

## 環日本海地域への CO<sub>2</sub> 地中貯留技術導入に関する基礎的研究

－地球エコシステム<sup>1)</sup>としての CO<sub>2</sub> 回収・地中貯留－

久留島 守広 (東洋大学)

### 1. はじめに

地球温暖化問題は、各国首脳マターとしていまや国際社会の中心的課題となり、昨年ドイツにおけるハイリゲンダム・サミットに引続き、本年の我が国・北海道洞爺湖におけるサミットでも主題となることとされている。二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) に代表される温室効果ガスの排出削減を国際的に取組むべく、1997 年気候変動枠組条約第 3 回締約国会議 COP3 が京都で開催され、先進各国は温室効果ガスの大幅削減 (90 年比 2010 年平均目標：日本は -6%、EU は -8%、米は -7%他) を約束し、その履行の目標年は本年 2008 年から始まり 2012 年までとまさに実行の年である。

また本件は、言われている将来の海面上昇のみでなく①「将来の危機ではなく現に今ある危機」として持続的開発のための基盤であり、②上記削減目標 (京都議定書) の実施規則他が定められ、本年 2008 年よりその目標年が始まり、さらに③各国政府・企業は「新たなグローバル・スタンダード」として戦略的に活用しようとする姿勢がうかがえることなどから、わが国として産官学の総力を結集した対応が必要であろう。

このため、CO<sub>2</sub> 排出削減の努力は、①省エネ

ギーはその即効性から、工業プロセスのみならず、家電、事務機器、自動車等についても現在官民あげて新たな技術へのチャレンジが行われ、②原子力も近年の事故等による影響が憂慮されるが、立地への着実な努力が行われている。また、③新エネルギーについては、導入促進への努力が国内外で行われている。

しかしながら、世界のエネルギー消費は、中国・インドをはじめとする開発途上国の人口増や経済発展による増加に直面しており、石炭を中心とする化石燃料への依存は不可避である。このように、引続き増大するエネルギー需要を化石燃料に依存すること等から、世界のエネルギー供給の見通し (OECD/IEA 「World Energy Outlook 2007 Edition」) では、2030 年までにエネルギー需要は 50% 増加 (年平均では 1.6% 増) するとされている。その需要増の 70% は、開発途上国によるもので、中国だけでも 30% を占める。

また、この見通しでは、現在 (2005 年実績で、石炭・石油・ガス等で 80%) 及び将来 (2030 年見通し同 81%) とともに大部分は化石燃料に依存し、とりわけ 2005 年から 2030 年へのエネルギー需要増の 83% を占めると予測されている。このため、省エネルギー・新エネルギー・原子力に続く第 4

---

### キーワード：

環境、二酸化炭素回収・地中貯留 CCS、地球エコシステム、エココンビナート、植物工場

の路として④化石燃料からのCO<sub>2</sub>の回収・利用をわが国はもとより、発展途上国も含めた世界における短・中期的な対応の柱とすることが不可避であろう。

ここでは、上記のように化石燃料（メジャーなエネルギー供給源）への対応を図り、北東アジアをはじめ地球全体の地域と地下を対象可能とするものとして「地球エコシステム」と仮称してみた。

## 2. CO<sub>2</sub> 吸収・貯留技術とは

我が国におけるエネルギー保障の面では埋蔵量の豊富さ、供給安定性ならびに経済性の面から石炭の重要性が今後益々増大する中で、化石燃料の利用によって排出されるCO<sub>2</sub>による地球的環境問題への対処方策が求められている。また、前述の中国、インドをはじめとする発展途上国、韓国、ロシア沿海部等の急速な経済発展に伴う世界規模でのエネルギー需要の拡大によって、エネルギー市場の需給逼迫への対応も重要な課題になってきている。

このため、石炭火力発電所をはじめとする大規模発生源などからCO<sub>2</sub>を吸収・分離・回収し地下に貯留する技術「CO<sub>2</sub>回収貯留技術：CCS」が21世紀の地球環境技術戦略の要として注目を浴びており<sup>2)</sup>、後述する海外においてノルウェー北海油田（洋上で天然ガスからCO<sub>2</sub>分離・海底下注入）及びカナダ油田（米国石炭ガス化プラントからCO<sub>2</sub>を回収し、パイプライン輸送の上油田増産に利用）等のように既に事業化<sup>3)</sup>がなされている。

