

# 二酸化炭素問題対策とエネルギー利用

展望

小島紀徳\*

## Measures for Carbon Dioxide Problem and Utilization of Energy

Toshinori KOJIMA

### 1. はじめに (エネルギーと地球環境をどうとらえるか)

地球環境問題に関連する事項を年表として表1に示す。ローマクラブ<sup>†</sup>の「成長の限界」、昭和47年、これは我々の世代(ちなみに私は、学部卒50年)にとって非常にインパクトの大きな出来事であった。世界で、地球で、資源量特にエネルギー資源は有限だと指摘したものであった。その後、いくつかの重要な会議が開催されたが、IPCC<sup>†2</sup>の第1回の会合は昭和63年であり、これから一般の間にも地球環境が「有限」との認識が広がってきたと考えられる。

地球環境問題としては、水、砂漠化、気候、熱帯林、野生動物、海洋汚染、核廃棄物汚染、酸性雨、オゾンなどであり、人口、食料、エネルギー、資源がこれを取りまく問題であると認識されよう。これらの根本は、先進国の意図によるところが大きい「開発」、「消費」と途上国の「人口」の問題に帰結されることは明らかである。が、従来技術を適用あるいはその延長上にある技術を開発、適用しさえすれば、あるいは一部の物質の生産・使用をやめ、代替品に置き換えることで解決できるであろう問題もある。各国が採用する(できる)かどうかは問

題であるが、オゾン層、酸性雨、海洋汚染、核廃棄物汚染はこれにあたる。これらの問題は、たとえば開発途上国に適した脱硫法等の開発など、個別の問題は残るが、我々も含めて衆知と投資を結集し、ことにあたれば決して不可能なことではないように思える(と期待したい)。途上国の人口問題と開発にかかわる、水、砂漠化、気候、熱帯林、野生動物、そして食料の問題については南北問題という大きなバリアが存在するが、これも双方の重要性の認識の上に立ち、先進国側の開発を抑え、かつ再生産(破壊だけではなく)のための努力と、途上国の教育、人口の問題を解決するための努力が進められれば、解決されていくはずの問題である。いや決していかなくてはならない問題である。

再度誤解の無いように申し添えると、これから述べることは、もちろん超長期的には重要な事項となる可能性が高いが、現在における状況は二酸化炭素問題の対策技術の開発よりもむしろ、民意に合致した安全性や廃棄物処理の問題をクリアした原子力発電、酸性雨などの原因物質の排出抑制などの方が先決ではあると考える。実際、我々の研究室でも、石炭利用との立場にたったエネルギー・環境に関連するテーマにむしろ重点をおいており、二酸化炭素問題についてはむしろ世の中の誤った研究の方向性を打破するための論理づくり、本質の理解と対策技術の可能性を本質的に立脚して基礎から検討している段階である。我々は、化学技術の分野に属する一介の研究者であるが、こと二酸化炭素問題については従来の化学技術(生物利用も含む)に立脚した、本質的な対策技術はありえないと理解しており、また、それを研究として取り上げるつもりはない。従来の分野が化学であるといつて、こじつけたテーマを研究テーマとして取り上げてはならないと考えている。

さて、はじめに述べた地球環境問題の中で、地球温暖化、特に二酸化炭素問題は、観点が全く異なることは衆目の一致するところである。ただし、小量かつ温室効果が大きい、オゾン、メタン、亜酸化窒素等についてはむ

表1 地球環境関連事項の年表

1972.	3:	ローマクラブ「成長の限界」:資源の有限性
	6:	国連人間環境会議「人間環境宣言」
	12:	国連環境計画, UNEP 設立
1977.	8:	国連砂漠化防止会議「砂漠化防止行動計画」
1980.	2:	第一回熱帯林専門会議
1981.	8:	国連, 新および再生可能エネルギー資源に関する会議
1984.	3:	酸性雨に関するカナダ・ヨーロッパ会議, SO <sub>x</sub> 削減
	5:	環境と開発に関する世界委員会, WCED
1985.	3:	オゾン層保護のためのウィーン条約
1987.	2:	WCED 最終会合「Our Common Future」
	9:	オゾン層破壊物質に関するモントリオール議定書
1988.	11:	気候変動に関する政府間パネル「IPCC」ジュネーブ
		(1989.6. ナイロビ, 1990.2. ワシントン, 1990.8. スンツバル)

† 1968年ローマで結成された、著名な財界人、科学者等からなる国際的グループ。

†2 気候変動に関する政府間パネル。地球温暖化問題の検討のため、1985年に設立された。

平成3年10月3日受付 (Received Oct. 3, 1991)

\* 成蹊大学工学部助教授 工博 (Faculty of Engineering, Seikei University, 3-3-1 Kichijoji Kitamachi Musashino 180)

Key words : carbon dioxide problem ; alternative energy ; energy efficiency ; carbon dioxide recovery ; global warming ; plantation ; ocean.

