

エネルギーと地球温暖化対策

横山 長之¹⁾

1. はじめに

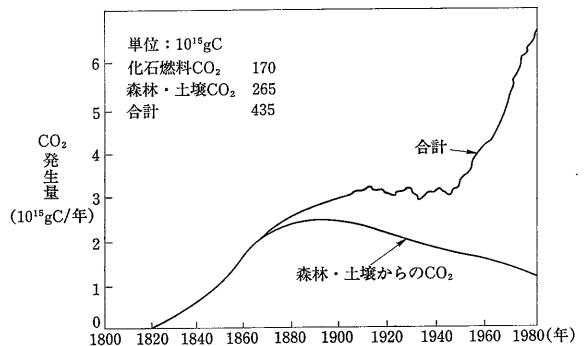
地球温暖化問題が顕在化し、世界的に取り上げられ始めて4年余が経過した。1987年に米国中西部に発生した大干ばつが引き金となって、米国議会で地球温暖化問題が議題となったのが契機であった様に思われる。背景には1974年にローランド博士が指摘したフロンガスによる成層圏オゾン層の破壊の問題や真鍋博士による新しい気候モデルによる二酸化炭素濃度増大に伴う気温上昇の予測結果など、地球環境に以前には認められなかった変化の兆しを感じられ始めたことがあった。その後、地球温暖化は世界共通の大きな問題となり国際会議が頻繁に開催され、対策が議論された。1989年のアルジュサミットで始めて地球環境問題が議題となり、1990年のヒューストンサミットでは地球温暖化防止の枠組み条約作りを1992年までに行う事を宣言した。そして1990年の気候変動に関する政府間パネル(IPCC)では温暖化の科学的知見、環境影響ならびに対応戦略が策定された。日本政府も1990年10月に温暖化防止のための行動計画を発表し、その中で2000年までに一人当たりの二酸化炭素排出量を1990年の値に安定化させる事を明示した。同時期に通産省は地球再生計画「The New Earth 21」を発表し、種々の二酸化炭素排出抑制技術の開発目標を明らかにした。そして1992年6月にブラジルで開催される国連環境開発会議では地球温暖化枠組み条約の締結が行われる予定である。

この様に地球温暖化問題の解決に向かって世界は急ピッチで進んでいるが、一方ではCO₂濃度の増加は産業革命以前から続いていて、人間の排出する50億トン/年の炭素の約半量が海洋、植物圏に吸収されていると推定できる。この吸収能の将来の継続性、大気中のCO₂濃度との関係などについて科学的知見は非常に不足している。この様な状況下において、どの様な対策が最も望ましいのかの判断はなかなか難しいが、炭素循環の定量的解明を進めながら損失にならない技術から採用して行く

のが常識的な判断であろう。温暖化防止対策について紹介する。

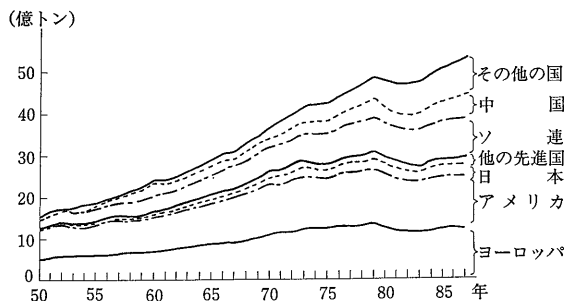
2. エネルギー使用量と二酸化炭素発生量の推移

CO₂は石油、石炭などの燃料の使用、森林の破壊、セメントの製造によって発生する。第1図に示したのは1820年から1980年までのCO₂の発生量の推移で、産業革命初期には森林破壊による発生量が多かったが、最近では化石燃料の使用による。一次エネルギーの構成比は石炭(31%)、石油(38%)、天然ガス(20%)、原子力(4.6%)、水力(6.3%)、その他の固体燃料(1.4%)となっている。これによれば石油、石炭、天然ガスの順に消費量が多く、これら化石燃料の総エネルギー量に占める割合は90%程度になっている。また、1950年から1987年までのエネルギー消費の推移は第2図に見られるように3.5倍に達している。第3図に示したのは1950-1987年のCO₂の発生量の変化である。1985年時点でのCO₂発生量は約50億トン(炭素量)に達している。これを各国別、燃料種類別に示したのが第1表である。発生量の多い国は米

