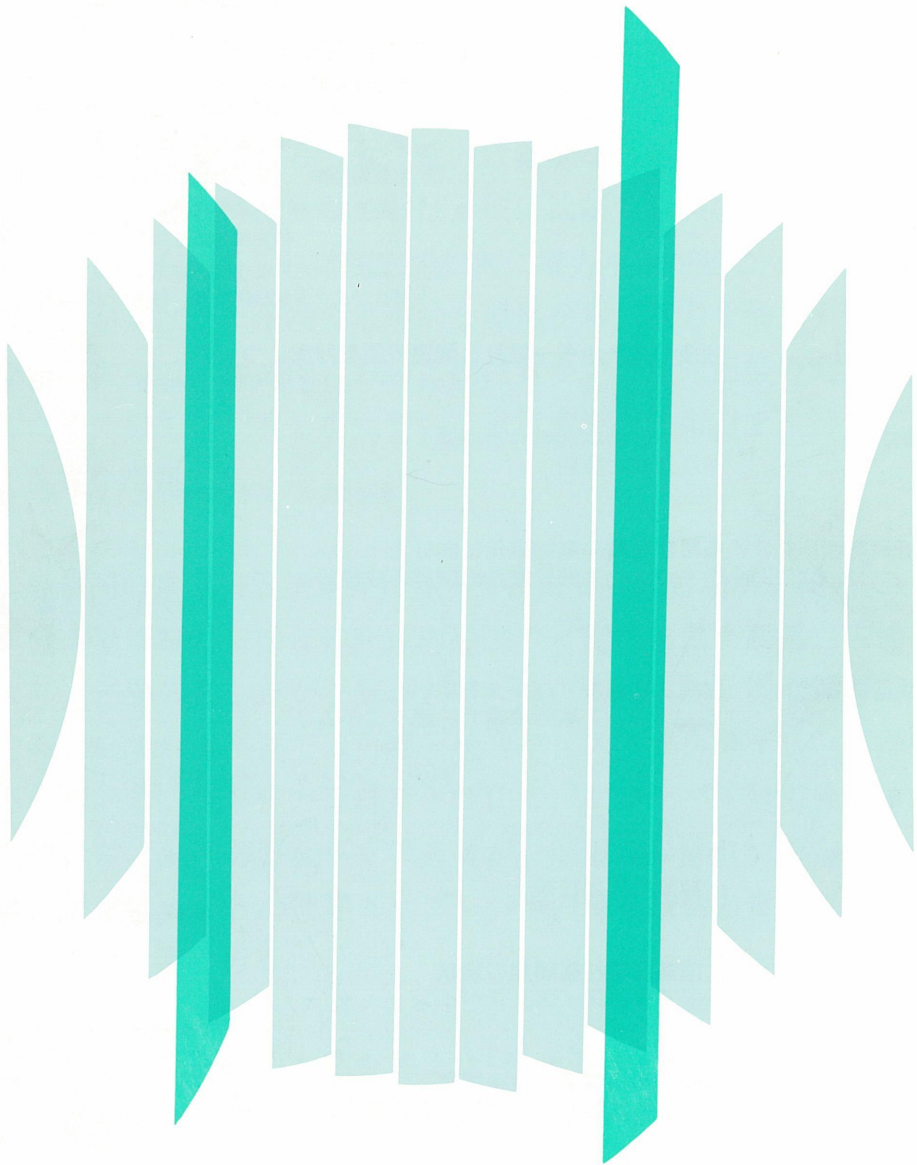


季報 エネルギー総合工学

Vol. 24 No. 2 2001. 7.



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】	重電産業分野における産学連携 (社)日本電機工業会専務理事 藤 本 弘 次 …1
【座談会】	わが国における将来の原子力技術開発について 経済産業省 資源エネルギー庁 原子力政策企画官 森 本 英 雄 東京大学 工学系研究科 教授 岡 芳 明 東京電力(株) 原子力技術部長 尾 本 彰 三菱重工業(株) 原子力技術部 研究開発担当部長 牧 原 義 明 司会 (財)エネルギー総合工学研究所 プロジェクト試験研究部 部長 松 井 一 秋 …3
【特別寄稿】	今後のエネルギー需給と関連の廃棄対象について (財)エネルギー総合工学研究所 理事長 秋 山 守 …24
【寄稿】	P F Iの基本的論点と課題をめぐって —リスクと契約— 電源開発(株) 新事業戦略室長 坂 梨 義 彦 … 34
【調査研究報告】	廃棄物発電の高効率化に向けた ガス化熔融発電技術開発の成果 研究員 大 森 伸 二 専門役 浅 見 直 人 …44
【調査研究報告】	電気二重層キャパシタを用いた 高効率電力貯蔵システム 主管研究員 蓮 池 宏 (株)パワーシステム 代表取締役社長 山 岸 政 章 …57
【調査研究報告】	新燃料オリマルジョン® —特徴と利用技術— 主管研究員 小 林 芳 照 … 69
【内外情勢紹介】	太陽熱発電技術開発の現状 —ドイツ、スイス、スペイン— 主管研究員 吉 田 一 雄 … 79
【事業紹介】	革新的実用原子力技術開発 —提案公募型原子力技術開発の取り組み— 主管研究員 松 下 和 海 … 88
【研究所の動き】	…105
【編集後記】	…106

巻頭言

重電産業分野における産学連携

(社)日本電機工業会専務理事

藤 本 弘 次



民生にとっても産業にとっても、電力は重要な必需品の一つである。他の必需品に比べ、最も特徴的なことは、仮に他国で如何に安くて良質なものがあつたとしても、あるいは国内で如何に電力不足が起こつたとしても、その性質上、および、わが国の地理的な環境から、電力を輸入する事は考えられない。従つて、わが国において高品質かつ合理的価格の電力を安定供給するための努力の一翼を担っている重電産業の技術力を維持していく事は大変重要な課題である。

一方、わが国の重電機器産業界にとって、厳しい経営環境が続いている。国内重電機市場は電力自由化の今後の進展の可能性に備えた電力設備投資抑制により、一層の厳しさが予想されている。このような環境に対応する一つの方策として、企業側では再編・統合やリストラクチャリングが強力に推進されている。企業体力を維持・強化し、グローバルな市場競争に打ち勝つためには、是非必要な事ではあるが、配慮しなければならない大切なことは、従来培つてきた世界トップレベルの重電技術力をこれからも維持・向上してゆく事である。

この課題に答える一つの有望な答えは「産学連携」である。米国においては、産学連携が大いに発達し、特に、IT、バイオ等、先端技術分野で、大学生まれの技術がベンチャ企業に移植され、ベンチャキャピタルによって

育成され、早いスピードで事業化されたことが、今日の米国経済の繁栄に大きく寄与したと言われている。

わが国においても、学術審議会等で産学連携の必要性が指摘され、産・官・学で努力が行われているところであるが、重電分野では大学の講座数が減少し、結果として、将来を担う学生も減っていると言われている。企業支援講座を開くなどの努力に加えて、産学連携の活性化が必要であるとの認識で、国内有志大学と重電企業が平成11年より検討を重ね、この度、日本電機工業会ホームページ (<http://www.jema-net.or.jp>) にリンクした産学データバンクの開設に漕ぎ着けることができた。これは「企業と大学がお互いに提供できる情報、ニーズなどを可能な範囲で開示しあい、お互いの理解を深め、協力しあうことから具体的な連携が芽生える」との認識の下に掲載情報が検討されたものである。例えば企業からは、大学が利用できる設備、見学可能な設備、利用可能教材等の情報提供を行い、大学からは研究室／研究者の研究テーマ、海外での委員会活動等の情報提供を行う。また、企業や大学のそれぞれが発信しているホームページを直接リンクしたり、相互に連絡をとるためのメールアドレスの照会機能や、双方が自由なテーマで意見交換できる広場＝産学FORUM＝も提供している。

まだ情報内容や使い勝手に改善余地があると思うが、是非、多くの大学と企業にこのホームページに参加・活用いただき、改善を重ねて重電技術分野の産学連携強化に少しでも寄与できればと考えている次第である。

座 談 会

わが国における将来の原子力技術開発について

森本 英雄 (経済産業省 資源エネルギー庁 原子力政策企画官)

岡 芳 明 (東京大学 工学系研究科 教授)

尾 本 彰 (東京電力(株) 原子力技術部長)

牧原義明 (三菱重工業(株) 原子力技術部 研究開発担当部長)

司会
松井一秋 (財)エネルギー総合工学研究所 プロジェクト試験研究部 部長)



はじめに

司会 昨年11月に原子力長計(「原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画」)が出されました。そこでは国と民間等における技術開発の役割分担についての言及があります。また、経済産業省総合資源エネルギー調査会

原子力部会がさらに具体的な政策の方向付けのため、「原子力の技術基盤について」と題する報告書の取りまとめを進めています。一方で、電力各社は、電力自由化、地球温暖化対策を念頭に平成13年度の電力供給計画を発表しています。

このような中、本日は「わが国における将来の原子力技術開発について」というテーマ

でいろいろな話をしていただければと思う次第です。

まず、「原子力の技術基盤について」の取りまとめを行っていらっしゃる森本さんからお願い致します。

わが国原子力技術開発に求められること

地球温暖化問題への原子力の貢献には十分な技術力と安全確保が大前提

森本 今回の原子力部会は、これまでの原子力部会とは趣が異なり、技術基盤の確保という、部会長の東京大学の近藤駿介教授の言葉を借りれば「足元の地固め」をすることがテーマでした。

これまでの原子力部会では、例えば「原子力は地球環境対策上、重要だ」といった位置づけの議論が多かった。あるいは、バックエンドの処分をどうするかとか、ある具体的なイシューについて掘り下げてやるが多かったのです。ところが、ご承知のとおり、今、総合部会や需給部会が先の気候変動枠組条約京都会議（COP3）なり、次のCOP6の再開機会をにらんで、2010年時点でどのように二酸化炭素（CO₂）の排出量削減に関する国際公約を守るかというところに焦点を置いています。その中で、原子力によるCO₂削減量がある程度入らないといけませんが、それを果たす大前提として、十分な技術力と安全確保が必要であります。この2つの前提条件をきちんと押さえておくために、今回の原子力部会では、議論を行ってきました。



森本 英雄 氏

（資源エネルギー庁 原子力政策企画官）

一方、安全について言えば、ジェー・シー・オー（JCO）事故のように、安全審査、法律で決められた審査対象とやや違うところでトラブルが起こってきたとか、核燃料サイクル分野で新たな事業が立ち上がっているとか、そんなこともあって、安全問題については間口を広げて議論するということで、保安部会が去年スタートしました。

核燃料サイクル事業の

立ち上げに技術が重要

森本 原子力の技術基盤の状況を見れば、軽水炉の技術開発については、1970年代頃から官民一体となって研究開発を進め、第3次改良標準化も1985年で完了し、それが柏崎6，7号機へとつながった。過去、建設された原子力発電所についても、勿論いろいろな改良を加えながらも、割とトラブルも少なくうまくいっている。軽水炉というのは割と成熟していて、出力も確保できているというのが認識です。環境に変化がなければ、技術基盤の確保については何の議論も必要ないでしょう

が、一方で、青森県六ヶ所村で核燃料サイクル事業が次々と立ち上がってきています。ウラン濃縮については、事業化は進んでいるものの、遠心分離機の停止問題と、1,500トンの能力達成に向けて新型の遠心機の開発に取り組んでいます。再処理はちょうど立ち上がりとしているし、MOX（ウラン・プルトニウム混合酸化物）加工も、今後設計に入っていくというところです。

核燃料サイクルの立ち上げは、ある意味で、今まで核燃料サイクル開発機構（JNC）がやってきた研究開発レベルのものを事業レベルで大規模にやっていかなければならない点で、その担当企業である日本原子燃料（株）（以下日本原燃）の使命は大きいんです。今回の報告書では「技術移転」という言葉を使っていますが、これまで開発をやってきたJNC、これから事業を行う日本原燃とが一体となって、オール・ジャパン体制みたいな感じになって立ち上げていかなければなりません。

軽水炉のリプレイスに備えた技術開発を

森本 一方で、軽水炉だけに限定すると、今の路線でも確実にいい発電ができます。しかし、もう少し先を見ると、委員会の中でも議論が出たのは、やはりリプレイス（老朽化した原子炉の建替）のことでした。現在稼働中の発電所の寿命延長をどこまで認め、どこからリプレイスを考えていかなければいけないか、そのリプレイスをどういうふうに行っていくか。これは20年先になるのか、何年先になるのかよく分かりませんが、それに備えて研究開発ではある程度ターゲットを絞っていかなければならないのではないかと議論

がありました。

ただ、それを誰がやるのか。国がやるべきなのか、民間企業がやるべきなのか、あるいは共同でやるべきなのか。

この問題を、エネルギー・セキュリティーの確保、エネルギー安定供給の確保という大きな目的から見れば、単にリプレイスをどうするかという議論よりも、20年先、30年先に困らないよう、ある程度の技術的選択肢を用意しておくということではないか。その部分は国の仕事だろうということで、委員会の意見が一致しました。

国がやる研究開発は、安全、バックエンド、将来の技術的選択肢の提供の3分野

森本 今回技術基盤を確保するということでは、官民の全ての研究開発プログラムを示すというよりは、国が何をやるべきかということに絞って議論が行われました。もちろん、第一義的には安全性確保というところもあります。これは保安部会でも別途検討しています。

原子力部会の話として、どうしてもやはり国がやるべきことというのは、先に述べた将来への選択肢の準備ということと、もう1つ、高レベル放射性廃棄物処分のような、今後の原子力プログラムがどうあろうと、これまで行ってきた行為に基づいて絶対やらねばならないバックエンド対策です。高レベル放射性廃棄物に限らず、ウラン廃棄物とか、超ウラン（TRU）廃棄物とかの問題もあります。核燃料サイクル全体の中で未解決の問題については、少なくとも国が研究開発をきちんとやる。それを事業として進めるのは原子力発電

環境整備機構（NUMO）であるとか、実施主体でしようけれども、安全評価の研究開発、基礎的な科学的知見の集積というあたりは、やはり国がきちんとやっていかなければいけないというような整理がされました。

さらに、核燃料サイクル事業の立ち上げについては、これまでJNCが行ってきた研究開発を日本原燃に移転し、一緒になってやっていくということです。

濃縮、再処理、MOX加工とか、それぞれの事業ごとに段階が違いますので、設計者が行くのがいいのか、運転者の訓練がいいのか、保守保安などの協力がいいのか。それぞれの段階に応じた協力を行っていくということが今回の部会のポイントになっています。

今回の部会では、経済産業省の直接の担当ではない日本原子力研究所（原研）も含め、国の研究の担い手として期待される役割を記載してます。

深刻なバックエンドの問題

森本 もう1つ重要な話は、研究の実施主体自身がかかえているバックエンドの問題です。JNCも原研も低レベル放射性廃棄物をドラム缶にして15、16万本ぐらいそれぞれかかえています。これがどのぐらいかというと、今までに六ヶ所に埋設した低レベル放射性廃棄物ドラム缶の数とほぼ同じです。しかも、運転廃棄物と違って、TRU廃棄物も含まれており、一部地層処分をしなければなりません。また、今後「ふげん」とか、人形峠とか、施設の廃止をしていかなければならず、これらのバックエンドの問題もあります。これを放っておくと、ある時点からは研究開発を一切やらな

いで、廃棄物処分だけにお金をかけなければならない、といった事態になりかねません。ですから、そういう負の遺産対策もきちんと対処していき、将来「研究をやらずしてバックエンドだけ」ということに絶対ならないよう、原子力委員会にも強くお願いした次第です。

また予算についても、総合科学技術会議での議論におけるエネルギー分野の重点化、予算の確保なりについて原子力委員会の方をお願いするところであります。

人材確保の重要性

森本 今回の議論で重要と言いながら、正直言って決定打を見出しにくいのが人材確保、人材育成です。国は長期的な方向性を示すことや、エネルギー総合工学研究所の方でやっていただいている提案公募制度（革新的実用原子力技術開発）で大学へも競争的資金が入るようにしています。しかし、原子力人材確保の抜本的な方策は何なのか、皆が問題意識を持って進めなければいけないところだと思います。単に数を確保するのみではなく、その分野に必要な人材が確保できるかといったところの決定打は、万全とはいえないところではあります。

電力会社の原子力技術開発の取組み

司会 実際のビジネスとして、電気をつくり、発電所を動かし、なおかつ、そこからも廃棄物が出てくる。そういう場にいらっしゃる原

子力技術部長の尾本さんに、特に変化が激しい事業環境の中で技術開発として何に重点を置いてやっていこうとしているのか、お話を伺えればありがたいと思います。

研究開発はプラント関係が過半数

尾本 電力会社の研究開発予算は、電力中央研究所も含めて、年間1,700億円ぐらいです。収入の1%強ですから、製品開発に取り組んでいる医薬品・自動車・電機と比べると比率は少ない。研究開発費の約3分の1弱が原子力分野です。その中身は、発電プラント関係が半分強で、残りがサイクルや廃棄物処理処分です。全体として額は若干減り気味です。

発電プラント関係の重点は、プラントの信頼性向上・燃料利用の高度化・次世代軽水炉開発

尾本 プラント運転経験の蓄積で信頼性は向上してきていますが、トラブルの未然防止・経年劣化対策・ヒューマンファクターなど高い信頼性確保に向けてまだまだやるべき事があります。燃料についても、燃焼度をさらに高めるためのデータ蓄積・進んだ設計評価手法の開発など、より合理的な利用に向けて開発投資を行ってきています。

1970年代から建設された発電プラントの寿命を60年と仮定すると、2030年ぐらいがリプレイス時期になります。70年代から80年代にかけての建設投資がリプレイス時に平行移動すると、投資が集中するという問題もあります。この投資を平準化することも想定して、2010年代後半でのリプレイスにむけた軽水炉



尾本 彰氏

(東京電力 原子力技術部長)

設計のオプションの用意に90年代初めぐらいから徐々に取り組んできています。電力はどういう性能を求めるのか、どういう技術が我々のニーズに合うのかから始めて、概念設計がまとまってきたところですが、これは原子炉メーカーとの共同研究という形で取り組んできています。

発電プラント関係が研究開発費の半分と言いましたが、サイクルや廃棄物分野でも高度な性能を持つ濃縮機の開発、まだ事業化されていない廃棄物の処分に関する開発研究など多様な技術開発をやっております。

市場競争と公益性のバランス

尾本 事業環境変化の中でという司会者の言葉もあり、事業環境変化の中での電力の研究開発はどう変わって行くのかについて少し触れたいと思います。これは原子力に留まらない話です。一般には、自由化という事業環境変化のもとでは電力は短期的視野で研究開発も抑制するのではないかと見られているかも知れません。自由化環境下でそれなりの変化

はありますが、逆に、エネルギー市場における競争に勝っていくための基礎は、いい技術を持っているということにあるという認識が非常に強くなりました。仏電力庁の研究開発部門の人間と話しても同じことを言います。私見ですが、電力会社の研究開発部門というのはこれまで比較的、商品開発とか現場のニーズにマッチした研究開発という思想がやや薄いところがあったと思います。今は、普通の民間会社の研究所と同じように、商品開発・現場のニーズに密着し、発電所の要求に応じた形で研究をやるという志向がかなり強くなってきています。

しかし、自由化に直面して市場原理だけを重視している訳ではありません。市場競争と公益性とのバランスを考えることの重要性を意識しています。市場競争の中にありながらこれに流されることなく、環境負荷低減・リサイクルを通じての資源制約の緩和・エネルギーの長期的な安定供給といった公益的な側面を支える研究開発を忘れてはいません。

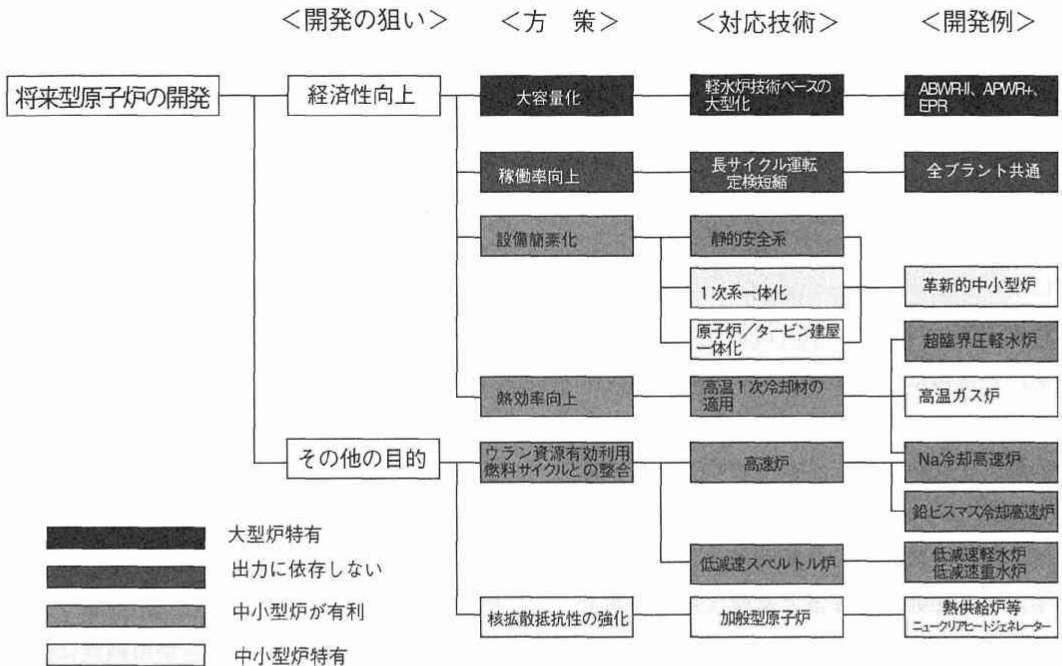
一方、研究投資という点では、いつの時代でも厳しく評価してゆくことは必要なのですが、例えばABWR（改良型沸騰水型軽水炉）ですと、国の開発資金も含めて全体でおおよそ700億円の開発資金が投入されてきました。しかし、これからは、最新の技術を利用してもっと合理的・効率的にやっていこうということになるわけです。将来のリプレースに向けた次世代原子炉はもっと少ない研究開発費で効率よく開発できるようにと考えています。具体的な例として数値シミュレーションの活用があります。原子炉の水化学と照射環境下での材料挙動や流体連成振動など、実際のプラントでのモニタリングとあわせて機構論的

なシミュレーション能力を高めて、大規模な実証試験への依存度を少なくしていくことによって、開発の効率性を高めたいと考えています。その中には、国内の研究機関、国内のメーカーのみならず、世界のいろいろな研究開発機関のリソースをうまく使ってやっていきたい、そういう時代ではないかなと思っています。つまり、従来以上に効率的な研究開発のやり方を指向していくようになってきているという訳です。

革新的な実用原子力技術開発の方向性

司会 続いて牧原さんをお願いします。ストレートに言いますが、技術開発の担い手というのは、1つは確かに先ほどのJNC、原研とかあるにしても、實際上、わが国も含めて、実際に物を建てる、あるいは何か新しいアイデアを出すとかいうところで、特にメーカーの位置づけというのは結構高かったらと思うんです。それが新規発注は少ない、高速増殖炉はどこかへ行ってしまったとかで、メーカーに流れる金がどんどん減っている。なおかつ、やはり人の問題とかがある。本当の民間企業はどこまで公益性を考えればいいのかということもある。そういった中で、特に牧原さんは最近、小型の軽水炉を手がけていらして、これはなかなか競争が激しいんじゃないかと思います。小型軽水炉には例のウエスチングハウスのIRISもあれば、アルゼンチンのCAREM、韓国のSMART、いろんな動きがある。そんな中で、お話をいただければありがたいと思います。

将来型原子炉開発の方向性



牧原 開発の方向性ということで、今どんな方向に向いているのか簡単にまとめてみました。開発の狙いは、やはり2つに分かれるという感じがします。

1つ目は、経済性の向上です。自由競争の時代なので、原子力というだけで世の中に受け入れられる時代ではなく、他のエネルギーに比べて十分競争力があるものにしていかねばならない、ということです。

2つ目は、その他の目的と書いてありますが、これはどちらかと言うと、もう少し広い意味合いでもって経済性を見るというか、燃料サイクル全体としての経済性向上ということです。技術的な話になりますが、図の燃料サイクルのところ、低減速スペクトル炉は中小型炉がいいとしてあるのは、ボイド係数とかを考えると中小型炉の方がやり易い、

またナトリウム冷却の高速炉でも、安全性を考えると、小さい方が受け入れ易いのかなという意味合いで「中小型炉が有利」としました。

経済性向上策の重点は、
設備簡素化と熱効率向上

牧原 上のほうの経済性の向上から説明します。まず経済性向上の方策には、大きく言って4つしかありません。大容量化によってスケールメリットをとっていくか、稼働率を向上させて運転維持費を削減していくか、設備の簡素化を図って建設費を削るか、熱効率を上げるか。この4つです。

軽水炉技術をベースに大型化して、ABWR-II（沸騰水型改良発展炉）、APWR+（加圧水

型改良発展炉)、EPR(欧州加圧水型炉)の開発が進められています。ここで何が制約になるかという、やはりグリッドサイズ(送電系統容量)だとかだろうと思います。今、ABWR-II、APWR+は170万kW級を考えて開発を進めていますけれども、その先となると大き過ぎるという感じです。スケールメリットを追求していく路線については、そろそろ上限に近いと思います。

稼働率向上については、長サイクル運転とか、定検短縮ということでやっているわけですが、日本の実情では、この数年、設備利用率が80%台です。この間のアイコン9(ICONE 9:第9回原子力技術国際会議)での各国の発表では、みんな90%ぐらいなっています。80%が90%になると結構、経済性向上があると思うんですが、90%が95%になってもそれほど経済性は向上しないと言われます。稼働率向上もそろそろ限界かなという気がします。

今の大型炉をベースにすると、設備簡素化はかなり上限に近づいてきています。今後、大型炉では、20%、30%といった大きなコストダウンはまず見込めないと思います。

結局、次に出てくるのは、大型炉では導入が難しい技術一例えば、静的安全系、1次系の一体化、原子炉/タービン建屋一体化一で本当に安くなるかという話だと思っています。これが今、いろんなところで革新型の中小型炉の研究が進められている背景だと思っています。

熱効率向上は、原子力で最後に残されている一番大きなところですが、熱効率は、軽水炉で35%くらいが上限と言われますが、これを何とか40%くらい、あるいは50%に近いところまで引き上げられないかということで、い



牧原 義明 氏
(三菱重工業 原子力技術部
研究開発担当部長)

ろいろな開発が進められています。高温の冷却材を使うことになってきますが、岡先生がやっておられる超臨界圧軽水炉とか、高温ガス炉とか、ナトリウム冷却の高速炉の観点になるでしょう。今まで話してきた軽水炉ベースの話とは違いまして、これには根本的な技術革新が必要だろうと思います。

ウラン資源は高速炉と

低減速スペクトル炉で一層の有効利用を

牧原 ウラン資源の有効利用、燃料サイクルとの整合性という話です。これには、高速炉を使ってプルトニウムを増殖させていく従来からの考え方と、低減速スペクトル炉という最近出てきた考え方があります。この分野については、軽水炉技術をベースにもう少しウラン資源を有効利用できるのではないか、いろいろ検討しています。

高速炉の流れでいきますと、ナトリウム冷却の高速炉とか、鉛ビスマス高速炉というようなものが出てくるでしょう。

低減速のスペクトル炉でいけば、低減速の軽水を使う場合と、重水を使う場合というのが出てくるでしょう。

核拡散抵抗性の強化では、可般型原子炉があります。実際に検討されているのは熱供給炉等ですが、原子力技術の面からいきますと余り革新的とは言えません。従来からある技術を適用すれば大体できると考えています。

人材育成と原子力技術開発について

回復しつつある学生の原子力人気と大学院の重点化

司会 岡先生は、アメリカ原子力学会の理事に選出されてご活躍中です。超多忙になられている岡先生に、人材育成だとか、革新型だとか、原子力技術開発に関する研究者の立場からお話をお伺いしたいと思います。

岡 人材育成は、大学としてはしっかりやらないといけないと思っていますが、原子力を始めた頃、原子力国産化といって沢山つくっていた頃とは、状況が幾つか変わってきたと思います。

まず、軽水炉技術を中心に技術がかなり成熟化し、研究開発についても転換期にあり、原子力を専門とする学生の需要が発電所をどんどん造っていた頃とは変化しています。

チェルノブイリ事故で人気は低下したこと。学生の人気があるかどうかは大学にとっては大変重要なことです。大学には、その産業に優秀な人材を集める、供給するという役割が



岡 芳明氏

(東京大学 工学系研究科 教授)

あります。「だめな学生ばかり来てるんじゃないか」と言われる方がいますが、優秀な学生は今もおります。昔、日本のトップランクの方々が原子力に入られたと思いますが、その頃に比べると、数は少ないのは確かです。

それが最近、やはり環境問題、エネルギー・セキュリティー、経済振興における原子力の役割とかをしっかりと理解して入ってくる優秀な学生が出てきました。原子力の人気は回復しつつあります。アメリカの方でも、カーター政権以来、政策が20数年ぶりに変わりましたので、この機会を捉えていい学生を集めたいと思っています。なお、東大の場合、システム量子工学を含む総合工学的な4学科が集まってシステム創成学科を作ったところ人気が急回復しています。

日本の大学特有のことなのですが、大学院重点化というのがあります。今までは教育は学部中心で、大学院は学部附属しているような構造だったわけですが、旧帝大を中心に大学院重点化が行われました。

これで、大学院の学生定員と学部の学生定員がほとんど同じになったんです。以前、大

学院の定員は学部は半分ぐらいしかなかった。ですから、結果的には旧原子力工学科の先生方が教えられている学生数は、20～30%から40～50%増えているという状況にあります。

学部で共通分野、大学院で専門分野を

岡 今まで学部で専門教育をやっていたところがありました。しかし、これからは学部では工学の基礎、あるいは文科系も含めた基礎、今まで工学系では余り教えていなかった技術倫理、社会心理と安全、技術革新や産業の変遷、経営工学的な話などを教える。伝統的な工学分野である機械工学、電気工学、もう少し細かく言うと制御、熱流動、材料力学とか—そういう共通なものは学部で教える。そして、大学院では専門教育をしましょうという方向に変わっていくんじゃないかと思っています。

実は、アメリカの大学は前から原子力工学科は大学院にしかないの、日本がそれに近づいたということかも知れません。いずれにしても、大学院でしっかり原子力を教えるようにしたいと思っています。

原子力特有のものには、放射線、放射能の取り扱い技術、原子炉物理学があります。これらの初歩は学部でも教える必要があると思います。この放射線、放射能の方は、例えばアイソトープ利用とか、比較的他分野と関係が深いです。東大で言いますと実はアイソトープを取り扱う必要のある人は工学系よりも医学部、生物、理学系の方に多くいます。その人たちに対する、いわゆる従事者教育のシステムはあります。それでも放射線に関する専門家教育はきちんとやる必要があります。加速器と関連して教えることもできます。

原子炉物理学は教科書が非常に沢山あり、よくできていますので、それを使いながら教えることができるのではないかと思います。

学問というのはある程度教科書ができあがりますと、その分野をずっと研究していくということは必ずしも必要なくて、ちゃんと教えるということをしていけばいい。その他の分野については、原子力関連技術としてももう少し広くいろいろ教えられます。例えば、火力と原子力とは熱流動で共通なものがありますので、そういう形で教えることもできる。先生方の教え方次第で、原子力に関する知識も伝えていけると思います。大学では現在のモノがどうなっているかというような知識を教えるより、新しい技術革新を導くために自分の頭で考えられるように基礎をきちんと身につけるよう教育することが重要だと思います。

教育と研究との関係ですが、大学院では、ある意味で研究と教育が一体化しています。研究することで学生が学習した知識を初めて身につけられるというところがあります。ですから、研究と教育は一体で進めたいし、進めるのが重要ではないかと考えています。そういう観点で、いろいろな研究をやるのが重要でしょう。

産業界による卒業生の受入れ、

建設継続によるノウハウ継承が重要

岡 いろんな学科との競争や、学生の将来を考えると、やはり産業界でしっかり原子力をやっていただくことが一番重要です。

それから、人材育成には、例えば原子炉の建設をきちんと続けていくということも重要です。それは学生を採っていただくためとい

う意味だけではありません。大学で教えていることは本当に基礎的な理論ですので、実際に物を造るためのいろいろなノウハウは、建設を続けていくということで継承され発展していくと思います。ぜひ、建設をしっかり続けていただきたいと思います。

先ほど森本さんから、JNC、原研にいろいろ廃棄物があるという話がありました。このあたり、実際に廃棄物処理を行うことの方が重要ですから、ぜひ、そういう経験のある方とうまく連携してやっていただきたいと思います。廃棄物研究に沢山投資しても問題は解決しないのではないかという感じがします。

日本に必要な国際的な情報発信

岡 軽水炉を中心とする日本の原子力技術は世界的に高いレベルにありますので、やはり国際的にもう少し情報発信をしていいと思います。先を考えれば、国際的にビジネスをやるということも出てくるのではないかと思いますので、学会活動を通じた情報発信も増やしたい。原子力学会での研究発表はこれまで、非常に国内を向いていましたが、少し海外の学会と連携を図りつつ国際的な情報発信に心がけるべきと考えています。

原子力開発の国際的な動き

アジアで盛んな原子炉建設計画

司会 アメリカでは、今、同国の電力会社エクセロンがPBMR（ペブルベッド・モジュラー

原子炉）の導入を進めたいという動きはあるんですけど、現実にはまだ見えてきません。同様に、ヨーロッパも今ある建設計画はフィンランドの5号基だけです。これはどうも本当に発注しそうだということにはなっていますが、既存炉の寿命延長はありそうだが、新型炉によるリプレイスの問題が将来どうなるかわからない。要は、ビジネス的に見たら、ヨーロッパでも、アメリカでも新型炉導入で見えているものはありません。見えているのは、2010年までに日本で13基。韓国、中国にもかなり積極的な導入計画がある。インドでも小型の重水炉が次々と建設されている。

今、少なくとも見える範囲では、アジアでの建設計画が進んでいるということです。私は、下手をすれば、世界の技術力だとかがどんどん劣化していく危険性があるのではないかという気がするんです。

PBMRは新しい研究投資モデルになるか

司会 1つの見方は、上述のPBMRが研究開発の国際的なビジネスモデルになり得るかもしれない。要するに、あれが長年、民間のESCOM（南アフリカ電力庁）が、ビジネスとしてドイツからガス炉の技術を持ってきて、10万kWのデモプラントから何とかというプロジェクトを、金を集めてやろうとしているわけです。何も成功間違いなしということではない、リスクは当然あるわけですが、南アフリカで金も集め、しかも国際的にも資金を集め、エクセロンからも集めた。一種の研究開発投資という見方が正しいのかも知れない。そういうやり方が今後の技術開発の中であり得るのかも知れないと思います。



松井 一秋氏

(エネルギー総合工学研究所
プロジェクト試験研究部 部長)

期待したいアメリカの「第4世代原子力システム」開発とIAEAの「革新的原子炉等プロジェクト」

司会 もう1つは、どちらかというと、旧態依然たる国ベースの、しかも1国ではどうも太刀打ちできないから国際協力でというのが、アメリカ主導の「第4世代原子力システム」開発とIAEA（国際エネルギー機関）主導のINPRO（革新的原子炉等プロジェクト）と言えます。米国流の見方をしますと、ある程度研究開発をやった後、その後の大きい計画は民間とちゃんと話を押さえなければいけないと思います。

「第4世代原子力システム」開発については、それだけですべてが片づくとは思いませんが、日本は一体本当にその中で何をしたいのか、そのスタンスがない限りは、本当は危険だと思うんですね。でないと、相手方に引っ張られっぱなしで、あとは捨てられるということがあるかも知れません。また、そこはしたたかに付き合う必要があるのかも知れません。

アメリカの原子力政策に方向転換の兆し

司会 クリントン政権、その前のカーター政権は、原子力に対しては少なくとも積極的な取組みが余りありませんでしたが、今回の政権はちょっと変わったように見えます。少なくとも言葉だけでは変わった。実際に予算の面でどの程度変わるかは、まだよく分からないような気がしますが、道筋はつきつつあるかも知れません。

ここで方針転換したように見えるのはなぜか考えてみると、何もカリフォルニアで電力不足が起こったからという短期的な話ばかりではないとも思えます。アメリカにとってのエネルギー・セキュリティの向上、原子力技術による世界の覇権への関与、あるいは覇権を取りたい、原子力における産業技術力の覇権をもう一度確立したいというところが、ひょっとしたらあるのかも知れないと思います。少し私の思い過ぎかもしれませんが、21世紀、途上国でもある程度原子力を導入しなければならぬ時代になった時、まさかそれをアメリカが指をくわえて見ているわけがないのではないかと思えるのです。やはり原子力も、かなり長期的なエネルギー戦略を見据えながら考える必要があるのではないかという感じを持っています。

わが国における

原子力技術開発の今後の戦略

安全性判断はベネフィットとリスクの比較で

司会 今後の戦略という観点から、安全性や経済性をどのように追求していくべきかという論点がありますが、まず牧原さんにこの辺りから考えを紹介して頂けたらと思います。

牧原 まず安全性の話からいうと、よく、“How safe is safe enough”とか、「安全性という青天井」とか言われ、結局、「どの程度安全だったら安全だと認めてくれるか」を議論しても余り意味がないのではないかと思います。

それより、安全性というのは、原子力なら原子力のベネフィットとリスクとを比較してその許容範囲に収まっているかどうかで判断すべきです。これが一般的な考え方を適用したときの安全性の考え方だと思います。

ベネフィットは市場競争力で示す、

リスクには受け止め方の違いあり

牧原 原子力の場合、どうもベネフィットとリスクの両方とも余り理解されていないのではないかという気がします。原子力のベネフィットを正しく理解してもらうには、「経済性、環境保護の点で、他のエネルギー源との競争に勝てるんだ」と言えることが一番ではないかという気がします。

司会者も言われましたが、アメリカの原子力復活の話も元をたどっていけば、やはり原子力の発電コストが圧倒的に安くなって、LNG、石炭がかなわないほどになっているという事実が裏にあるんだと思います。「原子力は十分に儲かるのでやっていくべきだ」という議論があって、「だったら少し認めてやろうじゃないか」ということになってきたのでは

