

## 燃 焼 と 環 境

## Combustion and Environment

大 竹 一 友\*

Kazutomo Ohtake

## 1. はじめに

エネルギー消費と地球規模の環境問題が、1988年6月にトロント・サミットで国際政治の場に取上げられてから、酸性雨、オゾン層破壊、地球温暖化に関する議論が沸騰している。我が国では、この中で、オゾン層破壊と地球温暖化に関わる物質としてのフロンガスの製造と使用を規制する「オゾン層保護法」を平成元年1月1日付けで発効させ、この動きにすばやく対応する姿勢を示している。

そのような時に、本誌の編集委員会から「燃焼と環境」に関する特集を企画するように頼まれた。固定式燃焼装置・内燃機関における環境汚染防除技術、環境汚染防除に関連して触媒燃焼の現状と将来、さらに省エネルギー化により燃料消費量を抑制し、環境浄化を図ろうとする方法、環境汚染ガス成分だけではなく、エアロゾルなどの微粒子の生成と防除に関する最近の研究・技術の動向、そして燃焼がもたらす環境への影響などを、その道の第一線で活躍しておられる方々に解説していただければいかかかと提案し、本号の特集となった。これらの項目の内、炭酸ガス問題を含めて、種々割愛した部分があり、それらを筆者に書くように依頼され、本稿をおこした次第である。

## 2. 我が国のエネルギー使用形態

我が国で1988年に消費された化石燃料は、全部で $1.6 \times 10^{16}$  kJであり、その内訳は、熱量換算で石油が66%、石炭が22%、天然ガスが12%となっている。エネルギー源としては、この他、原子力(全一次エネルギーの11%)、水力及び地熱(同じく5.7%)がある。この内石炭は、年間1億1千7百万t使用しており、その89%を輸入している。これは世界の石炭総輸入量の27%に対応する量であり、我が国は世界第一位の石炭

\* 豊橋技術科学大学教授

〒440 豊橋市天伯町雲雀丘1-1

輸入国である。1987年の統計では、世界の一次エネルギーの構成比率は、石油37.7%、石炭30.6%、天然ガス19.9%、水力・その他6.7%、原子力5.2%となっており、我が国の構成比率に比して、石炭が重要なエネルギー源となっている。このことが、国により、環境への関心度と環境保全技術の成熟度に差が生じる原因の一つとなっており、統一的に環境保全技術や環境への対応を論じにくくしている原因となっている。

次にこれら燃料を燃焼することにより生成される環境汚染物質と環境との関わりについて概説し、私見を述べたい。

## 3. 燃焼により生成する環境汚染物質

燃焼により生成する環境汚染物質をまとめると表1のようなものである。NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>の分類に属する物質は、酸性雨に直接関わるものであり、その生成機構および酸性雨の被害などについては、続いて専門的な解説がなされるのでそちらにゆずり、ここでは導入として燃焼と環境の関わりについて触れたい。

筆者は現在、人口32万人の都市に在住している。ひと月に2~3回東京、大阪、名古屋などの大都市に出張するが、これらの都市に近付くにつれ、上空に黄褐色のパンケーキのようなスモッグが、重苦しく覆いか

表1 燃焼により生成する環境汚染物質

相	物 質	総 称
気体	NO, NO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O SO <sub>2</sub> , SO <sub>3</sub> CH <sub>4</sub> , CnHmOi, PAH CO <sub>2</sub> その他	NO <sub>x</sub> SO <sub>x</sub> HC
液体	高沸点炭化水素微小滴 有害物質を含んだ微小水滴 その他	ミスト・エアロゾル・ サブミクロン粒子
固体	すす, ばいじん 金属酸化物粒子 その他	微粒子・エアロゾル・ サブミクロン粒子

ぶさっているのが見えてくる。都市に入ると、パンケーキの厚み方向に空を仰ぐため、先程のような重苦しさはないが、太陽がどんよりと黄色く見え、喉が痛い。10年以上もきれいな空気を吸っていると、喉が敏感になり、都市によって喉の痛さに違いがあることに気付くようになった。これは都市によって、空中に浮遊する塵あいの種類やガス状物質の成分が異なることに因っていると思う。特に、京都市のように公共交通手段がバスによっている都市では、この違いがはっきりとわかる。このところのディーゼル乗用車の普及により、山間部の道でも同じような痛さを感じるのが良くあり、山の木々がかわいそうな気がする。

