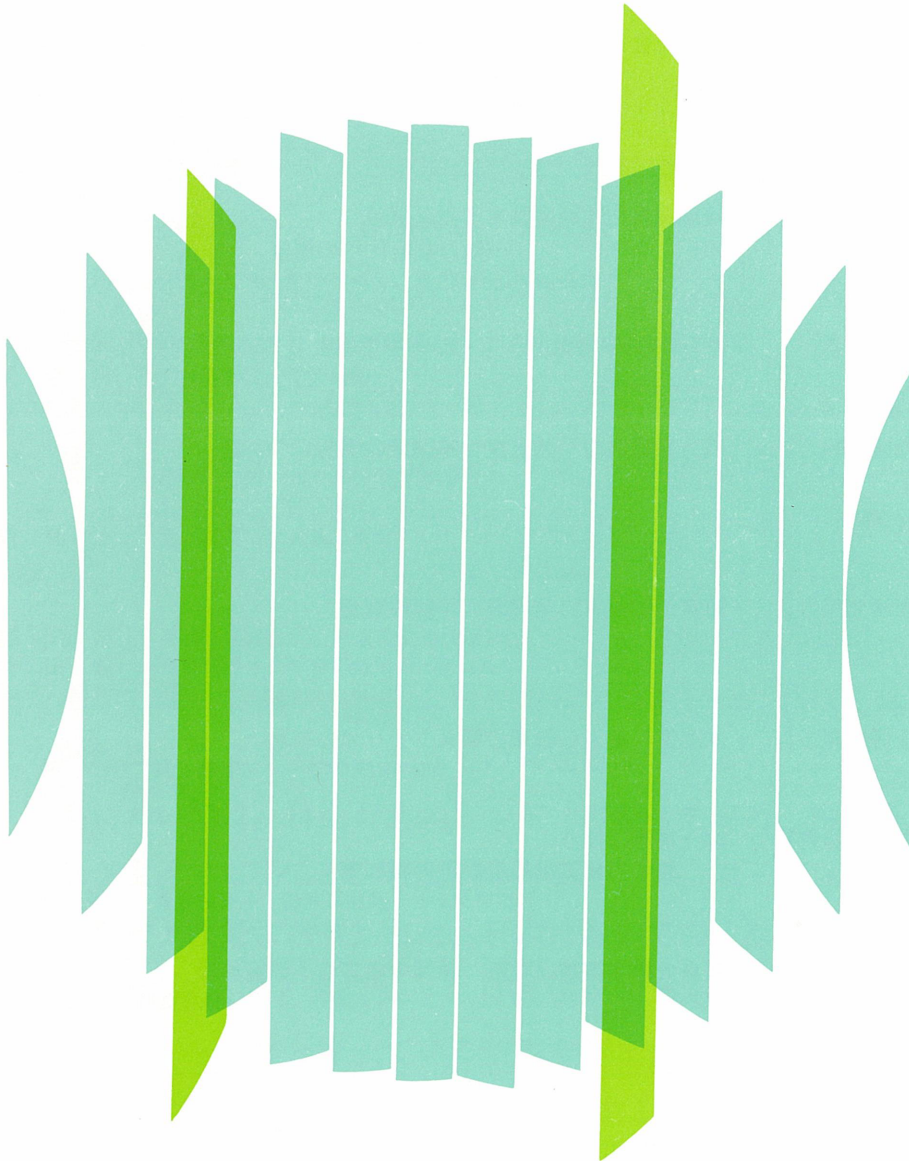


季報 エネルギー総合工学

Vol. 25 No. 4 2003. 1.



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

目 次

【巻頭言】	地球環境問題と電気事業	関西電力㈱ 取締役副社長	佐 藤 和 夫 …1
【対談】	脳化社会とエネルギー・環境問題を考える —『人間科学』の視点から—	北里大学教授 (財)エネルギー総合工学研究所 理事長	養 老 孟 司 秋 山 守 …3
【寄稿】	地球温暖化問題の動きと将来展望 —新たな時代への展望—	Climate Experts 代表 シニアリサーチフェロー	松 尾 直 樹 …23
【寄稿】	燃料DMEの特徴とディーゼル新燃料としての利用	茨城大学 工学部教授	梶 谷 修 一 …32
【調査研究報告】	風力発電電力系統安定化等調査の概要について	(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 東京工業大学 客員教授	七 原 俊 也 …42
【調査研究報告】	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 プロジェクト試験研究部 主任研究員	市 川 建 美 藤 田 光 一 …58
【調査研究報告】	水素燃料電池自動車の導入シナリオの検討	WE-NETセンター 主管研究員	小 林 紀 …73
【調査研究報告】	廃止措置に伴う 原子力発電供給量低下の緩和策について	元プロジェクト試験研究部 主管研究員	佐 藤 正 明 …88
【訪問記】	東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設	IAE女性研究員取材チーム	… 98
【研究所の動き】			106
【編集後記】			108

巻頭言

地球環境問題と電気事業

関西電力(株)

取締役副社長 佐藤 和 夫



2002年8月26日～9月4日、南アフリカのヨハネスブルグで持続可能な開発に関する世界サミットが開催され、地球環境保全として取り組むべき各国の指針となる「実施計画」が採択された。京都議定書の取り扱いについては、米国、オーストラリアの反対により、「地球温暖化対策の世界共通ルール」との日本およびEUの主張から、「議定書の発行に向けてのタイムリーな締結を強く求める」とする妥協案に留まったが、サミット会期中の中国の批准とロシアの批准意向の表明により、地球温暖化対策に対する重要性が再認識されたことは、一定の成果であろう。

その背景には、世界の1次エネルギー、とりわけ化石エネルギーの消費量が増加し続けており、早期に取り組みを開始しなければ、地球温暖化の抑制はますます困難になるとの共通認識があることが考えられる。欧州においては、再生可能エネルギーの割合を高め、脱原子力を図る流れが主流ではあるが、現実的な対策として、原子力以外の取り組みは未だ途上段階にあり、また、日本においても、温室効果ガスの排出量を1990年比で6%削減との目標値が定められてはいるが、2000年時点で既に8%増となっている現実を踏まえると、目標達成には個人の自覚と社会全体の相当な努力が必要である。

こうした状況のなか、国内の1次エネルギー消費量の約4割を占め

る電気事業は、温暖化対策に関して非常に重要な責務を負っている。電力会社は2度にわたるオイルショックの教訓から、低廉な電気の安定供給を前提として、脱石油・原子力の導入を推進し、結果として、温室効果ガス排出削減に寄与してきた。目標を達成していくには、グリーン電力基金を利用した太陽光や風力などの再生可能エネルギーの開発・普及や省エネルギーに係る1人1人の生活習慣改善に関する意識普及活動などが挙げられるが、当面、原子力がエネルギー供給の中心となることは明かである。最近の原子力発電所の自主点検に端を発する問題に関して、社会的信頼を低下させることとなったことは大変残念なことであり、原子力、更には電気事業に対する信頼を回復していくことが、エネルギー事業に携わる者の社会的責務であると強く認識しているところである。

脳化社会とエネルギー・環境問題を考える

— 『人間科学』の視点から —

養 老 孟 司 (北里大学教授)

秋 山 守 (財団法人エネルギー総合工学研究所
理事長)



はじめに

秋山 今日のお話の進め方ですが、導入部といたしまして、先生が解剖学、脳研究と幅広くご研究なさった、あるいは教育の面でご活躍になってこられました理由や背景を簡単にお話させていただきたいと思います。

特に最近『人間科学』という本をお出しに

養老孟司氏 略歴

1937年(昭和12年)神奈川県鎌倉市生まれ。1962年東京大学医学部卒業。インターンの後、解剖学教室に入り、以後解剖学を専攻。医学博士。1981年東京大学医学部教授。1995年に退官。現在、東京大学名誉教授。北里大学教授。

著書は『ヒトの見方』『からだの見方』『解剖学教室へようこそ』『考えるヒト』(筑摩書房)、『唯脳論』(青土社、ちくま学芸文庫)、『臨床読書日記』(文芸春秋)、『カミとヒトの解剖学』(法蔵館、ちくま学芸文庫)、『身体の文学史』(新潮社)、『脳と自然と日本』(白日社)、『人間科学』(筑摩書房)他多数。

なって、さらにご研究を深めておられる動機、ご熱意をお聞かせ下さい。

養老 医学部というのは、要するに臨床医を育てることが基本と認識していて、医学の基礎を研究する人は1割もいないんですね。私の卒業の頃に、インターンで1年間病院で実習することになっていました。医者でも学生でもないという奇妙な立場だったんですね。

そのインターンを意外にまじめにやりまして、一番思ったのは、とにかく何人患者を殺すかわからないということです。当時の病院というのは人の死ぬ所でした。特に東大医学部の場合は、よそで見放された患者さんが入ってくるという感じがかなりあったんです。もう1つ、心臓外科みたいに当時の最先端医療に手をつけておまして、そういうところで大勢の患者さんが亡くなるんですね。私はそれが恐かったんです。今年の医学部の同窓会では、医療過誤が話題になったんですね。それを聞いていて私は、「何を今頃」と思ったんです。私が病院にいた頃は、言ってみれば医療過誤だらけで、これじゃとても医者やってられないなと思っていました。

それで、自分としてはもう少し勉強させてもらいたいと思ったわけです。それで基礎医学を勉強し直したら、精神科の医者をやってみようかなと思ったんです。というのは、精神科のお医者さんというのは大体患者さんを殺さないで済むかなと思ったんです。ところが、大学院の定員があって、くじを引いたら外れた。

それで、それじゃあということで解剖学を勉強することにしました。医学部に入るときにまずやるのが解剖なんです、それがち



養老 孟司氏

(北里大学教授)

っともわかっていないと思っていたから、初めからやり直すにはいいと思いました。それを勉強し始めたら、そのまま一生過ぎちゃったというだけのことなんですね。医者のならそびれですけどね。

秋山 それで、脳のご研究は解剖とつながる話でしょうか。

養老 その頃から先程申しましたように、精神科には興味があったんです。それで、大学院で解剖学教室に行っている間も脇で精神科の勉強をしていました。そうしながら、長年解剖をやっているうちに、相手は死体ですから、「これは何だ」ということを誰でも考えると思うんですね。自分の前にある死人とは何だと。私は何かそれが気になっていろいろ考えたんです。

結論として、死んだ人は基本的には自分とどこも変わらない。物質的に言えばほとんど同じです。ただ違うのは相手は脳が働いていないということです。

もう少し別な言い方をしますと、解剖という仕事は他の仕事とどこが違うかということ、目の前で起こっていることが、全部私がやっ

たことの結果だということです。長い場合、3カ月ぐらいかかるんですが、解剖を途中までやって、帰って、次の日に来たって、きのう帰ったときの状態です。それで、しばらくやっていると、例えば腕が外れて足が外れて内臓が出てとか、そういう姿になる。ある日ふっと気がつくとならばらになっている。何でこんなになったんだというと、全部おまえがやったことだよという答えが返ってくる。そういう仕事って非常に少ないんだと思うんです。

秋山 例えば、ピル解体業の人の対象物は人工的な構造物です。先生の対象は人間ではない有機物であって、生きている人間との決定的な違いは、個性がない、高度な精神活動もしていないということですね。

養老 そうですね。他の仕事は相手の状態が勝手に変わるんですよ。生きた患者さんを扱っていれば、相手の状況が良くなったり悪くなったりします。だけど、必ずしも自分がやった結果が出ているとは限らないわけです。ところが解剖の場合だけは、起こっていることは全部自分のせいなんです。

今おっしゃった、人工物であるか有機物であるかということは大きい違いだと思います。というのは、死体には同じものはないわけで、必ず違うわけです。もう一つ、ばらしていきますと素材が出てくるんですけど、素材もちゃんと生き物としてあるんです。つまり顕微鏡で見ても細胞が見えたりするわけです。構造が見える。

人間としての動きは止まっているけれども、ただある程度のルールがそこに残っているわけです。血管、神経、結合組織、脂肪という違いはちゃんと出ています。そして実際に解剖するとき、根本的に固いところはメスで切

りますけど、あとは全部ピンセットでやっていくわけです。なぜかという、ピンセットでしごいていきますと、力学的に軟らかいところへピンセットが入っていきます。そうすると、自然に硬い構造と硬い構造の間にある軟らかいところだけが外れていく。そこに何か形があらわれてくるわけです。ピンセットで解剖を進めているうちに、どういうルールが、場所場所であるかが見えてくるんですね。例えば神経なんか相当細かいところまで追えるんですよ。で、非常に慣れてきますと、今度はじっと見ただけでどこに神経が走っているか見えるようになる。

『人間科学』について

秋山 先生が先頃出された『人間科学』（筑摩書房、2002年4月25日）というご本を面白く読ませていただきました。私どもの分野はエネルギー、環境が対象ですが、そこで仕事をしていますと、より安全とか安心ということを含めまして、人間のこれからの在り方とか、人間は何を期待しているとか、またうれしい、悲しいというようなことを含めて、人工物と人間をトータルに考えていくという方向に時代が変わりつつあります。その意味でも、先生のご研究は大変参考になります。

また、情報技術の進展が非常に速くなった一方で、21世紀になって特に犯罪、そしてテロの問題など、人間の悪い部分が大きく顕在化している状況になってきております。そのような現状があり、かつ興味深いものがありますので、同書のポイントを教えていただきたいと思います。

人間性を重視すべき医学教育

養老 まず第一に、その背景的なところから紹介しますと、私は医学を一体どう考えたらいいのかが非常に悩んだんです。

というのは、医学は自然科学だという医者が9割なんです。ところが、恐らく工学系の人から見たら、あれはとても自然科学ではない。物理科学ではないですよ。じゃあ生物学かといっても、それとも違う。なぜなら医学には価値観が入っています。それはできるだけ消去するようにはしているけれども、いわゆる典型的な科学的な考え方をする東大病院というのは、患者さんには人気がないですね。つまり、私は患者さんが要求しているのはそういうものではないなといつも感じていたわけです。

ところが、大学の中の価値観は研究者の価値観ですから、例えば、どれだけいい仕事をするか、どれだけいい論文を書くかという話に自然になっているんですね。そうすると、医者を育てるといって医学部がやっている教育は、極端に言うとう嘘じゃないかと思いました。授業で教えることは、基本的には全部自然科学的なことだけです。それなら東大医学部は研究者を養成するような学校に変えてほしいと私は思うんです。例えば、医学概論とか生命倫理みたいなことは一切なかったですし、医学史すらほとんどやらなかったですから。そういう社会の中ではある特定の価値観、自然科学的な価値観が非常に強くなっていく。それは患者さんの臨床の場面と徹底的に食い違うことは明らかなんですね。徹底的に客観的になろうとすれば、患者さんに対する態度



とは大分違ってきてしまうし、1人の人間が2つの価値観を合せ持って研究と医療行為を行うなんてそんな器用なことができるのかなと思いますね。

歴史に根付いた普遍的ものの見方を 重視する欧米の教育

養老 それでいろいろ悩んでいて、最終的に日本人が科学をやるときの基本的な立場というか、普遍性って何だろうと思ったんです。で、多少ヨーロッパの科学の歴史を勉強すればすぐわかることですが、やっぱり科学はキリスト教というものに何らかの意味で結びついている。ある意味では裏腹になっている。しかし、同時に、両者が欠点を補い合うような形で動いているものですから、ニュートンなどは自分が発見した法則は神様が宇宙に置いた法則だと思っているわけです。そうすると、そういう動機がない日本人が宇宙の法則なんか考えるだろうかということになるわけですね。

要するに、その仕事を西洋人が進めるということはいいかもしれないけれども、日本人

にとっては、ある意味でそれは何か借り物ですよね。内発したものではない。日本の学問は、西洋の学問に比べてある種の普遍性に乏しい気がする。今度はシステムとして科学を追ってしまうわけです。だから、外国に行くと普遍的な考え方に触れるので業績が上がる。やはり科学は社会的な行為だと思っんですね。日本がいわゆる西洋の科学には不適切な環境であることは明らかです。それは多分、社会そのものが大分違う、価値観とかが違うからでしょう。

日本から世界に発信したい普遍的考え —人間科学

養老 では、日本人が世界に向かって普遍性を主張するとしたらどんな普遍性があるのか。そうすると、「人間ならこうでしょう」ということが1つの普遍性ですよね。それは同時に西洋人も認める普遍性です。なぜなら、世界中どこへ行っても、この原則が通じなければおかしい。

アメリカ人は自由平等、フランス人は自由・博愛・平等、人権とか言う。それは神様と聖書とか長い歴史が結びついているんですけども、日本は日本で、「人間ならこうでしょう」ということが普遍性になる。その「人間ならこうでしょう」ということを、現代風に言うと『人間科学』になったわけです。

医学、生物学への問いかけでもある人間科学

養老 私は医学が自然科学だという、その常識はいいかなと感じました。もしそうでないと言いたいのなら、そこで非常に悩むわけ

ですよ。つまり、「自然科学じゃないよ」と言ったら、「それじゃあ何なの」ということになる。そうすると、学問の基礎というのは普遍性をもっていなければならない。「その普遍性って何だろう」というところに話が至って、「それは神様じゃないの」ということになるわけですね。ごく素直に納得できるのは、「人間ならこうでしょう」という話ですよ。

「人間ならこうでしょう」ということは医学の基礎になり得るんです。なぜなら、まさに医学は人間を扱っているわけですから。そこで人間というものを規定しているものを考えると、現代の生物学ではどうしても脳と遺伝子という話になります。では、その2つから人間を説明していったときに、そこへ戻した説明は言わば普遍的な説明でしょうという話。そこから話を始めてはどうしていけないのだろうかという目で見ると生物学の歴史というのは実は生物を情報として見る歴史だったのではないかという、私なりの結論が出ました。それはいわゆる物質的に見る科学と思われていたものとはちょっと違うんじゃないかと思います。だから生物学プロパーのルールというのは自然選択説にしても、ヘッケルの「個体発生は系統発生を繰り返す」にしても、メンデルの法則にしても、物理科学の法則でも何でもなく、それは情報の法則じゃないか、情報に関する経験則じゃないかと私は書いたんですね。そうすると、私なりに生物学というものが納得できるわけですね。

人間を科学する時の前提となるか 認識が実在かのテーゼ

秋山 詳しい御説明ありがとうございます。

それで、人間を科学することに情報が加わってきたという今のお話のもう一段前に、先生のご本の順序に従いますと、認識か実在かというテーゼがあったように思うんですね。我々が認識し、判断するのは、結局のところ我々の主観であって、客体が実在するかどうかというあたりの議論は、我々が考える範囲では何となく自己矛盾というか、限界があるということのようにも見えました。人間と外界を視野に入れて認識とか実在という言葉を読むときの概念規定を明確にすることが必要になるのでしょうかね。

物体と現象は実在

養老 実は、『人間科学』にはその部分は書いてないんです。『人間科学』の前に出した『考えるヒト』（筑摩書房）に書きました。私も実在というのが非常に気になって、次のように説明したんです。まず、誰でも素朴に実在だと思ふものが物体です。物です。そうすると、哲学的定義ではなくて脳の方から定義しますと、脳にとって物体とは五感から入るものなんです。例えば、私が今握っているコップがなぜ物体かという、五感のすべてに訴える性質をもっているからです。目、耳、触覚でとらえられて、重さの感覚があり、冷たい、温かいがあつて、肌の感じがある、つるつるとかざらざらとか。そして、何らかの味があつて、匂いがある。我々は暗黙のうちに、そういうものがあればそれを物体と言う。

秋山 今「我々」とおっしゃいましたが、コップを握っておられるのが養老先生としての個体です。私もそれがコップであると認識してはいるのですが、極めて厳密に言いますと、



秋山 守氏

（財）エネルギー総合工学研究所
理事長

それを確認しているのは1人1人の人間の範囲なんですね。それが同じ空間と時間を介して共有しているということで、実在とか実体というものは、デカルトではないんですけど、“我思う故に我あり”言い換えれば、“我思わざればなし”となって、つまりは自分の範囲ですよね。

しかし、自分が死んでも社会は多分継続していくと考えたときに、やはり自分の認識や主観を超えた〈客観〉ないしは〈客体〉があるとするとならえ方もできるのではないかと、とも思うんですね。

養老 いや、それは別にあってもいいんです。だけど、自分を超えた客観があると思つているのも私という主観なのですね。その形の無限循環になってきますから、そこは触れないでいいと私は思っています。むしろ、ごく素朴に我々が物が実在すると思つているのは、まず実際の物で五感から入るということが大事です。例えば、空や夕焼けというのは物体だとは思わない。なぜなら目にしか訴えない。音も物体ではない。そういうものは実在とい

う面からすると、一種はかないですね。空は毎回出るから別かも知れませんが、夕焼けにしろ、音にせよ、そういうものを普通は現象と言っていると思います。

行動を規制する概念も実在

養老 私は哲学的に厳密という意味ではなくて、ごく素朴な意味で一般の方がわかりやすいように考えれば、そういう物体の存在というものはまず第一の実在であろうということです。別な言い方をしますと、これをアクチュアリティ (actuality) と私は呼んでいます。アクチュアルなもの、具体的なものです。それに対して人間には第二の実在があるんですね。それはリアル (real) なものです。私はそれを真善美と訳しました。どうしてそういうふうにしたか説明します。脳は入出力系ですから、情報が入ってきて運動として出ていく。外界に対しては運動以外の出方はないんです。つまり骨格筋が動く以外に外界に対する働きかけがないわけです。そうすると、客観的に言うならば、実は入力があって出力がある。その出力に影響を与えるものはその人にとってすべて実在とみた方がいいんじゃないかというのが私のもう1つの考え方なんです。それは行動主義に非常に近いんです。例えば、「幽霊があるかないか」という議論をするわけですよ。外界に幽霊というものを想定するのは大変間違っているのです。すべては頭の中の話に決まってるんですから。真っ暗な墓場にいて向こうから白いものがやってきた時、急に起き上がって逃げ出して、墓石に蹴つまづいて転んで足を折ったとすると、その時、その人にとって幽霊は実在だというふうに私

は定義するわけです。どうしてそう定義できるかという、その人の行動からそれが客観的に分かるからです。

例えば、ここに机があるということを実在だと認めておられるかどうかはすぐわかるんです。なぜなら机におつかからないからです。おつかないように行動しているからです。つまり、その行動を規制するものがその人にとっての実在であると私は定義したわけです。そうすると行動を規制するものは物体に限らないということがあるんですね。「天皇陛下万歳」と叫んで鉄砲持って死んだ人がいる。さまざまな観念は実は実在です。

科学と哲学がくつついたような議論が起こったのは、外部的存在としての何らかの実在ということを考えたから、それは最終的には、物自体は死ぬことができないという話になります。

秋山 先生の定義された実在というものは、1つの理論としてわかる気がするんですが、例えば、仮に薬を飲んで意識が極めておかしくなつて机におつかった時に、その人にとって机が実在であるかないかという議論は今の先生の定義ですと別のことになるのですね。

養老 私は、実在というものを客観的なものに関する属性だという点からのみ考えるのは良くないと思っています。例えば、私、原理主義ってそういうところから発生すると思います。つまり、徹底的に実在観というものを強くしていくと、アラーが実在したり、正義が実在したりするようになります。じゃあ、「あんた寝てる時に正しいと思っているのかどうか」と聞かれたらどうするんだろうと思うんですね。つまり、自分が正しいとか正しく

ないとか思っているのは明らかに意識がある状態でのことです。しかし、人生の3分の1は意識がないんです。もっと厳密に考えると、3分の1以上意識がないんじゃないでしょうか。

秋山 お酒を飲んでいる時もそうかもしれせんね。これが自分かと自分で思うこともあります。とにかく、考えれば考えるほどおかしい気分になってくる。

エネルギー、物質、情報

秋山 エネルギー、物質+情報のお話は、私どもにとっても大変にヒントが多い話題です。世の中の見えるものを対象にいたしますと、物質とエネルギーと情報が組み合わさって、吉川東大元総長の言われる「人工物」となります。そして、それには人間の感性に訴えるさまざまなアーキテクチャーやデザインがあります。最近の流行り言葉で言いますと“複雑系”，とか“人工物工学”などに広がってきます。学術的な方法で見ますと、アナリシス（analysis）ではなく、むしろシンセシス（cynthesis），そしてコンビネーション（combination）の方向です。先生が『人間科学』の中で述べておられるエネルギー、物質、情報という3つのキーワードの組み合わせ、ないしは展開の視野の中に、そういったことがもう含まれていると考えてよろしいでしょうか。

養老 含まれているというとおかしいんですけど、その方向が、これまでの各論で非常に不足していたということだと思います。

秋山 私どもの研究所の名前は「エネルギー総合工学研究所」といいますが、私どもは

「総合」という言葉に夢を託しました。その言葉はまさに、先生が人間科学的なことを目指しておられる考え方と共通点を持つと思うんですが。

養老 おっしゃることを非常に端的に私の言葉で言いますと、それが「システムを構築する」ということなんです。

秋山 そうですね、構築ですね。

養老 「システムの構築」ということは、少なくともこの150年間の科学、特に最近の日本の科学界ではあまり意識されたことがなかったのではないかと思います。生物自体が複雑なシステムですが、むしろ、生物学は典型的にそのシステムを壊すことに専心してきたわけですね。

情報化というのは「スルメ作り」ですね。それは論文を書くのも典型的な「スルメ作り」なんですよ。そうすると、スルメばっかり作ってる。スルメを作るのを専門化しているのです。だから、まだロボットを作っている人の方がましだと私は思います。生物学の研究者たちはよくロボットを馬鹿にするんですよ。「あんなものができることは生物のほんのわずかしかない」と。だけど、あの方向性は将来の方向性として正しいと思いますね。

秋山 最近のペットロボットだとかの動きをどう思われますか。いいか悪いかは別にしまして、どこまでいくのかなと思っていますが。

養老 いや、私らには非常に参考になったんです。なぜかといいますと、人間がどうやって動いているかということを医者はあんまり理解しようとしなかったんです。ところが、工学系の人々がロボットを作って、人間が歩いてるってことは、具体的にはこうやってるんだよということが示されるわけですよ。医者

は、患者さんを見てても「歩くのは当たり前でしょう」という話をするだけで、ロボット工学のように論理化して、要するに運動線法則を作って、それを実際にコンピュータに組み込んで動かしてみようということはやってこなかったんですから。

秋山 それに関連して申しますと、私も大学を出たのはもう四十数年前なんですが、卒論でお世話になりました先生の1人がシステム工学を日本で最初に構想された方で、もう1人の方が自動制御とロボティクスの専門の方でした。私も若いころにはロボティクスに興味がありまして、今でも、あのペットロボットはこれからどこまで進化していくのかなと関心があるんです。先生も相当にご関心をお持ちということが分かり大変参考になります。

養老 関心もありますが、限度もよくわかっているつもりです。要するに、生物の場合には細胞が分子を組んでシステムを作るわけですね。しかも、それは代謝をやる。つまり、材料自身を自分で入れ換えています。ですから絶えずフレッシュな状態でシステムが動いています。けれども、ロボットなんかは作ったらそれっきりですから。私は、ロボットを見るといつも言うんです。「スイッチを切ったら止まるよな」と。人間はスイッチを切ったら困る、スイッチを切ったらアウトですから。

普遍性に結びつかないタコツボ的専門家

秋山 人間科学の次の話題に入らせていただく前に、関連がありますので少し横道にそらさせていただきますと思います。日本学術会議では学問分野を大きく7つに分けていますが、近頃、吉川弘之会長が特に強調されてい

る点は、学術分野のパラダイムシフトであり、別の表現例で申せば、いわゆる第1モードから第2モードへのシフトということなんです。私どもの研究所が対象としているエネルギー、環境などはまさに人間社会と複合的に絡み合う時に、従来の縦割りの学術、あるいは産業構造では対応しきれず、正にパラダイムシフトが強く実感される状況です。

先生の『人間科学』に関しましても、私どもの素人的な感じでは、従来の医学の中でも縦割りであったのをもう少し横断的、あるいは融合的にするということに通じる、と理解してよろしいでしょうか。

養老 まったくその通りです。私は、その縦割りの専門家が大嫌いだったんです。

実は、私は昆虫が好きで、中学生の頃から専門家とアマチュアが集まる科学博物館の会に参加しています。それで、高校生ぐらいだった私にも大人の行動が変だというのは分かるんです。「これこれの部分はあの人の専門であって、他人が口を出すもんじゃない」という部分がよく見えるんですよ。それで、「専門家というのはどうも良くない」という感じを持ちました。

それは結局いくつになっても変わらなかったですね。何かタコツボ的だと思っています。ある意味で自信のあらわれでもあるんですが、別の言い方をすると、普遍性がないんです。つまり、「どこへ出してもこうだろう」という話にならずに、「うちでは違うんだよ」ということで、それが何か独創であるとか、オリジナリティーがあるとか、ということに結びついているように思っている。私はそれは全然話が違うなとずーっと思い続けているんですね。

善悪は物差しを出して議論すべし

秋山 私が現在関係しています大学の教育理念の1つが「心」の重視です。心と脳の関係がまだよく分かっていないんですが、想像しますと脳が考えること、脳の処理する情報、などの基本を知識だとすれば、知識よりもさらに感情的な部分も含めて「心」と呼んでいるのではないかなと思っています。

その心の作用について先生のご本の中に、古典的には性善説と性悪説があると書かれていましたが、結局、人間の性は善悪両方あると。いつまでもどちらにも分かれないうふうに考えてよろしいでしょうか。

養老 ええ。そうですよ、私はいつも善と悪については物差しを出してくれと言うんです。私は物差しを出さずにいいとか悪いとか言うのはインチキだと思っていますから。

秋山 先生のその物差しというのは、時代とか文化とかによってやはり変わっていくものではないでしょうか。

養老 そうです。当然、暗黙のうちに物差しを入れているわけで、私ははっきり言って、物差しを出さずに間違っていると、けしからんとか言っているのは卑怯だと思います。「こうだからいけないでしょ」というふうに物差しを出すべきだと思いますね。

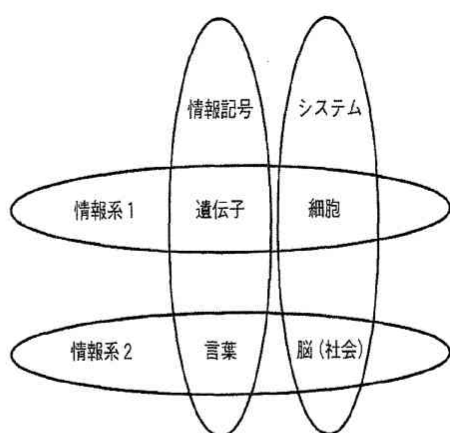
中学生、高校生が「人を殺してなぜいけない」と言った時に、大人が絶句しているということですが、結局、自分ではっきり物差しを持ってないからそうなるのです。「そんなことは当たり前じゃないか」と言うのは、いのような悪いようなところがあります。「それなら戦争は正しいのか」という議論を吹っかけられたらどうするんですかね。少なくとも、

日本は平和憲法を持っているんですから、そこをちゃんと考えるべきだと私は思っているんです。

秋山 『人間科学』が対象とする人間についてお伺いしますが、それは個人なのか、あるいは社会集団ないしは人間の連合体であるのかという点について如何ですか。これはコミュニケーションとも関連するのでしょうか、結局、人間とは個人であって、集団と対峙する存在であると考えてよろしいでしょうか。