## 3. CO<sub>2</sub> 吸収・分離・回収技術<sup>4)</sup>

（株）東芝は、体積の400倍の二酸化炭素を吸収できる画期的なCO<sub>2</sub>吸収セラミックスを開発した。この材料は、二酸化炭素と反応しやすい

リチウム（Li）と腐食しにくいシリカ（SiO<sub>2</sub>）とを組合せたリチウムシリケート（Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>）という粉末状の物質で、反応式： $Li_4SiO_4 + CO_2 = Li_2SiO_3 + Li_2CO_3$ により二酸化炭素の吸収・再生を繰り返し行うことができる。この吸収材のCO<sub>2</sub>吸収温度は500～600度と高く、反応熱は回収して蒸気発生や発電などに再利用できる。この吸収材を活用して火力発電などからの排煙中のCO<sub>2</sub>排出量を、小さなエネルギー・ペナルティで大きく削減できる。

このため、（株）東芝・中川、東京農工大学・堀尾ら及び筆者は、火力発電システムなどからのCO<sub>2</sub>排出量削減を目的に、セラミックス吸収材を用いた次世代二酸化炭素回収・利用システムの研究開発につき、特許出願を行うとともに、先導研究を行った。（実験装置は、図1）

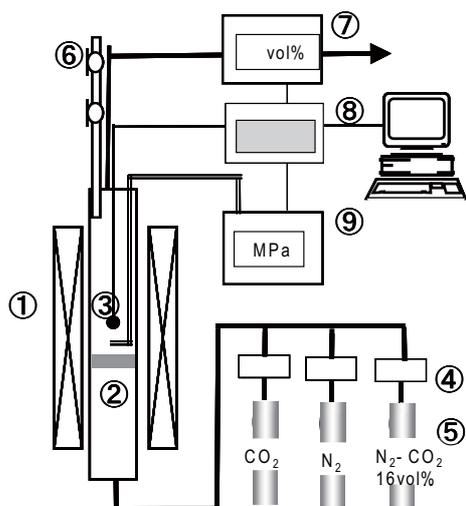
これら試みの目的は、前述の発展途上国、韓国、ロシア沿海部等において容易に導入できること（小型化・保守性の向上等）であり、また我が国をはじめ世界各国における事業採算性・経済性の確保である。

CO<sub>2</sub>を吸収・分離・回収し地下に貯留する技術「CO<sub>2</sub>回収貯留技術：CCS」についてのコスト試算は国内外で実施されているが、新エネルギー・産業技術総合開発機構NEDOの調査資料によると、分離・回収から貯留に至までのトータルコストは、地中貯留（LNG複合発電から化学吸収法によりCO<sub>2</sub>を分離回収した後、パイプラインで100km輸送後、帯水層に隔離した場合）では、約6,800円/t-CO<sub>2</sub>と試算されている。特に、トータルコストのうち約60～70%程度を占めるのが分離コストであり、また、その所要エネルギー（エネルギー・ペナルティ）も、同じく多くの部分が分離のプロセスで発生する（現在実用化されている化学法は、約25%）。

上記のCO<sub>2</sub>吸収・分離・回収技術（脱炭技術）では、このエネルギー・ペナルティを理論上数%までの低減が可能であり、今後の技術開発により

システムが確立され、前述のような導入への制度が整備されたならば、省エネルギー、新エネルギー、原子力などに次ぐいわば第四の路が拓ける事となる。

これら技術が実用化されたならば、前述のように化石燃料（メジャーなエネルギー供給源）への対応を図り、北東アジアをはじめ地球全体の地域を対象可能し、まさに「地球エコシステム」の実現が期待できる。



1. image furnace
2. column(i.d.100mm)
3. thermo couple
4. mass flow controller
5. gas cylinder
6. double rock hopper
7. gas analyzer 8. data logger 9. sensor

図 1. 反応特性基礎試験実験装置

#### 4. CO<sub>2</sub> を活用する植物工場概念確立<sup>5)</sup>

(株) 日建設計は、居室用高効率光ダクトシステムを開発し、人工光に代わる照明設備の実用化を可能とした。

回収 CO<sub>2</sub> を固定し、かつ有効利用できる手法として生物的固定（バイオマス・エネルギー、植林などが知られている）を挙げることが出来るが、生物的固定を効率的に行うには、自然光や熱を効率的に利用する必要がある。このため、回収 CO<sub>2</sub>

