

CO₂貯留研究グループ

グループメンバー(2023年4月)

グループリーダー・主席研究員	薛 自求	主任研究員	麻島 健
サブリーダー・主席研究員	梅田 信雄	主幹	淵上 聡子
主席研究員	横井 悟	主任	中西 公美子
主席研究員(兼)	野村 眞	研究員	三善 孝之
副主席研究員	高須 伸夫	研究員	小谷 雅文
副主席研究員	中島 崇裕	研究員	永田 丈也
副主席研究員	名井 健	研究員	Amer, Rasha
副主席研究員	橋本 励	研究員	曹 金荣
主任研究員	三戸 彩絵子	研究員	沖本 竜太
主任研究員	利岡 徹馬	研究員	峰崎 智成
主任研究員	高野 修	研究員	穂積 章一郎
主任研究員	内本 圭亮	研究助手	平井 順子
主任研究員	小牧 博信	研究助手	辻 志織
主任研究員	指宿 敦志	研究助手	氷見 悠子
主任研究員	渡辺 雄二	研究助手	西出 朱美
主任研究員	張 毅	研究助手	奥道 恵美
主任研究員	朴 赫	研究助手	佐々木 恵
主任研究員	末国 次朗	研究助手	佐々井 登喜男
主任研究員	山下 裕士	研究助手	日高 奈江

CO₂地中貯留の実用化へ向けた技術実証、情報発信と技術支援

1. はじめに

2023年3月に国が取りまとめた「CCS長期ロードマップ」では、2050年時点のCO₂地中貯留規模が1.2～2.4億トンとなっている。2030年のCCS事業開始を目指して、法制度をはじめCCS実用化の環境整備を急いでいる。また、CCS事業の安全性確保と同時に、コスト低減等の技術開発も求められている。

我が国におけるCO₂地中貯留技術開発は、2000年代前半の新潟県長岡市郊外の小規模実証試験(計1万トンのCO₂圧入)を皮切りに、2010年代前半までに様々な基盤技術が開発されてきた。その後、北海道苫小牧沖では計30万トンの大規模CO₂圧入実証試験が行われた。

CO₂貯留研究グループは、二酸化炭素地中貯留技術研究組合の一員として、100万トン/年規模のCO₂貯留技術の実用化に取り組んでいる(NEDO委託事業「安全なCCS実施のためのCO₂貯留技術の開発研究」)。

本事業の主眼は、CCS事業の安全性や経済性の向上のための技術開発とCCS普及のための条件整備であり、これまでに、圧入安全管理システムや光ファイバーによる分布式温度(DTS: Distributed Temperature

Sensing)、ひずみ(DSS: Distributed Strain Sensing)および音響(DAS: Distributed Acoustic Sensing)測定技術、貯留効率向上のためのマイクロバブルCO₂圧入技術などを開発してきた。現在は、国内外サイトでの技術実証試験を進めている。また、CCS技術の社会実装に向けての社会受容性向上手法の開発等にも取り組んでいる。

光ファイバー測定技術に関しては、米国内の大規模CO₂圧入サイトでの有効性検証や国内CCS事業への実適用に向けての計測システム運用等のノウハウの蓄積も進めている。排出源と貯留サイトのマッチングや国内CCS事業の経済性向上(コスト削減)の検討では、既存の地質情報や地下探査データを基に、“Storage Resource Management”(SRM)手法を検討しており、従来の貯留ポテンシャル評価に加えて、最適な事業計画検討が可能なCCSコスト試算ツールも開発している。また、従来のPA(Public Acceptance)やPO(Public Outreach)を発展させ、国内CCS事業に役立つ社会合意形成(SLO: Social License to Operate)の手法を開発している。

