

CO₂回収—海洋投入システムの経済性評価Economic Evaluation of Systems for the Recovery and Disposal of CO₂ in the Ocean

石谷 久*・松橋 隆治**・大村 昭士***・竹田 研一朗****

Hisashi Ishitani Ryuji Matsuhashi Syoji Oomura Kenichiro Takeda

(1992年7月28日 原稿受理)

1. はじめに

地球温暖化問題はその影響範囲の大きさと、人類の生存活動にかかせないエネルギー消費そのものから発生するCO₂が主要因であるという意味で、従来の産業廃棄物による汚染とは異なり抜本的な対応が迫られている。従って、CO₂排出の抑制策が極めて重要であるが、これは本質的には、省エネ、燃料転換、排ガスからのCO₂回収投入、あるいは光合成による大気中のCO₂固定(植林等)に限定される。これらの方策も现阶段では単独で地球温暖化問題を解決できるとは考えられずいずれも重要な課題として、全ての可能性を検討する必要がある。また、地球温暖化についての予測には大きな不確実性が伴うため、対策の実行は慎重に検討しなければならない。この点で、科学的知見の蓄積に努めることも必要であるが、我々工学者の重要な役割の一つは、実行可能な対策のリストを作り、その技術的問題点、経済性、環境への影響を分析しておくことにある。その上で、現実の社会状況と科学的知見の蓄積に伴い、CO₂低減策を実行に移す必要ができたときに、優位度の高いものから実行していけばよい。

著者らは文献[10]で省エネルギーと燃料転換によるCO₂抑制の経済性と削減可能性を算定し、文献[9]では、発電所からの効率の良いCO₂回収方法を提案し、文献[1]では回収されたCO₂の処分の方法とその技術的問題点を検討してきた。本論文では、文献[1]に引き続いてCO₂回収とその投入について検討した結果の一部を報告する。この考え方はそもそもSteinberg²⁾により具体的な検討がなされて以来多くの場面で議論されており、太陽などの非化石エネルギーへの

転換によりCO₂発生を抑制するという超長期的な最終策³⁾に至るまでの当面(数十年~百年)の対応策の一つとして位置づけられる。文献[1]において著者らは、CO₂海洋投入の技術的な可能性に焦点を当てて検討した。また、海洋の生態系への影響については、きわめて単純な仮定の基に検討された結果を示した。その後、技術的な可能性については文献[4, 5]においてより詳細な検討がなされている。また、海洋生態系への影響についても、ハイドレート生成の条件とその安定性についての検討結果が報告されるにいたり^{6) 7)}、徐々に成果が得られつつある。

CO₂の処理についての検討は常にCO₂の回収との関連を念頭におかなければならない。

なぜならば、発電所などの大規模発生源からの効率的CO₂回収法や回収されたCO₂の貯蔵及び港湾までの輸送システムが、CO₂処理の経済性を決定する重要な要因となっているからである。幸い、この分野でも朴ら⁸⁾や著者ら⁹⁾によってさまざまなシステムの検討が進んでいる。

本研究では上記のCO₂の回収、海洋投入のシステム全体における経済性の評価をおこなったので、ここにその結果を報告する。

2. 海洋投入システムの概念と構成要素

2.1 海洋投入システムの基本概念

CO₂の海洋への直接投入の方法としては、(1)圧縮液化、パイプ直結投入、(2)圧縮液化、運搬、投入の二方式があり、文献[1]で検討したように(2)の方が技術的可能性が高いとの結論を得た。

2.2 海洋投入方式と必要な主要施設

船舶輸送方式においては、基本的に以下の(1)~(5)に示すような設備を必要とする。

(1) 常圧から液化CO₂までの圧縮機(CO₂の貯蔵を考慮すると必要容積の少ない液化CO₂が有利であり、液化のための圧縮機が必要である。)

