama, Ziqiu Xue	Geophysics, Accepted
19.	弾性波の減衰を利用した CO_2 地中貯留モニタリングの可能性	東　宏幸，　薛自求，　松岡俊文	物理探査学会，vol.68 No.1 2015
20.	Detection and impacts of leakage from sub-seafloor deep geological carbon dioxide storage	Jerry Blackford, Henrik Stahl, Jonathan M. Bull, Benoît J.P. Bergès, Melis Cevatoglu, Anna Lichtschlag, Douglas Connelly, Rachael H. James, Jun Kita, Dave Long, Mark Naylor, Kiminori Shitashima,	Nature Climate Change, 4, 1011–1016, 2014

	タイトル	研究者	掲載先
		Dave Smith, Peter Taylor, Ian Wright, Maxine Akhurst, Baixin Chen, Tom M. Gernon, Chris Hauton, Masatoshi Hayashi, Hideshi Kaieda, Timothy G. Leighton, Toru Sato, Martin D.J. Sayer, Masahiro Suzumura, Karen Tait, Mark E. Vardy, Paul R. White, Steve Widdicombe	
21.	Causes of the multidecadal-scale warming of the intermediate water in the Okhotsk Sea and western subarctic North Pacific	Keisuke Uchimoto, Takuya Nakanowatari, Tomohiro Nakamura, Hiroki Uehara, Humio Mitsudera, Kay I. Ohshima, Hiroyasu Hasumi, Masaaki Wakatsuchi	Journal of Climate, 投稿中
22.	Benthic megafauna and CO_2 bubble dynamics observed by underwater photography during a controlled sub-seabed release of CO_2	Jun Kita, Henrik Stahl, Masatoshi Hayashi, Tammy Green, Yuji Watanabe, Stephen Widdicombe	International Journal of Greenhouse Gas Control, doi:10.1016/j.ijggc.2014.11.012
23.	Response of the ammonia oxidation activity of microorganisms in surface sediment to a ontrolled sub-seabed release of CO_2	Yuji Watanabe, Karen Tait, Simon Gregory, Masatoshi Hayashi, Akifumi Shimamoto, Peter	International Journal of Greenhouse Gas Control, doi:10.1016/j.ijggc.

	タイトル	研究者	掲載先
		Taylor, Henrik Stahl, Kay Green, Ikuo Yoshinaga, Yuichi Suwa, Jun Kita	2014.11.013
24.	二酸化炭素回収貯留（CCS）における微生物技術活用の可能性	中村 孝道	生物工学会誌，第93巻第2号, 82-90, 2015
25.	Experimental assessment of well integrity for CO_2 geological storage: I. Batch experimental results on geochemical interactions between a CO_2-brine mixture and a sandstone-cement-steel sample	Saeko Mito, Ziqiu Xue, Hisao Satoh	International Journal of Greenhouse Gas Control，投稿中
26.	Experimental assessment of well integrity for CO_2 geological storage: II. A numerical study on geochemical interactions between a CO_2-brine mixture and a sandstone-cement-steel sample	Joachim Tremosa, Saeko Mito, Pascal Audigane and Ziqiu Xue	International Journal of Greenhouse Gas Control，投稿中
27.	The effect of effective normal stress on particle breakage, porosity and permeability of sand: Evaluation of faults around methane hydrate reservoirs	Sho Kimura, Hiroaki Kaneko, Takuma Ito, Hideki Minagawa	Tectonophysics, 630, 285-299
28.	ルースパウダー蛍光 X 線分析法による貯留対象層のコア試料の迅速定量化への適用	中野和彦，伊藤拓馬，高原晃里，森山孝男，薛自求	X 線分析の進歩, 46, 227-235 (2015)

AIST

	タイトル	研究者	掲載先
29.	Dragon-Kings in rock fracturing: insights gained from rock fracture tests in laboratory	Xinglin Lei	European Physical Journal, Special Topics, 205, p217-230, 2012

	タイトル	研究者	掲載先
30.	Water Saturation Dependence on CO2 Sorption Potential of Sandstones	Takashi Fujii, Kaori Endo, Satomi Nakagawa, Yoshiyuki Sato, Hiroshi Inomata, Shinsuke Nakao, Toshiyuki Hashida	Natural Resources, 3, p48-55, 2012
31.	Reactive transport simulation study of geochemical CO2 trapping in the Tokyo-Bay model - with special interest to the behavior of dawsonite	Yasuko Okuyama, Norifumi Todaka, Munetake Sasaki, Shuji Ajima, Chitoshi Akasaka	Applied Geochemistry, 30, p57-66, 2013
32.	CO2 地中貯留—「地球温暖化」対策への地質学の貢献可能性—	當舎利行、奥山康子、石戸恒雄	地質学雑誌, 119, No.2, p124-138, 2013
33.	CO2 地中貯留における長期地化学プロセス	徂徠正夫	地質学雑誌, 119, No.2, p139-152, 2013
34.	Relocation of microseismicity using reflected waves from single-well, three-component array observations: Application to CO2 injection at the Aneth oil field	Nobukazu Soma, James Rutledge	International journal of Greenhouse Gas Control, 19, p74-91, 2013
35.	超臨界 CO2 注入に伴う来待砂岩および飯館花崗岩の浸透率の変化	藤井孝志、菅井裕一、佐々木久郎、橋田俊之、當舎利行、中尾信典	資源・素材学会誌, 129, p701-706, 2013
36.	CO2 地中貯留の長期安全性評価	徂徠正夫	日刊工業新聞 科学技術・大学, p28, 2014
37.	Experimental Study of Sealing Performance: Effects of Particle Size and Particle–Packing State on Threshold Pressure of Sintered Compacts	Masao Sorai, Takashi Fujii, Yuki Kano, Shinichi Uehara, Katsuya Honda	Journal of Geophysical Research, 10.1002/2014JB011177, 2014

	タイトル	研究者	掲載先
38.	Impact of effective pressure on threshold pressure of Kazusa Group mudstones for CO2 geological sequestration	Takashi Fujii, Shinichi Uehara, Masao Sorai	Materials Transactions, 56, No.4, p519-528, 2015
39.	Evolution of Permeability during Facturing Processes in Rocks under Conditions of Geological Storage of CO2	Takashi Fujii, Takahiro Funatsu, Yasuki Oikawa, Masao Sorai, Xinglin Lei	Materials Transactions, 56, No.5, 2015

◆口頭発表

RITE

	タイトル	研究者	発表先
1.	超音波および cbl 検層による長岡 CO_2 圧入サイトでの坑井健全性評価の試み	中島崇裕，薛自求，渡辺二郎，伊藤喜則，坂下晋	日本地球惑星科学連合 2012 年大会，2012/5/20
2.	Impact of lithofacies and reservoir hetorogeneity on distribution of CO_2 at nagaoka pilot site	Shun Chiyonobu, Takahiro Nakajima, Yi Zhang, Takeshi Tsuji, Ziqiu Xue	日本地球惑星科学連合 2012 年大会，2012/5/20
3.	定常法による相対浸透率測定：X 線 CT スキャンと物質収支法より測定された水飽和度の比較	小暮哲也，西澤修，千代延俊，矢崎至洋，柴谷聖司，薛自求	日本地球惑星科学連合 2012 年大会，2012/5/20
4.	CO_2 地中貯留サイトにおける微小振動観測ー米国 cranfield 油田の初期観測結果についてー	高岸万紀子，橋本励，堀川滋雄，楠瀬勤一郎，瀧澤孝一，薛自求	日本地球惑星科学連合 2012 年大会，2012/5/20
5.	Japan nagaoka pilot project and recent ccs research activities	Ziqiu Xue	International Workshop on CO_2 geological sequestration, China, 2012/07/05

	タイトル	研究者	発表先
6.	Overview and comparison of environmental assessment for the CCS	Jun Kita	IEA-GHG, 2012 Environmental Impacts of CO_2 Storage Workshop, USA, 2012/7/17-19
7.	Microbial nitrification activity in the surface sediment as a biological monitoring tool for CO_2 leakage	Masatoshi Hayashi, Akifumi Shimamoto, Yuji Watanabe, Jun Kita	IEA-GHG Environmental Impacts Workshop, 2012/7/18
8.	Geological modeling and its application of Nagaoka pilot site, implication for reservoir heterogeneity	Shun Chiyonobu, Nakajima Takahiro, Aoki Naoshi, Takeshi Tsuji, Takahashi Akihisa, Xue Ziqiu	International Geological Congress, 2012/8/6
9.	Nagaoka post-monitoring update and recent research activities in Japan	Mito Saeko, Xue Ziqiu	Carbon storage R&D project review meeting, Pittsburgh, USA, 2012/8/22
10.	光ファイバーを用いたベレア砂岩のひずみ測定	堀内侑樹，小暮哲也，薛自求，松岡俊文	資源素材学会　秋季大会, 2012/9/11
11.	Ｘ線ＣＴ可視化による多孔質砂岩内 CO_2 流動特性の解析	辻真也，小暮哲也，薛自求，西尾普，亀山寛達，松岡俊文	資源素材学会　秋季大会, 2012/9/11
12.	CCS 実証サイトにおける微小振動観測－初期観測結果について－	橋本励，高岸万紀子，楠瀬勤一郎，堀川滋雄，薛自求	日本応用地質学会平成 24 年度研究発表会, 2012/11/1-2
13.	海底下二酸化炭素貯留の環境影響評価について	喜田潤	東京大学大気海洋研究所共同利用研究集会　バイオミネラリゼーションと石灰化-遺伝子から地球環境まで-東京大学海洋研究所,2012/11/8-9

	タイトル	研究者	発表先
14.	Geochemical trapping of CO_2 in saline aquifer storage; results of the repeated formation fluid sampling at the Nagaoka site	Saeko Mito, Ziqiu Xue	11th International Conference on Greenhouse Gas Technologies (GHGT-11), ICC Kyoto, 2012/11/18-22
15.	Chemical impacts of CO_2 flooding on well composite samples: experimental assessment of well integrity for CO_2 sequestration	Yuki Asahara, Saeko Mito, Ziqiu Xue, Yuji Yamashita, Kazutoshi Miyashiro	11th International Conference on Greenhouse Gas Technologies (GHGT-11), ICC Kyoto, 2012/11/18-22
16.	Effects of Impurities in CO_2 stream on Marine Organisms	Jun Kita, Hideaki Kinoshita	11th International Conference on Greenhouse Gas Technologies (GHGT-11), ICC Kyoto, 2012/11/18-22
17.	Effects of elevated pCO_2 on the nitrification activity of microorganisms in marine sediment	Masatoshi Hayashi, Jun Kita, Yuji Watanabe, Akifumi Shimamoto	11th International Conference on Greenhouse Gas Technologies (GHGT-11), ICC Kyoto, 2012/11/18-22
18.	Evaluation of CO_2 Saturation at Nagaoka Pilot-Scale Injection Site Derived from the Time-Lapse Well Logging Date	Takahiro Nakajima, Ziqiu Xue	11th International Conference on Greenhouse Gas Technologies (GHGT-11), ICC Kyoto, 2012/11/18-22

	タイトル	研究者	発表先
19.	Assessment of Well Integrity at Nagaoka CO_2 Injection Site Using Ultrasonic Logging and Cement Bond Log Date	Takahiro Nakajima, Ziqiu Xue, Jiro Watanabe, Yoshinori Ito, Susumu Sakashita	11th International Conference on Greenhouse Gas Technologies (GHGT-11), ICC Kyoto, 2012/11/18-22
20.	Study on CO_2 undergroundbehavior:natunal analogue study on leaked natural gas in the Mobara gas field, Japan	海江田秀志	11th International Conference on Greenhouse Gas Technologies (GHGT-11), ICC Kyoto, 2012/11/18-22
21.	Study on CO_2 mineral trapping	海江田秀志	11th International Conference on Greenhouse Gas Technologies (GHGT-11), ICC Kyoto, 2012/11/18-22
22.	長岡サイトにおけるCO_2分布域の弾性波・比抵抗検層データの解析について	中島崇裕	JOGMEC-TRC ウィーク 2012 フォーラム 1：地下深くの貯留層におけ る流体の動きを把握する～残留炭化水素の開発に向けた最新モニタリング技術～ JOGMEC-TRC 大講堂, 2012/11/27
23.	海底下貯留における海域環境影響評価手法の開発	内本圭亮	CCS テクニカルワークショップ, 2013 年 1 月 24 日

	タイトル	研究者	発表先
24.	サイト選定と環境影響評価-法規制から実例まで-	喜田潤	CCS テクニカルワークショップ, 2013 年 1 月 24 日
25.	CCS RD&D and Strategy in Japan	田中良三	The 5th Symposium on CCS in Gungih Area, Central Java, Indonesia, 2013 年 3 月 16 日
26.	閾値圧測定のための超臨界 CO_2 を注入した泥岩の膨張変形挙動	木山保，西澤修，薛自求	資源・素材学会春季大会, 2013 年 3 月 29 日
27.	長岡サイトの貯留層における Vp/Vs と岩相の関係	中島崇裕，西澤修，薛自求	日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 2013 年 5 月 19 日
28.	分布式光ファイバーによるセメント試料の温度・ひずみ測定	小暮哲也，薛自求	日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 2013 年 5 月 19 日
29.	CO_2 地中貯留サイトにおける微小振動観測－米国 Cranfield 油田の観察結果－（その２）	高岸万紀子，橋本励，堀川滋雄，楠瀬勤一郎，薛自求	日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 2013 年 5 月 22 日
30.	長岡 CCS サイトの 3D 貯留層モデルと CO_2 挙動シミュレーション	千代延俊，中島崇裕，薛自求	JPGU Meeting 2013, 2013 年 5 月 22 日
31.	CO_2 地中貯留における部分飽和と弾性波の減衰	東宏幸，薛自求	第 128 回物理探査学会学術講演会, 東京, 2013 年 6 月 3 日
32.	A relationship between Vp/Vs and rock properties in the reservoir at Nagaoka CCS site	Takahiro Nakajima, Osamu Nishizawa, Ziqiu Xue	AGOS 10th Annual meeting, 2013 年 6 月 24 日
33.	光ファイバーセンシングによる坑井近傍の地層安定性モニタリング手法の開発	小暮哲也、薛自求	石油技術協会平成 25 年度春季講演会, 2013 年 6 月 28 日
34.	Microseismic monitoring at the CCS and CO_2-EOR fields -Lessons from the Nagaoka pilot CO_2 injection site-	Ziqiu Xue, Takahiro Nakajima	6th International Symposium on In-Situ Rock Stress, 2013 年 8 月 20 日
35.	Reactive transport modelling of mineral trapping of CO_2, revised by water sampling data at Nagaoka CO_2 storage site	Yuko Kawata, Ziqiu Xue, Saeko Mito	Goldschmidt2013, 2013 年 8 月 27 日

	タイトル	研究者	発表先
36.	Modelling Approaches to assess CO_2 leakage	Keisuke Uchimoto	IEAGHG Monitoring Network and Environmental Research Network Combined Meeting, Canberra, Australia, 2013 年 8 月 30 日
37.	Effects of elevated pCO_2 on the aerobic ammonia oxidation activity of micro-organisms in marine sediment	林正敏，嶋本晶文，勝山千恵，諏訪裕一，吉永郁生，渡辺雄二，喜田潤	3rd International Conference on Nitrification, 2013 年 9 月 3 日
38.	数種の泥岩の定流量排出法による超臨界CO_2閾値圧測定と膨張変形挙動	木山保，西澤修，薛自求	平成 25 年度 資源・素材関係学協会合同秋季大会, 2013 年 9 月 4 日
39.	X-CT による多孔質砂岩中の流体置換の可視化と弾性波の同時測定の試み	薛自求，張毅，西澤修，木山保	平成 25 年度 資源・素材関係学協会合同秋季大会，北海道, 2013 年 9 月 4 日
40.	西部北太平洋亜熱帯海域における植物プランクトン群集組成台風による影響の可能性	石田洋，牧野高志，石坂丞二，古澤一思，渡辺豊，渡辺雄二，喜田潤	2013 年度日本海洋学会秋季大会, 2013 年 9 月 17 日
41.	CO_2 地中貯留サイトにおける微小振動観測と観測システムの検知能力評価	高岸万紀子，橋本励，堀川滋雄，楠瀬勤一郎，薛自求	日本地震学会 2013 年度秋季大会, 2013 年 10 月 7 日
42.	CO_2 地中貯留モニタリングにおける弾性波の減衰の利用	東宏幸，薛自求	第 129 回物理探査学会学術講演会, 2013 年 10 月 22 日
43.	Well Integrity at Nagaoka site using time-lapse logging data	Takahiro Nakajima	CO_2CARE, 2013 年 11 月 4 日
44.	大規模CO_2地中サイトにおける微小振動観測（その３） —なぜ Cranfield サイトで微小振動が観測されていないのか？—	高岸万紀子，橋本励，堀川滋雄，楠瀬勤一郎，薛自求	日本地球惑星科学連合 2014 年大会, 2014 年 5 月 2 日
45.	CO_2 圧入に伴う微小振動評価手法の開発	高岸万紀子	天然ガス鉱業会 第 2 回地下貯蔵勉強会, 2014 年 5 月 26 日

	タイトル	研究者	発表先
46.	CCS Regulation and Demonstration in Japan	Ryozo Tanaka	6th IEA International CCS Regulatory Network Meeting, Paris, 2014 年 5 月 27 日
47.	CO_2-EOR における弾性波速度によるモニタリングの可能性	東宏幸，薛自求	第 130 回物理探査学会学術講演会，2014 年 5 月 28 日
48.	Recent and Ongoing CCS Developments in Japan	Ryozo Tanaka	66th IEA WPFF meeting, Beijing, 2014 年 6 月 6 日
49.	The estimation of CO_2 saturation by seismic velocity and amplitude attenuation	Hiroyuki Azuma, Ziqiu Xue, Toshifumi Matsuoka	AOGS 2014, 2014 年 7 月 30 日
50.	Numerical simulation of CO_2 leakage for assessment of the environmental impacts at geological storage sites	Takahiro Nakajima, Ziqiu Xue, Shun Chiyonobu, Hiroyuki Azuma	AGOS 11th Annual meeting, 2014 年 7 月 31 日
51.	Effects of heterogeneity on CO_2 storage in a saline reservoir: a case study from Nagaoka pilot CCS site in Japan	Jun Kita	IEAGHG Monitoring netowork and modelling network combined meeting, 2014 年 8 月 5 日
52.	Effects of heterogeneity on CO_2 storage in a saline reservoir: a case study from Nagaoka pilot CCS site in Japan	Takahiro Nakajima, Takuma Ito, Shun Chiyonobu, Ziqiu Xue	IEAGHG Monitoring netowork and modelling network combined meeting, 2014 年 8 月 6 日
53.	Utilization of seismic attenuation in the monitoring of CO_2 geological storage project	Hiroyuki Azuma, Ziqiu Xue, Toshifumi Matsuoka	12th International conference of Greenhouse Gas Control Technologies, Austin, TX, USA, 2014 年 10 月 6 日
54.	Numerical simulation of CO_2 leakage along fault system for the assessment of the environmental impacts at CCS sites	中島崇裕，薛自求、千代延俊，東宏幸	12th International conference of Greenhouse Gas Control Technologies, Austin, TX, USA, 2014 年 10 月 6 日

	タイトル	研究者	発表先
55.	Microseismic Monitoring at the Large-Scale CO_2 Injection Site, Cranfield, MS, U.S.A.	Makiko Takagishi, Tsutomu Hashimoto, Shigeo Horikawa, Kinichiro Kusunose, Ziqiu Xue, Susan D Hovorka	12th International conference of Greenhouse Gas Control Technologies, Austin, TX, USA, 2014 年 10 月 7 日
56.	Characterization on reservoir complex and CO_2 plume with Vp/Vs: Case study at Nagaoka site in Japan	中島崇裕，西澤修，薛自求	12th International conference of Greenhouse Gas Control Technologies, Austin, TX, USA, 2014 年 10 月 8 日
57.	GaMin'11 – an international inter-laboratory comparison for geochemical CO_2 - saline fluid - mineral interaction experiments	C. Ostertag-Henning, A. Risse, B. Thomas, R. Rosenbauer, C. Rochelle, G. Purser, A. Kilpatrick, J. Rosenqvist, B. Yardley, A. Karamalidis,f, C. Griffith, S. Hedges, R. Dilmore, A. Goodman, J. Black, R. Haese, C. Deusner, N. Bigalke, M. Haeckel, S. Fischer, A. Liebscher, J.P. Icenhower, D. Daval, G.D. Saldi, K.G. Knauss, M. Schmidt, S. Mito, M. Sorai and L. Truch	12th International conference of Greenhouse Gas Control Technologies, Austin, TX, USA, 2014 年 10 月 8 日
58.	Hysteretic elastic wave velocity and attenuation in partially saturated sandstone by CO_2 and brine: evidenced by an experimental study with X-ray CT	Yi Zhang, Osamu Nishizawa , Tamotsu Kiyama, Ziqiu Xue	12th International conference of Greenhouse Gas Control Technologies, Austin, TX, USA, 2014 年 10 月 8 日

	タイトル	研究者	発表先
59.	Petrophysical properties and their relation to injected CO_2 behavior in a reservoir at the Nagaoka pilot site, Japan	Takuma Ito, Takahiro Nakajima, Shun Chiyonobu, Ziqiu Xue	12th International conference of Greenhouse Gas Control Technologies, Austin, TX, USA, 2014 年 10 月 8 日
60.	Chemical interaction of well composite samples with supercritical CO_2 along the cement - sandstone interface	Kazuhiko Nakano, Atsushi Ohbuchi, Saeko Mito, Ziqiu Xue	12th International conference of Greenhouse Gas Control Technologies, Austin, TX, USA, 2014 年 10 月 8 日
61.	Effects of hydrostatic pressure on strain measurement with distributed optical fiber sensing system	Ziqiu Xue, Hyuck Park, Tamotsu Kiyama, Tsutomu Hashimoto,Osamu Nishizawa and Tetsuya Kogure	12th International conference of Greenhouse Gas Control Technologies, Austin, TX, USA, 2014 年 10 月 8 日
62.	Microbubble carbon dioxide injection for enhanced dissolution in geological sequestration and improved oil recovery	Ziqiu Xue, Susumu Nishio, Naoto Hagiwara, Toshifumi Matsuoka	12th International conference of Greenhouse Gas Control Technologies, Austin, TX, USA, 2014 年 10 月 8 日
63.	Operationally relevant outcomes for CCS from the QICS project	Jerry Blackford, Henrik Stahl, Jonathan M. Bull, Ian Wright, Rachael H. James, Steve Widdicombe, Jun Kita, Maxine Akhurst, Toru Sato, Baixin Chen, Mark Naylori, Chris Hauton, Benoît J.P. Bergès, Melis Cevatoglu, Douglas Connelly, Marius Dewar,Tom M. Gernon, Masatoshi Hayashi, Jason Holt, Hideshi Kaieda, Timothy G.	12th International conference of Greenhouse Gas Control Technologies, Austin, TX, USA, 2014 年 10 月 8 日

	タイトル	研究者	発表先
		Leighton, Anna Lichtschlag, Dave Long, Jack Phelps, Jeff Polton, Kiminori Shitashima, Dave Smith, Masahiro Suzumura, Karen Tait, Peter Taylor, Mark E. Vardy, Paul R. White	
64.	Numerical Method for Detecting the CO_2 Leakage Source in the Ocean	Chiaki Mori, Tom Sato, Yuki Kano, Hiroyuki Oyama, Jun Kita, Daisuke Tsumune, Yoshiaki Maeda	12th International conference of Greenhouse Gas Control Technologies, Austin, TX, USA, 2014 年 10 月 8 日
65.	The role of advanced reactive surface area characterization in improving predictions of mineral reaction rates	Lauren Beckingham, Shuo Zhang, Elizabeth Mitnick, David Cole, Li Yang, Lawrence Anovitz, Julie Sheets, Alexander Swift, Timothy Kneafsey, Gautier Landrot, Saeko Mito, Ziqiu Xue, Carl Steefel, Donald DePaolo, Jonathan Ajo Franklin	AGU Fall Meeting, 2014 年 12 月 9 日
66.	CO_2 移行解析技術開発について	喜田潤	CCS テクニカルワークショップ 2014, 2015 年 1 月 30 日
67.	漏出シナリオに基づく海中 CO_2 拡散シミュレーション技術開発	内本圭亮，中島崇裕	CCS テクニカルワークショップ 2014, 2015 年 1 月 30 日
68.	CCS 実用化に向けての安全性及び PA の取り組みについて	薛自求	第 5 回 CCS フォーラム, 2015 年 2 月 16 日

AIST

	タイトル	研究者	発表先
69.	CO2 地中貯留にともなう貯留システムの力学的応答評価手法の研究：産総研における取組の紹介	奥山康子、船津貴弘、雷興林、上原真一、中島善人、藤井孝志、中尾信典	地球惑星科学連合 2012 年大会, 2012/5/20
70.	CO2 地中貯留のシール品質に対する砂岩脈特性の影響検討シミュレーション	加野友紀、石戸恒雄	日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 2012/5/20
71.	ユタ州のクリスタル(CO2)間欠泉での重力連続測定	杉原光彦、相馬宣和	日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 2012/5/20
72.	重力連続測定による CO2 地中貯留モニタリング	杉原光彦、名和一成、西祐司、石戸恒雄、相馬宣和	物理探査学会, 2012/5/29
73.	Measurements of carbonate reaction rates at carbonated and bicarbonated springs as a natural analogue field of CO2 geological sequestration	Masao Sorai, Munetake Sasaki	34th International Geological Congress, 2012/8/6
74.	苫小牧地点における貯留層岩石のせん断強度特性	船津貴弘、奥山康子、中尾信典	資源・素材 2012, 2012/9/11
75.	含 CO2 泉での現場反応実験における各種炭酸塩鉱物の反応速度	徂徠正夫、佐々木宗建	日本地球化学会, 2012/9/13
76.	温泉地の石灰華の生成に寄与する要因の整理	佐々木宗建、徂徠正夫	日本地球化学会, 2012/9/13
77.	CO2 storage and monitoring -Assessment of injection induced earthquake and strong motion effect on storage ability of CO2 reservoir-	Shinsuke Nakao	CCOP-EPPM Workshop on CCS Opportunities in the CCOP Regions, 2012/9/14

	タイトル	研究者	発表先
78.	Continuous gravity monitoring for CO2 geo-sequestration	Mituhiko Sugihara, Kazunari Nawa, Yuji Nishi, Tsuneo Ishido, Nobukazu Soma	11th International Conference on Greenhouse Gas Technologies (GHGT-11), ICC Kyoto, 2012/11/18-22
79.	Fault Stability analysis related to CO2 injection at Tomakomai, Hokkaido	Yuki Kano, Takahiro Funatsu, Shinsuke Nakao, Kinichiro Kusunose, Tsuneo Ishido, Xinglin Lei, Toshiyuki Tosha	11th International Conference on Greenhouse Gas Technologies (GHGT-11), ICC Kyoto, 2012/11/18-22
80.	Effects of Heterogeneous Seal Layer Property on the Long-term Behaviour of CO2 Injected Into Deep Saline Aquifers	Yuki Kano, Tsuneo Ishido	11th International Conference on Greenhouse Gas Technologies (GHGT-11), ICC Kyoto, 2012/11/18-22
81.	Carbonate reaction experiments at carbonated and bicarbonated springs as a natural analogue field of CO2 geological sequestration	Masao Sorai, Munetake Sasaki	11th International Conference on Greenhouse Gas Technologies (GHGT-11), ICC Kyoto, 2012/11/18-22
82.	Monitoring underground migration of sequestered CO2 using self-potential methods	Tsuneo Ishido, J.W.Pritchett, Toshiyuki Tosha, Yuji Nishi, Shigetaka Nakanishi	11th International Conference on Greenhouse Gas Technologies (GHGT-11), ICC Kyoto, 2012/11/18-22

