

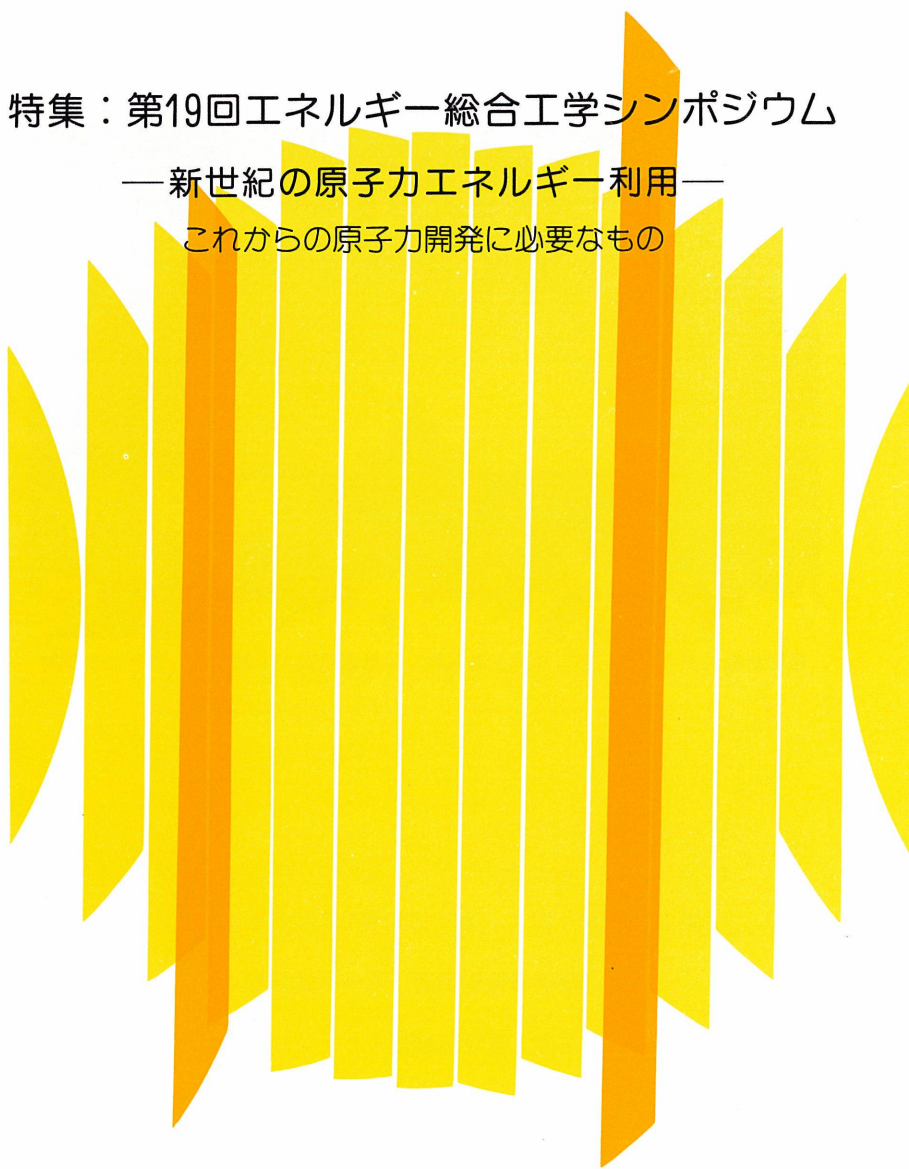
季報 エネルギー総合工学

Vol. 25 No. 3 2002. 10.

特集：第19回エネルギー総合工学シンポジウム

—新世紀の原子力エネルギー利用—

これからの原子力開発に必要なもの



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

第19回 エネルギー総合工学シンポジウム

—新世紀の原子力エネルギー利用—

これからの原子力開発に必要なもの



挨拶を述べる 迎 陽一 経済産業省 資源エネルギー庁 電力・ガス事業部長

日 時：平成14年7月17日（水） 10：00～17：00

場 所：経団連ホール（経団連会館14階）

総司会：プロジェクト試験研究部 部長 松井 一秋

目 次

【開会挨拶】	理事長 秋 山 守…	1
【来賓挨拶】	経済産業省 資源エネルギー庁 電力・ガス事業部長 迎 陽 一…	4
【基調講演】	わが国における原子力開発利用は何を目指すべきか 東京大学教授 近 藤 駿 介…	6
【講演】	環境・エネルギー・原子力 日本大学 総合科学研究所教授 高 木 美也子…	22
【講演】	電力自由化と原子力開発 東京電力株式会社 取締役副社長 原子力本部長* 榎 本 聡 明…	29
【講演】	原子力エネルギーの新技术開発と革新炉 プロジェクト試験研究部 部長 松 井 一 秋…	43
【講演】	放射性廃棄物処分としての分離・核変換処理技術の現状 日本原子力研究所東海研究所 大強度陽子加速器施設開発センター次長 高 野 秀 機…	59
【講演】	原子力の水素生産への利用 原子力システム研究懇話会／原子力水素研究会・代表 堀 雅 夫…	71
【総括と閉会挨拶】	専務理事 稲 葉 裕 俊…	85
【行事案内】	第2回高効率廃棄物発電に関するセミナー	87
【研究所のうごき】		89
【編集後記】		90

* シンポジウム開催時（2002年7月17日）における役職名です。

開 会 挨拶

秋 山 守

(財)エネルギー総合工学研究所
理事長



皆様おはようございます。本日はご多用の中、また大変お暑いい中、第19回エネルギー総合工学シンポジウムにご出席を賜わり誠にありがとうございます。日頃から私どもの研究所の事業に対しまして数々のご指導、並びにご支援を賜わっておりますこと、厚く御礼申し上げます。

さて、今回のシンポジウムの開催に当たりまして一言ご挨拶申し上げます。

エネルギーの課題には、原子力、新エネルギー、省エネルギー、化石エネルギー等、実にさまざまな分野があります。また、近年では地球環境に関連する課題もますます重要性を増してきております。私どもの研究所におきましてもこうしたエネルギーの幅広い分野を視野に入れ、地球環境との調和、また社会経済の維持発展、そして先進的科学技術の開拓と利用を目指しながら、総合工学の基盤に立ち鋭意事業を進めているところです。年1回開催のエネルギー総合工学シンポジウムでは、こうしたさまざまなエネルギー分野を逐次カバーし、その年その年に注目されるテーマを取り上げ、企画させていただいています。

さて、今回ですが、20世紀の後半に実用化が始まり、今世紀もますますその重要性が高まっています原子力エネルギーを対象に、「新世紀のエネルギー利用～これからの原子力開発に必要なもの～」と題しましてプログラムを編成いたしました。原子力エネルギーについては昨今さまざまな逆風が吹く出来事もありましたが、わが国の電力の約3分の1以上を供給いたしております、主要なエネルギー供給源としての役割を着実に果たしていることは皆様既にご案内のとおりです。また、国を挙げて取り組むべき地球温暖化防止対策につきましても、二酸化炭素をほとんど排出しない原子力の利用が極めて重要で、今般の京都議定書の批准を受けその認識は一段と高まっているものと考えております。ただ、電力業界におかれましては自由化という大きな波もあります。他のエネ

ルギー源との厳しい競争を勝ち抜いていくという観点で、原子力も常に新しい取り組みと開発努力が必要になっています。こうした中で、アメリカに見られます原子力利用の再評価、第4世代原子力システムの研究開発といった原子力エネルギーに対する新しい動きも、今申しましたような必要性を反映した躍動であり、新たな期待感を広めているところです。

以上申しましたように、原子力エネルギーの新しい技術を開発し、それをどのように利用していくかということは極めて重要な今後の課題です。今回のシンポジウムもまさにそうしたところに焦点を当てて企画いたしました。

プログラムとしまして、まず、経済産業省資源エネルギー庁電力・ガス事業部長の迎陽一様からご挨拶を賜わります。次に「わが国における原子力開発利用は何を目指すべきか」と題しまして、東京大学大学院工学系研究科教授の近藤駿介先生から基調講演を賜わります。エネルギー政策の視点からエネルギー安定供給確保、環境問題などについて、また科学技術政策の視点から基礎研究と応用研究の関係、そして社会との関係などについて、お話をいただけるものと期待いたしております。

そして、日本大学総合科学研究所教授の高木美也子先生からは「環境・エネルギー・原子力」と題し、科学的な視点から見た環境問題や大規模集中から小規模分散社会へという時代の流れの中での電気事業や原子力発電につきまして、また科学技術と一般大衆の関係の重要性につきまして幅広くご講演をいただきます。

午後には、東京電力株式会社取締役副社長原子力本部長の榎本聰明様から、「電力自由化と原子力開発」のご講演をいただきます。発電原価削減に努力しておられます原子力発電の取組みの現状を始め、バックエンドやセキュリティ、立地地域との信頼感の醸成といった原子力の課題につきまして、また海外の情勢、新型炉や水素製造など今後の原子力開発につきまして、電力自由化への対応の観点からご講演をいただきます。

続きまして、当研究所プロジェクト試験研究部部長の松井一秋より、「原子力エネルギーの新技术開発と革新炉」と題し、原子力エネルギーの新技术開発と第4世代の原子力システムを始めとした革新炉の開発につきまして、現状を中

心に将来展望も含めましてご報告申し上げます。また、経済産業省から補助を受けて当研究所が実施中の革新的実用原子力技術開発提案公募事業につきましても、その内容、状況をご紹介申し上げたいと存じております。

休憩の後には、日本原子力研究所東海研究所大強度陽子加速器施設開発センター次長の高野秀機様から「放射性廃棄物処分としての分離・核変換処理技術の現状」をご講演いただきます。高レベル放射性廃棄物の資源化と処分に伴う環境への負荷の低減の問題は、今後原子力の開発を着実に進める上で最も重要な課題の1つです。本日はこれに資するものとして有用な技術となる可能性のある分離・核変換技術の状況につきましてご講演をいただきます。

最後に、原子力システム研究懇話会の堀雅夫様から「原子力の水素生産への利用」をご講演いただきます。近い将来、燃料電池用あるいは石油精製用の水素需要が想定されております中、原子力による持続的かつ大量の水素供給の可能性を念頭に、水素生産の方法、技術開発の現状と課題、そして最近の関連の動きにつきましてご講演をいただきます。

以上、ご紹介させていただきましたように、原子力エネルギーの適切な利用を一段と図っていくために、現在どのような考えに立っているのか、具体的にどのような取り組みが行われているのか、また将来に向かってこういった開発利用が必要とされるのかという話が本日の中心テーマです。本日の講演が皆様方にとりまして優れて参考になること、また本シンポジウムを契機に、本日ご参会の皆様方との交流が今後ますます広がっていくことを主催者一同心から念じております。

最後になりましたが、本日、貴重なご講演を賜ります講師の先生方、またここにご参集いただきました多数の皆様方に重ねて厚く御礼を申し上げまして、私からのご挨拶とさせていただきます。本日は誠にありがとうございます。

来賓挨拶

迎 陽 一

(経済産業省 資源エネルギー庁
電力・ガス事業部長)



第19回エネルギー総合工学シンポジウムの開催に当たりまして一言ご挨拶を申し上げます。本シンポジウムは今回で19回に及ぶというお話ですが、これだけ長きにわたって続けてこられた主催者の方々に敬意を表したいと思います。今回は「新世紀の原子力エネルギー利用」というテーマで、3年ぶりに原子力エネルギーのあり方について議論をされると伺っております。新世紀の原子力エネルギー利用とは、単に暦の上での新世紀ということのみならず、原子力エネルギーの利用がまさに新世紀を迎えようとしているということではないかと思っております。プルサーマルの実施等について、いろいろ曲折はありますが、現在、私どもといたしましてはぜひこれを早期に実現したいと思っております。また、近く商業用再処理施設の運転の開始も控えております。高レベル放射性廃棄物の処分事業につきましても、いよいよ本格的に事業の着手が予定されています。いよいよ核燃料サイクルの確立が見通されるような段階になっているということで、まさに原子力は「新世紀」を迎える時期にあると思います。こうした時期に原子力をめぐるさまざまなテーマについて議論を深めるということは、誠に時宜を得たものと考えております。

また、近年、地球環境への関心が世界的に高まっています。政府も今年3月に京都議定書批准のための地球温暖化対策推進大綱の改定を行いました。今回の改定では、大綱の中で原子力エネルギーの利用推進を重要課題と位置づけて、原子力政策に関する国民的な合意形成のための広聴・広報活動を抜本的に充実していく、あるいはエネルギー教育を充実していくことを新たに打ち出しました。

一方、原子力をめぐる1つの状況としまして、総合資源エネルギー調査会におきまして、電力自由化に向けた検討を進めていただいております。安定供給を確保しながら経済性の高い電力供給体制をいかに確立していくべきかをテ

マに、昨年11月から議論いただいているところです。この中でも原子力は、エネルギーセキュリティの確保、あるいは環境保全の観点からも大変重要なエネルギー供給手段だと私どもも思っております。こういった点についても十分留意しながら全体的に整合性のとれたものとなるよう、電力供給体制の在り方についてとりまとめていただきたいと考えているところです。

また、国民のすべての方が省エネルギー、あるいは新エネルギーを含めたエネルギー問題を自分自身の問題として考えていただくということが大変重要だと考えております。今年2月にはこういう観点から“エネルギーにつぼん・国民会議 in 東京”という催しを行いました。電力の供給地域、あるいは消費地域の方々、双方のご意見に焦点を当てながら、エネルギーについて皆さんで考えていただくという催しでした。今後ともこういった取り組みを政府一丸となつて続けていかなければならないと考えております。

また、個別の問題に目を向けますと、原子力は格段に技術集約型のエネルギー源です。継続的な研究開発、あるいは優秀な人材の確保が大変重要になるわけですが、昨年6月に総合資源エネルギー調査会原子力部会で「原子力の技術基盤の確保について」という報告書を取りまとめ、この報告書に沿って技術開発を展開してきているところです。このシンポジウムでも、原子力技術開発のあり方について議論されると聞いておりますが、今後の技術基盤の確保のあり方についても議論が深まることを大いに期待しているところです。

最初にも述べましたように、使用済燃料を新たなエネルギー源として活用していく核燃料サイクルの推進は、資源の乏しいわが国がエネルギー開発を進めていく上で不可欠の課題です。これにつきましては、高レベル放射性廃棄物の処分事業で本年度中の概要調査地区の公募に向けた作業が進んでいます。また、青森県六ヶ所村での核燃料サイクル事業は、2005年の再処理工場運転開始に向けた最終準備段階にあります。こうしたサイクル事業が円滑に立ち上がりますよう、ご理解とご支援をお願いしたいと考えているところです。

今日は技術開発から自由化まで大変時宜にかなったテーマが並んでいます。本日のシンポジウムが原子力エネルギーの利用に関する議論をより深め、ご参加の皆様方にとって実り多きものとなりますよう祈念いたす次第です。簡単ではございますが、これで私のご挨拶とさせていただきます。

わが国における原子力開発利用は 何を目指すべきか

近藤 駿介 (東京大学教授)



はじめに

今日はわが国が直面するエネルギーをめぐる諸問題に対して原子力がいかなる寄与をなし得るか、何をを目指すべきかということに焦点を絞ってお話したいと思います。

最初にエネルギー政策と原子力の関係についての最近の政府の決定を、続いて原子力をめぐる内外の動向をレビューし、それからこれらを前提にすると我々は今後原子力の開発利用にいかなる考え方で取り組むべきなのか、について考えるところをお話しします。

わが国のエネルギー政策と原子力

この1, 2年の間にエネルギーに関してなされた主要な政府の決定がいくつかあります。1つ目は、2000年11月の原子力委員会の「研究開発及び利用に関する長期計画」(以下、長期計画)、2つ目が2002年6月の総合資源エネルギー調査会の総合部会における京都議定書を踏まえた「長期エネルギー需給見通し」の

〔略歴〕

1965年東京大学工学部原子力工学科卒業。1970年同大学院工学系研究科博士課程(原子力工学専攻)修了。工学博士。

1988年工学部教授(システム量子工学科 旧原子力工学科)、1995年大学院工学系研究科教授(システム量子工学専攻)、1999年東京大学原子力研究総合センター長(併任)現在に至る。

専門分野は、原子炉システム工学、原子力安全工学、ヒューマンインターフェイス工学。

原子力委員会専門委員、原子力安全委員会専門委員、文部省学術審議会専門委員、通産省総合エネルギー調査会委員(原子力部会長)他。

改定です。

その後、2001年1月に発足した総合科学技術会議が、同年9月、エネルギー分野も含む重点分野の推進戦略を取りまとめました。そして今年6月には「エネルギー政策基本法」が成立しました。この法律、「原子力」という言葉はどこにも出てこないのですが、その示唆するところは原子力についても意味があります。

(1) 原子力委員会「長期計画」

原子力委員会の「長期計画」のポイントは表1の3つです。

このうち②は、電力等すべてのものはなるべく自由化してマーケットメカニズムに任せ

表1 原子力委員会「長期計画」のポイント

① 原子力発電は供給安定性に優れ、二酸化炭素(CO₂)の排出量が少なく、しかも経済性があるのだから、電力事業者はこれを基幹電源に位置づけて技術の高度化を図りつつ、最大限に活用していくべきである。 ② 政府はこれに対して外部不経済の内部化を図るなど適切な規制と誘導施策を用いて電源構成における原子力発電の割合を適切なレベルに維持していくべきである。 ③ 政府は、原子力は人類にとって長期的に重要なエネルギー源の選択であり続けるべき技術であり、これの研究開発を長期的観点に立って推進すべきである。
--

るべきであるという主張と、原子力のような公益性のあるものはある割合を確保すべしという主張が折り合って辿り着いたもので、「適切な規制と誘導施策を用いて」という合意は、私としては非常に重要と思っています。

(2) 総合資源エネルギー調査会報告―需給見通しの改定

総合資源エネルギー調査会による需給見通しの改定は、京都議定書において2010年に達成するとした温室効果ガス排出抑制の国際公約を守るという命題と、わが国の経済の健全な発展を維持するために必要なエネルギーの安定供給の確保という命題の両立を目指す非常に難しい解の探索作業だったと理解しています。

その基本的目標は表2に示す通りです。この目標を達成するための政策の基本的方向としては、まず、エネルギー消費、特に民生・交通部門の消費の合理化の推進があります。つまり、増加に歯止めをかけるべきということです。次に、将来の不確実性に備えるため

表2 需給見通し改定での基本的目標

基本的目標：安定供給の確保、環境保全、効率化 これについて、以下の政策環境を考慮しつつ数量的なバランスを追求する。 ● 自由化・効率化の進行によるコスト意識の高まり。 ● 需給両サイドにおける主体の多様化。つまり、需要全体に占める産業界の割合が50%を切り、民生分野がメジャープレイヤーになり始めたということ、また供給サイドでも再生可能エネルギーを始めさまざまなエネルギー源が登場してきているということ。 ● CO₂の排出抑制が容易でないということがだんだんわかってきたこと。 ● 原子力発電の推進も、同じく容易でないこと。 ● アジアの経済の発展に伴うエネルギー需要の急増。中国を先頭に急速にエネルギー需要が増しているということ。

の供給源の多様化。さらには、エネルギー安定供給確保に向けた、アジア地域としての取組みの推進があります。

そこで総合資源エネルギー調査会は、将来に向けて目指すべきエネルギー需給像として次の3つを打ち出しています。

- 人口増は2005年で頭打ちとなるにしても経済は2010年まで年2%で成長していくものとする。
- 地球温暖化防止の観点から、エネルギー起源のCO₂排出量を2010年度には1990年と同じ水準に抑制するものとする。
- これらの制約の範囲内で、廉価な供給が可能な多様な供給源に基づく安定な電源構成を実現する。

[原子力の位置づけ]

原子力は既に自給率の向上、経済のCO₂排出量原単位の低減、エネルギー価格の長期安

定性の維持にそれぞれ貢献しています。総合資源エネルギー調査会報告では、原子力をできるだけ導入するとして、30%の供給増を期待しています。しかし、昨今の実績は建設中3基、準備中が6基という状況です。この数字は30%という供給増が達成できないことは明らかです。しかし、私は、この30%のうち10%ぐらいは稼働率の向上で達成するものかなと考えています。というのは、現在の原子力規制体制の見直しと高度化ということが、原子力安全保安部会等を通じて、あるいはそれ以前に「長期計画」でもうたわれました。現在、原子力安全保安部会では、これらを踏まえてより合理的な国の検査のあり方についての検討が始められているところです。そこで、その成果が稼働率にも反映されるのかなと大いに期待しているところです。

「需給見通し」では、原子力発電所が増設できない場合についても検討しています。その場合、2008年から炭素税等を大幅に導入して、かなり思い切った需要削減、あるいは石炭火力の抑制をしないとうまくいかないということです。これは経済が2%で成長するという前提ではありますが、現実的な施策としては取り得ないのではないかと考えているところです。

これらのことを踏まえて、目指すべきエネルギー需給像を実現するための原子力関連重要施策として部会は、技術基盤の確保、立地地域との共生、安全確保システムの信頼性の確保、その内容の高度化を達成していくことを指摘しているところです。

(3) 総合科学技術会議（CSTP）の重点分野 推進戦略

[CSTPの掲げる「4重点分野+その他」]

CSTPの掲げる「4重点分野」とは、①生命科学、②情報通信、③環境、④ナノテクノロジー・材料です。「その他」には「国の存立にとって基盤的であり、国として取り組むことが不可欠な領域」として①エネルギー、②製造技術、③社会基盤、④フロンティアが挙げられています。フロンティアというのは宇宙とかですが、そういう4つの分野を「その他」として掲げました。そして、今後5年間はこうした分野の科学技術活動に優先的にお金を投じていくことを決めました。

我々、大学にいますと文部科学省から「この4つ以外は研究予算の申請をしてもだめ」と言われるぐらい、この4重点分野は非常に重要な意味を持っています。省庁の枠を超えて内閣が非常に強い主導性を発揮するという行政手法が実現していることをひしひしと感じているところです。

CSTPのエネルギー関連の推進戦略を表3に示しました。原子力関係では、②のインフラの高度化というところに核燃料サイクル技術等による原子力の性能向上、③の安心安全のところに原子力利用等の安全対策の充実、そして④のシステムの評価能力のところに原子力のパブリックアクセプタンス（PA）についての研究の充実があります。最後のものは、

表3 CSTPのエネルギー関連の戦略

- | |
|---------------|
| ① トータルシステムの変革 |
| ② インフラの高度化 |
| ③ 安心安全の達成 |
| ④ システム評価能力の向上 |

総合科学技術会議の「総合」というのが単に科学技術のみならず、社会科学も含めてという意味ですので、PA研究の充実がそういう社会科学的な研究の重要な項目として取り上げられたのです。

先日、平成15年度の予算編成についてのCSTPの基本方針が定まったと思うのですが、そこでもこれらの項目がそのまま重点項目として採用されたということです。このことからCSTPの基本方針の影響力の大きさがわかりただけだと思います。

(4) エネルギー政策基本法

最近成立したエネルギー政策基本法の非常に重要なところは、安定供給の確保と環境への適合に十分配慮しつつ市場原理を活用するというエネルギー政策の基本方針を行政に示したことです。国会の議論では「二等辺三角形」という言葉がよく使われました。「安定供給確保」と「環境への適合」を前提に、「市場原理の活用」があるということです。電力自由化の議論等におきまして市場原理の活用を求める声が大変大きいのですが、エネルギー政策に関しては安定供給と環境への適合があってこそその市場原理の活用であるべしということを国会として示したことは大変重要と思います。

この他、この法律は国、地方自治体、事業者の責務、国民の努力の要請、エネルギーの需給に関する基本計画（「エネルギー基本計画」）の策定などを定めています。この計画ですが、経済産業大臣に対して関係省庁と総合資源エネルギー調査会の意見を聴きながら案を作成し、閣議決定を求めなければならない

と定めています。「エネルギー基本計画」の本身として、基本方針、政策、研究開発に関する基本方針を述べることになっています。CSTPとエネルギー政策基本法の「エネルギー基本計画」をどう調整させるのか、若干楽しみ気もいたします。エネルギー政策に対する国会の指導原理が述べられた重要な法律であり、行政はその指導を踏まえて行動する厳しい責任が生じたと思っているところです。

海外の動向

(1) 京都メカニズムからの原子力除外

第6回国連気候変動枠組条約締約国会議のボン会議（COP6 パート2）では、数値目標達成のための京都メカニズムの共同実施（JI）とクリーン開発メカニズム（CDM）において、原子力施設で実現された排出削減量を除外することが決定されました。私どもはさまざまな機会、組織を通じて、この決定がいささか非論理的であると主張してきました。というのは、京都メカニズムは、温室効果ガス排出抑制を唯一の目的として成立している国際的なジョイントベンチャーであり、その手段として原子力施設が効果的であると理解しながら、これを埒外に置くというのは、不埒な決定と考えるからです。国連気候変動枠組条約をどう読んでも、この決定は条約の精神と相容れません。科学的議論で物事を決めるという原則からも乖離して、このような政治的な決定がされることに強い憤りを感じるわけです。私としては、皆さまがわが国政府に対し

て、第2約束期間（2013年～）の議論の開始に当たってはこの条項を破棄することを前提条件として交渉に臨むべきということを強く要請するようお願い申し上げます。

（2）諸外国の動向

〔米国〕

過去10年の動きで最も重要なのは、米国における原子力発電所の運転者の集約と保守規則の導入です。前者は小電力が飾りのように持っていた原子力発電所が大手に集約されてプロにより運転される環境が整備されたということです。後者は、原子力発電所のメンテナンスに関して1992年までルールがなく、日本のような定期検査（定検）システムがなかった米国が、これでは安全系の信頼性の担保が不十分ということで、保守規則が制定されたということです。面白いのは、米国原子力規制委員会（NRC）が「業界が率先して『なるほど』』というものを作るなら、それを規制に取入れる、そうしないなら、自ら保守の規則、それは日本の定検に習うようなシステムになるが、そういうのを作るぞ」と通告した結果、電力事業者が原子力エネルギー協会（NEI）を中心として議論し、リスク・インフォームド・メンテナンス・ルールという、リスク情報を最大限に活用する合理的な保守基準を、アメリカ機械学会の知恵を借りて作成し、これを使って適切なメンテナンスが行われるようになったのです。日本は従来、定検がきちんとしているから、故障・トラブルが非常に少ないんだと言っていたわけですが、米国ではこうしたルールを入れたことによって画一的でない適切な機器のメンテ

ナンスが行われるようになりました。その結果、今や稼働率が90%を超えようとしています。日本は80%です。ですから、日本も産業界の方がそういう努力をされるならば今よりも10%程度稼働率を上げることは可能ではないかと思っています。原子力安全・保安院でも合理的な提案ならば取上げることでできるような準備が始められています。

また、ネバダ州ユッカマウンテンに使用済燃料の処分場を建設することについて、米エネルギー省（DOE）からNRCへの許認可申請が可能になりました。このことにも非常に大きな意味がある。これは説明を要しないでしょう。

さらに米国の原子力予算では、高レベル放射性廃棄物の処分と使用済研究施設の廃棄に関わる費用が圧倒的に大きい割合を占めているわけですが、原子力開発に関する能力は何か残さなければならないということで、いろいろ工夫しています。最もコストエフェクティブなのは、大学等の研究組織の専門的能力を維持することだということで原子力エネルギー研究イニシアチブ（NERI）というプログラムを立ち上げています。日本の大学に使われている研究開発費と同程度のレベルですけれども、公的研究費が原子力エネルギー技術の研究に投入され始めたのです。

ただ、次の段階をどうしようかということで各種作業が行われていますが、それを踏まえて次に大きな予算措置がなされるかということになりますと、米国はこのところ急速に財政が赤字に転じたこともあり、緊急性、効果性から考えて、近々に開発投資が増えることはないのではないかと思います。

それから米国の電気事業者が新設のプラン

トの議論の中で原子力に言及をし始めたということで日本の関係者も一喜一憂しているところがありますが、直感的には恐らく建設途中のプラントの建設再開とか、DOEのサイトを使って建設するというのが、実現性の高いオプションだと思っています。それにしても、決定にはなお数年を要すると思っています。

[フィンランド]

高レベル放射性廃棄物処分場建設の決定がなされ、かつ軽水炉1基の増設が決定されました。人口が少なく、土地が広いことから、利害が錯綜しないこともあるのですが、これらの決定に至る過程を見ていると、手順を尽くして合理的な決定に辿り着くことの重要性を国民1人ひとりが認識しているなどという感想を持ちます。

[イギリス]

ブリティッシュ・エナジーの新しい経営者がカナダ型重水炉（CANDU）に縁の深い方であったこともあって、CANDUの議論がイギリスで起こっています。しかし、彼らは英国政府が直接処分の容認と外部経済に見合った公的支援の2つを政策として取らない限り原子炉の新設はしないようです。もう1つの動きとして、政府がイギリス原子燃料会社（BNFL）やイギリス原子力公社（UKAEA）の原子力債務、主としてこれらの民営化組織が所有する過去の原子力研究開発の国家プロジェクトに関係する施設の廃棄コストの公的受け皿として債務管理庁を設置して、これに公的資金を投入する仕組みを考えています。こうしてBNFLのバランスシートを改善して、これが一

人立ちできるようになることを期待しているのですが、労働党の政策だけに今後の動向に注目していいと思います。

[フランス]

フランス原子力庁（CEA）が核燃料公社（COGEMA）等の原子力メーカーに、CEAの研究開発の成果で商売をしている電子機器メーカーを加えて、持ち株会社アレバを設立しました。アレバ株の過半数を持っているCEAは、そのうち保有株を売却して手に入れたキャッシュをCEAの原子力施設、研究開発施設の廃棄処分コストに充てることを考えているようです。イギリスは公的支援の受け皿を作ることにしていますが、フランスは研究開発の成果を中心としたプロフィットセンターを作って、そのプロフィットで施設の処分コストを出していくという形をとっています。

こういうふうに各国が今、時代の変わり目を迎えて、21世紀における原子力の旅立ち、子離れの仕組みを用意し始めたことは注目に値すると思います。

CEA自身の今後の原子力研究開発方針は、①軽水炉によるプルトニウム燃焼のオプションを拡大する。②将来の可能性としてのアクチニドの分離・変換技術については、基本的に高速炉を念頭に置いているので、再来年ぐらいまではFBR（高速増殖炉）フェニックスで技術、照射実績を獲得する。なお代替案として加速器増殖炉が考えられるが、これは国際共同研究で行っていく。③新しい原子炉としては、熱利用に向いていて高速増殖炉にもなり得るということでガス冷却炉に着目し、今後しばらくはこれの研究開発を続ける、その他の有望技術についてはウォッチングする

というものです。

結局、経済性、安全性、長期供給保障性、廃棄物、長半減期の放射性廃棄物の発生量の減少化等々のことを考えると、今後の方向としてはプルトニウムの管理は量的に考えても軽水炉を効果的に使うのが合理的ということ、炉心設計研究でコレイユ、APAといった燃料集合体設計によっては、軽水炉でもプルトニウムの蓄積を減少させることが可能であるということで、あと20年から30年かけて燃料集合体設計と実証を行おうと考えていること、新型炉はできれば一体型燃料サイクルのガス冷却高速炉がいいのではないかとことです。液体金属のナトリウム冷却高速炉については、FBR実証炉スーパーフェニックス（100万kW）を作ったことがあるわけですから、あとはマーケットが開いた時に投入していけるよう技術水準を維持していただくだけでよく、そのためこのスーパーフェニックスの資産を国際協力で未来へつないでいくということを基本方針とするとしています。

