

IV-2. 藻類による二酸化炭素固定とバイオマス燃料生産

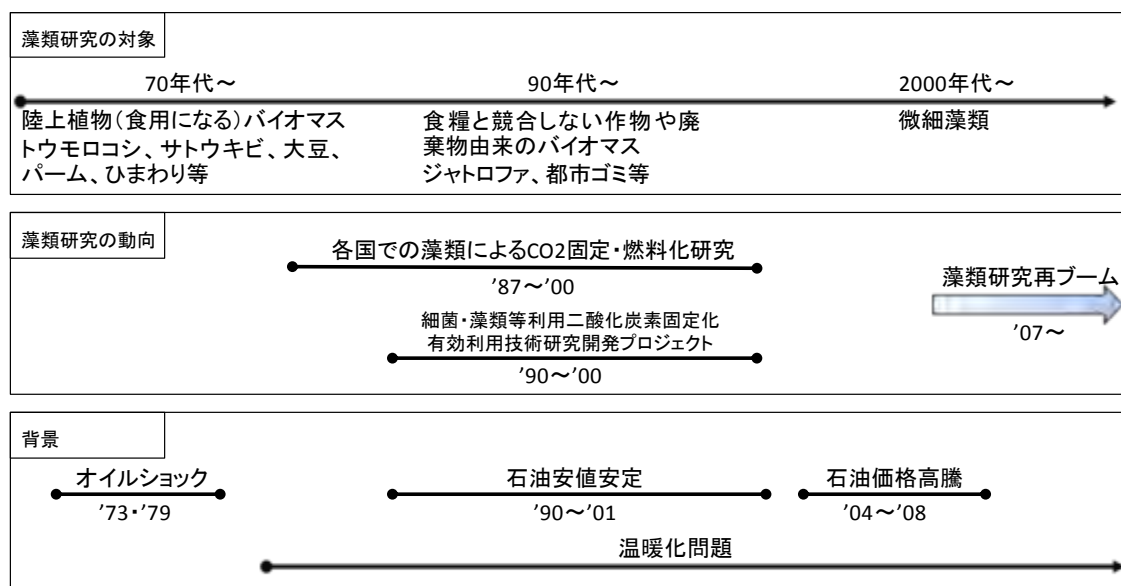
1. 藻類利用の技術開発と産業化の背景・経緯

(1) 背景

オイルショックと地球温暖化という背景の中、1980 年代後半から 2000 年頃
にかけ、各国は藻類による二酸化炭素（CO₂）吸収とバイオマス燃料生産の研究
開発を小規模なりに続けていた。しかしながら、2001 年まで約 10 年間続いた
石油価格の安値安定を受け、藻類研究は下火傾向になった。

近年、地球温暖化は二酸化炭素（CO₂）の排出が原因とほぼ断定されるよう
になったことから、CO₂ 削減方法や化石燃料に由来しないエネルギー源が注目
を集める中で、藻類利用のポテンシャルが注目されている。藻類を含む植物バイ
オマスからは燃料を生産することが可能であるとともに、成長過程で CO₂ を吸
収する種が多いため CO₂ 削減と化石燃料の代替の両面から注目されている。ま
た、藻類が再度脚光を浴びた理由として、2007 年に原油価格が高騰したことも
挙げられる。

〔藻類研究の動向と背景〕

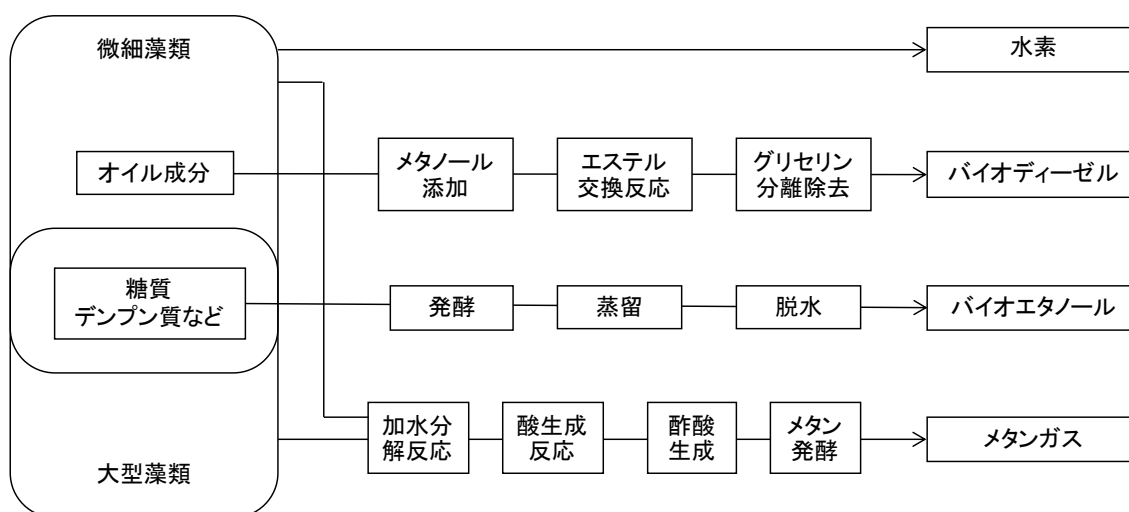


※渡邊信「はじめに」渡邊編集（2010）『新しいエネルギー 藻類バイオマス』（みみずく

舎)等を基に作成

従来、バイオマス研究・実用化の対象であった陸上バイオマス（トウモロコシ、サトウキビ等）に関しては、食糧との競合、農地拡大の必要性等の問題点が指摘されており、CO₂ 吸収源としての有効性を疑問視する見解もある。これに対し、藻類は食糧との競合が少なく、農地拡大の必要がない等の理由から、期待が寄せられることとなった。さらに、藻類はオイル生産効率が陸上植物と比べて 10 倍から数百倍も高いとの記事が Nature 誌（Haag, A. L. 2007、*Algae bloom again*. Nature 447）に掲載されたことも追い風となって、各国が投資の拡大を始めているというのが現状である。

〔主な藻類バイオマス燃料化のプロセス〕



※志甫諒「バイオマスエネルギーの現状」渡邊編集（2010）『新しいエネルギー 藻類バイオマス』（みみずく舎）を基に作成

日本においては、1990 年からの 10 年間、微細藻類を利用して CO₂ を固定し、増殖した藻類を再資源化することを目的とする研究プロジェクト（細菌・藻類等利用二酸化炭素固定化有効利用技術研究開発）が実施された。公益財団法人地球環境産業技術研究機構（RITE）が実施主体となり、独立行政法人新エネ

ギー・産業技術総合開発機構（NEDO）を始め複数の企業や大学が一つのまとまった事業体として、プロジェクト体制を組み、当時の通商産業省の支援の下、10年間で130億円以上が投入された。しかし、基礎研究レベルで一定の成果が上げられたものの、事業化の目途が立たないと結論付けられ、研究は終了の運びとなった。このプロジェクトで大きな役割を果たした株式会社海洋バイオテクノロジー研究所（釜石市）も小規模プロジェクト等の契約を終えた後、2007年度末（2008年3月）に閉鎖（北里大学へ移管）した。前述の通り原油価格高騰を背景とする藻類研究の大ブームが再来したのが2007年であったが、このような状況の中で、我が国の取り組みは俄かに拡大することが難しく、結果として他国に遅れを取る形となった。

藻類バイオマス事業を実用化するにはコストやエネルギー収支の問題から大量培養が必要となり、限られた日本の国土では困難であることが見込まれることから、海洋産業としての展開を望む声もある。

藻類利用の研究は多岐に渡るが、当報告書ではその中でも主流となっているCO₂固定、藻類バイオマスのエネルギー利用の2点に注目する。

(2)藻類利用の技術開発の概要

藻類は、海藻等の大型の多細胞生物から植物プランクトン等の単細胞微細種まで含む。現在の国内でのバイオ燃料化に関する技術開発は、流動性が良く、油分が回収しやすいため、微細藻類を中心に進められている。一方、大型藻類は二酸化炭素の固定化のスピードは速いが、食糧との競合がある等の理由から研究が遅れており、実用化レベルには達していない。

米国ではエネルギー省（DOE）が1978年から1996年まで約18年間ASP（Aquatic Species Program）という微細藻類からバイオ燃料を生産する研究を行っており、18年間で25億円程度の中規模な投資がされた。どの藻類からどれだけのオイルを採取できるか、オイル生産のメカニズムはどのようなものであるか、将来の品種改良のためにどういった遺伝子導入系をどのように作ったらよいか等、オイル生産に最適な藻類を特定するための成果を残した。その他、野外プールで培養した藻類の生産速度の調査や、総合的評価に基づくオイルの推定価格等、実用化に向けた分析も行われ、最終的な結論として、原油価格から比べるとまだ割高だが、実用化の可能性はあるとの報告がなされた。この研究について筑波大学大学院生命環境科学研究科の渡邊信教授（以下、渡邊教授）は、「公共事業である排水処理プロセスと藻類生産を統合することで、コスト的にもエネルギー的にも各段に改良されるため、短期実用化を目指す上で重要で