ないかと思います。

リスクについても、余り正しく理解されていないのではという気がします。これは、我々のやり方も悪いんでしょうが、例えば許認可の場で、格納容器の性能を確認するために被曝評価をやっています。あれが逆に、「事故が起きるとこんなことになるのか」と受け止められる感があります。どうも評価をした目的と現実の姿との乖離が大分あるのかなと感じます。

今後の原子力で安全性を高めるためには、安全設備をいろいろ変えるとかが正しいやり方とは思えません。まず、原子力の安全性、経済性を含めたコスト・ベネフィットを伝え、それからリスクについて正しく理解してもらうことが一番大切ではないかと思います。

「安全概念をいろいろ変えていこうじゃないか」という話があるのですが、これは今までの議論とは別の話で、やはり本来の目的は経済性の向上、運転員の負担の低減だろうと思います。静的安全系を入れるとか、動的安全系をなくして運転員の負担を低減させるとか、出力規模が小さければ使える技術というのがありますので、そういう技術を使って簡素化を図り、結果として安全性を高めるというのが重要だと思います。

経済性向上へ新たな視点

牧原 先ほど申し上げましたように、経済性向上の方策には4つ—大容量化、稼働率向上、設備簡素化、熱効率向上—しかないわけです。既設炉での経済性の大幅向上はもう難しいだろうと思います。しかし、これで軽水炉開発が終わったかというところではなく、別の

見方があるかも知れないと、最近のいろいろな文献を見ています。

○発電プラントの一括発注でコストダウン

1つは、この間のアイコン9でもフランス電力公社（EdF）が発表していますけれども、10基以上の原子力プラントを一括発注しますと50%近く安くなるというような話があります。当社の場合、まだそこまできちんと評価できていないのですが、かなり安くなるだろうと見込まれます。大型炉を10基以上一括で発注というのはなかなか難しいと思うんですが、それが中型炉、小型炉の一括発注となるとかなり安くなる可能性があると思います。

○小型炉専用技術でコストダウン

小型炉については、小型炉にしか使えない技術を使っていくと、さらに何割かのコストダウンの可能性があります。軽水炉技術に立脚してリスクが小さく、なおかつコストダウンを狙える、こういう方向性もあるのではないかと思います。

○新型軽水炉で熱効率向上

新技術を使って、今の軽水炉から脱却するという考え方もあると思います。これは原子力でただ1つ残されている開発部門である熱効率の向上ということだろうと思います。熱効率の向上でいきますと、最近一番注目を浴びているのが、高温ガス炉でしょう。高温ガス炉は、先ほども話題になりましたが、南アフリカで造ろうという話がありますが、もし、本当にこれがビジネスとして成功すると、ちょっとした革命になる可能性があるという気がします。

そのビジネスモデルに日本がどのぐらい協

力していくのかという点もあるでしょうが、当面の技術的開発という観点から見れば、ハイリスクという問題があります。

国際的視点が必要な開発技術の評価

岡 原子力R&Dは、国がどうサポートすればいいかという問題があります。当然、原子力のような、ある意味でビッグな事業は、民間に任せてはとてもできませんから、国がサポートしないとイケないと思います。では、どういうふうにサポートすればいいか、その時にどう評価すればいいか、ということになると思います。

最終的には実用化されるかどうか。実用化にも、国産化を実用化というのか、あるいは国際的にそれが商売として成り立つことを実用化というのか、いろいろな定義がありますが、やはり、これからは国際的に通用するということが重要だと思います。ウラン濃縮の話などで、やはり国産化の視点が以前はかなり強かったんですが、かなり変わってきています。国際的に通用するような開発のやり方、あるいは評価も含めて、最終的にはそれに投資していただけるかどうかで評価が決まると思います。

日本も海外の

研究開発プロジェクトに参加を

岡 PBMRのモデルは、一般産業の投資モデルだと私は理解しています。開発があそこまで進めば、そういうモデルも出回って、アメリカのような国では面白いのではないかと、日本企業もいいアイデアでチャレンジしている

のではないかと思います。

ただ、PBMRもAVRというドイツ政府の実験炉があるから、あそこまでやれている訳で、メーカーだけではできません。やはり国際的に協力しながら、何かそういう枠組みが必要かなと思います。その場合でも、少しフレキシブルにすると成功する確率が高まるかも知れないと思います。

新型炉については、技術開発における試行錯誤をある程度許容できる枠組みを用意し、海外、アジアでやってみると面白いんじゃないかなという気はします。その中で自ずと評価されるという感じがします。実用化の視点、あるいは実際に運転する時にどうかという視点など、視点によって、評価が随分違ってきますので、まだ開発の初期のものにいきなり運転中の原子炉の視点を適用されると混乱してしまうところもあるので注意が必要です。

私なども駆り出されるのですが、研究の初期段階での評価方法についても1つの研究課題であると言えるかも知れません。

司会 おっしゃるとおりです。例の「第4世代原子力システム」開発でも、いわゆる技術開発ロードマップを作ろう、何らかのコンセプトがある段階で、評価しようというのがある。一体、どのような評価基準を適用すれば、本当に収斂できるんだろうという大問題に、これから我々は突き当たるという感じがします。

今の関連で、構造改革の推進下で原子力技術開発に対して国はどのように関与していくか。エネルギーの問題は大きいし、中でも原子力の果たす役割をどうやって位置づけていくのか。その認識について合意した上でない

と話はどうにも進まないと思うんですが。少なくとも、原子力技術開発の今までの特異性と、これから変わっていくというところも睨んで、きちんと国が関与していただくとうれしいなと思います。

変わっていく国が関与する研究開発の位置づけ—競争力強化のための投資に重点

森本 エネルギー・セキュリティ確保は国の1つの役割だと思うんですが、そのための研究開発の位置づけはかなり変わってきていると思います。

今、総合科学技術会議の議論では、国が投資すべきところというのは、伸び盛りの「芽」の部分です。バイオテクノロジー、環境、ライフサイエンスというところに投資をして、将来の競争力の柱に育てていこうということです。これはある意味では、セキュリティと言うよりは、競争力確保の観点からの投資だと思います。

一方、セキュリティの確保のためには、長い目で見た投資を行う必要があります。大雑把に言えば、原子力というのはエネルギー・セキュリティを確保するために推進するのであって、それを利用するための技術を開発していかなければいけないということが鍵だと思います。しかし、このことと、技術開発プロジェクトとが必ずしも結びつかなくなりつつあるんじゃないかという感じがします。

岡先生のおっしゃった、「ビッグな事業は民間に任せてはできない」という部分ですが、未だそのエリアとして挙げられるのは宇宙分野などはそうかもしれませんが、原子力は、

その分野から脱しつつある。科学技術としての原子力では、加速器の研究とかの分野がまだ民間に任せておいてはできない分野として引き続き残っているかも知れません。しかし、エネルギーとしての原子力の利用技術の開発は、そういう分野から少しずつ脱却しつつあるのではないか。単に巨大であるから、あるいはリスクが大きいからというところから少しずつ変わってきているような気がします。

論議呼ぶ関与の程度

森本 一方で、電力会社が最終的に発電所で使う技術については、やはり実用化されて使われるものでない限り、国ももう手を出さなくなりつつあります。研究のための研究は国家プロジェクトとしてはもう走らせないというぐらいの感じになってきたわけです。

「使える技術でない限り国が投資するのは無駄である」、「使える技術であれば、ユーザー側の電力会社がコンソーシアムを組んで、共同で研究開発すればできるのではないか」という相反するような考え方があります。後者について、その上で何割かを国が負担するということがあるかも知れませんが、最終的に電力料金に転嫁できればそうすべきであって、国からの補助金がないと他のエネルギーと競合できないということなら、原子力に価格競争力がないのではないかという話に戻ってくるんです。この両方を同時に解決する理屈というのはなかなかありません。仮に、「とにかく原子力は推進しなきゃいけない」というテーゼがあって、しかも、研究開発の方向は分かっているし、お金をかければできる、そのために何らかの形で税金を投入しなければ

いけないとなった時には、単純な議論となるのかも知れません。

一方で、「原子力分野というのは、政策的に研究開発投資をしている分野の中では、国内に技術基盤がそなわっていて、それを維持することで技術ナショナリズムが達成される1つの分野ではないか。従って、そこへ投資すべきだ」という議論もあり得ます。

どちらの考え方を採るべきなのか、にわかには判じがたいところです。

原子力利用の裾野拡大の努力を

尾本 今まで、どちらかというと供給側に立った技術開発の見方が割と多かったような気がします。具体的なエネルギー市場のどこに入り込むかという視点がもっとあってよいと思います。例えば、輸送セクターはエネルギー市場で3分の1弱を占めています。世の中が、輸送分野に水素を用いた燃料電池というオプションを考えている時に、「では水素生産を原子力でとか最終的には原子力の電気で電気自動車」といった原子力が貢献する方策を積極的に考える努力がやや不足だったかなという気がします。

これから、日本原子力産業会議（原産）からレポートが出ますけれども、評価方式によって違いがありますが、原子力利用の経済規模は12～16兆円、GDP（国内総生産）を物差しにすれば3%相当との内容です。放射線利用・発電・鉱工業生産を合わせたものですが、二次的な効果は含めておりません。その中身を見ると、放射線利用は、随分と多方面に用途の拡大があることが判ります。エネルギー利用分野は全体で12兆円という評価の4分の

1 程度ですが、将来に向けてエネルギー市場での利用拡大が欲しいところです。需要末端のどこで使われるかということを常に意識して領域を拡大していく努力と姿勢が重要だと思います。

技術開発戦略の根幹

—「市場で売れる技術」

尾本 どういう技術の開発を目指すかについては、「世界の市場で売れる技術でなくては本物ではない」と思っています。過去には「日本向け」、「日本型」とかいうローカライゼーションを行い、中身も細かいところを気にし過ぎていた側面が今まで相当あったと思います。しかし、そうすることによって閉鎖市場でしか通用しないものになっている。「世界に売れる技術」を志向するのが根幹だろうと思っています。

技術を使う腕前向上も必要

尾本 ただ、こういう見方もしています。自由化環境では、やはり代替電源に対して競合できるか否かという経済的競争力に的が絞られるわけです。当該分野の費用なり生産コストの国際比較をして、本来は国際流通商品なら通貨換算ベースで悪くても購買力平価と比較して、相応の範囲内に収まっているかどうか競争力の客観的な目安として重要だと思います。市場価格に反映されていない将来世代における環境コストなど外部性コストを除いた論議ですが。発電はプラントコストを含めて収まっていると思いますが、周辺技術領域は収まっていない。それは、技術開発以前の

ところ、すなわち、規制とか競争市場からの購買方法とか、いかにプロジェクトを管理していくかとか、いかに社会とコンセンサスをつくるかとかを含めた仕事のやり方に構造的な問題があるからだと思います。一方で技術開発をやりながら、そういうところも注意していかないといけない。そうでないと、自由化の中で原子力をちゃんとやっていくことが難しくなかねないという感想をもっています。そういうところが処理されないと折角の技術開発の結果も経済性を失うという気がします。

司会 確かに将来の原子力技術のあり方を考える時に、単に技術の話ではないというのはそのとおりだと思います。

トップランクの軽水炉技術で世界に貢献

岡 国の役割については森本さんのおっしゃったとおりだと思いますが、私の意見を言います。1つは、開発については、従来のように計画を書いてやっていくイメージでは必ずしもないのではないかと思います。例えば、従来考えられてきたような国の機関でやって民間に移転とか、そういうイメージのものではないかも知れない気がします。

日本の技術の中で軽水炉技術は、やはり世界のトップランクなわけです。自動車を輸出するような感じではないですが、平和利用でこれだけやっている国は他にありません。日本は原子力平和利用のトップランナーですから大いに世界貢献ができる、地球環境問題についても貢献できると思います。そういう観点で原子力技術開発を遂行するという視点、

あるいはエネルギー・セキュリティーで貢献するという視点があるかと思います。

やはり、軽水炉という観点で見ますと、設計はかなり前に成熟してしまっていて、これから造る技術のほうを、どんどん改良していく方向だと思います。製造方法の改良は日本の得意な分野なので、ぜひ頑張っていたきたいと思います。

しかし、軽水炉だけで100年使えるとは言いがたいので、技術革新というか、やはり新しい技術にトライしないといけない。トライする時に、国がどこまで助けるかという話になると思うんですが、いずれにしてもトライしないといけないのは確かだろうと思います。それを国際的な中でやればできるのかも知れない。原子炉事業も、研究開発も、国際競争の中にないといけないと思います。

日本では、放射能とか何とか、特殊になり過ぎていて、放射能取扱施設はとても民間企業でやれることではありません。そういう技術については、ある程度のインフラが要ると思います。

また、日本のエネルギー・セキュリティーの部分で、石油を中東に86%も依存しては非常に不安ですし、電気以外へのマーケットの拡大もあるはずです。頭を柔軟にしているいろいろなことをやりたいなと思ってはいます。

技術導入を阻む技術以外の要素

森本 技術革新のトライは、保安部会で議論していることもあり、原子力部会の方では触れておりません。

アメリカの活性化は、NRC（原子力規制委員会）が過去非常に厳しい規制を行ったこと

への反省としての揺り戻しがあったためとも見ることができます。日本はNRCほど厳しい規制まではいっていないし、その分、揺り戻しも小さいのかなと思います。

また、小型のPBMRのような新型炉にしても、アメリカは南アフリカでの実験をベースにするとか、ドイツは南米で実績を積んだとか、そういうことをやりながら本国まで成果をもってきているんだろうと思います。しかし、日本の場合、外国での開発に協力しても、その成果を国内に入れるのがそう簡単ではありません。新原子力技術に対する保守性というか、規制だけでなく国民感情も含めて、そこがいま1つネックかなという気がします。

岡 非常に不思議なことに、西側の原子力発電所の事故で、一般の公衆で放射線障害で死んだ人がいないということを誰も言わないんですね。西側の原子力発電所の事故では米国のスリーマイル島の事故が最大ですが、敷地境界での線量は放射線障害をもたらすほど大きいものではありません。こういうことは、アメリカとも声を合わせて、一般の方の理解を求めるべきだと思います。安全は非常に多様なものなので、あんまり技術的に細かいところに入らないように、広く全体で安全が確保されるようにやるのが重要なんじゃないかなという気がします。

原子力技術者と社会との

かかわり合い方について

司会 社会との関わり合いという話のところ

が残っています。どうもやはり、原子力技術者が世の中とマッチングしていないというのは、我々の責任もあるのかな。我々自身のスタンスも何か間違ったというか、思い上がったところがあるのかもしれないと思います。それでは一体どうすればいいのか、ご意見をいただければと思います。

社会とのコンセンサス形成を欠く技術利用はうまくいかない

一求められる客観的判断材料の提供

尾本 今提示されていることは、技術を利用していく時に、社会とのコンセンサス形成というものをうまくやっていかないと、何もうまく運ばないということだと思います。例えば、遺伝子組換え食物とか、放射線の食品への照射だとかも含めて、そういう技術の利用に伴うベネフィットとリスクについて、社会の合意を得ながらやっていくということがいかに重要かという例だと思うのです。そういう場合にまず重要なのは、客観的な判断材料が皆に分かるように提供されているということです。国全体に関わる事項が住民投票になじむか否かは別として、仮にステークホルダー（利害関係者）に意見を問う場合には何を判断して欲しいかが適切に提示されていなければならぬと思います。

技術的な問題に関する過去の討論会では反対する側から、論理的な根拠が曖昧なまま不安なのだという提起をする場面があったように思います。そういう感覚が醸成されて、それ以上議論が深化せずにとどまるというのは、科学技術と知性を資源とした技術立国を志す国としては、甚だ不適切だと思います。

少なくとも必要なのは、専門家間で意見の相違があるのかどうか知らせることでしょう。学会のマジョリティがそういうことを問題にしているかどうかということすら分からない状態で、意思決定をしていくというのはやはりよくないことだと思います。

心理面についても大学で教える必要あり

岡 技術的にしっかりしている、これは根本だから必要ですけど、やはり心理的側面について、我々技術屋は今まで余りにも無知だったのではないかと思います。逆に、JCO事故の時も、「心理的に非常に不安になった」ということが伝えられています。やはり心理的側面を理解しないといけぬ。例えば、私などでも「遺伝子組換え技術についてどう思うか」と意見を求められた時、ほとんど専門知識がないですから、入ってくる情報で判断するしかない。それと同じようなことが原子力について一般の方にはあるのではないかと思います。心理的側面についてよく理解し、正しく情報発信をしたい。結局、一般の方は、原子力の中身について反応しているわけではなくて、あるリスクに対して自分で作ったイメージで反応しているということだと思います。心理的な面についてどういう対応をすればいいかということは、普通、技術屋が対応することではないですから、リスク心理学といいますか、大学関係者としてはそういうことも含めて教えるのかなと思います。

それから、今ある文化、今ある状態から物事を考えてしまう方、「現状がすべてだ」という考え方、そういう考え方もあります。「そういう考え方を持つ人もいるんだ」ということ

もちゃんと工学系の授業の中で教えないといけないのかなと思います。

提供すべき情報—専門家間で意見が一致しているか否か

司会 今、情報を得ようと思うと、インターネットだとかで、結構いろんなところまで得られる。反対派の方がデータベースがしっかりしているとか、見やすいと言われることがあるんですが、それも時間が経っていろいろな情報を選べる状況になってきたら、人々が、我々が言う「正しい判断」ができるようになるんじゃないでしょうか。

尾本 専門家の判断を提供するという点では、分かり易い格好になっていません。その分野の専門家が、安全審査などの場を通じてきちっと精査をし、議論をして、一致した見解が出ているにも拘わらず「安全性に不安」と言っているということは、要するに安全性に対する不安を適切に説明してくれていないということだと思うのです。いろいろなリスクに関係する技術を世の中で使っていく時に、ステークホルダーの関与というのはどこでも今言われていることです。客観的な判断材料を適切に提供できていないということは、こちら側の反省点になります。

一方、専門領域の学会は科学的に異論がある領域について議論を戦わせ判断することを常々行っている訳で、そういった議論の場で否認されている見解が例えば査読を受けない会議での論文といった形を取って世に出され、「原子力発電を危険に思わせる読者の興味をそそる物語」となっていることを保健物理学者

のバーナード・コーエン教授が著書「私はなぜ原子力を選択するか」(ERC出版)の中で嘆いています。専門家間で意見が一致しているか否か、専門領域に明るくない人が判断する際に、重要な判断材料として見て行くべきでしょうね。

原子力反対派を交えた議論で前進を

牧原 去年、「第4世代原子力システム」開発のミーティングでアメリカに行った時、例の「憂慮する科学者の会」からも代表が来て審議に参加していました。客観的ないろんな意見が出て、こうあるべきだという議論でまとまってくると、反対派も勝手なことをなかなか言えなくなるんじゃないかなと思いました。そういう意味では、反対する人たちの意見もいろいろ入れながら、ちゃんと技術的な議論ができるところでお互いに議論し、理解させると、もっとうまくいくのかなという感じがします。

司会 EPRI(米電力研究所)のジョン・テラーが委員長を務める、エネルギー省原子力諮問委員会の下の委員会、TOPS(原子力システムの核拡散抵抗性を強化する技術検討会)に参加したんですけど、メンバーの1人が、プルトニウム利用に大反対している天然資源防護協会の原子力プログラム部長トーマス・コ克蘭でした。「日本がプルサーマルをやる。再処理をやる。何でやるんだ」と議論をふっかけられたことがありました。そういう人も入れて「第4世代原子力システム」開発をやっているんですね。時々、感情的なやり合いになるときもありますけれども、それで

も、5回、6回の議論を通じて、報告書が出来上がるんですね。

そういう度量の広さというか、反対派の方の人たちもそういう議論に組み込んでいくだけのロジックを持っているような気がします。最後のところでの意見は一致しませんよ。一致しなくても議論はできるんですね。あんなところは正直言ってうらやましかったですね。

総合部会ではNGOも議論に参加

森本 今回の総合エネルギー資源調査会の総合部会では、いわゆるNPO、NGOのメンバーが入って、「原子力からの脱却」を目指した主張が行われました。

こうした主張に関連してですが、総合部会での議論としては、近藤先生がおっしゃっていたように、政策オプションを示す中で、「原子力がなくなった場合にはこういう痛みがあります」というオプションを明示的に示したこと。それから、NGOの方も含めて、「今あ

る原子力発電所を全部やめろ」という議論はさすがになかったということ。このようにより具体的な政策議論が進んだという点は、評価すべきというお話がありました。

訴えかける情報発信の手法が必要

森本 一方で、役所が作っている従来のパンフレットは、教科書として読むならいいかもしれませんが、パッと見た人が読んだところで、訴えかけてきません。そういう意味で、コミュニケーションの方法で、間違えないようにという方法と、訴えかけるようにという方法とがかなり違ってきているのかなと思います。どうしても、間違いの無いようにと腐心するあまり、訴えかける部分が弱くなってしまう嫌いがあると思います。

司会 今後、我々も努力をしていかなくちゃいけないというところですが、どうもありがとうございました。



今後のエネルギー需給と 関連の廃棄対象について

秋山 守 (財エネルギー総合工学研究所
理事長)



1. はじめに

21世紀が始まり、私たちはいま、遠い未来に亘る世界の姿を広く視野に入れながら、情報やバイオ・遺伝子の科学技術の進展、あるいは感性やアメニティの拡がりに期待している。

しかし一方で、地球環境を保全し、食料・水・エネルギーなどを確保しながら廃棄物を適切に処理していく、といった面で、課題が次第に深刻になっていくことが懸念される状況である。

そこで、本稿では広く一般の方々をも念頭に、今後のエネルギー需給と関連の廃棄対象に焦点を当てて、再生自然エネルギー、化石燃料、原子燃料などについて、それらの特徴を捉えながら役割や論点を整理し、さらに原子力に関しては、広く文化の基盤の上での役割についても、この機会に重ねて私見を述べることとした。

2. エネルギーの需要と供給の過去・ 現在・未来

まず、世界の長い長い歴史を振り返ってみ

たとき、時代ごとに人は日々どれほどのエネルギーを必要としてきたのであろうか？ アール・クックは、その実態の調査分析に基づいて、1人1日当りの使用量を図1のように要約している。現在では、18世紀の頃に比べてもさらに3倍にも増えており、これを支えるために様々なエネルギー資源の開発や利用環境の整備が進められてきている。

● 原始時代	2
● 狩猟時代	5
● 初期農業時代	12
● 高度農業時代	26
● 初期産業時代	77
● 現代	230

(出所：Earl Cook, The Flow of Energy in an Industrial Society, Scientific American, September, 1971)

図1 人間1人が使うエネルギーの
過去から現代
(千キロカロリー/日)

確かに、エネルギーの供給が豊かになるにつれて、健康や生活水準は向上し、個人も社会も動きが一段と激しくなってきた。しかし反面、エネルギーを巡る混乱や環境汚染の問題が懸念されるようになり、また南北格差の問題は依然として厳しい状況にある。

では、これからの百年、あるいはさらにその先までの、エネルギー需給の様子はどうか

あろうか？ これについては人口の推移，社会活動の展開，資源や環境面での制約など，グローバルな傾向を予測しながら，多くの専門家や関係機関が研究を進めている。

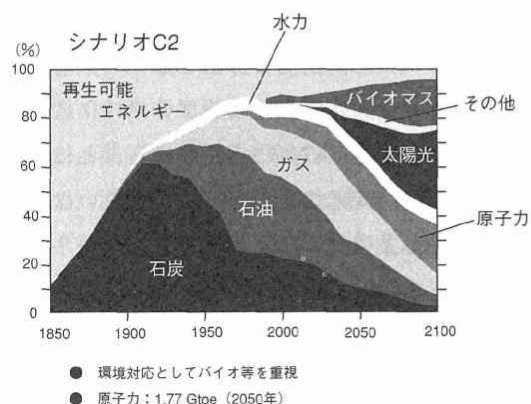
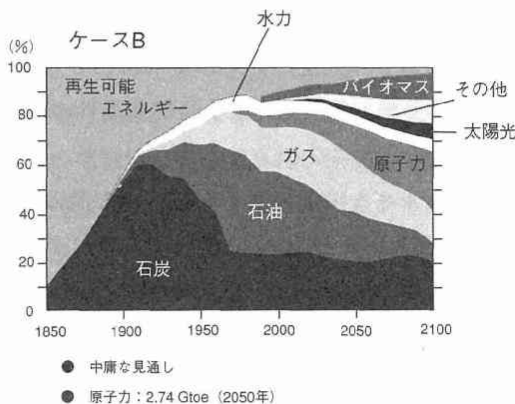
人口の推移で見ると，中国や欧州の歴史に見られるように，これまで農業・医療技術の進歩，疫病の流行，戦乱などの影響を受けつつ，波打ちながらも次第に増加してきており，この先，ならして見れば，2050年頃には世界全体で約90億人のレベルに近づくか，とも言われている。もっとも，最近では途上国でも人口問題への認識が広まり，人口の伸びはこのところ予想をかなり下回ってきていると伝えられている。

次にエネルギーで見ると，近年の世界の総需要は石油換算にして年間で約90億klであり，そのうち日本は約6億klとなっている。また，わが国で利用する各種のエネルギー源の比率を1997年の実績で見ると，それぞれ石油55%，石炭16%，天然ガス12%，原子力13%，水力3%，地熱0.2%，新エネ1%であり，用途としては産業用が49%，民生用が26%，運輸用が25%となっている。

今後の長期的なエネルギー需給については，

国際的に見て，気候変動抑制との関連に大きな焦点が当てられており，わが国の場合，基準ケースでは2020年で石油換算にして6.6億kl，燃料転換施策ケースでは6.1億klである。世界全体で見たときの，2100年に至る超長期のエネルギー需要と資源別の割合について，気候変動抑制の観点も含めてさまざまな予測シナリオが描かれている。図2はその1例である。

では，エネルギー資源の確保の見通しはどうかというと，それぞれの賦存についての知見はかなり整ってきており，またこの先，例えば海底メタン・ハイドレートなども含めて，探査技術や採取技術が進み，さらには新たなエネルギー源の研究開発が実用の段階に達するなどすれば，数字が格段に膨らむことも予想される。また，省エネルギーにも大きな期待が寄せられ，広く社会活動の基本構造や生活スタイルの変革にまで及んで関心が高まってきている。ただ，それぞれの資源への依存の在り方については，国によって，また人や立場によっても，かなり異なることが知られており，議論をさらに進めていくことが必要である。



(出所: IASA, Global Energy Perspectives, 1998)

図2 2100年に至るエネルギー供給源の展望

エネルギー利用について、今後われわれの採るべき方策としては、(1) これまで使い慣れた化石燃料を炭素成分の少ない化石燃料にシフトしながら継続的に使っていく、(2) 温暖化防止にも役立つ原子力の利用を着実に進めていく、(3) 再生エネルギーの利用条件を整え積極的に普及に努めていく、(4) エネルギーの供給負担を減らし、将来のエネルギー開発への資源投入の拡充要請も抑えるよう、省エネルギーに相当な期待を寄せて取り組んでいく、などであろう。

3. エネルギーへの取組みからの廃棄対象

さて、さまざまなエネルギー利用の活動に伴って、他の諸活動の場合と同じように、多かれ少なかれ必ず廃棄対象が生まれてくる。つまり、エネルギーを自然界から採取し、適切に加工・変換・輸送・貯蔵しながら利用していく過程で、自然界に物質やエネルギーなどを排出していくことが避けられない。

こうした物質やエネルギーのうち、例えば輸送のために資材・システムを構築し、そして運営していくのに要する物質ないしはエネルギー、といった間接的な排出を除いて、前記の過程で直接的に排出される部分だけに絞る、それを仮に<廃棄対象>と総称することにする。これは、英語では広くwaste、あるいはwaste objectsということになるであろうか？なお、<廃棄物>よりも広い意味の<廃棄対象>としたのは、廃棄されるのがモノだけでなく、ときにはエネルギーも含まれるためである。

とすれば、廃棄対象の内容は、要約してみ

れば次のようであろう。

まず、<廃棄物>の相を見ると、これは言うまでもなく固体、液体、気体、ないしはそれらの混じり合った物であり、一方、<廃棄エネルギー>は、多くの場合、排気ガス、そして冷却水や冷却空気に伴って、外界に排出される。

廃棄物には、大きく分けて、建設や解体の工事の際に出てくる通常の廃材と、有害金属・有害化学物質・放射性物質などの、許容濃度以上では健康に有害な物質、そして地球環境を温暖化する気体のように社会に広域的に有害な物質、などがある。

温排水は、海洋や河川の一部を熱的に汚染することを通して生態系に影響をもたらす、また温度・湿度の高い排気はローカルな気象への影響などを誘起する可能性がある。従って十分に希釈してから排出していくことが必要である。

石炭・褐炭などを始めとして、石油・タール・オイルサンド、ガス、水力・風力・波力・潮力、原子力、太陽の熱と光、など、エネルギー資源には多くの種類がある。まず、それらを採取してくる過程を見ると、化石燃料では流出や残査の形の廃棄物が、原子燃料ではおおむね残土が、それぞれ排出される。資源の分離、精製過程でも目的製品外の廃棄物が残ることになる。

エネルギーの変換過程を定性的に見ると、化石燃料からは燃焼に伴って二酸化炭素(CO₂)、硫黄酸化物、窒素酸化物、煤塵(炭素、金属酸化物などの微粒子)などが出てくる。これに対して、原子燃料からは核反応生成物、放射化物、放射線が生成する。石油火力、石炭火力、原子力の例では、通常運転時

	石炭	石油	LNG	原子力
SOx	約2,000トン	約4,500トン	0	0
NOx	約3,000トン	約3,000トン	約920トン	0
CO ₂	約510万トン	約410万トン	約270万トン	0
ばいじん・燃えがら	約19トン	約2,800トン	0	0
排熱	3.31PJ	3.76PJ	3.18PJ	4.79PJ
使用済み燃料	0	0	0	約30トン
ガラス固化体	0	0	0	約11トン

* 火力、原子力の設備利用率はそれぞれ70%、80%とした。

* 石炭、石油、LNG火力、原子力の熱効率率はそれぞれ40%、37%、41%、34.5%とした。

(出所：総合エネルギー調査部会総合第3回会合—平成12年6月—資料等より)

図3 火力、原子力発電所からの年間廃棄対象発生量（100万kWあたり）

のそれぞれの年間排出量は、性状別に見ておよそ図3のような数字となる。使用済み燃料や、高レベル放射性廃棄物のガラス固化体のような、原子力に特徴的な廃棄物は、化石燃料の排気などとは異なり、生態環境には出さないという考え方を採るのが大きな特徴である。

次に、使用済みとなった施設の残査に目を移すと、火力発電所や原子力発電所の解体廃棄物、水力ダムなどの遺留廃棄物などがある。太陽光発電の場合は、光電変換パネルのシリコン系材料と含有金属などの廃棄物が発生する。なお、これらの一部はリサイクルして、環境への排出を減らす方向で努力が払われている。

廃棄対象については、環境からの離隔性、影響の継続性ないし減衰性、検討すべき地域的・時間的な拡がり、などの観点から研究が進められている。廃棄対象それぞれの性状によって、環境や健康への影響などに違いがあり、また社会的な受けとめ方も一様ではないため、エネルギーの選択にあたって廃棄対象の長短をどう評価するかは必ずしも容易ではない。しかし、科学的・社会的に見た合理性

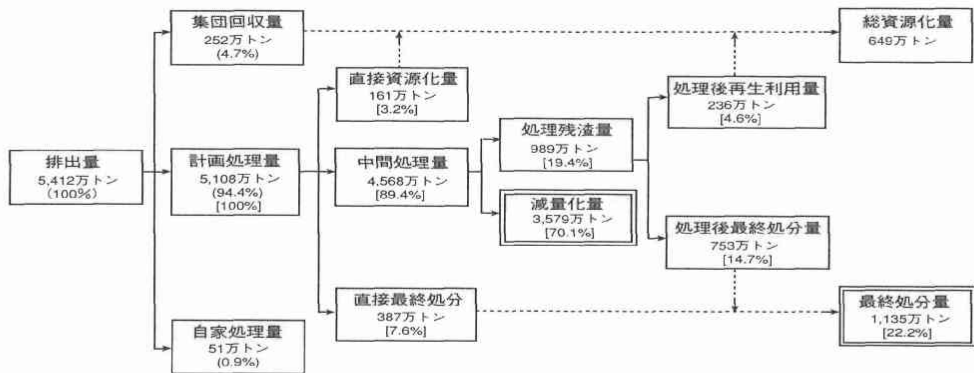
をベースに事が進んでいくことが望まれる。

4. 広い廃棄物全般の状況と課題

これまではエネルギー分野から出てくる廃棄対象を取り上げたが、今度は発生源は問わず、エネルギー資源の観点も含めて、わが国の廃棄物全般のことを眺めてみることにしたい。その際、一般家庭などから出てくる民生廃棄物としての〈ごみ〉と、産業活動から出てくる〈産業廃棄物〉とに大きく分けて、まずは前者から取り上げて見る。

最近では、ごみは可燃物、金属、プラスチックなどに、相当に分別した状態で回収され、一部は資源材料としてリサイクルされる。リサイクル率は現状では約1割のレベルであるが、関連法の整備や灰の溶融固化などによって、減量化は効を奏しつつあるようである。

さて、図4に沿って1998年度の数字で見ると、ごみの総量は年間で5,412万トンで、そのうち通常の処理ルートに乗る〈ごみ処理量〉は94.4%、自家処理が0.9%、団体による回収分が4.7%となっている。(数字などの出所は環境省資料)



(出所：環境省ホームページを基に作成)

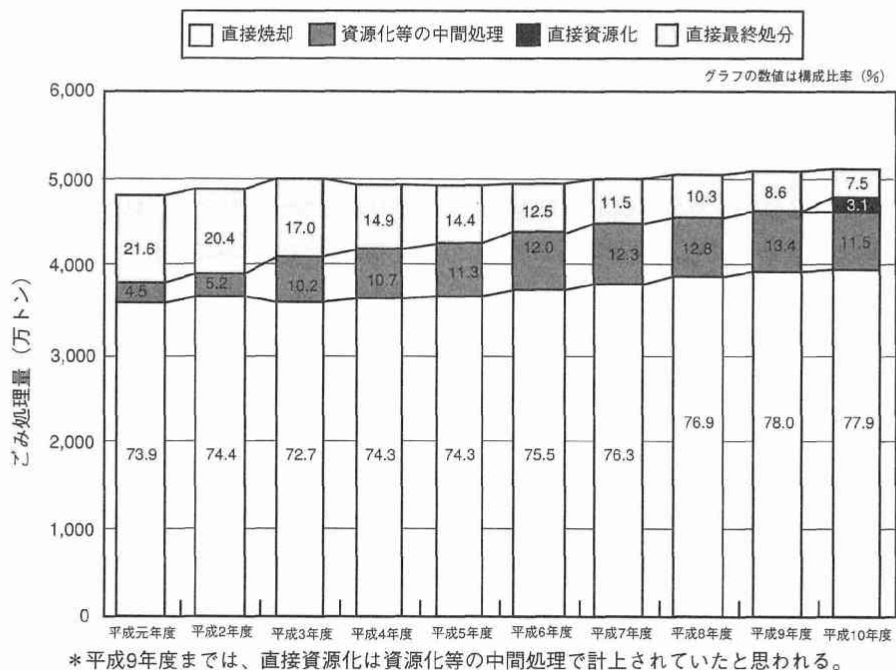
図4 全国の一般廃棄物処理（平成10年度実績）のフロー

ごみ処理量のうち、約3%が直接資源化され、78%は焼却に、8%は直接埋め立てに、そして12%は中間処理施設へと流れていく。これらの過程で選別されて資源化される部分は約8%である。焼却されないごみと焼却の後の残査とは、埋め立ても含めて最終処分場

へと向かう。(図5)

その最終処分場には、今後果たして何年の間、ごみを受け入れる空きがあるのだろうか？ 調査によれば、その容量は全国平均で約10年分くらいと見込まれている。

過去10年のごみの総量の動きを見ると、増



(出所：環境省ホームページを基に作成)

図5 ごみ処理方法の推移

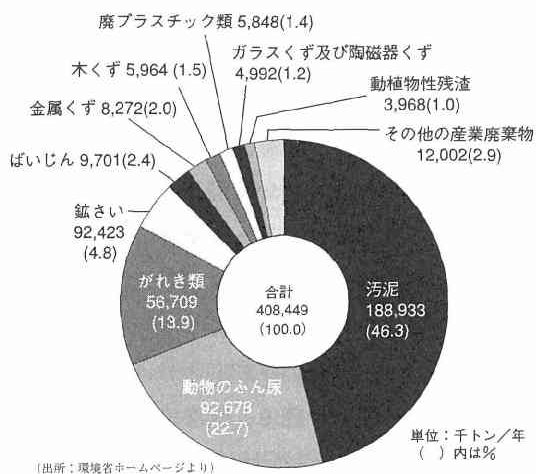


図6 1998年度(平成10年度)産業廃棄物の種類別排出量

え方は比較的に緩やかであり、消費者の意識の広がりや反映しているように見受けられる。

一方、産業活動から出る産業廃棄物に話題を移すと、その種類と量的な割合は、1998年度のデータでは図6に見られるような状況である。

これらのうち、現状では重量にして約4分の3近い廃棄物が、半分以上になるまで減量化処理される。処理しない残りの分のうち、7割が直接再利用のルートへ、そして3割が直接最終処分へと回っていった。減量化

の後の残査のうち、4分の3強は処理をして再生利用へと回っていく。(図7)

産業廃棄物はこれまでも相当に再生利用され、また減量化されてきており、近年ではとくに減量化が目立っている。1998年度の資料で見ると、排出時の総量が年間で約4億800万トン、そのうち再生利用したものが1億7,200万トン、減量化したものが1億7,900トン、最終処分場に送られたものが5,800万トンとなっている。

産業廃棄物についても、最終処分場の事情はかなり厳しく、受け入れ余裕がゼロになるまで全国平均で約3年と見込まれ、最近ますます最終処分場建設が困難となっており、早急に打開策が必要と見られている。

以上が廃棄物周りの概略の状況である。では、家庭から産業に亘る全ての廃棄物を見渡して、要するに日本人1人当たりいくらの廃棄物を出している勘定になるのであろうか？という視点で数字を挙げれば図8のようになる。ここでは併せて、医療に利用され、またエネルギー供給にも関連する放射性廃棄物についても、参考までに数字を示してある。

