

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)のロードマップでは、2050年時点の温室効果ガス半減に向けて、2020年には100件、2030年には850件、2050年には3,400件のCCSプロジェクトが必要と示唆されている。

このような状況の中、我が国ではCCSに必要な技術を確認するための施策としてCCS大規模実証試験が立ち上げられた。現在、北海道苫小牧市において、日本CCS調査(株)が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標としている。

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)上部にガスや液体をほとんど通さないシール性(不透水性)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。

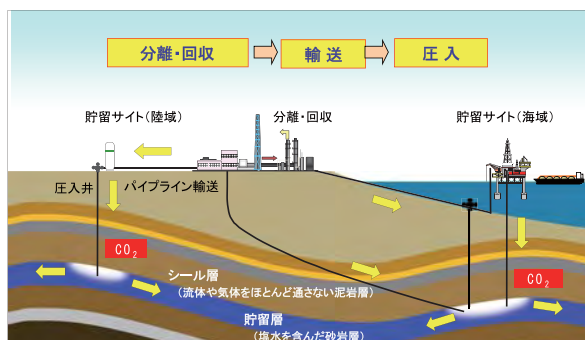


図1 CO₂地中貯留の概念図

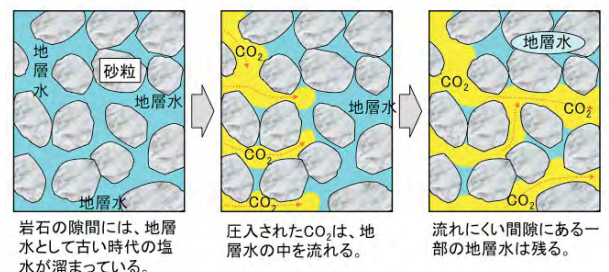


図2 貯留層におけるCO₂浸透のイメージ

RITEは、CO₂地中貯留の技術課題に対する取り組みとして、図3のように、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。

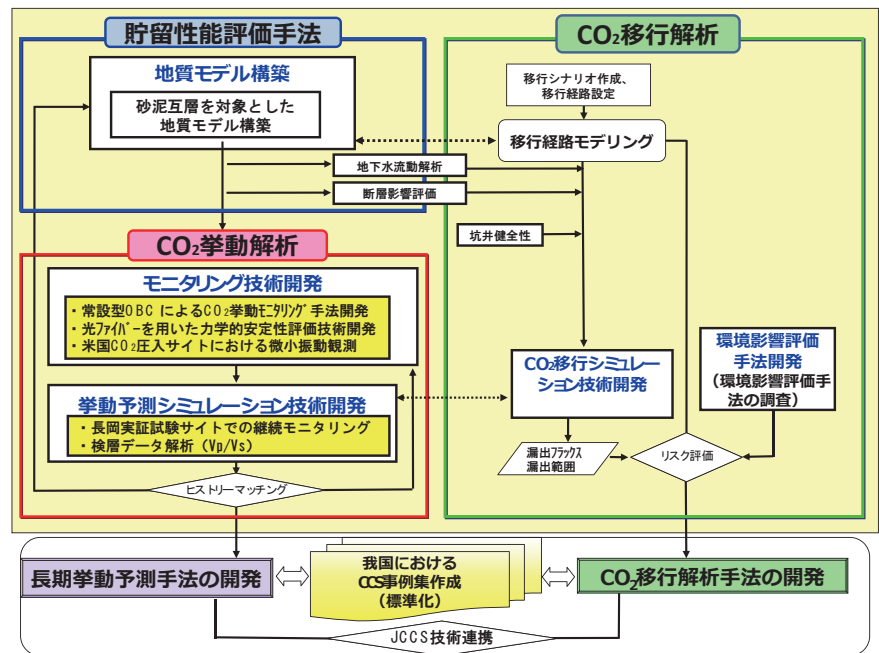


図3 CO₂地中貯留の技術課題に対するRITEの取り組み

(1) 貯留性能評価手法の開発

CO₂地中貯留では、超臨界CO₂を大量に地下へ圧入するため、石油・天然ガス開発とは異なる概念での貯留層性能評価と貯留層モニタリングを行うことが重要である。なかでも、特に重要とされるのが初期インプットとなる地下地質モデル(貯留層地質モデル)である。石油天然ガス開発が進んでいない地域での地質モデル構築は、地表に露出する地質の調査や過去の文献に依存することが多く、少ない地下情報を用いてモデル

