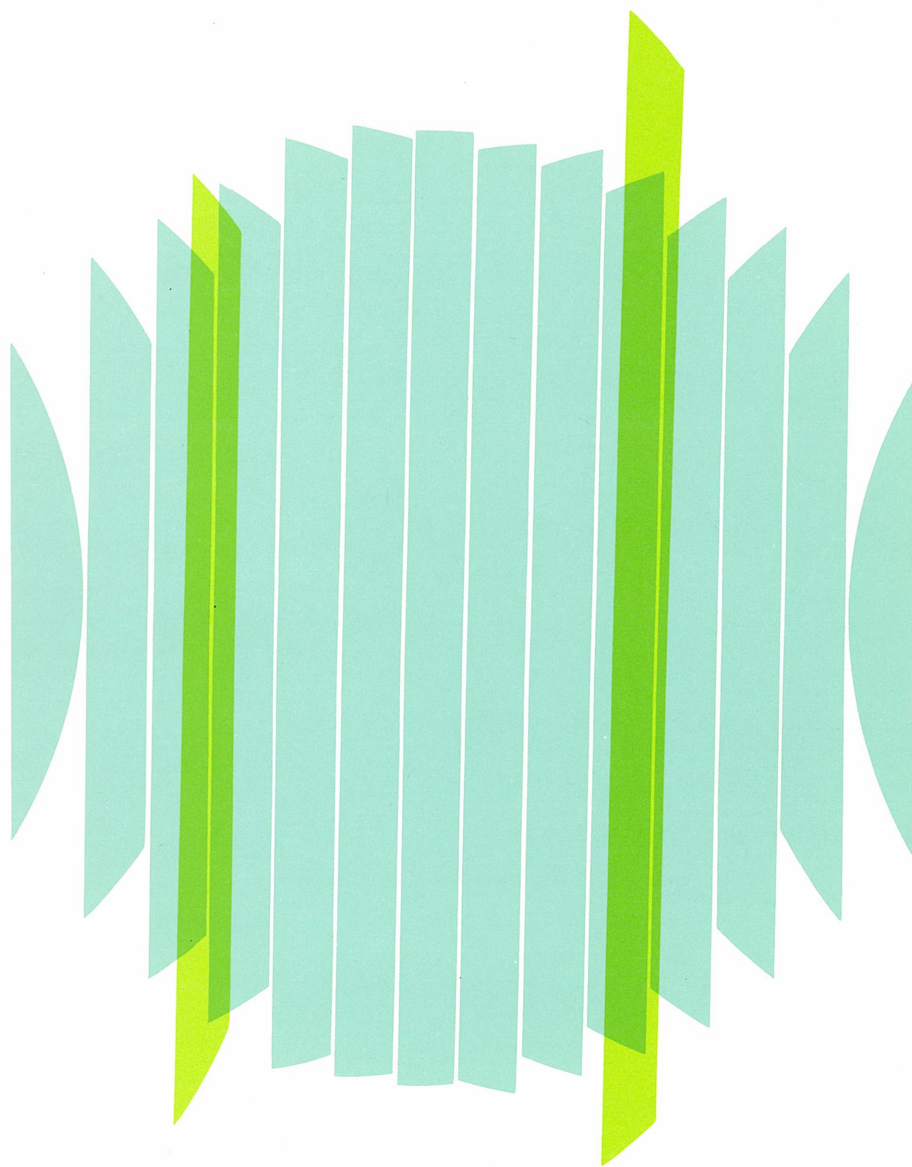


季報 エネルギー総合工学

Vol. 20 No. 4 1998. 1.



財団法人 エネルギー総合工学研究所
THE INSTITUTE OF APPLIED ENERGY

目 次

【巻頭言】	エネルギー・セキュリティ 関西電力(株) 取締役副社長 鷲見 禎彦… 1
【座談会】	これからの廃棄物発電を考える 京都大学 名誉教授 地球環境システム工学研究所 所長 平岡 正勝 資源エネルギー庁 公益事業部 電力技術課 開発振興室長 細川 政弘 新エネルギー・産業技術総合開発機構 水素・アルコール・バイオマス技術開発室長 新井 晴美 東京都 清掃局 工場管理部 発電計画担当副参事 永島 公明 司会 (財)エネルギー総合工学研究所 エネルギー技術情報センター長 小川 紀一郎… 2
【特別講演】	平成10年度予算要求における資源エネルギー政策 資源エネルギー庁 長官官房総務課 計画需給班長 高倉 秀和…20
【寄稿】	生物による二酸化炭素の固定と バイオマス・エネルギー (財)電力中央研究所 我孫子研究所 生物科学部 部長 齋木 博…34
【調査研究報告】	地球温暖化問題とその対応についての概要 プロジェクト試験研究部 部長 吉江 照一…47
【調査研究報告】	火力発電ボイラから 沸騰水型原子炉の熱水力解析へ 副主席研究員 楠野 貞夫…58
【海外出張報告】	WE-NET関連技術調査に欧州を訪れて 主管研究員 大野 哲雄…72
【訪問記】	電源開発(株) 奥清津第二発電所 訪問記 IAE女性研究員取材チーム…82
【研究所のうごき】	……………88
【編集後記】	……………90

巻頭言

エネルギー・セキュリティ

関西電力株式会社

取締役副社長 鷲見 禎彦



「エネルギー」という言葉は、ギリシャ語のenergeiaに由来し、「物体内部に蓄えられた、仕事をする能力」を意味する。「仕事の内容」は、すでに紀元1世紀からあるが、運動のエネルギーは17世紀はじめのガリレイの考察であり、そこから、位置のエネルギーを含む力学的エネルギーへ発展した。産業革命を経て、熱エネルギーをも包含した、総合的な概念としての「エネルギー」が確立したのは19世紀後半であり、意外と歴史は浅い。

「エネルギー」という抽象的な概念が確立されたのは、神との間でも契約するという、ロジックを重視するキリスト教の思想を背景に、西洋の近代科学が誕生してきた系譜上にある。19世紀後半と言え、日本では明治の開国前後であり、ペリーの乗ってきた黒船だけでなく、その手土産であった小型蒸気機関車や有線電信機により、西洋文明の力をまざまざと見せつけられ、開国を余儀なくされた時代である。

その後日本は、エネルギー・セキュリティをはじめとする国家安全保障のために、西洋の科学技術を積極的に取り入れ、近代化に邁進した。少なくとも、第2次大戦まではそうであった。しかし戦後の経済偏重と「平和ボケ」のなかで、2度にわたる石油危機があったにもかかわらず、エネルギー・セキュリティに対する日本人の認識は後退していった。その結果、資源小国日本のほうが、資源大国米国と比べて認識が低いのが現状である。

エネルギー・セキュリティは、政治、経済、外交、技術等を総合した国家安全保障の一環であり、国民各層の理解なしには推進しがたい。そのためには、フランスのように学校教育等を通じて、国民が子供のころからエネルギー問題について考えることが、もっとも望ましい。とくに原子力のような、技術によって生み出される「技術エネルギー」が社会に受容されるためには、教育、情報公開など、地味で息の長い努力が何よりも重要である。

これからの廃棄物発電を考える

平岡 正勝 (京都大学 名誉教授, 地球環境システム工学研究所 所長)
立命館大学 エコ・テクノロジー研究センター長

細川 政弘 (通商産業省 資源エネルギー庁 公益事業部)
電力技術課 開発振興室長

新井 晴美 (新エネルギー・産業技術総合開発機構)
水素・アルコール・バイオマス技術開発室長

永島 公明 (東京都 清掃局 工場管理部 発電計画担当副参事)

司会

小川紀一郎 ((財)エネルギー総合工学研究所)
エネルギー技術情報センター長



は じ め に

新エネルギーの中心柱——廃棄物発電

石炭火力3/4の開発ポテンシャル

司会 廃棄物発電は、平成6年度に取りまとめられた「新エネルギー導入大綱」の中心的

な新エネルギーとして、2000年度に200万kW、2010年に400万kWの導入目標が掲げられており、また、平成9年6月施行の「新エネルギー法」においてもその基本線が受け継がれ、国を挙げての取り組みが法的に定められました。

そこできょうは、廃棄物発電が、なぜ新エネルギーの中心柱の一つに取り上げられるに

至ったかの背景からお話します。

細川 まず、わが国のエネルギー政策を簡単に紹介いたします。ご案内のとおり、昨年12月にCOP3（地球温暖化防止京都会議）が開催されました。わが国は、2008年から2012年を目標期限とし、二酸化炭素（CO₂）などの温暖化ガス排出量を1990年比で6%削減することを基本合意しましたが、この地球温暖化問題にいかに対応していくかがエネルギー政策上の一つの大きな課題になっております。

もう一つは、現在、石油価格が低位安定していたこともあり、またCOP3の蔭に隠れがちでしたが、実はエネルギー・セキュリティの確保がもう一つの重要なエネルギー政策であります。

この二つの課題に対処するエネルギー供給面での政策は、一つが原子力開発の推進、もう一つが新エネルギーの加速的な開発と導入でして、廃棄物発電は、この新エネルギーのなかで最も実現性の高いものの一つに位置づけられております。

廃棄物発電がなによえ新エネルギーかと申しますと、一つはいま焼却施設から利用されずに捨てられている熱エネルギーの有効利用ですから、その分、化石燃料の消費節減、つまりCO₂の排出削減につながり、地球温暖化問題への対応に寄与するからです。また、ごみは国内から生ずる資源であり、無駄なく活用すれば、エネルギー・セキュリティにプラスすることからも新エネルギーといえます。

新エネルギーには、ほかにも太陽光発電、風力発電などがありますが、いままでの実績、今後の普及・拡大の確実性を考えますと、私自身は、新エネルギーのなかで、廃棄物発電が最も有望とみています。



細川 政弘 氏

（資源エネルギー庁 公益事業部）
電力技術課 開発振興室長

わが国の廃棄物発電量は、現在、一般廃棄物、産業廃棄物を合わせて約80万kWあります。しかし、その開発ポテンシャルは、資源エネルギー庁の試算によりますと、一般廃棄物で300万kW、産業廃棄物で1,200万kW、合計1,500万kWと出されています。

この数字は、現在、合計約2,000万kWであるわが国の石炭火力の実に4分の3に相当する量であり、そこに廃棄物発電が新エネルギーの一つとして大きな期待が寄せられ、政策的にも重視されるゆえんがあります。

廃棄物処理・発電の歴史

伝染病予防のごみ焼却から

公害防止の産業廃棄物処理を経て

循環型社会構築の時代へ

司会 続いて、廃棄物処理に関する今日までの経緯や狙いについてお話を伺いたいと思います。

平岡 日本の廃棄物処理の歴史的背景を簡単

にお話しますと、戦後の廃棄物処理の行政は、3つの段階に分けられます。

第1期には、昭和29年に「清掃法」の制定があり、都市ごみは市町村の責任による処理・処分が決められ、近代的なシステムづくりが発足しました。厚生省による「廃棄物処理施設整備計画」の第1次5ヵ年計画が始まったのが昭和38年で、いまは第8次の3年目になります。

その第1次5ヵ年計画のとき、公衆衛生の見地から、都市ごみは原則として焼却、残渣の埋め立て処分が決められました。

といいますのは、病原細菌は70℃以上に加熱しますとみな死滅しますので、公衆衛生的に伝染病予防の見地から焼却したのです。当時は、都市ごみ・し尿というのは、放置しますと腐敗して伝染病の原因になりました。

その頃の焼却炉は、大都市では24時間連続運転の全連続炉でしたが、中小都市では準連続炉という16時間稼働の焼却炉、小さな市町村ではバッチ炉という8時間運転の炉でして、各自治体の実情に合った焼却炉が建設されました。

第2期の昭和45年には、「公害国会」といわれた当時の国会で公害に関する14法案が一気に可決されております。そのとき、清掃法が改正され、現在の「廃棄物の処理及び清掃に関する法律」、略称「廃棄物処理法」に変わりました。また、「廃棄物」という言葉が初めて法律に入って、廃棄物処理は、一般廃棄物は従来の清掃法の流れを汲んで市町村の責任、産業廃棄物は事業者の責任となりました。

この法律は、平成9年6月、産業廃棄物の不法投棄防止を織り込んだ改正がなされています。

また、これに先立ち、平成3年に「リサイクル法」がつくられ、事業者、消費者、国・自治体がそれぞれの立場で資源の再生利用を促進するように定められました。さらに、平成9年4月には、「容器包装リサイクル法」が施行になり、消費者に分別排出、市町村に容器類の分別収集、メーカーに再商品化を義務付けました。平成3年頃から現在までを廃棄物処理の第3期、循環型社会構築の時代とみえています。

廃棄物発電の草分け——

昭和40年竣工の大阪市西淀工場

平岡 続いて廃棄物発電の歴史に移りますと、紙は繊維状物質で発熱量は4,600kcal/kg、プラスチックは6,000から1万kcal/kgぐらいあります。また、ごみが自燃するのは、1,200から1,300kcal/kgでして、外部から熱量の供給なしに燃焼します。

焼却面から見てごみ質が急上昇したのは、日本経済の成長著しかった昭和42年頃からで、国民生活の向上に伴い紙やプラスチックの使用量が増え、都市ごみはヨーロッパ並みのごみ質となりました。

日本での廃棄物発電所建設の草分けは、昭和37年に着工、40年6月に竣工した大阪市の西淀工場で、国産の焼却炉が8億円程度だった当時、一気に22億円かけてスイスのデロル社のストーカ炉を導入しました。

1日200トンの焼却炉が2基、発電出力2,700kWのタービン2基の設備で、ヨーロッパにはすでにあったのですが、これが日本の廃棄物発電の歴史の始まりなのです。

焼却炉におけるダイオキシン問題など

廃プラスチックなどの

焼却過程で発生するダイオキシン

司会 最近特に話題になっていますダイオキシン問題についてお願いします。

平岡 日本では、先ほどお話ししたような経緯があって、廃棄物処理施設の建設は急速に進み、現在、施設数で約1,900、ごみの焼却率は約75%に達しています。

ところがごみのなかには、廃プラスチックなどの量が昭和42年頃の2%から現在の7~8%まで増え、発熱量が上った反面、焼却に伴う有害物質が発生してきました。その最初が塩化水素、ついで乾電池からの水銀、さらにNOxなどがありますが、その最たるものがダイオキシンなのです。

ダイオキシンが最初に問題になりましたのはヨーロッパで、1977年、都市ごみ焼却炉の飛灰からダイオキシンが出たという報告がありました。日本では、6年後れて1983年の11月、愛媛大学の立川涼教授らのグループが、松山市の焼却炉の飛灰残渣からダイオキシン類が発見されたと発表しております。

ダイオキシンは、非意図的汚染物質といわれるように、ごみの中にあるわけではなく、塩素を含む物質の焼却過程で生成されるもののなのです。

ダイオキシンの生成は、酸素不足で燃焼温度が300℃から500℃の低い状態になったとき、飛灰中にある重金属が触媒になって、炭酸ガス中の炭化水素と塩化水素が反応してリング状のダイオキシンができるというのが現

在の定説で、われわれは「デノボ合成 (De Novo)」と呼んでおります。

問題化した当時、厚生省は緊急実態調査を行い、発生メカニズムと対策について5ヵ年にわたる研究をやりました。そのとき、私は、委員長を依頼されたのが切っ掛けで、以後今日まで、ダイオキシンに関っている次第です。

ダイオキシン対策とは矛盾せず

両立可能な廃棄物発電

平岡 ダイオキシン生成の抑制には、2つの策があります。まずはごみを完全燃焼させることで、燃焼過程で局部的未燃分が多量に発生する300℃から500℃という温度域での滞留時間をできるだけ短くし、高温にして完全燃焼させます。炉を冷さないための連続運転も必要です。第2が、集塵機などによる排ガス処理の強化になります。

特に燃焼室の燃焼管理で重要なのは、3 Tといわれている温度 (Temperature)、滞留時間 (Time) および混合 (Turbulence) の制御です。これは、1990年に作成した第1次ガイドラインに反映されています。

このダイオキシン対策と燃焼制御の技術は、両方ともごみ発電の燃焼技術の改善と一体関係にあるわけです。

そのところに、マスコミにも誤解があるようです。確かに焼却がなければ出ませんが、ごみの焼却がイコールでダイオキシンの発生ではないのです。ごみの焼却処理は、もともと衛生・公害対策から導入したのであって、何もエネルギー対策のために始めたわけではないのです。

日本がこれだけ豊かになりますと、都市ごみの発熱量は3,000kcal/kgに近づいてお



平岡 正勝氏

（京都大学 名誉教授
地球環境システム工学研究所 所長
立命館大学 エコ・テクノロジー研究センター長）

り、先ほど細川室長からお話がありましたように、膨大な潜在的エネルギー資源になっています。ですから、これを有効利用する廃棄物発電が、ごみの焼却時に発生するダイオキシンの低減と矛盾せず可能であることを理解いただくのが大切、と考えています。

推奨される

ごみ収集の広域化、焼却炉の連続運転

司会 ダイオキシン対策として平成9年12月1日から廃棄物処理法施行令、大気汚染防止法施行令改正による法規制が始まりました。その背景について補足をお願いします。

平岡 その点では、第1次の旧ガイドラインが1990年の施行、第2次の新ガイドラインが平成9年1月成立、それから今回の法令が平成9年12月からの施行ですね。これらのベースにある厚生省の考え方は、ごみ収集の広域化を進め、焼却炉の間欠運転をやめて、ダイオキシン対策の一つである全連続運転へ可能な限り移行するよう推奨したことです。

全連続運転は発電面からも非常によく、ごみの収集・焼却・発電をうまくマッチさせて

ほしいと思っています。

新基準値のクリアに取り組む全国自治体

司会 つぎに、廃棄物発電施設を運営されている、現場でのダイオキシン問題の悩みとありますが、取り組みについて紹介願います。

永島 平岡先生から西淀工場の紹介がありましたが、私どももその4年後の昭和44年に石神井工場（現在：練馬）と世田谷工場で本格的な発電に入りました。今年、新江東工場で5万kWの国内最大機ができますと、東京都23区内の清掃工場の発電出力は合計20万kWを超えることになります。

ダイオキシンについては、いま平岡先生が話されましたとおり、ごみ焼却工場周辺地域の住民から不安を訴えられ、社会問題化しております。

ごみ処理の団体に「余熱利用連絡協」，正式には「ごみ焼却余熱有効利用促進市町村等連絡協議会」というのがあり，構成は約100団体で，全国北から南までの都市が加入しています。そこでのダイオキシン対処状況，特に緊急対処についての調査結果を紹介します。

全国の焼却施設総数は1,854施設，そのうち1,150施設について報告があり，新聞紙上には昨年4月に載りました。そのなかで，排煙中のダイオキシン濃度が基準値の80ナノ（10億分の1）を超えた施設が72カ所，0.1ナノ以下の施設が32カ所と報道されております。

その後5月に開催された定期協議会のパネルディスカッションの中では，80ナノをクリアして安堵している自治体や，環境に関心の高い地域では0.1ナノにまで下げるべきであると要求されてるところがあり，実態は地域により様々です。

東京都は、廃棄物処理法施行令および大気汚染防止法施行令の発効に対する恒久対策として、平成9年9月に、建て替えも含めて、施設整備計画の素案を作成しました。各自治体も、現在、計画の作成あるいは検討に鋭意努力されております。

そこでの共通の課題は、財政上の問題と、5年以内に建て替えあるいは新設等を実施しなければならないという期限の問題です。また、その実施工期が長年月かかりますと、ごみ量が逼迫しているところのごみ処理に支障を来しますので、計画立案に頭を痛めているという報告がありました。

最終処分場の延命化、残渣の適正処理も ごみ焼却における今後の課題

永島 ごみを焼却しますと、灰や残渣が発生します。

灰には、焼却炉の底部から排出される焼却灰と後端の集塵機から排出される飛灰の2種類があります。それぞれ適正に処理がなされ、最終的には埋め立て処分場に処分されます。特に飛灰は溶融とかセメント固化など、法に定められた処理をしています。

最終処分場のスペースの不足が、現在、大きな問題になっています。平成5年度の調査によりますと、最終処分場は全国で2,321カ所、総面積が5,100ヘクタール、総容量は4億3,700万 m^3 、残余容量が1億4,900万 m^3 です。残余スペースも年々減少しており、特に山間、平地等における処分場が非常に制約を受けて逼迫した状態になっております。

最終処分場の延命化とともに、残渣の適正処理が今後の課題になります。その処理方法は、地下汚染、土壌汚染、環境汚染を引き起



永島 公明氏

(東京都 清掃局 工場管理部)
(発電計画担当副参事)

こさないことであり、さらに焼却残渣にはダイオキシンを含みますので、溶融等によりダイオキシンを確実に分解することが必要です。

そのほか、残渣の有効利用には、建設資材や金属回収等のリサイクル推進も求められています。

後ほど話題になると思いますが、最終処分場の延命化、ダイオキシン対策、焼却残渣の有効利用の推進など、今後の解決すべき課題に大きく寄与すると思われるガス化溶融技術に、強い期待を寄せております。

廃棄物発電技術の現状と問題点

廃棄物発電が低効率の理由――

小ロットのごみ処理と売電発想の薄さ

司会 わが国の廃棄物処理は、焼却率が73%と世界の中でも高く、焼却に回されるごみ量も世界で1、2位ですが、廃棄物発電の総発電量は米国の2割、ドイツの半分ぐらいしか

ありません。発生したごみの量に比べて発電量が少ない、すなわち発電効率が低いことが指摘されています。この点については、いかがでしょうか。

細川 いまお話がありましたとおり、発電効率の問題に関しては、日本は残念ながら発展途上国の段階と見ています。

廃棄物発電の平均効率は、アメリカは22%、ドイツは18%という報告もありますが、わが国では、10%未満のものが8割ぐらい。最高効率のものでも20%を少々超える程度で、欧米諸国に比べて大きな開きがあるわけです。

その理由について、かつてよく言われたのがアメリカ、ドイツと日本とのごみ質の差です。しかし、現在ではもうごみ質の差はかなり小さくなっております。むしろ歴史的、社会的な背景によるかと思えます。

一般廃棄物の処理は、わが国の社会制度として、市町村単位で行うのが原則でした。そういう体制の下でごみ焼却場が造られ、さらにその中に少しずつ発電施設が設けられてきたわけですが、基本的には小規模なロットによる処理がいまままでの流れのベースにあり、廃棄物発電のマインドが必ずしも昔からあったわけではありません。

仮に発電しても、自家消費を賄えば十分という考え方が支配的でして、高い効率で発電して売電事業を展開していくという発想が希薄な環境にあったのが、いちばん大きな理由と考えております。

したがって、通産省では、発電効率の向上が技術開発のなかの最大のターゲットと考えています。現状10%そこそこの効率を、何とか30%まで高めようということで、新しい燃焼炉やスーパーヒータ（後掲の図4参照）の

開発を含めた実証試験用施設を平成9年10月に完成し、試験運転を開始しております。

廃棄物発電の伸展は

高温蒸気使用による高効率化から

平岡 少々補足いたしますと、発電効率が低いのは、歴史的に見て、焼却炉はもともと発電目的に設けられたのではないことです。

また、ごみに含まれるプラスチック量が急増し、燃焼時にスーパーヒータを腐食させる塩化水素濃度は500から800ppmになりました。焼却炉は、もともとごみの適正処理が目的ですので、効率向上を追求してスーパーヒータが腐蝕しやすい蒸気温度まで上げるまでもないわけです。

私も委員でした厚生省の熱利用の委員会で10年も前から議論してきましたが、当時は、安全面から蒸気温度は270℃が上限でした。

ところが、先きほどの西淀工場は、最初から一気にヨーロッパ並みの350℃に上げました。効率は14%ぐらい出ましたが、スーパーヒータがしばしば破損し、取り替えを要しました。

ですから、塩化水素が800ppmぐらいあっても270℃ですと一応問題なく、それ以上は問題ありということで、廃棄物発電のスーパーヒータの温度をそこに決めたのです。そうしますと、効率は10%程度にとどまるわけです。

しかし、近年は、技術革新もあり材質も改良されて、300℃を超える工場が現れました。埼玉の東部清掃組合と帯広市清掃工場の施設です。現在、スーパーヒータの温度がいちばん高いのは400℃ぐらいまできており、いま細川室長がおっしゃった、国が方針とする効率30%の目標は、いい数字だと思います。

このようなわけで、日本の場合、ごみの適正処理と発電効率向上の両方を満足させなければなりません。ヨーロッパのごみは、生活のあり方の違いがあり、日本に比べますと塩ビの割合が低いのです。したがって、スーパーヒータは最初から400℃から450℃ぐらいあるのです。

ですから、廃棄物発電の技術開発では、都市エネルギーとして、ダイオキシン抑制とあわせ高効率を目指すのが、いちばんのポイントになります。

永島 ごみ焼却から発電になかなか進まなかったもう一つの理由は、電気事業法の規制により、以前は発電した電力が自家消費に限られていたこともありますね。

司会 結果的には、発電をより伸ばす、高効率化するという意欲といいますか、インセンティブが働かなかったのでしょうか。

効率30%を目指す

ストーカ方式のパイロットプラント

司会 ところで、先ほど細川室長もちょっと

触れられましたが、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）では、通産省の補助を受け「高効率廃棄物発電技術開発」というプロジェクトをやってみえますが、その模様を紹介いただけますか。

新井 廃棄物発電の効率に最も関係ある蒸気温度からお話します。図1がその推移を示すもので、平成2年頃までは最高でも300℃でありました。図中の蒸気温度が低い範囲では、発電効率は高いところで15%、大半はそれを下回っていたと思います。それを一気に30%まで上げるのを開発目標としております。発電効率30%ということは、投入したごみ、エネルギーの3割が電力化することで、同じごみ量で比べると従来の2～3倍の電力が出てくることになり、資源の回収面で非常に大きな意味があります。

開発中の燃焼炉には2方式があります。一つが移動する火格子（ストーカ）の上にごみを供給し、火格子に下から空気を吹込みながら燃焼させるストーカ方式です（図2）。

もう一つが流動する600℃～800℃の流動材

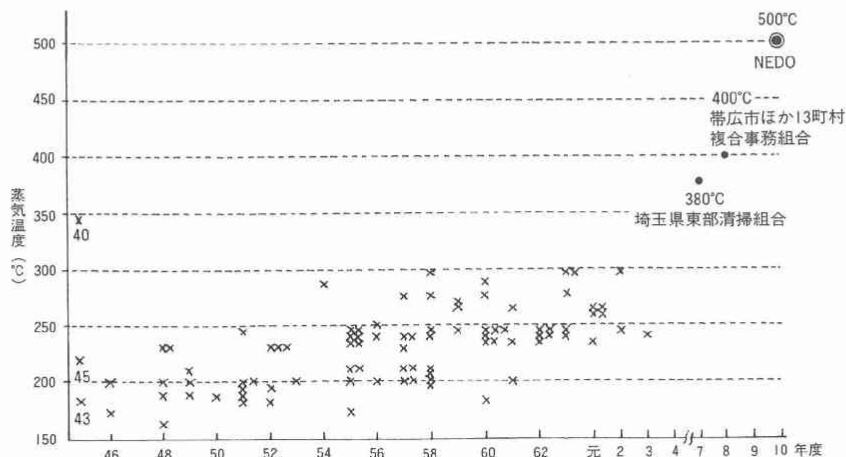


図1 発電設備の蒸気温度の推移

とごみをむらなく接触させることにより燃焼させる流動床方式です（図3）。

神奈川県津久井郡で建設中のパイロットプラントは、図4に示すストーカ方式の燃焼炉です。このプラントでストーカ炉を選んだ理由は、ごみを何らの処理もせずに燃やせることで、いままで地方自治体での採用実績が最も多い炉だからです。ボイラで発生させた蒸気をさらに高温の過熱蒸気にするためのスーパーヒータを取り替えれば、高い効率が容易に得られることで、波及効果が大きいと見込まれたことによります。

一方、流動床炉は、ストーカほど実績はありませんが、ごみの種類によっては非常に有効な燃焼方式であり、ごみ固化燃料(RDF)にも今後使用される見込みですので、新型式のものの基礎的な試験を実施しております。

流動床炉による発電システムは、図5のとおりです。燃焼室で800℃ぐらいにした流動材を循環させて、その中にごみを入れると一瞬に燃えます。燃焼室を上昇する時間を4秒ぐらいとっているため、ダイオキシンはこの過程で分解されてしまいます。

