

CO₂貯留研究グループ



グループリーダー
山地 憲治

【コアメンバー】

サブリーダー・首席研究員	山崎 啓	主任研究員	間木 道政	主任研究員	和泉 宏典
首席研究員	野村 眞	主任研究員	三戸彩絵子	主任研究員	岡林 泰広
首席研究員	薛 自求	主任研究員	利岡 徹馬	研究員	張 毅
副主席研究員	高須 伸夫	主任研究員	橋本 励	研究員	中野 和彦
副主席研究員	田島 正喜	主任研究員	西澤 修	研究員	朴 赫
主任研究員	喜田 潤	主任研究員	木山 保	研究員	伊藤 拓馬
主任研究員	中島 崇裕	主任研究員	指宿 敦志	研究員	中村 孝道
主任研究員	田中 良三	主任研究員	小牧 博信	研究員	蔣 蘭蘭
主任研究員	内本 圭亮	主任研究員	西村 真	研究助手	高岸万紀子
		主任研究員	高野 修	調査役	金森 薫

実適用を目指すCO₂地中貯留技術開発の取り組み

1. はじめに

温室効果ガスであるCO₂の排出削減は喫緊の課題である。火力発電所や製鉄所等の大規模発生源から排出されるCO₂を分離回収し地中に貯留するCCS (Carbon dioxide Capture and Storage) は、燃焼効率改善、燃料転換、再生可能エネルギー利用拡大といった他のCO₂排出削減策とともに、効果的な地球温暖化対策技術として重要視されている。

2014年に取りまとめられた気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 第5次報告書によると、2100年にCO₂濃度を430~480ppmにするシナリオ (いわゆる2°Cシナリオ) では2100年に年間排出量がほぼゼロ、電力部門では2050年に年間排出量がほぼゼロとなっている。その中で、CCSは重要な対策オプションの一つとして位置付けられている。

このような状況の中、我が国ではCCS大規模実証試験が立ち上げられ、日本CCS調査株式会社が北海道苫小牧市において坑井掘削等を進めてきた。この実証試験では、2016年度より、製油所の水素製造装置から発生したガスから分離・回収したCO₂を年間10万トン以上の規模で地下深部の地層 (萌別層: 地下1,100~1,200m、滝ノ上層: 地下2,400~3,000m) へ圧入を開始し、CO₂挙動モニタリング等を実施する予定である。

RITEでは、CO₂地中貯留安全性評価技術開発および国際連携・海外動向調査に取り組んでおり、苫小牧の大規模実証試験と連携しながら、地中貯留に係る安全性評価技術の実用化やCCSに関する社会的信頼の向上を目指している。

2. CO₂地中貯留技術研究開発

地中へのCO₂圧入については、油層にCO₂を圧入して石油の増進回収を行うEOR、炭層にCO₂を圧入してメタンを回収するECBM、枯渇ガス田への隔離、塩水性帯水層への貯留などがある。このうち地下深部の塩水性帯水層貯留では、図1のように貯留層 (砂岩) 上部にガスや液体をほとんど通さないシール性の高

いキャップロック（泥質岩）が存在することにより、CO₂を長期に安定して貯留することが可能である。

図2に示すとおり、RITEではCO₂地中貯留の技術課題に対する取り組みとして、貯留性能評価手法（地質モデル構築）、貯留層内のCO₂挙動解析（モニタリング技術、挙動予測シミュレーション技術）および貯留層外部へのCO₂移行解析（CO₂移行シミュレーション技術、海域環境影響評価手法）に係る技術開発を進めている。また、これらの研究成果および国内外の知見をもとにCO₂地中貯留に係る技術事例集を作成している。



