

CO<sub>2</sub>貯留研究グループ

## グループメンバー(2020年12月末)

グループリーダー・主席研究員	薛 自求	主任研究員	張 毅
サブリーダー・主席研究員	内田 堅二	主任研究員	朴 赫
主席研究員	横井 悟	主任研究員	末国 次朗
主席研究員(兼)	野村 眞	主任	淵上 聡子
副主席研究員	高須 伸夫	主任	中西 公美子
副主席研究員	中島 崇裕	研究員	孫 艷坤
副主席研究員	名井 健	研究員	三善 孝之
副主席研究員	田中 良三	研究員	小谷 雅文
主任研究員	橋本 励	研究員	永田 丈也
主任研究員	三戸 彩絵子	研究員	Amer, Rasha
主任研究員	岡林 泰広	研究員	吉川 浩人
主任研究員	利岡 徹馬	研究助手	平井 順子
主任研究員	高野 修	研究助手	辻 志織
主任研究員	内本 圭亮	研究助手	氷見 悠子
主任研究員	小牧 博信	研究助手	西出 朱美
主任研究員	指宿 敦志	研究助手	奥道 恵美
主任研究員	清水 信寿	研究助手	佐々木 恵
主任研究員	副島 勉	研究助手	佐々井 登喜男
主任研究員	渡辺 雄二		

安全な CCS 実施のための CO<sub>2</sub>貯留技術研究開発の取り組み

## 1. はじめに

CO<sub>2</sub>の発生源から分離・回収した CO<sub>2</sub>を隔離する方策として、CO<sub>2</sub>地中貯留は重要な選択肢の一つである。

CO<sub>2</sub>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、NEDO 事業「安全な CCS 実施のための CO<sub>2</sub>貯留技術の開発研究」に取り組んでいる。

本事業は、現在、CO<sub>2</sub>の大規模貯留の実用化に向けた技術開発のフェーズにある。実用化のためには、大規模な貯留層に年間 100 万トン程度の CO<sub>2</sub>を安全に圧入・貯留する必要があり、これを実現するための安全管理技術の開発、大規模貯留層の有効圧入・利用技術の開発を行っている。

これまでの取り組みにより、上記開発技術の構成要素である圧入安全管理システム、地層の安定性評価・監視技術、有効圧入技術など各種のシステムや技術が、実際の現場に適用できるレベルとなっている。

さらに、実用化に向けては、開発した技術で大規模サイトにおいて実証することが有効である。本事業においても、海外の大学や研究機関などと積極的に連携し、海

外の大規模サイトでの技術実証を進めている。

ここでは、2020 年度で技術・システムを確立した、マイクロバブル CO<sub>2</sub>圧入技術、圧入安全管理システム、CO<sub>2</sub>漏出検出・環境影響評価総合システムを紹介する。

これらについては、実用的で汎用性の高い装置・システムを構築することができた。このうち、マイクロバブル CO<sub>2</sub>圧入技術については、米国や中国での CO<sub>2</sub>貯留や石油増進回収(CO<sub>2</sub>-EOR)などへも展開する。

上記のほか、当研究グループの技術を貯留サイトで実証しているものとして、光ファイバーセンシングがある。地層のひずみを検出する独自の手法を開発し、温度、圧力、音響、そして、ひずみを同時に計測するマルチセンサー機能を実現した。これについても海外のサイトに適用し実証している。

このように、当研究グループは、それぞれの技術を発展させて実サイトに適用することで、CCS 普及促進に貢献していく。

## 2. 主な研究課題と成果

### 2.1. マイクロバブル CO<sub>2</sub> 圧入技術の確立

マイクロバブル CO<sub>2</sub> 圧入技術とは、特殊なセラミックフィルターに CO<sub>2</sub> を通して微細気泡(マイクロバブル)化し、地下に圧入する技術である。マイクロバブル化には CO<sub>2</sub> を地中貯留する上で、次の利点がある。