燃焼の際、塩素分はガス中に存在し、一方加熱された流動材で熱交換されるスーパーヒータの材料は塩素ガスによる腐食を受けないメリットがあるのが流動床炉です。

話を戻しまして、津久井郡に建設中のパイロットプラントは、ごみ処理量が50トン/日、24時間の全連続炉になっています。

蒸気条件は、スーパーヒータに技術開発の成果を入れた耐腐食性材料を採用し、この種のプラントの条件としては500℃、100気圧という最高水準のものになっています。

50トン/日程度の小規模プラントですと、

放散する熱量も多く、目標効率の30%は出ませんが、1,000トン/日程度の規模になりますと、30%以上の発電効率が見込めます。

開発スケジュールは、プラントの火入れ式を平成9年10月22日に終え、調整運転のあと実証試験に入る予定でして、期間は平成11年度までを考えております。

効率35%を狙うRDF発電の実証試験

司会 もう一つの高効率化プロジェクトに、

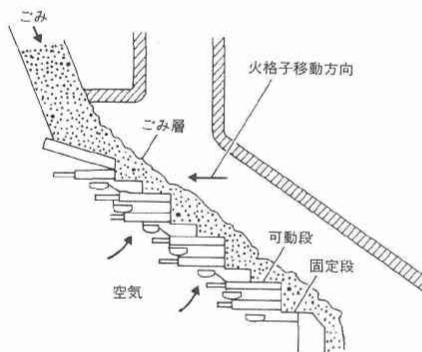


図2 焼却炉の基本構造（その1 ストーカ炉）

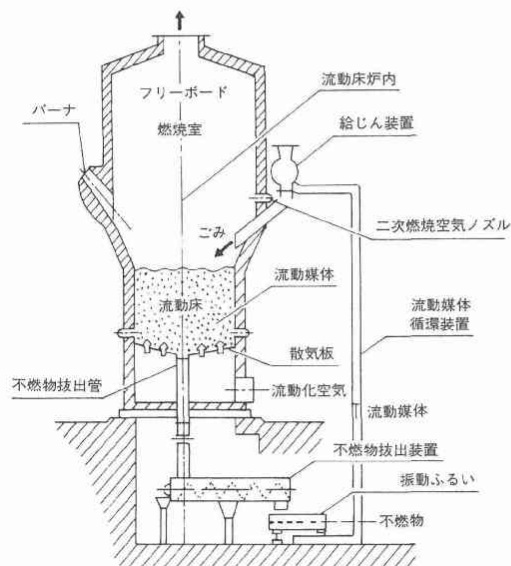


図3 焼却炉の基本構造（その2 流動床炉）

電源開発が通産省の補助を受け、九州の若松総合事務所で行っているRDF研究開発があります。その模様も簡単に紹介いたしたいと思います。

細川 RDFは、比較的小規模なごみ収集を広域化し、集めたごみを固形化して輸送・貯蔵に容易な形状にすることにより、遠隔地で

あっても、規模の大きい発電設備を備えた焼却プラントでの処理を目指して始まったものです（図6）。

RDF利用のニーズは社会的に高まっております、環境が整えられつつありますが、残念ながら、RDF発電は事業とまでは行っており、その直前の段階というところでは

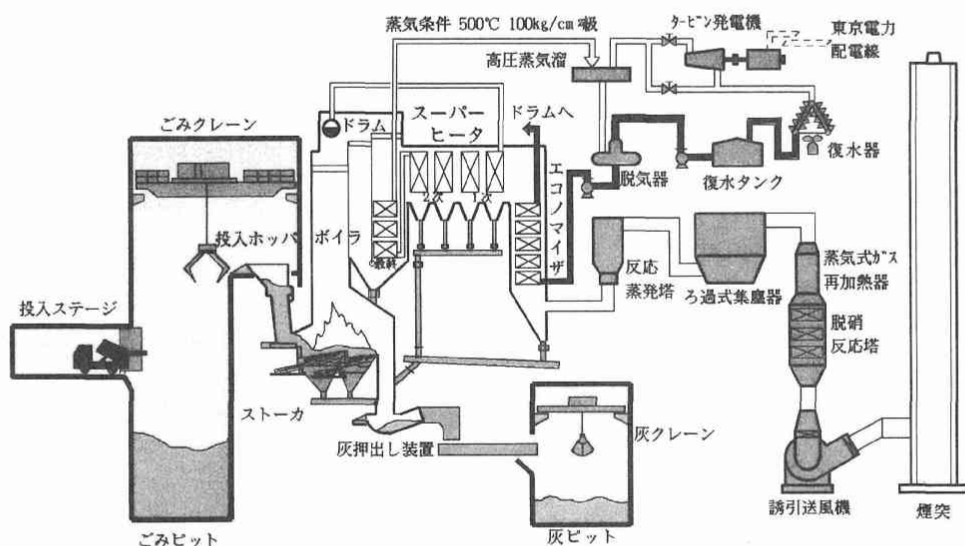


図4 高効率廃棄物発電プロジェクトのパイロット・プラント・システム（ストーカ炉）

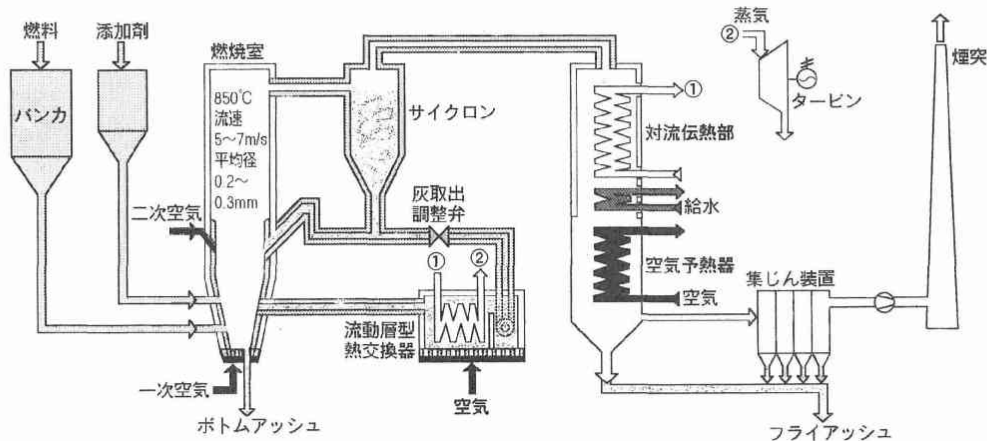


図5 高効率廃棄物発電システム（外部循環型流動床炉）



新井 晴美氏

(新エネルギー・産業技術総合開発機構
水素・アルコール・バイオマス技術開発室長)

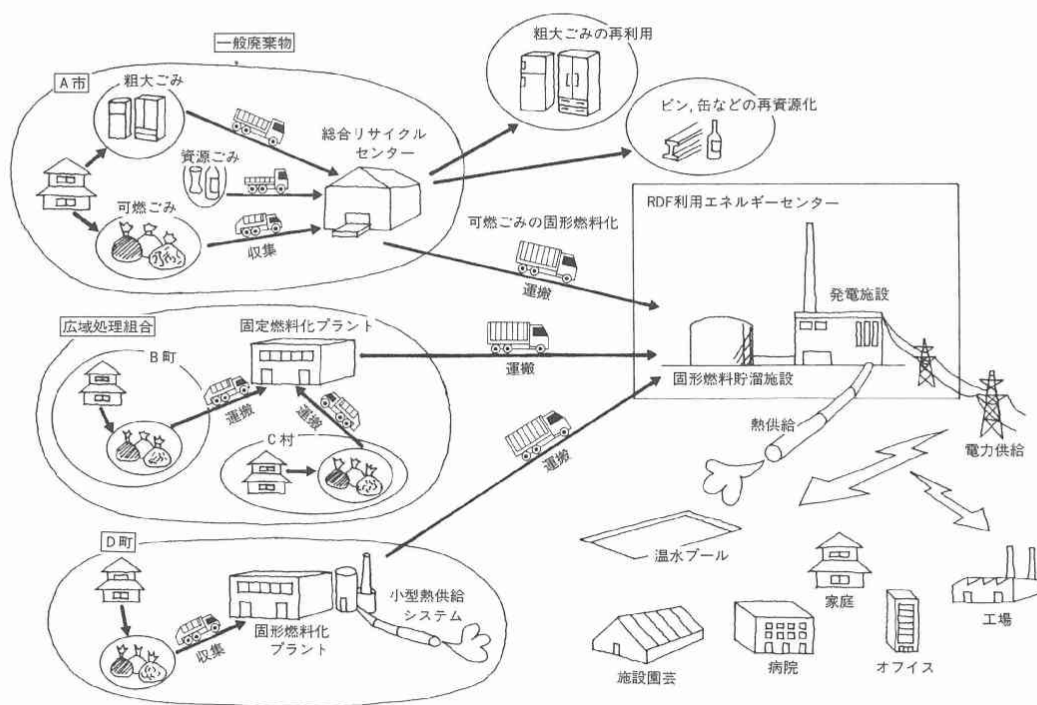
RDF利用の研究開発は、高効率達成が重要な目標でして、若松にRDF燃焼炉のパイロット・プラントを建設し終え、いま試験運転に入ったところです(図7)。

目標効率は5ポイントほど高く35%です。いろいろな形のごみや、RDFに応じた特徴ある技術開発が必要になってきています。

司会 効率向上には蒸気条件を上げる従来型の高効率化、今日は話が出ていませんが、ガスタービンとの組み合わせによるスーパーごみ発電、あるいは、小規模廃棄物処理施設の集約化を狙うRDF発電と、それぞれの技術開発が並行して進められていますが、実用機がまだ動いてないRDF発電実証プラントの成果が待たれますね。

平岡 私は若松の実証試験の評価委員会で委員長をやっており、特に期待しています。

RDF発電は、ダイオキシン対象のガイドラインにおいてごみ集収の広域化手段として推奨されており、最初の実用化の検討は、N



出所：21世紀に向けた発電技術懇談会・廃棄物発電部会報告書

図6 RDF利用発電広域事業の構造図

EDOの委託を受け、三重県企業庁が行っているRDF発電プロジェクトです。私はこれも委員長として2年間フィージビリティスタディをやりました。

RDFの製造は、予め金属分を分離し、ごみの腐敗を防ぐため石灰を練り込み、可燃分だけを固化します。発熱量は5,000kcal/kgぐらいで、非常に安定した燃焼をします。金属分が除去されていますので、焼却灰中の重金属が通常燃焼よりは少なく、三重県のプロジェクトで驚いたのはダイオキシンが非常に少なかったことです。

RDF発電は、小さな自治体のごみを集めてやるだけでなく、東京都のような大都市で、900トン、1,000トンのごみをRDF化し流動床高効率発電に結び付けますと、若松のプロジェクトが35%の効率ですから、より高効率

のプロセスができると思いますが。

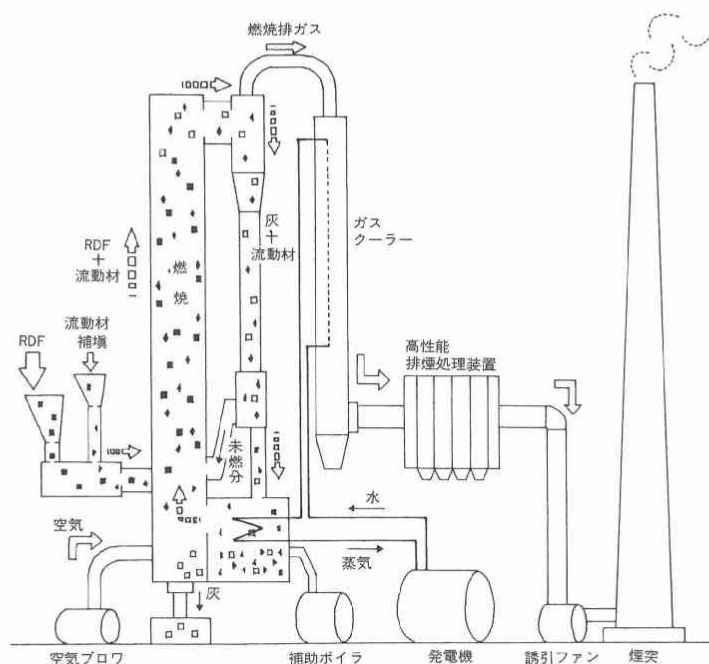
廃棄物発電の普及・促進策

望まれる補助政策の拡大

司会 廃棄物発電の普及・促進について政策制度、体制面等で現在抱える問題、その対応策についてお話したいのですが。

平岡 先ず第一の問題は、発電設備を設けて発電しても、これまで厚生省の補助金は自家消費分しか対象にならず、余剰電力の売電部分は補助が出なかったことです。

売電するため、発電効率を30～35%へ上げて出力を増そうとしますと、相応の発電設備の迫設が必要ですから、自家発以上の発電に



出所：21世紀に向けた発電技術懇談会・廃棄物発電部会報告書

図7 RDF燃焼炉パイロット・プラントの概念図

対する何らかの補助制度がないと進まないことになり、通産省の対応が期待されてたわけです。現状ですと、資金を要する大容量の発電設備の設置は、東京都などの大都市の場合にはできるでしょうが、小都市ではなかなか困難と思います。

第2点は、補助金制度の拡大が困難であっても、電力会社による電力買入れ価格の値上げを考慮してもらいたいですね。

司会 売電に関しては、いまは通産省から補助が出るようになったわけですね。つぎに、自治体の実情を説明いただけますか。

永島 自家消費分に対しては厚生省の補助金だけで、今までは通産省の補助金は受けていません。今後受けていく必要がありますが、設備の出力が5,000kW未満で10%、5,000kW以上で5%と金額が少ないのが現状です。ただ、額が少なくても、自治体はその制度を積極的に活用すべきだと思います。その他自治省には、広い意味で起債関係の優遇策の検討をお願いする動きが進んでいるようです。

いま平岡先生が言われましたように、今後、通産省からのなお一層のバックアップがほしいところです。

司会 NEDOの補助について紹介いただけますか。

新井 NEDOは、廃棄物発電の普及・促進関係に「新エネルギー導入促進部」という部があり、新エネルギー関係でできた技術開発を地方自治体の方々に採用してもらうため、普及・導入の支援策をやっています。そのなかに、現在、「環境調和型エネルギーコミュニティ形成促進事業」略称「エネコミ」という事業の一環として、高効率廃棄物発電の導入・促進のための補助事業を行っています。

これは、事業化の調査と発電施設設置の補助でして、これまで平成8年度に、先ほど話のありました、三重県企業庁のRDF発電設備の設置補助を行っています。

また、群馬県高浜発電所のスーパーごみ発電も共同研究として支援しており、事業化調査では、平成5年から8年度の間に24件の補助を行っています。

このような支援策により、廃棄物発電施設の導入・促進が一層なされるよう願っております。

売電事業の収支向上を目指して

司会 廃棄物発電は、広域化が必要であり、大都市が適しているとお話もありました。東京都で実際に廃棄物発電施設を建設、運転されていく上で、資金面などいろいろ苦労されていると思いますが、その辺についてお聞かせ願えませんか。

永島 財政上の問題は、大きな問題の一つです。発電設備を備えた清掃工場の建設には数百億円かかり、また建設後の維持管理にも多額の経費がかかります。財政事情が逼迫している今日、発電による売電収入を少しでも増やし、経費節減に努力しております。

高効率化には、当然ながら技術開発が必要です。現在、東京都は、蒸気温度450℃で効率25%を目指し、足立清掃工場で実験をしています。ボイラ材料も経済性がありかつ長寿命なものの開発を行っています。

一方では、売電電力を増加させるため、所内使用電力を平準化し抑制するとともに、電力会社の要求に沿った安定した電力供給ができるよう努力しております。

これらの結果、売電収入も、平成7年度の

18億5,000万円が、平成8年度には23億3,000万円に伸びております。

名答を見出したい電気料金値下げと

新エネ売電優遇のジレンマ

司会 廃棄物発電の推進には、政策上の助成、優遇策が重要と思います。先ほども話に出ましたが、通産省としての今後の方向についてご紹介したいのですが。

細川 先ほど出ました技術開発や、建設費の補助金5%、10%の話のほかにも、幾つかソフト的な施策もあります。

今後の方向については、新エネ開発は、COP3で決った温室効果ガス排出削減目標の達成のためにも国としての大きな役割を持ち、国際的な義務として推進していく必要があります。そのような環境対策面から、あるいはエネルギー・セキュリティの観点からも、廃棄物発電に対する国の支援は、これまで以上に一層拡充していきたいと、私自身は思っております。しかし、国の財政も、東京都同様に大変厳しい事情にありますが、そういったなかでも、支援拡充の方向でできる限り頑張っていきたいと考えています。

先ほど、電力会社の買い取り価格が廃棄物発電の普及・拡大に非常に重要だというお話がありました。しかし、いま電力料金を巡る環境は、国際水準に近づけるべく値下げが発表された折でもあり、廃棄物発電を含め、コスト高といわれる新エネ発電の取り扱いが議論されているところです。

新エネ推進の観点からは電力会社の積極的な対応も望まれますが、同時に、電気料金の国際水準化という命題があり、廃棄物発電に対するこのジレンマのなかで、なんとか名答を出し

たいものと、知恵を絞っているところです。

体力を備えるまでは

助成が望まれる廃棄物発電

司会 新エネルギーからの発電電力については、電力会社に取り組み義務を課すことを検討中との新聞記事を見たことがあります。電力会社の立場からは非常に難しい課題ですが、国家的に考えますと、新エネルギー展開の観点からは強い追い風だと思いますが。

細川 そうですね。いろいろの方策が議論されているのは事実でして、そのなかからベストを選出しなければなりません。

もう一つの視点は、廃棄物処分は、基本的には公共公益の問題ですが、発電して売電するのは、いわば一つの事業であります。採算性ある事業として普及させていくには、中長期的に見れば、マーケット・メカニズムのなかでビジネスとして成立つまでの体力に育て上げていくという、将来方向を見据えた大きな議論が必要です。どこかの支援だとか、下駄を履いて買ってくれとか、これは過渡期にはもちろん必要かもしれませんが。

ごみ処分という公益の問題と発電事業というビジネスの問題、この二つを整理して考えていくことが将来的には重要と、個人的には思います。

司会 以前私が調査に行きましたアメリカ、イギリスの政策制度では、特にイギリスですが、細川室長のお考えに近いと思います。廃棄物発電の助成に売電単価の補助を行っていますが、2000年には補助をやめ、事業として自立できるよう誘導しています。

それまでの期間は、電力会社が一般の卸売り電力より高く買い取る仕組みですが、その

動床は入っていましたが、新日鉄の溶融炉は構造指針に含まれず、適用外でした。構造指針に該当しないものが補助金を受けるためには、20トン/日のプラントを建てて実用可能というデータの提出が求められていたのです。

新日鉄の溶融炉以外にもいろいろのものが考案され、構造指針外の認定を目指した試験が行なわれましたが、そのなかでいま生き残っているのは新日鉄の溶融炉だけです。これは、茨城市のガス化溶融型焼却炉150トン/日の3基で、新日鉄は15年に及ぶ委託運転によりノウハウの蓄積があり、ダイオキシン対策を十分に取入れた新しい型を、今回再び茨城につくったわけです。

新日鉄の溶融炉は、ただ溶かしてしまいうすから、シーメンス社のように、ガスを熱分解したあとマテリアル・リサイクルはしていません。溶融のところで鉄分とアルミが分離できますから、限界はあるが一種のマテリアル・リサイクルはなされています。

ガス化溶融といいましても、シーメンス社のように外熱ロータリキルンで熱分解する方法、流動床でガス化溶融する方法、新日鉄方式のように一気にガス化溶融してスラグのところで金属を分離する方法など、いろいろな方法があります。それぞれが競争する結果、いい技術開発が生まれるものと期待しています。

ですけど、やはり新しい技術、ダイオキシン対策、エネルギー回収、マテリアル・リサイクルもできるこのガス化溶融技術には、通産省、NEDOの支援がほしいですね。地方自治体ではなかなか独自のリスクを負った技術開発はできませんから。

先ほどのイギリスの例にもありましたが、日本も第2次大戦後の経済復興期には、最初は国の支援があり、民間ベースに乗ったら手を退きました。例えば、四日市の日本合成ゴムケースも、日本航空のケースもそうです。

ですから、環境産業も立ち上がって、ある程度体力がつくところまでは国の支援があっ

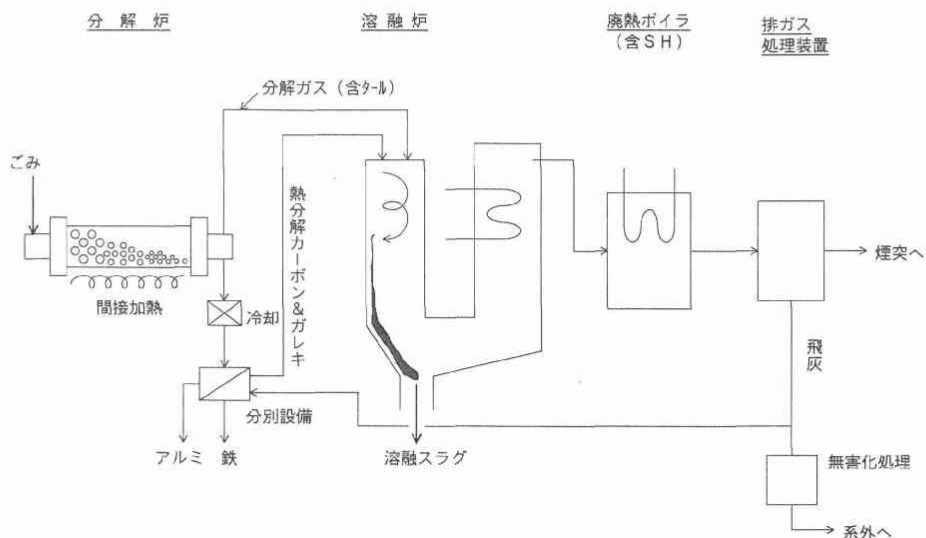


図8 廃棄物ガス化溶融方式の一例

てもいいのではないのでしょうか。私は、イギリスのやり方は賢明だと思いますね。

ま と め

次世代技術、ガス化溶融技術の

これからの進め方、広め方

司会 今後の次世代、あるいはガス化溶融技術の進め方に関して、最後になりましたがご意見がありましたらお願いします。

細川 次世代技術について、いま平岡先生から、ガス化溶融とともにRDFも大変期待できるという話を伺い、実は大変うれしく思っているところです。(笑い)

先ほど来の売電ビジネスの話に関連して一点だけ申しますと、実は電気事業法が改正されて新電気事業法になり、特定供給、自己託送という新しい道が開かれました。これを簡単にいいますと、自己発電した者が、売電ではなく電力会社の送電線を借用して、特定の需要家に電気を販売したり、自己の他工場などに送電できるようにした法改正です。

これは、廃棄物発電事業へのこれからの参入者に開かれた、新しい大きな道でして、ぜひご利用いただければと思っております。

本題に戻って、このガス化溶融の技術開発は、これから調査研究を進めていくものであり、これに携わる方々には、成果が適切に一般社会に受容されるような方向で検討願いたいと思います。

また、通産省としましても、この研究が大きな成果を挙げて、今後、社会に役立つよう

努力していきたいと思っています。

司会 住民説明にご苦勞の多い自治体にとって、ガス化溶融技術は、廃棄物発電の普及を加速する新兵器になりますでしょうか。

永島 従来型の廃棄物発電からガス化溶融発電へのストレートな話は、住民の方はすぐには理解ができないように思います。従来の発電からガス化溶融発電に移行する過程を理解してもらうのも、今後の私どもの務めかと思えます。

一方、自治体の責任としてのごみ処理と、廃棄物発電の位置づけを明確に理解してもらうことが重要です。熱の有効利用としての廃棄物発電が不明瞭ななかでは、なかなか進展できません。清掃工場は、単に、ごみを焼却するだけでなく、そこでの発電などによる熱の有効利用が、工場運転経費の節減をはじめとして、エネルギー確保の問題や地球環境に貢献していることが理解されれば、廃棄物発電はますます発展していくと思えます。

司会 いまの話を聞かれて、通産省の立場で更に何かありましたらお願いします。

細川 特に補足することはありませんが、廃棄物発電を普及・拡大させたい私どもの立場からは、もうあの手この手を使って発展させたいと思っています。

司会 きょうは、それぞれのお立場から、本当にすばらしいご意見をお聞かせいただきました。「あの手この手で、いまは普及することが第一の目標」という細川室長のお言葉をもって、本日の座談会を締めくくらせていただきたいと思います。

どうもありがとうございました。

〔特別講演〕

平成10年度予算要求における 資源エネルギー政策*

高 倉 秀 和 (通商産業省 資源エネルギー庁
長官官房総務課 計画需給班長)



予算要求における基本的考え方と背景

本日は、平成10年度の資源エネルギー関係予算要求の概要について話させていただきます。予算といいますと、これは政府の行政ツールのなかで最も重要なものの1つであり、かつそれだけの作業と重みを伴うものであることから、予算を語ることが、すなわち、私ども資源エネルギー庁の政策そのものの紹介にはかならない、と考えております。

まず、今回の予算要求にあたっての、私ども通産省資源エネルギー庁の基本的な考え方や背景からお話します。

行政改革の結論一

産業政策と切り離せない

資源エネルギー政策

一昨年10月、第2次橋本内閣の発足時から、総理は「6大改革」を標榜され、その柱の一つとして「行政改革」を挙げられました。

昨年9月に行政効率化の観点から現在の中

央省庁を1府12省庁に再編するという「中間報告」が出され、その基本ラインを踏襲した「最終報告」が昨年11月に取りまとめられました。

「行政改革」の理念と目標を一言でいいますと、「肥大化し、硬直化した国家行政組織を改革し、重要な国家機能を有効に遂行するにふさわしい、簡素にして効率的で透明な政府を実現すること」であり、さらに、「自由かつ公正な国際社会の形成と展開を目指して、国際社会の一員としての主体的役割を積極的に果たしうる組織にするということ」であります。

「最終報告」では、私どもの通商産業省は、「経済産業省」として生まれ変わることであり、その任務は「民間経済の活性化、対外経済関係の円滑な発展を中核とした経済・産業の発展、原子力を含むエネルギーの安定的・効率的供給の確保など」となっております。これは、21世紀という新たな時代を見据えた中央省庁の役割を踏まえ、従来から通商産業省が持つ任務を発展的に見直したものであると考えられますが、いずれにしても、

*本稿は、昨年9月26日、当所の第150回月例研究会においてなされたご講演をテープ起こしたものに、その後のCOP3、行政改革最終報告、平成10年度政府予算案決定に伴う修正を加筆いただいたものです。

資源エネルギー政策は、産業政策と切り離せない密接な関係があるという考えが反映されたものと理解しております。

予算のベースと背景をなす

「財政構造改革」

「6大改革」の2つ目の柱が「財政構造改革」です。予算に直接関係するのですが、皆様からは少し距離がある話かもしれません。わが国の財政状況は、現在、赤字国債が累積し、主要先進国の中で最悪の危機的状況に陥っていると言われております。例えば、毎年、国債の利子だけで何兆円も予算に計上しなくてはならない状況にあり、明らかに不健全であると考えられております。

そのため、21世紀に向けてさらに効率的で信頼できる行政を確立し、安心して豊かな福祉社会、健全で活力ある経済の実現という明るい展望を切り開くためには、経済構造の改革を進めつつ財政構造を改革し、財政の再建を図ることが喫緊の課題であることから、「財政構造改革会議」が発足しました。この財政改革法案が、昨年9月26日、閣議決定され、国会審議を経て成立しております。

その内容を一言で申し上げますと、国の借金を早く返せる体質に改めるということです。具体的には、2003年までを財政健全化の集中改革期間とし、財政赤字の対GNP比3%、赤字国債発行ゼロとする改革を実現しようということです。

この財政構造改革では、エネルギー関係予算についてもいろいろなことが決められました。これは、エネルギー政策を遂行する上で大変に厳しく、かつ真剣に受け止め、取り組まなければならない内容であります。

まず、第一に、エネルギー対策費を前年度枠以下に抑える、つまり、減額していくということです。これは、私どもに常日頃から与えられた「予算の効率的使用」という命題を、今一度、明確にかつ鋭く突きつけられたものと受け止めております。

次に、石油税を主な財源とする特別会計については、徴集した税金を一旦一般会計に入れた後、あらためて特別会計に繰り入れています。これについては、歳出全般の見直しを行い、繰入額の圧縮を行うことになりました。表現を変えますと、石特会計の予算額の圧縮を意味しているわけです。

さらに、電源開発促進税を財源とする電源開発促進対策特別会計は、電力需要量によりその総額が決まるものであり、歳出全般の厳しい見直しとともに、電源立地対策、電源多様化対策の一層の効率化を行うとの方針が示されました。

このように、資源エネルギー関係の予算は、基本的に、財政構造改革の考え方を背景として、今後より一層効率的な使用が求められています。

活性化を目指す

経済構造改革の3テーマ

3つ目の改革は、「経済構造改革」であります。これは、産業界を含む日本経済全体の活性化を主たるテーマとしており、それは、例えば、国際競争力が低下している日本産業の空洞化、また、国際金融面では、ニューヨーク、ロンドンと並んで3大市場をなしていた東京金融市場の凋落、といった昨今の日本経済を取り巻く状況から判断して、是非とも必要な改革の1つです。

このような状況の中で、各省一体となった議論がなされ、一昨年12月には「経済構造の変革と創造のためのプログラム」が、また昨年5月にはその具体化のための「行動計画」が閣議決定されております。

その中には、大きく分けて3つのテーマがあり、その1つが「新規産業の創出」です。これは、要するに既存産業への依存で国家経済が今後とも成り立つことは難しいのではないかと危機感から、新しい産業により日本経済を活性化させていこうという発想です。

第2が、「国際的に魅力ある事業環境の整備」でして、これは、企業が自然に日本を事業活動の拠点の1つとして選択するような、世界的にも遜色ない事業環境の整備を進めることであります。

第3が、「公的分野の効率化による公的負担の抑制」です。これは、先ほどの財政構造改革の議論とも関連がありますが、より経済活力への負担の少ない形での税制改正を目指して検討がなされ、昨年12月に一定の結論が出されています。その結論とは、わが国の法人課税の水準を国際水準に近づけることを目標に、平成10年度は法人税率を3%引き下げ、課税ベースの適正化を図っていくこと等を中心とするものです。

このほか、橋本内閣の「6大改革」には金融制度、社会保障制度、教育の改革がありますが、今申しました3改革がエネルギー政策と深く関係するものと考えております。

最重要政策になった地球温暖化問題

エネルギー政策を立案する上で最近非常に大きなウェイトを占めてきていることの1つに、地球温暖化問題への対応があります。

温暖化現象は、1980年代後半から世界の学者間でこの現象が科学的に認知されてきて、地球規模で対応の枠組みが整備されてきている状況にあります。1992年、ブラジルのリオデジャネイロで開催された「地球サミット」において、地球環境問題全般について国際的な枠組みが議論され、「気候変動枠組条約」が採択されました。

この条約は、温暖化対策の重要性については謳われましたが、具体的対策や目標については、実は何ら拘束力のないものでした。その後、95年4月の第1回締約国会議（COP1）において、第3回会議までに温暖化ガスの排出抑制に何らかの数量目的を決定することが各国で合意されました。

その第3回締約国会議（COP3）が、昨年12月、京都で開催され、わが国はホスト国として、議長役を務めました。

途上国を含め世界各国、各地域間の主張に激しい対立があり、連日連夜の徹夜の交渉となりましたが、最終的には、目標期限を2008年から2010年とした、先進国における個別の具体的な温室効果ガスの排出抑制目標を定める議定書が採択されました。その中でEU、米国、日本は、それぞれ90年比で8%、7%、6%の削減率となっております。

このような交渉の終結を迎えるに至った1つの背景として、わが国は、昨年の8月から11月にかけて橋本首相のもとで各省庁一斉になり、温暖化の原因となる二酸化炭素（CO₂）の排出量削減策について議論を重ねた結果、エネルギー関連ではCO₂排出が1990年レベルに安定化できるという一つの結論を得ておりました。これがベースとなって、今後の技術革新等に期待する部分や、森林による吸収、

CO₂以外の温室効果ガスの寄与、排出権取引など、新たに今回の議定書に盛り込まれた国際枠組みなどを総合して6%削減になっているわけです。

CO₂排出量は、エネルギーのうち特に化石燃料の使用量に大きく左右されますが、今回のわが国の削限目標のベースとなっている対策は、わが国にとって最大限とりうるギリギリのラインです。このように、温暖化防止策は、資源エネルギー政策として極めて重要であり、かつ大きな影響を与えるものと考えております。

伸び続けるエネルギー消費

それではここで、わが国のエネルギー消費の実態について簡単にお話します。

わが国の最終エネルギー消費の実績と見通しは図1のとおりです。第1次、第2次の石油危機の後、消費量は一時的に落ちる時期も

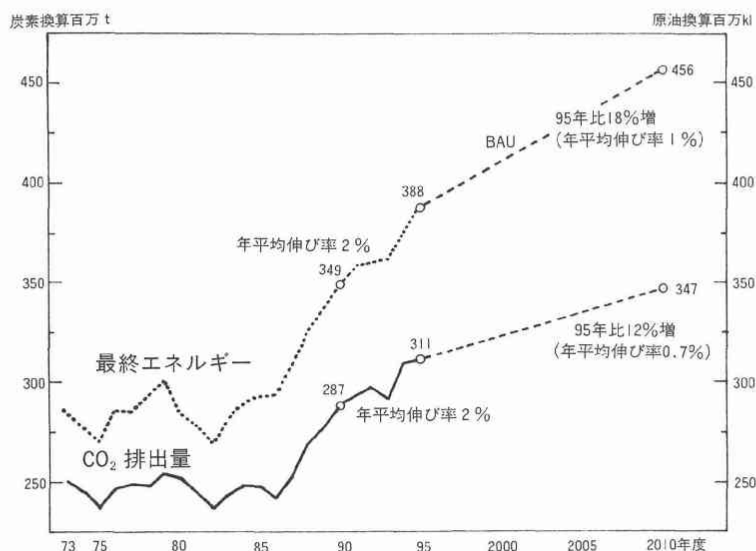
ありましたが、その後の経済成長に伴い上昇を続けてきました。最近では、94年の冷夏で若干トレンドの落ちる年もありましたが、基本的には増大傾向にあり、このままですと、将来は大変な消費量になることが予想されます。