の作成が行われる。また、CO₂地中貯留では、CO₂圧入により地下圧力が上昇するため、岩石の物理特性を把握してCO₂の挙動解析を行うことが重要となることから、その岩石物性を反映させた地質モデルの構築が必要である。

RITEは、2003年7月から2005年1月にかけて、長岡CO₂圧入実証試験サイト(新潟県長岡市岩野原基地:国際石油開発帝石株式会社)において、計10,400トンのCO₂を地下1,100mの塩水性帯水層に圧入した。圧入終了後も地下のCO₂の挙動を把握するため、坑井を利用して各種の現場測定を継続的に実施している。この測定データおよび岩石コア試料物性試験結果等をもとに、我が国特有の砂泥互層や砂礫層のような複雑な特性を反映した地質モデル構築手法の開発を行っている。

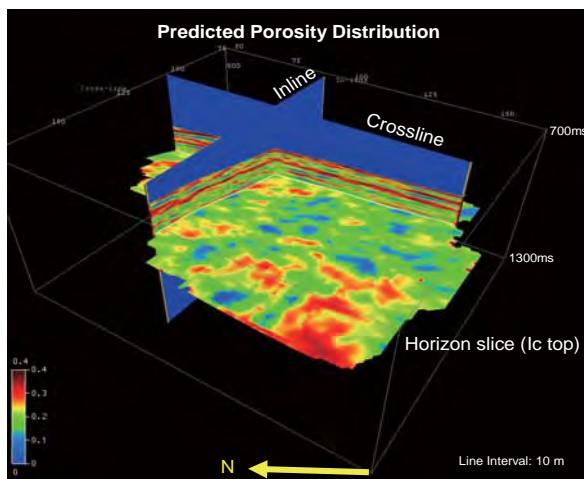


図4 長岡サイトの貯留層上面の孔隙率分布図

(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、沿岸域CO₂貯留サイトにおけるCO₂挙動モニタリングで有用な常設型OBCシステム等、様々な技術の開発を行っている。

・長岡サイトでのCO₂挙動解析

これまでにRITEは長岡CO₂圧入実証試験サイトにおいて、物理検層や坑井間弾性波トモグラフィ測定等のCO₂挙動モニタリングを継続的に実施している。物理検層により、観測井周辺の物性変化が計測され、観測井にCO₂が到達した時期、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)、といったことが推定できている。

2012年度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。

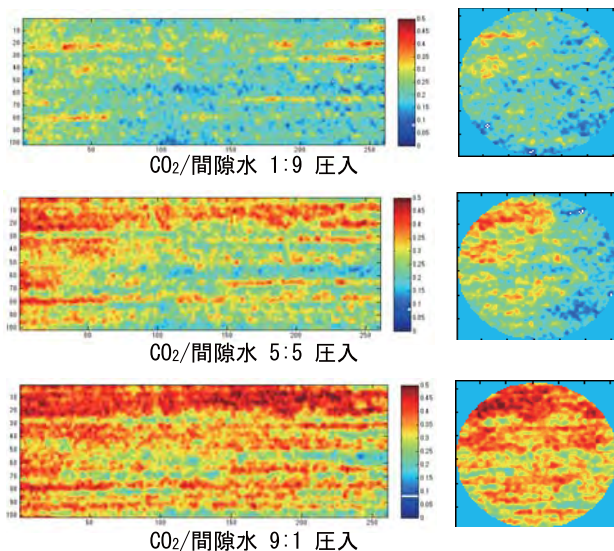


図5 コア試料内のCO₂分布状況の可視化画像

・X線CT画像解析によるCO₂分布状況の可視化

地下深部の貯留層に圧入されたCO₂の長期安全性評価には、複雑な貯留層構造とCO₂挙動の関連性や、CO₂貯留メカニズムの理解を深める必要がある。このメカニズムのひとつである、残留ガストラッピングは、油ガス田開発の分野でよく知られており、貯留されたCO₂の長期安定性を評価する上で重要である。