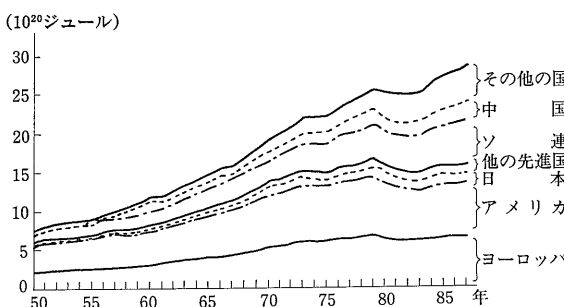


第1図 CO₂積算発生量・樹木内¹³Cの測定により求めた森林破壊と土地利用変更および化石燃料使用に伴うCO₂発生量の推移(SCOPE 29, 1986年)。

1) 資源環境技術総合研究所*所長: 〒305 茨城県つくば市小野川16-3 (*1991年10月、公害資源研究所を改称)



第2図 世界のエネルギー消費の推移. 国連統計より作成.
(環境庁, 1990)



第3図 世界地域別 CO₂ 排出量の推移 (環境庁, 1990).
国連統計等より作成. 重量は炭素換算. 化石燃料の消費
による CO₂ 排出量のみ集計.

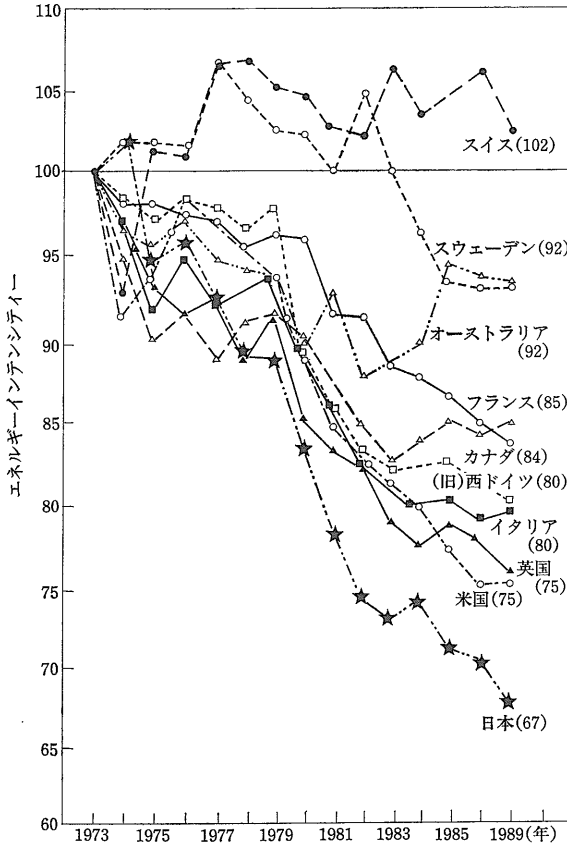
国 (26%), ソ連 (18%), 中国 (10%), 日本 (5%), 旧西ドイツ (4%) の順である.