養老 少なくとも意識的な議論に関する限り、大脳皮質というのは共通性を追求してきた存在以外の何ものでもないというのが私の意見です。ですから、皮質の構造自体はユニット構造になっていて、言語でおわかりのように、状況に応じて、どの言語でも入るようになっています。ということは、言語に関して大脳皮質が白紙状態で私たちは生まれてくるということですね。実は、我々が特にホモサピエンスになって非常に強く発達してきた部分というのは社会依存の部分です。そこはまさに共通性を保つための場所以外の何ものでもないんです。つまり、言葉はお互いに共通でない限り通じない。そこで、もしオリジナリティーというものがあつたら、それは絶対に評価されません。なぜなら、その人個人にオリジナルなものである以上は定義によって他の人に理解できないですから、それは意味を持たないんです。ですから、精神科の患者さんたちは世界から排除されるのです。

そうすると、個人とはどう定義されるのか。人間は遺伝子に関する性質についてはまったく個人です。私の心臓を人にあげても、例えば息子が死にそう、親父に心臓をもらえば当分もつということで移植しても、相手の体



人間における情報とシステム

(『人間科学』p.37より)

はその心臓を受け付けません。そのくらいははっきり個があります。

脳のはうは、むしろコミュニケーションのためにあると思います。

秋山 なるほど、要するにセパレートすると脳としての役割、立場というものがなくなるということですね。

養老 はい、皮質の意味がないんです。

秋山 先生が『人間科学』の中で紹介された二元論ということで、脳は言葉を介してその意識を司る。細胞は遺伝子の世界であって、これはもしかしたら意識下の世界である（上図参照）。この区分については私ども素人でも分かります。しかし、特に最近の少年の非行について見ますと、いろいろな犯罪の背後にやはり不安というものがあるのではないかと思うんです。昔、「白い恐怖」と題するアルフレッド・ヒッチコック監督の映画がありましたね。潜在記憶の亡霊に悩まされる映画でしたが、社会的なシステムの安全の問題につきましても、不安というものはもしかしたら意識と無意識の中間あたりにあって、そうした潜在記憶はもしかして遺伝子レベルでは、

我々のはるか昔の遺伝子情報を引きずっている可能性があります。

養老 そうだと思います。その部分というのは今の脳の皮質の話と違って、人間に作り付けられたものだと思います。つまり不安という感情は脳に作り付けのものだと思います。不安、あるいは恐怖がなければ生物の存在維持は危ういものです。だから、不安というのは当然のこととして付いてきているんだと思います。

秋山 それはかつてから綿々と続いている宿命という、必然というか…

養老 はい。そこへつながっていく経路も恐らくある程度、遺伝的に規定されているんだと思います。典型的なものは、だし抜けに何か大きな刺激が入る。つまり、いわゆるびっくりするという、驚愕反応というのは典型的に作り付けられている。誰でもドキッとするのは同じですね。

秋山 次の行為が予測できないという……。

養老 すくむとかですね。極端な場合には気を失うとかです。

秋山 話が少し変りまして、意識と無意識、あるいは記憶についてですが、某国の拉致問題に関連して思うのですが、幼い頃の個性なり、記憶なりが強制的にリセットされて次々に新しいものを埋め込まれたとします。そういう状況では昔の個性、記憶、記録はもうノーリターンなんでしょうか。

養老 人間は必ずノーリターンなんですね。過去を繰り返すことはできませんから、同じ状態には戻れません。

秋山 そうなんですねえ。戻れないところに生きることを本質みたいなものがあるのでしょうかね。

養老 要するに、何かがどの程度長期間我々の脳に刻み込まれるかということです。例えば、一番有名なのは、長期記憶というのは少なくとも定着するのに3年はかかるだろうということになっています。なぜなら両側下部の障害では逆行していった3年前までの記憶がなくなるからです。3年以前の記憶は残るんです。

「洗脳」とは、要するに社会的な価値観が非常に強く入ってくることですね。本来、そんなことを考えてもいなかった人がほとんどじゃないかと私は思っています。「マルキシズム万歳」とかいう人を逆に洗脳できるかという、これは難しいんじゃないですかね。

秋山 そうですねえ。たびたび洗脳できるか、という、それはなかなか難しい。

養老 そうでしょう。言ってみれば、教祖を洗脳するみたいなものだから。例えば、金正日は何してるか知らないけど、それを変えろといって変えろと思えません。

秋山 思えないですね。確かに……

養老 「そんなことをするぐらいなら死んだ方がいい」と言うと思います。ところが一般の人は普段はそんなことを考えていない。新聞で読んだとか、人から聞いたとか、その程度考えている人がある社会的価値観を強く言われると、「まあ、それでもいいです」ということになるんですね。私はむしろそれが当たり前じゃないかという気がします。普通に暮らしていた理科系の大学院生が麻原彰晃に入れ込んだら、「何事も尊師の言うとおりに」というのもごく普通にあることです。そんなにオーバーなことが起こっているわけではないんじゃないかなと思うんです。

ただ、日本に帰ってくれば意見は変わるだ

ろうというのはありますね。もともと、拉致されて洗脳されるということって異状ですから。そういうものというのは生物には根づかないわけです。

都市化と人間性

秋山 先生が『人間科学』の中で述べておられる都市化と人間性の観点についてなのですが、都市化とは、脳の中の世界がいわゆる記憶なり映像の形で投影されていくということですよね。ですから、人類は都市化する傾向にあるということは、脳の中の人工世界が近年どんどん広がっているということですね。

養老 都会というものがむしろ人工そのものです。つまり、意識的世界です。部屋が典型的な例で、部屋の中に置かれている物で意味の分からないものって普通ないんですね。意味の分かるものしか置いていない。ところが山へ行ったら、変な“きのこ”が生えていたり、変なところにカビが生えていたり、訳のわからない虫が歩いていたり、意味が分からないことだらけなわけです。

意識の世界での物はすべて人間が置いていますから、都会というのは基本的にそういうところですよ。自然もある程度残っていて、例えば「雑草」が生えていますが、「そんなものは植えた覚えがない」ということで「雑草」と呼ばれているのです。「勝手に生えてきやがって」となるわけですが、「雑草」のほうがもともとある物ですよ。

秋山 おっしゃるようなことは、あらゆることに見受けられ、19世紀、20世紀に産業も含めて人工の社会がどんどん進展してきた。そうした考え方、価値観を一度ここで、特に人

間を中心に考え直さないといけない、ということでしょうか。

ごみ問題から地球環境問題へ

秋山 先生のご本の中で、「仮想空間として社会制度がある。人工空間の中では自然物は排除され、失われてきている。」とありました。そのような状況下で、今エネルギーやごみの問題を抱えながら経済が発展しています。ごみの問題につきましては、先生も都市文明ではごみ発生量が飛躍的に増えていると指摘しておられます。東京都のごみ処理能力ももうほとんどパンクに近いといったこともありますし、片や江戸時代の循環型社会を現代的な価値観なりライフスタイルに照らしてどこまで受け入れられるか、参考にすべきだとする意見もあるようです。問題はあるけれど、それなりの完結したモデルとして検討する意味はあると思います。

こういったことで、人類とごみの問題を中心に地球環境問題まで視野に入れながら、先生のご感想、ご意見をお聞かせ下さい。

養老 環境問題には明らかに2種類あります。今おっしゃっていた工学的にというか、社会システム的に、例えば循環型社会を作るとかで環境問題を解決していこうということに関心のある方が8割と見えています。2割が、いわゆる本当の、私が言っているような、都市環境とそうでない環境、つまり本当の意味の自然環境との関わりに関心のある方々です。ですから、環境問題には二面あります。

最初の産業その他とごみの関係、我々の日常生活との関係、そういうものが現代社会、生活にどういうふうに合理化していくか。別

の言い方で、どうシステム化するかという問題が提起されていると思っています。我々は非常に不完全なシステムを作って、それで動かしている。そのために、その場で一番気が付かないところに必ずしわ寄せがきていて、それがごみ問題、炭酸ガス問題、あるいは病気の問題ですね、いわゆる公害問題という形で出てくるのだと思います。要するに、自然の方にツケを回していることは間違いない、極めて不完全なシステムなわけです。それを一生懸命、システムの方からアプローチして解決しようとしているのが前者だと思います。

私を含めた2割の方々は、むしろ全体をひっくり返して、自然の側から見直して、「これまでの経済発展はやり過ぎだろ」と思うわけです。自分が育ってきた過程を考えても、「50年間でここまでのいかになくてもいいじゃないか」という気がするんですね。

秋山 確かにそれはありますね。

養老 この変化は速過ぎる。もうちょっと戻せる形で前に進められないのかと思います。ここのところ前に進む時に戻すことを考えないで進めていますから。

秋山 そうですねえ。

養老 これだけコンクリートづけにして、これ、捨てるときどうするんだろうと、前から心配してるんですけどね。日本は年間何億トンかずつ重くなってるんじゃないんですか。

秋山 建築物にしても、大体西欧的なシステムに向ってきましたのでコンクリートなんかの使用量も増えてきたわけですが、できるだけもう一度日本の本来の気候風土に合った住環境、あるいは生活環境を目指すというのは大変重要な視点だと思いますね。

養老 それで私非常に気になるのは、私みた

いに乱暴なことを言うと、ジャーナリストなどが「そうは言っても先生、元には戻れませんか」と必ず言うんです。私はこれほど日本風の言い方はないと思った。元に戻れないなんて誰が証明したんだよと言いたいです。私らは、戦争でやむを得ず、あの経済的に貧しく不便な生活をしたわけですが、あの状態でも人間はちゃんと暮らしていたわけです。栄養失調になった人はいましたけど、餓死する人がそんなに多かったかというとそうではなく、餓死が新聞ネタになるくらい稀なことだったんです。そう思うと、私は「元には戻れませんか」というのは無責任だなと思うんですね。

秋山 そうですね。ただ、エネルギー多消費の国民はおいしいものも食べられて、医療環境もいいということが付随している一方で、エネルギーを余り使えない国の人は衛生も悪くて早死にするということもあります。現代的に満足できる、そして肉体的に十分安全で長寿命を保てるという意味では相応のエネルギーなり、インフラが要するとする考え方が現実を相当引っ張っている面があるんですね。

養老 これは研究費があれば研究ができるという考え方に似ているなと思うんですね。つまり、それだけエネルギーを使ったら、そういうメリットが出て当たり前じゃないかということです。それは無から有を生み出したわけではなくて、エネルギーを寿命に換算しただけでしょうと、こういうことになります。

それは逆算すると、エネルギーは非常に貴重なものですよという言い方にもなるんです。私はそれはどうも我々がいつも陥る穴ではないかという気もするんです。これだけのものを投入したら、これだけいい成果が出るのは当たり前で、何にも入れなかったのにこれだ

け成果が出たならさらに立派だと思うんですよ。

秋山 なるほど、そこら辺りまで深く思いをいたしながら相関を考えていく必要は当然ありますね。

秋山 もう1つ、エネルギーに付随するごみの問題、また加えて温暖化防止に向けた二酸化炭素排出の抑制の課題があります。後者については、日本も「第3回国連気候変動枠組条約締約国会議（COP3）」の「京都議定書」に批准いたしました。およそ2010年には、二酸化炭素の排出量を1990年比で6%減らすことを目標に取り組んでいるのですが、現状は残念ながら90年比で10%以上も増えていて、削減目標の達成は非常に厳しくなっています。温暖化防止に向けた約束を果たすために、私どもの研究所としましても省エネルギー、新エネルギー、原子力などを視野に調査研究の努力をしています。特に、私どもの研究所は技術的な面でどう貢献できるか研究を行っています。

温暖化、水の汚染、酸性雨、緑地の減少、あるいは土壌汚染など、いろいろな地球環境問題を『人間科学』の観点から見れば、方向として、あるいは基本的な対策として、やっぱり我々の価値観、ないしは文明観、社会観を変えていくことが基本になるのでしょうか。

養老 実はそう思ったことが、『人間科学』を出した根本的な動機の1つなんです。やっぱり、一生をどうやって生きるのが一番全うな生き方か、あるいは自分にとって一番幸せな生き方かということをみんなが考えるようになれば、自然に方向調整せざるを得なくなるだろうと思っています。少なくともアメリカみたいに、所得の下の方から数えて40%

の人の所得合計とビル・ゲイツの年間所得がイコールだというような世界は何か変ですよ。
秋山 そうですね。

養老 それは異状な世界で、そういうシステムは利口なシステムではないはずだという気がするんです。本当にアメリカが民主的な社会なら、40%が当然、文句を言って、何か革命を起こすに違いないと思うけど、一切そんなことを起こさないから、やっぱりそれはそれぞれの人の価値観の問題だろうと思います。その点で、日本はある意味でアメリカよりもはるかにましな社会だったんですけど、今はそれが壊れつつあるような気もするんですね。自分で調べたわけではないけれども、日本の場合も階層が分化しつつある、金持ちと貧乏人がはっきり分かれてきているということがよく言われますね。ルイ・ヴィトンの店ができて日本での売上げが一番大きいという一方で、ホームレスはどんどん増えている。

この間面白い話を聞きました。日本のホームレスの生活状況を社会的に調査してビデオを作って、アメリカのホームレスに見せたら、アメリカのホームレスがみんな日本に行きたいと言ったというんです。だけど、「日本型で暮らしている方が絶対暮らしたいんだよ」ということを日本人が言えない、この情けなさがあるんですね。私ははっきり言って、アメリカに住む気ないですから。まあ、コスタリカぐらいなら住んでもいいと思うけど。それはなぜかという田舎だから。

エネルギーを世界共通の貨幣単位に

秋山 エネルギーの話に戻りますが、私どもでは、原子力の安全の問題と同時に最終的な

放射性廃棄物の管理についても調査研究を進めています。そこでは、高レベルの廃棄物は1万年先までも念頭に入れながら現在の知識技術で検証して、「これはいけそうだと皆さんにご説明できるあたりまでいくことを目指して議論を進めています。

エネルギーの選択という観点で現在の化石系の燃料は温暖化の問題を抱えており、原子力は放射線の問題を抱えているけれども、安全性、環境への影響につきまして、私どもの研究所は、やはりそれぞれのエネルギーの合理的な特質を評価、判断して、科学的に十分検討しながらうまく使っていくのが妥当ではないかというスタンスで取組んでいます。先生がごらんになって、エネルギーの選択につきましてご意見や、ご示唆をいただけますとありがたいのですが。

養老 エネルギーの選択については私は何も申し上げることはないんですが、今おっしゃったように、日本の場合には上手にやっているんじゃないかなと思います。

私が思うのは、ごみ問題からエネルギーの問題を含めて誰がシステムの問題として考えるのかということです。例えば、石油にしても原子力でも基本的には同じだと思いますけれども、エネルギーは天然資源、自然のリソースなわけですから。それに対して、経済というのはまさに人工的なものです。

ですから、私は今の経済は根本的に「花見酒」だと思っています。どういうことかと言うと、経済は経済上の帳尻で全部計算します。しかし、石油がどれだけ減ったか、あるいは炭酸ガスがどれだけ増えたかは計算されない。そうすると、経済上の帳尻がいかにも良く見えても実は嘘なんですよ。「花見酒」の経

済ですから。それをずっと考えていたので、貨幣は何らかの兌換券にならないかと思うんです。例えば、欧州連合（EU）がユーロという共通通貨を作りますね。よくよく考えてみると、あれだけ広い領域の中で単一通貨を使うということは、世界共通通貨にしたかどうかという考えが当然あるに違いない。世界共通通貨にした時には、通貨の発行高に誰がどのような限度を設けるかということが課題として出てきます。私は前からそれはエネルギーじゃないかという気がしているんです。エネルギー単位というものが貨幣単位であるべきではないかと。人間のサービスというのは、そういうエネルギーを考えていないんで、これとは別な貨幣になってもいいんですけど、少なくとも今の貨幣には兌換するものが一切ついていないんです。だから「花見酒」の経済になるわけです。

秋山 実は最近、いわゆる廃棄物の管理をするコストだとか、二酸化炭素を出したら環境税をかけるとかいったことで、外部的な負荷をトータルな経済評価の中に取り込もうという方向にはあります。

養老 それはよく分かっています。私はそれでは中途半端だと思っています。根本的に人間はどれだけエネルギーを使っていきたいかというところから始めなきゃだめだということです。实际的に議論なするのであれば、それは今の原発の話と同じように、できない議論ではないわけです。年間、人間がどれだけ石油を使うことを許容できるか。

秋山 どこまで許容できるかがポイントですね。ただし絶対的な評価基準というものがなかなか難しいのではないかと思うんですが。

養老 それは絶えず変えればいいんです。

秋山 それは国際的なコンセンサスですか。

養老 そうです。まさに国際的にコンセンサスを取っていかなければならないし、それを京都議定書がやる、日本がリーダーシップを取ってやってどうしていけないんだと思いますね。隣の中国がどんどんエネルギー消費を増やすに決まっているから、地球環境全体としてはどれだけエネルギーを使うことが適正か。少なくともこの範囲を超えてはならないとかですね、もう、人間はそういう議論をすべきところに来ていると思います。

秋山 先生のおっしゃるようにすべきだということはCOPの会議の中でも極めてホットイシューだと私は思うんですよ。アメリカのようなあれだけ1人当たりのエネルギー消費量の大きい国はもっとセーブできる余地もあるし、努力すべきだ、模範を示すべしという議論もあるでしょう。

インド、中国あたりはアメリカに比べたら1人当たりのエネルギー消費量はずっと少ないけれど、そこでもセーブする努力はしてもらう。だけど、繰り返しますが先進諸国でエネルギーをじゃぶじゃぶ消費しているところは、もっともっと努力するという国際的な規範がなければならない。ただ実態では、やっぱりナショナルセキュリティとか、色々なエゴもあって、アメリカはアメリカの道を行くということで、COPの議論からも腰が引けているわけなんですよ。

養老 私はね、アメリカの国民だって同じことを思っていると思いますよ。それは当然なことです。正しいことは正しいんですから。アメリカが軍隊を使ってアフガニスタンまで入って行くということに比べたらはるかにましで、こんな当たり前のことはないでしょう。

だから、そういう意味で、アメリカが憲章をつくるようになれば大したもんだと思いますよ。

秋山 確かに先生のおっしゃたように、どのぐらいのエネルギー消費が今の国際的な状況、地球環境、あるいは社会経済に照らして我々として取るべき線かというあたりは、国際的にきちんと議論すべきだと思います。

養老 石油埋蔵量も概算は分かっているでしょうし、今後100年はこのぐらいでいこうというふうなことでもいいけど、国際的に話し合うのが私は健康だと思いますよ。中国が発展したらどうするかとか、さまざまな議論もある範囲の中に収めずに放っておくと、従来みたいな妙な戦争になっちゃったりするわけですよ。要するに、不安をかき立てますから。そういうリミットをかけていけば、逆にお互いにいくら得すると言っても、丸儲けはできないんだということが初めから分かるんですから。それは自然のリミットですから、分からざるを得ないんです。で、私は人間はそれほど馬鹿じゃないと思います。

秋山 そこはね、私も馬鹿でないことを期待しているんですがね。

養老 必ず。そういうことを、理科的にきちんと言っていけば、長い時間をかければ、必ず日本は信用されるようになると思う。「やっぱりあいつが言ってるとおりだな」という話になっていくことがいいんです。「神様がこう言いました」ということで今までやってきたんだけど、これはだめです。理科的な話ではないといけません。人間のことも遺伝子に直せば納得せざるを得ないでしょう。つまり実証的ですからね、そういう意味でいけば。

経済の話も同じで、誰が儲かるか損するか

なんて意味ないんです。アメリカが金を儲けてアフガニスタンが貧乏だっていいですよ。だけど、世界全体でどれだけのエネルギーを消費するかということは、全員に関わりがあることです。理科的な話にしなければいけない。

秋山 全員にかかる問題が個人にかかってくるわけですからね。

養老 そうです。ビル・ゲイツがお金を持ってもいいんですけど、アメリカ全体がどれだけエネルギーを使うかということは他の人に徹底的に関係するんです。

「手入れ」の思想

秋山 先生のご本の中の「手入れの思想」というのは、これからの世界、これからの日本を考えていく上での新しい観点だと理解してよろしいのでしょうか。対象を認め、そのすべてを許容して自分の方に関心を引っ張ってくる。

日本が島国であるという、いわゆる地政学的な条件とか、四季が移り変わるという風土的な条件、歴史的にひょっとしたら体質的、あるいは遺伝子的に何千年も埋め込まれた日本人気質というか、日本人の限界というものがあろうと思うんですが、それは極めて日本的な「手入れの思想」というふうに考えてよろしいのでしょうか。先生のこの思想はグローバルに、全人類に共通して語れる思想なのかというあたりはいかがでしょうか。

養老 例えば、砂漠でそれが通用するかというと、多分、全然関係ないんだらうと思いま

す。基本的に、砂漠では自然は敵ですからね。しかし、砂漠の民が扱わなきゃいけないラクダにせよ、砂漠の気候にせよ、それはやっぱり自然であって、彼らはそれと折り合っていかなければいけない。恐らくラクダの手入れもしていると思うんですね。そうすると、人間もそもそも自然であって、計画生産じゃないですから、「手入れの思想」は根本的にどこにでも通じるはずだと思います。

江戸時代に長崎に来た西欧人は、しばしば「天国に来た」と表現してますよね。天国、それはやっぱりそういう自然の手入れの美しさというのが誰にでも分かるということでしょう。私の家はトンネルを抜けたところにあるんですけど、私の知人のドイツ人が初めて来た時、我が家をパラダイスと言っていましたよ。ヨーロッパ人が考えるある種の理想郷みたいなものなのでしょう。

秋山 西洋の、文明以前の潜在意識から来るノスタルジアがあるのかも知れません。

養老 それで、江戸時代の西洋人は喜望峰を回り、インドと中国を通して日本に来ましたから、ほとんど同時の世界を見てきているんですが、日本に上陸して初めて理想的な環境だと言ったわけです。今、イングリッシュガーデンが流行っていますけど、あのイングリッシュガーデンを作り出すイギリス人の理想像というのは、山形県の農村だといわれているんですよ。

日本でイングリッシュガーデンが流行るのは、ジャポニズムの絵が日本で流行ったのと同じで、一種の里帰りなんです。私は、そういうものを作ってきた伝統を日本人が気がついたのではないかなって思ってるんです。

秋山 そうですね。私も中国に2、3回行っ

てシャングリラ（桃源郷）という名前のホテルに泊まったことがあります。その桃源郷がまさに中国の雲南かどこかにあるんだという話です。「手入れの思想」の延長として、そういう自然のシャングリラと同時に、人間の心も含めての理想郷を目指すことは大変に重要なことだと思います。

教育について

秋山 まとめになりますが、結局のところ、私は世の中を動かすためには、子供の頃から個性を持って大人になってもらう教育、単に知識を与えるだけでなく、自分の本質を引き出すことを基本とする教育が大事だと思っています。教育について欧米との比較で常々感じていますのは、日本では個性を伸ばしきれない教育ができていないんじゃないかという点です。結局、平均値が高ければ、それでよしとする感じ、でも落ちこぼれが出てきます。その落ちこぼれの中に意外と大きな天才の芽があります。社会の合理的なスタイルなり、あり方なりを納得の上でみんなが目指していくことが大切でそうした点を視野に入れながら、今申し上げた教育の問題で先生のご意見をお聞かせいただけませんか。

養老 端的に言えば、学校教育はだめですね。それから実習教育、現場教育がなさ過ぎます。私は、「農地か、田んぼか工場に行って働け」と言った毛沢東とほとんど同じ気分ですよ。都会でごろごろしてんじゃないよって。

私は1時間目に大学に行きますと、こんな天気の良い日でも9時から学生がいるんです

よ。私はいつも新しい学生に言うんです。「こんな天気のいい日にこんな薄暗い穴蔵みたいな部屋に、お前らみたいがいい若いもんが来て、しかも椅子に座って1時間半も白髪のじじいの話を聞いてんじゃない、さっさと外に行って体を使って働いてこい」と。誰も動かないですよ。後でレポート書かせると、「先生の講義をずっと聴いてたけど、あれが一番もったもだったと思った」とか言われて、「もったもだと思うならすぐ出て行きゃいいだろう」とこっちは思うわけですよ。

脳の観点からいうと、体を動かさなきゃダメなんですよ。それが脳からの出力ということだから。

秋山 そういう話はよく聞きますね、やっぱり刺激が、いろんな意味の刺激が必要なんですね。

養老 脳に入力が入って出力が出ていって、その出力の結果、外界が変化して、つまり自分が歩いたって景色が変わりますから、またそれが入力されて、また新しい出力になっていく。そういうふうに、回していくことで脳の中のプログラムがリファインされていったり、出来上がっていったりするんですから。それを一切出力しないで入力ばかりしていたら、それは頭が最後にはパンクするだけのことです。それに脳の中にプログラムもできやしないんです。

それで、私は必ず「文武両道」というのは、文は入る方で、武は出る方と解釈しているんです。それはまったく無関係のものではなく、回るんですよ。

秋山 私も教育は、知識だけでなく、もう少し遊び心、やる気を起こさせるためのやり方があるのではないかと思います。若い人がそ

れぞれに目標を見つけていくこと、そしてそれに向けての意欲を、自分自身をかき立てられるだけの人間になって欲しいなど。私も学生諸君と接することがありますけれども、かなり受け身ですよ、大人しいといえば大人しいんですが……

シンクタンクを考える

秋山 当エネルギー総合工学研究所は名前の通りエネルギーの調査研究が主体です。国や産業界からご委託いただいて、また私どもで自発的に戦略的な調査を提案しまして、環境問題も含め、また社会経済との関連も重視しながら研究をしています。

日本のこれからの、特にCOPの環境制約などを受けたときのエネルギーの選択について、産業の発展、そして人間の育成まで視野に入れながら、10年、50年先までどんな手を打っていくか。ポリシー、そして具体的なハウツーも含めて我々が用意していくために自発的に研究もしているんです。

先生のおっしゃった『人間科学』、人間というものが今後のエネルギー、環境、産業政策、そしてもちろん安全も含めて社会の維持、発展に非常に深く関わってくるんですね。これからは研究所の事業を進めていく上で、人間の心、脳の分野に関わることを気持ちとしてできるだけ取り入れていきたいと思います。

養老 人のことが分かるということは本当に大切なことだと思うんです。先ほどから個性ということがちょいちょい出ているんですけど、あんまり個性を強調すると、人のことは分からなくていいことになりかねない。私は教育であんまり個性を尊重しろというのは考

えもんかなとずっと思ってるんです。

昔の日本の躰けをごらんになるとわかると思うんですけど、明治まで非常にきつく、師匠のやるとおりにやれという形の躰けをしますね、教育でも何でもそうです、やるとおりにやらせる。じゃあ、明治の人は非常に画一的かという、そうじゃないですね。今、私は北里大学の教授ですけど、北里柴三郎さんなんかもそういう躰けを受けたはずですけど、画一的というより、むしろ逆で、どっちかという、我が強いですね。オリジナリティーの高い人です。今の人ははるかに弱いと思うんですね。そのオリジナリティーの部分が。ただ、オリジナリティーとは性格の強さ、人格の強さですね。折れないということですね。そういう強さというのは、非常に強い外圧にさらされて育ってくるのであって、今のうちに、何でもいい、この範囲なら何やってもいいということでは、子供にそんなオリジナリティーはちっとも育たないですね。「師匠のやるとおりにやってろ」と言われて、それが10年、20年続けて、どうしても一致しないところがお互いの個性ですね。本当に個性というものがあるとすれば、そういうふうな方法を使わない限り見出せないものではないんですか。謠だったら、声が違うのは初めから分かってるんですから、そんなもの個性だと褒めてみてもしょうがないでしょう。

しかし、教育ということで、そこにある個性がぎりぎり詰めていかなければ出てこないわけですよ。

1つにそういうことがありまして、私の先生は「人の心が分かる心を教養という」と言っておられたですね。教育はそれを忘れて久しいような気がする。どうしてこんなに、コ

ミュニケーションが便利になったのに、お互いに気持ちがわからなくなったのか。それはまずいと感じますね。それが日本を壊している1つの要因だと思います。だから、「心」とおっしゃっている、その言葉はまさに互いに共鳴するとか、受け容れられるものでなければならぬはずなのに、それに個性という言葉を入れていったために、若い人が苦勞しているという感じですね。

私はむしろ学生には、「あんたにおれの気持ちがわかるか」「友達の気持ちがわかるか」「おまえの個性なんて、いくら探したってラッキョウの皮むきのようにないんだよ」と言うんですね。すると娘が、「そんなこと言うと、お父さん、そのうち若い人に刺されるからね」と言う。

でもやっぱりそれは当然のことで、「20年かそこらしか生きてなくて、自分に中身があると思う方がおかしい」と、私ははっきり言うんですよ。教育はそういうことです。

秋山 長時間にわたり本当にありがとうございました。

【寄稿】

地球温暖化問題の動きと将来展望 —新たな時代への展開

松尾 直樹 (Climate Experts 代表
シニアリサーチフェロー)



1. 2003年への期待

(1) はじめに

1990年代は、地球規模の環境問題に関して、大きなうねりがあった十年であった。最初の成果である1992年のブラジル・リオにおける「地球サミット」を1つの契機として、特に地球温暖化問題に関しては、「気候変動枠組条約」が採択された。同条約は1994年に発効、1995年には第1回締約国会議(COP 1)がベルリンで開催された。その後、1997年12月のCOP 3では京都議定書という実を結び、2001年11月にはCOP 7で運用則の決定にまでこぎつけた。

温暖化問題が、現代文明を支えるエネルギー消費と密接に関わった問題であるという基本的な難しさを考慮すると、十年間という「短期間」でここまでこぎ着けたのは、奇跡的とも言えるかも知れない。米国や途上国の参加問題など、まだ多くの課題を残してはいるものの、国際社会は着実に前進してきたと言える。

(2) 持続可能性

1992年の「地球サミット」が、「環境と開発

に関する国連会議」であることなどからもわかるように、環境と開発とは、不可分の関係にあることが強く認識されてきた。その両立をはかる上でのキーワードが、「持続可能性」(Sustainability)あるいは「持続可能な発展」(Sustainable Development)である。もともと、この概念には幅があり、異なった解釈が可能なため、正面からとり扱うと哲学論争になる傾向があった。

地球温暖化問題においては、特に近年、この「持続可能性」が顕わな形で、さまざまなアプローチで扱われるようになってきた。例えば、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)が2001年に発表した第3次評価報告書(TAR)といくつかの特別報告書は、常に持続可能性を念頭におきながら作成された。特に、TARおよびシナリオ特別報告書(SRES)における重要な結論の1つは、「温暖化対策」は単独では十分な効果を持たず、むしろ「下敷きとなる社会の選択」が、効果的な温暖化対策となるという点であった。「下敷きとなる社会の選択」とは、温暖化を直接の目的としない政策や社会形態の選択である。共同利益(Co-benefits)を活かす政策が採れるか、ということでもある。技術移転特別報告書(SRTT)に

においても、単なる技術の移転だけではなく、その技術を活用・応用していける制度面などの重要性が強調された。

一方で、気候変動枠組条約においても、適応措置（Adaptation）の重要性が強く認識されるようになり、そのための資金的基盤整備がなされようとしている。また、いよいよ動き出すクリーン開発メカニズム（CDM）では、受入国の持続可能な発展をサポートするものである点が強調され、その制度設計においても小規模CDMが優先された。

