

二酸化炭素地中隔離：国際動向と課題

山本晃司¹⁾

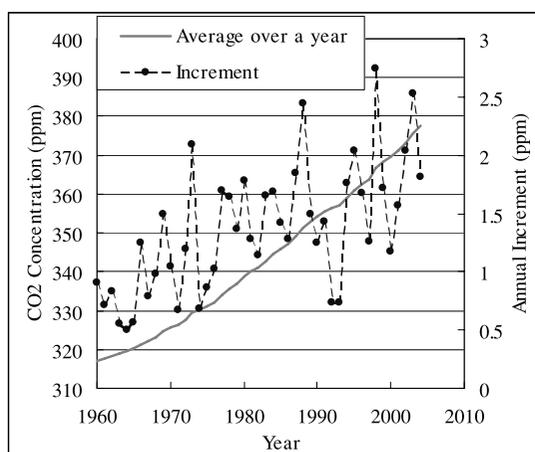
1. はじめに

カリフォルニア大学スクリップス海洋研究所のC. D. Keelingらが1958年からハワイのマウナ・ロア山で継続している大気中のCO₂濃度の年平均値(Keeling and Whorf, ホームページ)は、毎年ほぼ1.5ppmの上昇を見て、当初の315ppmから現在は380ppm近くまで達している。特に01年から03年の間の上昇率は2年続けて年2ppmを超え、CO₂濃度上昇に何らかの正のフィードバックが加わっているのではないかという懸念が語られた。03年から04年の上昇率は再び年2ppmを下回っているが、増加傾向が加速していることは第1図から見てとれる。また、気象庁は2005年の世界の平均気温が年差+0.33℃で史上二番目に暑い年であったと発表した(気象庁報道発表資料, 2005)。この発表では、1980年代中頃以降、高温となる年が頻出していることを指摘し、その原因の一つとして

CO₂による温暖化をあげている。このように、温室効果ガスによる地球温暖化は考えられるリスクの一つであるだけでなく、現実に人類が直面する懸念と理解されるようになってきている。

一方で、世界のエネルギー使用と化石燃料の使用量は一部を除いて増加の一途を辿っており、CO₂排出量は現在も加速度的に増大している。IEA(国際エネルギー機関)の発表では(IEA Press Release, 2005)、1990年から2003年の間に世界のCO₂排出量は20.5%増大し、その多くは発電部門と運輸部門の寄与であった。また、米国・中国・ロシアについて世界第4位の排出国である我が国の現状を見ると、2004年度の環境省の速報値(環境省, 2005)によるCO₂排出量は1.252Gt(以下tで表される量はすべてCO₂としての質量)であり、この値は2003年度に比べると0.8%減少したが、京都議定書の基準年の1990年から比べると11.5%の増加である。しかも、2003年度には原子力発電所の停止により一時的にCO₂排出量が急増しており、実質的には増加傾向が継続していると言える。

世界のエネルギー需要の見通しは、今後も化石燃料の使用が伸び続けることを示している。その一つの現れが一昨年来の原油価格の高騰であり、石油だけでなく天然ガス、石炭の価格も上昇を続けている。このことは、市場が今後も化石燃料が使われ続けると判断していることを示している。風力などの再生可能エネルギーの導入は着実に進んでおり、米国やドイツなどでは停滞していた原子力の使用も見直されはじめているが、これら一次エネルギーの転換はエネルギー需要の増大に追いついていないのが現状である。実際、経済の現実を考えると、現在導入されている技術を他の技術に置き換えるには、現有設備の減価償却期間程度の時間がかかると考えられる。また、エネルギー部門は上流から下流までの一貫性が重要で



第1図 マウナ・ロア山におけるCO₂濃度の観測値(Keeling and Whorfのホームページより)。

1) みずほ情報総研株式会社 環境・資源エネルギー部

キーワード：地球温暖化，二酸化炭素，地中隔離，リスク，規制

あり、一次エネルギーの転換にはそれに対応した輸送方法や利用技術の転換が必要になるため、仮に革新的な再生エネルギー技術が生まれても化石燃料が使用されなくなるにはかなりの時間を要するであろう。

このような状況の下で、当面化石燃料の使用は継続され、また増大するとさえ言える。一方で、IPCC（気候変動に関する政府間パネル）の第三次報告書のシナリオに基づけば、人類社会が地球温暖化による破滅的影響を防ぐためには大気中のCO₂濃度を450ppmに抑えることが必要とされ、そのために残された時間はあと30年ほどしかないことになる。そこで、CO₂排出による気候変動のMitigation technology（緩和技術）あるいは、再生可能エネルギー時代までのBridging technology（つなぎの技術）として、CO₂の回収・隔離（Carbon Capture and Sequestration, CCS）が注目されるようになった。

隔離技術の一つである地中隔離には、大きく分けて増進石油回収（Enhanced Oil Recovery, EOR）のためのCO₂圧入、枯渇油ガス田への貯留、帯水層への貯留、及び増進炭層メタン回収（Enhanced Coal-Bed Methane recovery, ECBM）のための炭層への貯留の四つがあるが、それぞれに必要な技術がこれまでに石油・天然ガスの開発で培われてきたものの応用であるため新たなブレークスルーは必要ないと考えられ、比較的短期的に実現可能である。また、もともと地下にあった化石燃料の炭素を元あった地下に封じ込め生態系から分離するという点で、社会に

も受け入れられやすい手法と考えられている。一方で、隔離可能な場所が地理的に制約され、隔離可能な総量が不確実で、また地理的制約からCO₂排出（ソース）と隔離場所（シンク）が必ずしも一致せず、輸送コストが大きな問題となる。さらに、不均質でダイナミックな地下の世界に置かれたCO₂の長期的安定性の評価も大きな問題である。