それから加速器駆動消滅処理システム（ADS）については、国際協力による研究開発を考えています。今の欧州連合（EU）の原子力予算は半分が核融合に当てられています。あとの2割が加速器ですから、フランス政府は、国内的には核融合と加速器に触らず、なるべく国際協力でやろうとしています。

ガス炉については、短期目標としてガスタービン・モジュラー・ハイテンパラチャー・リアクター（GT-MHR）を、中期目標としては廃棄物変換、つまり高速炉を目指しています。それから長期的には、インテグラルな一体型燃料サイクルで廃棄物最少化の高速炉を実現するというので、2007年までに20MW

ループという目標を掲げています。

既に日本では高温工学試験研究炉（HTTR）を作る時に10MWのヘリウムループを作っていますから、多分いまは日本の方が技術力はあると思います。フランスは、2012年までに臨界実験と日本と同じHTTRを作ることを目指しています。ですから、日本のレベルに追いつくのあと10年かけようということです。ただし、フランスの長い経験から燃料サイクルと原子炉は一体で開発していくことが重要ということで、再処理も合わせて行うというポジションをとっています。2020年までに国際共同プロジェクトで30万kWぐらゐの高温ガス炉を実現したいというのが彼らの希望で、これについて日本に協力を強く要請しているのが現状です。

[ロシア]

ロシアの原子力界は一時お金がなくて困っていましたが、政府は最近になって原子力部門への投資を再開しました。ただ問題はロシアの国内事情です。送電部門を握っている部分と原子力省との間の権力闘争が激しいのです。送配電部門が水力発電所を持っており、当然のことながら水力を一番稼働させて儲けたいと考えているため、原子力の稼働率が抑えられるということで、原子力部門からすればなかなか思うようにお金が入らないという事情があるようです。この権力闘争は今後も長く続くだろうと私は思っています。

そんなこともあって原子力部門は何とかキャッシュを手に入れたいと、放射性廃棄物の処理、処分についても国際的なビジネスが可能な仕組みを作る法律を出したりして、一生懸命努力をしているわけです。

[南アフリカ]

南アでは、産炭地から遠隔地への電力供給方式について検討して、軽水炉より安いペブルベッド・モジュラー原子炉（PBMR）の可能性の検討を始めて今日に至っています。いろいろな議論がなされていますが、前向きな議論がなお進んでいると理解しています。

[韓国]

アジアでは幾つか変わった動きがあります。これは未確認情報に近いのですが、韓国では海水脱塩用の小型炉の民間企業による建設が政府の支援の下で開始される予定になっているということです。韓国の企業は、現在世界の海水脱塩技術マーケットの6割か7割を握っていますので、次の時代の海水脱塩事業は原子力ということで自ら小型炉を作って長期にわたってこの市場における優位性を確保したいということで決めたということです。韓国政府は恐らく3割を超える財政支援をするのではないかと思います。

[中国]

中国では、一時、「経済成長のためには何でもいい」ということで石炭が沢山使われてきたわけですが、だんだん環境問題の重要性を理解してきて、少しずつ天然ガスや原子力の重要性に対する理解が深まってきました。

東京大学、マサチューセッツ工科大学（MIT）とスイス連邦工科大学（ETH）の3大学で行っている「アライアンス・フォー・グローバル・サステナビリティ（AGS）」というプログラムがあります。そこでケース・スタディとして、中国のエネルギー問題について、中国政府の要人を巻き込んで、中国の将来の

エネルギーの姿、それが持つ社会的環境的インパクトを調査研究した結果、将来なかなか容易ならざる状況が出現するに違いないという理解から、原子力も悪くないオプションだということをトップが認識し始めたということが報告されています。

今後の原子力開発利用の考え方

時間的枠組別の今後の取組み

今後の取組みを考えると私には、対象とする時間的枠組みを認識しつつ検討することが大切と考えています。多くの問題が短期的に取り組むべき問題、中期的に取り組むべき問題、長期的に取り組むべき問題のいずれかに分類できるからです。

短期的な問題に分類できるのは基本的には、我々が既に持っている資産をいかに有効に使うかという問題です。それらをより効果的に使う、あるいは効率的に使うために創意工夫を行う。これにタフネス、決意、細部への配

表4 短期に取り組むべき課題

- | |
|---------------------------|
| ① 軽水炉の安全安定運転の継続 |
| ■安全文化の維持向上 |
| ■稼働率向上、予防保全、高経年化対策の充実 |
| ② 核燃料サイクルシステムの確立 |
| ■廃棄物減量、廃止措置技術の確立 |
| ■使用済燃料再処理・貯蔵システムの確立 |
| ■放射性廃棄物処理処分システムの確立 |
| ③ 効果的・効率的で国民に信頼される安全規制の実現 |
| ④ 国民に支持される原子力発電の追求 |

慮をもって取組んでいく、そういう分野です。

中期的課題は基本的には、新規市場の開拓や既存技術が陳腐化することに備えて大きな投資をしなければならないところ、どういう投資をするのが一番いいかということです。これはリスクを賭して資本を有効に活用するという強い意志をもって取り組むべき課題とされています。

長期的課題は、新市場開拓とか、将来の技術、代替のための種を探す研究開発が典型的なものです。これは想像力とチャレンジ精神が要求される活動です。

(1) 短期的取組み：既存資産の最大活用のために

短期的に取り組むべき主要課題を表4に示しました。4つ目があるいは一番最初に来るべきかもしれません。

これは、エネルギー関係者、あるいは原子力関係者の仕事です。小学校からの総合学習、大人になってからの継続教育のために、学習のネットワークをいかに形成するか具体的にチャレンジしていくことが重要です。先ほどのエネルギー政策基本法にも、エネルギー教育の重要性がうたわれていますし、文部科学省では、現実に既にさまざまなエネルギー教育の予算が手当されています。このように、このことに対する環境は近来にないほど整ってきていると思いますので、いまや関係者がこのネットワークをいかに整備して活用していくかが問われていると思います。

[産業界による問題解決]

軽水炉の運転環境について、産業界の方は

いろんな機会に「アメリカはこうだから日本でもそうしてくれないと」とおっしゃいます。でも、アメリカの一番のポイントは、NEIという組織を通じて産業界自らが解決策をパブリックドメインで提案している、具体的な、しかも完全な提案をしているということです。これが非常に重要で、機械学会等を動員して具体的な提案をしているが故に、NRCもその論理的正当性を認めてそれを受け入れる、そういう構造になっているわけです。ですから、日本の産業界の方々にも、さまざまな問題について何をいつまでに解決するかというロードマップを作成して、国会や規制当局に対して、問題解決のための具体的な提案を行うことが大切だと思います。最近、原子力安全・保安部会原子炉安全小委員会が報告書「原子力発電施設の技術基準の性能規定化と民間規格の活用に向けて」をまとめましたが、ここでもポイントは事業者が「こういうことをすれば従来の定期検査をなくしても、あるいは2年に1度にしても従来とまったく同じ安全性が保てますよ」と、国民の代理者たる規制当局が国民に対して説明できる資料を用意できるかどうかです。それを用意できないならば従来と同じような定期検査が続くことだけは間違いありません。それを用意するかしないかは、自らの資産を最大限に有効活用したいと思われる電気事業者の選択の問題なのです。黙っていても国が何かいいことを決めてくれるという時代はすっかり終わっていますので、ぜひ、このあと半年か1年の間に誰もが「なるほど」となるような案をご提出いただくことを切に希望します。先ほど原子力の供給を30%増やすという目標が、あるいは要請があると申し上げましたが、そのうち

10%はぜひそういう努力で増やしていただければと考えているところです。

勿論、国は事業者のリスク管理状況を的確に監視するという安全規制活動を行うべきです。この点で国も、いわゆる検査のカルチャーから監視、監査のカルチャーに規制のあり方を変えなければならないということを申し上げているところです。そのためにはいつでも監査ができるように「ガラス張り」の運転、保守管理をやっていただくことが必要です。規制当局はいつでもどこでものぞけるという仕組みを作ることが大切です。事業者の皆さんは、見学者用のシースルーの建物を作っていますけれど、あの心でもって規制当局に対して全部見えるような運転管理活動を行っていただきたい。自由な創意工夫で運転管理を行って、資産を最大限活用していただく。規制当局は国民に対して適切な安全管理が行われていることを説明するために必要な情報をどこにでも入って取ってこられるという、そういう関係を作る。これが本当の意味の自主保安であり、国民の代理者としての規制のあり方と考えるからです。

（２）中期的取組み：高度化と新市場の開拓

中期の目標と可能性のある新技術を表５に示しました。

〔立地面での取替需要への対処〕

例えば、福井県は「15基体制」という言葉を使っていましたから、この地区は数に制約がある中でどうするかという命題に直面したわけです。幸いというか、地元の理解を得て敦賀は1号基を廃止して3、4号基を建てる。

表５ 中期に取り組むべき課題

目標：

- 新設・取替期に競争力のある新技術を投入すること
- 新技術で新しい市場を開拓すること

可能性のある新技術：

- 取替期一次世代軽水炉、FBR、中小小型炉
- 新市場—海水脱塩、水素製造、地域暖房

同一サイトではなく、別のところにサイトを見出して建てるということですが、これが将来の取替基建設の基本パターンなのか、例外なのか、今後、日本の電力業界は、取替需要にどう対応していくのかそれぞれのサイトにおいて真剣に検討しなければならないと思います。その答は、サイト条件や利用可能な技術と密接に関係すると思っていますところ。

〔中小型炉やHTTR市場の開拓主体は民間〕

中小型炉やHTTRが市場に参入できるためには、市場があること、つまり使いたい人なり産業があることが前提ですが、その上で第1に、世界に通ずる安全規制がセットが必要です。原子炉という物だけでは絶対売れません。安全確保の論理は、その国のみならず世界中に説明可能なものでなければなりません。第2には、燃料サイクルサービスの保証がなければいけません。国内の中小型炉や革新炉の議論は、市場創造努力、それへの取組みを全くといってよいほど欠いているように思います。潜在的利用者を見出して共同開発するのが合理的な資源の使い方であり、競争の時代の生き方と考えるべきです。

国としても、民間が自ら実証炉を作ってマーケットに参入していくという、そこまでの

リスクを賭して資本を投入していく気がない限り、国はこうしたものの実証プラントの建設に手をつけることはできないと思っています。国民に「車が通らない高速道路」と言われかねないからです。

[CSTPによる既存研究開発の見直し]

CSTPは既存の研究開発の見直しを始めています。そこでのキーワードは、必要性、計画性、有効性、効率性の4つです。要するに、今、必要だが国が関与しないと実施できないもので、目的を達成するための手段があり、期待される成果を期間中に得られ、その成果が投資に見合うことが要件となっています。この4つで国民の税金を使う研究開発プロジェクトの見直しを始めています。これに応えられるようなプロジェクトでない限り、国としてはお金を使わないというわけです。先ほど、民間が自ら実証炉を作ってマーケットに参入していくという気がない限り、国が実証プラントの建設などに手をつけられないと申し上げたのはこの所以です。

(3) 長期的取組み：革新技術の研究開発

長期的枠組みで考えるべきことは革新技術の研究開発です。表6に示すように研究開発活動自体に短期的、中期的、長期的課題の3つがあるわけですが、国が本格的に取組むべきは長期課題だということです。

[実現すべき技術の特性]

長期的視点から取組むべきは、安全で取り扱いやすく、資源利用効率が高く、再生可能エネルギーと経済的に競争でき、放射性廃棄

表6 長期に取り組むべき課題

短期課題：
■既存の資産を有効に使うための技術の開発
中期課題：
■既存の資産を代替する次世代技術の開発
長期課題：
■新市場開拓を目指す技術や将来の代替技術の開発

物の量が少なく、核拡散をもたらす可能性が小さく、地下立地および海上立地のように立地制約が少なく、最後に社会インフラとネットワーク化しやすい技術の研究開発です。

最後の社会インフラとのネットワーク化とは、熱利用や水素技術とか既に社会にあるインフラやこれから整備されるに違いない社会インフラとコンパティブルであるということです。そういうような技術であることが、参入障壁が低いということから望ましいのではないかと思います。

[研究開発の主体]

短期、中期の研究開発は、民間中心だろうと思いますが、長期課題については国が取り組むべきものと考えられます。

そこで、国は何をを考えて研究開発をするのか。よく言われることですが、21世紀の後半には、原子力と再生可能エネルギーに大きな市場が生じるというのが一般的な見方です。そこが原子力と再生可能エネルギーとの「戦場」となるわけです。ここでどれだけ供給力のシェアを勝ち得るか、いや、勝ち得る可能性の高いものをタイムリーに実現するか、このことが長期的な観点からの研究開発の戦略的視点であるべきと考えます。

[科学技術と社会]

研究開発のあり方を考える際には、科学技術一般に関わる動向にも注意を払う必要があります。最近の科学技術は激しく進歩していますが、そこでは基礎研究と応用研究がフィードバックを繰り返して展開が進んでいます。そこで基礎研究と応用研究の線引き自体が言葉として意味がないとして、いわゆる「パスツール型研究」の進め方が重要になりつつあるとされています。基礎と応用の仕分けが難しく、異分野交流が非常に重要で、異分野が共進化する、お互いの刺激でお互いに進歩していく、そういう構造が必要であり、現実であるというわけです。

ですから、科学技術開発計画の設計者もまたこの計画期間や使命等を含めて、ネットワーク学習の活用とマトリックス型のポートフォリオマネジメントが必要になってきていると思います。

なお、国への注文としてはリスクの高い基礎研究は今後も非常に重要な位置を占めてい

くべきではないかと思います。最近のように、国が「何でも5年で考えろ」というのは無茶な話だと思います。特定産業分野や技術を念頭に重点4分野に投資を集中して研究開発を行っていくというアプローチは、市場の選択を阻害してしまう可能性もあることを恐れるべきだと思います。今この不況を脱するためには科学技術あるのみということで、短期的に成果を求める政策の結果として応用研究にやたらに傾斜しているのは近視眼的です。

基礎研究が割を食って、国際協同研究で何とかやるしかないということになっていますが、このことについては米国でもそうすることが本当にアメリカの国益にかなうのかという議論が出始めています。そういう根源的な問題を踏まえれば、研究開発関係者にとっては、第1には基礎と応用の結びつきの重要性、公衆のリターンに対する関心の高まりを踏まえて、使命達成のための課題やアプローチのポートフォリオマネジメントを強化することが極めて重要ではないかと思っています。ま

表7 わが国の科学技術研究支出（2000年）

（単位：億円）

分野	大学	国研等	会社	民間研究	合計	国の分担
宇宙開発	331	1637	551	67	2586	1968
海洋開発	134	450	96	97	777	584
情報処理	493	223	14680	238	15634	716
環境保護	326	442	2551	310	3629	768
エネルギー	573	3182	4299	3786	11840	3755
（原子力分）	373	3013	614	496	4496	3386
生命科学	6757	2122	8234	738	17851	8879
合計	8614	8056	30411	5236	52317	16670

た、第2にはこの研究開発組織が常に社会規範から見た正当性、人々が何を大事にしているかという価値観を公衆とのネットワークを通して学習し、研究内容を常に見直していくことが重要ではないかと思います。さらに第3には、研究開発、特にミッションオリエンテッドな研究開発にはリスクがあることから、リスクマネジメントを適切に行うことが重要だと思います。研究開発自体が成功するかどうかというリスク、それから研究開発課題が達成されてもマーケットが変わってしまっただけとされるリスクもあります。それらの適切な評価とそれに基づいて、計画を柔軟にリストラクチャーしていくリスクマネジメントが重要だと思います。

当面の課題

(1) 研究開発資金の確保

日本の研究開発支出を見ますと、国の分担は1兆6,670億円です(表7)。そのうち生命科学が半分。その次がエネルギーで、うち原子力が3,300億円となっています。情報、環境は今重点分野になっているのですが、重点分野ではないエネルギーが割と多いのです。それで、重点4分野の立場からすると、「このシェアはおかしいと。エネルギー、特に原子力が大き過ぎるじゃないか」と思うわけです。しかも他の分野の方は、「自分の分野にこれだけの金を投入すれば、5年後にはマーケットは10倍になります」と言っているのです。例えば、バイオがそうです。

原子力関係者が「10年後にマーケットは何倍になるんですか?」と聞かれて、「10年後にも3基しか増設できません」と答えると、「それなのに何でそんなに研究開発費が必要なんだ」と言われます。これが今、原子力関係者に問われていることなのです。原子力関係者は、「原子力予算の中身を見ると、実は40%が加速器とか基礎研究であってエネルギー研究開発ではありませんよ」とまずは言うわけです。それから「固定費、今ある研究設備の維持運営にお金がかかるのです。これは研究費とは言えないけれども、とにかく組織があり物を持つと、雇用への貢献とかお付き合いとか、いろいろお金がかかります」とも言う。

もう1つ困ったことに、「研究開発施設とその使用済燃料とか、その他諸々の廃棄コストはどうするんですか?」と詰められた時にどう答えるか。金額すら判っていないでしょう。成長期には壊して新しいものを建てるということで、新設費でみてきた面もあるのですが、いまやそれができません。しかし、何とかしなければなりません。イギリス、フランスが具体策を用意し始めたのを見ると、半端な金額ではないようですから、きちんとする必要があります。

ところで、2020年までの日本の経済社会を展望しますと、財政赤字の状況はどう考えてもあまり変わらないでしょうから、研究開発に割けるお金はそう変わらないでしょう。

アメリカはどうかと調べてみますと、アメリカでは原子力予算は小さいのです(表8)。ただ、国防の中に海軍用原子炉、慣性核融合、シミュレーション計算というのが大きく入っています。それから科学というラインがあって、ここにもまた核融合が入っており、加速

表8 アメリカのエネルギー関係研究開発予算

(単位:百万ドル)

エネルギー省	2000	2001	2002
<u>国防（原子力関連のみ）</u>			
海軍用原子炉	675	688	688
慣性核融合		431	467
シミュレーション計算		747	738
<u>エネルギー源開発</u>			
省エネ研究	99	104	56
産業支援	137	148	88
電力技術	49	47	47
輸送セクター	229	255	239
再生可能エネルギー	306	373	238
化石燃料	397	541	449
原子力科学技術	225	243	223
<u>科学</u>			
基礎エネルギー科学	752	991	1005
計算科学	122	165	165
核融合科学	238	248	238

器関係が大きく挙がっている基礎エネルギー科学も別にあります。このようにアメリカの開発予算における原子力は、加速器や基礎研究、シミュレーションとは別になっていて小さい。日本の原子力予算は、アメリカと違ってこれを全部まとめている原子力としてきた。今になってみると、タイトルと中身が常識的でない、不透明と思われるという問題に遭遇しています。

米国における今後の技術トレンドについては、技術開発企業であるバットル社が2020年に向けて“Strategic Technologies for 2020”（1999年11月）として発表し10項目を挙げてい

ます。この中でエネルギーはどこかにあるかというと、“High-power energy package”として燃料電池、それから“GrinTech（Green Integrated Technology）”，これには再生可能エネルギーが入っているようですが、原子力は見当たらないのです。ただ“Worldwide Inexpensive Safer Water”という海水脱塩技術という非常に重要な項目があります。

それから、ブッシュ政権が重点を置くべき研究開発項目をRAND研究所がまとめているのですが、これを見ますと“Rethink Global Climate Change Policy”と“Anticipate Energy Crises”としてエネルギー問題についての関心

が2項目で示されています。

ということで、アメリカでは予算面ではかつてのように原子力研究開発に大きな公的投資が行われる可能性はないように思います。ですから、いろいろ問題があるが、そのうち米国で原子力研究開発が復活すれば世論も変わるだろうという考えは持たないほうがいいと思います。

(2) 今後の取組みで大切なこと

そこで、どうするかですが、第1には、環境とエネルギーセキュリティとの関係では原子力が重要だということは真実ですから、これを執拗に説き続け、データを示していくことが極めて重要と考えます。

他方、21世紀後半に至っても炭化水素系の燃料は重要ですから、炭化水素系の燃料生産者と共生すること、原子力唯我独尊ではなく共生というコンセプトが非常に重要ではないかと思います。

これに関連して最近、サステナブル・イノベーション (Sustainable Innovation) に対し、ディスラプティブ・イノベーション (Disruptive Innovation) が勝利することがあると言われています。ハーバード・ビジネス・スクールのクレイトン・クリステンセン教授が著書 “The Innovator’s Dilemma” で、ハーレーダビッドソンがホンダに負けてしまった例などのように、非常にすばらしい製品を作っている優良企業が、その会社から見れば二流、三流のものを作っている会社にやられてしまった例を紹介しています。安っぽくてもあるマーケットセグメントのニーズに合った技術がシェアを拡大して結局世の中を変えていく

というわけですが、これをクリステンセンはディスラプティブ・イノベーションと言っています。原子力界もこの可能性について、リスクとチャンスの両面から考えなければなりません。原子力界にとってリスクとしてのディスラプティブ・イノベーションとは何かというと再生可能エネルギー、これには宇宙太陽光発電も含まれると思います。宇宙太陽光発電は原子力の持っている特徴を全部持っています。もしそれが安く導入されたら、原子力は確実にメインストリートから外れてしまうでしょう。原子力界にとってチャンスとしてのディスラプティブ・テクノロジーはPBMRの例が示すように市場のあるセグメントのニーズに積極的に応えて提出される技術です。「格納容器もないような原子炉を作ってどうするのか」と言っているうちに、何となくファンが増えてしまったことがこのことを示しています。先程ご紹介した韓国の海水脱塩炉なども気がついたら人気が出ていて「日本政府は国内産業保護のため小型炉の研究をやるの?」と、世界中の笑いものになるかも知れません。我々は、こういうことも考えつつ生きていかなければならないのです。

もう1つの問題は、先程述べたことですが、研究開発施設の廃止措置費用をどうするかです。民間企業の場合、当然、生産費用の一部に計上して手当していくわけです。実際、フランスのCOGEMA社のバランスシートには、廃棄コストとして4,000億円ぐらいの準備金が積んであります。

国の活動についてはどう考えるか。恐らくそれは第一義的に国の責任という意見と、プロフィットセンターに国の開発した原子力技術を渡したのだから、そこのプロフィットで

原子力開発にかかった施設の廃棄費用を賄うべきだという議論があり得ると思います。原子力関係者は、軽水炉は国産技術じゃないから国の研究開発活動はプロフィットの発生する要因としては小さい、リスクを賭しての研究開発活動であって、それは将来の保険であるところ、廃棄も研究開発活動の一部として自己完結的に扱われるべきというか、このあたりの考え方を整理しておく必要があるのではないかと思います。

おわりに

原子力というのはわが国のエネルギー需給において、セキュリティ、環境対策という点から非常に重要な役割を担っています。これを維持するためには、短期、中期、長期で取

り組むべき課題が山積していると思いますが、これを着実かつ合理的に解決していくためにはやはり全体像を共有しなくてははいけません。できれば、これを国民と共有して解決に取り組む姿勢が望ましいところです。何か言われてから「実は……」というパターンは余りにも信頼を損ない過ぎてうまくやっていけないのではないかと思います。

このあと各論について、それぞれの専門の方がお話しされると思いますので、一応これが我々が今置かれている立場ではないかということでお話し致しました。極論すれば、今後は追求すべきベネフィットとその実現リスク、利用可能な資源の動向を見定め、効果的かつ効率的なアプローチで研究開発と実用化を進めていくことが重要だということを申し上げたつもりです。ご静聴ありがとうございました。(拍手)

〔講演〕

環境・エネルギー・原子力

高木 美也子（日本大学 総合科学研究所教授）



はじめに

私はバイオ関係が専門で、今は主に生命倫理をやっています。その関係で文部科学省の委員をやらせていただいたりしております。

原子力関係との係わりでは、東京電力の研究会に参加させていただいたのが最初だったと思います。その時はこちらがいろいろ勉強させていただきました。原子力発電所、あるいは水力発電所等を見せていただいたりしました。水力発電所は環境に易しいと言われるのですが、全部地下はくり抜いてあるわけで、これで環境に優しいと言えるのかと感じました。単に水力発電所とか原子力発電所とか言われていても見えない部分があったりします。実際に現場を見てどういうものか、まがりなりにも語れるようにしていただいたと思っています。

そういうこともありまして、「環境・エネルギー・原子力」という題で体験談を少しお話ししたいと思います。

〔略歴〕

1975年青山学院大学理工学部卒業。1979年仏・ソルボンヌ大学博士課程修了。理学博士。1993年～2000年3月東横学園短期大学教授。1988年～99年東京工業大学講師（併任）、1992年オーストリア・モナッシュュ大学生命倫理研究所。2000年4月より現職。専攻は生化学、分子生物学、生命倫理。

文部科学省科学技術・学術審議会生命倫理・安全部会委員、文部科学省ヒトES細胞研究専門委員会委員、東京大学医科学研究所遺伝子治療臨床研究審査委員他。

海外生活の体験から

サマータイム制度の導入

私は「なぜ日本が夏時間（サマータイム）制度を導入しないのだろうか？」と思っています。戦後一度導入されたけどどうもいかなかったというのですが、現在では70カ国以上で導入されていて、経済協力開発機構（OECD）加盟国でサマータイム制度を導入していない国は日本、韓国、アイスランドだけです。アイスランドは白夜になるためにサマータイムが必要がないということです。韓国は、日本との経済関係が緊密で、日本との時差が生じるとビジネス上不便であるために導入しない

とのことです。

このように世界的に普及している制度を導入する時、日本は先進国である割にすごく遅いところがあると思うんです。

サマータイム制度は1時間、夕方の明るい時間を増やして朝の時間を1時間ずらす制度です。これをやると体調が狂うとか、労働強化につながるなどという理由で反対が強いということですが、今の不況下で労働強化なんてないと思うんです。ワークシェアリングで少ない労働を分けていくとか、リストラとか言われている中で、サマータイムによって労働強化になるとはとても思えません。今が導入する良い時期じゃないでしょうか。

私はフランスに4年ほどいた時にサマータイムを経験していますが、明るい時間が増えるというのは非常にうれしいですね。大学が終わった後でもちょっとテニスをしたりする時間ができます。普通は暗くなってできないのに、やっぱり明るい運動しようとか、何かやりたいという気になるのです。オーストラリアにいた時も、仕事の後にゴルフを9ホールぐらい回ってくるとか、アフターファイブにスポーツを楽しむということをうまくやっていました。これはやっぱりサマータイムのおかげではないかと思います。

日本でもこういうシステムをうまく活用すればいいんじゃないでしょうか。これは是非やってもらいたい。省エネしなくては行けないといわれている量の約1割を、このサマータイム制度導入で達成できるということはかなり大きいことです。今のこの不況の時期、労働強化のない時期こそ導入すべき時ではないかと思われます。

省エネには経済的インセンティブを

最近買物袋を持って行くと安くなるというスーパーがあって、自分の買物袋を持って買っている人を見かけたりします。フランスではもともとスーパーで余り袋をくれません。だからみんなたたむと小さくなるような網の袋をバッグの中に入れていて、買った物をそれに入れて帰ります。フランスに住んでいた時、スーパーで袋をもらう習慣が日本で身についていたためつい手ぶらで行っていたんですが、そのうち、私も網袋を持つていくようになりました。

日本でついこの間、あるスーパーに行ったらレジで並んでいる人がみんな自分のバッグや袋を持っているんです。そのスーパーは、袋を使わないとカードにポイントをたくさん打ってくれるらしいんですね。そういう特典があるとやっぱり主婦はがんばっちゃうわけです。ただ「環境のためにやりましょう」と言っても、なかなか難しいです。小さなことでも金銭的に反映されるとなると、みんな急に頑張り出すんです。

フランスで、もう20年ぐらい前からマンションやビルで夜になると各階の廊下のところに小さい電灯がついていて、スイッチを押せば電気がつき、しばらくすると消えてしまうというシステムが普及しています。「そういうシステムを日本も導入すればいいのに」と、10年ぐらい前に話しました。そうしたら電力関係の人が「日本は省エネ技術がすごく進んでいるので、常時ついているほうが消費電力が少ないんです。フランスの方が効率が悪いんです」と言われました。「ああ、そうなんです。じゃあ個人は努力しなくていいんです

ね」と返事したのを覚えています。確かに省エネのための企業努力も重要なんですが、個人に対しても努力することを訴えることが必要だという気がします。

原子力研究者—フランスではエリート

フランスでは、原子力研究者は非常にエリートだったのです。これに対して日本では、日本の原子力関係で働いている人たちをエリートだとは思っていないんじゃないかという気がします。

フランスは、すべての電力の80%ぐらいを原子力で担っている原子力大国ですから、原子力関係者はエリートという意識があり優秀な人材がそちらの方に行くのでしょうか。それに比べて日本では原子力の研究をしたいと希望する優秀な若者が少ないんじゃないかという気がしています。

大学の各種統計を見ても、工学系で今人気があるのはロボット関係です。競争率が非常に高くなって優秀な人材がそちらに流れているんです。それからバイオ関係の人気も非常に高いです。「農学部」という名前を「バイオ何とか科」というふうに変えると急に学生がたくさん来るようになります。これに対して、原子力となると優秀な学生にとってあまり魅力がないのではないかという気がします。

エネルギー教育の必要性

では、どうすればいいのか。日本でこれだけエネルギーが重要だと言われているのに若者が余り関心を示さないということは、事故

等が起きた時の報道の仕方にも原因があると思います。どうも印象がよくない。今年の4月から小中学校で総合学習が始まりましたが、現場の先生たちは一体何をしたらいいのか困っています。そこで、総合学習にうまくエネルギー教育を取り入れ、システム立てて教育してゆけばどうでしょう。第一線の方がお話しをすると、エキサイティングな状況を子供たちに見せて教育する。そういうことがとても重要です。「あの時、あんなすごい先生や研究者が来てくれてこんな話をしてくれた」という経験は、子供たちに強い印象を残します。そうなれば、きっと大学でも優秀な人材がエネルギー関連に集まってくると思います。

成功するリサイクル政策のために

リサイクルにも必要な科学的な目

リサイクルの形態を大きく分けると、①牛乳びん、ビールびんなど、リターナブルなものを何度も使っていく形、②古紙とかガラスびんなどを再生利用していく形、③廃プラスチックみたいなものを再利用していく形の3つがあります。リサイクルをどうすればうまくやっていけるのかということですが、リサイクルも科学的な目で見ていかなければいけないと思うんです。

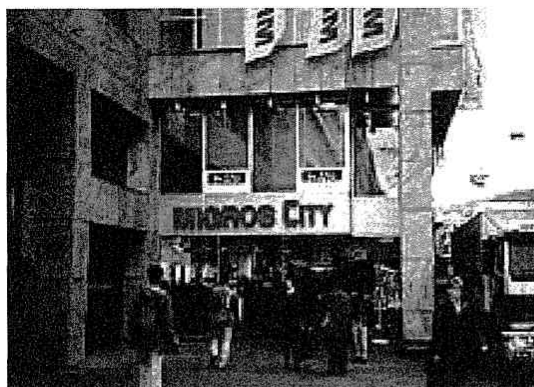
実際にある市民団体の代表の方がおっしゃっているんですが、約16年前に牛乳パックの回収運動に取り組んだところ、その後紙パックが氾濫してきて、牛乳びんを追いやってしまった。自分たちのやってきた運動が本当に

よかったのか、今考えさせられるということです。本当に環境に良いリサイクル運動をやるためには、どういうふうにやれば一番効率的なのか、科学的に見ていかないといけないんです。

