

CCSにおけるモニタリング技術と その特徴

2025年4月

日本CCS調査株式会社

序

CCS事業においてCO₂の地中貯留を行うためには、準備段階におけるベースライン調査に始まり、CO₂圧入操業期間はもとより、圧入操業終了後も一定の条件を満たすまでの間、長期にわたる圧入状況等のモニタリングが必要となります。

日本CCS調査株式会社（JCCS）は、「苫小牧におけるCCS大規模実証試験」（実証試験）を国等より受託・実施するに際し、解決すべき技術課題等を検討することを目的とした「苫小牧CCS実証試験に係わる課題検討会」（課題検討会）を設置して、有識者の助言を得てきました。地層圧モニタリングに関しても、課題検討会における助言・確認を頂きながら、準備段階から30万トン圧入を達成した後の現在に至るまで約12年間継続的にモニタリングを実施しています。

そうした中、国によるCCS長期ロードマップの策定、CCS事業法の制定、先進的CCS事業の選定等、CCSの社会実装に向けた動きに呼応して、2021年に課題検討会の下部組織として「将来のCCS社会実装を見すえたあるべきモニタリングに係る分科会」（モニタリング分科会 2021年度～2023年度）をJCCS内に設け、苫小牧実証での経験を基に海外の動向調査結果等も踏まえて、我が国におけるモニタリングのあるべき姿を検討し取りまとめを行いました。その概要については、第2回カーボンマネジメント小委員会（2023年11月6日資料4）においても、あるべきモニタリングの姿「提案骨子」という形でお示ししています。（https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shigen_nenryo/carbon_management/pdf/002_04_00.pdf）

これに加えて今般、「モニタリング技術とは何か」「モニタリングによって何がわかるのか」ということを、あらためてより多くの方に理解していただくことを目的として、小冊子「CCSにおけるモニタリング技術とその特徴」を作成しました。

本小冊子は、専門的な用語に馴染みのない方にも理解しやすいように可能な限りわかりやすく短くまとめており、企業意思決定者や、政策決定者をはじめ、広く一般の方々にも役立つガイドとなることを目指しています。

より専門的な内容につきましては、すでに二酸化炭素地中貯留技術研究組合から「CO₂地中貯留技術事例集」の一部が発行されていますので、そちらをご覧くださいいただければと存じます。

なお、本冊子の作成にあたっては、課題検討会とモニタリング分科会の有識者委員、ならびに所属機関の方々にご助力をいただきましたことに、この場をお借りして御礼を申し上げます。

はじめに

序……3

もくじ……4

基本編

CCSとは……5

モニタリングの目的……7

モニタリング手法の概要……9

技術解説編

1 | 温度・圧力計測技術【温度・圧力】……13

2 | 微小振動計測【微小振動】……15

3 | 光ファイバーによる計測技術【CO₂挙動把握】【操業状況の把握】【坑井の健全性把握】……17

4 | 坑井検層技術【CO₂挙動把握】【漏洩監視】【坑井の健全性把握】……19

5 | 弾性波探査【CO₂挙動把握】……21

6 | 重力探査、電気/電磁探査による計測技術【CO₂挙動把握】……24

7 | 地層水分析【地層水・地下水の性状】……26

8 | 地表変位計測【地表変位】……28

9 | 環境モニタリング【環境】 Environment/海洋環境……30

10 | 音響探査【環境】 Environment/海洋環境/気泡……32

11 | シミュレーション【CO₂挙動把握】……34

12 | 機械化（無人化）への対応【環境】 Environment/海洋環境……36

おわりに

合理的なモニタリングの考え方……38

苫小牧CCS実証試験に係わる課題検討会 有識者委員一覧……39

参考資料……39

CCSとは

CCS (Carbon dioxide Capture and Storage) とは、「二酸化炭素回収・貯留」技術のことです。地球温暖化対策が急がれる今、世界ではすでに多くの大規模CCSが稼働し、日本でも事業化に向けた環境整備が進んでいます。



地球温暖化対策の切り札

CCSは、二酸化炭素を分離・回収して地中深くに封じ込める技術です。工場や火力発電所、製油所などから大気中に出される二酸化炭素を大幅に減らすことができるため、地球温暖化対策の切り札として注目されています。

今、多くの国が2050年カーボンニュートラル（二酸化炭素など温室効果ガスの排出量と吸収量を均衡させて、実質的に排出量をゼロにすること）を目指しています。しかし、化石燃料を今すぐ他のエネルギーに切り替えることはできませんし、二酸化炭素を出さない工程に変えることが難しい産業もあります。そうすると、化石燃料を使いながら急速に進む地球温暖化を抑止しなければならず、その対策が急がれます。そのため、二酸化炭素を直接的に削減できるCCSに、大きな期待が寄せられているのです。

CCSのしくみ

二酸化炭素を封じ込める場所は、地下およそ1000メートルから3000メートルの地層です。砂岩のようにすき間が多く二酸化炭素が入りやすい「貯留層」と、その上を覆う二酸化炭素を通さない「遮へい層」が必ずペアになっていることが条件となります。遮へい層は粘土のように細かな粒子が固まった層で、二酸化炭素が漏れないよう蓋の役割を果たします。できるだけ多くの二酸化炭素を封じ込められるように、なるべく貯留層が厚く、そして広く分布している場所を選ぶのが理想的です。

CCSでは貯留層まで井戸を掘り、工場などの排ガスから分離・回収した二酸化炭素に圧力をかけて送り込みます。これを「圧入」、そのための井戸を「圧入井（あつにゅうせい）」といいます。このとき、地中の圧力と温度を利用して、二酸化炭素の体積を地表の約300分の1として貯留します。

石油・天然ガス開発の技術を応用

「二酸化炭素を地中に入れる」という技術自体は新しいものではなく、油田開発で以前から利用されています。すでに1970年代から、二酸化炭素を地中に入れて石油を回収する手法（石油増進回収：EOR）が使われていました。

また、貯留層と遮へい層がペアになっている条件は、油田やガス田も同じです。そのため、石油を見つける技術をCCSに適した場所を見つけることに応用できます。他にも、圧入井を掘る技術、二酸化炭素を圧入する技術、高圧のガスをパイプラインで輸送する技術なども油田開発の技術に似ています。

こうして、石油・天然ガス開発で培われたさまざまな技術を応用し、そこに新しい技術も加わって、世界各地でCCS事業が行われています。

事業化が加速する世界の動き

1996年に、世界で初めてCCSを事業化したのはノルウエーの石油会社です。きっかけは、ノルウエー政府が二酸化炭素の排出に炭素税をかけると決めたことです。そのため、スライプナーというガス田で天然ガスから分離した二酸化炭素を地中に圧入し戻したのが始まりです。

その後、欧州各国をはじめとした炭素税の導入、2015年COP21でのパリ協定の採択、アメリカでは二酸化炭素回収のインセンティブとして「45Q」という税控除制度ができるなど、一気にCCS事業化の流れが加速していきました。現在では、アメリカ、カナダ、ヨーロッパなどで、多くの大規模CCS事業が稼働しています。

事業環境の整備に向けた日本の動き

日本ではこれまでに、新潟県長岡市でCO₂圧入実証実験、北海道苫小牧市でCCS実証試験を行っています。長岡では2003～2005年に1万トン、苫小牧では2016～2019年に30万トンの二酸化炭素を圧入し、CCSが安全で安心なシステムであることを実証しました。

さらに最近は、CCSの事業化を促す動きが活発になっています。2023年3月には、経済産業省が「CCS長期ロードマップ検討会」の最終とりまとめを公表。その具体的なアクションの一つとして、2030年までの事業開始を目指し、独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構（JOGMEC）が9件の「先進的CCS事業」を選定しました。さらに、2024年5月の国会で『二酸化炭素の貯留事業に関する法律（CCS事業法）』が成立し、公布されています。

このように、CCSを新しい産業として日本に根付かせるための環境整備が着々と進んでいます。目安は、2050年までにCCSで年間1.2億トン～2.4億トンの二酸化炭素を削減することです。CCS事業が本格化すれば、2050年のカーボンニュートラル実現へと大きく前進することになるでしょう。

モニタリングの目的

CCS事業では操業準備段階から操業終了後まで、長期にわたるモニタリング（監視）が必要となります。二酸化炭素が安全に貯留されていることを、データをもとに管理すると同時に、確認した内容を分かりやすく説明し、地元の理解を得ることも非常に重要です。



なぜモニタリングが必要か

CCS事業を行ううえで、最も優先されるのは安心・安全です。CCS事業は数十年という長期にわたるものであるため、モニタリングによってきちんと監視をしながら操業し、得られたデータを規制当局や地元住民等のステークホルダーと共有することが求められます。モニタリングが必要な主な理由として、次の3つが挙げられます。

〈モニタリングが必要な理由〉

- 1) 計画通り二酸化炭素を貯留できていることを示すため
- 2) CCS事業が法律に則って安全に行われていることを示すため
- 3) 地元住民などステークホルダーの理解を得るため

地元の理解を得るために

二酸化炭素を安定して地中に貯めておくには、地下の構造がカギとなります。CCSの場所を選ぶISO（国際標準化機構）などの国際基準があります。具体的には、貯留層の上に遮へい層があること、近くに大きな断層がないこと、過去に大きな地震が起きていないことなどです。

これらの基準を満たす場所を選んでいるので、実際に二酸化炭素を地中へ圧入しても、これに伴う地震の発生や二酸化炭素の漏れなどのリスクが非常に小さいことは、国内外の事例で確認済みです。

それでも、一般的には人はよく分からないものを不安に感じ、理解できるものは受け入れやすい傾向があります。今はまだCCSそのものが日本の社会では広く知られていないため、当然、不安を感じる人が多いのかもしれませんが、だからこそ、安全であることを分かりやすく説明することが何より重要です。CCSについて一般市民の方に意見を聞くと、不安材料として次のような項目が挙がります。

- 1) 二酸化炭素が漏れ出てくることはないか？ もし漏れていたら、それが分かるのか？
- 2) 地中のどこに、どれだけの二酸化炭素があるか正確に分かるのか？
- 3) 二酸化炭素を地中に圧入することで地震が起きないか？

地元の理解と協力を得るためには、上記の項目をモニタリングで調査し、不安を解消することが重要になってきます。見えない地下を調べる技術があること、圧入した二酸化炭素が漏れていない状態をしっかりと監視していること、さらにデータをもとにして科学的に正しく伝えること。そうした取り組みを通して地元の理解を得ることが、安定した操業の土台となるでしょう。

CCS事業が安全に行われていることを示すために

具体的に、3つのカテゴリーに分けてご説明します。

1) 操業状態（二酸化炭素の圧入が安全にできているか）

二酸化炭素を地中に送り込む井戸や装置など、圧入システムに不具合がないかどうかを監視します。また、操業が始まると圧入井の近くの地層の圧力が高くなるため、圧力・温度・振動などに想定していない変化が起きていないかを監視します。

2) 貯留状態（二酸化炭素が貯留層に留まっているか）

送り込んだ二酸化炭素が貯留層の想定した範囲に貯まっているか、さらにそれがどの程度、遮へい層の中に入り込んでいるか、また断層の近くへ移動していないかを監視します。また漏れにつながるような変化がないかを注意深く監視します。

3) 環境（生活圏の環境へ悪影響がないか）

二酸化炭素が地表や海中に漏れ出すことがないか、もし漏れ出した場合はどういう影響があるのかを監視します。そもそも適切な施設（サイト）を選んでいるので、生活圏に漏れ出すこと自体ほぼ考えられませんが、事業の安全性を高めることや社会的な関心に対応するために必要となります。

「漏洩（ろうえい）」と「漏出（ろうしゅつ）」は別もの、その違いとは

CCSのモニタリングにおいて、漏洩と漏出は分けて考える必要があり、重要な意味を持ちます。

- ・漏洩＝あらかじめシミュレーション等で想定した貯留域外の地中に、二酸化炭素が移動すること
- ・漏出＝二酸化炭素が人々の利用する地下水に入ったり、地上や海に出たりすること

もし漏洩が見つかった場合、それが漏出に至るまでには数年から数十年かかると考えられます。つまり、現実的には漏出の原因となる漏洩のモニタリングを行い、漏洩の恐れがあると分かった時点で適切な手を打てば、漏出に至る前に、問題に対処することができると考えられています。このように漏洩と漏出をきちんと区別して対応し、事前に漏洩という黄色信号を見つけることが最も有効であり、漏出のモニタリングは“必要になったときに念のためにするもの”と考えることができます。

モニタリング手法の概要

地中深くの見えない場所を見るために、実際にどのようなモニタリング技術があるのか、また、得られたデータに基づいて対応や説明ができると、事業者やステークホルダーにどのような利益があるのか、代表的な手法や事例をご紹介します。



温度・圧力からさまざまな状態を読み取る

CCSのモニタリングで極めて重要な項目に、温度・圧力があります。圧入井や貯留層の温度・圧力を調べることで、さまざまな状態を読み取ることができます。

例えば、もし想定されていた圧力が大きく下がれば、どこからか二酸化炭素が漏れている可能性があり、反対に圧力が上がりすぎれば、遮へい層の破壊につながる恐れのあることが分かります。その場合は、圧入を止めてみて漏れている原因を推定し、井戸自体にトラブルはないか、遮へい層を守るため圧入する量を調節するなど、大きな問題となる前に対処することができます。

井戸を使って地下の状況を知るさまざまな手法

井戸周辺の地下の状況を調べるには、圧入井に温度センサーや圧力センサー、地震計などさまざまな観測機器を設置して連続的に観測する方法があります。一方で、必要に応じて井戸に観測機器を降ろし、少しずつ引き上げながら、井戸の壁に亀裂など二酸化炭素の通り道はできていないか、また井戸周辺の地層のようすはどうなっているかなど、詳細なデータを集める方法もあります。

最近では、井戸周辺の状況を連続観測する方法として光ファイバーセンシング技術が注目されています。井戸を掘る工事と同時に光ファイバーの観測機器を設置すれば、長期間にわたり、温度、ひずみ、振動などのデータをリアルタイムに得ることも可能となり、モニタリングの手間とコストを大幅に抑えることができるため、本格的な実用化が期待されています。

