



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

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排出源から排出されるCO₂を分離回収し地中に貯留するCCS (Carbon dioxide Capture and Storage) は、燃料消費率改善、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2012」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、大規模発生源から分離・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、安全確認のための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、CO₂地中貯留関連の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

CO₂地中貯留には、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、帯水層貯留では、貯留層 (砂岩) 上部にガスや

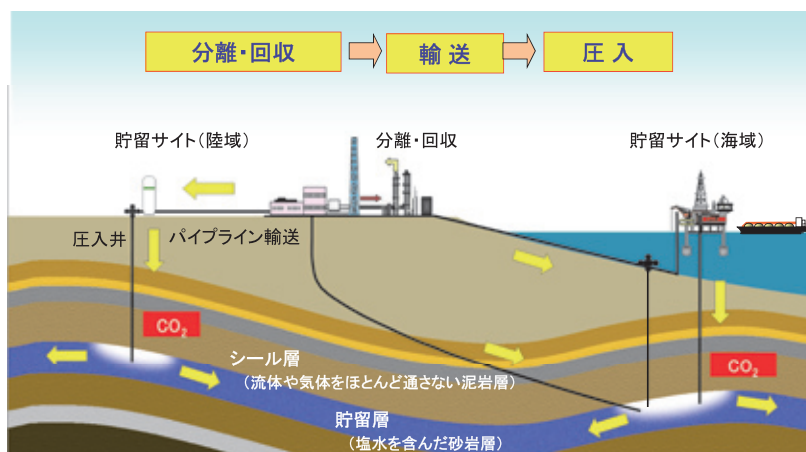


図1 CO₂地中貯留の概念図

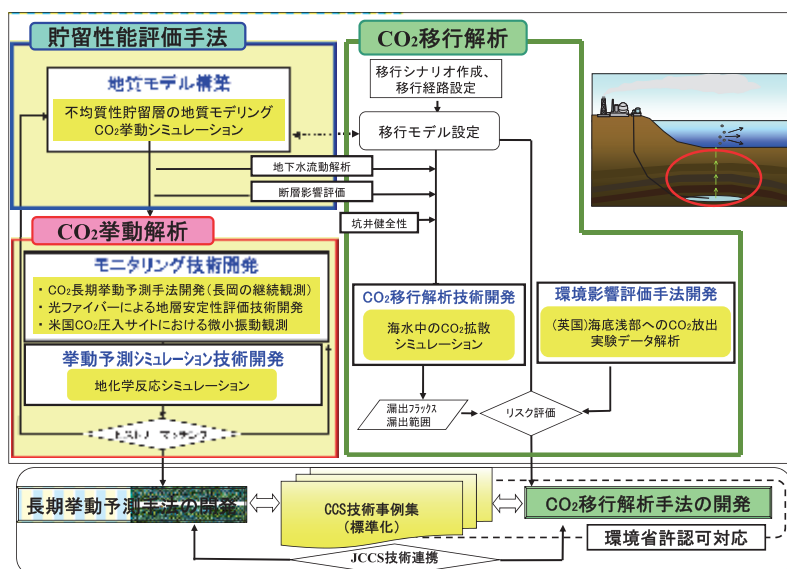


図2 CO₂地中貯留の技術課題に対するRITEの取り組み

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。

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、「我が国特有の地質構造モデルの構築」と「地下水流動の解析手法の開発」からなる。

我が国特有の地質構造モデルの構築では、石油・天然ガス開発において行われる地質モデル構築とその特性評価手法のCCSへの適用とその限界を明らかにし、



図3 RITEにおけるCO₂地中貯留技術開発経緯

CCS特有のモデリングから特性評価までの手法を確立する。CCSでは石油開発と比べてコストや漏洩防止の観点から、坑井の掘削数や反射法探査から得られるデータが限られている。このため、地質特性評価や貯留層モデルの不確実性が増加し、CO₂圧入性や分布予測などの数値解析結果への影響が大きくなる。RITEでは限られた地質学的情報と統計学的手法を統合させた地質モデルの構築手法を研究開発することを目的として、CCS実証試験長岡サイトを例として用い、特に砂泥互層を対象として、限定的な地質学的、地球物理学的データから地層の地質特性を評価し、CO₂挙動解析に必要な貯留層モデルを構築した。