びんかプラスチックか科学的に決める

スイスのミグロスという生協は、環境保護型スーパーマーケット（図1）ですが、自分の研究所を持っていて、どういった回収をすれば一番効率的か研究しています。例えば、ヨーグルトの容器はガラスがいいのかプラスチックがいいのか。ヨーグルトの容器のような小さいものと、びんにして回収するとどんなによくても回収率は60%だということです。流通過程で必要となるエネルギー、生産工程までのエネルギー、回収後の再使用のための洗浄に要する水量、廃棄するとどのぐらいの汚染物質が出てくるかというような、全部の効率を計算します。そしてびんにするかプラスチックにするか選択しているんです。この場合はプラスチックを選択しています。理由は、びんだと回収率がよくないということ、いろんなエネルギー効率すべてを考えるとプラスチックの方がいいという結論に達したからです。びんを使用するのは1ℓ入りのジュースの場合です。その大きさの容器にびんを使用し間口も大きくすると、中を洗浄する水の量が小さい容器より少なくて済むのです。

カナダのビクトリア大学のグループとアメリカの環境調査会社が同じような研究をしています。自動販売機で使われるコップは紙製がいいか、プラスチック製がいいかという研究です。製造に要するエネルギーの量、大気



（出所：首都圏生協ホームページ）

図1 スイスの環境保護型スーパーマーケット

汚染の量、製造工程の冷却水、必要な電力量を計算しています。回収がうまくいけば絶対にプラスチック製がいいという結果が出ています。コップですから水が漏れては困るのでちゃんとコーティングしないとイケない、しかも薄い紙にコーティングするので次の再生が非常に難しいということで、効率を考えるとプラスチック製コップの方が環境に優しいという結果を出しています。

観念的で誤った環境教育

ところが、「紙だと環境に優しくて、プラスチックだと環境に悪い」という先入観があります。アメリカで子供たちに“Fifty Simple Things Kids Can Do to Save the Earth”という本が50万部売れました。この本は日本語でも『21世紀の子どもたちが地球を救う50の方法』という書名で出ています。それによりますと、「もしファーストフード店に行ったらプラスチックのコップを渡されたら『紙コップに替えて』と言いましょ」なんてことが出ているわけですね。子供たちにそういう指導をしていく

というのもちょっと恐いなと思います。ですから、本当にどちらが環境に優しいのか、科学的に見る目をもって調べていかないと、結論を出すのは難しいのではないのでしょうか。

このことを一度ある環境フォーラムで話したところ、環境運動家の方が「私たちの運動が駄目だということのか」と控え室にどなりこんで来ました。私は「駄目ということではなく、科学的に考えて運動しないと環境のためになると思ってやっていることが実は環境のためになっていないということがあるんです。重々考えて環境運動をやりましょうということなんですよ」と申し上げました。

しっかりした動機づけでごみ減量に成功

ドイツのリサイクル運動は非常に有名です。ドイツは1980年からごみ収集を有料化し、1991年からは包装ごみの回収とリサイクルを企業に義務づけました。これが非常にうまく機能しています。

家庭ごみの場合、紙のごみ、生ごみ、プラスチックの3種類に分かれています。清掃局はごみ箱を有料で貸し出しています。そのごみ箱を使わないと回収してもらえないので、必ずそのごみ箱を借りないといけなわけです。それが、例えば60 Pのごみ箱だと年間1万3,000円ぐらい払います。これが240 Pだと年間5万円ぐらい払わなくちゃいけません。それで、みんななるべく家庭ごみを少なくする努力をし、なるべく小さいごみ箱を借りようとしています。

今度は企業による包装ごみの回収とリサイクルの仕組みについてご紹介します。まず企業が「緑のマーク」の認定を受け、自社製品

にそのマークを表示します。他方、ある団体が黄色い回収ボックスを用意するのですが、「緑のマーク」がついている製品であれば、購入者はそこに捨てることができます。自分が清掃局から有料で借りているごみ箱に捨てなくていいんです。その分、自分の家庭ごみは減るわけですね。ですから、みんな「緑のマーク」のついている製品を買うようになるわけです。

そこで企業は売り上げを伸ばすために、さらに「緑のマーク」を欲しがようになります。「緑のマーク」の認定料というのが結構高いのですが、再生可能な材料を使っている製品のほうが安くて済むようになっています。再生の難しい製品、例えば廃プラスチックは混合すると硬度が落ちますし、余り伸ばしたりもできません。そういうプラスチック製品の場合、「緑のマーク」をとる時の認定料が高く設定されています。紙は再生可能ですから、「緑のマーク」を取るときに安くなっているわけです。そうすると企業は、プラスチック部分をなるべく押さえ、補強にプラスチックを使いながらも、紙の容器にして、安く「緑のマーク」を取ろうと努力するわけです。例え



(出所：千葉市ホームページ)

図2 「緑のマーク」(グリーネプункト)

ば、洗剤もできるだけ濃縮するんです。そうすれば容器が小さくて済むわけで、家庭ではそれを希釈して使えばよいのです。

企業は「緑のマーク」を安く手に入れるために努力し、消費者は自分のごみの量を減らすためにはなるべく「緑のマーク」のついたものを買うということで、うまく機能していて、家庭ごみの量が減ってきています。経済が成長している時は、国のごみ総量を維持するだけでも難しいんですが、ドイツは減ってきています。

このシステムを学ぼうと、日本も含めていろんな国が見学に行ったり、それぞれの国でリサイクルの施策に反映しようとしているらしいんですが、なかなかドイツのようにうまくは機能していないようです。

リサイクルがうまく機能するには、先ほどの日本のスーパーでの袋の例に見られるように、自分のお金に反映させるという動機づけが鍵だと思うのです。ドイツでは企業も緑のマークをいかに安く取ろうかということで努力し、家庭もいかにごみを減らして支払いを少なくするかということで努力するわけです。環境に優しくあろうという気持ちは、もちろん重要ですし美しいことですが、それだけではリサイクルはうまく機能しません。いろんな事例を見ていて私が思うことです。

原子力発電について思うこと

子供の将来のためになる交付金の使い方を

私は今、原発地域の人たちとの話し合いを

していこうという市民懇談会に関わっていますが、何で原発はこんなに反対されてしまうのかと考えてみました。エネルギーというのが必要だということは皆さんわかっているのに、これだけ住民の反発にあってしまいます。最近では2001年5月、東京電力柏崎刈羽3号機でのプルサーマル計画実施を問う住民投票で、また2001年11月には三重県海山町での原発誘致に関する住民投票でも負けました。市民懇談会のメンバーとして住民の人たちと接して判ったことは、やっぱり「自分たちの所には来て欲しくない」という人たちが多くいます。特に、お母さんたちは将来の子供のことを考えると「うちの地域でそういうものは困る」という人たちが非常に多いということです。どうして今までもっと将来の子供たちのためになるようなお金の使い方ができなかったのかというのが私の正直な感想なんです。

原子力発電所がある市町村にはあれだけお金が落ちているわけですね。それを今まで文化ホールや道路などの箱物、ハードばかり作ってきていて、それがまったく有効に機能していないのです。多額の交付金の下りるわけですから、最初はある程度みんな期待したと思うんです。「交付金で自分たちの場所は潤うのではないか」という期待がかなりあったと思うんです。ところが、自分たちがそれによって何か利益を得たという気持ちが地元の人たちに残っていないのです。そこが大きな問題だと思うんです。

例えばIT（情報技術）を時代に先駆けて導入したパソコン教育を徹底的にやるとか、子供たちが将来国際人になることを期待して外国人講師をたくさん呼んできて、すばらしい英語教育をやるとか、何かそういう将来の

子供たちのためになるようなこと、そういうソフト的なことになぜお金を使わなかったのでしょうか。ですから、将来の子供たちのためにはならないから原発に反対するという発想が出てくるんだと思うんです。

結局、交付金の使い方に制約があるということではできなかったようですが、今からでももっと将来の子供たちのためになるような使い方というのを考えていかなければいけない。交付金の使い方を根本的に見直していくことが非常に重要だと思います。

一般市民との橋渡しの人材を育てる必要性

私は遺伝子工学が専門です。よく話題になるクローン技術や遺伝子技術というのは、予防医学、あるいは将来自分の細胞から臓器ができて自家移植ができるとか、そういう研究に進んでいくために絶対に必要な技術なんで

す。ですから、21世紀の医療にとって不可欠な技術なんですけど、「ちょっと怖い」「よくわからない」「何ができるかわからない」だから「反対」という人たちが多いです。私は、事あるごとに、「そうではないんですよ。こういうことなんです」と説明しています。エネルギーや原子力についても、一般の人にわかってもらうための橋渡し役とか知識をもって一般の人たちの疑問にわかりやすく答える人が必要だと思います。そういう小さな努力が「何か難しくてよくわからないけど、危険なものが自分たちの町に来る」というふうに地元の人たちに思われないで済む方向へ進んでゆく。一般の市民と研究者との間に立てるような、そういう人材を育てる学部があってもいいと思うんですね。大学でそういうことを考えてゆくことも必要ではないかと思います。

あまり専門でない話を長く聞いていただきました。(拍手)

〔講演〕

電力自由化と原子力開発

榎本 聡明

（東京電力株式会社取締役副社長
原子力本部長）*



はじめに

電力の自由化が進む中で原子力をどのように扱っていくかというのは大変重要な課題であるにもかかわらず、余りこれが掘り下げて議論されていないように感じております。今後、国レベルを初め、あらゆる所でこの問題を真剣に検討していただきたいという思いが強いわけです。今日は私が感じております幾つかの課題、あるいは知見についてお話ししたいと思います。

原子力へ寄せる電力自由化の波

平成7年度（1995年度）に電気事業法が改正され、卸供給への参入規制が原則撤廃になりました。誰でも電力会社へ電気を売ることができるようになったわけです。電力会社はこれまではほとんど自分で発電していたわけですが、独立系の発電事業者から電気を購入するということができるようになったということです。それから平成11年度（1999年度）

〔略歴〕

1965年東京大学工学部原子力工学科卒業。同年東京電力㈱入社。1981年福島第一原子力発電所技術課長。1991年原子力業務部部長。1995年柏崎刈羽原子力発電所長、1997年取締役原子力本部副本部長兼技術開発本部副本部長、1999年常務取締役原子力本部長、2002年6月取締役副社長原子力本部長、同年9月退任。工学博士。

の電気事業法改正で、小売の部分自由化が決まりました。全体の約3割に相当する2万ボルト以上で受電する使用規模2,000kW以上の特別高圧需要家が対象です。現在、電気事業分科会で今後さらにどういうふうに自由化を進めていくか検討が進められているところです。

表1は東京電力の最近の電気料金改定の経

表1 東京電力の最近の電気料金改定

1988年1月	19.16% 値下げ
1989年4月	3.11% 値下げ
1995年	電事法改正（卸供給への参入規制撤廃）
1996年1月	5.39% 値下げ
1998年2月	4.20% 値下げ
1999年	電事法改正（小売りを部分自由化）
2000年10月	5.32% 値下げ
2002年4月	7.02% 値下げ

（燃料費調整制度の適用を除く）

（出所：東京電力㈱）

* シンポジウム開催時（2002年7月17日）における役職名です。

表2 小売りへの新規参入状況

- ・ 特定規模電気事業者の届け出を行っている新規参入者は9社、その内7社が既に電気の供給を開始
 ・ 参入形態は、グループ内の自家発電等の自社電源を持っているもの7社、自社電源を持たない商社系2社

(平成14年7月現在)

事業者	出力(届出ベース)	母体企業	電源の種類	電源の所在地
ダイヤモンドパワー	32万4700 kW	商社(三菱商事)	他社(火力・水力)	関東、中部
丸紅	1万2500 kW	商社	子会社(水力)	中部
旭硝子	4万 900 kW	窒業	自社(火力)	九州
イーレックス	8万8895 kW	金融・商社(物産)	自社、他社(火力)	九州
新日本製鐵	3万1000 kW	鉄鋼	自社(火力)	東北、中部、九州
エネット	24万2870 kW	NTT・東ガス	自社、他社(火力)	関東、関西
サミットエナジー	6万8400 kW	商社(住商)	他社(火力)	四国
大王製紙	52万4110 kW	紙パルプ	自社(火力)	四国
サニックス	7万4000 kW	産廃処理	自社(火力)	北海道
合計	140万7175 kW	—	—	—

(出所：東京電力㈱)

緯です。2回の電気事業法の改正によって値下げが起こったふうに見えますが、その前から企業努力によって電気料金の値下げを行ってきているというふうにも言えると思います。

表2は小売の自由化が実現してから市場に参入してきてきた事業者を示したものです。自分で電源を持っているところもあれば、他社から電気を買って供給しているという会社もあります。

原子力の挑戦

これら新規事業者の参入に伴い、原子力発電も競争力を持っていかなければいけません。原子力発電は従来から原価低減の傾向にあります。原子力発電の課題として、基幹電源としての役割を果たしながら、電源全体の平均原価を抑制して電力会社の競争力を確保するという点であります。さらに今後は、自由化が拡大しても十分な市場競争力を確保していくことが重要です。

図1は原子力発電の原価の変動を示してい

ます。1年間に大体0.3円/kWhの低減をしています。原価低減に最も大きく貢献しているのは減価償却といわれている部分です。

図2は当社の各燃料別の発電原価を示したものです。これらの電源別の価格をそのまま比較することには余り意味がありません。なぜかと言いますと、役割に応じて稼働の仕方が違うからです。現状は火力の設備利用率が約45%、水力が約20%、原子力が約80%です。平均で約50%となります。

原子力発電の現状の実勢発電原価は、多くの電力会社で7～8円/kWh程度ではないかと思っています。どこまで下げれば原子力は市場競争できるのかと言いますと、当面の目標として5円台と思っています。7円台から5円台まで下げようとしめると20%ぐらい原価を低減する必要があるということになります。

平成12年に通商産業省(当時)から出されました電源別発電原価の比較によりますと、原子力は長期的に見て一番安くて5.9円/kWhとなっていました。時間がたつと減価償却が進んで5円台になるんですけども、自由化の波はその時まで待ってくれない。今もう始まっているということです。

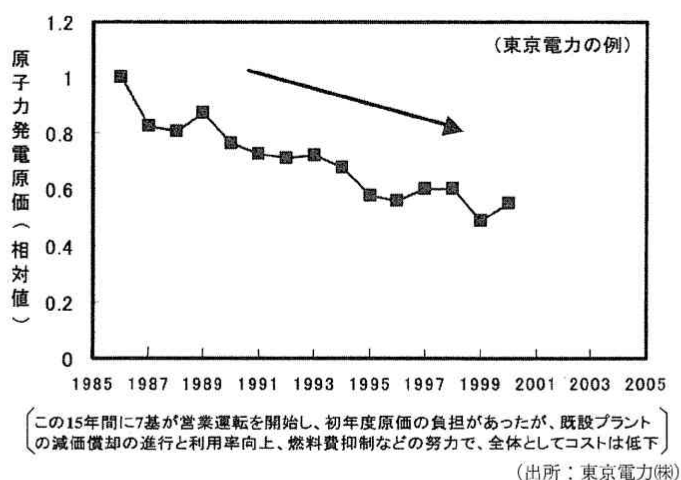


図1 原価低減の傾向にある原子力発電

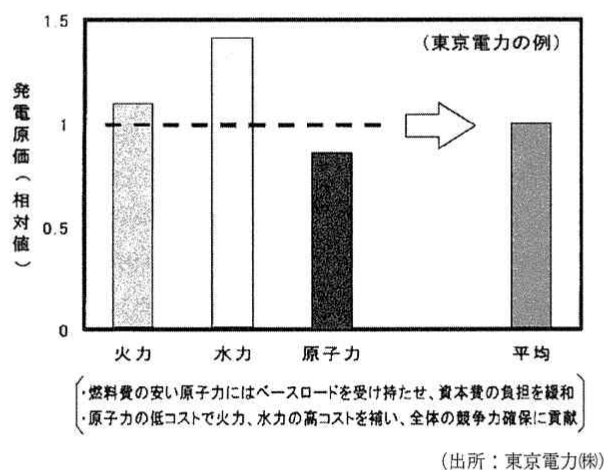


図2 平均発電原価を抑制する原子力

自由化における原子力の課題

（1）原子力は短期の勝負に弱いのでは？

[固定費が大きい原子力]

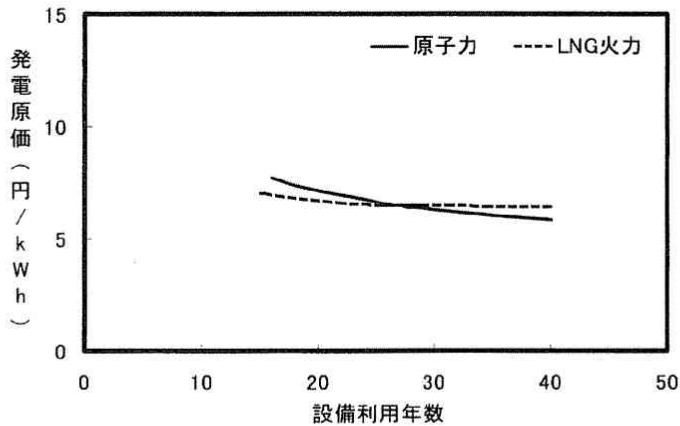
そもそも原子力は非常に固定費が大きいので

すから、全体のコストに占める燃料費は小さいわけですが。逆に言いますと、時間がたって減価償却が進まないとなかなか安くなりませんが、ある程度まで下がってくると、価格が非常に安定するという特徴があります。

[化石燃料はフレキシブルな燃料]

化石燃料の価格は、大きく変動するもので

・資本費が高く運転費の安い原子力は、短期的には不利だが、長期的には
優位 → 資本費は安いが燃料費の高い火力をやがては抜く
・減価償却が進む前は競争力が劣るが、これ迄は総括原価によりコストを回収



(出所：平成11年12月 総合資源エネルギー調査会原子力部会)

図3 長期運転で優位になる原子力

す。ですから火力発電は燃料費が安い時には化石燃料に頼り、燃料費が高くなると化石燃料から他のものにシフトするということで、その燃料費の動向によってフレキシブルに対応できる電源だと言えます。発電所の建設期間も短いですし、建設費も原子力発電所に比べれば安いわけですから、この点でも非常にフレキシブルだと言えます。

[火力と原子力の組み合わせで安定供給]

原子力発電は、他の電源がどうであろうとまったく関係なく、価格が安定しています。火力と原子力を上手に組み合わせることによって供給安定性というのを保ってきたというふうに言えるかと思います。

ですから、短期の競争が始まったり、石油価格や天然ガスの価格が下がったりして化石燃料による電源の発電原価が下がるようなことがありますと、原子力はすぐには追従できないという意味で短期の勝負に弱い面があると言わざるを得ないと思います。

図3は原子力とLNG火力について発電原価が運転とともにどのように変わるかを示したものです。原子力発電所は年数がたてばたつほど価格が下がる傾向にあります。一方、火力の方は燃料依存性が高い価格構成になっており、燃料の価格変動に大きく左右されますが、それがほとんどの範囲内で変動が収まれば変化しない特性を示します。従って、どこかで交差するわけです。図3では20数年のところで交差していますが、大体こういう2つのものを組み合わせて使っているということが言えると思います。

海外では原子力発電所の建設が最近ほとんどありません。古いプラントが多いので減価償却が相当進み市場競争力が強いということが起こっています。米国では1978年以降、新規発注がなく、今動いている発電所のほとんどは減価償却が終わっており、一番市場競争力があるとも言われています。日本では最近も新規建設が続いていますが、減価償却が十分進まない間に自由化がきたということで

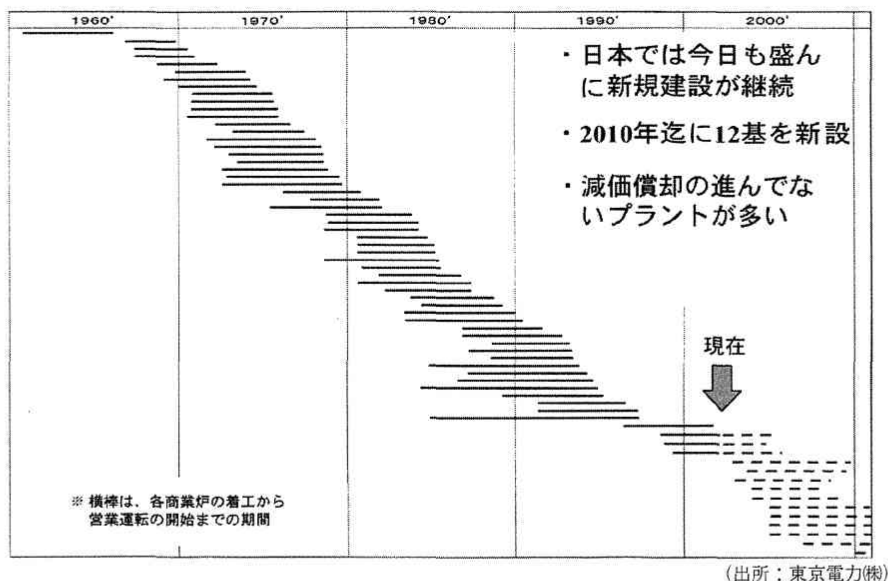


図4 わが国における原子力プラントの新規建設

大変になっているわけです。

図4は、日本では現在も原子力プラントの建設が続いていることを示したものです。バ－の最初の部分が着工で、最後の方が営業運転を開始した時です。全体的にまだ若いプラントが多いため減価償却は進んでいません。

円/kWhという単位で表す原子力発電原価をこれから約20%下げて競争力を出すということで最も手っ取り早い方法には、円の方を小さくするか、kWhを大きくするか、2つの選択肢があります。一緒にやるのがいいわけで、経費節減で円を小さくしながら、利用率の向上でkWhを大きくするという方法です。今、日本の原子力発電所の平均的な利用率は80%前後です。アメリカでは90%を超えているものが多く高いものでは95%ぐらいのレベルもあります。日本の原子力発電所の利用率として95%ぐらいのレベルを目指すとしみますと、kWhが20%伸びるということになり、発電原価を20%下げるといった目的が達せられるということになります。

〔利用率向上にむけた課題〕

しかし、利用率を伸ばすということはそう簡単ではありません。以下のようないろいろな課題があります。

①点検保守の効率化・高度化による、定期点検（定検）期間の短縮化

定検期間は最近だんだん短くなって40日を切ったというような話がしばしば報道されていますが、安全上本当に問題ないのかという話があると同時に、地元の雇用問題に支障はないのかという意見をよく伺います。実際には定検には幾つか種類があります。代表的なものとしては、「定例的な定期検査項目だけから構成される定検」、「点検頻度の比較的少ないものが入ってくる中程度の長さの定検」、「大きな改良工事が入ってくるような定検」があります。それぞれ期間の長さが違います。今、「40日を切りそうだ」と言っているのは定例的な定検のことです。しかし、3つの種類の定検の長さを平均しますと、今でも大体60

日ぐらいの定期検査を行っています。

昨年秋だったと思いますが、アメリカで23基の原子力発電所が定検に入り、その期間の平均値が38日でした。アメリカの定検は、全部同じような長さの定検、平均的に見ても40日を切っているということになるわけです。ですから私どもが工夫すべきことは、長い定検と中ぐらいの定検を短くしていくことです。それができなければ、実態として定検期間が短くならないということになります。

なお、昨年度、その23基のプラントが定期点検に入る前のサイクルの設備利用率は95%近くに達しているわけです。ですから、何とかしてアメリカの状況などよく調査をしながら、私たちもできるだけことをやっていきたいなと考えています。

②予防保全、適切な高年化対策によるトラブルの未然防止

これは予定外の停止を少なくするという意味で大事だと思います。

③運転期間の長期化

これは、これから国との間で十分お話し合いをして調整していかなければならない問題ではありますが、極めて大事なことであります。

④定格熱出力一定運転

これは原子力発電所の熱出力は安全との関連で非常に厳しく管理をしないといけないのですけれども、冬場と夏場と海水の温度が違ふことで、冬場にはタービンの熱効率が上がってきまして、同じ熱出力のもとでも電気出力をたくさん出せる可能性があります。最近ようやくそういう場合は電気出力をたくさん出していいですよと規制当局から認めていた

いただきましたので、今、それを実施中です。2%弱ぐらい利用率が上がってくるといいます。

⑤定格熱出力の増加

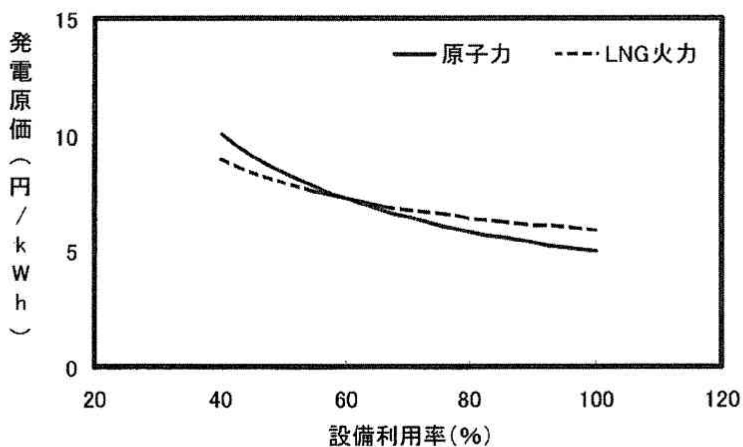
これは外国では行われているのですが、もちろん日本ではまだ行われておりません。これは原子炉にも、またタービンやその他の設備すべてが、少しずつ余裕をもっておりますので、その余裕を最大限使って出力を出すということです。もちろん、これは安全対策の影響をいろいろチェックをしながら進めないといけないことですが、その余地があります。大体、5%から10%ぐらいのところは海外の場合では試みられているということであります。

⑥高燃焼度化

これは燃料の取り替え本数を少なくして運転をするわけで、もちろん燃料費の低減が図れると同時に、使用済燃料の排出本数が少なくなるというメリットもあります。

図5は、横軸に設備利用率、縦軸に発電原価を取っております。原子力発電の場合には固定費、設備費が非常に高いですから、一旦建てたらできるだけフルに運転する方が得になるということを示しています。火力の場合、原子力に比べて燃料費が高いですから、設備利用率を上げて電気をたくさん出しますと燃料がたくさん要るということで、原子力のようには発電原価は下がりません。

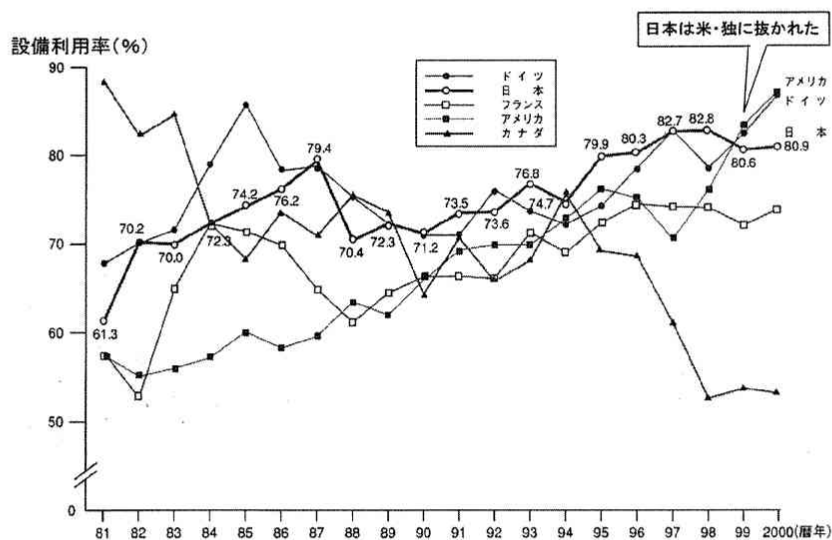
図6は原子力発電所の設備利用率の変遷です。日本は1990年代前半ぐらいまでは世界でもトップレベルでしたが、だんだん他の国に追い抜かれて、今は3番目ぐらいになっています。



➡ 資本費が高く運転費の安い原子力は、火力に比べ、低稼働率では不利だが、高稼働率では優位

(出所：東京電力(株))

図5 高稼働率で優位になる原子力



(出所：原子力発電所運転管理年報 他)

図6 原子力発電所の設備利用率の変遷（国際比較）

表3は東京電力の話で恐縮ですが、自由化を控えて、原子力だけでなくいろいろな業務において工夫をして、20%以上の原価低減を達成することが1つの大きな目標になって現在各部門で取り組んでいます。

設備利用率は、連続運転の期間、その間の負荷率に左右されます。負荷率として挙げている96%とか97%という値は最近の実績からいうと少し低くて、98%以上が現在の実績だと思います。その負荷率の残りのパーセントの部分は、トラブルが起こったりしてプラン

表3 「米国並の利用率を」—東京電力

・東京電力の「経営ビジョン」(2001年3月発表)の数値目標の一つ 業務効率を1999年度から20%以上向上(2005年度)			
・そこで、定期検査の短縮、運転期間の延長により、欧米並みの設備利用率を達成			
13ヶ月運転	負荷率96%	定期検査60日	→ 利用率83%
15ヶ月運転	負荷率96%	定期検査50日	→ 利用率87%
18ヶ月運転	負荷率97%	定期検査40日	→ 利用率90%
24ヶ月運転	負荷率97%	定期検査30日	→ 利用率93%
・同時に、経費の低減に努力 運転費、燃料費、保守費、一般管理費、etc			
・これにより 「円/kWh」を改善(2割減少)			

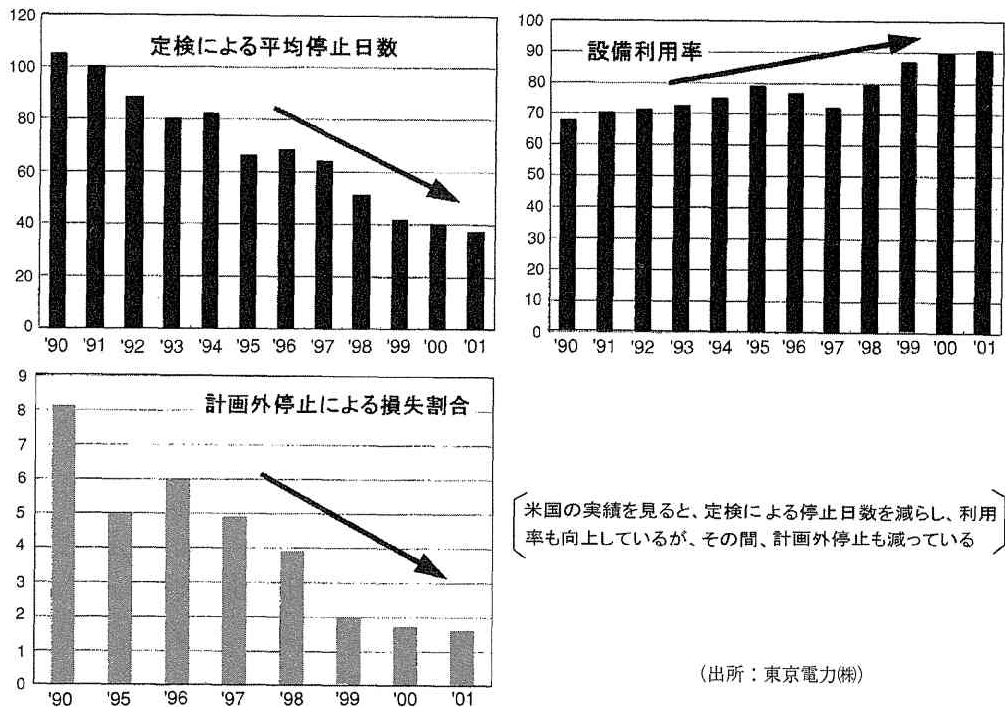
(出所：東京電力㈱)