民生・運輸部門とともに

産業部門も可能な限りの省エネを

次に、この伸びの要因について簡単に分析いたします。

わが国におけるエネルギー消費原単位の推移が図2です。単純にいいますと、一つのサービスなり物をつくるに使用するエネルギー量でして、大まかには、省エネの度合いの推移と考えて差し支えありません。1973年を100にとりますと、製造業は急速に低下しています。民生の業務部門も、例えば電気機器の省エネが進み、最近はやや上昇傾向が見られま



出所：「地球温暖化問題への国内対策に関する関係審議会合同会議」資料等

図1 わが国の最終エネルギー消費及び二酸化炭素排出量の実績と見通し

すものの、長期的に見ますと低下しております。

上昇したのが民生の家庭部門と運輸部門です。この図は原単位の伸びを示すものですから、機器などの使用量が増えるなどすれば、エネルギーの総量ではさらに伸びていることになります。

その要因は、民生部門では、ゆとりと豊さを求める国民生活の質の向上を背景として、例えば電気製品の大型化等により、運輸部門では、自家用車は、一人が1台、2台持つ時代になってきており、さらには、高齢化社会を迎えてより便利な生活が求められ、また大型車、高級車などの使用が増えたことなどが原因となって消費量が増大したものと考えられます。国民のライフスタイルを規制するのは大変難しいこともありますが、民生部門、運輸部門への対策が、より一層求められる状

況にあります。

産業界の省エネは、すでに絞りつくされているという議論もありますが、私どもは、限界に近いことはあっても、これで十分という限界はないと考えており、引き続き省エネを推進する所存であります。

その理由は、産業部門からのCO₂排出量が日本全体の約4割を占めており、消費原単位は、最近では図2のとおり、少々上昇傾向にあり、これが続きますと、わが国全体としてCO₂排出の大きな伸びが予想されるわけです。対策としては、産業界の自主的な取組みを最大限生かしつつ、その効果的なフォローアップを図ることが重要です。

いずれにしましても、地球環境問題の対応には、民生・運輸部門とともに、産業部門も可能な限りの対策が必要と考えております。

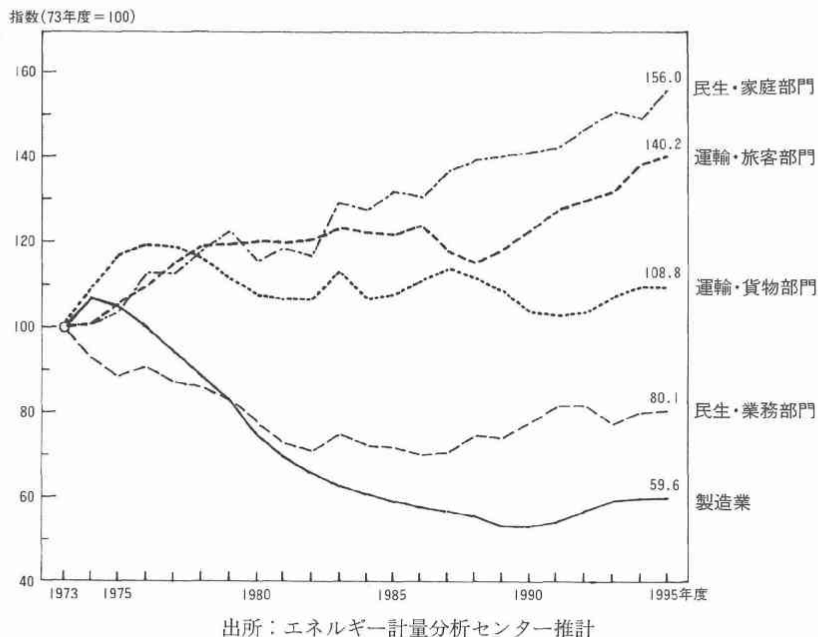


図2 わが国のエネルギー消費原単位の推移

エネルギー政策の視点

温暖化防止、安全保障および

高コスト構造の是正が3本柱

次に、以上に述べました背景のもと、いかなるプライオリティにより予算が組まれているかをお話します。

第1に、わが国の新たなCO₂排出抑制目標である、2010年頃の1990年度比6%削減の達成に向けて、そのベースとなるエネルギー関連のCO₂排出抑制に、エネルギー需給両面にわたる最大限の対策を予算面でも支援することにあります。

第2に、温暖化問題とともに、エネルギーにおける最大の問題は安全保障、すなわち、国民あるいは産業界が安心して持続的な活動を可能にするエネルギーの確保であります。

もともと、省エネの推進、新エネの導入が政策の柱に掲げられているのは、地球環境問題が顕在化する以前の、かつての石油危機や90年の湾岸戦争時に発生した石油確保への不安にありました。また、今後、アジア等の経済成長に伴うエネルギー需要の急増や、わが国の石油供給における中東依存の高まりが予想される現在、石油になおエネルギーの5割以上を依存しているわが国には、石油をはじめとするエネルギーの安定供給なくして生活・産業の維持はありえず、当然のことながら、エネルギー安全保障が一つの柱をなしているわけであります。

第3は、「経済構造改革」の推進に向け、産業活動の基盤であるエネルギーを国際的に遜色ない水準のサービスにすることでありま

す。電気事業審議会でも、昨今、外国に比べて高いといわれている電気料金・ガス料金や、エネルギー産業独特の高コスト構造などが取り上げられ、エネルギー安定供給の仕組みのもと、これらの見直しを進めることにしています。

第4は、先ほど申しました「財政構造改革」と関連し、エネルギー予算の節減が求められております。既存予算の見直しにより、従来にも増して効率的な予算の執行に努めながら、いま申しました地球環境問題、資源・エネルギーの安全保障、エネルギー分野の高コスト構造は正の3本柱を中心に、平成10年度は、総合的エネルギー政策の展開を図る所存であります。

地球温暖化問題に向けた

イニシアティブの発揮

抜本的強化を進めたい省エネルギー対策

次に個別の主要施策の概要についてお話します。

地球温暖化問題は、一朝一夕に解決しうるものではなく、継続した努力が求められます。その一つの重要な柱が省エネルギーであります。平成10年度は、産業、民生、運輸のすべての分野において省エネルギーを加速的に推進するため、「地球温暖化への国内対策に関する関係審議会合同会議」の報告書の基本線に沿った、法制面の整備も含めた抜本的な省エネルギー対策を講じることが必要です。その中でも、予算措置としては、高性能工業炉等の省エネルギー技術の開発・導入の促進、省

エネルギー型の新しいライフスタイルの構築に向けた情報提供等の各種施策を抜本的に強化し、省エネルギーへの国民的な取り組みを支援することが柱となっております。

平成10年度の予算要求は、表1のとおりです。

以下に、産業、民生、運輸の分野別にお話します。

「産業分野」にある「高性能工業炉の導入実証事業の創設」は、これまで従来に比べて3割以上の省エネ可能な工業炉の技術開発を進めてきましたが、今後、実規模のものの普及を促進するためのフィールド・テストに、新規に39億円の補助を行うものです。

「高性能工業炉」は、技術開発は概ね終期にあり、今後は導入・促進に、件数で80件ぐらい、設置費の3分の1の定額補助を考えております。

次の、「先導的省エネモデル事業制度の創設」は、これまで省エネ努力を行ってきたことを前提に、さらに先進的、かつ波及効果の高い事業を対象とし、モデル的に行うもので

あり、事業費の3分の1の助成を考えております。

「中小企業の省エネ対策の強化」は、中小企業にもそれなりの省エネ対策をきめ細かく実践してもらうため、助成に6億ほど増額したものです。

「民生分野」では、主なものとしては「省エネ型超先端液晶技術の開発」があります。これは、現在の液晶のおよそ10分の1の消費電力で済む先端技術を開発し、コンピューター、その他色々な操作制御盤への導入に向け、技術開発の加速的推進を図るものであります。

次に、「高効率照明の技術開発」では、新規に5億円ほど要求しています。これは、新型の発光ダイオードを使い、電力消費が従来の蛍光灯の約半分で済むような高効率照明の開発を目指すものであります。図3、図4にある家庭・業務の民生部門におけるエネルギー消費を見ますと、各家庭における冷暖房需要もさることながら、家庭・業務における照明・電気製品のエネルギー消費量がかかなり多くな

表1 省エネルギー関係主要予算の概要

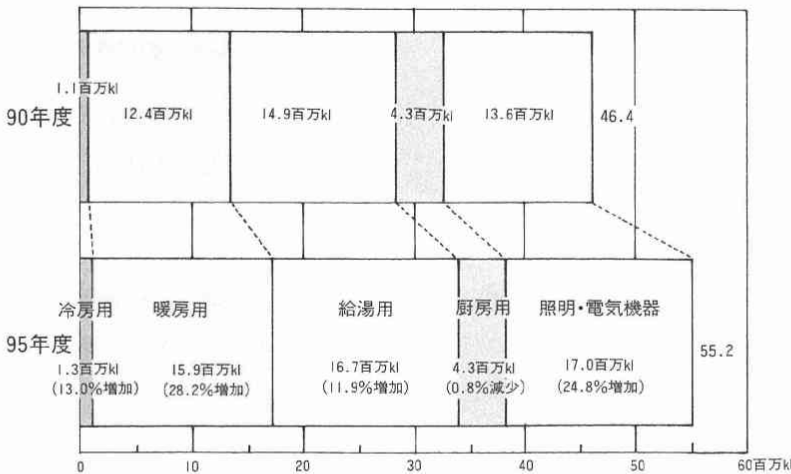
単位：億円

項 目	9年度予算額	10年度予定額
<産業分野>		
○高性能工業炉の導入実証事業の創設	(新 規)	39.2
○高性能工業炉等の開発の促進	24.0	27.8
○先導的省エネモデル事業制度の創設	(新 規)	20.0
○中小企業の省エネ対策の強化	32.1	38.4
<民生分野>		
○省エネ型超先端液晶技術の開発	14.2	24.0
○高効率照明の技術開発	(新 規)	5.5
○住宅等建築物における省エネ導入促進事業の強化	0.5	3.3
<運輸分野>		
○クリーンエネルギー自動車の開発及び普及促進の強化		(後 掲)
<横断的対策>		
○省エネルギー情報公開対策等の強化	18.0	33.0

っており、高効率照明の技術開発による省エネが重要であることを物語っております。

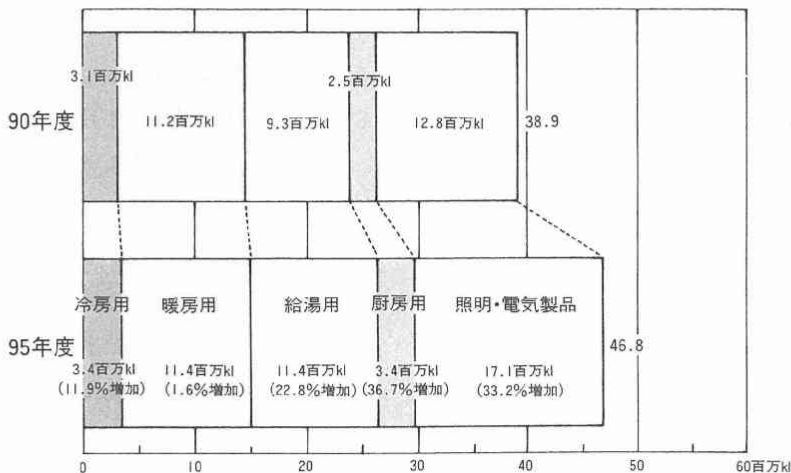
民生分野では、その他に「省エネルギー型機器関連製造設備の導入支援」があります。これは、これまでのものと少々毛色が違い、

直接の予算ではなく、いわゆる財政投融资、すなわち低利の政府関係金融機関からの融資ですが、いわゆる「省エネ法」に定めます特定機器、例えば自動車、コンピューターのようものの製造設備に、さらに進んだ省エネ



出所：エネルギー計量分析センター推計

図3 民生家庭部門における用途別エネルギー消費



出所：エネルギー計量分析センター推計

図4 民生業務部門における用途別エネルギー消費

型設備を導入しようとする事業者に対する低利融資制度を、開銀融資3,290億円(エネルギー・セキュリティ対策枠)の内数として創設しました。

次に「横断的対策」についてですが、まず「省エネルギーの情報公開対策等の強化」があります。情報公開という表現は必ずしも適切ではないかもしれませんが、適切な情報提供と申しましょうか、要するに、民生分野での省エネルギーをさらに進めるため、国民の皆さんに対する一層の意識啓発の推進を図るということです。

今でも省エネ月間というのを設け、通産省の壁に垂れ幕を下げて国民意識の喚起のために努力は重ねてきたつもりですが、残念ながら現在はエネルギー価格が安定しており、かつ資源枯渇の切迫感が一時期ほどない現状では、国民意識に訴えかける省エネが浸透しているとはいえないのが本当のところだと思います。したがって、今後はなお一層この分野で取組む必要があるといえます。

一例を申しますと、例えば皆さんの家庭で、その日使った電気代はいくらとか、今月の電気料金はいくらかを表示する仕組みをつくりますと、エネルギーの節約意識を生む端緒となり、省エネ情報として大きな効果があると考えております。

最後に、税制ですが、省エネ設備・新エネ設備の導入支援策として、一定の税額控除や特別償却により、事業者の省エネ・新エネ投資を呼び戻そうというのが「エネルギー需給構造改革投資促進税制」です。先ほど申し上げましたように、公的負担の抑制という税制全般の見直しや財政構造改革の流れの中で、

このような税制優遇措置も厳しく見直しが図られました。しかしながら、本税制は、民間の省エネ投資等の促進による温暖化対策の観点から、また、冷え込む景気への刺激策との観点からも極めて重要であることから、制度としてはほとんどそのままの形で2年間の延長が決定いたしました。

新エネルギーの開発と利用の促進

太陽光発電などの新エネルギーの導入は、地球温暖化問題への対応、資源制約の緩和面からも重要であり、またクリーンエネルギー導入施策として大きなP A効果が期待できます。例えば、学校や公的機関に設置しますと、子供たちのエネルギー・環境教育に好ましい効果が期待できるわけです。一方、現時点では、大規模電源として使用するには、技術的問題等多くの克服すべき課題があり、すぐにわが国のエネルギー源の中で大きな地位を占めるまでには至らない状況にあります。

しかしながら、政府としては、現行の「石油代替エネルギーの供給目標」に基づき、2010年で19百万キロリットル(原油換算)分の新エネルギー導入を目指し、平成10年度は表2のとおり予算を要求しております。

まず、「クリーンエネルギー自動車の開発及び普及促進の強化」があります。図5にありますように、運輸部門、なかでも自家用車部門でのエネルギー消費には大巾な増加が見られ、これに伴いCO₂の排出量も増大しています。このような傾向を緩和すべく、クリーンエネルギー自動車の導入促進策の強化を考えております。

2番目に、「太陽光発電システムの普及促進事業の拡充」があります。太陽光発電は、コ

ストの低下が進みましたが、なお1キロワット当たり90万円～100万円ほどで、家庭で使う3キロワットの太陽電池の設置にはおよそ300万円かかり、躊躇されがちな価格です。しかし、今後の普及には、商業ベースに乗るまでの初期需要の創出が必要です。平成10年度から設置費の3分の1程度を補助する制度と

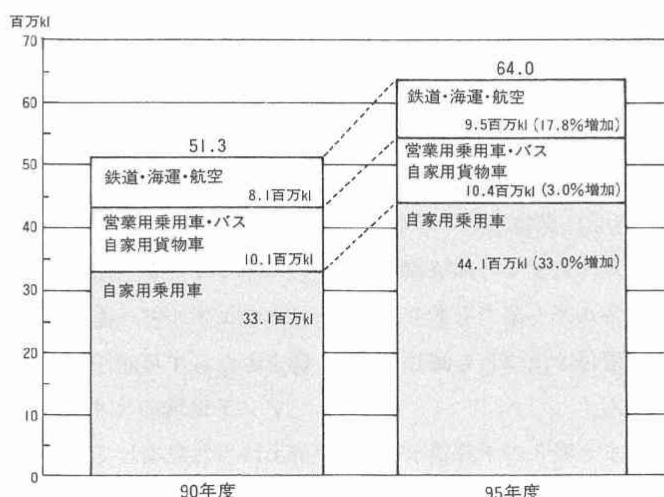
しましたが、平成9年度の要求上9,400件に対して、平成10年度は、1.5倍程度の拡充となりました。

そのほか特に強調したいのが、「新エネルギー事業者支援の拡充」です。これは、主に事業者を対象にしており、大規模又は高効率に新エネルギーを導入するなど、先進的かつ先

表2 新エネルギー関係主要予算の概要

単位：億円

項 目	9年度予算額	10年度予定額
○クリーンエネルギー自動車の開発及び普及促進の強化		
・クリーンエネルギー自動車の導入促進	28.1	83.9
・クリーンエネルギー自動車の技術開発	3.2	6.3
○太陽光発電システムの普及促進事業の拡充	124.6	172.7
○太陽光発電用シリコン製造プロセスの開発	5.8	8.3
○系統連系円滑化のための環境整備に関する技術的検討の強化	(新規)	2.9
○新エネルギー事業者支援の拡充	11.2	53.9
○地域における新エネルギー等導入促進事業の拡充	28.5	51.8
○風力開発フィールドテスト事業の拡充	4.6	15.3
○廃棄物発電開発費補助制度の対象拡充	11.0	12.6



出所：自動車輸送統計年報，内航船舶輸送統計年報ほか

図5 運輸旅客部門の輸送機関別エネルギー消費

導的な新エネルギー事業者に対して、必要な新エネルギーの導入経費の3分の1を補助することにより、一般家庭の太陽光発電普及と併せて、事業者での新エネルギー導入促進を図るものであります。

さらに「地域における新エネルギー等導入促進事業の拡充」があります。太陽光発電、あるいは偏在性はあるにせよ風力発電は、例えば沖縄のような離島ですと、新たな送電施設を設置するよりも、新エネなどの分散電源を導入したほうがコスト的に有利になる可能性があります。さらには、地方自治体が行う新エネ導入の積極的支援という意味もあって、およそ20億円を増額し、一層の拡充を図りたいと考えております。

そのほか、従来から技術開発を進めてきました「風力発電」は、フィールドテスト事業の拡充などを図っていく予定です。

原子力の開発と利用の促進

原子力につきましては、近年、残念ながら国民の皆様の不信、不安を高めるいくつかの事態が発生しました。

その点、行政の側も大いに反省し、改めべきは改めるとの姿勢が重要と考えております。しかしながら、今日すでに発電電力の3分の1を賄っており、さらに発電段階でCO₂の排出がなく、トータルで見ますと地球環境問題対応上欠かせぬエネルギー源でもあり、エネルギー政策上の位置付けは少しも減じられるものではありません。

このような状況を踏まえ表3の予算要求になっております。

まず、「原子力立地の推進」です。政府が目標として掲げている原子力発電設備容量の達

表3 原子力関係主要予算の概要

単位：億円

項 目	9年度予算額	10年度予定額
○原子力立地の推進	818.3	820.3
○放射性廃棄物対策の強化	25.4	27.4

成に向けて、原子力発電や核燃料サイクルに対する国民みなさんのご理解と信頼を醸成するための広報対策も必要ですし、また、原子力立地地域が自立的・持続的な発展を図っていくための支援も必要であり、これらに要求額の積み増しを行っております。

一方、立地対策費そのものは、厳しい財政事情もあり、昨年とほぼ同額になっております。

もう一つが、「放射性廃棄物対策の強化」ですが、これは避けては通れない重要課題であり、厳しい財政事情にもかかわらず増額となっているところです。

省エネ・新エネ分野における

国際協力の推進

アジア諸国におけるエネルギー消費量は、急増が続いています。そのうち最も脅威なのが中国です。経済成長率は毎年およそ10%、エネルギー消費量に至っては、90年度は日本よりも若干少ない程度でしたが、10年後には倍増する勢いで急伸しています。アジア全体のエネルギー安全保障を考えますと、将来、日本のエネルギー需給に対しても、大きな影響をもたらす可能性があります。

アジア地域のエネルギー消費に伴うCO₂排出は当然急増しており、地球規模でのCO₂排出の削減を進めるには、経済発展の著しいアジア太平洋諸国との一致協力した取り組みが不可欠です。

そのため、これらの地域における省エネの推進・新エネの導入を促進するためのフィージビリティ調査及びモデル事業を国際協力の一つの柱として立てております。

また、COP3において京都議定書に規定された温室効果ガス排出量削減のための国際的な共同実施を念頭においた基礎調査の抜本的強化を行うことにしています。

予算要求は表4のとおりです。

表4 省エネ・新エネ分野における国際協力推進に関する主要予算の概要

単位：億円

項 目	9年度予算額	10年度予定額
○省エネ分野における国際協力の推進	54.7	68.7
・うち、共同実施のための基礎調査の抜本的強化	2.0	21.7
○新エネ分野における国際協力の推進	1.7	5.4

以上がわが国の平成10年度における地球環境問題への対応です。今後は、これらの予算措置等により、着実に新エネ・省エネ・原子力を推進し、地球温暖化防止のために最大限の努力をして参る所存です。

資源・エネルギー安全保障の確保

石油・天然ガスの自主開発及び

産油国協力の推進

日本は、現在、エネルギー資源のほとんどを輸入に依存しております。したがって、消費面での省エネルギーの推進とともに、供給面での安定確保に向けた施策が重要であり、これらに関する平成10年度の予算要求は次の

とおりになっています。

単位：億円

項 目	9年度予算額	10年度予定額
○石油・天然ガスの自主開発及び産油国協力の推進	1,081.4	1,108.5

その一つが「石油・天然ガスの自主開発の推進」であります。これは、中央アジアを中心として鉱区開放の動きが進んでおりますが、わが国のエネルギー供給体制をさらに安定化させるため、石油・天然ガスの自主開発を積極的に進めることとし、石油公団の探鉱投融資などの増額を予定しております。

次が、「産油国との人的交流、共同技術研究等の推進」であります。わが国の石油輸入は、中東地域への高い依存がなお続くと見込まれるため、平時より産油国との友好関係の維持・強化が、わが国への安定的な石油供給の確保に欠かせぬとの観点から、産油国協力を引き続き進めたいと考えております。

石油・LPGガスの国家備蓄及び

大規模石油災害対策の推進

この項目に関する予算要求は、表5のとおりです。

表5 石油・LPGガスの国家備蓄及び大規模石油災害対策の推進に関する主要予算の概要

単位：億円

項 目	9年度予算額	10年度予定額
○石油・LPGガス国家備蓄の維持・推進	3,275.7	3,136.0
○大規模石油災害対応体制の整備	15.1	22.9

脆弱なわが国の石油供給構造に鑑み、石油・LPGガスの国家備蓄は、民間備蓄も合わせ、5,000万klを目標としております。

石油備蓄を増量するには、タンクの増設や石油の買増し資金が必要になります。しかし、財政構造改革の集中改革期間になります来年度は、石油備蓄の積み増しをせず、現水準の維持ということで、予算も合理化を図り、百数十億円の減額になっています。

「大規模石油災害対応体制の整備」に関しては、皆さんまだ記憶されてるところと思いますが、昨年1月、島根県隠岐島沖でナホトカ号の船体が折損し、日本海沿岸がひどい重油汚染に見舞われました。さらに、7月には東京湾でも大型タンカーの座礁、原油流出の事故があり、幸にも半分ぐらいが軽質油でしたので大事には至らずすみましたが、タンカーからの石油流失事故が日本近辺で発生しています。このような石油汚染事故に備え、必要な資機材の購入費、災害発生時に資機材使用のための技術者派遣費などを増額するものであります。

海外炭の安定供給確保対策の推進

ご承知のとおり、国内石炭政策は平成13年度を目途に終了いたします。一方、世界的に見ますと、石炭は、石油、天然ガス、ウランに比べて賦存量は豊かであり、今日なお余裕のある海外炭の安定供給を確保するため、民間企業による海外炭開発を支援するとともに、石炭生産技術やクリーン・コール・テクノロジー

表6 海外炭の安定供給確保対策の推進に関する主要予算の概要

単位：億円		
項 目	9年度予算額	10年度予定額
○海外炭の安定供給確保の推進	38.5	39.2
○クリーン・コール・テクノロジーの開発及び技術協力の推進	109.8	111.3

等を産炭国へ技術移転することを考えております。クリーン・コール・テクノロジーは、石炭利用を進めつつエネルギー供給の安定化を図りつつ、また環境面での対応も図っている極めて重要な位置付けとなっております。

これらに関する予算は、表6のとおりです。

エネルギー分野の高コスト構造是正

電力・ガス分野における検討

あらゆる産業活動の基盤であるエネルギーの安定的かつ効率的な供給は、経済活動にとって極めて重要であります。

このため、電力に関しては、平成13年(2001年)までに、国際的に遜色ない水準を目指し、わが国の電力コストを低減することになっていきます。今後の電気事業のあるべき姿について、電気事業審議会基本政策部会において検討がなされ、負荷率改善対策の強化等の検討が進められております。

予算要求は、

単位：億円

項 目	9年度予算額	10年度予定額
○電力負荷率改善対策の抜本的強化	36.3	64.2

を計上しております。

その中身は、氷蓄熱式の空調システムの導入促進でして、小型のもの4,000台程度の導入補助を考えており、約30億円の増額分は殆どそのためのものです。

石油分野における検討

石油分野では、特石法廃止を契機として、

国内市場における競争の激化、業態の変化が進んでいます。さらに、国際的にはアジア地域における需要構造の急激な変化が予想され、ますますセキュリティの確保が必要です。

このような状況にあります。一方、市場原理の導入により一層の石油流通の効率化などを図るため、石油政策全般の見直しを石油審議会にて検討中です。

ここに掲げる構造改善とは、具体的には、ガソリンスタンド等の事業の多角化などを支援するためのものです。

予算要求は、

単位：億円

項 目	9 年度予算額	10年度予定額
○石油製品販売業の構造改善支援の推進	208.5	151.7

となっています。

見かけ上は減額ですが、昨年、100億円ほどの債務保障基金の積み増しを特別にやっておりますので、その分を差し引きますと、実質上約40億円の増額になります。

本日は、これまで、資源・エネルギーに関する平成10年度予算要求の状況について話させていただきました。このほか、お話をさせていただいていない分野もありますが、時間の関係もあり、省略させていただきます。



〔寄稿〕

生物による二酸化炭素の固定と バイオマス・エネルギー

齋 木 博 (勸電力中央研究所
我孫子研究所 生物科学部 部長)

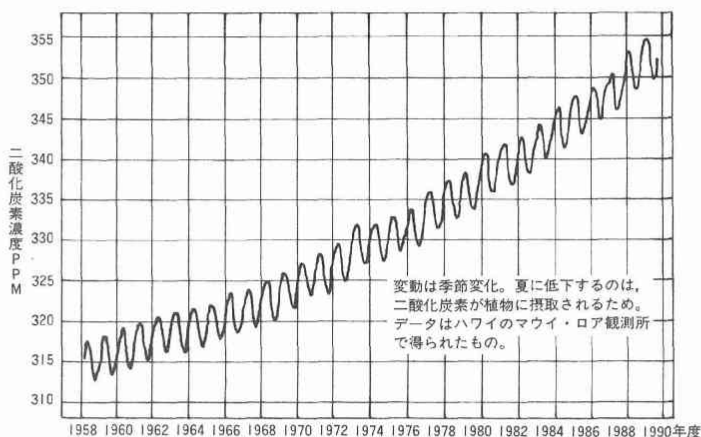


1. はじめに

産業革命以来の化石燃料の燃焼に伴い、大気中に放出してきたCO₂濃度がこの200年間で280ppmから350ppmへと増加している。この100年間に増加した濃度は約50ppmであり、この間に地球全体で上昇した温度は約0.5℃といわれている。

図1に示したのがハワイのマウナ・ロアにおける大気中のCO₂濃度の増加を示した観測

結果である。図中鋸の歯のようにCO₂濃度が振幅しているのがわかる。これは北半球と南半球の光合成によるCO₂固定の能力の差を示しており、北半球が夏の際は北半球に多く存在する陸上の植物が繁茂することによりCO₂が固定され、大気中の濃度が減少し、北半球が冬の際は植物の枯死によるCO₂の放出により濃度が増加することを示している。また、この季節的な変化幅が近年では5ppmから7ppmへと増加し、鋸の歯の切れ込みがより深くな



(出典：日経サイエンス、1990年)

図1 大気中のCO₂の増加

編者注：本稿は、昨年8月29日、当所が開催した第149回「月例研究会」のご講演を、本誌への掲載のため文章化していただいたものです。

っていることが観察される。これは、CO₂濃度の増加により植物の光合成がより活発化され、夏の間に固定されるCO₂の量が増えていることをも示している。このように、植物の光合成は地球規模におけるCO₂の増減に大きな影響力を持っており、生物を用いたCO₂固定はCO₂削減に関する重要な手段の一つと考えられている。

CO₂削減の方法としては、省エネや高効率化によるCO₂放出の削減、政策や経済的な対策によりエネルギー消費を抑制して削減する方法、排出したCO₂を回収して固定したり、処理する方法などがあるが、ここでは生物的なCO₂固定について解説し、他の方法と比べてその特徴を明らかにする。

2. 生物的CO₂固定とは

生物的なCO₂固定は大きく分けて二つに分けられる。一つはCO₂を有機物の形で固定する光合成であり(式1)、もう一つは無機物の塩である炭酸カルシウム、すなわち石灰として貝やサンゴの形で固定するものである(式2)。



生物的なCO₂固定を温暖化防止の観点から考えた場合、CO₂固定産物の寿命も考慮に入

れる必要がある。図2は生物の寿命およびCO₂固定産物の寿命を時間で示したものであり、横軸は対数目盛でとってある。

温暖化防止の観点から考えた場合、直接的なCO₂固定の効果が現れるためには、少なくとも、化石燃料の寿命である200年は必要となる。この点から考えれば、木本植物である樹木を育てる植林が数百年のオーダーでCO₂を固定でき、また、石灰化も地殻変動のスケールとなる数億年のオーダーで固定できるので、この二つが意味を持つことになる。それ以外の草本類による固定(海藻を含む)や微生物による固定は直接的な固定としての意味はほとんどないと考えてよい。しかし、これらの場合は、固定産物を有効利用することなどにより、後に述べるようにメタンガスや亜酸化窒素(N₂O)のような他の温室効果ガスの削減につながる場合もあり、間接的な温暖化防止の効果がある場合もある。

一方、海洋に溶けているCO₂を石灰化により固定した場合は、アルカリ度の減少により溶けているCO₂が溶けきれなくなり、



により、大気中に再びでてくるという説もあり、石灰化それ自体が大気中のCO₂を直接固定できるとは現在考えられてはいない。

生物的なCO₂固定を政策的な手段として考

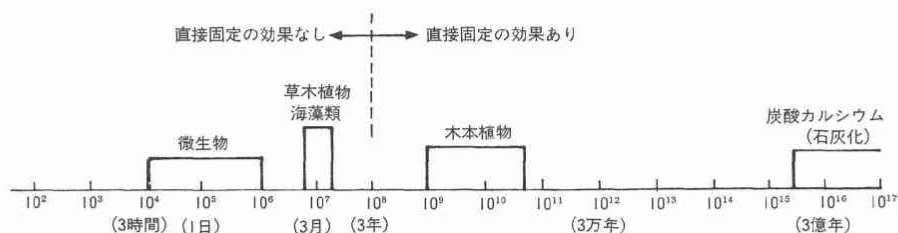


図2 生物の寿命とCO₂固定の効果 [単位: 秒]