- ・貯留層を構成する砂岩の隙間(孔隙)に入りやすい。
- ・貯留層内に密に留まりやすい。
- ・孔隙中の水に溶けやすい。

当グループは、これらの利点を室内実験と現場試験によって検証してきた。室内実験は、岩石コア試料を対象として X 線 CT 装置を利用して実施している図 1 上部は岩石コア試料の X 線 CT 画像の例である。図の左から注入された CO<sub>2</sub> が、コア試料の 82mm の位置に到達した時点の CO<sub>2</sub> 分布を寒色から暖色への変化で示している。2 本のコア試料の 82mm までの孔隙体積は、ほぼ同じである。マイクロバブル圧入による CO<sub>2</sub> が通常圧入よりも密に孔隙を満たしており(図 1 上部)、また、CO<sub>2</sub> の圧入量と溶解量も、共に多くなる(図 1 下部)。

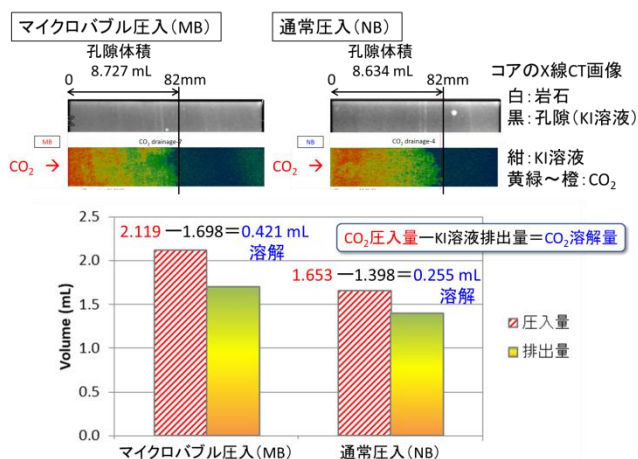


図 1 岩石コア試料を用いた  
マイクロバブル CO<sub>2</sub> の貯留効率評価

実サイトでのマイクロバブル圧入試験は、2019 年度に引き続き、秋田県男鹿市の石油資源開発株式会社申川鉱場内で現場試験を行った。CO<sub>2</sub> 圧入対象層は地下約 800m にある低浸透性の砂岩層である。2020 年度は、マイクロバブル CO<sub>2</sub> 発生装置の坑内設置作業の効

率化を図るため、パッカーより下のシステム全長を 2019 年度の 84m から 14m へと 1/6 に縮小した(図 2)。設置・回収に伴う作業時間は 15 時間から 4 時間へと約 1/3 に短縮できた。

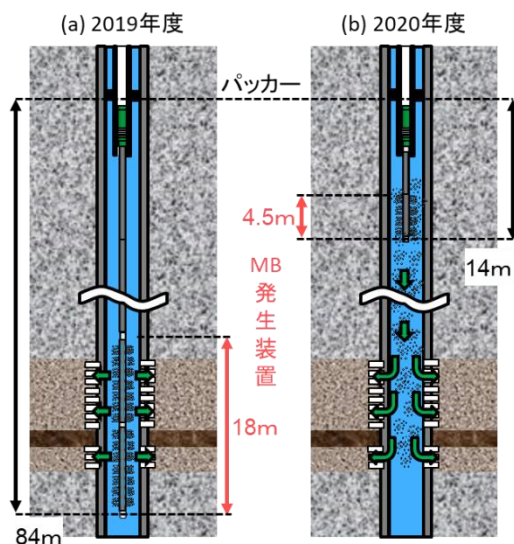


図 2 マイクロバブル(MB)発生装置の設置モード

システムの短尺化により、マイクロバブル発生装置本体の長さは 18m から 4.5m になった。また、マイクロバブルが発生する深度は、圧入対象層付近(図 2a)から浅くなった(図 2b)。このような設置条件で、2019 年度と同等のマイクロバブル CO<sub>2</sub> の圧入効果が発揮できるか検証した。マイクロバブル CO<sub>2</sub> の圧入レートは 2019 年度と同じ 1.5 トン/日である。坑口圧は 8.4MPa であった。坑底圧は 8.8MPa から 14.9MPa に上昇し、その後一定圧力で圧入できた。1MPa あたりの CO<sub>2</sub> 圧入レートを示す CO<sub>2</sub> 圧入指数は 0.25 トン/日/MPa であり、2019 年度の 0.36 トン/日/MPa とほぼ同じであった。マイクロバブル発生装置の設置条件が変わっても、通常圧入法の 0.09 トン/日/MPa よりも多くの CO<sub>2</sub> を圧入できることが確認できた。また、CO<sub>2</sub> 貯留率も高く、2019 年度と同等の 82.9% であった。

