

## CO<sub>2</sub>貯留研究グループ



グループリーダー・  
主席研究員

薛 自求

サブリーダー・主席研究員  
主席研究員  
副主席研究員  
副主席研究員  
副主席研究員  
主任研究員  
主任研究員

内田 堅二  
野村 眞  
高須 伸夫  
中島 崇裕  
名井 健  
田中 良三  
内本 圭亮  
三戸彩絵子  
張 毅  
朴 赫  
利岡 徹馬  
松村 淳  
小牧 博信  
渡辺 雄二  
樋脇 和俊  
橋本 励  
指宿 敦志  
清水 信寿  
高野 修

主任研究員 岡林 泰広  
研究員 伊藤 拓馬  
研究員 三善 孝之  
研究員 孫 艶坤  
研究員 翟 鴻宇  
研究員 中村 明寛  
研究員 永田 丈也  
研究員 小谷 雅文  
主任 淵上 聡子  
主任 中西公美子  
研究助手 奥道 恵美  
研究助手 佐々井登喜男  
研究助手 佐々木 恵  
研究助手 辻 志織  
研究助手 西出 朱美  
研究助手 氷見 悠子  
研究助手 平井 順子  
研究助手 柴谷 聖司  
岡田 浩将

## 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

2019年8月にオーストラリアのGorgonプロジェクトにおけるCO<sub>2</sub>圧入が開始された。天然ガスに伴随するCO<sub>2</sub>を回収し、Barrow島下の帯水層に貯留するもので、圧入量は年間340~400万トンを見込んでいる。また、米国ノースダコタ州では、帯水層貯留やCO<sub>2</sub>石油増進回収（EOR）で年間100万トンを超す規模のプロジェクトが本格的に動き出したことも注目される。米国のプロジェクトでは、CO<sub>2</sub>の圧入中ならびに圧入後の地表や地下の状況をモニタリングし、信頼性や費用対効果の高い監視システムを開発することも計画されている。そこで、CO<sub>2</sub>貯留研究グループは光ファイバーを用いた地中のひずみ、圧力、温度を測定する技術を開発して貢献する。CO<sub>2</sub>地中貯留技術の実用化に向けて、安全にCO<sub>2</sub>を貯留するための技術開発がより一層重要になってきている。

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。本事業においては、先述の長尺光ファイバーを用いた地中計測の実証試験のほか、CO<sub>2</sub>圧入における

安全管理システムの開発、海洋におけるCO<sub>2</sub>漏出検出のための研究、仮にCO<sub>2</sub>が海洋に漏出した場合における環境影響の評価にも取り組んでいる。

CO<sub>2</sub>圧入安全管理システムは、CO<sub>2</sub>圧入サイト周辺の自然地震や微小振動を常時観測し、他の観測結果との総合判断により準リアルタイムで安全管理をするものである。また観測結果を適切に公開することで社会受容の獲得につなげることも意図している。

海洋におけるCO<sub>2</sub>漏出検出の研究に関しては、大阪湾で変動特性の異なる2地点で年間データを取得した。今後はデータを解析し、炭酸系のモニタリング方法を検討する。このような多面的な技術開発と適切な情報公開のしくみづくりにより、安全安心なCO<sub>2</sub>貯留に貢献していきたい。

CO<sub>2</sub>を効率的に圧入するという観点では、これまで、CO<sub>2</sub>をマイクロバブルにして圧入する技術開発に取り組んでいる。NEDO事業では、現地実証試験も行って有効性を確認している。

また、当研究グループは、CCSに関係する国際機関や国際的な枠組みとの連携を通してCCSの普及に貢献している。

## 2. 主な研究課題と成果

### 2.1. 光ファイバーを用いた地層健全性評価モニタリングシステムの開発

アルジェリアのIn Salahプロジェクトでは、CO<sub>2</sub>の圧入による圧入井まわりの地表隆起や、サイト周辺での微小振動（マグニチュード1未満）が多数観測された。微小振動の発生はCO<sub>2</sub>プルームの広がりや地層圧上昇との関連が指摘されている。そのためCO<sub>2</sub>地中貯留では、圧入されたCO<sub>2</sub>の広がりの監視に加えて、地層圧の上昇にともなう地層変形や圧力伝播範囲の監視が必要となる。これらの監視を効果的に実施する技術の一つとして、分布型光ファイバーセンシング技術が挙げられる。

