



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	山崎 啓	主任研究員	西村 真
主席研究員	野村 眞	主任研究員	喜田 潤
副主席研究員	高須 伸夫	主任研究員	高野 修
副主席研究員	田島 正喜	主任研究員	和泉 宏典
主任研究員	中島 崇裕	主任研究員	岡林 泰広
主任研究員	内本 圭亮	主任研究員	間木 道政
主任研究員	田中 良三	研究員	張 毅
主任研究員	三戸彩絵子	研究員	朴 赫
主任研究員	利岡 徹馬	研究員	伊藤 拓馬
主任研究員	橋本 励	研究員	中村 孝道
主任研究員	木山 保	研究員	蔣 蘭蘭
主任研究員	造倉 茂文	研究員	王 璐琛
主任研究員	小牧 博信		

実用化規模に適用できるCO₂地中貯留に係る安全管理技術開発の取り組み

1. はじめに

1996年より圧入開始したノルウェーの北海Sleipnerサイトでは、約1,600万トンの天然ガス随伴CO₂を海底下の塩水性帯水層に圧入してきた。その後、大規模CO₂地中貯留プロジェクトとしてカナダのQUESTに続いて、今後は米国イリノイのIndustrial CCS (Decaturサイト)、オーストラリアのGorgonプロジェクトもCO₂圧入開始予定である。これらはいずれも実用化規模の100万トン/年に達しているだけでなく、CCS事業のインセンティブやCCS関連法規への対応も大きく注目されている。北海Sleipnerサイトは、圧入開始から20年目を迎えているが、これまでにCO₂漏洩や誘発地震の報告はなく、地下深部帯水層へのCO₂地中貯留の手本となっている。

CO₂地中貯留の実用化に向けて、小規模 (pilot-scale) 圧入から大規模 (large-scale) へのアップスケールは欠かせない。このようなアップスケールでは、関連技術検証だけでなく、様々な技術を統合 (integration) することにより、事業のコスト削減も図ることが可能である。そこで、我が国の貯留層に適した実用化規模 (100万トン/年) でのCO₂貯留に関する技術統合やコスト削減を目指して、2016年

4月1日に「二酸化炭素地中貯留技術研究組合」が設立された (詳細については後述のトピックス参照)。ここでは研究機関と民間企業が持っている知見やノウハウを幅広く結集してCCS技術の実用化を目指した研究を推進することになっている。

RITEは、CO₂地中貯留の安全管理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、CCSに関する社会受容性の向上を目指している。

2. 二酸化炭素地中貯留技術研究組合の主な研究課題とRITEの役割

二酸化炭素地中貯留技術研究組合は、「二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術開発」の研究成果を基に、実用化フェーズへ向けて、2016年度に立ち上げられた「二酸化炭素大規模地中貯留の安全管理技術開発」事業の実施者となり、「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」に取り組んでいる。研究課題の詳細と、実施する組合員を表1に示す。

RITEは、これまでも先導的にCCS関連の研究を進めてきたが、本技術研究組合においても主要組合員とし



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	組合員
(1)大規模CO ₂ 圧入・貯留の安全管理技術の開発	①圧入安全管理システムの開発	RITE、JAPEX、INPEX
	②CO ₂ 長期モニタリング技術の確立	AIST
	③大規模貯留層を対象とした地質モデル構築、貯留層評価	RITE、JAPEX、応用地質
	④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
	⑤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	RITE、AIST、JAPEX、INPEX
	⑥CO ₂ 漏出検出・環境影響評価総合システムの構築	RITE
(2)大規模貯留層の有効圧入・利用技術の開発	① CO ₂ 圧入井や圧力緩和井の最適配置技術の確立	RITE、大成建設
	② CO ₂ 溶解促進技術の適用による貯留効率向上	RITE、JAPEX
(3)CCS普及条件の整備、基準の整備	① CO ₂ 貯留安全管理プロトコル(IRP)の整備	RITE
	② 苫小牧実証データの提供による技術事例集の作成、海外機関との連携	RITE
	③ 社会受容性の向上、国際標準化との整合	RITE