現在、先進各国はCO₂排出削減の手段として地中隔離の技術的研究とともに、政策的位置づけを探っている。また世界各地で地中隔離に必要な技術の研究開発とともに、実際に一定量のCO₂を地中に貯留するデモンストレーション・プロジェクトが各所で進められている。本論文では、地中隔離が世界でどのような位置づけにあるかを概括し、今後の課題について示す。

2. 地中隔離を取り巻く環境

2005年は地中隔離の技術にとって特筆すべき出来事が相次いだ。一つは言うまでもなく、ロシアの批准に伴う京都議定書の発効である。このことで、もともと経済的にはコストでしかないCCSを実施するインセンティブが批准各国に加わることになる。また、日本のように地中隔離のポテンシャルが小さいと考えられている国にとっては、クリーン開発メカニズム（Clean Development Mechanism, CDM）や共同実施（Joint Implementation, JI）といった京都メカニズムの枠組みを利用して、他国のポテンシャルを利用できること

グレンイーグルズ行動計画（気候変動、クリーン・エネルギー、持続可能な開発）

Gleneagles Plan of Action: Climate Change, Clean Energy and Sustainable Development

...

14. 我々は、以下により、炭素固定貯留技術の開発及び商業化を加速するための作業に取り組む。

- (a) 炭素隔離リーダーシップ・フォーラム（CSLF）の目的及び活動を支持し、同フォーラムがより広い市民社会と協力すること、また、炭素固定貯留技術が公衆に受け入れられるための障壁に対処することを奨励する。
- (b) CSLFと協力し、原油増進回収及び天然ガス生産における二酸化炭素の除去などの、化石燃料部門における炭素固定貯留の短期的な可能性に関するワークショップを開催するよう国際エネルギー機関（IEA）に要請する。
- (c) IEAが、CSLFと協力し、「炭素固定が容易な」設備に関する定義、費用、範囲を研究し、経済的誘因を検討するよう要請する。
- (d) 地中への二酸化炭素の貯留のための研究オプションについて、主要な開発途上国と共に取り組む。
- (e) 産業界及び国内外の研究プログラム、パートナーシップと協力し、開発途上国も含め、炭素固定貯留技術の潜在的可能性を探求する。炭素の貯留のための研究オプションについて、主要な開発途上国と共に取り組む。

...

（外務省仮訳（ホームページ）を一部改変）

になった。

また、7月の先進8カ国首脳会議(G8)においては気候変動、クリーン・エネルギー、持続可能な開発に関するグレンイーグルズ行動計画の中で、CCSの推進が謳われた(前頁、囲み記事参照)。このような形でCCSの技術が取り上げられることは、政策的観点からCCSの重要性が認知されたことを示すとともに、G8各国間での共同研究の枠組みを作りやすくなったことを示す。また、G8には京都議定書への参加を拒否している米国、カナダが出席している。これは、この両国が京都議定書とは別の独自のアプローチに関心を示していることの一つの現れである。

さらに、11月にはIPCCの特別報告書(IPCC, 2005)が発行された。IPCC第3次報告書に続くこの報告書では、CO₂分離・回収、輸送、地中及び海洋貯留、鉱物化、産業利用のそれぞれに関して実用化に向けた現状の地位について述べているが、地中貯留の各技術はECBMが依然Demonstration Phaseにあると分類されている他は、Economically Feasible under Specific ConditionsあるいはMature marketと分類され、それ自体は実用化フェーズに達していると判断されている。また、CO₂地中隔離のポテンシャルは、油ガス田が675～900Gt、ECBMが3～200Gt、帯水層が1,000～10,000Gtとされる。ちなみに現在の世界全体のCO₂排出量は、年間約25Gtである。

この特別報告書は、CCSが温暖化抑制技術として国際的に認知されつつあることを示す重要なステップである。現在IPCCは2006 IPCC Guideline for National Greenhouse Gas Inventoriesを作成中で、2006年春には採択後発表予定である。その中では、初めてCCSの国別インベントリ(排出・吸収量目録)の算定方法が示される予定であり、このような動きを通じてCCSが各国の政策の中に明確に位置づけられるようになるであろう。

3. 実証プロジェクト

実際にCO₂を地中に圧入してCCSの有効性、安全性、経済性などを検証するための実証あるいはデモンストレーションのプロジェクトも継続して各地で行われている。プロジェクトは、実用的・産業的に行われるプロジェクトと、研究開発を目的として集中的にモデル化研究や観測が行われるプロジェクトに分けられ

るが、前者も現状では研究開発のためのデータ取得が行われている。

CO₂を利用したEORは石油貯留層圧力の維持や石油の粘性低下の目的で従来から行われていて、米国ではこの目的で天然CO₂の生産やパイプライン網の整備も行われていたが、CO₂隔離の目的を兼ねて発電所から分離回収されたCO₂を地下に圧入する最初のプロジェクトとして、米国サウスダコタ州の石炭ガス化プラントからカナダ・サスカチュワン州のWeyburn油田までCO₂を輸送しての圧入が開始されている。研究開発としては、2004年に終了したWeyburn Iとその後継のWeyburn IIで圧入ガスの漏洩のモニタリングとリスク評価に注力されている。このような化石燃料起源のCO₂によるEORは、石油の生産増進が分離回収・輸送・圧入のコストを上回ればただちに経済的に成り立ち、また圧入層が油田であることからデータが豊富で安定性の懸念が小さいこともあり、もっとも実用化に近いと考えられる。また、CDMとしての実現性も高いことから、京都議定書付属書I国以外の産油国での適用も考えられる。日本の石油会社が操業するアラブ首長国連邦のザクム油田などいくつかの計画が既に存在する。