図1 CO₂地中貯留の概念図

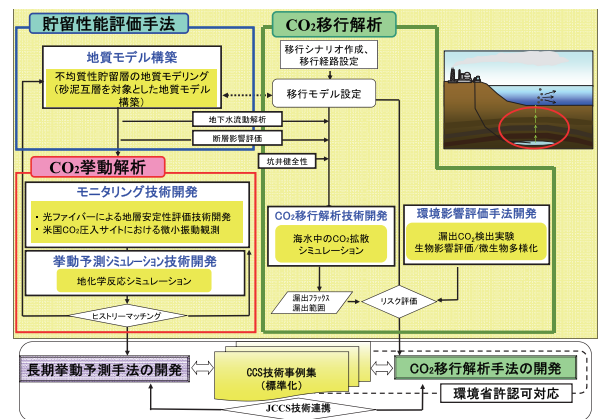


図2 CO₂地中貯留の技術課題に対するRITEの取り組み

2.1 貯留性能評価手法の開発

貯留性能評価手法の開発は、「地質モデルの構築手法の開発」、「地下水流動の解析手法の開発」からなる。

貯留層に圧入されたCO₂挙動解析には、不均質性を反映した信頼性の高い地質モデル構築が重要である。CO₂地中貯留分野では漏洩防止の観点から、調査井の本数が少なく、ボーリングコアや物理検層等の地質学的データに限られる。このような制約下で得られたデータを最大限に有効活用するため、ボーリングコア、物理検層、三次元弾性波探査の各種データを組み合わせた地質モデル構築の技術開発が求められる。RITEでは長岡実証試験サイトを例に、まず貯留層の地質特性解析を実施し、地層の堆積環境を明らかにした。さらにGDI（Geology Driven Integration）解析技術を適用することで坑井物理検層やコア試料から得られる孔隙率や浸透率等の地質学的データと三次元弾性波探査データを統合することにより、信頼性の高い地質モデル構築手法を開発している。また、大規模貯留層へのCO₂圧入に向けて、最適な坑井配置や坑井機能の組み合わせ手法も検討している。

地下水流動の解析手法の開発では、我が国の沿岸域におけるCO₂地中貯留を想定し、CO₂圧入による広域地下水流動への影響評価を行っている。沿岸域の地下水流動解析のために、陸側と海側の地質データを統合し、陸と海がつながる水理地質モデルを作成する必要がある。RITEでは苫小牧実証試験サイトを対象に、沿岸域の広域地下水解析に必要な水理地質モデルを構築している。地下水の流れを正確に予測するためには、文献値を利用するだけでなく、調査井等による貯留サイトの地層サンプルを採取・分析し、孔隙率や浸透率などの水理定数データを取得することや、CO₂圧入前の地下水状態を把握しておくことが重要である。

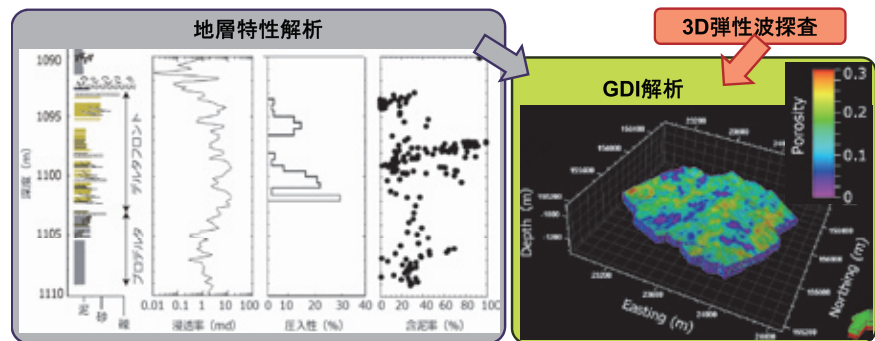


図3 地質学的データと弾性波探査結果を統合解析した孔隙率分布の例

2.2 貯留層内のCO₂挙動解析

CO₂地中貯留の実用化においては、地下深部の貯留層に圧入されたCO₂の挙動をモニタリングし、安定的に留まっていることを確認することが重要である。このため、長岡CO₂圧入実証試験サイトにおいて取得した繰り返し物理検層等のデータを総合的に解析し、CO₂貯留メカニズムを明らかにするとともに、長期挙動予測シミュレーション技術の高精度化に取り組んでいる。また、CO₂圧入に伴う微小振動評価手法の開発、CO₂圧入時の地層の安定性モニタリング技術開発等、CO₂地中貯留の安全性に資する様々な技術開発を行っている。