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、地質データを収集して水理地質モデルを作成し、地下水解析を実施した。その結果、CO₂圧入による浅層への塩水侵入を予測するためには、CO₂圧入前のサイトの地下水に含まれる塩濃度分布の把握の必要性が示されるとともに、地下水の流れを正確に予測するためには、文献値を利用するのではなく調査井などを利用し、貯留サイトの岩盤のサンプルを採取・分析して、孔隙率や浸透率などの水理定数データを取得する必要性が示された。

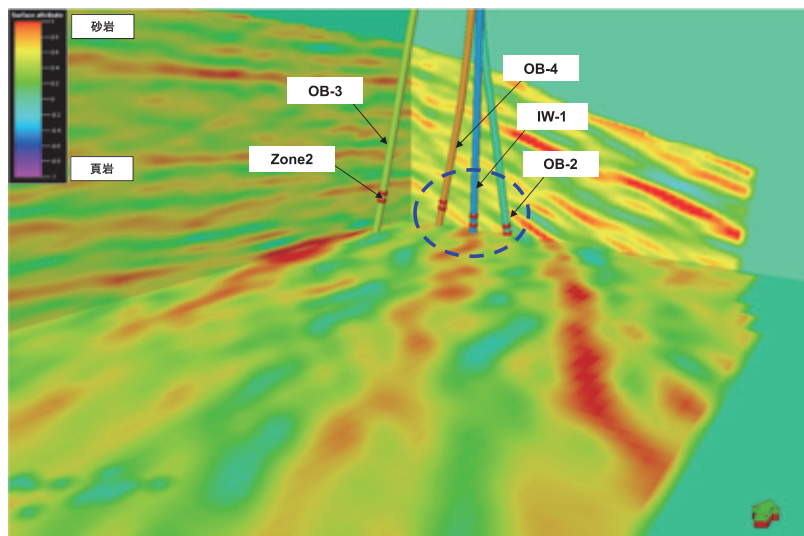


図4 反射法弾性波探査による地質モデリング



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、安全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、RITEは長岡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分析し、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、光ファイバーセンシングによる地層変形監視技術等、CO₂地中貯留に資する様々な技術開発を行っている。

・光ファイバーによる地層安定性評価技術開発

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では光ファイバーセンシングによる地層変形監視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認した。この基盤技術の実用化を目指して、2012年度には複数の光ファイバーケーブルを深度300mの坑井に設置し、CO₂圧入に伴う地層変形（ひずみ）を計測することに成功した。さらに実用化に向けた技術課題を検討するため、2013年度も継続して現場試験を実施している。

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が必須である。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。

