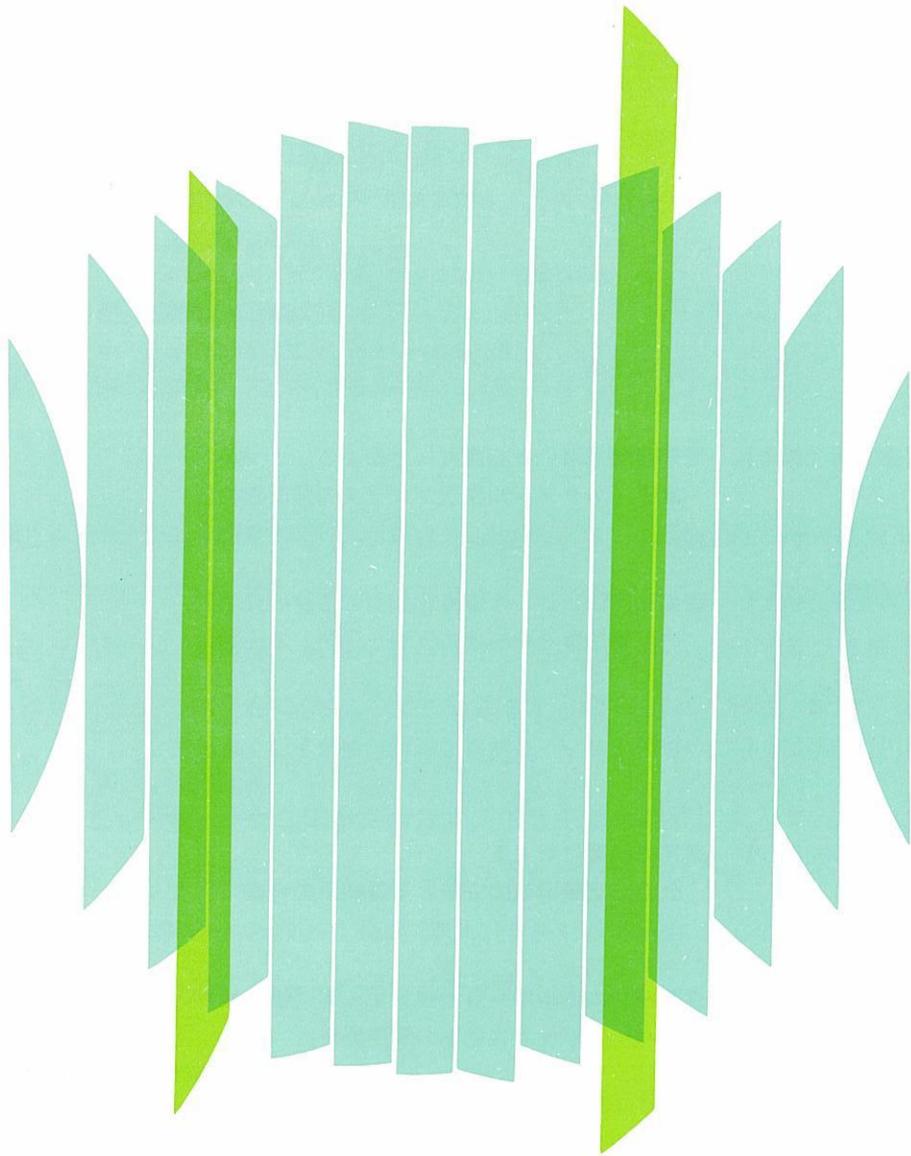


季報 エネルギー総合工学

Vol. 23 No. 4 2001. 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】	21世紀に想うこと 電気事業連合会 副会長 児 島 伊佐美… 1
【座談会】	資源循環型社会とエネルギーの将来を語る 立命館大学 エコ・テクノロジー研究センター長 京都大学 名誉教授 平 岡 正 勝 東京大学 大学院新領域創成科学研究科 教授 山 地 憲 治 通商産業省 環境立地局 環境政策課 環境調和産業推進室長 山 本 哲 也 通商産業省 工業技術院 資源環境技術総合研究所 温暖化物質循環制御部長 横 山 伸 也 ㈱三菱総合研究所 資源・循環研究部長 中 條 寛 司会 ㈱エネルギー総合工学研究所 専務理事 稲 葉 裕 俊… 3
【調査研究報告】	電解酸素を用いた石炭ガス化による 水素・メタノール製造プロセスの経済性検討 プロジェクト試験研究部 部長 片 山 優久雄…27
【調査研究報告】	磁気冷凍法による水素液化技術の基礎研究開発 —革新的な液化技術の実現を目指して— 主任研究員 上 岡 英 之…46
【内外情勢紹介】	わが国の高レベル放射性廃棄物処分を巡る新展開 副主席研究員 河 本 治 巳…57
【調査研究報告】	原子力発電に対する 公衆の意識構造の分析と情報提供の考察 エネルギー技術情報センター センター長補佐 下 岡 浩…74
【技術解説】	クリーンエネルギー自動車レポート（第8報） —ハイブリッド自動車の新展開— 主管研究員 蓮 池 宏…90
【研究所のうごき】	……………99
【編集後記】	…………… 101

巻頭言

21世紀に想うこと

電気事業連合会

副会長 兒島 伊佐美



いよいよ21世紀の幕開けである。20世紀について、実感として認識しているのは後半の約50年間のみであるが、今更ながら年々変化が激しくなってきた感がある。特に、1990年代はリエンジニアリング、リストラクチャリング、デレギュレーション等の言葉に代表される構造改革、リユース、リデュース、リサイクル等の言葉に代表される環境保護の時代となった。自由化、グローバル化の名の下に、従来型の組織・構造は悪であるということで、あらゆる組織・構造が見直しを迫られた。

確かに、多くは自由競争を妨げる要素を顕在的あるいは潜在的に持っており、社会全体が安定成長をしていた時には問題とならなかったことが、変化の時代には根本的な問題となる場合もある。通信事業の自由化は多くの利用者に多種多様のサービスと低廉な料金を提供し、大きな恩恵をもたらした。銀行、証券、保険業界の自由化、グローバル化も様々な新規サービスを創出し、投資の活性化の基盤が整備され、今後、社会全体が真の意味での自由競争時代に突入することになる。企業にとっても個人にとっても生き残りをかけた闘いになるわけで、永年皆がそこそこうまく行くというのに慣れ親しんできた日本人にとっては古い体質・意識を捨て、相当の覚悟を持って望む必要があるだろう。

エネルギー問題についても、2000年3月の電力小売自由化により、自由競争の時代に突入した。これまでに商社、外資系企業、ガス会社等が電力市場への参入を表明し、既に一部のお客様はそれら新規参入企業からの電力供給を受けている。

一方、先般オランダのハーグで行われた COP 6 会議では具体的成果なく懸案を持ち越す形になったが、CO₂ 排出量の内、発電過程で発生する量も相当量あり、CO₂ 排出の少ない高効率発電に努める必要がある。この点ではクリーンな電力として注目されている太陽光発電・風力発電は有効な対策であり、新規事業者、地方自治体から一般家庭まで導入が進んでいるが、まだまだ発電原価が高く、CO₂ 排出抑制効果が見込める程の導入量は期待できないのが実状である。また、米国の一部の州では、自由化の進展から設備投資が過度に抑制され、需給バランスが崩れ、輪番停電や料金高騰などが余儀なくされ、深刻な社会問題となっている。

このようなことから、自由化、競争化で料金が下がり利用者が恩恵を享受できることは重要であるが、その中でいかに長期的に安定した電力供給能力（エネルギーセキュリティ）を確保するか、CO₂ 排出抑制をするかを総合的に考えていかねばならない。特に、エネルギーセキュリティについては、供給力不足になれば隣国から供給を受ければ良いというような国と違い、資源に乏しい我が国としては、やはり長期的なエネルギーセキュリティ確保の第一は原子力を中心に図っていくことが必要であろう。また、CO₂ 問題については、政府の積極的なイニシアティブにより解決策が見出されることを期待したい。

自由競争そのものは大いに結構なことであるが、長期的な視野に立った物の見方と最低限の規律、規制は今後とも必要であろう。21世紀の日本は、これらの適度なバランスの下、企業も個人も生き活きとした活動のできる時代となって欲しいものである。

資源循環型社会とエネルギーの将来を語る

平岡正勝 (立命館大学 エコ・テクノロジー研究センター長
京都大学 名誉教授)

山地憲治 (東京大学
大学院新領域創成科学研究科 教授)

山本哲也 (通商産業省 環境立地局* 環境政策課
環境調和産業推進室長)

横山伸也 (工業技術院** 資源環境技術総合研究所
温暖化物質循環制御部長)

中條 寛 (㈱三菱総合研究所 資源・循環研究部長)

司会

稲葉裕俊 (㈱エネルギー総合工学研究所 専務理事)



はじめに

司会 21世紀におけるわが国の持続的発展を図る上で、環境と資源の制約の克服は大変大きな、重要な課題であり、これに対応するため循環型社会の構築が急務になっています。この問題はエネルギーの諸問題に関わりが深

く、また技術とともに社会経済システム、さらには、国際的な広がりを持っており、新しい世紀のはじめに取り上げるにふさわしいテーマと考えました。本席はこの分野の専門の方々にお集まりいただき、循環型社会とエネルギーにつきまして、忌憚のないお話が伺えればと思います。

* 現 経済産業省 産業技術環境局

** 現 経済産業省 産業技術総合研究所

また、本座談会中の関係組織名は、開催時である省庁再編前の名称になっています。

循環型社会追求の歩みと背景

循環型生態系が形成されてた

江戸時代の都市・農村

司会 まず、環境問題、廃棄物問題がご専門の平岡先生から、わが国のこれらの問題の推移、特色また最近の動向につきまして口火をお切りいただければと思います。

平岡 私は、以前から廃棄物処理を中心に環境問題に取り組んでまいりましたので、廃棄物問題の背景から始めたいと思います。

ご承知のように、廃棄物問題は、人類の歴史とともに始まり、国の文化を反映しながら、文明とともに変遷してきました。日本とヨーロッパでは、中世から近代にかけて、農業のあり方に大きな相違があります。ヨーロッパの農業は、農地を畑、牧場、休耕地に分け、畑のあとを休耕地とし、次の年にはそこに家畜を入れ、3年目になりますと雑草、家畜の糞と一緒に土を耕して畑にし、農地の中で生態系の維持がなされていました。これに対して、日本では、都市の糞尿が農村で肥料に用いられ、農村からの作物が都市で消費され、また糞尿としてバックされるというつながりの中で、農村と都市が循環型の生態系をなしておりました。江戸時代の頃、農村と都市がそれぞれ独立していた西欧の都市がしばしば不潔な状況をつくりだし、ペスト、コレラが流行したのに対して、日本の都市が農村との循環サイクルの中で、比較的清潔さを保っていたのです。

明治になって諸外国との交流が盛んになり、伝染病菌が持ち込まれて、明治20年代末に

ペストの大流行に見舞われたことから、ごみ、し尿の処理が公衆衛生の見地から取り上げられ、明治33年、「汚物掃除法」が制定されました。このようなことを申しますのも、2000年が「汚物掃除法」制定100年に当たるからです。

終戦直後の伝染病予防、

経済成長時の“公害国会”から

循環型社会形成の“リサイクル国会”へ

平岡 第2次大戦後のわが国の廃棄物処理体系は、3つの時代に分けられます。

廃棄物処理の近代的システムづくりは、昭和29年の「清掃法」制定に始まります。清掃法では、都市ごみ、し尿を“汚物”と称して、これを公衆衛生的に処理し、生活環境から適切に排除処分するのが目的でした。当時の日本は経済的にまだ貧しく、伝染病が流行っていた時代でしたので、ごみ・し尿の処理は、当然、伝染病予防が目的だったのです。昭和38年に始まった厚生省の「廃棄物処理設備整備計画」の第1次5ヶ年計画では、病原菌は焼けば死にますので、都市ごみの焼却処理が衛生的な処理方法として導入されました。

次の時代は、経済成長により、事業活動に伴って排出される廃棄物が問題になりました。昭和45年の公害国会で「清掃法」が「廃棄物処理法」に改正され、産業廃棄物の処理は事業者責任、一般廃棄物の処理は従来の流れを汲んで市町村の責任と処理責任の明確化がなされました。この時期、経済成長が予想をはるかに超えるスピードでしたので、廃棄物処理体系は経済成長の後追い、法整備が追いつかない時代でありました。

第3期は、大量生産、大量消費、大量廃棄の社会経済システムから循環型社会システム

への変換を目指す時代になりました。平成3年に「リサイクル法」の施行，平成4年に「廃棄物処理法」の改正，平成9年に「容器包装リサイクル法」の施行，また平成10年5月には「家電リサイクル法」の制定ということで，本格的に循環型社会へ向けてのスタートが切られました。

さらに，平成12年5月には，「循環型社会形成推進基本法」が制定され，第147国会ではそれと一体的に「改正廃棄物処理法」，「資源有効利用促進法」，「建設リサイクル法」，「食品リサイクル法」，「グリーン購入法」の各法が整備されました。昭和42年に14の公害関係法が一気に制定されたいわゆる“公害国会”に対して，“リサイクル国会”といえると思います。

循環型社会の構築により

輸入エネルギー・資源の減量を

平岡 わが国の物質収支は，図1のとおりです。輸入資源と輸入製品の合計が約7億トン，輸出が1.1億トン，エネルギー消費が4億トンになっています。今後，循環型社会形成に向

けて一番重要なことは，リサイクルにより輸入資源を減らすことです。

中国の石油消費量は，1人当たりは少量ですが人口は13億人もいますので，現在すでに全消費量は日本と並んでいます。これに加えて，今後成長が見込まれる東南アジア諸国に資源・エネルギーの消費が増加しますと，世界的に見て日本が図1にあるエネルギー・資源の輸入が続けられるかが危惧されます。環境審議会で物質循環のあり方を議論したときにも，日本全体の物質収支の中で，輸入資源を減らすことが最初に取り組むべき道筋であり，技術開発の基本理念もその方向にいくべきと提唱した次第です。

そのような観点から，後ほど詳しい話があると思いますが，「循環型社会形成推進基本法」では，回収した製品の有用物を製品の原材料とし再利用する従来のリサイクル (Recycle) の強化とともに，廃棄物の発生抑制 (Reduce) 及び部品等の再利用 (Reuse) の「3R」を新たに打ち出しております。

昭和48年の第1次石油ショック，53年の第

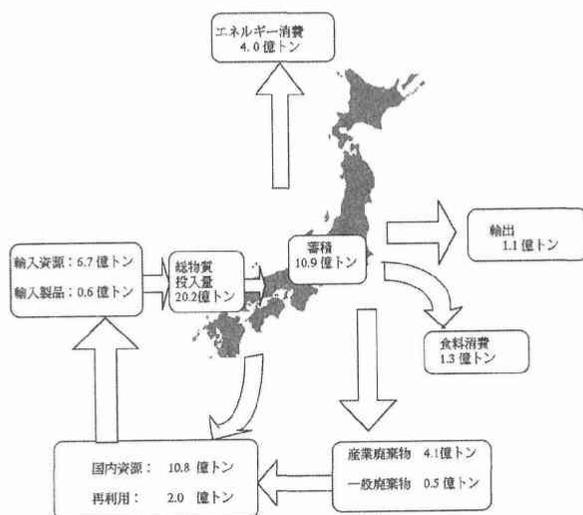


図1 わが国のマテリアルバランス (物質収支)



平岡 正勝氏
(京大名誉教授)

2次石油ショックで、油価が一挙に1バーレル36ドルまで急騰した強烈な記憶があります。最近のように、再び30ドルを超えますと、第3次石油ショックの到来かの不安も生まれ、リデュース、リユース、マテリアル・リサイクル、そして廃棄物を焼却してのサーマル・リサイクルを確実に実行することが求められます。資源エネルギー庁の試算によりますと、一般廃棄物、産業廃棄物のエネルギーをすべてサーマル・リサイクルすれば、国内石炭火力発電量の4分の3相当のエネルギーが得られるとのこと。したがって、このような観点からのエネルギー・環境問題への対応が重要です。

エネルギー対策の基本は3E

決意が重要な温暖化問題への取り組み

司会 平岡先生のお話の後段では、エネルギー関連のお話も出ました。次に山地先生から、環境問題と多岐にわたり深く関係あるエネルギー問題について、お話をお願いいたします。

山地 環境の方ではリデュース、リユース、

リサイクルの3Rが唱えられていますが、エネルギーでは、エネルギー、エンパイロメント、エコノミーの3Eの関係が問題です。今、平岡先生の話にもありましたが、石油価格は、この数年、10ドル台の安値が続きましたが、ここ1年半ほどで2倍強の30ドル台に上昇しました。資源小国のわが国には、エネルギーセキュリティの問題が常に底流にあるわけです。

同時に、90年代のエネルギー政策で最も大きな変化に、エネルギー産業の規制緩和、市場の自由化があります。法律も改正され、電力小売市場までが一部自由化になり、大きく様変わりしました。このような市場重視の中で、セキュリティ問題、90年代の最大課題である地球温暖化問題、これらの市場を超えた問題が政策のターゲットになりました。この基本構造は変わっていません。

ここで、一番難しいのが、2010年を目標期限とする温暖化対策です。いかにしてこの目標を達成するのか、真剣な模索が続いています。原子力は、'99年のJCO事故により、2010年までの増設計画は修正せざるを得ず、COP3(温暖化防止京都会議)で公約したCO₂削減目標の達成に整合性ある計画ができるのか、今なお誰もが確信を持ってない厳しい状況下にあります。

私自身は、温暖化対策は、超長期的な視点で取り組むべき課題と思います。2010年は確かに大事な区切りの年ですが、削減目標が達成できなかったとしても、それで地球が終わりになるわけでもないし、達成できたら大丈夫ということでもありません。もちろん、真剣に努力すべきではありますけど、それでなおかつ達成できなかったら、国際間の約束に従い、罰金を払うぐらいの覚悟が必要だろう

と個人的には思っています。大事なのは、温暖化問題に取り組む決意だと思います。

エネルギーのリサイクルに

注目すべきバイオマスの大きさ

山地 循環型社会ということでエネルギーを考えると、エネルギーの供給側と需要側の2つの問題があります。

まず、供給側から申しますと、「循環」、「リサイクル」というのは、エネルギーにはそぐわないと思っています。通産省の新エネルギーの定義には、「リサイクル型」と称して廃棄物発電や排熱利用がありますが、エネルギーは、ご存知のように、熱力学の第1法則ベースでいえば保存され、第2法則ベースでは一方的に質が低下していくわけですので、その意味では厳密にはエネルギーにリサイクルはあり得ません。ですが、物質はリサイクルされます。物質のリサイクルという形態をとってエネルギーが循環されているように見えるのが、水力です。水という物質は循環しており、太陽によって位置エネルギーを得て、またエネルギーを再生産します。

物質構造の中にエネルギーがより蓄えられているという意味では、バイオマスです。横山さんがご専門の分野ですが、バイオマスは、明らかに、太陽エネルギーを化学物質の形態で固定しており、それを我々が燃やせば、エネルギーを回収して二酸化炭素と水に戻るという循環をしています。

そのようなことで、バイオマスの循環量は水力の循環量より大きいと見られ、私個人は、供給面ではバイオマスは注目すべきものと思っています。もちろん、バイオマス以外にも、プラスチック系の廃棄物をサーマル利用



山地 憲治氏

(東京大学 教授)

するリサイクルもありますが、エネルギーのリサイクルに一番イメージが近いのはバイオマスかと思います。

もう一つのリサイクル資源

タイプが異なる原子力の使用済燃料

山地 実はエネルギーのリサイクルにもう1つあって、これはまったくタイプが違う原子力です。原子力関係者の間では、使用済燃料が「ごみ」なのか、「資源」なのかの議論がなされています。日本政府はこれをごみだとは決して言わないのですが、諸外国を見ますと、ごみとして処分している国もあります。考えてみますと、他のものにも、資源でありごみであるものがありますが、原子力も同じと見るぐらいの余裕がほしいと思います。

使用済燃料から有用物のプルトニウムや燃え残りのウランを回収して、再びエネルギー源として使うのは明らかにリサイクルです。この量も、バイオマスに劣らず、ものすごく大きくなります。

私は、地球温暖化問題のような長期の問題を考えるときには、バイオマスのような循環

タイプのエネルギー資源と、燃え残りウランやプルトニウムを利用するタイプの原子力の燃料リサイクルは、少なくとも選択肢として残しておくべきと考えてます。

消費者側の省エネに

鍵をなす3R方策の拡充を

山地 エネルギー分野では余り言われていませんが、需要サイドで、リデュース、リユースを含めた3Rは、省エネルギーの大きな鍵だと思います。これらをうまく組み合わせれば、現在、民生部門で一方的に伸びて困っているエネルギー消費量を理論的には相当減らせますし、今までそこへの注目度が足りなかったと思っています。今回、リサイクルとエネルギーという視点で、供給者側だけではなく、消費者側にも3Rの方策を広めれば、システムの設計次第で革命的な省エネが可能かと思っています。このような視点も、ぜひ忘れないでいただきたいと思っています。

循環型社会形成に向けた法体系の整備

確立したい

「循環型社会元年」の位置づけ

司会 次に、山本室長から、ただ今の両先生のお話へのコメントを含め、循環型社会構築に向けた国の動き、法整備などについて紹介をお願いいたします。

山本 先ほど平岡先生のお話にありましたように、2000年の春の国会で「循環型社会基本法」を初めとし6本の法制定、法改正という大きな動きがありました。それは、政府全体

として、21世紀を前にした2000年を「循環型社会元年」と位置づけようとしたわけです。

その1つの背景が、近年のダイオキシン問題でして、これはごみの焼却時に発生して大きな社会問題になりました。このダイオキシン抑制を目的とする法律が、2000年1月、施行になりました。ここでの考え方は、根本的には、廃棄物を減化させ、あるいは埋立処分量をできるだけ減らすことが解決につながるとしています。そのため、1999年秋、「ダイオキシン対策閣僚会議」において、2010年におけるごみ減量化の目標が策定されました。現在、家庭から出てくる一般廃棄物が年間5,000万トン、産業界からの産業廃棄物が4億トンという大変な量があります。まず、この発生量を減らし、さらにリサイクル率をできるだけ高めて、結果的に最終処分、埋立処分となる量を、現状に対して半減させようという意欲的な目標でした。この具体的な措置として、2000年春、先ほど申しました6本の法律が出来上がったということです。

処分場に見られる

大量生産・消費・廃棄型社会の行き詰り

山本 一方、通産省では、産業構造審議会に地球環境部会と廃棄物・リサイクル部会による合同基本問題小委員会を設け、本日ご出席の平岡先生と東京大学名誉教授の茅陽一先生に共同委員長になっていただき、約1年間かけて議論を行いました。その結果、「循環型経済システムのあり方」という循環経済ビジョンができました(図2参照)。

そこにあるのは、資源枯渇、環境、あるいはエネルギーの問題を考えたとき、現在のまま大量生産、大量消費、大量廃棄型の経済社

会を続けていけば、遠からず行き詰まりがくるといふ問題意識です。端的な例を申しますと、廃棄物の最終処分場の残余年数は、一般廃棄物が約8年、産業廃棄物が約3年といわれています。これは、毎年排出されます廃棄物の埋立処分量で、今の空き容量を割ったものです。ここ何年間かその数字が変わらずに推移してきましたのは、最終処分場の立地が毎年の排出量相当分あったからですが、最近、特に産業廃棄物の最終処分場立地が大変困難になっております。以前から住民投票の条例がありましたが、特に平成9年の「廃棄物処理法」の改正により、いわゆる環境アセスメント制度が導入され、処分場の立地には住民同意が実態として必要になったという経緯があります。その関係で、かつては毎年100件程度の新規立地がありましたが、平成11年は10件程度となり、先ほど申しました産業廃棄物処分場の残余年数は、従来約3年のものが、

平成11年度では半分の1年半ほどとなり、空き容量が急減しています。

一方で、各地に不法投棄による大きな環境破壊が起こり、日本の経済社会は、言葉は悪いかも知れませんが、“トイレのない社会”になってきたという問題意識が生まれました。このような経済社会を根本的に変革するため、循環型の経済システムを構築していこうという考え方です。

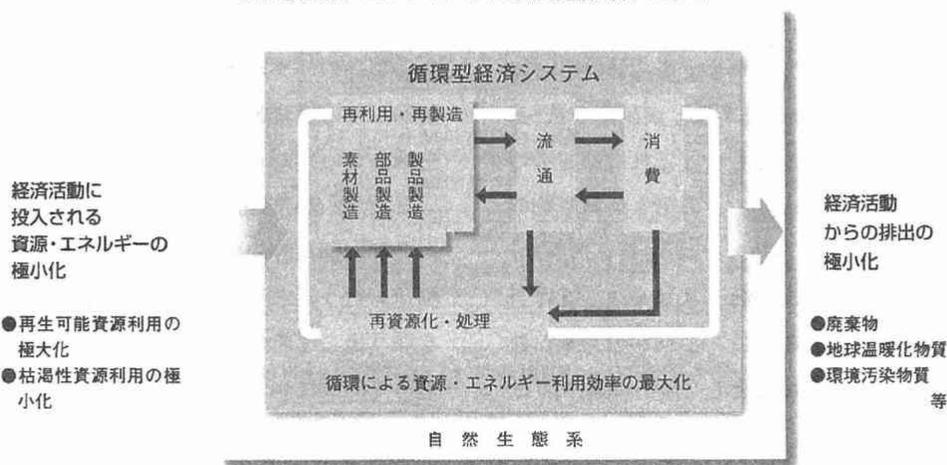
施策の基本をなす順位付け

3R、サーマル・リサイクル、適正処理

山本 ここでの基本的な考え方は、大量使用している資源、エネルギーの投入量をできるだけ減らす。そして、自然界に排出する廃棄物、汚染物質の量も可能な限り減らす。ただ、両方をやみくもに減らしますと経済社会の活性が失われますので、資源、エネルギーの利用を効率的に、飛躍的に、高めていこうとい

<経済と環境の統合>

○市場機能がビルトインされた循環型経済システム



○経済活力の維持と良好な生活環境の両立

図2 循環型経済システムのイメージ



山本 哲也 氏

(通商産業省 環境立地局 環境政策課)
環境調和産業推進室長

う考え方です。その対策が、先ほど平岡先生が触れられた「3R」です。詳しくは後ほど述べますが、これを易しくいいますと、従来の単にリサイクルすればいいという考え方から、始めからごみを出さない、ごみにならないような物作りをする、あるいは、部品とか製品をそのレベルで再使用してもらうという新しい考え方を入れたもので、この「3R」の考え方を循環型経済社会のビジョンの中で提唱したわけです。

このような考え方を踏まえて、2000年4月、「循環型社会形成推進基本法」が制定され、基本原則が打ち出されました。これには5つの施策の優先順位があり、その第1が廃棄物の発生を抑えるリデュースを行う。第2に製品、部品レベルの再使用を行うリユース。3番目にリサイクル。4番目に、これらの対策が難しいものについては熱としてサーマル・リサイクルをしていく。これも難しいものについては、最後に廃棄物として処分をせざるを得ず、適正に処理する。このような施策の優先順位づけをしたのが、一番大きな考え方です。

「廃棄物処理法」「リサイクル法」の改正 排出者責任の拡大と3Rの具体化を

山本 その具体化に、一般法の「廃棄物処理法」と「リサイクル法」の改正が行われました。

「廃棄物処理法」の改正では、大きな問題になっています不法投棄に対して、排出者責任をより明確にしたことです。すなわち、従来は産業廃棄物処理業者に処理を委託すれば、それにより排出者責任は全うされていたわけです。法改正により、仮に処理業者が不法投棄を行いますと、その責任の一端をごみの排出者にも担っていただくことで、排出者責任が拡大されました。

「リサイクル法」の改正は、正式には「資源有効利用促進法」という名前になりましたが、先ほど申しました“3R”，を個別に具体化していこうというものです。この中には、製品対策、産業廃棄物（副産物）対策の2つの対策が入っております。

製品対策では、廃棄物の発生抑制対策として、製品の省資源化・長寿命化設計やアップグレードによる長寿命化などにより、廃棄物になる製品のリデュースです。すなわち、個別製品ごとに廃棄物としないモノ作りの対策を講じていただくことにしています。

また、製品、部品レベルでの再使用、リユースでは、部品等の再使用が容易な製品設計・製造を行うことや、回収した製品から部品等を取り出して新たな製品の製造に再使用するもので、既にレンズ付フィルムとか、複写機の一部で取り組みが始まっておりますが、そのような取り組みを法律で義務づけようというものです。

それからリサイクル、これは従来から行っ

てきたものですが、今回、拡大生産者責任（EPR, Extended Producer Responsibility）の考え方を導入しております。これは、製品を作った事業者が廃棄物の処理、リサイクルにも一定の責任を持つということで、当面はパソコン、二次電池などを対象として事業者自らが回収、リサイクルを行うべきであるとする規定です。

このような形で、3Rによる製品対策を講じることとしております。

産業廃棄物については、鉄鋼業、化学産業のような大量の廃棄物を出す事業者に対して、生産工程の見直し、運転の高度化、それからリサイクルなどの対応により、計画的に廃棄物の発生量を減らしていただきます。今、スラグがセメント材料に使われていますが、

汚泥などの副産物のリサイクルについて義務づけを行うことにしています。（図3参照）

このような形で、リサイクルと廃棄物処理の一般法の改正が行われました。

拡充された個別分野のリサイクル法 政府の率先実施を示す「グリーン購入法」

山本 個別分野では、先ほど平岡先生のお話にもありましたが、容器包装と家電についてのリサイクル法は、従来からありました。「容器包装リサイクル法」は、平成9年、ガラスびん、ペットボトルなどを対象に施行されましたが、平成12年4月に紙製容器包装、プラスチック製容器包装を加えて全面的に施行になりました。「家電リサイクル法」は、テレビ、冷蔵庫、洗濯機、エアコンの大型家電製品を

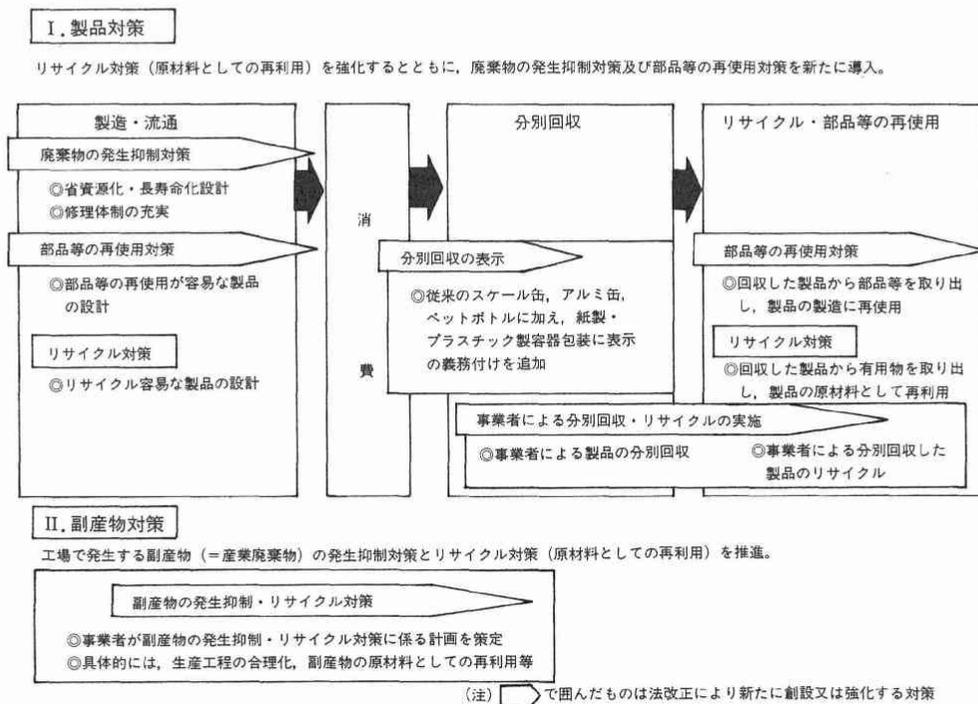


図3 資源有効利用促進法による新たなスキーム

対象機器とし、平成13年4月から全面施行することになっています。

これらに加えて、新たに「建設資材リサイクル法」と「食品リサイクル法」が制定されました。「建設資材リサイクル法」は、土木工

事や建築物の解体時に大量に発生する建設廃棄物を、アスファルト、コンクリート、木材、その他に分別し、そのあと再資源化施設に持ち込みリサイクルすることを義務づける法律です。

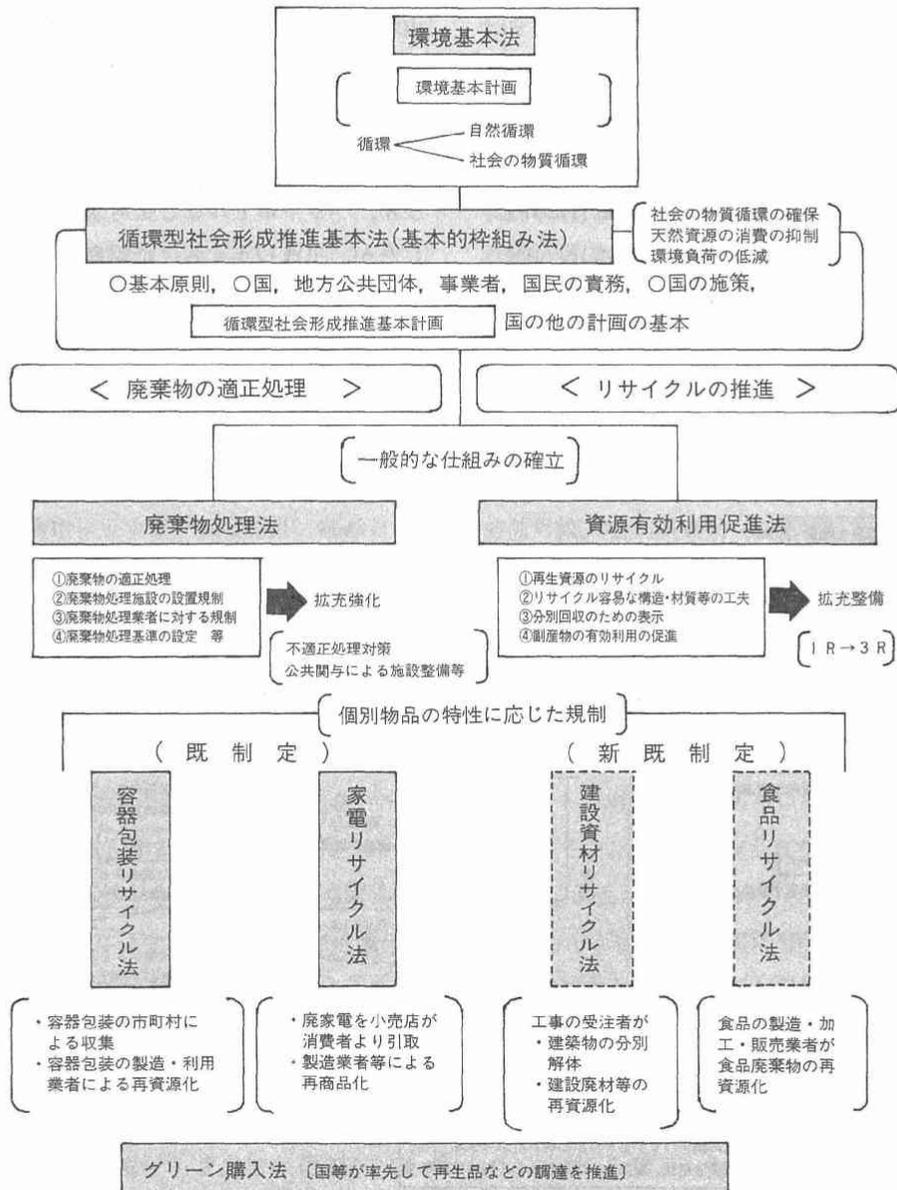


図4 循環型社会の形成の推進のための法体系

「食品リサイクル法」は、食品の製造・加工業、あるいはホテル、レストラン等の流通業から出てきます食品廃棄物を堆肥化、飼料化の形でリサイクルすることを義務づける法律です。