2. 主な研究課題と成果

2.1. 光ファイバー測定技術開発と技術実証

CO₂地中貯留では、圧入されたCO₂が地下に安全に貯留されていることを示さなければならない。そのためには、地下のCO₂分布範囲の把握に加えて、地層圧の上昇に伴う地層変形、圧力影響範囲の監視、CO₂漏洩検知を目的とした坑井やCO₂パイプラインの健全性監視等が必要である。これらの監視を効果的に実施できる技術として、光ファイバー測定技術が有望である。

光ファイバー測定技術は、光ファイバーそのものがセンサーとなるために、光ファイバーケーブルの長さ方向に連続的にデータ計測ができる。また、複数の光ファイバーを束ねた一本の光ファイバーケーブルを設置することで、温度・ひずみ・音響をすべて捉えるマルチセンサーとして利用でき、それぞれのセンサーやシステムを設置する場合に比べて大幅なコスト削減が期待できる。

当研究グループでは、室内試験および現場試験を通じて同技術の研究開発を進めており、現在では国内外サイトにおいて実証試験を実施中である。国内サイトでは、開発した光ファイバーケーブルの性能評価に加えて、複数坑井での圧入など実事業を想定したCO₂圧入環境下での光ファイバー計測の有効性検証を進めている。また、米国ノースダコタ州CCSサイトでは、マルチセンシング型CO₂地中貯留モニタリングシステムの技術実証として、一本の光ファイバーケーブルを用いた温度・ひずみ・音響の同時計測を実施している。以下では、米国ノースダコタ州CCSプロジェクトについて紹介する。

米国ノースダコタ州CCSプロジェクトでは、エタノール製造工場から回収される年間約18万トンのCO₂を地下深部約2,000mの塩水性帯水層に圧入している。2022年6月中旬から圧入を開始し、2023年3月末現在、約10万トンのCO₂が貯留されている。

同プロジェクトのCO₂モニタリングは、我々の光ファイバー測定技術が用いられている。図1はCO₂貯留サイトと光ファイバーモニタリングシステムの概要図を示している。4本の坑井(圧入井、観測井、浅部地下水観測井×2)とCO₂輸送パイプラインには、光ファイバーケーブルが設置され、DTS(温度)、DSS(ひずみ)およびDAS

(音響)の同時計測を実施している。各計測システムの役割を表1にまとめた。

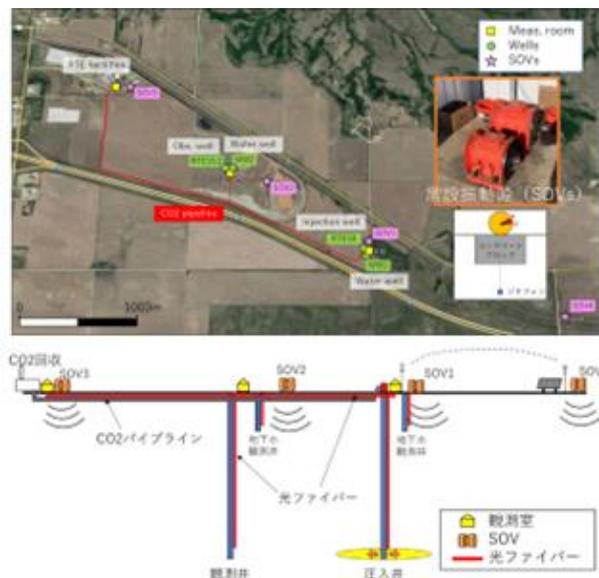


図1 光ファイバーモニタリングシステムの概要

表1 光ファイバー計測の役割

DAS (音響計測)	CO ₂ 分布状態の把握、地震観測
DTS (温度計測)	坑井・パイプライン周辺の漏洩監視
DSS (ひずみ計測)	貯留層・遮蔽層の安定性監視