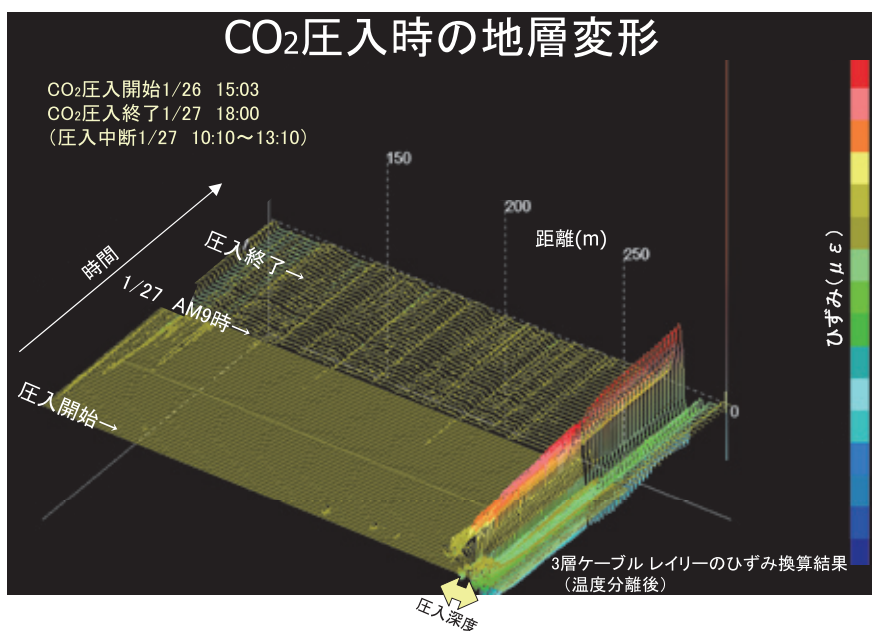


図5 坑井に設置した光ファイバーでの計測結果

・ X線CT装置を用いたCO₂挙動解析

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、地質学的に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。多孔質砂岩中の不均質がCO₂と地層水の分布に及ぼす影響を室内実験によって調べることは、アップスケールされた実規模の貯留層におけるCO₂と地層水の挙動を予測する手法を開発する上で多くの知見を与える。X線CTによるイメージング技術により、岩石試料内部の流体挙動を非破壊で観測できる。RITEでは、X線CTイメージデータの解析によって、孔隙率や流体飽和度と岩石の物性との関係を定量化する技術の開発に取り組んでいる。

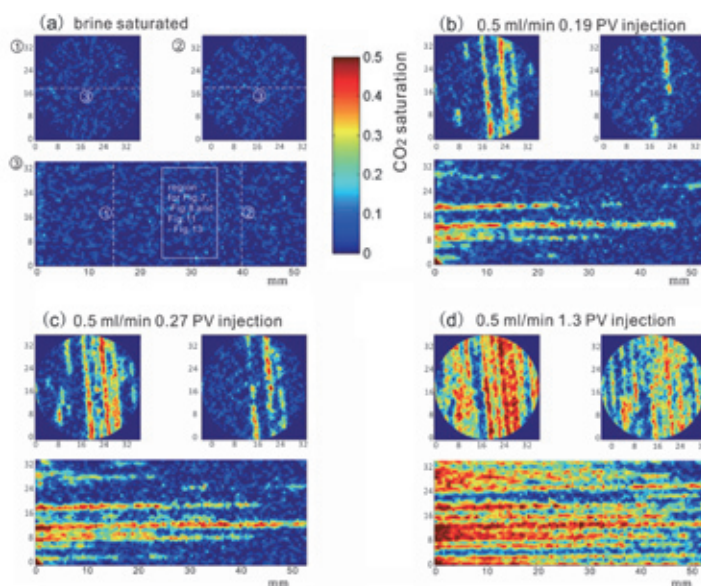


図6 コア試料内のCO₂分布状況の可視化画像

・ 常設型OBCによるCO₂挙動モニタリング手法開発

CO₂地中貯留技術の実用化においては、地下に圧入されたCO₂の挙動モニタリングが重要な研究課題であるが、そのもっとも有力な手段として「繰返し3次元反射法弾性波探査」が挙げられる。この探査方法を海域CO₂地中貯留に適用する場合、対象エリアの海底に受振器（センサーモジュール）を敷設して受振する常設型OBC（Ocean Bottom Cable）システムが効率的、低コスト、かつ高品質な観測を実施できるため有効である。これまでにRITEは苫小牧沖（北海道）、平塚沖（神奈川県）での実海域性能評価試験を実施した。さらに、2013年度には大規模実証試験サイトである苫小牧沖へ常設型OBCシステムを適用し、反射法弾性波探査に加えて微小振動を同時に観測する準備を行っている。

・ 長岡サイトでのCO₂挙動解析

RITEは2003年7月から2005年1月にかけて実施した新潟県長岡市でのCO₂圧入実証試験において地下1,100mの塩水性帯水層に10,400トンのCO₂を圧入し、地下におけるCO₂の挙動を弾性波トモグラフィや物理検層などで把握するとともに、観測結果をもとにCO₂地中貯留挙動予測シミュレータを開発した。