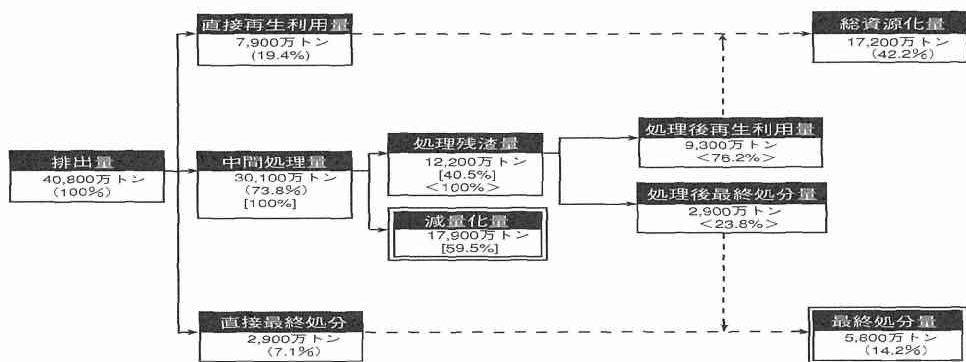


図7 全国の産業廃棄物処理(平成10年度実績)のフロー

(単位: kg/年・人)

一般廃棄物	一 般	4 0 8
	し 尿	2 9 6
産業廃棄物	汚 泥	1,3 8 1
	その他	1,7 9 8
放射性廃棄物	低レベル	0.1 2 6
	高レベル	0.0 0 3 7

(出所: 総合エネルギー調査部会総合第3回会合—平成12年6月—資料)

図 8 日本人 1 人あたりの年間の廃棄物量

5. エネルギー・地球環境から見た原子力とその廃棄対象

ここ10年ほどの間に、地球環境の問題が急速に高まってきた。1997年に開かれた気候変動枠組み条約京都会議（COP3）で、わが国は2010年前後において、大気中へのCO₂の排出を1990年レベルの6%減とすることに合意した。これを受けて、産業、民生、輸送などの各方面で、その目的に向けて、それぞれに鋭意取り組みが進められている。

さらに遠い将来の大気環境については、CO₂の管理目標として、2100年時点で大気中の濃度を約550ppmのレベルに抑制することなどが検討されており、その実現には、CO₂の排出をいずれ現在の3分の1程度にまで削減する必要がある、とも言われている。

最近では、2000年秋にボンで開催のCOP 6 会議の議論、そして、その後の米国の動向など、気候変動枠組み条約を巡る各国の姿勢には難しい不協和音が目立つが、そもそも気候変動への影響の少ないエネルギー源を選択し、開発し、利用していくことは、長期的にも国際的にも極めて重要なことである。

その中で、原子エネルギーについて見ると、原子燃料に含まれるエネルギーの密度は極めて高く、燃料資源の入手も安定しており、また性質からして、直接的にはほとんど温暖化ガスを排出しないという特徴がある。このため、エネルギー・セキュリティと環境セキュリティの両面で本来極めて優れている、といえる。

原子エネルギーの平和利用は、これまでに約半世紀の歴史を刻み、現在では世界の31カ国で原子力発電が行われ、世界の電力の約16%を占めるに至っている。わが国では51基の原子力発電プラントが国内の電力の約37%を供給し、CO₂の年間排出を国全体として十数%も減らすのに寄与している。

ただ一方で、放射線に対する不安や、事故への不信などを背景に、社会的に厳しい状況も見られるのが実情である。

ここでは行政の考え方には触れず、主に科学的・技術的な観点から、エネルギー・環境問題の中での原子力の特徴と課題を要約したいと思う。

まず、資源の量の面では、当面のこととして経済的に容易に採取できるウランが数十年分と確認されている。さらにトリウムも含めて採掘可能な地中埋蔵のもの、海水中のもの、そして増殖利用も視野に入れば数千年分、さらに数百万年以上と、ほぼ無尽蔵と考えることができる。

次にエネルギー密度の点では、先にも触れたように、化石エネルギーが電子の結合を伴う化学変化によるものであるのに対して、原子エネルギーは原子核の変化によるものであり、燃量の単位質量あたりのエネルギー密度が百万倍以上と高いこと、従って燃料の量も

それに反比例して少なくて済むことが挙げられる。

ただし、課題として放射性物質や放射線を扱うことが挙げられ、厳重な閉じ込めと多重防護を徹底する必要がある。事実、原子力では開発初期の頃から、安全確保の体系を自ら築き、それに準拠してきた。

原子力発電所が動いている時の、環境に出ていく極くわずかの放射性物質や放射線からの影響は、自然界から毎日受けている放射線のレベルに比べても十分に低く—具体的には2桁近く低く—抑えられている。これは自然放射線のレベルが地域によってかなり異なり、極端な例では桁違いであるといった事実を考えれば、管理の徹底のほどが十分に納得できる。

ただ、残念ながら航空、宇宙、化学、石油、ガスなどの各分野の巨大大事故と並んで、海外では原子力発電所が炎上し、あるいは炉心熔融事故などの苛酷事故が発生するなどの経緯があり、また燃料施設での臨界事故についても、海外だけでなくわが国でも起きたことが記憶に新しい。

では、原子力の利用に伴うリスクは、他のエネルギー源によるリスクと比べてどうであろうか。これについては、発電の分野を対象として、石炭、石油、ガス、太陽エネルギー原子力のそれぞれの場合について、顕在的ないしは潜在的なリスクを詳しく比較研究した例が見られる。

それによれば、図9のように、エネルギーの採掘、加工、利用などの全プロセスで発生する事故でも、また廃棄物による大気汚染などが原因の健康リスクでも、原子力のリスクは比較的低いと評価されている。また、原子力で大事故を想定した場合のリスクは隕石の落下、大地震、台風などといった巨大大自然災害のリスクの包絡線から見て、かなり安全側に収まるとも推定されている。

なお一般に、社会的に受容されるリスクのレベルは、ベネフィット（それを使うことの便利さや快適さも含めた利益の総体）との比較で決まると言われ、現に自動車や航空機の場合がその代表例である。便利さや快適さの故に、人はリスクを忘れ、あるいは忘れようと心を欺くのではないであろうか。

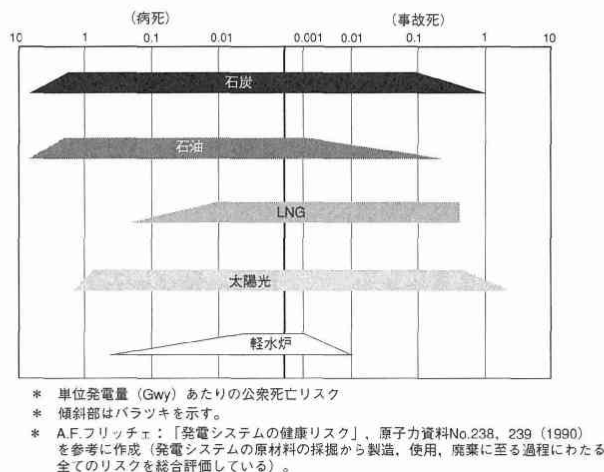


図9 各種発電方式のリスク比較例

社会での利用実績の積算規模や、自分との出会いからの年月の長さなども受容度に関係しているようである。

また仮に、核拡散のリスクを平和利用と絡めて議論するとすれば、その観点からの詳しい評価や対策が必要である。

原子力ではさらに、遙かな未来に負の遺産を残さないかどうか、についても議論が行われている。

さて、原子力発電を例にとり、物質やエネルギーの流れを詳しく眺めると、施設関係では（１）燃料サイクル施設の建設と使用終了・撤去、（２）原子力発電プラントの建設と使用終了・撤去、に大別され、日常の業務としては（１）燃量の採取、（２）精製・転換・濃縮・加工、（３）燃焼（核分裂）熱による発電と排熱、（４）使用済み燃料の貯蔵と再処理、（５）燃料サイクル施設からの廃棄対象の処分、などとなる。

これらについて、廃棄に関わる主な課題を要約すると、まず施設関係ではプルトニウムや核分裂物質の安全な取扱い、運転中ならびに使用終了・撤去の際に生成する放射性廃棄物の問題、などがあり、次に日常の業務に伴うものとして温排水、中・低レベル放射性廃棄物などの問題がある。

百万kWの原子力発電所が数十年に亘る運転を最終的に終えたあと、数年またはそれ以上の期間を経て解体撤去されるとしたときの、廃棄物の量が試算されている。総重量にして約50万トンの全廃棄物のうち、その大半を占める鉄筋コンクリートは、ほぼ自然界の放射能レベルに近いので、一般産業廃棄物と同じように取り扱えると考えられ、そのための規制限界の値が定められている。放射化された

原子炉の鋼材などは、放射性廃棄物となるため、減容化や適切な管理、再利用の研究などが行われている。

低レベル放射性廃棄物は、半減期も比較的に短いため、浅地層に埋設管理する方式が一般的である。約百年後には環境影響の観点からも十分に低いレベルとなり、埋設地の表層は緑化公園として開放できるとされている。

一方、高レベル放射性廃棄物については半減期が極めて長いので、ガラス固化などの処理をした上で容器に密封し、地質の安定した地下深部に埋設することが考えられている。わが国でも昨今、これに関する法律が制定され、事業主体による活動が本格化してきている。

なお、今後はこの方向を基本としながらも、国内外の情勢を踏まえて、時間的にも方式的にも、ある程度の柔軟性を持たせながら進めるのが妥当、とする意見もある。

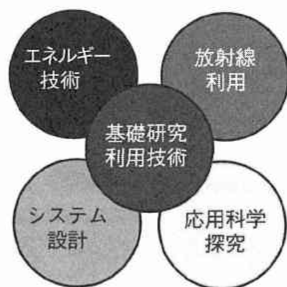
6. おわりに

以上、今後のエネルギーとさまざまな廃棄対象について、それらの内容や論点を整理要約し、併せて少しばかり将来への期待を述べさせて頂いた。

原子力についても、主題の範囲であるエネルギーの話題に絞ったが、例えば図10のような総合的な視野で、原子力の本質的な意義、役割、ないしは力を的確に捉えておくことは、エネルギーの座における原子力の将来像を描く上でも、深層的に重要であろう。

それはミクロな世界を基礎として、原子力発電や核融合や加速器のような高度で複雑なシステムに広がる一方、異なる専門分野の科

＜原子力の主な視野＞



＜原子力科学技術と関連分野＞

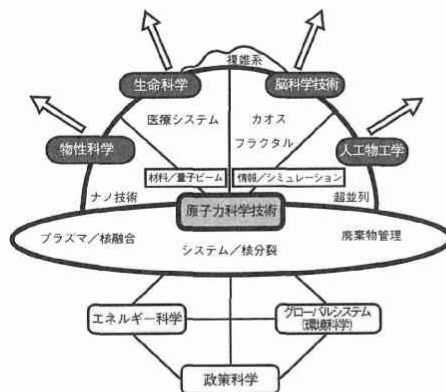


図10 原子力の広がり全体像

学技術はもとより、社会科学、哲学、倫理学などとも関連し、最近の第2モード論の動きを先導してきたとも言えよう。

原子力は安全、閉じ込め、リサイクルなど、これからの時代のリード・コンセプトに沿った学術・産業・社会に寄与しながら、併せてさまざまな先端科学技術と交流し、融合し、そしてさらに芸術も含めた感性の次元にまで、スパイラル状に広がっていきこうとしている。

原子力は地球シミュレータや先進プラント・シミュレータのような、高度な計算科学技術と基盤を共有している。さらに、イメージネーションや映像表現などの分野でも新たな地平を拓こうとしている。

もとより、さまざまな廃棄対象も、このような大きなスパイラル状の潮流の中で捉えていくことが望まれる。別の言葉で言えば、関連の科学技術、経済、制度、管理システムなどの次元を包含しながら、さらに広く深く、アメニティやヒューマニティに亘る新たな文化として展開していくことが望まれる。そのような意欲的な活動の中から新たな理念、価値観、方向、概念、そして具体的な取組みの像を含めた魅力的なパラダイムが浮かんでくることを期待したい。

パラダイムと言え、最近では＜エネルギー学＞、＜環境学＞、＜人間学＞などのように、これまでの比較的縦型の学術体系の構造から、横断的、学際的、学芸融的な動きが目立ってきている。とすれば、廃棄対象に関しても、それを例えば＜リサイクル学＞の中の柱と位置付けて、学芸融を駆使した文化の観点から、大きく体系化と展開を図っていくべきであろう。廃棄対象という表現も、リサイクルの地平にあっては、むしろ＜未利用有価対象＝untapped resources＞と呼ぶのが相応しいのではなかろうか。

エネルギーも廃棄対象も、社会経済・文化も、そして広くは全環境も、それらを映す大きな時空の鏡に照らしながら考えていくことが重要であろう。その際の座標は多岐に亘るが、簡潔にエネルギー・資源・環境周りに重点を置けば、＜エネルギー・資源のセキュリティ＞、＜環境のセキュリティ＞、＜科学技術を含めた智・情・意のフロンティアの先導と貢献に関わるセキュリティ＞などとなり、これらで構成する座標時空が前稿（季報エネルギー総合工学第22巻第1号、1999）でも触れた＜グローバル・フロンティア・カルチャー＞ではなかろうか、と考える。

[寄稿]

PFIの基本的論点と課題をめぐって —リスクと契約

坂 梨 義 彦 (電源開発(株) 新事業戦略室長)



1. はじめに

公共事業の実行に民間の資金と技術を導入するPFI（プライベート・ファイナンス・イニシアチブ）手法が自治体を中心に積極的に試みられている。平成11年9月に「民間資金等の活用による公共施設等の整備等の促進に関する法律」（PFI法）が施行され、既にかかなりの数にのぼるPFIプロジェクトが実施されているが、必ずしもPFIの理論と実際の双方において洗練された状況にあるとは言い難い。財政構造改革等を受けて益々高まるPFIへの期待に応えていくためにも、まだまだ多くの試行錯誤と議論が必要と思われる。本稿はそうした議論の一助に資するため、PFIにとって本質的に重要と思われる論点について筆者なりの見解を提示するものである。これは筆者が関わってきた多くの実際のPFIプロジェクト、種々の研究会等での議論を踏まえているが、あくまで筆者個人の見解であることを予めご了解願いたい。

2. 「民営化」「3セク」との違い —契約によるリスク処理の約定

行政が民間の力を利用するというのは従来

からさまざまに試みられてきたことであり、「民営化」然り、「3セク」（第3セクター）然りではないかという疑問が当然あろう。

まず、「民営化」にしろ「3セク」にしろ、これらは事業のスポンサー（株主）を表す言葉であって事業の仕組みを表す言葉ではない。「PFI」とは事業の仕組みに本質があり、事業の所有とは直接には関係は無い。従って、「3セク」のPFIもあれば、100%民間出資の「民営化」PFIもある。論理的に言えば筆者は100%行政出資の株式会社によるPFIも有り得ると考えている。

PFIの本質として筆者が第1に指摘したいポイントに関して図1、図2を示す。これは事業に係る「リスク」の取り扱いの違いを示そうとしている。図1は、PFIではない通常的方式による事業の場合である。3セク会社でも100%民間会社でも、行政の直営でも、いずれにしろ、事業があつてその上にスポンサーが存在する。事業の中には様々なりリスクが充満している。事業実行時にこうしたリスクのいずれかが顕在化した時には、会社であれば株主、行政直営であれば自治体等のスポンサーに責任のつけ回しがいくことになる。

PFIの場合はどうか、について図2に示す。通常方式（図1）では事業会社の中に充満し



図1 通常型事業方式
(従来型3セクスキーム等)
の場合のリスクの扱い

ていたリスクをここでは外に切り分けている。通常方式の事業会社の中に充満していたリスクを1つひとつ言葉で定義し、それを契約書の形にすることで外にそれぞれ切り出す。実際には、事業が内包するリスクを全て完璧に評価してきれいに切り分けるということではできないが、理念的に描けば、全てのリスクを定義し、契約で誰かに受け取ってもらうことができれば、事業会社の中に充満していたリスクは無くなり、まっ白になる。従って、通常方式(図1)ではどのようなリスクが顕在化した場合でも、結局はスポンサーがこれを引き受けるということになるが、PFIの場合は、あらかじめこうしたリスクが顕在化した時に、誰がどういう条件でそれを引き受けるのかということが契約の中で定められるのである。

例えば「コストオーバーランリスク」というものがある。100億円の予算で作り始めたが、完成時には150億円になっていたというようなリスクである。通常方式であればスポンサーがその追加コストを負担しなければならない。このリスクを外に切り出す方式が現実にはいろいろある。例えば、フルターン

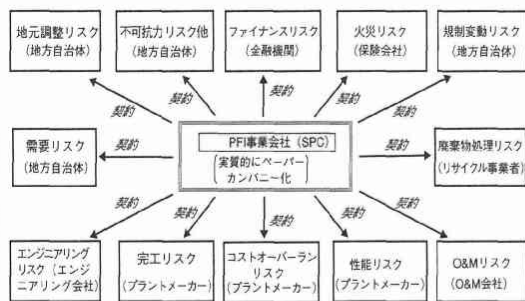


図2 PFIスキーム (SPC事業方式)
の場合のリスクの扱い

キー契約方式で固定価額での契約(ランプサム契約)をすれば良い。もし仕上がりで150億円になった場合は、その事業を請け負ったメーカーなりゼネコンが予算オーバーの50億円を負担するということになる。

こうしたリスクの契約による切り出しという考え方は、例えば「火災リスク」を考えると分かり易い。保険会社と契約して火災保険をかけることができる。上記の「コストオーバーランリスク」の例ではメーカーにこのリスクを取ってもらったわけであるが、この場合は「火災リスク」を保険会社に取りもらったことになる。

3. リスクの分析と契約による事前約定 —PFI=プロジェクトファイナンス

事業に内在するリスクを分析し、1つひとつ言葉で定義し、それを契約書の形にすることで外にそれぞれ切り出す作業というのは目新しいことでも何でもなく、世の中に、特に金融界では十分歴史がある。いわゆる「プロジェクトファイナンス」という資金調達方式を行う時にやる作業とほとんど同じ作業であ

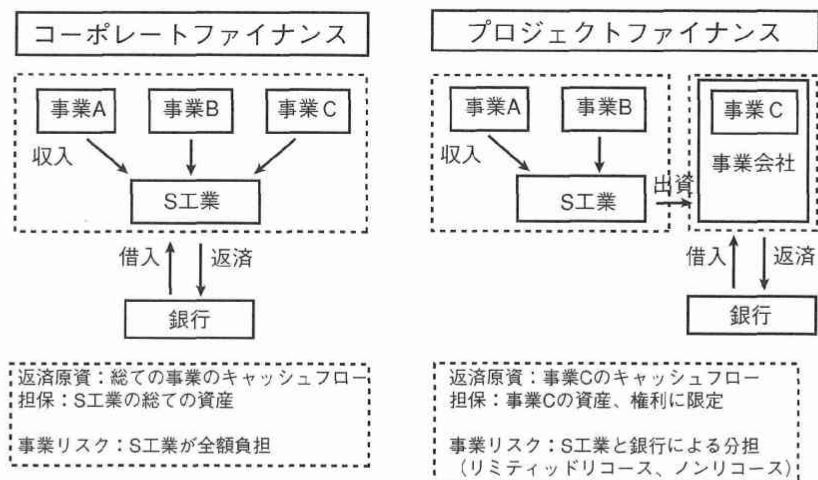


図3. コーポレートファイナンスとプロジェクトファイナンス

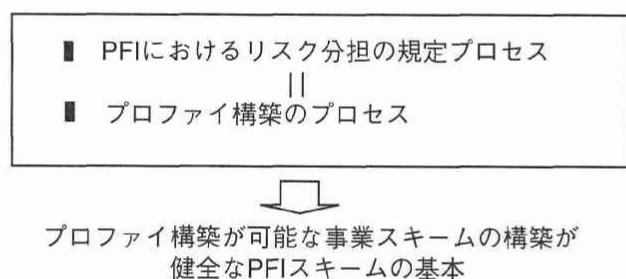


図4. PFIとプロジェクトファイナンス

と言える。プロジェクトファイナンスとは「返済財源を特定プロジェクトにかかわる収益、資産に限定した金融」である。従来型の資金の借り方である「コーポレートファイナンス」の場合には、一朝事がある時にはスポンサーに請求書の付け回しがいくことになるが、プロジェクトファイナンスの場合は、スポンサーに請求書の付け回しをしない、つまり債務保証は無いということである（図3）。従って、プロジェクトファイナンスを構築する場合、まさにその事業が持っているリスクを

洗い出して、それを誰に、どういう条件で、いくらで、引き受けてもらえるだろうかという議論を延々と続け、いい形に仕上がり、銀行もそれに納得すれば、そこで無保証で金を貸してくれることになるわけである。そういう意味で、PFIという議論をする時には、ほとんど必ずといっていいほどプロジェクトファイナンスという言葉が出てくることになる。端的に言って、PFI＝プロジェクトファイナンスであると言える（図4）。

4. PFIによるコスト低減の根拠 ーリスクの最適配分競争

では、PFIの最大眼目の1つであるコスト低減はどのような根拠で実現されるのか。最も本質的に言えば、事業の中に充満しているリスクをいかに的確に分析評価して言葉で定義できたか。そのリスクを安い値段で取ってくれる者をうまく見つけることができたか、によってコスト低減が実現される。

リスクの配分先は当然、多岐にわたる。PFIを成立させる当事者、本質的な当事者というのは決して自治体とPFI事業者だけに限らない。金融機関、保険会社、プロジェクトによっては当然、運営を請け負う会社、建設を請け負う会社、燃料を使う場合は燃料会社が必須の本質的な当事者として存在する。こうした多様な当事者と協働することによって、事業リスクをよりの確に定義し、それをより効

率的に、より安い値段で取ってくれる専門企業を見つけて実際に契約できた者、トータルで一番効率的な諸契約ができた者が最大のコスト低減を実現し、PFIの入札で一番札で落札するはずだということになる。

PFIではVFM (Value for Money), すなわち、「一定の支払いに対して提供されるサービスの価値」を最大にするというコンセプトが基本となっている。例えば、PFI手法と従来の公共事業の手法を比較して、PFI手法の方がVFMが大きい場合にPFI手法を活用するというものである。このVFMは前述のように自治体、民間双方を含む多様な当事者間に最適なリスク配分を行うことによって実現されることになるが、これを単純化して大きく「官」と「民」に二分して図示したものが図5である。従来型の行政直営による公共事業の場合のVFMに対して、どのようなリスクを民間に移転していくかによりPFIのVFMが異なってくるため、

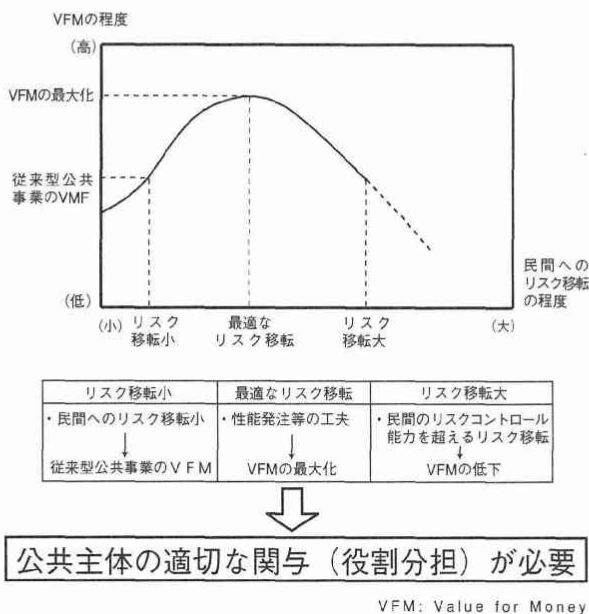


図5. 官民の役割分担とVFM

公的部門と民間部門との間のリスク分担、または役割分担のあり方は、非常に重要な要素である。例えば、性能発注により民間事業者は技術的リスクを負わせると、民間事業者は機器の満たすべき性能のみに制約されることになるため、自己の責任において必要以上に厳しい基準は排除して最適設計を図り、結果としてコスト低減、すなわちVFMの向上を図ることが可能となる。しかし、例えば不可抗力や社会変動等のリスク、制度変更等のリスクなど、民間事業者では予見もしくはコントロールできないリスクまで民間事業者に移転すると、民間事業者がこれらのリスクを大きなリスクプレミアムとしてコストに転嫁することになり、VFMが低下してくる。このように、官民双方で最適なリスク分担を実現することにより、VFMを最大とすることができる。この「最適なリスク分担」という点が冒頭述べた「PFIは民営化と同じではない」という論点とも重なってくる。

5. コスト見積額はPFIが高い

ー「見えるコスト」と「見えないコスト」

PFIとはリスクを分析してそれを契約の形で最適に配分するところに本質があると述べてきたが、この時に忘れてならないのは、リスクを取ってもらう時には料金を払わなければならないということである。

保険の場合は分かり易い。保険会社に「火災リスク」を取ってもらうと、その料金は保険料という形になる。従って、従来の公共事業方式による発注価格 100億円が妥当な価格である場合、もし受注者に「コストオーバーランリスク」を取ってもらうとすれば、プ

スアルファの料金が上乗せされるはずであり、100億円ではなく、例えば 110億円でなければ契約は発注できないはずである。

この点が「見えるコスト」と「見えないコスト」ということで、PFIのVFM議論の大きな論点の1つとなる。

従来の公共事業では、保険を徹底的にはかけずにやられている例もあろう。保険をかけずに、もし火災で燃えてしまったら、もし台風で壊れてしまったら、その時はまた税金を投入して建て替えるというようなことがあり得る。この時、「火災リスク」とか「台風リスク」というのは「目に見えないコスト」として存在している。それを保険という契約に翻訳すれば、保険料という形で「目に見えるコスト」として表現されることになる。プラントの契約においても同じことで、ランプサム条項付きのフルターンキー契約でやるのか、従来型でやるのかによって発注金額は当然違ってくる。

PFIの時の見積額と従来どおり行政直営でやった場合の見積額を普通に比べると、必ずPFIのほうが高くなるということをあえて言いたい。ほかの条件が同じだとすれば、見かけ上、PFIのほうが高くなるはずだということである。

「金利」という舞台を使って、リスクの扱いに関連したコストの見え方を確認したい。行政側が従来の直営方式でやったと想定した場合のコストの評価（PFI用語で言うPSC：パブリック・セクター・コンパラター）では「金利」として自治体の起債金利、例えば2%分を算入するであろう。民間がPFIの入札書類を作る時にも当然、「金利」に相当する項目を計算するが、「金利」ではなく「IRR（Internal

Rate of Return：内部収益率）」を記入する。手ざわりのあるようにあえて言えば、例えば「金利」が2%とすれば「IRR」は10%というような数字を入れなければならない。見積額は当然高くなる。安いとか高いとかいうことではなくて、「金利」と「IRR」は定義が異なり、「金利」には反映されない隠れたリスクも「IRR」では勘定に入れるためである。

そこで「金利」がどういったリスクを反映するのか少し考えてみたい（図6）。まず、行政が実行するにしろ民間が実行するにしろ、およそ事業と名の付くもの、およそ投資をやる時に、必ずかぶってしまうリスクがある。インフレなどによる「通貨自体の価値が変動するリスク」というものは、投資を行う限り、誰がやろうと必ずかぶってしまう。それから「期間リスク」もある。資金を5年間で回収しようとするのか10年間で回収しようとするのか、その期間の違いによって出てくるリスクが必ずある。「通貨自体の価値が変動するリスク」や「期間リスク」いったものは、誰がどういうことをやろうと、必ず金利に反映される部分である。国債金利がそれに近い概念と言ってもいいかもしれない。

次に誰が投資しようとするか。その「誰か」とは自治体かも知れないし、PFI事業会社（SPC）かも知れないし既存の大企業かも知れない。その「誰」かが持っている財務的健全性や体力、投資のやり方だとかが持っているリスクが反映されて出てくる。この2つが合わさったものが、企業金利、自治体の場合は起債金利と言っていいであろう。

さらに、民間がPFIプロジェクトの入札書類を作る時には、この企業金利、もしくは起債金利だけではだめで、当然その上に事業固有

■一般的なリスク：市場金利（国債金利、地方債金利） インフレ・リスク、期間リスク、平均的経済パフォーマンス
■事業主体のリスク：企業格付けによるリスクプレミアム（企業金利） 体力（ストック）、収益力（フロー）、経営健全性
■事業固有のリスク：事業IRR 技術リスク、顧客リスク、物価変動リスク、規制変動リスク、etc.
■関係者間でのリスク（＝リターン）配分：事業スキーム（ビジネスモデル）構築 事業者、銀行、オフテーカー（顧客）、メーカー、メンテ業者、オペレーター、 保険会社、etc.

図6 事業リスクと「金利」の種類

のリスクを利回りに翻訳して上乗せしなければならない。それが「事業IRR」という概念である。事業に充満している固有の様々なリスクを利回りに表現したものが「IRR」である。これが、事業方式、事業主体の如何を問わず、当該プロジェクトが本質的に有しているリスクの全体水準を表している。

このリスク（＝リターン）を、前述したような多様な当事者間でそれぞれいくらかで引き受けるかということで分け合っていく。PFIの本質が事業のリスクを事前に分析摘出しそれを過不足なく諸当事者間で事前契約により設定していくものである以上、すべてのリスクを「見えるコスト」にしなければならない。

これを絵にしたのが図7である。一般的なリスクを反映した一般金利（国債金利等）があり、事業主体リスクを反映した金利（企業金利等）があり、その上に事業固有のリスクを反映した「事業IRR」が乗ってくる。通常の事業方式でやる場合には、企業金利までしか見えない。事業固有のリスク、例えば火災が起きて壊れるかも知れない場合、保険をかけていないとそれはコストとしては見えない。性能が5年目で落ちるかも知れない。それをメーカーとの契約で担保していないとすれば、コストとしては表現されない。

例えば、「火災リスク」を表に出しコストに

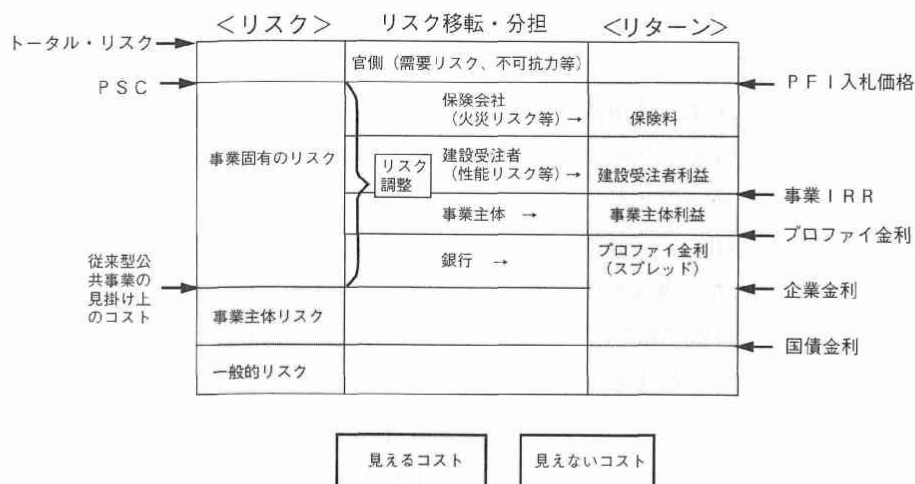


図7 見えるコスト、見えないコスト

表現して、保険会社にとってもらうと保険料という形で目に見えるようになる。これが上乗せされる。それから、例えば完工リスク、コストオーバーランリスク、性能リスクといったプラントが抱えるリスクをメーカーに契約で取ってもらうと、発注主はその分を追加代金としてメーカーに払わなければならない。それは社会的には、プラント発注代金の増高分という、目に見える形になってくる。

それから、プロジェクトファイナンスということで債務保証しない場合は、銀行に相應のリスクを取ってもらうことになる。そうすると銀行は当然その分を貸出金利に上乗せしてくることになる。ここがプロファイ金利の上乗せ分（スプレッド）という形で出てくる。そして最後に残ったリスクは事業主体で取らざるを得なくなり、この部分は事業主体が受け取るべきPFI料金の一部として表現されることになる。

PFIのような形、より本質的にはプロジェクトファイナンスの形ですべてのリスクを表に

出して料金に換算して積み上げていくと、見えなかったコストが積み重なってきて、これがPFIの目に「見えるコスト」（PFI見積り料金）ということになる。逆に言えば、公共事業のコスト計算でこれに相当するものが本当のPSCということになる。すなわち、従来目に見えなかったコストが、民間にリスクを移転したことによって目に見えるようになる。政府が提示している「PFIガイドライン」ではこれを「リスク調整額」と名づけている。この「リスク調整額」を上乗せして本当の意味でのPSCとなる。

実はほとんどの場合、これ以外にも目に見えないコストが隠れている。当然、どんなPFI事業でも必ず自治体にとってもらわなければならないリスクがある。例えば、ごみ発電の場合、ごみの質と量の変動というリスクは行政が取るほうがVFMは向上する。もし人口が少なり、ごみ処理プラントの稼働率が落ちて追加コストがかかるようになった場合、そのコストは自治体側で事後的に引き受けるこ

とになる。それは事前にはPFI料金としてコストに翻訳されていないわけであるから隠れている。従って、事業全体の本当のトータルコストの中には、こういうコストが目に見えない形で依然として背後にあるのである。

6. PFIスキーム設計上の具体的課題

これまで述べてきたように、PFIの本質の1つは「リスクと契約」にある。この観点から具体的にPFI事業を設計する上で留意すべきと考える課題とその取組みの方向性について摘記しておきたい。

(1) 諸契約間の整合性確保

PFI事業に関連する諸契約は、建設契約、運営保守契約、燃料契約、保険契約、融資契約等多岐にわたる。事業契約とこれらの諸契約との間に整合性がとれている必要がある。すなわち、各当事者のリスクカバー範囲と事業全体のリスクとが完全に一致しており、リスクカバー範囲に穴、ダブリがないようにする必要がある。そのためには、例えば、落札から事業契約調印までのスケジュールについて十分な余裕を確保しておくことなどが必要不可欠である。

(2) 諸「期間設定」間の調整

PFI事業の実施にあたって、事業契約期間と事業に関連する各種の期間選定、例えば、施設の耐用年数、事業ニーズの存続期間等の事業存続期間、投資回収期間、融資期間、税務（償却）期間等の間で、適切な調整が必要となる。

① 契約期間の設定の考え方

事業契約期間はリスク評価期間および融資期間との整合をはかる必要がある。

一将来のリスク評価が可能な期間との整合

PFIはリスク配分の最適化、すなわちリスク管理能力の最も高い主体へのリスクを割り振ることによりVFMの最大化を図るものであるから、リスク評価が可能な範囲でなければリスク配分の最適化を図ることはできない。仮に、事業主体がリスク評価ができない遠い将来のリスクを負担するとした場合には、一般に膨大なリスクプレミアム（リターン）が得られることが前提条件となり、必然的にVFMは低下することとなる。リスク評価が可能な期間は、リスクの種類により異なるが、リスクの扱いが最も洗練された金融市場における金融商品の開発状況からしても、一般的には15～20年程度と考えられる。

一融資期間との整合

事業契約期間は融資期間より長いことがファイナンス成立の条件となる。融資期間に対して事業契約期間がどの程度の余裕度を持っているかは、事業の確実性という意味でも一つの目安となる。ただし、キャッシュフローのバランス上、事業契約期間に対して極端に短い融資期間を設定することは困難である。融資期間は、民間金融機関が貸し手の場合には、長くて15年程度であるのが現状である。

将来のリスク評価が可能な期間ならびに融資期間との整合を考えると、事業契約期間は概ね20年程度以内が望ましいと考えられる。

② 事業契約期間と諸期間設定との調整

PFI事業の実施にあたって、事業契約期間と事業存続期間、投資回収期間、融資期間、税務（償却）期間等の間で、適切な調整が必要

となる。

事業契約期間と事業存続期間、税務（償却）期間などは同程度である方が望ましく、これらの期間の間に大きな乖離があると、後述するように、事業契約期間が事業存続期間よりも短い場合、施設譲渡後の瑕疵担保の問題が、事業契約期間が税務（償却）期間よりも短い場合、有税償却に伴う税負担の発生などの問題が起こる。また、投資回収期間、融資期間などは事業契約期間と密接に関係しており、事業構築の際に重要な論点となる。

これら期間設定間の整合性を確保できるように、各リスクの評価・分担方法、料金設定のあり方、契約の間の調整が必要であり、これらを適切に調整することは諸リスクの最適管理、プロジェクトファイナンス成立の要件となる。

（３）税務（償却）期間と施設耐用年数

① 事業契約期間と税法上の償却期間

事業契約期間と税法上の償却期間とが同程度であれば、収益と税法上の経費のバランスがとりやすく事業実体にあった税務処理が可能であるが、建物など税法上の償却期間が長い施設のウェイトが高い事業においては、投資回収期間と税法上の償却期間に大きな乖離が発生する。投資額は事業契約期間内に回収しなければならないのに対して、事業契約期間内に経費として償却できる部分は設備投資の一部に限定されるため、事業契約期間終了時の償却残部分に相当する投資回収は税務上経費ではなく利益と認定されて課税され、有税償却による税負担が発生する。

こうした税負担を回避するために、PFI事業に対して加速償却等の調整措置の導入等が望

まれる。また、ファイナンスリース等の活用などを工夫し、有税償却に伴う税負担を回避することも考えられる。

② 事業契約期間と施設の耐用年数

事業契約期間と施設の耐用年数が同程度であれば、事業終了時には施設を処分して事業を終了することになり事業終了後の問題は発生しない。しかし、施設の耐用年数が事業契約期間よりも長い場合には、事業契約終了時に施設を公共側に譲渡する場合が多い。この場合、事業契約終了時、譲渡後の瑕疵担保をどのように取り扱うかは重要な問題であり、適切かつ明確に瑕疵担保の取り扱いを規定しておく必要がある。

（４）自治体特有の契約上の課題

自治体の予算管理は単年度予算主義であるため、原則として長期契約を結ぶことができない。このため、PFI事業のような長期にわたる事業契約が必要な事業にはなじみにくい体制にあるといえる。