地下のCO₂の広がり把握するには、2本の深い坑井に設置した光ファイバーによる弾性波探査(DAS-VSP)技術が用いられる。VSP (Vertical Seismic Profiling)探査では、坑井に受振装置を配置する探査手法であり、計測対象と受振器が近づくため、高品質なデータ取得が可能である。坑内受振器として、光ファイバーを利用することで、データ収録が高速化され、かつ繰り返し探査における受振点位置ずれによる誤差が低減できる。また、光ファイバーケーブルは直径が数ミリメートル程度であり、ケーシング背面に設置できるほか、坑内装置のある圧入井であっても利用することができる。

地下のCO₂の広がり把握を目的とした繰り返しの3次元弾性波探査は、数年毎に実施されることが多い。この観測期間のギャップを埋めるため、頻回なデータ取得が可能な常設型の発振装置 (Surface Orbital

Vibrators: SOVs)を導入した。SOVsは、コンクリートブロック上に設置された偏芯おもり付きのモーターが高速に回転することで、地下に振動が伝わるようになっている。また、遠隔操作および自動コントロールが可能であるため、発振作業のための現場オペレーターが不要である。ノースダコタサイトでは、サイト周辺に4箇所設置し、毎日発振作業を行っている。

図2は、圧入井から約60mと約1,000mの地点にそれぞれ設置したSOVsから発振されたDAS-VSP測定結果である。横軸が深度に対して、縦軸が経過時間であり、左上から右下方向に連続する直達P波が、地表から地下(下方)に向かって伝播するのに対し、右上から左下方向に連続する波は、地下から上方へと伝播する反射波を表す。VSPデータ解析において主要なシグナルとなる反射波(上方へ伝播するP波)がS/Nよく記録されている。坑井近傍で発振されるゼロオフセット記録は、圧入開始直後のCO₂プルームの検知に用いられ、坑井から離れたオフセットVSP記録は、CO₂プルームの広がりを把握するために利用される。現在、CO₂の広がり把握のために、繰り返しのVSP記録のタイムラプス解析を実施中である。

図3は、圧入開始前後の圧入井におけるDTS計測結果である。カラーコンター図は縦軸深度、横軸時間に対して計測された温度を示しており、深度方向の時間的溫度変化が確認できる。圧入開始前は地温勾配を反映した深度方向の温度分布であるが、圧入開始直後は最大で約20℃も温度が低下している。これは、坑井近傍の温度よりも低い温度のCO₂が圧入されたためである。また、圧入開始後も、短期間の温度上昇・低下が数回ほど見られる。これは、圧入を一時停止したことにより、CO₂によって冷やされていた坑井周辺の温度が元の地層温度に戻ろうとする様子を示している。

CO₂圧入に伴う地層変形の監視として、坑井に設置した光ファイバーによって地下深部から地表までの連続したDSS(ひずみ)計測を実施している。ノースダコタ州CCSプロジェクトでは、衛星データを用いた地表変形監視も合わせて実施しており、地表変状(隆起)が地下深部へのCO₂圧入との関連性を見極めることができるよう