・CO₂圧入に伴う微小振動評価手法の開発

2014年度までに、米国ローレンスバークレー国立研究所の協力を得て、米国のCO₂圧入サイトに設置した微小振動観測システムを用いて、CO₂圧入に伴う微小振動観測を実施した。これまでに得られた観測データなどを解析し、CO₂圧入との関連性について整理を行った。また、微小振動観測に基づく「CO₂圧入管理手法」(TLS: Traffic Light System)の仕様検討を行った。

・CO₂圧入時の地層安定性モニタリング技術開発

CO₂圧入時の地層の安定性を評価するためには、貯留層や遮蔽層の地層変形を詳細に監視することに加えて、サイトの貯留層から地表までのすべての地層の変形を監視することが望ましい。地表から地下までを連続的に計測できる手法として、石油・天然ガス開発分野では、光ファイバーによる深度方向の温度を計測する技術(DTS: Distributed Temperature Sensing)が実用化されている。RITEではこの光ファイバーセンシング技術に着目し、地層変形(ひずみ)を深度方向に連続的に計測する技術を開発している。

2012年～2013年度のパイロットテストでは、深度300mの坑井のケーシング外側に光ファイバーを設置することにより、CO₂圧入に伴って圧入区間の地層が徐々に変形する状況や坑内パッカーのステップ解放に伴うケーシングひずみの変化を光ファイバーで計測することに成功した(図4)。2014年度は、深度880mの坑井を用いた実証試験を行い、深部坑井への光ファイバー設置方法を確立したほか、長尺ファイバーを用いても、現在の設置方法による信号ロスが少ないことを確認できた。2015年度は、長期モニタリング時の計測システム安定性、現場でのひずみ計測能力および地層変形以外の光ファイバー計測技術開発を検討するために、周辺井戸の揚水に伴う地層変形監視試験(図5)、地層内の漏えい検知試験、

DAS (Distributed Acoustic Sensing) 方式の音波探査試験などを行った。

今後の実用化に向けては、深部坑井に設置可能な高い強度・高い感度の光ファイバーケーブルの製作が必要であり、RITEでは、このような地中埋設型光ファイバーケーブルの開発・改良を行っている。