の施肥、光ダクトシステムを利用した自然光の高密度化利用、および廃熱を効率的に利用できる植物工場概念を確立し、この構想を展開した CO<sub>2</sub> 利用植物工場群の実現性について検討し、その構想を具体化する。さらに、前述の CO<sub>2</sub> 分離・回収技術（脱炭技術）と地中隔離等と組み合わせることにより、地球エコシステムとしての実用性を有することを検証した。

現在、(株) 日建設計及び NEDO の共同研究として、高効率光ダクトシステムを植物工場、ビル、地下施設等に広く適用するための諸条件の抽出、コスト試算及び CO<sub>2</sub> 排出抑制効果の試算等を行った。

#### 5. 海外での事業化の現状

こうした状況の下、各国において単なる夢の技術でなく産業技術としての本技術への期待が高まっており、前述のように既に①ノルウェー北海油田（図 2 のように、洋上で天然ガスから CO<sub>2</sub> 分離・海底下注入）及び②カナダ油田（図 3 のように、米国石炭ガス化プラントから CO<sub>2</sub> を回収し、約 330 キロをパイプライン輸送し油田増産に利用）等で既に事業化がなされている。さらに北アフリカのインサラー・ガス田、オーストラリアにおいては複数の石炭火力所などにおいて事業化が進みつつあり、加えて欧州連合 EU は本技術 CCS に積極的に取組んでおり、英国、ドイツ、オランダ等において事業化の検討・準備がなされている。<sup>6)</sup>

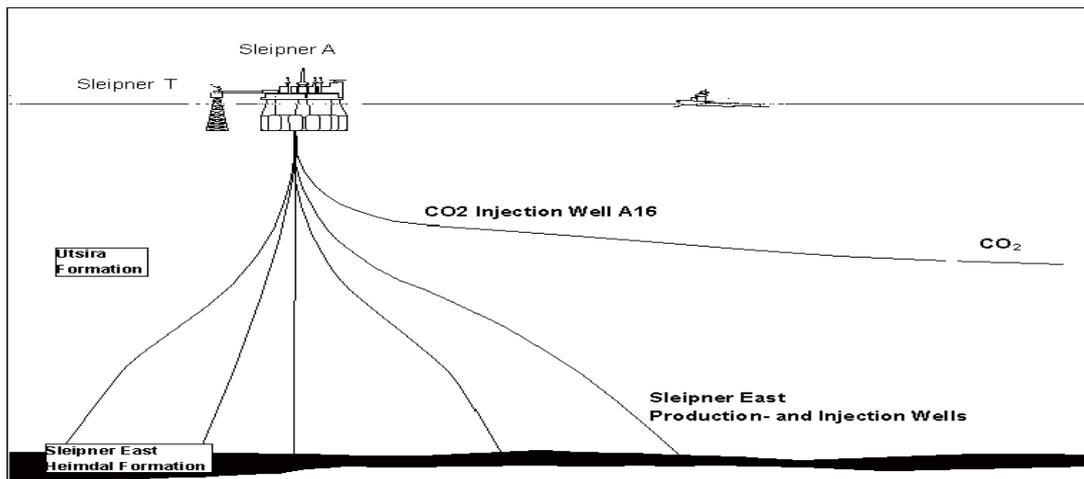


図2. 天然ガス採掘設備からCO<sub>2</sub>分離・帯水層に年間約100万トン注入  
(出典：スタットオイル社資料)

### CO<sub>2</sub> PIPELINE TO CANADA

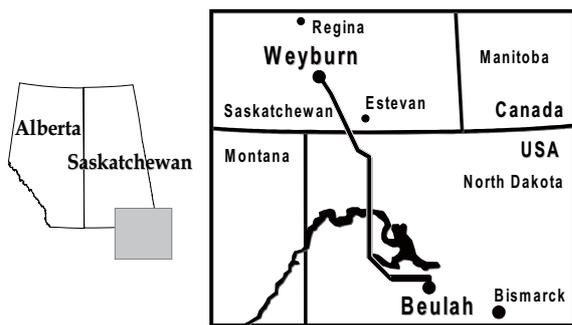


図3. 石炭ガス化プラントから油田までのCO<sub>2</sub>パイプライン  
(出典：サスカチュワン州エネルギー資源省資料)