その他、リモートセンシングにより、地下の圧力によって地表が押し上げられて変形していないか、井戸の近くで二酸化炭素濃度を直接測り、井戸に沿って生じた漏出の有無を調べる方法もあります。

弾性波探査で地下を調べる

直接目にするのことができない地下の地層の状況を知るための技術が弾性波探査です。この技術は、CCSに適した地層を探したり、さらに詳しく地層にどのくらいの量の二酸化炭素が貯留できるかを判定したりすることにも使われます。また、弾性波探査では事前調査で「圧入を開始する前（ベースライン）

のデータ」と、事業が始まってからモニタリングで得た「実際に圧入が始まった後のデータ」を比較することで、地下の変化を監視することができます。

弾性波探査のしくみは、病院で使われる超音波エコー診断や3D-CT検査に似ています。音波の反射によって体の内部を見るのと同じ原理で、地層の断面を見たり（2D（2次元）弾性波探査）、地下を立体的に見たり（3D（3次元）弾性波探査）することができます。

この弾性波探査によって、二酸化炭素が貯留層にきちんと留まっているかが分かり、時間をおいて繰り返し調べることでその二酸化炭素がどう動いていくかを予測することができます。

二酸化炭素がどう広がっているか

貯留層はガラス容器のように外部から完全に隔離された場所ではないため、圧入された二酸化炭素は、圧入井の底からもやもやと貯留層（砂層）の中に広がっていくイメージです。そのとき同心円状にきれいに広がるのではなく、すき間の多いところ入りやすいところにいびつに流れていくことになります。弾性波探査により、二酸化炭素を貯めやすい場所が予想された範囲内に広がっているかが明らかになれば、安心してCCS事業を継続することができます。

弾性波探査の費用（コスト）

CCS事業に欠かせない弾性波探査ですが、非常にコストがかかります。とくに事業を開始する前に行う最初の貯留適地調査（基礎調査）やサイトの特性評価は、調査範囲にもよりますが、数億円以上と高額になります。しかし、その後のモニタリング（確認調査）では、目的によってはもっと小規模な調査で済ませることもできます。

モニタリングのコストは、沖合か、沿岸か、陸上かなど、場所によって大きくも変わりますが、範囲を限定したり、2D探査にしたり、頻度を少なくしたりすれば、安価に収められるケースもあり、経済的に合理的な範囲でモニタリングを計画することができます。

“保険”としてのモニタリング

モニタリングは、事業者や地元住民を守る“保険”の意味もあります。例えば、もし二酸化炭素が漏出してしまうと、地元住民に迷惑をかけるだけでなく、その処理に莫大な費用がかかるうえ、漏出事故として社会的なダメージを負うことにもなりかねません。

しかし、そうなる前に漏洩の有無を監視して適切な対処をすれば、少ない費用で処理でき、地元との信頼関係も保たれます。もし漏洩を発見したとしても、圧入を停止したり、圧力を下げる等の対処で漏出事故は避けられます。

このように、モニタリング費用を“保険”と考えることで、さまざまなメリットを得ることができます。

地震誘発への関心

日本は地震が多いため、CCSによって誘発地震が起きないか、地震で二酸化炭素が漏れないか、に強い関心が寄せられています。

世界初の大規模CCS事業であるスライプナー（ノルウエー）を見てみると、すでに27年経っていますが誘発地震は起きていません。そして、苫小牧CCS実証試験のサイトでも、二酸化炭素の圧入後も貯留層の圧力がほとんど変化していないことが分かっています。そして、現在までに誘発地震が一度も観測されていません。

加えて、日本のCCS事業が対象とする地層は、海外に比べて誘発地震が起きにくいとされています。その理由は、日本の貯留適地の地層は相対的に割れにくく、伸び縮みするような、比較的新しい時代の地層を対象にしているからです。二酸化炭素を圧入しても割れずに変形するため、地震が起きにくいともいえます。

他方で、日本列島とその周辺は複数のプレート境界に位置しています。貯留適地選定は活断層を避けなければなりませんから、海外との比較でいえば、対象地域の選定はより重要となってくるでしょう。

2018年9月6日には北海道胆振東部地震（マグニチュード6.7）が発生し、苫小牧CCS実証試験センターも震度5弱の揺れに見舞われました。その際も地上設備に異常はなく、また貯留層の温度・圧力のモニタリングにより、地中の二酸化炭素は漏洩していないことが確認できました。加えて、モニタリングで蓄積したデータやCO₂挙動シミュレーションを示すことにより、二酸化炭素の圧入が地震の原因ではないことを、地元住民などステークホルダーに理解していただくことができました。

海洋を対象としたモニタリング

もう一つ、社会的な関心が高い環境への影響について、苫小牧CCS実証試験の例をご紹介します。苫小牧は漁業が盛んなため、「弾性波調査で出る音や振動で魚が減ってしまうのではないか」「二酸化炭素が漏れて海が酸性になり、魚や甲殻類が死んでしまうのではないか」と心配する方もおられました。そこで、ホッキ貝などの生物、海水、海泥などをとって調査したり、無人探査機で海を観察したりしました。その結果、二酸化炭素が漏れていないこと、生物への影響はないことが確認できました。

このような海洋環境調査による環境影響評価は、季節や海流などによる自然変動の影響が大きいため難しい面があります。苫小牧の場合は事業ではなく実証試験のため、手厚くモニタリングを行い、その結果から、本当に必要なモニタリングと除外してもよいモニタリングを見極める目的もありました。

その結果、自然変動の影響を大きく受ける海洋環境調査は、漏出を常時観測する手段としては不向きであるという結論が得られています。海洋環境の調査は必要に応じていつでも監視できることを地元理解してもらい、漏洩を事前にチェックすることによって、漏出の有無を調べるための海洋環境調査は、多くの場合、通常のモニタリングから除外することが可能と考えられます。

CCS施設閉鎖後の管理

CCS事業では、二酸化炭素の貯留量が目標に達すると、圧入を停止して施設（サイト）を閉鎖します。その後も、貯留した二酸化炭素が漏洩しないようにモニタリングを続ける必要がありますが、永久的な管理を民間事業者に求めることは困難なので、一定期間の後の保安管理を、独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構（JOGMEC）に移管することなどが考えられています。

モニタリング技術とその特徴

個々のモニタリング技術を説明するにあたり、その対象と技術を、日本のあるエリアにおけるモニタリングを想定して説明します。

日本における想定モニタリングプラン（エリアA）

日本の沿岸域・沖合・断層に囲まれた地域・陸域等のエリアでCCSを行う場合、その具体的な場所によって最適なモニタリングはそれぞれ異なります。ここでは代表的なエリアとして「エリアA」を仮定し、標準的なモニタリングについて、いつ、どのような技術をどこに適用して行うかを具体的に例示しました。「エリアA」は、苫小牧のように陸域から沿岸域海底下にCO₂を貯留するような地域と仮定します。

| 対象 | 項目 | 適用技術・計測 | 圧入前 (必要な期間) | 圧入中 | | 圧入 停止後 | 移管 または 廃坑後 | |
|------------------------------|---|-------------------|----------------------------|----------------------------|----------------|-----------|------------------|-------|
| | | | | 平時 | リスク懸念時 シナリオ | | | |
| 操業状況 | 圧入流体（組成、流量、濃度） | 圧入量計測 | | | ○ | | | |
| | 坑口（圧力、温度） | 温度・圧力計、 光ファイバー | | | ● | | | |
| | 坑底（圧力、温度） | 温度・圧力計、 光ファイバー | ベースライン | | ● | ○** | △ | |
| | 坑井健全性 (アニュラス圧力等) | 圧力計、検層、 光ファイバー | ベースライン | | ● (●) | | | |
| | 微小振動 | 地震計、光ファイバー | ベースライン | | ○ | ○** | △ | |
| 貯留された CO ₂ の状態 | CO ₂ 挙動把握 近 ↓ 遠 | 坑井近傍 ~10m | 検層、坑井物理探査、 光ファイバー | ベースライン | | ● | | |
| | | 坑井周辺 ~1km | 坑井物理探査、2D/3D 弾性波、光ファイバー | ベースライン | | ● | | |
| | | 広域 ~数km | 2D/3D弾性波、 光ファイバー | ベースライン | | ● | ○** | △ |
| | 地層水分析 | 組成変化並びに定量化 | ベースライン | | △ | | | |
| 地表変位（主に陸上） | GPS測位、In-SAR | ベースライン | | △ | | | | |
| 環境への影響 (リスクに応じて実施) | 海洋環境 必要に応じて | 水質 | 有人探査、無人探査等 | ベースライン (圧入前に少なくとも1回+適宜) | | (2次)* | (2次)** | (2次)* |
| | | 底質 | 有人探査、無人探査等 | | | (2次)* | (2次)** | (2次)* |
| | | 気泡 | 音響探査 | | | (2次)* | (2次)** | (2次)* |
| | | 同位体 | 圧入起源のCO ₂ 検出 | | | (2次)* | (2次)** | (2次)* |
| | 環境影響 (利用に供する地下水) | 組成変化並びに定量化 | ベースライン | | (2次)* | (2次)** | (2次)* | |

1次監視として行う項目 ○:実施、△:場合により実施。●、▲は重点監視項目。無印は通常のモニタリング状況である限り実施しない項目。
*2次監視移行時の実施項目は、リスクに対応した項目のみを実施。 ベースライン:圧入開始前に少なくとも1回行うことを前提に、取得開始時期についても適宜。 **終了時に参考データを取得。

出典：第9回将来のCCS社会実装を見据えたあるべきモニタリングに係る分科会 2024208を参考に作成

1 温度・圧力計測技術

【温度・圧力】



背景 ▶ 二酸化炭素 (CO₂) の状態と温度・圧力の関係は？

CO₂が計画通り安全に貯留層に圧入されていることを監視するうえで、最も基礎的なモニタリングの一つが温度・圧力計測です。温度・圧力の値や変化を監視することにより、圧入プロセスの管理、圧入したCO₂の挙動、貯留層の性状、圧入井の健全性などを確認することができます。

CCSでは、CO₂を「超臨界」という状態で貯留層に圧入するのが一般的です。超臨界状態では、CO₂の容量（体積）が十分に小さくなり、粘度が低くかつ拡散しやすくなります。この状態で圧入することで、貯留層を有効に活用することができ、効果的な圧入が可能になります。地中の温度・圧力は、深度が増すにつれて高くなるので、超臨界状態となる深度より深い地層に圧入します。

さて、圧入井は外側の複数段のケーシングパイプと内側のチュービングパイプで構成されており、ケーシングとチュービングあるいはケーシングとケーシングの間の環状の間隙を“アニュラス部”といいます。ケーシングと地層の間はセメントですき間なく埋まっており、チュービングを通してCO₂は貯留層に圧入されます。

アニュラス部の圧力から圧入井の健全性の評価、CO₂漏洩の検知を行うことができます。例えば、圧入井は耐圧、耐腐食性を考慮して製作されますが、万が一ケーシングまたはチュービングに穴が開くようなことがあれば、アニュラス部の圧力変化として異常を知ることができます。

圧入を停止すると、貯留層の圧力が変化しますが、その時間変化から貯留層の性状や貯留層の広がりを示すデータが得られます。さらに圧入中は、遮へい層が破壊することのない圧力を維持していることを確認するのも圧力モニタリングの重要な役割です。

温度、圧力は連続して計測することができます。計画外の挙動が懸念される状況は、多くの場合、温度・圧力の変化を伴うと考えられるため、温度と圧力の計測は非常に重要なモニタリングです。

技術 ▶ CCSにおけるセンサーや光ファイバーの利用

さまざまな測定方式のセンサーが石油・ガス産業や地熱開発を含む幅広い産業で使用されており、CCSでも利用することができます。CCSでは、特に坑底（出口付近）に設置するセンサーには精度に加え、長期間故障しない安定性も求められます。近年では、長期安定性にも優れる光ファイバーを利用した温度・圧力測定技術の開発が進められています。

CCSの温度・圧力モニタリングは、少なくとも圧入井の坑口と坑底の両方で計測します。加えて、

アニュラス部の監視も重要です。

これらの計測結果をもとに、圧入されたCO₂がどのような性質を保っているか、貯留層内に確実に封じ込められているかを確認します。また、計測結果は貯留層の性状、広がり把握するデータとして活用できます。

CCSで利用できるセンサーの例として、右のものが挙げられます。

1. 測温抵抗体センサー
2. サーミスタ
3. 光ファイバー温度計
4. 半導体圧力センサー
5. 水晶式圧力センサー
6. 光ファイバー圧力計

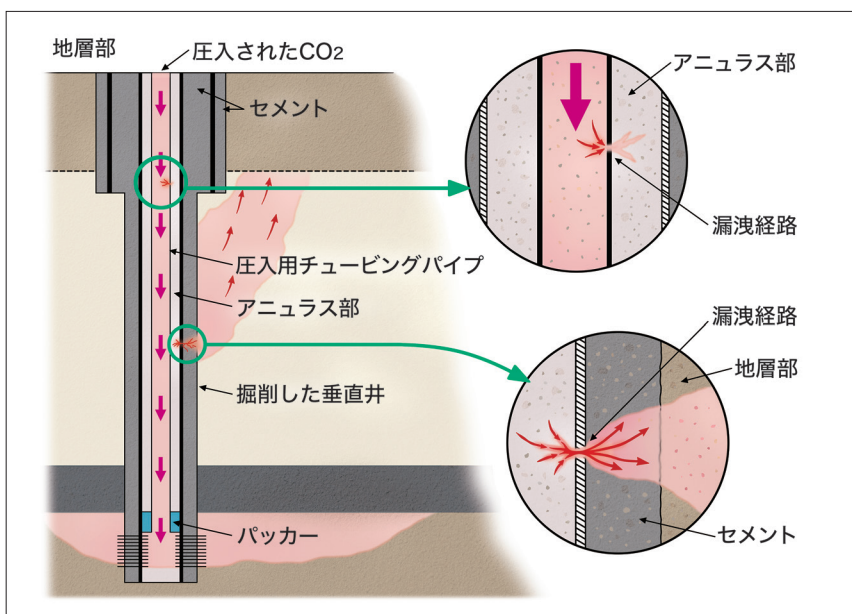
事例 ▶ 苫小牧実証試験

圧入井の坑口、坑底、観測井の坑底における温度・圧力計測を実施しました。

PTセンサー（坑内の貯留層近くに設置した温度・圧力計）によりデータを連続的に監視・記録し、圧入中にあらかじめ想定した温度・圧力の範囲から逸脱しないことを常時確認しました。その結果、圧力の最大値は、遮へい層破壊を避けるために設けた上限よりも十分低く、圧入を開始してからPTセンサーの温度・圧力は正常な範囲内でした。苫小牧では、坑口装置付近（地上近く）でアニュラス圧力の測定を行い、坑底の温度・圧力の値と総合して、坑井の健全性が担保されていることを確認しています。