（３）ヨハネスブルク・サミットからCOP 8まで

2002年は、1992年の「地球サミット」から10年目ということで、環境問題全般をカバーする「リオ・プラス・テン」すなわち「ヨハネスブルク・サミット（WSSD）」が開催された。これはリオで作られたアジェンダ21のフォローアップ的な色彩が強く、やはり「持続可能性」が概念としての軸にあった。温暖化問題に関して特に目立ったトピックはなかったが、各国が京都議定書の批准を行うにあたっての締結期限目標としての役割を果たし、欧州連合（EU）、日本などはこれに間に合うように国内批准手続を急いだ格好になった。

また、10月にニューデリーで行われたCOP 8は、発展途上国の持続可能な発展が最も強調されたCOPであったとすることができよう。途上国の将来のコミットメントに関する 이슈が見え隠れしたCOPでもあった。

2002年は、温暖化問題にとって、なにか大きなことが決まった年ではなかったが、京都体制のルールブックたるマラケシュアコードを咀嚼し、実行に移すための準備を行ってき

た助走の年であったと言えよう。

（４）2003年という年の位置づけ

国際的な温暖化問題への対応は、「制度デザイン」のステージから、「対策実施」のステージへ大きく舵を切りつつある。その旗頭がCDMで、2003年の早い時期には最初のCDMプロジェクトが登録されるであろう。2005年には、EU全域の排出権取引制度が動き出そうとしている。

日本国内では、2004年の既存政策の包括的審査を控え、2005年からの第2ステップの姿が見えてくるものと期待される。

これらの点から、2003年という年にうまく「波に乗る」ことができたなら、その後の温暖化問題への対応がスムーズに行え、かつ競争相手よりも一歩前に出ることができると考えられる。これは、国レベルでの対応でも、各企業での対応においても同じことが言えよう。

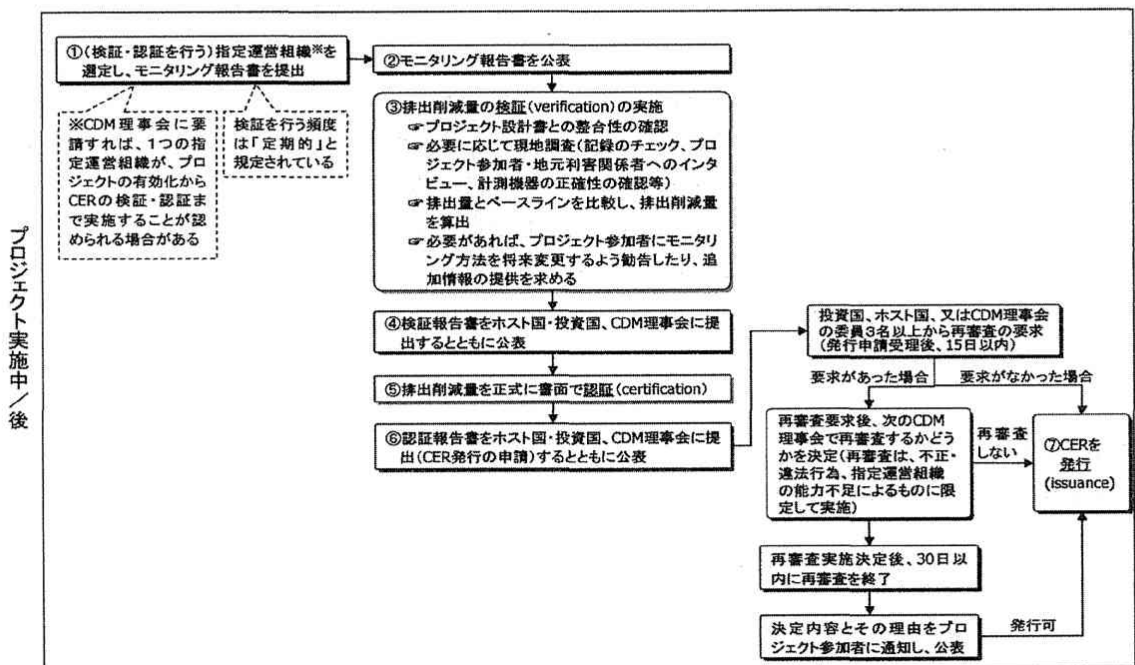
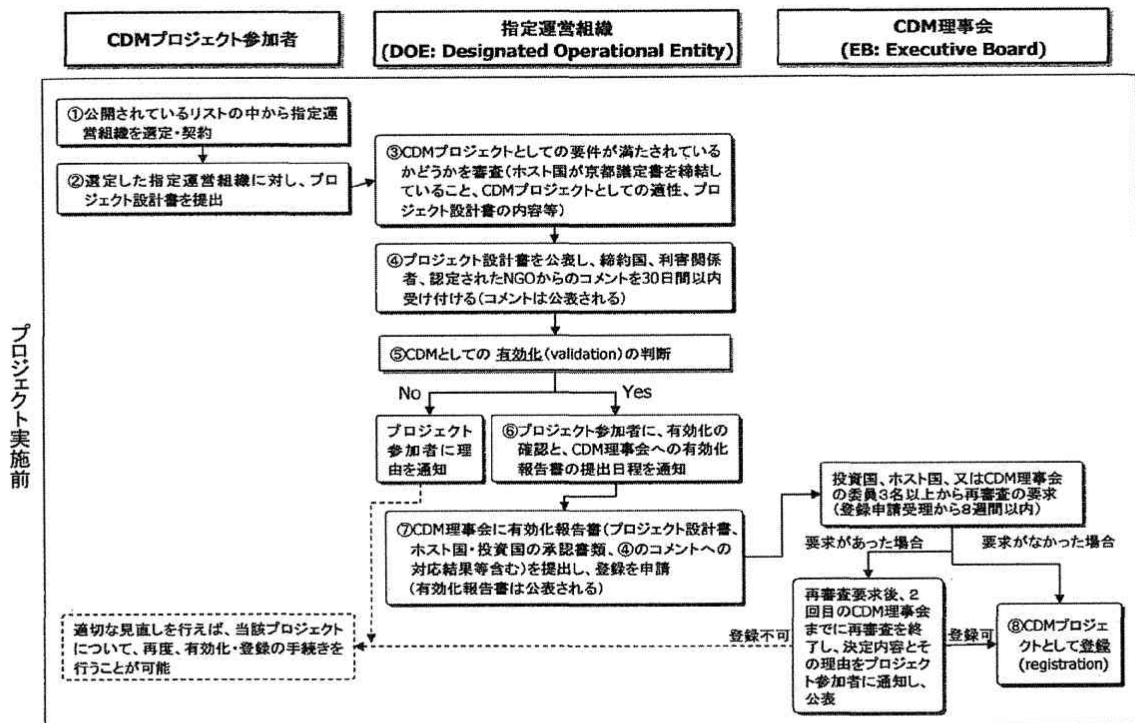
2. 動き出すCDMと排出権市場の胎動

（１）CDM理事会の活動

CDMの監督機関たるCDM理事会は、COP 7で設立され、それ以降、積極的に活動を行ってきた。高い優先度で行われたのが、

- 運営組織（OE：Operational Entity）の認可プロセスの整備
- 小規模CDMの手続き簡素化
- プロジェクト設計書（PDD）のフォームの作成

であり、それぞれ、CDM-AP（認可プロセスに関するパネル）、SSCパネル（小規模CDMパネル）、Methパネル（ベースラインおよびモニタリングの方法論に関するパネル）が、



環境省資料を一部改変。

図1 CDMのプロジェクトフロー

CDM理事会の下に設置され、作業に当たっている。

(a) 運営組織の認可とその役割

特に、OEの認可（Accreditation）プロセスは優先度が高く、CDM-APの下にOEの評価を行う専門家チームが結成され、すでに審査が始まっている。2003年3～4月頃には、最初のOEが誕生すると期待される。

OEの役割は、そのプロジェクトがCDMとなりうるか、というvalidation（有効性評価）審査であるが、評価とは、申請のあったプロジェクトがCDMとしての要件を満たしているかをチェックするプロセスである。ここでは、プロジェクトの開始以降に排出削減量を求めるにあたっての方法論を「事前に」決めておく必要があり、それは申請者のプロジェクト設計書に記載されるのであるが、その有効性を審査することになる。評価作業の内容におけるキーポイントは、あとで困らないように「きちんとしたPDDの設計」ができているかどうか、のチェックである。なお、CDMとして認められるには、受入国の承認や、CDM理事会の承認なども必要となる。

プロジェクト開始後は、（一定期間ごとに）排出削減量を求める必要があるが、その検証・認証を行うのもOEの仕事となる。ここでは、原則として、有効性評価を行ったOEとは別のOEが、すでにPDDで記載された方法に基づいてプロジェクトからの排出量や吸収量のモニタリングが行われたか、ベースライン排出量が求められたか、などのチェックを行う。ただし、小規模CDMや、CDM理事会が認めるなどの事情があれば同じOEでも可能である。

すなわち、OEの役割の大きな部分は、

CDMスキーム全体の「運用（オペレーション）」であり、その仕事の「質」が、CDMスキーム全体の「質」すなわち「信頼性」にかかわるという意味で、非常に重要となる。

COP 8 当時、CDMとして全部で7社申し込みがあったなか、5社が日本企業であり、他の2社も日本法人を有する企業である。このニュービジネスにおける日本のISO系・監査法人系の会社の関心の強さを伺い知ることができる。なお、経済産業省、環境省ともに、補助金を出してこれら事業の育成を行っている。

(b) ベースラインにかかわる課題

CDM特有で、最も難しく重要な課題は、どのようにベースラインシナリオを設定するかであろう。PDDの段階では、その方法論すなわち考え方を確定することになる。

「そのプロジェクトがなかりせば」というシナリオ（ベースラインシナリオ）をプロジェクト参加者が作成するわけであるが、OEはその論理的整合性や妥当性、そしてその裏付けとなるデータや証拠が揃っているかどうか、評価していない影響がないかどうか、をチェックする。OE以外にも、CDM理事会承認、パブリックコメントというスクリーニングを経ることとなる。

実際、ベースラインシナリオの設定いかんによっては、得られる排出削減クレジットの大きさが数倍から数十%異なることもあり得るため、この部分は非常に重要となる（図2）。

あまり認識されていないことであるが、ベースライン設定とは、それがリーズナブルであるということの正当性をいかにして示すか、という作業であって、高いクオリティーのベ

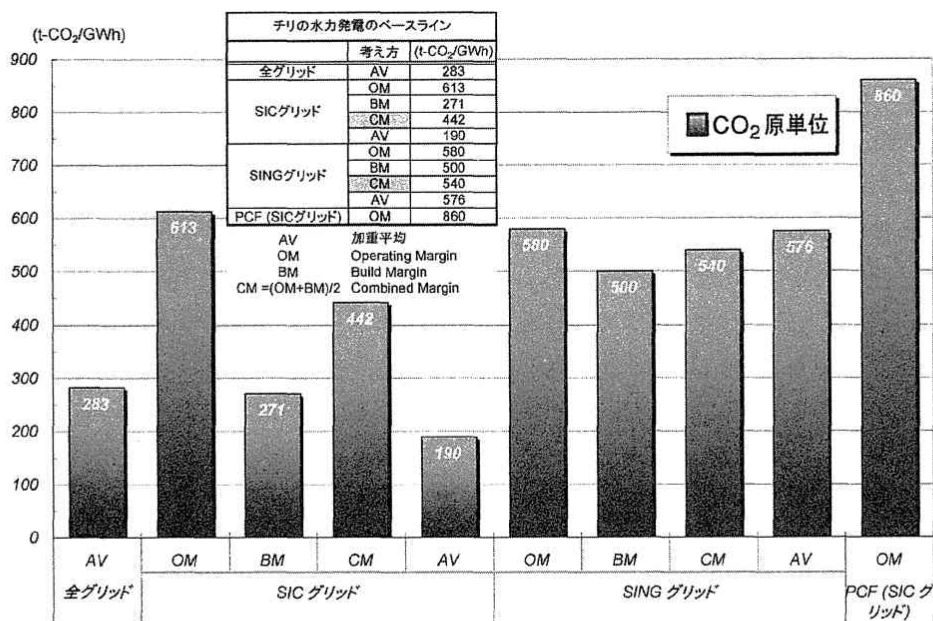


図2 クレジットの大きさが異なるベースラインシナリオの例

ースライン設定ができれば、それだけ多くのクレジットを獲得することができる。

また、方法論は、いわゆる判例主義で蓄積されていくため、その蓄積の仕方、すなわち、ある方法論の適用条件や保守的であるということの定義などに関するガイドラインが必要であり、それに関する今後の「Methパネル」の作業が重要となる。良いガイドラインを提供できなければ、「悪貨が良貨を駆逐する」という状況が生まれるおそれがある。

(c) 残された課題

CDMには、その他、CDMレジストリーの整備、吸収源プロジェクトの扱いなどの課題が残されている。吸収源に関しては、COP 9で決定することになっている。その他のイシューに関しても、重要なものから順次、整備されて行くであろう。

(2) CDMプロジェクトの動き

CDMに関しては、制度の整備を待たずにプロジェクトが動き出している。国際復興開発銀行（世界銀行）のプロトタイプカーボンファンド（PCF）、オランダ政府の買取制度（CERUPT）などが先行しているが、ほかにも民間のプロジェクトがいくつも動いてきている。

(3) 民間企業がCDMに取り組む際の工夫

ただ、現状の課題は資金調達である。日本政府も政策投資銀行などを使った支援措置を行おうとしているが、民間企業による工夫も必要であろう。

CDMでは、大～中規模プロジェクトの場合、CDMからの収益だけでプロジェクトを成り立たせることは非常に難しくかつリスクが大きい。従って、『それだけで収益性のある「ペー

ス」部分+追加的削減分である「CDM」部分』という形のプロジェクトを考えた方が現実的であろう。日本の技術力の高さが生きるのも、この「追加的」部分である。

例えば、そのままでCDM化には問題があるものの、すでに何らかの海外直接投資や公的資金などによるプロジェクトがあった場合、それを母体として、何らかの「追加的」削減をもたらす部分を検討し、その部分にCER（認証排出削減量）を用いることで採算がとれるように工夫することが現実的であろう。すなわち、温室効果ガス（GHGs）排出削減は、そのプロジェクトが生み出す「付加価値の1つ」という考え方である。海外プロジェクト案件に関して、社内でこのようなスクリーニングをかけるという工夫も有効であろう。

（4）排出権市場の胎動

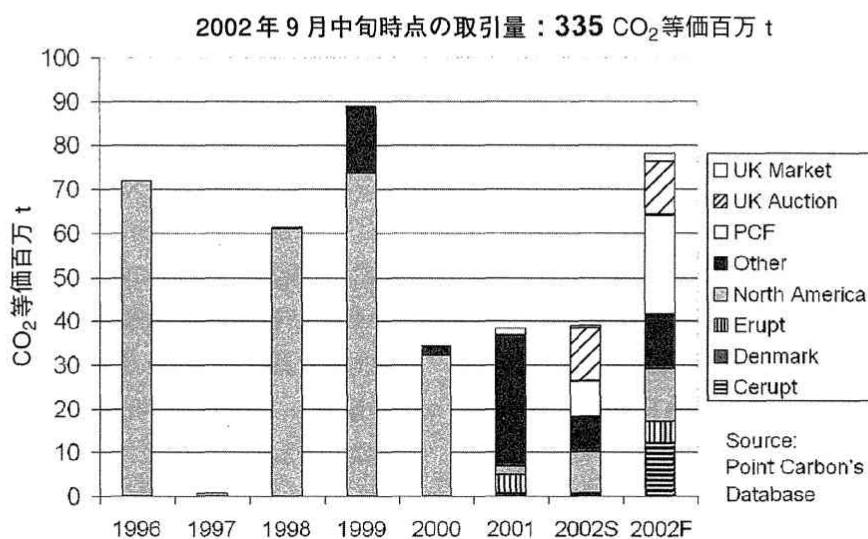
CDMスキームを牽引するのは、その市場性の魅力であろう。CDMのクレジットを含んだ

GHGs排出権市場は、新しい市場を形成していくものと考えられる。

一般に、GHGsに関する排出権市場は、各国において個別に排出権取引などの制度が発足する形で発展していくと考えられる。しかし、市場が分離された形で発展していく中で、CERsは「共通通貨」、すなわちどの制度においても使用できる排出削減量として、重要な役割を果たすと期待される。

排出権や排出削減クレジットの市場は、図3に見られるように、自主的な削減が北米でいわば勝手に取引されていた状況から、政府や世界銀行などの公的な制度によって「明確に定義された」ものへと移行してきている。量だけでなく、図示してはいないが取引数も指数関数的に増えてきている。今後、京都議定書によって、米国などを除き、世界全体をカバーする巨大な市場が生まれるにあたって、CERsはその先鞭をつけるであろう。

ここで注目されるのは、EUの動きである。



2000年頃まで量が大きかった自主削減に基づく北米市場は小さくなり、代わりに公的な制度に基づく市場規模が急速に大きくなってきている（2002Fは推計値）。

図3 GHGs排出権市場の近年の動き

昨年末、EU閣僚理事会は、EU全域の排出権取引制度にゴーサインを出した。企業への割当方法など、制度設計の詰めが残されているものの、2005年開始を目指して、大きく動いてきている。実際はEUだけでなく、ノルウェーやスイス、拡大EU諸国なども制度に参加すると考えられるため、さらに大きな市場となるであろう。

日本を含むその他の国々がどのような動きをするかはまだわからない。しかし、一般に市場は大きいほうがベターであり、カナダ、豪州、ニュージーランドあたりが市場を繋げるように動く可能性も否定できないであろう。

上記のように、CERsは「共通通貨」となるであろうから、2008年を待たずに、大きな排出権市場が誕生する可能性は認識しておくべきであろう。日本も国内取引市場を海外市場とリンクさせることを、選択肢の1つとして、考えておくべきであろう。

最後に認識しておくべきことは、この「市場へのアクセスの魅力」こそが、米国が将来、議定書に戻ってくる上での最大の実質的インセンティブとなるということである。

3. 新しい国内制度の可能性

(1) ステップバイステップ・アプローチ

(a) 地球温暖化対策推進大綱の考え方

2002年3月に、日本の温暖化対策の方針として改訂された「地球温暖化対策推進大綱」は、2005～2007年を第2ステップ、2008年以降を第3ステップと位置づけ、制度を順次、整備していこうとしている。それぞれの節目として、例えば2004年に、それまでの政策の

包括的レビューを行い、必要であれば次ステップの新たな政策を立案し、実施する準備をすることになっている。

ここでの疑問は、

- どのようにして必要性を判断するのか？
 - 必要だと判断された場合、政策を立案して準備するのに1年間で間に合うのか？
 - どのような政策が導入されようとしているのか？
- などの点であろう。

(b) 日本の排出量の現状

日本のGHGs排出量は、図4のように推移してきており、2000年段階で基準年比+8%となっている。

(財)日本エネルギー経済研究所の短期見通し(2002年12月)によると、エネルギー起源CO₂に関して、2001年は前年比-1.3%(実績推定)、2002年は前年比+2.6%(予測)、2003年は-2.9%(予測)となっている。エネルギー起源CO₂が全GHGsの方向性を規定するため、全GHGsもほぼこのような数字となるであろう。レビューの行われる2004年時点では、2001年実績あるいは2002年実績をベースにした分析が行われる。

2002年と2003年の大きな差は、原子力稼働の差に依るところが大きいであろうが、いずれにせよ、基準年水準と比較すると、かなり大きなギャップがあるのは事実で、現状政策でそれが埋まる可能性は限りなくゼロに近い。すなわち、審査の結果は、「国内対策の強化」と「京都メカニズムの大幅活用」の必要性を謳ったものとなるのは間違いない。

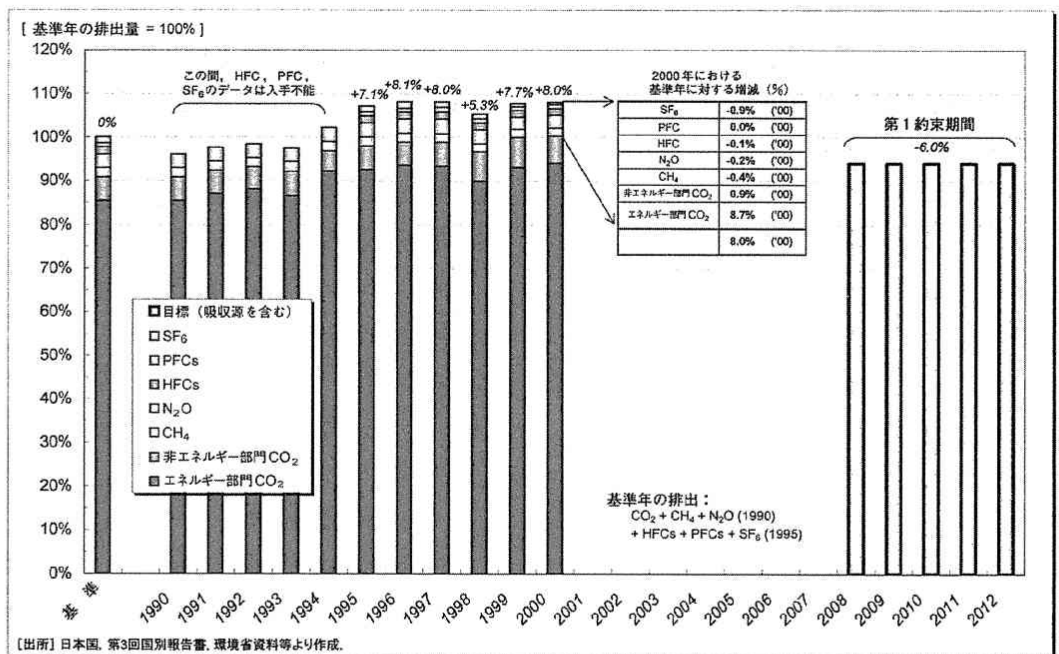


図4 日本のGHGs排出量トレンド

(c) タイミング

上述のように、1年間で、既存政策の審査を終え、「その結果を踏まえて」次の新制度を「審議」し、「決定」し、「準備」するのは、ほとんど不可能であると考えられる。言い換えると、目に見えるところとそうでないところできなり前倒しで物事が動いてくると予想される。利害関係者たる企業などは、そのことに留意しておかなければ、置いていかれることになる。

ステップバイステップ・アプローチは、2005年までは何もしないというシグナルではなく、2005年には大幅な制度改革をする、という政府の堅固な意思表示であると読むべきと言ったら言い過ぎであろうか。

(2) 新たな政策措置に関して

(a) 課税措置

それでは、どのような制度が新たに考えら

れるであろうか？

2002年に急展開した「エネルギー特別会計」の財源たる課税措置の再編の経験は、さまざまな点で示唆に富む。すなわち、動き出してから「早さ」、役所の壁を越えた対応へ道を付けたこと、課税措置拡充への可能性、役所の思惑などである。

少なくとも、課税措置が大きな焦点の1つとなるのは間違いなく、それが2003年度からの形態のまま、その亜流になるか、あるいは全く別の大きな課税がなされるかは、むしろ財務省の大型間接税への取り組み姿勢によって決まってくるものと予想される。

(b) 排出権取引制度

京都メカニズムを活用するためには、排出権取引制度が非常に重要なものとなる。国外で市場ができてきているのに、国内企業がそれへのアクセスのインセンティブが小さいよ

うでは、新しい時代の国際制度に日本が乗り遅れることになりかねない。

前述の税金の議論と兼ね合わせると、すでに大きな省エネを行ってきている産業部門は排出権取引制度の導入、それでカバーできない部門に関しては税金、という図式もありそのようなシナリオであろう。

この場合の重要な視点は、産業界側の対応が迅速に行われるかどうか、という点かと思われる。すなわち、自主行動計画をどうしていきたいか、という点を明確にし、先手を打って出ない限り、政策サイド側の対応はそれを待っていないであろう、ということである。

4. おわりに

この問題を、特に日本の今の動きを見て感じることは、やはり色々な面で英国の事例が参考になるということであろう。

英国では、政府主導での税金（Climate Change Levy）導入の意志が強いと見た産業界は、それならばという形で、排出権取引を用いて自分たちの使いやすい制度を自ら設計した。現在では英国政府もそれを強くバックアップし、最大の知見を持つ米国が足踏みしている間に、英国がこの分野で世界をリードしようという意志が明確に見える。

英国発の多国籍企業の中でも、BP社、Shell社は、巨大な自社内の排出権取引制度を創設し運用してきたが、2002年でそれを廃止している。その理由は、もうその必要性がなくなった、言い換えると、社外で実際の市場が動き出し、彼らはすでに社内での経験から多くの蓄積を得た、という判断である。

もちろん、先駆者にはそれなりのリスクも

あり、EU制度との整合性などの点で彼らはこれから苦勞するところもあるであろうが、彼らはすでに国内排出権取引制度を動かしており、急速に経験を蓄積してきている。ビジネスの世界で、「経験」や「時間」というものの価値は、非常に重要な要素であり、日本の企業や役所も、その「機会を失うリスク」を考慮した上での対応が求められるのではなかろうか。

最初の方で、2002年は「助走」の年であったと書いた。2003年は、そこから「離陸」できる組とまだ助走を続ける組に分かれてくるであろう。どちらに属したいと思うかは、それに対してどのような行動をとるか、という形で表される。

〔寄稿〕

燃料DMEの特徴と ディーゼル新燃料としての利用

梶谷 修一 (茨城大学工学部教授)



〔概要〕

DME（ジメチル・エーテル）は常温、常圧では気体であるが、LPG同様、数気圧で液化しハンドリングが容易である。さらに、自動車用燃料のみならず、発電用、民生用、燃料電池用、化学原料用と多くの分野に利用できるのが特徴である。

内燃機関の燃料としてのDMEは最初、メタノール機関の始動補助燃料*、次にメタノールディーゼル機関の着火補助燃料**として検討された。

デンマークのハルダートプソ社、日本のNKK社が天然ガスから直接DMEを合成するプロセスを開発したことから、DMEの燃料としての利用が検討された。

DMEがディーゼル機関用燃料として優れているのは、①セタン価が高く自着火運転が可能、②無煙燃焼する（吐煙の生成がない）、③燃料中に硫黄分を含まない、④人体に対し無害であり、同時にオゾン層、光化学スモッグにも影響しない等、将来さらに厳しくなると

予測される排気ガス規制を満足させるポテンシャルを有するからである。

また、現在は価格の観点から天然ガスを燃料としているが、将来は石炭、メタンハイドレートを、さらに都市ゴミ等を原料にすることも可能である。さらに、将来バイオマスを原料として妥当な価格でDMEを製造することが可能となれば環境循環型燃料となる。

1. まえがき

（1）人口問題

2000年現在、世界人口は約60億と見積もられ、その半数はアジアの人口である。この世界人口は30年後には80億になると予測されている。日本、欧州、アメリカ***の人口はほぼ一定と考えられるので、30年後にはアジアで約50億の人々が暮らすこととなる。このアジアの人々が生活するエネルギーが必要となる。さらに、アジア諸国の昨今の経済発展はより多くのエネルギーを必要とする。

一方、石油資源を見ると、存在し続けるに

* メタノールは沸点が低いので低温始動性のためメタノールを解質してDMEとすることで始動性を高めた。

** メタノールはセタン価が低く自着火しないので、DMEで着火させた後、メタノールを燃焼させた。

***北米の人口は約1億人程度増加すると予測されており、世界平均のエネルギー消費量からみると約5億人の増加となる。

しても、急増する人口と経済発展を考えると価格は現在の何倍かになる可能性がある。また、そのような高価格であれば現在我々が享受している生活が広く普及することも不可能となる。

従って、石油資源に付け加えるべき新たな燃料が不可欠である。当然、わが国にとっても新たな燃料の存在は石油のみに依存しないエネルギー体制を作る上で不可欠である。

(2) 都市環境および地球環境問題

ガソリン機関からの排出ガスは高度の燃料、空気量制御、シリンダ内の燃焼制御および排気後処理技術によって非常に清浄なものとなってきたが、物流を担う大型ディーゼル車の排気ガスは窒素酸化物(NO_x)と煤のトレードオフの関係から未だ解決策が見いだせない状況である。また、排気ガス規制も年々より厳しい規制が検討され、アメリカの2007年の大型トラック排気規制はガソリン車なみである。一方、地球環境問題、特に温暖化ガスである二酸化炭素(CO_2)を考えると、ディーゼル機関は非常に熱効率が高く CO_2 の排出量が少ないのが特徴である。このため欧州では乗用車の半数以上はディーゼル車で置き換えようとする計画が進んでいる。

(3) 新燃料に求められる特徴

以上のような背景から、新燃料は以下の特徴を有することが必要である。①多くの資源から合成可能なこと、②民生(炊飯、暖房)利用、発電利用、ディーゼル燃料、燃料電池用燃料など多方面で利用ができること、③取り扱いが容易なこと、④人体、環境に影響がないこと、⑤妥当な価格であること、⑥将来

は環境循環型燃料になりうること、このような多くの要求を満たす燃料としてDMEがある。

DMEは現在、世界で約15万トン/年、日本で約1万トン/年、化粧品や塗料のプロペラント(噴射剤)として利用されている。これらはオゾン層を破壊するフロン代替としての利用である。従って使用に先立ち、各種毒性、物性の調査^(1~2)が行われ、LPG並に極めて毒性が低いこと、大気中での分解時間は3から30時間で温室効果やオゾン層破壊の問題が無いことが明らかにされた。

先に述べたようにDMEの燃料としての利用は、当初メタノール機関の始動補助燃料^(3~6)として検討され、次にディーゼル機関の着火補助燃料^(7~10)として検討された。これはDMEの沸点が -24.8°C と低いこと、また、自着火温度が 350°C と低いことによる。DMEが天然ガスから安価に製造する技術開発が行われたこと^(11~12)から単味の利用^(13~17)が検討された。

燃料としてのDMEは、①単味の利用、②ブレンドの利用、に大別できる。①に関してはDMEの燃料物性に適合した新機関開発の指針確立、②に関しては現存する機関および①の新機関普及までの対応となる。なお、次世代の動力源として注目されている燃料電池に関してDME直接燃料電池の利用も可能であるが割愛する。

以下、DMEのディーゼル機関への利用について述べる。

2. DMEの物性

DMEの燃料としての物性を表1に示す。DMEの利点は蒸気圧が530kPaでプロパンの

表1 DMEの主な物性値

Fuel	DME	Diesel Fuel
Chemical Formula	CH ₃ OCH ₃	—
Stoich. A/F ratio	9.0	14.6
Lower heating Val.	28430 kJ/kg	42700
Boiling point @0.101MPa	-24.8 C	180-370
Liquid Density @20deg.C	0.668 g/cc	0.840
Cetane Number	>>55	~60

830kPaよりも低い、自着火温度が350℃と低い、沸点が-24.8℃と低い、無煙燃焼することである。一方、欠点は潤滑性がなく、粘度が低いことである。一般にハンドリングを考えると燃料は液体であることが望ましい。しかし、昨今の自動車の燃料タンクや配管系からの燃料放出規制の厳しさを考えると、必ずしも燃料は常温、常圧で液体である必要はないと考えられる。

3. DMEレトロフィット機関の諸機関性能、燃焼および排気ガス特性の特徴

(1) 供試機関および解析装置

DMEディーゼル機関の諸性能を把握する目的で以下の実験を行った。供試機関は単筒水冷4サイクル直噴ディーゼル機関で、Bore×Strokeは92mm×96mm、圧縮比17.7である。噴射ポンプはジャーク式で噴射ノズル径0.26mm×4、軽油使用時の推奨開弁圧は21MPa、静的噴射開始時期は-17度（クランク角度）である。電子天秤上の1リットル容器（あるいは1ガロン容器）のDMEは窒素ガスで35kg/cm²に加圧し、噴射ポンプに導いた。噴射圧力測定装置、噴射ノズル内部にニードルリフト測定装置を取り付け燃焼圧力計測装置からの信号とともに記録した。排気ガスの