あると成果報告書で言及されている点が注目され、この見解は現在も国際的にみても留意すべきである」と指摘している。

国内では、米国に比べると遅れを取ったものの、数年前から藻類研究が見直され、主に大学での基礎研究を中心に多数の研究開発が進められている。

①炭素固定

他の植物同様、多くの藻類も光合成によって二酸化炭素を吸収する。光合成は、光エネルギーを利用して二酸化炭素と水からデンプン等の有機物と酸素を生成する生化学反応のことである。これらの反応は葉緑体の中で起こり、多くの生物群においても共通性が高いと考えられているが、後述の *Aurantiochytrium* 等のように葉緑体を持たず光合成をしない従属栄養生物*の藻類も存在する。また、光合成における二酸化炭素固定は、カルビン-ベンソン回路という二酸化炭素固定機構で行われる。その鍵酵素となるルビスコは光照射により活性化するため、暗所では二酸化炭素固定機能が低下することとなる。

*従属栄養生物・・・炭素を固定せず、体外の有機物を摂取して生育する生物

多くの藻類はこのメカニズムを利用して二酸化炭素を吸収、有機物を合成し、細胞数を増加させていくという生育過程を有している。これらの藻類は自然環境下でも CO₂ を吸収するが、大量培養により工業化することで CO₂ 吸収・固定化の効率を上げることができる。

宮本、他（2006）（IV－2 末尾の参考文献参照）によると、「集中発生源から排出される CO₂ を藻類バイオマスの形で人為的に有機物に変換した場合、大量のバイオマスは何らかの形で再利用されなければすぐに CO₂ として大気に戻ってしまう」とある。同じく炭素固定の役割を果たす陸上植物は根や茎等の非光合成器官に炭素を蓄える機能を備えているが、海藻を含む藻類はそれらの器官が少ないため、炭素を貯蔵する機能がない（井上勲「藻類バイオマス資源」渡邊編集『新しいエネルギー 藻類バイオマス』）。すなわち、CO₂ 固定が藻類培養の目的であっても、藻類が CO₂ を固定化した後の利用法及びその合理性を複合的に考える必要がある。環境問題対策を加味したシステム構築を踏まえると、CO₂ 固定後の藻類は化石燃料の代替として有効活用することが期待されている。

前述の「細菌・藻類等利用二酸化炭素固定化有効利用技術研究開発」プロジェクトの主な焦点は以下の 2 点であり、藻類の二酸化炭素固定技術全体の観点から見ても要と言える。

〔CO₂ 固定化に最適な藻類の研究開発〕

効率的に CO₂ を固定する種が望ましい。培養層で人工的に高濃度の CO₂ を吸収させる場合は排出源の種類により、CO₂ 濃度、温度、含有物質等が異なるため、培養に最適な条件を考慮した上で、固定後の利用法に沿った種を探索、スクリーニングする必要がある。CO₂ 固定化能力向上のための遺伝子組み換えについては、現在国内では活発的に研究開発は行われていないが、遺伝子組み換えを行った個体が外部に放出された場合、生態系が乱れる等の大きな問題を生じる可能性があるとして「細菌・藻類等利用二酸化炭素固定化有効利用技術研究開発」プロジェクト報告書（2000）で指摘されており、安全性の確保が求められる。

〔大量培養システムの研究開発〕

培養層を用いて、効率的に CO₂ を融解し、高密度で成長速度を促すことで藻類の大量培養を図る。実用化を前提とするのであれば、CO₂ 排出源の近隣に設置しなければならない等、技術面以外での対応も必要となる。培養する種に合わせた育成密度や周囲環境との適合等、光合成能力を最大化し、培養に最も適したシステム構築が研究対象である。海藻等の大型藻類の育成には陸上の培養層の他、一般的な食用海藻に見られるように海域での藻場や養殖場も利用される。従来海藻は岩や養殖網等に固定して養殖することが多かったが、近年では浮遊式培養の研究が進み、琉球大学では火力発電所から排出された CO₂ を溶解させ海藻を浮遊培養する実験を行った（未来を創ろう！地球を救う科学技術を学ぼう！運営事務局 Web サイト『環境への取り組み 沖縄における海洋バイオマス利用による CO₂ 固定化・新エネルギーの開発』

(http://www.mirai-kougaku.jp/eco/pages/091001_06.php)。

〔CO₂固定化・有効利用分野の技術マップ〕

削減ポテンシャル・コスト両面から有効な技術群で導入に向けた取り組みが進められるべきもの

注)技術マップ(技術リスト)(分離・回収)

削減

化石資源→原子力・新エネルギー
化石資源間エネルギー変換

大規模排出源からの二酸化炭素の排出

分散型排出源からの二酸化炭素の排出

排出削減技術

分離・回収

化学吸収
物理吸収
膜分離
物理吸着
深冷分離
その他

隔離

地中貯留

地下深部塩水層貯留
炭層固定
石油・ガス増進回収
枯渇油・ガス層貯留
蛇紋岩体固定
高温岩体固定
海底下ハイドレート層貯留
(関連技術)地中メタン変換

海洋隔離

溶解希釈(固定式)
溶解希釈(移動式)
深海底貯留隔離

注)技術マップ(技術リスト)(変換・有効利用)

変換・有効利用

カーボンへの分解

プラズマ分解法
マグネタイト・Mg法
メタン利用
炭素分離埋め戻し

化学品への変換

炭酸塩固定
超臨界CO₂利用
直接水素化
高分子合成
メタンによるCO₂改質
電気化学還元
光化学還元
光合成藻類・細菌類による変換
非光合成細菌による変換

注)技術マップ(技術リスト)(吸収・固定)

大規模植林による地上隔離

森林管理
CO₂固定量の適切な評価方法
植物の生育が可能な土地における単位面積あたりの二酸化炭素固定量増大
乾燥地等不良環境地への植生拡大
産業利用による植生拡大
バイオマスの革新的利用による植生拡大

海洋・水生植物による吸収

植物プランクトンの増殖・沈降固定
大型海藻の育成・利用
植物プランクトン、海藻等の培養設備生産

動物による吸収

珊瑚礁・貝による固定

大気中の二酸化炭素

濃度低減技術

生物による吸収固定

127

②藻類バイオマスの活用

前述の通り、地球温暖化対策が急がれる中、近年注目されているバイオマス利用法は化石燃料の代替としてのバイオ燃料化である。

i) 微細藻類

微細藻類については、近年の国内の研究では個体が生成する脂質を転換し、バイオディーゼルとして利用することが最も一般的な利用方法である。

一部の微細藻類は、光合成の過程で細胞内に蓄えられた有機物からオイルを産生するため、これを抽出して使用する。よって、実用化には増殖率と脂質含有率の高い藻類の培養が適している。乾燥重量に対する脂質含有量の多い微細藻類は *Botryococcus braunii* (7~75%)、*Chlorella* sp. (28~32%)、*Nitzschia* sp. (45~47%)、*Neochloris oleoabundans* (35~54%)等であるが、産生されるオイルの特性等もあり、全てが運輸燃料に適しているわけではない（渡邊信（2010）『オイル産生藻類』渡邊編集「新しいエネルギー 藻類バイオマス」）。

主に藻類が蓄積する脂質はトリグリセリドと呼ばれるいわゆる植物油で、これを加工（結合している脂肪酸とグリセリンを切り離し、メチル基を与えるメチルエステル化等の変換）することで石油燃料の代替（バイオディーゼル）として利用することができる。しかし、燃料化後の内燃機関の酸化・腐食や燃焼時の窒素酸化物（NO_x）発生等がこのオイルの問題点として挙げられている。更に、低温で凝固する性質があるため、冬場の車両や-50℃の中を飛ぶジェット機での使用を可能にするには、混入割合を1%以下程度にしなければならない。

また、上記のような問題が発生しない炭化水素*を直接生成する藻類も研究されている。炭化水素を産生し、かつ大量生産の可能性がある（増殖率の高い）種類は後述の2種類（淡水性の *Botryococcus* と海洋性の *Aurantiochytrium*）しか今まで世界でも発見されていない。

*炭化水素・・・水素と炭素から構成されている化合物で、側鎖を複数持つため、運輸燃料に近い。

現状では、微細藻類からのオイル生産は陸上バイオマス使用に比べ、エネルギー収支が低くコストは高いとされているため、より脂質含有率の高い藻類の増殖技術と生産からオイル転換までの一連のプロセスのコスト低減が望まれている。

ii) 大型藻類

大型藻類を燃料化する技術は数々あるが、財団法人電力中央研究所（CRIEPI）の報告書（（2010）「藻類からのバイオ燃料生産に関する調査報告」）によると、「大型藻類は含水率が高いため、メタン発酵またはアルコール発酵が最も適している」とされている。メタン発酵は微生物に有機物を分解させバイオガスを生成し、アルコール発酵は糖化・発酵を行う技術である。自然繁殖した海藻を使用する方法や、培養層で養殖する等、藻類の生産方法も多岐に渡るが、開放環境で生育した大型藻類の場合、気候や環境状況によって収穫量が大きく変わるため、安定した供給は困難とみられている。また上記報告書でエタノール発酵でのエネルギー収量が算出されており、「海藻のエネルギー収量はトウモロコシ等の陸上バイオマスのおよそ 4～12%であるため、現状では競争力に乏しい」とされている。

しかし、今まで海藻のエタノール発酵の課題とされていた糖質分解について、2012 年 1 月に米国ベンチャー企業バイオ・アーキテクチャ・ラボ社（Bio Architecture Lab, Inc.）が海藻からバイオエタノールを効率的に抽出する技術を確認したと発表した。今までは海藻に含有される糖質の分解が困難なため燃料化の効率性に問題があったが、人工的に繁殖させた微生物の開発により可能になったという。当該研究は実証実験のため、日本と同じく長い沿岸部を持ち、海洋養殖に適しているとされるチリで 2012 年 7 月完成を目標にエタノール生成工場の設置を計画している（愛知県産業労働部（2012）「新たなバイオエタノール燃料の普及可能性について」『海外産業情報センター』）。

