

CO₂貯留研究グループ



グループリーダー・
主席研究員

薛 自求

【コアメンバー】

サブリーダー・主席研究員	松田 央	主任研究員	樋脇 和俊
主席研究員	野村 眞	主任研究員	高野 修
副主席研究員	高須 伸夫	主任研究員	指宿 敦志
副主席研究員	中島 崇裕	主任研究員	清水 信寿
副主席研究員	名井 健	主任研究員	岡林 泰広
主任研究員	内本 圭亮	研究員	張 毅
主任研究員	田中 良三	研究員	朴 赫
主任研究員	三戸彩絵子	研究員	伊藤 拓馬
主任研究員	利岡 徹馬	研究員	蔣 蘭蘭
主任研究員	橋本 励	研究員	王 璐琛
主任研究員	木山 保	研究員	孫 艷坤
主任研究員	小牧 博信	研究員	三善 孝之
主任研究員	西村 眞		

安全かつ実用規模のCCS実現のためのCO₂地中貯留技術開発の取り組み

1. はじめに

カナダアルバータ州のQUESTに続いて、米国イリノイ州のIndustrial CCSプロジェクトでも、陸上で実用化規模の100万トン/年のCO₂圧入が行われている。また、オーストラリアのGorgonプロジェクトが2018年圧入開始予定であり、CO₂圧入規模は340～400万トン/年にのぼる。一方、ノルウェーでは複数の大規模排出源におけるCO₂分離回収と輸送、そして海域貯留までを一体化したフルスケールプロジェクト(Smeaheia)のフィジビリティスタディが計画されている。また、2017年11月に米国エネルギー省(DOE)はメキシコ湾を対象に、2つの海域帯水層貯留の研究プロジェクトを採択している。油ガス田開発で得た豊富な地下情報やパイプライン等の既存インフラの活用を念頭に置いたと思われる。このため、今後は海域の大規模CO₂貯留への注目が高まっていくことになる。

CO₂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、我が国の貯留層特性に適した実用化規模のCO₂地中貯留技術開発を推進している。海域帯水層貯留に係わる海洋環境影響評価については、まだ知見が少なく、欧州では海域での漏出CO₂の検知や海洋生物への影響評価を主要な課題とする研究

プロジェクト(STEMM-CCS)が進められている。

CO₂貯留研究グループでは、貯留サイトの海域サンプリングポイントごとに海水を採取し、海水中のCO₂溶解量を調べる化学的手法とは異なる音響ソナー技術を利用して漏出気泡を物理的に検知する手法の確立を目指している。2017年は海域の模擬実験を基に音響ソナー技術を利用した漏出気泡検知手法の有効性を明らかにした。

また、特殊な多孔質フィルターを介してCO₂を圧入することにより、貯留効率の向上や地層水への溶解促進が期待できるマイクロバブル技術開発にも取り組んでおり、本技術の実用化のカギとなる坑内ツールを試作し、現場テストを実施した。

さらに、CO₂地中貯留の安全管理技術開発のほかに、国際連携・海外動向調査にも取り組んでおり、苫小牧の大規模実証試験とも連携してCCSの早期実用化を目指している。

2. 主な研究課題と成果

CO₂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枠組みの下で、CCSの実用化に向け、「大規模CO₂圧入・貯留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」、「CCS普及条件の整備、基準の整備」を柱に技術開発を進めている(表1)。主な研究課題の実施内容及び研究成果を以下に紹介する。

表1 二酸化炭素地中貯留技術研究組合 研究課題と組合員の役割

研究課題	実施組合員	
(1)大規模CO ₂ 圧入・貯留の安全管理技術の開発	●大規模貯留層を対象とした地質モデル構築(2.1)、貯留層評価	RITE, JAPEX、応用地質
	●CO ₂ 長期モニタリング技術の確立	AIST
	●圧入安全管理システムの開発(2.2)	RITE, JAPEX、INPEX
	●大規模貯留層に適したCO ₂ 挙動シミュレーション、長期挙動予測手法の確立	RITE, AIST、大成建設、応用地質
	●光ファイバーを利用した地層安定性や廃坑井の健全性監視システムの開発(2.3)	RITE, AIST、JAPEX, INPEX
●CO ₂ 漏出検出・環境影響評価総合システムの構築(2.4)	RITE	
(2)大規模貯留層の有効圧入・利用技術の開発	●CO ₂ 圧入井や圧力緩和井の最適配置技術の確立／NRAPツール評価	RITE, 大成建設
	●CO ₂ 溶解促進技術の適用による貯留効率向上(2.5)	RITE, JAPEX
(3)CCS普及条件の整備、基準の整備	●CO ₂ 貯留安全管理プロトコル(IRP)の整備	RITE
	●苫小牧実証データの提供による技術事例集の作成(2.6)、海外機関との連携(2.7)	RITE
	●社会受容性の向上、国際標準化との整合	RITE