て、産業技術総合研究所と連携して研究開発を進め、これらの研究成果をもとに、民間企業の組合員と連携して、CCS実用化に向けた技術開発に取り組んでいく。

2.1. 大規模CO₂圧入・貯留の安全管理技術の開発

地質モデルの構築、CO₂挙動シミュレーションや長期予測手法の確立、光ファイバーを利用した健全性監視システム、圧入安全管理システムの構築等により、大規模CO₂圧入・貯留の安全管理技術を開発する。

◇圧入安全管理システムの開発

自然地震や圧入に伴う微小振動の観測結果、CO₂挙動モニタリングおよび海洋モニタリングの結果、CO₂圧入データを基に、赤、黄、青の交通信号システムのように、CO₂圧入が安全に実施できる管理システム(ATLS: Advanced Traffic Light System)の開発を行い、苫小牧サイトでの結果をもとに、日本の独自先行技術として、世界展開を目指して、ATLS機能の検証・確認を行う。

◇大規模貯留層を対象とした地質モデル構築、貯留層評価

大規模貯留層の貯留可能量評価のため、評価技術の開発および地質モデル構築手法を確立し、苫小牧実証サイトや適地調査サイトに適用する。

◇大規模貯留層に適したCO₂挙動シミュレーション、長期挙動予測手法の確立

大規模貯留層内のCO₂の長期的な挙動を予測するため、我が国の貯留層の地化学反応特性(地層水の塩濃度が低い、反応鉱物が多い等)を考慮したCO₂長期挙動予測手法を確立し、苫小牧実証サイトや適地調査サイトに適用する。

◇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

地層の安定性や万一の廃坑井からのCO₂漏洩を監視するため、地中埋設型光ファイバーを用いて、地層の変形、地中の温度と圧力の変化を連続的に測定するシステムを開発・適用し、有効性を検証する。

◇CO₂漏出検出・環境影響評価総合システムの構築

万一の廃坑井や遮蔽層等から海底へのCO₂漏出について、有効な漏出検出手法や漏出CO₂の海中拡散シミュレーション技術を開発するほか、生物影響データベースの活用によって環境影響評価を行うための総合システムを開発する。

2.2. 大規模貯留層の有効圧入・利用技術の開発

大規模貯留層への有効圧入・利用技術を開発するため、圧入井や圧力緩和井の最適配置技術や、微細なCO₂気泡を活用したCO₂溶解促進技術の適用に向けた研究を実施する。

◇CO₂圧入井や圧力緩和井の最適配置技術の確立

実用化規模(100万トン/年程度)の大規模貯留サイトでは、複雑な地層構造や貯留層の不均質性に対応して、複数の圧入井、あるいは圧力緩和井を利用するケースもあることから、複数坑井の配置や機能を最適化できる手法、苫小牧や適地サイト等のデータを活用しつつ確立する。

◇CO₂溶解促進技術の適用による貯留効率向上

塩濃度の低い地層水への溶解促進や、貯留層の圧力増加の抑制につながる溶解促進技術を確立するとともに、微細なCO₂気泡を貯留層に圧入し、CO₂貯留効

率向上を図る。室内実験から現場適用手法の検討まで行い、溶解促進技術の適用効果を評価する。

2.3. CCS普及条件の整備、基準の整備

CCS普及のためには、普及に向けた条件整備や基準の整備が不可欠であることから、安全性管理プロトコル(IRP)の整備、技術事例集の作成、海外機関との連携、および、社会受容性の向上・国際標準化の整合のための検討を実施する。

◇CO₂貯留安全性管理プロトコル (IRP) の整備

CCSの社会受容性確保にも寄与するIRPの海外サイトの事例を調査し、その機能検討を行った上で日本版IRPを構築する。

◇苫小牧実証データの提供による技術事例集の作成、海外機関との連携

国内外の大規模CO₂地中貯留プロジェクトの技術事例や知見を集約し、CO₂地中貯留事業の基本計画から閉鎖後管理までをカバーする技術事例集を完成させ、事業者の参照に供する。

◇社会受容性の向上、国際標準化との整合

CO₂地中貯留事業の普及に欠かせない社会受容性の向上を図る。また、海外機関との連携により、CCS事業の国際標準化との整合に取り組み、我が国のCCS技術の向上や普及を促進する。

