

CO₂地中固定 —地球温暖化防止とエネルギー問題の同時解決へ—

小出 仁 Hitoshi Koide

早稲田大学 客員教授

(財)地球環境産業技術研究機構(略称RITE) 主席研究員

略 歴：1962年東京大学工学部卒業、1968年東京大学大学院博士課程修了、工学博士。1969年通商産業省工業技術院地質調査所入所、地質物性課長、環境地質部長を歴任。2000年より現職。

専 門：環境地質学、地球工学、岩石・地殻力学

受賞歴：エネルギー資源学会創立20周年記念懸賞論文優秀賞、日本鉱山地質学会論文賞

著 書：「地震と活断層の本」(国際地学協会)



火力発電所などの燃焼排ガスからCO₂を回収し、地下深部に貯留する技術の開発が、世界中で進められている。CO₂の地下圧入を利用して、石炭層に吸着されているメタンやメタンハイドレート、水溶メタンを回収したり、超臨界CO₂により深部石炭や重質油を抽出回収することも提案されている。地下の強い還元環境と最近続々と発見されている地中微生物を利用すれば、非光合成カーボンリサイクルにより、地球温暖化防止とエネルギー問題を同時に解決できる可能性もある。

1. 地球温暖化防止技術

最大の温室効果ガス排出国である米国が離脱するなど、京都議定書の批准が難航しているのは、社会的・経済的負担が大きいためである。地球温暖化防止への国際的な取り組みが始まる意義は大きい、京都議定書は地球温暖化防止の第一歩にすぎない。地球温暖化は化石燃料の大量消費の結果であるが、化石燃料は産業革命以後の高度な工業社会発達の原動力であるだけに、その消費抑制は容易ではない。生活スタイルを変えてエネルギー浪費を抑制する必要があるのは言うまでもないが、温室効果ガス排出の少ないエネルギー利用技術に画期的なブレークスルーがない限り、地球温暖化問題の根本的解決は難しい。

気候変動対策技術は、

- ① ノーリグレット方策(no regret measures)、
 - ② 最小リグレット方策(minimum regret measures)、
 - ③ 温暖化特化方策(GW specific measures)
- に分けられる¹⁾。①ノーリグレット方策とは、温暖化を考慮しなくても、経済的な観点から見て開発意義の高い方策で、その例として省エネルギー技術などがある。ノーリグレット方策は、すでに積極的に推進されている。②最小リグレット方策とは、温暖化を考慮しなくても、別の意味で長期的に開発意義のある方策で、その例として

大規模緑化技術などがある。最小リグレット方策の技術開発は盛んに行われているが、経済的メリットが少ないため、実施はなかなか進んでいない。公的な支援策が期待される分野である。③温暖化特化方策とは、温暖化の緩和を唯一の目的とする方策で、温暖化を考慮しなければ開発意義のない方策と言える。そのため実施例はごく少なく、国などによる研究開発も始まったばかりである。温暖化特化方策の典型が、火力発電所や製鉄・セメントなどの大規模工場では化石燃料の燃焼によって排出される廃ガスから、温室効果ガスであるCO₂を回収し、海洋水に溶解させたり(CO₂海洋隔離)、地下の枯渇油田やガス田、あるいは帯水層に貯留する(CO₂地中貯留と総称する。帯水層貯留とも言う)技術である。

2. CO₂地中貯留技術の世界的展開

CO₂海洋隔離やCO₂地中貯留は、地球温暖化防止の切り札と言われている。その理由は、世界中で排出されるCO₂を収容できる十分な収容能力があり、大量のCO₂圧入が技術的にも可能なためである。また、化石燃料中心の現在のエネルギー供給体制をほとんど変えずに、即効的かつ確実に温室効果ガスの排出を削減できるので、緊急に大規模実施しても社会・経済への影響が少ないという

