

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・主席研究員	野村 眞	主任研究員 大槻 芳伸	主任研究員 高野 修
主席研究員 薛 自求	主任研究員 喜田 潤	主任研究員 木山 保	主任研究員 内本 圭亮
主席研究員 上林 匡	主任研究員 三戸彩絵子	主任研究員 田中 良三	主任研究員 和泉 宏典
副主席研究員 太田 洋州	主任研究員 岡林 泰広	研究員 張 毅	主任研究員 指宿 敦志
副主席研究員 名井 健	主任研究員 辻本 恵一	研究員 中野 和彦	研究員 朴 赫
主任研究員 間木 道政	主任研究員 渡辺 雄二	研究員 伊藤 拓馬	研究員 中村 孝道
主任研究員 橋本 励	主任研究員 利岡 徹馬		
主任研究員 西澤 修	主任研究員 中神 保秀		
主任研究員 中島 崇裕			

実適用を目指すCO₂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。

国際エネルギー機関 (IEA) は、「エネルギー技術展望2014」の分析において、世界の平均気温の上昇を2℃以内に抑えるという世界的な合意を達成するためには、CCSが2050年時点で必要なCO₂削減量の17%を担う必要があるとするなど、CCSを重要な低炭素エネルギー技術の一つとして位置付けている。

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いる。この実証試験では、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）へ圧入し、CO₂挙動モニタリング等を実施する計画である。

現在、RITEは、CO₂地中貯留安全性評価技術研究開発、日中CCS-EORプロジェクト、国際連携・海外動向調査といった技術開発および情報収集に取り組んでおり、その成果をCCS大規模実証試験に適用し、我が国におけるCCS事業を推進することを目指している。

2. CO₂地中貯留技術研究開発

地中へのCO₂圧入について、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（モニタリング技術開発、挙動予測シミュレーション技術開発）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開発、海域環境影響評価手法開発）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技術事例集の作成を行っている。

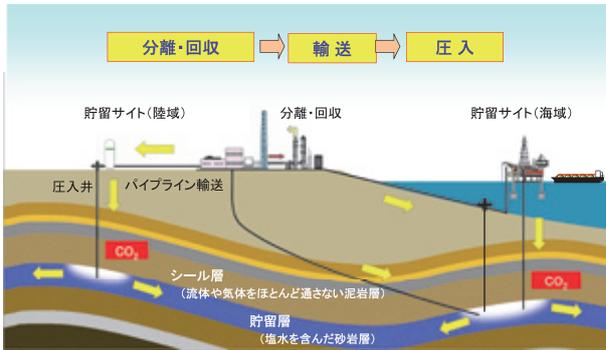


図1 CO₂地中貯留の概念図

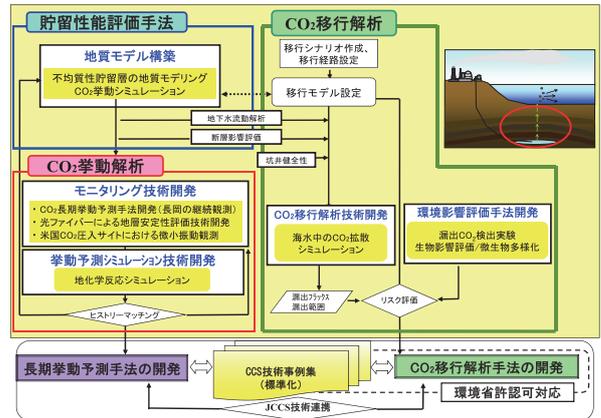


図2 CO₂地中貯留の技術課題に対するRITEの取り組み

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、「日本の地質特性に適した地質モデルの構築手法の開発」と「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精緻な地質モデル構築が不可欠である。CCS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が限られる。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した貯留層物性解析や地質モデル構築技術の開発が期待されている。RITEでは長岡実証試験サイトを例に、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。また、地層の堆積環境に基づく地層フレームワークを作成し、含泥率、孔隙率、浸透率等の貯留層物性を組み込むことで地質モデルを精緻化できることが明らかになった。

