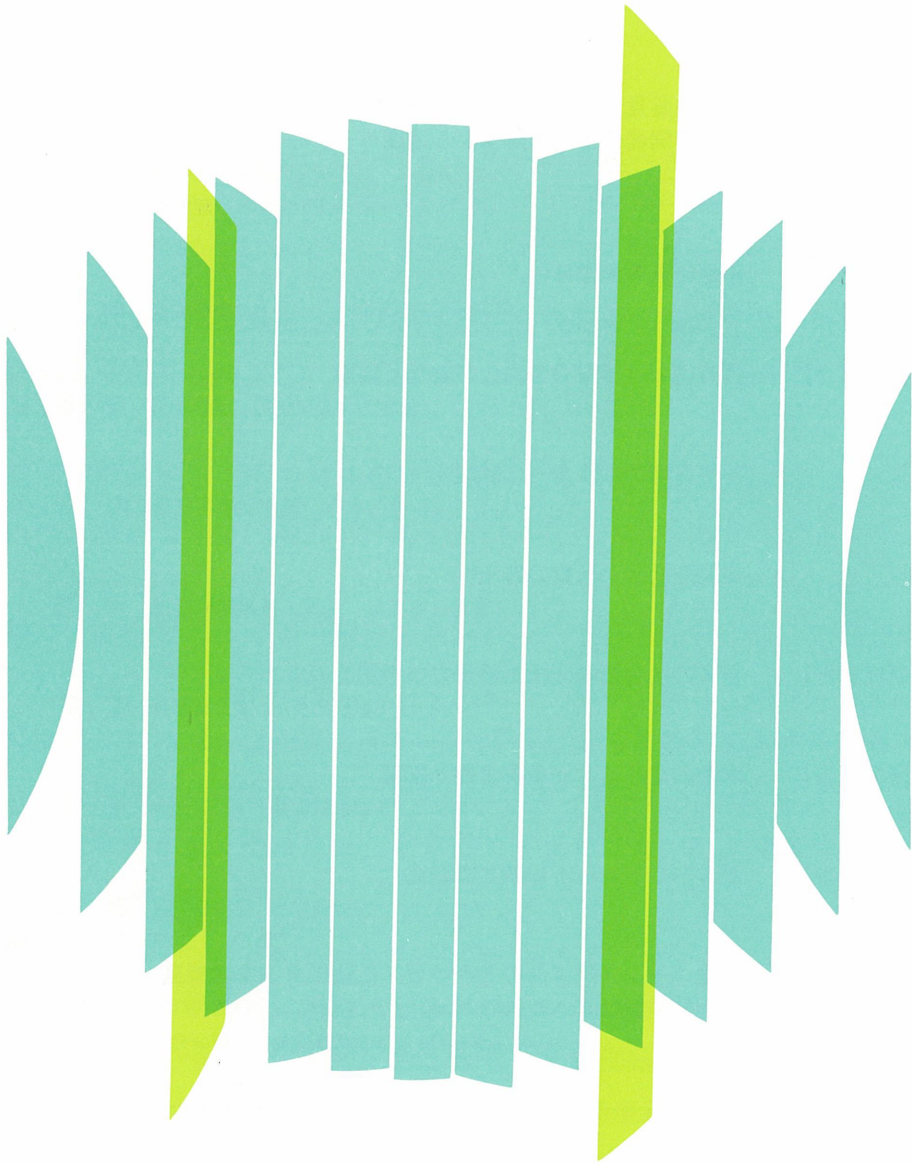


季報 エネルギー総合工学

Vol. 26 No. 4 2004. 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】	年頭所感	経済産業省 資源エネルギー庁長官 日 下 一 正 …1
【理事長対談】	人間から見たエネルギーと環境 —技術開発によって対立から協調へ—	独立行政法人 国立環境研究所 理事長 合 志 陽 一 (財)エネルギー総合工学研究所 理事長 秋 山 守 …5
【内外情勢紹介】	停電に見る米国事情	(社)海外電力調査会 ワシントン事務所長 飯 沼 芳 樹…22
【内外情勢紹介】	内外における電力自由化の動向と課題	(財)電力中央研究所 理事待遇 矢 島 正 之… 26
【寄稿】	再生可能エネルギーの課題	筑波大学 機能工学系教授 内 山 洋 司… 33
【寄稿】	循環型社会と産業の方向性	(株)三菱総合研究所 資源・循環研究部長 中 條 寛…43
【調査研究報告】	将来の社会情勢分析と原子力技術開発のロードマップ	プロジェクト試験研究部 主管研究員 菅 野 実… 52
【調査研究報告】	水素の普及における安全性と課題	プロジェクト試験研究部 主管研究員 佐 藤 保 和… 65
【調査研究報告】	ガスハイドレートに関する研究	プロジェクト試験研究部 主管研究員 奥 田 誠 …75
【調査研究報告】	高温コークス炉ガスのドライガス化法による水素製造 —小型装置による実験—	プロジェクト試験研究部 主管研究員 橋 本 孝 雄… 87
【研究所の動き】		96
【編集後記】		98

巻頭言

年 頭 所 感

経済産業省 資源エネルギー庁長官

日 下 一 正



平成16年の新春を迎え謹んでお慶び申し上げます。新たな1年の始まりに、資源エネルギー行政の指針について、私の所感を述べさせていただき、新年のご挨拶とさせていただきます。

わが国のエネルギー政策を取り巻く現状を俯瞰いたしますと、複雑かつ重要な課題を抱えております。2度にわたる石油危機以降、石油代替対策や省エネルギー対策等、エネルギー安定供給の確保に最優先で取り組んでまいりましたが、わが国のエネルギー自給率は約4%（原子力を含めると約20%）と、依然、諸外国と比べ海外依存度が格段に高い状況にあります。また、近年、地球温暖化対策が課題となっておりますが、わが国の二酸化炭素（CO₂）排出量の大部分をエネルギー起源のCO₂が占めていることから、地球環境問題への対策はエネルギー政策にとって不可避の課題となっております。加えて、経済のグローバル化が進展する中、経済発展の基盤であるエネルギーの一層の効率的供給を実現することが求められています。

こうした状況を重く受け止め、本年におきましても、引き続き問題の解決に取り組んでまいります。

具体的には、昨年10月に閣議決定されましたエネルギー基本計画においても示されている3つの基本方針、すなわち「安定供給の確保」、「環境への適合」、そしてこれらを十分に考慮した上での「市場原理の活用」に基づいて、以下のようなエネルギー政策を推進してまいります。

「安定供給の確保」については、新技術の導入や環境整備を通じて、世界最先端の省エネルギー社会の構築を目指す一方で、エネルギー供給源の多角化等を進めてまいります。

石油・天然ガス等については、石油・LPガス備蓄の着実な実施、産油国・産ガス国との関係強化等総合的な資源戦略の展開、石油産業の強靱な経営基盤の構築などを進めてまいります。また、鉱物資源についても中期的な対策として探鉱開発およびリサイクルを促進するとともに、短期的な供給障害への備えとして備蓄事業を行ってまいります。そして、今般の特殊法人改革の議論を踏まえ、石油公団および金属鉱業事業団の事業および組織形態について抜本的に見直し、引き続き石油・天然ガスおよび鉱物資源の安定的な供給の確保に必要な事業を実施すべく、本年2月末に石油天然ガス・金属鉱物資源機構を設立いたします。

また、1つのエネルギー源に過度に依存することなく、供給途絶リスクの小さいエネルギーを中心に、エネルギー源の多様化を図ってまいります。その一環として、エネルギー自給率向上の観点を踏まえて、原子力や新エネルギー等の開発・導入を進めます。

さらに、国内においては、十分な安全確保を前提に、需要に見合った信頼性の高い安定したエネルギー供給システムを着実に構築してまいります。特に昨夏の電力需給逼迫問題を踏まえ、電力の広域融通の体制整備、分散型エネルギーの導入促進、ピーク需要抑制のための対策などを検討してまいります。

次に「環境への適合」を目指して以下のような取組を行います。

エネルギー起源のCO₂排出を抑制し地球温暖化防止の実効を挙げるため、省エネルギー対策を推進してエネルギー消費量の抑制を図るなど、需要サイドの対策を積極的に推進してまいります。具体的には、近年、エネルギー需要の増加傾向が著しい民生・運輸部門を中心に、改正省エネルギー法に基づく業務部門におけるエネルギー管理、トップランナー制度やE S C O事業等を積極的に推進してまいります。

一方で、供給サイドの対策としては、CO₂を排出しない原子力や新エネルギーの利用を推進してまいります。原子力については、安定供給に資するためだけではなく、地球温暖化対策面での優れた特性を有するエネルギーであるため、安全確保を大前提に、核燃料サイクルを含め、原子力を基幹電源として推進してまいります。新エネルギーのうち燃料電池については、自動車を始めとして広範な分野における応用が期待されるクリーンエネルギーであり、2010年度の導入目標を、燃料電池自動車については約5万台、定置用燃料電池については約210万klと設定し、その実現に向けて関連施策を強力に進めてまいります。さらに、石油・石炭と比べてCO₂排出量の少ない天然ガス等のガス体エネルギーへ燃料転換を進めるとともに、石炭のクリーン化および高効率利用技術の開発、導入を進めてまいります。

最後に「市場原理の活用」については、わが国の実情に適合する形での市場原理の活用策を設計することが重要です。電気およびガスについては広く国民生活に不可欠な財であり、自由化を通じたより効率的な供給を実現すると同時に、安定供給の確保と環境への適合を前提に多様な要請をバランスよく達成することが必要と考えております。昨年の通常国会において、電気事業法、ガス事業法の改正を行ったところであり、それぞれ本年4月を目処に自由化範囲の拡大等を実施することとなっており、現在、詳細な制度設計について、電気事業分科会および都市熱エネルギー部会にて御審議をいただいております。検討を進めているところです。

なお、原子力発電によって生じる使用済燃料の再処理や放射性廃棄物の処理処分などのバックエンド事業については、これまでに講じてきた対策に加え、新しい市場制度の下、今後いかなる措置が必要になるかに関し、官民の役割分担の在り方、既存の制度との整合性等を整理した上で、本年末までに、経済的措置等の具体的な制度及び措置の在り方について検討を行い、必要な措置を講ずることとしています。

以上のように、エネルギー政策の基本方針に沿った取組を推進してまいりますが、それと同時に、エネルギー政策の中長期的な在り方についても再検討を進めていく所存です。

エネルギーを取り巻く環境は、中東などの国際情勢、産業構造や人口構造の変化、エネルギーの供給信頼性への関心の高まり、地球温暖化問題の動向等、大きな変化の中にあります。このような環境変化に柔軟に対応し、新たな課題を克服していくために、中長期的な政策の在り方を再検討すべき時期に至っていると考えます。このため、2030年までを見通した長期エネルギー需給見通しおよびエネルギー政策の見直しの検討を昨年12月に開始し、本年6月頃を目処に成果を得ることとしております。また、本年1月には産業構造審議会と総合資源エネルギー調査会の合同会議を設置して、エネルギー政策および環境政策のあり方について幅広い観点からご議論をしていただくことになっております。エネルギー政策は政府にとって重要な政策課題のひとつであり、経済と環境の両立に向けて全力を尽くしてまいり所存です。

以上、エネルギー政策について所感を述べさせていただきましたが、これらの政策の推進は、皆様の御協力によって初めて実現できるものです。

今後、ますます複雑で困難な問題に直面していくことが考えられますが、そのような状況の中で、エネルギー行政に対して、引き続き御理解と御協力をいただくとともに、忌憚の無い御意見をいただくことをお願いいたしまして、新年のご挨拶とさせていただきます。

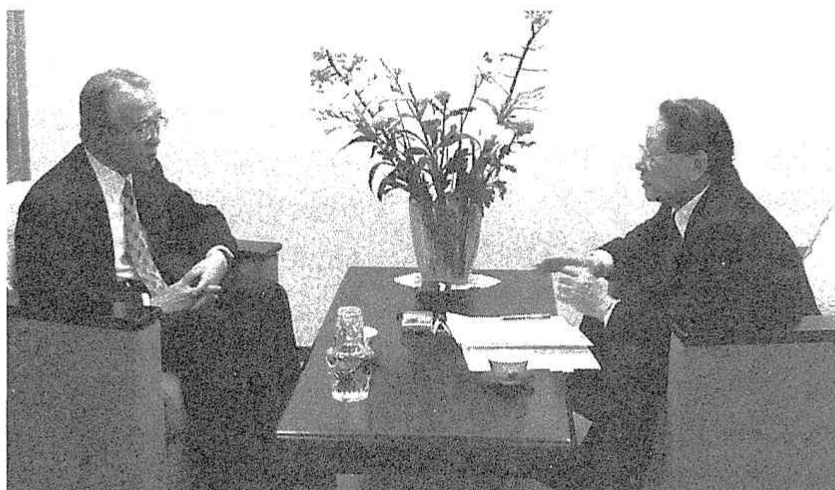
理事長対談

人間から見たエネルギーと環境

—技術開発によって対立から協調へ—

合 志 陽 一 (独立行政法人
国立環境研究所 理事長)

秋 山 守 (財エネルギー総合工学研究所
理事長)



はじめに

秋山 環境とエネルギーを取り巻く状況に緊迫感の見られる今日、かねて希望しておりました先生との対談を行う機会が得られ大変嬉しく思っています。まず、導入部分として先生の自己紹介をかねて

合志陽一氏 略歴

1937年(昭和12年)東京都生まれ。1961年東京大学工学部応用化学科卒業。1977年東京大学工学博士。1961年(株)東芝中央研究所入社。1974年(株)東芝総合研究所主任研究員。1977年東京大学工学部助教授。1981年東京大学工学部工業化学科(現応用化学科)教授。1998年環境庁国立環境研究所副所長を経て2001年4月から独立行政法人国立環境研究所理事長に就任。

東京大学工学部長、日本分光学会会長、日本分析化学会会長等を歴任。専門分野は工業分析化学。

国立環境研究所に勤められるようになったいきさつ等をお聞かせ願います。

合志 技術史、技術論のような工学一般について関心がありましたので、割に拡がりのある環境という分野が私の関心とフィットしましたので今の仕事をさせていただいています。大学卒業後は会社に就職し、16年ほどおりました。その後、東京大学に戻りました。大学での仕事が終わってから国立環境研究所の方にどうかというお話がありました。私の専門は分析科学という非常に狭い分野でしたが、会社勤めしていた時代には「常陽」とか「もんじゅ」の核燃料の部分を担当したことがあります。

秋山 「環境」には、社会の活動から地球温暖化などに亘って実に色々な問題があります。我々人間に対する外界すべてという定義では要素も拡がりも非常に多岐にわたりますけれども、今、先生の国立環境研究所のお仕事のメニューはやはり相当幅広いのでしょうか。

合志 ええ色々範囲が広がっています。一般に産業界の研究所にも環境部門がありますが、我々の場合は専ら環境ばかりということで、非常に特異な研究所だと思っています。しかし、一方では人間社会的な問題では経済関係、フィジックスでは気候変動や気象関係、さらに生物では医療関係や自動車の排ガス関係など多岐にわたった研究を行っています。

一方、それに対する人員面としては、



合志 陽一氏

(独立行政法人 国立環境研究所
理事長)

まず上部機関の環境省が1000人台、国立環境研究所にいたっては正規職員が277人です。アメリカの環境保護庁（EPA）とその研究所の人員数よりそれぞれ1桁下の数で大変困っているのですが、それでも必要な範囲はカバーしなければなりません。そこで1人が色々なことをやっております。担当分野を平等にカバーするのは不可能ですので、あるポイントでピークを作って研究をしています。

秋山 規模ではアメリカよりも小さいですが、逆に、近くの分野を視野に入れたりそことの連携を強めることで、問題を大きく、そして複合的にとらえることが期待できるのでしょうか。権限と責任がきちっと分けられている欧米の縦割り型のやり方に比べて、ある意味ではプラスなのではないかと思いますが。

合志 それしか道がないということをやっているのですが、そう言えるかも知れません。

過去に学び、未来を考える

「人間と周囲とのやりとり」という

環境問題へのアプローチが解決に有効

秋山 環境問題の「環境」というキーワードの意味なのですが、まず主体がある。主体は個人だったり集団であったり、もっと広く言えば生物界であったりします。そして、それぞれに対して環境が存在します。その場合、いわゆる自然界という環境と人工社会という環境がありますね。公害問題や汚染問題は人工社会での物質、エネルギー、あるいは情報の活動の中で生ずる負の部分と言えらると思います。

私が今申し上げた環境への理解へのご意見も含めて、先生が環境問題をトータルにどうとらえておられるか、ご紹介いただけますでしょうか。

合志 環境問題は実に多様ですが、大きく分けると2つのアプローチがあると思います。1つは、例えば自然環境、人工環境、あるいは地球環境というものがあって、それらが相互に作用し合うというアプローチです。従来のアプローチはみんなそうだったと思います。そういう自分と自分以外のものという形でのアプローチは必要だと思うのですが、環境ということがどういう時点で、どういう状況のもとに認識されて問題が起こってくる

かということを考えると、人間を主体としての周囲との色々なやりとりを経て起こる。そういうふうに整理した方が、現時点での問題の解決には有効だろうと思っています。例えば、旧来の分野で述べますと汚染をもたらす物質のやりとりやエネルギーのやりとりがあります。しかし、多分、これから問題になるのは情報のやりとりです。これは「情報環境」と言うこともできると思うのですが、無形のものではありながら、将来的には非常に大きな影響力を持つものではないかと思っています。

秋山 情報を研究し、あるいは活用していく中で直接的に環境問題の予測や解決に相当大きな力になるという面もあるのでしょうか。

合志 情報の力については2つの面があります。1つは情報が人間をどういう方向に引っ張っていく可能性があるかという面です。その代表例が予測です。予測は情報の最たるもので、みんなそれを頼りに生きていくわけです。そうすると、色々な予測が満ち溢れている今、どれを信じていいかわからない、中には非常にミスリーディングなものがあるわけです。

もう1つはもっと原始的な問題として、人間の精神生活、あるいは生理的な面に外部の情報が影響を与えるという面です。この2つの面で情報は非常に重要だということです。

「見逃さない」「放置しない」「慌てない」

秋山 先生が学会の講演*等で説明された中で3つのキーワード「見逃さない、放置しない、慌てない」というのがあります。これは大変重要な視点、考え方の軸だと思いました。

まず、過去から学ぶことが大事だということで、これまでの経験として「水俣病」、「イースター島の環境破壊」、「サリドマイド禍」などを挙げておられます。できましたらこれらの事例に関しまして先生のご所見、あるいは問題点の分析につきまして伺いできるとありがたいのですが。

合志 環境問題を初めまで遡りますと、「見逃さない」ということが非常に重要だと思います。水俣病の大変な悲劇については皆さんよくご存知のとおりです。しかも、原因を科学的な立場で完全に立証することが長い間なかなか難しかった。それで原因が解明され対策がとられるまでの間に色々なことが起こりました。

猫の異常行動が新聞で報じられた時点が問題の始まりのように言われていますが、その前に非常に妙なことがいっぱいチッソ水俣工場の周辺で起こっているんです。魚が浮いたり、色々なことが起こっています。なぜそんなことが起こるのか、素直に突きつめていくともっと早く原因を解明できただろうと思われるのです。それは見逃してはいけないということの1例です。

別の例では、最近の地球温暖化に関連してですが、1800年代末にアレニウスという人が地球の気温に対して炭酸ガスが非常に大きな影響力を持つということを書いてあります。そのことが何を招くかということまで、20世紀後半になるまで突っ込んで考えていないわけですね。これは大変まずいことだと思います。基礎科学の中に、こういう原因究明の元になるものが沢山あるのではないかと思います。ですから、基礎科学における指摘を「見逃さない」ということも大事になるわけです。

「放置しない」ということ。水俣病の場合に一番それが厳しくあらわれたと思うんですが、立証実験ができない限りは責任があると見なさないという形で事が推移して、非常にまずい事態を招きました。

イースター島では一時栄えた非常に高度な文化が森林の乱伐によって滅びてしまった。それも巨大な島でもなく、住んでいる人だったら隅々まで状況を把握できるはず、自分たちが切り倒していく木に対して、成育してくるものがそんなにないということは分かっていたと思うんです。ところが、過剰な伐採をずーっと続けたために文明が滅びることになってしまったというわけですね。

多分、人間は2～3年で変化することについては非常に敏感でも、10年、20年のタームでじりじり変化していくものについては大変鈍感なのかも知れませんね。

少なくとも今のモンゴルの過放牧の間

*「水面下の環境問題をどう考えるか」学会会報 No.841 (2003-IV)

題については同じことが言えます。家畜がどんどん草を食べる、草の成長速度よりもそのスピードの方が速いから危機的な状況に陥ってきているわけですね。

「慌てない」ということ。問題点を見逃さないのは最も重要なことですが、それと同時に、もしも問題が解決される可能性があれば、今度はその可能性を躊躇なく、他の有効な用途に使うことが重要です。

秋山 「今、事例を通してご説明下さった「見逃さない」「放置しない」「慌てない」という3点は私が理解しますところ、まず「見逃さない」とは、事象とか原因を的確にとらえ、それを深く考察していく一種の頭脳、観察力のこと、「放置しない」とはその事象に対する対策を迅速かつ適切に適用していく活動のこと。「慌てない」とは、冷静かつ着実に、できれば科学的かつ客観的に物事をとらえていく態度だと思うのですが、そんな理解でよろしいでしょうか。

合志 そうのことだと思います。「慌てない」という時、特に環境問題の場合、人間はどうしても善と悪に分けたがる。一旦悪と決めてしまうと、永久に悪であるというふうにしがちなんです。善か悪かは状況によって変わってきますから、その辺を冷静に合理的に考えていくべきだということが「慌てない」ということの根底にあります。

学際的アプローチが有効な環境学の形成

秋山 最近流行りの「危機管理」という言葉がありますね。その根底となる我々の思考や行動には人間の心理とか、社会心理とかが非常に深く広く関わっていると思うのですが、「見逃さない、放置しない、慌てない」を支える理論武装として、日本学術会議や日本工学アカデミーのお仕事の中で、社会学や人文学を含めた学際的な捉え方はあるのでしょうか。

合志 学術会議の重要な機能として、学際的なアプローチが半強制的にセットされているということが挙げられます。例えば、すべての部から代表が出てきて議論するというようなことです。これは非常にポジティブな面を生んでいると思います。もちろん色々な指摘が必ずしも迅速に実行されないという意味でのものどかしさから批判も沢山ありますが、ただ、こういう機能はもっと充実させた方がいいと思うのです。

エネルギーと環境問題の関係

秋山 広がる環境問題にいかに接するかについてですが、まず環境問題の原因として大きいところでは世界人口の増加に端を発して、その中での利益配分とか、責任分担も含めて複雑な問題が出てきます。エネルギーの長期の見通しと地球環境問題との切り口で見ますと、国際的にはCOP（国連気候変動枠組条約締約国会議）による議論の場があり、つい先日、

イタリアのミラノでCOP9が開かれ京都議定書の実施細則について合意が成立したところです。そこで、エネルギーと地球環境との関連につきまして、ご意見を伺えますでしょうか。

合志 エネルギーと環境というのは今、CO₂の問題、汚染の問題など、対立することが非常に多く、相容れないファクターとしてしか見られていないところがあると思います。ですが、私は「エネルギー」と「環境」は本質的にはあまりぶつかるようなものではないのではないかと思います。

同じ人間のやっていることですからそれは決してぶつかるものではない。今のたまたまCO₂問題ではそれがぶつかるように見えているだけであって、本来はエネルギーを使う人間の行動と環境からのサービスを享受したいと思う人間の活動とは、それぞれ独立に動いていって然るべきものだろうと思っているんです。

汚染の問題にしても、今の劣悪な、あるいは未熟な技術で解決を図ろうとすると起こるかも知れませんが、基本的には知恵で克服できる部分が非常に大きいわけです。ですから、本質的なぶつかり合いではないと思います。

将来予測に悲観し過ぎることなく
できることからチャレンジし変えていく

秋山 実は私が学術会議に参加していた頃、学界の見解として長期のエネルギー

予測を議論したことがあります。2100年にCO₂の大気中濃度を550ppmぐらいに落ち着かせるという目標を設定し、それまでのエネルギー供給力を分析しました。CO₂問題を含めて、「自然エネルギー」、「原子力」および「化石エネルギー」の3つを適切にバランスさせるという考え方のもとに、かなり定量的に議論しました。その時に、私はエネルギーと環境とが互いに制約要因として強くリンクしていると感じました。新・省エネ技術と原子力がさらに普及し、そして革新的な社会構造やライフスタイルが実現していけば、エネルギーと環境とはぶつからないようになるかと思います。ただ、現在の状況の延長で、20年、50年先を見た時には、そう明るい展望が得られないように思うのですが…。

(注)日本原子力産業会議が行った2050年までの中長期エネルギーバランスのスタディでは、原子力エネルギーがなければ、環境調和的なシナリオは描きにくいという見通しが出ています。CO₂を海洋投棄するという方法もありますが、コストの問題に加えて海洋汚染の問題が出てくことも懸念され、検討課題が残っています。

合志 ご心配は十分わかります。ただ、現在の社会構造、経済構造と技術を前提に議論していくと将来は大変破滅的になるという話だということに過ぎないと思います。世界を見ますと、例えば砂漠の民の水の使い方と我々の水の使い方というのは一桁ぐらい量が違うのです。

エネルギーに関しても、使用する資源の生産性（資源投入量当りの財・サービス生産量）を4倍にする「ファクター4」とか、10倍にする「ファクター10」とかいう運動があります。「ファクター10」は技術的に実現するのは難しいと思いますが、「ファクター4」はそんなに荒唐無稽な話ではないのです。現在の技術のフレームワークの中でじりじりと2割改善するのは大変なことです、原理的にゼロからのスタートして全システムを考えなおすとなると、5割、6割の改善は決して不可能ではない。ただ、この前提には、例えば水平に移動する自動車はほとんどエネルギーを使わないとか聞いてるだけでも楽しくなるような話がいっぱい入っています。しかし、科学的にあり得ない話にならない範囲でやれることは、まだまだ随分大きいと私は思っています。

さらに、天然資源のエネルギーは希少になれば値段が上がるという関係があるわけですから、高価になればまた新しく可採資源が開発されて賦存量が延びるというケースもあります。それがついに駄目というところまでには立ち至っていないのではないかとかなり楽観的に思っています。

秋山 可能性として考えられるメニューは全て大切に、それぞれに成功を目指して努力していくことは非常に良いことです。

合志 エネルギー利用を目的として植物を育ててバイオマスエネルギーでやっていけ



秋山 守氏

（財）エネルギー総合工学研究所
理事長

ばいいんじゃないかと言うと、普通の化石燃料を使っている方は、とんでもないコストがかかるということで笑ってしまいます。そのコストのギャップは大きいと思うのですが、空想の話ほどのギャップではないという感じがします。バイオマス関係で、常に問題になるのは、バイオマスが水でびしょびしょのエネルギーで乾燥工程が必要だということなのですね。

これがきちんとしない限り、バイオマスは本当のエネルギー資源にはなっていないという感じがします。

環境問題の位置づけ

グローバルは誘導策、ローカルは懲罰策で

秋山 環境問題の関連活動を取り上げる中で、先生は2次元座標で環境問題の原因と事象を分類されていらっしゃる

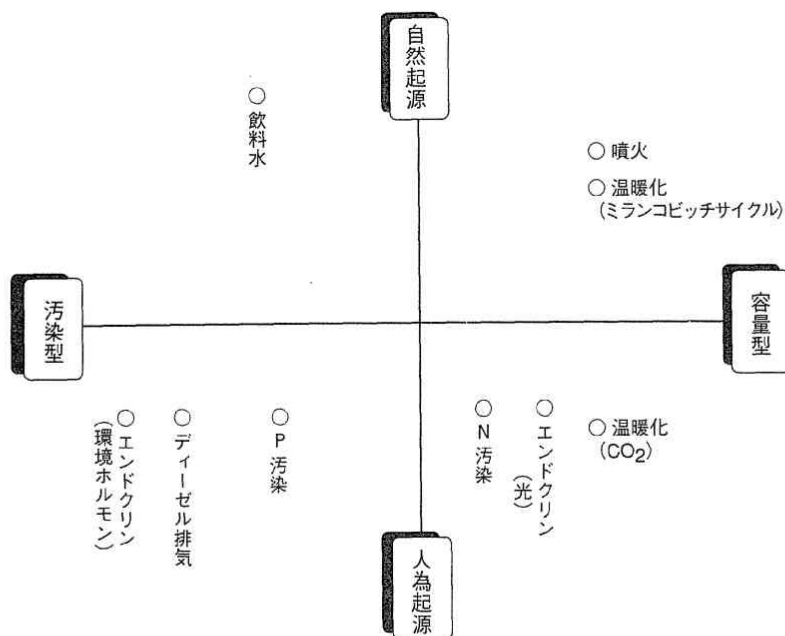


図1 環境問題の分類

ね（図1）。そこでは原因については自然起源と人為起源に、事象については容量型と汚染型とに分けておられます。ここで、容量型とは別の言葉でいえば、グローバルなことで、汚染型とはある程度ローカルに限定されたもの、という理解でよろしいのでしょうか。

合志 結果としてそうだと思います。容量型というのは全地球的な処理能力、あるいは受け入れ力が問題になってくるような問題。汚染型は有毒物質に見られるような問題です。

秋山 例えば、レバノン杉絶滅の問題などは容量型ということですね。この二次元座標は大変よく整理されて分かり易くできておりますが、「原因」と「結果」

としての事象にもう1つの軸として「対策」を加えることができるのではないかなと思うんです。アクションにつながる軸であり、一番深いところは基礎研究、それから人材教育、さらに空間的な広がりということでは、国内の政策から国際協力まで、といった考え方はいかがでしょうか。

合志 なかなか面白いお考えだと思います。例えば、人間が活動する以上どうしても起こることで、しかも全世界的な拡がりを持つ容量型の問題というのは、誘導政策的なもので解決していかないと多分うまくいかないだろうと思います。

汚染型は処罰するという形でのコントロールが十分効く可能性があります。このような懲罰的政策というのは適用でき

る範囲が時代とか技術的進歩によって変わってくると思います。

秋山 今、誘導政策的とおっしゃいましたが、例えば、COPなどは議定書による縛りを踏まえようとするものではありませんが、その精神としては皆が等しく自発的に参加していく必要があります、国際的に見た誘導策が望まれると思います。

国際的にペナルティーを科すというやり方も、結局は皆が納得してライフスタイルなどを変えて、国全体としても良い結果が見えてくるということですか。

合志 そうだと思います。炭素税にしてもペナルティーに見えますが、結局、誘導策なんですね。

これから研究すべき汚染型問題とは

秋山 汚染型の問題には、有害物質による汚染、物質以外のさまざまな要素、例えば音だとか光だとかに起因する問題など、色々ありますね。各要素の内容、特徴を少し易しく表現していただけますか。

合志 人間は外界との相互作用において関係性を認識し、また環境に支配されているということになります。外界との相互作用は基本的には五感、それから物質エネルギーの入力と言えるものでしょう。食べ物という物質を体内に取り入れることの影響は十分わかっているわけですが、その他の感覚的な入力の影響が良く分か

っていません。生理学者は随分明らかにしているわけですが、それが環境の問題として影響を持つかどうかという立場で見ているものは割に少ないのです。

例えば、植物や動物に対して光がどんな影響を与えるかについては、膨大な研究があります。それが現代社会において、環境として人間に対してどういう影響を与えるかということは意外に解明されていないんです。

秋山 光とか風景のような視覚、それから聴覚や触覚などの問題は重要ですね。それと低周波ノイズなども近頃では話題になっています。このような様々な刺激の中で、これから人間の感覚や健康に何らかの基本的な影響が出てくるのかも知れませんか。