RITEはX線CT装置を用いて不均質性が著しいコア試料内のCO₂分布状況を可視化し、CO₂と間隙水との置換特性やCO₂残留トラップメカニズムについて検討している。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らかにし、CO₂圧入サイトで得た物理検層データや弾性波探査データの解釈への適用について検討している。

・CO₂圧入時の地層の安定性モニタリング技術の開発

光ファイバーセンシング技術では、光ファイバーを地中に設置することにより、深度方向の圧力・温度を連続的に常時監視することが可能である。さらに、CCSの分野では地下の圧力・温度のほかに、CO₂圧入による貯留層やキャップロック層への影響(地層変形等)の把握が期待できる。

これまでにRITEはCO₂圧入による地層の安定性評価やCO₂漏洩の早期検出の

ための基本技術を岩石やセメント試料を用いた室内試験により検討してきた。その結果、地層の変形を計測できるレベルのひずみ測定、および岩石中のCO₂の動きをひずみの変化として捉える基盤技術を確立した。また、坑井のケーシングセメントに埋設する光ファイバーの仕様を検討し、試作品を作製した。さらに、室内試験の結果をもとに、堆積層の地盤に掘削したボーリング孔を利用してCO₂圧入時の地層変形をモニタリングする現場試験を開始した。

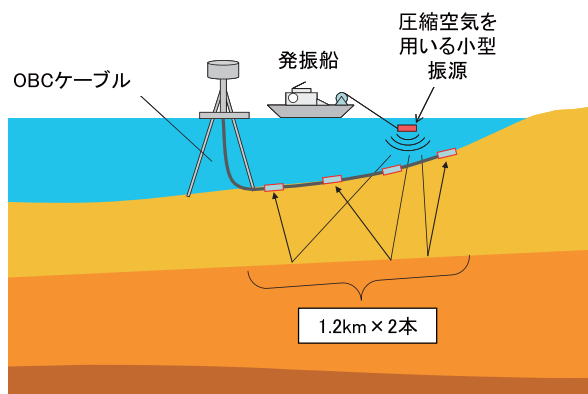


図6 平塚沖での常設型 OBC 試験観測

・常設型OBC長期現場観測試験

CO₂地下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とされるが、そのもっとも有力な手法のひとつとして、石油・天然ガス等の資源探査分野で発展を遂げてきた「繰り返し3次元反射法探査」が挙げられる。この繰り返し3次元反射法探査を海底CO₂地中貯留に適用する場合には、低コストかつ高精度のシステムとして、貯留対象となるエリアの海底に受振器(地震計)を定置し、データを常時収集する常設型OBC(Ocean Bottom Cable)システムが有効である。

RITEは昨年度に引き続き2012年度も神奈川県平塚沖で実海域試験を実施した。エアガン発振による地震波探査を実施するとともに、システムの長期安定性や耐久性等を検証し、実用化に向けた課題を整理した。

・CO₂圧入時の地層への影響に関する研究

CO₂地中貯留による微小振動の発生可能性が議論されている。海外のCO₂圧入サイトによる事例を踏まえると、CO₂圧入によって発生する微小振動はごく微小なものと想定されるが、安全性評価、社会的受容性の観点からサイトでのモニタリングが必須である。