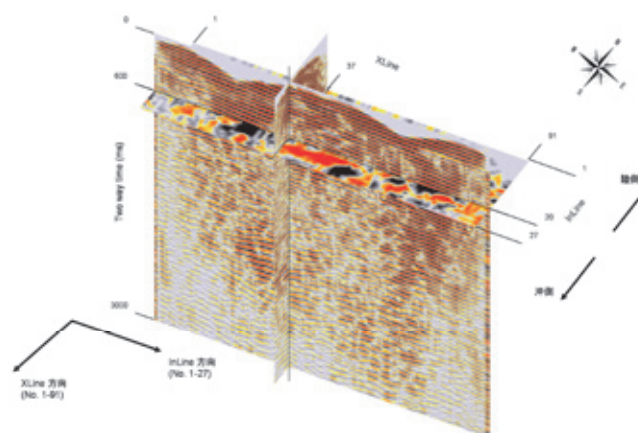


図7 常設型OBCを用いた3次元反射法探査結果

物理検層により観測井周辺の物性変化を計測し、CO₂の深度方向の広がり、およびCO₂の状態（超臨界状態のままであるか地層水に溶けた状態であるのか）などを推定した。

2013年度には坑内物理検層を実施して、CO₂圧入後の貯留状況の調査を行った。また、これらの調査結果をもとにヒストリーマッチングを行い、長期挙動予測シミュレーション解析を進めた。なお、地中貯留の実証試験は海外でも実施されているが、圧入後のCO₂挙動を継続的に監視し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。

2.3 貯留層外部へのCO₂移行解析

RITEは、安全性評価技術開発の一環として、貯留層外部へのCO₂移行解析手法の開発を進めている。

CO₂が貯留層から移行し海水中に拡散する過程をシミュレーションするためには、地層中と海水中の2つのモデルが必要である。地層中での検討においては、断層や廃坑井などの移行経路を想定した上で、CO₂が海底面まで移行する過程を解析する手法を開発している。この地層中シミュレーションの結果から、評価対象の貯留サイトの特性に応じた地質モデル、および貯留層でのCO₂分布を初期値に用いるシミュレーションが必要であることが示された。この地層中シミュレーションによって算出される海底面へのCO₂漏出レートは、海水中シミュレーションの初期値となる。

海水中での検討においては、海底面から漏出する気泡および溶存態CO₂が海水中で拡散する際の濃度分布シミュレーション手法の開発を行っている。気泡として海底面から漏出したCO₂は浮力によって上昇しつつ海水の流動や水温等の影響を受けながら海水に溶解するので、使用しているモデルではCO₂気泡の挙動と溶解が計算できるようになっている。海水中シミュレーションの結果から、CO₂濃度分布には成層、水温、背景流および気泡励起流が複雑に寄与することが判明した。

漏出によって生じる海水中CO₂濃度上昇が生物に与える影響を明らかにするため、海洋生物影響を集約したデータベースに最新の知見を加え、解析を行っている。さらに、海洋のCO₂濃度モニタリングを行った際に自然変動と漏出CO₂



を識別する手法について検討した。この結果、一般的な観測機器を用いて、水温、塩分、溶存酸素量、pHを測定することにより、漏出による異常値を検出することが可能となった。

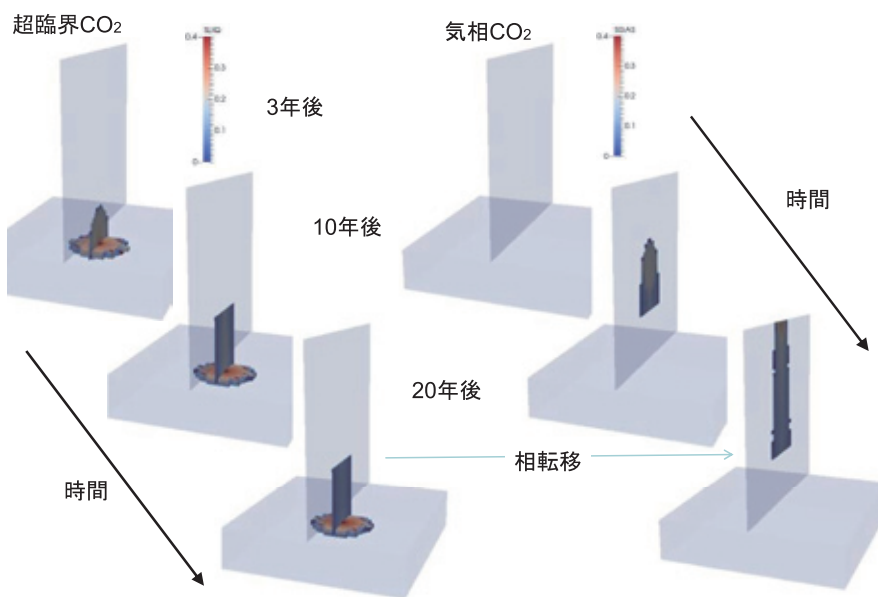


図8 地層中シミュレーション結果 (断層中: CO₂飽和度分布)