2.1. CO₂地中貯留のための地質モデル構築手法開発

貯留層地質モデルの構築はCO₂地中貯留にとって基本的かつ重要な課題である。図1の通り、地中貯留の各ステージにおいて、必要とされる地質モデルが異なっている。油ガス田開発に比べて、利用できる坑井データが少なく、コア試料、物理検層や弾性波探査データは空間的分解能やカバレッジ(カバーする範囲)が異なっており、それらを統合する手法が必要となる。

ステージ	サイト選定	圧入前評価	詳細設計・建設	CO ₂ 圧入	サイト閉鎖後
作業	・広域地質評価 ・広域概念モデル	・基本地質モデル ・詳細地質モデル ・圧入地点決定	・地質モデル更新 ・圧入貯留設計 ・監視範囲決定	・地質モデル更新	・地質モデル更新 ・貯留範囲評価
目的	・構造形態 ・貯留層の広がり ・透流層の広がり	・貯留層評価 ・透流層評価 ・CO ₂ 貯留範囲	・圧入貯留計画 ・モニタリング計画	・安全管理 ・不確実性の低減 ・貯留可搬量把握	・長期挙動予測 ・安全管理
取得すべき情報等	・地質学的知見 ・国土地理院情報 ・2D/3D震探	・調査井 ・高解像度解析 ・3D震探	・評価井 ・ベースラインデータ	・モニタリングデータ ・4D震探	・モニタリングデータ ・4D震探



図1 地中貯留における地質モデル構築について

2017年は、貯留サイトの特性評価時の地質モデル構築に関して検討を行った。数少ない坑井から得た検層等のデータより、できるだけ多くの地質情報を得ようとして、堆積学的な知見から、各データを統合する手法について検討した。

FMI (Formation Micro-Imager) 検層では192個の電極より、細密な比抵抗を測定している。このイメージデータのヒストグラムは、岩種や堆積環境に関する情報が比抵抗の次元で表現されている。一方、NMR

(Nuclear Magnetic Resonance) 検層では励起スピン緩和時間分布が孔隙特性の情報を持つため、貯留層性能につながる情報が得られると考えられる。本研究では、長岡サイトのFMIとNMR検層データを対象に、貯留層特性解析を行った。FMI検層データからは、平均的な比抵抗値と淘汰度に関する情報が得られた。また、NMR検層データ解析では、貯留層の孔隙径分布の特徴を調べるための緩和時間分布の因子解析を行い、8つのクラスターに分けることができた。これらの解析結果を基に、地質性状に関する解釈を行った。図2の緑・黄・赤枠部分はそれぞれ地質性状(孔隙率、浸透率など)が良・中・不良であることを示している。このような地層の不均質性は、図2右の、圧入性(injectivity)の高・中・低の違いとよく一致する。このように、検層データの分解能やカバレッジに注意しながら地層解析を行えば、貯留層評価に有用な情報が得られることが分かった。

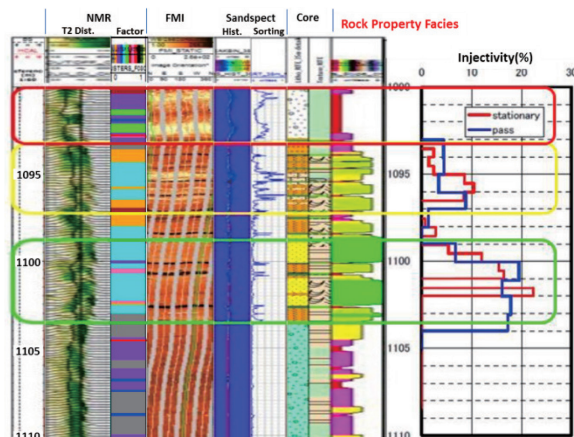
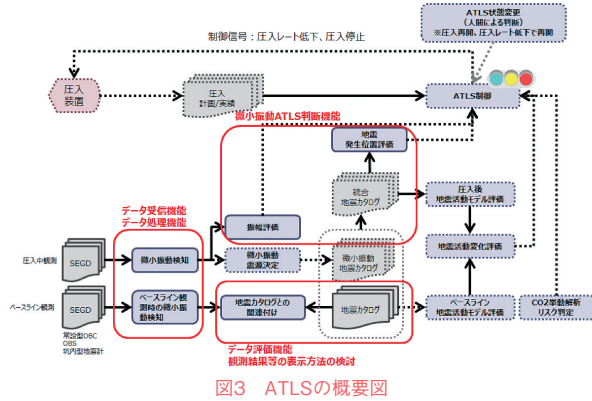