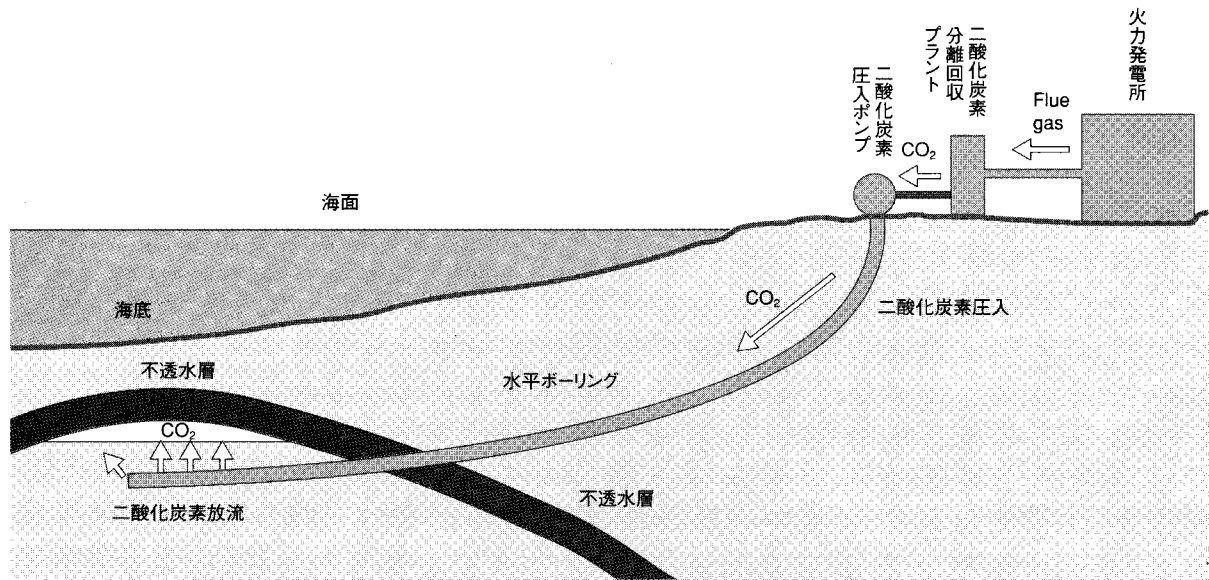


図1 沿海底下構造性帯水層へのCO₂地中貯留

利点もある。しかし、地球温暖化防止だけを目的にしているため、他のメリットがなく、安全性や環境への影響も十分検討されていないため、「切り札」という言葉には、本格実施には慎重であるべきだという意味も込められている。

しかし、ノルウェーの国営石油会社Statoil社では、1996年から、北海のSleipnerガス田で海底下800mの砂質帯水層に年間100万t規模のCO₂地中貯留を実施している²⁾。ガス田から産出される天然ガスに含まれるCO₂を、天然ガス貯留層より浅い帯水層に貯留することにより、CO₂の大気への排出を削減している。Statoil社によれば、ノルウェーでは炭素税が導入されているため、CO₂地中貯留によって温室効果ガスの排出を削減した方が、炭素税を払うより経済的にも有利とのことである。

CO₂海洋隔離技術が最も盛んに研究されているのは、日本である。経済産業省が1997年から「二酸化炭素の海洋隔離に伴う環境影響予測技術研究開発」を実施しているほか、日本を中心として米国、ノルウェー、カナダ、オーストラリア、および民間組織も加わったCO₂海洋隔離に関する国際共同研究が、国際エネルギー機関(IEA)の気候変動技術イニシアチブ(Climate Technology Initiative : CTI)の枠組みの下で行われている。国際的に海洋環境保全への関心が高まっており、原則として廃棄物の海洋投棄もなるべく禁止される方向にあるため、CO₂を海洋に投入することによる環境への影響が慎重に

研究されている。

CO₂地中貯留についても、2000年度に経済産業省の国家プロジェクトとして「二酸化炭素地中貯留技術研究開発」が開始され、地球環境産業技術研究機構(RITE)とエンジニアリング振興協会(ENAA)が中心となって技術開発が進められている。CO₂地中貯留技術とは、地下深部の岩層にある微細な間隙(帯水層)にCO₂を圧入して浸透させるもので、安全性が高く、環境への影響が小さいことから、実用化も近いと言われている。しかし、地中貯留はサイトへの依存性が高く、適用地域の地質条件によって、経済性、安全性、最適技術システムが大きく異なってくる。好適な帯水層をCO₂の大規模発生源から近い距離に見つけることが、経済性の面から見ても安全性の面から見ても重要である(図1)。CO₂地中貯留に最適な帯水層として当面想定されるのは、海岸から10kmくらい沖で、海面から約1,000m前後の深度にあり、十分な空隙率と浸透性と有効層厚を有する地層である。地層上部が連続性のよい難浸透性の岩層などで覆われ、十分な期間CO₂を大気から隔離できる地質構造が望ましい。塩水化のため水資源として利用できない沿海地域の帯水層の有効利用にもなる。