合志 そうだと思います。特に光に関しては、蛍光灯、白熱灯を廃止して発光ダイオードに代えたら、民生用のエネルギーの20%を占める照明用が数分の1に落とせる可能性があると言われます。

ところが、その中の青色の部分が人間の内分泌（エンドクリン）に影響を与えるらしいということが議論されています。そういうことになると、一方で省エネのためにぜひ推進したい。一方では慎重にやらないといけないということになります。

秋山 光の関係ではこのオフィスも蛍光灯ですが、米国出張でホテルに行きますと、大体は白熱灯で、オフィスでも照明全体が暗いせいもありますが、非常に安

らぎますね。放電光ではなく発熱線だからかなとも思います。

合志 お感じになりますか。

秋山 はい。人類の照明は、焚き火から始まりましたからね。非常に周波数の低い光への思いが遺伝子に組み込まれているのかも知れませんね。それを科学的にも証明しようとするのが最近になって行われているのでしょうか。

合志 だんだん出てきています。

秋山 幼児の教育、あるいは人格形成のあたりに、ただ今のお話しの光とか、周辺環境がいろんな意味でネガティブに影響しているおそれがあるかも知れません。最近、特に幼い子供や若い人がすぐ暴力を振るいたがるのも、甘いものやカルシウムを十分食べないとか、色々あるでしょうけれど、光のことも意外に影響しているかも知れませんね。

合志 可能性があります。かなり前にアメリカの学校の教室の問題として、蛍光灯的な光と白熱灯の光でトラブルが起こる率が明らかに違うというようなことがレポートされていました。ですから、こういう問題は本当に大きい問題です。

秋山 免疫とか、メラトニンなどについて相当に定量的な影響が分かれば、その説は一段と信憑性が出てきそうですね。

合志 少なくとも我々として、問題があるかないかを早く確かめておくという作業がとても大事だと思います。

地球温暖化問題への理解と取り組み

国立環境研は各国モデル作りで貢献

秋山 国際的に大変ご活躍されていた森田恒幸博士が残念なことに亡くなりましたが、国立環境研究所では森田博士のお仕事を引き継ぎ、さらに展開しておられると存じます。そのあたり、国際的な評価作業の推進状況も含めてご紹介いたします。

合志 森田さんが果たしてきた役割はとても大きいもので、簡単に埋められるようなことではありません。ただ、幸いにして、一緒に仕事をしてきたチームメンバーが跡を継ぎながら仕事をしていこうとしています。

それから、良き共同研究者であった京都大学の松岡教授が色々とサポートしてくださっていますので、何とかそれを埋めていこうと努力しています。

国際的な活動で森田さんが非常に重要な貢献をされたのは、経済活動とCO₂、温暖化との関連を明らかにしていく各国に適したモデル（AIMモデル）を共同で作りながら、キャパシティビルディングをしておられたことです。今、インドや中国、タイ、インドネシアなどで共同研

究をやる人がある程度育っています。森田さんがデザインしてやってくれた活動は決して消えることはないと思います。本当に重要な貢献でした。

産業界のご協力もありまして、そのモデルには随分新しいデータも入っています。普通はあの種のモデルに入ってくる産業の基礎データは古いものが多くて、「役に立たん」と笑われたりするのですが、非常に新しいデータでやれるようになってきています。

秋山 私どもの研究所でも環境問題との関連での調査研究が数多く進められています。環境グループもあります。これからも色々と先生のご指導をいただければと思います。

環境問題に取り組む際の戦略

秋山 温暖化問題についてですが、優れたモデルのもとに適確な評価をしていくことが大変重要であると同時に、もう1つ、我々の限られた資源のもとに、どこまで環境対策に力を入れていったらいいかということがありますよね。

エネルギー関係ですと、エネルギー利用に基づくリスクの問題があります。原子力ですと、事故や放射線影響をリスクとしてカウントして、それをどこまで下げることを目指すのか。他のリスクとの比較や社会経済活動の観点も含めた上での安全目標の検討が行われています。温暖化問題ですと、温暖化によってどれだ

け経済的なリスクが生じるか、そして人命や健康はどれだけ失われるか、といったスタディを基盤として、適切な投資戦略を進めていく必要があります。ま、それはさておき、これからの取組みの力点についてはいかがですか。

合志 環境問題のどういうところにどう注力すべきかということは非常に大きな問題です。基本的に経済的なファクターが圧倒的に支配的な要因なわけですから、従来のアクセスとこれからの経済環境の立場からのものはそんなにずれるわけはありません。ただ、新しく起こってくる問題をウォッチしていかなければいけないと思います。恐らく、五感を通じての問題は、1人ひとりの人間を取り囲む環境問題ですから、このファクターへのウェートはもう少し増す必要があるのではないかと考えています。

エネルギーの問題について、私は基本的にはあまり心配していないんです。多分、世界の人口増加の問題は2040年あたりでピークになって、あとは下がり出すだろうという見方もあります。これは国連推計の下位、低い方です。今までの修正のされ方からいって、多分、下位が下位でなくなってくるといった感じがするんです。

ここで想定されている将来の合計特殊出生率は1.86人で、今の日本人の出生率は1.36ですから、非常に違います。ですから、下位推計が中位になる可能性は十分あると思います。

それに先の状態としてエネルギーの入

手が困難という予測が出ると、やはり人間の行動に影響を及ぼします。

ただ、分配をめぐる問題は、情報の交換が進めば進むほどシビアになってきますので、日本はある意味で苦しい目に遭わなければいけない面が出てくると思います。そういう時、色々な提案は少し慎重にした方がいいんじゃないかと思います。

秋山 学術会議の作業に加わった専門家の中には、1000年単位の超長期的な予測をしておられる方もいました。エネルギー、環境、食糧などファンダメンタルな要因と連動して人口がどう推移していくか。世界人口がピークを迎える時期の予測を含めた極めて興味深いスタディです。ただし、その前提は国際的に平和なスキームが存続することなのですが、各地での内紛や宗教戦争を考えると、前途はどうなりますか。しかし、それでもなおもっとグローバルに、我々の目指すべきところ、目指したいところを絶えず前向きに描いていくことが重要です。

環境保全と工学・技術の役割

人間の要求に応える技術開発を

秋山 工学技術と社会、工学技術とエネルギー、環境、経済といった中で、技術がどう位置づけられ、またどのような役割をするか、先生のお考えや現在のご活

動の概要をご紹介いただけますか。

合志 一般的に技術が非常に走り過ぎて、人間に対して害を及ぼしてきているというような印象で語られることが非常に多いと思います。しかし、結局、技術というのは人間がコントロールしていくものですから、そういう状況に陥らない技術を作っていけば良いだけの話です。技術が我々の存続に決定的な影響を持っていることは間違いないと思いますし、ぜひ進めていかなく

てはならないと思います。ただ、技術の場合に今問題になっているのは、先に技術があって、それをいかに人間社会に適用するかという側のアプローチが強過ぎるくらいがあるということです。ですから、人間側として何が必要かということから技術への要求がだんだん明確になってきて、それに応えるために技術ができてくるというプロセスの方をもう少し強めた方がいいんじゃないかと思います。

秋山 技術それ自体が技術の論理なり、勢いで我々の感覚から外れた方向に走るのではなく、常に技術が我々の期待や構想にミートする形で実現させていく。何か問題があれば絶えずフィードバックして、常に人間と技術のリンクが失われないう形で進めるというご趣旨のお話ですか。

合志 そうです。人間側からの要求が最初のドライビングフォースになっているような技術の方がバランスがとれるのではないかということです。

その点で日本は割にいいポジションにあると思います。例えばゲームソフト、あるいはエンタテインメントの世界では日本の競争力が非常に強くなりつつありますね。それは、基本的には全体のストラクチャーを作ってから最後に人間社会にアプローチするというやり方ではなく、まさに携帯電話を持っている人たちの要求に応え続けてきた結果としてでき上がったような技術なんですね。

秋山 西欧は社会環境や技術をも含めて、あらゆるものを安全に、より便利に、しかも我々の平均的要求を満たすためにということで品質を高めてきました。それは良いのですが、品質向上では標準化のアプローチを採った。社会、人間、あるいは男性、女性といった、かなり大きくくりの対象に対してベストミートするようなシステムを作り上げました。

ところが、物のサイズにしても、様式にしても人には色々バラエティがあります。身長や体重の違い、体力の強弱、多様な好みなどがあるにもかかわらず、規格に個々の人間が合わせていかなければならず物によっては大変苦しくなっています。そこで、社会適応から限りなく人間適応へ、しかも個人の要求に対する適応へと進んでいくことが求められていると思います。

合志 そういう面があります。その時代、

時代の技術の可能性からいって、できなかったこととできることが出てくるわけです。今までは技術が及ばないので、機械に人間を合わせるとか、全体のシステムを設計してその中で生きるようにしてきたわけですね。けれども、今は技術にかなりゆとりができてきたので、個々人の要求に応えることが可能になってきた。情報のやりとりがものすごく自由になっていますから、今後の大きな方向として、人間側、あるいは個人側からの色々な物のデザインに対する要求が活きるようになってくると思いますね。その辺り、日本は割に強いんですね。

秋山 環境保全に対しては直接、間接に技術の持つ役割が色々提案されているところです。例えば、NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）の提案公募事業では、広義の省エネ、新エネ、それから原子力、様々な提案が出てきていて、新しい改善が期待できる状況です。

また、日本工学アカデミーを中心に当所もお手伝いして工学技術の役割に重点を置いた「エネルギーと気候変動に関する報告書」を出しました。現在では、さらに「エネルギー基本戦略作業部会」が活動しており、わが国としての長期的な視野でのエネルギー基本戦略の設計を目指すことと併せて、早期にエネルギー情報の基盤を整備していきたいと願っています。

受け身でない環境保全の活動を

秋山 エネルギー技術、工学技術に限らず全てに共通して重要なことは、物事を戦略的に進めるということだと思います。エネルギー政策で見ますと、最近、プッシュ政権の新しいエネルギー計画の柱にストラテジック（戦略的な）という言葉があります。環境問題でも先生の取り組みの中で、戦略ないしはミッション・アンド・ゴールなどの言葉に照らして参考になる動きがありましたらご紹介いただけますでしょうか。

合志 恐らく、環境問題で一番世の中に受け入れられているのは「サステナビリティ（持続可能性）」だと思います。持続可能な社会、サステナビリティを持つ社会を構築するということに帰着すると思います。これは誰も否定しようがない表現ですよね。ところが、どうやって構築するかという話になると、個々の国の事情が出てきます。そこを考えないで「サステナビリティ」とだけ言っていてほとんど何も言わないのと同然ということになってしまいます。私はやはり日本がどういう面で寄与しながら世界の中で生きていくのか、その辺のことをはっきりさせておいた方がいいと思うんです。

環境に関しては、危機的状況からいかに逃れるか、破滅をいかに回避するかというレベルの話は当然やらなければいけないことです。ただ、日本は基本的に天然資源の乏しい国ですから、人間の活動を盛んにする環境と言うか、人間活動の制約要因ではなく、推進力となる環境を考えていく必要

があるのではないかと考えています。

秋山 その推進力の中身はどういうものでしょうか。

合志 日本の場合、技術面で十分寄与できると思います。しかし、そのためには、結局、個々の人間のメンタルな部分でのアクティビティーが上がらないといけません。そういう意味で今環境を十分に考えているかということ、私はやっぱりとても不足していると思いますね。言い換えますと、受け身の環境保護活動はみんな推進しているけれども、もっとアクティブな活動が必要です。

秋山 おっしゃることは、エネルギー開発の面でも共通したことだと思います。何のためにエネルギー開発に取り組むかということ、生命や社会活動の「サステナビリティ」のためであり、加えて活動の泉を強めていくためでもあります。より前向きに、より発展的に取り組んで、アウトプットを新しい学術、新しい産業、新しい文化にまでつなげたいという思いがあります。

エネルギー、特に原子力開発では、ミクロレベルのメカニズムを追求しており、そこからエネルギーだけでなく、物理学の開拓への貢献もあります。安全に関しては人間と機械の複雑な相互作用を扱います。大きな人間科学の次元でも先生の環境分野と共通点が多いのではないかと思います。

合志 お話を伺って、まさにそうだとい

う感じがします。

秋山 環境では環境産業といったものが
繁栄していくのでしょうか。

合志 十分あり得ると思います。廃棄物
処理やリサイクルという意味の産業は既
にあるし、必ず発展的に推移すると思
いますね。

それから、極端なことを言いますと、
一軒一軒の家庭が、環境的にどうい
う状況でどういうふうに判断したらいいのか
という、1つの情報、1つの安心を提供
するビジネスがこれから出てくるんじ
ゃないでしょうか。それは健康ビジネスと
非常に似ていると思います。今は「何
か有害物質があるらしい。うちの空気を計
ってくれ」というお話があって、それ
にいちいち応えていたら大変だとい
うことになります。しかし、そういう個々の家
庭、あるいは割に小さな単位の地域でも、
この状況は今こういうことになっている
ので安心していいというような、判断
や情報を提供していくものがこれから
ビジネスとしてあり得ると思います。

それに適する色々な測定器の製造とかも
1つの産業として成り立つと思いますね。

若い世代、次世代へ思うこと

社会教育による意識改革が

大きく影響する循環型社会形成

秋山 何といっても今後の活力の中心は
若い世代です。エネルギー関係では、最
近、若い世代のフォーラムや国際的なネ
ットワーク作りなどが盛んです。環境と
エネルギーの両方を視野に入れた若い人
の活動もあるのではないかと思います。
そうしたことも含めて、環境分野、エネ
ルギー分野での取り組みに今後どのよう
に人を惹きつけ、そして参加を得てい
くかということでヒントを頂けますでし
ょうか。

実は原子力では、その必要性や特に安
全の問題について様々な広報活動を展開
していますが、そのツールとしてもっと
進んだパンフレットや映画を作ることも
考えられます。もっと分かり易くて魅力
のあるコンテンツ、説明の仕方、交流の
仕方などを人間の心理とリンクさせなが
ら研究していますが、環境の分野でも
色々お考えをお持ちだと思います。

合志 環境分野もそういう社会の教育を
利用する必要があります。例えば、リサ
イクル社会を成立させるための最大の阻
害要因は経済性です。なぜ経済性が成り
立たないかというと、リサイクルする
色々な物をきちんと分類して集めて回す
というのに非常に手間がかかるからなん
です。ただ、1人ひとりのユーザー、市
民がそのつもりで最初から行動すれば、
きれいに分別されて動くわけですから、
そこには教育のファクターがとても大き
く働くと思いますね。それはある意味で
将来の我々社会のあり方を規定するほど
大きな影響力を持っていると思います。

環境の場合、例えば「省エネをしろ」「無駄を省け」ということで分別をしようということがある。ある意味で思想、信条に近い部分があるのですが、ただ、「この市の中でこれとこれとは分別しても意味がない」ということもあるわけです。分別するとかえってコストが上がってしまう時に、機械的に分別していくことが合理的な行動としては必ずしも意味があるとは言えない。そういう面があるんです。ですから、信条の問題と合理性の2つが緊張感をもってぶつかり合い、ある種の敬意を払いながら接していくというのがこれからの成熟した社会だと思っています。

学問として貫徹した「環境学」の難しさ

秋山 大学に「エネルギー学部」「エネルギー学科」という名前のものは数少ないと思いますが、先生の言っておられる「環境」に対応する学部、学科、研究所は相当に整備されているのでしょうか。

合志 勿論、「環境」を標榜している学部、学科も結構多くあります。ただ、構成を見ますと、環境学部の先生だけでも当人は経済学者であるとか、生物学者であるとかいうことになっているのが大部分だと思っています。

急には環境学者が育たないからだとも言えると思いますが、本質的に環境学というものが学問としてどこまで貫徹できるかという、なかなか難しいところがあるんです。

環境問題はある種の巨大な 이슈 です。それに対して色々な武器を持った人がわたり合うという感じではないかと思っています。勿論はつきり「環境学というのにはあり得る」と主張される方はいますが、その辺は難しいですね。

シンクタンクへの期待

責任をもった取り組みを

秋山 当研究所は、(財)日本エネルギー経済研究所など、エネルギー関係の研究機関のネットワークの中で、これからますますお役に立ちたいと願っています。

エネルギーと環境の関わり方の視点も含めまして、最後に、当研究所のようなシンクタンクへご示唆、ご助言をいただけますでしょうか。

合志 やはり、エネルギー問題は人間の生活において根源的な部分ですから、それを、きちんと責任をもってやらないと、我々の生活が危うくなると思います。我々は環境というサイドからその根源的な部分に接するわけですが、ぜひ頑張っていたきたいと思います。

多分、これから日本の中でエネルギーの場に起こってくることの1つは、多様なエネルギーの供給の仕方という問題だと思います。今、電線や自動車でエネルギーが供給されています。電線なら電気

で、自動車なら燃料で生活しているわけですが、その供給のされ方も多様になるばかりではないでしょうか。

秋山 今ご指摘の点は、私どもも非常に重要だと認識してしまして、例えばデマンドサイドで分散的に最適にエネルギーを利用できるように調査研究を進めているところです。

合志 特に私は、色々な社会構造的なことで理想社会を設計される方とよくお会いするのですが、いつも非常に不安に思うのは、彼らの描く理想社会がものすごく密結合だということです。エネルギー

使用を極小化する地域ができる。それを1回作ってしまうと、そのうちの10分の1の人たちが少し別のことをしたいという時に動きがとれないんです。

そういう社会というのはいくら設計してもやっぱり実現しないと思うのです。ですから、個々の小さな主体が自由度を失わないようにしながら、しかし結合しているという社会がどのサイズ、どこまで可能かがこれからの重要な問題だと思いますね。

秋山 長時間にわたり、貴重な沢山のお話をいただきましてありがとうございます。

類の多さ等は日本の方が上である。いずれにしろ、前回の米国生活と比べると、米国の圧倒的な豊さは感じられなくなったというのが実感である。

また、冷戦の終焉という戦後世界の大転換があったが、20年前と大きく異なる点は、米国における中国のプレゼンス（存在感）の高まりである。ワシントンDC地域で有機栽培による原料を用いた商品を中心に品揃えしている高級スーパーでは、商品名が日本語で書かれた煎餅類までが中国製であり、中国がありとあらゆる商品の供給国となっている。

しかし、停電については、場所と時間が異なるとは言え、何か共通のものがあるように思える。1982年の11月にハワイ諸島をハリケーン「イワ」が直撃したが、体感的にはそれほど大型のハリケーンと感じられなかったのにも拘わらず、筆者が住んでいたオアフ島も全島で停電し、復旧にも随分時間がかかった。当時東西センター資源システム研究所の「東アジアの電力の将来」という研究プロジェクトに参加していたが、プロジェクト参加者の友人が「東アジアではなくハワイの電力の将来を考えるべき」と半ば真剣に言っていたことを思い出す。

3. ハリケーン・イザベルによる「大停電」

2003年8月14日の「北米大停電」発生は、規制緩和問題との絡みでわが国でも大きく取り上げられたが、幸運にも筆者

が住むメリーランド州は影響を受けず直接の被害はなかった。しかし、その後の8月26日～27日夜半サンダーstormに襲われ、「本格的」停電を初めて経験することになった。そして、9月17日～19日にかけてバージニア州、ワシントンDC、メリーランド州を含む中部大西洋岸を直撃した大型ハリケーン「イザベル」による大停電を経験することになった。

イザベル自体は、ノースカロライナ州に上陸した時点の最大風速が約40m/秒と大型のハリケーンであったが上陸後急速に衰え、ワシントンDC付近での風速は20m/秒程度であり、大停電をもたらすような暴風雨になるとは思われなかった。メディアも超大型ハリケーンであるというニュースを事前に流しており、市民も停電対策として、水、懐中電灯、電池、蠟燭などを準備、電力会社も停電後の復旧のために、近隣の電力会社に応援を依頼してあり準備万端でハリケーンを迎えるはずであった。実際、市民の対応ぶりは徹底しており、わが国の第1次石油危機時のトイレットペーパー騒動ほどではないにしろ、筆者も買いに走ったスーパーの棚には、既に必要なものはほとんど残されていなかった。

そして予報どおりハリケーンを迎えたわけであるが、17日夜中に風雨で目を覚ました際に断続的に停電していることがわかった程度で、一夜明けた18日には復旧しており、そうたいしたハリケーンではなかったように思えた。しかし、ケーブルテレビがダウンして見られず、全体的な状況がわか



(ワシントン事務所員撮影)

図1 ハリケーンによる倒木

らないまま所員に電話連絡したところ、ワシントンDC地域はほとんど停電していることがわかった。バージニア州に住んでいる所員の場合は、夜中に庭の木が折れて車の上に倒れるような物理的な被害に加え、電力会社の対応もお粗末でこの所員の場合は復旧に丸3日間もかかってしまうありさまであった。「なぜこのくらいのハリケーンでかくも停電してしまうのか、わが国ではありえない」というのが、日本人関係者の一般的な感想であろう。

表1が示すように、ワシントンDC地域（バージニア、DC、メリーランド）を供給区域としている3電力会社の需要家の7割以上が今回のハリケーンの影響で停電を経験したことになる。

4. イザベルによる停電の影響

あの程度のハリケーンで広域的な停電になったこと自体の問題はさておき、小生を含め一般住民のフラストレーション

表1 ハリケーン・イザベル（2003年9月17～19日米東部到来）による停電の影響

電力会社名	需要家数 (A)	停電軒数 (B)	(B)/(A)	停電完全復旧期日
ボトマック電力	71万軒	57万軒	79%	9月27日
ボルチモアガス&電力	110万軒	77万軒	70%	9月26日
ドミニオン				
バージニア	220万軒	180万軒	82%	10月3日
北バージニア	72万軒	52万軒	71%	N/A

出所：各社ニュースリリースおよびワシントンポスト紙から作成

がたまったのが、遅々として進まない復旧工事への不満であった。ポトマック電力とボルチモアガス&電力の場合で1週間、バージニアのドミニオン社に至っては完全復旧するまでに2週間以上もかかっている。結果として、電力会社が停電家庭向けに配布した冷蔵庫用のドライアイス程度の対応で済む話ではなく、「我慢強い」と我々日本人関係者が考える当地の一般住民もさすがに今回の停電に対しては堪忍袋が切れたようであった。

5. 米国的停電事情

このような「大停電」については、ワシントンポスト紙を中心にして、メディアも珍しくかなり紙面を割いていた。しかし、その後の取り上げ方や一般の人たちの態度を見る限り、停電問題についても「短期思考」である。8月の北米大停電もその後のサンダーストームによる停

電で関心が薄れる一方、それすら9月のハリケーンによる停電で過去のものになってしまうというように、米国文化の一面を表象しているように思える。

元米国エネルギー省(DOE)長官が米国のグリッドは「第三世界並み」と言っていたが、配電線も然りである。イザベル停電の1件では、電力会社の対応の悪さだけが目立ったが、こうした問題の本質はどれだけ供給側が信頼度確保に投資するのかということであろう。だが、それを決めるのは、米国では消費者である。通勤途上、裸線のままで鬱蒼とした林の中をくぐるように張られている配電線を見るにつけ、ちょっと風が吹けば停電するのは当たり前で、学校でも大風が吹けば停電になると教えているとのことである。

結局、こうした品質の電気になっているのも、消費者に与えられた選択の自由の結果なのではないかと思う。



(ワシントン事務所員撮影)

図2 近所の電線の断線の様子

内外における電力自由化の動向と課題

矢 島 正 之 (財電力中央研究所
理事待遇)



1. はじめに

欧米では、イングランド・ウェールズが1990年にドラスティックな電力再編・自由化に踏み切って以来、多くの国や米国の州が次々と電力市場の自由化を行った。わが国では、2003年に、電気事業法が改正され、2005年までに低圧を除くすべての需要家を対象に電力市場が自由化されることとなった。本稿では、欧米に

おける電力自由化を概観するとともに、わが国における電力自由化の動向と今後の課題について述べる。

2. 欧米における自由化動向

(1) 米国における自由化の進捗度

米国では24州とコロンビア特別区で電力市場の自由化を求めた電力再編法が成立している(図1)。

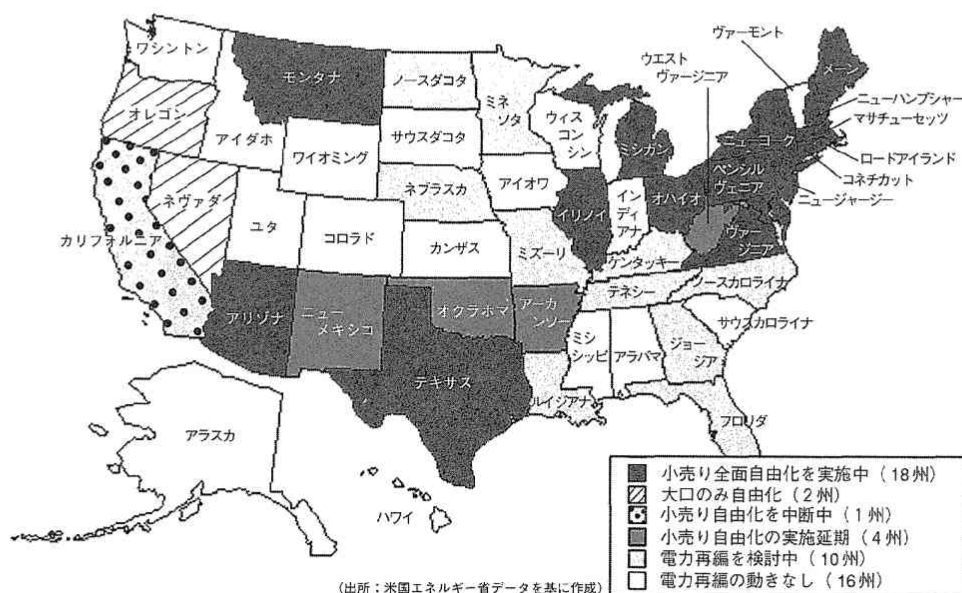


図1 米国における小売自由化の進展

これらのうち17州とコロンビア特別区で自由化がスタートしている。しかし、2000年夏から2001年初めにかけてのカリフォルニア電力危機を経験して、4州が再編法の実施を延期している。ネヴァダ州は自由化対象需要家を大口需要家のみに限定した。このほか10州は調査中で、16州では特に動きはない。再編法を成立させていないこれらの州では、カリフォルニア電力危機以前は法律の制定間近と見られていた。しかし、現段階ではこれらの州で再編法が成立する見通しは立っていない。

(2) 慎重論の台頭

米国における電力自由化に関するこれまでの経験から、多くの識者は次のように指摘するようになっている。

- ① 急速かつ過激な改革は非常にリスクであり、破壊的結果をもたらす場合もある。
- ② 電力は特殊な財であり、自由化を成功させるのは容易でない。
- ③ 卸売市場における価格の乱高下は予想以上に大きく、価格の乱高下に対してのリスク管理は不可避なものとなっている。

このような慎重論が出てきている背景には、電力は特殊な財であるとの認識が広まってきていることがある。すなわち、電力は貯蔵ができず、瞬時・瞬時に発電と消費のバランスを確保していなくて

ならない上、需要と供給の価格弾力性は小さく、市場支配力の行使には極めて脆弱であるとの認識である。電力市場の自由化は1990年の英国に始まり、1990年代に世界的な潮流となったが、その過程において電力という財は一般商品と同じであるとの認識の方が一般的であったと言える。カリフォルニア州の電力危機を経験して多くの研究者は、電力は特殊な財との認識を持つようになってきている。

(3) 自由化モデルへの影響

このような認識は自由化モデルのあり方にも大きな影響を与えている。電力自由化に伴う電力再編のあり方について、米国では当初、垂直的な市場支配力の行使、すなわち発送電が一体化していることにより、既存電力会社が第三者による系統アクセスに対する差別的行動が深刻な問題として考えられてきた。カリフォルニア州で規制当局が発電を可能な限り完全に分離しようとしたのは、この垂直的市場支配力を懸念したためである。ところが、カリフォルニア電力危機を経験した後は、多くの関係者が水平的市場支配力のほうがより深刻な問題であると認識するに至っている。垂直的市場支配力を弱めるには、発電と送電の分離が求められるが、水平的市場支配力から需要家を保護するためには、発電の分離はむしろマイナスになる可能性が大きいと考えられる。このため米国では、カリフォルニア電力危機以降、垂直統合の完全分離には慎重な意見が目立つようになってきている。

(4) 欧州における自由化状況

欧州では、1997年に発効したEU指令がEU加盟15カ国に対して2003年までに小売の33%を開放することを義務づけた。しかし、多くの国ではすでに全面自由化を実施または計画している*。2001年3月に、EU委員会はさらなる自由化に関する提案を行い、小売の全面自由化、系統部門の法的独立化（独立会社化）など一層の自由化を求めた。2003年7月に新たなEU指令が発効し、2007年までの全面的自由化と系統部門の法的独立化が加盟各国に義務づけられた。

このように欧州では、電力自由化の一層の促進を目指しているが、その背景としては、米国カリフォルニア州のような電力危機を経験していないこと、電源や送電能力に十分余裕があることなどが指摘できる。

3. わが国の動向

(1) 概要

2003年2月18日、総合資源エネルギー調査会電気事業分科会報告書『今後の望ましい電気事業制度の骨格について』において、「電力の安定供給を効率的に達成しうる公正かつ実効性のあるシステムの構築に向けての今後の電気事業制度のあり方」が示された。そこでは、2005年4月までにすべての高圧需要家まで自由化を拡大すること、2007年から全面自由化についての検討を開始することなどが提言された。また、2003

年11月14日には、同分科会より中間報告として『今後の望ましい電気事業制度の詳細設計について』が提出された。以下は、これら報告書のポイントである。

① 送配電部門の公平性・透明性の確保

発送配電の分離は行わず、電力会社の送配電部門から独立した中立的機関（例えば、中間法人）を設立し、系統アクセスに関するルール策定、監視、斡旋・調停などを通じて、電力会社の送配電部門の公平性・透明性の確実な担保を図ることとなった。

この中立的機関は、送配電等業務支援機関と呼ばれる。中立的機関は、電力会社、特定規模電気事業者、卸電気事業者・自家発設置者等の3つの利害関係者グループと中立的な学識経験者等の4グループで構成され、意思決定は、各グループから選出された理事で構成される理事会で投票により決まる。

理事総数は15名以内とする。利害関係者3グループの理事の議決権は同数とし、中立的グループの理事は他の各グループの理事数よりも多数とする。

また、利害関係者から独立した視点から機関の業務全体をチェックし、高く広い見地から必要な提言を行う場として評議会を設置する。

さらに、理事会の指示に基づき、特定の事項について調査・検討を行い、結果を理事会に対して報告または必要な勧告を行う専門委員会（ルール策定のための

*全面自由化を行っていない、または行う計画のなかった国は、ポルトガル、イタリア、ルクセンブルク、フランス、ギリシャである。

専門委員会およびルール監視のための専門委員会)を設置する。

さらに、送配電部門の公平性・透明性を担保するために、行為規制により、情報遮断、内部相互補助の禁止、差別的取り扱いの禁止、行政による事後監視・紛争処理体制の整備を行う。

② 全国規模の電力流通の活性化

供給区域をまたぐごとに課金される現行の方式を見直し、政策的要請に鑑み、供給区域内外の取引を問わず、各供給区域における系統利用料金に一本化する。ただし、電源の遠隔立地を抑制する措置として、設備増強時の相当部分を原因者負担とし、現行の需要地近接性評価を継続する。