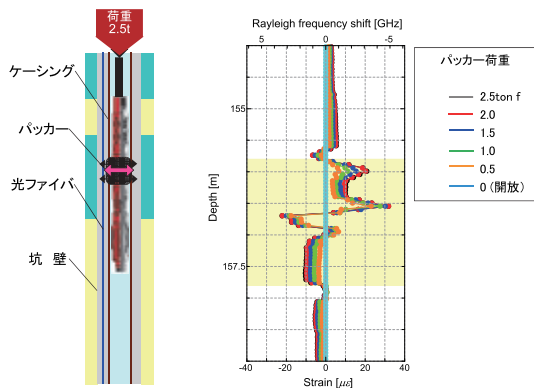


図4 現場でのレイリーの計測感度

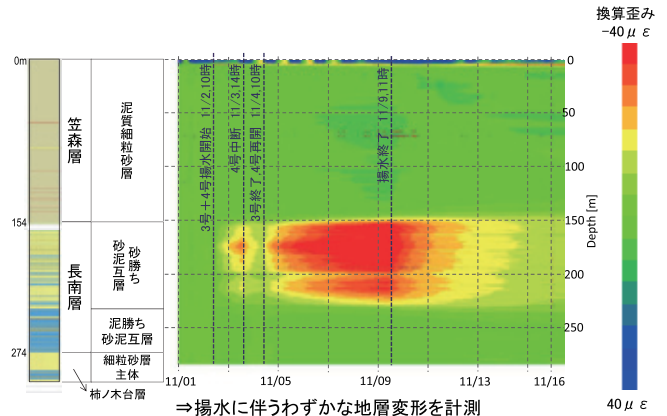


図5 揚水試験 (11/2~11/9) に伴う地層変形

・X線CT装置を用いたCO₂挙動解析とアップスケール化

地下深部貯留層に圧入されたCO₂の長期安定性を評価するためには、貯留層岩石におけるCO₂と地層水との置換メカニズムの解明が重要である。貯留層岩石内部には堆積環境を反映して、孔隙特性 (大きさ、連続性) の違いが存在し、X線CT装置により、不均質を持つコア試料内のCO₂分布と、塩水とCO₂それぞれの浸透率 (相対浸透率) との関係を調べた結果、不均質に対するCO₂の流動特性が明らかになった (図6)。また、CO₂の流動特性は流量にも大きく依存しており、これらの知見は実フィールドへのアップスケール時の流動特性の解明に役立つ。

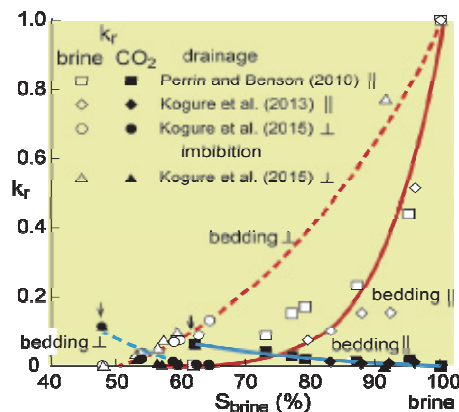


図6 微細不均質に交差する方向と平行方向のCO₂と塩水の相対浸透率

・長岡サイトのCO₂挙動解析

RITEは、2003年7月から2005年1月にかけて新潟県長岡市郊外でCO₂圧入実証試験を実施し、地下1,100mの塩水性帯水層に10,400トンのCO₂を圧入した。RITEでは、当該サイトを研究対象として、地中のCO₂の状態のモニタリング手法の開発、およびCO₂挙動予測シミュレータの開発を行ってきた。地中貯留の実

証試験は海外でも実施されているが、圧入終了後のCO₂挙動を詳細にかつ10年以上継続してモニタリングされているのは長岡サイトであり、その成果は世界から注目されている。