一方、世界最初の帯水層へのCO₂圧入プロジェクトであった北海油田のSleipner油田の観測プロジェクト(Torp and Gale, 2004)は終了しているが、圧入自体は継続しており、研究の成果は後継プロジェクトであるCO2STOREに引き継がれ、得られた知見の他のフィールドへの移転が図られている。Sleipnerでは圧入されたのは天然ガスに含まれるCO₂であり、このような天然ガス随伴ガスとしてのCO₂の分離はガスの品質を保ったりLNGを製造したりするために日常行われていることから、同様の事例が今後も増えると考えられている。また、ノルウェーの場合はCO₂排出規制と炭素税が既に施行されているため、分離ガスを回収・圧入するインセンティブが既に存在する。

このような随伴CO₂の圧入はバレンツ海のSnohvitガス田、オーストラリアのGorgonガス田など今後事例が増えると考えられる。また、アルジェリアのIn Salahガス田の場合は、圧入対象が帯水層ではなく同一地域の枯渇した油ガス貯留層であることが特徴になっている。

小規模であるが、様々なモニタリング技術を集中的に適用した研究開発プロジェクトとしては、新潟県長

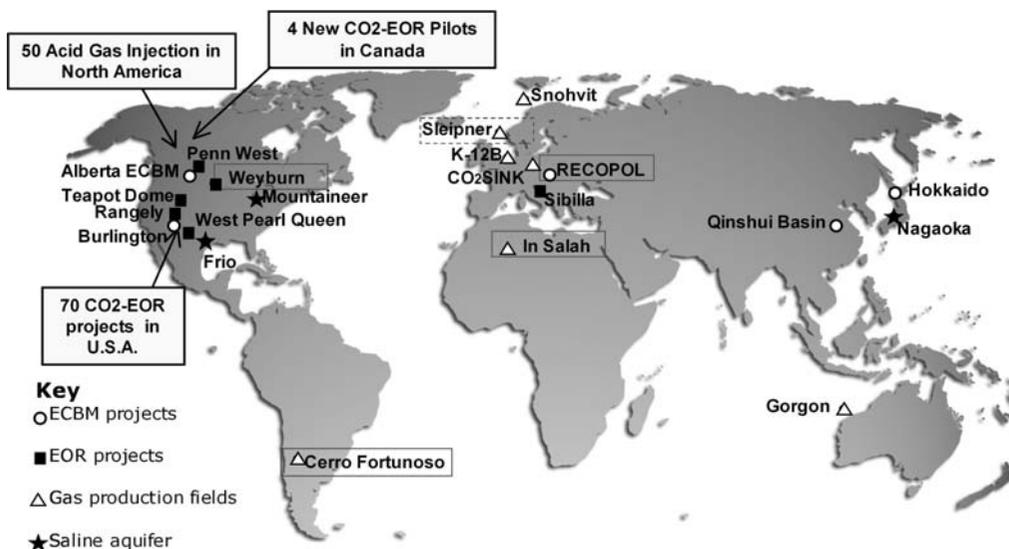
第1表 世界の主要なCO₂地中隔離実施プロジェクト(IEA-GHGホームページより)。

