資 料
Note

産学連携講座

持続型炭素循環システム工学（国際石油開発帝石㈱）社会連携講座

小林 肇*・佐藤 光三*

(Received January 12, 2011 : accepted March 10, 2011)

Research Progresses in Engineering for Sustainable Carbon Cycle
(INPEX Corporation) Social Cooperation Program

Hajime Kobayashi and Kozo Sato

要 旨： 化石資源（石油、石炭、天然ガス）から得られるエネルギーは人類の文明と科学技術を飛躍的に発展させ、今や社会を維持するために不可欠なものとなっている。しかし、地球に埋蔵された化石資源は無限ではなく、将来的な供給の不安定化が懸念されている。また、化石資源の大量燃焼によって発生した二酸化炭素は地球温暖化の主原因となり、人類社会の未来を脅かしている。この「化石資源の枯渇」と「地球温暖化」の相補的な解決を目指し、持続型炭素循環システム工学（国際石油開発帝石㈱）社会連携講座では二酸化炭素回収・貯留により地中貯留した二酸化炭素を微生物を利用してメタンに変換し、エネルギー資源として再利用する「持続型炭素循環システム」の構築を目的に、地下貯留層内でのメタン生産にかかわる微生物代謝の挙動と活性促進に関する研究を行っている。

Keywords： carbon cycle, carbon dioxide, fossil fuel, CCS, methane, microorganism

1. 炭素循環と化石資源、二酸化炭素

化石資源は、主に古代の動植物や微生物の体細胞に含まれていた有機物（炭素原子を含む化合物）が地下に堆積し、長い年月をかけて変性してできたと考えられている。それら有機物が元々は二酸化炭素から光合成によって合成されていることを考えると、化石資源も二酸化炭素も、それぞれ「炭素」が地球中を循環する過程の一形態ととらえることができる。つまり、古代の大気中に二酸化炭素として存在していた「炭素」が、有機物として生体内に固定され、その有機物が地下に堆積されて、数百万年～数億年の間に変性して化石資源となった。化石資源（特に石油と天然ガス）の燃料としての主成分は炭素原子と水素原子が結合した炭化水素と総称される化合物群である。炭化水素は酸素と反応（燃焼）すると二酸化炭素と水を生成して高いエネルギーを発生させる。この炭化水素の大規模燃焼によってエネルギーを採取する人類の営みは、化石資源中に固定されていた「炭素」を地質学的年月の後に再び二酸化炭素として大気中へ放出した。

2. 「持続型炭素循環システム」構想

この人工的な「炭素」放出の速度が、自然の炭素循環メカニズムによる固定速度をはるかに上回っている点に「地球温暖化」と「化石資源の枯渇」の本質的な問題がある。自然の炭素循環系は大気中の二酸化炭素を今も常に固定し、堆積し、化石資源を生産し続けており、観念的には両方の問題を解消する方向に働いている。しかし、そのプロセスには地質学的な時間が必要であり、私たちが直面している急激な環境変化とエネルギー需要を考えると、自然の「炭素循環」に解決を委ねるのでは明らかに遅すぎる。これに対し、持続型炭素循環システム工学（国際石油開発帝石㈱）社会連携講座では、循環速度の速い人工的な炭素循環系を作り出し、その中でエネルギー資源を生産する「持続型炭素循環システム」の構築に取り組んでいる（図 1）。

地球温暖化の進行を緩和するために、二酸化炭素の大気中への排出量を削減する取り組みが国際的に行われている。その要となる手段として、二酸化炭素回収・貯留 (Carbon dioxide Capture and Storage : CCS) が実用化へ向けて動き出している。CCS は、大規模な発生源（火力発電所など）から二酸化炭素を分離・回収し地下へ貯留する手法で、現在の技術でも実行が可能な対策として期待されている。

国際石油開発帝石㈱ (INPEX) と東京大学は、これまで

*東京大学大学院工学系研究科エネルギー・資源フロンティアセンター
Frontier Research Center for Energy and Resources, Graduate School of
Engineering, the University of Tokyo

