

第 4 章

4

今後の温暖化抑制  
対策に向けて

第4章 今後の温暖化抑制対策に向けて 目次

経済社会研究所 研究コーディネーター 上席研究員 大河原 透	経済社会研究所 主任研究員 永田 豊
経済社会研究所 主任研究員 田頭 直人	研究企画部 主任研究員 西村 嘉晃
狛江研究所 微量物質課題推進担当 上席研究員 朝倉 一雄	経済社会研究所 主任研究員 杉山 大志
経済社会研究所 主任研究員 本藤 祐樹	狛江研究所 大気科学部 上席研究員 横山 隆壽
我孫子研究所 環境科学部 上席研究員 大隈多加志	我孫子研究所 環境科学部 主任研究員 仲敷 憲和
横須賀研究所 エネルギー機械部 上席研究員 森塚 秀人	横須賀研究所 エネルギー機械部 上席研究員 齋川 路之
我孫子研究所 生物科学部 上席研究員 渡部 良朋	我孫子研究所 生物科学部 主任研究員 森田 仁彦
我孫子研究所 応用生物部 主任研究員 立田 穰	我孫子研究所 応用生物部 主任研究員 小林 卓也
我孫子研究所 応用生物部 主任研究員 中屋 耕	我孫子研究所 環境科学部 主任研究員 石井 孝
	狛江研究所 研究調査担当 上席研究員 西宮 昌

4 - 1 温暖化抑制のための制度・政策 .....	56
コラム9：電気事業の抑制対策 .....	61
コラム10：京都議定書を巡る国際動向 .....	62
4 - 2 CO <sub>2</sub> 排出に関する発電方式のLCA .....	63
4 - 3 排ガスCO <sub>2</sub> 回収・海洋隔離・地中処分技術の評価 .....	65
4 - 4 CO <sub>2</sub> 回収型火力発電システムの評価 .....	72
コラム11：CO <sub>2</sub> ヒートポンプの基礎研究と実用化 .....	75
4 - 5 生物・バイオ技術によるCO <sub>2</sub> 固定・資源化技術の評価 .....	76
コラム12：人工衛星による葉面積の計測 .....	80
4 - 6 まとめ .....	81



大河原 透（1982年入所）  
 全国9地域の中長期経済予測、発電所立地が地域経済に与える社会経済影響評価などの研究に従事。現在は温暖化対策に関する経済政策が電力会社経営や日本経済に与える影響を評価する研究にも取り組んでいる。



永田 豊（1987年入所）  
 これまで、日本のエネルギー・電力需要予測、環境税の影響分析、最適電源構成の分析、省エネルギー技術の経済性評価などに従事。



田頭 直人（1992年入所）  
 地球温暖化を抑制するための都市の交通、エネルギーシステム、および都市構造に関する研究に従事。現在は、再生可能エネルギー利用の支援制度に関する調査・分析も行っている。



西村 嘉晃（1992年入所）  
 ダム流域の融雪や貯水池の結氷など、陸・水面の熱収支の研究に従事。現在は環境に関する研究の総合推進業務を担当。

朝倉 一雄（8ページに掲載）



杉山 大志（1993年入所）  
 エネルギーシナリオ分析および政策科学における政策過程分析の2つの手法による温暖化防止政策研究に従事。現在は京都議定書に関する国際交渉や国内対策のあり方など、温暖化対策制度設計に関する研究に取り組んでいる。



本藤 祐樹 (1992年入所)  
主に環境面および経済面からの技術評価に関する研究に従事。これまでに、発電技術の環境対策コスト分析、LCAによる発電技術の評価、産業連関表を利用したLCA手法およびデータベースの開発などを実施した。



横山 隆壽 (1975年入所)  
1980年代後半から、地球温暖化防止技術の研究に従事。特に、火力発電所排ガスからのCO<sub>2</sub>回収技術、火力発電プラントからの一酸化二窒素の排出係数、地球温暖化問題とエネルギー利用などの研究活動を実施。



大隈多加志 (1987年入所)  
現在、地球環境産業技術研究機構 (RITE材) CO<sub>2</sub>貯留研究室 主席研究員として出向中。  
入所以来、高レベル放射性廃棄物地層処分の研究、地熱貯留層評価、圧縮空気貯蔵などの研究に、地球化学の専門家としてなどに従事。1989年からは、CO<sub>2</sub>の海洋隔離、地中隔離に関わる研究に取り組んでいる。

仲敷 憲和 (33ページに掲載)



森塚 秀人 (1981年入所)  
入所以来IGCCフィージビリティスタディ、IGCCの熱効率および動特性解析等に従事してきた。現在は、高温水素分離膜を用いたCO<sub>2</sub>回収型火力発電、ガスタービン高温部品の保守管理等の研究に取り組んでいる。



齋川 路之 (1986年入所)  
圧縮式ヒートポンプの研究開発や新型火力発電システムの評価研究に従事。現在は、自然冷媒を利用したヒートポンプの研究開発、燃料投入型分散型電源による熱電併給システムの適用性評価研究に取り組んでいる。



渡部 良朋 (1988入所)  
微細藻類の光合成機能を利用したCO<sub>2</sub>固定・資源化技術の開発に携わってきた。現在は、微細藻類機能の環境保全技術への適用を図るとともに、バイオマスを利用したCO<sub>2</sub>対策に関する検討を行っている。



森田 仁彦 (1996年入所)  
排ガス中の高濃度炭酸ガスを利用して微細藻類を培養するための光バイリアクター開発に携わってきた。現在は、微細藻類機能の多面的な利用に関する研究に取り組んでいる。



立田 穰 (1981年入所)  
放射性核種の海洋生態系における挙動、海産生物における放射性核種の濃縮係数、海洋生態系における放射性核種の動的移行モデル、同位体比を用いた沿岸海洋生態系によるCO<sub>2</sub>固定量の測定法について研究。1995-1996年 IAEA海洋環境研究所外来研究員。



小林 卓也 (1992年入所)  
酸性降下物の植物影響評価、森林の物質循環に関する研究に従事。現在は、安定同位体比情報を用いた森林における炭素・水収支の解明に関する研究に取り組んでいる。



中屋 耕 (1993年入所)  
緑化植被面における熱収支の解明、レーザー誘起蛍光を利用した植物生理反応推定手法の開発に従事。現在は、森林におけるCO<sub>2</sub>フラックス評価に関する研究に取り組んでいる。



石井 孝 (1990年入所)  
森林植生と降雨流出特性に関する調査研究に従事し、衛星データによる森林植生計測手法を開発してきた。現在、マングローブ林の現存量評価や水循環評価に向けた森林蒸発散量の研究を行っている。

西宮 昌 (8ページに掲載)

## 4 - 1 温暖化抑制のための制度・政策

### 4-1-1 環境税

すでに欧州のいくつかの国で導入されている環境税には、化石燃料の価格を人為的に引き上げることによりその節約を促すことと、得られた税収で所得税や法人税など一般的な税を軽減することにより経済全体の効率性を高めるといふ、2つの目的がある。しかし、図4-1-1に示すように、ある国だけが環境税を導入すると、製造に多くのエネルギーを必要とする鉄鋼などの生産物価格が上昇して国際的競争力が低下することから、環境税を導入したほとんどすべての国において、何らかの減免措置が設けられている。以下、当所の長期経済予測システムを用いて、日本で環境税を導入した場合の経済的影響について、このような減免措置の有無や、税収の使途、課税方式の違いなどを考慮しながら定量的に分析した結果を紹介する。

試算したケースの概要と結果を表4-1-1に示す。環境税を導入しない参照ケースでは、2010年のCO<sub>2</sub>排出量は90年比13.1%増となり、経団連の自主行動計画や省エネ基準の強化だけでは、国が目標とするCO<sub>2</sub>排出量の安定化（2010年の排出量を90年水準に抑制）は達成

できない。環境税を2003年に導入して安定化を達成するためには、2010年に炭素1トン当たり33,000円程度という非常に高い税が必要であり、同年の実質GDPは参照ケースより0.83%減少する（環境税導入基準ケースの場合）。税収の大きさからみると、同じCO<sub>2</sub>削減目標を達成する場合、減免措置がない場合よりある場合の方が、所得税減税より公共投資拡大の方が、炭素含有量比例の課税（炭素税）よりエネルギー量比例の課税（エネルギー税）の方が多くの税収を集めなくてはならず、CO<sub>2</sub>削減という観点からは非効率であると言える。これは、減免措置はエネルギーに対する価格弾力性が大きく、かつ炭素税によるエネルギー価格の上昇率が大きい製造業におけるCO<sub>2</sub>の削減を鈍らせること、公共投資拡大はセメントや鉄鋼など素材産業への波及が大きいため、産業構造の“脱CO<sub>2</sub>化”を遅らせること、エネルギー税はCO<sub>2</sub>排出原単位が小さい天然ガスなどへの燃料転換のインセンティブを持たないこと、などの理由による。以上のことから、環境税を導入する場合は炭素含有量に比例して課税し、減免措置は設けず、税収は公共投資に支出する場合に最も経済的ダメージが少ないといふことができる。このときの実質GDPの減少分（約2兆円）を多いとみるか少ないとみ

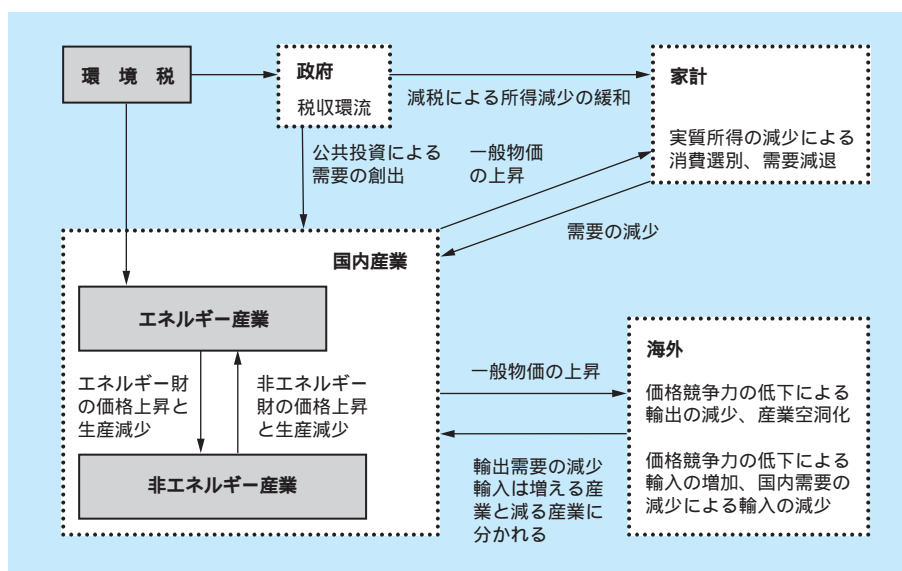


図4-1-1 環境税の国内経済への波及経路

表4-1-1 試算ケース名とその設定条件および試算結果

ケース名	ケースの設定条件			試算結果（2010年）		
	課税方式	税収還流方式	減免措置	税率	税収 (兆円)	参照ケースからの 実質GDPの変化率
参照ケース	課税なし					
環境税導入基準ケース	炭素含有量比例	所得税減税	なし	33,000円/t-C	9.48	- 0.83%
減免ケース	炭素含有量比例	所得税減税	あり*1	50,600円/t-C*2	11.96	- 0.92%
公共投資ケース	炭素含有量比例	公共投資拡大	なし	34,700円/t-C	9.97	- 0.28%
エネルギー税ケース	エネルギー量比例	所得税減税	なし	590円/GJ	12.80	- 1.03%

\*1 製造業の税率を他の部門の半分に減免する

\*2 非減免部門の税率

るかは意見が分かれるところであるが、環境税によるダメージは産業によって大きく異なっているため、その導入に当たっては、被害が大きい産業の抵抗が避けられないと思われる。

#### 4-1-2 排出権取引

気候変動枠組み条約締約国会議（COP）では温暖化対策のために、CO<sub>2</sub>排出権取引などの柔軟性措置を用いることを合意しており、今後の国際交渉では、国際排出権市場をどのように設計するかが重要な討議事項となるであろう。

排出権取引には、COPで検討される国際取引、一部の国で導入が始まっている国内取引など、様々な形がありうるが、取引のメカニズムは、国際取引でも国内取引も基本的には同じで、国内取引を例に取り、基本的な仕組みをはじめに概観しよう。

企業や団体に与えられる排出枠の設定は、経済的利害に直接絡むため、大きな対立点になるが、排出枠ないしは排出削減目標の設定が、取引を行うための前提条件になる。排出枠は、一般的には基準年の排出量より少なく、取引対象年の排出量と排出枠の差が排出削減目標量となる。この削減を行うためには、当然ではあるが、努力が必要で、費用もかかる。企業が保有している技術には多様性があり、排出削減を低い費用で達成できる企業、高い費用を要する企業が存在する。

このとき、国全体の経済効率を高めるという観点からは、排出削減費用の高い企業が目標を達成するために、自ら保有する削減技術のみで対応するのは合理的でなく、安い費用で削減を行いうる企業の技術を借りて排出削減に当たるのが望ましい。排出権市場が存在するならば、

排出権の交換により、異なる削減技術を市場で交換することができる。市場で成立する排出権価格が与えられたとき。それよりも高い費用をかけて排出削減を行う企業はない。排出権価格より安い費用で削減できる企業が、排出権の売りに回り、買い方も、売り方も互いに得をするというのが排出権市場である。

既に、デンマークでは発電会社を対象にCO<sub>2</sub>排出権の割り当てを行い、発電会社間でCO<sub>2</sub>排出権取引を行う制度が2001年1月より実施に移されている。さらに英国においては、産業全体を視野に入れたCO<sub>2</sub>排出権の国内取引が、英国で2002年4月から実施されることになっており、産業界との合意も成立し、現在、施行関連法案が国会で審議されている状況にある。そして、欧州連合では、2005年の域内取引の実施に向け、取引の概念設計の調整に入っている。

京都議定書を批准すれば、わが国も排出権の国際取引に参加することになり、国内にも排出権市場が創設されることになる。また、経団連が検討するという排出削減実績の登録機関ができれば、利潤動機で排出権取引所を開設する業者が出てくるだろう。

ここでは国内排出権取引が始まり、電力産業内で排出権取引が行われる事態を想定し、どのようなことが起きるかを実験により検討した当所の研究を紹介する。

実験では、9つの仮想電力会社を設定し、当所職員がプレーヤーとしてネットワーク上で、電力と排出権の取引を行った。これは、CO<sub>2</sub>が発電を行う際に生み出されるマイナスの価値を持った副産物であり、この外部性が排出権というかたちで内部化されたとき、主生産物である電力の生産にも影響が及ぶことに着目しての実験である。実験は、仮想状況を設定したものであり、実験で設定した数値、実験より得られた数値に定量的な意味は