近海の地中帯水層へのCO₂貯留技術は、最も可能性が高いと思われるが、技術をより最適化し、経済性を向上させ、長期安全性を確認する必要がある。そのためには、

地中でのCO₂の挙動を解明して地中貯留技術の科学的基盤を確立すると共に、実際のデータに基づいて技術システムを構想し、環境への影響、安全性、全体的な経済性、総合的環境負荷、社会的合意の形成について検討しなくてはならない。日本列島は地震が多く、活断層も密に分布しているため、大規模な地中貯留を実施するには、地震と活断層の評価も必要である。地震時、あるいは断層からの長期のCO₂漏洩や、地中への流体圧入に伴う流体破碎と誘発地震について、十分検討する必要がある、安全性に関しては外国以上に慎重でなくてはならない。

CO₂地中貯留の研究は、海外でも盛んに行われている³⁾。ヨーロッパでは、1996年まで実施されたJoule II研究で、ヨーロッパ北西部の地下にはEUの全発電所の800年分の排出量に当たる8,000億tの貯留容量があると見積もっており、EU各国の地質調査所が参加してGESTCOプログラムが開始されたほか、安全性を検討するNASCENTプロジェクトやヨーロッパ諸国の研究開発のネットワークを作るCO₂NET計画もスタートした。また、カナダのワイバーン油田では、大規模なCO₂圧入による原油増進回収(CO₂-EOR)を実施し、これを利用してワイバーンCO₂モニタリング計画という国際共同研究が実施されている。オーストラリアでもCO₂地中貯留に適した帯水層を探すための堆積盆地の調査が、GEODISC計画という研究プロジェクトによって行われている。

米国エネルギー省(DOE)ではBush政権の方針を受けて、カーボン固定技術を最重要課題とし、化石燃料の燃焼による廃ガスからCO₂を回収して地中貯留する技術をエネルギー企業9社(4カ国にまたがる)と共同で開発するなど、民間、国立研究所、大学を動員した多様な研究計画が次々と立ち上げられている。米国のカーボン固定は、CO₂の燃焼廃ガスからの回収と貯蔵(海洋貯留、地中貯留)、および土壌処理、鉱物処理に加えて、森林や藻類による大気からのCO₂固定までを含む広い概念である。

3. CO₂炭層固定-メタン回収とCO₂-EOR(原油増進回収法)

CO₂地中貯留やCO₂海洋隔離は、「温暖化特化方策」の典型、つまり地球温暖化防止以外の利益をもたらさない技術とされている。しかし、CO₂地中貯留技術の原型は、

原油増進回収(EOR: Enhanced Oil Recovery)である。原油増進回収技術とは、枯渇しかけて原油が出にくくなった油層に温水やガスを圧入し、岩石の細かい間隙に潜んでいる原油を押し出して回収する技術である。CO₂は、原油に溶解してその粘度を低下させるため回収効果が高いので、米国の油田ではよく使われている。CO₂を使った原油増進回収(CO₂-EOR)の目的は原油生産であるが、油層にCO₂がかなり残るので、温室効果ガス排出の削減にも貢献する。米国テキサス州の油田では、1998年には3,100万m³/日のCO₂地中圧入を行なっているが、そのCO₂のほとんどはコロラド州の天然CO₂ガス鉱床から採取したもので、温室効果ガス排出の削減にはあまり貢献していない。しかし、年間360万t以上は天然ガス精製工場で分離回収されたものを使っているため、この分はCO₂排出の削減に貢献している。

テキサスの油田などでのCO₂-EORは、CO₂を市場価格で購入して使っても利益が出ているので、地球温暖化防止技術として見れば、ノーリグレット方策と言える。だが、「枯渇油田」の多くでは、地下深部の岩層中の微細な空隙に原油が含浸されて、まだ半分以上が残されている。温室効果ガス削減の推進政策が採られ、CO₂の貯留に若干のプレミアが提供されれば、こうした多くの「枯渇油田」で原油増進回収が実施できるであろう。その場合のCO₂-EORは、最小リグレット方策と言える。