長期契約が可能な形態としては、長期継続契約、後年度債務負担行為の議会議決をよりどころとした長期契約があるが、それぞれ課題を抱えている。

長期継続契約においては、地方自治法上、自治体が任意解除権を留保することが求められているため、その解除権発動時の損害賠償について事業契約の中で規定しなければならない。

後年度債務負担行為議決をよりどころとした長期契約の場合にはその問題はなくなるが、事業契約期間中の様々な状況に応じて変動する可能性のある自治体負担額（サービス購入

費)に対して予算額、条件の設定をどのように決定するかの工夫をしなければならない。

(5) 事業契約期間中の施設の所有形態

事業契約期間中の施設の所有形態により、事業開始時に事業者が施設を公共に譲渡して事業契約期間中施設を公共が所有する方式(BTO方式)と事業契約期間終了時まで施設を事業者が所有する方式(BOT方式等)が考えられる。

施設の維持管理についての責任の明確化、施設の維持管理に起因する瑕疵担保という視点から見ると、施設の所有者と維持管理者が異なるBTO方式の場合、責任の所在のあいまいさ、原因特定の判断の難しさといった問題を生じる懸念がある。

(6) 付帯事業の実施によるリスク

VFMの向上を目指して、付帯事業(収益事業)を許容するスキームを取り入れるケースがでてきているが、付帯事業の実施には、付帯事業のリスクが多様であり客観的評価が困難であること、付帯事業を実施することにより事業リスクが増大し付帯事業の破綻が本体事業の破綻につながるリスクを抱えてしまうことなどの問題がある。

付帯事業を実施することにより本来の目的である公共事業の継続性が脅かされることは根本的な問題であり、付帯事業の実施については慎重に検討する必要がある。

(7) 公的助成措置の獲得と受益配分

公的助成措置を活用して事業コストを最小限に抑えることは重要なことであるが、一般に、入札時には公的助成の獲得の可能性が不

明確になっている場合がほとんどである。公的助成の獲得は、国及び地方自治体の裁量によって左右される。公的助成の獲得リスクを事業者が負担すると、大きなリスクとなりVFMの低下につながる可能性がある。従って、公的助成獲得のリスクは国及び地方自治体が負担し、公的助成獲得のメリットを国及び地方自治体が享受するのが望ましいと考えられる。

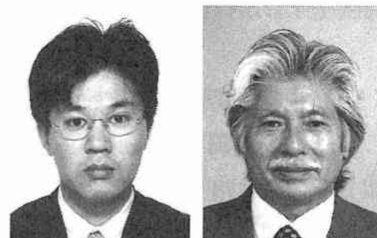
7. おわりに

PFIをめぐる若干の議論を提示してきたが、これはいずれも「リスクと契約」の基本論に関するものであり、PFIに限らず、およそ「プロジェクト」というものを考える際の必須の問題である。「市場の時代」と言われるが、そこでは企業であると行政であるとを問わず、民間事業であると公共事業であるとを問わず、市場の評価に晒されることになる。自らが関与するプロジェクトでどういうリスクをどういうコストで引受けているかを契約の形で明確にしていく説明責任(アカウンタビリティ)が求められている。PFIはその大きなうねりの一環としてとらえるべきであろう。

廃棄物発電の高効率化に向けた ガス化溶融発電技術開発の成果

大 森 伸 二 (財エネルギー総合工学研究所
プロジェクト試験研究部 研究員)

浅 見 直 人 (財エネルギー総合工学研究所
プロジェクト試験研究部 専門役)



1. はじめに

資源の有効利用を考えた循環型社会の構築や、地球温暖化ガス排出の低減といった観点から、現在、廃棄物発電に大きな期待が寄せられている。平成10年9月の「総合エネルギー対策推進閣僚会議」で決定された現行の「長期エネルギー需給見通し」によれば、廃棄物発電の導入目標値は2010年に500万kWで、新エネルギーの中で最大級の扱いとなっている。また、現在検討中の同改訂案では、多少下方修正されているが、基本的な位置付けは変わっていない。しかし、現在、廃棄物発電設備を導入済みの焼却炉数は、全国の焼却施設数の約1割で、その発電規模は約95万kWに過ぎない。一方、廃棄物発電を取り巻く状況としては、ダイオキシン類発生、最終処分場の不足問題などが顕在化してきている。従って、環境特性に優れ、かつ高効率で発電できる廃棄物発電技術を開発し期待に応えることが望まれている。

当所では平成4年度より新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託研究「高効率廃棄物発電技術開発／最適トータルシステムの研究」を通して、廃棄物発電の高効

率化に向けたシステム最適化の検討を行ってきた。本「高効率廃棄物ガス化溶融発電技術開発」プロジェクトは、同研究の中で平成9年度に実施した廃棄物ガス化溶融発電に関するフィージビリティ・スタディ（FS）の結果を受けて、平成10年度から3カ年計画で実施してきたもので、平成12年度に目標をほぼ達成しプロジェクトが終了した。

本稿では、同プロジェクトで実施した技術開発の成果概要、及び技術開発成果を踏まえたFSの結果について紹介する。

2. 廃棄物発電の現状

現在稼働中の廃棄物発電プラントの発電端効率、最高で20数パーセント程度、平均では10%程度という低い値に留まっている。これは、ごみ中の塩素分によるボイラ蒸気過熱器（スーパーヒーター：SH）の腐食問題があり、最近まで蒸気温度が300℃以下に抑えられてきたためである。SH材料開発などにより、数年前から、高効率発電を狙った蒸気温度400℃級のプラントが運転を開始している。しかし、500℃以上の高温蒸気条件を用いた高効率プラントは、未だ商用化されていない。

発電設備の導入割合は、全国の焼却施設数約1,900に対しわずか1割程度に過ぎない。これは、発電効率が低く、経済的メリットが小さいためであると思われる。

わが国の廃棄物発電の導入量推移を図1に示す。廃棄物発電の導入量は増加の一途をたどっているが、その増加量は年間10万kW程度であり、冒頭で述べた2010年度に500万kWという目標を達成するには、導入済み発電設備の高効率化、及び発電設備が未導入の焼却施設への発電設備の導入などが必要である。

廃棄物発電を取り巻く課題としては、ダイオキシン類等の環境問題、最終処分場確保問題などが挙げられる。

ダイオキシン類の発生は、高温燃焼などによりかなり抑制することができる。また、バグフィルタなどの排ガス処理装置により除去可能である。2002年12月にはダイオキシン類の厳しい規制値 $0.1\text{ng-TEQ}/\text{Nm}^3$ が完全適用されることになっており、現在そのためのごみ焼却プラントの改装・更新が相次いでいる。

一方、一般廃棄物（平成9年度5,120万t）の78%が直接焼却処理され焼却灰が最終処分場に持ち込まれ埋設処分されている。この焼却灰（同767万t）が最終処分される廃棄物量（1,201万t）の約64%を占める。現在、最終処分場問題が極めて深刻な問題となっており（図2参照）、特に大都市における確保が非常

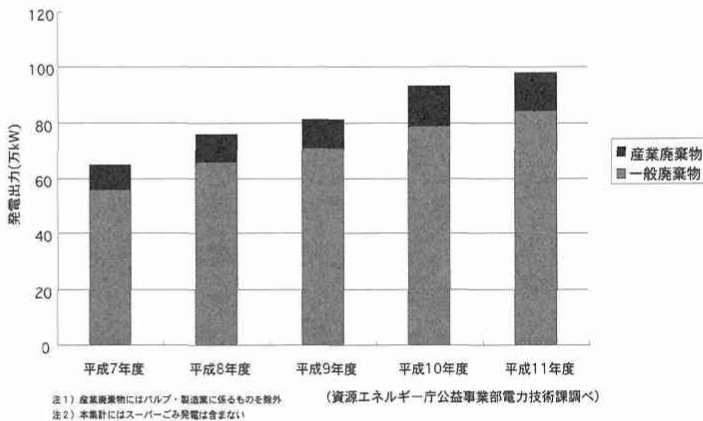


図1 わが国の廃棄物発電導入推移

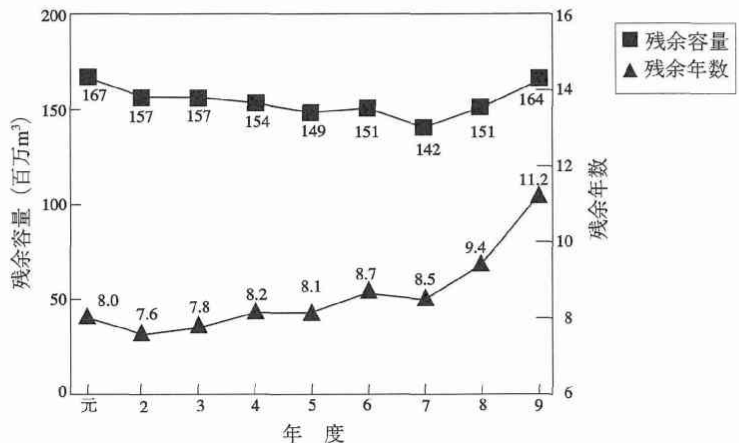


図2 一般廃棄物最終処分場の残余容量と残余年数の推移

に困難となっている。そのような状況でもあり、昨今、灰を減量するための処理法として溶融固化が注目されている。これは、焼却灰を高温で溶融させ、スラグと呼ばれる固化物として取り出すことで、焼却灰を1/2～1/3程度に減量できるからである。さらに、重金属類をスラグ中に閉じ込めることもできるため、処分場の延命化に貢献でき、同時に、環境特性にも優れた方法であると考えられるためである。なお、スラグは路盤材やコンクリート骨材などへの再利用も可能である。

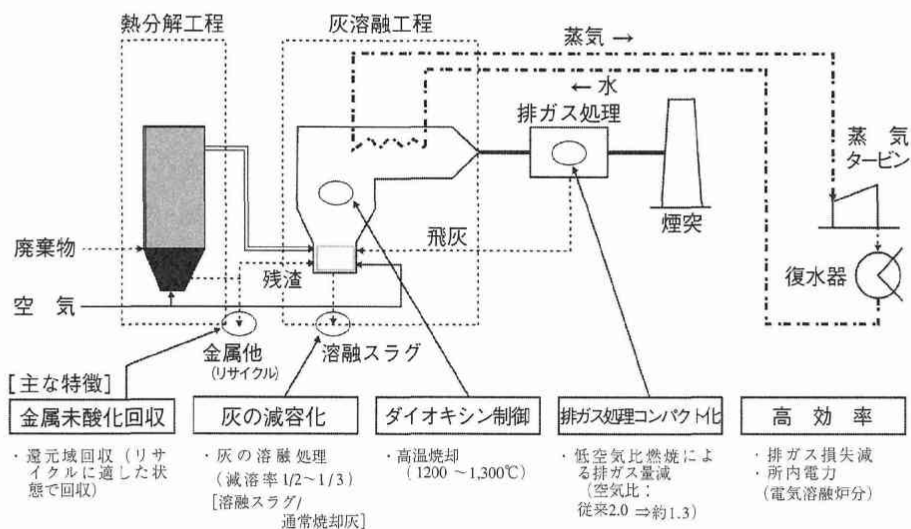
3. ガス化溶融技術の特徴

従来の廃棄物発電は、ストーカ炉、流動床炉に代表されるように、ごみを直接焼却し、

ボイラで熱回収を行い、蒸気タービンで発電を行うものであった。この場合、灰は主として電気などの外部エネルギーで溶融するため送電端効率が低かった。

一方、ガス化溶融技術は、400℃～600℃程度という比較的低温で、空気を断ち、ごみを蒸し焼きにし、可燃性の熱分解ガスとし、そのガスをボイラで高温燃焼させ蒸気としてエネルギー回収し、蒸気タービンで発電するとともに、灰を溶融させるシステムである。

このように、ガス化溶融技術は、ごみ自身の持つエネルギーで灰を溶融することができるため効率面で有利であると同時に、1,200℃以上の高温でガスを燃焼させるためダイオキシン類の発生を抑制する効果もある。さらに、金属類を未酸化状態で回収できることも大きなメリットである。



[技術開発課題]

熱分解工程	灰溶融工程	排ガス処理工程	その他
●安定供給システムの開発（水分低減によるごみの高カロリー化） ●廃プラスチックの吹き込み技術開発（熱分解ガスの高カロリー化）	●脱塩素化技術開発（SH加熱用の燃焼ガスの脱塩素化）	●高温除塵システムの開発（SH過熱用の燃焼ガス中の灰の除去。ガス中の灰の除去。排ガス条件700℃） ●セラミック式高温空気を加熱器の開発（燃焼ガスとの熱交換による、SH高温空気を加熱）	●低温脱硝装置の開発（排ガス温度150℃での脱硝）

図3 ガス化溶融発電システムと技術開発課題

表 1 各種廃棄物ガス化溶融技術の特徴等

方式		特徴	技術課題
「直接型熱分解溶融方式」 (シャフト炉方式)		・外部燃料であるコークスを用いることにより安定した溶融が可能 ・コンパクト	・外部燃料（コークス）が必要 ・有価金属の回収が困難
「直結型熱分解溶融方式」(ガス化溶融方式)	「ロータリ・キルン方式」	・安定した熱分解ガス化反応が可能 ・有価金属を未酸化で回収可能	・設置スペースが他方式より必要
	「流動床方式」	・高効率発電が期待される ・有価金属を未酸化で回収可能	・不燃物の排出機構の確立が必要 ・安定な流動機構の確立が必要

(出所：通商産業省 21 世紀に向けた発電技術懇談会 1997 年 6 月)

図 3 にガス化溶融発電システムの概略を示す。また、ガス化溶融技術の種類と特徴を表 1 に示す。詳細は別途資料⁽¹⁾にゆずる。

4. ガス化溶融発電技術開発の経緯と内容

4.1 概要

(1) 背景

冒頭に述べたとおり、廃棄物発電は新エネルギーの中でも比較的安定的な電源として期待されている。しかし、従来の廃棄物発電の効率は事業用火力などと比較すると非常に低く、その高効率化が課題となっていた。そこで、当所ではガス化溶融発電技術に注目し、平成 9 年度にメーカーの協力を得て、性能及び経済性に関する FS を実施するとともに、高効率化のための開発課題の抽出を行った。

その結果、ガス化溶融技術は高効率化のためのポテンシャルを十分に有することが分かった。また、以下に述べるような開発課題が提案され、平成 10 年度からプロジェクト化され、以下のような各要素技術開発が開始された。(図 3 参照)

① 蒸気温度上昇のための技術開発

発電効率を向上させるために最も効果的な

手法の 1 つは、蒸気温度・圧力を上げることである。先に述べたとおり、ごみ中の塩素分による SH の腐食問題があったため、従来の廃棄物発電プラントでは蒸気温度が 300℃程度に抑えられてきた。高温蒸気条件である 500℃達成を目標に、ガス化溶融プラントにおける SH 材料特性評価や間接加熱方式による蒸気高温化、さらには高温除塵装置による高塩素濃度の腐食雰囲気低減する技術などを研究するものである。

② 排ガス再加熱回避のための技術開発

廃棄物発電プラントでは、排ガス中のばいじんやダイオキシン類の除去のためにバグフィルタを設けているが、その動作温度は 150℃程度である。しかし、その後流にある NO_x 除去のための脱硝装置は、従来技術では触媒の性能上 200～220℃程度で運転しなければ十分な性能が発揮できない。そのためバグフィルタを通過した後の排ガスを再加熱する必要がある。それには蒸気タービンの抽気等からの蒸気を使用するため、蒸気量が少なくなり発電効率を低下させる一因となっている。そこで 150℃程度で運転可能な低温脱硝装置を開発し、効率向上を図るものである。

③ 自己熱溶融限界発熱量低減のための技術開発

廃棄物ガス化溶融発電システムでは、炉形式にもよるが、外部エネルギーを投入することなく、ごみ自身のエネルギーだけで灰を溶融することが可能である。しかし、水分の多い低カロリーごみの場合は、補助燃料を使用するなど外部エネルギーを投入しなければ灰を溶融することができない。多様化しつつあるごみに対して、ごみの自己燃焼熱で灰を安定的に溶融するために、脱水機で機械的に水分を除去し、ごみのカロリーアップ、均質化を行う、ごみの安定供給システムの開発である。

④ 外部燃料投入量削減のための技術開発

シャフト炉タイプの直接溶融システムを活用した発電の高効率化を図るためには、外部燃料であるコークスの投入量を極力抑え、かつ高カロリーのガスをいかに得るかがシステム全体の効率アップに繋がる。シャフト炉内に廃プラスチックを吹き込み、適正温度域で燃焼または熱分解ガス化することにより、コークスの量を低減できると同時に、熱分解ガスの高カロリー化を図り、効率と経済性の向上を狙うものである。

(2) 目標

技術開発の目標は以下のとおりである。

- ① 発電端効率を30%以上とし、送電端効率を極力高める。
- ② 灰は、有効利用可能な溶融固化スラグ状にして排出する。
- ③ ダイオキシン類は、新設規制値を充分下回るレベルとする。
- ④ 経済性は、従来技術に比べ、建設費、運転費とも下回ること。
- ⑤ 回収金属類、副生品のリサイクル特性が、

従来方式より優れていること。

4.2 技術開発の成果概要

各要素技術開発は、メーカー6社に再委託され実施された。また、当所内に「ガス化溶融発電技術開発評価委員会」（委員長：平岡正勝 立命館大学エコ・テクノロジー研究センター長、京都大学名誉教授）を設置し、試験内容の検討及び結果を評価した。

以下に、各要素技術開発の成果概要を述べる。なお、各要素技術開発は、開発メーカーそれぞれのガス化溶融システムの高効率化のための技術開発である。

(1) 蒸気温度上昇のための技術開発

① SH材料の高温腐食性の評価及び高温除塵システムの開発（三井造船株）

ガス化溶融システムにおけるSH管の最適材料の選定を行うとともに、ホットサイクロン、またはセラミックフィルタを使用する高温除塵システムの除塵性能及びその後流でのSH管腐食の評価を行った。図4に、高温除塵システムのフロー図を示す。

試験の結果、ガス化溶融炉の腐食環境特性は、溶融塩腐食が支配的な領域ではストーカ炉などの従来炉よりも低いことが分かった。これはガス化溶融炉が500℃の高温蒸気を得るのに有利な炉であることを示唆するものである。

SHの上流に設置される高温除塵装置としては、セラミックフィルタが有望であることが分かった。まず、セラミックフィルタを用いたSH管腐食の評価で、フィルタ後流の付着灰は溶融開始温度が650℃以上の高融点腐食灰であることが確認された。SH上流に除塵装置を

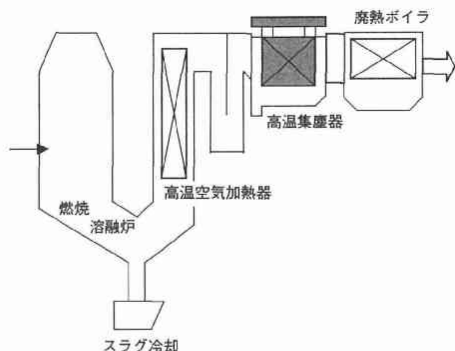


図4 高温除塵システム

設置することにより低融点灰が捕足され、後流では高融点腐食灰が主体となる。このため、500℃の高温蒸気を得るために必要なメタル温度域でも溶融塩腐食の発生を防止できることが確認された。

② 熱分解工程における脱塩素化技術の開発 (三菱重工業(株))

廃棄物発電の蒸気条件が400℃以下と低く抑えられてきた理由として塩素分によるSHの腐食問題が大きく影響していることは先に述べた。従って、発電効率向上につながる蒸気温度上昇のためにはSH部での塩素濃度を低減させることが重要である。熱分解工程で脱塩素した残留固形分、チャーの燃焼ガス中の塩化水素(HCl)濃度は低いので腐食問題が起こりにくく、低コストの既存ボイラ材料を使用してSH蒸気条件540℃×100ata以上、発電端効率30%以上の性能が期待できる。その検証と必要技術を開発するため、熱分解工程での脱塩素技術の適用、及び材料腐食試験等を行った。図5にフロー図を示す。

試験の結果、熱分解温度を400～450℃程度とすることにより高効率な脱塩素化が可能であり、ごみ質の変動等運転状況により変化はするがチャー側のHCl濃度を100ppm程度に抑制できることが実証炉で確認できた。従来型

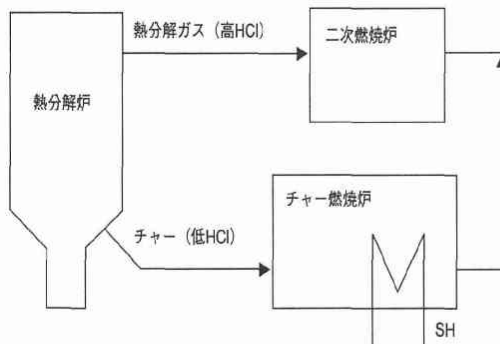


図5 脱塩素化技術の開発

では数百～1,000ppm程度である。

また、ラボ及び、実証炉を用いて材料試験を行った結果、脱塩素化技術を適用すれば、500℃級プラントでも超高級材料(例えば、Alloy625)を使用せずに、より低廉な材料(例えば、Alloy825)を実機に採用できることが示唆された。

③ セラミック式空気加熱器の開発(株荏原製作所)

SH管の腐食問題解決のため、炉内に設置されたセラミック式空気加熱器を用いて700℃程度の高温空気を発生させ、その高温空気により炉外に設置された間接式熱交換器で空気と蒸気の熱交換を行い、最終的には高温腐食を生じさせないで500℃の高温蒸気を得ることを目的とする。実証試験及び各種シミュレーションを行い、評価を行った。図6にフローを示す。

高温空気加熱器の設置されるガス化溶融炉出口の高温腐食環境において、セラミック製伝熱管(SiC)は管温度1,000℃程度までは優れた耐久性を示した。実証試験結果からその年間減肉量は1mm以下と推定される。また、実規模の施設における管温度分布の試算を行ったところ、約150℃の空気を700℃以上に加熱する場合、管温度を1,000℃以下とすることが可能であることが確認された。

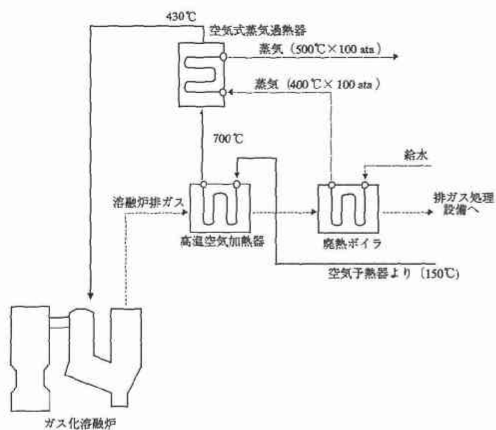


図6 高温空気加熱器フロー図

(2) 排ガス再加熱回避のための技術開発 「低温脱硝装置の開発」(川崎重工業(株))

従来200～220℃程度で運転していた脱硝装置を使用し150℃で脱硝効率75%以上を達成することを目標に、触媒の選定、及び耐久性試験等を行った。図7にフローを示す。

従来のチタンバナジウム系触媒に改良を加え、低温脱硝用高性能ハニカム触媒(Ti-V-Mo)を開発した。ラボ試験の結果、この触媒は150℃で75%以上の脱硝率を達成できることがわかった。

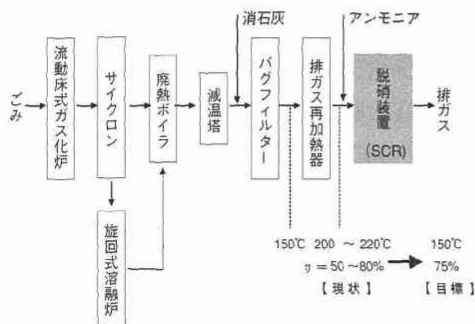


図7 低温脱硝装置の開発

また、新たな触媒として高性能マンガン系触媒(Mn-Ce-TiO₂)を見出した。現状では耐久性、ハニカム成型性に課題が残るものの、低温活性が高いことから、ダイオキシン類低減用等、他の系への応用が期待される。

(3) 自己熱溶融限界発熱量低減のための技術開発

―「廃棄物安定供給システムの開発」 (日立造船(株))

高温排ガスを使用する乾燥機の性能面及び経済面での課題を克服し、熱的・機械的に効率の高い機械式脱水機の実用化のために、パイロット試験及び実証試験を行った。図8にフロー図を示す。

試験結果から、脱水後のごみ水分値が40%近くになるまで脱水可能であることが分かった。また、乾燥システムと比べ、設置面積、消費動力等の点で脱水システムが有利であることが分かった。

脱水分離水については、二段脱水を行い、分離水を二次燃焼炉に噴霧し蒸発させることにより、汚水の無放流プラントが可能となった。

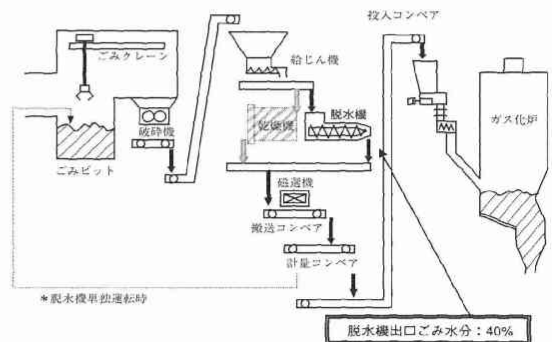


図8 脱水システム実証試験フロー

(4) 外部燃料投入量削減のための技術開発

―「廃プラスチックの吹き込み技術の開発」(新日本製鐵株)

廃プラスチック吹き込み技術確立のため、実証装置を用いた試験及び各種シミュレーションを行った。図9にフロー図を示す。

実証設備により、シャフト炉へのフラフ状廃プラスチック吹き込み試験を行い、コークス比30 kg/ごみtレベルという従来よりも30%以上低い低コークス比運転を確認した。安定したスラグの排出も確認されており、廃プラスチック吹き込みでは、廃プラスチックは単にコークスの燃料機能だけではなく、コークスの還元剤機能も十分代替できることが確認され、この技術の実用性について見通しを得た。

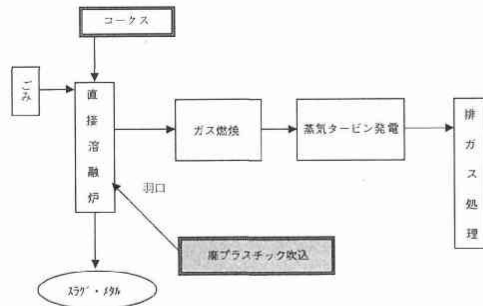


図9 廃プラスチック吹き込みフロー図

$$\text{ごみ処理単価} = \frac{\text{資本費} + \text{ランニングコスト} - \text{売電収入 (円)}}{\text{年間ごみ処理量 (t)}}$$

以下にFS検討結果を述べる。

(1) 個別トータルシステムの検討

主な検討条件を表2に、試算結果を図10に示す。

表2 主な検討条件

ごみの種類	一般ごみ(2100kcal/kg、水分 42%)
排ガス処理系統	バグフィルタ、脱硝装置を設置し、バグフィルタ入口温度: 150℃~180℃ 脱硝入口温度: 200℃~210℃とする。
蒸気条件	400~3.92MPa (40ata) をベースとして、開発技術を適用した場合と比較する。
年間利用率	80%

5. FS検討結果

前述の要素技術開発の成果をもとに、実機規模でのFSを実施した。実施したFSは以下の2とおりである。

① 個別トータルシステムの検討

各要素技術を単体で適用した場合のFS

② 最適トータルシステムの検討

各要素技術を組み合わせて最高効率を狙ったFS

評価は、蒸気条件400℃×40 ataで、従来技術のみのプラントをベースとして、開発技術を適用した場合と比較することにより行った。比較する項目は、性能面に関しては「発電端効率」、「送電端効率」、経済性に関しては「ごみ処理単価」である。

ごみ処理単価は以下のとおり定義する。

ここでは600 t/d (トン/日)、空冷復水器での検討結果を述べ、規模依存性は後述する。

① 高温除塵装置による高効率化

セラミックフィルタを採用し、蒸気条件を500℃×100 ataとすることにより、発電端効率、送電端効率とも大きく向上する。経済性も、従来技術より若干改善される。

② 脱塩素化技術による高効率化

脱塩素化技術を採用し、蒸気条件を500℃×100 ataとすることにより、発電端効率、送電端効率とも大きく向上する。

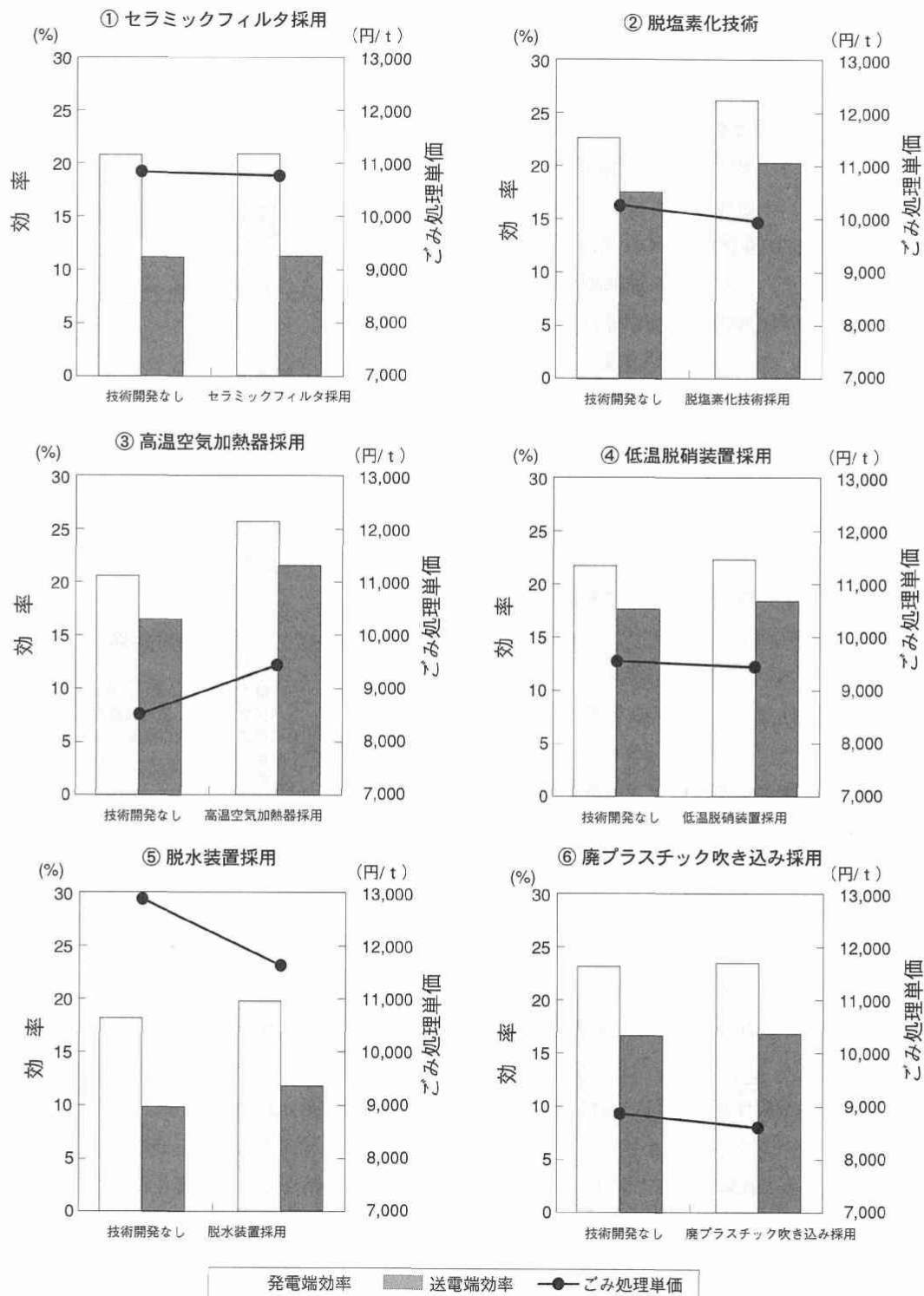


図10 個別トータルシステム検討結果 (600t/d, 空冷復水器)

脱塩素化により効率向上が図れることに加え、Alloy 825等の比較的安価な材料の使用が可能となること、さらに設備費がほとんど増加しないため経済性は大きく向上する。

③ 高温空気加熱器による高効率化

高温空気加熱器を採用し、蒸気条件を $500^{\circ}\text{C}\times 100\text{ ata}$ とすることにより、発電端効率、送電端効率とも大きく向上する。

経済性は若干悪化する。これはセラミック管の単価の影響よりも、蒸気条件上昇によるボイラ耐圧部等のコストアップによるものである。

④ 低温脱硝装置による高効率化

低温脱硝装置を採用し、 210°C の脱硝入口温度を 170°C にすることにより、発電端効率、送電端効率とも若干向上する。ラボ試験では脱硝入口温度 150°C で75%の脱硝効率を得られているが、実機採用となると諸条件の見直しが必要でFSでは 170°C とした。

効率の向上はそれほど大きくないが、脱硝設備自体のコストアップはほとんど無く、経済性は若干向上する。

⑤ 脱水装置による高効率化

機械式脱水システムは40%程度までの脱水が限界であるため、ここでは分別ごみ(1,700 kcal/kg, 水分46.2%)を用いて試算を行った。ベースプラントは乾燥機で前処理を行うものを想定し、その場合の乾燥機出口のごみ水分を20%とした。

脱水装置の採用により、発電端効率、送電端効率とも2%程度向上する。効率の向上は、脱水機の採用で乾燥に使用する排ガスが不要となるためボイラ効率が上昇し、それにより発電端効率も上昇したことによるものである。また、効率向上が図れることに加え、設備費

も減少することから経済性は大きく向上する。

⑥ 廃プラスチック吹き込み技術による高効率化

廃プラスチック単価は10円/kg、コークス単価は22円/kgとして試算を行った。また、廃プラスチック吹き込み量は試験結果より20 kg/ごみtとした。

廃プラスチック吹き込み技術を採用することにより、シャフト炉内での燃焼効率が上がり、空気比を低下させることができるため排ガス損失が低減し、発電端効率、送電端効率とも0.5%程度向上する。

設備費は若干増加するが、廃プラスチックの価格がコークスに比べ安いいため経済性は大きく向上する。

(2) 最適トータルシステムの検討

本技術開発で開発した各要素技術のうち組合せ可能なものを検討し、最高効率を達成するシステムを検討した。先にも述べたとおりメーカー6社はそれぞれ独自のガス化溶融システムを持っており、それぞれに適合する技術開発を行ったため、すべての開発技術が互いに流用可能と言うわけではない。ここでは、その1例を紹介する。

主な検討条件を表3に、検討結果を図11に示す。これは、三菱重工業の流動床ガス化溶融システムに脱塩素化技術を適用し、さらに川崎重工業で開発した低温脱硝装置を組み合わせたものである。さらに高効率を狙うため、復水器を水冷式にした。その結果、発電端効率は31%と、当初目標であった30%以上を達成することができた。また、送電端効率も26%と非常に高い値となった。

本稿では紹介していないが、各社それぞれの

表3 最適トータルシステムの主な検討条件

	従来システム	最適システム
ごみ処理規模	600t/d	
システム構成	流動床式ガス化溶融システム	流動床式ガス化溶融システム + 脱塩素化技術 + 低温脱硝装置
蒸気条件	400℃×40ata	500℃×100ata
脱硝装置入口温度	210℃（従来型脱硝装置）	170℃（低温脱硝装置）
復水器形式	空冷復水器（排圧 0.2ata）	水冷復水器（排圧 0.05ata）

ガス化溶融システムも、蒸気条件を500℃まで上げ、低温脱硝装置を用い、復水器を水冷式とすることにより発電端効率30%を、ほぼ達成することができる。

経済性に関しても、高効率化による売電収入の増加が設備のコストアップ分を上回るため、図のとおり従来システムを大きく上回る。

（3）規模依存性及びストーカ炉との比較

ごみ処理規模による性能、及び経済性に関して灰溶融設備付のストーカ炉と比較したものを図12、図13に示す。復水器は空冷式で試算を行っている。また、建設単価は同規模のストーカ炉、ガス化溶融炉では同等とした。

発電端効率、送電端効率とも同一条件で比較した場合、ガス化溶融炉は灰溶融設備付のストーカ炉を上回る。とくに送電端効率は、ガス化溶融炉では灰溶融設備での電力消費がないため、ストーカ炉との差が大きい。また、両者とも蒸気タービンによる発電を行っているため、小規模になるほど効率は低下する。

経済性に関しても、ガス化溶融炉は送電端効率が高いため、ストーカ炉を大きく上回る。

6. まとめと今後の課題

（1）個別トータルシステム

開発技術を単独で用いた場合、蒸気温度上

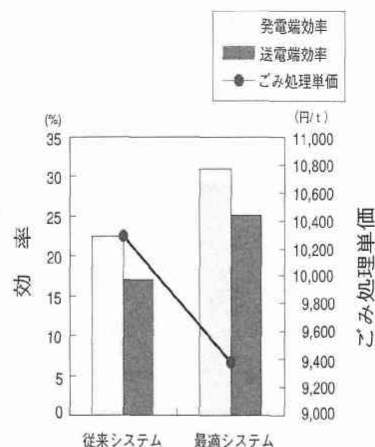


図11 最適システム試算結果例

昇により600 t/d規模、空冷復水器の場合で発電端効率は26%程度、送電端効率は20%程度まで向上することができる。

経済性は、ほぼ開発技術の適用により、従来の蒸気条件の場合、従来技術を上回る。しかし、蒸気条件を上げた場合、ボイラ耐圧部など技術開発部分以外のコストアップにより経済性が悪化するケースも見られた。その場合もスケールアップにより若干の経済性向上が図れる。

（2）最適トータルシステム

他社開発技術を組み合わせ、水冷復水器を用いることにより目標である発電端効率30%を達成した。本稿で紹介した例のように、送電端効率でも、26%を達成する組み合わせもある。経済性では、上述のとおり蒸気条件を向上させるためのコストアップにより悪化するケースも見られたが多くの場合改善される方向であった。ベースとなるプラントは各社のノウハウにかかる部分であり、各社の単純比較はできないが、目標発電端効率を30%とする技術開発の適用による効率向上と経済性

