

炭素固定化技術の現状と展望

第二研究部 環境グループ
主任研究員 佐々木宏一

はじめに

日本をはじめ EU 諸国は京都議定書の批准を 2002 年に行い、京都議定書が発効するか否かはロシアの批准に懸かっている状況にある。このような状況下において、京都議定書を批准した各国は、京都メカニズム活用による CDM/JI 事業や排出量取引による具体的な削減対策の準備を着実に進めている。また、京都議定書の第 2 約束期間に関する事前の議論が行われつつあり、日本としては中長期的な地球温暖化対策の可能性を視野に入れながら検討をしておく必要がある。

一方、日本の国内における温室効果ガス排出量削減コストは他国と比較すると高いことが見込まれており、その対策の検討に際してはこれまでとは違った視点や技術革新による削減対策の検討が必要である。そういった点で注目される対策技術の一つが、炭素固定化である。炭素固定化が技術的にもコスト的にも適用可能となれば、日本として大きな削減ポテンシャルを有する対策を持つこととなり、日本の温暖化対策戦略上大きな意味を持つことになる。そこで、中長期的視点（京都議定書の次の議論など）からの技術革新を見込んだ対策の必要性、排出抑制対策と異なった視点による対策の検討、日本は削減コストが他の国と比較して高いが国内対策の一つとしてコスト低減・削減ポテンシャルが期待できる、との観点から、炭素固定化技術に注目し、技術的適用の可能性と他の温暖化対策とのコスト比較を行なうことにより、炭素固定化技術の現状と今後の展望について評価を試みる。

1. 炭素固定化の国際上の扱い

炭素固定化の国際上の扱いは、炭素固定リーダーシップフォーラム（CSLF: Carbon Sequestration Leader Forum）¹や日本の内閣府総合科学技術会議²等、様々な主体によって推進されている。しかし、京都議定書、マラケシュ合意、そして IPCC の第 3 次報告書においては、炭素固定化技術に期待する記載内容はあるものの、現状では詳細な運用ルールが定められておらず、実際に削減対策として適用できない。

この状況からの一歩前進として、IPCC（気候変動に関する政府間パネル）の第 20 回総会

¹米国が呼びかけた国際憲章で、温室効果ガス排出量の削減対策として、炭素の分離・回収・輸送・貯留に関する国際協力研究開発の枠組みを整備することを目的とし、米国、日本、EU、インド、中国など 15 の国と地域が参加している(2002 年 7 月)

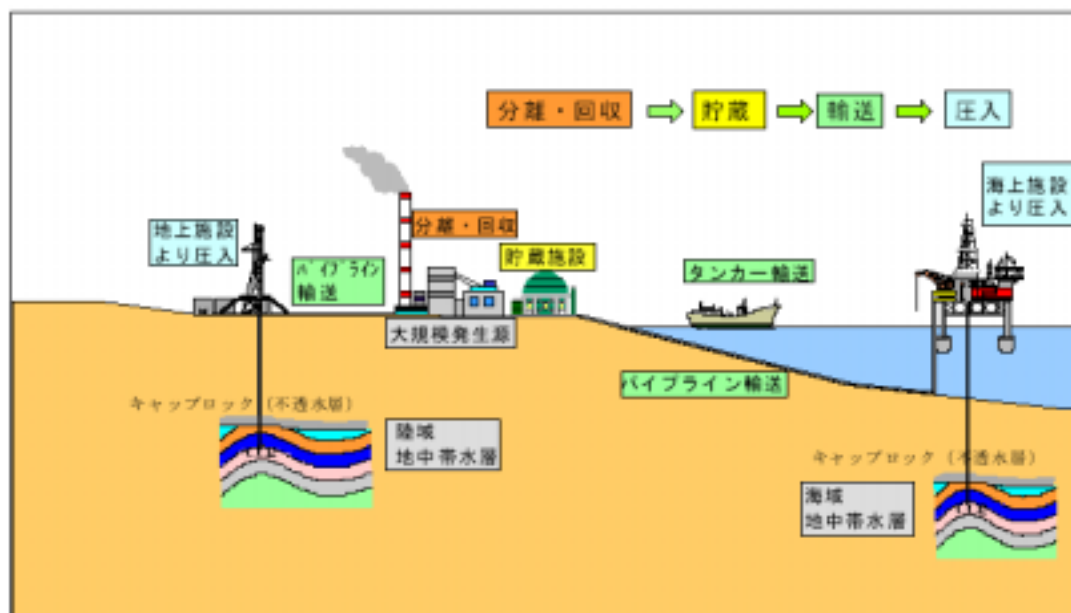
²地球温暖化対策技術研究開発の推進の中で、中長期的な観点から、温室効果ガス削減ポテンシャルが大きい研究開発課題であり今後、特に重点的に取り組む必要性が高い、と位置付けている(平成 15 年 4 月 21 日決定)