図2 検層データの解析結果とCO₂圧入性の比較

2.2. 圧入安全管理システム(ATLS)の開発

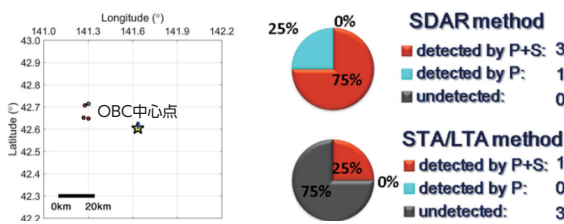
CO₂圧入によって、地中の圧力が増加し、地震が誘発されることが懸念されている。このため、CO₂圧入サイトでは地震観測など様々なモニタリングが行われている。CO₂貯留研究グループではこれらの観測結果に基づいたCO₂圧入管理システム(ATLS: Advanced Traffic Light System)を開発している。高温岩体地熱発電(EGS)では、主に微小地震観測結果に基づき、緑・黄・赤の交通信号機の色で表現する、トラフィックライトシステム(TLS)が開発されている。本研究ではCO₂圧入サイトの地震観測を含むすべての観測データや圧入状況も勘案した、より発展的な機能を有

するATLSシステム開発を行っている(図3)。ATLSは



いち早く異常を検出し、CO₂圧入制御にフィードバックする仕様になっている。事業者はATLSからの情報を基に、CO₂圧入量を制御するほかに、異常事象に対する必要な対策を講じることも可能となる。図3はATLS概要を示しており、赤枠の部分が開発済みであり、他の部分についてもプログラム開発を進めている。

ATLSに地震観測結果を反映させるには、微小振動(極微小地震)まで取りこぼさずに確実に検出すること、ノイズを誤って抽出しないことが必要である。微小振動をより確実に検出するため、従来から使われているSTA/LTA法(Short Term Average/Long Term Average method)に替えてSDAR(Sequentially Discounting AR model learning: 忘却型学習アルゴリズム)をとり入れている。この2つの判定法を、OBC(Ocean Bottom Cable)の観測データに適用し、有効性を検証した。図4はOBC周辺100km以内で1年間のマグニチュードM1程度の自然地震を対象とする解析結果である。これより、SDARのパラメータを適切に設定することにより、STA/LTAより確実に地震イベントを検出できた。今後はOBC以外、例えば坑井内地震計などの観測データへの適用性を検証する予定である。

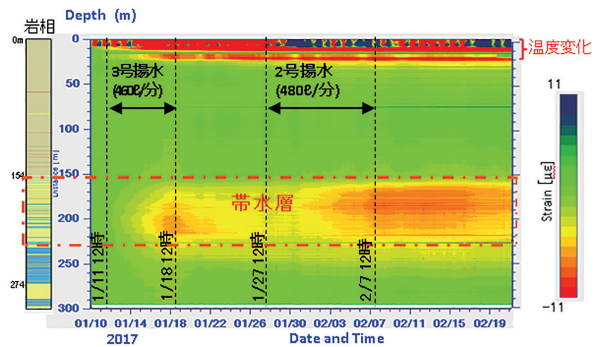


2.3. CO₂圧入時の地層安定性モニタリング技術開発

CO₂圧入サイトの地層の力学的安定性について、貯留層や遮蔽層だけでなく、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。地表から地下深部まで連続的に計測できる手法として、DTS(Distributed Temperature Sensing: 分布式温度センシング)が開発され、石油・天然ガス開発分野において実用化されている。同様な光ファイバーセンシング技術として、CO₂貯留研究グループでは、地層変形(ひずみ)を深度方向に連続的に測定する技術開発を行っている。