しる前述の酸性雨等の問題に近く、少なくとも工業分野から排出されるガスについては今後の技術開発が進んでいくものと考えられる。少なくとも小量だけが排出される物質については、人類は“エネルギー”を用いてこれらの回収除去に努めてきたし、効率改善、有効利用も進めてきた。例えば、筆者らは、石炭利用技術の一形態として、(循環)流動層燃焼の研究会にも属しているが、亜酸化窒素の排出抑制技術の開発は日本でも多くの研究者がこれを精力的に実施しており、もちろんその努力があればこそであるが、近い将来優れた提案がなされるものと期待される。生態系から排出されるメタン、亜酸化窒素についてはこれは地球の定常状態においてバランスしているものであるから、排出を抑制すべき性質のものではなく、一方、農林牧畜業から排出されるものについては、農学からの排出抑制技術の提案が待たれる。

さて、最後に二酸化炭素については本質的には現在のエネルギー使用の約85%を占める化石燃料から必然的に排出されることを認識したい。確かに上述のガスと同様、二酸化炭素の排出を低減する、すなわちエネルギーの有効利用に関する技術は進められるべきであるし、進んだ日本の技術を“輸出”していくことは重要である。しかし、現在のエネルギー供給体系が、水力、バイオマス等の自然エネルギーから化石燃料にシフトしてきた過去と、原子力が環境・安全面(PR不足との意見もあろうが民意を無視することはできまい)から先の見通しが立たない現状と、太陽光等の自然エネルギー開発が明確に将来見えてこないことを考えると、現状認識としてはしばらく(どのくらい?)この化石燃料に頼らざるをえない。

二酸化炭素を“回収・固定”することは、明らかに従来技術の延長上では原理的に無理なことが自明の利であるにもかかわらず、一方政府は諸外国にわが国の“ポーズ”を示さんがため政策を打ち出し、その間も多くの人がうろろうしており、研究者たちもその本質をわきまえずに研究費を得るためにその本質を議論することをさげ、さらにはサンゴによる固定とかバイオ利用であるとか、二酸化炭素を“媒体”としたエネルギーシステムとか、本質的には“負”の対策技術や、実はエネルギー効率からその妥当性を検討すべき問題を環境問題にすり替えてしまっているというのが現状であろう。この問題を主導すべき政府すら、これは当然ではあるが、結局のところ何も指針を示せず、日本はこれだけ環境問題に投資をしているかのごときポーズをしているに過ぎないことは前述のとおりである。このウルトラC無しには解決できない問題である二酸化炭素問題の看板を用いて、実は他の用途を目的とした開発をも進めているところもある。

すなわち、二酸化炭素問題こそエネルギー問題の本質であり、現在人類に与えられた貴重な化石燃料を無駄な

く効率よく使いながら、一方化石燃料を使わない新しいエネルギー体系を確立し、エネルギー多消費型構造を改めることこそ、二酸化炭素問題を“本質的に”解決する唯一の手段であり、ここに向かう力を結集することこそ二酸化炭素問題から導かれる唯一の合理的な方向性であろう。これは、ローマクラブが指摘したエネルギー資源の問題からも、同一の方向性が生まれてくることに注意したい。すなわち、二酸化炭素問題は、新エネルギー開発の大きな推進力となるべきものであるにもかかわらず、現状の政策的対応がそうになっていないことに大きな不満を覚えるものである。

このとき注意しなくてはいけないのは、エネルギーシステム自身が炭素といかにかかわっているかは問題ではなく、結局いかにトータルとして効率のよいエネルギー生産・供給システムが構築されるかが問われているのである。そこでは二酸化炭素がまったく関与する必要はないのであり、二酸化炭素問題の解決のためには二酸化炭素のことを一度除外しないと語れないところに一種問題の複雑さと、道の誤りやすいいわば落とし穴がある。

カーボンタックスの考え方が多く提案されている。しかし、やはり基本はエネルギーとしか考えようが無い。後述のように化石燃料間でのシフトはまったく意味が無いばかりでなくむしろ弊害があるとすら考えられるからである。原子力でもその安全性の更なる向上が求められており、安易に転換できるものではない。重要な点は、省・節エネを更に進めさせる方向の技術開発の原動力となるべき、あるいは本質的に新しいエネルギーパス、太陽や地球などの自然エネルギー源を開発させるべき原動力となるような技術を育てるためのタックスである必要がある。

前置きが長くなったが、本稿では、地球環境特に温室効果ガスである二酸化炭素の排出との観点から、エネルギーとの関わりを述べていきたい。

## 2. エネルギー生産にともなう二酸化炭素の排出と地球の収支

### 2.1 二酸化炭素濃度の増大

大気中の二酸化炭素濃度は KEELING<sup>1)</sup>によりハワイのマウナロアで測定されている値が最も確度の高いデータとして用いられている。季節変動としては5月頃にピークを迎え、9月から10月ごろに最低濃度を記録している。濃度減少の要因としては海洋・陸上植物の光合成の活発化、増大の要因としては生物体の分解、冬季における化石燃料の利用量の増大が挙げられる。最近の年平均データを表2に示す。20年ほど前には年間の増大量が1ppm程度であったものが、最近では2ppm近い値となっていることがわかる。1978年から88年までの平均は1.6ppm、これに大気中のガスの全モル数をかけて計算すると、大気中には炭素換算で年間35億t程度蓄積

表 2 化石燃料からの排出と大気への残留

西暦	二酸化炭素濃度 (ppmv)	化石燃料等からの二酸化炭素放出量 (億 t-C/y)			
		統計	固体燃料	液体燃料	その他*
1963	319.1	28.6	14.0	10.5	4.1
1968	322.8	36.0	14.6	15.5	5.9
1973	329.8	46.5	15.9	22.4	8.2
1978	335.2	50.8	18.0	23.8	9.0
1983**	342.8	50.8	20.0	21.6	9.2
1988	351.2	58.9	23.9	23.9	11.1

\* 大部分が気体燃料であるが、セメントからの排出も 0.5(1963) から 1.5(1988) へと大幅に増大した。  
 \*\* オイルショックのため液体燃料が大幅に減少した。

されていることになる。

### 2.2 化石燃料からの放出

一方、全世界での化石燃料等からの二酸化炭素の排出量は、国連エネルギー統計などをもとに、MARLAND ら<sup>2)</sup>の報告が成されている。結果を表 2 に併せて示す。ここには年間の発生量しか示さないが、同じく(半年のずれはあるが)1979 年から 1988 年のデータの平均は 55 億 t 程度となる。