RITEは、CO₂圧入に伴う微小振動を観測するため、米国ローレンス・バークレー国立研究所およびテキサス大学鉱山地質学研究所の協力を得て、米国炭素隔離地域パートナーシップのCO₂圧入サイト(ミシシッピ州クランフィールド油田)に微小振動計を計6台設置し、2011年12月から観測を行っており、得られたデータを解析することにより微小振動とCO₂圧入との関連性について検討している。

(3) 貯留層外部へのCO₂移行解析

CCS事業実施にあたっては、様々な側面から慎重に事前調査を行い、CO₂が長期間安定して貯留層に留まると予測できるサイトを選定する。しかしながら、一般社会等が抱くCCSに対する懸念のひとつにCO₂漏出リスクがある。よって、CCSが広く社会に認知され普及するために、万一のCO₂漏出による環境影響を事前に見積り、CCSを安心安全な技術として確立しておくことが重要である。このためRITEは、安全性評価手法開発の一環として、貯留層外部へのCO₂移行解析を実施している。

貯留層から海底に移行する際、CO₂は地層中を移動し海底堆積層を通り、そして海水中へ広がる。したがって、CO₂の漏出シミュレーションを行うためには、地層中、海底堆積層中、海水中の3つのモデルが必要である。地層中では、CO₂の移行経路となる断層を想定した上で、CO₂が超臨界、気相、液相、溶存態と相変化しながら移行する状態をシミュレーションし、海底堆積層中では、CO₂が上方に拡散しながら化学反応や微生物による作用等によって変化していく状態をシミュレーションする。海水中では、海底堆積層から漏出したCO₂が海水の流動によって広がり、どのような濃度分布となるかをシミュレーションする。また、海水中のCO₂濃度変化が海洋生物に与える影響を集約したデータベースを整備している。

さらに、CO₂漏出が海洋環境に及ぼす影響について理解を深めるために、CO₂を海底から人為的に漏出させる現場実験(英国QICSプロジェクト:Quantifying and Monitoring Potential Ecosystem Impacts of Geological Carbon Storage)に参加している。ここでは、大型底生生物への行動変化を観察するために間欠自動撮影水中カメラシステムを設置してデータを取得した。また、底泥中微生物の好氣的アンモニア酸化活性に及ぼす影響を調査するために現地での測定試験を行った。