ない。

実験では、コンピュータネットワーク上に電力と排出権の会社間取引を扱う2つの市場を設けた。仮想電力会社は、電力需要の不確実性に直面するなかで、ピーク期、オフピーク期の電力需要を満たすように、発電設備の形成・運用、会社間電力取引・排出権取引に当たる。終了期間を事前に通知しない多期間取引、電力取引における空間的な取引費用なども導入した。仮想各社への排出権の割り当ては、たとえば、2008年から2012年の5年間については、全社の発電あたりの排出原単位を、1990年比20%減とし、これを排出量比例と発電量比例の実績値で各社に配分する方式を採用した。なお、燃料費や資本費、顧客に販売する電気料金は実験期間を通じ、便宜的に一定に保った。

これら仮想電力会社の行動原理と市場取引の構造を図4-1-2に示した。

各仮想会社がCO<sub>2</sub>排出量制約と電力供給義務制約に従うとき、各社が利益の最大化を図るために、会社間でなされる電力取引とCO<sub>2</sub>排出権取引、各社の発電設備の形

成と運用にあたる実験を2回行い、取引量や価格の変動を確認し、実験参加者の成績評価と市場が産み出す成果について評価した。また実験を通じ、不確実性を伴う電力需要に直面する電力会社が、供給義務制約のもとで、異なる費用構造を持つ発電（排出削減）技術の組み合わせ、どのように対応しうるかなどを確認した。さらに、両市場で設定した取引ルールや不遵守罰則金がCO<sub>2</sub>排出権と電力の取引結果（数量、価格）などに与える影響も評価した。取引実験の結果については、1回目と2回目の排出権取引の結果を図4-1-3、図4-1-4に示した。

1回目の実験では、排出権、電力価格は初期段階での緩やかな上昇、中間段階での安定を経て、上昇に転じた。一方、2回目の実験では、初期段階の安定を経た後、一転して低下に転じた。1回目の実験では、仮想電力会社全体で排出目標が達成できなかったのに対し、2回目の実験では、新規電源の開発費用は要したが、仮想電力会社全体で排出目標は達成することができた。

2つの実験の基本的な差異は、実現した電力需要の規模と発電設備の投資規模の差にある。1回目の実験では

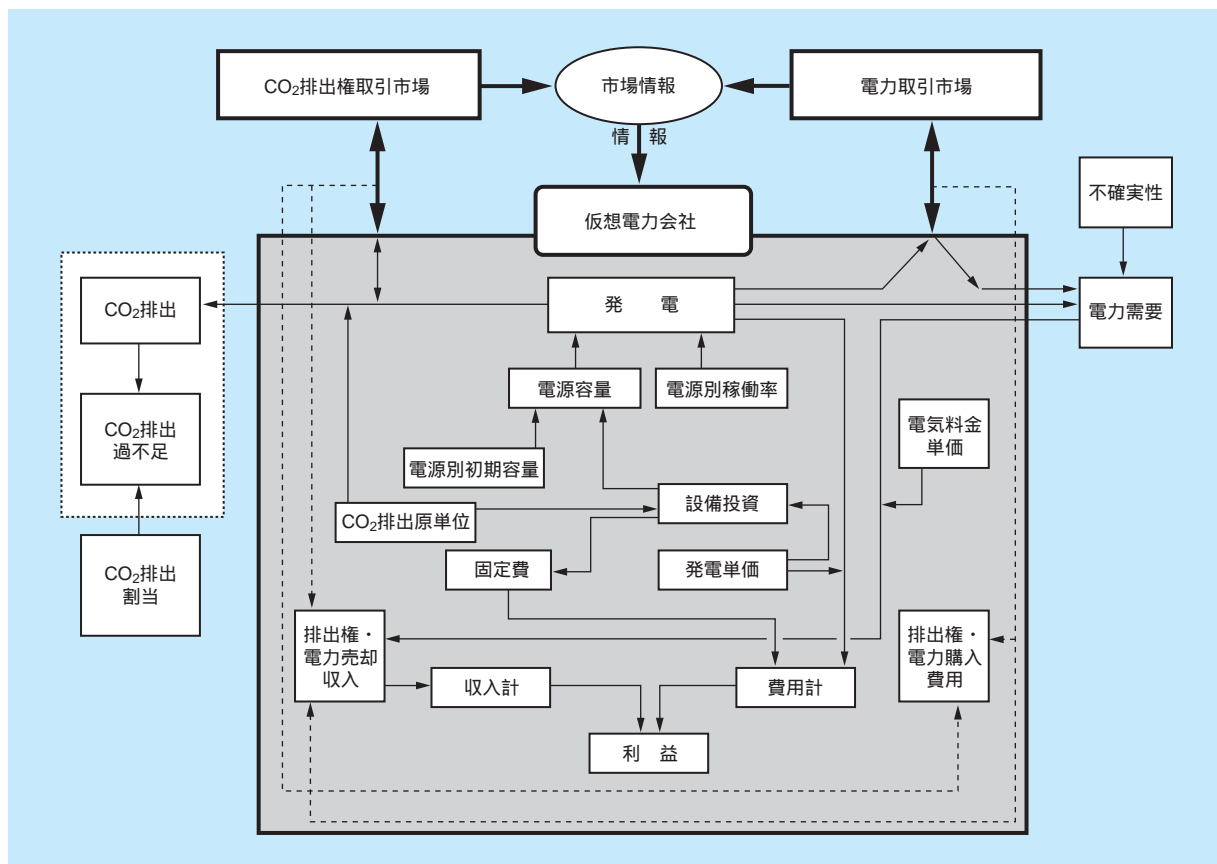


図4-1-2 仮想電力会社の行動原理と市場取引の構造

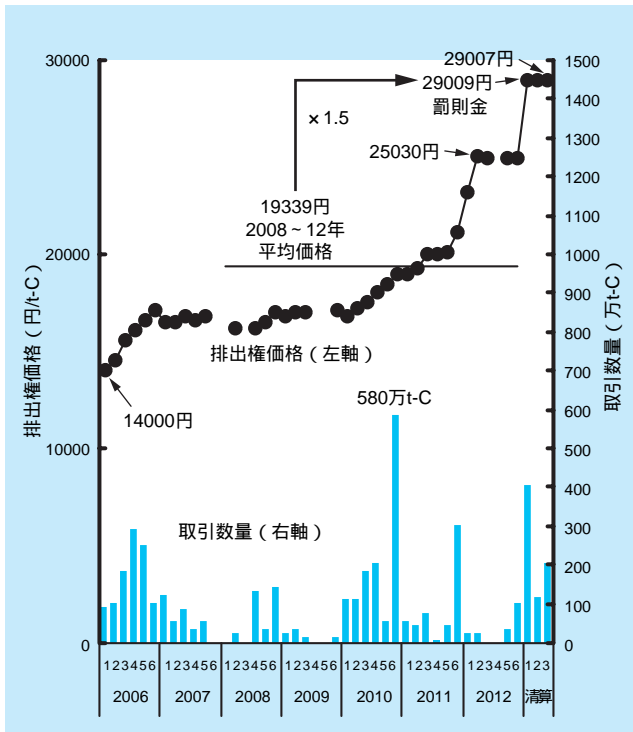


図4-1-3 第1回実験の排出権取引市場

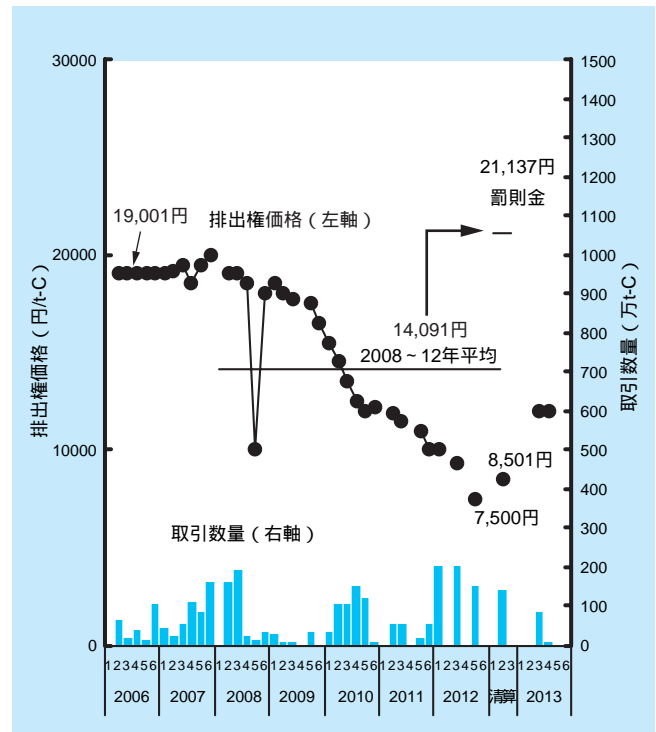


図4-1-4 第2回実験の排出権取引市場

電力需要の規模は2回目に対して約5%大きかったが、発電の設備投資は小さかった。電力産業のように需要を受身とする産業にとっては、需要想定を正確に行い、対応する設備投資を適切に行うことが重要であるが、1回目の実験では発電設備の供給予備力が少なかったことが、電力価格と排出権価格の高騰を招いていた。また、2回目の実験では、より多くの原子力発電が早期に導入されたことが、CO<sub>2</sub>の排出抑制に貢献し、結果として排出権の抑制に寄与した。

実験で与えた2008年から2012年の排出目標は電気事業が掲げている自主行動計画に対応するものであるが、目標の達成には向け原子力の導入が果たす役割は大きいことが実験を通じて確認することができた。

また、不遵守罰則金の導入形態が取引価格に大きな影響を与えており、この導入方式は排出権市場の制度設計を考えると、重要なポイントとなることが明らかになった。

### 4-1-3 グリーン証書取引システム

温暖化抑制対策の一つとして、太陽光、風力等の再生可能エネルギー利用の重要性が高まっている。この再生

可能エネルギー利用の促進策として、近年注目されているのが「グリーン証書取引システム」である。「グリーン証書」とは、再生可能エネルギーを用いて発電された電力の発電量等を証明するために発行される証書である。グリーン証書取引システムでは、この証書に対する取引が行われる。すなわち、グリーン証書取引システムは、再生可能エネルギーを用いて発電された電力に対して、電力自体の価値とは別に、グリーン証書による価値を与える。

図4-1-5を用いて、一般的なグリーン証書取引システムの概略を説明する。発電事業者が再生可能エネルギーを用いて発電した場合、まず電力を一般の電力市場に販売する。次に、発電事業者は、グリーン証書を発行する組織に発電量を報告し、その発電量を証明するグリーン証書の発行を受け、証書をグリーン証書取引市場に販売する。すなわち、再生可能エネルギーにより発電された電力は、電力とグリーン証書の二つから対価を得る。ただし、このシステムが成立するためには、グリーン証書に対する需要が必要となる。第一の需要は、政府等が、再生可能エネルギーによる発電を促進するために、電力供給事業者、あるいは需要家に、グリーン証書の一定量の保有義務を課すことにより発生する。この義務制度は、

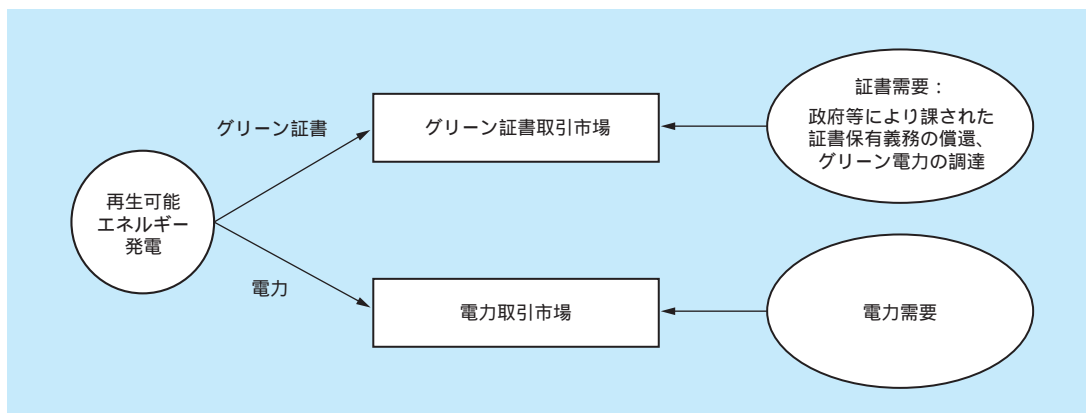


図4-1-5 グリーン証書取引システム

一般にRPS (Renewable Portfolio Standard) と呼ばれる。保有義務の対象が電力供給事業者の場合、事業者は電力供給量の一定割合に相当するグリーン証書の保有義務が課される。義務の対象が需要家の場合、需要家は電力消費量の一定量に相当するグリーン証書を購入しなければならない。

第二の需要は、「グリーン電力制度」からの需要である。需要家が通常の電気料金に加えて、自発的に、一定額、あるいは電力消費量等に比例した額を支払い、電力供給事業者がその金額を、再生可能エネルギーを用いた発電設備の建設、助成、あるいは再生可能エネルギーにより発電された電力の調達等に用いる制度を、グリーン電力制度という。すなわち、需要家にグリーン電力を提供している事業者が、グリーン電力の調達のために、グリーン証書を購入する。

グリーン証書取引システムの大きな長所の一つは、再生可能エネルギーの地理的偏在性に起因するコスト上昇の抑制効果にある。例えば、風力発電は立地場所の風力の強さ、安定性により、発電コストが大きく異なるので、発電コストを抑制するためには、適地において発電を行うことが重要である。近辺に適地が存在しない供給事業者が、風力発電による電力を調達する場合、適地に存在する風力発電事業者等も参加しているグリーン証書取引市場で証書を購入することにより、調達コストを抑制することが可能となる。したがって、グリーン証書取引システムは、出来る限り広い地域で実施した方が、コスト

抑制効果が高い。

実際に行われた事例としては、世界初のグリーン証書取引システムとして、1998年より2000年まで実施されたオランダの「グリーンラベルシステム」が挙げられる。「グリーンラベル」とは、1Mh毎に再生可能エネルギーにより発電された電力に付与されるグリーン証書である。オランダでは、1996年にエネルギー事業者連合が、政府と2000年末までに1700GWh (1995年における大規模需要家を除く供給量の約3%) を発電するという目標に合意し、この合意目標が、各電力供給事業者に割り振られた。供給事業者は、この割当量を達成するために、グリーンラベルシステムを利用した。さらに、オランダでは前記したグリーン電力制度も実施されており、この制度からの証書需要も存在した。グリーンラベルシステムは2000年末で終了したが、現在は、新たに政府によるグリーン証書取引システムが導入されており、グリーン電力のみが証書の需要となっている。