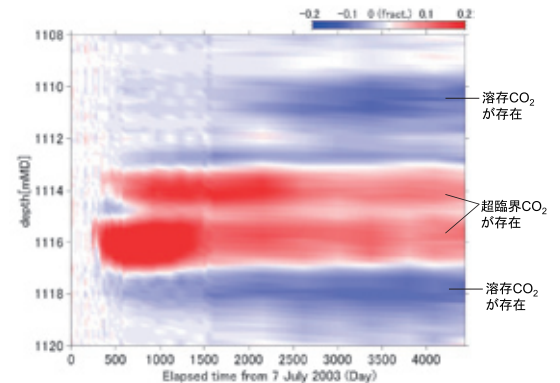


図7 長岡サイトの比抵抗検層によるCO₂挙動モニタリング観測結果

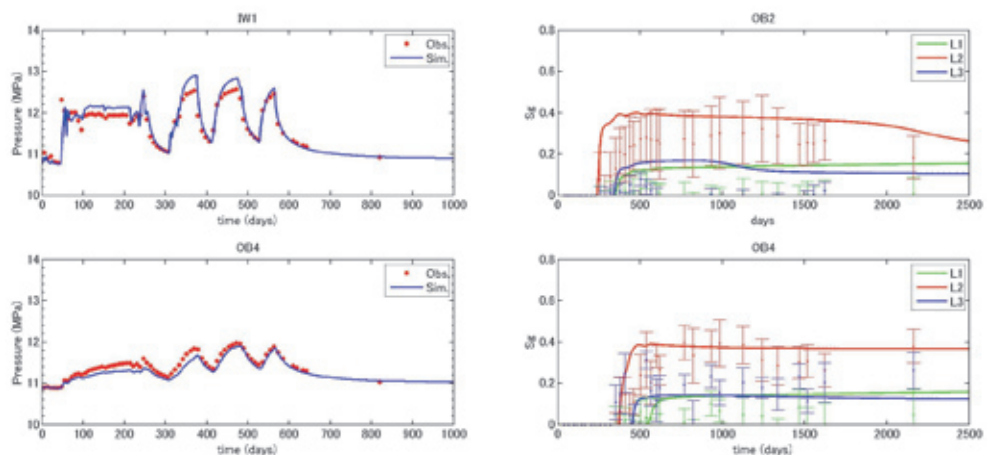


図8 圧入モニタリング観測結果とCO₂挙動シミュレーション結果
(左：坑底圧力、右：層別のCO₂飽和度)

CO₂挙動モニタリング手法の開発では、物理検層、地層水採取、および坑井間トモグラフィを繰り返し実施し、CO₂の広がりや貯留状態（超臨界状態であるか地層水に溶けた状態であるか）の推定を行ってきた。2015年度には中性子・音波・インダクション検層を実施し、圧入後のCO₂はほとんど動かず、安全に貯留されていることを確認した。同時に圧入したCO₂の地層水への溶解が進行し、より安全なトラッピングへと移行していることを確認した。

CO₂挙動シミュレータの開発では、長岡サイトの詳細な観測データを使って検証を行ってきた。観測データとのヒストリーマッチングによって、地質モデルの信頼性の向上や信頼性の高い地質モデルに基づいた1000年後の長期挙動予測を実施した。その結果、圧入されたCO₂は貯留層の限られた範囲に留まりほとんど移動しないことが確認された。

2.3 貯留層外部へのCO₂移行解析

海底下地層へのCO₂貯留の場合、海洋環境保全の観点から貯留層から海中にCO₂が漏出していないことを監視しなければならない。万が一のCO₂漏出検知を

念頭に置いて、海水に溶解したCO₂の監視方法として、海水中のpH、全炭酸、全アルカリ度などを測定し、バックグラウンドデータと比較する方法を提案している。公表されている大阪湾の長期観測データを基にケーススタディーを行い、炭酸系（pH、全炭酸、全アルカリ度など）と同時に溶存酸素量を測定することにより、漏出による異常値を検出できることを示した。さらに、実海域において炭酸系（CO₂分圧）および日射量を連続測定し、炭酸系の自然変動を把握するとともに、自然変動の中から異常値を実際に検出することができるかを検討した。その結果、沿岸域において炭酸系は光合成や生物の呼吸・分解活動等により大きく変動することから、この手法により、漏出による異常値を高精度で検出できる可能性が示唆された。

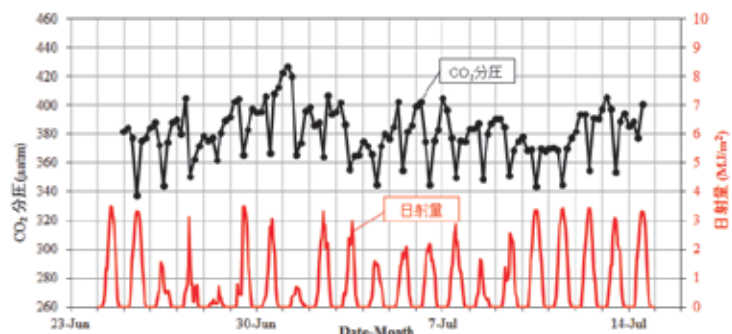


図9 沿岸域の海底（水深50m）で得られたCO₂分圧と日射量との関係

気泡として漏出したCO₂については、音波を強く反射・散乱させるため、音響機器による監視が有効と考えられる。これまでにサイドスキャンソナーを用いて、自然界のガス放出海域での観測や人工的に放出させた気泡による検知実験を行い、比較的少量の気泡漏出でも検知でき、さらに漏出量を定量化できることを示した。