米国では石炭層に吸着されているメタン、すなわち炭層メタンの回収が大規模に実施されており、重要な天然ガス資源になっている。ニューメキシコ州サンファン盆地でCO₂地中圧入による炭層メタン増進回収法(CO₂-ECBM)のパイロットテストが実施され、3年間で生産量の75~100%増加に成功している⁴⁾。1996年以来6,000万m³(約12万t)のCO₂が圧入されたが、採取井側からの漏出はほとんどなかった。

石炭層およびその周辺の地層に多量のメタンガスが埋蔵されていることはよく知られている。しかし、メタンは石炭の微細な空隙に吸着されているため、その採取は容易ではない。石炭層の坑道掘進現場や採掘切羽からのガス突出は、しばしば大事故の原因になる。ガスの多い炭層ではガス抜きボーリングが行われるが、ガスを完全に抜くのは難しい。しかし、CO₂はメタンよりも石炭に吸着されやすいので、CO₂を石炭層に圧入すると、石炭中のメタンを追い出して、代わりにCO₂が石炭に吸着さ

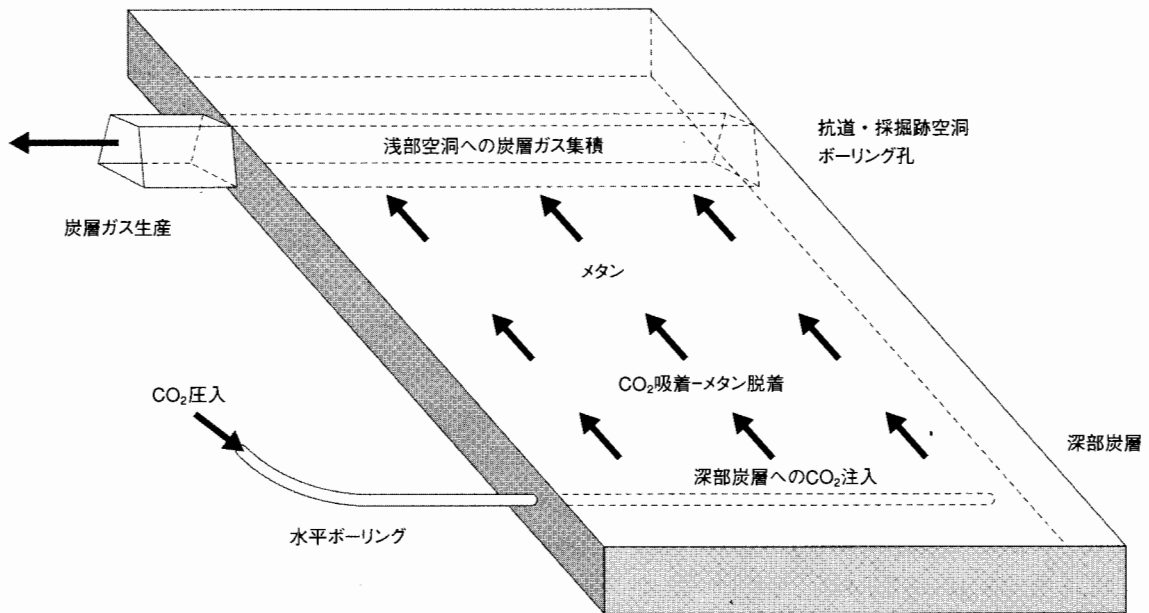


図2 CO₂圧入による炭層メタンの置換回収 (CO₂-ECBM)

れる。そのため、CO₂は漏洩することなく、効果的に地中固定される。石炭層は内表面積が大きいため、通常の天然ガス貯留岩の6～7倍のガスを貯蔵できる。しかも石炭層は、脱着されるメタンの2倍の分子量のCO₂を吸着するので、CO₂の貯留能力はさらに高くなる(図2)。

ニューメキシコ州のCO₂-ECBMパイロットテストでは、コロラド州にある天然CO₂貯留層から採取したCO₂を、テキサス州のCO₂-EORサイトまで圧送するCO₂パイプラインから途中分岐して、サンファン盆地のテスト現場に供給している。サンファン盆地では、1,000ft³当たり0.5ドルのCO₂供給代を払っても、CO₂-ECBMによって新たに3,700億m³のメタンが商業的に回収できる⁴⁾。つまりこの場合のCO₂-ECBMはノーリグレット方策として実施される。