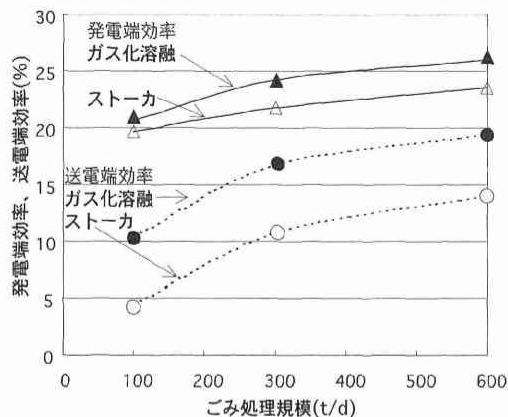


図12 ストーカー炉との性能比較

成立という目標はほぼ達成できたものと考え
る。

(3) ストーカー炉との比較

灰溶融設備付ストーカー炉と比較した場合、600 t/d程度以下のごみ処理規模では性能面、経済性の両面においてガス化溶融炉に優位性があることが分かった。灰溶融設備付ストーカー炉では灰溶融に外部エネルギーを必要とするため発電量のうち自家消費する所内率が高く、特に小規模になると送電端効率が極端に低下する。従って、小規模になるほどガス化溶融炉の優位性が大きくなる。

600t/d以上の大規模プラントになると、両方式ともスケールメリットが出てくるが、もし同一スケールでの大型化が可能であれば、ガス化溶融炉の経済性はさらに良くなると思われる。しかし、現在実用化されているもの、あるいはメーカーで検討しているところによれば1炉あたりの最大容量は200～300t/d程度が限界であり、大型施設ではストーカー炉の採用が現実的であると考え。

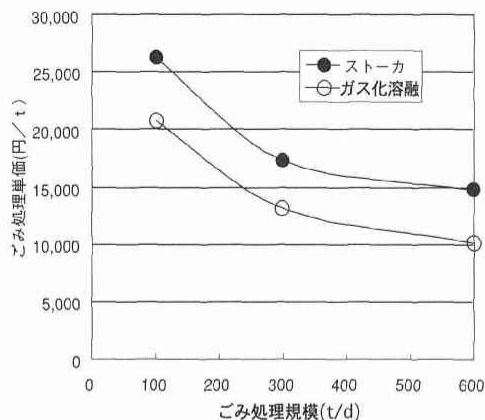


図13 ストーカー炉との経済性比較

(4) 今後の課題

今後の課題をまとめると以下のとおりとなる。

① 経済性

蒸気温度上昇のための技術開発では、その適用により経済性が悪化するものがあつた。しかし、FS検討結果から明らかなように、効率向上のためには蒸気温度上昇が最も効果的であり、発電端効率30%達成のためには蒸気条件向上は必須である。従って、経済性の悪化はある程度避けられない問題であると思われる。施設の大規模化による経済性向上を図ること、または高効率廃棄物発電による二酸化炭素削減効果を経済面に反映させる方策等も考える必要がある。

経済性を向上させるには、送電端効率の向上、すなわち高効率化、設備費及びランニングコストの削減が必要である。本技術開発の各要素技術はいずれも消費電力を大幅にアップさせるものではない。各社試算の送電端効率のばらつきはそれぞれのプラントシステム独自のもので、本技術開発とは直接的には関係ない部分であるが、経済性を向上させるた

めには、今後所内電力を削減するための方策も検討する必要がある。

② 小規模施設の高効率化

ガス化溶融発電システムは、600t/d規模では発電端効率30%を達成し、経済的にも性能面でもストーカ炉などの従来型発電システムを上回る可能性を有している。一方、約200t/d以下の小規模でも従来型発電システムを上回ることが、蒸気タービンにより発電を行っていることから従来型発電システムと同様、効率が悪く、経済性は大規模施設と比べ良くない。今後、約200t/d以下の規模で高効率発電を行い、例えば、ガスエンジン発電によるガス変換システムなど経済性にも優れた廃棄物発電システムの検討が必要であろう。

(5) 実用化にむけて

日立造船の脱水機は、本技術開発で使用した二軸式とはタイプの異なる一軸式であるが、実機への採用が決定している。そこでの運転結果から今後、二軸式脱水機が採用されていくものと思われる。また、荏原製作所の高温空気加熱器は、現時点では蒸気発生を目的としたものではないが、燃焼空気加熱用の高温空気加熱器も実機への採用が決まっており、今後高効率発電用の空気加熱器が採用されていく可能性がある。川崎重工業の低温脱硝装置は、既に185℃での実機運転が確認されており、さらに低温での実機運転により耐久性を見極めていくものと期待される。

実証試験期間が短期間であったため、SH材料や脱硝触媒の寿命評価などについては、さらに長時間の試験を行う必要がある。FSである程度の仮定の下に試算を行ってはいるが、より正確な試算を行うため、また実用化のた

めにはさらなる実証的検討が必要である。

7. おわりに

ガス化溶融システムは、近年急速にその導入が進んできている。発電設備の無いものを含めたごみ焼却施設の2000年度受注のうち約半数がガス化溶融炉という状況である。今後その役割はますます大きくなっていく可能性がある。本技術開発が活かされ、高効率ガス化溶融発電プラントの早期実用化が進むことを期待するものである。また、本稿では紹介しなかったが、本技術開発の一環として「廃棄物ガス変換技術」に関するFSも実施してきた。これは、特に小規模プラントでの発電効率の改善を狙ったものであるが、別途報告したいと考えている。

謝辞

本稿作成にあたり、情報提供あるいは資料利用に対してご理解をいただいた経済産業省及びNEDO、協力メーカーの関係者に誌面を借りて深甚の謝意を表します。また、「ガス化溶融発電技術開発評価委員会」で適切な意見を頂きました平岡正勝立命館大学エコ・テクノロジー研究センター長をはじめ、各委員の皆様にも感謝申し上げます。

参考文献

- (1) エネルギー総合工学研究所：「新エネルギーの展望 廃棄物発電（その3）」廃棄物ガス化溶融発電（1999年3月）

電気二重層キャパシタを用いた 高効率電力貯蔵システム

蓮 池 宏 (財)エネルギー総合工学研究所
プロジェクト試験研究部 主幹研究員)
山 岸 政 章 (株)パワーシステム
代表取締役社長)



1. はじめに

電力は使い勝手の非常に良いエネルギーであるが、貯蔵が容易でないことが短所の1つとされている。電力を貯蔵する技術としては、大規模なものは揚水発電が、小規模なものは二次電池が実用化されているが、より一層の高効率、コンパクト性、汎用性を求めて各種の技術開発が行われている。特に、電力需要の昼夜較差を平準化する電力負荷平準化システムへの適用に向けては、新型二次電池、圧縮空気貯蔵、海水揚水発電、地下揚水発電、フライホイール、超電導マグネットなど多くの技術が研究されている。

電気二重層キャパシタ（以下、誤解を生じないと思われる場合は単に「キャパシタ」と記す）は、充放電効率が高い、耐久性が優れている、メンテナンスが容易という特徴から、新しい電力貯蔵技術として注目されている。

（財）エネルギー総合工学研究所と（株）パワーシステムは、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）からの委託により「負荷平準化用キャパシタシステムの実証調査」を平成9～11年度に実施し、キャパシタの負荷平準化用電力貯蔵システムへの適用可能性を実証・検討した。このうち、平成9年度の成

果については季報『エネルギー総合工学』第21巻第4号に報告している⁽¹⁾。本稿では、「負荷平準化用キャパシタシステムの実証調査」の3年間の成果⁽²⁾に加えて、平成12年度に引き続き実施した同調査の「フォローアップ研究」における成果⁽³⁾を含めて紹介する。

2. 電力貯蔵システムの構成

負荷平準化用キャパシタシステムの実証調査（以下「実証調査」）では、平成9年度における単セルの製作、平成10年度におけるモジュールの製作を経て、平成11年度に出力2kW、貯蔵容量4kWhの電力貯蔵システムを製作した。製作した電力貯蔵システムの諸元を表1に、回路構成を図1に、外観を図2に示す。

表1 電力貯蔵システムの諸元⁽²⁾

項 目	諸 元
定格電圧	216V (DC)
総蓄電容量	5,760Wh (DC)
利用可能電力量	4,300Wh (AC)
外形寸法 (バンク)	637(W)×1118(H)×793(D)mm
体 積 (#)	565 L (liter)
エネルギー密度 (#)	10Wh/L
交直変換器 AC 出力	100V±10%, 50/60Hz, 2kW

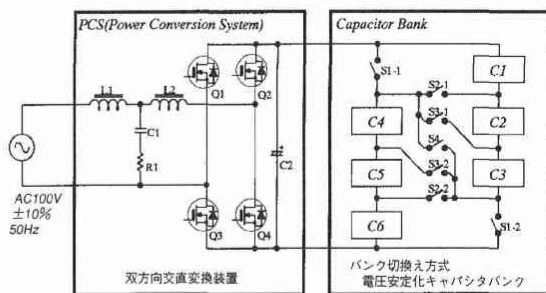


図1 電力貯蔵システムの回路構成図

図1に示したように、本システムは商用電力の貯蔵を想定して双方向の交直変換装置までを含んだ構成となっている。システムの総蓄電容量は5.8kWh（DC）であり、放電深度（0.88）、インバータ効率（0.95）、マージン（0.9）を加味した交流端での利用可能電力量は4.3kWhである。

電力を貯蔵するキャパシタバンクの構成としては、まず1個18Whの容量のセル10個で1個のモジュールを構成し、モジュール32個でバンクを構成している。32個のバンクは6個のブロックに分かれており（図1のC1～C6）、充放電の途中でスイッチ（図1のS1-1～S4）を開閉してブロックの直並列を切り替える仕組みになっている。これは、バンクの電圧変動を一定範囲内に抑えるためのものであり、その動作は次項で示す。

本システムに用いた単セルの諸元を表2に、外観を図3に示す。また、単セルを10個収納したモジュールの外観を図4に示す。単セルにおける16.6Wh/Lというエネルギー密度は、二次電池に比べれば高い値ではないが、電気二重層キャパシタとしては画期的な性能である。この単セルを、平成9年度に37個、10年度に150個製作し、自己放電、温度特性、繰り返し充放電などの試験を行った。そして平成



図2 電力貯蔵システムの外観⁽²⁾

11年度に製作した320個を電力貯蔵システム用に供した。

電気二重層キャパシタを直列接続する場合、システムの最大電圧を〔単セル最大電圧×直列接続数〕の70%程度に抑えることが、過去にはしばしば行われてきた。これは、直列接続した各セルへの電圧配分が一般には均一にならないことから、印加電圧に余裕を持たせてセルを保護するためである。その結果、蓄えられるエネルギー（最大電圧の2乗に比例）は減少することになっていた。これに対し本システムでは、並列モニタ⁽⁴⁾と呼ぶセル電圧制御回路（図4の黒い蓋に取り付けられている）を各セル毎に設けることによって、〔単セル最大電圧×直列接続数〕までの充電を可能にしている。これにより、全てのセルの蓄電容量を無駄なく利用することが可能になる。

表2 単セルの諸元

項 目	諸 元
静電容量	18,700 F
最大電圧	2.7 V
体 積	1.13 L (liter)
エネルギー容量	18.8 Wh
エネルギー密度	16.6 Wh/L
正規化内部抵抗	108 ΩF

注：諸元値は平成11年度製作の320個の平均
静電容量はエネルギー換算法による

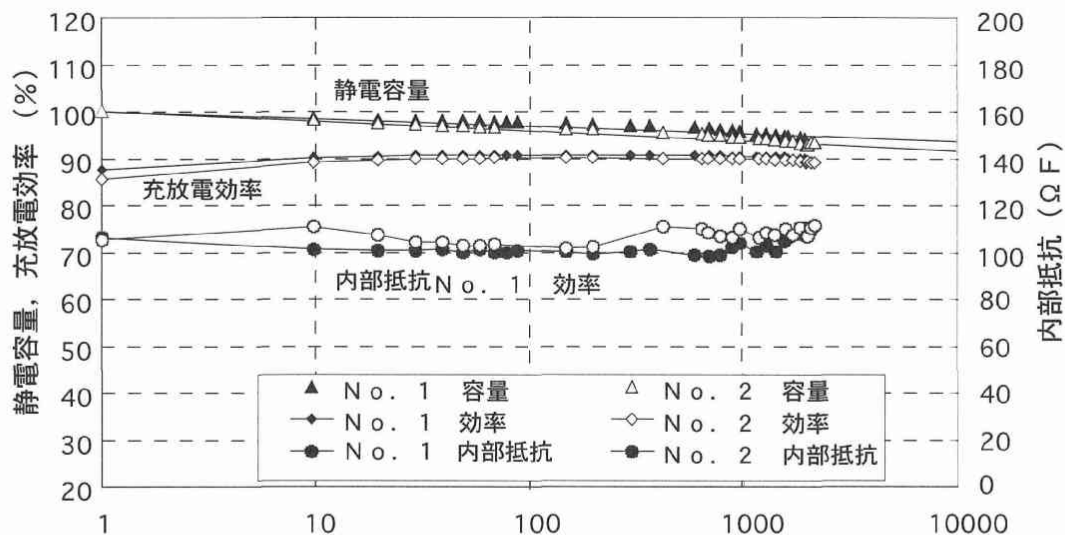


図5 単セルの充放電サイクル試験結果⁽³⁾

たデータからは、1万サイクルでの容量低下は9～10%程度と試算される。

この他の単セル試験としては、自己放電率と温度特性を測定した。自己放電率については、20℃における72時間の自己放電は、満充電でのエネルギー容量の12～16%であり、20%/72時間と設定していた目標性能値はクリアした。ただし、充放電サイクルが数時間以上もある負荷平準化システム用には必ずしも満足できる性能ではない。充電8時間、放電4時間という条件では、損失全体に占める割合は、内部抵抗によるオーム損失より自己放電による損失の方が大きくなってしまう。「実証調査」で製作したセルは自己放電の低減について特別な注意は払っていなかったため、試験後に別途検討を行っており、自己放電特性の大幅な改善が可能との見通しを得ている。

温度特性については20℃を基準として10℃での容量低下はわずか1%、-10℃でも8%減、という結果が得られた。低温時は内部抵

抗が増大するが、電流が流れれば抵抗による損失分が熱に変わってセルの温度を上げる。このことを考慮すると、キャパシタは少なくとも-10℃程度までは強制的な加温装置は不要であると考えられる。

(2) 電力貯蔵システムの試験結果

電力貯蔵システムの充放電サイクル試験は、「実証調査」では50サイクル、「フォローアップ研究」では運転条件を若干変更して270サイクル実施した。図6は「フォローアップ研究」における結果をまとめたものである。キャパシタバンクの充放電効率(DC-DC)は、初回の96%から始まり、94～91%と漸減している。これに対して、交直変換装置の効率はキャパシタバンクへの充電が約95.5%、放電が約96.5%と一定である。この結果、総合効率(AC-AC)は、初期に88%を記録し、その後ゆるやかに86.5%～83.5%へと推移している。総合効率で85%以上という値は、二次電池に

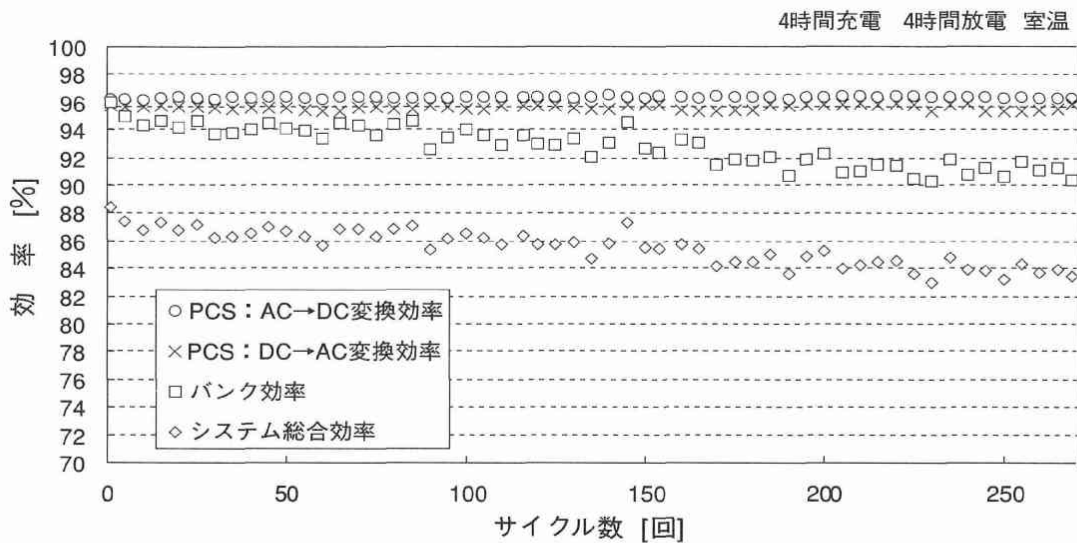


図6 電力貯蔵システムの充放電効率⁽³⁾

よる電力貯蔵システムより10ポイント程度高い値であり、AC-ACの実証値としては、筆者らの知る限り、各種電力貯蔵技術の開発の歴史のなかで最高の値である。

そして、この効率はさらに向上する可能性がある。単セルの試験結果で述べたように、自己放電の低減については改善の余地が大きく、自己放電特性を改善したセルを用いれば、AC-ACで90%を超える値も実現可能であると

予想される。

なお、バンク効率が徐々に低下しているのは、容器のシールに問題があったためと考えられる。この点については、次項で詳述する。

図7は、充放電におけるキャパシタバンクの電圧変化である。前項で述べたブロックの直並列の切り替えが充電・放電の過程で3回ずつ行われている。図8はブロックの直並列切り替えの模式図である。充電開始時はmode-

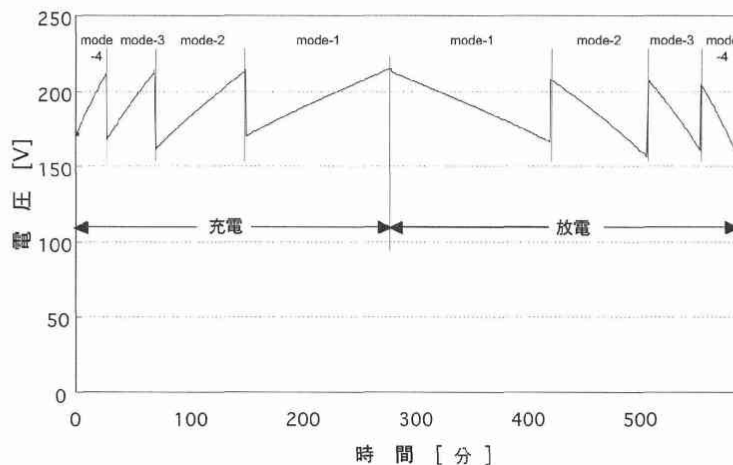


図7 キャパシタバンクの直流端電圧⁽³⁾

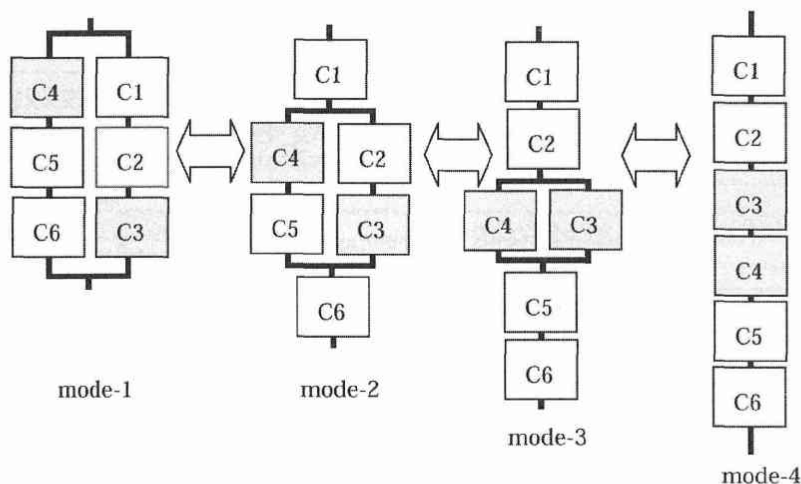


図8 ブロックの直並列の切り替え⁽²⁾

4の状態にあり、充電が進んで総電圧が一定値に達するとmode-3、mode-2と切り替わり、最終的にはmode-1の状態になる。そして、放電時は逆の経路を辿る。

これまで、電気二重層キャパシタは電圧変動が大きいため二次電池に比べて交直変換器のコスト・効率の面で不利になるという懸念があったが、セルの直並列数を切り替えることにより、効率、コスト等の大きな犠牲なしに二次電池と同じ程度の電圧変動範囲（図7では中央値±15%）に収めることが可能になった。この電圧カーブはサイクル試験の終了まで全く崩れを見せず、ブロックの直並列切り替えが健全に動作することが確認された。

また図7では、仕様どおり〔単セル最大電圧×直列接続数〕の216Vまで充電が行われていることも確認できる。

（3）電力貯蔵システムの試験中止の原因と対策

フォローアップ研究における電力貯蔵システムの充放電試験は、270サイクル目に一部の

モジュールの電圧が定格まで上昇しなくなり、運転を停止した。調査の結果、電圧が上昇しなくなった原因は、1個のキャパシタモジュール内の並列モニタ回路が、電解液の漏洩によってショートしたためであった。モジュール内の各セルには漏液以外に異常はなかった。

単セルの試験では2,200サイクルまで充放電効率の低下はわずかであった（図5参照）のに対し、システムの試験では200サイクル程度でもキャパシタバンクの充放電効率が明らかに低下してきていた（図6参照）が、これは、漏液した箇所からの水分の混入により電解液の分解が起こり内部抵抗が増加したためと推測される。

従来の電気二重層キャパシタには、アルミニウム製のハードケースが一般に使われてきた。この方式は先行例が豊富で失敗のない無難な選択であり、採用していれば漏液は防止できた可能性が高い。しかしながら「実証調査」では、高エネルギー密度の確保、将来的なコスト低減の可能性などを重視してキャパシタ用としては先行実施例が乏しい熱融着多

層ラミネートフィルム容器をあえて採用したという経緯がある。

単セルの充放電サイクル試験では2,200サイクルまで健全であったラミネートフィルム容器が、システムの試験では漏液を生じたことについては、複数のセルをモジュールに組み上げる際にシートの折り曲げ部分へ機械的ストレスがかかったことが影響していると推測される。なお、多数のセルを接続して使用している中で一部のセルに過大な電圧が印加された可能性も検討したが、電圧制御の異常は発見されず、制御システムは設計どおり正常に動作していたと考えられる。

原理的に電気二重層キャパシタは充放電に伴う劣化が非常に少ないが、現実のキャパシタシステムではセルの容器の良否がその耐久性に大きく影響し、信頼性を左右する重要なポイントであることが明らかになった。

「実証調査」においてラミネートフィルム容器を用いたセルおよびモジュールを多数製作した経験をもとに、この方式の改良研究は現在も継続している。フィルムの厚さ、包み方（角での折り曲げの処理）、シール技術などの再検討を行い、250cc程度の小型セルでは、モジュールに組み上げた状態で振動試験に耐え、高温負荷試験では70℃で1,000時間以上をクリアしている。そして、更なる長期使用を想定して技術の改良を進めている。

こうした実績は、本研究に用いたような大型セルとそのモジュールに対しても適用が可能であり、次の製作の機会には格段に進歩したラミネートフィルム容器の耐久性と信頼性を実証できると考えている。そして、多層ラミネートフィルム容器を用いた場合のモジュール単位での耐久性・信頼性の問題が解決さ

れれば、キャパシタシステムとしても単セルで達成された2,200回以上のサイクル寿命を達成し、充放電効率も初期値とほとんど変わらない値を維持することが十分に可能と考えられる。

4. エネルギー密度向上の研究

ー第二世代の炭素材料の利用ー

電力貯蔵システムに用いたセルのエネルギー密度16.6Wh/Lは、従来の電気二重層キャパシタのエネルギー密度2～3 Wh/Lと比較すれば格段の進歩であった。しかしそれでも二次電池と比較すれば、ようやく下の端に手が届いたレベルである。エネルギー密度の向上は、設置スペースの節約とコスト低減の二つの観点からキャパシタにとって最も重要な技術課題であり、追究を続けていく必要のあるテーマである。

電気二重層キャパシタの電極には、システムの実証用に用いた16.6Wh/Lのセルも含めて、従来から活性炭が用いられてきた。活性炭の多孔性と巨大な細孔面積は電気二重層キャパシタの電極として非常に適している。しかし、活性炭の表面に存在する官能基と活性炭自体がもたらす化学的活性が、電気二重層キャパシタを構成したときの電解液の分解電圧を低下させ、電圧を高めたとき寿命を制約する要因となっている。

こうした背景から活性炭以外の材料の研究が種々行われているが、そのなかで岡村ら⁽⁵⁾⁽⁶⁾が発見した「活性化された非多孔性炭素」を用いた分極性電極は、従来の活性炭電極では到達できなかった静電容量密度と耐電圧が得られることが実証されている。

この「非多孔性炭素」の出発原料としては種々の炭素材料、たとえば石油コークス、石油ピッチ、メソフェーズカーボン、あるいは不融化した塩化ビニールなどを用いることができる。これらの原料をあらかじめ800～900℃で炭素化し、さらに活性炭製造における水酸化カリウム賦活と同様な処理を加える。ここで得られる材料は800m²/g以下と活性炭とは呼べない小さな比表面積となる⁽⁷⁾。

キャパシタへの適用は、活性炭粉末の場合とはほぼ同様にシート化して分極性電極に用いる。電解液も従来と同じ有機電解液が利用できる。変わっているのはその先で、完成したキャパシタを充電すると、最初の充電で電圧が加わるとともに電極が極端に（何の処置もしなければ1.5～3倍に）膨張する。これは実用上困るので、外部から力を加えて膨張を抑える。電圧の上昇とともに膨張圧力が増加し、同時に静電容量が増大していく。その状況を図9に示した。非多孔性炭素による電気二重層キャパシタの特徴は、電極材料の官能基などによる触媒的な作用が活性炭に比べて低いため、耐電圧が高く得られる点にある。また、静電容量密度も非多孔性炭素の方が大きく得られる。

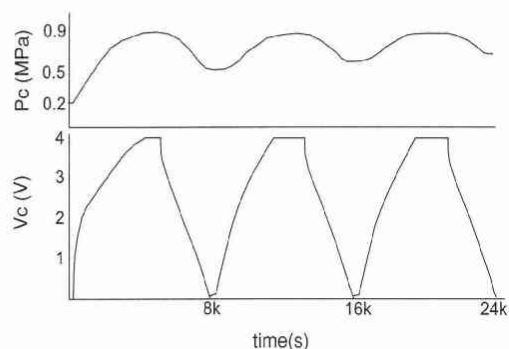


図9 新しい炭素材料を用いたキャパシタの充電サイクルと圧力⁽⁶⁾

表4 新しい炭素材料を用いたキャパシタの諸元⁽²⁾

項目	諸元
静電容量	3,464 F
最大電圧	3.2 V
体積	0.183 L (liter)
エネルギー容量	4.81 Wh
エネルギー密度	26.7 Wh/L
正規化内部抵抗	42 Ω F

注：静電容量はエネルギー換算法による



図10 新しい炭素材料を用いた高エネルギー密度キャパシタ

「実証調査」ではこの炭素材料を用いて180ccの単セルを製造した。表4に諸元を、図10にセルの写真を示す。エネルギー密度は、26.7Wh/Lという従来の電気二重層キャパシタの常識を覆すような値が得られた。

一方、実験室レベルの研究用セルとしては、電極対の端子間電圧と静電容量で3.5V、33F/mLという性能が得られている⁽⁷⁾。この電極性能をもとに実現できるセルのエネルギー密度を計算すると、セパレータなどを除いた電極有効体積を90%、「実証調査」での積層フィルム容器による18kF大型セルの実績から充填率を90%と仮定すると、45.5Wh/Lの実用セルが得られることになる。45.5Wh/Lという値は純粋な電気二重層キャパシタのエネルギー密度としては前代未聞であり、「実証調査」

の電力貯蔵システムに使用したセルのエネルギー密度16.6Wh/Lの3倍近くに達している。このような高いエネルギー密度はキャパシタ蓄電システムの設置スペースの節約になり、エネルギー効率と寿命に優れた二次電池の代替として応用分野の拡大をもたらすばかりでなく、蓄電容量当りの総てのコストを現行のはば3分の1にするというコスト低減効果も大きい。

非多孔性炭素の研究の初期段階では、最高の性能が得られる条件がデリケートで、炉内の昇温などの条件が一樣にならないと一樣な特性が得られずバルクとしての性能が低下するなどの課題があった。しかし、その後の研究⁽⁷⁾により、研究室レベルでは再現性よく高性能の非多孔性炭素を作ることが可能となっている。しかしながら、その収量は一回あたり数グラム程度なので、作ることができるのは研究用コイン状セルにとどまり、この材料を用いて大型セル、ましてや電力貯蔵システムを製作することは困難である。さらに、この材料の製造技術を商業生産レベルまでスケールアップするには2～3段階の開発ステップを経る必要があり、研究投資にはリスクを伴うため現状では民間ベースの開発はなかなか進まない状況にある。キャパシタの広範

な利用（これは電力貯蔵の高効率化をもたらす）にとってこの新しい炭素材料は重要な鍵を握る技術になると考えられるので、公的な研究プログラムも含めて今後の開発の進展が期待される。

5. 電気二重層キャパシタの用途および競合技術との比較

前項までに紹介したように、キャパシタによる電力貯蔵システムは、ベンチスケールのプラントの実証により基本的に優れた特性を有していることが確認され、セル自体の高エネルギー密度化も有望な技術シーズが育ってきている。

以降、キャパシタ電力貯蔵技術の実用化の方向を展望してみる。

電気二重層キャパシタを用いた電力貯蔵システムは、接続する単セルの数を変えることで、小規模なものから大規模なものまで自由に設計できる。また、ベンチプラントに用いた単セルは、標準的な放電時間（内部抵抗損失が5%となる放電時間）を1時間として設計されているが、この標準放電時間は、セル構造を変えることにより最短6秒程度までの間で設定でき、各用途に合わせた最適設計が

表5 電気二重層キャパシタにより構築可能な電力貯蔵システムの例

	最大出力	定格放電時間	貯蔵容量
揚水発電代替システム	30 万 kW	8 時間	240 万 kWh
周波数調整システム	3 万 kW	30 秒	250kWh
独立型太陽光発電バックアップシステム	5kW	50 時間	250kWh
ハイブリッド自動車用蓄電システム	30kW	30 秒	0.25kWh

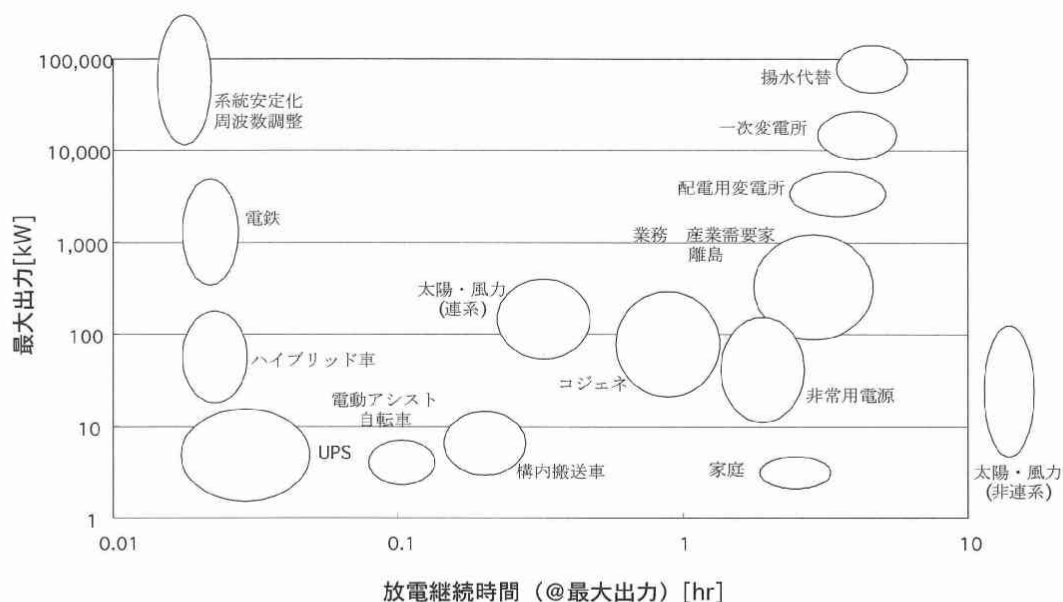


図11 電気二重層キャパシタの用途

可能である。

上記の特性から、たとえば表5に示すような種々の電力貯蔵システムを構築することが可能である。この他、図11に示すように、大規模から小規模まで、長時間放電型から短時間放電型まで、電気二重層キャパシタは様々な仕様の電力貯蔵システムに適用できる。

各種用途のうち電力負荷平準化に利用でき

る、定格放電時間が数時間程度の電力貯蔵システムに関して、各種技術を比較したのが表6である。

電気二重層キャパシタは、充放電効率と寿命が競合技術に比べて最も優れている。エネルギー密度は電気二重層キャパシタの短所であるが、揚水発電（の貯水池）に比べれば1桁大きく、一部の二次電池とは肩を並べるレ

表6 電力貯蔵技術の比較

	効率 (%)	寿命 (サイクル)	エネルギー密度 (Wh/L)
揚水発電	65～70	>10,000	～1
鉛電池	75～80	1,500	～30
NAS 電池	75～80	2,500	～80
レドックスフロー電池	70～75	>10,000	～20
リチウムイオン電池	80～85	3,000 (目標)	～120
電気二重層キャパシタ	85～	>100,000	10

注：定格放電時間 6～8 時間程度のシステムを想定し、効率とコストはシステム全体、エネルギー密度は電力貯蔵部分のみ（＝電力変換装置を除く）を考慮した。

ベルに近づいている。もう1つ重要な評価要素であるコストに関しては、ほとんど手作りの試作段階にあるキャパシタは、現状では二次電池より高価である。電気二重層キャパシタのコスト低減の見通しに関しては次項に述べる。

6. 実用化のシナリオ

電気二重層キャパシタによる電力貯蔵装置の実用化のためには、コストの低減が最大の課題となる。コスト低減のシナリオは表7のように考えている。

本調査で製作したキャパシタのコストは貯蔵容量1Wh当たりで約10,000円（製作予算と製作したシステムの容量との比）であり、負荷平準化用システムとして実用化されるためのコストの目安60円/Wh⁽²⁾とは2桁以上の開きがある。

ただし、現状のコストは手作りで製造した結果であり、連続生産が始まれば1桁程度の

コスト低減は比較的容易に実現できると考えられる。幸い、無停電電源（UPS）用途やハイブリッド自動車（HEV）用途では実用化に要求されるコストレベルが負荷平準化システム用より高く（UPSで3,000円/Wh，HEVで1,000～500円/Whと推定），ハイブリッド車については昨年（2000年）から複数の商品化計画が報道されている⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。ハイブリッド自動車用としての量産が始まれば、原料単価の低減が進み、負荷平準化システム用のコスト低減にも反映されるであろう。

しかし、量産化だけでは60円/Whまでのコスト低減は困難と予想される。そのレベルを実現するためには、一層のエネルギー密度向上が必要である。単純に考えて、例えば単セルの重量・体積が一定でエネルギー密度が2倍になれば、必要なセル数が半減し、材料費も組立費も半減することになる。

4項に述べたように、実験室レベルでは、今回のベンチプラントに用いたセルの約3倍のエネルギー密度が実現できる可能性が確認

表7 コスト低減のシナリオ

単 価 (円/Wh)	～10,000 → 1,000 ～2,000 → ～200 → ～60			
コスト低減 要因	製造方法の改善 小規模連続生産		自動生産 原料単価低下 エネルギー密度向上	大量生産
用 途	UPS 用実用化 実験・研究 HEV 用実用化 試験的導入 自家発電電力安定化用実用化 風力併設実証 → 風力併設実用化 LL 中規模実証 → LL 実規模実証 → LL 実用化			

注 UPS：無停電電源装置，HEV：ハイブリッド電気自動車，LL：負荷平準化

されており、継続的な研究開発により、低コストで量産可能な高エネルギー密度キャパシタの実現が期待される。

7. まとめ

以上、4年間にわたる「実証調査」と「フォローアップ研究」の成果をまとめると次のとおりである。

- ① キャパシタ電力貯蔵システムは他の電力貯蔵技術と比較して明らかに高効率であることが実証された。
- ② 単セル試験において長寿命を示唆するデータが得られた。
- ③ 従来の電気二重層キャパシタに比べてエネルギー密度の大幅な向上が達成された。
- ④ 多数のセルを直列接続した場合でも、全てのセルを最大電圧まで充電できることが確認された。
- ⑤ 多数のセルから構成されるバンクにおいて、充放電に伴う直流電圧変動を一定範囲内に収めることができた。
- ⑥ 自己放電率や容器の耐久性などの課題が明らかになったが、これらについても改善の見通しが得られた。

今後、効果的な研究開発や実証試験が着実に実施されていけば、2005年頃までには図11に示した多くの用途で、電気二重層キャパシタを用いた高効率・長寿命な電力貯蔵システ

ムが実用化されるであろう。

本稿の大部分の内容は、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）からの委託による「負荷平準化用キャパシタシステムの実証調査」（平成9～11年度）、ならびに引き続き実施した同調査の「フォローアップ研究」（平成12年度）において得られた成果である。

参考文献

- (1) 伊久美, 電気二重層キャパシタによる電力貯蔵技術, 季報エネルギー総合工学, 第21巻, 第4号, 1999
- (2) エネルギー総合工学研究所, 負荷平準化用キャパシタシステムの実証調査, 平成9～11年度成果報告書, 2000
- (3) エネルギー総合工学研究所, パワーシステム, 負荷平準化用キャパシタシステムの実証調査のフォローアップ研究成果報告書, 2001
- (4) 岡村, 電気二重層キャパシタと蓄電システム (第2版), 日刊工業新聞社, 2001
- (5) M.Takeuch, T.Maruyama, K.Koike, A.Mogami and M.Okamura, Denikagaku, 66, No. 12, (1998) 1311-1317
- (6) 岡村, 清水, 山岸: 信学技報, Vol. 98, No. 279, (1998) 25-32
- (7) 竹内, 丸山, 小池, 最上: 非多孔性炭素を用いた高容量電気二重層キャパシタ, 電気化学会大会, 2000.3, 1G27
- (8) 日経産業新聞, 2000年6月22日
- (9) 日刊工業新聞, 2000年9月28日
- (10) 日刊工業新聞, 2000年10月31日