プロジェクト名称(実施主体)	場所と貯留層タイプ	CO ₂ 源と輸送方法	状況
SACS (Statoil)	北海油田ノルウェー海域Sleipnerガス田上部層のUtsira帯水層	同ガス田で生産される天然ガス随伴CO ₂ を海上プラットフォームで分離・回収し、同プラットフォームより圧入	1996年以来、年間約1Mtの圧入を継続。研究としては設計、モニタリングを実施して終結。現在後継のCO ₂ STOREプロジェクトに移行。
Snohvit (ノルウェー政府, Statoil他)	バレンツ海Snohvitガス田上部の帯水層	同ガス田海底仕上げ坑井で生産される天然ガス随伴CO ₂ を145km離れた陸上LNG生産施設で分離・回収し、元のガス田上部帯水層に圧入	年間0.7Mtを圧入予定。最初の欧州・北米向けLNG輸出は2006年の予定。
Weyburn (EnCana, Dakota Gasification Company) http://www.encana.com/operations/upstream/weyburn_scope_co2.html	カナダ・サスカチュワン州、既存油田のガスEOR	米国ノースダコタ州の石炭ガス化プラントから回収したCO ₂ を330kmパイプラインで輸送(最初の国間CO ₂ 輸送プロジェクト)	2000年より一日約5,000トンのCO ₂ を継続的に圧入、20~25年のプロジェクト期間で最終的に約20Mt圧入予定。現在リークのリスク分析に特化したWeyburn II研究プロジェクトが進行中(2004~2008)。
In Salah (BP, Sonatrach)	アルジェリア中部In Salarガス田の中のガス貯留層	同ガス田で生産される天然ガスに含まれるCO ₂ を分離回収し同ガス田中に圧入	年間0.9Mtの圧入を計画し、2004年までに完了したPhase Iの開発で南欧へのガス販売を開始済み。
CO ₂ sequestration into the Frio Formation (テキサス大, BP, Schlumberger他)	米国テキサス州ヒューストン近郊地下のFrio帯水層	至近の飲料水用炭酸井より購入	モニタリング及びモデリング技術に特化した研究プロジェクト。事前検討後1,600tのCO ₂ を約100日かけて圧入し、その後1年間の挙動を観測。
COAL-SEQ (Advanced Resources Intl, Burlington Resources, BP, Kinder Morgan) http://www.coal-seq.com/	米国ニューメキシコ州北西部San Juan BasinのAllison Unit及びTiffany Unitでの炭層	産業用CO ₂	ECBM有効性検討のための研究プロジェクト。1995年に最初のCO ₂ /N ₂ 圧入が開始され研究継続中。
CO ₂ SINK (GFZ, Vattenfall, Shell他) http://www.co2sink.org/	ベルリン西方Ketzinの深度600-700mの帯水層	産業用CO ₂	約3万tのCO ₂ を圧入。モニタリング技術の検証。ステークホルダー、住民の関与したリスク評価実施。EUFrameWorkProject6
RECOPOL(RECOPOL consortium) http://recopol.nitg.tno.nl/index.shtml	ポーランド、約1,000mの深部炭層	産業用CO ₂	2004年に約一年間で1,000tのCO ₂ を圧入。EUFrameWorkProject5で開始しCO ₂ NETの一部で実施。
岩野原(RITE, エンジニアリング振興協会, 帝国石油他)	新潟県長岡市、南長岡ガス田上部の深度1,100mの帯水層	産業用CO ₂	2004~2005年、約10,000tを1坑井より圧入、モニタリング井でのトモグラフィ等によるモニタリング。
夕張(環境総合テクノス, JCOAL他)	北海道夕張市夕張炭田、約900mの深部炭層でのECBM	産業用CO ₂	2003~2004年、2坑井で圧入及び生産テスト、各種モニタリング実施。
Gorgon (ChevronTexaco)	オーストラリア北西沖Barrow Island直下帯水層	Gorgonガス田の天然ガス中のGHGを分離回収し陸上生産基地近傍の地下2,300mのDupuy帯水層に圧入	2008年~2010年頃より年間3.3Mton-CO ₂ 圧入を計画中。
上部ザクム油田EOR(ジャパン石油開発他)	アブダビ沖の上部ザクム油田におけるガスEOR	陸上の発電所・石油精製プラントで分離・回収されたCO ₂ を沖合いプラットフォームへパイプライン輸送	最大年間15MtのCO ₂ を圧入する計画中。

岡市岩野原地区、テキサス州ヒューストン近郊のFrio帯水層、ベルリン近郊のKatzinなどの例がある。Katzinの場合は技術的な検討のみならず、地域住民とのコミュニケーションを含むリスク評価と対策研究

が行われており、今後の実証プロジェクトのありかたに示唆を与えている。

ECBMについては、いずれも研究開発フェーズであるが、ニューメキシコ・コロラド州境付近のSan Juan



第2図 世界各地の主要なCO₂地中貯留プロジェクト(IEA-GHGホームページの図を一部改変)。

Basinでは既に10年近く研究が続けられている。また、北海道夕張、ポーランド・シレジア地方のRECOPOLプロジェクトなどで、圧入性評価や向上、モニタリングなどの研究が進められている。このような実施事例を第1表及び第2図に整理する。

4. 諸外国の研究動向と実用化への道筋

1) 欧州の研究動向

CO₂排出削減に熱心に取り組んでいる欧州各国及びヨーロッパ連合(EU)では再生可能エネルギーの研究とともにCCS技術にも大きな研究投資が行われている。また、欧州では北海油田が大きな貯留ポテンシャルを持つことと、油田の開発継続が経済に大きな貢献をしていることが研究の動因の一つであろう。ヨーロッパは年間約1.5GtのCO₂を排出しているが、欧州全体の貯留ポテンシャルは1,400Gtと見積もられ(IPCC, 2005)、その多くが北海油田地域内の帯水層である。

EUは第5次及び第6次のFramework Programme(1998-2006)に含まれる研究において、CCSを含む排出削減技術を重要要素として取り上げているとともに、2012年以降のポスト京都時代を見越した戦略を検討中で、2006年度以降の第7次Framework Programmeの中では2050年までの排出量を3.6Gt削減できる15

の課題を選んで重点的に投資する予定である。

また、各国の研究プランにもCCSが含まれ、英国、ノルウェーは国の排出削減計画の中にCCSが位置づけられており、オランダ、ドイツ、フランス、イタリアといった諸国も独自の研究計画を有している。

企業レベルでも、既にStatoil、BPといった大手石油会社がプロジェクトに取り組んでいる他、機器メーカー、電力会社も関心を持って研究プログラムに取り組んでいるが、欧州のエネルギーのもう一本の柱である石炭業界の取り組みはまだ少ない。また鉄鋼メーカーの削減策にもCCSが考慮されている。

欧州はEU新規加盟の東欧諸国のエネルギーシステムで石炭依存度が高く近代化が進められているなど、域内のCO₂排出量にばらつきが大きい。そのため、域内の排出権取引を熱心に勧めており、すでにヨーロッパ排出権取引システム(European Emission Trading System)が2005年1月より始動している。ここではCCS技術で隔離されたCO₂をどう扱うかが検討されており、各国に中間的なガイドラインの提出を呼びかけている。そのひとつである英国貿易産業省の報告(Department of Trade and Industry, UK, 2005)は、CO₂の排出や安全性を監視する第三者機関の設置や、ライセンス制や許可制といった社会制度の整備を呼びかけている。また、実施に向けての環境グループを含むNGOとの対話もヨーロッパ委員会