題に取組み、新潟県岩野原において平成15年から17年にかけて約1万トンのCO<sub>2</sub>を地下廃ガス田に注入し、その後CO<sub>2</sub>の挙動把握などのモニタリングを行っている。また、CO<sub>2</sub>地中貯留を組合せたゼロエミッション型石炭火力発電所の実現に向けた米国を中心としたイニシアチブ：フューチャージェン（FutureGen、総事業費は10年間で10億ドルの見込み）に参画すべく、経済産業省にて19年度予算7.45億円（拠出金の一部と国内事業費）を新規計上し、現在米国内の実験プラント候補地の選定・施設設計などが行われている。

CCSの対象フィールドは大きく3つに分類される。まず上記新潟県岩野原での研究のような①廃油田・ガス田に貯留する方法。次に、図3のような②CO<sub>2</sub>を油田に注入して石油回収量を増加させる原油増進回収法（EOR）。そして図2のような③帯水層に貯留する方法である。

## 5. わが国における取組みと今後の展望

わが国においても、産官学が連携し国内の具体的なフィールドに適用する技術の開発に着手している。具体的には、経済産業省によりNEDOプロジェクトとして当初の予算計上がなされた後、エンジニアリングと地球環境技術の各々中核機関たる（財）エンジニアリング振興協会及び（財）地球環境産業技術研究機構RITEが車の両輪となり、産官学の技術力を結集した体制のもと上記課

国内においては、NEDOにおけるこれまでの調査結果から、貯留能力の高い帯水層が日本海側に存在することが確認されており、上記③が有望と思われる。高い貯留能力を有するフィールド（地層）は、難浸透性の岩石で構成されている層（キャップロック）に覆われた封塞構造（トラップ）を持つ構造性帯水層で、調査の結果、構造性帯水層が確認された地域は、陸域16カ所、海域13カ所の計29カ所におよび、その隔離能力は約15億トンと見込まれる。これは、我が国のCO<sub>2</sub>

排出量の内、1990年を基準とした削減目標6%の約2割、年間15百万トン（全体の約1.2%）をこのフィールドに地中隔離すると仮定して、約100年分に当たる。<sup>7)</sup>

しかし、帯水層内でのCO<sub>2</sub>挙動等について十分な検証がなく、更に長期貯留に関する安全や環境影響について技術的、科学的な知見が十分とは言えない。また、帯水層における貯留条件下での鉱物との反応性等についても検討する必要がある。

本システムの事業化において、その前提となる地中隔離の対象フィールドについては、前述のように、わが国の調査結果から、貯留能力の高い帯水層が日本海側北部沿岸及び太平洋沿岸全域の一部に存在することが確認されている。また、国内の大規模発生源の集計は筆者他が関係者への聞き取り等によりとりまとめ、これらを表1に示す。<sup>8)</sup>しかしながら、上記フィールドを対象にこれら大規模発生源からの一部を地中隔離すると仮定しても、約100年分に当たるにすぎない。このため、わが国における可能性とともに、環日本海地域と

の連携と本技術の当該地域への導入のための体制・事業化に際しての費用負担のあり方など、その社会的コストとともに推進方策を示していく必要がある。

## 6. 環日本海地域への導入の可能性

上記の知見を総合し、①火力発電所を中核とし、②回収CO<sub>2</sub>、自然光および廃熱、海水資源を利用した生物生産工場群と、③その生産物の製品化工場群、④各工場から出る排水等を浄化する環境保全技術、⑤バイオエネルギーの生産などが結合した実現性の高いエコ・コンビナートの構成を提案しいわばウィン・ウインの関係を明らかにすることが肝要であり、その課題・背景は次のとおりである。