CO₂が無料で供給されれば、CO₂-ECBMによって利益が出る世界中の石炭層を考えると、180億tものCO₂固定が可能なのである⁴⁾。さらに、CO₂の固定費用として1t当たり50ドルの補助が出れば、世界中で600億tものCO₂を石炭層に固定できる。すなわち、温室効果ガス排出の削減を目的とした削減費用が別途支給されれば、大量のCO₂固定と未利用天然ガス資源の回収も可能になるので、CO₂-ECBMは最小リグレット方策として活用できるのである。

日本の石炭層は、構造が複雑であるが、炭層メタンの含有量が多いことが知られている。経済的に採掘対象にならない深部の石炭層や採掘跡の旧鉱でも、炭層メタンを採取できる可能性は大きい。また、褐炭、亜炭、泥炭などの低品位炭も利用できる。山口、山崎⁵⁾は、日本の石炭の可採埋蔵量分だけを見ても、炭層メタン資源量は少なくとも2,540億m³あり、石炭はメタンの2倍のCO₂を吸収できるので、約5,000億m³(約10億t)のCO₂が固定できると見積もっている。不可採埋蔵量が採掘可能埋蔵量の約10倍あるとすると、不可採とされている深部などの石炭層も利用すれば、約5兆m³(約100億t)のCO₂が圧入でき、約2.5兆m³の炭層メタンが回収できると推定される。

米国のパイロットテストの成功を受けて、CO₂炭層固定とそれを利用したメタン回収に関する技術開発が盛んに行われている。カナダのアルバータ州では、米国、英国、オーストラリア、オランダなどの政府機関に加え、多数の企業も参加して、CO₂-ECBMの現場実証試験やモニタリング、シミュレータの開発などの国際共同研究が進行中である(ARC-CO₂-ECBMRプロジェクト)。また、ヨーロッパでは、オランダ地質調査所(TNO-NITG)が中心になって、ポーランドの石炭層でCO₂炭層固定の実証実験が行われ、地質モデル、モニタリング、シミュ

レーション、室内実験も実施されている (RECOPOLプロジェクト)。日本でも2001年5月に、(財)石炭エネルギーセンター (JCOAL) を中心に20の企業、機関が参加して「CO₂炭層固定研究会」が発足しており、カナダとポーランドで実施されている上記の国際共同研究にも参加している。さらに2002年には経済産業省によるCO₂炭層固定技術開発の国家プロジェクトが開始される。

北海道の赤平炭鉱は1994年2月に閉山し、坑口はすでに密閉されているが、1996年5月からの3年間に3,879万m³のメタンガスが湧出した。その後ガス湧出量はしだいに減衰しているが、1999年4月時点でも毎分17.1m³が湧出している。そこで、湧出量の少ない1本の立坑からCO₂を注入して、他の立坑からメタンを回収し、そのメタンを使ってマイクロガスタービン発電を行っており、排ガスは立坑に注入して、ゼロエミッション発電を実現している。このような旧炭鉱を利用したCO₂-ECBMは、規模は小さいながらも地球温暖化防止と未利用の非在来型天然ガス資源開発を同時に実現しており、今後の進展が期待される。日本では、全ての炭鉱がすでに商業生産をやめているが、採掘コストが高いなどの経済的理由で閉山したものが多く、未採掘の石炭が多量に残っている。また、従来の坑内採炭方式では採掘が困難だった1,200mより深い石炭層は探査もされていない。日本近海の海底下にも石炭層が広範囲に分布していると推定される。CO₂-ECBMは深部石炭層にも適用できるので、そのために深部石炭層を探索する必要がある。

4. 未来に向けて

小出は、化石水を含む帯水層にCO₂を圧入して溶解させ、水溶性天然ガスを回収する技術を提案している⁶⁾。さらに、メタンハイドレート層やその下のフリーガス層にCO₂を圧入してガスを採取する技術も提案している (図3)⁷⁾。地中にCO₂を圧入して、包蔵されているメタンなどの天然ガスを回収する技術を、CO₂-ガス増進回収法 (EGR) と総称する。メタンは地殻中に、従来考えられていた以上に広範囲に含有されていることがわかってきた。しかし、その多くは地下水などに希薄に含まれているため、採取は経済的に困難である。メタンはCO₂の約20倍も温室効果が高いので、地下浅所のメタンは温

