

# DENCHUKEN REVIEW

電中研レビュー

「地球温暖化に挑む」



NO.28 1992.4



電中研レビュー第28号 ● 目次

地球温暖化に挑む

編集責任●環境総合推進室長 天野 博正

第1部 編集担当●柏江研究所 発電プラント部 次長 西宮 昌

第2部 編集担当●環境総合推進室 次長 瀬間 徹

巻頭言	名古屋大学 水圏化学研究所 教授 半田 暢彦 …	2
はじめに	常務理事 尾出 和也 …	5
序章	どのように取り組むか—温暖化研究の戦略と方法—	
第1部	温暖化の現象解明と適応方策	
1-1	●温暖化の実態解明 …	26
1-2	●温暖化による気候変動の予測 …	34
1-3	●温暖化の影響予測・評価と適応方策 …	39
第2部	温暖化の抑制対策—CO <sub>2</sub> 抑制対策を中心に—	
2-1	●政策・制度的方策 …	52
2-2	●CO <sub>2</sub> 抑制対策技術 …	60
2-3	●CO <sub>2</sub> 有効利用技術 …	71
おわりに	環境総合推進室長 天野 博正 …	74
関連する主な研究報告書等		75



# カメシロバ

## 「非なる南」 「美聞る静寂」

南へいって、静寂を求めて、目を争い、  
土を、世を、まきかき、まきかき、まきかき、  
何の音もなく、何の音もなく、何の音もなく、  
まきかき、まきかき、まきかき、まきかき、

まきかき、まきかき、まきかき、まきかき、  
まきかき、まきかき、まきかき、まきかき、  
まきかき、まきかき、まきかき、まきかき、  
まきかき、まきかき、まきかき、まきかき、

まきかき、まきかき、まきかき、まきかき、  
まきかき、まきかき、まきかき、まきかき、  
まきかき、まきかき、まきかき、まきかき、  
まきかき、まきかき、まきかき、まきかき、

まきかき、まきかき、まきかき、まきかき、  
まきかき、まきかき、まきかき、まきかき、  
まきかき、まきかき、まきかき、まきかき、  
まきかき、まきかき、まきかき、まきかき、





## かんとうげん

### 「環境と開発」「南と北」



1992年6月、ブラジルで地球サミットが開催される。日本をはじめとする先進国、途上国の首脳が集まり、地球温暖化に伴う気候変動枠組み条約の合意に向けて会議をすることになっている。

地球の温暖化は年毎にみれば全く微々たるもので、自然の変動の中にかくれてしまう程度のものである。したがって1970年代までは、大気中の二酸化炭素の増加についても、社会的にそれほど大きな関心と呼ぶまでには至

らなかった。むしろ、当時は粉塵による大気汚染、重金属および栄養塩による河川や内湾の汚染に人々の関心が集まっていた。しかし、その間にも地球は二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素、フロンなどの温室効果ガスによって確実に影響を受けていた。

特に大気中の二酸化炭素の濃度は、1960年をさかいに急激な増加率を示し、いまでもそのような増加率の上に乗っている。現在、地球上では、炭素として年間5.5ギガトンの二酸化炭素が化石燃料の燃焼によって排出され、これが年々増加して、2050年には、大気中の二酸化炭素の濃度が550ppmとなると予測されている。これは産業革命前の2倍に相当し、気温の上昇は2.5度と予測されている。これによって地表では、砂漠の拡大、海水面の上昇などの影響を受ける。極域の凍土が溶けて、メタンの発生が促進され、さらに気温の上昇につながる。かくて地球はとめどなく温暖化の方向に走っていく。



---

さて、はたしてこの方向を変えることができるだろうか？

ブラジルで開催の地球サミットも決して環境サミットではない。「環境と開発に関する国連会議」である。二酸化炭素の排出規制に対する先進国と途上国との間に、はっきりとした考え方の相違があることに注意しなければならない。例えば、日本と同様に、1990年の二酸化炭素排出量を維持すると合意したら、途上国の国づくりはほとんど不可能になってしまうであろう。したがって、地球サミットでは「環境と開発」という、全く異なった方向を打ち出さざるを得なかったものと想像される。これは、先進国と同様に、途上国も二酸化炭素を出しながら国づくりをする権利があることを示すものであり、我々としても容認せざるを得ない。

しかし、ここで化石燃料の燃焼に伴う二酸化炭素について、その排出抑制技術や回収技術、あるいは適当な場所への貯留技術などの発達があるとすれば別である。これらの技術は、もともと先進国内での問題解決のために開発し、使用されるべきものはあるが、種々の経済的問題を解決しながらも、途上国にこれらの技術が移転されるとしたら、低減化された二酸化炭素の発生のもとで、途上国の国づくりが行われるものと予想される。これによってはじめて、21世紀の地球に、ある種の光明を見出せるように感ずる。この点で、地球温暖化の現象解明と温暖化を低減させる技術の開発は人類にとって大変重要な課題である。

名古屋大学 水圏科学研究所 教授

半田 暢彦







# はじめに

電力中央研究所 常務理事 尾出 和也



ソ連邦が解体し、かつての冷戦構造が世界政治の表舞台から姿を消した今、20世紀から21世紀にかけて、われわれ人類の最大の課題は地球規模での環境問題だといわれている。

そして、この地球環境問題のうちでも、地球の温暖化は最大級のもので、これはエネルギー問題と密接に係わるものだけに、影響するところは、極めて広く、かつ深い。

ところで人類は、その発生以来、現在にいたるまで、地球から無限の恩恵を蒙って成長をつづけてき

たが、これは未来永劫、決して変わるものではない。だとすれば、現在に生きるわれわれとしては、この大切な地球を守り、大事にして後世に引き継いでいく義務があるのではないだろうか。

とくに、地球は、従来無限だと考えられてきたのが、どうも、そうではないということが、だんだんとはっきりしてきたように思える。最近の人間の活動は、とみに巨大化し、この結果、資源にしても、エネルギーにしても、埋蔵量の限界がみえはじめ、さらに、自然の環境にまで影響を与えるようになってきている。今や、地球は無限ではなくなってきている。

このことを強く認識し、豊かで美しい地球を末永く保ちつづけていくために、資源やエネルギーの多消費文明から脱却した新しい発展の方向を見出し歩んでいくことが、今、改めて、求められていると思う。

地球温暖化問題は、現在いまだ現象そのものが、明確には解明されていないものであるが、これが一度起こると取り返しがつかないことは確かである。

このため私どもでは、現象の正しい把握につとめるとともに、事態の推移をできる限り遠くまで見通し、そのときどきの最善の対応が可能のように温暖化に係わる研究を強力につづけていきたいと思っている。

このような想いを込めて、このレビューのタイトルを「地球温暖化に挑む」と名付けることにした次第である。







# 序<sup>章</sup>

## どのように取り組むか — 温暖化研究の戦略と方法 —



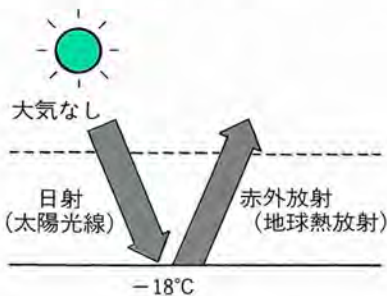


# 温暖化研究の背景と内外の取り組みの動向

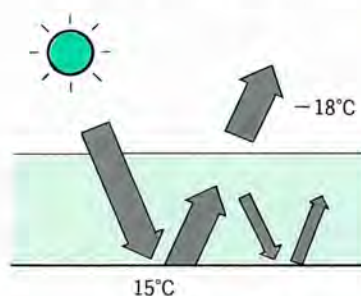
## (温暖化とは)

地球は現在、平均して15°Cという温暖な状態に保たれ、われわれは快適な生活を送っている。しかし、もし地球に大気がなかったら、地球の温度は-18°Cになるといわれている。この地球に大気がないときの温度と現在の温度との差が、大気の温室効果であり、このような機能をもつ気体を温室効果ガスと呼んでいる。すなわち温室効果ガスは、現在の地球の気温を維持するためには必要不可欠なものであり、これらのガスがなければ、地球の気温は今より約33°Cも低くなる。

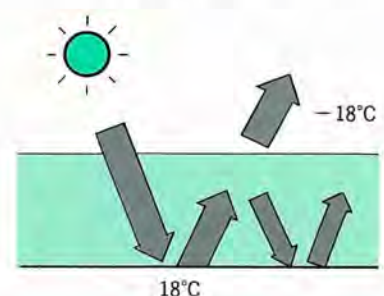
(1) 温室効果ガスを含んでいないケース



(2) 温室効果ガスを適度に含んでいるケース



(3) 温室効果ガスが増加したケース



大気の温室効果

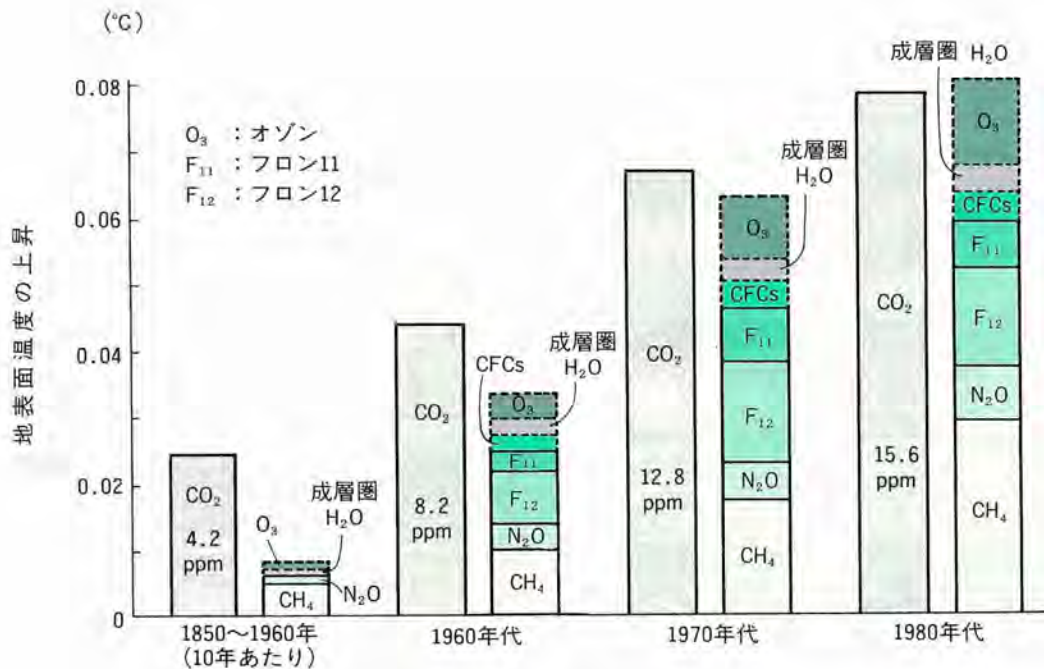
- (1) 地球に大気がなければ、太陽からの日射は地表で吸収され、そこを加熱し、その温度に応じた熱エネルギーをすべて宇宙に放出する。日中は灼熱、夜間は極寒となる。このときの地球の平均気温は-18°Cになる。
- (2) しかし地球には、熱エネルギーを吸収するガス（温室効果ガス）を含む大気があり、これが地表から放射される熱エネルギーを吸収する。この結果、大気は暖められるが、その温度に応じた熱放射を行い、やがて地表が日射で受けたエネルギーと同量のエネルギーを宇宙空間に放出する。したがって、大気上端では日射とつり合う-18°Cという温度を示すが、地表は日射に加えて、大気からの下向きの熱放射によっても加熱される。このとき、CO<sub>2</sub>を約0.03%含む現在の大気での地球の平均気温は、15°Cになる。
- (3) 温室効果ガスは、地表からの熱エネルギーは吸収するが、波長の関係で日射はほとんど吸収しない。したがって、温室効果ガスが増加すると、地表からの熱エネルギーをさらに吸収して、いっそう加熱され、地表温度は高くなる。温室効果ガスの一つであるCO<sub>2</sub>の大気中濃度を現在の2倍にすると、そのときの地表の平均気温は、IPCCによると18°Cになるとの試算もある。

このように、温室効果ガスは本来なくてはならないものであるが、われわれ人間の活動が活発化した結果、近年、温室効果ガスの大気中濃度が増加している。

人間活動によって排出される温室効果ガスには、化石燃料の消費などから発生する二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)のほか、畑や腐敗したものなどから発生するメタン(CH<sub>4</sub>)、農地の肥料などから発生する一酸化二窒素(N<sub>2</sub>O)、そして工業用の洗浄剤やスプレーなどから発生するフロン(CFCs)などがある。

温室効果ガスが地球の温暖化に及ぼす影響は、ガスの種類や濃度によって異なり、また大気中における寿命によっても異なる。メタンなどCO<sub>2</sub>以外の温室効果ガスは、CO<sub>2</sub>よりもはるかに濃度は低いが、これらをCO<sub>2</sub>の濃度





(出典：J.Hansen et al., J.Geophys. Res. Vol.93 (1988))

#### 温室効果ガスの各年代ごとの増加による地表面温度の上昇

メタン (CH<sub>4</sub>)、一酸化二窒素 (N<sub>2</sub>O)、フロン (CFCs) など、CO<sub>2</sub>以外の温室効果ガスの大気中の濃度は、CO<sub>2</sub>に比べてはるかに低いが、温暖化に与える影響は相対的に大きいため、これらの総量の温室効果は、現在ではCO<sub>2</sub>とほぼ等しくなっている。

に換算した (等価CO<sub>2</sub>濃度) ときの温室効果は、現在ではCO<sub>2</sub>とほぼ等しいと考えられている。

現在までに、温室効果ガスの大気中濃度が、増加しているのは実測により明らかにされている。とくに大気中のCO<sub>2</sub>濃度は、このところ毎年1.5ppm前後で増えつづけ、産業革命前と比べると75ppmも増え、今では355ppmになっている。このままでは、今後、地球は温暖化していくと考えられているが、しかし、温暖化の程度は明確ではなく、しかも、いつ、どこで、どのような影響が発生するかも、まだ明らかではない。さらに今後、温暖化が進むと、その影響は測り知れず、しかも一度影響が発生するとともに戻すことは不可能に近いと、早急な対策が必要であると考えられている。

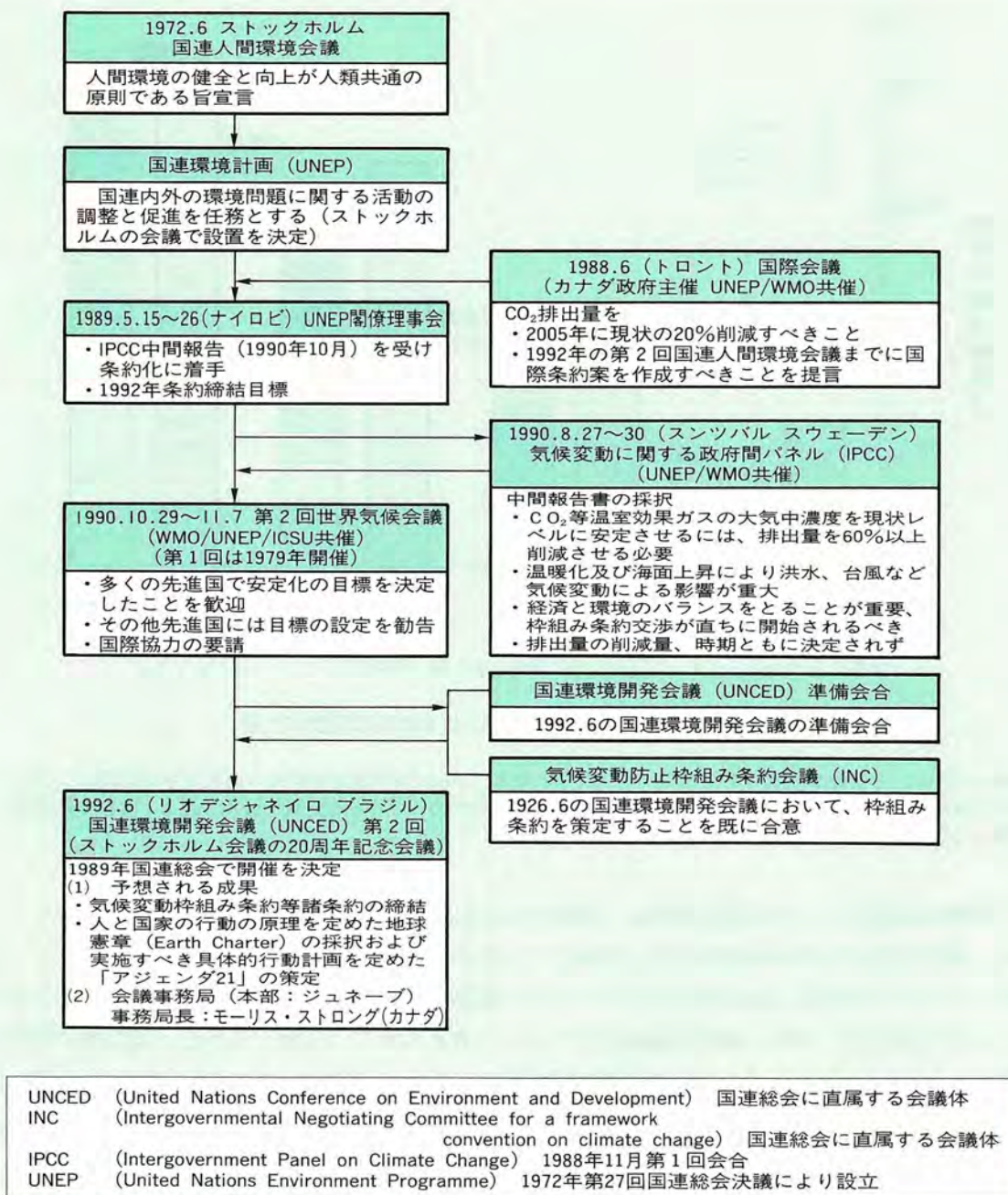
### (世界の動向)

このようなことを背景に、1988年6月、カナダ・トロントで「大気変動に関する国際会議」が開催された。この会議で、世界ではじめて、温暖化防止対策として具体的なCO<sub>2</sub>削減目標の数字が示された。

それは、「2005年までにCO<sub>2</sub>排出量を1988年レベルから20%削減すべきである」というものであったが、これを契機に、地球温暖化を巡る国際的な動きは一気に加速され、本年 (1992年) 6月にブラジルで開催予定の「環境と開発に関する国連会議 (UNCED)」で、気候変動防止枠組み条約 (地球温暖化防止条約) が締結・調印される運びになっている。

この条約 (案) の検討に先立ち、1988年11月、「世界気象機構 (WMO)」と「国連環境計画 (UNEP)」は、「気候変動に関する政府間パネル (IPCC)」を設立し、温暖化に関する知見の整理と今後の対策についての検討に入った。





### 地球温暖化問題に関する国際会議の流れ

IPCCでは、世界の70ヶ国から約1,000人の専門家の参加をえて、

- 地球の温暖化について、何がどこまでわかっているか、
- 地球の温暖化によって、環境や社会あるいは経済がどのような影響を受けるおそれがあるのか、
- 予想される影響を予防したり、あるいは軽減させるために、どのような政策を採るべきか、

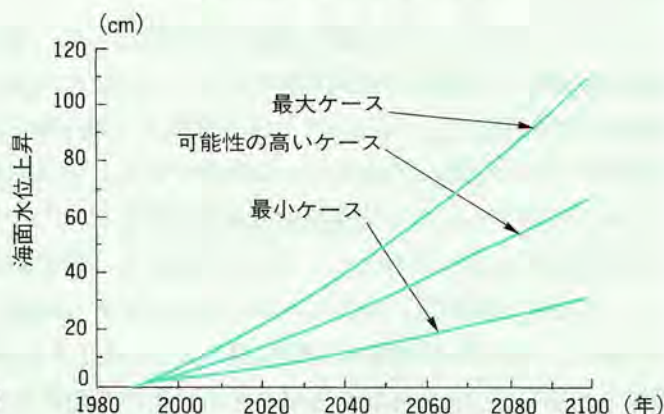
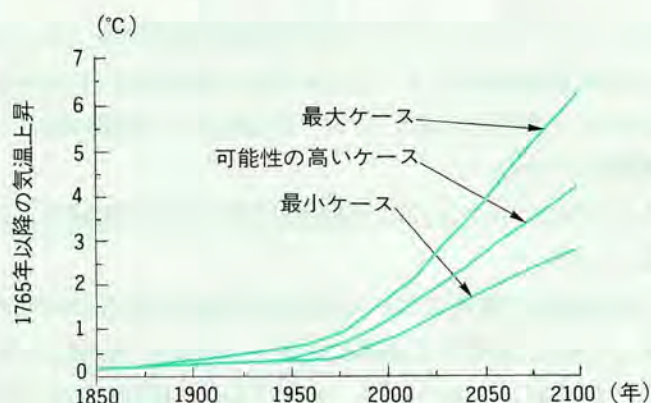
を検討し、2年後の1990年10月に、中間報告書を「第2回世界気候会議 (SWCC)」に提出した。この報告は現在、温暖化問題の検討や対策の具体化の際の世界共通の議論の土台となっている。

これによると、気候変動の科学的知見には多くの不確実性があるものの、温室効果ガスの大気中濃度は年々増加し、このままの状態がつづく、早ければ2025年に、遅くとも2050年には、産業革命前の2倍になるという。また、気温は10年間で平均0.3℃、海面は10年間で平均6cm上昇し、21世紀末までには、それぞれ3℃の気温上昇



(1) 気温はどの程度上昇するか

(2) 海面水位はどの程度上昇するか



(出典：IPCC中間報告書)

### 気候変動予測モデルによる推定

- (1) IPCCによると、大気中のCO<sub>2</sub>やメタンなどの温室効果ガスが、今後、何ら対策がとられずに増加しつづけた場合の気温の上昇は、可能性の高いケースでは、10年あたりで約0.3°C（不確かさを考慮すると0.2°C～0.5°C）と推定される。予想される気温上昇は、2025年までに現在より約1°C（産業革命前からは約2°C）、21世紀末には約3°C（産業革命前からは約4°C）である。
- (2) また海面水位の上昇は、極地方の氷が溶けたり、海水が熱で膨張すると考えられるため、可能性の高いケースでは、10年あたりで6cm（不確かさを考慮すると3～10cm）と推定される。予想される海面上昇は、2030年までに平均で20cm、21世紀末には65cmである。地域的なバラツキはかなりあると予想される。

と65cmの海面上昇が予想されるとしている。

この結果、人類はとり返しのつかない甚大な影響を蒙るおそれがあるという。たとえば、自然環境や生態系に大きな変革をもたらすだけでなく、海面上昇の脅威にさらされる低い島嶼や沿岸地帯、生産力や技術管理法に大きな変化を受ける農林畜産業、そして水の需要や汚染などの人間の居住環境などは、世界の多くの地域で問題になると考えられている。

しかも、地球温暖化問題は、環境や社会あるいは経済に影響を及ぼすだけとは限らない。それは、大量生産・大量消費の現代物質文明や、エネルギー資源の利用のうえに成り立つ現代エネルギー文明を享受しているわれわれに対して、ライフスタイルの見直しに止まらず、現代文明そのものの問い直しを迫りかねない。

それは、第一に、大気中にごくありふれて存在するCO<sub>2</sub>などの増加によって、温暖化のような地球環境問題が生ずるに及び、いかに人間活動が巨大化してしまったか、そして巨大化した人間活動のまえに、地球がいかに限られた容量しかもたず、しかも、いかに傷つきやすい存在に過ぎなかったかが明らかになったためである。

このことは、限りない空間を前提としたこれまでの人間活動に対して、大転換を迫ると考えられる。なぜなら、限られた小さな空間しかもたない地球においては、もはや、地球そのものが許容する範囲内でしか人間活動が許されないことになるからである。

第二に、これに加えて重要なことは、地球温暖化問題は、直接、エネルギー問題と結びついている。というのは、現在、世界で消費される一次エネルギーの約90%が石油、石炭などの化石燃料であり、化石燃料の燃焼によって必ず発生するCO<sub>2</sub>が地球温暖化の主因となっているからである。

したがって、温暖化防止のためにCO<sub>2</sub>の排出を抑制することは、まさに、世界の90%を占めるエネルギー（化石燃料）の使用制限につながりかねない。エネルギーの使用制限は、当然、経済や社会生活の基盤である現代エネルギー文明の根底を大きく揺さぶることになるからである。

このような状況のもとで、世界的に温室効果ガスの排出を緊急に抑制することが必要であるとの認識が高まり、



気候変動防止枠組み条約(案)の検討と前後して、ヨーロッパ先進諸国は相次いで、CO<sub>2</sub>排出量の削減行動目標を定めるにいたった。

ヨーロッパでは、この目標を達成する手段として、省エネルギーやエネルギー利用の高効率化を図る一方、化石燃料に課税して燃料の使用量を抑えることにより、CO<sub>2</sub>の排出量を削減しようとする考え方が主流で、CO<sub>2</sub>の回収・処分技術の開発については、CO<sub>2</sub>を回収して地下水に溶かして処分する考えについての調査や、海洋に投入した場合のモデル計算が行われている程度であり、あまり積極的ではない。

このようなヨーロッパ先進諸国の動きに対して、アメリカはCO<sub>2</sub>のみではなく、温室効果ガス全体を削減対象として対策を考えるべきだとし、これらの国々と一線を画している。

とくにCO<sub>2</sub>の抑制は、省エネルギーやエネルギー利用の高効率化の推進によって排出量を削減できるとの考え方が強く、一部で火力発電所の燃焼排ガスからCO<sub>2</sub>を回収したあと、液化して海洋に処分する提案や、酸素による燃焼を利用してCO<sub>2</sub>の回収を容易にする技術の基礎研究などが進められているが、ヨーロッパと同様にCO<sub>2</sub>の回収・処分技術の開発の優先順位は低いようである。

## (わが国の動向)

このような世界の動きに対して、わが国も、1990年10月23日、「地球温暖化防止行動計画」を策定し、CO<sub>2</sub>の排出量を2000年までに1990年レベルで安定化する目標を定めた。

すなわち、CO<sub>2</sub>は主要国が排出抑制のために共通の努力を払うことを前提に、

(a) 第一目標として、一人あたりのCO<sub>2</sub>排出量を、2000年以降、概ね1990年レベルでの安定化を図る、

(b) 第二目標として、CO<sub>2</sub>排出総量を、技術の予想以上の進展を条件に、2000年以降、概ね1990年レベルでの安定化に努める、

としている。

またわが国は、地球温暖化の総合的な防止対策として、1991年7月のヒューストン・サミットにおいて「地球再生計画」を公式に提唱した。これは、今後の100年間で、過去の200年間に蓄積された大気中の温室効果ガスを削減して地球の姿をもとに戻そうとするもので、前半の50年間に環境に優しい技術の開発・導入に努め、後半の50年間にその成果を最大限に活かして、緑の地球を再生・創造することを目指している。

このほか民間レベルにおいても、経団連の「地球環境憲章」をはじめ、地球環境保護のための多くの行動計画や指針づくりがつつげられている。

## (電気事業の取り組み)

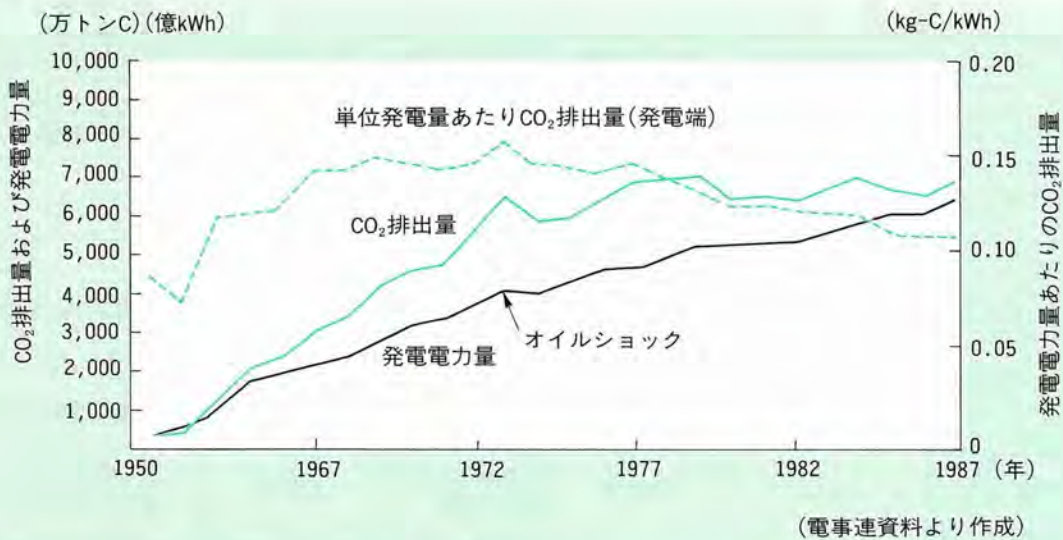
わが国の総エネルギー需要は、1973年のオイルショック以降ほぼ横ばいで推移してきたのに対して、電力需要は着実に増加し、一次エネルギー供給ベースにおける電力供給の割合を示す電力化率は、オイルショック当時の30%程度から現在では40%近くまでに達している。

このような傾向に対して、電気事業では、電力の安定した供給を基本に、セキュリティやコスト、発電方式別の稼働特性や環境対策などに配慮して、エネルギー源をバランスよく組み合わせるベストミックスの観点から、必要とする発電所の建設を進めてきた。

この結果、最近10年間(1977年～1987年)の電気事業におけるCO<sub>2</sub>の排出傾向をみると、電力需要は約1.4倍も増加したにもかかわらず、CO<sub>2</sub>排出総量はほぼ横ばいで推移してきた。

これを発電々力量あたりのCO<sub>2</sub>排出量、すなわち排出原単位(kg-C/kWh)で見ると、約0.15から0.11へと低減しているが、これは、原子力など非化石燃料による発電量の増加、火力発電の熱効率の向上、そして送配電ロスな





電気事業からのCO<sub>2</sub>排出量の推移 (炭素換算)

ど総合効率の改善に努めてきたためである。このようなわが国の状況を、化石燃料を比較的多く利用しているアメリカやイギリスと比べると、CO<sub>2</sub>排出原単位は6割程度に止まっている。

しかし、今後のわが国の社会・経済動向を考えると、省エネルギーの進展やエネルギー多消費産業から寡消費産業への産業構造の転換が進むと予想されるものの、その一方で、高齢化・情報化社会の到来による民生用需要の伸びや生産の自動化による産業用需要の進展などが予想されるため、今後とも、電力需要とともに電力化率も着実に増加すると考えられる。しかも、当面、この増分の半数以上は、バランスのとれたエネルギー源構成の観点からも、石炭やLNGなどの化石燃料でまかなう必要があると考えられるため、今後、電気事業におけるCO<sub>2</sub>排出量の増加は避けられない趨勢にある。

かかる状況のもとで、電気事業も温暖化問題に重大な関心をもち、経済成長と環境保護を調和させつつエネルギーの供給責任を果たすことを基本として、CO<sub>2</sub>を排出しないか、あるいは排出が少ない方策の研究開発を積極的に進める一方、それでもなお、止むをえずCO<sub>2</sub>を排出せざるをえない場合も想定して、CO<sub>2</sub>の除去・固定技術の研究開発についても他の業界に先駆け幅広く取り組んでいる。

とくに、CO<sub>2</sub>の除去技術の中でも回収技術については、電力各社は、緊密な連携を図るとともに、すでにパイロットプラントによる研究開発に着手するなど各種方式について幅広く検討を進めている。



温室効果ガスの目標設定に関する各国の動向

1992年2月15日現在

国名	対象ガス	安定化目標	削減目標	基準年次	備考
オーストリア	CO <sub>2</sub>	——	2005年までに20%削減	1988年	・トロント会議(88年)で示された目標
デンマーク	CO <sub>2</sub>	——	2005年までに20%削減	1988年	
フランス	CO <sub>2</sub>	2000年までに一人あたり排出量を2トン/年以下へ	——	——	・閣議了解(90年9月)
ドイツ	CO <sub>2</sub>	——	2005年までに25%削減	1987年	・閣議決定(90年11月)
イタリア	CO <sub>2</sub>	2000年	2005年までに20%削減	1990年	・ECE環境大臣ベルゲン会合(90年5月)で表明
オランダ	CO <sub>2</sub>	1995年	2000年までに3~5%削減	1989年と90年の平均	・新国家環境政策計画(90年6月)で位置づけ
ノルウェー	CO <sub>2</sub>	2000年	——	1989年	・ECE環境大臣ベルゲン会合(90年5月)で表明
スウェーデン	CO <sub>2</sub>	1988年レベルで安定化	——	1988年	・国会決議(88年6月)
イギリス	CO <sub>2</sub>	2005年	——	1990年	・環境白書(90年9月)で表明
カナダ	CO <sub>2</sub> と他の温室効果ガス	2000年	——	1990年	・グリーンプラン(環境問題に関する行動計画90年12月)で位置づけ
アメリカ	全温室効果ガス	2000年	——	1987年レベル以下	・第1回気候変動防止枠組み条約会議(91年2月)で表明
オーストラリア	全温室効果ガス	——	2005年までに20%削減	1988年	・閣議決定(90年10月) ・温室効果ガスのうちモントリオール議定書で規制されるガスを除く
ニュージーランド	CO <sub>2</sub>	——	2000年までに20%削減	1990年	・国民党政権(90年10月)となりCO <sub>2</sub> 削減目標を5年間早める
日本	CO <sub>2</sub>	2000年	——	1990年	・閣議決定(90年10月)