分布型光ファイバーセンシング技術は、光ファイバー全体が受信部となるために、空間的に連続した記録を取得できる技術として様々な分野での利用が進んでいる。また複数のファイバーを一度に設置することで、温度・圧力・ひずみ・振動をすべて捉えるマルチセンサーとして利用でき、多数のセンサーを設置する場合に比べて大幅なコスト低減を図ることができる。

当研究グループでは、この分布型光ファイバーセンシング技術を用いたモニタリングシステムの実用化に向けて現場試験を実施しており、以下では2つの事例について紹介する。

最初の事例は、坑井掘削中の地層の微小なひずみの計測である。図1は、掘削井からそれぞれ3m（左図）と10m（右図）離れた既存坑井に設置された光ファイバーで計測されたひずみ変化である。これらの記録から、坑井掘削によって地層には多孔質弾性変形に伴うひずみが生じること、またそのひずみが周囲へ伝播すること、伝播距離や方位によってひずみの減衰傾向が異なることを光ファイバーセンシング技術によって明確に捉えられることが示された。深度方向に現れるひずみの局所的な違いは、地層を構成する岩石の剛性や浸透性に起因すると考えられる。

二番目の事例は、坑井に設置された光ファイバーによる自然地震観測である。圧入井や観測井に設置される振動計測用の光ファイバーは、CO<sub>2</sub>プルームの広がりを把握するためのVSP（Vertical Seismic Profile）技術の受振器としての利用に加え、VSPを実施しない

期間における坑井周辺の微小振動観測にも用いることができる。図2は、長期間の連続観測によって検知した多数の地震イベントのうち、観測サイト近傍で発生した地震記録（震央距離約12km、震源深度1.7km、マグニチュード1.3）である。上段の加速度計記録では、2秒付近にP波が、6秒付近にS波が記録されている。一方、下段のファイバー記録では、地下深く（記録の下端）から到来する地震波が地表面（記録の上端）で反射し地下深部へと伝播し、逆V字形を形成している。地震波の伝播速度によって、逆V字形の角度が異なることから、角度が小さいP波と角度が大きいS波の識別が容易に行えることが特徴である。加えて、地表反射に伴うPS変換波や、地下深部で発生したSP変換波などが記録されており、検知した振動イベントの特徴づけや、次項で紹介する圧入安全管理システムへの入力データとしての利用が期待される。

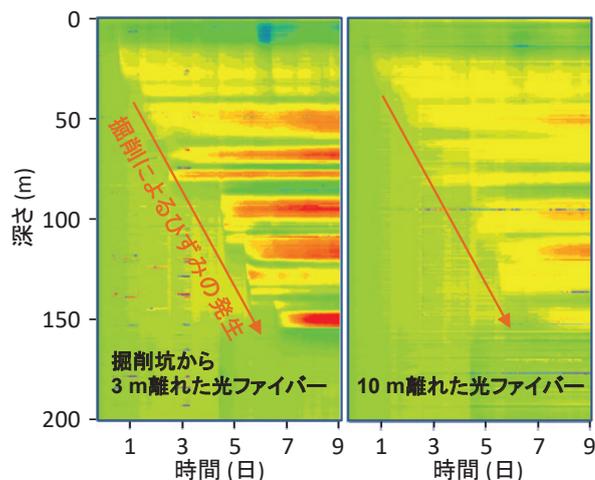


図1 坑井掘削中の地層のひずみ  
(ひずみが生じると黄緑から暖色へ変化)

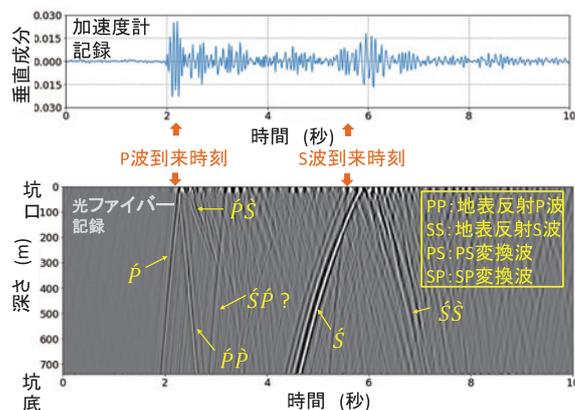


図2 自然地震記録

## 2.2. 圧入安全管理システム (ATLS) の開発

様々な流体圧入プロジェクトにおいて、地層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。しかしながら一般市民の懸念が強いことから CO<sub>2</sub> 地中貯留においても地震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、全ての観測システムのデータを利用し、かつ我が国の実状でも適用可能な CO<sub>2</sub> 貯留のための圧入安全管理システム (ATLS: Advanced TLS) の開発を行っている (図3)。我が国に適用可能な ATLS としては、