2017年は、光ファイバー設置済み坑井(深度300m)を活用した地層変形観測実験を実施した。この現場実験において20cm間隔で坑井の深度方向の地層変形を測定することにより、砂泥互層の変形特性や力学的解析モデル構築に関する重要な知見を得た。

この坑井では、長期観測中にサイト周辺の地下水汲み上げに起因する地層変形(ひずみ)が複数回計測された。サイト周辺の複数の坑井を利用して揚水し、地下水賦存層の水利特性を調べる実験を行った(図5)。



光ファイバー設置坑から280m離れた坑井からの揚水試験では、揚水後数時間以内に帯水層(深度200-230m)に圧縮ひずみが生じた。また、同方向に940m離れた坑井での揚水試験では、最初の試験と異なる時間差とひずみ量が観測された。さらに、2回の揚水試験の比較では、最大ひずみの深度が異なっていること、および上位層において伸びひずみが生じたことも注目される。このような観測結果は、水理地質学と岩盤力学の連成解析を可能とする世界初のフィールドデータである。

2.4. 海洋環境影響評価技術開発

海底下地層に貯留したCO₂が海中に漏出するおそれは極めて小さいと考えられている。海洋汚染防止法では、万が一に備えて、漏出が起きていないことを確認するための漏出監視が義務付けられている。浅海域の海底の温度、圧力条件では漏出CO₂が気体になる。そのため、漏出が起きると、海底から気泡のCO₂が出てくることになる。したがって、海底から出ている気泡が無いことを確認することが漏出監視の一つの手段となり得る。

海中での気泡検知には、音響機器（音波）が使われており、メタンなどの気泡の観測事例がある。音響機器にはいくつか種類があるが、CO₂貯留研究グループでは、広範囲の気泡探査が可能なサイドスキャンソナー（SSS; side-scan sonar）を用いたCO₂気泡の検知手法の確立に取り組んでいる。SSSは機器の左右両方向（進行方向に直交する面）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である。過年度の研究開発において、SSSを海中に沈め船で曳航することで、海中のCO₂気泡が検知できることが明らかになった。

一方で、海水に溶けにくい空気の気泡に比べると、海水に溶けやすいCO₂気泡は、SSSでの検知が難しく、空気やメタンなどの気泡検知で得られた知見をそのままCO₂の気泡検知に適用することはできないこともわかった。したがって、SSSを実際に漏出監視に用いるためには、SSSのCO₂気泡検知能力や運用手法を明らかにする必要がある。気泡検知能力とは、SSSで検知可能なCO₂気泡の最小フラックス（漏出率）がどの程度なのか、SSSからCO₂気泡までどの程度離れていても検知可能なのかなどであり、運用手法とは、SSSを曳航する船の速さはどの程度がよいのか、SSSをどの程度の深さまで沈めるのがよいのかなどである。

2017年は、現在CO₂の海底下貯留の実証試験が行われている苫小牧の沖合いと同程度の水深（約30m）の海域で、海底からCO₂気泡を放出し、それをSSSで観測する実証実験を行った。様々な気泡放出条件（放出率や気泡のサイズ）と観測条件（SSSを沈める深さ、曳航する船の速さ、気泡放出点からの距離）で実測した結果、船速2.5～5.5ノットで放出（漏出）率500～5000ml/minのCO₂気泡をSSSで検知できることが明らかになった（図6）。

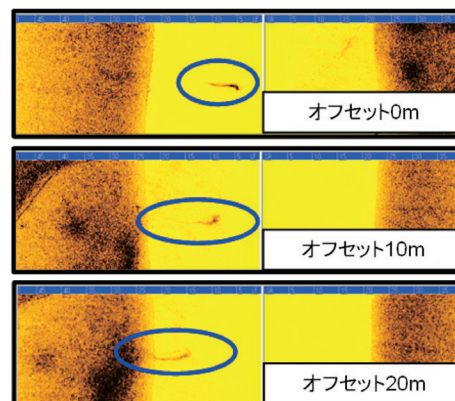


図6 SSSによる観測で検出したCO₂気泡画像（オフセットは気泡放出点から観測線までの距離）

2.5. CO₂の溶解促進技術

CO₂貯留研究グループは東京ガス株式会社との共同研究により、特殊フィルターを利用してCO₂をマイクロバブル（微細気泡）にして地中貯留する技術開発を行ってきた。図7は長さ30cmの多孔質砂岩試料に圧入されたマイクロバブルCO₂の挙動をX-CT装置によって可視化した結果である。暖色系カラーが孔隙内のCO₂分布を示しており、従来法に比べて、マイクロバブルCO₂圧入の方がCO₂飽和率が高く貯留性能が優れていることが分かる。