トが止まるという意味です。それから定検日数を加えると最終的に利用率が決まってきます。定検の間隔を2年ぐらいにしまして、定検を短くしていきますと90%を超える利用率が達成可能になるということを示しております。

[経済性と安全性]

利用率を上げる、また定検の日数を短くすると言いますと、「安全を犠牲にして点検すべきこともちゃんと点検しないで運転しようとしているのではないか」というお話をよく伺います。

図7はアメリカの実績ですが、一番右上が設備利用率です。図に示すように年々上がってきました。それから、定検による平均停止日数もどんどん下げてきてまして最近では40日を切っています。アメリカでの定検には短中長という区別はありませんので、この日数はいつでもこのぐらいで定検を行っているという日数です。こういうことをやりながらも、計画外で原子力発電所を止めて出力を損したという割合は同時に減っているのです。要するに、安全性、信頼性と経済性は相反するも



(出所：東京電力㈱)

図7 両立する経済性と安全性 (米国の例)

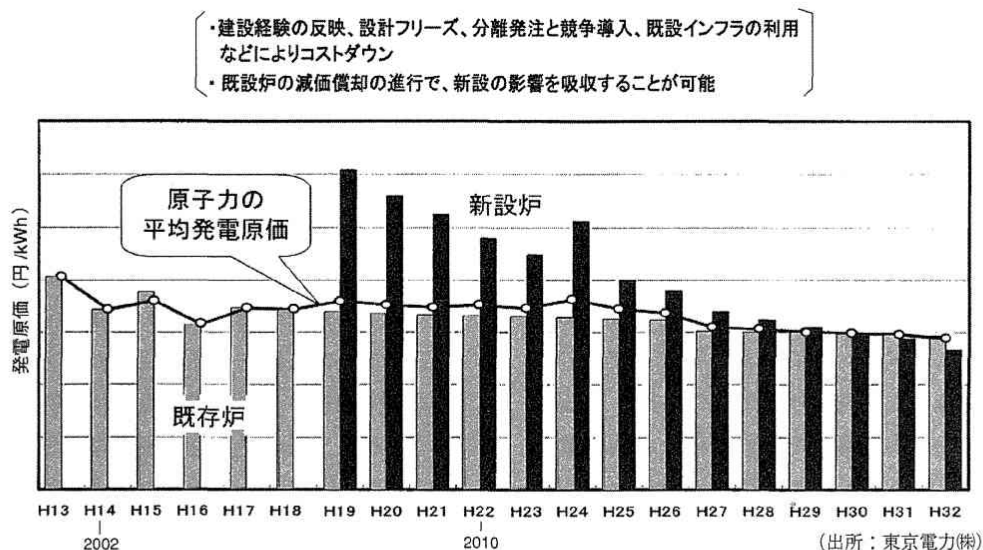


図8 新規建設の見通し

のではないということです。丹念に保守をやって大事なところをきちんと点検し、大して意味のないところはそれなりの扱いをして、重点志向できちんとやれば経済性と安全性を両立させることができるということだと思っています。

(2) 新規の建設はこれから可能か

先ほど言いましたように、もう既に建てたものはそれなりに減価償却も進んでいますから、利用率向上や経費節減などの努力によって競争レベルへ近づけるということが出来ます。しかし、新規に原子力発電所を建てますと、減価償却が進むまでの間は発電原価が高くなるわけです。建てた直後の初年度原価は11円/kWhとか12円/kWhです。それが運転とともにどんどん安くなっていくわけです。

図8の折れ線グラフは、原子力発電全体の平均価格みたいなものを示しています。棒グラフは既存炉と新設炉のそれぞれの発電原価

を表します。平成19年に新設炉を入れたと仮定します。初年度原価は高いのですが、それもだんだん減価償却が進んでいきますから、平成23年、平成24年に向けて下がってくる。ところが平成24年に次のプラントを新規に入れたとします。折れ線を見ていただきますと分かりますが、減価償却がかなり進んでいるプラントをたくさんかかえている中で新しいものが入った場合、平均価格の上昇はわずかです。黒いバーの部分は大きいように見えますが、平均ということになりますと、東京電力の場合でしたら既に17基あるわけですから、突出した黒の部分の18分の1だけが平均価格を引き上げるわけです。その部分は小さいもので、例えば、初年度でも0.3円/kWhとか0.4円/kWhだと思います。

私は図1で減価償却でどんどん価格は下がっていることを示しました時に、1年間で大体30銭ぐらい下がっていったと言いました。ちょうど新規プラントを入れて上げる部分と減価償却で下がる分とが相殺しあって、

発電原価の平均は余り増加をしません。ですから、減価償却が進んでいない新規プラントを入れたとしても既存炉が多い場合は、発電原価についてそんなに悲観的になることはないということです。

[各社個別の条件に依存する競争力]

図9はA社、B社、C社、D社という原子力発電の全電源に占める割合の違う会社について試算した発電原価です。例えば、C社の場合は原子力を建ててからまだそれほど運転を続けていません。まだ償却が終わってないので非常に高いわけです。しかし、原子力発電所の割合が少ないということは、他の電源による割合が大きいわけで、そういう部分が低いコストなため平均が低く保たれています。ですから、原子力発電所が少ない電力会社が大変かということ必ずしもそうは言えないわけです。他の化石燃料の発電所の低い発電原価で平均を低く支えれば、最初の一番高い原子力発電所を入れることができるということです。

それは各社の経営戦略によって決まってくるということだと思います。

[今後の原子力増設計画]

2010年までに全国で12基の新設計画があります。需要規模の小さな電力会社の増設計画は、その会社の平均発電原価を押し上げるため、単独では増加分の原価を吸収することが難しいケースもあります。複数の電力会社による共同開発、共同受電、減価償却方式の変更、政府による資金調達優遇策などの工夫で対応する必要があるのではないかと思います。

(3) バックエンド費用は大丈夫なのか

[バックエンド費用は30兆円?]

最近幾つかの新聞で、「2045年までのバックエンド費用が30兆円かかる」と報道されました。「非常に大変なことになった」という感じで伝えられておりました。この点について少し説明しておきたいと思います。

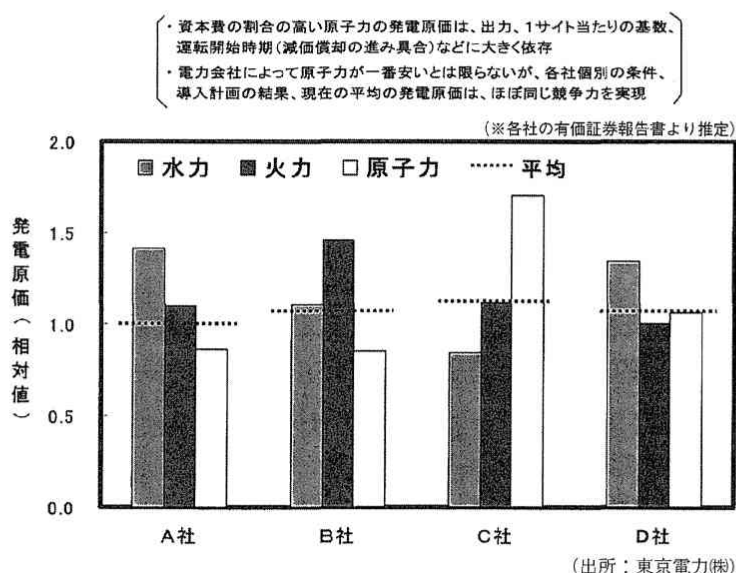


図9 各社個別で異なる原子力発電の競争力

新聞報道の「30兆円」がどういう積み上げでなされたものかはっきり分かりません。また、幾つかの廃棄物についてはまだ処分方法が決まっておらず、その費用を合理的に算定するのが現在難しい点もありますので、この数字は不確実性の高いものだと思います。

「30兆円」の真偽を詳細に論ずる段階にはないと思いますが、一応、今まで算出されたいろんな発電原価から推定して、「30兆円」が新たに考えなければならぬエキストラの費用なのかどうかだけをはっきりさせておきたいと思います。

[発電原価5.9円/kWhと30兆円は矛盾しない]

総合エネルギー調査会原子力部会から公表された5.9円/kWhという発電原価について説明しましたが、その時の計算をベースに45年間のバックエンド費用を計算してみますと、大体30兆円になります。

表4に書いてあるような諸々の項目を加え、5.9円/kWhを導き出した時の割引率3%で計算すると、バックエンド費用は1円/kWhになります。ここを出発点に45年間の発電量を考

えて計算しますと、約30兆円になります。未算入コストは割引率を仮に0%にしましても数十銭ですから、大きな価格の変動はないと思っています。

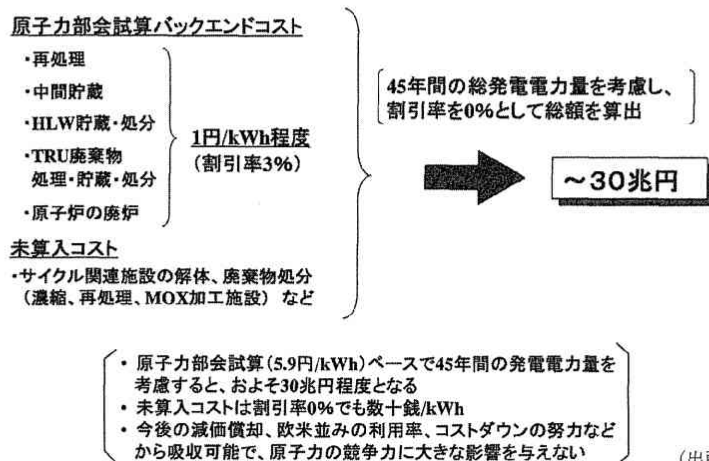
私がここで言いたいのは、今原子力の発電原価が5.9円/kWhで長期的には競争力があると通産省がかつて試算したこの値には、実は「30兆円」が含まれていると考えてもよいぐらいだということです。

[バックエンドの不確実性への対応]

バックエンド費用には、30年、40年先に発生する費用もあります。その時の社会情勢、技術進歩の度合、経済性、経済状況、あるいは規制の動向、例えば許容線量を最終的にどのぐらいにするかとか、そういったものにバックエンド費用は依存してきます。そういう不確定要素を考えますと当然のことながら、この計算にも不確実性があると言わざるを得ません。

従って、私どもとしてはまだ制度や基準のできていないものについての整備は早急に実施して、合理的な費用を算定することに努め

表4 バックエンド費用30兆円の計算



なければならないと思います。それから、私たちが競争の中で稼いできたお金を必要な時まで積み立てておく分は無税にさせていただくとか、そういった税制上の優遇措置、それから保険の制度があってもいいのではないかと思います。そういうことを今後検討していく必要があると考えます。

こういう不確実なコストというのは原子力だけでなく火力にも当然あります。中東などの政治不安に基づく燃料費の高騰、それから将来、炭素税、環境税みたいなものが導入されるかも知れません。

(4) 原子力発電を積極的に評価

[エネルギーセキュリティの確保]

何のために今まで原子力をやってきたのかと言いますと、やはり1つはエネルギー価格の安定性、いわゆるセキュリティ。それから環境対策。炭酸ガスを出さないということがあります。

そういう目的、メリットのために原子力を建てたのだから、原子力の貢献度を積極的に評価していく必要があるのではないかと思います。

図10で電源選択における「その他の考慮」について示しました。エネルギーセキュリティへの貢献をお金にするとどれぐらいになるのか現在いろいろ試算されています。いろいろな論文がありますが、今の段階で大ざっぱに言って1円/kWhぐらいではないかと思っています。

それから地球温暖化防止のための炭素税。これから排出権取引などが行われるようになってきますと大体相場が決まってくると思いますが、1円弱/kWhぐらいかなと思います。それから、その他の外部に対するマイナス要因を算出しようとする試みに、欧州のExternEプロジェクトがあります。各種電源がそれぞれの環境に与える影響がいくらで、その影響をなくすためにいくらかかるかということですが、ExternEの計算によると他の電源と比べて原子力はキロワット当たり1円ぐらいメリットがあるということになるようです。

エネルギーセキュリティへの貢献、地球温暖化防止、その他外部コストを足すと、原子力発電は約3円/kWhの貢献、あるいはメリットがあるということになります。計算する人や仮定によって随分違って来るとは思いますが、今後こういう評価をして、原子力の意義を社

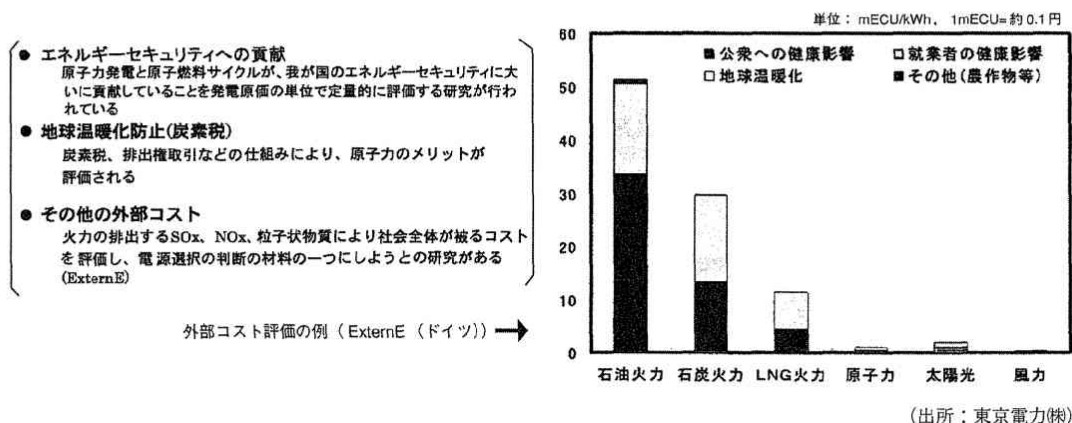


図10 電源選択におけるその他の考慮

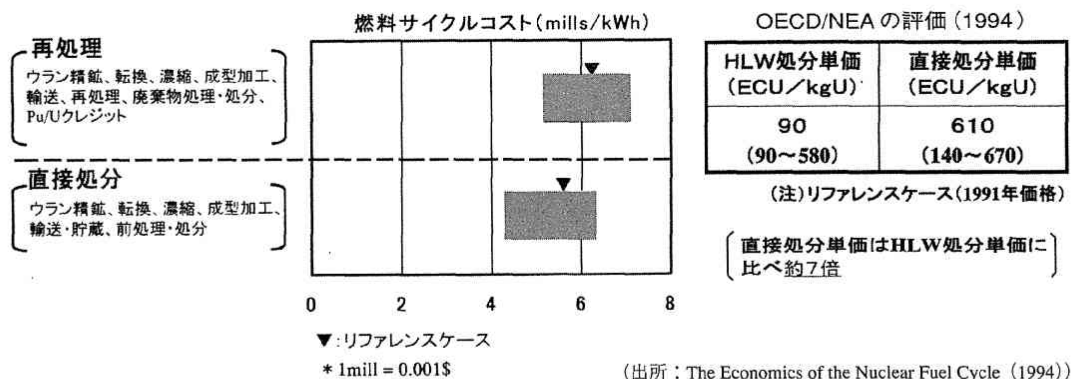


図11 コスト比較—再処理 VS. 直接処分 (OECD/NEA)

会に訴えていく必要があると思っています。

(5) 再処理より直接処分が安いのでは？

表5 直接処分コスト評価の例 (ONDRAF)

[再処理と直接処分]

これも今盛んに議論されていますが、幾つかの評価や試算があります。

① OECD/NEA

図11は再処理 (リサイクル) と直接処分 (ワンスルー) についてOECD/NEAが1994年頃に計算したものです。燃料サイクルコストはどちらを選択しても平均的には余り変わらないと言っています。その根拠を見ますと、処分費、要するに直接処分費のキログラム当たり単価を取ってどちらが高いか調べてみると、直接処分の方が相当高いというのがOECD/NEAの仮定です。この試算では約7倍になっています。

② ベルギー国立放射性廃棄物核物質管理庁の試算 (2002年)

これは非常に新しい試算です。表5で示されていますが、これだと直接処分費用は再処理に伴う高レベル放射性廃棄物 (HLW) 処分

	HLW処分費用 (億ユーロ)	直接処分費用 (億ユーロ)
建設	1. 9	4. 3
操業	0. 63	0. 53
閉鎖	0. 36	1. 06
合計	2. 89	5. 89

(注)・基本ケース(2000年価格)

・直接処分費用には、既発生のHLWの処分費が含まれる

[直接処分費用はHLW処分費用に比べ約2倍]

(出所: ONDRAF/NIRAS: Safety Assessment and Feasibility Interim Report 2 (2002))

費用の2倍だと言っています。2倍だということとワンスルーの方が安いという結果になるかも知れません。

③ シャルバン報告 (2000年)

フランスの評価を表6に示しました。評価期間は2000年から2050年まで、発電設備の平均寿命を45年として原子力発電所を運営するためのあらゆる費用を試算したものです。そうすると、2010年に再処理を中止してしまって、そこから燃料を貯蔵してワンスルーで

表6 再処理の経済性（仏シャルバン報告）

【前提条件】

評価期間：2000年～2050年
発電設備の平均寿命：45年

単位：10億フラン (1999年ベース)	再処理継続 (28基でMOX装荷)	2010年に 再処理中止
発電設備の建設・解体費等	682	682
発電設備の運転維持費	1297	1297
ウラン濃縮・UO ₂ 燃料加工費等	578	602
バックエンド費 ^(注)	263	195
廃棄物処分費	107	112
総計	2927	2888

(注)
再処理、MOX成型加工、
回収ウラン及び劣化ウラ
ンの中間貯蔵、再処理さ
れない燃料の中間貯蔵、
最終貯蔵を持つ廃棄物の
中間貯蔵、再処理施設
UP2の解体費用を含む

【試算結果】

再処理を中止する場合と継続する場合でコスト差は1%でしかない

(出所：東京電力㈱)

するケース。それと再処理をずっと継続するケースの2つについて全体の費用を計算したものです。たった1%しか変わらないという計算になっています。これはバックエンドの費用のところだけ見ているわけではなくて、全体の原子力の運営費みたいなものを考えています。

【原子燃料サイクルの着実な完成】

原子燃料サイクルはどうしたらいいのでしょうか。フランスの評価によりますと、現実には投下した資金を含めて算定をしていけばワンスルーとリサイクルはほとんど差がないということになります。

それからリサイクルは処分の形態、廃棄物の短寿命化など、フレキシビリティが非常に大きいと考えます。これは今日の午後にもある群分離消滅処理のお話もそういったことを可能にする技術であると思われる。

それから使用済燃料の扱いをどうするのかということに対して明確な見通しのない状態の中で、長期貯蔵が本当に社会に受容されるだろうかということも考えていかなければい

けません。

現実的な選択肢としては、長期的なセキュリティ確保のために、サイクルの輪の完成に向けて現在のプロジェクトを着実に推進する意義は非常に大きいのではなかろうかと考えています。

また、再処理工場の建設は20年～30年に1つ工場を建てるぐらいですので、原子力発電所のように幾つも建てて、その結果をまた次にフィードバックしてというようなことが早く行われるものではありません。そういう設備技術ですので、これに関わる技術開発については着実にやって、経験の蓄積を図ることが大切ではないかと考えています。

私の話はこれで終わらせていただきます。ありがとうございました。(拍手)

〔講演〕

原子力エネルギーの新技术開発と革新炉



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

最初に、新技术開発ということで当研究所が実施している「革新的実用原子力技術開発提案公募事業」(IVNET: Innovative and Viable Nuclear Energy Technology) についてお話しいたします。それを踏まえて革新炉のお話に入らせていただきます。その中では、革新炉の定義、意義、シーズ、第4世代(Generation 4) 原子力技術開発の国際協力についてご紹介いたします。最後に、原子力技術開発に関わる課題、疑問、挑戦につきまして、問題提起させていただきます。

革新的実用原子炉技術開発提案公募事業

〔目的、仕組み、対象技術〕

平成12年度に開始されたIVNETでは、原子力発電及び核燃料サイクルの両分野にわたり、大学、研究機関、企業の方々からの提案を審査いたしまして研究を進めています。新技术の導入によって実用原子力技術の開発を図る

〔略歴〕

1969年東京大学工学部原子力工学科卒業。1971年東京大学大学院工学修士, 1971年呉羽化学工業株式会社入社。1975年米国ペンシルバニア州立大学大学院化学工学修士。1980年エネルギー総合工学研究所入所。現在プロジェクト試験研究部部長として主に原子力関連プロジェクトを総括。国内では原子力委員会の専門委員, 国際的には第4世代国際フォーラムのメンバー, OECD/NEAの原子力開発委員会メンバー。

ものを選んでいきます。

〔平成12年度及び13年度の実施状況〕

平成12年度に約60件の応募のうち10テーマを採択しました。13年度には、新規8テーマを加え合計18テーマに、14年度は応募が終わり技術審査中ですが、このうち23~26件が採択されると思います。また、米国が2000年から始められているI-NERI (International Nuclear Energy Research Initiative) に対応する研究を幾つか、さらに少しシーズ的な予備的研究を5件ぐらい採用する予定です。

同時に、文部科学省でもほとんど同じ分野で、もう少しシーズ的なものを対象に、革新的原子力システム研究開発という提案公募事業が開始されることになっています。

[平成12年度・13年度の採択テーマ]

表1に掲げたように、超臨界圧炉、低減速炉、一体型モジュラー炉（IMR）といった炉系という革新炉のテーマがあります。

燃料に関しては、振動充填燃料、発電技術開発の中では、高速炉の方の熱交換器のテーマ、原子炉制御棒の駆動機構のテーマがあります。

材料に関しては、超環境耐久性材料の開発。発電所の方ではヒューマン・マシン・インターフェースの話や二層流の流動解析の評価、手法の技術開発も挙がっています。

サイクル関係は、再処理と高レベル放射性廃棄物の処分とに分けられます。中でも現在の湿式の再処理法の改良版、あるいはその革新的な技術開発をもくろんだものが2件あります。うち1件は群分離・核変換処理の新しいシステムに関するテーマです。また、総合的なものとして、外部性の評価手法の体系もあります。

表1 採択テーマ（平成12年度・13年度）

☞ 原子力発電技術開発（1）	
● 新型炉技術開発	高経済性低減速スペクトルBWR 超臨界圧水冷却炉 受動的安全性を具備した低減速軽水炉 一体的モジュラー軽水炉（IMR）
● 新型燃料技術開発	軽水炉MOX振動充填燃料
☞ 原子力発電技術開発（2）	
● 新型機器技術開発	新型熱交換器（AIHX） セラミック絶縁耐熱コイルを用いた内蔵CRD
● 材料技術開発	超環境耐久性材料
● システム／評価技術開発	次世代HMS 気液二層流複雑流動評価
☞ 核燃料サイクル関連技術開発	
● 使用済み燃料再処理技術開発	フッ化揮発法と溶媒抽出法のハイブリッド再処理 長半減期MA・FP核種の分離回収システム Super-DIREX再処理法（U、Pu直接抽出）
● 高レベル放射性廃棄物処分技術開発	高圧環境における性能評価手法 天然バリア中の物質輸送予測 地下水中心コロイドのIn-Situレーザ計測 性能検証用計測システム
☞ 総合的な技術の開発	
外部性評価手法体系	

[採択テーマの具体例]

① 一体型モジュラー軽水炉（IMR）

要するに蒸気発生器（SG）が格納容器の中に入っている出力30万kWぐらいまでの加圧水型軽水炉（PWR）です（図1）。解決すべき

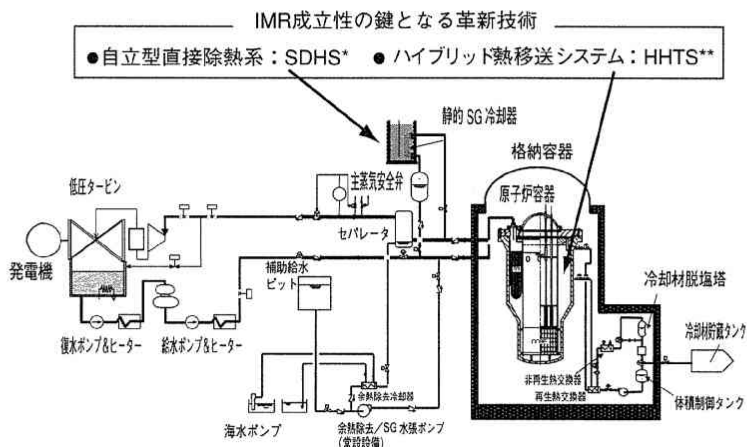
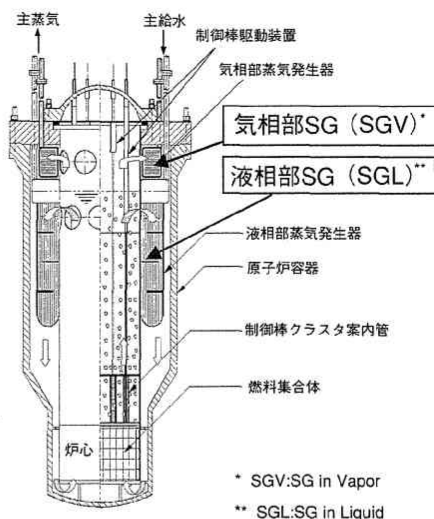


図1 IMR技術開発の目的



技術的特徴

- 2相自然循環の採用
- 炉心からの熱移送に潜熱移送と
顕熱移送を併用 (ハイブリッド熱移送)
- SGLの機能:
顕熱による蒸気生成+出力制御
- SGVの機能:
潜熱による蒸気生成+圧力制御

図2 HHTSの技術的特徴

問題として、特に小型化によるスケールデメリットの克服、内部循環の不足分の克服があると思います。図2で示すように、このIMRは気相部を持った少し変わったPWRだと思います。

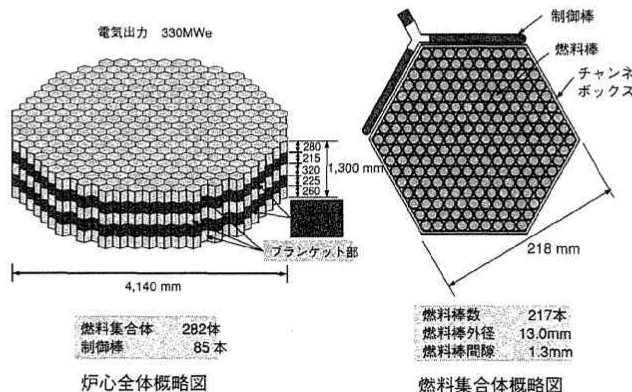


図3 低減速軽水炉基本炉心設計概要

② 低減速軽水炉

高速炉のような水炉と言えらると思います(図3)。昔、軽水炉開発において高転換炉というものが世界的に流行したことがあります。これはその流れをくんでいるのですが、特にこれは沸騰水型軽水炉(BWR)なのですが、沸騰状態をうまく使った低減速炉と言えないのではないかと思います。しかし、問題はこういう稠密炉心における熱水力、あるいは安全の問題だと思ひます。

BWRの小型のパッシブ安全システムを低減速炉に採用するアイデアです(図4)。小型炉の大きな問題の1つは経済性の克服です。プラントですからスケールメリットがあるのは間違いな話で、小さくした場合に一体どこを省くことができ、経済性が向上するかということが一番大きなポイントです。図5に示すように、この場合には安全系が簡素化されることで相当のスケールデメリットを克服できる可能性があるということです。

③ フッ化物揮発法による再処理簡素化

使用済燃料の95%はウラン238(U-238)ですが、それをわざわざ溶解してリサイクルし

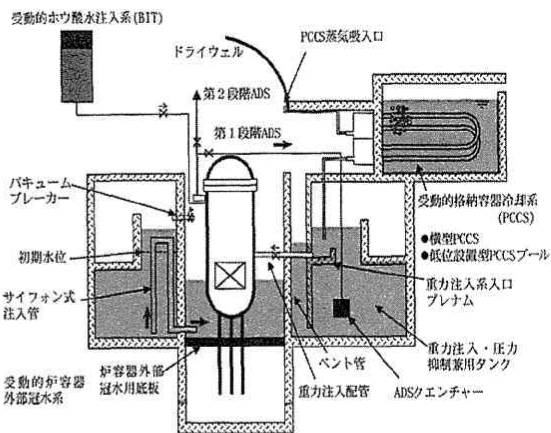


図4 フルパッシブ安全系

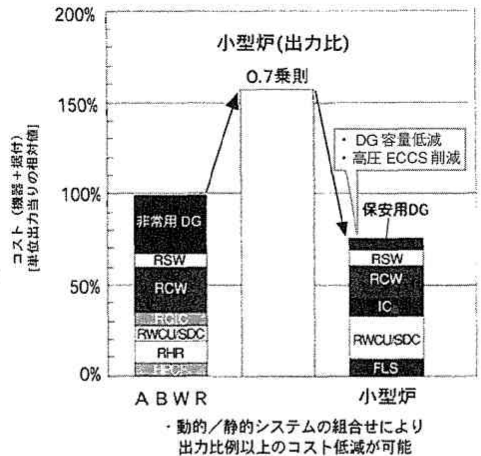


図5 安全系システムのコスト評価

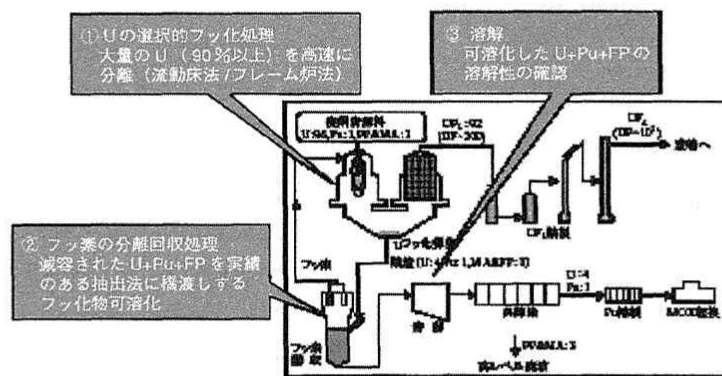


図6 フッ化物揮発法による再処理簡素化

ようというのではなく、揮発性のフッ化物にして、部分的でもUを簡潔に処理しようということがこのアイデアのポイントだと思います(図6)。以前にもこういう技術開発が行われたと聞いています。

④ 仮想実験プロセス

図7はコンピュータ上に実験システムを構築して、特に地下水と廃棄物処理帯との反応をシミュレーションすることによって安全性

を確認していこうというシステム開発を一部模擬したものです。

⑤ 超臨界圧軽水炉

図8は超臨界圧炉です。これはPWRとBWRのいいところを取り入れるというか、炉心を通る超臨界水がワンパスで通り抜けてしまうという、炉心の超簡素化も含む新しいアイデアです。