- (1) 自然地震が多く人為的ノイズも大きい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の決定が可能なこと、
- (3) 自動でリアルタイムのデータ処理が可能なこと、が必要となる。

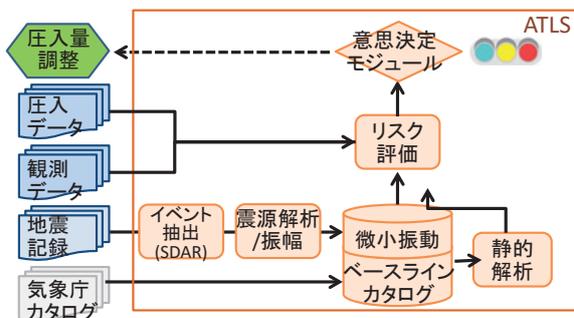
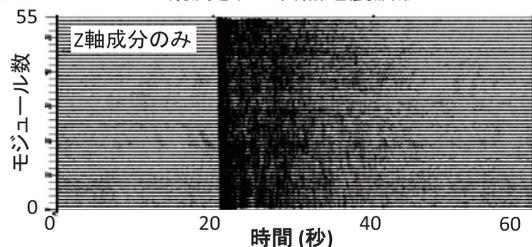


図3 ATLSの概要図

ATLSの機能として、自然地震との区別を行うために、気象庁の一元化震源情報を自動的に収集し、自然地震と観測振動を比較して判別するようにした。また、ノイズの大きなデータから振動イベントを抽出する方法として、SDAR (Sequentially Discounting AR model learning: 忘却型学習アルゴリズム) を利用した手法を開発した。微小振動イベント位置決定機能については、我が国の震源位置決定に利用されている hypomh を適用することとした。それらの機能を ATLS のコードに実装し、苫小牧実証試験サイトに設

置した Ocean Bottom Cable (OBC) による地震観測システムのデータ (図4) を用いて、システムの動作検証を行った。ATLS は1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微小振動イベントの位置決定が行えることを確認した。

全55モジュールで観測された自然地震波形



モジュールNo.37  
3成分の拡大図

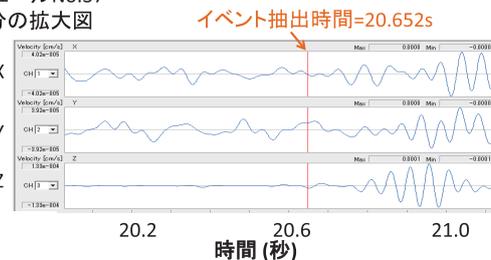


図4 OBCによる微小振動観測例

## 2.3. 海域におけるCO<sub>2</sub>漏出監視

海底下 CO<sub>2</sub> 貯留を実施する場合には、CO<sub>2</sub> が海水中に漏出していないことを確認することが法令により求められている。また、社会的にも特に周辺住民の安全安心を担保する上で CO<sub>2</sub> 漏出監視が重要となる。このため、当研究グループでは海洋中に漏出した CO<sub>2</sub> を検出するための技術開発も行っている。

CO<sub>2</sub> の海水中への漏出形態は、気泡と海水に溶解した溶存態の2種類が考えられる。気泡については、漏出した CO<sub>2</sub> 気泡を音響により検出する手法を開発した。溶存態については、溶存態 CO<sub>2</sub> の指標の一つである海水中の CO<sub>2</sub> 分圧 (pCO<sub>2</sub>) を用いた判定手法の研究開発を行っている。これまで、長期間の四季調査データが整備されている大阪湾を対象として、pCO<sub>2</sub> を推定し、異常値の検出手法を研究してきた。その結果、四季の採水調査で適切なバックグラウンドデータを得るためには少なくとも4~6年の調査が必要であることがわかってきた。このように数年の調査が必要となる理由は、海水の水質が気象や海象などの要因により季節変動や経年変動を示すためである。

そこで、季節変動や季節内の短期変動を評価するために、大阪湾を対象としてpCO<sub>2</sub>と水質の連続観測を2018年7月から1年以上にわたり実施した。大阪湾海域は東部と西部で海洋構造が異なる。水深が浅い東部は河川の流入により成層しやすい。一方で、水深が深い西部は流れが強いために、混合型を示す。東部の代表点として神戸沖（A点）、西部の代表点として関空沖（B点）を調査点とした（図5）。