また、北海道胆振東部地震（2018年9月6日）の際には、貯留層の温度・圧力の傾向に異常がないことから、CO₂の漏洩は無かったと判断する一助となりました（※）。

※詳細については、日本CCS調査株式会社HPに記載されている北海道胆振東部地震のCO₂貯留層への影響等に関する検討報告をご参照ください。



●アニュラス圧力計測の必要性

左図は圧入井が損傷してCO₂が地層に漏れ出す例を示したものの。アニュラス部にセンサーを設置して計測することにより、圧入井の健全性が損なわれたことを検知することができる。図の上から1番目はチュービングに穴が開いた例、2番目はケーシングに穴が開いた例。こうした損傷があれば、アニュラス部の圧力変化となって現れる。圧力が上がるか下がるかは、地層、アニュラス部、チュービング内の圧力の関係、および損傷の箇所によって異なるが、圧力変化を検知し、調査を進めることで、原因把握と対策が可能になる。なお、損傷はしていなくても、作業時にパイプ内を通る流体の熱が伝導し、アニュラス部の流体が膨張して、その結果、アニュラス部の圧力が上昇することがある。図の出典：EPA, "Geologic Sequestration of Carbon Dioxide Underground Injection Control (UIC) Program Class Six Well Testing and Monitoring Guidance" (2013) を参考に作成

ポイント

メリット1：操業を安全に行ううえで、温度・圧力の監視は必須であり、各国の法律でも要求されると同時に、社会的受容性の向上にも大変有用なデータとなります。

メリット2：事業の長期的な管理に必要な貯留層モデルの精度を上げるのに使用されます。

メリット3：光ファイバー技術の導入により省力化・コストダウンが期待できる技術です。

2 微小振動計測 【微小振動】



背景 ▶ CO₂圧入の管理に用いる、地震国・日本で関心の高いモニタリング

高感度の計測機器により、微小な地震動を観測します。この連続監視により、周辺の地震活動とCO₂貯留に関連性がないことを示す重要なデータが得られます。

地震が多い日本においては、CCS事業による誘発地震の発生および地震による貯留層への影響の有無に高い関心が寄せられており、有感地震に加えて、体を感じないような微小な振動のモニタリングも重要です。CCS事業は地域社会に受け入れられることが重要であり、微小な振動も含めた地震動を詳細に監視・記録することは、「自然地震とCO₂圧入との関係がない」ことなどを説明するうえでも有効です。

技術 ▶ ごく小さな振動を検出するための手法

地震計は、地面の動きを電気信号に変換して測定する装置です。高感度の地震計などを使用して、3方向（東西／南北／上下）の振幅や周期を測定し、監視します。装置は一般的な製品を利用することができますが、海底や坑井内に設置できる装置もあります。海底で使う地震計としては、海底地震計（OBS）や海底受振ケーブル（OBC）などがあります。

また、気象庁などが設置している既存地震観測網のデータを参照することもできます。

さらに、地球環境産業技術研究機構（RITE）では、CCSの事業化に向けて微小振動観測をはじめとするさまざまな観測データや圧入状況を総合的に判断できる「CO₂圧入管理システム（ATLS）」を開発しています。これにより、万が一異常な状況がみられた場合、いち早く必要な対策を取ることが期待されています。

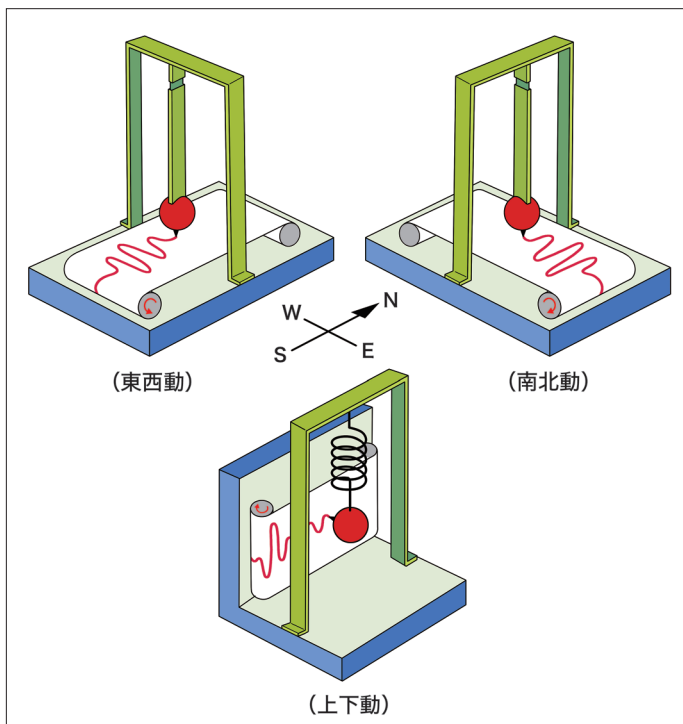
事例 苫小牧実証試験

陸上地震計、坑内地震計、海底地震計、海底地震ケーブルを設置し、地震活動・圧入地点近傍の微小振動の監視を行いました。

具体的には、観測井、72個の弾性波探査用小型地震計（ジオフォン）を取り付けた海底受振ケーブル（OBC）、沖合4地点に海底地震計（OBS）、さらに陸上に気象庁の地震観測網と同等の地震計を設置し、貯留層周辺（東西6km×南北6kmの範囲）で微小振動モニタリングを実施しました。その結果、気象庁の地震観測網にかからない、微小振動を確実に検知できることを確認しました。

モニタリングの結果、苫小牧実証試験ではCO₂圧入と関連する微小振動や有感地震は検知されていません。なお、その後の見直しにより、陸上地震計とOBSは、他の地震計があれば微小振動の位置決定精度への影響はないとして、圧入停止後に撤去しました。

苫小牧は実証試験であったことから、より広範囲のデータ取得を試みたので多数の機器・地点による観測網を確保しました。今後のCCS事業においてはサイトの状況に合わせた選択が必要です。



●微小振動計

一般に地震観測は、地震計により東西動・南北動・上下動の3成分で地面の動きを電気信号に変換して記録する。振動計は地震計の一種であり、微小振動計は、加速度センサーを用いて3次元空間の3成分（XYZ）の加速度を記録する。加速度センサーにはいくつかの種類があるが、微小振動を含む地震観測には主に高精度の測定が可能なサーボ型が用いられる。

出典：国立研究開発法人防災科学技術研究所HPを参考に作成

ポイント

メリット：CCSが地震を誘発していないことを示す科学的な“説明材料”として役立ちます。

課題：微小振動は、地震活動の他にも交通機関や工事現場、海岸の波、火山活動など、さまざまな原因により発生します。その多くはただちに生活に影響を与えるものではありませんが、許容される程度はその地域の特性や、事業の継続性・公共性などにより異なると考えられ、事業ごとの検討が必要です。

3

光ファイバーによる計測技術 【CO₂挙動把握】【操業状況の把握】 【坑井の健全性把握】



背景 ▶ 光ファイバーをセンサーとして使う

光ファイバーはデータ通信だけでなく、センサーとしても広く活用されています。長い区間にわたって連続的に多点計測できるのが特徴です。ひずみや振動をとらえることができるので、橋梁、トンネル、プラント設備などの損傷や不具合をいち早く見つけるのに欠かせない技術となっています。

CCSの分野では坑井近傍のモニタリング技術として注目が高まっています。目的は、坑井に沿った地層の温度、ひずみ、振動を時間的にも空間的にも連続的に測り、CO₂の圧入が安全に操業できているかを監視することです。具体的には、例えば、CO₂の圧入によって圧入井にどれくらい力がかかっているか、圧入井に沿ってCO₂が漏洩していないかを把握できます。

技術 ▶ 温度・ひずみ・振動をマルチに計測

光ファイバーによる計測は、ファイバー内を光が通過するときに発生する、異なる散乱光の特性を利用します。それにより、温度、ひずみ、振動を測ることができます。

●温度

光ファイバーが温度変化をとらえることで、坑井に沿ってCO₂が漏れていないかを監視するのに役立ちます。

●ひずみ

ひずみの変化を測定することにより、貯留層・遮へい層の圧力変化を監視します。

●振動

振動を解析することによって坑井近傍の微小振動の観測に役立てたりします。近年は、弾性波探査のDAS-VSP（P23参照）にも用いられ、坑井近傍のCO₂分布の把握に役立てられています。

光ファイバーセンシング技術のメリットとして、次のものが挙げられます。

・連続データの取得

光ファイバー全体がセンサーとなり、時間・空間的に連続したデータを取ることができます。

・長期的（20年以上）に使用できる

最初にきちんと保護された光ファイバーを設置しておけば、メンテナンスや校正の必要がなく、いつ

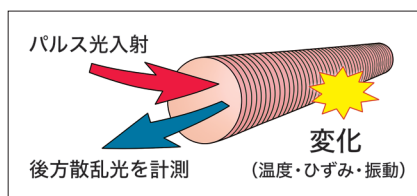
でもデータを取得することができます。そのため、オペレーションコストやランニングコストを大幅に抑えられます。

・マルチセンサーとして使用できる

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れば、一度に3種類のデータを取得できます。センサーを個別に設置する場合に比べて、大幅にコストを抑えられます。

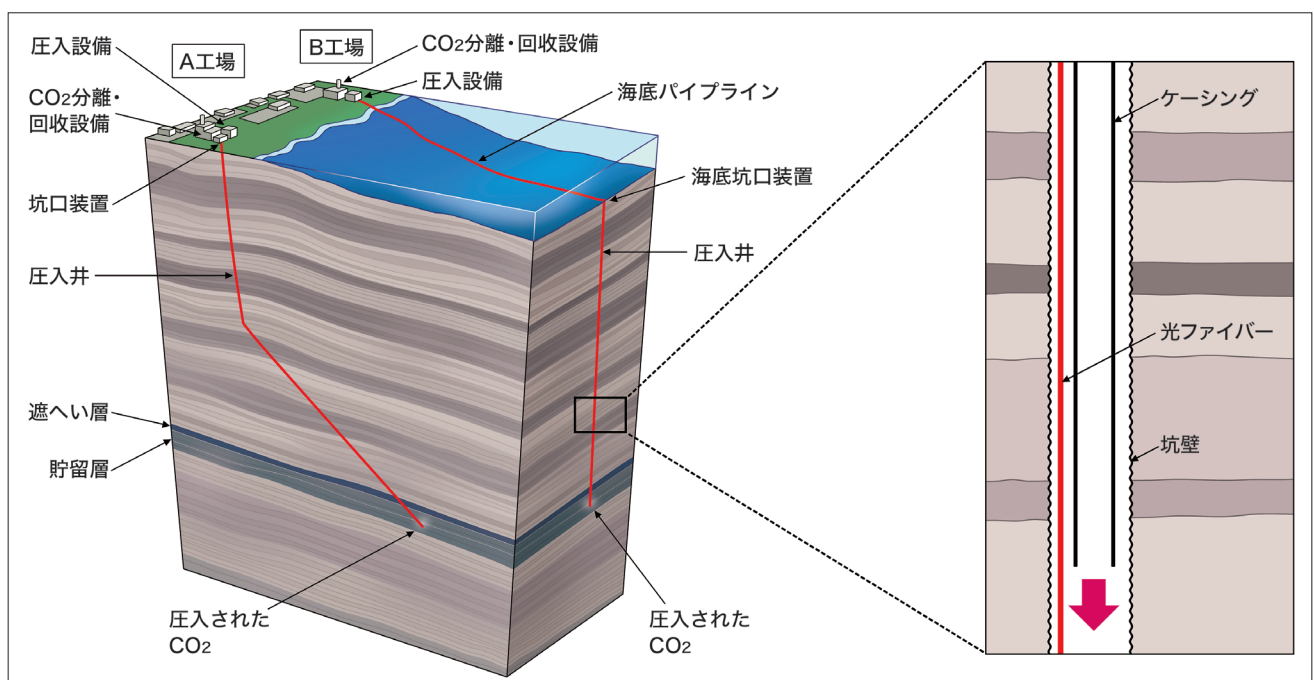
課題と展望

光ファイバーによる計測技術は、多目的にデータを取得できることもあり、油田開発では実用段階にあります。CCSでも将来的に既存の計測機器の一部を代替する可能性があります。実用化には精度や耐久性など、さまざまな課題があります。一例として、曲げに弱いという欠点を克服しようとするすると自重が重くなり、計測できなくなる問題がありました。それを克服するため、地球環境産業技術研究機構(RITE)では世界で初めて保護管と共に大きく曲げることができる光ファイバーケーブルを開発し、その欠点すら乗り越えました。今後も新しい技術開発が進み、実用化が加速することが期待されています。



●光ファイバーによる計測のイメージⅠ

光ファイバーによる測定は、光ファイバー内の変化に伴って発生する散乱光を利用する。光ファイバーの素線は、屈折率の高いコアを、それより屈折率の低いクラッド層で包む構造となっている。コアに入射されたレーザー光パルスは、光ファイバー内部で散乱される。散乱光には性質の異なる3種類があり、それぞれの特徴を利用して、温度やひずみ等の変化を測定できる。出典：RITE CCSテクニカルワークショップ2013資料「光ファイバーによるCO₂圧入サイトの地層安定性観測技術開発について」を参考に作成