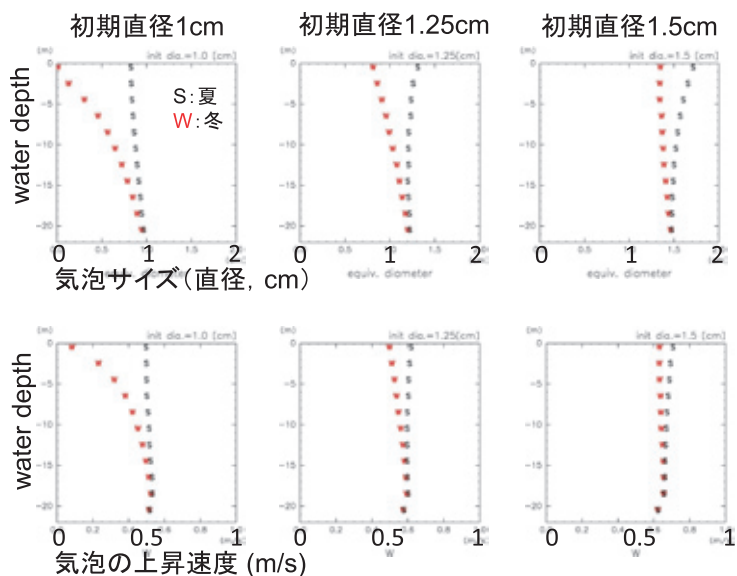


図9 海水中シミュレーションによるCO₂気泡サイズと上昇速度の変化

2.4 CCS実用化に向けた技術事例集の作成

1996年にノルウェーのSleipnerで世界初のCO₂帯水層貯留（深度800mの帯水層へ貯留）が開始された。その後、主に米国や欧州において多くのCO₂地中貯留事業が開始された。これらのCCS事業の知見はプロジェクトレポートとして報告されてきたが、数年前から、BP(Best Practice)として汎用的な知見やサイト固有の事例を集約する動きが出てきた。これらに前後して、CCS事業の法的整備も進められてきた。例えば、米国ではEPA（米国環境保護庁）が連邦規則集にCO₂の深部帯水層貯留に対する規則を整備し、坑井規格としてクラスⅥを設定した。欧州では、欧州委員会がEU加盟国に対してCCS実施の規則としてCCS指令を公表した。これらの法規に対する解説書やガイダンス書も作成されている。民間レベルでは、ノルウェーのDNV社が独自にCCS事業の認証手続きとその解説書を公表している。

一方、我が国では、経済産業省が国内での大規模実証試験を対象として2009年に「CCS実証事業の安全な実施にあたって」を作成した。この報告書にはCO₂地中貯留実証事業の安全面・環境面からの遵守基準などが示されている。また、CCS技術に関して、RITEは基礎研究や技術開発を進めるとともに、長岡におけるCO₂圧入実証試験（2003年7月～2005年1月）に引き続き、CO₂圧入終了後のモニタリングなどを継続的に実施し、多くの知見を得ている。

このように、RITEはCCSにかかわる国内外の豊富な知見を蓄積してきており、CCS事業の国内普及や海外展開を見据え、国内のCCS事業者を主な対象とした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。この事例集は、図10に示すように、CCSに関するあらゆる技術事例を対象とし、国内外の技術事例を集約した汎用的事例集を目指している。また、我が国初のCO₂圧入実証事業である長岡実証試験の知見を集約した事例集も作成中である。将来的には苫小牧大規模実証試験の知見も取り込む計画である。