レベル及び各国政府レベルで開始されている。このように、ヨーロッパでは研究段階を一歩脱して、実用化への枠組みを作成中の段階であると言える。

2) 米国

米国のブッシュ政権は気候変動への取り組みに熱心でないとして繰り返し批判を浴びており、また京都議定書には参加しないことを明確に表明している。しかし、排出削減への取り組みを全くしていないわけではなく、主に技術開発によって経済に悪影響を及ぼさない排出削減を行うことを主張していて、原子力の復活、バイオマスエタノール、水素燃料と並んで、CCSをその柱の一つに据えている。

米国エネルギー庁 (US Department of Energy, DOE) は2002年と2003年に炭素隔離ロードマップ (Carbon Sequestration Technology Roadmap and Program Plan) を発表し、2012年までに、産業の単位生産量あたりのCO₂排出量を2002年基準で18%削減するという独自の目標を掲げた。そして排出削減へのビジョンの年次展開を提示して、具体的な技術課題を記している (第2表)。

また、CO₂排出量の多い国を中心に、炭素隔離リーダーシップフォーラム (Carbon Sequestration Leadership Forum, CSLF) という枠組みを提唱した。これは、京都議定書とは別の枠組みでCO₂隔離技術開発の国際的協力を目指すものであり、現在20カ国とEUが参加している。この枠組みには京都議定書を批准していないカナダ、オーストラリアと、中国、ブラジル、コロンビア、韓国、南アフリカ、インド、サウジアラビアといった諸国が含まれる。つまり、エネルギー供給国を巻き込んだ枠組みであるという点に特徴がある。この枠組みの中で実際に行われているのは、技術情報の交換や国際共同研究のサポートといった技術開発の支援、政策・規制に関する情報交換といったもので、まだ間接的な役割ではあるが、グレンイーグルスサミット行動計画で研究実施の主体として取り上げられるなど、今後役割が増加することが期待されている。

また、米国はCO₂隔離を実施すると決定された場合に国内各地域がその特性に合わせたCCSを実現できる準備を行うために、地域パートナーシップ (Regional Partnership) の枠組みを策定しようとしている。これは、分離回収から、森林吸収等も含む隔離の実現までの、排出源 (source) と隔離場所 (sink)、

第2表 USDOE炭素隔離ロードマップにおけるVision Statement概略 (USDOE Office of Fossil Energy, 2003)。

2006年	排出量測定と取引のための、地中、森林、土壌への固定に関するモニタリング機器と測定ガイドラインを開発する。
2008年	炭素トンあたり10ドル以下の商用隔離技術を開発する。
2009年	年間1Mt規模の地中隔離デモンストレーションを実施。
2010年	人の健康と環境を守るための測定・評価・検証 (MM&V) 技術の開発。
2012年	エネルギーコストがサービス価格の10%以内の商用技術の開発、実用化。
2018年	ほぼゼロエミッションでエネルギーサービスコストの増加がない、分離回収設備を開発。

必要な技術、インフラストラクチャー、法規制の一連の流れを地域の公共部門及び民間部門をリンクさせて実現させる試みで、2003年に7つのパートナーシップが選定され、それぞれで各地域での炭素ネットワークの特定とそれに関わる技術と機関の組織化が進められている。

もう一つの柱はFutureGen (フューチャージェン) 構想である。これは石炭ガス化複合発電所 (Integrated coal Gasification Combined Cycle, IGCC)、水素製造、CCSの三点セットでゼロエミッション発電所を作ろうというもので、約1,000億円の経費が見込まれている。この計画では10年でパイロットプラントをワシントン州に建設することになっており、ブッシュ政権は強く推進していたが議会が予算を認めないために実現が遅れていた。しかし、2005年によく予算が承認されて、DOEは2005年12月6日、プラントの建設に関して、フューチャージェン産業連合 (アメリカン・エレクトリック・パワー社、サザン・カンパニー社など8社) と正式に合意したと発表した。計画では予算の約7割を政府、3割を民間が負担して、設備容量が27万5,000kWのプラントが2012年頃に運転開始の予定とされている。このゼロエミッション発電所は今年1月31日のブッシュ大統領の一般教書演説でも取り上げられた。

3) アジア・太平洋地域

世界規模でのCO₂排出削減を実現するためには京都議定書付属書2国以外の中国・インドといった諸国の役割が重要である。2005年7月に米国が主導し、オ

オーストラリア、日本、韓国、中国、インドの6カ国が参加して、「クリーン開発と気候に関するアジア太平洋パートナーシップ (Asia Pacific Partnership on Clean Development and Climate, APP)」が発足し、今年1月11、12の両日その第一回閣僚会議がシドニーで開催された。この会議では、よりクリーンな化石燃料、再生可能エネルギーなど8つの技術分野での協力で技術移転によって温室効果ガスの削減を目指すことが合意され、その中でもCCSが重要な技術と位置づけられている。この合意は現在エネルギー需要の増大している国々を巻き込む一つの試みとして重要となるであろうが、参加国が日本を除いて京都議定書未批准および削減義務を負わない国々であり、また石炭の生産・利用の多い国々であることから環境保護への実効性に関して批判もある。また、EUと中国はこれとは別に昨年9月気候変動パートナーシップを結ぶことを合意した。この中でも、CCSが2020年までに達成すべき項目の一つとしてとりあげられている。

5. 実用化への課題

(1) 排出削減手法としての地中隔離の問題点

地中隔離技術の適用について、主流の環境保護グループは温暖化防止のための次善の策として、推奨はしないが強固に反対はしないという態度のものが多い。主たる批判は次のようなものである。