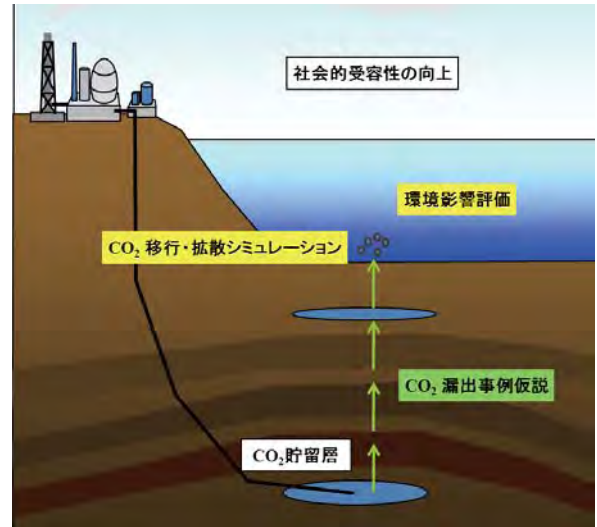


図7 CO₂移行・拡散シミュレーションの概念図

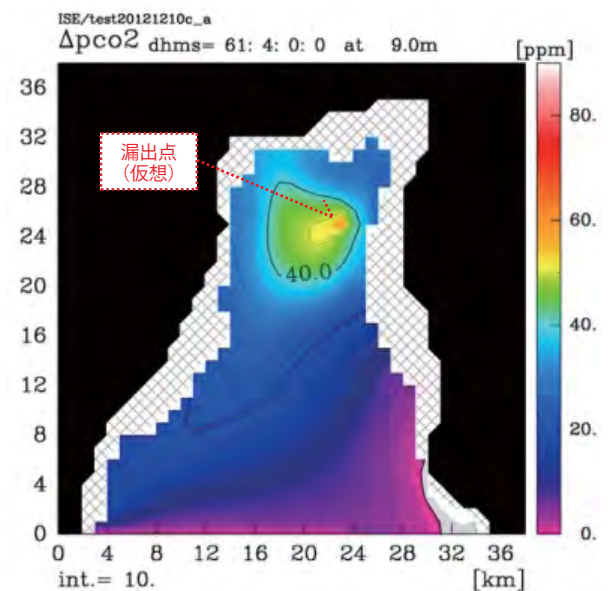


図8 海中でのCO₂拡散シミュレーション
(漏出後のCO₂濃度の増加を示している)

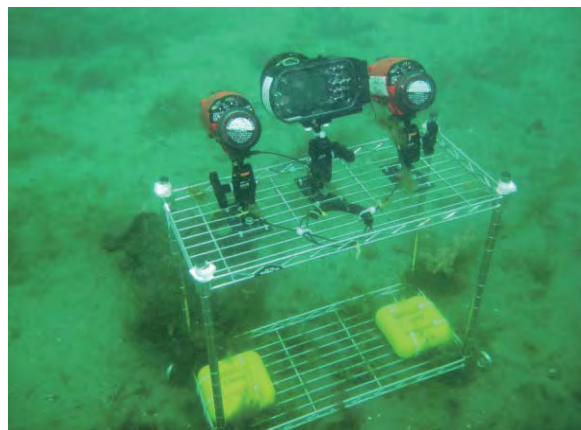


図9 間欠自動撮影水中カメラシステム



図10 底泥中微生物の好氣的アンモニア酸化活性の測定

(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プロジェクトにおいて世界で最初のCO₂帯水層貯留が開始されてから既に16年が経過した。この間に世界では多くのCO₂地中貯留事業が開始され、2008年頃からそれらの知見がBPM(Best Practice Manual)などの形で集約され、さらに汎用的な解説書やガイドラインなどが作成されてきた。例えば、欧州では欧州委員会がCCS指令を作成し、加盟国に対してCCS実施に関する規則を示すとともに、EU加盟国が国内法を整備する上での参考資料として4種類のガイダンス・ドキュメントを作成した。このように、CCS事業の実証試験の経験・知見を整理し、本格的な地中および海底地層へのCO₂貯留の実施に向けた準備が進められている。

我が国においては、環境省が「海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律および関連法令」を整備し、経済産業省は国内での大規模実証試験を対象に議論を進め、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技術の研究開発については、長岡CO₂圧入実証試験等で多くの知見が得られている。

将来の本格的なCCS事業の展開のためには、国内外の知見を整理し有用な形で取り纏めることが重要である。このため、RITEは、CCS事業者を主な対象者として、CCS事業を実施する際の技術的な参考となるように、我が国が保有するCCS技術開発成果や海外事例を整理したCCS技術事例集の作成を目指して、調査研究を進めている。

表1 CCSに関する主な解説書・手引書

	機関	発行している解説書・手引書など
米国	EPA	CO ₂ 貯留の坑井に関する手引書(全12冊)
	DOE/NETL	CO ₂ 貯留のBPMシリーズ(全6冊)
カナダ	CSA	CCS国際規格
欧州	EC	CCS指令の加盟国向け手引書(全4冊)
日本	環境省	CO ₂ 海底地中貯留申請書の作成手引き
	METI	大規模実証試験のための報告書
国際機関	CSLF	BPMの比較
	WRI	EU, IEA, EPAの各規制の比較
	IEAGHG	ワイバーンプロジェクトのBPM
民間機関	DNV	事業の認証手続きに関する推奨指針書