(2003/2 開催) で、2005 年に炭素固定化に関する特別報告書を完成させることが合意されている。この報告書により、炭素固定化の適用ルールに関して国際的に議論が進むことが期待され、日本としても炭素固定化を活用できるように積極的に働きかけることが重要である。

2 . 炭素固定化技術とは

炭素固定化は、大規模な二酸化炭素排出源から排出される二酸化炭素を分離・回収し、地中または海中に貯留する一連のプロセスを指す(図1)。発電所や製鉄所といった大規模な二酸化炭素排出源の排ガス(主に燃焼排ガス)から、化学反応や二酸化炭素の物性を利用して二酸化炭素のみの分離・回収を行い、パイプラインや船舶(この場合は液化要)にて貯留地点まで輸送を行う。貯留地点では、輸送された二酸化炭素を地中または海中に圧入し、固定化が終了する。

図表 1 炭素固定化の概念



(出所)METI ホームページ産業技術研究開発プロジェクトの平成12年度主要成果より

現在行われている炭素固定化の事例として、以下の2つがあげられる。

- Sleipner ガス田 (ノルウェー) : 1996 年から沖合いの天然ガス田にて産出される天然ガスより CO₂ を化学吸着法(アミン法)により分離・回収し、100 万 t - CO₂ /年を帯水層へ注入(炭素税の回避: 約\$50/t-CO₂)
- Weyburn EOR^{*} (米国、カナダ) : 2001 年から合成ガス製造より化学吸着法(アミン法)により CO₂ を分離・回収し、5,000t-CO₂/日を 330km パイプラインで輸送し、油田に注入し、石油の増進回収を図る(ただし、注入 CO₂ の 50%が再放出? : 研究中) * EOR(Enhanced Oil Recovery): 石油増進回収

これらの事例では、商業化を実現しつつ、炭素貯留についての研究を行っている重要な事例である。両事例とも、地中での CO₂ の挙動について、モニタリング方法を確立しつつ研究を進めている。

3 . 日本の主な排出源

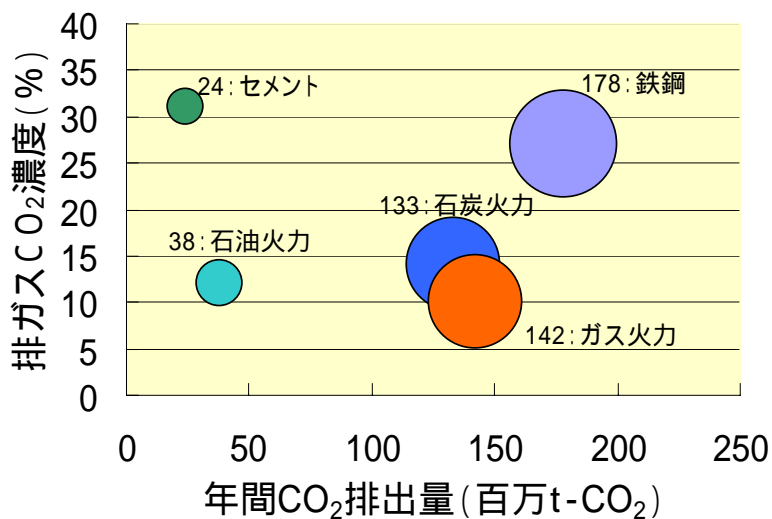
2001 年度における日本の主な二酸化炭素排出源と排出量は、以下の通りである。産業部門の排出量と発電所の排出量を合わせると、総温室効果ガス排出量の約 50%となる。これらの排出源に対する炭素固定化対策が技術的・コスト的に適用可能となると、日本は将来的に大きな削減ポテンシャルを持つことになる。

		排出量 (t-CO ₂)
・発電所	ガス火力:	142 百万
	石炭火力:	133 百万
	石油火力:	38 百万
・一般製造設備	製鉄所:	178 百万
	石油化学コンビナート:	74 百万
	製油所:	43 百万
	紙 / パルプ工場:	29 百万
	セメント工場:	24 百万

(出所) 発電所の排出量は、環境省の「2001 年度(平成 13 年度)の温室効果ガス排出量増減の要因について」と電力中央研究所報告書の CO₂ 排出原単位より算出、一般製造設備は、日本経団連自主行動計画第五回フォローアップ結果の数値を適用(電力含む)