	タイトル	研究者	発表先
83.	Asessing the geomechanical responses of storage system in CO2 geological storage: An introduction of research program in the National institute for Advanced industrialastrial Science and Technology (AIST)	Takahiro Funatsu, Yasuko Okuyama, Xinglin Lei, Yoshito Nakashima, Shinichi Uehara, Takashi Fujii, Shinsuke Nakao	11th International Conference on Greenhouse Gas Technologies (GHGT-11), ICC Kyoto, 2012/11/18-22
84.	Effective utilization of geophysical monitoring for CO2 geological storage	Shinsuke Nakao	I2CNER INTERNATIONAL WORKSHOP, 2013/1/31
85.	地下深部状態監視のコスト低減を目指した多面的モニタリング技術の検討－米国SWPサイトにおけるベースライン観測	相馬宣和、西祐司、杉原光彦、石戸恒雄、名和一成、中尾信典	資源・素材学会春季大会, 2013/3/29
86.	CO2 Geological Storage Researches in AIST	Yuji Nishi	CCOP CO2 storage mapping program (CCS-M) Launching Seminor, 2013/4/29
87.	超伝導重力計 iGrav による CO2 地中貯留サイトでの連続重力測定	杉原光彦、名和一成、西祐司、石戸恒雄、駒澤正夫、相馬宣和	日本地球惑星科学連合大会 2013, 2013/5/19
88.	米国テキサス州ファンズワースでの重力調査	駒澤正夫、杉原光彦	日本地球惑星科学連合大会 2013, 2013/5/19
89.	大阪南部、和泉層群での CO2 質流体の移行と炭酸塩沈殿－CO2 地中貯留における流体移動のナチュラル・アナログ事例	奥山康子	日本地球惑星科学連合大会 2013, 2013/5/22
90.	Coupled fluid flow and geomechanical modeling in geological CO2 storage: Application to Matsushiro phenomena	Takahiro Funatsu, Yasuko Okuyama, Xinglin Lei, Shinsuke Nakao	日本地球惑星科学連合大会 2013, 2013/5/22

	タイトル	研究者	発表先
91.	Dawsonite and other carbonate veins in the Cretaceous Izumi Group, SW Japan: A natural support to fracture self-sealing in mudstone caprock in CCS?	Yasuko Okuyama, Takahiro Funatsu, Takashi Fujii, Shuji Take	WRI-14, 2013/6/11
92.	Measurements of threshold capillary pressure of mudstones under geological CO2 storage conditions	Takashi Fujii, Keita Hayashi, Shinichi Uehara, Masao Sorai	Asia Oceania Geosciences Society 2013, 2013/6/24
93.	Experimental Study on Seal Integrity: Effects of Particle Size and Size Distribution on Threshold Pressure	Masao Sorai, Takashi Fujii	Asia Oceania Geosciences Society 2013, 2013/6/25
94.	Progress report on AIST's CO2 geological storage researches	Shinsuke Nakao, Toshiyuki Tosha	Asia Oceania Geosciences Society 2013, 2013/6/25
95.	Geophysical Monitoring Researches for CO2 Geological Storage	Shinsuke Nakao	CCOP CCS-M Training Course, 2013/8/20
96.	Re-Analysis of Microseismicity Observed during CO2 Injection in the Aneth Oil Field: Improving Depth Estimates from Single-Well Observations	Nobukazu Soma, James Rutledge	The 6th International Symposium on In-situ Rock Stress, 2013/8/21
97.	CO2 地中貯留ー地球温暖化対策としての現状と今後	奥山康子	新化学技術推進協会, 2013/8/23
98.	CO2 地中貯留のための泥岩を対象とするスレッショルド圧測定に関する研究	藤井孝志、上原真一、徂徠正夫	資源・素材学会秋季大会, 2013/9/4
99.	圧入井周辺の貯留層岩盤の力学的安定性に及ぼす CO2 圧入の影響	船津貴弘、加野友紀、奥山康子、中尾信典	資源・素材学会秋季大会, 2013/9/4
100.	CO2 地中貯留漏洩事象のナチュラル・アナログとしての松代群発地震と原因流体の地球化学的特性	奥山康子、船津貴弘、高本尚彦	日本鉱物科学会 2013 年年会・学術講演会, 2013/9/11
101.	Gravity monitoring for CO2 sequestration using a superconducting gravimeter	Mituhiko Sugihara, Kazunari Nawa, Tsuneo Ishido, Nobukazu Soma, Yuji Nishi	11th SEGJ International Symposium, 2013/11/19
102.	Gravity survey at Farnsworth CO2-EOR site, Texas	Masao Komazawa, Mitsuhiko Sugihara	11th SEGJ International Symposium, 2013/11/19

	タイトル	研究者	発表先
103.	Geomechanical stability analysis of reservoir rock related to CO2 injection in Japan	Takahiro Funatsu, Yuki Kano, Xinglin Lei, Shinsuke Nakao	Geomechanics and Energy Workshop 2013, 2013/11/26
104.	Analysis of stress changes and fault stability related to CO2 injection at the Tomakomai offshore site	Yuki Kano, Takahiro Funatsu, Shinsuke Nakao, Kinichiro Kusunose, Tsuneo Ishido, Xinglin Lei, Toshiyuki Tosha	AGU Fall Meeting 2013, 2013/12/9
105.	Monitoring underground migration of sequestered CO2 using self-potential methods	Tsuneo Ishido, J.W.Pritchett, Toshiyuki Tosha, Yuji Nishi	AGU Fall Meeting 2013, 2013/12/10
106.	沿岸海域での CO2 地中貯留の重力モニタリングの検討	杉原光彦、相馬宣和、石戸恒雄、駒澤正夫、大熊茂雄、西祐司	資源・素材学会平成 26 年度春季大会, 2014/3/28
107.	iGrav10 超伝導重力計と FG5/217 絶対重力計の並行測定	杉原光彦、名和一成、宮川歩夢	日本地球惑星科学連合 2014 年大会, 2014/5/1
108.	テキサス州ファンズワース CO2-EOR サイトでの重力モニタリング	杉原光彦、名和一成、相馬宣和、石戸恒雄、宮川歩夢、田中明子、西祐司	日本地球惑星科学連合 2014 年大会, 2014/5/2
109.	松代群発地震に関係した深部地下水の水質再構成：CO2 動的漏洩のナチュラル・アナログ研究でのシミュレーション条件整備	奥山康子、船津貴弘、藤井孝志	日本地球惑星科学連合 2014 年大会, 2014/5/2
110.	米国テキサス州ファンズワース CCS-EOR 調査地での重力変化に及ぼす地下水の影響	杉原光彦、名和一成、相馬宣和、石戸恒雄、西祐司、宮川歩夢、田中明子、船津貴弘	日本地下水学会 2014 年春期講演会, 2014/5/24
111.	CCS プロジェクト・最近の研究動向ー産総研における CO2 地中貯留関連研究ー	西祐司	第 13 回 CO2 固定研究会, 2014/6/20
112.	Effective stress depending on threshold pressure of mudstones for CO2 sealing integrity of caprocks	Takashi Fujii, Shinichi Uehara, Masao Sorai, Shinsuke Nakao	11th Annual Meeting Asia Oceania Geosciences Society, 2014/7/30

	タイトル	研究者	発表先
113.	Experimental Study of Seal Integrity on CO2 Geological Sequestration	Masao Sorai, Takashi Fujii, Yuki Kano, Shinichi Uehara	11th Annual Meeting Asia Oceania Geosciences Society, 2014/7/30
114.	Application of InSAR to the Detection of Surface Deformation in the CO2 Sequestration Field	Akiko Tanaka, Yuji Nishi	11th Annual Meeting Asia Oceania Geosciences Society, 2014/7/31
115.	大阪南部、和泉山脈地域の脈性炭酸塩鉱物の酸素・炭素同位体組成	奥山康子	日本鉱物科学会 2014 年年会学術講演会, 2014/9/17
116.	Experimental study on seal integrity: the correlation between threshold pressure and permeability in a supercritical CO2-water system	Masao Sorai, Takashi Fujii, Yuki Kano, Shinichi Uehara	12th International Conference on Greenhouse Gas Technologies (GHGT-12), 2014/10/7
117.	Continuous gravity monitoring for CO2 geo-sequestration (2) a case study at the Farnsworth CO2-EOR field	Mituhiko Sugihara, Kazunari Nawa, Nobukazu Soma, Tsuneo Ishido, Ayumu Miyagawa, Yuji Nishi	12th International Conference on Greenhouse Gas Technologies (GHGT-12), 2014/10/7
118.	GaMin’11 – an international GaMin'11-an international inter-laboratory comparison for geochemical CO2 - saline fluid - mineral interaction experiments	C.Ostertag-Henning, A.Risse, B.Thomas, R.Rosenbauer, C.Rochelle, G.Purser, A.Kilpatrick, J.Rosenqvist, B.Yardley, C.Griffith, S.Hedges, R.Dilmore, A.Goodman, J.Black, R.Haese, C.Deusner, N.Bigalke, M.Haeckel, S.Fischer, A.Liebscher, J.P.Icenhower, D.Daval, G.D.Saldi, K.G.Knauss, M.Schmidt, Saeko Mito, Masao Sorai, L.Truche	12th International Conference on Greenhouse Gas Technologies (GHGT), 2014/10/8

	タイトル	研究者	発表先
119.	Effective confining stress depending on fluid flow and capillary sealing properties of mudstones for CO2 geological sequestration	Takashi Fujii, Shinichi Uehara, Masao Sorai	12th International Conference on Greenhouse Gas Technologies (GHGT), 2014/10/8
120.	Dawsonite-bearing carbonate veins in the Cretaceous Izumi Group, SW Japan: A possible natural analogue of fracture formation and self-sealing in CO2 geological storage	Yasuko Okuyama	12th International Conference on Greenhouse Gas Technologies (GHGT), 2014/10/8
121.	米国テキサス州ファンズワースにおける2台のiGrav型超伝導重力計の並行観測	名和一成、杉原光彦、宮川歩夢、西祐司	日本測地学会第122回講演会, 2014/11/7
122.	Soil moisture effects on superconducting gravimeter measurements at Farnsworth field, Texas	Mituhiko Sugihara, Kazunari Nawa, Ayumu Miyagawa , Yuji Nishi	Soil Moisture WS 2014, 2014/11/29
123.	GHGT-12参加レポートと産総研におけるCO2地中貯留関連研究の紹介	徂徠正夫	グローバルCCSインスティテュート日本事務所主催第14回勉強会, 2014/12/12
124.	Sealing performance of caprocks: Correlation between threshold pressure and permeability	Masao Sorai	I2CNER International Workshop, 2015/2/4
125.	小型超伝導重力計のCO2地中貯留モニタリングへの適用	杉原光彦、名和一成、池田博、宮川歩夢、相馬宣和、石戸恒雄、西祐司	資源素材学会平成27年度春季大会, 2015/3/27

◆その他出版物等

RITE

	タイトル	研究者	掲載先
1.	海底下二酸化炭素貯留の環境影響評価について	喜田潤	月刊地球、Vol.35, No. 12, 2013
2.	二酸化炭素の地中貯留の安全性評価	辻本恵一	日本応用数理学会 ONLINE MAGAZINE　ラボラトリーズ, 2013
3.	二酸化炭素の海底下地中貯留 -CO_2 排出削減策としての現状-	喜田潤	海洋と生物, vol.36 no.2, p240-245, 2014
4.	大規模 CCS の安全性･信頼性構築に向けた技術開発動向	薛自求	月刊 OHM, 2014 年 5 月号, p.24-27 「特集 CCS-CO_2 回収・貯留技術」
5.	北米におけるCO_2貯留プロジェクトおよび技術開発の動向	Don J. White, Thomas M. Daley, 編著 薛自求	月刊 OHM, 2014 年 5 月号, p.12-15 「特集 CCS-CO3 回収・貯留技術」
6.	第４節　二酸化炭素分離回収・貯留（CCS）、2. CCS をめぐる法制、3. 世界におけるプロジェクトの動向	田中良三	海洋白書 2015
7.	長岡サイトの圧入後観測結果からみたCO_2地中貯留の長期安定性	薛自求, 中島崇裕	岩の力学連合会、１月号、2015

AIST

	タイトル	研究者	掲載先
8.	CO_2 地中貯留の長期安全性評価	徂徠正夫	日刊工業新聞 科学技術・大学, p28, 2014
9.	CCS 技術の現状と課題、今後の展望 ―実証試験を通した研究開発の重要性―	中尾信典	月刊 Business i. ENECO, Vol.47, No.11, p14-17, 2014

◆特許

	発明の名称	発明者（出願人）	出願番号
1	物体の圧力、温度、ひずみ分布測定システム、これを用いた二酸化炭素注入による地層安定性への影響評価方法、および結氷監視方法	薛自求，山内良昭，岸田欣増（RITE、ﾆｭｰﾌﾞﾚｸｽ㈱）	特願 2012-180725
2	光ファイバケーブル、光ファイバの製造方法、および分布型測定システム	薛自求，岸田欣増，山内良昭，須崎慎三（RITE、ﾆｭｰﾌﾞﾚｸｽ㈱、㈱ﾌｼﾞｸﾗ）	特願 2013-099869
3	地盤状態監視システムおよび地盤状態監視方法	薛自求，山内良昭，岸田欣増（RITE、ﾆｭｰﾌﾞﾚｸｽ㈱）	特願 2014-019187
4	岩石内部の診断システム、それに用いられる容器、岩石内部の診断方法および地中岩石内への流体注入方法	薛自求，西澤修（RITE）	特願 2014-096786

３－２　目標の達成度

本事業では、CO_2 地中貯留の安全性評価手法の技術開発として、貯留性能評価、貯留層内の CO_2 挙動解析、貯留層外部への CO_2 移行解析の 3 つの技術項目に関する技術開発を行うとともに、CCS 事業者が参照する技術事例集を作成した。

具体的な内容は前述した通りであるが、それが本事業の成果として妥当であるかを評価するため、２－１で設定した「研究開発目標」に対する成果・達成度を以下の表 3-2-1（全体目標に対する成果、達成度）と、表 3-2-2（個別要素技術に対する成果と達成度）にとりまとめた。

表 3-2-1　全体目標に関する成果、達成度の一覧表

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 CO_2 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
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。	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、苫小牧実証地点の環境調査に活用し、その成果は海洋汚染	達成

項目	目標	成果	達成度
	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。	防止法に基づく許可申請にも利用された。	
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」の各ステージの技術事例集を作成した。	達成

表 3-2-2　個別要素技術目標に対する成果・達成度の一覧表

要素技術		目標・指標	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	①地質モデルの構築	（目標） 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。 （指標） 1）砂泥互層を対象にした地質モデリング手法を実用化する。 2）貯留層の不均質性を考慮した貯留性能評価手法を実用化する。 3）地化学反応を考慮した広域地下水流動解析手法を確立し実用化する。	1）限定された地質情報から、砂泥互層を対象とした地質モデルを構築する手法を確立した。本成果は、苫小牧の萌別層の地質モデル構築に活用されている。 2）貯留層の不均質性を組み込んだ地質モデルを構築し、貯留性能を評価する手法を確立した。本成果は、同じく苫小牧の萌別層の貯留性能評価に活用されている。 また、貯留層のキャップロックをモデル化し、遮蔽性能を評価する手法を確立した。 3）沿岸域の地中貯留を想定し、陸域と海域をつなぐ水理地質モデルを構築し、広域地下水流動解析手法を確立した。本成果は、同じく苫小牧サイトの広域地下水解析に活用されている。	達成

要素技術		目標・指標	成果	達成度
２．長期挙動予測手法の開発	①長期挙動予測手法の開発	目標） 　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。 （指標） １）地化学反応を考慮した長期挙動予測シミュレーション手法を実用化する。	１）地化学反応を組み込んだ CO_2 の長期挙動予測手法を構築した。本手法は、苫小牧実証試験において、CO_2 圧入に伴う貯留層内の地化学反応の事前評価に活用される。	達成
	②CO_2 挙動モニタリング手法の開発	（目標） 　我が国に適応した CO_2 挙動モニタリング手法を実用化する。 （指標） １）常設型 OBC システムによる沿岸域モニタリング手法を実用化する。 ２）CO_2 圧入に伴う微小振動発生に関する評価手法を確立し、観測システムを構築する。 ３）データ取得のための信号源を要する弾性波探査に対し、それを補完するための受動的信号を用いた多面的モニタリング手法を確立する。	１）常設型 OBC を開発し、苫小牧サイトに埋設、実適用した。従来の弾性波探査だけでなく、自然地震や微小振動の観測にも利用されている。埋設により、ノイズレベルが 50～70%低下しており、高精度の CO_2 挙動モニタリングが期待できる。 ２）CO_2 圧入時の微小振動の観測システムを設置し、米国の大規模 CO_2 圧入サイトでので観測観測システムの構築や CO_2 圧入と微小振動発生との関連についての知見を得た。 ３）弾性波探査を補完するため、重力などの受動的信号を用いた多面的モニタリング手法を確立した。 　現在、苫小牧実証地点に高精度重力モニタリングを適用するための予備データ収録中。	達成

要素技術		目標・指標	成果	達成度
２．長期挙動予測手法の開発		４）光ファイバーによる埋設型地盤変形監視システムを実用化する。 ５）岩石力学―流体流動連成シミュレーション手法を確立する。	４）深度方向に連続して地層のひずみ等を計測できる光ファイバー計測システムを開発し、その機能を実用深度の坑井で実証した。今後、苫小牧の廃坑井へ適用し、実用性を検証予定である。 ５）CO_2圧入に伴う地層の力学的応答性を評価するため、岩石力学－流体流動連成シミュレーション手法を確立した。	
３．貯留層外部へのCO_2移行解析	①CO_2移行に関する安全性評価手法の開発	（目標） 貯留層から海底に至るまでの移行について移行経路をモデル化し移行シミュレーション技術を実用化する。 （指標） １）移行経路をモデル化する技術を実用化する。 ２）底質や流況等を考慮したCO_2移行シミュレーション手法を実用化する。	以下に示す成果は、苫小牧実証試験の海洋汚染防止法に基づく許可申請において適用されている。 １）貯留層から海底面へのCO_2移行モデルを構築し、CO_2移行シミュレーションを実施した。 ２）多様な海域特性に対応するCO_2海域拡散シミュレーション技術を確立し、各種条件を　想定したシミュレーションを実施した。	達成

要素技術		目標・指標	成果	達成度
３．貯留層外部へのCO_2移行解析	②海域環境影響評価手法の開発	（目標） 上記シミュレーションに基づいて予測した移行CO_2に対して、海域環境影響評価手法を実用化する。 （指標） １）潜在的移行経路から海底付近に到達するCO_2を対象として、浅部地層を含む海底および海中における効率的なCO_2モニタリング手法を確立する。 ２）海底生態系へのCO_2影響評価手法を確立する。	以下に示す成果は、苫小牧実証試験の海洋汚染防止法に基づく許可申請において適用されている。 １）CO_2モニタリング手法として ・海水溶存CO_2、O_2濃度の関係から漏出を検知する手法、および ・CO_2気泡を音響測定で検出し、CO_2漏出を検知する手法を確立し、それぞれの有効性を実海域で検証した。 ２）CO_2濃度と「海底生物への影響」との関係をデータベース化し、CO_2漏出による生物影響を効率的に評価する手法を確立した。	達成
II. CCS 推進基盤の確立				
		（目標） 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。 （指標） １）長岡実証試験および個別技術開発項目に関する技術事例集を作成する。	１）長岡実証試験や海外CO_2圧入プロジェクト等の最新情報収集し、それをベースにCO_2地中貯留の「基本計画」「サイト選定」「サイト特性評価」「実施計画」に関する技術事例集を作成した。	達成

４．事業化、波及効果について

４－１　事業化の見通し

前章の「成果、目標の達成度」で紹介したように、本事業では CCS の安全性評価に資する基盤技術を確立することができた。これらの成果は、苫小牧の CCS 大規模実証試験に適用済み、もしくは適用予定である。また、解析技術などは、CCS 安全性評価の基盤技術としてその適用性が検証され、技術事例集にその成果が反映される。これらは、2020 年以降の CCS 実用化時の安全性確保に必須な基盤技術として活用される見通しである。

以下、具体的な事業化の見通しについて紹介する。（技術的成果の内容については前章を参照）

（１）苫小牧実証試験への適用および事業化

「貯留層内の CO_2 挙動解析」技術に関しては、多くの関連技術が苫小牧実証試験に適用もしくは適用予定であり、その後の CCS 実用化の際には実適用される見通しである。

・常設型海底ケーブル（以下、常設型 OBC）

常設型 OBC は、平成 25 年度に苫小牧サイトに埋設され、平成 26 年度より実適用されている。埋設によってノイズレベルが 50～70%低下しており、高精度の CO_2 挙動モニタリングが期待できる。本機能は CCS の事業化に欠かせない CO_2 の貯留認証に大きく貢献する。また、常設 OBC は自然地震の観測も可能であり、CCS の安全操業に寄与する。

・微小振動観測システム

CO_2 圧入時の微小振動の観測システムを設置し、米国 LBNL と共同でテキサス州 Cranfield で観測試験を行い、観測システムの構築や CO_2 圧入と微小振動発生との関連について知見を獲得、整理した。

この成果、および常設型 OBC の機能の組み合わせで、微小振動観測に基づく CO_2 圧入管理システムへと発展させる予定であり、CCS 実用化の際には、その機能が組み込まれる予定である。

・光ファイバー計測システム

深度方向に連続して地層のひずみ等を計測できる光ファイバー計測システムを開発し、その機能を実用深度の坑井で実証した。今後、苫小牧の廃坑井へ適用し、実用性を検証する。

環境省の指針で規定されている「継続した地層健全性の監視」や「廃坑井のセメント劣化に伴う CO_2 漏えいの監視」への適用が見込まれる。

・弾性波探査を補完するモニタリング技術
米国テキサス州 Farnsworth テストサイトにおいて超伝導重力計を適用し、サブマイクロガル精度での重力の連続計測を達成した。現在、苫小牧実証試験への適用のために、予備データの収録を行っている。
当技術は、長期的に低コストで CO_2 を監視する上で有効であり、圧入停止からサイト閉鎖後のツールとしての活用が見込まれる。

・X 線-CT 装置による地層コア分析
医療用の X 線 CT 装置を CO_2 挙動の把握（可視化）に活用している。相対浸透率測定など、従来の測定方法に弾性波等の物性測定を併用することにより、CO_2 挙動の精緻な解析が可能となっている。
当技術は、苫小牧サイトのコア分析に実適用しており、今後の CCS の普及展開にあたっても、必須の測定手段として適用される予定である。

また、「貯留層外部への CO_2 移行解析」で開発した以下の技術は、苫小牧地点における CCS 大規模実証試験の海洋汚染防止法に基づく許可申請において適用されており、今後の海域 CO_2 地中貯留の普及展開時にも適用が必須となる。

・CO_2 地下移行シミュレーション技術
・CO_2 海中移行シミュレーション技術
・漏出 CO_2 モニタリング技術
・生物影響データベース

（２）基盤技術の確立と技術事例集への反映
「地質モデルの構築」では、我が国固有の不均質な砂岩層の地層において、限定された情報からでも精度の高い地質モデルを構築する手法を確立した。また、広域地下水の環境影響評価手法も確立することができた。
さらに、「貯留層内の CO_2 挙動解析」では、地化学反応を組み込んだ大規模実証試験にも適用可能な CO_2 長期挙動予測手法、および岩石力学－流体流動連成モデリング手法を構築した。これらの手法は、苫小牧実証試験において、CO_2 圧入に伴う貯留層内の地化学反応および力学的応答性の事前評価に活用される。
これらの手法は、CCS 事業者が参照できるよう「CCS 技術事例集」に反映される。また、苫小牧実証試験へ適用し、改良を加えることで、CCS 実用化時点では、CO_2 貯留の安全性評価に必須な手法として事業化に組み込まれる見通しである。

（３）CCS 技術事例集

CCS 技術事例集として、「基本計画」、「サイト選定」、「サイト特性評価」、「実施計画」の各章を完成させた。今後、苫小牧の大規模実証試験の情報を取り入れ、「設計・建設」「操業・管理」「サイト閉鎖」「閉鎖後管理」の各章を完成させ、CCS 事業者が参照する実践的な参考書とする。

４－２　波及効果

CO_2 貯留に関する技術は、石油資源開発等の技術をベースにしていることが多い。当事業で CCS のために開発した技術は、逆に資源開発にも適用が可能である。また、光ファイバーや常設型 OBC は、その機能を CCS のみでなく別の産業や地域防災の分野に適用することができる。以下、その具体例を紹介する。

（１）CO_2 挙動解析技術の資源開発への応用

当事業では、CO_2 挙動解析の手段として、海外の CO_2 貯留サイトにおいても適用事例のある米国 LBNL が開発した流体挙動シミュレーターである TOUGH2 を活用した。当シミュレーターには結果表示機能等がないため、利便性を高める補助ツールの TOUGH2’LBOX（T2B）を組み合わせ、挙動解析の大幅な効率化を図った。この機能は地下の流体シミュレーションに広く活用でき、たとえば地熱開発分野等への応用が期待できる。

また、CO_2 の利用技術として CO_2-EOR が地層特性が良好な米国を中心に実用化されているが、今後は複雑で低浸透性の油田への適用拡大が期待されている。当事業で開発した CO_2 挙動モニタリング技術、X 線-CT 装置を用いた地層コア分析技術は、地層に圧入された CO_2 の挙動把握を精緻化し、複雑な地層特性を持つ油田での CO_2-EOR の適用、効率化に貢献する。

（２）地質モデリング技術の CO_2 貯留ポテンシャル評価への応用

現在、経済産業省と環境省の事業として、CO_2 貯留適地調査を行っている。我が国の地層は不均質で複雑な構造を持っており、単純な地質モデルでは精度の高い評価が難しい。当事業で開発した「地質モデリング技術」を活用すれば、不均質性が著しい地層でも精度の高い貯留ポテンシャル評価が可能となる。

また、米国のイリノイプロジェクト（＊）でも、貯留の不均質性への対応は重要な課題として認識されており、不均質の地層をモデリングする技術は、将来の CCS の海外展開へも貢献することとなる。

(*) エタノール・プラントから CO_2 を毎年 110 万トン回収し、イリノイ州 Decatur の地下に貯留する事業

（３）常設型 OBC の自然地震観測機能の応用

常設型 OBC は、海底に受振器を埋設することにより、従来法に比べて受振器の位置ずれがないため、高精度の反射法弾性波探査が実現できるとともに、ストリーマ方式よりもトータルでは安価な探査が可能なことが期待される。また常時観測であるため、多チャンネルで自然地震・微小振動の観測にも利用できる。

我が国は地震大国であり、地震観測技術が発達しているが、特に高感度地震観測網（Hi-net）は、陸域に約 800 か所（2011）の観測点を持つ世界に比類ないものである。

海域での精緻な地震観測を可能とする常設型 OBC と陸域の Hi-net が連携すれば、地震観測の精度向上が図れ、地震メカニズムの研究推進や地域防災へ貢献することが可能となる。

（４）光ファイバー計測システムの利用範囲拡大

光ファイバー計測システムは、深度方向に連続した地層ひずみの計測を可能とするが、その機能は CCS のみでなく資源開発分野へも適用可能である。たとえば海底油田での流体産出モニタリング、資源開発に伴う地盤沈下の監視などに応用できる。

さらに、パイプラインなど長尺の構造物の異常監視にも適用可能であり、地層や構造物の健全性監視に対し、精度向上や大幅な労力削減をもたらす潜在能力がある。

（５）高精度重力モニタリングの資源・エネルギー・防災分野等への応用

高精度重力モニタリングにおける小型超伝導重力計の利用技術により、地熱・地下水高エネルギー廃棄処分・火山等において用いられている重力モニタリングの精度を飛躍的に向上させることが可能であり、例えば地熱貯留層評価の高精度化等への貢献が期待される。

（６）環境影響評価手法の資源・エネルギー開発への応用

我が国の海洋資源として、メタンハイドレートなどのエネルギー資源および銅やレアメタルを多く含む深海底鉱物資源が注目されている。これら資源の開発に当たっては、海洋環境の保全にも注意を払い、持続可能な開発を行うことが肝要となる。海底下 CO_2 貯留の環境影響評価において開発された技術には、海水中の物理化学的シミュレーション、海域環境のモニタリングならびに生物影響予測があり、これらは海洋資源開発分野への応用が期待される。

（７）我が国の CCS 技術の海外展開、国際標準化

本事業の成果である、地質モデル構築手法や貯留性能評価技術は、複雑な地層にも対応できる高度な技術であり、世界の多様な貯留層に対応可能となる。

また、OBC システムや微小振動観測システムは、地震多発国である我が国の先端技術やノウハウが組み込まれており、地震の影響が懸念される地域で技術アドバンテージが得られる

さらに、これらの情報も記載された「技術事例集」は、我が国の CO_2 貯留技術の海外 PR や国際標準化にも貢献することとなる。

５．研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果

５－１　研究開発計画

平成 12 年度から財団法人地球環境産業技術研究機構（以下「RITE」という。）が独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下「NEDO」という。）および国からの公募による選定審査手続きを経て委託、補助金を受け、大規模発生源から分離・回収した CO_2 を深部塩水層に長期にわたって安全に貯留する技術の確立を目指し研究開発を行っている。

平成 12 年度から平成 13 年度は NEDO からの委託、平成 14 年度から平成 22 年度は国からの補助金、平成 22 年度、平成 23 年度は国からの委託を受けて実施した。なお、平成 22 年度からは独立行政法人産業技術総合研究所（以下「AIST」という）も直接国からの委託を受け、一部研究課題を分担し、RITE と共同で研究開発を実施している。