また、海中に漏出したCO₂がどの程度の濃度でどの範囲に広がるのかをシミュレーションするための数値モデルの開発を行っている。CO₂は海底から気泡として漏出してくると考えられているため、CO₂気泡が浮力で海中を上昇しながら溶解するという過程を海洋モデルに組み込むことに取り組んでいる。海水に溶け

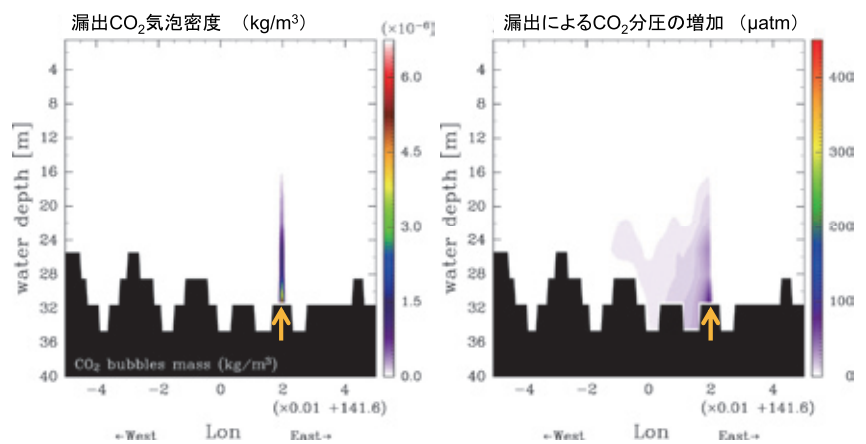


図10 漏出CO₂海中拡散シミュレーション結果（矢印は漏出域）

たCO₂は海の流れによって広がっていくが、海の流れは流れの直上の風だけでなく、遠く離れた海上を吹く風などによって作られていることもある。そこで、数百kmスケールの海域のシミュレーションができる広域モデルと気泡を組み込んだ高解像の狭域モデルを組み合わせることで、より正確なシミュレーションを目指している。

2.4 CCS実用化に向けた技術事例集の作成

1996年に北海のSleipnerにおいて、世界初のCO₂地中貯留事業が開始された後、多くのCO₂地中貯留プロジェクトが行なわれており、CCS推進に向けてCCS技術に関する汎用的解説書、ガイドライン、ベストプラクティスマニュアルが北米やEUの主要国の機関などによって作成されている。

RITEでは、CCS事業の国内普及や将来の海外展開を見据え、国内の事業者がCCS事業を実施する際に技術的に参考となる「CCS技術事例集」の作成を進めている。CO₂地中貯留の国内事例としては、2003年から2005年にかけて新潟県長岡にて実施されたCO₂圧入実証試験での関連技術を中心とし取りまとめるとともに、海外事例としては、米国Regional Carbon Sequestration Partnerships (RCSP) および欧州の事例を主な対象として収集・整理している。

2015年度末までに、第1章「基本計画」から第4章「実施計画」までを完成させ、第5章「設計・建設」から第8章「閉鎖後管理」までは苫小牧の大規模CCS実証試験事業の成果をとり入れ、2020年度までに完成させる予定である。