また、排ガス中の二酸化炭素濃度は、分離・回収の効率に影響があり、濃度が高いとコスト効率的となる。例えば図表 2 に示すように、ガス火力発電所は、燃料に天然ガスを使用しているため、排ガス中の二酸化炭素濃度は低い(炭素集約度が低い)が、二酸化炭素の分離・回収を行う上では経済効率性が低下することになる。

図表 2 年間排出量と排ガス中の CO₂ 濃度



4 . 分離・回収方法とその特徴

排ガス中の二酸化炭素は、排出源において排ガス中より分離・回収される。排ガス中の二酸化炭素の分離・回収ための方法（図表 3）としてはいくつかの研究・開発がなされており、既に実用化の段階にあるものもある。中でも化学吸収法は、吸収液にアミン溶液を利用した方法で既に商業化（Sleipner, Weyburn 共に）されており、現時点でも適用可能と考えられる。しかし、二酸化炭素を吸収した液から二酸化炭素を回収するために多くの熱エネルギーが必要である。そのため、分離・回収コストの総額が炭素固定化による削減コスト全体の 70%程度を占めることになり、このプロセスにおける効率改善が課題である。

また、低コストな方法として高分子膜分離法の研究・開発が進められている。高分子膜そのものは高価であるが、回収のためのエネルギーが低く抑えられるため、実用化されれば分離・回収費用の低減が期待できる。

図表 3 分離・回収方法とその特徴

分離・回収方法		特徴
吸収法	化学吸収	CO ₂ 吸収液の化学反応を利用してCO ₂ を分離するものである。吸収されたCO ₂ を取り出す際に多量のエネルギー(蒸気)が必要である。CO ₂ の回収率は90%、純度は99.9%である。
	物理吸収	吸収液により物理的にCO ₂ を吸収し、減圧(加熱)してCO ₂ を回収するものである。CO ₂ の回収率、純度は化学吸収法(アミン法)と同等かやや劣る程度である。
吸着法		CO ₂ を活性炭などの吸着剤と接触させ、その微細孔にCO ₂ を物理化学的に吸着させるものである。CO ₂ 回収率は90%、回収CO ₂ の純度は99%とされている。
膜分離法	高分子膜	高分子膜に対する気体の透過速度の違いを利用してCO ₂ を分離するものである。
	液膜	CO ₂ を選択的に輸送する物質であるキャリアを保持した膜によりCO ₂ を分離するものである。現時点では、基礎的研究の段階にある。
	無機膜	多孔質材料中の透過において表面拡散流を生じるため、これを用いて分離を行う。
酸素燃焼法		化石燃料を酸素で燃焼させ、排ガス中のCO ₂ 濃度を100%近くに高めるものである。CO ₂ 濃度94~95%の排ガスが得られることが実験により確認されている。
昇華法		ガス中のCO ₂ を昇華させドライアイスとして回収するものである。

5. 輸送方法とその特徴

排ガスより分離・回収された二酸化炭素は、その後貯留地まで輸送される。輸送方法としては、排出源と貯留地が近い場合にはパイプラインによる輸送が効率的であり、排出源と貯留地が遠い場合には船舶による輸送が他の輸送手段に比べ効率的である。パイプラインで輸送する場合は、分離・回収した二酸化炭素を超臨界の状態まで圧縮することで輸送効率を上げ、導管の腐食を防ぐ必要がある。船舶で輸送する場合には、分離・回収した二酸化炭素を液化する必要がある、液化を行うコストは無視できない。利用する船舶は、二酸化炭素の物性から専用船の必要はなく、LPG 船の適用が可能と考えられる。

図表 4 輸送方法とその特徴

輸送方法	特徴
パイプライン	排出源と貯留地が近い場合、分離・回収したCO ₂ を超臨界状態(気体と液体の密度が同じになり、互いの区別ができない状態)にして貯留地まで輸送する
船舶	排出源と貯留地が遠い(海外など)場合、分離・回収したCO ₂ を液化し船舶で貯留まで輸送する

6. 貯留方法とその特徴

貯留地まで輸送された二酸化炭素は、地中や海中に圧入される。その方法は、貯留される場所や目的により、図表5のように分類できる。原油回収と炭層メタン回収では、二酸化炭素の貯留と同時に副産物(石油やメタンガス)が得られるため、副産物の利用まで考慮すれば、炭素固定化の費用を低減できる可能性がある。