また、系統利用料金規制方式は、現行の事後規制(届け出制)が維持されるが、行政による変更命令基準の明確化を図る。

③ 全国規模の卸電力取引市場の整備

個々の事業者における需給ミスマッチ・リスクの解消を図る仕組みを整備するため、全国規模の卸電力取引市場の整備を図る。取引所は、私設で、参加は任意とする。

扱う商品としては、先渡し市場と1日前スポット市場とし、後者については1価格1オークション制度とする。

また、十分な取引量を確保するため、電力会社は取引所への投入の考え方を表明し、取引の実施状況の適切な公表を行う。

また、優先給電指令の発動要件の明確化等のルール整備、長期的に送電容量確

保を可能とする送電網利用ルールの整備により、電源開発環境の整備を図る。

④ 供給力確保や需給調整に関する役割分担ルールの見直し

接続供給契約上の容量確保要件を緩和し、同時同量については、現行の30分3%以内インバランス料金(単純従量制)に加え、3%超過変動範囲内インバランス料金(2部料金制)と変動範囲外インバランス料金(単純従量料金)が設定され、段階別のインバランス料金を選択するメニューが整備される。

⑤ 行政の市場監視・紛争処理機能の整備

市場監視・紛争処理など制度運用を行う行政側について、外部識者の積極的活用等による専門性の強化等の体制整備を図る。

⑥ 小売自由化スケジュール

2004年4月を目途に500kW以上の需要家を、2005年4月を目途に50kW以上のすべての高圧需要家を対象に自由化範囲を拡大する。また、家庭用については、2007年4月を目途に具体的な検討を開始する。

⑦ エネルギー・セキュリティや環境保全等の課題との両立

エネルギー・セキュリティや環境保全等の両立確保の観点から、エネルギー関係の歳入・歳出の見直しにより、原子力等の推進の環境整備を図るとともに、バックエンド事業全般のコスト構造、原子力全体の収益等を分析・評価する場を立ち上げ、その

結果を踏まえて、官民の役割分担のあり方、既存制度との整合性等を整理の上、2004年度を目途に、経済的措置などの具体的な制度・措置のあり方について検討する。

(2) 課題

わが国の電力自由化は、発送電の構造分離のアプローチをとらず、行為規制により、第3者による系統への公平なアクセスを確保することとなった。米国においても、卸売市場における市場支配力の行使による価格の高止まりや変動の大きさから、最終需要家へ電力を安定的に供給するものは、発電を所有すべきとの考えが有力になりつつある。この点で、発送電の完全分離を行わない今回の決定は評価できる。

しかし、今回の一連の報告書は、解決すべき数多くの課題も内包している。つぎに、分科会報告書で示されたわが国の電力自由化の方向性についての評価を行うとともに、今後検討すべき課題について述べる。

① 送配電部門の公平性・透明性の確保

中立的機関のガバナンスとして、利害関係者からなる理事会で意思決定がなされることになるが、利害関係者からなる意思決定機関による決定は、しばしば政治的な妥協の産物でしかなく、必ずしも社会的厚生を最大化するものではない。送電運用に関して非営利の中立的組織（ISO）を設立した米国の経験からは、意思決定の難しさや官僚化の問題が指摘される。中立的機関に対しては、送配電への公平なアクセスの確保にのみ権限と責任を付与すべきであり、

設備形成など他の領域に関して権限が拡大していくことは避けるべきである。非営利といっても中立的機関は独占であり、その運営については市場による制裁を受けることがない。中立的機関の業務は、必要最小限度の役割に限定すべきである。

また、わが国では構造規制ではなく、行為規制を採用することになったが、会計上の分離だけでは十分でなく、禁止されるべき行為をリストアップし、その違反をチェックし、継続的な監督と違反への制裁が有効に機能するものにしなければならない。

② 全国規模の電力流通の活性化

系統利用料金については、原因者負担原則を徹底すべきである。これこそが、発電や送電の投資のインセンティブを付与するものであるからである。系統アクセス料金と混雑料金とを明確に区別し、前者については送電線の固定費回収のための料金とし、英国で採用されているゾーン毎に注入料金と引き出し料金を設定し、送電線建設のインセンティブを付与するためにゾーン毎に差をつける方式が参考となる。

また、混雑料金に関しては、報告書で示される前日市場での地点別価格差方式は適切でない。相対取引中心のモデルでは、英国やドイツの例を見ても、前日市場が効率的な地点別価格を提示できるほど十分な流動性を確保できるとは限らないからである。英国や米テキサス州で採用されている調整入札（混雑解消のための発電の増・減および負荷の増・減についての入札）の方式によるべきである。

③ 全国規模の卸電力取引市場の整備

卸電力取引市場の設立に関しては、国がイニシアティブをとって設立する理由は見当たらない。相対取引は取引所のみならず、多くのブローカーにより仲介されることになるであろう。また、短期の市場に対するニーズはあり、スポット市場を中心に運営する取引所は自然発生的に出現してくる。入札のルールなどのビジネス・モデルについては競争させるべきであり、最も優れたビジネス・モデルを開発したものが、大部分の市場参加者の支持を得ることになるだろう。

電源開発の環境整備としては、とくに十分な送電能力の確保が重要である。このためには、適切な系統アクセス料金や混雑料金の設計、さらには送電権の創設なども必要であるが、送電能力の増強は市場メカニズムだけでは十分でなく、なんらかの計画的な要素も取り入れられなくてはならない。

④ 供給力確保や需給調整に関する役割分担ルールの見直し

同時同量の確保については、新規参入者からは参入障壁になるとして、ルールの改善が要求されてきた。今回、原則堅持で、変動範囲の新設がなされたが、一層の改善策としては、ドイツにおけるバランス・グループの考え方が参考になる。多くの需要家の供給や需要をグループ化し、個々の需要家のインバランスを相殺し、グループ全体のインバランスの解消

を系統運用者に委ねる方式である。

⑤ 行政の市場監視・紛争処理機能の整備

世界的に見て発電市場は有効な競争が機能しているとは言いがたい。このため、発電の市場支配力の行使について監視し、必要な場合には再規制する必要性が認識されるようになってきている。問題は、このような監視や規制を有効に行うために、どれだけコストをかけなくてはならないか未知数であることである。市場支配力が発揮しやすい取引形態であれば、このような監視や規制は増大する。英国で採用されていた強制プールや破綻した米カリフォルニア州の自由化モデルの経験からは、取引所取引に大きく依存した制度では、市場支配力が容易に行使しやすい。相対取引中心の制度とし、監視や規制コストの増大を防ぐべきである。

⑥ 小売自由化スケジュール

2007年に小売の全面自由化を検討することになっているが、家庭用までを自由化すべきかどうかは、競争的な卸売市場の存在、マーケティングや料金徴収の小売供給コスト、供給事業者変更のコスト、さらには供給事業者間の競争の程度に依存している。とりわけ、家庭用需要家に対して供給事業者の変更を可能にするためのメータや通信コストの大幅低減が必要である。ロード・プロファイリングにしても負荷分析などが必要であり、また、このような近似的な手法に基づく料金調停方式の受容性の問題がある。

⑦ エネルギー・セキュリティや環境保全等の課題との両立

わが国では、エネルギー・セキュリティ確保の観点から、また地球規模の環境問題の解決の観点から原子力発電を積極的に開発してきた。総合資源エネルギー調査会による2010年度の電源開発および電力供給目標では、1999年度から2010年度にかけて10～13基程度の原子力発電所の建設が必要である。自由化市場においては将来の不確実性が増大し、資金リスクの大きな原子力発電所の建設は困難化してくる。とりわけ、バックエンド**に対しての政府の支援は不可避であり、発生者負担の原則を維持しつつ、投資家に対して経済的リスクを軽減させるためには、最善のコスト見積もりを行い、これを上回る場合には、政府が負担するなどの措置が求められる。

さらに、原子力発電を行うことによる環境への負荷を軽減させる外部効果を内部化するために、炭素税、排出権取引、原子力発電を対象としたクォータ制や補助金などが導入されるべきであろう。

4. 結び

これまでの電力自由化議論では、電力市場に十分競争が導入されるとの前提で自由化制度が検討されてきた。しかし、世界的に見て、発電や小売において十分な競争が機能しているとは言いがたい。伝統的な産

業組織論によれば、市場の構造が競争的になっていない場合には、価格低下などの良好な市場の成果をもたらす市場参加者の行動は期待できない。米国において、発電の監視と規制が必要と認識されるようになった背景には、発電分野における水平的な市場支配力の問題がある。市場構造が十分に競争的になっていない場合、取引所取引中心ではなく相対取引を中心とする取引制度を導入すべきである。

総合資源エネルギー調査会電気事業分科会報告書では、必ずしも基本的な設計思想が明確になっていない。相対中心の取引制度であれば、取引所の役割は補完的なもので、市場参加者のニーズに応じて取引所は設立されるべきである。入札方式なども競争させるべきである。また、「球出し」なども求められることはない。さらに、取引所の流動性が低く、市場支配力の問題がある場合には、地点別価格差を用いた混雑管理は適切ではない。わが国においては、プール・モデルに見られるような統制的な自由化制度ではなく、取引の自由度の高い相対取引を中心とした制度が導入されるべきである。電力自由化は文字通り「自由な取引制度」を目指すべきであり、政府の介入は必要最小限度に抑えるべきである。

**軽水炉の核燃料サイクルの例で言えば、使用済燃料の冷却・再処理、回収ウランおよびプルトニウムの再加工の各工程とそれらの工程の間に必要となる輸送工程、さらにはそれらの各工程から発生する廃棄物の処理処分を意味する。なお、使用済燃料をそのままの形で処分あるいは保管する場合も考えられる。

〔寄稿〕

再生可能エネルギーの課題



内 山 洋 司 (筑波大学 機能工学系教授)

1. はじめに

エネルギーは社会の産業活動と人々の暮らしを支える上で不可欠なものになっている。社会は水や空気のように大量かつ安定に、そして安心して使えるエネルギーを要求している。しかし、エネルギーは水や空気のように自然に供給できるものではない。社会が要求する要件を満たすためには優れた技術を常に開発していかなければならない。エネルギー供給の基本要件は「入手のしやすさ」、「使いやすさ」、「受け入れやすさ」で表わすことができる(図1)。

「入手しやすさ」とは、社会が求めている大量のエネルギーを長期間にわたって安定に供給していくことができる資源を確保することになる。それには豊富な資源量を有しており、その供給に途絶の不安がなく、また価格の変動が小さいといった特性を持つ資源が望まれる。「使いやすさ」とは消費者に使いやすいエネルギーを送り届けることを意味している。それは入手されたエネルギー資源を消費

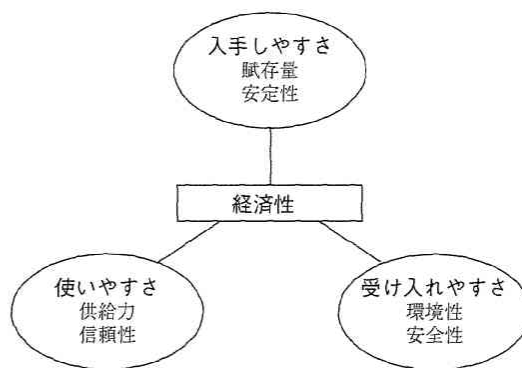


図1 エネルギー供給の3つの基本要件

者に使いやすい形態のエネルギーに変換して、供給においても停止や不測の事態が発生しないようにしていくことである。「受け入れやすさ」とはエネルギーの採掘、生産、流通の供給工程において環境や安全の面で人々に不安を与えないようにしていくことである。

しかし、すべての要件を完全に満たすことはできない。すべての要件を完全に満たそうとすると経済的な負担から供給コストが高くなってしまう。エネルギーは消費者に安価に供給されなければならず、経済性を考慮してそれぞれの基本要件を満たしていくが必要になる。

社会で使われているエネルギー源には化石燃料、原子力、再生可能エネルギーがある。どのエネルギー源もエネルギー供給の基本要件のすべてを満たすことはできず、それぞれに利点と欠点がある。そこで経済性という制約の下でそれぞれの利点を最大限に発揮できる利用方法を考えていくことが大切になる。ここでは、再生可能エネルギーについて「入手しやすさ」、「使いやすさ」、「受け入れやすさ」の3つの視点から特徴を整理し、経済性の課題と普及方策について述べる。

2. 基本要件から見た再生可能エネルギー

(1) 入手しやすさ

入手しやすさとは、エネルギー資源の特性を「賦存量」と「安定性」によって表わしたものである。エネルギーは産業活動や人々の暮らしを支えていくのに不可欠なものとなっており、社会は豊富な賦存量を持つエネルギー資源に頼らざるを得ない。

再生可能エネルギーの特徴は豊富な資源量と供給途絶の不安がないことである。再生可能エネルギーは、化石燃料やウランのように資源が枯渇する心配がなく、

繰り返し使えるエネルギーである。再生可能エネルギーには、太陽熱・光、水力、風力、海洋、バイオマスといった太陽エネルギーのほかに、地下のマグマ熱である地熱エネルギー、それに月や太陽と地球との間に働く引力によって発生する潮汐エネルギーがある。

地表面に到達する太陽エネルギーの出力は 947W/m^2 で、1年間の入射エネルギーは $3.82 \times 10^{21} \text{ kJ}$ になる。そのエネルギー量は、世界で消費されている年間エネルギー量の約1万倍に相当する。地球に降り注ぐ太陽エネルギーの量は膨大であるが、実際に利用できるエネルギーとなると地域的な偏在性と時間的な変動によって量が限られてしまう。表1は、世界の各地域で潜在的に利用できると思われる再生可能エネルギーの量を潮汐と地熱を含めて表したものである。その数値は $1.145 \times 10^{22} \sim 6.421 \times 10^{22} \text{ J}$ の幅にあり、世界で消費されているエネルギー量 $3.6 \times 10^{20} \text{ J}$ の32～178倍に相当している。資源として潜在的に多いのは太陽熱・光、海洋温度差、地熱、風力である。

資源の入手しやすさについてみると、再生可能エネルギーには気象など自然の影響を受けやすいために国や地域によっ

表1 潜在的に利用可能な再生可能エネルギー（単位： 10^{21} J ）

太陽熱・光	水力	風力	海洋エネルギー				地熱
			波浪	海流・潮汐	濃度差	温度差	
1.575～49.837	0.146	1.8	0.065	0.079	0.083	7.2	0.5～5.0

出所) UN Development Programme, UN Department of Economic and Social Affairs and World Energy Council, World Energy Assessment, 2000などのデータから作成

て利用可能量が大きく異なるといった課題がある。また、エネルギー密度が化石燃料やウランに比べて希薄であるために生産エネルギー量あたりのコストが高いといった問題を抱えている。さらにエネルギーを貯蔵したり輸送したりすることも技術的かつ経済的にみて容易ではない。経済性を考えると再生可能エネルギーは、入手できる場所で直接利用していくローカルエネルギーとしての普及が望ましい。それにはそれぞれの地域で資源のポテンシャルを技術的および経済的な面から見極めていくことが大切となる。

（２）使いやすさ

使いやすさとは「供給力」と「信頼性」をいい、エネルギー技術の利用特性を指す。どのようなエネルギー源も、そのままの状態ですべて使っていくことは難しく、使いやすいエネルギー形態に変換している。図２の家庭のエネルギーもより使いやすい形態に移ってきている。エネルギーは需要に見合った供給力を常に確保しなければならない。

また、エネルギーは、季節、月、日、時刻などでたえず変動するエネルギー需要に合わせて信頼性を損なうことなく供給していかなければならない。

エネルギーの供給力についてみると、化石燃料やウランのように燃料として供給するエネルギー源と太陽光や風力のように自然任せのエネルギー源との間には大きな違いがある。前者は供給力と信頼性の面で優れているが、その代わりに燃料を精製、貯蔵、輸送、変換する施設の建設が必要になる。後者には燃料を供給する施設はないが、反面、供給力と信頼性が劣ってしまい使いにくいエネルギーとなっている。

再生可能エネルギーはエネルギーの種類が多いために、使いやすさは種類によって異なっている。木材や有機廃棄物などのバイオマスは、化石燃料と同じように燃料として利用される。木材は伐採、採集、運搬、乾燥などの施設が、廃棄物は収集や分別、また物によっては燃料化の施設が必要になる。エネルギー密度が

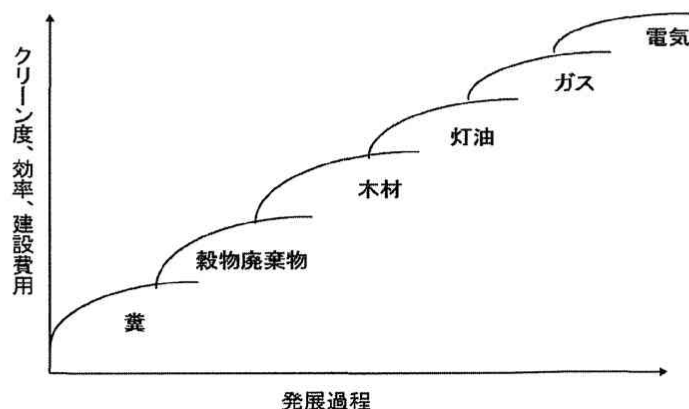


図2 家庭のエネルギーの変遷

化石燃料に比べて小さいバイオマスの場合は、そういった燃料供給施設にかかる建設と運用の費用は化石燃料に比べてかなり高いものとなる。

バイオマス以外の再生可能エネルギーである水力、風力、太陽光、地熱は、エネルギー源が燃料でないためにバイオマスのような燃料供給施設が不要となる。しかし、太陽熱温水器や太陽光発電のようにその場で直接利用できるもの以外は、生産されたエネルギーは需要地まで運ばなければならない。エネルギーの輸送は、地熱の直接熱利用のように周辺地域に配管を使って熱として運べるものもあるが、その多くは電気のように一旦、価値の高い2次エネルギーに変換してから運ばれている。しかし、電気として運ぶには送電施設を敷設しなければならない。水力発電や地熱発電のように発電設備を大型にしないと経済的に採算が合わなくなる。

社会のエネルギーの使い方は季節、曜日、時間によって絶えず変動している。その変動に合わせてエネルギーは供給されなければならない。エネルギーの供給が停止すると、社会は混乱し大きな経済的損失を招くことになる。事故や災害が発生してもエネルギーの供給不足にならないように、燃料の貯蔵施設や供給設備を整備することによって常に安定した供給ができるように努力していなければならない。特にそのままの状態では貯蔵できない電気は、停電すると社会的な影響が大きいため、電力の最大負荷に合わせて電力設備を確保しておかなければな

らない。電力設備の建設には時間がかかるために、将来の電力需要をできるだけ正確に予測して適切な電源計画を事前に立てておく必要がある。社会の発展はより信頼性の高い電力供給を要求するようになっている。情報化やロボット化といった高度技術社会を支えていくためには、電気の電圧や周波数に変動が小さい高品質の電気を送っていく必要がある。

化石燃料と原子力のように燃料を使って発電する技術は、需要の最大負荷に合わせて電気を供給することができる。再生可能エネルギーのうちバイオマス、水力、地熱も貯えられたエネルギーを利用していることから、需要の変動に合わせてある程度まで供給することができる。しかし太陽光や風力となると間欠的なエネルギーであるためにそうはいかない。風の運動エネルギーを動力に変換する風力発電は、気ままな風に合わせて発電するために電気の供給が自然任せとなってしまう。風力発電の電気出力は気象状態によって変動するため、最大負荷が発生する最も大切なときに発電できるという保証はない。また、電気の電圧や周波数も変動しやすいといった課題もある。間欠的なエネルギーである太陽光発電や風力発電によって社会に電気を安定して供給していくには、電力貯蔵技術やバックアップ電源といった補償設備を別に設置しなければならないコスト高となる。

(3) 受け入れやすさ

受け入れやすさとは「環境性」と「安

全性」をいい、生産、製造、利用の過程においてエネルギーが人々の健康や生態系に与える影響の度合いである。

化石燃料を使ったエネルギー技術は、利用時に窒素酸化物や硫黄酸化物といった大気汚染物質と、地球温暖化の原因といわれている二酸化炭素を放出する。化石燃料を利用していくためには事故への対策も必要となる。石油はタンカーの座礁、石炭は採鉱の爆発や落盤事故、天然ガスはガス漏れや火災といった事故が発生する可能性がある。

原子力の利用も放射性廃棄物の扱いと安全の問題に課題がある。原子力発電の特徴は、火力発電に比べて廃棄物の量が非常に少ないことである。もちろん量は少ないとはいっても、放射能がある廃棄物は危険である。放射性物質は一旦、外部に漏洩すると長期にわたり生態系や人々の健康に影響を与える恐れがある。低レベル廃棄物と高レベル廃棄物の処分に対しては長期間にわたり放射性物質が外部に漏洩しないような対策が必要になる。また、原子力施設の事故や核拡散に対しても人々が安心できる徹底した対策を構築しなければならない。

「受け入れやすさ」に優れているエネルギーは再生可能エネルギーである。多くの再生可能エネルギーは発電時に汚染物質を出すことはない。また原子力や化石燃料を使う設備よりも安全性は高い。もちろん環

境への影響や安全性の問題が全くないわけではない。地熱発電の場合、地下から汲み上げた蒸気あるいは熱水中に環境汚染物質が含まれていることがある。ゴミ焼却炉からはダイオキシン*が、バイオマスからは僅かではあるが有害物質や光化学スモッグの原因となる揮発性有機化合物が燃焼時に発生するおそれがある。水力発電はダムを建設すると生態系への影響や景観問題、あるいはダムの決壊といった事故が発生する可能性がある。太陽光発電は、単独運転(islanding operation)**のため、電力系統の停電時や震災などの事故時あるいは発電設備の廃棄時に保守員や作業員が知らずに感電する事故の心配がある。また、半導体シリコンの製造時に洗浄に使用しているフロンの環境対策が必要になる。風力発電の場合は、台風による風車の破損、渡り鳥の被害、高調波による電波障害、騒音、落雷といった問題を解決していく課題がある。

3. 再生可能エネルギーの動力変換と経済性

(1) 動力への変換

エネルギー資源には化石燃料、原子力、再生可能エネルギーの3種類がある。エネルギー資源はそのままの状態では利用できず、使いやすいエネルギー形態に変換してから利用されている。エネルギー形態からエネルギーを分類すると、力学

* 最近の施設においては十分、規制値以下まで処理されている。

**islanding operation（単独運転）：自家用発電設備が接続される一部の電力系統が系統電源と切り離された状態において、自家用発電設備から、線路負荷に電力供給又は電圧を印加している状態。（JISの太陽光発電用語集より）

エネルギー、電気エネルギー、熱エネルギー、化学エネルギー、光エネルギー、核エネルギーなどがあり、それぞれのエネルギー形態は相互に変換し合うことができる。エネルギー形態の変換には、常にエネルギー損失がともなうために、できるだけ効率の良いエネルギー変換技術を開発していくことが望まれる。

社会で使われているエネルギーの用途で最も多いのは熱と動力である。動力への変換プロセスには様々な方法があるが、エネルギー資源を実用的な動力に変換していくプロセスでみるとその種類は限られている。社会の動力機械のほとんどは、風、水、水蒸気などの流体が持っている運動エネルギーを利用してタービンを駆動するものである。タービンの出力は、作動流体の種類によって異なる。作動流体は、風車が空気、水車が水、蒸気タービンが水蒸気である。

流体の運動エネルギーは作動流体の質量と速度の2乗に比例する。運動している流体から取り出される動力は作動流体の単位時間あたりの運動エネルギーで表される。作動流体がもっている運動エネルギーのすべてが動力に変換したとすると、その動力は作動流体の密度、作動面積、流体速度の3乗の積で表される。作動流体が持っている運動エネルギーのすべてが動力に変換できたとすると理論動力 L_{th} は(1)式によって表わすことができる。

上式から風力、水力、水蒸気によって得られる単位面積あたりの理論出力を計算することができる。これらのことから、

$$L_{th} = \frac{1}{2} m' v^2 = \rho A v^3 / 2 \quad \cdots \cdots (1)$$

m' : 作動流体の単位時間あたりの質量 ($= \rho A v$)
 ρ : 作動流体の密度
 A : 流体の作動面積
 v : 作動流体の速度

大きな動力を得るためには、流体の速度をできるだけ大きくしていくことが重要になる。風力、水力、火力について、理論的にみてどの程度の動力が発生できるのかを簡単に調べてみることにしよう。

風力発電は風の運動エネルギーを利用してタービンを駆動する発電技術である。風は大気圧の空気の流れであることから密度はほぼ 1.29 kg/Nm^3 となる。これからたとえば風速 20 m/s で風車を定格出力で駆動した場合、単位面積あたりに得られる理論出力は 5.16 kW となる。水車は水の持っている位置エネルギーや運動エネルギーを利用して水車タービンを駆動することで動力を得る技術である。例えば、有効落差 100 m の水の位置エネルギーを運動エネルギーに変換すると流速は 44 m/s となる。この運動エネルギーのすべてが動力に変換されたとすると、水の密度が $1,000 \text{ kg/m}^3$ であることから単位面積あたりの理論出力は $43,500 \text{ kW}$ となる。この数値は風力発電の $8,400$ 倍に相当する。

火力発電所で蒸気タービンのノズル内での水蒸気はタービン入口でマッハ数の 0.80 程度にもなっており、流速は 400 m/s である。水蒸気の温度圧力を超々臨界圧まで高めると蒸気の密度は 74 kg/m^3 になる。蒸気の持っている運動エネルギーがすべ

表2 風力、水力、水蒸気の理論出力

	密度 [kg/m ³]	流体速度 [m/s]	動力 [kW/m ²] (倍率)
風力(風速 20m)	1.29	20	5.2 (1)
水力 (有効落差100m)	1,000	44.3	43,500 (8,400)
水蒸気 (超々臨界圧)	74	400	2.37×10^6 (460,000)

て動力に変換できると仮定すると、単位面積あたりの理論出力は $2.37 \times 10^6 \text{ kW}$ にもなる。水蒸気によって得られる理論出力は大きく、その値は水車の54倍、風車の46万倍にもなっており、水蒸気を利用することが動力技術としていかに優れたものになるかがわかる (表2)。

同じことは水蒸気に限らずガスエンジンやガスタービンについても言える。このように熱機関には、小さな設備で大きな動力を取り出すことができるといった特長がある。また、風力や水力の場合は動力が得られる場所に制約があるが、熱機関の場合は燃料さえあれば好きなところで動力を得ることができることも大きな利点である。産業革命は熱機関による動力革命であり、産業革命以降の動力技術の発展は熱機関の発展と言える。熱機関を駆動する燃料として最も優れているのは、高温高压の高温ガスや水蒸気を生産することができる化石燃料と原子力で、今日の動力技術の大半がそういったエネルギー源に依存している理由となっている。

(2) エネルギー供給密度

エネルギーの消費は都市を中心に増え続けている。都市におけるエネルギー消

費密度を敷地面積あたりの電力消費量で調べてみると、都内の8階建てのオフィスビルで約 400 kWh/m^2 になり、郊外にある一戸建ての住宅で約 35 kWh/m^2 になっている。電力の消費密度は、冷暖房機器や情報化機器の普及、大型住宅や事務所ビルなどの高層化によって今後も高まっていくと予想される。

高まる電力の消費密度に対して、電力の供給密度はどのようになっているのだろうか。異なる発電技術について発電所の敷地面積あたりの電力供給密度を調べた結果を紹介しよう。表3は、わが国で設置されている太陽光発電、風力発電、水力発電、火力発電、原子力発電について求めた敷地面積あたりの電力供給密度である。

表から風力発電や太陽光発電は供給密度が 20 kWh/m^2 程度で、それは家庭の電力消費量の3分の2を供給できる密度となっている。水力発電の供給密度は発電所によって大きく異なる。表の数値はわが国における100箇所の水力発電の供給密度を平均した値である。 $10,000 \text{ kWh/m}^2$ の高い密度を持つものから数 kWh/m^2 の密度のものまで大きくばらついているが、分布からみて 100 kWh/m^2 前後の発電所の数が最も多い。

石炭火力発電所は、貯炭場、発電・環

表3 電力の供給密度と消費密度

	対象	電力密度 [kWh/m ² 年]	備考
供給密度	風力発電	21	アメリカ、デハチャビ・ウイント・ファーム、出力 275kW×340 基 (3mile ²)、年設備利用率 20%
	太陽光発電	24	日本 (緯度 35 度)、年設備利用率 15%
	水力発電	100	日本の 100 箇所の水力発電平均 (湛水面積あたり)
	火力発電	9,560	碧南石炭火力発電所、70 万 kW×3 基、年設備利用率 75%、敷地面積 133.6 万 m ²
	原子力発電	12,400	柏崎刈羽原子力発電所、821.2 万 kW、年設備利用率 75%、敷地面積 420 万 m ²
消費密度	オフィスビル	400	8 階建てオフィスビル、延床面積 3,000m ²
	家庭	35	一戸建て 2 階、敷地面積 165m ² 、契約電力 40A

境設備、管理棟、灰捨て場、構内の道路・緑地といった発電所にかかわる敷地を入れて計算しても10,000kWh/m²近い電力供給密度となっている。同じように原子力発電所も敷地面積に管理区域以外の構内緑地帯を含めても12,000kWh/m²以上の電力供給密度となっている。それらの数値は風力発電や太陽光発電の500倍にもなっており、原子力発電と火力発電がわずかな土地で大量の電気を供給できる技術であることがわかる。わが国は国土の3分の2が森林で覆われ、残った土地も農地、工場、住宅、道路などに使われている。原子力発電と火力発電は、限られた土地で電力を大量に供給していくのに優れた技術であることがわかる。

(3) 建設費と発電コスト

再生可能エネルギーにはバイオマスを除いて燃料を使わないことによる経済的なメリットがある。しかし、一方では次

に示すような課題がある。

- ① エネルギー密度が低いために単位出力あたりの建設費が高い。
- ② 年間の設備利用率が低いために単位電力量あたりの建設費が高い。
- ③ 間欠的なエネルギーであるために最大負荷時において設備能力が低く、また電圧・周波数に変動があるために電気の質が低下する。
- ④ 発電量が地域の特性に依存しており、場所によって設備工事費が高くなる。

再生可能エネルギーの経済性には、立地制約に伴う費用増の問題が大きい。一般に、太陽光発電や風力発電と言った小規模分散型技術は、家電製品や自動車と同じように製品を量産することによってコストが安くなっていくと考えられている。普及によって量産化が進めば習熟効果によってコストが低減し、それによっ

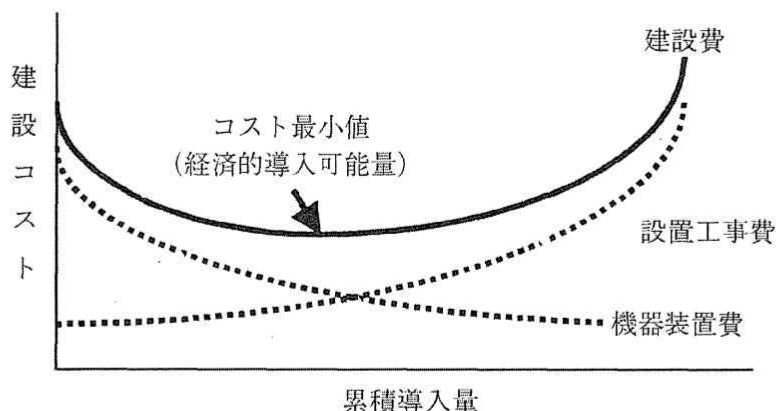


図3 再生可能エネルギーの導入規模に対する建設コスト

てさらに普及が拡大していくと期待されている。確かに太陽電池や風力発電の翼や発電機といった機器装置は、家電製品などと同じように量産化によってコストが低減していく。

しかし、発電設備の建設費にはそういった機器装置だけでなく、それらを設置するのに必要となる工事費用がある。再生可能エネルギー技術はエネルギーが生産できる場所に設備を建設しなければならない、設置場所の特性によって建設費が大きく変わる。例えば、風力発電は設備の稼働率を高めるためには強風地点である岬や山岳地帯に導入していくことが望ましい。そういった地点は、一般に風車の翼やタワーなどの大型装置が搬入できる港湾施設や道路が整備されておらず、また立地点の基礎工事に手間がかかることが多い。導入初期であれば、そういった制約の少ない地点を選んで建設していくことができるが、普及が進むにつれて条件の悪い場所しか残らず、設置工事費が高くなるところに風車を建設せざる