●光ファイバーによる計測のイメージⅡ

坑井の坑壁に沿って、光ファイバーを地下深くまであらかじめ設置しておき、温度やひずみ等を観測する。出典：日本CCS調査株式会社HPの画像等を参考に作成

4

坑井検層技術

【CO₂挙動把握】【漏洩監視】

【坑井の健全性把握】



背景 ▶ 坑井周辺の状況を正確に把握する

CCSサイトには、「地下を調査するため」、「CO₂を圧入するため」、「観測（モニタリング）のため」の井戸があり、それらを「坑井」と呼んでいます。その坑井にさまざまな装置を下ろし、CO₂の分布状況や周辺の地層のようすを調べるのが坑井検層です。

調べる範囲は坑井中心から水平方向に半径数メートルに限られますが、坑井に沿って数10cm間隔でさまざまなデータを取ることができます。加えて、圧入されたCO₂による地層、坑井本体も含めた周辺の挙動についても詳細に調べることができます。

技術 ▶ さまざまな検層技術

坑井検層では、各種計測機器を坑井内で上下させることで、坑井に沿った深度方向の地層の特徴を数10cm間隔で知ることができます。こうした使い方によって、地層の特徴（例えば、貯留層と遮へい層の違いなど）を把握することができます。さらに、繰り返しデータを取得することで、地層の弾性波伝播速度、抵抗値などが時間的にどのように変化しているかを追うこともできます。

CCSのモニタリングでの坑井検層の目的は、繰り返しデータを取得することにより、時間による変化を追跡することです。具体的には、貯留層に圧入したCO₂がきちんと貯留層に閉じ込められ、その他へ漏れていないかどうか、さらに検層を行った坑井自身の異常がないかどうかなどを、貯留層周辺に設置した検層装置によって長期的な変化を調べようとしています。

●速度検層

地層にCO₂が圧入されると、地層の弾性波速度が低下します。それを計測することで、CO₂の広がり把握することができます。速度検層は坑内にある機器どうしで発信と受信を行い、地層の弾性波速度（P波とS波）を得ることができます。

・VSP (Vertical Seismic Profiling) 検層

地表の振源から出した弾性波を坑内の受振器で記録し、坑井周辺の地層やCO₂貯留の状態を把握します。

・セメントボンド検層

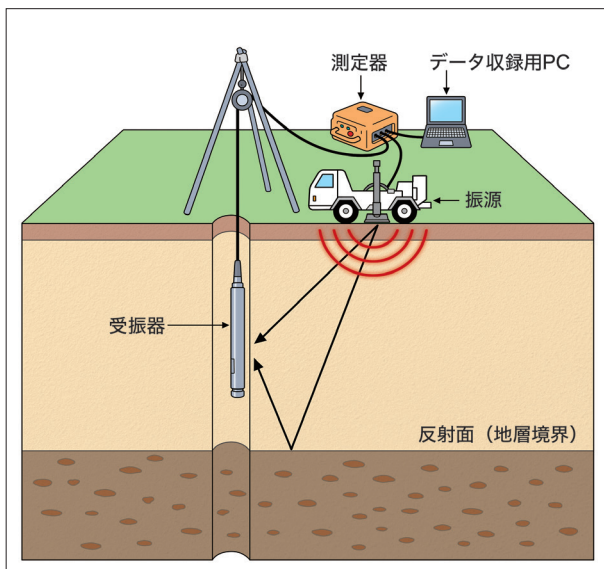
ケーシングの裏側にあるセメント部分に、CO₂が漏れる経路ができていないかを調べます。

●中性子検層

放射線源を使って貯留層中のすき間がどれくらいあるかを推定します。

●比抵抗検層

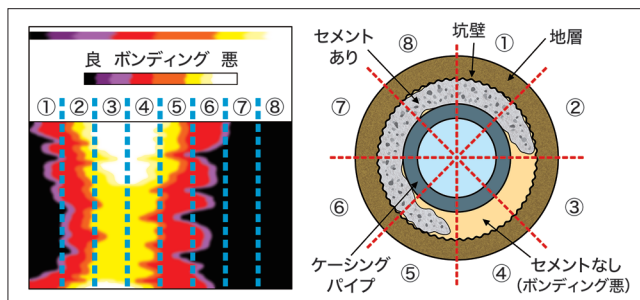
地層がどれだけ電気を通しにくいかを測定します。地層の特性や検査の目的によって使い分けますが、CO₂の移動によっても値が変化するため、CO₂挙動の把握に利用します。



●VSP検査の概念図

地表の震源から発振される弾性波を、坑内に配置されている受振器で記録することで、坑井周辺の地層ならびにCO₂貯留の状況を把握する。

出典：株式会社日本地下探査HPを参考に作成



●セメントボンド検層

ケーシングの周囲にセメントがあるかないかによって音波の伝わり方が異なることを利用し、ケーシングを伝播する音波の第1波の振幅を連続して測定し、データ処理をすることでセメンチング状況を評価する技術。図の左は測定結果から得られたセメンチング状況、右は坑井の断面図。

出典：株式会社物理計測コンサルタントHPを参考に作成

事例

苫小牧実証試験での実施事例はありませんが、ここで紹介した坑井検層の調査項目は、モニタリングの目的、坑井の種類（調査井か圧入井か）、操業状態（圧入前か、圧入中か）などによって使い分けることとなります。使える場面は限定されますが、圧入直後のCO₂の挙動を把握したり、観測井の坑井近傍へのCO₂の移動をいち早く把握するには効果的な手法の一つです。

ポイント

メリット：CO₂の貯留状態、坑井の健全性の時間経過を精度よく観測できます。

課題：広いエリアを調査するには向いていません。

5 弾性波探査 【CO₂挙動把握】



背景 地層中の二酸化炭素（CO₂）を可視化する

弾性波探査は、石油や天然ガスなどの地下資源を調べる技術として広く普及しています。その手法をCCSに応用すれば、遮へい層や貯留層の広がり具合の全体像をとらえることができます。まず貯留適地調査の段階で、CO₂を貯留できる砂岩のようなすき間の多い地層（貯留層）があるか、その地層に蓋をする泥岩のような粒子の細かい地層（遮へい層）があるか、事業計画に見合う十分な貯留容積があるかなど、CCSに必要な条件を満たしているかどうかを弾性波探査でしっかりと確認します。

そのデータを基にして、CO₂を圧入する前と圧入した後を比較するために、同じ場所で繰り返し弾性波探査を行います。これによりCO₂の貯留を始めた後、CO₂が地中でどのように広がり、分布しているか、漏洩の恐れがないかなど、貯留層のようすの時間変化をとらえることができます。

弾性波探査は陸域でも海域でも行うことができ、広域を対象とした物理探査の中で最も分解能が高い手法です。費用は高額ですが、実施する頻度、観測範囲、振源と受振器の組み合わせなどを工夫し、なるべく合理的な計画を立て実施することが重要です。

技術 弾性波を起こし、反射波から読み取る

弾性波探査は、陸地の場合は起振車（振動発生装置を備えた大型車）を使い、海の場合は船からエアガン（圧縮空気を発射して音波パルスを発生する装置）で弾性波を発生させます。その弾性波が、陸や海底の地下深くの地層へと伝わっていき、地層の境界面ごとに反射します。その反射波を地上や海上に設置した受振器で測定することで、層状に重なり変形した複雑な地層の形状を可視化することができます。

このデータを基に地下の地質モデルを作ることができます。地質モデルというのは、地下の構造や性質をコンピュータ上で再現するもので、地中におけるCO₂の挙動をなるべく正確に予測するために用いられます。地質モデルを作るときは、弾性波探査のデータから地層の状態を解釈し、さらに既存の地質情報、坑井を掘削した時に得た岩石のサンプル、坑井検層で得られた地層の物理的性質のデータなど、さまざまな情報を活用します。繰り返し弾性波探査を行ってデータを更新することで、地質モデルの精度をより高めていくことができます。

CO₂の貯留によって、反射する弾性波の特性が変化するため、CO₂の圧入前と圧入後の画像を比べることにより、CO₂が地層のどこに入ったか、どこへ移動しているかがわかり、地層内での動きを知るこ

とができます。この動きを、シミュレーション結果と比較することによって、CO₂分布状況の確からしさを確認することができます。

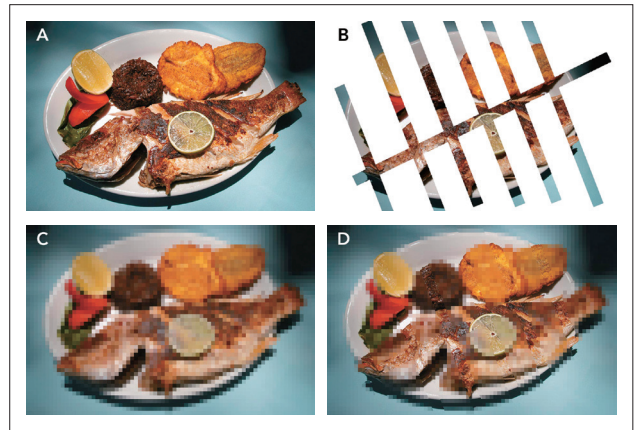
弾性波探査には、弾性波の生じさせ方や反射波の利用法などが異なるいくつかの方法があります。ここでは、CCSのモニタリングに適した反射法探査を中心に紹介します。

●反射法探査

1) 2D・3D (2次元・3次元) 弾性波探査

2D弾性波探査は、測線と呼ばれる直線上の線に沿って調査し、地下断面の画像を得ます。解像度は高いものの、確認できる範囲は測線の直下部のみと限られます。

3D弾性波探査は、平面的に配置した受振器で観測しますので、地下のようすを立体的に把握できます。陸域・海域のいずれでも調査できますが、現在のところ海域で広い範囲の地下を見られる方法は2D・3D弾性波探査だけです。使用する船は大きいものと1万トンクラスから、小型漁船クラスまでさまざまです。調査する場所が広い海洋か、岸に近い浅瀬か、船舶が行き交う湾内かなど、場所や深度によって適した船と機材(ストリーマケーブル、OBC、OBN)を選んで実施することができます。



●2D・3D弾性波探査による探査結果の把握イメージ

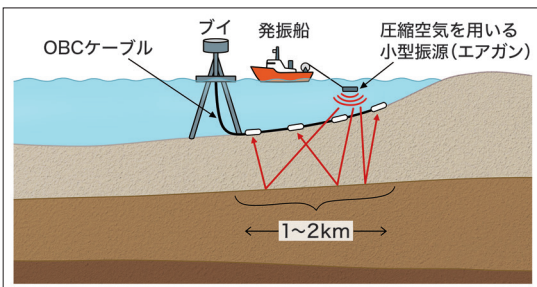
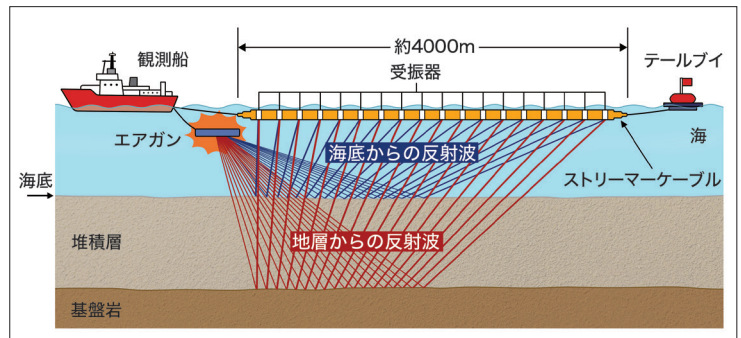
2D、および3D弾性波探査による地下のようすの把握法を、(A)の魚料理の画像にたとえて説明する。2D弾性波探査では、(B)のように測線直下のデータを高解像度で得られるが、確認できる範囲はすき間が多くまばらになる。一方、3D弾性波探査では、(C)のように解像度は低くなるが、魚料理全体を確認できる。そこで、3D弾性波探査の結果に2D弾性波探査の結果を組み合わせると、(D)のようなより鮮明な画像が得られる。このような方法で地下のようすを把握できる。

出典：Rob Vestrum et.al(2008).”To Kill or to Complement: Three Technology Improvements in Foothills Seismic Imaging”, RECORDER,33(9),22-26.