表2 CCS技術事例集作成の目的とイメージ

	内容
目的	1. 技術的に安全かつ経済的なCCS事業の実施 ・経済性、安全性、法令遵守、合意形成の担保 ・CCSの普及障壁の低減 2. 日本の技術力の海外への発信・展開・普及の支援 ・海外での事業展開、国際共同研究への参画 ・国際標準化活動、国際機関との連携
技術事例集のイメージ	利用者 : CCS実施事業者 使われ方: CCSを実施する際に技術的に参考とする手引書 形態 : わが国が保有するCCS技術開発成果を集約 海外事例も参考とする 事例 : 長岡実証試験、海外情報、新規国内事例

CCS技術事例集の作成に向けた検討スキームを図11に示した。主な流れとしては、①国内外の情報の収集・整理・分析を行い、国内事例である②長岡実証試験事例を整理する。次にRITEの研究開発成果に基づき③RITE版CCS技術事例集を作成し、最終的には国内の大規模実証試験の事例を踏まえた④日本版CCS技術事例集を作成する計画である。2011年度にCCS関連の主要な情報を収集・整理しており、2012年度からは、海外のCCS事例集等に関する更新状況を把握するとともに、長岡実証試験を対象にした事例集の作成に着手するほか、CCS技術事例集のための国内外の情報整理を行っているところである。

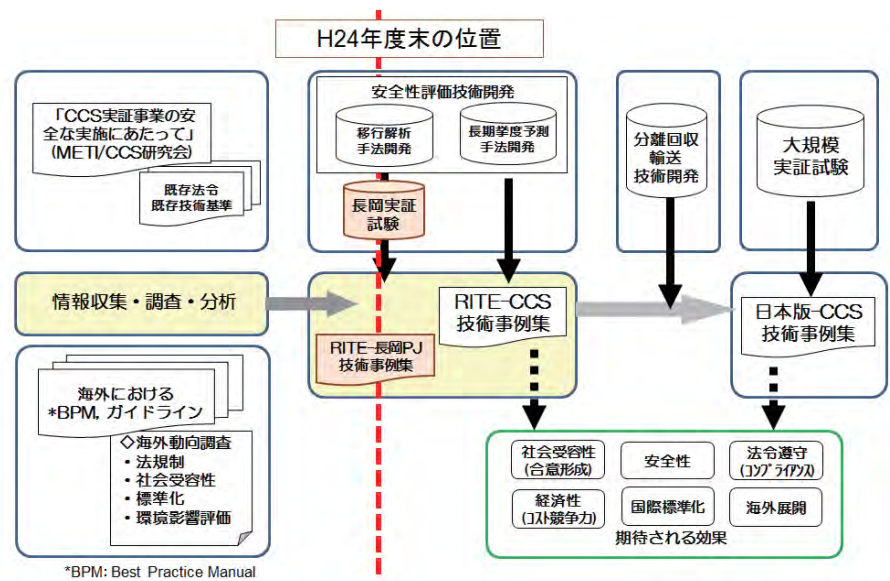


図 11 CCS 技術事例集作成の検討スキーム

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、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。既に米国においては天然に存在するCO₂を活用したCO₂-EORが年間6千万トンの規模で実施されており、今後、特にエネルギー原単位当たりCO₂排出量の多い石炭火力発電所の排出CO₂を対象としたCCS-EORの普及が期待されている。

中国は既に世界最大のCO₂排出国だが、経済発展に伴いCO₂排出量が年々増加している。日本も世界第5位のCO₂排出国であり、この両国が協力してCCS-EORの共同調査研究を行うことは、地球温暖化防止の観点から国際的に非常に大きな意義を持つ。

RITEは、中国石油天然気集団公司(CNPC)と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を通じて技術交流を深めてきた。

2011年9月28日北京で「CCS-EOR日中協力テーマに係る確認書」を調印し、①CCS-EOR(CCUS)全体システムの検討、②貯留層評価技術の検討、③微生物利用地中メタン再生技術検討の3テーマを日中協力テーマとして選定した。

これを受けて2012年度にRITEは中国の岩石試料について弾性波測定、X線CT装置による画像解析等の物性測定/解析などを行い、RITEが保有する貯留層評価技術の中国油田での適用可能性を検討した。