を得なくなる。設置工事は機械電気装置のように工場で量産化できるものではないために、設置条件が悪い場所になるとその費用が高くなる。風力発電の建設費は、導入の初期段階では低下していくが、設備の累積導入量が多くなるとある段階から増加していく(図3)。再生可能エネルギーは、地域的な特性に依存するために、経済的に立地できる場所がどれだけあるかを見極めることが大切になる。

4. おわりに

再生可能エネルギーは、政府の目標によると2010年までに1次エネルギー総供給の3%（水力の3%を除く）であり、当面は基幹エネルギー源としては期待できない。わが国の膨大なエネルギー需要を再生可能エネルギーによって供給していける見通しは当面考えられない。その打開策の1つに、海外で再生可能エネルギーをメタノールや水素に転換して輸入することも考えられている。しかし、そ

の方法は経済的に巨額な資金負担が伴うことの他に、燃料が海外依存になるために化石燃料と同様に供給途絶や価格変動といった不安が発生する。

再生可能エネルギーのポテンシャルは海外において大きい。21世紀は再生可能エネルギーの利用が地球規模で拡大していく可能性がある。国際的な技術としての市場を確保していくには技術基盤の確保が重要で、わが国においてもその基盤維持のための普及が望まれる。わが国において再生可能エネルギーの普及が望まれる地域は、化石燃料や原子力発電といった大型技術の導入が難しい離島や僻地

であり、地域におけるローカルエネルギーとしての利用である。そういった地点では、通常、燃料輸送や送電線敷設の費用負担から発電コストが高価であるために、経済的に再生可能エネルギーを導入していくことができる。地域でのローカルエネルギー利用は、地域産業の振興も考慮して総合的に検討していくことが重要になる。そういったノウハウは、再生可能エネルギーの普及が期待されている南太平洋の島々や開発途上国の農村におけるエネルギー供給計画にも役立つことになる。

〔寄稿〕

循環型社会と産業の方向性



中 條 寛 (株)三菱総合研究所
資源・循環研究部長

1. はじめに

循環型社会形成推進基本法に基づく基本計画が策定されたことも手伝い、最近、循環型社会というキーワードを目にする機会が多くなっている。本稿では、循環型社会とはどんな社会なのか、ビジネスとどのような関係があるのか、さらにもう少し広く、今後の産業活動の方向性とどういった関係があるのかという観点から筆者なりの考え方を述べてみたい。

2. わが国における物質・エネルギー利用の概要

循環型社会を考える場合、まず物質・エネルギーの利用が現在どのようになっているのかを見るのが基本となる。図1は、1995年のわが国の物質・エネルギーフローを示したものである。ここでは、投入資源を4つに分けている。1つ目が生物系の資源（1億8,100万トン）、2つ目が鉱物系の資源（金属、土石、石灰石など12億8,500万トン）、3つ目が化石エネルギー資源

（4億6,000万トン）、最後がエネルギーの1つとしての非化石エネルギー資源である。これに中間・最終製品として輸入されるものを加え、わが国では22億トン弱が投入されている。一方、そういった資源を使って経済活動を行った結果として約4億5,000万トンの廃棄物が排出されている。その差は社会に蓄積されるか、化石燃料の燃焼の結果、二酸化炭素（CO₂）などとして大気中に排出されていることになる。

木質資源、食料資源といった生物系の資源については、再生可能、CO₂固定という意味で非常に重要な役割があり、これらをどのように利用するかが持続可能性という意味で重要となる。また、プラスチックのように化石エネルギー資源である石油をマテリアルとして使用した後、エネルギー利用を含め、さらにどのように使っていくのかという、物質・エネルギー利用のバランスも大きな問題となる。

このような物質・エネルギー利用構造の中で、いま問題となっていることを短期、中長期の順に以下の5つを挙げることができる。

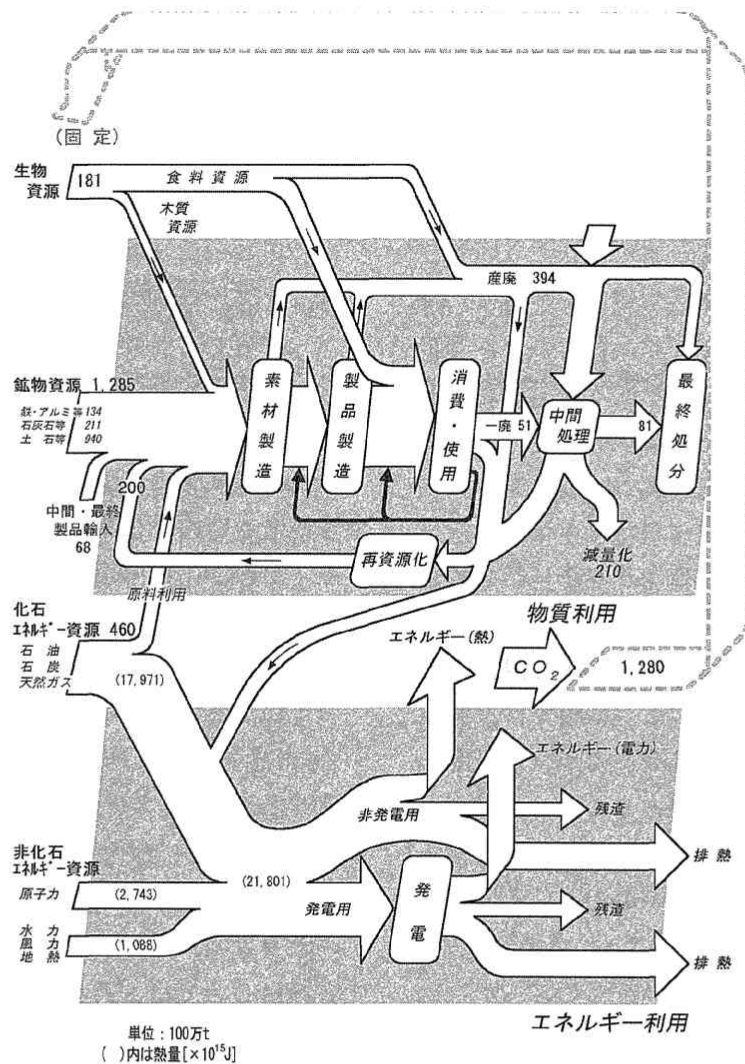


図1 わが国の物質・エネルギーフロー (1995年度)

- ① 最終処分場が逼迫している，すなわち，いつまでも廃棄物を捨て続けられるわけではないということ。
- ② このような資源の利用，特に廃棄物の処理やリサイクルに伴って環境負荷・リスク物質が排出されているということ。
- ③ 資源循環とは言え，トータル環境負荷の観点からはそれに要するエネルギーとのバランスを考えなければいけないということ。
- ④ 物質の利用，エネルギーの利用に伴ってCO₂が排出され，地球温暖化が進行しつつあるということ。

- ⑤ 鉱物資源、化石エネルギー資源は非再生性のため、これらがいずれは枯渇するということ。

2. 循環型社会の姿

(1) 3つの視点から

前章の問題認識を踏まえると、目指すべき循環型社会とはどのような社会であろうか。

今般策定された循環型社会形成推進基本計画の中でも、同じような視点を示しているが、表1のように要約できる。

表1 循環型社会の3つの視点

- | |
|--|
| <p>① 生産・流通・消費・廃棄・リサイクルといった経済活動すべての段階で資源・エネルギー利用の無駄がなくなり、環境への負荷が低減される。</p> <p>② 環境に配慮した経済活動が市場で評価される形になる。</p> <p>③ 結果として、経済活力と良好な生活環境が両立する。</p> |
|--|

(2) 3つの側面

こういった社会像は次の3つの側面から見ることができる。

① 物理的な物質循環

この点では物質の利用とエネルギーの利用がベストミックスして最も効率がよい社会ということができよう。わが国は非常に多くの資源を海外から輸入して利用しているため、社会に既に蓄積された資源をいかに上手く活用するかということでもある。

② 産業構造

生産・流通・消費・廃棄という一方通行型、使って捨てるという形から、リサイクルが加わって循環型に進化しつつあるというのが現在の状況であるが、さらには、より循環の目が細かくなって、単純な1つのループではなく様々な段階で多様なループが結合するという形、言わばネットワーク型に産業構造が組み立てられた社会という姿である。

③ ライフスタイル

現在、我々はモノを消費する、あるいは保有するといった形で利用しているが、これをモノの果たす機能をサービスとして利用する形に変革する、つまり、モノの所有と利用とが切り離された形へと展開していくことが考えられる。リースやリペア、メンテナンスなどの形で、長くモノを使うようなスタイルに変わってくる社会が循環型社会としてイメージされる。

(3) 循環型社会構築の課題

循環型社会の形成に向けては図2に示すように多くの課題が存在する。

① 物質循環面での課題

1つ目の物質循環という側面では、多くが廃棄物として回収され、リサイクル、あるいは処分される中で、資源の再生利用をいかに拡大するか、廃棄物からいかに高効率にエネルギーを回収するか、最終的に処分される場合の環境負荷をいかに極小化するか、といった課題がある。

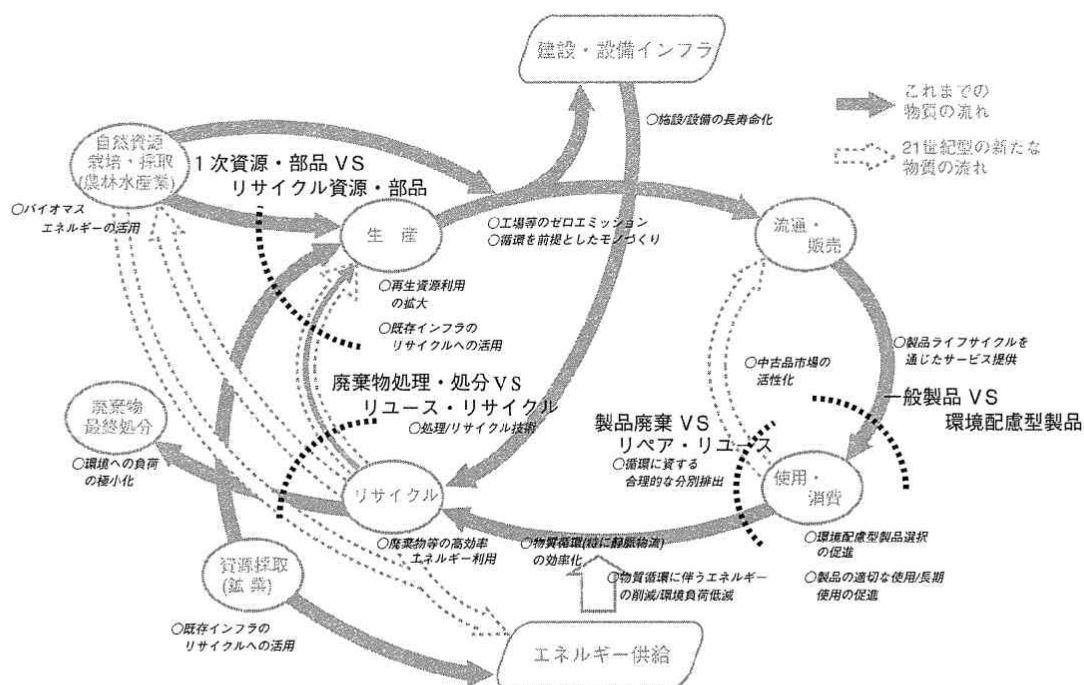


図2 循環型社会への課題

こういったリサイクルのルートを考えてみると、いくつかのハードルが存在する。廃棄物の処理・処分とリユース、リサイクルを比較すると、現状では必ずしもリサイクルが価格的にメリットのある手段とは限らない。また、再生資源を利用する側にとっても、1次資源・部品と、再生資源・再生部品のどちらを使うかという選択の問題がある。一般的には、リサイクル資源の方が高い場合が多く、このようなハードルも乗り越えて初めて循環が成立することになる。

② 産業構造面での課題

産業構造的に見た場合にも同じような問題が存在する。ネットワーク的に産業連携が進むとしても、例えば処分、ある

いはリサイクルという段階では、処理・リサイクル技術をより高度化し、いかに資源やエネルギーの回収効率を上げるか、あるいはコストを下げるかという課題がある。ここでは、既存インフラをいかに上手く活用するかがポイントとなる。また、コスト効率を考えると、一番大きなネックとなる物質の循環、すなわち物流の部分をいかに効率化することも大きな課題である。ここでも、処理・処分とリサイクルとの比較、あるいは利用する側での1次資源と再生資源との比較というハードルを乗り越えなければならない。

③ ライフスタイル面での課題

3点目のライフスタイルという側面では、モノ自体を消費するのではなくモノ

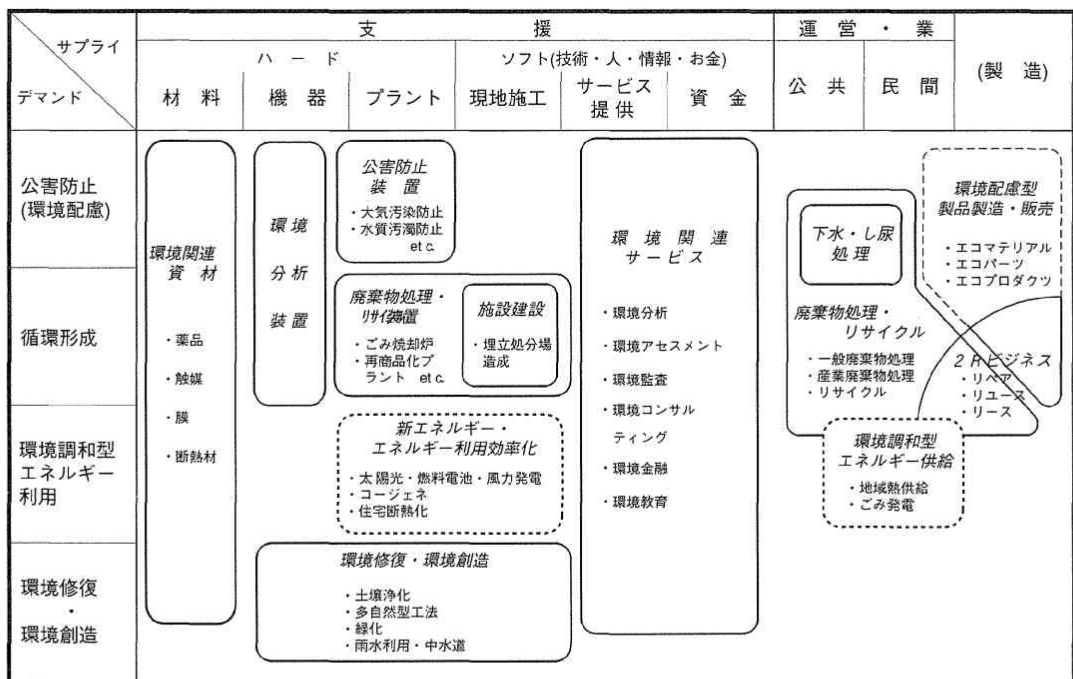


図3 環境産業の分類

によって提供されるサービスを消費するという考え方から言えば、製品のライフサイクルを通じたサービス提供、すなわちモノを作って売って終わりということではなく、使っている間もメンテナンスをしながら総合的にサービスを提供するというビジネスや一旦不要になったモノを中古品市場に送って再使用するというビジネスの確立が課題である。一方、消費者の側から言えば、環境に配慮した製品の選択の促進や、製品の適切な使用、長期使用の促進が課題である。

こういったライフスタイル側面を考えた場合にもハードルがある。1つは、製品選択をする場合に、環境に配慮された製品とそうでない製品のどちらを買うかという問題であり、もう1つは、不要あるいは故障

した時に、製品を廃棄した方がいいのか、リユースという形で回した方がいいのか、修理して使うのか、この選択の問題である。循環が成立するためには、こういったハードルも乗り越えなければならない。

3. 循環型社会と環境ビジネス

(1) 環境ビジネスの分類と市場規模

少し視点を変えて、「ビジネスとしての循環とはいかなるものか」を見てみよう。図3は環境産業にどのようなものがあるかを、そのビジネスが提供するもの、貢献する環境分野でまとめたものである。

環境ビジネス分野は、表2に示すように、現状、48兆円の市場規模、136万人の雇用規模が、2010年には67兆円、170万人

表2 環境産業の市場規模：現状と展望

	市 場 規 模【億円】		雇 用 規 模【人】	
	現状	2010年	現状	2010年
環境分析装置	300	400	1,290	1,080
公害防止装置	11,690	15,760	18,610	19,370
廃棄物処理・リサイクル装置	4,870	7,120	7,740	8,940
施設建設(埋立処分場造成)	1,660	340	1,490	310
環境修復・環境創造	17,350	54,850	62,020	192,840
環境関連サービス	2,230	7,360	9,880	28,610
下水・し尿処理	920	12,120	12,420	42,500
廃棄物処理・リサイクル	407,220	531,750	1,183,310	1,332,290
環境調和型製品	34,970	43,760	62,620	77,760
合 計	481,210	673,460	1,359,380	1,703,700

出所：経済産業省産業構造審議会資料

に拡大するものと予測されており、他の産業分野に比べても大きな伸びが期待されている分野と言える。これまで述べてきた循環分野（ここでは具体的には廃棄物処理・リサイクル分野）は現時点でも市場規模、雇用規模が最も大きいセクターであるが、今後の伸びの面でも最も期待されているセクターと言えよう。

なお、ここでの廃棄物・リサイクル分野はリユースやリペアなどを含んだものであり、リデュースなどについては概念的には環境調和型製品分野などをも含み得るものとなり、3R全体ではさらに大きな意味を持つ分野である。

（2）環境ビジネスの方向性

上記の環境産業分類の中で現在のビジネスの動きとしては大きく次の2点を指

摘することができる。

まず第1に、公害防止あるいは廃棄物処理・リサイクル装置を作って供給するという形から、関連サービスも含めて、人、技術、お金の面で産業の環境化をサポートする、さらには、廃棄物処理・リサイクルの事業運営など、総合サービス業に展開するといった動きが挙げられる。

2点目は、廃棄物の処理・リサイクルの動きと、既存の産業の中で環境に配慮する、例えばゼロエミッション、インバースマニファクチャリングなど動脈部分の環境化の動きが一体になった形、言わば動脈系産業と静脈系産業が一体化し、その際にリサイクルだけではなく、リユース、リデュースという3R全体を含んだ形へ展開していく動きである。

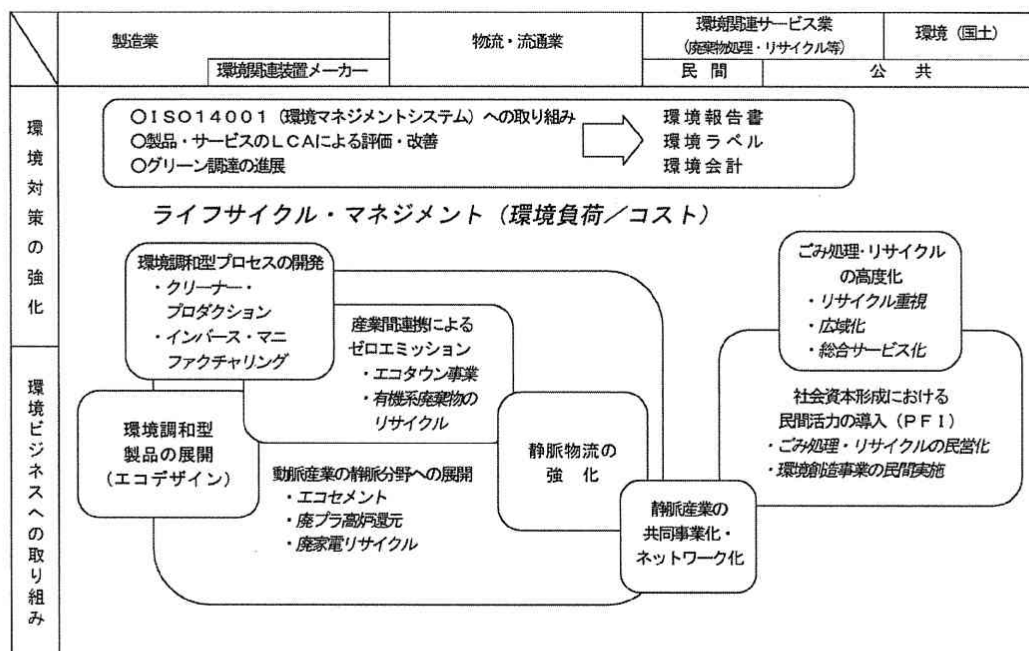


図4 企業による環境への取り組み

4. 企業活動と環境への取り組み

(1) 環境への取り組み：守りと攻め

一方、企業活動の視点から環境への取り組みを見てみると、図4のようにまとめられる。

一般的に企業にとって環境取り組みといった場合、環境対策をいかに強化するかという視点とビジネスとして環境にどのように取り組むかという視点がある。

環境対策の強化という視点では、ISO14000をベースにした取り組み、およびそこから発展形として、製品・サービスについてライフサイクルアセスメント(LCA)に基づき評価・改善する、調達においてグリーン調達を進めるという大きな動きがある。さらに、このような

取り組みを世の中にどのように説明していくかという点で、環境報告とか、製品の環境ラベルといった動きが存在する。ライフサイクルで環境負荷やコストをマネジメントするという動きである。

環境ビジネスへの取り組みという視点では、これまで動脈と考えられていた素材系の産業、例えば、セメント、鉄、非鉄、化学産業などが静脈分野へ大きく展開しているという動きがある。

これらの展開を合わせ見ると、環境対策の強化という“守り”と、環境ビジネスへの取り組みという“攻め”が一体化し、より環境に配慮したプロセス、あるいは製品・サービスがビジネスの競争力につながってくるものと、環境先進企業では捉えられて来ていると言えよう。

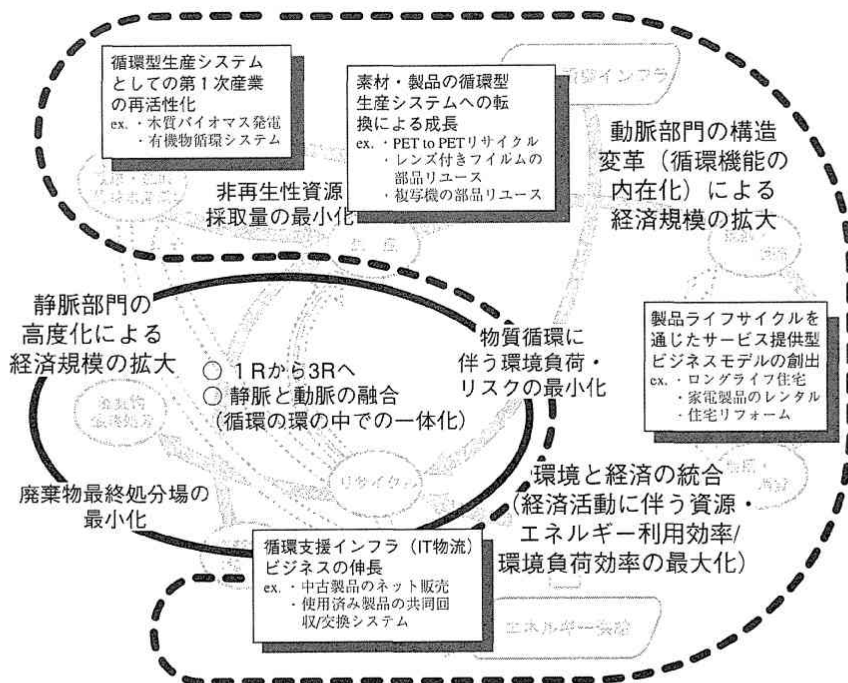


図5 循環型経済社会のビジネスモデル

(2) ビジネスの方向

このような動きの中で、今後、新たなビジネスモデルとしてどのようなことが考えられるであろうか。図5に示すように、リサイクルから3Rへ進化する、また動脈と静脈が融合して循環の環の中で一体化するといった『静脈部門の高度化による経済規模の拡大』がまず挙げられる。しかし、実はそれ以外に、これを取り囲むような形での動脈部分の変化、言わば『動脈部門の構造変革（循環機能の内在化）による経済規模の拡大』に向けたビジネスモデル創出が本質的部分で、ビジネス規模としても今後期待できる展開ではないかと考えられる。

例えば、1次産業というのは、これまで食料資源・木質資源などを提供すると

いう役割があったわけだが、木質バイオマス発電や有機物の循環システムといった形で経済社会における循環システムと密に連携した形で、新しい産業、1次産業の再活性化につながる姿が考えられる。

また、素材・製品の生産システムで、循環型に展開していくことによって成長するビジネスモデルもあり得る。PET to PETのリサイクル、レンズ付フィルムのリユースといった循環型の生産システムはその萌芽とも言える。

さらに、製品のライフサイクルを通じたサービス提供のためのビジネスモデルも期待される。例えば、住宅で言えばロングライフ化やリフォーム、製品の提供形態でもリースなど、ライフサイクル全体でサービスを提供してコストを回収す

るビジネスであり、ここにも新たな可能性がある。

一方、こういった循環全体をコントロールするということでは、IT（情報技術）や物流が非常に重要な役割を占めるため、この辺のビジネスも大きな進展が期待できる分野である。

5. 循環型社会と産業の方向

循環が成立するためには、図2で示したようにモノを買う段階、捨てる段階、処理・リサイクルする段階、再利用する段階で、それぞれのハードルを乗り越えなければならない。まさに、そこが循環型ビジネスで苦勞する部分、なかなか循環がうまくゆかない部分である。

第4章第2節で述べたビジネスモデル、特にライフサイクル型のビジネスモデルが示唆しているのは、『1つひとつのハードルを乗り越えるのは大変かもしれないが、循環全体をまとめると、ビジネスベースで成立する場合がある』ということである。例えば、我々がテレビを買う。ここで、テレビはいくらかと言うと、テレビという製品をお店で買う時の値段を考えるが、テレビのライフサイクル・コストはそれだけではない。受信料や電力会社に払う電気代、捨てる時の廃棄代などライフサイクル全体で見ると、色々な対象に色々なお金を払っているのである。トータルで安いサービスが提供できれば、それ自体が経済ベースで成り立つ可能性がある。

では、なぜ現在、そのような選択がなされないのか。それぞれのお金を支払う対象者が違うという点があげられよう。電気代であれば電力会社、テレビという製品であれば家電販売店に支払うという形で、支払対象者が異なるので、同じモノに払っているという認識での製品選択ができないのである。従って、ライフサイクルコストを情報提供、情報流通させる枠組ができれば、そのような製品選択があり得るし、それに応えるビジネスも成立する可能性がある。これこそが静脈部分だけではなく、循環全体の中で考えた場合のビジネスのヒントになるのではないか。

循環システムの方向性としては、リサイクルだけではなくリデュース、リユースという3Rの形にまで選択肢が広がり、必然的に循環全体をカバーするような形が見えつつある。それは、環境・資源制約が顕在化しつつあるなかでの、持続可能性、すなわち産業競争力そのものであり、循環形成による環境の維持・向上と持続的な経済成長とが両立することでもある。そのような意味で、循環型社会の形成は、国際的にわが国がモデルを示しリーダーシップを発揮できる分野と位置づけた取り組みが望まれよう。

将来の社会情勢分析と 原子力技術開発のロードマップ*



菅 野 実

(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

地球温暖化防止への貢献やエネルギーセキュリティの向上等、原子力発電は他電源と比較して優位な面を有している。しかし、電力市場の自由化や核燃料サイクル/バックエンド事業など、わが国の原子力を取り巻く環境は大きく変化しており、今後、これまで以上に研究開発資源の効率的な投下が求められる。本調査では、原子力発電の研究開発方針の策定に資するため、原子力需要に影響を与える諸要因を幅広く抽出して総合的に評価・分析を行い、将来的に求められる原子力技術開発のロードマップとしてとりまとめた。

2. エネルギー需要の予測

将来のエネルギー需要を予測するものとして、世界レベルでの標準値には、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) による排出シナリオに関する特別報告書⁽¹⁾ (SRES: Special Report on Emission Scenarios)

に示される4シナリオを想定したエネルギー需要分析がある。SRESシナリオでは、社会情勢を考察する軸として、「社会的価値」(環境対経済成長)、「空間」(世界対地域)が想定されており、A1が経済重視・地球志向シナリオ、A2が経済重視・地域志向シナリオ、B1が環境重視・地球志向シナリオ、B2が環境重視・地域志向シナリオとなっている(図1)。「空間」の世界対地域では1人あたり所得の収束速度の違いによって途上国のエネルギー需要増加率に影響を与え、世界だと格差縮小速度が速く、地域だと格差縮小速度が遅い。

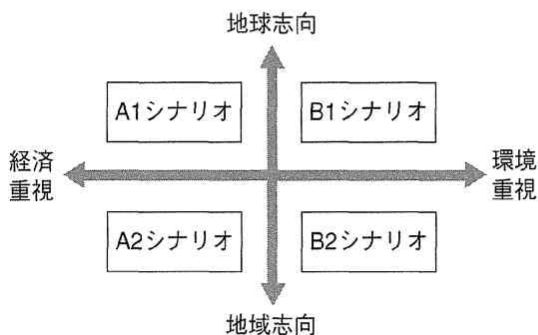


図1 SRESの将来社会想定

*本稿は2003年3月にまとめた「軽水炉改良技術確証試験(次世代型軽水炉開発戦略調査に関するもの)報告書」の内容を整理・加筆したものである。

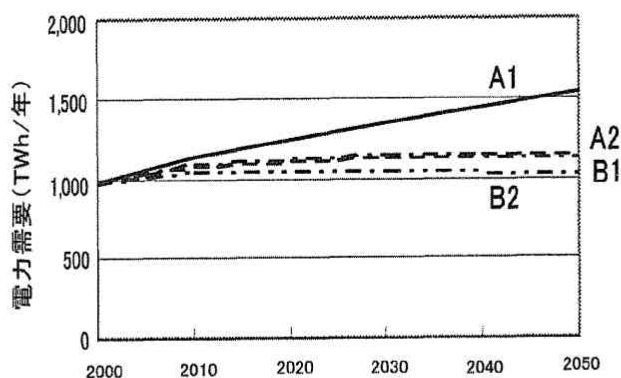


図2 日本の電力需要

また、日本のエネルギー需要としては、環境省がSRESの価値基準に準拠して作成した日本版SRESシナリオ⁽²⁾（平成13年6月）がある。ここでは、日本の人口は2008年頃をピークとして低下するとの前提にたっており、日本の電力需要は人口1人あたりの国内総生産（GDP）やエネルギー消費量が大幅に伸びるA1シナリオを除いて停滞傾向にある。日本における2050年時点の電力需要を日本版SRESから外挿してみると、A1シナリオでは現在の1.5倍程度、A2、B1、B2シナリオでは1.1～1.2倍となる（図2）。

なお、SRESでは、各シナリオに沿った1次エネルギー種別構成や電源構成も提示されているが、例えば、B2の環境重視・地域志向シナリオでは、日本における原子力発電所の新設をゼロとする等の極端な仮定をおいている。このため、本調査では、各シナリオのエネルギー需要のみを参照し、電源構成は、別途、分析モデルを作成して評価した。