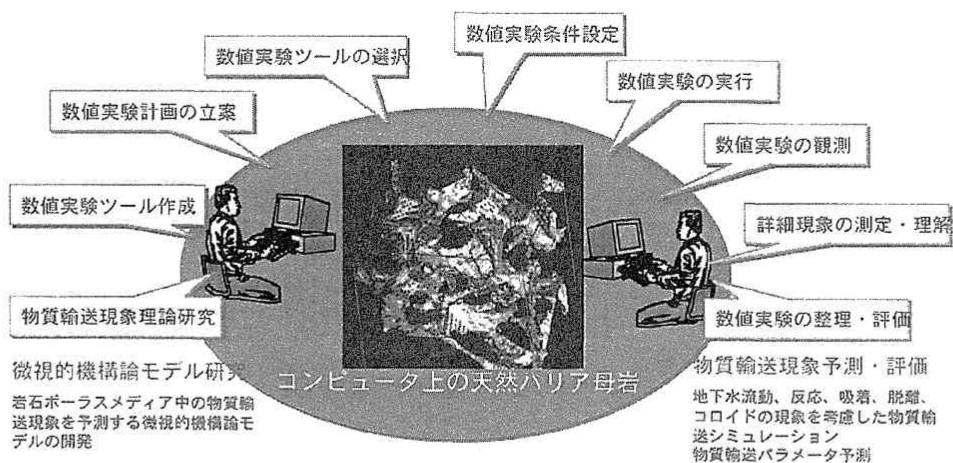


図7 仮想実験プロセスのイメージ

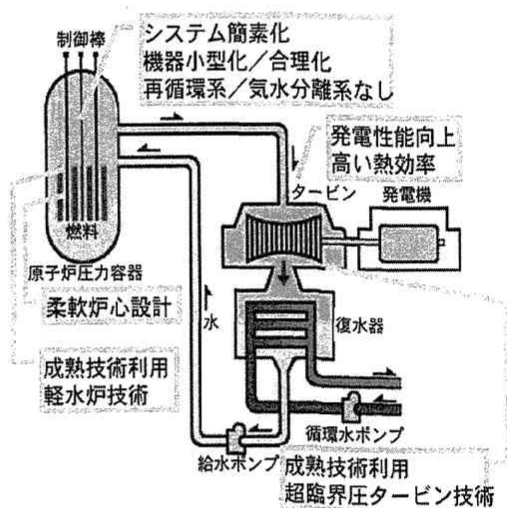


図8 超臨界圧軽水炉の特徴

「原子力の研究、開発および利用に関する長期計画（長計）」では、表2のように書かれています。これは、炉の規模や方式にとらわれず、いろいろなバリエーション、多様性を持ったままでいいのではないかとこのこと言われていることだと私は思います。

本日基調講演をされた近藤駿介先生が部長をされている総合資源エネルギー調査会原子力部会でまとめられた「原子力の技術基盤の確保について」（平成13年7月）では、革新炉、並びにそれに対するスタンスについて表3のように表現しています。

表2 長計における革新炉

革新炉	☞（革新的原子炉） ・・・次世代軽水炉とともに、高い経済性と安全性をもち熱利用などの多様なエネルギー供給や原子炉利用の普及に適した革新的な原子炉が期待される。・・・炉の規模や方式にとらわれず多様なアイデアの活用に留意しつつ、国、産業界および大学が協力して革新的な原子炉の研究開発についての検討を行うことが必要である。 （平成12年11月24日原子力委員会）
-----	--

[革新炉の定義と意義]

革新炉の定義と意義については、既に幾つかの議論があります。その議論の一部をご紹介します。

表3 原子力部会における革新炉

革新的な実用原子力関連技術の開発

- ……エネルギー安定供給の確保を図るため……原子力利用の技術的選択肢を探索する観点から……新型炉技術や新型燃料技術等に関する研究開発を促進……
- ……世界に対する技術的貢献の観点から、更には将来の国際標準化炉の共同開発の可能性をも念頭においた上で、国際的な検討の場への参加を行うことが必要である。

表4 原子力委員会における革新炉

- ☞ エネルギー市場の一層の自由化進展を見据えて、世界の原子力技術開発を牽引する自主技術を我が国に育成、蓄積する。
- ☞ 革新的原子力システムは、現行の特性を超えて、エネルギーセキュリティの確保、原子力産業の活性化による技術基盤の維持、新産業の創出による経済社会への貢献および社会的受容性の一層の向上
- ☞ 安全な存在として安心感をもって社会の中で認められることを期待

[革新炉の狙い]

表4は今原子力委員会革新炉検討会で議論されている狙いの表現の部分です。ここでのポイントの1つは、世界の原子力技術開発を牽引する自主技術を我が国で育成・蓄積しようではないかということです。

[社会的ニーズ]

表5は革新的原子力システムに対する社会的ニーズです。2番目に掲げられている「電力需要、設備投資等における柔軟性」というのは、できるだけ小さい投資額で、すなわちそれは直接的ではありませんが小型炉をも視野に入れているニーズとってよいと思います。それから、4番目の原子力エネルギーの発電分野以外への有効利用。これも今日この後堀さんから原子力水素の話を伺うことになっておりますが、多分に水素をターゲットに置いたニーズと考えていいと思います。

そうは言っても、原子力の需要は一体どんなことで決まるのでしょうか。図10は私どもの研究所で行っているスタディの一端ですが、いろんな要因が絡みます。要するに、単純な市場からの電力需要だけで決まるわけではな

表5 革新的原子炉システムの社会的ニーズ

- 核燃料資源の有効利用（エネルギー長期安定供給）
- 電力需要、設備投資等における柔軟性
- 経済性の大幅な向上
- 原子力エネルギーの発電分野以外への有効利用
- 優れた安全性
- 環境負荷の低減
- 核拡散抵抗性の向上

く、社会制度的な要因や環境負荷要因等々、いろいろあります。図中の要因が立体的、あるいは時間的にも複雑に絡んでいるのだらうと思います。

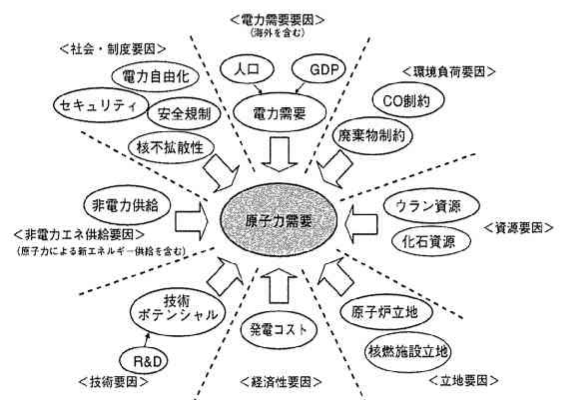


図9 原子力需要の決定要因

表6 わが国原子力技術開発の現状

	炉型	原子力システム概念名称	電気出力 [MWe]	研究開発機関	実用化時期	特徴
1	BWR	ABWR-II	1700	BWR 6 電力、日立、東芝、GE	2010年代後半	大型炉心格子、安全系ハイブリッド（静的システム導入）
2	BWR	低減速スペクトルBWR	1350	東芝、岐阜大	2010年代以降	稠密炉心、転換比=1.0、Puマルチリサイクル対応
3	BWR	HSBWR	300～600	日立	—	自然循環型、自然放熱型格納容器
4	BWR	小型RBWR	300	日立、原研、原電、東工大	2030年頃	低減速スペクトル炉心、受動的安全系+動的な安全系ハイブリッド
5	BWR	LSBWR	300	東芝	2010年代以降	超長期サイクル、原子炉・タービン一体型建屋、モジュール方式、船殻構造、上部内蔵型CRD
6	BWR	SSBWR	150	日立	2030年頃	稠密炉心、超寿命炉心
7	BWR	TTBWR	600（注1）	東芝	2000年代可能	自然循環、電熱併給、静的安全系
8	PWR	APWR+	1750	PWR電力、三菱	2010年代以降	APWR大容量化、SA対応能力強化、運転性向上（長サイクル運転、高プラント稼働率）、設備簡素化
9	PWR	AP-1000	1000	WH、三菱	2010年代以降	静的安全系（重力注入、CV自然冷却）を採用したパッシブ炉
10	PWR	燃料マルチリサイクル型 重水冷却PWR（RPWR）	～1000	原電、原研、三菱	2010年代以降	稠密格子MOX炉心、重水冷却によりFBR並みの転換比を達成
11	PWR	一体型モジュラー軽水炉 （IMR）	300（注2）	原電、電中研、京大、三菱	2010年代以降	自然循環型一体炉、安全性向上、システム簡素化
12	SCR	超臨界圧軽水炉	600～1700	東大、東芝、日立、九大、北大	2020年頃	貫流型コンパクトシステム、火力発電技術利用、高熱効率、高速炉心適合性、軽水炉類似性
13	ガス炉	GT-MHR	300	GA、OKBM、FRAMATOM、富士電機	～2010年	閉サイクルガスタービン発電による高効率、システム簡素化、固有安全特性を活用した安全系システム簡素化
14	ガス炉	PBMR	115（注2）	PBMR、三菱	2010年代以降	高熱効率発電（Heガス冷却、ペーパーベッド炉心）を目指した固有安全炉
15	高速炉	旭	1500	JNC、三菱	2030年代以降	ループ型Na冷却炉、中間熱交換器／1次ポンプ合体、ループ数削減（2ループ）、自然循環崩壊熱除去、高強度12Cr鋼採用
16	高速炉	EGCR	1400	NNC、富士電機	～2010年	ガス冷却炉のプラント技術と高速炉の炉心・燃料技術を組合せた開発リスクの小さな概念
17	高速炉	小型高速炉	50	電中研、東芝	2000年代可能	地域密着型の多様なニーズに対応する小型で固有の安全性を有するナトリウム冷却高速中性子炉

注1：熱出力

注2：1モジュールあたりの出力

[日本での革新炉候補]

我々が検討している中で、日本の革新炉候補には一体どんなものがあるのかペンダーに対して調査を行いました。表6は、大学、他の研究機関が持っているアイデアを網羅しているわけではありませんが、広い意味で、わが国における革新炉のアイデアの一覧と言ってよいと思います。ただし、これらのコンセプトは技術的な検討が相当進んでいるものから、ペーパーリアクター的なものまでであると思います。

BWR系の軽水炉を並べてありますが、一番上は例の有名なABWR-IIで、いくつかの実証は要るでしょうが、実機建設可能な大型炉です。4番目の小型RBWRなど、このうちの幾つかは当方の提案公募事業で採択になっています。

次がPWR系で、これもABWR-IIに相当するAPWR+等々並んでいます。IMRも私どものIVNET採択テーマの1つですし、さらに、超臨圧水炉も私どもの採択テーマの1つです。

第4世代技術開発

現在、第4世代技術開発ということで米国中心に呼びかけがあり、世界10カ国が集まり第4世代国際フォーラム（Generation 4 International Forum）というものを作っています。なぜ第4世代かと言うかは図10で示しました。第1、第2世代が既存炉で、第3世代が改良型炉、つまり技術開発が相当程度進んでいる炉です。その少し先の世界の需要拡大、それから先進国における建替需要市場の一部を満たすことができる可能性のある新しい炉を第4世代と呼ぼうと、99年頃にDOE原子力局のマグウッド部長が言い出したようです。今のところ、この第4世代を2030年頃から導入可能になるような炉と定義しています。

[国際フォーラムの目的と性格]

国際フォーラムの目的は、①1つ以上の第

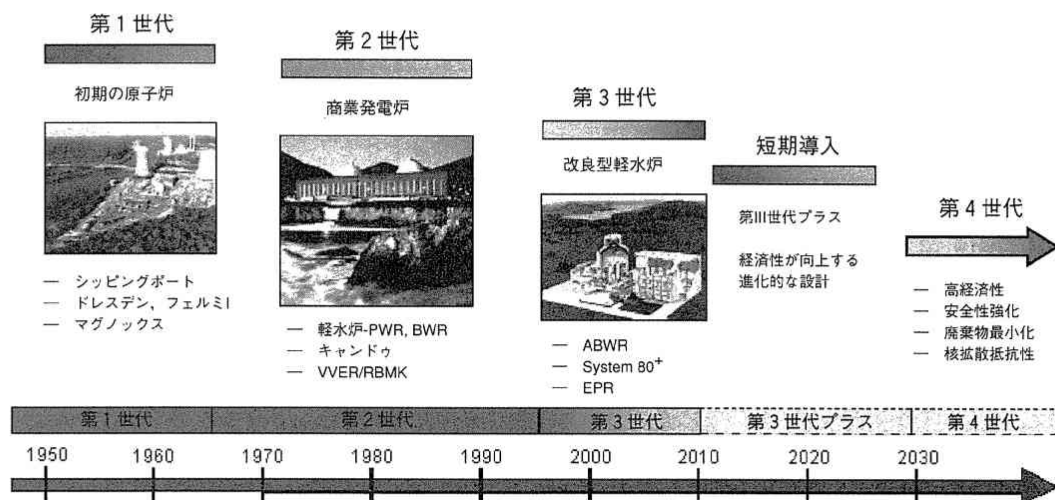


図10 世界的な原子力技術開発の推移

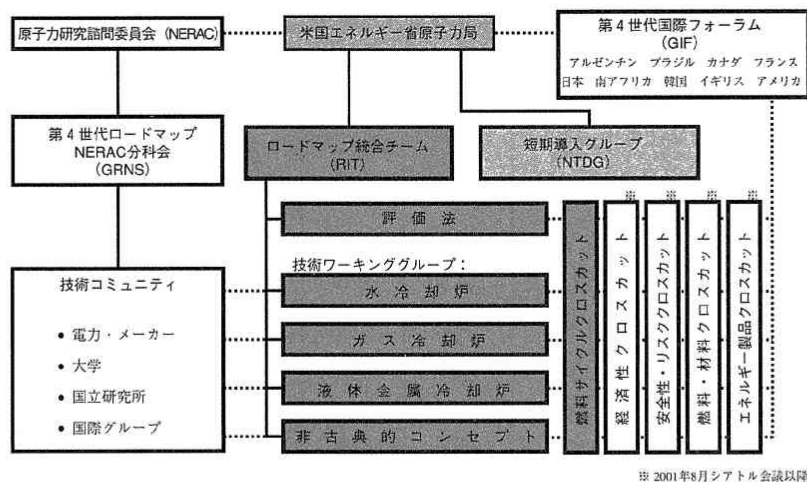


図11 第4世代ロードマップ策定組織図

4世代原子力エネルギーシステムのコンセプトの開発、②導入国において競合できる価格の信頼されるエネルギー供給を提供し、③認可、建設、運転されるシステム、④原子力安全、廃棄物、核拡散や公衆の心配に十分に対応する、となっています。

このフォーラムの議定書では、お金を出せとか、どこかに恒久的な事務局を置くとか、そういう強制的なことは一切ありません。10カ国うち、興味がある国が集まって、自分たちの費用で、自分たちの国の中でやる研究開発を寄せ合わせて国際研究開発協力としようということになっています。昨年7月、わが国はこの議定書に調印しました。

【国際フォーラムのロードマップ】

第4世代国際フォーラムの加盟国は、アルゼンチン、ブラジル、カナダ、フランス、日本、韓国、南アフリカ、スイス、英国、米国です。フォーラムの事務局も今のところDOE原子力局にありますが、今年の9月か10月に開催される国際フォーラムの時には事務局が

どこか他の国に移る可能性があります。

フォーラムは作業の一環として、開発すべき革新炉の具体的なコンセプト、研究開発項目を策定するグループを作りました。それが図11に示したロードマップグループです。ここには総計100名ぐらいの専門家が集まりました。約半数が米国で、残りの半数が10カ国プラスOECD/NEAとIAEA、ECの研究機関からの参加者です。炉系別、あるいは横断的なテーマの検討グループに分かれて議論いたしました。ロードマップ、いわゆる研究開発計画案の活動は今年9月末で終了する予定です。

加盟国は表7のように自分が興味を持つ分野のワーキンググループに参加しています。水炉は南アフリカを除いて、全加盟国が参加しています。ガス炉はブラジル、カナダを除いて他は全部です。要は、南アフリカはPBMR計画があってガス炉しか興味がない、カナダはCANDUをやっていますので、水炉系しかコミットするつもりがないということです。全部参加は米国、日本、英国、フランスです。

表7 ロードマップへの参加状況

	水炉	ガス炉	液体金属炉	非古典炉	評価法	燃料サイクル
アルゼンチン						
ブラジル						
カナダ						
フランス						
日本						
韓国						
南アフリカ						
英国						
米国						

表8 コンセプトの評価指標

大目標	目標	1次指標	2次指標
持続可能性	資源利用	ウラン消費量	
		環境影響（資源確保による影響）	
		他資源の利用、枯渇	
	廃棄物最小化と管理	高レベル廃棄物最小化	廃棄物重量
			廃棄物体積
			長期経過後発熱量
		環境影響（高レベル廃棄物以外）	長期経過後放射性毒性
	核拡散抵抗性	廃棄物管理の負担	
		兵器級原料への分離回避性	
		仕様済み燃料特性	
安全性と信頼性	通常運転時の安全性、信頼性	サボタージュなどに対する耐性	
		信頼性	
		平常時の公衆および従業員被曝	
	炉心損傷防止（DBA）	事故時従業員安全性（被曝など）	
		工学的安全性の頑強性	簡易、頑強な反応度制御
			簡易、頑強な崩壊熱除去
		事象モデルの確実性、検証性	モデルの確実性
	敷地外緊急時退避不要性		燃料の熱的応答
			モデルの縮尺度
		ソースターム	ソースタームの大きさ、エネルギー放出特性
		格納系の影響緩和機能	炉心損傷発生までの時間
			放射性物質の保持能力
経済性	コスト	個人リスク	
		集団リスク	
	リスク	建設費（炉）	
		運転費/燃料費	
		炉建設期間	
		投資額	
		収益性	

[目標に対する定量的指標]

第4世代の目標に対する定量的な指標を考え出し、それらの指標を使って提案されてきたコンセプトを評価する方法がとられています。例えば、表8にある大目標の持続可能性の中の資源利用とは資源の有効利用ということです。その中の指標を見ていただくと、ウランの消費量、環境影響、他資源の利用、効率の活用があります。実際にはウランの使用量で、これはリサイクルした方が点数がよくなる仕組みだと思います。他のものも可能な限り定量的な指標をつくって評価するようにしました。ただ、大きな問題は、例えば核拡散抵抗性、兵器級原料への分離回避性は確かにいい指標なんですけど、これをいったい何で定量的にあらわすかということになりますと実は解がないに近いのです。実際にはこの部分は相当問題を残したままで評価を進行させてしまいました。この部分については、特に9月11日米国同時多発テロ事件の後、核拡散抵抗性プラステロ対策、PP (Physical Protection) も含めたワーキンググループを作ってこれの評価のやり方をどんなふうにしていったらいいのか、それに伴うR&Dにどんなものがあるか検討するグループを今後作ることにしています。

[原子力利用のミッション]

原子力利用として発電だけでなく、その他に多目的の用途があるのではないかとということで、それをミッションと呼んで考えてみています。ポイントの1つは水素などの多目的利用です。もう1つは、リサイクル、あるいは廃棄物の中のマイナーアクチノイドや長寿命核種の処理に対するニーズが一体あるのか。

表9 第4世代システム候補

- ① VHTR—超高温ガス炉
- ② GFR—ガス高速炉
- ③ SCWR—超臨界圧炉
- ④ MSR—熔融塩炉
- ⑤ PB Alloy—液体金属冷却高速炉
- ⑥ Na LMR—ナトリウム冷却高速炉

それから、小型炉の需要も本当はどこにあるのかということもミッションに絡んでくる話です。

[6つの第4世代候補]

最終的に選ばれた第4世代候補は表8の6つです。VHTRの出口温度は1,000℃か1,000℃以上を目指しています。これはまだ長期的な研究開発テーマです。しかも、この超高温を置いている理由は、間違いなく水素製造を狙っているからです。

ガス炉ではもう1つ、ガス高速炉があります。この2つは特にフランスが推しています。

3番目が超臨界圧炉で、日本とカナダが強く推しました。カナダはCANDUという重水炉を持っていますが、重水減速軽水沸騰水冷却炉の新型炉の売り込みと同時に、その次の次のステップぐらいには冷却のところを超臨界圧水で行い高効率を狙うシステムを念頭に置いているため、これを推したということです。

非古典炉として熔融塩炉があります。これもオークリッジ国立研究所のワインバーグさんとかが、1970年代までいろいろやって停止になったプロジェクトです。しかし、フランスが長期的な意味から多少興味があるということで推してきました。

最後の2つが、液体金属冷却の高速炉とナ

トリウム冷却の高速炉です。鉛合金の方は鉛冷却のリアクターシステムで、ナトリウム冷却炉のほうは酸化燃料と金属燃料の両方を含んで考えようというものです。

こうして見ますと、6つのうち3つが高速炉です。なおかつ、超臨界圧炉でも評価では高速炉バージョンも視野に入れようということになっていまして、それまで含むと6つのうち4つが高速炉になります。あるいはMSRだって増殖性まで考えますと、実は6つのうち5つまでリサイクルを前提とするシステムだと言えらると思います。

[各国の関心度]

国別にどんな研究開発に関心を持っているか見ると、ガス炉と超臨界圧の関心が高いようです（表10）。例えば、南アフリカはVHTRへの関心が高いです。ただし彼らは、今現在持っているPBMR計画とのリンケージにおいてVHTRに興味があると言っていると思いま

す。それは超臨界圧炉についてカナダが興味を示しているのとはほぼ同様の関係だと思えます。残念ながら溶融塩のところを見ますと、フランスはこれを推したにもかかわらず少し興味があるとはしか言っていない。英国は全部に対して“Yes”書いてありますが、コミットするかどうかはまだ決めていない、決められないと言っていました。

[今後のスケジュール]

今年9月末でロードマップ、いわゆる研究開発計画案が完成する予定です。それを踏まえて、現在の予定では今年10月に第4世代国際フォーラムの会合が東京で開催されることになっています*。そこでは、ロードマップに基づいてどんなことができるかあたりから始めようではないかということになると思います。

それを踏まえて来年3月に南アフリカで開催する会議で、各国ともある程度の研究開発

表10 参加各国の関心度

	アルゼンチン	ブラジル	カナダ	フランス	日本	韓国	南ア	スイス	英国	米国
VHTR				high	high	high	high	some	Yes	high
GFR				high	some			high	Yes	high
SCWR			high	some	high	high		high	Yes	high
MSR				some					Yes	
Pb Battery					some	some		high	Yes	high
Na-cooled				high	high	high			Yes	some

High：コンセプトの全局面に対して興味あり。
Some：コンセプトのいくつかの局面に対して興味あり。
Yes：当該トピックについて研究開発中

* 実際には9月19日、20日に開催された。

計画は持っているので、資金分担も含めどんな研究開発ができるかということを考えるのではないかと思います。

さらにそれを踏まえて、来年の秋、カナダで開催される予定の会議で、第4世代に伴う研究開発の実施協定みたいなものができ上がって研究開発プロジェクトが開始できるかもしれません。その時までには米国の2004年度予算がある程度はつきりしているでしょうから、少し具体的になるのではないかと思います。これはまだ案の段階で、しかも極めて希望的観測だと思っていただいても結構です。

おわりに

[原子力の課題]

これから申し上げることは、私の私見であって、私が所属する研究所の意見ということではありません。

原子力の課題を表11に示しました。長期的に、世界全体で原子力エネルギー利用への復帰が本当にあるのか。それはまだそう確かな話ではありません。特に経済性の問題、社会の問題、政治的な障害があると思われます。わが国で見ると原子力技術研究開発に対する公的支援の規模は縮小し、基礎的、基盤的な支援に変質しつつあると思います。例えば、5年間で成果を出せとかということを考えますと、相当程度圧縮していく傾向にあると思います。自由化の影響も相当あるでしょう。

さて、セキュリティとは何だ、どう扱うのか。まだこれは疑問だと思います。残念ながら

表11 原子力の課題

- ☞ 長期的、安定的なエネルギー供給、地球環境問題から原子力エネルギー利用への回帰はあるのか？
- ☞ 本質的には持続可能なエネルギーミックスの重要な構成員
- ☞ 経済的並びに社会的、政治的な障害
 - 新規プラントの経済的競争力：大型投資へのためらい
 - 放射性廃棄物処分
 - 安全性と核拡散抵抗性（対テロ！）
- ☞ 原子力技術研究開発に対する公的支援の規模は縮小しかつ基礎的、基盤的な支援へ変質
- ☞ 電力市場自由化の圧力の影響
- ☞ エネルギーセキュリティ？
- ☞ 京都議定書！CDMからは蹴落とされている
- ☞ 国益と地域エゴの相剋（プルサーマル）
- ☞ 産官学に残る甘え、もたれ合いの構造

ら原子力は、京都議定書の共同実施（JI）からもクリーン開発メカニズム（CDM）からも蹴落とされているというのが実態です。なおかつ、国内の実施を見れば、日本全体としての利益と、申し訳ないのですが、言わせて頂ければ地域エゴではないかと思われる相克が残念ながら続いているのではないのでしょうか。さらに、研究開発を見ても、産官学の間に残る甘え、もたれ合いの構造も依然として見つめなければいけないものではないかと私は思います。

[答えるべき疑問]

今後の原子力技術開発については、表12にまとめたような疑問が呈される可能性があります。これらの疑問について、真剣に考えてみる必要があるのではないのでしょうか。

表12 疑問

- ☞ 革新炉、次世代炉とは高速増殖炉ではないのか？
- ☞ 高速炉が必要というパラダイムは生きているのか？
- ☞ 高転換、低減速炉など中間炉の意味はあるのか？
- ☞ 絶対、超安全の小型炉か？
- ☞ どこに市場があるのか？
- ☞ 電力自由化の中で誰が開発費を持つのか？
- ☞ 原子力は人々に受け入れられる様になるのか？
- ☞ 過剰な規制は緩和されるのか？
- ☞ 原子力村は自己批判したのか？

表13 挑戦可能なこと

- ☞ エネルギー供給セキュリティを超えて国際的なエネルギー技術覇権
- ☞ 国際的なパートナーシップ、オプションシェアリングによる研究開発→例：第4世代
- ☞ 市場メカニズムの活用と公的なリーダーシップ（新しい皮袋？）
- ☞ 長期的なエネルギーならびに科学技術戦略に基づく原子力技術開発
- ☞ 原子力水素→輸送用エネルギーへの拡大展開
- ☞ わが国の原子力技術開発能力と資源、潜在的可能性は世界最大
 - ABWRなどに代表される軽水炉技術
 - 高速炉：JSFR（JNC）、4S
 - 高温ガス炉：HTTR（JAERI）
 - 超臨界圧炉：（岡/東大）
 - 低減速水炉：（JAERIほか）
 - 先進再処理：（フッ化物揮発法、超臨界圧利用他）
- ☞ これらを活かして、持続可能な地球社会のための、国際的な産業競争力の強化

[原子力の挑戦]

それらの課題と疑問を超えて、挑戦可能なポイントを表13にまとめました。原子力技術開発を国際的なエネルギー技術覇権の一環として考えても良いと思います。いろいろなやり方があると思いますが、1つは国際的なパートナーシップ、オプションシェアリング方式があります。オプションシェアリング方式というのは、例えば、第4世代技術開発の中でリーダーシップを取るということです。その他に市場メカニズムの活用とかもあるでしょう。

わが国の原子力技術開発能力、資源、潜在的可能性は世界最大であることは、自他共に認められていることだと思います。軽水炉、高速炉、ガス炉、その他いろいろなアイデアにおいても世界を凌駕する、あるいはリードする可能性は十分にあると思います。これを活かして持続可能な地球社会のためのわが国の国際的な産業競争力の強化が求められるのではないかと考えているところです。

精緻な議論ではないので申し訳ございませんが、これで私の報告を終わらせていただきたいと思います。（拍手）

〔講演〕

放射性廃棄物処分としての 分離・核変換処理技術の現状



高野 秀機 (日本原子力研究所東海研究所
大強度陽子加速器施設開発センター次長)

はじめに

今日は分離・核変換処理技術の現状について報告させていただきます。

まず、分離・核変換 (P&T: Partitioning & Transmutation) 技術の意義と必要性、次に核変換技術の1つである加速器駆動システム (ADS: Accelerator Driven System) による核変換の仕組み、さらにもう1つの変換技術である高速炉による変換との効率を比較した経済協力開発機構/原子力機関 (OECD/NEA) の報告書について、最後に日本原子力研究所 (原研) で進めている計画を含めてADSに関する世界の研究開発動向について報告させていただきますと思います。

分離・核変換技術とは

高レベル放射性廃棄物の最小化技術

エネルギー問題、経済、環境というトリレンマの中で、人類が将来エネルギーをずっと使い続けていくと、必ず人口増加や廃棄物処

〔略歴〕

1965年茨城大学文理学部卒業。1965年日本原子力研究所入所。核設計研究、原子炉システム研究、新型炉検討特別チーム、軽水炉検討特別チーム、中性子科学研究センター等を歴任。2001年4月から現職。

専門分野は、長寿命燃焼軽水炉の燃料サイクル、岩石型燃料軽水炉の概念、加速器駆動核変換システム。OECD/NEA "Accelerator-driven Systems and Fast Reactors in Advanced Fuel Cycles" ワーキンググループ日本側メンバー。

理という問題に突き当たってきます。原子力発電の燃料としてプルトニウム (Pu)、海水ウランを考えるだけでも数千年はそのエネルギーを使っていくことができますが、放射性廃棄物をできるだけ最小にしていくシステムを今から考えておくことが重要ではないかと思っています。その1つに、高燃焼化、リサイクルによるプルトニウム (Pu) 利用、高レベル放射性廃棄物 (HLW) の分離・核変換による極小化、残ったものの地層処分という対応があると考えられます。

例えば、廃棄物は、分別してごみ処理プラントで処理し、残ったものを埋設します。原子力発電所から出る高レベル放射性廃棄物も同様で、分離し核変換プラントシステムで最小にして地層処分へもっていくことが必要です (図1)。

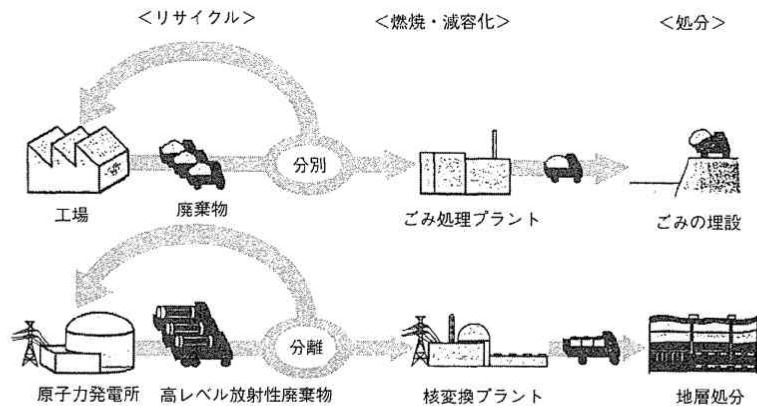
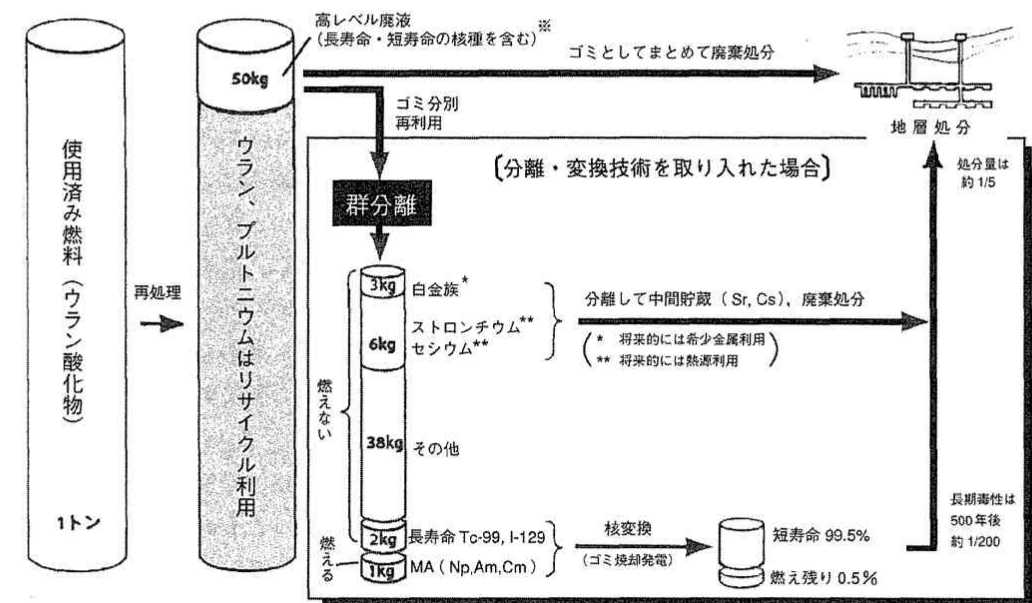