3. RITEにおける2016年度の主な研究成果の紹介

RITEではCO₂地中貯留の技術的課題に対する取り組みとして、CO₂圧入・貯留の安全管理技術の確立、大規模貯留層有効圧入・利用技術の確立、CCS普及条件の整備・基準の整備を進めている。これらの技術的課題の研究推進とともに、国際連携を通じた海外研究機関との研究協力、および海外動向調査等による情報収集にも取り組んでいる。

3.1. 地質モデル構築技術の開発

貯留層に圧入されたCO₂挙動予測のためには、地層の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。この地質モデル構築においては、これまで石油・天然ガス生産において開発されてきた手法を利用することが可能であるものの、CO₂地中貯留では漏洩防止の観点から掘削坑井の本数が少ないことが一般的である。そのためCO₂地中貯留では、そのような

地質学的データが少ない制約下においても、CO₂貯留可能量の把握、安定した圧入性能、地表へのCO₂漏洩が起きない事等の評価を行うことが必要である。

CO₂貯留研究グループでは、限られた坑井からのボーリングコアや物理検層等の地質学的情報と、地表からの弾性波探査等による各種データを最大限に有効活用し、得られた情報を統合して地質モデルを構築していく手法の技術開発を進めている。図1には、地質学的解析と貯留性能評価に関するデータ統合手法の例を示している。

コア試料のX線CT画像および柱状図による堆積環境解析から、貯留層はデルタフロントとプロデルタからなることが示されている。さらに地層中のマイクロな不均質性を表す孔隙径分布が、CO₂圧入性に大きく影響していることを示している。これらの情報から広域の貯留性能評価を行うためには、三次元弾性波探査結果を用いる。その手法の一例として、GDI (Geology Driven Integration) 解析技術を適用し、坑井物理検層等による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で、長岡サイトにおいて信頼性の高い地質モデルを構築した。これらの手法は、堆積層を対

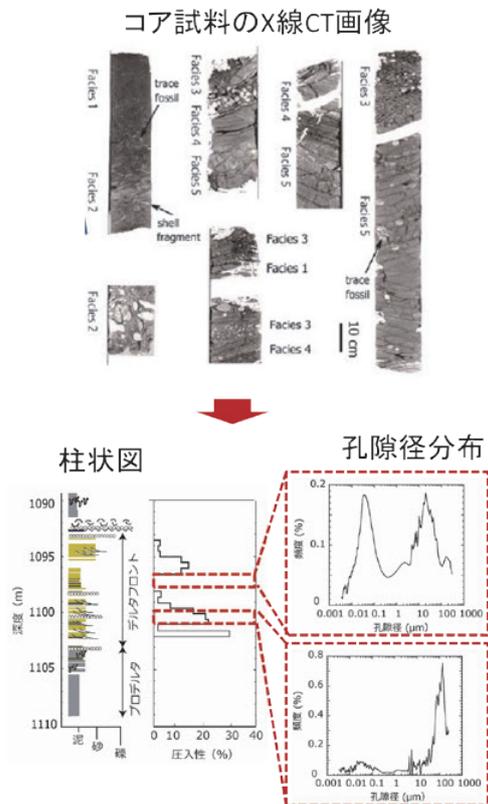


図1 地質モデル構築のためのデータ統合例と不均質性評価の解析例

象としての貯留層に対して適用可能であり、CO₂貯留可能量の事前評価においても有効な手法である。

3.2. 長期CO₂挙動予測技術の開発

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挙動をモニタリングし、安定的に留まっていることを予測・確認することが重要である。大規模貯留サイトを対象とした挙動予測技術としては、大規模モデルに対応するシミュレータの開発、および長期予測対応として地化学反応を考慮したシミュレータの開発が必要となる。