EC (欧州共同体)	CO <sub>2</sub>	2000年	——	1990年	・EC環境エネルギー合同理事会(90年10月)で決定
EFTA (欧州自由貿易連合)	CO <sub>2</sub>	2000年	——	1990年	・第2回世界気候会議(90年11月)で表明

EC加盟国：フランス、ドイツ、イタリア、ベネルクス3国、イギリス、デンマーク、アイルランド、ギリシャ、スペイン、ポルトガル

EFTA加盟国：スウェーデン、ノルウェー、スイス、オーストリア、フィンランド、アイスランド

(平成3年版環境白書をもとに作成)



地球温暖化対策を計画的・総合的に推進するため、当面の政府としての方針や今後取り組むべき実行可能な対策の全体像を明確にし、もって国民の理解と協力をえるとともに、わが国として国際的な枠組みづくりに貢献していく上で基本的な姿勢を明らかにするもの。

●地球温暖化対策の基本

〔環境保全型社会の形成〕

環境と人間活動の適切なバランスを図り、「地球環境への負荷の少ない社会」を形成していく。

〔経済の安定的発展との両立〕

地球環境問題の解決にあたっては、持続可能な経済の安定的発展との両立を図る。

〔国際協調〕

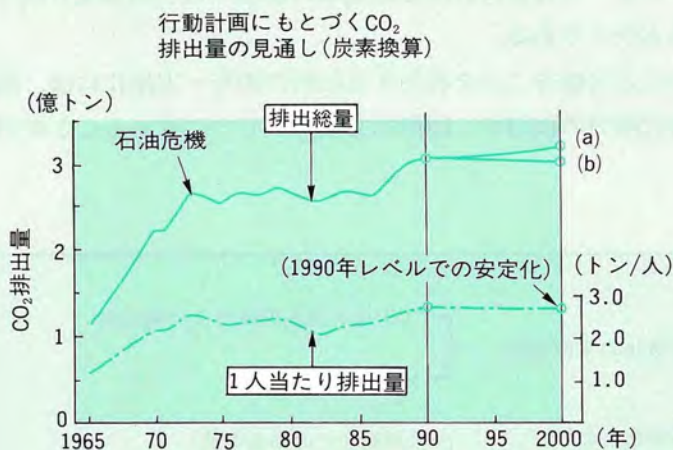
わが国は、優れた技術力と環境保全の豊かな経験を背景に、国際協力を通じて世界の取り組みの先導的役割を果たしていく。

●温室効果ガス排出目標のための行動計画の目標

① CO<sub>2</sub>は、主要先進国が排出抑制のために共通の努力を払うことを前提に、

(a) 一人あたりCO<sub>2</sub>排出量は、2000年以降概ね、1990年レベルでの安定化を図る。

(b) さらに革新的な技術開発等が、現在予測される以上に、早期の大幅な進展により、CO<sub>2</sub>排出総量が2000年以降、概ね1990年レベルで安定化するよう努める。



「地球温暖化防止行動計画」では、(a)一人あたりのCO<sub>2</sub>排出量の安定化と、(b)CO<sub>2</sub>排出総量の安定化に努める、とがある。現在までのCO<sub>2</sub>排出総量の推移をみると、オイルショック以降は安定していたが、ここ2～3年前から排出量は急増し、1990年には約3.2億トンとなっている。一方、一人あたりのCO<sub>2</sub>排出量はほぼ安定して推移しており、1990年には2.59トンであった。これを、2000年までに安定化させるとすると、人口増加が見込まれる分だけ、CO<sub>2</sub>排出総量は増加し、グラフの(a)点となる。排出総量を安定化させるとすると(b)となる。その差は、約2000万トンである。

② メタンは、現状の排出程度を越えないこととする。また一酸化二窒素などその他の温室効果ガスについても、極力その排出を増加させないこととする。

●行動計画の期間と主な講ずべき対策

1991年から2000年までの間に、計画の目標達成に向け、実行可能な対策から順次着手する。

① CO<sub>2</sub> 排出抑制対策

- ・ CO<sub>2</sub> の排出の少ない都市、地域構造の形成
- ・ // 交通体系等の形成
- ・ // 生産構造の形成
- ・ // エネルギー供給構造の形成
- ・ // ライフスタイルの実現

発電部門においては、

- (a) CO<sub>2</sub> を排出しないエネルギーとして、原子力、水力、地熱、太陽光、風力の利用を推進
- (b) 発電効率の向上を図るため、複合発電、超々臨界圧プラントの開発・導入
- (c) 燃料電池、太陽電池等の分散型電源の導入

② CO<sub>2</sub> の吸収源（森林等の緑）対策

- ・ 国内の森林、都市等の緑の保全、整備
- ・ 木材資源利用の適性化

③ 技術開発およびその普及

- ・ 温室効果ガス排出抑制のための技術
- ・ 温室効果ガス吸収、固定等のための技術
- ・ 温暖化適応技術

「地球温暖化防止行動計画」の概要



# 電力中央研究所における取り組み

## (温暖化研究の対象と推進方法)

当研究所では、1988年より地球温暖化問題として、温暖化の不確実性を解消するための温暖化の現象解明や温暖化の適応方策から温暖化の抑制対策にいたる研究を幅広くとりあげ、総力を結集して取り組んでいる。

しかも研究を推進するにあたっては、積極的に国内外の研究機関と手を取り合い、広く国際的なプロジェクトとして、地球規模で研究を展開していくことにしている。

これは、温暖化研究がグローバルな問題を対象とするだけに、一研究機関はもちろん、一国のみでよくなしうるものではないためである。というのも、温暖化問題のような地球規模の現象については、国際的な協力なくして必要なデータすら手に入れることが難しいうえ、多分野にわたる最先端の情報や科学的知見を広く取り入れていくことが、温暖化問題の解決に不可欠であるからである。

また、これに加えて、宇宙空間や海洋における実験やこれを利用する技術の開発・実用化には、国際的なコンセンサスが不可欠であることを踏まえて、研究開発の段階から国際的な協力のもとに進めることが何より重要であるからである。





## (温暖化の現象説明と適応方策)

このままでは、今後、地球は温暖化していくと考えられているが、気温の上昇や降水量の増加など温暖化の幅は明らかではなく、しかも、日本を含む東アジア規模はもちろん、地球規模でも、いつ、どこで、どのような影響が発生するかも定かではない。

これは、地球上の気候を構成する大気や海洋などの実態が解明されておらず不確かなところがあることと、それらが相互に影響しあった結果おこると考えられる温暖化のメカニズムも不明な点が多くあるためである。したがって、温暖化の予防や緩和、あるいは温暖化世界への適応などの対応策を有効ならしめるためには、まず、これら二つの点を相補い、より完全なものにすることが不可欠になる。

このため当研究所では、まず、**温暖化の実態解明**として、温暖化の主因であるCO<sub>2</sub>の排出実態とエネルギー利用からみたCO<sub>2</sub>の排出量の将来予測、また人工衛星による大気中のCO<sub>2</sub>濃度や気温分布および波浪などの海洋の実態把握とそのための観測データの解析手法の開発など研究に取り組んでいる。

また並行して、当研究所では、気象条件に影響されやすい電気事業にとって、地域的、時間的に精度の高い**温暖化による気候変動の予測**を行うことを主眼とし、東アジア地域を対象とした地域気候変動予測モデルの開発に取り組み一方、そのために必要となる地球全域を対象とした気候変動予測モデルの信頼性向上を図るため、大気や海洋など温暖化に影響を及ぼす重要な因子を明らかにするとともに、そのメカニズムを定量的にモデル化するための研究を国際協力をベースに進めている。

気候変動の予測の研究を並行して進めるのは、本来、研究の方法論上は、温暖化の実態解明を俟って、気候変動の予測の研究に取り組むことが一般的であるが、信頼性の高い気候変動の予測を実現するためには、世界中が協力しても10年から20年にわたる長期の観測研究が必要不可欠と考えられていることと、その間に温暖化対策が遅れをとり、取り返しのつかない事態を迎えるかもしれないため、その時々最新の科学的知見とデータをもとに、その時点で可能な限り、より良い方法を求めて、気候変動の予測を試みる事が何より重要となってくるからである。

このような目標を現在の科学的レベルで達成することは極めて難しいことであるが、現在、予想される温暖化の影響が大きいため、当研究所では、世界有数の気候変動予測モデルの研究機関であるアメリカ・国立大気研究センター(NCAR)などと共同で、これにチャレンジしている。

併せて当研究所では、**温暖化の影響予測・評価と適応方策**の研究にも取り組んでいる。

とくに温暖化により、電力需要や電源構成のあり方など事業展開の根本的な見直しと革新が求められかねない電気事業について、アメリカ・電力研究所(EPRI)と共同で、電気事業がどのような影響を受けるかを定量的に予測・評価するとともに、そのときに予め、どのような適応方策を講じておくべきかについての研究を進めている。

## (温暖化の抑制対策)

温暖化防止の対策として、当面、考えられることは、CO<sub>2</sub>の大気中濃度の増加スピードを、いかに抑えるかということである。このための方法としては、大別してつぎの対策が考えられる。

- (a) 第一が、省エネルギー（エネルギーを浪費しない）
- (b) 第二が、エネルギー選択（エネルギーを利用するときは、CO<sub>2</sub>を排出しない非化石燃料に変える）
- (c) 第三が、化石燃料の効率的利用（どうしても化石燃料を利用しなければならないときは、効率を高めて利用する）



(d) 第四が、排ガスからのCO<sub>2</sub>の除去(それでもCO<sub>2</sub>を減らさなければならぬときには、化石燃料を燃やした排ガスからCO<sub>2</sub>を取り除く)

(e) 第五が、大気中のCO<sub>2</sub>の固定(その上でなお、大気中のCO<sub>2</sub>が増えるときには、大気中のCO<sub>2</sub>を森林やプランクトンなど生物を利用して固定する)

の5つであり、これらの対策のうち、温暖化対策として、もっとも望ましいのは、第一の省エネルギーであり、つぎはエネルギー選択(非化石燃料への転換)や高効率化によるCO<sub>2</sub>の排出抑制である。しかし、これらの対策だけで対応するには、現在のところ、技術的にもエネルギー資源的にも難しい。

要は、温暖化問題の重大性を考え、対策の選択の幅を広げ、どのような状況においても対応できるさまざまな柔軟な対策を、予め用意しておくことが求められているのである。

このため当研究所では、温暖化の抑制対策として、政策や制度的方策から技術的方策まで、幅広く可能性を追求している。

**政策・制度的方策**については、まずエネルギー政策として、世界のエネルギー需要の予測とCO<sub>2</sub>排出量の量的、質的变化について分析し、これをもとにCO<sub>2</sub>排出抑制のためのあるべきエネルギー戦略を考察する一方、電気事業のエネルギー選択にとって、その検討の基礎ともなる発電方式、すなわち従来の原子力・火力・水力発電から新発電方式にいたる全般について、それぞれの方式の地球温暖化への寄与について、総合的に評価している。

また制度的方策としては、間接的な規制の中でも、公平かつ効率的な制度の創案を目指して、課徴金制度や排出権市場など経済メカニズムによる抑制策などについて検討を進めている。

つぎに、**CO<sub>2</sub>抑制対策技術**については、まず省エネルギーについて、ヒートポンプなどの個別技術の開発に取り組むとともに、都市全体を対象として、エネルギーを高度に活用する社会の構築に必要な技術やシステムの開発を進めることにしている。

また、エネルギー選択については、原子力発電技術、高温岩体発電や太陽光発電など自然エネルギーの利用技術、そして、従来ややもすると見捨てられていた低いレベルのエネルギーの利用法の開発を推進する一方、高効率化技術として、石炭ガス化複合発電や燃料電池などの開発に取り組んでいる。

これに対して、排ガスからのCO<sub>2</sub>の除去(回収・処分)および大気中CO<sub>2</sub>の固定化については、現在、基礎的段階の研究を推進しているところである。

CO<sub>2</sub>除去技術の回収は、とくに電力各社が各種方式の実現可能性を幅広く追求しているため、当研究所では重複を避け、現時点で、とくに低エネルギー化、低コスト化の観点から、比較的早期の実用化の可能性が高い方式に焦点を合わせて基礎的な実験を進めている。一方、回収した大量のCO<sub>2</sub>の処理方法については、深海底への貯留を構想し、その可能性について研究中である。この研究の推進にあたっては、とくに生態系への影響が生じないように環境影響評価を中心に取り組んでいる。

このほかにも、有望な研究を取り上げ、海洋性植物プランクトンなどによるCO<sub>2</sub>の固定化や、**CO<sub>2</sub>有効利用技術**として、回収したCO<sub>2</sub>を資源として飼料・燃料・化学原料に有効に利用する方法についても可能性を追求し、多角的、総合的な研究の推進を目指している。

## (さらなる温暖化対策研究へ)

以上が現在、当研究所が取り組んでいる地球温暖化研究のあらましであるが、これらはほんの序の口の研究にすぎない。

というのは、地球温暖化などの地球環境問題の出現は、世界の経済成長と人口の爆発的増加にともなう資源・エネルギー消費量の急速な増加傾向により、人間活動による環境への負荷がついに地球的規模にいたったことを示すものであるからである。



それゆえに、この問題を解決するためには、現象発生のメカニズムの解明や原因物質の排出抑制に止まらず、地球の有する物質循環能力や環境浄化能力などで示される地球環境容量の有限性を理解し、これまでのエネルギー多消費文明から脱却して、環境やエネルギー・資源や経済発展と調和した新しい人間活動を具体的に探ることが必要となる。

それはたとえば、地球のもつ有限の環境容量（許容能力、物質循環能力、環境浄化能力など）を前提とする新しい世界経済システムや人類社会システムのあり方から、地球環境全体の安全保障を図る新しい科学と技術の体系を基礎とする新しい文明の構築を目指すものとなり、このための研究開発が展開されることになることであろう。







目 次 表紙中巻の印刷増紙の仕様紙 - 版下表

序 巻頭 巻頭 巻頭 巻頭 巻頭 巻頭 巻頭 巻頭 巻頭 巻頭

第1巻 第1号 第1号 第1号 第1号 第1号 第1号 第1号 第1号 第1号

第2巻 第2号 第2号 第2号 第2号 第2号 第2号 第2号 第2号 第2号

第3巻 第3号 第3号 第3号 第3号 第3号 第3号 第3号 第3号 第3号

第4巻 第4号 第4号 第4号 第4号 第4号 第4号 第4号 第4号 第4号

第5巻 第5号 第5号 第5号 第5号 第5号 第5号 第5号 第5号 第5号

# 第1部

## 温暖化の現象解明 と適応方策





## 第1部 温暖化の現象解明と適用方策 ● 目次

狛江研究所 発電プラント部 次長 西宮 昌  
 発電プラント部 広域環境研究室 主任研究員 小林 博和  
 発電プラント部 広域環境研究室 主査研究員 加藤 央之  
 我孫子研究所 水理部 構造水理研究室 専門役 丸山 康樹  
 経済研究所 経済部 エネルギー研究室 担当研究員 長野 浩司  
 情報システム部 経営情報研究室長 高橋 誠

1-1	温暖化の実態解明 .....	26
1-2	温暖化による気候変動の予測 .....	34
1-3	温暖化の影響予測・評価と適応方策 .....	39



西宮 昌 (1968年入所)

気象学を畑とし、電気事業に係わる大気環境研究に従事。地球環境問題がクローズアップされる以前から、地球温暖化と気候変動、酸性雨問題の研究に取り組んでいる。



丸山 康樹 (1976年入所)

臨海発電所（火力・原子力）の港湾形状最適化などの設計と環境問題（海岸変形）について、数値モデルを主体に研究を進めてきた。その後、生物部門との学際研究や企画部勤務の経験を踏まえ気候変動予測モデルの開発に従事。現在、経営調査室課長を務める。



小林 博和 (1973年入所)

入所以来、大気汚染と気象との関係について研究してきた。その後、原子力関係の部門に異動してデータベースシステム開発に従事し、機械と人間の哲学的関係に興味を覚えた。現在は、地球環境衛星開発に携わっている。



長野 浩司 (1987年入所)

原子力開発戦略の評価、原子燃料サイクル技術の評価などを担当。'90年10月より国際応用システム解析研究所 (IIASA) において、地球規模でのエネルギーシステムの将来予測とCO<sub>2</sub>の排出抑制戦略の評価に関する共同研究に参加。



加藤 央之 (1983年入所)

入所以来、大気拡散場の気象解析やシミュレーションを担当。現在、地球温暖化により電気事業が受ける影響の予測評価手法や気候変動予測モデルの開発に関するアメリカ・電力研究所 (EPRI) との共同研究に従事。



高橋 誠 (1971年入所)

確率・統計モデル、最適化手法などオペレーションズリサーチの電気事業への適用を中心に経営情報の活用策、システム化を研究してきた。現在は、電気事業の情報高度化とネットワーク構築方策を検討。



# 研究課題の概要

## (温暖化の実態解明)

### —CO<sub>2</sub>排出量の現状と将来—

世界の人為的なCO<sub>2</sub>排出量は、1987年現在、84.9億トン(炭素換算)で、その内訳は化石燃料の燃焼が55.5億トン、森林破壊が28億トン、セメント製造が1.4億トンと推定されている。このうち化石燃料の燃焼による将来のCO<sub>2</sub>排出量の推移は、人口、経済活動、エネルギーの非化石・化石燃料の割合などによるため、国や地域によって排出特性が異なり予測は難しいが、今のままで進めば2000年には約73億トン、2050年時点では約130億トンと、現在の2倍以上に達すると予想される。

一方、化石燃料の燃焼によるわが国のCO<sub>2</sub>排出量は、1987年現在、2.5億トン(1990年現在では3.2億トン)で、このうち、自家発電を含めた電力部門が約30%(電気事業に限ると約25%)を占めている。当研究所の予測では、今後の経済成長、人口、省エネルギーなどの推移を考慮すると、21世紀初頭にわが国CO<sub>2</sub>排出量はピークを迎え、その後は、新技術の導入や徹底した省エネルギーの推進などが行われれば安定化していくものと予想される。

今後とも当研究所では、IPCCの第3部会・エネルギーと産業に関するサブグループ(EIS)への参加や、国際応用システム解析研究所(IIASA、在オーストリア)との共同研究など国際協力をベースに、世界のエネルギー分析とCO<sub>2</sub>排出量予測の研究を進めていくことにしている。

### —人工衛星による地球・大気環境の観測—

わが国では、地球の大気や地球表面の状態など地球環境を監視することを目的に、1996年に地球観測衛星(ADEOS)を打ち上げることになっている。ADEOSには、気温、雲、オゾン、海洋温度など8種類の観測センサーが搭載されるが、その一つに温室効果ガスセンサー(IMG)がある。

当研究所では、このIMGの機能を最大限発揮させるために、観測する赤外線スペクトルの情報から、大気の大気温度や気圧、温室効果ガスの種類やその濃度を解析する手法の開発を国からの受託研究として進めている。一方、この研究に併せて、陸域や海洋を対象に、マイクロ波放射計を利用した人工衛星のデータを解析し、土壌の水分量や海洋の波動・拡散・波浪などの物理現象を明らかにする手法の開発も進めている。

これらの衛星からえられるデータは、地球や大気の実態解明はもとより、温暖化を予測する気候変動予測モデルの精度向上に有益な役割を果たすものと期待されている。

## (温暖化による気候変動の予測)

### —気候変動予測モデルの開発—

将来の気候変動に的確に対応するためには、その変動幅を精度よく予測しなければならない。IPCCの中間報告によれば、温室効果ガスの排出を削減しなければ、21世紀末までに3℃の温度上昇、65cmの海面上昇が予想される。しかし現在のところ、大気・陸域・海洋・雪氷・生物の5つの要素で構成される気候メカニズムがまだ解明されておらず、気候変動の予測にはいまだに多くの不確実性がともなう。

このため、気候変動予測モデルの信頼性を高めるための努力が世界中で進められているが、ほとんどのモデルは、数値シミュレーションを行うときの地理的な間隔(メッシュ)が500km以上と粗いため、現状では、気温や

湿度などを平均化して、より狭い地域の特徴をぼかしてしまう。

そこで当研究所では、気象条件に影響されやすい電気事業にとって必要な気候変動に関する予測データをうることを主眼に、地球全体の気候変動を予測するモデルの改良を目的とした国際共同研究「気候モデル評価コンソーシアム (MECCAプロジェクト)」を発足させるとともに、これをもとにして東アジア地域を対象とする地域の気候変動予測モデルの開発を進めている。

## (温暖化の影響予測・評価と適応方策)

### －わが国への温暖化の影響－

地球温暖化の進行にともなう気候変動は、わが国の自然環境、生態系、社会・経済、そしてエネルギーの使い方などにさまざまな影響を与える。このため当研究所では、前提条件として、大気中CO<sub>2</sub>濃度を600ppm、平均気温上昇を3℃、平均降水量増加を10%、平均海面上昇を1mとして、温暖化によって生じると予想される影響経路と項目、すなわちイベントツリーを作成した。

一例をあげると、自然環境への影響としては、大陸と海洋の境界にあるわが国の気候は、海洋の変化に支配され、温暖化によって、冬は短く夏は長くなる。また海面上昇によって、海拔0m地帯は現在の1,200km<sup>2</sup>から2倍に広がる。一方、生態系への影響としては、気候帯が、数10年間に、極方向へ300～500kmも移動すると推定されるため、陸上の植物相や動物相、海生生物の分布や生物相に変化が生じると予想される。

人間社会への影響としては、農業面では、農作物の生産力は増大するが、新たな病虫害などの発生が起り、品種改良や農業管理技術の改革が必要になる。また水産業面では、漁業資源の分布に変化が生じることが予想される。このほか産業面では、食料、繊維、エネルギーなどの利用形態や価格などに影響を及ぼし、さらに国民の生活基盤である構築物や交通手段にまで大きな影響を与える。

このように自然環境から社会生活にいたるまで、さまざまな形で影響を及ぼすが、同様に電気事業にも大きな影響を及ぼす。

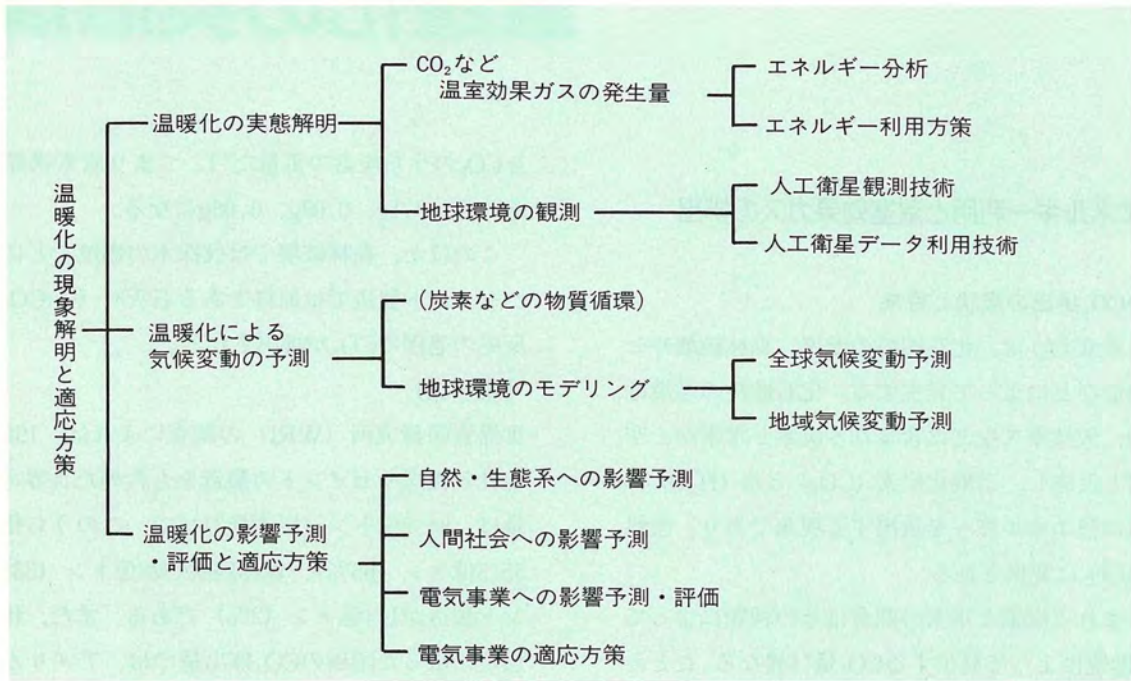
たとえば気温の上昇は、電力設備の容量(kW)と最大電力量(kWh)の両面で、夏季需要、とくにピーク需要を極端に増大させるのに対して、冬季需要を減少させる。また、降水パターンが変化するため、地域ごとに水力発電量の変動が大きくなる。このほか、雷や台風の発生頻度が増えるため、送配電施設などに対する雷害や塩害の対策が必要となることなどが予想される。

### －電気事業経営への影響評価と適応方策－

温暖化が避けられないものであれば、この影響を予測・評価し、発生する可能性のある影響に対して、事前に、いかに、これを予防もしくは緩和、あるいはより良く適応するかが重要となる。

このため当研究所では、アメリカの電力研究所 (EPRI) と共同で、温暖化がもたらす電気事業の経営に与える影響、とくに気候変動とCO<sub>2</sub>の排出規制から直接、間接に受ける可能性のある影響を取り出し、これらを定量的に評価する手法を構築するとともに、これをもとに、温暖化がもたらす電気事業経営への影響に対して戦略的な対応を決定するための手法の開発と改良を図ることにしている。





# 1-1 温暖化の実態解明

## 1-1-1 エネルギー利用と温室効果ガスの排出

### (1) 世界のCO<sub>2</sub>排出の現状と将来

二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)は、化石燃料の燃焼、森林破壊やセメントの製造などによって発生する。化石燃料の燃焼は、石炭、石油、天然ガスなどに含まれる炭素と水素が、空気中の酸素と反応し、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)と水(H<sub>2</sub>O)になり、大量の熱エネルギーを放出する現象であり、燃料中の炭素はCO<sub>2</sub>に変換される。

燃料に含まれる炭素と水素の割合はその種類によって違うため、燃焼によって発生するCO<sub>2</sub>量は異なる。たとえば1キロカロリーの熱量をえるとき、石炭では0.37g、石油では0.3g、天然ガスでは0.21gのCO<sub>2</sub>を発生する。これ

をCO<sub>2</sub>のうち炭素の重量だけ、つまり炭素換算でみると、それぞれ0.1g、0.08g、0.06gになる。

このほか、森林破壊では伐採木の燃焼などにより、またセメント製造では原料である石灰石(CaCO<sub>3</sub>)の化学反応の過程でCO<sub>2</sub>が排出される。

### 〔現 状〕

世界資源研究所(WRI)の調査によれば、1987年現在、森林の伐採やセメントの製造をも含めた世界のCO<sub>2</sub>排出量は、84.9億トン(炭素換算)で、このうち化石燃料が55.5億トン(65%)、森林破壊が28億トン(33%)、セメント製造が1.4億トン(2%)である。また、化石燃料の燃焼に限った国別のCO<sub>2</sub>排出量では、アメリカ、旧ソ連、中国の3ヶ国の排出量が多く、これらの国々で世界のCO<sub>2</sub>排出量の半分を占めている(図1-1-1)。

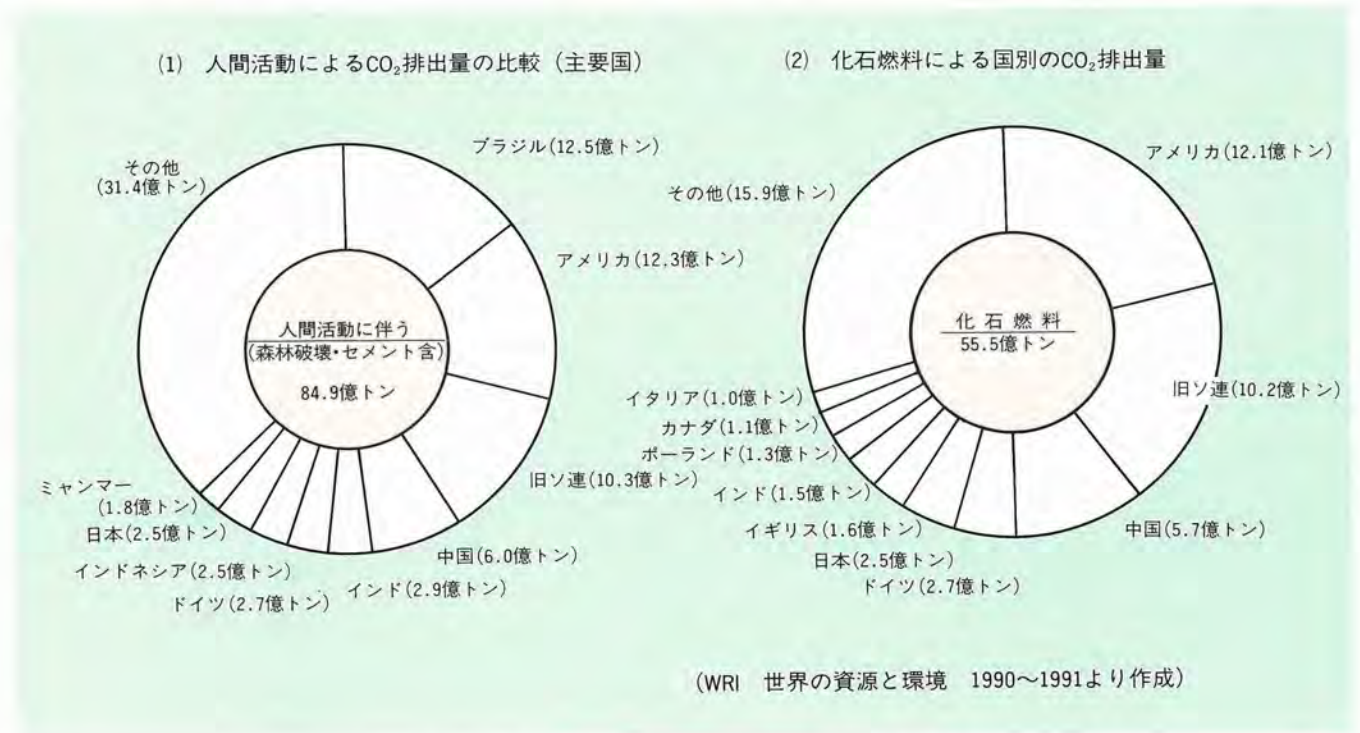


図1-1-1 世界のCO<sub>2</sub>排出量の現状(1987年-炭素換算)

エネルギーの利用に加えて、森林の破壊、セメントの製造などを含めた世界のCO<sub>2</sub>排出量は、熱帯雨林の消失が懸念されるブラジルがアメリカをわずかに上回り、世界第1位の排出国となる。一方、化石燃料の燃焼によるCO<sub>2</sub>排出量は、アメリカ、旧ソ連、中国の3ヶ国で世界の半分を占める。なお日本は、東西ドイツの統一により世界第5位の排出国となっている。



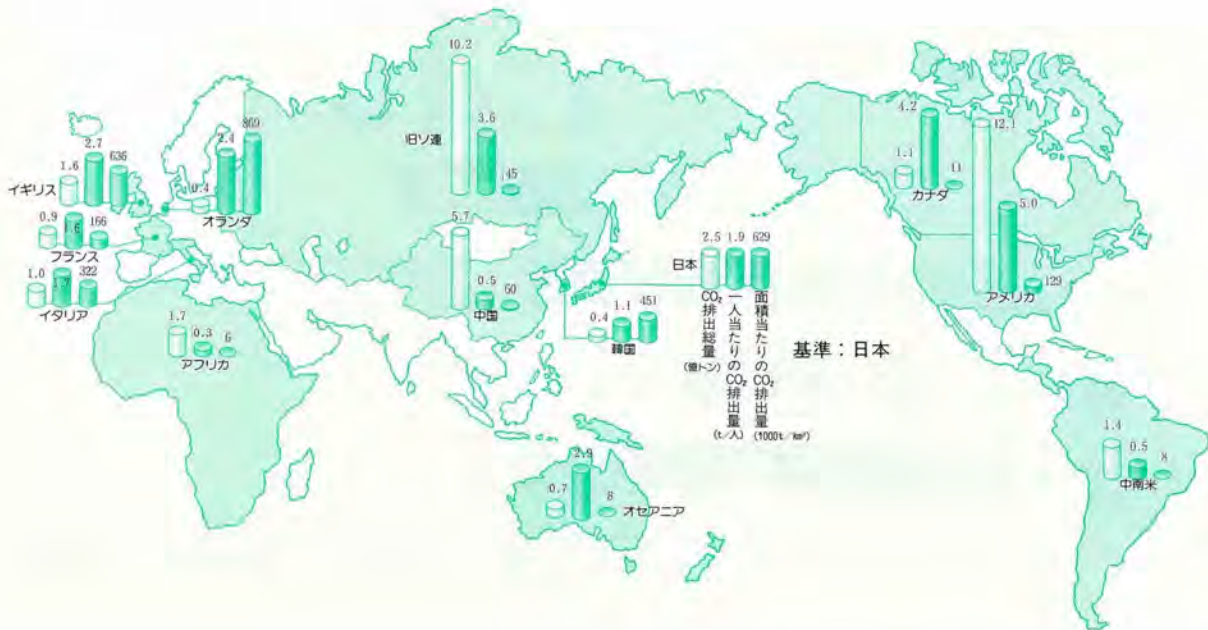


図1-1-2 化石燃料の消費による世界のCO<sub>2</sub>排出量(1987年-炭素換算)