また、燃料としての活用以外では、藻類はたい肥や飼料として使用されており、沿岸に打ち上げられる海藻の処理方法としても、すでに実用化されている。近年では化学肥料の普及により大型藻類の肥料利用は減少したが、藻場の衰退に伴う漁業への影響を受け、海藻類利用が見直されている（水産庁（2009）「藻場資源消滅防止対策ガイドライン」）。

微細藻類の飼料利用では、ヤマハ発動機株式会社がグローバル展開を視野に入れて技術開発を進めていた。人工的に CO₂ を固定させた微細藻類を利用し稀少水産飼料を生産するなどの事業を行っていたが、事業性の確立が困難なことから 2010 年に当該事業から撤退すると発表した。

(3)これまでの技術開発

国内の CO₂ 固定、藻類バイオマス燃料に関する技術開発は単独の小規模な研究が多く見られる。いずれも主に基礎研究である。下記は近年の主要な研究だが、これ以外でも各分野・各プロセスにおいて様々な研究が行われている。

〔近年の藻類研究〕

研究機関	概要
(独)産業技術総合研究所	・ CO₂ 固定能力の高い微細藻類の研究 ・ 下水処理水を使用し、<i>Botryococcus</i> を培養
慶應義塾大学	・ 微細藻類からのオイル生産のための培養条件に関する研究 ・ 微細藻類の品種改良 ・ (株)デンソーとの、微細藻類による CO₂ 吸収のための効率的な培養層やオイル抽出の研究等。 2020 年までの実用化を目標とする ・ 微細藻類由来のバイオジェット燃料生産に関する研究を、JX 日鉱日石エネルギー(株)を含める 3 社と合同で行っている。
農林水産省所管 (財)東京水産振興会研究委員会	日本の領海と排他的経済水域 (EEZ) で養殖した大型藻類を利用し、ガソリン使用量の 1 割弱に当たるバイオエタノールの生産が可能との試算を発表
琉球大学	沖縄電力を含む 4 社とうるま市 (沖縄県) の協力を得て行った共同研究。火力発電所等から排出される CO ₂ を溶解させた海水を使用し海藻類を増殖させ、海洋バイオマスを利用する「炭素回生システム」の研究
京都大学	京都府等と共同での海洋バイオマスからのバイオエタノールを生産する研究

※志甫諒「バイオマスエネルギーの現状」渡邊編集 (2010)『新しいエネルギー 藻類バイオマス』(みみずく舎)、等を基に作成。

2. 技術開発と産業化の現状

(1) 海外動向

米国では現在、藻類研究に大規模な投資を行っている。2009 年には約 45 億円をかけて研究開発のためのコンソーシアムが設立された。また、政府と企業が主導しているため、ベンチャーが多数輩出されている。エネルギー省 (DOE) による投資は現在サファイアエナジー社 (Sapphire Energy, Inc.)、ソラザイム社 (Solazyme, Inc.) とアルジェノール社 (Algenol Biofuels, Inc.) の 3 つのベンチャー企業に集約されてきており、サファイアエナジー社には約 50 億円、ソラザイムとアルジェノール各社には約 25 億円ずつ投資されている。各企業の役割には相違があり、サファイアエナジー社が光合成藻類のオイル生産、ソラザイム社が従属栄養性藻類のオイル生産、アルジェノール社はアルコール生産に従事している。サファイアエナジー社は後に 100 億円を超す追加投資を受けており、その 3, 4 倍に及ぶ非公開の投資を受けているともみられている。欧州では、フランスでも産学連携の事業体を持っており、10 年間で約 200 億円の投資を行っている。

近隣諸国では、韓国も 9 年間で 150 億円ほどの投資金額を発表しており、中国においては更に多額の投資が行われていると言われている。

(2) 国内動向

① 概要

現在、独立行政法人科学技術振興機構 (JST) が採択する CREST (戦略的創造研究推進事業) の「二酸化炭素排出抑制に資する革新的技術の創出」領域において、藻類研究が 3 課題採択されており、「藻類・水圏微生物の機能解明と制御によるバイオエネルギー創成のための基盤技術の創出」領域でも藻類を扱っている。そのため、国内の藻類研究への投資規模は、基礎基盤技術研究レベルで言うと 5 年間で 50 億円程度である。また、経済産業省が NEDO のプロジェクトに年間数億円、農水省が年間 2 億円ほど投資しているため、合計約 100 億円が藻類研究費に充てられている。

ここでは、主要な大規模プロジェクトである筑波大学における藻類バイオマスエネルギー研究開発と東京工業大学が主体となった AES プロジェクト (2015 年以降の CO₂ 削減を先導する先進エネルギーシステム (AES) モデルの実現)

を紹介する。

②主な調査事業の現状と将来展望、問題点・課題等

i) 筑波大学

筑波大学では 2008 年に「オイル産生緑藻類 *Botryococcus* (ボトリオコッカス) 高アルカリ株の高度利用技術」事業が CREST に採択された後、藻類研究が見直されたため、関連研究を強化した(2012 年 3 月の CREST 終了後、「つくば国際戦略総合特区」として発展的に展開される予定である)。現在、運輸燃料に近い炭化水素を産生することから、主に *Aurantiochytrium* と *Botryococcus* の 2 種の微細藻類を対象として研究を行っている。

Aurantiochytrium は体内にドコサヘキサエン酸(DHA)を蓄積することで知られ、米ソラザイム社が DHA 生産で実用化しているが、筑波大によるスクリーニングでは新たに炭化水素のスクワレンを多く産生することが確認された。化粧品や健康食品の原料として注目されるスクワレンは従来、深海鮫の肝油から抽出されていたが、乱獲による絶滅が懸念されているため、今後 *Aurantiochytrium* から抽出するケースが増加する可能性がある。

藻類が作る炭化水素は質のよい燃料になるとともに、石油の代替になるという点でも期待される。石油は燃料だけではなく、化粧品・医薬品・潤滑油・グリース・プラスチック生産等幅広い用途で使用されているため、多方面での展開が可能である。運輸燃料としての実用化はまだ先と見られているが、別の用途では近い将来実用化が可能との見通しである。運輸燃料としての藻類の単価は 1kg あたり 50~100 円まで下げる必要があり、現時点では採算が取れないが、化粧品では 1kg あたり 3000~4000 円でよいとため、経済的にも実現可能である。まず単価の高い分野で実用化することで、段階的に生産コストが下がるため、運輸燃料生産の可能性も高まっていくと考えられる。*Aurantiochytrium* から採れるスクワレンは元来、化粧品・医薬品等に利用されているため、理論上実用化はすぐ可能ではあるが、商用ベースではまだ実現されていない。米ソラザイム社は既に *Aurantiochytrium* から DHA 生産を行なっているため、適切な戦略がないままではスクワレンに関しても先を越されてしまう可能性がある。

また、筑波大学は、仙台市と東北大学と研究協力協定を結び、仙台市の復興計画の一環として実証実験を実施する予定である。被災した下水処理場の排水を利用し、筑波大学が *Aurantiochytrium* の培養の研究を進め、東北大学がオイル化の研究を行う計画となっている。

上記研究も含め、一般的に微細藻類バイオマスからの燃料生産を実用化するにあたっては、各プロセス（生産・濃縮収穫・抽出・精製の4プロセス）ごとに、技術的な課題が依然残っている。

- **生産：** 大量培養（光合成藻類は屋外または屋内培養層での生産、従属栄養性藻類は大規模な発酵タンク等での生産）のため、コストをかけず、かつ効率的に生産性を上げる技術が不可欠である。屋外の開放された培養プールと閉鎖型のバイオリアクターはどちらも長所・短所がある。コストを始め、立地条件、周辺環境、培養する種、規模を含めた総合的なシステムとして検討する必要がある。

従属栄養性の藻類は解放された屋外で培養できないため、発酵タンクのようなもので培養する。日本の発酵工業技術の蓄積が活用可能であると考えられているが、これらの技術はエネルギー生産目的で開発されてこなかったため、現状の発酵タンクのシステムはエネルギー効率が低い。そのためエネルギーをあまり消費しない発酵タンクシステムの構築が期待される。

- **濃縮収穫：** 培養液からの微細藻類の回収について、水 1ℓあたりの培養液濃度は 0.1～0.5%分程度なので、10%以上での濃縮収穫が必要となる。実験室レベルなら既に可能だが、大量培養となると更なる課題解決が必要である。藻類回収のため、遠心分離、ろ過、凝集剤の使用等の方法がある。しかし、大規模生産での収穫率やコスト、凝集させた後の凝集剤の処分等技術課題が残っている。
- **抽出：** 有機溶媒により脂質抽出を行う際、水分が抽出効率に影響する。そのため乾燥が必要だが、この過程に多量のエネルギーを使用するため、効率的な抽出方法が課題である。また、ほとんどの微細藻類は体内にオイルを蓄積するため、細胞壁を破碎し、できるだけ多くの脂質分を抽出する技術開発が必要だ。
- **精製：** 精製方法は藻類によっても変更される。*Botryococcus* のように、純度が 90%の炭化水素系のオイルを細胞外に排出するものはほとんど精製する必要がないものの、トリグリセリドを燃料として使用するには水素転換や異性化が必要である。しかし現状では、これに関するコストや熱量は無視したまま研究が進められている。