3. エネルギーモデルと原子力需要分析モデルの統合化

原子力需要に影響を及ぼす要因として、電力需要、環境負荷、立地、経済性、技術、社会・制度、および非電力エネルギー供給の8要因を対象とし、定量的な評価が可能な要因は最適化型モデルでエネルギー需給システムを推定し、定量化が難しい要因に対しては原子力に関するシステムダイナミクスモデルを組み合わせることで原子力の将来像を描くモデルを作成することとした（図3）。

（1）最適化型モデル（DNE21モデル）

DNE21モデル⁽³⁾は21世紀中頃にかけての二酸化炭素（CO₂）問題対策技術の包括的可能性評価と将来の具体的対策シナリオの作成を目的に開発された最適化型モデルである。このモデルの特徴は、全世界を対象とし、工学的データに基づいた技術評価を指向していることである。

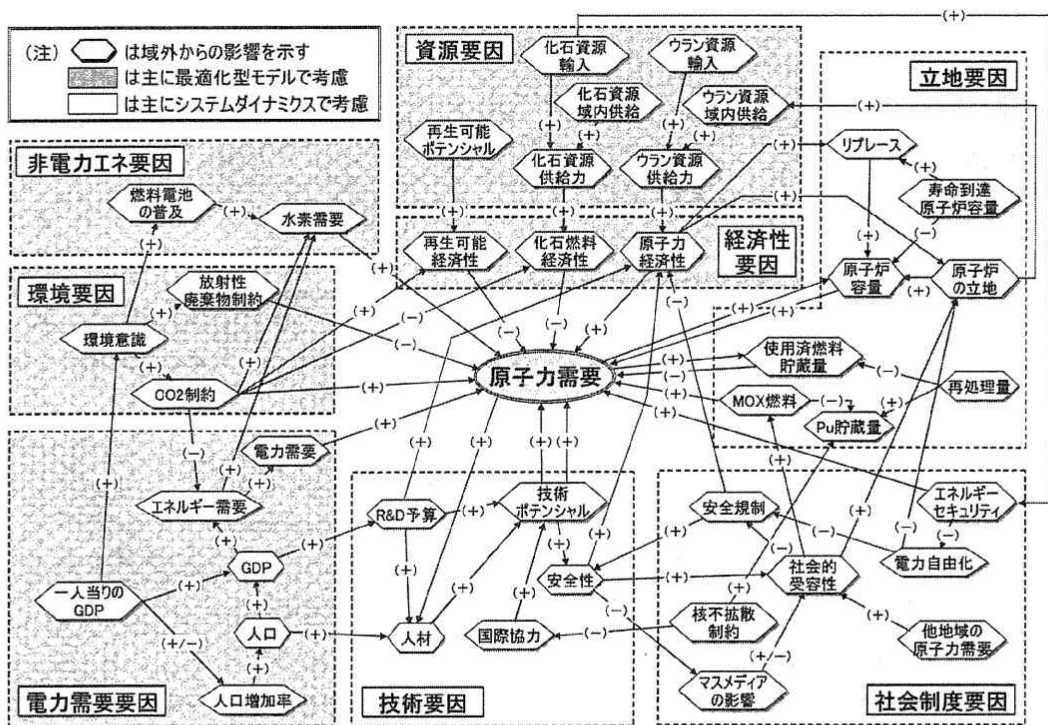


図3 要因相互関係の整理とモデルの構築

CO₂回収処理やエネルギー長距離地域間輸送などの技術的対策は、従来の計量経済モデルや一国のみを対象にしたエネルギーモデルでは評価が困難であったが、DNE21モデルではそれらについても適切な評価が可能となっている。

DNE21モデルは、1990年～2100年までのエネルギー需要シナリオの下で、世界全体のエネルギーシステムの最適化を行なうものである。最適化の評価基準は、世界全体のエネルギーシステムの総コストである。

(2) システムダイナミクスモデル

システムダイナミクス (SD: System Dynamics) とは、「任意のシステムにお

る情報と決定の依存関係を想定し、それに基づくシステムの時間変動を研究するアプローチ」である。社会、経済、産業、企業の別を問わず、あらゆるシステムの中には、「情報」と「決定」との間に複雑な依存関係が存在する。システムの中の各行動主体は、各時点における「情報 (現状と将来予測)」に基づいて意思決定を行う。その決定は何らかの形で行動となって現実を動かし、その結果、現実はその以前と異なるものに変化する。すると今度は変化した現実を反映して「情報」が再構築され、それが次の時点の意思決定に影響を与える。

SDモデルの適用範囲は、都市計画や地域開発などの政策問題の検討、新製品の市

表1 日本の電力コスト入力

	OECD/NEA 「Projected Cost of Generating Electricity 1998」*1				DNE21 への入力データ		
	建設費 (\$/kW)	資本コスト (mills/kWh)	O&Mコスト (mills/kWh)	年経費率	建設費 (\$/kW)	年経費率	備考
原子力	2521	24.9~47.8	16.8~17.5	0.11~0.17	2120	0.13	原子力: 5.9 円/kWh*2
石炭	2561	24.0~44.5	12.5~12.7	0.09~0.15	2110	0.12	石炭火力: 6.5 円/kWh*2
天然ガス	1640	14.9~26.9	7.9~8.0	0.09~0.14	1540	0.11	LNG 火力: 6.4 円/kWh*2

*1: OECD/NEA の評価では、負荷率 0.75、割引率 5%~10%、また、プラントコストは 1996US\$ で算定されているため、GDP デフレーター(1996 年を 1 とした場合、2000 年は 1.07)を用いて 2000US\$ に調整している。

*2: 1998 年の総合資源エネルギー調査会の発電単価想定になるように、建設費と年経費率を調整した。

場戦略や研究開発投資などの意思決定分析、企業成長や景気変動といった経済問題の分析、在庫管理等の企業経営分析、地球規模での資源問題の検討（ローマクラブのレポート『成長の限界』）等、様々な分野に適用され多くの成果を挙げている。

4. 原子力需要の分析

(1) 仮定条件

モデル分析では計算対象期間を2000年から2100年までとし、割引率年2%を前提とした。各種電源のプラント寿命は40年とし、プラントコストはOECD/NEAの評価⁽⁴⁾を用いたが、日本の場合のみ、1998年の総合資源エネルギー調査会の発電単価想定になるように調整した（表1）。また、化石種燃料の資源量、価格はRognerの推定⁽⁵⁾をベースに図4~6に示す供給関数とした。天然ウラン資源量は、OECD/NEA-IAEAによる推定値⁽⁶⁾に基づいて設定し、図7に示す供給関数とした。原子力における燃料サイクルは、日欧はプルサーマルによる天然ウラン資源の節約、その他地域はワンスルーを仮定した。

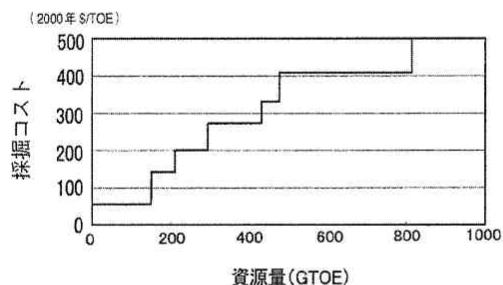


図4 石油の資源供給関数

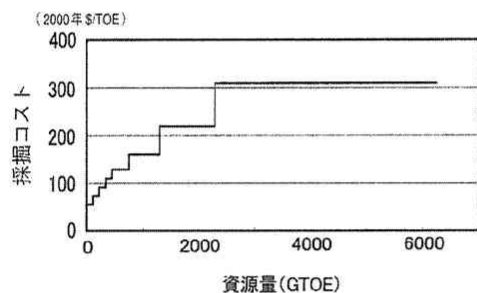


図5 石炭の資源供給関数

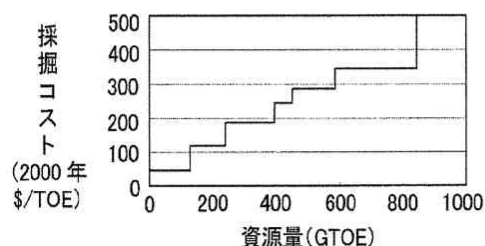


図6 天然ガスの資源供給関数

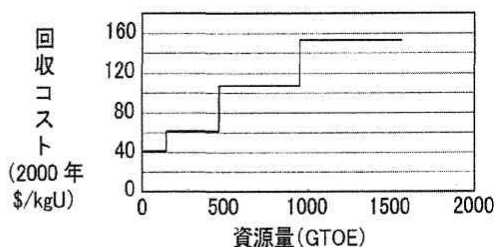


図7 天然ウランの資源供給関数

(2) 原子力発電量に関する基本想定

前述の通り、日本版SRESでは、日本における2050年時点の電力需要は、A1シナリオで現在の1.5倍程度、A2、B1、B2シナリオでは1.1～1.2倍になると分析されている。本調査ではこの電力需要をベースに電源種別のシェアを、総コスト最小化の観点から分析した。この結果、日本における2050年時点の原子力需要はA1シナリオで現在の2.6倍、A2、B1、B2シナリオで2.2～2.4倍と、電力需要よりも大きな伸び率となり、原子力のシェアはいずれのシナリオでも54%以上となった。このような試算結果を得た理由として、原子力の発電コストが他電源よりも安いとした総合資源エネルギー調査会の試算結果を仮定条件としたこと、将来のCO₂排出制約をすべての試算ケースで想定したこ

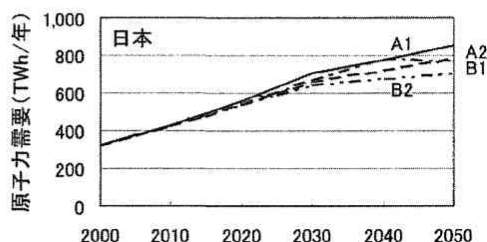


図8 日本の原子力需要

となどが挙げられる。

(3) 原子力需要に影響を与える要因の感度分析

次に、経済性要因における発電コスト等、各種要因の関連パラメータの仮定条件を変化させて原子力需要に与える影響度を分析した(図8)。

最適化型モデルではCO₂規制シナリオとして京都議定書を2100年まで継続するケースと2100年時点のCO₂濃度を550ppmに規制するケース、発電コストとして5.9円/kWhの標準ケースとそれぞれ20%増減したケースを評価した。SDモデルでは既存サイトに増設可能な想定量として3,600万kWと4,800万kWのケース、また、資本生産性や国民が原子力の安全性に対して懸念を抱く事象の発生頻度を変えたケース、その他にプラント寿命期間、建設/立替期間、設備利用率などを変化させた分析を行った。この結果、原子力需要に特に大きな影響を示した例を以下に示す。

① 発電コストの影響(最適化型モデル)

発電コストを標準値5.9円/kWhから20%低減した場合、A1シナリオでは原子力需

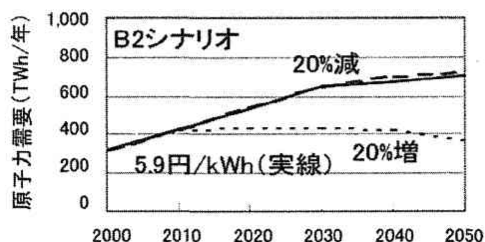


図9 発電コストの影響

要が若干増加するが、A2、B1、B2シナリオでは既に原子力のシェアが相当高いため、大きな需要の増加は見られなかった。また、発電費が逆に20%増加した場合、A2、B1、B2シナリオでは大幅な需要減となった（図9）。

② 資本生産性（SDモデル）

投資家にとって重要な財務指標である総資本経常利益率は、「売電価格」と「発電量／総資本」の積である総資本回転率等で構成される。総括原価方式では、投下資本に応じた売電価格が設定されるが、競争市場では市場で売電価格が決定される。このため、競争市場では固定資産額に対する発電量を示す資本生産性を高めることがより強く求められる。

2000年時点で、設備利用率を80%、減価償却済プラントの割合を45%とすると、原子力発電の資本生産性は0.095kWh/円であり、LNG火力はその1.4倍程度である（図10）。資本生産性の目標が高く設定された場合、原子力需要は低減する。

③ トラブル頻度（SDモデル）

原子力の社会的受容性を分析する例として、国民が原子力の安全性に対して懸念を抱く事象の発生頻度を仮定した。事象が発生しない場合は年2%で信頼度が向上するが、発生した場合には20～30%の信頼度低下を招くとした。この仮定では、事象の発生頻度は原子力需要に大きな影響を与える結果となった（図11）。

これらの原子力需要の分析を通して、

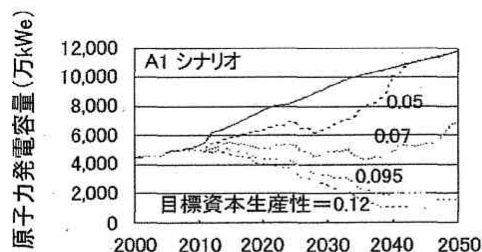


図10 資本生産性の影響

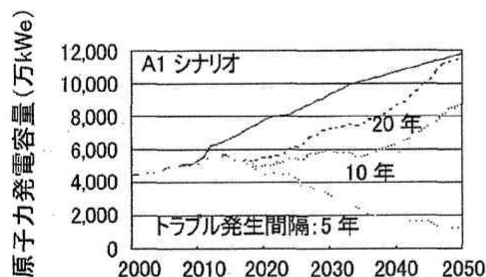


図11 トラブル発生間隔の影響

使用済燃料、高レベル放射性廃棄物、およびプルトニウムの蓄積量なども関連して評価され、これらの燃料サイクルに関する対応策もシナリオに応じて重要課題となることが示された。

同様に、天然ウラン資源についてもエネルギー需要が大きいシナリオではより有効な資源利用の必要性が示された。

また、将来の原子力需要に対して立地要因が制約となる可能性があり、寿命延長、廃炉・建設期間短縮等による用地の利用効率向上あるいは新規サイト確保策の必要性が示された。

電力以外の原子力利用である非電力エネルギー要因については、水素燃料電池の大幅な導入を仮定した場合に、核熱としての原子力利用形態が想定可能である。

以上、各パラメータの変動による原子力需要への影響度が定量的に示された。

5. 将来の技術開発方針の検討

(1) 検討のアプローチ

原子力需要に影響を与える要因として分類したもの内、特定の技術課題に関連しない電力需要要因および技術要因を除いた6要因に着目して、以下に示す手順で作業を進め、最終的にシナリオに応じた「技術開発ロードマップ」をとりまとめた。

①各要因の克服あるいは達成に向けて

「必要となる対応策」(1次分類)の抽出

②「必要となる対応策」の重要度付け

③「必要となる対応策」に対応する「技術開発テーマ」(2次分類)の抽出

④「技術開発テーマ」の導入想定時期、導入効果、開発コストの評価

⑤技術開発ロードマップのとりまとめ

(2) 「必要となる対応策」の抽出

本調査ではワーキンググループを設置し、専門家によるレビューを受けつつ検討を進めた。「必要となる対応策」の抽出結果は図12に示す通りである。



図12 必要となる対応策の抽出

(3)「必要となる対応策」の重要度付け

原子力需要に対する要因の影響度はシナリオに応じて異なる。その要因に対する「必要となる対応策」の寄与度もその内容に応じて異なる。「必要となる対応策」の優先度を検討するため、各シナリオに対する関連要因の重要度と「必要となる対応策」自体の関連要因への寄与度の2面から検討を行った。各シナリオに対する要因の重要度は感度分析で影響度の大きかった経済性要因（発電コスト、資本生産性）や社会制度要因（社会的受容性；事象発生頻度）を相対的に大きくすることが考えられた。しかし、パラメータの変動幅設定が各要因に対して適正に

バランスしているか等について十分な検討がなされていないこと、また要因そのものの不確実性が大きいこと等から、要因間の重要度比較は行っていない。このため、各要因とも最高配点は一律10点として、原子力需要に与えた感度分析結果から各シナリオに比例配分した。

「必要となる対応策」自体の関連要因への寄与度は大きいものからそうでないものがある。また、単一の要因のみに留まらず、複数の要因に対しても効果を及ぼすものがある。これらを考慮して「必要となる対応策」の相対的な重要度を、ワーキンググループの専門家によるエンジニアリングジャッジにより、1～3に配分した。

表2 「必要となる対応策」の重要度

		環境 要因	資源 要因	立地 要因	経済性 要因	社会制 度要因	非電力 工ネ要因	合計評点			
A1 シナリオ→		10	10	10	10	10	—	A1	A2	B1	B2
A2 シナリオ→		10	8	8	8	9	—				
B1 シナリオ→		9	6	9	9	10	10				
B2 シナリオ→		8	7	6	8	10	—				
環境	高レベル廃棄物／①燃料の高燃焼度化技術	◎3			◎3			60	54	54	48
	高レベル廃棄物／②長寿命核種の核変換技術	○2						20	20	18	16
	TRU(超ウラン元素)、ウラン廃棄物低減技術	◎3						30	30	27	24
	低レベル廃棄物、解体廃棄物低減	○2						20	20	18	16
資源	増殖炉技術	◎3	◎3				△1	60	54	55	45
	高転換炉技術	○2	◎3					50	44	36	37
	改良燃料サイクル技術	◎3	◎3		△1			70	62	54	53
	Pu 燃料製造技術		◎3					30	24	18	21
	高効率プラント型原子炉		○2		○2		○2	40	32	50	30
	プラント高効率化要素技術		△1		○2			30	24	24	23
	新規ウラン確保技術		◎3					30	24	18	21
立地	発電所新規立地方策等			◎3				30	24	27	18
	中間貯蔵施設確保策&貯蔵技術			◎3				30	24	27	18
	高レベル廃棄物処分場確保策			◎3				30	24	27	18
経済性	建設費／①輸出／リブレス用成熟技術改良				◎3			30	24	27	24
	建設費／②革新炉システム技術				◎3			30	24	27	24
	運転保守費の低減技術、合理化技術				◎3	○2		50	42	47	44
	燃料費の低減技術、合理化技術				◎3			30	24	27	24
	設備利用率の向上技術				◎3			30	24	27	24
社会制度	電力自由化対応				◎3			30	24	27	24
	社会的受容性向上策			◎3				30	24	27	18
	核不拡散性向上技術										
非電力工ネ	原子力による水素製造						◎3	—	—	30	—

「必要となる対応策」のシナリオ別の合計評点は、上記要因の重要度（１～１０）と「必要となる対応策」自体の関連要因への影響度（１～３）を乗じて合計評点を割り当てた。なお、複数の要因に影響を及ぼす場合は要因数に応じて加算した（表２）。

表２より、資源要因はB1、B2シナリオ

よりもA1シナリオに対して影響が大きいこと、立地要因はB2シナリオに対して比較的影響が少ないこと、また、環境要因と経済性要因に関連する燃料の高燃焼度化、環境要因と資源要因に関連する増殖炉技術、高転換技術、改良燃料サイクル技術等、複数の要因に関連するものの配点が当然ながら高いことが分かる。なお、非電力エネ

表３ 「技術開発テーマ」の抽出

必要となる対応策		技術開発テーマ	
環境	高レベル廃棄物低減技術 ①燃料の高燃焼度化技術	・70GWD/t 程度までの高燃焼度化(ジルカロイベース) ・100GWD/t 以上の高燃焼度化(非ジルカロイベース)	
	高レベル廃棄物低減技術 ②長寿命核種の核変換技術	・長寿命核種の分離・回収プロセス ・高速炉による核変換技術	・低除染燃料製造技術 ・ADS を用いた核変換技術
	TRU、ウラン廃棄物低減技術	・TRU 廃棄物低減技術	・ウラン廃棄物低減技術
	低レベル廃棄物、解体廃棄物低減	・放射化範囲の低減技術 ・クリアランス基準の策定、クリアランスレベル検認技術の開発 ・可燃物、難燃物、金属等の減容技術、除染技術 ・金属廃材、コンクリート等の再利用技術	
資源	増殖炉技術	・Na 冷却炉、鉛ビスマス冷却炉、ガス冷却炉、水冷却炉技術	
	高転換炉技術	・水冷却低減速炉技術	
	改良燃料サイクル技術	・先進湿式法(MOX、窒化物) ・乾式法: 金属電解法(金属、窒化物、MOX)	・乾式法: 酸化物電解法(MOX)
	Pu 燃料製造技術	・簡素化ペレット法(MOX、窒化物) ・鋳造法(金属)	・振動充てん法(MOX、窒化物)
	高効率プラント型原子炉	・ガス冷却直接サイクル炉、超臨界圧水炉等の技術	
	プラント高効率化要素技術	・高性能廃熱回収系の開発	・1 次冷却材温度高温化
	新規ウラン確保技術	・海水ウラン回収技術	
立地	発電所新規立地方策等	・地元雇用等の立地地域との共存策(非技術) ・第4 紀層立地、海上立地、地下立地	・免震技術、制震技術 ・需要地近接立地、都市建設立地
	中間貯蔵施設確保策 & 貯蔵技術	・立地地域との共存策等の中間貯蔵サイトの確保策(非技術) ・コンクリートキャスク等の貯蔵技術	
経済性	高レベル廃棄物処分場確保策 & 処分技術		
	建設費の低減技術 ①輸出/インプレイス用成熟技術改良	・解析技術の高度化による実証試験の合理化 ・メガブロック建設工法、大ブロック工法、ユニット工法 ・SC 構造、船殻構造の適用	・60 年を上回る長寿命化設計
	建設費の低減技術 ②革新炉システム技術	・分かり易い安全性と経済性を共に達成するブレークスルー技術 ・革新的な燃料&炉心、原子炉システム、安全系技術	
	運転保守費の低減技術、合理化技術	・長メンテナンス周期を可能とする機器の開発 ・リスクベースド保守	・改良 ISI 技術
	燃料費の低減技術、合理化技術	・(燃料の高燃焼度化: 前述) ・運転サイクルの長期化策	・(改良燃料サイクルの技術開発: 前述) ・出力アップレート
	設備利用率の向上技術	・定検短縮技術(大型燃料集合体、オンラインメンテナンス)	
	廃炉コストの低減技術	・改良解体技術 ・環境要因(低レベル廃棄物、解体廃棄物低減)と同様の技術	
社会制度	電力自由化対応	・経済性(建設費)関連と同様の技術	
	社会的受容性向上策	・PA 等による原子力の正しい理解促進活動 ・情報公開、透明性、コーポレートガバナンス ・発電所立地地域の人々の発電所経営への参加	・炉内構造物等の耐 SCC 材料(BWR) ・分かり易い安全技術の開発
	核不拡散性向上技術	・Pu 単独での取扱いの回避、アクセス性を困難にする方法 ・Pu 蓄積量のミニム化	
	非電力エネ	原子力による水素製造	・中/高温炉システム技術 ・各種水素製造プロセス

ルギー要因の水素製造は、今回の調査ではB1シナリオのみを対象とした。

(4)「技術開発テーマ」の抽出

一次分類として抽出した「必要となる対応策」に応じて、2次分類となる「技術開発テーマ」を抽出した。その結果は表3に示す通りである。ここでは、現在、実施中の開発課題の他に、未実施であるが将来必要と考えられる課題を包含するテーマとして取り上げた。

(5)「技術開発テーマ」の評価

① 導入想定時期

モデル分析結果から各「技術開発テーマ」の開発必要時期が示唆されたものは次の通りである。

● 環境関連の解体廃棄物低減技術は、プラント寿命を40年とすると2010年頃までに実用化が必要とされる。

● 資源関連の天然ウラン資源有効利用技術は、世界全体の天然ウラン資源の消費量に関連する。A1シナリオでは2040年頃、A2では2050年頃、B1では2060年頃、B2では2070年頃に究極天然ウラン資源量(1,620万トン)の約50%が消費されると推定された。

● 立地関連では各シナリオともに、2020年代に既存サイトへの増設可能想定量3,600万kW_eに達し、新規サイトが必要とされる。また、同時期には使用済燃料の

サイト内貯蔵量が満杯となり、中間貯蔵施設が必要とされる。

● 経済性関連の輸出／リプレイス用成熟技術の改良は、各シナリオとも、アジアの原子力需要、国内のリプレイス需要が本格化する2020年頃までに必要とされる。

● 社会制度関連の電力市場自由化は、現在制度化が検討されており、対応策は現時点から必要とされる。また、社会的受容性の向上については随時必要とされる。

● 非電力エネルギー関連の水素需要はB1シナリオのみで需要量が解析され、2030年頃から需要が本格化すると推定された。以上のもの以外は、シーズ側の所要開発期間から決まるものが多い。

② 導入効果、開発コスト

「技術開発テーマ」の導入効果は、市場規模に着目して主にコストの面から評価を行った。2050年までの各市場（プラントの建設、解体や処理・処分、運転保守、燃料のフロントエンド、中間貯蔵、再処理、高レベル処分）の市場規模の目安は、各シナリオの原子力需要量と発電コストを構成する単価内訳から算出した。当該技術開発テーマが影響を及ぼす市場の大きさと、当該「技術開発テーマ」がその市場に寄与する割合等からおおよその導入効果を求め、導入効果大（100億円／年以上）、中（10～100億円／年）、小（10億円／年以下）の区分でロードマップに記載した。

技術開発コストについては、成立性研

究、最適化研究、実証試験の各段階に必要となる研究内容、研究期間を想定してコスト大（10億円／年）、中（1～10億円／年）、小（1億円／年以下）の区分で

ロードマップに記載した。

これらについてもワーキンググループの専門家によるレビューを受けつつ検討を進めた。

表4 技術開発ロードマップの例

必要となる対応策														
対応策名		評点付け						合計評点				テーマ名		
		環境 要因	資源 要因	立地 要因	経済性 要因	社会制 度要因	非電力 工ネ要因							
A1 シナリオ		10	10	10	10	10	—	A1	A2	B1	B2			
A2 シナリオ		10	8	8	8	9	—							
B1 シナリオ		9	6	9	9	10	10							
B2 シナリオ		8	7	6	8	10	—							
環境 関連	高レベル廃棄物 ①燃料の高燃焼度 化技術		◎			◎			60	54	54	48	70GWD/t 程度ま (ジルカロイベース)	
													100GWD/t 以上 (非ジルカロイベー	
	高レベル廃棄物 ②長寿命核種の 核変換技術		○						20	20	18	16	長寿命核種の分	
													(低除染燃料製 :後述@資	
													高速炉による核	
													ADS を用いた核	
	TRU(超ウラン元素)、 ウラン廃棄物低減技術		◎						30	30	27	24	TRU 廃棄物低減	
													ウラン廃棄物低減	
	低レベル廃棄物、 解体廃棄物低減		○						20	20	18	16	放射化範囲の低	
													改良解体技術	
													クリアランス基準の クリアランスレベル	
													可燃物、難燃物、 減容技術、除染	
													金属廃材、コンク 再利用技術	

(6) 技術開発ロードマップのとりまとめ

技術開発に当っては、提案された多種多様な技術課題が技術的また経済的に成育できることを確認する「成立性研究段階」を経る。ここでは大規模な開発を行

う前に予備的な研究を行い、次の段階に進める技術課題がある程度絞り込まれる。絞り込まれた技術課題は次に「最適化研究段階」に移行し、技術の最適化／成熟化が図られる。その結果により次の商業

対応策に応じた技術開発テーマ							
	開発時期 (A1 シナリオの例を示す)						導入効果 大: 100 億円/年以上、 中: 10~100 億円/年、 小: 10 億円/年以下
	2000	2010	2020	2030	2040	2050	
での高燃焼度化		最適化 → 実証					大
の高燃焼度化 (入)		成立性 → 最適化 → 実証(LWR 用) → 実証(SCR 用) → 実証(FBR 用、A1) 実証(FBR 用、A2) 実証(FBR 用、B1、B2)					大
離・回収プロセス	実用化戦略調査研究	 実証炉計画など					大
造技術 (源要因)							—
変換技術	実用化戦略調査研究	 実証炉計画など					大
変換技術	試験設備建設 → 予備実験 実験プラント	 実証プラント					大
技術	改良技術の成立性、最適化、実証	 処分地の選定					中
技術	改良技術の成立性、最適化、実証	 処分地の選定					小
減技術	最適化(炉型開発スケジュールと関連)						小
	改良技術の成立性、最適化、実証	 処分地の選定					小
策定、 検証技術の開発	最適化、実証						中
金属等の 技術	最適化、実証(技術進展に応じ、随時)						中
リート等の	最適化、実証						小

化に向けた「実証試験段階」に進める技術が更に絞り込まれる。「実証試験段階」では試験範囲、規模、期間のオプションが検討され、海外との協力も視野に入れられる。次の「商用化段階」は民間で行うもので、本調査には含めていない。

紙幅の関係で技術開発ロードマップの全てを紹介することはできないが、表4にその例を示す。技術開発ロードマップは要因別に必要となる対応策の重要度や技術開発テーマの必要とされる時期などの目安を示しており、将来、新たな技術課題材料が提案されても、その課題がどの技術開発テーマに分類されるかを見れば、原子力技術開発全体枠組の中の位置付け（重要度や導入効果など）をおおよそ判断し得るものと考えられる。但し、要因間の重要度についてはロードマップ評価の対象としていないため要因間の相対的關係を読み取りたい場合には、利用者独自の重み付けを念頭に置いてロードマップを見る必要がある。

6. おわりに

本調査で実施した社会情勢分析は、典型的な既存軽水炉を対象として原子力需要を評価しており、需要に応じて発生する廃棄物量や資源消費量などは従属的に求めたが、他の炉型では異なるものとなる。今回の炉型を主体にした検討から、炉と燃料サイクルを組み合わせた総合システムとして全体のコスト、廃棄物発生量、資源消費量などを評価し、この観点から

どのシステムの需要が求められるか等の検討も必要になるものと考えられる。

また、SDモデルでは各要因に対して簡易なパラメータを用いており、特に社会制度要因における社会的受容性や電力自由化対応のより具体的な評価方法の改善が必要と考えられる。

なお、社会情勢の動向変化や、技術の進展は今後も進むものと考えられ、技術開発ロードマップは定期的な見直しが必要と考えられる。

最後に、本内容は経済産業省から受託した「軽水炉改良技術確証試験（次世代型軽水炉開発戦略調査に関するもの）」の研究成果であり、調査を進めるにあたり、学識経験者、専門家の方々に構成する委員会、ワーキンググループを設置した。ご指導、ご協力を頂いた関係者各位に深く感謝の意を表する。

参考文献

- (1) Special Report on Emissions Scenarios, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2001
- (2) 4つの社会・経済シナリオについて-「温室効果ガス排出量削減シナリオ策定調査報告書」-, 平成13年6月, 環境省地球環境局
- (3) 藤井康正著, エネルギーシステムにおけるCO₂問題対策の評価, 東京大学博士論文, 1992年
- (4) Projected Cost of Generating Electricity: Update 1998, OECD/NEA, 1998
- (5) Rogner, H.H., An Assessment of World Hydrocarbon Resources, Annual Review of Energy and the Environment, vol 22, pp. 217-262, 1997
- (6) Uranium 1999, OECD/NEA, IAEA, 2001

水素の普及における安全性と課題



佐藤 保和 (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

水素をエネルギー媒体として使用できるようになると、埋蔵量に制約のある化石燃料以外の1次エネルギーを利用しやすくなる、大気汚染と地球温暖化を抑制できる、と言われる。また、わが国のエネルギーセキュリティを向上させ産業を活性化させるので、水素利用が普及することが期待される。