- ・隔離されたCO₂が長期間漏洩しないという保証がない、またはそのような保証はありえない
- ・エネルギーを生産するために化石燃料をとりだし、さらにエネルギーを使ってCO₂を隔離するというのは効率的と言えない
- ・研究資金の優先順位を再生可能エネルギーや省エネルギーの技術開発から奪う恐れがある
- ・化石燃料の使用による大量エネルギー消費時代の継続につながり、再生可能エネルギーによる社会の到来を遅らせる

隔離技術の適用とそのため研究開発においては、これらの批判に耳を傾けて長期的視点の中で隔離技術を位置づける必要がある。

地中隔離のもう一つの難点は、貯留ポテンシャルの偏在である。CO₂を安価かつ大量に隔離するために

は、孔隙率と浸透率が高い地層が厚く均質に広がっていることが必要であり、また安全性のためには不透水性の構造性キャップロックを持つことが望ましい。そのような地域は炭化水素資源と同様に主に堆積盆地に存在するが、石油資源ほどではないにせよ地域的な偏在性が大きい。そのため、地中隔離が排出削減の切り札であるとする、米国のような資源大国は排出削減も安価に行え、日本のような資源輸入国は排出削減にもより高いコストを強いられるといった、地域的な不公平が生じる。

(2) 法規制との整合性

CO₂を地中に圧入するという行為は、EOR目的でこれまでも行われてきており、その範囲では規制する法律もあった。

米国においては、流体圧入用の坑井は環境保護庁 (Environmental Protection Agency, EPA) 及び各州政府によって、飲料水安全法 (Safe Drinking Water Act, SDWA) の下の地下圧入規制プログラム (Underground Injection Control program, UIC) によって規制される。石油開発用の圧入坑井はUICのClass II wellに分類され、保安基準が定められている。また、米国では、有害液体廃棄物の地中圧入が過去に行われていて、そのための坑井はClass I wellとして、Class II wellとは異なった規制が加わる。Class I wellでは一万年という長期にわたって圧入された流体が飲料水として利用可能な帯水層を汚染しないことを求めている。現在EPAはCO₂隔離用の坑井をどのクラスに分類すべきか、あるいは新しいクラスを作成すべきか検討しているが、結論は出されていない。

日本では改正水質汚濁防止法によって、指定された特定有害物質を地中に浸透させることは禁止されている。しかし、CO₂は有害物質とはみなされていない。現在の国内の実証試験は鉱業法、鉱山保安法に依拠して行われているが、今後帯水層圧入など石油・石炭の資源と関わり無く行われる作業が発生した場合には、従うべき法律が明確ではない。

CO₂を海底の地層に隔離する場合には、廃棄物の海洋投棄を禁止したいわゆるロンドン条約 (the Convention of the prevention of Marine Pollution by Dumping of Wastes and Other Matter 1972) 及び同議定書 (1996 Protocol, 2006年4月発効) の規制対象となる可能性がある (OECD/IEA, 2005)。特にロンドン

議定書は指定された特定の廃棄物以外の海中、海底面 (Sea-bed) 及び海底土壌 (Subsoil) への投棄を原則禁止している。陸上で分離・回収された地中隔離を規制する可能性が高い (Subsoilに海底面下数百メートル以深の地層が含まれるのかどうかは解釈が微妙であるが、現在は含まれるという前提での議論が多い)。ただし、同条約及び議定書は海底地下資源生産に伴う廃棄物の海底処分を対象としていないので、天然ガス生産に伴うCO₂の圧入 (Sleipnerがその例) は認められると考えられる。また、陸上からのみアクセスする海底下貯留層は同議定書の対象とならないので、陸からの傾斜掘りで海底の帯水層や油層に達する場合は対象外であると考えられる。

ロンドン条約締結国会議は地中貯留が地球環境保護の施策と有効であるという認識の元で、将来の議定書及び条約の解釈の確定や条文の修正も視野に入れた検討を続けており (Report of the 27th Consultative Meeting, 2005)、ロンドン議定書に関して現在CO₂を規制対象外のリスト (Reverse List) に含める方向で議論が行われている。

また、北西ヨーロッパ14カ国とヨーロッパ委員会が参加して北海周辺海域における海洋への投棄を規制しているOSPAR条約は、地域条約ではあるが、環境規制の厳しい地域の基準として今後他地域での運用の基本となると考えられる。CO₂貯留に関しては、2002年にノルウェー海域での海洋貯留の妥当性をめぐる議論を背景にOSPAR理事会は法学者・言語学者グループに検討を諮問し、海洋起源 (offshore arisings) のCO₂の圧入は禁止されないが、陸上起源 (non offshore arisings) のCO₂はEOR以外の目的では投棄 (dumping) と見なすとの解釈を答申している (OSPAR Commission, 2004)。しかし、この答申は海洋貯留と地中貯留を区別しておらず、またCO₂は海洋の汚染 (pollution) にはあたらなないので貯留には条約が及ばないという議論もあるなど、解釈は確定していない。

これら、海洋に関する2条約はいずれにせよEORと海底ガス田の随伴ガスとしてのCO₂圧入は許可され、陸域からのCO₂に関しては議論が続いている状態であると言える。

(3) 安全性

CO₂は有害物質または毒劇物には含まれないが、

濃度3%以上で人の健康に被害を及ぼし始め、10%を超えると致死的な影響を及ぼす。天然のCO₂による人的被害については、カメルーンのNyos湖 (1986年) (Kling, *et al.*, 1987)、八甲田山 (1997年) (Hernández, *et al.*, 2003)、インドネシアのDieng高地 (1979年)、カリフォルニアのマンモス山 (1998年) (Sorey, *et al.*, 1996) などが知られる (International Volcanic Health Hazard Network, ホームページ)。これらの地域では火山性のCO₂噴出に地理的条件が重なって局所的に高いCO₂濃度の場所が発生したことが人命の損失につながった。その一方、1965～67年の松代群発地震では地表の地割れから大量の湧水とともにCO₂が噴出しているが、人的被害は皆無であった。また、CO₂が地下水に溶けることによる酸素の欠乏や地下水の酸性度の上昇が植生に影響を与える。前述のマンモス山では断層にそって広範囲で木の枯死が観察されている。