* 東京大学工学部資源開発工学科教授

** " " 助手

*** " " 助手

**** " " 助手

〒113 東京都文京区本郷7-3-1

- (2) 各圧縮拠点から海岸の送出地点（港）の貯蔵タンクにCO₂を送るパイプライン網
- (3) オペレーションの信頼性向上とCO₂投入負荷平準化のための貯蔵タンク
- (4) 海岸の送り出し地点から洋上（投入）ステーションまでのCO₂運搬タンカー
- (5) 洋上ステーションから海洋投入点までCO₂を送り出す垂直パイプ

上記の設備のうち(1)、(2)については、CO₂を液化せず気体で高圧パイプライン輸送し、港で液化し貯蔵する方法も考えられるが、港湾設備への負担を考慮し、液化設備を発電所で確保することとした。

また(2)、(3)については、各発電所の立地および電力需要の変動によって、パイプラインの必要長や貯蔵タンクの必要容量が異なるため、後述のコスト試算には含めないこととした。この点は今後の課題である。

3. CO₂の投入後の挙動について

投入されたCO₂が深海中でどのように拡散していく、付近の海洋にどの程度の影響を及ぼすかという問題は本研究の中心課題である。これについては、文献[1]で若干の予備的検討を行った。しかしながら、文献[1]でも述べたように深海におけるCO₂の挙動を分析するためには、未だに究明されていない多くの不確実性が伴い、それらの中には実験で解決しなければならないものもある。分析の目的としては次の二点が特に重要である。

- (1) 投入されたCO₂の深海中での拡散
- (2) 拡散したCO₂が付近の海洋に及ぼす影響（pHの変化など）

(1)は、CO₂の海洋投入システムの成否を決定する重要部分であり、この点からCO₂の海洋投入に関し二つの考え方ができる。

一つは、投入されたCO₂が長期間に渡り、深海にとどまっていることを再重要と考える場合である。この場合は、洋上ステーションからの垂直パイプを最大限の深さにまで、すなわち、CO₂溜りの真上まで伸ばすことになる。この場合はCO₂の海洋表層への拡散を最小限に抑えることができるが、一方では、付近の海底に住む底生生物に大きな影響を及ぼす。

もう一つは、底生生物への影響を避けるため、パイプの深さを3000mで止めてしまう場合である。文献[1]では深海流の影響を無視するという前提条件の下で分析をおこなった結果、3000mからの放流の場合で

も、大部分は4000mの地点まで達するという結論を得た。しかし、実際には深海流の影響で、海底に達する前に安定したCO₂の降下流が消滅する可能性がある。こうした状況の分析は厳密にはパイプからのCO₂の流れと、深海中の海水の流れ（深さにより流れの方向が異なる）を含んだ複雑なモデルとなる。さらに、低温高圧下でのCO₂ハイドレートの生成がCO₂の拡散にどのような影響を与えるか、また大流量のCO₂降下流の中でどのようにハイドレートが生成するかについていまだ不明な点も多い。これらの点については、今後実験的検証を含めた研究が必要とされる。

4. CO₂海洋投入システムの経済性評価

本節では、CO₂の回収から海洋投入にいたるシステム全体についての経済性評価を試みる。文献[10]で述べたように、ある対策技術が市場に導入されるための、いわゆる市場導入コストは(1)式のように表わされる。

$$P_c = \frac{\Delta I \times \alpha + \Delta (p \times E)}{\Delta (CO_2)} \quad (1)$$

P_c : 当該対策の市場導入コスト

p : 燃料単価

E : 燃料消費量

Δ(p×E) : 当該対策導入の際の燃料コストの導入前からの変化分

Δ(CO₂) : 当該対策導入によって削減されるCO₂放出量

ΔI : 当該対策による資本コストの導入前からの変化分

α : (均等化)年経費率

(1)式を用いて市場導入コストを算定する際以下の点に注意する必要がある。

(a) (1)式にみられるように経済性評価の鍵となるのは、対策導入の前後における費用の変化分である。したがって、何から何への転換であるかに注意しなければならない。このことを発電所からのCO₂回収を例に述べる。今、微粉炭火力発電所があるとする。この発電所が耐用年数を終え、更新するときにCO₂処理設備を付加することを考える。このときの方法は図-1のように三通り考えられる。IGCC (Integrated coal Gasification Combined Cycle の略であり、石炭ガス化複合発電を意味する。)における燃焼前のCO₂回収設備とは、著者が文献[9]で検討した方法である。これは、石炭をガス化した後、燃料改質によ