事業名称・委託者は下記の通り。

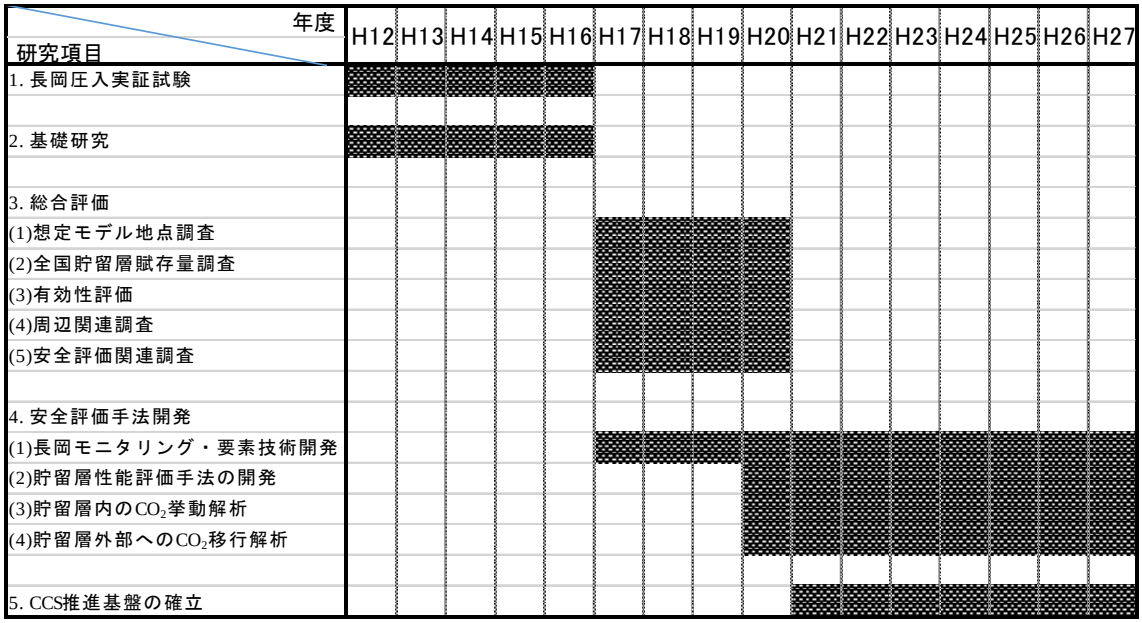
平成 12-13　二酸化炭素地中貯留技術研究開発事業（NEDO：委託）
平成 14-20　二酸化炭素地中貯留技術研究開発事業（国：補助金）
平成 21-22　二酸化炭素貯留隔離技術研究開発事業（国：補助金）
平成 22　　二酸化炭素挙動予測手法開発事業（国：委託）
平成 23-27　二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術開発事業（国：委託）

平成 12 年度から平成 16 年度までは、科学的知見の集積を目的とした基礎研究等を行うとともに、長岡で我が国初の CO_2 圧入実証試験を行ったほか我が国の CO_2 貯留可能量を評価した。また、平成 17 年度から平成 19 年度までは、圧入後の CO_2 長期挙動予測に向けて長岡サイトにおける圧入後の CO_2 挙動モニタリングにより地層水の CO_2 溶解や地化学反応に起因する鉱物溶解・沈殿等の貯留メカニズムの解明、貯留された CO_2 の長期安定性評価手法を確立した。

2020 年頃の CCS 実用化の方向性を受け、平成 20 年度には、それまでの基礎研究から、CCS の安全性や海域環境影響評価に関する基盤技術の開発に重点を置くように事業内容の見直しが行われた。具体的には、大規模圧入実証試験と密接に連係し、CCS 実用化に欠かせない社会的受容性獲得や信頼性醸成に資するため、圧入された CO_2 の長期挙動予測や CO_2 漏洩による海域環境影響評価に関する基盤技術開発へと見直された。

このため、平成 21 年度からは、我が国の地質特性を反映した安全性評価に関する基盤技術開発を目的とした、貯留層性能評価手法開発、貯留層内の CO_2 挙動解析、貯留層からの CO_2 移行解析に関する安全評価手法の開発とともに実用化に向けた CCS 推進基盤の確立にも取り組むようになった。

表 5-1　二酸化炭素地中貯留技術研究開発の全体スケジュール



５－２　研究開発実施者の事業体制・運営

(1)　研究開発実施者の事業体制

研究開発実施者である公益財団法人地球環境産業技術研究機構（以下「RITE」という）の CO_2 貯留研究グループ（グループリーダー：山地憲治）による統括管理体制のもと、研究計画、進捗状況管理、経費配分と執行管理に当たっている。また、プロジェクトリーダーとして同グループの薛自求主席研究員を専任させ、研究を推進している。（産業技術総合研究所のプロジェクトリーダーは西祐司　地圏資源環境研究部門 CO_2 地中貯留研究グループ長。平成 25 年度より）

(2)　研究開発実施者の運営

研究内容は全て研究推進委員会において審議を受けて進めている。研究推進委員会の委員には、学識経験者のみでなく、地中貯留に関連して高い技術を有する国際石油開発帝石（株）、石油資源開発（株）、CO_2 の大規模排出事業者である電力関係の研究機関である電力中央研究所も参加している。なお、研究推進委員会以外にも、必要に応じてワーキンググループを開催して、プロジェクトの課題の検討、個別テーマの専門的な検討、情報交換等を行っている。

研究推進委員会に関しては、RITE の CO_2 貯留研究グループが研究総括を行っている。委員会の開催状況は下記のとおりである。

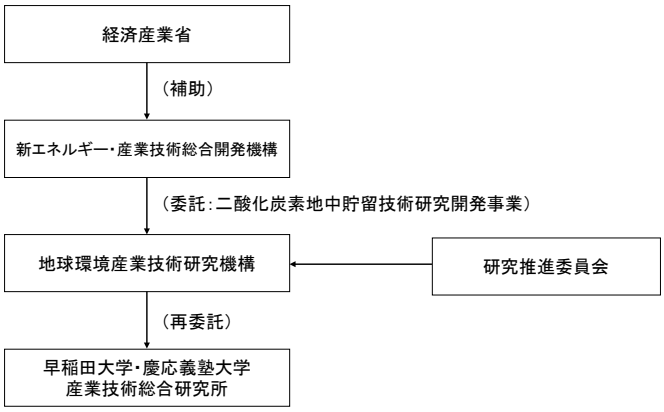
・ 研究推進委員会

構成メンバー　　：大学の研究者（5 名）、民間（2 名）、研究機関等（2 名）
〔平成 27 年 3 月現在〕

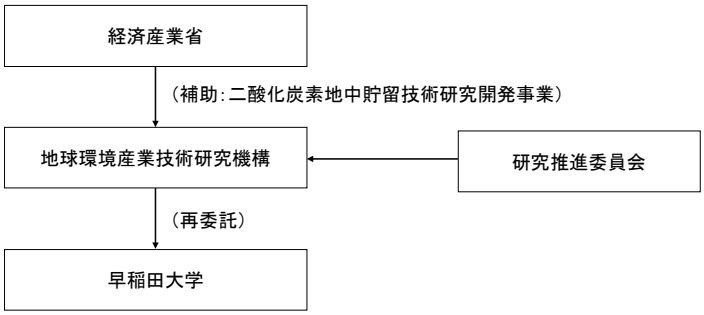
開催頻度　　：3 回／年

位置付け　　：各研究課題内容の整合・相互調整を図り、研究開発の全体取りまとめを行う。また、研究計画と進捗状況や成果について検討し、研究の方向性を決定する。

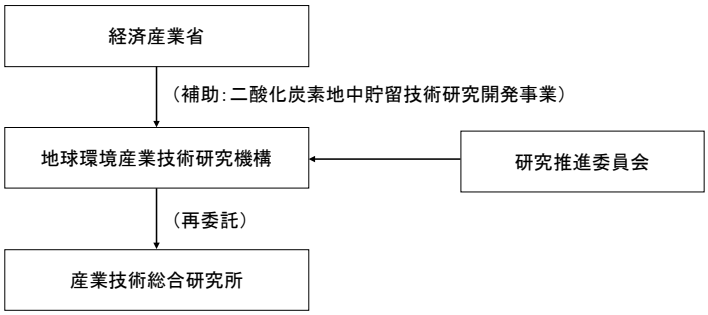
情勢変化への対応：科学的知見の集積段階であった平成 12 年度～平成 16 年度では、研究推進委員会のもとにシステム分科会、実証試験分科会を設けていた。以降は、長岡実証試験や基礎研究などの進展により、我が国のような複雑な地質構造でも地中貯留実施できることが明らかになったため、長岡サイトのCO_2挙動モニタリングを継続し、我が国での地中貯留を実現に向けた政策的判断の基礎を提供する総合評価の充実、我が国の地質特性に考慮した地中貯留の可能性を検討することになり、技術関係合同 WG、調査関係合同 WG に改編した。平成 21 年度以降は、2020 年 CCS 実用化本格導入に向け、CCS の安全性や海域環境影響評価に係る研究開発に重点を置くように事業内容の見直しを行ったことに伴って、従来の研究推進委員会およびＷＧ体制を改編し、新たなメンバー構成により研究推進委員会を立ち上げ現在に至っている。



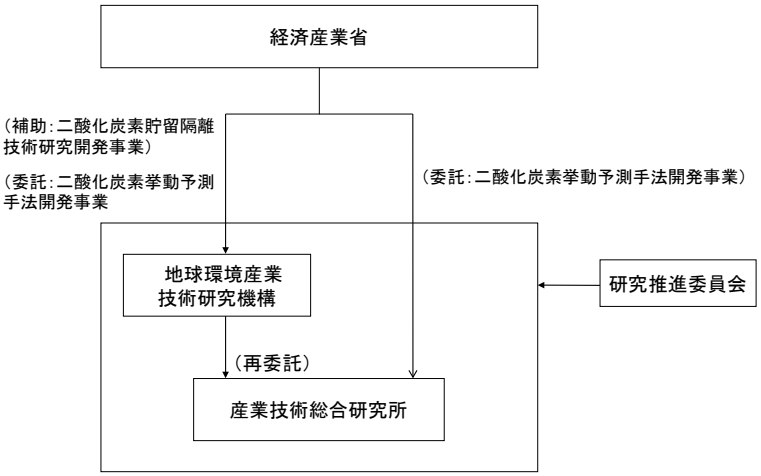
研究開発体制（平成12-13年度）



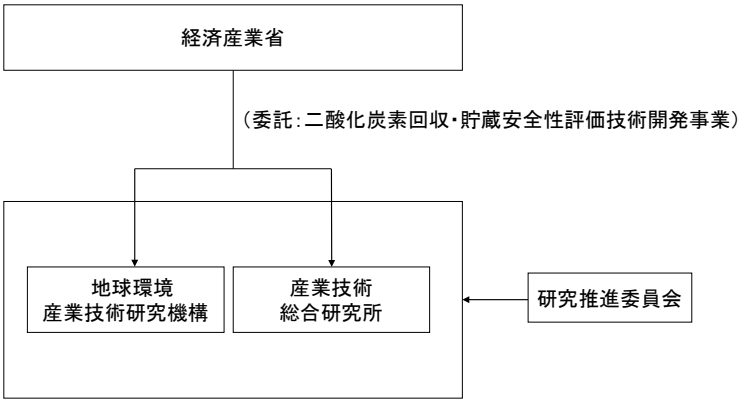
研究開発体制（平成14-16年度）



研究開発体制（平成17-21年度）



研究開発体制（平成22年度）



研究開発体制（平成23-27年度）

図 5-2　事業体制研究管理体制

５－３　資金配分

本事業における資金配分を表 5-2 に示す。平成 12 年から 16 年までは長岡サイトでの CO_2 圧入実証試験を中心とした基礎研究段階であり、地質構造が複雑な我が国においても CO_2 地中貯留の可能性を明らかにできるように資金配分を行った。平成 17 年から 20 年にかけては、長岡サイトの現場試験や室内の基礎実験の成果を受けて、我が国における CO_2 貯留ポテンシャル調査や CO_2 地中貯留の有効性評価を進めながら、基礎研究から基盤技術開発に適切な資金配分を行った。

その後は、長岡サイトでの CO_2 挙動の継続モニタリングや CO_2 漏洩による海域環境影響評価に関する安全性評価技術開発を行っている。また、海外の CCS 関連の最新情報の収集や実用化後 CCS 事業者に役立つ技術事例集の作成に向けた CCS 推進基盤の確立を目指した取組みも実施している。以上述べたように、基礎研究から基盤技術開発へと技術開発の進捗度に応じて最大の効果が得られるように資金配分を行い、効率的な事業運営を心がけた。

表 5-2　資金配分　　（単位 : 百万円）

年度	H12	H13	H14	H15	H16	H17	H18	H19	H20	H21	H22	H23	H24	H25	H26	H27	合計
長岡圧入実証	200	422	467	579	571	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	2,239
基礎研究	254	343	259	185	239	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	1,280
総合評価	－	－	－	－	－	477	441	405	489	－	－	－	－	－	－	－	1,812
安全評価	－	－	－	－	－	386	366	405	112	433	833	726	830	674	922	786	6,472
推進基盤	－	－	－	－	－	－	－	－	－	97	101	105	25	26	27	26	407
合計	454	765	726	764	810	863	807	810	601	530	934	831	855	700	949	812	12,211

（注）平成 27 年度は予算額

５－４　費用対効果

地球温暖化防止のために、温室効果ガスの排出量削減を達成するには、化石燃料の利用によって排出される CO_2 を地中に貯留する技術の実用化と普及が重要な役割を果たす。IPCC の CCS 特別報告書（2005）によれば、世界全体において、排出量の約 70 年分にも相当する、約 2 兆トン-CO_2 の貯留ポテンシャルが見込まれている。

IEA「エネルギー技術展望 2012」では、産業部門における大幅な CO_2 排出量削減目標の達成を可能にするには、CCS が有望な技術であるとしている。地球全体の温度上昇を 2℃以内に抑えるシナリオにおいて、2050 年までに CCS による CO_2 累積削減量が最大で 20%を占めると試算され、もし CCS を放棄すれば、必要とされる電力分野の追加投資額は 40%増加し、今後 40 年間で総額 2 兆ドル

に達するとしている。さらに、CCS なしでは、他の CO_2 排出量削減オプションに対する圧力も増すことになるとしている。

CCS 事業を実施することによって得られる CO_2 の削減量のみならず、CCS 事業による市場創出等の経済効果を考慮する必要もある。しかし、これら効果については、今後の金融・税制優遇措置や CO_2 クレジット価格によって大きく変わる可能性があり、現段階では定量的評価は困難であるが、CO_2 の削減ポテンシャルが非常に大きいことから、世界の温暖化対策をリードするためにも、我が国において CCS 技術を早期に確立する必要がある。

本事業において投入した予算額に対してどの程度の結果をあげたかを定量的に算出することは難しいが、直接的効果のみならず間接的な効果を含めて資金配分に対して費用対効果が極めて大きいと考えられる。その一例として、本事業で実施した全国貯留層賦存量調査や想定モデル地点調査の結果が、大規模実証試験のサイト選定に大きく貢献した。日本 CCS 調査（株）は本事業の調査結果および民間企業の地質調査データを基に、地点評価や総合技術評価を経て、苫小牧を含む 4 つの候補サイトに絞り込み、最終的に苫小牧沖合いを大規模実証試験サイトに決定した。

本事業では、長岡サイトにおいて、日本はもとより、世界でも当時は初めての陸域深部塩水層 CO_2 圧入実証試験を行った。観測井を利用した綿密な CO_2 挙動モニタリングによって、IPCC の特別報告書に示された地層水への CO_2 溶解や地化学反応に伴う鉱物の溶解・沈殿等の CO_2 貯留メカニズムに関する観測データを取得できた。CO_2 貯留メカニズムは長期安定性を議論する上で欠かせなく、実データが得られているのは長岡サイトだけであり、その科学的意義が高く、我が国の CCS 技術力を海外に示すことができた。また、CO_2 挙動モニタリングや坑井健全性調査の結果より、2004 年の中越地震と 2007 年の中越沖地震の影響を受けず、CO_2 が安全に地中貯留されていることが明らかになり、CCS の社会的受容性の獲得や信頼性の醸成に活用され、我が国だけでなく、CCS の世界的展開にも大きく寄与し、十分な費用対効果が得られている。

長岡サイトで得られた CO_2 挙動モニタリングの知見は苫小牧の大規模実証試験に提供することができる。物理検層等の CO_2 挙動モニタリング技術の有効性は、苫小牧における CO_2 挙動モニタリングの計画や手法の検討に役立ち、不均質性の貯留層における CO_2 分布特性の評価に関しても大いに参考になる。さらに、CO_2 挙動モニタリングの結果と CO_2 流動シミュレーション結果とのヒストリーマッチングによって、初期の地質モデルを改良することや、コア試料の物性測定試験方法および測定結果の利用方法、常設型 OBC による反射法弾性波探査、および自然地震や微小振動の同時観測技術についても、苫小牧の大規模実証試験を通じて実用化されることから、十分な費用対効果が得られる。

本事業における貯留性能評価手法、貯留層内の CO_2 挙動解析、貯留層からの移行解析などの技術開発は、着実に成果を上げており、今回の評価対象期間に

おいては 39 編の論文を国内外の学会誌に投稿し、また、光ファイバー測定技術、X 線 CT 装置を用いた CO_2 挙動解析の特許を計 4 件申請しており、我が国の科学技術力を世界にアピールすることができる。

５－５　変化への対応

平成 20 年度に国内で CCS 大規模実証試験を実施する場合の候補地や技術的な可能性に関する検討が行われることになり、それに対応するように、本事業を従来の基礎研究から、2020 年頃から CCS 技術の本格導入に向けた基盤技術の開発に深化させる内容の見直しを行った。また、平成 21 年度には経済産業省より、CCS の大規模実証試験を実施する際に安全面、環境面から、遵守することが望ましい基準となる「CCS 実施事業の安全な実施にあたって」を発表した。

このような情勢変化に対応し、大規模圧入実証試験と密接に連係して、CCS 実用化に欠かせない社会的受容性獲得や信頼性醸成に資する、CO_2 の長期挙動予測や CO_2 漏洩による海域環境影響評価に関する基盤技術開発に重点的に取り組むこととなった。この事業内容の見直しに伴って、本事業の研究推進委員会の運営および委員会メンバーも更新した。このため、平成 21 年度からは、我が国の地質特性を反映した安全性評価に関する基盤技術開発を目的とした、貯留層性能評価手法開発、貯留層内の CO_2 挙動解析、貯留層からの CO_2 移行解析に関する安全評価手法の開発とともに実用化に向けた CCS 推進基盤の確立にも取り組むようになった。

５－６　「国民との科学・技術対話」の推進

本事業においては、「国民との科学・技術対話」の一機会としてワークショップを開催し、CCS の研究活動や成果を一般市民に対してわかりやすく紹介する理解促進活動に取り組んだ（表 5-3）。毎年度、時宜を得た技術課題をテーマに取り上げ、国内・海外の専門家、技術者を招聘し、ワークショップ参加者を一般から広く募った。国内外の技術動向や本事業による最新成果を紹介し、CCS 技術開発の現状や実用化の課題に関して、会場参加者との間で活発な議論が行われた。

また、参加者アンケートの実施を通じて、本ワークショップ開催による理解促進効果の調査および CCS 技術事例集作成に有効なデータの取得を行ってきた。アンケート結果（図 5-3）に示されるとおり、9 割以上が CCS 実施の必要性を感じていることがわかり、「CCS の最新動向、現状の課題を知ることができ、非常に有効だったと言える。オープンな議論ができる機会として今後も継続を期待する。」、「安全性確保のためのモニタリングの重要性が理解できた。」、「地域住民の合意を得るためにも環境影響評価は必須であることがわかった。」といったコメントが寄せられた。また、「CCS 商用化のために必要な取組み」についての質問に対しては、「政府主導による技術開発支援」、「産業界への経済的インセン

ティブ」、「一般市民による認知度向上と社会的合意の形成」などの回答が得られた。

表 5-3　　ワークショップ開催実績

開催年月日（開催地）	開催概要	主な講演（講演者）	参加者数
平成 25 年 1 月 24 日（東京）	CCS テクニカルワークショップ 2012「貯留層に圧入した CO_2 の漏出に係る懸念への取組み」 （概要） CCS を実展開するためには、環境影響評価によって技術的安全性を検証し、社会的に受容されることが不可欠となることについて情報発信を行った。海外の専門家による事例紹介と RITE からも報告を行い、参加者らと議論を実施した。	モデレーター : 東京大学　佐藤徹教授 ◆サイト選定と環境影響評価－法規制から実例までー（RITE　喜田潤） ◆米国イリノイ州 Decatur、100 万トンの CCS プロジェクトにおけるサイト特性調査とモニタリングプランの開発（米国　イリノイ大学 Robert J. Finley 博士） ◆海底下貯留における海域環境影響評価手法の開発（RITE　内本圭亮） ◆CO_2 漏洩の申し出に対応したフィールド調査の事例（米国　テキサス大学　Katherine Romanak 博士） ◆本事業の研究成果について、5 件のポスター発表を実施した。	137 名
平成 26 年 1 月 23 日（東京）	CCS テクニカルワークショップ 2013「CCS 大規模実証プロジェクトに向けた安全性評価技術開発の最前線」 （概要） 苫小牧実証試験と海外の商業規模 CO_2 圧入プロジェクトのモニタリングの役割と技術開発状況に焦点を当てて、国内外の専門家を招聘し、モニタリングと事業の安全性について広く議論を実施した。	モデレーター : 京都大学　松岡俊文教授 ◆CCS のスケールアップーIn Salah プロジェクトが苫小牧に伝えたいこと（英国　BP　Iain W. Wright） ◆苫小牧 CCS 実証試験の現況について（日本 CCS 調査株式会社　棚瀬大爾） ◆Aquistore プロジェクト : カナダ サスカチュワン州の深部塩水層への商業規模 CO_2 貯留（カナダ Geological Survey of Canada　Don White） ◆CO_2 坑内利用モニタリング光ファイバーセンシングの最新開発動向（米国　LBNL　Tom Daley） ◆光ファイバーによる CO_2 圧入サイトの地層安定性観測技術開発について（RITE　薛自求） ◆本事業の研究成果について、12 件のポスター発表を実施した。	295 名

開催年月日（開催地）	開催概要	主な講演（講演者）	参加者数
平成 27 年 1 月 30 日（東京）	CCS テクニカルワークショップ 2014「CO_2 貯留の環境影響評価に向けた取組み」 （概要） CCS 実施の安全性・信頼性を担保して、社会的受容性の向上にも重要な役割を果たす環境影響評価技術について、海外の専門家と RITE からの報告を行い、会場参加者との活発な議論を行った。	モデレーター : 東京大学　佐藤徹教授 ◆CO_2 移行解析技術開発について（RITE　喜田　潤） ◆ZERT プロジェクト: 陸域の人為的 CO_2 漏出実験によるモニタリング手法および検出限界と生態系影響について（米国　モンタナ州立大学 Lee Spangler 教授） ◆QICS プロジェクト - 成果と CCS 開発におけるその意味（英国 Plymouth Marine Laboratory　Jeremy Blackford） ◆漏出シナリオに基づく海中 CO_2 拡散　シミュレーション技術開発（RITE　内本圭亮・中島崇裕） ◆本事業の研究成果について、7 件のポスター発表を実施した。	186 名

- CCS の実施について

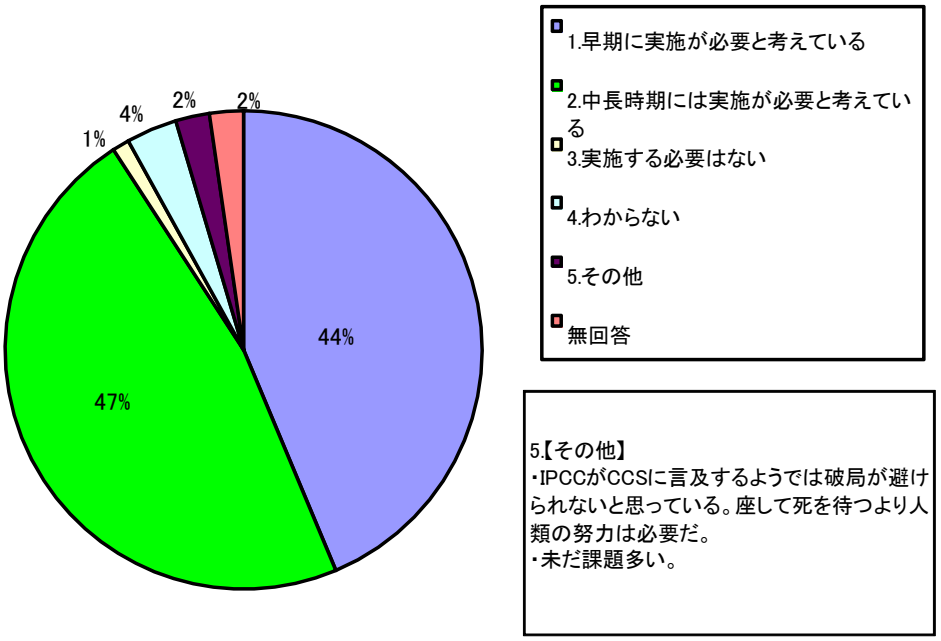


図 5-3　アンケート集計結果

６．中間評価結果

平成 24 年度に産業構造審議会産業技術分科会第 58 回評価小委員会において、中間評価を受け、「今後の研究開発の方向等に関する提言」に対して、下記の対応を実施した。

対応状況を表 6-1 に示す。

表 6-1 産構審の「今後の研究開発の方向等に関する提言」に対する対応状況

	提言等	対応状況
①	個別要素技術をどう生かすかは CCS 推進基盤の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。	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、苫小牧実証試験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。
②	長期的な視点にたって地球全体の CO_2 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。	世界で CCS が実用化された際、日本の CO_2 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。

第３章　評価

第３章　評価

１．事業の目的・政策的位置付けの妥当性

地球温暖化への対応が叫ばれる中で、その主要な原因となっている温室効果ガスであるCO_2の削減は世界共通のテーマとなっている。経済の持続的成長に欠かせない化石燃料の利用によって大量に発生するCO_2の削減への取組みは、地球温暖化対策の中でも特に重要な位置づけにある。本事業は、そのCO_2削減の取り組みの一環として、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CO_2を深部塩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。しかし、CO_2地中貯留を具体化するにはその安全性を含めた評価のもとに社会全体に受け入れてもらう必要があり、そのためにもCO_2を深部塩水層に長期的に安定かつ安全に貯留する技術を確立する必要がある。さらに国内においては、CO_2を安全に貯留しやすい石油天然ガス油田は少なく日本特有の地層環境に対してCO_2を安全に長期的に貯留する技術を確立しなくてはならない。本事業は日本独自の地質環境で安定的かつ長期的にCO_2を地下貯留するための技術開発として、重要な位置づけを持っている。

一方、CCS技術が外部不経済とはいえ、経済性を欠いたままでは実用化は難しい。経済的な意義や具体的な経済試算が必要である。さらに、CCSの実用化には、国民合意、市民合意を得るための総合的社会技術開発が必要であり、そのための要素検討、課題抽出および実証を行う必要がある。

【肯定的意見】

○外部不経済が前提となるCCSに関する技術開発は、国が優先して先導すべき事業であるため政策上の意義は極めて大きく、さらに地球環境の観点からも国民や社会のニーズに合致した事業であり、現段階では官民の役割分担は適切であると思われる。また、今回の評価対象である二酸化炭素貯蔵に関する技術は安全性に関わる技術となるため、新規性や独創性よりもむしろ正確性や再現性に優れた技術であることが望まれるが、本事業では従来技術を十分に発展させることにより、事業目的を達成できるレベルの技術に到達したと考えられる。（A委員）

○昨年閣議決定されたエネルギー基本計画の中に「CCS技術の実用化を目指した研究開発」と明確に示されており、上位の施策との関連付けは極めて明確である。また、エネルギー自給率の低い日本において「

石炭の有効活用」はエネルギーセキュリティー確保の観点からも重要であるが、同時にCO_2を多く排出する課題を抱えており、その解決策のひとつとしてＣＣＳは有望な手段であり、社会的・経済的な意義も大きいと考える。また、本研究に関しては、多額の研究開発費や環境への影響等長期にわたる調査研究期間が必要であるとともに、高い技術的難易度が求められる事。加えて、将来的にも研究・技術開発に伴うインセンティブが働きにくい課題でもある事から、民間企業での取り組みには限界があり、国の事業として実施する必要性は極めて高いと考える。さらには、本事業あるいは関連する事業で得た技術・ノウハウを用いて、石炭使用量の多い発展途上国での適用も期待できる事業であり、国際貢献面で考えても国が実施する重要な事業と位置づけられる。（B委員）