●ストリーマケーブルを用いた

海域での2D・3D弾性波探査の概念図

2D・3D弾性波探査は、海域の地下構造を評価する方法として最も多く用いられている。ただし、大型の船舶を使用する場合は、プラットフォームなど構造物の周囲では実施できない。また、繰り返し観測を行う際、海上では測線の正確な再現が困難であるため、経時観測の測線位置の精度は低くなる。
出典：日本CCS調査株式会社HPを参考に作成



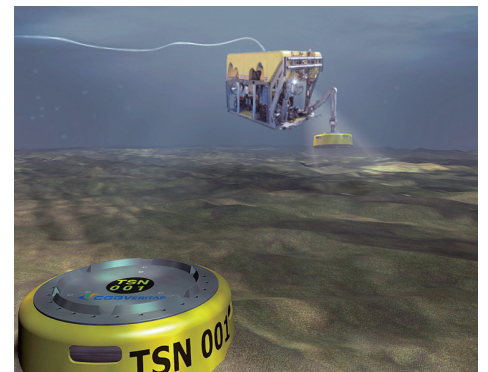
●海底受振ケーブル (OBC) を用いた弾性波探査の概念図

OBC (Ocean-Bottom Cable) を用いた弾性波探査は、受振器が取り付けられたケーブルを海底面に敷設し、海底下からの反射波をとらえ、地質構造や岩石物性を把握する。
出典：公益財団法人地球環境産業技術研究機構 CO₂貯留グループ HPを参考に作成

●海底ノード (OBN) イメージ図

OBN (Ocean-Bottom Node) を用いた弾性波探査は、海底面に受振器が取り付けられた「ノード」と呼ばれる装置を敷設し、海底下からの反射波をとらえる。原理はOBCと同様だが、OBNはケーブルを必要としない独立した受振器のため、敷設の自由度が高く、精度の高いデータの収集が可能である。

出典：Seis Tech Inc.HP

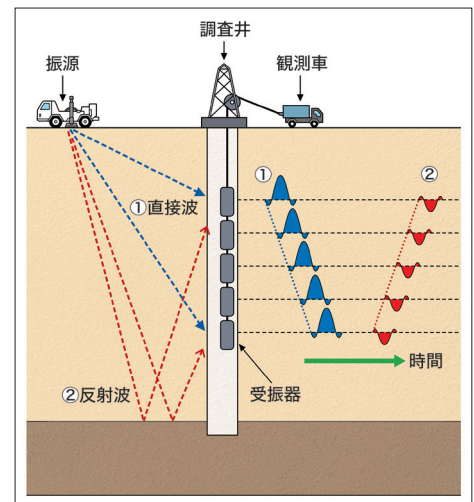


2) VSPとDAS-VSP

VSPは坑井に沿って複数の受振器を設置して行う、弾性波探査方法の一つです。坑井周辺（半径数十メートルから数百メートルの範囲）の高品質なデータを取ることができます。しかし、ワイヤーで上げ下ろしをして受振器をずらしながら測定するため、手間と時間がかかります。そこで、坑内受振器として光ファイバーを利用したDAS（分散音響センサー：P17-18参照）を採用した、新しい技術DAS-VSP法が開発されました。従来、VSPで数日かかっていた期日を大幅に短縮させ、手間やコストを大幅に削減できるようになりました。

●坑井間弾性波トモグラフィ

複数の坑井を使い、一方に振源、他方に受振器を設置して、地中を伝わる弾性波を測定する手法です。地層の水を押しつけてCO₂が入っていくと、岩石中の弾性波速度が低下します。長岡実証試験サイトではそれを利用して、CO₂の広がりを検出することに成功しました。VSPと比較してCO₂の把握がしやすい手法ですが、坑井同士が近くにあることが条件です。



●VSPの概念図

VSP（Vertical Seismic Profiling）は坑井を利用した弾性波探査手法の一つで、地表や海面から発振した弾性波を坑井内に設置した受振器で観測する。坑井周辺（通常は半径数十～数百メートルの円錐状の範囲）の高解像度の画像が得られる。データ解析が複雑であることや、坑井内での受振器の上げ下ろしに時間がかかるといったデメリットがあったが、近年では受振器にDASを用いたDAS-VSP法が開発され、手間やコストが大幅に削減されている。

出典：株式会社地球科学総合研究所HPを参考に作成

事例 苦小牧実証試験

CO₂圧入前、圧入中、圧入後において、OBCを用いた2D弾性波探査と3D弾性波探査を隔年で交互に実施しました。地中のCO₂の状態を精度よく把握するためには3D弾性波探査を繰り返し実施するのが理想ですが、費用や作業期間を考慮し、2D弾性波探査と交互に実施しました。

2016年4月に圧入を開始してから2019年度末までに計4回のモニタリング調査を実施し、CO₂の分布域を調べました。2017年度以降に萌別（もえべつ）層におけるCO₂分布状況が検知され、圧入したCO₂は事前の想定どおり貯留層内にあり、貯留層区間の外への漏洩など、異常は生じていないことが確認されています。

ポイント

メリット1：油田やガス田で実績のある技術であり、CCSでも最も有効な物理探査技術です。

メリット2：地層とCO₂のようすを3D画像で見ることができます。

メリット3：シミュレーションと比較することでCO₂分布状況の確からしさを確認できます。

課題1：CCS事業全体へのコスト面での影響を考慮し、モニタリング計画として合理的に組み込むことが重要です。特に実施頻度は、事業の進展状況を踏まえて決めることが肝要です。

課題2：弾性波探査を実施する際は、港湾や海域の利用者に及ぼす影響について配慮する必要があります。船尾からケーブルを曳航する場合、またはケーブルを海底に設置する場合には、船舶の航行や漁業活動と調整が必要になることもあります。

6

重力探査、電気/電磁探査による計測技術 【CO₂挙動把握】



背景 地下のようすを大規模に、迅速に調べる物理探査手法

CCS事業にとって、圧入したCO₂が想定された貯留域に留まっていることを確認することは非常に重要であり、それを確認するためのモニタリング手法がいくつも検討されています。CO₂の挙動把握や、貯留層と遮へい層の全体像を調べるには、主に弾性波探査が用いられますが、他にも重力探査、電気探査、電磁探査などの補完的利用が期待されています。

重力探査は、石油・天然ガスの存在が期待される地質構造の特定など、弾性波探査やボーリング調査前の大まかな調査手法として使われるほか、火山のマグマ移動による微小な重力変化をとらえる調査にも使われています。電気探査は地下水やダムの調査、電磁探査は地熱開発などで幅広く使われています。

技術 重力や電気・電磁波を使って測る

貯留層に圧入したCO₂によって生じるわずかな重力（密度）変化、または電気抵抗（比抵抗）値の変化を観測、評価して、CO₂が貯留層内での状況を把握します。

●重力探査（精密重力探査）

地下にある物質の密度の違いで、重力の値は違ってきます。例えば、もともと地層に入っている水が1ml当たり1g、その水を押しのけて入るCO₂が1ml当たり0.6gとすると、圧入前と貯留開始後では重力の値がわずかに減少していきます。そのわずかな密度の変化を測って、CO₂がどの辺りに貯留されているのかを知ることができます。精密重力探査は従来の重力計と比較してより精度の向上が図られていますが、取扱い、持ち運びが難しいため広域の調査には向いていません。

重力探査は、弾性波探査と比べると分解能は低くなりますが、固定した場所に設置すれば連続観測ができる点、低コストである点などの優位性があります。

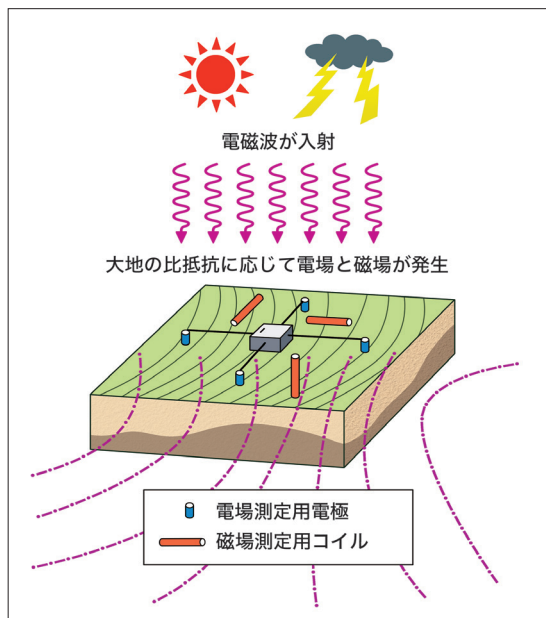
●電気探査、電磁探査

電気探査、電磁探査は、利用する信号は異なるものの、CO₂による地層の電気抵抗（比抵抗）が変わることを利用します。探査深度は概ね1000m前後の深度となります。また、弾性波探査と比較して低コストの探査手法ですが、得られるデータの解像度は重力探査同様低くなります。

電気探査は地表や地下に複数の電極を設置して電流を流し、電位を測ります。電磁探査は、電磁波を用いますが、自然の電磁信号を用いる方法（MT法）や、人工の電磁信号を用いる方法（CSEM法）など

があります。

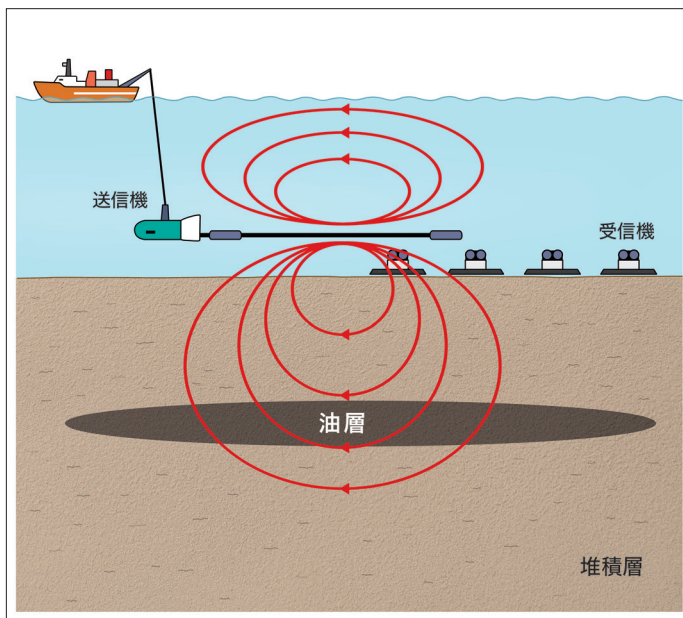
電気探査、電磁探査の大きな特徴は、弾性波探査では観測できないガス飽和度を高感度で観測することができる点です。ただし、そのガスがCO₂か別のガスかを区別することはできませんので、枯渇ガス田におけるCCSに活用する場合には、CO₂圧入前の記録と比較することや、ガスの成分を分析することなど多くの探査が必要となります。



●陸域でのMT法電磁探査の模式図

電磁探査は、CO₂の圧入による地層の電気抵抗（比抵抗）の変化を探査する。MT(Magneto-Telluric)法は、地表に照射される自然の電磁信号によって、地中に誘導される電場と磁場の強度の比を測定し、地下の比抵抗分布を推定する。信号源は不要だが、ノイズに弱い。

出典：根木健之「MT法電磁探査における三次元解析技術の検討」、石油技術協会誌、第68巻、第1号（2013）を参考に作成



●海洋におけるCSEM法電磁探査の模式図

人工の電磁信号を用いるCSEM(Controlled Source Electromagnetics)法は、信号源が必要になるが、ノイズに強い。周波数を制御できるため、対象に合わせた分解能に調整できるのがメリット。

出典：石油技術協会、石油鉱業便覧 石油技術協会創立80周年記念(2013)を参考に作成

事例 ノルウェー（スライプナー）および苫小牧実証試験

ノルウェーのスライプナーでは繰り返し弾性波探査が行われましたが、重力探査も補助的に複数回行われており、CO₂の圧入による微小な重力の変化を検出しています。苫小牧実証試験サイトでは、高感度の超伝導重力計を使って調査しましたが、圧入地点から離れていたことと、圧入量が少なかったために重力変化を検出することはできませんでした。ただし、連続してデータを取れるメリットがあるので、今後も活用場面を探っていくことになります。

ポイント

メリット1：弾性波探査の補完的ツールとして、貯留層形状、経時変化を広域で、安価、簡便に調べることが期待されます。

メリット2：他の産業では実績があり、CCSへの展開が期待されます。

課題：探査深度に限界があることと、分解能が低いため、CCSへの適用は研究段階です。

7 地層水分析

【地層水・地下水の性状】



背景 CO₂が溶け込んだ地層水を調べる

貯留に適した地層の多くは堆積層です。堆積層は、流れる水の働きで泥や砂、礫（れき）が運ばれて溜まったもので、貯留に適した広大な堆積層の多くは海域で形成されています。その堆積物のすき間（孔隙）に溜まっている塩水を地層水といいます。

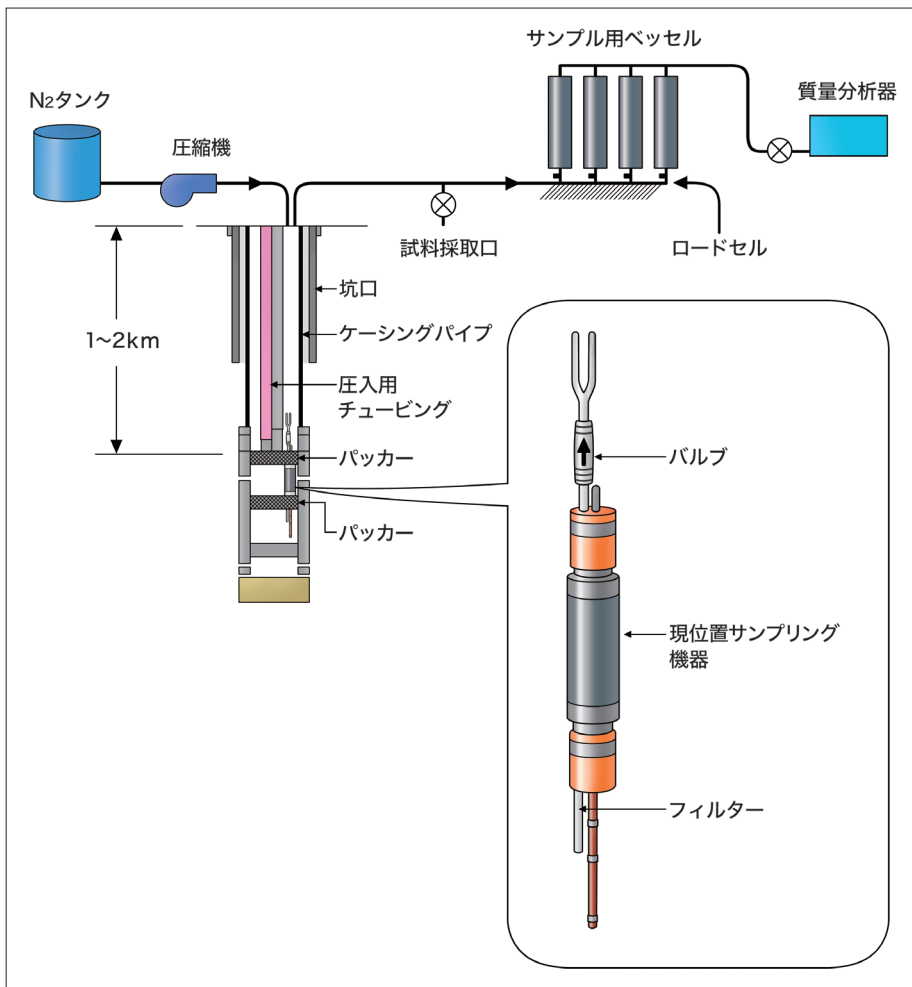
サイト選定時のベースライン調査で地層水の組成を調べ、それがCO₂圧入開始後、圧入終了後にどのように変化しているかを調べるのが、地層水分析です。圧入したCO₂は地層水の中に入り込み、化学変化を起こすため、この地層水に含まれるCO₂濃度等を分析することにより、貯留層内での挙動追跡が可能になります。また、CO₂の漏出や地層中での化学変化等の評価も可能です。