その他、欧米各国、オーストラリアでも様々な取組みが行われている。また、わが国でも、経済産業省総合資源エネルギー調査会新エネルギー部会新市場拡大措置検討小委員会において、再生可能エネルギーによる発電を促進するためのさまざまな施策が議論されており、グリーン証書の保有義務およびグリーン証書取引システムは、施策の有力候補として挙げられている。小委員会は、2001年内に報告書を取りまとめる予定であり、今後の展開に注目していく必要がある。



## コラム9：電気事業の抑制対策

電気事業は、地球温暖化問題を経営課題の最重要課題の一つに位置付け、CO<sub>2</sub>の抑制対策に自主的、積極的に取り組んでいる。このため、毎年、1996年に策定した「電気事業における環境行動計画」のチェック＆レビューを行い、結果を公表している。この環境行動計画の中で電気事業は、CO<sub>2</sub>削減目標として「2010年度のCO<sub>2</sub>排出原単位を1990年度に比べ20%程度低減する」を掲げている。具体的には、CO<sub>2</sub>排出原単位の1990年度の実績は0.42kg-CO<sub>2</sub>/kWhであったので、2010年度の目標値を0.3kg-CO<sub>2</sub>/kWh程度と設定している。現在、原子力発電、LNG火力発電および水力発電の導入、火力発電所の熱効率向上などにより、2000年度のCO<sub>2</sub>排出原単位は0.37kg-CO<sub>2</sub>/kWhにまで低減されているが、2010年度の目標達成に向けて一層の対策強化が必要となっている。

電気事業は、環境行動計画で設定したCO<sub>2</sub>削減目標を達成するため、電気の供給面および使用面での対策に取り組んでいる。

電気の供給面の対策では、CO<sub>2</sub>を排出しない原子力発電の推進を中心に、LNG火力発電の導入拡大、水力・地熱・太陽光・風力など自然エネルギーの開発・普及を進めている。電力設備の効率向上を図るため、複合発電の導入や石炭火力の高効率化、高圧送電による送配電ロス率の低減などに取り組んでいる。

電気の需要面の対策では、省エネルギー対策とし

て、ヒートポンプなど高効率活用・省エネルギー機器の開発・普及、未利用エネルギーの活用、蓄熱システムなどの普及・促進による負荷平準化の推進などを行っている。これらの対策の中で、特に原子力発電の導入を中心としたエネルギーのベストミックスによるCO<sub>2</sub>排出抑制効果が大きいことが示されている。

当所は、電気事業のCO<sub>2</sub>抑制対策の実践に貢献するため、様々な分野で地球温暖化対策に関連する研究課題を展開している。電気の供給面での主要な対策である原子力発電については、経年炉対策、高燃焼度燃料など軽水炉発電の経済性向上、バックエンド対策、原子力発電の信頼性向上に関する研究を進めている。自然エネルギー発電については、太陽光・風力発電の導入技術、高温岩体発電技術の開発などを行っている。化石燃料発電については、ガスタービン超高温化技術など火力発電の高効率化、石炭ガス化複合発電技術や燃料電池発電技術の実用化研究を進めている。電気の需要面での対策として、住宅・ビルの省エネ革新技術、リチウム二次電池によるエネルギー貯蔵技術などの開発を行っている。また、これらの短期的なCO<sub>2</sub>抑制対策技術の開発を支えるため、当研究所は温暖化現象の予測・影響評価や環境政策分析など、中・長期的な研究課題にも積極的に取り組み、電気事業の温暖化抑制対策技術の開発に総合的に取り組んでいる。

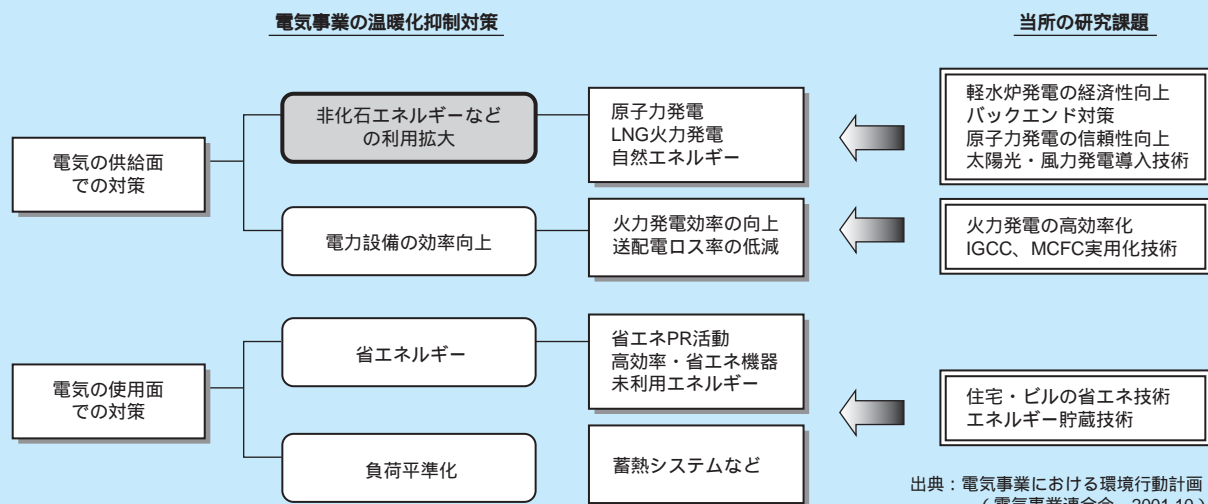


図1 電気事業の温暖化抑制対策と当所の研究課題

## コラム 10：地球温暖化問題に関する政策科学研究

地球温暖化防止京都会議（正式名称は気候変動枠組み条約第3回締約国会議）は1997年12月に開催され、京都議定書がまとめられた。京都議定書の特徴は先進国に課せられた「厳しい数値目標」と、その達成のために認められた「柔軟性」である。厳しい数値目標とは、2008年から2012年までの平均で、1990年水準の排出量に比べて、日本は6%、米国は7%、EUは8%削減する、というものである。「柔軟性」には3つある。第1が「京都メカニズム」と総称されるもので、これには排出権取引、共同実施およびクリーン開発メカニズムの3つがある。第2は植林などによるCO<sub>2</sub>の吸収で、吸収源、シンク、土地利用および森林活動（LULUCF）といった呼び方をされている。第3はバスケット方式と呼ばれるもので、CO<sub>2</sub>だけでなく、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、HFC、PFC、SF<sub>6</sub>といった計6種類の温室効果ガス排出量の合計を対象とするというものである。

「厳しい数値目標」に関してはよく知られている。仮に無対策時に排出量が年率1%で伸びるとすれば、2010年までには1990年に比べて20%以上排出が増えることになり、6%削減とはこの「なりゆきケース」に比較して26%という大規模削減を意味する。これは容易ではない。

このような厳しい目標が先進諸国に受け入れられた背景に「柔軟性」の確保があった。ただしこれらは原則として認められたものの、それが実際にどのような制度設計につながり、結果としてどの程度の費用対効果および規模を持つものになっていくか、その運用則については、不透明な点が多かった。これがブエノスアイレスにおける1998年のCOP4以降、今日まで議論され続けている。COP6ではこれに関する政治合意が成立し、2001年11月のCOP7ではさらに法文書を採択して、運用則を確定することを目的としている。

当所では、国際交渉の動向を把握する一方で、初めはエネルギーシステム分析（2～30）後には政策科学の方法論（31～77）によって分析し、学術誌や業界誌・新聞などを通じて政策提言活動を行ってきた。これについて紹介しよう。

\* \* \*

京都議定書の最大の「武器」は、数値目標を法的に設定したことだ。これによって、各国は批准にあたり、向こう10年の排出削減計画を整備し、それに対応した法制度整備を行い、政策措置を打つことになる。これは温暖化防止政策を押し進めようとする官民にとっての強力な足がかりになる。問題への関心が高まり、対策推進に利益を見出す企業が生まれる。政府はこの動きにさらに呼応する。温暖化防止へ向けて歯車が回り始める。

他方でこの数値目標は「野心的」に過ぎたこれが議定書の最大の欠陥となった。数値目標は技術的に真剣な検討をすることなく政治的勢いだけで決まった。日本はこれまで増加し続けたCO<sub>2</sub>排出を、ほぼ同じペースで減少させることになっているが、本当に可能だろうか。

政策科学では、環境条約における数値目標の性格やその国内政策との関連についての詳しい分析がなされている。京都議定書に関する国際交渉および国内制度設計の在り方は、このような分析から得られるものが多い。

当所ではこれを行ってきた。中でももっとも重要な成果は、京都議定書の「遵守システムの理論」ひらたく言えば「数値目標未達成の場合に罰則を設けるか否か？」という議論である。

民主主義国家の政府には、基本的にCO<sub>2</sub>を制御する能力は無い！ 環境条約に関する政策科学の知見は衝撃的である。しかし、事実認識として正しい。政府は計画を立てたり政策を打つことはできるが、その達成を確実なものにすることはできない。CO<sub>2</sub>削減のためにこれまで経営や生活の前提としてきたコストの在りようが大きく変わるとなると、企業や個人レベルでみれば異議を唱えるところがたくさんでてくる。問題は経済的というより政治的である。さまざまな利害を調整して排出に関する“経済構造を改革”していくことは政治的に難しい。国の総排出量の結果を保証することは政府の能力を超える。

このため数値目標達成には高い不確実性がつきまとう。しかしなお、京都議定書はその達成を謳っている。議定書は基本的には出来ない約束をしている。この欠陥をカバーすることが議定書運用則づくりの要諦である。

このことを理解していない議論が横行している。「数値目標に達しない国を罰しよう」という意見がある。しかし、主権国家を罰で追い詰めたり実際に罰したりするということは大変なショック療法であって、政治的にも経済的にも大変な混乱をもたらす。これに耐えられない国は議定書から離脱してしまう。もし議定書に留まっても、そのような罰があれば、決して野心的な目標を掲げないようになる。これでは温暖化防止政策の推進が停滞してしまう。現在の国際交渉では環境条約に前例のない厳しい罰則を設けようとする主張が強い。このままでは京都議定書はうまく立ち行かない。過去の環境条約に学び、京都議定書に関する国際交渉において、どのような政策判断が地球環境保全のために適切かを分析し、提言する。これが当所における政策科学研究である。

## 4-2 CO<sub>2</sub> 排出量に関する発電方式のLCA

### 4-2-1 はじめに

我が国のエネルギー政策の立案において地球温暖化の視点は重要である。当所では、地球温暖化の観点からライフサイクルアプローチによる発電技術の評価を行ってきた。発電に伴うCO<sub>2</sub>排出量を考えるとき、発電燃料が燃焼する際に排出されるCO<sub>2</sub>のみを思い浮かべてしまいがちである。しかし、実際には、発電燃料の生産や輸送、発電所の建設などに伴いCO<sub>2</sub>が排出されていることにも着目すべきである。原子力や太陽光発電においても、ウラン燃料の製造や太陽光電池の製造時にCO<sub>2</sub>が排出されている。一般に、資源の採取から、製造、使用、廃棄に至るすべてのプロセスを踏まえて環境負荷を評価する方法は、広くはライフサイクルアプローチ（LCA）と呼ばれている。

### 4-2-2 ライフサイクルアプローチ

地球温暖化という観点から発電技術の評価する場合には、1kWh（送電端）あたりのライフサイクルCO<sub>2</sub>排出量(式1)が、指標として有効である。これは、発電所の耐用年数において排出される温室効果ガス量を、その期間中の総発電量(送電端)で割ることで求められる。CO<sub>2</sub>以外の温室効果ガスは、GWP（地球温暖化ポテンシャル）を用いてCO<sub>2</sub>量に換算される。ライフサイクルにわたり排出される温室効果ガスは、発電燃料の燃焼による直接排出、設備建設、設備運用、設備解体に伴う間接排出の4つに大きく分けられる。このうち、発電所などの設備建設に伴うCO<sub>2</sub>排出量の推計が最も煩雑である。一般に、ライフサイクルからの排出量を推計するためには、そのライフサイクルに含まれるプロセスをひとつずつ検討する手法（積み上げ法）が採用される。しかし、発電システムのように多種多様な製品で構成されている設備の製造および建設のプロセスをひとつずつ把握するのは極めて困難である。そこで、設備の製造および建設に伴うCO<sub>2</sub>排出量については、産業連関表を用いて推計する

手法（産業連関法）が有効である。本研究では、積み上げ法と産業連関法の長所を生かした融合手法を利用して、ライフサイクルにわたるCO<sub>2</sub>排出量（LC-CO<sub>2</sub>）を推計している。

ライフサイクルCO<sub>2</sub>排出原単位[g-CO<sub>2</sub>/kWh(送電端)]

$$= \frac{(\text{発電燃料} + \text{設備建設} + \text{設備運用} + \text{設備解体})[\text{g-CO}_2]}{\text{耐用年間の発電電力量(送電端)}[\text{kWh}]} \quad [\text{式1}]$$

### 4-2-3 検討対象とライフサイクルの定義

対象とした発電技術を表4-2-1に示す。既存の発電技術である火力、原子力、水力、地熱と、新エネルギーの代表である太陽光、風力を対象とした。基準ケースとして、我が国の平均的な技術レベル（熱効率など）を想定した。また、発電燃料の生産や輸送などのプロセスについても我が国の現状を反映している。例えば、輸入に大きく依存している化石燃料やウラン燃料の生産については、海外での生産活動の実態を反映している。ただし、現状を基準とした前提条件が変化する場合、その変化がLC-CO<sub>2</sub>へ与える影響についても分析している。なお、温室効果ガスとしてはCO<sub>2</sub>とメタンを対象としている。メタンの温室効果はCO<sub>2</sub>の21倍（積算年数100年）としてメタンをCO<sub>2</sub>に換算している。

電力のライフサイクルは大まかには図4-2-1のように表現できる。各段階におけるエネルギーや消耗資材など

表4-2-1 検討対象とした発電技術

	出力 (MW)	設備利用	熱効発電	所内	耐用年数 (年)
石炭火力	1000	70%	39.6%	6.9%	30
石油火力	1000	70%	38.4%	5.7%	30
LNG火力	1000	70%	38.9%	4.3%	30
LNG複合	1000	70%	44.6%	2.2%	30
原子力 <sup>[1]</sup>	1000	70%	33.7%	4.3%	30
水力 <sup>[2]</sup>	10	45%		0.7%	30
地熱 <sup>[3]</sup>	55	60%		7.0%	30
太陽光 <sup>[4]</sup>	0.003	19%		0.0%	30
風力	0.3	20%		10.0%	30

[1] 沸騰水型軽水炉（BWR）[2] 中規模ダム水路式 [3] ダブルフラッシュ方式 [4] 家庭屋根設置型、多結晶シリコン太陽光電池

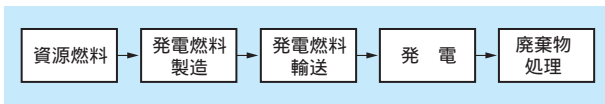


図4-2-1 電力ライフサイクル

の消費に伴うCO<sub>2</sub>排出量を考慮している。また、各段階における設備の製造に伴うCO<sub>2</sub>排出も含めている。ただし、設備の解体については、原子力以外は考慮していない。