一連の現場試験により、短尺のマイクロバブル発生装置の有効性ならびにその設置効率の向上が確認できた。これにより、本システムの製作や設置回収作業に関するコストの削減に大きく貢献できる。

2008 年に東京ガス株式会社と共同で基礎研究に着

手したマイクロバブル CO<sub>2</sub> 発生技術は、「貯留物質の貯留装置および貯留方法」として特許(特許第 5399436 号)も取得している。室内試験と現場での実証試験を経て、マイクロバブル CO<sub>2</sub> 圧入の技術を確立できた。2021 年以降は、実用技術として米国ノースダコタ州での CO<sub>2</sub> 貯留や中国君倫石油との CO<sub>2</sub>-EOR 等、実適用を通して、本技術の普及・展開を図っていく。

## 2.2. 圧入安全管理システム(ATLS)の完成

様々な流体圧入プロジェクトにおいて、地層内圧力の増加に起因する地震の誘発が懸念されている。そのため、鉱廃水圧入プロジェクトや高温岩体地熱発電(EGS)では、サイト周辺の振動イベント発生状況を基に、操業を管理するトラフィックライトシステム(Traffic Light System)が利用されている。これまで CO<sub>2</sub> 地中貯留サイトでは、マグニチュード 1.1 以下の微小振動しか報告されていないものの、CO<sub>2</sub> 地中貯留事業においても誘発振動活動に対するリスクマネジメントが必要である。

当研究グループでは、我が国の実情に適した CO<sub>2</sub> 地中貯留のための圧入安全管理システム(ATLS: Advanced TLS)の開発を行ってきた。その要件としては、

- (1) 自然地震が多く、人為的ノイズも大きい観測データから微小振動イベントを抽出できること
  - (2) 微小振動イベント位置が決定可能なこと
  - (3) 自動でリアルタイムのデータ処理が可能なこと
- などが挙げられる。これらを満たす管理システム構築のために、CO<sub>2</sub> 貯留サイトで実観測を行っている苫小牧実証試験サイトの観測データを利用して研究開発を行ってきた。図 3 に ATLS の処理フロー概要を示す。地震観測データ入力後、イベントピック、位置決定を自動的に行う。同時に気象庁一元化震源情報を取得し、遠地の自然地震を排除した微小振動カタログを作成する。さらにイベントのマグニチュードと位置から判定を行う。

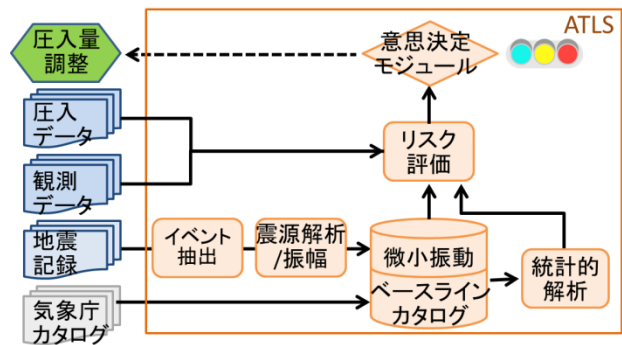


図 3 ATLS 概要図

ATLS は苫小牧サイトでの 2 年以上の長期間の連続観測データに対しても、自動的に信号処理および圧入地点近傍の微小振動イベントの位置決定が行えることを確認した。ATLS の出力(レポート)イメージを図 4 に示す。この図では監視対象区域内の微小振動発生頻度・イベント位置、およびそれらから判定されたトラフィックライトの色が示されている。