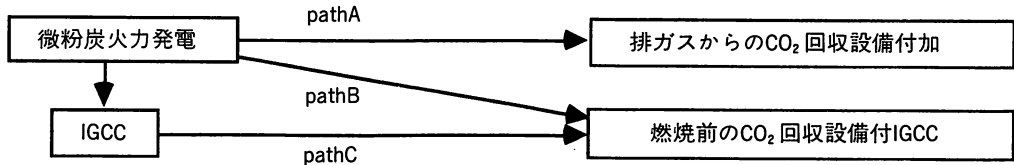


図-1 石炭利用発電技術のCO₂処理設備の付加方法

により CO の持つエネルギーを H₂ に転化し、その結果生成した CO₂ を燃焼前に除去してしまう方法である。この方法では、ガスが大気と混合される前の高濃度の CO₂ を除去するので効率低下を抑制できる^{*)}。

三通りの方法の中で path A については、効率低下が著しいことがすでに文献[8]などで指摘されている。そこで、本論文では path B と path C を比較した。ただし、path B は微粉炭火力と CO₂ 回収設備付き IGCC とのコスト比較であり、path C は IGCC (回収無し) と CO₂ 回収設備付き IGCC とのコスト比較である。

(b) 当然のことながら、経済性評価の結果は資本費、燃料費などの前提条件によって全く異なる。したがって、市場導入コストの算定結果だけでなく、導入される対策の資本費、燃料費などの前提条件が明示されて

いることが重要である。

以下では、CO₂回収-海洋投入システムの諸設備について説明し、上の二点に留意しつつ、市場導入コストを(1)式に基づいておこなう。

4.1 CO₂回収設備を持つ発電所のコスト

エネルギー・電力需給の長期展望(電力中央研究所)¹²⁾によれば、通常の IGCC の資本費は 35~42 万円/kW である。一方、著者らは CO₂ の回収について IGCC と CO₂ 回収を組み合わせたプラントの検討を行ってきた。(文献[9]) これによると、CO₂ 回収液化設備を持つ IGCC の建設コストは 40 万円~51 万円/kW となる。この算定の内容を表 1 に示す。ただし、表 1 には後述する CO₂ 処理設備の費用項目も含まれている。また、CO₂ の圧縮液化設備のコストは毎秒 4 Nm³ (0.248Mt/年) の CO₂ を圧縮する能力を持つ場合に 3.5 億円と見積られている。CO₂ 回収、液化を含んだ総合的な発電効率は通常の IGCC の発電効率より 6.0 ポイント劣るため、燃料費は 1.1 円/kWh だけ上昇する。

稼働率については、'84 の石炭火力の全国平均値を基に 61.3% とした。

4.2 CO₂ 海洋投入システムのコスト

著者らは文献[1]で、海洋投入設備の具体的構成とその妥当性を検討した。

文献[1]によれば、CO₂ タンカーは一隻 800 億円で積載量 0.15Mt のものを 3 隻用意する必要がある。一方、洋上基地の建設費は CO₂ 投入能力が 39.5Mt/年である時、建設費は 201~251 億円と推定される。ただし、これは、関東地方の全ての火力発電所から排出される CO₂ を輸送しうる容量なので、費用評価のさいには前提とした発電所の容量と整合性がとれるようにする。

また、海洋投入の可変費については、文献[1]では、CO₂ の積み出し港から 150km 以内の地点での投入を想定しているが、地方により(例えば、関東の A 電力会社と関西の B 電力会社では)タンカーの輸送距離が全く異なるため、それによる燃料費その他の可変費は、ここでの算定に含めないこととする。