#### 4-2-4 各発電技術のライフサイクルCO<sub>2</sub>排出量

##### 火力発電

火力発電のLC-CO<sub>2</sub>は、他の発電システムのそれと比べて10倍以上である。石炭火力と石油火力は、発電燃料の燃焼に伴う直接排出量が全体の9割以上を占めている。間接排出量の占める割合は小さいが、発電燃料の輸入国の違いによって幅をもつ。これは、主に各国からの輸送距離そして石炭採掘時のメタン漏洩量が異なるためである。他方、LNG火力については、LC-CO<sub>2</sub>に占める直接排出量の割合は約8割である。天然ガスの液化に伴うCO<sub>2</sub>排出や天然ガス中に含まれるCO<sub>2</sub>放出のために、石炭火力や石油火力に比べて間接排出量が多い。これらの間接排出量は、いずれの国からLNGを輸入するかの想定によって異なり、その想定の違いでLC-CO<sub>2</sub>には

16%程の差異が生じる。

##### 原子力発電

原子力では核燃料の濃縮に伴う排出量が全体の3分の2程度を占める。現状では、我が国で使用されているウラン燃料の約3分の2は、石炭火力の比率の高い電源構成を持つアメリカで、多量の電力を消費するガス拡散法を用いて濃縮されているために濃縮プロセスからの排出量が多い。他方、使用済み燃料を再処理してMOX燃料として利用する場合（リサイクル）についても検討したが、22g-CO<sub>2</sub>/kWhと現状ケースとほとんど変わらない。再処理や高レベル廃棄物の処分などの追加的なプロセスからの排出量は増加する。しかし、使用済み燃料を再処理して得られたウランやプルトニウムの利用に伴いウラン新燃料の必要量が減少するために、濃縮プロセスからの排出量が減少するからである。なお、利用する濃縮技術と濃縮実施国の電源構成はLC-CO<sub>2</sub>に大きな影響を与え、これらの濃縮条件の違いによってLC-CO<sub>2</sub>は10～30g-CO<sub>2</sub>/kWhの幅をもつ。

##### 水力、地熱、太陽光、風力発電

水力、太陽光、風力発電では、発電設備の建設に伴う排出量がライフサイクル全体の8割近く以上を占めている。地熱は、運転開始後に補充井の追加掘削や設備交換が必要となるため、運用時の排出量が全体の6割以上となる。設備建設に伴うCO<sub>2</sub>排出量が大きな割合を占める

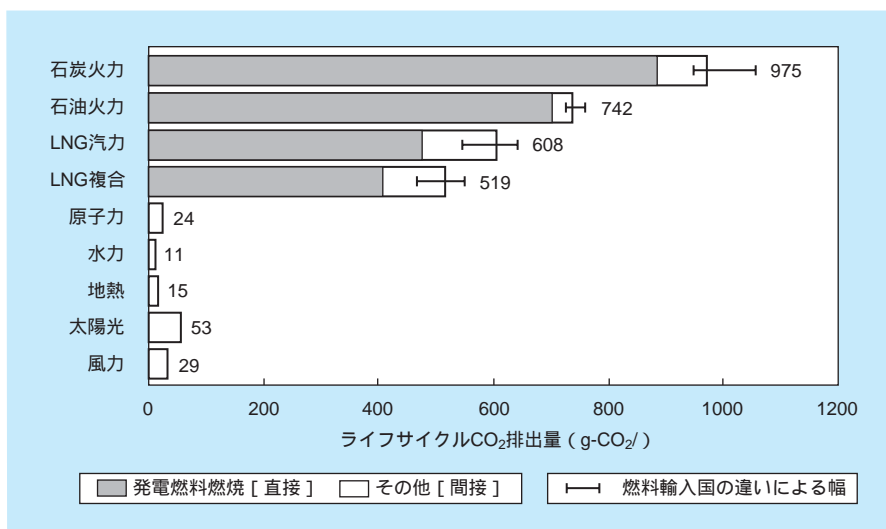


図4-2-2 ライフサイクルCO<sub>2</sub>排出量

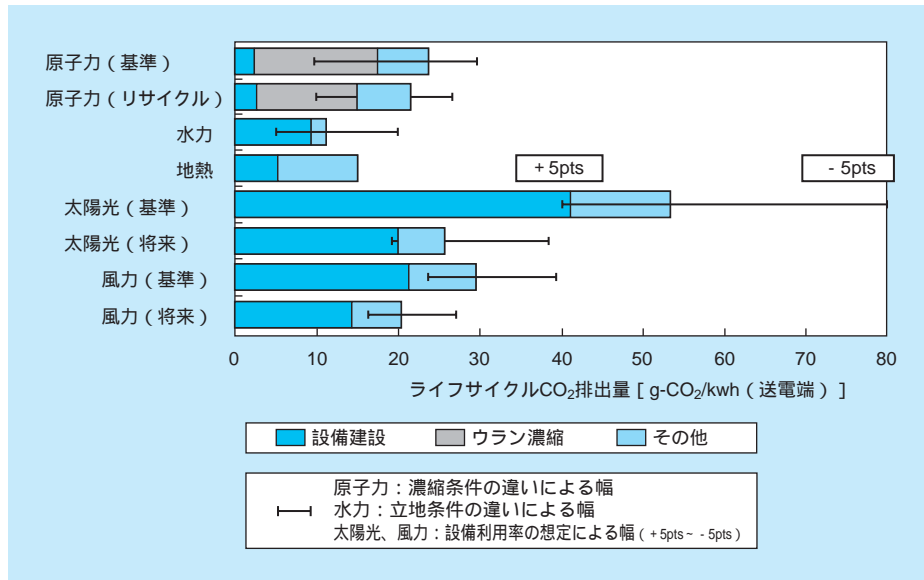


図4-2-3 火力発電以外のライフサイクルCO<sub>2</sub>排出量

発電技術では、設備利用率の想定が結果に大きな影響を及ぼす。例えば、太陽光と風力は、設備利用率の変化によってLC-CO<sub>2</sub>は大きく変化する。他方、水力のLC-CO<sub>2</sub>は立地場所や型式に強く依存し約4倍の開きがある。また、太陽光と風力は、今後の普及に伴う生産規模の拡大や技術改善により、設備製造からの排出量が削減される余地があり、現状に比べて、太陽光は26g-CO<sub>2</sub>/kWhと約半分に、風力は20g-CO<sub>2</sub>/kWhと7割程度になる可能性がある。

#### 4-2-5 意思決定の材料のひとつとして

当所では、ライフサイクルアプローチにより地球温暖化の面から各発電技術の特性を分析してきた。今後の発電技術の導入や技術開発においては、環境性はもちろんのこと、経済性、供給安定性など様々な要因を考慮する必要がある。上述した分析結果が意思決定における材料のひとつとして活用されることが期待される。

## 4 - 3 排ガス CO<sub>2</sub> 回収・海洋隔離・地中処分技術の評価

### 4-3-1 CO<sub>2</sub> の回収・隔離の沿革

地球温暖化防止を目的とした「排ガスからの二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) の回収の技術開発研究」は1990年代初頭から始まった。1992年アムステルダムで開催された第1回CO<sub>2</sub>除去に関する国際会議 (FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON CARBON DIOXIDE REMOVAL) では、火力発電所等からの大量のCO<sub>2</sub>回収を対象として、実証あるいは商用規模の現有技術に基づく様々な技術が

発表された。加えて、EOR (原油増進回収) 地中貯留、海洋処分など隔離技術も発表された。しかし、必ずしも、CO<sub>2</sub>回収技術及び隔離技術との統合あるいは連携が十分に意識されて、研究の目標が設定されてきたとはいえず、特に、CO<sub>2</sub>回収技術は、当時すでに一般化学工業、石油産業及び燃料製造などの分野で約半世紀に近い技術に基づき、回収の可能性が示唆されていただけに、以降、革新的技術的進展は見られていない。

一方、1996年秋にノルウェーの沖合北海 Sleipner 鉱区 (天然ガス田) において、CO<sub>2</sub>地中圧入事業が年間

100万トン規模で開始された。これは、天然ガス精製を目的としたCO<sub>2</sub>回収・貯留であり、「回収・貯留規模」において大きく、「CO<sub>2</sub>回収技術と処分技術とが連携」された商用プラントであり、炭素税とのトレードオフにより回収・貯留を行う点で地球温暖化防止と密に関連したものである。これを機に近年、排ガスからのCO<sub>2</sub>回収技術についての開発研究戦略が隔離技術と連携する具体的なシナリオに基づき、活発に練り直されている。

また、米国のブッシュ大統領は、2001年6月11日にワシントンで行った演説の中に、地球温暖化ガスの削減技術について、いくつかの見解を示しているが、(抜粋、Greenhouse Issues, No.55, July 2001, IEA Greenhouse Gas R&D Programme) そのなかに以下のように回収・貯留及び隔離技術が述べられていることは、今後の回収・貯留技術の国際的研究展開になかで注目すべき点がある。

“ There are only two ways to stabilize concentrations of greenhouse gases. One is to avoid emitting them in the first place; the other is to try to capture them after they are created. And there are problems with both approaches. We are making great progress through technology, but have not yet developed cost-effective ways to capture carbon emissions at their source; although there is some promising work that is being done. ”

「温室効果ガスの濃度を安定させる方法は2つある。一つはまず第1に温室効果ガスを排出しないことである；もう一つは生成してしまった温室効果ガスを捕集することである。だが、どちらのアプローチにも問題がある。我々の技術はあまねく大きく進歩しているが、排出源からの炭素(二酸化炭素)を経済的に捕集する方法を開発するまでには到っていない。もちろん、将来見込みのある研究が行われてはいるが。」

“ We all believe technology offers great promise to significantly reduce emissions - especially carbon capture, storage and sequestration technologies ”

「我々は皆、技術(特に、回収、貯蔵および隔離技術)が二酸化炭素の排出を大きく低減させることを、しっかり約束してくれるものと信じている。」

以下では、火力発電所を対象とした排ガス中からのCO<sub>2</sub>の回収技術及び隔離技術について概説する。技術的視点として重要なことは大規模、エネルギー所要量、回収・隔離の連携、地球温暖化防止策としての対費用効果である。これに加えて、重要なことは、CO<sub>2</sub>削減策としてのCO<sub>2</sub>の回収+隔離技術の開発は、従来の排煙脱硫や排煙脱硝技術のように技術的完成がそのまま直接実用化に結び付くとは限らない、国内・国際的エネルギー政策と関連する政治局面をもっていることである。これに関しては、ここでは触れない。

#### 4-3-2 火力発電所排ガスからのCO<sub>2</sub>の回収技術

##### 大規模システムに適用されているCO<sub>2</sub>の回収技術

一般的なCO<sub>2</sub>回収法には、吸収法(化学吸収液及び/または物理吸収液を用いる方法)、吸着法(吸着剤による吸着分離)、膜分離(膜による選択分離)法及び深冷法(沸点の違いによる分離)がある。

現在までに、大容量の化石燃料燃焼排ガスに適用された実績があるのは吸収法であり、石油工業をはじめとする化学工業の分野で広く用いられている(表4-3-1)。

化学吸収法については、過去に石油の強制回収(EOR: Enhanced Oil Recovery)のために、天然ガス焼き火力発電所(50Mw × 2基Lubbock Power & Light Holly Plant, Texas, USA)に適用された実績がある。ここではMEA(モノアタノールアミン)吸収液による化学吸収法(Dow Chemical社、Gas/Spec FT-1(MEA + 添加剤))を用いて1100t-CO<sub>2</sub>/日の規模でCO<sub>2</sub>を回収した。この設備は1980年代始めにすでに解体されている。現在稼動中のものではKerr-McGee/ABB Lummus Crest社によるものが最大であり、CO<sub>2</sub>の回収規模は約800t-CO<sub>2</sub>/日である。多くのプロセスではMEAをベースとする化学吸収液が用いられている。最新のプロセスでは、三菱重工業及び関西電力が開発したKS-1(2級アルカノールアミン系立体障害アミン)を吸収液として用いられているものがある。

表4-3-1 稼働中のCO<sub>2</sub>回収プロセス

排ガス源	プロセス ライセンサー	プロセス名 (吸収剤)	CO <sub>2</sub> 回収量 (t-CO <sub>2</sub> /日)	サイト	目的/用途 運開年
石炭ボイラ <sup>1)</sup>	Kerr-McGee/ ABB/Lummus Crest	CO <sub>2</sub> Recovery (MEA+添加剤)	800	Trona, Seales Valley, California, USA	ソーダアッシュ 製造用 1978～稼働
石炭ボイラ <sup>1)</sup>	Kerr-McGee/ ABB/Lummus Crest	CO <sub>2</sub> Recovery (MEA+添加剤)	300	Sua Pan, Botswana	ソーダアッシュ 製造用 1991～稼働
石炭流動床 燃焼コジェ ネプラント <sup>1)</sup>	Kerr-McGee/ ABB/Lummus Crest	CO <sub>2</sub> Recovery (MEA+添加剤)	200	Applied Energy System, Shady Point Plant, Oklahoma, USA	食品用 1991～稼働
天然ガスタ ーピン <sup>2)</sup>	Fluor Daniel	Econamine FG (MEA+添加剤)	320	Bellingham, Massachusetts, USA	化学品用 1991～稼働
蒸気改質器 排ガス <sup>3)</sup>	MHI/KEPCO	KS-1 (立体障害 アミン)	160	Petronas Fertilizer Kedah, Kedah Darul Aman, Malaysia	尿素合成原料 1999運開予定

### 4-3-3 電気事業におけるCO<sub>2</sub>回収技術の研究

#### 当所の研究(化学吸収法を用いた排ガスからのCO<sub>2</sub>回収技術)

この研究は、1991年に開始し、1995年に電力共同研究が開始する時点で終了した。これは排ガスからのCO<sub>2</sub>回収技術に関する包括的研究である。化学吸収式CO<sub>2</sub>回収実験装置(CO<sub>2</sub>回収規模3 t-CO<sub>2</sub>/日)を設置し、運転特性及び所要エネルギーを実験により検討し、その結果に基づき、600MW級LNG火力発電所を想定し、フィジビリティスタディを行った。この研究では20wt%のMEA水溶液を用いた化学吸収法による。

この研究は以下の内容を含む：

運転特性

熱消費特性

所要熱量の低減化に関するパラメータスタディ

吸収液の劣化及び装置材料の腐食

600MW級LNG火力発電所に設置するCO<sub>2</sub>回収・液化設備(CO<sub>2</sub>の処理・処分は除外)

(詳細な機器・建屋構成、機器要領・寸法、基本設計図、プロセス物質・熱バランス、全体配置図、建設費・変動費・運転費)