### 2.3 森林破壊

いま地球上の炭素の保存場所として重要な意味を持つ熱帯雨林が破壊されつつあるという。熱帯林の消失速度は FAO<sup>3)</sup> によれば 1981 年から 1985 年の平均として 0.113 億 ha/y 程度であると報告されている。期間は若干異なるものの、表 2 とほぼ同一時期のデータである。熱帯での造材面積は 0.011 億 ha であり、差は 0.102 億 ha/y となる。ここで WOODWELL<sup>3)</sup> によれば 1 ha あたりの熱帯林の生体中炭素量と、草原の炭素量との差は 170 t/ha と報告されているが、これと前述の 0.1 億 ha/y との積を求めると、15~20 億 t/y との数字を得る。すなわち熱帯林が破壊され、草原となることによる大気への二酸化炭素の放出がある。数字に幅があるのは、表 2 の数字に比して信頼性が乏しいからである。

### 2.4 地球の炭素収支

地球における炭素収支を図 1 に示す。もしこれが陸上・大気圏の全放出・吸収源のすべてとすれば、残りは海しか考えられない。確かに海は、大気との平衡関係から、大気中の二酸化炭素濃度増大を考慮すれば、二酸化炭素の吸収源となっているはずであるが、残念ながら、海洋の吸収量を直接、この図に載せられるほど精度よく推定できるほどの実測値が無い。海洋学者のモデルによる試算によれば、最大でも 20~25 億 t-C/y しか吸収されおらず、残りはミッシングシンクとして不明扱いとなっている。不明分としては①海洋の吸収能力がもっと高い②北方での植林が行われているが旧共産圏のためデータ不足③CO<sub>2</sub>濃度増による植物成長速度および土壌中も含めた炭素固定量の増大が考えられている。

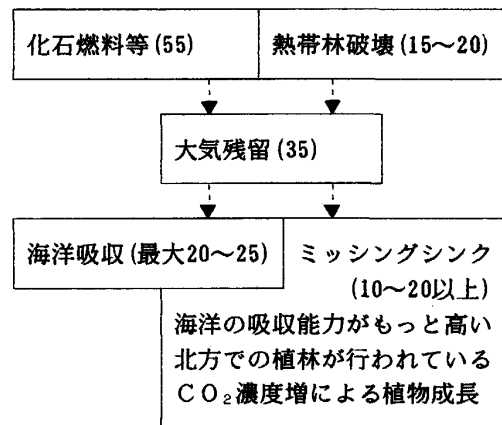


図 1 地球の二酸化炭素収支 (炭素億t/y)

これらのデータを総括すると、熱帯林の破壊を止める(これは二酸化炭素だけの問題ではない)ことを前提に考えると、従来の破壊速度と同一速度で植林をすすめれば、あるいは化石燃料からの排出を 30% 抑制すれば、あるいは海洋の吸収能力を若干高めれば、大気中の二酸化炭素増大に対応できる可能性を示唆している。もちろん根本的解決ではないが、また、森林破壊が進む一つの原因である、途上国の薪利用に変わる新しいエネルギー源を供給する必要はあるが。

## 3. 二酸化炭素を排出しないあるいは排出量の少ない一次エネルギー源とエネルギー輸送

### 3.1 太陽エネルギー等の新エネルギーの開発

エネルギー使用量が変わらずに、化石燃料の使用を止めるあるいは削減するとすれば、太陽、地球等を起源とする自然エネルギーや原子力を用いざるを得ない。太陽熱利用法としては、小型の物では温水器などが普及している。大型の物は香川県仁尾町での 1000 kW 級のパイロット試験が行われている。一方太陽光利用は、特殊用途に限定すれば実用化されているものもあるが、規模は小さい。愛媛県西条市では 1000 kW の試験が行われている。いずれも政府主導型であり、コストの問題が大きい。

他の自然エネルギーとして、バイオマス、水力、風力、波力、潮力、地熱、温度差、濃度差などが検討されている。日本では水力、地熱発電実績はあるが、いずれも立地上的問題がある。世界中では立地可能な土地はあるが、得られたエネルギーの消費地への輸送の問題がある。バイオマスは一見魅力的に見えるが、途上国での薪利用は再生産の必要性すなわち森林破壊と表裏一体となっている。ブラジルでの実施例(サトウキビからのエタノール生産)はあるが、後述のようにエネルギー転換効率が太陽光発電に比しても劣ること、後処理にエネルギーおよびコストを要することからこれも特殊条件下の技術と思われる。先進国では木材にしろ、微生物利用に

<sup>13</sup> 国連食糧農業機関。1945 年設立。食糧に限らず、森林、海洋など地球環境面での活動もなされている。

しろ、さらにコスト面の制約が多くなろう。しかしながら、自然エネルギー全体についてはケースバイケースであり、若干初期投資が大きくとも使用拡大のための補助金など政策上の配慮をすれば、適用可能地域も増えることが期待され、また、使えるものは使うとの姿勢も重要である。

原子力については核融合という本当に夢の技術はあるが、近い将来実用化するとは思えない。安全面の考慮も必要であることは言うまでもない。

### 3.2 新エネルギーの輸送・二次エネルギー体系と二酸化炭素の役割

上述のようにこれらの自然エネルギーの立地条件を考えると、例えば砂漠で発電し、それを輸送する技術の開発も必要となる。この面の研究開発はまだ始まったばかりであろうし、今後一次エネルギーの開発とマッチングした新しい体系が生まれることを期待したい。ただ注意すべきはエネルギー媒体として“二酸化炭素を用いること”自体は全く意味はなく、二酸化炭素問題にすり替える“だけ”の技術開発はまやかしと言わざるを得ない。本質的にエネルギーとしての評価を正しく行う必要がある。