最後の「グリーン購入法」といいますのは、従来からも率先事項計画でやってきましたが、国自らが率先して環境配慮型製品を購入することを義務づける法律です。循環の輪とは、リサイクルされたものが再度製品として利用されて市場が拡大されていくことが大事で、そこを補う国の役割に一定の法律上の義務を課したものです。

以上の「循環型社会基本法」、「廃棄物処理法」、「リサイクル法」、それから「食品リサイクル法」、「建設リサイクル法」、「グリーン調達法」の6本の法律が、2000年春の国会で成立をしました。2001年以降、順次施行される状況にあります。(図4参照)

循環型社会構築に向けた 企業・団体の取り組み

期待される新ビジネス

司会 このような法律の制定などが民間企業の活動に及ぼす影響も大きいと思われます。次に、循環型社会における企業・団体に求められる取り組み、それからビジネスチャンス、可能性を含め、産業体系の新しい構図、経済全般に及ぼす影響などについて中條部長からお話し願います。

中條 先ほど話が出ました産業構造審議会の報告書の中にも、循環型経済システム構築に



中條 寛氏

(株)三菱総合研究所 資源・循環研究部長

向けて出現が期待されるビジネスが整理されています(図5参照)。その中では、例えば従前からのごみ処理リサイクルでも、ガス化溶解のような新しい技術があり、再生資源を受け入れる側でも、先ほどお話に出たセメント、あるいは廃プラスチックの高炉還元剤としての利用など、新たに廃棄物を利用した生産方式がいろいろ模索されています。

これらの狭義のリサイクルに加えて、最近の特徴として、より小さな循環と申しますか、リペア・リユース、循環型生産などの動きが出てきています。例えば、リペア・リユースですと、自動車部品のリユースは結構昔からなされていますし、家電品のリペアもメーカー横断的に実施する独立のビジネスが出現しています。先ほどお話があった、複写機とかレンズ付フィルムは、一度返ってきた製品のなかから部品を取り出して、新製品の中に再使用するもので、より小さな循環を形成する流れが出てきています。

このような循環の輪の中で機能として重要なのが物流のコントロールで、静脈物流が今後期待される大きなビジネスと思います。

動脈・静脈産業の一体化と

総合サービス提供へ

中條 また、循環型産業の特徴を考えると、これまではメーカーが製品・装置を作って使用者に供給し、使用後の廃棄物処理は、公共なり民間なり別の主体が実施するという形でしたが、今申しましたような個別の事例を考え合せますと、産業の姿はかなり変わってきています。

その1点は、従前の“環境の産業化”の部分、装置をつくるとか、装置を運用して事業をするという部分と、モノをつくる際に環境に配慮するという、“産業の環境化”の部分かなり一体化してきました。その担い手は、例えばごみ処理ですと、自治体が今までやってきましたが、PFI (Private Finance Initiative)

推進の流れの中で、民間事業にかなりの役割が期待されています。リサイクル、リユースに民間の役割は当然ですが、それが製造と結びついた形で、動脈産業と静脈産業の一体化の動きが大きくなってきています。

それから、装置をつくる産業自体も従来からのモノの供給だけではなく、その後の運転、運用段階においても、人、技術、資金の面で産業の環境化をサポートするような総合的サービスの提供という、ソフト的な産業に変わってきています。

企業の環境対策に大きな影響を及ぼす

ISO14000への取り組み

中條 以上がマクロ的に見た循環型産業の特徴ですが、個別企業の立場で見ても、企業が環境対策を強化する部分と、企業が環境ビジネス

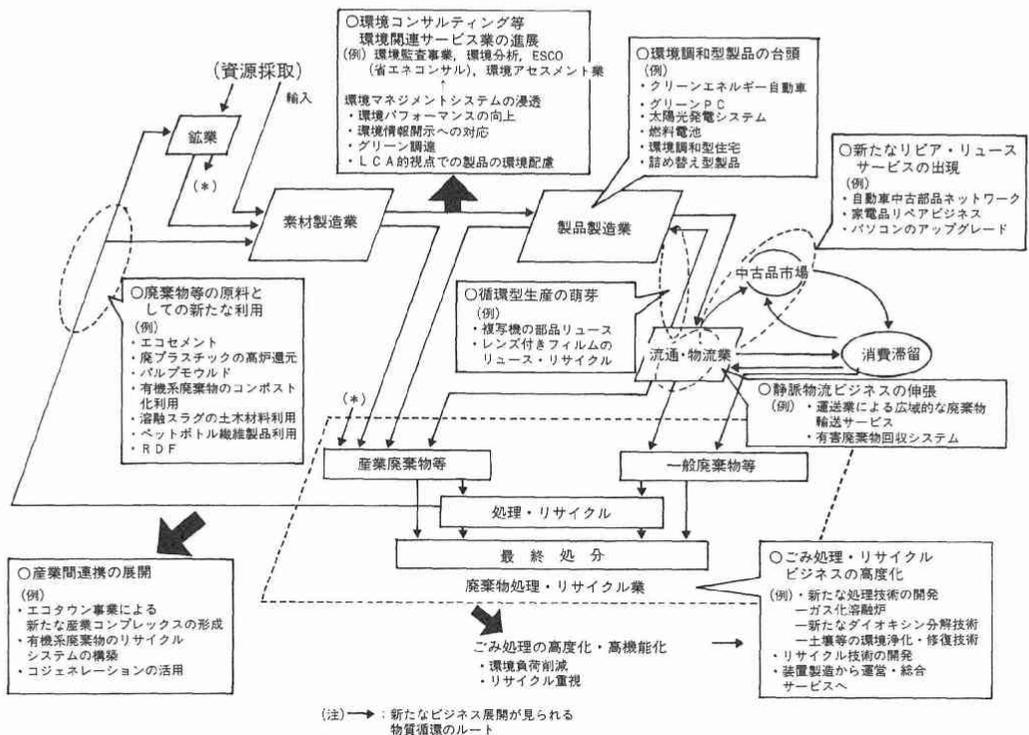


図5 循環型経済システム構築に向けての新たなビジネスの動き

き課題、また研究開発の最近の動きについてのコメントを横山部長にお願いいたします。

横山 わが国における新エネルギーの利用は非常に少なく、総合エネルギー調査会の長期見通しによりますと、95年で1次エネルギーの総供給に占める割合は、すべての新エネを合計してもわずか1.1%です。2010年度で見ましても、導入・普及への施策が現状のままですと、わずか1.3%、追加的施策がとられたケースであっても3.1%に過ぎません。

その中で、廃棄物発電の割合が大きくなっています。森林系のバイオマスも多く、少なくとも3%、多い人は10%ぐらいいはあるだろうとしています。わが国は資源に乏しく、世界の約5%の資源・エネルギーを輸入に依存していながら、バイオマスを利用しないという、まことに困った状況だと思えます。アメリカでさえ、現在、バイオマスを3%使用しており、クリントン大統領はこれを10年間で3倍にしようという声明を出しています。北欧では、使用が非常に多く、例えばスウェーデンですと、現状でも13%をバイオマスによっています。

北欧でバイオマスの使用が多い理由は、寒い国ですから熱の需要が多く、木材を燃焼して発電をし、同時に熱を供給する熱電併給というシステムがあり、熱供給インフラが整備されており、林業が盛んなことからエネルギー源として安定供給される現状によります。また、石炭や石油に炭素税をかけていますから、相対的に木材資源が安いことが、普及の一因になっているわけです。

わが国は、国土の3分の2の2,500万ヘクタールが森林ですので、この未利用資源をもう少し利用する工夫が必要です。



横山 伸也 氏

(工業技術院 資源環境技術総合研究所)
温暖化物質循環制御部長

研究面では、いろいろな研究が盛んです。例えば、木材、いわゆるドライなバイオマスですと、ガス化複合発電、あるいはガス化した合成ガスからのメタノール、DME（ジメチルエーテル）の製造です。ちょっと質の変わったウエットな廃棄物系の場合ですと、メタン発酵、最近ではメタン発酵したガスを燃料電池に使うのがかなり普及しています。これは、エタノールも従来どおりの糖類、澱粉系ではなくて、直接的にセルロースからアルコールをつくる研究もずいぶん盛んに行われております。日本での当面の普及、導入の観点からは、やはり一番導入しやすい形態のプロセスを取り上げるべきだと思います。

例えば、先ほど申しましたバイオマスによる熱電併給は、確かに国内のどこにでも向いているわけではありませんが、北海道、東北の寒冷な地域では、分散型の発電として十分使い得ると思います。最近、大手の民間企業にこのような事業の展開を計画している動きがあり、大変に期待しているところです。

中国・東南アジアへの国際協力

発育が速いバイオマスの

プランテーション技術の提供を

司会 循環型社会の構築は、わが国のみならず各国においても重要な課題かと思えます。特にわが国と関係の深い東南アジアにおける動向を中心に、これらの国々との国際協力など日本の役割を含めて、お話を伺えればと思えます。

平岡 前にも申しましたが、中国、東南アジア諸国は、急速な経済成長を続けており、人口は中国だけでも13億人ですから、資源・エネルギーの消費量は、ものすごい勢いで伸びています。既に石油の輸入国になっており、今後考えられる新たなエネルギー供給源にバイオマスが挙げられます。化石資源はグローバルに見て必ず枯渇するものですから、日本がこれらの国に再生可能なバイオマスのプランテーション技術を提供するのは、東南アジアは植物の発育が速いですから、グローバルな協力として望ましいやり方と思えます。

輸送用燃料へのバイオマス転換技術

CDM適用への期待も

横山 平岡先生がおっしゃるとおりです。山地先生の関連で申し上げたいのですが、循環型社会のキーワードは、持続性です。バイオマスは、有機質ですから、燃焼して電気エネルギーにも変えられますし、ケミカルエネルギーにも変えられます。

中国は、今話されましたように、既に日本と同量程度の石油を消費していますが、農産

系や畜産系のバイオマス資源は豊富です。ただ、燃焼して使う場合、残念ながら、エネルギーとしての利用効率が大変低いのです。廃棄物のエネルギー効率の向上を図ることも大事ですが、将来的にはさらに前向きに、作物をつくってより高いエネルギー転換をして使用することも大事です。発電もありますが、例えば一つのアイデアとして、木材に限らず、農産系の廃棄物をガス化して合成ガスをつくります。これは技術的に可能です。合成ガスから、さらにメタノール、あるいはジメチルエーテルをつくれれば、これは燃料として、輸送用にもコジェネ用にも十分に使えます。

いずれにしても、CO₂排出量削減の問題は、量的問題があります。日本が出す温暖化ガスでさえもCO₂換算で年間13億トンになりますので、ある程度量的にさばくには、やはりバイオマスから輸送用燃料をつくるというオプションが出てくるわけです。その場合に、日本の技術を移転して、CDM〔クリーン開発メカニズム〕が適用されれば、わが国にもメリットになる構図が考えられます。

このようなバイオマス技術の移転に対して、わが国が何らかの形でコミットをすることが大事だと思います。

モノ作りの原点

3Rの考え方と技術の移転も

山本 経済のグローバル化により、多くのモノの生産が東南アジアに拠点を移しました。モノ作りの流れを考えたとき、生産するだけですと最後は廃棄物となって捨てられることになります。やはり、東南アジアの諸国にも、リデュース、リユース、リサイクルという循環型モノ作りの考え方を原点に据えてもら

必要があると思います。そういう意味で、日本は、特にエネルギー分野では、優れた省エネ技術を持っていますから、その面での技術移転は大変重要だと考えます。

一方、平成11年に海外への有害廃棄物の大量輸出があり、大きな国際問題になりました。

やはり、発展途上国にもリサイクルのある社会制度を設けてもらうとともに、それに必要な技術や、資金を提供していくことがわが国にとって重要と思います。

今後の循環型社会の構築に向けて

経済活動へ環境配慮のビルトインを

司会 それでは次に、循環型社会の構築に向けてのこれからの取り組みについて、さらにお話を伺っていききたいと思います。まず、関係の他省庁との連携も含めまして、通産省の新しい政策について紹介をお願いします。

山本 先ほど、循環型社会形成に向けての法整備が済んだと申しました。しかし、法律は、どちらかといいますと、規制的色彩が強いものになります。循環型社会の形成は、規制だけで行われるものではなく、むしろ、どのようにして経済活動に環境配慮をビルトインしていくか、経済社会の中に環境の重要性が正しく評価される仕組みをつくっていくかが大事だと思っています。そのため、私ども通産省は、様々な方策により、できるだけの支援を考えており、次のものがあります。

○ 環境マネジメント、環境会計

環境マネジメントシステムのISO14000シ

リーズは、既に多くの企業で取り込まれていますが、これを中小企業を含め普及していくとともに、コスト面で正しく評価する観点から、今話題の環境会計という手法も広めたいと考えています。環境庁でも多くの手法を出されており、私ども通産省も、設備投資、製品開発に際して最適な環境対策とコストを評価できる環境管理会計の手法開発を行っております。

○ 環境報告書

環境配慮型の事業活動を、国民に、あるいは地域社会の方々に理解をしていただくことが必要です。それが、ひいては企業活動に対する評価になるわけですが、主要大手の企業では環境報告書という手法が行われています。地域社会、消費者、投資家などの利害関係者とのコミュニケーションの手段として、このような事業活動を支援していくことが重要と思っています。

○ 環境配慮型の製品設計

製品自身を環境配慮型に変えていくことも大切です。それには、DFE(Design for Environment)と呼ばれていますが、製品設計の段階から環境配慮型にすることが重要です。一部の大手企業では既に取り組みされていますが、中小企業にもこのような手法を広く普及していくことが望まれます。

○ ライフサイクル・アセスメント

製品の環境負荷を考えると、単に使用段階、使用後の廃棄段階だけではなく、原材料の調達から生産、流通、消費、廃棄、リサイクルという製品のライフサイクル全般を通じ

て環境負荷を低減させることが重要です。このための手法が、いわゆるライフサイクル・アセスメント（LCA）でして、この手法によりますと、環境負荷がどこが一番大きく、どこに対策をすればどの程度低減できるかが明らかになります。このLCAの手法を製品開発の中にぜひ生かしたいと考えています。

○ 環境ラベル

製品が持つ環境特性を、一般消費者や国民との間でどのようにコミュニケーションをしていくかの問題があります。

これには、「環境ラベル」と呼ばれる手法があり、今、環境庁が進めているのが「エコマーク」です。これは、ある基準を満たした製品を第三者機関が認証し、製品にラベルを貼付して表示するというものです。一見して分かりやすい利点がありますが、製品のどこが環境負荷に優しいかが分かりません。

もう一つの手法として、今ISOで議論されているのが、定量的な環境情報を提供するラベル、いわゆる「タイプⅢラベル」というもので、製品の環境負荷データをカタログやインターネットにのせる形で提供する手法です。これは、事務機械の分野で印刷機や複写機の一部のメーカーでスタートしています。

このような環境ラベルの手法によって製品の環境配慮への取組が公正に市場で評価されることが必要で、そのためのガイドラインづくりや支援策の策定を進めているところです。

○ エコタウン事業

通産省が行った環境産業の将来予測では、市場規模は2010年に現在の15兆円から37兆円に、また雇用も現在の64万人から140万人とい

う大きな数字が出ています。これを現実のものにするには、担い手である環境産業をどう発展させるかが重要です。現在、リサイクル産業の直接的な支援策として、通産省と厚生省が連携して行っているのが「エコタウン事業」です。

これは、これまで提唱されてきた「ゼロエミッション構想」をもとにして、地域に循環型社会をつくらうというものです。各地のごみ処理施設やリサイクル施設の整備に対する助成と地方自治体が行う分別収集体制、リサイクル製品の需要開拓などのソフト面の助成で、地方自治体と地域産業の連携による循環型社会形成への支援であります。

現在までに10カ所ほどの地域を指定し、20ほどのリサイクル施設が稼動中です。このうち、15ほどは新しい会社による新規産業としてリサイクル産業が出現しており、また既存の鉄鋼会社やセメント会社によるリサイクル分野への進出が、産業の環境化という形で進行しています。

これらの直接の支援措置や先に述べた企業活動を環境配慮型にしていく支援措置を通して、リサイクル産業、あるいは環境産業の発展に、さらに循環型社会の構築に向け取り組んでいるところです。

リサイクルを推進する技術

環境サイクルを守るエコ・テクノロジー

司会 次に技術面に移りたいと思います。循環型社会を構築する技術のあり方、環境技術、



稲葉 裕 俊 氏

(財)エネルギー総合工学研究所 専務理事)

エネルギー技術の展開などにつきまして、ご自由に語っていただきたいと思ひます。

平岡 私が長年やってきた環境技術の研究、開発、教育の中で常々申してきたことは、静脈系の概念です (図7参照)。

我々が経済活動を行っている社会を人間生態系といい、その周りを取り囲んでいます自然生態系とのバランスを保っているのを「環境サイクル」といっています。1960年から70年代にかけて発生した公害は、環境サイクルのバランスの乱れです。我々が消費したエネルギーが有害物質になりましたが、その影響を無視した結果です。

私は、「エコ・テクノロジー」の定義として、次の3つを挙げ、環境技術を整理しています。第1に環境サイクルを守る技術、これは1960年代に発生した公害を防止する技術に関連するものです。第2にリサイクルを推進する技術、第3に生産工程から廃棄物を出さないようにクローズド化する技術です。

このうち、環境サイクルを守る技術が最も重要で、わが国の場合、もともと伝染病予防のため都市部に導入された焼却炉からダイ

オキシン問題が発生しました。これは、わが国の経済発展の中に潜在した矛盾が表面化したものと思ひます。私は、この問題にもろに巻き込まれて関与することになり、1990年にダイオキシン制御の第1次ガイドラインを、1997年には第2次ガイドラインの作成に携わりました。

今後の問題として、PCBその他の有害物質を処理する技術が、リサイクルする前に必要だと思ひます。

「マテリアル・リサイクル」を基本に
「フィードストック・リサイクリング」を

平岡 リサイクルの推進技術は、発生抑制、再使用、再利用、および熱回収ですが、基本は、「マテリアル・リサイクル」です。しかし、紙から紙へ、プラスチックからプラスチックへのリサイクルは、古紙が数回のリサイクルで繊維が短くなり、紙としての使用が不可能になるように、材料品質の劣化により、マテリアル・リサイクルには限界があります。

私は、その次にくるのを「フィードストック

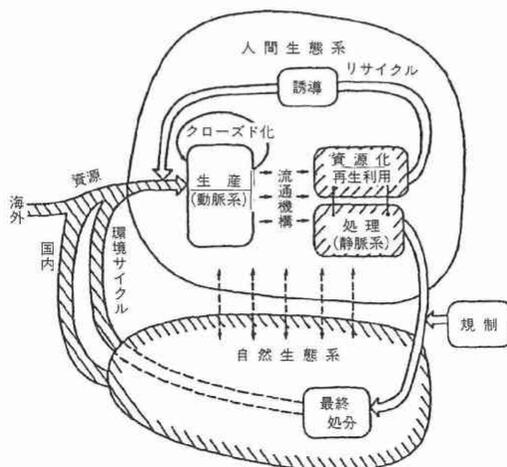


図7 静脈系の概念

ク・リサイクリング」と呼んでおり、先ほど中條部長のお話にもありましたもので、動脈系である各種製品製造プロセスの一次原料にまで廃棄物をリサイクルするものです。通産省はよく「ケミカル・リサイクル」と呼んでいます。

先ほど、循環型社会の基本としては輸入資源を減らすことだと申しましたが、一番典型的な例が、鉄鋼業で高炉の原料に廃プラスチックを還元剤として石炭代わりに使う技術ですし、またコークス炉の原料に使用する技術も実用化レベルに達しています。石炭の輸入量を減らせますから、これは基本的なリサイクル技術であり、このような方向に進めるべきと考えます。

この外、焼却灰、ばいじん等の廃棄物を原料としてエコ・セメントを製造する技術が開発され、千葉県に実用プラントが建設中です。それから、横山部長の話にありましたが、バイオマス燃料を使用するのではなく、熱分解ガスに酸素を吹き込み、高温で改質してCO、H₂を回収して、アンモニア合成、メタノール合成等の原料として使用するプロセスも開発途上にあります。

これらが進みますと産業構造が変化し、環境産業、リサイクル産業が伸びてくると思います。

「サーマル・リサイクル」に

ダイオキシン抑制型の高効率ごみ発電を

平岡 マテリアル・リサイクルで劣化した廃棄物も高発熱量を有するものは、高効率のエネルギー回収、サーマル・リサイクルを進めなければいけません。

そのとき、ダイオキシン問題があり、焼却

処理が悪者扱いされていますが、決して悪者ではないのです。ダイオキシン生成の抑制には、ごみを完全燃焼させることが重要です。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、高温域での滞留時間を長く、混合をよくして、完全燃焼させます。特に燃焼室の燃焼管理では、3 Tといわれている温度 (Temperature)、滞留時間 (Time) および混合 (Turbulence) の制御が重要で、第1次ガイドラインに反映されており、抑制の目標値は十分達成できると思っています。

横山先生がおっしゃったように、わが国はエネルギー資源が少ないですから、廃棄物をそのまま最終処分するのではなく、当然ながら、その前にサーマル・リサイクルする。それにはダイオキシン抑制型の高効率発電にもっていく。さらに、前にも述べましたが、廃棄物を1次資源までリサイクルする「フィードストック・リサイクリング」を基本として、廃棄物ガス変換発電を行う方式、あるいは熱分解してアンモニア合成する等の技術が進められていくと考えています。そういう中で、有害物はきちっと処理しながら、循環産業が育成されればと思います。

司会 私どもの研究所も、先生のご指導のもとで、廃棄物ガス化溶融発電技術の開発や、廃棄物ガス変換という、新しい技術のフィージビリティ・スタディに取り組んでいるところです。

横山 プラスチックですと、わが国での生産量が年間約1,500万トン、廃プラとしての排出量が約950万トン、そのうち有効利用される割合は、マテリアル・リサイクルが12%に対してサーマル・リサイクルが30%となっており、

サーマル・リサイクルが大事なことが分かります。

山本 最近、ペットボトルのリサイクルが話題になっています。回収量、回収率ともここ3～4年間で急激に向上してきました。これは、平成9年の「容器包装リサイクル法」の施行に伴いペットボトルがリサイクルの対象になり、市民や自治体の方が熱心に協力して下さった賜物ですが、それが処理可能量以上に集まって5,000トンほどがリサイクルできなかったことで大変な社会問題になりました。

これを一部サーマル・リサイクルできないかという議論がありましたが、やはり、原材料としてのリサイクルを進めるとともに、更にはペットボトルに何とか再生利用が可能になる技術の研究開発を進めています。ただ、リサイクルを繰り返しますと劣化が進みますから、最後はサーマル・リサイクルになりますので、紙製容器包装紙は「容器包装リサイクル法」の中でマテリアル・リサイクルが困難な場合にはサーマル・リサイクルを位置づけています。

バイオマスの小規模リサイクルに

クリーンな燃料電池の活用も

山地 先ほど一つ言い忘れたのが分散型エネルギー、分散型電源です。特に、90年代後半に期待が高まった自動車用、家庭コジェネ用の燃料電池、それにマイクロ・ガスタービンは、先ほどの物質循環と結構関係が深いと思います。

マテリアル・リサイクルにしてもサーマル・リサイクルにしても、廃棄物の取り扱いでコストがかかるのは分類と回収です。集中型でまとめて処分できるのは廃棄物発電です

が、規模が大きくなってしまいます。もっと小規模で経済性のあるクリーンなエネルギー転換技術があれば、かなり模様が変わってきます。その例が、ビール会社で使っている燃料電池のケースでリン酸形のものですが、もっと多くのところに普及できると思います。畜産系廃棄物の利用は、規模から考えて、経済性のある分散型エネルギー技術が出現すれば相当マーケット性があると思います。

バイオマスは、分散型の自然エネルギーとしては質がいいものです。私の僻みかもしれませんが、どうも廃棄物系なものですから政策の谷間に置かれて、サーマル・リサイクルをいやがられたり、支援がなされていない気がします。燃料電池などで使ってクリーンな発電ができますと、支援されない理由はまったくなくなるとは思いますが。

食料系、畜産系バイオマス利用に残る

経済性、社会システムとの適合性

山本 廃棄物は、いま年間4.5億トン、その約2割が農業系のもので、大変な量です。これは動物のふん尿などの畜産関係が中心ですので、これを堆肥として利用するか、それが困難なものは下水処理されています。私ども通産省がなかなか手を出しにくい分野ですが、エネルギーの有効利用の点から、バイオマスのガスなどの技術は出てきていますので、エネルギー利用などもう少し何とかできないかと思っています。

山地 私は、木材系、食料系のバイオマスの循環量についての調査をしています。日本にはエネルギー専用のバイオマスはありませんが、非エネルギー用の木材系、食料系のバイオマスでみましても、副産物を主体とした廃棄物

系で石油換算4,000万トンぐらいあります。耕地鋤込みとか、ウエットな畜産系廃棄物があることで、エネルギーを全部回収できるとは思いませんが、その鋤込み量などを何とか計算して、ウエットなものはバイオガス化ぐらいでメタンになる割合を考えても、大ざっぱに見て半分の2,000万トンぐらいはエネルギー用に利用できると思われます。そのうち、黒液と廃棄物発電で石油換算600万トンぐらいを利用しているのが現状で、まだ1,000万トンぐらいは増やせると思います。日本のエネルギー消費量は年間で石油換算5億2,000万トン、それと較べると小さなものですが、ただ、自然エネルギーの中では本当に貴重なものです。また、燃料として使えるので、安定的で質の高いエネルギーになり得ます。

山本 最近、自民党に有機資源の有効利用に関する議員連盟が結成され、食品廃棄物のリサイクルとして、堆肥、肥料、飼料などのマテリアル中心のリサイクルの推進が提唱されました。先ほどお話のありましたバイオマス関係のエネルギーは、発生場所が分散型ですから、回収し集約化して、コストが安いエネルギーに転換できるかが問題です。技術はあるのですが、経済性、あるいは社会システムへの適合性にどう対応していくかが課題だと思います。

山地 経済性は何と比較するかによりますが、微妙でしょう。例えば、畜産系バイオガスの場合は、消化液の液体廃棄物が問題です。バイオガス化してエネルギーを回収すれば、有機物は減っているはずですが、廃棄物処理がしにくい組成になります。液肥で撒ける北海道やヨーロッパは別にして、液肥としては使えないところは汚水処理になって、ものす

ごいコストがかかる可能性があります。この場合には、廃棄物処理コストとしての比較が必要になるでしょう。

EPRの考え方の導入と

リサイクル生産技術のブラッシュアップを

司会 循環型社会の形成にかかわる技術的側面について、生産者としての企業においても設計からリサイクルに至るまでの新たな取り組みが必要かと思いますが、その際留意すべき点につきお伺いしたいと思います。

中條 モノづくりとリサイクルが不可分になりつつあり、製造業の中にリサイクル機能というか、リサイクルビジネスが潜在化しているのが現状だと思います。目下、設計面、製造面に、リデュース、リユース、リサイクルの3Rをどのように取り込むかが現在の最大の課題です。これまで、モノの売買の時点で品質が一番よくなるように設計されていましたが、今後は使用に入った後も、ライフサイクル全体を通して品質が維持され、使用後のリサイクルにも配慮された設計が非常に重要な課題になってきます。

先ほど山本室長が述べられた「資源有効利用促進法」により、EPR（拡大生産者責任）の考えが取り入れられます。生産者は使用済み製品の処理、リサイクルに一定の責任を持つことになり、それを前提にした設計では、性能だけではなく、環境負荷、環境コストを含めたライフサイクル・エンジニアリング能力が求められてきています。

また、廃棄物処理の面から見ると、適正処理が大原則なのはもちろんですが、リサイクルにより原料をつくることになりまから、生産技術としてどのようにブラッシュ

アップするかが重要になってきます。今まで処理することに意識が向いていましたが、モノをつくるという意味合いで、廃棄物をどのように転換し易くするかというスタンスでの技術が求められてきます。

さらに、モノの廃棄とリサイクルによる生産の間をつなぐということでは、量、質、時間のマッチングが重要な課題になります。静脈物流のハードウェアにはパッファ的な機能も必要ですし、リサイクル可能な廃棄物がどこで出て、どこで求められているかという情報面でのマッチングも必要と思っています。

消費者に求められる

グリーン購入の重要性の認識

司会 消費者もしかるべき役割を社会の中で果たしていくことが求められるのではないかと思います。この点についてはいかがでしょうか。

山本 循環型社会における消費者の役割は、一つは製品の購入面にあります。これは、購入に当たり、リサイクルに容易な製品なのか、リサイクルに配慮した製品なのか、環境配慮型の製品になっているのかをきちっと見極めて選んでいただくことで、この選択は、ひいては環境に配慮している企業を選別していくことになりますから、消費者は物の購入という手段を通じて循環型社会形成の役割を担うことになります。

また、ごみを出す段階の問題があります。これは、先ほど大変苦勞が多いというお話がありましたけど、分別排出として、ペットボトルとか罐とかを分けて出していただくことも非常に大きな役割です。まとめて後で分別するのは、大変なコストと労力を要しますか

ら、排出段階で分けていただくということが重要です。

もう一つ、コストの負担があります。このリサイクル費用の負担は、容器包装のように製品価格に上乗せする場合と、家電製品のように排出するときにお金を払ってもらう場合があります。いずれにせよ、最終的には製品の受益者負担ということで、製品の原材料費や加工・組立費などの製造コストと同様に、リサイクル費用を消費者に負担いただくことになります。その意味で、消費者の役割は大変重要です。

今述べましたような行動を消費者にとっていただくことが重要です。理想を申しますと、「グリーン・コンシューマー」という言葉がありますが、グリーンな商品をどう見分けていただくか、グリーン調達していただく消費者をどのように増していくかということです。このような観点から、いろいろな法律の中で消費者の役割を決めており、例えば「容器包装リサイクル法」の中では、消費者にリサイクルの一端として分別排出などの役割を担っていただくことにしています。あわせて、消費者に環境やリサイクル問題に関心を持ってもらうといえますか、各種の情報提供を通じてグリーン購入の重要性を認識していただくことが重要と考えています。

将来への展望

英知と決意が問われる社会実験

国民の価値観、意識構造の改革から

司会 最後に循環型社会構築の将来展望につ

いて、長期の観点、また国際的な視点なども含めての皆様のお考えをお聞かせいただきたいと思います。

平岡 戦後50年続いたわが国の社会システムを循環型に変換するのですから、いわば大きな社会実験をやっていると思っています。そのためには、教育、学習を通じて、国民の価値観、意識構造をまず変革していくことが必要です。21世紀に、経済社会をより高次なものに発展させていけるかどうか問われている試金石で、超長期的な課題と思っています。

ドイツでは、リサイクル運動の創始時に行ったシンポジウムで、10年、20年かけてもやると宣言していました。日本ですと、ペットボトルが溜ったとき、すぐマスコミが非難しましたが、長期にわたった人間の英知と決意が問われているわけですから、実現に向けてのあらゆる努力が必要です。

温暖化防止につながる

循環型社会構築への賛同

山地 地球温暖化問題のような、全人類に対する普遍的な課題に対するときには、循環型社会の構築が重要だと思います。ただ、若干危惧しますのは、狭くて短期的なイメージでの循環型社会の構築が自己目的化しますと、話はややこしくなってきます。サーマル・リサイクルも取り込んだ、少し広くとらえた循環型社会をライフサイクル評価の視点から吟味して、ステップ・バイ・ステップで目指していくべきだと思います。

私が期待していますのは、地球温暖化対策の中で最も政策手段のないライフスタイルの変更に關してです。多くの方がその必要を唱えられますが、政策的には具体的になかなか

難しく、ライフスタイルの変更といっても大きなインパクトは期待できません。

しかし、ライフスタイルなどと言わず、循環型社会の構築ということであれば、おそらく大勢の方の賛同が得られると思いますので、それによって身の周りの生活様式が変わりますと、それを通して省エネにプラスします。しかし、教条的に何が何でも循環型社会というように集中しすぎますと、かえって視野が狭くなって非効率的になるように思います。広い視野で循環型社会を望めば、非常にスムーズに温暖化防止につながっていくかと考えます。

横山 石油や天然ガスは、枯渇が遠からず到来する状況にあり、再生可能な資源であるバイオマスの持続的利用は、循環型社会の構築にとって大事です。とにかく、最近、北海道、岩手、兵庫、岡山、大阪などの地方自治体や森林組合の中にバイオマスをエネルギーに使用して循環型社会づくりに貢献しようという動きが出てきて、私としては心強く思っています。将来的には、バイオマスを石油代替に使うことで、CO₂削減に寄与できる日本の技術が、国際社会でも大いに貢献することを期待しています。