えるためにはCO₂固定量に対するコストを明らかにして、その優劣を判断する必要がある。ここではCO₂を含む温室効果ガス全体の削減量をCO₂換算の炭素量で表し、植林、微細藻類、植物プランクトンを通して海洋に吸収させた場合の3つについて、コストとその成立

について概説する。

2.1 植林によるCO₂ 固定

樹木によるCO₂固定量は、言い換えれば、森林の炭素保持量に相当する。森林は地上部の木材だけではなく、地下部の土壌もまた有機

表1 各種森林による炭素貯蔵量

		森 林 タ イ プ	現 存 量 (ト ン C/ha)		事例数
			平均(標準偏差)	量小～最大	
熱帯・亜熱帯	天然林	熱帯降雨林	149.5(69.8)	36.1～ 533.8	119
		熱帯季節林	110.8(59.2)	15.7～ 199.8	22
		マングローブ林	65.9(59.9)	12.4～ 158.6	8
	人工林	Leucaena leucocephala	23.3(17.4)	4.5～ 52.0	9
		Shorea robusta	96.2(81.7)	8.9～ 288.8	12
		Tectona grandis	133.2(110.6)	27.5～ 334.5	6
暖温帯	広葉樹	モリシマアカシア林	41.3(14.4)	19.5～ 68.9	22
		ツバキ林	84.8(17.2)	61.6～ 99.9	4
		コジイ林	85.9(58.7)	23.0～ 211.5	16
	針葉樹	カシ林	156.6(68.6)	106.9～ 310.5	14
		クロマツ林	22.4(10.1)	11.0～ 36.6	6
		マツ林 b	53.4(51.1)	3.4～ 164.9	8
		アカマツ林	58.3(42.4)	20.7～ 184.5	22
		マツ林 a	75.3(17.7)	51.5～ 98.0	5
		スギ林	84.8(53.8)	7.0～ 276.5	48
		ヒノキ林	108.2(46.5)	31.1～ 179.6	28
		冷温帯	広葉樹	カエデ林	60.3(29.1)
サクラ林	39.6(33.4)			12.9～ 87.5	4
カンバ林	66.9(52.3)			12.2～ 272.8	26
モチノキ林	62.1(37.6)			20.5～ 113.9	6
ポプラ林	68.3(62.3)			1.5～ 240.8	14
ユリノキ林	86.4(28.8)			63.9～ 118.8	3
ナラ林	93.5(56.3)			22.9～ 242.8	43
ブナ林	109.3(45.0)			21.6～ 197.9	25
針葉樹	ハンノキ林		118.8(84.5)	16.1～ 272.7	9
	マツ林 c		68.4(37.9)	13.9～ 130.8	7
	マツ林 d		91.4(61.2)	26.1～ 224.1	9
	セコイア林		1,443.9(518.3)	621.0～1,844.6	5
	亜寒帯		針葉樹	オウシュウアカマツ林	60.4(38.0)
カラマツ林		72.8(27.2)		42.4～ 102.3	5
トウヒ林		99.3(69.5)		8.4～ 336.6	59
モミ林		171.2(170.6)		41.2～ 911.0	36
ベイマツ林		199.6(196.9)		27.0～ 859.1	33
ツガ林		243.7(138.2)		16.9～ 472.5	12

本表の値はすべて植物体全体（地上部＋地下部）の現存量である。

a. *Pinus echinata*, *Pinus taeda* ; b. *Pinus radiata*, *Pinus pisaster* ; c. *Pinus nigra* ; d. *Pinus strobus*, *Pinus muricata*, *Pinus pumila*, 他

物として炭素をためることができる。一般に森林は年々成長して大きくなっていくが、十分に成長した森林ではもうそれ以上成長しない状態、吸収するCO₂と放出するCO₂の量が釣り合う状態がくると考えられている。この状態は極相林と呼ばれ、森林の炭素貯蔵量には限界がある。森林による炭素貯蔵量は、森林が若いか成熟しているかという点の他に、樹種や気候にも影響される。

表1に示したのが現存する森林のタイプ別炭素貯蔵量である。ここに示したのは若い森

林から、成熟した森林まですべての森林を含んでいる。特に天然林においては過去に伐採が行われたかどうかにより、その貯蔵量に大きな変化がある。森林の種類はおおざっぱには気候帯によって類別されるが、樹の種類によっても、炭素貯蔵量は大きく異なる。平均値で比べてみてもセコイア林の1,400tからクロマツ林の22tまで大きな幅で存在する。一般的な場合では、表より成熟した森林（範囲の最大値）では200tから300tの炭素が貯蔵できる。

表2 植林に関わるコスト—過去の植林プロジェクト

	国 名	開始年	主要造林樹種	造林面積	コスト(円/㎡)	備 考
ア フ リ カ	ブルキナファソ	1980	ユーカリ, Gmerina	3,500ha	425,704	5年目までの造成, インフラ, 運営経費
	コートジボアール	1987	Terminalia, Tarrietia 他	1,200ha	271,125	
	ガーナ	1985		58,000ha	141,529	
	ケニヤ	1984		44,000ha		
	マラウイ	1980	Gmerina, ユーカリ	28,000ha	106,426	1年目費用 3年間 25年間 5年間 寄せ植え 水路沿い
	ニジェール	1986	ユーカリ		81,797	
	ナイジェリア	1985	松		66,543	
			ユーカリ		172,446	
	ルワンダ	1980	ユーカリ, 松	8,000ha	212,852	
	スーダン	1987	ユーカリ	596ha	71,036	
ア ジ ア				169ha	37,714	
	バングラデッシュ	1980	マングローブ	40,000ha	85,141	5年間
	ブルネイ	1983		1,000ha	416,978	
	ミャンマー	1980	Tectona grandis	14,000ha	53,213	5年間
	ブータン	1985			94,721	1年目 人件費
	中国	1985	広葉杉, 馬尾松		130,000~200,000	
		1984			88,822~111,028	
	インド	1984	ポプラ		198,724	10年間
		1985	ユーカリ		62,310	初年度造林
		1986			82,363	5年間
	マレーシア	1985	アカシア 他		402,059	15年
	ネパール	1980	Alnus, Prunus, Ectula	11,000ha	191,567	5年間
	パキスタン	1984	ポプラ		373,452	10年
	フィリピン	1980	松, Leucaena	32,000ha	489,559	5年間
		1982	フタハガギ科	2,090ha	1,021,338	9年
	タイ	1980	ユーカリ, 松	11,000ha	48,317	5年間
		1985	ユーカリ		617,172	5年民有林
		1986	アカシア 他	844ha	348,973	単年度
中 南 米	ブラジル	1978	ユーカリ	40,000ha	79,600	5年間
	チリ	1983	ラジアータ松		33,232	
	コロンビア	1985		1,500~3,000	140,096	

(出典：F A O の植林に関するレポート1985~1987, 国際協力事業団報告書1982~1989, ㈱海外林業コンサルタンツ協会の報告書1985, 1988から抜粋した)

樹木によるCO₂固定のコストは植林のコストと考えて良い。植林にかかるコストはその土地の状態、気候・風土、国柄などにより千差万別ではあるが、過去に行われた植林のプロジェクトからそのコストを見積もることができる。表2に示したのが過去に国連主導で行われた発展途上国の植林プロジェクトの概要である。植林の内容は定植後の施肥など最大で5年間程度の管理を含んでいる。

樹種としてはポプラ、ユーカリなど比較的成長の早いものが選定されており、植林のコストもhaあたり、3万円から100万円まで種々報告されており、これらの平均では約30万円となる。しかし、これらの中には植林のための造成や灌漑施設の整備などを含むものもあり、直接的な経費は安く見積もった場合、発展途上国では10万円前後、1,000\$程度となる。一方、商業造林におけるパルプ生産のための植林コストがやはり10~15万円といわれているので、発展途上国における植林のためのコストは10万円程度と見積もることができる。植林の大部分が人件費であることから、先進国では植林の経費が高くなる。わが国の場合、杉林でhaあたり200万円といわれているが、欧州の例ではポルトガルの23万円、ギリシャの28万円が報告されており、おおむね発展途上国の2~3倍となる。

植林による炭素貯蔵のコストは、植林のコストを森林の炭素貯蔵量で割ればよい。この場合、森林の炭素貯蔵量は森林を伐採したあとの畑や草原との差を比べることとなるので、haあたり150t前後と見積もられる。従って、植林における炭素固定の経済性は炭素1tあたり、発展途上国700円程度、先進国で2,000円程度となる。

2.2 藻類を用いる方法

微細藻類を用いたCO₂固定は既に述べたように直接的な固定とはなり得ない。しかし、固定産物を有効利用したり、固定産物を海底に導入するような方法を採用すれば、大気中の温室効果ガスの削減には貢献する。

(1) 微細藻類によるCO₂固定と

固定産物の家畜飼料への利用

微細藻類、ここでは主としてクロレラを念頭に置いているが、CO₂をクロレラの形で固定し、そのクロレラを家畜飼料として有効利用する(図3)。この結果、本来家畜飼料として使われていた大豆やトウモロコシの代替をすることにより、大豆やトウモロコシを生産する際に発生していた温室効果ガスを出さなくなる分だけ温室効果ガスの削減になる。畑

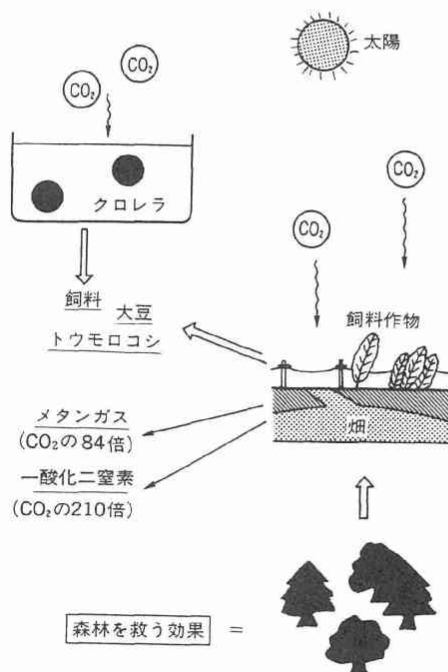


図3 クロレラの生産と温室効果ガスの削減

に由来する温室効果ガスは、投入エネルギーに相当するCO₂、土壌中の有機物の分解に由来するメタンガス、投入した窒素肥料の分解物である亜酸化窒素(N₂O)があり、詳細な見積もりによれば、表3に示したように、1tCの穀物を生産するとき、畑に由来する温室効果ガスはメタンや亜酸化窒素に由来するものが、炭素換算で6.3t、投入エネルギーに由来するものが0.2tCとなり、計6.5tCとなる。これに対して、クロレラの生産のための投入エネルギーは1.1tCとなるので、クロレラ1tCの生産は温室効果ガスを約5.4tCの削減となる。

この方法では畑を必要としない農業となるため、耕地をつくるために森林を開拓しないで済むという効果もある。1tCの穀物を生産するための耕地は約7haと見積もられるので、年間1tCの微生物による飼料生産は約100tCの炭素の貯蔵庫を守ることになる。

今までに排出ガスを利用してクロレラを生産するためのコストの見積もりを行ったものはないが、最も経済的にクロレラ生産をハワ

イで行った場合のコストを計算した例では表4に示したように、約27万円/tCとなっている。輸入飼料である大豆・トウモロコシの12～15万円(1990年)と較べて少し高いが、栄養価が高いので引き合うとされている。家畜飼料としてCO₂固定産物を利用する場合は、生産物が商売の対象となるので固定のためのコストは考えなくとも良いことになる。

(2) 植物プランクトンの増殖によりCO₂を海洋に吸収させる場合

海洋は地球の全面積の7割を占めるが、その生産性は地上の半分にも満たない。海洋における光合成による有機物の増大は、大気中のCO₂の固定につながる。このためには、海洋中の光合成を増やす必要がある。

海洋の生産性を高めるためには、陸上と同じように窒素、リンなどの栄養素が必要となる。海洋は通常は貧栄養の状態であるが、海底の栄養塩類を巻き上げ海面近くまで持ってくる湧昇流が存在するところがある。このような

表3 飼料1tC生産当りの温室効果ガス放出量

飼料の種類	投入エネルギー (燃料、電気等)	耕地等に由来する 温室効果ガス	総放出量 (CO ₂ 換算)	代替効果
飼料穀物	0.2	6.3	6.5	—
微細藻類SCP	1.1	0	1.1	5.4

*；メタンおよび亜酸化窒素の温室効果ガスの63倍、180倍と見積った。(単位：tC)

表4 安価なクロレラの生産例

	10%システム	100%システム
クロレラの生産物 価格	\$3.25/kg乾物 (約100万円強/tC)	\$0.82/kg乾物 (約27万円/tC)
日本の米の価格	92万円強/tC	

(出典：J.R.Benemann et al. TIBTECH 5, pp47-53, 1987)

場所は通常は栄養塩が豊富にあるため、植物の生産性は高い。

しかし、中には微量元素で必須元素である鉄分が周囲から供給されないため、有り余る栄養塩類があるにも関わらず、生産性がきわめて低い海域が存在する。このような場所に不足している鉄分を供給することにより、植物プランクトンの増殖を飛躍的に増大させることができる（図4）。

世界の海洋の中にはこのような場所が3カ所知られている。すなわち、南極海と太平洋赤道域と太平洋北東部北極域である。この中では南極海が最も大きく、その効果も期待できる。一つの試算によれば、このような海域に鉄1gを撒けば1万倍の炭素が固定されることが期待でき、南極海全体では17億tC/年にも相当する。ここで生産された植物プランクトン総てが海洋中に留まっているわけでは

ないが、湧昇流があるところでは、その逆の海底に向かう流れもあり、これにより固定されたプランクトンのかなりの量が海底に引き込まれることが期待されている。3つの海域総ての潜在的な炭素固定能力は最大で28億tCと見積もられており、そのコストは、鉄散布のコストとなり、1tCあたり60～2,000円と計算されている。この方法は最も安価なコストで海洋にCO₂を導入する方法ではあるが、巨大な炭素の流れを大気から海洋に引き起こすこととなり、環境影響などの不測の事態に対する懸念が心配されている。

2.3 他の方法との比較

ここでは生物学的なCO₂固定に対して、物理化学的な方法と呼ばれるCO₂の回収と海洋処分及び政策的な手段である炭素税による課税を比較する。

(1) CO₂の回収と海洋処分の経済性

燃焼後のCO₂を回収し、これを水深3,000mより深い深海底や地下2,000mの地中に投棄すれば、大気中に戻ってくるまで1,000年オーダーでの貯留ができる、すなわちCO₂を処理できると考えられている。

この方法は排ガス中のCO₂を回収する部分と、回収したCO₂を投棄する部分とに分けて考えることができる。CO₂を回収する方法は化学吸収法と物理吸着法とが知られているが、ここでは幾分安価であると言われている化学吸収法により回収する方法の経済性を考慮する。また、投棄する場所としては排ガス田のような地中に投棄する場合と海底3,000mの場合とが考えられるが、日本の場合、地中処分の方が経済的には安価と考えられている

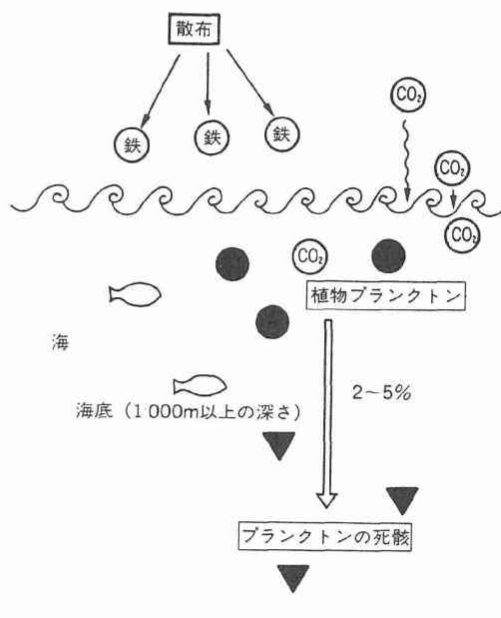


図4 プランクトンの増殖と
海洋におけるCO₂の吸収

が、十分な排ガス田等の処分場を持たないので、ここでは3,000mの海底に投棄する方法をモデルケースとしたい。

微粉炭燃焼火力発電所から排出されるCO₂を化学吸収法により回収した場合、これに要するエネルギーを発電所内のエネルギーでまかなえば、発電効率は41%から31%まで落ち、約100kmのパイプラインを施設して3,000mの海底にCO₂を導入すれば、これに要するコストは炭素1tあたり約2万4,000円と試算されている。

(2) 炭素税課税によるCO₂削減効果

一つの試算(シミュレーション)によれば、日本国内のCO₂排出量を1988年レベルに押さえるために、1990年から炭素1tあたりの燃焼に関して4,000円の課徴金を導入し、これを2005年まで毎年同額ずつ引き上げる必要があるとされている。この場合、原油価格は課徴金を導入しない場合と比較して約2.8倍まで上昇する。このような課徴金の導入は経済の構造を歪め、GNPの減少を引き起こす。課徴金による税収を所得税減税のような形で還元しても、年率0.3%程度のGNPの減少が見込まれる。このような、課徴金を導入することにより減少したGNPは1990年から2005年までの累積として、約230兆円となり、これにより減少した炭素の排出量は累積で9億4千万tCに相当し、炭素1tあたりの削減に伴うGNPの損失は約24万円に相当する。このGNPの損失を炭素固定のための社会経済的なコストとする。

(3) 各種CO₂削減方法の比較

今まで述べてきた各種CO₂処分技術の経済

性を比較すると表5のようなものとなる。経済性の観点からだけ見れば、微細藻類によるCO₂の固定とその利用が、固定のコストがかからないので最も安価なものとなり、次に鉄散布による海洋によるCO₂の吸収となり、植林による固定はさらにその次となる。CO₂の回収・海洋処分や、課徴金によるCO₂の放出削減はいずれの場合も生物的な固定と較べて高価なものにつき、植林と較べても海洋処分で10倍、課徴金の導入は100倍のコストがかかることを示している。

しかし、総合的な観点から見た場合、微細藻類によるCO₂固定は未だ実用化されておらず、鉄散布による海洋によるCO₂吸収は環境影響が危惧されているので、生物的な固定の中では、植林が最も現実的な手段であり、実行可能な手段である。

一方、CO₂の回収・処分は大量のCO₂が一挙に処理できる唯一の方法と考えられており、本格的にCO₂問題に対処するときは重要な選択肢となると考えられている。また、課徴金はそのものでCO₂の削減をめざすことは難し

表5 各種CO₂処分技術の経済性の比較

処分技術	コスト/1t当りの炭素を処分
植林	700円～1,000円(発展途上国) 1,500円～2,000円(先進国)
鉄散布による海洋のCO ₂ 吸収	100～2,000円
微細藻類によるCO ₂ 固定とその利用	コストはただ、固定産物が販売できるので。但し、販売できなければ、約30万円
海洋処分 (地中処分) 課徴金	2万4,000円 (1万8,000円) 24万円
原油の卸売価格 (参考)	3万2,000円 (1バレル、25\$として)

いが、植林や回収・処分のための財源として重要な手段となると考えられている。

2.4 共同実施と多目的プロジェクト

生物的なCO₂固定法の中では、すでに述べてきたように、植林が現在最も現実的な方法である。植林を行う場合、先進国ではその単価が高くなるため、発展途上国で行う場合がでてくる。この場合、先進国が植林の資金を提供し、途上国が植林の場所を提供することになる。これは、「共同実施」と呼ばれ、温暖化防止のための一つ的手段として成立するようになってきている。

このような、共同実施と呼ばれる生物的なCO₂固定のプロジェクトのいくつかが実施されてきている。発展途上国では、実際の問題としてCO₂を固定するためだけの植林というものとは考えられない。農業植林や（果樹や薪を取る）工業植林（パルプや建材をつくる）が行われるのが通例である。このような発展途上国におけるプロジェクトに相乗りすることによるCO₂固定の効果をねらっていく方法では、コストの一部を負担するだけでよいから、CO₂を固定する植林のためのコストは通常の植林の約1/10、1～0.1\$と試算されている。

例えば、1989年にガテマラの農業植林計画に参加した米国電力会社AES社は、少なくとも2億tの炭素が固定されると見積もられている農業植林計画に200万\$の出資を行う。これはCO₂固定のコストとして炭素1tあたり0.1\$を意味している。米国ではこのような観点から、CO₂固定のコストとしては5\$以下のプロジェクトに注目するようになってい

3. 植林とバイオマス

植林によるCO₂固定は、森林が極相林となるともうそれ以上CO₂を吸収しなくなるので、CO₂固定に関して限界が存在する。もし、森林に蓄えられた有機炭素をバイオマス・エネルギーとして利用することができれば、そこででてくるCO₂は再び森林として貯蔵することができるので、トータルとしてCO₂のでてこないエネルギーとして利用することが可能である。この場合、再生可能エネルギーとして半永久的にエネルギーを生産し続けることができる。このような観点から植林をバイオマス・エネルギー生産の場として結びつけて考える方向がでてきている。

3.1 バイオマス・エネルギーの利用

バイオマス・エネルギーは、森林バイオマスに始まり各種残渣物、メタン発酵・アルコール発酵等、いわゆる生物の体に由来するものは総て含まれる。しかし、ここではバイオマス・エネルギーの9割以上といわれている森林バイオマスに限って話を進めていく。

(1) バイオマス・エネルギーの利用状況

多くの発展途上国では、いわゆる薪や炭のようなバイオマス・エネルギーに依存しているが、このようなエネルギーは石油や天然ガスのような化石燃料とは異なり大部分が実際には取引されない非商用エネルギーとして利用されている。従って、その実体は統計に現れない推計の領域である。1987年のバイオマス利用量は国連の推計では567MTOE（ミリオントンオイル相当）であるが、世界エネルギー会議（1989年）のホールらの見積もりに

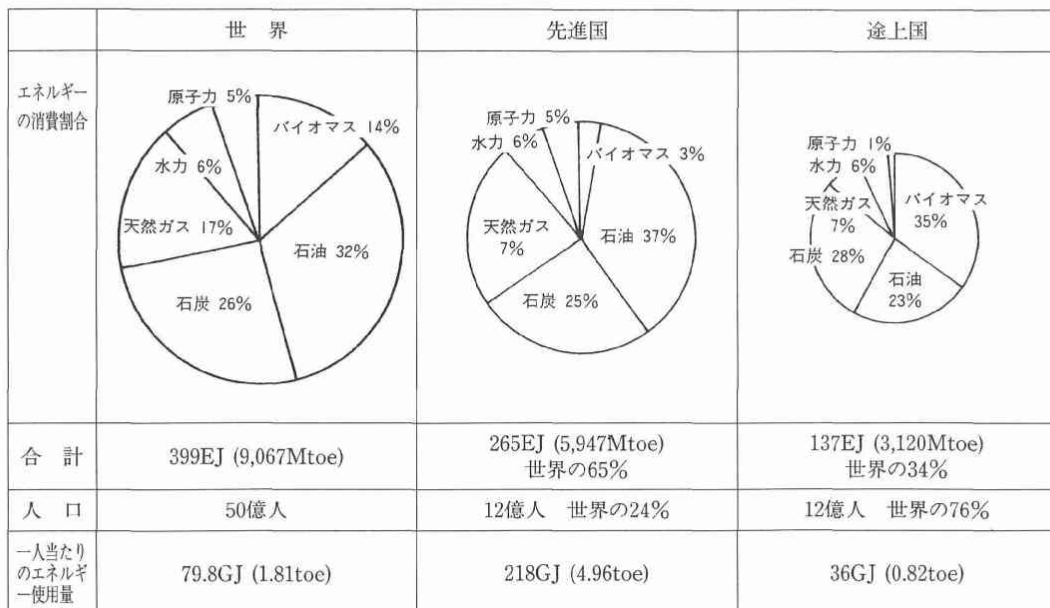
よれば1,275MTOEと2倍以上の開きがある。ホールらの推計の方法は発展途上国における人口にバイオマス使用量を一定の仮定の下に乗じて、統計に現れないバイオマス使用量を推計したものであり、現状では最も精度の高い推定値と考えられている。図5に示したように発展途上国においては全エネルギーの35%を、主に薪などのバイオマス・エネルギーに頼っている。先進国では化石燃料や原子力等を多用しているため、バイオマス・エネルギーの割合はわずか3%となっているが、世界全体では14%となっている。

(2) これからのバイオマス・エネルギー利用

ブラジルにおけるアルコール生産によるガソリンの代替が、大規模に行われてきた唯一のバイオマス利用であるが、今後は薪木による石炭の代替が進むことが予想されている。

その中の一つとして、森林バイオマスを利用した薪発電が考えられている。薪発電はもともアメリカにおける森林製材業のおがくずや、製材の残渣を処分する過程で始まっている。現在まではその多くが非商用エネルギーとして工場内の内部動力として利用されてきたが、最近では売電を目的としたものができるようになってきている。アメリカ、スウェーデン、フィリピン、ブラジル等で実用化されてきているが、ブラジルにおける木材燃焼発電コストは天然林を利用した例で7.3セント/kWhとやや高いが将来的には4.3セント/kWh程度になると見積もられている。

木材燃焼発電は、一般的には全木をチップに加工し、これを流動床燃焼し、蒸気タービンで発電する方式となっている。木材は石炭と較べて、発熱量が小さいので発電効率はそのほど高くなく30%程度とされている。石炭



[出典：ホールら，1989]

図5 バイオマス・エネルギーの全エネルギー消費に占める割合

と同様ガス化して二段階で発電する複合発電も実証段階であるが、この場合の発電効率も40数%といわれている。

木材を利用した発電の場合、燃料である木材をどのように供給するかが大きな問題である。ハイブリッド・ポプラ等の成長の早い樹種を利用して六年間に一回植林して伐採するサイクルを、アメリカの電力研究所（EPR I）が提案している。図6のような土地を六等分し、その中央に発電所を置き、伐採した木材は発電所に集めることにより、集荷をシステム的に行うものである。半径10kmの場合、植物の生産性をhaあたり年7.5t(乾重)として発電効率34%で100MWの発電が5セント/kWh程度で可能としている。このような、集約的な栽培をする場合は通常の農作物を管理するようなきめ細やかな栽培や、耕地のような生産性の高い土地が必要となる。

3.2 バイオマス・エネルギーの見通し

(1) 植林によるバイオマス・エネルギー供給可能性

IPCCの将来のエネルギー供給のシナリオの一つとして、また米国EPA（米環境保護局）の将来のエネルギー供給の一手段として、バイオマス・エネルギーが注目を浴びており、将来的には全世界のエネルギーの1/3程度をバイオマス・エネルギーでまかなうシナリオまで登場してきている。その根拠となっているのが植林可能面積と、現状における森林保有面積である。

植林によるバイオマス・エネルギーの供給可能性の評価として、代表的な事例を表6に示した。いずれの推定値も大きな供給可能性

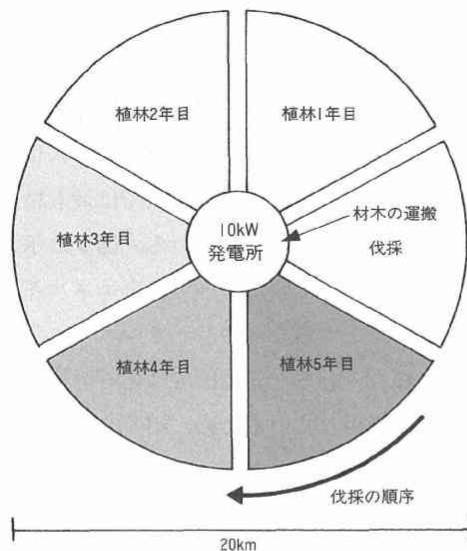


図6 薪発電の概念図

を示しているが、かなり大きな幅（15～208 EJ<10¹⁸ジュール>）があり、これは推定方法が成熟していないことに由来している。推定方法の問題点としては、エネルギー植林に利用可能な土地面積を、様々な目的（土地保全、劣化地回復、CO₂固定、地域の燃材供給など）のために推定された値を流用していること、楽観的な土地競合シナリオに基づいていることがあげられる。

エネルギー植林の可能面積を推定するためには、繰り返し伐採することに耐え得るような生産性のある土地であることがまず重要であり、そのような土地は食料生産と強く競合することが想定される。このような条件下でのエネルギー植林はかなりの制約を受けることが予想される。

(2) 土地利用競合を考慮したバイオマス・エネルギー供給可能性

土地利用形態をある程度考慮に入れ、先進

表6 植林によるバイオマス・エネルギー供給可能量の見積りに関する従来の文献整理ならびにその問題点

文献名	算出方法	具体的方法	植林面積など	算出方法の問題点
1. Johansson (1993)	トップダウンとボトムアップ	・先進国は余剰耕地を、途上国は劣化地を利用するとした。生産性は10~15t/ha/yrとしている。	・2050年までに先進国で108Mha、途上国で321Mhaの合計429Mhaで128EJ/yrを生産。	・楽観的な食料供給シナリオに基づいている。 ・他の目的のために算出した植林可能面積を流用している。
2. Dessus (1992)	トップダウンとボトムアップ	・世界を22地域に分け、現存する森林からの木材に加えて、サトウキビなどの作物を考慮。木材は生産性を5ランクに分け、また、輸送可能性を考慮。作物は、人口密度を用いて利用可能面積を推定している。	・2020年において、木材からは、先進国と途上国ともに4.2EJ/yr、他の作物からは世界合計で6.3EJ/yrの総計14.7EJ/yrを見込んでいる。	・2020年と比較的見積の年次が速く現在の土地利用が大きく変化しないと想定している。
3. Hall (1991)	トップダウン	・生産性を途上国5t/ha/yr、先進国10t/ha/yrとすると、先進国では39EJ/yr、途上国では38EJ/yr供給可能と見積。	・世界の耕地、永年牧草地、森林の合計の10%(890Mha)	・ラフな推計である。
4. Alcamo (1994)	シミュレーション、ボトムアップ	・IMAGEモデル(地球全体の土地のグリッド単位計算を含む地球環境、土地利用、土地被覆、エネルギーを統合した大規模モデル)を使ったシミュレーション。	・シナリオによりバイオマス・エネルギー導入量を設定。最大で2100年に208EJ/yrを想定。	・楽観的な食料供給シナリオに基づいている。

算出方法のうち、トップダウンは地球規模で積算された基準面積に特定の基準を掛け合わせて算出するもの。ボトムアップは物理的・技術的観点から積み上げたもの。

国での余剰耕地(生産過剰等の理由により休閑している耕地)、および発展途上国の潜在耕地(現在は森林として存在しているが、耕地としての生産性を持っている土地)に基づいてバイオマス・エネルギーの供給可能量を見積もると、表7に示したように2010~2020年において約95Mhaの耕地から33.5EJ/年程度のエネルギー供給が見込まれる。ただしこの見積もりでは、食糧供給の南北格差は依然放置したままである。

次に、世界合計の全耕地(この場合は、既耕地と余剰耕地、潜在耕地を含めるものとする)の内、食料供給に用いて余る土地を全部エネルギー植林するとして、2100年頃を想定してエネルギー供給を見積もってみる。全耕地面積は様々な見積もりがあるが、最も楽観的な値では3,900Mhaを耕地面積と仮定して