前述したように二酸化炭素の発生はエネルギー消費と比例関係にある. 現在世界的に見た場合の一次エネルギーの割合は第3図に示すように石油, 石炭, 天然ガスが88%を占め, その他の燃料を加えると90%以上になっている. したがって, エネルギーの消費は即二酸化炭素の発生につながると考えて良い. また二酸化炭素の発生はエネルギーの消費構造と密接に関連している. 同じエネルギーを消費しても多くの仕事に効率よく利用されているか, そのエネルギー消費は有効性の高い使われ方をしているかを示す指標はエネルギー消費量/GNP比 (Energy Intensity と呼ばれる) で表される. 第4図は第1次石油危機の起こった1973年以後, このエネルギーインテンシティーが各国でどの様に変化したかを示したものである. OECD諸国の中で日本は最もエネルギーインテンシティーの低下が激しい. 現状では, 二酸化炭素発生量はエネルギーインテンシティーと GNP 伸び率に比例する. 将来の二酸化炭素発生量の予測を行うには各国における GNP の伸び, エネルギーインテンシティーの変化, ならびに二酸化炭素を発生しないエネルギー (水力, 原子力, 地熱, 太陽熱, 太陽光などの CO₂ フリーエネルギー) の比率を予測する事が必要である. このような二酸化炭素発生量の将来予測は多くの機関で行われており, 第5図にそれらをまとめた結果を示す. 日本におけるエネルギー

第1表 CO₂ の発生量の現状 (1985年) (公害資源研, 1990)

(単位: 100万tc)

地域/国	石炭	液体燃料	ガス	総量	構成比 (%)
世界合計	2221(45%)	1888(38%)	826(17%)	4934	100
OECD 諸国	923	1199	413	2534	51.4
日本	65	166	30	260	5.3
米国	491	540	243	1274	25.8
カナダ	34	54	28	117	2.4
西ドイツ	82	87	24	193	3.9
英国	62	60	27	149	3.0
フランス	25	65	15	105	2.1
イタリア	16	63	16	96	1.9
発展途上国	226	312	84	622	12.6
アフリカ	74	51	10	134	2.7
アジア	133	182	36	351	7.1
ラテンアメリカ	20	79	38	137	2.8
共産圏	1072	378	329	1779	36.0
中国	411	54	7	472	9.6
ソ連	348	246	271	865	17.5
東ヨーロッパ諸国	276	69	48	392	7.9



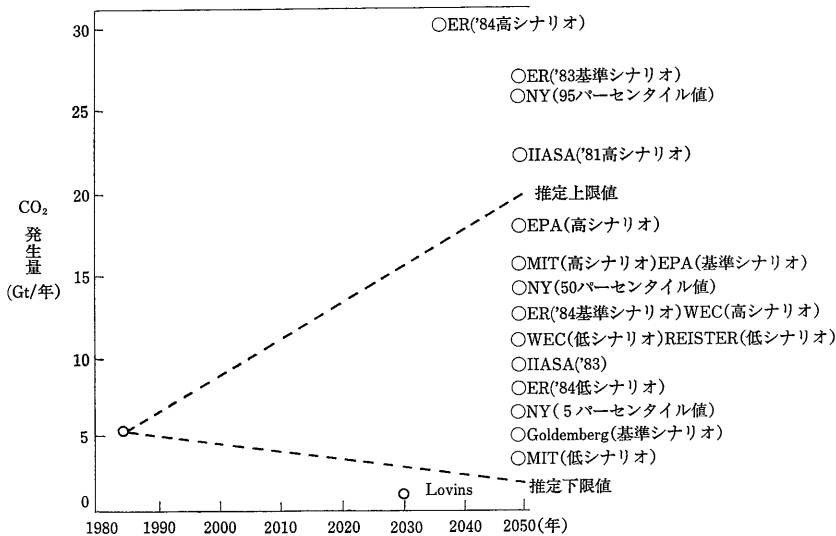
第4図 OECD諸国におけるエネルギーインテンシティー(エネルギー消費量/GNP)の推移。1973年を100とした場合、各国がどのように変化したかを見ると、日本の変化が最も著しい(通産省統計資料による)。

需給の予測は資源エネルギー庁の総合エネルギー調査会が行っており、1990年6月の予測では省エネを今後一層徹底し、また原子力、自然エネルギーの比率を増加させても2000年時点で二酸化炭素は16%の増加になる。