太陽などの一次エネルギー生産から生じるであろう水素があることを前提とした、種々の提案については、その本質を熟慮することが必要である。まず、発生した二酸化炭素を還元することは、二酸化炭素の回収が可能となるような大規模エネルギー施設では水素エネルギーの直接利用が可能になるはずであろうから、またいずれ分解するであろう有機物を合成しても意味が無いことから、将来的にも実現性の薄いシステムと考えざるを得ない。

炭素を有用資源と考え、リサイクル利用するエネルギーシステムの構築も、まだこれを本格的に考えるには時期が早すぎる(むしろそんな時代がくるとはとも思えない。化石燃料のうち炭素資源として用いられている割合はわずかであり、その分ぐらゐの使用は許されよう。また炭素源としては二酸化炭素の回収還元リサイクル使用より、バイオマス活用の方が有効と思える)。そのくらいなら、水素により石炭などを低炭素化処理し、これを民生燃料とする方が将来のシステムとしては可能性が高いだろう。なお、二酸化炭素の回収、投棄・保存(前述のように水素還元はナンセンス)を前提とすれば、民生用の非水素低炭素燃料への転換は、自らの中の、炭素が二酸化炭素に転換する際のエネルギーを用いて得られる水素を用いて行うことも可能である。これを、二酸化炭素発生源の集中化という。

以上をまとめると、水素エネルギー、送エネルギー手段の開発などを含めた二次エネルギーシステムについては、一次エネルギーを系統的に有効に利用する技術として評価されるべきである。一次エネルギー源の開発

と並行した開発が要求される。

### 3.3 低炭素燃料への転換と燃料の低炭素化処理

石炭、石油などからの天然ガスなどの低炭素燃料(単位エネルギー当たりの二酸化炭素排出量は、天然ガスでは石油の約70%、石炭の50%)への転換は、資源量さえ確保できれば望ましいが、天然ガスは現状の使用量でも数十年分の埋蔵量しか無いため一時の時間稼ぎの意味しか持たない。現在の埋蔵量から考えると、全化石エネルギーを天然ガスに転換したとすれば30年程度の埋蔵量しかないことになり、一方30年後にすべてのエネルギーが自然エネルギーあるいは安全な原子力にとってかわるほど技術が進んでいるとは考えられない。このとき、低炭素エネルギーを先行させることは意味が無いとの結論に至るばかりでなく、海洋の吸収能力から考えると後述のようにむしろ最終的には大気中の二酸化炭素濃度の増大にもつながりかねない。また、こと地球規模の問題だけに、資本力のある先進国がこのような安易な二酸化炭素低減策をとるよりも、このような資源をむしろ技術力の低い国にまわし、先進国は二酸化炭素対策技術あるいは新エネルギー開発に努力するべきとも言えよう。

化石燃料から炭素だけを取り除き、これを炭素として保存すると共に、残りの水素だけをエネルギー源として使用する考え方がSTEINBERG<sup>4)</sup>により提案されている。これは実に斬新な発想ではあるが、石炭の場合には取り出されるエネルギーは高々1/4であり、現実味は薄いと考えられる。エネルギー価格が上昇するということは、代替エネルギーの開発が進むことでもある。

### 3.4 未利用エネルギーの利用とエネルギー価格

ゴミなどの廃棄物、未利用エネルギーの有効利用(後述参照)、エネルギー化も同様に今後さらに開発は進められるべきであり、これをサポートする政策が期待される。“エネルギー価格”がどうあるべきかは真剣に考える必要がある。

## 4. 省エネ・節エネ・エネルギーの高効率利用

### 4.1 エネルギー利用効率

二度にわたるオイルショックで、日本のエネルギー利用効率は世界に誇れる値となり、もし日本の効率を全世界に広めるとすれば、二酸化炭素排出量は現在の半分以下の値となると一般に言われている。エネルギー利用効率の定義は複雑であり、電力生産でのいわゆる送電端効率から、さまざまな生産物のエネルギー原単位まで、定義によりさまざまであり、そのそれぞれを分離して議論する必要がある。ここではそれらを個々に議論する。

### 4.2 エネルギー転換における高効率化

二次エネルギーの転換過程において効率が低く、技術革新により効率向上が期待できるものの一つに発電がある。送電端効率は日本の現状では30数%であるが、こ

れを40%以上にまで引き上げる試みが日本でもいくつかなされている。一つは現状の水蒸気タービンにガスタービンを組み合わせるコンバインドサイクルであり、天然ガスを原料とする場合には既に実用プラントが、また石炭をガス化してからコンバインドサイクルとすることを想定した石炭ガス化プラントも既にパイロットプラントにまで至っている。さらには石炭加圧流動層燃焼とガスタービンとの組合せによる効率向上についても既に開発段階にある。更なる効率向上の手段として燃料電池が開発途上にある。これは化学エネルギーを電気エネルギーへ(熱、機械的エネルギーを経ずに)直接変換するもので、石炭ガス化などとの組合せを想定した、より適用温度が高い技術の開発が行われている。発電効率の向上を可能にする将来技術としては他にMHD発電<sup>14</sup>などがある。

発電に限定されないが、酸素富化燃焼、すなわち高い酸素濃度で燃焼させることにより排ガスの持ち出し熱量を減らす試みもある。問題は酸素製造の(エネルギー)コスト、システム、耐熱材にある。本法は、後述の二酸化炭素回収システムに適合した燃焼法としての可能性もある。