図5 連続観測の実施点

観測したpCO<sub>2</sub>と酸素飽和度（DO%）の変化を図6に示す。いずれの海域でも、pCO<sub>2</sub>は夏季に高く、冬季に最も低い。神戸沖は、冬季に200~300 μatmまで低下するが、夏季には1000 μatm以上になる。また、夏季の変動が非常に大きく、数百 μatmの変動幅をもつ。一方、関空沖は神戸沖に比べて季節変動が小さい。冬季は約300 μatmと神戸沖と同様だが、夏季は約600 μatmまでしか上昇しない。DO%はpCO<sub>2</sub>とは逆に、冬季に高く夏季に低くなるが、変動幅はpCO<sub>2</sub>と同様に夏季に大きく冬季に小さい。また、神戸沖と関空沖のDO%を比較すると、どちらも冬季はほぼ飽和状態にあるが、夏季は関空沖が80%程度なのに対し、神戸沖は冬季に比べて大きく低下し、貧酸素状態になることがある。

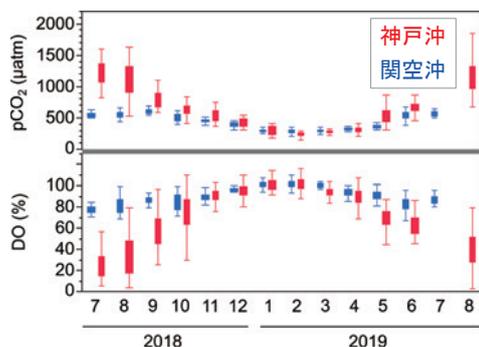


図6 pCO<sub>2</sub>とDO%の季節変化  
（線の上下は最大最小値を、箱は四分位範囲を示す）

DO%に対してpCO<sub>2</sub>をプロットすると、両者には逆相関の関係がみられる（図7）。これは主に生物活動の作用によるものである。植物プランクトンによる光合成でCO<sub>2</sub>の吸収とO<sub>2</sub>の放出が生じ、好気的な呼吸ではO<sub>2</sub>の消費とCO<sub>2</sub>の放出が生じる。つまり、pCO<sub>2</sub>が低くなるとDO%は高くなり、逆にpCO<sub>2</sub>が高くなるとDO%は低くなる。もし、圧入したCO<sub>2</sub>が漏出すると、DO%は変化せずCO<sub>2</sub>のみが増加するため、自然変動で示された逆相関関係からpCO<sub>2</sub>が大きく超えることになり、CO<sub>2</sub>漏出を判定することができる。このため、pCO<sub>2</sub>-DO%の自然変動の状態を知ることが重要となる。

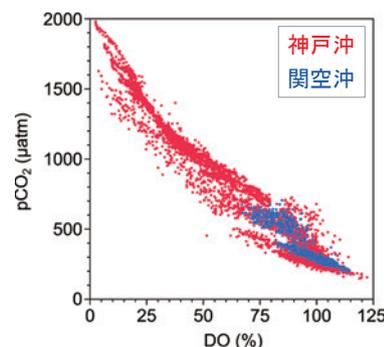


図7 DO%とpCO<sub>2</sub>の散布図

自然状態のpCO<sub>2</sub>とDO%の関係は、水温や塩分の変化、荒天による物理的な攪乱、大気と海水間のCO<sub>2</sub>やO<sub>2</sub>のガス交換や海水中のイオン濃度の変化などにより影響を受ける。その結果、pCO<sub>2</sub>とDO%の逆相関の関係には図7に見られるような変動幅が生じることになる。今後、得られたデータについて変動をもたらす要因の解析を進めることにより、CO<sub>2</sub>漏出の適切な判断基準を得るための手法開発を、ひいては海底下CO<sub>2</sub>貯留における適正な海洋モニタリングの確立を目指している。

#### 2.4. マイクロバブルCO<sub>2</sub>の圧入試験

マイクロバブルCO<sub>2</sub>圧入とは、特殊フィルターにCO<sub>2</sub>を通過させ、マイクロバブル（微細気泡）化し、岩石の孔隙中に浸透させる技術である。これまで東京ガス(株)と共同でマイクロバブルによるCO<sub>2</sub>圧入効率の向上に取り組んできており、「貯留物質の貯留装置および貯留方法」として特許を取得している（特許第5399436号）。本技術の特徴より、