表 1 CO₂回収-海洋投入関連設備費用と市場導入コストの算定 (path C)

費用算定の主要な前提条件			
発電プラント(CO ₂ 回収関連設備)		本論文	文献[11]
稼働率	%	61.3	68.5
建設費(未回収)*1	万円/kW	35.0~42.0	15.4
	(回収) 万円/kW	39.6~51.2	20.2
年経費率 *2	%	20.0	10.0
発電効率(未回収)	%(HHV)	42.1	42.0
発電効率(回収)	%(HHV)	36.1	36.7
燃料費(未回収)	円/KWh	6.77	2.31
燃料費(回収)	円/KWh	7.90	2.65
海洋投入関連設備		本論文	文献[11]
CO ₂ タンカー	億円	2400	
積載量	Mt	0.15	
洋上基地(最大)	億円	500	
	(最小) 億円	400	
能力	t/s	2.50	
Pc*3(最大)	万円/C-t	2.33	0.64 *4,5
	(最小) 万円/C-t	2.05	/

*1 CO₂ 回収、液化設備を含む。

*2 プラント 償却費、運転補修費を含む年経費をプラントの建設費で除した値。

*3 地上での液化 CO₂ パイプラインや CO₂ 貯蔵タンクの費用は、地域によって差がでるためこの算定に含まれていない。

*4 文献[11]では、コスト算定に際し最大値と最小値の幅を持たせていないので、最大値の欄にその値を示した。

*5 文献[11]では、ガス田への加圧注入を前提としているため、海洋投入関連設備のコストは含まれていない。

*6 1 Dfl=70円とした。

4.3 市場導入コストの推定結果

以上の前提を基に、IGCCをCO₂回収設備を持つIGCCに転換した時(path C)の市場導入コストP_cは2.0~2.3万円/t-Cと推定された。

ここで、前に述べた注意点(a)を検証してみる。前に述べたように商業運転をおこなっているIGCCは存在しない。文献[9]で提案されているようなシステムが実際に導入されるとすれば、現在ある微粉炭火力が耐用年数を終えた時点で、代替される可能性もある。すなわち、微粉炭火力 → CO₂回収設備付IGCC (path B)という技術転換になる。この場合は微粉炭火力の資本費がIGCCより低いため、市場導入コストは高くなり、3.0~4.3万円/t-Cと推定された。算定結果を表2に示す。このように何から何への技術転換であるのかを注意しなければならない。

次に注意点(b)を検証する。実は同様のCO₂回収システム概念をHendriksらも検討している。[11]この文献によれば、回収システムがほぼ同じであるにもかかわらず、CO₂低減コストは、上記の値の半分以下となっている。これを表2に示す。

著者らはこの算定の内容を本論文の算定と比較検討し、その差が主にIGCCの固定費と可変費のデータの差によることを確認した。(算定の基準となる通常のIGCCのデータに差があれば、それを基にしたCO₂回収システムの費用は当然異なる。)そこで、IGCCの固定費と可変費に注目して、文献[11]の算定と本研究との比較をおこなった結果を図-2に示す。図-2は三次元グラフのx、y軸方向に通常のIGCCの固定費と可変費をとり、z軸方向にCO₂低減のための市場導入コストを示したものである。また、図-2では比較結果を分かりやすく示すため、固定費、可変費以外のパラメータは著者らが用いた値に統一し、文献[11]のコストには海洋投入関連設備を加えている。これより、両者が前提とした固定費と可変費のデータに大きな差があり、これにより算定結果の差の主要な部分が説明できることがみてとれる。