#### 4.3 エネルギーの高効率利用および未利用エネルギーの利用

まず、一般には前項に分類されるであろうコージェネレーションについて述べる。すなわち電気と熱の併給システムである。現状で廃棄されている、発電に伴い発生する熱をも利用しようとするものであり、未利用エネルギーの利用ではあるが、熱を供給しやすい形で生産するためには当然電気の方が一部犠牲となる。2次エネルギー供給システムとして熱エネルギーまで考慮に入れるとき、最もエネルギー転換効率が高いシステムとなりうる可能性があるものはコージェネレーションではあるが、エネルギー利用体系がコージェネの供給体系とうまく合致していることが必要であり、両方からのエネルギー高効率化のためのアプローチが必要である。

コージェネの例を見てもわかるように、エネルギーには品位の高い、例えば電気のようなエネルギーと、低品位のエネルギー、例えばぬるま湯のようなエネルギーとでは同じエネルギー量でも価値が異なる。低温源も含め、これらを評価する指標としてエクセルギーがある。確かに日本ではアメリカ、旧ソ連、中国などに比べ、大幅に省エネルギーが進んでいるが、エクセルギーの高いところから、系統的にエネルギーを複合使用していくことにより、更なる省エネルギーが計れる可能性は残されている。

運輸におけるエネルギー利用効率は、システムが小さいだけ高効率化が難しかったが、一方それだけ技術革新

の道が残されているともいえる。NO<sub>x</sub>排出抑制と併せた技術開発が要求される。後述のように電気自動車も選択の一つであろう。民生における使用エネルギーの大半は、先進国では冷暖房に費やされている。省エネルギー住宅の普及はこれを大幅に減らすであろうと期待される。

#### 4.4 省エネ、節エネ、エネルギー浪費型文化からの脱脚

一人一人の生活における省エネ、節エネは、本当に可能だろうか？ ライフスタイルの大きな変更が、すなわちエネルギー浪費型文化からの脱却が要求されているのではないだろうか？

### 5. エネルギー利用に伴って排出される二酸化炭素の回収・保存・利用? 技術

#### 5.1 二酸化炭素の回収技術の分類

二酸化炭素の回収技術としてこれまで議論の対象となってきたものは大別して1) 大気からの自然のメカニズムを利用した吸収速度の増大、2) 大量排出源からの回収と回収した二酸化炭素の保存・廃棄、3) 同じく回収した二酸化炭素の化学的・生物的変換・固定、の三つのカテゴリーとなる。このうち3番目の対策技術はエネルギー問題として捉える場合には意味がないあるいは回収技術としての評価とは観点が異なることを再度述べる。

1) については次の6章で述べる。

#### 5.2 二酸化炭素の化学的・生物的回収利用と二酸化炭素/エネルギー問題

化学的再資源化は、二酸化炭素を二酸化炭素以外の固定化しやすい物質に変えることであり、化石燃料から二酸化炭素に変換した際に得られたエネルギー以上のエネルギーが必要である。従って、これはエネルギー問題として捉える限り原理的に不可能である。水素エネルギーについてもその水素をつくるための一次エネルギー源開発の方が優先順位が高い。

炭素を含んだメタノール等をエネルギー媒体とするという提案、すなわちエネルギー使用国から排出される二酸化炭素を一次エネルギー(太陽光発電など)源産出国に持ち帰り、そこで輸送媒体を合成し、再びそれを持ち帰り、エネルギー源とするというものは、もしそれが、エネルギーを一次エネルギー源産出国から使用国へ輸送する手段として最も効率が高いものであるのであれば、二酸化炭素問題への寄与はあるが、二酸化炭素の固定ではない。一次エネルギー(太陽エネルギー)生産と輸送として考えるべきである。

回収した二酸化炭素から太陽光を用いて植物性プランクトンを培養する場合は、生体は再び分解により二酸化炭素の放出源となる。従ってこれをエネルギー源として利用することになるが、二酸化炭素を回収し媒体としてリサイクルする太陽エネルギー利用システムとして評価

<sup>14</sup> 電磁流体力学発電。磁石の間に高温ガスプラズマを通過させることにより発電する方法。

すべきであり、本項で扱う二酸化炭素を回収・固定システムとして評価することはできない。

### 5.3 回収した二酸化炭素の海洋等への投棄・保存

排出二酸化炭素を回収し、加圧して液状にし、深海に押し込むという方法が STINBERG<sup>5)</sup>らにより試算されている。この方法を化石燃料による火力発電に適用すると、エネルギー効率は負とはならないものの大幅な効率減少が予測されるとしているが、システムの最適化により効率低下を減らしようとする報告もある。深海に一度沈められた二酸化炭素は、深度 3 km 以上では沈降を続けると言われており、また 500 m 程度に投入した場合でも深海で拡散し、後述の大循環に乗れば、千年間は表層に出てこない。現存する沈み込み流の利用、ドライアイス状での投棄の可能性も検討されているが、液化炭酸の方が有利との試算もなされている。クラスレート (ハイドレート)<sup>†5)</sup>の形成、海底の炭酸カルシウムとの中和の可能性に加え、環境・生物への影響については十分検討する必要がある。

海洋以外の二酸化炭素の廃棄・保存先としては廃油井、廃岩塩坑、天然ガス廃坑等さまざまな場所が考えられているが、現実性と輸送の問題がある。この方法の長所としては、海洋投棄ほどの圧縮の必要がなく、生態系への影響が少ないと期待される点にある。現状でもアメリカなどでは天然ガスの地下貯蔵が行われているが、この場合の貯蔵量は日本の二酸化炭素の年間排出量の高々半年分にしかならない。

Block ら<sup>6)</sup>によればオランダでは廃棄先として天然ガスの廃田を候補としてあげており、発生する二酸化炭素の 45 年分を蓄えることができるとしている。またこのコストは回収を含めた全コストの数分の 1 に過ぎないとしている。輸送コストの問題はあるものの天然ガスパイ