フィジビリティスタディは、図4-3-1に示すようなかなり具体的なプラント設計にまで踏みこんだものである。

排ガスからCO<sub>2</sub>を吸収する吸収塔の高さは約44 m以上になり、こうした一連の装置が数基以上必要とされる結果が示された。このような設計結果から回収設備の設置を現実的なものとするには課題が多いことが予想された。

得られた主要な結論は以下の通りである。

所要動力は回収及び液化で、それぞれ発電出力の6.8%及び4.7%を要し、発電出力の大幅な低下を招くとともに、通常設置されている排煙脱硫装置に比べて極めて大きい(電力消費だけでも数倍以上)、広い敷地面積(201m×241m)を要する。

発電減価(当時10円/kWhに設定)の約50%の上昇を招く。

#### 電力共同研究

CO<sub>2</sub>回収技術に関する電力共同研究会は、電力各社、当所及び三菱重工業を構成メンバーとして1994年～1998年まで行われた。その内容はパイロットプラントによるシステム評価を中心とするものであり、当初は化学吸収法(関西電力、東京電力)及び物理吸着法(東京電力PTSA：温度圧カスイング法、東北電力PSA圧カスイング法)後に、移動床を用いた物理吸着法(北陸電)が加わり実施された。加えて、エネルギー所要量の低い化学吸収液の開発や物理吸着法で用いられる吸着材の開発も行われた。

そのねらいは以下の点であった。

エネルギー消費量低減  
大容量化

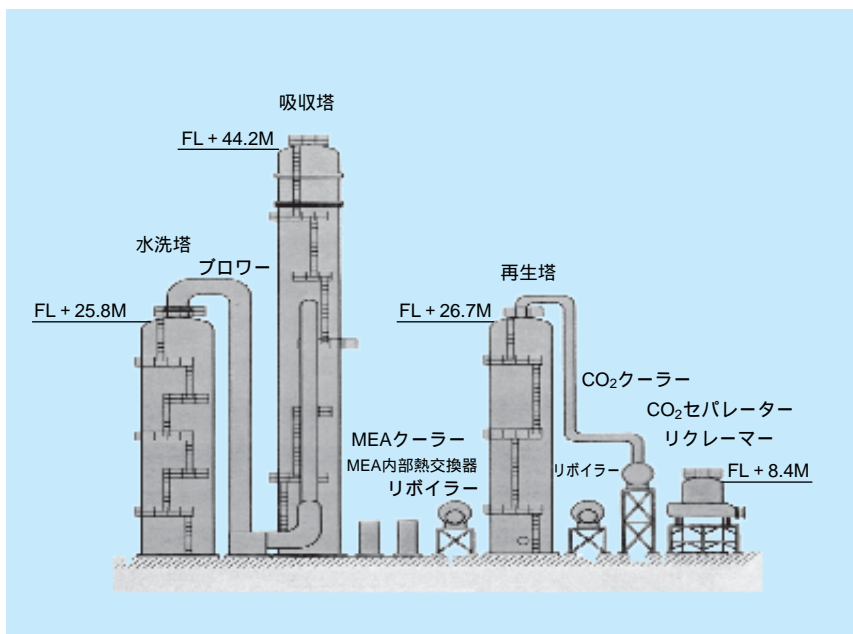


図4-3-1 主用機器構成 (CO<sub>2</sub>回収設備)

腐食対策

排ガス中不純物 (SO<sub>x</sub>) 対策

環境特性

長期連続運転

負荷変動追従性

ここで得られた主要な結論は以下の通りであり、さらなる課題が残された。

化学吸収法については、エネルギー所要量が大きく、さらなる低減が必要である。

物理吸着法には、PSA (Pressure Swing Adsorption) やPTSA (Pressure Temperature Swing Adsorption) による方法があるが、吸着法を化石燃料燃焼排ガスに適用するには、大容量化とともに、充填材や大型真空バルブなどの周辺機器の技術課題を解決する必要がある。

化学吸収法及び物理吸着法ともに広大な敷地面積を要する。

#### 4-3-4 その他のCO<sub>2</sub>回収に関する研究

##### 膜分離法・深冷法

排ガスからのCO<sub>2</sub>回収技術として、さらに膜分離法や深冷法がある。膜分離法は、まだ研究段階である。深冷法では、数段にわたって排ガスを圧縮・冷却することが

必要であり、CO<sub>2</sub>の回収するためには多量のエネルギーが要求される。さらに、石炭燃焼排ガスの場合では、共存ガス (SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>) による冷却の干渉や材料腐食の可能性もある。今後さらに研究が必要である。

##### 発電方式とCO<sub>2</sub>回収技術との適切な組合せ

石炭火力の発電方式は、従来型のボイラータービン方式のみならず、PFBC (加圧流動床燃焼方式) やIGCC (石炭ガス化複合発電方式) などがあり、排ガス特性 (温度、圧力、組成) が異なる。そのため、当所では発電方式とこれに適したCO<sub>2</sub>回収技術との組合せによるコスト削減の可能性の検討も行った。これは、発電方式として、微粉炭燃焼方式、PFBC及びIGCCを選定し、それぞれに対し、化学吸収法及び純酸素/CO<sub>2</sub>燃焼 (IGCCの場合はガス化) の2通り、IGCCの場合には、さらに、酸素吹きガス化 + シフト反応 + CO<sub>2</sub>PSA を加えた3通りを想定して、それぞれ、発電端効率、所内率、送電端効率、コストについてベースケースとの比較を行った。

最良の特性が得られたケースは、IGCCの酸素吹きガス化 + シフト反応 + CO<sub>2</sub>PSA のケースであった。しかし、これは、IGCCの実証も含め等、さらなる研究を要するものである。



#### 4-3-5 CO<sub>2</sub> 隔離技術

##### 隔離技術の現状と分類

CO<sub>2</sub>の隔離に関して、大きく海洋隔離及び地中隔離の2通りのアイデアがある。前者は海洋での炭素循環の研究成果に立脚した地球温暖化防止の最後の手段としての位置付けから出発し、一方、後者は、むしろ、原油増進回収法として利用されていた、CO<sub>2</sub>注入という化石燃料生産における実用現場から発想されたと考えられる。こうした、科学的研究及び実用現場という発想の違い及び環境適合性に関する要因が、現在、両者の研究における進展の違いに反映している。しかし、1996年にノルウェー沖合西 Spleiner 鉱区(ガス田)でのCO<sub>2</sub>地中圧入事業が開始されたことを契機として、欧州のエネルギー産業では、CO<sub>2</sub>の隔離方策を京都議定書の目標達成の手段として組み入れようとする動きも、近年、活発になってきた。

隔離技術について、隔離の概念、特徴、技術的なポイント及び技術開発の現状について表4-3-2に概括する。

##### 海洋隔離方策

海洋隔離技術は、隔離量と隔離場所を限定し、具体的

に副次的な“adverse effect”の生じる空間領域や時間について明らかにし、周辺海洋環境への影響評価の研究が重要となる。これが、CO<sub>2</sub>の海洋への溶解(隔離)に関する具体的な技術開発を進める要点である。そのため、CO<sub>2</sub>海洋隔離については、「副次的に生じうる海洋環境影響を極小化する技術」を開発するとともに、海洋環境影響評価のための材料を揃えて社会の判断あるいは合意を仰ぐことが不可欠である。

影響を小さくすることを考慮した隔離方式に溶解型と貯留型がある。溶解型は、CO<sub>2</sub>を海水中に溶かし希釈することによって、本来海洋中に溶解しているCO<sub>2</sub>の濃度を許容範囲内で上昇させるという考え方である。一方、貯留型は、深海底の窪みにCO<sub>2</sub>を溜めることができれば、影響の範囲を局所化できるという考え方である。貯留型の方式は、地球表層に特異点を人類が設計し、その隔離性能を長期にわたって担保するという考え方であり、地中隔離の諸方式との親近性が高い。

当所では、1989年からCO<sub>2</sub>海洋隔離の研究を開始し、1991年からは資源エネルギー庁からの受託研究にも携わり、現在、NEDOが進める「CO<sub>2</sub>海洋隔離環境影響予測技術開発」(1997年度～2001年度)に協力し、その枠内では、特に国際共同研究としてのCO<sub>2</sub>海域注入実験の

表4-3-2 様々な隔離技術の現状と分類

隔離の概念	特徴	技術的なポイント	技術開発の現状
海洋溶解	大気中に放出されたCO <sub>2</sub> はいずれ海洋中に吸収され溶解する。海洋表層と中深層とが躍層によって混合が妨げられているため、溶解には1000年以上を要する。海洋表層をバイパスして、パイプを介して人為的に直接、大洋の中深層へCO <sub>2</sub> を注入・溶解させ、大気中CO <sub>2</sub> 濃度の急激な上昇を回避する方策。	例えば大気中でのCO <sub>2</sub> 濃度の安定化目標を550ppmとすれば、その時点で想定される中深層中のCO <sub>2</sub> 濃度にまで、人為的に希釈するためには、30万倍希釈が目標である。30万倍希釈にまで到らないCO <sub>2</sub> 濃度を持つ水塊が出現することになるが、その継続時間と空間的広がりなどが、海洋環境に許容できるよう設計すること。	環境影響評価手法を検討するために、少量のCO <sub>2</sub> を深さ800mの水深の海域に注入し挙動を観察する国際共同研究が進行中(日本・米国・ノルウェー・カナダ・オーストラリアなど)。
帯水層貯留	長期間にわたって地表水との連絡が絶たれている地下深部の塩水帯水層に、坑井から超臨界CO <sub>2</sub> を圧入する。注入率の大きい対象層を選び、その間隙水を超臨界CO <sub>2</sub> で、置換する場合に、最大の経済性が得られる。	サイトの特性(陸域が沖合いか? 帯水層の上部のシール層に遮断性能をどれほど期待できるか? など)に応じて、長期的な漏洩の可能性が排除できるよう圧入坑井の配置や圧入量をコントロールすること。	1996年から北海のスライプナー天然ガス田で事業として実施中(年間CO <sub>2</sub> 100万トン規模) 水深80mの海域の海底下1000mの帯水層に圧入中のCO <sub>2</sub> の地下挙動をモニタリングする国際共同研究プログラムSACSが進行中。
炭層吸着	石炭がCO <sub>2</sub> を吸着することを応用し、将来とも採炭の見込みのない炭層に坑井を通じて吸着固定させる。	CO <sub>2</sub> を吸着させる地下の炭層に効率的に、最少の坑井数で、CO <sub>2</sub> を送りこむ技術を確立すること。	米国、カナダでは、フィールド実証試験段階。日本、欧州、オーストラリアでも研究計画を立案中。
地熱利用中和	大気中にもたらされた過剰なCO <sub>2</sub> は、百万年スケールでは、ケイ酸鉱物から供給される陽イオンと反応し、中和されることに着目し、反応速度を加速する場としての地中深部の地熱に期待する。	効率的な地熱エネルギー利用に適さない温度域で、CO <sub>2</sub> の注入効率が高く、圧入坑井が経済的な掘削深度であるような、サイトが選定できること。	欧州で、地中隔離のオプションとして検討されている程度。
深海底貯留	海洋隔離の考え方として古典的な概念。海洋で水深3000mを超えると、液体CO <sub>2</sub> のほうが海水より大きい密度となることから、深海底の窪地に、水溜り状にCO <sub>2</sub> lakeとして安定的に貯留することが可能。	地表の貯水池に比較しても特異で、かつ大規模な人工物を地球環境の一構成物として設計することになるため、管理方策を含め技術を越えた多岐にわたる検討が必要。	検討事例として、当所や船舶技術研究所の研究がある。

成功に向けて注力しているところである。

溶解型の海洋隔離の技術的方策として、当所は三菱重工業株式会社とともに、前述の資源エネルギー庁からの受託研究の中で、1993年に、船による希釈放流 - Moving ship 方式を提案している。これは船から長さ 1,000 ~ 2,500m のパイプを吊り下げ、液化 CO<sub>2</sub> を放流しつつ船を前進させる。海洋の自然の混合に委ねる前に、放流点の移動により人為的に一定以上の希釈をする技術である。

曳航されるパイプの下端近傍に多数の小孔を設けて CO<sub>2</sub> を放流すると、放出口において CO<sub>2</sub> 液滴は周囲流体によって形成途中で引きちぎられ、さらにパイプ背後に生じられる渦流によって分裂し微細化する。図 4-3-2 に記すように、液滴の浮上・溶解挙動を予測した結果によると、実機規模の 150kg 毎秒の CO<sub>2</sub> を深度 2,000m にて 3 m/sec で曳航しながら放出した場合、最も濃いところで海水に対し 1/60,000 の重量比の CO<sub>2</sub> 濃度上昇になることが示される。この値の影響評価における位置付けはまだ論じられないが、工学的に可能な初期希釈のレベルを提示する一例である。

### 地中貯留方策

1990 年代前半の CO<sub>2</sub> 地中隔離に関する研究対象は、世界での隔離容量推定、CO<sub>2</sub> 地中挙動シミュレーションや経済性検討といった分野に限られていた。しかし化石燃料生産現場での具体的な取り組みは、着々と進み、1996 年秋に開始された北海 Sleipner 鉱区における年間 100 万トン規模での CO<sub>2</sub> 圧入事業を皮切りに、現在では、多方面にわたる研究プログラムが公的な研究資金を受けつつ産業界の積極的な関わりのなかで実施されるにいたっている。この動きは欧州および英連邦系の国々で顕著

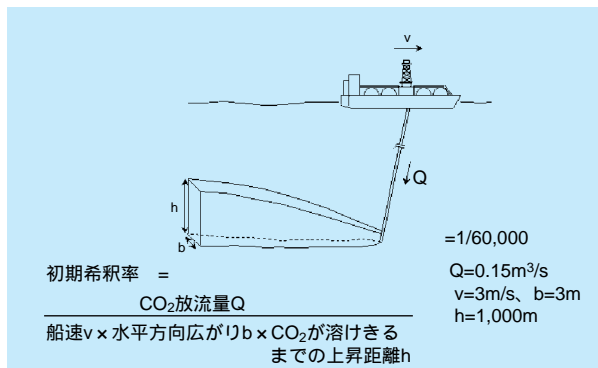


図4-3-2 概略の初期希釈率

となり、下記に概観するように、それぞれに特色を持った多数の、研究プログラムが現在進行中である。こうした中で、米国のブッシュ政権が温暖化対策として打ち出した研究開発パッケージにある CO<sub>2</sub> 隔離研究の重点が、「海洋隔離および地中隔離」となっていることは注目される。

これらの研究プログラムに共通する特徴は、「エネルギー文明が積極的に気候変動に対応してゆくためには、CO<sub>2</sub> 地中貯留が社会に受け入れられることが重要」であり、社会合意形成もねらいに入れたものとなっていることである。こうした背景には、エネルギーと環境に関わる社会的な接点（環境や社会へのエネルギーシステムの影響に関するライフサイクル分析、高レベル放射性廃棄物の深地層処分あるいは海底下処分の安全評価研究）で、これまで科学者・技術者が果たしてきた役割についての経緯が反映している。