図1 リサイクルの流れ（産業廃棄物と放射性廃棄物）

HLW処理の流れだけをより詳しく見てみます（図2）。軽水炉で50GWd/tまで燃料を燃やした場合、使用済燃料を1tと考えると、リサイクル可能なウラン（U）とPuを取り出すと、50kgのHLWが残ります。それを直接処分するか、分離・核変換するかの方法が考えられます。

原研の場合、①白金族元素群、②非常に熱源として大きいストロンチウム（Sr）、セシウム（Cs）群、③超ウラン元素（TRU）群、④その他放射性レベルの低いものの4群に分離します。TRU群にはマイナーアクチノイド（MA）、長寿命核種（LLFP）であるテクネチウム（Tc-99）、ヨウ素129（I-129）などがあり



※ 長寿命核種：1～1000万年程度で放射能消滅するゴミ
短寿命核種：1000年程度で放射能消滅するゴミ

図2 高レベル放射性廃棄物処分（核燃料サイクルと核変換処理サイクル）

ます。

それからLLFPをMAと一緒に燃やして、99.5%の短寿命核種と0.5%の燃え残りができます。99.5%が技術的な限界ではないかと考えています。このようにして、MAとLLFPを短寿命核種に変換することで、長期毒性を200分の1ぐらいにできないかということです。世界中でそういうシナリオが考えられています。

放射性毒性を低減する技術

図3はHLWの放射性毒性を示したものです。毒性指数とは現在含まれている核種の質量を年摂取限度で割ったものです。図3では新燃料1t当たりの毒性を示しています。最初は主にSrとCs（非常に大きな毒性を持つ）

が存在しますが、これは半減期が30年ですから、1,000年でほとんどなくなることになります。1万年、10万年、100万年の長期にわたって毒性を持つのは、アメリシウム243（Am-243）、ネプチウム237（Np-237）などです。アメリシウム241（Am-241）は崩壊してネプチウム237（Np-237）を出します。最終的にはトリウム229（Th-229）やラドン（Ra）が数百万年のところで毒性を持てきます。キュリウム（Cm）が崩壊してPuができてきます。毒性の観点からいいますと、Tc-99やI-129というのは、MAに比べれば非常に小さいです。

MAやLLFPを分離・核変換できれば、約数百年で、新燃料を1tつくるのに必要な天然ウラン5tと同程度の毒性に弱めることができるということです。これが分離・核変換技術の目的です。核変換処理システムには、大別

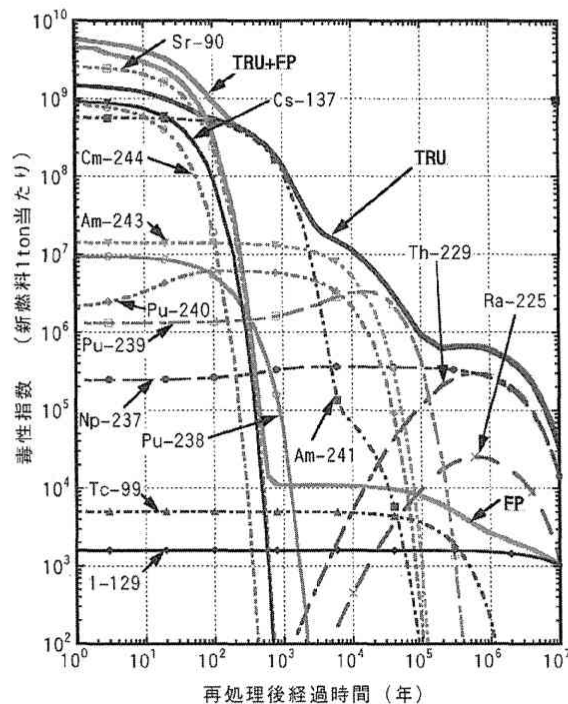


図3 高レベル放射性廃棄物の放射性毒性

して先進的高速炉サイクル概念と階層核燃料サイクル概念とがあります。前者は高速炉（FR）の本格的な導入を前提としています。後者は分離変換技術と商業サイクルを分けて、核変換処理サイクルはすべて独立サイクルで行うものです。高速炉の導入を前提としないため、現在各国で研究開発がすすめられています。その際の分離・核変換技術としてADSが考えられているというわけです。

ADSによる核変換の仕組み

ADSは、MAおよびLLFPを短寿命または安定的な核種に変換する方法の1つです。構造的には、陽子を加速する線型加速器と未臨界体系で構成されます（図4）。

未臨界炉心の中央に核破碎ターゲットとし

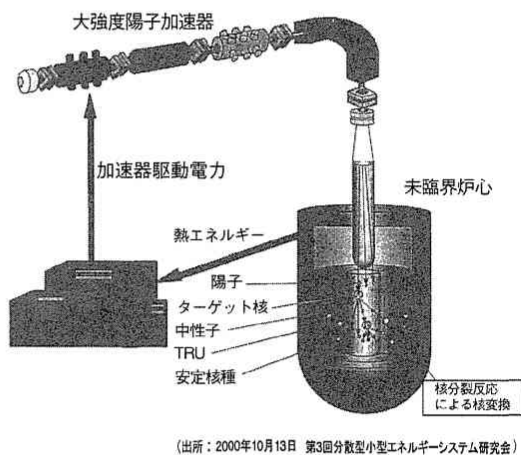


図4 加速器駆動システムの仕組み

て非常に重い重核からなる液体金属を置き、そこへ高エネルギーの陽子ビームを照射します。すると、核破碎反応が起きターゲットから中性子が飛び出します。飛び出す中性子の個数は照射する陽子のエネルギーによって異なりますが、エネルギー1 GeV*だと約30個です。その中性子をターゲット周辺に置いたMAにぶつけて核分裂させてやる。MA自身も核分裂して中性子を出しますから、またその中性子を利用してMAを核変換することが可能になります。

ADSではMAを主燃料としますが、効率よく核変換するために、できるだけウラン238（U-238）が少ない燃料の方がいい。U-238があれば、それが中性子を吸収してPuになり、そのPuに中性子が吸収されてMAが作られてしまいます。ところが、U-238は中性子を吸収することから安全性を高める大きなドブラー効果**を持っています。燃料中のU-238をできるだけ少なくし、なおかつ安全性を確保するためには、臨界炉ではなく未臨界炉を使うことになるのです。勿論、加速器の電力が必要ですが、残ったものは売電が可能です。

核変換技術ADSと高速炉の比較研究 OECD/NEA

今年4月、OECD/NEAからADSと高速炉による分離・核変換に関する比較研究レポート“Accelerator-driven systems and Fast Reactors in

* ギガエレクトロンボルト。素粒子、原子核、原子、分子などのエネルギーを表す単位。

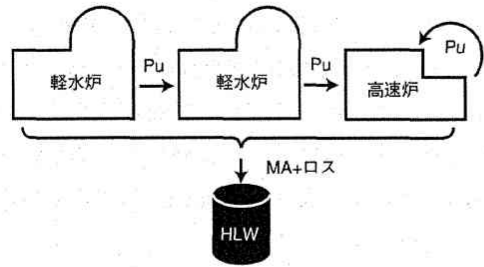
** 軽水炉は、濃縮度（Uの同位体の中でU235が占める割合）が2～4%の低濃縮ウランを使用するので、燃料中のウランの大部分は核分裂を起こしにくいU238である。原子炉の出力が上昇して燃料の温度が上昇すると、ウラン原子の熱運動が激しくなるため、U238がより多く中性子を吸収するようになる。これをドブラー効果と呼び、中性子数が減少するため出力が低下する。

図5 燃料サイクルスキーム

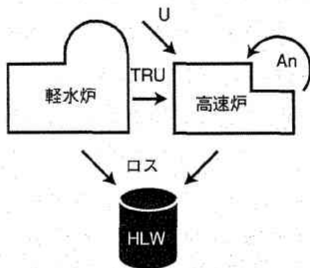
① ワンスルー（オープンサイクル）



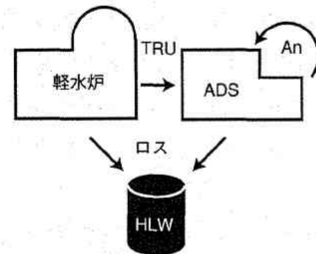
② Pu バーニング



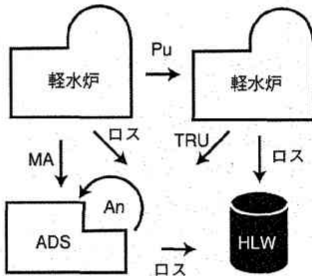
③-a：高速炉におけるTRUバーニング（FR—TRU）



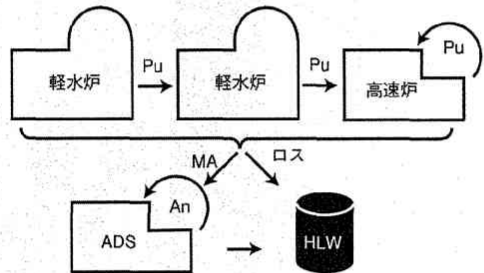
③-b：ADSにおけるTRUバーニング（ADS—TRU）



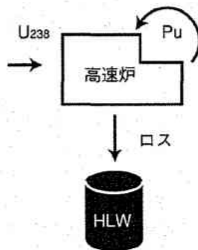
③-c：MOXリサイクル—TRUバーニング（MOX—TRU）



④ ダブルストラータ（ADS—MA）



⑤ 高速炉ストラテジー（All FR）



Advanced Nuclear Fuel Cycles” が出ました。オープンサイクルとクローズドサイクルに分けて検討しています（図5）。

オープンサイクルというのは、①のワンスルーのことです。要するにMAをリサイクルの中に閉じ込めないということです。

②のPu バーニングとは軽水炉で混合酸化物燃料（MOX）を、高速炉でPuを燃やしますが、

MAは地層処分するという現在のシナリオに相当するものです。

③-aでは高速炉でMAをリサイクルし、そのロスを高レベル廃棄物として処分します。

③-bは、軽水炉からのPuとMAをADSでリサイクルするスキームです。高速炉でなく加速器で行うというアメリカが最初に考えたATW (Accelerator-driven Transmutation of Waste) というプログラムです。

③-cは軽水炉でMOXを燃やして、そこから出てくるPuとMAをADSで処分するというシナリオです。

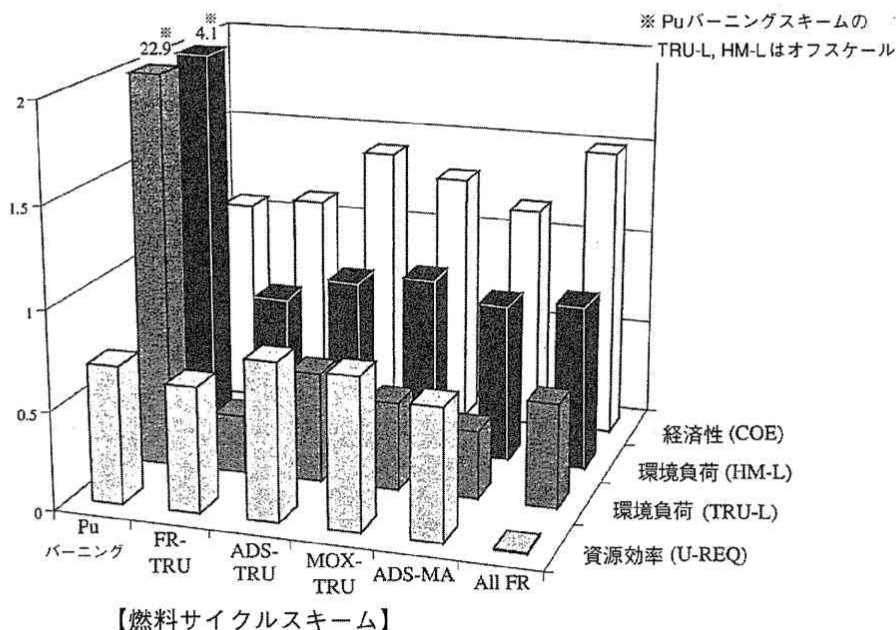
④のダブルストラータとは、軽水炉でMOX、高速炉でPuをリサイクルする。上段から出てくるMAをADSで核変換するシナリオです。

⑤が金属燃料のメタル高速炉です。高速炉の中でMAを自己完結型でリサイクルしてやる。これは乾式再処理です。

環境負荷低減と経済性では高速炉とADS

同じ報告書で、各燃料サイクルスキームの効率を比較しています (図6)。効率はワンスルーに対する比率であらわされています。資源効率では、すべて高速炉で行うスキーム (All FR) が一番良い。U-238の利用が一番良くて、資源は非常に少なくて済むという結果になります。他のスキームはワンスルーの半分ぐらいで余り変わりません。

どれだけ環境に優しいかという点では、Pu



U-REQ: 必要な天然ウラン (ワンスルーに対する比率)
 TRU-L: 処分される TRU ロス (ワンスルーに対するパーセンテージ)
 HM-L: 処分される重金属ロス (tenths of % of OFC)
 COE: 発電コスト (ワンスルーに対する比率) (nominal case).

図6 燃料サイクルスキームの比較

を含めTRUを燃やした場合、ロスとなるPuとMAがどれだけあるかという視点でワンスルーと比べています。そういうものが一番少ないのはFR-TRUです。ADS—MAがそれとほとんど変わらないで続きます。重金属のロスがどれくらい出るかで環境に対する優しさを比較しても同じような結果になります。発電コストについても、FR-TRUが一番いい。それとほとんど差がない程度でADS—MAが続いています。

世界の研究開発の主流はADSが対象

ところが日本を除いて、高速炉の研究開発は世界的に停滞しています。現在世界各国で行われている研究開発は前述の階層核燃料サイクル概念でのADSが主流となっています。

そこで、ADSと高速増殖炉（FBR）を比較してみました（表1）。ADSは、軽水炉の長期

化、原子力廃止といった将来の原子力事情にも対応して、最後に残った廃棄物を処理することができます。核変換量は、ADSの年間300kg/GWtに対して、FBRは年間50-60kg/GWtです。従って、ADSは非常に効率よくMAを集めて処理できるということになります。

安全性では、FBRは燃料にMAを混合するためボイド係数もドップラー係数も悪くなります。ADSはもともとドップラー効果が悪いということから未臨界炉にしています。未臨界ですから陽子ビームの照射を止めれば即座に反応は止まってしまいます。核変換処理コストの上昇は、どちらもワンスルーの10～20%で同じです。

ADSはフレキシブルなシステム

ADSは、表2に示すように、将来のいろいろなシナリオに対してフレキシブルに対応でき

表1 ADSとFBRの比較

ADSシステム	FBRシステム
▲ 将来の原子力事情(軽水炉長期化、原子力の廃止、FBR導入あり・なし)の変化時に対しても廃棄物の極小化のために適用可能。 ▲ 核変換特性:マイナーアクチニド(MA)が主燃料のため変換量は300 (kg/GWt/y)で12基軽水炉分に相当。したがって、導入規模は、出力換算で発電炉規模の5%と小規模。 ▲ 安全性: ADSは未臨界炉であるため、陽子ビーム(外部中性子源)をとめれば炉は即時停止。炉心冷却等の課題は臨界炉と共通。 ▲ 経済性: OECD/NEA報告では、軽水炉/FBR/ADSシステムによる核変換処理のコスト上昇はワンスルーに比べ約10-20%。 ▲ 開発課題 高信頼性、高効率の大強度陽子加速器の開発 ターゲットシステム・陽子ビーム窓の開発 MA主成分窒化物燃料製造・照射・乾式分離 高レベル廃液の分離技術の低コスト化 分離・変換後の廃棄物処分技術の開発	▲ 商用発電炉として導入されることが前提。ナトリウム冷却MOX燃料FBRはもんじゅ等で実証。 ▲ 核変換特性:核的安全性、燃料健全性の観点からMAの混合割合が5%に制限されるため、変換量は50-60(kg/GWt/y)で2-2.5基軽水炉分に相当 ▲ 安全性: FBRは冷却材ボイド係数は正になる固有の課題がある。MAを5%混合することによりボイド係数及びドップラー係数が悪化する。 ▲ 経済性: OECD/NEA報告では、軽水炉/FBRシステムによる核変換処理のコスト上昇はワンスルーに比べ約10-20%。 ▲ 開発課題/問題点 軽水炉並の経済性、安全性が重要な課題 高度化再処理技術・高レベル廃液の分離技術の低コスト化 MA混合燃料 新燃料・使用済み燃料取り扱い設備の増強 MAが発電炉サイクル全体に拡散

表2 ADSの利点

廃棄物極小化シナリオにフレキシビリティ

- UO₂-LWR / MOX-LWR cycle
 - ADSは MAs と残りの Pu を核変換
- UO₂-LWR / MOX-LWR / RMWR / FBR cycle (RMWR: 低減速スペクトル炉)
 - ADS は LWRs の MAs 及び RMWR/FBR の (Am, Cm) を核変換し RMWR/FBR と共存可能

商用炉サイクルと独立

- 商用燃料サイクルの負担を低減
- MA を小さな P&T サイクルサイトに閉じ込め
- P&T サイクルでの取扱量は少ない
 - ✓ Transmutation: MAs は HLW の約 1/50.
 - ✓ Partitioning: HLW (MA & FP) は 使用済み燃料 の約 1/20.

外部ソースにより未臨界条件で運転

- 大量の MA を核変換するための炉心設計の自由度がある

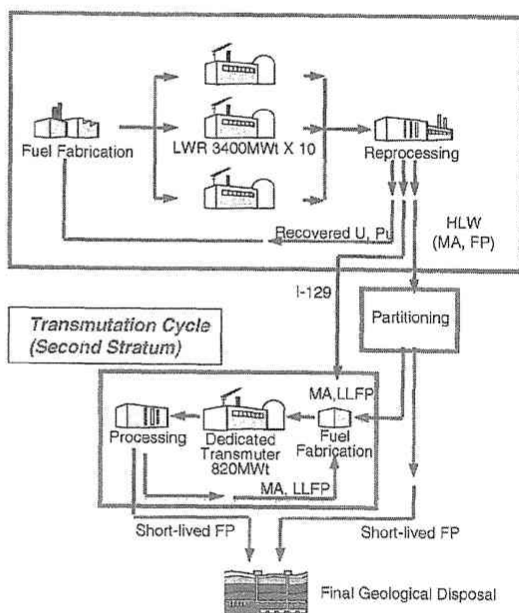


図7 色々なシナリオに対応するADS

るシステムです。UO₂-LWR, MOX-LWRから出てくるMAとPuを、さらには低減速スペクトル炉 (RMWR: Reduced Moderation Water Reactor), FBRから出てくるMAやLLFPを核変換することができます。ADS導入により、商用燃料サイクル全体に拡散する負担が軽減できます。P&Tサイクルでの取扱量が少なく、また未臨界条件で動かすことができるので、

炉心設計の自由度が非常に高いです。

要するに、商用炉サイクルで将来いろんなシナリオがありますが、図7で示すように、そこから出てくるMAとI-129を専用炉で燃やしてやればいいということになります。

ADS導入の将来の効果

ADSシステムを具体的に示すと、図8のように概ねタンク型です。核破碎ターゲット材として現在は鉛ビスマス (Pb-Bi) が最有力候補になっています。勿論、冷却材としてもPb-Biが考えられます。フランスはガス冷却、アメリカはナトリウムで外側を冷却するという概念を持っています。

一例として原研で設計したPb-Bi ADSシステムについて述べますと、熱出力800MWt、

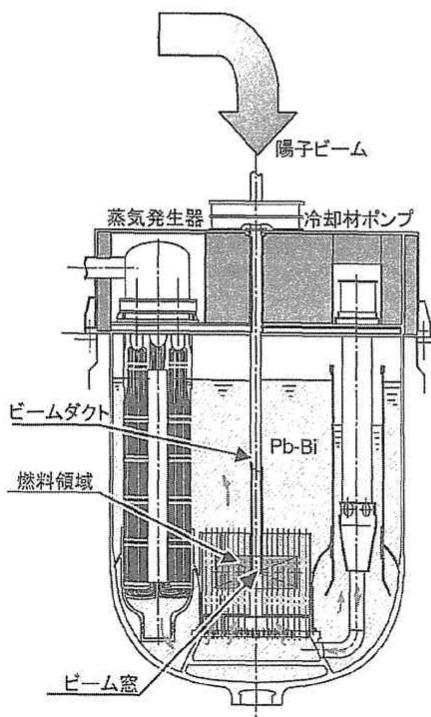


図8 タンク型ADS概念図

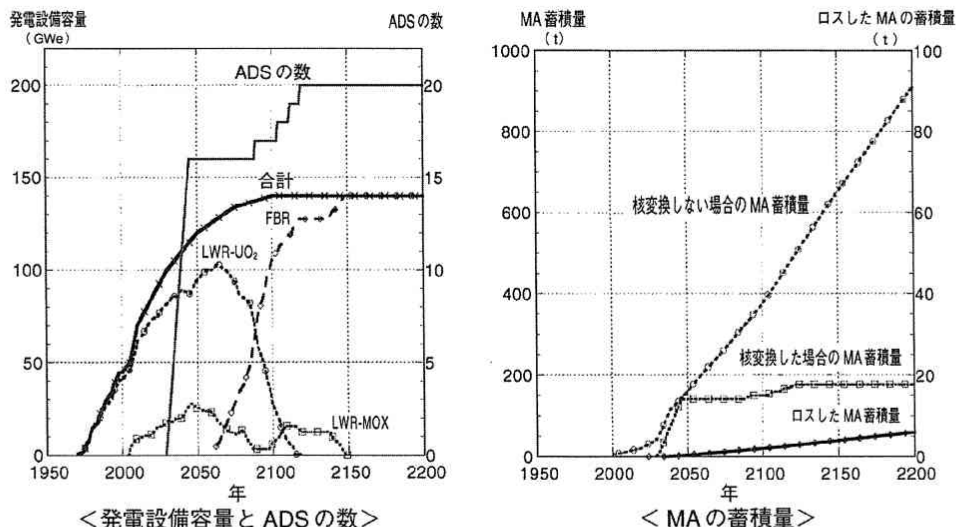


図9 ADS導入の長期的効果

未臨界面0.95, 炉心サイズが半径1m, 高さ1mです。処理能力は, 1年間に軽水炉10基分から出てくる量のMA, 9基分から出てくる量のI-129を処理できる設計となっています。

ADSを導入した場合の将来の効果についてですが, 例えば, 図9のように2100年までに原子力発電を設備容量140GWeを導入するとします。最初は軽水炉, それからMOX軽水炉等, 2050年ぐらいからFBRが立ち上がっていく。ADSは100年後ぐらいで十数基, 最終的に

は20基導入する(図9左)。MAの蓄積量は2200年で約900tになるわけですが, そういうMAが核変換され約200トン以下の水準で一定になります(図9右)。技術的な限界から0.5%は漏れると考えられるMAは, 地層処分していけばいいということになります。

MAの分離・核変換には, 毒性の低減の他に, もう1つ地層処分に必要な面積を減らす効果があります。六ヶ所の再処理工場で年間800tの使用済燃料処理を考えていますが, 図

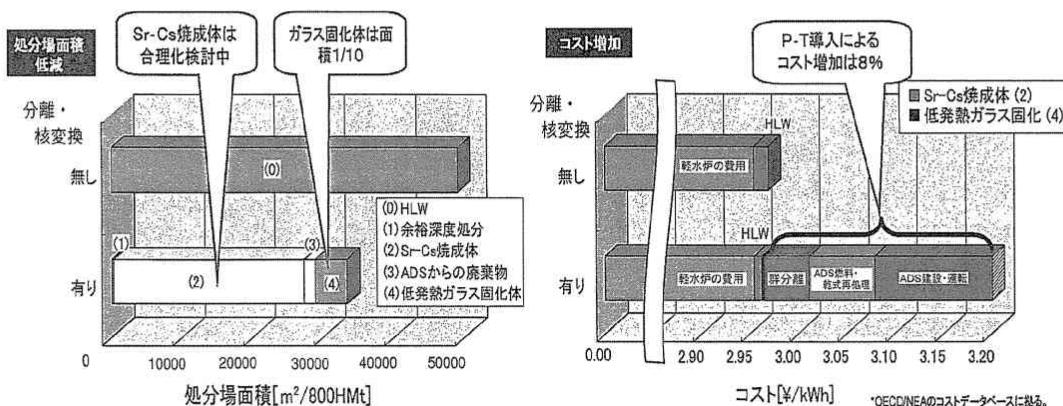


図10 地層処分の必要面積を減らす効果

10左はその場合、1年間に出てくるMAを分離・核変換すると、今の段階で処分面積をいくら減らすことができるか示しています。Sr, Csについてもう少し検討を進めていけばさらに減らすことができると思います。しかし、ADSで分離・核変換しますと、そこから二次廃棄物が出てきます。そういうものを含めどのぐらいのコストアップになるか試算した結果が図10右に示されています。約8%程度の増加ということです。

分離・核変換技術の研究開発

必要な研究項目と技術的課題

[研究項目]

分離・核変換技術を進めていく上で必要な研究開発項目を表3に示しました。使用済燃料からTRU, LLFPを99.9%以上分離する技術があります。分離した後、少なくとも10回またはそれ以上リサイクルをしていかなければなりません。そのためには、特にADSで乾式プロセスを実証していく必要があります。

また、そういうシステムを導入した場合に2次廃棄物がありますが、分離・核変換後の廃棄物の地中処分性能評価、要するに地中処分へのどういうインパクトがあるかきちんと把握していく必要があります。

原子炉としては高速炉スペクトルを持つものがいいのですが、冷却材に何を使うかということも必要な研究です。現在冷却材として鉛ビスマス(Pb-Bi)が主になっていますから、その場合の核破砕ターゲットの材料開発も非常に重要になってくる。

専用燃料の成立性に関する研究も必要です。ADSだと燃料はMAが主で、さらに原研の場合は窒化物です。アメリカは金属を考えたりしています。そういう燃料の成立性についての検討が必要になります。

ADSの信頼性、有効性というところからこういう基礎的なデータも含めた研究開発が必要となります。特に加速器と未臨界炉心のインターフェースである陽子ビーム窓の技術開発は大切です。

このように、ADS特有の技術開発として、陽子加速器、ビーム窓等インターフェースの開発などがありますが、特に炉心や冷却材に関してはFBRと共通部分が多いのです。分離

表3 必要なR&D

燃料サイクル

- LWR-UOX/MOX, FR/ADS-FuelsからTRU,LLFPの分離: 99.9%以上
- 技術的、経済的可能性を評価するための乾式プロセスの実証
- ADS/FR核変換システムからの長寿命廃棄物と2次廃棄物の評価
- P&T後廃棄物の地中処分性能評価: 将来のP&T研究の鍵

原子炉

- 高速スペクトルシステムにおける冷却材の選択
- 専用燃料の成立性: 製造、照射、再処理等の実験、照射施設
- 材料開発: 照射、熱等の実環境下での試験、照射施設
- ADSシステムの信頼性、有効性: 核データ、核計算、加速器性能、陽子ビーム窓、安全解析(HCDAへのパス)、O&M
- 実験炉級ADSによる実証: EU, USA, 日本、ベルギー、イタリア等計画

表 4 ADS実現のための主な技術的課題

加速器・ビーム ・高効率、安価、高信頼性、低ビームロス等の要件を兼ね備えた大強度陽子加速器の開発(CWが望ましい) ・陽子ビームを導入する機構の開発(ビーム拡大、緊急遮断機構等)	
炉物理 ・増倍率、出力分布、中性子スペクトル、燃焼反応度などの予測精度検証 ・未臨界度の連続監視方法 ・核変換特性の評価	大強度陽子加速器プロジェクトでR&D
制御システム ・燃焼反応度補償及び出力調整の方法 ・ビームトリップ時、再起動時の挙動	
Pb-Biシステム技術・材料・熱流動 ・Pb-Biと共存する耐照射材料の開発(ビーム窓、構造材) ・Pb-Biの取扱技術の開発(熱流動特性、Po生成)	
燃料 ・MA窒化物燃料の製造・処理技術の開発 ・窒素-15の濃縮技術開発	
炉構造 ・免震装置(重金属冷却材を使用するため) ・炉心上部構造の配置(ビーム導入機構、燃料交換機構、ビーム窓交換機構等)と遮蔽	

技術についてもPUREXと同じです。燃料、乾式技術、Pb-Bi技術については、ジェネレーション4でも取り組まれているところです。

世界のADS開発動向

[実現のための技術的課題]

ADS実現のための技術的課題を表4にまとめました。その中でも特に、信頼性の高い加速器の開発が要求されています。今まで原子炉と一緒に使ってきた加速器の例がないため、現在の加速器だとしょっちゅう陽子ビームがトリップします。それから、これまで臨界が主だった炉物理も未臨界について考えていく必要があります。制御システムについても加速器と連動したもの、ビームトリップ時の挙動、それからPb-Biを使うことから、そういう材料、熱流動についての検討を進めていくことが必要だと思います。これらは活発に世界中で行われていることです。もう1つ、免震技術も重要です。

各国の計画の概要

[EU]

欧州連合(EU)の中に技術評価ワーキンググループ(TWG)が設置されています。1984年にノーベル物理学賞を受賞した欧州共同原子核研究所(European Organization for Particle Physics, CERN)のカルロ・ルビア教授が議長で、スペイン、イタリア、フランス、ドイツ、スウェーデンなど9カ国が参加しています。

2001年3月に、コスト、ADS開発のブレークスルー等々に関するロードマップを作成しています。それによりますと、2003年から基本設計が始まって、2005年からライセンシング、2008年から建設、2015年から実験級ADS(XADS: eXperimental Accelerator Driven System)のオペレーションという目標で進めています。

XADS予算を見ますと、2012年までにR&Dだけで1億8,000万ユーロ（約200億円）。建設に4億5,000万ユーロ（約500億円）、燃料開発に1億8,000万ユーロ（約200億円）という見積りを立ててEUの中で進めています。

[フランス]

ジェデオン（GEDEON）計画は、原研と同じような階層型ですが、ADSでは冷却材としてPb-Biやガスが考えられています。1991年の「放射性廃棄物管理研究法」に基づいて、2006年には放射性廃棄物の最終処分法が決定されるため、それまでにある程度の見通しを立てたいということです。

また、ミューゼ（MUSE）計画では、マズルカにある炉物理実験施設で4年ぐらい前から未臨界物理実験を行っています。

[ベルギー]

最近非常に面白いのは、多目的なミラー（MYRRHA）計画です。ADSによる長寿命核種の核変換研究、材料照射、RI製造、高速炉や軽水炉燃料照射研究といった多目的な計画です。2005年に建設に着手し、2010年には運転を開始したいとしています。これは、今あるBR2が2010年には廃炉になるので進められている計画です。

この計画は、EUのロードマップの中にあります。これは加速器としてサイクロトロンを用います。陽子ビーム出力は1.75MW、ターゲットはPb-Biですが、窓を作らないという画期的な概念で実験を始めています。