各調査時において、貯留層にある地層水の成分を分析すると、どれくらい多くのCO₂が溶け込めるか、岩石との反応性はどうか、地表とつながる経路があるかなどがわかります。さらに、浅い層の地下水の分析を行うと、浅い層にCO₂が漏れていないかがわかるなど、さまざまな情報を得ることができます。

技術 坑井からサンプルを採取して分析する

地層水分析は、特殊な装置を用い、特定の深度にある貯留層に溜まっている地層水だけを坑井から採取して、どのような成分がどれくらい含まれているかを分析します。

採取した地層水を分析することにより、CO₂分圧（pCO₂）、水素イオン指数（pH）、炭酸水素イオン（HCO₃⁻）溶解ガスなどの情報を得ることができます。観測井からの採水の場合には、二酸化炭素分圧の変化によってCO₂の広がりを把握できる可能性もあります。



●地層水分析（Uチューブサンプリングシステム）の模式図

坑井から地層中の流体を採取・分析することで、対象深度でCO₂が漏洩していないかを判断するのに役立つ情報が入手できる。ただし、CO₂の溶解度は圧力と温度によって変化するため、大深度での試料採取では、地上への引き上げ時に、圧力や温度の大幅な低下が生じないように行わなければならない。図は、窒素バージにより採取試料を隔離するUチューブ法の例。

出典：Underground Injection Control (UIC) Program Class Six Well Testing and Monitoring Guidanceを参考に作成

事例 長岡実証試験と海外の事例

長岡実証試験サイトでは、CO₂が鉱物として固定されていく過程を調べるため、地層水を圧入前、圧入開始後2年5か月、8年2か月の3回採水して分析しました。その結果、地層水中にCO₂起源である炭酸系の物質が増えたことで、カルシウムイオンは減少しました。そのことから、カルシウムイオンが炭酸と結び付き、炭酸カルシウム (CaCO₃) となって沈殿したと考えられます。これは圧入したCO₂が鉱物化し、貯留層内で固定され始めていることを示している可能性があります。

海外では、アメリカ、カナダ、オーストラリアなどのCCSプロジェクトで地層水分析が実施されています。またアメリカでは、地下水法の規制があり、CCSによって地下水の水質が変わっていないことを保証するため、遮へい層より浅い層での定期的なモニタリングが求められています。

ポイント

メリット1：地層水の成分を分析することで、貯留状態、CO₂の飽和率が把握できます。

メリット2：浅い層の地下水を分析することで、CO₂が地表に向けて移動していないことを確認できます。

課題：深部の環境を保持しながら試料水を採取するには、特別な技術が必要となります。

8 地表変位計測

【地表変位】



背景 地下の圧力変化は地表に伝わる

地下水の汲み上げすぎで地盤沈下が起こるように、CO₂を大量に圧入しすぎると、地面が徐々に隆起することがあります。そうした地表の変化を監視するのが地表変位計測です。このモニタリングによって、CO₂の圧入量が適切か、圧入した二酸化炭素がきちんと貯留層に封じ込められているか、想定した範囲外に移動していないかを確認することができます。

なお、海域を対象としたCCSでは変化を測定することはできず、適用は困難です。

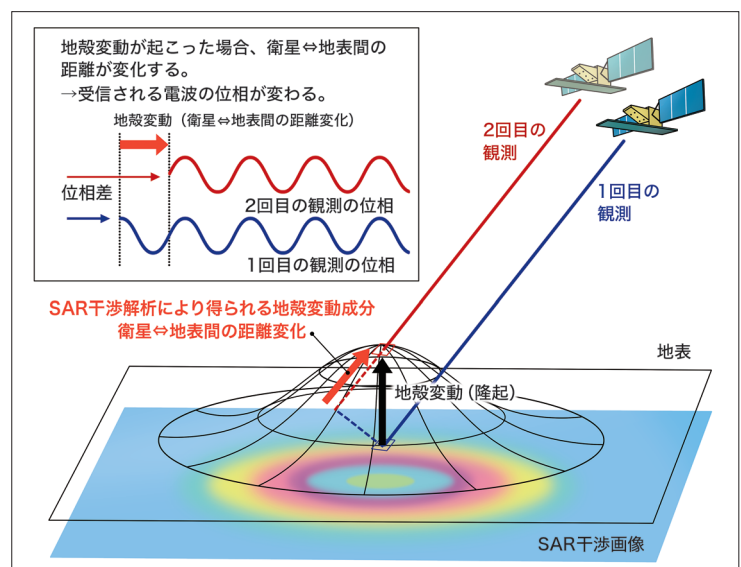
技術 リモートセンシング技術を活用

地表変位をとらえるのには、従来は水準測量（水準測量機器を用いて2地点間の高低差を測定する方法）が用いられてきましたが、最近は衛星データを使ったリモートセンシング技術が活用されています。ここでは、InSAR（干渉合成開口レーダー）をはじめ、傾斜計やGPSを使って測定する手法をご紹介します

●InSAR（インサー）

宇宙から地球の表面の変化を監視する技術で、衛星画像によって目に見える形で地表のようすを把握することができます。活断層による地震後の隆起・沈降域の調査にも使われています。

衛星が軌道を回りながらマイクロ波を何度も連続して発射したものを受信し、それらのデータを合成することで、地表面の形や高低の変化をとらえます。この手法は、地表に観測機器などを設置する必要がなく、地表の広い範囲の変化を数mmの精度で検出することができます。



●InSARによる地表変位の計測原理

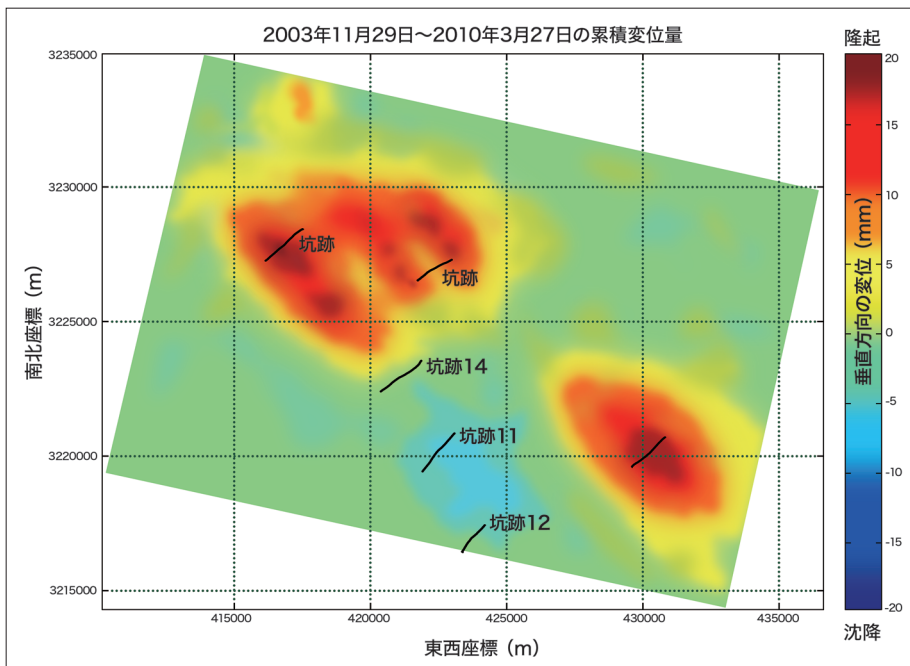
InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) は、電波の「位相」を利用して画像を得る技術。位相とは、衛星と地表の間の距離（実際には往復するので2倍）を電波の波長で割ったときの端数。地表面の同じ場所に対して2回の観測を実施し、それぞれの位相画像の差を取る（干渉解析）ことで、わずかな距離差の情報を得ることが可能になり、地面の変動をとらえることができる。
出典：国土交通省国土地理院HPを参考に作成

●GPS

GPSは、スマートフォンやカーナビなど身近なところでも活用されている衛星測位システムです。衛星から電波が発信されて受信機に到達するまでにかかった時間から、地表上の位置を数cmの精度で測定することができます。GPSで得たデータは測定点に限られるため、広域をカバーするInSARや傾斜計による計測を補完するために使われます。

事例 アルジェリア (In Salah) の事例

衛星を使った地表変位のモニタリングは陸域が対象となります。例えば、In Salah（アルジェリアにおけるCCSプロジェクト）の事例では、CO₂の圧入によって貯留層の圧力が上がり、圧入井周辺の地表が隆起していることが観測され、圧入を停止することがありました。また、隆起部分の広がりと同心円状でないことからCO₂の分布域が貯留層内で入りやすい方向に広がっていることが可視化されたことも大きな成果であったといえます。



●In Salah プロジェクトにおける CO₂ 圧入による地表変位の衛星画像

アルジェリアのIn Salahプロジェクトでは、CCSモニタリングにInSARが使用された。In Salahの地表面は植生が少ない岩石砂漠のため、電波の位相差を確認しやすく、InSARによる観測に適している。図中の黒点が坑井、黒線が坑跡。赤い領域は隆起を示し、青い領域は沈下を示す。経時的なデータ分析の結果、圧入井を中心とした隆起が年間最大5mmの速度で成長しており、累積隆起は20mmを超えていることが示された。

出典：Mathieson et al./ In Salah CO₂ Storage JIP: CO₂ sequestration monitoring and verification technologies applied at Krechba, Algeria, Energy Procedia, v.4, pp:3596-3603. を参考に作成

ポイント

メリット1：リモートセンシング技術により、非常に高精度のデータを比較的安価に取得することができます。

メリット2：InSARは、地表に観測機器などを設置する必要がありません。

課題：海域での実施は難しく、現時点では陸域に適用範囲が限られています。

9

環境モニタリング

【環境】

Environment/海洋環境



背景 CCSによる環境影響を評価する

CCSを実施する場所は、国や国際的な基準に従って選定されるため、封じ込めたCO₂が環境中（生物圏）に漏出する恐れは十分に低いといえます。そのうえで、CCS事業が海の環境や生物などに影響を及ぼさないことを説明するための科学的根拠を得るために、環境への影響に関するモニタリングを行う場合があります。具体的には、周辺環境、住民、生物圏への影響の有無、CO₂漏出が懸念された場合の陸域や海域の環境の変化を把握します。

こうした環境モニタリングによる「漏出の心配（事実）がない」というデータに基づいて、地元住民などステークホルダーに分かりやすく説明をして理解を得ることは、安定した操業を続けるうえで重要です。

ただし、対象となる環境影響の変化はその地域によってさまざまであり、実施内容や時期は個別に設定する必要があります。

技術 環境に係る試料を採取して分析する

海域では、海水や海底の堆積物を採取して、CO₂や酸素の量、pH（CO₂の量によって変化）、水温、塩分濃度など、その性状を分析します。気泡の発生の有無など、海中を観測することもあります。陸域であれば土壌中や大気中のガスなどを採取して行います。あわせて、生物相の調査を行うこともあります。

また、CCSでは生活用水等に利用される地下水層を貯留層とすることはありませんが、地下水層から採水し、貯留層から漏れたCO₂が含まれていないかを調べることもできますし、CO₂が地表に向けて移動していないことを確認することもできます。

環境モニタリングの目的は、CCS事業によって、周辺環境、地元住民の生活圏、生物圏に影響が出ていないことを実証することです。環境試料の採取や分析方法など、それぞれの技術は確立され、広く使用されているものですが、自然環境を対象としているため、取得すべきデータ、得られた結果の評価は全国一律に定められるものではありません。

また、環境モニタリングにより得られるデータは、自然変動をはじめとする外部要因の影響を受けやすく、例えば海水に含まれるCO₂の濃度は、季節、天候、プランクトン発生状況、海流の状況、河川からの流入水等、さまざまな要因で変動します。

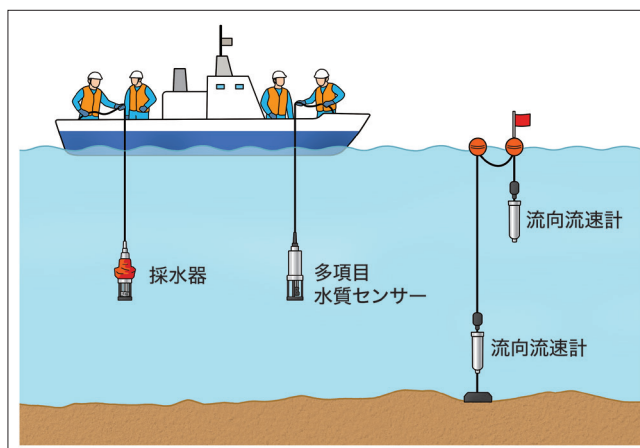
一方で、新たな技術の開発も進められています。例えば、地球環境産業技術研究機構（RITE）は、海中のCO₂が自然由来のものか、貯留層からの漏出によるものかを区別する技術を開発しています。このような実用的な最新の技術を活用しながら、モニタリング方法を検討することが重要です。



●多項目水質センサー
水質調査に必要な水温、pH、溶存酸素、塩分など、多数の項目を1台で測定できる。



●ニスキン採水器
容器の上下に蓋があり、所定の水深で採水器を吊るすワイヤーに通した錘を船上から落とすと、ストッパーが外れて蓋が閉まり、採水ができる。



●採水、水質観測、および流況観測の模式図

水質調査では、①採水器による海水採取とあわせて、②多項目水質センサー（水深、水温、塩分、pH等を測定）による観測、さらに③観測点における潮流の流向・流速の観測が行われる。観測精度は、採水による分析が最も優れている。一方で、多項目水質センサーは、複数の水深で鉛直方向の分布を測定でき、多項目水質センサーで得られたデータと、採水器で採水したサンプルの水温とを比較することで、採水が所定の水深で行われているかどうかを確認できる。また、流向・流速の観測データは、異常な観測結果が得られた場合に、異常の発生場所の推測に利用できる。