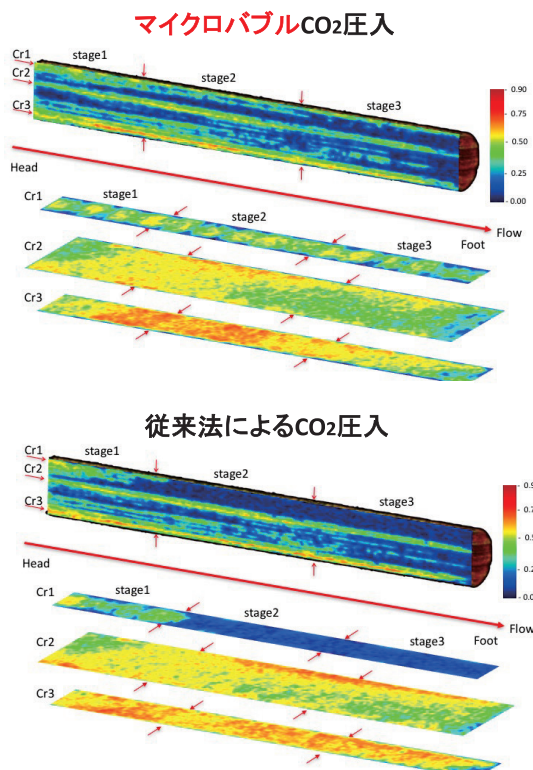


図7 異なる圧入法によって生じたCO₂分布の差異

マイクロバブル技術の実用化に向けて、現在石油資源開発株式会社と協力して、実際のCO₂圧入現場に利用する坑内ツールの開発に取り組んでいる。2017年は試作した坑内ツールを深さ約250mの坑井に設置し、N₂とCO₂の圧入テストを行い、浅部地層におけるマイクロバブルCO₂発生状況を確認した。今後は、大深度坑井を利用して、高温、高圧の条件下での適用を目指して、圧入ツールを改良していくとともに、CO₂貯留メカニズムを検討しながら、マイクロバブル技術の実用化を進めていく予定である。

2.6. CCS技術事例集の作成

カナダのQUESTと米国の産業CCSが相次ぎ、年間100万トン規模のCO₂圧入を実施している。日本においても2016年から年間10万トン規模の苫小牧実証試験事業が開始され、計30万トンのCO₂圧入が計画されている。

このような背景の中、CO₂貯留研究グループではCCS事業の国内普及や日本のCCS技術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。

このCCS技術事例集は、CO₂地中貯留事業に係る作業工程である「基本計画」、「サイト選定」、「サイト特性評価」、「実施計画」、「設計・建設」、「操業・管理」、「サイト閉鎖」、「閉鎖後管理」を対象に、第1章から第8章に対応して作成している（図8）。

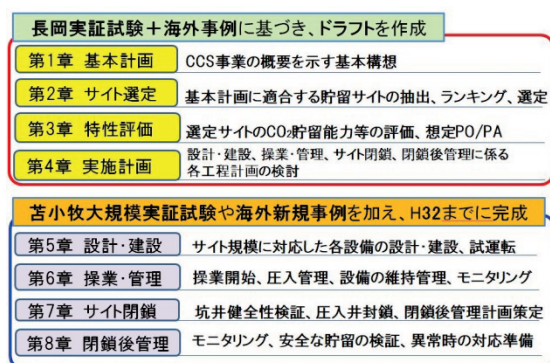


図8 CCS技術事例集全体構成

第1章の「基本計画」から第4章の「実施計画」までは、2003年～2005年に新潟県長岡市で実施された国内初のCO₂圧入実証試験の成果を中心に、米国や

欧州等の海外CCSプロジェクトの情報や技術マニュアルを参考にして、2015年度ドラフト版を作成した。現在は、第5章の「設計・建設」から第8章の「閉鎖後管理」までについて、苫小牧実証試験において得られる成果およびカナダ、米国等の海外の最新CCSプロジェクト情報を参考として、ドラフトの作成に取り掛かっている。