国内だけで閉じないリサイクル、

動脈・静脈の物流を合わせた最適化と

リユース情報提供のインフラ整備を

中條 国際的な観点、グローバル化の關係で申しますと、廃棄物の輸出になってはいけません、リサイクルを日本だけで閉じられるのか、難しい面がある気がします。例えば、有機系で、食料、飼肥料などを大量に輸入していることを考えると、そのアウトプットを

日本の中だけで閉じるのはそもそも無理がありますので、近隣諸国を含めたもう少し広い範囲でのリサイクルを考える必要があるかと思えます。

それから、情報技術の面で3Rを考えますと、物流が非常に重要です。現在は、動脈物流が動脈だけで最適化されていますが、静脈物流を含めると、おそらく、全体最適にはなっていません。動脈と静脈をあわせた最適化を探る必要があると思えます。

また、リユースに関する情報では、今すぐできるというわけではないでしょうが、個別の製品を識別して性状を評価し、その情報をやりとりしてリユースを促進するインフラが今後必要になってくると思えます。

ま と め

魂を入れるのはこれから

事業者・消費者・行政のパートナーシップを

司会 それでは、最後に、山本室長からまとめのお言葉をお願いいたします。

山本 わが国では、循環型社会の形成に向け法律はできましたが、魂を入れるのはこれからです。地球環境問題や廃棄物・リサイクル問題は、その影響が極めて広範囲で、時間的にも長期にわたるもので、これまでの取組と

は異なるアプローチが必要です。また、原因者と被害者が同一となることもあり、特定の者に対する対策だけでは不十分です。さらに、これを実現するには、事業者、消費者、行政の3者がそれぞれの役割分担の下でパートナーシップを組まなければ進みません。

さらに、この問題は日本国内だけの問題ではなく、日本は資源を大量に輸入しているという先ほどのお話を考えましても、循環型社会への取組というのは、エネルギー問題への取組と同様に、近隣諸国との、あるいはグローバルな視点でやっていくことも必要と考えます。

21世紀は、環境の世紀とも呼ばれています。今後、将来にわたって、環境問題や資源・エネルギー問題が世界の経済発展の制約とならないように、これらの問題をいかに克服し、経済システムの中にビルトインしていくかが重要な課題です。その中で、日本として何ができるのか、これからの大きな長期的な課題として、資源・エネルギーと環境の両方の問題を含めて考えていかなければいけないと思っています。

司会 本日は、皆様から大変すばらしいお話を伺うことができました。非常に幅広いテーマでしたので、まだまだ語り尽くせないことも多いかと思いますが、時間が参りましたので、このあたりで終らせていただきます。

どうもありがとうございました。

〔調査研究報告〕

電解酸素を用いた石炭ガス化による 水素・メタノール製造プロセスの経済性検討



片山 優久雄 (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

新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) は、2000年6月、太陽熱エネルギーを用いて石炭と天然ガスからメタノールを製造する「石炭・天然ガス活用型二酸化炭素回収・利用技術開発」を公募した。当所はこれに応募するため、海外のサンベルト地域における太陽熱エネルギーを直接用いて石炭を水蒸気改質ガス化する方法による水素・メタノール製造プロセスの検討を行った。

太陽熱を直接利用する場合においては、以下の解決を要する重要な課題が存在する。その第1が、数秒の短時間で一酸化炭素(CO)と水素を製造する石炭の水蒸気改質反応エネルギーを、太陽熱エネルギーのみで供給とした場合のガス化炉入熱量は、蒸気温度を2,800℃程度にするエネルギー量が必要とされることである。第2が、石炭の水蒸気改質ガス化等のガス化において、雲等による太陽光の遮蔽による急激な熱変動は、ガス化炉閉塞等のトラブルを惹起するため回避すべき重要な要因となることである。

また、太陽熱エネルギーは、日中10時間ほどしか利用できない。したがって、装置費の嵩む石炭ガス化設備や天然ガスの水蒸気改質

設備を稼働率40%以下で操業することとなり、燃料費がたとえゼロであっても経済性に乏しくなる。それ故、24時間操業を前提に、太陽エネルギーを取り込む方法について検討を行った。その結果、太陽エネルギーを電気に変え、その電力を用いて水を電解して酸素と水素を製造することとした。この酸素を用いて石炭をガス化し、得られたCOと水素に、さらに電解で得られた水素を加えてメタノールを製造する方法を創出した。

そこで、最初に電解酸素を用いる石炭ガス化により得られるCOのシフト反応によって水素を製造するプロセス「電解酸素利用石炭ガス化水素製造プロセス」について、従来方式の深冷分離酸素利用石炭ガス化水素製造プロセス及び電解水素製造プロセスとの経済性比較を実施した。次いで、石炭ガス化により得られたCOと水素に、水を電解して得られた水素を加えてメタノールを製造する場合の「電解酸素利用石炭ガス化メタノール製造プロセス」について、電解水素と炭酸ガスを利用してメタノール製造する電解水素・炭酸ガス利用メタノール製造プロセス、及び通常の深冷分離酸素利用石炭ガス化メタノール製造プロセスとの経済性比較を行った。それらの試算結果を以下に紹介する。

2. 電解酸素利用石炭ガス化プロセスの特徴

時々刻々変動する太陽や風力などのエネルギーを直接一般電力として用いるには、蓄電設備、インバーター等の高価な付帯設備が必要なため、電力コストは火力発電や原子力発電からの電力と比べて割高となる。しかし、本検討プロセスでは、これらの付帯設備を設けず、変動にかかわらず、発生する直流電力を用いて水を電解することにより、酸素と水素を製造する。

電力の変動は、電解量の差となるのみで、発電量が多ければ、電解生成物である酸素と水素の量が多くなるだけで、比較的 low コストで設置できるガスホルダーに余力を持たせれば石炭ガス化プロセスへの影響は皆無といえる。この貯蔵された電解酸素を用いて石炭をガス化し、かつ電解により併産される水素も利用するのが本稿で提唱する電解酸素利用石炭ガス化プロセスである。

自然再生エネルギーの中で最も安定した電力が得られる水力によって、水の電解を行う場合は不要であるが、風力エネルギーや太陽エネルギーによって製造される電力は変動が大きいために、水の電解によって製造される酸素量は、石炭ガス化炉を24時間運転するに十分必要な量をガスホルダーに確保することが前提となるのが特徴である。

3. 水素製造プロセスの比較

3.1 3プロセスの概要

水素製造コストの比較検討に先立ち、現状技術による2プロセス及び今回の提唱プロセスについて、それぞれのプロセスの概要を説

明する(図1参照)。

① 電解水素製造プロセス

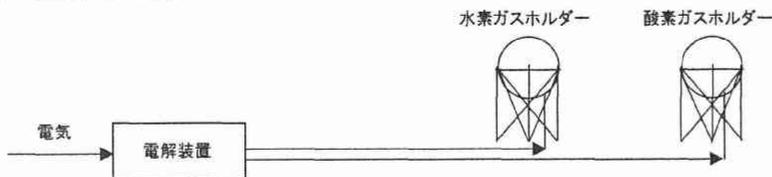
当該プロセスを図1の1に示す。太陽、風力、水力などより発電した直流電力を用いて、固体高分子電解質タイプの電解装置で水素、酸素を発生させ、ガスホルダーに貯蔵し利用するシステムである。

② 深冷分離酸素利用石炭ガス化水素製造プロセス

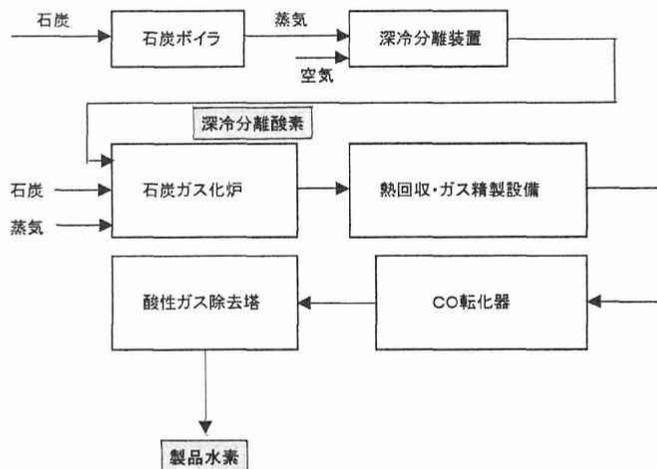
当該プロセスを図1の2に示す。石炭ボイラで蒸気を発生させ、その蒸気によるタービン駆動機で空気の高圧分離装置を駆動させ、酸素を製造する。プラント規模が小さい場合には、プレッシャー・スイング法を用いて空気から酸素を製造する設備が用いられることも多い。深冷分離による酸素を用いて石炭をガス化する。ガス化炉への石炭供給は、通常は加圧窒素ガスにて行なわれているが、後段における水素の精製を考慮し、本プロセスでは300℃の蒸気による供給とした。また、ガス化炉壁の保護冷却用として300℃の蒸気を吹き込む。本試算における石炭供給用と冷却用の蒸気比は、3:7である。ガス化炉から出たガス化ガスは、廃熱回収ボイラで熱回収され、脱硫などのガス処理を行うガス精製工程に入る。なお図1では、これらを一括して熱回収・ガス精製設備としている。その後、COを水素に転化するためにCO転化器(シフト反応器ともいう)に入り、COと水の反応によって水素とCO₂に転化される。その後、二酸化炭素(CO₂)除去のために酸性ガス除去塔に導かれ、CO₂が除去され製品水素となる。

③ 電解酸素利用石炭ガス化水素製造プロセス

1. 電解水素製造プロセス



2. 深冷分離酸素利用石炭ガス化水素製造プロセス



3. 電解酸素利用石炭ガス化水素製造プロセス

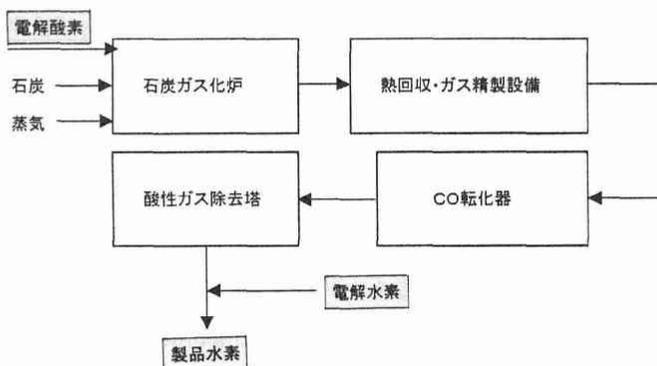


図1 水素製造プロセスフロー

当該プロセスを図1の3に示す。前記①項の電解水素製造プロセスで作られた酸素を用いるので、②項のプロセスに必要な石炭ボイラと深冷分離装置が不要である。その代わり、

①項のプロセスと同じ設備が必要となる。石炭ガス化炉以降は、②の諸設備と同じであるが、異なるのは製品水素に電解からの副生水素が付加されることである。

表1 酸素吹き石炭ガス化プロセスの基本物質・熱収支

		ガス化炉入口		ガス化反応ゾーン		ガス化炉出口	
		t/h	t·mol/h	t/h	t·mol/h	t/h	t·mol/h
原料 石炭	石炭(DAFベース*) %	91.1					
	C = 83.64	76.2	6.3	Cロス	1.0%		
	H = 5.16	4.7	2.3				
	N = 1.32	1.2	0.0				
	S = 1.10	1.0	0.0				
	O = 8.78	8.0	0.2				
	灰分 8.90	8.9		8.9		8.9	
	水分 0.00	0.0					
合計	100.0	9.0					
バーナ	燃焼用 酸素	77.0	2.4				
	窒素	0.0	0.0				
	アルゴン	1.0	0.0				
	噴霧用蒸気(300℃)	15.0	0.8				
	冷却用蒸気(300℃)	35.0	1.9				
	合計	128.0	5.2				
転換 処理後 のガス 組成	Cロス			9.77	0.06	0.00	0.00
	H ₂			7.59	3.76	7.59	3.76
	CO			159.64	5.70	159.64	5.70
	CO ₂			24.61	0.56	24.61	0.56
	CH ₄			0.34	0.02	0.34	0.02
	COS			0.05	0.00	0.05	0.00
	H ₂ S			1.04	0.03	1.04	0.03
	N ₂			1.21	0.04	1.21	0.04
	A _r			1.96	0.05	1.96	0.05
	H ₂ O			22.87	1.27	22.87	1.27
合計			220.07	11.50	219.30	11.44	
温度	°C		°K	°C	°K	°C	°K
	25	298	1,300	1,573	1,200	1,473	

* D A F : 無灰状態

3.2 水素製造3プロセスの物質・熱収支

① 石炭ガス化プロセスの物質収支

表1に、水素・メタノール製造プロセスの基礎となる酸素吹き石炭ガス化の物質収支を示した。この計算結果が示すガス組成をベースに、通常の深冷分離酸素(98%酸素純度)を用いる石炭ガス化炉周りの物質収支を表2に、また電解からの酸素(100%酸素純度)を用いる石炭ガス化炉周りの物質収支を表3に示した。

② 石炭ガス化炉の総合熱効率

石炭ガス化の総合熱効率を両者で比較すると、深冷分離酸素を用いるケースは、原料石炭の熱量7,340G cal/日とプロセス全体の消費燃料1,650G cal/日を加えた値8,990G cal/日で、製品ガスの総発熱量6,505G cal/日を割る総合熱効率は、72.4%となっている(表2)。

一方、電解酸素を用いるケースの総合熱効率は、原料石炭の発熱量7,340G cal/日とプロセス全体の消費燃料850G cal/日(深冷分離装置駆動用エネルギーが不要なために少ない)と電解に消費された電気エネルギー量3,523

表2 深冷分離酸素利用石炭ガス化プロセスの物質収支

セクション		ガス化炉 入り口	ガス化炉 出口	ガス精製 出口
		t・mol/day	t・mol/day	t・mol/day
原料 石炭	原料処理量 1,000t/day			
	構成元素比(DAF)			
	C = 83.64	63.4		
	H = 5.16	23.3		
	N = 1.32	0.4		
	S = 1.10	0.3		
	O = 8.78	2.5		
	灰分 (%) 8.90	89.0		
	水分 (%) 0.00	0.0		
	発熱量(HHV : 7,340kcal/kg)			
バーナ	燃焼用 酸素(40℃)	24.1		
	噴霧用 蒸気(300℃)	8.3		
	冷却用 蒸気(300℃)	19.4		
転換 処理後 のガス 組成	電気分解余剰H ₂		0.0	0.0
	Cロス		0.6	0.0
	H ₂		37.6	37.6
	CO		57.0	57.0
	CO ₂		5.6	0.0
	CH ₄		0.2	0.2
	H ₂ S		0.3	0.0
	N ₂		0.4	0.4
	A _r		0.5	0.5
	H ₂ O		12.7	0.0
	合計		115.0	95.8
	生成ガスの総発熱量(G cal/day)		6,505.5	6,505.5
①プロセス消費燃料(G cal/day)		1,650.000		
冷ガス効率 (出口ガス/入口原料石炭)		88.6%		
熱効率(石炭ベース) (出口ガス)/(入口石炭+①)		72.4%		

G cal/日(酸素1 mol当り146kcal/mol)の合計値11,713G cal/日で、電解副生水素を加えた製品ガスの総発熱量9,793G cal/日を割ると、83.6%と、11%も高くなっている(表3)。

なお、表2、表3の相違点は、深冷分離酸素利用の表2の結果に、アルゴンの0.49t・mol/日が加算されており、表3には、電解からの副生水素48.12t・mol/日が加算されている点である。

③ プロセスのフローデータ

水素生産量5,000,000Nm³/日(石炭消費量1基100t/時の、現状技術で最大規模のガス化炉)の石炭ガス化水素製造プロセスについて、

各ユニットプロセスの入口・出口の物質収支を、それぞれ表4、表5に示した。

3.3 水素製造3プロセスのコスト試算結果

表6に、既存海外文献に出ているプラントコストをベースに国内価格に換算した、水素製造3プロセスの設備コストを示す。

表7に、水素製造3プロセスの耐用年間平均水素製造原価を示す。算出には、表4、表5の物質収支データと表6の設備コストデータを用い、水素製造地は産炭地、プラント規模を水素生産量5,000,000Nm³/日、石炭価格をトン当たり1,500円、プラントの耐用年数14

表3 電解酸素利用石炭ガス化プロセスの物質収支

セクション		ガス化炉 入り口	ガス化炉 出口	ガス精製 出口
		t·mol/day	t·mol/day	t·mol/day
原料 石炭	原料処理量 1,000t/day			
	構成元素比(DAF) C = 83.64	63.4		
	H = 5.16	23.3		
	N = 1.32	0.4		
	S = 1.10	0.3		
	O = 8.78	2.5		
灰分 (%)	89.0			
水分 (%)	0.00			
	発熱量(HHV : 7,340kcal/kg)			
バーナ	燃焼用 酸素(40℃)	24.1		
	噴霧用 蒸気(300℃)	8.3		
	冷却用 蒸気(300℃)	19.4		
転換 処理 後の ガス 組成	電気分解余剰H ₂		0.0	48.1
	Cロス		0.6	0.0
	H ₂		37.6	37.6
	CO		57.0	57.0
	CO ₂		5.6	0.0
	CH ₄		0.2	0.2
	H ₂ S		0.3	0.0
	N ₂		0.4	0.4
	H ₂ O		13.0	0.0
	合計		114.8	143.4
生成ガスの総発熱量(G cal/day)			6,505.5	9,793.4
①プロセス消費燃料(G cal/day)		850.0		
②電気分解使用エネルギー(G cal/day)		3,522.5		
冷ガス効率 (出口ガス/入口原料石炭)		133.4%		
熱効率(石炭ベース) (出口ガス)/(入口石炭+①)		119.6%		
総合熱効率 (出口ガス)/(入口石炭+①+②)		83.6%		

年、金利4%、修繕費を建設費の3%、保険料を簿価の0.77%、固定資産税を簿価の1.4%、インフレ率0%、電力価格4円/kWhとした。また、地球環境対策として、プロセスで発生するCO₂は、液化CO₂として回収し、地中若しくは深海底に処理することとして、表7には回収、処理コストをそれぞれCO₂1トンあたり3,000円、2,000円を計上した。

表7の変動費の中にある燃料は、ガス化原料となる石炭(発熱量HHV=7,340kcal/kg)を用いるとしてCO₂発生量を計算し、ガス化からの回収CO₂に加えて回収・処理費用を求

めた。

3.4 水素製造プロセスの経済性についての感度解析結果

① CO₂回収処理を行わないケースの電力価格と水素製造コスト

水素製造コストと電力価格との相関関係を図2に示した。電解酸素利用石炭ガス化法からの水素製造コストが深冷分離酸素利用石炭ガス化プロセス法より安価となるのは、電力価格が2円/kWh以下のときである。電解水素は、2種類の石炭ガス化法から作られる水

表4 深冷分離酸素利用石炭ガス化水素製造プロセスの物質収支表

(基準：水素生産量：5,000,000Nm³/day)

工程番号	1		2		3		4		5		6		7		
物質名	深冷分離 酸素		ガス化炉用 原料炭		噴霧用 スチーム		冷却用 スチーム		ガス化炉 出口ガス		CO転化器用 スチーム		CO転化器 入口ガス		
状態	ガス		固体		ガス		ガス		ガス		ガス		ガス		
元素等	分子量	t-mol/d	mol.%	t/d	wt.%	t/d	wt.%	t/d	mol.%	t-mol/d	mol.%	t-mol/d	mol.%	t-mol/d	mol.%
H ₂	2.0									88.8	32.9			88.8	18.2
CO	28.0									134.5	49.8			134.5	27.6
CO ₂	44.0									13.2	4.9			13.2	2.7
CH ₄	16.0									0.5	0.2			0.5	0.1
COS	60.1									0.0	0.0			0.0	0.0
H ₂ S	34.1									0.7	0.3			0.7	0.2
O ₂	32.0	56.8	99.0												
H ₂ O	18.0					354.0	100	826.1	100	30.0	11.1	217.0	100	246.9	50.7
CH ₃ OH	32.0														
C-C	12.0			1,798	76.2										
C-H	2.0			111	4.7										
C-N	28.0			28	1.2										
C-S	32.1			24	1.0										
C-O	32.0			189	8.0										
灰分				210	8.9										
合計		57.4	100	2,360	100	354.0	100	826.1	100	269.9	100	217.0	100	486.9	100

工程番号	8		9		10		11		12		13		
物質名	CO転化器 出口ガス		酸性ガス除去塔 出口ガス		酸性ガス除去塔 除去ガス		製品水素		回収硫黄		回収二酸化炭素		
状態	ガス		ガス		ガス		ガス		固体		液体		
元素等	分子量	t-mol/d	mol.%	t-mol/d	mol.%	t-mol/d	mol.%	t-mol/d	mol.%	t/d	wt.%	t-mol/d	mol.%
H ₂	2.0	222.0	45.6	219.8	97.6			219.8	98.5				
CO	28.0	1.3	0.3	1.3	0.6			1.3	0.6				
CO ₂	44.0	146.4	30.1	1.5	0.6	144.9	99.5	1.5	0.7			144.9	100
CH ₄	16.0	0.5	0.1	0.5	0.2			0.5	0.2				
COS	60.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0						
H ₂ S	34.1	0.7	0.2	0.0	20ppm	0.7	0.5						
O ₂	32.0												
H ₂ O	18.0	113.8	23.4										
CH ₃ OH	32.0												
C-C	12.0												
C-H	2.0												
C-N	28.0												
C-S	32.1									22.5	100		
C-O	32.0												
灰分													
合計		486.9	100	225.3	100	145.6	100	223.1	100	22.5	100	144.9	100

表 5 電解酸素利用石炭ガス化水素製造プロセスの物質収支表

(基準：水素生産量：5,000,000Nm³/day)

工程番号		1		2		3		4		5		6		7	
物質名		電気分離水素		電気分解酸素		ガス化炉用原料炭		噴霧用スチーム		冷却用スチーム		ガス化炉出口ガス		CO転化器用スチーム	
状態		ガス		ガス		固体		ガス		ガス		ガス		ガス	
元素等	分子量	t-mol/d	mol.%	t-mol/d	mol.%	t/d	wt.%	t/d	wt.%	t/d	mol.%	t-mol/d	mol.%	t-mol/d	mol.%
H ₂	2.0	75.3	100									58.9	32.9		
CO	28.0											89.1	49.8		
CO ₂	44.0											8.7	4.9		
CH ₄	16.0											0.3	0.2		
COS	60.1											0.0	0.0		
H ₂ S	34.1											0.5	0.3		
O ₂	32.0			37.6	100										
H ₂ O	18.0							234.6	100	547.4	100	19.9	11.1	143.8	100
CH ₃ OH	32.0														
C-C	12.0					1,192	76.2								
C-H	2.0					74	4.7								
C-N	28.0					19	1.2								
C-S	32.1					16	1.0								
C-O	32.0					125	8.0								
灰分						139	8.9								
合計		75.3	100	37.6	100	1,564	100	234.6	100	547.4	100	178.9	100	143.8	100

工程番号		8		9		10		11		12		13		14	
物質名		CO転化器入口ガス		CO転化器出口ガス		酸性ガス除去塔出口ガス		酸性ガス除去塔除去ガス		製品水素		回収硫黄		回収二酸化炭素	
状態		ガス		ガス		ガス		ガス		ガス		固体		液体	
元素等	分子量	t-mol/d	mol.%	t-mol/d	mol.%	t-mol/d	mol.%	t-mol/d	mol.%	t-mol/d	mol.%	t/d	wt.%	t-mol/d	mol.%
H ₂	2.0	58.9	18.2	147.1	45.6	147.1	97.6			220.9	99.0				
CO	28.0	89.1	27.6	0.9	0.3	0.9	0.6			0.9	0.4				
CO ₂	44.0	8.7	2.7	97.0	30.1	1.0	0.6	96.0	99.5	1.0	0.4			97.0	100
CH ₄	16.0	0.3	0.1	0.3	0.1	0.3	0.2			0.3	0.1				
COS	60.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0						
H ₂ S	34.1	0.5	0.2	0.5	0.2	0.0	20ppm	0.5	0.5						
O ₂	32.0														
H ₂ O	18.0	163.6	50.7	75.4	23.4										
CH ₃ OH	32.0														
C-C	12.0														
C-H	2.0														
C-N	28.0														
C-S	32.1											14.9	100		
C-O	32.0														
灰分															
合計		322.6	100	322.6	100	150.8	100	96.5	100	223.1	100	14.9	100	97.0	100

表6 水素製造プロセス設備コストの試算結果

(水素生産量：5,000,000Nm³/day)

(単位：億円)

プロセス	電解水素法	深冷分離酸素利用 石炭ガス化法	電解酸素利用 石炭ガス化法
設備名			
石炭前処理		115	80
石炭ガス化		255	180
熱回収/ガス精製		215	150
熱回収			
水洗浄			
酸性ガス除去			
空気分離		230	
電気分解	550		200
水処理/排水/ボイラ等	20	85	60
タンクヤード	50	35	30
その他	20	70	50
合計	640	1,005	750

表7 水素製造3プロセスの経済性検討結果

(水素生産量：5,000,000Nm³/day)

モード		部分燃焼ガス化法 (深冷分離法)		部分燃焼ガス化法 (電解酸素法)		電解酸素製造法	
項目	単価/方式	年間数量	年間経費 (100万円)	年間数量	年間経費 (100万円)	年間数量	年間経費 (100万円)
1. 変動費							
原料石炭(Dry Base)* 用役	1,500円/ton	787×10 ³ ton	1,180	521×10 ³ ton	782	0	0
工業用水	13.75円/ton	4,320×10 ³ ton	59	4,000×10 ³ ton	55	1,600×10 ³ ton	22
燃料	214円/10 ⁶ kcal	1,280×10 ⁶ kcal	274	440×10 ⁶ kcal	94	0	0
触媒・ケミカルズ	円/kg	—	237	—	229	—	30
電力	4.0円/kW	0	0	2,137×10 ⁶ kW・h	8,547	12,667×10 ⁶ kW・h	50,667
変動費小計(A)			1,750		9,707		50,719
2. 固定費							
人件費	780万円/人・年	80人	624	45人	351	15人	117
資本費							
減価償却費	建設費×8.92%		8,965		6,690		5,709
金利	4%	建設費： 1,005億円	—	建設費： 750億円	—	建設費： 640億円	—
修繕費	建設費×3.0%	簿価： 553億円	3,015	簿価： 413億円	2,250	簿価： 352億円	1,920
保険費	簿価×0.77%		426		318		271
固定資産税	簿価×1.4%		774		578		493
諸雑費	建設費×0%		0		0		0
一般管理費	人件費×20.0%	(人件費： 624百万円)	125	(人件費： 351百万円)	70	(人件費： 117百万円)	23
固定費小計(B)			13,928		10,256		8,533
3. CO₂回収・処理費							
CO ₂ 回収費	3,000円/ton	2,619×10 ³ ton	7,857	1,594×10 ³ ton	4,781	0	0
CO ₂ 処理費	2,000円/ton	同上	5,238	同上	3,188	0	0
回収処理費小計(C)			13,095		7,969		0
年間総経費 (D)=(A)+(B)+(C)			28,774		27,933		59,252
年間水素製造量 (E)					1,667×10 ⁶ Nm ³		
水素製造原価 (F)=(D)/(E)			17.26円/Nm ³		16.76円/Nm ³		35.55円/Nm ³

*Dry Base：無灰状態

素よりも高価で、電力価格が1円/kWhでも水素製造コストは12.75円/Nm³であり、電力価格が4円/kWhの時の電解酸素利用石炭ガス化法から作られる水素価格11.98円/Nm³よりも高い価格となっている。

② CO₂回収処理を行うケースの電力価格と水素製造コスト

CO₂回収・処理費用を計上した場合の水素製造コストと電力価格との相関を図3に示した。この場合、電力価格が4円/kWhであって

も、電解酸素利用石炭ガス化法による水素価格は、16.76円/Nm³であり、深冷分離酸素利用ガス化法からの水素製造コスト17.25円/Nm³と比べ、僅かに安価になっている。電解水素は、電力価格が1.6円/kWh以下でないと深冷分離酸素利用石炭ガス化法による水素と競争できないことを示している。

③ CO₂回収処理を行うケースのプラントコストと水素製造コスト

図4に、地域補正や海外設備調達などによ

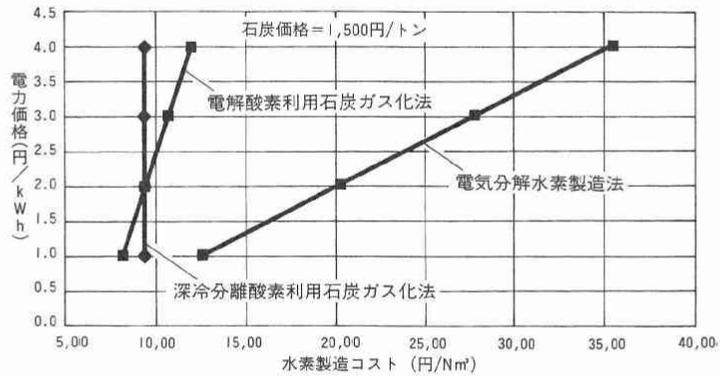


図2 電力価格と水素製造コスト
CO₂回収処理のないケース
(水素生産量：5,000,000Nm³/day)

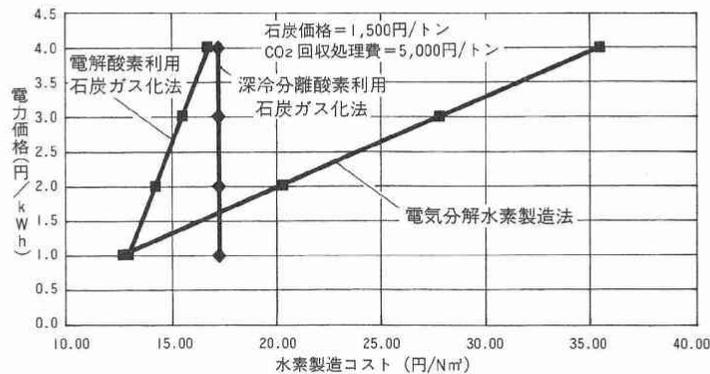


図3 電力価格と水素製造コスト
CO₂回収処理を行うケース
(水素生産量：5,000,000Nm³/day)

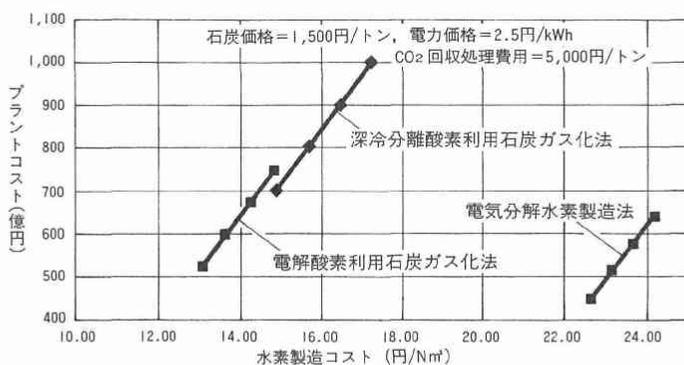


図4 プラントコストと水素製造コスト

CO₂回収処理を行うケース
(水素生産量：5,000,000Nm³/day)

るプラントコスト変動が、水素製造コストに与える影響について示した。前提として、海外の水力発電の発電コストは、2～2.5円/kWhのところも多いことから電力価格を2.5円/kWh、石炭価格を1,500円/トンとして計算した。なお、図4のグラフにおいて各プロセスのプラントコスト最高値が表6の値である。プラントコストの変化に対する水素製造コストの変化は3種類とも同じ傾向であるが、電気酸素利用ガス化法が一番有利であることを示している。

3.5 経済性感度解析結果のまとめ

図2～4は、3種類のプロセスにおける水素製造コストについて、環境負荷が最も小さい自然再生エネルギーからの電力を用いる電解水素製造法は、水素製造コストにおいて深冷分離酸素利用石炭ガス化法に対して競合不能であるが、副生される酸素を石炭ガス化に用い、石炭ガス化プロセスから生産される水素と電解から生産される水素を混合利用することにより競合可能となることを示してい

る。また、電力価格が2円/kWh以下では、CO₂の回収処理を行わない場合にも、深冷分離酸素利用石炭ガス化法よりも経済的に有利なことを示している。

4. メタノール製造プロセスについて

水素をエネルギーとして使用するインフラが未整備の現状においては、第3章に示すプロセスから製造された水素を海外の産炭地から消費地に輸送するには、メタノールかデメチルエーテル(=DME)に変換して運搬する方法が考えられる。さらに、メタノールやDMEは、低公害輸送用燃料としても、また、近い将来の燃料電池用燃料としても有望視されていることから、メタノール製造プロセスについての経済性検討を行った。

4.1 メタノール製造3プロセスのフロー

電解による水素とCO₂を利用してメタノールを製造するプロセス、通常の深冷分離酸素を用いる石炭ガス化メタノール製造プロセ

ス、電解による酸素と水素を用いる石炭ガス化メタノール製造プロセスについて検討を行った。各フローを図5に示した。

の水素を用いて、CO₂からメタノールを製造するシステムとした。電解水素とCO₂は、メタノール合成触媒が充填されたメタノール反応塔でメタノールとなり、反応副生物の水は脱水塔で除去されて製品メタノールとなる（図5の1）。