出典：公益財団法人海洋生物環境研究所による海洋環境調査報告書（3点とも。イラストは報告書をもとに作成）

事例 苦小牧実証試験とカナダ（陸域）での環境調査

苦小牧では海洋環境調査として、実証試験であることから法律で定められた以上の周期で（季節ごと）、水質（溶存酸素濃度、CO₂分圧、pH等）、気泡確認、底質、および海洋生物（動植物プランクトンや底生生物）の調査を実施しており、また、陸上では坑井付近においてCO₂の測定を実施しています。

カナダの陸上では、圧入したCO₂と土壌ガスのCO₂を比較して、その成分の違いから漏出はしていないと判断できた事例があります。

ポイント

メリット1：CCS事業と周辺環境の関係について、科学的根拠に基づいた説明をすることができます。

メリット2：得られた結果は、社会的関心や周辺住民の要望への説明にも有用です。

課題：自然変動など外部要因の影響を受けやすいため、データの評価には十分な注意が必要です。

10

音響探査

【環境】

Environment/海洋環境/気泡



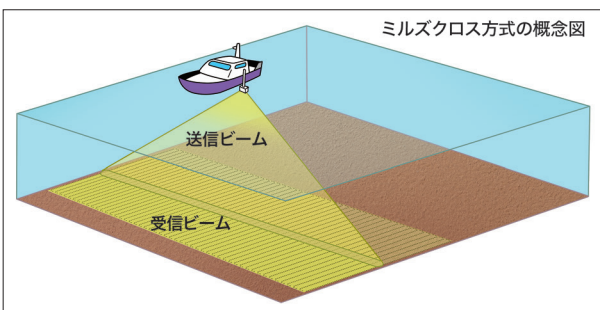
背景 海底の地形や海の中の気泡を調べる

海域での環境モニタリングにおいては、潜在的なCO₂の漏出経路となり得る海底窪地などの検出、繰り返しの測定により、CO₂の圧入前と圧入後の海底地形の変化について調べることができます。

また、船から水中に向けて音波を発信させて、その波の強弱によって、気泡の有無を調べることもできます。気泡の見つけ方は、漁船がソナーを使って魚の群れを見つけるのと同じ原理です。

技術 船の上から音波の送受信を繰り返す

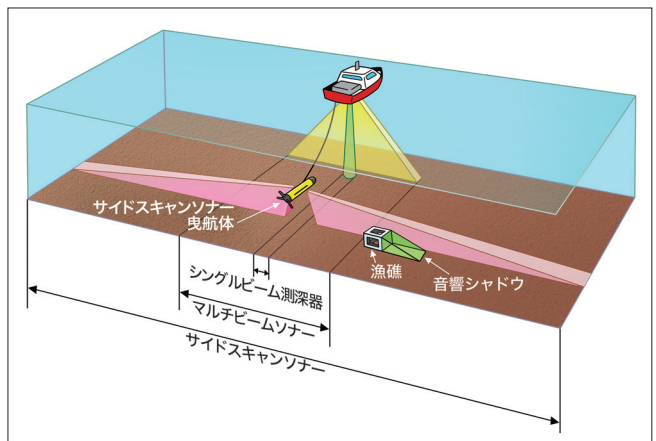
音響探査は一般的に、船を前進させながら音波の送受信を繰り返し、海底のようすを帯状に調べていく技術です。主に海底地形図を作るためのデータ収集に用いられ、サイドスキャンソナー (SSS)、マルチビームエコーサウンダ (MBES)、合成開口ソナー等が実用化されています。対象とする気泡の規模、水深などにより、適切な手法を選ぶことが重要です。



●マルチビームエコーサウンダ (MBES) の模式図

MBES(Multi Beam Echo Sounder)は、マルチビーム測深機から調査船の左右両舷方向に幅広く、前後方向に狭い、扇状に広がる音波を発信する。反射波を受信するまでの往復送時を計測し、多数点の測深を行えるため、3次元画像を作成できる。海底の詳細な地形変化までを把握することが可能。

出典：沿岸海洋調査株式会社HPを参考に作成



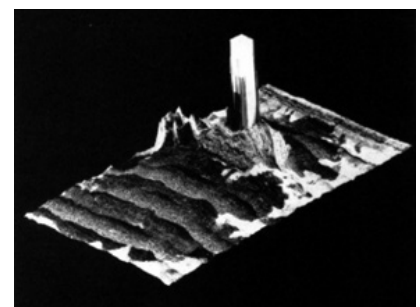
●サイドスキャンソナーの模式図

サイドスキャンソナーは、海中を移動する曳航体の両舷につけた変換器から扇状に音波を発信する。海底面に当たった音波は距離が近いものから順に戻ってくるので、この音波の強弱を時間別に記録する。得られたデータを分析することで、海底面の散乱強度の違いを表す2次元画像を作成できる。水深を測ることはできないが、他の計測方法によって得られた水深データを加味することで、3次元画像を作成できる。

出典：株式会社ハイドロシステム開発HPを参考に作成

●サイドスキャン画像の3次元表示

出典：植木俊明「サイドスキャンソナーによる海底の把握」(1990)

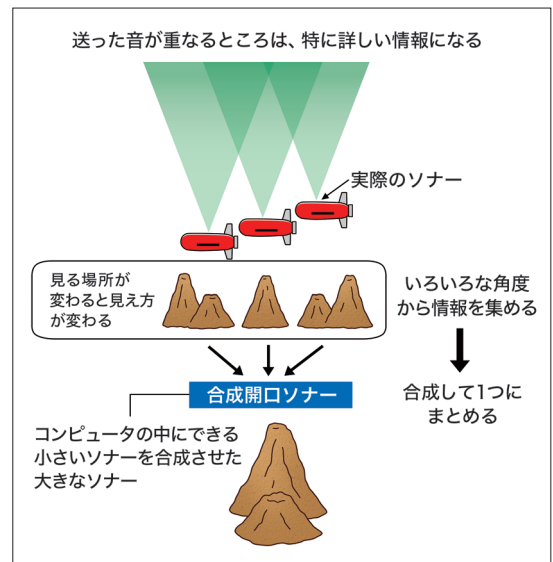


海中でのメタンなどによる気泡の検知には音響機器（音波）が用いられていることから、広範囲の気泡探査が可能なサイドスキャンソナーを用いたCO₂気泡の検知手法の開発が進められています。しかし、メタンと比較して、海水に溶けやすいCO₂の検知は難しく、どのような条件であれば検知できるか等の検討が進められています。

●合成開口ソナーの概念図

合成開口ソナーはサイドスキャンソナーを原型に開発された音波発信機器。移動しながら多数の異なる位置で得た海底反射情報をコンピュータで処理することで、分解能と感度を大幅に向上させることが可能。

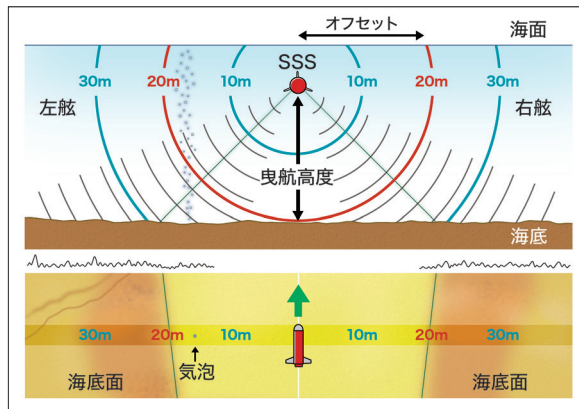
出典：国立研究開発法人海洋研究開発機構（JAMSTEC）HP



事例 海域での実証実験

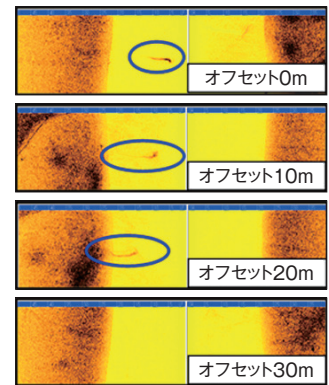
地球環境産業技術研究機構（RITE）では、2017年に苫小牧の沖合と同じくらいの水深（約30m）の海域で、海底からCO₂の気泡を放出し、サイドスキャンソナーで観測する実証実験を行いました。気泡の放出率や気泡のサイズ、観測条件などを変えながら測った結果、船速2.5～5.5ノット、放出（漏出）率500～5000ml/minで気泡を検知できることが分かりましたが、気泡から離れるほど検出精度が落ちるので、調査の効率などに課題があります。

また、気泡が見つかったとしてもガスの種類や由来は分かりません。貯留層から漏出したCO₂との関連は、気泡を採取して別途分析する必要があります。



●サイドスキャンソナーによる気泡検知の原理

サイドスキャンソナーは、機器の左右両方向に音波を発振し、反射波を受信することで、海中の物体や海底の凹凸などのイメージ画像を得る機器。これを海中に沈め船で曳航することによって、海中のCO₂気泡を検知する。



●検知されたCO₂の気泡画像

RITEが2017年に行った実証実験で得られたCO₂の気泡画像。出典：公益財団法人地球環境産業技術研究機構HP（2点とも）。左のイラストはHPを参考に作成

ポイント

メリット1：気泡の発生を分かりやすい画像にして見ることができます。

メリット2：同じ場所で時間をずらして観測することで、魚影と気泡の区別を簡単につけられます。

メリット3：海底の地形や地形変化についても調べることができます。

課題：気泡の検出技術としては、確立した段階には至っておらず、他の方法を併用する等、留意が必要です。しかしオーストラリアの研究機関等ではこのモニタリングが非常に有力として本格的な研究が進んでいるところもあります。

11

シミュレーション 【CO₂挙動把握】



背景 観測データと計算結果の“答え合わせ”

シミュレーションはモニタリングではありませんが、この小冊子を利用される方の利便を考慮してその概要を紹介します。シミュレーションとは、対象となる貯留エリアの地下を数値化したモデル（貯留層モデル）を作って将来（例えば1000年後）を予測する技術です。CCSでは、地中に圧入したCO₂が地層に安定的に貯留されているかどうかを示す必要があります。そのため、CCSではまず事業を計画する段階で、地下の構造や特性を調べて地下の地質をモデル化し、そこにCO₂をどれだけ貯留できるか、またそのCO₂が地中でどう動くかなどを計算し、1000年後も安定して貯留できる場所を選定します（貯留適地調査段階におけるシミュレーション）。事前の貯留適地調査に基づいて事業計画を立て、実際の事業がスタートすることになります。

貯留適地調査の段階で作ったモデルは初期モデルともいえるものです。圧入井・観測井の掘削後、CO₂の圧入の開始後にモニタリングで得られたさまざまな追加の観測結果を踏まえて、モデルの更新が行われます（操業段階でのシミュレーション）。このように観測結果とシミュレーション結果とを比べ、いわば“答え合わせ”をしながら、モデルを修正し、シミュレーションを更新していきます。これは、CCSの事業や将来的な動向を見据える際、さまざまな「判断」「決定」をするうえで重要な要素技術と位置付けられます。こうして、モニタリングとシミュレーションの両輪でモデルの精度を上げる作業を行い、CO₂を長期にわたって安定して貯留できることを確認しながら事業を続けていきます。

技術 モデルを作成し、更新を繰り返す

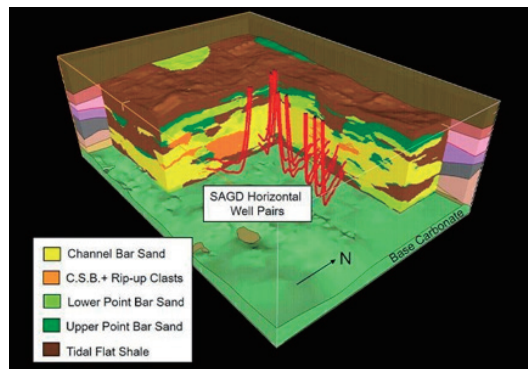
CCSでは、CO₂の圧入で地中がどう変化するか、圧入終了後（例えば10年後、100年後、1000年後）まで見通せるようなシミュレーションを行います。そのプロセスは、次の3段階に分けられます。

1) 貯留層モデルの作成と更新

CO₂の動きを正確に予測するには、精度の高いモデルを作ることが求められます。弾性波探査で調べた貯留層の厚さと広がり、各種モニタリングで得た岩石のすき間の割合、流体の流れやすさなどの情報をもとに、コンピュータを駆使して地質モデルを作成します。続いて貯留層内でCO₂がどのように貯留されるかをシミュレーションする貯留層モデルは、地質モデルを簡略化したものともいえます。

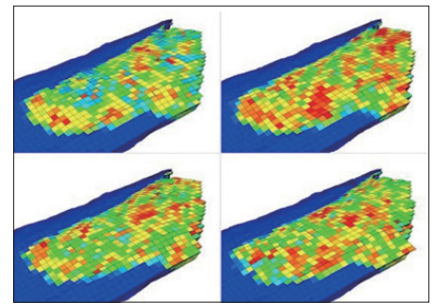
●貯留層モデルの作成/更新

地質情報や弾性波探査、坑井等で得られた観測データ（孔隙率および浸透率分布、地質構造、岩種についての熱的性質、貯留層の形と大きさ、流体特性など）をもとに、地質モデルを作成。その地質モデルを解析する計算を簡略化して実用的な時間で計算できるように、各セルをいくつかまとめてサイズを大きくする（粗いモデルにする）アップスケーリングを行い、貯留層内の流体の移動等の変化を計算できるように組み込んだ、貯留層モデルを作成する。図は、貯留層の三次元地質モデル例。