〇温暖化対策のなかでも、CCSは省エネや原子力、再生可能エネルギーと異なり、それだけで経済的価値を生むことがないという点で、民間企業の自発的な取り組みは期待しにくい。導入されるとすれば、排出量取引や国際炭素税など世界的な枠組みが創設されて日本も参加するなど、高率のカーボン規制が課されることが前提になる。カーボンコストが相当程度に上昇することで初めて、CCSの経済メリットが出てくる。国際社会と国のカーボン政策に連動するだけに、国が関与してその技術的な可能性を把握しておく意義は大きい。

温暖化対策の国際枠組みの方向性を見定めるのは難しく、ハリケーンや干ばつなどの大災害が頻発すれば、国際世論が一気に高まるリスクも秘める。CCSは、こうした国際的なカーボン規制リスクに備える技術としても、国が主導して保持しておく必要性と意義がある。

電源構成のベストミックスの検討中で、原子力発電の比率低下が避けられない中、CCSの重要性は一層高まっている。（C委員）

〇地球温暖化への対応が叫ばれる中で、その主要な原因となっている温室効果ガスであるCO_2の削減は世界共通のテーマとなっている。経済の持続的成長に欠かせない化石燃料の利用によって大量に発生するCO_2の削減への取組みは、地球温暖化対策の中でも特に重要な位置づけにある。本事業は、そのCO_2削減の取り組みの一環として、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CO_2を深部塩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。しかし、CO_2地中貯留を具体化するにはその安全性を含めた評価のもとに社会全体に受け入れてもらう必要があり、そのためにもCO_2を深部塩水層に長期的に安定かつ安全に貯留する技術を確立する必要がある。さ

らに国内においては、CO_2を安全に貯留しやすい石油天然ガス油田は少なく日本特有の地層環境に対してCO_2を安全に長期的に貯留する技術を確立しなくてはならない。本事業は日本独自の地質環境で安定的かつ長期的にCO_2を地下貯留するための技術開発として、重要な位置づけを持っている。

CO_2地中貯留は現状において採算的がなく、とても民間でなし得る事業ではない。本事業は、国民的な課題でありながら経済性がないものを取り扱う以上、国が率先してやるべきものである。（D委員）

〇二酸化炭素による地球温暖化対策として極めて重要な課題であり、我が国の今後のエネルギー政策に対しても大きな影響を及ぼすものである。国の事業とすることに全く問題なく、政策的位置づけは明確である。また、我が国特有の地質に適した技術開発であり、新規性、独創性の有する開発と考えられる。（E委員）

〇CCS技術開発は、地球温暖化の防止策であると同時に、ボイラーなど関連エネルギー変換技術の海外展開などにおいても、必要とされている。一方で、現段階では経済性に乗りにくいことから国が関与して、政策的に開発を進めることが重要である。また、本PJのように、貯留後の安定性に関する研究は、CCSの安全性を高める上でも欠かすことのできない研究開発事業と位置付けられる。（F委員）

【問題点・改善すべき点】

●CCS 技術が外部不経済とはいえ、経済性を欠いたままでは実用化は難しい。経済的な意義や具体的な経済試算を積極的に公開して頂きたい。（A 委員）

●現時点では技術の確立、実証に向けた取り組みであるためやむを得ないところはあるが、経済性評価項目がやや曖昧と思われる。我が国で経済的に優位な地点の特定などが出来れば望ましい。また、CCS の実用化には、国民合意、市民合意を得るための総合的社会技術開発が必要であり、そのための要素検討、課題抽出および実証を行う必要がある。（E 委員）

２．研究開発等の目標の妥当性

安全評価手法の開発については、目標と共に、目標をブレークダウンした具体的な指標が設定されており、妥当であると考える。また、CCS 事業者向けの「CCS 技術事例集」の作成が目標設定されており、将来の実施において大きな効果を発揮するとともに、成果の事業者への移転という観点からも適切な目標であると評価できる。 一方、全体的に目標が定性的であり、具体的に何をどこまで開発するといったところがやや不明確である。

【肯定的意見】

○地震が頻発に起こる日本独特の地質に対するモデリング技術やシミュレーション技術の開発は、CCSを実用化する上で必修の技術であり、かつ将来的には技術輸出にも繋がるため経済的効果も期待できる。広く世界で活用してもらうには技術事例を作成することは重要である。（A委員）

○安全評価手法の開発については、目標と共に、目標をブレークダウンした具体的な指標が設定されており、妥当であると考える。

CCS推進基盤の確立のために、CCS事業者向けの「CCS技術事例集」の作成が設定されており、将来の実施において大きな効果を発揮するとともに、成果の事業者への移転という観点からも適切な目標であると評価できる。（B委員）

○CCSが本格的に実施される段階では、圧入地域の選定、圧入地域の社会的受容性、そして圧入後のCO_2削減（漏えいの防止）を保証する仕組みが大きな課題となる。そうした観点から、目標設定に地質モデリングによる圧入の安全性・経済性の評価、圧入後のモニタリング、CO_2長期挙動予測シミュレーションの評価手法開発を掲げたことは的を射ている。

日本の地形は複雑なだけに、地質モデリングやモニタリング、CO_2挙動予測の難易度は高く、平坦な地層の多い国・地域に比べて、より高度な技術が求められる。CO_2の圧入を海外で実施した場合、化石燃料の確保とCO_2削減の双方を海外に依存することなり、安全保障上、問題が多い。国内での圧入を可能にするためにも、日本の地層に対応したCCS技術を確立しておく意義は大きい。

また、「CCS技術事例集の作成」も、多額の税金を投入したCCS実証事業で得たノウハウを公開し、本格導入の段階で、幅広く民間企業の

参入を促す意味でも意義がある。（C委員）

〇CCS実用化に向けて、我が国特有の地質条件に対応した貯留性能評価手法の開発、貯留層内のCO_2の挙動解析技術の開発、貯留層外部へのCO_2移行解析技術の開発は、CO_2地中貯留の安全性や環境影響評価を確立するための基本技術として位置づけられる。また、CCS推進基盤の確立を目指して、CCS技術の事例集の編纂を行うことは新技術の確立を達成するためにも必要な目標として評価できる。（D委員）

〇我が国特有の地質条件に対して地質モデリング、長期挙動予測シミュレーション技術、移行モニタリング手法の開発、安全性評価などが目標となっており、適切と判断できる。また、CCS技術事例集の作成も今後のCCS推進の基盤として評価できる。（E委員）

〇CCSの実用化および技術基盤の確立に向けて、CO_2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めざしており、環境エネルギー技術革新計画、エネルギー基本計画など政策的にも明確に位置付けられている。（F委員）

【問題点・改善すべき点】
●安全性基準を策定できるのか。将来的には技術優勢が損なわれることなく、さらに踏み込んだ技術情報の公開が必要であると考える。（A委員）

●CCS 推進基盤の確立のために、「CCS 技術事例集」が事業者向けに大きな貢献をするのは容易に理解できるが、H24 の中間評価にも、CCS の社会的受容性の向上に向けて、「地域住民などの貯留に対する理解が重要で(中略)、CCS の社会的認知度の向上を図る必要がある」とされている中で、それに対する目標・指標の再設定はなされていない。ワークショップを 1 回/年開催し、一般市民への認知度向上の取り組み向上施策を行っているが、何れも東京での開催で参加者も限定される。新しい技術を実用化するには、安心・安全の観点を踏まえて社会から受け入れられる必要があり、広く社会一般に向けた PR 資料などがあれば将来有用であると考える。今後の取り組みに期待している。（B 委員）

●全体的に目標が定性的であり、具体的に何をどこまで開発すると行ったところがやや不明確である。本技術が、国際的に認知されるよう

な体制、取り組みを検討して頂きたい。また、市民合意を得るための社会技術的手法の開発を取り入れることが必要と思われる。（E 委員）

●本研究開発事業の性格助致し方ないところはあるが、目標設定に数値がなく、評価にやや難しい所はある。（F 委員）

３．成果、目標の達成度の妥当性

それぞれの開発課題で得られた知見は極めて有益であり、顕著な成果が認められる。特に、複雑な地形に対応したCCSの基本技術を確立したことは高く評価できる。また、長岡での長期モニタリングのデータは貴重であり、今後の苫小牧での実証に有益と考えられる。事例集の作成も成果として評価できる。更に、原著論文３９報、口頭発表１２５件など、成果の公開も十分である。 一方、目標そのものが定性的であるため、定量的にどこまで達成されたのか判断しがたい面もある。

【肯定的意見】

〇貯留層内のCO_2モニタリング技術とそれによるシミュレーションの精度の向上、さらにはCO_2注入による地質や地下水等への影響の有無の解析が詳細に行われており、今回の評価によりCO_2貯留の安全性はある程度確保されたと思われる。心配された地震の誘発も起こらないことから、今後はさらなる大規模スケールでのCO_2注入を実施し、さらに技術の向上とシミュレーションモデルの精度の向上を期待したい。また、特許や論文発表等により研究内容に対する評価も多面的に行われており、得られた成果は妥当であり、目標も達成されたと考えられる。（A委員）

〇安全評価手法の開発について、計画した3項目とも設定した目標に対して妥当な成果が得られたと評価できる。さらに、その成果全てが苫小牧実証事業に活用されている点も高く評価できる。今後は、成果を実際に活用し、その結果が想定通りのものであるのか、何か改善・変更が必要なのか評価を行うなど、将来さらに活用されるようPDCAを確実に廻していただきたい。

また、上記について、数多くの国内外の学会発表や論文誌投稿がなされ、高く評価できる。

CCS基盤の確立についても、今回計画した事項について「技術事例集」が作成され、成果は妥当で目標は達成されたと評価できる。（B委員

）

〇地質情報が少ない中で、3次元貯留層モデルの構築に成功した。こうした3次元モデルは、視覚的に一般の人にも分かりやすく、CCSの理解を深めるうえでも意義がある。

CO2モニタリング結果による100m×20mの広がりと、シミュレーションによる105m×22mの広がりは、かなり近似しており、シミュレーションの精度が信頼に足りうる水準に達していると評価できる。CO_2挙動継続モニタリングに関しても、複数のパラメーターによってCO_2が安全に貯留されていることが定量的に証明されている。

CO_2の圧入が国内で本格的に実施された場合、周辺住民にとって最も懸念され、説明を求められるのは「誘発地震」と思われる。従って、CO_2を大量に圧入した場合の微小振動との関連性について、より多くの知見を蓄積しておくことが必要に思われる。その点、今回の実証事業で、米国の大規模圧入サイトで微小振動を観測し、「微小振動イベントが認められなかった」との結論を得るとともに、圧入時の地層のひずみの測定法やジオメカニクスを考慮した断層モデリング手法の開発にまで踏み込んだことは評価できる。

また、CO_2が漏えいした場合を想定し、海水中での拡散シミュレーションや生物への影響を研究していることは、「絶対的な安全はない」という科学技術への謙虚な姿勢が感じられ、結果的に社会的受容性を高めるものと評価できる。（C委員）

〇貯留性能評価手法の開発においては、長岡実証試験サイトのCO_2流動シミュレーションとCO_2の挙動モニタリングの結果とのヒストリーマッチングを行い、我が国の地質条件に適した地質モデル構築手法を確立したことは評価できる。また、地下水流解析手法の開発において、沿岸域のCO_2の貯留サイト特有の陸域と海域をつないだシームレスの推理地質モデルを構築し、さらに地域地下水流動解析手法を確立できたことは評価できる。

貯留槽内のCO_2の挙動解析においては、CO_2長期挙動解析予測評価手法とCO_2挙動モニタリング手法を確立できたことは評価できる。

貯留層外へのCO_2移行解析においては、海洋漏出後の拡散を予測するCO_2海中拡散シミュレーターの開発、漏出CO_2気泡の音響探査検出技術の及びCO_2漏出検知手法の確立及びCO_2漏出による生物影響評価手法を確立できたことは評価できる。

CCS実用化にむけた技術事例集の作成においては、事業者に参考となる技術資料集を作成できたことは、今後の関係者に対しての知識的な

支援だけでなく、CCS技術に対する社会的受容性の向上においても役に立つと評価できる。（D委員）

〇それぞれの開発課題で得られた知見は極めて有益であり、顕著な成果が認められる。特に、複雑な地形に対応したCCSの基本技術を確立したことは高く評価できる。また、長岡での長期モニタリングのデータは貴重であり、今後の苫小牧での実証に有益と考えられる。事例集の作成も成果として評価できる。更に、原著論文３９報、口頭発表１２５件など、成果の公開も十分である。（E委員）

〇地中、帯水層における安定性、および移行性に関して、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などが確立され、実際に、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ことは、本事業の成果として、高く評価できる。設定された目標以外に得られた成果があるとまでは言えないが、確実に研究成果が実用性を有していることが実証されていると判断できる。（F委員）

【問題点・改善すべき点】

●圧入終了後、5 年 9 か月後に実施した「坑井間弾性波トモグラフィ」によって、CO_2 が安全に貯留されていることが確認されたことは評価できる。ただ、同測定結果の図を見ると、CO_2 の貯留箇所を示す黄色と黄緑の速度変化率のエリアが、遮蔽層から上に漏れ出ているようなイメージに見える。この点は、前回の中間評価の際に、実際に漏れ出しているわけではないとの説明を受けたが、こうした誤解を与えるような図に関しては、今後一般に公開する場合、丁寧な解説が必要に思われる。

　微小振動に関して、米国の大規模圧入サイトで微小振動を観測し、「微小振動イベントが認められなかった」とのことであるが、「地層の異なる米国と国内では、振動を引き起こすメカニズムが異なるのでは」との疑問が出ることが予想される。地震の多い日本では、圧入による振動と、圧入に起因しない振動を見分けるのが難しい面もあるが、逆に圧入中に偶然に発生した自然地震が、圧入とは無関係であることを論理的に明確に説明できないと、「予防原則」の立場から、圧入への反対運動が起きる可能性もある。こうした恐れをなくすことからも、国内での圧入と微小振動との関連性についても、より知見を深める必要がある。（C 委員）

●事業で実施できたことについて評価できるが、その達成レベルの評価については判断が難しい。何をもって想定以上の成果なのか、結果をもって判断するよりもプロジェクトの開始時点において、達成レベルの期待値をある程度示しておく必要があると思われる。比べるべき対象の基準がないために、達成レベルの妥当性を評価することが難しく客観的な評価に欠ける部分がでてくる。（D 委員）

●目標そのものが定性的であるため、定量的にどこまで達成されたのか判断できない。（E 委員）

４．事業化、波及効果についての妥当性

本事業で開発した技術は、苫小牧の大規模実証試験に様々な角度から貢献でき、事業化のための技術的基盤は確立していくものと思われる。また、本技術は、資源開発、地震対策など他分野への応用も十分期待できる。さらに、技術事例集の作成は国際標準化にも貢献できるものと期待できる

一方、他の地域あるいは地層へどれくらい適用可能かは、不明確な点がある。また、競合が予想される他の技術との性能評価やコスト計算がなされていないため、CCS以外での波及効果がどの程度あるかは現状判断できない。また、この技術が関与できる市場はどの程度あるのかなどの調査も今後必要となる。さらに、技術事例集のほか、一般市民に対する説明資料（必要性、安全性、経済性）も必要である。

【肯定的意見】

〇CCSは今回の安全性に関する基盤技術だけで構成されている訳ではないため、直ちに実用化とはいかないが、貯留されたCO_2やその周辺環境を解析する技術は今回の事業である程度確立されたため、CCS実施時には実用化できる見通しは立ったと考えられる。（A委員）

〇基礎研究段階であるので、具体的な事業化はまだ先のことであると考えられるが、成果の多くが苫小牧実証事業試験へ活用されており、それを持って概ね妥当であると評価できる。一方で、実証事業は単なる一サイトでの適用に過ぎず、先にも記したが、PDCAを確実に廻す事により実証事業への適用で得られた知見を確実に将来の事業化時に残せるような今後の取り組みを期待している。また、これらを、今回作成した技術事例集にも反映いただきたい。（B委員）

○事業化については、政策的位置づけで述べたように、国際的な温暖化対策の枠組みや国の政策に依存する面が大きく、今回の成果によって判断すべきものではない。ただ、民間によるCCS事業を想定し、限られた予算の中で圧入サイトを適切に選定し、効率的にモニタリングするという視点に立っており、事業性を高めるうえで、一定の成果を上げたと評価できる。また、CCSが商用段階に入った場合、地方の建設会社などの新規参入も予想され、その際に「CCS技術事例集」が大いに参考になると評価できる。（C委員）

○貯留層内のCO_2挙動解析技術に関しては、その多くの関連技術が苫小牧実証試験に提供もしくは適用予定であると考えると、事業化についての見通しが立っていると評価することができる。

貯留層外部へのCO_2移行解析は苫小牧地点におけるCCS大規模実証試験の海洋汚染法に基づく許可申請に適用されたことを考えると、事業化についての見通しが立っていると評価できる。

地質モデルの構築や貯留層内のCO_2挙動解析は苫小牧実証試験にも適用され、改良を加えCCS実用化時点で、CO_2貯留の安全性評価に必須の手法として事業化に組み込まれる予定となっており、事業化に対して妥当な成果を出したと評価できる。

波及効果として、CO_2挙動解析技術の今後増々増えてくると予想される複雑で低浸透性の油田に対するCO_2-EORの適用・効率化への貢献、地質モデリング技術の海外における不均質な地層に対するポテンシャル評価の実施を通しての海外展開など、今回の事業によって得られた技術は様々な領域での応用的な利用が可能であり、国際的にも利用価値の高い技術として活用されることが期待できる。（D委員）

○本プロジェクトで開発した技術は、苫小牧の大規模実証試験に様々な角度から貢献でき、事業化のための技術的基盤は確立出来て行くものと思われる。また、本技術は我が国の複雑な地形に対応できるものとして、資源開発、地震対策など他分野への応用も十分期待できる。（E委員）

○CCS事業の実用化に対する見通しを評価する事は容易ではないが、CCS事業を実用化する際の基盤技術は確実に開発されていると評価できる。（F委員）

【問題点・改善すべき点】

●他の領域（地域あるいは地層）へどれくらい適用可能かは、今回の

発表や資料からだけでは十分には読み取れなかった。さらなる検討が必要であると考えられる。また、競合が予想される他の技術との性能評価やコスト計算がなされていないため、CCS 以外での波及効果がどの程度あるかは現状判断できない。また、この技術が関与できる市場はどの程度あるのかなどの調査も今後必要となろう。（A 委員）

●波及効果については、この度開発した技術成果が「適用できる」「期待できる」に留まっており、具体的にどのように波及させて効果を活用するかが検討されていないと考えられる。実際に活用すべく事業者等との協議等も行って行くべきであると考える。標準化については、これからであると考えられるが、成果の標準化への適用について、報告書の中でほとんど触れられていない。大きな国費・マンパワー・技術を投入して成果を出してきたプロジェクトであるので、標準化に向けたシナリオについてもう少し検討いただき、将来、検討が進んだ際あるいは実証事業からの知見が得られた際、直ちに標準化できるように準備を進めていただければと考える。日本発で世界に発信できる将来有望な技術であり、標準化により本分野で日本がリーダーシップをとることに繋がる取り組みを期待している。（B 委員）

●NEDO の風況マップや日射量データベースが、風力や太陽光発電の普及に大きく寄与したように、今後は、圧入サイトの選定に役立つ「地質・地層データベース」のような情報公開サービスも検討課題ではないか。また、CCS 技術が国際標準化されることを睨み、地層の複雑な日本での CO_2 圧入事業が不利にならないことに加え、日本企業の持つ CCS 関連技術が世界的に活用されやすくなるよう、標準化の作業に積極的に関与すべきであろう。（C 委員）

●技術事例集の作成は国際標準化にも貢献できるものと期待できるが、更に、一般市民に対する説明資料（必要性、安全性、経済性）も必要と思われる。また、今後本技術を実用化、普及させるためには、CCS 回収型発電システム（大崎クールジェン）などとの連携を含む実証も計画する必要があると思われる。（E 委員）

●ここで、実証された技術が、他の分野に展開されるとよい。（F 委員）

５．研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性

研究計画、実施体制や運営、資金等は適切であったと考えられる。費用対効果については、CCS 事業の経済性効果が今後の金融・税制優遇措置や CO_2-クレジット価格によって大きく変わるため、現時点で経済的な評価を行うこと自体が困難であるが、地球温度上昇 2℃のシナリオにおいて、2050 年までに CCS 事業の CO_2 累積削減量が 20%であることを鑑みると、その経済的な貢献は膨大であり、本事業の持つポテンシャル的な費用対効果は非常に大きいと言える。

一方、研究開発マネジメントにおいて、基礎研究段階や調査段階では、様々な不確定要素があり、研究としても探索的な研究の色合いが強く、自由闊達な意見を尊重し柔軟性の高い緩いマネジメントで進めることが望ましいが、実用化を見据えた技術開発においては、技術開発リスクをある程度評価し、技術難易度や時間・予算等を考慮したきっちりしたマネジメントに移行し運営する必要がある。しかし、体制面や運営面においても本事業を通して初期から最後まで同様のマネジメントのやり方が行われてきたようであるので、今後は研究開発のステージを意識し、それぞれのステージに応じた適切なマネジメントのやり方を実施するようにすべき。

【肯定的意見】

〇研究計画、実施体制や運営、資金とうは適切であったと考えられる。費用対効果は比較事案が少ないため正確な評価はできないが、他国で行われている事業等と比較して概ね妥当ではなかと考えられる。（A委員）

〇長期間で大きな費用が必要な研究を、4つのステップに区分して、ステップごとに評価して次に進む研究計画は適切であると評価できる。（B委員）

〇事業化へのシナリオに不確実性が高く、また社会的受容性に課題があるCCSのC02圧入プロジェクトに関しては、国の研究機関であるRITE、AISTが主導するという体制が望ましい。また、米国の大規模圧入サイトとの連携や、環境影響評価に関する英国との共同研究など、この分野で先行する海外の研究機関と積極的に連携していることは、CCS研究のネットワーク拡大や、研究の費用対効果を高める上で評価できる。（C委員）

〇長期にわたる研究開発に対して研究開発ロードマップを作成し、さ

らに事業の進展や事業環境の変化にともない、事業内容の見直しを適切に行いながら進めていったことは評価できる。また資金配分においても、基礎研究から基盤技術開発への技術開発の進捗に応じて効果を最大化すること念頭においた資金配分を行ってきたことも妥当である。

費用対効果については、CCS事業の経済性効果が今後の金融・税制優遇措置やCO_2-クレジット価格によって大きく変わるため、現時点で経済的な評価を行うこと自体が困難であるが、地球温度上昇2℃のシナリオにおいて、2050年までにCCS事業のCO_2累積削減量が20%であることを鑑みると、その経済的な貢献は膨大であり、本事業の持つポテンシャル的な費用対効果は非常に大きいと言える。

本事業において「国民との化学・技術対話」の一環としてワークショップを行い、CCSの研究活動や成果を一般市民に分かりやすく説明し、理解促進に努めたことは評価できる。CCS事業の展開には地域住民の理解は不可欠であり、本事業の重要なステイクホルダーである一般市民を早くから意識し、その市民に対して正しい知識を与え理解を得る努力は、CCSの普及の難点から非常に重要な意味を持ち、その点も視野に入れた積極的な活動を評価できる。（D委員）

〇本課題の内容から判断して、国の方針の下、研究機関（RITE,AIST）が実施する体制は適切である。また、非常に多くの技術開発が行われており、個々の開発に対する資金配分、費用対効果は難しいが、全体としては適切と判断できる。苫小牧の実証にも適応でき、スケジュールも妥当と思われる。「国民との科学・技術対話」の推進として、ワークショップを開催したことは評価できる。（E委員）

〇概ね妥当にマネジメントされたと判断できる。（F委員）

【問題点・改善すべき点】

●他国で行われている同様な事業における資料があれば、詳細な比較は可能であった。（A 委員）

●体制について、受諾者の RITE/AIST だけでなく、早稲田大学・電中研・石油資源開発等が研究開発実施者として参画しているが、それぞれの役割が不明なため、実施体制・運営の適切性が判断できない。資料６－１　P118 に示す図 5-2 事業体制研究管理体制の中に、研究開発実施者の名称・役割などを記載の上、管理・運営すべきであると感じた。（B 委員）

受託期間中に東日本大震災が発生した。長岡サイトで CO_2 挙動モニタリングを行っているが、震災後特別に、観測頻度を密にして安全を確認する必要はなかったか？（B 委員）

●研究開発マネジメントにおいて、基礎研究段階や調査段階では、様々な不確定要素があり、研究としても探索的な研究の色合いが強く、自由闊達な意見を尊重し柔軟性の高い緩いマネジメントで進めることが望ましいが、実用化を見据えた技術開発においては、技術開発リスクをある程度評価し、技術難易度や時間・予算等を考慮したきっちりしたマネジメントに移行し運営する必要がある。しかし、体制面や運営面においても本事業を通して初期から最後まで同様のマネジメントのやり方が行われてきたようであるので、今後は研究開発のステージを意識し、それぞれのステージに応じた適切なマネジメントのやり方を実施するようにして頂きたい。（D 委員）

●ワークショップを開催したことは評価できるが、内容から判断して専門家向けのものと思われる。今後は一般市民の合意を目的とした取り組みを検討する必要がある。（E 委員）

６．総合評価

CCS 技術開発は地球温暖化対策、外交戦略などおいても我が国にとって極めて重要な課題である。得られた知見は新規性があり、苫小牧の大型実証にも貢献できるなど多くの成果が認められる。また、成果の公開やワークショップ開催など本開発技術を世界および国民に理解してもらう努力がなされていることも評価できる。また、日本の様々な複雑性を持った地層への対応と、本格的な実用への対応など、まだまだ技術的に解決すべき課題は多く存在するが、海外以上に困難な貯留条件での実用化は一方で CCS 活用の範囲をグローバルレベルで格段に広める可能性も示している。日本だけでなく、将来的な国際貢献も視野に入れ、本事業での技術の高度化を目指すべき。

一方、いずれの開発技術も今後の実用化に向けて、どこまで達成すれば十分かというような定量的目標がなされておらず、また、経済的評価がやや曖昧である。

また、国内で CO_2 圧入事業を本格的に実施する場合、「誘発地震」のリスクについて、周辺住民に対していかに説明するかが最も大きな課題になる。圧入が始まった場合、圧入中に起きた自然地震や微小振

動の原因に対し、その都度、説明責任を求められる可能性が高いため、「圧入と微小振動(地震)が関連しないこと」を説明できるデータ収集や分析手法という視点も必要。

【肯定的意見】
○期間内に目標を達成したと思われる。長岡から苫小牧へと規模を拡大して本成果が活用されており、着実に貯留CO_2のモニタリング技術やシミュレーションモデルの向上がはかられている。（A委員）

○エネルギー自給率の低い我が国では、多くの電源種を確保し、電力の安定供給と低廉で価格変動の少ない電気料金を実現してきた。近年、新エネ等の導入が進み更に電源の多様化が図られる見込みであるが、資源の安定供給面や価格面から、石炭は将来にわたっても必要とされる重要な選択肢のひとつである。将来、もし、温暖化対応によりCO_2の大幅な排出削減が必要となっても、本事業やＣＣＳに関連する事業の成果が得られていれば、有効な選択肢として石炭を活用する可能性は残される。一方で、本事業を含めたＣＣＳに関する技術開発は、長期間にわたり多額の費用が必要となる事に加え、コストインセンティブが働きにくい課題でもある事から民間企業での取り組みには限界がある。そういったことを勘案すると、国の事業として実施する必要性は極めて高いと考える。（B委員）

○「CCS」というそれ自体が価値を生まない温暖化対策を巡っては、そもそも賛否がある。実際に本格的に実施されるか否かは、温暖化対策の国際枠組みに大きく依存し、その活用に懐疑的な見方も多い。そんななかエネルギーセキュリティのリスクという視点から、CO_2圧入を本格的に実施することを前提に、地質モデルやモニタリング、長期シミュレーションなど地道な研究開発を着実に積み上げ、成果を上げていることは、たいへん評価できる。
　「国内の地層は複雑なため、CO_2圧入は難しい」との短絡的な見方もあるが、今回の成果で得られた地質モデルやCO_2の挙動予測などの水準を見ると、定量データをもって安全性を確保しつつ、国内でCCS事業を本格的に実施できる道筋が見えてきたように思う。（C委員）

○CCSはCO_2固定化に必須の技術でありながら、日本においては比較的に容易に貯蔵できる油田ガス田は少なく、より複雑な地層モデルである沿岸域帯水層貯留における技術の確立を実現しなくてはならない。