3. 炭素循環

温室効果ガスは地表や大気から放出される赤外線を遮蔽し、地表に逆に戻すために対流圏の温度が上昇する。温室効果ガスには二酸化炭素(CO₂)、メタン(CH₄)、亜酸化窒素(N₂O)、フロン類(CFCs)等があり、その温室効果は第2表に示すようになっている。これらのガスの大気中濃度は第2表に示すように、いずれも増加している。表に示したGWP(Global Warming Potential)はCO₂に対する各温室効果ガス1分子当たりの温室効果を示す指標である。全体としてCO₂は今後発生する気温上昇の約半分を荷担し、残りの半分の昇温はメタン、フロン類、亜酸化窒素などによると予測されている(e.g., Ramanathan et al., 1985)。

CO₂は世界各地にある測定局(e.g., NOAA/GMCC: National Oceanic and Atmospheric Administration, The Geophysical Monitoring for Climatic Change USA)で長年にわたり測定されてきた。人間が化石燃料の使用によって大気中に放出しているCO₂は前述の通り約50億トン/年(炭素量)であるが、それを一様に大気中に拡散すると約3ppmになる。実測される二酸化炭素濃度の増加率は第1表に示すように1.5ppm/年であり、その差は海洋と植物に吸収されているものと推定される。第6図に大気、海洋、植物圏の間における炭素の循環量の推定



第5図 2050年におけるCO₂発生量の予測シナリオ。推定の上限と下限との差においても、年間約1500億tもの開きがある。(公害資源研、1990)
EPA: 米国環境保護庁(1983年)
ER: エドモンド・ライリー(1984年)
IIASA: 国際応用システム解析研究所(1981, 1983年)
MIT: マサチューセッツ工科大学(1983年)
NY: ノルドハウス・ヨッフエ(1983年)
WEC: 世界エネルギー会議(1983年)

第2表 温室効果ガスの諸元

ガス	現在濃度(1955年) (ppm)	発生量(年間)	吸収・分解	寿命 (年)	年増加率 (%)	放射効率	GWP
CO ₂	345	海洋 1046億tC 陸域 87~1200 " 化石燃料 50 "	海洋 1070億tC 陸域 1200 " —	500	0.4 (1.5ppm)	10	1
O ₃	対流圏 0.02~0.1 成層圏 0.1~10	光化学反応	酸化 地表面吸着	数時間~	対流圏で増大 成層圏で減少	2±1	
CH ₄	1.6~1.7	湿地 1.1億 t 腸内発酵 0.8 " 水田 0.7 "	酸化	7~10	1.1	3±1	20
N ₂ O	0.31	土壌 200万 t 海洋 650 " 燃焼 400 t	成層圏で光分解 ~1000万 t	150	0.2~0.3	2±1	200
CFC-11	200ppt (1983年)	工業生産 33万 t	成層圏で光分解	75	5	2±1	20000
CFC-12	320ppt (1983年)	工業生産 44万 t	成層圏で光分解	110	5	4±1	20000

米国エネルギー省報告「温室効果ガス入門」1988年から作成。

を示す。この推定では人間が排出するCO₂の半分が海洋に吸収される。海洋によるCO₂の吸収のメカニズムにはまだ不明確な点が多く、全地球的な吸収量と吸収速度の定量的な解明が必要である。大気と海洋の間でのCO₂の交換を明らかにしなければ、人間の出し得るCO₂量も不明確であると言わざるを得ない。ちなみに、前述したように1950-1987年の間に人間が年々排出するCO₂は約3.5倍になったのに対し、その間の大気中のCO₂濃度は1.2