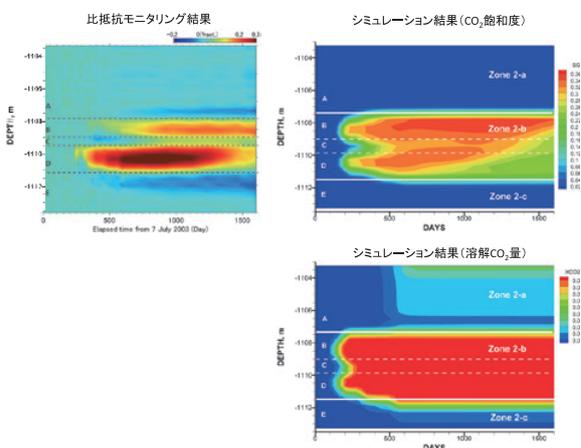


図2 CO₂モニタリング結果と挙動シミュレーション結果の比較

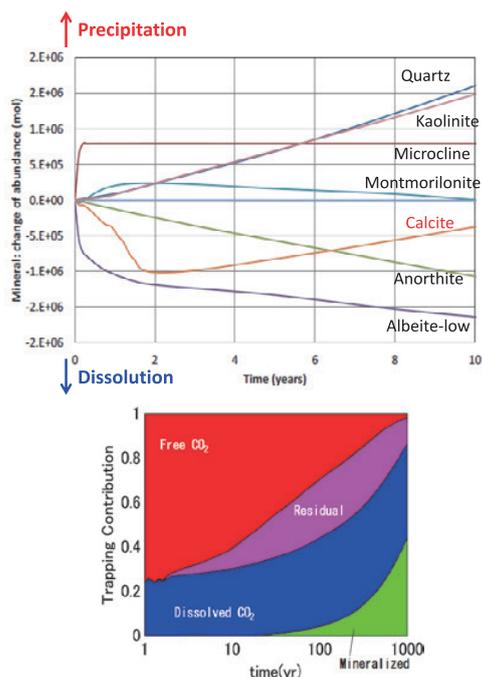


図3 鉱物反応シミュレーション結果とトラッピングメカニズムの経時変化

CO₂貯留研究グループでは、これらの課題に取り組むために、米国ローレンス・バークレー国立研究所で開発されたTOUGHREACT V2.0の並列化、およびヒステリシス特性への対応のためのコードの改良を行った。開発したコードの検証と性能評価のため、国内で唯一のCO₂圧入後のモニタリングを行っている長岡サイトの詳細地質モデル（格子数約10万）に対して適用し、その性能評価を行った。比抵抗モニタリング結果では高比抵抗部分に相当する超臨界CO₂は2つの部分に分かれて存在し、その上下に低比抵抗部分に相当する溶解CO₂が存在していることが明らかになっているが、シミュレーションによるCO₂挙動解析結果において詳細に再現できている（図2）。

また、地化学反応を含めた1,000年間の長期挙動予測を行った結果、どのような鉱物が反応（溶解・生成）しているか、およびCO₂のトラッピングに対する寄与率の経時変化も計算可能となった（図3）。これらの計算は、並列化する計算機数を増やせば短時間で実行可能であるため、大規模サイトへの適用も可能である。

3.3. 海洋環境影響評価技術開発

CO₂地中貯留においては、CO₂が安定的に貯留される地層を貯留層として選定するため、漏出のおそれは極めて小さいと考えられる。しかし、万が一に備え、漏出を検知する技術は必要である。RITEでは、沿岸域の海底下貯留を想定し、海洋へのCO₂漏出の検知技術の研究開発を行っている。CO₂は主として気泡の状態で海底から漏出し、気泡は浮力により海中を上昇しながら海水に溶解すると考えられている。したがって、漏出の検知技術としては、海中の気泡を検知する手法と、漏出CO₂の溶解によるCO₂分圧（pCO₂）の上昇を検出する手法が考えられる。

海中の気泡を検知する手法としては、サイドスキャンソナー（Side-scan sonar、以下、SSS）を用いた音響探査手法を検討している。SSSとは、送波器より発信した音波が物体に反射して戻ってきた際に、音波の強度の違いを色の濃淡によって平面画像に表示する音響探査機器であり（図4）、海底地形や海底地質の探査に頻りに用いられている。RITEでは、海中の気泡が音波を反射する性質に着目し、これまでに水深6～7mの海底から20mL/minで放出した圧縮空気の気泡柱をSSSで検知できることを明らかにし