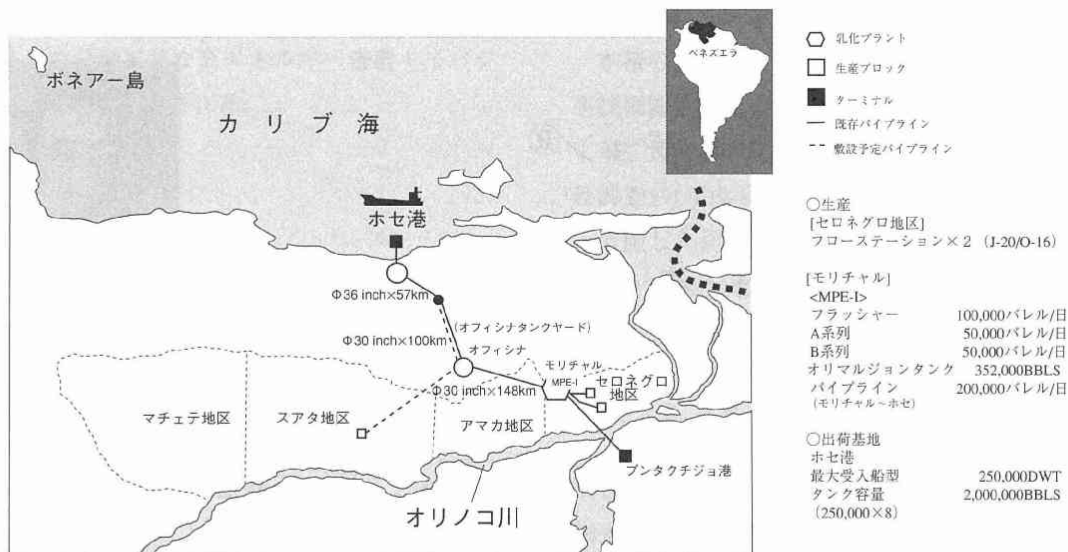


図1 1997年生産・出荷設備現状

オリマルジョンは、1990年代初頭、発電燃料としてイギリス、日本に導入された。その後、カナダ、デンマーク、リトアニア、イタリア等に導入が拡大し、現在では世界全体で発電容量4,100MWを超える1次燃料として利用されている。

オリマルジョンの国内外における商業導入状況を表1に示した。年間契約量はビートル社の生産能力の限界である650万トンに達しており、今後の追加販売は新規の生産設備が完成する2003年以降になるという。

表1 オリマルジョンの商業導入状況

2001年3月現在						
国名	会社名	発電所	発電容量	導入時期	年間契約量	備考
日本	鹿島北共同発電(株)	鹿島北共同発電所2号機	125MW	1991年10月	60万トン	2001年以降75万トンの計画あり
		鹿島北共同発電所1号機	95MW	1994年1月		
		鹿島北共同発電所5号機	70MW	1999年10月		
	関西電力(株)	大阪発電所4号機	156MW	1994年9月	6万トン	実証燃焼試験中
	北海道電力(株)	知内発電所2号機	350MW	1996年12月	10万トン	
カナダ	New Brunswick Power	Dalhousie	110MW	1994年10月	80万トン	20年契約
			221MW			
デンマーク	SK Power	Asnaes	700MW	1995年1月	110万トン	
イタリア	ENEL	Brindisi Sud#1	660MW×2基	1998年	250万トン	
		Fiume Santo	320MW×2基	1999年		
中国	CNPC	Shengli発電所等、複数発電所	未確認	1996年8月	100万トン	数量は1999年。2000年も同程度の見通し
その他 リトアニア バルバドス ドイツ等			未確認	未確認	32万トン	
合計量					650万トン	

表2 わが国におけるオリマルジョン導入状況

年	1995	1996	1997	1998	1999	2000
輸入量（トン）	921,962	841,033	715,585	579,564	611,534	610,227

※2000年は推定値

わが国におけるオリマルジョンの導入は、1991年の鹿島北共同発電(株)に引き続き、関西電力(株)、北海道電力(株)等で行われている。

わが国における、オリマルジョンの輸入状況（B/Lベース通関数量、1—12月）は表2に示すとおりである。1995年をピークにして減少傾向にあったが、1999年からは増加に転じている。

（2）オリマルジョンの化学組成

オリマルジョンは、約70%の天然オリノコと特定の乳化剤成分、約30%の水からなるが、その生産過程において天然オリノコに添加する乳化剤成分は、界面活性剤アルコール・エトキシレート（AE）と乳化安定剤モノエタノールアミン（MEA）である。オリマルジョンの化学組成を表3に示す。界面活性剤AEとしては、分岐状のアルキル鎖を有するトリデシルアルコール・エトキシレートが使用されている。

表3 オリマルジョンの組成

天然オリノコ	約70%
水	約30%
トリデシルアルコール・エトキシレート（AE成分）	約0.13%
モノエタノールアミン（MEA）	約0.03%

また、AEおよびMEAの化学構造式は以下のように表されるが、トリデシルアルコール・エトキシレートは $R=C_{13}$ で示される。

【アルコール・エトキシレート（AE）の構造】



【モノエタノールアミン（MEA）の構造】



構造式で示されるように、AEは疎水性の長鎖アルコールと親水性のポリエチレンオキサイド成分からなる、非イオン界面活性剤である。

オリマルジョンの燃料としての性状と化学組成を、天然オリノコとC重油に比較して表4に示した。天然オリノコを水中に乳化することにより、C重油に近い流動性を有していることが分かる。

（3）オリマルジョンの物理的組成

オリマルジョンの乳化粒子は、平均粒子径が $4\mu m$ と $20\mu m$ の双山に分布し、図2で模式的に示すように、小さい方の粒子がベアリングの役割を果たすことによって、比較的低い粘度を発現すると説明されている⁽¹⁾。なお、オリマルジョンの乳化分散状態は図3⁽²⁾に示す通りである。このような双山分布を実現させるために、図4に示すように、異なる分散効果を持つミキサーを配置した2系列の行程から得られた平均粒子径の異なる乳化粒子を、混合して製品化するというプロセスを採用している。

オリマルジョンの物理的性質を表5にまとめて示した。そのうち、流動点は約3℃、引

表 4 オリマルジョンの燃料性状*1

計測項目	オリマルジョン	天然オリノコ	C重油
比重 (15℃)	1.013	1.018 * ³	0.931
粘度 : cSt (80℃)	約 100 (推定値)	1528 * ²	34.8 * ²
mPa・s (30℃,100/S)	200-350 * ³	>10000 * ³	—
窒素 (%)	0.54	0.63	0.22
硫黄 (%)	2.78	3.79	0.97
水分 (%)	26.3	< 0.1	< 0.1
高位発熱量 (kJ/kg)	29830	約 42000	43680
(kcal/kg)	7125	約 10000	10400
灰分 (%)	0.07	0.13	0.01
残留炭素 (%)	11.2	17.4	8.0
微量成分 (ppm)			
バナジウム	394	400 ~ 500	< 50
ナトリウム	9	60 ~ 100	
マグネシウム	26		

* 1 : 三菱重工技報、37(1),14,2000.

* 2 : 平成 10 年度超重質燃料油利用技術調査報告書 (1999)

* 3 : N. G. Tavel, et al., International Oil Spill Conference, 1233-1238 (1999)

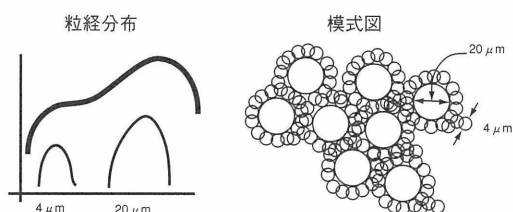


図 2 オリマルジョンの粒経分布

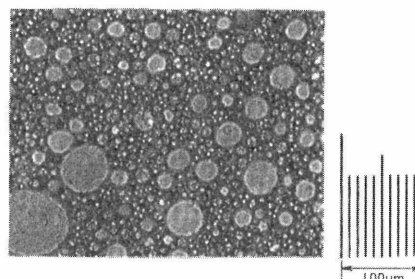


図 3 オリマルジョンの乳化分散状態

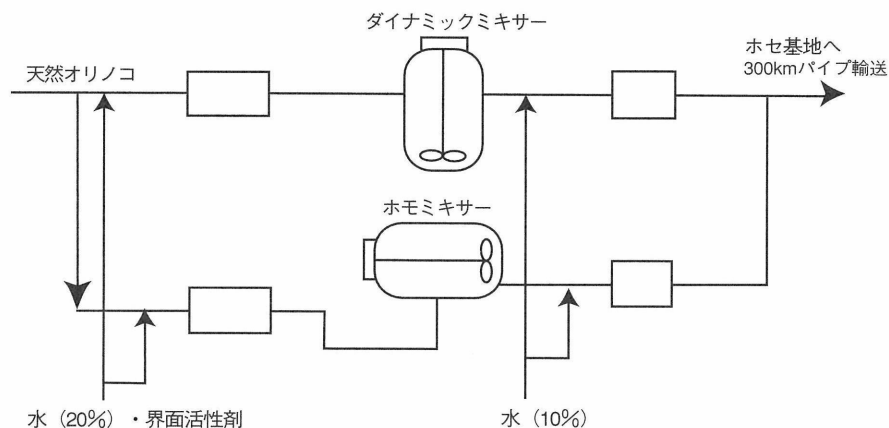


図 4 オリマルジョンの製造方法

表5 オリマルジョンの物理的性質

物理的試験パラメーター	Battelle	Environment Canada	PDVSA-BITOR
含水量 (%)	ND ^a	3.0	27.5-30.2
平均粒子径 (μm)	18.5 $\pm$ 0.3	19	14-20
密度/15℃ (g/mL)	1.0106	1.0095	1.013
流動点 (℃)	3	0	3
引火点 (℃)	>94	>95	>90
表面張力/15℃ (mN/m)	ND ^a	35.4	ND ^a

出所：I. C. Johnson (Golder Associates Inc.), N. G. Tavel (BITOR AMERICA Co.),
F. Marrufo (PDVSA-BITOR), POWER-GEN'98, Dec.9-10, 1998, Orlando, Florida, USA.
Battelle, 1998; Environment Canada, 1998; and Marrufo et al., 1998

a) ND: Not Determined

火点は90℃以上である。また、輸送時および保存時の好適な温度は約32℃とされている。

オリマルジョンおよびビチューメン（天然オリノコ）⁽³⁾の密度は図4に示すように、淡水と海水の中間に存在し、天然オリノコの密度は1.01～1.02である。なお、オリマルジョンの密度における温度依存性は天然オリノコよりも小さいとの報告がある。また、水中に於ける挙動は塩分濃度、温度、漏洩量および水の動的性質の影響を受けるが、残念ながら現時点では詳細な挙動は不明である。

(4) オリマルジョンの法的位置付け

オリマルジョンが関係する法令としては以下が挙げられる。

海洋汚染及び海上災害の防止に関する法律（昭和45年法律第136号）（以下海防法という）では、油、有害液体物質、未査定液体物質、有害液体物質等、廃棄物の5つの内「油」に該当するが（海防法第3条第2号）、「特定油」には該当しない。また、油濁損害賠償保障法（昭和50年法律第95号）でも「油」に該当する（油濁損害賠償保障法細2条第3号）。

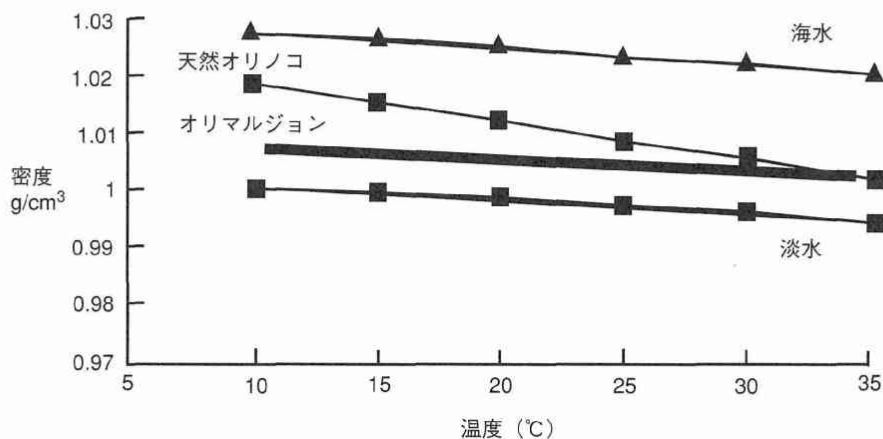


図5 オリマルジョンおよび天然オリノコの密度

他方、危険物船舶運送及び貯蔵規則（昭和32年運輸省令第30号）および消防法（昭和23年法律第186号）では、非危険物であることから、法の適用を受けない。

また、オリマルジョンを海上輸送する船舶からオリマルジョンの漏洩事故が発生した場合、あるいはオリマルジョンの荷役中に船舶または施設からオリマルジョンの漏洩事故が発生した場合の防除措置等については、海防法及び関係政省令に規定されている。

4. オリマルジョンの利用技術

表4から予想できるように、燃料として利用する際には、次の点を考慮した技術的対応が必要となる。

- 発熱量がC重油の約70%と低い
- 窒素分および硫黄分が高く、窒素酸化物（NOx）および硫化物（SOx）発生量の増加が予想される。
- 灰分、残留炭素分が多く煤塵量の増加が予想される。
- バナジウム、ナトリウム等の重金属分が多く、高温腐食を起こしやすい。

バナジウムの高温腐食を防止するためにはマグネシウムとの共存が必要である。このため、水溶性の硝酸マグネシウムを必要量だけ添加する工夫がなされている。

従って、オリマルジョンを安全に取り扱うためには、輸送や受入れ時の漏洩防止および燃焼運転時の環境への影響防止を念頭に、最適な技術の適用を考えなければならない。このような観点に立って、最近、米国環境保護庁（USEPA）から、オリマルジョンの燃焼技術と大気汚染防止技術について調査結果が報

告されている⁽⁴⁾。また、燃焼技術に関しても数件の文献が報告されている⁽⁵⁾。

ここではオリマルジョンの利用技術として、「受入・貯蔵技術」及び「燃焼・運転関連技術」について、平成10年9月25日に営業運転を開始した北海道電力(株)知内発電所2号機（出力35万kW）、及び平成11年9月にオリマルジョン専焼ボイラーの稼働を開始した鹿島北共同発電(株)鹿島北共同発電所の具体例を示しながら説明したい。

（1）受入れ・貯蔵技術

① オリマルジョンの取扱い上の特徴

オリマルジョンはベネズエラ、ホセ港から出荷され（図1）、大型船のアフラマックス（Aframax）型は喜望峯周りで約45日、パナマックス（Panamax）型はパナマ運河経由で約30日かけて波方ターミナルおよび鹿島港まで搬入される。

オリマルジョンは、重油並みの輸送、貯蔵、燃焼が可能である。従って、原油、重油等を燃料としている火力発電所と設備構成は同様であり、燃料タンクからボイラーまではポンプによって移送できる。

しかし、界面活性剤の効果が失われると水と天然オリノコに分離するため、界面活性剤の効果を持続させる技術的対応が必要となる。界面活性剤の効果が失われる要因としては、使用温度、使用時の剪断応力、原油・重油等との混合、貯蔵期間等が挙げられる。

●使用温度

ビートル社の取扱い推奨温度は5℃～75℃である。貯蔵タンクではボトムヒーターによる加温、冬場の外気温度を考慮すると、輸送配管も重油と同様に加温が

必要である。しかし、オリマルジョンと接触する表面金属の温度は80℃以下でなければならないことから蒸気トレース加温は使用できないので、温水トレース加温あるいは電気トレース加温が使用される。

●使用時の剪断応力

過度の剪断応力をかけると、オリマルジョンは品質が劣化するので、低剪断応力ポンプ、低剪断応力バルブの使用が推奨されている。そこで移送用ポンプには2軸スクリュウポンプが採用されており、流量はバルブによる絞り制御ではなく、ポンプ回転数の変化により制御される。

ポンプやヒーター等機器類の前後や配管中に使用するバルブ型式には、アングル弁、グローブ弁よりも、仕切弁、ボール弁の方が好ましい。

●原油・重油等との混合

他油種との混合を避けるためにオリマ

ルジョン専用の配管を敷設しているのが普通である。

●その他

貯蔵タンクにおけるオリマルジョン保持温度は35℃程度であり、粘度は数百cStと通常の重油よりも高く重質油に近い。貯蔵タンクからボイラーまでの距離が長い場合、移送時の圧力配管損失が大きくなり、ボイラーにて噴霧、燃焼させるためには再度ポンプによる昇圧が必要である。そのためオリマルジョン焚火力発電所では、通常の火力発電所と異なり、ボイラー近辺にサービスタnkを設置する必要がある。なお、サービスタnkの加温も温水を用いたボトムヒーターが使用される。

② オリマルジョン設備の特徴

知内発電所2号機のオリマルジョン系統図を図6に示す。2号機は重油とオリマルジョンの専焼・混焼が可能な国内初の電気事業用発電設備であり、オリマルジョンの特徴を十

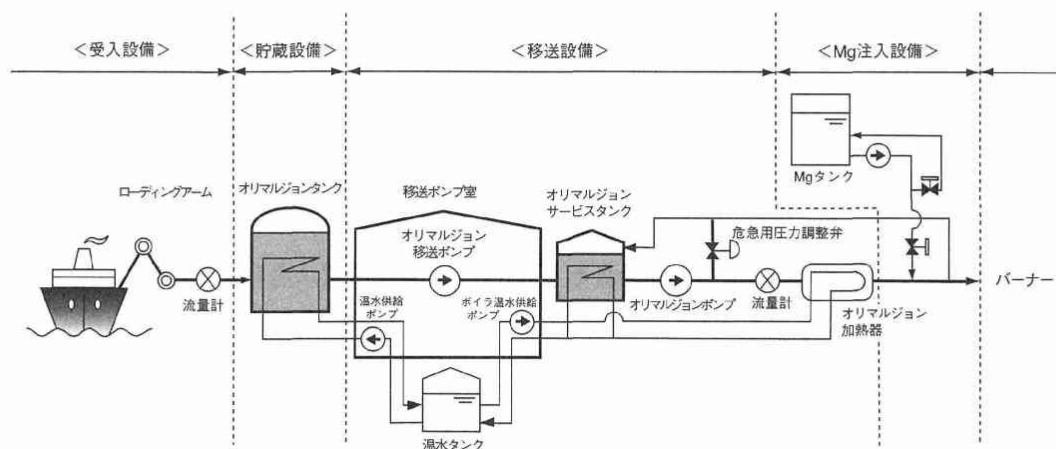


図6 知内発電所オリマルジョン系統図

表6 知内発電所2号機におけるオリマルジョンと重油系統の設備上の相違点

	機器類	オリマルジョン系統	重油系統
受入設備	ローディングアーム	オリマルジョン専用	1号機用重油と共用
	受入配管	オリマルジョン専用	2号機用重油専用
	流量計	電磁式流量計	容積式流量計
	加温方式	電気式	揚油栈橋～計量設備室 電気 計量設備室～燃料タンク 蒸気
貯蔵設備	燃料タンク	ドームルーフ型 40,000 kL×2基 (No.5, 6 燃料タンク)	・フローティングルーフ型 30,000 kL×1基 (No.1 燃料タンク) ・ドームルーフ式 40,000 kL×1基 (No.4 燃料タンク)
	タンク加温方式	温水 (80℃)	蒸気
	温水タンク	容量: 100 kL	なし
	攪拌機	なし	タンクミキサー3台/No.1燃料タンク タンクミキサー3台/No.4燃料タンク
	貯蔵温度	35℃	70℃
	移送ポンプ	回転数制御の2軸スクリー ポンプ50%×2台	なし
移送設備	サービスタンク	容量: 200 kL 温水加温 (80℃)	なし
	ポンプ	オリマルジョンポンプ 回転数制御の2軸スクリー ポンプ50%×2台	重油ポンプ 3軸スクリーポンプ 50%×2台
	流量制御	ポンプ回転数による制御	流量調節弁による制御
	加熱器	温水加温 加熱器出口オリマル温度 45℃	蒸気加温 加熱器出口重油温度 120℃
	流量計	電磁式流量計	容積式流量計
	圧力調節弁	加熱器入口戻りライン (通常 時全開)	重油ポンプ出口戻りライン
	マグネシウム 注入設備	Mg注入ポンプ 2 連往復型 (遠隔自動/イン バータ制御) 1 台 0.0032 ~ 0.120 m ³ /h	なし
	Mg貯蔵タンク	容量: 15m ³	
	Mg貯蔵タンク 攪拌機	バイエル・サイクル可変付 横置攪拌機 (インバータ制御) 2 台	

分に考慮した設備である。

なお、表6には、燃料受入設備、燃料貯蔵設備、移送設備、マグネシウム注入設備について、重油系統と比較してオリマルジョン設備の特徴をまとめた。

オリマルジョンは重油に比べてバナジウムの含有量が多く、燃焼時に高温腐食が懸念される。これを防止するためにマグネシウム注入設備を設けてオリマルジョン加熱器出口にマグネシウムを注入している。

(2) オリマルジョンの燃焼・運転関連技術

オリマルジョンは重油系燃料とは異なる性

状や特徴を有するため、燃焼設備についても、これらの特徴を考慮しなければならない。

例えば、オリマルジョンは窒素分および硫黄分が高いので、NO_xおよびSO_x発生量の増加が予想される。これについては、それぞれ従来実績のある低NO_xバーナーや排煙脱硝法および排煙脱硫技術を応用することによって対応することができるとの報告がある⁽⁵⁾。また、煤塵量の増加の問題については、特に大気環境に対する影響の点で重要である。これに対しては、電気集塵機により、重油等の他の化石燃料並に煤塵を除去することができるとの報告がある⁽⁴⁾。

バナジウムによる高温腐食やSO₃への酸化促進作用に対する問題は装置寿命に大きく関係する問題なので重要である。この問題に対してはマグネシウム成分を添加することによって防止しており、その腐食防止機構についても報告されている⁽⁵⁾。

ここでは、上記のようなオリマルジョン特有の燃料性状に基因した問題点に対応しながら、鹿島北共同発電所において1年間の長期運転した結果について概説する。

① 鹿島北共同発電所の燃焼設備とその特徴

鹿島北共同発電所におけるオリマルジョン燃焼用ボイラーの概要を表7に示す。

表7 オリマルジョン燃焼用ボイラー概要

1号	発生蒸気：圧力12MPa、温度541℃、流量650トン/時 使用燃料：重油＋オリマルジョン混焼
2号	発生蒸気：圧力12MPa、温度541℃、流量650トン/時 使用燃料：重油＋オリマルジョン混焼
5号	発生蒸気：圧力14MPa、温度569℃、流量500トン/時 使用燃料：オリマルジョン専焼（重油混焼可能）

オリマルジョンの燃焼のために設備的に対応すべき点は以下の項目があるが、考え方は、「オリマルジョンの取扱い上の特徴」で記載した内容と同様である。以下、既設ボイラー改造の場合と新設の場合につき概説する。

【既設ボイラーを改造して対応する場合】

- 温水または電気による加熱システムを設置する。
- 過度の剪断応力が掛かることを防止するために、スクリーポンプを採用し、流量はポンプの回転数の制御により行う。
- 設備の増設や吹き込み頻度の増加等により、スートブローを強化する。
- NO_x対策として低NO_xバーナー並びに炉内脱硝システムを採用する。

- 煤塵増加対策として電気集塵機の放電極を変更する。
- バナジウムによる高温腐食を防止するためにマグネシウム系燃料添加剤を注入する。
- 低酸素運転による還元腐食対策として、蒸発管に高クロム溶射を施す。
- 排ガス量の増加やその温度上昇に対しては、蒸気発生能力を10～30%低下させる。

【専焼ボイラーを新設して対応する場合】

新設の場合は、次の項目を重点的に考慮する。

- 過熱器用に高耐食性の材質を選定する。
- スケールによる閉塞を防止するために、熱交換器チューブの間隙を広く取り、千鳥配列を避ける。
- 熱交換器の分割により、スートブロー配列を適正化する。

② オリマルジョンの燃焼状況

今回の5号ボイラーによるオリマルジョン専焼を1年間実施した結果、排ガス温度の上昇や圧力損失等の経時変化が非常に緩やかであり、他の重油焚きボイラーの場合と比較しても大差ないことが判った。

すなわち、燃焼性が良いため、オリマルジョン専焼では、過剰空気率を5%以下に絞っても排ガス中に未燃カーボンほとんど検出されなかった（ただし排ガス中の一酸化炭素は増加）。そのため、5号ボイラーでは、過剰空気率が設計の6%から現状の4%に見直された。

また、比較的ファウリングが少なく、排ガス温度の上昇や圧力損失の経時変化が緩やかであることも分かった。

さらに、オリマルジョンの性状から考えて、既設の油焚きボイラーも、軽度の改造でオリ

マルジョン燃料による1年間の連続運転が可能になると判断される。

4. おわりに

埋蔵量の豊富な天然オリノコを原料としたオリマルジョンは、エネルギーセキュリティの観点からも、また、石炭にリンクした価格的魅力からも、燃料として今後世界的に益々注目を浴びるであろう。実際、オリマルジョンの生産能力は、現状では需要に対応できないために、ビートル社では増産を計画中とのことである。

オリマルジョンの燃料としての特徴に対応した利用技術を適用すれば、原重油系燃料と同様の取扱ができることが分かった。

今後は発電システムのより一層の技術改良により、オリマルジョンが高効率発電システムへと展開して行くことを期待したい。

なお、利用技術としては、オリマルジョンの燃焼時に発生する重金属を含む燃焼灰や排ガス中のNO_xおよびSO_x等の回収物を有価物へ転換して、有効利用する技術、さらにはオ

リマルジョンの輸送および受入時の漏洩防止対策等も重要な技術であるが、紙幅の関係で割愛した。

最後に、本稿の執筆にあたり、種々のデータの提供等でご協力を頂いた「超重質燃料油利用技術調査委員会」の関係各位に深く感謝する。

参考文献

- (1) 平成10年度超重質燃料油利用技術調査報告書，海外出張報告書，14頁，平成11年3月（1999）
- (2) 菅澤文夫，須賀田健二，荒川善久，黒石敏郎，一ノ瀬利光，廣田智計「オリマルジョン焚きボイラの計画と運転実績」火力原子力発電，第51巻11号，53-62頁（2000年）
- (3) 本稿では『ピチューメン』と『天然オリノコ』は同義語として使用している。
- (4) C. A. Miller, R. K. Srivastava, Progress in Energy and Combustion Science, 26, 131-160 (2000)
- (5) 梶谷一郎，茂田潤一，小島史生，「重質油燃焼灰の付着特性と高温腐食特性の評価」火力原子力発電，第51巻2号，56-66頁（2000年）



太陽熱発電技術開発の現状 —ドイツ、スイス、スペイン

吉 田 一 雄 (助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

発達した低気圧の通過により、出発当日の成田空港は風雨が強く、フランクフルトへ向けての離陸は一時間ほど遅れた。出だしから荒天だった今回の出張は、最後まで天候にたたられ、太陽の姿はほとんど仰ぎ見ることができなかった。

冒頭に「天候」の話題を持ってきたのにはちゃんとした訳がある。すなわち、今回の出張は新たに始まったプロジェクトのために、太陽光集光技術を調査するのが目的だからである。

新たなプロジェクトとは「石炭・天然ガス活用型二酸化炭素回収・利用技術開発」と題されたものである。プロジェクトのタイトルと太陽光とは直接結びつかない。しかし、プロジェクトの内容は石炭と天然ガスをそれぞれガス化、水蒸気改質して合成ガスをつくり、それをもとにメタノール等のクリーン燃料を製造するもので、太陽エネルギーを導入することで製造過程における二酸化炭素 (CO₂) の発生量を削減できるというものである。太陽エネルギーの導入方法については太陽光もしくは太陽熱によって発電し、それによって水を電気分解して得られる電解酸素を用いる

製造プロセス⁽¹⁾や、製造過程の吸熱反応に、太陽エネルギーを直接もしくは間接的に導入する方法が考えられる。いずれにしても、今回のプロジェクトが成功すると、CO₂削減というグローバルな環境対策と、クリーン燃料の導入というローカルな環境対策とが一挙に可能となる。従って、陽光のない出発日の天候は、太陽のエネルギーを活用してクリーン燃料を製造するという新プロジェクトに関連した海外出張の幕開けとしては、そぐわないものであった。

今回の出張のスケジュールは、最初ドイツにある太陽光集光ならびに太陽熱発電メーカー、次にスイスにある太陽エネルギーを用いた化学反応の研究を行っている国立研究所を訪問する。さらに陽光あふれるスペインに飛んで、太陽エネルギー利用設備を見学し、さらに太陽エネルギーの導入に積極的なユネスコ (国連教育科学文化機関) を訪問するというものである。今回出張したのは、東京工業大学の玉浦裕教授と筆者他2名の都合4名であった。

2. ドイツの技術開発

バブコック・ボルシグ・パワー 環境
部 (旧スタインミュラー社)訪問

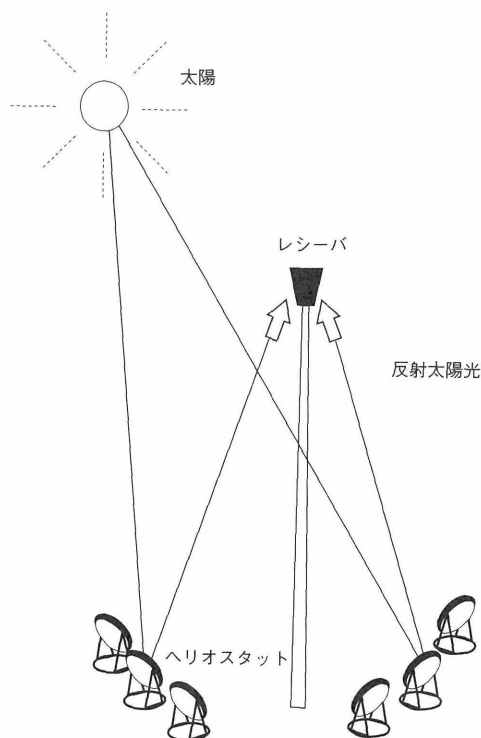


図1 フォボス型太陽熱発電

ローマ帝国華やかし頃には、ゲルマン人に対するの守りの要であったというケルンの町から東へ約40km。会社はグンメルスバッハという山間の町にある。ケルン中央駅からここまでは、鉄道が延びており、美しい田舎の風景を見ながら1時間ほどの列車の旅を楽しむことができる。

ここはつい2年程前までスタインミュラー社であったが、バブcock社に吸収合併され、バブcock・ボルシグ・パワー（以下BBP社）の環境部門となっている。スタインミュラー社は以前からエネルギーと環境に関連した事業を行っており、太陽エネルギーの利用技術もその一環である。同社の太陽関連事業は太陽光発電ではなく太陽熱発電技術であり、それに関連して太陽光の集光技術開発も行っ

ている。太陽電池については太陽熱発電の3～5倍のコストがかかるので、会社として一切かわっておらず、太陽エネルギーは集光熱に限るという明確な方向性である。

BBP社は図1に示すセントラル・タワー方式のフォボス（Phoebus）型と称せられる太陽熱発電の開発はすでに終わり、実用段階に入っていると判断しており、現在は10～30MWの受注生産ができる状況にある。フォボス型のコンセプトは次のとおりである。

- 昼間だけの発電を考え、余分な蓄熱設備等は設けない
- 昼間の安定運転を追及する
- 熱媒体には安全で取り扱いが容易な空気を用いる

以上のコンセプトを実現するために優れた技術が取り入れられている。

フォボス型のプロセスを図2に示す。ヘリオスタットで反射された太陽光はタワー上部のレシーバに集められ、そこで熱媒体として用いる空気を700℃に加熱する。高温の空気は熱交換器で蒸気を過熱し、タービンをまわして発電するというものである。次に、図に示す中で、特筆すべき技術について記す。

（1）ヘリオスタット

ヘリオスタットは太陽光を反射して集光・集熱部分に集める役割をする。BBP社のヘリオスタットは、ストレッチト・メンブレイン（Stretched Membrane）とよばれる構造のもので、図3に示すような外観である。刻々と変化する太陽の位置にヘリオスタットを追従させるために、太陽追尾装置を設けている。太

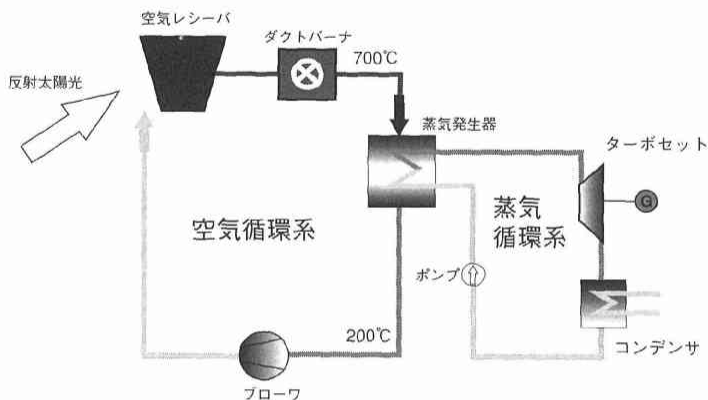


図2 フォボス型の発電プロセス

陽光を反射する部分の構造は、細長い鋼板を円形に溶接し、それに張力をかけた状態で薄い鋼板を溶接してその上に鏡を貼り付けている。鏡面は凹面になるよう内部は負圧状態としてある。全体の構造はいかにもドイツ製らしく堅牢であり、その分製作コストも高くなることをメーカー側も認めている。実際のプラントでは非常に多くのヘリオスタットを必要とするため、発電コスト削減のためにはヘリオスタットのコストダウンが必要と思われる。なお、このタイプのヘリオスタットについては現地での組み立てが可能なおから、輸送コストは低く抑えられると思われる。

(2) レシーバおよびダクト・バーナ

レシーバの熱交換部分はニットッド・ワイヤ (Knitted Wire) と呼ばれる構造で、高合金鋼の細いワイヤを編んだものである。身近なものに例えれば、台所で使用するスチールたわしといったところか。熱媒体の空気は集光熱により高温になったニットッド・ワイヤ部分を通過することにより約700℃まで加熱される。加熱された空気はタワー内部をとって熱交換器に入り、水蒸気と熱交換された

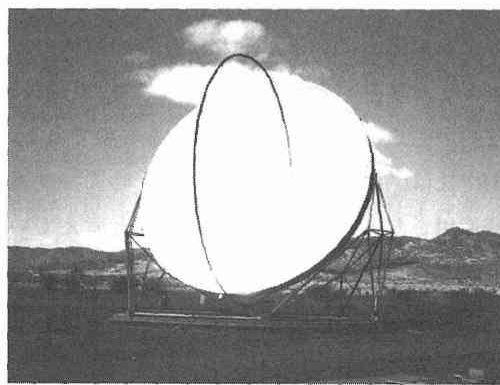


図3 BBP社のヘリオスタット

後にまたレシーバ入口付近に戻され、循環される。

自然エネルギーを用いた発電では、安定運転が課題である。BBP社のプラントでは空模様の変化によって熱媒体の温度が下がった時に備えて、化石燃料を燃やすダクト・バーナを導入している。使用する燃料は当然ながら環境負荷が小さい天然ガスを用いている。例えば環境負荷が小さくても、化石燃料を一切導入しないシステムでは安定運転は困難である。BBP社はより現実的な選択をしたといえる。図4はダクト・バーナの導入効果の一例である。昼間、曇りになって日射量が減少しても、ダクト・バーナを稼動すると一定の出力になっていることがわかる。

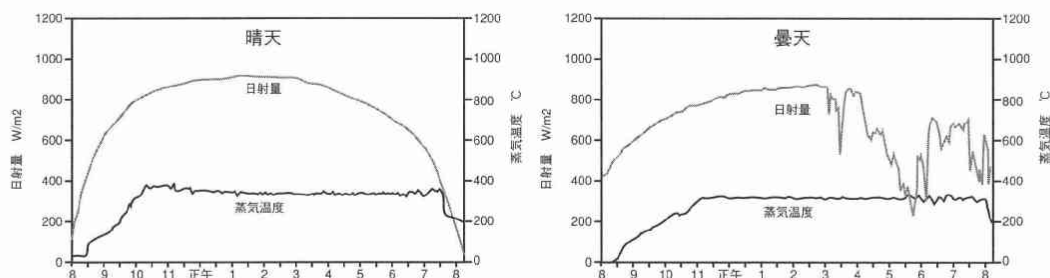


図4 ダクトバーナの導入効果

BBP社ではより環境負荷が小さい安定化システムも考えている。それは多数の球体のアルミナを蓄熱材として用いるもので、日射に変動が生じたときに随時使用するものである。BBP社は、このシステムを通常1時間程度連続使用される規模の蓄熱システムと考えている。

BBP社のシステムが優れているところは既存の蒸気タービン発電機にも太陽エネルギーを容易に導入できる設計となっていることである。これにより、従来のプラントにおいても、単位発電量当りのCO₂発生量を抑制することができる。また、前述のように熱媒体に空気という安全なものを用いることで、広く環境への影響を考慮した設計を行っていくという会社の姿勢が理解できる。

(3) 実プラント

BBP社はフォボス型太陽熱発電システムの技術開発はすでに終了し、今後は実プラントの建設を待つのみとしている。現在、レバノンやスペインでのプラント建設が計画されている。30MW級発電プラントを建設する場合、表に示すように広大な敷地面積と膨大な数のヘリオスタットが必要である。その場合の発電コストは、0.20マルク/kWh (14cts/kWh) と

表 30MW級発電プラントに必要な条件

出力	30 MW
タワー高さ	130 m
敷地面積	0.9 km ²
＝半径	550 m
ヘリオスタットの台数	1,090 台
ミラー部総面積	163,500 m ²

比較的低い。因みに、計算のベースは利率を7%、プラント稼働年数を30年、太陽エネルギーの割合を62%、プラント稼働率を92%とし、1998年の価格をもとにしている。建設コストにはヘリオスタットが占める割合が高く、ヘリオスタットの低価格化に成功すればかなりのコスト低減が可能であると思われる。