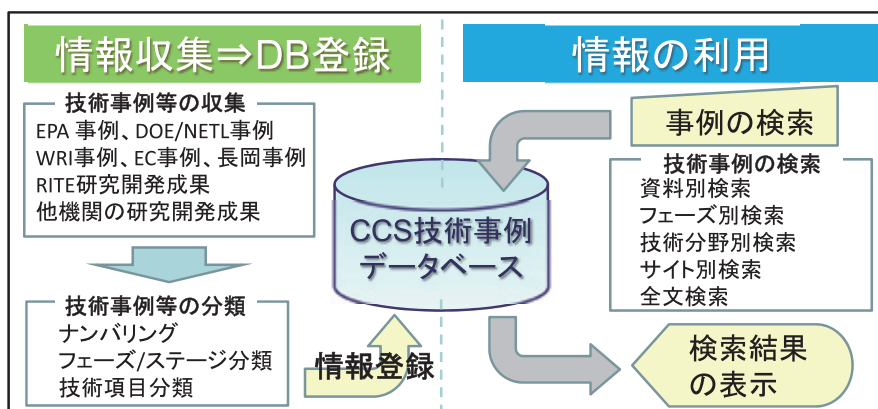


図10 CCS事業にかかわる各種のドキュメントと事例集の関係

CCS技術事例集は、CCSにかかわる国内外の様々な情報を対象としており、関連情報は増加し続けることが想定される。この結果として、膨大な情報が登録・蓄積されることになり、冊子版での提供では技術事例の検索が容易でなくなる可能性がある。そのため、CCS技術事例集は情報の登録・更新・利用の面からデータベース化し、図11に示すような事例情報の登録および利用が可能となるシス



テムを検討している。

CCS技術事例の利用に際して、利用者によるデータベースへのアクセスの利便性を高める必要がある。そのために、利用目的に対応した複数のアクセス方法を検討している（図12）。ここでは、主要な利用方法として、CCSフェーズ別インデックスと技術分野別インデックスの作成を進めている。

CCSフェーズ別インデックスでは、各フェーズの実施工程に対応した事例を関連付けており、事業の進捗に合わせて、該当する事例を把握できるようにする。一方、技術分野別インデックスでは、特定の技術の情報を集約しており、該当技術および関連技術を把握できるようにする。また、視覚的に情報を検索できるように、「CCS技術事例マップ」を作成する。そのほかに用語集・略語集、各種情報の比較表、CCSにかかわる国内外の履歴表などを用意する。

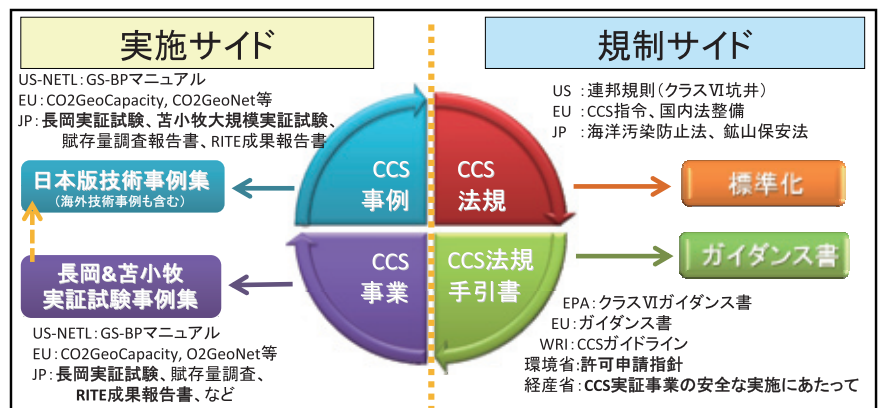


図11 CCS技術事例データベースの登録・利用のイメージ

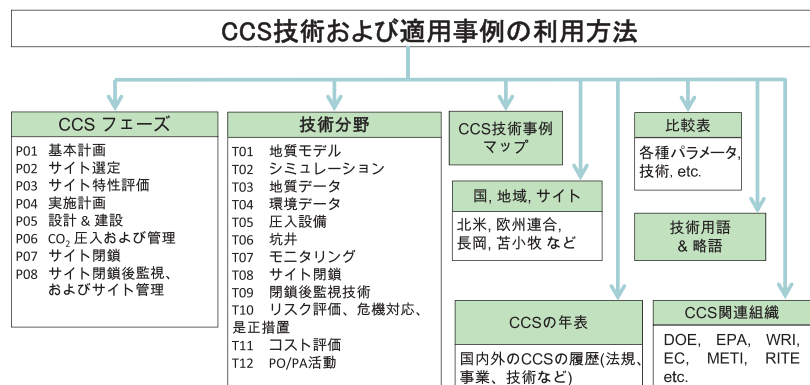


図12 CCS技術事例の様々な利用を考慮した事例インデックスの構成

現在、情報収集の主要な段階はほぼ終了し、データベースの設計および登録作業の段階にある。2014年度中旬にドラフト版を完成させる予定である。



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きわ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、いくつかの油田ではすでに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の効率化の技術開発が課題となっている。