### SACS (Saline Aquifer CO<sub>2</sub> Storage) 研究プログラム

1996 年 9 月から、ノルウェー沖合約 240km の北海中央部のスライプナー鉱区ガス田では、海底帯水層に 100 万 t/年規模の CO<sub>2</sub> 地中圧入を開始した。この商業プロジェクトの目的は、あくまでもスライプナー鉱区の天然ガス開発が主体であることに留意する必要がある。地中隔離実施のきっかけは、ノルウェー政府が沖合油田に対して炭素税を課したことであり、CO<sub>2</sub> 圧入事業計画当時の炭素税額は CO<sub>2</sub> 排出量 1t あたり 350 クローネ（約 55 米ドル）であった。同鉱区の権利保持者スタットオイル社（ノルウェー国有の石油会社）は、同鉱区の開発を 1980 年代半ばから検討していたが、ネックは、生産ガスに不純物として 9% 含まれる CO<sub>2</sub> であり、天然ガス中の「CO<sub>2</sub> 濃度 3% 以下」という技術基準をクリアする必要があった。炭素税の負担を回避するために、CO<sub>2</sub> を化学吸収法のひとつであるアミン法で分離・回収することとし、高さ 20m で重量 240t の吸収塔 2 基を備えた 8,000t のプラットホームが新しく設置された。回収された CO<sub>2</sub> は海底下の深度 1,000m の砂岩帯水層「Utsira」（厚さ 200m）に、CO<sub>2</sub> は地中圧入されている。一方、技術基準を満たすように精製された天然ガスは既設の海底敷設のパイプラインを用いて陸上へ輸送される。地球温暖化防止に関連した研究プロジェクトとして世界で最初である。

この事業を利用してCO<sub>2</sub>の地中挙動をモニタリングするSACS研究プログラムは、1998年から開始された。欧州共同体から研究費の49%を受け入れ、欧州に本拠を持つ石油会社・ガス会社・電力会社なども資金を提供して実施されることになった。SACS研究プログラムの具体的な中身を審議し、立案するための専門家会合は1997年11月にノルウェーはトロンハイム市にあるスタットオイル社の技術開発センターで実施され、当所の研究者も参加した。

SACS研究プログラムの成果のハイライトは、“time-lapse seismic”であった。1999年秋に得られた地震探査結果は、圧入事業開始以前の1994年の地震探査データとの差を解析することによって、みごとに「地層間隙の塩水を置き換えている超臨界状態CO<sub>2</sub>」と思われる影を捉えていた。これは「地中に圧入された超臨界のCO<sub>2</sub>の原位置での溶解は、どれほど時間のかかる過程なのだろうか?」「超長期的なリスクの評価に盛り込む必要がある要素なのであろうか?」という技術課題を提起することとなった。

現在、我が国でも有望な地中貯留の方式は、沖合帯水層への圧入であるとして、2000年度からNEDO/RITEの技術開発プログラムが開始されたところであり、SACS研究プログラムの動向は今後とも注視しつづける必要がある。

#### Weyburnモニタリング研究プログラム

Weyburn EOR（原油増進回収）プロジェクト（カナダ・サスカチュワン州）は、Pan Canadian社によって操業され、2つの特徴を持っている。第一に、国境線の南にある米国ノースダコタ州の石炭ガス化炉をEOR用のCO<sub>2</sub>供給元とし、本プロジェクトのためにパイプラインが建設された。第二に、本格的なEOR商業プロジェクトであり、営利を目的としてビジネスとして行われていることである。2000年秋から20年間にわたって、年間100万トン、総計2000万トンのCO<sub>2</sub>がEORの目的で地下の油層へと送りこまれる。CO<sub>2</sub>は再利用される。

プロジェクトの研究側面として、Weyburnモニタリング研究プログラムの実施主体は、カナダのPTRC（Petroleum Technology Research Center）である。モニタリング研究プロジェクトは2001年より3年間とされているが、事業期間が20年であるところから、多くの研究参加機関がより長いスコープを考えている。研究の目的としては、「注入されたCO<sub>2</sub>のモニタリングを通して、隔離されたCO<sub>2</sub>の挙動、隔離のメカニズムや長期の安全性の問題に関する知見を集めること」が、掲げられている。

このプロジェクトには欧州共同体の資金も投入され、ヨーロッパの科学者（デンマーク、フランス、イタリア、英国）も参加している。

## 4 - 4 CO<sub>2</sub> 回収型火力発電システムの評価

ガスタービンによる複合発電は高効率であることから、世界各国の電力会社で導入されている。効率向上により単位発電電力当たりのCO<sub>2</sub>排出量は8～9割に低減する。さらに積極的にCO<sub>2</sub>排出量の削減を行うために、CO<sub>2</sub>を排出しない新しい発電システムの開発が必要となる。ここでは、従来の発電システムとは基本的に異なるシステム構成を持つCO<sub>2</sub>回収型火力発電システムであるクローズド型タービン発電システムと水素分離型タービン発電システムについて紹介する。これらの新しい発電システムで回収したCO<sub>2</sub>を海中または地中に封じ込むことにより大気との隔離が実現できれば、原理的に大気へCO<sub>2</sub>を排出せずに発電することが可能となる。

### クローズド型タービン発電システム

クローズド型ガスタービン発電システムは、水蒸気やCO<sub>2</sub>等の作動流体を循環使用するものであり、わが国でも、水力資源等の自然エネルギーが豊富にある諸外国にて水素を製造、輸送し、国内で発電を行うという水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術（WE-NET）プロジェクトが行われ、水素を酸素燃焼する水素燃焼タービンの研究が行われた。水素は酸素と当量燃焼すれば非常に高温の水蒸気を発生させることができる。この性

質を利用したものに、変形ランキン統合タービン発電システムとグラーツサイクルがある。（詳細は文献参照）

この2つのサイクルの特徴は、複合サイクルの低温側であるランキンサイクルが超高温の水素/酸素燃焼器を経由していることである。熱効率は共に水素/酸素燃焼器出口温度が1700℃の場合、酸素製造動力を差し引いて約54%である。

なお、これらのクローズド型ガスタービンは燃料に天然ガスを用いることも可能である。その場合は、燃焼ガスは水蒸気とCO<sub>2</sub>の混合ガスとなるため、非凝縮ガスであるCO<sub>2</sub>を復水器からCO<sub>2</sub>圧縮機により抽出する。図4-4-1に天然ガス燃焼グラーツサイクル（CO<sub>2</sub>回収対応クローズド型高効率ガスタービン）の構成図を示す。

### 水素分離型タービン発電システム

水素分離型タービン発電システムの基本的な概念は、燃料の水蒸気改質による再生サイクルガスタービンである。メタノールを燃料とする再生サイクルガスタービンは、中国電力 大崎発電所において国プロジェクトとして研究開発が行われた。メタノールは水蒸気を加えることにより比較的低温（250～350℃）で水素とCO<sub>2</sub>に改

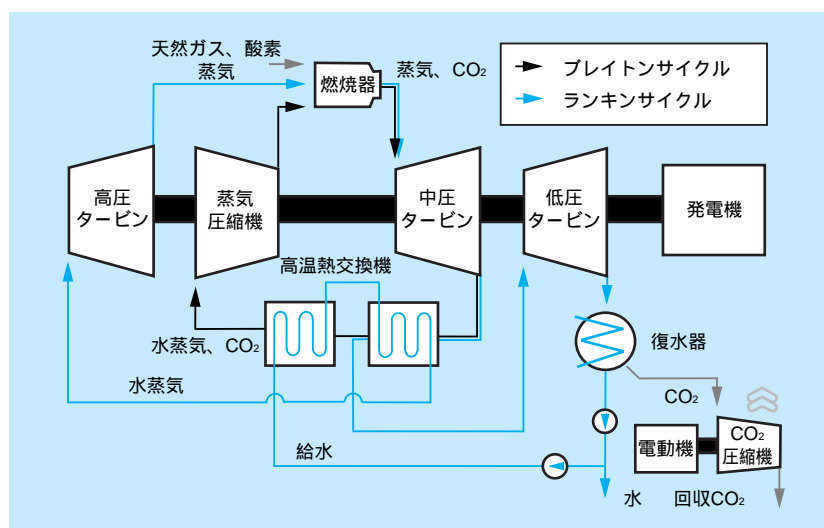


図4-4-1 天然ガス燃焼グラーツサイクル構成図  
(CO<sub>2</sub>回収対応クローズド型高効率ガスタービン)

質させることが出来る。メタノール - 水蒸気改質反応は吸熱反応であるため、低温のガスタービン排熱を高温のガスタービンに戻すことが出来る。これを再生サイクルと呼び、この再生サイクルの効果により、サイクル全体の熱効率が向上する。

主成分がメタンである天然ガスの場合、メタン - 水蒸気改質反応も吸熱反応であるが、十分な改質率を得るためには化学平衡上 900 以上の高温下で反応させる必要があるため、燃料電池用の改質器では、天然ガスの一部を燃焼することにより、高温にして反応熱を供給する。よってガスタービンの排熱は利用できない。しかし図 4-4-2 に示すような膜改質器を用いれば、水素分離膜により反応系から生成ガスの水素が除去されるので、水蒸気改質反応が進み、550 ~ 600 程度の比較的低い温度でも水蒸気改質が可能となる。この温度レベルであれば、天然ガスでもガスタービン排熱を利用した再生サイクル

を組むことが可能となる。

当所はこの膜改質器を排ガスボイラの中に設置した天然ガス改質水素分離型タービン発電システムを考案した。このシステムは改質に必要な反応熱と改質用水蒸気の発生両方にガスタービン排熱を用いることにより最大限に再生サイクルの効果を得ることができる。図 4-4-3 に提案システムの構成図を示す。1300 級ガスタービンの場合、メタン水蒸気比 3.5、水素分離率 98 % の条件で送電端熱効率は 51 % となる。再生サイクルの効果により、通常の複合発電を超える高い熱効率で CO<sub>2</sub> を回収できる唯一の発電システムと思われる。

本システムの実現には、セラミック多孔質膜、パラジウム膜等の膜改質器に使用可能な高温無機水素分離膜技術の開発が、鍵となる。近い将来、高信頼性、低コストな高温技術の開発が期待されている。

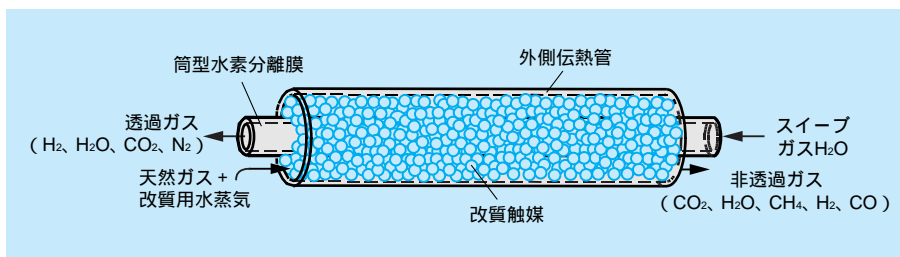


図4-4-2 膜改質器モジュール

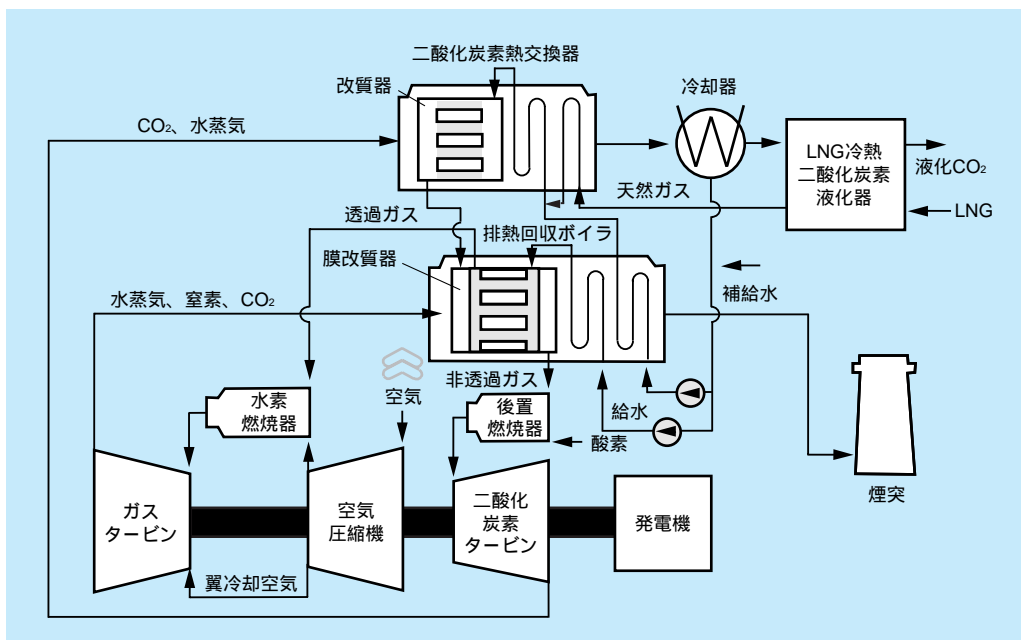


図4-4-3 天然ガス改質水素分離型タービン発電システム構成図

### 水素分離型IGCC 発電システム

石炭ガス化複合（IGCC）発電は、高効率で環境保全性に優れた新しい石炭焼き火力発電プラントとして内外で鋭意研究開発が行われている。当所は石炭焼き火力発電プラントから排出されるCO<sub>2</sub>を回収するために、このIGCC発電システムをベースとした水素分離型IGCC発電システムを提案している。水素分離型IGCC発電システムは、図4-4-4に示すように石炭ガス化設備、ガス精製設備、ガス分離設備および複合発電設備から構成される。本発電システムは、石炭を水を加えてスラリー化してガス化炉に供給し、酸素でガス化し、水素とCOを主成分とする可燃性ガスに変換し、COはCO<sub>2</sub>に変換した後、ガス精製設備で硫黄分とばいじんを除去する。このクリーンとなった燃料ガスから、水素分離膜で水素とCO<sub>2</sub>を分離し、透過した水素はガスタービンに供給し、CO<sub>2</sub>を含む非透過ガスは回収して海中に注入処分する。本システムにおいても高温水素分離膜が重要な構成要素である。水素/CO<sub>2</sub>分離率を500と想定した場合、1300級ガスタービンを用いた本システムの送電端出力は約41万kW、送電端効率は40%（高位基準）以上

となる。そして、CO<sub>2</sub>回収率は99%、CO<sub>2</sub>排出単位は僅か0.007kg-CO<sub>2</sub>/kWhである（通常の石炭火力は約0.92kg-CO<sub>2</sub>/kWh）。また、SO<sub>x</sub>とNO<sub>x</sub>排出濃度は10ppm以下である。