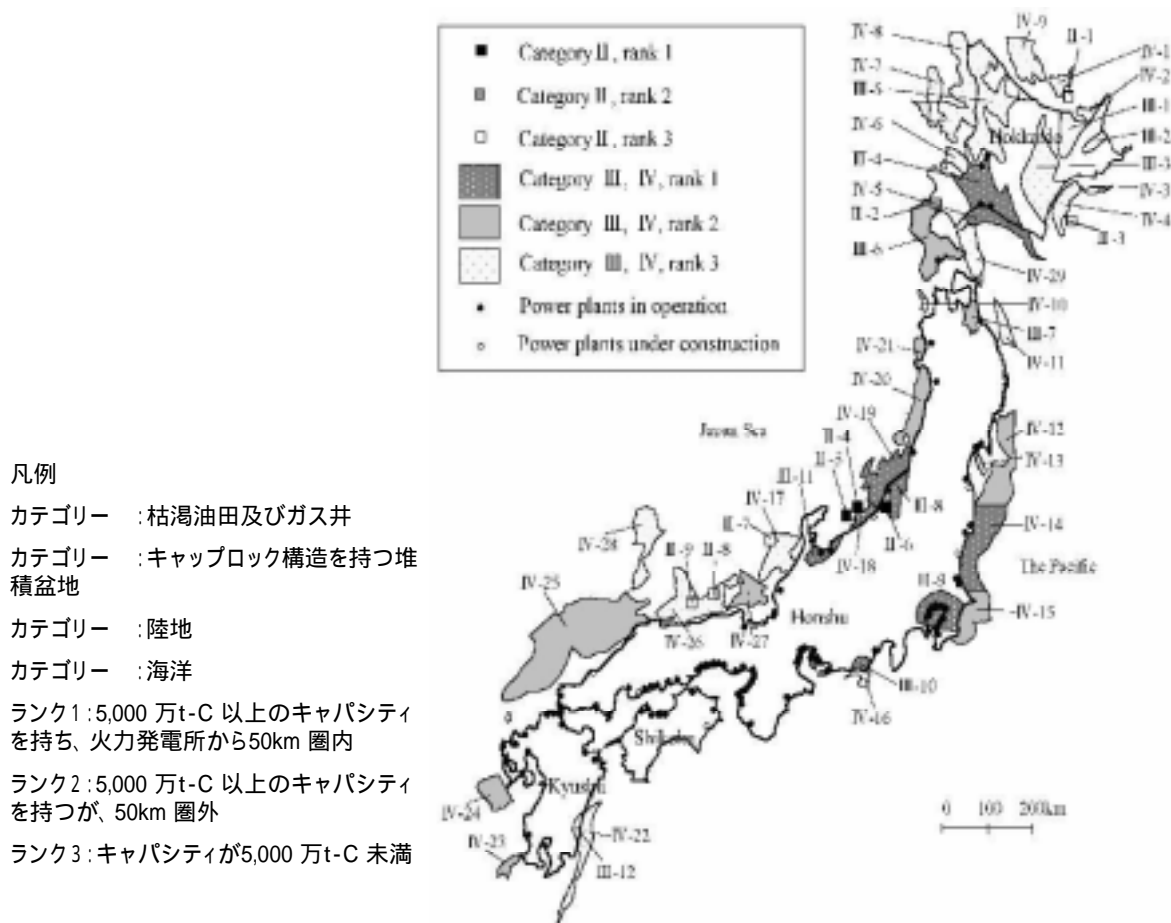
世界における貯蔵能力の推計では、1990 年排出量基準で地中固定のみで約 280 年分と推定されており、炭素固定化による温暖化対策が長期的に利用可能であることがわかる。ただし、地中や海中での二酸化炭素の挙動が解明されておらず、貯留に関する長期的な環境への評価、地震による影響、貯留ポテンシャル、漏洩、モニタリング手法の確立等、技術的に不確実な部分が多数残っている。

図表 5 貯留方法

固定方法		特徴	貯蔵能力(全世界)
地中固定	原油回収	原油の三次回収において油田にCO ₂ を注入し、原油回収を促進する。	733 ~ 2,383億t-CO ₂
	炭層メタン回収	採掘不可能な深層炭層にCO ₂ を吸着させ、同時にメタンを回収する。	1467億t-CO ₂
	枯渇油・ガス井	石油や天然ガスを蓄えていた油田やガス田の貯留能力を利用。貯留能力は実証済である。	油井: 3,667億t-CO ₂ ガス井: 14,667億t-CO ₂
	帯水層	ほとんど変動しない地下の塩水にCO ₂ を溶かし込む。	36,667億t-CO ₂ 以上
海底固定	海洋溶解	CO ₂ を海洋に注入し溶解、拡散させるもの。気体での注入を気体溶解法、液体での注入を液体溶解法と呼ぶ。	36,667億t-CO ₂
	深海注入	海底の窪地にCO ₂ の湖を形成させる。隔離期間は2000年以上と期待される。	
生物固定		植物や藻類、植物プランクトンなどの光合成によって植物体に固定する方法。	地上植物: 44億t-CO ₂ /年