いずれの現象も局所的に特異に高濃度のCO₂が発生したことによるもので、自然のバックグラウンドに比べて10倍程度のCO₂ではこのような環境影響は生じない。このことから、隔離されたCO₂が高レートで局所的に噴出するような現象を引き起こさないことが重要な課題である。むしろ、低濃度のCO₂が徐々に漏洩する現象でも長期的には温室効果ガスの排出増加と同様の現象となる。地中隔離が広く受け入れられる技術となるためには、環境に影響を与えるレベルの漏洩が生じないこと、あるいは制御できることが重要になる。

地下に圧入されたCO₂を地中に止めるトラップメカニズム4つ (Benson and Cook, 2004) が考えられているが、それぞれ有効に働く上での条件が存在する (第3表)。現在考えられているCO₂の主なリークの経路としては、既存の坑井、及びキャップロックを通じる断層が考えられている。これらの長期的安定性についてはまだ十分理解されているとは言えず研究が待たれている。漏洩リスクに関する検討は、漏洩の要因とメカニズム、時間・空間的特徴、インパクトのそれぞれについて検討する必要がある (第4表)。また、漏洩をモニタリングする技術も重要な研究開発課題である。

今後地中隔離を実現する上では、リスクアセスメントが科学的根拠に基づいて適切になされていることが、地域住民や環境グループへのアウトリーチにおいて重要となるであろう。

第3表 トラップメカニズムの種類と特徴.

メカニズム	問題点
Physical (or Hydrostratigraphic) Trapping	
石油貯留層の形成と同様に、低浸透率のキャップロックと背斜等によるドーム形状の地質構造の組み合わせによるシール構造がある場合、キャップロックの低浸透性と幾何形状によりCO ₂ の上向き及び側方への移動が妨げられる。	油ガス田の場合は炭化水素を長期間保持するシールが存在することが確かめられるが、それ以外では圧入されたCO ₂ の保持が確実といえない。油ガス田の場合も、生産時・圧入時の圧力変動、あるいは掘削・坑井刺激・増進回収等によりシールが破壊されている恐れがある。
CO ₂ が地層水に溶解すると密度は水と同程度または若干大きくなる。そのため、CO ₂ が水に完全に溶け切れれば移動は移流または拡散のみとなり、地層水の流れがなければ移動時間は非常に長くなる。	長いスケールでは移流及び拡散による移動が生じる。圧入を続けた場合は地層中の圧力分布により流れが生る。温度圧力変化により溶解度に変化する。
多孔質体中で気泡の状態 で存在するガスは表面張力により孔隙を封鎖して実効的な浸透圧を減少させる。したがってガスの飽和率が一定の範囲であれば、気体のCO ₂ の移動も妨げられる。	Trappingが生じるのは一定のガス飽和度の範囲(孔隙サイズ、鉱物の濡れ性等で変わる)なので圧入全量をトラップできない。
炭酸が地層水中あるいは岩石中の金属イオンと反応して炭酸塩鉱物を作り地層に沈着する(石炭への吸着を含める場合もあるが、石炭の場合は地層中のCO ₂ 分圧が下がれば脱着するので、性質としてはSolubilityに近い)。	反応に長い時間がかかる。酸性度があがると再度CO ₂ が発生する。

第4表 漏洩リスクの分類.

漏洩経路	時間的特徴	空間的特徴	関連する要因	関連するフィールドとインパクト
A. 坑井及び周辺からのリーク	圧入中及び直後に高く以後低減	坑井周辺で高い	掘削時のオペレーション、ケーシング・セメントと炭酸の反応	すべてのフィールドで生じる。人の健康・地域的な健康への影響が大きい。マネージメント課題。
B. 廃坑坑井等の人工パスからのリーク	圧入後一定期間経過後、継続的。比較的高レート。	坑井付近に集中、ただし坑井が多数で位置が不明な場合は広域的	坑井の掘削時期、廃坑方法	すべてのフィールド、ただし坑井の多い油ガス田でリスクが大きい(安全性、長期安定性)。マネージメント課題。
C. シール・キャップロックの浸透性(断層・き裂等の地層の不連続性を含む)によるリーク	長期・低レートの安定的漏洩	広域的	キャップロックの健全性、キャップロックとCO ₂ の化学反応	非構造性帯水層で顕著。長期安定性に関連。リスク予測とサイト選定の課題。
D. 圧力変動による貯留構造の一次的破壊	圧入直後最大確率、以後	局所的。ただし、断層位置が確定できない場合は広域的	地殻応力、粘土鉱物の影響	非構造性帯水層で顕著であるが油ガス田でも生じる。長期安定性に関連。リスク予測とサイト選定の課題。
E. 地震等の外力による貯留構造の破壊	地震：一定確率の断続的漏洩、開始直後高レート	断層周辺に局所化	地震による応力変化	非構造性帯水層で顕著。長期安定性に関連。リスク予測のサイト選定の課題。
	火山活動、人間(掘削など)：低確率、発生後急速な漏洩	広域	想定外の事態	