てきた。そこで2016年度は、SSSによる気泡検知技術の実用性を検証するため、海底下貯留の実証試験が実施されている苫小牧沖と同程度の水深30mの海底から圧縮空気およびCO₂気泡を放出し、気泡放出点と測線との距離（オフセット、図4）によって、得られる気泡画像に違いがあるか否かを検討することにした。圧縮空気の場合には、オフセットが20mおよび10mでは海底付近から気泡柱が認められたが、オフセットが0mおよび2mでは海面から水深5~20mにかけてのみ気泡がみられた（図5a）。一方、CO₂に対しては、オフセットが10mでは水深5~15m付近に気泡がみられたが、オフセットが0mおよび2mでは水深5m付近に気泡が確認された（図5b）。このように、圧縮空気、CO₂のいずれにおいてもオフセットによって、SSS画像上に反映される位置（深さ）が異なることが明らかになった。実際の音響探査では、複数の測線を平行に設定するので、複数のSSS画像上の気泡の位置からおおよその漏出地点を予想できることが期待される。CO₂の放出率は圧縮空気の10倍程度であったにも拘わらず、得られた画像の強度は圧縮空気より弱かった（図5）。これは、海底から放出されたCO₂気泡が上昇していく過程で溶解するために気泡が小さくなり、反射強度が弱くなったためと推察される。このように、圧縮空気とCO₂では、SSS画像に特徴的な差が生じることが明らかになった。

CO₂漏出によるpCO₂上昇の検出する手法については、異常値判定の基準をどのように設定するのが問題となる。RITEでは、pCO₂だけでなく溶存酸素飽和度(DO)も用いた異常値判定基準を考案した。以下に、

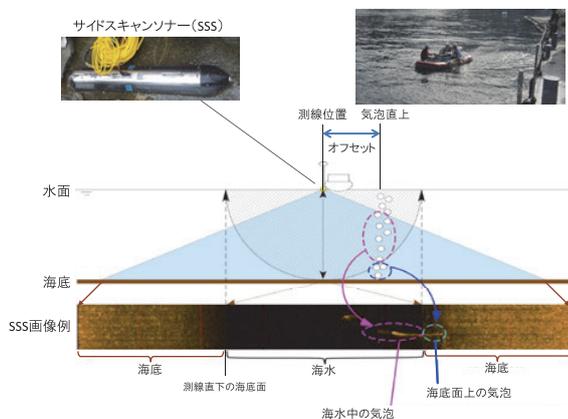


図4 サイドスキャンソナー画像における気泡のシグナルと海水中の位置関係の概念図

大阪湾で観測されたデータを用いて、pCO₂の値だけで異常値を判定する場合の問題と、その問題がDOも用いることで改善されることを示す。大阪湾では毎年2月、5月、8月、11月に定点観測が行われている。pCO₂とDOは明瞭な逆相関を示している（図6）。RITEが考案したのは、pCO₂とDOの線形回帰の予測区間上限を異常値判定基準にすることである。pCO₂の値のみで異常値の判定基準を設定する（例えば図6の黒点線）と、貧酸素状態では自然変動の範囲内であるpCO₂値を異常値と誤判定しやすく（図6の①）、酸素が豊富な状態では自然変動の範囲を大きく超える高いpCO₂値を正常値と判定してしまう（図6の②）という問題が生じる。しかし、回帰直線の予測区間上限（例えば図6の緑太点線）を判定基準にするとこの問題は大幅に改善される。ただし、自然変動データのみしか含まれていない図6においても緑太点線より上にデータがあるように、一定の割合で自然変動が異常値と誤判定されることは避けられない。また、8月（青点）に注目すると、400μatm~1800μatmでばらついており、年によって値が大きく変動していることが示されている。このことから、異常値判定基準の作