- (1) CO<sub>2</sub>地中貯留における孔隙の利用効率の最大化
  - (2) 従来、貯留層として対象としていなかった浸透性の低い地層の活用
  - (3) 石油回収率の向上
- が期待できる。

室内試験では、円盤型の多孔質フィルターによりマイクロバブルCO<sub>2</sub>を発生させ、円柱型の岩石試料に注入することによってその性能を評価していた。一方、現場でマイクロバブルCO<sub>2</sub>を発生させるには、地表から地下にCO<sub>2</sub>を送り込む必要があるため、圧入井の坑内に吊り下げられ、10～数10mのある圧入区間にマイクロバブルを圧入する工夫が必要であった。そこで、当研究グループでは、マイクロバブルCO<sub>2</sub>坑内発生装置を開発した(図8)。図では一本のマイクロバブル発生ツールを示している。およそ1.5m長のこのツールはジョイントにより連結でき、圧入区間に対応した長さに調節して坑内に設置できる。



図8 マイクロバブル発生ツール

開発したツールについて、貯留率向上効果の検証のための現場実証試験を石油資源開発株式会社と協力して、秋田県男鹿市申川鉱場で行った(図9)。試験に選んだ地層は、地下約900mにある油を含む砂層である。地下にある原油はほとんど自噴しない状態で砂層に留まっている。ここに、CO<sub>2</sub>と水を9:1の割合で圧入し、その後、地下流体を汲み上げるHuff and Puffを実施した。

マイクロバブルツールを設置せず、従来通りのCO<sub>2</sub>圧入を実施したところ、およそ0.6トン/日で10日間、合計5.8トンのCO<sub>2</sub>を圧入できた。圧入終了後、2日間CO<sub>2</sub>を地層に浸透させ、その後、5日間連続して地下流体の回収を行った。CO<sub>2</sub>は2.1トン回収されたものの、油は回収されなかった。回収されずに地下に留まっているCO<sub>2</sub>の貯留率は62%であった。一方、同様の工程でマイクロバブルツールを設置した試験で

は、CO<sub>2</sub>を2トン/日で10日間安定して圧入することができ、20トンのCO<sub>2</sub>を圧入できた。CO<sub>2</sub>の回収量は3.9トンであり、貯留率は80%であった。更に、原油の回収量は試験前の10倍に向上した。このように、マイクロバブルCO<sub>2</sub>圧入技術は、従来法に比べ、圧入効率の向上、CO<sub>2</sub>の地下貯留率の向上、原油の回収量の向上が見込まれる。

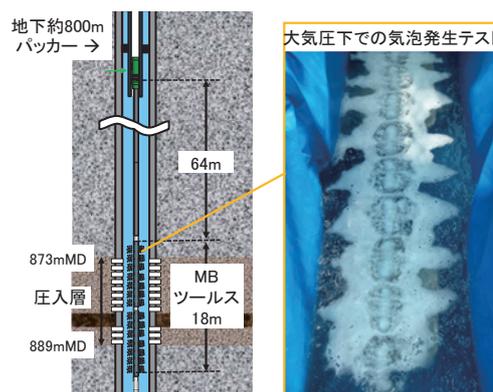


図9 マイクロバブルCO<sub>2</sub>坑内発生装置の現場設置イメージと大気圧下での気泡発生テスト

本技術は、国内での研究開発に留まらず、海外からも注目されている。マイクロバブル特許技術の使用許諾契約を2018年に締結した中国君倫石油へ、本2019年には坑内マイクロバブルCO<sub>2</sub>発生ツールを販売した。低浸透性油田へのCO<sub>2</sub>-石油増進回収(EOR)適用に関して、事業展開の第一歩を踏み出だした。また、米国においても本技術の検証が計画され、2019年、ノースダコタ大学とCO<sub>2</sub>地中貯留やEORに関する共同研究の覚書を締結した。今後、様々な地層での実証試験を積み重ね、マイクロバブルCO<sub>2</sub>圧入技術の適用範囲や有用性を示すデータを蓄積し、経済性等を評価する予定である。

## 2.5. 国際連携および海外動向調査

当研究グループでは、CCSに関係する国際機関や国際的な枠組みとの連携を通してCCSの普及に貢献するとともに、CCSの海外動向を調査している。2019年の国際機関と国際的な枠組みの動向を以下にまとめる。