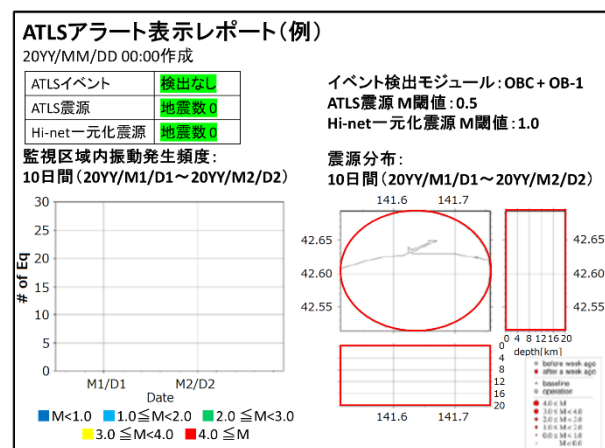


図 4 ATLS 出力例

これらの ATLS の基本機能に加え、様々なサイトにおいても本システムを適用できるように、補助的なツールの開発も行った。まず観測点設置に係わるツールとして、具体的な地震計配置と仮想イベント発生位置を指定した場合に、観測データからイベント位置推定を行うものを整備した。これは ATLS と同じ、平田・松浦(1987)による震源決定プログラム hypomh を活用したものとなっている。本ツールにより、どのような地震計配置がよい

のか、および観測網でのイベント位置決定精度の評価が行える。

また、入力データフォーマットを変換するツールを開発した。これまでの ATLS では苫小牧実証試験サイトに特化し、SEGD 形式のデータのみを対象としていた。この形式以外に、一般的な自然地震観測でも使われている、mini-SEED 形式と ASCII 形式のデータも取り扱えるようにした。

これらの改良を行った結果、実際の我が国の CO<sub>2</sub> 地中貯留サイトで動作検証され、かつ他のサイトでも適用可能な汎用性のある圧入安全管理システムが完成した。

SEGD 形式：地震探査学会 (Society of Exploration Geophysicists, SEG)が開発した地震データファイルの形式のひとつ。

mini-SEED 形式：地震データ交換標準 (The Standard for the Exchange of Earthquake Data, SEED)に則った地震データファイルの形式。時系列データを含む。

ASCII 形式：米国規格協会によって定められた文字コード (American Standard Code for Information Interchange)によるテキスト形式

### 2.3. CO<sub>2</sub> 漏出検出・環境影響評価総合システム

CO<sub>2</sub> 地中貯留において、貯留サイトの選定は、CO<sub>2</sub> が安全かつ安定的に貯留されるように慎重に行われるため、貯留した CO<sub>2</sub> が漏出するおそれは極めて小さいと考えられている。しかし、万が一の漏出に対する社会的な懸念を考えると、環境を監視することは重要である。また、海底下に CO<sub>2</sub> を貯留する場合には、法令により、漏出を仮定した環境影響評価をすることや、漏出やその兆しが生じていないか監視することが定められている。そこで、当研究グループでは、これまで海洋環境影響評価手法と監視手法の研究開発を行ってきたが、2020 年度にその成果を CO<sub>2</sub> 漏出検出・環境影響評価総合システムとしてまとめた。ここでは、環境影響評価手法と監視手法の概略を紹介する。

海洋環境影響評価手法は、仮定した CO<sub>2</sub> の漏出によ

り、海水中の pCO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub> 濃度の指標の一つ)が、どの範囲でどれだけ上昇するのかを推定し、その pCO<sub>2</sub> 上昇幅 ( $\Delta pCO_2$ )により、どんな生物がどんな影響を受けるかを示すものである。海に漏出した CO<sub>2</sub> は海の流れにより拡散されるため、海洋モデルを用いたシミュレーションで  $\Delta pCO_2$  の分布を計算する。 $\Delta pCO_2$  の計算のためには数 10km~100km 程度の領域を計算すればよい。また、CO<sub>2</sub> を拡散させる海の流れは数 100km スケールの気象や海岸・海底地形の影響を受けて生じる。しかし、数 100km の領域を高解像に計算するのは効率が悪いため、当グループでは、 $\Delta pCO_2$  の分布の計算に用いるのは別の低解像のモデルで数 100km の領域を計算し、そのデータを利用することで適切な流れを再現し  $\Delta pCO_2$  の分布を計算できるようにした。一方、 $\Delta pCO_2$  の生物影響を調べた研究、論文は多いが、そのデータがまとまった形になっておらず、シミュレーションによって得られた  $\Delta pCO_2$  の値がどんな生物にどんな影響を与えるのかを調べるのは容易ではない。そこで当研究グループでは、データベースを構築し、 $\Delta pCO_2$  の値と生物の影響の対応関係を容易に抽出できるようにした。構築したデータベースに生物の条件(分類群、生息域など)を入力すると、その条件に合った生物がどの程度の  $\Delta pCO_2$  でどんな影響を受けるのかが出力される。この出力データとシミュレーションで得られた  $\Delta pCO_2$  の分布を組み合わせることで、どの範囲で、どんな生物種が、どんな影響を受け得るかを推量することができる。