第5章ではサイトに必要とするCO₂輸送、CO₂昇圧、坑井の設計・建設と、各設備の試運転等を、第6章では実施計画に沿ってCO₂圧入操業設備の運転・維持管理、モニタリング、異常対処方法等を、第7章では坑井健全性の検証、坑井封鎖、閉鎖後管理計画等を、第8章では閉鎖後管理期間におけるモニタリング、安全な貯留の実証、CCSを進める海外諸国における閉鎖後管理の現状等について記載する予定である。

2.7. 国際連携および海外動向調査

CCSの普及に貢献するとともに、CCSの海外動向の調査を行っている。ここでは、2017年の動向について、国際機関等の動向にも触れながら以下にまとめることとする。

米国では、1月に既設石炭火力にCCSを追設したPetra Novaプロジェクトが、4月にはバイオマス由来のCO₂を深部塩水層へ大規模圧入するイリノイ州のプロジェクトが本格稼働した。幸先は良かったが、徐々にCCSの退潮の懸念が高まった。トランプ新政権が発電セクターにおけるCCSの普及の駆動力と目されていたCO₂排出規制の撤廃を表明し、5月には次年度のCCS研究開発予算の大幅削減を提案した。6月には、発電用の褐炭ガス化ガスからCO₂を回収するKemperプロジェクトが、ガス化の不具合により天然ガスによるコンバインドサイクル発電に転換されることが決定され、CO₂回収が中止となった。しかし、懸念は払しょくされることになる。予算については、議会により7%減に押しとどめられ、また、エネルギー長官が6月に北京で開催されたクリーンエネルギー大臣会合（CEM）において、原子力とともにCCUSに関する新たなイニシアティブの立ち上げを提案し、12月にアブダビで開催された炭素隔離リーダーシップフォーラム（CSLF）の大臣会合においてはCCSへの支援を支持するコミュニケのとりまとめに尽力したためである。

欧州では、ノルウェーが孤軍奮闘しているが、その動きが減速する懸念が一時的に高まった。検討中の3つの工業排出源を対象とするプロジェクト向けの次年度政府予算が94%削減されたことが公表されたことによる。しかし、プロジェクトの継続は2018年半ばに議会によって決定されることになっており、継続が決まれば議会による予算修正が期待されることが明らかになった。同プロジェクトの実現を前提に、近隣国のCO₂の受け入れ構想もあるが、海底下貯留を目的としたCO₂の輸出を可能とするロンドン議定書の改正の発効が障壁となる。2017年にフィンランドが批准国に加わったが、発効の必要数には遠く及ばないままである。

英国では、10月に発表された「クリーン成長戦略」により、2015年に大規模実証の政府予算の執行が中止となってから不透明となっていたCCUSに関する戦略が明らかになってきた。この中で、CCUSの本格的な普及はコスト削減の実現を前提として2030年以降とされている。より具体的な普及の道筋は、2018年末を目途に示されることになっている。オランダの石炭火力を排出源とするROADプロジェクトは、EU域内で唯一の大規模実証計画であったが、6月に事業者が撤退を表明し中止された。一方、新政権は10月に野心的な2030年の気候目標を公表し、その方策の一環として産業セクターと廃棄物燃焼での2千万トン/年のCCSの実施を掲げている。オランダでのCCSの実現に期待が高まった一方で、実現を疑問視する声も少なくない。

欧州では、数10万トン/年レベルの工業排出源を対象とするCCSクラスターが志向されていると言える。また、回収したCO₂に付加価値を与えるCO₂利用の検討も世界的に盛んになりつつある。IEA温室効果ガスR&Dプログラム（IEAGHG）が2017年に発行した報告書も、その多くが製油、水素製造、天然ガスなどの工業排出源を対象としている。発電所のCCSについては、フレキシビリティというコストでは測れない付加価値に関する報告書が出された。

なお、上述のCSLFの大臣会合のインプットの一つにCO₂地中貯留に対する合理的、実用的な規制についての提言が含まれていた。これはCO₂地中貯留の許可を取得しているSleipner、ROAD、Peterhead、

Quest、Decatur、苫小牧、Otwayという7つのプロジェクトの許可申請にかかる経験、知見をCO₂貯留研究グループが主導して取りまとめたものである。報告書はCSLFのウェブサイトにおいて公開されている。