### (1) 課題

産業規模（生産スケール）と生産コスト、CO<sub>2</sub>固定量の推定につき、火力発電所を中核とした場合の生物原料生産工場の生産スケールを推定する

表1. わが国のCO<sub>2</sub>大規模発生源

	年間排出量（炭素換算）		排出ガスの特性		
	排出総量（2000年度）	1箇所あたり	CO <sub>2</sub> 濃度	その他排ガス中物質	排ガス温度
石炭火力発電所 （電力事業）	3,831万t	（平均規模） 約64万t （大規模） 210～280万t	13～15%	・SOX： 30～70ppm ・ダスト： 5～25mg/ N m3	100度前後
石油火力発電所 （電力事業）	1,695万t	（平均規模） 約9.8万t （大規模） 180～250万t	12～13%	・SOX： ～100ppm	100度以下
天然ガス火力発電所 （電力事業）	2,790万t	（平均規模） 約24万t （大規模） 100～130万t	8～10%	不純物は少ないが、水分が15～17%と多い	100度前後
一貫製鉄所 （高炉＋転炉）	3,585万t	（平均規模） 約84万t （大規模） 93万t	高炉ガス：22% 熱風炉ガス：27%	高炉ガスには、CO、H <sub>2</sub> の含有量が高い	数百度
セメント工場 （キルン保有工場）	887万t	（平均規模） 約46万t （大規模） 95万t	23～37%	・SOX： ～30ppm ・ダスト： 50mg/ N m3程度	100度前後

【出典：各種資料を基にNEDO技術開発機構で作成】

と共に、生産コスト、CO<sub>2</sub>固定（消費）量の推定を行う。検討にあたっては、最新の生物生産技術に関する知見（最新の生産技術や生産量）に基づく。

このため、火力発電所に付帯するコンビナートとしての実現可能な生物生産量を推定する。火力発電所1基当たり（例えば石炭火力やLNG火力100万kw級）の生物原料供給量を推定し、これを用いた製品製造工場の規模推定を行う。生物工場、製品工場から排出される工場排水の生物的処理と、これによる生物生産量についても計算に加える。生物生産量は光条件、CO<sub>2</sub>供給量、栄養供給量によって異なる。また栽培（培養）法によっても異なる。このため生産量の推定には最新の知見（高効率の生物生産技術の適用など）と最適な条件を前提に試算を行う。

さらに、上記計算で求められる生物原料から、各生産過程での生物系残渣量を推定し、これを利用したバイオエネルギー生産量の推定を行う。また生物生産量として炭化水素生産生物や、生物起源のメタノール、水素等の生産量を推定する。

CO<sub>2</sub>固定量（収支）の推定としては、年間の生物生産量から、CO<sub>2</sub>固定量の推定を行う。具体的には想定する生物の炭素量を推定し（主に文献値、必要な場合は実測）、年間生産量からCO<sub>2</sub>固定量を按分する。生物的排水処理施設についてもCO<sub>2</sub>固定量を推定する。火力発電所における脱炭装置による実現可能なCO<sub>2</sub>回収量と比較し、生物生産への利用可能量を推定する。

## （2）背景

環日本海地域における中国・ロシア両国とも次のように、エネルギーの安定供給とその需給構造の環境調和型への転換を志向しており、また将来はわが国と天然ガス、さらにわが国との間でCO<sub>2</sub>パイプラインネットワーク敷設の可能性も考慮できることから本構想検討のフィールドとして有望である。

①中国は、2006年にエネルギーの中期戦略を含む「第11次5カ年計画」（2006年から2010年）を発表した。主な内容は、以下のとおり。<sup>9)</sup>

- [1] クリーンコールテクノロジーの開発努力の強化、モデルプロジェクトを通じた広範な普及
- [2] 天然ガスの探査・開発・利用の促進
- [3] 海外の石油・天然ガス開発による石油輸入の多角化、戦略的な国家備蓄への着手によるエネルギーセキュリティの向上
- [4] 都市及び農村での電力ネットワークの構築とともに既存網の改造の強化、電力体制の改革の深化、健全で合理的な電気料金体系の形成。
- [5] 積極的な風力、太陽、地熱などの新エネルギー・再生可能エネルギーの発展。