図1 持続型炭素循環システムの概念図

石油技術を応用した CCS 地下貯留技術の開発に参画してきた。炭素循環という観点から CCS をとらえなおすと（二酸化炭素を温室効果が発揮されない地下に隔離する点で温暖化対策として効果的だが）、地下貯留された二酸化炭素の「炭素」は死蔵される。この点に着目し、CCS と微生物的プロセスを組み合わせ、回収・貯留された「炭素」を持続的に循環させてエネルギー資源へと変換する「持続型炭素循環システム」を構想した。メタン生成古細菌（メタン菌）と総称される一群の微生物は、二酸化炭素をメタン（天然ガスの主成分）に変換する能力を持っている。「持続型炭素循環システム」は、このメタン菌を利用し、CCS によって地下貯留された二酸化炭素を貯留層内でメタンへと変換し、エネルギー資源として再回収する。回収したメタンを燃焼してエネルギーを採取し、さらに再び発生した二酸化炭素を回収・貯留することで、循環速度の速い閉環的（二酸化炭素の大気中への放出を経由しない）炭素循環系が構築できる。この人工の炭素循環系は自然の炭素循環に比べはるかに早いスピードで地球温暖化の緩和とエネルギー資源の生産を行うことができるだろう。東京大学と INPEX は社会連携研究によって、この「持続型炭素循環システム」に必要な技術群の開発に乗り出した。

3. 「持続型炭素循環システム工学」社会連携研究

持続型炭素循環システム工学（INPEX）社会連携講座では、2008 年の講座発足以降、CCS と組み合わせる微生物技術に焦点を絞り、地下貯留層内でのメタン生産にかかわる地下微生物の代謝の挙動解明と活性促進を目的とした研究を行っている（図 2a, b）。「持続型炭素循環システム」の人工的な炭素循環系では、前述のように二酸化炭素をメタンに変換するメタン菌（図 3）の代謝能力が 1 つの鍵となる。メタン菌による二酸化炭素のメタンへの変換反応は以下の式で表される。

この反応は、メタンの原料として二酸化炭素と共に水素を利用することから、水素資化性のメタン生産と呼ばれている。水素資化性メタン生産は標準自由エネルギー変化が負の発エルゴン反応であり、この代謝活性を持つメタン菌（水素資化性メタン菌）は反応から生じるエネルギーで生命活動を営んでいる。メタン菌は地球中に広く分布が確

認されており、水溶性ガス田の何割かはメタン菌の活動によって形成されたと考えられていることから、メタン菌を利用した地下での大規模なメタン生産という構想は自然現象を範とする合理性を持つといえる。

しかし、CCS 地下貯留層でのメタン生産を考えるとどうであろう。まず、CCS 地下貯留層内でメタン菌はメタンを生産する代謝能力を保持し得るだろうか。また、その生産速度を産業利用可能なレベルまで賦活化することは可能だろうか。そして、二酸化炭素と反応させるもう一方のメタン原料、「水素」はどのように供給するのか。そこで「CCS 貯留層内でのメタン生産の効率化」と「メタン菌への水素供給法の確立」、さらに人工炭素循環系の最適化ツールとして「地下貯留層内での微生物挙動シミュレーションの開発」を社会連携講座の主要な研究課題とした。

CCS 地下貯留層として、深部塩水層とともに枯渇した油・ガス田の利用が想定されている。そこで社会連携講座では、油田を CCS 地下貯留層の研究モデルとして利用し、油田から採取した地下微生物を用いた実験を行っている。これまでに、油層水内に生息する微生物種を分析し、二酸化炭素をメタンに変換できる水素資化性のメタン菌が貯留層内

図2 東京大学の持続型炭素循環システム工学（国際石油開発帝石株）社会連携講座での研究活動（上図 a, 下図 b）

図3 水素資化性メタン菌の一種 *Methanothermobacter thermautotrophicus*

に生息していることを確認している。さらに、それら地下微生物が CCS 貯留層を模した培養条件下（高濃度の二酸化炭素存在下）でもメタン生産が実際に可能であり、そのメタン生産活性が外部からの栄養分の添加により賦活化されることを示している。これらは「持続型炭素循環システム」の中心である「CCS 貯留層内でのメタン生産」コンセプトの地下微生物を用いた実験による実証といえる。