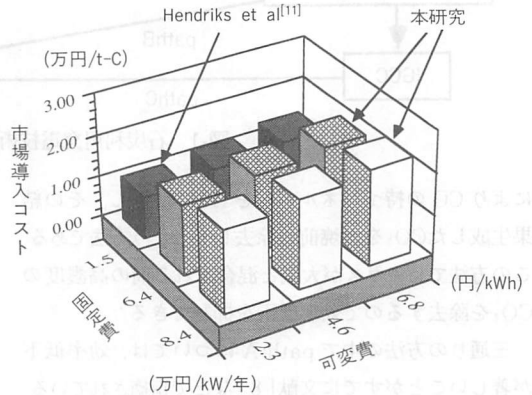


図-2 前提条件の相違によるCO₂回収処理の市場導入コストの差 (path C)

また、当然のことながら、ここでの評価結果はそのほかの前提条件にも依存する。特にCO₂回収システムを持つ発電プラントの稼働率は市場導入コストの算定結果に大きな影響を及ぼす。図-3には、IGCC → CO₂回収設備付IGCC (path C)の転換における市場導入コストとプラントの稼働率の関係を示す。このようにプラントの稼働率が低下すると市場導入コストは急激に上昇する。したがって発電所からのCO₂回収を議論する場合、発電所の稼働率を高めることが重要である。しかし、発電所の負荷分担は電源構成全体の最適化により決定され、通常原子力と一般水力が負荷のベース部分を占め、それに次ぐミドル部分を石炭火力が占めている。この意味で電力の負荷平準化がCO₂除去コスト低減の鍵となる。このように、個別の対策の評価をおこなう場合でも、最終的にはトータルエネルギーシステムの構成いかんにより、その経済性が左右されることに注意すべきである。

著者らは、燃料費などの前提条件に留意しながら、省エネルギーなど他のCO₂削減技術の評価もおこなってきた。図-4¹³⁾には、それらのCO₂低減策と今回評価したCO₂の回収—海洋投入の経済性およびCO₂低減

表2 CO₂回収—海洋投入の経済性の推定結果

path B : 微粉炭火力発電→CO ₂ 回収設備付IGCC (本研究)	3.0~4.3万円/t-C
path C : IGCC→CO ₂ 回収設備付IGCC (本研究)	2.0~2.3万円/t-C
path C : ただし、算定はHendriks et al ¹¹⁾ による	0.6万円/t-C*

* 文献[11]では、回収されたCO₂は海洋ではなくガス田に圧入することを検討しているため、CO₂タンカーや洋上基地などの海洋投入関連設備はコスト算定に含まれていない。

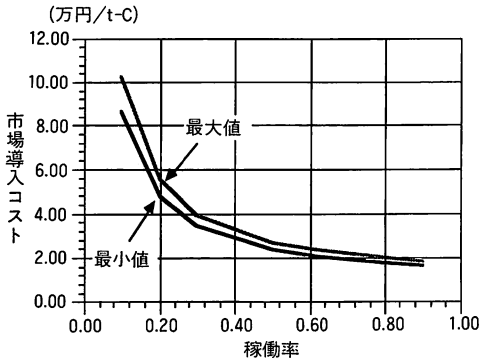


図-3 CO₂回収処理の市場コストP_cと回収プラントの稼働率の関係

可能量(日本にある石炭火力発電をCO₂処理設備付IGCCに置き換えた場合)を比較した結果を示す。また、付録の表3には評価の対象とした技術項目のリストを掲げた。CO₂の低減策としては、表3に挙げたもの以外に植林、原子力発電、太陽光発電をはじめとす