近年石油が豊富に出回り、ハイテク化の波に乗って大形化、高速化、高級化の傾向が強くなってきた。これはそれに見合ったエネルギー供給によって成り立つものであり、特に電力によるところが大きい。このところ新発電所建設の申請が頻繁に提出される背景が正にここにあるわけで、近い将来リニアモーターカーなどによる、超高速新幹線網が全国に敷き詰められるようになった時には、現在の何倍の数の発電所があれば良いのかなど、想像がつかない。というのは、これはただ単に超高速新幹線によるエネルギー需要だけではなく、それによりもたらされる生活パターンと、生活意識の変革により、どのようなエネルギー需要形態がやってくるかが想像出来ないからである。

このような時代はすぐにやってくるはずであり、その時のエネルギー供給が、相変わらず化石燃料の燃焼によっているとすれば、それによる環境への影響は計り知れないものがある。このためには燃焼の環境保全技術を十分に成熟させておかなければならないことはいうまでもないが、燃焼によらないエネルギー供給技術の完成がより一層重要なものとなる。

以上のように、燃焼を取り巻く状況には楽観できるものは何一無い。しかし、現実問題として、燃焼に頼らざるを得ないことも又事実であり、そこに一種のジレンマがある。次に表1に示した燃焼に伴い生成する環境汚染物質の中から、炭酸ガス、亜酸化窒素、未燃分、すす・ばいじんなどと環境の関わりについて概説する。

### 3.1 炭酸ガス (CO<sub>2</sub>)

CO<sub>2</sub>はH<sub>2</sub>Oとともに、炭化水素燃料の最終燃焼生成物であり、燃焼技術者はいかに燃料を高効率にこの最終生成物に変換するかの技術開発を行ってきた。しかし、地球規模における自然の循環能力を越えた量の

CO<sub>2</sub>の排出により、CO<sub>2</sub>が大気中に累積してその濃度が上昇し、地球規模の温室効果をひきおこしていることは想像に難くない。

しかし、この件について現在よりどころとしているデータは、1958年の地球観測年活動の一つとして開始された、ハワイ・マウナロア山における大気中の連続CO<sub>2</sub>測定データと、NASAのハンセン博士の米国上院証言資料などである。最近地球規模環境に関する解説が相当目につくが、ほとんどのものが、この2つのデータから脱出していない、といえ叱られるだろうか。しかし、これは事実であり、多くの環境学者が、これ以上に説得力のある自分のデータを持っていないことから来ることは否めない事実である。とは言え、環境中のCO<sub>2</sub>濃度が徐々に上昇し、温室効果によって気温が上昇することは理解できる。

表2に1988年の燃料の使用実績に基づく、燃料別のCO<sub>2</sub>排出量をブロック別に示す。計算に際して、石炭を(CH)<sub>n</sub>、石油を(CH<sub>2</sub>)<sub>n</sub>とし、ガスは天然ガスをメタンで、石油ガスをブタンで代表させた。我が国の寄与は約5%程度である。しかし、2005年の予測では、自由経済圏(OECD)の延びに対して、発展途上国の人口増加と生活レベルの向上、および中央計画経済諸国の大幅な生活レベルの向上に伴うエネルギー消費量の増加から、地球全体として、CO<sub>2</sub>の生産量は、ひかえめに見積もっても1988年の約1.4倍にものぼる。発展途上国の中でも、中国は現在でも米国、ソ連に次ぎ全世界第3位で、約10%のCO<sub>2</sub>を生産しているが、このところの近代化政策により、個人のエネルギー消費量の増加率が大きく、例えば、個人のエネルギー消費レベルがフィリピン並みになると、国全体のエネルギー消費量が現在の我が国のそれとほぼ等しくなり、韓国並みになると、現在のアメリカの使用量とほぼ同じになると試算される。このように、人口の大きな国

表2 1988年のCO<sub>2</sub>生産実績および2005年の生産予測  
単位：100万t-CO<sub>2</sub>

ブロック	石炭	石油	ガス	総CO <sub>2</sub> 生産量
1988年				
OECD諸国	2,980	5,641	1,401	10,022
発展途上国	876	1,921	374	3,171
計画経済諸国	4,372	2,058	1,407	8,197
2005年				
OECD諸国	4,575	5,779	1,948	12,302
発展途上国	1,420	2,810	764	4,994
計画経済諸国	7,369	2,406	2,575	12,350