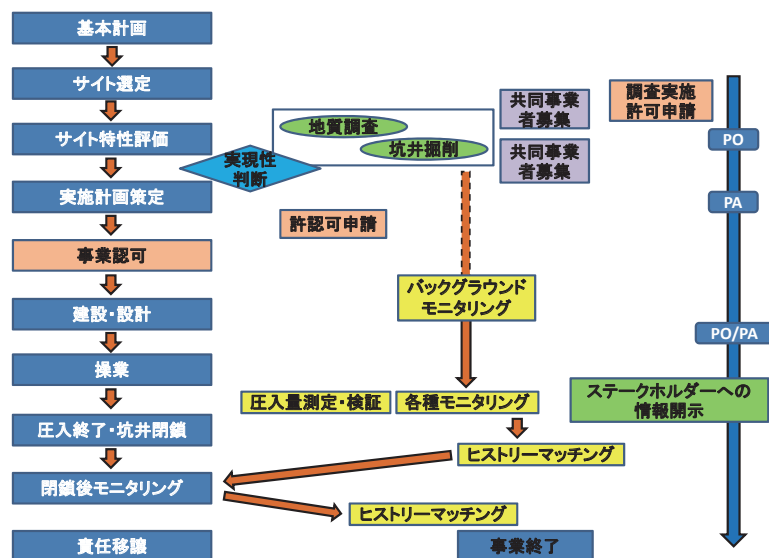


図11 CCSフロー

3. 国際連携および海外動向調査

RITEは、CCSに係る国際機関等との連携を通してCCSの普及に貢献するとともに、CCSの海外動向調査を行っている。ここでは、2015年度のCCSに係る主な国際動向とRITEが参加している国際機関等のうち国際エネルギー機関温室効果ガスR&Dプログラム (IEAGHG) と炭素隔離リーダーシップフォーラム (CSLF) の動向をまとめることとする。

3.1 CCSに係る海外動向

2015年のハイライトの一つとして、11月のカナダでのQuestプロジェクトの稼働が挙げられる。Questは水素製造プロセスからCO₂を回収して塩水性帯水層に貯留するものである。公的補助金の供与のほか、炭素税の2倍に相当するクレジットの付与がインセンティブとなった。この運転開始により、世界の大規模なCCSプロジェクトは15件となり、このうち4件が塩水性帯水層貯留となっている。

電力セクターでは、カナダのBoundary Damプロジェクトが2014年10月に世界で初めて運転を開始したが、2016年には米国で2件の石炭火力のCCSが新規稼働される。さらに、これまでその実施が危ぶまれていたオランダのいわゆるROADプロジェクトに対して、2016年中に最終投資決定がなされる可能性が高まってきた。このように電力セクターでの実績の増加への期待感が高まる中、2015年11月に英国政府から火力発電のCCS実証への10億ポンドの出資の中止が発表された。同国はCCSの普及推進に最も積極的であった国の一つであり、今後のCCS技術の普及への悪影響が懸念されている。

規制面でのハイライトは、米国で導入された火力発電所に対するCO₂排出規制と言える。新設石炭火力に対する規制値は、CO₂排出量の20%程度の回収が必要となるレベルとなった。しかし、この規制によって促進されるのは、コンバインドサイクルのガス火力の新設であり、CCS付きの石炭火力の新設ではないとの見方が多い。

3.2 CCSに係る国際機関等の動向

IEAGHGは、2015年がIPCCによるCCSの特別報告書の発行から10年目に当たることから、学術誌の特別号を9月に発行した。この特別号はこの10年間のCCSの進展に焦点を当てた17の論文から成り、回収、貯留、経済性、バイオCCS、政策、社会的受容性というCCSの主要分野を網羅している。CCSを支える科学技術は過去10年間で大きく発展し、CCSが大規模プロジェクトに適用できる段階まで達したとしている。

CSLFは、11月に開催された閣僚級会合においてルーマニアとセルビアを新メンバーに迎え、加盟国数が25カ国となった。両国とも、世界的に気候変動対策が強化される気運の中で、豊富な国内の褐炭資源を有効活用していく方策としてCCSへの期待が大きい。閣僚級会合においては、大規模な塩水性帯水層貯留のプロジェクト間の国際ネットワークが立ち上げることになり、今後の同分野での知識共有の進展が期待される。これまで約2年間活動してきた第2・第3世代の回収技術タスクフォースや海域CO₂貯留に係るタスクフォースは、それぞれ報告書を策定し公表した。前者で収集された情報はCSLFのウェブサイト上でも整理・公開されることになっている。後者については、今後の国際協力を模索するためにワークショップが2016年に開催される予定である。なお、新しいタスクフォースとして、貯留層における孔隙スペースの有効利用（貯留効率向上）、海域EOR、バイオCCSが取り上げられることになった。