これは、海外以上に高度なCCS貯留技術とともにその安全性技術の確立を必要とし、より難易度の高い技術を要求する。その中で、長岡の実証実験サイトでのデータ等を効果的に活用し、効果的なモデルを確立し、それらの成果をさらに大規模な苫小牧での大型実証で利用できるまでに仕上げたことは評価できる。

日本の様々な複雑性を持った地層への対応と、苫小牧での大型実証実験の規模をはるかに上回るスケールでの本格的な実用への対応など、まだまだ技術的に解決すべき課題は多く存在するが、海外以上に困難な貯留条件での実用化は一方でCCS活用の範囲をグローバルレベルで格段に広める可能性も示している。日本だけでなく、将来的な国際貢献も視野に入れ、本事業での技術の高度化を目指して欲しい。（D委員）

〇CCS技術開発は地球温暖化対策、外交戦略などおいても我が国にとって極めて重要な課題である。得られた知見は新規性があり、次の大型実証にも貢献できるなど多くの成果が認められる。また、成果の公開やワークショップ開催など本開発技術を世界および国民に理解してもらう努力がなされていることも評価できる。（E委員）

〇CCS技術開発は、我が国独自の技術を開発することは地球温暖化防止策とエネルギーに関わる産業の国際競争力強化にとって、重要な政策課題である。長岡の地下貯留層の安定性評価、帯水相における貯蔵性評価か着実に進んだことは、極めて有意義であった。（F委員）

【問題点・改善すべき点】

●安全性が確認されたとはいえ、地震誘発に対する心配と地震時の環境への影響は必ずしも今回の事業で完全に払拭されたとは思えない。例えば、どのような条件であれば地震が誘発されるのか等の事例があれば一般市民を納得させられるのでは。この点に関するさらなる情報の蓄積を期待したい。（A委員）

●終了時評価用資料において、「５．研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性」の説明が全般的に薄く、外部有識者として十分な評価をするのが難しい状況である。（B委員）

●国内でCO_2圧入事業を本格的に実施する場合、「誘発地震」のリスクについて、周辺住民に対していかに説明するかが最も大きな課題になると思われる。圧入が始まった場合、圧入中に起きた自然地震や微小

振動の原因に対し、その都度、説明責任を求められる可能性が高い。その点で、長岡サイトにおける圧入による微小振動と自然地震の観測とその分析に関し、やや物足りない面もある。「圧入と微小振動(地震)が関連しないこと」を説明できるデータ収集や分析手法という視点も必要なのではないか。（C委員）

●本事業の重要性や必要性、また実現できた内容についても評価できるが、安全性技術開発としては本事業の内容ですべて網羅できているのかどうなのかが良くわからない。これで網羅できているのであれば、そのように記すべきであるし、もしまだ実施すべき課題があるのであれば現時点で想定する中で、どの部分を実施してどこまで達成しているのかを示して頂きたい。（D委員）

●いずれの開発技術も今後の実用化に向けて、どこまで達成すれば十分かというような定量的目標がなされていなかった（開発経過とともに設定されるものかもしれない）。また、経済的評価がやや曖昧であったように感じられる。（E委員）

●診断技術等など異分野への大きな波及効果を期待したい。また、国際競争力強化の観点から、さらに海外の技術との比較をシビアに行うことは重要であろう。（F委員）

７．今後の研究開発の方向等に関する提言

今回の成果を実際に苫小牧実証事業試験へ活用し、その評価を十分に行い、必要に応じて今回の成果の見直し・バージョンアップをすべき。

大変多くの貴重な知見を有することが出来ており、更に以下の方向を目指すことを期待する。

１．当然ではあるが、長岡で行った小規模のデータと苫小牧の大規模実証との相関を十分検討し、スケールアップ指針を確立すること、

２．安全性、経済性の視点から、我が国における CCS の適地、貯留量の選定を行うことが出来るような技術とすること。

３．CO_2 回収型発電システムなどとの連携によって、より実用的な実証システムによる検証を行うこと。

４．国際的に認知されるような活動をより積極的に行うこと。

５．市民合意に向けて、地域一体化技術などの社会技術開発を検討、

実施すること。

　我が国独自の CCS 技術を早期に確立する事は、地球温暖化対応のみならず、産業競争力強化の視点からも重要である。今後は、海外の技術とも、完成度、コストを比較しつつ、海外にも展開力のある CCS 技術へと仕上げるべく、努力してほしい。

〇大規模 CO_2 注入により、さらなる安全性の確保に向けたしシミュレーションモデルの性能向上に期待します。（A 委員）

〇先にも記載したが、今回の成果を実際に苫小牧実証事業試験へ活用しており、その評価を十分に行っていただき、必要に応じて今回の成果の見直し・バージョンアップを行っていただきたい。
　ＣＣＳ技術を確立し、実際にフィールドで活用するには、今後も相当の期間と費用を必要とすると考えられるが、将来の電源の選択肢を拡げる観点から、現在の基礎研究の段階では、ある程度コストは度外視して「技術の確立」を大きな目標として取り組んでいいただきたい。さらなる、今後の研究開発の進展に大変期待しているところである。
　社会一般に対するＣＣＳの受容性の獲得や、安全・安心意識の向上は、実際にＣＣＳを行う際に必ず必要となる事項である。実用化段階での活用を意識して、今後、社会一般に対する受容性の向上に資する資料等の作成も取り組むべきではと考える。（B 委員）

〇長岡サイトの成果は、苫小牧実証事業に適用し、改良することで、モデリングやモニタリング、長期シミュレーションの精度が向上すると思われる。日本の複雑な地層で、こうした技術を確立し、精度を高められれば、海外のほとんどの地域で活用できるはずだ。こうした産業政策の視点から、一層の精度向上が望まれる。
　一方で、実際に民間ベースで CCS 事業を実施する段階では、モデリングやモニタリング、長期シミュレーションの費用対効果を高める必要がある。「過剰」な部分をそぎ落とすことで、事業性を高めることが求められる。
　また、「CCS」をより積極的に地域活性化につなげる視点も求められる。例えば、バイオマスガス化と水素製造、CCS を組み合わせることで、水素を製造しつつ、CO_2 総量を減らす「カーボンマイナス」が実現できる。また、分離した CO_2 の一部をハウス栽培の生育増進に活用する「CCU」など、一次産業と連携したエネルギーシステムを構築するアイデアもある。（C 委員）

〇今後の実用化を目指して研究・開発は継続されていくものと思われるが、国からの予算にも限りがあり、全て満足の行く研究開発は望めないことも多々あると思われる。その場合の視点として、実運用に資するにおいての必要性とリスクを十分考え、実施内容に対して成果の視点から優先順位を明確にし、メリハリをつけて研究・開発を進めていって頂きたい。そのためにも、海外での様々な研究成果を調べ、利用できるものは利用し、どうしても我が国で実証すべきテーマに優先的に資金が配分できるような、優先順位を考慮した研究開発を意識して進めて頂きたい。（D 委員）

〇本事業では大変多くの貴重な知見を有することが出来ており、更に以下の方向を目指すことを期待する。
１．当然ではあるが、長岡で行った小規模のデータと苫小牧の大規模実証との相関を十分検討し、スケールアップ指針を確立すること、
２．安全性、経済性の視点から、我が国における CCS の適地、貯留量の選定を行うことが出来るような技術とすること。
３．CO_2 回収型発電システム（大崎クールジェン）などとの連携によって、より実用的な実証システムによる検証を行うこと。
４．国際的に認知されるような活動をより積極的に行うこと。
５．市民合意に向けて、地域一体化技術などの社会技術開発を検討、実施すること。
（E 委員）

〇すでに述べているように、我が国独自の CCS 技術を早期に確立する事は、地球温暖化対応のみならず、産業競争力強化の視点からも重要である。今後は、海外の技術とも、完成度、コストを比較しつつ、海外にも展開力のある CCS 技術へと仕上げるべく、努力してほしい。（F 委員）

第４章　評点法による評点結果

第４章　評点法による評点結果

「二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術開発事業」に係るプロジェクト評価の実施に併せて、以下に基づき、本評価検討会委員による「評点法による評価」を実施した。その結果は「３．評点結果」のとおりである。

１．趣　旨

評点法による評価については、産業技術審議会評価部会の下で平成 11 年度に評価を行った研究開発事業（39 プロジェクト）について「試行」を行い、本格的導入の是非について評価部会において検討を行ってきたところである。その結果、第 9 回評価部会（平成 12 年 5 月 12 日開催）において、評価手法としての評点法について、

(1)数値での提示は評価結果の全体的傾向の把握に有効である、

(2)個々のプロジェクト毎に評価者は異なっても相対評価はある程度可能である、

との判断がなされ、これを受けて今後のプロジェクト評価において評点法による評価を行っていくことが確認されている。

また、平成 21 年 3 月 31 日に改定された「経済産業省技術評価指針」においても、プロジェクト評価の実施に当たって、評点法の活用による評価の定量化を行うことが規定されている。

これらを踏まえ、プロジェクトの中間・事後評価においては、

(1)評価結果をできる限りわかりやすく提示すること、

(2)プロジェクト間の相対評価がある程度可能となるようにすること、

を目的として、評価委員全員による評点法による評価を実施することとする。

本評点法は、各評価委員の概括的な判断に基づき点数による評価を行うもので、評価報告書を取りまとめる際の議論の参考に供するとともに、それ自体評価報告書を補足する資料とする。また、評点法は研究開発制度評価にも活用する。

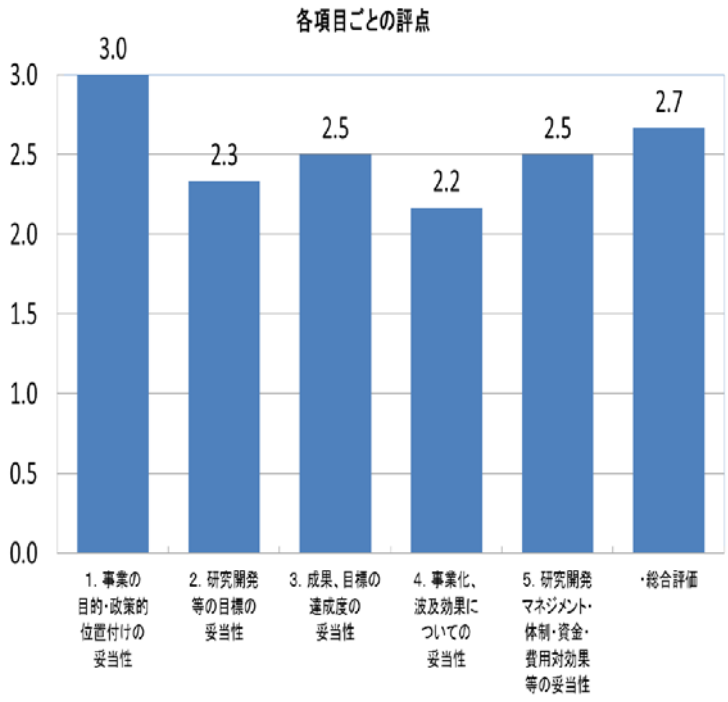
２．評価方法

- 各項目ごとに４段階（Ａ(優)、Ｂ(良)、Ｃ(可)、Ｄ(不可)<ａ，ｂ，ｃ，ｄも同様>）で評価する。
- ４段階はそれぞれ、Ａ(ａ)＝３点、Ｂ(ｂ)＝２点、Ｃ(ｃ)＝１点、Ｄ(ｄ)＝０点に該当する。
- 評価シートの記入に際しては、評価シートの《判定基準》に示された基準を参照し、該当と思われる段階に○を付ける。

・大項目（Ａ，Ｂ，Ｃ，Ｄ）及び小項目（ａ，ｂ，ｃ，ｄ）は、それぞれ別に評点を付ける。
・総合評価は、各項目の評点とは別に、プロジェクト全体に総合点を付ける。

３．評点結果

	評点	A委員	B委員	C委員	D委員	E委員	F委員
１．事業の目的・政策的位置付けの妥当性	3.0	3	3	3	3	3	3
２．研究開発等の目標の妥当性	2.3	2	2	3	3	2	2
３．成果、目標の達成度の妥当性	2.5	2	2	2	3	3	3
４．事業化、波及効果についての妥当性	2.2	2	1	3	3	2	2
５．研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性	2.5	2	2	3	2	3	3
・総合評価	2.7	2	2	3	3	3	3



【評価項目の判定基準】
評価項目1.～5.
3点：非常に重要又は非常によい
2点：重要又はよい
1点：概ね妥当
0点：妥当でない

6. 総合評価
3点：実施された事業は、優れていた。
2点：実施された事業は、良かった。
1点：実施された事業は、成果等が今一歩のところがあった。
0点：実施された事業は、成果等が極めて不十分であった。

第５章　評価ワーキンググループのコメント及びコメントに対する対処方針

第５章　　評価ワーキンググループのコメント及び

コメントに対する対処方針

本事業に対する評価ワーキンググループのコメント及びコメントに対する推進課の対処方針は、以下のとおり。

【二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術開発事業】

（事業化、波及効果についての妥当性） ・技術的には評価されているので、いろいろな波及効果の検討及び整理を行い、後継事業に生かしていくこと。
対処方針 ・　後継事業において、公募により選定する事業者により詳細な事業計画を作成させる際に、成果の波及効果を意識した計画とするよう調整してまいります。

参考資料１

経済産業省技術評価指針

平成２６年４月

目次 ・・・

経済産業省技術評価指針の位置付け

経済産業省技術評価指針（以下、「本指針」という。）は、経済産業省が、経済産業省における研究開発プログラム及び研究開発課題（以下、「研究開発プログラム・課題」という。）の評価を行うに当たって配慮しなければならない事項を取りまとめたものである。

本指針は、「産業技術力強化法」（平成１２年法律第４４号）第１０条の規定、「科学技術基本計画」（平成２３年８月閣議決定）、「研究開発システムの改革の推進等による研究開発能力の強化及び研究開発等の効率的推進等に関する法律」（平成２０年法律第６３号）第３４条の規定及び「国の研究開発評価に関する大綱的指針」（平成２４年１２月内閣総理大臣決定）（以下、「大綱的指針」という。）に沿った適切な評価を遂行するための方針を示す。

同時に、「行政機関が行う政策の評価に関する法律」（平成１３年法律第８６号）（以下、「政策評価法」という。）に基づく「経済産業省政策評価基本計画」（以下、「政策評価基本計画」という。）に沿った、経済産業省政策評価のうち研究開発に関する部分の実施要領としての性格を持つ。したがって、研究開発プログラム・課題についての評価の結果は、政策評価基本計画に基づき実施される事前評価及び事後評価に適切に反映・活用を図る。

技術評価は、政策評価法上要請される評価を含め政策評価の一環としての位置付けを有することから、本指針は、研究開発プログラム・課題の成果や実績等を厳正に評価し、それを後の研究開発プログラム・課題の企画立案等に反映させる政策サイクルの一環としての評価の在り方について定めるものである。

ただし、研究開発プログラム・課題に係る評価は、研究開発の内容や性格、実施体制等の態様に応じた評価方法に拠るべきであるとともに、評価の厳正さと効率性を両立するためには、評価をとりまく様々な状況に応じた臨機応変な評価手順を設定する必要がある。さらに、評価手法は日進月歩であり、今後よりよい評価手法が提案されることも十分考えられる。したがって、本指針では共通的なルール及び配慮事項を取り上げることとし、より詳細な実施のプロトコルは評価マニュアルの作成等により記述することで、機動的な実施を図ることとする。

当省研究開発機関が自ら実施する評価をその機関の自己改革の契機とするような自律的なシステムの構築に努め、研究開発を実施する当省研究開発機関が、大綱的指針及び本指針に沿って、研究開発評価の実施に関する事項について、明確なルールを定め、研究開発評価の実施及び評価結果の活用が適切かつ責任を持って行うよう、所管官庁としての責務を果たすものとする。

◎本指針における用語については、次に定めるところによる。

・研究開発プログラム：　「上位施策の目標達成に向けて複数の研究開発課題を含む各手段を組み立てた計画や手順に基づく取組」及び「上位施策目標との関連性を明確にし、検証可能な目標を設定した研究資金制度」をいう。

（注１）「政策評価の実施に関するガイドライン」（平成１７年１２月１６日政策評価各府省連絡会議了承。以下「政評ガイドライン」という。）においては、各行政機関が所掌する政策を、「政策（狭義）」、「施策」及び「事務事業」の三階層に区分整理するところであり、その定義は次のとおり。

・政策（狭義）：　特定の行政課題に対応するための基本的な方針の実現を目的とする行政活動の大きなまとまり。

・施策：　上記の「基本的な方針」に基づく具体的な方針の実現を目的とする行政活動のまとまりであり、「政策（狭義）」を実現するための具体的な方策や対策ととらえられるもの。

・事務事業：　上記の「具体的な方策や対策」を具現化するための個々の行政手段としての事務及び事業であり、行政活動の基礎的な単位となるもの。

（注２）第４期科学技術基本計画においては、研究開発の政策体系は、「政策」、「施策」、「プログラム・制度」及び「研究開発課題」の四階層に区分整理するところである。政評ガイドラインとの関係では、当該「プログラム・制度」及び「研究開発課題」は、ともに政評ガイドラインにおける「事務事業」に該当するものと整理されているところである。

・研究開発課題（プロジェクト）：　具体的に研究開発を行う個別の実施単位であり、当省が定めた明確な目的や目標に沿って実施されるものをいう。

なお、大綱的指針においては、競争的資金制度等の「研究資金制度」における個々の採択課題も「研究開発課題」と称呼されているところであるが、本指針においては、混同を避けるため、当該各採択課題は「研究課題」と称呼するものとする。

・研究資金制度：　資金を配分する主体が研究課題を募り、提案された中から採択した研究課題に研究開発資金を配分する制度をいう。競争的資金制度は、これに含まれる。

なお、「上位施策目標との関連性を明確にし、検証可能な目標を設定した研究資金制度（以下、「研究資金制度プログラム」という）」については、大綱的指針における整理に従い、本指針においても「研究開発プログラム」の一つとして取り扱うものとする。

・競争的資金制度：　資金を配分する主体が、広く一般の研究者（研究開発に従事している者又はそれらの者から構成されるグループをいう。）、企業等又は特定の研究者、企業等を対象に、特定の研究開発領域を定め、又は特定の研究開発領域を定めずに研究課題を募り、研究者、企業等か

ら提案された研究課題の中から、当該課題が属する分野の専門家（当該分野での研究開発に従事した経験を有する者をいう。）を含む複数の者による、研究開発の着想の独創性、研究開発成果の先導性、研究開発手法の斬新性その他の科学的・技術評価又は経済的・社会的評価に基づき研究課題を採択し、当該研究課題の研究開発を実施する研究者等又は研究者等が属する組織若しくは企業等に研究開発資金を配分する制度をいう。

・当省研究開発機関：　国からの出資、補助等の交付を受けて研究開発を実施し、又は研究開発の運営管理を行う機関のうち、当省所管の独立行政法人をいう。

・政策評価書：　本指針において用いる「政策評価書」とは経済産業省政策評価実施要領を踏まえた評価書をいう。

・政策サイクル：　政策の企画立案・実施・評価・改善（plan-do-check-action）の循環過程をいう。

・評価システム：　評価目的、評価時期、評価対象、評価方法等、評価に係るあらゆる概念、要素を包含した制度、体制の全体をいう。

・推進課：　研究開発プログラム・課題を推進する課室（研究開発担当課室）をいう。

・主管課：　研究開発プログラム・課題の企画立案を主管する課室及び予算等の要求事項を主管する課室をいう。

・査定課：　予算等の査定を行う課室（大臣官房会計課、資源エネルギー庁総合政策課等）をいう。

・有識者：　評価対象となる研究開発プログラム・課題について知見を有する者及び研究開発成果の経済的・社会的意義につき評価できる者（マスコミ、ユーザ、人文・社会科学者、投資家等）をいう。

・外部評価者：　経済産業省に属さない外部の有識者であって、評価対象となる研究開発プログラム・課題の推進に携わっていない者をいう。

・外部評価：　外部評価者による評価をいい、評価コメントのとりまとめ方法としてパネルレビュー（評価者からなる委員会を設置（インターネット等を利用した電子会議を含む。）して評価を行う形態）による場合とメールレビュー（評価者に対して郵便・ＦＡＸ・電子メール等の手段を利用して情報を提供し、評価を行う形態）による場合とがある。

・評価事務局：　研究開発プログラム・課題の評価の事務局となる部署をいい、評価者の行う評価

の取りまとめ責任を負う。

・評価者：　評価の責任主体をいい、パネルレビューによる場合には外部評価者からなる委員会が責任主体となり、メールレビューによる場合には、各外部評価者がそれぞれ責任主体となる。また、評価の結果を踏まえて、資源配分の停止や変更、研究開発プログラム・課題の内容の変更に責任を有するのは研究開発プログラム・課題の推進課及び主管課である。

・終了時評価：　事業終了時に行う評価であり、事業が終了する前の適切な時期に行う終了前評価と事業の終了直後に行う事後評価がある。

・アウトプット指標：　成果の現象的又は形式的側面であり、主として定量的に評価できる、活動した結果の水準を測る指標をいう。

・アウトカム指標：　成果の本質的又は内容的側面であり、活動の意図した結果として、定量的又は定性的に評価できる、目標の達成度を測る指標をいう。

Ⅰ．評価の基本的考え方

１．評価目的

(1) より良い政策・施策への反映

評価を適切かつ公正に行うことにより、研究者の創造性が十分に発揮されるような、柔軟かつ競争的で開かれた研究開発環境の創出など、より良い政策・施策の形成等につなげること。

(2) より効率的・効果的な研究開発の実施

評価を支援的に行うことにより、研究開発の前進や質の向上、独創的で有望な優れた研究開発や研究者の発掘、研究者の意欲の向上を促すことにより、研究開発を効果的・効率的に推進すること。

(3) 国民への技術に関する施策・事業の開示

高度かつ専門的な内容を含む研究開発プログラム・課題の意義や内容について、一般国民にわかりやすく開示すること。

(4) 資源の重点的・効率的配分への反映

評価の結果を研究開発プログラム・課題の継続、拡大・縮小・中止など資源の配分へ反映させることにより資源の重点化及び効率化を促進すること。

また、評価の結果に基づく適切な資源配分等を通じて、研究開発を次の段階に連続してつなげることなどにより、その成果の利用、活用に至るまでの一体的、総合的な取組を推進し、研究開発成果の国民・社会への還元の効率化・迅速化に資すること。

２．評価の基本理念

評価の実施に当たっては、以下の考え方を基本理念とする。

(1) 透明性の確保

推進課、主管課及び当省研究開発機関は、積極的に研究開発成果を公開し、その内容について広く有識者等の意見を聴くこと。評価事務局においては、透明で公正な評価システムの形成、定着を図るため、評価手続、評価項目・評価基準を含めた評価システム全般についてあらかじめ明確に定め、これを公開することにより、評価システム自体を誰にも分かるものとするとともに、評価結果のみならず評価の過程についても可能な限り公開すること。

(2) 中立性の確保

評価を行う場合には、被評価者に直接利害を有しない中立的な者による外部評価の導入等により、中立性の確保に努めること。

(3) 継続性の確保

研究開発プログラム・課題においては、個々の評価がそれ自体意義を持つだけではなく、評価とそれを反映した研究開発プログラム・課題の推進というプロセスを繰り返していく時系列のつながりにも意義がある。したがって、推進課及び主管課にとって評価結果を後の研究開発プログラム・課題の企画立案等に反映させる際に有用な知見を抽出し、継続性のある評価方法で評価を行うこと。

(4) 実効性の確保

政策目的に照らし、効果的な研究開発プログラム・課題が行われているか判断するための効率的評価が行われるよう、明確で実効性のある評価システムを確立・維持するとともに、研究開発プログラム・課題の運営に支障が生じたり、評価者及び被評価者双方に過重な負担をかけることのない費用対効果の高い評価を行うこと。

３．指針の適用範囲

(1) 本指針においては、多面的・階層的な評価を行う観点から、経済産業省における研究開発プログラム・課題を基本的な評価対象とする。

(2) 国費（当省予算）の支出を受けて研究開発プログラム・課題を実施する当省研究開発機関、民間企業、大学・公設試験研究機関等について、当該研究開発プログラム・課題の評価の際に、これら機関における当該研究開発プログラム・課題に係る研究開発実施体制・運営面等に関し、国費の効果的・効率的執行を確保する観点から、必要な範囲で評価を行う。

(3) 上記(1)及び(2)の規定にかかわらず、当省研究開発機関が運営費交付金により自ら実施し、又は運営管理する研究開発プログラム・課題については、独立行政法人通則法（平成１１年法律第１０３号）及び大綱的指針に基づいて実施されるものであることから、原則として本指針による評価の対象としない。その他、公的第三者機関において技術的事項も含めて事業内容の評価検討等がなされることとなった研究開発プログラム・課題についても、原則として本指針による評価の対象としない。

(4) 評価の種類としては、この他に当省研究開発機関における研究者等の業績の評価が存在するが、これは当該機関の長が評価のためのルールを整備した上で、責任を持って実施することが基本であり、本指針による評価の対象としない。

４．評価の類型・階層構造及びリンケージ

(1) 実施時期による類型

評価はその実施時期により、事前評価、中間評価、終了時評価及び追跡評価に類型化される。

(2) 評価の階層構造及び施策階層における評価

経済産業省における技術評価は、「研究開発プログラム」階層又は「研究開発課題」階層における評価を基本とするが、政策効果をあげるために特に必要があると認められるときには、「施策」階層において、関連する複数の研究開発プログラム・課題が有機的に連携をとって体系的に政策効果をあげているかを評価することとする。当該「施策（階層における）評価」は、それを構成する研究開発プログラム又は研究開発課題における評価結果を活用し、研究開発プログラムの評価に準じて実施するものとする。

(3) 実施時期による評価のリンケージ

中間評価、終了時評価は、研究開発プログラム・課題の達成状況や社会経済情勢の変化を判断し、計画の見直しや後継事業への展開等の是非を判断するものである。また、事前評価での予想が実際にどのような結果となったか、予算措置は妥当であったか等を確認することにより、事前評価の方法を検証し得るものである。したがって、中間評価、終了時評価の結果をその後の産業技術政策・戦略の企画立案や、より効果的な事前評価の評価手法の確立に反映させるよう努めるものとする。

5．評価方法等

厳正な評価を行うためには、評価方法、評価項目等に客観性を持たせることが必要であることから、本指針をはじめ評価実施に係る諸規程等を整備の上、公開するものとする。

技術評価室は本指針を踏まえ、評価マニュアル等を策定するとともに、円滑な評価の実施のための指導及び評価システムの維持管理を行う。

(1) 事業原簿

研究開発プログラム・課題の基本実施計画書、政策評価書等をもって事業原簿とする。推進課又は主管課は、事業原簿を作成・改定した場合は、速やかにその写しを技術評価室へ提出する。

(2) 評価項目・評価基準

評価の類型及び研究開発プログラム・課題の態様に応じて標準的な評価項目・評価基準を技術評価室が別に定めることとする。

(3) 評価手法

評価の類型に応じて適切な評価手法を用いるものとする。

(4) 評価の簡略化

評価の実施に当たっては、評価コストや被評価者側の過重な負担を回避するため、研究開発プログラムの評価においては、合理的と考えられる場合には、研究開発課題の評価を省略又は簡略化することができるものとする。また、評価対象となる事業に係る予算額が比較的少額である場合には、評価項目を限定する等の簡略化を行うことができるものとする。

なお、省略及び簡略化の標準的な方法については技術評価室が別に定める。

６．評価結果の取扱い等

(1) 評価結果の取扱い

評価事務局は、評価終了後速やかに評価書の写しを技術評価室に提出する。技術評価室は全ての評価結果について、これまでに実施された関連調査及び評価の結果、評価の実施状況等を踏まえつつ意見をまとめ、査定課及び政策評価広報課に報告する。

主管課、推進課は、評価結果を踏まえ、必要に応じ、研究開発プログラム・課題の運営見直し・改善等を図るものとする。

(2) 予算査定との関係

査定課は、技術評価室から事前評価、中間評価及び終了前評価の評価書の提出を受けた場合は、技術評価室の意見を踏まえつつ研究開発プログラム・課題の査定等を行う。

(3) 評価結果等の公開の在り方

評価結果及びこれに基づいて講ずる又は講じた措置については、機密の保持が必要な場合を除き、個人情報や企業秘密の保護、知的財産権の取得等に配慮しつつ、一般に公開することとする。

なお、事前評価については、政策立案過程の透明化を図る観点から、評価事務局は予算が経済産業省の案として確定した後に、公開するものとする。

７．評価システムの不断の見直し

いかなる評価システムにおいても、評価は評価者の主観的判断によってなされるものであり、その限りにおいては、完璧な客観性、公平性を求めることは困難である。したがって、評価作業が終了するごとにその評価方法を点検し、より精度の高いものとしていく努力が必要である。また、本指針については、こうした一連の作業を踏まえ、原則として毎年度見直しの要否を検討する。