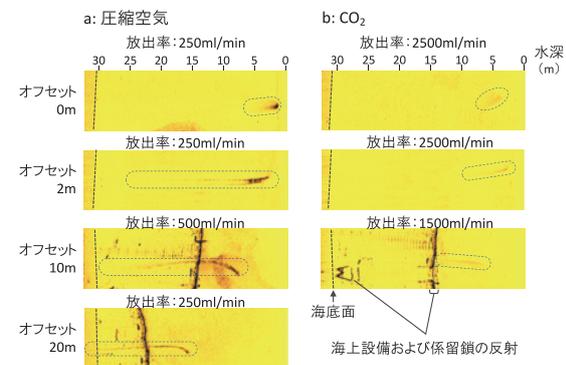


図5 実験で得られたサイドスキャンソナーの画像

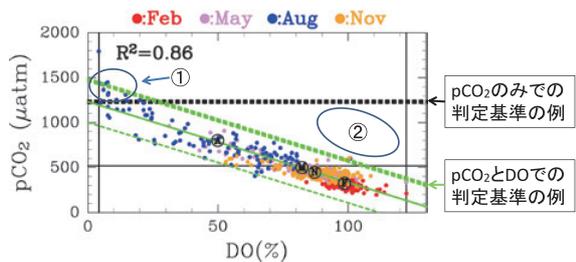


図6 溶存酸素飽和度(DO)とCO₂分圧(pCO₂)の散布図
黒点線はpCO₂の平均値+標準偏差の3倍、緑直線と緑点線は回帰直線とその99%予測区間。①と②は本文参照のこと。



成には少なくとも数年以上のデータが必要であることが示唆される。

4. 国際連携および海外動向調査

RITEは、CCSに関係する国際機関などとの連携を通して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、2016年のCCS関連の主な国際動向と、RITEが参加している国際機関などのうち、2016年10月に東京で会合を開催した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。

4.1. CCSに係る海外動向

2016年は、世界初の大規模CCS事業であるノルウェーのSleipnerプロジェクトにおいて、深部塩水層へのCO₂圧入が開始されてから20年目に当たる節目の年であった。同プロジェクトは、2016年までに1,600万トン以上のCO₂を安全に貯留しており、CCS技術の安全性を示す好例となっている。

さらにノルウェーでは3つの産業プラントに対するCCSプロジェクトの計画が進んでいる。事業の実現可能性を探る検討の結果が2016年夏に公表され、政府の支援を受けて詳細な検討を行う次の段階に進むことが決定している。回収されたCO₂は船舶で浮遊式一時貯蔵施設に集約されたのちに、パイプライン経由で海域の深部塩水層に圧入される計画となっている。2019年春に予定されている最終投資決定が下されれば、2022年の稼働が見込まれる。

2016年に運転を開始した大規模CCSプロジェクトは、世界初の鉄鋼セクターでのCCSであった。アラブ首長国連邦に立地する製鉄所から年間80万トンのCO₂を回収し、石油増進回収（EOR）に利用するものである。この製鉄所では、高炉方式ではなく、CO₂回収が比較的容易な直接還元プロセスが採用されている。

オランダのROADプロジェクトは、政府から2016年12月に支持が表明され、2017年中に最終投資決定が下されることへの期待が高まっている。2017年中に運転開始が見込まれる大規模CCSには、米国のイリノイ産業CCSや豪州のGorgonなどの産業CCSのほか、Petra Nova、Kemperという米国の石炭火力CCSがあり、2017年がCCSコミュニティにとって飛

躍の年となることが期待される。

4.2. CSLFの動向

CSLFの2016年の年次会合が、経済産業省とRITEの主催により10月に東京で開催された。この会合において、苫小牧CCS実証プロジェクトがCCSの普及・発展に資するプロジェクトとして認定された。日本国内のCSLF認定プロジェクトは、RITEによる膜分離技術の開発プロジェクトに次いで2件目となる。

技術グループにおいては、2015年秋以降、貯留層の孔隙スペースの有効利用、海域EOR、バイオCCSの3つのタスクフォースが2017年秋の閣僚級会合前の報告書の策定に向けて活動中である。東京会合において、これに加えて、CO₂利用に焦点を当てた産業CCSについてのタスクフォースも立ち上げることになった。また、日本の提案により、CCSに対する合理的な規制を検討するタスクフォースを政策グループとともに設置することが検討されることになった。

政策グループでは、東京会合においてチェコの加盟が議論され承認を受けた。チェコは石炭の生産量が多く、また、石炭火力への依存度も高いため、CCSへの関心が高い。チェコの加盟により、加盟国数は欧州委員会を含めて26となった。政策グループには、「コミュニケーション」と呼ばれるCCSの啓蒙活動のためのタスクフォースがあるが、その活動の一環としてCSLFのウェブサイトが関係者以外にも有用な情報源となるように東京会合の開催を前に刷新された。