政府は平成14年5月、副大臣会議において燃料電池の早期実用化を積極的に推進するうえで、2004年度中までに関連法令の再点検・見直し、技術基準の整備を実施することとした。安全を確保しつつ都市部に実用規模の水素充てんスタンドを設置する場合、保安距離、水素貯蔵量等に関する現行規制が見直されることが望まれている⁽¹⁾。そのためには災害リスクが許容範囲にあることを実証データに基づいて確認する必要がある、漏えい、拡散、着火、火炎、爆燃等における水素の特性を実験とシミュレーションで把握することが求められる。本報告ではこれらの実験結果を報告し、安全性について

若干の考察を試みる⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。

2. 安全に係わる水素の性質

表1に水素の物性を他の燃料と比較して示す。水素はメタンに比べ、空気中での浮力が大きい、拡散が速い、火炎の輻射率が小さい等安全側に働く性質がある一方で、小孔から漏れやすい、燃焼可能濃度範囲が広い、着火しやすい、爆風圧が大きい、火炎を視認しにくい、金属材料を脆化する等の不安全な要素もある。

3. 見直しが望まれる主な法規制項目

見直しが望まれる主な法規制項目を表2に示す。これらのうち特に、離隔距離が現行の圧縮天然ガススタンドの規定(充てん機を敷地境界から5 m以上)並に緩和されること、および3,000 Nm³程度の高圧水素ガスが貯蔵できるようになることが求められる。そのためには水素の爆燃あるいは火炎で引き起こされる災害の大きさを知ることが重要となる。

表1 水素の物性⁽³⁾

	水素	メタン	プロパン	ガソリン (ガス状)	水素の特性
最小着火 エネルギー(mJ)	0.02	0.29	0.26	0.24	着火しやすい
燃焼範囲 (下限－上限) [vol%]	4.1－75	5.3－15	2.1－10	1.0－7.8	燃焼可能濃度範囲が 広い
沸点 (℃) (大気圧)	－252.9	－162	－42	70～220	通常気体であり高压で 貯蔵することが多い
分子量	2	16	44	58～170	拡散しやすい。空気中 で浮力が生ずる
拡散係数(空気中) [cm ² /s] (1atm, 20℃)	0.61	0.16	0.12	0.05 (ガス状)	希釈されやすい 小孔から透過しやすい
金属材料を脆化	あり	なし	なし	なし	金属をもろく、割れや すくする
火炎の可視性	困難	容易	容易	容易	火炎検知が難しい
熱放射 (輻射率 ϵ)	0.04～0.25	0.15～0.35	ガソリン並	0.3～0.4	熱放射による被害や 類焼は少ない
最大燃焼速度 [cm/s]	346	43.0	47.2	42.0	爆風圧が大きい。 ジェット火炎が保炎 しやすい
燃焼熱[MJ/Nm ³] 総発熱量 真発熱量	12.78 10.77	39.93 35.90	99.1 91.2		限られたガス体積で 熱量を確保するには 高压を要する
燃焼熱[MJ/kg] 総発熱量 真発熱量	142.9 120.9	55.7 50.2	50.3 46.3	45－49 43－45	熱量あたりの重量は 小さい

表2 見直しが望まれる法規制⁽³⁾

高圧ガス保安法 ①高圧ガス製造設備の離隔距離 ・第1種保安物件(学校等)から17 m以上 ・第2種保安物件(住宅)から11.3 m以上 ・火気から8 m以上 ・他の可燃性高圧ガス設備から5 m以上 ②有資格者(保安技術管理者,保安係員)の配置 ③移動式製造設備から車両容器への直接充てん不可	消防法 ①給油取扱所構内への水素製造設備 あるいは充てん設備の設置不可 道路法 ①危険物積載車両(高圧水素60Nm³超、 容器容積120 L以上)の水底トンネル通行 の制限		
建築基準法 ①都市計画区域における建築物建築の禁止			
	圧縮ガスの貯蔵量／処理量の上限	可燃性ガスの上限	可燃性／圧縮ガスの製造
準住居地域	350 Nm ³ (またはNm ³ /日)	35 Nm ³ (Nm ³ /日)	不可(CNGスタンドでは可)
商業地域	700 Nm ³ (またはNm ³ /日)	70 Nm ³ (Nm ³ /日)	不可(CNGスタンドでは可)
準工業地域	3,500 Nm ³ (またはNm ³ /日)	350 Nm ³ (Nm ³ /日)	不可(CNGスタンドでは可)

4. 水素の爆燃実験

(1) 開放空間における爆燃

(a) 実験方法

水素／空気均一混合気の開放空間におけ

る爆燃に伴う圧力変化を測定し、主に最大ピーク過圧で評価した。なお、圧力センサはピエゾ型を用い、計測・記録系を含めた時定数は100kHz以上が確保されている。

大きさが高さ 1.05m、幅2.22m、奥行き



図1 解放空間での爆燃装置（ 5.2m^3 ）と防爆壁⁽²⁾

2.22m（障害物がある場合は高さ1.13m），水素／空気混合気の体積が 5.2m^3 の実験装置（図1），および大きさが $4.29\text{m} \times 4.29\text{m} \times 2.0\text{m}$ （高），体積 37m^3 の実験装置（図略）を用いた。水素濃度は主に30%とし，濃度を変えた場合も実験した。混合気をポリエチレンフィルム内に閉じ込め，着火直前にフィルムを切断した。主として電気火花（40J）を用いて混合気中心底部で着火させた。また，参考のた

め爆薬（C4火薬10g（ $5.2 \times 10^4\text{J}$ ））を用いて着火させる実験も行った。混合気中に障害物として鉄パイプを溶接して作った3次元格子（パイプ部の容積10.9%）を置いたケースと置かないケースも試験した。

(b) 実験結果

開放空間でのガス体積 5.2m^3 規模の爆燃試験結果を表3に示す。

表3 開放空間における爆燃実験の結果⁽²⁾

水素濃度 (%)	障害物 (3次元格子)	点火源	最大ピーク過圧 (kPa)					インパルス (Pa-s)	火炎伝播速度 (ガス端付近) (m/s)
			混合気からの距離 (m)						
			障害物 上部	混合気 下端	10m	20m	40m	距離 10m	
20	なし	電気火花	—	2.1	0.44	0.20	0.11	10	—
30	なし	電気火花	—	8.2	1.5	0.85	0.38	26	(43)
57	なし	電気火花	—	11	3.1	1.6	0.79	32	20
30	なし	爆薬	—	1,290	23	7.9	2.7	45	1,980
30	あり	電気火花	3,270	764	23	7.3	2.7	42	780
都市ガス* 濃度9.5%	なし	電気火花	—	0.40	0.18	0.09	0.03	～4	7.5

水素／空気体積： 5.2m^3 、インパルス：最大ピーク過圧(kPa)を時間に対して積分したもの

*日本原子力研究所の実験結果を参考にした

〔水素と都市ガスの違い〕

障害物なし、電気火花による着火、ガス体積 5.2m^3 の条件で、水素濃度30%を爆燃させた時のガス端から10m地点における最大ピーク過圧は約 1.5kPa であった。一方、都市ガス9.5%を同じ条件で爆燃させると、最大ピーク過圧は約 0.18kPa であった。このように化学量論比の混合気条件の比較で、水素では都市ガスより約1桁大きな最大ピーク過圧が計測された。

〔距離と爆風圧〕

爆風圧の距離減衰については一般にTNT爆薬の爆発における減衰が参照されるが、混合気の爆発についても例えばBaker-Strehlowのプラスト曲線により推測できる⁽⁵⁾。ピーク過圧、インパルスおよび距離はSachのスケール則で標準化される。換算距離 $[R/(E/p^0)^{1/3}]$ とピーク過圧 $[(p-p^0)/p^0]$ の関係^{*}は火炎伝播速度をパラメーターとして同一曲線上に重なることが知られている⁽⁶⁾。

電気火花による点火では、点火位置からの距離 r （ガス端からの距離+1m）と最大ピーク過圧 ΔP の関係は図2のようになった。障害物なしの場合、 P に対する r の次数は実験では -1.1 であった（ $\Delta P \propto r^{-1.1}$ ）。

また、前述のように放出エネルギーに関する立方根則が成り立つとすると、燃焼ガス量 W に対し、 $\Delta P \propto W^{1/3}$ となるので、均一濃度の予混合気を用いた本実験の場

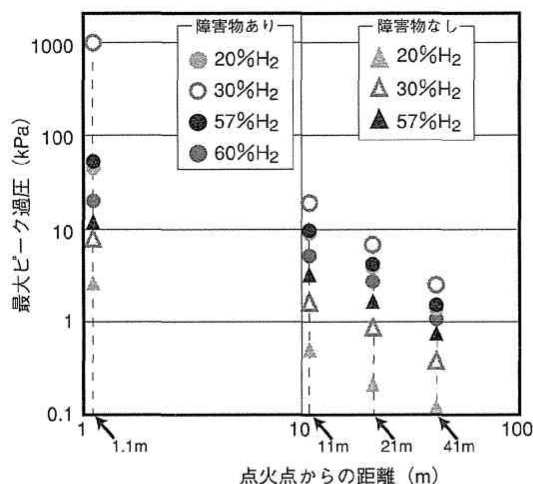


図2 爆燃に伴う最大ピーク過圧（開放系）⁽²⁾

合、 $\Delta P = A \times (W)^{1/3} \times (r)^{-1.1}$ の形となる。ここで、実験の $\Delta P = 1.54\text{kPa}$ 、 $W = 0.14\text{kg}$ 、 $r = 11\text{m}$ を当てはめると、 $A = 41.5$ となり、濃度30%の水素を障害物のない状況で爆燃させた時の関係式は（1）式のようにになる。

$$\Delta P = 41.5 \times (W)^{1/3} \times (r)^{-1.1} \dots\dots\dots (1)$$

ΔP : 最大ピーク過圧 (kPa)

W : 燃焼ガス量 (kg)

r : 距離 (m)

例えば、水素ガスから5mの地点におけるピーク過圧の許容限界値を 9.8kPa とした時^{**}、漏えい、滞留の許される水素量は、（1）式から 2.7kg （ 30Nm^3 ）と試算できる。ただし、これは30%の均一な混合気が形成された場合の試算であり、実際の漏えいでは濃度分布が生ずるので、漏えい後の拡散の評価が重要となる。また、本試算は、

* ここで、 R : 距離 E : 爆発源の放出エネルギー p^0 : 大気圧 p : 絶対的ピーク圧

**危険限界値 9.8kPa （ 0.1kgf/cm^2 ）：コンビナート等保安規則における新設設備向けの値

表4 防爆壁の効果⁽⁴⁾

(水素30%/空気70%濃度均一混合気に点火、障害物なし)

水素/空気 混合気 体積(m ³)	防爆壁*	点火源	最大ピーク過圧 (kPa)					インパルス (Pa-s)	火炎伝播速度 (ガス端付近) (m/s)
			着火点からの距離 (m)						
			混合気 下端	7m	11m	21m	41m	距離 11m	
5.2	なし	電気火花	8.2	(計算) 2.5	1.5	0.85	0.38	26	—
5.2	あり	電気火花	5.6	1.8	1.1	0.70	0.36	19	44
5.2	なし	爆薬	1,290	—	23	7.9	2.7	45	約1,980
5.2	あり	爆薬	1,269	21.2	14	6.2	3.4	36	約1,980
3.7	なし	電気火花	8.4	—	2.9	1.7	1.0	82	—
3.7	なし	爆薬	1,266	—	66	20	8.5	194	約1,980

* 防爆壁：混合気端から4mの位置に2m(高)x10m(幅)のコンクリート

今回の実験結果を外挿したものであり、今後、水素量を増した実験等を実施して確認することも必要となる。

なお、混合気内での火炎伝播速度は電気火花点火の場合は外周に移るほど速くなったのに対し、爆薬点火ではほぼ定常状態でしかも高速度であった。このことから、爆薬点火では爆ごうが生じたと考えられる。

[障害物の影響]

3次元格子状の障害物を水素/空気混合ガス内に設置し、障害物の影響を実験した。障害物があると火炎伝播速度が増し、ガス中心から11mの地点で最大ピーク過圧が障害物なしの場合の3～15倍になった。

[防爆壁の効果]

図1の実験装置を用い、混合気端から4mの位置に設置した高さ2m、幅10mのコンクリート製防爆壁の効果を実験した。電気火花による点火と爆薬による点火をそれぞれ実施した。結果を後述の水素量の影響とともに表4に示す。

防爆壁の後方6mにおける地表面上の最大ピーク過圧は防爆壁により約30%低減された。爆風が防爆壁上面を通過した後回折して、壁の陰にも回り込んだと思われる。遠ざかるにつれ防爆壁の効果は小さくなった。

[水素量の影響]

体積が37m³の実験装置を用い、水素30%/空気70%混合気で爆燃実験を実施

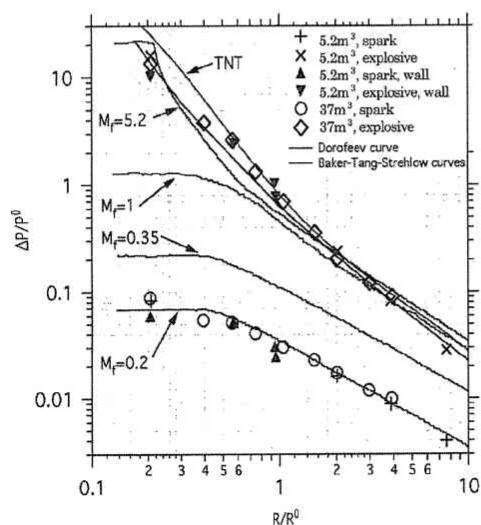


図3 換算距離と最大ピーク過圧⁽⁷⁾

した。水素量が約7.1倍になるのに伴い、距離11mにおけるピーク過圧が約1.9倍となった。このようにピーク過圧が水素量のほぼ1/3乗に比例し、スケール則が成り立つことが確かめられた。すなわち、図3に示すように、水素30%均一濃度を電気火花で点火させると 5.2m^3 と 37m^3 のいずれも、換算距離とピーク過圧の関係がマッハ数0.2の同一曲線で表すことができた。

換算距離とピーク過圧の関係は火炎伝播速度によりほぼ推測できる。水素30%均一濃度を電気火花で点火させた時の火炎伝播速度は約 44m/s であり、爆薬で点火させると約 $1,980\text{m/s}$ となった。

(2) ダクト内における水素の爆燃

(a) 実験方法

図4にダクト型爆燃実験装置を示す。1辺 38.1cm の正方形を断面とし長さ 990cm のダクト上壁に圧力検知器と火炎伝播速度を計測するためのイオン電流検知器を配置し、またダクト端から 10m の地点にも圧力検知器を置いた。ダクト内全体を30%水素で均一に満たし、閉鎖した一端にて電気火花で着火し爆燃させた。また、ダクト内に遮蔽断面積比0.32で遮蔽板を7個、13個、25個それぞれ設置し、障害物の影響を試験した。

(b) 実験結果

ダクト内における爆燃試験の結果を表5に示す。

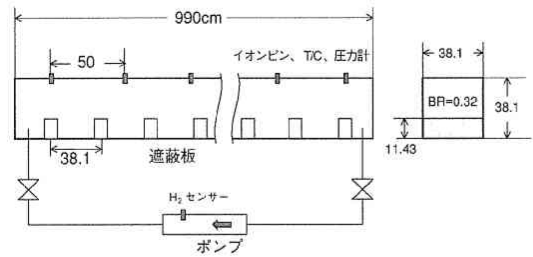


図4 ダクト型爆燃試験装置⁽³⁾

表5 ダクト内水素爆燃試験の結果⁽³⁾

障害物	最大爆風圧(kPa)		火炎伝播速度 (ダクト端付近) (m/s)
	ダクト端	ダクト端から10m	
遮蔽板なし	320	12	610
遮蔽板7個	1,580	11	1,230
遮蔽板13個	1,720	11	1,460
遮蔽板25個	1,050	9	1,660
(参考) 開放系障害物なし (水素濃度30%)	(ガス端) 8	(ガス端10m) 1.5	—
開放系障害物なし (水素濃度57%)	11	3.1	20

ダクト： $38.1 \times 38.1 \times 990\text{cm}$ （角型4面壁） 遮蔽板：ダクト断面遮蔽率0.32
水素濃度：30 vol%

遮蔽板がない場合で、開放した反対側のダクト端における最大ピーク過圧は約 320kPa 、火炎伝播速度は約 610m/s となった。開放系の場合（ 8kPa ）に比べ、壁で囲われることでピーク過圧は顕著に増加した。ダクト内に遮蔽板7個を置くと、ダクト端における最大爆風圧は約 $1,580\text{kPa}$ 、火炎速度は約 $1,230\text{m/s}$ とさらに増大した。図5にダクト内での火炎伝播の様子を示す。ダクト内を火炎が伝播するにつれ、特に遮蔽板が存在すると伝播速度が著しく増大した。

トンネル内、駐車場等の半閉鎖空間で水素／空気混合気に着火し爆燃すると、

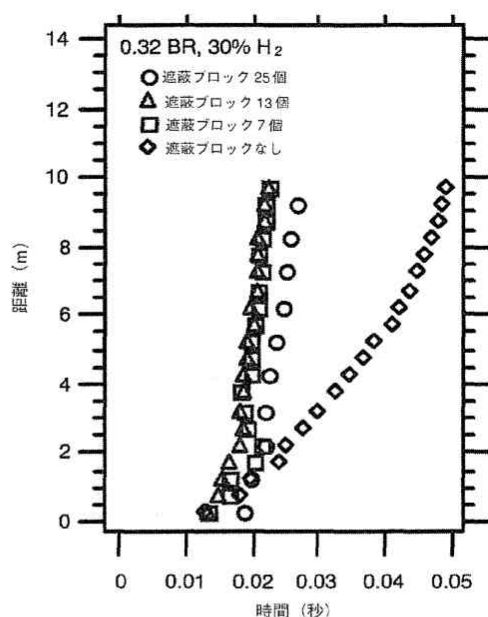


図5 イオン電流検出器の位置と火炎到達時間⁽⁴⁾

爆風により大きな災害が引き起こされるおそれがある。

5. 高圧水素ガスの噴出、火炎の特性

漏えい元圧20MPaおよび40MPaの水素

ガスがピンホールから噴出したときの挙動を実験で調べた。

(1) 噴出速度

ピンホールからの高圧水素の噴出ではチョークが生ずるので、噴出線速は噴出圧によらず一定となるが、密度が圧に依存するので図6のように噴出重量速度は圧の増加とともに増加した。例えば噴出元圧40MPa、1.17mm ϕ 円口径ノズルから噴出する水素の重量速度は約0.015kg/s (約600 Nm³/h) であった。

(2) 自己着火性

水素元圧40MPaまでのピンホールからの噴出においても自己着火は生じなかった。

(3) 火炎サイズ

火炎の長さと同幅は、等しい元圧ではノズルの径にほぼ比例した。また、高元圧の超音速領域で、等口径では火炎の長さと同幅は噴出元圧の0.4～0.5乗に比

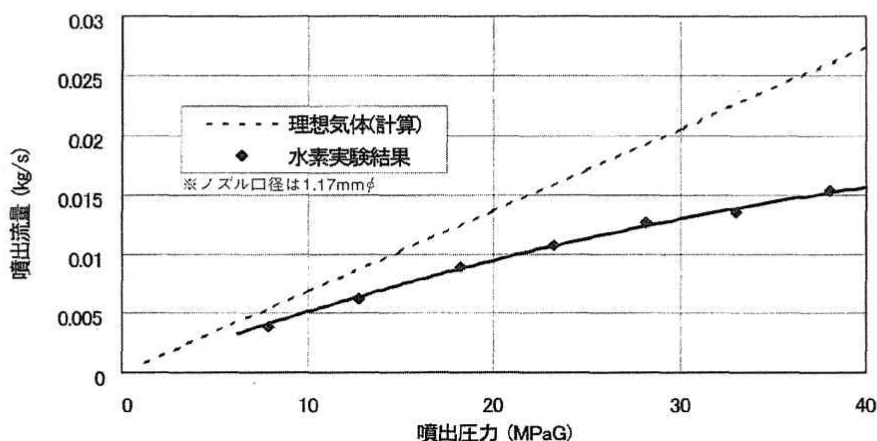


図6 噴出圧力と流量⁽⁷⁾



図7 高圧水素噴出火炎の状況⁽⁷⁾

例した。水素火炎の最高温度は約1,650～1,750℃，食塩水の微量噴霧により視認できた火炎先端付近温度は900～1,000℃であった。

例えば，噴出元圧40MPa，1.17mm ϕ 径ノズルから噴出した水素の火炎長さは約2.9mであり（図7），ガス温度300℃の領域は噴出口から約450cmであった。

(4) 輻射熱

1.1mm ϕ 径ノズル，40 MPaからの噴出水素火炎による輻射熱流束の最高値（火炎軸方向）は約23,000 W/m²（火炎近傍，形態係数を1とした場合）であった。その

方向の平均火炎温度を1,500℃とすると，火炎の輻射率 ϵ は約0.04と求まった。通常の炭化水素系燃料による輝炎の輻射率は0.4～0.8であるので，水素火炎の ϵ はそれより小さいといえる。これは，水素燃焼では輝炎を生じず，生成するH₂Oあるいは中間体ラジカルのみが主として輻射に寄与するからと思われる。

6. 漏えい水素の拡散シミュレーション

(1) ピンホールからの漏えい

構造物なし，風速3 m/sのもとで元圧15MPaの水素が口径0.8mm ϕ のピンホール

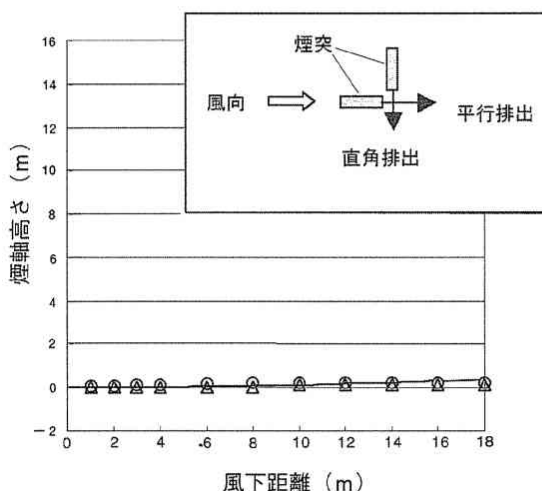
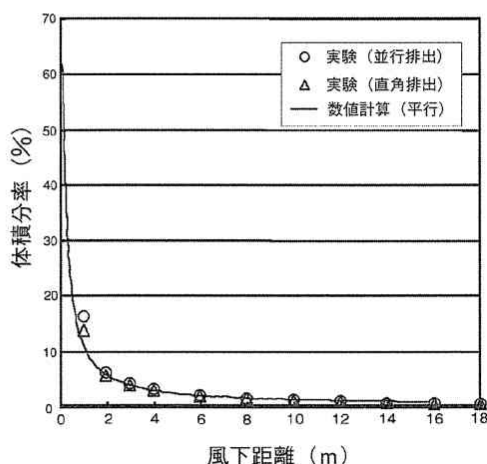


図8 風洞拡散実験結果⁽²⁾

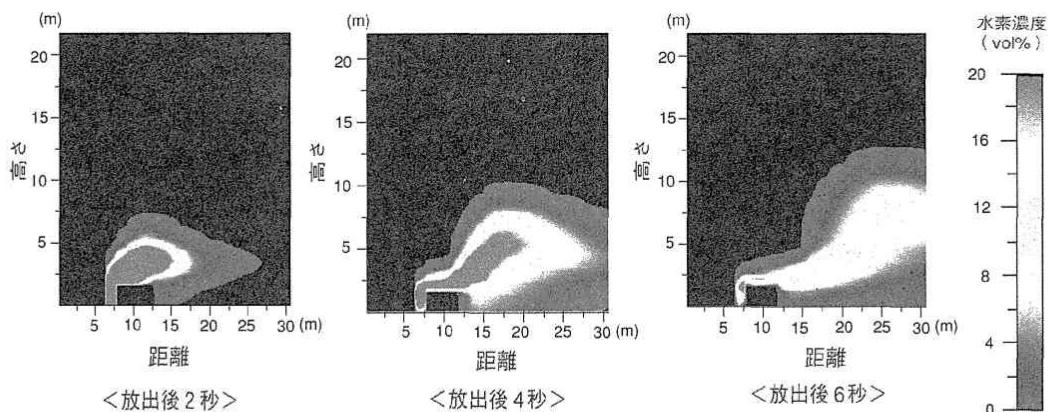


図9 漏洩水素拡散シミュレーション⁽²⁾

から噴出した場合を想定し、模擬ガスを用いた1/20縮小規模の風洞内拡散実験の結果を図8に示す。放出口から風下へ移動するにつれて急速に水素濃度は低下し、燃焼下限界4%になるのは約3mの地点であった。これは数値計算とほぼ一致した。

(2) 瞬時大量漏えい

5 m/sの風速のもと、下流1 mに幅4.5 m、高さ2 mの壁を設け、80 Nm³の水素を2.23秒間で放出した時の水素濃度分布の経時変化を数値計算でシミュレートした。風向き方向の断面でみた、放出開始2、4、6秒後の水素濃度分布の例を図9に示す。

放出終了後、時間の経過につれて水素の拡散が進み、最高水素濃度は急速に低下した。放出開始4秒後で、地面から4 m高さで燃焼下限である4%濃度以上の領域は風下約20 mにまで達した。漏えい水素への着火、爆発を回避するには、漏えい量の抑制と着火源の除去が望まれる。

これに着火したときの風下9 m地点に

おける最大ピーク過圧は約32 kPaと試算された。また、風速1 m/sの場合の同最大ピーク過圧は約10 kPaと試算された。

7. 水素インフラに求められる安全面の要件

想定される実用水素充てんスタンドの安全性に関し、予備的な災害リスク評価を行って主なリスクを洗い出した。高リスクの災害シナリオとして、高圧水素貯槽の脆性破壊、高圧配管の疲労亀裂/応力腐食割れ、ディスペンサー/貯槽への車両衝突あるいは大地震により、水素が大量に漏えい、爆発すること等が挙げられた。水素施設における安全性の判断は災害リスク評価を待つことになる。リスクが社会に許容される水準である必要がある。

事故の発生頻度を小さくするか、万一の事故の被害を最小にすることにより、リスクが低減される。爆発に対しては、水素漏えいの頻度と量を低減する（材料

の選択，誤操作防止，漏えいの早期検知，インターロック機構の充実，単位貯蔵量の最小化，貯槽の耐火被覆），拡散の促進（開放空間で取扱う，半閉鎖空間では十分な換気），爆風圧の抑制（障害物の除去，半閉鎖空間での取扱い回避），着火の回避（着火源の除去，水素噴出口での焼却）等の対策が考えられる。

8. おわりに

近年，発生件数が減少したものの，かつて石油精製等高圧水素を大量に取り扱う工場において水素の爆発に伴う事故事例がいくつか報告された。産業界で取扱い経験の乏しい高圧（～40MPa）水素を取り扱う水素スタンドを都市部に設置する等のために現行の法規制を緩和するにあたっては，想定される事故事象の発生頻度とその被害の大きさを推定して，災害リスクが許容範囲にあることが確認される必要があろう。水素の性質は天然ガス等の燃料とは大きく異なるので，規制緩和にあたり新たな安全対策を施すことが求められる可能性がある。また一方では，水素の普及を図るうえで，コスト高となる過剰，不必要な安全対策を強制することは避けなければならない。そこで，水素の性質等を明確にして災害リスク評価の精度を高めることが求められる。本研究の結果が関連法令，基準の見直しに役立ち，水素普及のための一助になれば幸いである。

謝辞

本研究は新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）からの委託を受け，WE-NET（水素利用国際クリーン・エネルギー・システム技術）プロジェクトの一環として実施されました。ご指導していただいたNEDO，WE-NETタスク2委員会委員，並びに実験を担当され考察を加えていただいた三菱重工業㈱とSRIインターナショナルの研究者の方々に篤くお礼申し上げます。

参考文献

- (1) 副大臣会議燃料電池プロジェクトチーム『燃料電池プロジェクトチーム報告書』，平成14年5月
- (2) 新エネルギー・産業技術総合開発機構；『平成13年度成果報告書NEDO-WE-NET-0102』，平成14年3月
- (3) 佐藤保和『水素の普及における安全性と課題』，化学装置，45-4（2003），109-113
- (4) 佐藤保和，千葉正毅『水素の爆燃実験』，化学エネルギーシステム，28-1（2003），73-78
- (5) R.A. Strehlow, R.T. Luckritz, A.A. Adamczyk and S.A. Shimp；“The Blast Wave Generated By Spherical Flames”，COMBUSTION and FLAME，35（1979），297-310
- (6) M.J. Tang and Q.A. Baker；“A New Set of Blast Curves from Vapor Cloud Explosion”，Process Safety Progress，18-3（1999），235-240
- (7) 佐藤保和『水素の爆燃と火炎実験』，エネルギー・資源，24-6（2003），39-43

ガスハイドレートに関する研究

奥 田 誠

(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

「ガスハイドレート」は水分子と気体分子からなる氷状の固体結晶である。その存在自体は約200年前に知られていたが、限られた研究者の対象に留まっていた。

その後、1930年代にシベリアの天然ガスパイプラインで度々発生した閉塞トラブルの原因がパイプ内でのメタンハイドレートの生成であることが判明したことから、技術的対応を中心としたガスハイドレート研究が進められるようになった。しかし、ガスハイドレートへの関心が急激に高まったのは、1995年に米国フロリダ沖のブレイクリッジ、1998年にカナダの北極海に面したマッケンジーデルタ、1999年に日本の熊野灘にある南海トラフでのメタンハイドレート試掘によってサンプルが採取されてからである。

サンプル分析の結果、図1に示すように、南海トラフを含めた日本近海に現在の日本の天然ガス使用量の約100年分に相



(出所：佐藤幹夫他 地質学雑誌第102巻第11号を基に作成)

図1 日本近海のメタンハイドレート分布

当するメタンガスが賦存している^{*}ことが予想された。

新たな日本独自の天然ガスエネルギー資源が得られるという期待が、エネルギー安定供給確保、自給率向上という国のエネルギー・環境政策とも合致し、2001年度から16年間3フェーズに渡る計画で「わが国におけるメタンハイドレート開発計画」(MH21計画)が始められた。現在はその第1フェーズにあるが、2003年度予算額は55億円で、期待の大きさが伺える。

^{*} 2001年度の日本の天然ガス消費量750億 m^3 に対し、試算された賦存量は約7.4兆 m^3

一方、ガスハイドレートは高い貯蔵性やガス選択性などの優れた特性を有している。これを工業プロセス等に応用することにより新たな産業システムの創出や既存システムの効率化などが検討されている。

(財)エネルギー総合工学研究所では、そのようなガスハイドレートの特性に着目し、ここ数年間ガスハイドレートを利用した産業システムの研究開発を新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の国際共同研究補助事業の委託プロジェクトとして進めている。本稿では、MH21計画の概要とガスハイドレートの一般的特徴および関連の研究開発動向について紹介する。

2. ガスハイドレートの分子構造

ガスハイドレートは、水分子が作る立体網状構造の籠（ケージ）中にガス分子が入り込んで形成される。水分子がホスト分子、ガス分子がゲスト分子と呼ばれる。特に、ゲスト分子がメタンのものをメタンハイド

レート（MH）、メタン以外にプロパン、ブタンなどを含む天然ガス成分がゲスト分子になるものを天然ガスハイドレート（NGH）と呼んで区別するが、混同して使われることもある。ゲスト分子にはこの他に二酸化炭素、酸素もあり、これらを総称してガスハイドレートと言う。

図2は人工的に作ったメタンハイドレートがビーカーの中で燃焼している様子であるが、「燃える氷」という形容にふさわしいものである。

ケージは、図3に示すように12面体（5角12面体：水分子20個）、14面体（5角12面6角2面体：水分子24個）、16面体（5角12面6角4面体）などの多面体となっている。12面体のケージ2個と14面体