図は国・地域別の比較を行うため、日本を基準に、化石燃料の消費による世界のCO<sub>2</sub>排出量を表したものである。人口一人あたりのCO<sub>2</sub>排出量は、主として国土が広く経済活動も活発な先進地域が多いが、面積あたりのCO<sub>2</sub>排出量は、国土が狭隘で都市化が進んでいる地域の水準が高い。一人あたりや面積あたりなど単位あたりのCO<sub>2</sub>排出量は、産業構造やエネルギーの消費水準、国土の広狭などの要因により大きなバラツキがある。

化石燃料によるCO<sub>2</sub>排出量は、通常、つぎの二つの要因によって決まる。

- (a) 経済規模、産業構造、エネルギー利用効率などに依存するエネルギー消費量
- (b) エネルギー源（化石燃料、原子力、水力など）の構成

このうち産業構造は、重化学工業の比率が高い国ほどCO<sub>2</sub>の排出が多くなる。また、発電効率や自動車の燃費、家電製品の効率といったエネルギーの供給・利用技術の水準、あるいは輸送のためのエネルギー消費やその効率に影響を与える都市の集中度などもCO<sub>2</sub>排出量に関係する。

これらを反映して、国内総生産（GDP）あたりのCO<sub>2</sub>排出量は、中国、旧ソ連などの国々が多い。一方、一人あたりの排出量は、アメリカ、カナダ、旧ソ連や東欧諸国が多い。さらに面積あたりでは、国土が狭隘で都市集中度が高いオランダや日本の排出量が多くなっている（図1-1-2）。

### 【将来】

このようにCO<sub>2</sub>の排出特性は、国によって大きく異なるが、将来のCO<sub>2</sub>排出に影響を与える主な要因としては、つぎがあげられる。

#### ① 人口水準

総エネルギー需要の動向は、基本的に人口水準によって決まるため、人口増加率が高い国では、エネルギー消費の伸び率も大きい。

#### ② 経済活動水準とその構造

GDPを創出するために必要なエネルギー量は、経済活動における産業構造、気候、輸送距離、エネルギー利用効率などに依存する。とくにエネルギー利用効率は、商品やサービスの生産技術、管理方式や行動様式、インフラストラクチャーなどから影響を受けることになる。

#### ③ エネルギー供給源の炭素集約度

炭素集約度は、経済活動のために消費される化石燃料構成、非化石燃料（原子力・水力など）の全エネルギー

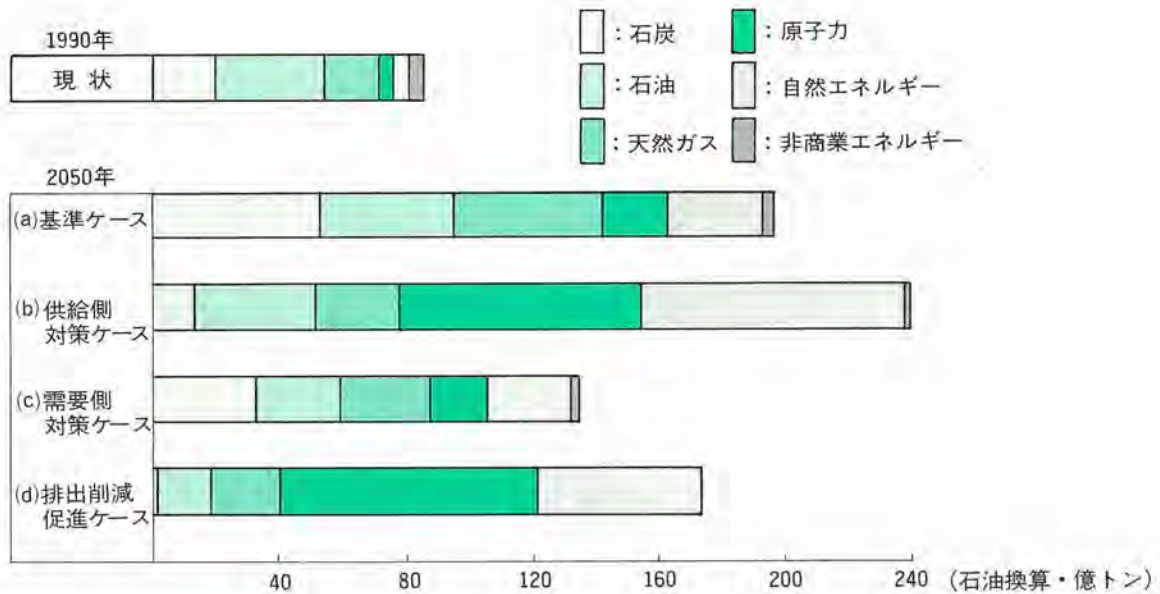


図1-1-3 世界の一次エネルギー消費量(2050年)

2050年における世界の一次エネルギー消費量は、現在の1.5~2.7倍へと増加する。とくにケース(d)のように大きなCO<sub>2</sub>排出削減目標を掲げる場合、たとえ最終エネルギー需要を減少傾向に転じさせたとしても、一次エネルギー消費量は増大する。これは、電力に変換する必要のある原子力や変換効率の低い自然エネルギーなどの利用を拡大するためである。

ギー需要に占める割合、エネルギー資源の生産、流通、輸送、転換の方法に関係する。

このような要因に加えて、新技術の導入など他の要因があれば、いっそう不確実性が増すため、将来のCO<sub>2</sub>排出量を予測することは難しくなる。

このため当研究所では、国際応用システム解析研究所（IIASA、在オーストリア）と共同で、21世紀半ばにいたる世界のエネルギー需給、およびそれに起因するCO<sub>2</sub>排出量の動向を次の4つのケースに分け、試算した。

- (a) 特段の制度的、技術的対策が実施されない場合  
(基準ケース)
- (b) 原子力や新エネルギーの導入など、供給側で最大限の排出抑制対策を実施する場合  
(供給側対策ケース)
- (c) エネルギー利用効率の改善など、需要側で最大限の排出抑制対策を実施する場合  
(需要側対策ケース)
- (d) 需要および供給の両面で実施可能な対策をすべて講じる場合  
(排出削減促進ケース)

この結果、世界の一次エネルギー消費量（1990年現在、石油換算で85億トン、このうち化石燃料が71億トンでシェアは83%）は、基準ケース(a)では、2050年に197億トンと現在の2倍以上にまで大きく増加する。また、途上国のエネルギー消費は急速に伸び、21世紀前半に先進国のそれを上回る。

また、あらゆる対策を講じる排出削減促進ケース(d)では、IPCC・第1作業部会の「科学的評価」において示された、大気中のCO<sub>2</sub>濃度安定化のために必要とされる排出削減量（現状から60%削減）を、2050年時点で実現することとしているが、この場合には、化石燃料の消費量は41億トン、シェアで23%にまで低下させる必要がある。

この結果、原子力では81億トン（石油換算）、自然エネルギーでは53億トンを供給しなければならない（図1-1-3）。

一方、エネルギーシステムからのCO<sub>2</sub>排出量は、基準ケース(a)で見ると、2000年で73億トン（炭素換算）、2030年で107億トン、そして2050年には約130億トンに達する。現在、世界のCO<sub>2</sub>排出量に占める先進国のシェアは約三分の二であるが、2010年では56%、2050年には39%へと



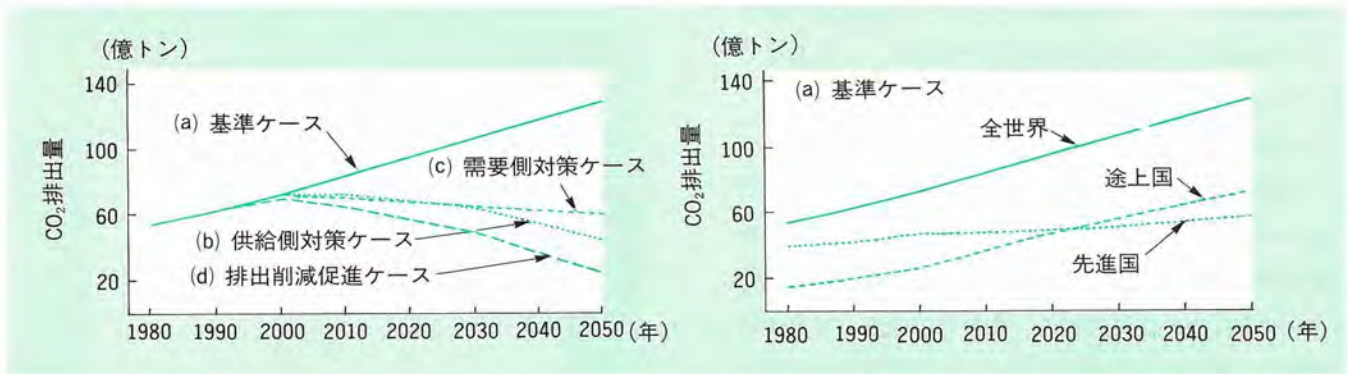


図1-1-4 世界のCO<sub>2</sub>排出量の予測(炭素換算)

- (1) 21世紀のCO<sub>2</sub>排出量は、特段の制度的、技術的対策が実施されない基準ケース(a)では、2050年になると現在の2倍以上に増大する。一方、排出削減促進ケース(d)では、省エネルギー、エネルギー効率改善などの対策を徹底的に進めること(需要側対策ケース(c))はもちろん、それ以上に原子力や新エネルギーの導入など供給構造の抜本的な変革を図ること(供給側対策ケース(b))が不可欠になる。
- (2) 基準ケース(a)では、先進国のCO<sub>2</sub>排出量は、ごくわずかずつ増加していくのに対し、途上国のそれは急激に増加し、21世紀前半には先進国を上回る。

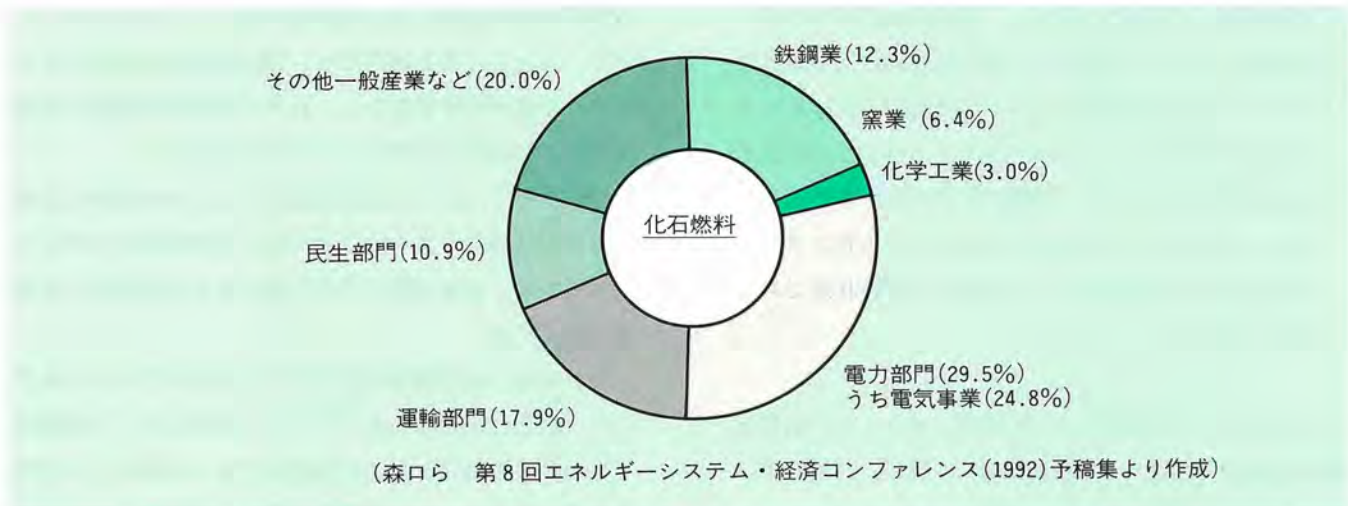


図1-1-5 わが国の部門別CO<sub>2</sub>排出量の割合(炭素換算)

電力部門のように、化石燃料の燃焼の過程でCO<sub>2</sub>が発生するのが一般的であるが、鉄鋼業では、鉄鉱石からコークスによる還元反応で鉄をつくる過程でもCO<sub>2</sub>が発生する。また窯業、とくにセメントは、石灰石を主とする原料を焼成する過程でCO<sub>2</sub>が発生する。

減少し、一次エネルギー消費量と同様にCO<sub>2</sub>排出量においても、その主役の座は21世紀前半に先進国から途上国へと移る(図1-1-4)。

2050年におけるCO<sub>2</sub>排出量をケース別にみると、供給側対策ケース(b)では45億トン、需要側対策ケース(c)では60億トン、排出削減促進ケース(d)では25億トンであり、このことから地球規模での大幅なCO<sub>2</sub>排出抑制のためには、需要側での省エネルギー努力が重要であることは

いうまでもないが、その上でなお、エネルギー供給構造の抜本的な変革が不可欠であることがうかがえる。

## (2) わが国のCO<sub>2</sub>排出の現状と将来

化石燃料の消費によるわが国のCO<sub>2</sub>排出量は、1990年現在、約3.2億トンで、このうち自家発を含めた電力部門が約30% (電気事業に限ると約25%) を占めている(図1-1-5)。



当研究所では、わが国の将来の社会・経済情勢を展望し、21世紀半ばにいたるCO<sub>2</sub>排出量を試算した。試算に当たっては、つぎを前提条件とした。

#### ① 経済活動の水準

今後わが国は、第3次産業への産業構造転換を進めながら内需主導型の経済活動が続き、2005年までは世界全体の経済成長率を上回る、年率3.7%程度の成長をつづけるものと予測される。またその後も、社会生活基盤の一層の充実を図りながら、なお年率2%程度の成長をつづけると想定される。

#### ② 人口の水準

今後わが国の人口は、厚生省によると、現在の1億2000万人強から徐々に増加し、2020年頃に最大の1億3500万人程度となる。その後は減少に転じ、21世紀半ばには現在とほぼ同程度になると推計している。

#### ③ 省エネルギーの水準

わが国は、今後とも率先し、積極的に省エネルギー努力を払っていくと考えた。実際の効果には不確実性がともなうので、年率で1.2～2%の割合で省エネルギーが進むものとした。この1.2%という値は、ほぼ過去わが国の省エネルギー実績に相当する。また年率2%は、オイルショック後から現在にいたる省エネルギー実績に相当するもので、ほぼ限界に近い状態であると考えられる。

これらをもとに試算を行った結果、エネルギー需要は、1985年現在の3.9億トン（石油換算）に対し、21世紀半ばには1.4倍～2.2倍強の5.5～8.7億トンとなる。

また電力需要は、高齢化・情報化の進展により、今後とも民生用、産業用ともに着実に上昇し、一次エネルギー供給量に占める電力供給量の割合である電力化率は、現在の40%弱から2005年には46%程度に伸び、21世紀半ばには50～55%に達すると考えられる。これは、現在の世界最高水準であるスウェーデン（59%）、ノルウェー（55%）など北欧諸国に匹敵する値である。

このようなことからわが国のCO<sub>2</sub>排出量（炭素換算）は、1985年の2.7億トンから21世紀初頭には約1.3倍になり、その後は、新技術の導入や徹底した省エネルギーの推進（年率2%）が図られれば、わずかずつ減少していくと予測される（図1-1-6）。

これは、産業、交通、電力などのあらゆる部門で、化

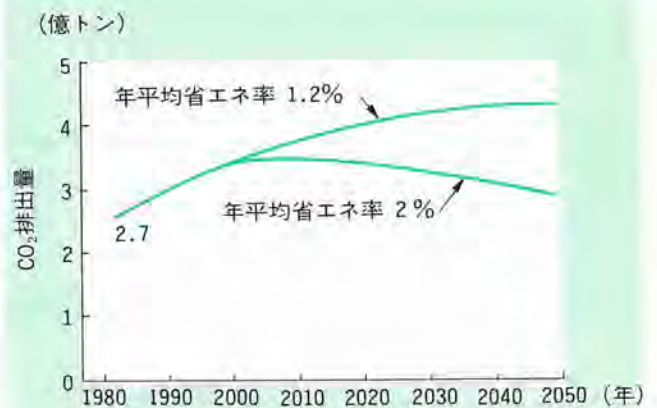


図1-1-6 わが国のCO<sub>2</sub>排出量の予測（炭素換算）

わが国のCO<sub>2</sub>排出量は、21世紀初頭に現状を上回ると予測された。その後は、新技術の導入や徹底した省エネルギー（年率2%）が図られれば、わずかずつ減少していく。

石燃料利用の徹底した高効率化を図るとしたものの、一方で、たとえば電力部門では、1500℃級の超高温ガスタービンや燃料電池発電など、有力な高効率化技術の本格実用化を2010年頃と想定しているためである。

したがって、とくに21世紀初頭に向け、わが国のCO<sub>2</sub>排出量を現状程度、あるいはそれ以下に抑制するためには、省エネルギーを最大限まで推し進めるなど抜本的な対策を必要とする。

なお従来、化石燃料の燃焼により発生するとみられていた一酸化二窒素（N<sub>2</sub>O）やメタン（CH<sub>4</sub>）は、当研究所で電力各社の協力をえて実態調査を行った結果、わが国の火力発電所からの排出濃度は低く、温暖化への寄与は無視できると推定された。

## 1-1-2 人工衛星による観測

### (1) 大気の観測

地球上で起こる自然現象は、時間的にも空間的にもさまざまなスケールをもっている。

このように複雑な地球の環境を観測する場合、地上の定点観測、船、航空機を利用すると、非常に精密な測定ができるが、地球全域をカバーすることは時間的、コスト的にみても難しい。これに対して人工衛星を用いた観測では、地形や地質、海水温や海流の動きなどの状態、あるいは雲の形やその分布、気温、降水など大気圏の状



態を短時間で幅広く捉えることができる。

このため、近年、人工衛星による地球観測技術が飛躍的に発展していることもあり、地球温暖化問題に対して、

- ・温暖化の原因となるCO<sub>2</sub>、メタン(CH<sub>4</sub>)、オゾン(O<sub>3</sub>)など温室効果ガスの大気中での分布やその挙動を観測できないか、
- ・気候変動予測モデル(次節参照)の開発を進めるときに必要な、大気や雲からの赤外線放射特性、あるいは地球全域の気温分布を把握できないか、

など、人工衛星による地球大気の観測に期待が寄せられている。

すべての物体は、それぞれの温度に応じて固有の波長の赤外線を放射している。一方、大気中の温室効果ガスは、それぞれのガスに固有の、赤外線を吸収する波長もっている。このため、空間の、ある場所の大気温度は、そこに存在する温室効果ガスの赤外線の放射と吸収のバランスによって決まる。したがって、例えば、人工衛星に搭載される赤外線の観測センサーが捉えるエネルギーの形やスペクトルには、対象物からセンサーまでの距離(高度)ごとの大気温度やガスの種類・濃度などの情報が含まれることになる(図1-1-7)。

人工衛星を利用して地球の大気を観測する場合、

- (a) 太陽を放射源とする赤外線の大気による吸収を地

球の周縁方向から測定する、

- (b) 大気を放射源とする赤外線の大気放射と吸収を衛星直下の方向で測定する、
- (c) レーザーを光源とし大気の散乱や吸収を測定する、などの方法がある。

そこで、世界各国で人工衛星を利用し、気温や大気中の温室効果ガスなどを観測する計画が進められているが、わが国でも地球環境のグローバルな変化を監視することを目的に、1996年に地球観測衛星(ADEOS)を打ち上げることとなった。ADEOSには、気温、温室効果ガスなどの微量成分、雲、オゾン、海洋温度など8種類の観測センサーが搭載されるが、その一つに通産省が提案した温室効果ガスセンサー(IMG)がある(図1-1-8)。

このIMGは、地球と地球大気の発する赤外線のスペクトルを解析し、温室効果ガスの濃度や気温の三次元分布を観測する装置で、13秒間に1回、地表の大きさにして8km×8kmの目標を極軌道に沿って観測し、ほぼ4日間で地球全体をカバーする。

当研究所では、国からの受託研究として、IMGで計測し、地上で受信される赤外放射エネルギーに関する信号を解析し、気温や温室効果ガス濃度を求める手法や、膨大な量のIMGデータを円滑に処理・解析・伝達するシステムの開発を進めている。

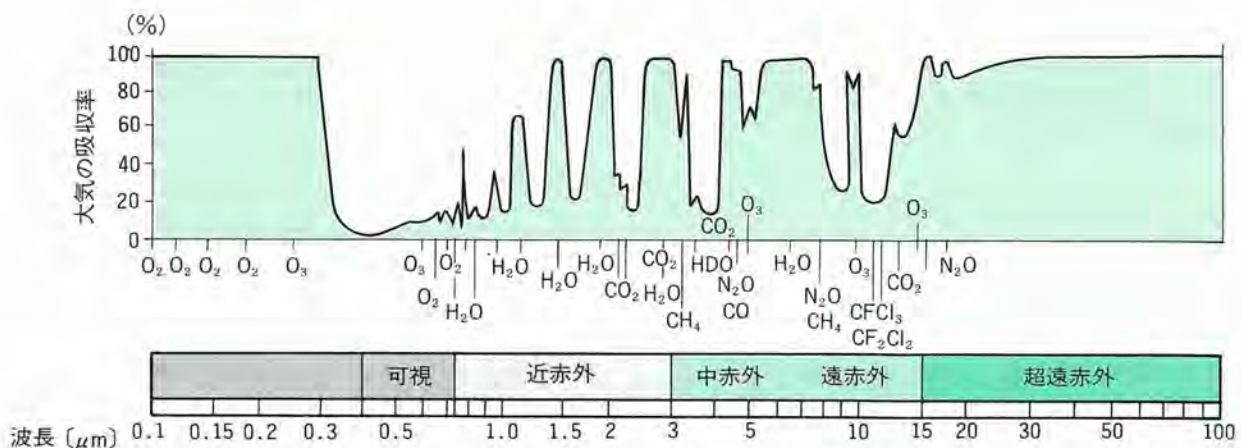


図1-1-7 可視および赤外領域における温室効果ガスの吸収特性

大気中には二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)、水蒸気(H<sub>2</sub>O)、メタン(CH<sub>4</sub>)、オゾン(O<sub>3</sub>)、フロン(CFCs)、一酸化二窒素(N<sub>2</sub>O)など、赤外線を吸収するガスが含まれており、吸収率は波長によって異なる。たとえば、12μm付近の波長では、大気層に含まれるCO<sub>2</sub>の吸収が少ないので、地表が発した赤外線はそのまま衛星に到達する。これに対し、15μm付近の波長では、大気層でほとんど吸収され、衛星に到達するのは大気上端からでる赤外線だけになる。この波長域の違いによって赤外線の吸収特性が異なることを利用し、気温や温室効果ガス濃度の鉛直分布を求めることができる。



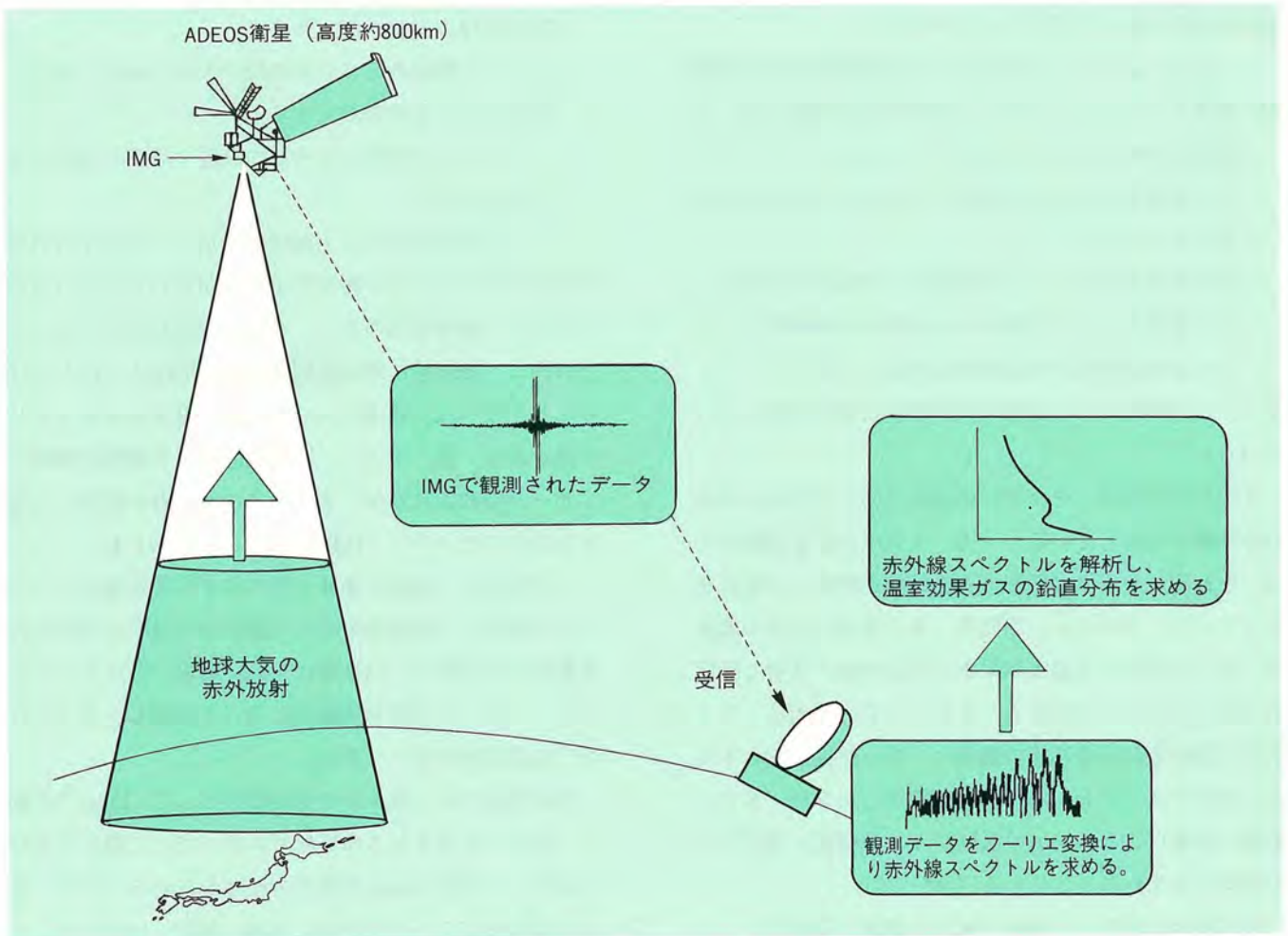


図1-1-8 地球観測衛星(ADEOS)による観測

1996年に国産衛星H-IIロケットにより打ち上げ予定のADEOSは、極軌道をとおりほぼ4日間で地球全域を観測する。ADEOSに搭載される温室効果ガスセンサー(IMG)は、地球と大気の発する赤外線の波長をスペクトル分析し、温室効果ガスや気温の三次元分布を観測する装置である。IMGのハードウェアの開発は、資源探査用観測システム研究開発機構が担当し、当研究所は、衛星信号を解析しCO<sub>2</sub>の濃度や気温に変換するソフトウェアの開発を担当している。

人工衛星から送られてくるデータには、大気の赤外放射以外に、迷光や機器の振動などによって発生するノイズが含まれているため、それらの除去方法を考えなければならない。また、短時間に広範な地域にわたってえられるデータを補正し、それぞれの目的に応じた解析手順(アルゴリズム)によって処理し、信頼性の高い情報としなければならない。

IMGのような赤外線観測センサーを人工衛星に搭載する計画は、以前よりアメリカ航空宇宙局(NASA)で検討されているが、わが国の計画が先に実現する見込みであり、世界初の人工衛星観測計画として解決しなければならない課題も多い。そのため、NASAをはじめとす

る国内外の研究機関と技術情報の交換など、国際的な研究協力を進めることによって、より精度の高い解析方法の確立を目指している。

このように、大気の赤外放射量(地球熱放射)や、これにもとづく気温やガスの濃度分布がえられれば、温室効果ガスの地球規模の循環メカニズムの解明に重要な手がかりとなるだけでなく、気候変動予測モデルの開発においても、極めて有益な情報を提供するものと考えられる。

## (2) 海洋・陸域の観測

地球温暖化において、海洋はエネルギーの輸送や蓄積



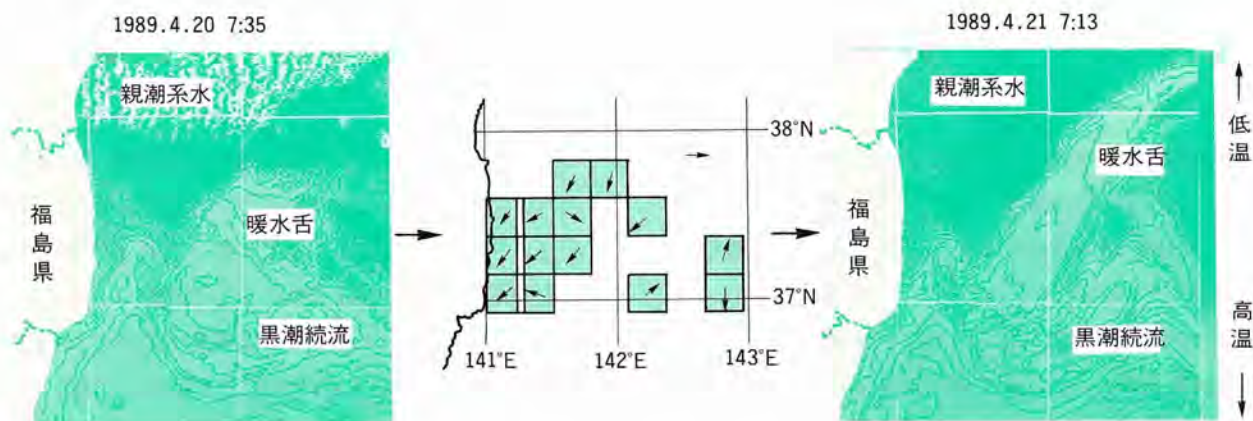


図1-1-9 地球観測衛星(NOAA)の熱赤外面像から求めた流況図

人工衛星による観測から、海洋の流動や波浪の状況を知ることができる。たとえば、福島県沖のように、黒潮や親潮といった強い海流から派生した流れが卓越する海域では、流況を水温分布から読み取ることができる。中央の流況図は、NOAAのとらえた連続した2日間の海面温度分布画像(両側の図)よりプレート法と呼ばれる方法をつかいコンピュータによって算出される。

に大きな役割を果たしており、海洋の状態や循環をより正しく評価することが、温暖化やそれにともなう気候変動のより正確な予測につながる。

また、気候変動予測モデルの精度向上にとって、地表面からの蒸発散のモデル化の改良が課題の一つであり、そのためには、降雨が地中に浸透する量(土壌水分量)の把握が重要になる。

これまで、人工衛星による海洋や陸域の観測研究は、アメリカのノア(NOAA)シリーズやランドサット(Landsat)シリーズ、フランスのスポット(SPOT)や、わが国の観測衛星(Mos-1b)などに搭載された可視域や熱赤外域のセンサーによる画像データの利用を中心に進められてきた(図1-1-9)。

しかし最近では、雲などの気象条件に関係なく、恒常

的に短時間で観測が可能なマイクロ波放射計の利用が注目されている。これは、1992年2月に打ち上げられた地球資源観測衛星1号(JERS-1)に搭載され、今後、打ち上げ予定のランドサット6号(Landsat-6)などにも搭載されることになっている。

これらの衛星データからは、海面温度、海流、海上風、波浪など海洋の特性や、地表温度、土壌水分などの陸域の特性のより正確な把握が可能となり、地球環境の実態解明とともに、気候変動予測モデルの精度向上に大いに役立つと期待されている。