になっている。

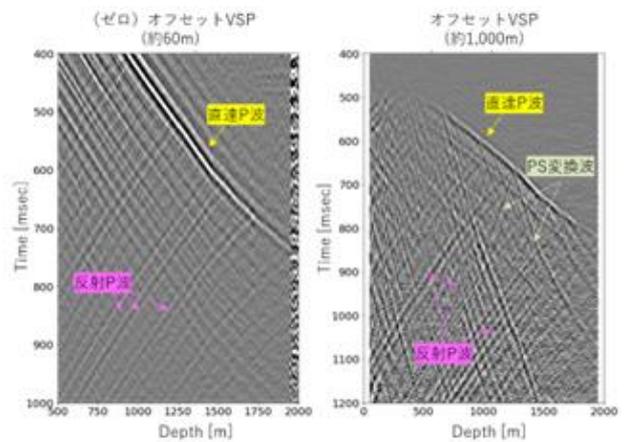


図2 SOV発振によるDAS計測結果

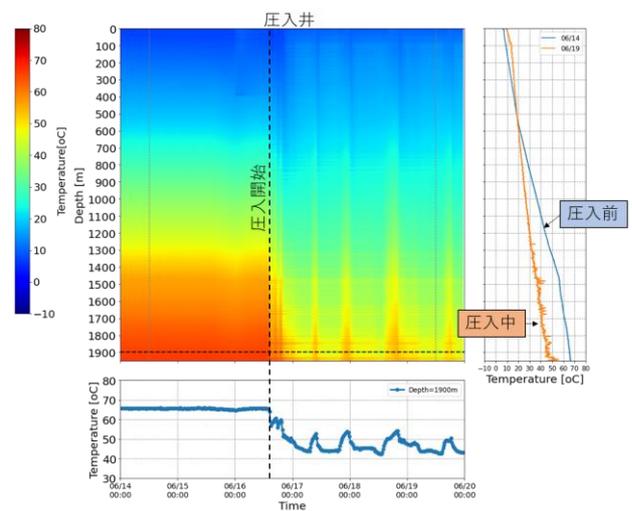


図3 圧入開始前後の圧入井のDTS計測結果

一方、豪州ビクトリア州南西部のOtwayサイトでは、光ファイバー測定技術を用いた浅部断層からのCO₂漏洩検知現場試験が進められている。図4はCO₂漏洩検知試験のために、新規に掘削された圧入井(Brumby 3)と観測井(Brumby 4)と既存の2つの坑井の配置を示す断面図である。豪州研究機関CO₂CRCの先行研究では、浅部断層破碎帯を貫く坑井を掘削し、光ファイバーを用いてDTS(温度)測定を実施した。DTS測定では設置された光ファイバー周囲の狭い範囲の温度変化しか監視できない。このため、新規掘削の2つの坑井に

は高性能のDSS(ひずみ)測定ができる新しい光ファイバーを設置した。

この光ファイバーは米国ノースダコタサイトや国内サイトでも使用されており、DSSのほかにDTSとDAS計測も実施できる。漏洩検知試験では、圧入井(Brumby 3)からCO₂ガスを圧入し、一部のCO₂が断層破砕帯に沿って地表に向かって移動すれば、観測井(Brumby 4)の光ファイバーがCO₂漏洩の挙動を検出・追跡できると期待できる。CO₂漏洩検知試験は、今夏に予定している。

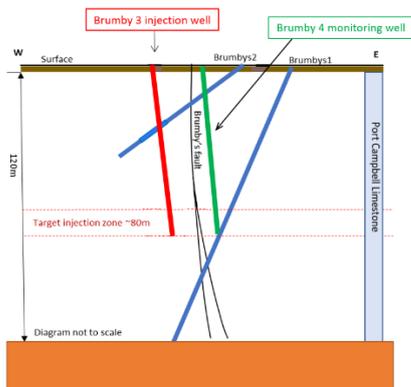


図4 Otwayサイトの坑井配置の概念図

以下に、開発中のツールについてその特徴を記す。

1)使いやすいインターフェイス:ユーザが画面を見ながら、迷うことなく適切に必要なデータの入力が行え、計算実行の指示ができるよう、入力インターフェイスに工夫を凝らしている。画面がわかりにくかったり、操作が複雑であったりすると、ユーザは正しく諸元を入力できず、それが原因で誤った結果を導いたり、操作時間の浪費に繋がったりする。そのため、平易かつ明瞭な入力インターフェイスは重要である。図5にケースの選択画面を示した。この画面から諸元確認画面の呼び出しや、計算の実行を行うことができる。



図5 ケース選択画面

2.2. SRM手法開発:コスト試算ツールの開発

Storage Resource Management (SRM) 手法開発では、CO₂貯留サイトにおける地下の貯留容量(リソース)を有効活用する手法と、CCS事業全体のコスト評価を行うツールの開発を行っている。CCS事業全体には、CO₂回収・輸送・貯留のステージが含まれており、様々なCO₂排出源、輸送方法、圧入量の選択肢に対応したコスト試算が可能であることを目指している。