また、技術的課題のほかにも実用化に向けた環境整備上の課題がある。例えば、CO₂ 供給源の確保の必要性が挙げられる。CO₂ は空気中に 0.04%ほどしか存在しないため、大量培養には人為的に高濃度の CO₂ を供給する必要がある。排気ガスは環境規制のため、基準値内で使用する必要がある等、技術確立後すぐに実用化できる訳ではない。そのため、既存のインフラを利用しやすいシステムや制度整備が重要である。

以上を考慮すると実用的な燃料化に成功するには、10 年以上は必要であるとの見方が強い。

ii) 東京工業大学

東京工業大学のソリューション研究機構では 2008 年より「海洋バイオマス研究コンソーシアム」を設立し、海水への CO₂ 溶解技術開発や海藻からエタノールを生成する実証実験等を行ってきた。このコンソーシアムが前身となり、2011 年 4 月より一般社団法人海洋環境創生機構が創立された。同機構では、藻類のバイオマス利用において、エネルギー化だけでは経済的に成り立たず実用化が困難だという点に着目し、収益性のある海洋バイオマスの在り方を追求している。そのため、エネルギー回収だけではなく、付加価値の高い事業を付随したシステム、すなわちコプロダクション(co-production)のプロセスの構築に従事している。現在、コンブ・アオサ等の大型藻類を使用する際、併産できるものとしてバイオガス・バイオエタノールに加え、医薬品や化粧品の有効成分に着眼し、これらの分野に関わる東京工業大学内の研究者が参加する、経済ベースの事業に見合う技術のベストミックスを備えたシステムの研究開発に取り組んでいる。東京工業大学ソリューション研究機構の柏木孝夫教授は「コプロダクションに着目した海洋バイオマスの利用プロセスにおいては、個々の要素技術の基礎研究はほぼ確立されているものの、いかに無駄を排除する形で事業を統合できるかが今後の課題である」と指摘している。

また、環境に経済成長モデルを加味した都市計画を持つ環境未来都市に選定された富山市の都市構想にも海洋環境創生機構は携わっている。富山は伝統的に医薬品の町でもあることから、北陸電力の石炭火力発電所から排出される CO₂ を利用して工業的にアオサを繁殖させ、医薬品等を生産する資源循環型の経済成長達成モデルを取り入れている。

この実証実験はまだ未着手であるが、実際に開始となれば、コプロダクション型の海洋バイオマス利用の後押しとなると見られている。琉球大学でもコプロダクション型の海洋バイオマス利用を念頭に CO₂ 融解によるアオサ増殖の研

究が行われてきている。

3. 技術開発と産業化の課題と展望

①国家戦略としてのシナリオ構築

日本でも現在、藻類バイオマス関係の研究に約 100 億円と、ある程度の規模の投資が行われている。しかしながら、渡邊教授は、「藻類研究に関し、十分な国家的戦略ロードマップがなく、個別の研究グループがそれぞれの関心に応じて技術を発展させているため、実用化を視野に入れたシステムが欠如している点が課題である」と指摘している。

米国ではロスアラモス国立研究所に設立された **Biofuels Center** を中心として、様々な大学や企業等と連携していくという構造が確立されている。藻類バイオマスの燃料化に向けて政府主導で産業界等と一体となり、包括的なシステムの下、研究を進めているので、近い将来、実用化が見えてくるのではないかと言われている。

米エネルギー省 (DOE) が「**National Algal Biofuels Technology Roadmap** (http://www1.eere.energy.gov/biomass/pdfs/algal_biofuels_roadmap.pdf)」という国家戦略を公表しており、「2022 年までに藻類も含んだバイオマス燃料を 8000 万トン程度まで蓄積」という基本的な目標を掲げている。個別技術とその統合について、「何年から何年まではこの技術」といったスケジュールではなく、例えば「藻類のバイオ燃料化においての課題や解決のために必要な技術は何か」等が明確化されている。渡邊教授は、「我が国の藻類研究の国家戦略は基礎技術が確立された後、実用化のための技術を展開するという流れになっており、できる限り早い段階での実用化を実現するため、米国のようにダイナミックな方法を構築できるかが今後の課題である」と指摘している。

藻類産業創成コンソーシアムでは、農林水産省「農山漁村 6 次産業化対策事業に係る『緑と水の環境技術革命プロジェクト事業』」の一環として、藻類の効果的な燃料技術開発をめざす戦略ロードマップを取りまとめており、今後の研究開発に貢献することが期待される。

②日本の背景に適した研究

国全体の戦略として研究目標を見定めるには、実用化の際に生じる国の事情

を踏まえる必要もある。例えば米国は水資源が日本のように豊富ではないため、大量培養には、砂漠に近い場所で塩分の高い地下水を利用する必要がある。よって米国では一貫して海洋性微細藻類（*Nannochloropsis oculata* 等）に注目している。我が国は米国と異なり砂漠はないが、水利用システムが充実しているという日本独自の背景を踏まえて例を挙げると、水田農業システム等により水の供給が張り巡らされている耕作放棄地が培養の場所として有望とされる。しかし実用化となると、現状では農地法に制限されるため藻類培養が困難である。また生産に必要な CO₂ 排出源が周囲にない農地も数多くあるため、いかに藻類を新作物資源として農地で培養できるようにし、技術面と併せて法制度の上でも整備していくかが実用化のポイントとなる。

このように、技術が確立されても制度上に問題があれば、実用化が困難であるため、背景に併せた対応が求められる。

③微細藻類新種の探索

コストが比較的安価な野外の開放池における培養では、夏の高温や他種・他生物の混入等、生育が阻害される条件が付随する可能性がある。培養池を酸性もしくはアルカリ性にすることで他種・他生物の混入を防ぐことができるため、そういった特殊条件下でも繁殖でき、高温にも耐えられる種が望ましい。そのため、さらなる探索とスクリーニング手法が引き続き課題となっている。

また、前述のとおり、石油燃料代替として大量生産の可能性がある微細藻類は、世界でも今のところ *Botryococcus* と *Aurantiochytrium* の 2 種類しか発見されていないが、より有用な未発見の種が存在している可能性は十分あるとされる。藻類は記載されている種（既に発見されている種）だけで 4 万種、未記載種まで含めると 30 万～1 千万種生息していると言われているが、オイルを産生すると判明している種は数十種ほどで、未知の可能性はある。特に海洋性藻類は更なる探索が求められている。藻類では現在も度々、新属・新種だけでなく、新科や新目等ファミリーレベルでの発見があるため、探索の拡大による、新たな発見が期待されている。

④大規模培養施設

微細藻類の培養について、開放池は閉鎖型の培養槽に比べて安価でエネルギー使用量も少ないが、培養環境を制御できないため生産効率が低くなり、生産

が不安定である。逆に閉鎖型のフォトバイオリアクターを使用する場合、藻類に合わせて増殖に最適な環境を保てるため、生産効率は上がるが、コストが高いことが問題である。大型藻類に至っても、CO₂ 固定をプロセスに統合する際等、陸上水槽が必要な場合もあるが、大規模な設備はコストがかかり経済的な面で実用化が困難になってしまう。また、CRIEPI の報告書では、安定供給を図るための乾燥保存には、生産可能な熱量の数倍以上のエネルギーを使用してしまうことが指摘されている（CRIEPI（2010）「藻類からのバイオ燃料生産に関する調査報告」）。

日本の国土面積を考慮した施策も鑑みる必要がある。藻類を大量培養するにあたり、比較的規模の小さい分散型藻類バイオマス利用施設を各地方に整備する方法もあるが、より効率的な方法として、集中的な大規模藻類エネルギー生産設備が考えられる。後者に関しては、我が国では土地面積の制限があるため、海洋を候補地とする提案もある。効率化を図るため、洋上の風力発電機の上に培養槽を設置し、培養に必要なエネルギーは発電機から供給する等の例も挙げられる。

また、コプロダクション型の大型藻類事業洋上プラットフォームについては、株式会社竹中工務店が中心となり実際に研究が行われており、海洋バイオマス利用等を前提とすると、採算ベースにのると見込まれる規模が 500m 四方のプラットフォームと想定されている。構想に反対する可能性がある漁業者と協働していくために、プラットフォーム下に鉄スラグを投入して漁場を設置する等、ビジネスモデルを成り立たせるための複合的なバリューチェーンが考案されている。

このように、商業化を目的とすると、藻類の種類に関わらず、大量培養を前提とした一連の事業プロセスの統合が国内および国際的にも課題となっている。

○インタビュー：

渡邊 信 筑波大学大学院生命環境科学研究科 教授

柏木 孝夫 東京工業大学ソリューション研究機構 教授

左子 芳彦 京都大学大学院農学研究科 教授

○主な参考文献：

渡邊信「はじめに」渡邊編集（2010）『新しいエネルギー 藻類バイオマス』（みみずく舎）

志甫諒「バイオマスエネルギーの現状」渡邊編集（2010）『新しいエネルギー 藻類バイオマス』（みみずく舎）

宮本、他（2006）「微細藻類による CO2 固定」乾監修『CO2 固定化・隔離技術』（2000 年『CO2 固定化・隔離の最新技術』普及版）

井上勲（2010）「藻類バイオマス資源」渡邊編集『新しいエネルギー 藻類バイオマス』財団法人電力中央研究所（CRIEPI）（2010）「藻類からのバイオ燃料生産に関する調査報告」

経済産業省（2010）「5. 環境 CO2 固定化・有効利用分野」『技術戦略マップ 2010』

経済産業省（2000）「ニューサンシャイン計画「細菌・藻類等利用二酸化炭素固形化・有効利用技術研究開発」最終評価報告書概要」

(<http://www.meti.go.jp/report/downloadfiles/g00523jj.pdf>)