倍に留まっている。これが何を意味しているのかを考える事が必要であろう。この分野での地質調査所の役割は大きい。

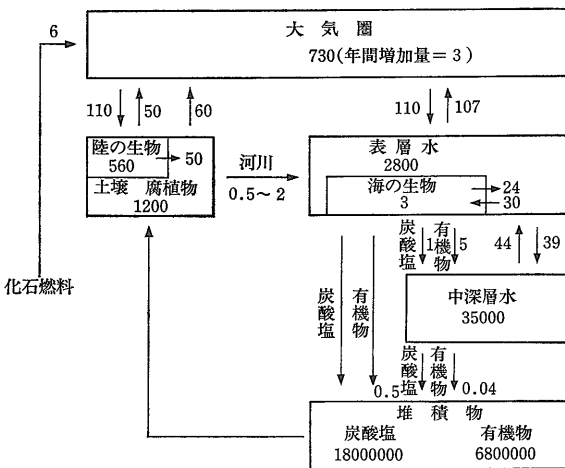
4. 二酸化炭素排出抑制技術

温室効果の約半分がCO₂以外のガスによって引き起こされる事から、CH₄、N₂O、CFCsの対策も必要である。特にCFCsは20%程度の気温上昇効果をもたらし、GWPが20000と大きいのでこの排出抑制を図る事が大事である。前述したようにCO₂対策には省エネとエネルギー利用効率向上、CO₂フリーエネルギーの利用拡大が基本となる。そして、具体的な対策として考えられているのは、実行の容易な順に次のようなものがある。

1. 省エネルギーとエネルギー効率改善ならびに資源リサイクル
2. 軽質燃料への転換と燃料改質
3. 再生可能自然エネルギーの使用
4. 原子力エネルギーの利用
5. 二酸化炭素の人工処理

4.1. 省エネルギーとエネルギーの高効率利用

出来るだけエネルギーを使わないのが省エネであり、同じ仕事をより少ないエネルギーで行うのがエネルギー利用効率の向上である。現在日本では一次エネルギーの約90%を石炭、石油などの化石燃料に頼っている。このため、省エネルギーは即二酸化炭素排出削減となる。わが国では1973年の第1次石油危機以来、省エネとエネ



第6図 炭素の地球化学的循環(角皆, 1989).

IGBP 関係資料などをもとに製作。単位は存在量(太数字)が 10¹³ g。移動量(斜体数字)が 10¹³ g/年。

ギー高効率利用技術の開発が官民あげて実施され、対GNP比でのエネルギー消費は世界で最も低いレベルにまで低下している（第4図）。特に工業部門での高効率利用技術の開発は目ざましい。また、最近では都市の地域冷暖房における廃熱利用の新しいシステムの開発など高効率エネルギー技術の開発が進んでいる。2-3の実例を以下に紹介する。

(1) 家庭における技術

家庭においては高効率の電気器具の使用は既に一般的になっている。これからは冷暖房の総合化、すなわちエアコンによる冷暖房給湯のシステム化や太陽熱、光のより一層の利用技術の開発などが行われるであろう。パッシブソーラーハウス等が一般的になろう。また昼夜の温度差あるいは季節の温度差を利用する蓄熱式の冷暖房システムも可能であろう。現在使われている深夜電力を使った給湯ボイラーもCO₂排出抑制につながっている。それは深夜電力に占める原子力の割合が大きいためによる。さらに将来には家庭用のコージェネシステムすなわち燃料電池と廃熱利用の冷暖房システムなども開発されるかも知れない。

(2) アーバンエネルギー技術

ビル、市街地においては種々の廃熱、自然熱を利用した地域冷暖房技術が実用化されている。清掃工場の廃熱、変電所の廃熱、浴場の廃湯、地下鉄構内の廃熱、河川水の温度、下水処理後の排水の熱などをヒートポンプを使って利用する冷暖房システムが既に実用になっている。例えば東京箱崎地区では墨田川の河川水の温度（夏に冷たく冬に暖かい）を利用し、深夜に冷水を蓄熱槽に蓄え、昼間に冷房に使っている。このシステムは二重の意味でCO₂排出抑制に貢献している。すなわち原子力の比率の多い（CO₂発生が少ない）深夜電力の使用と自然のエネルギーの利用である。