高速炉のMOX燃料を置いて、そこに陽子ビームを打ち込みます。いろんな照射口を設けて、将来は照射炉にするという計画です。

建設費はトータルで2億7,000万ユーロ（約320億円）。加速器が約6,000万ユーロ（約72億

円）です。

[アメリカ]

アメリカには、トリプルA（AAA；Advanced Accelerator Application）計画があります。当初、軽水炉から出てくるPuとMAを燃やすというシナリオだったのですが、今は軽水炉でMOXとか、一度軽水炉でPuを燃やした残りとか、そういうMAを燃やすことを考えています。これはロスアラモス研究所でのトリチウム生産のためのAPT（Accelerator Production of Tritium）計画の加速器利用と一緒に進められています。

2001年は6,800万ドル、2002年は5,000万ドルを投入し、実際に燃料開発を進めてきています。原研の提案しているような窒化物燃料についても、金属、MOXを含めて、2003年には照射実験をする計画が立てられています。

[日本—原研]

今、原研では大強度陽子加速器計画の中の核変換実験施設を考えています。これは基礎的な先ほどの炉物理とPb-Biターゲットの実験用材料の開発を目的としています。

図11はその概念図です。200kWの陽子ビームをPb-Biターゲットに、そして10Wのビームを臨界集合体に打ち込んで、未臨界炉物理や制御性等について検討を進めていく予定です。2005年後半から実験施設の建設に着手したいということで進めています。

[世界のR&D計画の進捗状況]

世界のADS実証プラントのR&D計画の進み具合を見ますと、ベルギーのミラー計画が一番進んでいます。2010年のオペレーションを開始したいということです。アメリカは当初計画より遅れて2015年、EUが2015年ぐらい、

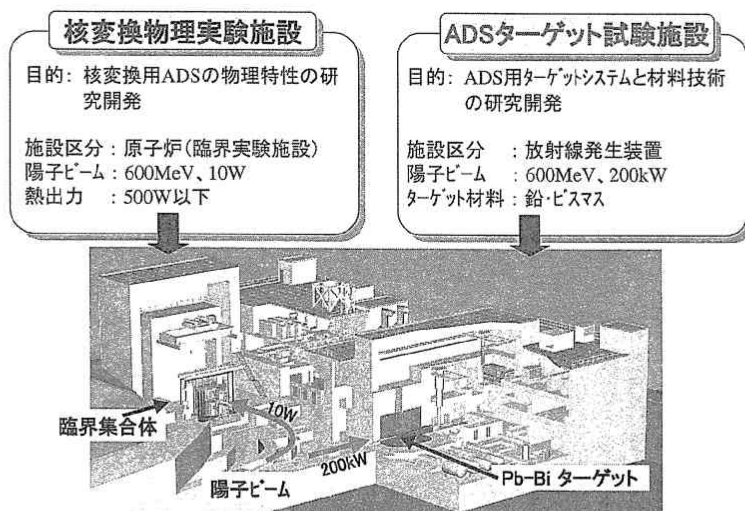


図11 核変換物理実験施設とADSターゲット試験施設

原研は前々から2020年ぐらいのオペレーション開始で計画を進めています。

技術課題毎の取組み例

① 加速器

アメリカのロスアラモス研究所にあるランス（LANSE）やスイスのパウル・シューラー研究所（PSI）にあるシンク（SINQ）では、加速器出力が1 MWです。原研は、大強度陽子加速器計画の下に開発を進めていく計画です。

未臨界ですから安全性は非常に高いのですが、未臨界度を余り低くすると加速器の性能に負担となります。また、燃焼させるので、未臨界度が余りに変動するということであれば、それも加速器への負担を大きくします。

② 核破砕ターゲットの材料

Pb-Biが最有力です。鉛（Pb）は吸収断面積

が非常に小さいこと、Pb自体の融点は高いのですが、Pb-Biだと融点が低いこと、それからプロトンあたりの中性子の発生率も高いことが理由として挙げられます。一方、Pb-Biの課題としては重いこと、半減期が138日ながらポロニウム（Po）という揮発性の α （アルファ）核種が出てくること、それから材料の開発が必要になってくるといった難点があります。ただし、このPb-Biについてはロシアの原子力潜水艦での80原子炉・年^{*}という経験があります。また日本では自然循環ですが、八戸の鉛亜鉛精錬所で19年間、発電を続けており、あまり問題がないという実績があります。

アメリカはロシアで進んでいる技術をそっくりもってきてTC-1で検討を進めています。

PSIではメガパイ（MEGAPIE）計画の下、1 MWで実際にPb-Biターゲットを使って、いろんな照射を2004年から始めるということです。今、これをアメリカ、ヨーロッパ、原研、韓国が入って国際協力で行っています。日本

^{*} 原子炉の運転時間の延べ年数。（社）日本原子力産業会議発行の『世界の原子力発電開発の動向 2000年次報告』（2001年6月22日）によると、2000年12月31日現在での日本の原子炉・年は877、基数は52で世界第4位。

は、照射材料開発のターゲット実験施設を2005年あたりに建設する計画でいます。

Pb-Bi技術については、ドイツがカールスルーエ超ウラン研究所（FZK）にKALLAという非常に大きなループを幾つも作ってやっています。また、欧州原子力機関（ENEA）やベルギーは、窓なしターゲット技術開発をやっています。さらに、原研、三井造船㈱、東京工業大学もPb-Biループを作って技術開発を行っています。

③ 未臨界炉物理

未臨界炉物理では、MASURCAでのミューゼ計画があります。また、アメリカはアイダホ国立工学研究所のゼロ出力プルトニウム炉（ZPPR）を用いた計画、原研は高速炉臨界実験装置（FCA）、さらに大強度陽子加速器計画では実際の陽子を入射して実験する計画です。そうして実験炉建設へ向けた基礎データを取得していきたいと思っています。

④ 燃料開発

燃料は非常に大切なものです。今、原研が考えている燃料サイクルでは、MAの窒化物燃料を考えています。MOXに比べAmの安定性が高いということ、また、熱伝導などいろんな点で金属に近いということで、窒化物燃料を第1候補にしています。

MAの窒化物燃料については、現在アメリカ、フランス等で高速炉フェニックスを使って照射実験をやる計画が進められています。日本も参加を呼びかけられていますが、予算の関係上どこまでできるか検討している段階です。

おわりに—チャレンジ精神を

今のところ、Pu利用炉と組み合わせて再処理しない限りADSの出番はありません。そのため経済性と安全性を向上させて、RMWRやFBRの持続可能な商用発電炉サイクルシステムがADS導入にあたって非常に重要となります。何となれば、ADSとはそういう炉から出てくる放射性廃棄物の極小化を図るシステムだからです。あらゆる燃料サイクルに対応でき、放射能廃棄物の蓄積量を減らし、地層処分のコストを低減し、社会的受容性をも向上させるための技術がADSなのです。

先日、ベルギーのミラー技術ガイダンス委員会がありました。私も委員の1人として参加しましたが、その結論だけを申しまして終わりに致します。

ミラー計画は革新的であり、そのためにR&Dと費用がかかりますが、革新性なくしてミラーの価値がないということです。科学者やエンジニアのチャレンジ精神をかきたて、特に若者に対して非常に魅力的です。

今、ヨーロッパでも日本でも原子力離れがありますが、新しい分野や新しい技術、例えば、大強度陽子加速器に関する技術、核破砕ターゲットに関する技術、未臨界炉心について若い人たちのチャレンジが期待される場所です。500年、1000年スケールの持続可能な原子力エネルギー社会の発展のためには、Puリサイクル利用と廃棄物最小化技術の確立が必要です。そのためのADSを導入した階層型核燃料サイクルを確立するには、まず軽水炉でのPU利用の早期実施が望まれます。

ご静聴、ありがとうございました。（拍手）

〔講演〕

原子力の水素生産への利用

堀 雅夫

（原子力システム研究懇話会／原子力水素研究会・代表）



はじめに

復活した原子力による水素生産研究

原子力の水素生産への利用について最近の状況をお話いたします。

原子力による水素生産が考えられたのは大分前のことです。最初、1970年頃に1次エネルギーとして主に原子力と再生可能エネルギーを使った水素生産が考えられていました。その頃の原子力利用のプロジェクトとして、1973年から80年に日本では原子力製鉄のプロジェクトがあり、この中で原子力で水素を作るプロセスが検討されました。また、西ドイツでは、原子力で天然ガスを水蒸気改質して原子力を化学エネルギーに変え、それを輸送するNFEプロジェクトがありました。その後、日本では日本原子力研究所（原研）の高温ガス炉利用の現在のプロジェクトへとつながっていますし、ドイツもしばらくの間はこの関係の研究を続けていました。

1999年5月に、国際原子力機関（IAEA）がそれまでの原子力による水素生産のいろいろな研究をまとめた調査報告書“Hydrogen as an energy carrier and its production by nuclear

〔略歴〕

1955年慶応義塾大学工学部卒業。1957年東京大学大学院化学工学修士課程修了。1957年日本原子力研究所。ブルックヘブン研究所。1969年動力炉核燃料開発事業団（現核燃料サイクル開発事業団）、大洗工学センター所長、理事。1998年から原子力システム研究懇話会。2001年原子力水素研究会を設立・代表。

power”を作りました。このころから別な意味で、原子力による水素生産が考えられるようになりました。それまでどちらかという技術、シード面から見た水素製造だったのですが、今度はニーズ面から水素生産の必要性、原子力による生産の必要性が出てきました。特に地球環境問題との関係で、この頃からまた世界各国で研究が盛んになりました。

2000年10月に経済開発協力機構／原子力局（OECD/NEA）が初めて原子力による水素生産“Nuclear Production of Hydrogen”の情報交換会議を開催しました。この会議には、10カ国から40人が集まり、原子力水素生産の関係のいろんな側面について検討しています。

日本では原研が高温ガス炉利用の水素製造研究開発を継続しており、現在では実績的にも世界のナンバー1です。1年半ほど前に、私が代表を務めている原子力水素研究会ができ技術検討を始めました。

アメリカでもその頃からいろいろ研究が行われています。今年1月には“FreedomCAR”というプロジェクトが始まりました。これは、アメリカ政府と三大自動車メーカー（ゼネラルモーターズ、フォード、ダイムラー・クライスラー）との共同プロジェクトで、2010年までに水素の燃料電池車の技術開発を積極的に行っていこうというプロジェクトです。

これらの水素利用の進展もあって、3月には「エネルギーセキュリティ法案」の中に、高温原子炉による水素生産研究を国立研究所で実施するという文面が追加されております。

また、アメリカの民間研究所もいろいろ研究しています。例えば、今年5月、核融合と高温ガス炉の両方を研究しているゼネラルアトミックス社が原子力水素のワークショップを1カ月ぐらいの予告期間で開きましたが、60人ぐらいが集まって討議するほどまでに盛り上がってきております。

フランスでは、水素製造として高温ガス炉での熱化学法に関心を示しています。特に原子力庁（CEA）がこれに積極的に取り組んでいます。CEA自身は原子力と関係なしに燃料電池のプロジェクトをもっていますので、技術的素地ができています。

国際的には、第4世代原子炉開発のロードマップを作成中でその中に各炉型を串刺したようなクロスカットグループというのがあります。その中にエネルギー製品クロスカットというのがあります。エネルギー製品とは電力以外の、海水脱塩と熱、それから水素です。今ちょうどR&D計画を審議しているところで、7月中にまとめるという段階にきています。この中で一番のターゲットは、高温ガス炉を使った熱化学法水素生産です。これが今の主流になっています。

原子力による水素生産には、熱化学法以外にいろんな方法があります。水素製造プロセスには、原子力だけでなく、化学、石油、ガスなどかなり広い範囲の技術分野が関係してきますので、原子力水素研究会ではそういう機関の方から技術評価をして頂いて、6月に「原子力による水素エネルギー」と題する展望・解説書を作りました。

水素に対する需要の高まり

—燃料電池車用と石油精製用

水素に対する需要が今後どうなるのか、最近の状況を申し上げます。

まず1つは燃料電池車用です。日本でもこの7月にトヨタが1年初めて水素の燃料電池車を市販すると発表しています。世界的には、特に2010年以降にかなり増えるの見込まれています。

もう1つは石油精製用です。水素は石油精製の原料として使われてきました。ところが、特にアメリカで中東からの軽質油の輸入を減らすために、アメリカ大陸の重質油を使う必要が出てくると予想されています。重質油は炭素分がより多いので、そこに水素を添加して軽質化したり、また脱硫する必要が出てきます。そのための水素の需要が、2010年までに約4倍に増加するという予想で、アメリカでは燃料電池用需要よりもむしろ石油精製の需要が先に出てくると思われています。

〔燃料電池車用〕

燃料電池の実用化戦略研究会の報告（表1）によりますと、日本では、移動用の燃料電池用、定置用の燃料電池用、水素発電、あるいはパソコン用電源など小さいものも含めて

表1 日本における水素エネルギー需要の予測

単位：億 Nm³/年

	2010 年	2020 年
燃料電池自動車	0.4 (5万台)	37.5 (500万台)
定置用燃料電池	72.7	350
水素発電、その他	0.4	4.6
合計	73.4	391
(再生可能起源水素)	(0.4)	(4.5)

資源エネルギー庁燃料電池実用化戦略研究会報告(2001.8)より

参考：現在の日本の工業用水素生産量＝170 億 Nm³/年

(この内、市場取引量＝2 億 Nm³/年)

2010年で73.4億Nm³/年の容量規模が見込まれ、それが2020年に391億Nm³/年と想定されます。燃料電池車も5万台から500万台に増えまして、さらに2030年には1,000万台という予測が出ています。水素需要はこのように増えてくる。供給サイドを見てみますと、再生可能エネルギー起源の水素は非常に少ないです。2010年に0.4億Nm³/年、2020年になっても4.5億Nm³/年です。この辺に炭酸ガスを出さない特徴を持つ原子力が入り得る余地があるわけです。

[石油精製用]

石油精製プロセスの今後の変化を米国の例

で見てみます(図1)。過去は軽質油を使って、そのままガソリンにしている。今はこれが重質油に代わりつつあるわけで、そうすると、これに水素を添加してガソリンにしていかなければなりませんから、どうしても水素が必要になってきます。真ん中の近未来フローに見られるように水素は、天然ガス改質で作った水素を加えます。将来はこれを化石燃料起源ではない水素に変えていって、できるだけクリーンにしていく必要があります。ガソリンは使いたいけれども炭素起源以外の水素で展開していきたい。ここで原子力が出てくるわけです。

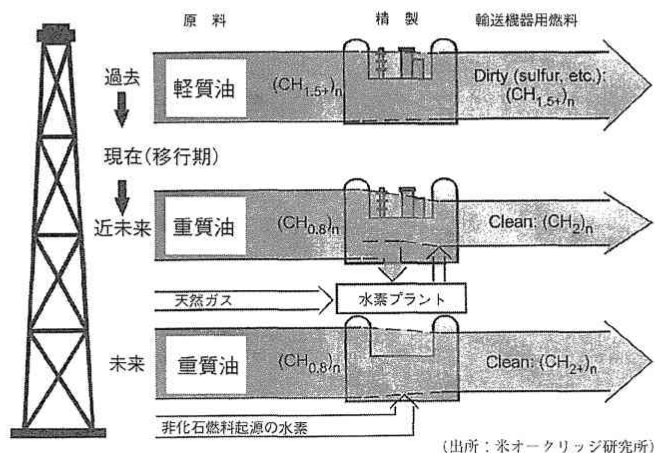


図1 石油精製用の水素需要

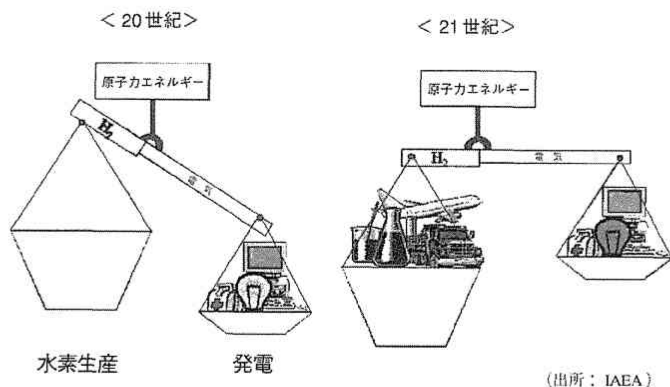


図2 発電と水素生産がバランスする21世紀の原子力利用

[世界の水素生産量]

IAEA資料によりますと、現在の世界の水素生産量は約500GNm³です。この全部を熱量に換算しますと、最終エネルギー全体の2%ぐらいになります。今はそのぐらいですが、全体のエネルギー消費量が増えていくにつれ、水素の割合も2%ぐらいが20%とかの1桁以上大きい割合になると想定されるわけです。

原子力による水素生産

持続的大量供給と

エネルギーセキュリティが可能

原子力で水素を生産するメリットは何か。1つは持続的大量供給が可能ということです。原子力そのものの大量供給性は、特に再生可能エネルギーに比べると大きな特徴です。

もう1つは炭酸ガス排出の抑制が可能ということで、ほとんどゼロにできます。

もう1つ、これはエネルギーセキュリティが可能ということです。日本の場合、60%近くを占めている非電力エネルギーを原子力が

供給することによってエネルギーセキュリティに貢献できます。

図2はIAEAの人が描いた絵ですが、20世紀と21世紀と原子力がどういうふうに使われていくか、電気と水素を天秤にかけています。20世紀はほとんど発電だけに使われていた。21世紀はもっとバランスした必要がある。図2ではバスケットの大きさが水素の方が電気よりもずっと大きい、潜在需要としては水素の需要は電力と同程度か、あるいは多くなると見ている人もいます。

世界全体の1次エネルギー利用の状況を見ますと、電力に使っている1次エネルギーの割合は30%。残りは輸送が15%で、熱が55%です。つまり、輸送と熱の分野に原子力が水素を介してエネルギーを供給していくことによって地球環境や資源の保存に貢献できるわけです。

水素生産の方法

水素を作るのにどんな方法が実際にあるか。現在は、天然ガス、石油、石炭などからの直接生産(60%)、他の化学プロセスの副産物(36%)、水の電気分解(4%)であります。

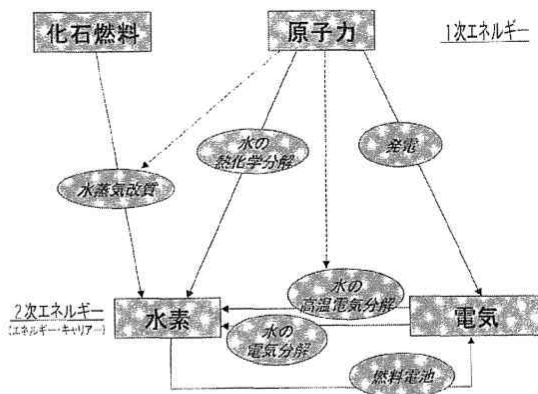


図3 原子力と電気・水素

表2 原子力による水素生産の方法

エネルギー形態	使用原料	水素製造方法	原子炉型(例)
電気	水	電気分解	軽水炉
電気+熱(高温)	水	高温電気分解	高温ガス炉
熱(高温)	水	熱化学分解	高温ガス炉 高温液体金属炉
熱(高温)	化石燃料+水	水蒸気改質	高温ガス炉
熱(中温)	化石燃料+水	水蒸気改質	ナトリウム冷却炉
熱(高温)	化石燃料	熱分解	高温液体金属炉
放射線	水	放射線分解	放射性廃棄物

原子力を用いる方法としては、以下の方法があります（図3）（表2）。

① 水の電気分解

原子力で発電して水を電気分解し水素を得るのが一番簡単な方法です。当面は軽水炉（LWR）を使っていく。将来もっと効率のいい炉があれば、それを使えばよい。この場合は、軽水炉の発電効率の32～33%，水の一番簡単なアルカリ水電解の効率80%を合わせると、原子炉発電量に対する水素の熱量は25%ぐらいになります。

② 水の高温電気分解

電気分解の時に一部高温の熱を加えること

によって、少し効率を上げることができます。これを高温電気分解、ホット・エレクトロシスと言っています。

③ 水の熱化学分解

水を熱化学分解して水素を作る方法です。この方法については後で説明しますが、高温ガス炉、あるいは高温液体金属炉（鉛ビスマス）で行うことが考えられています。

④ 水蒸気改質（共生法）

化石燃料に水蒸気をかけて水蒸気改質反応を行わせて水素を作る方法です。現在、その熱は化石燃料を燃やして得ているのですが、これを原子力で与えることで30%程度の化石燃料が節約でき、その分だけ二酸化炭素（CO₂）の発生が少なくなります。原研は熱化学法とこの方法の両方の研究開発を行っています。

最近、中温の400℃～600℃の熱で水蒸気改質を行わせる方法がいくつか考えられています。これが実用化されると大体600℃ぐらいまでのナトリウム冷却材温度の熱が使えるようになります。

⑤ 燃料電池と組み合わせる

水素と電気は一緒にしてハイドロシティ“Hydrocity”と言われます。電気分解と燃料電池を使えば、両者の変換効率が非常に高いので、電力負荷平準化が可能になります。一旦電気にしたものをまた水素にして、実際に使う時に燃料電池で電気にするのはもったいない気がしますが、現実的にはかなり楽で手取り早い方法だと思います。

⑥化石燃料の熱分解

その他では、例えば化石燃料、天然ガスを完全に炭素と水素に分けてしまう方法があります。要するに単純な熱分解です。この場合は、そこにある水素しか使えませんので、水素の発生量としては水蒸気改質による方法の半分になりますが、出てきた炭素は固体ですので処理の点などで楽な方法です。これには、高温液体金属を使う方法が考えられています。

⑦放射線による水の分解

放射線による水の分解があります。例えば、電力中央研究所では放射線の機能触媒を使い、ちょうど光で水を分解して水素をつくると同じように、水素を作ることに取り組んでいます。この場合、原子炉の中の放射線量はエネルギー的に限られているので、当面は放射性廃棄物を使っていくことが考えられます。

電気分解水素生産—コストと効率

水の電気分解は、値段的にかなり高いことが課題です。例えば、米エネルギー省（DOE）の評価ですと、5.5円/kWhの電気を使うと、熱量当りでガソリンの4倍ぐらいのコストになります。もし安い原子力発電の電気があれば、化石燃料起源の水素より安くなる可能性はあります。少し古いデータですが、例えばフランス電力公社（EDF）による解析（図4）では、化石燃料起源の水素に対して、原子力発電起源の水素は同じ程度かやや安めとなっています。しかし、一般的にまだコストが高いと言えます。

電気分解の効率ですが、高温水蒸気電解（SOSE）では固体酸化物の電解質を使うので高温化が可能で効率が上がります（図5）。例

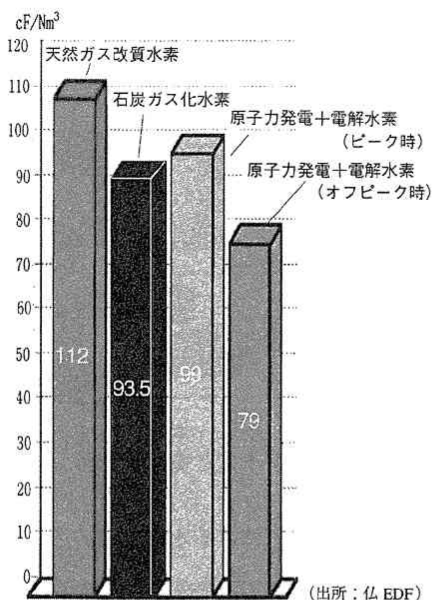


図4 水素のコスト比較

えば、900℃の場合、電気分解だけですと40数%ですが、高温水蒸気電解では50%以上になります。熱化学法の当面の目標を55%に設定して研究開発を行っていますので、高温水蒸気電気分解は効率的にはかなりいい方法と言えます。

図6はアメリカのアイダホ国立研究所で検討されているものです。高温ガス炉により、ガスタービンで発電します。原子炉熱の一部を使って蒸気発生器で高温水蒸気を作り、SOSEに電気と水蒸気を送って水素を製造する方法です。この場合の温度は850℃です。これくらいの温度から、この方法のメリットが出てきます。

熱化学法による水素生産

本命の熱化学法は、原子炉の熱を直接使って水素を生産するので、理想的であり、究極的な方法と言えます。効率は55%ぐらいを狙

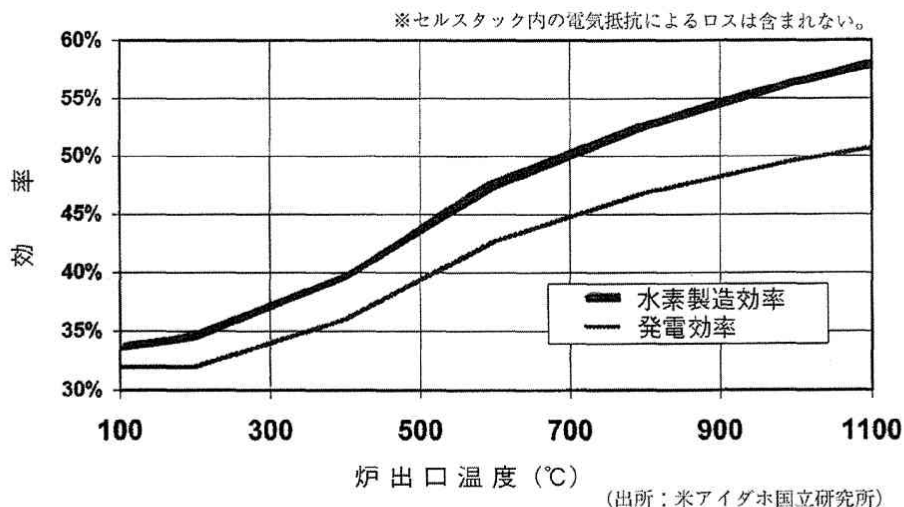
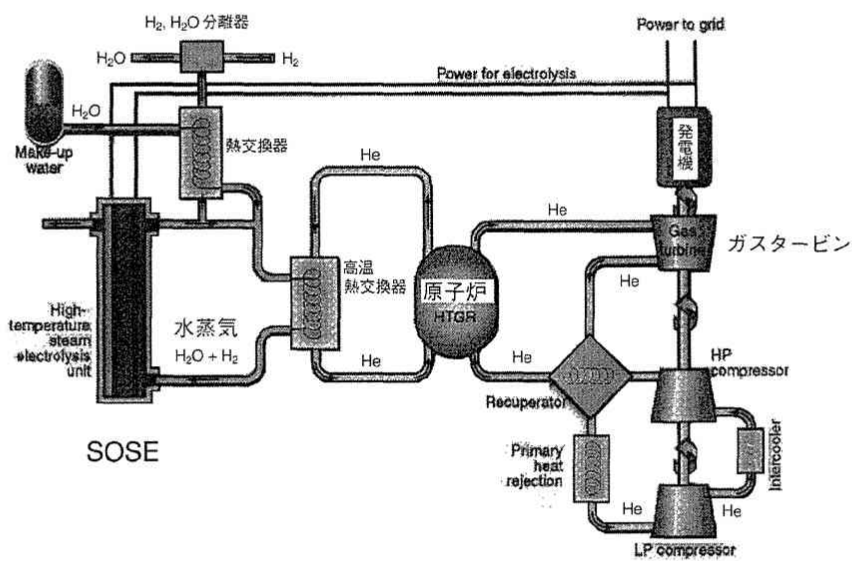


図5 水素生産効率と蒸気温度



(出所：アイダホ国立研究所)

図6 高温水蒸気電気分解のプロセス例

っています。効率は原子炉の発熱量に対してできた水素が持っている熱量の比率です。

理論的に、2,500℃以上では水は水素と酸素に分かれます。実用的には幾つかの化学反応と組み合わせたサイクルで、1,000℃以下の温度で水を分解します。今有力視されている方法は、UT-3法とIS法です。これは750℃～

800℃以上の温度で可能になります。現在、原研が高温ガス炉と組み合わせるIS法を開発中です。アメリカでは高温液体金属炉と熱化学法を組み合わせる研究などが原子力エネルギー研究イニシアチブ (NERI) プロジェクトの一環として2000年から開発が行われています。

熱化学法プロセスに関する研究は、第1次

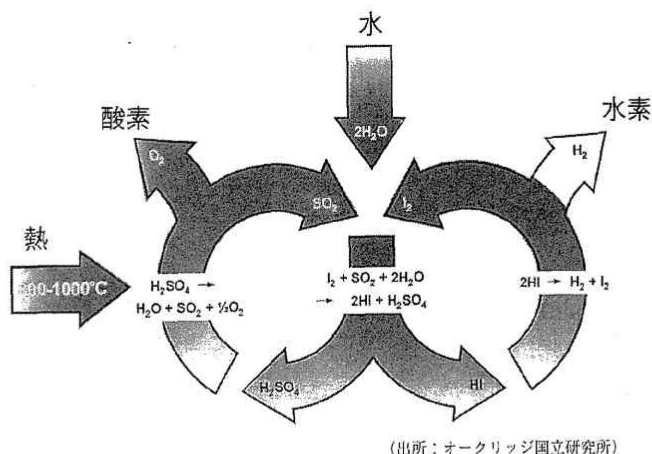


図7 IS法プロセスの例

表3 UT-3 プロセス

石油危機の頃をピークに多く行われました。その後、エネルギー、石油の供給安定化とともに下火になりましたが、今また多くなっています。これまで、熱化学法プロセスについて100以上のサイクルが提案され、その中から本当に使えそうなものとして、UT-3法とIS法が選ばれ、その改良が行われています。

[IS法]

原研が一番進んでおり、世界的に最も本命視されているプロセスです。単純化して説明しますと、図7のように、硫酸の分解サイクルとヨウ化水素の分解サイクルがあります。硫酸の分解のときに800℃～1,000℃の高熱を与えて、酸素を発生させます。2つのサイクルが一緒になったブンゼン反応で100℃くらいの熱を放出します。そしてヨウ化水素 (HI) のサイクルで、ヨウ化水素の分解させて水素を出すという仕組みです。

実際には材料などいろいろな課題があつて、このプロセスはまだ開発途上です。

カルシウム、鉄、臭素の化合物による4反応で構成

1. $\text{CaBr}_2(\text{s}) + \text{H}_2\text{O}(\text{g}) = \text{CaO}(\text{s}) + 2\text{HBr}(\text{g})$
700-750℃ 吸熱: 217 kJ
2. $\text{CaO}(\text{s}) + \text{Br}_2(\text{g}) = \text{CaBr}_2(\text{s}) + 0.5\text{O}_2(\text{g})$
500-600℃ 発熱: 79 kJ
3. $\text{Fe}_3\text{O}_4(\text{s}) + 8\text{HBr}(\text{g}) = 3\text{FeBr}_2 + 4\text{H}_2\text{O}(\text{g}) + \text{Br}_2(\text{g})$
200-300℃ 発熱: 276 kJ
4. $3\text{FeBr}_2 + 4\text{H}_2\text{O}(\text{g}) = \text{Fe}_3\text{O}_4(\text{s}) + 6\text{HBr}(\text{g}) + \text{H}_2(\text{g})$
400-600℃ 吸熱: 380 kJ