プラインの利用を提案している。彼らは廃棄先として海洋を利用しない理由として、近くに深海が存在しないためとしている。

### 5.4 二酸化炭素の排煙からの回収法

STEINBERG<sup>5)</sup>の試算で用いられた MEA 吸収法のほか、吸収法として他の溶剤の使用、物理吸収さらに深冷分離法や膜分離法、PSA・TSA 吸着法などがあるが、二酸化炭素濃度、不純物の存在に応じて、その選択を十分に検討する必要がある。

### 5.5 二酸化炭素の回収を前提とした新しい化石燃料からのエネルギー生産プロセス

前出の Block ら<sup>6)</sup>の試算では IGCC<sup>†6)</sup>からの二酸化炭素回収すなわち、石炭ガス化炉からの合成ガス中の一酸化炭素を二段 (400°C, 220°C) のシフト反応により 90% まで二酸化炭素に一度変換し、水素と分離回収するプロセスを対象としている。この場合燃焼排ガスから回収するより二酸化炭素濃度が高くなり、前出の物理吸収法の一つである Selexol プロセス<sup>†7)</sup>が適用できる。プロセスを図 2 に示す。水素選択的透過膜の利用も検討されている。

また現在は空気燃焼が行われているが、二酸化炭素の回収を前提とする場合には、酸素燃焼 (燃焼温度を下げるために二酸化炭素等で希釈する必要もあろう)、あるいは水蒸気改質による燃焼前回収なども可能性が高い。特に石炭のガス化技術との組合せ、すなわち酸素ガス化、高压燃焼、複合発電を考えると前者は魅力的に思われるが、二酸化炭素からの水分除去の問題が残る。二酸化炭素回収を考える場合には、石炭等の化石燃焼変換プロセスも含め全体として最も効率がよいプロセスを再構築する必要がある。前述の投棄・固定先の問題と共に今後の重要課題の一つと考えられる。

†5 水と二酸化炭素との複合化合物。深海の温度、圧力条件下では、二酸化炭素と水とが、この化合物を界面に形成するため、二酸化炭素の水への溶解、拡散が抑制される可能性がある。

†6 ガス化複合サイクル発電。石炭をガス化し、ガスタービンと蒸気タービンを組み合わせることにより、効率向上が期待できる。

†7 溶媒として Selexol (dimethyl ether of polyethylene glycol) を用いる、二酸化炭素の吸収、精製プロセス。

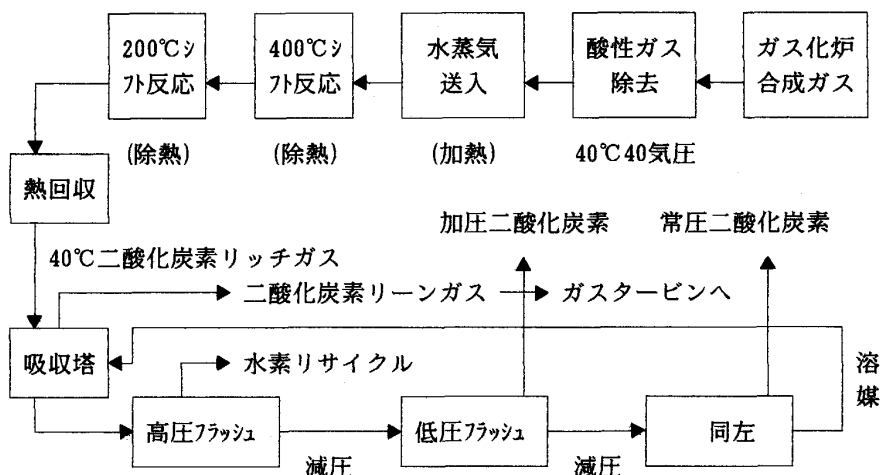


図 2 石炭ガス化複合発電/二酸化炭素回収プロセス

## 5.6 発生源の集中化・二酸化炭素回収システムの民生・運輸への適用

上述はすべて大量発生源からの回収であった。しかしながら二酸化炭素排出源としては、家庭用暖房、炊事用あるいは運輸（自動車）の寄与が大きい。この場合には直接排出源から二酸化炭素を回収することは事実上不可能である。

家庭用として現在の都市ガスに代えて発生源で水素を化石燃料から製造し、発生する二酸化炭素を改質プロセス内で回収してしまうシステムも考え得る。しかしながら上述の最終的廃棄場所の確保に加えて、家庭内での安全面での対策など解決すべき問題が多い。

運輸には現在ガソリン、軽油が主として用いられている。石炭液化油を将来的に用いる場合についても同様である。これも同様に改質することにより二酸化炭素発生源の集中化が可能であるが、エンジンの改良、改質技術の確立とともに安全面での対応が必要となる。水素自動車ばかりではなく電気自動車についても発電時における二酸化炭素回収によりシステムとしてほぼ 100% 二酸化炭素の排出を抑制することが可能となる。なお電気自動車については総合的エネルギー効率の点でも従来のガソリン車等より優れるとする試算もある。

これらの中庸的対策としてメタノールなどの低炭素液体燃料の使用も、二酸化炭素排出量削減を可能とする。

## 6. 自然の吸収能力を利用した二酸化炭素対策技術とエネルギー

### 6.1 陸上植物特に森林の吸収能力と炭素保存能力

ここでは最も二酸化炭素収支に寄与が大きい森林を主として取り扱う。森林に降り注ぐ太陽光エネルギーのうち光合成に利用される割合は 1% 程度であり、太陽電池の有する効率、現状で最大十数%、将来的には 20% 以上が期待されることと比して著しく効率が悪い。さらに光合成量の約 75% がその場で呼吸として消費され、固定された枝葉も大部分が落下して土中で分解される。光合成量の 5% 程度が幹、枝の成長に使われるものの、人類がこれを有効利用しない限り、成熟した森林ではほぼ同量の枯木が倒れて土となると考えてよい。すなわち真の生産はゼロあるいは仮に落葉までバイオマスとして使用したとしても、太陽光の 0.25% が利用できるに過ぎず、ソフトエネルギー生産の場としては効率が悪い。