日本における貯留候補地は沿岸部に分布しており、炭層を含まない貯留可能量は 1990 年度における温室効果ガス排出量を基準にすれば約 75 年分と推定されている（図表 6）。このポテンシャル相当の貯留が可能となれば、日本は長期的に有力な温暖化対策措置を手にすることになる。

図表 6 日本の貯留地と可能量



(出所)RITE ホームページより

分類	定義	貯留可能量
カテゴリー1	大規模な既発見の油・ガス田にある油・ガス層及び帯水層	約 20億トン
カテゴリー2	過去に国による基礎試錐が行われ、背斜構造が確認されている帯水層	約 15億トン
小計	確認されているトラップ構造内への貯留可能量	約 35億トン
カテゴリー3	陸地で確認されている堆積盆地内の背斜構造を伴わない帯水層	約160億トン
カテゴリー4	海域の堆積盆地内の背斜構造を伴わない帯水層	約720億トン
小計	通常の帯水層への貯留可能量	約880億トン
合計	日本及び近海におけるCO2地中貯留可能量	約915億トン

(出所)(財)エンジニアリング振興協会

7. 炭素固定化技術の現状と展望

炭素固定化は、技術的には事業化のレベルにある(図表7)が、以前多くの検討課題が山積しているのが現状である。

排ガス中からの二酸化炭素の分離・回収技術では、石油増進事業(EOR: 排ガスからの化学吸収法によるCO₂分離・回収)により商業ベースとして既に確立している。輸送技術

では、EOR においてパイプライン方式が実用化されており、LPG 船の適用など船舶輸送方式も問題はないと考えられる。しかし、地中への注入として EOR が商業ベースで確立しているものの、環境（生物、地下水等）への影響を解明することが先決である。さらに海洋への貯留は、地中への貯留よりも環境への影響が懸念されており、慎重に研究を進める必要がある。

図表 7 炭素固定化技術の適用可能性

		適用	理由
分離・回収			EOR事業化(Weyburn)、スライプナーガス田
輸送	パイプライン		EOR事業化(Weyburn)
	船舶		LPG船の適用
貯留	地中		EOR事業(油田)、スライプナーガス田(帯水層)
	海洋		研究段階

□ : 実用化済み、○ : 可能、△ : 検討要

8 . コストの現状と展望

ここで、現在の炭素固定化技術による二酸化炭素削減のコストに関する試算を行う。具体的ケースとして想定するのは、以下のケースである。

国内炭鉱ケース

国内石炭火力発電所(100 万 kW) パイプライン(直線 50 km : 敷設 100 km) 廃炭鉱

海外枯渇油田ケース

国内石炭火力発電所(100 万 kW) 液化 LPG 船輸送(約 4,300 km : マレーシア) 枯渇油田
天然ガス発電所ケース :

○ のケースで石炭から天然ガス発電所としたケース

国内帯水層ケース :

○ のケースで貯留場所を国内の帯水層としたケース

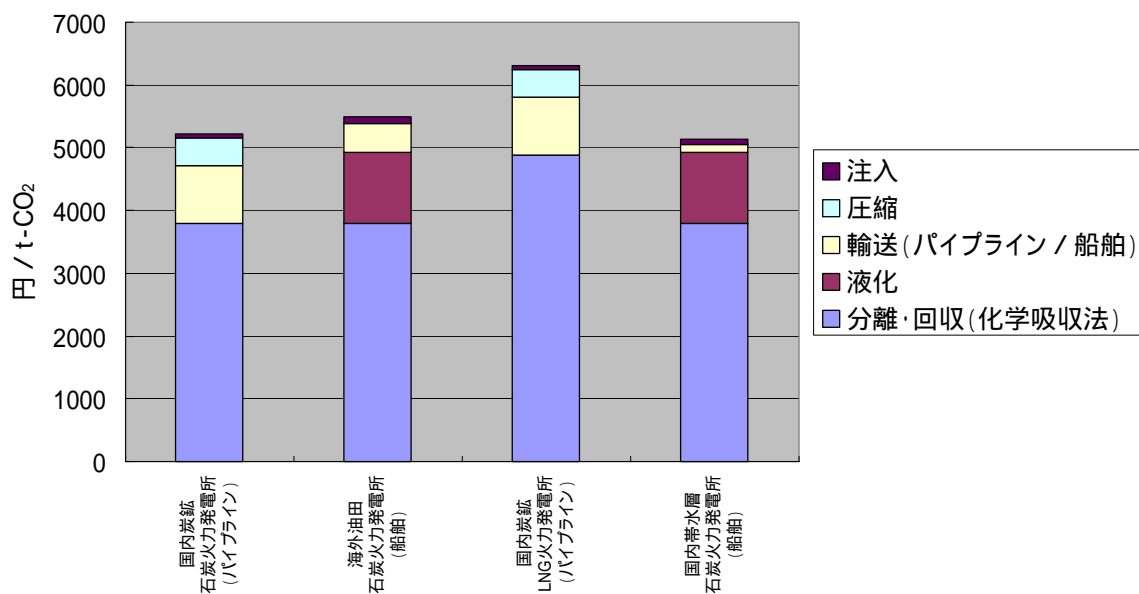
今回特に石炭火力発電所を想定した理由は、当該発電所が二酸化炭素排出規模が大きく、分離・回収技術は化学吸着法が EOR にて実用化されており、発電所が輸送・貯留に適した沿岸部に位置していることである。これらのケース内、○ と △ の二つのケースにおけるそれぞれの想定条件を図表 8 に示す。○ のケースでは、分離・回収された二酸化炭素を LPG 船で輸送するが、現在の LPG 船の積載容量と回収二酸化炭素量から、週 1 便の輸送が必要となると評価している。