また、ヨルダンに出力10MWのプラントを建設・運転を想定した試算では、初期費、システム全体の運転費も含めて1998年価格で1億8,000万マルク、ヘリオスタットの価格は本体と制御系を含めて平方メートルあたり350マルク/m²としている。なお、コストは日照条件、資材の運搬等、条件によって変わる。

3. スイスの技術開発

パウル・シェレー研究所 (PSI) 訪問

ここはスイスのノーベル賞学者パウル・シェレールの名を冠した国立研究所である。この研究所ではエネルギー、環境、材料関連の研究を中心に行っている。研究所はチューリッヒの北西方向にあり、チューリッヒ中央駅から快速列車で約15分のところにあるバーデンという町で降りて、車でさらに20分ほどの田舎町にある。研究所はライン川の支流をはさんで両岸にあり、かなり広い敷地を有している。

PSIはSolar PACES（Solar Power and Chemical Energy System）と呼ばれる、多国間研究コンソーシアムのコアになる研究所の1つとなっている。Solar PACESは国際エネルギー機関（IAEA）の活動の一環として行われている。参加国は2000年9月現在でオーストラリア、ブラジル、エジプト、EC、フランス、ドイツ、イスラエル、メキシコ、ロシア、南ア

フリカ、スペイン、スイス、イギリス、アメリカ合衆国の13カ国となっており、日本は参加していない。参加国は研究成果を共有しているが、外部に対しては非公開であり、日本が研究成果を利用することは不可能である。現在のところSolar PACESは太陽エネルギーを吸熱反応に供給するソーラ・ケミストリ、光化学反応並びに太陽熱発電の分野を中心に行っている。

現在、PSIが力を入れているのは、ソーラ・ケミストリの1分野であるソーラ燃料の研究である。現在進めているZn（亜鉛）プロジェクトは、「SynMetプロセス」と称し（図5）、ZnO（酸化亜鉛）と天然ガスが共存する系に集光太陽光を直接照射してZnOの還元と天然ガスの改質を行い、Znと合成ガスをつくるというものである。合成ガスはさらにメタノールや水素に転換され、ソーラ燃料となる。

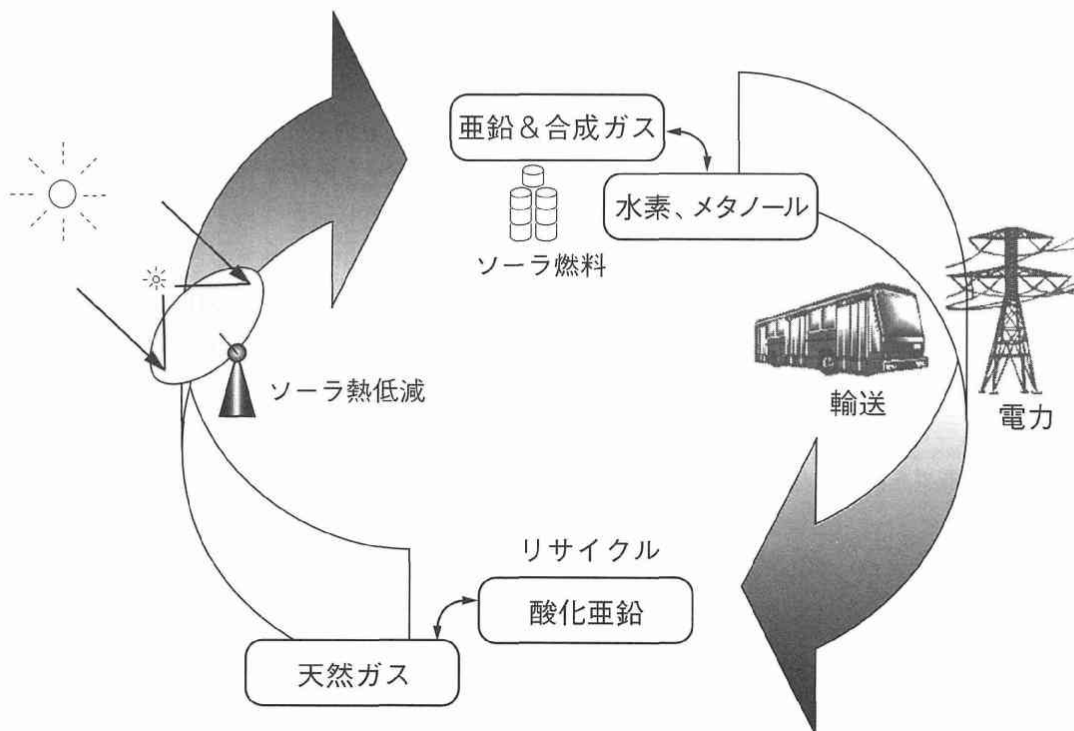


図5 SynMetプロセス

ZnOは集光太陽光を当てることにより、還元剤が無い条件でも2,000Kでソーラ亜鉛となる。また、還元されたZnは水と反応させて水素を生成し、それ自身はZnOとなって還元プロセスに戻される。現在は5kW級の小型反応炉での実験が行われているが、必ずしも順調には進んでいないようである。問題はスイスの天候である。太陽に恵まれているとはいえないスイスでは実験回数が不足がちである。今後の予定として、Znプロジェクトでは3MW級をイスラエルのビームダウン集光設備で実施の予定である。

PSIはチューリッヒにあるETH（スイス連邦技術研究所）と共同研究を行っており、PSIのソーラ関係の責任者であるアルド・スタインフェルド氏はETHの教授を兼任している。ETHの研究室には現在すでに100kW級のソーラシミュレータを設置している。この装置は集光度 $5,000\text{kW/m}^2$ であり、光のエネルギーの強度は太陽5,000個分である。

PSIの優れているところは、化学、機械等専門分野が異なる研究者と一緒に仕事をしていることである。これに加えて上述のETHとの交流もあることからより多くの研究者の参加が可能なことである。当方のプロジェクトに関連した分野では、太陽エネルギーのレシーバの形状、熱フラックス、熱/温度シミュレーションについてはツールも在り、すぐにでも解析が可能である。また、実際の集光設備、レシーバ（CPC）の小型装置を開発して実験を行っており、実データに基づいたレシーバのデザインや溶融塩炉の形状、大きさなどが計算できるとのことである。

4. スペインの技術開発

アルメリア太陽光プラント（PSA） 訪問

アルメリア太陽光プラント（PSA：Plataforma Solar de Almeria）はCIEMAT（国立エネルギー技術研究センター）の附属組織であり、太陽エネルギー関係の研究を担当している。PSAはスペイン南部のグラナダ地方、地中海沿岸にあるアルメリアという港町にある。この町はジブラルタル海峡から東北東の方向に約300km離れたところにあり、対岸のアフリカ大陸までは約200kmと近く、フェリーが就航している。また、シーズンにはヨーロッパ各地からバカンス客が訪れ、町は活気を呈するとのことだが、筆者が訪れた時は季節外れで、町には観光客の姿はまばらであった。

強風の中、異常なゆれ方をしたプロペラ機がアルメリアの空港についたのは3月6日午後。サンベルトの北端にあるこの町で雨が降るのは年に数えるほどだということだが、同日は曇天で、今にも雨が降りそうな空模様だった。空港から市内に向かう途中、ついに雨が降り出した。雨が少ない地方の人たちにとっては恵みの雨かもしれないが、日本から太陽を求めて旅立った者にとっては恨みの雨である。

翌朝、雲は多いものの晴天の中、車でアルメリアの中心部から北へ30kmほどのところにあるPSAに向かった。途中道路は、高い木が全く見当たらない灌木だらけのなだらかな丘陵地帯を縫うように走っている。PSAは丘陵地帯を抜けた盆地のような場所に広大な敷地を有し、その中に数多くの施設がつくられている。施設の中でも特に目立つのは高さ60mという集光タワーで、その周りに配された多

数のヘリオスタットが太陽のほうに向いて我々を出迎えてくれた。

これまでのCIEMATによるPSAの運営方針は「ヨーロッパの最大の太陽集光試験場」としての利用であった。このことから1986年以降、ドイツ風力・宇宙航空センター（DLR）との折半出資で運営されてきた。しかし、CIEMATは1999年1月1日からPSAを「国際研究センター」と位置付け、次のような運営方針に転換している。

●太陽エネルギーとソーラ・ケミストリに関する技術開発への参画と推進

●商業利用プロジェクトやデモンストレーションプロジェクトの推進

に注力することとなった。この方針転換によ

り日本等から共同研究の申し込みが容易になったといえる。

PSAには大小様々なソーラ関連設備があるが、最大規模のものはCESA-1と呼ばれる高さ80mのコンクリート製タワーとその周りに広がる300台のヘリオスタット群である（図6）。この実験設備では主としてセントラル・レシーバ・システムのテストが行われており、タワー上部にレシーバが設置されている。タワー上部には、前述のBBP社製のKnitted Wireレシーバが置かれ、そこで熱媒体である空気と熱交換をしている。オルノ・ソラル（Horno Solar）はタワーに隣接した建屋にある熱交換器で、蒸気を過熱して蒸気タービンを回している。

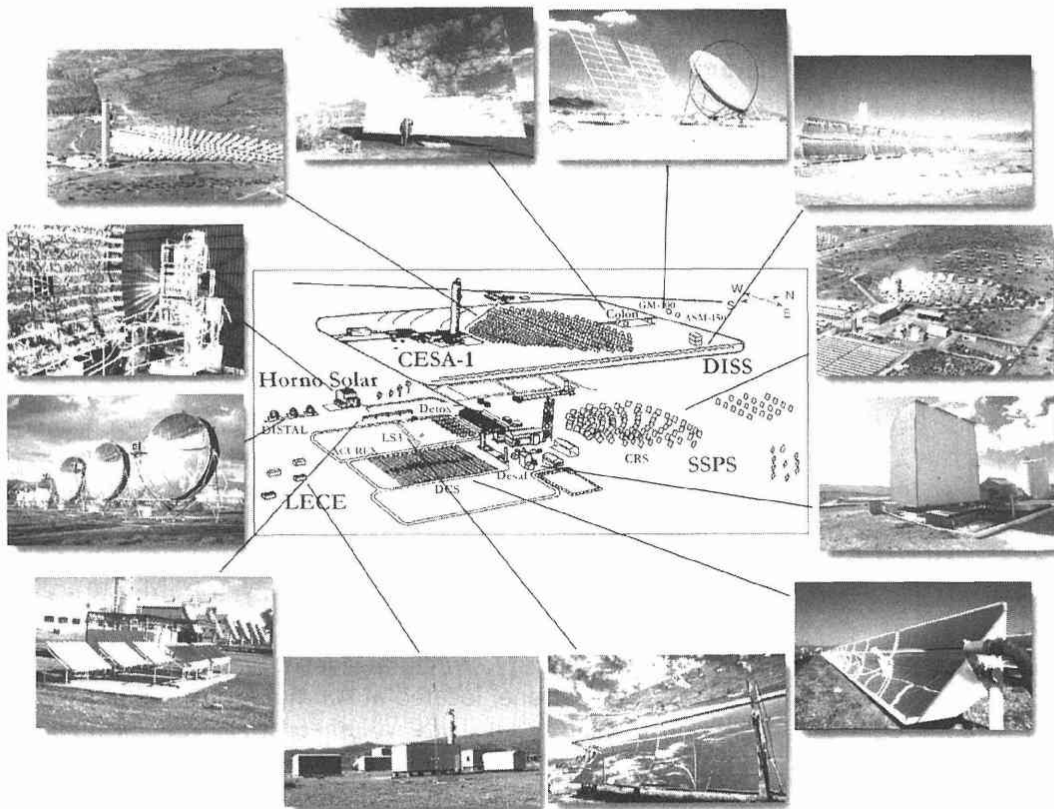


図6 PSA全景

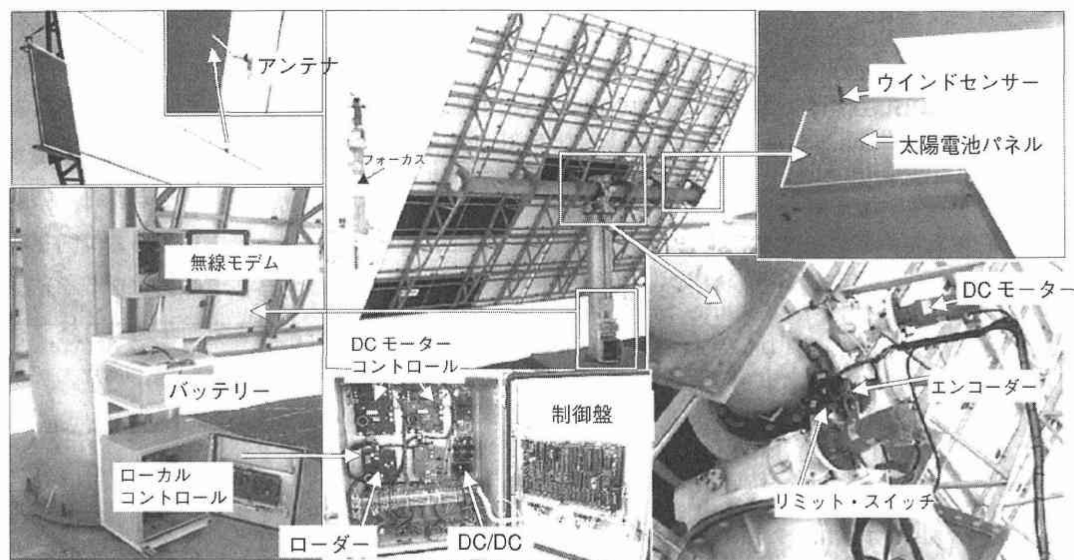


図7 自律型ヘリオスタット

CESA-1の周囲にあるヘリオスタットはスペインのINABENSA社が開発した「コロン・ソル・ヘリオスタット」と呼ばれるものである。このヘリオスタットは2軸トラッキングタイプで、トラッキングエラーは各軸で1.2mradと十分な精度になっている。また、反射板の面積は39.6m²、平均反射率はクリーンな状態で92%である。このヘリオスタットはスペイン製で中央の支柱で支える構造となっており、BBP社製ヘリオスタットと比較すると華奢に感じる。しかし、PSAの担当者によると、これら「T型」のヘリオスタットには強度上の問題は無いとのことであった。その他、同じT型タイプで、反射板面積が広い、PSAとアルメリア大学が共同で開発中の「自律型ヘリオスタット」のテストも行われている。(図7)

その他、PSAでは、集光太陽光を直接リアクタに取り込むソーラ熱化学のプラントがある。これはスイスのPSIにあるものよりかなり大規模で、なおかつほとんど雨が降らないこ

とからスイスのPSIよりも実験には向いている。また、このプラントでは集光太陽光を各種材料に当て、耐熱性などを調べている。集光照射部は最大3,000℃まで上るとのことで、金属はもちろん、セラミックも溶融するという。

この実験の目的は宇宙開発、軍事目的で行われているようである。さらに、太陽エネルギーによって稼働させる海水淡水化装置も設置されている。これらの装置群に加えて、ディッシュタイプやトラフタイプの集光装置、様々なタイプのヘリオスタット等の試験も幅広く行われている。

さて、見学を楽しみにしていた「セントラル・レシーバ・システムでの太陽光発電」の運転はというと、結局のところ見る事ができなかった。到着後1時間あまりミーティングを済ませた後に見学に回ると、空は見事に曇り、ヘリオスタットは休止状態だった。そして、夕刻近く、研究所を離れる頃になると

また朝と同じような青空が戻っていた。結局、「太陽」を求めたヨーロッパ出張は最後まで空振りに終わった。

5. おわりに

今回の出張により改めて感じたのは、環境志向が強いヨーロッパ諸国では、新エネルギー導入熱が高いことである。太陽エネルギーの利用も、発電を中心に様々な研究が行われている。また、研究開発を進める上でECとして、また本文中に示したSolar PACESとして、各国が協力して取り組める体制が整えられていることも成果を得やすくしていると思われる。さらに、ヨーロッパは太陽利用による発

電は、地理的に比較的有利である。すなわち、サンベルトであるアフリカや中東に近く、送電ネットワークも整備しやすいことから、サンベルトで発電してヨーロッパへ送電することも可能である点、日本から見ればうらやましい限りである。

参考文献

- 1) 片山優久雄「電解酸素を用いた石炭ガス化による水素・メタノール製造プロセスの経済性検討」季報エネルギー総合工学, Vol.23, No.4, 2001



革新的実用原子力技術開発 —提案公募型原子力技術開発の取り組み—

松 下 和 海 (助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

21世紀のエネルギー安定供給を視野に入れた原子力技術開発において、次世代軽水炉とともに革新的な原子炉の研究開発は重要な課題である。米国では、大統領科学技術諮問委員会（PCAST）の報告を受けて創設された原子力研究イニシアティブ（NERI）において、1999年から革新的原子力技術の研究開発を開始し、3年目を迎えている。一方、わが国でも、原子力委員会で取りまとめられた「原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画」（原子力長計）で、国、産業界及び大学が協力した革新的な原子炉の研究開発についての検討が求められている。

このような状況から、当研究所では平成12年度から経済産業省の補助金を受けて、革新的実用原子力技術開発に関する提案公募事業を実施している。本事業は、わが国の原子力技術の経済性・安全性を飛躍的に高めることを目的として、提案公募という競争的環境下で革新的原子力技術の提案と開発を促進するもので、産業界、大学等の柔軟な発想による革新的なアイデアの活用、ならびに原子力技術開発基盤の維持・向上も期待される。本稿では、当研究所が事務局として実施してい

る革新的実用原子力技術開発提案公募について紹介する。

2. 提案公募制度の枠組みと対象

（1）制度の枠組み

事業の実施における枠組みを図1に示す。当研究所は革新的実用原子力技術開発テーマを公募により募り、一方、大学、研究機関、企業等またはこれらの連携体は自ら実施する原子力技術開発を応募する。応募された技術開発テーマは当研究所内に組織された審査委員会が審査しその結果に基づき、技術開発を実施する有望なテーマを選定・採択する。

（3）公募対象

平成12年度の公募は、原子力技術のうち柔軟な発想により安全性・経済性が飛躍的に向上することが期待される革新的な技術概念・要素技術等に係る技術開発を対象とした。ただし、基礎的な研究は制度の対象外とした。提案の対象とする技術分野は次の3分野である。

- ① 革新的実用原子力発電関連技術の開発（例：新型炉技術、新型燃料技術など）
- ② 革新的実用核燃料サイクル技術関連技術

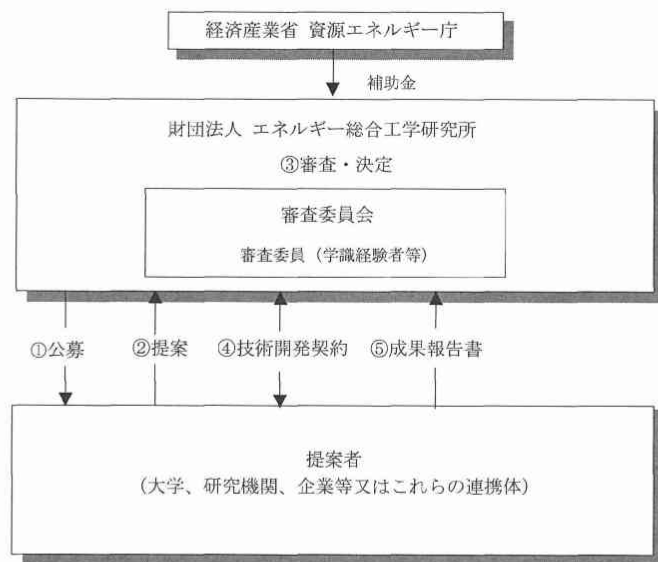


図1 革新的実用原子力技術開発提案公募の枠組み

の開発（例：廃棄物の処理処分技術など）

③ ①及び②に共通する技術，両者を包含する総合的な技術または評価技術（例：被ばく低減技術，リスク評価など）

技術開発は原則として3年間の計画とし，実施効果が高く特に認めるものは最長で5年間まで認める。1テーマあたりの技術開発費は1年間で1億円を限度としている。

また，これまで大学が実施してきた革新性の高い基礎研究の成果の積極的な実用化を図る観点から，技術開発にわが国の大学関係者が参加することを奨励している。

3. 平成12年度提案公募の状況

(1) 応募の状況

平成12年度から開始した事業であったため，本提案公募が関係者に周知され，興味を持たれ，十分な件数の応募があるか不安な面もあったが，公募開始前から公募に関する種々の

問い合わせもあり，本制度への関係者の関心の高さを感じた。

平成12年度は初年度にあたり，本制度の仕組みや運用方法の検討，審査の方法等の準備を行った上で，平成12年11月27日に3週間の公募期間がスタートした。公募開始時期や公募要領等に関する情報は当研究所のインターネットホームページを通して広く一般の研究者に伝達する仕組みを用いた。提案者などからの質問に対する回答や採択結果についてもホームページでお知らせした。公募期間中に開催された説明会には70名を超える応募希望者の出席が得られ，事務局としては予想していないほど活発な質疑が行われた。

応募は採択予定件数よりかなり多い58件であった。平成12年度に応募された技術開発のテーマを分野に分けて表1にまとめた。

原子力発電関連技術の分野では従来型軽水炉の改良技術，受動的安全系を有する新型プラント概念の開発，低減速炉心の技術開発，

表1 平成12年度提案の技術開発テーマ

技術開発の分野	技術開発テーマ（順不同）	
① 原子力発電関連技術分野	1.原子炉内装型機構簡素化制御棒駆動装置 2.総合一体型ガードベッセル格納中小型PWR 3.新型ハイブリッド安全炉の事故時自然循環除熱 4.自立安全性を有する小型一体炉 5.海洋深水層を利用する原子力発電施設 6.給水駆動ジェットポンプ型原子炉プラント 7.被覆粒子燃料を使用した小型軽水炉 8.ニュークリアバッテリー軽水炉 9.高経済性低減速スペクトルBWR 10.超臨界圧水冷却炉 11.受動的安全性を具備した低減速軽水炉 12.超長期運転・簡素化BWR 13.超高燃焼MOX燃料PWR炉心	14.超長寿命水冷却金属燃料炉心 15.超長寿命小型安全炉 16.鉛ビスマス冷却長期燃焼固有安全炉 17.鉛ビスマス冷却小型原子力発電バージ 18.直接サイクル実用高速炉 19.リサイクル燃料活用原子炉 20.固体冷却多目的安全原子炉 21.光原子炉による超高効率直接発電システム 22.熱電素子発電システム 23.軽水炉MOX振動充填燃料 24.新型熱交換器 25.高温高压高性能プレートフィン型熱交換器 26.高温流体用緊急遮断弁
② 核燃料サイクル関連技術分野	1.新脱被覆技術 2.フッ化揮発法と溶媒抽出法のハイブリッド再処理 3.長尺切断燃料体溶解システム 4.革新的な軽水炉燃料リサイクル技術 5.超臨界流体を用いた再処理技術（直接抽出法） 6.軽元素同位体分離 7.長半減期MA・F P核種の分離回収システム 8.SF中アクチノイド全量回収・資源化 9.地層処分場の高圧環境における性能評価手法	10.深層地下水の流向流速計測技術 11.地下水中の溶存有機物の影響把握 12.岩石間隙構造と拡散・流体移動特性 13.緩衝材の新材料および新工法 14.微生物を利用したコンクリート除染技術 15.放射化コンクリートの処分レベル降下 16.廃止措置に伴って発生する放射性廃液処理技術 17.リサイクル燃料の廃熱を利用した農芸栽培 18.電力貯蔵用アクチノイド・レドックスフロー電池
③ 共通・総合・評価技術分野	1.地層処分並列シミュレーションベッド 2.天然バリア中の物質輸送予測 3.多孔質岩石媒体水理特性評価システム 4.TRU廃棄物処分のVEシステム 5.核燃料サイクルシステムの外部性評価手法体系 6.公衆のリスク認知に基づく原子力発電の外部性評価 7.複合燃料サイクル技術評価システム	8.気液二相流による構造物の連成振動に関する解析技術 9.シビアアクシデント損傷炉心の再臨界安全解析技術 10.原子力発電プラントに関する技術情報基盤の構築 11.可搬型中性子スペクトロメータ 12.リアルタイム安全性診断技術 13.磁気測定量の逆問題解析による定量劣化診断技術 14.原子力安全管理ロボットシステムの開発

*テーマの名称は提案された名称を正確に表すものではなく、著者の判断で略称したものである。

鉛ビスマスを冷却材として用いた新型炉心の開発、長寿命運転を目指す炉心の開発、新型燃料に関わる技術開発など26テーマが提案された。

核燃料サイクル関連技術の分野では、湿式・乾式・ハイブリッド等の再処理に関する技術開発、同位体分離回収に関する技術開発、地層処分に関する技術開発、廃止措置に関する技術開発など18テーマが提案された。

また、共通・総合・評価技術の分野では、プラント劣化診断技術、放射線計測技術、現

象シミュレーション・安全解析モデル開発、外部経済性評価手法開発など14テーマが提案された。

技術開発へ参加を希望した大学、研究機関、民間企業の延べ数は164機関にのぼり、その内訳は図2に示すとおり、民間企業89社、大学55校、研究機関20組織であった。また、1テーマの提案は平均で2.8機関が共同提案（連携体）で実施する計画であり、2～4機関の連携体での提案が一般的であったといえる。

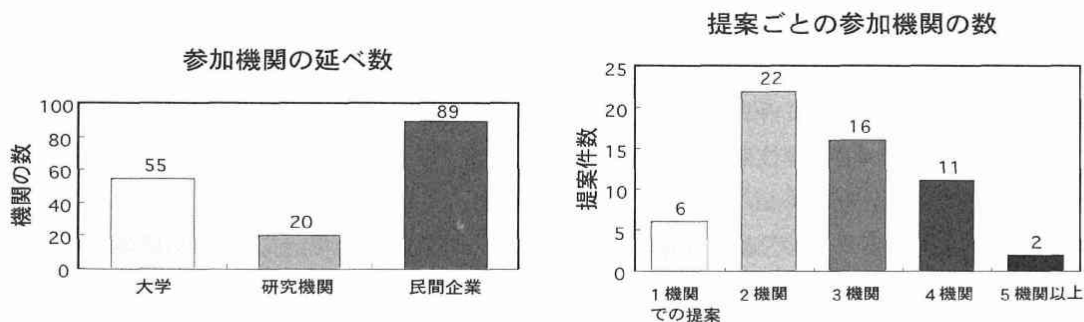


図2 公募への参加機関

(2) 採択テーマ

提案された58件の技術開発テーマを外部の専門家の協力を得て審査した結果、表2に示す10テーマを採択した。各テーマの概要は以下のとおりである。

① 超臨界圧水冷却炉の実用化に関する技術開発

超臨界圧水冷却炉は、原子力発電の経済性をより高めることを目指している。蒸気サイクルの超臨界化（目標：圧力24 MPa、温度530℃以上）により、高热効率（40%以上）を実現し、比容積が小さく気水の区別がない超臨界圧水の特徴を活かしてシステム合理化を

図る。（本テーマの内容等詳細は4章で紹介する。）

② 受動的安全性を具備した低減速型軽水炉に関する技術開発

軽水炉において稠密格子MOX（ウラン・プルトニウム混合酸化物）燃料集合体を採用することにより、中性子の減速を抑制して転換比を高め、高燃焼度・長期サイクル運転及びプルトニウム多重リサイクルが可能な炉心を設計する。炉型はボイド効果による低減速化が期待できる沸騰水型軽水炉（BWR）とし、建設費低減、受動的な安全機能、需要地近接地等の観点から小型受動的な安全炉を対象とし

表2 平成12年度採択技術開発テーマ一覧

	技術開発テーマ名	実施機関
1.	超臨界圧水冷却炉の実用化に関する技術開発	(株)東芝、東京大学、九州大学、(株)日立製作所
2.	受動的安全性を具備した低減速軽水炉に関する技術開発	日本原子力研究所、日本原子力発電(株)、(株)日立製作所、東京工業大学
3.	高経済性低減速スペクトルBWRに関する技術開発	(株)東芝、岐阜大学
4.	新型熱交換器（A I H X）に関する技術開発	三菱重工業(株)、大阪大学
5.	軽水炉MOX振動充填燃料の開発	(株)東芝、大阪大学、日本ニュークリア・フューエル(株)、日本核燃料開発(株)
6.	地層処分場の高圧環境における性能評価手法に関する技術開発	(株)神戸製鋼所、東京大学、(株)コベルコ科研
7.	フッ化揮発法と溶媒抽出法のハイブリッド再処理に関する技術開発	(株)日立製作所、埼玉大学、名古屋大学
8.	長半減期MA・FP核種の分離回収システムの開発	東京工業大学、三菱マテリアル(株)、日本原子力研究所
9.	放射性廃棄物地層処分における天然バリア中の物質輸送予測	(株)富士総合研究所、東京大学、日本原子力研究所
10.	核燃料サイクルシステムの外部性評価手法体系に関する技術開発	(株)三菱総合研究所、埼玉大学

たシステム設計を実施する。さらに熱的及び炉物理的特性に関する実験・解析を実施して成立性を確認するとともに、燃料の照射時挙動解析及びMOX燃料再処理技術の評価を行い安全性及び経済性向上を図る。本炉は軽水炉技術に立脚し、使用済燃料貯蔵量の削減及びプルトニウム蓄積量の抑制に貢献するものである。

③ 高経済性低減速スペクトルBWRに関する技術開発

低減速スペクトルBWRと乾式再処理、振動充填燃料を組み合わせた新リサイクルシステムは、ウラン・プルトニウム（U・Pu）有効利用や経済性の点から有望かつ革新性の高いシステムである。本技術開発では、新リサイクルシステムの中核となる中性子ストリーミングチャンネルの採用を特徴とする低減速スペクトルBWRの実用化を目的とする。稠密MOX格子炉心の炉心性能確認、乾式再処理から得られるPuと稠密格子との組み合わせでの核特性確認、臨界集合体による稠密MOX格子の核的性能確認とその測定手法開発、運転時・事故時の除熱性能試験による確認、核熱結合解析による炉心・プラント挙動評価、総合的な炉心成立性の確認を行う。

④ 新型熱交換器（AIHX）に関する技術開発

高速増殖炉（FBR）実用化のためには、プラントの安全性や信頼性を確保しつつシステムを簡素化することで建設・保守コストを低減し、経済性に優れたシステムを構築することが必要とされている。

システム簡素化の一例として、従来より2次系の削除が検討されてきているが、単に2次系を削除しただけでは、安全性を十分に確保することが困難と考えられている。そこで

安全性を確保しつつ、2次系の大幅削除を実現できる概念として大阪大学で研究されてきた新型熱交換器（AIHX）を提案し、AIHXを実機プラントへ適用した場合の概念構築を行う。

⑤ 軽水炉MOX振動充填燃料の開発

ペレット燃料製造では成型、焼結、研削等の複雑な工程が存在するため、軽水炉用MOX燃料製造法にこれを適用した場合は燃料加工コストが大幅に上昇する懸念がある。このため本技術開発では軽水炉用MOX振動充填燃料の燃料製造技術並びに炉心・燃料設計技術の確立をはかるとともに、許認可対応データの蓄積をはかり、軽水炉用MOX振動充填燃料実用化への目処をつけることにより、MOX軽水炉燃料製造コストの大幅な低減を目指す。

⑥ 地層処分場の高圧環境における性能評価手法に関する技術開発

廃棄物地層処分時に関与する現象への圧力の物理・化学的な効果・影響については国際的に重要な評価課題であるとされている。しかし、地下環境の加圧状態を地上で再現することは実験装置並びに実験手法的にも容易でないため、十分に対応できていないのが現状である。そこで、本事業では神戸製鋼(株)が保有する高圧技術を応用し、処分場での高圧環境を再現するために既存の高圧試験装置をベースに改良開発する。また、信頼性の高いデータを取得するために実験的手法を開発する。さらに、圧力による効果・影響を考慮した処分場環境の時間的、空間的変化を定量的に把握するために解析・評価技術の開発を行う。

⑦ フッ化揮発法と溶媒抽出法のハイブリッド再処理に関する技術開発

フッ化揮発法と溶媒抽出法のハイブリッド

再処理により、処理施設を大幅に小型化し、経済性向上を図るとともに、軽水炉期から軽水炉、FBR併用期を視野に入れた次世代の再処理技術の完成を短期間で目指す。(本テーマの内容等詳細は4章で紹介する。)

⑧ 長半減期MA・FP核種の分離回収システムの開発

アメリカシウム241 (Am-241)、Am-243、キュリウム245 (Cm-245) などのマイナーアクチニド (MA) 元素や主要核分裂生成物 (FP) であるヨウ素129 (I-129) などの長半減期核種はガラス固化処分後も長期にわたり放射毒性を有し、自然放射能レベルまで減衰するのに10万～100万年を必要とする。長半減期核種を原子炉で短半減期核種に変換し、廃棄物の短期無毒化をするための核変換処理システムの構築が望まれている。本提案では、東京工業大学で開発が進められている「親水性多座抽出剤の協同効果を利用したソフト金属の抽出技術」及び「再処理オフガスからの放射性核種の分別回収技術」を応用してMA及びI-129の高選択分離技術を開発し、従来の群分離技術の簡素化及び高機能化を図る。核変換処理システムの実用化、ならびに高レベル廃棄物の深地層処分に対する安全性・経済性の向上に資する。

⑨ 放射性廃棄物地層処分における天然バリア中の物質輸送予測

本技術開発では、近年研究成果が上がりつつある微視的機構論に基づいたシミュレーション技術と、実験・理論研究による微視的輸送モデルを基礎として、地下水流れ、吸着・離脱・会合といった微視的素過程から巨視的物質輸送までを直接計算するマルチスケール・シミュレーション技術、VR (バーチャル

リアリティ) による複雑輸送現象の可視化技術を利用した仮想実験システムを開発し、母岩中核種の輸送特性、移行遅延効果等の新しい評価技術を確立することを目的とする。(本テーマの内容等詳細は4章で紹介する。)

⑩ 核燃料サイクルシステムの外部性評価手法体系に関する技術開発

核燃料サイクルの全段階を対象として、人の健康、自然生態系、人工環境等への影響を評価して、かつこれらの影響を貨幣価値換算することにより、核燃料サイクルシステムの操業に伴って発生する社会的コスト (外部費用) を定量化する核燃料サイクルシステムの外部性評価手法体系を開発する。本技術開発により、

- (a) 原子力開発計画：他電源との比較、炉型比較、ワンススルーシステム、プルトニウムリサイクルシステムなど核燃料サイクルシステムの比較等を行う際の指標
- (b) 外部費用の内部化策：負荷対策の導入、安全基準や環境基準等の規制の強化または緩和など
- (c) 原子力問題に係わる理解促進：原子力問題に係わる社会の理解促進のための素材の効果が期待できる。

これらの技術開発テーマについては、現在、各テーマの計画に基づき技術開発を実施しているところである。採択した技術開発は3～5年間で実施する計画となっているが、各年度ごとに成果に対する評価を行い、次年度への継続を審査することとしている。

4. 革新的原子力技術開発の紹介

平成12年度に採択され、現在実施している

技術開発の中から3つのプロジェクトについて目的・背景，技術的課題，実施計画などの概要を紹介する。

4. 1 超臨界圧水冷却炉の実用化に関する技術開発

本技術開発では，(株)東芝，東京大学，九州大学，(株)日立製作所の4者連携体で，発電性能向上とシステム簡素化，成熟した火力技術利用により経済競合力を高める超臨界圧水冷却炉の実用化に向けた技術開発を行う。

(1) 背景と目的

原子力開発はわが国だけでも50基以上の商業用原子炉の導入という成果に結びついたが，最近是他電源と比較して経済性でさらに優位に立つことが望まれている。また，先進国での電力需要の伸びの鈍化，初期投資額や投資リスクに関する不安，環境保護の点から原子力利用のグローバリゼーション，すなわち，発展途上国での導入等の課題に対処できる原子力プラントが望まれている。このような背景から，大型化以外の方策も用いた競争力の高い原子力プラントの開発が必要である。

そのためには，火力発電技術の開発経緯からも原子力発電プラントの超臨界圧化による性能向上とシステム簡素化が有効と考えている。超臨界圧化は，蒸気サイクルを用いた火力発電では既に実用化された技術で，タービン入口条件（蒸気の温度と圧力）を水の臨界点（22.1 MPa, 374℃）以上に高め，熱効率の向上とシステム簡素化を図っている。熱力学の法則からタービン入口条件が高いほど，蒸気サイクルの熱効率は向上する。タービン入口条件が高いほど蒸気の比容積が小さくなるので，タービンや熱交換器が小型化し，システム簡素化，付随する系統の合理化や建屋の小型化が期待される。さらに，亜臨界圧水と異なり超臨界圧水は沸騰現象がないので，軽水炉など蒸気プラントで用いられている再循環系統，気水分離器・蒸気乾燥器，もしくは蒸気発生器が不要となり，システムが簡素化される（図3）。結果として，原子炉压力容器，格納容器，原子炉建屋もコンパクトになり得る。その上，成熟した火力超臨界圧ボイラー・タービン技術を利用できるので開発投資における簡素化も期待できる。以上の効果により，超臨界圧化は原子力発電プラントの経

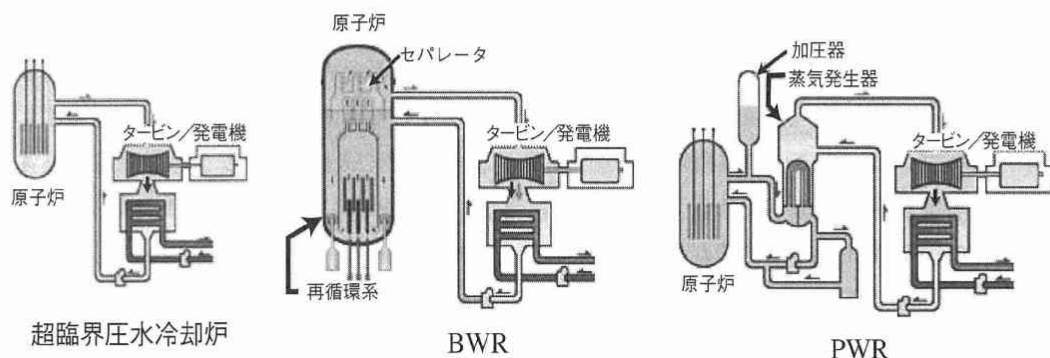
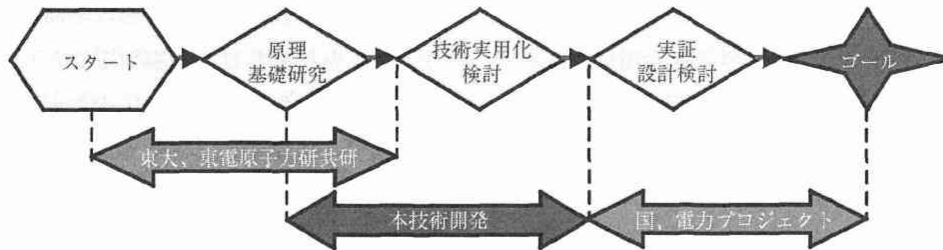