(現在の耕地面積は1,440Mha)食料生産を行った場合、この耕地による2100年の穀物生産量が16.9Gt(10⁹トン)/年であり、世界の人口による食料の需要が9.2Gt/年であれば、この差に相当する7.7Gt/年を生産する余剰耕地は1,767Mhaとなる。これからでてくるエネルギーは353EJ/年という巨大なものとなる。しかし、この見積もりは最も甘い仮定に立っているもので、実際には2100年頃には食料需給は逼迫し、現在保全している熱帯雨林をも耕地に変換しなければならないことが予想され、バイオマス・エネルギーの生産に充てられる肥沃な土地は殆ど無くなることが予想される。

すなわち、2010~20年頃は食料需給がそれほど逼迫する可能性はないので、若干の余剰耕地や潜在耕地を利用したバイオマス・エネ

表7 2010～2020年の植林によるバイオマス・エネルギー供給見通し

	現在耕地面積	現在余剰耕地面積	将来余剰耕地面積	2010～2020年のエネルギー植林面積	植林によるバイオマス・エネルギー生産量
単位	Mha	Mha	Mha	Mha	EJ/yr
世界合計	1,440	—	>136	95	33.5
先進国					
アメリカ合衆国	162	25	74	8～16	2.4～4.8
カナダ	46	6	>0	3	0.9
日本	4.7	—	0	0	0
オーストラリア					
／ニュージーランド	48	—	>0	>0	>0
欧州共同体	130	30	62	30	9
東欧	55	—	0	0	0
旧ソ連	232	—	0	0	0
途上国					
ラテンアメリカ・カリブ海諸国	184			50	20
サブサハラアフリカ	211			0	0
近東・北アフリカ	62			0	0
南アジア	186			0	0
東アジア(中国を除く)	77			0	0
中国	97			0	0

先進国は余剰耕地を、途上国は潜在耕地を利用するとしている。伝統的薪炭利用は除外していることに注意。バイオマス発熱量は20GJ/tdbとした。バイオマス生産性は南米では20tdb/ha/yr、他の地域では15tdb/ha/yrとした。カナダについては、アメリカ合衆国を参考に、現在余剰耕地の1/2がエネルギー植林に利用できるとした。オーストラリアとニュージーランドについては見積もっていないが、ある程度のエネルギー植林が見込まれる。東欧と旧ソ連については穀物生産能力が存在しないためエネルギー植林は存在しないとした。

ルギーの生産が可能であるが、2100年頃には人口の増加とそれに伴う食料生産の必要性から、余剰耕地を使ったバイオマス・エネルギーの生産は先細りとなることが予想される。

4. おわりに

生物的なCO₂固定の方法は植林とバイオマス・エネルギー利用とに焦点が絞られてきて

いるが、植林にしろ、バイオマス発電にしろ技術的な問題はほとんど解決しており、むしろ政策的な問題へと推移しているように見受けられる。なお、本校は著者が既に発表してきた「地球温暖化とバイオテクノロジー」『資源と素材』1994年14号、「植林による持続可能なエネルギー生産」『緑の文明学会報』1996年2号の内容を大幅に改題して著したものである。

地球温暖化問題と その対応についての概要

吉 江 照 一 (財エネルギー総合工学研究所
プロジェクト試験研究部 部長)



1. はじめに

地球温暖化問題は、化石燃料使用に伴うCO₂などの温室効果ガスが大量に大気中に放出され、これにより長期的に地球規模で気温が上昇し、その結果、海面の上昇や気候の変動等様々な悪影響が顕在化してくることが懸念される問題である。大気中の温室効果ガスの濃度は、近年、人類の活動が質的量的に変化したことに伴い、急速に増大し始めている。

地球温暖化を防止するための温室効果ガスの排出削減は、特定の国だけが実施しても効果はなく、国際的取組みが不可欠であり、これまでに多くの国際会議が開かれ議論されてきた。1997年12月には、わが国が議長国となり、気候変動枠組み条約に関する第3回の締約国会議(COP3)が京都で開催され、2000年以降の先進国の温室効果ガス削減目標が設定された。

本稿では、これまでの地球温暖化問題に対する内外の動向やCOP3での取り決め、CO₂排出削減に関する技術的対応策等について概略する。

2. 温室効果ガスについて

地球温暖化を一言でいえば、CO₂等の大気

中の赤外線を吸収するガスの増加により、地表から宇宙空間へ出ていく熱放射が妨げられるために起きる気温の上昇である。この大気中の赤外線を吸収するガスを温室効果ガスという。

現実の地表面の大気温度は、約15℃であるが、温室効果ガスがないとすると、マイナス18℃になると言われる。従って、地球上の生態系にとっては、温室効果ガス自体は必要なものであるが、問題は温室効果ガスが過剰に存在すると気温が上昇し、各地域における気候のバランスや生態系のバランスを崩し、それに伴う海面上昇、農作物への悪影響、マラリアの発生増大などを引き起こすということである。

温室効果ガスには、CO₂、メタン、亜酸化窒素(N₂O)、オゾン、各種フロン、水蒸気等がある。現在の地球の温室効果の90%以上は、水蒸気によって引き起こされているといわれるが¹⁾、水蒸気が地球温暖化問題で問題にされないのは、人為的排出量より、自然生成量の方がはるかに大きく、人工的制御が利かないためである。表1は、各種温室効果ガスの温暖化能力(地球温暖化指数)と寿命時間を示したものである²⁾。温暖化能力とは、ある温室効果ガス1kgを大気中に放散したときに、同じ条件のCO₂の温暖化効果に対する比であ

表1 地球温暖化指数

温室効果ガス	寿命 (年)	地球温暖化指数		
		20年	100年	500年
CO ₂	50~200	1	1	1
CH ₄	12.2±3	56	21	6.5
N ₂ O	120	280	310	170
HFC134a	14.6	3,400	1,300	420
HFC-23	264	9,100	11,700	9,800
PFC-14	50,000	4,400	6,500	10,000
PFC-116	10,000	6,200	9,200	14,000
SF ₆	3,200	16,300	23,900	34,900

出所：IPCC報告書 1995

る。当然ながら気体の赤外線吸収量が大い
ほど、また寿命時間が長いほど大きい値になる。

地球温暖化などの地球規模の気候変動は、
エネルギーの大量消費など人間活動の拡大に
よる温室効果ガスの上昇によるものだけでは
なく、自然変動による、例えば、地球軌道の長
周期変動、太陽活動の変化、火山活動などの
影響もあり、人間活動がどの程度寄与してい
るかは、不透明な部分が多い。また、化石燃料
の燃焼などから生じるエアロゾル（大気中に
浮遊する微粒子）の増加は、地球を冷却する
方向に作用するといわれている。しかしなが
ら、近年の温暖化の傾向は、人間活動による
ことが大きいというのが、一般的認識である。

表2は、CO₂、エアロゾル、太陽活動の過去
100年における地球温暖化（約0.6℃上昇）へ
の寄与を推算した例である³⁾。これによれば、
温室効果ガスのプラス効果とエアロゾルのマ
イナス効果を総合すると、人間活動による温
暖化への寄与は、約7割を占めることになる。

図1は、気候変動に関する政府間パネル
（IPCC）の第2次報告書に示された、産業革命
前から現在までの人間活動による地球温暖化
への、温室効果ガス別の寄与である。CO₂が64%

と最も大きく寄与しているが、メタン、フロン
類などのガスの影響も大きいことが分かる。

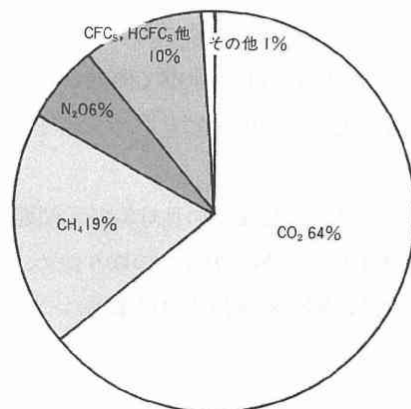
このIPCC報告書は、地球温暖化に対して、

表2 地球温暖化への要因（1986～1996年）

温室効果ガス (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, CFCs 等)	184% (1.1℃)
エアロゾル	-112% (-0.7℃)
太陽活動	28% (0.2℃)
トータル	100% (0.6℃)

(注) CO₂濃度が2倍になったとき、3℃の気温
上昇を仮定

出所：T.Wigley;W.E.C.Symposium on Global
Warming, Tokyo, 1997



出所：IPCC報告書 1995

図1 地球温暖化への温室効果ガス別寄与

以下のような警告を行っている。最近の地球の温暖化傾向は、化石燃料の燃焼等の人間活動によって生じたCO₂の上昇によるものと断定し、何らかの対策をとらないと、2100年には、平均気温が約2℃、海面は約50cm現在より上昇するとしている。また、CO₂を産業革命以前の約2倍の550ppmに安定化させ、温暖化を食い止めるには、2100年までのCO₂の累積排出量を現在想定されているベースに比べて、34%削減する必要があるとしている。

3. 地球温暖化問題に対する国際的動向

CO₂の増加が地球を温暖化するという指摘は、既に、1896年にスウェーデンの化学者アレニウスが行ったといわれるが、地球温暖化問題が、国際的関心を強く引くようになってきたのは1980年代後半からである。これは、一つは冷戦が終わり東西間の緊張が無くなって(1989年ベルリンの壁崩壊)、国際政治における関心が地球環境問題に向けられるようになったこと、一つは、1987～1988年のアメリカにおける異常気象による干ばつともあいまって、1988年6月の米上院公聴会におけるハンセン証言である。これは、米航空宇宙局(NASA)のゴッダード宇宙研究所のハンセン所長が、コンピュータ・シミュレーションの予測値をもとに近年の温暖化は、99%温室効果ガスによるものと発言し、大きな社会的影響を与えたことである⁴⁾。

表3は、地球温暖化問題に関する国際的動きをまとめたものである。1988年のトロント会議では、世界的なレベルで初めて、科学者、官僚、政治家が集合して地球温暖化を議論し、「先進国のCO₂排出量を2000年までに20%削減すべきである」という提言が採択されてい

る。同年、世界気象機構(WMO)と国連環境計画(UNEP)によりIPPCが設置されている。

IPPCは、気候変動に関する最新の科学的知見をとりまとめて評価し、各国政府にアドバイスとカウンスルを提供することを目的とした政府間機構であり、これまでに2度報告書を作成し、人間活動拡大に伴う地球温暖化への警告を行っている。

1992年には、地球温暖化防止対策を国際協力で進めるため、国連で気候変動枠組み条約が採択され、同年開催されたりオ環境サミットでは、155ヶ国がこれに調印している。この条約の中では、2000年のCO₂排出量を1990年レベルに抑制することを目指しているが(法的拘束力を持ったものではない)、各国ともこれを達成するには、非常に厳しい現状である。

一方、2000年以降の地球温暖化対策に関しては、これまでに、95年のベルリンでのCOP 1、96年のジュネーブでのCOP 2、97年の京都でのCOP 3と3回の締約国会議が開催されてきた。COP 3の概要については、次章で述べることにする。

4. COP 3の概要

1997年12月京都で開催されたCOP 3には、161ヶ国が参加し、2000年以降の先進国の温室効果ガス削減目標を盛り込んだ議定書を正式に採択した。削減に向けた途上国の取り組みに関しては、残念ながら議定書ではうたわれなかったが、先進国を軸に世界各国が地球温暖化防止に本格的に取り組む重要な一歩といえる。

COP 3の初期段階においては、2010年に向かっての温暖化ガス削減目標として、1990年の排出レベルに対し、日本政府は5%、米国は0%、EUは一律15%削減を提案する等、

表3 地球温暖化問題に関する国際的動きとわが国の対応

年	国際会議ほか	内 容	日本の対応
1979	・第1回世界気候会議	地球温暖化に対する危険性を指摘する。	
1985	・フィラッパ会議 「二酸化炭素およびその他温室効果ガスの、気候変化とその影響における役割のアセスメントに関する国際会議」	温暖化の影響についての初めての科学的な国際会議。	
1988	・ハンセン議長証言 ・トロント会議 「変わりつつある大気—地球安全保障にとっての意味に関する国際会議」	先進諸国に対し、炭酸ガス排出量を2005年までに現状のレベルより20%削減し、最終的には50%以上削減するようにという具体的提言を行う。	
1988	・気候変動に関する政府間パネル「IPCC」の設置	1990年中頃までに科学的知見、影響、対策について検討を行うことを決定。各国から温暖化に関する専門家が集まって、国際社会の次元で温暖化のシナリオ「科学的アセスメント」を作成することを決める。	
1989	・ノルドウェイク会議 「大気汚染・気候変動についての閣僚会議」	CO ₂ などの温室効果ガスの排出の安定化の必要性について合意。	地球環境保全に関する関係閣僚会議の設置。
1990	・IPCC第1次評価報告書 ・ヒューストン・サミット	温室効果ガスの大気中濃度を現状レベルに安定化するには、ただちに排出量を現状より60%削減する必要があると勧告。	地球環境保全に関する関係閣僚会議で「地球温暖化防止行動計画」策定。CO ₂ の排出抑制目標やそのための対応策が示された。 「地球再生計画」をヒューストン・サミットで提唱。
1992	・気候変動枠組み条約採択 ・国際環境開発会議「環境と開発に関する国連会議」(リオ環境サミット)	気候変動枠組み条約に日本を含む155カ国が署名。	
1993			環境基本法制定。
1994	・気候変動枠組み条約発効 ・締約国会議の設置		
1995	・第1回締約国会議(COP1) ・IPCC第2次評価報告書採択	ベルリンマンデートの採択： COP3までに2000年以降の新しい公約策定とパイロット段階の活動を設定すること。	協同実施活動ジャパン・プログラムを決定。
1996	・第2回締約国会議(COP2)	IPCC第2次評価報告書の評価。 ベルリンマンデートの検討。	
1997	・第3回締約国会議(COP3)	先進国の温室効果ガス削減目標を定めた「京都議定書」を採択。	COP3の議長国としてのまとめ役。

出所：文献4等より作成

参加各国間で大きく意見が分かれていた。合意に至るまでの交渉は紛糾を極めたが、以下の骨子で漸く合意が成立した。

- ①削減対象とする温室効果ガスは、CO₂、メタン、亜酸化窒素と3種の代替フロン系ガス（ハイドロフルオロカーボン（HFC）、パーフルオロカーボン（PFC）、六フッ化硫黄（SF₆）の6種類とする。
- ②先進国全体で、1990年比で5.2%（CO₂換算）の削減を達成し、各国ごとに削減目標を設定する。削減の基準年はCO₂、メタン、亜酸化窒素に関しては、1990年とし、代替フロン類については、1995年とする。主な国別内訳としては、EU 8%、米国7%、日本6%である。
- ③目標達成は、2008年から2012年までの5年間の平均とする。
- ④温室効果ガス吸収源としての森林の役割は、1990年以降の植林、伐採に限り考慮する。
- ⑤先進国間での排出権取引および共同実施を

認め目標達成のための柔軟性を高める。排出権取引の具体的な実施規程は、COP 4以降の締約国会議で決定する。

なお、COP 4は、1998年11月、アルゼンチンで開催されることとなった。

5. 地球温暖化問題に対するわが国の対応

5.1 地球再生計画の提言

わが国の地球温暖化問題への対応としては、1990年の地球環境保全に関する関係閣僚会議での申し合わせに基づき、対外的には「地球再生計画」をヒューストン・サミットで提唱している。「地球再生計画」とは、産業革命以来200年の間に変化した地球を、

- ・世界的な省エネルギーの推進
- ・クリーンエネルギーの大幅な導入
- ・革新的なエネルギー環境技術の開発

等により、今後100年かけて温室効果ガスを削減し緑の地球を再生することを目標とした、総合的かつ長期的な行動計画である（図2）。

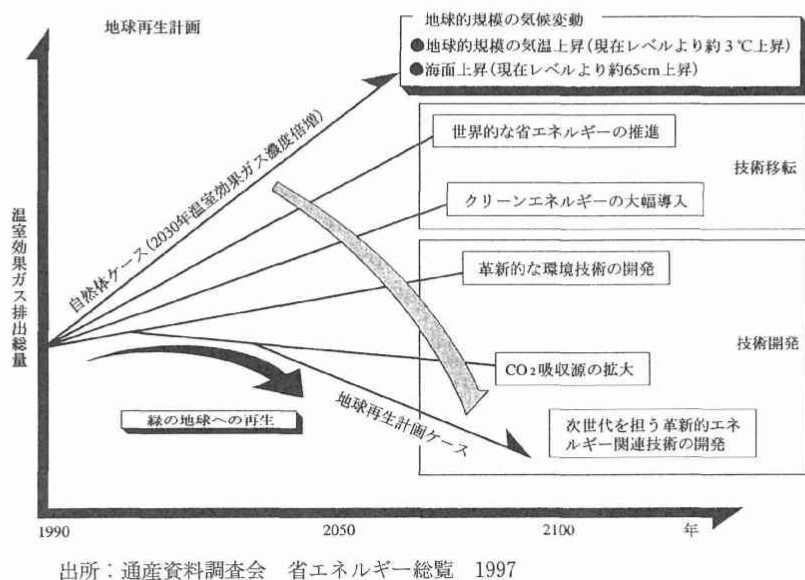


図2 地球再生計画の概念図

この「地球再生計画」に関しては、1997年3月、産業構造審議会地球環境部会の中間報告書で、「気候変動問題についての我が国の対応について（新地球再生計画構想を中心として）」という骨子で、2000年～2100年に向けてのCO₂対策技術に対する具体的検討に資するため、全世界を対象として以下のシナリオについての試算を行っている。

① CO₂の抑制のない自然体ケース

この場合は、一次エネルギーにおける石炭の割合が著しく増加し、2100年にはCO₂レベルは、700～1000ppmと予想され温暖化が進むという結果となる。

② 政策制度面の支援がなく2100年にCO₂濃度を550ppmに制約するケース

この場合は、技術開発が進まないため、対策技術のコストは下がりず、エネルギー供給コストが大幅に上昇し、エネルギー需要が自然体ケースに比べ、4割強減退する。

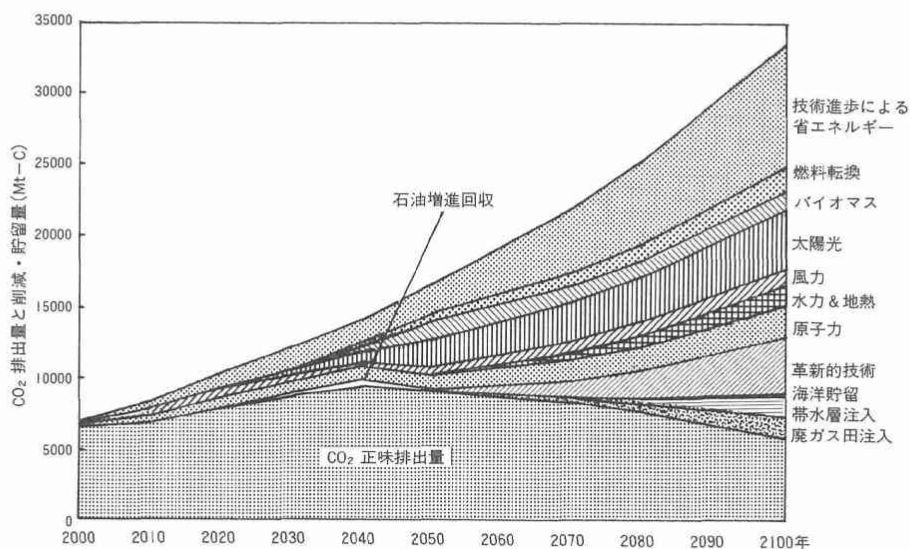
③ 技術開発・移転を政策的に促進する前提で

2100年にCO₂濃度を550ppmに制約するケース

この「新地球再生計画」と呼ばれるシナリオに対する試算結果を図3に示す。これによれば、目標をクリアするためのCO₂の排出量削減の分担としては、将来的には、省エネルギー3割、クリーンエネルギー3割、革新的エネルギー2割、CO₂の回収分離約1割という分担になる。

5.2 国内の行動計画

国内の行動計画としては、前述の地球環境保全に関する関係閣僚会議での決定に基づく「地球温暖化防止行動計画」があり、これは、「一人当たりCO₂排出量について2000年以降概ね1990年レベルでの安定化を図ること」、「CO₂排出総量が2000年以降概ね1990年レベルで安定化するように努めること」等を目標としている。対策としては、非化石エネルギー



出所：産業構造審議会地球環境部会 資料

図3 「新地球再生計画」に対する試算結果

一源の活用，炭素の含有の少ない燃料への転換，エネルギー効率の改善，CO₂の吸収源となる森林の保全などを規定している。

CO₂排出抑制に係わる省エネ，新エネの強化を目的とした最近の取り組みとしては，

- ・総合エネルギー対策推進会議における「2000年に向けた総合的な省エネルギー対策」の決定（1997年4月）
- ・「新エネルギー利用等の促進に関する特別措置法」の施行（1997年6月）
- ・「新エネルギーの利用等の促進に関する基本方針」の閣議決定（1997年9月）

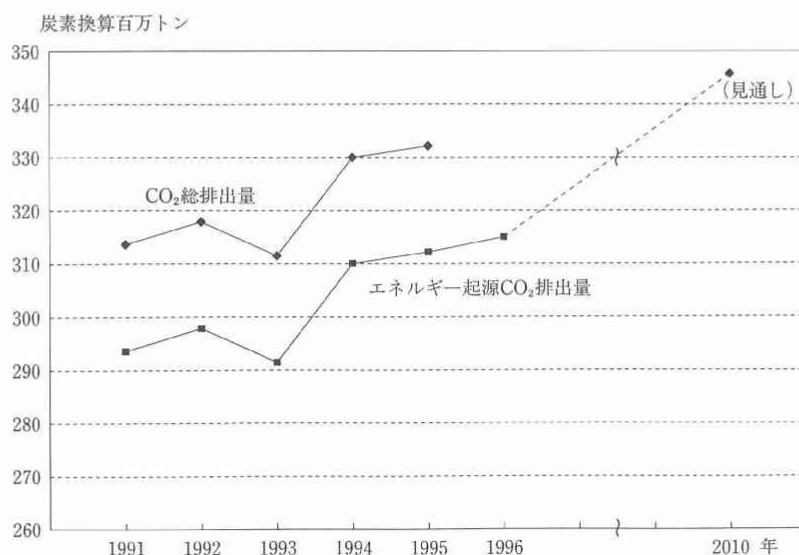
がある。

前者の「省エネ対策」は，産業，民生，運輸の全ての部門にわたる66項目の具体的強化施策から構成されており，今後，本対策に基づき，具体的な対策の実施・検討を進めるとともに，毎年実施状況をフォローアップすることになっている。産業分野における対策は，

事業者による一層の省エネルギー促進，行政による省エネルギー設備の導入支援等が，民生分野での対策は，省エネルギー型住宅の普及促進，住宅以外の建築物の省エネルギー化の推進等が，また，運輸分野での対策としては，交通機関単体のエネルギー消費効率の向上や自動車交通円滑化，渋滞緩和等の交通対策がうたわれている。

後者の「新エネ法」は，新エネルギーの導入を総合的に推進するために，政府，エネルギー使用者，エネルギー供給事業者，機械器具の製造・輸入事業者，地方公共団体等の講ずべき基本的措置を定めたものである。

なお，対象となる新エネルギーは，太陽光発電，風力発電，太陽熱利用，温度差エネルギー利用，天然ガスコージェネレーション，燃料電池，廃棄物発電，クリーンエネルギー自動車（電気自動車，天然ガス自動車，メタノール自動車）等である。



出所：通産省資料

図4 わが国のCO₂排出動向

6. わが国のCO₂排出動向

わが国の温室効果ガス排出の96%はCO₂であり、その9割強がエネルギー起源である。

図4は、わが国のCO₂の排出動向である。CO₂の排出量は、年間約3.3億トンであり、これは世界の約5%（世界で4番目）に当たる。エネルギー関連のCO₂排出量は、1990年で2.9億トン、95年で3.1億トン、何ら対策をとらない場合の2010年の見通しは3.5億トンとなり、1990年レベルに対して約20%の増大となる。

このような状況を背景に、総合エネルギー調査会基本政策小委員会は、1996年5月～12月にかけて、今後のエネルギー政策のあり方に関する広範な検討を進め、同年12月に中間報告書の取りまとめを行った。

その中で、2000年～2030年のエネルギー見通しとわが国のCO₂排出量見直しを探索目的でのシミュレーションが実施されている。シミュレーションのシナリオと結果を表4および図5に示す。これによると、現行程度の省

エネ、新エネ施策でこのまま推移した場合には、CO₂排出量は大幅に増大すると見込まれる一方、CO₂排出総量を1990年レベルに抑制するためには、省エネ、新エネ、原子力をそれぞれ最大限に推進して、2030年に初めて実現可能というものである。従って、最近のエネルギー消費の大幅な増大傾向や新エネルギー導入の停滞、原子力発電所の立地の困難さをみると、前述の「地球温暖化防止行動計画」の目標を上回るCOP3の6%温室効果ガス削減の達成は、非常に厳しいものと言える。

7. 温暖化問題に対する技術的対策の概要

地球温暖化に対する技術的対策には、大きく分けて、「緩和策 (mitigation)」と「適応策 (adaptation)」がある。前者は、積極的にCO₂などの温室効果ガスの大気への放出を抑制する対策であり、後者は、将来温暖化した場合にその影響を少なくさせる対策である。例えば、後者の対策としては、海面上昇に備えての堤防の構築、気温の変化に応じての農作物

表4 CO₂排出量シミュレーションの「シナリオ」と試算結果

	基 本 的 想 定	試 算 結 果
シナリオ1	・一定の経済成長率達成 (2011～2025年度平均2.2%) ・現行程度の省エネ・新エネ施策 ・原子力は20基程度増加の後、横ばいに転ずる。	・エネルギー消費の伸びは年1.0%程度 ・CO₂排出量は1990年度の約50%もの大幅増加 ・石油依存度も48%の高水準
シナリオ2	・一定の経済成長率達成 (2011～2025年度平均2.2%) ・省エネ (5,000万kℓ相当)・新エネ (8,000万kℓ相当)施策の最大限強化 ・原子力は更に50基程度増加 (この結果、設備容量1億kWを達成) 横ばいに転ずる。	・エネルギー消費の伸びは年0.7%程度 ・CO₂排出量は1990年レベルに抑制可能 ・石油依存度は41%まで低下

出所：総合エネルギー調査会 基本政策小委員会 中間報告（平成8年12月）

の転換や品種改良などが挙げられる。

技術的緩和策に関しては、わが国では主に発電システムを中心に研究、開発が進められてきている^{5),6)}。本稿では、これらを参考にこれまでに検討されている技術的緩和策の概要を述べることにする。

大気中のCO₂上昇による温暖化を防ぐ技術的緩和策としては、①CO₂発生を抑制する方法と②発生したCO₂を回収、③処理する方法がある。

(1) CO₂発生を抑制する技術

CO₂発生を抑制するためには、省エネルギー技術の導入や化石燃料の効率的な利用システムの導入などにより化石燃料消費量の削減を図る方法と、CO₂発生を伴わない再生可能エネルギー等の化石燃料以外のエネルギーを使用する方法がある。

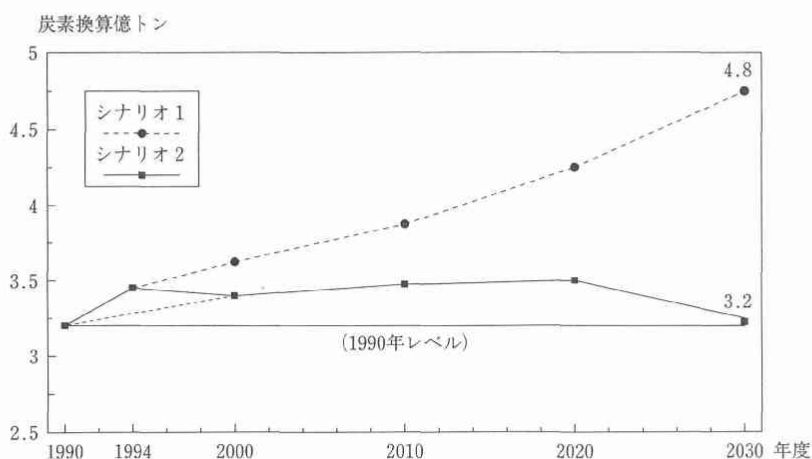
CO₂発生を抑制する対策技術としての例を以下に挙げる。

① 化石燃料の効率的利用システム

- ・コンバインド・サイクルによる高効率発電：ガスタービンや蒸気タービンなど2個以上のサイクルを組み合わせることにより、効率を向上させる発電方式。天然ガス複合発電，加圧流動床ボイラ複合発電，石炭ガス化複合発電などがある。既存の発電所の送電端効率は、40%程度であるが、これらのシステムでは約50%のレベルにも上昇させることができる。
- ・コージェネレーション：発電の際にできる高温排熱を暖房，給湯などに有効に用いる電熱併給システムで総合効率は、70～80%と高い。
- ・燃料電池発電：天然ガス等の燃料を改質して得られた水素と大気中の酸素を電気化学的に反応させて発電させるシステムで、発電効率は40～60%、排熱を回収すれば熱効率80%にすることも期待できる。

② 再生可能エネルギー・未利用エネルギーの利用

- ・太陽光発電：半導体の光電効果を用い、



出所：総合エネルギー調査会 基本政策小委員会 中間報告（平成8年12月）

図5 CO₂排出量に対するシミュレーション結果

太陽光エネルギーを電気エネルギーへ変換。

- ・地熱、風力、波力などの発電への利用。
- ・廃棄物発電：ごみ焼却に伴い発生する高温燃焼ガスを利用してボイラで蒸気を発生させ、蒸気タービンにより発電。

総合エネルギー調査会の「長期エネルギー需給見通し」によれば、わが国での新エネルギーは1992年度においては、黒液(パルプ液)、太陽熱、ごみ発電が主で全一次エネルギーの1%に過ぎなかったが、2010年には3%を目標としている。

③ 安全性確保に充分配慮した原子力利用

現在稼働中の原子力発電がなくなると発電部門におけるCO₂の排出量は2割アップするといわれており、原子力はわが国のCO₂削減に大きく寄与している。電力供給の安定やCO₂削減において、他に現実的で有効な方法がなければ、安全性を充分配慮した原子力開発利用の推進は、今後とも必要であろう。

(2) 発生したCO₂の回収

化石燃料の燃焼によるCO₂の回収には、大気に拡散したCO₂を回収する方法と、燃焼装置等の発生源において回収する方法がある。大気中からのCO₂の回収は、森林などによる光合成等の生態系を利用する方法しか目下のところ有力な方法はないが、固定燃焼装置からの回収方法としては、以下の3つの技術的方法が検討され、実証試験も行われている。

① 空気燃焼による燃焼排ガスからのCO₂分離・回収

燃焼排ガスからCO₂と窒素を分離しCO₂を回収する方法で、以下の技術が検討されている。

- ・物理吸収法：メタノール、ポリエチレン・グリコール系統の吸収液に高压下でCO₂を溶解。
- ・化学吸収法：モノエタノール・アミン等アミン系の吸収液に化学反応でCO₂を吸収。
- ・物理吸着法：ゼオライトなど固体吸着剤によるCO₂の吸着、分離。
- ・膜分離法：気体の透過係数の差を利用して、高分子膜を通すことによりCO₂を分離。
- ・深冷分離法：原料ガスを圧縮液化し、低温でCO₂を蒸留分離。