しかしながら、熱帯林が草原あるいは農地に転換された場合の炭素保持量の減少量 170 t-C/ha は、逆に森林を創造した場合の効果を表す数字となる。従って図 1 は、前述のように森林破壊を抑え、従来の破壊速度と同一の速度で植林を進めると、定常的には二酸化炭素の大気残留量はゼロになることを示している。ただし、北方林については、森林の創造には数十年を要し南方林より更に時間を要すること、また地表樹木の炭素保持量に比

して土壤中の炭素保持量が多いとの特徴があり、植林をしてもその効果が現れるまでに時間を要する。

火力発電所から排出される分の二酸化炭素を植林により回収する場合のコスト試算がいくつかなされている。例えば前出のオランダの Block ra<sup>6)</sup>の試算によれば、森林の保守コストを樹木から収益でまかなうとして 0.1 円/kWh 程度としている。発電コストを 5 円/kWh とすれば、許容できる額であるが、一方発電コストに匹敵するほどの見積もりをしている研究者もおり試算の精度をあげることが重要である。土地・人件費が安く、森林の生産性、炭素保存量が大きく、森林破壊が進む、熱帯地方で逆に植林を行うことは十分対策技術として価値があるものと考えられる。

森林破壊の原因にはいくつかあげられており、それらが複合化して問題を複雑化しているが、ここでは住民のエネルギー源、薪としての利用について言及する。薪の使用量は年々増大しており、途上国での木材生産量の 8 割が薪に使われているという。従来は成熟した森林での再生産が行われていく過程での余剰生産の利用であり、これを石炭などにおきかえることは二酸化炭素の排出増につながる。しかし最近の人口圧力により森林消失が進みつつある現状では、上述の成熟森林の太陽光エネルギー利用効率に比してさらに低い利用効率を持つ幼年期の樹木すら薪としており、もしそのまま育成するならば森林が形成され、より高い利用効率を得られるようになるであろうことから、過剰エネルギー利用量に相当する分については、もちろん太陽光などの自然エネルギーに置き換えられればそれに越したことはないが、化石燃料に置き換えるとしても二酸化炭素の放出削減につながると考えられる。ただし、酸性雨などの観点からは、この際硫黄含有量の少ない石炭を供給する必要があり、簡単な前処理技術などの開発、技術提供の必要がある。

工学的に寄与できる分野としては砂漠の緑化が考えられる。砂漠面積は広く、これを植林することは二酸化炭素問題においても重要な価値を持つ。従来農学的見地からその困難さが指摘されていたが、逆に水利さえ整えれば技術的には（他にもっと重要な問題として社会教育の問題はあるが）可能となる。そのためには“植林”のためのエネルギー生産が必要であり、これは砂漠の広大な面積、膨大な太陽エネルギーを用いることにより可能となる。

これは場所にもよるが海水あるいは塩水は容易に供給されれば、太陽エネルギーを用いて淡水化することは可能であろう。ただし上述のように森林から生産されるバイオマスをエネルギー源とすることはナンセンスである。森林の純生産量を熱帯林で 0.5 kg-C/m<sup>2</sup>/y、灌水法を工夫し、最低限必要な要水量を 300 kg（降雨量として 300 mm、草原地帯を森林化するために附加的に必要な量として考えてもよい）とすれば蒸発熱として 160 Mcal

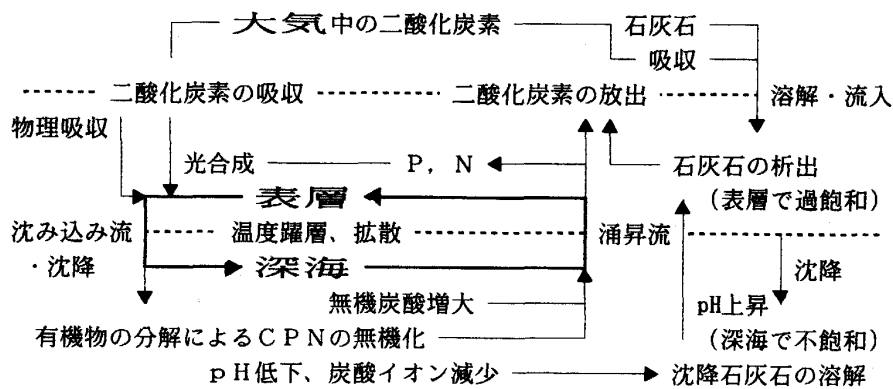


図3 海洋における海洋水と炭素の循環

を要する。多重効用缶利用としてもバイオマスとして有するエネルギー量の数倍になる。砂漠で太陽光発電を行っても輸送等を考えると有効には用いられず、無駄になる。従って無駄に捨てられている太陽光を二酸化炭素固定に用いることは大きな意味を持つ。太陽光の1/5を蒸発熱に転換できれば、その面積の3倍の森林が得られることになる。

### 6.2 海洋の炭素循環と海洋への大気からの吸収

海洋の二酸化炭素吸収能力は図1からもわかるように現状では化石燃料からの放出をすべて吸収するほどではないが、大きな二酸化炭素の吸収源として働いている。産業革命以降の増加量を大気と分配しているからであり、平衡論的には海洋水だけで大気の数倍の吸収能を持ち、さらに海底の石灰石と海中の二酸化炭素と中和する反応を考えると無限の能力を有するが、前者は深海と表層(平均100~150mの厚さ)との間に温度躍層(平均100~1500mの深さにある混合の悪い層)が存在するため、混合には時間がかかり、後者の速度はさらに遅い。海洋には全体にわたる循環が知られており、北大西洋から沈み込み、千年程度かけて太平洋に至る。図3に大循環と、表層深海間の交換とによる物質の移動を模式的に示す。