未来を創ろう！地球を救う科学技術を学ぼう！運営事務局 Web サイト『環境への取り組み 沖縄における海洋バイオマス利用による CO2 固定化・新エネルギーの開発』

(http://www.mirai-kougaku.jp/eco/pages/091001_06.php)

水産庁（2009）「藻場資源消滅防止対策ガイドライン」

(http://www.jfa.maff.go.jp/j/gyoko_gyozyo/g_hourei/pdf/sub7941.pdf)

愛知県産業労働部「新たなバイオエタノール燃料の普及可能性について」『海外産業情報センター』

(<http://www.pref.aichi.jp/ricchitsusho/gaikoku/center.html> よりダウンロード)

Haag, A. L. (2007) Algae bloom again., 520—521, Nature 447

2（1）「海外動向」について

U.S. Department of Energy, 2009, *Secretaries Chu and Vilsack Announce More Than \$600 Million Investment in Advanced Biorefinery Projects*

(<http://energy.gov/articles/secretaries-chu-and-vilsack-announce-more-600-million-investment-advanced-biorefinery>)

Sapphire Energy, Inc., *The Sapphire Energy Story*

(<http://www.sapphireenergy.com/sapphire-renewable-energy/>)

Institut Scientifique de Recherche Agronomique (INRA), 2012, *GreenStars : vers une nouvelle génération de biocarburants et de produits à partir des micro-algues*

(<http://www.inra.fr/presse/greenstars>)

Ji-Won Yang, *Algal Fuel Research in Korea*

(<http://www.sakura.cc.tsukuba.ac.jp/~eeeforum/3rd3EF/IS5.pdf>)

IV-3. 二酸化炭素の回収・貯留(CCS)

1. CCS の技術開発と産業化の背景・経緯

(1)背景

CCS（二酸化炭素の回収・貯蔵/Carbon dioxide Capture and Storage）とは二酸化炭素（CO₂）の回収・輸送・貯留の3つのプロセスを統合させたシステムであり、火力発電所やセメント製造所など、大量に CO₂を排出する施設で人為的に回収した CO₂を輸送し、貯留する技術のことである。CO₂を大気中に拡散させる前に回収し、隔離することから地球温暖化対策の一つと位置付けられている。地球温暖化への対応が急がれる中、開発・展開が期待されている。以下の図は CCS の形態を示したもので、地中貯留（海域地下や炭層等含む）と海洋隔離に大きく二分される。

〔CCS の形態〕



※出典：独立行政法人産業技術総合研究所（産総研）提供「環境豆知識【CCS】」
(<http://unit.aist.go.jp/emtech-ri/ci/e-keyword/CCS/ccs.html>)

国際エネルギー機関（IEA）の調査「Technology Roadmap Carbon Capture and Storage」によると 2050 年までに CO₂ を 2005 年比で半減させるには CCS により 19%を削減する必要があるとされる*。また、CCS を使用しない場合には、コストは 70%増となる見込みである。

*CO₂ 半減シナリオ・・・詳細や図は「OECD/IEA (2009) Technology Roadmap Carbon Capture and Storage (www.iea.org/papers/2009/CCS_Roadmap.pdf)を参照のこと。

上記の IEA の他、様々な国際機関や会議で CCS について議論されており、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）でも気候変動対策の重要な技術として CCS を挙げている。「1972 年の廃棄物その他の物の投棄による海洋汚染の防止に関する条約（ロンドン条約）の 1996 年議定書」は廃棄物等の海洋投棄を原則禁止しているが、附属書 I に列挙されている廃棄物等については例外としている。当議定書が 2006 年に改正された際に CCS における CO₂ も当附属書に追加され、国際条約で初めて CCS が承認されることとなったが、投棄場所は海底下地層に限定された。

このような国際的な流れを受け、海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律（海洋汚染防止法）も 2007 年に改正された。海洋汚染防止法における改正はロンドン条約 96 年議定書改正に対応しており、これにより国内で、地中貯留に限り CCS 事業実施が可能となった。

以降、日本における CCS の位置付けは明確化しており、実用化を念頭に置いた姿勢が見られる。以下は CCS の展開に関わる主要な事項である。

〔日本における CCS の位置付け〕

2008年3月	Cool Earth エネルギー革新技术計画	2050年までにCO ₂ 排出を半減する目標の中で、重点的に取り組むべき革新技术の一つとしてCCSを位置付け
2008年6月	G8エネルギー大臣会合共同声明	2020年までのCCSの幅広い普及開始を目指すため、大規模プロジェクト展開の必要性があるという勧告を支持
2008年7月	G8洞爺湖サミット首脳宣言	2010年までに世界で20の大規模CCSプロジェクトを実施することを支持
2008年7月	低炭素社会づくり行動計画	2009年度以降早期に大規模実証実験に着手し、2020年までの実用化を目指すと表明
2008年12月	総合科学技術会議	CCS大規模実証試験の実施を承認
2009年9月	国連気候変動首脳会合	2020年までに温室効果ガスを1990年比で25%削減（1990年比）すると明言

※経済産業省 二酸化炭素回収・貯留研究会（平成20年度第1回）配付資料等を基に作成（<http://www.meti.go.jp/committee/materials2/downloadfiles/g81030d06j.pdf>）

(2) CCS 技術開発の概要

CO₂ 貯留方法として、地中貯留と海洋隔離がある。地中貯留は陸地または海底下の地層に CO₂ を圧入する技術である。海洋隔離は、CO₂ を海水に溶解させる方法と深海底に隔離貯留させる方法があるが、いずれもロンドン条約および海洋汚染防止法で禁止されている。

①地中貯留

CCS の主な3つのプロセスである CO₂ の分離回収、輸送、貯留の各技術は、それぞれ CCS とは別の目的で発達した産業技術を応用することができる。たと

例えば、CO₂ 回収は、ガス生成プロセスや肥料製造などにおいて、炭化水素や石炭の燃焼前、燃焼後にガス流から回収する技術が実用されている。輸送は、既存の高圧パイプラインの使用や液化ガスなど通常の燃料を輸送する船舶などが応用できる。また貯留においても、石油やガスの増進回収*のため CO₂ が注入される事例が主に北米を中心に数多く存在するため、地中貯留の技術としては、商業ベースで開発・展開されている。

*増進回収・・・炭層や油層に CO₂ を圧入して流動性をよくすることで、石油やメタンガスの回収を促進する技術

CO₂ を貯留できる地層は深部の帯水層（水を含んでいる地層）、枯渇した油田・ガス田、採掘不可能な炭層である。IEA によると、もっとも多量の CO₂ を貯蔵できるのは塩水性帯水層だとされている（OECD/IEA (2009) *Technology Roadmap Carbon Capture and Storage*）。

枯渇した油田・ガス田は地質構造などが明らかになっているのに比べ、深部の帯水層は世界の広範地域に存在し、地質構造もそれほど明らかにされていないため、更なる調査を必要とする。また、注入に関する技術自体は既知であるが、商業スケールでの CO₂ の挙動については実証が必要である。

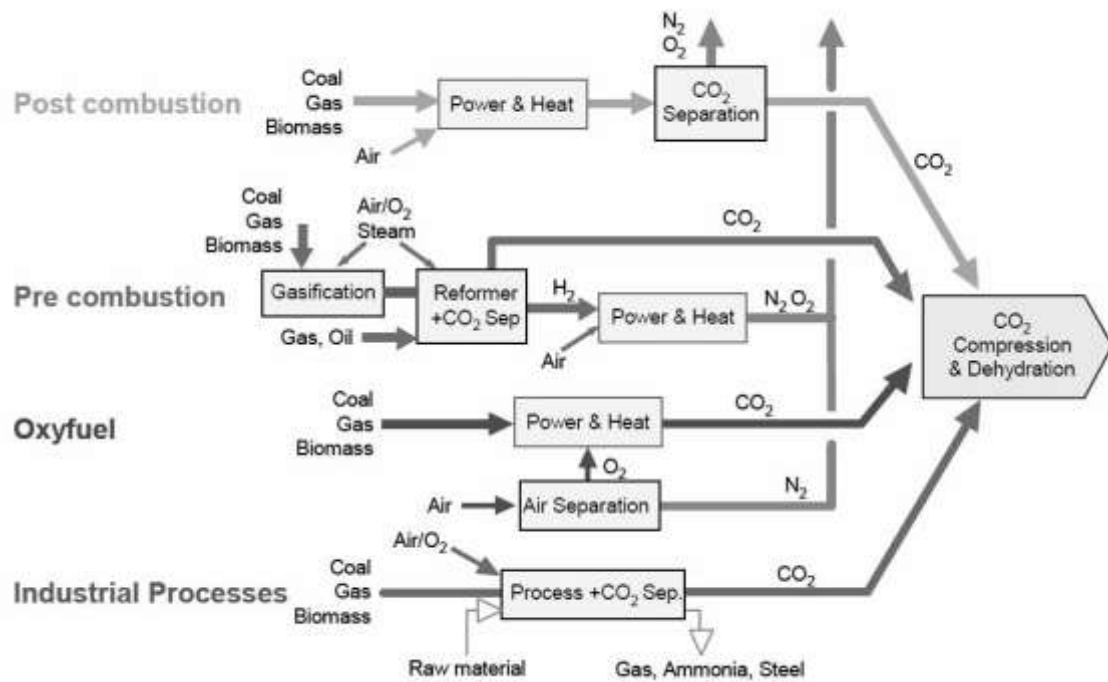
i) CO₂ の分離回収

CO₂ 発生源から排出されるガスに含まれる CO₂ を、大気に放散させないように、分離回収する主な技術としては下記の 3 種類がある。

- 燃焼後の CO₂ 分離回収 (Post-combustion)
- 燃焼前の CO₂ 分離回収 (Pre-combustion)
- 酸素燃焼 (Oxyfuel)