漏出が生じていないかの監視は、CO<sub>2</sub> が貯留される地層(貯留層)から海中まで対象が広範囲に及ぶ。貯留層は海底下 1km 以深にあるため、当研究グループの行った計算によれば、CO<sub>2</sub> が貯留層から漏れ出たとしても、真上の海底までの移動には 5 年以上かかる。また、貯留層から海底までの CO<sub>2</sub> の移動経路は地層の状況によるため、必ずしも貯留層の真上の海底から CO<sub>2</sub> が漏出するとは限らない。このようなことを勘案し、当研究グループでは、以下の手順で監視を行うことを提案する。まず、貯留層やその周囲の地層の監視をしっかり行う。そして、貯留層から CO<sub>2</sub> が漏れ出ていることがわかれば、

CO<sub>2</sub> が海底に到達するまでの間に地層内の詳細調査を行い、海底のどの辺りから漏出し得るか、範囲の絞り込みを行う。最後に、その絞り込んだ範囲を対象に海中を監視する。

海中での監視に関しては、漏出シグナルの検出手法の研究開発も行った。海中での漏出シグナルとしては、漏出 CO<sub>2</sub> の気泡と漏出 CO<sub>2</sub> の海水への溶解による CO<sub>2</sub> 濃度上昇の 2 種類が考えられる。気泡の検出にはサイドスキャンソナー (SSS; 音響探査機器の一種) が有効と考え、SSS の CO<sub>2</sub> 気泡検知能力を明らかにするための実験を行った。海域で海底から CO<sub>2</sub> 気泡を放出し、SSS で検出できるかどうか、条件を変えて繰り返し調べる実験である。この実験により、SSS は 2~4 トン/年以上の漏出速度の CO<sub>2</sub> 気泡を検出できることや、監視時の測線間隔は SSS の高度 (海底から SSS までの距離) 以内にしなければならないことなどを明らかにした。なお、4 トンの CO<sub>2</sub> は、10 人の人が呼吸で一年間に排出する量に相当する極めて少量の CO<sub>2</sub> である。一方、CO<sub>2</sub> の濃度上昇シグナルの検出のためには、pCO<sub>2</sub> の異常値の検出に関する研究を行った。CO<sub>2</sub> はもともと海水中に存在し濃度が自然変動するため、pCO<sub>2</sub> の上昇が自然変動によるのか (正常値)、漏出によるのか (異常値) を区別するのが難しく、異常値判定基準をどのように設定すればよいかは課題である (図 5)。当研究グループでは、pCO<sub>2</sub> と溶存酸素 (DO) の相関関係を用いた異常値判定基準 (pCO<sub>2</sub>-DO 法) を考案した。まず、大阪湾の 9 年間の四季調査データ (1 観測点につき 1 季節 1 データ) の解析により、pCO<sub>2</sub> の変動が大きい海域や夏季は、pCO<sub>2</sub> の値だけで設定した異常値判定基準よりも、pCO<sub>2</sub>-DO 法の方が精度よく異常値の検出ができることや、適切な基準を設定するためには少なくとも 5 年程度以上のデータを用いる必要があることを示した。次に、1 年以上に渡る pCO<sub>2</sub> や DO などの連続観測を行い、夏季の大阪湾奥部では pCO<sub>2</sub> の変動が大きく、場合によっては、観測時刻が数時間異なるだけでも pCO<sub>2</sub> の値が大きく異なりえることを明らかにした。一年を通じたデータが得られたことにより、pCO<sub>2</sub>-DO 法では、偽陽性 (自然変動を異常と誤判定) の生じやすさが季節に