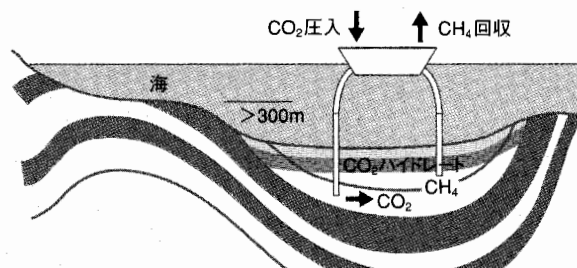


図3 CO₂ハイドレート天盤形成によるメタンハイドレートと深部メタンの置換回収

暖化の伏兵である。CO₂固定と天然ガス採取を組み合わせたCO₂-EGRは、地球温暖化防止とエネルギー資源獲得を同時に実現する一石二鳥の技術として期待が高まっている。

石炭層周辺の地層には有機物が多いので、地中微生物にとって活動しやすい場である。CO₂を有機物に変換できる生物には多くの種類があるが、地下深部でCO₂を有機物に固定できる生物は、嫌気性化学合成独立栄養微生物である。最近、1,000m以上の地下深部の玄武岩層でメタン生成菌の活動が報告されている⁸⁾。メタン生成菌は、深部の玄武岩層で熱水と玄武岩とが反応してできた水素と、地下深部由来のCO₂からメタンを合成し、エネルギーを得て生きていると考えられる (図4)。

空気中に遊離酸素が豊富に存在する酸化環境にある地表では、CO₂が炭素化合物の終局的な形態であり、メタンを酸化してCO₂に変換することでエネルギーが得られる。しかし、無酸素の還元環境にある地下深部では、メタンが炭素化合物の終局的な形態であり、CO₂をメタンに変換することでエネルギーが得られる。そのため、地下深部の還元環境を上手に使えば、メタン生成菌など嫌気性地中微生物の活動により、非光合成カーボンリサイクルが実現する (図5)⁹⁾。

一般に地下深部では反応速度が遅いので、CO₂からメタンへの変換も遅いことが予想される。しかし、強力な還元剤や触媒になる鉱物が存在すれば、変換が促進され、無機的な化学反応によるカーボンリサイクルが実現する可能性がある¹⁰⁾。地殻ガスサイクルに有利な岩体の候補としては、蛇紋岩、かんらん岩、玄武岩などが考えられる。地中微生物にも強力な還元反応促進機能を持つものが存在する。地中微生物の持つ酵素は、地下深部の高温・高圧下でも強力な触媒作用を持つ。地熱と無機的な