表3 評価の対象としたCO₂削減技術項目

1	鉄鋼	平炉の転炉化
2	鉄鋼	直送圧延
3	鉄鋼	高炉炉頂圧発電
4	鉄鋼	転炉ガス回収
5	鉄鋼	密閉転炉ガス回収
6	鉄鋼	コークス炉調湿炭
7	鉄鋼	連铸設備
8	鉄鋼	コークス乾式消火設備
9	鉄鋼	乾式高炉炉頂圧発電
10	鉄鋼	スラグ顕熱回収
11	鉄鋼	連続焼鈍炉
12	鉄鋼	溶融還元プロセス
13	セメント	中低温発電
14	セメント	NSP
15	セメント	縦型ミル(仕上工程)
16	セメント	縦型ミル(原料工程)
17	紙・パルプ	高性能面圧脱水装置
18	紙・パルプ	高性能サイズプレス装置
19	紙・パルプ	予備浸透型連続蒸解装置
20	紙・パルプ	置換漂白装置
21	紙・パルプ	高性能パルプ洗浄装置
22	発電	石炭加圧流動床複合発電
23	発電	IGCC
24	発電	複合発電(天然ガス)
25	民生業務	一戸建て断熱材(50mm厚)
26	民生業務	一戸建て断熱材(100mm厚)
27	民生業務	集合住宅断熱材(50mm厚)
28	民生業務	集合住宅断熱材(100mm厚)
29	民生業務	業務ビル断熱材(50mm厚)
30	民生業務	業務ビル断熱材(100mm厚)
31	発電	CO ₂ 回収・海洋投入システム

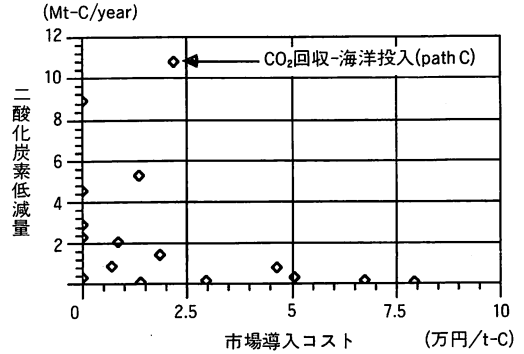


図-4 CO₂低減策の市場導入コストとそれによるCO₂低減可能性の関係

る再生可能エネルギーの導入などが考えられる。しかし、植林は土地の制約や耕地用の土地との競合、施肥や灌漑施設など費用評価をおこない難い問題点があり、原子力発電は社会受容の問題点を抱えている。また、太陽光発電は超長期にはともかく現段階ではあまりにも高コストで導入量にも限界がある。したがって、ここでの評価は上述のような問題点がなく、中短期的に実現可能と考えられる省エネルギー技術に限定した。

市場導入コストが10万円/t-C以上の方策は、現時点での実行可能性が小さいと考えられるため、図-4には10万円/t-C以下のもののみ示した。

図-4は次のことを示唆している。すなわち、CO₂回収プラントが、現状の石炭火力発電の平均稼働率である60%程度を維持できれば、その経済性は他の対策と比較しても、決して実行不可能なほど高い値ではない。しかし、CO₂海洋投入において、最も重要な問題は海洋環境、特に海洋生物環境への影響であって、投入点直下のCO₂貯蔵地点では当然生物の生存は不可能となる。更に文献[1]で述べたように、予備的検討の結果によれば、長期間に及べば投入地域の周辺かなり広い範囲にわたってCO₂が拡散し、そのpHを下げ、生物の生存環境に影響を及ぼす可能性がある。したがってこうした海洋環境への影響を十分に解明した上で、なお他の対応策と比較して優位と判断されるまでは、この対策はおこなうべきではない。

5. おわりに

以上、CO₂海洋投入の経済的可能性の評価結果を示した。本研究の主な成果は以下に要約される。

(1)CO₂の回収-海洋投入システムを構成する各設備の積み上げによって、この対策の市場導入コストを算

定した。(表1,2)

(2)この推定結果がどの前提条件により主に影響を受けるかを検討した。特に我々の評価結果と同様の概念でCO₂の回収システムの検討をおこなっている文献[11]との結果を比較し、両者の差が主にIGCCの固定費と可変費の前提条件の差異により説明できることを示した。(表1,図2)