図表 8 想定ケースの条件

国内炭鉱ケース				
石炭火力発電所	分離・回収		パイプライン輸送	注入(廃炭鉱)
・発電電力: 100万kW ・排ガス流量: 2,004,000Nm ³ /h ・排ガス中CO ₂ 濃度: 13.2%	・CO ₂ 回収量: 11,224t-CO ₂ /日 ・CO ₂ 回収率: 90% ・回収CO ₂ 濃度: 99.9%		・輸送距離: 100km ・入口圧力: 10.6MPa ・出口圧力: 8.1MPa ・中間昇圧 ・パイプ径: 20インチ	・注入圧力: 15.2MPa
海外油田ケース				
石炭火力発電所	分離・回収	液化	船舶輸送	注入(枯渇油田)
・発電電力: 100万kW ・排ガス流量: 2,004,000Nm ³ /h ・排ガス中CO ₂ 濃度: 13.2%	・CO ₂ 回収量: 11,224t-CO ₂ /日 ・CO ₂ 回収率: 90% ・回収CO ₂ 濃度: 99.9%	・液化圧力: 0.7MPa ・液化温度: -50	・輸送距離: 4,300km ・利用船舶: LPG船 ・積載容量: 78,000m ³ (1便/週) ・長期契約ベース	・注入圧力: 15.2MPa ・陸内輸送なし

(出所)平成 13 年度 NEDO 報告書 CO₂ 分離・回収技術に関する調査研究(RITE/MRI)、平成 4 年度 NEDO 報告書 火力発電プラントからの CO₂ 回収システムに関する調査(II)を元に設定

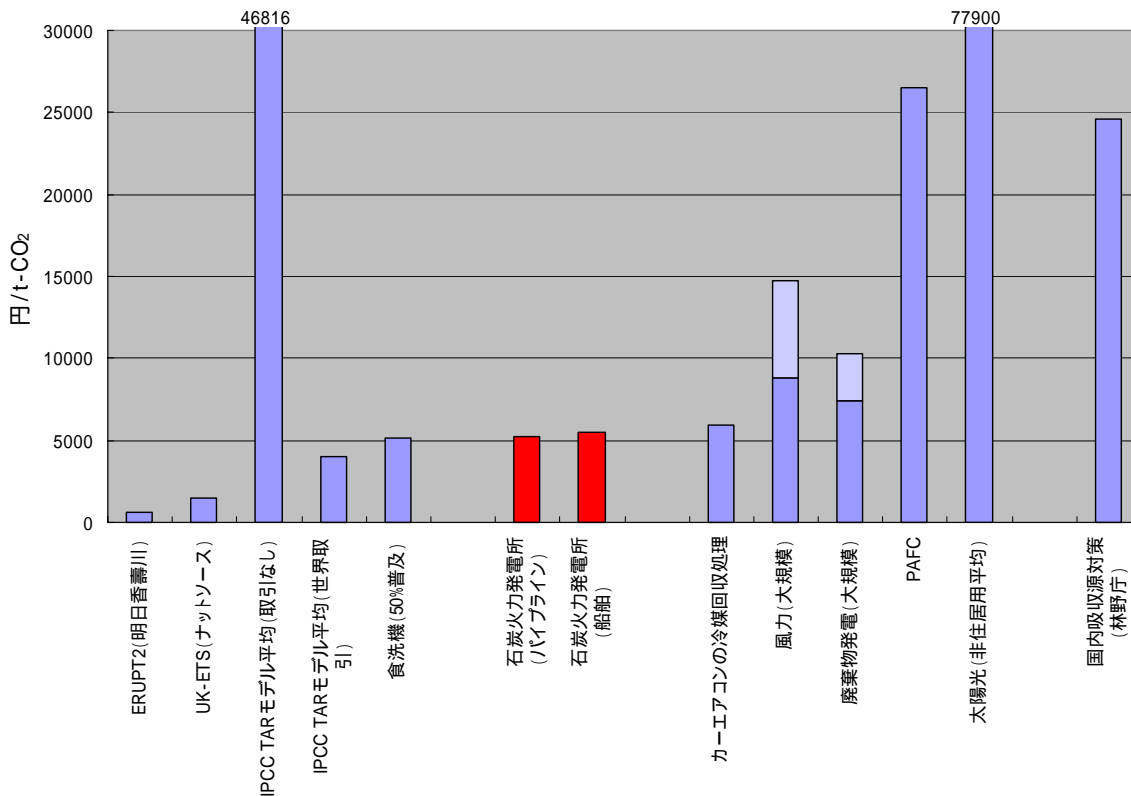
それぞれのケースの費用内訳を、図表 9 に示している。一番費用がかかるプロセスは全ケース共通で二酸化炭素の分離・回収で全体の約 70% を占めておりこの費用削減が導入促進におけるポイントとなる。また、 と の場合はパイプラインを使用するため二酸化炭素の液化の費用が不要となるが、パイプラインの建設コストと輸送のための圧縮コストが必要となる。 の場合は、船舶で輸送可能とするために回収した二酸化炭素の液化が必要となり、液化と輸送(船舶費)を合わせたコストは の場合よりも高くなっている。この輸送コスト削減のためには、排出源に近い貯留場所を選定することが重要となる。さらに、排出源の違いを と で比較すると、ガス火力発電所からの排ガスにおける二酸化炭素濃度が低いため、回収効率が低下して分離・回収費用が相対的に高いことがわかる。