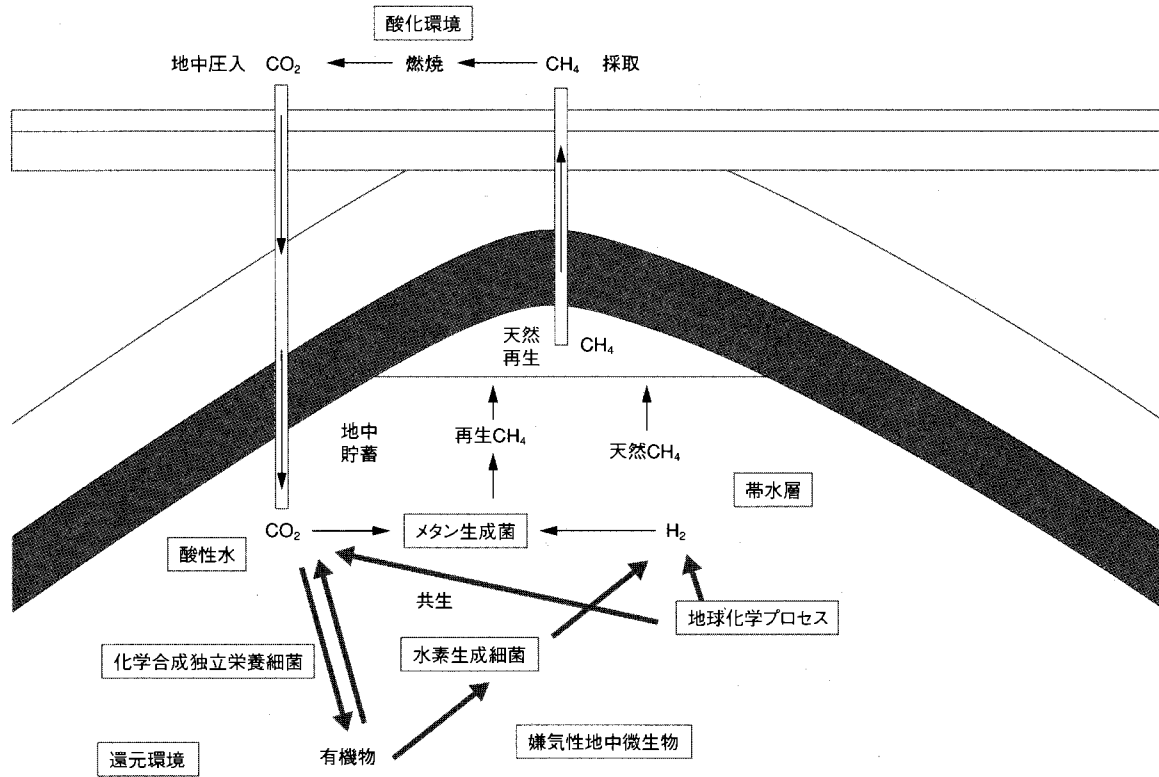


図4 帯水層中のメタン生成菌などの嫌気性微生物による非光合成カーボンリサイクル

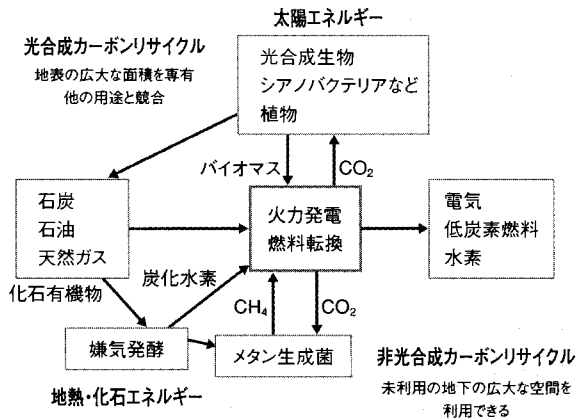


図5 地下の還元性を利用する非光合成カーボンリサイクル

触媒、微生物の酵素により変換が促進されれば、非光合成カーボンリサイクルの弱点である変換速度もかなり改善される可能性がある。地下には広大な空間があり、また地球環境という長期的問題に関わることなので、変換速度は必ずしも重要でないことも指摘しておきたい。

天然ガスや石油の無機起源説で有名なゴールドは、地

下の膨大な微生物活動圏の存在も指摘している¹¹⁾。地下には、多種多様なCO₂固定経路を持つ様々な非光合成微生物が存在する¹²⁾。地中微生物は、地下深部で無機のCO₂からメタンや酢酸など様々な有機物を生成する。CO₂固定のエネルギー源は、直接的には水素である。水素は、鉄などの岩石中の還元剤と熱水との無機反応によっても発生するが、岩石中に化石有機物が含まれていれば、地中微生物も嫌気発酵によって水素を生産する。地中微生物によるCO₂固定-メタン・有機物生成の量は、全地球規模で見れば膨大なものになるだろう。

水溶性天然ガス、コールマインガス、メタンハイドレートなど、メタンを主成分とする、比較的浅所にある天然ガスの多くが、メタン生成菌によって生成されたことが、炭素同位体比の研究などから明らかになっている。石炭層周辺の地層には有機物が多く含まれており、メタン発酵の起こる条件が整っているため、石炭層付近に豊富に見出されるメタンも、メタン生成菌によるものなのである。CO₂-ECBMによりメタンを置換して石炭層に吸着されたCO₂が、メタン生成菌によって再びメタンに変換され

れば、地殻カーボンサイクルが実現する。CO₂と地中微生物の利用により、地下深部の石炭、低品位の炭質物、採取困難な深部の重質油、タールサンドやオイルシェールなども回収できるようになるかもしれない。