2.2.1. ツールの特徴と構成

当研究グループでは、専門家以外でもCCS事業コストを適切に試算できるとともに、専門家にも種々のCCSのケーススタディーに利用していただけるようCCSコスト試算ツールの開発を進めている。ツールの仕様としては、個別ケースでの試算の他に、複数ケースを一括して処理できる仕組みを備えており、ケース毎の比較検討の他、ケースを組み合わせた検討も可能である。

また、出力インターフェイスも同様に重要である。計算結果はWeb画面上に表で出力されるが、簡単にコピー&ペーストができるため、Excelや専用のグラフ作成ソフトに取込んで、自由にグラフを作成することができる。図6は本ツールからの出力を利用して、パイプラインを利用した場合と船舶を利用した場合との輸送量別、距離別のCCSコストを示した。なお、ここでのパイプラインは陸上型を想定している。

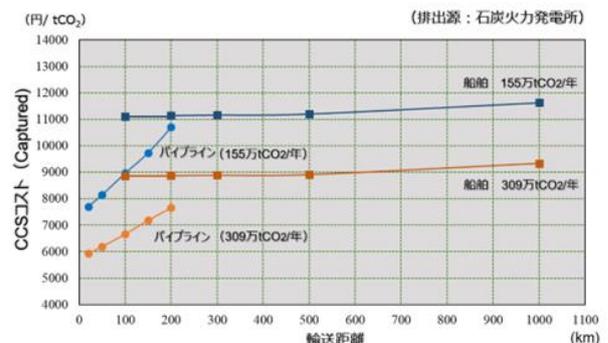


図6 パイプラインと船舶における輸送量別、距離別のCCSコスト

2)DBMS(database management system)の搭載:ユーザ別に各検討ケースにおけるデータの管理を、容易かつ安全に行うことを目的に汎用のDBMSを搭載した。また、DBMSの搭載は、インターフェイスとデータの管理部分ならびに計算エンジンとを独立させる上でも重要である。コスト試算ツールは、完成すれば一連の開発が全て終わるわけではなく、ルールの変更や追加、データの更新など継続的な保守が必要である。本ツールでは各部の独立性を高めることで保守性の向上を図っている。

3)WEBシステムとして開発:ユーザ側に特別なソフトや更新等の操作は必要なく、ブラウザだけで利用できる。また、計算は全てサーバ上で処理されるため、ユーザPCの能力やプラットフォームに影響されない。そのため、会議室でスマホやパットを利用して、特定の諸元を変えて再計算する等にも、対応が可能である。

2.2.2. 開発の進捗状況と今後の開発計画

図7に、これまでに搭載済みのモジュール(赤枠)と開発予定のモジュール(青枠)を示した。

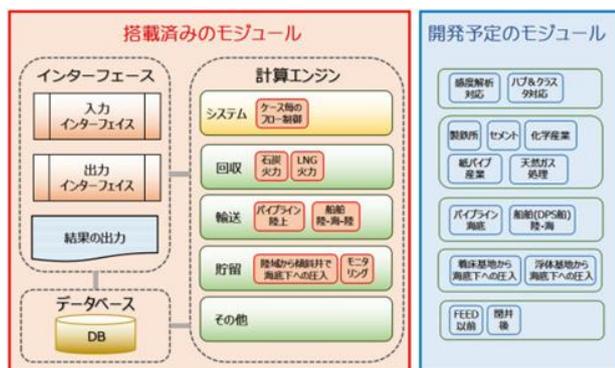


図7 これまでに搭載済みのモジュールと開発予定のモジュール

回収では、石炭火力発電所とLNG火力発電所が搭載済である。輸送では陸上パイプラインならびに、船舶輸送のうち陸から荷積みして海上を輸送し、再び陸に荷揚げするパターンの計算が可能である。貯留では陸から傾斜井で海底下にCO₂を圧入するパターンの計算ができる。今後は、図の右側に示したモジュールについて、順次作り込みを行う予定である。その中には、各工程のコスト計算のほか、感度解析やハブ&クラスターといった、基