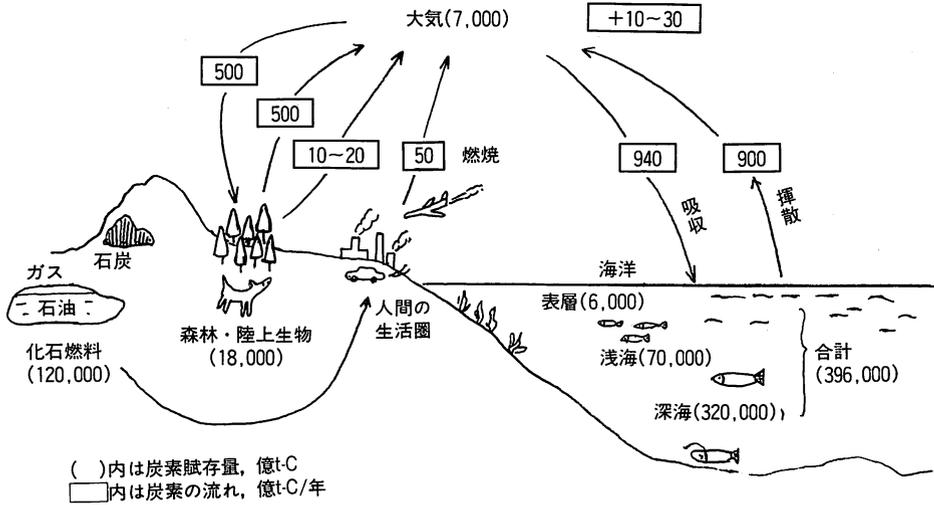


図-1 CO<sub>2</sub>の地球的物質収支

が全体に与える影響は極めて大きく、出来る限り早急に合理的なエネルギーシステムを完成させ、その技術を世界の国々に普及させていくことが大切である。

図-1にCO<sub>2</sub>の地球的バランスを示す。この中で信頼性の点で問題の数値は、海洋における吸収・放散の量である。この図のように本当に海洋がCO<sub>2</sub>のかんりのバッファーになっていれば、問題はさほど深刻ではないが、これが思ったほど大きくないときは、大変である。図-2に示す熱量バランスにおいても、むずかしい

のは雲量の推定であり、仮に気温が上昇すれば、蒸発が進み雲量が増加して、太陽の熱放射が地上に届きにくくなり、気温が自動的に調整されるだろうとも考えられる。

とは言え、CO<sub>2</sub>による環境の悪化を防止することは絶対的に必要であり、その排出量の低減を図る技術として現在のところ、次のようなものが提案されている。  
 ①メタンやアルコールなどのC/H比の小さな燃料か、H<sub>2</sub>のようにC分を全く含まない燃料に転換する。