排出源の種類などによって、分離方法は異なるが、CO₂ を分離させた後は、圧縮・脱水を行うのが一般的である。

〔CO₂ の分離回収方法〕



※出典：環境省「二酸化炭素海底地層貯留に関する技術について」（原典は IPCC SR-CCS）
<http://www.env.go.jp/council/06earth/y068-04/ref05.pdf>

ii) 輸送

分離回収施設から貯留地点までの CO₂ の輸送については、天然ガスや液化天然ガス (LNG) の輸送の技術が応用できる。主にパイプラインが用いられるが、船舶による輸送方法を使用することもできる。現行のシステムでは長距離の輸送も技術的には可能だが、距離が長ければ長いほどコストや課題が増加する傾向にあるため、貯留地点が排出源施設からより近い方が望ましいとされている。

新たな船舶輸送方法として、CCS を推進する国際機関である Global CCS Institute (GCCSI) の出資を受け、千代田化工建設株式会社と東京大学が、「CO₂ シャトルシップ方式と沖合貯留システム」の研究を進めている。当研究は中小規模船舶輸送をベースとし、排出源と貯留地点の選定における制限を少なくする CCS のシステム構築と船舶開発を目的としている。従来の CO₂ 輸送方法は距離的な問題から排出源と貯留地点の選定に影響を及ぼし、洋上プラットフォーム建設の必要性や貯留地点での揚荷・再ガス化などの作業を発生させるが、これらを解消するため、当研究は直接洋上から CO₂ 圧入ができるシャトルシップ（中・小型船舶）を提案し、システムの簡易化を図っている。詳細なコスト分

析、船舶デザイン、既存の法律との適合性や、海象の及ぼす影響など、今後の研究課題も残るが、実現の折には日本における CCS 発展に寄与すると考えられる。

iii) 貯留

地下に CO₂ を貯留する場合、圧力の高い地中へ更に圧力をかけて注入*するため CO₂ は超臨界状態（液体・固体両方の性質を持つ状態。温度・圧力が臨界点を超えた場合に起こる。）になる。圧入した直後は水の一部を押しよける形で超臨界状態を保つが、次第にその水の中に 2~3 割は溶け込んでいくため、超臨界状態で残留する部分と溶解する部分に分かれる。溶解したものも数百年から千年程経過すると、一部が鉱物として固定されるため、千年という長期間の区切りで見ると、結果的に気体・液体・固体の 3 種類で貯留されることとなる。最終的には（約 1 万年後）液体または固体になるというシミュレーション結果もある。

*圧入・・・CCS において、CO₂ に圧力を加えて地層に注入することを圧入と言う。たとえば 1100 メートルの帯水層であれば、一般的には、およそ 11MPa（メガパスカル）の圧力を有する。そこで、CO₂ はそれより 1~2MPa 上げることで圧入できる。

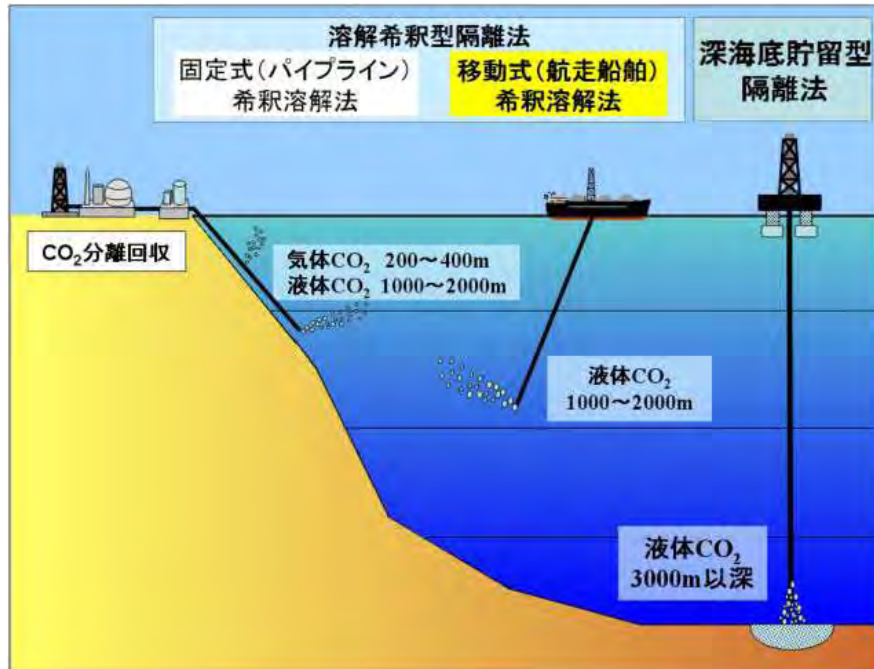
②海洋隔離

前述の通り、海洋隔離による CCS はロンドン条約と海洋汚染防止法で禁止されており実用化の予定はないが、手法としては溶解型と深海底貯留の 2 種類に区分される。

- 海洋溶解（固定式・移動式）：大規模排出源から分離回収された CO₂ を海底パイプライン、またはタンカーにより移動し、表層または中層へ注入溶解する。
- 深海底貯留隔離：大規模排出源から分離回収された CO₂ をタンカーで輸送し 3000 メートル以深の海底に貯留する。

※出典：経済産業省「技術戦略マップ 2010」

〔CO₂ 海洋隔離の種類〕



※出典：産業構造審議会産業技術分科会評価小委員会（2009）「二酸化炭素炭素固定化技術開発プロジェクト評価（事後）報告書」

海洋溶解に関し、経産省の補助を受け、RITE が「二酸化炭素の海洋隔離に伴う環境影響予測技術開発」プロジェクトを 2002 年から 2009 年まで実施してきた。海洋に放出する CO₂ を拡散し、環境への影響を最小化するという目的で、移動する船舶から CO₂ を海洋放出するという移動式を念頭に、CO₂ 希釈技術の開発（フェーズ 1）、CO₂ 挙動観測・予測技術の開発（フェーズ 2）に取り組んだ。以下が主な取り組みの内容である。

- CO₂ の隔離量・隔離期間を明らかにし、希釈溶解された CO₂ の挙動を把握する技術の確立などの CO₂ 海洋隔離能力の技術
- 環境への影響を把握するために必要な海洋炭酸系物質の濃度・深海生態系などのデータ蓄積及び調査の実施などの環境影響評価の技術
- CO₂ 放出装置開発や CO₂ 分布予測などの CO₂ 希釈の技術

なお、2002 年に本事業に関し、ノルウェーにおいて 5 カ国（日・米・カナダ・

ノルウェー・スイス) 共同で実証実験を行う計画があり、実験準備は完了していたが、ノルウェー政府から実験取り消しの要請があり中止となった。中止の理由には、国際条約との関連性に関する懸念、海洋隔離が気候変動に対する有望な対策として IPCC に認められていない点、そして NGO などからの反対を受けた点が挙げられた (RITE (2006) 「フェーズ 1 の効果」『CO₂ 海洋隔離プロジェクト 二酸化炭素の海洋隔離に伴う環境影響予測技術開発』)。

当研究は海洋隔離技術の研究を行っていた唯一の事業であり、その重要性を認識するとともに、成果も評価されていたが、社会的受容性に課題があることに加え、CCS 技術としては地中貯留に優先度が置かれる傾向にあると結論付けられたため、2009 年をもって事業を中断する運びとなった。

このような背景から、以下からは現在 CCS 技術の主流であり、最も実現可能な地中貯留を取り上げる。

(3)国内の過去の実証試験および技術開発

過去の日本におけるフィールドでの CCS 関連プロジェクトとしては北海道夕張市 (2002 年度～2008 年度) で ECBM (炭層メタン増進回収) プロジェクトと新潟県長岡市 (2000～2007 年度) で実証試験が行われた例がある。どちらのプロジェクトも経済産業省の補助事業であり、現・公益財団法人地球環境産業技術研究機構 (RITE) や株式会社環境総合テクノスが主体となって教育機関の協力のもと、実施された。

現在も上記機関で研究は続けられているが、2008 年に日本 CCS 調査株式会社が設立され、苫小牧地点をはじめとする国内における CCS の実証試験候補地点の調査の実施主体となっている。

i)CO₂ 炭層固定化プロジェクト(北海道夕張市)

火力発電所等の大規模発生源から CO₂ を回収し、石炭層に圧入・固定化させ、CO₂ と置換した未使用のメタンガス (CH₄) を回収する技術を確立し、実用化可能な全体システムを構築することを目的とした事業である。石炭埋蔵量、メタン湧出量、排水量、地元合意形成を考慮し、名張市が選定された。総合的な視点で鑑みると、安全性を確保し、有効性を実証するには長期間のモニタリングが必要であるものの、事業で得られた結果は高く評価されている。本来 CCS は経済的なインセンティブが働かない点が課題となっているが、当事業はメタ