CO₂地中固定は、従来は典型的な温暖化特化方策と考えられていたが、未利用天然ガスの回収に利用でき、さらに非光合成カーボンリサイクルによりエネルギー資源再生の可能性も持つ、新しい最小リグレット方策に発展しつつある。

最後に、問題点と将来展望の要点をまとめると、以下のようなになる。

(1) 問題点

- ① 通常のCO₂地中貯留やCO₂海洋隔離は、地球温暖化防止以外にメリットがない。地球温暖化防止のための特別な施策がなければ、経済的なモチベーションがない。
- ② 地下には未知の部分が多く、CO₂地中貯留の安全性や環境影響についても研究され始めたばかりである。
- ③ 日本は先進工業国の中で突出して地震活動の活発な国であるため、地震や活断層に対するCO₂地中貯留の安全性を独自に研究する必要がある。

(2) 将来展望

- ① 従来のCO₂地中貯留から、地殻岩石との結合性を高めて安定にしたCO₂地中固定へと、技術開発が進む。
- ② CO₂地中圧入を利用して、炭層メタンやメタンハイドレート、水溶性メタンなどが回収される。

- ③ 石炭や枯渇油田の残存石油、オイルシェールなどの抽出・ガス化回収が、超臨界CO₂の地中圧入によって実現する。
- ④ 地下の還元環境を利用して、天然の触媒や地中微生物によるCO₂-メタン変換や固定が行われ、非光合成カーボンリサイクルが実現する。

要約すれば、生命創成期の原始環境に近い地中環境を利用して、CO₂固定とメタンや石油の再生を実現し、地球温暖化問題とエネルギー問題を同時に解決するのが、将来の夢である。

引用・参考文献

- 1) 茅 陽一：RITEの研究とその今後の方向，<http://www.rite.or.jp/> (2001).
- 2) R.Korbøl, A.Kaddour: *Energy Convers. Mgmt.*, 36-6/9, 509 (1995).
- 3) 赤井 誠：日本エネルギー学会誌, 80, 828 (2001).
- 4) Stevens, S.H., et al.: *Greenhouse Gas Control Technologies*, Elsevier, 175 (1999).
- 5) 山口伸次, 山崎豊彦：第12回エネルギーシンポジウム, 1 (1999).
- 6) 小出 仁：地球温暖化問題ハンドブック, アイピーシー, 345 (1989).
- 7) H.Koide: *Greenhouse Gas Control Technologies*, Elsevier, 345 (1999).
- 8) T.O.Stevens, J.P.McKinley: *Science*, 270, 450 (1995).
- 9) H.Koide, K.Yamazaki: *Environmental Geosciences*, 8, 218 (2001).
- 10) 乾 智行：月刊エコインダストリー, 7, 5 (2002).
- 11) トーマスゴールド：未知なる地底高熱生物圏, 大月書店, 250 (2000).
- 12) 今中忠行, 跡見晴幸：月刊エコインダストリー, 7, 61 (2002).

用語解説

【隔離】 isolation. 廃棄物を大気圏や生物圏から遮断すること。海洋隔離と地中隔離がある。処分とはほぼ同義。

【地中貯留】 underground sequestration. 地中貯蔵 (underground storage. 将来再び取り出して利用することを前提に地下空間などに一時保管すること) と地中処分 (underground disposal. 廃棄物として地下に永久に埋設すること。原則として再取り出しはしない) の中間の意味。再取り出しの可能性を一部残して、地下に貯留すること。

【Joule II】 ヨーロッパで実施されていた非原子力エネルギー共同研究開発プログラムの名称。

【GESTCO】 ヨーロッパのCO₂地中貯留能力を研究するプログラム「European Potential for Geologic Storage of CO₂ from Fossil Fuel Combustion」の略称。

【NASCENT】 地中に天然にあるCO₂溜まりを研究するヨーロッパの共同研究「Natural Analogues for the Storage of CO₂ in the Geological Environment」の略称。

【GEODISC】 オーストラリアのCO₂地中貯留研究計画「Geological Disposal of Carbon Dioxide」の略称。

【炭層メタン】 メタンガスが石炭に多量に吸着されたもので、炭鉱事故の原因になる迷惑物であったが、最近では天然ガス資源として見直されている。

【地中固定】 underground fixation. 石炭層や岩石に吸着させたり、ハイドレート化したり、化学反応や微生物の働きにより地中に安定に隔離すること。