もう一つの注目すべき技術にコージェネシステムがある。ディーゼル発電機、ガスタービン発電機あるいは燃料電池を市街地に設置し電力をビルなどに供給すると共に廃熱は冷暖房に利用する。このようなコージェネシステムは急増しつつある。総合効率で60-80%となり、既存の蒸気発電の35%程度の効率の2倍になり、さらに市街地に設置出来る事から送電ロスもない。

さらに将来には季節による水や雪の温度差を蓄熱技術によって取り出し、冷暖房に利用する事も考えられ、北欧では試験が試みられている。

(3) 交通、運輸における技術

低燃費自動車等の開発では高効率エンジン、軽量な車体、低い摩擦、空力抵抗の車両の製作が試みられている。また、合理的交通システムの構築も必要で電車、バス、

乗用車などの総合的な組み合わせとシステム化を図るべきであろう。さらに、物流の合理化、交通流の整備、渋滞などの発生しない道路網の建設などを考えるべきである。メタノール自動車の普及ではガススタンドなどのインフラ構造の整備などに問題があり、また電気自動車はトータルとしてエネルギー効率を考えて有効か検討すべきであろう。

(4) 工業における技術

発電では従来の蒸気タービン発電が35%程度の変換効率なのに対し、コンバインドサイクル発電（LNG、石炭ガス化）、スチーム吹き込み式のガスタービン加圧流動層燃焼発電などでは40-45%、燃料電池では50%と高効率である。この様な高効率な発電技術が開発され、導入されつつある。製鉄では熱のカスケード使用を徹底し、連続铸造装置などが開発され省エネになっている。また、廃熱、廃エネ回収が行われ、高炉頂発電、コークス乾式消火装置などが世界に先駆けて実用化されている。

石油精製、石油化学、紙パルプ、セメントなど多くの工業部門において生産施設の省エネ化、高効率化が行われており、今後もなお一層の努力がはられるであろう。また今後よりマイルドな高温高圧を必要としない高選択的な生産プロセスへの開発を行い、転換することが大きな技術開発の流れになるであろう。また、電気、機械、建設などで一般に多数使用される消費財の生産に当たっては、それら製品のエネルギー効率を高める事が工業部門に課せられたもう一つの義務であろう。

(5) リサイクル技術

アルミ、金属、紙パルプの回収と再利用によって省資源だけではなく省エネにも効果がある。種々の計算法があるが、アルミ缶の再生では80%の省エネになるという試算がある。こんごは缶のような単純な物ばかりでなく、耐久消費財なども寿命を考慮し、最終的には素材毎に簡単に分離でき再利用が図れるような生産を目指すべきであろう。家電製品、車、家屋、家具等についてそのような視点に立った設計が導入されるべきではないだろうか。

4.2. 軽質燃料への転換と燃料改質

炭素分の少ない燃料へ転換することによって二酸化炭素の発生を抑制できる。同じエネルギーを得るのに石炭で一単位の二酸化炭素が発生すると仮定すれば、石油は約0.8、LNGは約0.6の発生量になる。ただしLNG、石油については賦存量に限りがあり、枯渇を考慮しなければならない。水素は全く二酸化炭素を発生しない燃料であるが、天然には賦存しない。水素を他の一次エネルギーから生産する方法が考えられている。しかし、化石燃

料から生産する方法はいずれもトータルとして二酸化炭素抑制にはならない。

4.3. 再生可能エネルギーの使用

再生可能な天然エネルギーは化石燃料の代替となるエネルギー源として貴重である。しかし現在のところエネルギー源としての比率は大きくはない。現在(1988)世界全体で水力と原子力の割合は10%程度であり、その他の再生可能エネルギーの占める割合は非常に少ない。この様に化石燃料が一次エネルギーの90%を占める状況では、他のエネルギー源もその開発に当たって使用されるエネルギーを考慮すると多かれ少なかれ二酸化炭素放出があると考えなければならないことに注意したい。また、再生可能エネルギーを評価する際、その開発に要するエネルギー、耐用年数とその間に生産する一次エネルギーの量について考えることが必要である。現在水力は唯一大きな比率を占める天然エネルギーである。その他の天然エネルギーは再生可能新エネルギーと呼ばれている。それは風力、波力、太陽光、太陽熱、潮汐力、バイオマス、地熱、海洋温度差などである。これらは二酸化炭素発生のないエネルギーであり原子力と並んで地球温暖化対策に役立つので積極的に利用拡大を図るべきである。