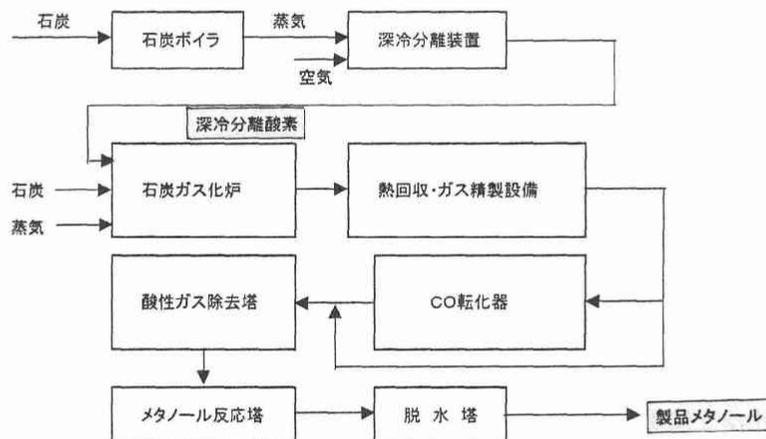
① 電解水素メタノール製造プロセス

3.1で紹介した電解水素製造プロセスから

1. 電解水素利用メタノール製造プロセス



2. 深冷分離酸素利用石炭ガス化メタノール製造プロセス



3. 電解酸素利用石炭ガス化メタノール製造プロセス

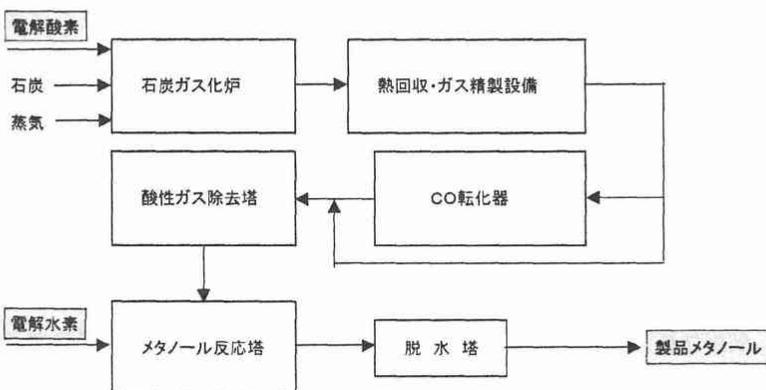


図5 メタノール製造プロセスフロー

水素とCO₂とのメタノール化反応は、以下のとおりである。



② 深冷分離酸素利用石炭ガス化メタノール製造プロセス

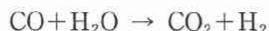
図5の2にプロセスフローを示す。このフローは、深冷分離酸素利用石炭ガス化水素製造プロセスとCO転化器に入る前まで同じであるが、合成ガス(CO+H₂)からのメタノール化反応は、



であるために、COと水素の容積比率が1:2になるように、ガス化ガスの45.5%がCO転化器に入り、COは水と反応して水素とCO₂に変わる。残りの54.5%のガス化ガスがCO転化器をバイパスし、CO転化器出口ガスと合流し、CO₂除去のために酸性ガス除去塔に導かれ、CO₂が除去され、COとその2倍量の水素は、メタノール合成触媒が充填されたメタノール反応塔でメタノールとなり、その後、反応副生物の水は脱水塔で除去され、製品メタノールとなる。

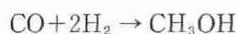
③ 電解酸素利用石炭ガス化メタノール製造プロセス

図5の2にプロセスフローを示す。電解酸素利用石炭ガス化水素製造プロセスとCO転化器に入る前まで同じであるが、ガス化ガス(=合成ガス)の17%がCO転化器に入り、COは水と、



の反応によって、水素とCO₂になる。残りの83%のガス化ガスがCO転化器をバイパスし、CO転化器出口ガスと合流し、CO₂除去のために酸性ガス除去塔に導かれ、CO₂が除去され、COと水素になる。ここで電解副生水素と混合

され、COとその2倍量の水素ガスとなる。その後メタノール反応塔を経て脱水塔で脱水処理され、



の反応により製品メタノールとなる。

4.2 メタノール製造3プロセスの物質・熱収支

深冷分離酸素利用及び電解酸素利用による石炭ガス化メタノール製造プロセスについて、メタノール生産量2,400トン/日の各ユニットプロセスの入口・出口の物質収支をそれぞれ表8、表9に示した。

4.3 メタノール製造コストの試算結果

表10に、前章同様、既存海外文献のプラントコストをベースに国内価格に換算し、3種類のメタノール製造プロセス設備コストを示した。なお、表10においてCO₂と電解水素からメタノールを製造するプロセスの設備コストは、合成ガスからのメタノール合成プロセスの設備コストと同じと仮定した。

また、表11にメタノール製造3プロセスについて、耐用年間平均のメタノール製造原価を示した。

算出には、表8～9の物質収支データと表10の設備コストデータを用い、メタノールの生産は産炭地、その他の条件は水素製造の経済性検討と同様に、メタノール生産量2,400トン/日、石炭価格をトン当たり1,500円、プラントの耐用年数14年、金利を4%、修繕費を建設費の3%、保険料を簿価の0.77%、固定資産税を簿価の1.4%、インフレ率0%、電力価格4円/kWhとした。また、プロセスで発生するCO₂は、水素製造の経済性検討と同様に回収処理するとして、回収、処理コストをCO₂1

表 8 深冷分離酸素利用石炭ガス化メタノール製造プロセスの物質収支表

(基準：メタノール生産量：2,400t/day)

工程番号	1		2		3		4		5		6		7		
物質名	深冷分離酸素		ガス化炉用原料炭		噴霧・冷却用スチーム		ガス化炉出口ガス		CO転化器用スチーム		CO転化器入口ガス		CO転化器出口ガス		
状態	ガス		固体		ガス		ガス		ガス		ガス		ガス		
元素等	分子量	t-mol/d	mol.%	t/d	mol.%	t/d	mol.%	t-mol/d	mol.%	t-mol/d	mol.%	t-mol/d	mol.%	t-mol/d	mol.%
H ₂	2.0							90.0	32.9			41.0	17.1	102.4	42.7
CO	28.0							136.3	49.8			62.0	25.8	0.6	0.3
CO ₂	44.0							13.4	4.9			6.1	2.5	67.5	28.1
CH ₄	16.0							0.5	0.2			0.2	0.1	0.2	0.1
COS	60.1							0.0	0.0			0.0	0.0	0.0	0.0
H ₂ S	34.1							0.7	0.3			0.3	0.1	0.3	0.1
O ₂	32.0	57.6	99.0												
H ₂ O	18.0					1,196	100	30.4	11.1	98.9	100	129.3	53.9	67.9	28.3
CH ₃ OH	32.0														
C-C	12.0			1,823	76.2										
C-H	2.0			112	4.7										
C-N	28.0			29	1.2										
C-S	32.1			24	1.0										
C-O	32.0			191	8.0										
灰分				213	8.9										
合計		58.1	100	2,392	100	1,196	100	273.6	100	98.9	100	240.0	100	240.0	100

工程番号	8		9		10		11		12		13		14		
物質名	CO転化器バイパスガス		酸性ガス除去塔出口ガス		酸性ガス除去塔除去ガス		メタノール反応塔入口ガス		製品メタノール		回収硫黄		回収二酸化炭素		
状態	ガス		ガス		ガス		ガス		液体		固体		液体		
元素等	分子量	t-mol/d	mol.%	t-mol/d	mol.%	t-mol/d	mol.%	t-mol/d	mol.%	t/d	wt.%	t/d	wt.%	t-mol/d	mol.%
H ₂	2.0	49.1	37.0	149.9	66.1			149.9	66.4						
CO	28.0	74.3	56.1	74.9	33.0			74.9	33.2						
CO ₂	44.0	7.3	5.5	0.5	0.2	74.8	99.0	0.5	0.2					74.8	100
CH ₄	16.0	0.3	0.2	0.3	0.1			0.3	0.1						
COS	60.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0								
H ₂ S	34.1	0.4	0.3		20ppm	0.7	1.0								
O ₂	32.0														
H ₂ O	18.0														
CH ₃ OH	32.0									2,400	100				
C-C	12.0														
C-H	2.0														
C-N	28.0														
C-S	32.1											23.2	100		
C-O	32.0														
灰分															
合計		132.5	100	226.9	100	75.5	100	225.6	100	2,400	100	23.2	100	74.8	100

表9 電解酸素利用石炭ガス化メタノール製造プロセスの物質収支表

(基準：メタノール生産量：2,400t/day)

工程番号	1		2		3		4		5		6		7		
物質名	電気分解 水素		電気分解 酸素		ガス化炉用 原料炭		噴霧・冷却用 スチーム		ガス化炉 出口ガス		CO転化器用 スチーム		CO転化器 入口ガス		
状態	ガス		ガス		固体		ガス		ガス		ガス		ガス		
元素等	分子量	t-mol/d	mol.%	t-mol/d	mol.%	t/d	mol.%	t/d	mol.%	t-mol/d	mol.%	t-mol/d	mol.%	t-mol/d	mol.%
H ₂	2.0	76.0	100.0							59.5	32.9			10.1	5.2
CO	28.0									90.1	49.8			15.3	7.9
CO ₂	44.0									8.8	4.9			1.5	0.8
CH ₄	16.0									0.3	0.2			0.1	0.0
COS	60.1									0.0	0.0			0.0	0.0
H ₂ S	34.1									0.5	0.3			0.1	0.0
O ₂	32.0			38.0	100										
H ₂ O	18.0							790.2	100	20.1	11.1	145.3	100	165.3	85.8
CH ₃ OH	32.0														
C-C	12.0					1,204	76.2								
C-H	2.0					74	4.7								
C-N	28.0					19	1.2								
C-S	32.1					16	1.0								
C-O	32.0					126	8.0								
灰分						141	8.9								
合計		76.0	100	38.0	100	1,580	100	790.2	100	180.7	100	145.3	100	192.6	100

工程番号	8		9		10		11		12		13		14		15		
物質名	CO転化器 出口ガス		CO転化器 バイパスガス		酸性ガス除去塔 出口ガス		酸性ガス除去塔 除去ガス		メタノール反応塔 入口ガス		製品メタノール		回収硫黄		回収二酸化炭素		
状態	ガス		ガス		ガス		ガス		ガス		液体		固体		液体		
元素等	分子量	t-mol/d	mol.%	t-mol/d	mol.%	t-mol/d	mol.%	t-mol/d	mol.%	t-mol/d	mol.%	t/d	wt.%	t/d	wo.%	t-mol/d	mol.%
H ₂	2.0	25.3	13.1	49.4	37.0	73.9	49.1			149.9	66.6						
CO	28.0	0.2	0.1	74.8	56.1	74.9	49.8			74.9	33.2						
CO ₂	44.0	16.7	8.6	7.3	5.5	0.2	0.1	24.0	97.9	0.2	0.1					24.0	100
CH ₄	16.0	0.1	0.0	0.3	0.2	0.3	0.2			0.3	0.1						
COS	60.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1								
H ₂ S	34.1	0.1	0.0	0.4	0.3	20ppm	0.5	2.0									
O ₂	32.0																
H ₂ O	18.0	150.2	78.0														
CH ₃ OH	32.0									2,400.1	100						
C-C	12.0																
C-H	2.0																
C-N	28.0																
C-S	32.1													15.3	100		
C-O	32.0																
灰分																	
合計		192.6	100	133.4	100	150.5	100	24.5	100	225.3	100	2,400.1	100	15.3	100	24.0	100

表10 メタノール製造プロセス設備コストの試算結果

(メタノール生産量：2,400t/day)

(単位：億円)

プロセス 設備名	電解水素法	深冷分離酸素利用 石炭ガス化法	電解酸素利用 石炭ガス化法
石炭前処理		115	80
石炭ガス化		255	180
熱回収/ガス精製		215	150
熱回収			
水洗浄			
酸性ガス除去			
空気分離		230	
電気分解	550		200
メタノール製造	100	100	100
水処理/排水/ボイラ等	70	90	60
タンクヤード	80	35	30
その他	30	70	50
合計	830	1,110	850

表11 メタノール製造3プロセスの経済性検討結果

(メタノール生産量：2,400t/day)

モード		部分燃焼ガス化法 (深冷分離法)		部分燃焼ガス化法 (電解酸素法)		電解酸素製造法	
項目	単価/方式	年間数量	年間経費 (100万円)	年間数量	年間経費 (100万円)	年間数量	年間経費 (100万円)
1. 変動費							
原料石炭(Dry Base)* 用役	1,500円/ton	797×10 ³ ton	1,196	527×10 ³ ton	790	0	0
工業用水	13.75円/ton	5,200×10 ³ ton	72	4,800×10 ³ ton	66	2,000×10 ³ ton	28
燃料	214円/10 ³ kcal	1,440×10 ³ kcal	309	640×10 ³ kcal	137	0	0
触媒・ケミカルズ	円/kg	—	237	—	229	—	30
電力	4.0円/kW	0	0	2,159×10 ³ kW・h	8,636	12,759×10 ³ kW・h	51,036
CO ₂	0円/ton	—	—	—	—	1,099×10 ³ ton	0
変動費小計(A)			1,813		9,858		51,093
2. 固定費							
人件費	780万円/人・年	80人	624	45人	351	25人	195
資本費							
減価償却費	建設費×8.92%	[建設費：]	9,901	[建設費：]	7,582	[建設費：]	7,404
金利	4%	簿価：]	—	簿価：]	—	簿価：]	—
修繕費	建設費×3.0%	簿価：]	3,330	簿価：]	2,550	簿価：]	2,490
保険費	簿価×0.77%		470		360		352
固定資産税	簿価×1.4%		855		655		639
諸雑費	建設費×0%		0		0		0
一般管理費	人件費×20.0%	(人件費：)	125	(人件費：)	70	(人件費：)	39
固定費小計(B)			15,305		11,568		11,118
3. CO ₂ 回収・処理費							
CO ₂ 回収費	3,000円/ton	1,371×10 ³ ton	4,114	413×10 ³ ton	1,239	0	0
CO ₂ 処理費	2,000円/ton	同上	2,743	同上	826	0	0
回収処理費小計(C)			6,857		2,065		0
年間総経費 (D)=(A)+(B)+(C)			23,974		23,491		62,211
年間メタノール製造量 (E)					800×10 ³ ton		
メタノール製造原価 (F)=(D)/(E)			29.97円/kg		29.36円/kg		77.76円/kg

*Dry Base：無灰状態

トンあたりそれぞれ3,000円, 2,000円を計上した。

表11の変動費の中の燃料は, 表7と同様に, ガス化原料となる石炭(発熱量HHV=7,340 kcal/kg)を用いるとしてCO₂発生量を計算し, ガス化からのCO₂に加えて回収・処理費用を求めた。

4.4 メタノール製造3プロセスの経済性についての感度解析結果

① CO₂回収処理を行わないケースの電力価格とメタノール製造コスト

メタノール製造コストと電力価格との相関関係を図6に示した。電解酸素を用いる石炭ガス化メタノール製造プロセスの製造コストが, 深冷分離酸素利用石炭ガス化プロセスの製造コストより安価となるのは, 前章の水素製造と同様, 電力価格が2円/kWh以下のときである。電解水素とCO₂より作られるメタノールは, 2種類の石炭ガス化プロセスから作られるメタノールよりも高価で, 電力価格が1円/kWhでもメタノール製造コストは

29.92円/kgと電力価格が4円/kWhの電解酸素利用石炭ガス化メタノール製造プロセスから作られるメタノール価格26.78円/kgよりも高い価格となっている。

② CO₂回収処理を行うケースの電力価格とメタノール製造コスト

CO₂回収処理費用を計上した場合のメタノール製造コストと電力価格との相関を図7に示した。電力価格が4円/kWhであっても, 電解酸素利用石炭ガス化法によるメタノール価格は, 29.36円/kgであって深冷分離酸素利用ガス化法からのメタノール製造コスト29.97円/kgと比べ僅かに安価である。電解水素とCO₂から作られるメタノールは, CO₂費用がゼロにもかかわらず, 電力価格が1円/kWh以下でないと石炭ガス化メタノール製造プロセスからのメタノールとは競争が困難なことを示している。

③ CO₂回収処理を行うケースのプラントコストとメタノール製造コスト

図8に, 地域補正や海外設備調達などによるプラントコストの変動が, メタノール製造

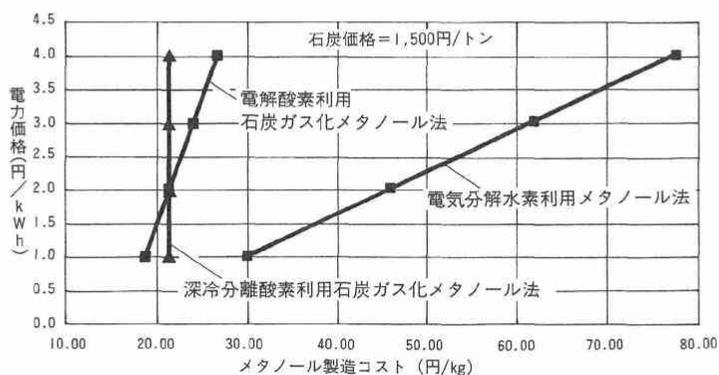


図6 電力価格とメタノール製造コスト

CO₂回収処理のないケース
(メタノール生産量: 2,400t/day)

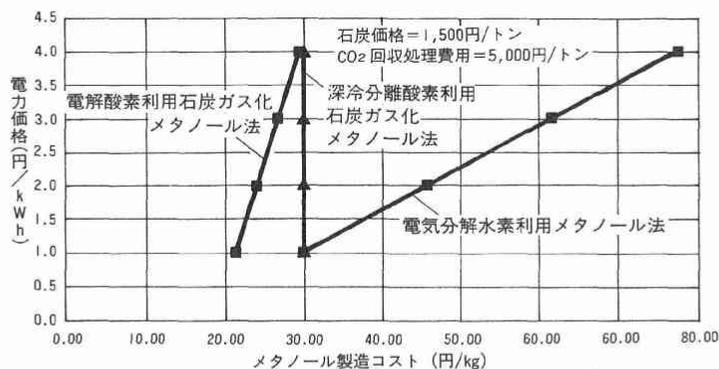


図7 電力価格とメタノール製造コスト

CO₂回収処理を行うケース
(メタノール生産量：2,400t/day)

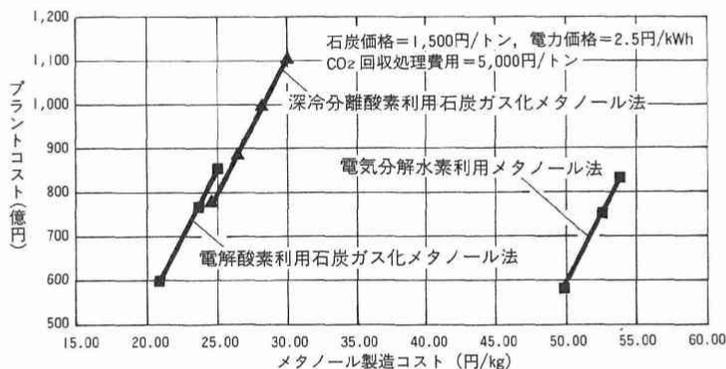


図8 プラントコストとメタノール製造コスト

CO₂回収処理を行うケース
(メタノール生産量：2,400t/day)

コストに与える影響について図示した。前章の図4同様、電力価格を2.5円/kWh、石炭価格を1,500円/トンとして算出した(図8のグラフにおいて各プロセスのコスト最高値が表10の値である)。図8から、プラントコストの変化に対するメタノール製造コストの変化は3種類とも同じ傾向にあるが、電解酸素利用石炭ガス化法が一番有利であることを示している。

4.5 経済性感度解析結果のまとめ

図6～8は、3種類の製造プロセスからのメタノール製造コストに関して、環境負荷の最も小さい自然再生可能エネルギーからの電力を用いる電解水素とCO₂を反応させるメタノール製造プロセスでは、深冷分離酸素利用石炭ガス化法に対して競合困難なことを示している。しかし、電解酸素利用石炭ガス化法であれば、電解プロセスからの酸素を石炭ガス化に使い、ガス化プロセスから生産される

水素、COと、電解から生産される水素を混合利用することによって、深冷分離酸素利用石炭ガス化法と競合可能なことを示しており、電力価格が2円/kWh以下ではCO₂の回収処理を行わない場合にも有利になっている。

5. まとめ

石炭ガス化の総合熱効率率は、深冷分離酸素を用いるケースが72.4%、電解酸素を用いるケースが83.6%と、11%も良くなっている。この効率の差が反映され電解によるコストアップを吸収し、かつ、併産される水素が利用されることから、電解酸素・水素利用石炭ガス化プロセスの導入可能性が高いことが、今回実施した一連の試算によって明らかとなった。

水素製造やメタノール製造において電力価格が2円/kWh以下のケースでは、深冷分離法を

用いる現状の石炭ガス化システムよりも電解酸素・水素を用いる石炭ガス化システムが経済性に優れ、CO₂回収処理を必要とする場合には、電力価格が4円/kWhでも経済的に優れている結果となった。このことは、水力の豊富なカナダやインドネシア等の産炭地で電解酸素・水素を用いる石炭ガス化システムを用いたメタノール製造の立地可能性を示していると考えられる。

また、本試算結果は、自然再生可能エネルギーから作られた電力による電解酸素・水素を石炭ガス化ガスに使用することによって、ガス化原料石炭の熱量を20%程度嵩上げたクリンガス（COと水素の混合ガス）やメタノールの生産を可能とするため、石炭のCO₂排出量を石油並に削減できることも示しており、次世代の石炭転換プロセスとなる可能性を示唆するものと考えている。



磁気冷凍法による水素液化技術の 基礎研究開発

— 革新的な液化技術の実現を目指して —

上岡 英之 (財)エネルギー総合工学研究所
WE-NETセンター 主任研究員



1. はじめに

当研究所は、平成12年度より、米国のクライオ・フューエル・システム社と磁気冷凍法による水素液化技術の研究開発に取り組んでいる。

磁気冷凍法により常温から水素を液化する技術は、既存のガスサイクル冷凍技術に対して、高いプロセス効率と経済性の向上が期待できる、世界的に研究報告例がない技術である。

本研究開発は、当所が新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）から受託した「水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術（World Energy Network:WE-NET）第II期研究開発」の一環として実施されている。

本研究開発の目的は、室温の水素を磁気冷凍法のみによる液化の可能性を検証し、実用化研究のための技術開発課題の抽出にある。

2. 基礎研究テーマの選定理由

(1) 液体水素の優位性

水素は、液体、圧縮水素、水素吸蔵合金などの形態で貯蔵することができる。液体水素以外での貯蔵は、エネルギー密度が相対的に

低いため、容積および重量エネルギー密度が重視される用途には、使用条件の観点から、液体水素の形による貯蔵が選ばれる。

表1は、水素吸蔵合金タンク（MHタンク）、圧縮水素ボンベおよび液体水素タンクについて水素貯蔵重量%、貯蔵容積効率の比較を行った例である。本表から、水素を貯蔵・輸送する場合、液体水素の形態が、単位重量・容積当りの貯蔵量が大きく、積載重量・容積を小さくできるため有利なことが分かる。

表1 固体高分子型燃料電池車用水素タンク比較

	MHタンク*	圧縮ボンベ**	液体水素タンク*
水素貯蔵量 kg	5	5	5
Nm ³	56	56 (250kg/cm ³)	56 (70L)
容器サイズ L	160	277	140
容器重量 kg	50 (タンク重量) 170(合金)	68 (ボンベ重量)	50 (総重量)
水素貯蔵重量%	合金 3 総重量2.3	6.8	10
貯蔵容積効率 g(H ₂)/L	31.3	18.1	35.4

* : タスク11調査WG試算例

** : Dynetek Industries Ltd.(カナダ)

水素は、現状、圧縮水素と液化水素の2形態で貯蔵される割合が高い。水素の圧縮、液化に要するエネルギーを比較すると、液化エ

エネルギーは圧縮エネルギーより大きくなる。液体水素を選択するうえで、この液化エネルギーをいかに小さくできるかが重要な課題の1つである。

図1に、水素を25MPaに圧縮した場合と液化した場合における圧縮、液化エネルギーを比較した。25MPaまでの圧縮エネルギーは約0.5kWh/Nm³、液化エネルギーは1.27~1.98kWh/Nm³であり、水素液化には圧縮エネルギーの約2~4倍のエネルギーが必要である。なお、水素液化装置は、一般的な水素膨張タイプのものを対象としている。

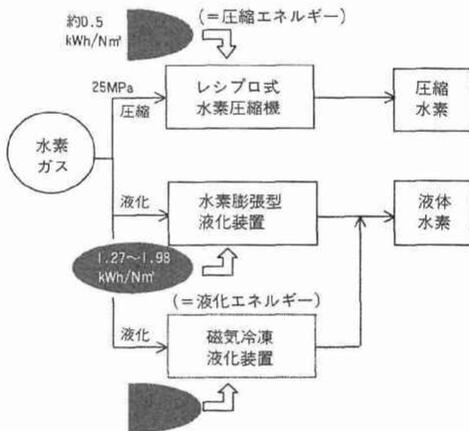


図1 液化・圧縮エネルギーの比較

この液化エネルギーを圧縮エネルギーと同程度まで減少できれば、液体水素の利用価値が高く、液体水素のもつ優位性を発揮させるものと期待される。

(2) 水素液化における磁気冷凍技術の有望性
クライオ・フューエル・システム社の創設者にしてピクトリア大学低温工学専攻のジョン・パークレイ教授らにより、平成9年度に実施された新技術提案「磁気冷凍技術による大規模な水素液化の経済性調査」の結果、磁

気冷凍法による水素液化装置のプロセス効率は約60%とされた。表2のとおり、既存のガ

表2 磁気冷凍技術の経済性調査結果
水素液化規模300t/日

	磁気冷凍*	ガスサイクル冷凍**
プロセス効率 %	60	45
設備費 %	30	100

* 平成9年度FS実施時の設計レベル

** 平成10年度サブタスク3、全体システム概念設計値

スサイクル冷凍技術を用いた研究開発による液化設備のプロセス効率が約45%であるのに対して、磁気冷凍を応用した水素液化装置の効率は、約60%が期待できるため、液化エネルギーを在来液化機より小さくすることが可能である。

この磁気冷凍水素液化装置が実現できれば、圧縮エネルギーと同等程度のエネルギーで液体水素が得られる可能性があり、液体水素を選択する意義が大きくなる。また、在来液化機に比べ、低コスト水素液化システムの実現が期待できる。

WE-NET第II期研究開発における300t/日の水素液化設備の開発では、遠心式水素圧縮機などの各要素技術の向上を目指す研究開発を行うことを前提として、表2に示す約45%のプロセス効率が期待されている。

しかしながら、50%以上のプロセス効率と設備コストの飛躍的な改善のためには何らかの新技術が必要と考えられる。その一つが磁気冷凍法による水素液化技術である。

3. 磁気冷凍法による水素液化技術

(1) 在来型水素液化システムとその効率

従来の水素液化方法は、往復コンプレッサ

もしくは遠心コンプレッサ、ジュール・トムソン膨張弁、タービン、熱交換器、絞り弁など、多くのコンポーネントを組み合わせた複雑な熱力学システムであり、それらのコンポーネントはそれぞれ個別のコストがかかり、総合効率とシステムの信頼性を分担している。

水素液化機は、現在、世界中にさまざまな規模のものが存在する。例えば、大型液化プラントとして、エア・プロダクト・アンド・ケミカルズ社のニューオリンズ・プラント、エア・リキッド・ワジェプラント、日本では太平洋水素のプラントなどが存在し、それぞれの液化規模と推定プロセス効率は、表3のとおりである。

大型設備の大部分は、クロード・サイクル

表3 大型水素液化プラントの例

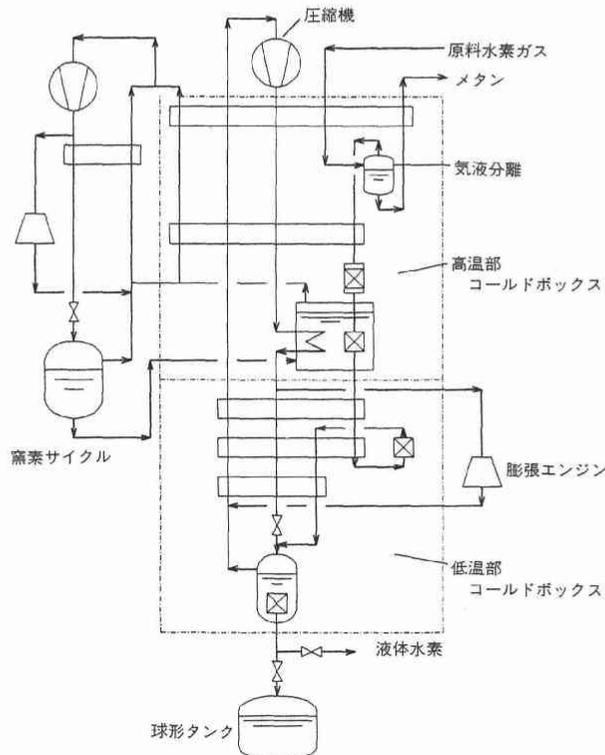
社名	APCI	エア・リキッド	太平洋水素
所在地	糶,ニューオリンズ	フランス,ワジェ	日本,大分
液化能力 t/日	54.4	10	1.5
型式	水素クロードサイクル		
稼動年	1966,1977	1987	1987
効率%	約32	約28	約22

出所：NEDOサブタスク5 平成5年度成果報告書より作成

をベースにしており、気体の圧縮・膨張を基本にしていることから類似したコンポーネントで構成されている。その一例を図2に示す。

それより小規模の水素液化機は、クロード/J-Tサイクルあるいはスターリングサイクルのヘリウム冷凍機をベースにしたものがある。

米国のナショナル・インスティテュート・オブ・スタンダード・テクノロジー(NIST)



出展：NEDOサブタスク5 平成6年度成果報告書

図2 APCIニューオリンズ・プラント水素液化プロセスの概略フロー

イスが強磁性体で発見したものである。磁性体である強磁性ニッケルに磁場をかけたり取り除いたりすると、強磁性ニッケルが可逆的に熱したり冷めたりする磁気熱量効果現象を実験で観察した。ジオークとデバイにより、1926年、磁気冷却の提案が行われ、1933年、0.26 K (0 K = -273°C) の極低温が磁気冷却により達成された。

1960年代に発達した超伝導磁石技術によって、数テスラ (T) から数10 T の高い磁場が使用できるようになり、より高性能の断熱消磁が可能となった。

この時期、磁気冷却は、物理学上の研究用途に1 K以下の極低温を作り出す目的で研究されたが、1970年代中頃からは1 Kより上の低温や室温以上の温度から効率的に冷却できる可能性を秘めた技術として研究されるようになってきた。

なお、日本における磁気冷凍の研究は、1978年に始まった東工大での「誘電冷凍および磁気冷凍の研究」が創始とも言われている。1980年代には、東工大、旧科学技術庁金属材料技術研究所などで磁性材料等の基礎研究が行われ、さらに1990年代にかけて重電メーカーなどにより後に述べる磁性体静止型磁気冷凍機の研究等が行われてきた。

最近の研究では、金属材料技術研究所が米航空宇宙局 (NASA) などと共同で観測衛星に搭載する赤外線センサーの冷却装置として磁気冷却装置の開発を行っており、また中部電力と東芝の共同開発では、フロンを使用しない次世代冷凍システムとして磁気冷凍技術研究開発が実施されている。

(3) 原理と特徴

冷凍機は、冷媒が低温の熱源から熱を吸収

して高温部へ熱を放出するサイクルで作動する。従来のガスサイクル冷凍機では、ガスが冷媒であり、熱の吸収と放出に必要な温度変化をガスの膨張・圧縮によって発生させる。

これに対して、磁気冷凍機では、冷媒は磁性材料で、熱の放出と吸収は、磁化と消磁による磁性冷媒の温度変化によって得られる。断熱磁化と消磁を繰り返すことにより磁気冷凍が達成されるのである。

以上のことから、磁気冷凍法の冷却原理は図5のとおり、ガスの膨張・圧縮を磁性材の磁化・消磁に置き換えたものと考えることができる。

特徴としては、下記のことがあげられる。

- ① 原理的に効率が高く、小型化が可能であり、低コスト化が期待できる。
 - ・高いエントロピー密度
 - ・磁気熱量効果による磁性体内部の温度変化が一様で、瞬時に生ずる現象を利用するため、従来のガスサイクル冷凍に対して、コンプレッサーが不要でエネルギー損失が少ない。
- ② 磁気熱量効果が小さいことから、十分な磁気熱量効果を得るためには、数T以上の磁界と適正な磁性材料が必要である。

(4) プロセス効率の定義

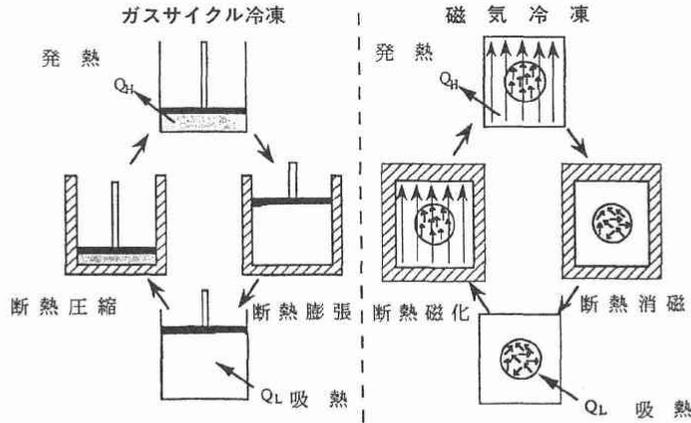
これまでに使われてきたプロセス効率とはカルノー効率 η であり、次式で定義される。

$$\eta = W_{\min} / W_{\text{act}} \times 100 \quad [\%]$$

W_{\min} : 理論最小動力 [W]

W_{act} : 実際のプロセスの消費エネルギー [W]

冷凍または液化の場合の理論最小動力は、次のように求められる。



出展：「磁気冷凍の研究動向」沼澤健則

図5 磁気冷凍とガスサイクル冷凍の比較

【冷凍理論最小動力】

冷凍のために必要な理論最小動力は、基準点の温度、冷凍温度および冷凍能力から、次式によって求められる。

$$W_{\min} = (T_0 - T) / T \times W_{\text{ref}}$$

W_{\min} ：理論最小動力 [W]

T_0 ：基準点での温度 (=300K) [K]

T ：冷凍温度 [K]

W_{ref} ：冷凍能力 [W]

【液化理論最小動力】

液化のために必要な理論最小動力は、エクセルギーを用いて算出することができる。

エクセルギーとは、ある状態より、基準点での状態へ移行するまでに得られる最大仕事、あるいは基準点状態より、ある状態へ移行させるのに必要な最小動力を表す。通常基準点には、仕事としては外部へ何も取り出せない状態という観点から、常圧、常温状態を採用する。

圧力 P_1 、温度 T_1 でのエクセルギー e_1 は次式で表される。

$$e_1 = H_1 - H_0 - T_0 (s_1 - s_0)$$

e_1 ：圧力 P_1 、温度 T_1 状態のエクセルギー

[J/g]

H_1 ：圧力 P_1 、温度 T_1 状態のエンタルピー [J/g]

H_0 ：基準とした圧力 P_0 、温度 T_0 状態のエンタルピー [J/g]