② 酸素燃焼による燃焼排ガスからのCO₂直接回収

化石燃料を、空気の代わりに酸素で燃焼させ、排ガス中に窒素がない状態でCO₂を直接回収する方法。

③ 燃焼前の燃料改質によるCO₂分離・回収

ガス化した化石燃料を、水蒸気改質反応でCO₂とH₂に転換し、CO₂を分離回収し、残りのH₂を燃焼させる方法で、CO₂を分離回収する技術は①と同じである。

わが国における固定燃焼装置からのCO₂発生の主たるものは、火力発電所からの発生である。現時点では、発電所にこのCO₂分離・回収技術を採用すると、発電コストの上昇と燃料消費量の増大に伴う総合効率の低下が大きいことが指摘されており、経済性の面からも早急な導入は困難な状況にあると言える。

(3) CO₂の処理

回収したCO₂の処理としては、以下の方法が検討されている。

① 海洋処理

- ・CO₂を気体のまま500m程度の浅海に、小さな気泡で放出し、海水に溶解させる方法。

- ・液化したCO₂を1,000~2,000m程度の大洋の中層水へ放流し、海水に吸収させる方法。

- ・液化または、固化(クラスレート化)したCO₂を3,000m以深の深海に貯留する方法。

いずれの方法も、CO₂の大量処理に伴う海洋生態系への影響評価を充分に行い、その安全性を確認する必要がある。

② 地中処理

- ・原油増進回収(EOR)への利用：原油層にCO₂を高圧で注入することで、原油を効率良く回収するとともに、原油層にCO₂を貯留する方法。

- ・天然ガス田や油田にCO₂を貯留する方法。

- ・地下帯水層にCO₂を貯留する方法。

③ CO₂の有効利用

- ・回収したCO₂を利用したアルコール、炭化水素類などの有用物質の合成。

以上、CO₂の技術的緩和策には現段階で適用可能なものから将来の技術開発を待たねばならないものまで様々な方法が検討されている。現段階では、単一の対策による短期間での解決方法はなく、適用可能な各対策を平行して進めていく必要があろう。

8. おわりに

COP 3で先進国の温室効果ガス削減の数値目標が設定され、わが国に対しては6%削減という厳しい値が課せられた。

地球温暖化問題への対応策としてこれまで様々な方法が検討され提案されているが、現

在のところ地球温暖化問題を短期間で解決する方法はない。問題の重要性、緊急性を考えれば、省エネルギー機器の導入など、現在の技術レベルで実行可能な対策から取組むことが必要であろう。

主たる温室効果ガスであるCO₂の発生は、化石燃料の利用段階だけでなく、燃料の採掘、処理、輸送、プラントの製造等でも当然発生するものである。地球全体としてのCO₂の発生を抑制していくには、個々の地域ごとの対策だけでなく、グローバルかつライフサイクルの観点から効率的な対策を行う必要がある。このためには、先進国と発展途上国との共同によるCO₂抑制策の実施が望まれる。

地球温暖化対策の多くが、省資源や自然環境の保全に繋がることを考えると、経済的にもリーズナブルな政策措置と技術開発の早期実現が求められる。

参考文献

- 1) R.Lindzen, Global Warming: The Origin and Nature of Alleged Scientific Consensus, MIT Faculty Seminar, 1992
- 2) IPCC第2次報告書, 1995
- 3) T.Wigley, Scientific Aspects of Global Warming, W.E.C.Symposium on Global Warming, Tokyo 1997
- 4) 米本昌平, 地球環境問題とは何か, 岩波新書, 1995
- 5) 加賀城俊正, 地球温暖化の防止技術, 季報エネルギー総合工学, 第14巻 第3号, 1991
- 6) 小川紀一郎, 地球温暖化問題と技術的対応策—CO₂分離・固定化技術の技術開発を中心として—, 動力第47巻第241号, 1997年7月

火力発電ボイラから 沸騰水型原子炉の熱水力解析へ

楠 野 貞 夫 ((財)エネルギー総合工学研究所
プロジェクト試験研究部 副主席研究員)



1. はじめに

当研究所では、平成4年度から平成9年度上半期まで、BWR(沸騰水型原子炉)の熱水力解析コードの開発に関する研究を、電力会社、大学、メーカ、ソフト会社と共同で進めてきた。その最新の成果は、平成9年9月末に東京工業大学で開かれた「第4回サブチャンネル解析に関する国際セミナー」(ISSCA-4: The Fourth International Seminar on Subchannel Analysis)の論文集に報告した。

なお、本研究の開始された年である平成4年(1992年)には第1回セミナー(ISSCA'92)を当研究所主催で開催した。第2回は1993年に米国で、第3回は1995年にスウェーデンで開催されている。

ここでは、本研究の概略を述べることにしたい。その準備として、火力発電とボイラの方面から入って、熱水力に関する予備知識を概説しておくことにする。

2. ボイラ技術と熱水力の発展

(1) 産業革命

火力発電、特に汽力発電は、燃料である石油、石炭、あるいはLNG(液化天然ガス)の燃焼熱によって水から蒸気を発生する「ボイ

ラ設備」と、熱を機械エネルギー(仕事)に変換する蒸気タービン設備とが中心である。

火力発電を論じるには、ボイラ技術の基礎となる水蒸気を利用する技術にさかのぼる必要がある。

蒸気力の利用例としては、すでに西暦1世紀にアレキサンドリアのヘロンが祭壇の扉を開く装置を作ったことが知られている。¹⁾しかし、近代的な蒸気機関は18世紀の産業革命に至って発明された。当時、次第に深くなる石炭坑道からの湧水の汲み上げポンプの駆動力に500頭もの馬では限界に達しており、蒸気力ポンプはこれに代わるものとして登場した。18世紀初頭には、ニューコメンの蒸気機関が実用化され、イギリスだけではなくヨーロッパ大陸にも普及したが、その仕事効率は低く、大量の燃料を消費した。これは、蒸気を冷却したときの真空に及ぼす大気圧の力を利用する「大気圧機関」であった。

18世紀中頃、グラスゴー大学のブラックは潜熱を発見した²⁾。その弟子であったJ.ワットは潜熱が比熱よりも約1000倍も大きいことを知って、それまでの蒸気機関の500パーセント以上もの熱効率改善のある蒸気機関を発明した。この振動式回転機関の特許が1782年に成立し1800年に消滅するまでに、ほぼ500台の

ワットの蒸気機関が市場に出た。1807年には、ワットの蒸気機関を利用したフルトンの蒸気船がハドソン河を航行し、1829年にはスチーブンソンの蒸気機関車がマンチェスター〜リバプール間を走っている。

(2) 熱水力現象の基礎づけ

ブラックと同時代の頃、ライデンフロストは高温の媒体に接する液滴の振る舞いを観察し、膜沸騰の概念を組み立てた²⁾。

19世紀、特にイギリスの産業革命の最後の段階（ヴィクトリア朝時代）は、主として蒸気力によって牽引されたものである。したがって、この世紀は水・蒸気系の熱流体力（熱水力）学の研究が大幅に進歩した世紀でもある。熱力学一般および蒸気の表面凝縮に関するジュールの業績、ケルビン卿（元の名前トムソン）による気泡核形成の理論、クラウジウスによる飽和曲線の特性確立、レイリー卿による気液界面の不安定性の考察また気泡成長と収縮の基礎理論、20世紀に入っては、ヌッセルトによる膜凝縮の解析、抜山四郎氏（東北大学元教授）による沸騰過程特性の解明（プール沸騰曲線）³⁾等々がある。

(3) 蒸気機関とボイラ

火力発電は、このような熱水力の成果を基礎にして発達したものである。なお、熱水力とは直接関係ないが、電気といえばエジソンによる発電システムが世界最初であろう。エジソンは企業家でもあり、パールストリート発電所及びニューヨークのエジソン電気照明会社（現在コンソリデーティッド・エジソン社）の配電網として形をなした電灯システムを設立した³⁾。この発電所は1882年9月に商

業運転を開始した。ただ1つの発電機がバブcock・ウィルコックス・ボイラから蒸気を供給されるポーターアレン機関に直結されて運転された。

わが国最初の火力発電所は、明治20年（1887年）に建設された東京電灯の往復蒸気機関によるものである。この時期のボイラは煙筒式丸形であった。初期の火力発電は往復蒸気機関を用いるものであったが、明治34年以降は水管式ボイラとタービン発電機が用いられるようになり、ボイラおよびタービン共に改良されつつ現在に至っている⁴⁾。

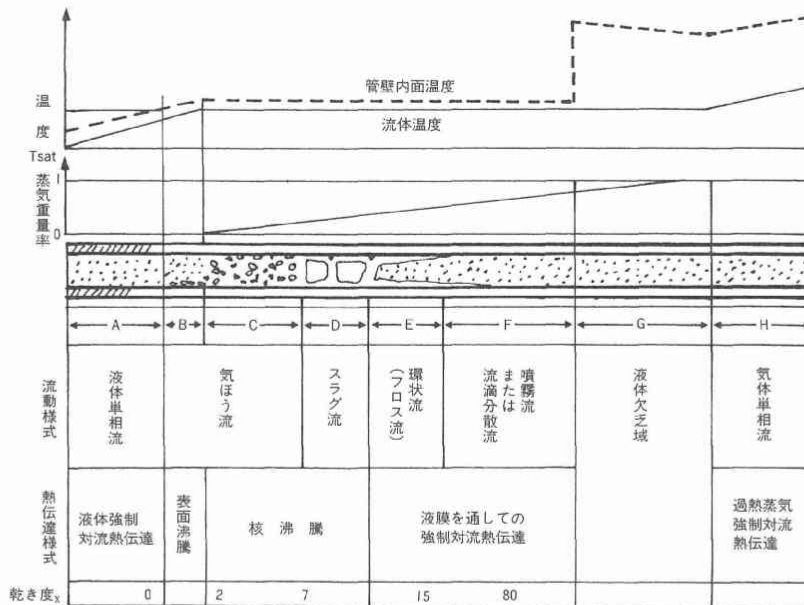
(4) 水管ボイラ

ボイラの主要部は、水および蒸気を入れる鋼鉄製容器（ボイラ本体）と燃焼装置から成り立っている。汽力発電に用いられる水管ボイラでは、火炉の周囲に水管を配した構造になっている。ボイラの給水は、この水管内を上昇しながら加熱され、蒸気となる。さらに、蒸気は過熱器に入り必要な温度まで昇温され、過熱蒸気となる。

なお、過熱器を抜けた燃焼ガスは、再熱器（タービンから戻された蒸気を再度過熱域まで昇温する）、節炭器（ボイラのガス流路の最下流で、火炉水管に入る前の給水に残留熱を与える）、及び空気予熱器（ボイラの外で燃焼用空気を予熱する）で徹底的に熱を回収された後、集塵機を経て空中に放出される。もちろん、このとき大量の炭酸ガスと窒素酸化物も放出される。

燃焼熱を有効に利用するために、水管の配位は垂直、水平、斜め、あるいはスパイラルなどが組み合わせられた構造になっている。

水管ボイラでは、水管内で沸騰して発生す



注：図中のA, B, C, …は図2に対応している。T_{sat}は飽和温度。

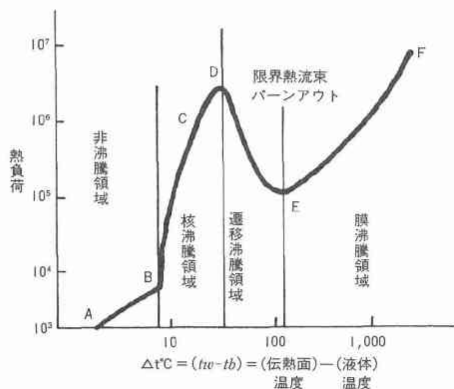
出典：「新原動機論」日本工業新聞（昭和55年11月）

図1 管内沸騰熱伝達様式と流動様式⁴⁾

る気泡を伝熱面より除去させないと、蒸気は熱の不良導体であるため過熱して腐食や破裂の危険がある⁴⁾。垂直蒸発管中では、図1に示すように、最初は水の液体単相流であるもの

が管外からの加熱により沸騰し、相変化のある沸騰熱伝達状態となる。

熱伝達率は、液膜の消失する付近で急激に減少し、そのため蒸発管の温度は急上昇し、図2に示すように、管材料の耐熱温度を越すこととなって、水管の過熱膨出破裂などの事故を生ずることとなる⁴⁾。



横軸は伝熱面の表面温度と水の飽和温度との差の対数。
縦軸は単位伝熱面積あたりに単位時間に伝わった熱量（熱負荷）の対数

出典：「新原動機論」日本工業新聞（昭和55年11月）

図2 沸騰中の水の熱伝達例⁴⁾

3. 原子力と火力の違い

水の位置（ポテンシャル）エネルギーをタービン発電機を介して電気に変換する水力発電は別として、火力発電も原子力発電も化石または原子燃料の潜在（ポテンシャル）エネルギーを解放して水に伝達して蒸気を発生利用する点では、全く同等と言える。両者の違いは燃料であり、前者が化石燃料の燃焼（化学反応—原子・分子レベル）であるのに対して、後者は原子核燃料の「燃焼」（核反応—原

子核レベル) という点である。

原子・分子レベルから原子核レベルへと対象がより微視的になるにつれて、物質の反応エネルギーはけた違いに巨大化する。例えば、石炭、石油の主成分の一つである炭素の発熱量は1 kg当たり8.1 Mcal (メガ10^6カロリー)⁵⁾であり、また LNG では同じく13 Mcal⁶⁾である。

これに対して、天然ウラン中の原子核1個が核分裂するときの放出エネルギーはほぼ

表 1 燃料の発熱量と炭酸ガス排出量

燃料タイプ	発熱量または最大保有エネルギー (Mcal/kg)	CO ₂ 排出係数 (0.1kg-C/Mcal)
炭素	8.10 *1	1.235 *4
コークス	7.20 *2	1.230 *5
LNG	13.00 *2	0.5639 *5
天然ウラン	2×10^7 *3	0
水力(高さ1m)	2.34cal/kg/m *6	0
太陽光 (1日当り)	2.73Mcal/m ² /d *7	0

*1 火力原子力発電必携

*2 EDMC '97エネルギー経済統計要覧

*3 ウラン原子核1個が核分裂するときの放出エネルギーを200MeVとし、すべての天然ウランが核分裂するものと仮定して計算した

*4 炭素の発熱量の逆数から求めた

*5 「気候変動に関する国際連合枠組条約」に基づく日本国報告書、1994年、日本国政府

*6 1kgの物質が高さ1mにある時の位置エネルギー

*7 理科年表。東京の全天日射量の日積算量の月別平均値の年平均を11.44 MJ/m²とした

200 MeV (メガ電子ボルト) であるから、もしも天然ウラン1 kgがすべて核分裂するならばその発熱量はほぼ 2×10^7 (2千万) Mcal という膨大なものになる。代表的な燃料の発熱量を表1で比較した。参考のために、炭酸ガス排出量も示した。

原子力発電の場合も、基本的には火力発電と同様な設備構成であるが、ここに述べたよう

に、化石燃料に比べて、原子燃料の単位質量当たりの発熱量(燃料のエネルギー密度)がけた違いに大きいこと、さらに燃料が放射性物質であること、核分裂連鎖反応により生じる中性子の制御等のために、燃料輸送・管理・備蓄などに関して特徴的な差が生じてくる。また、ボイラ設備と燃焼方法等にも特徴が出てくる。

もっとも、燃料の放射性に関しては、石炭などにも多くの放射性物質が含まれていることは周知の事実であり、リスクの比較がなされている⁷⁾。

4. 原子力発電、とくに軽水炉

日本の現在の発電は、主として火力、原子力、水力によって構成されており、1995年の発電電力量の構成比はそれぞれほぼ6, 3, 1の割合となっている。このように、日本の原子力発電は送電を開始した1965年から30年あまり経過した現在、重要な電力供給源の一つとして不可欠な地位を占めている⁸⁾。

1938年12月にハーンとシュトラースマンによる核分裂の発見から丁度4年後には、フェルミらによって世界最初の原子炉「シカゴパイプ」が臨界に達した。しかし、真の世界最初の原子力発電に成功したのは、アメリカの実験用増殖炉 EBR-1であって、1951年から1964年まで運転された⁹⁾。電気出力は最大200kWであり、冷却材は常温で液体のナトリウム-カリウム合金 NaKであった。

現在、世界の原子力発電の大部分(85%)は軽水炉であり、PWR(加圧水型原子炉)とBWRの2種類がある⁹⁾。原子力開発初期の頃には、多くのタイプの原子炉概念が考案されている。その中には、燃料のウランを水溶液や熔融塩の形で循環させるものもあった。し

かし、結局、燃料の除熱と中性子の減速とを軽水により兼ねて行う軽水炉が主流になった歴史的な事実は興味深い。なぜならば、軽水を中心とするボイラ技術は、火力発電と共通部分が多いからである。

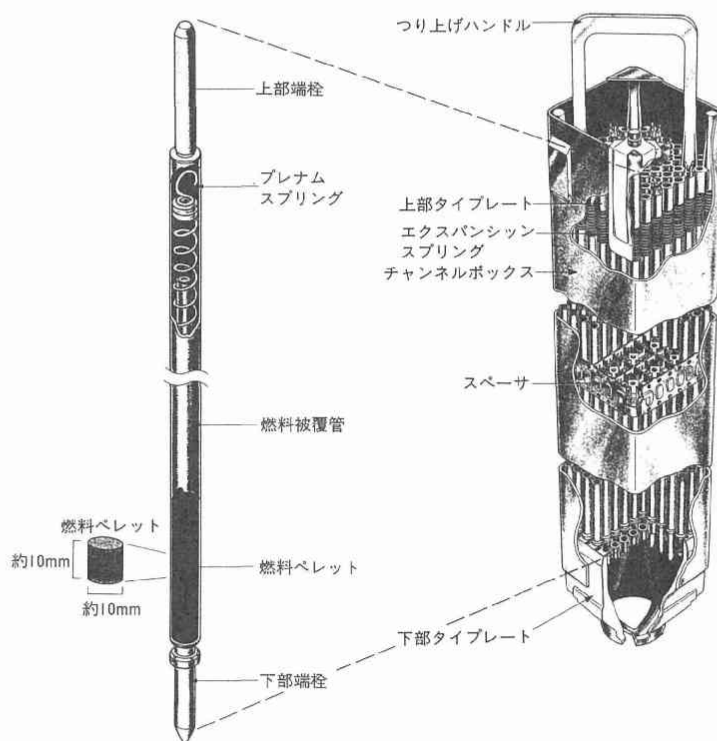
しかし、PWR と BWR では開発の初めからその目的が異なっていた。PWR は潜水艦の動力源が目的であり、1955年1月にノーチラス号として実現した。最初の PWR 実証炉は SHIPPINGPORT (6 万 kW 電気出力) で 1957 年 12 月に運開した。PWR では、一次系の水は約 150 気圧まで加圧されて沸騰が抑えられており、蒸気発生器を介して発電する間接サイクル型である。

一方、BWR の研究開発はアルゴンヌ国立

研究所によって始められ、ゼネラルエレクトリック社が共同開発で進め、当初から発電を目的としていた。最初の商用 BWR ドレスデン 1 号炉 (2 万 kW 電気出力) は 1960 年に運開した。水の圧力は約 70 気圧であり、沸騰により発生した蒸気で直接タービンを動かす直接サイクル型である。ただし、正確にいうと、ドレスデン 1 号炉は間接サイクルも併用した二重サイクルであった。

先に述べた火力との燃料の違いを考慮すると、以下のような特徴が出てくる。

- (a) 燃料はペレット形状に焼き固められたセラミックスで、被覆管中に封入され (燃料棒)、燃料集合体としてまとまった単位で取り扱われる。図 3 は BWR 燃料集合体¹⁰⁾の



(資源エネルギー庁、原子力発電施設安全性実証解析シリーズ、原子力発電所のしくみ、<「確かな設備」で「安全運転」を> 第2章-3より作成)

図 3 燃料棒と燃料集合体¹⁰⁾

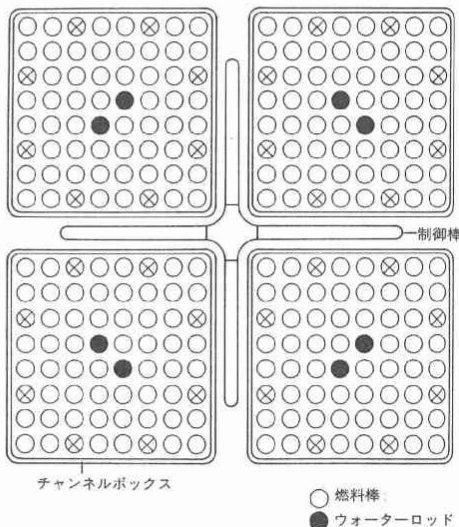
一例を示したものである。集合体の全長は4m程度あり、燃料棒の間隔を正確に保つためにほぼ7個のスペースを使用する。

- (b) 燃料の供給は、一定期間毎に複数の燃料集合体をまとめて取り替えるパッチ交換方式であり、燃料交換なしで1年以上の連続運転が可能である。
- (c) 中性子の減速や制御のために、燃料集合体の中には水やクラスター制御棒の通る管が入る場合がある。
- (d) BWR の場合には、燃料集合体の外側をチャンネルボックスで取り囲み、隣り合うチャンネルボックスの間に十字形制御棒が入る構造である。

5. 燃料集合体の構造と冷却材の流れ

(1) 燃料棒の配列

軽水炉では、水管ボイラとは反対に、水が



8×8の4つの燃料集合体が中央部に十字形制御棒を配置して基本モジュールを構成する。各燃料集合体を取り囲む缶がチャンネルボックスである。ウォーターロッドは中性子束、したがって出力分布を平坦化するために使用される。

図4 BWRの4燃料集合体モジュール⁸⁾

燃料棒の周囲を流れて熱を受け取る。多数の燃料棒は燃料集合体として束ねられ、垂直に炉心に装荷される。BWR燃料集合体の水平断面形状は、例えば図4のように燃料棒を正方格子状に規則的に配置したものである。同図では、制御棒を囲む4燃料集合体の配置を示している。図5はその鳥瞰図である。BWR特有のチャンネルボックスは、燃料棒冷却のための流路と制御棒、炉内計装等を冷却するための流路を分けるとともに、制御棒をガイドし、燃料棒を保護する機能を持つ。さらに、燃料集合体取扱い時に、それに剛性をもたせるとともに燃料棒の保護ともなっている。

このように、BWRでは、PWRとは異なり、燃料集合体はチャンネルボックスで相互に隔てられており、その全長にわたって流動に関わる諸物理量のやりとりはない。その代わり、各集合体間の熱流挙動は、各燃料集合体の出入口が上部、下部プレナム部分に直結しているので、この部分における境界条件を介して流体力学的に相互作用する。

図4では、燃料棒の配列が8×8で、中央に2本のウォーターロッドが配置された例を示している。このほかにも、9×9や10×10の配列がある。ウォーターロッドについても円筒形以外にも、四角いチャンネルボックス形状、十字形状などもあり、各燃料メーカーのノウハウの詰まった製品として電力会社に納入されている。

燃料集合体は炉心に装荷されると、定検期間を除いても、数年間は安全かつ効率的に燃焼するように設計される。従って、一つの燃料集合体中の燃料棒の出力分担割合は、燃焼初期と末期とは異なることがある。各燃料棒を出来る限り安全かつ効率的に燃焼させる

管に置き換える。これは、燃料棒の外径と配列ピッチで決まるものである。図7はこのような水管における流動様式を示している²⁾。

燃料ペレット中に蓄積された核分裂の熱が熱伝導により被覆管表面にまで伝わり、さらに管表面から冷却材へと熱が伝達されることにより、図7のような流動様式が形成される。

(a) 液体单相流

冷却材が燃料集合体下部に液体单相流(水)の状態に入った直後は、熱伝達面の温度(T_w)は飽和温度(T_{sat})よりも低いので対流熱伝達がおきる。また、燃料棒の上下端は一般に燃料表面熱流束も最も小さい領域である。

(b) 気泡流—サブクール沸騰

冷却材がさらに上方に移動するに従い温度も上昇する。冷却材温度が飽和温度よりも低い、管表面温度が飽和温度を超えると、サブクール沸騰(表面沸騰)とともに気液二相に相分離が起こり気泡流となる。しかし、冷却材温度が飽和温度よりも低い間は、気泡が管表面から離脱してもすぐにつぶれてしまう。

(c) 気泡流—飽和沸騰

冷却材温度が飽和温度に達すると、飽和沸騰(バルク沸騰)が起こり、気泡はつぶれずに沸騰する。沸騰が開始すると、冷却材のバルク温度は一定となる。この領域では、被覆管の表面温度は最大発熱量の場所で最高となる。このことは、冷却材が沸騰しないPWRとは異なるところである。

(d) 気泡流—核沸騰

さらに、冷却材温度が飽和温度を越えると、まだ気泡流の状態であるが、熱伝達様式は、核沸騰領域に入る。この熱伝達様式は極めて

効率が良く、管表面の微小な気泡発生点において多くの小気泡が形成され、単位熱流束当たりの温度上昇は非常に小さい。

(e) スラグ/チャーン流から環状流へ

冷却材が上に行くに従い気泡が合体しながらスラグ流、チャーン流(またはチャーン・タービュレント流:スラグ流と環状噴霧流との遷移状態)、さらに環状流の様式が次々と形成されていく。BWRでは、燃料上部の方は環状流の状態で運転されており、特に重要な流動様式である。環状流では、燃料棒表面に液膜が張り付いて流れる(液相)と同時に、流路中央部には蒸気相(気相)と飛散した液滴とがより大きな速度で流れている。この液滴径が比較的小さい場合を、特に環状噴霧流と言い、BWRでは典型的なものである。

(f) 強制対流蒸発

燃料集合体内の強制対流下における熱伝達様式の多様なモードを理解するために、図8に沸騰曲線を示す¹²⁾。縦軸は壁面熱流束 q'' 、横軸は壁面過熱度($T_w - T_{sat}$)である。同図の上部は強制対流沸騰曲線である。下部には比較のためにプール(解放された空間における自然対流下の)沸騰曲線も示したが、これは図2と同じものである。BWRのような蒸気重量率の大きい環状流条件下では、蒸気流速と界面での乱流レベルが大きく、かつ液膜が薄くなり過ぎて、気泡核が形成されずに、熱伝達が加熱面上の薄い液膜を通して直接行われる(強制対流蒸発)¹²⁾。これは、図8の④から⑤の区間に対応しており、気・液界面における蒸発と単相での対流熱伝達に類似した流れが特徴である。ここでは、熱伝達係数が非常に高い結果、熱流束が増大するにつれて壁面温度が低下する。

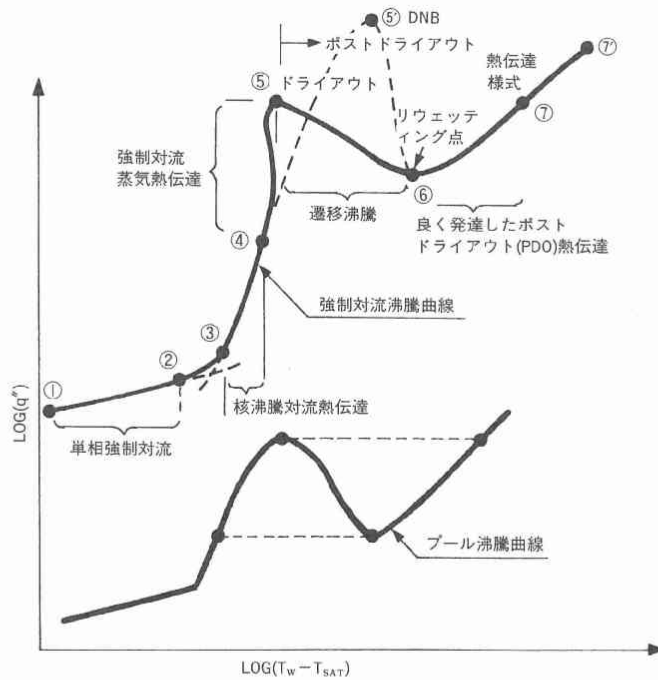


図 8 典型的な対流沸騰曲線とプール沸騰曲線⁽¹²⁾

(g) 沸騰遷移点

図 8 の⑤は、BT (沸騰遷移) あるいはドライアウト点、すなわち、強制対流蒸気熱伝達と遷移沸騰との切替点である。液単相強制対流①からこの点までの熱伝達モードをプレ BT 熱伝達モードという。また、このドライアウト点から強制対流蒸気単相までの熱伝達モードをポスト BT 熱伝達モードという。

BT 現象は二相流条件に関係するもので、主として加熱面上の液膜のドライアウトに起因する。液膜が一旦消失すると、加熱面は蒸気及び液滴の衝突だけで冷却される。特に蒸気速度がかなり大きく、高い蒸気重量率の条件下では、この熱伝達モードはかなり優れている。それにも係わらず、液膜が消失すると加熱表面の温度が急上昇する。通例この表面温度は振動するが、それはドライアウトの先

端が振動するからである。ただし、BWR の場合には温度上昇は通例どちらかと言えば緩やかで、振動も激しいものではない。

(h) 遷移沸騰

領域⑤から⑥までは、TB (遷移沸騰) 領域である。ここは極めて不安定な領域で、加熱面が流動中の液体によって間欠的に物理的に濡れる (リウエットング) ことが特徴である。BWR では実用上の重要性はほとんどない。

(i) リウエットング点

⑥はリウエットング点と呼ばれているが、膜沸騰から核沸騰への切り替え点であり、またある条件下では強制対流蒸気単相または噴霧流から強制対流蒸気への切り替え点である。通例、熱伝達率は BT 点とリウエットング点とで著しく変化する。

(j) 良く発達したポストドライアウト熱伝達

領域⑥から⑦は、BTが発生する蒸気重量率及び質量流束条件に対応して、PWRの場合とBWRの場合とに区別される。

BWRのような高蒸気重量率/低質量流束条件に対しては、図9に示すように、壁温度上昇は緩やかで、液膜ドライアウト点よりも下流側の熱伝達状況はしばしば噴霧流（液不足の膜沸騰—文字通りには蒸気膜は明らかに存在しないが）と呼ばれる。PWRとの混乱を避けるために、⑥から⑦で起きる高蒸気重量率/低質量流束条件下の熱伝達現象を記述するために、良く発達したPDO（ポストドライアウト）熱伝達という言葉を使っている。

これに対して、PWRでは、この領域を対流膜沸騰といい、図9に示すように、低蒸気重量率/高質量流束条件のため、かなり厳しい壁面温度上昇がDNB（核沸騰からの離脱）点

で発生する。この点よりも下流（燃料上部）側で、加熱面を蒸気が環状に覆うような逆環状流が形成されて、⑥～⑦では膜沸騰が起きている。

7. スペーサ

燃料集合体内の熱流動現象の中でもう一つ忘れてはならないものは、スペーサに係わる現象である。スペーサは燃料棒間隔を機械的に固定するために不可欠ではあるが、余計な中性子吸収材になること、また流動障害物となる恐れもある。従って、スペーサの設計は燃料集合体設計の重要な位置を占めている。スペーサの断面形状は、格子（グリッド）状あるいは、円環を水平につなげた（サーキュラー）形状などがある。スペーサが流れを乱すことを逆用して、熱的余裕のある設計が行われている。