本機能を拡張した計算機能も追加してゆく予定である。

なお、第一段階の開発(2023年度末まで)においては、CCSに要する費用の試算に特化する予定であるが、将来的にはインセンティブも考慮した経済性指標等の算出機能も搭載し、ビジネスモデルの検討にも利用できるように開発を進める計画である。

2.3. 社会合意形成(SLO)手法の開発

CCS事業を実施するには、地元を含む社会の合意が必要不可欠である。地元住民がCCSの必要性を理解し、事業を支持するために、事業者が地元住民とどのようにコミュニケーションを取るべきなのかが社会合意形成(SLO)手法の重要な課題の一つである。

事業者と地元住民のコミュニケーションという観点から見たCCS事業の大きな特徴は、一般市民のCCSに関する認知度が極めて低いということである。最近行われた認知度の調査では、「CCSを知っている」と答えた人は14%、「CCSという言葉聞いたことがある」と答えた人は42%で、半数近い人がCCSという言葉すら聞いたことがないという状況であった。このためCCS事業の初期のコミュニケーションでは、CCSの認知度を上げること、すなわち地元住民にCCSを知ってもらうことが主たる目的となる。

オランダのBarendrechtプロジェクトは地元住民の反対で中止になったCCS事業として有名である。住民の反対の要因として、手続きの公正性や信頼など、リスクコミュニケーションにおいて重要とされることがいくつも欠如していたことが指摘されている。しかし、ここで注目するのは住民がCCS(事業)を十分に理解していなかったと考えられる点である。当初、住民は利害関係者と見なされず、情報の提供が十分ではなかった。また、住民の反対が顕在化した後は、公的な情報提供が住民から「CCS派のプロパガンダ」とみなされ、住民への情報提供が十分機能しなかった。住民が十分な情報を得ていないということから、住民の反対がCCSや事業の理解に基づくものではなかった可能性が考えられる。すなわち、信頼できる人(著名人やメディアなど)や多くの人から耳にする情報を基にして反対した可能性がある。こ

のような場合には、誤った情報を基にして判断が行われることもある。実際、Barendrechtのケースでは、火山の噴火のようにCO₂が街に噴出するという現実には起こり得ない絵が雑誌の表紙になったりもしている。事業初期にCCSの認知度を高めることの重要性の一つは、CCSやCCS事業を理解した上で、事業に対する賛否を判断できる人を増やすことである。

コミュニケーションに関する文献では、事業者が一方的な説明(一方向コミュニケーション)をするのではなく、住民・市民の意見を聞き、対話すること(双方向コミュニケーション)が重要と指摘されている。しかし、これはCCS事業初期のコミュニケーションには必ずしも当てはまるとは限らない。対話の機会を作ったとしても多くの人は積極的に参加しないおそれがある。社会的な課題に対しては「自分の貴重な時間や労力を割いてまで解決に向けて協力しようとは思わない」人が多いという指摘もある。また受動的な(一方向)コミュニケーションの方が良いと感じる人もいる。双方向コミュニケーションでは、何か意見を述べなければならぬと思ひ、精神的負担が大きいと感じるということと思われる。このため、事業初期のコミュニケーションでは、一方向か双方向かよりも、参加の負担が小さく、参加しやすいことが重要と考えられる。

科学技術の普及、特に、科学技術への関心が低い人に科学技術に親しみをもってもらうための科学イベントとして、講演会や展示会、サイエンスカフェなどがある。CCS事業の初期のコミュニケーションイベントにおいても、参加の負担が小さいことからこれらの科学イベントが適している。しかし、科学イベントの多くは、その目的に反し、科学技術に関心の低い人の参加率が極めて低いことが知られている。ただし、科学イベントでも、個人的利害に関わるテーマや生活に直結するテーマであれば科学技術に関心の低い人の参加率が上がる。このことから、CCS事業の初期のコミュニケーションイベントは2種類、すなわち、科学技術に焦点を当てたイベントと生活に直結する事柄に焦点を当てたイベントを開催する必要があると考えられる。