図2 燃焼するメタンハイドレート⁽⁹⁾

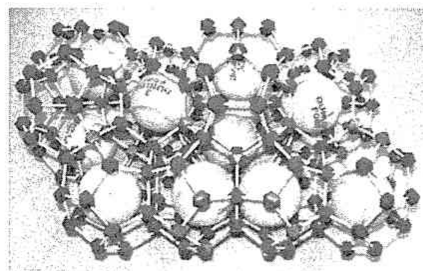
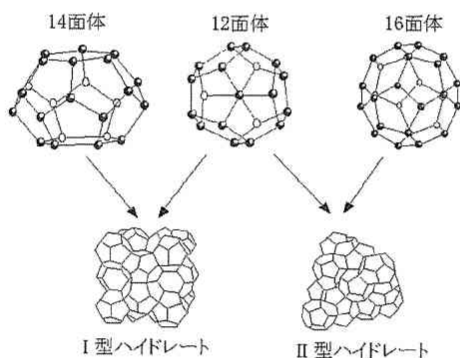


図3 ガスハイドレートの分子構造⁽⁷⁾⁽¹⁵⁾

のケージ6個が集合して安定化した結晶構造を形成したものをⅠ型ハイドレート、12面体のケージ16個と16面体のケージ8個が集合して安定化した結晶構造を形成したものをⅡ型ハイドレートという。さらに、12面体3個と12面体2個および20面体（5角12面6角8面体）1個が集合して安定化した結晶構造を形成したものをH型ハイドレートといい、現在は以上3つのハイドレート構造が知られている。

ゲスト分子の種類により形成されるハイドレート構造は決まっていて、メタンがゲスト分子となるメタンハイドレートの場合はⅠ型ハイドレート構造をとり、プロパンガスのハイドレートの場合はⅡ型ハイドレート構造をとる。

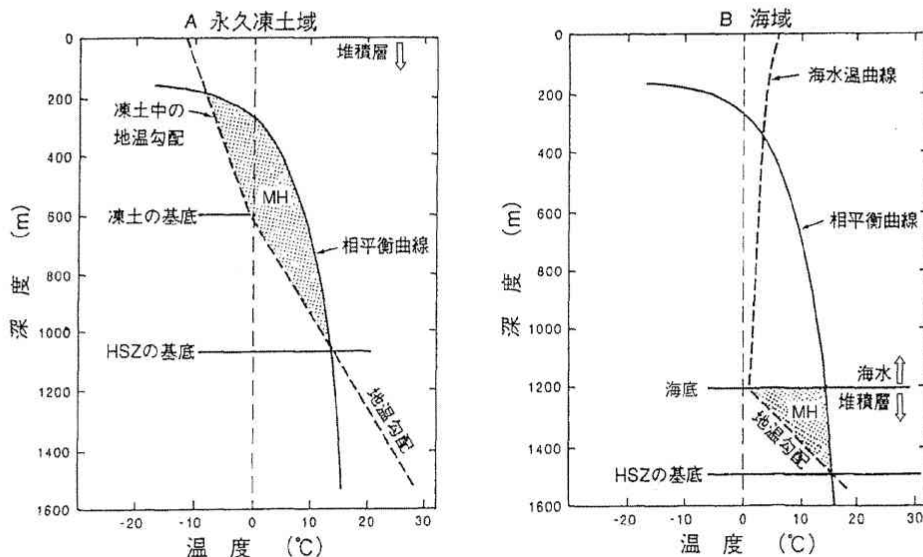
表1に主なゲスト分子とハイドレート構造の関係を示す。なお、混合ガスがハイドレートを形成する場合は、メタン・プ

表1 ゲスト分子とハイドレート構造⁽⁷⁾

ゲスト分子	構造	ゲスト分子	構造
メタン	Ⅰ	プロパン	Ⅱ
エタン	Ⅰ	イソブタン	Ⅱ
炭酸ガス	Ⅰ	窒素	Ⅱ
キセノン	Ⅰ	酸素	Ⅱ
硫化水素	Ⅰ	アルゴン	Ⅱ
メチルシクロヘキサン			H
ネオヘキサン			H

ロパン混合ガスがⅡ型構造をとるとか、メタン・エタン混合ガスは混合比により構造がⅠ型からⅡ型、Ⅱ型からⅠ型に変化するという現象が確認されており、特に多成分混合ガスの構造・物性等については未だ研究が進められている状況である。

Ⅰ型のメタンハイドレートは、理論的には水分子46個とメタン分子8個で構成されるので、1 m³のメタンハイドレートが分解するとメタン172 m³と水0.79 m³に



(出所：参考文献14, p.67, 図3-7を基に作成)

図4 メタンハイドレートの安定存在領域

なる。ただし、すべてのケージにメタン分子が入ることがないため、実際には約150m³のメタンとなる。言い換えれば、約15MPaの圧縮メタンガスボンベに相当する貯蔵性を有していることになる。

また、このメタンハイドレートが生成する条件は、0℃で約2.6MPa、10℃で約7.6MPaである。例えば、日本近海の深さ1000mの海底の下の堆積層では、温度が5℃近くで圧力が100MPa程度なのでメタンハイドレートの生成が可能な領域になっている。図4に海底下および永久凍土地帯におけるメタンハイドレートの安定領域(HSZ)を示す。

3. ガスハイドレート研究開発の位置づけ

ガスハイドレートに関するわが国における研究開発の目的は表2に、関連するプロジェクトの位置づけを図5に整理した。

表2 わが国における研究開発の目的

- ① 日本近海の海底下に賦存するメタンハイドレートの資源化
- ② 東南アジア等の中小天然ガス田からのNGH船による輸送
- ③ ハイドレートによる国内の天然ガス貯蔵および輸送インフラの構築
- ④ ガスハイドレートの特長を活かした工業プロセスおよび産業システムの構築
- ⑤ 地球科学的な探求

以下、本章において資源化と海外からの輸送に係わる表2の①②および⑤の関連状況を概説し、国内利用に関する③④は次章で取り上げる。

(1) 日本近海のハイドレートの資源化

南海トラフなど日本近海の海底下に莫大に存在すると予想されるメタンハイドレートを資源として開発し、日本の新たなエネルギー源にしようとするものである。このため、経済産業省が策定した

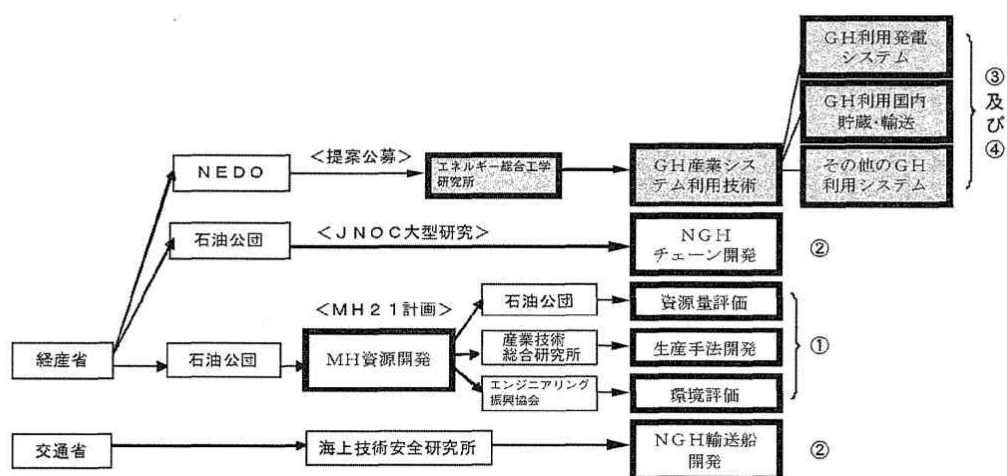
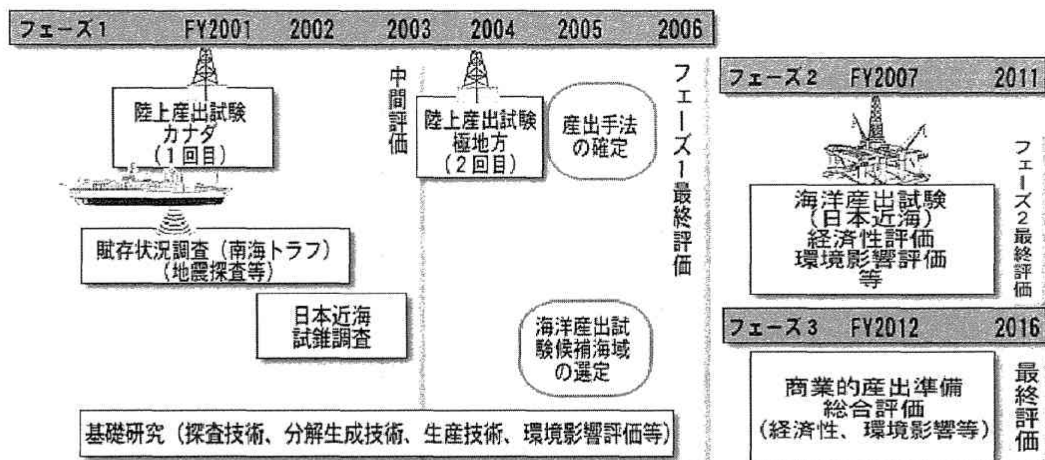


図5 関連研究開発の位置づけ



(出所：「メタンハイドレート開発計画」資源エネルギー庁 石油・天然ガス課作成資料2001.7.19)

図6 MH21計画の概要



図7 MH21研究コンソーシアムの組織⁽⁹⁾

「わが国におけるメタンハイドレート開発計画」(MH21計画)に基づき「メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム」が組織され、2001年度から2016年度までの16年計画で開発が進められている。その目的は以下の通りである。

- a) 周辺海域におけるメタンハイドレートの賦存状況と特性の明確化。
- b) 有望メタンハイドレート賦存海域のメタンガス賦存量の推定。
- c) 有望賦存海域からのメタンハイドレート資源フィールドの選択、並びにその経済性の検討。
- d) 選択されたメタンハイドレート資源

フィールドでの産出試験の実施(2011年度まで)。

- e) 商業的産出のための技術を整備(2016年度まで)。

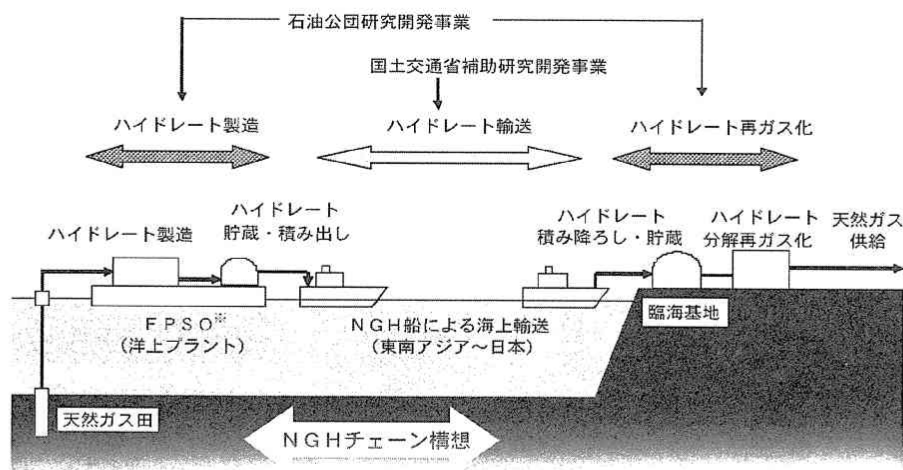
- f) 環境保全に配慮した開発システムの確立。

MH21計画の概要を図6に研究コンソーシアムの組織図を図7に示す。

(2) 天然ガスのNGH船による輸送

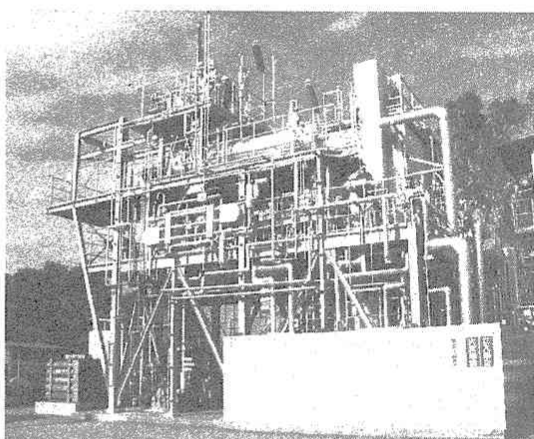
現在、わが国への天然ガスは、大規模ガス田から得られた天然ガスをLNG(液化天然ガス)としてLNG船によって運ばれている。しかし、将来東南アジア等にある中小ガス田からの供給を考える場合、LNG船に拠るよりは天然ガスをハイドレート化しNGH船として運ぶ方が経済的であるという試算が報告されている。この天然ガスハイドレート化輸送技術(NGH Chain)構想に関する研究開発を図8に示す。

この中で、NGH輸送船の部分について



(出所：参考文献(12)(13)を基に作成)

図8 NGH船による天然ガス輸送構想



写真提供：三井造船(株)

図9 三井造船のメタンハイドレート製造プラント

は海上技術安全研究所および三井造船、大阪大学が国土交通省の補助を受けて2001～2003年度で開発を進めている。

また、洋上のFPSO（Floating Product Storage Off-loading）による天然ガスメタンハイドレート製造（生成）と日本の港における再ガス化（分解）に関する研究開発は、石油公団の石油・天然ガス開発・利用促進型大型研究により製造部分は三菱重工業

(株)、産業技術総合研究所などが、再ガス化の部分は三井造船(株)、産業技術総合研究所などが進めている。

三菱重工業および三井造船は、それぞれ0.5～1 t/dクラスのメタンハイドレート製造装置を昨年度試作している。(図9)

(3) 地球科学的な探究

メタンハイドレートの生成起源を研究するもの、地殻－海洋－大気炭素循環とメタンハイドレートとの係わりを研究するもの、などが挙げられている。

4. ガスハイドレートの特長と産業システムへの応用

まず、表2の③および④を説明する前段としてガスハイドレートが有する特長を述べる。

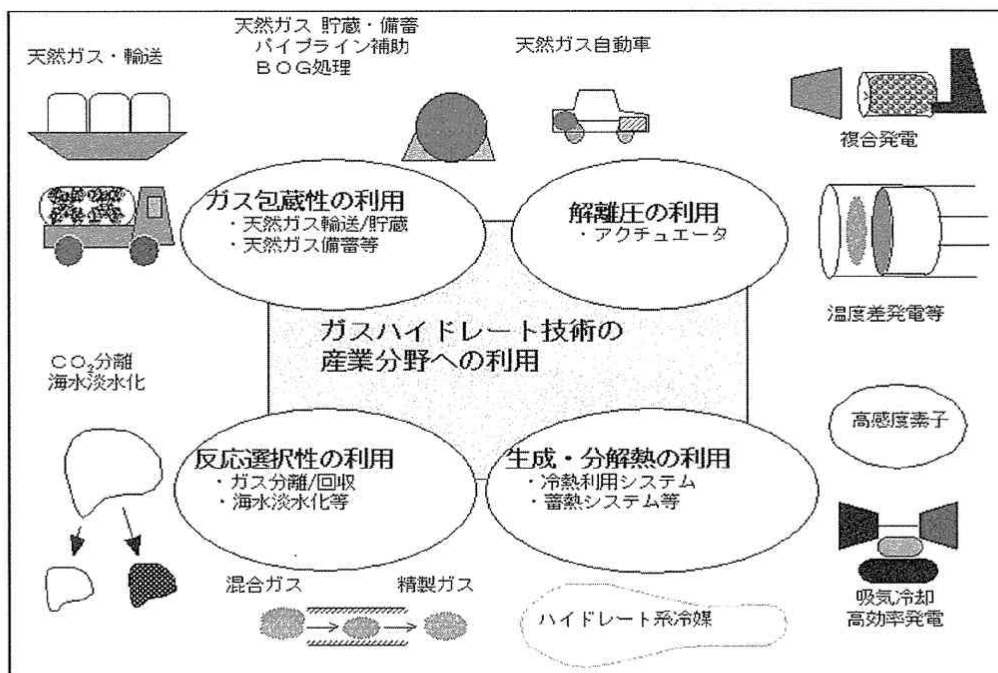


図10 ガスハイドレートを利用した産業システム、工業プロセスのアイデア⁽⁷⁾

(1) ガス包蔵性

第2章で述べたとおり、 1 m^3 のメタンハイドレートが分解・再ガス化するとメタン 172 m^3 と水 0.79 m^3 になるが、このことは常圧で172倍のメタン貯蔵能力があることを意味する。貯蔵能力では約600倍もある液化天然ガスに比べると低いが、高压ポンペに貯蔵する圧縮天然ガスとは同程度である。なお、メタンハイドレートは、極低温（ -162°C ）が必要となる液化天然ガスに比べて取り扱いが容易で、輸送・貯蔵に適している上に、万が一漏洩した場合でも、①分解再ガス化に吸熱を伴うので急激には分解・拡散しない、②着火したとしても水分を含むので穏やかな燃焼になる、ということから圧縮天然ガスに比べて安全性が高いという長所がある。

(2) 反応選択性

ガスハイドレートにおいては、水分子の作る籠（ケージ）内部の大きさに見合うガス分子のみ取り込まれる。また、ガスハイドレートになるガス分子の種類によって平衡圧力・温度が異なる。

この性質を利用すると混合ガスから特定のガス分子を分離回収できる。例えば、火力発電所の排ガスから炭酸ガスをガスハイドレート化して分離回収したり、燃料電池用の改質ガスから燃料電池の性能低下につながる H_2S をガスハイドレート化して分離除去したりすることも可能である。

(3) 生成・分解熱利用性

メタンガスハイドレートの場合、分解に係る吸収熱（または生成に係る放出熱）

は102.7kcal/kgであり、氷の融解熱（または水の凝固熱）の約1.3倍と大きいのが特長である。

ガスハイドレートは氷状の固体であるから、氷と同様に蓄熱や冷熱利用のシステムに適用できる。

（４）分解圧力利用性

ハイドレート $\leftrightarrow$ 水／ガス気体の平衡圧力は、メタンガスハイドレートの場合0℃で約3 MPa、20℃で約30 MPaである。従って、低温排熱等を利用してガスハイドレートを分解すれば、再ガス化した時に高压のガスとして得られる。

これを利用して膨張タービンなどのシステムに適用することが可能である。

（５）自己保存効果

メタンハイドレートの平衡条件は大気圧下の場合－80℃であるが、自己保存効果により－15℃程度でも分解が進まず安定状態を保つので、貯蔵が楽になる現象がある。これは、低温高压環境から取り出されたガスハイドレートの塊は表面から分解してガスと水になっていくが、分解してできた表面の水が分解に係る吸収熱により凍結してガスハイドレート塊表面を覆い断熱保護するためと考えられている。

５．ガスハイドレート利用産業システムに関する研究開発

さてここで、表2の③および④に関する利用面の検討状況について紹介する。本章ではまずその研究経緯につき概説する。エ

ネルギー総合工学研究所では、早くからガスハイドレートに注目し、わが国ではまだ関心が低かった1989年から「非在来型天然ガス基礎調査」というテーマのもと、1999年までガスハイドレートに関する調査研究を行ない、ガスハイドレートの基本的な物性からメタンハイドレートの賦存状況、資源化（探査・掘削等）技術、利用システムまで幅広く、その当時急速に進展しつつあったガスハイドレート関連研究に関する情報を集め、整理した。

また、1997～1999年度にはNEDOのプロジェクト化事前調査研究「ガスハイドレート資源化技術先導研究開発」を工業技術院（当時）などと共同研究を行い、資源化技術研究、環境影響調査、利用システム調査などを行った。

このような調査研究によりハイドレートに関する認知がわが国で広がってきた頃と時を合わせて1999年に石油公団の事業により南海トラフでメタンハイドレートが実際に採取されたことが大きな推進力となって3章で述べた現在的大型プロジェクトの開始につながっていった。

これ以降、当所はメタンハイドレート資源化開発の研究開発などからは離れて、ガスハイドレートの特長を活用した用途開発、産業システム応用などに的を絞って研究開発を行っている。

これに関する調査・研究開発は、ガスハイドレートの基礎研究をリードしていた海外ではカナダの研究機関と、国内では産業技術総合研究所（旧工業技術院の資源環境技術総合研究所、北海道工業技術研究所、地質調査所）と国際共同研究

表 3 ガスハイドレート技術応用の産業システムに関するNEDO国際共同研究の推移

年度	事業名	共同研究機関及び協力企業
98～99年度	ガスハイドレート資源のエネルギー総合開発・利用技術の研究開発	工業技術院（資源環境技術総合研究所、北海道工業技術研究所、地質調査所） カナダ（化学プロセス環境技術研究所＜ICPET＞、ステシー分子科学研究所＜SIMS＞、プリティッシュコロンビア大学＜UBC＞、カナダ地質調査所＜GSC＞） 三菱重工業、日鉱探開
00年度	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	工業技術院（資源環境技術総合研究所、北海道工業技術研究所、地質調査所）、 カナダ（SIMS、UBC、GSC） 三菱重工業、三井造船、川崎重工業
01年度	ガスハイドレート技術による天然ガス供給システムに関する研究開発	産業技術総合研究所（エネルギー利用研究部門、地圏資源環境研究部門・・・上欄の工業技術院の3研究所） カナダ（SIMS、UBC、GSC） 三菱重工業、三井造船、川崎重工業
02～03年度	天然ガスハイドレート技術の産業システム適用のための研究開発	産業技術総合研究所（エネルギー利用研究部門、地圏資源環境研究部門）、 カナダ（SIMS、UBC） 三菱重工業、三井造船

の形で、さらに国内メーカーの協力を得て現在まで継続して行っている。表3にこの国際共同研究の概要を示す。

これらは、NEDOの国際共同研究公募事業の補助を受けて行っている。1年ないし2年間の公募事業であるため、研究開発の内容は継続しているが、件名はそれぞれ異なっている。この研究開発の中で行っている項目は次の通りである。

- ① ガスハイドレート技術を適用した工業プロセス、産業システムの抽出とその可能性の検討
- ② 上記で抽出した適用分野の中で有望と思われるシステムの概念検討
- ③ 上記システムの実現可能性評価のためのフィージビリティスタディーの実施
- ④ 上記システムの実用化に必要となるガスハイドレートの物性、反応等に関する基盤技術の基礎研究

- ⑤ 上記システムの実用化に必要となる工業プロセスの要素技術の研究開発

2001年度までの①～③の調査研究によりガスハイドレート技術を適用した産業システムのフィージビリティが確認・評価されたので、現在は④と⑤を中心に研究開発を進めている。

6. ガスハイドレート技術適用の産業システムの検討

ガスハイドレート技術の適用が可能と思われる分野として、天然ガスの輸送・貯蔵、分散型発電システム、炭酸ガスの分離・固定化、天然ガス自動車などを抽出した。

天然ガスの輸送・貯蔵は、図11に示すように内陸部の天然ガス需要地に天然ガスハイドレートをトレーラー輸送する構想である。ガスハイドレートの分解およ

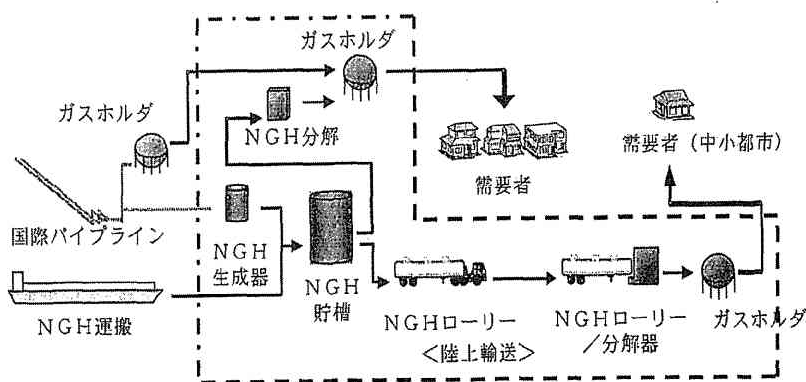


図11 天然ガスハイドレートによる国内輸送・貯蔵システムのフロー⁽⁶⁾

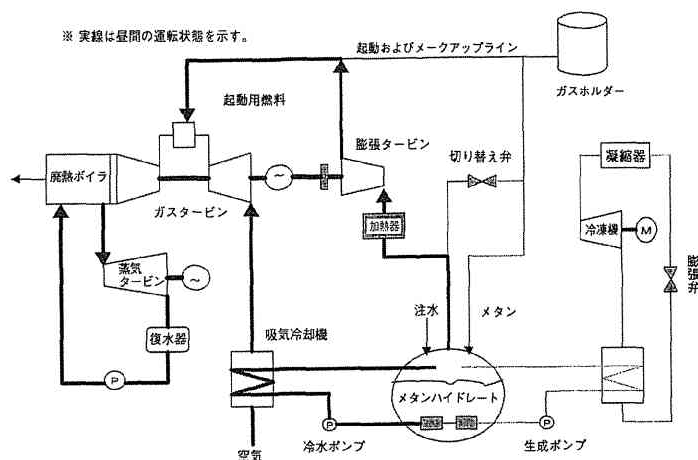


図12 ガスハイドレート利用吸気冷却ガスタービン発電システムのフロー⁽⁶⁾

び燃焼は前述のように穏やかであるので、輸送においても比較的安全性が高いと考えられている。

また、ガスハイドレートを利用した分散型発電システムの例を図12に示す。従来技術として、ガスタービン発電設備の夏季出力低下に対して夜間電力利用氷蓄熱とその冷熱利用の吸気冷却システムが実用化されている。氷の代わりにガスハイドレートを利用した場合、吸気冷却と同時に分解・再ガス化したメタンがター

ビンの燃料となる、また分解圧力が高いため膨張タービンでさらに電力の回収ができることが利点となり効率的なシステムになると考えられている。

発電システムへの適用では、他にもハイドレートの高い分解圧力を利用したガスインジェクションタイプのディーゼルガス発電設備、ハイドレートの燃焼と同時に発生する蒸気を有効利用するシステムなどが考えられている。

これらシステムに関するフィージビリティスタディー（システム技術検討（物質バランス、エネルギーバランス）および経済性評価）については、図11の例でローリー（輸送容量 56m^3 ）による輸送距離300km、年間輸送量7, 21, $35 \times 10^6\text{m}^3$ の3ケースに対して、また図12の例ではガスタービン7,120kW、蒸気タービン2,240kWの4系列合計37,440kWの発電設備でのケースについて計算を行い、導入可能性の確認を行っている。

なお、この試算ではメタンハイドレートの物性値を使って計算しているが、実際には天然ガス（メタンの他にブタン、プロパン等の成分を含む。）のハイドレートを扱うことになる。このような混合ガスハイドレートでは純メタンハイドレートとは平衡温度・圧力などの物性が異なり、運転条件が緩和され、より経済性が得られる可能性もあるので、今後の混合ガスハイドレートの物性研究の結果を反映した概念設計をする必要がある。

7. 産業システム実用化のための基盤技術研究開発

ガスハイドレートを上述の産業システムの適用する場合、その実用化に必要な技術項目としては次のものが挙げられる。

- ① 混合ガスハイドレートの生成・分解に関する反応機構解明
- ② ハイドレートスラリー挙動・特性の把握
- ③ 実用的なハイドレート濃度測定技術

先にも述べたように実用プロセスでは天然ガスという混合ガスのハイドレートを扱うことになる。

混合ガスの特性において、1) 純メタンハイドレートではⅠ型構造をとるのに、プロパンが3%混じるとⅡ型構造になる。2) メタン／エタン混合系ではメタン濃度0.74以上でⅠ型からⅡ型に変化し0.993以上でⅡ型からⅠ型に戻る。3) メタンにエタンやプロパンが混じると生成・分解条件が低圧・高温側に移動する。などという現象が明らかになってきた。この特性により実用システムの設計仕様が変わってくることが考えられる。このような特性の反応機構などはまだ十分に解明されていないので、把握する必要がある。

それをもとにガスハイドレートの生成・分解速度を速めたり制御したりする技術を構築することが重要であると考えている。

また、実用プロセスではペレット形状による貯蔵、水などと混合したスラリー状態での配管内流動供給になると想定されているが、ペレットの貯蔵特性にしてもスラリーの流動特性にしても未だ十分には把握されていない。ハイドレートスラリーの配管内流動時の圧力損失はいくらか、分解・再ガス化しながら流動していく場合の熱交換率はいくらか、などプロセス設計に必要な項目はまだ多い。

また、新たな試みとしてガスハイドレートの貯蔵条件を緩和するものとしてガスハイドレートとシリコンオイル等を混合したハイドレート油スラリーに注目し、その特性把握の実験研究なども行っている。

一方、計測技術の関係では、従来ハイ

ドレート結晶構造の解明には核磁気共鳴法（NMR）やラマン分光分析の技術が威力を発揮しているが、発電システムにおいて発電量に対応した燃料供給を行うには現場におけるハイドレートスラリー濃度測定（オンライン計測）が求められており、NMRやラマン分光分析では対応できない。そこで、現在誘電率センサーを利用したスラリー濃度計測法などを研究開発している。また、MRIマイクロイメージング法によるガスハイドレート混合物の可視化計測法についても適用の可能性について研究を進めている。

6. あとがき

ガスハイドレートの産業システムへの適用は解決・解明しなければならない技術的および社会システムの要件がまだ数多くあると考えるが、三菱重工業および三井造船において1 t/d規模のハイドレート製造装置を製作するところまできており、実用化への道が多少見えてきたようにも思える。

ガスハイドレートの研究開発については、産業システム適用に係るものとNGH輸送チェーン開発に係るものなどと共通する項目が多い。今後、それぞれの成果を相互に活用し早期の実用化に向けた研究開発がさらに進展していくことを望みたい。

エネルギー総合工学研究所におけるガスハイドレートの研究開発はNEDOの補助事業として進めている。また、研究開発の実施にあたっては共同研究先である産業技術総合研究所、カナダの研究機関、および再委託で協力をいただいているメ

ーカーの支援を得ている。ここであらためて関係各位に感謝したい。

参考文献

- (1) 「メタンハイドレートとその将来性—日本周辺海域に眠る新しい天然ガス資源—」, 季報エネルギー総合工学, Vol.20, No. 1 (1997), エネルギー総合工学研究所
- (2) 「ガスハイドレート船による天然ガス輸送—LNG船方式を凌ぐエネルギー効率と環境調和性—」, 季報エネルギー総合工学, Vol.22, No. 2 (1999), エネルギー総合工学研究所
- (3) 「非在来型天然ガス（メタンハイドレート編）」, 新エネルギーの展望, 1998年3月, エネルギー総合工学研究所
- (4) NEDO委託事業「天然ガスハイドレート技術の産業システム適用のための研究開発」平成14年度成果報告書, エネルギー総合工学研究所
- (5) NEDO委託事業「ガスハイドレート技術による天然ガス供給システムに関する研究開発」平成13年度成果報告書, エネルギー総合工学研究所
- (6) NEDO委託事業「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」平成12年度成果報告書, エネルギー総合工学研究所
- (7) 「特集メタンハイドレート」, 石井吉徳他, エネルギーレビュー, 1999年11月号
- (8) 「ガスハイドレートの工業的利用」, 川崎達治他, 化学工業, 2001年10月号
- (9) メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアムのホームページ (<http://www.mh21japan.gr.jp>)
- (10) 石油公団ガスのホームページ (<http://www.jnoco.go.jp/>)
- (11) 海上技術安全研究所のホームページ (<http://www.nmri.go.jp>)
- (12) 平成14年度石油公団TRC研究成果報告会発表資料, 2003年7月
- (13) 4th International Conference on Gas Hydrates 予稿集, 2002年5月
- (14) メタンハイドレート（21世紀の巨大天然ガス資源）松本良他, 日経サイエンス社, 1994年
- (15) 北見工業大学のホームページ (<http://snow2.civil.kitami-it.ac.jp/ner-pub/main.html>)