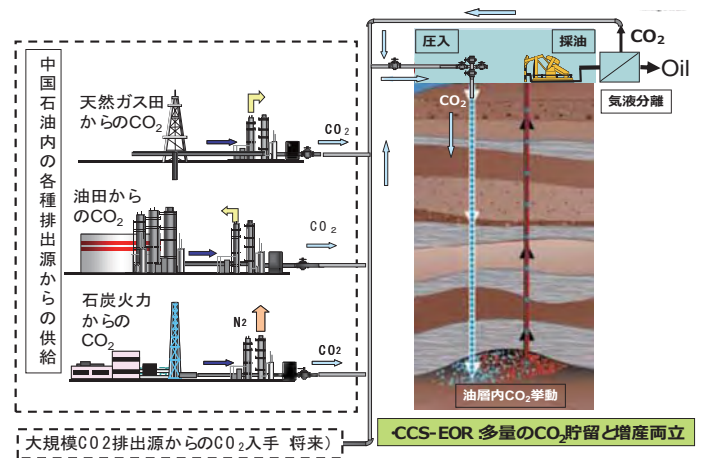


図 12 CCS-EOR の概要図



図 13 中国石油 RITE 訪問(2012年6月)

4. 国際連携および海外動向調査

RITEでは、CCSの普及を図る国際機関等と連携するとともに、CCSの海外動向の調査を実施している。CCSを普及していくためには、経済性、普及政策、法規制の整備、社会的受容性などの課題があり、こうした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と言える。

RITEが協力している主な国際機関等として、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

炭素隔離リーダーシップフォーラム(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であり、米国が主導して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、日本などの先進国のほか、新興国、産油国を含む24か国と欧州委員会が参加している。活動は政策立案者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で構成される技術グループによって行われており、数年ごとに閣僚級の会合を開催している。RITEは2009年から技術グループに参加している。

CSLFではCO₂貯留とともに、2011年から回収したCO₂の利用、特に石油の増進回収(EOR)での利用を活動対象に含めることになった。その背景には、世界でのCCSプロジェクトの立ち上げが想定よりも遅延していることから、ビジネスとして成立しやすいCO₂の利用を目的としたプロジェクトを推進することにより回収技術のコストを削減し、将来のCCSの加速につなげていくという発想がある。2013年秋に米国テキサス州で開催される次回の閣僚会議でも、EORが会議の主要テーマとして取り上げられる予定である。また、同会議に向けて、CCUSの技術ロードマップの改訂作業が短期的な取り組みにも焦点を当てて進められている。

・IEAGHGの概要と動向

温室効果ガスR&Dプログラム(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して、国際エネルギー機関(IEA)のもとで締結された協定に基づいて1991年に設立された。現在、温室効果ガスの削減技術のうち、主にCCSが活動対象となっている。日本を含む21か国、欧州委員会、石油輸出国機構(OPEC)のほか、24企業が参加している。RITEは2009年から日本の代表機関として執行委員会に参加し、IEAGHGの活動計画の策定や活動の評価に貢献している。

IEAGHGの主要な活動の一つにCCSの専門家ネットワークの構築とワークショップの開催、また、大規模な国際学会の開催がある。ワークショップでは、CCSの実証プロジェクトの進展に伴って、2012年に環境影響の専門家ネットワークが整備された。また、貯留に関するモデリング、モニタリング、リスクといった個々のネットワークにとどまらず、複数のネットワーク間での知識共有が重視されるようになってきている。2012年には貯留関連の4つのネットワークの合同会合が開催され、2013年にはリスクとモデリング、モニタリングと環境影響の合同ワークショップがそれぞれ予定されている。国際学会については、IEAGHGとともにRITEが第11回温室効果ガス制御技術国際会議(GHGT-11)を2012年11月に京都で開催し盛況を呈した。2013年度は回収技術関連の2件の国際会議が予定されている。