８．評価体制の充実

評価体制の充実を図るため、研究者を評価者として活用するなどにより、評価業務に携わる人材を育成・確保するとともに、評価の実施やそれに必要な調査・分析、評価体制の整備等に要する予算を確保する。

９．評価者（外部有識者）データベースの整備

技術評価室は、国内外の適切な評価者を選任できるようにするため、及び個々の評価において普遍性・信頼性の高い評価を実現するため、研究開発プログラム・課題に係る外部有識者（評価者）データベースを整備する。

１０．評価における留意事項

(1) 評価者と被評価者との対等性

① 評価者と被評価者との関係

評価作業を効果的に機能させるためには、評価者と被評価者の双方が積極的にその知見と情報を提供し合うという協調的関係と、評価者もその評価能力を評価されるという意味で、評価者と被評価者とが相互に相手を評価するという緊張関係とを構築し、この中で、討論を行い、評価を確定していく必要がある。この際、評価者は、不十分な成果等を被評価者が自ら進んで提示しない事実があるかどうかを見極める能力が要求される。一方、被評価者は、評価対象の研究開発プログラム・課題の位置付けを明確に認識するとともに、評価結果を正確に理解し、確実にその後の研究開発プログラム・課題の創設、運営等に反映させていくものとする。

② 評価者に係る留意事項

研究開発成果を、イノベーションを通じて国民・社会に迅速に還元していく観点から、産業界の専門家等を積極的に評価者に選任する。

③ 被評価者に係る留意事項

被評価者は、評価を事業の質をより高めるものとして積極的に捉え、評価は評価者と被評価者の双方の共同作業であるとの認識の下、真摯な対応を図ることが必要である。

(2) 評価の不確実性

評価時点では見通し得なかった技術、社会情勢の変化が将来的に発生し得るという点で評価作業は常に不確実性を伴うものである。したがって、評価者は評価の精度の向上には、必然的に限界があることを認識した上で、評価時点で最良と考えられる評価手法をとるよう努めることが必要である。かかる観点からは、厳正さを追求するあまりネガティブな面のみを過度に減点法で評価を行うこととなると、将来大きな発展をもたらす技術を阻害するおそれがある点にも留意する必要がある。また、成果に係る評価において、目標の達成度合いを評価の判定基準にすることが原則であるが、併せて、副次的成果等、次につながる成果を幅広い視野からとらえる。

(3) その他の留意事項

① 評価人材としての研究者の活用

研究者には、研究開発の発展を図る上で専門的見地からの評価が重要な役割を果たすものであることから、評価者としての評価への積極的参加が求められる。一方、特定の研究者に評価実施の依頼が集中する場合には、評価への参加が大きな負担となり、また、評価者となる幅広い人材の養成確保にもつながらないことから、海外の研究者や若手研究者も評価者として積極的に参加させることなどにより評価者確保の対象について裾野の拡大を図るよう努める。

② 所期の成果を上げられなかった研究開発

研究開発は必ずしも成功するとは限らず、また、失敗から貴重な教訓が得られることもある。したがって、失敗した場合には、まずその原因を究明し、今後の研究開発にこれを活かすことが重要であり、成果を上げられなかったことをもって短絡的に従事した研究者や組織、機関を否定的に評価すべきものではない。また、評価が野心的な研究開発の実施の阻害要因とならないよう留意しなければならない。

③ アウトプット指標及びアウトカム指標の活用等

評価の客観性を確保する観点から、アウトプット指標やアウトカム指標による評価手法を用いるよう努める。ただし、論文の被引用度数、特許の申請状況等による成果の定量的評価は一定の客観性を有するが、研究開発プログラム・課題においては研究分野や内容により、その意味は大きく異なり得るものであり、必ずしも研究開発成果の価値を一義的に表すものではない。したがって、これらを参考資料として有効に活用しつつも、偏重しないよう留意すべきである。

④ 評価結果の制度間での相互活用

研究開発をその評価の結果に基づく適切な資源配分等を通じて次の段階の研究開発に連続してつなげるなどの観点から、関係府省、研究開発機関及び制度を越えて相互活用するよう努める。

⑤ 自己点検の活用

評価への被評価者等の主体的な取組を促進し、また、評価の効率的な実施を推進するため、推進課及び主管課は、自ら研究開発プログラム・課題の計画段階において具体的かつ明確な目標とその達成状況の判定基準等を明示し、研究開発プログラム・課題の開始後には目標の達成状況、今後の発展見込み等の自己点検を行い、評価者はその内容の確認などを行うことにより評価を行う。

⑥ 評価の国際的な水準の向上

研究開発の国際化への対応に伴い、評価者として海外の専門家を参加させる、評価項目に国際的なベンチマーク等を積極的に取り入れるなど評価に関して、実施体制や実施方法などの全般にわたり、評価が国際的にも高い水準で実施されるよう取り組む。

Ⅱ．評価の類型と実施方法

１．研究開発プログラムの評価

１－１．複数の研究開発課題によって構成される研究開発プログラム（以下「複数課題プログラム」）の評価

(1) 事前評価

① 評価者
外部評価者
② 被評価者
推進課及び主管課
③ 評価事務局
推進課及び主管課。ただし、必要に応じて技術評価室が行うこともできる。
④ 評価手法
外部評価を行う。
⑤ 評価項目・評価基準
技術評価室が定める標準的な評価項目・評価基準又は評価者が定めるものとする。
⑥ 実施時期
「複数課題プログラム」の創設時（プログラム構成要素として最初に実施する「研究開発課題（プロジェクト）」の初年度予算要求時）に、当該プログラム全体に係る「事前評価」を実施する。
これに加え、既に実施中の複数課題プログラムにおいて、新たな「研究開発課題」を実施する前（初年度予算要求時）に、当該研究開発課題に係る「事前評価」を実施するものとする。

(2) 中間評価

① 評価者
外部評価者
② 被評価者
推進課及び主管課
③ 評価事務局
推進課及び主管課。ただし、必要に応じて技術評価室が行うこともできる。
④ 評価手法
外部評価を行う。

⑤ 評価項目・評価基準

技術評価室が定める標準的な評価項目・評価基準又は評価者が定めるものとする。

⑥ 実施時期

複数課題プログラムを構成する各「研究開発課題」が終了する各年度中に、当該プログラム全体に係る中間評価を実施する。（ただし、当該研究開発課題の終了をもって複数課題プログラム全体が終了する場合にあっては、当該プログラム全体の終了時評価（終了前評価又は事後評価）を行うものとし、前記中間評価は実施しない。）

なお、複数課題プログラムを構成する一の「研究開発課題」の実施期間が５年以上である場合にあっては、必要に応じ、上記中間評価の実施に加え、当該研究開発課題事業の開始から３年程度ごとを目安として、当該プログラム全体に係る中間評価を行うものとする。

(3) 終了時評価

① 評価者

外部評価者

② 被評価者

推進課及び主管課

③ 評価事務局

推進課及び主管課。ただし、必要に応じて技術評価室が行うこともできる。

④ 評価手法

外部評価を行う。

⑤ 評価項目・評価基準

技術評価室が定める標準的な評価項目・評価基準又は評価者が定めるものとする。

⑥ 実施時期

複数課題プログラム全体の終了時に実施する。

ただし、当該プログラムの成果を切れ目なく次の研究開発プログラム等につなげていく場合には、当該プログラムが終了する前の適切な時期に終了時評価（終了前評価）を行うこととし、その他の場合には、当該プログラムの終了直後に終了時評価（事後評価）を行うものとする。

１－２．競争的資金制度等の研究資金制度プログラムの評価

(1) 事前評価

① 評価者
　外部評価者
② 被評価者
　推進課及び主管課
③ 評価事務局
　推進課及び主管課。ただし、必要に応じて技術評価室が行うこともできる。
④ 評価手法
　外部評価を行う。
⑤ 評価項目・評価基準
　技術評価室が定める標準的な評価項目・評価基準又は評価者が定めるものとする。
⑥ 実施時期
　新規の研究資金制度プログラムの創設時（初年度予算要求時）に行う。

(2) 中間評価

① 評価者
　外部評価者
② 被評価者
　推進課及び主管課
③ 評価事務局
　推進課及び主管課。ただし、必要に応じて技術評価室が行うこともできる。
④ 評価手法
　外部評価を行う。
⑤ 評価項目・評価基準
　技術評価室が定める標準的な評価項目・評価基準又は評価者が定めるものとする。
⑥ 実施時期
　実施期間が５年以上の研究資金制度プログラム又は実施期間の定めのない研究資金制度プログラムについて、３年程度ごとに行う。

(3) 終了時評価

① 評価者

外部評価者

② 被評価者

推進課及び主管課

③ 評価事務局

推進課及び主管課。ただし、必要に応じて技術評価室が行うこともできる。

④ 評価手法

外部評価を行う。

⑤ 評価項目・評価基準

技術評価室が定める標準的な評価項目・評価基準又は評価者が定めるものとする。

⑥ 実施時期

研究資金制度プログラムの終了時に実施する。

ただし、当該研究資金制度プログラムの成果を切れ目なく次の研究資金制度プログラム等につなげていく場合には、当該研究資金制度プログラムが終了する前の適切な時期に終了時評価（終了前評価）を行うこととし、その他の場合には、当該研究資金制度プログラム終了直後に終了時評価（事後評価）を行うものとする。

２．研究開発課題（プロジェクト）の評価

(1) 事前評価

① 評価者

外部評価者

② 被評価者

推進課及び主管課

③ 評価事務局

推進課及び主管課。ただし、必要に応じて技術評価室が行うこともできる。

④ 評価手法

外部評価を行う。

⑤ 評価項目・評価基準

技術評価室が定める標準的な評価項目・評価基準又は評価者が定めるものとする。

⑥実施時期

新規の研究開発課題（プロジェクト）の創設時（初年度予算要求時）に行う。

(2) 中間評価

① 評価者

外部評価者

② 被評価者

推進課及び主管課

③ 評価事務局

推進課及び主管課。ただし、必要に応じて技術評価室が行うこともできる。

④ 評価手法

外部評価を行う。

⑤ 評価項目・評価基準

技術評価室が定める標準的な評価項目・評価基準又は評価者が定めるものとする。

⑥ 実施時期

実施期間が５年以上の研究開発課題（プロジェクト）又は実施期間の定めのない研究開発課題（プロジェクト）について、３年程度ごとに行う。

(3) 終了時評価

① 評価者

外部評価者

② 被評価者

推進課及び主管課

③ 評価事務局

推進課及び主管課。ただし、必要に応じて技術評価室が行うこともできる。

④ 評価手法

外部評価を行う。

⑤ 評価項目・評価基準

技術評価室が定める標準的な評価項目・評価基準又は評価者が定めるものとする。

⑥ 実施時期

研究開発課題（プロジェクト）の終了時に実施する。

ただし、当該研究開発課題（プロジェクト）の成果を切れ目なく次の研究開発課題（プロジェクト）等につなげていく場合には、当該研究開発課題（プロジェクト）が終了する前の適切な時期に終了時評価（終了前評価）を行うこととし、その他の場合には、当該研究開発課題（プロジェクト）終了直後に終了時評価（事後評価）を行うものとする。

３．追跡調査・追跡評価

３－１．追跡調査

終了した研究開発プログラム・課題を対象として、終了後数年間にわたり、その研究開発活動や研究開発成果が産業、社会に及ぼした効果等について調査を行う。

３－２．追跡評価

終了して数年経った国費（当省予算）投入額の大きな研究開発プログラム・課題を対象として、その研究開発活動や研究開発成果が産業、社会に及ぼした効果等について外部評価を行う。

(1) 評価者
　外部評価者
(2) 被評価者
　評価対象となる研究開発プログラム・課題に携わった推進課及び主管課
(3) 評価事務局
　推進課及び主管課。ただし、必要に応じて技術評価室が行うこともできる。
(4) 評価手続・評価手法
　過去の事業原簿等の文献データ、関連部署・機関及びその他関係者等からの聞き取り調査等による情報を基にパネルレビュー又は第３者機関への委託による外部評価を行う。
(5) 評価項目・評価基準
　技術評価室が定める標準的な評価項目・評価基準又は評価者が定めるものとする。
(6) 実施時期
　研究開発プログラム・課題終了後、成果の産業社会への波及が見極められる時点とする。

参考資料２

経済産業省技術評価指針に基づく
標準的評価項目・評価基準

平成２５年４月

経済産業省産業技術環境局

技術評価室

目　次

はじめに

研究開発評価に当たっては、公正性、信頼性さらには実効性の観点から、その対象となる研究開発の特性や評価の目的等に応じて、適切な評価項目・評価基準を設定して実施することが必要である。

本標準的評価項目・評価基準は、経済産業省における技術に関する施策及び技術に関する事業の評価を行うに当たって配慮しなければならない事項を取りまとめたガイドラインである経済産業省技術評価指針に基づき、評価方法、評価項目等に一貫性を持たせるために、標準的なものとして、技術評価室が定めるものである。

なお、本標準的評価項目・評価基準は、あくまで原則的なものであり、必ずしも全てそのとおりとしなければならないものではなく、適切な評価の実施のために評価対象によって、適宜、変更することを妨げるものではない。

Ⅰ．施策評価

【事前評価】

１．目的

・施策の目的は特定されていて、簡潔に明示されているか。
・当該施策の導入により、現状をどのように改善し、どのような状況を実現しようとしているのか。

２．必要性

・国（行政）が関与する必要があるか。

（注１）　背景として、どのような問題が当該施策の対象領域等に存在するのか。
また、その問題の所在や程度を数値、データや文献により具体的に把握しているか。

（注２）　行政関与の必要性や妥当性について、その根拠を客観的に明らかにする。
具体的には、妥当性を有することを説明する場合、これらニーズや上位目的に照らした妥当性を可能な限り客観的に明らかにする。また、「市場の失敗」と関連付けて行政の関与の必要性を説明する場合には、「行政関与の基準」の「行政関与の可否に関する基準」により、必要性を明らかにする。

（注３）　行政目的が国民や社会のニーズ又はより上位の行政目的に照らして妥当性を有していること、民間活動のみでは改善できない問題であって、かつ、行政が関与することにより改善できるものが存在することを明らかにする。

３．施策の概要

・施策全体としての概要を適切に記述しているか。
・当該施策を構成する事業を網羅し、個々の事業について記載しているか。

（注）施策の概要の記載において、施策の中間・事後評価時期を記載する。

４．目標、指標及び達成時期

（１）目標

・具体的にいつまでにいかなる事業をどの程度実施し、どの水準から事業を開始し、どの水準の成果を達成するのか。目的と照らして、明確かつ妥当な目標を設定しているか。
・政策の特性などから合理性がある場合には、定性的な目標であっても良いが、その場合、目的として示された方向の上で目指す水準（例えば、研究開発成果による新規市場の創設効果など）が把握できるものとなっているか。

（注）　目標は、資金提供やサービス提供の量といった施策の実施の直接的な結果（アウトプット）だけでなく、施策の目的を具現化した効果（アウトカム：実施の結果、当該施策を直接に利用した者以外にも生ずる効果等）についても設定する。

（２）指標及び目標達成時期

・適切な指標を設定しているか。毎年のモニタリングとして測定可能なものとなっているか。
・当該指標により当該目標の達成度が測定可能なものとなっているか。

・目標達成時期は明確かつ妥当であるか。

（注）＜共通指標＞
・論文数及びそれら論文の被引用度数
・特許等取得した知的所有権数、それらの実施状況
・特に、製品化に際しての実施権供与数、取得実施権料
・国際標準形成への寄与

５．中間・事後評価の時期及び方法

・事前評価書に、中間・事後評価の時期を設定しているか。
・目標達成や運用の状況を、いつ、どのようにして計測し、また、検証するかを明らかにしているか。
・事前評価段階で、評価方法を定めているか。

（注１）施策の中間評価は、技術評価指針に基づき、４年以上の事業期間である施策について、実施する。
なお、技術評価指針における「中間評価」は、政策評価法上においては「事後評価」のカテゴリーに整理される。
（注２）事業の実施状況モニタリングは、過度のコストを伴う等非現実的な実施が前提とならないように配慮し、各指標値を得る情報源及び入手頻度等は明確にする。

６．有識者、ユーザー等の各種意見

・当該施策の企画・立案過程において参照した外部の意見や要請等を施策全体及び個別事業毎に具体的に記述しているか。

７．有効性、効率性等の評価

（１）手段の適正性
・目的や目標を達成するために採り得る政策手段にはどのようなものがあるか。その中で、提案している施策が最も優れていると考える根拠は何か。
・採ろうとする政策手段が目的や目標の達成に役立つ根拠及び程度を明らかにしているか。

（２）効果とコストとの関係に関する分析（効率性）
・要求予算規模、想定減税規模、機会費用その他の当該政策手段に伴い発生するコストを明確にしているか。
・各選択肢についての社会的便益と社会的費用の比較（費用便益分析、費用効果分析、（社会的便益が同等な場合は）コスト分析等）を行っているか。定量的な評価が困難な場合は、少なくとも、各々の想定される結果の長所・短所の定性的な比較に基づいて行っているか。

（３）適切な受益者負担
・政策の目的に照らして、政策の効果の受益や費用の負担が公平に分配されるか。

【中間・事後評価】

１．施策の目的・政策的位置付けの妥当性

（１）施策の目的の妥当性

・施策の目的が波及効果、時期、主体等を含め、具体化されているか。

・技術的課題は整理され、目的に至る具体的目標は立てられているか。

・社会的ニーズに適合し、出口（事業化）を見据えた内容になっているか。

（２）施策の政策的位置付けの妥当性

・施策の政策的位置意義（上位の政策との関連付け、類似施策との関係等）は高いか。

・国際的施策動向に適合しているか。

（３）国の施策としての妥当性、国の関与が必要とされる施策か。

・国として取り組む必要のある施策であり、当省の関与が必要とされる施策か。

・必要に応じ、省庁間連携は組まれているか。

２．施策の構造及び目的実現見通しの妥当性

（１）現時点において得られた成果は妥当か。

（２）施策の目的を実現するために技術に関する事業が適切に配置されているか。

・配置された技術に関する事業は、技術に関する施策の目的を実現させるために必要か。

・配置された技術に関する事業に過不足はないか。

・配置された技術に関する事業の予算配分は妥当か。

・配置された技術に関する事業のスケジュールは妥当か。

３．総合評価

Ⅱ．技術に関する事業評価

Ⅱ－１　プロジェクト評価

【事前評価】

１．事業の必要性及びアウトカムについて（研究開発の定量的目標、社会的課題の解決や国際競争力強化への対応）

（１）事業の必要性はあるか（どのような社会的課題等があるのか）。
（２）アウトカム（目指している社会の姿）の具体的内容及び検証可能なアウトカム指標とその時期は適切に設定されているか。
（３）アウトカムが実現した場合の日本経済や国際競争力、問題解決に与える効果の程度は優れているものか。
（４）アウトカムに至るまでに達成すべきいくつかの中間段階の目標（技術的成果等）の具体的内容とその時期は適切に設定されているか。

２．アウトカムに至るまでの戦略について

（１）アウトカムに至るまでの戦略に関して、以下の点について適切に計画されているか。
・アウトカムに至るまでのスケジュール
・知財管理の取扱
・実証や国際標準化
・性能や安全性基準の策定
・規制緩和等を含む実用化に向けた取組

（２）成果のユーザーの段階的イメージ・仮説は妥当なものか。
・技術開発成果の直接的受け手は誰か
・社会的インパクトの実現までのカギとなるプレイヤーは誰か

３．次年度以降に技術開発を実施する緊急性について

（１）次年度以降に技術開発を実施する緊急性は合理的なものか。

４．国が実施する必要性について

（１）科学技術的価値の観点からみた卓越性、先導性を有している事業か。
・我が国が強みを持ち、世界に勝てる技術分野か

・他の研究分野等への高い波及効果を含むものか

５．当該事業のアウトカムと関連性のある省内外の事業について

（１）当該事業のアウトカムと関連性のある省内外の事業との関係性は適切か
・当該事業のアウトカムと関連性のある省内外の事業として何があるか
・上記の関連性のある事業と重複がなく、また、適切に連携等が取れているか

【中間・事後評価】

１．事業の目的・政策的位置付けの妥当性

（１）事業目的は妥当で、政策的位置付けは明確か。
・事業の政策的意義（上位の施策との関連付け等）
・事業の科学的・技術的意義（新規性・先進性・独創性・革新性・先導性等）
・社会的・経済的意義（実用性等）

（２）国の事業として妥当であるか、国の関与が必要とされる事業か。
・国民や社会のニーズに合っているか。
・官民の役割分担は適切か。

２．研究開発等の目標の妥当性

（１）研究開発等の目標は適切かつ妥当か。
・目的達成のために具体的かつ明確な研究開発等の目標及び目標水準を設定しているか。特に、中間評価の場合、中間評価時点で、達成すべき水準（基準値）が設定されているか。
・目標達成度を測定・判断するための適切な指標が設定されているか。

３．成果、目標の達成度の妥当性

（１）成果は妥当か。
・得られた成果は何か。
・設定された目標以外に得られた成果はあるか。
・共通指標である、論文の発表、特許の出願、国際標準の形成、プロトタイプの作製等があったか。

（２）目標の達成度は妥当か。
・設定された目標の達成度（指標により測定し、中間及び事後評価時点の達成すべき水準（基準値）との比較）はどうか。

４．事業化、波及効果についての妥当性

（１）事業化については妥当か。

・事業化の見通し（事業化に向けてのシナリオ、事業化に関する問題点及び解決方策の明確化等）は立っているか。

（２）波及効果は妥当か。

・成果に基づいた波及効果を生じたか、期待できるか。

・当初想定していなかった波及効果を生じたか、期待できるか。

＊知的基盤・標準整備等の研究開発の場合、以下の評価項目・評価基準による。

４．標準化等のシナリオ、波及効果の妥当性

（１）標準化等のシナリオは妥当か。

・ＪＩＳ化や我が国主導の国際規格化等に向けた対応は図られているか。

（２）波及効果は妥当か。

・成果に基づいた波及効果を生じたか、期待できるか。

・当初想定していなかった波及効果を生じたか、期待できるか。

５．研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性

（１）研究開発計画は適切かつ妥当か。

・事業の目標を達成するために本計画は適切であったか（想定された課題への対応の妥当性）。

・採択スケジュール等は妥当であったか。

・選別過程は適切であったか。

・採択された実施者は妥当であったか。

（２）研究開発実施者の実施体制・運営は適切かつ妥当か。

・適切な研究開発チーム構成での実施体制になっているか、いたか。

・全体を統括するプロジェクトリーダー等が選任され、十分に活躍できる環境が整備されているか、いたか。

・目標達成及び効率的実施のために必要な、実施者間の連携／競争が十分に行われる体制となっているか、いたか。

・成果の利用主体に対して、成果を普及し関与を求める取組を積極的に実施しているか、いたか。

・国民との科学・技術対話を効果的に実施したか、又は実施することとしているか。（ただし、公募要項に当該対話を実施することが明記されている研究開発で、３千万円以上の公的研究費の配分を受ける研究開発を実施する研究者等を対象とする。）ここで、国民との科学・技術対話とは、研究活動の内容や成果を社会・国民に対して分かりやすく説明する、未来への希望を抱かせる心の通った双方向コミュニケーション活動をいう（「国民との科学・技術対話」の推進について（基本的取組方針）（平成 22 年 6 月 19 日））。

（３）資金配分は妥当か。

・資金の過不足はなかったか。

・資金の内部配分は妥当か。

（４）費用対効果等は妥当か。
・投入された資源量に見合った効果が生じたか、期待できるか。
・必要な効果がより少ない資源量で得られるものが他にないか。
（５）変化への対応は妥当か。
・社会経済情勢等周囲の状況変化に柔軟に対応しているか（新たな課題への対応の妥当性）。
・代替手段との比較を適切に行ったか。

６．総合評価

Ⅱ－２　研究開発制度評価

※複数の制度の制度構造評価を実施する場合、参考に示す評価項目・評価基準に留意する。

【事前評価】

１．事業の必要性及びアウトカムについて（研究開発の定量的目標、社会的課題の解決や国際競争力強化への対応）

（１）事業の必要性はあるか（どのような社会的課題等があるのか）。
（２）アウトカム（目指している社会の姿）の具体的内容及び検証可能なアウトカム指標とその時期は適切に設定されているか。
（３）アウトカムが実現した場合の日本経済や国際競争力、問題解決に与える効果の程度は優れているものか。
（４）アウトカムに至るまでに達成すべきいくつかの中間段階の目標（技術的成果等）の具体的内容とその時期は適切に設定されているか。

２．アウトカムに至るまでの戦略について

（１）アウトカムに至るまでの戦略に関して、以下の点について適切に計画されているか。
・アウトカムに至るまでのスケジュール
・知財管理の取扱
・実証や国際標準化
・性能や安全性基準の策定
・規制緩和等を含む実用化に向けた取組

（２）成果のユーザーの段階的イメージ・仮説は妥当なものか。

・技術開発成果の直接的受け手は誰か
・社会的インパクトの実現までのカギとなるプレイヤーは誰か

３．次年度以降に技術開発を実施する緊急性について

（１）次年度以降に技術開発を実施する緊急性は合理的なものか。

４．国が実施する必要性について

（１）科学技術的価値の観点からみた卓越性、先導性を有している事業か。
・我が国が強みを持ち、世界に勝てる技術分野か
・他の研究分野等への高い波及効果を含むものか

５．当該事業のアウトカムと関連性のある省内外の事業について

（１）当該事業のアウトカムと関連性のある省内外の事業との関係性は適切か
・当該事業のアウトカムと関連性のある省内外の事業として何があるか
・上記の関連性のある事業と重複がなく、また、適切に連携等が取れているか

【中間・事後評価】

１．制度の目的及び政策的位置付けの妥当性
（１）国の制度として妥当であるか、国の関与が必要とされる制度か。
（２）制度の目的は妥当で、政策的位置付けは明確か。
（３）他の制度との関連において、重複等はないか。

２．制度の目標の妥当性
（１）目標は適切かつ妥当か。
・目的達成のために具体的かつ明確な目標及び目標水準を設定しているか。特に、中間評価の場合、中間評価時点で、達成すべき水準（基準値）が設定されているか。
・目標達成度を測定・判断するための適切な指標が設定されているか。

３．制度の成果、目標の達成度の妥当性
（１）制度としての成果は妥当か。
・得られた成果は何か。
・設定された目標以外に得られた成果はあるか。
・共通指標である、論文の発表、特許の出願、国際標準の形成、プロトタイプの

作製等があったか。

（２）制度としての目標の達成度は妥当か。

・設定された目標の達成度（指標により測定し、中間及び事後評価時点の達成すべき水準（基準値）との比較）はどうか。

４．制度採択案件に係る事業化、波及効果等その他成果についての妥当性

（１）成果については妥当か。

・当該制度の目的に合致する成果は得られているか。

・事業化が目標の場合、事業化の見通し（事業化に向けてのシナリオ、事業化に関する問題点及び解決方策の明確化等）は立っているか。

（２）波及効果は妥当か。

・成果に基づいた波及効果を生じたか、期待できるか。

・当初想定していなかった波及効果を生じたか、期待できるか。

５．制度のマネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性

（１）制度のスキームは適切かつ妥当か。

・目標達成のための妥当なスキームとなっているか、いたか。

（２）制度の体制・運営は適切かつ妥当か。

・制度の運営体制・組織は効率的となっているか、いたか。

・制度の目標に照らして、個々のテーマの採択プロセス（採択者、採択評価項目・基準、採択審査結果の通知等）及び事業の進捗管理（モニタリングの実施、制度関係者間の調整等）は妥当であるか、あったか。

・制度を利用する対象者はその目標に照らして妥当か。

・個々の制度運用の結果が制度全体の運営の改善にフィードバックされる仕組みとなっているか、いたか。

・成果の利用主体に対して、成果を普及し関与を求める取組を積極的に実施しているか、いたか。

・国民との科学・技術対話を効果的に実施したか、又は実施することとしているか。（ただし、３千万円以上の公的研究費の配分を受ける研究開発で、公募要項に当該対話を実施することが明記されている研究開発を実施する研究者等を対象とする。）ここで、国民との科学・技術対話とは、研究活動の内容や成果を社会・国民に対して分かりやすく説明する、未来への希望を抱かせる心の通った双方向コミュニケーション活動をいう（「国民との科学・技術対話」の推進について（基本的取組方針）（平成 22 年 6 月 19 日））。