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圧入が広域地下水流動に与える影響の評価を行っている。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て解析し、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。

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の評価手法の開発、CO₂圧入時の地層の安定性モニタリング技術開発等、CO₂地中貯留に資する様々な技術開発を行っている。

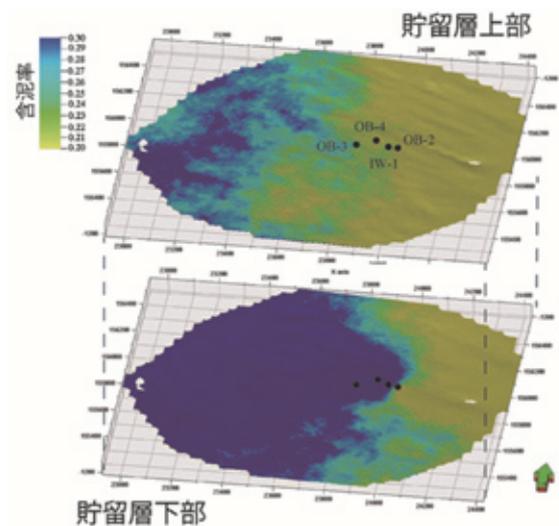


図3 貯留層最上部(上)と最下部(下)の含泥率の三次元分布

・CO₂圧入に伴う微小振動の評価手法の開発

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圧入サイトの浅部ボーリング孔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継続しており、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圧入時の地層の安定性モニタリング技術開発

CO₂地中貯留サイトにおいて、地下の温度、圧力に加えて地層変形(ひずみ)を深度方向に連続的にモニタリングすることは、CO₂地中貯留の安全性を評価する上で重要である。RITEではCO₂圧入時の地層の安定性モニタリング技術を開発しており、光ファイバーを用いて地層変形(ひずみ)を計測する基盤技術を確立した。この基盤技術の実用化を目指して、2012年度の現場試験結果をもとに、2014年度は深い坑井へ試作した長尺光ファイバーケーブルを設置し、実フィールド試験より実用化に向けた技術課題を検証した。

また、今後の実用化にあたっては、CO₂地中貯留サイトに適した光ファイバーケーブルを製作する必要がある。このため、温度、圧力、ひずみに対して高感度であることに加えて、十分な強度を持つ地中埋設型光ファイバーケーブルの開発も行っている。

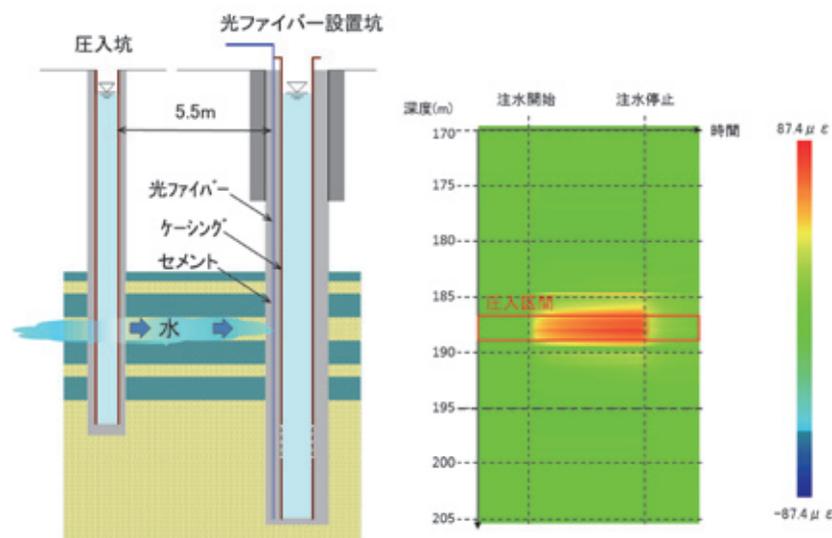


図4 光ファイバーによる注水に伴う地層変形測定

・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、不均質な貯留層におけるCO₂の挙動およびCO₂と地層水との置換メカニズムの解明が重要である。X線CT装置により、不均質性が著しい実証試験サイトのコア試料内のCO₂分布を可視化し、CO₂と地層水との置換特性やCO₂残留トラップメカニズムを解明した。可視化されたCO₂分布と弾性波や比抵抗等の岩石物性との関連性を明確にし、CO₂圧入サイトで得た物理検層や弾性波探査データの解釈に適用した。また、貯留層性能評価にその知見を生かすべくアップスケールの研究を進めた。