ン回収が CCS 事業に統合されているため、事業化の実現可能性を高め得るものとなった。

プロジェクト事後評価では、事業化にあたり重要となる課題として CO₂ 分離回収のコスト効率や、各技術の継続した技術開発、環境への影響や安全性における評価の充実、市民からの理解を得るための広報などが挙げられている。

ii) RITE CO₂ 地中貯留プロジェクト(新潟県長岡市)

RITE が新潟県長岡市で 2000 年～2007 年度に実施した総量 1 万トンを押入する実証実験である。当実験は、長岡市南西部の信濃川支流渋海川左岸、旧帝国石油株式会社岩野原基地（南長岡ガス田）の帯水層が選定された。事業の目的は、天然ガス・原油増進回収で使用されている技術を応用し、CO₂ 排出削減事業として必要な研究課題の解決につなげ、実用化への基盤を確立することにあった。CO₂ 供給施設点検・整備、CO₂ 供給逼迫期、そして新潟県中越地震の際に圧入休止・中断したものの、大きな問題もなく完了した。現在もなお、RITE によりモニタリングは継続されており、問題がないことが確認されている。

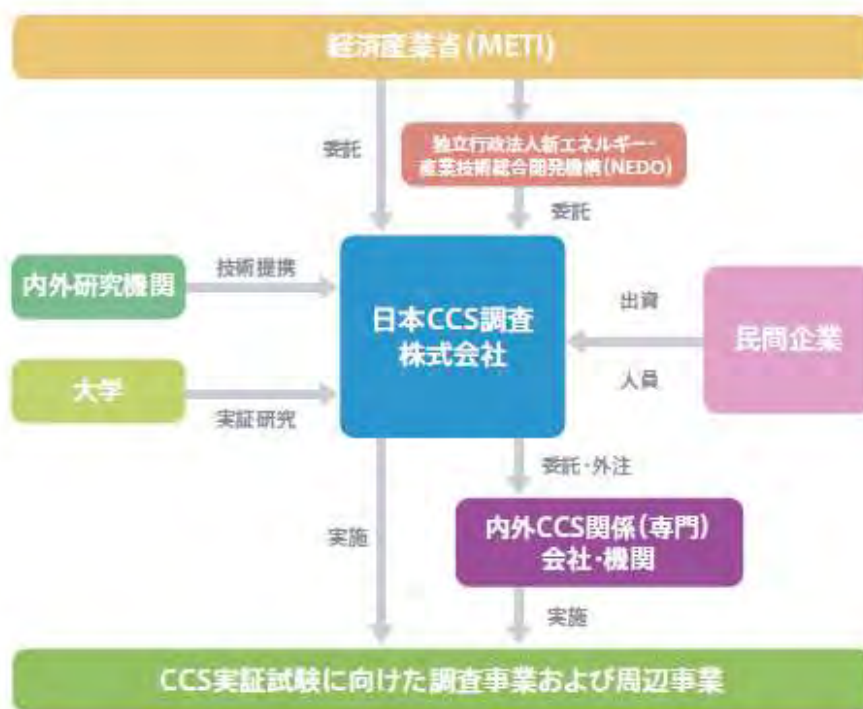
iii) 日本 CCS 調査株式会社の設立

上記の実証試験終了の際、さらなる大規模実験が必要との認識が共有された。そして 2008 年 7 月の主要国首脳会議（G8）洞爺湖サミットでは CCS が主要な議題になるという見通しが生まれる中で民間の CCS 実証試験の実施主体が望まれる社会情勢となった。この背景の下、民間 29 社（平成 24 年 3 月現在 36 社）の出資を受けて日本 CCS 調査株式会社が設立された。主な事業内容としては、CCS 事業*の調査実施、国内外での CCS の普及、情報収集などである。

*（日本 CCS 調査(株)における）CCS 事業・・・日本 CCS 調査(株)は地中貯留に関する事業のみ展開している。

〔日本 CCS 調査(株)の実施体制〕

調査事業の実施体制



※出典：日本 CCS 調査株式会社 Web サイト 「会社情報」
(http://www.japanccs.com/about/about_us.html)

2. 技術開発と産業化の現状

分離回収・輸送・貯留の各フェーズでの技術は、前述のとおり既存技術が応用可能であるが、従来それらを統合し、かつ多量の CO₂ を扱うことがなかったため、実証実験を行う必要があるとの認識の下、事業化を目指した実証実験の準備が行われている。

RITE の 2005 年度の報告「平成 17 年度 二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業 二酸化炭素地中貯留技術研究開発 成果報告書」によると、新設石炭火力発電所に CCS を設置するケースでも 1 トンの処理を行うのに約 7300 円かかるとされており、その 6 割が分離回収にあてられる。一連のプロセスの中で最もコストが高いため、そのコストを低減するのが現状の課題である。

また、安全性においては高い評価を得ているが、CO₂ を長期間貯留すること

の影響について完全に判明しているわけではない。前述のとおり、天然ガスの地下貯留や CO₂ を油層に圧入し原油を回収するという石油の増進回収を目的とした技術がすでに確立され、事例も数多く存在するが、CCS は CO₂ を大量に数百年から数千年間貯留し続けることになるので、安全性を確保するためにも引き続き検証が必要である。

(1) 海外での動向

海外での代表的な CCS の事例は以下の通りである。

〔海外での代表的な CCS(地中貯留)の事例*〕

実施主体	国名	概要
Sleipner	ノルウェー	・炭素税に係るコスト対策として 96 年から年間 100 万トンの CO₂ を帯水層に圧入 ・帯水層の中で CO₂ がどのように留まり、その後どうなるのかをモニタリングするという技術が確立されていないため、事業を行いながら欧州連合 (EU) からの研究資金で研究を行っている
Snøhvit	ノルウェー	・ノルウェー北部にある液化ガス (LNG) 施設から回収した CO₂ をバレンツ海底帯水層に年間 70 万トン圧入している商業プロジェクト ・2008 年から CO₂ 貯留を開始
In Salah	アルジェリア	・国営企業による帯水層への圧入 (年間 100 万トン) ・スタッド・オイル社と BP 社も技術協力しており、日揮株式会社が分離回収設備を納入している ・世界で最初の大規模なガス田での CCS プロジェクトであり、プロジェクト終了までに 1700 万トンの CO₂ を貯留する予定である
Otway	オーストラリア	・枯渇ガス層への圧入 ・研究的なプロジェクトであり、2 年間で累計 6 万トンを圧入。現在も小規模の研究を続行している
Lacq	フランス	・枯渇ガス層への圧入を行う研究的なプロジェクト。 ・2 年間で 12 万トンの予定

		・回収された CO ₂ は、約 27km のパイプラインを使用して枯渇ガス層へ輸送される
Mountaineer	アメリカ	・10 万トンを出発源サイトの帯水層に圧入する予定であったが、最終的に 3.7 万トンの CO ₂ が圧入された

※日本 CCS 調査株式会社提供資料等を基に作成

*海外事例・・・The Cooperative Research Centre for Greenhouse Gas Technologies (CO2CRC) のデータベースで CCS のプロジェクトが検索できる。
(<http://www.co2crc.com.au/demo/worldprojects.html>)

2011 年に米国でトータルシステムの CCS が実施され、最終的に 3.5 万トンの CO₂ が火力発電所から回収され、帯水層に圧入された。続けて 100 万トンの圧入を行う予定であったが、費用負担の問題もあり、計画は棚上げの状態になっている。上記以外でも火力発電所での CO₂ 分離回収、帯水層への圧入という計画がアメリカ・カナダ・欧州を中心に進んでいる。上記のうち、ノルウェー・アルジェリアのケースは実用規模で商業的に行っているが、貯留確認の技術開発においては実証段階（デモンストレーション）である。その他の事例においては、初歩的な実証試験である。

米国では 1970 年代から石油の増進回収をしており、年間 2 千~3 千万トンの CO₂ を油層に注入する事業の実績があるため、油田における CCS は米国が最も進んでいると言われている。一方で、帯水層貯留はノルウェーが先進的であるとされる。日本は個別の技術開発が進んでおり、特に分離回収技術は世界的に見ても高い水準にあると言われている。輸送技術も、前述の輸送船舶の開発など、独自の技術を築いている。しかし、統合的な技術はこれらの国に比べ開発が遅れているため、大規模開発に向けた取り組みを急ぐ必要があるとの指摘もある。

(2)国内での CCS 調査

①概要

2008 年の G8 洞爺湖サミットで大規模な CCS の展開が支持され、国内でも CCS の実用化が目標として織り込まれた「低炭素社会づくり行動計画」が閣議決定されるなど、CCS は日本の環境政策の中でも重要な位置を占めることとなった。2008 年に経産省の補助事業として日本 CCS 調査株式会社が実証実験に向けて、候補地のスクリーニングを行った。排出源の有無・利用条件・どういった技術開発ができるのかといった点を踏まえて最終的に 4 つの実証試験が必要なのではないかとのもとめを経産省に提出した。

2009 年に委託事業が始まり、地質調査と地上設備の概念的な設計を含めて、苫小牧、北九州、勿来・磐城沖の 3 箇所で調査を進めてきた。地層や周辺環境によって結果が異なる可能性もあることから、4 タイプ（生産終了油・ガス層、構造的帯水層*、非構造的帯水層（新第三紀以降）、非構造的帯水層（古第三紀）**の貯留層で実験を行うことが必要だとした。この 4 タイプで事業遂行が可能であれば、日本全国どこでも実施可能との見通しであるため、それぞれの代表として 3 地点を絞り込んでいる。RITE の 2005 年度の報告では勿来・磐城沖地点や苫小牧地点を含む全国で合わせて 1461 億トンの CO₂ 貯留ポテンシャルがあるとしている。