（３）資金配分は妥当か。

・資金の過不足はなかったか。

・資金の内部配分は妥当か。

（４）費用対効果等は妥当か。

・投入された資源量に見合った効果が生じたか、期待できるか。

・必要な効果がより少ない資源量で得られるものが他にないか。
（５）変化への対応は妥当か。
・社会経済情勢等周囲の状況変化に柔軟に対応しているか。
・代替手段との比較を適切に行ったか。

６．総合評価

（参考）制度構造評価

＜複数制度の俯瞰的評価＞

１．複数制度のバランス、相対的位置の妥当性
・他の制度との重複により効率が低くなっていないか。結果的に類似し重複や非効率が目立つ制度となってはいないか。
・産業技術戦略や内外情勢変化に即した制度の配置、構成となっているか。
・目標のレベル、国が関与すべき程度、実用化時期の想定等に関して、複数制度の相対的位置、複数制度間の政策目的に照らした整合性は妥当か。
・利用者から見て、制度間の相違（趣旨、対象者、要件等）が分かりにくいものとなっていないか。一方、複数の制度間で申請書類の様式が必要以上に異なり、利用者側に不用な負担をしいることとなっていないか。

＜個別制度の方向性項目＞

２．俯瞰的にみた個別制度の方向性
・内外情勢変化、他の制度との相対関係、個別制度評価の結果等を踏まえ、個別制度の継続、統廃合、新設の必要性はどうか。国の関与の度合いはどうか。
・統廃合を行う必要はなくても、運用面における連携、協調の必要性はどうか。

Ⅱ－３　競争的資金による研究課題に関する評価

＜ア．主として技術シーズの創造を目的とする競争的資金制度の場合＞

【事前評価】

１．目標・計画
・制度の目的（公募の目的）に照らして、研究開発目標・計画が具体的かつ明確に設定されているか。その目標の実現性、計画の妥当性はどうか。

２．科学的・技術的意義（新規性、先進性、独創性、革新性、先導性等）

・最新の研究開発動向・水準からみて新規性はあるか。
・研究開発内容について独創性はあるか。
・飛躍的に技術レベルを高めるような技術的ブレークスルーポイントがあるか。

３．実施体制

・研究開発代表者に十分な研究開発管理能力があるか。既に、相当程度の研究開発実績を有しているか。
・研究開発内容に適した研究開発実施場所が選定されているか。
・研究開発を行う上で、十分な研究開発人員（研究開発分担者）及び設備等を有しているか、また、研究開発を推進するために効果的な実施体制となっているか。

４．実用化の見通し

・研究開発の成果が実用化に結びつく可能性があるか。
・実用化された場合に、産業・社会への波及効果は認められるか。
・研究開発代表者又は研究開発チームに属する研究開発分担者が、当該研究開発の基礎となる特許を有しているか、又は出願中であるか。
・国内外で関連の特許が押さえられていないか。

５．想定される選択肢内の比較

・事業の提案に当たり、選択肢の吟味を行っているのか。提案する手段が最も優れていると考える根拠は何か。

【中間・事後評価】

１．目標・計画

・技術動向等の変化に対応して、事業の目的や計画は妥当であったか。
・成果は目標値をクリアしているか。

２．要素技術から見た成果の意義

・科学的・技術的意義（新規性、先進性、独創性、革新性、先導性等）が認められるか。

３．実施体制

・研究開発管理能力、研究開発実施場所、研究設備等実施体制は適切であったか。
・国民との科学・技術対話を効果的に実施したか、又は実施することとしているか。（ただし、３千万円以上の公的研究費の配分を受ける研究開発で、公募要項に当該対話を実施す

ることが明記されている研究開発を実施する研究者等を対象とする。）ここで、国民との科学・技術対話とは、研究活動の内容や成果を社会・国民に対して分かりやすく説明する、未来への希望を抱かせる心の通った双方向コミュニケーション活動をいう（「国民との科学・技術対話」の推進について（基本的取組方針）（平成 22 年 6 月 19 日））。

４．実用化の見通し

・成果に関する特許の出願予定はあるか。
・実用化に向けた具体的な計画があるか。

＜イ．主として研究開発成果を早期に実用化することを目的とする競争的資金の場合＞

【事前評価】

１．必要性

・制度の目的に照らして、国の支援が必要な事業であるか。
・当該事業に対する社会的なニーズが具体的かつ明確となっており、ニーズを満たすために相当程度有効な事業であるか。

２．目標・計画

・制度の目的（公募の目的）に照らして、技術開発目標・計画が具体的かつ明確に設定されているか。その目標や計画は実現性が高い妥当なものとなっているか。
・実用化（事業化）に向けた具体的な計画を有し、実用化（事業化）の可能性が高いものとなっているか。

３．新規性、先進性、技術レベル

・革新的な新製品の開発に取り組むものであるか。
・既存製品の延長ではあるが経済性の格段の向上や新機能の付加が認められるなど、新規性・先進性を有しているか。
・技術開発の難易度が既存の技術水準に比して高い事業であるか。

４．実施体制

・事業を的確に遂行するために必要な開発体制及び能力を有しているか。既に、関連する研究開発等の事業経験があるか。

５．実用化（事業化）の見通し

・当該研究開発の基礎となる研究開発成果が確実なものとなっているか。
・実用化による産業・社会への波及効果は認められるか。
・実用化による市場の創出効果が大きいか。または市場を占めるシェアが大きいか。

・実用化した製品が継続的に受け入れられる市場環境にあるか。
・事業化に結びつくための生産に必要な資源の確保や、販売ルートを保有しているか。
・事業化に結びつくための（競争相手に対する）優位性が存在するか。

【中間・事後評価】

１．必要性

・社会的なニーズを満たすために相当程度有効な事業であったか。国の支援が必要な事業であったか。

２．目標・計画

・技術動向等の変化に対応して、事業の目的や計画は妥当であったか。
・成果は目標値をクリアしているか

３．要素技術から見た成果の意義

・新規性、先進性が認められるか。

４．実施体制

・開発体制及び能力は適切であったか。
・国民との科学・技術対話を効果的に実施したか、又は実施することとしているか。（ただし、３千万円以上の公的研究費の配分を受ける研究開発で、公募要項に当該対話を実施することが明記されている研究開発を実施する研究者等を対象とする。）ここで、国民との科学・技術対話とは、研究活動の内容や成果を社会・国民に対して分かりやすく説明する、未来への希望を抱かせる心の通った双方向コミュニケーション活動をいう（「国民との科学・技術対話」の推進について（基本的取組方針）（平成 22 年 6 月 19 日））。

５．実用化（事業化）の見通し

・成果に関する特許出願、国際標準の提案の予定はあるか。
・実用化に向けたスケジュールや体制は明確になっているか。
・実用化による産業・社会への波及効果は認められるか。
・実用化による市場の創出効果が大きいか。または市場を占めるシェアが大きいか。
・実用化した製品が継続的に受け入れられる市場環境にあるか。
・事業化に結びつくための生産に必要な資源の確保や、販売ルートを保有しているか。
・事業化に結びつくための（競争相手に対する）優位性が存在するか。

Ⅲ．追跡評価

Ⅰ．波及効果に関する評価

Ⅰ－１．技術波及効果

（１）実用化への進展度合

・プロジェクトの直接的および間接的な成果は、製品やサービスへの実用化にどのように寄与したか、あるいは寄与する可能性があるか。特許取得やその利用状況、市場環境の変化、競合技術の台頭等を踏まえて評価する。

①プロジェクト終了後に実用化した製品やサービスは数多くあったか。

②プロジェクトの成果から今後実用化が期待される製品やサービスはあるか。

③多額の実施料収入を生み出す等、インパクトのある技術が得られたか。

④外国での特許取得が行われたか。

⑤基本特許を生み出したか。

（２）プロジェクト成果からの技術的な広がり具合

・プロジェクトの成果により直接的に生み出された技術は、関連技術分野に技術面でのインパクトを与えたか。派生技術には、プロジェクト実施当時に想定されていたもの、想定されていなかったものを含めてどのようなものがあり、それらはどのように利用されているかを踏まえて評価する。

①数多くの派生技術を生み出したか。

②派生技術は多くの種類の技術分野にわたっているか。（当該技術分野、他の各種技術分野）

③直接的に生み出された技術又は派生技術を利用した研究主体は数多くあるか。

④直接的に生み出された技術又は派生技術を利用する研究主体は産業界や学会に広がりを持っているか。（参加企業、大学等、不参加の同業種の企業、その他の産業等）

⑤参加企業等が自ら実施する研究開発の促進効果や期間短縮効果はあったか。

（３）国際競争力への影響

・直接的に生み出された技術の成果技術や派生技術により、国際競争力はどのように強化されたか。

①我が国における当該分野の技術レベルは向上したか。

②外国と技術的な取引が行われ、それが利益を生み出しているか。

③プロジェクトの技術分野に関連した外国での特許取得は積極的になされているか。

④国際標準の決定に対し、プロジェクトはメリットをもたらしたか。

⑤国際標準等の協議において、我が国がリーダーシップをとれるようになったか。

⑥外国企業との主導的な技術提携は行われたか。

⑦プロジェクトが外国の技術政策に影響を与え、その結果技術交流が促進され

たり、当該分野で我が国がイニシアチブをとれるようになったか。

Ⅰ－２．研究開発力向上効果

（１）知的ストックの蓄積度合

・特許や、研究者のノウハウ・センス・知識等の研究成果を生み出す源となる知的ストックはどのような役割を果たしたか。それらはプロジェクト終了後も継承され、次の研究の芽になる等、今後も影響を持ち得ることができるか。

①当該分野における研究開発は続いているか。

②プロジェクト終了後にも、プロジェクトに参加した研究者が派生技術の研究を行っているか。

③プロジェクトの終了時から現在までの間に、知的ストックが将来的に注目すべき新たな成果（画期的な新製品・新サービス等）を生み出す可能性は高まっているか。

（２）研究開発組織の改善・技術戦略への影響

・プロジェクトは、研究開発組織の強化・改善に対してどのように役立ったか。あるいは、実施企業の技術戦略に影響を与えたか。

①企業を超える研究開発のインフラとして、学会、フォーラム、研究者間交流等の公式・非公式の研究交流基盤は整備され、活用されているか。

②企業間の共同研究の推進等、協力関係、良好な競争的関係が構築されたか。

③顧客やビジネスパートナーとの関係の変化が、経済性を向上させたか。

④技術の管理組織を再編成する契機となったか。

⑤研究開発部門の再構成等、社内の組織改編は積極的に行われたか。

⑥研究開発の予算規模が増減する契機となったか。

⑦プロパテント等の特許戦略に対する意識が高くなったか。

⑧知的ストックは、企業の技術戦略にどのような影響を与えたか。

（３）人材への影響

・プロジェクトは研究者の効率的・効果的配置や能力の向上にどのように寄与したか。

①国内外において第一人者と評価される研究者が生まれたか。

②論文発表、博士号取得は活発に行われたか。

③プロジェクト従事者の企業内での評価は高まったか。

④研究者の能力向上に結び付くような研究者間の人的交流が行われたか。

⑤関連分野の研究者増員が行われたか。

⑥国内外から高く評価される研究機関となったか。

Ⅰ－３．経済効果

（１）市場創出への寄与

・新しい市場を創造したか。また、その市場の拡大に寄与したか。

（２） 経済的インパクト

・生産波及、付加価値創出、雇用創出への影響は大きかったか。
①直接的に生み出された技術や派生技術の実用化により、製品の売り上げと利益は増加したか。
②直接的に生み出された技術や派生技術の実用化により、雇用促進は積極的に図られたか。

（３）産業構造転換・活性化の促進

・プロジェクトが産業構造の転換や活性化（市場の拡大や雇用の増加等）にどのような役割を果たしたか。
①プロジェクトが、各関連産業における市場の拡大や雇用の増加等に寄与したか。
②プロジェクトが新たな産業の勃興や、既存市場への新規参入、あるいは既存市場からの撤退等をもたらしたか。また、それらが市場全体における雇用に影響したか。
③プロジェクトが生産業務の改善や更新に結びついたことにより生産性・経済性は向上したか。

Ｉ－４．国民生活・社会レベルの向上効果

・プロジェクトによって新たな製品・サービスが実用化されたこと、プロジェクトの成果の応用による生産性の向上や顕著なコストダウン、デファクトを含めた規格化を促進したこと等の事例がある場合、それらは、例えば下記に挙げる項目にそれぞれどのような影響をもたらしたか。

（１）エネルギー問題への影響

・エネルギー問題の解決に寄与した効果としてどのようなものが考えられるか。

（２）環境問題への影響

・環境問題の解決に寄与した効果としてどのようなものが考えられるか。

（３）情報化社会の推進

・情報化社会の推進に寄与した効果としてどのようなものが考えられるか。

（４）安全、安心、生活の質

・国民生活の安全、安心、生活の質の向上に寄与した効果としてどのようなものが考えられるか。
①国民生活の利便性を向上させた事例が存在するか。
②国民生活の安全性の向上に寄与したか。
③プロジェクトの成果は、身障者や高齢者の多様な生活を可能にしたか。また、個の自立を支援するものであるか。

Ｉ－５．政策へのフィードバック効果

（１）その後の事業への影響

・プロジェクトの成果や波及効果、改善提案、反省点等がその後の研究開発プロ

ジェクトのテーマ設定や体制構築へ反映されたか。

（２）産業戦略等への影響

・プロジェクトの直接的・間接的な成果が実用化したり、関連の研究開発基盤ができたこと等による、その後の産業戦略等への影響があったか。

Ⅱ．現在の視点からのプロジェクトの評価

Ⅱ－１．国家プロジェクトとしての妥当性

・国のプロジェクトとしてどのような効果があったか。Ⅰに示した各効果を総合的に評価する。

・現在（追跡評価時点）から見て、国が関与する必要性があったか。また、関与の方法や程度は妥当であったか

①多額の研究開発費、長期にわたる研究開発期間、高い技術的難度等から、民間企業のみでは十分な研究開発が実施されない場合。

②環境問題への先進的対応等、民間企業には市場原理に基づく研究開発実施インセンティブが期待できない場合。

③標準の策定、データベース整備等のうち社会的性格が強いもの（知的基盤）の形成に資する研究開発の場合。

④国の関与による異分野連携、産学官連携等の実現によって、研究開発活動に新たな付加価値をもたらすことが見込まれる場合。

⑤その他国が主体的役割を果たすべき特段の理由がある場合。

Ⅱ－２．目標設定

・当時の技術動向、市場動向、社会環境、政策目的等から見て、目標設定の方向性とそのレベルは妥当であったか。

Ⅱ－３．プロジェクト実施方法

・プロジェクトの計画策定、スキーム（予算制度）、実施体制、運営方法等の実施方法が現在の視点から見て妥当であったか。

Ⅱ－４．Ⅱ－１～Ⅱ－３の評価結果を踏まえ、プロジェクト終了時の事後評価の妥当性

・事後評価で行われた評価結果は、追跡評価の時点から見て妥当であるか。

（現在の事後評価項目の例示）

目的・意義の妥当性、目標の妥当性、計画内容の妥当性、国のプロジェクトであることの妥当性、研究開発体制・運営の妥当性、研究開発成果の計画と比較した達成度、実用化の見通し（成果普及、広報体制、波及効果）、総合評価、今後の提言

・今後の最終評価において改善すべき評価方法、考慮すべき要因等を提案。

Ⅱ－５．プロジェクト終了後のフォローアップ方法

・プロジェクトの成果の実用化や普及に対して、プロジェクト終了後のフォローアップ体制が適切であったか。後継の国のプロジェクトを立ち上げる必要は無かったか。

・不適切な場合の改善点、より効果を発揮するための方策の提案。

参考資料３

平成 18 年度　二酸化炭素地中貯留技術研究開発
中間評価報告書概要版

平成１９年３月
産業構造審議会産業技術分科会　評価小委員会

中 間 評 価 報 告 書 概 要

プロジェクト名	二酸化炭素地中貯留技術研究開発
上位施策名	地球温暖化防止新技術プログラム
推進課	経済産業省　産業技術環境局　環境政策課　地球環境技術室

プロジェクトの概要

大気中の二酸化炭素（以下「CO_2」）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 CO_2 を地下深部塩水層（以下「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。

予算額等　　単位：千円

開始年度	終了年度	中間評価時期	事後評価時期	事業実施主体
平成 12 年度	平成 24 年度	平成 14,18 年度	平成 25 年度	RITE
H19FY 要求額	H17FY 予算額	H18FY 予算額	総予算額	総執行額（H12-17FY）
1,020,000	950,000	1,200,000	6,028,000	4,390,472

目標・指標

二酸化炭素を地中帯水層に長期間、安全（二酸化炭素を大気中に漏出させない）に貯留し、二酸化炭素の地中挙動予測にもとづく安全評価手法を開発するとともに、地中貯留の有効性をコスト、ポテンシャル、安全性、社会受容性なども明らかにし、実適用に必要な基盤技術を終了年度までに確立する。

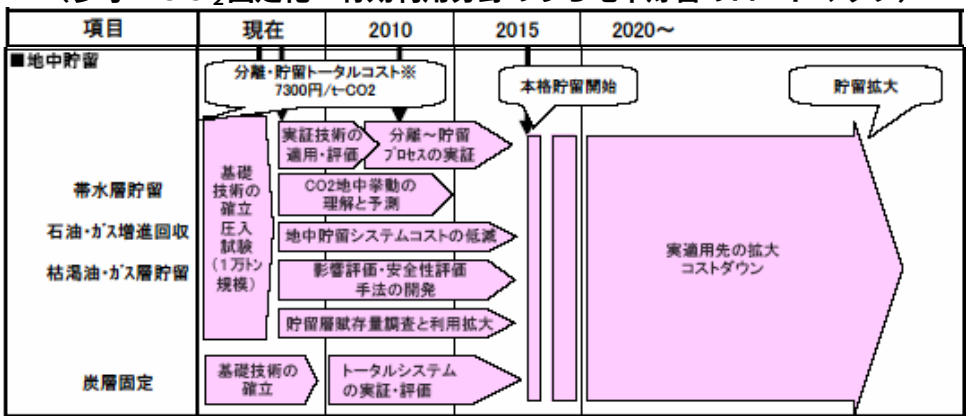
（目標及び開発計画の変更）

平成 16 年度までの成果により、地中挙動に係わる科学的・技術的知見を取得できたと言えるが、実用化に際しては、圧入終了後における CO2 挙動のモニタリング結果からヒストリーマッチングを継続して行い、長期挙動予測シミュレータの更なる精度向上を図る必要があった。

また、地中貯留の本格適用を図るには、国内の貯留候補地の選択肢を広げ、地中貯留の経済性を高めるため、新たに大規模発生源近傍に多く分布する層位トラップなどを有する地中構造（カテゴリーB）での貯留の可能性を検討する必要があり、トラップメカニズム解明や貯留可能量評価などに向けた課題の整理等を行う必要があった。

このため、平成 17 年度に研究推進委員会での承認を受けて研究期間を変更（平成 12～24 年度（8 年延長））等を行った。

（参考：CO_2固定化・有効利用分野のうち地中貯留のロードマップ）



（注）技術戦略マップ２００６「CO_2固定化・有効利用分野のロードマップ」から一部抜粋。

成果

新潟県長岡市において、約１万トンの CO_2 を地下 1,100mの帯水層に我が国で初めて圧入し、その挙動をモニタリングした。それらの観測データによるシミュレーションスタディから長期挙動予測を行い、圧入 CO_2 が実証試験サイトで長期的に安定して貯留されることを明らかにした。また、我が国における貯留可能量を既存地質情報から再評価し、CO_2 排出量に比べて十分に貯留可能量が大きく、地中貯留適用の可能性を明らかにした。

なお、本事業は、CO_2 固定化・有効利用分野の地中貯留のロードマップに沿って概ね順調に進捗している。

その他の成果物については、下表のとおり。

研究項目別論文（原著／他）、講演（招待／他）、特許、報道の件数一覧

	論文（原著／他）	講演	特許	報道
安全評価手法の開発	18（14/4）	67	0	55
総合評価	5（5/0）	29	0	35
合計	40（21/19）	109	0	90

（地中貯留全般に係わるものは合計にだけ計上）

評価概要

① 事業目的及び政策的位置付けの妥当性

地中貯留は、近々に産業として利益を生じることはなく、民間での研究開発にインセンティブがないこと、実用化に向けて長い研究期間を要すること等の理由から、国の事業としての実施が妥当であり、国の関与が必要不可欠な事業である。本技術を経済合理性、社会的合意を得て実施するには、より慎重な検討と広範なデータ蓄積が必要なため、長期的な技術としての位置付けを明確にすべきである。

② 目標の妥当性

地中貯留技術は、工学的な技術開発だけでなく、社会、経済的な側面を持つ総合的なものであり、長期的な展望に立ってマイルストーンを定めた研究開発の目標は妥当である。確実性の高いカテゴリーＡについては、まず実証試験を行い CO_2 挙動の科学的理解を深めること、カテゴリーＢについては、課題の整理を行うという貯留区分に応じた整理を行っており、現時点での実施すべき項目は妥当である。

③ 成果、目標の達成度の妥当性

岩野原実証試験・モニタリングにおいては、CO_2 挙動の実測値が得られ、シミュレーションも妥当なレベルに達している。有効性評価においても詳細な地中貯留の経済性評価を可能としたことは今後の CO_2 地中貯留の研究開発の方向性を定める指針にもなり、目標の達成度は妥当である。これまでの結果を踏まえ、どのような発展に繋がるかを明示すれば、プロジェクトの意義がより明確になる。

④ 波及効果、事業化についての妥当性

本プロジェクトが政策立案での選択肢を増やしたという点で見れば波及効果は大きい。プロジェクトの着実な遂行により社会的関心が高まり、個別要素技術は海外プロジェクトへの波及も期待される。貯留可能量の大きいカテゴリーＢの実用化については、知見の集積と着実な技術開発が必要である。

⑤ マネージメント、体制等の妥当性

事業体制・運営については、国の主導のもと、RITE がこれまでの蓄積を有する大学、他研究機関へ再委託し、先導的役割を果たすべき民間に協力を仰ぐ流れは、非常に適切、妥当である。本プロジェクトに対する関心が高まり、社会的要請が急激に変化する中で、平成１７年度に事業計画の見直しを行っており、研究推進委員会を中心とした事業マネージメントが機能している。

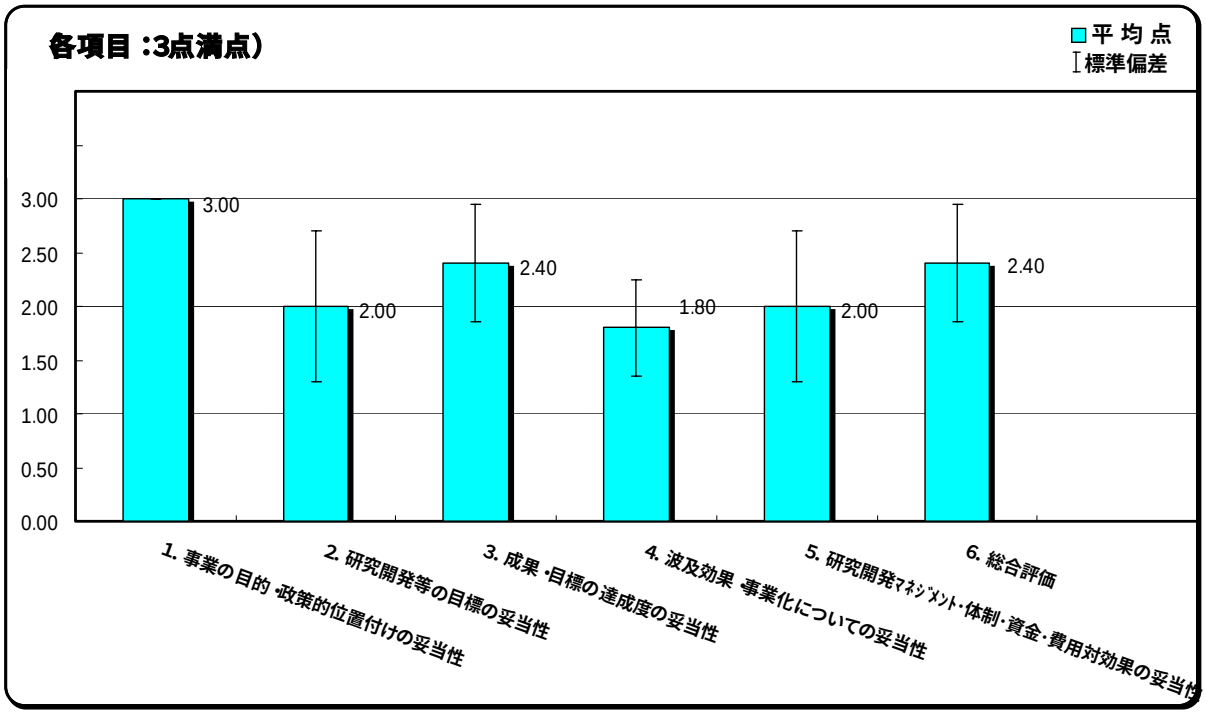
⑥ 総合評価

地球温暖化防止は重要事項であり、本プロジェクトの社会的意義は大きく、国の支援は極めて適切である。CO_2の分離回収・貯留の実用化への道筋が示されたことは、日本の気候変動政策の選択肢を増やし画期的である。実用化の長期的ストラテジーの中で、本プロジェクト及び個々の要素開発技術の位置付けや体系を明確にする必要がある。

⑦ 今後の研究開発の方向等に関する提言

地中貯留に関する技術開発、特にシミュレーションに基づく予測と実測による検証や安全性に関する信頼できる客観的事実の蓄積を積極的に進めることは重要である。多くの温暖化対策全体の中で、我が国で地中貯留することの優位性を確認しながら進める必要があり、本プロジェクト終了時には、次期プロジェクトのあるべき姿をもとに明確な計画を立て、十分な事前評価を行う必要がある。

評点結果



参考資料４

二酸化炭素地中貯留技術研究開発事業
中間評価報告書概要

平成２２年３月
産業構造審議会産業技術分科会
評価小委員会

中間評価報告書概要

プロジェクト名	二酸化炭素地中貯留技術研究開発
上位施策名	温暖化対策の推進
事業担当課	経済産業省　産業技術環境局　環境政策課　地球環境技術室

プロジェクトの目的・概要

大気中の二酸化炭素（以下「CO_2」という。）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 CO_2 を地下深部塩水層（以下「帯水層」という。）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。

本事業では、平成 12 年度から 16 年度までを科学的技術知見の集積とする第１フェーズ、平成 17 年度から 19 年度までを岩野原モニタリング等による実適用に向けた技術実証の進展とする第２フェーズ、そして平成 20 年度以降は、安全評価手法の開発に関する第３フェーズとして実施している。

予算額等　（単位：千円）

開始年度	終了年度	中間評価時期	事後評価時期	事業実施主体
平成 12 年度	平成 24 年度	平成 14,18,21 年度	平成 25 年度	財団法人地球環境産業技術研究機構（RITE）
H18FY 要求額	H19FY 予算額	H20FY 予算額	総予算額	総執行額（H12-20FY）
820,000	840,000	604,000	7,092,000	6,601,869

＊本プロジェクトに係る予算には、RITE が実施した研究開発（表中の予算額）の他、調査事業として H18 年度は、380,000 千円、H19 年度は、180,000 千円、H20 年度は、700,820 千円が予算計上されている。

目標・指標及び成果・達成度

(1) 全体目標に対する成果・達成度

第２フェーズ（平成１７年度～１９年度）における要素技術の目標・成果・達成度については以下のとおり。

要素技術	目標・指標 （第２フェーズ評価時点）	成果概要	達成度
１．安全評価手法の開発 ①岩野原実証試験・モニタリング	（目標） わが国の帯水層における CO_2 圧入終了後の CO_2 挙動に関する観測データを取得して地質工学的な解析・評価を行い、本事業で開発した長期挙動予測シミュレータにより CO_2 を安定して貯留できることを確認する。 （指標）	１）長岡市岩野原の地下 1,100m の帯水層に圧入した CO_2 の貯留状況について、圧入後の物理検層、トモグラフィ観測により、CO_2 の存在を確認することができた。貯留層地質モデルを用いたシミュレーション・スタディにより、圧入した CO_2 が実証試験サイトに長期的に貯留されることを高い精度で確認	達成