今後、当研究所では、これまでの知見も活かし、マイクロ波を利用した衛星観測データの解析手法を確立していくことにしている。

# 1-2 温暖化による気候変動の予測

## (1) 気候変動予測モデル（気候モデル）の開発

地球温暖化の予防や緩和、あるいは温暖化世界への適応などの対応策が有効かどうかは、気候変動の予測の信頼性にかかっている。

予測には、大別して、過去に地球が温暖化したときの気候の特徴を調べ、それを将来の温暖化の類推に用いるものと、大気や海洋のさまざまな現象を物理学の法則にもとづき表現した、大気大循環モデル（GCM）によるものがある。

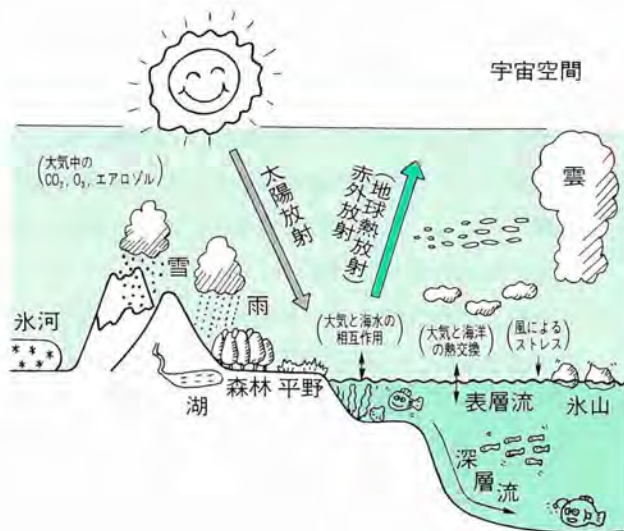
将来起こると考えられる類似のパターンとして、前者の過去のパターンを利用する場合、気候変動の影響要因（温室効果ガスや地球軌道の変化、太陽活動の変化など）や、氷の面積、土地利用の形態などの条件が同一でなけ

ればならない。しかし実際には、気象観測の歴史は、まだ100年と浅いため、古文書や地誌学などの成果に頼らざるをえず、温室効果によって変動する将来の気候と類似した気候を過去から推定することは難しい。ただし古気候は、気候プロセスの考察、温暖化の際の平均的な様相、あるいはGCMの妥当性の検証には役立つ可能性がある。

一方、後者のGCMは、大気・陸域・海洋・雪氷・生物からなる気候システムの各圏の物理現象をモデル化して結合し、さらに関係する諸過程や相互作用を数式化したもので、数百の方程式と数十の変数で表した大型のコンピュータモデルで、現在、もっとも進歩した気候予測手段といえる（図1-2-1）。

それは、まず、GCMにより現在の状態の気候をシミュ

(1) 気候システム（概念図）



(2) 気候モデル（概念図）

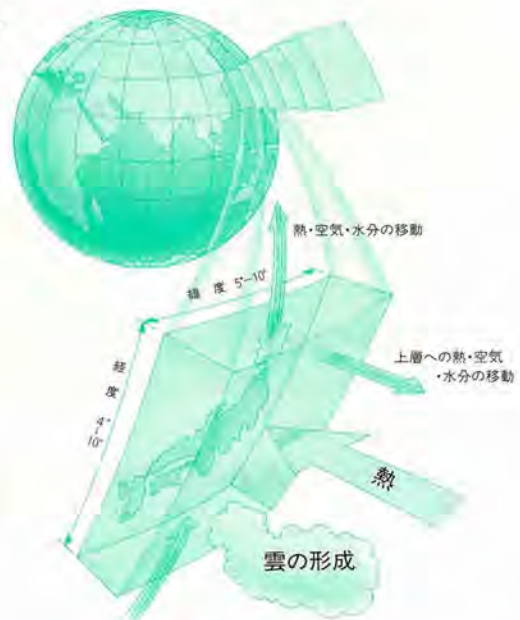


図1-2-1 気候システムと気候モデルの概念

- (1) 地球上の赤道付近と極地方では、太陽から受ける日射のエネルギーの強さが異なるため大きな温度差が生じる。この温度差を解消するために大気の流れが起き、その過程で、大気・陸域・海洋・雪氷・生物の間で熱・水・運動量の交換が行われる。気候システムは、このとき、さまざまに変動していく姿を気温や雨、雲、風のような大気現象として捉えたものである。
- (2) 気候モデルとは、気候システムを物理法則にしたがって多くの方程式で表し、コンピュータで気候変動を予測するものである。現状の地球全体の気候モデルの地理的な間隔（メッシュ）の大きさは、緯度・経度方向がそれぞれ500km程度で、高さが2～3kmである。



[メッシュ500km×500km]



[メッシュ100km×100km]



(出典：MACCAパンフレット)

図1-2-2 気候モデルによる大気現象の再現例

気候モデルを用いて将来の気候を予測する場合、最新のスーパーコンピュータでも1000時間以上の計算時間を必要とする。このため現状では、コンピュータの容量や演算時間の制約から、メッシュを500km四方とするなど計算を粗くせざるをえない。このような粗い空間分解能では、メッシュのより小さい大気現象の再現は悪くなる。きめの細かな予測を行うには、計算能力の向上が不可欠であり、このため当研究所も加わり発足した国際共同研究「MECCA」では、専用のスーパーコンピュータにより気候モデルの信頼性評価を進めている。

レーションし、これが実際の大气や海洋の状態を良く近似しているかどうかを調べる。もし良い近似であれば、つぎに温室効果ガスの濃度を増加させ、シミュレーションを繰り返す。この二つの結果の差が、温室効果ガスの増加にともなう気候変動を表すことになる。

#### ① 現状の気候モデルの限界

GCMで100年程度を予測するには、最新のスーパーコンピュータでも1000時間以上の計算時間を必要とする。また海洋と大気の相互作用や雲の影響などは、気候形成に重要なプロセスであるが、計算容量の制約もあり、各サブ・プログラムごとに簡単な仮定が行われている。このため、これまでに温室効果ガス濃度の増加の影響を詳細に評価した例は少ない。

さらに、現状のGCMの限界の一つは、空間分解能である。ほとんどのモデルは、地球を約500km四方に分割し、標高などの重要な要素をもとに気温や湿度などを平均化する。したがって、このような粗い分割では、より狭い地域の特徴をぼかし、地域スケールでの予測は曖昧にならざるをえない(図1-2-2)。

また分解能を2倍にすると、6～8倍の計算能力が必要になる。

現状の気候モデルには、このような限界があるものの、すべてのモデルは温室効果ガスの濃度が倍増すれば、地

球は全体的に温暖化すると予測している。しかし、気温の上昇や降水量の変化の予測範囲は、熱帯よりも高緯度地域で昇温が大きいことは一致しているが、その変動量はモデル間でバラツキが大きく、しかも地域規模の気候パターンには違いが見られる(図1-2-3)。

現在、気候モデルの確実性を高めるための努力が世界中の研究機関で進められているが、信頼できる気候モデルができあがるまでには10年～20年を要するといわれている。

#### ② 地球全体の気候モデルの改良

温暖化によって、ある程度以上の気候変動は必ず起こるといえるが、気温や降雨のような地球全体の気候特性の予測や、地域的な気候変動、その結果生ずる海面上昇や生態系の変化の予測には、大きな不確実性がある。現状では、今後、気候変動予測モデルの信頼性を向上させるためには、つぎの分野の観測とモデル化の研究が重要と考えられている。

- (a) 雲 : 雲の生成・消滅および放射特性
- (b) 海洋 : 海洋と大気、海洋の表層と深層間のエネルギー交換
- (c) 温室効果ガス : 温室効果ガスの排出と吸収の定量化
- (d) 極域の水床 : 太陽反射や融氷などの特性

しかし、このような取り組みは、対象が地球規模の現

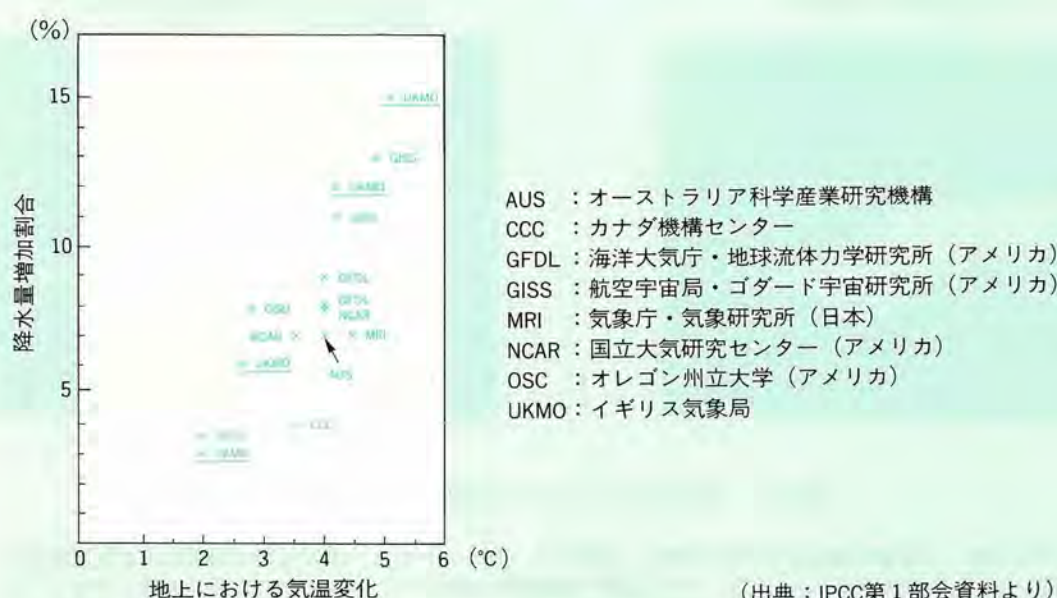


図1-2-3 大気中のCO<sub>2</sub>濃度が2倍になったときの気候変動

大気中のCO<sub>2</sub>濃度が2倍になったときの気温や降水量の予測は、モデル間あるいは同一モデルでも格差がある。これは、気候システムを構成する要素の数値モデル化の方法や計算方法の違いによる。同一モデル（たとえばUKMO：イギリス気象局）でも、条件を変えるだけで、気温は2℃～5℃まで、降水量は3%～15%まで変化する。気候モデルの信頼性を向上させるためには、感度解析による評価が不可欠となる。

象であるため、また多分野にわたる最先端の技術を利用して実施しなければならないため、国際的な協力なくしては必要なデータすら手に入れることが難しくなる。

このため当研究所では、既存の気候モデルの信頼性を向上させるため、1990年6月、3ヶ年計画でアメリカ・フランス・イタリアなどのエネルギー関連研究機関との国際共同研究「気候モデル評価コンソーシアム(MECCAプロジェクト)」を発足させた(表1-2-1)。

これは、温室効果ガスの増加による将来の気候変動の範囲を、現状の気候モデルを用いて定量化する一方、GCMの予測精度を向上させる重要な因子を明らかにすることを目的としており、つぎの二つのフェーズで進められている。

1) フェーズI (1年間)：気候モデルの感度解析

比較的短期間(数10年)を対象とした感度解析を多数行い、GCMの予測結果に差異をもたらすもっとも重要な因子を見出す。現状では、CO<sub>2</sub>濃度、大気-海洋の熱交換、雲、植生変化、海水などの影響が大きいと考えられている。

2) フェーズII(2年間)：高分解能モデルによる温暖化予測

フェーズIの結果を受け、気候変動を支配すると考えられる重要な因子(たとえば大気・海洋の結合)を最新の知見をもとにモデル化する。つぎに全体の精度、応答の遅れなどを考慮し、CO<sub>2</sub>濃度を長期間(100年程度)にわたって徐々に増加させ、温暖化を予測する。

③ 地域気候モデルの開発

地球全体の気候変動だけでなく、日本や東アジアを対象とする地域規模の気候変動が予測できれば、つぎに示すように高い波及効果が期待される。

- (a) 温暖化の対応策をタイムリーに実施することができ、しかもコストの低減に役立つ、
- (b) 気候変動予測の不確実性を定量的に評価でき、採るべき対策の妥当性をより正確に評価できる、
- (c) 電気事業に影響を与える局地的な気候変動や異常気象の発生が予測できるため、電力需給計画、電源立地計画、設備運用・保守計画などをより確実に立



表1-2-1 MECCAプロジェクト (Model Evaluation Consortium for Climate Assessment) の概要

背景	<p>気候変動の予測のために、日本を含め世界中で約20のモデルが開発され、シミュレーション実験が進められているが、信頼のおける予測が可能なモデルはわずかしかない。</p> <p>しかも、これらの予測モデルは計算も複雑で、時間も多にかかるため、十分な分析・評価が行われることがないのが現状である。</p>
目的	<p>気候変動予測モデルを改良するために専用のコンピュータを備え、世界各国の研究者の参加をえて、地球温暖化による気候変動予測の信頼性を高める。</p> <p>当面、1992年6月、ブラジルで開催予定の「環境と開発に関する国連会議」に向け、政策決定に役立つ研究成果を取りまとめる。</p>
参加機関	<ul style="list-style-type: none"> <li>・大気研究大学連合 (アメリカ・UCAR)</li> <li>・電力研究所 (アメリカ・EPRI)</li> <li>・電力中央研究所 (日本)</li> <li>・原子力エネルギー・代替エネルギー委員会 (イタリア・ENEA)</li> <li>・フランス国営電力公社 (フランス・EdF)</li> <li>・オランダ電力研究所 (オランダ・KEMA)</li> </ul>
研究期間	1991年～1993年 (3ヶ年)
所要資金	2,120万ドル
実施方法	シミュレーション実験や分析についての提案を世界中から公募し、そのなかから、MECCAの目的に適した研究を選び、実施する。

案できる。

[地域気候変動予測手法]

地域規模の気候変動の予測手法は、大きくつぎの4つに分けられるが、現状では、それぞれに長所、短所がある。

- (a) 過去の気候や古気候のデータを用いた経験的手法  
データの解析 (トレンド解析、温暖年と寒冷年の比較など) や古気候との類推から、将来の温暖化に対する地域気候の変動を予測するもの。シミュレーションと違って比較的容易であるが、経験則やえられるデータの質により、解析の制約を受ける場合が少なくない。
- (b) 大気大循環モデル (GCM) による手法  
GCMの空間分解能を高め、将来の地域気候変動予測をシミュレーションにより直接行うもの。厳密性はあるが、計算時間が膨大になる上、高分解能化にともない、気候モデルそのものを精密に表現しなければならない。今後、コンピュータの飛躍的な性能向上が期待できることから、近い将来には試行されるかもしれない。
- (c) 大気大循環モデル (GCM) 結果と気候データによる半経験的手法

大スケールの気候変動 (大気の大循環) は、GCMにより求め、えられた大規模な気流場の変化を、現在あるいは過去の気候データの特性を利用して、対象地域の気候変動を予測する。この場合、上記(a)より取り扱いは高度になるが、一方で同様な制約も受ける。

- (d) 大気大循環モデル (GCM)/地域気候モデル (RCM) による手法  
上記(c)と同様に、大スケールの気候変動はGCMによるが、そこで模擬された大規模な気流場を境界条件として、GCMに組み込まれた地域気候モデル (RCM) により、この気流場に対応する対象地域の気候変動を模擬するもの。空間分解能は50km程度までのものが試みられており、現時点ではもっとも進んだ予測手法である。

[地域気候変動予測モデルの概要]

日本を含む東アジアの地域気候を予測する手法として、当研究所では、上記(d)の数値モデルによる方法を採用することにした。

温暖化への相対的な寄与度を図るため、CO<sub>2</sub>以外の温室効果ガスもCO<sub>2</sub>濃度に換算した等価CO<sub>2</sub>濃度について、まず、GCMを用いて、現状と同程度の濃度 (1 CO<sub>2</sub>-以下

同じ)とそれが2倍になったときの濃度(2 CO<sub>2</sub>-以下同じ)に対する地球全域規模の気候シミュレーションを行う。すなわち、これらの二つの条件に対する大スケールの気候状態(大気の大循環:大規模な気流場)が模擬される。

この結果としてえられた、1 CO<sub>2</sub>、2 CO<sub>2</sub>に対する粗いメッシュ(400~500km)上での気温や降水量などの時間変化の中から、対象地域を取り囲むメッシュの時間変化を取り出し、これらを境界条件として、それぞれ1 CO<sub>2</sub>、2 CO<sub>2</sub>に対してRCM(メッシュは40~50km)を利用し、小地域の気候状態を再現・予測する。

解析のフローは、つぎのとおりである。

1) GCMにより1 CO<sub>2</sub>時の地球規模の気候シミュレーションを行い、400~500kmのメッシュでの気温

や降水量などの気象要素の時系列値がえられる。

- 2) この結果から、対象地域を取り囲むメッシュの時系列値を取り出し、これを境界条件として、RCM(メッシュは40~50km)を用いた対象領域内部のシミュレーションを行う。
- 3) 上記2)でえられた結果を、現在の観測データと比較し、モデルの改良を行う。(モデルの検証)
- 4) GCMにより2 CO<sub>2</sub>時の地球全域規模の気候シミュレーションを行う。
- 5) 上記4)の結果を用いて、RCMを用いた対象地域内部のシミュレーションを行う。
- 6) 1 CO<sub>2</sub>、2 CO<sub>2</sub>に対するRCMの結果を比較し、対象地域の気候変動を予測する。



# 温暖化の影響予測・評価と 適応方策

## (1) わが国への温暖化の影響

将来の気候変動の予測に不確実性がある以上、科学的な知見を整え、より精度の高い信頼できる気候モデルが完成するまでは、温暖化への影響の対応を待つべきとの意見がある。

しかし、CO<sub>2</sub>など温室効果ガスの大気中濃度は年々増加しており、このままの状態では放置しておくとも将来にわたって大気の組成は変化していくと考えられる。それゆえに、大気の組成が大きく変化してしまってからでは温暖化の影響が避けられず、対策が手遅れになってしまうか、あるいは温暖化に適応するために実行不可能なほどコストが高つくことになりかねない。

したがって、科学的解明を待たずに不確実でも温暖化の予測の幅を考慮しつつ、事前にいかに効果的な対策を講ずるかが重要になる。

このため当研究所では、まず、温暖化の影響を定量的に評価するための手法の開発に取り組んでいる。

### ① 気候変動への適応—イベントツリー—

地球温暖化の進行にともなう気候変動は、自然環境、生態系、社会・経済、エネルギーの使い方などに大きな影響を与える。この影響は、時間的、空間的にさまざまなスケールをもち、直接的なものから間接的なものまで、大小さまざまな事象が複雑に関連して生じるものである。

そこで当研究所は、地球温暖化がわが国へ及ぼす影響をはじめ、わが国の電気事業への影響を検討した。

これらの検討に際しては、温暖化によって生じると予想される自然環境や生態系など各領域への影響とその経路、すなわちイベントツリーを作成し、各領域がどのような経路で影響を受けるかを調べた。

大気中の温室効果ガス濃度の増加は、地球の温暖化を加速し、自然環境（気象、陸域、海洋）⇨生態系（陸上生物、淡水生物、海生生物）⇨社会（農林・畜産業、漁業、産業、社会生活基盤）の各領域に影響を波及させていくと考えられる（図1-3-1）。

このイベントツリーの前提条件は、中緯度に位置するわが国では、地球全体を代表する気候変動のシナリオが適用できるものと考え、つぎのように設定した。

- ・大気中の温室効果ガスの濃度(CO<sub>2</sub>換算)が600ppmに上昇。
- ・地球の平均気温の上昇は3℃。
- ・平均降水量は10%増加。ただし局地的な少雨・多雨地域の出現など降水パターンが変化する。
- ・平均海面上昇は1m。
- ・平均値の変化とともに変動の幅も拡大する。

### ② 温暖化がわが国に及ぼす影響

#### 〔自然環境の変化〕

温暖化が進むと、北や南の極地方ほど気温上昇の程度が激しいため、南北の温度差が小さくなり、大気の循環経路が大きく変化する。

一方わが国は、大陸と海洋の境界にあるため双方の影響を受けた気候が形成されるが、温暖化が進めば海洋の変化が日本の気候を支配するようになる。

気温上昇によって夏の期間は長くなるのに対し、冬は短くなり、降水量の増加、集中豪雨の発生、急激な雪融けによる河川の氾濫などの危険性が増す。

また海面の上昇によって海岸線が後退し、海浜地形が変化する。たとえば海面が1m上昇すると、わが国の海拔0m地帯は現在の1200km<sup>2</sup>から、神奈川県面積に相当する2400km<sup>2</sup>に広がる。

#### 〔生態系への影響〕

大気中のCO<sub>2</sub>濃度の増加やこれにともなう気候変動は、陸上の自然生態系にも重要な影響を与える。気温や降水量からみた気候帯は、数10年間に、南北の極方向へ300～500km移動すると推定されている。

気候帯の移動により、従来と異なる気候にとり残される植物相や動物相に変化が生じ、種によっては生産力あるいは繁殖力を増大または減少させることになる。このような生物相や数の変化により、新しい生態系が形成さ



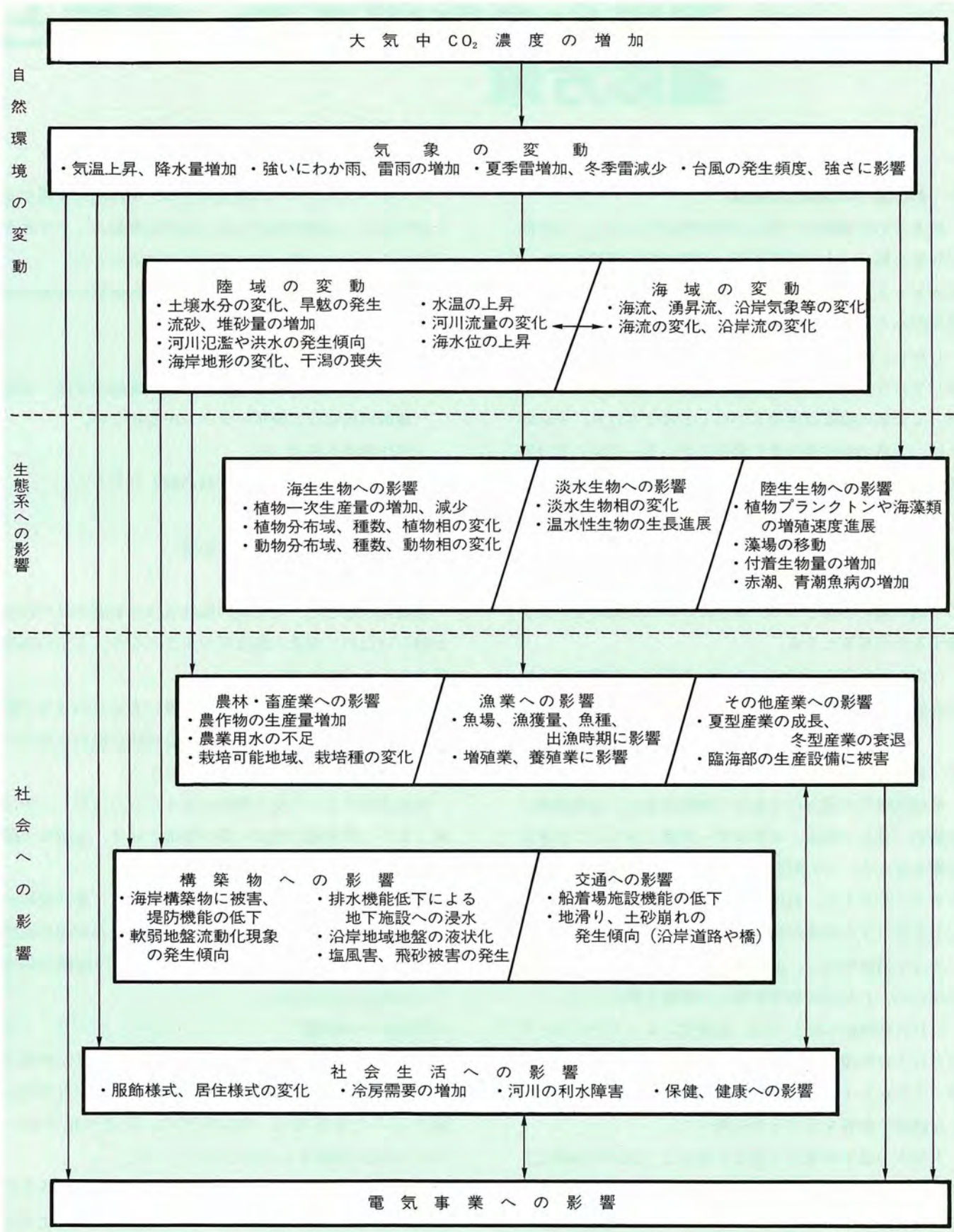


図1-3-1 地球温暖化がわが国の自然環境・生態系・社会に及ぼす主な影響



れる。

一方、海面上昇にともない沿岸の湿地帯などの海岸植生にも大きな影響が及ぶ。海域でも海流・海水温の変化や海面上昇にともなう水深の変化などにより、海生生物の分布やその生物相が変化する。

#### [人間社会への影響]

##### 1) 農林・水産業への影響

CO<sub>2</sub>濃度の増加と気温の上昇によって、植物の光合成が活発になるため、農作物の生育期間の延長と併せて生産力は増大する。また、気温上昇や降雪・積雪期間の減少にともない、東北・北海道地方で米の生産量が増える。

しかし、気候変動によって新たな病虫害などの発生が起これ、作物の品種改良や農業管理技術の改革が必要になる。さらに、世界的にみて、現在の主要な農産物の輸出地域では、早ばつや猛暑の発生が予測されるため、穀類をはじめとする農産物の輸出入や価格などに大きな影響を与える。

このほか、温暖化にともなう気候変動の速さが樹種の環境への適応よりも速いと考えられるため、森林生態系の変化が予想され、植林・造林や製材・加工など森林の利用技術に影響を及ぼす。また、熱帯林保護の動きはわが国の木材利用法に変革を与える。

一方、海表面の温度上昇による熱収支の変化や海洋循環の変化、海面上昇などによる沿岸海域の富栄養化など栄養構造の変化は、海洋の生態系に影響を与える。

たとえば、海藻類を含めて水産資源の分布に変化が生じることが予想され、魚種や漁獲高に影響が現れる。

##### 2) 産業への影響

気候変動は、食料、繊維、エネルギーなどの利用形態や価格に影響を与えるため、これらの関連産業の競争力や存続にも大きな影響を及ぼす。とくにレクリエーション産業には直接的な影響が及ぶ。

温室効果ガスの排出規制やエネルギーの利用形態の変化は、国民の省エネルギーやクリーン産業への関心を高めるため、自動車やエネルギー、重工業などの部門では新たな対応を迫られることになる。

しかし、これらは十分な準備期間があれば、温暖化に適応する行動をとることができよう。

##### 3) 社会生活への影響

生活レベルの向上とあわせ気温の上昇は、エネルギ

ー供給構造を変化させる。

降雪の量・期間・地域の縮小はスキーなどに影響を与える。また、夏の期間の増加や海岸地形の変化は海水浴などに影響を与えるため、四季をつうじてのレクリエーションのあり方を変える。

また、わが国の場合、人口の大部分は河川流域の平野部に集中しているにもかかわらず、地形的にみて貯水能力が限られているため、渇水期の延長や集中豪雨は水資源の管理に大きな影響を与える。

さらに、地球温暖化や成層圏オゾン層の破壊は、大都会の大気汚染を悪化させ、昆虫媒介性の病気、寄生虫やウイルス性の病気を増加させる。

##### 4) 生活基盤の構築物への影響

海面上昇は地下水位の上昇や塩分濃度の増加に加え、地盤の流動化や液状化をもたらす。これにより沿岸の構築物は冠水、転倒、破壊、塩害などの危険にさらされる。

##### 5) 交通への影響

温室効果ガスの排出量削減のために、自動車の個人利用の制約、公共交通機関の充実、燃料と排ガスの規制が進むだろう。

また冬期は、凍結の恐れが少なくなることから、北海道などの北国で産業が発展し、港湾部門が海上交通に重要な役割を果たすことも考えられる。

#### [電気事業への影響]

このように、わが国の自然環境から社会生活にいたるまでさまざまな形で現れる温暖化の影響は、電気事業には一体どのように波及するだろうか(図1-3-2)。

##### 1) 電力需要の変化

温暖化により、発電の最大設備容量(kW)と最大電力量(kWh)の両面で、夏季需要、とくにピーク需要が極端に増加するのに対し、冬季需要が減少する。

このため、気候変動の影響による季節型産業や地域加工業の盛衰により、地域ごとの電力需要に影響を及ぼす。

##### 2) 水力発電の運用への影響

降水パターンが変化するため、地域ごとに水力資源の変動が大きくなる。

たとえば、降水量が増大すると発電量の増加が見込まれるのに対し、早期の融雪や出水などにより発電量は減少する。また異常出水、集中豪雨があれば、流砂・

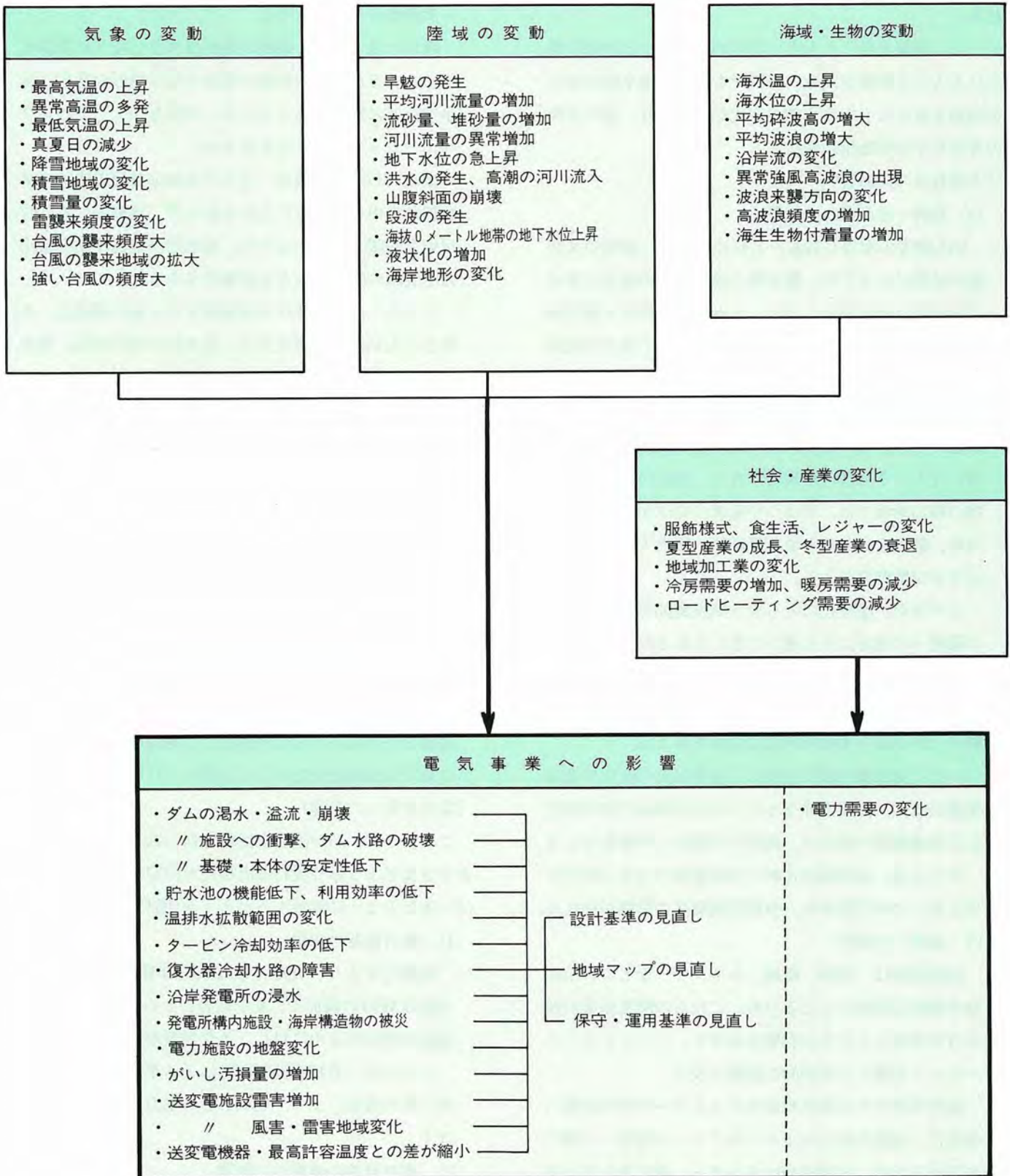


図1-3-2 地球温暖化がわが国の電気事業に及ぼす主な影響

この図は、図1-3-1に示した項目（本来は150項目）の中から、とくに電気事業に係わりが深いものを取り出したもので、温暖化によって気象・陸域・海域などが変動したとき、それらが相互に関連しながら電力設備の運転・保守・運用などに影響が現れる。たとえば、最高気温の上昇、異常高温の多発、最低気温の上昇が起こると、送変電機器の最高許容温度（設計値）との差が縮小するため、電力設備の保守・運用基準の見直しが迫られると考えられる。