・ロンドン条約の概要と動向

ロンドン条約によって、CO₂の海底下貯留が国際的に認められている。同条約は陸上で発生した廃棄物などの船舶等からの投棄による海洋汚染を防止することを目的とした国際条約であるが、海底下貯留を可能とする条約改正が2007年に発効した。現在でも、CO₂の越境移動などのCCSに関連する議論が続いている。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。

越境移動には、圧入前のCO₂の国境をまたぐ輸送と圧入されたCO₂の国境を越えた移動とがある。こうした越境移動が認められるように同条約は2009年に修正されたが、批准国数が規定に達しておらず発効していない。条約の改定以降、CO₂輸送と圧入CO₂の越境移動についてのガイドラインの制定作業がそれぞれ進められていたが、後者については2012年に作業が終了し採択された。

・CCSに係る海外動向

2009年にIEAが発行したCCSロードマップによると、2050年までにCO₂排出を現状レベルから半減するシナリオを達成するためには、2020年までに100件の大規模CCSプロジェクトの実施が必要である。一方、現在、操業中の大規模なCCSプロジェクトは8件に過ぎず、数年内の操業が確実な案件を含めても16件にとどまる(グローバルCCSインスティテュート調べ)。このうち、12件が北米でのプロジェクトであり、同地域が現在の大規模プロジェクトを主導していると言える。また、14件がCO₂回収に必要な追加コストが少ない工業プラントをCO₂排出源とし、10件が回収したCO₂を石油増産回収(EOR)事業に売却するビジネス形態をとっており、経済性の確保がプロジェクト実施のカギとなっている。石炭火力発電所のCCSプロジェクトは北米のBoundary DamとKemperの2件にとどまるが、両者とも2014年の運転開始を目指して順調に建設が進んでおり、特に石炭火力からの回収実証の観点からその完成が待たれる。

一方、温暖化対策に積極的な欧州では、これまでCCS導入により大幅なCO₂排出削減が期待される石炭火力発電所に対する大規模実証プロジェクトの推進に主眼を置いてきたが、計画通りには進んでいない。欧州委員会は、初期投資に対する支援を目的として2008年と2009年に2つのスキームを立上げているが、経済の混乱、インセンティブとして期待されていた炭素価格の低迷などにより、1996年と2008年にノルウェーで開始されたSleipner、Snøhvitの2つのプロジェクト以降に実施されたプロジェクトはなく、実施が決定された案件もゼロである。こうした中、ノルウェーが2012年に比較的大規模に回収技術の実証を行うことができる試験センターを設立し、回収コストの削減への貢献に期待が寄せられている。また、英国政府が導入を決めた電力の固定価格買取制度は再生可能エネルギーや原子力とともにCCSも対象としており、炭素価格に代わる経済的インセンティブとして注目されている。

豪州では、民間コンソーシアムが海底下ガス田をCCSプロジェクトとして開発している。このGorgonプロジェクトでは、生産した天然ガスを処理する際に発生する年間300万トン超という多量のCO₂を回収して地中に貯留する計画となっており、その建設が2015年の運転開始を目指して順調に進んでいる。同国では、2012年7月に炭素税が導入され、また、連邦政府や州政府がCCSプロジェクトへの出資に積極的であり、CCS推進の環境は整っていると言える。しかしながら、Gorgonに続くプロジェクトの実現には時間を要する見込みである。政府が主導し、多数の排出事業者が参加することになるSouth West Hub、Carbon Netと呼ばれる2つの大規模プロジェクトがあるが、現在、フィージビリティ・スタディの段階にあり、政府による出資コミットもスタディまでにとどまっている。

こうした中、アジアにおけるプロジェクトの動向が注目を集めている。日本政府が北海道苫小牧市での大規模実証の準備を進めているほか、中国ではCO₂回収レートが年間10万トンクラスの2件のCCSプロジェクトが操業中であり、10～30万トンクラスの2件が建設中とされている。