	１）岩野原実証試験の貯留層において、物理検層や弾性波トモグラフィーなどによる CO_2 の貯留状況の把握。 ２）実規模での地中貯留を想定した CO_2 挙動を精緻に予測可能なシミュレータの構築。	した。 ２）岩野原サイトの各種観測データや基礎実験結果を基に、我が国特有の変化に富む地質構造を有する帯水層に適した CO_2 挙動の把握･予測を可能とするシミュレータを完成させた	
②基礎実験	（目標） 岩石試料を用いた室内実験により、CO_2 注入に伴う物理的･化学的な変化を調査し、現場測定結果の解釈、安全評価手法の確立に知見を提供する。 （指標） １）CO_2 注入による弾性波速度や比抵抗の変化を測定し、岩野原サイトの物理検層や弾性波トモグラフィ測定結果の解釈への知見を提供。 ２）超臨界 CO_2＋地層水系における鉱物溶解特性の把握と化学反応による鉱物固定に関する金属類の影響把握。	弾性波による CO_2 挙動モニタリングの有効性を示したほか、音波や比抵抗検層結果の解釈に貢献し、現在まで目標に沿った以下の成果を得ている。 ・貯留層上部のキャップロックのシール評価手法を開発し、地下深部の圧力・温度条件下におけるコア試料の閾値圧力を測定できるようになった。 ・比抵抗検層データに基づく CO_2 飽和度評価では、粘土の影響を補正する評価手法を提案し、中性子検層の結果と比較することによりその有効性を確認した。 ・GEMGHG による感度解析では、Mg 鉱物の存在下では中和反応と鉱物固定化がより進行するため、Mg の有無が挙動予測に大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。	達成
③地中挙動予測手法の高精度化	（目標） 地中貯留の可能性を科学的に明らかにするため、実験やシミュレーションなどから CO_2 挙動やトラップメカニズムなどに係わる技術課題を整理し提示する。 （指標） １）広域地下水流動解析による CO_2 挙動の把握。 ２）CO_2 溶解を含む地化学的 CO_2 貯留の定量的把握。 ３）浅部･大気中における CO_2 挙動把握。	地中挙動予測手法の高精度化は平成 17 年度から研究を開始しており、現状における成果は次のとおりである。 ・温度分布を用いた地下水流動解析法を拡張して、東京湾岸地域の浅部深度での地下水流動を評価し、貯留層深度への応用について見通しを得た。 ・地化学的 CO_2 トラップメカニズムの検討において、鉱物固定相平衡反応の熱力学的パラメータの妥当性を確認した。 ・水溶性ガス田における天然ガス湧出をナチュラルアナログとし	達成

		て調査した。	
２．総合評価 ①想定モデル地点調査	（目標） 日本国内での地中貯留実適用の可能性を、具体的なエンジアリングスタディにより、全体設計ならびにコスト評価を行う。 （指標） １）実適用地点を想定したモデルとして、大規模発生源が隣接する地点における、トータルシステムのケーススタディ、コスト評価、課題抽出。 ２）地中貯留に対する社会受容性獲得の一方策として、将来の地中貯留に関係者を対象としたエンジニアリングドキュメントの作成。	・2,300 万ﾄﾝ CO_2/年をﾊﾟｲﾌﾟﾗｲﾝで輸送し、ERD 井で圧入する A 地点、1,000 万ﾄﾝ CO_2/年を船舶か、ﾊﾟｲﾌﾟﾗｲﾝで輸送し、海底の坑口から圧入する B 地点を設計した結果、A 地点は輸送距離が小さいことから比較的安価となった。B 地点は船舶輸送とした場合はコスト増となったが、圧入場所が近い場合はﾊﾟｲﾌﾟﾗｲﾝコストが削減されて低コストとなった。より詳細な検討のためには、分離回収装置の設置用地の確保、市街地でのﾊﾟｲﾌﾟﾗｲﾝ敷設の可否、地層特性の確実性などの課題が抽出された。 ・想定モデル地点調査での成果について、地中貯留のコストを含む関連設備概要と全体システムについてエンジニアリングドキュメントを作成した。 ・分離回収の低コスト化、輸送に関する法整備、低コスト化、貯留層内での CO_2 挙動解析、環境影響など実適用に向けた多面的な検討を行い、実務的･実証的に解決することが必要であることを明らかにした。	達成
②全国貯留層賦存量調査	（目標） 日本の地質状況において地中貯留が実現可能な考え方および概念を整理するとともに、賦存量調査の調査手順・評価手順を全国貯留層賦存量調査法としてとりまとめる。 （指標） １）排出源近傍における地中貯留の可能性評価と概算貯留可能量の算定、調査法の確立。 ２）将来の地中貯留実用化に備え、新規事業者が参考となる貯留可能量調査方法ガイドラインの作成。	・大規模排出源近傍および中規模排出源の貯留可能量を算出した結果、それぞれ、138.5 億ﾄﾝ、229.5 億ﾄﾝとなり、過去の試算と合計すると、1,829 億ﾄﾝであることを明らかにした。震探層序学に基づく堆積層解析などにより、貯留データの精度向上が図れた。 ・今後の地中貯留の可能性評価と概算貯留可能量の算定、調査法の指針となる、貯留可能量調査法ガイドラインを作成した。	達成

③有効性評価	（目標） 　我が国における地中貯留適用の政策的判断に寄与するため、大規模排出源の主たるものである火力発電所に絞って有効性を評価する。 （指標） 　火力発電所に分離回収設備を設置したときの詳細なプロセスとコストの関係の明確化。	・微粉炭火力、LNG コンベンショナルおよび LNG コンバインドサイクルの排ガスから化学吸収法による CO_2 回収を行った場合の熱効率および経済性の解析を行った。微粉炭火力および LNG コンベンショナルについては回収設備からの排熱を最大限に活用することで、熱効率の低下を大幅に低減できることを示した。 ・100 万 kW 級微粉炭火力から年間 100 万 t-CO_2 の CO_2 を回収したケースでは、送電端効率の低下を 0.8%（絶対値）程度に抑えることが可能で、分離回収・昇圧のアボイデッドコストを 2,000 円/t-CO_2 台にできる可能性があることを示した。	達成
④周辺関連調査	（目標） 　社会的受容向上など社会への　普及方策や実適用の実施スキーム、法体系などの社会システムのあり方を提示するため、以下の項目に取り組む。 (指標) １）国際的な技術動向、政策動向の把握。 ２）社会的受容向上方策や法体系などの検討。 ３）地中貯留の法的取り扱い、および国内における地中貯留に係る関連法整備の動向調査。	技術および政策に関わる海外動向調査、社会的受容性に関する調査を実施して、目標に沿った以下の成果を得ている。 ・　中国などアジア諸国でも CDM を通して CCS プロジェクトに関与していることが明らかになった。 ・　政策動向を中心とした海外動向は重要であり、今後も継続して実施していく必要がある。 ・　社会的受容性向上については、地中貯留のベネフィットを適切に伝えることが重要であるという知見を得た。 ・　ロンドン条約 1996 年議定書が発効されたことを受けて、本条約に関連する国内法整備も急速に進んだ。 ・　先行する海外プロジェクトにおける法整備、ガイドラインの制定等の情報収集を今後も継続していくことが重要である。	達成
⑤安全評価関連調査	（目標） 　地中貯留の実適用に向けた社会的受容性を高めるために、国内外のリスク抽出手法および安全ガイドラインを調査し、実証試験や実適用に必要な知見を蓄積する。 （指標） １）リスク抽出手法の調査	予定した調査、検討等を実施し、目標に沿った成果を得ている。 １）リスク抽出手法の調査 ・FEP データベースを改良してわが国における地中貯留の重要シナリオを抽出し、適用性を確認することができた。	達成

	・ ＦＥＰデータベースを用いた CO_2 移行シナリオの抽出手法の適用性の検証。 ・ 重要シナリオの定量評価に必要なデータベースの構築。 ・ 断層が安全性に及ぼす影響の評価手法の提案。 ２）安全ガイドラインの調査 ・ 既存法規の調査により、地中貯留の安全ガイドラインの内容、課題の抽出。	・重要シナリオの影響評価検討により、断層シナリオが重要であり優先的に検討すべきシナリオと評価した。それに伴い断層に関する物性データを整理した。 ・さらに断層については、主要な研究動向をまとめ、CO_2 地中貯留の安全性に関する知見を整理した。 ２）安全ガイドラインの調査 ・鉱山保安法、高圧ガス保安法等の安全項目と地中貯留に関する必要事項を比較整理し、今後検討すべき安全項目を抽出した。 ・国際的な情報共有、共通化が進んでおり、情報収集を継続実施していくことを確認した。	

平成 20 年度からは、大規模実証試験との役割を考慮して研究開発に取り組むものとした。

平成 20 年度に実施した研究開発項目は次のとおり。

① 貯留層内の CO_2 挙動解析（CO_2 挙動モニタリング基礎実験）

②海底下 CO_2 移行解析手法の開発

③CO_2 貯留性能評価

④周辺関連調査

(2) 目標及び計画の変更の有無

平成 12～16 年度においては、岩野原実証試験において、我が国特有の変化に富んだ地質構造に CO_2 を安全に圧入できること､圧入された CO_2 の挙動を物理検層や弾性波トモグラフィーなどでモニタリングできることを検証するとともに、新たに開発した長期挙動予測シミュレータで CO_2 の長期挙動を予測することができた。

これらの成果により、本技術開発は、技術実証・実適用段階に向けた新たな段階への検討を行う必要があった。このため、平成１７年度からの第２フェーズでは、岩野原モニタリング、基礎実験、地中挙動予測手法の高精度化を要素技術とする「安全評価手法の開発」及び、想定モデル地点調査、全国貯留層賦存量調査、有効性評価、周辺関連調査、安全評価関連調査を要素技術とする「総合評価」に枠組みを見直して取り組むこととした。

また、平成 20 年以降においては、これまで想定モデル地点調査として取り組んできた実適用事業が、大規模実証試験事業として立ち上げられ、2015 年までに CCS 実用化に必要な要素技術の開発としての取り組みが開始された。地中貯留技術研究開発事業は、この大規模実証試験で明らかとなった研究課題を解決するなど、連携を深めて支援を行うこととし、平成 20 年度以降の第３フェーズでは、従来取り組んできた研究を見直し、大規模実証試験との役割を考慮するとともに、将来の国内での CCS 実用化に向けて、社会受容性獲得および信頼性醸成に資するために、貯留層の CO_2 挙動解析や長期的な安全評価に関する手法を開発し､CCS の安全評価に主眼をおいて研

究開発に取り組むものとした。

＜共通指標＞

（平成１８年度～２０年度）

論文数	論文の被引用度数	特許等件数（出願を含む）	特許権の実施件数	ライセンス供与数	取得ライセンス料	国際標準への寄与
５２		１				

総合評価

二酸化炭素貯留技術は温暖化防止のために欠くことのできない技術であるが、民間のインセンティブは働かず、国の積極的な関与が必要不可欠である。

世界初の先駆的な試みである岩野原実証試験で開発したモニタリング手法では、貯留層内の CO2 分布の高い精度での確認と、CO2 挙動予測が可能となったことは大きな成果である。とりわけ、社会的受容性を高める鍵である貯留後のモニタリングに関しては、複数の手法を用いて、地下に貯留した CO2 の動きを把握することに成功し、開発した長期挙動予測シミュレータにより 1000 年後までの長期挙動を予測した。これは、周辺住民の理解を得るのに有効なデータとなる。

安全評価手法の開発については設定された目標が達成されており、妥当な成果を得ている。

これまでに得られた我が国の CO2 貯留可能量に加えて、最新地質データを用いてより経済性が期待できる排出源近傍沿岸域での貯留可能量が試算されており、今後の実用化計画にあたっては非常に有用である。

一方で、賦存量調査や安定性評価が大規模実証試験にどのように反映されるのかを、波及効果の観点から、さらに明確にする必要がある。また、研究開発段階から民間企業も参加すべきである。

岩野原で実施した１万ｔ規模の地中貯留実証試験により得られたモニタリング技術が、今後のスケールアップした実証試験にどのように活用できるかを明確に示すべきである。

海底下に貯留する場合、観測井を掘れない分だけモニタリングは陸地の地中よりも難しく、これまで蓄積してきたモニタリング手法だけでは十分ではなく、CCS の円滑な実用化という点ではやや課題が残る。

地中貯留の事業化において、貯留層の貯留能力は、そのまま経済性と関係を持ち、大規模な貯留層と小規模な貯留層では、貯留コストに大きな差が出てくることが容易に想定される。特に我が国においては、大規模な貯留層はそれほど多いとは考えにくいため、小規模な貯留層においても経済性を担保できる貯留技術と安全性を確立することも、今後の目標として設定するべきである。

今後の研究開発の方向等に関する提言

このプロジェクトの役割を検討し、特に、大規模実証試験とも十分にリンクした研究開発の継続が望まれる。

これまでに開発したモニタリング技術およびシミュレーション技術を向上させることは今後の大規模実証試験においても極めて有用と考えられる。また、FEP データベースを今後どのよう

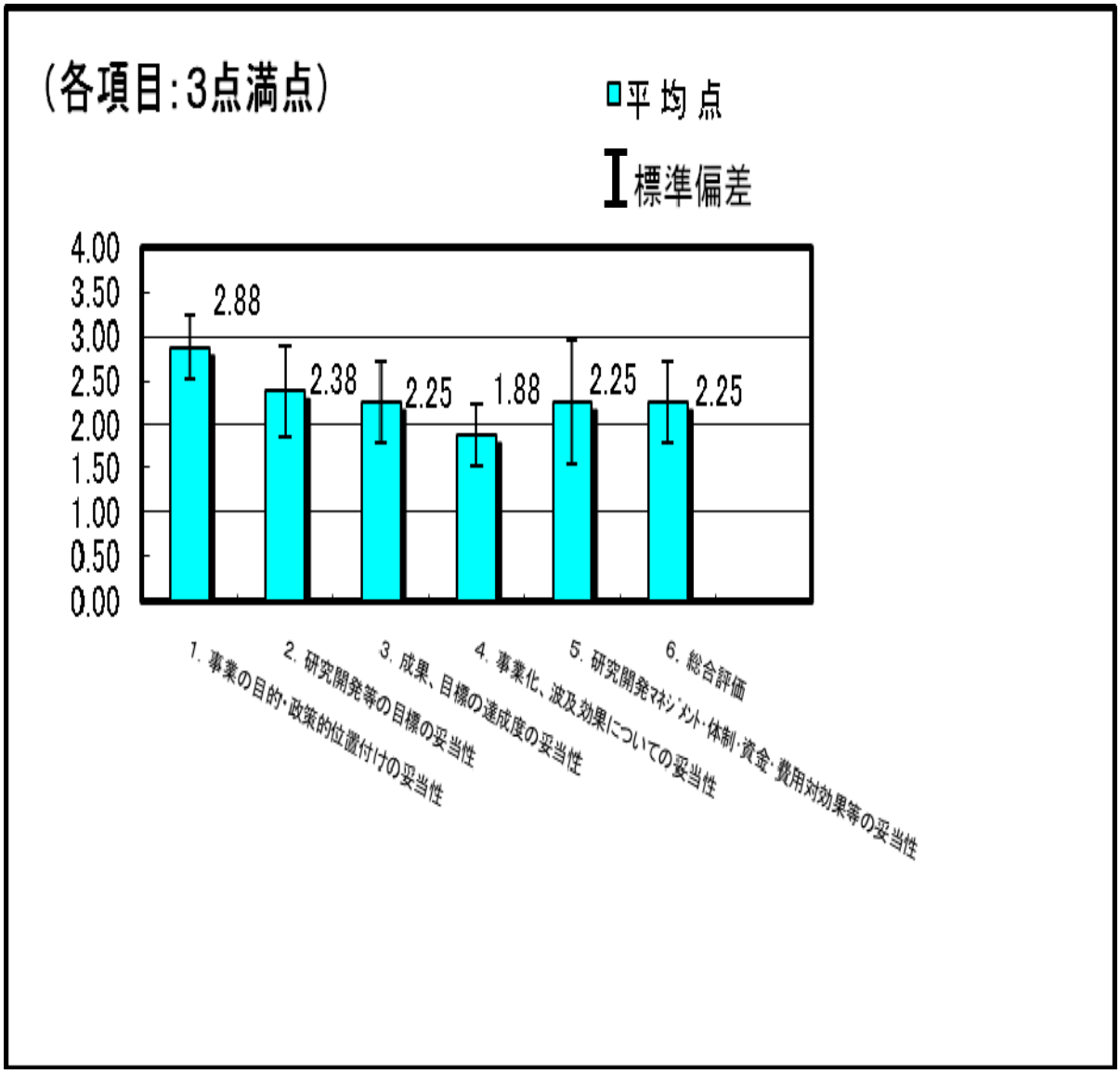
に利用するのか、明確にすべきである。

賦存量調査について、今後は経済性を含めた貯留可能地点調査を実施すべきである。

貯留の安定性・安全性確保の観点から、地中貯留と地殻変動・地震との関連性を明確に否定できるような論理構成や実証的なデータを構築していくことが必要である。

CO2 地中貯留技術は海外においても類似の研究が進められているため、自ら積極的に海外の研究者に働きかけるなど海外の研究グループとの人的交流や情報交換を通して、より研究の成果を最大化できるようにグローバルでシナジーを高めるような進め方を考えることが重要である。

評点結果



参考資料５

平成24年度　二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術開発事業中間評価報告書
（概要版）

平成２５年３月
産業構造審議会産業技術分科会
評　価　小　委　員　会

中間評価報告書概要

プロジェクト名	二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術開発事業
上位施策名	資源エネルギー・環境政策
事業担当課	産業技術環境局　環境政策課　地球環境連携・技術室

プロジェクトの目的・概要

大規模発生源から分離回収した二酸化炭素（以下「CO_2」という。）を地下深部の塩水性帯水層（以下「帯水層」という。）に貯留する技術開発が地球温暖化対策の重要な選択肢の一つとして期待され、先進国を中心に盛んに行われている。

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）が 2005 年にまとめた「二酸化炭素回収・貯留（CCS）に関する特別報告書」では、世界全体における CO_2 地中貯留のポテンシャルが約 2 兆トンと大きく、世界全体排出量の 70 年分にも相当すると見込まれている。また、国際エネルギー機関（IEA）の「エネルギー技術展望 2012」では、CCS は、今後も長期的に極めて重要な役割を果たすとし、産業部門において大幅な CO_2 排出量削減目標の達成を可能にする有望な技術であるとしている。

このような背景のもと、我が国においても、地球温暖化対策としてCCSの実用化に向けた対応を速やかに進めることが求められており、CCSの実用化に資するため、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CO_2を帯水層に長期的に安定かつ安全に貯留する技術開発が必要とされてところである。

本事業では2020年までにCCS技術の実用化に向けて、我が国の地質的・社会的実情に適したCCS安全性評価技術を確立するほか、CCSに関する知見やノウハウを技術事例集にまとめることとしている。

予算額等（委託）　（単位：千円）

開始年度	終了年度	中間評価時期	事後評価時期	事業実施主体
平成１２年度	平成２７年度	平成 14,18,21,24 年度	平成２８年度	公益財団法人地球環境産業技術研究機構 独立行政法人産業技術総合研究所
H21FY 予算額	H22FY 予算額	H23FY 予算額	総予算額	総執行額
580,000	980,000	911,671 の内数	9,563,671	8,895.988

目標・指標及び成果・達成度

(1) 全体目標に対する成果・達成度

項目	目標・指標		成果	達成度
	最終時点	中間時点		
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。	砂泥互層を対象にした地質モデリング手法を確立する。	油・ガス田に比べて少ない地質情報に基づき、砂泥互層に代表される不均質性に富む貯留層の地質モデルの構築手法を確立した。	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。	長期挙動予測に必要なシミュレーション手法の要素技術の検証および高精度化を進め、手法を確立する。 海底下地中貯留に適応可能なモニタリング手法を確立するために要素技術の検証、改良を行う。	TOUGH2 による長期挙動予測シミュレーション手法を確立した。さらに長岡サイトの長期モニタリング結果の解析から高精度なシミュレーションに必要な知見を提供できた。 常設型 OBC システムの実海域試験を実施。その有効性を確認し、大規模実証試験への適用が決定した。	達成
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。	貯留層外部への CO_2 移行の要因を分析し主要な原因を抽出する。断層に関する移行経路のモデル手法を調査する。 CO_2 の海域環境影響評価手法を設計し、生物影響データベースを構築する。さらに、生態系機能の監視を可能とするバイオロジカルモニタリング手法の基盤技術を構築する。	FEP を用いて CO_2 移行要因を抽出した。抽出された要因である断層に関する移行経路のモデル手法を調査した。 文献調査を基に海洋生物影響データベースの構築・整備を行った。海洋微生物のアンモニア酸化活性を指標とするモニタリング手法について基盤技術を確立した。	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。海外展開に向けた国際連携の強化を図る。	国内外の CCS 関連機関との連携、海外の最新動向調査、理解促進活動を通じて、安全性・信頼性の構築に資する推進基盤を整備する。	技術動向、政策動向をとりまとめ、CCS データベースとして整理、構築した。 ワークショップを開催し、技術交流、CCS への理解促進を図った。	達成

(2) 目標及び計画の変更の有無

平成 20 年度に国内で CCS 大規模実証事業を実施する場合の候補地や技術的な可能性に関する検討が開始され、それに対応して本事業を従来の基礎研究から、2020 年頃から CCS 技術の本格導入に向けた基盤技術の開発に深化させる内容の見直しを行っている。

具体的には、大規模圧入実証事業と密接に連係して、CCS 実用化に欠かせない社会的受容性獲得や信頼性醸成に資する、CO_2 の長期挙動予測や CO_2 漏洩による海域環境影響評価に関する基盤技術開発に重点的に取り組むこととなり、平成 21 年度から、我が国の地質特性を反映した安全性評価に関する基盤技術開発を目的とした、貯留層性能評価手法開発、貯留層内の CO_2 挙動解析、貯留層からの CO_2 移行解析に関する安全評価手法の開発とともに実用化に向けた CCS 推進基盤の確立にも取り組んでいる。

＜共通指標＞

論文数	論文の被引用度数	特許等件数（出願を含む）	特許権の実施件数	ライセンス供与数	取得ライセンス料	国際標準への寄与
３８	２０	１				

評価概要

１．事業の目的・政策的位置付けの妥当性

地球温暖化対策として二酸化炭素の地中貯留技術は重要である。特に安全性評価手法の開発はCCSの実用化に向けた社会的受容性を確保するために極めて重要であることから、本事業の目的・政策的位置付けは妥当である。

また、CCSの実用化に当たっては、技術開発による安全性向上やコストダウンのほか、制度的、社会的課題を解決する必要があり、実用化時点でのビジネスモデルも明確になっていない現時点では、民間企業には技術開発のインセティブが働きにくく、国の事業として実施することが必要である。

一方、CCSの実用化のためには、コスト競争力に加えて、安全性、安定性や貯留に対する地域住民の理解といったソフト面のアプローチや民間の事業への参画による技術移転の推進が必要であり、その準備として科学技術、社会受容、事業性をまとめた総合的能力の向上に配慮が必要。また、貯留地を国内に限定することが現実的であるが、安価に実施できそうな地点での共同参画も常に念頭におくことが必要。

２．研究開発等の目標の妥当性

実際に地中貯留を進めるうえでの最大の課題は、圧入技術そのものよりも、むしろ安全かつ経済性の高いサイトの効率的な探索と周辺住民の理解だと思われる。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の開発、安全性評価、海域環境評価など必要な項目が挙げられていることから、目標は適切に設定されていると評価される。

また、CCS 実用化に向けた安全性・信頼性の構築に資する CCS 推進基盤を確立するという視点から、中間目標は立てられており、中間評価の目標設定も概ね妥当であると考える。

一方、開発課題の性格からやむを得ないところもあると思われるが、目標に曖昧なところがある。

地質モデリング手法やモニタリングに関して、高度化に向けての課題と解決策等が、より具体的に示されることが望ましい。

また、本開発は社会受容性を確保されるために行われるものであり、技術面だけでなく、マーケッティング的な観点から何が必要かを検討し、その目標設定を行うことが必要。例えば、地震に関する項目等も必要であると考えられる。

今後、国際的競争力、優位性も大切な視点。つまり海外シミュレーターの日本への応用を超えて、世界標準技術を目指すべき。

３．成果、目標の達成度の妥当性

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分野において、期待される成果が得られ、貯留層内の CO2 挙動解析などは苫小牧における大規模実証実験に適用されることが決まり、現時点での成果は充分出ている。

また、長岡での長期モニタリング結果は非常に貴重なデータであり、貯留層における CO2 の挙動を継続的に可視化するとともに、そのデータ解析などをもとに事業は着実に進んでおり、概ね目標は達成されている。石油坑井周辺における光ファイバー測定では、今まで圧力と温度しか測られておらず、今回は地層のひずみをそれらと同時に測定できることを示した。坑井のケーシング外側に光ファイバーを設置すれば、深度方向のひずみ分布が測定でき、CO2 圧入による地層安定性評価や CO2 漏洩監視に利用できることが期待される。今回の成果は、今後の開発方針につながる成果であり、高く評価できる。

一方、開発課題の性格からやむを得ないところもあると思われるが、目標に曖昧なところがあるため、目標にあった成果が得られているのか判断しがたい部分がある。得られた成果をどのように統合し、実際の事業に資するものとするかについて、さらに検討を進めて貰いたい。

長岡のCO2貯留試験サイトで圧入された量は、CCSで想定されている量よりも遙かに少ないため、長岡のデータを根拠とする際には、その点を常に考慮する必要がある。

CO2圧入に伴う微小振動の発生は、社会的受容性を確保する上で特に重要な問題と考えられる。その検証事例では微小振動が観測されていないが、地層との相関性を明確にできれば、実用化システムの構築にとってその意義は大きい。

また、CCSの認知度は未だ低く、認知度の向上を図る必要がある。その場合、「坑井間弾性波トモグラフィ」の測定結果画像については成果の説明において誤解を招かないよう、画像と共に解説文を入れるなど、きめ細かい説明が必要。

４．事業化、波及効果についての妥当性

苫小牧大規模実証試験に向けた明確な見通しを持って研究が進められており、開発されたCO2挙動モニタリング技術が苫小牧の大規模実証試験に適用されることは大きな成果であり、事業化の加速化へつながるものと期待される。また、適用される常設型海底ケーブルはCO2挙動モニタリングと微小振動観測の両方が可能であることから、CO2圧入と誘発地震との関連性を検証することができ、社会的受容性を高めるための大きなデータとなる。

本事業の成果は、CCS に留まらず、地震観測のモニタリング、高レベル放射性廃棄物の地層処分や地熱開発などの技術に移転されることが期待される。光ファイバー測定システムは CCS だけでなく、石油天然ガ

スやメタンハイドレート開発における地層や坑井の安全性評価にも広く利用できる。

一方、事業化に向けて、さらに個々の技術の統合を進めることにより、CCS の実用化に資するものとして完成を目指して貰いたい。

今後CCS技術の国際標準化の動きが出てくることが予想されることから、本事業の成果が活用できない不利益な状況が起こらないよう、戦略的な取り組みが必要である。

国際貢献の方向も検討して欲しいが、本技術と海外技術との比較もなされていないため、国内限定の技術なのか、海外への技術展開が可能な普遍的な技術なのか判断ができない。このため、事業化においては適切な説明が必要である。

また、事業化には大規模実証試験を通じて技術的な課題を抽出することも必要であることから、今後、実用化にあたっては、国内のみならず、海外の大規模実証試験での実証、実証参加への要請が望まれる。

５．研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性

CCSの事業化は、国の環境政策や国際的な環境規制枠組みに大きく依存するため、研究機関が中心的な役割を担うことは適切であろう。

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。更にその知見は苫小牧の大規模実証試験でも活かされることから、定量的評価は難しいものの、その費用対効果は十分得られていると評価できる。

今後、海外の動向を踏まえた我が国のCCS技術が不利にならないバックアップが必要だが、2020年実用化を見据えて、本事業は計画に沿った進捗状況を示している。また、計画に応じた適切な資金配分が行われている。

一方、多岐に渡る開発項目それぞれが、個別に実行され、それぞれの達成レベルもまちまちである。このため、互いにリンクしながら共通の目標を効率的に達成する体制にすることが望まれる。

本研究開発の成果が苫小牧での大規模実証試験に適用されることから、苫小牧の大規模実証試験と十分にリンクした研究体制を構築することが望まれる。

また、他分野への応用可能性や海外展開で資金を回収できる展開（優位性が認められる方向）を考えて欲しい。

６．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．今後の研究開発の方向等に関する提言

- 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CO_2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。

評点結果

評点法による評点結果

（二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術開発事業）

	評点	A委員	B委員	C委員	D委員	E委員	F委員	G委員	H委員
1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性	3.00	3	3	3	3	3	3	3	3
2. 研究開発等の目標の妥当性	2.00	2	2	1	3	2	2	2	2
3. 成果、目標の達成度の妥当性	2.13	2	2	2	3	2	2	2	2
4. 事業化、波及効果についての妥当性	2.25	2	2	1	3	3	1	3	3
5. 研究開発ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ・体制・資金・費用対効果等の妥当性	2.13	2	2	1	3	2	2	3	2
6. 総合評価	2.50	2	2	2	3	3	2	3	3