CO<sub>2</sub>回収型火力発電システムの熱効率と単位発電電力量あたりのCO<sub>2</sub>排出原単位を従来型微粉炭火力、天然ガス焼き複合発電と比較して図4-4-5に示す。

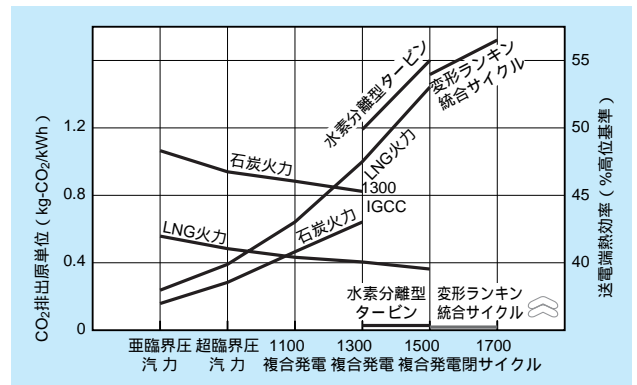


図4-4-5 各種CO<sub>2</sub>回収型火力発電システムのCO<sub>2</sub>排出原単位比較

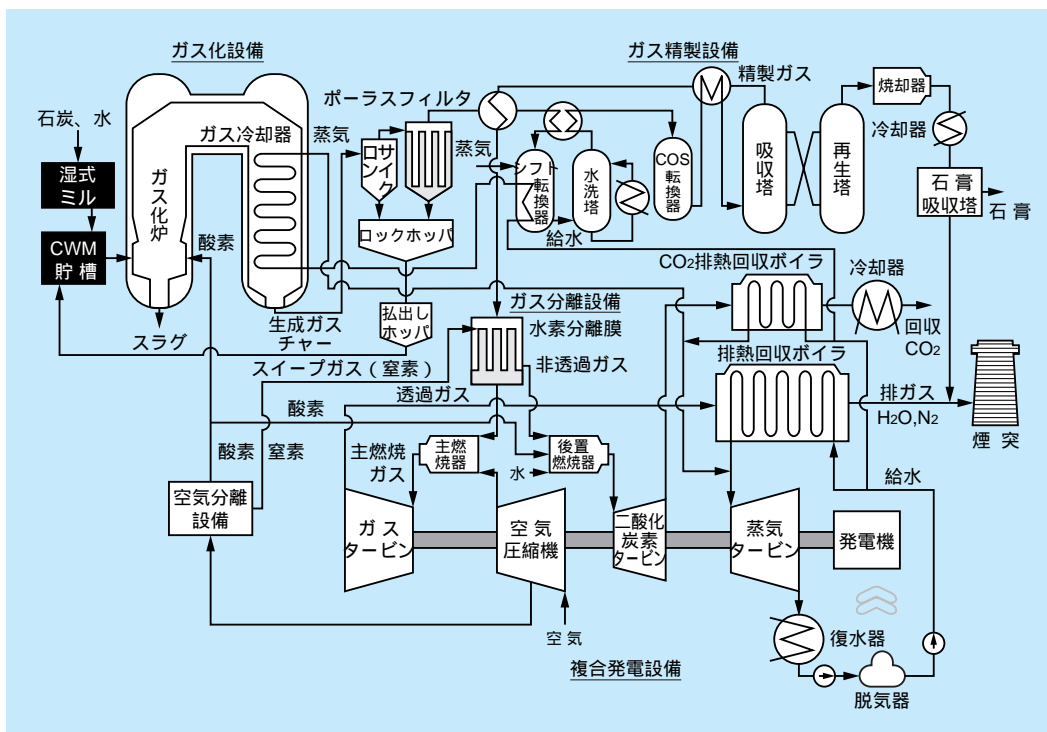


図4-4-4 水素分離型IGCC発電システム構成図

## コラム11：CO<sub>2</sub>ヒートポンプの基礎研究と実用化

わが国の家庭用最終エネルギー消費の約1/3は給湯であり、そのほとんどが化石燃料の直接燃焼により賄われている。従って高効率な給湯ヒートポンプの開発・普及は省エネルギーの観点から重要である。一方、地球環境保護の観点から、フロンのような合成品ではなく、環境に負荷の小さい自然冷媒を利用したヒートポンプの開発が必要となっている。

このような状況のもと、当所は、自然冷媒の中でも、毒性・可燃性が無いCO<sub>2</sub>に着目し、わが国ではいち早く、1995年からその可能性を評価するための基礎的な研究を開始した。

冷暖房や給湯用ヒートポンプの冷媒としてCO<sub>2</sub>を利用する場合、フロンと異なり、サイクルの高圧側が超臨界状態となる。このため、研究課題が多く、**図1**に示すCO<sub>2</sub>ヒートポンプ基礎実験ループ等を用いて基礎的な研究を進めてきた。その結果、CO<sub>2</sub>はヒートポンプの冷媒として十分利用可能であること、特に給湯用に関しては、サイクル上の特別な工夫をしなくても高いCOP（給湯能力/圧縮機入力）が得られるため、将来有望であることを明らかにした。

これら基礎的な研究成果をベースに、1998年9月から、当所は、東京電力、デンソーと共同で、家庭用CO<sub>2</sub>ヒートポンプ給湯機の研究開発を開始した。共同研究において、当所は、圧縮機や熱交換器の開発・改良等を技術面からサポートし、8段階に渡って試作機を改良、試験風洞に試作機を設置して試験を行った。その結果、高い省エネ性や機能を含む技術的な課題をクリアし、年間平均のCOPで3以上を達成できる家庭用CO<sub>2</sub>ヒートポンプ給湯機を開発し、世界初の商品化を達成した。**図2**に試作機の外観を、**図3**に開発機の外観を示す。

開発機は、**図4**に示すように、広く普及している燃焼式の給湯器に対し、約3割の省エネルギーを達成でき、CO<sub>2</sub>排出量は約半分に削減できる。国も本技術の優位性を評価し、その普及促進を図る施策を決めるに至っており、省エネルギーの推進、地球温暖化防止に有効な技術として普及が期待されている。



図1 CO<sub>2</sub>ヒートポンプ基礎実験ループ



図2 試作機の外観  
(4.5kW出力、80×35×100cm)



図3 開発機の外観

左：ヒートポンプ（4.5kW出力、81×32×65cm）  
右：貯湯タンク（300、109×45×152cm）

	ガス方式	発電設備+CO <sub>2</sub> 冷媒HP給湯器	比較
ガス給湯器との比較	ガス給湯器 100 = 78% 給湯エネルギー	HP給湯器 COP3.0以上 78 電気 26 発電設備 70 大気熱エネルギー 44 発電ロス+送電ロス 37.4% 給湯エネルギー	一次エネルギー効率 30%削減

図4 開発機の省エネ性

## 4 - 5 生物・バイオ技術による CO<sub>2</sub> 固定・資源化技術の評価

### 4-5-1 はじめに

地球温暖化問題が社会に広く認知されるようになった1990年前後から、温暖化対策技術として、生物やバイオ技術を利用したCO<sub>2</sub>固定ならびに資源化技術の検討が進められた。この生物的なCO<sub>2</sub>対策技術は、陸上の森林生態系や沿岸の生態系（マングローブや珊瑚礁等）をCO<sub>2</sub>吸収源（シンク）として利用するものと、クロレラ等の微細藻類の高い光合成能力を利用してCO<sub>2</sub>を固定し、家畜飼料等として有効利用できる微細藻類の藻体として資源化するものに分けられる。本節では、各技術の概要について述べる。

### 4-5-2 森林の炭素吸収 CO<sub>2</sub> 固定量の評価

森林の炭素吸収源としての利用に関しては、まず、その意味づけ、ポテンシャル、概略的なコストなど、全体像を把握する調査研究が行われた。これにより、森林シンク利用を包括的にとらえる基本的情報が整理された。さらに1997年のCOP3で先進締約国がとることができる温室効果ガス削減の政策措置として、森林シンクの利用が国際的に認められる方向性となり、その具体的な実施方策についても電力各社で検討されるようになった。

この森林シンクの利用において、森林の炭素吸収量の評価が重要となってきた。すなわち、京都議定書にある森林シンクの利用に関しては、2008年～2012年の第一約束期間への適用を目標として、国際的なルール作りが求められている。このルール適用を支える技術的な基盤が、森林によるCO<sub>2</sub>吸収量をどのようにして、正確にかつリーズナブルなコストで計測・認証するかということである。当所では現在、今後の森林シンクの利用を見越し、森林の炭素吸収量の評価に関する包括的な技術体系を確立するための研究に取り組んでいる。

この研究では、森林の炭素収支測定が重要な項目である。森林に吸収された炭素の量は植物および土壌中の炭素量の変化から推定することができる。しかし、調査に

多大な労力と時間を必要とするとともに、調査が生態系自体の変化を伴うため実用的ではない。また、将来的には生態系モデルによる評価が有望であるが、モデルの高度化に必要な基礎データの蓄積不足や検証方法が確立されていないなどの問題点が残っている。そこで、森林全体の炭素収支を評価するための手法として、タワー観測によるCO<sub>2</sub>フラックス測定が、国内外で計画・実施されるようになってきている。フラックス測定の利点は、森林の炭素吸収量の評価の基礎となる「陸上生態系と大気との間での正味の炭素の移動量」を測定できると同時に、広域的な炭素収支の評価や、森林生態系の短期的な応答への対応が期待できることである。また、大気・植物・土壌それぞれの系における炭素収支素過程と森林のフラックスを総合的に解析することにより、森林における炭素収支を理論的に説明することが可能となる。さらに将来的には、フラックス観測データの蓄積が、生態系モデルの高度化にも寄与する。

こうした背景を受け、当所では現地観測に基づいて森林の炭素収支を評価するために、CO<sub>2</sub>フラックスの長期観測を平成13年から開始した（写真4-5-1）。ダケカンバを主な樹冠構成種とする樹高約18mの落葉広葉樹林内に高さ28mのタワーを設立し、このタワー上で、森林上のフラックスを算定するために様々な気象要素（風向風速、放射、気温、湿度など）と大気CO<sub>2</sub>濃度を連続測定している。同時に、森林の大気・植物・土壌・土壌



写真4-5-1 落葉広葉樹林におけるフラックス測定



水それぞれの系内における炭素収支の素過程を調査し（表4-5-1）総合的に解析することで、森林における炭素動態を明らかにする計画である。これらの研究の成果は、森林シンク利用による炭素クレジット確保に必須のカーボンアカウンティング法の確立に役立つことが期待される。

### 4-5-3 沿岸海洋生態系の炭素吸収・固定量の評価

陸上の森林生態系と同様に、沿岸海洋生態系においても、光合成を行う生物が有機物を生産し（CO<sub>2</sub>固定）、一部が呼吸等の活動でCO<sub>2</sub>として再放出され、残りが生物体として貯蔵される。また、生産された有機物の一部については沿岸堆積物や深海に運搬され、最終的に生態系の中で難分解性有機物として貯蔵される。沿岸海洋生態系の中で、特にマングローブやサンゴ礁生態系は、光合成に必要な太陽エネルギーの豊富な亜熱帯・熱帯に位置することから、その生産力は大きく、CO<sub>2</sub>固定・貯蔵源として期待されている。

これまでの研究結果により、サンゴ礁については、サンゴの石灰化によるCO<sub>2</sub>放出により、温暖化対策としては必ずしも効果的なものとならないことから、サンゴ礁のCO<sub>2</sub>吸収効果については、観光資源・水産資源育成効果・防波効果・生物多様性保存効果に加えて、付加的に

取り扱うのが現実的と考えられている。一方、亜熱帯・熱帯沿岸生態系のもう一つの代表的生態系であるマングローブ生態系については、年間炭素純固定量は、マングローブ地上・地下部でおよそ5～10t-C/ha/年と推定され、熱帯雨林と同様に高いCO<sub>2</sub>吸収能力を持つと推定されている。さらに、その炭素貯蔵量はマングローブ地上部で200t-C/ha、地下部で100t-C/ha、さらに堆積した有機物は1000t-C/ha程もあると推定される。これらの量は大きい数値であるが、様々なマングローブ生態系のCO<sub>2</sub>貯蔵量の評価例は少なく、その評価手法も完全には確立されていない。また、マングローブ生態系は湿地帯であり、メタンや亜酸化窒素等の温室効果ガスが発生する可能性があることが示されており、それらの放出による温暖化効果の評価も必要となっている。

これらの知見をふまえて当所では、マングローブ沿岸生態系におけるCO<sub>2</sub>貯蔵量評価研究において、生態系における（炭素）現存量、陸上部のCO<sub>2</sub>純吸収量、有機物分解に伴うCO<sub>2</sub>放出量、有機物堆積によるCO<sub>2</sub>貯蔵量、メタンや亜酸化窒素等の収支、等の評価手法開発に取り組んでいる。結果の概要を以下に述べる。

マングローブ沿岸生態系では、海水の潮汐により生産された有機物が沿岸域に運搬後に分解され、また有機物が堆積して形成される泥炭層が非常に長期間の炭素貯蔵を行うことから、陸上生態系の群落内CO<sub>2</sub>濃度フラックスの変化のみでは、炭素貯蔵量の評価は困難である。本

表4-5-1 森林の炭素収支を解明するための当研究所における調査項目

	主な調査項目	目的
森林CO <sub>2</sub> フラックス	乱流変動法	フラックス、熱収支
	傾度法	フラックス、熱収支
	シンチロメータ法	平均化された顕熱フラックス
	関連調査項目	温湿度プロファイル 風速プロファイル 上下方向長短波放射量 地中温度・地中熱流量
土壌面CO <sub>2</sub> フラックス	チャンバー法 濃度勾配法	フラックス 年間炭素収支
炭素安定同位体比	植物・土壌・大気中炭素安定同位体比 炭素含有量	森林内炭素動態
土壌理化学性	土壌・土壌水中形態別炭素含有量 土壌水中イオン組成 雨水中イオン組成	土壌中炭素量・動態
森林基本量調査 他	毎木調査（樹高、胸高直径等） 落葉落枝量 葉量調査 個葉の光合成速度 植物体中元素含有量	生長量、バイオマス量 葉量、土壌への炭素供給量 光合成器官 基本生理反応 養分状態

研究では、まず直接マングローブ群落の光合成や呼吸を測定した。その結果、日本のような中緯度（光エネルギーが小さい）のマングローブ陸上生態系は、CO<sub>2</sub>吸収速度は5 t-C/ha/yであるが、タイのような低緯度（光エネルギーが大きい）のマングローブ陸上生態系は、さらに大きなCO<sub>2</sub>吸収速度を有することが示されている。また、マングローブ生態系の底質における有機物堆積は、数千年に渡るCO<sub>2</sub>貯蔵プロセスであるとされるが、天然放射性トレーサーを用いた堆積物の年代測定の結果、熱帯雨林土壌に比較して、より大きな炭素貯蔵効果が有ることも示された（図4-5-1、写真4-5-2）。