よって異なり得ることもわかった。センサーを用いた観測の場合には、センサーの応答時間を考慮して相関関係を計算する必要があることもわかった。このように、pCO<sub>2</sub> と DO の相関関係を用いた pCO<sub>2</sub> 異常値検出基準について、実際の運用で重要となる様々な特徴を明らかにできた。一方で、漏出 CO<sub>2</sub> は海の流れにより拡散されやすいことや、同じ点から漏出しても流れの向きや漏出率によって pCO<sub>2</sub> の高くなる範囲が変わり得ることなどから、漏出による pCO<sub>2</sub> の異常値を捉えるには、時間的・空間的に密な観測が必要となる。そのため、当研究グループでは、pCO<sub>2</sub> や pH などの CO<sub>2</sub> 濃度指標の観測は漏出を検出するためではなく、環境影響の有無を確認することに用いるのが適切と考えている。

得られた研究成果は事例集に組み込み、今後の海底下 CO<sub>2</sub> 貯留実用化において有効に活用されることを期待している。

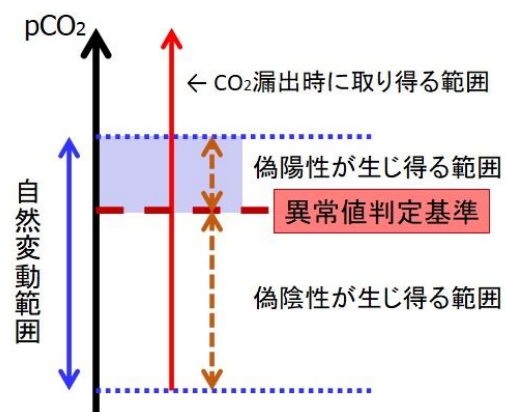


図 5 pCO<sub>2</sub> 異常値判定と偽陽性、偽陰性の関係

#### 2.4. 先進技術開発による世界への貢献

世界各国では、大規模な CO<sub>2</sub> 貯留プロジェクトが進行している。ノルウェーの Snøhvit、カナダの Quest、豪州の Gorgon の各プロジェクトなどであり、いずれも年約 100 万トンの CO<sub>2</sub> 貯留が実現されている。

大規模 CO<sub>2</sub> 貯留で、世界各国が先行する中で、我が国が世界各国と対等に連携し、CCS の普及促進を先導していくには、核となる独自技術の提供で世界に貢献していく必要がある。

その一つが、前述したマイクロバブル CO<sub>2</sub> 圧入技術である。当該技術の適用により、流体の浸透性が必ずしも

良くない地層においても、CO<sub>2</sub>の貯留効率を高めることができる。そのため、CO<sub>2</sub> 供給点近傍立地など、貯留地点選定の選択肢を高め、世界の CCS 普及促進に貢献することが可能となる。さらには、2018 年より中国君倫石油と共同開発を進めている低浸透性の油田での油の増産を実証し、CO<sub>2</sub>-EOR への貢献も強化する。

もう一つが、光ファイバーセンシング技術である。地下の温度や圧力のモニタリング技術として、石油分野等ですでに適用が進んでいるが、当グループは光ファイバーにより地層のひずみを検出する独自の手法を開発し、温度、圧力、地震、そしてひずみを同時に計測するマルチセンサー機能を実現、実証した。

当該技術は、世界から高い関心を集めている。例えば米国ノースダコタ州立大学エネルギー・環境研究センター(EERC)と、実際の CCS サイトで共同実証試験を実施している。米国側は CO<sub>2</sub> 貯留サイトの地層安定性や CO<sub>2</sub> 挙動把握が可能となる一方、日本側は、大規模 CO<sub>2</sub> 貯留サイトで、光ファイバー計測技術の検証や施工技術の改良を図れるなど、相互にウィンウィンの関係を構築している。

また、海底下地中貯留の安定性を検証する欧州の SENSE プロジェクトにおける海底面の挙動監視への適用、さらには、アジア各国で計画されている CO<sub>2</sub> 貯留プロジェクトでの適用など、実証や活用の方が広がっている。

我が国の温室効果ガス排出を 2050 年までに実質ゼロにする目標を実現するには、世界各国と協調した CCS の普及促進が不可欠である。新技術開発やその活用のコンサルティング等で貢献する RITE、CO<sub>2</sub> 貯留研究グループの今後の活動にぜひ注目いただきたい。