(4) コスト、経済性、実施主体

地中隔離が安全面・環境面のリスクを考慮しても有効な温室効果ガス排出抑制手法と認知された場合、それを誰がどれだけコストをかけて実施し、どの

ような利益を得るのかというビジネスとしての側面が重要になる。そのための研究として重要なのはコストの削減であり、この点は技術開発課題として取り組まれているが、同時に規制コストをどれだけ削減できる

かという法規制面の検討も必要になる。また、実施主体に経済的インセンティブを与えるための方法(総量規制, 補助金あるいは罰金, 税の減免など)についても仕組みづくりが必要である。これらについては, 直接の利害関係者となるエネルギー産業とともに, 政府, 及び最終的にコストを負担し気候変動緩和の利益を得る国民の間で, 十分な議論が行われることが望まれる。

6. まとめ

地中隔離に関して, 国際的な動向と実現に向けての課題を整理した。この技術がCO₂の排出削減を比較的短期間で実現できる重要な手法であることについては国際的な合意が形成され, 積極的に進める方向で枠組みの策定が進んでいる段階であるといえる。特に, EORとして実施される地中隔離と油ガス田から排出される随伴ガスを再圧入することについては, すでに実用化段階であるといえる。欧州では排出削減を実施する具体的手段として, EU及び国ごとの研究開発が進められている他, 排出権取引の仕組みの整備も行われている。米国は, 京都議定書とは独立した独自の排出削減戦略の中でCCSを重要な課題と位置づけ, CSLFの主導, 地域パートナーシップ, FutureGenなどで地中隔離の実現を目指している。また, 今後排出量が増大するであろう中国やインドを巻き込むパートナーシップの合意がなされている。

今後の課題としては, 法規制の整備, 長期・短期の漏洩リスクの低減とリスクアセスメント及びマネジメント, 実現に向けたビジネスとしての仕組みの整備などが挙げられる。これらの課題の解決を通じて地中隔離を社会に受け入れられる技術とするための研究開発と検討が早急に必要とされている。

謝辞：本論文の執筆にあたっては, John Gale氏 (IEA-GHG), 小出仁氏 (早稲田大学理工学総合研究センター), 赤井誠氏及び富舎利行氏 (産総研), 板岡健之氏 (みずほ情報総研) のご協力を頂きました。ここに感謝申し上げます。

文 献

Benson, S. and Cook, P. (2004) : Status and current issues in geologic storage of carbon dioxide. Proc. 7th International Conference on

Green House Gas Control Technologies, Vancouver BC, September 2004.

Department of Trade and Industry, UK (2005) : Developing Monitoring, Reporting, and Verification Guideline for CO₂ Capture and Storage under the EU ETS. January.

外務省 : (http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/summit/gleneagles05/s_03.html).

Hernández Perez, P., K. Notsu, M. Tsurumi, T. Mori, M. Ohno, Y. Shimoike, J. Salazar and N. Pérez (2003) : Carbon dioxide emissions from soils at Hakkoda, north Japan. J. Geophys. Res., 108 (B4), 2210.

IEA-GHG : (<http://www.co2captureandstorage.info/>).

IEA Press Release (2005) : "Energy and climate change: more action needed" 06/12/2005 Montreal, Canada.

International Volcanic Health Hazard Network : 火山ガス・エアロゾルのガイドライン—二酸化炭素.

(http://www.geocities.jp/ychojp/ivhnn/guidelines/gas/co2_japanese.html).

IPCC (2005) : Carbon Dioxide Capture and Storage.

環境省 (2005) : 2004年度 (平成16年度) の温室効果ガス排出量速報値について<概要>. 平成17年10月.

Keeling, C.D. and Whorf, T.P.: Atmospheric carbon dioxide record from Mauna Loa. (<http://cdiac.esd.ornl.gov/trends/co2/sio-mlo.htm>).

気象庁報道発表資料 (2005) : 「平成17 (2005) 年の世界と日本の年平均気温について (速報)」。平成17年12月14日.

Kling, G. W., M. Clark, H. R. Compton, J. D. Devine, W. C. Evans, A. M. Humphrey, J. P. Lockwood and M. L. Tuttle (1987) : The 1986 Lake Nyos gas disaster, Cameroon, West Africa. Science, 236, 169-175.

OECD/IEA (2005) : Legal Aspect of CO₂ Storage.

OSPAR Commission (2004) : Report from the Group of Jurists and Linguists on Placement of Carbon Dioxide in the OSPAR Maritime Area. Annex 12 of the report of the 2004 meeting of the OSPAR Commission.

Report of the 27th Consultative Meeting (2005) : , 27th Consultative Meeting of Contract Parties to the Convention of the prevention of Marine Pollution by Dumping of Wastes and Other Matter 1972. 24-28 October 2005, Agenda item 16, International Maritime Organization, Dec 16.

Sorey, M. L., Farrar, C. D., Evans, W. C., Hill, D. P., Bailey, R. A., Hendley, J. W. II and Stauffer, P. H. (1996) : Invisible CO₂ Gas Killing Trees at Mammoth Mountain, California. U.S. Geological Survey Fact Sheet-172-96.

Torp, T. A. and Gale, J. (2004) : Demonstration storage of CO₂ in geological reservoirs: The Sleipner and SACS projects. Energy, 29, 1361-1369.

USDOE Office of Fossil Energy (2003) : Carbon Sequestration Technology Road Map and Program Plan, March 12.

(http://www.fossil.energy.gov/programs/sequestration/publications/programplans/2003/sequestration_roadmap03-13-03.pdf).

YAMAMOTO Koji (2006) : Environment, Natural Resources and Energy, Mizuho Information & Research Institute.

<受付：2006年4月3日>