また、参加のしやすさという観点からはイベントをオ

ンラインで行うことも効果的である。コロナ禍により、それまで対面で行われていたイベントの中には、オンラインで行われるようになったものもあるが、オンライン化により対面イベントでは参加の少なかった層が参加するようになったという報告がある。ただし、オンラインイベントは参加も気軽にできる反面、集中して見なかったり、途中で見るのをやめたりすることが起きやすいという短所もある。

なお、ここまで述べてきたのは、あくまでも事業初期のコミュニケーションであり、事業の計画が具体化していくにつれ双方向コミュニケーションの重要性が増していく。事業者が決定したことを住民に説明し受け入れてもらうということではなく、事業者は双方向コミュニケーションで住民と対話し、その結果を意思決定に反映させることが必要であり円滑な事業実施に重要となる。また、CCSやCCS事業の認知度を上げるためには、このようなイベントと並行して、事業初期からwebやSNS、パンフレットなどを使った広報活動も必要である。

当研究グループでは、住民にCCSについて説明したり、住民からの質問に回答したりする際に参照できるQA集の作成も行っている。一般市民がCCSに対して感じる不安や懸念の主たるものはCO₂の漏出と地震の誘発と言われている。そのため、QA集ではこの2つに特に重点を置いている。A(回答)は、当研究グループのこれまでの研究開発成果を含む科学的知見に基づいた内容ではあるが、予備知識が無くても理解できるような説明になるよう努めている。

住民・市民の「合意」には、CCS技術そのものを理解してもらうことが重要であり、CCS事業を行うことによるメリットを知ってもらうことも重要である。海外のCCS事業では、事業実施による投資額や雇用者数の増加について紹介している。商業規模といわれる100万トン/年程度の設備では、おおよそ1,000億円の設備投資額が見込め、雇用効果は、建設時に数千人、操業時に数十人の規模と報告されている。米国では、石炭火力発電所を廃止せずに、CCSを実施することにより、失業や地域産業の過疎化を防ぐ効果があることも示されている。当該地域では、石炭火力発電所に隣接して、炭鉱がある。

地域住民のほとんどが発電所や石炭産業に関わりを持っているため、石炭火力発電所の閉鎖は地域住民のみならず、自治体の存続にも悪影響が及ぶ。我が国においても、CO₂大量排出源である製油所、製鉄所、石炭火力発電所などの休廃止により、地元自治体の税収が激減することが懸念されている。脱炭素化のオプションとしてのCCSは持続可能な地域運用に貢献でき、地元へのメリットが十分にある。

CCSの事業化には、国内各地域の状況にあったCCSビジネスモデルを想定する必要がある。CO₂排出量を把握するために、排出源データベースを作成した。CO₂排出量は火力発電所要覧、温室効果ガス排出量算定・報告・公表制度に基づく温室効果ガス排出量の集計結果などから換算して、直接排出量として整理した。排出源データベースには位置情報を含み、地図上で示すことができる。個社では排出量が少ない場合でも、地域クラスターとして排出源をまとめることにより、ハブ&クラスター方式のCCSの検討に役立つ。排出源マップとRITEが所有するCO₂貯留地の賦存量マップを統合し、事業イメージを可視化しやすくなるよう、工夫した。さらに、港湾情報を付加したことにより、排出源から貯留地までの輸送経路を陸路のみならず航路を含めて計画することを可能にした。現在、CCSのコスト試算ツールも開発しており、経済性の観点からも、CCS実施メリットを検討できるようSLO手法をとりまとめている。