分析装置は一般的に使われているものである。ただし、排気THC（全炭化水素）の大部分が未燃焼DMEであることから、水素炎イオン化検出器（FID）の出力に関しては相対モル感度を0.605（CH₄換算計測値を1.52倍する）⁽¹⁸⁾とした。

(2) 機関性能および問題点

DME運転時の特質を軽油運転と比較すると、次のとおりである。

- ① 正味熱効率は軽油運転とほぼ同じ
- ② 無煙燃焼する、
- ③ 排出炭化水素（HC）濃度は低く、さらに、その約8割が未燃焼DMEである、
- ④ 排出する一酸化炭素（CO）濃度が低い
- ⑤ 噴射開始時期を遅らせた時の正味熱効率の低減が少ない、
- ⑥ NO_x排出濃度は軽油運転と同等であるが無煙燃焼することからその削減が容易、
- ⑦ DMEの無潤滑性は噴射ノズルニードルおよびポンププランジャを激しく摩耗させる。ただし、潤滑向上剤の添加で解決可能である。しかし、表面処理および信頼性の検討は不可欠である。
- ⑧ DMEの低粘度は噴射ノズルのリターンからの漏れ、および噴射ポンプ部からの漏れをもたらす。この解決にはリターン燃

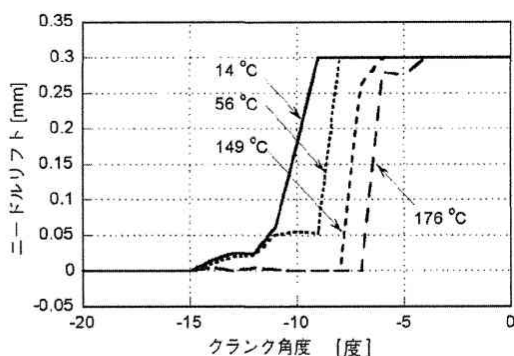


図1 噴射ノズル部温度とニードルリフトの関係

料を噴射ポンプ前に戻すことで解決可能である。将来的にはコモンレール方式の採用が不可欠と考えられる。

- ⑨ 機関停止時配管に残る燃料の処理（全て回収か消費してから機関停止等の手法）が不可欠。
- ⑩ 噴射ノズル部の温度が高くなるに従い、ニードルリフトの立ち上がる時期は遅れる（図1参照）。さらに、ノズル開弁圧が低いとニードルリフトの振動が噴射後期に観察される。これは高負荷、高回転速度領域におけるキャビテーション問題が予測され、噴射ノズル部の（燃料）温度制御が不可欠である。
- ⑪ DMEの沸点が -24.8°C であることから、物理的着火遅れは非常に短く、また、自着火温度が低いことから噴射時期による指圧線図、熱発生率への影響は少ない。代表的熱発生率を図2（静的射開始時期のクランク角度は -17° および -5° ）に示す。これら詳細については現在噴射開始時期任意に制御できるコモンレール噴射装置を用いて検討を行っている。

図3にDMEのP-T線図を示す。雰囲気圧力が低いと減圧沸騰となりDMEは急激に沸騰す

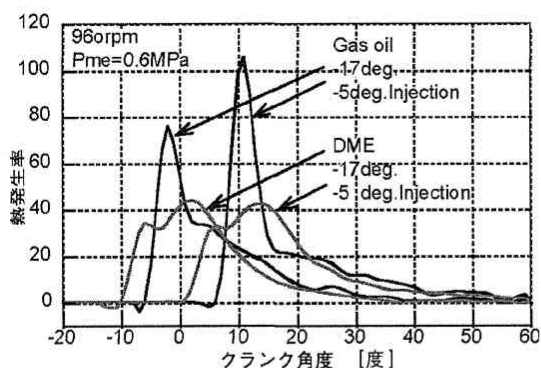


図2 噴射時期変化と熱発生率の関係

るが、雰囲気圧力が 5 MPa 以上、雰囲気温度が 400 K 以上になるとDMEの蒸発現象はなくなる。DMEの臨界点での密度は 0.258 g/cc と常温液体密度 0.668 g/cc の約38%である。また、DMEの発熱量が軽油の発熱量の65%であることから（同一ノズル径の時）噴射期間の増加となる。従って着火後の燃料噴射は、超臨界状態への噴射となり噴霧到達距離の短縮をもたらす。特に負荷が増加した際には顕著となる。かかる特徴は後述するが、燃焼室内の雰囲気圧力を下げて燃焼する低圧縮比DME機関を検討する上で重要な点である。

4. ブレンド燃料の可能性

DMEの物性に基づいた新規機関の重要性とは別に、現存するディーゼル機関の有害排気成分の削減を行うには、燃料改質が有効である。特に単味DMEでは磨耗、漏れ、発熱量および燃料密度の低減が問題となるがブレンド燃料（最初からの混合および燃料供給時の混合）で解決可能となる。新燃料ではそのインフラ整備が問題となるが、バイフュエルとすることで解決できる。そこで以下に述べるブレンド燃料の幾つかを検討した。

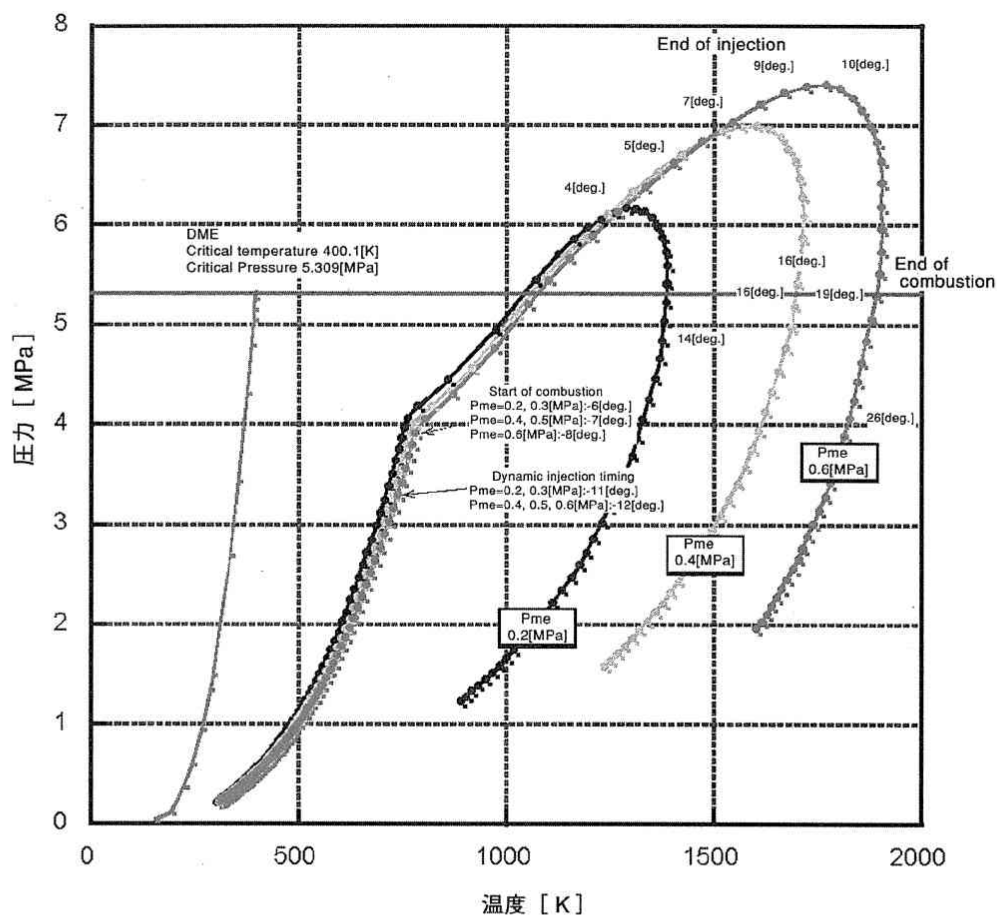


図3 DMEのP-T線図

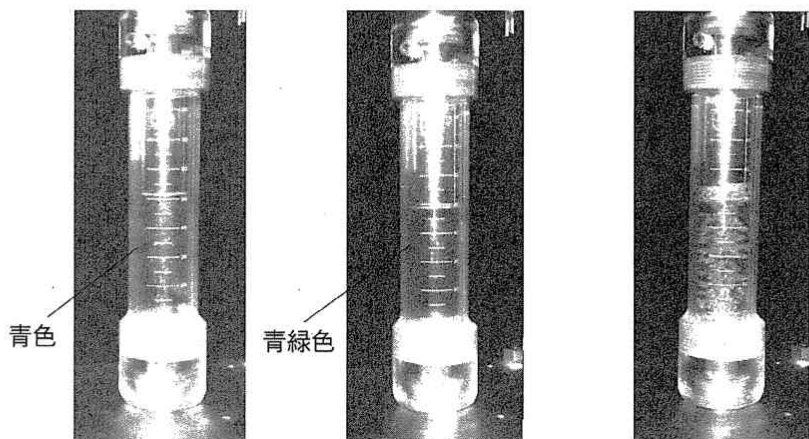


図4 (a) DME単味 (b) DMEと軽油の混合油 (c) DMEの減圧沸騰

[DME+軽油]

先に述べたように、DMEは炭化水素系燃料を溶解する。図4は(a) DME単味、(b) DMEと軽油の混合油、(c) 減圧時のDMEの沸騰である。DMEと高粘度燃料とのブレンドはDME単味時に問題となる噴射系(特に噴射ノズル)からの漏れを多少解決する。例えば、DME単味でもノズル開弁圧を低くするに従い漏れ量は減少するが、同等の効果を燃料の粘度を増加させることで実現できる。DMEと軽油の割合を2:8にすると軽油単味でノズル開弁圧20.5MPaと同等の漏れ量にできる。さらに、軽油をブレンドすることで、燃料質量を増加させ噴霧到達距離の増加が期待できる。この様なブレンドによる噴霧の微粒化は吐煙濃度の低減をもたらす(図5参照)。データは割愛するが、機関性能その他は軽油運転とほぼ同等である。

[DME+プロパン等]

DMEは物性が液化石油ガス(LPG)に近いので、DMEインフラとしてLPGインフラを転用することが可能である。また、LPGの価格安定、DMEの発熱量増加にはLPGとのブレンド利用が考えられる。さらに、民生用と燃料用との燃料性状の統一化の可能性を検討する意味で、DME+プロパン燃料の諸機関性能に及ぼす影響を検討した。その結果、噴射開始時期(静的噴射開始時期)のクランク角度を軽油運転と同じ -17° とすると約40%のブレンドまで安定運転できることが分かった。この際の機関性能、排出ガス特性はDME単味の時と同等である。なお、ブタン等のブレンドにより運転範囲を拡大でき、DME+プロパン+軽油(あるいは植物油、廃食油)など多

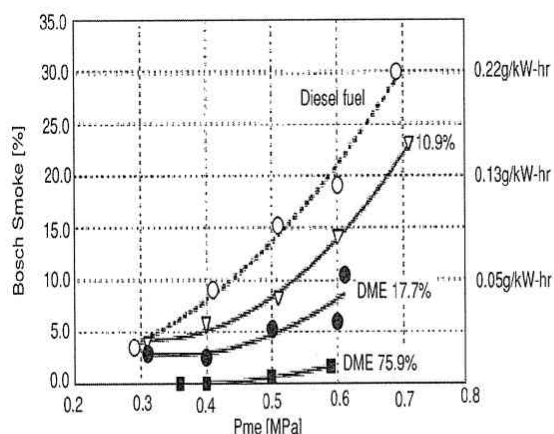


図5 DMEブレンドの吐煙削減効果

成分燃料としての可能性もある。

[都市ゴミの処分問題]

次に、都市ゴミの処分問題がある。一般に都市ゴミの約20%は廃プラスチック(廃プラ)といわれ、安易な処分方法ではダイオキシン等別の汚染物質を発生させる。そこで、廃プラから軽油相当の燃料を製造する技術開発が行われている。この廃プラ還元油のセタン価は製造条件および材料となるプラスチックの種類で変化するが比較的燃料粘度が高く、燃料加熱などの方法が必要である。そこで、DMEと廃プラ油とのブレンド燃料の機関性能、燃焼特性、排気特性に及ぼす影響について実験した。その結果、ほぼ軽油ブレンドDMEと同様の機関性能を示すことを確認した。バイオマス資源由来の燃料製造の最大ネックは収集システムであるが、都市ゴミを一種バイオマス資源と考えると唯一大規模な収集システムが完備されていると言える。20万都市での試算で、廃プラの約2%を効率60%でDME製造すると、契約している塵芥回収車を全てDMEで走らせることが可能となる。

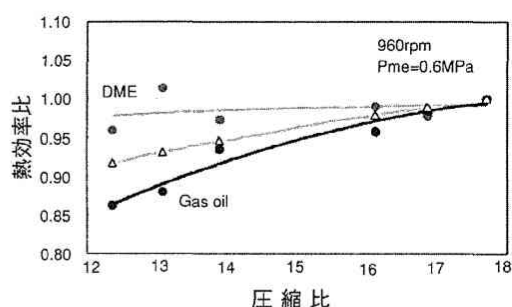


図6 圧縮比と熱効率比

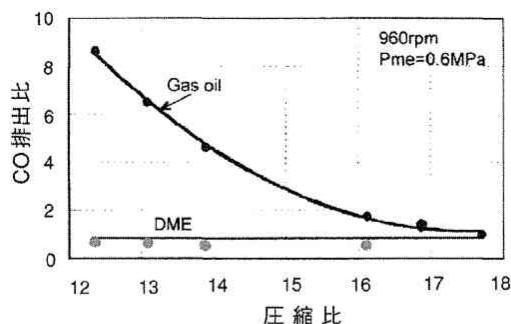


図7 圧縮比とCO排出比

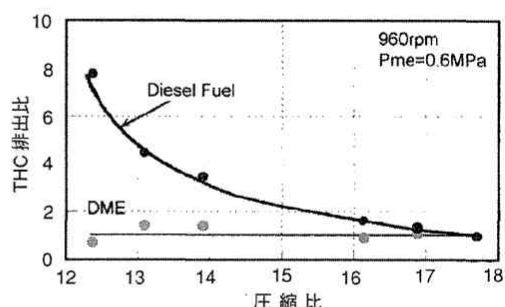


図8 圧縮比とTHC排出比

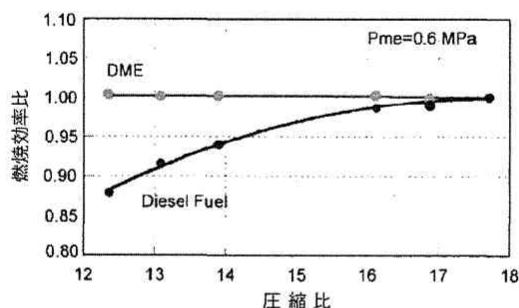


図9 圧縮比と燃焼効率比

5. 火花点火機関と圧縮点火機関の融合

最近のガソリン機関はガソリンの筒内噴射方式を採用している。この際、ガソリンの筒内噴射方式の問題点は、始動時の排気浄化である。先に述べたように、DMEの沸点が低いこと、および着火温度が低いことから、これらの問題を解決すると同時に、全ての原動機をDME燃料駆動にすることができる。そこで、DME機関の低圧縮比化を検討した。

圧縮比は上死点間隙を調整することで10.19, 11.16, 12.36, 13.08, 13.89, 16.12, 16.87, 17.7と変化させた。図6に圧縮比と熱効率比を示す。

DME機関の特徴は圧縮比を下げても正味熱効率の低下が極めて小さいことが特徴である。これは着火遅れが短く、圧縮比を下げても等

容度の低下が小さいこと（噴射時期の最適化で高圧縮比における等容度の増加も見込める）、図7および図8に示すように圧縮比を下げてもCO、THCの排出が極めて少なく、結果として図9に示すように燃焼効率が高いことが主因である。さらに、DMEの燃焼が輝炎を伴わないことから冷却損失も小さく、着火遅れ期間が短いので機関騒音も小さい特徴がある。これらは乗用車用機関を検討する上で非常に重要なことになる。しかし、NOx濃度は依然として将来の排気ガス規制を満足する水準ではなく、脱硝触媒、EGR（Exhaust Gas Recirculation）****の利用が不可欠である。排気に脱硝触媒を適用した際、DME機関の未燃焼HC量が極めて少ないので、排気中にDMEを供給して実験を行った。触媒温度が

****EGRは、一度排出されたガスの一部（EGRガス）を再び吸入空気（新気）と混合させることで、燃焼室内の酸素量を抑制する。これにより、シリンダ内の燃焼が緩やかになり、燃焼温度が低下し、NOxを低減できる。



図10 (a) 供試機関 (b) ボルボ社製のDMEバス (c) 茨城大学試作2サイクル機関

350℃以上でNO_xの約90%の削減が可能となる。また、触媒温度が低い低負荷ではEGRによって同等のNO_x削減が得られることを確認している。これら触媒、EGRがディーゼル機関に簡単に適用できるのは、DMEの無煙燃焼特質によるものである。

図10 (a) は本実験に利用した機関で、圧縮比12.36～17.7まで運転可能である。(b) はボルボ社で試作し、デモ走行中のDMEバスで単気筒あたりの排気量1600ccの大型機関である。(c) は自着火まで約20msec必要な圧縮比6を利用し当研究室で試作したDME予混合気供給、火花点火運転の2サイクルバイクである。すなわち、DMEはこれら機関の共通燃料となる。なお、バイクの燃料にはカセットを用いインフラ整備を不要としている。

次に、コモンレール方式を用いた単気筒機関の実験は佐藤ら(図11参照)によって行われている。図に示されるように吐煙ゼロ、燃費の若干の低下、CO、THC濃度の増加、およびNO_x濃度の低減が報告されている。さらに、NO_x濃度に関してはDMEが無煙燃焼することからEGRを行うことにより大幅な削減が得られる。この際、EGR率50%でも無煙燃焼すること、燃費の悪化がほとんどないことが特徴である。図12にいずれ自動車(株)のDMEバスを示す。このバスはEGRおよび酸化触媒を用いることによって、図13に示すPMおよびNO_xのEURO 5 規制を満足させる水準である。

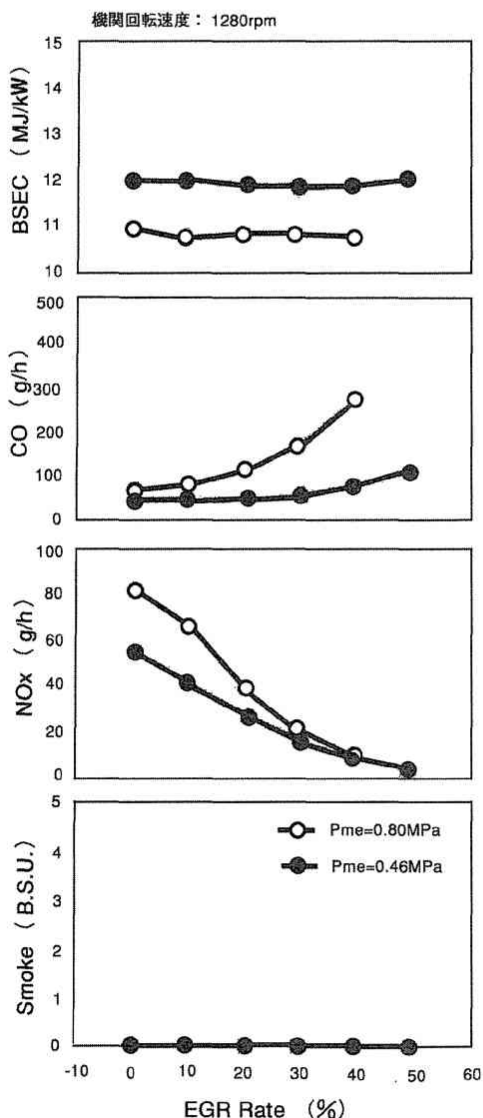


図11 EGRの排気特性に及ぼす影響



図12 いすゞ自動車製のDMEバス

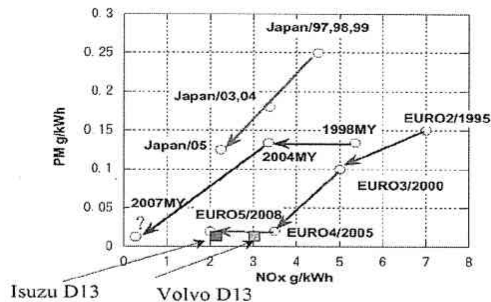


図13 DMEバスの排出ガス特性

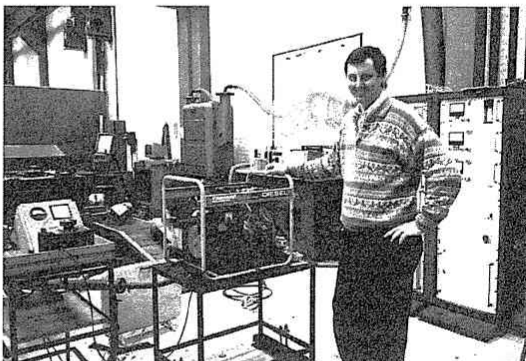


図14 Sorenson教授とDME機関



図15 ボーマン教授と改造前のシャトルバス

6. 海外のDMEエンジン研究

デンマーク工科大学でDMEエンジンの研究が行われた。図14に示すように可般式機関であることからエンジン性能に大きく影響を及ぼす諸項目を十分に計測することはできなかった。その後、ジャーク式噴射ポンプのプランジャの磨耗、高温高压容器内での噴霧の挙動、潤滑向上剤の検討などを行っている。

図15はペンシルバニア大学構内を走るシャトルバスであるが、同大のボーマン教授はエアプロダクト&ケミカルズ社の支援のもと、DME+軽油のブレンド燃料で走るシャトルバスと燃料供給スタンドを試作中である。これはDMEの低潤滑性を軽油ブレンドで補い(19)、かつブレンド燃料で吐煙削減を行おうとするもので、レトロフィット機関でDMEの利用を検

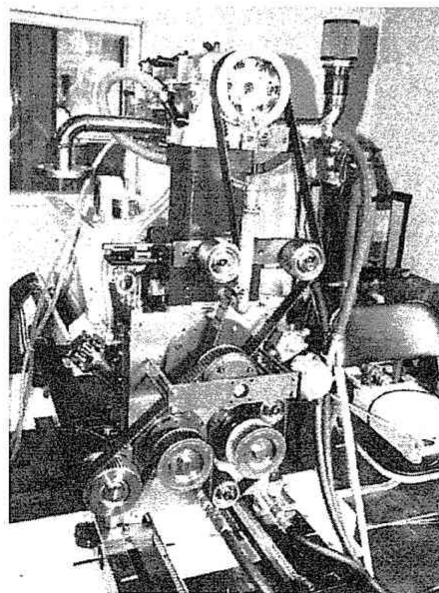


図16 韓国エネルギー研究所のDMEエンジン

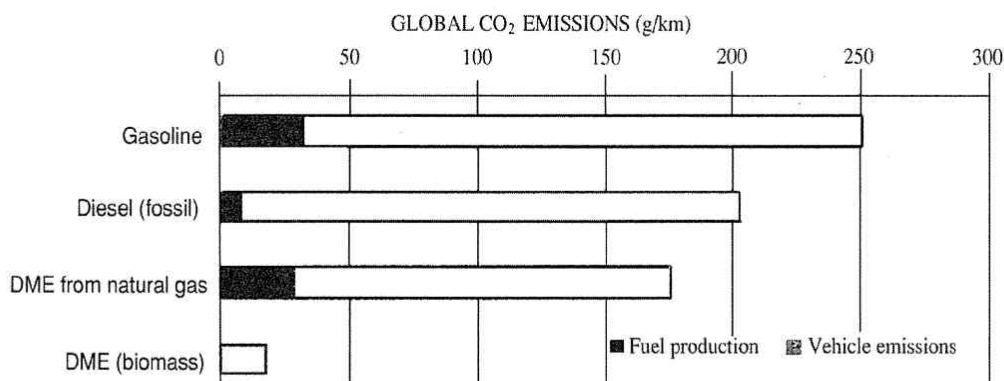


図17 DME機関のCO₂排出

討したものである。

韓国では韓国エネルギー研究所においてレトロフィットDME機関の運転を行い、研究所のプロジェクトの1つに採用され、現在は図16に示す可視化機関を試作し、DMEの噴霧、燃焼機構の解明を行っている。また、全南大学の自動車工学部の金栄吉教授、忠北大学の樫教授らはDME噴霧の研究を、先の韓国エネルギー研究所と共同で行っている。噴射系の開発、試作はAVL米国社およびAVLオーストリア社が行い、ボルボ社製バスで運転している。また、現在はDMEの原料に天然ガスが検討されているが、将来はバイオマスを原料とすることでCO₂の大幅削減が見込めると予測される(図17参照)。

7. 今後の課題

上述したようにDMEは大きな可能性を秘めた燃料ではあるが、今後解決すべき事項が多々ある。例えば、DMEの噴霧特性、空気導入率など基礎的検討、DMEおよびLPGに対応するシール材の開発、DMEの無潤滑性に対応

できる材料の開発、表面処理技術の開発と設計、さらに、現在のディーゼル機関で達成されている高信頼性の確保が必要である。

参考文献

- (1) Bohnen, K.J.M., Areosole Report, 18 (3), 1979,
- (2) H.Holldrof et al, Fuel Phase Equilibria, 40, 1988,
- (3) K.H.Kozole et al, "SAE Paper 881677, 1988
- (4) Galvin, M.P., 8th ISAF, Tokyo, 1988
- (5) M.E.Karpuk et al, SAE Paper 881678, 1988
- (6) Iwai, N. et al, SAE paper 880044,
- (7) Cipolat, D. 11th ISAF, Firenze, 1991,
- (8) M.K.Karpukl, et al, SAE Paper 912420
- (9) Murayama, T., et al, SAE Paper 992212
- (10) Guo, T. et al, SAE Paper 941098
- (11) Hansen, J.B., et al, SAE Paper 950063, 1995
- (12) Ohno, et al. 213th ACS National meeting of San Francisco, CA, April 1997,
- (13) S.C.Sorenson et al. SAE paper 950064, 1995
- (14) Kapus, P. et al SAE paper 950062, 1995
- (15) Macarthy, C. et al, SAE Paper 950061, 1995
- (16) Fleish T. et al, SAE Paper 950061, 1995
- (17) Kapus, P.E. et al, SAE Paper 952754, 1995
- (18) 金野他 日機論 (B編) 67巻659号, pp1849, 2001,
- (19) Shirish V. Bhide et al, Fuel Chemistry Devision Preprints, 2001, 46 (1),
- (20) Denis Gill et al, SAE2001-01-2015

風力発電電力系統安定化等調査の 概要について



七原 俊也 (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
東京工業大学 客員教授)

1. はじめに一調査の背景と目的

(1) 背景

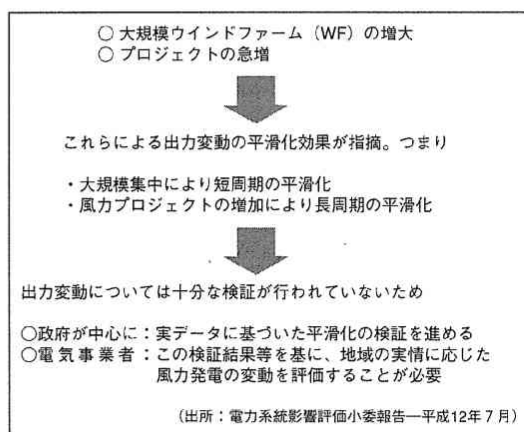
昨年と一昨年に新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）から受託して行った風力発電電力系統安定化等調査の概要について報告したいと思います。

その背景ですが、総合資源エネルギー調査会の新エネルギー部会電力系統影響評価小委員会の中間報告（平成12年7月）に要領よくまとまっています（表1）。中間報告では、出

力変動について、1つはかなり大規模な風力発電所（ウィンドファーム）が入ってきているということ、それともう1つプロジェクトが急増しているということが背景として挙げられています。

大規模なウィンドファームになると、その中に10本から20本もの風車があるわけですから、それなりの出力平滑化が生じるはずですが、また、プロジェクトが増えてくればあちこちにウィンドファームが置かれますから平滑化が生じるはずですが、こういう平滑化、出力変動については十分検討が行われていないので、政府が中心に実データに基づいた平滑化の検証を進め、電気事業者がこの結果をもとに地域の実情に応じた変動を評価することになっています。私たちの調査は、前者を背景にしています。

表1 風力発電を巡る状況と出力変動



(2) 目的

風力発電は天候、立地条件により出力が変動するという課題があるため、複数地点で風況を測って出力安定化、平滑化を調べること（第1目的）、複数の風力発電導入による系統

* 本稿は、昨年8月30日の「第204回月例研究会」におけるご講演を、本誌掲載のためにテープ起こししたものです。

表2 風力発電を巡る状況と出力変動

風力発電は天候、立地条件等により出力が変動するという課題があるため ○出力変動のマクロ的な解消方策に関する実証 ・複数地点の風況調査による出力安定化の検証 ○風力発電の系統に与える影響調査 ・複数の風力発電導入による系統への影響シミュレート (出所：電力系統影響評価小委報告—平成12年7月)
--

影響のシミュレートを行うこと（第2目的）です。この手法について検討しなさいというのが全体の目的になります。

2. 調査の内容

調査の内容は第1に風を測ること、風のデータ集めです。第2は、風を風力発電出力に換算すること。さらに第3に、発電出力がどんな特徴をもっているか、風力発電がたくさん入ったときにどうなるかという分析、すなわち系統影響を分析することでした。

本調査は、(財)日本気象協会、三菱重工業(株)、

(財)電力中央研究所の3機関で共同して実施しました。風の部分については日本気象協会が、出力換算については三菱重工業(株)にお願いしています。残りの出力分析以降は私どもが担当しました。

(1) 風況観測

まず、風況観測からお話しします。北海道内の16サイトに30本の観測ポストを立てて観測しました。高度20mおよび40mで1ケ年、1秒サンプリングで、GPS (Global Positioning System) により同時性を確保しました。

その16サイトは図2のとおりです。1つの例外を除けば概ね沿岸部にあります。○と●がありますが、●は2km弱の間に複数本の観測ポストを立てた地点です。ウィンドファームの中では10基、20基という風力発電機を置くのが通常ですから、そういう狭いところでの風況を見たかったのです。また、複数本を設置する地点としては、地形が平坦なサイトと起伏があるサイトとを選びました。地形の