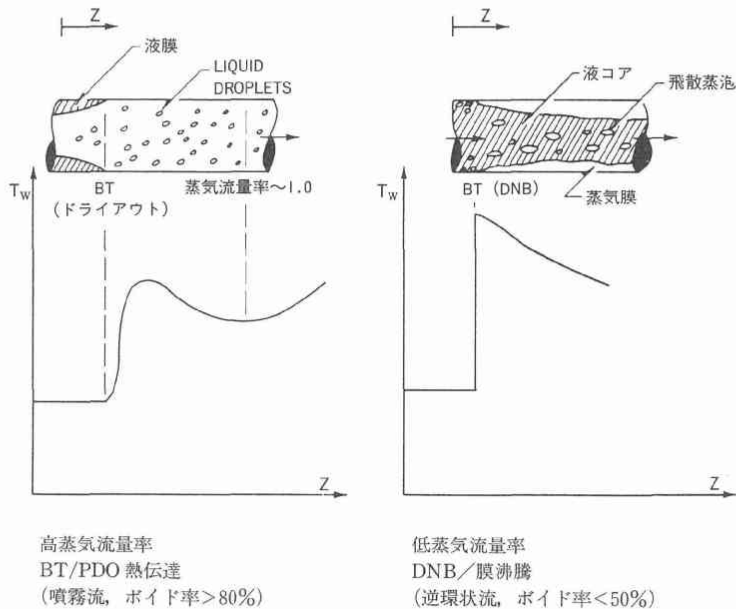


図9 ポスト沸騰遷移熱伝達様式¹²⁾

一般に、これまで述べたような熱伝達機構や流体力学現象に關与する物理現象は相当複雑であり、現在のところ実験的に決められた相関式によって表現することがよく行われている。このような実験は、集合体を構成する部品毎に行われる他に、燃料集合体全体を模擬した総合試験もある。

8. サブチャンネル解析コード

(1) サブチャンネル解析とは

炉心設計においては、原子炉の通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時において、燃料の許容設計限界を越えることがないこと、また燃料設計においては、燃料集合体は、原子炉内における使用期間中に生じ得る種々の因子を考慮しても、その健全性を失うことがないことが要求される¹³⁾。

このような要求に熱水力学的な方面から応えるために、いくつかのコードを使用する。その中でも、個々の燃料集合体内の詳細な解析をするために、「サブチャンネル解析手法」が用いられる。すなわち、一個の燃料集合体の燃料棒・流体間の熱水力学的な特性を求めるために、インチャンネル領域をいくつかの小領域（サブチャンネル）に分割し、隣接するサブチャンネル間において、質量、エネルギー、運動量の保存則を境界条件のもとで解くことである。

サブチャンネルを定義するには、2つのやり方がある。一つは流路中心サブチャンネルであり、他は燃料棒中心サブチャンネルである（図10参照¹⁴⁾）。ここでは、伝統的によく行われている前者の方法を採用する。チャンネルボックス・コーナー及びチャンネルボックスに面する部分を含めたサブチャンネルの取り

方の例を図11に示した。また、軸方向についても有限のメッシュサイズを用いる。

解くべき基礎式は、基本的に流体力学と熱力学とを組み合わせたもので、前記手続きで定義された有限の3次元立体（コントロールボリューム）に対して適用する。BWR では、液相と気相の二相体系であるが、これまで開発されたコードには、気・液を均質化したもの、

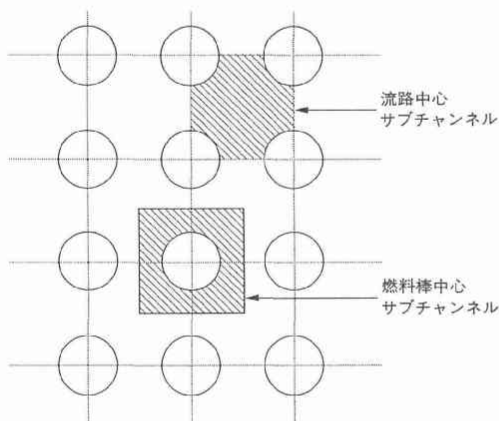
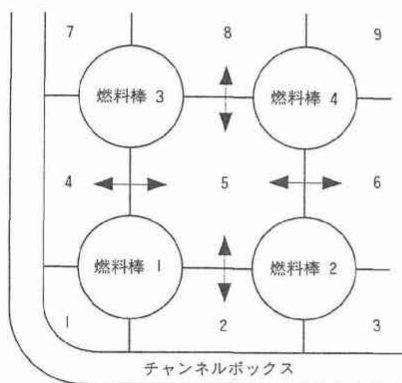


図 10 サブチャンネルの定義に関するオプション¹⁴⁾



矢印は隣接サブチャンネル間の物理量交換を示す

図 11 インチャンネル断面の流路中心サブチャンネルへの分割方法の例

気液二相のもの、液相を液膜と液滴の2流体にさらに分離して三流体場の取り扱いをするものなどがある。

(2) NASCA コード

当研究所は、冒頭で述べた研究の成果として、サブチャンネル解析コード NASCA (Nuclear Reactor Advanced Sub-Channel Analysis) を関係機関と共同開発した¹⁵⁾。

NASCA 開発の目的は、BWR 燃料集合体内の熱流動現象、すなわち液体単相から沸騰遷移、ポスト沸騰遷 (沸騰遷移後) に至るまでの一連の事象推移を時間的にシミュレーションし、燃料内温度分布変化を算出し、燃料の健全性評価に役立てることである。開発の中心は、ポスト沸騰遷の伝熱・流動挙動評価機能である。さらに、サブチャンネル間の流体移動モデル、スぺーサモデルの高度化及びリウェッティングモデルの開発を行い、コードに組み込んで解析手法を高度化することである。

NASCA では、二流体スキームの三流体場に関する9方程式を同時に解く。すなわち、未知数は液膜体積率、蒸気体積率、圧力、液膜速度、蒸気速度、液滴速度、液膜温度、蒸気温度、液滴温度の9個である。燃料集合体内の熱流動現象は、出来る限り素過程を物理 (機構論的) モデルに基づいて方程式に反映するようにした。また、これらの方程式を閉じるための構成方程式 (物質方程式) についても最新のものを整備した。コードの数値計算技術以外に、特に物理モデル構築のために注力した現象は、

- (a) サブチャンネル間の流体移動
- (b) 液膜・液滴挙動
- (c) スぺーサ効果
- (d) 沸騰遷移、ポスト沸騰遷移、リウェッティング
- (e) 隣接する燃料棒の発熱量が異なる (ウ

オータロッドなど)

である。

採用した物理モデルはまだ完全なものではないが、実施した検証計算の範囲では、ほぼ妥当な結果が出ている。例えば、 4×4 燃料集合体ポスト沸騰遷移現象におけるリウェッティング実験データの検証においては、燃料棒壁面温度の時間変化を再現することができた。

9. おわりに

BWR においても、速い過渡事象が発生し、それによってドライアウトが引き起こされる可能性はゼロではない。これに対処する安全系は整備され、設計条件も満たされている。

現在の熱的制限値は、燃料棒の健全性を保持するために、定常運転及び異常運転時の過渡事象において、燃料棒は沸騰遷移条件よりも下に保たねばならない。しかし、最近の多くの実験データによれば、もしもドライアウト時間が短い (数千分の一秒程度) ならば、燃料被覆管はたとえ非常に高温 (1300K) 条件下でも正常であることが示されている¹⁶⁾。さらに、前節の図9で示したように、BWR 条件下では蒸気と液滴の混合流が熱伝達に良く寄与するので、被覆管温度は沸騰遷移後でも著しくは上昇しない。

従って、現行の熱的基準を変更し、過渡事象に対して短時間のドライアウトは許容しようという動きもあるし、事実そのような新しい基準で運転しているプラントが海外にはある。これは、「ポスト・ドライアウト基準」あるいは、「時間・温度基準」と言われている。これは、BWR 設計に多大な自由度をもたらし、より単純な設計も可能となる。

ただし、これを実現するためには、従来のような多くの実験式を組み込んだコードでは、保守的な評価しかできず、自由度の高い設計に挑戦するには不十分である。ほんのわずかの設計変更だけで、実規模の燃料集合体試験を実施することは極めて不経済である。

今後、NASCAは極めて多くの検証データと突き合わせる「検証期間」を経て、燃料設計等に役立てられる予定である。そのためには、できる限り多くの実験データ、特に実規模を模擬したものの公開が望まれる。

参考文献

- 1 渡辺 啓 著, エントロピーから化学ポテンシアルまで, 裳華房 1997年
- 2 G.S.H. Lock, Latent Heat Transfer, Oxford Univ. Press 1996
- 3 T.P.ヒューズ著, 市場泰男訳, 電力の歴史, 平凡社
- 4 資源エネルギー庁公益事業部発電課編, 火力ハンドブック, 電力新報社 1992年
- 5 火力原子力発電必携, 火力原子力発電技術協会編, 平成5年改訂5版
- 6 EDMC/エネルギー・経済統計要覧(1997年版), 日本エネルギー経済研究所, エネルギー計量分析センター編
- 7 バーナード・L・コーエン著, 私はなぜ原子力を選択するか, E R C 出版 1990
- 8 F.J. Rahn, A.G. Adamantiades, J.E. Kenton and C. Braun, A Guide to Nuclear Power Technology, Krieger Publishing Company, 1992.
- 9 日本原子力産業会議, 世界の原子力発電開発の動向, 1996年次報告
- 10 資源エネルギー庁, 原子力発電施設安全性実証解析シリーズ, 原子力発電所のしくみ
- 11 柏崎刈羽原子力発電所 原子炉設置変更許可申請書(6号及び7号炉完本)本文及び添付書類 平成6年9月現在 東京電力株式会社
- 12 R.T.Lahey, Jr. & F.J. Moody, The Thermal Hydraulics of a Boiling Water Nuclear Reactor, 2nd Ed. American Nuclear Society 1993.
- 13 発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針, 平成2年8月30日, 原子力安全委員会決定
- 14 N. E. Todreas and M.S. Kazimi, Nuclear Systems II, Elements of Thermal Hydraulic Design, Hemisphere Publishing Corporation 1990.
- 15 H. Ninokata, et al., "Development of the NASCA Code for Prediction of Transient B T and Post B T Phenomena in BWR Rod Bundles", The 4th International Seminar on Subchannel Analysis, Tokyo 1997.
- 16 T. Anegawa, "Industry Incentive to Improve Subchannel Analysis Method", The 4th International Seminar on Subchannel Analysis, Tokyo 1997.

〔海外出張報告〕

WE-NET関連技術調査に欧州を訪れて

大野 哲雄 (財)エネルギー総合工学研究所
WE-NETセンター 主管研究員



1. はじめに

「水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術研究開発、通称WE-NET (World Energy Network) プロジェクト」は、通産省・工業技術院のニュー・サンシャイン・プログラムの一環として企画・立案されたプロジェクトで、水素を二次エネルギー媒体として再生可能エネルギーの国際的利用を実現することを目的としている。このプロジェクトは、世界各地に豊富に存在する水力などの再生可能エネルギーを利用して発電し、この電気により水を電気分解して製造した水素を、液体水素やメタノールのような効率的に輸送可能な媒体に変換して輸送し、エネルギー消費地域での需要に供する、世界的規模のネットワークの導入を目指している。具体的な研究開発項目として、固体高分子膜水電解による水素製造法、水素燃焼タービン発電等の中核的な要素技術の開発およびシステム設計を総合的に推進している。

WE-NETプロジェクトの研究開発体制は、図1に示すように、九つのサブタスクにより構成されている。当研究所は、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託を受けて、このうちサブタスク1、サブタスク3の一部(安全)、サブタスク9を推進

している。

サブタスク1は、広範なテーマを抱えるWE-NETプロジェクトを効率的かつ一体的に運営するための調整機能、および開発計画の検討・立案等を実施する部門であり、当研究所は、そのためにWE-NETセンターを設立して研究開発の推進にあっている。

このプロジェクトは本年度で発足5年目を迎え、第II期計画案の検討・作成の時期にきている。このため、当所は、国内外の水素関連技術の最新開発動向の把握に努めており、本

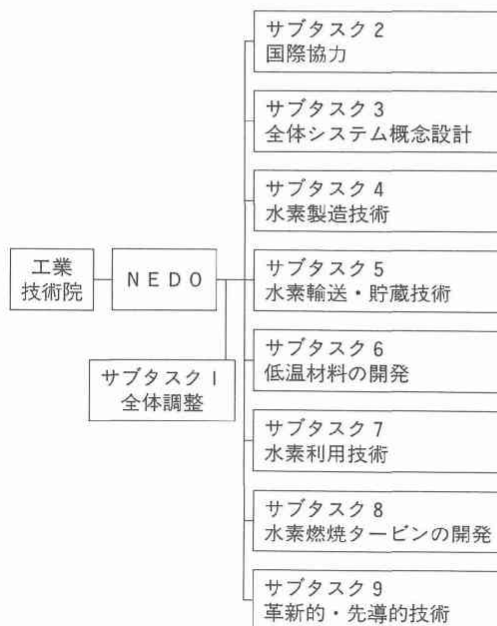


図1 WE-NETプロジェクト研究開発体制

年度は、欧州地域、特に再生可能エネルギー利用の盛んな北欧地域における水素関連技術の開発動向の調査と、水電解による水素製造技術の現状について調査を実施した。以下はこの調査の報告である。

2. 調査日程および訪問先

水素製造技術に関しては、現在世界最大の水電解水素製造能力をもつエジプト、アスワンのK I M A (Egyptian Chemical Industries) 社を訪問した。また、欧州地域の水素関連技術開発状況の調査としては、ノルウェーで開かれた水素エネルギー技術に関する国際会議HYPOTHESIS II (Hydrogen Power, Theoretical and Engineering Symposium II) に参加するとともに、同会議期間中にアルカリ水電解設備のメーカーであるノルスク・ハイドロ・エレクトロライザー (NHE) 社と情報交換を行った。このほか、ドイツのフラウンフォーファー研究所およびフィンランドのヘルシンキ工科大学を訪問した。

今回の調査日程および訪問先を表1に示す。

表1 調査日程および訪問先

日 程	訪 問 先
8月13日	K I M A 社 (エジプト, アスワン)
8月15日	フラウン・フォーファー研究所 (ドイツ, フライブルグ市)
8月17日 ~22日	HYPOTHESIS II 国際会議 (ノルウェー, グリムスター)
8月20日	ノルスク・ハイドロ・ エレクトロライザー社
8月25日	ヘルシンキ工科大学 (フィンランド, ヘルシンキ)

3. 水電解による水素製造技術の調査

水電解技術の特徴は、分離操作がなく、可動部が少なく、かつ無公害、保守が容易など、工業プラントとして優れた特性を有しており、今世紀初頭から工業化されていた。その後、水素を必要とする化学工業の発展に伴い、水電解プラントの数、規模も増大してきたが、増大する水素の需要に対して、発電による安価な電力が得難くなってきたことから、近年、水素は殆ど化石燃料から製造されるようになってきた。

しかし、最近、水電解技術が新たな視点から再び注目を浴びるようになった。それは、1973年の石油危機を契機として「水素エネルギー」の概念が生まれたことによる。つまり、水電解技術が、従来の化学工業用の原料水素を供給する手段としてだけでなく、エネルギー媒体としての水素を水から製造する手段、あるいは電力から水素へのエネルギー変換手段として見直されたのである。

世界の水素製造量は、副生水素を含み、表2⁽¹⁾に示すように総量が5,000億Nm³/年で、その大半は化石燃料、とりわけ天然ガスを原料とした蒸気改質法によりつくられている。水の電気分解による水素製造は、全体の4%、200億Nm³/年となっている。日本における水素製造量は、現在約170億Nm³/年であり、そ

表2 世界の水素製造量

水 素 源	億Nm ³ /年	%
天 然 ガ ス	2,400	48
石 油	1,500	30
石 炭	900	18
水電解	200	4
合 計	5,000	100

のうちソーダ電解副生水素が約10億Nm³/年を占めている。

3.1 世界最大の水電解設備を有するK I M A社を訪問

現在の水電解プラントは、多くが安価な電力が得られる水力発電所の近くに立地している。表3⁽²⁾に大規模水電解プラントの例を掲げる。今回訪問したK I M A社のプラントも例外ではなく、アスワン・ダム⁽¹⁾の安価な水力発電電力を利用しており、世界最大の規模を有している。

表3 大規模水電解プラントの例

場所 (国名)	装置企業	水素製造能力 (Nm ³ /h)	電解電力 (MW)
アスワン (エジプト)	ブラウン・ボベリ	33,000	182
ナンガル (インド)	デノーラ	30,000	165
リューカン (ノルウェー)	ノルスク・ハイドロ	27,900	153
グロムフィヨルド (ノルウェー)	ノルスク・ハイドロ	27,100	149
トレイル (カナダ)	トライル	15,200	84

表4 K I M A社のアルカリ水電解設備データ

項 目	内 容
水素製造能力	36,000m ³ /hr, 1ユニット900m ³ /hr×40グループ
製品純度	99.8%
運転条件	80℃常圧
エネルギー効率	71%*
稼働率	年間330日
セル面積	2.8m ²
セル電圧/電流	2.1V/セル セル全体で7.7kA
工場建屋	高さ20m×幅26m×長さ360m
電源	132kVの4回線
電力消費	180MW _e
水素貯蔵タンク	水封式15,000m ³
設備メーカ	デンマークのブラウン・ボベリ社(BBC社)製**

* 電力消費180MW_eと水素製造容量36,000m³/hrから逆算

** 現在BBC社は水電解分野から撤退しており、リベア部品はノルスク・ハイドロ・エレクトロライザー社等から購入している。

(1) K I M A社の概要

K I M A社は、窒素肥料等を製造する化学会社であり、水電解で得た水素と窒素から高圧法によりアンモニアをつくり、それより窒素肥料を製造している。

K I M A社の水電解設備は、1973年に更新のものが中心で、水電解セル、制御装置盤などはかなり古色蒼然としていたが、日常の保守点検、定期点検により、大きなトラブルもなく運転されていた。水素ガスの漏洩検知機が全く設置されていないのには驚かされたが、上部が開口した風通しのよい建屋に水電

解設備が格納されており、いわゆる静的な安全設備により安全運転がなされているのは注目に値する。設備データを表4に、受電設備、水電解設備を図2、図3に示す。

(2) コスト関連

使用電力の価格は世界最低レベルにあり、従って、水素の製造コストも表5のとおり、非常に安価である。

表5 エジプトにおける水素製造コスト

製造方法	製 造 コ ス ト
水電解法	0.4E £/m ³ (=12円/m ³)
天然ガスの蒸気改質法	0.17E £/m ³ (=5.1円/m ³)

(注)・電力コストは4.7ピアストル/kWh=1.4円/kWh (KIMA社向け特別価格)

・E £はエジプトポンド、1 E £=30円で計算

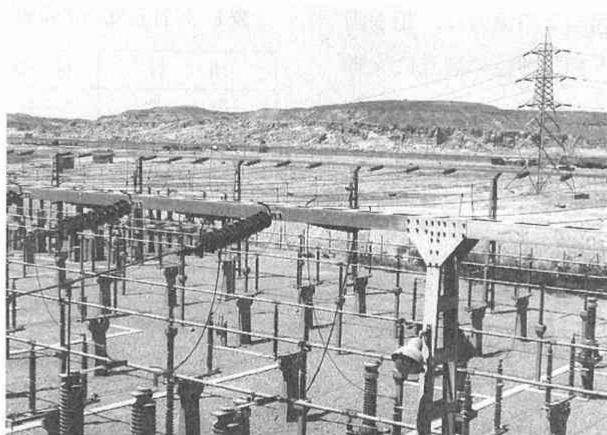


図2 アスワン・ダムからの水力発電電気の受電設備

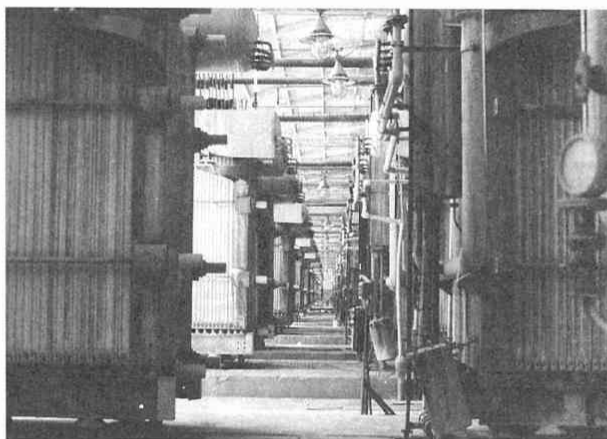


図3 300m以上にわたる水電解設備群

(3) エジプト雑感

ここで、アスワン訪問前に通過したカイロの印象を述べてみる。

カイロの人口は、周辺地域を含めて東京圏と同程度の1,200万人。空港からカイロ市内までの交通は一般にタクシーの利用で、いわゆるリムジンバスのような公共の交通機関は見あたらない。エジプトでリムジンというのは、程度のよいタクシーのことで、一般のタクシーはエアコンもなく、かなり古いルノーが多い。また、タクシー乗り場は決まっておらず、

近づいてきた何人ものタクシー運転手を相手に行き先地までの料金の個人交渉となる。

市内の交通事情は混雑が激しく、かつ運転は荒々しい。道路は排気ガスの臭いが充満しており、ドライバーの健康が気にかかる。また、横断歩道は見あたらず、歩行者は車の間を敏捷に走り抜け道路を横断している。カイロの人々の逞しさに新たな驚きを感じるとともに、このような発展途上国の実状を目の当たりにすると、経済発展のあるべき姿について再考させられるとともに、WE-NET構想

の実現に要する海外諸国との協力は、相手国事情への十分な配慮と相互利益の観点に立脚することが必要であると痛感した。

3.2 ノルスク・ハイドロ・エレクトロライザー（NHE）社との情報交換

NHE社は、ドイツのルルギ社、カナダのエレクトロライザー社と並ぶ、代表的な商用アルカリ水電解設備の供給会社である。また、ブラウン・ボベリー社（BBC）が水電解分野から撤退するに際して、その所有する水電解技術をすべて受け継いでおり、BBC製プラントのメンテナンス業務もすべて引き受けている。親会社のノルスク・ハイドロ社は、41%政府出資、49%各国資本参加の総合エネルギー企業で、化学肥料、石油・ガス、軽金属、石油化学に進出している。NHE社の最新アルカリ水電解設備データは表6のとおり。また、本アルカリ水電解設備1パッケージの例を図4に示す。

なお、より高効率を目指した、高压型アルカリ水電解設備の開発は、設備コストが高くなり採算がとれないため、開発は中断している。

ノルウェーでの水力発電コストは、平均4.8円/kWh、企業向けは3.2円/kWh、また、発電はベースが水力で、ピーク時は一部買電によっている。

水素製造コストは、NHEの試算によると、電気料金を9.4円/kWhとしたとき、54円/Nm³で、天然ガスから水素をつくればこの2/3ぐらいで可能としていた。なお、コスト評価時の設備償却年数は15年、設備は7～8年でセル表面の再処理を行うとしたものである。

表6 NHE社のアルカリ水電解設備の概要

項目	区分	内容
型式	—	バイポーラ型
セル数 (セル/パッケージ)	低電流型	31～230
	高電流型	24～230
セル配置	—	放射状に自由に配置できる。 最大24パッケージ
水素製造能力 (Nm ³ /h)	低電流型	377(230セルのとき)
	高電流型	485(同上)
製品純度 (%)	—	水素 99.9±0.1 酸素 99.5±0.3
運転条件	—	80℃、常圧
エネルギー効率 (%)	低電流型	86.5
	高電流型	82.4

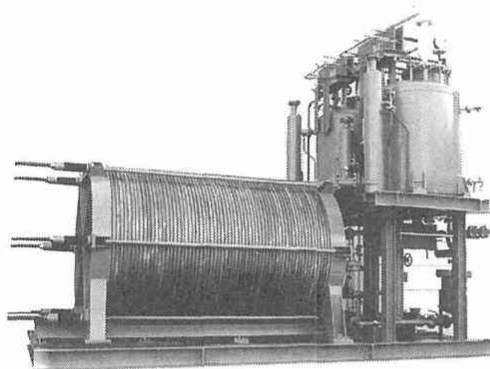


図4 ノルスク・ハイドロ・エレクトロライザー社の最新アルカリ水電解設備

4. HYPOTHESIS II 会議の概要

国際水素エネルギー協会（International Association for Hydrogen Energy : IAHE）は、1976年以降、世界水素エネルギー会議（WHEC）を偶数年に開催している。今回参加したHYPOTHESIS IIの会議は、水素エネルギー技術に関する国際会議で、このWHECを補完する意味で、奇数年に交互に開催さ

れ、本年は、その第2回目であり、ノルウェーのグリムスターで開催された。グリムスターはノルウェーの南端に位置する町、クリスチャンサンから、海岸沿いにオスロ方向に40kmほど行ったところにあり、若い頃のイプセンが過ごした町である。会議の参加者は表7に示すとおりである。

表7 会議参加者内訳

国名	人数	国名	人数
ノルウェー	66	フランス	6
ドイツ	26	ロシア	6
日本	9	ウクライナ	6
米国	8	その他	42
イタリア	8		
合計	177名		

会議は、「エネルギー価格競争下における、エネルギーキャリアーとしての、クリーンな水素燃料利用への挑戦」と題するオープニングセッションと、下記の技術プログラムに分けて開催された。

- ・輸送 11件
- ・水素製造 19件
- ・水素吸蔵合金 23件
- ・安全 5件
- ・水素システム 15件
- ・液体水素 8件
- ・燃料電池 9件

上記以外に、ポスターセッションが約30件あり、水素製造および水素吸蔵合金関連の基礎技術に関するテーマが主であった。

WE-NETについては、サブタスク2「国際協力」の関連で、エンジニアリング振興協会の岡野一清理事が、基調講演としてWE-NETの最近の研究状況について報告され、

また、サブタスク3「全体システム概念設計」関連の研究内容をイギリスのインペリアル・カレッジのハート氏が報告した。ポスターセッションでは、三菱重工がサブタスク8で「水素燃焼タービンのシステム検討」の結果を発表した。

会議の内容は、技術報告が中心であった。水素製造では化石燃料からの水素製造技術のレビューおよび水素製造関連の基礎技術が主であり、水素吸蔵合金、燃料電池とも研究室レベルの基礎研究報告が多かった。水素関連の技術開発プロジェクトにいくつか興味深い報告があったので、以下に紹介する。

(1) 水素燃料飛行機開発⁽³⁾

ダイムラーベンツ・エアロスペース・エアバス(DASA)社による報告である。水素燃料飛行機は、液体水素(LH₂)を燃料とし、オプションとして液化天然ガス(LNG)も考えられている。極低温液体燃料飛行機(Cryoplane)の名称のもと、ドイツとロシアによる1990年以来の共同実施のプロジェクトである。以下に開発のインセンティブの概要を示す。

①低コストの航空用燃料ケロシンが、将来は入手難となる

彼らは、2010~2020年頃には、主として地政学的理由により価格が高騰すると予想している。

②地球環境の保全

環境対策が、代替航空燃料を探索する最大の動機となる。いうまでもなく、水素飛行機は炭酸ガス(CO₂)放出はゼロである。

③なぜ水素か?