	分離・回収 (化学吸収法)	液化	輸送 (パイプライン / 船舶)	圧縮	注入	合計 (円 / t-CO ₂)
国内炭鉱 石炭火力発電所 (パイプライン)	3791.0		918.3	444.1	67.4	5220.9
海外油田 石炭火力発電所 (船舶)	3791.0	1140.8	461.9		99.6	5493.3
国内炭鉱 LNG火力発電所 (パイプライン)	4889.0		918.3	444.1	67.4	6318.9
国内帯水層 石炭火力発電所 (船舶)	3791.0	1140.8	112.0		99.6	5143.4

想定した と のケースにおける二酸化炭素の削減コストを他の温暖化対策コストと比較する (図表 10) と、炭素固定化による削減コストは、現状では CDM / JI による海外事業や国際排出量取引によるコストより高いが、国内の省エネルギーや新エネルギー対策との比較では同等もしくはそれ以下の水準となっている。このことから、現状の費用構造においても、環境への影響評価や国際ルールの規定がしっかりと行われれば、国内削減対策として実施することは十分に可能であると思われる。

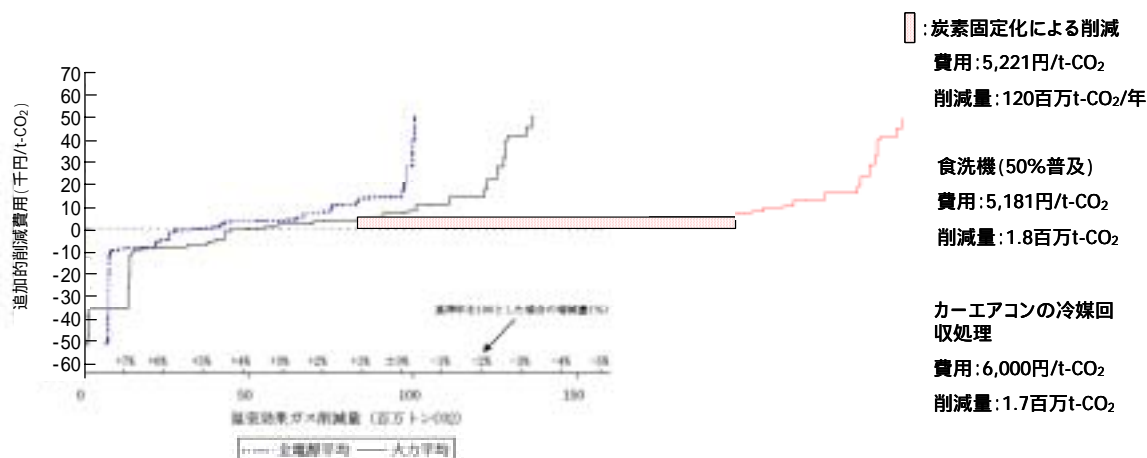
図表 10 温暖化対策コスト比較



(出所)新エネは総合エネ調新エネ部会(2001.6)の報告書より算出。CO₂排出源単位は、火力平均 0.68kg-CO₂/kWhを使用。省エネは環境省の目標達成シナリオ小委員会中間とりまとめ。その他、資料より作成