東南アジアでは、エビ養殖池造成のためにマングローブ生態系の消失が進んでおり、タイではマングローブ面積の半分が消失した上、造成されたエビ養殖池も経営上の理由から遺棄されている場合が多い。この伐採されるマングローブと環境が変わった低質土壌から、年間数百t-C/haの炭素が放出されると推定されている。

マングローブ沿岸生態系は水産稚仔魚の育成場所であり、また水質浄化作用や波浪に対する防波堤および護岸効果、さらに観光的価値も有する。多様な価値を持つマ

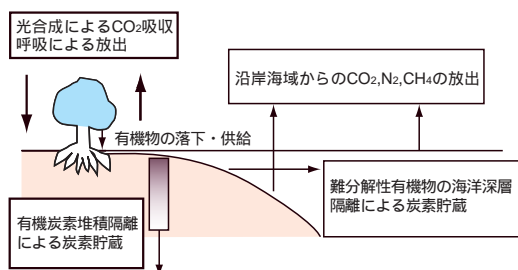


図4-5-1 マングローブ生態系におけるCO<sub>2</sub>その他の温暖化ガスの吸収・放出



写真4-5-2 マングローブ生態系における温室効果ガス収支測定の様子

ングローブ沿岸生態系保全の観点に、CO<sub>2</sub>固定・貯蔵源としての役割を付加することにより社会的な波及効果が高まることで、これら沿岸生態系の回復方策が進むことが期待される。

#### 4-5-4 クロレラを用いたCO<sub>2</sub>固定・資源化技術

クロレラ (*Chlorella*) は、微細藻類（小さな藻の総称）の一種で、高等植物等に比較して高い光合成能力を有する。光合成の結果としてCO<sub>2</sub>を吸収固定し、自分の体（藻体）に変換する。この藻体は、健康食品や家畜飼料等、さまざまな用途がある。

当所では、微細藻類によるCO<sub>2</sub>固定・資源化による温暖化抑制のコンセプトを提案した。これは、微細藻類を利用して火力発電所の排ガス中に含まれるCO<sub>2</sub>を吸収固定して藻体を生産し、それらを家畜飼料等として利用することで温暖化抑制に役立てるというものである。CO<sub>2</sub>固定産物である藻体は何十年という長期間にわたって貯蔵できるものではなく、炭素を大気中から隔離しておく効果は小さい。しかし藻体は、栄養価の高い家畜飼料として利用できる可能性がある。現状では、家畜飼料として穀物を主成分とした配合飼料が多く使われている。飼料穀物の生産では、畑での耕作の際に作物残さの堆肥化や土壌中の微生物による肥料の分解によって、強力な温室効果ガスであるメタンや亜酸化窒素が発生する。一方、藻体の生産ではこのような温室効果ガスを発生する可能性が少ない。当所の試算では、1 t-Cの飼料穀物を藻体飼料で代替すれば、約6 t-CのCO<sub>2</sub>に相当するメタンや亜酸化窒素の放出を抑制することが可能である。さらに本方法は、農耕地に適さない土地でも適用の可能性があるので、将来の飼料穀物増産のための森林耕地化を抑制する効果もあわせ持つと考えられ、CO<sub>2</sub>の吸収源である森林の保護についても潜在的な効果を持っていると考えられる。

このコンセプトを実現するため、さまざまな技術開発を進めた。本技術は、太陽光を利用する光合成を基本とした技術である。このため、生物的、工学的なアプローチにより、従来技術よりも極めて光合成生産性の高い新規技術確立を目標とし、新しい光バイオリクター開発や、新規の有用なクロレラを発見する等の成果を修めた。

新しい光バイオリアクターの特徴や概略を図4-5-2に示した。このバイオリアクターは螺旋状チューブリアクターと呼ばれ、光合成の効率が高いなどの特徴を持ち、基本ユニットを連結化することで、容量増加を図ることができる。また、排ガスを直接バイオリアクターに吹き込んで成長するクロレラ、高温でも活発に成長するクロレラなど、当所が新たに発見した新規株を用いることで、年間を通じて効率的に培養することも可能であることを示した。

これらの技術を適用した場合にCO<sub>2</sub>固定・資源化できる量は、培養に用いる土地面積によって規定される。例えば、60万KW級LNG火力に適用した場合、排出総量の10%を固定するためには2,000haという広大な面積が必要である。COP3で議論された現実的な数値目標への

貢献を考えた場合、難しい面があるため、現状では技術適用の誘因は大きくなっていない。しかし、人類にとって必要な資源を作るという点では、大きな意味がある。すなわち、現在の農業で同じ量の穀物飼料を作る場合、約10～20倍の面積の耕地が必要である。将来的には、自然環境に負担の少ない小型で経済的な技術が必要となってくると考えられるが、本技術は生物資源生産の分野でこれに寄与するものであろう。微細藻類を利用した効率的なCO<sub>2</sub>固定・資源化技術に関する研究は、90年代を通じて、国のプロジェクトや、当研究所をはじめとして電力各社において行われ、広範な技術を生み出した。今21世紀にグローバルな視点から、温暖化抑制への貢献のみならず人口・食糧問題については人類の幸福に貢献できる重要な技術として、発展が期待される。

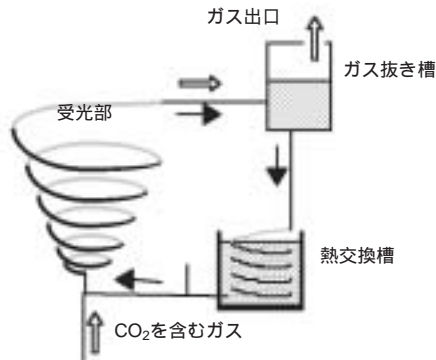
・リアクターの特徴

- 受光面積/設置面積：大 → 光エネルギーの利用効率：向上
- CO<sub>2</sub>吸収経路：長 → CO<sub>2</sub>利用効率：高
- 半閉鎖系のシステム → 他の微生物の混入：少
- 通気による培養液の循環 → リアクター運転エネルギー：低減

・連結化したリアクターの写真



・リアクターの該略図



・大規模化のイメージ図



図4-5-2 クロレラを用いたCO<sub>2</sub>固定光バイオリアクターの概念図

## コラム 12 : 人工衛星による葉面積の計測

森林は、降水の河川への急激な流出を防ぐなど、人々が安全かつ快適に生活していく上で重要なさまざまな役割を果たしている。当所では、こうした森林の役割を積極的に利用して、降水を有効に水資源化する方法を検討している。広範囲の森林状況を把握するためには、衛星データの利用が効率的である。そこで、わが国のダム流域を対象に、人工衛星がとらえた様々な波長の電磁波のデータを解析し、森林の分布、種類、および葉量などの森林植生の計測技術を開発した。

森林の葉の茂り方は、雨水が樹木に遮断されたり、葉から蒸散する量に関係し、ダムに蓄えられる水量を左右する重要なパラメータである。この葉の茂り方は、地表に何枚の葉が重なっているかという葉面積指数（LAI）で表すことができるが、これまで、広域で定量的に測定する方法がなかった。そこで、森林調査と衛星データによる解析から、日本全域での1km四方ごとの葉面積測定法を開発した。

具体的には、スギやヒノキの人工林で樹木を伐採して葉面積を実測するとともに、葉に遮られる太陽光の強さを測定することで葉の面積を計測し、こうした地上のデータをフランスの地球観測衛星が

観測した20m四方単位の植生分布と比較し相互の関係を定式化した。これに米国の観測衛星で撮影した約1km四方単位の植生の様子をもとに葉面積の分布を計算する方法を開発し、1km四方という細かいブロック単位で分かるようにした。

樹木によって葉のしげり方が違うため、森林からの水蒸気発生量などをより正確に割り出すには、森林の面積ではなく、葉の総面積を知る必要がある。葉の総面積のデータは地球規模で100km四方のものが存在するが、日本国内を詳しく見るには粗すぎた。今回の方法は、日々の衛星データから分布図が得られるため、季節ごとの変化を追うなど、よりきめ細かい利用が可能となった。

葉面積の把握により、森林の水蒸気発生量や光合成の能力などについて、従来より厳密に森林の効果を考慮した気象や水循環の計算が可能となる。また、正味の緑の増減が正確につかめるので、地球温暖化に関係する森林の二酸化炭素吸収量の評価にも活用できると考えており、現在、NEDO/JOIA（日本海洋開発産業協会）からの受託研究の一環として、石垣島や東南アジアのマングローブ林を対象に、本手法を使った炭素貯蔵量推定法の開発を行っている。

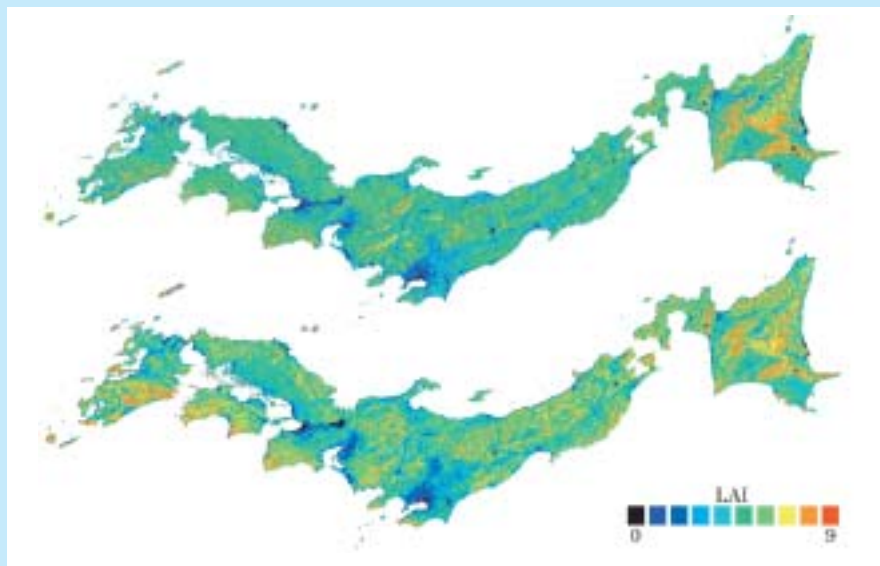


図1 日本全域の葉面積指数最大値マップ  
上図：植生図、土地利用図、文献値により作成した文献値マップ  
下図：衛星データ、変換式、補正計数により作成したマップ

## 4 - 6 ま と め

地球温暖化の原因やメカニズムには、未解明の点や不確かさが多々ある。しかし、有効な防止対策を講ぜず、放置したまましていると、温暖化の影響が顕在化した時の対策コストは膨大になるだけでなく、原状回復が困難か、既に手遅れになっている危険性が高い。これが地球温暖化問題の特質である。

本章では、当所が行っている、国や電気事業における温暖化防止・軽減対策を支援するための政策・制度的側面および技術的側面に関する研究を紹介した。

### [ 政策・制度的側面 ]

京都議定書の批准・発効に向けて、国内法の整備や制度設計に関する具体的な議論が進められている。

京都メカニズムの中で、ボン会議（COP6再会合）で最大の争点となった「遵守システム（罰則規定）」における「法的拘束力のある措置」の解釈について、わが国の主張（「強制」ではなく「促進」が、国際条約への参加や履行を円滑にするための基本である）に政策科学面で貢献し、最終決定はCOP7に委ねられることになった。

環境税には二つの目的がある。すなわち、化石燃料の価格を人為的に引き上げるによりその節約を促すこと 得られた税収で所得税や法人税など一般的な税を軽減することにより経済全体の効率性を高めること。産業構造の“脱炭素化”を目標に炭素税を導入する場合は、炭素含有量に比例して課税し、減免措置は設けず、税収は公共投資に支出する場合に最も経済的ダメージが少ないことを明らかにした。

市場メカニズムを活用したCO<sub>2</sub>の国内排出権取引を、仮想電力産業内で排出量制約と供給義務制約の下で行う場合、電力取引とCO<sub>2</sub>排出権取引、各社の発電設備の形成と運用がどうなるか、の実験を行い、その仕組みや効果を明らかにした。利益の最大化には、当該電力の需要規模や原子力の導入計画、不遵守罰則金の導入形態、等に依存することを明らかにした。

温暖化抑制対策の一つとして注目されている再生可能エネルギーによる発電を促進するための「グリーン証書取引システム」について、再生可能エネルギーの地域偏在性に起因するコスト上昇を抑制できることを、海外事例を踏まえて解説した。

### [ 技術的側面 ]

排ガスからのCO<sub>2</sub>回収・処分技術については、電気事業としてのフィジビリティ・スタディが完了し、国の研究開発方針でも、2030年以降の技術と位置づけられていたが、京都議定書を巡る国際交渉において産油国の参加を得るには、欠かせない技術として再浮上する機運にある。本章では、実規模プラントを想定した排ガスCO<sub>2</sub>の回収・隔離技術のFSの結果と回収CO<sub>2</sub>の海洋隔離・地中処分技術の評価・課題についてまとめた。

また、当面、豊富な石炭を温暖化対策技術として有効活用するために、CO<sub>2</sub>回収型発電システム「水素分離型石炭ガス化複合発電」を紹介した。これによって、発電効率を低下させることなくCO<sub>2</sub>の分離回収が可能で、海洋隔離技術などとの組み合わせでCO<sub>2</sub>の排出を大幅に抑制できることが示された。

京都議定書における「森林シンク」の扱いに関する科学的透明性を高めるために、陸上の森林生態系や沿岸の生態系（マングローブや珊瑚礁等）のCO<sub>2</sub>吸収源としての効果を評価する研究を紹介した。また、クロレラ等の微細藻類の高い光合成能力を利用してCO<sub>2</sub>を固定し、家畜飼料等として有効利用できる微細藻類の藻体として資源化する技術を取り纏めた。生物やバイオ技術を利用したCO<sub>2</sub>固定・資源化技術は、生態系のもつ自然サイクルを最大限活用する試みであり、長期的取組みが必要である。

IPCC TARでも指摘されているように、現在の地球温暖化は人間活動に由来する温室効果ガスの増加が原因であるから、真の温暖化防止対策はその排出を減らすことで、森林吸収や炭素固定化等の対策は本流ではない。

今後予想される国際的な大幅削減に向けての動きに対応するには、効率向上や節約などの省エネルギーの徹底と低炭素・無炭素排出エネルギーへの燃料転換、等による温室効果ガスの大幅な発生抑制とそれが実現可能な社会システムの構築である。

温暖化防止対策への取組みには国際協力・協調が不可欠である。そのため、内外の研究機関と連携し、特に、アジア・大洋州の持続的発展を保証する温暖化抑制策を推進することがわが国に課せられた課題であり、当所の課題でもある。