従ってこの大循環を加速するあるいは表層との混合を促進することにより、海洋の物理的吸収量は増大するが、冷たく重い深海水と暖かくて軽い表層水を置き換えるための必要エネルギーは、二酸化炭素の吸収量増加分に相当するエネルギーに比して膨大であることは容易に計算される。従ってこれだけでは固定技術としての意味は持たないが、この温度差を用いる海洋温度差発電の副次的効果は期待でき、さらには冷深海水が表層に出ることによる温暖化抑止効果も期待できる。いずれにせよエネルギーシステムとしての効用を多面的に検討することが必要である。なおP、Nに富む深海水を汲み上げ、表層光合成を活性化するという対策技術も提案されているが、海洋微生物の組成はP:N:C=1:15:80程度でほぼ一定となっており、図からもわかるようにP、N

は生物体の分解により生じたものであるため、付随して生成した二酸化炭素を過剰に含む。これは表層で放出されるため、生物的な光合成量増大による実質的回収効果は期待できない。循環速度を余りに速くしすぎると、光合成が追いつかず、二酸化炭素の放出だけ起こってしまう可能性すらある。表層攪はん、鉄などの微量元素施肥は局所的には効果がある可能性はある。

海洋中に保持されている生物体量がP、Nで律せられているとすれば、生物有機物起源の炭素量を増大させるには、海洋に肥料を加えるしか方法はない。有機炭素1tを固定するのに必要な窒素量は0.2t、りん量は0.02t程度であり、化石燃料起源のCO<sub>2</sub>をすべて固定するには現状での全世界の生産量の10倍以上を要する。

しかしながら、肥料合成に要するエネルギーは効果に比して十分小さいとの試算結果を得ており、二酸化炭素の吸収法としては決して非現実的ではない。

海洋中で海藻等を繁殖させる方法は、海洋中のP、N量で生物体量が決まっているとすれば、その分の肥料を与えない限り、全海洋の炭素量は十とはならない。これをソフトエネルギー源として利用し、さらに生体中のP、Nを海洋に戻せば、人的サイクルが形成され、その分化石燃料消費が減ると期待される。集中発生源から排出された高濃度二酸化炭素を用い、タンクで太陽光を用いてプランクトンを培養する方法と同様、一次エネルギー生産としての評価が必要である。

なお、水中の微生物中には水分と共にP、Nが樹木などに比して多く含まれ、これを植林用施肥として活用するとの提案もあり、植林システムと併せたエネルギー面からの検討が必要である。

海洋表層中には過剰なカルシウムイオンが存在しているが、これを用いて石灰石あるいは珊瑚や生物体として固定することはむしろpHを低下させ海洋からの二酸化炭素の発生の原因となる。共生光合成植物体育成の効果についても海洋全体のPN収支の面から考える必要がある。ほかの植物性プランクトンも光合成に併せて炭酸



カルシウムの析出作用があり、これによる二酸化炭素の放出を考えると上述の必要 P, N 量は、上述の値より 30% 程度多めに見積もる必要がでてくる。なお珊瑚は窒素固定能を有する藻類と共生しており、海洋中にも存在することから、窒素よりむしろリンの施肥の方が有効かも知れない。

海洋については現状の吸収量さえ明確にはなっておらず、生物体の挙動と寄与、海洋化学、対策技術が海洋生態系に与える影響、エネルギー勘定など海洋をエネルギー工学者の立場から十分かつ総合的に研究、検討する必要がある。

## 7. 終わりに

以上、エネルギー生産と地球規模での環境保全、特に二酸化炭素問題について概略を述べた。二酸化炭素問題はほとんどエネルギー問題そのものであること、対策技術についても上述の一部の一見非現実的対策（すべて自然を利用する技術であることに注意されたい）を除けば、ソフトエネルギーパスの開発技術の一つとして評価すべきであることを述べた。二酸化炭素問題は人類に①自然の偉大さとその利用の難しさおよび未知なる点が多いこと②エネルギー資源が重要かつ有限であること③太陽エネルギーの重要性を教えている。また前述のように

本質から外れた小手先の技術では二酸化炭素問題の対策はあり得ないことも容易に理解できよう。これを機会にエネルギー利用とエネルギー開発のあり方を考えるべきだろう。またこれに先立ち、現状技術および延長技術で対応できるはずの環境対策技術も多く山積みされていることも認識しておきたい。

本調査実施にあたり、鉄鋼業環境保全技術開発基金の御助成をいただいた。また新エネルギー・産業技術総合開発機構・新エネルギー情報センターのご協力をいただいた。記して感謝する。

## 文 献

- 1) C. D. KEELING and T. P. WHORF: Report in "TRENDS '90" by Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory (1990)
- 2) G. MARLAND: Report in "TRENDS '90" by Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory (1990)
- 3) G. M. WOODWELL, W. A. WHITTAKER, G. E. LIKENS, C. C. DELWICHE and D. B. BOTKIN: *Science*, **199** (1978), p. 141
- 4) M. STEINBERG: BNL Reprt, BNL 42228 (1989)
- 5) M. STEINBERG: DOE Reprt, DOE/CH/00016-2 (1984)
- 6) K. BLOCK, C. A. HENDRICKS and W. C. TURKENBURG: Proceeding of an Expert's Seminar, "Energy Technologies for Reducing Emissions of Green House Gases", Paris (1989年4月)