図3 代表的な炉型のシステム構成の比較



原理・基礎研究：超臨界圧水炉のキー技術について、概念を構築し、原理を示す段階

技術実用化検討：超臨界圧水炉プラント概念を構築し、模擬試験や解析で技術的実用性を示す段階

実証・設計検討：大規模試験／照射試験を実施し、実機プラント設計に必要な情報をそろえる段階

図4 超臨界圧水冷却炉実用化への道筋

済競争力を高められると予想される。

(2) 実用化への道筋

図4のように、超臨界圧水冷却炉の実用化までに、3段階からなる技術開発が必要と考える。既に東京大学が中心になって、1990年頃より原理・基礎研究を実施してきた。本技術開発は、原理・基礎研究と技術実用化検討に位置付けられ、さらに大規模試験や照射試験などからなる実証・設計検討へつなげる役目を果たすものである。実証・設計検討は、技術実用化検討で実用性が示された後から実施されるが、大規模試験が主となるので、過去の改良型沸騰水型軽水炉（ABWR）開発の例から、国や電力の支援を受けながら10年程度必要と想定される。

原理・基礎研究の経緯を簡単に説明する。本技術開発で視野に入れている超臨界圧水冷却炉概念は1990年に東京大学より発表された⁽¹⁾。なお、1950年代1960年代にも蒸気冷却炉などとともに超臨界圧水により炉心冷却を行う原子炉概念は発表されていたが、東京大学の概念はそれらの発展・改良ではなく、独立

したものである^{(2) (3)}。東京大学での研究は、その後も継続して実施され、炉心設計検討から、過渡事象評価、安全性評価、運転方法に至るまで多くのことが検討されてきた。この内容については、例えば東京大学主催の弥生研究会で定期的に報告がなされている⁽⁴⁾。

東京大学以外でも、例えば東京電力、原子力研究所と国内原子力メーカー3社（三菱、日立、東芝）は共同して、超臨界圧水冷却炉の概念設計検討を実施した^{(5) (6)}。外国でも、欧州共同体やカナダ、ロシアなどでも超臨界圧水冷却炉概念の研究開発が行われている^{(7) (8)}。

原子炉概念だけでなく、材料、水化学、熱水力などの分野で多くの基礎研究が行われている。中でも、九州大学では超臨界圧火力ボイラーの伝熱特性について精力的に研究がなされてきた。特に、伝熱劣化と呼ばれる現象に対して有用な相関式や設計のベースとなるデータを発表してきている⁽⁹⁾。また、東京大学では、特に伝熱劣化の予測手法の開発に取り組む、既に1994年には数値シミュレーションによる伝熱劣化の解明に成功している⁽¹⁰⁾。

このように多くの基礎研究によって実用化が具体化されてきた超臨界圧水冷却炉の基本検討を実施するのが、本技術開発である。

(3) 技術開発計画及び目標

本技術開発は、これまでの原理基礎研究から抽出された課題を解決する技術実用化検討段階として位置付けられ、国や電力プロジェクトとして実施する大規模試験や照射試験などからなる実証設計検討への橋渡しの役目を果たす。その技術実用化検討を、3つのサブテーマ：「プラント概念に関する技術開発」、「伝熱・流動に関する技術開発」と「材料・水化学に関する技術開発」に分けて実施する。

① プラント概念に関する技術開発

本サブテーマでは、原子力プラントとして特徴的な系統・機器の設計、性能評価を通じて、超臨界圧水冷却炉の概念検討を行うことが目標である。概念検討には、適宜、伝熱・流動検討と材料・水化学検討の成果を取り込み、次の段階で実施される実証・確証試験などの計画も策定する。

これまでの研究開発から、タービン入口条件をより高めつつ、より一層のシステム簡素化が重要と考えられるため、入口温度を火力超臨界圧タービンの仕様に合わせるとともに再熱サイクルを視野に入れた超臨界圧炉（SCPR: SuperCritical Pressure Reactor）概念を設計ターゲットとする。この構成が実現可能ならば、熱効率44%を達成しつつ、原子炉系統、タービン系統、建屋の大幅な簡素化により建設単価をABWRと比較して数十%低減できると見込まれ、これを開発目標とする。

② 伝熱・流動に関する技術開発

本サブテーマでは、試験検討、解析検討を

通じて超臨界圧水冷却炉における高温超臨界圧水の伝熱流動特性を把握することが目標である。試験検討は、超臨界圧火力ボイラーの研究開発で実績豊富な九州大学において、模擬流体（R22）を用いた超臨界圧伝熱流動試験を実施する。解析検討では、試験の評価解析、既存の軽水炉設計解析コードの超臨界圧水冷却炉への適用性検討を実施する。

これまでの研究開発から、超臨界圧水冷却炉の実現には伝熱劣化対策が重要と考え、伝熱劣化の機構を試験的、解析的に確認し、対策を開発目標とすることが指摘された。この伝熱劣化は、亜臨界圧での熱伝達が沸騰遷移領域で悪化し、バーンアウトを起こす現象とよく対比される。伝熱劣化対策により、タービン入口条件がどこまで高められるかが明らかになり、SCPR概念の実現可能性が高まる。

③ 材料・水化学に関する技術開発

本サブテーマでは、超臨界圧水冷却炉に特有の炉内構成材料（燃料被覆管・炉内構造物）技術課題を抽出し、超臨界圧条件下での強度試験／腐食試験／照射模擬試験により、材料の絞り込みを行い、適用性・成立性を検討することが目標である。様々な材料候補の強度試験から、材料基礎特性や機械的性質が得られる。腐食試験として、耐食性Uバンド試験、低歪速度応力腐食割れ（SCC）感受性試験を実施して、一様腐食特性や局部腐食特性を整理する。照射模擬試験によりスウェリング、照射クリープ、耐照射損傷性に影響ある特性を取得する。

これまでの研究開発から、超臨界圧水冷却炉の実現には、特に高温超臨界圧条件下で被覆管や炉内構造物の腐食、SCCが重要と考え、それらの特性を把握し、適した材料及び適し

た温度や水化学条件を見出すことを開発目標とすることが指摘された。このような材料や条件が明らかになれば、SCPR概念の実現可能性が高まる。

4. 2 フッ化揮発法と溶媒抽出法のハイブリッド再処理に関する技術開発

本技術開発では、(株)日立製作所、埼玉大学、名古屋大学の3者連携体で、再処理施設の小形化、廃棄物の低減など経済性・安全性の向上を図るハイブリッド再処理に関する技術開発を行う。

(1) 背景と目的

原子炉及び核燃料サイクルの将来の形態は時期により3種類あると考えられる。第1は軽水炉による発電を主とする時期であり、第2は軽水炉とFBRが併用される時期、第3はFBRの自立サイクルが確立される時期である。

この3種類の時期のうち、第一期の前半における再処理の任務は、主として、軽水炉燃料サイクルであり、軽水炉燃料中のPuはブルサーマルでの燃焼を前提としたMOXとして、Uは濃縮による再使用または貯蔵が可能な形態で、ともに高精製度で回収することである。一方、第1期後半から第2期前半にかけては、FBR用初期装荷燃料の製造のための任務が再処理に含まれてくる。この時期においては、FBRのためのMOXは、高精製度を要求されなくなる可能性がある。一方、軽水炉燃料とFBR燃料の富化度の違いから、FBRで必要とする以上のUが余剰Uとして再処理施設で発生し、このUは濃縮による再使用または貯蔵を行うため依然として高精製度で回収することが要請される。第2期後半から第3期におけ

る再処理の任務は、この時期の主たる原子炉であるFBRの燃料を再処理することであり、FBR用のMOXを製造する。この時期の再処理においては、U及びMOXの精製度は強くは要求されず、工程的に簡素化された再処理法が最適と考えられる。

第2期前半くらいまでの再処理施設は、第2期後半から第3期に想定されるFBRサイト内コロケーション型再処理施設ではなく、集中立地型になり、燃料製造も一括になる可能性が高い。この時期においては燃料製造時のハンドリング及び輸送を考慮すれば、依然としてMOXが高精製度であることの利点は高い。

U及びMOX、またはPuを高精製度で回収する再処理技術として、溶媒抽出を用いたピュレックス法がわが国でも実用化され、現在六ヶ所に建設中の再処理施設でも採用されている。ピュレックス法は核燃料物質を高精製度で回収するには最も実績がある優れた方法であり、開発が急がれる第1期から第2期前半の次世代再処理ではこの方法をベースに技術開発を行うことが望ましいと考える。一方ではピュレックス法に対して、施設の小型化、廃棄物量の低減を行っていく必要もある。

一方、1980年代まで研究が続けられた再処理方法に、フッ化物揮発法がある。この方法はUの精製がコンパクトになる点で優れているが、Puの精製が難しいという課題があった。そこで、Uの精製にはフッ化物揮発法を、Pu精製にはピュレックス法を用いることで、相補的な優れた再処理方法を考案した。

本開発は、この新しいハイブリッド再処理法による、設備の小型化、低レベル廃棄物発生量の低減、転換施設の省略、重要核種の分

離といった、大きな経済的効果の発現、及び、Puに関する固有の安全性、固有の核不拡散性といった安全性の向上を目的として実施している。

(2) 技術開発の内容

① 新しい再処理法の構成

本開発で実用化を目指す新しいハイブリッド再処理法の構成を図5に示す。まず、脱被覆工程で使用済軽水炉燃料を粉碎して粉末状にする。次いで、フッ化工程でフッ素を作用させ、使用済燃料に含まれていたUの90%以上を揮発性のフッ化物に転換する。揮発したUフッ化物はフッ化ナトリウム (NaF) などの吸着剤と蒸留により、精製度(精製前の不純物の放射能の量を精製後の不純物の放射能の量で除した値)が $10^7 \sim 10^9$ まで精製される。このUは濃縮に供される場合と同じく、六フッ化ウラン (UF₆) の形態を取っているので、転換施設を介することなく、そのまま濃縮、再転換施設に供給して燃料原料として再利用することが可能であり、また、一時貯蔵に供

することもできる。一方、Uを揮発させた残りの使用済燃料は10%以下のUと、Pu、MA、FPのフッ化物からなる。この残渣から、フッ素を除いた後、溶解工程で硝酸溶液に溶解し、清澄する。この溶液は、ピュレックス法と同様の工程で処理される。すなわち、リン酸トリブチル (TBP) などの有機溶媒を用いた溶媒抽出法により、硝酸溶液からUとPuを有機溶媒に抽出し、MAとFPを除去する。ついで、希薄な硝酸をUとPuを含む有機溶媒に接触させ、UとPuを再び硝酸溶液に取りこむ。必要な精製度が得られるまでこの操作を行ったのち、UとPuを含む硝酸溶液を脱硝酸・焙焼し、MOX原料となるUとPuの混合酸化物を得る。

② 期待される経済的効果

ハイブリッド再処理法で期待される経済的効果の第1は、従来から大型であることが難点であった溶媒抽出工程を著しく小型化できる点である。粉碎後の軽水炉燃料に含まれるPuは約1%、FPとMAは約3%であるから、Uの90%以上を事前分離すると、溶解と溶媒抽出工程で扱う物質量は15%程度に減少する。

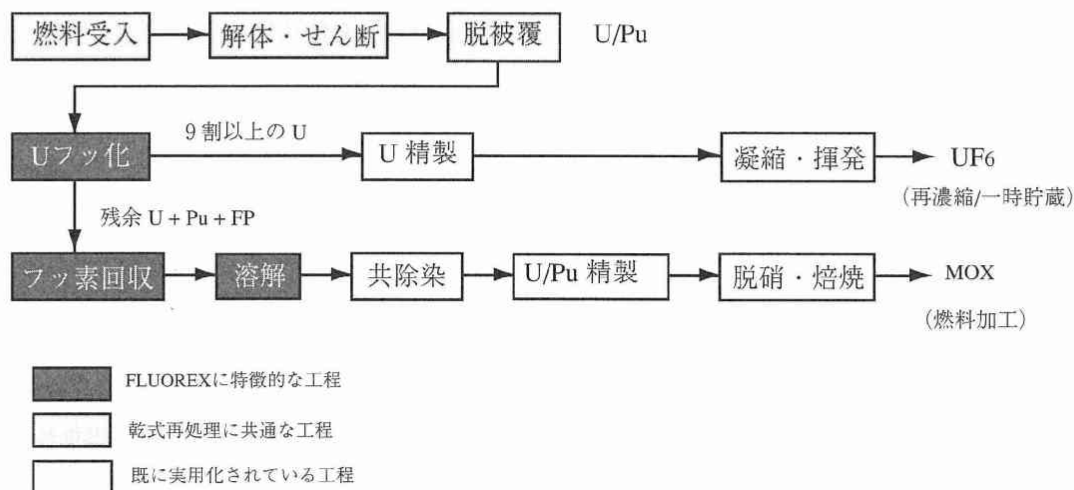


図5 ハイブリッド再処理法の構成

すなわち、溶解と溶媒抽出工程は従来の再処理設備の6分の1以下の処理量の設備でよくなる。フッ化物揮発による分離の特徴は、分離したUF₆をNaFのような吸着剤と蒸留により簡単に精製できることである。文献⁽¹¹⁾によればその精製度は10⁷から10⁹に達する。従って、回収したUを精製して軽水炉用に再利用する場合には、この新しい再処理方法が著しくコンパクトになるという経済的効果がある。

経済的効果の第2は、低レベル廃棄物発生量の低減である。既に述べたように、溶媒抽出系で扱う物質の量が従来の6分の1以下に低減されるため、使用される試薬、溶液の量も軽減され、低レベル廃棄物処理系及び低レベル廃棄物発生量が1桁低減できる。

経済的効果の第3は、回収したUが濃縮施設に供給されるのと同じ、UF₆の化学形で、かつ精製度が高いことから、U-235を再濃縮するためのガス拡散法または遠心分離法工程に直接適用できる。このため、軽水炉燃料の再利用にかかわる一連の処理において、酸化ウランのUF₆への転換と精製を行う転換設備が省略できるため、燃料サイクルコストが低減される効果がある。

ハイブリッド再処理法で期待される経済的効果の第四は、いくつかの、処分上重要な元素を分離でき、高レベル廃棄物処分の選択肢を広げうる点である。たとえば、ルテニウム/ロジウム (Ru/Rh)、テクネチウム (Tc)、ヨウ素 (I)、ネプツニウム (Np) は容易にU精製系で回収でき、高レベル固化体とは別に処理できる可能性がある。このことは、地層処分の選択肢を広げ、より経済的な方法を選定できる可能性を与える。

③ 安全性の向上

本方式のハイブリッド再処理法の元になったフッ化物揮発法では、Uのフッ化分離に続き、高濃度フッ素によるPuのフッ化揮発工程が含まれていた。しかし、本再処理法ではUの一部のみを分離すれば良いので、このPuのフッ化回収は行わなくて済む。このため、気体状のPuを扱わなくてよく、固有の安全性をもち、フッ化物揮発にかかわる部分で、従来法のフッ化物揮発法よりも安全性が高いと考える。

従来のピュレックス法では、MOXのPu富化度が使用済軽水炉燃料より高いことから、UとPuを分離する工程が溶媒抽出工程に含まれ、純粋なPuが単離されている。この新しい再処理方法ではUの大部分を事前分離して、MOXに必要なPu富化度を確保するため、溶媒抽出でUとPuを分離する必要がある。工程内にPu単体の工程が含まれないことは、核拡散抵抗上有利と考える。

(3) 開発内容

新しいハイブリッド再処理法は、フッ化物揮発法とピュレックス法の各々の得意とする部分を組み合わせた方法である。各々の固有部分は既に多くの開発が行われている。両者を組み合わせるインターフェイス部分、すなわち、Uを選択フッ化する技術とUを分離した後フッ化残渣を溶媒抽出のために硝酸溶解する技術は原理的には可能であることが分かっているが、工業技術としては今後開発が必要である。連携部分においては、その工学的成立性を数年で実証し、その後さらに数年でPuを用いた実証を行う必要がある。表3に今後の開発方向の検討事項を示す。

表3 今後の開発課題

工程	開発課題	内容
Uフッ化	フレーム炉設計手法の確立 フレーム炉 U/Pu 分離確証試験	流動床方式での実績あり より合理化の可能性あるフレーム炉の開発
フッ素 回収	フッ化残渣→酸化物転換、フッ 素回収手法の確立	酸化転換反応での表面妨害反応の有無確認、フッ素 回収条件の確認
溶解	酸化物溶解特性確証試験	

本開発では、ハイブリッド再処理法に関して概念設計を実施し、従来の軽水炉サイクル技術と比較するとともに、Uの選択フッ化条件の把握とフッ化残渣溶解過程の把握のため、主として模擬物質を用いた試験を実施し、成立性の見通しを得る。

ハイブリッド再処理システムの具体的検討として、概念設計により下記事項を実施する。

- ・本再処理方式選定の妥当性確認（他方法との詳細比較検討）
- ・本再処理方式の成立性の詳細評価
- ・種々の燃料サイクルへの適用性の評価
- ・本再処理プロセスの設計研究
- ・本再処理プロセスの経済性評価

また、本再処理システムの技術的成立性を確認することを目的として、インターフェイス部分にかかわる開発要素を解決するためのコールド試験を実施する。

以上の検討、試験結果を体系的に整理し、今後実施すべき課題を摘出する。また、摘出された課題の解決策について検討し、さらなる開発計画を立案する。

4. 3 放射性廃棄物地層処分における天然バリア中の物質輸送予測

本技術開発では、(株)富士総合研究所、東京大学、日本原子力研究所の3者連携体で、放射性廃棄物地層処分場での天然バリア母岩中

の地下水の流れとそこにおける物質輸送現象を把握し正しく評価する新しい評価技術の開発を行う。

(1) 背景と目的

放射性廃棄物地層処分を考える上で、天然バリア母岩中の地下水の流れとそこにおける物質輸送現象を把握し正しく評価することは極めて重要である。母岩中の物質輸送は、母岩亀裂、空隙構造が幾何的に複雑であることに加え、鉱物表面への吸脱着、流れの中で化合物の会合、コロイド形成などの微視的・物理・化学現象が組み合わさった複合現象であるため、放射性核種の収着による移行遅延、コロイド形成による遅延効果、または遅延抑制効果等を正確に考慮し母岩中核種の輸送特性を評価する技術は確立されていない。

このような複雑現象を解明する手段として、計算科学技術の適用が考えられる。しかしながら、現在の放射性廃棄物地層処分の安全性評価で用いられている計算機シミュレーションでは、母岩を大きいスケールで平均化し、透水係数、総括拡散係数など巨視的輸送パラメータ、構成式を援用することによりマクロなスケールでの挙動を評価しているため、微視スケールの現象との関連を評価したり、広い範囲の条件に適合する解析・評価を行うことが困難である。

本技術開発では、上記の技術課題をブレークスルーする技術として、近年研究成果が上がりつつある微視的機構論に基づいたシミュレーション技術と、実験・理論研究による微視的輸送モデルを基礎として、地下水流れ、吸着・離脱・会合といった微視的素過程から巨視的物質輸送までを直接計算するマルチスケール・シミュレーション技術、VR（バーチャルリアリティ）による複雑輸送現象の可視化技術を利用した仮想実験システムを開発し、母岩中核種の輸送特性、移行遅延効果等の新しい評価技術を確立することを目的としている。

（２）微視的機構論モデル

本技術開発では、岩石中の微視的輸送現象をシミュレーションする計算モデルとして、微視的機構論に基づいたシミュレーション技術が開発される。具体的には、複雑形状への適用性の高さから岩石空隙スケールでの石油回収シミュレーション等に应用されている格子ボルツマン法（LBM：Lattice Boltzmann Method）、東京大学が提案し、コロイドの形成や化学反応の考慮が容易な新しい格子流体モデルである実数格子ガス法（Real-coded Lattice Gas Automata）を核にした計算モデルが開発される。微視的機構論モデルは、①ポリマー、コロイドを含む流れや多相流れ、化学反応流れなど従来手法では取り扱い不可能な複雑流体運動を解析できる、②境界条件処理が単純であり、複雑形状の取り扱いが容易である、③計算処理の局所性が高く、並列化が容易なため大規模シミュレーションに適するという特徴を持つ。また、これらのモデルは、分子動力学法などによるミクロシミュレ

ーションの結果や知見を、マクロな輸送特性評価に反映できるメゾスケール（マクロとミクロの中間スケール）計算モデルとして注目されている。

岩石、岩盤中の流動、輸送現象シミュレーションについては、パーコレーションモデルと呼ばれる簡易モデルなども存在するが、物理的健全性に欠けるという問題がある。また、岩盤中の亀裂構造をネットワーク化したシミュレーションモデルが、より詳細な解析モデルとして研究され、岩盤中の不均一な亀裂構造における輸送特性の予測に成果を挙げているが、岩石空隙での吸脱着、コロイド挙動といった複雑輸送現象を直接評価するには至っていない。これに対し、本技術開発で開発する計算モデルは、スケールに合わせた運動モデルにより比較的小規模なスケールからマクロなスケールまでを物理的健全性を維持した上で統一的に取り扱うため、岩石中の微視的輸送現象をメカニズムに忠実なモデルで直接シミュレーションできる革新的な評価技術になると期待できる。

（３）微視的機構論モデルによる流動特性パラメータ予測

平成12年度の技術開発では、物質輸送特性予測シミュレーションの中核となる岩石中の流動特性を予測するための計算モデル開発として、実数格子ガス法、格子ボルツマン法による複雑流路内シミュレーション技術開発が東京大学を中心に行われている。その成果の一部を以下に紹介する。

従来の物質輸送シミュレーションでは、岩石中の地下水流動を空隙率と透水係数データをもとにダルシー則と呼ばれるマクロな関係

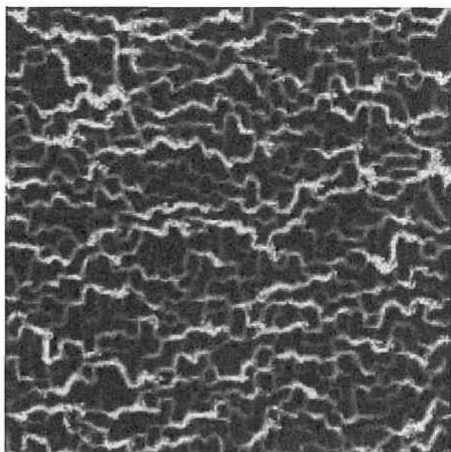


図6 ポーラスメディアシミュレーション結果

式 $J = -(k/\mu) \nabla P$ (J : 単位流量, k : 透水係数, μ : 粘性係数, ∇P : 圧力勾配) に基礎を置き平均的地下水流動を計算するのに対し, 微視的機構論モデルによるシミュレーションでは, 岩石などの多孔質構造の総称であるポーラスメディア構造中の流体運動を直接シミュレーションする。

図6, 図7には, 開発中の計算モデル(この例では格子ボルツマン法)により, 擬似ポーラスメディア(複雑構造物)内の流動をシミュレーションした結果を示す。図7に示した結果から複雑構造物中の詳細流動がシミュレーションできていることが分かる。この結果を解析体系全体で平均化処理を施すことにより, 従来手法では入力パラメータであった, 巨視的輸送特性パラメータの1つ, 透水係数を評価することができる。透水係数評価式として知られているコゼニー・カーマン(Kozeny-Carman)モデル式により評価された透水係数と比較すると規則的な擬似ポーラスメディア形状の場合に良く一致することが確認された。同式は, 観測・測定値がない場合などに経験式として援用されるが, 実際の岩

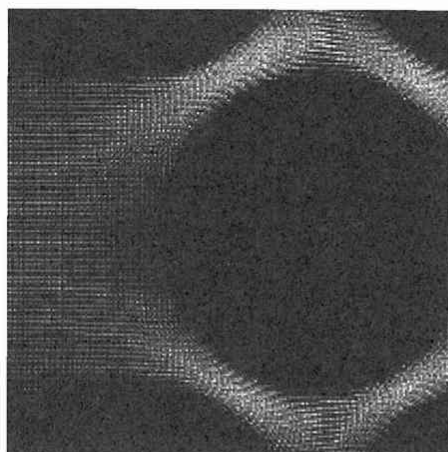


図7 詳細流れ分布

石構造では必ずしも一致しない場合もあり, 適用範囲に制約がある。これに対し, 開発中の計算モデルの場合には特別な制約なく計算を行うことが可能である。さらに, 岩石中の詳細シミュレーションが可能のため, 今後開発する反応, 表面への吸脱着現象モデルも現象に忠実にモデル化できると考えられる。

(4) 並列処理による大規模計算

岩石中の物質輸送特性をシミュレーションするには, 微視的機構論モデルによる岩石ポーラスメディア構造の3次元大規模体系での計算が必要となる。同モデルは, 計算モデルの局所性が強いいため計算処理を並列化することによりこの問題に対応できると考えられる。試験的に行った並列効率測定では, 日本原子力研究所のSR8000並列計算機上の32プロセッサを使用した場合に, 単一プロセッサの約17倍程度, 部分処理については32倍の性能を有することが確認された。今後, よりスケーラブルな性能が発揮される計算アルゴリズム, 領域分割, 要素並列処理方法に関する検討を行い, さらに性能向上を目指す予定である。

(5) 仮想実験システムの構成

既存の計算機シミュレーションシステムの多くは、ソフトウェア、情報処理の複雑さから、解析者はブラックボックスとなりがちなシミュレータの理解、データ作成、シミュレーション結果の理解・評価や整理に、また計算モデル研究者は、ソフトウェア作成等に時間を費やしてきた。このような課題に対し、本技術開発で構築するシステムは、物質輸送現象解析者あるいは計算モデル研究者が、計算機システム、並列処理といった計算技術や情報処理技術を意識することなく、微視的機構論モデル開発や物質輸送シミュレーションを実行でき、放射性廃棄物地層処分で問題となる岩石中の複雑輸送現象を理解し、物質輸送特性予測できるためのシミュレーション・システムである。すなわち、複雑形状を持つ岩石ポーラスメディアをコンピュータ上に作り上げ、その上で様々な輸送現象を対象とした数値実験ツール（計算モデル）開発、数値実験（シミュレーション）を行い、物質輸送特性を測定・評価する仮想実験システムを実現することを目的としている。

具体的には、微視的輸送現象シミュレーションを計算機上で実行する環境として、①計算モデル開発、②輸送解析条件設定、③シミュレーション状況把握（モニタリング）、④輸送特性予測、⑤複雑構造中の現象可視化・理解、⑥データ、シミュレーション結果の管理等に注目し、シミュレーションソフトウェアにおける並列処理の隠蔽方法、モデル開発支援、解析データ設定支援、VR技術を活用した可視化・現象把握技術、データ管理方法などに関する調査・検討、仮想実験システムの概

念設計が行われている。

5. おわりに

提案公募型技術開発は、限られた資源の有効活用の利点を背景に、今後さらに継続発展していくものと予想される。本事業においてはわが国の原子力技術の安全性・経済性の飛躍的な向上を目指す革新的な技術の発掘と実用化に向けた研究開発を積極的かつ合理的に推進することが求められる。

当研究所では、平成12年度に採択した技術開発テーマを審査委員会による審査を経て、平成13年度にも継続するか否かを判定する。各技術開発ではその成果として特許等の知的所有権の取得や論文発表などを積極的に行うことが奨励されており、各年度末には公開の成果発表会が開催される予定である。平成13年度には新規の技術開発テーマの公募を実施する予定である。本制度が関係者へかなり周知されてきており、平成13年度には前年度を上回る応募件数と質の高い技術開発テーマの提案が期待される。

一方、米国ブッシュ政権が打ち出した国家エネルギー政策では、原子力開発に積極的な政策が示されており、引き続き米国でのNERI、I-NERI（国際共同によるNERI）や第4世代原子力発電システム開発計画は活発に推進されるものと思われる。また、IAEAにおける革新原子炉開発プログラム（INPRO）が組織され国際的な原子力開発の動きは活発になりつつあるという状況である。

当研究所もこうした国際的な次世代原子力技術開発に係わる種々の活動に関与し、その動向を的確に把握している。本事業では次の

段階として、こうした国際的な共同研究活動へ貢献することを念頭にした取り組みが必要であると考えている。本技術開発がわが国の原子力の技術開発基盤を強固なものとし、国際的な研究開発テーマ及び研究開発者の育成を図り、国際競争力を高める援助とする必要がある。本事業で発掘された革新的原子力技術が世界の原子力研究をリードする新たな技術に発展することを期待している。

謝辞

最後に本稿の作成に際して多大なるご協力をいただきました本事業の委託元である経済産業省資源エネルギー庁、技術開発実施者である(株)東芝、(株)日立製作所、(株)富士総合研究所、東京大学、九州大学、埼玉大学、名古屋大学、日本原子力研究所の関係者の皆様に深く感謝する。

参考文献

- (1) 岡 芳明, "蒸気冷却高速増殖炉に関する調査と検討", 第1回新型炉研究会報告書, (1990) pp.61-72.
- (2) OKA, Y., KOSHIZUKA, S., "Design Concept of Once-Through Cycle Supercritical-Pressure Light Water Cooled Reactors", Proceedings of The First International Symposium on Supercritical Water-cooled Reactors, Desihn and Technology, (2000) pp.1-22.
- (3) OKA, Y., "Review of High Temperature Water and Steam Cooled Reactor Concepts", Proceedings of The First International Symposium on Supercritical Water-cooled Reactors, Desihn and Technology, (2000) pp.37-57.
- (4) 木藤 和明, 越塚 誠一, 岡 芳明, "超臨界圧軽水冷却炉における過渡事象判断基準の高度化と安全解析", 第9回 新型炉研究会報告書, (2000) pp.49-70.
- (5) TANAKA, S., et al., "Core Design of Supercritical-Pressure Light Water Reactor", Proceedings of ICONE4, Vol.2, ASME, (1996) pp.199-211.
- (6) TANAKA, S., et al., "Plant Concept of Supercritical Pressure Light Water Reactor", Proceedings of ICONE5, ASME, (1997) pp.1-6.
- (7) G. Heuser, U. Muller, T. Schulenberg, D. Squarer, "A European Development Program of a High Performance Light Water Reactor (HPLWR)", Proceedings of The First International Symposium on Supercritical Water-cooled Reactors, Desihn and Technology, (2000) pp.23-28.
- (8) Stephen, J., Bushby, et al., "Conceptual Designs for Advanced, High-Temperature CANDU Reactors", Proceedings of The First International Symposium on Supercritical Water-cooled Reactors, Desihn and Technology, (2000) pp.29-36.
- (9) YOSHIDA, S., MORI, H., "Heat Transfer to Supercritical Pressure Fluids Flowing in Tubes", Proceedings of The First International Symposium on Supercritical Water-cooled Reactors, Desihn and Technology, (2000) pp.72-78.
- (10) KOSHIZUKA, S., OKA, Y., "Computational Analysis of Deterioration Phenomena and Thermal-hydraulic Design of SCR", Proceedings of The First International Symposium on Supercritical Water-cooled Reactors, Desihn and Technology, (2000) pp.169-179.
- (11) 乾式再処理研究専門委員会, 「乾式再処理の現状と問題点」, 日本原子力学会誌9巻9号530～535ページ (1967)
- (12) 河野, 平林, 大橋, 陳, 大谷, 渡辺, 地層処分における天然バリア中の物質輸送予測の技術開発 (1) 技術開発の全体概要も, 原子力学会2001年秋の大会講演予定
- (13) D. ROTHMAN, S. ZALESKI, Lattice-Gas Cellular Automata, CAMBRIDGE Press, (1997)
- (14) T. SAKAI, Y. CHEN, H. OHASHI, Formation of Micelle in the Real-Coded Lattice Gas, CPC, 129, 75-81, (2000)

研究所のうごき

(平成13年4月2日～7月1日)

◇ 第56回理事会

日 時：6月14日(木) 12:00～13:00

場 所：経団連会館(9階) 906号室

議 題：

第一号議案 平成12年度事業報告書および決算報告書について

第二号議案 評議員の委嘱について

第三号議案 その他

◇ 月例研究会

第190回月例研究会

日 時：4月27日(金) 14:00～16:00

場 所：航空会館 7階 702・703会議室

テーマ：

1. 「エネルギー学」について
(東京大学大学院 新領域創生科学研究科
先端エネルギー工学専攻 教授 山地憲治氏)
2. 平成13年度供給計画の概要について
(電気事業連合会 電力技術部長 大津谷正氏)

第191回月例研究会

日 時：5月24日(木) 14:00～16:00

場 所：航空会館 7階 501・502会議室

テーマ：

1. 循環型社会構築に向けた法体系の整備
(経済産業省 産業技術環境局 リサイクル推進課 課長補佐 山内輝暢氏)
2. バイオマスエネルギーに関する政策動向とわが国における導入可能性
(㈱三菱総合研究所 資源・エネルギー科学研究部 研究員 井上貴至氏)

第192回月例研究会

日 時：6月29日(金) 14:00～16:00

場 所：航空会館 7階 501・502会議室

テーマ：

1. 第4世代原子力開発の動向
(プロジェクト試験研究部 部長兼副主席研究員 松井一秋)
2. 原子力発電に対する公衆の意識構造の分析と情報提供の考察
(エネルギー技術情報センター 主管研究員 下岡 浩)

◇ 主なできごと

- 4月6日(金) ・第2回革新的実用原子力技術開発提案公募審査委員会
- 10日(火) ・第4回サハリンパイプラインP SDC検討評価委員会
- 5月16日(水) ・第1回WE-NET研究調整会議
- 22日(火) ・第5回サハリンパイプラインP SDC検討評価委員会
- 6月5日(火) ・第1回実用発電用原子炉廃炉技術調査委員会
- 11日(月) ・第3回蓄電池併設風力発電導入可能性調査実行委員会
- 12日(火) ・第1回発電所CO₂低減システムに関する技術調査委員会
- 15日(金) ・第1回WE-NETタスク2安全対策に関する調査・研究委員会
- 25日(月) ・第1回高温ガス炉プラント研究会
- 27日(水) ・第2回WE-NET研究調整会議
- 29日(金) ・第2回ソーラーフューエル研究推進委員会

◇ 人事異動

○5月31日付

(出向解除)

丸山 文夫 WE-NETセンター 主管研究員

(解職)

遠藤 肇 プロジェクト試験研究部非常勤嘱託

○6月1日付

(出向採用)

佐藤 保和 WE-NETセンター 主管研究員

○6月30日付

(出向解除)

上岡 英之 WE-NETセンター 主任研究員

大森 伸二 プロジェクト試験研究部研究員

○7月1日付

(出向採用)

稲垣 浩伸 WE-NETセンター 主任研究員

阿閉 聡 プロジェクト試験研究部 主任研究員

編集後記

今年の関東の梅雨は、入梅の時はそれらしい天候が続きましたが、後半には真夏到来の感を抱かせる天気が続き未だ梅雨明け宣言のなされていない7月5日、東京で34.9℃にも達し、所轄管内の最大電力を5年ぶりに更新したと報ぜられました。この調子で暑い日が続くと今年はどうなるのだろうかと心配する向きもあるようですが、一般に暑さに比例して売上が伸びる商品例えば空調機器、清涼飲料等が先導役となつて、現在低迷しているわが国の経済情勢下において景気打開の活性剤となることも期待され、やはりこの夏は思い切り暑くあってほしいと考える方が多くいらっしゃるのではないのでしょうか。

暑い夏で思い出されますのが、井上靖氏、中島健蔵氏、司馬遼太郎氏他日中文化交流会のメンバーが1977年の8月に文革以降初の日本人代表として中国へ招待された時の話であります。「崑崙（こんろん）から流れる白玉河・黒玉河訪問の岐路、タクラマカンの砂の上で『車をとめてください』突然井上さんが叫んだ。車から走り出た井上さんはどっかりと砂の上に胡座（あぐら）をかいて座ると、突然黄色の砂をすくい、思い切り掌の砂に顔を押し当てた。そして「君に会いたかったんだ、君にー」・・・暫くして顔を上げた井上さんは泣いて居られた。そしてあの端正な顔は砂だらけだった。・・・」と同行された團伊玖磨氏が語っておられます（平成12年1月1日「日本

経済新聞」交遊録）。「敦煌」、「楼蘭」、「崑崙の玉」などシルクロードにまつわる多くの本を書きながら、現地にはそれまで1回も訪問することなく全て資料でその地を見、人物と物語を躍らせた同氏は、どんなにか熱い思いで彼の地に会いたいと思っておられたかを物語る話に過ぎないかもしれません。しかし今私たちの回りを見たとき、場所にせよ、人にせよ、問題解決にせよ、どれほど熱い思いで会いたい・解決したいと願うものがあるでしょうか。

現在の地球規模の問題、特に確実に忍び寄るといわれる水資源・食料問題、エネルギーと環境問題のようなグローバルで長期的問題を考える時、いささかでもその本質を知るわれわれがどれだけ熱い思いをもって臨んでいるかが先ず問われているように思われます。

暑い夏は、そのための感性を磨き、情熱の火を蓄える絶好の機会ではないでしょうか。

本号の内容とりわけ巻頭言、座談会、および外部・内部寄稿は、現在のエネルギー関連の問題をそれぞれの立場と専門分野から比較的わかり易く解説・紹介されたものであります。

暑い夏この種問題を真剣に考えていただく際の材料にいただければと願う次第であります。

編集責任者 小川紀一郎

季報 エネルギー総合工学 第24巻第2号

平成13年7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) 3 5 0 8-8 8 9 1

FAX (03) 3 5 0 1-1 7 3 5

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

無断転載を禁じます。(印刷) 和光堂印刷株式会社