高温コークス炉ガスのドライガス化法による 水素製造—小型装置による実験—



橋 本 孝 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 主管研究員

1. はじめに

水素エネルギー時代の到来に向けて、クリーンな発電システムである燃料電池(FC)に注目が集まっている。特にFC自動車普及への期待は大きく、ある予測によれば、2020年には約500万台のFC車を想定しそれに必要な水素量は年産40億 m^3 との試算がなされている。しかし現在流通している水素量(2億 m^3 程度)ではその需要には応えられない。勿論、既存技術により都市ガス、ナフサ改質からある程度の水素を得ることは可能ではあるが、将来、多量の水素需要が生じた際、供給面でどのようにして安価な大量の水素を確保するかが重要な課題である。米国では、FutureGen計画⁽¹⁾に示すように、2010年までにガソリン価格レベルの1.5ドル/gallonの水素を製造する技術を開発することを目的に技術開発を進めている。

このような状況下で、国内製鉄所が有するコークス工場から発生する副生ガスのコークス炉ガス(COG)はその発生量(年間115億 m^3 、水素として65億 m^3)からFC用水素供給源として有望視されている。また、コークス工場は将来水素需要

の多いと思われる首都圏、都市部周辺にも比較的多く立地していることも好材料である。COGには、元々、50%程度の水素が含まれることからPSAで分離し水素を利用している製鉄所もある。

コークス炉から直に得られる高温COG(700~800℃、水素、メタンの他にタール等の液状成分蒸気を含む)は、供給可能量の大きさに加え、供給基地の分散化・広範囲供給の可能性があること、およびコスト面からもFC導入初期の水素供給源として期待できる。また、高温COGは、水素、一酸化炭素、メタン、タール等を含むことから、その保有顕熱を利用しつつ効率的にタール成分等をドライガス化(高温COGを微減圧下でガス化しハンドリングしやすい水素、一酸化炭素、メタン等のドライガスに改質する反応)して水素に転換し最終的に水素生成量を増幅するための技術開発が行なわれている。

高温COGドライガス化プロセスには無触媒と触媒を用いる2つのケースがあるが、ここではすでに検証済みで今後有望な無触媒ドライガス化プロセスに関する小型実験装置による成果の一部⁽²⁾⁽³⁾を中心に紹介する。

2. プロセスの概要

高温COGドライガス化プロセスの全体概略フローを図1に、高温COGドライガス化炉内反応イメージを図2に示した。本プロセスの基本的な考え方については、すでに「コークス炉ガスの改質並びに顕熱回収法」として片山により特許出願⁽⁴⁾されている。

本プロセスの特徴は、微減圧下、タール等蒸気成分を含む高温COGに少量の酸

素と水蒸気を加えて、水素、一酸化炭素等にドライガス化するもので、タール等成分を下流側でハンドリング容易なドライガスに改質することが技術開発のポイントであり、ドライガス化部分以外は既存技術での対応可能である。

本技術開発の目標は原料カーボンの98%以上をガス化すること、および原料COG中の有効ガス(CO+H₂)量を2倍以上に増幅することである。

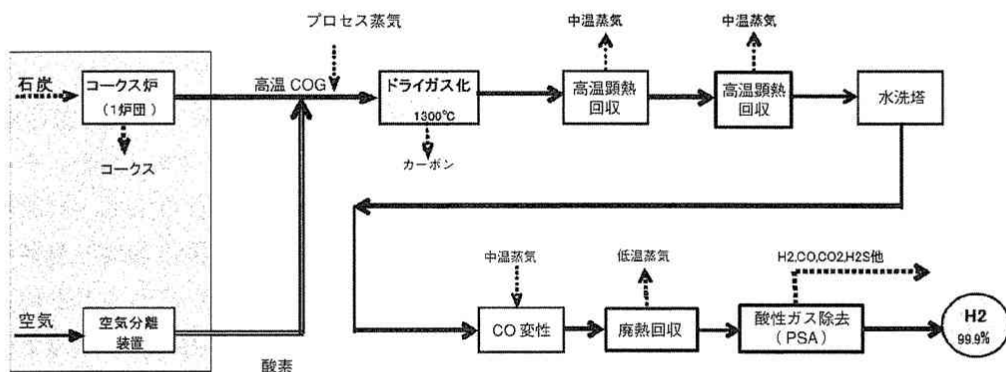


図1 高温COGドライガス化水素製造プロセス概略のフロー

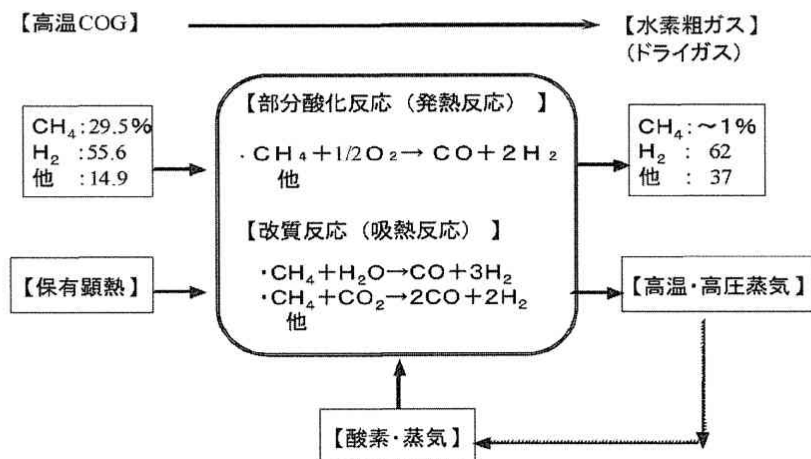


図2 高温COGガスドライ化炉内反応イメージ

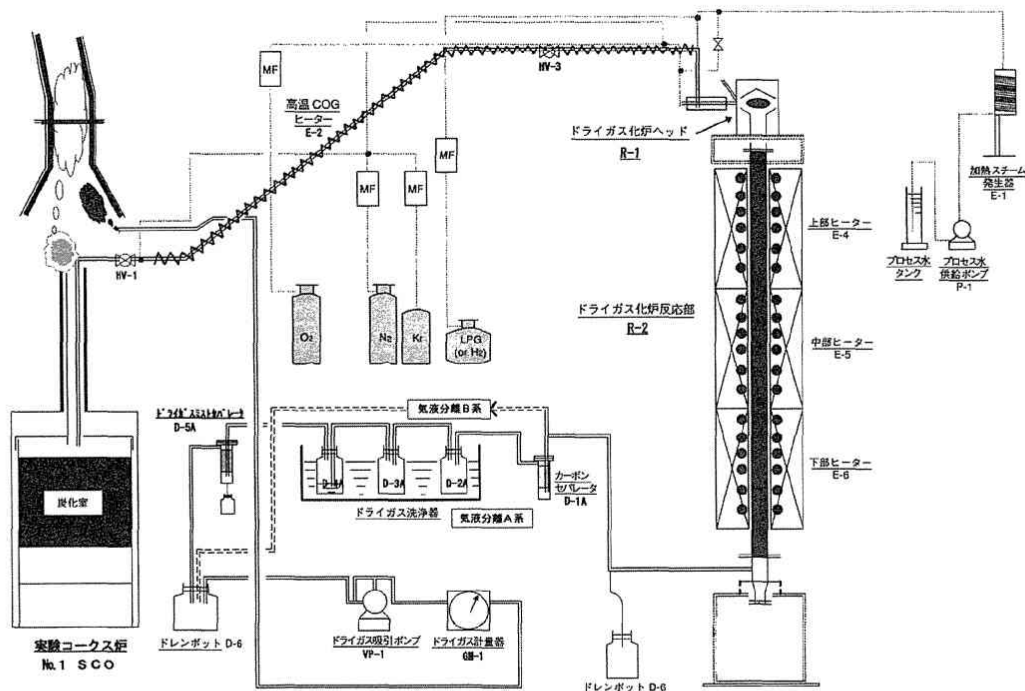


図3 高温COGドライガス化実験装置フロー

3. 小型実験装置による実験

(1) 小型実験装置

高温COGドライガス化特性を把握・検証するため、既設のコークス試験炉を利用し、高温COG発生量に見合うドライガス化実験装置(図3, 図4)を設置した。現在、装置は(株)新日化環境エンジニアリング君津事業所内に設置されており運転・分析業務も同社が担当している。

筆者らは、運転計画および設備改造計画等の立案・実施、実験結果の解析を行なうだけでなく、直接現場に赴きデータ取得状況を把握することになっている。毎回の現場での立会いは、後日、データ解析の精度を確保するのに非常に役立つ。

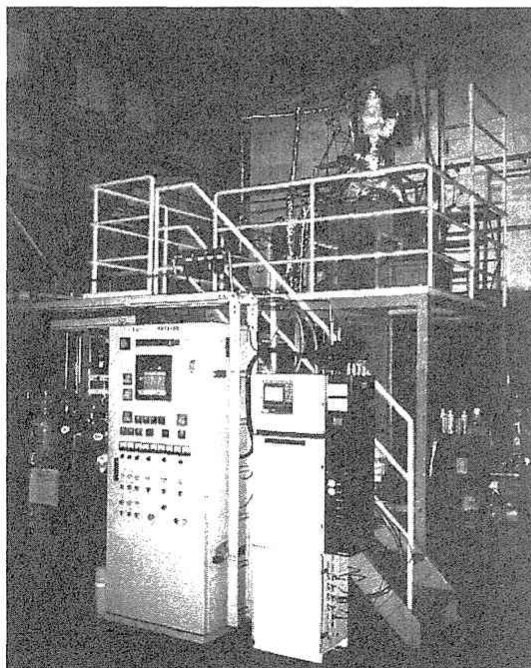


図4 実験装置全景

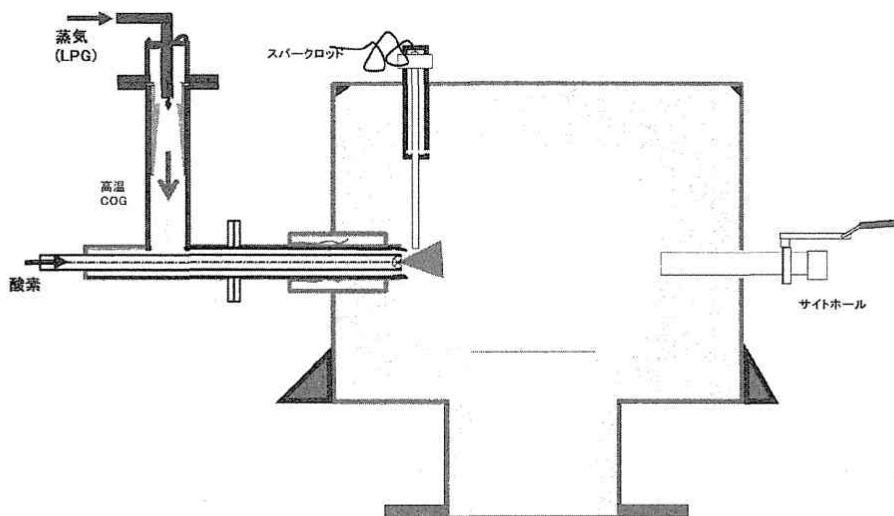


図5 横型ドライガス化ヘッド

図3においてドライガス化炉は、ハイアルミナキャストブルを内張りした中空円筒容器のドライガス化ヘッド部(R-1)と耐熱反応管(R-2)で構成されている。ヘッド部には高温COGが酸化剤と速やかに混合するために噴射ノズルが装着され

ている。R-1(図5)はCOGおよび酸素等を水平・接線方向から吹き込む横型タイプであり、この他に垂直形状のものを交換し実験できるようになっている。図6に、LPG燃焼時、高温COGのガス化反応時の状況を示した。R-2(内径102mm、長

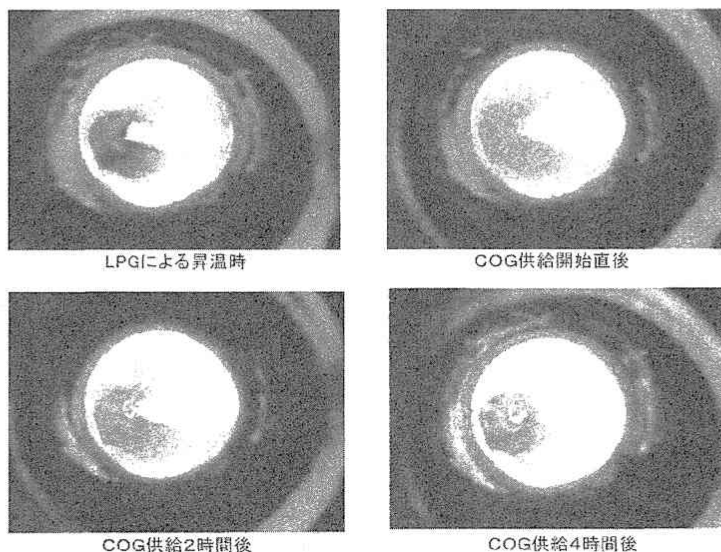


図6 ドライガス化ヘッド噴射ノズル状況

さ2.5 m)は加熱用電気炉(高さ2 m, max.1,500℃, 3分割)を備えている。また, 生成系には, 発生カーボン回収のため固液分離系があり, その他, 運転管理と各種データ保存のためのガス分析・データ収録システムを具備している。

(2) 実験

① 実験スケジュール

表1 高温COG組成例

成分	mol%	wt%
H ₂	43.3	6.7
N ₂	1.2	2.6
CH ₄	25.3	31.2
CO	5.4	11.6
CO ₂	1.6	5.3
C ²⁺	2.3	5.3
H ₂ S	0.1	0.3
SO ₂	0.1	0.4
NH ₃	0.7	0.9
タール等	1.4	10.0
水分	18.6	25.7
計	100.0	100.0

実験では, 実機高炉コークス用として使用されている装入炭をコークス試験炉に仕込み, 発生する模擬の高温COG(組成例を表1に示す)を実験に用いた。代表的な実験スケジュールは表2の通りである。実験前日, コークス試験炉に予めセットした80kgの装入炭を実験当日の朝から徐々に昇温・加熱するとともに, LPG燃焼によりドライガス化ヘッド部を所定の温度まで加熱・昇温, ガス供給ラインをLPGから高温COGライン(700℃)に切り替え, その時点ドライガス化実験開始時刻とした。実験は, 乾留初期を避けて5時間経過時から9~10時間経過時までの比較の実高温COGガス組成に近い区間において連続的に実施した。

② 実験条件

実験条件は, 高温COG流量: 10~20 l/min, 酸素量: 8~12.5 l/min, 水蒸気量: 1.2g/min, 反応圧力: 0.09MPa以下(微減圧下), ガス化炉ヘッド部温度: ~1,350℃, 出口吸引ガス流量: 26 l/minである。

表2 実験スケジュール

項 目	設 定 条 件
《高温COGドライガス化装置》	
石炭乾留開始時刻	8 : 0 0
ガス化炉ヘッド予熱時間	1 0 : 4 0 ~ 1 3 : 0 0
高温COG供給時間	1 3 : 0 0 ~ 1 7 : 3 0
出口ガス吸引量	2 6 L/min (max)
酸素供給量	1 2 . 5 ~ 8 . 0 L/min
《 実験コークス炉内の状況 》	
コークス化開始(8時)→石炭水分蒸発完了(18時)→プラスチック層の合体(19時)→タール前駆体消滅(24時)→コークス概成(翌日5時)→赤熱コークス消火(翌日8時)	

サンプリングは、1時間間隔とし原料ガス組成、生成ガス組成、タール、BTX、水分濃度を分析した。カーボン生成量については、実験終了の翌日、実験装置を開放点検する際、各部分ごとにカーボンをかき集め重量を測定した。

③ 物質収支

物質収支算出にあたり、高温COG流量は直接測定ができないため供給側と生成側のカーボンバランスから推算した。また、生成側水分はまず、供給側と生成側との酸素バランスから燃焼による生成水を推算し、次に、この生成水に供給COG含有水と供給プロセス水とを合算して求めた。全体の物質収支は、原料供給側は高温COG、プロセススチーム、プロセス酸素の合計、ドライガス化反応生成物側はドライガス、タール、BTX、水分、カーボンの合計として元素バランスにより検討した。

(3) 結果

分析、測定、計量データに基づき、反応系の総物質収支を算出し、ドライガス化率（目標値：98%以上）、有効ガス量増幅比（2倍以上）について検討した。

① ドライガス化率

ドライガス化率を、100－ガス化未転換カーボン率として定義した。ここで、ガス化未転換カーボン率は、原料である高温COGの炭素量に対するドライガス化後のカーボン析出量（ミストタールの炭素量も含む）の割合である。

図7に、酸素供給流量を3段階に変えて実験を行なった結果をO/Cとガス化率の関係で示した。結果によれば、酸素供給量12.5 l/minでは、ガス化率98%を達成しているが、酸素供給量の少ない、O/Cが小さい場合にはガス化率が低下する傾向が見られた。これは、本実験装置が小規模設備であることから断熱を強化

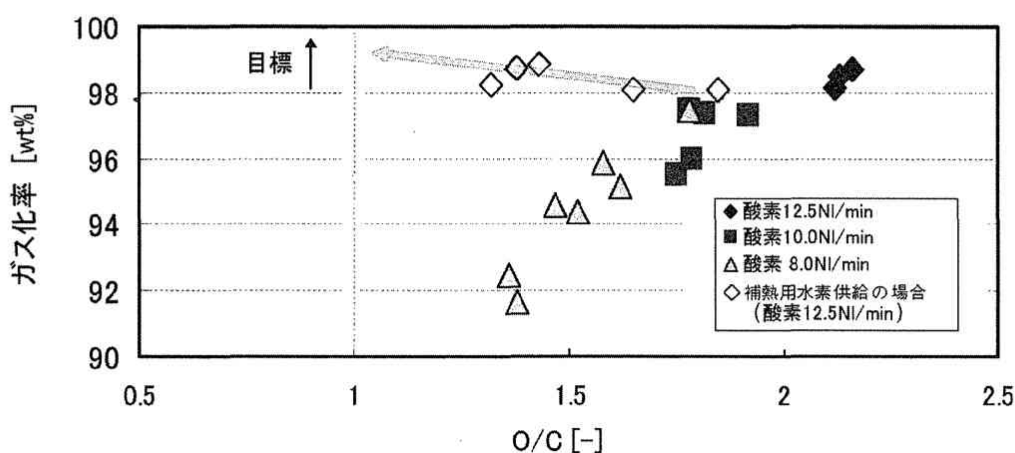


図7 酸素流量別のO/Cとガス化率の関係

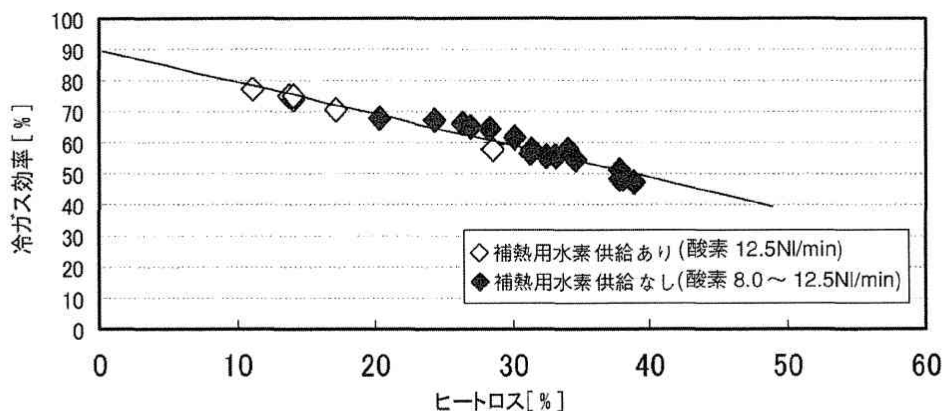


図8 ヒートロスと冷ガス効率の関係

しているが装置上の限界もあり、その結果、ガス化ヘッド部でヒートロスが生じ、所定のドライガス化温度を維持するために供給プロセス酸素の一部を消費したためと考えられる。

このヒートロスを補うため高温COG供給ラインに補熱用水素を供給した場合、補熱用水素によりガス化ヘッド温度の低下防止、ヒートロスの抑制がはかられ、O/Cの小さい領域でもガス化率98%以上達成の見通しを得た。

また、ヒートロスと冷ガス効率の関係

を図8に示した。実線は(株)KEMのガス化シミュレータによる推算値と良く一致している。

②有効ガス量増幅比

有効ガス量増幅比は、ドライガス化後の有効ガス (H_2+CO) に対する原料高温COG中の有効ガスの容量比として定義した。図9にO/Cと有効ガス量増幅比の関係を、表3に補熱用水素供給ありの場合の反応結果を示した。経過時間とともに有効ガス量増幅比が減少傾向にあるのは、

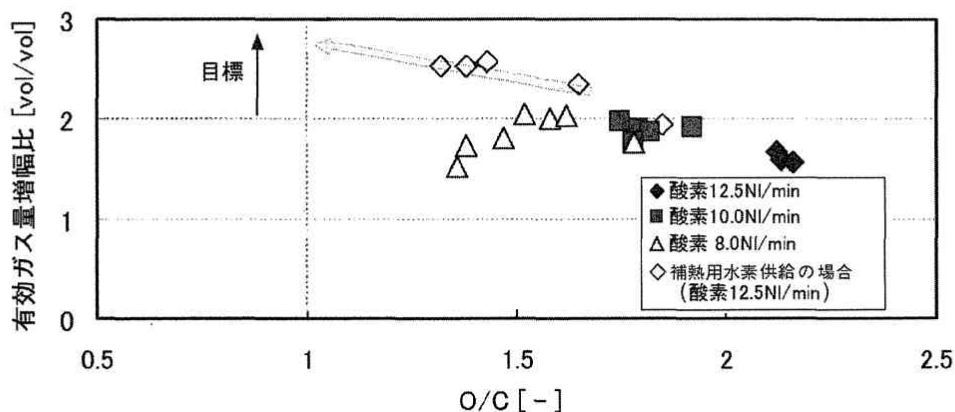


図9 有効ガス比とO/Cの関係

表3 ドライガス化実験における有効ガス（H₂+CO）量増幅比

サンプリング時間(h)	14:00	15:00	16:00	17:00	17:30
供給側 (mol/h)					
H ₂	14.21	15.59	16.63	17.76	17.62
CO	2.04	2.12	2.23	2.35	2.35
有効ガス量合計	16.25	17.71	18.86	20.11	19.97
生成側 (mol/h)					
H ₂	35.69	35.66	35.62	34.12	34.41
CO	12.81	12.67	12.54	11.64	11.66
有効ガス量合計	48.5	48.33	48.16	45.76	46.07
増幅比（生成/供給）	2.98	2.73	2.55	2.28	2.31

実験コークス炉はバッチ運用のため発生するCOG中の水素濃度が徐々に増加するためである。

補熱用水素の供給がない場合、有効ガス量増幅比は2.2～1.8であったが、これもドライガス化率の場合と同様に、ドライガス化温度維持のため供給プロセス酸素の一部を消費し、結果として有効ガスを燃焼損失したためである。一方、補熱用水素を供給した場合には、有効ガス量増幅比は2以上（表3）となり目標値を達成している。

4. プロセスの経済性検討

ドライガス化プロセス検討の一環として、全体プロセス構成の経済性を粗評価した。製鉄所内コークス炉に隣接設置されるものとし、コークス日量2,000トン相当を生産する際に副生する高温COGを原料に、化学用高純度水素を製造できる規模と想定したプロセス（図1）を構築し、

プロセスシミュレーターを利用し設計検討を行ない概略建設費を算定した。経済性の評価は、ナフサスチームリホーミング法水素製造コストとの比較で検討を行った。

検討の結果、以下のことが分かった。

- 製造コストに占める変動費の割合が約80%で、その大部分はCOGとドライガス昇圧動力などの経費である。
- 製造コストに占める固定費の割合は約20%で製造コストへの影響は小さい。
- 水素は日本で多く採用される既存技術のナフサ原料水素製造法よりも低廉に製造できる。

4. おわりに

小型実験装置を用いた微減圧下、タール等を含む高温COGドライガス化実験により、当初の目標であるドライガス化率98%以上、有効ガス量増幅比2以上の達成およびプロセスの経済性検討結果によ

り無触媒高温COGドライガス化プロセス
成立の見通しを得た。

今後は、本成果を含めて適正な技術開
発成果の評価を経て次のベンチプラント
段階への展開が期待される。

なお、本研究は、R金属系材料研究開
発センター（JRCM）が経済産業省の補助
金を受け、民間企業、大学等が連携をと
りながら行なっている「製鉄プロセスガ
ス利用水素製造技術開発」の一部を役務
提供のかたちで実施したもので、関係各
位の協力に感謝いたします。

参考文献

- (1) “The Department of Energy Strategic Plan” (2003)
- (2) 橋本他, 『第40回石炭科学会議発表論文集』 p.46
(2003)
- (3) 橋本他, “Journal of the Japan Institute of Energy,”
Vol.82, No.10, ” p.797, (2003)
- (4) 片山優久雄 ; 公開特許公報 特開2001-220584
(2001)

研究所のうごき

(平成15年10月1日～12月31日)

◇ 月例研究会

第217回月例研究会

日 時：10月31日（金）14:00～16:00

場 所：航空会館 7 階 702・703会議室

テーマ：

1. 地球温暖化対策の現状とその一手段としての温暖化対策税について
(環境省 総合環境政策局 環境経済課 課長補佐 永見 靖氏)
2. 地球温暖化研究の最前線
－IPCCと地球温暖化イニシアティブ－
(独) 国立環境研究所 社会環境システム研究領域 環境計画研究室長 原沢 英夫氏)

第218回月例研究会

日 時：11月28日（金）14:00～16:00

場 所：航空会館 7 階 702・703会議室

テーマ：

1. リスクベースの安全の考え方
(プロジェクト試験研究部 主管研究員 氏田 博士)
2. MITが描く原子力の未来
(プロジェクト試験研究部 専門役 楠野 貞夫)

第219回月例研究会

日 時：12月19日（金）14:00～16:00

場 所：航空会館 7 階 702・703会議室

テーマ：

1. わが国のバイオマスエネルギーの現状と今後の見通し
(株)三菱総合研究所 地球環境研究本部 サステナビリティ研究部 主任研究員 井上 貴至氏)
2. 経済産業省のバイオマス導入促進施策
(経済産業省 資源エネルギー庁 省エネルギー・新エネルギー部 新エネルギー対策課長 荒木 由季子氏)

◇ 主なできごと

- 10月1日（水）・第2回高効率廃棄物ガス変換発電技術評価委員会
・第1回品質別電力供給システム技術検討会
- 10月8日（水）・第1回電力系統制御システム技術検討会
- 22日（水）・第2回天然ガスハイドレート技術の産業システム適用のための研究開発委員会
- 30日（木）・第1回電力分野技術戦略に関わる動向調査委員会
・第3回高効率廃棄物発電技術に関するセミナー
- 31日（金）・第3回高効率廃棄物発電技術に関するセミナー
- 11月6日（木）・原子力水素研究会
- 7日（金）・第1回新電力供給システム技術に関わる動向調査WG
- 11日（火）・第1回風力発電電力系統安定化技術開発実行委員会
- 12日（水）・第1回核燃料サイクル関連技術調査委員会
- 17日（月）・第2回多様なニーズに対応するフレキシブルタービンシステムの研究開発委員会
- 19日（水）・第2回電力系統制御システム技術検討会
- 25日（火）・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
- 27日（木）・第2回品質別電力供給システム技術検討会
・第3回高温ガス炉プラント研究会
- 12月1日（月）・第2回エネルギー経済環境予測検討委員会
- 8日（月）・第2回高性能蓄熱材料による熱搬送・利用システム検討委員会
- 9日（火）・第1回高速増殖炉利用システム開発調査検討委員会
- 12日（金）・第1回高効率発電及び地球環境保全技術に関わる動向調査WG
- 15日（木）・第3回木質系バイオマスによる小規模分散型高効率ガス化発電システムの開発推進委員会
- 16日（火）・第1回小出力発電設備の自主保安を促す方策に関する検討会

- 17日（水）・第2回新電力供給システム技術
に関わる動向調査WG
- 18日（木）・第1回「水素安全利用等基盤技
術開発」「革新的技術に関する調
査・研究委員会」
- 25日（木）・第2回水素基礎物性に関する委
員会

◇ 人事異動

○10月1日付

（出向採用）

松本行晴	業務部長
横山 博	プロジェクト試験研究部 主管 研究員 電力技術開発プロジェ クトリーダー
村田謙二	非常勤嘱託

○12月31日付

（出向解除）

野口 仁	プロジェクト試験研究部 部 長・副主席研究員
------	---------------------------

編集後記

昨年は、イラク戦争に始まりイラン大震災に終わった混乱の年でありましたが、年が変わり穏やかな日差しが続く正月を迎え、今年の世界と日本もこのようにあって欲しいと願われた方が多かったと思います。

もっともこの陽気のせいでしょうか、日比谷公園のつつじが、部分的に花をつけるという珍現象が見られました。広い園内で局部的に咲いた花で、普段なら見過ごしにしているところを当所職員が発見し、筆者等も野次馬気分で駆けつけ確認したものです。それを地球温暖化現象と結びつけるのは早計としましても、この穏やかさの裏に隠れ、あるいは忍び寄る一種の影を思わずにはおれないひと時でした。

さて、本号の理事長対談でご登場いただいた国立環境研究所理事長 合志陽一氏が主唱されている「見逃さない」、「放置しない」、「あわてない」は、換言するとあらゆる環境変化を「目ざとく捉え」、「対策を講じ」、その知見を躊躇無く「他の問題に適用する」ということと解釈されますが、長年環境問題に携わってこられた人の重みある言葉として受け止めることができるのではないのでしょうか。また、同対談で更に今後の環境問題では、「物質」や「エネルギー」と並んで「情報」（将来の予測情報と現在の必要情報の2面）が重要になると挙げておられる

のも注目したいと思います。

さて、本誌は1月号でもあり、資源エネルギー庁長官 日下一正氏による「巻頭言」へのご寄稿をはじめとして、「電力自由化」を巡る話題・動向、「再生可能エネルギー」の課題、さらに「循環型社会」の方向性等、エネルギーと環境関連の最新動向を各分野の権威・専門家に紹介いただきました。また、所内からは、「原子力」、「水素」、および「ガスハイドレート」に関わる研究成果の一部を紹介しました。

最近あまりにも大きな問題、事件が多発したからでしょうか、「エネルギー」と「環境」問題が新聞紙上（一般紙）をにぎわすことは少なくなった感じがします。

しかし、本年は国内では「長期エネルギー需給見通し」の改定、「地球温暖化推進大綱」の評価など、国際的には不透明感はあるものの「京都議定書」の発効の動きと同議定書以降（2013年以降）の在り方の議論など、ますます同問題から目が離せない時期に来ていることは間違いないようです。

本年はこのように「エネルギー」と「環境」問題にとって重要な年であり、改めて本紙の内容充実への決意とともに、皆様に更にご活用いただけるようにとの期待を込めて新年号をお届けいたします。

編集責任者 小川紀一郎



（日比谷公園に咲くつつじ 2004.01.07撮影）

季報 エネルギー総合工学 第26巻第4号

平成16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) 3508-8894

FAX (03) 3501-1735

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

(印刷) 和光堂印刷株式会社

無断転載を禁じます。