堆砂量が増大し、ダムの排砂技術の確立が必要となる。

さらに、設計降水量が増大し、貯水池使用容量が制限を受ける。とくに河川では、異常出水による安全対策が必要となる。

### 3) 火力・原子力発電設備などへの影響

気温上昇によって、発電所の冷却水として用いる海水などの水温が上昇し、発電効率が低下する。また、復水器の冷却水系に付着する生物量が増加して復水効率の低下を招く。さらに沿岸流に変化が生じ、温排水の拡散範囲が変化する。

海面の上昇は、既設発電所の冷却水系の配管を加圧するほか、防波堤のかさ上げなどの改修を必要とする。

### 4) 送配電施設への影響

気温の上昇によって、積乱雲などの雲が形成されやすくなるため、雷の発生頻度が増え、雷害が増加する。

一方、降雪や積雪地帯の変化にともない、雪害の発生地域やその範囲が変化する。さらに台風の発生頻度やその大きさの変化は不明であるが、風害や塩害が増加する。このほか、異常高温の出現にともない、送配電設備・機器の最高許容温度幅が縮小する。

ここに紹介した影響の経路と形態は、現在もしばしば生じているものである。問題はこれらの発生頻度や大きさであり、気候変動や海面上昇の程度と速度に、現在の生態系をはじめ、社会・経済のシステムが適応できるか否かである。今後、当研究所では、CO<sub>2</sub>排出規制が社会経済に与える影響も含め、温暖化の潜在的影響の予測評価を行い、適応対策あるいは軽減対策のコスト評価を進める予定である。

## (2) 電気事業経営への影響評価と適応方策

地球温暖化にともなう気候変動は、前項で述べたように、自然界、人間社会に多大な影響を与えるばかりでなく、電気事業にも大きな影響を及ぼす。

とくに気温の上昇・降水量の変化・海面の上昇などによる需給両面への影響が、電気事業の経営にとってもっとも重大なものになると考えられる。これに加えて、温暖化防止対策からの影響として、火力発電の運用制限、燃料費の変動などが及ぼす供給への影響、そして省エネルギー対策などによる需要構造の変化などがある。

このため経営上のリスクを予め的確に予測・評価し、

事前に対応策を検討しておくことは、温暖化影響のリスクが大きいと考えられるだけに重要となってくる。

そこで当研究所は、1990年から4ヶ年計画で、アメリカの電力研究所(EPRI)と共同して、温暖化が電気事業の経営に与える影響を定量的に評価する手法の開発を進めてきた。現在は、引きつづき電気事業への温暖化影響を緩和するための戦略、すなわち適応方策を決定するための手法の開発に着手している。

### 〔影響評価モデル〕

電気事業経営の基本は、需要を的確に予測し、電源のベストミックスを図りながら、もっとも効率的に必要な電力の供給を確保することである。

このため電気事業では、常に10年以上先までを想定した長期的な電力需給計画を策定しているが、温暖化の影響を調べるには、50～60年先を見通す必要がある。そこで当研究所では、超長期の電気事業の経営のリスクを予測・評価するモデルを構築した(図1-3-3)。

このモデルでは、まず保有する供給力と運用条件、将来可能となる供給技術、燃料価格の変化をはじめ、気温や降水量などの気候変動やCO<sub>2</sub>規制などを想定して、複数のシナリオを作成する。

つぎにシナリオに沿って、電力需要を予測する。そして、これらのデータをもとに、電気事業の総合計画モデル(IPM)で最適な電源構成などを求める。

### 〔試算結果〕

温暖化による気候変動が電気事業の経営に及ぼす影響を把握するため、複数の基本シナリオをもとに、北陸電力の協力をえて解析した(表1-3-1)。

#### ① 基本シナリオの電源構成

基本シナリオにおける新設電源は、いずれのケースも、もっとも低コストになる石炭火力が全面的に選択される。

しかし、石炭と原子力あるいは天然ガス(LNG)の発電コストの差は小さく、これらの電源を組み合わせたとしても発電コストは大きく変わらない。なお想定した条件のもとでは、革新的な発電技術は2050年まで導入されないものとしている。

#### ② 気温上昇の影響

夏季の需要が増加するのに対し、冬季は減少する。このため、総需要量(kWh)は大きく変化せず、基本的な電源構成は基本シナリオと変わらないが、ピーク需要が増加し、その分負荷率は低下する。

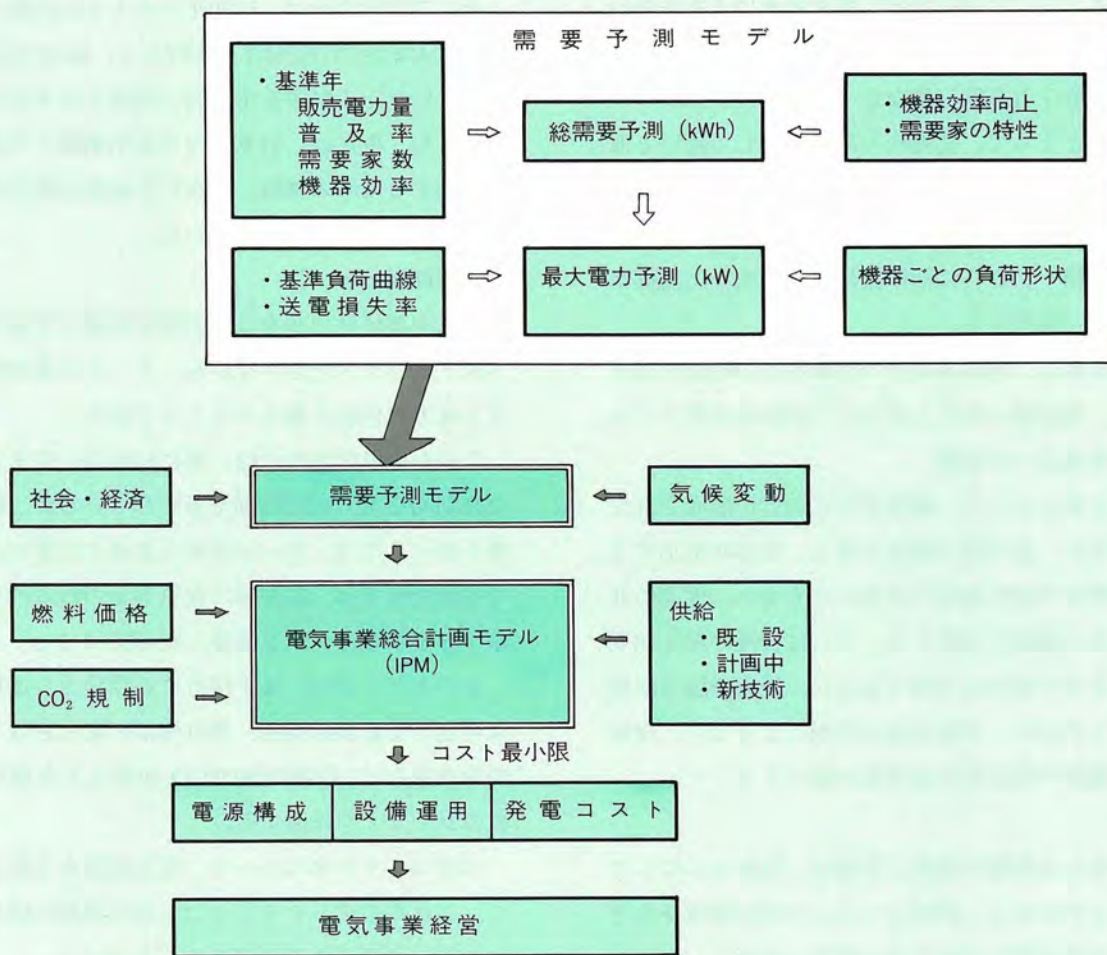


図1-3-3 気候影響評価モデルの構成

このモデルは、アメリカで用いられている電気事業総合計画モデル (IPM) をもとに、超長期の需要予測と気候変動予測を組み合わせ、2050年にいたるわが国の電気事業経営を予測評価するものである。

需要予測モデルにおける総需要 (kWh) は、気温の影響を考慮し用途別に分け予測する。家庭用は主要な電気機器ごとの普及予測と機器の効率変化予測を組み合わせ予測し、業務用を含む産業用は、当研究所の地域経済モデルを活用し、経済動向・人口・エネルギー価格などから予測する。

最大電力 (kW) は、総需要を季節別、用途別に分け、さらに機器ごとの使用パターンと効率変化予測を組み合わせるなどして想定する。

ピーク需要の増加に対応するため、タービン発電所はかなりの容量で建設される。この発電所の利用率は低いですが、建設期間が短く燃料費も安いので、コストは1%程度の上昇ですみ、それほど大きくならない。

### ③ 降雨量変動の影響

降雨量の変動は水力発電の可能性に影響する。とくにピーク需要時期における降水量の多寡が問題となる。

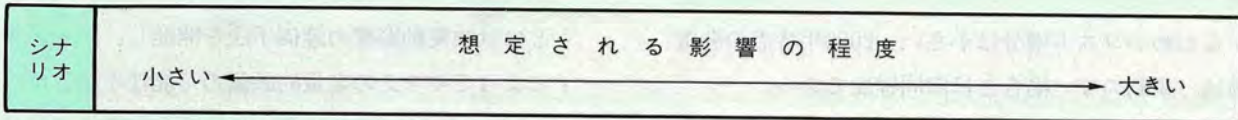
降水量が平年より20%増加(減少)すると、2025年時点で平均の発電コストは約2%低下(3%上昇)する。このように発電コストに及ぼす影響が比較的小さいのは、わが国の場合、今後とも水力発電の開発に多くを望めないためである。

### ④ CO<sub>2</sub>排出規制

気候変動はかなり先に影響が現れるのに対し、CO<sub>2</sub>排



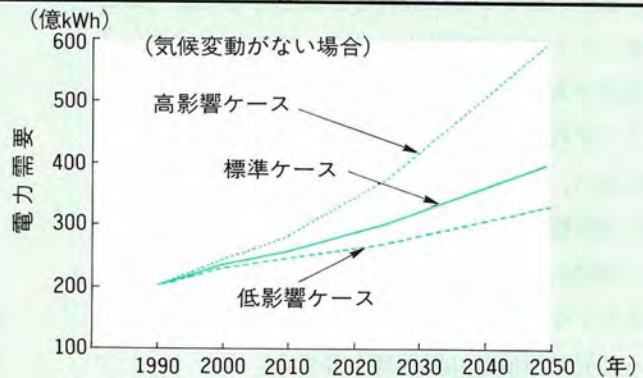
表1-3-1 電気事業影響評価シナリオ



このシナリオは、気候変動の電気事業への影響を評価するため、北陸電力の協力をえて想定したもので、基本シナリオの3つのケースをもとに、気候変動シナリオ、CO<sub>2</sub>規制シナリオを組み合わせる一つのシナリオとしている。

基本シナリオ	低影響ケース ・低い電力需要の伸び ・安い燃料コスト ・新発電技術の早期実用化	標準ケース ・低影響、高影響 ケースの中間	高影響ケース ・高い電力需要の伸び ・高い燃料コスト ・原子力不使用
--------	--	-----------------------------	---

電力需要は過去の伸びより低く想定しているが、右図に示すように、それでも2050年には現在と比べると、低影響ケースで1.5倍、標準ケースで2倍、高影響ケースでは3倍となる。このように気候変動がない場合でも、想定する条件によって需要は大きく変化する。



気候変動	変化なし	・平均気温 2.4℃上昇 (夏季は5.4℃上昇)	・平均気温 2.4℃上昇 (夏季は5.4℃上昇) ・降水量変化 (平年の±20%)
------	------	-----------------------------	--

電力の需給に影響を与える要因はさまざまであるが、影響が定量的に把握できる気温上昇と降水量のみを対象としている。信頼できる気候変動のシナリオが描けるのは、数十年先と考えられるため、気温変化はIPCCの予測値から、降水量変化はモデル電力地域の過去の気候特性を加味する方法を採っている。

CO <sub>2</sub> 規制シナリオ	規制なしケース	安定化ケース (2000年以降 1990年レベル)	20%削減ケース ・2000年以降1990年 レベル ・2025年以降20%削減	20%・50%削減ケース ・2000年以降1990年 レベルの20%削減 ・2025年以降50%削減
------------------------	---------	---------------------------------	---	---

わが国が策定した「地球温暖化防止行動計画」では、一人あたりのCO<sub>2</sub>排出量を、2000年以降1990年レベルで安定化させるものとなっている。これは、一見、「安定化ケース」より緩やかな規制に見えるが、今後、わが国の人口は、2000年以降、あまり増加が見込まれないので、実質的には「安定化ケース」とほぼ同じと考えてよい。なおCO<sub>2</sub>税や課徴金は考慮していない。

出規制は短期のうちに課せられる可能性がある。このため、2000年以降のCO<sub>2</sub>排出の安定化のための規制に対応するには、現在から電源の構成やその運用を検討しておく必要がある。

1) 安定化ケースが適用された場合

2000年までに、現在新設中の原子力発電所を運用すれば、石炭火力の運転を現状維持のままで1990年レベルをクリアできる。また2010年以降も、原子力発電所

の追加で適合できる。

原子力と石炭のコストの差が小さいため、規制に適合するためのコスト増分は小さい。2025年時点の発電単価は、規制のない場合とほぼ同程度である。

### 2) 20%あるいは50%規制の場合

前記と同様に、原子力を導入すれば適合できる。ただし、規制時期に合わせて、既設火力(石油)を停止し、原子力の新設を繰上げる必要がある。石炭価格は規制のためにむしろ下落すると予想され、CO<sub>2</sub>規制の範囲内で石炭火力も利用の方が有利である。

### 3) 原子力が利用できない場合

CO<sub>2</sub>規制があっても石炭火力を原子力で代替することで低コストで適合可能となるが、原子力の利用にも不確実性がある。CO<sub>2</sub>規制に加えて原子力も利用しないシナリオの場合では、発電コストの大幅な上昇は避けられない。

また高影響ケースでは、2050年以降はCO<sub>2</sub>排出の全くない仮想的な発電技術に期待しなければ、規制に適合できなくなる。このコストを原子力の2倍程度と仮定すると発電原価は30%程度上昇する。

### 〔適応方策〕

これまでの研究では、アメリカの経営計画モデルをもとに気候変動影響の評価手法を開発し、ケーススタディによってリスクの定量的評価の可能性を示した。

これにつづく、電気事業への温暖化影響を緩和するための戦略、すなわち適応方策の研究は、以下の手順で進めることにしている。

まず、先の電気事業経営への影響評価にもとづき、適応方策の対象となる影響項目を選定し、これに対応策のオプションを定める。

つぎに、対象電力会社に関する必要な関連データを収集・整理・分析する。たとえば、電力需要の増加に対するケースでは、発電システム、燃料価格、資金計画、需要などのデータが必要となる。

そして、基準となるケースの分析を行い、これにもとづき、現状分析と可能な対応策を実施した場合の分析・評価を行い、採るべき適応方策を決定する。

このようなケーススタディを実施するにあたっては、温暖化の影響をはじめ、多くの不確実性が介在するため、起こりうる可能性のあるケースを幅広く取り上げて進めていくことにしている。



# 第 2 部

## 温暖化の抑制対策 — CO<sub>2</sub>抑制対策を中心に —





## 第2部 温暖化の抑制対策 — CO<sub>2</sub>抑制対策を中心に — ● 目 次

	環境総合推進室 次長	瀬間 徹
狛江研究所 発電プラント部	広域環境研究室 主査研究員	横山 隆寿
我孫子研究所 水理部	環境水理研究室 主任研究員	大隅多加志
	生物部 水産技術研究室長	清野 通康
	生物部 バイオ技術研究室長	斉木 博
横須賀研究所 エネルギー部	複合発電研究室 主査研究員	森塚 秀人
	エネルギー部 石炭技術研究室 主任研究員	福澤 久
経済研究所 経済部	エネルギー研究室 専門役	山地 憲治
	経済部 エネルギー研究室 専門役	内山 洋司

2-1	政策・制度的方策	52
2-2	CO <sub>2</sub> 抑制対策技術	60
2-3	CO <sub>2</sub> 有効利用技術	71



**瀬間 徹** (1965年入所)  
 発電用燃料の燃焼技術や同技術による公害低減化技術、及び石炭ガス化複合発電関連の研究開発に従事。'89年より環境総合推進室にて地球温暖化問題の総括の任にあっている。



**斉木 博** (1982年入所)  
 生物分野におけるエネルギー変換を工学的に応用するため、人工光合成、生態模倣電池などの研究を進めてきた。現在はバイオテクノロジーをエネルギーや環境分野へ応用し、電気事業への適用を開拓している。



**横山 隆寿** (1975年入所)  
 排水や排ガスなど発電所に係わる環境問題とその対策、石炭・石炭灰の分析と規格化を進めてきた。現在は、地球温暖化対策、特にCO<sub>2</sub>回収技術の研究に意欲を燃やす。



**森塚 秀人** (1981年入所)  
 入所以来、石炭ガス化複合発電システムの解析・制御、また同PP計画の立案・設計に従事。現在は、燃料改質によるCO<sub>2</sub>回収型火力発電システムや溶融炭酸塩型燃料電池複合発電システムの検討に取り組む。



**大隅多加志** (1987年入所)  
 学生時代に海洋化学を専攻し、研究調査航海に合計200日参加。CO<sub>2</sub>との出会いは、'86年にアフリカのニオス湖でのCO<sub>2</sub>ガス突出災害調査に携わったこと。入所以来、高レベル放射性廃棄物地層処分、地熱、圧縮空気貯蔵などの分野で地球化学的研究に従事。



**福澤 久** (1965年入所)  
 入所以来、排煙脱流・脱硝、触媒燃焼など大気汚染防止関連研究に従事。現在は排煙処理技術、CO<sub>2</sub>の化学的資源化技術、新種燃料製造・利用技術の研究に取り組んでいる。



**清野 通康** (1975年入所)  
 入所以来、温排水や貯水池の富栄養化などの生物影響予測評価に関する研究に従事。'86年よりヒラメなど海産魚の効率的養殖システムの開発を進める一方、'90年より並行して生物によるCO<sub>2</sub>固定の研究に携わる。



**山地 憲治** (1977年入所)  
 原子力開発戦略、ロードマネジメントなどを対象に工学と経済学との境界領域で技術評価研究を進めてきた。'91年4月からは東京大学に開設された寄付講座に派遣され、地球温暖化に取り組んでいる。



**内山 洋司** (1981年入所)  
 専門はエネルギー技術評価とシステム分析。原子力や火力、自然エネルギーなどの技術について、技術経済分析、エネルギー収支、CO<sub>2</sub>分析、多目的意思決定法、電源構成モデルといった各手法の開発と評価に取り組んでいる。



# 研究課題の概要

## (政策・制度的方策)

### —エネルギー戦略—

地球全体として、公平で効率的なCO<sub>2</sub>削減を追求するには、国あるいは地域ごとの事情を考慮したきめ細かな対策が必要であり、技術移転などの国際連携を活性化させる仕組みを工夫すれば、地球全体としてのCO<sub>2</sub>排出抑制は実現できる可能性がある。このような観点から当研究所では、オーストリアの国際応用システム解析研究所（IIASA、在 オーストリア）およびアメリカのスタンフォード大学との共同研究などをつうじて、世界規模のエネルギー戦略によるCO<sub>2</sub>排出抑制方策の研究を実施している。

### —発電方式の相違による温暖化影響の総合評価—

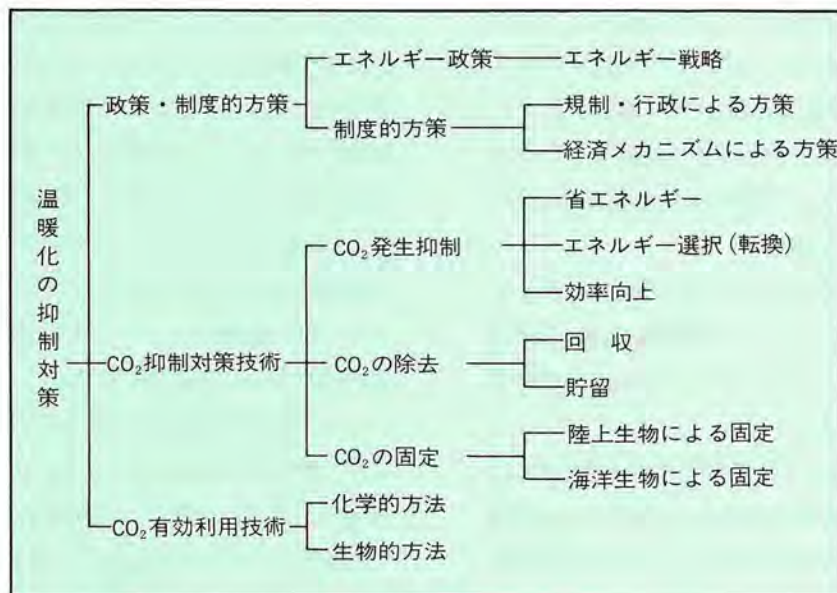
電気事業ではこれまで、電力を安定的に供給するために、セキュリティ、コスト、電源の運転特性・環境特性などに配慮して、各発電方式をバランスよく組み合わせ

ながら電源の開発を進めてきた。しかし、これからは、CO<sub>2</sub>の排出抑制という新たな視点を加えて電源のベストミックスを考える必要がある。

このため当研究所では、火力・原子力・自然エネルギーの各発電方式について、装置の建設・運転・保守の過程から、燃料を採掘・精製して発電所に運び入れるまでの過程で必要なエネルギーから生じる温室効果ガス（CO<sub>2</sub>とメタン）を調査し、各発電方式の温暖化への寄与を総合的に明らかにした。

### —制度的方策の効果—

CO<sub>2</sub>の排出抑制のための制度的方策には、CO<sub>2</sub>排出規制などの直接規制と、税・課徴金制度、排出権市場、補助・助成制度などの間接規制がある。当研究所では、世界全体でCO<sub>2</sub>排出抑制を公平かつ効率的に追求できる制度として、排出権市場を課徴金と組み合わせた抑制システムを考え、世界のCO<sub>2</sub>総排出量を50億トン（炭素換算）と仮定した場合のケーススタディを実施した。このケースでは、東南アジア地域が総供給量の80%近くの排出権



を市場に放出し、総輸入量の40%以上をアメリカが購入することになる。

## (CO<sub>2</sub>抑制対策技術)

### －CO<sub>2</sub>の除去－

電気事業の将来のCO<sub>2</sub>排出量を予測すると、2000～2010年で過渡的にピークを迎え、それ以後は、新技術などの導入により減少すると予想される。そこで、わが国の「地球温暖化防止行動計画」の目標を達成するためには、21世紀初頭を目標に、CO<sub>2</sub>排出量を現在と同程度に抑えることが緊急の課題として重要となる。

当研究所では、これを踏まえ、時間的な制約の中でCO<sub>2</sub>の排出を量的に抑制する方法として、火力発電所の排ガスからCO<sub>2</sub>を低エネルギーかつ低コストで回収し、これを深海底に貯留する技術を選定し、その研究開発を最優先で実施している。

CO<sub>2</sub>を回収する技術は、すでに化学プラントなどで小規模のものが実用化されており、これらの技術を大容量の火力発電所の排ガスに適用するという視点で評価したところ、化学吸収式が早期の実用化の可能性があると予想された。

しかし、この方法でさえも、適用しやすいと考えられるクリーンなLNG火力発電所に設置した場合の所要エネルギーとコストを試算したところ、いずれも大幅に増加することがわかり、現状技術をそのまま適用した実用化は困難であると考えられた。このため当研究所では、化学吸収法をLNG火力発電所の排ガスに適用するとして、所要エネルギーやコストをどこまで低減できるかを見極めるため、一時間あたりの排ガス処理量880Nm<sup>3</sup>の実験装置を設置して研究を進めている。

また当研究所では、将来に向けたCO<sub>2</sub>の回収技術として、発電効率を低下させることなく、高濃度でCO<sub>2</sub>を回収できる新しい火力発電システムとして、「CO<sub>2</sub>回収型火力発電システム」に取り組んでいる。

このシステムは、LNGなどの燃料を水素とCOガスに改質し、水素分離膜で両者を分けた後、COガスのみを酸素燃焼して高濃度のCO<sub>2</sub>を直接生成する一方で複合発電を行うものである。まだ多くの技術課題が残されているものの、LNGを燃料とした場合には、現状のLNG複合発電なみの高効率で、CO<sub>2</sub>の80%以上を回収でき、既存の

LNG火力発電所からCO<sub>2</sub>を回収する場合と比べると、著しく高い発電効率が達成できると推定された。

火力発電所の排ガスから回収した大量のCO<sub>2</sub>処理方法としては、大規模な火力発電所が臨海に立地している点を考慮すると、深海底への貯留は有望な技術の一つと考えられるため、この成立性評価の研究に取り組んでいる。

海洋の利用と開発は、国際的な合意のもとに進められるべきであり、当研究所もその思想にもとずき、第一段階では、CO<sub>2</sub>の深海底貯留技術の環境適合性を判断するための手法を開発することに主眼を置いている。すでに、深海におけるCO<sub>2</sub>の物性などを解明する基礎実験を行っており、今後、実海域におけるCO<sub>2</sub>の挙動データをもとに、深海に貯留したCO<sub>2</sub>挙動のモデル化を図り、環境への影響を評価してCO<sub>2</sub>の深海底貯留技術の成立性を確認する予定である。

### －CO<sub>2</sub>の固定－

大気中に放出されたCO<sub>2</sub>の一部は、植物や微生物などにより有機物や炭酸カルシウム(CaCO<sub>3</sub>)に変わり固定される。生物を利用したCO<sub>2</sub>の固定技術には、陸上と海洋を利用する方法とがある。前者は樹木や緑藻類などの微生物を利用するもので、後者は海洋性植物プランクトン、貝類、サンゴ類、大型海藻類などを利用するものである。これらについて、適用可能域、CO<sub>2</sub>固定量、コストなどについて評価した結果、海洋性植物プランクトンと樹木によるCO<sub>2</sub>固定が有望と判断された。

海洋性植物プランクトンによるCO<sub>2</sub>の固定は、南極海などのように、不足している鉄など微量栄養塩を補って植物プランクトンを増殖させ、光合成によって海水中のCO<sub>2</sub>を固定するものである。植物プランクトンが増殖すると、表層の海域ではCO<sub>2</sub>の濃度が低くなるため、大気から海洋へとCO<sub>2</sub>が溶け込むことになる。また植物プランクトンは、動物プランクトンに捕食されるなど、食物連鎖の流れの中に組み込まれるが、この一部は植物プランクトンの死骸の凝集物や動物プランクトンの糞粒などになり、光合成で固定されたCO<sub>2</sub>の少なくとも5%程度は表層から深層に沈降し、長期間固定されると考えられる。

樹木によるCO<sub>2</sub>の固定法は、森林が毎年どのくらいのCO<sub>2</sub>量を貯蔵しつつある(純一次生産力)のか、また、CO<sub>2</sub>の現在の貯蔵総量はどのくらいかを文献により調査した。この結果、世界の森林総面積は約35億haで、現存量は約



5,000億トン(炭素換算)、年間の純一次生産力は概ね250～350億トンと推定された。

### (CO<sub>2</sub>有効利用技術)

CO<sub>2</sub>は、医薬品や基礎化学原料、尿素肥料、合成樹脂などの原料や、石油の2次・3回収の圧入剤、飲料原料などに利用されているが、その利用量はごくわずかであ

る。もちろん、有効利用だけで、CO<sub>2</sub>の抑制が可能とは考えられないが、今後は実施できる対策を積み重ねてゆくことも重要と考えられる。

当研究所では、CO<sub>2</sub>を化学的に燃料資源や化学原料に転換する技術と、CO<sub>2</sub>を微細藻類を利用して付加価値の高い有用物質(飼料生産)に転換する技術について調査・検討を進めている。

## 2-1 政策・制度的方策

地球温暖化など地球規模の環境問題の深刻化とその広がりを契機として、「持続可能な開発」、「先進国と途上国の協調と適切な役割分担」の実現が強く求められている。

これに対して、世界のCO<sub>2</sub>排出量は、社会・経済活動の活発化や人口増加などによりエネルギーの使用量が増大し、特別な対策が施されなければ今後とも急増しつづけ、この結果、温暖化に拍車をかけることが懸念されている。すなわち、先進国ではサービス化など産業構造変化の進展により、CO<sub>2</sub>排出量はさほど大きな増加を生じさせないとしても、途上国の発展のためには、製造業をはじめとする産業の振興が不可欠であり、しかも人口増加が相俟って先進国を大きく上回るCO<sub>2</sub>排出量の増大が不可避であると予想されている。

このような状況のもとで、どのように世界全体や各地域・各国の発展を考え、それに、いかに貢献していくか、といった地球的視点からのエネルギー政策が、より重要となってきている。

この意味で、エネルギー産業の一員である電気事業としても、定量的な検討をもとに、エネルギー政策をつうじて、今後の世界の協調・発展のあり方の議論を深め、それを具体化することが求められている。

### (1) エネルギー戦略

地球全体として、公平で効率的なCO<sub>2</sub>の排出削減を追求するためには、国あるいは地域ごとの事情を考慮したきめ細かな対策が必要である。

たとえば、旧ソ連・東欧諸国などエネルギー効率の改善余地が明らかに大きな国もあるが、一方では、今後、工業化を進めていくと予想される途上国では、エネルギー消費の急増は避けられず、とくに中国のような石炭資源国でのCO<sub>2</sub>の排出抑制は、極めて難しいと考えられる。

ところで、各国のエネルギー部門からのCO<sub>2</sub>排出量は、

- エネルギーの炭素依存度、すなわちエネルギーあたりのCO<sub>2</sub>排出量 [CO<sub>2</sub>/エネルギー]、
- 省エネルギーのもっともマクロな指標、すなわち国内総生産(GDP)あたりのエネルギー原単位 [エネルギー/GDP]、

c) 経済活動の水準を示す国内総生産 [GDP]、の3つの指標の掛け算で表すことができる。

したがって、a)とb)の指標を、より小さくすることができれば、c)の経済活動の水準を下げることなく、CO<sub>2</sub>の抑制ができることになる。

これまでの実績をみると、各国のa)とb)の指標は大きなバラツキがあり、先進国では、オイルショック以降のエネルギー価格の高かった時代(1973年~1986年)に、この両方の指標を減少させることができたが、途上国では逆に増大している(図2-1-1)。

[エネルギー/GDP(石油換算トン/ドル)]

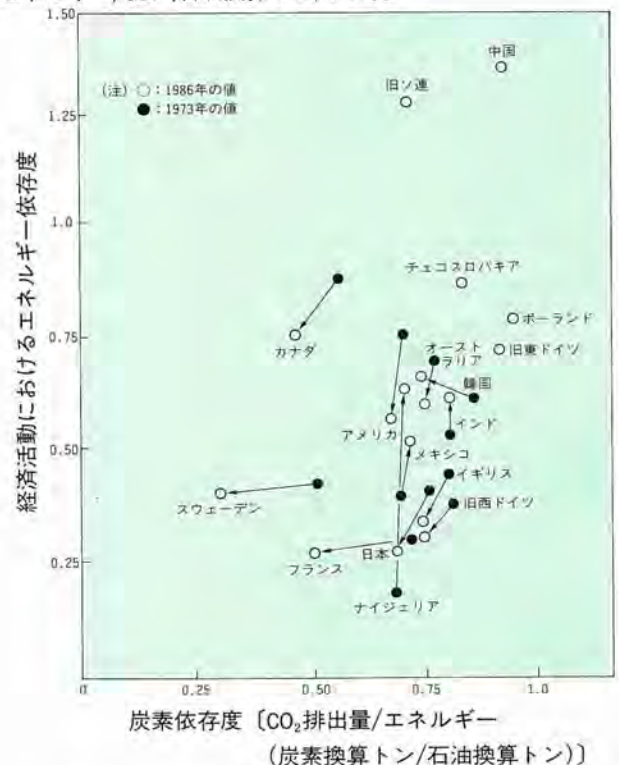


図2-1-1 活動におけるエネルギー依存度と炭素依存度との関係

オイルショックによる変化を見るため、1973年の値(●印)から1986年の値(○印)への変化を示した。先進国の中では、日本、カナダ、旧西ドイツ、イギリスのように両方の指標をともに減少させたところが標準的であるが、フランスやスウェーデンのように炭素依存度を大幅に減少させた国もあれば、ナイジェリアやメキシコのように経済活動におけるエネルギー依存度を大幅に悪化した国もある。