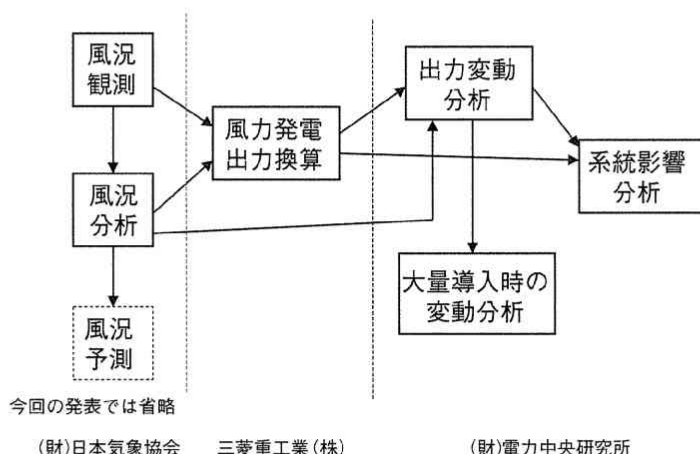


図1 検討の流れ

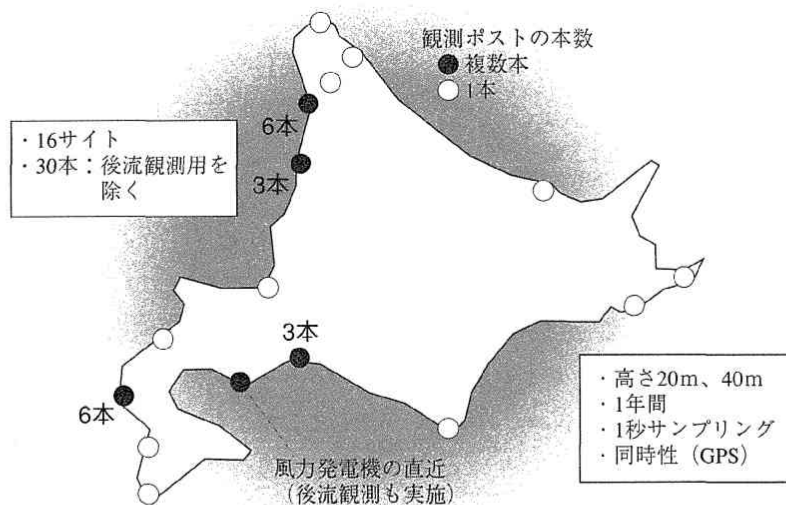


図2 風況観測サイト

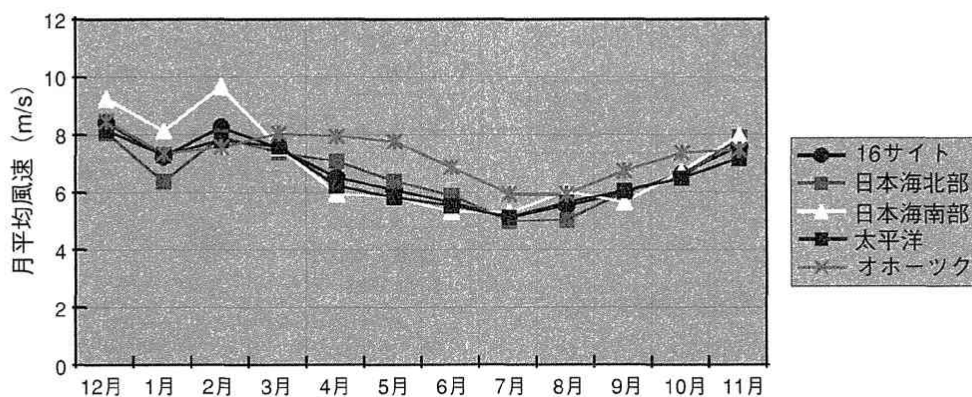
影響を見ながら風況を調べたということです。

それともう1つ少し特殊なサイトがあります。出力換算は実測データと照らし合わせた上で精度を見ないとチェックできません。そこでサイトでは風力発電機の真前で風況を測っています。正確に言いますと、真前と一緒に真後ろでも測っています。風力発電の

場合、後ろ側の気流に影響（後流）を及ぼします。それを見るために後ろでも測りました。

(2) 風況分析

風況の特徴、例えば、風速変動、風向変動、さらに、季節変動、違う地点における風速の



※ 全般に冬場の方が利用率が高い。ただし、地域差がある。

図3 月平均風速（2000年12月～2001年11月）

相関（コヒーレンス）、その他諸々の検討をしました。

① 風向の季節変動

図3は2000年12月から2001年11月までの1カ年で測った平均風速です。冬場に強く夏場に弱いということが一般的な傾向です。ただ個別に見ると、例えば夏場に出力が高めとなる地点があったり、厳寒期に下がる地点もあります。どうも局地的な気象条件が影響しているようです。

② 異地点の風速の間の相関

今度はウィンドファーム内での風速の相関（コヒーレンス）についてお話しします（図4）。コヒーレンスとは、スペクトル解析の指標の

1つで、周期別に見た相関係数のことです。妙な例え話ですが、小学校の1学年が遠足で山に登っているとします。学年全体の大きな流れとして山へ登っているのですから、学級間の相関（コヒーレンス）は大きい。ところが児童1人1人の足の上げ下げや動きを見るとばらばら、完全独立です。つまり、児童間でのコヒーレンスは低いということになります。

私たちの調査では、2km弱の範囲内に6本の観測ポストを立てています。この6本の風速を比較するとコヒーレンスがわかるということです。周波数の高い、言い換えれば短い周期で動く風は少し離れた場所の風とは独立になります。先ほどの例え話でいえば、児童1人1人の足の上げ下げと同じです。逆に、

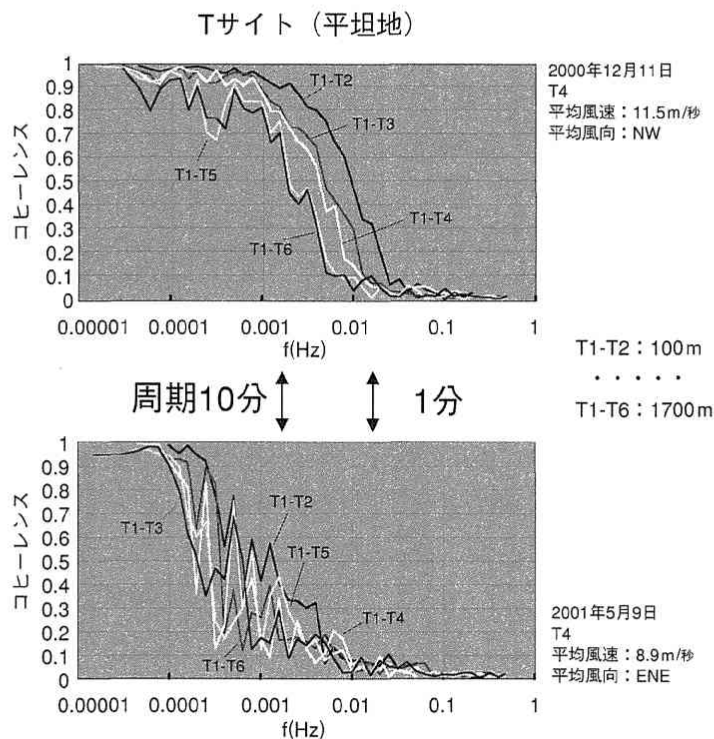


図4 風速のコヒーレンス

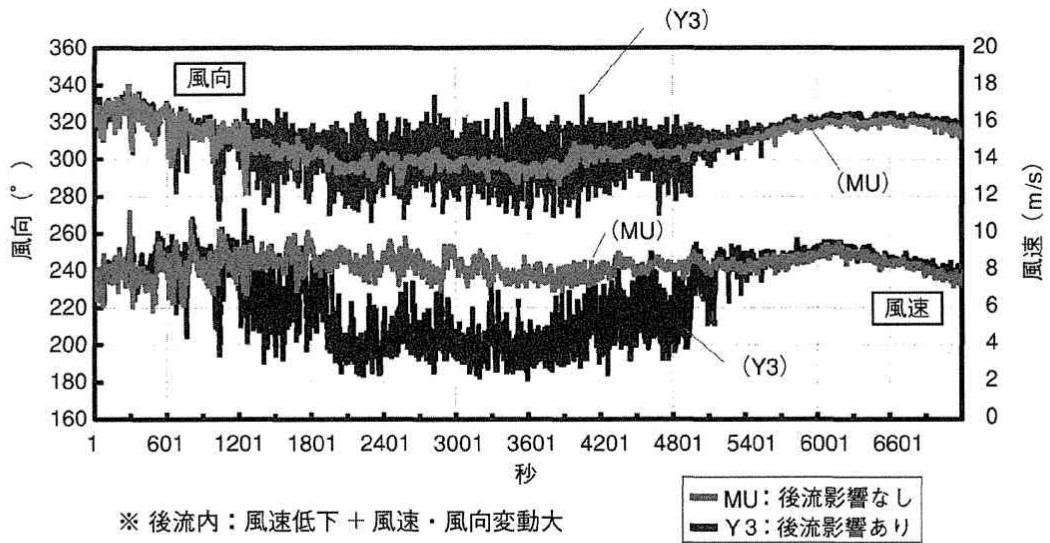


図5 風車後流の影響

1 学年が山へ登っているという目的に照らしたゆっくりした周期についてはコヒーレンスが大きくなります。その中間的なゾーンもあり得ます。

当然のことですが、距離が離れば離れるほど相関は下がってきます。図4で隔離が100mのT1とT2の間の相関係数は一番高いです。一方、1,700mの離隔があるT1とT6だと相関は低下します。

周期が1分以下では大体ほとんど独立になるようです。10分ぐらいになるとより相関が出てきます。しかしこの状況は、風向によって異なりますし、季節、風速レベルによっても異なってきます。さらに、平坦地形の方が、風がそんなに乱れませんので、コヒーレンスは多少大きく出ます。

③ 風車後流内の風速・風向

図5は風車後流内の風速・風向を示したものです。下が風速、上が風向です。それで、MUが風車の前、Y3が風車の後ろの風車直径

の4倍ぐらい離れた地点で測ったものです。風速8 m/sぐらいの風が風車の後ろでは4 m/sぐらいになっています。

もう1つ見ていただきたいのは、風車後ろの風向の変動が非常に大きいことです。要するに、後流に入っているかどうか判断する一番簡単な方法は風向の乱れを見ることです。

(3) 風力発電出力の推定

発電出力の推定には、翼空力特性（翼素・運動量理論）にピッチ角等の制御特性を考慮した詳細換算出力とパワーカーブを使った簡略換算出力の2種類の手法を目的に応じて併用しました。パワーカーブというのは、一方に風速を他方に出力を取ったカーブのことです。

詳細出力換算では、風車タービンをセグメントに分け、セグメントごとの空力特性を織

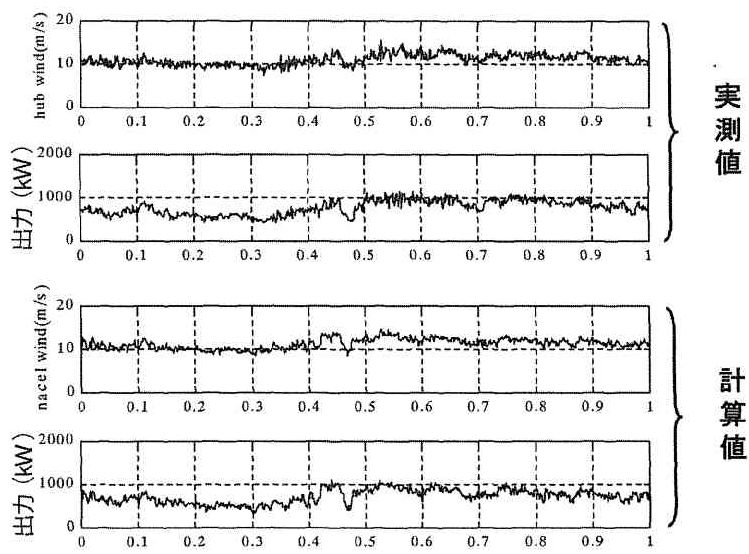


図6 発電出力の実測値と推定値

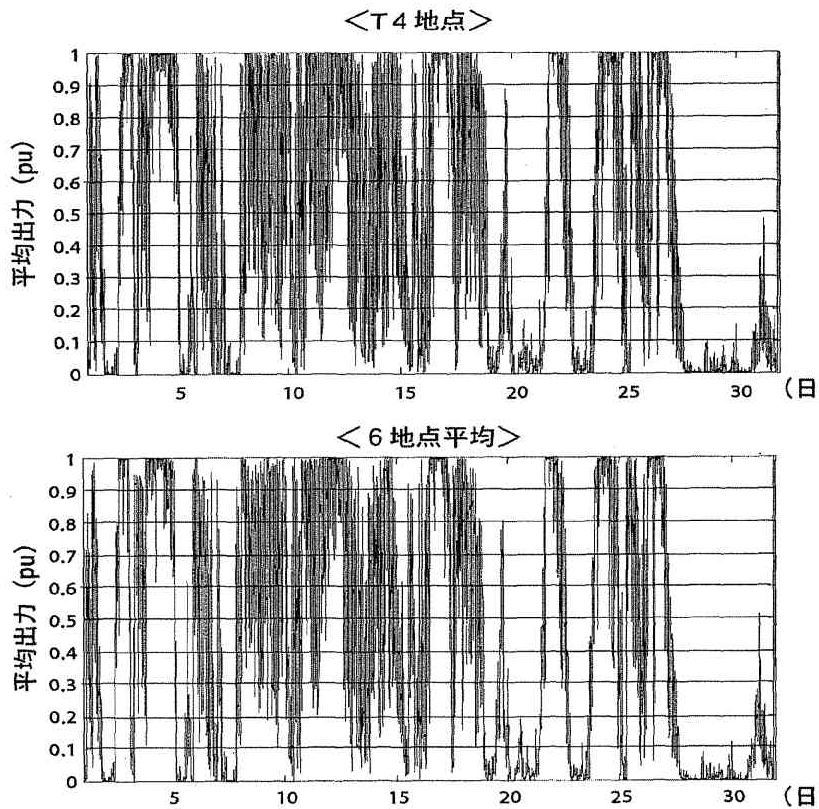


図7 Tサイトの出力(2000年12月)

り込み、ついでに風車等の制御特性を織り込んだシミュレーションを行いました。

詳細出力換算では、30地点の風況強観測データのうち、特徴のある時間帯をピックアップして換算を行うとともに、観測された6地点の風速、風向波形を基に、TサイトとKサイトをウィンドファームとした場合のファーム内各地点の風速を推定しました。TサイトとKサイトは図2に示した6地点で風向観測を行ったサイトです。

図6は、実測値と詳細換算による推定値の例です。大体同じような波形が再現できていると思います。

(4) 波形から見た風力発電出力

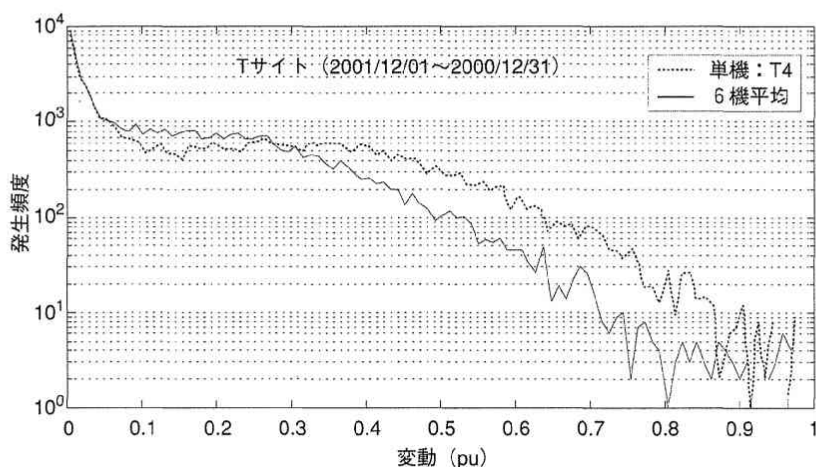
① 平滑化効果の検証

図7に2000年12月のTサイト（T1からT6で構成）のうち、T4地点の出力と6地点平均の出力をプロットしています。これは風速

データを1分刻みで簡略換算したのですが、上と下で波形はそれほど変わりません。2kmぐらいのところに発電機を散らばらせたからといって大きく平滑化するわけではないことが判ります。

今言ったことをもう少し定量的に示すために、出力変動幅という考え方を導入しました。出力変動幅とは、ある時間内の最大出力と最低出力の差です。図8は、図7のデータについて評価時間10分で計算したものです。横軸は出力変動幅です。これはパワーカーブを使った簡略換算ですので、1pu**以上の出力も0pu以下の出力も実際とは違って現れません。出力変動幅は0から1の間になります。

6機平均だとT4だけの場合よりも出力変動が小さくなりグラフが多少下へシフトします。ただ、最大のところを見ると変動幅はほとんど定格出力に達していますので、出力は10分間に最大でゼロからフル出力までふれていると見るのがいいと思われます。



※ 評価時間10分では、出力はほぼゼロ～フル

図8 Tサイトの出力変動分布

** pu (per unit) : 設備容量で定格化した値。つまり定格出力に対する比。1pu=100%

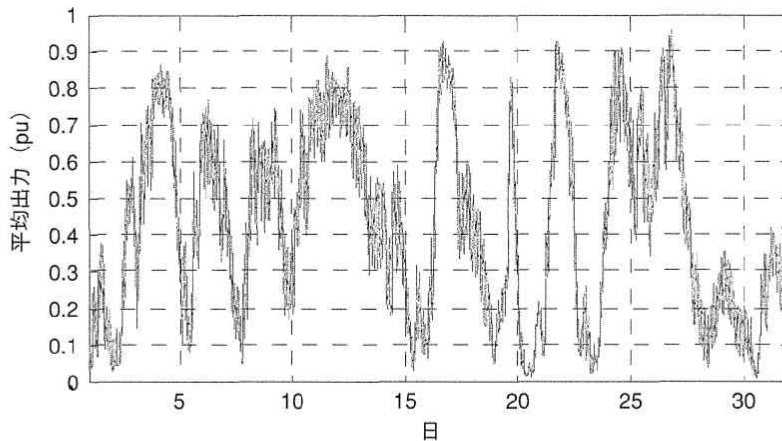


図9 30地点の平均出力の変動（2000年12月）

では、観測した30地点全部ならかなり平滑化が効くだろうという議論があります。実際、かなり平滑化が効きます。図9は、同じ2000年12月の30地点の平均出力の変動を計算したものです。定格出力で規格化した変動幅が図7より相当小さくなっています。これが平滑化効果です。

図9では逆に3日とか4日とかの周期でゆっくりしたうねりが見えてきます。これは気象擾乱の通過などによるうねりだと思います。

12月は非常に風が強い時期なのですが、30地点のほとんどどこも風が吹かない時もありますし、30地点ともほとんど全部フル出力までいく時もあります。これが1日ぐらいで入れ替わる時があります。つまり、1日で見ると、やはりほぼゼロ出力からフル出力までふれることがあります。なお、平滑化効果があるといっても、30地点の出力を平均した図9でも縦軸を30倍すれば、短周期の変動、つまりグラフのぎざぎざは図7よりずっと大きくなります。

② 出力変動が大きなケース

出力変動が大きくなる場合には、大きく分けて2つのケースがあるようです。1つは、気象要因によるケース。低気圧が通るような場合です。もう1つは、気象要因と風車の制御特性が複合するケースです。

気象要因によるケースでは、2つ玉低気圧などの通過で荒れるように天気図から判断しやすいケースと、天気図からは判断しにくいケースがあります。例えば、厳冬期、北海道の一部地域で風が弱くなることがあります。北海道のど真ん中が徹底的に冷えて局地高気圧ができ、本来なら北西の季節風が吹くのに風がやんでしまうことがあります。

気象要因と風車の制御特性の複合ケースには、強風によるカットアウト、カットアウト後のリカバリ、風向急変による失速、低風速で回る二速機の切替などがあります。

出力変動のスピードで見ますと、気象要因による場合の方が、気象要因と制御特性が組み合わさる場合より小さい傾向があります。北海道を低気圧が通っていくのはそれなりの

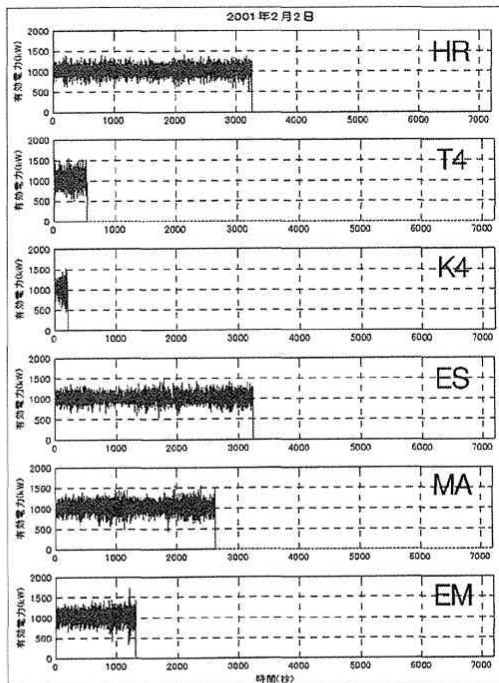


図10 強風時のカットアウト事例

時間がかかりますので、それなりにゆっくりした変動になります。

ただ、全系から見た変動の大きさで言うと、概して気象要因による場合の方が大きいです。ただし、観測した中で例外的な事例が幾つかありました。風速が大きくなった時に危険防止のため風車の回転を止めるカットアウト、風向急変による失速などです。

● カットアウト事例

図10は2001年2月2日、典型的な2つ玉低気圧が北海道中央部を通過した時の結果です。昼過ぎに全道で強風が吹き荒れています。25 m/sの風が10分以上吹くとカットアウトするという条件で計算していますが、1時間以内に30地点中16地点、16サイト中6サイトでカットアウトが起こっています。

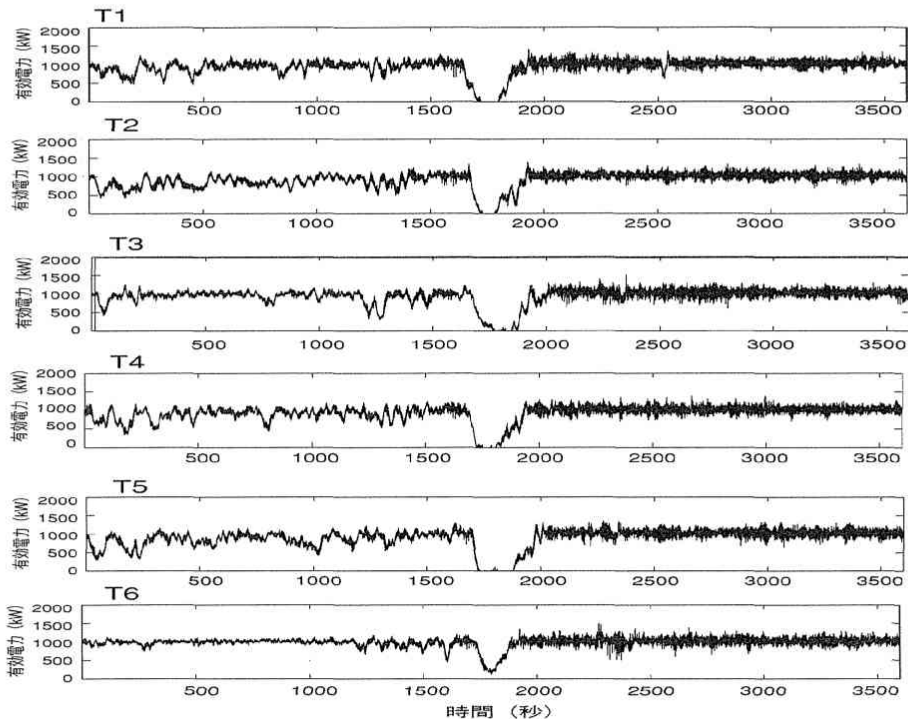


図11 風向急変による出力変動事例

● 風向急変の事例

風向急変は、場所によって起こりやすい所と滅多に起きない場所とありますが、Tサイトはそれなりに起きる地点でした。

そのTサイトで閉塞前線が通った2001年2月1日に、3分間で風向が80度急変した事例があります。風向が3分間にはほぼ真横を向いたという状況です。この時、18m/sぐらいの強風が吹きながら、風向が急変したのですが、風車の方位制御が風向急変に追いつきませんでした。このため、図11に見るように6カ所の発電出力波形が、すーっと落ちて、またすーっと戻る形になっています。この時、恐らく前線が6本の並びとほとんど平行に通っていったんだと思います。ちなみに、地点によっては3分間で百数十度ぐらい振れるという事例もありました。

● 発電タイプによる違い

風力発電機には、固定速・可変速、定格風速の異なるもの、その他いろいろなタイプがあります。タイプが異なることでどれぐらい出力が違うか調査しました。風速が定格風速以上の場合にも、二速機切替の有無、また無

効電力の面では、タイプによる明確な差が出る場合があります。ただ、定格風速以上の場合を除けば、周期数分以上の有効電力の変動については差が小さいことが判りました。

3. 平滑化効果と大量導入時の出力変動

(1) パワースペクトルによる分析

風況分析でウィンドファーム内の周期別のコヒーレンスを調べると、周期1分はほぼ独立ですが、周期10分になるとかなりの相関があるという話をしました。ただし、コヒーレンスというのは1地点対1地点の指標です。ウィンドファームでのすべての風車の組み合わせに対し、そのようなコヒーレンスがあるとして、そのファーム全体の出力はどうなるのという話がややこしくなってしまいます。そこでここでは、パワースペクトルの考え方でこの平滑化効果を検討します。

パワースペクトル分析とは、変動周期別に周期の成分の大きさを分析することです。図12の上のカーブが2000年12月の1カ月間のデータに対するTサイトの単機および6本合計

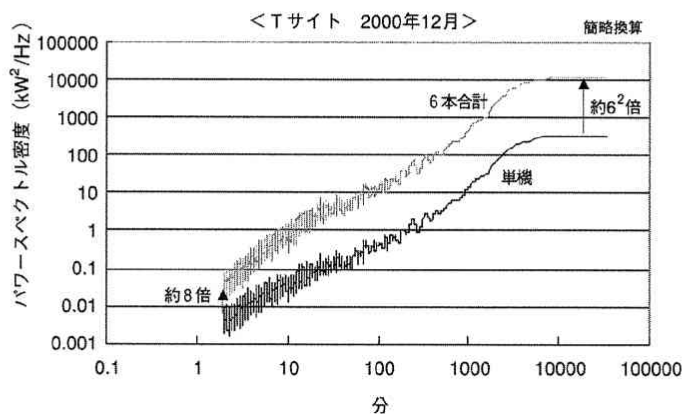


図12 ウィンドファーム規模のパワースペクトル

の発電出力に対するパワースペクトルです。ちなみに、12月の1カ月分のデータを使っていますので、風が弱い時も風向が違う時もありますが、いろんな条件をなべて平均した特性とご判断ください。

パワースペクトルというのは実は普通のスペクトルと違い、出力の二乗に比例します。それで、6本がまったく同じ動きをすると、6本合計のパワースペクトルは単機の36倍になります。逆に6本が完全にばらばら、統計的に独立であれば6倍になります。図12で2本の曲線の差は変動周期2分くらいのところだと8倍です。上下の波形の広がり具合が独立と連動を分けているわけですが、1分あたりでは狭まっていて、10分あたりを過ぎるとかなり広がっています。要するに、1分、10分あたりで独立と連動が切り替わるという感じでは。

また、図12の上のカーブでは、高周波成分だけ、つまり曲線の左端で差が縮まります。言い方を変えると、1本の発電機の出力に比べ、何本か組み合わせたものは高周波分だけ出力が小さくなります。要するに、等価フィルタみたいな働きが出てくるということです。

この等価フィルタの形もパワースペクトル

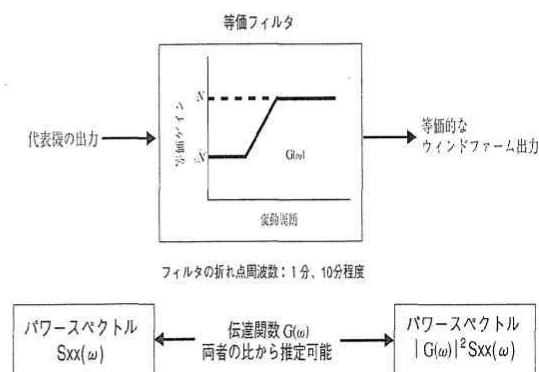


図13 ウィンドファームの出力推定方法

の値から推定できます（図13）。やはり1分、10分程度でゲインが切り替わっている感じです。因みに、低周波領域でのゆっくりした変動については、 n 基の合計出力は単機の出力の n 倍。速い変動については $\sqrt{n}$ 倍になります。

（2）広域における平滑化

広域でのウィンドファームの平滑化となると、話が非常にややこしくなります。16サイトの発電出力の相関（平均コヒーレンス）をいろいろな日について計算した例（図14）があるのですが、日によりまちまちです。離隔が数百キロあっても相関が高いケースも結構あります。どうも気象状況によって決まっているようで、低気圧が通るなど明確な気象擾乱が見られる日に相関が高くなる傾向が見えます。そういう日には、離隔が数百キロあってもそれなりの相関があります。逆に周期10分以下では離隔が数十キロもあればほとんど独立に動きます。やはり変動周期と連動具合というのはつながりがあるという話です。

（3）大量導入時の出力変動

ここまで、30地点で計った風のデータをベースに議論をしてきました。ただ、ウィンドファームがたくさん導入されたときの出力変動の大きさは、30地点だけでは推し計れない部分があります。それについて検討したのが次のステップです。

最初にやったのが大量導入時の出力変動推定方法の開発です。それを使って極めてシンプルなケースですが、たくさん入ったときの出力変動の特徴を分析しました。ウィンドフ

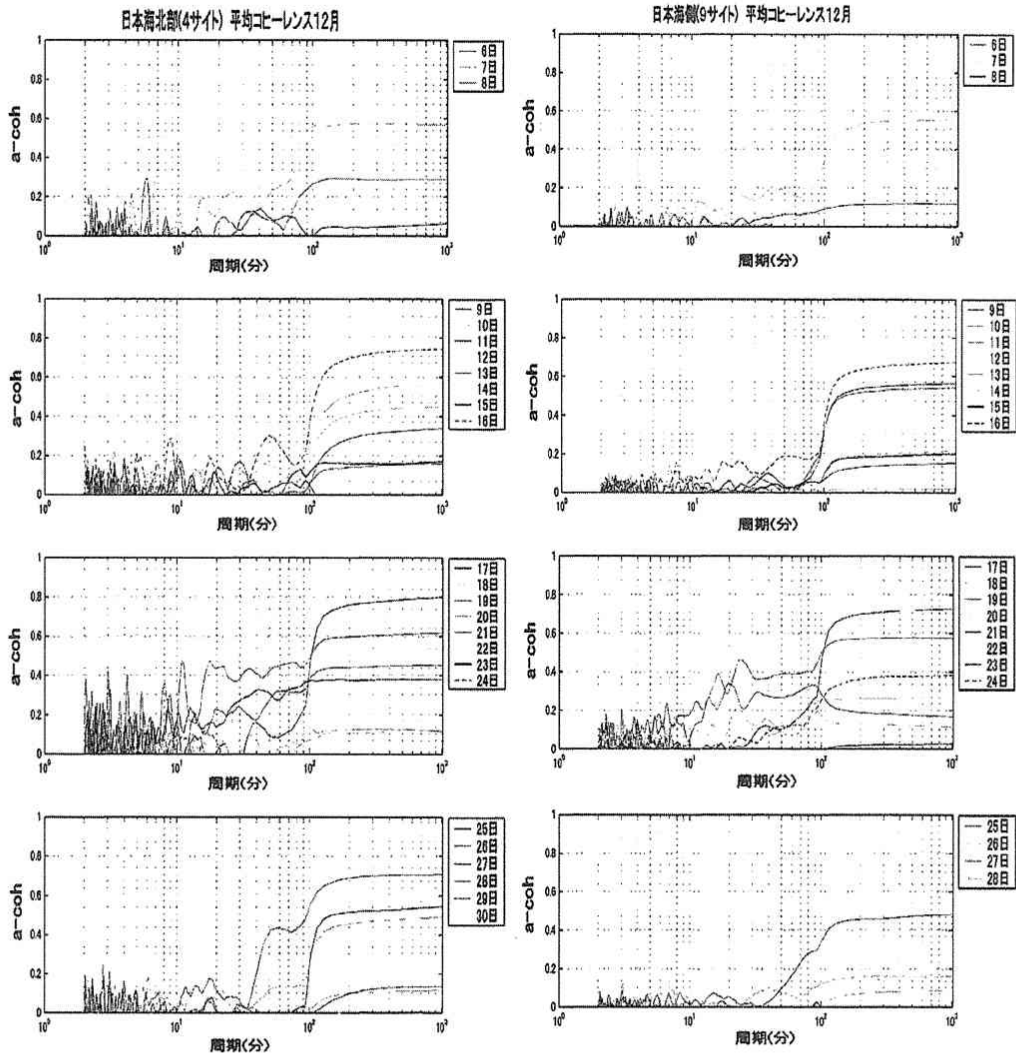


図14 広域における平均コヒーレンスの計算例（2000年12月）

ファームの出力推定については、図13で紹介した等価フィルタを使っています。代表基の出力を入れれば、ウィンドファーム全体の出力がある程度出てきます。

今回は、例えば、私どもの狛江、我孫子、横須賀、大手町にある研究所の各々がウィンドファームだったとすると、各地点で測った実測値を持ってきて、さっきの等価フィルタを通し各地のウィンドファームの出力を出し、