2009年11月8日、北京で第4回日中省エネルギー・環境総合フォーラムが開催され、RITEと中国石油外事局との日中CCS-EOR協力合意をはじめとする、日中省エネルギー・環境協力案件の調印文書の交換が行われた。

この合意に基づき、RITEは中国石油天然気集团公司（CNPC）と連携し、CCS-EORの技術協力を進めてきた。また、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も深めてきた。これらの連携を通じ、RITEはCNPCの技術力向上に貢献するとともに、CCS-EORの効率化には、圧入したCO₂の挙動を的確に把握するモニタリング技術の向上が欠かせないことを明らかにした。

これを受け、2013年度には、実際の油田にCO₂挙動モニタリング技術の適用を目指す活動を開始し、重要な条件整備として当技術を検証する油田候補をCNPCと共同で設定した。また、適用候補油田の一つを訪問し、技術交流会を開催し、中国におけるCCS-EORの具体的な課題を明らかにする一方、RITEのモニタリング技術の有効性の認識を深めた。

今後は、候補油田でのモニタリング技術適用計画を立案するとともに、その効果を事業化可能性調査により明らかにし、CCS-EORモニタリング実証事業へと発展させる予定である。また、プラント建設会社等の協力を得て、中国におけるCCS-EORのビジネスモデルを提案していく計画である。

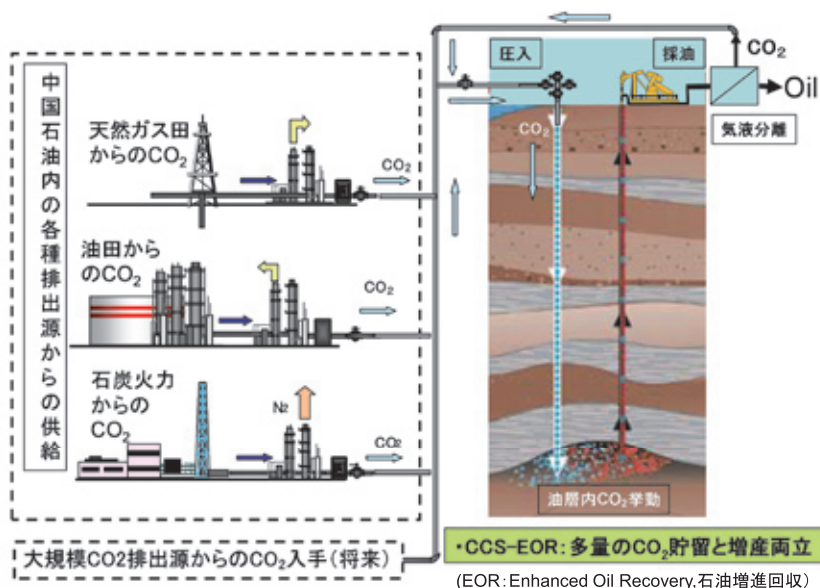


図13 CCS-EORの概念図



4. 国際連携および海外動向調査

RITEは、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の海外動向調査を実施している。CCSを普及していくためには、経済性の確保、普及政策や法規制の整備、社会的受容性の確立などの課題があり、国際機関等を通しての国際的な連携、協力、知識共有が必要不可欠である。RITEが参加している炭素隔離リーダーシップフォーラム（CSLF）、国際エネルギー機関（IEA）の温室効果ガスR&Dプログラム（IEAGHG）およびロンドン条約の概要と動向、また、CCSに係る全般的な海外動向を以下にまとめる。

・CSLFの概要と動向

CSLFは、CO₂の回収とその地中貯留ならびに産業利用（CCUS）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として2003年に設立された。米国エネルギー省が事務局を務めており、現在、日本を含む22か国と欧州委員会が参加している。その活動は各国の省庁職員から構成される政策グループと企業や研究機関からの代表者からなる技術グループによって行われており、2年ごとに閣僚級の会合が開催される。RITEは2009年から技術グループに参加している。

第5回閣僚級会合が2013年11月に米国において開催され、CCSの研究開発、実証、そして世界的な普及の加速の必要性が確認された。インセンティブ・メカニズムの創出など、CCSの普及に必要な7つの主要アクションが採択され、また、政策グループのもとに小委員会を設置し、今後のCSLFの具体的な活動をこれまで以上の協力を行っていくことを念頭に議論していくことになった。