〔エネルギー/GDP(石油換算トン/ドル)〕

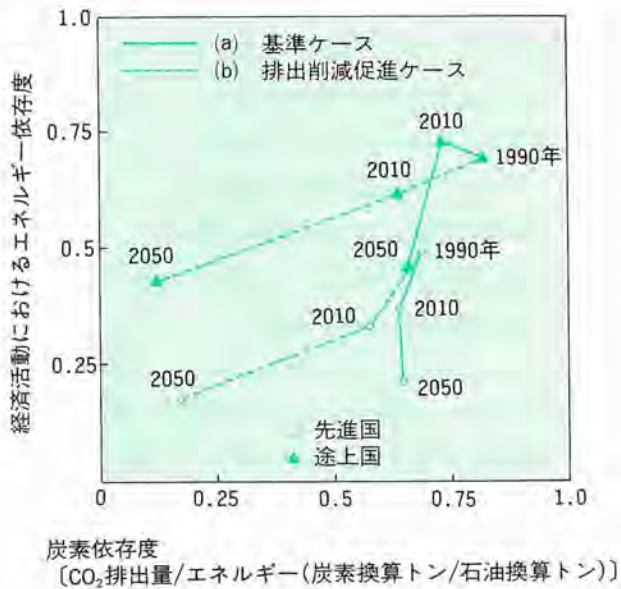


図2-1-2 世界のCO<sub>2</sub>排出削減過程の要因分析

IAASAとの共同研究における基準ケースおよび排出削減促進ケースについて、現在から2050年にいたるCO<sub>2</sub>排出削減努力について分析した。この結果、基準ケースでは、先進国、途上国ともに、主として経済活動におけるエネルギー依存度、すなわち省エネルギーがCO<sub>2</sub>排出抑制に寄与している。大幅な排出抑制を実現するためには、省エネルギーとともにエネルギーの炭素依存度の両指標ともに改善を進め、図の左下の方に向かう必要がある。

このように各地域・各国間でエネルギー消費とCO<sub>2</sub>排出特性とに大きな格差が存在するということは、技術移転などの国際連携を活性化させることにより、地球全体のエネルギー需給の調整をつうじて、より効率的にCO<sub>2</sub>の排出抑制を実現できる可能性があることを示している。

CO<sub>2</sub>の排出抑制のためのエネルギー戦略研究では、さまざまな省エネルギー技術や非化石エネルギー技術などの技術開発戦略の検討とともに、前述のようなグローバルな視点からの政策的な研究が重要となる。

このような問題意識で、当研究所ではCO<sub>2</sub>の排出量抑制の国民経済的なコスト評価を進めているが、その第一歩として、国際応用システム解析研究所(IIASA、在オーストリア)およびアメリカのスタンフォード大学との共同研究などをつうじ、世界規模のエネルギー戦略とCO<sub>2</sub>の排出抑制方策の研究に着手している。

第1部でも紹介したように、IIASAとの共同研究では、21世紀半ばにいたる世界のエネルギー需給およびCO<sub>2</sub>排出の量的・質的な変化を、つぎの4つのシナリオに

もとづき分析した。

- a) 特段の制度的、技術的対策が実施されない場合  
(基準ケース)
- b) 原子力や新エネルギーの導入など、供給側で最大限の排出抑制対策を実施する場合  
(供給側対策ケース)
- c) 経済活動におけるエネルギー依存度の改善など、需要側で最大限の排出抑制対策を実施する場合  
(需要側対策ケース)
- d) 需要および供給の両面で、実施可能な対策をすべて講じた場合  
(排出削減促進ケース)

この結果、世界全体でのエネルギー部門からのCO<sub>2</sub>排出量は、基準ケースa)でみると、2000年で炭素換算73億トン、2030年で107億トン、そして2050年時点では約130億トンに達する。現在、世界のCO<sub>2</sub>排出量に占める先進国のシェアは約三分の二であるが、2010年には56%、2050年には39%に減少し、一次エネルギー消費量と同様にCO<sub>2</sub>排出量においても、その主役の座は21世紀前半に先進国から途上国に移る(第1部図1-1-4参照)。

現在、温暖化の防止に向けて、各地域・各国で具体的なCO<sub>2</sub>の削減目標が検討され、発表されつつある。これら個別の努力の積み重ねの結果として、世界全体でのCO<sub>2</sub>排出量が、a)の基準ケースからd)の排出削減促進ケースのそれに向かって押し下げられることになる。

そこで、エネルギーの炭素依存度および経済活動におけるエネルギー依存度の分析によって、a)とd)の両ケースでのCO<sub>2</sub>排出削減過程を調べた(図2-1-2)。

基準ケースa)では、世界全体の平均のエネルギー原単位の改善、すなわち省エネルギーの進展は、2050年まで年率1%となっている。一方、エネルギー選択(転換)の変化の結果としての炭素依存度の改善、すなわちエネルギー部門の脱炭素化は、同じく2050年まで年率0.2%に止まっている。当面のCO<sub>2</sub>排出削減努力としては、第一に、省エネルギーが現実的かつ重要であることを示している。

排出抑制を極限まで押し進めるには、この両指標ともに改善率をさらに押し上げる必要がある。

とくに大気中のCO<sub>2</sub>濃度安定化のために、2050年時点でCO<sub>2</sub>排出量を25億トン(炭素換算)とした排出削減促進ケースd)では、省エネルギーの加速とともに、世界全体での脱炭素化が年率3%と、抜本的なエネルギー供給構造の変革が求められることになる。

特筆すべきことは、途上国地域においても、21世紀には先進国を上回る脱炭素化の加速が要求されることである。オイルショック以降に、年率3%程度に上る脱炭素化を実現した国は、原子力開発を主とする先進的なエネルギーシステムの構築を実現したフランス、スウェーデンの2国のみであった。これは、今後の途上国地域において、予想される人口の増加、経済成長とエネルギー消費の高い伸びを支えながら、なおかつ優れて革新的なエネルギーシステムの構築が求められていることであり、途上国の自助努力のみでは実現不可能なことは明らかである。

これからのCO<sub>2</sub>排出抑制戦略において、21世紀前半に排出量で主役となる途上国地域の重要性は、今後、ますます高まる。しかし、途上国地域での排出抑制を実現するためには、先進国の主体的な取り組みが不可欠であることを認識する必要がある。また、その際、国際的な合意へ向けて途上国の積極的かつ広範な参加を促すとともに、先進国から途上国への技術および資金の移転を円滑にする枠組みの構築が、とくに重要になろう。

## (2) 発電方式の相違による温暖化影響の総合評価

電気事業ではこれまで、安定的な電力供給のため、セキュリティ、コスト、電源の運転特性・環境特性などを配慮し、原子力発電を積極的に導入するなどエネルギー源をバランスよく組み合わせるベストミックスの観点から、電源の開発を進めてきた。しかし、これからは、CO<sub>2</sub>の排出抑制という新たな視点を加え、ベストミックスのあり方を考える必要がある。

現在、電気事業が進めるCO<sub>2</sub>排出抑制策の一つに、CO<sub>2</sub>排出量の少ない液化天然ガス(LNG)への燃料転換やCO<sub>2</sub>を排出しない原子力発電や自然エネルギーの導入がある。

しかし、LNGの場合、発電時の単位あたりのCO<sub>2</sub>量は、確かに石炭の約半分と小さいが、一方では、天然ガスを液化し、日本に運ぶまでに消費する多量のエネルギーや、天然ガスを採掘するときのメタン(CH<sub>4</sub>)洩れを考慮すると、CO<sub>2</sub>のみの排出抑制ではなく、温室効果ガス全体の抑制という観点から、LNGへの燃料転換は必ずしも優れたものではない、という指摘がある。

また原子力や自然エネルギーの利用についても、ウランの濃縮やプラントの建設に多くのエネルギーを使用し

ており、このときに必要なエネルギーから生じるCO<sub>2</sub>の排出を考慮すると、これらの温暖化影響は意外と大きいのではないかと、という疑問が提起されている。

そこで当研究所では、火力・原子力・自然エネルギーの各発電方式の全プロセス、すなわち、

- a) プラントの建設・運転・保守、
- b) 燃料の採掘・加工・輸送・精製、
- c) 化石燃料採掘時のメタン(CH<sub>4</sub>)洩れ、
- d) 発電時の化石燃料の燃焼、

における必要なエネルギーを対象に、CO<sub>2</sub>とメタンの排出量を調べ、温暖化への寄与を総合的に検討した。

この結果、水力、原子力、地熱、その他の自然エネルギー、そしてLNG火力、石油火力、石炭火力の順に、温暖化への寄与が高いことがわかった(図2-1-3)。

とくに、火力発電は、原子力や自然エネルギーに比べ、CO<sub>2</sub>排出量はかなり高いが、これは発電時の燃焼により直接、排出される量が圧倒的に多いためである。ただしLNG火力は、その比率が意外と小さく石炭火力の約65%に止まっている。

原子力は、やはりCO<sub>2</sub>を排出しない分、温暖化への寄与が小さく、LNG火力の約1/25である。ただ今回は、使用済み燃料の処理過程、すなわち再処理や放射性廃棄物の処理処分、廃炉などで必要になるエネルギーを除き試算している。しかし、これらはいくら多くても、ウラン濃縮過程の寄与以上(ウラン濃縮過程からのCO<sub>2</sub>量は原子力全体の85%)にはならないと考えられるため、たとえこれらを考慮しても原子力の優位性は変わらない。

水力発電は、検討したプラントの中で温暖化への寄与が最小であった。今回はプラントの寿命をすべて30年としたが、水力発電の実績をみれば50年あるいはそれ以上で運転しており、実際にはさらに小さくなる。

また、地熱発電も温暖化への寄与が比較的小さいが、他の自然エネルギーは、発電量の割に、設備の建設・製造に必要なエネルギーから排出するCO<sub>2</sub>量が多くなっている。このように、たとえ自然エネルギーであっても意外と温暖化への寄与は無視できず、必ずしも温暖化の対応技術として優れているとは限らないことが明らかとなった。

エネルギー技術の選択は、資源に乏しいわが国にとって、温暖化問題だけではなく、資源・立地・安全性・経



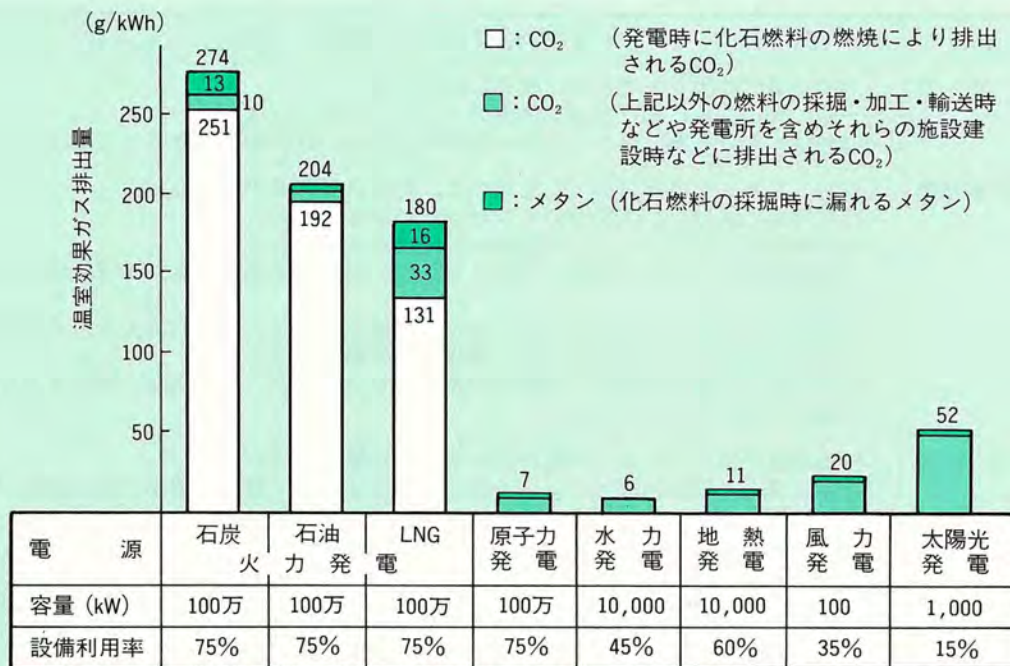
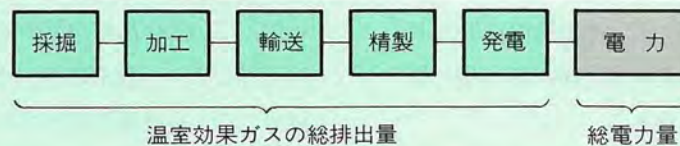


図2-1-3 発電方式別の温室効果ガスの排出量

このグラフの値は、プラントの寿命を30年として、この間に排出される温室効果ガスの総量を、発生した総電力量で割ったものである。下図のように、エネルギーを生産する過程には、燃料を採掘・加工し、それをわが国へ輸送して精製する過程、そして発電する過程があるが、これらをすべて考慮して温室効果ガスの排出量を算出した。



なお化石燃料採掘時のメタン漏れは、天然ガスは生産ガス量の1%に相当し、石炭は坑内掘りの場合、1トン生産するのに約7.3kgとなる。

また原子力発電は、

- (a) 放射性廃棄物の処理などのバックエンド時に必要なエネルギー
- (b) 燃料の採掘や精製などフロントエンド時の施設建設に使うエネルギーを試算に含めていないが、本文中にも示したとおり、たとえそれらの過程から排出するCO<sub>2</sub>を含めたにしても、温暖化影響は基本的には大きく変わらないと考えられる。

なおプラントに係わる温室効果ガスには、一酸化二窒素 (N<sub>2</sub>O) があるが、すでに当研究所の調査で、温暖化への寄与はほとんどないことが明らかとなっているため、この試算には含めていない。

経済性など総合的な視点から決めなければならない。

しかし温暖化を防ぐ技術は、基本的には技術の簡素化やエネルギーの有効利用技術であり、それらは同時にセキュリティの確保と経済性の向上にもつながる。

この意味で、水力・地熱・原子力は、総合的に見て温暖化への寄与がもっとも小さな発電技術であり、今後そ

これらの発電方式の比率を高めていく必要があるが、これと同時に、わが国のように火力発電の比率が高い国では今後、発電効率の向上などエネルギーの有効利用に係わる技術開発が、とくに重要となってくる。



表2-1-1 制度的方策の主な特徴

手 段	主 な 特 徴
直 接 規 制	<ul style="list-style-type: none"> <li>・汚染物質の排出を一定水準に緊急に抑制可能。</li> <li>・一層の排出抑制に向けた技術開発のインセンティブを与えない。</li> <li>・抑制コストの多寡に係わらず画一的規制のため、社会経済全体としてロスが大きい。</li> </ul>
税・課徴金制度	<ul style="list-style-type: none"> <li>・抑制コストと全負担コストとを比べて、費用負担の最小化可能。</li> <li>・排出抑制に向けた技術開発のインセンティブを与える。</li> <li>・生産要素のよりクリーンな代替物への転換が促進される。</li> <li>・環境保護のための財源確保に有効。途上国に対する地球温暖化対策援助のための基金財源となりうる。</li> <li>・課税効果の予測が不明確なため、排出量を確実に一定レベルに抑えることが不可能。</li> <li>・排出抑制効果を上げるためには、相当高い税額が必要。</li> <li>・既存税制との整合が必要。税負担が重くなり過ぎると、国民経済・国民生活などに悪影響を及ぼすおそれがある。</li> </ul>
排 出 権 売 買	<ul style="list-style-type: none"> <li>・排出総量が保たれることが前提だから、排出量の管理が容易。</li> <li>・抑制コストと権利の購入コストを比べて、全体として最小の費用で排出抑制が可能。</li> <li>・排出抑制に向けた技術開発のインセンティブを与える。</li> <li>・生産要素のよりクリーンな代替物への転換が促進される。</li> <li>・国際的制度として実施する場合は、各国の利害対立の調整が必要。</li> <li>・国際的制度として実施する場合は、大幅な権限を持った管理機構・組織が必要。</li> <li>・排出権の買い占め、投機目的の利用、価格の乱高下の危険がある。</li> </ul>
補助・助成制度 (補助金、税制 優遇、特別融 資等)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・助成対象の汚染物質排出抑制設備、機器の導入が促進される。</li> <li>・助成対象の技術開発へのインセンティブを与える。</li> <li>・助成対象のクリーンな生産要素代替物への転換が促進される。</li> <li>・排出量を確実に一定のレベルに抑えることは不可能。</li> <li>・助成拡大のための財源確保が問題。</li> <li>・費用負担を引き下げることにより、長期的に、助成対象分野への企業参入を促進し、全体として汚染物質の排出総量を増加させるおそれがある。</li> </ul>

### (3) 制度的方策の効果

CO<sub>2</sub>抑制のための制度的方策には、排出量の法的規制などの直接規制と、税金・課徴金制度、排出権市場、補助・助成制度などの間接規制とがある。

これらの方策には、それぞれ長所・短所があり、適用する場合には、当該地域の事情や効果を勘案して、単独あるいは組み合わせる必要がある(表2-1-1)。

わが国の環境対策では、汚染物質の排出量を直接規制するケースが多いが、CO<sub>2</sub>抑制のような広域的規制が必要で対象も膨大な場合には、課徴金や補助金などの経済的なインセンティブを介した間接規制の方が適している場合がある。

ヨーロッパでは、燃料に課税して使用量を抑制することによりCO<sub>2</sub>排出量を削減しようとする動きが主流であり、すでに、フィンランド、オランダ、スウェーデン、ノルウェーでは実行に移されている(表2-1-2)。

#### ① 課徴金によるCO<sub>2</sub>の排出抑制

CO<sub>2</sub>の排出に対して課徴金を導入する場合の影響は、エネルギー価格の上昇による直接的影響と、経済活動や

一般物価の変化をつうじた間接的影響があり、これらが相俟ってCO<sub>2</sub>排出量が減少する。さらに、エネルギー価格の上昇により、化石燃料、とくに石炭の需要量が大幅に減少しCO<sub>2</sub>排出量が抑制される。

当研究所の研究によれば、わが国において、課徴金導入による価格効果によってCO<sub>2</sub>排出量を安定化させるには、オイルショックに匹敵するようなエネルギー価格の上昇が必要で、大きな国民経済的コストを生じる可能性が高い(図2-1-4)。

一方、わが国単独での課徴金の導入は、わが国のCO<sub>2</sub>排出抑制は実現できても、これによって国際的な産業構造が変わり、世界全体ではCO<sub>2</sub>の排出をむしろ増大するおそれもある。このため課徴金の導入は、国際的な連携のもとに慎重に検討してから実施すべきである。また、導入の目的は価格効果を主とせず、地球環境対策の資金集めの手段と考える方がより効果的である。

#### ② CO<sub>2</sub>排出権市場による排出抑制

気候変動に関する政府間パネル(IPCC)における議論では、国際的なCO<sub>2</sub>排出抑制方策として、CO<sub>2</sub>排出権市場



表2-1-2 CO<sub>2</sub>排出抑制に関連する世界の税の種類

国名	税制	概要	制定状況
デンマーク	環境税 (CO <sub>2</sub> 税、 SO <sub>2</sub> 税)	<ul style="list-style-type: none"> <li>現在のエネルギー税と並列に課税。また、エネルギー料金も見直す。ただし全体としては過重な税にならないことを目指す。</li> <li>新エネルギー計画「エネルギー2000」で勧告(1990年4月)</li> </ul>	内容検討中
フィンランド	燃料税の改正	<ul style="list-style-type: none"> <li>炭素含有量基準の税を制定、CO<sub>2</sub>排出1kgあたり0.018ドル、政府の基本方針を強調したもので本格的CO<sub>2</sub>税への1ステップ。CO<sub>2</sub>税収6,000万ドル(1990年一般財源組み入れ)。(1990年1月1日施行)</li> </ul>	実施中
フランス	(酸性雨税)	<ul style="list-style-type: none"> <li>SO<sub>x</sub>、排出量1トンあたり27万ドル、N<sub>2</sub>O、HCl/その他も含まれている。この新税は炭素税の先駆けと見られている。税収は政府の公害防止費用に充当。</li> <li>1990年5月13日大統領令として公布。4年間の時限立法。</li> </ul>	内容検討中
ドイツ	CO <sub>2</sub> 税	<ul style="list-style-type: none"> <li>経済メカニズムを重視、CO<sub>2</sub>税も必要と考える。CO<sub>2</sub>課徴金の導入により排出量を抑制し、収入は大気保護(特定財源)に用いる。</li> <li>1991年夏以降に骨格ができる。事業者との調整もあり、実施は1995年以降。</li> </ul>	内容検討中
イタリア	CO <sub>2</sub> 税	<ul style="list-style-type: none"> <li>発電所からのCO<sub>2</sub>排出量1kgあたり3リラ(0.002ドル)をベースに燃料別に、その消費量に対し課税。税収はエネルギー節約、代替エネルギーへの転換、再生可能エネルギーの研究のインセンティブに使用。</li> </ul>	内容検討中
オランダ	CO <sub>2</sub> 税	<ul style="list-style-type: none"> <li>燃料中の炭素の含有量に応じて賦課(CO<sub>2</sub>排出量1kgあたり0.0006ドル程度)</li> <li>包括燃料税の増税(1.5倍)時に付加的に導入された。年間7,500万ドルの税収を見込む(一般財源組み入れ)。用途は産業部門での環境対策費などに充当。(1990年2月1日より実施)。</li> </ul>	実施中
ノルウェー	エネルギー税の増税	<ul style="list-style-type: none"> <li>石油及び石油製品の消費抑制を目的。エネルギー税増税、CO<sub>2</sub>税(新設、燃料1lあたり0.05ドル、ガソリン同0.1ドル)SO<sub>2</sub>税。CO<sub>2</sub>税収は1.4億ドル(1991年)で一般財源に組み入れ公共交通機関の改善に充当。同時に所得減税(20~32%減)を実施。(1990年1月1日施行)。</li> </ul>	実施中
スウェーデン	CO <sub>2</sub> 税	<ul style="list-style-type: none"> <li>地球温暖化だけでなく、広く大気汚染防止を目的。CO<sub>2</sub>排出1kgあたり0.04ドル(電力及び電力多消費産業には課税せず)。税収で現行のエネルギー税と所得税を減税(歳入中立)。</li> <li>1990年6月14日国会通過(1991.1.1施行)。同時に硫酸化物税(1991.1.1施行)、窒素酸化物税(1992.1.1施行)も成立。</li> </ul>	実施中
イギリス	グリーン・タックスの検討	<ul style="list-style-type: none"> <li>CO<sub>2</sub>の大量排出産業を対象として大気汚染コストの原因者負担を検討。</li> <li>環境白書において環境税、CO<sub>2</sub>税の有効性が述べられているが、同時に、ここ数年間は導入の考えはない、とも併記されている。</li> </ul>	内容検討中
アメリカ	炭素税法案	<ul style="list-style-type: none"> <li>化石燃料に課税。1991年から1995年まで段階的に増加、以降一定。</li> <li>法案の取り扱いについてのスケジュールは未定。</li> <li>これとは別に1990年9月30日に財政赤字対策としてエネルギー税の増額(ガソリン及び石油税の増税)が決定。</li> </ul>	法案提出中
E C	環境税	<ul style="list-style-type: none"> <li>「CO<sub>2</sub>排出安定化のためのエネルギー税制等に関するガイドライン」を提案(1990年12月環境相理事会、ECのCO<sub>2</sub>排出削減行動計画提案の一部として)。</li> <li>すべてのエネルギーを対象とする総合エネルギー税及び炭素含有量を対象とするCO<sub>2</sub>税の組み合わせであり、具体化について検討中。</li> </ul>	内容検討中



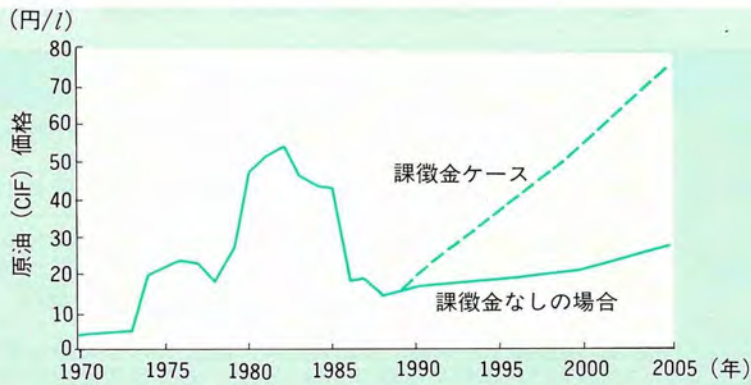


図2-1-4 課徴金の賦課による原油価格の変化

課徴金制度によるわが国のCO<sub>2</sub>の排出抑制について、当研究所が開発した中期経済予測システムを用いて検討した。この結果、2005年のCO<sub>2</sub>排出量を1988年レベルに抑制するためには、1990年からCO<sub>2</sub>排出量1トン（炭素換算）につき、4000円を課徴金として導入し、これを毎年、同額づつ上昇させればよいことがわかった。この場合、原油価格は、2005年時点で、課徴金なしの場合と比べて3倍近く上昇し、また、この間のGNPは年率で0.4%減少する。結論として、わが国のエネルギー経済条件下では、課徴金だけに依存してCO<sub>2</sub>排出量を現状に凍結するには、あまりにも国民経済的な損失が大きく、効率的な政策とはいえない。

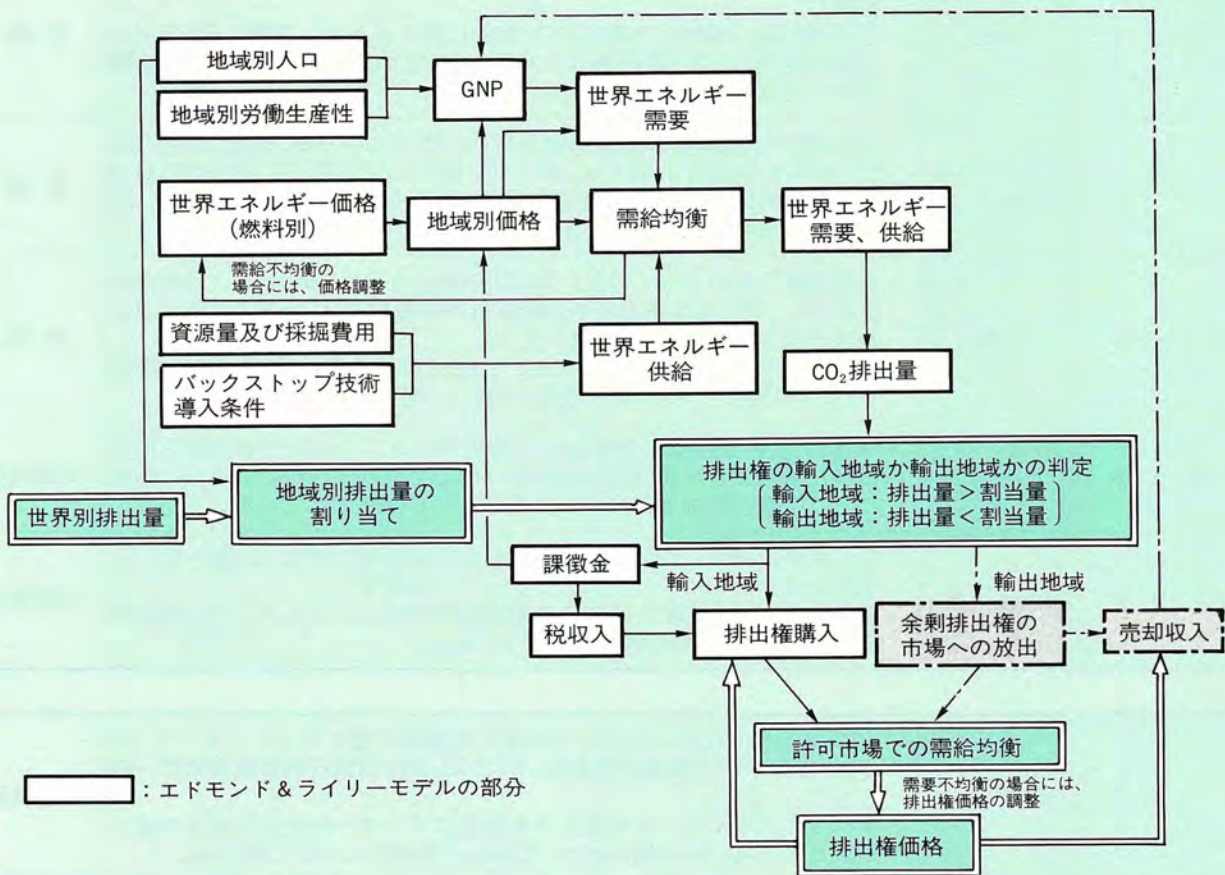


図2-1-5 排出権市場と課徴金制度を組み合わせたCO<sub>2</sub>抑制システム(モデルの概要)

世界全体で、CO<sub>2</sub>排出抑制を公平かつ効率的に進める方法として、排出権市場と課徴金制度とを組み合わせるシステムを考え、その成立性を定量的に評価した。評価には、世界のCO<sub>2</sub>政策の解析によく用いられるエドモンド&ライリーモデルを改良して利用した。図に示した二重線の部分が改良部分である。



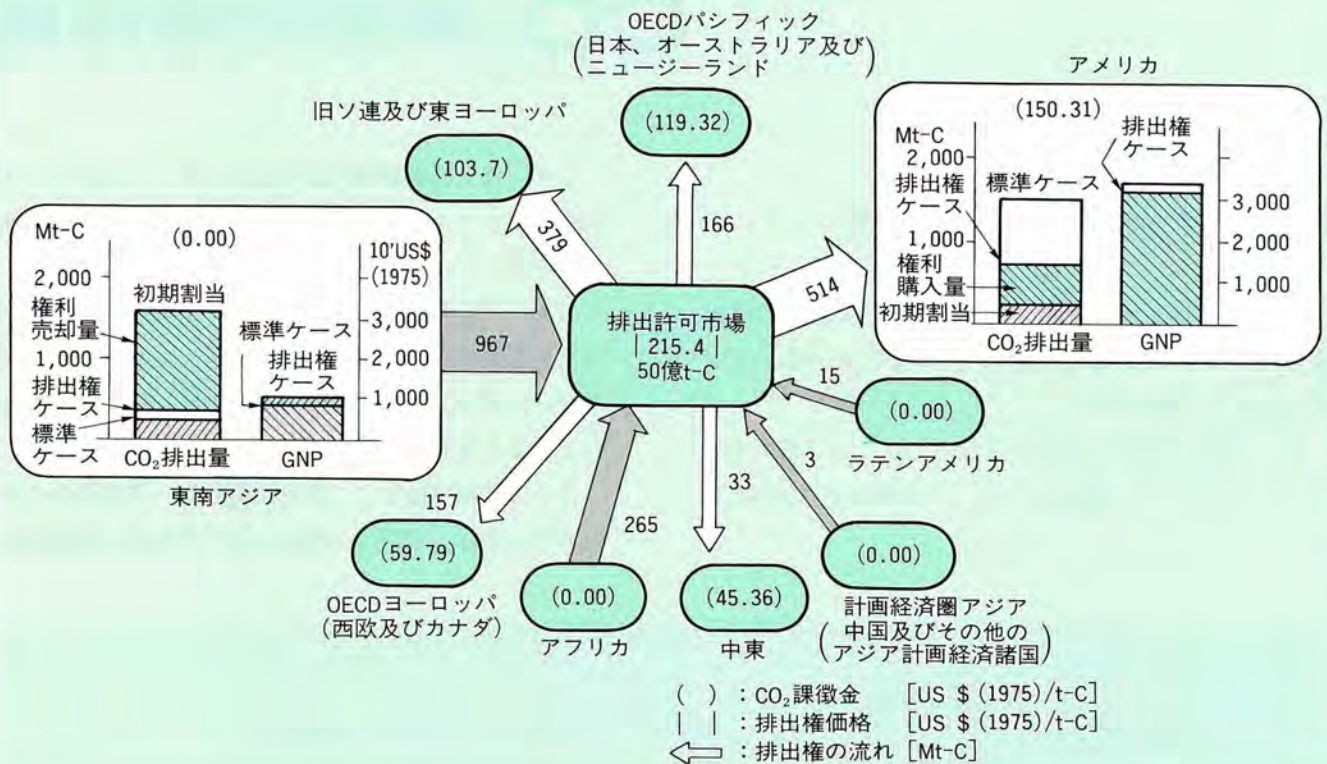


図2-1-6 2000年で世界のCO<sub>2</sub>排出総量を50億トン(炭素換算)に規制した時の排出権市場

試算では、世界を9地域に分け、人口などのデータはエドモンド&ライリーモデルのものをそのまま利用している。図には、CO<sub>2</sub>排出権市場の需給均衡点における、排出権のやり取り、排出権の国際価格、さらに各地域のCO<sub>2</sub>課徴金の水準を示している。東南アジアなど4地域が余剰の排出権を放出し、他の5地域がそれを輸入している。とくに、東南アジア地域が総供給量の80%近くを供給し、総輸入量の40%強がアメリカに流れている。一方、輸入地域の課徴金を比較すると、一人あたりのCO<sub>2</sub>排出量が多いアメリカなどの先進工業地域での課徴金の水準が高くなっている。