T_0 ：基準の温度 [K]

s_1 ：圧力 P_1 、温度 T_1 状態のエントロピー [J/g K]

s_0 ：基準とした圧力 P_0 、温度 T_0 状態のエントロピー [J/g K]

前記における冷凍最小理論動力と同一基準となるよう基準点を 1atm(101kPa), 300K とする。

ある気体を液化能力 K [g/s] で液化する場合の液化理論最小動力 W_{\min} は、

$$W_{\min} = e_1 K \text{ [W]}$$

となる。

(5) 磁気冷凍機の種類

種類は、磁性体静止型と移動型に、さらに磁性体移動型は、上下動型と回転型に区分され、3タイプに分類できる。

① 磁性体静止型

- ② 磁性体移動型 上下動型
- ③ " 回転型
- ① 磁性体静止型

1982年に東工大と東芝は共同開発により20 Kから4.2Kの磁性体静止型のヘリウム液化試験装置を製作しており、そのカルノー効率約50%が確認されている。さらに、1995年頃には、三菱重工工業長崎研究所において、磁気冷凍による水素液化試験装置の研究が行われていた。

このタイプは、電磁石の磁界印加を周期的に行い、磁性体に磁界変化を与えることにより、磁気熱量効果を得ている。(図6参照)

② 磁性体上下動型

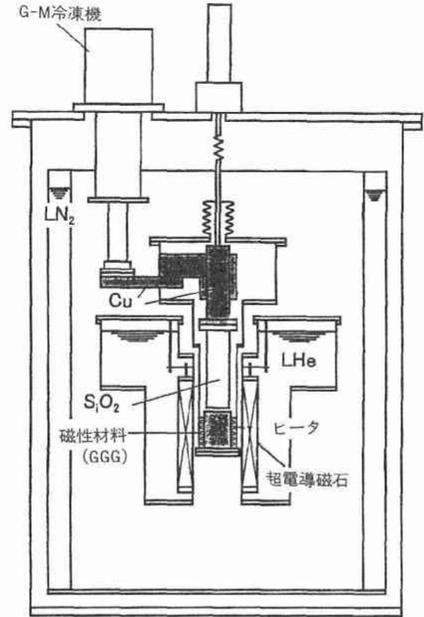
中部電力と東芝が共同研究を行っている磁気冷凍システムがこのタイプで(図7参照)、磁性体が磁界中を上下運動することによって磁性体に磁界変化を与え、磁気熱量効果を得る。後述する回転型に比べ、冷媒のシール構造がシンプルである。

研究開発課題としては、磁界から磁化した磁性体を引き抜く際に磁性体が磁界に引き込まれる力が作用するため、その力を最小限にする対策が必要である。また、磁性体の形状によっては熱交換面積が限られてくるので、冷媒との間で効率的な熱交換を行わせるために、磁性材の形状などの工夫が必要となる。

③ 磁性体回転型

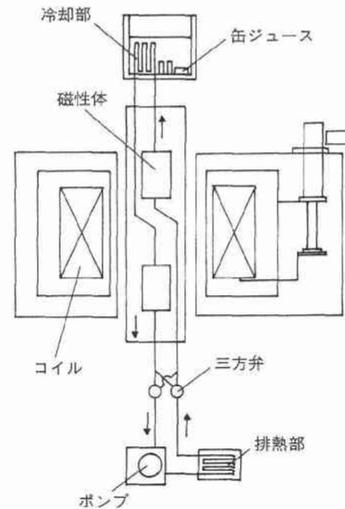
ジョン・パークレイらにより提案された磁気冷凍水素液化装置がこのタイプに該当する。(図8参照)

磁性体が回転するホイールに収められ、ホイールの回転により磁性体が磁界中を移動することにより連続的に磁気熱量効果が得られ、大容量の液化にも適している。



出展：三菱重工工業長崎研究所資料

図6 磁性体静止型水素液化磁気冷凍試験装置



出展：中部電力ホームページ

図7 磁性体上下動型磁気冷凍システム

主なコンポーネントは、

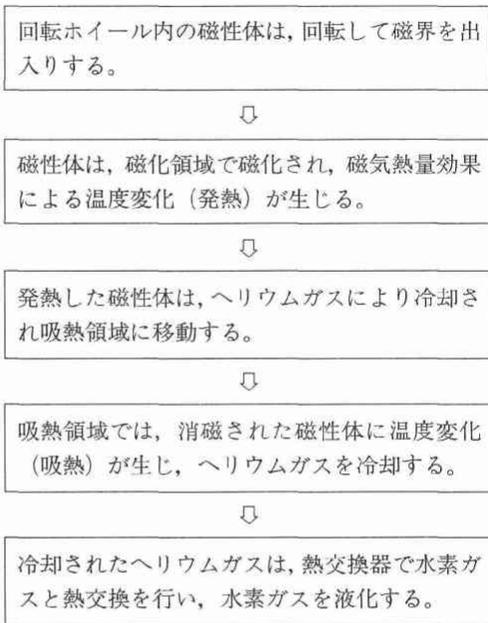
- ・磁性材料を収める回転ホイール
- ・回転駆動装置
- ・磁性体を磁化する超電導磁石システム

- ・ヘリウムガスループ
- ・各熱交換器

である。

水素ガスが液化される過程は、次のとおりである。

＜水素液化フロー＞



研究開発課題としては、最適磁性体の開発、

回転部と静止部間の冷媒シール技術および磁性体が抱え込む冷媒量の抑制技術の開発などがあげられる。

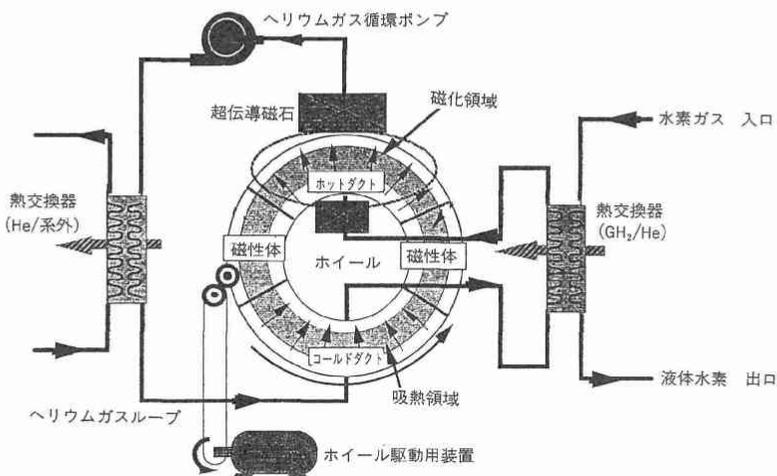
4. WE-NETプロジェクトにおける磁気冷凍法水素液化技術の基礎研究

(1) 第II期研究開発における位置付け

WE-NETプロジェクトは、旧通商産業省工業技術院のニューサンシャイン計画のもと、地球規模のエネルギー・環境問題解決に資するため、未利用の形で世界に偏在する再生可能エネルギーを環境負荷の少ない2次エネルギーである水素に転換し、発電、輸送用燃料、都市ガス等の広範な分野で利用するための技術開発を行うプロジェクトである。図9にWE-NETプロジェクトの概念を示す。

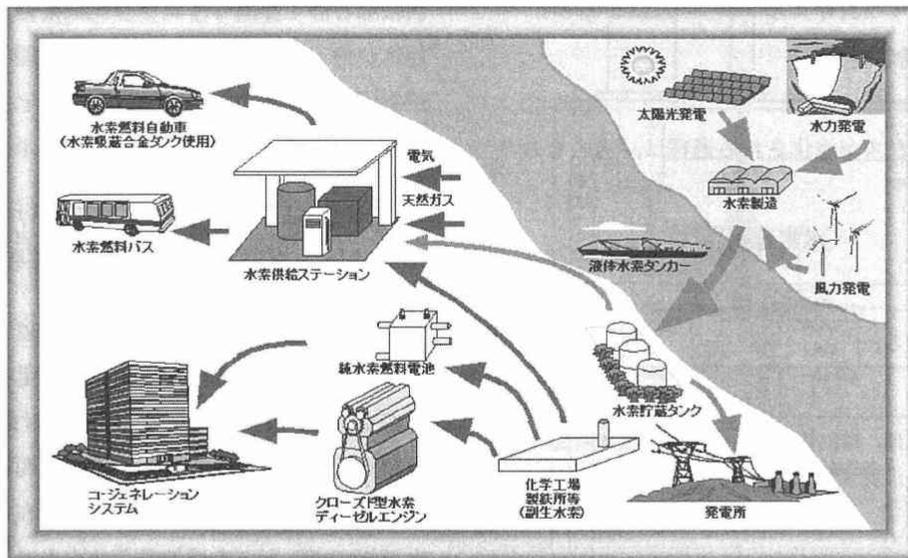
1998年度に1993年度よりの第I期研究開発を終了し、現在1999年度より5ヵ年計画で各要素技術開発・実証を行う第II期研究開発を実施している。

この第II期研究開発の体制は、水素エネルギー



出展：NEDOサブタスク9 平成9年度成果報告書

図8 磁性体回転型磁気冷凍機概念図



出展：WE-NET研究開発資料

← 短期・中期
← 長期

図9 WE-NET概念図

ギー技術の開発を5項目に区分し、12の研究担当(タスク)で研究が実施されている。

- ① システム研究
- ② 水素利用技術
- ③ 水素製造技術
- ④ 水素輸送・貯蔵技術
- ⑤ 革新的・先導的技術

革新的・先導的技術のタスクは、図9に示すWE-NETシステムの構成技術を最適化するため、現状の技術開発の対象外であるが将来的に有望な新技術について調査研究を行い、その実現可能性を確認するとともに、WE-NETプロジェクトのシステム技術に取り入れるべきか否を明らかにする役割を担っている。

第I期研究開発において、革新的・先導的技術のタスクで実施した34件のフィジビリティ・スタディの中から、ジョン・パークレ

イらによる「磁気冷凍技術による大規模な水素液化の経済性調査」結果が、従来のWE-NETプロジェクトで検討してきた気体冷媒法に比べ高いプロセス効率と経済性向上が期待できること、および常温から水素液化温度まで磁気冷凍法のみにより水素を液化するアイデアが革新的技術であると評価され、関係方面より高い評価を得た。

第I期研究開発では、大規模な水素液化を前提としていたが、第II期研究開発では、水素が優位性を発揮できる分野への早期導入も視野に入れることが重要であるとの観点から、水素自動車へ燃料を供給する水素供給ステーションの研究開発なども実施されている。

これらの水素利用技術に対して、水素の貯蔵・輸送の観点より液体水素の位置付けとして、短期的・長期的な観点から高効率で経済的な水素液化技術の確立が必要であるとの結論に至った。

〔短期的〕

液体水素は、水素自動車用燃料としても考慮されている。

〔長期的〕

水素大量貯蔵・利用に対して、液体水素は重要なオプションである。

(2) 研究目標

研究目標は、最終的には室温の水素を磁気冷凍法のみにより液化できるかどうかの実証であるが、まず、第一ステップとして、磁気冷凍液化装置を実現するうえでキーポイントとなる要素技術研究を行い、年度ごとにその成果を評価しながら、次のステップに進める計画としている。なお、年度ごとの評価結果によっては、基礎研究の中止も当然あり得る。

これらの要素技術の検証をもとに次ステップとして、小規模水素液化装置を製作し、試験を実施する。最終的に、磁気冷凍技術の成立性を確認し、実用化研究に向けた技術開発課題を抽出する。

(3) 研究開発スケジュールの概要

基礎研究の全体概略スケジュールは、

フェーズⅠ 要素技術研究

フェーズⅡ 小規模液化装置の製作，試験
(改良を含む)および総合評価

に大別される。

フェーズⅠでは、磁気冷凍水素液化装置でキーポイントとなる要素技術研究を重点的に行う。要素技術研究項目としては、高い磁気熱量効果が得られる磁性材料の調査、磁性材によるヘリウムガス冷媒の抱え込み効果抑制技術の研究などがある。

フェーズⅡでは、フェーズⅠでの要素技術

の研究成果をもとに小規模水素液化装置の製作，試験を行い、実際に水素液化の検証を行う予定である。

現状の研究概略スケジュールは、表4のとおり予定している。

表4 研究概略スケジュール

研究項目	H12	H13	H14	H15
<フェーズⅠ> 要素技術研究		△評価		
要素技術研究		△評価		
要素技術研究 <フェーズⅡ> システム製作			△評価	
試験 総合評価				

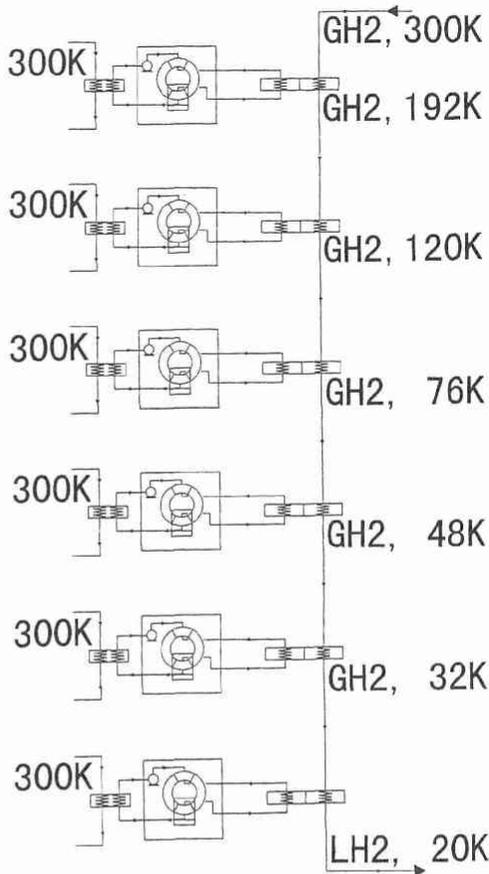
(4) 平成12年度の要素技術研究

本年度の要素技術研究として、最適磁性材料の調査研究を実施している。

常温(300K)から水素液化温度(20K)まで磁気冷凍法により水素液化を行うために、第一に取り組むべき研究として、最適磁性材料の探索と合成があげられた。

磁性材料は、ガドリニウム(Gd)、ケイ素(Si)、ゲルマニウム(Ge)などの金属間化合物あるいは固溶体が使用され、それぞれの磁性体が各冷却温度域で最大の磁気エントロピーを得られるように合成される。

水素液化システムは、図10に示すとおり、現状6ステージを予定している。各磁性体の配列はステージごとに異なり、さらに特定のステージにおいても異なる磁性体が配置される。これは、各磁性体の特性、例えば、熱容量や伝熱特性などが異なるためであり、各冷却温度域で最大の磁気エントロピーを得るための磁性体の調査、合成が行われる。



出展：NEDOサブタスク9 平成9年度報告書

図10 磁気冷凍システム概念図

5. おわりに

磁気冷凍技術は、磁性体内での磁気熱量効果という可逆的な性質とそれに伴う優れた熱伝達により、在来型ガスサイクル冷凍機よりも効率的、小型および低コストの設備に通じる技術と期待され、そうした有望性の結果、水素液化装置への使用以外にも、低温液体のボイルオフ再液化装置など種々の応用が見込

まれるなど注目を集めている技術である。

磁気冷凍法水素液化技術の基礎研究開発では、要素技術の評価を行いながら計画を進めていく予定であり、この研究開発を通じて、水素液化の可能性を見極め、ぜひ磁気冷凍法により水素液化を実現したいと思っている。

6. 謝 辞

本基礎研究の実施にあたり、提案者であるクライオ・フューエル・システム社のジョン・パークレ氏ら、ならびに研究資料について協力を頂いた金属材料技術研究所の沼澤健則氏、三菱重工業長崎研究所の大平勝秀氏に対して、厚く御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) John Barclay, "Prospects for Magnetic Liquefaction of Hydrogen" (1991)
- 2) J.L.Hall and J.A.Barclay, "Analyzing Magnetic Refrigeration Efficiency Arotary AMR-Reverse Brayton Case Study" (1998)
- 3) 沼澤健則, 「磁気冷凍の研究動向」(1997)
- 4) Katsuhide. Ohira, "The Characteristics of Magnetic Refrigeration Operating at the Temperature of 20K" (1996)
- 5) Katsuhide.Ohiraら: "Experimental Study on Magnetic Refrigeration for the Liquefaction of Hydrogen" (1996)
- 6) 大塚泰一郎, 橋本巍洲, 「磁気冷凍」, (社)未踏加工技術協会
- 7) NEDO タスク1, 「平成11年度 成果報告書」
- 8) NEDOサブタスク3, 「平成10年度 成果報告書」
- 9) NEDOサブタスク5, 「平成6年度 成果報告書」
- 10) NEDOサブタスク5, 「平成10年度 成果報告書」
- 11) NEDOサブタスク9, 「平成9年度 成果報告書」

〔内外情勢紹介〕

わが国の高レベル放射性廃棄物処分 を巡る新展開



河本 治 巳 (財)エネルギー総合工学研究所
副主席研究員

1. はじめに

原子力発電により使用済み燃料が発生し、100万kW程度の大型原子力発電所からは約30トンにのぼる。使用済み燃料自体を廃棄物としている国もあるが、わが国は、使用済み燃料を再処理し、再び燃料として使用できるウランやプルトニウムを回収する再処理・リサイクル路線を取っている。回収後には核分裂により生じた燃えがら（核分裂生成物）を約1トン含む廃液が残るが、これを安定なガラスの形態に固化したガラス固化体を高レベル放射性廃棄物（HLW）と称している。その放射能は極めて高く、時間とともに減衰するものの長く継続することから、その対策に当たっては長期にわたる安全確保に留意しなければならない。このため、わが国を含めて諸外国も長い年月をかけて研究開発を進めてきた結果、科学技術的には高レベル放射性廃棄物を地層深く埋設し、人間の生活環境から安全に隔離する方法（地層処分）が最も好ましい対策として認められている。

ここでは技術および制度的進展を中心に、2000年を節目に急速に整備が進んできた日本の処分事業の枠組みを紹介する。

2. 日本の高レベル放射性廃棄物処分への取り組み

わが国では、原子力委員会の専門部会が中心になって検討を進めてきた。その歴史的検討経過を年代ごとに簡単に振り返ってみる。

(1) 1960年代

昭和37年（1962年）4月の原子力委員会、廃棄物処理専門部会の中間報告で初めて検討結果が公表され、高レベル放射性廃棄物処分方式について、

「処分を行なった後は管理を要しない段階の処分方式を確立する必要がある。この最終処分方式としては次の2方式があげられる。

- 容器に入れて深海に投棄すること。
- 放射性廃棄物を人の立ち入ることの不可能かつ漏洩の恐れのない土中に埋設したり、天然の堅牢な洞窟あるいは岩石層に入れること。

とした」

ここでは、現在の地層処分に近い概念と思われる「人の立ち入ることの不可能かつ漏洩の恐れのない土中に埋設したり、天然の堅牢な洞窟あるいは岩石層に入れること」につい

ては、「放射性廃棄物の処分の可能な場所の調査発見には努力すべきである」として、調査研究の必要性を述べている。一方、昭和39年（1964年）の専門部会中間報告では、高いレベルの廃棄物を永久貯蔵地域等に廃棄貯蔵する場合は閉じこめ方式が妥当であるとしている。

(2) 1970年代

昭和48年（1973年）6月に公表された、原子力委員会の専門部会分科会報告書では、放射性廃棄物の陸地処分の方法として、具体的に検討された3つの方法が提言された。

- 回収または再処分を前提とした、人間の管理下における陸地の保管施設を用いた保管（陸地保管という）
- 地中施設への永久処分
- 地中への直接永久処分（地中埋没）

次に原子力委員会は、昭和51年（1976年）10月に、高レベル放射性廃棄物対策についての方針を示した。ここでは、初めて「隔離」の概念を明確に打ち出し、また、基本的な進め方は高レベル放射性廃棄物は安定な形態に固化し、一時貯蔵した後、処分するものとするとして、現在に至る基本方針を定めた。その推進方策については、

「当面地層処分に重点をおき、わが国の社会的、地理的条件に見合った処分方法の調査研究を早急に進め、今後3～5年のうちに処分方法の方向付けを行うものとし、さらに昭和60年代から実証試験を行うことを目標とする」とした。

1970年代は、①高レベル放射性廃液の固化方法に関する研究開発が進み、ガラス固化についての基礎的な知見を蓄積する一方、②処

分概念として生活圏からの隔離を明確にするとともに、③安定な形態に固化し、一時貯蔵した後処分するものとする、現在に至る基本方針が定められた年代であったと整理することができる。

(3) 1980年代

1980年代には、カナダ等いくつかの国で地下研究施設を設置しての研究開発がスタートするとともに、それまでの調査研究の成果をとりまとめて、地層処分の技術的成立性等（スウェーデン1983年、スイス1985年、など）が示され始めた。米国においては、ユッカ・マウンテンが処分候補地に指定され（1987年）、処分場開発に向けた活動が大きく動くこととなった。

わが国では昭和55年（1980年）12月に公表された、原子力委員会、放射性廃棄物対策専門部会の報告書で、地層処分の基本的考え方が次のように示されている。

「地層処分の意図するところは、地層中に埋設した放射性廃棄物からの放射能の人間環境に対する影響が放射能の減衰によって充分小さくなるまでの間、人間環境から放射性廃棄物を隔離することであり、その手段として「障壁（バリア）」と「人間環境からの距離」を利用することである」

一方で、研究開発の手順を、①可能性ある地層の調査、②有効な地層の調査、③模擬固化体現地調査、④実固化体現地調査、⑤試験的処分、の5段階を経て行うことと定めた。

さらに、昭和60年（1985年）に公表された専門部会報告書では、5段階による地層処分の研究開発手順を見直し、第2段階以降の進め方を次のように改めている。

「高レベル放射性廃棄物の処分の実施に向けての今後の進め方は、処分予定地の選定（第2段階）→処分予定地における処分技術の実証（第3段階）→処分場の建設・操業（第4段階）という段階を踏むこととする」

改められた手順に合わせた処分予定地の選定は、動力炉・核燃料開発事業団が電気事業者など関係者の協力も得て行うものとする一方で、処分を行う主体についての検討も行い、次のように結論している。

「国の責任の下に処分の実施を担当していく主体については、開発プロジェクトとの連続性の確保にも配慮しつつ、開発プロジェクトの今後の進展状況を見極めた上で、適切な時期に具体的に決定するものとする」

このように、1980年代では、70年代を通じて蓄積されてきた研究開発の成果に基づき、まず、実固化体による試験的処分を目指した研究開発手順が示され、その後、第1段階の「可能性のある地層の調査」成果の評価結果に基づき、研究開発の手順が見直され、実際の処分場の開発の手順を示す方向へと大きな転換が行われる一方で、処分の実施主体については、研究開発の主体とは別に、別途適切な時期に具体的に決定することとされ、処分の実施に向けた制度作りのための検討がスタートしたものと言える。

(4) 1990年代

1990年代に入り技術的側面に加えて、地層処分と社会との関わりが具体的な形で論じられるようになったのが特徴的である。

国際的には、フランスにおける地下研究施

設立地に端を発したモラトリアムと新しい法律の制定、米国の科学アカデミーの国家研究協議会による地層処分の「再考」レポートの公表、国際機関が取りまとめ公表した放射性廃棄物処分に係わる環境と倫理に関する報告書(OECD/NEA, 1995)の事例に象徴的に表れている。

わが国では、技術的には1992年に、動燃事業団が地層処分研究の中核推進機関としてそれまでの成果の第1次取りまとめを行い、地層処分の安全な実施が可能であることを示して国に報告した。これに対して国は概ね妥当との評価を下した。1995年9月の原子力委員会決定により技術的事項の検討のために設置された原子力バックエンド対策専門部会は、1997年4月にとりまとめた報告書（以下、専門部会報告書という）で、次の目標は、その後の進捗を取り込んで地層処分の技術的信頼性を示すとともに、安全基準の策定に資する目的の「第2次取りまとめ」を2000年前までに作成することであると明示した。

一方で、社会的側面に関して、同じく1995年9月の原子力委員会決定により、高レベル放射性廃棄物処分懇談会（以下、処分懇談会という）が設置され、高レベル放射性廃棄物処分の円滑な実施の具体的取組に向け国民の理解と納得が得られるよう、社会的・経済的側面を含めて、幅広い検討を進めることとなった。1998年5月に公表された処分懇談会報告書では、廃棄物処分の安全性の確保と責任体制の明確化が図られるとともに、透明性ある体制の確立、国民の理解と信頼を得るための環境の整備が必要であるとしている。放射性廃棄物の処分問題が一般の人々の意識からは遠いところにあるとし、関係者の努力が必

ずしも十分でなかったことを指摘したこの報告書は、広く社会的、経済的視点から、地層処分の問題を検討することに注意を促したという意味において、時代の要請に即した方向を示すものであった。

以上の日本の高レベル放射性廃棄物処分への取り組み経緯を表1に、また参考までに主要国の取り組みを表2示す。

3. 高レベル放射性廃棄物処分の実施に向けた進展

1998年6月に原子力委員会は、処分懇談会報告書を尊重し、処分についての国民の理解と信頼を得るために一層の努力を払うとともに、2000年目途の事業化に向けて、実施主体の設立、資金確保等に係る諸制度の整備を着実に進めること、また、研究開発に引き続き着実に取り組み、2000年前までに技術報告書を取りまとめること及び安全規制に関する制度を着実に整備すべきであるとした。

以下では、「第2次取りまとめ」の作成、評価を中心とした技術的進展、最終処分に関する法律の制定を中心とした制度整備の進展および処分の安全規制に関する基本的考え方の検討を中心とした規制面の進展、さらには関連する国民意見の募集等、2000年を区切りとして急展開を見せた項目の概要を示す(図1参照)。

3.1 技術的進展—「第2次取りまとめ」

(1) 「第2次取りまとめ」の概要

「第2次取りまとめ」の目標である「わが国における地層処分の技術的信頼性を示すこと」について、核燃料サイクル開発機構(以

下、サイクル機構という)では「高レベル放射性廃棄物を地層処分するための、実用可能で合理性を備えた技術の存在を明らかにすること、さらにそのような技術と適切な地質環境によって長期にわたる地層処分の安全性が保たれることを、科学的な根拠に基づいて示すこと」と捉え、これに応えるため、「わが国の地質環境」「地層処分の工学技術」および「地層処分システムの安全評価」という3つの研究開発分野の成果を取りまとめた(図2参照)。

① わが国の地質環境

地質環境の長期安定性に影響を与える可能性のある天然現象には、地震・断層活動、火山・火成活動、隆起・沈降・侵食、気候・海水準変動がある。これらの活動の記録が残されている地質や地形を対象に現地調査や年代測定を主体とする事例研究を進めた。地下深部の地質環境特性については、人工バリアの設置環境や天然バリアとしての機能の観点から重要な地下水や岩盤の特性に焦点をあて、文献データを整備するとともに、東濃地域や釜石鉱山における地層科学研究の成果を活用して検討を行った。その結果、

- a. わが国における岩盤の性質は多様であるが、地温が十分に低く応力がほぼ均等に働いているような岩盤が、わが国の地下深部にも広く存在することが確認できた。
- b. 地下深部の地下水は、還元性になることが実測値や理論解析により確認された。また地下深部では、地下水の動きが遅くなることが確認された。このような深部地下水の一般的な性質は、人工バリアの設置環境として重要である。

表 1 HLW処分に關する主な活動経緯（日本および国際機関を中心に）

年代	年	日本の政府	日本の研究開発	国際機関動向等
70	73	原子力委／放射性固体廃棄物分科会：陸地処分法提言		
	74			
	75			OECD/NEA 発足
	76	原子力委／放射性廃棄物対策専門部会：高レベル放射性廃棄物対策の方針提示（基本方針，推進方策）	ガラス固化体の組成と物性評価検討を開始	
	77			OECD/NEA, Polvani 報告書, 廃棄物管理の目的, 概念, 戦略
	78		基本的なガラス原料組成を確立	
	79			
80	80	原子力委／放射性廃棄物対策専門部会：地層処分の基本的考え方／5段階の研究開発手順提示		
	81		ガラス固化体物性評価実施	IAEA：ベーシックガイダンス報告書
	82			OECD/NEA, 処分原則オーバービュー
	83			OECD/NEA, デモンストレーション報告書
	84	原子力委／放射性廃棄物対策専門部会中間報告：第1段階の成果を評価。5段階の開発方式を見直し，4段階方式を提示	ガラス固化体標準組成決定 幌延町／貯蔵工学センター誘致決議	
	85	原子力委／放射性廃棄物対策専門部会：4段階の開発方式を再確認・提示。処分予定地の選定や実施主体についても言及		ICRPPub46 (固体廃棄物処分に關する放射線防護の諸原則)
	86			
	87			
	88		釜石鉱山で原位置試験開始	
	89			IAEA 安全基準99 (原則と基準)
90	90			
	91			OECD/NEA, 長期安全性報告書 (長期安全は評価可能か?)
	92		第1次取りまとめ公表, ガラス固化技術開発施設建設	ブラジル環境サミット
	93		地層処分基盤研究施設 (ENTRY) 完成	
	94	原子力長計：処分実施主体を2000年目安に設立。処分場の操業は2030年代から2040年代半ばを目途		
	95	原子力委／高レベル放射性廃棄物処分懇談会 (社会的・経済的側面等検討), 原子力バックエンド対策専門部会 (技術的事項の検討) 設置	超深地層研究所構想／東濃地科学センターにおける地層科学研究の協定締結	IAEA：放射性廃棄物管理の原則レポート OECD/NEA：環境と倫理レポート
	96			
	97	原子力委／原子力バックエンド対策専門部会：「第2次取りまとめ」に盛り込むべき重点事項報告		
	98	原子力委／高レベル放射性廃棄物処分懇談会報告書	釜石鉱山の原位置試験終了	
	99		「第2次取りまとめ」公表	OECD/NEA：国際評価レポート
	00	特定放射性廃棄物処分法制定, 実施主体／資金管理主体設立 原子力委：「第2次取りまとめ」評価, 新長計		

表 2 主要国の地層処分計画スケジュール

	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	備考
カナダ	カナダ核燃料廃棄管理計画(1978)																							政府決定に対する対策待ち
米国	NWPA(1982)																							2001年のサイト勧告に対し大統領が決定
	NWPAA																							
	VA																							
	最終EISサイト勧告																							
	サイト特性化プロセス															サイト許可プロセス							建設	
ドイツ	1977ゴルレーベンが候補地に1979調査開始1983中間報告書																							2000年6月の政策合意により計画見直し
	2本の立坑掘削開始																							
	ゴルレーベン安全評価書																							
	840m940m立坑掘削終了																							
	政府と電力会社の合意により3~10年間調査中断																							
フランス	キャスタン委(1981~1984)ゴーゲル委(1985~1987)																							法に基づき2006年に管理方法の総合評価見込み
	4地下研候補地選定・調査																							
	廃棄物法1991.12																							
	モラトリアム計画見直し																							
	地下研候補地の選定																							
	許可申請																							
	3候補サイトでの特性調査																							
	東部サイト承認:粘土																							
	建設開始																							
	原位置試験開始																							
	試験, 2006年の総合評価に備える																							
スウェーデン	KBS-3処分概念報告(1983)																							2012年頃の部分運開(実証処分)目標
	HRLの建設																							
	HRL運転																							
	サイト・フィージビリティ調査1																							
	サイト・フィージビリティ調査2																							
	2サイト絞り込み: 2001サイト調査をへて更に1ヶ所を選定し建設フェーズに																							
スイス	保証計画'85																							フェーズ4: 建設運開 2020以降
	フェーズ1: 地層処分の安全性の基本的実証(1978~1988)																							
	フェーズ2: 適切なサイトを特定する可能性の実証(地表から)																							
	クリスタリン1																							
	フェーズ3: 詳細サイト特化(>2000)																							
日本	研究開始: 1976 国際計画参加: '81 4段階の開発: '85																							運開は2030年代~2040年代半ば
	第1次とりまとめ(1992)																							
	第2次とりまとめ(1999)																							
	廃棄物処分法制定 実施主体設立																							
	処分候補地の選定段階																							

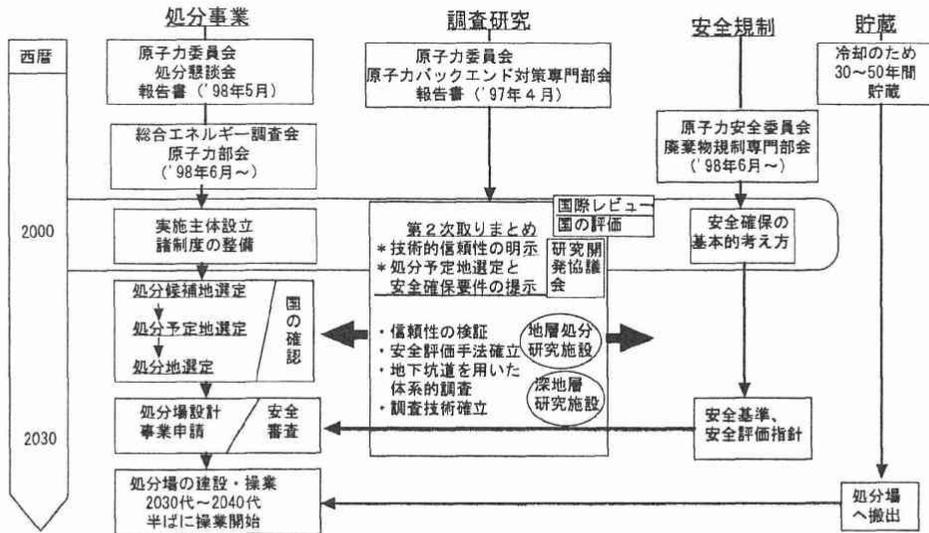
c. 物質の移行経路となる岩石中の粒子間隙や割れ目などの分布・形状は、一般に地下水による物質の移動を遅延させ、天然バリアとしての機能の面から重要である。これらから、将来十万年程度にわたって十分に安定で、人工バリアの設置環境および天然バリアとして好ましい地質環境がわが国にも広く存在すると考えられる。

② 地層処分の工学技術

人工バリアや処分施設の工学技術に関して

は、わが国の幅広い地質環境を考慮しつつ、現状の技術に基づいて人工バリアや処分施設的设计要件を明らかにするとともに、現実的なデータや信頼性の高い解析評価手法を適用して合理的な設計を行い、人工バリアと処分施設の仕様例を示した。