・長岡サイトでの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の深部塩水性帯水層に10,400トンのCO₂を圧入した。RITEでは当該サイトにおいて、地中のCO₂の状態のモニタリング手法や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、圧入後(ポスト・インジェクション)のCO₂挙動を詳細にかつ10年以上モニタリングされているのは長岡サイトだけであり、その成果は世界から注目されている。

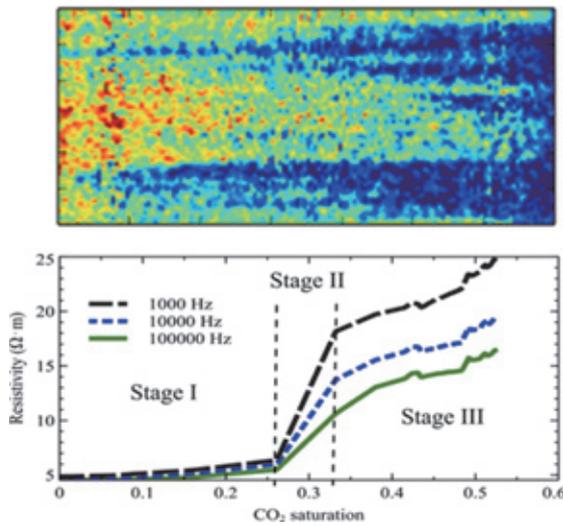


図5 コア試料内のCO₂分布状況の可視化画像

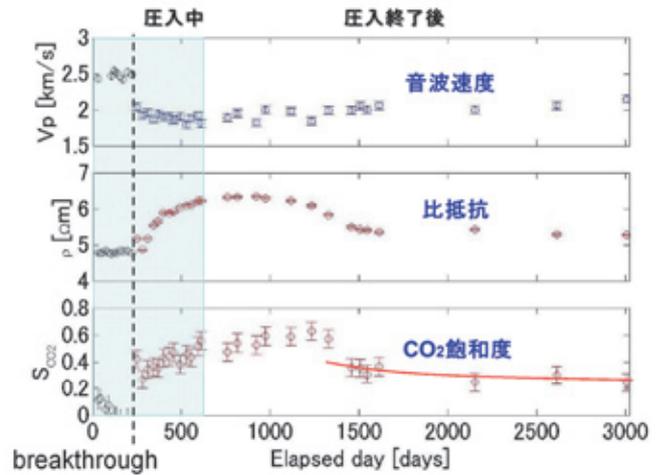


図6 長岡サイトの観測井近傍のCO₂挙動観測結果

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。2014年度には坑内物理検層を実施し、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CO₂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モニタリング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、初期の地質モデルの更新を行い、圧入されたCO₂の長期挙動予測に必要な地質モデルが完成されつつある。