他の代替燃料と比べて、水素のユニークな利点を挙げている。

- ・再生可能エネルギーからの電気分解，あるいはバイオマスのガス化により，容易に，かつ世界中のどこでも製造できる。
- ・水素は燃焼に際して，排出は水のみであり，環境への影響はない。
- ・水素は，他の燃料に比較して重量当たりのエネルギーが最大であり，航空機燃料に適している。ただし，水素の運搬・貯蔵は，重量および容積の観点から液体水素となるが，なおケロシンの4倍の容積を必要とするため，飛行機の形状を変更する必要がある。

④水素エンジンの窒素酸化物 (NOx) 放出について

水素と空気の化学量論比燃焼における燃焼温度は，ケロシンの場合と比較して100℃程高くなっている。そのため，水素エンジンはNOxの放出量は増えるのではないかという議論がある。この反論として，

- ・水素はケロシンよりも希薄燃焼の安定性に優れており，実際の運転ではより低温運転が可能である。
- ・水素は燃焼が早く，NOxを形成する時間が少ない。
- ・水素はガス状で噴射するため，混合が良く，燃焼の際のホットスポットを避け易い。
- ・ケロシンと異なり一酸化炭素，炭化水素等がないため，NOx低減のみの観点から燃焼を最適化すればよい。

等々の特徴があり，低NOxを実現できるとしている。ブラット&ホイットニー・カナダ社は，予混合を用いることにより，将来の低NOxケロシン・エンジンのさらに1/10に低減可能とっている。

水素飛行機開発の現状は，ロシアでは実験

機ツポレフ-155を用いて，1988年に3基のエンジンのうち1基をLNGあるいはLH₂エンジンにしたデモ飛行を行っており，現在は，1998年に貨物輸送機ツポレフ-156のデモ飛行に向け計画を推進している。ロシアは主としてLNGを対象とした開発を行っているのに対し，西欧諸国では液体水素燃料飛行機に当初から着目している。両者は技術的には類似しており，共同開発として，エアバスA310をベースとした極低温液体燃料飛行機プロジェクトが推進されている(図5)。また，現在，ドイツ，ロシア，カナダの共同によりエアライナー・ドルニエDo328をベースとした液体水素飛行機(図6)を用いて，2000年に初飛行，2002年にデモ飛行をする計画もある。



図5 エアバスA310をベースとした水素飛行機



図6 ドルニエDo328をベースとした水素飛行機

(2) 欧州共同の水素燃料電池自動車開発プロジェクト

プロジェクト名称を「FEVER」と呼ぶ、欧州共同の燃料電池自動車開発には、フランスのルノー社（構造設計、デモ車組立）をリーダーとし、イタリアのデ・ノーラ社（固体高分子型燃料電池）、スウェーデンのボルボ社（制御、安全検討等）、フランスのエア・リキッド社（水素タンク、燃料交換設備等）等7社が参加している。1994年に開始し、1997年までに以下を仕様とする燃料電池自動車の開発を目指している。

- ・ 走行距離：500km
- ・ 最高速度：120km/h
- ・ 定格出力：30kW
- ・ 車両重量：2,200kg
- ・ 液体水素搭載量：8kg
- ・ 燃料電池：10kW燃料電池を3スタック

FEVERの燃料電池自動車は、走行距離を現行のガソリン自動車並とすることを狙ったゼロ・エミッション・ビークルである。会場には、車体の写真およびモデルが展示されていたが(図7)、ルノーのエステートバンに組み込んだ燃料電池システムはコンパクト化が十分でなく、後部座席と荷室を全部占領している。本プロジェクトの1993年の開始時点では、固体高分子型燃料電池の出力当たり重量は25 kg/kWであったが、1995年には10kg/kWになった。最新は4 kg/kWまで低減可能を見込んでいる。このように、固体高分子型燃料電池のコンパクト化が長足の進歩を遂げたことにより、出力当たり重量が、カナダのバラード車の2倍程度までに漕ぎ着けることができた。

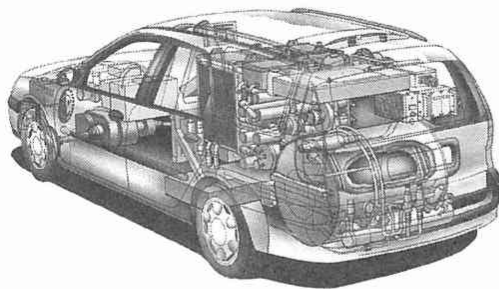


図7 FEVERが開発した燃料電池自動車

5. フラウン・フォーファー研究所訪問

フラウン・フォーファー研究所は、ドイツ国内37カ所に47研究所を有する非営利の研究機関である。職員は全体で8,000名、そのうち1/3が科学者とエンジニア。今回訪問した太陽エネルギーシステム研究所（Institute for Solar Energy Systems: ISE）は、その一部門で100人のスタッフがおり、ポリシーとして、大学の基礎研究と企業研究の中間に位置する、実用化研究に重点をおいた研究を行っている。

研究予算の内訳は20%が自己資金、20%が企業から、残りが政府からの拠出金となっている。ISEの研究部門は、熱および光システム、太陽電池システム、化学エネルギー変換および貯蔵、太陽電池セル技術、材料の5部門がある。トピックスは以下のとおり。

- ・ 太陽熱エネルギーの利用というテーマで、太陽エネルギーの集熱、蓄熱、採光、光発電、電解水素製造、水素触媒燃焼、燃料電池、ヒートポンプ・システムなどを設置した自給自足型ソーラーハウス研究を実施していた。ソーラーハウス（図8）は1992年に完成し、実際に居住する状態で3年間デ

ータを収集し、中央ヨーロッパの気候条件下での自給自足型ソーラーハウスの可能性をシステマチックに検証した。

- ・ 固体高分子型燃料電池、水素の触媒燃焼、炭化水素のリフォーミングを実験室規模で研究中。
- ・ 太陽光発電セルに関しては、表面加工などによる低反射高效率型を各種、精力的に開発中。

6. ヘルシンキ工科大学訪問

(1) フィンランドのエネルギー事情

電力構成は、水力20%、原子力30%、各種バイオマス20%を含む火力が50%となっている。また、1次エネルギーの25%が各種バイオマスで、200万トンのアンモニアをバイオマス起源の水素から製造している。水素製造のコストとしては、バイオマスは石炭より安い。LNGよりは高いとのこと。ガソリンは75%が税金で、その内30~40%が環境税。電力料金はエンドユーザーで12円/㎖程度。なお、フィンランドではバイオマスのガス化技術は既に実用化しており、スウェーデンの会社と

共同で、世界最初のバイオマスの加圧型ガス化のデモプラントを建設していた。

フィンランドの総発電電力量は日本の6~7%程度であるが、そのうち再生可能エネルギーの割合は40%を占めており、原子力の30%を加えれば、70%が再生可能エネルギー・ベースないしはCO₂放出なしの発電を既に実現していることになる。

北欧3国は、おしなべて発電に占める再生可能エネルギー割合が高い。1994年データによると、ノルウェーは、総発電電力は日本の約12%であるが、ほぼ100%が水力発電。スウェーデンは、総発電電力は日本の約15%であるが、水力が42%、原子力が51%となっている。

(2) フィンランドの新エネルギー開発プロジェクトNEMO 2

フィンランドでは、国のエネルギー研究体制が1988年に再編され、通商産業省は多数のエネルギー研究開発プログラムを設定した。その一つであるNEMO (New Energy Methods and Option) プログラムの目的は、国のエネ

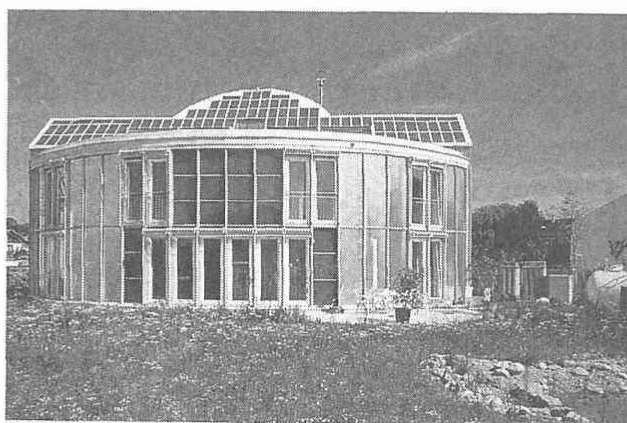


図8 自給自足型ソーラーハウス (ドイツ、フライブルグ市)

ルギー供給システムに対する新エネルギーシステムのポテンシャルを評価すること、および関連産業技術の振興である。NEMO 2は1993年度～1998年度の6年間のプログラムであり、新エネルギー分野技術の商業利用の促進を目指すもので、主として太陽光発電、風力発電、およびそれらのエネルギー貯蔵ならびに水素技術の3分野に重点を置いている。予算規模は、1994年度がピークで約4.8億円、その後は減少傾向になっていた。

NEMO 2プログラムにおける水素技術開発⁽⁴⁾では、水素を用いた新方式のエネルギー貯蔵システムの研究を行っている。すなわち、太陽電池、水電解設備、水素タンク、燃料電池設備を組み合わせ、既存の電力ネットワークから孤立した地点での、自立型エネルギーシステムの成立性を実証的に研究している。システム構成を図9に示す。本設備は、安全上の配慮から、担当しているヘルシンキ工科大学の構内には設置せず、隣接する学外の敷地に設けて研究を行っている。コスト評価の結果では、本システムは、太陽電池－蓄電池、および太陽電池－ディーゼル発電機の組み合わせよりも有利と報告している。

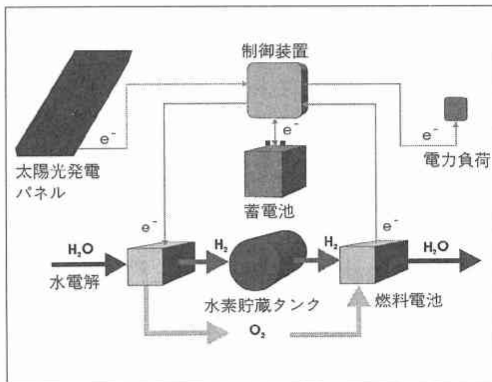


図9 自立型エネルギーシステム

7. あとがき

今回の調査の結果、最新のアルカリ水電解法のエネルギー効率は86.5%止まりであり、またWE-NETプロジェクトで開発中の固体高分子型の水電解技術が、設備のコンパクト化によるコスト低減可能性も含め、次世代型の水電解製造技術として適切で、かつエネルギー効率の目標値90%も妥当であることが確認できた。

さらに、北欧地域では、いわゆるバイオマス水素製造およびエネルギー利用が既に実用化域にあり、水素技術の国際会議でバイオマス水素製造技術の議論が少ないのも得心がいった。

水素自動車開発では、フランスのルノー社を中心とした企業が精力的に研究開発をつづけ、ドイツ、米国に急迫しているのが印象的であった。

引用文献

- (1) B.Gaudernack, Institute for Energy Technology, Norway
「Hydrogen Production from Fossil Fuels」
HYPOTHESIS II発表論文より
- (2) 竹中啓恭, 大阪工業技術研究所, 「燃料協会誌」70巻6号, P.487 (1991)
- (3) Dr. Heinz G.Klug, Daimler-Benz Aerospace Airbus GmbH, Hamburg, Germany
「CRYOPLANE, Hydrogen Fuelled Aircraft」
- (4) NEMO REPORT 28, 1996 「Advanced Energy Systems and Technologies Research in Finland」 NEMO 2 annual report 1994-1995

電源開発(株) 奥清津



「国境の長いトンネルを抜けると雪国であった…」の一節で有名な川端康成の名作「雪国」の舞台となった越後湯沢。現在では、スキー場のメッカとして毎年多くの人々が訪れています。

今回は、その越後湯沢にある日本最大の揚水式発電所、「奥清津第二発電所」(電源開発(株))をIAE女性研究員取材チーム(坂口, 元吉)が訪問しました。



発電所地点全景

☆国内最大の揚水式発電所☆

奥清津発電所は、国内最大規模の揚水式発電所です。ここでは上池(カッサ調整池)と下池(二居調整池)の2つの調整池を持ち、その間の有効落差470mを利用して、2つの発電所で最大160万kWの発電を行っています。昭和57年にできた第一発電所は、4台の発電機で100万kW、平成8年に完成したばかりの第二発電所は2台で60万kWの発電をしています。つくられた電気は東京電力(株)の新潟渇幹線により東京方面に送られており、発電所の運転は埼玉県川越市にある「東地域制御所」から遠隔操作で行っているそうです。

第二発電所 訪問記



！ A E 女性研究員取材チーム

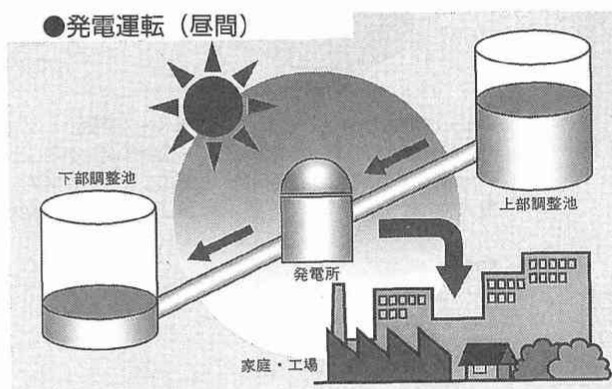
● 揚水式発電 — 上下2つの池を使う水力発電

奥清津発電所では、昼と夜に上下2つの池を使って発電する「揚水式発電」を行っています。まず、私たちの生活の中で最も多くの電力を使う昼間には、上の池から下の池へ水を落とし、水車を回転させて電気をつくります。一方私たちが眠っている夜は、昼間に比べ電気を使う量が少なくなるため、火力・原子力発電所で起こした電力を利用して下の池にたまった水を上の池にくみ上げ、翌日の昼間の発電に備えています。

揚水発電は夜間の電気を昼間のために水という形で貯蔵しています。夜間に電気を使い、昼間電気をつくることにより、1日の電力消費量が平均化され、発電設備全体の利用効率、投資効率を上げることに大いに貢献するそうです。

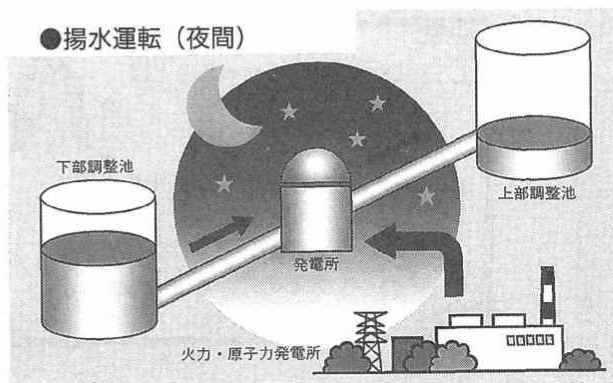
■ 揚水発電のしくみ

● 発電運転（昼間）



上の池から下の池に水を落とし、その勢いで発電機を回して電気をつくります。

● 揚水運転（夜間）



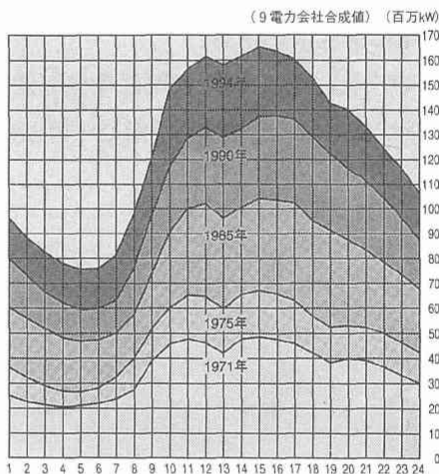
下の池にたまった水を、上の池にもどし貯水しておきます。

● 昼間のピーク時需要

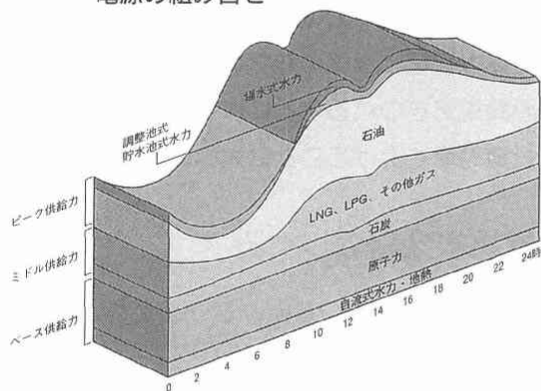
電気の使われ方は、年間では夏、一日のうちでは昼間が電力消費量のピークとなるなど季節や時間によって大きく変化しています。また、電気はためておくことができないため、品質の良い電気を安定的に安く供給するためには、それぞれの発電所の方式や特長を生かして、最適な方法で電気をつくる必要があります。

発電所の利用形態には大きく分けてベース電源、ピーク電源、ミドル電源の3つがあり、揚水式発電所は、この電源のベストミックスの中で、ピーク電源として重要な役割を担っています。

■ 1日の電力の使われ方（年間ピーク発生日）



■ 1日の時間帯別の電源の組み合わせ



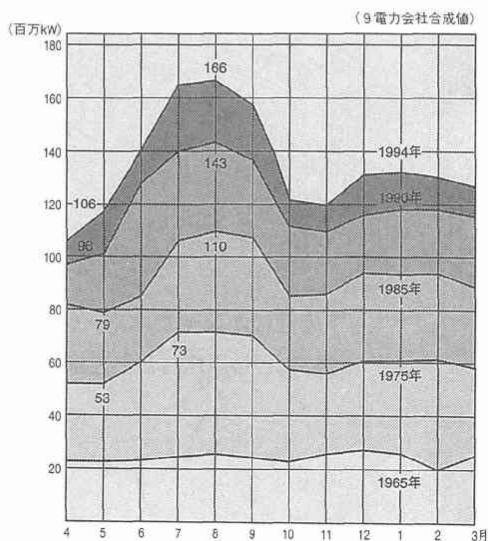
● ピーク供給力

一日のうち需要の高い昼間の限られた時間帯のみ発電する発電所
揚水式発電所など

● ベース供給力

一日中ほとんど同じ出力で運転するのに適した発電所
原子力発電所、石炭火力発電所

■ 月別最大電力の推移（発電端1日最大）



● ミドル供給力

ベース電源とピーク電源の中間的な特性を持つ発電所
LNG火力発電所など

素朴な質問 1

Q 水がなくなっちゃうことはないんですか？

A 揚水式発電所は水を2つの池に交互に移動させることにより、水を半永久的に使えるので、渇水の心配などはありません。

飯島課長

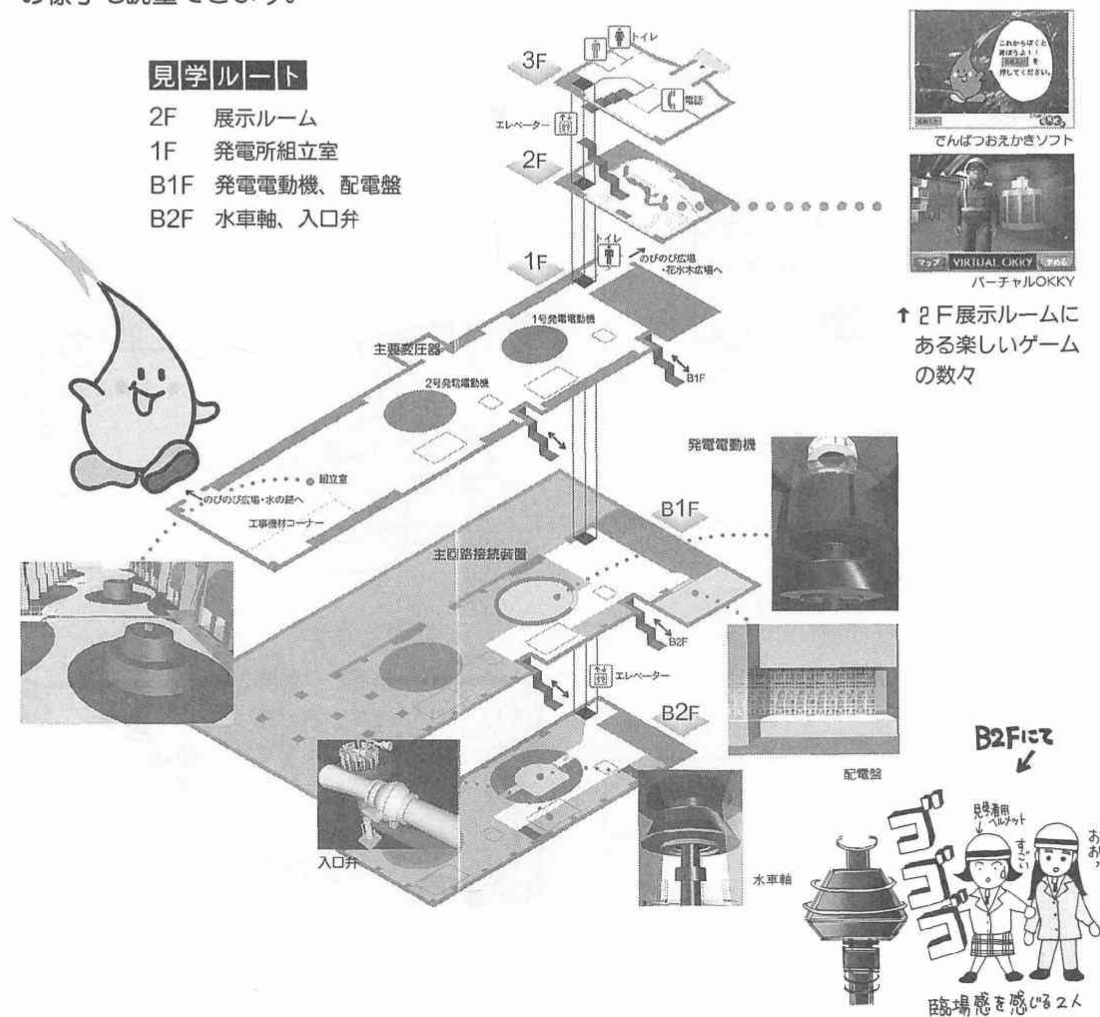
元吉

☆地域解放型発電所☆

平成8年8月から一般開放された「奥清津第二発電所」は、それ自身が「OKKYミュージアム」という見学施設になっており、12月～3月の閉館時を除いて平成9年11月末までに約48,000人が見学に訪れました。三国の山々に囲まれ、美しい湯沢の自然に調和したこの発電所は、本物の水車軸や発電電動機などが動いている様子を、透明のアクリル板を通して見るができます。

入口の2Fはマルチメディアを駆使した展示ルーム、1Fは発電所組立室、B1Fには発電電動機や配電盤、B2Fには水車軸・入口弁が配置されています。地階に落ちにつれ、ゴゴゴゴという重低音が体に響き、回転する機械の力強さを実感しました。

屋外には水路建設のために鉄管や資材を搬入したトンネルがそのまま保存された「水の路」や「のびのび広場」などの施設があり、岩を積み上げて作った「ロックフィルダム」の様子も眺望できます。



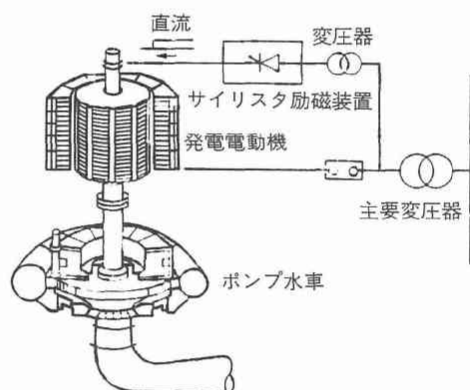
☆可変速揚水発電システム☆

奥清津第二発電所の特長の1つに、「可変速揚水発電システム」があります。これまでの揚水発電所のポンプ水車や発電電動機は一定の速度で運転されており、発電出力調整は入口流量を変化させることにより、発電運転時のみ可能でした。

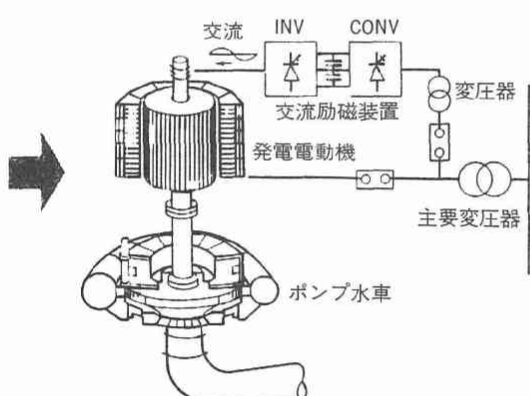
これに対して「可変速揚水発電システム」は、発電運転・揚水運転ともに回転速度を変化させることができることから、発電運転時の出力調整に加え、従来一定であった揚水運転時のポンプ入力調整も行えるという大きなメリットがあり、電力システムの安定度向上に寄与することができるようになったとのことです。

私たちの知らないところで新しい技術が生まれ、ピーク時電力が供給されることにより、現代の便利な電気機器に囲まれた個人生活やオフィス業務、また電力を大量に消費する産業活動などが支えられているのがわかりました。

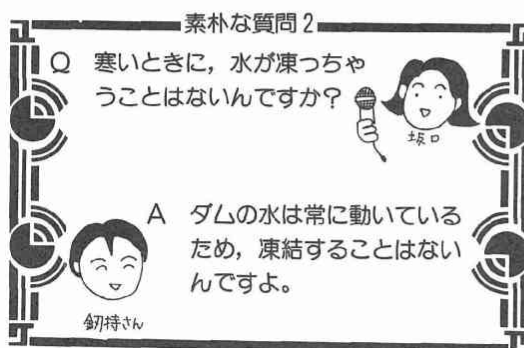
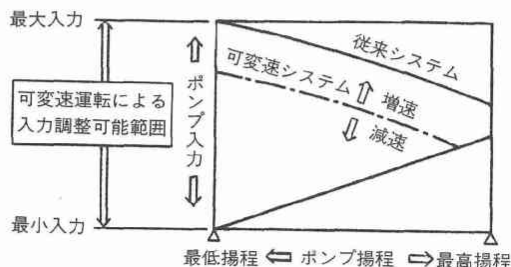
■従来システム



■可変速システム



■揚水運転時入力調整





奥清津電力所 鈎持さんを囲んで

取材を終えて

水の上げ下ろしという簡単な仕組みながら160万kWという大型発電所2基分にも相当するといわれる電気を発生し、また同時に貯蔵もする壮大な施設を見て、自然の力の大きさと、その力をうまく引き出す人間の知恵の素晴らしさを改めて感じ入る思いがしました。

最後になりましたが、丁寧に説明をして下さった奥清津電力所の飯島課長、鈎持さんをはじめ奥清津電力所の皆様に心からお礼を申し上げます。

INFORMATION

■交通のご案内

- 車利用の場合／関越自動車湯沢ICより国道17号線で東京方面に20分。
田代スキー場入口より約1分。
- 公共交通機関（バス）利用の場合／JR越後湯沢駅より越後交通バス
浅貝行きを利用、所要時間40分。田代スキー場下車、徒歩約12分。

■開館期間：4～11月（10:00～17:00）

- 毎週月曜日休館（但し屋外施設はオープン）
月曜日が祭日の場合は火曜日休館

■料金：無 料

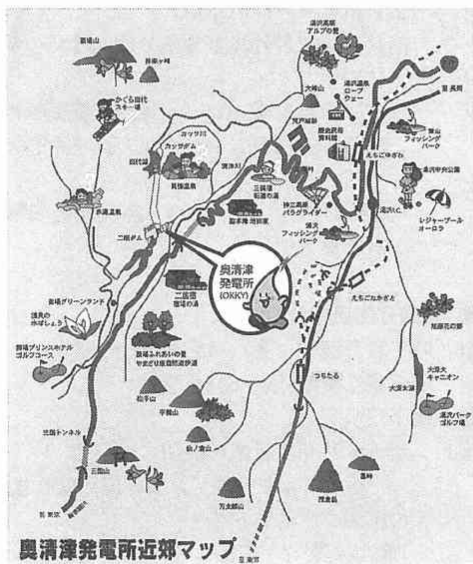
※なお施設内には飲食施設はありません。

※敷地内での事故、盗難等につきましては当施設では一切責任をおい
ませんので、ご了承ください。



お問い合わせ：0257-89-2728
0257-89-2707

<http://www.kdc.co.jp/okky/>



奥清津発電所近郊マップ

でん/ぽつ
電源開発株式会社

■関東支社 奥清津電力所／新潟県南魚沼郡湯沢町大字三国土場山 TEL.0257-89-2707(代表)

研究所のうごき

(平成9年9月1日～12月31日)

◇ 第3回賛助会員会議

日 時：11月14日（金）15：00～18：00

場 所：経団連会館（9階）901号室

議事次第：

1. 平成8年度事業報告および収支決算
2. 平成9年度事業計画および収支予算
3. 講演「地球環境問題の最近の動向ー地球温暖化防止京都会議に向けてー」
(通商産業省 大臣官房審議官 《地球環境問題担当》 石海行雄氏)

◇ 月例研究会

第151回月例研究会

日 時：10月31日（金）14：00～16：00

場 所：航空会館6階 中ホール

議 題：

1. 日本における地層処分コンセプトの評価研究について
(プロジェクト試験研究部 部長補佐 兼 主管研究員 蛭沢重信)
2. 高レベル放射性廃棄物処分に向けての取組みについて
ー原子力委員会高レベル放射性廃棄物処分懇談会中間報告（H9年7月）を中心としてー
(科学技術庁 原子力局 廃棄物政策課長 有本建男氏)

第152回月例研究会

日 時：11月28日（金）14：00～16：00

場 所：航空会館6階 601会議室

議 題：

1. 新エネルギー政策の展開について
ー「新エネルギー法」および同「基本方針」の解説を中心としてー
(通商産業省 資源エネルギー庁 新エネルギー対策課 技術班長 和久田肇氏)
2. 代表的な新エネルギー技術の概要について
(プロジェクト試験研究部 部長兼副主席 研究員 高倉毅)

第153回月例研究会

日 時：12月19日（金）14：00～16：00

場 所：航空会館6階 601会議室

議 題：

1. 環境・エネルギー産業と日本経済
(一橋大学 商学部 教授 栗原史郎氏)
2. 今後の省エネルギー推進動向
(（財）省エネルギーセンター 技術部長 大槻満氏)

◇ 主なできごと

- 10月1日（火）・第1回石炭灰有効利用拡大技術調査委員会
・第1回地球環境対策技術としてのグローバルエネルギーシステムの評価に関する調査研究(II)委員会
- 2日（水）・第2回石油活用型スーパーごみ発電導入に向けた課題に対するアクションプログラムに関する調査委員会
・第3回高温ガス炉プラント研究会
- 3日（木）・第2回石炭水添ガス化高度化調査委員会
・第1回負荷集中制御専門委員会
・第1回分散型電源動向分析調査委員会
- 7日（火）・第2回WE-NET革新的・先導的技術に関する調査・研究委員会
- 17日（金）・第1回夜間電力需要動向分析調査委員会
- 21日（火）・第2回エネルギー環境予測検討委員会
- 22日（水）・第2回高速増殖炉利用システム開発調査検討委員会
- 23日（木）・第1回先端技術調査分析検討会
- 28日（火）・第2回WE-NET総合評価と開発計画のための調査・研究委員会
- 31日（金）・第1回産業構造変化の電力需要への影響分析調査委員会
- 11月4日（火）・第2回原子炉総合数値解析システム実用化検討委員会
・第3回高速増殖炉利用システム開発調査検討委員会
- 6日（木）・第1回地層処分研究委員会
- 10日（月）・第1回地層処分背景情報委員会

11月12日(水)・第4回高温ガス炉プラント研究会
 13日(木)・第2回地下水流動に関するデータの
 収集・整備に関する検討委員会
 19日(水)・第2回実用発電用原子炉廃炉技術
 調査委員会
 ・第2回IPCC第三次評価報告書
 に関する国内委員会
 25日(火)・第2回地球環境対策技術としての
 グローバルエネルギーシステムの
 評価に関する調査研究(II)委員会
 26日(水)・第2回火力発電設備からのCO₂
 排出量調査委員会
 12月2日(火)・第2回WE-NET全体システム概
 念設計—安全政策・評価技術委員
 会
 3日(水)・第2回先端技術調査分析検討会
 4日(木)・第2回負荷集中制御専門委員会
 ~5日(金)
 8日(火)・第2回地球環境対策技術調査研究
 委員会

12日(金)・第2回分散型電源動向分析調査委
 員会
 15日(月)・第3回低品位炭改質技術に関する
 調査委員会
 17日(水)・第2回夜間電力需要動向分析調査
 委員会
 ・第2回廃棄物ガス化溶融発電技術
 評価委員会
 19日(金)・第1回地層処分背景情報委員会
 25日(木)・第2回産業構造変化の電力需要へ
 の影響分析調査委員会

◇ 人事異動

○10月20日付
 (採用)

竹端賢二郎 プロジェクト試験研究部付
 研究参事
 (平成10年10月19日迄)

編集後記

社会面、特に経済面を中心として不安で暗い話が続いた平成9年の中で、サッカー日本代表のワールドカップ出場決定と京都で開催された地球温暖化防止会議は、日本と世界の将来に大きな希望を与えてくれた点で特筆すべき明かるい話題であったと思う。しかも両話題とも今後の進む道においては、これまで以上の難関が横たわっていると想定されるにも拘わらず、各人あるいは各国がその持ち味を生かしながら全体として難関に立ち向かう挑戦者の姿勢が共通して伺えるところに興味をそえられる。

さて、本号はその地球温暖化問題およびそれに関係深いエネルギー問題を考える上で関係するテーマを選択的に取り上げた。

巻頭言は、関西電力(株)の鷺見楨彦副社長にエネルギー・セキュリティというテーマで寄稿いただいた。短かい中に氏の思いと含蓄ある文章を味わっていただけたものと考え

る。座談会は、増大する廃棄物の処分を電力エネルギー源として利用する廃棄物発電の現状と将来につき、特に通産省が平成10年度より開発を予定している次世代型高効率廃棄物発電技術開発の関係者の中から平岡正勝京大名誉教授、通産省エネ庁開発振興室細川政弘室長、NEDO/水素・アルコール・バイオマス室新井晴美室長、東京都清掃局永島公明副参事に出席いただいた。

外部からの寄稿は、このような社会状況下で策定されることになった平成10年度エネルギー関係予算の基本的な考え方を通産省エネ庁長官官房総務課の高倉秀和計画需給班長に紹介いただいた。また、地球温暖化対策の一つとして注目されているバイオマス技術の開発状況を電中研我孫子研究所の齋木博部長に解説いただいた。いずれも、昨年の当所月例研究会で講演願ったものであるが、その後の状況につき一部加筆修正いただき掲載したものである。

所内からは、吉江照一郎長が基礎的事項を含めて地球温暖化問題の解説を、楠野貞夫副主席研究員が我が国の温暖化対策上期待がますます高まる原子力発電における沸騰水型原子炉の熱水解析状況の紹介を、大野哲雄主管研究員が自然エネルギーの地球的活用計画であるWE-NETに関する海外情報を紹介した。

本号の女性訪問記は、電源開発(株)の奥清津第二発電所の訪問記である。水の落下という単純な原理で160万kWもの大規模発電が得られる壮大な施設と景観を目の当たりにして自然の力とそれを克服した人間の知恵の素晴らしさに感動したありさまを率直に述べているが、今後一層重要とされる自然と人間の共生を考える上でいささかなりともご参考になれば幸いである。

編集責任者 小川紀一郎 記

季報 エネルギー総合工学 第20巻第4号

平成10年1月20日発行

編集発行

財団法人 エネルギー総合工学研究所

〒105-0003 東京都港区西新橋1-14-2

新橋SYビル(6F)

電話 (03) 3508-8891

無断転載を禁じます。(印刷) 和光堂印刷株式会社