この仕様例に基づいて、処分場の建設や操業の各作業手順について検討し、これらの作業が独立に並行して実施出来るような処分場全体のレイアウトを示した。また、それぞれの作業について基本的に現状の技術あるいは



出所：処分懇談会報告書ほか

図 1 高レベル放射性廃棄物の最終処分への取組み

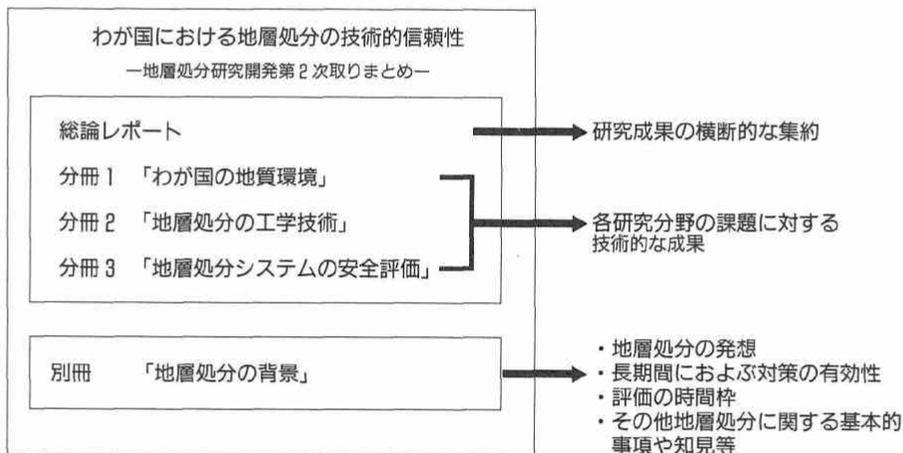


図 2 地層処分研究開発「第2次取りまとめ」報告書の構成

近い将来実現すると考えられる技術で実施可能であることを示した。

③ 地層処分システムの安全評価

適切に設計された処分場の仕様例を示すことによって明らかになった具体的な地層処分システムを対象として、とくに人工バリアと

その近傍の岩盤の領域（ニアフィールド）の性能に重点をおいた評価手法を構築するとともに、その手法を用いて安全評価を実施した。

安全評価手法については、体系的なシナリオ開発を進め、廃棄物と人間との物理的な距離が接近することによって人間の生活環境に影響が及ぶと想定した接近シナリオと、地下

水により放射性核種が人間の生活環境に運ばれると想定した地下水シナリオを考えた。シナリオに従って、より現象に即したモデルの開発とより現実的なデータの整備を行った。わが国でも、地層処分に適切な地質環境を選定し、その地質環境に適合した処分場を設計・施工することにより、長期間安全性を維持できる地層処分システムを構築することが可能であることが示されたが、このように構築されたシステムの長期的安全性は、ニアフィールド性能を中心として体系的に開発された方法論による評価を通じて確認された。

④ 処分予定地選定と安全基準策定に資する技術的検討

3つの分野の研究開発成果を、処分予定地の選定や安全基準の策定等の今後の処分の事業や安全規制にどのように反映できるかについて検討を行った。

まず処分地の選定が、①処分候補地の選定、②処分予定地の選定、③処分地の選定、の3段階によって進められることを前提に、選定にあたって考慮すべき地質環境上の要件と必要になる情報、およびこれらの重要な地質環境情報を取得するために必要な調査手法・技術の開発状況を整理した。

⑤ 結 論

- a. 地層処分概念の成立に必要な条件をみただけ地質環境がわが国に広く存在し、特定の地質環境がそのような条件を備えているか否かを評価する方法が開発された。
- b. 幅広い地質環境条件に対して人工バリアや処分施設を適切に設計・施工する技術が

開発された。

- c. 地層処分の長期にわたる安全性を予測的に評価する方法が開発され、それを用いて安全性が確認された。

サイクル機構では、事業化に向けたスケジュールと整合をとりつつ、次段階の研究開発を展開していくことが可能な状況になったとして、わが国においても地層処分を事業化の段階に進めるための、信頼性のある技術的基盤が整備されたものと総括した。

3.2 「第2次取りまとめ」の評価

(1) 評価の位置付け

「第2次取りまとめ」が、専門部会報告書で示された課題に代えたものとなっているかという観点から原子力委員会では専門部会で評価を行うこととし、評価分科会（主査：小島圭二地圏空間研究所代表）を設置して技術的に詳細な評価を行った。評価に当たっては、まず、これらの各研究分野ごとに、専門部会報告書で示している「第2次取りまとめ」に盛り込むべき事項や技術的重点課題等への対応について詳細な検討を行い、次に、これらの結果に基づいて、わが国における地層処分の技術的信頼性についての総合的な評価を行った。

また同時に、この研究開発が地層や処分場の場所が特定されていない段階のものであり、地層処分の実現に向けての基盤技術的なものであることに留意した。

(2) 基本的考え方および技術的重点課題に対する成果の評価

① 地層処分の技術的信頼性についての総合評価

「第2次取りまとめ」では、まず、わが国

の地質環境として天然現象、岩盤及び地下水の特性についての情報や知見が地層処分の観点から整理・分析されている。その結果に基づき、地層処分施設を構築する場として長期にわたって安定であり、安全性を確保するための人工バリアの設置環境及び天然バリアの機能としても適切な地質環境が、わが国にも存在し得ることが示されている。また、これまでの調査研究を通じて、地層処分にとって十分安定で適切な地質環境を調査するための基盤的な知見が整備されている。

次に、想定した地質環境に対応させて人工バリアや処分施設を設計し、現状技術及びその改良技術により処分施設の建設・操業・閉鎖を安全かつ合理的に行うことが可能であることが示されている。また、人工バリア性能は、わが国の地質環境に柔軟に対応できるように安全裕度を十分に見込んだ評価に基づく設計が可能であることが示されている。さらに、将来起こり得る地質環境の変化、人工バリア機能の変化、あるいは発生の可能性が小さい著しい隆起・侵食や偶発的な人間侵入などを考慮した複数のシナリオに基づき、地層処分システムの安全性が総合的に評価されている。その結果、シナリオ、モデル、データの不確かさを考慮しても高レベル放射性廃棄物を地層処分することによって人間が受ける最大線量は、諸外国で提案されている防護目標値と同等あるいはそれ以下であることが明らかにされている。

これらの結果から、地層処分概念の成立に必要な条件を満たす地質環境がわが国に存在し、特定の地質環境がそのような条件を備えているか否かを評価する方法が開発されたことや、わが国の地質環境を踏まえて設定した

条件に対して人工バリアや処分施設を適切に設計・施工する技術の見通しが得られたこと、地層処分の長期にわたる安全性を予測的に評価する方法が開発され、それをういて具体的な安全評価結果が示されたこと等から地層処分の技術基盤が整備されたと判断できる。すなわち、「第2次取りまとめ」の研究成果は、わが国の地質環境、地層処分の工学技術及び地層処分システムの安全評価の3つの研究開発分野における成果について、それぞれの関連する技術的知見を総合的に検討したことにより得られていると判断できる。従って、「第2次取りまとめ」の研究成果により、専門部会報告書で示された技術的重点課題等が適切に達成されているとともに、わが国における地層処分の技術的信頼性が示されていると判断できる。

② 処分予定地の選定に資する技術的拠り所について

「第2次取りまとめ」では、地質環境の長期安定性、人工バリアの設置環境として重要な地質環境の特性、天然バリアとして重要な地質環境の特性のそれぞれの観点から、処分予定地の選定に当たって考慮すべき地質環境の要件や取得すべき情報が示されている。また、必要な情報を取得するための調査手法や機器についても、着目すべき特性ごとに、調査の段階に応じて整理して示されている。

以上のように、「第2次取りまとめ」には、処分地選定に当たって考慮すべき地質環境の要件、取得すべき情報とそのための調査手法や機器が示されており、処分予定地の選定に当たっての技術的拠り所とすべき内容が示されていると判断できる。

③ 安全基準の策定に資する技術的拠り所について

「第2次取りまとめ」では、地層処分の工学技術の観点から、人工バリア及び処分施設的设计・施工要件、並びに品質・施工管理についての基本的な考え方及び管理項目が整理されている。これらは、現在の技術水準で考えられる限りの知見を活用して検討されていると判断できる。

一方、地層処分システムの安全性の評価手法としては、評価シナリオ作成の考え方及び手順に基づき、地下深部で起こり得る種々の現象の影響を網羅的に考慮したシナリオ及びデータやモデルの不確実性へ対応するため、地層処分にとって適切で安定な場所に信頼性の高い処分場を建設することにより、実際には避けられると考えられる事象についても、その影響を考慮したシナリオが構築されており、これらのシナリオに沿った安全性の評価解析が実施されている。その評価結果を判断する指標としては、地下水シナリオにおいては線量の最大値、接近シナリオにおいては天然の放射線レベルとの比較が例示されており、地層処分の安全性が確保できる見通しが示されている。

以上のように、「第2次取りまとめ」には、地層処分の工学技術について処分場の設計・施工要件及び管理項目が示されるとともに、安全性についての評価手法及び評価結果が示されており、安全基準の策定に資する技術的拠り所となると判断できる。

④ 総合的な評価

以上のことから、「第2次取りまとめ」には、わが国における高レベル放射性廃棄物地層処

分の技術的信頼性が示されているとともに、処分子定地の選定と安全基準の策定に資する技術的拠り所となることが示されていると評価する。このことから、「第2次取りまとめ」は地層処分の事業化に向けての技術的拠り所となると判断する。

3.3 制度整備

2000年目途の事業化に向けた制度整備のなかでも、実施主体のあり方、資金確保策などの処分事業の制度設計については、総合エネルギー調査会原子力部会を中心に検討され、国会審議を経て2000年5月31日に高レベル放射性廃棄物処分事業の枠組みを示す「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」が制定され、6月7日に公布された。ここでは、高レベル放射性廃棄物処分懇談会報告書を踏まえ、国の役割、処分費用の確保方策、処分実施主体の設立、地元の意見の聴取を含めた処分地選定プロセスなどを定めている。以下に法律とその後の進展の要点を示す。なお、全体のスキームを図3に示す。

(1) 法律制定の目的

原子力発電所の運転及び使用済燃料の再処理により高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）が発生する。現在までに発生した使用済燃料の量からそれに相当するガラス固化体の本数を計算すると13,300本（1999年末現在）に達する。

高レベル放射性廃棄物の最終処分を計画的かつ確実に実施するため、最終処分費用の拠出制度、最終処分を実施する主体の設立、拠出金の管理を行う法人の指定等の関係規定の整備を行う。なお、本法律は最終処分の実施

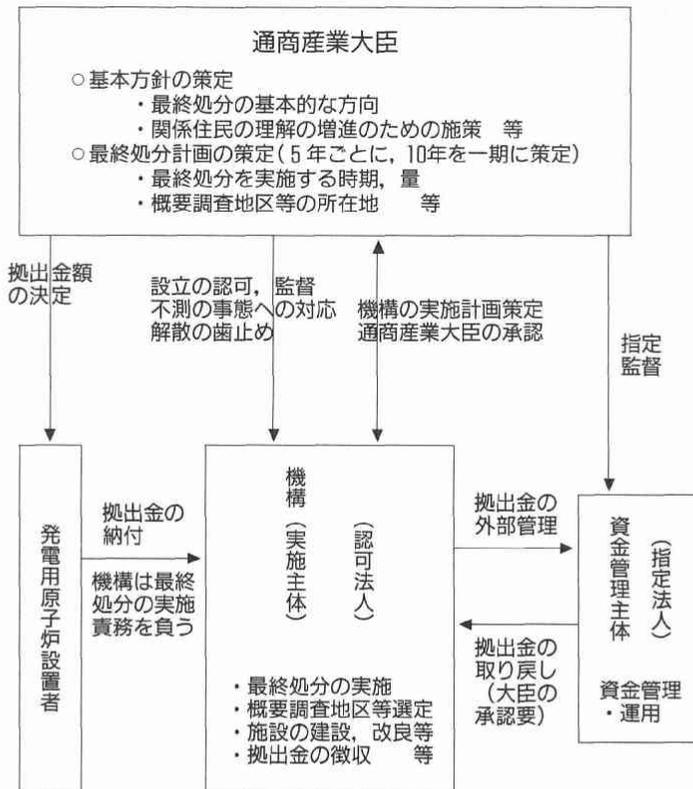


図3 基本的スキーム図

に必要な枠組みを制度化するものとし、最終処分の安全規制については、別に法律で定めることとする。

(2) 法律の概要

① 国の基本方針及び最終処分計画の明確化

高レベル放射性廃棄物の最終処分を進めるための基本的な方針、わが国の最終処分の全体計画を原子力委員会、原子力安全委員会の意見を聞いて、通産大臣が策定し、閣議の決定を経るものとする。

② 抛出金の納付

発電用原子炉設置者は、通産大臣が決定した抛出金額を処分実施主体に抛出する。抛出

金に見合う高レベル放射性廃棄物の処分は実施主体が行う。

③ 概要調査地区等の選定

a. 3段階の選定プロセスを定義し、選定の際の調査・評価事項を明確化する。

概要調査地区：ボーリング等により、最終処分施設を設置しようとする地層が長期間にわたって安定しているかどうかを調査する地点。

精密調査地区：地下に施設を設けることにより、当該地層の性質が最終処分施設の設置に適しているかどうかを調査する地点。

最終処分施設建設地：地層の性質が最終処

分施設の設置に適している地域であって、最終処分施設を建設しようとする地点。(安全規制は別途設ける。)

- b. 処分実施主体による処分地等の選定が行われた場合には、通産大臣が都道府県知事、市長村長の意見を聴き、十分に尊重して最終処分計画を改定する。

④ 処分実施主体

処分実施主体は、本法律に基づき民間の発意により設立され、通産大臣が認可・監督する。国の出資はなく、数は限定されない。名称は「原子力発電環境整備機構」とする。

⑤ 資金管理主体

処分実施主体に納付された拠出金は、通産大臣が指定する公益法人の資金管理主体が管理し(指定法人)、透明かつ健全な資金管理が行われるよう通産大臣が厳正に管理・監督する。

(3) 法律の施行状況

この法律に基づき、2000年9月に高レベル放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針および最終処分に関する計画が明確化されると共に、2000年10月18日には実施主体の「原子力発電環境整備機構」が設立され、また2000年11月1日には環境整備センターを母体にした「財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター」が資金管理主体として指定された。

3.4 規制の考え方

放射性廃棄物安全規制専門部会は、原子力安全委員会の指示(平成10年6月)を受け、

原子力委員会において示されている地層処分を前提に、現時点において、高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全確保原則、安全確保の考え方、処分の安全規制の在り方等の安全規制の骨格となる基本的考え方を取りまとめた。

将来、処分候補地、処分子予定地及び処分地の選定、並びに操業の開始という処分事業の段階的な進展に伴い、安全審査、安全設計等に係る具体的な安全基準・指針等を順次策定することが必要になることから、具体的な安全基準・指針等に関する策定スケジュールについても併せて検討を行っている。今後の安全基準・指針等の整備には、国際機関等における動向にも留意し、最新の科学的知見を取り入れながら、検討スケジュールに沿って進めることになる。

(1) 安全確保原則

地層処分の安全確保に当たっては、安全確保のための措置(長期的安全確保対策)が適切であって、長期に亘って人間とその生活環境に対してその影響が及ぶおそれがないことをあらかじめ確認する(安全評価等による安全確認)が必要である。

なお、高レベル放射性廃棄物の処分は、その安全性を考慮すべき期間が長期に亘るため、制度的管理等の社会的な対応に拘わらず、長期的にはそれらに依存しなくても安全が確保されるように措置しておくことが重要である。

(2) 高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全確保の考え方

処分事業の展開スケジュールを勘案すると、高レベル放射性廃棄物を処分するための事業は、以下の各段階を経て進められる。

- ① 立地段階（概要調査地区の選定，精密調査地区の選定，最終処分施設建設地の選定）
- ② 事業許可申請（安全評価）
- ③ 建設段階（地上及び地下施設の建設）
- ④ 操業段階（ガラス固化体の搬入・定置，処分坑道の埋め戻し）
- ⑤ 閉鎖段階（地下施設の閉鎖，地上施設の解体）
- ⑥ 管理段階～事業廃止（実施主体の事業の廃止）

高レベル放射性廃棄物の処分の安全性が長期に亘って確保されるためには，実施主体による地層処分に適した処分地の選定に続いて，事業許可申請以降，事業廃止に至るまで，各段階に対応した安全確保方策を講じることが必要である。

原子力安全委員会は，安全基準・指針等の策定を行うとともに，事業許可申請以降，事業廃止に至るまで，各段階において適切に関与することが重要である。

(3) 処分地に要求される環境要件

高レベル放射性廃棄物を地下深部に埋設し，長期にわたって物理的に人間の生活環境から隔離し，公衆の安全確保を図る地層処分においては，その多重バリアシステムが長期にわたって所期の性能を発揮できるように，適切な環境要件を満たす処分地の選定が重要である。

(4) 高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制

- ① 事業許可申請時における安全評価の基本的考え方
事業許可申請時においては，実施主体は選

定された処分地に応じて適切な工学的対策を施した処分場を設計し，国は安全審査においてその妥当性を安全評価により確認することが必要である。

この安全評価においては，高レベル放射性廃棄物処分の安全性を確保するための対策（サイト選定，工学的対策）を踏まえ，地層処分の安全性に影響を及ぼす可能性のある種々の現象を考慮したシナリオに対して適切なモデルとパラメータによる解析を行い，一般公衆に対する評価線量が最大となる時期においても，あらかじめ基準値として定められた放射線防護レベルを超えていないこと等を確認することがその基本である。

② 建設・操業段階等における安全確認の考え方

高レベル放射性廃棄物の処分においては，安全評価の結果が確実に担保されるように建設，操業等の各段階において「安全確認」を行うことが重要である。さらに，操業段階が終了した後は処分場を完全に閉鎖するとの考え方が地層処分の概念であるため，処分場閉鎖時の「安全確認」も重要である。

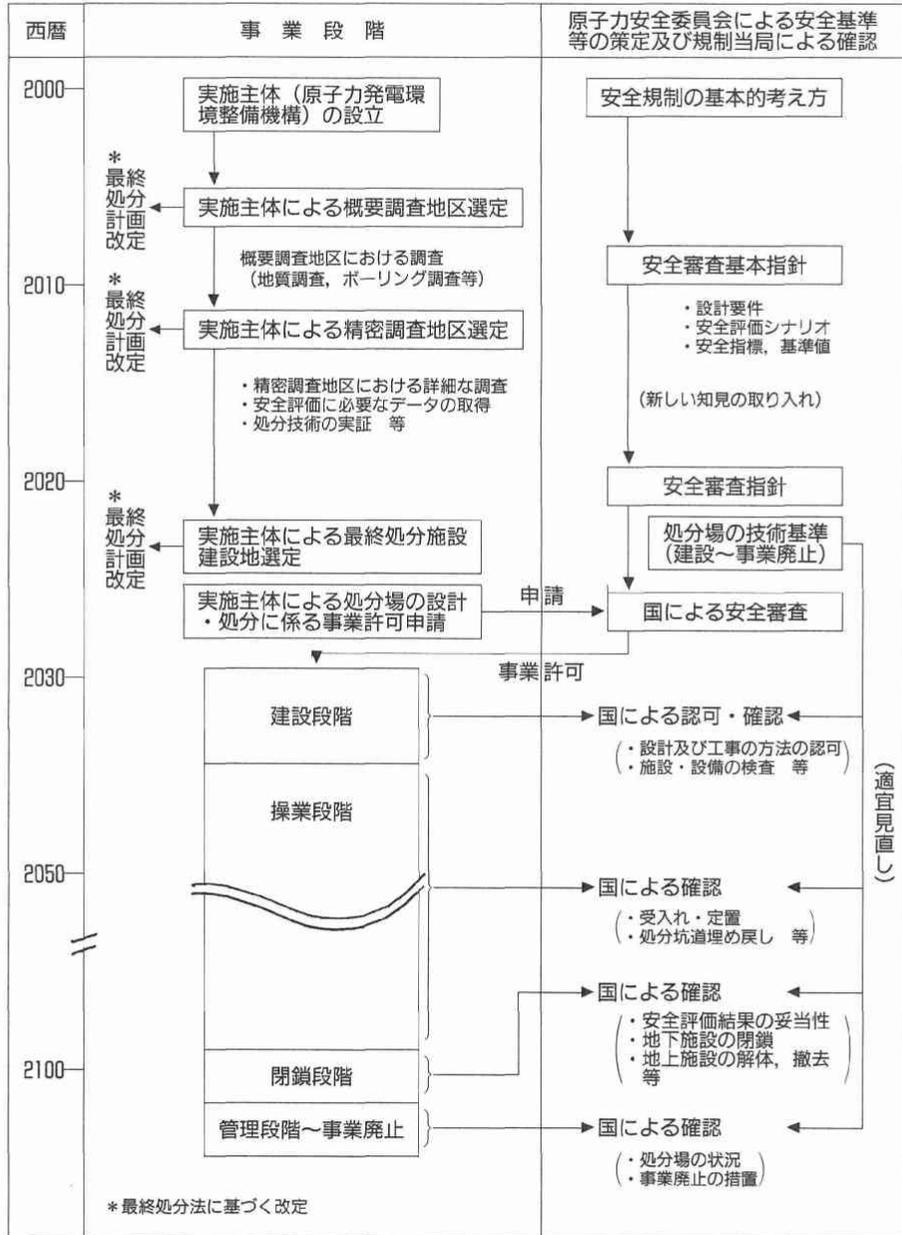
③ 今後策定する具体的な安全基準・指針等に関するスケジュール

高レベル放射性廃棄物の処分場の立地については，実施主体（原子力発電環境整備機構）が，法に基づき，概要調査地区，精密調査地区，最終処分施設建設地を選定することになる。実施主体は，概要調査地区等を選定したときは，国の承認を受けて，その所在地を，当該実施主体の実施計画において定めることとなっている。

その後、国による安全審査を経て、処分場の建設、操業が開始されることになる。

このため、事業の進展に合わせて安全の確認が適切に行われるように、安全審査、安全

確認等に係る指針・技術基準を策定していくこととする。現状のこれら全体的スケジュールを図4に示す。



出所：放射性廃棄物安全規制専門部会 第1次報告書

図4 高レベル放射性廃棄物の処分の安全基準・指針等に関するスケジュール

(5) 今後の留意事項

処分地が特定されていない段階で作られる基準・指針等は、一般事項についての概括的なものであるが、処分地の選定が進むに従って、サイト固有の状況に応じ、より具体性を持った詳細なものとなっていくことが重要である。

また、科学技術の進歩、安全研究の成果等を踏まえながら、安全規制の基本的考え方も修正等を加えていくことが必要である。

さらに、今後の安全基準・指針等の策定、安全審査及び建設・操業段階等における安全確認に際しては、安全規制の透明性を確保するために適切な情報の公開を行うなど国民の十分な理解を得ることが重要である。

3.5 社会的側面、国民の反応

(1) 報告書作成時の国民の意見の反映等

「第2次取りまとめ」の評価報告書の作成に当たっては、専門部会は23名の専門家からなる評価分科会を設置して検討を進め、平成12年7月に「評価報告書案」を公開し、1カ月間国民からの意見募集を行った。これに対して41名から67件の意見が寄せられた。1件に複数の意見が記述されている場合があり、これらを報告書案の項目ごとに整理したところ、192件になった。また評価の客観性や視点の多様性を確保するために、国内外の専門家を中心に幅広く意見交換を行う国際ワークショップを開催し議論を行った。これらの意見を踏まえて「第2次取りまとめ」に示された研究開発成果についての最終評価報告書が作成され、平成12年10月1日に原子力委員会はその報告を受け了承した。

一方、原子力安全委員会の指示（平成10年

6月）を受け、高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方について調査審議を行ってきた放射性廃棄物安全規制専門部会は、平成12年7月26日に、高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全確保原則、安全確保の考え方、処分の安全規制の在り方等の安全規制の骨格となる基本的考え方の第1次報告を取りまとめ公表した。これに対して平成12年8月7日から1カ月間国民からの意見募集を行い、7名から21件の意見が寄せられた。これらを踏まえた第1次報告（意見公募結果反映案）が平成12年10月27日に原子力安全委員会に報告された。（前述3.4）

(2) 放射性廃棄物問題への理解促進

放射性廃棄物処分に取り組むに当たり、国民の理解を得ることが重要であることは懇談会報告書をはじめ、各種審議で重ねて指摘されてきたが、放射性廃棄物に対する理解が一層深まり国民各層で幅広い議論が行われるように、平成10年末から「放射性廃棄物シンポジウム」が全国各地で開催されてきた。国から放射性廃棄物処分への取組に関する概況説明の後に、開催地域を中心に公募および指名で選定されたパネリストが意見を発表し、最後に一般から募集した約150名程度の参加者を含めて出席者が一体となって意見交換を行うスタイルが取られた。平成12年度は合計15地区での開催となり、通算では23回、参加者は3,300名に達している。ここでは、高レベル放射性廃棄物処分については、処分方法、安全性、モニタリング、処分法、処分事業、費用負担、責任の所在や合意形成等の話題に対して広範な意見が提出され事後の検討に資するように整理された。

(3) 批判グループとの技術討論

原子力資料情報室を中心としたグループは、2000年7月、「『高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性』批判」と題するレポートを公表した。「第2次取りまとめ」についての調査検討結果を次のように結論づけ批判した。

「第2次取りまとめ」は、地層処分の実施可能性や安全性に関わる多くの重要な事項について、恣意的な解釈と評価を行ない、不確実さに対して科学的に真摯な検討を経ることなく、地層処分が行えるという予め定められた結論を導いている。これら多くの恣意的で不確実な点は、『第2次取りまとめ』の技術的信頼性が著しく低いことを示していると同時に、日本において地層処分を実施することが困難であることを強く示唆している。

この批判レポートを契機に10月21日に「高レベル放射性廃棄物の地層処分を考える」公開討論会が開催され、①なぜ地層処分なのか、②安全な地層が日本にあるのか、③人工バリアは機能するか、④安全評価について、⑤高レベル放射性廃棄物対策はどうあるべきかの5テーマを巡り推進・反対双方の専門家が討論を行い注目された。

司会の日本放射化学会坂本浩副会長は、今後とも議論を継続することが重要であると指摘した。

4. おわりに

高レベル放射性廃棄物処分の問題は核燃料サイクルを閉じる上で最後の難関と見られており、まだ世界で事業化されるに至ってはい

ない。世界の原子力発電先進国と比較してわが国の取組は10年は遅れていると言われてきたが、2000年目途の事業化に向けての1998年6月の原子力委員会指示に従い、「第2次取りまとめ」の作成・評価を中心とした技術的進展、最終処分に関する法律の制定を中心とした制度整備の進展および処分の安全規制に関する基本的考え方の検討を中心とした規制面の進展等が、2000年を区切りとして急展開を見せた。フィンランドやスウェーデンの北欧諸国では処分の実施に向け開発努力が実を結びつつある。わが国では今後は実施主体を中心に、処分についての国民の理解と信頼を得るために一層の努力を払いながら、関係機関が事業の推進に向けて着実にその役割を果たして行くことが求められることとなろう。

5. 参考文献

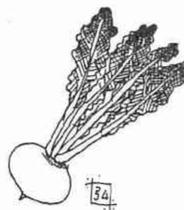
- (1) OECD/NEA, The Environmental and Ethical Basis of Geological Disposal of Long-Lived Radioactive Wastes, A Collective Opinion of the Radioactive Waste Management, 1995
- (2) 「高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発等の今後の進め方について」原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会, 1997.4
- (3) 「高レベル放射性廃棄物処分に向けての基本的考え方について」原子力委員会高レベル放射性廃棄物処分懇談会, 1998.5
- (4) 「地層処分コンセプトの背景に係わる評価研究(II)」(JNC委託研究成果報告書)エネ総研, 1999.1
- (5) 「地層処分コンセプトの背景に係わる評価の取りまとめ」(JNC委託研究中間成果報告書)エネ総研, 1999.11
- (6) 「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第

2次取りまとめ」核燃料サイクル開発機構,
1999.11

- (7) 我が国における高レベル放射性廃棄物地層
処分研究開発の技術的信頼性の評価,原子力
委員会バックエンド対策専門部会, 2000.10
- (9) 高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規
制の基本的考え方について(第1次報告)意

見公募結果反映(案), 原子力安全委員会放射性
廃棄物安全規制専門部会, 2000.10

- (9) 「高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的
信頼性」批判, 地層処分問題研究グループ,
2000.7
- (10) 「特定放射性廃棄物の最終処分に關する法
律」, 2000.6



〔調査研究報告〕

原子力発電に対する公衆の 意識構造の分析と情報提供の考察

下 岡 浩 (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
センター長補佐



1. はじめに

どのような産業や技術であろうと、社会の構成員である公衆から社会的に認められずに存続し続けられるものはない。原子力発電のような巨大システムに関しては、特に社会との相互作用が大きいといえる。そのため、原子力発電のPA・情報提供等の必要性がますます高まってきており、この問題は今日最も重要なものの一つとなってきた。

ただし、情報は効果的に提供されなければならない。そのためにも、情報の受け手である公衆が原子力発電等に対しどのような認識を持っているのかを知る必要があるが、アンケートによる意識調査はこの公衆の認識について情報を与えてくれる有力な手法の一つとして利用できる。

当研究所では1986年度から1999年度まで6回にわたって、アンケート調査による公衆の意識構造の分析を行い、原子力発電に対する公衆の認識について多くの知見を得ている。最近では、1998年度の調査の後、1999年9月にわが国初の犠牲者も出たJCO臨界事故が起り、原子力発電に対する意識がかなり変化している可能性も考えられたため、事故後に前年度調査と同じ調査対象者に対し同様の

調査を行い、この事故により原子力発電に関する評価および態度決定要因等がどのように変化したかを分析した。本報では、過去に行ったアンケートの成果も踏まえ、JCO事故前後に行ったアンケート結果とその分析を紹介し、それらを参考にした情報提供に関する考察を行う。

ただし、今回報告を行うのはあくまでも東京を調査地域とした調査結果であり、日本全国の調査結果ではないこと、及び1999年度に行ったアンケート調査結果はJCO事故直後という特異な時点の調査結果であるという点に留意する必要がある。

2. 過去の主な研究成果

2.1 公衆の原子力発電に対する態度決定に至る意識構造モデル

今日の社会において、産業や技術は、その存続のためには、社会的に評価され受け入れられることが必要である。原子力広報評価検討会がその中間報告書¹⁾において「3Eの調和という政策目標は、エネルギー・原子力問題に対する国民各層の理解と協力を得て実現していくことが極めて重要となっている」と指摘しているが、これも社会的に評価され受

け入れられることの重要性を指摘したものである。

社会的に評価され受け入れられるためには、社会の構成員たる公衆の考え方を知ることが必要である。過去において行ったアンケート調査結果から、原子力発電に対する態度決定要因として「必要性」と「安全性」に関する評価が主要な要因として挙げられるが、これらの要因に影響を与える社会的要因というものが考えられるとし、図1の様な態度決定の意識構造モデルを筆者は提案している²⁾。原子力発電に対し「必要・安全」との評価を得るには、まず公衆の生き方、社会に対する考え方の考察が必要である。それがあってこそ、公衆の求める社会に適した技術・組織であるとの評価を得るために、どのような理念で、どのような活動（広報等）をしたら良

いかなどについて考えることができるのではないかと思われる。

2.2 公衆の原子力発電に対する認識の特徴

1988年度に行った第2回アンケート調査では、原子力発電を含む複数の技術についての「推進廃止の態度」「有用感」「安心感」「制御可能感」を聞いている。それぞれの技術についての推進意見回答者と廃止意見回答者別にそれぞれの「有用感」「安心感」の回答の平均値をプロットしたのが図2である³⁾。それぞれの技術の推進意見回答者の評価は、図中の相対的に良い評価を行っている[A]と相対的に悪い評価を行っている[a]の2グループに分けられ、同じく廃止意見回答者の評価は図中の相対的に良い評価を行っている[B]と相対的に悪い評価を行っている[b]

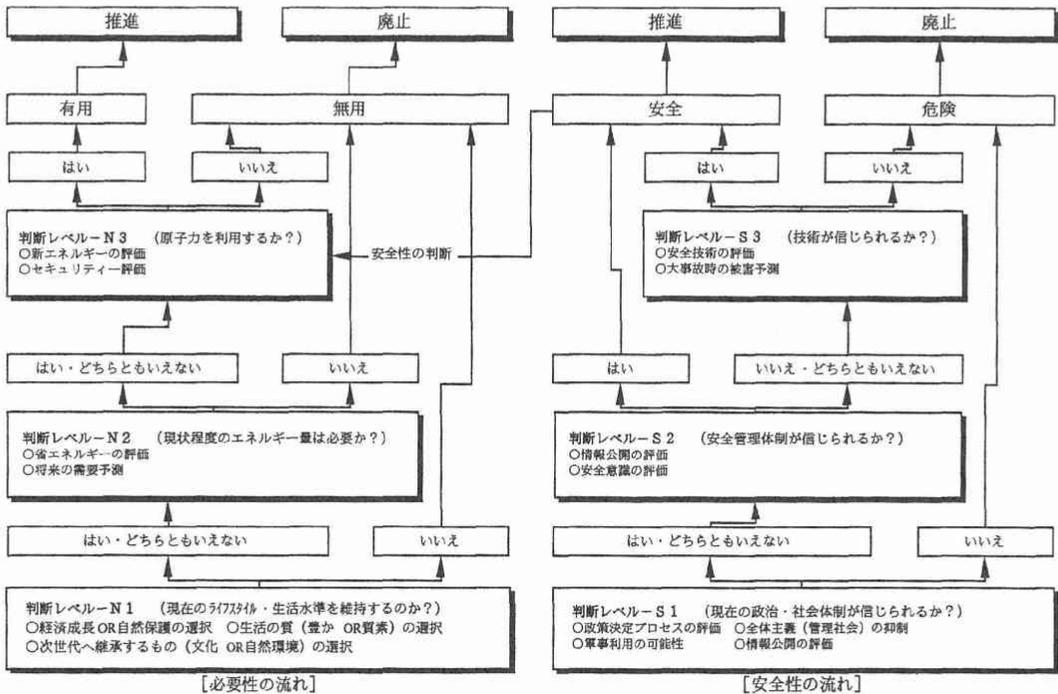


図1 原子力発電の推進・廃止の態度決定に至る公衆の意識構造モデル²⁾

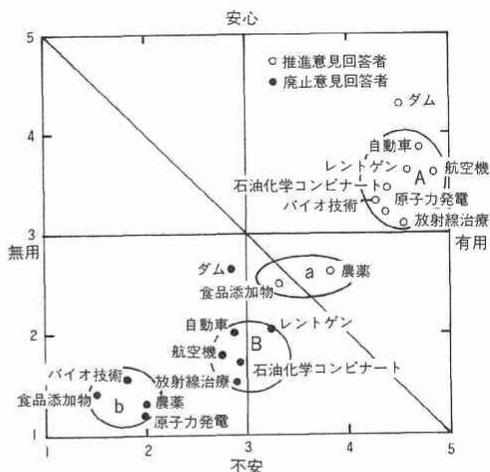


図2 各技術の推進派廃止派別の有用感と安心感(東京/1988.10)³⁾

の2グループに分けられる。多くの技術は推進意見回答者と廃止意見回答者共に比較的良い評価という[A-B]又は推進意見回答者と廃止意見回答者共に比較的悪い評価という[a-b]という評価パターンになっているが、原子力発電はバイオテクノロジーと共に推進意見回答者は比較的良い評価だが、廃止意見回答者は比較的悪い評価という[A-b]という評価になっており、推進派と廃止派の意見の差が他技術の場合のそれに比べて大きいことがその特徴であるといえる。