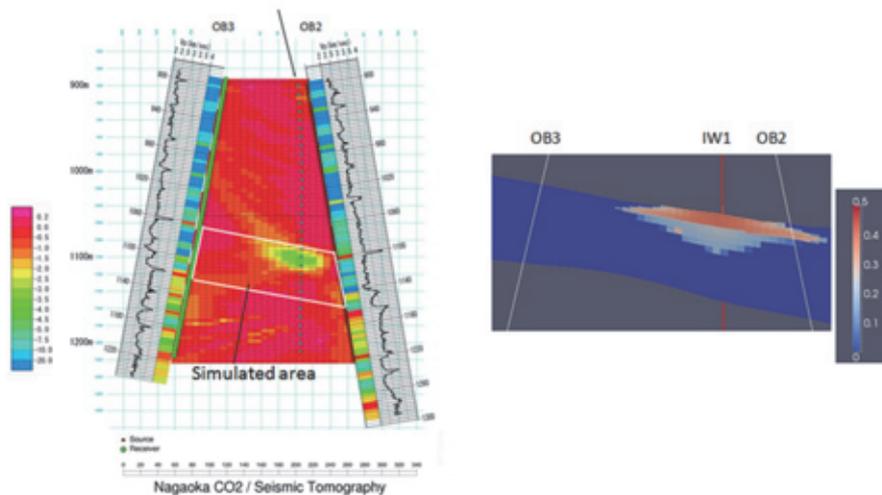


図7 圧入終了直後の坑井間トモグラフィ結果（左）とシミュレーション結果（右）の比較

2.3 貯留層外部へのCO₂移行解析

海底地層へのCO₂貯留を実施する際には、海洋環境への安全性を確保するために、貯留層から海中にCO₂が漏出していないことを監視する必要がある。CO₂は気体あるいは海水に溶解した状態で海底から漏出すると想定される。

海水に溶解したCO₂の監視方法の1つとして、海水の炭酸系（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がある。これまでに、公表観測データを基にケーススタディーを行い、炭酸

系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を測定し、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ている。その結果、沿岸域において炭酸系は自然条件により短期間に大きく変動する場合もあるが、同時に溶存酸素量の変動を測定することにより炭酸系の自然変動の幅を正確にとらえることができ、漏出による異常値を高精度で検出できる可能性が示された。

また、CO₂が気体として漏出した場合、海水中の気泡は音波を強く反射・散乱するため、音響機器による監視が有効と考えられる。これには海底探査や水深測量に利用されてきたサイドスキャンソナーやマルチビーム測深器等によって気泡の検出が可能となるため、天然のガス噴出海域での観測や人工的に噴出させた気泡を用いた検出試験を通じて、検知感度の検討を行っている。この結果、比較的小さな漏出でも検出可能であることが示された。音響探査はさまざまな機器が開発されてきており、面的な広域監視から測点を絞ったスポット監視まで多様な対応が期待できる。

さらに、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モデルを構築している。海の流れは、必ずしも流れがある海域の直上や周辺を吹く風によってのみ作られるわけではなく、遠く離れた海上を吹く風などによって作られることもある。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数値モデル（広域モデル）とCO₂の漏出域周辺を高い精度で計算できる数値モデル（狭域モデル）の二つ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。これまでに、広域モデルで現実的な流れが再現できていることを確認した。また、狭域モデルに時空間的に変化できる海面風応力を与えられるようにし、側面境界に時空間的に変化できる水温や塩分を与えられるようにした。図8は250トン/年の漏出率で行った狭域モデルのシミュレーション結果である。