それを合計すると全体の出力が出るだろうという考え方をとりました。

それで、2つのケースについて計算しました。ケース1は、容量が何万kWになろうと場所は同じ、地理的な分布は変わらない場合の出力変動幅の変化です。ケース2は逆に、トータル出力を一定にして、風車発電機の地理的分布を変化させた場合の出力変動幅の変化です。

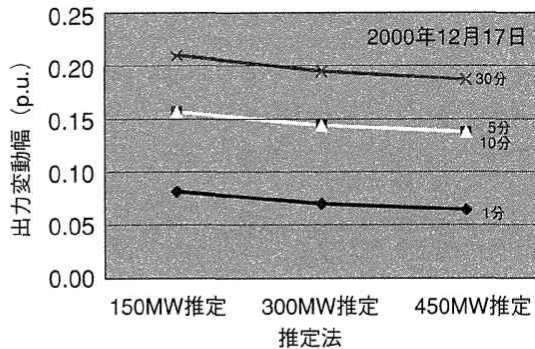


図15 風力発電容量と出力変動幅

それで計算してみますと、ケース1は図15のようになります。容量が15万kW、30万kW、45万kWと増えても、定格出力比で見た出力変動幅はそんなに変わりません。

地理的分布を変えるケース2は、図16のようになります。このケースでは変動幅が大きく変わります。1地点とは狛江だけ、2地点とは、狛江・我孫子という具合です。そうすると、明らかに下がっていきます。

以上のことをまとめますと、地理的な分布がそれほど変わらないなら、出力変動は総設備容量によって大きく変わることはないと考えてよいということ。もう1つは、風車の設置地点の分布の違いは、非常に大きく作用しますので、これについてはどういう条件を入れるべきかを把握した上で計算しないとちゃんとした値は出てこないということです。

4. 系統影響のシミュレーション

(1) 風力の出力変動の影響

電力システムというのは刻一刻需要と供給を一致させないといけません。そこに風力が入るとどうなるか表3にまとめました。

時間から日オーダーで考えると、ゼロ出力か

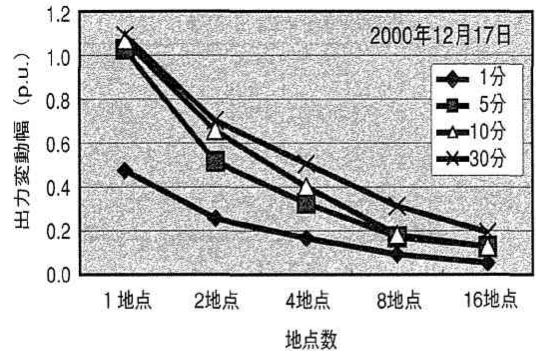


図16 風力発電の分布と出力変動

らフル出力ぐらいいまで振ることがあるので、それに対応した調整力を確保する必要があるということ。これを含め厳しいのは深夜軽負荷時で火力を最低負荷程度まで絞っているケースかと思います。また、長い時間領域を考えたときには、風力発電出力の予測が難しいという問題があります。例えば今、風力発電出力が下がっているとして、それが下がり続けるのか戻ってくるのか、そのあたりの予測ができるか。やはりそのあたりが難しいなということです。

秒から時間オーダーでは、いろんな制御、つまり負荷周波数制御 (LFC)、ガバナフリー (GF)、経済負荷配分制御 (EDC) とかが行われています。

表3 出力変動の需給運用・制御への影響

● 時間～日オーダー：

- 他電源で風力導入容量に相当する連続的な調整力の確保が必要。
- 深夜軽負荷時で火力出力を最低負荷程度まで絞っている場合等に対応が困難となりうる
- 風力発電出力の予測は難しいことも、円滑な対応を困難とする一因

● 秒オーダー～時間オーダー

- 需給制御（および需給調整）での対応が必要
- 十数分程度以上の長周期の変動を対象とする EDC、数分以上で十数分程度を対象とするLFC、さらに短い領域を対象とする発電機の GFの組み合わせ

(2) 周波数変動シミュレーション

本検討では、風力発電出力の変動を想定した場合における、LFC、GF運転を考慮した場合の周波数変動についてシミュレーション解析を実施しました。EDCや人間が関わってきた需給調整とかは技術計算になじみにくいので対象外としました。

モデル系統は図17のとおりです。水力機と火力機があって、それにGFとLFCによる制御が行われ、LFC指令は中央給電指令所から出ているという流れです。その他に原子力機、その他のGF、LFC対象となっていない電源があります。それから系統擾乱として、ランダムに変動する需要と、風力の出力変動を重ねたものを入れてあります(図18)。それで計

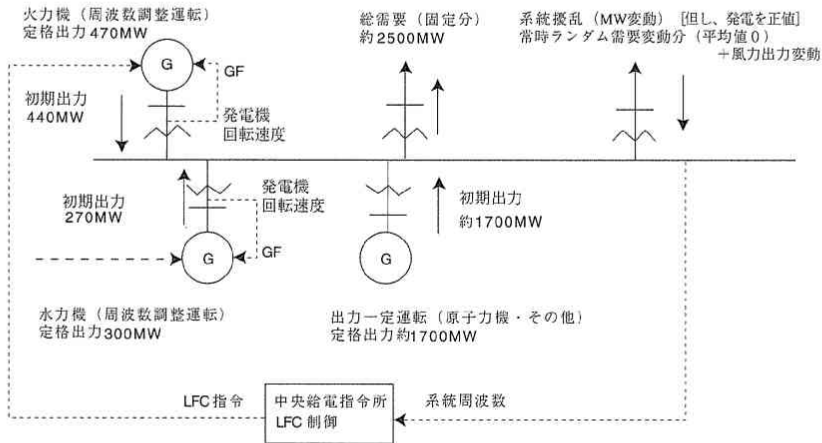


図17 周波数変動解析用モデル系統

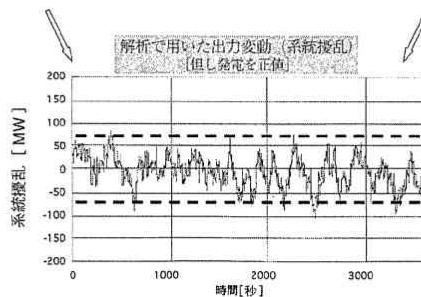
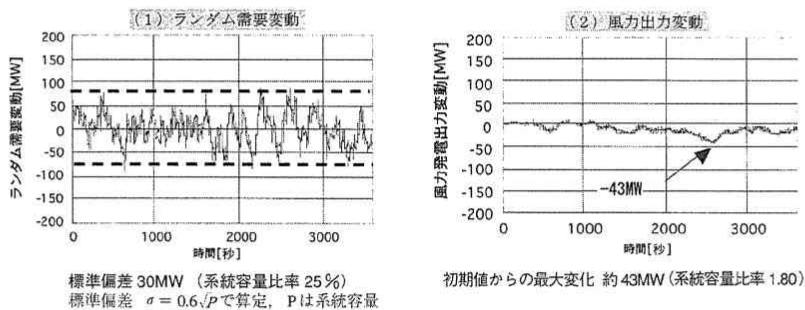


図18 系統擾乱のシミュレーション

算するに際しては、もちろん各々の出力とか容量、周波数特性その他のパラメータを決めてやる必要はあります。周波数調整容量がどれくらいあるかということは当然結果の仕上がり非常に影響してきます。計算は周波数の運用管理値を $\pm 0.3\text{Hz}$ として行っています。

一般需要変動に風力の出力変動を重ねると、図19のように周波数がびよこんと下がるところが出てきます。このように、もともと一般需要変動のみで系統周波数変動がほぼ限界にある運用条件で、風力の出力変動が重なると、

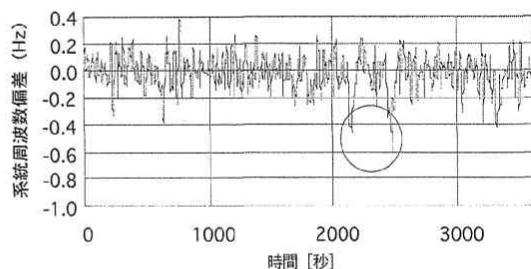
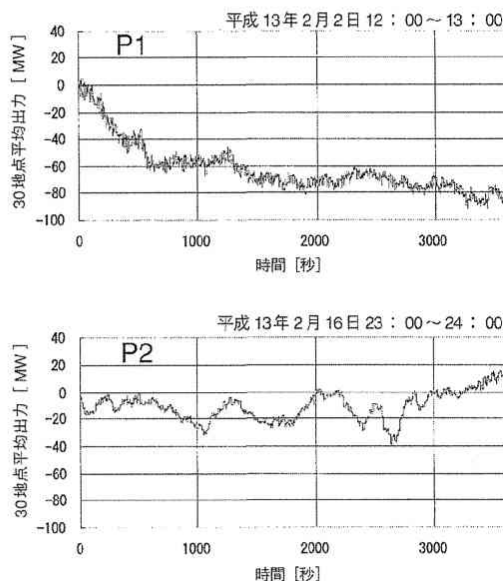


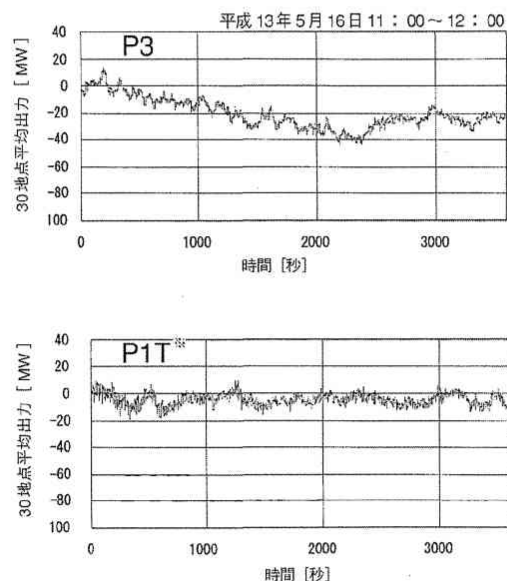
図19 系統周波数変動のモデル計算例



突発的な周波数変化をもたらすことがあります。

風力発電の出力変動パターンもいろいろ見えますと、ある程度くせというか代表的な変動パターンがあります。どういうくせがどういう時に影響するのか調べてみたのが図20です。パターンP1は急激に下がっています。パターンP1Tは、パターンP1から周期20分以上の変動分を取り去ったものです。こういうパターンの先がある程度読めるとして、長周期についてはEDCその他でこの変動を除去できるだろうと想定したわけです。そうして計算してみると、表4のようになります。風力発電の出力レベルの変動が大きいパターンP1、P3で、周波数変動は大きくなるという傾向があります。ただし、P1でも周期20分以上程度の変動を除去したP1Tでは周波数変動は大幅に改善されています。

言い方を変えると、風力発電出力の大幅な



※ 左上P1から長周期成分(周期20分程度以上)を除外

図20 風力発電の出力変動パターン

表 4 周波数変動例（系統容量約2500MW）

ケース名 (風力変動パターン)	系統 容量 MW	風力 発電 連系	周波数調整 容量%MW (MW)		系統擾乱 %MW (MW)			周波数変動 Hz		
			GF	LFC	標準 偏差	最小/最大	平均	標準偏差	最小/最大	平均
標準	約2500	無	3.13 (75)	1.25 (30)	1.25 (30)	-3.67/3.70 (-88.1/88.9)	0.0 (0)	0.1029	-0.325/0.36	-0.0009
パターンP1	〃	有	〃	〃	1.63 (39)	-6.90/2.47 (-165.7/59.2)	-2.6 (-63)	0.1382	-0.659/0.27	-0.0995
パターンP2	〃	有	〃	〃	1.21 (29)	-4.11/3.20 (-98.7/76.9)	0.54 (-13)	0.1007	-0.325/0.34	-0.0011
パターンP3	〃	有	〃	〃	1.42 (34)	-4.87/3.16 (-116.8/75.9)	0.83 (-20)	0.1039	-0.338/0.32	-0.0121
パターンP1T	〃	有	〃	〃	1.29 (31)	-4.12/3.93 (-98.8/94.3)	0.0 (0.0)	0.1060	-0.362/0.37	-0.0016

表 5 周波数シミュレーションのまとめ

- (1) 風力発電出力の周波数への影響度合いは、常時の需要変動の大きさと風力発電出力変動の大きさの相対関係で異なる。
- (2) 常時の需要変動のみで周波数調整的に厳しい状況では風力発電連系によって突発的に大幅な周波数低下が生じることがある。
- (3) 風力発電出力変動のうち長周期成分による出力レベルの大幅な変化が周波数へ与える影響が大きい。このため、需給制御でどの程度対応できるかが重要なポイントと考えられる。

■本検討では、風力発電の出力変動パターンとして、風況実測結果から求めた30地点平均出力の出力変動パターンを入力した。これは、風力発電の出力変動の大きさは風力発電の総設備容量よりもその地理的な分布により定まり、変動周期別にさまざまな平滑化効果が働くため、一般的な風力発電の出力変動パターンを想定することが不可能であるという事情によっている。

■また、風力発電出力には変動周期別にさまざまな平滑化効果が働くため、本検討では特徴的な入力パラメータとして、短周期変動の大小、長周期変動の大小などの検討も行い、それぞれの変動パターンに対する周波数変動の特徴を整理している。したがって特定の系統を対象とした検討を行う際には、風力発電の設置地点の分布や個々のサイトの出力変動および、周波数変動の大きさを左右する電力系統の調整力の保有状況等のパラメータについて、対象とする電力系統に即した条件を入力した上で周波数変動の分析を行うことが必要である。

変動をどの程度まで予測でき、どの程度まで需給制御、LFC等に対応できるかがこういう時の周波数の荒れを左右するポイントになると思います。周波数変動シミュレーションの結論については表5にまとめました。

5. おわりに

最初に2つの柱があると申し上げましたが、出力変動に関わる柱については、風力発電の

出力変動の様相をそれなりに明らかにできたと思います。ウィンドファーム及び広域的な平滑化効果の解明については、等価フィルタを使って平滑化効果を入れる方法などを提案させていただきました。

風力発電の系統に与える影響については、その分析を実施し、どういう状況、どういう要因が影響を強く及ぼすか明確にしました。今後の検討の参考になれば幸いです。

蓄電池併設風力発電導入可能性調査

市川 建美 (財電力中央研究所
CS推進室 部長)

藤田 光一 (財エネルギー総合工学研究所
プロジェクト試験研究部 主任研究員)



1. はじめに一調査目的

風力発電は、新エネルギーとして非常に期待されている電源ですが、風力発電の出力は、図1のように変動します。図1は縦軸が風力発電機の定格出力程度、横軸が6時間程度に相当します。風力発電の導入が進み、電力系統に数多くの風力発電機が連系すると、条件によっては電圧と周波数を変動させるという問題が指摘されています。

経済産業省電力系統影響評価小委員会の中間報告書（平成12年）では、まず電圧問題について各種ガイドラインで対応を整備できるとしています。周波数問題については対応が未整備なので、対策が必要とされました。風力発電の出力変動が大きくなると周波数変動が大きくなる場合があります。需要家サイドの製品品質に影響が出ないようにするには、周波数変動を今以上悪くしてはいけないということで、調整電源の増設、連系線の活用、蓄電池の併設、可変速タイプの風車の導入というような対策が考えられます。

こういう状況を踏まえ、蓄電池併設風力発電導入可能性調査が行われました。この調査

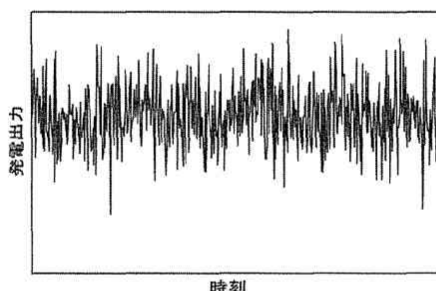


図1 風力発電出力の波形例

の目的は、①蓄電池併設風力発電システムの実証試験、②実証データを基にした同システムのシミュレーション解析、③平滑化効果、システム効率、経済性、蓄電池の安全性と信頼性を含めた総合評価です。

2. 実証試験の実施体制と内容

(1) 実施体制と調査スケジュール

今回の実証試験の体制を図2に示します。実証試験のサイトは「八丈島」、「竜飛」、「泊」の3つです。新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）から財エネルギー総合工学研究所が委託を受けまして、「八丈島」サイトについては東京電力㈱にNAS電池の設置と実証試験の実施までを委託しています。「竜飛」

*本稿は、昨年8月30日の「第204回月例研究会」におけるご講演を、本誌掲載のためにテープ起こししたものです。

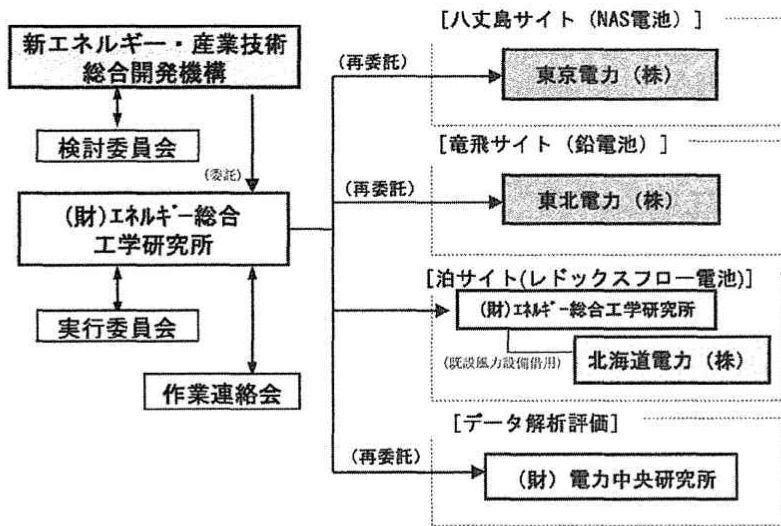


図2 調査の実施体制

サイトでは同じく鉛電池の設置と実証試験の実施までを東北電力(株)に委託しています。「泊」サイトについては(財)エネルギー総合工学研究所が直接レドックスフロー電池の建設および実証試験を実施しています。北海道電力(株)には既設風力設備の借用という形でご協力いただいています。そして各サイトで得られたデータを電力中央研究所で解析評価をしました。

本調査は平成12年度から平成14年2月まで行われました(表1)。平成12年度は、試験内容の検討、試験設備の設計と工事を行い、平成13年3月までにシステムを完成させました。その後、データを収集し、分析・評価をして平成14年2月に事業が終了しました。

表1 スケジュール

年度	平成12年度 (平成12年8月～平成13年3月)	平成13年度 (平成13年3月～平成14年2月)
研究内容		
1. 基本計画策定・システム設計 (1)基本計画策定 (2)基本システム設計	● → 10 8 → 10	
2. システム整備等 (1)サイト別機器仕様検討 (2)システム設置工事	● → 12 11 → 3	
3. 解析・評価 (1)試験方法の検討 (2)解析・評価方法の検討 (3)試験・データ収集 (4)データ解析評価 (5)総合的評価	10 → 1 10 → 3 3 → 8 3 → 9 3 → 2 10 → 2	8 → 1 9 → 2 10 → 2

表2 蓄電池システム

サイト	八丈島 サイト	竜飛 サイト	泊 サイト
風力発電機出力(kW) ^{注1}	500	300	275
蓄電池システム 種 類	NAS	鉛	レドックス フロー
定格出力(kW、AC)	400	200	170
" (kW、DC)	417	215	185
定格出力での放電時間 (h)	7.2	4.0	6.0
交直変換装置定格出力(kW、AC)	400	200	275 ^{注2}
蓄電池システム定格出力(kW、AC)	400	200	170

注1: 風力発電設備は既設

注2: 高出力運転試験のために電池定格出力よりも大きく設定。(高出力運転以外では、リッチャーを設定(170kW)。)

(2) 実証試験システムの構成

蓄電池システムの概略を表2に、蓄電池を併設する風力発電設備の構成を表3に示します。併設した風力発電設備について、「八丈島」サイトでは定格出力500kWで、発電機は多極同期発電機+回生インバータと書いてありますが、要するに可変速タイプの発電機です。

表3 蓄電池を併設する風力発電設備

項 目	仕 様		
	八丈島サイト	竜飛サイト	泊サイト
風車形式	水平軸プロペラ式	水平軸プロペラ式	水平軸プロペラ式
ロータ配置	アップウィンド型	アップウィンド型	アップウィンド型
ロータ中心高さ(m)	44	30	30
ロータ直径 (m)	40	29	28
ロータ回転数(rpm)	18~38	43	43
起動風速 (m/s)	2.5	5.5	5.0
定格風速 (m/s)	12.5	14.5	12.9
停止風速 (m/s)	25.0	24.0	24.0
出力制御方式	翼ピッチ角制御	翼ピッチ角制御	翼ピッチ角制御
発電機形式	多極同期発電機 + 回生インバータ	誘導発電機	誘導発電機
定格出力 (kW)	500	300	275
発電機回転数(rpm)	18~38	1,500	1,500
定格電圧 (V)	400	400	400

「竜飛」サイトは出力300kWの誘導発電機、「泊」サイトは出力275kWの誘導発電機で、それぞれ標準的な発電機が入っています。

今回設置した3種類の蓄電池の簡単な比較を表4に示します。NAS電池は名前のとおり

ナトリウムと硫黄を使った蓄電池です。この蓄電池の運転温度は常温ではなく300~350℃です。この蓄電池には、エネルギー密度が高い、充放電サイクル寿命が非常に長いという特徴があります。

表4 蓄電池の比較

電池種類 比較項目	NAS 電池	鉛電池	レドックスフロー電池
反応物質	正極：硫黄 (S) 負極：ナトリウム(Na)	正極：二酸化鉛 (PbO ₂) 負極：鉛 (Pb)	正極：5価バナジウムイオン 負極：2価バナジウムイオン
電解質	ペーザルミナ (固体)	希硫酸	希硫酸 (液体)
運転温度	300~350℃	常温	常温
主な補機	ヒーター	なし	電解液循環ポンプ
保守	不要	定期的な均等充電	不要
標準的な放電時間 (例) (定格出力時)	7.2 時間	10 時間	任意 (電解液量による)
定格以上の高出力放電	設計変更により可能	数倍も可能	短時間なら2倍程度
長期停止後の起動	約 55 時間	瞬時	数分程度
エネルギー密度比	3	1	0.7
効率 (DC端)	92%程度	80%程度	82%程度
充放電サイクル寿命	3,500サイクル以上の実績がある。	500サイクル以上の実績がある。	13,000 サイクル以上の実績がある。

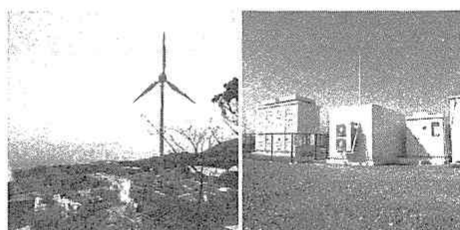
注：各蓄電池メーカー資料等から抜粋

鉛電池は一般的な蓄電池で、自動車のバッテリーにも使われているものです。今回の風力用には、充放電サイクル寿命が非常にいいタイプを採用しました。常温で作動すること、エネルギー密度はNAS電池より少し小さいという特徴があります。

最後にレドックスフロー（RF）電池ですが、5価バナジウムイオンと2価バナジウムイオンを常温で希硫酸の中に入れて電荷のやりとりで電気をやりとりするという蓄電池です。

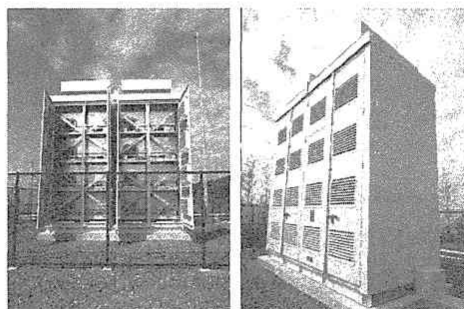
（3）実証試験サイト

図3が「八丈島」サイトと取り付けたNAS電池です。NAS電池は本体部分、交直変換装置、制御装置等で構成されています。図3（b）

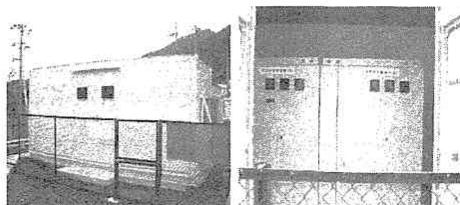


(a) 八丈島地熱発電所外観

(b) NAS電池システム外観



(c) NAS電池外観



(d) 配電盤収納コンテナ外観

(e) 交直変換器

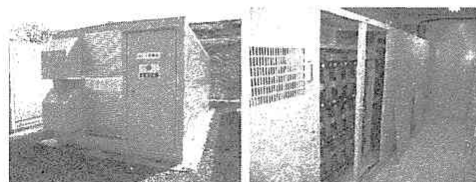
図3 八丈島サイト

の左端がNAS電池、中央が配電盤、右端が受電設備です。図3（c）よりNAS電池は大きく2つのユニットに分かれており、200kWずつのユニットになっています。図3（e）が交直変換器です。

次に、「竜飛」サイトですが、図4（a）が竜飛第7発電所です。4つのコンテナがあり、一番右が共通設備で変換器とか計測装置を入れています。他の3つのコンテナに鉛電池が収められています。図4（c）は蓄電池パッケージですが、電極を横にして入れる横置きタイプの鉛電池です。1つのユニットに22個の小さな蓄電池が入っていて、3セット、660個つけています。図4（e）が変換装置とか制御装置の部分です。

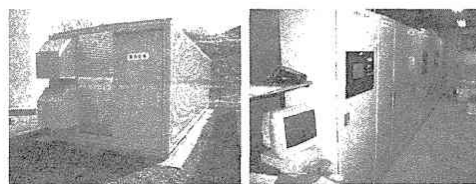


(a) 竜飛第7発電所概観



(b) 鉛電池パッケージ

(c) 鉛電池パッケージ内部



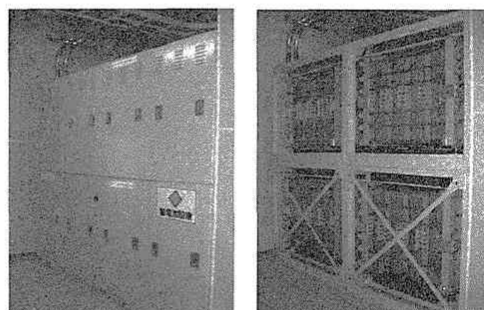
(d) 電気設備パッケージ

(e) 電気設備パッケージ内部

図4 竜飛サイト



(a) 蓄電池建屋外観(冬期)



(b) RF電池盤



(c) RF電解液タンク (d) RF電解液ポンプ

図5 泊サイト

最後に「泊」サイトです。図5 (a) が泊発電所の3号機です。左奥が北海道電力(株)ほりかつぶ発電所の制御室です。右にある二階建ての建物が今回設置したレドックスフロー電池建屋です。その奥に見えるのは泊発電所4

号機です。図5 (b) はレドックスフローの電池盤ですが、ここが電圧を発生させる一番大事な部分です。図5 (c), (d) はそれぞれ電解液のタンク部分と電解液のポンプ部分です。

(4) 蓄電池併設風力発電システムの基本構成

システムの基本構成を図6で説明します。左端に風車があり、その右に発電機が付いています。一番右側に電力システムがあります。風力発電出力は頻繁に変動しますので、途中に変動を吸収するための蓄電池と交直変換装置を置くことによって、出力変動がそのまま系統側に行かないようにします。出力が大きくなった場合は蓄電池で吸い取るように、小さくなったら蓄電池からある程度補っていき運転を交直変換装置にさせて、最終的に合成出力を平滑化しようという構成にしています。

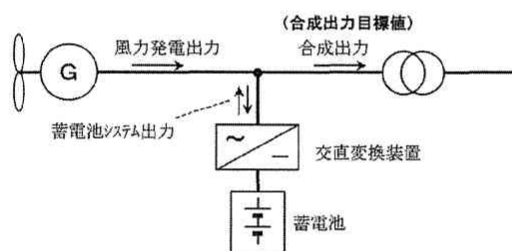


図6 システムの基本構成

(5) 試験内容

試験内容は、出力変動平滑化試験とパターン運転試験の2つです。出力変動平滑化試験は、数秒から数十分オーダーで変動する出力を蓄電池システムの充放電により平滑化する試験です。パターン運転試験は、蓄電池を活用して、電力需要の小さい時に発電電力を蓄え、需要の大きい時にそれを放出するような出力制御（パターン運転制御）が可能かどうか検証する試験です。詳細は、実証試験データとともに後述することとします。

4. データ分析とシミュレーション

(1) 出力変動平滑化運転の概要

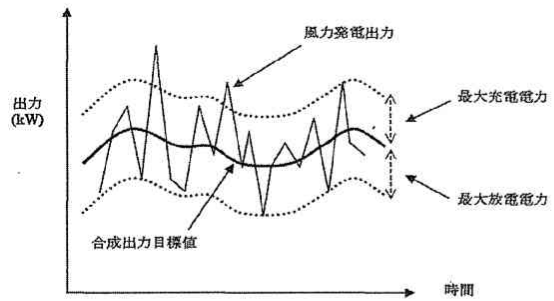
出力変動平滑化運転について、データ実証試験、シミュレーション解析で狙ったところを説明します。

出力変動平滑化運転（図7）というのは、ある目標値を決め、それに対して発電出力が多ければ充電する、少なければ放電するというやり方で平滑化をしようという運転です。ですから、合成出力は目標値と同じになることが理想です。目標に対して発電出力が上回った時にこれを吸い取るわけですが、この時に蓄電池に入れるための変換器の容量に限りがありますから、発電出力が非常に大きくなると取り切れないというようなことが起こります。定性的にはそう思われるわけですが本当にそういうことが起こるのか、当然、この変換器の容量に依存するわけですからその辺の関係を明らかにしようということです。