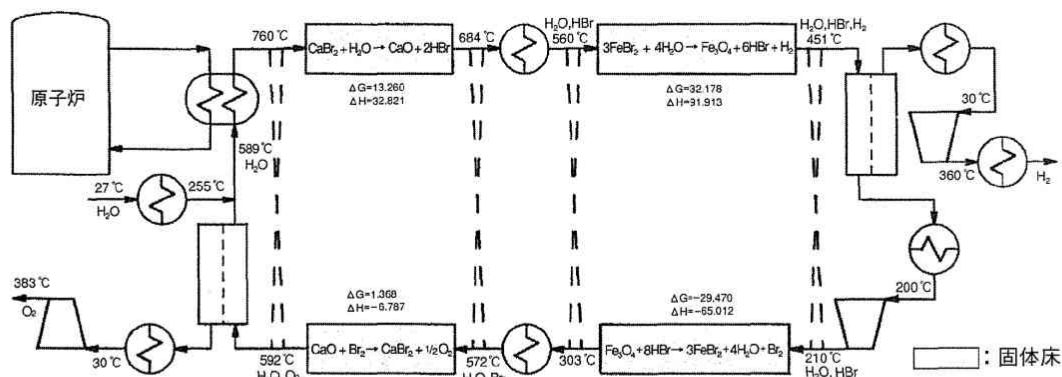
固体反応床を固定してガスを切り替えて循環

[UT-3法]

これは東京大学工学部の吉田邦夫教授が開発したもので“University of Tokyo, Number 3”というプロセスです(表3)。カルシウム (Ca) と鉄 (Fe) と臭素 (Br) の加合物で、4つの反応を行わせるという構成です。これは固体とガスの反応です。

この4つの反応を行わせることによって水から水素を作っていくわけです。

UT-3プロセスを原子炉と組み合わせたのは図8です。UT-3の固体と気体の反応は4つの



(出所：ジェネラル・アトミックス)

図8 UT-3法の設計イメージ

固体床をバルブの切り換えで行わせます。この場合は、入口温度が760℃ですから、IS法の850～900℃よりも100℃ぐらい低い温度でプロセスが成立します。その点で魅力があるものと考えられます。この方法についても現在改良案が出ています。例えば、アルゴンヌ国立研究所は、HBrの分解にプラズマを使う方法を提案しています。

化石燃料 & 原子力による水素水蒸気改質法

化石燃料の水蒸気改質反応に原子炉から熱を与える方法です(表4)。改質反応はこの場合、メタンに水を加えてCOと3倍の水素が出てくる。そしてシフト反応でCOに水を加えて水素と炭酸ガスにする。この2つの反応を行わせると1モルのメタンから4モルの水素が出てくる。この反応では、合計165KJ/molの吸熱反応になる。この熱を原子炉から供給するわけです。

表4の反応の吸熱量をメタンの燃焼で供給すると、メタンの必要量は理論的には18%、実際は30%程度増加します。その分の熱を原子力で与えるわけですから、化石燃料の節減

表4 共生法の反応式

改質反応	$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} + 3\text{H}_2$	-206 KJ/mol
シフト反応	$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2 + \text{CO}_2$	+ 41 KJ/mol
	$\text{CH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O} = \text{CO}_2 + 4 \text{H}_2$	-165 KJ/mol
この熱を原子炉から供給 CH₄を最大30%削減(CO₂も減少)		
方式	温度レベル	原子炉
通常	750～900℃	高温ガス(高温液体金属)炉
SER	400～500℃	ナトリウム冷却炉(高速炉)
MR	500～550℃	ナトリウム冷却炉(高速炉)

量は30%ぐらいだと思います。それだけCO₂の発生も少なくなるということです。この方法は普通、750℃～900℃の高温で行いますが、ナトリウム冷却炉の温度である400℃～600℃ぐらいが使える方法の開発が進められています。

図9は今の反応の平衡組成です。750℃以上になると反応が水素生成の方へ動きます。もっと低い温度では水素の組成が小さくなります。低い温度で水素発生へ進ませるには、できてくる反応生成物を取ってしまえばいいのです。COとCO₂を吸収してしまう。あるいは、

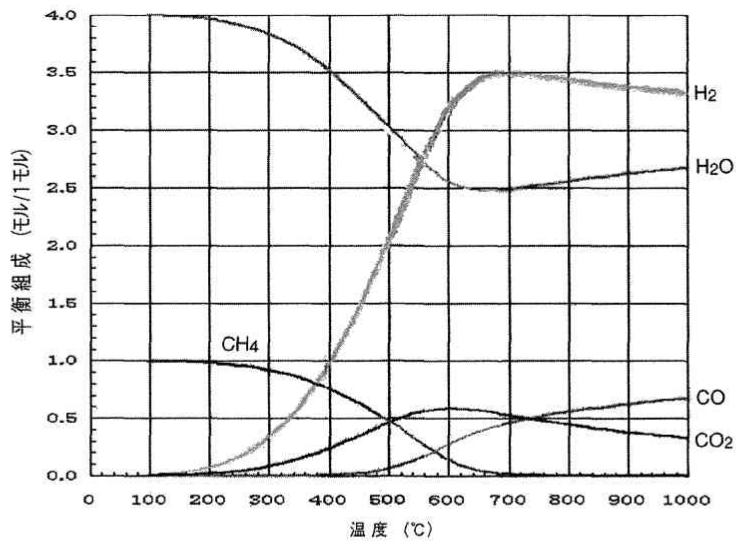


図9 水蒸気改質法における化学反応の平衡組成

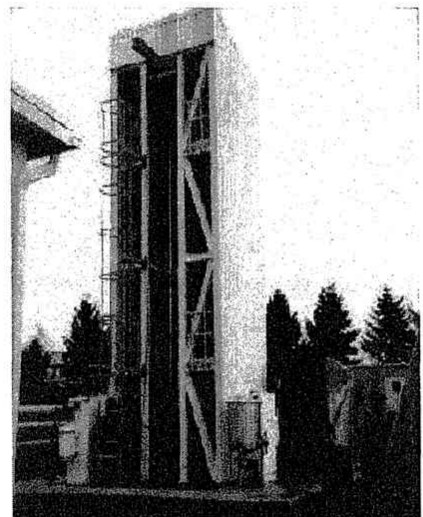
反応域で水素を吸収する。そうすれば反応は低い温度でも水素生成の方へ動くことになります。その原理を使うのが中温の水蒸気改質法です。

[中温の水素水蒸気改質プラント]

図10はSER法による中温の水蒸気改質プラントです。これは、DOEの委託でエア・プロダクツ・アンド・ケミカルズという水蒸気改質の大手プラントメーカーが開発しています。反応域に炭酸ガスを吸収するハイドロタルサイトを置き、できてくる炭酸ガスを吸収します。それはまた脱着する必要があるので2つの塔を切り換える操作が必要です。この方法は400℃～500℃ぐらいでできます。

[合金膜分離による水素分離方法]

図11は三菱重工業(株)と東京ガス(株)が、町中の水素ステーション用に開発した方法です。これは、成形触媒が詰まった反応域にメタンと水が入り、CO₂は透過せず水素を良く透過

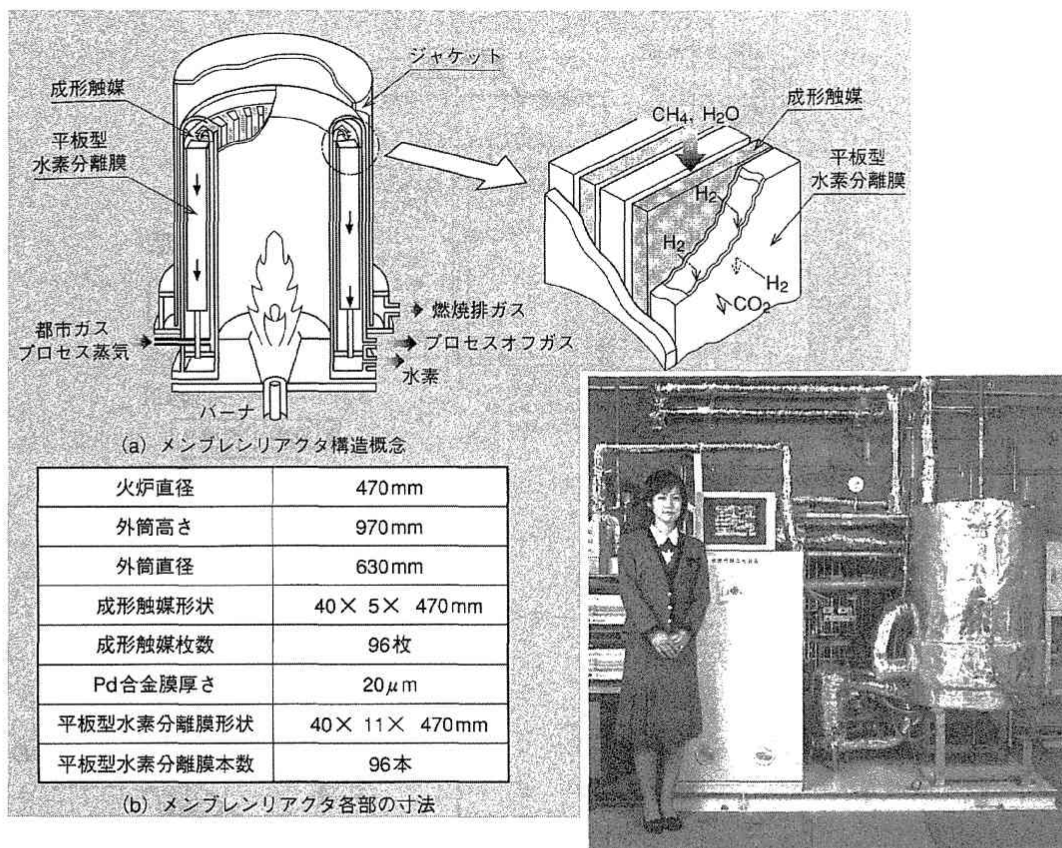


(出所：米APCI)

図10 エアプロダクツ社のSER実験ユニット

するパラジウム合金膜で水素を分離します。これによって、低い温度でも反応が進みます。今行っている試験では熱は都市ガスで供給しています。この熱を原子炉から供給すればどうかという話です。

図11右下には東京ガス(株)でテストしている水素ステーション用のメンブレン型水素製造



(出所：三菱重工技報 VOL.38 NO.5 2001)

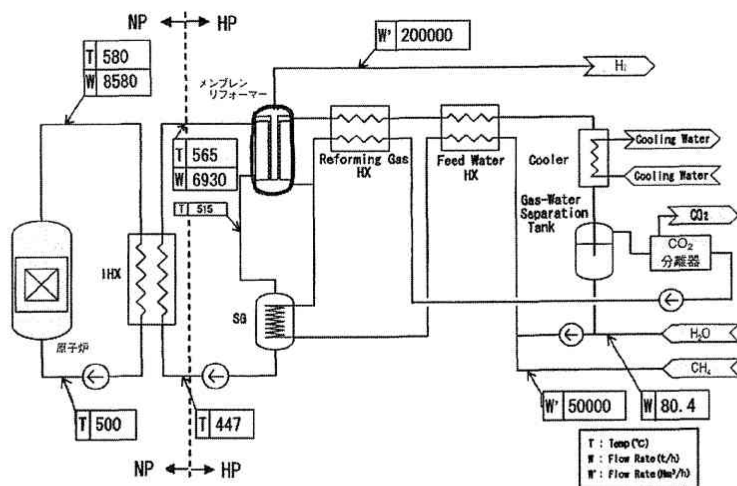
図11 メンブレンリアクタ構造概念と試験中ユニットの外観

ユニットの外観も示しましたが、非常にコンパクトです。今までの水蒸気改質法は改質器、シフト反応器、さらにプレッシャスイング (PSA) という水素を脱着させるところがありましたが、それをパラジウムのメンブレンリフォーマー1本でできるのでコンパクトになったのです。既に数千時間テストしてしまし、膜を通して水素を得るので非常に純度の高いファイブ・ナイン (99.999%) の水素ができ、そのまま燃料電池車に供給できるというタイプです。

図12は、この原理を応用したプラントです。三菱重工業と東京ガスが共同で設計し、昨年11月のANS (American Nuclear Society) 冬季

会合で発表したものです。この場合は、ナトリウム冷却の高速炉を使い、最高565℃の温度のメンブレンリフォーマーに天然ガス (メタン)、水蒸気を入れ、メンブレンから水素を採っていく方法です。

この方法のもう1つの鍵は、普通はワンスルーで捨ててしまう反応生成物の炭酸ガスなどをリサイクルしているところです。メンブレンリフォーマーの出口で必ずしも100%の水素を採る必要がなくなってくるので、リフォーマーの管の拡散に必要な面積が小さくできること。それから、窒素が混じった燃焼後の状態からのCO₂分離ではないので、分離プロセスがより楽になるわけです。また、将来



2001. 11. 13 ANS WINTER MEETING 14

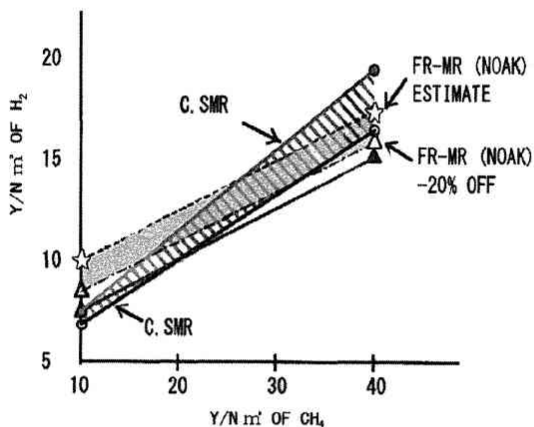
(出所: 新型炉技術開発㈱)

図12 高速炉とメインブレンリフォーマー (FR-MR) を組み合わせたシステム

必要があれば分離後のCO₂を処分できます。

例えば、熱量240MWtという非常に小さなプラントでも、1基で燃料電池車180万台分の燃料が供給できます。要するに、原子炉は脇役で熱だけを供給します。その熱量は天然ガスの熱量の20%程度ですが、それによって炭酸ガスの排出を抑制する特徴を持ちます。原子力プラントと化学プラントが複合したプラントになりますので、原子力を地下立地で地上に水素プラントを置くという図も描けます。

このプラントでのコストを推定したものが図13です。横軸に天然ガスの値段を取り、縦軸に水素の値段を取りますと、濃い斜線の部分 (C.SMR) が従来の化石燃料水蒸気改質法による値段で、薄い網掛けの部分 (FR-MR) が高速炉を使用した水蒸気改質法の値段です。下の線 (▲—▲) は、さらに将来の技術改良によるコストダウン (20%) を考えた値段です。いずれも多数機導入ケース (NOAK) で計算しています。この図では天然ガスの値段が30円近辺でクロスしており、天然ガスの値



(出所: 新型炉技術開発㈱)

図13 FR-MRシステムの経済性評価

段が高ければ高いほど原子力を使用する方法が有利になってくることを示しています。

以上の原子力による水素生産方法を総括すると、原料は水か化石燃料、原子力のエネルギーは電気か熱 (高温または中温)、方法は電気分解か熱化学分解か水蒸気改質となり、これらの方法の技術の現状、生産効率、コストなどを表5にまとめました。

表5 主な原子力水素生産方法

使用原料	供給原子力エネルギー		水素製造方法		組み合わせ技術の現状	効率 (コスト ^{*4})
	エネルギー	発電効率 温度レベル ^{*1}				
水	電気	30%~50% [発電効率]	電気分解法	アルカリ水	実用	25~45% ^{*2} (2.5)
				固体高分子	実証	
				固体酸化物	研究	
	熱	高温 (高温ガス炉) (高温 LM 炉)	熱化学法	I-S 法	研究	約 50% ^{*2} (1.5)
UT-3 法				研究		
水蒸気改質法			高温法	開発	17% ^{*3} (0.9)	
			SER 法	開発		
化石燃料水		中温 (Na 高速炉)	膜分離法	開発		

*1 高温=800~1000℃、中温=450~600℃

*2 原子炉の発電量に対する生成した水素の熱量の割合

*3 生成水素熱量の中に占める原子力熱の割合

*4 コストは化石燃料燃焼水蒸気改質法に対する比価格(原研試算)

原子力による水素生産実現への課題

原子力の水素生産の実用化までにまだかなりの課題があります。以下、いくつかの課題についてお話しします。

① 経済性

今一般に使われていて最も安いといわれる化石燃料燃焼水蒸気改質法(天然ガスベース)を1として、高温ガス炉を利用した場合のコストを原研が試算しています。それによりますと、原子力を利用した場合、改質法だけが0.9で競合できますが、熱化学法が1.5、電気分解だと2.5倍のコストになっています。ただ、化石燃料燃焼水蒸気改質法は炭酸ガスが出てくるので、将来の環境影響を考慮して炭酸ガスの処理費用をベースのコストに上乗せしますと、熱化学法が0.7、改質法が0.8、電気分解法が1.1となり、競合できるところに近づいてきます。

② 生産規模

燃料電池戦略研究会が計算した車の燃費のデータをもとに計算すると、100万kWeの原子

力発電所で電気分解で水素生産した場合、1基で200万台の燃料電池車に水素を供給できます。2020年に500万台ですので、100万kWeの原子力発電所2.5基で2020年の需要は賄えます。さらにもっと効率のいい熱化学法、あるいは水蒸気改質法を使いますともっと小さな炉でできる。逆に言うと、水素を配るインフラができていない場合は小型炉の方が有利ということです。

③ 持続的大量供給の条件

今の電力需要を満たすだけでも、世界規模で考えますと高速増殖炉(FBR)による増殖・リサイクルが必要です。今のままのワンスルーでは2070年ぐらいには陸上ウランを使い切る計算になります。世界的なリサイクルへの移行は、熱中性子炉からFBRへのタイムリーな移行によって可能になります。実際にLWRとFBRの核分裂物質のインベントリーが大分違いますので、FBRをどんどん導入する時は燃料である核分裂物質が不足することが考えられます。このつなぎを考えて移行すれば、電力と水素生産のエネルギーの原子力による供給は量的には十分足りることになります。

④ 生産プラントの安全性

電気分解法だと需要先、例えば水素ステーションで電気分解すればいいわけです。その場合、それぞれのプラントの安全性の確保ですから既存技術で足ります。問題は、原子炉と化学プラントの複合プラントの場合です。これもプロセスによっていろいろ違いますが、基本的には中間系統を設ける、両系統の直接的な相互作用を回避する、あるいは場所的に配管を長くして離すとかの設計対応が考えられます。この場合も、連結部分を通してエネルギー的、機械的、物質的な相互作用の安全性に与える影響について検討しておく必要があるでしょう。例えば、原子炉のできるトリチウムは配管を通して移行するので、この量について確認しておかなければなりません。

⑤ 社会的な受容性

2001年10月8日のフィナンシャル・タイムズ社発行の“Power in Europe”誌で“Nuclear and hydrogen - 21st century dream team or PR disaster?”(「原子力と水素は夢の取り合わせか、それともPRで大失敗か?」)というタイトルで、原子力と水素が結合した場合、ベネフィット、リスク、コストという点では、21世紀のドリームチームだと言っています。しかし、一般大衆にどう受け入れてもらうか、社会的な受容性をこれからどうやっていくかということが重要だと指摘しています。

元アメリカ原子力学会長アラン・ウォルター氏がまとめた論文にありますが、水素が移動用や定置用の燃料電池の燃料(エネルギーキャリア)として受け入れられるとしても、原子力も受け入れてもらうという、やはりベネフィット、リスク、コストをきちんと社会に示して理解を得るということ、全関係者による討論決定のプロセスをかなり早い時期

からとっていく必要があるということです。

⑥ 開発パートナーとなる業界

開発パートナーとしてはどういう業界が実際に考えられるか。今、研究会にも化学プラントの方、石油の方、ガス会社の方が入っています。こういう複合プラントの場合には、そういう関連業界の方が参加して、実際に協働的、あるいは共生的な取り組みが必要だと思います。また、ユーザー等からのいろんな要望もどんどん受け入れていく必要があると考えます。

おわりに

最後に、実用化の見通しについてです。我々の研究会でいろいろ議論していること、あるいは実際に研究開発している原研など、他の人からの話も聞いてまとめたものです。

現段階では、軽水炉による電解法が技術的に実用レベルにありますので、オフピークの電力が安いとか、原子力発電比率が非常に高いという場合は、実用化が現在でも可能だと思います。

2010年代までの中期では、高温ガス炉の実用化によって水蒸気改質法と高温水蒸気電解が可能になると思います。もし中温の水蒸気改質反応が実用化できれば、ナトリウム冷却炉の利用も可能になってきます。

2020年代までの長期では、高温ガス炉と熱化学法の組み合わせが実用化すると期待されます。以上です。(拍手)

総括と閉会挨拶

稲葉 裕俊 (財エネルギー総合工学研究所
専務理事)

皆様、本日は朝から長時間にわたりまして私どもの第19回エネルギー総合工学シンポジウムを熱心にご聴取いただき誠にありがとうございました。

今回は「新世紀の原子力エネルギー利用—これからの原子力開発に必要なもの」をテーマに開催させていただきましたところ、350名を超える多数の方々のご参加をいただきました。

プログラムに沿って冒頭の東京大学近藤教授の基調講演、「わが国における原子力開発利用は何を目指すべきか」から、ただいまの原子力システム研究懇話会の堀様の「原子力の水素生産への利用」まで6件のご講演をお聴きいただきました。本日のシンポジウムのテーマである「これからの原子力開発に必要なもの」につきまして、総合エネルギー政策、科学技術政策、また技術と社会との関わりの視点からのお話、電力自由化の流れの中での対応、そして技術開発にわたる広範なお話をお伺いすることができました。いずれのご講演も大変興味深く、多くの示唆に富んだ誠に有意義なものであったと存じます。講師の方々に深く感謝申し上げる次第です。

21世紀という新しい世紀においてエネルギーセキュリティの確保、地球環境問題への対応が一層重要になり、原子力への期待がますます高まってきておりますが、電力自由化の進展、コスト削減への要請の強まり、依然として難航する原子力発電所の立地地域での問題と国民的合意形成の必要性、さらには原子力の研究開発利用において世界のトップランナーであるわが国への期待の増大などから、原子力をめぐって取り組むべき課題はますます複雑かつ難しくなっており、関係者の一層の戦略的な対応が望まれております。

私どもエネルギー総合工学研究所におきましてこうした中、原子力分野における昨今の調査研究テーマとして、2050年、あるいは21世紀の末までを見通しつつ原子力開発への期待や高速増殖炉などの次世代炉の位置づけなどを明らかにしながら、原子力技術開発の戦略づくりに取り組んでおります。また、今後の原子力開発上の最重要課題であります高レベル放射性廃棄物の処分をめぐる技術、制度、社会的受容などの多面的な調査に加えまして、革新的な原子力技術開発への支援や、商業炉

の廃止措置や安全確保に係る調査研究など、短期から中長期にわたるテーマを国際的な視点にも立ちつつ実施いたしてきているところです。

こうした調査研究を通じて多くの難題が横たわる原子力の課題に今後も積極的に取り組み、お役に立つ成果を提示してまいりたいと考えております。

時間もまいりました。本日のシンポジウムが予定どおり日程を終えることができたが、これもひとえに会場の皆様のご協力のおかげと改めて厚く御礼を申し上げます。また、本日のシンポジウムの内容が今後の皆様方の事業活動や研究活動のご参考の一助になれば大変幸いと思う次第であります。

最後に、私ども研究所の運営に対しまして皆様方の一層のご支援ご協力のほどお願い申し上げまして、第19回エネルギー総合工学シンポジウムを閉会とさせていただきます。本日は誠にありがとうございました。

◆ 行 事 案 内 ◆

第2回高効率廃棄物発電技術に関するセミナー — 高度循環型社会の構築と先進的廃棄物発電の普及を目指して — 「高効率小規模ごみ発電への期待」

主催：新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）
財団法人 エネルギー総合工学研究所

《講演》「新エネ法と廃棄物発電への期待」

総合資源エネルギー調査会 新エネルギー部会長（東京農工大学大学院教授） 柏木 孝夫

《講演》「廃棄物処理の評価学（LCA）とリサイクル社会の課題」

岡山大学教授 北海道大学客員教授 田中 勝

《講演》「リサイクル社会における循環エネルギー」

名古屋大学大学院工学研究科教授 武田 邦彦

《発表》「高効率廃棄物ガス変換（ガス化改質）発電技術の開発状況について」

廃棄物処理施設メーカー各社等

《パネルディスカッション》「循環型社会と廃棄物発電」

パネリスト：立命館大学エコ・テクノロジー研究センター長、京都大学名誉教授 平岡 正勝
福岡大学工学部教授、北九州産学連携推進室長 長田 純夫
他数名の先生方

《ポスターセッション》

廃棄物ガス変換発電技術等について、メーカー（約15社）によるポスターセッションを併設いたします。

日 時：平成14年12月12日（木） 9：40～17：30

会 場：abc会館ホール（東京都港区芝公園2丁目6-3）

参 加 費：無料

その他：プログラム内容は変更になる場合がありますのでご了承ください。

問合せ先：（財）エネルギー総合工学研究所 廃棄物発電セミナー事務局
〒105-0003 東京都港区西新橋1-14-2
電 話：03-3508-8894/FAX：03-3501-1735
担 当：浅見（あさみ）、阿閉（あとじ）
メール：gomihatu@iae.or.jp

※備考：本セミナーは、昨年の第1回セミナー（11月）に続き、開催するものです。

第2回高効率廃棄物発電技術に関するセミナー 申し込み用紙

氏 名	
勤務先および所属	
勤務先住所	(〒 —)
電 話 番 号	
F A X 番 号	
メールアドレス	
受 付 番 号 (事務局記入)	

- 申し込みは、次のいずれかの方法でお願いいたします。
(1) 本ページをコピーし、FAXにて送信 (2) E-mailにて送信
- 参加申し込みの方には、受付手続きの後、本紙を折り返しFAXまたはE-mailさせていただきます。セミナー当日、受付にお持ちいただきますようお願いいたします。
- 申し込み者多数の場合、参加をお断りする場合がございます。ご了承ください。(定員400名)
- 複数で参加される場合、お手数ですが必要数コピーの上、ご送付ください。

〔送付先〕

財団法人 エネルギー総合工学研究所 廃棄物発電セミナー事務局
 〒105-0003 東京都港区西新橋1-14-2
 担当：阿閉（あとじ）宛
 FAX番号：03-3501-1735
 E-mail：gomihatu@iae.or.jp

申し込み期限：11月29日（金）

研究所のうごき

(平成14年7月2日～9月30日)

◇ 第14回評議員会

日 時：7月10日(水) 11:00～12:00

場 所：経団連会館(9階) 902号室

議 題：

- 第一号議案 役員の一部改選について
- 第二号議案 評議員の一部交替について
- 第三号議案 平成13年度事業報告書および決算報告書について
- 第四号議案 その他

◇ 第8回賛助会員会議

日 時：9月20日(金) 16:00～19:00

場 所：経団連会館(9階) クリスタルルーム

議事次第：

- 1. 平成13年度事業報告および収支決算
- 2. 平成14年度事業計画および収支予算
- 3. 講演
「水素エネルギーを巡る最近の動向
ー燃料電池自動車の市場投入を間近に控えてー」
(財団法人エネルギー総合工学研究所
WE-NETセンター プロジェクトマネージャ
ー 福田健三)

◇ 月例研究会

第204回月例研究会

日 時：8月30日(金) 14:00～16:00

場 所：航空会館7階 702・703会議室

テーマ：

- 1. 風力発電電力系統安定化等調査
(財)電力中央研究所 狛江研究所 需要家システム部 上席研究員 兼 東京工業大学 電気電子工学専攻 客員教授 七原俊也 氏)
- 2. 蓄電池併設風力発電導入可能性調査
(財)電力中央研究所 CS推進室 部長 市川建美 氏
(財)エネルギー総合工学研究所 プロジェクト試験研究部 主任研究員 藤田光一)

第205回月例研究会

日 時：9月27日(金) 14:00～16:00

場 所：航空会館7階 702・703会議室

テーマ：

- 1. 地球環境問題を巡る国内外の情勢について
(経済産業省 産業技術環境局 環境政策課 課長補佐 菊川人吾 氏)
- 2. 平成15年度エネルギー関連予算の概要とその背景

◇ 主なできごと

- 7月8日(月) ・第1回WE-NETタスク2安全対策に関する調査・研究委員会
- 11日(木) ・第1回天然ガス供給インフラ整備研究会
- 16日(火) ・第4回高効率発電技術検討会
- 17日(水) ・第1回エネルギー経済環境予測検討委員会
- 22日(月) ・第1回原子炉総合数値解析システム実用化検討委員会
- 25日(木) ・第1回新電力ネットワークシステム研究会
- 26日(金) ・第1回次世代の原子力技術開発の方針策定に関する調査検討委員会
- 30日(火) ・第2回WE-NET革新的・先導的技術に関する調査・研究委員会
- 8月6日(火) ・第1回高性能蓄熱材料による熱搬送・利用システム検討委員会
- 8月8日(木) ・第1回新システム技術評価分科会
- 8日(木) ・第1回マイクロコージェネレーション検討委員会
- 19日(月) ・第1回高効率発電技術開発検討WG
- 9月2日(月) ・第1回高効率廃棄物ガス変換発電技術開発導入調査幹事会
- 10日(火) ・第7回革新的実用原子力技術開発提案公募審査委員会
- 11日(水) ・第2回高効率発電技術開発検討WG
- 17日(火) ・第2回高速増殖炉利用システム開発調査検討委員会
- 18日(木) ・第2回新システム技術評価分科会
- 18日(木) ・第3回高効率発電技術開発検討WG
- 18日(木) ・第1回水島コンビナート省エネルギー調査委員会

◇ 人事異動

○8月9日付

(出向解除)

尾形 圭史 プロジェクト試験研究部 主任研究員

○8月10日付

(出向採用)

曾ヶ端賢治 プロジェクト試験研究部 主管研究員

編集後記

本号は、本年7月に開催しましたシンポジウム特集号であります。

今日までたった約3ヶ月しか経っていないのにこの間何と大きな問題、事件が多発したことでしょう。歴史的「日朝首脳会談」開催、「小柴昌俊氏と田中耕一氏のノーベル賞ダブル受賞」、「第2回国連地球サミット」開催、「内閣改造」、そして「原子力発電所における（点検・補修作業に係わる）問題発生」等々であります。

本号の主題が「新世紀の原子力エネルギー利用—これからの原子力開発に必要なもの—」というテーマであっただけに、この間の情勢変化、特に最後に掲げた「原子力発電所における問題発生」が誠に残念であります。

多分、同シンポジウムで講演いただいた講師の先生方はもとより当日の出席者、さらにはエネルギーに多少とも関係・関心を持たれる方々も同じような思いで上述問題の推移を息を潜めて見つめてこられたと思います。そのような中であって特に東京大学近藤駿介教授は、経済産業省の諮問機関（総合

資源エネルギー調査会）内に設けられた専門委員会（原子力安全規制法制検討小委員会）の委員長として、また東京電力榎本聡明副社長（当時）は問題が発生した部門の長として、それぞれ立場は異なりながら同問題の対処に非常に多忙でかつ心身ともに厳しい時期を迎えておられたと想像いたしますが、共に今回の季報刊行のための講演記録のレビューを真摯かつ熱心に行なっていただきました。

世の中はどのように変わることになるろうとも、日本におけるエネルギー政策上の原子力の意義をしっかりと見据えた上で、今語るべきことを手を抜かないで語るというお二人の姿勢を拝見し、事務局としては少なからぬ感銘を受けました。

原子力は正しく今嵐の中にあるようですが、徒に案じすぎないで我が国のエネルギー政策の現在と将来を静かに考える際の1つの材料として小誌をご利用されることを願ってここにお届けいたします。

編集責任者 小川紀一郎

季報 エネルギー総合工学 第25巻第 3 号

平成14年10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 4

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

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

(印刷) 和光堂印刷株式会社

無断転載を禁じます。