3. 最近のアンケート調査概要

JCO 臨界事故(1999年9月30日)を挟み、1998年度(第5回調査)と1999年度(第6回調査)に行ったアンケート調査の概要は以下のとおりである。

- ① 母集団：東京都全域に居住する18歳以上の男女
- ② 実施時期：第5回調査 1998年11月～

1999年1月
第6回調査 1999年11月～
2000年1月

- ③ 標本数：1500人
- ④ 抽出法：第5回調査 住民基本台帳にもとづく2段無作為抽出法
第6回調査 第5回調査と同じ標本
- ⑤ 調査方法：郵送法
- ⑥ 有効標本数：第5回調査 660人(44%)
第6回調査 649人(43%)
(第5回と第6回の両方回答した回答者数は491人)
- ⑦ 質問構成：公衆の原子力発電に対する態度とそれに影響を与えると考えられる要因に関する質問

4. 最近のアンケート結果の概要

4.1 原子力発電に対する公衆の態度の変化

(1) 推進派、廃止派の割合に大きな変化なし
JCO 臨界事故の前後に行った2つの調査で、回答者の原子力発電に対する態度がどの様に変化したかを図3に示す。「推進廃止の態度」に関しては、「推進派」(「新設や増設をしながら続ける」と「現状程度のまま続ける」の回答者)の割合が若干減少し、「廃止派」(「すぐにやめる」と「徐々にやめていく」の回答者)の割合が若干増加しているが、あまり大きな変化は認められない。

(2) 有用感に大きな変化はない

「有用感」に関しても大きな変化はなく、「有用」との回答(「有用である」と「どちらかといえば有用である」の回答の合計)の割

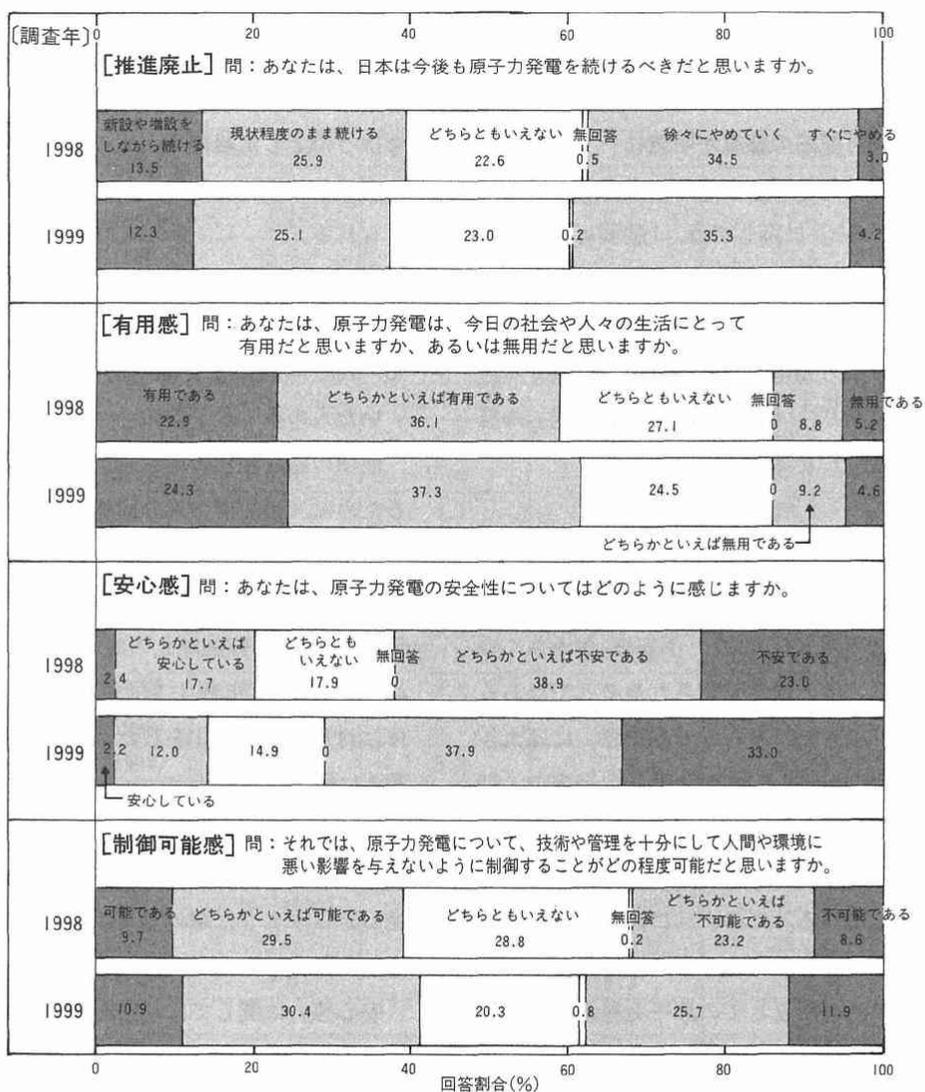


図3 JCO事故前後の原子力発電の推進廃止の態度と有用感・安心感・制御可能感の変化（東京/1998.11, 1999.11）

割合が若干増加している程度であり、大部分が「有用」と回答している。JCO臨界事故は、有用感の増減にあまり影響はなかったといえる。

(3) 不安感が大きく増大

「安心感」に関しては、大部分が「不安」と回答（「不安である」と「どちらかといえ

ば不安である」の回答の合計）しているが、JCO臨界事故の前後で「安心」との回答（「安心している」と「どちらかといえ

れるように、JCO 臨界事故は、東京においては安心感に大きな影響があったと言える。

(4) 制御可能感の態度が明確に

「制御可能感（安全感という意味合いを持たせている）」に関しては、「制御可能」の意見も「制御不能」の意見も増加し、「どちらともいえない」という中間意見が減少している。事故が原子力発電の安全性について考えるきっかけになり、「制御可能」「制御不能」の態度を明確にしたと考えられる。

(5) 公衆の態度の変化に対するまとめ

わが国では初めての犠牲者も出た JCO 臨界事故後であるだけに、「不安感」が大きくなっているのは、当然予想されたことではあるが、それにもかかわらず「有用感」には大きな変化はなかった。また、原子力発電の「制御可能感」に関しても「制御不能」の意見も増加しているが、同時に「制御可能」の意見も増加している。このように、「不安感」以外の要因には特にマイナスの影響は見えず、結局、最終的判断としての原子力発電の「推進廃止の態度」は「推進」意見の割合が若干減少している程度で、「安全感」以外にあまり大きな変化は認められないことがわかった。

公衆は原子力発電の「有用感」や「制御可能感」については、時々の事故や事件等にはあまり影響されず、極めて冷静に対応していると思われるのに対し、「不安感」が事故や事件の度に大きくなるのをみると、公衆は原子力発電の技術そのものではなく、それを運営管理する組織や制度といったものへの不信の増大が原因ではないかと思われる。後述のように、公衆は「民主的であること」や「情

報」を重視しており、「事故・トラブルを起こさないこと」は当然として、「原子力関係者への信頼感」を得るために、積極的な情報提供をはじめとした組織や制度の透明性を高める等の改革が求められているのではないかと考えられる。

4.2 態度変化の詳細分析

(1) JCO 事故により原子力発電に安心して いた人の多くが不安に

前項の態度変化の内容をより詳しく分析するために、事故前の第5回調査と事故後の第6回調査において同一回答者に対する調査（パネル調査と呼ばれる）を行った。原子力発電に対する「推進廃止の態度」「有用感」「安全感」「制御可能感」に関して、同一回答者全体に対して態度変化をしたグループの割合を表1に示す。

「推進廃止の態度」「有用感」「制御可能感」に関しては、例えば「推進→廃止」「廃止→推進」というように逆の意見に変える割合は変えない割合に比べて比較的小さい。しかし、「安全感」に関しては「安心→安心」と態度を変えない割合10.0%に対し「安心→不安」と逆の態度に変えた割合が8.6%と比較的大きな割合になっている。また、JCO 臨界事故前の中間意見回答者（18.1%）の中の多く（10.8%）が「不安」との態度に変わっている。これが大きく影響して、東京において JCO 臨界事故の前後で「安心」との回答が大きく減少し、「不安」との回答が増加している。逆に、「有用感」に関しては JCO 臨界事故前の中間意見回答者（27.1%）の中の多く（10.0%）が「有用」との態度に変わっている。これが大きく影響して、東京において JCO 臨界事故の

表 1 原子力発電の推進廃止の態度と有用感・安心感・制御可能感のパネル調査結果／パネル全体に対する割合（東京）

(A) 推進廃止の態度 (%)

	推進 (1999)	中間 (1999)	廃止 (1999)	パネル合計
推進 (1998)	27.7	6.9	6.9	41.5
中間 (1998)	4.1	9.8	7.1	21.0
廃止 (1998)	5.7	6.1	25.7	37.5
パネル合計	37.5	22.8	39.7	100

(B) 有用感 (%)

	有用 (1999)	中間 (1999)	無用 (1999)	パネル合計
有用 (1998)	49.3	6.5	3.9	59.7
中間 (1998)	10.0	13.4	3.7	27.1
無用 (1998)	3.9	4.1	5.3	13.2
パネル合計	63.1	24.0	12.8	100

(C) 安心感 (%)

	安心 (1999)	中間 (1999)	不安 (1999)	パネル合計
安心 (1998)	10.0	3.3	8.6	21.8
中間 (1998)	1.6	5.7	10.8	18.1
不安 (1998)	2.6	5.3	52.1	60.1
パネル合計	14.3	14.3	71.5	100

(D) 制御可能感 (%)

	可能 (1999)	中間 (1999)	不能 (1999)	パネル合計
可能 (1998)	25.5	7.3	6.5	39.3
中間 (1998)	9.0	9.8	10.2	28.9
不能 (1998)	7.1	4.1	20.6	31.8
パネル合計	41.5	21.2	37.3	100

注1 パネル調査対象者数は491人

注2 表の見方：例えば、(A)推進廃止の態度の表で1998年に行った第5回調査において「推進」の回答（「新設や増設をしながら続ける」と「現状程度のまま続ける」の回答の合計）を行い、JCO 臨界事故後の1999年に行った第6回調査において「廃止」の回答（「すぐにやめる」と「徐々にやめていく」の回答の合計）を行った人の割合はパネル全体の491人の中の6.9%である。また、各質問の回答はプラス回答、中間回答、マイナス回答の3区分にまとめている。

前後で「有用」との回答が若干増加している。

（注：アンケート全体での回答割合にはパネル調査以外の回答者も含まれるので、パネル調査での回答割合とは若干の差がある）

(2) 「不安で有用」の態度は変わらず

また、2つの調査で共に「有用」と回答した人の割合と、共に「不安」と回答した人の割合は全体の約50%もあり、他の意見に変えた割合はどちらも小さい。このように、原子

力発電に対する「不安で有用」の態度はなかなか変化しないものといえる。

(3) JCO 事故は「安心」と思っていた女性に強い影響を与えた

ここで、「安心感」の態度変化に関して性別に分析してみる(表2)。JCO 臨界事故前の中間意見回答者は、男女共ほぼ同程度の割合で「不安」との態度に変わっている。しかし、前回調査(1998年)で原子力発電に「安心」と答えた回答者(男性=26.5%, 女性=17.5%)の中で、今回調査(1999年)で「安心→安心」と態度を変えない回答者の割合(男性13.7%, 女性=6.6%)に対し「安心→不安」と態度を変えた割合が(男性=8.5%, 女性=8.6%)と、女性の態度変化の割合が圧倒的に大きい。また、JCO 臨界事故前後で「安心」との態度を変えない割合でみると、事故前に「安心」との態度であった人の中で、男性はその約半が事故後も「安心」との態度を変えないのに対して、女性のそれは約半でしかなく、その結果、JCO 臨界事故前後で「安心」との態度を変えない人の割合は女性全体の6.6%と非常に小さな値になっている。JCO

臨界事故は今まで原子力発電所を「安心」と思っていた東京の女性に対し、より強い影響を与えたといえる。

4.3 推進廃止の態度決定要因の分析

(1) 不安だから廃止派となるのではない

東京では、JCO 臨界事故後に原子力発電に「不安感」を持つ人が増えたが、「廃止」の意見の人が特に増えたわけではない。そこで、原子力発電の「推進廃止の態度」に直接影響を与える主要因子として「有用感」と「安心感」「制御可能感」を考え、それらと「推進廃止の態度」との関係を図4に示す。

大部分の回答者が原子力発電を「不安」「有用」と回答しているが、「安心」との意見を持つ回答者は「推進派」となる傾向が非常に強く、「無用」との意見を持つ回答者は「廃止派」となる傾向が非常に強い。まず、「有用」との認識が「推進派」となるために必須である。また、「不安感」を持つ回答者の割合は多いが、「不安感」を持つ人が「廃止派」になる傾向はあまり強くなく、「推進派」の中にも「不安感」を持つ回答者の割合は高く、「安心感」を持つ人の割合より多いくらいである。「不安

表2 性別にみた原子力発電の安心感のパネル調査結果/パネル全体に対する割合(東京)

(%)

		安心 (1999)	中間 (1999)	不安 (1999)	パネル合計
安心 (1998)	男	13.7	4.3	8.5	26.5
	女	6.6	2.3	8.6	17.5
中間 (1998)	男	1.7	6.0	9.8	17.5
	女	1.6	5.4	11.7	18.7
不安 (1998)	男	3.0	6.4	46.6	56.0
	女	2.3	4.3	57.2	63.8
パネル合計	男	18.4	16.7	65.0	100
	女	10.5	12.1	77.4	100

注) パネル調査対象者数は、男性234人、女性257人。

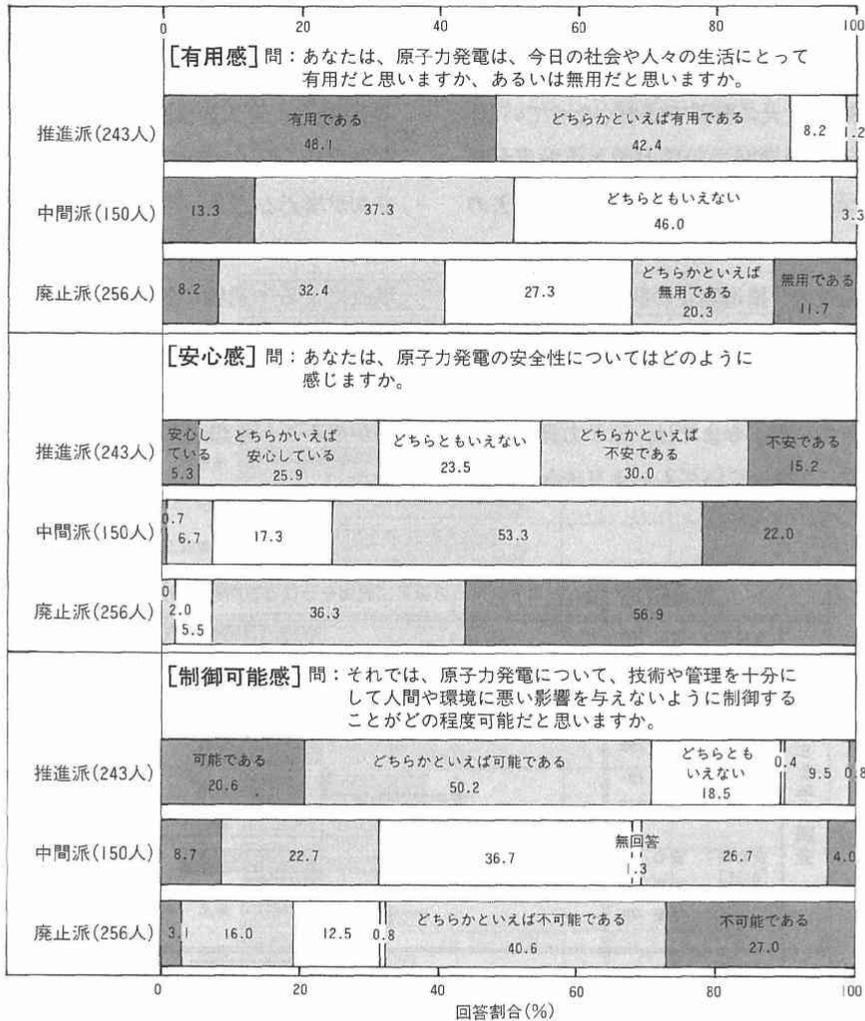


図 4 推進派—中間派—廃止派別にみた原子力発電の有用感・安心感・制御可能感 (東京/1998.11)

だからといって直ぐに「廃止派」となるのではない。それに対し、原子力発電を「制御可能」と思う人の多くは「推進派」に、原子力発電を「制御不能」と思う人の多くは「廃止派」になる傾向がみられる。

(2) 「有用感」の影響力が弱くなった

このような原子力発電の「推進廃止の態度」

に直接影響を与える 3 要因を用い、要因の有無と大きさを求める手法の一つである林式第 2 類数量化解析を行った結果を図 5 に示す。

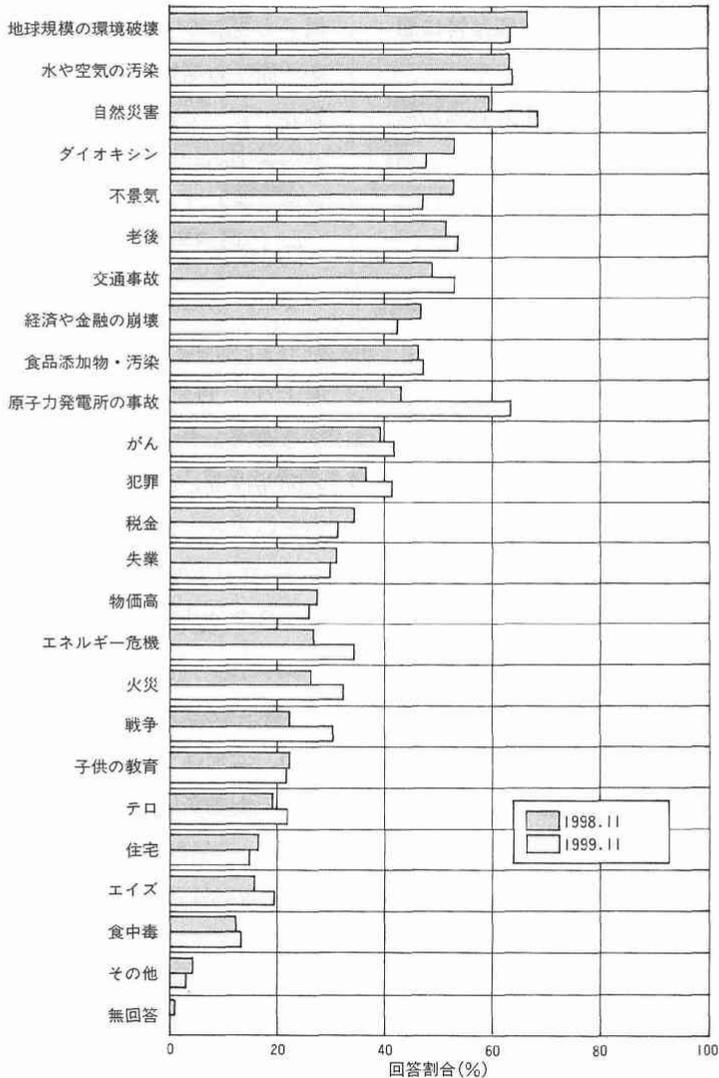
JCO 臨界事故前に行った 1998 年度の第 5 回調査では、それまでの調査の場合と同様に「有用感」の有無がこの 3 要因の中で最も大きな要因であったが、事故後に行った 1999 年

4.4 その他の分析

(1) 原子力発電に対する不安感を特別視する必要はない

JCO 臨界事故後に原子力発電への不安は大きくなったが、原子力発電への不安は、他の事例の不安に比べて特に大きいわけではな

い(図6)。JCO 臨界事故後(1999年度調査)という特異な状況下においても、最も不安の大きなグループの中の一つでしかない。過去のアンケート調査においても平均値で見れば原子力発電は他の施設と同程度の捉え方をされており、原子力発電に対する不安感が特別



問：あなたは、ふだんの日常生活の中で特にどのようなことに強い不安を感じますか。特に強く不安を感じるものをいくつでも選んで番号に○をつけてください。

図6 ふだんの日常生活の中で特に強く不安を感じるもの
(東京/1988.11, 1999.11)

に大きく、特異なわけではなく、原子力発電をことさら特別視する必要はないものと思われる。ただし、前述のように、推進派と廃止派の意見の差が他技術の場合のそれに比べて大きいことが原子力発電の特徴であるといえる。

(2) 女性の原子力発電に対する評価は特に悪くはない

よく、「女性は原子力発電に対する評価が悪い」と言われているが、今回のアンケート調査結果をみても、女性の方が若干評価が悪いといえる(図7)。原子力発電の「推進廃止」の態度をみると、「廃止」の意見は男女差はあまりなく、女性は「どちらともいえない」という中間意見が多く、その分「推進」の意見が少なくなっている。ただし、否定的な意見では、あまり大きな男女差はみられない。

(3) 原子力発電と再生可能エネルギーの関係

大衆の予想する将来(20年後)の主要電源は、他を圧して「再生可能エネ」と「原子力発電」となっている(図8)。当然のことではあるが、原子力発電の「推進派」の過半数は、将来の主要電源を「原子力発電」とみており、

原子力発電の「廃止派」の過半数は、将来の主要電源を「再生可能エネ」とみている。「廃止派」にとって原子力発電を廃止した後、原子力発電に替わるものとして「再生可能エネ」を考えているようである。しかし、「推進派」も少なくない割合の人が将来の主要電源を「再生可能エネ」とみており、同じく「廃止派」も少なくない割合の人が将来の主要電源を「原子力発電」とみている。本アンケート調査でも、公衆は環境問題に高い関心を持っているとの結果を得ており、原子力発電の「推進派」でも「再生可能エネ」には好意的で強い関心を持っている。

また、前回調査と今回調査のパネル調査において、将来の主要電源の予測を、「原子力→原子力」「再生可能エネ→再生可能エネ」と態度を変えなかった割合はそれぞれのグループの60%程度しかなく、この意見の流動性は高いといえる。

(4) 公衆は「環境」「民主」「情報」を重視する

公衆の生き方、社会に対する考え方を探るため、公衆は今、何を重視しているのかをアンケート調査により調べた。誌面の制約上図

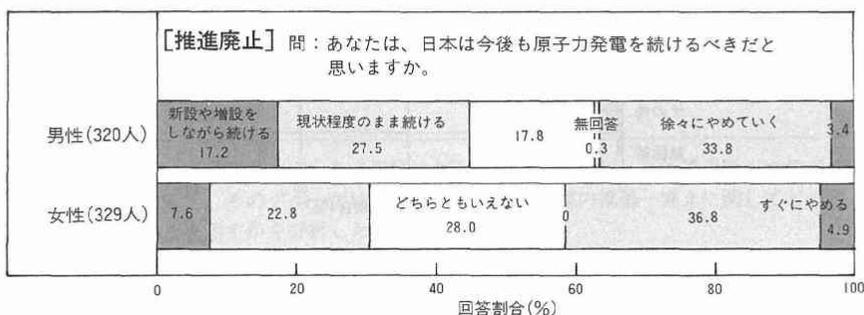
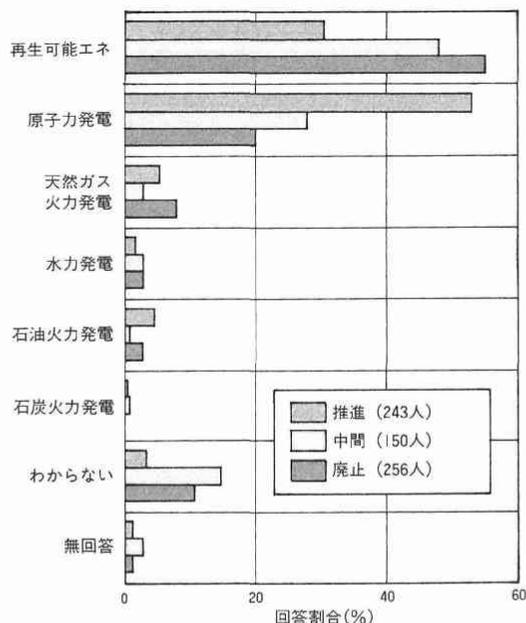


図7 性別にみた原子力発電の推進廃止の態度 (東京/1999.11)



問：20年後の日本では、次のどれが最も主要な電源になると思いますか。
1つだけ選んで番号に○をつけてください。

図8 推進派—中間派—廃止派別の20年後の日本で最も主要になると予想される電源 (東京/1999.11)

表は示さないが、アンケート調査結果によると、公衆は「環境」「民主」「情報」といったものを重視している。「民主的」と思われることは原子力発電の推進にとって非常に重要な要因である。

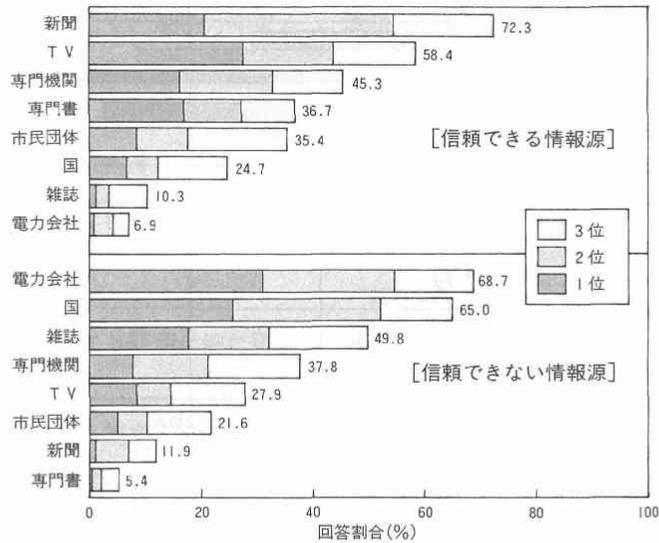
したがって、「事故・トラブルを起こさないこと」は当然として、「原子力関係者への信頼感」を得るために、積極的な情報提供を効果的に行うことが必要であるといえる。特に、ただ情報を出すだけでは不十分であり、公衆に十分な情報公開をしていると認められるような適切な情報の提供を行うことが重要であろう。

(5) 情報源の評価は単純ではない

前項で述べたような適切な情報提供を行う

ためには、公衆の情報に関する認識を把握することが必要である。そのため、公衆が原子力に関して信頼できる（又は信頼できない）情報源の種類を聞いた。その結果を図9に示す。「新聞・TV」等が信頼されている情報源、「電力会社、国、雑誌」等が信頼されていない情報源となっている。しかし、この問題は単純ではない。

「住まいの近くに作ってもらいたくない」ような施設の建設計画に対し、必要性や安全性などを「説明すべきだ」と思う人や組織、次いで意見を参考として聞いてみたい人や組織、更に参考になる情報を得たいと思うメディアについて聞いた結果を図10に示す。この調査によると、必要性や安全性などを「説明すべきだ」と思うのは、信頼していない情報



問：あなたは原子力に関してどんな情報源が信頼できるとお考えですか。
 次の8つの中から第1位，第2位，第3位と順位をつけて3つまで選んでください。

問：前問に引き続き，今度は逆に最も信頼できないと思う情報源を
 第1位，第2位，第3位と順位をつけて3つまで選んでください。

図9 原子力に関して信頼できる（又は信頼できない）情報源
 （東京/1999.11）

源とされた「国，県や市町村」といった公的機関が上位にあり，意見を参考として聞いてみたいと思うのは，「中立的専門家」とする意見が多い。また，参考になる情報を得たいと思うメディアとしては，信頼しているとされた「新聞・TV」以上に「講演会・説明会」とする意見が多い。

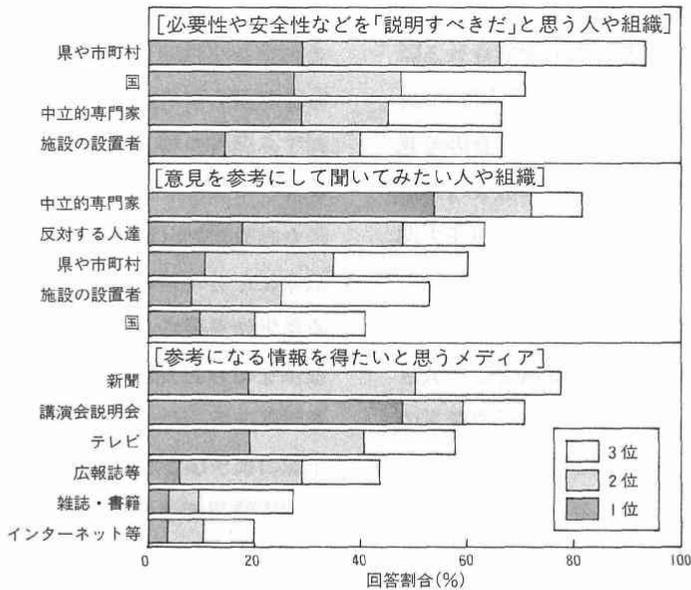
さらに，「インターネット等」は割合こそ低い，インターネットを利用できる人の割合21%（本アンケート調査結果）と比べると非常に高率であるといえる。また，過去に行ったアンケートでは，効果的な情報伝達には対人情報伝達を重視すべきであるとの結果を得ているが，バーチャルな双方向コミュニケーション手段であるインターネットはその点でも有用といえる。今後，インターネットの利用拡大が予想されるため，このメディアの重

要性はますます大きくなるものと思われる。アンケート結果をまとめると，施設の受け入れを図る場合，[国，県や市町村]が[中立的な専門家]も含めた[講演会・説明会]を開催し，[適切な情報の提供]を行うことが最も効果的であり，今後はインターネットの利用も考慮すべきであるとの結論になる。

5. アンケート分析のまとめ

1999年に起こったJCO臨界事故の前後に行ったアンケート調査の分析の結果，注目すべき公衆の原子力発電に対する態度の変化を知ることができた。

その一つは，JCO臨界事故後，東京の公衆の原子力発電に対する不安感は事故前に比べ明らかに大きくなってはいたが，原子力発電



- 問：あなたは、「住まいの近くに作ってもらいたくない」ような施設が実際にあなたの住まいの近くに作られるような計画が持ちあがったときに、だれが施設の必要性や安全性などを説明すべきだと思いますか。
次の4つについて、第1位から第4位までの順位をつけて□内に番号を記入してください。
- 問：それでは、あなたは、「住まいの近くに作ってもらいたくない」ような施設を受け入れるか、受け入れないかを決めるときに、だれの意見を参考として聞いてみたいと思いますか。
次の5つについて、第1位から第5位までの順位をつけて□内に番号を記入してください。
- 問：それでは、あなたは、「住まいの近くに作ってもらいたくない」ような施設を受け入れるか、受け入れないかを決めるときに、どのメディアから参考になる情報を得たいと思いますか。
次の6つについて、第1位から第6位までの順位をつけて□内に番号を記入してください。

図10 「住まいの近くに作ってもらいたくない」ような施設の建設計画時における人や組織、メディアの評価 (東京/1998.11)

の推進廃止の態度には大きな変化はなかったことである。もう一つは、原子力発電の推進廃止の態度に影響を与える要因として、前回調査までは「有用感」の有無が最も大きな要因であったが、今回の調査では、東京では「制御可能感」が推進廃止の態度決定に最も大きな要因となり、「有用感」が首位ではなくなっていたことである。

原子力発電に関するアンケート調査を、10数年間にわたり実施した結果として得られた知見の一つは、公衆が概して原子力発電を「有用」と思い、同時に「不安」と思う傾向は、

時期により多少の増減はあるものの、昔から変わらない評価であるというものである。今までは、この「有用」との評価が原子力発電の推進廃止の態度に最も大きな影響を与える要因として働き、「不安」はあるものの、大勢としては公衆は原子力発電に推進の態度であった。ただし、この「有用」との評価は原子力発電の推進廃止の態度に影響を与える要因として、徐々にその影響力が下がってきており、その分「安心感」「制御可能感」が大きな要因となってきている。今後この傾向が進み、原子力発電の有用性より危険性を重視すると

いう、原子力発電の推進廃止の態度への影響力の逆転する時期が来ることも想定される。

公衆が原子力発電を「不安」と思う傾向は、これからも短期的には変わることはないと思われるが、情報公開への欲求や事故及び事故時にみられる対応の不手際等により原子力関係者への「信頼」が揺らぎ、その結果、徐々に「安心感」「制御可能感」が原子力発電の推進廃止の態度に影響を与える要因として大きくなってきていると思われる。原子力発電の広報は、有用性の認知を図ることは当然として、その目的は（短期的にはなくならないであろう）「不安感」をなくすことではなく、情報公開のやり方や事故時の対応を適切にする等により、原子力関係者への「信頼」を得ることにあると思われる。「信頼」があれば、たとえ「不安感」があっても、それは原子力発電の推進廃止の態度に影響を与える要因として大きいものにはならないのではないだろうか。