### (1) CCSに係る海外動向

CCSの普及にはCO<sub>2</sub>の輸送および貯留用の共用インフラを核とし、将来の拡張が容易な“クラスター”に

よる推進が有効であるとして、これまで諸外国、特に、欧州で幅広く議論されてきた。英国では、気候変動委員会（Climate Change Committee）が発表した報告書「Net Zero-The UK's contribution to stopping global warming」で、2050年までに同国の温室効果ガス排出量を実質ゼロすることの重要性、CCSの必要性を強調し、2026年頃までに少なくとも1つのクラスターの運転を開始し、その後早急に4つ以上のクラスターの追加運転が必要と提言している。また、英国会は6月に、2050年までにCO<sub>2</sub>ネット排出量をゼロにすることを法定の政策目標とするため、2008年気候変動法改正法案を可決している。

ノルウェーでも現在クラスタープロジェクトが検討されている。フルスケール産業CCSプロジェクトは、Heidelberg Norcem社のセメント工場とFortum Oslo Varme社の廃棄物焼却施設という2つ排出源からのCO<sub>2</sub>回収、船舶輸送と共用インフラによるCO<sub>2</sub>海底貯留（総回収量80万トン/年）を目指している。2018年から基本設計（FEED）が実施されており、プロジェクトの最終投資判断は2020年度に予定されている。また、10月に開催されたロンドン条約・議定書の締約国会議では、海域貯留を目的とするCO<sub>2</sub>の国境を越えた輸送・輸出を可能にする決議が採択された。これにより、今後多国間での海域CO<sub>2</sub>貯留プロジェクトの実施が可能となる。将来的に、地域的なハブやクラスターによる複数国との輸送ネットワークの共有、コストの低減、CCSの導入・普及、新たなビジネスモデルの機会へと繋がるのが期待できる。

また、中国では5月に中央政府（科学技術部）が「CCUSロードマップ2019」を公表した。同ロードマップは、2050年までに国内のCCUSの大規模普及とクラスターの実現（8億トン/年以上）を目指し、商用化のための制度設計、インフラ整備、技術革新など積極的に動き始めている。

そのほか、豪州では8月に西オーストラリア州北西部に位置するGorgonプロジェクトの回収プラントが稼働となった。同プロジェクトは、天然ガス処理（LNGプラントは2016年に稼働）に伴うCO<sub>2</sub>をBarrow島下の帯水層に貯留することを目的としている。圧入量は340~400万トン/年と想定されている。

Chevron社を中心とする民間主導のプロジェクトであり、大阪ガス、東京ガス、JERAも出資している。CO<sub>2</sub>回収を含むガス処理プラントの設計・建設には日揮が参画している。

## (2) CCSに係る国際枠組みの動向

CCSの国際コミュニティは、大規模実証のフェーズから普及のフェーズに移行するために様々な取り組みを行っている。2019年の最大の成果として、前述のロンドン議定書におけるCO<sub>2</sub>輸出の暫定的な解禁が挙げられる。

CCUSが、当機構等による提言を反映した形で、2019年6月に軽井沢で開催されたG20エネルギー・環境大臣会合で取り上げられたことも特筆に値する。閣僚声明やアクションプランにおいて、CCUSの可能性や投資等の必要性への認識が示され、既存枠組みでの国際協力の強化や研究開発および普及の奨励等が謳われた（詳細はトピックスをご覧ください）。

クリーンエネルギー大臣会合の枠組みのもとで2018年に設置されたCCUSイニシアティブは、引き続き、金融セクターとの連携とウェビナー（webinar）等を通じたCCUSの認知度向上に取り組んでいる。2019年は、気候変動対策を推進するために10数社の石油大手が立ち上げたOGCII（Oil and Gas Climate Initiative）とのCCUSの普及に向けた協力に合意し、今後の活動の活性化が期待される。

CCSに係る国際枠組みである炭素隔離リーダーシップフォーラム（CSLF）の技術グループでは、これまでの取り組みの成果の有効活用を念頭に、活動のあり方が見直されつつある。2017年に策定したCSLF技術ロードマップについては、2025年のCCSによるCO<sub>2</sub>削減目標（4億トン/年、累計18億トン）やその実現に向けた技術関連の4つの提言：① CCSインフラの構築、② 大規模実証の知見の共有、③ コスト低減、④ ビジネスモデルの構築、に⑤ CO<sub>2</sub>利用、を加えた5分野での進展を評価していくことになった。本年の評価では、2025年の目標達成は不可能ではあるが、官民の共同出資によりCO<sub>2</sub>インフラが大規模に整備されれば、後年に遅延を取り戻すことができるとされた。