それから、パターン運転は合成出力目標値を発電の変動と関係なく指定する運転です。例えば目標値を下の点線にしますと、年中充電、上の点線にすれば年中放電ということになるわけですが、そういうことをやったらどうなるかも調べました。

(2) 合成出力目標の計算方法

風力発電出力の波形に平均をかける方法には幾つかあります。移動平均でやる、あるいは図8にあるような「一次遅れ要素」を使う方法もあります。事前の解析で両方の特性を比較したところ、平滑化効果はそう変わらない、また一次遅れ要素の方が回路の要素の数も少ないということなので、一次遅れ要素を採用することになりました。この回路の平滑化時定数を大きく選ぶとより目標値が平滑化



- ・ 風力発電出力の平均値を合成出力の目標値(合成出力目標値)とする
- ・ 風力発電出力が合成出力目標値より大きい ⇒ その差を蓄電池に充電
- ・ 風力発電出力が合成出力目標値より小さい ⇒ その差を蓄電池から放電

図7 出力平滑化運転の概要

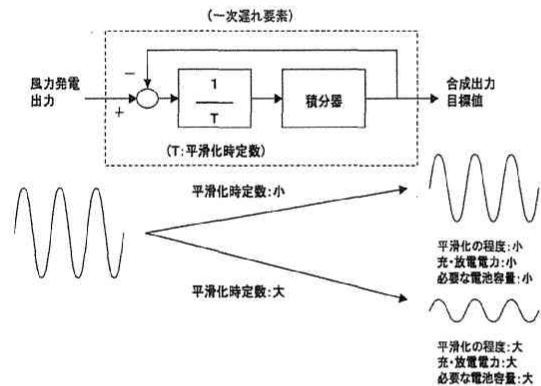


図8 合成出力目標値の計算方法（概要）

された形で出てくる、大きくすれば平滑化効果は高くなるということはそのとおりですが、その分、充放電の電力が大きくなる。それだけ蓄電池も大きくなるので、この辺を定量的に分析しました。今回の実証試験での平滑化時定数は、表5に示すとおりです。

表5 出力変動平滑化試験の平滑化時定数の設定

平滑化時定数	8秒	22秒	1分	2.8分	8分	22分	1時間	2.8時間	8時間	ケース数
八丈島サイト (NAS 電池)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	9
竜飛サイト (鉛電池)	○○	-	○○	-	○○	-	○○	-	○○	10
泊サイト (R F 電池)	○○	-	○○	-	○○	-	○○	-	○○	10

注1) 鉛電池とレドックスフロー電池は電池容量を覚えて2ケースずつ行う。

鉛電池併設実証試験設備（平滑化時定数：1時間）

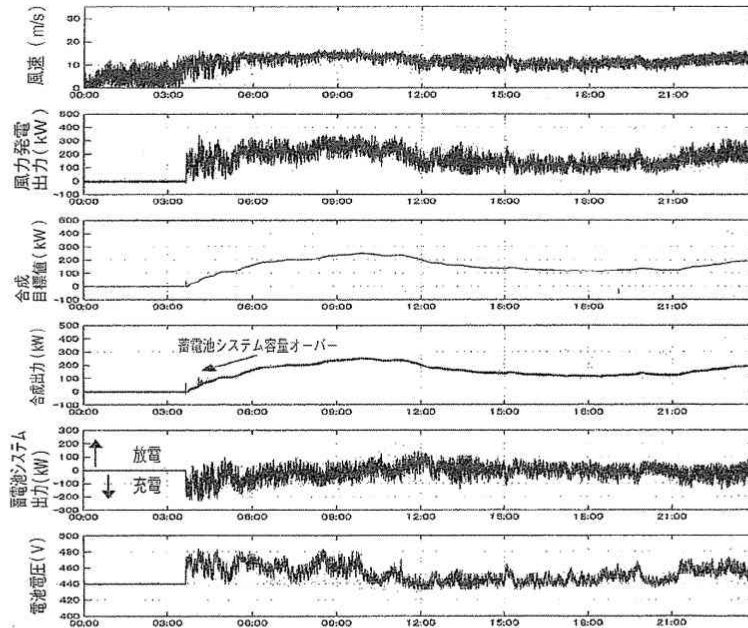


図9 出力変動平滑化運転試験の実測値

（3）出力変動平滑化運転試験とパターン運転試験の実測値

出力平滑化運転試験の実測例を9に示します。一番上から風速の変動，発電出力，合成出力目標値，合成出力，充放電（上側が放電，下側が充電），一番下が電池電圧，言わば充電レベルです。横軸は時間で1日です。1目盛3時間です。

この例では最初，風速が低かったので発電はしていない。3時を超えた辺りから発電が始まっています。上から2番目の波形が実際に発電機から出てくる出力で，これを平滑化回路に入れたのが3番目の線，目標値です。出力変動のゆっくりした成分を拾いますと目標値のような感じになるのがお分かりいただけると思います。それに対して，最終的なプラントの出力，合成出力が目標値に対して追従性が良いということがお分かりいただけると思います。

図10はパターン運転の実測例です。今度は出力目標値をあらかじめセットして与えます。17時頃からパターン運転が始まったと理解してよいと思います。こういうふうにして欲しいという目標値設定に対して，合成出力がそのようになっている，うまくいっている例です。下から2番目が充放電電力で，一番下が残存容量ですが，この場合はNAS電池を使っていますので残存容量が明白に分かります。その容量がだんだん減っているというのは，目標に対して風力発電の出力が弱くなって蓄電池からの放電が多かったということです。ですから，設定値が大きかったりすると，残存容量がもっと下がってくると予想されます。例えば，要求を高く設定し，長い時間パターン運転をやったときに，残存容量がどんどん減っていくわけです。すると蓄電池の方から，もうこれ以上出せませんということで待たがかります。そこでパターン運転ができな

NAS電池併設実証試験設備（電池時間容量：7.2時間）

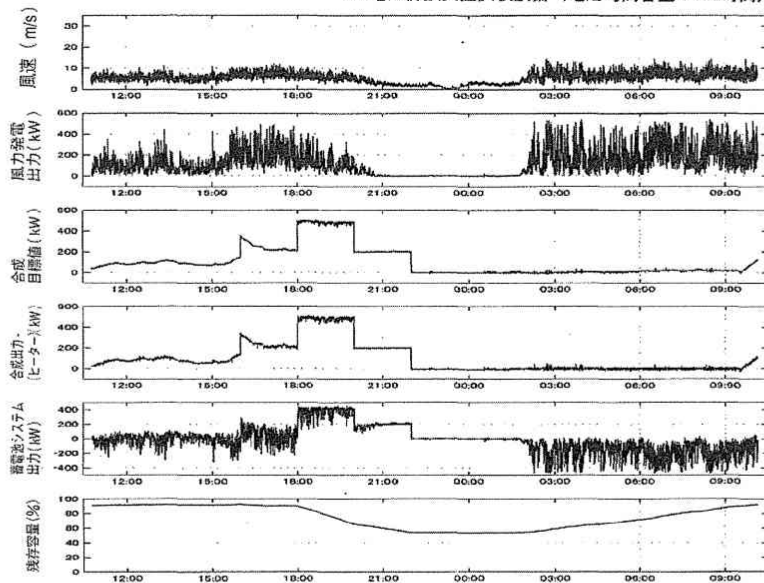


図10 パターン運転試験の実測値

くなるという状況も実際には観測されました。

（４）出力変動平滑化運転試験のデータ分析

データを分析するのに最大出力変動幅で表す方法とパワースペクトル密度で表す方法の2通りがあります。

① 最大出力変動幅

変動データそのものをある評価時間内で眺めて、その間でどれぐらい変動しているかを最大出力変動幅で表す方法です（図11）。ある評価時間に対して発電出力の最大と最小を取り、その差である変動幅を逐一記録します。

鉛電池併設実証試験設備（平滑化時定数：1時間）

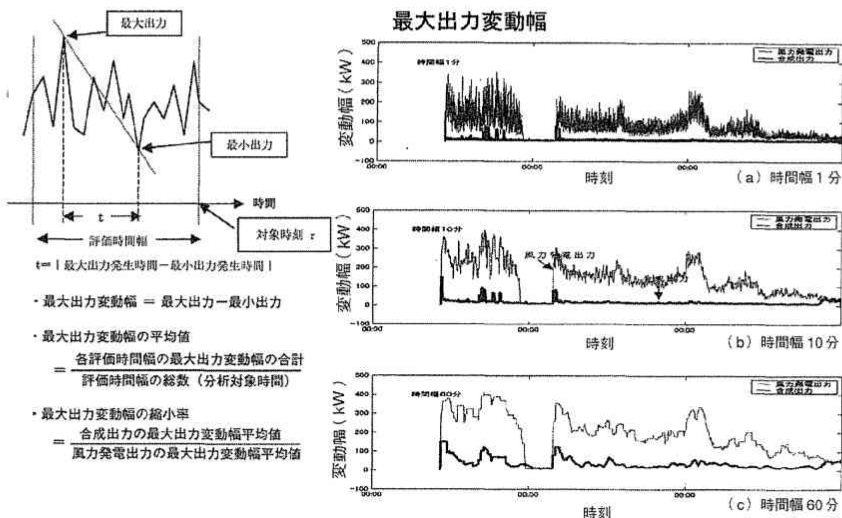


図11 出力変動平滑化運転試験の分析例—1

その場合、評価時間が短いと変動幅は小さいのですが、評価時間を長くすればするほど、変動幅が大きくなっていくということが観測されます。

それに対して、図11の波形（b）の下の方に太めの線で合成出力の変動を示してあります。評価時間が短い場合にはほとんどゼロです。これは短い時間内の平滑化が大変うまくいっていることを示しています。評価時間を長くしていくと少しずつ変動が出てきます。合成出力目標値そのものが発電出力の平均ですから、発電出力が動いているので、必然的に出てくる変動です。

② パワースペクトル密度

パワースペクトル密度（注1）とパワースペクトル密度比（注2）は、例えば図12のような感じです。平滑化時定数を1時間にした場合、発電出力に対して合成出力が一致していきます。10分ぐらいが1つの節目ですが、平滑化

時定数を1時間としたこの例では10分ぐらいだとパワースペクトル密度比が2桁はいかない、つまり平滑化のkW比にすると10分の1になっていない。10分の1には1分辺でなっています。平滑化時定数を小さくするとこの点が周期の短い方へ行きますし、大きくすると長い方へ行きますので、この点をある程度人間がコントロールできます。

（5）シミュレーション解析の例

出力変動平滑化運転試験のシミュレーション解析について説明します。図13は発電出力のパターンを6つ選んでシミュレーションした結果です。場所も違いますし、3つのサイトについて同じ発電出力パターンで実験することは決してできないわけですが、シミュレーションだとそれができます。そこで色々な変化に対してどういう特性があるか見たわけです。

最大出力変動幅を見ますと、T1からT6ま

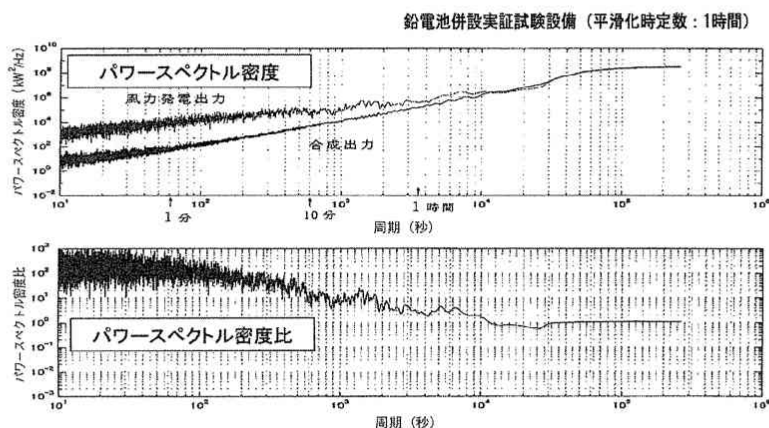


図12 出力変動平滑化運転試験の分析例—2

注1）離散フーリエ変換で得られた各周波数の成分振幅の自乗値（パワー）を求め、これを隣り合う周波数間の差周波数（基準周波数）で割って、単位周波数当りのパワーとして求めたもの。

注2）各周波数における風力発電出力のパワースペクトル密度と合成出力のパワースペクトル密度の比。平滑化効果の周波数特性を概ね把握することができる。比が大きいほど平滑化効果大きい。

〔離散フーリエ変換〕

風力発電出力や合成出力のように、不規則に変動する状態量の波形は、基準周波数とその整数倍の周波数を持つ多くの周波数成分波形の合成により表すことができる。これを利用して、各周波数の成分の振幅を求める方法。

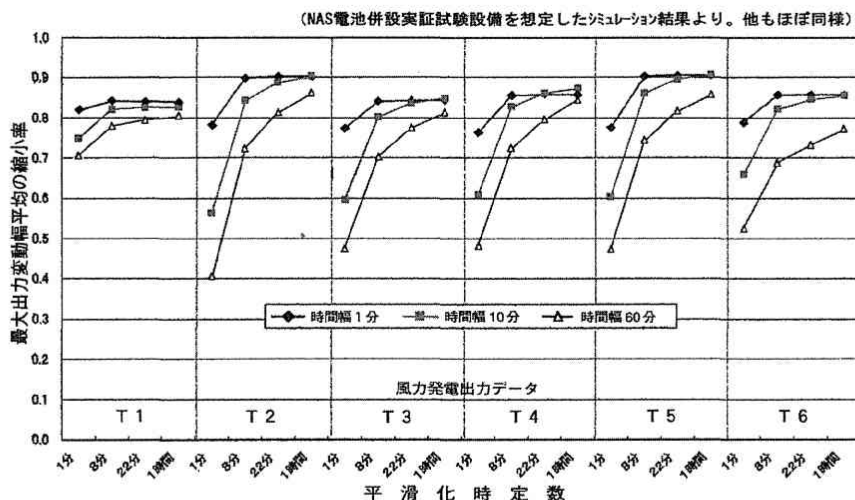


図13 最大出力変動幅の縮小率

での1つ1つの部屋が風力発電実測データの
パターンのタイプで、その中の横軸は平滑化
時定数です。その時定数を大きくすれば最大
出力変動幅の縮小率は大きくなる。つまり、
平滑化効果は高くなる。風のタイプによって
個性がありますが、いずれも右上がりという
ことは、平滑化時定数を大きくすれば平滑化
効果は増えてくるということです。

パワースペクトル密度比も、やはり平滑化
時定数を大きくすると大きくなります(図
14)。つまり、平滑化効果が高くなるという
ことです。

また、変換器出力の大小が仕上がりに影響
があります。図15では風力発電の定格出力と
変換器出力を同じにすれば、そのオーバー分
が少なくなります。定格出力を小さくしてい

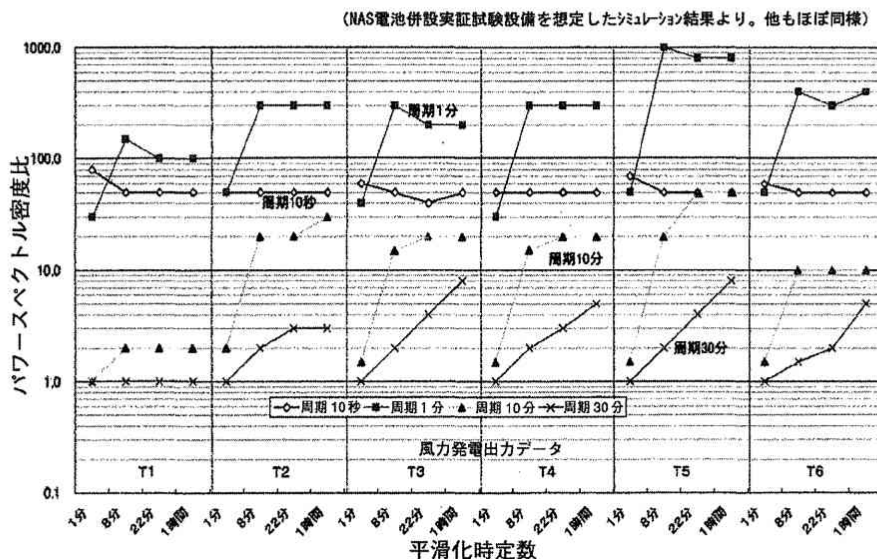


図14 パワースペクトル密度比

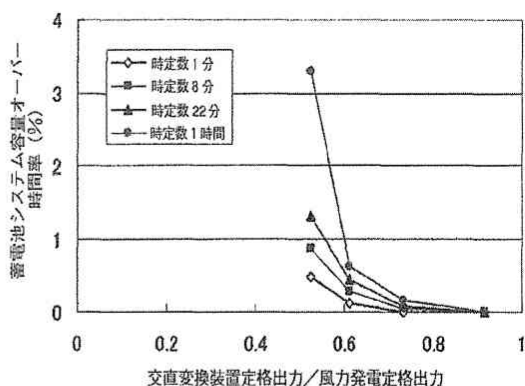


図15 交直電力変換装置の定格出力が平滑化効果

きますと、当然のことながら、時折はみ出しも出ますので、オーバー分が大きくなりますが、変換器出力を発電機出力の7割ぐらいにすると、そのオーバー分は余り目立たないということが分かりました。

図16もシミュレーションです。出力変動平滑化運転をやる時に、基本的には変動に対し

て平均を取るわけですから、ある時間の積分値はゼロなわけです。蓄電池の充電レベルは変わらないはずですが、実際にはシステム中で充電から放電までに変換器や蓄電池にロスがありますから、このように蓄電池の充電レベルは少しずつ下がりはじめます。それが下がりを続けずに補正をかけてやると、ずっと運転できます。本来合成出力の出ていくべきところを少しもらって埋め合わせをしています。そういう方法も明らかになりました。

充放電のことですけれども、風力発電出力が平均値として高い出力で変動していても、低い出力で変動していても、変動分は余り変わりません。図17で、設備利用率が高いと平均出力が高い、低いと平均出力が低いということですが、いずれにしても蓄電池の充放電への依存は余り変わりません。そこにロスがあるわけですから、平均出力が低くなるほど全体のシステム効率は低くなるということが

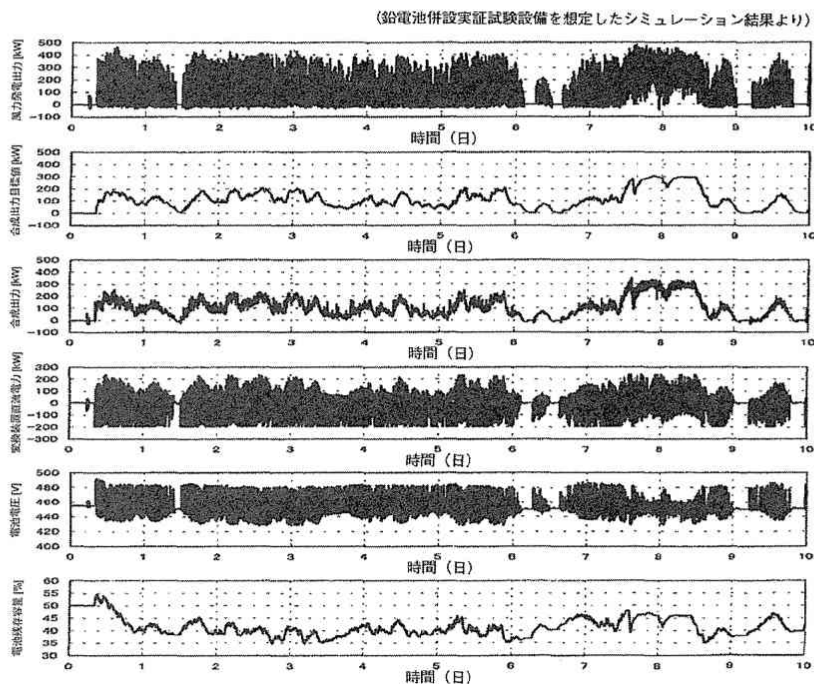


図16 蓄電池充電レベルの中位維持を目指す補正制御の効果

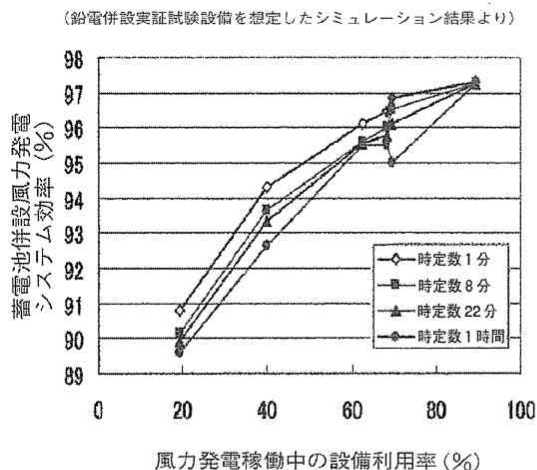
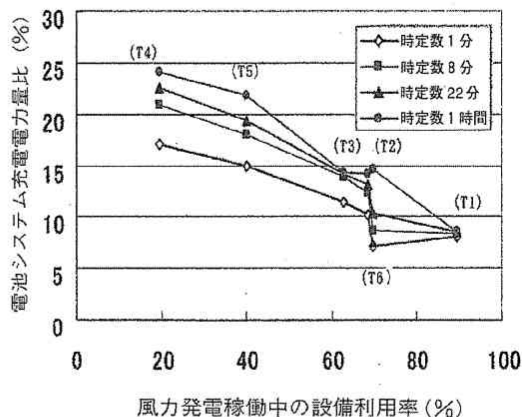


図17 風力発電稼働中の設備利用率と蓄電池併設風力発電システム効率の関係

分かるわけです。鉛電池の場合には、低出力運転でも効率は90%で、高出力運転をしていれば97%以上の高い効率だということも分かりました。

(6) 実証試験データの分析とシミュレーション解析のまとめ

●平滑化時定数を1時間とすると、風力発電出力に含まれる10分程度の周期成分の振幅が約70~90%、30分程度の周期成分については約40~80%、それぞれ実質的に縮小されることを明らかにできました。

●この平滑化効果自体は交直電力変換装置の容量や蓄電池の容量に依存しており、蓄電池のタイプでは差がないことを確認しました。

●蓄電池システムの交直変換装置の定格出力は、平滑化時定数1時間とすれば風力発電設備の定格出力の約70%であると考えられます。

●その場合、蓄電池の容量は、定格出力で2

時間程度必要と考えられます。例えば、仮にフル発電出力が300kWなら、変換機は200kWで2時間程度の容量のものということです。

●1時間程度までの出力変動を平滑化することは技術的に十分可能であることを確認しました。これはあくまでも、今回の実証試験の結果ですから1時間が限界ということではなく、より大きな容量の蓄電池システムをかかえれば、より長い時間まで変動を吸収することができると予想されます。

●蓄電池併設風力発電システムの効率は、風力発電稼働中の発電設備利用率や蓄電池運転に不可欠な補機の消費電力量によって大きく影響を受けることを明らかにしました。

●パターン運転の達成度合は風力発電の出力レベルの変動状況、電池容量に大きく依存することを確認しました。

●フライホイール併設による風力発電出力安定化技術については、今回、実用的側面から

選定したエネルギー蓄積容量の条件下では、風力発電出力に含まれる10秒オーダでの周期変動の平滑化に効果的であることを、シミュレーション解析で明らかにしました。フライホイールはどうしても容量が小さいので余り長い周期の変動の吸収には向いていません。

(7) 技術的課題

技術的課題としては、①蓄電池の補機電力・電力量の低減、②蓄電池の残存容量のより一層正確な計測、③出力変動平滑化運転制御方式の高度化、④フライホイールシステムのエネルギー蓄積容量の増加があります。

蓄電池の充電レベルがもう少し細かく分かると、蓄電池の満杯から空までぎりぎり使えるようになります。裏を返せば蓄電池がコンパクトになるということが分かりました。

5. 実用化に向けて

(1) 実用化プラントの建設費

蓄電池を併設すると風力発電の出力は平滑化できるということが確認できました。次に実用機の建設費を算定しました。機器仕様は表6に示します。

表6 建設費算出時の機器仕様

(NAS電池、鉛電池、レドックスフロー電池)

- ・風力発電出力定格出力：1500kW
- ・蓄電池システム定格出力：1000kW
- ・定格出力での放電時間：8h(7.2h)、4h、2h、1h
注：()内はNAS電池
- ・交直変換装置定格出力：1000kW

(レドックスフロー電池高出力運転時)

- ・蓄電池システム定格出力：330kW
- ・定格出力での放電時間：2h、1h
- ・交直変換装置定格出力：1000kW

風車の定格出力が300kWでその7割ぐらいの200kWの蓄電池が良いのではないかとこの提案がありましたので、昨今導入されている風力発電機の出力を考えて、風車は1,500kWぐらい、これに1,000kWの蓄電池システムを設置した場合の建設費を算定してみました。定格時間での放電時間を1時間、2時間、4時間と色々変えて算定しました。NAS電池では7.2時間としました。レドックスフロー電池は、構造上、定格出力と放電時間を独立に変えられます。放電時間は電解液タンクを増やせば長くできますし、定格出力はセルの部分を増やせば大きくできるという特徴をもった蓄電池です。それと、レドックスフロー電池

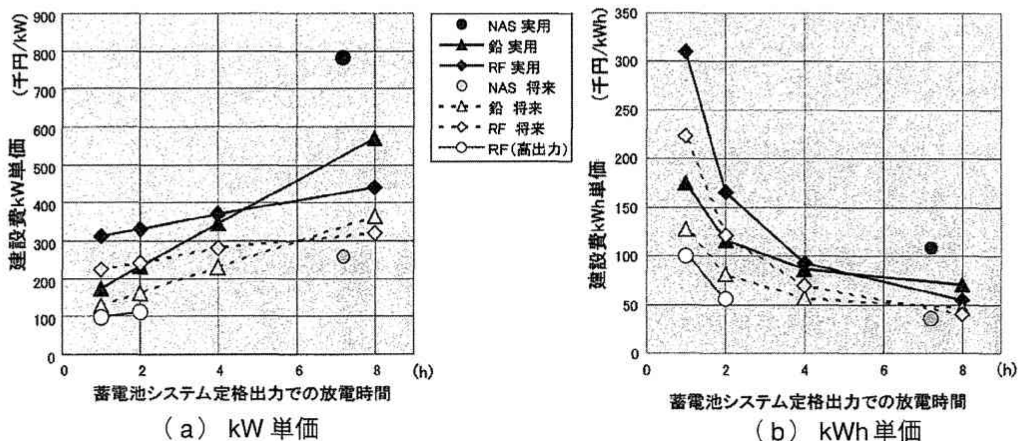


図18 実用プラント建設費

は、短時間であれば高出力運転ができるという特徴がありますので、この分についても算定しています。

図18 (a) は建設費のkW単価です。横軸に定格出力での放電時間をとってあります。実線の「実用」と点線の「将来」に分けてありますが、「実用」は今建設した場合にどれぐらいの単価になるのか、「将来」というのは、2, 3年後という話です。検討したのが平成13年8月頃なので、NAS電池などは若干安くなっていると思いますが、検討時点でNAS電池を作った場合には80万円ぐらいしました。将来、ある程度導入量が確保できた時には30万円を切るぐらい安くできるという算定が出ています。

鉛電池は、放電時間8時間の場合が55万円ぐらいで、放電時間を短くする、要するに蓄電池の数を減らしていくことで安くなります。レドックスフロー電池も鉛電池と同様な傾向があり、8時間で40数万円、1時間まで短くすると30万円ぐらいです。鉛電池に比べると減り具合は少し小さいという特徴があります。将来についても、鉛電池もレドックスフロー電池も安くなります。

レドックスフロー電池の高出力部分ですが、算定如何では10万円前後と一番安くなっています。というのも、レドックスフロー電池で一番高いのがセルの部分で、セルの定格出力を小さくすると値段も非常に安くなるという結果になるからです。ただし、これは短時間、容量でいくとこれぐらいのものしかつくれないという特徴があります。6時間とか8時間のものをこういう仕様で使うことはできません。図18 (b) はkWh単価ですが、図18 (a) と逆の傾向を示しています。放電時間が長くなるとそれぞれ蓄電池は単価的には少し安くなっていきます。

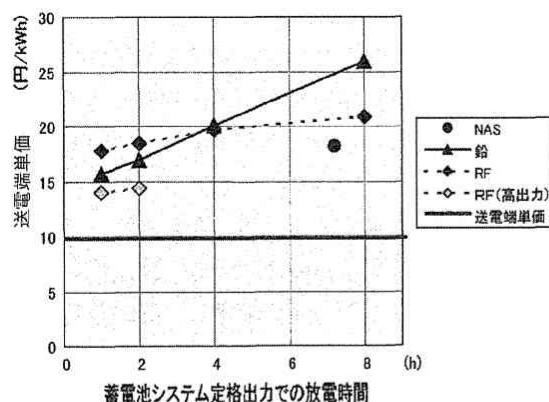


図19 蓄電池併設風力発電システムの発電単価

(2) 蓄電池併設風力発電システムの発電単価

図19の実線が風力発電機の送電単価です。10円前後だと想定できます。将来の条件で算定すると、NAS電池の場合は大体10円のが18円程度で、鉛電池は8時間の容量をもつと25円、1時間ぐらいの容量のものを入れると15円と出てきました。レドックスフロー電池は、20数円から18円ぐらいの単価になります。レドックスフロー電池の高出力運転を採用すると14円から15円ぐらいの間になります。いずれにしても送電単価は多少高くなるという結果です。

(3) 総合評価のまとめ

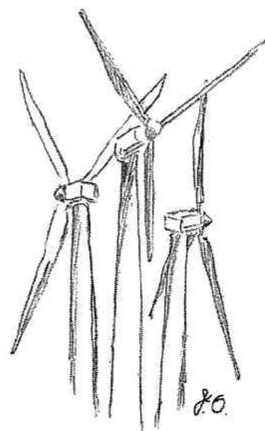
1つ目は、風力発電システムに蓄電池を併設すると、その平滑化の効果は技術的には十分立証されました。2つ目は、実際に蓄電池システムを設置したところ、建設についての特段の障害はない。検証期間は非常に短かったのですが、信頼性、耐久性についても特に問題とならないと推定されます。最後に、発電単価については、もとの単価よりも1.6倍～1.8倍。レドックスフロー電池の高出力運転を採用すると1.4倍程度になると予想されます。

(4) 今後の課題

最後に今後の課題ですが、①風力発電出力の変動特性および出力変動平滑化効果のサイトや季節等の違いによる風況の影響について知見を積み重ねる、②実機への導入の際には、風況、それによる風力発電出力変動特性、平滑化する風力発電出力の変動周期（設定する平滑化時定数）等を十分に考慮し、蓄電池システムの設計を行う、③電池寿命の評価、蓄電池の残存容量のより一層正確な計測、充放電制御方法の更なる開発等、④蓄電池システムのコスト低減を上げることができます。

実験サイトは3つだけで、しかも期間も半年から1年しかありませんでした。データとしてまだまだ十分とは言えないと思われます。種々の風況での風力発電の運転データを積み重ねることが今後の課題の1つ目だと思います。2つ目に、実際の導入の際のシステム設