という構想が注目されている。この排出権市場の特長は、抑制を公平にしかも効率的に実現できる点にある。

そこで当研究所では、国際的な排出権市場と地域的な課徴金をとを組み合わせる抑制システムを考え、その定量的な評価を実施した(図2-1-5)。

この結果によれば、2000年で、世界のCO<sub>2</sub>排出総量を50億トン(炭素換算)と仮定した場合のCO<sub>2</sub>排出権市場では、主として東南アジア地域が余剰の排出権を市場に放出し、その多くがアメリカに流れる(図2-1-6)。

また各地域が単独で、課徴金政策によりCO<sub>2</sub>排出削減

を達成する場合と比べて、排出権の取り引きにより、先進国地域での国民経済的損失が緩和されるとともに、途上国地域では排出権の売却収入によって国民総生産が増加することなども明らかになった。

ただし、この研究で仮定したような世界の各地域を市場構成員とする制度が、現実的に成立するかどうかについては異論も多い。現在、当研究所では具体的な途上国援助において、同様の効果を実現できる制度の検討を進めている。



## 2-2 CO<sub>2</sub>抑制対策技術

### 2-2-1 CO<sub>2</sub>抑制対策技術の考え方

CO<sub>2</sub>の技術的な抑制対策としては、第一にCO<sub>2</sub>の排出を予防するものと、第二に排出されたCO<sub>2</sub>を対象とするものがある(図2-2-1)。

第一のCO<sub>2</sub>の排出を予防するものとしては、「省エネルギー」、「エネルギー選択」、そして「効率向上」があげられる。

これらは、消費者側の取り組みでは、エネルギーの節約やリサイクルの推進、そして高効率家電機器の利用などになる。

一方、供給者側の取り組みでは、発電効率の向上やロス電力機器の活用、また未利用エネルギーや自然エネルギー、原子力の利用拡大、そして電力貯蔵技術の利用などによる化石燃料の節減などが含まれる。

とくに電気事業として重要な課題に、発電効率の向上があげられる。これは、将来に向け高効率の新発電方式

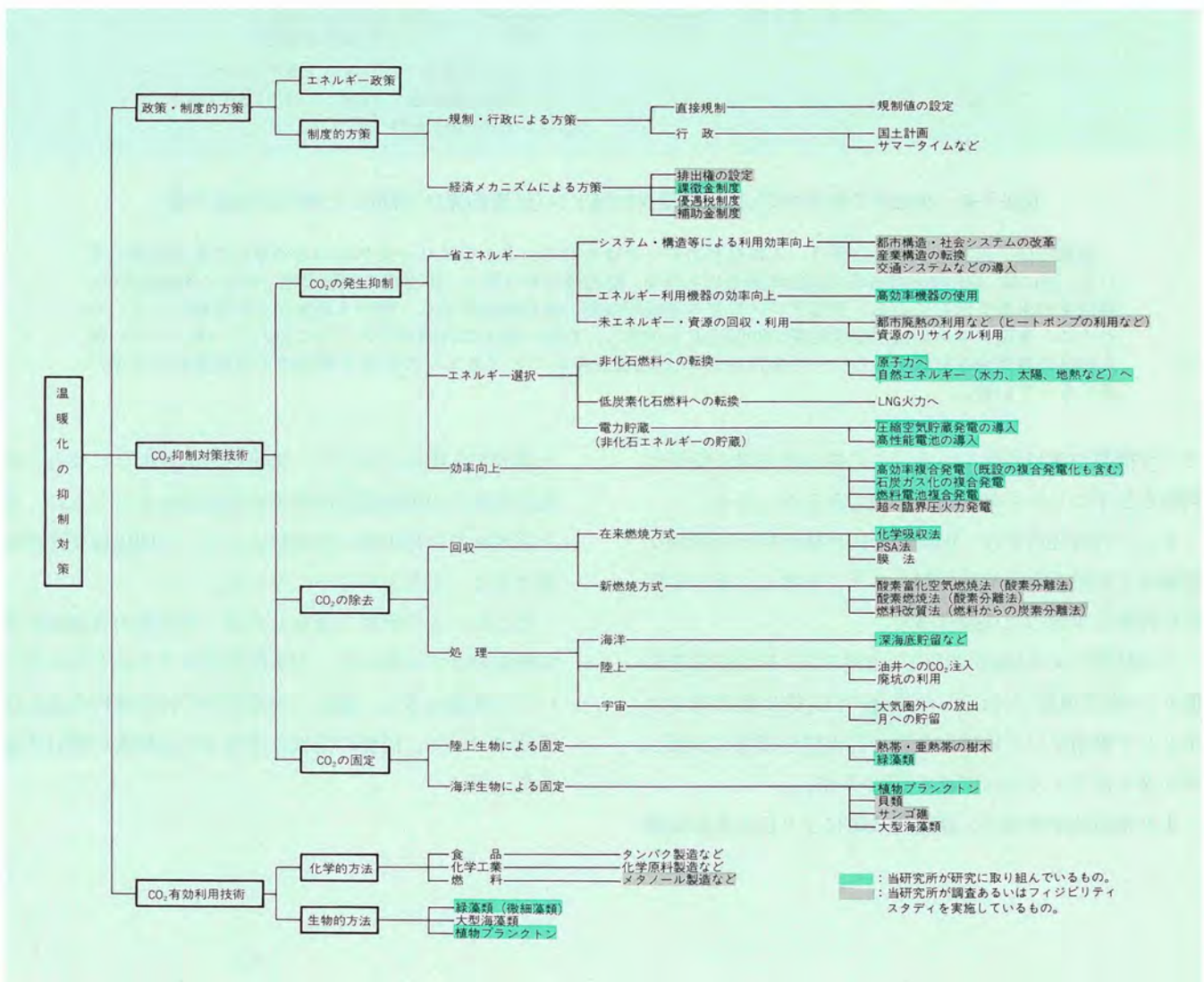


図2-2-1 CO<sub>2</sub>抑制対策の体系図



を開発するものと、技術や材料の進歩に合わせ既存技術の改善を図るものがあるが、いずれにしろCO<sub>2</sub>抑制対策技術としてのみでなく、電力の供給信頼性やコスト低減などからも重要な課題であり、当研究所においても地球環境問題がクローズアップされる以前から、常に追求しつづけている課題である。

また、これに類した方法として、CO<sub>2</sub>を排出しないか、あるいは排出量の少ないエネルギーの選択（転換）がある。

第二の排出されたCO<sub>2</sub>を対象とするものには、燃焼排ガスからの除去と大気中からの除去（固定）とに分けて考えられる。

工学的な側面からは、CO<sub>2</sub>濃度が濃い燃焼排ガスからの除去が有利であり、その方法としては、CO<sub>2</sub>を分離・回収する方法とその後の方策として処理とがある。一方、大気中からの除去は、植物あるいは微生物を利用する環境にやさしい方策である点に特徴がある。

このレビューでは、第二の排出されたCO<sub>2</sub>の除去を中心に取り上げる。

## 2-2-2 CO<sub>2</sub>の除去

### (1) 在来燃焼方式によるCO<sub>2</sub>回収技術

CO<sub>2</sub>を回収する技術としては、すでに化学プラントや天然ガス田などで小規模のものが実用化されている。そ

の主なものは、つぎの3つの技術である。

- (a) 吸収液にCO<sub>2</sub>を化合させ分離・回収する化学吸収法
- (b) 固体吸着剤の細孔にCO<sub>2</sub>を物理的に吸着させ分離・回収する物理吸着法
- (c) 高分子膜の透過速度の違いを利用してCO<sub>2</sub>を分離・回収する膜分離法

これらの技術について、当研究所では、大容量の火力発電所の排ガスからCO<sub>2</sub>回収するという視点で検討した結果、アミン系吸収液を用いた化学吸収法が、早期の実用化の可能性が高いと判断された。

なお物理吸着法は、大容量化やコストの面で難点はあるが、圧力差を利用する圧力スイング吸着法(PSA法)は、技術的な完成度が高く、また吸収液の飛散などによる環境問題が発生しないなどの利点もあり、高性能吸着材の開発など今後の研究開発の進展によっては化学吸収法と競合する可能性もある(表2-2-1)。

まず当研究所では、アミン系吸収液を用いた化学吸収法を、現状の技術を前提に、50万kW級のLNG火力発電所に適用し、排ガス中の90%のCO<sub>2</sub>を回収する場合を想定して、所要エネルギー量やコストを試算した。

この結果、所要エネルギー量を発電出力との比率で示すと、回収のための蒸気エネルギーが10~20%、電気エネルギーが3%、液化のための電気エネルギーが10%と、全体では発電出力の20~30%もの膨大なエネルギーを必

表2-2-1 火力発電所を対象としたCO<sub>2</sub>回収方法の比較・評価

方法(原理)	概要	長所	短所	備考
化学吸収法	吸収液にCO <sub>2</sub> を化学反応で吸収させ、それを加熱することなどにより、CO <sub>2</sub> を分離・回収する。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・大容量化が容易。</li> <li>・低濃度ガス成分の分離に適する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・CO<sub>2</sub>の分離に大きなエネルギーが必要。</li> <li>・吸収液の使用量が多く、かつ高価。</li> </ul>	アメリカにおいて中規模の天然ガス焼き発電ボイラの排ガスからCO <sub>2</sub> を分離し枯渇油井から石油の強制回収に利用した例がある。
物理吸着法	ゼオライトなどの固体吸着剤の細孔にCO <sub>2</sub> を物理的に吸着させ、圧力をさげることによってCO <sub>2</sub> を分離・回収する。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・比較的簡易な装置ですむ。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・CO<sub>2</sub>の分離に非常に大きなエネルギーが必要。</li> <li>・大容量化のための技術開発(真空ポンプ、圧力切替バルブなど)が必要。</li> <li>・大容量化の実績がない。</li> </ul>	製鉄所の熱風炉ガス中のCO <sub>2</sub> 回収に利用した例が国内にある。
膜分離法(透過)	高分子膜に対する気体の透過速度の違いを利用してCO <sub>2</sub> を分離・回収する。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・装置は非常に簡単</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・膜が非常に高価なため、コストが非常に高い。</li> <li>・膨大な面積の膜が必要なため、大容量化が大変困難。</li> <li>・不純物が多い排ガスに適した膜の開発が必要。</li> </ul>	現状技術では、火力発電所排ガスへの適用は困難。



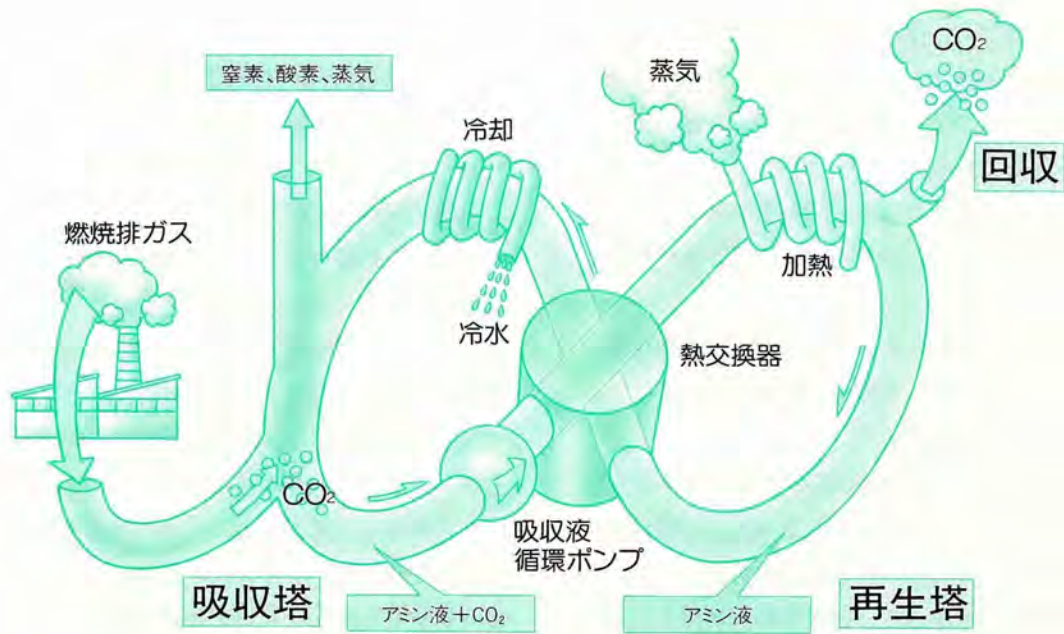


図2-2-2 化学吸収式CO<sub>2</sub>回収方法の原理

化学吸収液は、モノエタノールアミンなどのアミン系のものが用いられるが、温度によってCO<sub>2</sub>と化合したり、分離したりする性質がある。このシステムは、吸収塔で排ガスと吸収液が接触し、排ガス中のCO<sub>2</sub>が吸収液中のアミンと化学的に結合して、その他のガス成分と分けられ、吸収液とともに再生塔に運ばれる。再生塔で加熱されると吸収液は化学結合が解け、CO<sub>2</sub>を吸収液から分離する。吸収液は冷却して循環利用する。この方法は、火力発電所のような常圧で比較的低濃度のCO<sub>2</sub>を含むガスに適しており、また大容量化が比較的容易であるが、吸収液の加熱・冷却・循環に多くのエネルギーを必要とする。

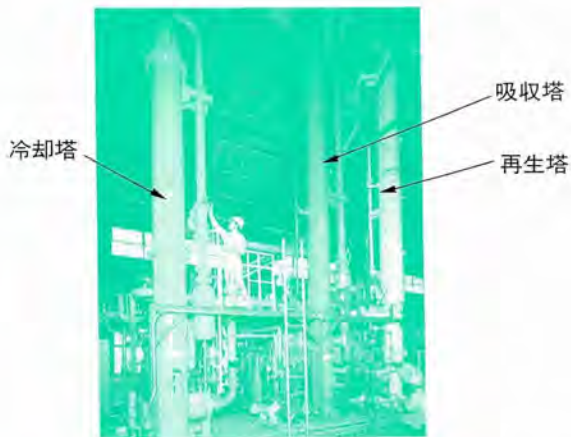


図2-2-3 化学吸収式のCO<sub>2</sub>回収基礎実験装置(写真)

化学吸収式CO<sub>2</sub>回収技術の低エネルギー化の限界を見極めるため、この装置で、吸収液の熱や物質収支の検討を進めている。処理ガス量は、一時間あたり最大880Nm<sup>3</sup>で、100万kW級LNG火力発電所排ガスの1/4000に相当する。大きさは、もっとも高い吸収塔が12.2m、再生塔が10.6mである。また実験の省エネルギー化を図るため、分離後のガスは循環使用できる。

要とする。したがって、送電端の出力は、CO<sub>2</sub>の回収・液化装置を設置すると70~80%に低下する。

またコストは、主な増加費用であるCO<sub>2</sub>回収装置、吸収液、液化装置、および先に試算した所要エネルギーを所内電力として加えると、通常の1キロワットアワーあたり11円より40~60%高くなる。

なお、石油火力や石炭火力の場合、CO<sub>2</sub>排出量が多い分だけコストは高くなり、それぞれLNG火力の1.2倍、1.5倍になる。さらに、これら火力の排ガスをCO<sub>2</sub>回収装置に適用するためには、前処理してクリーンにしなければならず、その分コストはさらに高くなる。

このため、当研究所では、排ガスからのCO<sub>2</sub>回収技術として、当面、経済的に有利なLNG火力を対象に、早期に実用化の可能性がある化学吸収法による回収技術を採用し、低エネルギー・低コスト化を目指した研究に着手した。

すでに当研究所では、一時間あたりの排ガス処理量880



Nm<sup>3</sup>の基礎実験装置を設置し、吸収液の熱や物質収支の検討を進めている（図2-2-2・図2-2-3）。

現在、モノエタノールアミン吸収液の性能評価を中心に実験を行っており、最終的には、火力発電システムの一部として、化学吸収式CO<sub>2</sub>回収技術の低エネルギー化、低コスト化の限界を見極めることにしている。なお並行して、性能劣化した廃吸収液の処理方法の検討も進めている。

## (2) 新燃焼方式によるCO<sub>2</sub>回収技術

アメリカのアルゴンヌ国立研究所など内外の研究機関では、CO<sub>2</sub>の回収を効率的に進めるため、燃料の純酸素燃焼の研究など新方式の火力発電システムが模索されている。しかし現時点では、純酸素燃焼は酸素を空気から分離製造するため、多くのエネルギーを必要とし、またコストが高く、さらにボイラ全体の見直しが必要となるため、実用的な段階までにはいたっていない。

### ① 燃料改質CO分離複合発電システム

当研究所では、発電効率を低下させることなくCO<sub>2</sub>を回収できる火力発電システムの実現を目指して検討を進めてきた結果、将来の技術ながら、高い発電効率で直接高濃度のCO<sub>2</sub>が回収できる「CO<sub>2</sub>回収型火力発電システム」を新たに取りまとめた。

これは、天然ガス(LNG)や石炭を燃料とするもので、LNG改質、石炭ガス化、膜分離など最新の技術を

組み合わせたものである。このシステムでは、燃料を水素とCOガスに改質し、水素分離膜で両者を分けた後、COガスのみ酸素燃焼して高濃度のCO<sub>2</sub>を直接回収し、ガスタービンの燃料として水素とCO<sub>2</sub>をつかい、また排熱を利用して蒸気タービンで発電するもので、いわば「燃料改質CO分離複合発電システム」と呼べるものである（図2-2-4）。

しかも、発電効率、CO<sub>2</sub>回収率などの性能を検討した結果、LNGを燃料とした場合は、現状のLNG複合発電なみの高効率（送電端で43.4%）で、CO<sub>2</sub>の80%以上を回収でき、従来の燃焼方式であるLNG火力発電所の排ガスからCO<sub>2</sub>を回収する場合と比べた場合、著しく高い発電効率が達成できることが分かった。

また、石炭を燃料とする場合は、CO<sub>2</sub>回収を行わない現状の微粉炭火力なみの効率で、CO<sub>2</sub>を90%以上回収できることが分かった（表2-2-2）。

取りまとめたCO<sub>2</sub>回収型発電システムは、燃料中の炭素が燃焼して発生するCO<sub>2</sub>の80%以上を純度90%前後で、直接回収できる新しい発電システムであるが、天然ガス改質器、水素分離膜などを組み合わせた複雑なものであり、解決しなければならない技術課題も数多く残されている。

しかし、概念的な検討では所内動力は少ないなど多くのメリットがあることも分かったため、今後、当研究所では、システム構成の最適化を含めた経済性の検討を進めることにしている。

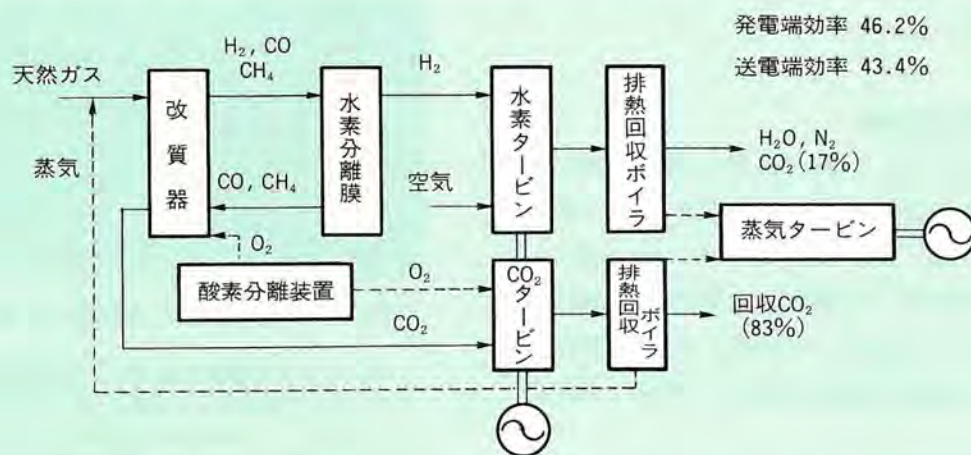


図2-2-4 燃料改質CO分離複合発電システムの構成図 (LNGの場合)

このシステムは、発電効率を低下させることなく、燃料を改質してできたCOと水素を分離し、COは酸素で燃焼させ、できたCO<sub>2</sub>をそのまま回収する。図はLNGの場合を示すが、現在のLNG複合発電なみの高効率でCO<sub>2</sub>の80%以上を回収できる



表2-2-2 燃料改質CO分離複合発電システムの評価

	LNG改質CO分離	石炭ガス化CO分離	LNG火力からのCO <sub>2</sub> 回収
CO <sub>2</sub> 回収率	82.6%	93.1%	90.0%
回収CO <sub>2</sub> 純度	87.8%	93.8%	99.0%以上
発電端効率	46.2%	44.2%	40.7%
所内率	6.0%	16.0%	3.0%+17.0%
送電端効率	43.4%	37.1%	33.0%

表は、取りまとめたCO<sub>2</sub>回収型火力発電システムの性能を示したもので、CO<sub>2</sub>回収率は、発生するCO<sub>2</sub>に対して回収するCO<sub>2</sub>の割合である。また参考までに、現在の火力発電所排ガスからCO<sub>2</sub>を回収する場合も示したが、所内率の+17.0%は、CO<sub>2</sub>回収のための所内動力分である。なお、CO<sub>2</sub>の液化動力分は除いている。

### ② 酸素富化燃焼によるCO<sub>2</sub>回収

一方、従来の火力発電システムを前提としながらも、酸素富化燃焼による新しい火力発電システムでCO<sub>2</sub>を回収する方法もある。

酸素富化燃焼とは、発電プラントに酸素製造装置を新たに加え、製造した酸素により燃焼空气中的酸素濃度を高めた燃焼方式である。この方式では、排ガス中のCO<sub>2</sub>濃度が高められ、処理すべき排ガス量が減少するため、その分、排ガスからのCO<sub>2</sub>回収に必要な動力費や設備費の低減が見込まれる。

そこで当研究所では、100万kW級の石炭およびLNG火力発電所を対象として、酸素製造装置とCO<sub>2</sub>回収装置を組み合わせた場合と、CO<sub>2</sub>回収装置のみを設置した場合を比較したコストの評価を実施した。この結果、現状では、新たに酸素製造装置を追加することによるコスト増が避けられず、回収コストの改善は望めないことが明らかになった。

### (3) CO<sub>2</sub>の深海底貯留技術

火力発電所の排ガスからCO<sub>2</sub>を回収する場合、回収したCO<sub>2</sub>は大量となるだけに、予め、処分方法について検討しておく必要がある。処分方法には、いくつかの考え方があるが、わが国では、大規模な火力発電所が臨海に立地しており、CO<sub>2</sub>を大気圏からの隔離するという観点からは、深海底への貯留は有望な技術の一つと考えられる(図2-2-5)。

海洋の利用と開発は国際的な合意を基本に進めるべきであり、当研究所では、その前提として、CO<sub>2</sub>の海洋処分技術の環境適合性を判断するための手法を開発することに主眼をおいている。



図2-2-5 深海底にCO<sub>2</sub>を貯留した場合のイメージ図

CO<sub>2</sub>は、火力発電所の排ガスから分離・回収した後、液化してタンカーで輸送し、3,000メートル以深の深海底に貯留する。3,000メートル以深の深海底では、液体CO<sub>2</sub>の方が付近の海水よりも重くなるので、そのままにしておくと、沈んでいき凹地に貯まると予想される。現在は、実験室で深海の条件をつくり出し、海水と接する部分でクラスレート水和物ができる条件の確認や、そのときの水の密度とCO<sub>2</sub>の溶解度を実測している。将来は、深海底でのCO<sub>2</sub>の挙動をモデル化する予定である。



### ① クラスレート水和物

当研究所では、CO<sub>2</sub>が深海中ではクラスレートと呼ばれる水和物になると考えられるため、まず、深海を模擬した高圧実験装置による室内基礎実験を実施し、その現象や物性を確認することにした(図2-2-6)。

- (a) 加圧条件下で水中に液体CO<sub>2</sub>を注入すると、CO<sub>2</sub>は徐々に溶解するが、それが飽和に達するとCO<sub>2</sub>の液滴が水中に存在する二相共存の状態となる。
- (b) この状態でさらに加圧しつづけると、300気圧あたりから容器の上部にあったCO<sub>2</sub>の液滴が沈降しはじめ下部に貯まる、つまり海水とCO<sub>2</sub>液体との密度の逆転がおこる。
- (c) 350気圧で約10℃以下の条件では、CO<sub>2</sub>の液滴表面にクラスレート水和物ができる。さらに容器内を激しく攪拌すると、CO<sub>2</sub>の液滴は内部までクラスレート化する。

以上が実験結果の概要であるが、かりに、水深3000m

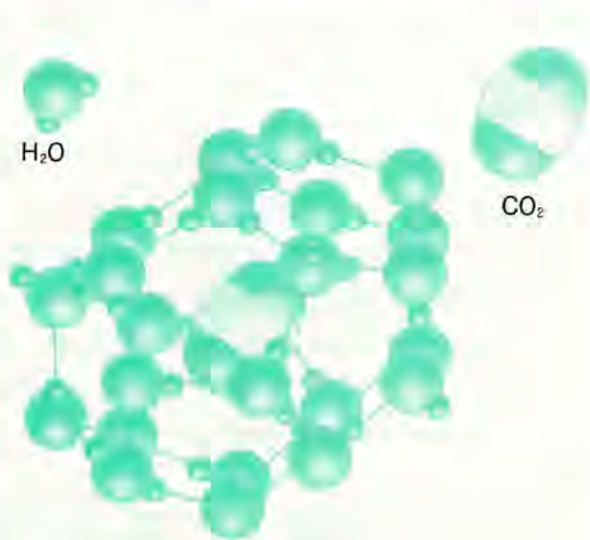


図2-2-6 クラスレート水和物のかご構造の模式図

「クラスレート」という語は、ギリシャ語で「かんぬき」という意味である。クラスレート水和物(包接化合物)とは、ホスト分子(水)が結合してできた3次元構造の内部に適当な大きさの空孔があり、その中にゲスト分子(CO<sub>2</sub>)が入り込み、特定の結晶構造をつくっている物質である。ホスト分子が水の場合をとくにクラスレート水和物と呼ぶが、ホスト分子とゲスト分子の間に化学結合があるわけではない。気体水和物のかご構造では、単格格子が12.03 Åの大きさで、46個の水分子と8個の空隙(2個は空孔径5.1 Å、6個は5.8 Å)とからなっている。1 Åは、0.1ナノメートル(100億分の1メートル)。

(300気圧)以上に液体CO<sub>2</sub>を注入した場合、CO<sub>2</sub>は深海底に一旦は液体のまま貯まり、さらにその一部がクラスレート化したとしても、時間の経過とともに流動する海水に徐々に溶けつづけることが予想される。

### ② CO<sub>2</sub>深海底貯留技術の環境適合性

溶けたCO<sub>2</sub>は、深層中の海流で運ばれるうちに希釈される。300気圧以上、5℃以下の条件下での液体CO<sub>2</sub>あるいはクラスレート化した水和物の近くの海水のpHは、3.5程度を示すと予想されるが、pHが低下した海水の拡がりを予測するためには、つぎの過程についての解明が必要となる。

- (a) 海底の液体CO<sub>2</sub>(表面は水和物となってクラスレート化)から深層流中へと移行するCO<sub>2</sub>の溶出過程と溶出速度
- (b) CO<sub>2</sub>の溶解にともなう海水の密度変化
- (c) 深層水中あるいは海底でのCO<sub>2</sub>の中和反応過程と反応速度

このうち(b)のデータについては、3℃・343気圧の条件の室内実験では、CO<sub>2</sub>が1%溶解すると、海水の密度は、1立方センチメートルあたり0.0028g増加することの実験結果をえている。このことは、CO<sub>2</sub>の貯留域近くでは、地形によって、CO<sub>2</sub>の溶解した海水は付近の海水より重くなるため、海底の表面を拡がってゆく可能性があることを示している。

また(a)および(c)については、今後、検討を進め、モデル化を試みることにしている。さらに、pHの低下、底層水の成層化、底層水の炭酸物質の増加などが底生生物に対してどのような影響を与えるのかを解明し、環境影響評価手法の開発を進める予定である。

## 2-2-3 CO<sub>2</sub>の固定

大気中に放出されたCO<sub>2</sub>の一部は、植物など生物の働きにより有機物や炭酸カルシウム(CaCO<sub>3</sub>)に変わり固定される。このような自然界の生物を利用して、大気中のCO<sub>2</sub>を固定する方法としては、樹木、海洋性植物プランクトン、サンゴなど炭酸カルシウム形成生物、大型海藻類などによる方法が提案されている。

これらの方法は、固定可能なCO<sub>2</sub>の総量や固定のためのコストが明らかでないものが多いが、当研究所で

は文献などを参考にして評価したところ、海洋性植物プランクトンによる固定と樹木による固定とが有望と考えられた(表2-2-3)。

#### (1) 海洋性植物プランクトンによるCO<sub>2</sub>の固定

海洋性植物プランクトンによるCO<sub>2</sub>固定は、アメリカのMartinらにより提案されたもので、南極海や太平洋赤道域などの海域に鉄など微量栄養塩を散布し、植物プランクトンの生産量(CO<sub>2</sub>固定量)を増大させ、大気中のCO<sub>2</sub>の海洋への吸収を促進させようとするものである。実際、北部太平洋では、黄砂の降下による鉄の供給にともない、一時的に植物プランクトンの生産量が増大することが知られている。

この方法が提案されて以来、賛否両論の議論が行われている。

たとえば、Baumは、年間10億米ドルの費用による鉄散布で、年間20億トンの炭素が南極海に吸収できるとしている。またアメリカ・研究評議会(NRC)は、年間100~500万トンの鉄散布で10~18億トンの炭素が除去できるとしている。

一方、Peng&Broeckerや米国湖沼・海洋学会はこの方法に批判的であるが、これらの批判的論文でも、簡易な流動モデルによる計算から、100年程度の長期にわたる鉄散布により、大気中のCO<sub>2</sub>の10%程度、年間では10億トンオーダーの炭素が、南極海に吸収されるとしている。

このように、海洋性植物プランクトンによるCO<sub>2</sub>の固定は有効な方法となる可能性があり、このため当研究所では、まず既存の知見をもとに鉄散布によるCO<sub>2</sub>固定のシナリオを作成し、南極海などの植物プランクトンの生産可能量やCO<sub>2</sub>固定量を試算した(図2-2-7)。

この結果、たとえば南極海に年間12~80万トンの鉄を散布することにより、炭素1トンあたり100~2000円のコスト(原料と輸送コスト)で、表層では新たに年間3~17億トンの炭素が植物プランクトンにより固定され、そのうち少なくとも5%程度が中深層に沈降すると試算された。

しかし、これらの試算も、またこれまでの議論も、さまざまな仮定をおいている。このため、海洋性植物プランクトンによるCO<sub>2</sub>固定法の効果や成立性をより定量的に評価するためには、対象海域における植物プ

ランクトンの増殖メカニズムや、鉄など微量栄養塩散布の環境影響予測評価に関する知見をさらに蓄積することが必要となる。

当研究所では今後、成立性評価を早期に実施できるよう、内外の研究機関などと連携をとり、実現の鍵となる植物プランクトンの増殖に与える鉄など微量栄養塩の散布効果を実験的に解明するとともに、環境影響予測評価のための生態系モデルの構築などを進める予定である。

#### (2) 樹木によるCO<sub>2</sub>固定

樹木は、数10年から1000年以上にわたって、光合成によりCO<sub>2</sub>を体内に固定する能力を持つことから、大気中のCO<sub>2</sub>を抑制する方法として、植林などの対策が注目されている。

植物は光合成によってCO<sub>2</sub>を体内に吸収・固定して有機物をつくる。この速度を「純一次生産力」と呼び、生きた植物体の量を「現存量」と呼んでいる。現存量には純一次生産力でつくられた有機物が加わる一方、枯死・脱落・動物の採食などによって一部が失われる。これらの失われた有機物は、最終的には微生物による分解作用を受け、CO<sub>2</sub>となり大気中に戻る。

このような大気と植物を巡る炭素循環において、植林による大気中からのCO<sub>2</sub>固定を考えるには、炭素の貯蔵庫としての森林の大きさや現存量、また間口の広さにあたる純一次生産力を把握する必要がある。

このため当研究所では、内外の文献を整理して、森林が毎年どのくらいのCO<sub>2</sub>を固定する能力があるのか、また現在の森林の炭素の貯蔵量はどのくらいなのかを調査した。

世界の森林面積の推定値には大きな幅があるが、国連食料農業機関(FAO)によると、世界の森林総面積は、現在、約40億ヘクタールである。また、森林総面積に占める気候帯別の割合は、熱帯林が40%、温帯林と亜寒帯・寒帯林がそれぞれ30%程度と考えられる。さらに、地域別の森林面積は、ユーラシア大陸、南・北アメリカ大陸に多く分布しており、国別ではブラジル・旧ソ連・カナダ・アメリカで全体の半数(52%)を占めている。