・IEAGHGの概要と動向

IEAGHGは温室効果ガスの削減技術の評価、普及促進、評価調査の情報発信、国際協力の推進を目的とする国際機関であり、IEAのもとで締結された国際協定に基づいて1991年に設立された。主にCCS技術を活動対象としており、日本を含む20の締約メンバーと23の民間企業等から出資を受けている。RITEは2009年から締約メンバーである日本を代表して執行委員会に参加している。

IEAGHGの主要な活動の一つにCCS専門家の各種ネットワークの運営とそれらの会合の開催、および国際学会の開催がある。ここ数年、モニタリング、モデリング、リスク評価、環境影響というCO₂貯留に関連するネットワークが、複数のネットワーク間の合同会合を開催してより幅広い専門家間の知識共有を重視するようになってきている。また、世界最大のCCSの学会である温室効果ガス制御技術国際会議の12回目の会議（GHGT-12）が2014年10月に米国テキサス州で開催されることになっており、その準備が進められている。

・ロンドン条約の概要と動向

CO₂の海底下貯留は、ロンドン条約の96年議定書の改正が2007年に発効したことによって国際的に認められるようになった。RITEは、締約国会合、および科学的知見をベースに情報共有化を図る科学会合に日本代表団の一員として参加している。

同議定書はCO₂の越境移動が認められるように2009年に修正されたが、批准国が規定の必要数に達しておらず発効していない。条約の改定以降、輸出されたCO₂が圧入される場合、CO₂が複数の国によって同じ貯留層に圧入される、あ



るいは、圧入されたCO₂が国境を越えて移動する可能性がある場合の責任の所在を規定する作業が行われてきた。2012年に後者の責任の所在が既存のCO₂の海底下貯留に係るガイドラインに盛り込まれ、前者についても2013年に新たに策定されたガイダンスで定められて決着した。

・ CCSに係る海外動向

IEAは、2050年までに必要とされるCO₂削減量へのCCSによる貢献を14%とする分析結果を2012年に公表した。この貢献度を達成するには、CCSによるCO₂の年間貯留量を2020年で2億6千万トン、2030年で25億トン、2050年で80億トンとする必要があるとしている。しかし、2020年に必要な貯留量の達成はほぼ不可能な情勢となっており、IEAは2020年までの7年間に取るべきアクションに焦点を当てたCCSの技術ロードマップの改訂版を2013年7月に公表した。この中で資金支援メカニズムの導入、貯留層の探査等の推進の必要性などを指摘している。

現在、操業中の大規模なCCSプロジェクトは、人為排出のCO₂を用いた石油増進回収（EOR）事業を含めても12件（GCCSIによる）に留まっている。しかも、これら全てがCO₂回収に追加コストが不要ないし限定的な工業プラントからのCO₂を利用している。12件中8件を実施している北米が世界のCCSをリードしていると言えるが、同地域で2014年の稼働を目指して建設されている2件の石炭火力のCCSプロジェクトが操業を開始すれば、さらにその存在感が増すことになる。

温暖化対策に積極的な欧州は、石炭火力に対するCCS実証試験を推進してきたが、いずれのプロジェクトも中止あるいは停滞している。欧州議会は、2013年9月、欧州でのCCSのテコ入れを図るための政策提言案を公表したが、この提言案への期待は高くはない。欧州委員会の取り組みが機能しない中、EU圏外のノルウェーで計画されていたガス火力の大規模CCSプロジェクトに期待が集まっていたが、この計画も政府によって2013年9月に中止が決定された。このような状況の中、英国でのCCSの進展への期待が高まっている。同国政府は2012年にCCS実証のスキームを刷新し、2013年11月および2014年2月に2件のプロジェクトの基本設計（FEED）への出資を決定した。また、CCS普及に向けて政策的な環境整備を進めている。

一方、これまで注目度が低かったアジアでは、日本政府が北海道苫小牧市での実証試験の準備を進めているほか、中国が過去2年間で大規模CCSプロジェクト計画の件数の増加した唯一の国である（GCCSIによる）など、CCSに係る進展が見られる。東南アジアでも先進国の支援を得て将来のCCS普及に向けた基礎調査や貯留パイロットの計画が実施されており、CCSへの関心が高まっている。