4.4. 原子力エネルギーの利用

原子力発電は二酸化炭素の発生の極めて少ないエネルギーである。ただし、一般に思われているように二酸化炭素を全く発生しない事ではなく、燃料の再処理、廃棄物の処理、建設に係るエネルギーは二酸化炭素発生につながっている。原子力の問題はその安全性にあり、これが解決しないと急速な増大はなかなか困難と思われる。

4.5. 二酸化炭素の処理、固定化技術

(1) 植林などによる対策

植林や森林破壊の防止は当然二酸化炭素対策として有効である。また海洋植物プランクトンの活動を促す海洋環境の保全と整備は自然の力を借りた二酸化炭素対策になる。このような植林、森林破壊防止によって10%程度の温室効果防止になるという試算がある。

(2) 人工処理技術

現在のところ植物や微生物が古来行って来た光合成による炭素同化作用以上に効率的な二酸化炭素固定技術はない。また、二酸化炭素の処理に際しては加えられるエネルギー、物質について二酸化炭素発生を調べておくことが大切で、その処理プロセス全体としての二酸化炭素とエネルギーの収支で有効性を評価しなければならない。また、太陽光を利用したりする処理システムを考え

際には太陽光の別の利用技術、例えばソーラーバッテリー発電の効果と比べて有利なプロセスである事が証明できなければそのプロセスは有効ではない。二酸化炭素の人工的な処理プロセスの開発は非常に困難であろうし、さらに、二酸化炭素の発生量の膨大さのため固定化した後の処理まで考慮しなければならないなど、実用的な処理は非常に困難が伴う。

しかし、将来の実用化を目指して燃焼排ガスからの二酸化炭素の除去、固定化、再利用等が研究され始めている。燃焼排ガス中の二酸化炭素を分離し、濃縮再放出し、これを吸収固定化したり種々の化学反応によって再資源化する試みがある。

6. おわりに

地球温暖化問題はまさに地球規模の問題であり、日本の二酸化炭素排出量が全世界合計の4%程度であることから、CO₂排出抑制には世界各国の協調体制がなくてはならない。また炭素循環のメカニズムを早急に解明し、人間の出し得るCO₂量を明確にしなければならない。しかし、温室効果ガスの濃度増加が気温上昇やそれに伴う様々な環境影響をもたらす事は事実であり、対策には長い時間が掛かる事から、やはり対策は出来る物から始める事が大事である。例えば、これまで開発してきた高効率エネルギー利用技術を世界に広める事によっての貢献も考えるべきであろう。今までの環境問題とは全く次元の異なる問題であり、新しい規範(Paradigm)があらゆる面で求められている。

参考文献

- SCOPE (ICSU) Report 29 (1986): Part A, How is man changing the composition of the atmosphere.
- 通産省公害資源研究所 地球環境特別研究室 編 (1990): 地球温暖化の対策技術, オーム社
- 環境庁 (1990): 環境白書 (平成2年版)
- U. S. DOE (1985): Projecting the climatic effects of increasing carbon dioxide, DOE/ER 0237, pp. 381
- 角皆静男 (1989): 炭素などの物質循環と大気循環, 科学 59, 9, 岩波書店.
- Ramanathan V. and Coakley J. A. (1978): Glimate modeling through radiativeconvective models, Rev. Geophys. Space Physics, 12, 447-493.
- YOKOYAMA Osayuki (1992): Energy related technology for mitigating CO₂ emission.

<受付: 1991年11月22日>