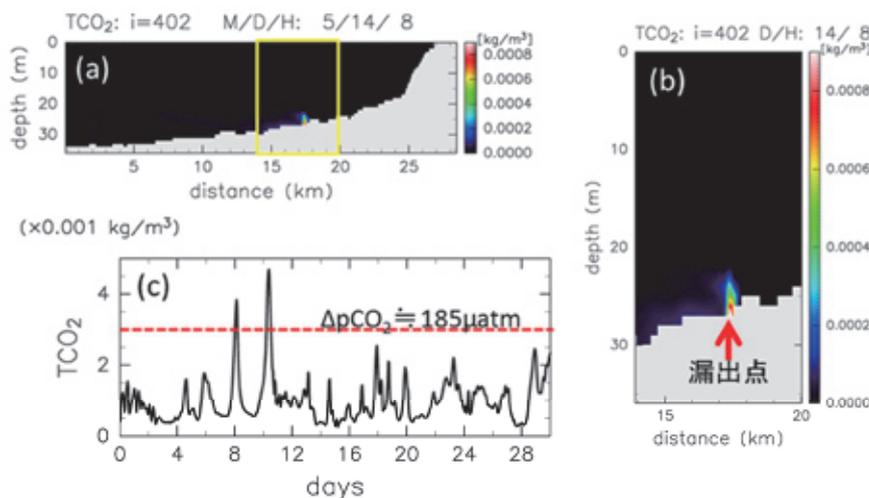


図8 狭域モデルで行ったシミュレーション結果
(a)漏出CO₂濃度の鉛直断面図、(b)漏出点付近拡大図(aの黄色枠内)、(c)漏出点における漏出CO₂の時系列

2.4 CCS実用化に向けた技術事例集の作成

1996年に北海油田のSleipnerにおいてノルウェーが世界初のCO₂帯水層貯留事業を開始した。その後、豪州、米国、欧州、日本などでも、CO₂地中貯留プロジェクトが行われており、CCS関連技術の事例が増えている。また、CCSの普及に必要な法規の整備が進められている。

RITEは、CCS事業の国内普及や海外展開を見据え、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。国内事例としては、長岡実証試験と苫小牧大規模実証試験を、また、海外事例としては、米国（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。

2014年度には「CCS技術事例集検討WG」が設置され、CCSに関連する分野の専門家のご指導を踏まえて、

事例集の作成を進めている。現在の計画では、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2020年度までに完成させる予定である。



図9 CCS技術事例集の構成

表1 CCS技術事例集の主な内容

		主な内容
第1章	基本計画	CCS事業の基本計画策定（事業の目的、選定条件など）
第2章	サイト選定	候補サイトの中から、事業サイト選定する
第3章	サイト特性評価	選定サイトの特性評価（貯留性能、遮蔽性能等、安全性）
第4章	実施計画	第5章(設計・建設)、第6章(運用・管理)、第7章(サイト閉鎖)、第8章(閉鎖後管理)の実施計画を策定する
第5章	設計・建設	サイト開発、坑井(設計、掘削、仕上)、圧入設備、監視設備など
第6章	操業・管理	CO ₂ 貯留事業の認可取得、CCS事業の開始から終了まで
第7章	サイト閉鎖	陸上設備の撤去、坑井の検査と修復、監視設備の更新
第8章	閉鎖後管理	坑内圧力、坑内CO ₂ 挙動、CO ₂ 漏洩等の監視継続

3. 日中CCS-EORプロジェクト

化石燃料の燃焼時に排出されるCO₂を回収し地中に貯留するCCSは、今後の地球温暖化対策にとって極めて重要な技術であり、なかでもCCSに原油増進回収を組み合わせたCCS-EORは、商業的利益を生むことから早期実用化が可能なものとして注目されている。

中国においては、CCS-EORの候補地点が多く、その普及展開が強く期待されており、いくつかの油田ですでにCCS-EORの実績を積んでいる。その一方、期待された石油増産効果が得られないケースも散見されており、CCS-EORの効率化が課題となっている。

当該課題の解決を目指し、2009年11月の第4回日中省エネルギー・環境総合フォーラム（北京）の場で、RITEと中国石油天然気集团公司（CNPC）外事局との間で日中CCS-EORの協力合意がなされた。

本合意に基づき、RITEとCNPCは、CCS-EORの協力を進めてきており、CCS-EORワークショップ（2009年、2010年）、省エネルギー・環境保全・GHG削減ワークショップ（2011年）の共同開催や、日中のCCS/CCS-EOR関連施設/サイトの相互視察など技術交流を深めてきた。

この一連の協力の中、RITEのCO₂挙動モニタリング技術やCO₂を微細気泡化して油層への浸透性を高めるマイクロバブル技術は、CCS-EORの効率化に極めて効果的であることがCNPCで認識され、2013年度には当該技術の実証候補油田をいくつか抽出するにいった。

2014年9月には、これらの活動成果を総括する日中CCS-EORワークショップを北京で開催し、CNPC関係者の他、主要石油会社、発電会社、政策決定機関からも多く参加者を得た。中国からはCCS-EORの実績の紹介、日

ドの拠出を発表し、企業等からの提案公募が開始された。日本における経済産業省と環境省による適地調査事業と相通ずるプロジェクトと言え、共に海域貯留である観点からも、その行方が注目される。