*構造的帯水層・・・地層が山形（背斜構造）になっている帯水層

**新第三紀、古第三紀・・・いずれも地質時代の名称。それぞれ 2,303～258 万年前 6,550～2,303 万年前

②主な調査事業の現状と将来展望、問題点・課題等

苫小牧、勿来・磐城沖、北九州の各地点での実証試験の現状は以下の通り。

地点	概要
苫小牧	・製油所からの分離回収。 ・2009-2010 年度に帯水層などの地質を把握するため 3 次元弾性波探査*を実施。 ・2010-2011 年度に調査井を掘削し、地質調査を実施。 ・貯留層の評価を行い、それを基に実証試験計画案を経産省に提出。 ・2012～2015 年度に実証実験施設の設計・建設等が行われる予定。
福島（勿来・磐城沖地点）	・震災の影響により本地点での調査は当面取りやめとしている。 ・予定では株式会社クリーンコールパワー研究所が実証実験を行った IGCC（石炭ガス化複合発電）を引き継ぎ、分離回収施設を新設した上で 80km ほどの海底パイプラインを引き、生産終了したガス田で圧入を行うというモデルが検討されていた。
北九州	・地質データが不十分であり、地質調査の初期段階にある。 ・2010 年度にボーリング調査（地質性状調査）を行っており、現在も評価を継続中。2012 年度も引き続き調査が行われる予定。

*3 次元弾性波探査・・・この場合、海底に平行に設置したデータ受振ケーブル周辺でエアガンを発振し、地質境界面での反射波を測定することで各地層の広がり把握する調査。

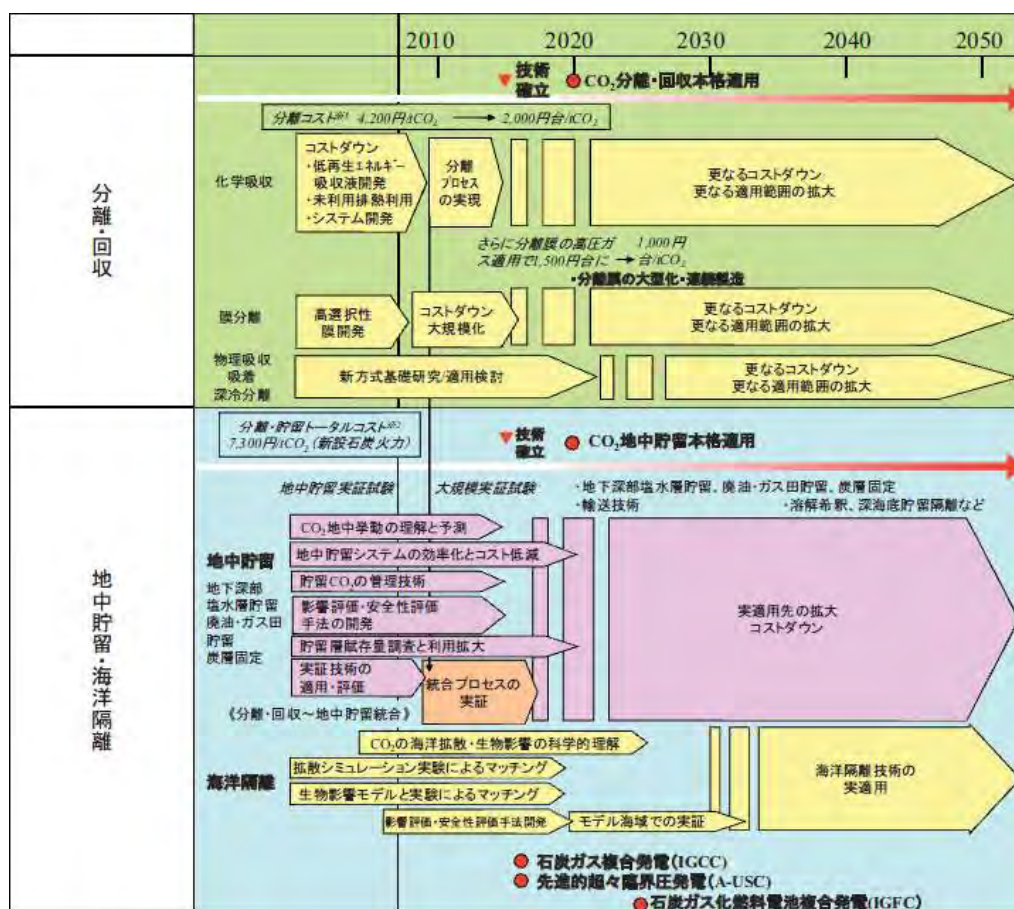
上記を含む国内の CCS 事業はいずれも基礎的な研究開発・大規模実証実験、分離・回収のコストダウン、安全性の向上を主な柱としている。

現時点においては利用可能な最良の技術（best available technology）が適用されているが、実用化に向けて引き続き安全性を高めていく必要がある。貯留された CO₂ の挙動と安全性を確認するには弾性波探査で圧入前・圧入過程のデータを取り、差分を検証するのが一番有効であるとされている。しかし、誤差を含むため、取得データから高い精度で定量化するのが現状の課題であり、今後、検証していく必要がある。

3. 技術開発と産業化の課題と展望

経産省「技術戦略マップ 2010」によると、分離回収技術におけるコストダウンが課題となっている。輸送、圧入プロセスは既にある程度確立しているため、大幅にコストを下げることは困難と見られているが、分離回収についてはまだ技術開発の余地があり、コストダウンを見込めるため、RITE が主導で課題解決に取り組んでいる。現在、CO₂の回収・貯留に1トンあたり7,300円ほどかかり、この内、分離・回収には約4,200円がかかるが、このコストを2020年までに1トンあたり1,000円台まで低減することを目指して開発中である。膜を使った分離も有効で、高い圧力を有するガスから分離するのであれば熱エネルギーが不要である。

〔CCS 技術戦略マップ〕



※出典：経済産業省「技術戦略マップ 2010」

経済的側面に関しては、何らかの形で利益が発生することが産業化に向けての必要条件と言える。現在は国が実証試験と研究開発にかかる費用を全額負担しているが、CCS を国内で商用化するには、これらの研究開発を進めコスト削減を図ることに加えて、たとえば、排出した CO₂ を CCS により削減した者に対して、何らかのインセンティブを付与する等が必要になる。このため、国際的な動向を踏まえながら日本国内でも制度を整備していくことが必要である。

2011 年に南アフリカ共和国・ダーバンで開催された第 17 回国連気候変動枠組条約締約国会議（COP17）と同時開催されていた第 7 回京都議定書締約国会合で、CCS によるクリーン開発メカニズム（CDM）化の大まかな手続きと手順が合意され、今後 CCS の世界的な推進や海外での事業展開が後押しされる可能性がある。しかし、事業を展開していく上では、2005 年に開始された CCS の CDM 化議論は数年の間、反対派と賛成派が激しく対立していたことや市民団体などの非政府組織（NGO）にも依然反対派が多いことから、社会的受容性を得るための対応も重要である。

○インタビュー

日本 CCS 調査（株）技術企画部

尾崎 雅彦 東京大学大学院新領域創成科学研究科 教授

○主な参考文献：

日本 CCS 調査（株）提供資料

日本 CCS 調査（株）web サイト

国際エネルギー機関（IEA）（2009）*Technology Roadmap Carbon Capture and Storage*（www.iea.org/papers/2009/CCS_Roadmap.pdf）

経済産業省「技術戦略ロードマップ 2010」

経済産業省（2008）「二酸化炭素回収・貯留研究会（平成 20 年度第 1 回）配付資料」（<http://www.meti.go.jp/committee/materials2/downloadfiles/g81030d06j.pdf>）

小出仁（2006）「CO₂ の地中隔離」乾監修『CO₂ 固定化・隔離技術』（2000 年『CO₂ 固定化・隔離の最新技術』普及版）

公益財団法人地球環境産業技術研究機構（RITE）web サイト

公益財団法人地球環境産業技術研究機構（RITE）（2006）「平成 17 年度 二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業 二酸化炭素地中貯留技術研究開発 成果報告書」

公益財団法人地球環境産業技術研究機構（RITE）（2006）「フェーズ 1 の効果」『CO₂ 海洋隔離プロジェクト 二酸化炭素の海洋隔離に伴う環境影響予測技術開発』

（http://www.meti.go.jp/policy/tech_evaluation/c00/C0000000H19/080121_program&s）

ea/program&sea-6-re5.pdf)

独立行政法人産業技術総合研究所 web サイト

(<http://unit.aist.go.jp/emtech-ri/ci/e-keyword/CCS/ccs.html>)

環境省「二酸化炭素海底下地層貯留に関する技術について」

(<http://www.env.go.jp/council/06earth/y068-04/ref05.pdf>)

産業構造審議会産業技術分科会評価小委員会（2009）「二酸化炭素炭素固定化技術開発
プロジェクト評価（事後）報告書」

(www.meti.go.jp/policy/tech_evaluation/e00/03/h20/309.pdf)

（2） ii）「輸送」について

Global CCS Institute (GCCSI)

The Global Status of CCS:2011

(<http://cdn.globalccsinstitute.com/sites/default/files/publications/22562/global-status-ccs-2011.pdf>)

Preliminary Feasibility Study on CO₂ Carrier for Ship-based CCS

(<http://cdn.globalccsinstitute.com/sites/default/files/publications/24452/chiyoda-report-merged.pdf>)