さらに、温室効果ガスの削減ポテンシャルとコストを合わせて比較すると、他の国内対策に比べて炭素固定化の有効性が明確となる。炭素固定化の削減コストと削減ポテンシャルを日本の限界削減費用曲線に挿入すると、現状の国内対策と同程度の費用をかければ、大幅な量の削減が実現できる可能性がある」と評価される。

図表 1 1 炭素固定化による削減費用と削減ポテンシャル



(出所) 環境省 中央環境審議会地球環境部会 目標達成シナリオ小委員会 「中間とりまとめ」に加筆

このように炭素固定化は、現状でも日本国内の省エネルギーや新エネルギー対策とのコスト競争力があるが、現時点では炭素固定化のルールが明確になっていないため、海外では炭素固定を目的としない EOR 等の付加価値のある事業の実施にとどまり、炭素固定を目的として事業を行うまでには至っていない。将来における炭素固定化による削減コストは、既に商業ベースにある事業の延長線上にある技術を適用するため若干下がるのが考えられるが、技術的にはその改善余地は小さいものとする。しかし、CDM/JI 事業による削減費用や排出量取引価格は将来的には上昇することが予想され、炭素固定化が相対的な費用面からより競争力を持つものと予想できる (図表 1 2)。

図表 1 2 削減対策のコスト見通し

	現状	将来	展望
海外事業・取引	低	増加	低コスト事業から実施されるため、高コスト事業が残る
炭素固定化	中	減少	商業化段階にあり、緩やかな減少が望める
国内省エネ	低～高	増加	技術革新は進むが、低コスト対策から実施される
国内新エネ	中～高	減少	技術進歩により低コスト化が見込めるが、大幅な改善は期待できない

9. 課題

これまで述べてきた炭素固定化の課題を整理すると、次の点があげられる。

- (1) 二酸化炭素貯留による環境への影響：地中や海中の生物や地下水への影響を解明するため、その挙動について研究を推進する必要がある。
- (2) 国際ルールの明確化：現状では、技術の可能性については認識されているが、実用化を促すまでの国際ルールが決まっておらず、国際交渉の場で議論を行い決定して

いく必要がある。IPCC の特別報告書が 2005 年に発行される予定であり、それによって国際的議論が開始されることが期待される。

- (3) モニタリング方法の確立：広域に渡る漏洩等のモニタリングの技術や、長期的な微小漏洩や地震による漏洩のモニタリング方法を確立する必要がある。
- (4) コスト削減：他の対策による削減コストとの比較では一部競争力が認められるものの十分とはいえないため、コスト低減の努力は引き続き必要である。
- (5) 回収エネルギー効率の改善：分離・回収に多くのエネルギーを投入しており、資源の効率的利用、コスト削減の面からエネルギー効率の改善を図ってゆく必要がある。
- (6) 特性に適した固定化システムの選択：排ガスの特性や発生源、貯留地等の特性に適した技術を組み合わせて、最適なトータルシステムを構築するための研究が必要である。

以上の点に留意しながら、中長期的視点から、日本の温暖化対策の切り札としての選択肢の一つとして活用できるように、これらの課題を早期に解決する取り組みが重要である。

まとめ

- 炭素固定化による二酸化炭素貯留可能量は多く、1990 年度における日本の総温室効果ガス排出量の約 75 年分であり、長期的に利用可能である。
- 炭素固定化は、技術的には事業化のレベルにあるが、貯留による生物、地下水等の環境への影響については説明が必要である。
- 炭素固定化による削減コストは、現状では海外事業や国際取引による価格と比較すると高いが、国内の省エネルギーや新エネルギー対策と比較すると同等もしくはそれ以下であり、将来においてはよりコスト競争力をもつことが予想できる。
- これらの特徴を生かして、2013 年以降におけるわが国温暖化対策の切り札の一つとすべく、炭素固定化技術の実用化に注力すべきである。

また日本にとって炭素固定化が削減対策として 2013 年以降に適用できれば、以下の効果も期待できよう。

- 国内対策として、量的 / コスト的に有効な削減手段を持つことになる。
- 海外事業や国際取引での一方的買い手から、対等な立場で交渉ができる（足元を見られることが無くなる）。
- 2013 年以降の国際交渉における戦略に、新たな手段として利用できる。
- 海外での貢献に役立てることができる。

お問い合わせ先：ieej-info@tky.ieej.or.jp