②ロシアは、2003年エネルギー省より「2020年までのロシア・エネルギー戦略」が発表され、閣議承認がなされた。主な内容は、以下のとおり。

- [1] 国と経済と国民に対し、経済合理的であると同時に節約を促す価格で、エネルギー資源を完全かつ確実に供給する。国のエネルギー供給におけるリスクを減らす。
- [2] エネルギーの消費を合理化し、省エネ技術と装置を導入し、燃料エネルギー供給網の拡充・流通における損失を減らすこと等により、エネルギーの使用効率を向上する。
- [3] 国の社会経済成長を確実にするため、エネルギー部門の潜在能力の利用効率と財政的な安定を向上させる。
- [4] 経済的刺激の導入、生産設備の改善、製品の販売と消費、輸送、加工、採掘における新技術の導入を基本とし、エネルギー産業が環境に与える影響を最小限に抑える。

これらのための、具体的な施策としては、エネルギー輸送のための港湾ターミナルの建設・高度化、現在、天然ガスが主流となっている電力供給源の石炭、原子力、再生可能エネルギーへの転換促進の検討などである。

## 7. おわりに

前述のように、回収 CO<sub>2</sub> を分離し、かつ有効利用を可能とする技術を社会システムとして導入する方策・構想は、わが国のみならず、CO<sub>2</sub> の輸送・ネットワーク化が可能な環日本海地域への導入が肝要であり、その前提となる経済性・エネルギーバランス等を明らかにするとともに、協力対象たる中国・韓国・ロシア等の協調・連携のためにはウィン・ウィンの関係構築が必要である。こ

のため現在、NEDO、RITEをはじめ各機関・大学において回収 CO<sub>2</sub> の利用、光ダクトシステムを利用した自然光の高密度化利用、および廃熱を効率的に利用できる植物工場を開発中（上記3参照）であり、この構想を海外展開した CO<sub>2</sub> 固定化生物生産工業団地（エココンビナート、下図）等国内外での実現性について検討し、その構想を具体化するための方策について、広く環日本海地域関係者の指導・助言を得つつ検討・試算を行うこととしたい。