これら研究は、東京大学と INPEX との社会連携を活用し、油田でのサンプリング（図 4）、地下試料の分析、微生物培養や分子系統的分析等（図 2b）、石油技術と微生物工学を融合した独自のアプローチで進められている。さらに、この社会連携研究は、INPEX で進められていた「枯渇油田の微生物利用メタン再生」技術開発プロジェクトと共同して実施され、両プロジェクト間で技術や情報の共有・交換が活発に行われている。「枯渇油田の微生物利用メタン再生」プロジェクトは、枯渇した油田内に残された原油を油層内に生息している微生物の作用によりメタンに変換し、天然ガスとして増進回収する新規の微生物攻法の開発を目的としている。この技術構想と「持続型炭素循環

システム」の両方に共通する「地下貯留層内での微生物によるメタン生産」というプロセスに着目し、両プロジェクト共通課題である「地下貯留層内でのメタン生産の効率化」に共同で取り組んでいる。

4. 「持続型炭素循環システム」の構築へ向けて

現在、社会連携講座では次段階の課題である「メタン菌への水素供給法の確立」と「地下貯留層内での微生物挙動シミュレーションの開発」に取り掛かっている。これらは新エネルギー開発や微生物攻法への転用が可能な技術であり、将来的にさらなる技術開発や新事業等へもつながって行くと期待される。また、この大学と企業との社会連携による活発な共同研究・意見交換を通して、グローバルな視野と発想力を醸成する教育環境を学生に提供し、資源・環境をめぐる実社会の動向に俯瞰的な視点で即応できる人材の育成に取り組んでいる。

化石資源は現代社会を維持する質と量を備えた現状で唯一のエネルギー源であり、化石燃料の継続的な利用は文明の維持と発展のための大前提である。「持続型炭素循環システム」は、化石燃料の継続的使用を地球温暖化と切り離し、さらにそこからエネルギー資源を産み出すことを可能とする近未来の技術である。企業と大学との社会連携による創造的発想と実用的思考のバランスの取れた取り組みがこのシステムの実現に向けた大きな力となっている。私たちはこの社会連携研究によって、エネルギー資源・環境の両面で社会の持続的発展へ貢献することを目指している。

謝 辞

研究で多大なるご協力を頂いている国際石油開発帝石㈱・技術本部の技術推進ユニット EOR（油ガス増進回収）グループ・前田治男マネージャー、同技術研究所の五十嵐雅之様、宮川喜洋様、産業技術総合研究所・地圏資源環境研究部門・地圏微生物研究グループ・坂田将グループ長に心よりお礼申し上げます。本文中で紹介した研究成果は本学の学生諸君の卒業研究によるものである。研究を遂行した

図4 油田から嫌氣的に油層水サンプルを採集する

学生（遠藤啓太君，大中温さん，斎藤直輝君），ご協力頂いた増田昌敬准教授，長縄成実助教，川口秀夫特任助教，

荒川英一様，小泉恵美子様にこの場を借りて感謝の意を表する。

講座に寄せて

地球温暖化をはじめとする環境問題とエネルギー資源の不足は，われわれ人類にとって解決すべき喫緊の課題となっています。この社会連携講座は，これらの課題を「炭素循環の不均衡化」と集約してアプローチし，その不均衡を解消するための「持続型炭素循環システム」の開発に産学連携共同研究という形で取り組んでいます。現在は，CO₂を大気中へ排出する代わりに回収・貯留する CCS (CO₂ Capture and Storage) と，微生物を用いた CO₂ の CH₄ への変換を組み合わせた研究を 1 つの要として，以下のような技術課題に取り組んでいます。

1. 枯渇油田の微生物利用メタン再生
2. メタン菌への水素供給技術の効率化

3. 地下貯留層内での微生物挙動シミュレーションモデルの開発

これまでの研究成果として，国内の油田，構造的および水溶性ガス田において普遍的にメタン生成微生物の存在を確認するとともに，地下を模擬した高温高圧環境におけるラボスケールでの当該微生物によるメタン生成ならびにメタン生成に至る反応経路が明らかとなっています。今後は，メタン生成活性を促進するための常在微生物賦活化手法ならびに効率的な水素供給技術の開発に向けて，さらなる成果を上げるべく共同研究を進めていきたいと考えております。

（社会連携講座連携企業：国際石油開発帝石㈱）