(3)発電プラントの稼働率と、CO₂低減策としての経済性の関係を定量的に分析し(図-3)、以下の示唆をえた。発電所からのCO₂回収を議論する場合、発電所の稼働率を高めることが重要である。しかし、発電所の負荷分担は電源構成全体の最適化により決定され、通常原子力と一般水力が負荷のベース部分を占め、それに次ぐミドル部分を石炭火力が占めている。この意味で電力の負荷平準化がCO₂除去コスト低減の鍵となる。このように個別の対策であってもトータルエネルギーシステムの立場から評価することの重要性を示した。

(4)CO₂の回収-海洋投入システムの経済性を、現在実行可能な省エネルギーその他のCO₂低減策と比較し、少なくとも経済的には実行可能であるとの結果を得た(図-4)。しかし、本文中で述べたように、地上での液化CO₂パイプラインやCO₂貯蔵タンクの費用は、地域によって差がでるため今回の算定に含まれていない。また、CO₂海洋投入において、最も重要な問題は海洋環境、特に海洋生物環境への影響であって、投入点直下のCO₂貯蔵地点では当然生物の生存は不可能となる。更に文献[1]で述べたように、予備的検討の結果によれば、長期間に及べば投入地域の周辺かなり広い範囲にわたってCO₂が拡散し、そのpHを下げ、生物の生存環境に影響を及ぼす可能性がある。したがってこうした海洋環境への影響を十分に解明した上で、なお他の対応策と比較して優位と判断されるまでは、この対策はおこなうべきではない。

今後は本論文で検討した経済性評価と最も重要な問題である海洋環境への影響評価の精度を高め、さまざまなCO₂低減策を総合的に評価するとともに、その中での本対策の位置付けを明確にしていきたい。

謝辞

本検討を行うにあたって、多大な御助力を頂きました三井造船特機システム事業部大桑義昭課長に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 石谷, 松橋, 大村, 島田, 須藤, CO₂の海洋投入に関する技術的可能性評価, エネルギー資源学会誌, pp66~73 vol. 12 No.3, 1991
- 2) Steinberg, M. et al "A Systems Study for the Removal, Recovery, and Disposal of Carbon Dioxide from Fossil Fuel Power Plants in the U.S.", BNL35666 Informal Report (1984).
- 3) 佐野, 石井, エネルギーと地球環境の同時解決を目指して, エネルギー資源, Vol.11, No.2, pp 5-10, 1990
- 4) 浅井, 尾崎, 高倉, 末竹, 二酸化炭素の深海への送り込みシステムについて(その2), 日本造船学会論文集 第171号, pp 135-145, 1992
- 5) 古林義弘, 液化CO₂の深海投入について, 日本造船学会論文集 第171号, pp 531-543, 1992
- 6) 田中, 増田, 長縄, 荒川, 高圧下における二酸化炭素の挙動に関する研究, 第8回エネルギーシステム経済コンファレンス講演論文集 pp357-360, 1992
- 7) 大垣, 井上, Gas Hydrateを利用した気体の海底貯蔵に関する研究, 第8回エネルギーシステム経済コンファレンス講演論文集 pp373-376, 1992
- 8) 朴, 中村, 鈴木, 二酸化炭素回収石炭ガス利用高効率発電システム, 電気学会論文誌B, Vol.110, No.2, 1990
- 9) 松橋, 石谷, 朴, 石炭ガス化複合発電における効率的CO₂回収方法の検討, 電気学会論文誌B, Vol. 112, No. 6, 1992
- 10) 松橋, 石谷, 茅, 永田, 山地, CO₂放出量低減策の経済性評価, エネルギー資源学会誌, Vol. 12, No. 5, 1991
- 11) C.A. Hendriks, K. Blok and W.C. Turkenburg, Technology and cost of recovering and storing carbon dioxide from an integrated gasifier, combined cycle plant, Report number Lucht 92, State University of Utrecht, 1990
- 12) エネルギー・電力需給の長期展望, 電力中央研究所, 1984
- 13) 松橋, 古垣, 石谷, 茅, CO₂放出量低減策としての省エネルギーの経済性評価, 第8回エネルギーシステム経済コンファレンス講演論文集 pp285-290, 1992