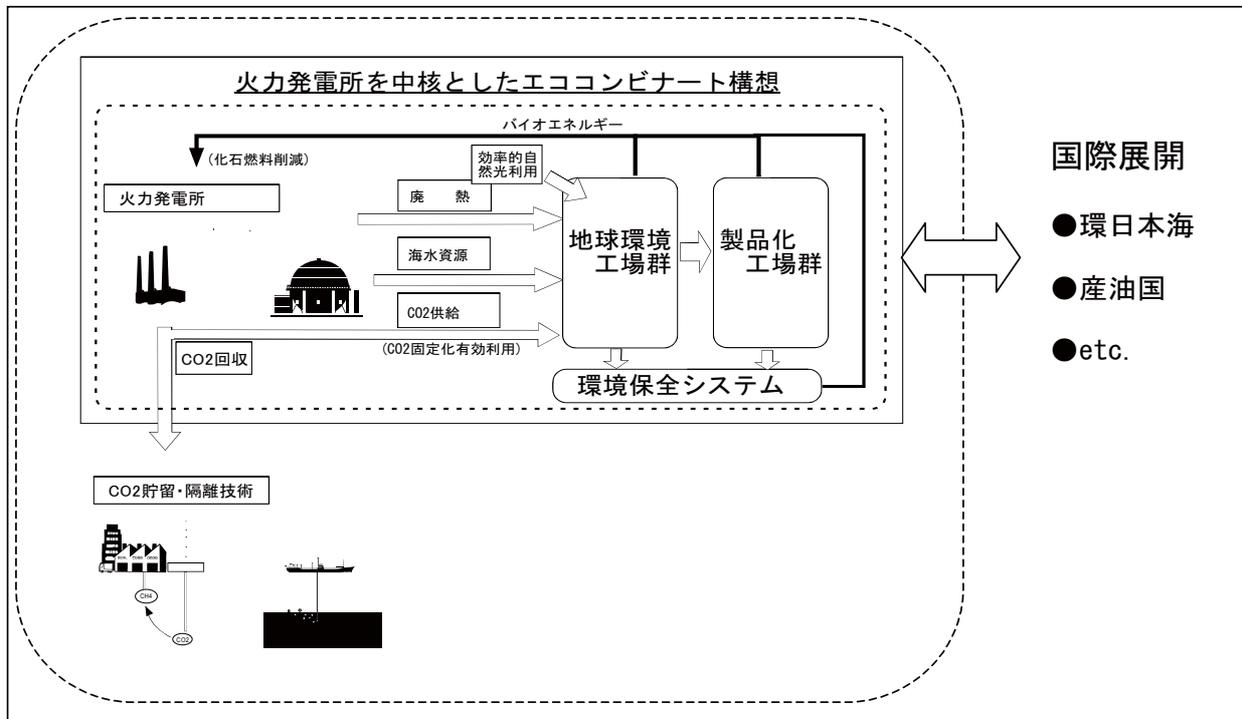


図 4. 環日本海への展開の概念図

## 注

- 1) 地球エコシステムとは、環日本海学会において著者が発表・提言した概念として、地球上の地理的広がりである地域と下への広がりである地下を活用し、環境調和型社会、つまりエコロジーを追及するものである。久留島守広：地球エコシステムとしての地中隔離「環日本海研究」第11号、2005.10.1, P123
- 2) 本邦において、初めて本技術:CCSの重要性を指摘し、(財)地球産業技術研究機構 RITE のデータベースなどの筆頭に掲載されている。  
久留島守広：地中隔離技術、21世紀地球環境技術戦略の要、「Engineering」No.93, P14-17,2001.11
- 3) 海外への招聘・視察により本技術が実用化されている現状を把握し紹介した。  
久留島守広：連載解説,地球ビジネス時代の化学工学(第1回)地球環境問題とビジネスチャンス「化学工学」Vol.68 No.4, 2004.4.1
- 4) 筆者の提言により、(株)東芝と東京農工大がプロジェクトを組み本実験を実施した結果である。  
桑木賢也、堀尾正毅、久留島守広、中川和明、村田圭治：CO<sub>2</sub>吸収セラミックスを用いた炭酸ガス高効率回収システム の概念設計, 化学工学会第33回秋季大会、2000.11
- 5) 同じく筆者の提言により、(株)日建設計と関総テクノス(株)がプロジェクトを組み本構想の策定と関連実験を実施した結果である。  
株式会社日建設計：平成15年度NEDO委託調査報告書「植物工場等二酸化炭素隔離技術の経済性等調査」, 2003.3
- 6) 欧州連合EUは、2050年を展望したCCSなども含めた世界エネルギー技術を取りまとめている。そこに具体的な事例とともに、コスト試算なども行っている。  
World Energy Technology Outlook-WETO H2, [http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/weto-h2\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/weto-h2_en.pdf), pp52-60
- 7) 国内の全国貯留層賦存量調査は「二酸化炭素地中貯留技術研究開発」の一環として、平成12年度と13年度NEDOから(財)地球産業技術研究機構 RITE への委託研究として実施した。
- 8) CCS技術に関し、経済的試算などを行い事業化への展開も含めた社会システムとしての導入可能性につき検討・提言を行った。  
久留島守広：地球ビジネスとしての地中隔離に向けての基礎的研究－CO<sub>2</sub>分離・地中隔離・エココンビナートの導入－  
「資源と素材」Vol.120(2004.10.1)P677-680
- 9) 資源エネルギー庁「エネルギー白書2008」2008.5及び経済産業省などを参考とした。

Basic study on the introduction of CCS in the Northeast Asian region  
— CO<sub>2</sub> capture and geological storage with bio-factory as the Earth Eco System —

Morihiro Kurushima (Toyo University)

**Abstract**

From 2001, NEDO started the project with universities and industries on innovative ceramics absorbent material and the CO<sub>2</sub> recovery system for Geological Storage.

This material may enable significant reduction of CO<sub>2</sub> emissions with a small energy penalty.

As 80% of the world primary energy including in the Northeast Asian region is dependant on fossil fuel, it is essential to address large-scale emission sources to achieve the reduction targets set by the Kyoto Protocol of COP3. Even though promotion of utilizing renewable

energy, energy conservation, etc. are important measures for reducing CO<sub>2</sub> emissions, sustained utilization of fossil fuels including coal resources cannot be denied from the viewpoint of efficient use of resources. And, the implementation of an effective CO<sub>2</sub> capture and storage is the key to efficient use of fossil fuel for the Northeast Asian region and the global environment.

CO<sub>2</sub> capture/storage/bio-factory: CCS with Bio-Factory as the "Earth Eco System" should be the major way to establish the sustainable energy system by using fossil fuel including coal resources in the Northeast Asian region.