CCSの法規制においては、米国での2つの動きに注目が集まった。一つは発電所のCO₂排出規制であり、もう一つはCO₂貯留用の坑井、いわゆるClass VIとして初めてとなる許可発行である。共に環境保護局（EPA）が当局となる規制である。排出規制については、新設の石炭火力は実質的にCCSの導入が義務付けられることになるEPA案が最終的にどのような規制として導入されるかが注目されたが、その最終化および導入が2015年1月から同年夏に延期されることになった。これは、EPAが2014年6月に発表し議論の絶えない既設火力の排出規制に相当するクリーン発電計画案との同時施行がより合理的との判断による。Class VIの許可は酸素燃焼の石炭火力のCCSプロジェクトであるFutureGen 2.0とバイオエタノール工場をCO₂排出源とする産業CCSプロジェクトにおける計6本の坑井に対して出された。いずれも帯水層貯留用の坑井である。FutureGenの実施は予断を許さないが、これから蓄積される知見やデータは、帯水層貯留を志向する日本にとっても大いに参考になると考えられる。

国際協力の分野では、2014年11月に米中首脳間での合意が注目を集めた。この合意は基本的に気候変動対策を対象としたものであったが、その中で技術革新の果たす役割が重要であるとしたうえで、先進石炭技術開発、大規模貯留プロジェクト、淡水の増進回収（EWR）での協力が合意された。大規模貯留プロジェクトでの協力は第3国も参加して実施するとされており、後述のCSLFでの大規模プロジェクトにおける国際協力に関連する米中の動きと合致する。EWRはCO₂圧入と並行して淡水を生産するものであり、米中間でそのパイロット試験を実施するとしている。大規模CCSの実施で世界をリードする米国とCCSプロジェクト計画を多数有する中国との協力の進展は今後とも注目される。

4.2 CSLFの動向

CSLFは、CO₂の回収とその地中貯留等の研究開発、実証、商業化のための国際協力を推進する国際的な組織であり2003年に設立された。現在、日本を含む22か国と欧州委員会が参加している。その活動は政策グループと技術グループによって行われており、RITEは2009年から技術グループのメンバーとして活動している。

2014年度は、2013年秋にCSLFが開催した閣僚級会合の結果を受けて、CSLFが今後取り組むべき活動テーマの選定とその具体化に向け、政策グループにおいて活発な議論が展開された。その結果、政策グループの下で3つの新規の活動が実施されることになった。中でも、米国と中国が主導する大規模CCSプロジェクトにおける国際協力に係る活動は、これまでに実施例が限定的な帯水層貯留の実プロジェクトにおける国際協力を実施するという野心的な取り組みである。協力を行うプロジェクトの決定を2015年秋の次回閣僚級会合の開催に合わせて行うことを目指している。第2世代および第3世代の回収技術に係る活動では、技術グループとも協力して、既存の資金援助スキームのまとめや様々な当該技術の整理、既存の大規模試験施設の活用法の検討、開発や実用化の加速に向けた政策提言を行う。この活動にはRITEの化学研究グループの研究者も参加することになっている。“コミュニケーション”と名付けられたタスクフォースでは、CCSの普及に向けたCSLFとしてのメッセージを策定し、その統一されたメッセージを各種イベントで発信していく。メッセージ発信の機会として、2015年末にパリで開催される国連気候変動枠組条約（UNFCCC）の第21回締約国会議（COP21）が重要視されている。この他、これまで実施されていた大規模CCSプロジェクトへの金融セクターからのファイナンスに係る活動の継続が決定された。これまでと同様にラウンドテーブルを中心に実施されていくことになる。

技術グループは、上述の通り、第2・第3世代の回収技術の活動へ貢献することになっているが、2014年に入ってから他にもいくつかの新しいタスクフォースを立ち上げている。中でも、海域でのCO₂貯留に係るタスクフォースには、RITEのCO₂貯留研究グループの研究者が積極的に参加しており、2015年半ばに報告書が策定される計画となっている。その報告書では、海域でのCO₂貯留プロジェクトおよびEORプロジェクトの現状、貯留ポテンシャル、輸送、リスク分析、坑井管理、モニタリング・検証・評価、法規制がまとめられる見込みである。