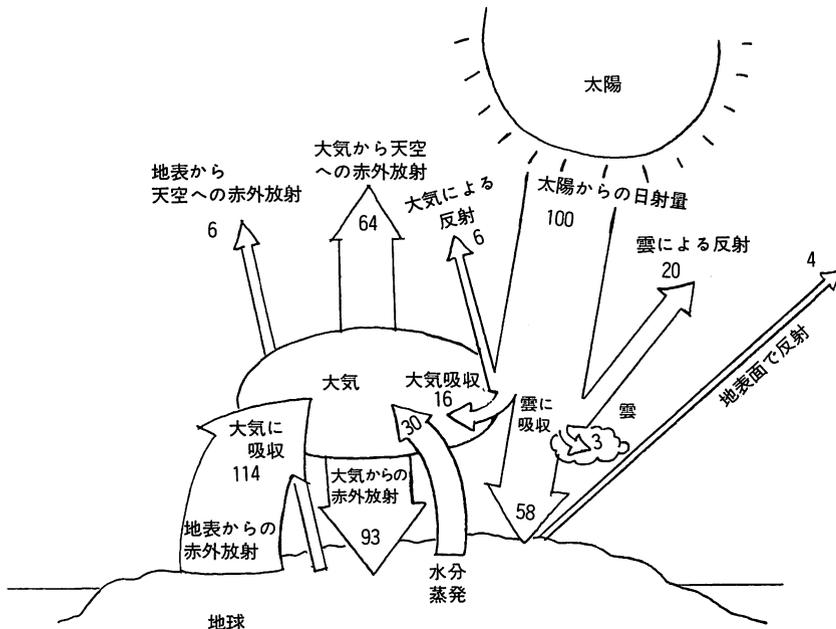


図-2 太陽熱の地球的収支

②省エネルギー化をすすめる、全体のエネルギー消費量を抑制する。

③排気ガス中のCO<sub>2</sub>を固定化し、大気中に放出しない。

④炭化水素燃料の燃焼過程で、C分を固定・抽出する。

⑤燃焼に頼らないエネルギーシステムを実現する。

などである。

これらの中、①、②、⑤などは実現の方向で努力する価値があるが、③はこのプロセスにかかるエネルギーと、固定したものを運搬・保存または投棄するためのエネルギーとそれらによる二次汚染の試算に疑問が残る。すなわち1,000MW級の火力発電所では、毎秒当たり700kgの燃焼ガスが放出され、その22%（質量割合）すなわち154kgのCO<sub>2</sub>が生産される。これは毎時間当たり554t、日量13,300tの生産高となる。ターンドウンを考えて、1/2としても、6,650tであり、その1/10を固定化しても、665tとなる。

日本全体のCO<sub>2</sub>生産高は7.8億tと試算されており、その内の27%が電力、33%が一般産業、23%が運輸、17%が民生となっている。したがって、全CO<sub>2</sub>の20%を固定するとして、これを燃料の使用先から割り出すと、電力と一般産業用の固定燃焼装置で、33%に当たる1.6億tのCO<sub>2</sub>を固定しなければならないことになる。中小規模のそれでは難しいので、大規模なものに頼れば、その数値は倍以上になり、大変難しいこととなる。④の提案は、炭化水素燃料の発熱量を40,000kJ/kg-fuelとすると、炭素がCO<sub>2</sub>になる時の発熱量32,900kJ/kg-Cのバランスから考えたとき、かなりの発熱量を犠牲にすることとなる。また使用しないC分をはるばる海を越えて輸入するエネルギーから考えて、現在、炭素関係の工業原料として、燃焼ですすを製造している部分をこれに充てるのかと想像している。抽出した炭素を原料として、化学工業製品を作るためには、水添を行う必要があることを考えると、余分なエネルギーがかからないような方式と、製品を使用後絶対に焼却しないようなシステムが組めないと、反って多くのエネルギーを使い、そのために環境をより汚染してしまうことに連がるので注意が必要である。

このように、CO<sub>2</sub>に限らずエネルギーの問題は、広い分野に関係したトータルシステムの問題であり、局的な考えだけではうまく行かないようである。

### 3.2 NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, 特にN<sub>2</sub>O

N<sub>2</sub>OはNO, NO<sub>2</sub>などとともNO<sub>x</sub>と総称されているものの中の一つである。NOは直接人体や他の動植物に害を及ぼすものではないが、空中に放出された

表3 温室効果ガスとその効果度

温室効果ガス	記号	温室効果
炭酸ガス	CO <sub>2</sub>	1
メタンガス	CH <sub>4</sub>	20
亜酸化窒素	N <sub>2</sub> O	100
対流圏オゾン	O <sub>3</sub>	2,000
フロン	CFC <sub>s</sub>	10,000
水蒸気	H <sub>2</sub> O	2

後酸化されてNO<sub>2</sub>になると、雨滴に溶解して硝酸となり、おなじく硫酸になるSO<sub>x</sub>とともに、酸性雨として環境に被害を与えたり、光化学スモッグ反応の引き金物質として活躍する。NO<sub>x</sub>およびSO<sub>x</sub>の生成挙動およびこれらの環境に及ぼす影響については本号で改めて解説されるので、ここではN<sub>2</sub>Oについて述べることにする。

N<sub>2</sub>Oは高濃度では顔面にけいれんを起こさせる笑気ガスとして知られているが、低濃度では無害である。直接的には、表3に示すようにCO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>にならんで地球温暖化の原因物質の一つであり、間接的にはオゾン層破壊反応の引き金物質でもある。現在大気中に0.3ppm程度存在しており、その主たる発生源は有機肥料や動物の排せつ物が分解することによるとされており、年間0.5~0.9ppbの濃度増加がある。しかし、これが燃焼によるものかどうかについての確証はないが、N<sub>2</sub>Oは石油よりは石炭燃焼装置からの排出量が多いため、石炭燃焼の盛んな米国で熱心に研究されている。特に流動層燃焼では、燃焼温度が850℃程度と低いため、微粉炭燃焼に比して生成濃度が高い。さらに加圧流動層になると、圧力の効果で反応速度が大きくなるため、N<sub>2</sub>Oの生成量も大きくなる可能性が高く、これらに関する信頼度の高い知見の集積をしておく必要がある。