森林の現存量は、陸上植生の現存量の約90%を占めている。炭素量では約4500億トン~9800億トンと推定されているが、その多くは4500億トン~5600億トンの



表2-2-3 生物を利用したCO<sub>2</sub>の固定技術とその評価（炭素換算）

生物の種類		内容と適用箇所	CO <sub>2</sub> 固定能力とコスト	評価
陸	熱帯・亜熱帯の樹木	<ul style="list-style-type: none"> <li>荒地に植林し大気中のCO<sub>2</sub>を固定</li> <li>植林可能面積は、1.5～2億ha</li> <li>南アメリカ、東南アジアなどの熱帯、亜熱帯地方など</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>年間2～10トン/ha 〔全面積に植林すると、年間3～20億トンを固定〕</li> <li>250～7,500円/トン 〔固定可能期間：40年 植林コスト（途上国）：10～60万円/ha〕</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>面積は広大であるが、大量に固定</li> <li>経済的にもかなり有利</li> <li>砂漠防止、生物種保存などの効用もある</li> <li>固定期間は30～40年位</li> <li>適切な地域、樹木の選定が必要</li> </ul>
	緑な藻類の微生物	<ul style="list-style-type: none"> <li>火力発電所前面の海や敷地などを利用し、クロレラなどの微生物を増殖させCO<sub>2</sub>を固定し、畜産飼料とする</li> <li>可能面積は約4万ha 〔発電所敷地と前面の海域〕 〔500ha×80ヶ所＝4万ha〕</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>年間30トン/ha程度 〔全面積を利用して、年間120万トンが固定可能〕</li> <li>メタンなど温室効果ガスの低減効果は、飼料1トンあたり約5トンに相当する</li> <li>3万円/トン 〔飼料販売すれば、ほぼ上記コストが回収可能〕</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>年間低減効果600万トンは、電気事業排出CO<sub>2</sub>の6.7%に相当</li> <li>森林保護など環境問題全般に対して貢献が可能</li> <li>CO<sub>2</sub>を飼料として資源化するには社会的コンセンサスが必要</li> <li>高濃度のCO<sub>2</sub>中で増殖する緑藻類の探索が必要</li> <li>水中での光合成のため、太陽光の有効利用法の開発が必要</li> </ul>
海	植物プランクトン	<ul style="list-style-type: none"> <li>鉄など微量栄養塩類が不足の海域に、それらを散布して植物プランクトンを増殖させ、海水中のCO<sub>2</sub>を固定</li> <li>植物プランクトンは死骸あるいは動物プランクトンなどに捕食され糞として中深層に沈む</li> <li>南極海（約32億ha）</li> <li>太平洋赤道域（約11億ha）等</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>年間0.1～0.5トン/ha程度 〔南極海全域を利用すれば、年間0.1～17億トンが長期固定可能〕</li> <li>100～2,000円/トン 〔塩化第2鉄散布のための原料および輸送コスト〕</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>可能であれば固定量が多く、もっとも経済的</li> <li>国際的な合意形成が必要</li> <li>自然のメカニズムの解明や、生態系に対する影響など、環境影響評価手法の確立が必要</li> </ul>
	貝類	<ul style="list-style-type: none"> <li>増養殖した貝類が、海水中の重炭酸イオン(HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)とカルシウム(Ca)を吸収して炭酸カルシウム(貝殻)となり、海水中のCO<sub>2</sub>を固定</li> <li>貝肉は食用に利用可能</li> <li>沿岸域が対象</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>年間10～70トン/ha</li> <li>100万円/トン程度 〔殻付カキの生産コストは、1kgあたり100円、殻付貝1kg中のC含有量は、0.1kg〕</li> <li>コストは高いが、販売を考慮すると、一部コストの回収は可能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>適用面積は少なく、固定量に限度</li> <li>貝の生産に伴う、生成CO<sub>2</sub>の挙動が不明</li> <li>生産物の利用方法</li> </ul>
	サンゴ礁	<ul style="list-style-type: none"> <li>サンゴを増殖させ、サンゴ礁(有機物と炭酸カルシウム)として海水中のCO<sub>2</sub>を固定</li> <li>熱帯・亜熱帯の沿岸域 〔現在のサンゴ礁面積は、全海洋で6,200万haと推定〕</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>年間3～30トン/ha 〔全世界で現在、年間2～17億トンと推定〕</li> <li>コストは不詳だが、かなり高いと想定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>増殖技術は研究開発中</li> <li>サンゴの生産に伴う生成CO<sub>2</sub>の挙動が不明</li> </ul>
	大型海藻類	<ul style="list-style-type: none"> <li>浅海にジャイアント・ケルプなどの大型海藻類を増養殖し、海水中のCO<sub>2</sub>を固定</li> <li>生産物は、エタノールなどのバイオマスエネルギーとして利用可能</li> <li>沿岸域が対象</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>年間1～30トン/ha</li> <li>500万円～2,000万円/トン 〔基盤造成して増養殖した場合〕</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>適用面積が少なく固定量に限度</li> <li>バイオマスエネルギーコストは石油の5～6倍</li> <li>増殖した膨大な海藻の回収方法が課題</li> <li>海藻の利用方法と生態系に対する影響等の評価手法の確立が必要</li> </ul>



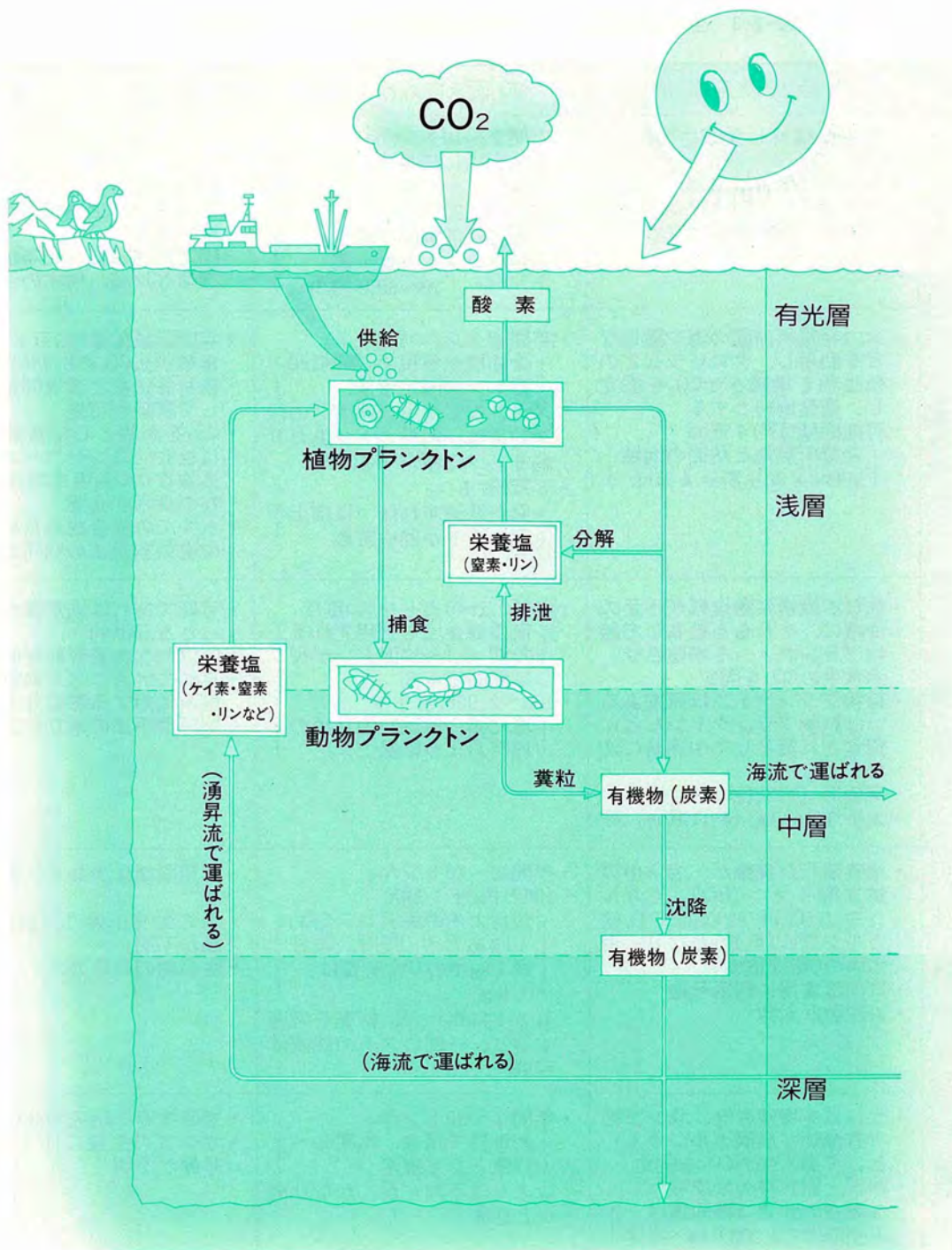


図2-2-7 海洋性植物プランクトンによるCO<sub>2</sub>固定のシナリオ

南極海や太平洋赤道域などのように、鉄が不足している湧昇海域にそれらの栄養塩を散布すると、植物プランクトンが増殖し、光合成により海水中のCO<sub>2</sub>を固定して有機物を合成する。この有機物の一部は、動物プランクトンに捕食されて糞などになり、表層から中深層へと沈降する。この結果、海域の表層のCO<sub>2</sub>が減少し、その分大気から海洋へとCO<sub>2</sub>が溶け込む。また表層には、植物プランクトンや動物プランクトンなどが生産した溶存有機物が存在するが、それらの一部も循環する海水の流れによって中深層へと移行する。中深層水が表層まで上昇するには、100~1000年もかかると考えられるため、有機物として中深層に沈降したCO<sub>2</sub>は、長期間固定されることになる。



表2-2-4 森林タイプ別の純一次生産力と現存量（炭素換算）

森林タイプ	Whittaker & Likens (1975)		Ajtay et al (1979)	
	純一次生産力	現 存 量	純一次生産力	現 存 量
熱 帯 降 雨 林	168億トン	3,400億トン	105億トン	1,931億トン
熱 帯 季 節 林	54億トン	1,200億トン	32億トン	506億トン
温 帯 常 緑 林 (暖 温 帯)	29億トン	800億トン	20億トン	405億トン
温 帯 常 緑 林 (冷 温 帯)	38億トン	950億トン	18億トン	378億トン
亜 寒 帯 ・ 寒 帯 林	43億トン	1,080億トン	32億トン	923億トン
そ の 他 (疎 林 ・ 低 木 林 等)	27億トン	220億トン	35億トン	376億トン
合 計	359億トン	7,650億トン	242億トン	4,519億トン

(純一次生産力は年間あたり)

植物が光合成によってCO<sub>2</sub>を体内に吸収・固定して有機物をつくるときの速度を「純一次生産力」と呼び、また光合成を行う植物体の量を「現存量」と呼んでいる。これらのデータを世界的に調査したものは、数多く報告されているがその幅は大きい。熱帯降雨林の現存量は、人工衛星などの観測によると、年々低下している。



(出典：科学52巻11号(1987年))

図2-2-8 単位面積あたりのバイオマス純生産量

地球上のバイオマスの大半を占める緑色植物は、光合成によってつくられる有機物である。ここで示した「純生産量」とは、光合成される総量から呼吸量を差し引いたものである。面積あたりのバイオマス純生産量は、気象条件に左右される。純生産量の高い地域は、降水量の多い赤道付近に帯状に分布しており、温帯でも降水量の多い日本やヨーロッパも比較的条件に恵まれている。

範囲にあり、現時点での全世界の森林現存量は、約5000億トン程度と考えられる。単位面積あたりの現存量は、森林のタイプにより大きく異なるが、1ヘクタールあたり20～200トン（炭素換算）の範囲にあり、セコイア林・モミ林・ベイマツ林・ツガ林といった針葉樹林では、1ヘクタールあたり150トン以上の大きな現存量を有している。広葉樹林では、熱帯降雨林やカシ林で、1ヘクタールあたり150トン前後の現存量があるが、その他は50～100トン程度となっている。

世界全体の森林の純一次生産力は、概ね、年間250～350億トン（炭素換算）の範囲にある。この量は化石燃料の燃焼によって全世界から1年間に排出される炭素量の5～6倍にあたる。

同様に、気候帯別の年間あたりの純一次生産力は、熱帯林が約100～150億トン、温帯林が約40～80億トン、亜寒帯林・寒帯林が約30～50億トンの範囲にある。単位面積あたりの純一次生産力は、気候、とくに気温と密接に関連しており、熱帯・亜熱帯、暖温帯、冷温帯、亜寒帯の順に小さくなる傾向にある。熱帯・亜熱帯産の早生樹種では、年間1ヘクタールあたりで10トンを越す大きな純一次生産力を持つ樹種が多く存在する（表2-2-4・図2-2-8）。

以上のように、森林は膨大な現存量・純一次生産力を有している。このため、現存する森林を保護するとともに、新たに植林などによって森林面積を増大させることがCO<sub>2</sub>の抑制に大きくつながると考えられる。



## 2-3 CO<sub>2</sub>有効利用技術

### (1) CO<sub>2</sub>の化学的資源化技術

CO<sub>2</sub>は、従来、医薬品や基礎化学原料、尿素肥料、合成樹脂などの原料、そして石油の2次・3回収の圧入剤、飲料原料などとして利用されているが、その利用量は発電所からの排出量と比べると極くわずかである。このため当研究所では、CO<sub>2</sub>を化学的に燃料資源や工業原料に転換して有効利用を図る観点から、技術開発の現状と可能性について調査した。

現在、開発中の化学的資源化利用技術は、光化学法、電気化学法、接触水素化法、高分子合成法、鉱物合成法、高エネルギー分解法などに大別される。いずれもCO<sub>2</sub>を燃料資源や化学原料などの有用物質に転換し有効利用しようとするもので、ほとんどの場合、基礎研究段階にある(表2-3-1)。

このほかにも、種々の化学的資源化利用技術について、基礎研究が進められているが、研究レベルや進捗度の違いなどから現時点での一様な評価は困難である。

しかし代表的な資源化利用技術の中で、技術的観点から、強いて早期の実用化可能な技術を挙げるならば、比較的技術的課題の少ない接触水素化法になる。しかも、この場合、種々の水素化反応の中で、エネルギー損失の少ないメタノール合成が有利になると考えられる。メタノールは安全性、運用性、ハンドリング性に優れており、その合成は、従来の気相合成法よりも所要エネルギーの低減化が期待できる液相合成法が有利になると考えられる。

発電所からのCO<sub>2</sub>を単に炭素資源として資源化しても、利用などによってCO<sub>2</sub>が再放出されては意味をなさない。そこで将来に備えて、たとえばCO<sub>2</sub>のメタノールへの転換・循環利用システムなどを構築しておくことも重要になると考えられる。

なお、CO<sub>2</sub>の接触水素化法による資源化循環利用システムの構築には、経済的なメタノール合成法、水素製造法などの技術開発が不可欠になる。

表2-3-1 CO<sub>2</sub>の化学的資源化技術の概要と課題

資源化技術	技術の概要	主な課題等	実現性
光化学法	光エネルギーを半導体光触媒などの懸濁溶液に照射し、発生する光電流で溶存CO <sub>2</sub> と水分解H <sub>2</sub> とを反応させて、ギ酸、ホルムアルデヒド、メタノール、CO、メタン等に転換する。基礎研究が進められている段階である。	<ul style="list-style-type: none"> <li>エネルギー変換効率の向上</li> <li>H<sub>2</sub>生成速度の向上</li> <li>高性能光触媒等の開発</li> <li>生成物の生成速度、収率、選択性の向上</li> </ul>	光エネルギーを利用する点は魅力的であり、高性能な光触媒等を開発できれば可能性はある。
電気化学法	溶液中の溶存CO <sub>2</sub> を電極触媒でギ酸、シュウ酸、メタノール、メタン、CO等へ電気化学的に還元する。基礎研究が進められている。	<ul style="list-style-type: none"> <li>電気エネルギーが必要</li> <li>高性能電極触媒の開発</li> <li>生成物の生成速度、収率、選択性の向上</li> </ul>	高性能な電極触媒を開発できれば、可能性はある。
接触水素化法	触媒の存在下でCO <sub>2</sub> をH <sub>2</sub> と反応させ、メタノール、炭化水素、ガソリン等へ転換する。COとH <sub>2</sub> との反応が参考になり、多くの基礎研究が進められている。特に、メタノール合成反応は、発電プラントでの炭素資源循環システムとして組み込み易い。	<ul style="list-style-type: none"> <li>H<sub>2</sub>製造方法の低コスト化</li> <li>高性能触媒の開発</li> </ul>	種々の資源化技術の中で、技術的課題の少ない接触水素化法は早期に実現可能な技術になり得る。
高分子合成法	CO <sub>2</sub> をエポキシドやジアミン類と共重合させ、ポリカーボネート、ポリウレタン、ポリ尿素等を合成する。	<ul style="list-style-type: none"> <li>重合用化合物が必要</li> <li>大量のCO<sub>2</sub>処理は難しい</li> <li>合成物の生成速度の向上</li> </ul>	一部、既存技術として確立されているが、大量のCO <sub>2</sub> 処理を対象とすると、実現性は困難と考えられる。
有機合成法	フェノール、アミン、ブタジエン等と反応させて、サリチル酸、カルバミン酸、ラクトン等の有機化合物を合成する。	<ul style="list-style-type: none"> <li>新規市場の開拓が必要</li> <li>一部は既存の実用化技術</li> </ul>	



表2-3-2 飼料1トンの生産にともない排出する温室効果ガス量（炭素換算）

飼料の種類	投入エネルギー 燃料・電気など	耕地に由来する 温室効果ガス	総排出量	代替効果
飼料穀物	0.2トン	6.3トン	6.5トン	1.0トン
クロレラなど微細藻類	1.1トン	—	1.1トン	5.4トン

飼料穀物を1トン生産（固定）すると、機械生産で投入するエネルギーから約0.2トン、肥料などの分解から約6.3トンの温室効果ガスが発生する。一方、クロレラのような微細藻類の生産にともなう温室効果ガスは、培養液の調整などで必要なエネルギーから約1.1トン発生すると推定される。つまり、飼料穀物をクロレラで代替すれば、差引き、温室効果ガス5.4トンの削減効果があることになる。

なお、メタン、一酸化二窒素の単位質量あたりの温室効果はCO<sub>2</sub>の63倍、180倍と見積り試算している。

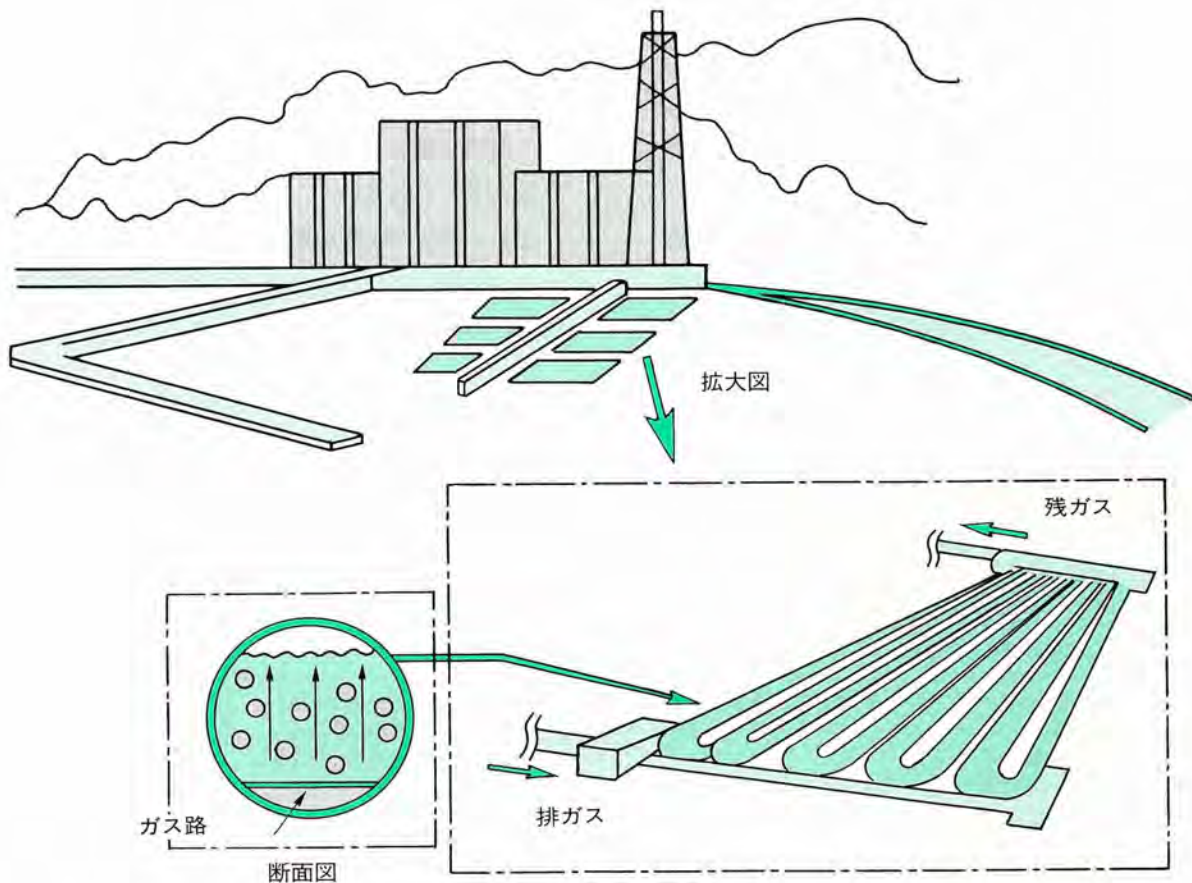


図2-3-1 火力発電所排ガスを利用したクロレラによる飼料生産（CO<sub>2</sub>固定）システム（イメージ図）

クロレラを利用して飼料生産をする場合、太陽光を利用するため広大な面積を必要とする。当研究所で探索したクロレラは火力発電所排ガスでも成育できるため、かりに太陽光の利用効率を3%と仮定した場合、発電所前面の海の5km<sup>2</sup>を利用すると、年間15000トンの飼料が生産できる。これは、60万kW級のLNG火力発電所の排ガス中のCO<sub>2</sub>を約5%固定できることになる。この場合、飼料穀物のクロレラによる代替効果は5.4倍（表2-3-2参照）であるため、温室効果ガスの削減効果は約8万トンになる。



## (2) CO<sub>2</sub>の生物的資源化技術

微細藻類は炭酸同化作用があるため、CO<sub>2</sub>を固定し増殖する。その藻体は、通常、タンパク質の含有量が高く、高品質であるため、現在では、一部が人間の食料や家畜の飼料などとして利用されている。

藻体を利用した場合、利用後は呼吸作用などで比較的短期間に分解され、大部分が再びCO<sub>2</sub>に戻ってしまうため、大気中のCO<sub>2</sub>を固定する意味は大きくない。

しかし当研究所では、畑で栽培する畜産飼料（穀物生産）は、利用する肥料などから強い温室効果をもつ一酸化二窒素（N<sub>2</sub>O）やメタン（CH<sub>4</sub>）を発生させるのに対し、これを微細藻類で代替すると、培養液の調整や攪拌などに必要なエネルギーから間接的に排出する温室効果ガスだけですむことに着目し、今後、世界的にも、人口増加などにより社会的な要請が強くなると予想される飼料穀物の増産を、微細藻類の生産で代替する方策を検討している。

現在、当研究所では、微細藻類のなかでも、とくに健康食品として有名なクロレラを、火力発電所の排ガスを利用して増殖させ、CO<sub>2</sub>を飼料として資源化する研究を進めている（表2-3-2）。

クロレラを成育させるためには、通常、CO<sub>2</sub>の濃度は4%程度が最適の条件であり、火力発電所のようにCO<sub>2</sub>濃

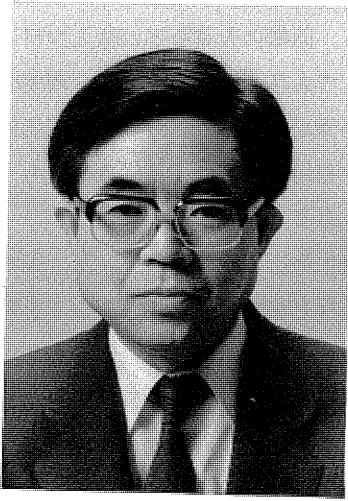
度が15%程度の排ガスをそのまま利用したのでは成育することができない。しかし、当研究所が探索したクロレラは、火力発電所の排ガスで、しかも酸性の条件下でも良好な早さで成育することから、今後、クロレラの大量培養技術の開発を進め、有効な畜産飼料として生産技術の確立を図る予定である（図2-3-1）。

これまで、発電所の排ガスを利用してCO<sub>2</sub>固定のコストを試算した例はないが、粗放的な大型の池でクロレラを飼料として生産すれば、炭素1トンあたり約27万円と試算されている。同様に大豆などの輸入飼料は、12~15万円（1990年）であり、クロレラと比べ割安ではあるが、クロレラは栄養価が高いため競合できる可能性がある。さらに排ガスを利用して生産する場合は、もう少し安価になる可能性もある。

このような微生物を用いた飼料生産は、畑で飼料を生産するために森林を開墾し耕地化することを防ぐなど、将来の農業のあり方を抜本的に変える可能性も含んでいるが、直ちに実行に移せ早急な効果が期待できるようなものではない。しかし、火力発電所の排ガスを資源として有効利用し、しかも温暖化防止に役立てるという視点からは、CO<sub>2</sub>問題を根本的に解決できる方策の一つとして期待されるため、当研究所では今後、長期的な観点から研究をつづけることにしている。

# お わ り に

環境総合推進室長 天野 博正



この3月9日から10日の2日間にわたって、IERE(電気事業研究国際協力機構)主催の「気候変動に関するワークショップ」がオランダのアーネムであったが、地球温暖化にともなう気候変動には未だに不確かなところが多いものの、これには世界の電気事業者にとって、広く共通する課題が多いことを確認して帰ってきた。

ことに、気候変動メカニズムの解明はそうであるし、また、対策技術や技術移転についても協力し合えるところが多々あるにちがいない。

このワークショップを契機に、世界中の電気事業者が温暖化研究にいつそう協力し合うようになれば、研究のダブリや不用な研究を整理でき、エネルギーや資源が節約できるばかりでなく、研究資金とマンパワーの効果的な運用が一段と進むことであろう。

地球温暖化のようなグローバルな問題については、一機関、一企業、そして一国がバラバラに研究しても効果的ではない。グローバルな解決を求めて世界中で広く協力し合い、全人类的行動のもとに、一日も早く、問題の解明と解決を目指すようになればと思う。



## 関連する主な研究報告書等

### ●序 章●

1. 「Intergovernmental Panel on Climate Change, Scientific Assessment of Climate Change」 Report of Working Group<sup>1</sup>  
(1990)

### ●1-1●

1. 「地球環境と調和した21世紀のエネルギーを考える」電中研 資料 (1990)
2. 「火力発電所排ガス中のN<sub>2</sub>Oに関する調査」電中研 研究報告：T89045 (1990)
3. 「人工衛星NOAA/AVHRRデータを用いたプレート法による海域流況の推定」電中研 研究報告：U91029 (1991)

### ●1-2●

1. 「温室効果気体センサIMGのデータ解析評価 —データ解析システムの予備調査—」電中研 調査報告：T91018 (1992)

### ●1-3●

1. 「MECCA プロジェクト・パンフレット」(1991)
2. 「Approaches to the Simulation of Regional Climate Change a Review」Reviews of Geophysics、192~216 (1991)

### ●2-1●

1. 「CO<sub>2</sub>発生量抑制ケース」電力経済研究 No.27 (1990)
2. 「発電プラントのエネルギー収支分析」電中研 研究報告：Y90015 (1991)
3. 「採掘から燃焼までのトータルな温室効果からみた化石燃料の比較」エネルギー経済 Vol.17 (1991)
4. 「市場機構を利用したグローバルなCO<sub>2</sub>抑制方策のシミュレーション解析」電中研 研究報告：Y90301 (1990)
5. 「課徴金によるCO<sub>2</sub>抑制効果と経済的影響の分析」電中研 研究報告：Y91002 (1991)

### ●2-2●

1. 「Sequestering of CO<sub>2</sub> in a Deep-ocean —Fall Velocity and Dissolution Rate of Solid CO in the Ocean—」CRIEPI  
REPORT：EU91003 (1991)
2. 「二酸化炭素回収のための火力発電システムの検討（第1報）—LNG複合発電の場合—」電中研 研究報告：W89016 (1989)
3. 「二酸化炭素回収のための火力発電システムの検討（第2報）—石炭火力発電の場合—」電中研 研究報告：W89044 (1990)
4. 「CO<sub>2</sub>回収型火力発電システムの開発 —CO分離複合発電システムの性能解析—」電中研 研究報告：W90050 (1991)
5. 「酸素富化燃焼によるCO<sub>2</sub>分離・回収コスト改善の可能性の検討」電中研 研究報告：T90067 (1992)
6. 「海洋におけるCO<sub>2</sub>の挙動とその固定方策に関する調査」電中研 研究報告：U90052 (1991)
7. 「海洋性植物プランクトンを用いたCO<sub>2</sub>固定方策 —鉄などの微量栄養塩の散布効果の予備的評価—」電中研 研究報告：  
U91049 (1992)
8. 「植物による炭素固定に関する文献調査 —森林樹木・海産植物・微生物の炭素固定量—」電中研 調査報告：U91054 (1992)

### ●2-3●

1. 「二酸化炭素の資源化利用技術の調査」電中研 調査報告：W90029 (1991)
2. 「微生物によるCO<sub>2</sub>固定 —温室効果ガス放出低減効果—」電中研 研究報告：U90002 (1990)





## 本 部/経済研究所

東京都千代田区大手町1-6-1 ☎(03)3201-6601 ☎100

我孫子研究所 千葉県我孫子市我孫子1646 ☎(0471)82-1181 ☎270-11

赤城試験センター 群馬県勢多郡宮城村苗ヶ島2567 ☎(0272)83-2721 ☎371-02

## 狛江研究所/原子力情報センター/ヒューマンファクター研究センター

東京都狛江市岩戸北2-11-1 ☎(03)3480-2111 ☎201

横須賀研究所 神奈川県横須賀市長坂2-6-1 ☎(0468)56-2121 ☎240-01

塩原試験場 栃木県那須郡塩原町関谷1033 ☎(0287)35-2048 ☎329-28

## 編集後記

電中研レビュー第28号「地球温暖化に挑む」をお届けいたします。

本号では、「巻頭言」を、名古屋大学 水圏科学研究所教授 半田 暢彦様をお願いいたしました。ご多忙中にもかかわらず早くご寄稿いただき、心よりお礼を申し上げます。

地球温暖化問題は、今はまだ、かなり不確かところが多いようです。そのなかで極めて確かな点は、大気中のCO<sub>2</sub>濃度が年々1.5ppm前後で増えつづけていることだけです。産業革命前と比べると、すでに75ppmも増え、今では355ppmになっています。

この増加傾向がいつになったらおさまるのか、今のところ正確には予測できませんし、それこそ欲望に満ちた人間を考えると、化石燃料がなくなるまで大気中のCO<sub>2</sub>の増加はつづくかもしれません。

そのときには、大気中のCO<sub>2</sub>濃度は一体何ppmになっているのでしょうか。

かつて、恐竜が全盛を誇っていた後期白亜期（1億～6700万年前）のころの大気中のCO<sub>2</sub>濃度は約1800ppmもあったようですが、それが徐々に減り、旧人類の祖先が生まれたころには約500ppm程度、そして、現代人の祖先であるホモサピエンスが生まれたころには、300ppm前後にさがっていたようです。

つまり、大気中の低CO<sub>2</sub>化が進んで、はじめて脳腔の大きいホモサピエンスが誕生したことになります。もし、人類の進化と大気中の低CO<sub>2</sub>化とに関係があるとすれば、大気中のCO<sub>2</sub>濃度をせっせと高めているわれわれ人類は、一体なにを企てようとしているのでしょうか。

地球の温暖化やオゾン層の破壊など地球規模の環境問題は、1988年6月、カナダのトロントで開催された「大気変動に関する国際会議」を契機に、世界中に危機感が広がり、国際的なレベルで活発な議論がはじまりました。わが国でも、1990年10月に、「地球温暖化防止行動計画」を策定し、CO<sub>2</sub>排出量の削減目標を世界に宣言しています。

このように、地球の温暖化をめぐる国際的な動きは、ここ数年の間に、問題の深刻さから一気に加速され、本年、1992年6月にはブラジルで開催予定の、いわゆる地球サミットで、地球温暖化防止条約が締結・調印される運びとなっています。

当研究所では、地球規模の環境問題、とくに温暖化研究を最重点の課題の一つとして位置づけ、総力を結集して技術的側面から経済的側面まで幅広く取り組んでいます。本レビューは、地球温暖化の防止に関する国際的な動きに加え、当研究所の取り組みの考え方を明らかにするとともに、その内容などについて総合的に取りまとめたものです。

本冊子が関係諸機関の皆様方の一助となれば幸いです。

**IR**