6. 情報提供の考察

アンケートの分析でも述べたように、積極的に効果的な情報提供の重要性は今後ますます大きくなるものと思われる。この情報提供の方法について、一連のアンケート結果と識者の意見を統合し、その提供にあたって留意すべき点を考察してきたが⁹⁾、そのまとめを下記に示す。参考になれば幸いである。

まず、原子力発電が社会的に評価され受け入れられるには、公衆から常に民主的と受け止められることが前提になり、そのために情報公開は不可欠であり積極的な情報提供が必

要であることを認識する必要がある。また、この情報提供の目的は公衆に原子力発電のことを理解してもらうことではなく、関係者に対する信頼を得ることにあることを強調したい。

ただし、情報はただ出すだけでは不十分で、公衆に十分な情報公開をしていると認められることが重要であり、そのための適切な情報提供を行う必要がある。この適切な情報提供を行う上で、伝え方の技術的な面では、例えば下記のようなことを考慮すべきと思われる。

- 対人情報伝達や双方向コミュニケーションの重視。
- 分かりやすく簡略化された情報&オリジナル生データの提供。
- 自分の意見を全面肯定したり、反対派の意見を全面否定した表現を用いない。

また、伝え方の内容的な面では、例えば下記のようなことを考慮すべきと思われる。

- 公衆は環境問題に高い関心を持っており、新・省エネと原子力発電は常にセットで考慮する。
- 原子力発電を特別のものとしてせず、社会の中の1事象として考える。
- 有用性を伝えるべき。ただし、豊かな生活の増進や科学技術の進歩等に対する無条件の賛成はないとの考えを前提にする。

また、情報提供に最も大きな影響力を持つマスコミに対しては、一つ一つに間違いを正す努力は無論必要ではあるが、元来マスコミは誤報・無理解等はつきものであり、それらを完全になくすことを願うのは無理である。それよりも、その性癖を考慮した対処が必要

である。さらに、情報の受け手である公衆に対しても、さまざまな認識・感性等を把握する必要がある。例えば、公衆は原子力発電情報をインターネットで入手したいと思っているのか、講演会・説明会で入手したいと思っているのか等の情報を知らずして効果的な情報伝達はできない。

これまで提案してきたような原子力発電の情報提供を、日頃情報提供以外の仕事を行っている者が効果的に行うことは、その原則を理解していても無理がある。そのためには、情報提供の専門家を育成し、大きな権限とその活躍の場を与える必要がある。

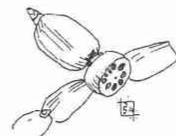
さらに、近年急速に普及しているインターネット（特にホームページ）は、今後その影響力は大きくなっていくものと予想され、これを効果的に利用することも有用と思われる。計算機としての機能を大いに利用し、欲しい情報をいつでも、どこでも、素早く提供できる実用性の高いホームページが求められる。この「欲しい情報をいつでも、どこでも、素早く提供」という性質が最も生かされるのは事故等の緊急時であろう。核燃料サイクル開発機構ではモニタリング・ステーション等

のリアルタイムデータをインターネットで公開しているが、JCO事故では数十万件のアクセスがあったそうである。この情報提供により無用な不安を打ち消す効果もあったと思われる。

以上、情報提供について考察してきたが、最も効果的で重要な情報は事故やトラブルを起こさないことであり、これに勝るものはない。また、不幸にしてもしも事故やトラブルが起きた場合は、情報提供を適切に行い、くれぐれも「事故隠し、情報隠し」ととられることの無いように努める必要があることは論を待たない。

参考文献

- (1) 原子力広報評価検討会、「原子力広報評価検討会中間報告」(1999)
- (2) 下岡浩、『原子力発電に対する公衆の態度決定構造』「原子力学会誌」Vol. 35, No. 2(1993)
- (3) “Nuclear Power at the Crossroads: Challenges and Prospects for the Twenty-First Century”, ICEED (1994)
- (4) エネルギー総合工学研究所、『エネルギー情報提供のための手法検討報告書(2)』(1999)



〔技術解説〕

クリーンエネルギー自動車レポート (第8報)

—ハイブリッド自動車の新展開—

蓮池 宏 (財)エネルギー総合工学研究所
プロジェクト試験研究部 主管研究員



1. はじめに

本レポートの第3報(1997年4月)でハイブリッド自動車を取り上げた。その後、1997年12月に世界初の量産ハイブリッド車トヨタ・プリウスが発売されたが、早いものでそれから3年が経過した。この間、プリウスは順調に販売台数を伸ばし、2000年12月には累計販売台数が5万台に達した¹⁾。また、トヨタに続いて本田が1999年11月にインサイトを、日産が2000年4月にティーノ・ハイブリッドを発売した。

ただ、プリウス登場の際のインパクトが非常に大きかったため、その後のハイブリッド自動車の開発機運は、過熱気味の燃料電池自動車フィーバーの陰に隠れて、ややトーンダウンしたかのようにも映る。

しかし最近1年間で、ハイブリッド自動車の開発に関して次々と新しい、そして重要な動きが出てきている。本稿では、そうしたハイブリッド自動車の新しい展開を展望してみたい。

2. 三者(社,車)三様のハイブリッド乗用車

まず、トヨタ、本田、日産から発売された

ハイブリッド乗用車の位置づけを整理してみたい。各車の概要を表1に示した。個々の技術内容については多くの解説記事があるのでここでは触れないが、同じハイブリッド乗用車でもその中身はいろいろな面で異なっており、そこから3社の考え方を伺い知ることができる。

(1) プリウス

プリウスの価値は、量産型ハイブリッド車として「世界初」という点と、販売台数「世界一」という点に集約される。新しいコンセ

表1 プリウス、インサイト、ティーノ・ハイブリッドの比較

	プリウス	インサイト	ティーノ
発売	97年12月	99年11月	00年4月
重量 kg	1,220	720	1,500
定員 人	5	2	5
燃費 km/L	28*1	35	23
車体	専用	専用	既存
形式	シリーズ・パラレル	パラレル	パラレル
エンジン	高膨張比	希薄燃焼	高膨張比
変速機	遊星ギヤ式無段	マニュアル5段*2	ベルト式無段
電池	ニッケル水素	ニッケル水素	リチウムイオン
価格 万円	215	210	315

*1: モデルチェンジ後の新型プリウスは29km/L

*2: 無段変速機仕様車もあり、燃費は33km/L

ブトの商品が発表されると、すぐに他のメーカーがより優秀な同様の商品を開発するということがよくあるが、ハイブリッド車の場合には性能・コストなどを総合的にみて、プリウスを凌ぐハイブリッド車は、3年を経過しても未だに現れていないと言える。「21世紀の自動車はどうあるべきかを示す」という当時の豊田英二名誉会長の肝いりで開発したと言われる車だけに、開発にも生産にもPRにも他社とは力のかけ方（投資額）が違うという感がある。

(2) インサイト

本田のインサイトは、プリウスから約2年遅れて商品化された。2番手として登場するに当たって本田が目指したのは「低燃費世界一」という点であった。35km/Lは100kmを2.9Lのガソリンで走る計算になり、3リッターカーが実現したことになる。その超低燃費の達成のために、2人乗りの小型車が選択され、車体の軽量化や空気抵抗の低減も徹底された。ただし軽い車が燃費が良いのは当然であり、これはハイブリッド化の効果とは別ものである。月産300台という計画からもわかるように、インサイトは広範な普及を目指した車ではなく、存在をアピールすることを第一の目的としたものと考えられる。その結果は、米国環境庁とエネルギー省による車種別の燃費調査において、インサイトが2年連続で首位を獲得し³⁾、米国環境庁からは「地球気候保全賞」を受賞、ドイツ運輸省からはディーゼル車を含めてCO₂排出量が最も少ない車として認定されるなど、狙いは成功したと言えよう。

(3) ティーノ・ハイブリッド

日産のティーノ・ハイブリッドは、インサイトからさらに半年後の発売となった。本来はもっと早い時期の発売予定だったものが一時は発売を断念されながら、技術水準の維持向上という観点から、台数限定で販売されることになったという。予定の100台はあっという間に売れたようである。

プリウスやインサイトと比較してのティーノの特徴は、同じ重量のエンジン単独車を基準とした場合の燃費向上率が優れていることである（図1）。この特徴を達成するために、無段変速機（CVT）、リチウムイオン電池など、効率向上に有効な技術が採用されている。燃料消費を絶対量としてどれだけ減らせるかという観点からは、ティーノ・ハイブリッドのように、車両重量が大きな車種をターゲットにして、高い燃費向上率を達成することが重要である。その意味でこの車が目指した方向は正道であったと思うが、生産台数が限定されたことが残念であった。

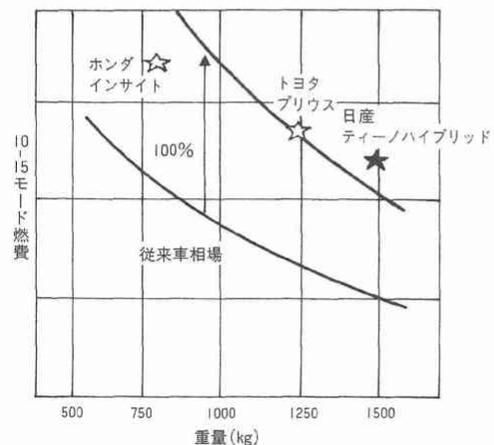


図1 ハイブリッド乗用車の燃費向上率⁴⁾

出所：北田，パワーエレクトロニクス研究会論文誌 Vol. 25, No. 2, 2000.

3. 本田，トヨタの次期ハイブリッド車

昨年(2000年)半ばに、本田とトヨタが2001年にハイブリッド車の第2弾を発売する計画であることが報じられた^{5,6)}。本田はシビックをベースとしたハイブリッド車(以降、シビックHVと略す)を、トヨタはエスティマをベースとしたハイブリッド車(以降、エスティマHVと略す)を予定しているとのことである。プリウスやインサイトのようなハイブリッド専用モデルではなく、既存ガソリン車、それも両社の主力モデルにハイブリッド仕様車を投入する点が注目される。ティーノ・ハイブリッドも既存車をベースとしていたが、生産台数が少なく市場がどの程度受け入れたかは判断できなかった。

ハイブリッド専用モデルの場合は、特別装備を付けることなどでハイブリッド以外の部分でも付加価値を高めることができた。また、ハイブリッド車であることが一目でわかる(他人から分かってもらえる)ことが何よりのメリットであった。こうした点がプリウスやインサイトの販売増に少なからず貢献していると考えられる。

それに対しシビックHVやエスティマHVの場合は、専用モデルで付加できる α がないので、エンジン単独仕様車と比較しての車両価格の増加分と燃費節減分の比較が、購入を考えるとときの判断材料として一層重要になってくるであろう。また、ハイブリッド仕様車だけ車体を軽量化して燃費向上を図るということはできないので、純粋にハイブリッド化の効果だけが燃費に現れてくる。

ハイブリッド車が広く普及するためには、いずれはそうした状況に入っていかなければ

ならない。その意味で、シビックHVとエスティマHVの発売によってハイブリッド車は新しい段階を迎えることになる。

本田、トヨタの両社は、第2弾に続くハイブリッド車の構想も発表している⁵⁻⁷⁾。本田はシビックに続いてアコードの新モデルや新型リッターカーにもハイブリッド仕様車を設定する予定で、2001年度の総販売計画台数275万台のうち5万台以上をハイブリッド車にする計画という。トヨタはさらに踏み込んで、首脳が「近い将来、全てのクラスでハイブリッド車を投入できる」「将来は、ハイブリッド車の比率を販売全体の30~50%に引き上げたい」と表明している。

まずシビックHVとエスティマHVがどのような実績を残せるかが、今後ハイブリッド自動車が本格的普及に向かうかどうかを占う試金石となる。

4. 商用車への適用

2000年10月に第34回東京モーターショーが開催された。東京モーターショーは1999年から毎年1回の開催となり、内容は乗用車と商用車(トラック、バス等)とを交互に行うこととなった。2000年は商用車の年で、いくつかのメーカーからバスやトラックのハイブリッド車が出品された。表2に出品されたハイブリッド自動車の概要を示す。

商用車にハイブリッドシステムを適用する場合、乗用車と異なる点は次のとおりである。

- ① 走行距離が長いので、燃費向上による燃料費節減効果が大きい。
- ② 1車種当たりの販売台数が少ないため、量産効果が出にくい。

表 2 東京モーターショーに出品されたハイブリッド自動車

メーカー		日産ディーゼル		三菱	日野	ダイハツ	トヨタ
車種		路線バス	中型トラック	路線バス	トラック	軽バン	マイクロバス
乗車定員/積載量		65人	3.8トン	57人	2.0トン	0.2トン	25人
車両総重量		約15トン	約8.6トン	14トン	ベース車+0.2t	0.99トン	5.3トン
ハイブリッド形式		シリーズ	パラレル	シリーズ	シリーズ/パラレル	パラレル	シリーズ
エンジン	サイクル	ミラー	オットー	ディーゼル	ディーゼル	オットー	オットー
	排気量 cc	4,617	6,925	8,201	3,839	659	1,496
	燃料	CNG	CNG	軽油	軽油	ガソリン	ガソリン
	最高出力 kW	81	154	165	96	31	36
発電機	種類	PM同期	—	PM同期	PM同期	—	三相交流
	最高出力 kW	75	—	100	72	—	25
モータ	種類	PM同期	PM同期	誘導	PM同期	PM同期	誘導
	最高出力 kW	75×2	50	150×2	72	10	70
電池	種類	キャパシタ	キャパシタ	Liイオン	ニッケル水素	ニッケル水素	鉛
	メーカー	自社	自社	日本電池	パナソニックEV	パナソニックEV	新神戸電機
	最高出力 kW	—	—	340/145	—	—	—
	容量 kWh	1.21	0.4	21	1.872	0.936	26.4
	電圧 V	378	350	648	288	144	480
	重量 kg	200	100	300	42	21	504
燃費向上	倍率	1.7~1.8	1.5	1.67	1.5	1.3	1.1
	比較対象	ディーゼル車	CNG車	ディーゼル車	ディーゼル車	ガソリン車	ディーゼル車
市販予定		未定	2001年	2003年	2003年	未定	市販中

③ 経済性や運転性が厳しく評価され、外観や目新しさはセールスポイントにならない。

④ 走行距離が長いので、各コンポーネントの耐久性や信頼性への要求が厳しい。

これまで、商用車の分野で実用化されたハイブリッド車の例としては、日野のHIMRバス、HIMRトラック、トヨタのコースターハイブリッドがあるが、普及台数はいずれも数十~百数十台程度にとどまっている。普及が進まないのは、車両価格が高いことが第一の原因であるが、技術的にも燃費の向上率が1.1~1.2倍程度で燃料節約の効果があまり大きくない、鉛電池の耐久性が十分でなく2~3年ごとに交換が必要、といった課題があった。

今回のモーターショーに出品されたハイブリッド車は、蓄電装置にハイブリッド乗用車で実績のあるニッケル水素電池やリチウムイオン電池、そして最近の技術進歩が著しい電気二重層キャパシタを用い、燃費向上率は1.3倍~1.8倍と大きくなっている(トヨタのマイクロバスは除く)。

日産ディーゼル、三菱、日野の各社は、近い将来の商品化を表明しており、商用車部門でのハイブリッド車の開発も活発化してくると予想される。先に述べたように、商用車では技術の中身がよりシビアに評価される。この分野でハイブリッド車が普及できたならば、その技術が本物であることの証明となろう。

5. 蓄電装置の開発競争

近年、電子情報機器の分野で「デファクトスタンダード」という言葉がしばしば登場し、自動車の分野でもデファクトスタンダードの獲得競争が注目されている。これは基本的に完成車メーカー間ではなく、部品メーカー間の競争である。

ハイブリッド自動車における最も重要なデファクトスタンダードの対象として、蓄電装置を挙げることができる。その競争はこれまでのところ、プリウスとインサイトに使われたパナソニックEVエナジー社のニッケル水素電池が他の技術を大きく引き離してリードしているが、新しい技術の開発も続けられている。

(1) 電気二重層キャパシタ

最近の技術的トピックスとして最も注目されるのが、電気二重層キャパシタ（以下キャパシタと略す）である。

日産ディーゼルがNEDOの高効率クリーンエネルギー自動車開発プロジェクトの中で1999年度にキャパシタを用いた路線バスを開発した⁹⁾。また2000年6月には、2001年中にキャパシタを搭載したハイブリッド式トラック

を商品化すると発表した⁹⁾。開発されたバスとトラックは東京モーターショーにも出品された（表2）。

本田も2000年6月に、2001年に発売する予定のシビックHVにキャパシタを使うと発表している¹⁰⁾（追補参照）。米国での実証試験用に開発した燃料電池自動車にもキャパシタを使っており、その開発に本格的に取り組んでいることを伺わせる。

さらに、2000年10月には、京セラ、三井物産、日本電子、パワーシステムの4社がキャパシタを用いたハイブリッド自動車用蓄電装置の事業化で業務提携を発表した¹¹⁾。

ハイブリッド自動車へのキャパシタの適用は特に新しいものではない。表3に示すように、過去に何回か試みられてきた。トヨタのプリウスも本田のインサイトも、東京モーターショーにコンセプトカーとして最初に出品された時には、蓄電装置としてキャパシタを使用していた。しかし、商品化の段階でキャパシタからニッケル水素電池へ変更されたという経緯がある。富士重工もキャパシタを搭載したコンセプトカーを2回出品したが、こちらも1999年にはニッケル水素電池に変更されている。

これらの状況から、ハイブリッド車用蓄電

表3 東京モーターショーに出品されたキャパシタ搭載のハイブリッド車

	1995	1997	1999	2000	備考
トヨタ	プリウス	—	—	—	プリウスはニッケル水素電池に変更して1997年に商品化
富士重工	エルキャバ	エルテン	—	—	1999年に出品したエルテンはニッケル水素電池を使用
本田	—	JVX	—	—	JVXはニッケル水素電池に変更してインサイトとして1999年に商品化
日産ディーゼル	—	—	—	3.5tトラック 路線バス	トラックは2001年に商品化予定

装置としてのニッケル水素電池とキャパシタとの競争は勝負あった（ニッケル水素電池の勝ち）と見る向きもあった。

しかしながら、ここへきて前述のようにキャパシタの実用化の計画が相次いで発表されている。この背景としては、技術的には、キャパシタの問題点であったエネルギー密度が向上したことが最も重要なポイントである。表3のプリウスやエルキャパに搭載されていたキャパシタのエネルギー密度は2 Wh/kg程度であったが、日産ディーゼルの路線バスに使われたキャパシタは6 Wh/kgまで向上している。それでもニッケル水素電池と比べると1桁近く小さいが、劣化防止のために充放電の範囲を限定する必要がないこと、高出力で放電する際の損失が少ないこと、損失（＝発熱）が少ないため冷却装置が不要なことなどを加味すると、実質的に利用できる容量は遜色ないレベルに達してきている。

コストの面からは、ニッケル水素電池の場合は、AV機器、電動工具、電動アシスト自転車などの民生分野で多くの生産実績があり、ハイブリッド車用に実用化するに当たって、製造技術の転用や原料の共通化が可能であった。それに対しキャパシタは、既存用途であるメモリバックアップ用等とハイブリッド車用とでは、製造技術も需要規模も要求コストもギャップが大きい。ハイブリッド車用に要求されるコスト低減を達成するためには生産規模を一挙に拡大させる必要があり、リスクは大きい。それでも、ハイブリッド車の市場規模がある程度見通せるようになってきたことで、キャパシタへの投資の動きが出てきたものと思われる。

(2) ニッケル水素電池

ニッケル水素電池は、プリウスとインサイトで実績を伸ばすとともに、性能改善も進められている。出力向上、容量増、形状変更等により全体としてコンパクト化を達成した改良タイプが開発され、マイナーチェンジした新型プリウス（2000年5月発売）に搭載されている¹²⁾。

改良されたニッケル水素電池は、日野、ダイハツといったトヨタグループのメーカーのハイブリッド車にも採用されている（表2）。ダイハツの軽バンはプリウスと同じ電池を1セット、日野の2トン積みトラックは2セット搭載しており、これらの車が商品化されれば一層の量産効果が狙える。

このように、販売実績の蓄積→コスト低減→需要増→性能改善→適用車種拡大→一層の需要増、という好循環が形成されていくのが、デファクトスタンダード確立の効果であり狙いである。

(3) リチウムイオン電池

リチウムイオン電池は日産ティーノ・ハイブリッドに使われた。モーターショー出品車の中では三菱が路線バスに採用している。

リチウムイオン電池は、性能的には出力密度、エネルギー密度、充放電効率のいずれの面でもニッケル水素電池より優れている。課題はコスト、耐久性、安全性と思われる。携帯電話用など民生分野向けには膨大な量の生産が行われており、多数のメーカーが参入して性能向上とコスト低減にしのぎを削っている。今後ハイブリッド車用に適用されるポテンシャルは十分にあると考えられる。

ただし、日産のティーノ・ハイブリッド、

三菱の路線バスとも、本格的実用化のきっかけとしては力不足であり、現時点ではニッケル水素、キャパシタに続く三番手、という印象は否めない。

(4) キーテクノロジーとしての蓄電装置

日本の自動車メーカーがハイブリッド車の商品化で欧米メーカーに先行できたのは、国内電池メーカーの存在が大きいと筆者は見ている（追補参照）。

民生用ニッケル水素電池の生産は日本メーカーが大半を占めており、複数のメーカーが激しい競争を行っている。ハイブリッド車用電池の基礎技術と生産技術がそこで蓄積されてきたのである。さらに言うなら、安定した品質の量産を可能にした製造装置メーカーの存在がそれを支えている。

リチウムイオン電池の生産も日本メーカーの独壇場であり、キャパシタも原理の発見と最初の試作は欧米でなされたが、性能の改善と製造技術の確立は日本が先行している。したがって、キャパシタやリチウムイオン電池がハイブリッド車用に実用化される場合でも、ニッケル水素と同様に日本の自動車メーカーがリードすることになると予想される。

6. 新たな課題——カタログ燃費と実使用燃費

ハイブリッド車登場の副産物として、「カタログ燃費（10.15モード走行で計測された燃費）」と「実使用燃費」の問題がクローズアップされてきた。

その発端は「プリウスの‘燃費2倍’は本当か」という興味からであった。プリウスのユ

ーザーによるWEBサイトが立ち上げられ、実走行でのプリウスの燃費が報告された。また、計測機器を取付けて実走行における燃料消費を詳細に分析した論文も報告された¹³⁾。

カタログ燃費と実使用燃費が異なるのは、プリウスだけの問題ではない。と言うより、これは今後の自動車用エネルギー消費の抑制を図る上で、非常に重大な問題を含んでいる。実使用燃費がカタログ燃費より何割か悪くなるのは言わば常識であるが、日本では近年、両者の差が拡大する傾向にあるのである。その原因については、回帰分析などによる要因の研究例があるが、十分な説明はなされていない。筆者は、エアコン使用率の増大と使用1回当たりの走行距離の減少が主要因と見ているが、検証データがあるわけではない。

日本では1999年に2005～2010年に向けた新しい燃費の規制値が定められたが、カタログ燃費の向上だけを進めても、期待したほどの効果は上がらない可能性が高い。規定モード走行でのエネルギー消費の削減だけを追求していくと、カタログ燃費と実使用燃費との差は一層拡大することになるからだ。ハイブリッド車の場合もこの罠にはまる恐れがある。特にハイブリッド車は、走行時の燃料消費が大幅に減っているだけに、暖機やエアコン使用による燃費低下が、見掛け上大きく現れやすい。

政府の総合エネルギー調査会省エネルギー部会における検討でも、カタログ燃費と実使用燃費とを区別した議論が行われているが、実使用燃費を改善させる具体的な対策が行われなければ、自動車のエネルギー消費削減はおぼつかない。最も効果的な対策は、コールドスタートからの燃費や、補機を駆動させた

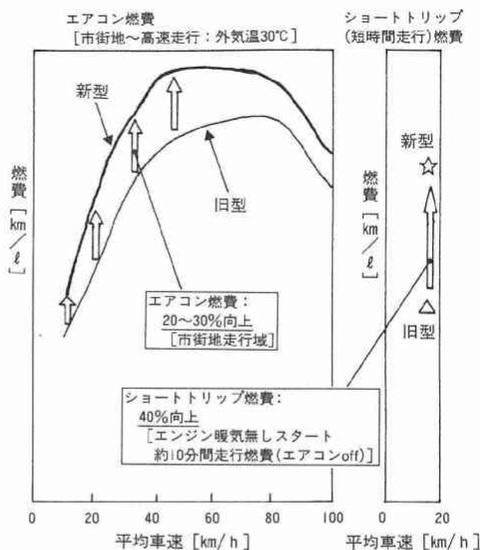


図 2 新型プリウスにおけるエアコン使用・短時間走行時の燃費向上¹²⁾

出所：大井，小木曾，TOYOTA，Technical Review，Vol. 50，No. 1，2000.

状態での燃費など，実使用に即した燃費測定基準を定め，それを重視する方針を打ち出すことであろう。

メーカー側ではこの問題に気が付いているようで，既に対応を始めている。例えば，プリウスのモデルチェンジでは，エアコン使用時や短時間走行時の燃費にも気を配るなど，カタログ燃費以上に実使用燃費の向上が図られている（図 2）¹²⁾。

7. ま と め

ハイブリッド自動車の普及は今年（2001年），新しい段階に突入する。助走期から離陸期への移行である。離陸に成功すれば，2010年頃までに自動車全体の中でハイブリッド車が主流になる途も開けてくる。その意味では，

燃料電池自動車の開発競争よりも（エンジン・電池の）ハイブリッド自動車の開発競争の方が重要かも知れない。現在，日本のメーカーはその競争の先頭に立っており，離陸に成功すれば，さらに優位な地位を築くことになる。

筆者は，期待を含めて，離陸成功の確率は高いと見ている。

参 考 文 献

- 1) 日経産業新聞，2000年12月14日。
- 2) 御堀，エコフレンドリーカー，山海堂，2000。
- 3) 日本工業新聞，2000年10月4日。
- 4) 北田，パワーエレクトロニクス研究会論文誌，Vol.25，No.2，2000。
- 5) 日本経済新聞，2000年6月13日。
- 6) 日本経済新聞，2000年9月28日。
- 7) 日本経済新聞，2000年9月30日。
- 8) 佐々木ほか，自動車技術会2000年春季大会学術講演会前刷集，No. 2，講演番号8，2000。
- 9) 日経産業新聞，2000年6月22日。
- 10) 日刊工業新聞，2000年9月28日。
- 11) 日刊工業新聞，2000年10月31日。
- 12) 大井，小木曾，TOYOTA Technical Review，Vol.50，No.1，2000。
- 13) 石谷ほか，エネルギー経済，第25巻，第7号，1999。

(追 補)

2001年が明けて早々，新しいニュースが相次いだ。

まず，本田がシビックHVに搭載する蓄電装置をキャパシタからニッケル水素電池へ変更することが報じられた（日刊自動車新聞，2001年1月6日）。キャパシタのエネルギー容量が小さく，停車中の電力供給のためにエンジンのアイドリングを止めることができない

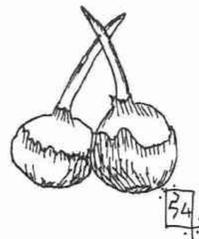
ことが問題になったようである。ただし、この記事は本田からの正式発表ではないようなので、商品化までには、まだ曲折があるかもしれない。

一方で、いすゞが小型トラックのハイブリッド車の実用化を計画しており、これにキャパシタを用いる予定との情報もある（日刊自動車新聞，2001年1月9日）。

また、三洋電機が米国フォード社にハイブリッド車用ニッケル水素電池を供給することを発表した（日経産業新聞，2001年1月9日）。

このように欧米の自動車メーカーも、日本の電池メーカーからの供給を受けることでハイブリッド自動車の生産に参入してくるであろう。それでも国内に電池メーカーと電池製造装置メーカーを有していることは、ハイブリッド自動車の開発と性能向上を進めていく上で日本の大きな強みであると考えられる。

蓄電装置を巡る開発競争は今後も続くと考えられるが、こうした競争によってハイブリッド自動車の技術は一層強化され、洗練されたものになっていくであろう。



研究所のうごき

(平成12年10月1日～12月31日)

◇ 第6回賛助会員会議

日時：11月17日(金) 15:00～18:00
場所：経団連会館(9階) 901・902号室
議事次第：

1. 平成11年度事業報告および収支決算
2. 平成12年度事業計画および収支予算
3. 講演
「原子力開発利用の当面する課題」
(東京大学大学院工学系研究科 教授 近藤 駿介氏)

◇ 月例研究会

第184回月例研究会

日時：10月27日(金) 14:00～16:00
場所：航空会館7階 702・703会議室
テーマ：

1. 地球温暖化問題と国際的取組みに関する最近の動向
(財)電力中央研究所 企画部 上席研究員
(研究参事) 新田義孝氏
2. PFI事業の実際と課題
(電源開発(株) 新事業開発部 副部長
坂梨義彦氏)

第185回月例研究会

日時：11月24日(金) 14:00～16:00
場所：航空会館7階 702・703会議室
テーマ：

1. 高レベル放射性廃棄物処分事業の概要
(原子力発電環境整備機構 技術部長 北山一美氏)
2. 革新型炉としての高温ガス炉の特長と国際的な取り組み
(日本原子力研究所 核熱利用研究部 部長 塩沢周策氏)

第186回月例研究会

日時：12月22日(金) 14:00～16:00
場所：航空会館 7階 702・703会議室

テーマ：

1. 排出権取引一ハグ会議の結果と今後のビジネスの視点
(財)地球環境戦略研究機関 上席研究員/
(財)地球産業文化研究所 主任研究員 松尾直樹氏)
2. 環境問題の現状と企業への期待
(東京大学 国際・産学共同研究センター 教授 山本良一氏)

◇ 主なできごと

- 10月6日(金)・第1回大気改善のための自動車及び燃料技術開発に関する調査委員会
11日(水)・第5回 WE-NET 研究調整会議
・第2回廃棄物ガス化溶融発電技術開発評価委員会
13日(金)・第3回高温ガス前処理技術調査委員会
16日(月)・第2回沿岸地域再生エネルギー研究委員会
20日(金)・第2回ガスハイドレート技術の産業利用・社会システム化に関する研究開発委員会
30日(月)・第2回電力技術懇談会
11月7日(火)・第4回原子力発電技術開発の方向性に関する調査検討委員会
8日(水)・第1回民生用電力需要動向分析調査委員会
15日(水)・第1回電力需要の想定と実績に関する分析調査委員会
・第6回 WE-NET 研究調整会議
20日(月)・第3回高温ガス炉プラント研究会
30日(木)・第1回バイオマスエネルギー技術調査委員会
12月1日(金)・第2回実用発電用原子炉廃炉技術調査委員会
4日(月)・第1回 WE-NET システム評価委員会
6日(水)・第2回原子力の外部コストの考え方に関するWG
7日(木)・第2回原子炉総合数値解析システム実用化検討委員会
8日(金)・第2回 WE-NET 安全WG
・第3回サハリンパイプラインPS

- DC評価委員会
- 12月11日(月)・第4回高温ガス前処理技術調査委員会
- ・第3回エネルギー経済環境予測検討委員会
 - ・第3回 WE-NET 革新WG
- 13日(水)・第7回 WE-NET 研究調整会議
- 14日(木)・第2回アルコール系燃料に関する

- 調査委員会
- ・第3回電力技術懇談会
- 18日(月)・第2回高速増殖炉利用システム開発調査検討委員会
- 27日(水)・第1回マイクロコージェネレーション検討委員会
- ・第1回エネルギーに関する俯瞰的「知」の創出研究会

編集後記

新しい世紀と新千年紀が幕開けしました。通常の世紀の変わり目にも会えない人も多い中で、千年紀の変わり目というこの機会に出会えることを先ずは素直に喜びたいと思います。

しかし、現実の私どもの周囲を見ますと素直に喜べない状況が余りにも多いようです。将来の希望や向上心を欠く青少年、長寿とはいえ寝たきりになった高齢者、早い情報化の波に乗り切れないでもがく中高年者などに見られる個人的・社会的問題から、さらに経済の停滞、環境・エネルギー問題、少子高齢化など国全体の問題もあります。そのような問題に加え20世紀時代の負の遺産ともいわれる地球環境問題、人口・食糧問題など人類存続に係わるグローバル問題が挙げられています。

そのような中でとりわけわが国技術陣の総力を挙げて現在取り組むべき喫緊の課題として循環型社会の構築が挙げられています。それは、日本特有の状況もあり資源の大量消費、大量生産、そして大量廃棄の構造によって発展してきた経済社会の歪が顕在化し、今やごみの処分場不足、不法投棄の横行、環境汚染物質の増加、もっと根本的には資源そのものの枯渇化等により従来のような生産活動が制約される状態となってきたからであります。このため2000年度は環境元年と称されるように主要環境関連法が制定あるいは実施される年となりました。

本号はそのような背景を踏まえ「循環型社会構築」のテーマを座談会でとりあげま

した。出席者は、同問題推進の中心的、あるいは専門家の方々とあり、同問題の本質、内容、背景等についてそれぞれの立場から存分に解説していただいたと思います。

さて、最近以上のグローバルな諸問題に対し単に科学技術面のみでなく、経済、社会システム、人間性への配慮、さらに空間的、時間軸も考慮した「あらゆる角度からの検討」が必要との認識から、その検討方法自体を研究テーマ或いは学問の体系として扱うべきとする考えが注目されてきております。例えば、人間にとってのエネルギーの価値を自然科学のみならず人文・社会科学、さらに政策等の視点も踏まえ総合的に取り組む「エネルギー学」の提唱（日本学術会議、社会・産業・エネルギー研究連絡委員会報告『エネルギー学の確立を目指して』、平成12年6月26日他）、千年を一つのスパンとして地球全体としての再生可能性を追求する「千年持続学」の提唱（日本経済新聞、平成13年1月7日）、あるいは文部科学省が本年4月より発足させる「総合地球環境学研究所」のような具体的取組みの例などであります。またこれらの成果が日本発の地球再生への取り組みとして国際的な理解と協力へと発展することも考えられます。

この区切りの時、現代の人々が自信と希望を持ち、また後世の人々が先人の負の遺産に嘆くことなくむしろその配慮を感謝する日の到来を夢見つつ新年号をお届けいたします。

編集責任者 小川紀一郎 記

季報 エネルギー総合工学 第23巻第4号

平成13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

FAX (03) 3501-1735

http://www.iae.or.jp/

無断転載を禁じます。(印刷) 和光堂印刷株式会社