### 3.3 未燃分・すす

燃料の不完全燃焼により生ずる未燃分には、ガス状の炭化水素と、すすや石炭のフライアッシュ中に存在する未燃の固定炭素のような固体状のものがある。ガス状のものは、地球温暖化に寄与し、また光化学スモッグをもたらす反応物質として環境に悪影響を及ぼす。固体状のものでは特にすすに付着している多環芳香族の中のニトロアレン系の物質に発癌性のものが含まれるなど、未燃分・すすの問題を解決することの意義は大きい。特に、すすの問題は燃焼学において残された最後の研究課題として、世界中で精力的に研究

されている。このことは、国際燃焼シンポジウムの論文集や、燃焼分野の国際誌・国内学会論文集などに数多く発表がなされていることから、伺い知ることができる。しかし、すすの生成機構については、現在でも定説はなく、種々の説が併存している状況にある。

一方、実用面では燃焼技術の改良により、未燃分・すすの発生は相当改善されたが、大形プラントではコールドスタート時や燃焼負荷増加時にまだまだ改善すべき余地を残しているし、小形のものでは、大幅な改善がなされるべきである。またディーゼルエンジンからの排出は、すでに社会問題ともなっており、遅すぎた観もあるが、新規制によってかなりの清浄化が期待されている。この件については、後に詳しい解説がなされるのでそちらにゆずる。

固体の未燃分の内、石炭燃焼の場合には、燃焼ガス中および回収灰中に炭化水素などの未燃分が残存しないようにするためには、燃焼条件を十分に吟味する必要がある。特にコールドスタート時の黒煙の発生は、

環境問題もさることながら、必要以上に石炭が汚い燃料であるとの印象をあたえるため、これの発生防止にかなりの技術的配慮がなされている。定常運転時には、回収したフライアッシュ中に5%以上の未燃固定炭素分があると、粒子の黒度が上昇し、フライアッシュの商品価値がなくなってしまう。このため、エネルギーの有効利用からのみならず、灰分の有効利用の観点からも燃焼効率の確保は重要な開発課題である。

現在、図-3に示すように、我が国のボイラメーカーの技術では、NOx150ppm以下、灰中未燃固定炭素5%以下を実現している。

炭種が変化した場合、灰中未燃分がどのように変化し、それをカバーするのに、どのような粒径にする必要があるかを、正しく把握しておくことが重要である。蔵田ら<sup>2),3)</sup>は、この問題に工学的立場から取り組み、燃料比(固定炭素分/揮発分)、粒径、酸素分圧、燃焼温度などの関数として、微粉炭の燃焼履歴を数式化し、種々の炭種、燃焼条件に対して、回収灰中の未燃分について、実験炉で得られた実験値と理論値の照合を行い、かなりの確度で灰中未燃分の評価が可能であることを示している。図-4は、炭種を燃料比としてとらえ、粒径をパラメータとして、フライアッシュ中の未燃分を評価しており、例えば未燃分のレベルを5%とした場合、炭種に対してどのような粒径にしなければならないかを与えている。

3.4 微粒子

燃焼による微粒子の生成は、重質油の残渣、石炭の灰分などが燃焼に伴い微粒化して生ずるものと、比較的軽質油でもディーゼルエンジン内の燃焼のように、高温・高圧で、かつ燃料過濃な領域が存在する燃焼条件下で生成する炭素状のものなどに分類できる。この内第3番目のものは、別に解説されるので、ここでは触れないこととする。

もともと化石燃料は、地殻の中から採掘されたものであり、地殻中に存在する全ゆる元素を含んでいる。石油の場合は精製工程で除去されるので、重質油の燃焼を除けば問題はないが、石炭の場合には、脱灰CWMなどのように、灰分を取り除く前処理工程を経ているものを除けば、原料そのものを燃焼することにつながり、灰分の微粒子を環境中に排出する問題が出てくる。原炭灰分の中には、比較的低い温度で揮発する成分があり、それが燃焼後ガス温度が低下してくると、微粒子に選択的に凝縮するため、微粒子において特別な成分が原炭中の灰分における濃度よりも高くなる濃