貯留層の三次元地質モデル例

出典：高橋明久・柏原功治・溝畑茂治・島田信仁・中山徹・古瀬雅己・鳥越隆弘、2006、オイルサンド貯留層三次元地質モデルの構築、物理探査、59、3、233-244



4つの異なる貯留層モデル例

出典：石油資源開発株式会社HP

2) ヒストリーマッチング（観測値と計算値との比較）

ヒストリーマッチングとは、計算結果と観測データを照らし合わせ、モデルの修正をしていく作業のことです。CCSでは、シミュレーションの計算結果と、実際の圧入量やモニタリングによる観測結果を照合し、貯留層モデルを修正します。このヒストリーマッチングを繰り返し、計算結果と観測結果のズレをできる限り小さくしておくことは、1000年後の将来予測のズレを最小限にすることにつながります。

3) 将来予測

ヒストリーマッチングで精度を高めたモデルを使って、CO₂の現在の貯留状況、将来の動きを予測したり、貯留層の漏洩の有無を評価します。

事例 苦小牧実証試験

坑内圧力が一致するようにヒストリーマッチングを行い、複数のモデルを作成しました。

いずれのケースも長期将来予想シミュレーションでは、圧入したCO₂は、圧入を停止してから1000年後も圧入井を中心とした1000m程度の範囲に留まっていることが予測されました。

ポイント

メリット1：さまざまなモニタリングで得たデータを基にモデルを作成し、1000年後のCO₂の挙動を予測します。これは、CCS事業における意思決定を担う重要技術です。

メリット2：モデルの精度を上げると、地下のCO₂がきちんと留まっているかどうかをさらに正確に予測できるようになり、1000年後の予測の振れ幅が小さくなります。これにより、CCS事業の安全・安心を担保することができるようになります。

課題：コストや手間を最小限にしつつ、目的に応じた精度のモデルを作成すること、また、観測結果とシミュレーション結果との比較やモデル更新の頻度を適切にすることが挙げられます。そのため、事前調査時点でのシミュレーションにより、モデルの不確実性の大小について十分に把握しておくことが大切です。

12

機械化（無人化）への対応 【環境】 Environment/海洋環境



背景 海洋でのモニタリングに役立つ機械化

今後のCCS事業の普及に向けて、モニタリングのコストや負担を軽減することが課題の一つに挙げられています。深海底のように人間が簡単に行くことのできない場所での調査や、自動化できる単純作業などは、機械化することが課題の解決策となり得ます。

技術的にはさまざまな機器や装置が開発されており、例えば、海洋調査、ダム湖、発電所の温排水が流れ出る海域の環境調査、漁礁、遺跡、落下物の探索など、機械化が取り入れられている分野は多岐にわたります。CCSモニタリングでも、機械化の可能性を探ることができます。

技術 さまざまなタイプの海洋無人機

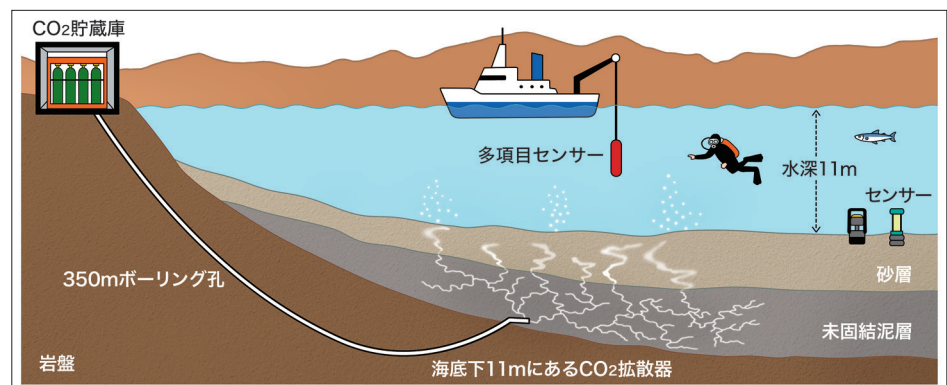
海洋におけるモニタリングでは無人潜水機や無人水上機が用いられ、海外のCCSモニタリングでは、遠隔操作型無人潜水機（ROV）の導入事例があります。

他には全自動で動き、広い範囲での水質調査や海底地形調査に適している自律型無人探査機（AUV）、別名「水上ドローン」とも呼ばれる自律型無人水上機（ASV）、遠隔操作型無人水上機（ROSV）などがあります。

事例 海外のCO₂放出試験事例と無人機の活用例

1) 日英共同漏出実験 (QICSプロジェクト)

QICSプロジェクトは、スコットランドで行われた英国と日本の共同研究プロジェクトです。実際に海底下からCO₂を漏出させる世界初の実験であり、海洋環境への影響と回復



●QICSプロジェクトでの実験の概要

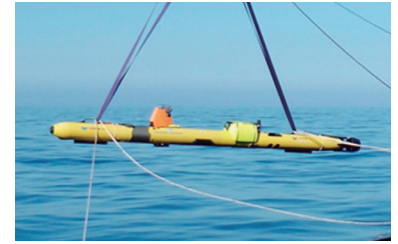
沿岸の陸地から沖合へ水平距離で約350m、水深10～12m（潮位により変動）の海底下12mでCO₂を放出するようにボーリング孔を掘削し、CO₂を放出した。

出典： https://www.rite.or.jp/news/press_releases/pdf/press20140929.pdf を参考に作成

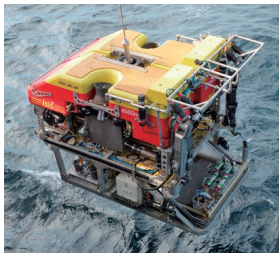
過程に関する調査を行いました。CO₂漏出の環境への影響は極めて小さく、すぐに回復することが示されました。

2) スコットランドの事例 (STEMM-CCS)

AUVとROVを使って、海底から実験的にCO₂を放出して、放出地点を検知できるか、何か影響が出ていないかを調査するためのモニタリングが行われました。ROVで機器類を運んで海底に設置。さまざまな機器を搭載したAUVでデータを収集し、海底のようすを画像化しました。



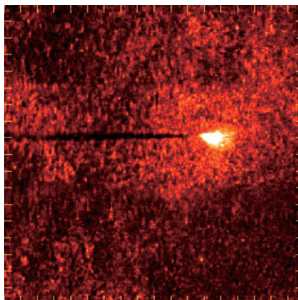
●STEMM-CCSで使用されたAUV
空中重量:70-88kg、長さ2.7m、直径20cm。500~1000mを潜航でき、3ktで4~5時間持続可能。
出典：Anita Flohr et.al (2021)
Towards improved monitoring of offshore carbon storage: A real-world field experiment detecting a controlled sub-seafloor CO₂ release", International Journal of Greenhouse Gas Control.106



●STEMM-CCSで使用されたROV
STEMM-CCSでは、漏出検知と影響評価のために、AUVを用いたモニタリング調査が行われた。AUVには、放出地点とその周辺の海底の画像化を行うサブボトムプロファイラー、海底の表面形状の調査や水柱の観測を行うサイドスキャンソナー、実験領域でのpH分布の空間データの収集を行うpHセンサー等が搭載された。写真のROVは、空中重量:4000kg、大きさは2m×2m×2.5m。カメラ、ライト、スラスター、マニピュレーター、多数の科学センサーを装備し、水深6500mまで降下可能。

3) イギリスの事例 (ETI-MMV)

CO₂を海底から放出し、AUVにサイドスキャンソナーや化学センサーなどを搭載してモニタリングを実施しました。サイドスキャンソナーで放出した地点のCO₂を自動的に検出し、高画質の画像を撮影。放出した位置の特定に成功しました。



●撮影されたCO₂放出の画像
搭載されたサイドスキャンソナーで撮影された画像。CO₂ブルームの音響影(音がさえぎられて生じる影=黒線)を示している。
出典：Marcella Dean et al. Insights and guidance for offshore CO₂ storage monitoring based on the QICS, ETI MMV, and STEMM-CCS projects, 2020



●ETI-MMVで使用されたAUV (ALR)
空中重量600~1200kg、長さ3.7m、航続距離1000km。使用するセンサーや操作の種類にもよるが、3か月の配備が可能。
出典：National Ocean Center HP

ポイント

- メリット1**：機械化により、モニタリングコストの負担軽減が期待されます。
- メリット2**：海底等、調査が難しい場所でもデータを得ることができます。
- メリット3**：不特定の場所での漏出を探查するには効率的とはいえませんが、地点が分かっているときに、そこから漏出しているものが、貯留していたものかを判断する場合、あるいは漏出地点を特定する場合には大変有効です。
- 課題**：内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) でも、JAMSTEC等と連携した研究が進められていますが、まだ研究途上であり、具体的に得られる成果の内容も含め、国内での運用についてはこれからになります。

合理的なモニタリングの考え方



ここまで、モニタリング技術を紹介するとともにステークホルダーの理解を得ることの大切さについて触れてきましたが、モニタリングでもう一つ重要なのが事業性（経営的側面）を考慮することです。必要なモニタリングは、CCSサイトの地質的特性や社会的環境などによって異なりますので、サイトごとにモニタリング計画を立案することが求められます。

そのうえで、まずは操業状態や二酸化炭素の動きを監視し、諸データが想定範囲内に収まっていることを確認します（一次監視）。また、想定から外れるデータが確認されたときには、そのリスクを評価し、必要に応じて追加の監視に移行します（二次監視）。他方、操業を継続する中で、リスクがないと判断できれば、監視を軽減することも考えられます。このように操業期間にわたるリスク評価に基づいて、監視項目・監視内容を適切かつ柔軟に設定していくことが、事業性向上に資することになります。

なお、CCSに係る事業は新しい馴染みのない事業であることから、ステークホルダーの理解に関連して、法の規制によるモニタリングとは別に社会的関心に基づいた項目（サンゴの監視など）を、監視項目として加えることも考慮する必要があるでしょう。

このように、総合的に必要と判断した項目をサイトに合った形で計画し、その内容を適宜見直しながら実施していく。それが、あるべきモニタリングの姿だといえます。

苫小牧CCS実証試験に係わる課題検討会 有識者委員

(○印: 将来のCCS社会実装を見すえたあるべきモニタリングに係る分科会 委員兼務)

2024/03/31 現在職位

| | |
|---------------|---|
| ○ 佐藤 光三 (委員長) | 東京大学大学院工学系研究科 システム創成学専攻 教授 |
| ○ 海江田 秀志 | 電力中央研究所 名誉研究アドバイザー |
| ○ 佐藤 徹 | 東京大学大学院新領域創成科学研究科 海洋技術環境学専攻 教授 |
| ○ 薛 自求 | 地球環境産業技術研究機構 主席研究員 |
| ○ 徂徠 正夫 | 産業技術総合研究所 CO ₂ 地中貯留研究グループ グループ長 |
| ○ 徳永 朋祥 | 東京大学大学院新領域創成科学研究科 環境システム学専攻 教授 |
| ○ 松岡 俊文 | 深田地質研究所 特別研究員 京都大学 名誉教授 |
| 岸本 幸雄 | 日本エヌ・ユー・エヌ(株) シニアアドバイザー |
| 中垣 隆雄 | 早稲田大学理工学術院 創造理工学部総合機械工学科 教授 |
| 瀧野 哲郎 | 東京工業大学物質理工学院 応用化学系 准教授 |

【参考資料】

- 「分科会」支援業務報告書概要版 (2023年度の取りまとめ)
- 『社会実装に向けたモニタリングのあり方検討』に係る技術動向調査および「将来のCCS社会実装を見据えたあるべきモニタリングに係る分科会」支援業務報告書概要版 (2023年度の取りまとめ)
- 『CO₂地中技術事例集Phase01 基本計画』 二酸化炭素地中貯留技術研究組合
- 『将来のCCS社会実装を見据えたあるべきモニタリングに係る分科会』の進捗報告並びに提案骨子 日本CCS調査株式会社 (2023年11月)
- 『苫小牧におけるCCS大規模実証試験 30万トン圧入時点報告書』 経済産業省、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構、日本CCS調査株式会社 (2020年5月)
- 株式会社日本CCS調査 (JCCS) HP
<https://www.japanccs.com/corporate/message.php>
- JCCS動画 https://www.japanccs.com/library_category/movie/
『苫小牧から世界へ』
CLIP1 『CO₂はどこに閉じ込めるのか』
CLIP2 『貯留槽と遮へい層の解説』
CLIP3 『貯留場所の調査』
『CCSの可能性、貯留技術編』
- 経済産業省 資源エネルギー庁 エネキャリア～ENERGY CAREER ACADEMY～
第6回「エネルギー業界の新しい取組」 松岡 俊文
<https://www.youtube.com/watch?v=3iXLFrjExPU>
- 『長岡プロジェクトからみた二酸化炭素地中貯留技術の現状と課題』
薛自求、松岡俊文 (地学雑誌、2008)
- 公益財団法人地球環境産業技術研究機構 (RITE) HP <https://www.rite.or.jp>
- 公益財団法人地球環境産業技術研究機構 年次報告書
『RITE Today Vol.19 2024』 『RITE Today Vol.18 2023』
- 「CO₂地中貯留における誘発地震リスクマネジメントについて」 薛自求・中島崇裕 (石油技術協会誌 Vol.89 No.2 2024)
- 「CO₂地中貯留技術開発の動向」 薛自求 (エネルギー・資源Vol4.0 No.3 2019)
- 株式会社地球科学総合研究所 (JGI) HP <https://jgi-inc.com>
- 独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構 (JOGMEC) HP 『資源ミライ開発』
- <https://mirai.jogmec.go.jp>
- 『CCS技術の新展開』 監修：茅陽一 シーエムシー出版 (2011)
- 『図解CO₂貯蓄テクノロジー』 公益財団法人地球環境産業技術研究機構編 工業調査会 (2006)
- 『見えない地下を診る 驚異の物理探査』 公益財団法人物理探査学会 幻冬社 (2022)

この小冊子は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務の一環として日本CCS調査株式会社が作成しました。

【禁無断複製】 本小冊子の全部または一部を無断で複写複製（コピー）、磁気または光学記録媒体に入力することを、著作権上の例外を除き、禁じます。