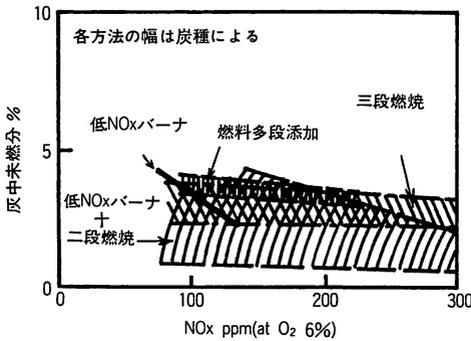


図-3 微粉炭燃焼ボイラーにおけるNO<sub>x</sub>と灰中未燃分の関係<sup>1)</sup>

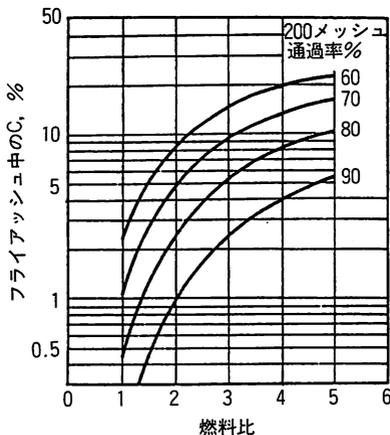


図-4 燃料比と灰中未燃分の関係<sup>2),3)</sup>

縮現象が生ずる。これは特にサブミクロン粒子に顕著であり、この粒径領域が電気集塵器の捕集能力が低下するところであるため、注意が必要である。現在の技術では、この領域の微粒子を捕集するには、バグフィルターによるしかなく、300°C以上の温度で動作する高温フィルターの開発が行われている。

1982年春にメキシコ・ユカタン半島のエルチション火山の爆発で、噴出ガスから生成した硫酸塩の微粒子が地球を覆い、世界の直達日射量を約20%減らし各地に冷害や異常気象をもたらしたことは、記憶に新しい。時間とともにこれら微粒子も分解・沈降してその影響は薄らいだが、先述の大都市を覆っている黄褐色のパンケーキ状の構成成分として、微粒子は大きな役割を演じている。燃焼や都市生活で舞い上がる微粒子の量は、火山爆発のそれに比べれば比較にならないものかも知れないが、それがサブミクロンレベルのものになると、なかなか沈降せずに大気中に累積し、直達日射量を低減し、冷害や植物の枯渇を招いたりすることになりかねない。そこまで短時間の直接的変化でなくとも、地上に達する太陽光のスペクトルの内、短波長側の強度が低下するために、動植物の生態や種類に変化が生じ、長い間に地球上の生態サイクルが変わってしまうかも知れない。このようなことから、燃焼により排出される微粒子の問題に対し、もっと真剣にとりくむべきであると訴えたい。

#### 4. おわりに

以上、本特集号の導入として、他の解説と重複しない範囲で燃焼と環境について、現状と私見を述べた。燃料の使用量は、毎年2～3%の着実な伸びを示しており、その排気ガスや微粒子により、環境が蝕まれている。このことは、都市に生活している人々より、筆者のように田園都市に住んでいる者の方が、より直接

的に感じている。筆者は分光学の上からCO<sub>2</sub>が赤外活性な物質であることは、この道に入る以前から知っていた。また、燃焼工学の立場から、燃料を完全燃焼させて、CO<sub>2</sub>とH<sub>2</sub>Oにするために、いろいろなお手伝いもしてきた。あるときこのように大量のCO<sub>2</sub>を放出すると、きつとっぺがえしが来るのでは、と感じたこともあったが、このような形で環境汚染物質の一つとしてクローズアップして来るとは、想像すらしなかった。ともかく、現在のエネルギーの使用量は異常であり、これから先、さらに増加すらせよ減少することはないはずである。これが燃焼によって支えられるのであれば、エネルギーシステムを抜本的に組み替えて、温度レベルを考えたカスケードシステムを構築したり、地域コージェネレーションシステムの導入を図るなどして、エネルギー利用率を大幅に改善することにより、燃料の使用量を減少する方向で努力しなければならぬ。CO<sub>2</sub>の例は、無害と思っていたものでも、自然の循環を乱すほどの量になれば、極めて危険な物質に成り得ることを教えてくれた。これから先当分の間、燃焼に頼ったエネルギー生産が続くと思われるが、次の環境汚染物質を模索し、今から種々の対応を開発しておくことが必要である。

#### 参 考 文 献

- 1) K. Ohtake, Research and Development of Coal Combustion Technology in Japan and Its Technology Transfer, Coal Combustion, Hemisphere Publishing Corp., (1988), 65~84
- 2) 加藤幸三, 白羽陸宏, 蔵田親利, 藤井健一, 微粉炭燃焼における灰中未燃分の低減に関する研究(第1報, 理論計算による影響因子の検討), 日本機械学会論文集, 49巻, 437号, B編(1983), 233~243
- 3) 同上著者, 同上題目(第2報, 実験結果と理論計算の比較), 日本機械学会論文集, 49巻, 437号, B編(1983), 244~254