計についてですが、それぞれのサイトで風況が色々違います。ですから、その辺を十分考慮するということ、平滑化する変動周期、どの辺のものを平滑化しようかというのを考えて蓄電池の施設系を設計する必要があるということです。3つ目が電池寿命です。風力の平滑化用につけた場合、蓄電池の寿命がどうなるのかももう少し詰める必要があると思います。それと蓄電池の残存容量をより一層正確に計測することで蓄電池の容量を小さくできます。安いシステムができるということです。それと充放電制御方法のさらなる開発。これもうまく制御して容量を小さくして安くできるという可能性があります。最後に、風車に併設するという意味では蓄電池はコスト的に問題があるので、コスト低減が最後の課題だと思います。



水素燃料電池自動車の 導入シナリオの検討



小林 紀 (財エネルギー総合工学研究所
WE-NETセンター 主管研究員)

1. はじめに

2002年1月、米国はブッシュ大統領の新エネルギー政策を受けて、FreedomCARプロジェクトを公表した。このFreedomCARでは燃料電池自動車（FCV）の開発がメインテーマになった。一方、よく知られているようにカリフォルニア州では1999年11月からCaFCP（California Fuel Cell Partnership）プロジェクトが進んでいる。2002年9月の時点でCaFCPに参加しているFCVの総走行距離は約10万km（6万マイル）に達したという。また、サンフランシスコに初のサテライト水素ステーションが完成し市内を走行する水素燃料電池バスを運行する計画もあるという。ドイツではドイツ水素協会が2002年10月に水素インフラ整備に向けたロードマップを発表している。2005年から2010年の間に2,000箇所を超える水素供給ステーション整備を目指す計画である。

日本でも経済産業省を中心に、これまでのWE-NET（水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術開発）プロジェクトの研究開発に加え、水素・燃料電池実証プロジェクトを2002年度から立ち上げるなど、技術開発、法整備の徹底化を図りつつある。

このように、日米独を中心として国際的にも水素インフラ整備および水素自動車の導入を促進する動きが活発になってきた。

本稿では資源エネルギー庁が2001年1月に発表した燃料電池（FC）導入目標をもとに作成を進めている燃料電池導入シナリオについてその途中結果を報告する。

2. 水素および水素システム

水素は、燃えてもクリーンであるがFCに用いることによって水のみを排出しかつ高い効率で電気エネルギーを発生することができる。水素は自然界に単独では存在しないが、図1に示すように色々な1次エネルギーからつくることができる。水素エネルギーはこれらの特長を有する2次エネルギーである。

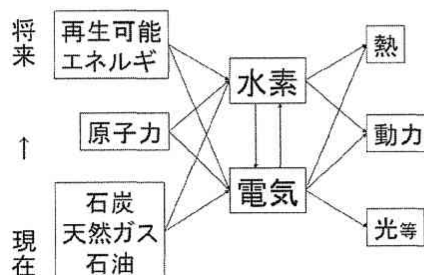


図1 水素エネルギーシステム

水素エネルギーの利用については、長期的には再生可能エネルギーからの水素を利用し、エネルギーシステム全体を通じてクリーンなエネルギー利用が目指される。その途中の短期・中期では、石油や天然ガスなどの化石エネルギーを水素に転換し、エネルギーの有効利用を図ることが期待される。特に、FCは、高い効率でのエネルギー利用が可能となると同時に、排気は水だけでクリーンであるため、導入、普及が期待されている。

本シナリオでは、化石エネルギー起源の水素を対象に2020年までの期間について検討を行なう。

3. 水素FC導入シナリオ

資源エネルギー庁は、2001年1月に、表1に示すFC導入目標を発表した。WE-NETセンターは資源エネルギー庁の要請で、2001年度からこの導入目標をもとにFC導入シナリオの作成を行なっている。その目的は、導入目標を肉付けし、目標を実現するにあたっての課題を見出し、その解決策を見出すことと考えている。同シナリオはFCV導入シナリオと定置用FC導入シナリオからなるが、本稿ではこのうち、水素燃料FCVの導入シナリオについてその途中結果を報告する。

表1 FC 導入目標

2001.1発表			
	2000～2005年	2010年	2020年
FCV	・基盤整備 ・技術実証 ・標準化	5万台	5百万台
定置用 FC		2.1百万kW	約10百万kW

(1) シナリオ作成の前提条件

図2に、シナリオ作成に向けた検討の概要を示す。検討フローの途中で、水素需要やCO₂排出削減効果を評価した。FCVの受容性としては、社会的な要件として環境改善効果

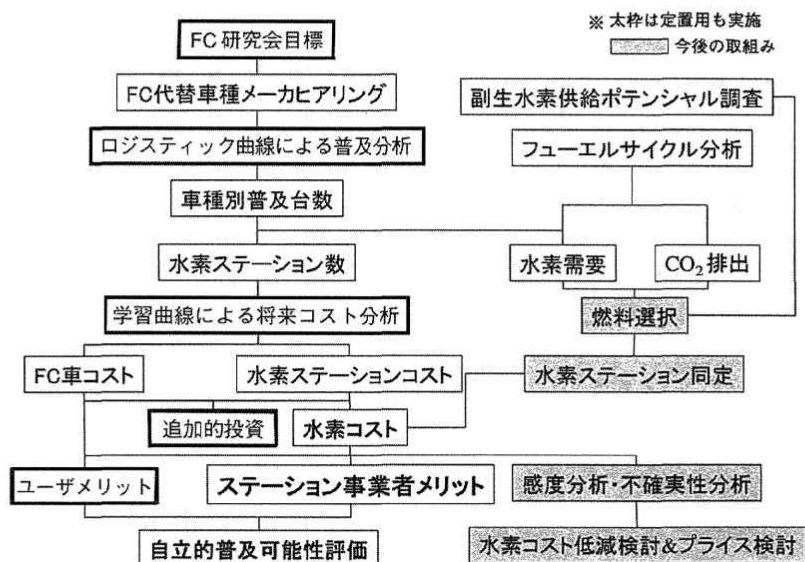


図2 FCV導入シナリオの検討方法

とエネルギーセキュリティや省エネなどのエネルギー問題改善効果があげられる。ユーザーサイドの要件としては、安全はもとより、性能、利便性そして経済性があげられる。本シナリオでは、導入目標が決められているので、安全、性能そして利便性は改善されていくものとして、普及の鍵になる経済性についてFCコスト、車両コストおよび水素供給コストを検討した。以下に図2の流れに沿って検討の概要を説明する。

① FCVへ代替可能な車種

FCVは高压水素ボンベ搭載型（35MPa）を

対象とした。FCVの車種別の普及可能台数を予測するに当たって、国内の主要自動車メーカーにアンケート調査を行ない、車種別、用途別に、導入が可能となると考えられる時期を調査した。導入が可能でないと判断される理由として、求められる性能に対する技術、コストおよびインフラの整備状況などに起因する利便性などをあげ区別可能とした。その結果を表2に示す。黎明期（2005年～2010年頃）には公用車を中心とした業務用乗用車や路線バスから導入が始まり、導入初期（2010年～2015年頃）には業務用乗用車の導入がさらに促進され、徐々に域内フリート走行*の小型

表2 FC車導入分野の選定

車種区分	形状等	利用形態等（用途）	普及可能性		
			黎明期	導入初期 ～中期	普及期
貨物車	ライトバン・ワンボックスクラス	宅配便（営業用）	×2	○	○
		域内定型走行（営業用・自家用）	×2	○	○
		域間定型走行（営業用・自家用）	×1	×3	○
		非定型走行（営業用・自家用）	×1	×3	○
	2tトラッククラス	宅配便（営業用）	×2	○	○
		域内定型走行（営業用・自家用）	×2	○	○
		域間定型走行（営業用・自家用）	×1	×3	○
		非定型走行（営業用・自家用）	×1	×3	○
	4t～10tトラッククラス	宅配便（営業用）	×1	×1	○
		拠点間輸送（営業用）	×1	×1	○
		非定型走行（営業用・自家用）	×1	×1	○
	大型トラッククラス	拠点間輸送（営業用）	×1	×1	×2
		非定型走行（営業用・自家用）	×1	×1	×2
乗合車	マイクロバス	送迎バス（自家用）	×2	×2	×2
		貸切バス（営業用）	×2	×2	×2
	大型バス	路線バス	○	○	○
		リムジンバス	×1	○	○
		高速バス	×1	×3	○
		貸し切りバス	×1	×3	○
乗用車	マイカー		×3	×3	○
	業務用・事務用		○	○	○
	公用車		○	○	○
	ハイヤー・タクシー		×3	×3	○
特種車	應答車		×1	○	○
	冷蔵冷凍車		×1	×1	×2
	その他		×1	×1	×2

凡例 ○：導入分野

×1：導入が難しい分野－車両技術的要因

×2：導入が難しい分野－コスト要因

×3：導入が難しい分野－利便性制約要因

*複数の自動車からなり決められた地域内を走行すること

表3 走行効率

	普及前半 黎明期～ 導入初期	普及後半 導入中期～ 普及期	備 考
水素FCV走行効率	50%	60%	トヨタ資料
改質を除く OBR車効率	45%	54%	重量影響考慮
改質効率 (ガソリン)	75%	80%	METHANEX資料
水素純度	90%	90%	METHANEX資料
OBR車走行効率	約30%	約38%	上記値の積
ガソリン車	17%	20%	—
ディーゼル車	20%	24%	—

貨物自動車に導入が拡大していき、普及期（2015年～2020年頃）にマイカーへと普及が拡大していくと予測された。

② FCVの走行効率

走行効率はいわゆる燃費性能を決める。表3に仮定した効率を示す。FCの効率は今後改善されるとした。また、現行車も将来、効率が改善されると仮定した。

筆者は1次エネルギーの採掘から2次エネ

ルギーである燃料が製造され自動車の燃料タンクに充填されるまでを「燃料製造効率」そして燃料タンクからタイヤまでを「走行効率」と呼んできた。最近では、欧米での呼称から、前者は「W-T (Well to Tank) 効率」、後者は「T-W (Tank to Wheel) 効率」と呼ばれることが多い。

③ 対象とした水素供給ステーション形式

水素供給ステーションの形態を図3に示す。水素供給ステーションにはオフサイト形とオンサイト形の形態が考えられる。オフサイト形ステーションは他所で比較的大量に製造した水素をタンクローリなどでステーションに輸送し、その水素を自動車に充填するタイプのステーションである。鉄鋼所のコークスオーブンガス（COG）に含まれる水素（COGガスは約55%の水素を含有する）や塩電解副生水素などの利用が考えられる。また、天然ガ

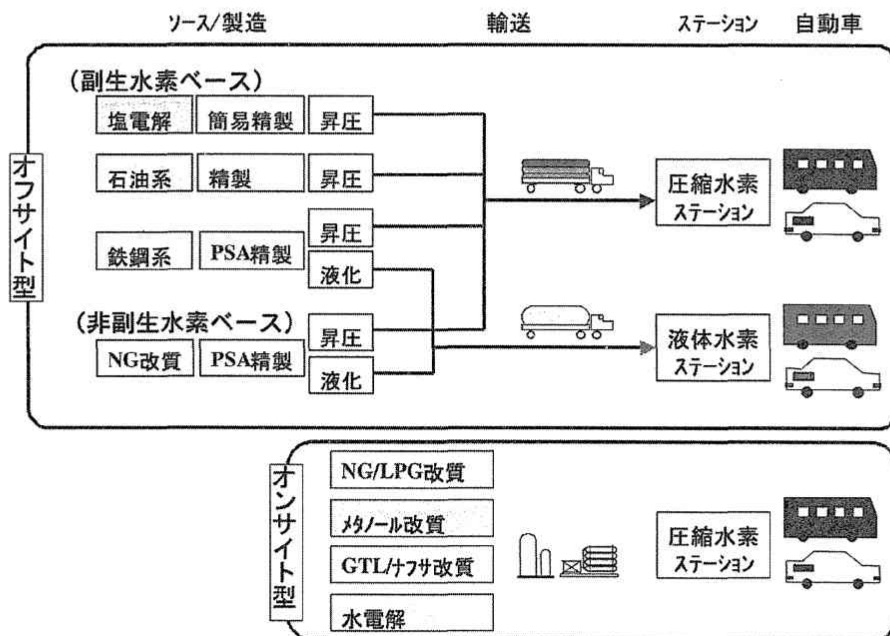


図3 水素ステーションの形態

スなどを原料に水素製造を行なう非副生水素ベースの水素利用も考えられる。

他方、オンサイト形ステーションでは、水素製造はステーションで行なわれる。原料として、図3に示す色々なエネルギーが考えられている。

本シナリオではオフサイト形として鉄鋼系の副生水素（1次エネルギーは石炭）を高圧形で輸送し利用するタイプ、オンサイト形として天然ガス改質型を対象ステーションとして検討する。

オンサイト形ステーションのうち、WE-NETプロジェクトにおいて塩電解副生水素を高圧水素としてステーションに輸送し利用するタイプのステーションが横浜市鶴見区に建設され2002年8月から安全性やエネルギー効率に関する試験が行なわれている。また、2002年度から始まった、水素・燃料電池実証事業（経済産業省）において、鉄鋼系副生水素を液体水素の形態で輸送し利用するタイプのステーションを首都圏（有明のビックサイト近辺）

に建設中で、2003年度早々には竣工し実証試験が実施される予定である。

オンサイト形ステーションのうちWE-NETプロジェクトで、天然ガス改質形ステーション（大阪）と固体高分子電解質形の水電解ステーション（高松）の建設が行なわれ、2002年度から安全性やエネルギー効率に関する試験が行なわれている。また、水素・燃料電池実証事業において、LPG改質形（荒川区南千住）、ナフサ改質形（横浜市旭区）そして図にはないが脱硫ガソリン改質形（横浜市大黒町）のステーションを首都圏に建設中で、早いものでは脱硫ガソリン改質形が2003年3月、遅いものでも同年8月には実証試験に供される予定である。

④ ステーションの仕様と設置時期

表4にオフサイト形ステーションの想定仕様例を示す。圧縮機能力で100Nm³/h（1日の充填能力は約40台）、300 Nm³/h（同、約130台）、500 Nm³/h（同、約220台）の3つの規模を想

表4 オフサイト高圧形ステーションの仕様例

型式	単位	CH-100	CH-300	CH-500	備 考
圧縮機能力	Nm ³ /h	100	300	500	Ave10→40MPa
ST営業時間	h	13	13	13	全国平均13.1h
処理量	Nm ³ /日	1,300	3,900	6,500	
一台当たりの充填量	Nm ³ /台	30	30	30	
充填間隔	分	10	10	10	
充填台数(1日)	台/日	43.3	130.0	216.7	
(時間平均)	台/時間	3.3	10.0	16.7	
(ピーク時)	台/時間	6.7	20.0	33.3	平均の2倍と想定
ディスペンサー口数	口	2	4	6	
基数	基	1	2	3	
蓄圧器容量	L	4,391	13,173	21,955	
容器本数(240L/本)	本	19	55	92	
蓄圧器貯蔵量	Nm ³	1,446	4,187	7,004	
トレーラー基数(2日分)	基	1	3	5	2740Nm ³ /基
合計貯蔵量(3日分)	Nm ³	4,186	12,407	20,704	
第二種設備距離	m	11.3	12.0	14.0	
想定消費電力	kW	15	39	62	圧縮機、その他

表5 ステーションの設置比率

供給能力 タイプ	黎明期	導入初期	導入中期	普及期
100Nm ³ /h オフサイト	100%	—	—	—
300Nm ³ /h オフサイト	—	80%	20%	—
500Nm ³ /h オフサイト	—	20%	40%	50%
500Nm ³ /h オンサイト	—	—	40%	50%

定した。オンサイト形では改質能力が圧縮機能力と同じに設定されている。想定される消費電力は異なるが1日の充填台数など、ステーション規模はオフサイト形とオンサイト形で同じである。既存のガスステーション（ST）が1日に何台さばいているかという公式データはないが、年間の販売量などから計算すると、全国平均で100台～200台/日をさばいていると計算された。従って、想定したステーション規模はほぼ妥当と考えられる。

これらのステーションタイプおよびステーション規模についてそれぞれの設置時期を表5のように想定した。はじめに、整備コストが小さい小規模のオフサイト形ステーションから整備が始められ、水素FCVの普及にともなって規模の大きいステーションが整備され、そして2015年頃の導入中期以降、大規模のオンサイト形ステーションが整備されるという想定である。

（2）水素FCV導入の影響と効果

① 車種別普及台数の推定

どのような車種、用途にいつ頃どれくらい普及するかを明らかにするために車種別普及台数の推定を行なった。車種、用途ごとに年間走行距離や燃費が異なるのでこの推定は水

素需要やCO₂排出削減効果に影響する。

2010年と2020年における導入台数は表1に示したように決められている。そこで、2005年頃から2020年までの毎年の普及台数はロジスティック曲線に従うとして2010年と2020年以外の普及台数の推定を行なった。その上で前項①で述べた車種適合性と現在の保有台数構成などを考慮し、2005年から2020年間の車種別（用途別）保有台数の推定を行なった。結果を図4に示す。乗用車が大部分を占める構成となった。

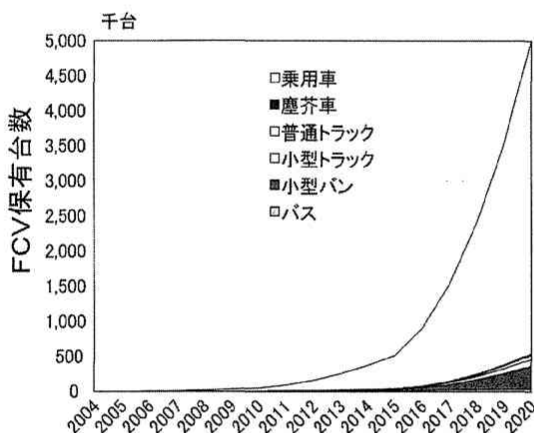


図4 車種別FCV保有台数

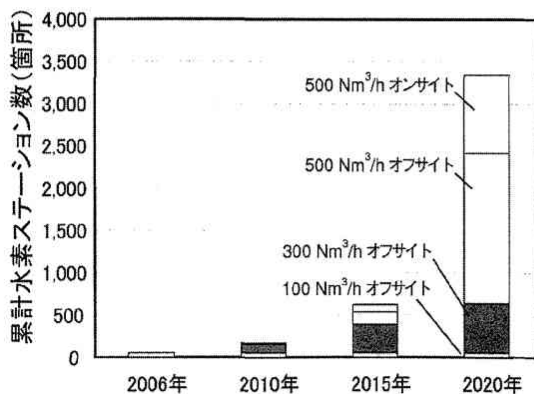


図5 タイプ別ステーション推計数

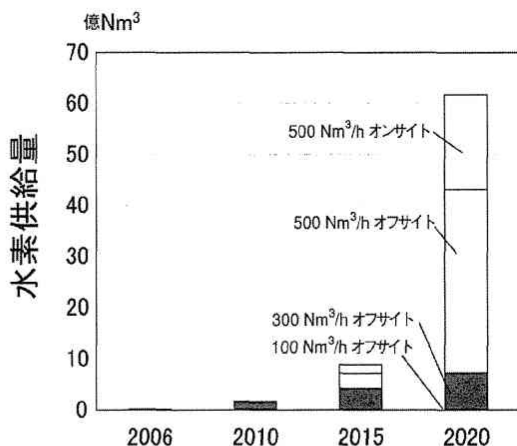


図6 ステーションタイプ別水素供給量

② 水素供給ステーションの設置数と水素需要

図5に必要な水素供給ステーション数を示す。2020年に約3300箇所の水素供給ステーションが必要となると想定された。現在、既存のガスステーションでは全国平均で1ステーション当たり約1400台ほどをさばいている。3,300箇所という値は、水素供給ステーションでもほぼ同様の台数をさばくことに等しい。黎明期から導入期（～2015年）にかけては、水素FCVの普及拡大をステーション整備が引っ張っていくことが期待される。実現の可能性が高いシナリオを目指す意味でも、今後、水素供給ステーション数を見直した検討を行

表6 副生水素供給ポテンシャル（2000年）

	水素ガス量 (億 Nm ³ /年)	供給可能量 (億 Nm ³ /年)
コークス炉ガス水素	64.0	44.8 ¹⁾
塩電解水素	13.6	12.6 ²⁾
石油業界水素	105.5	70.9 ³⁾
合計	238.3	128.3

注:

- 1) コークス炉水素の内の70%を供給可能量とした
- 2) 苛性ソーダ生産量からの計算値から、外販水素を除いた量
- 3) 生産と消費の差に設備余剰能力分を加算した量
- 4) 実際の供給可能量は、既存の工場インフラ、市場などで異なる

なう予定である。

次に、前項①で求めた車種別（用途別）のFCV普及台数とこれら車種別、用途別の現行車の年間走行距離および表3の走行効率をもとに水素需要（供給量）を求めた。図6にその結果を示す。水素供給ステーションのタイプ別での水素供給量がわかるように記した。500万台の普及を想定している2020年では水素需要は62億Nm³になる。このうち、オフサイト形ステーションで供給する量は約70%の42億Nm³と推定された。表6に副生水素の供給ポテンシャルを示す。副生水素の供給可能量の3分の1が供給されるという想定をしていることになる。石油業界からの水素は厳密には副生水素ではないかもしれないが、石油業界からの水素供給が実現性に影響することになると考えている。

また、図7に副生水素の発生源の全国分布を示す。輸送距離が長くなると液体水素輸送が輸送コストの点で有利になる⁽¹⁾。この図は液体水素での輸送あるいはオンサイト形ステーションの必要性を示していると考えられる。今後、地域別に水素供給方法を具体化する予定である。水素供給の予測として、導入の黎明期から副生水素の利用が始まり、その後も一定量が副生水素で賄われ、不足分を天然ガス改質形オンサイトもしくは天然ガスなどの化石燃料改質形オフサイトステーションが賄うという図式になると考えている。

③ ライフサイクルでのエネルギー消費低減効果とCO₂排出削減効果

図8および図9に表3の走行効率や各エネルギーフローのW・T効率をもとに計算したライフサイクルでのエネルギー消費低減効果と

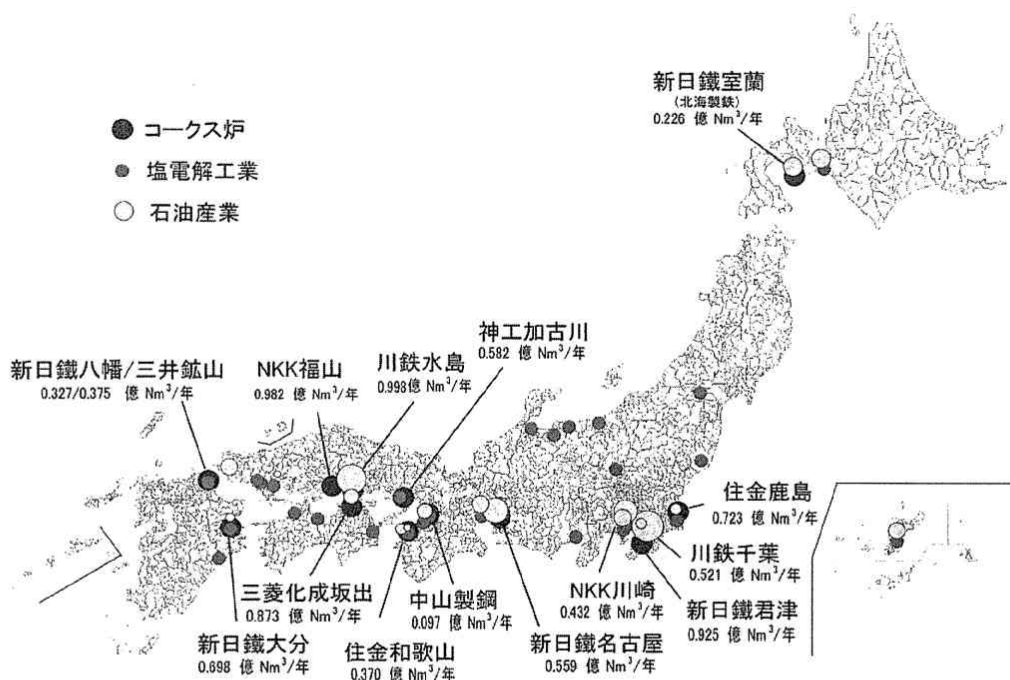


図7 副生水素発生源の分布

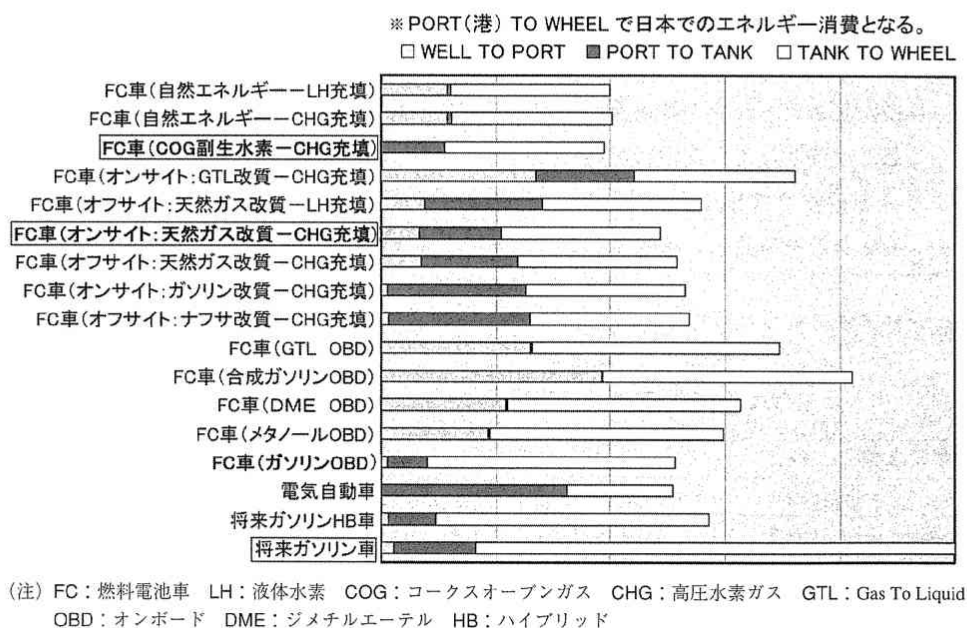


図8 エネルギー消費量：普及後半

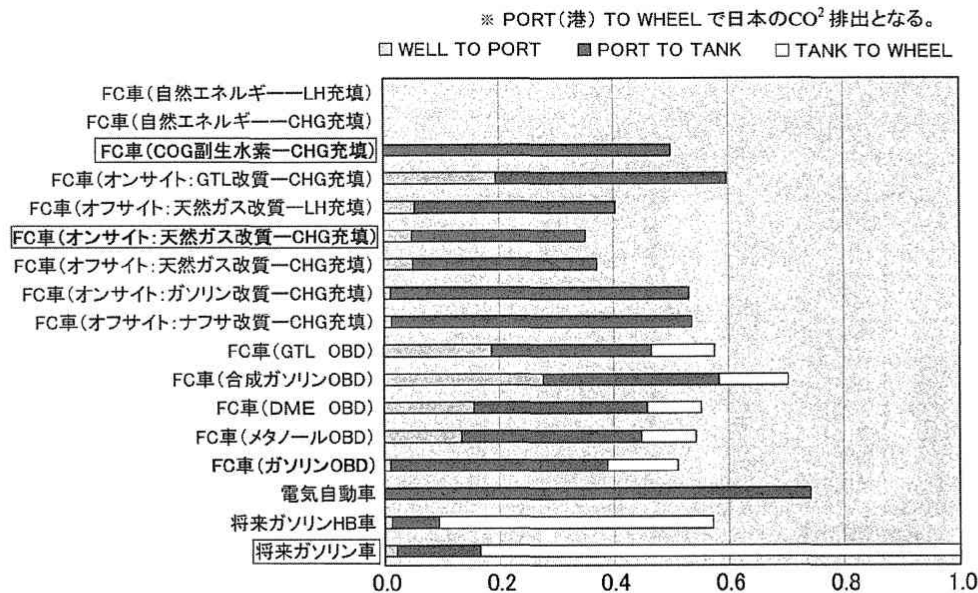


図9 CO₂排出：普及後半

CO₂排出削減効果を示す。両図ともガソリン車を基準（1）として示している。Port to Wheelで日本国内でのエネルギー消費およびCO₂排出を意味する。検討対象とした、FCV（COG副生水素 - CHG充填）とFCV（オンサイト：天然ガス改質 - CHG充填）はともにガソリン車に対してエネルギー消費、CO₂排出とも半減している。本シナリオでは水素源として化石エネルギーを仮定したのでエネルギー消費低減によりCO₂排出が削減されたといえることができる。なお、FCV（COG副生水素 - CHG充填）がFCV（オンサイト：天然ガス改質 - CHG充填）に対してエネルギー消費量が少ないにもかかわらずCO₂排出で逆転しているのは対象としたCOG副生水素が石炭起源であるためと考えている。

上記のCO₂削減効果をもとにCO₂削減量を計算すると、2020年で約260万t-CO₂となった。日本の年間CO₂排出量を約3億t-CO₂とすると、この削減量はその0.7%に相当する。2020

年のFCV導入目標500万台は日本の現在の保有台数約7,200万台の7%に相当する。輸送のCO₂排出分担は約20%であるから、500万台の自動車のCO₂排出分担は約1.4%となる。従って、CO₂削減量0.7%は妥当な値と考えられる。

（3）経済性からみた水素FCVの普及可能性

① FCおよび車両コストの検討

FCVの車両コストをFCコストとボディなどその他の部分に分けて考察した。その上で、将来コストの予測を学習曲線を用いて分析した。学習曲線による将来コスト分析が有効である例として太陽電池のコスト解析を挙げることができる。

表7にFCに学習曲線を応用した時の結果を示す。コストの削減を出力密度向上要素と本来のコスト低減要素に分けて、学習曲線手法を用いて検討した⁽²⁾。表中の進歩指数とは生産が2倍になったときのコスト低減率を示す。

表7 学習曲線によるFCコスト

※上段はFC車普及台数が5万台の時。下段は同500万台の時。

シナリオ 進歩指数		高出力 (H)	中出力 (M)	低出力 (L)
		出力密度 2→5 kW/m ²	出力密度 2→4 kW/m ²	出力密度 2→3 kW/m ²
高A	膜: 78 電極: 78 セパレータ: 78 周辺部品: 95 白金: 0.4→0.05mg/cm ²	① HA 11,500 円/kW 1,977 円/kW	② MA 13,447 円/kW 2,507 円/kW	③ LA 15,700 円/kW 3,186 円/kW
	膜: 82 電極: 82 セパレータ: 82 周辺部品: 95 白金: 0.4→0.1mg/cm ²	④ HB 18,550 円/kW 3,874 円/kW	⑤ MB 21,737 円/kW 4,984 円/kW	⑥ LB 25,423 円/kW 6,406 円/kW
中B	膜: 88 電極: 88 セパレータ: 88 周辺部品: 95 白金: 0.4→0.2mg/cm ²	⑦ HC 37,061 円/kW 11,406 円/kW	⑧ MC 43,504 円/kW 14,817 円/kW	⑨ LC 50,954 円/kW 19,192 円/kW
	膜: 88 電極: 88 セパレータ: 88 周辺部品: 95 白金: 0.4→0.2mg/cm ²	⑦ HC 37,061 円/kW 11,406 円/kW	⑧ MC 43,504 円/kW 14,817 円/kW	⑨ LC 50,954 円/kW 19,192 円/kW

備考) 2000年における燃料電池の累積生産量は2,000kW、コストは24万円/kW

例えば、進歩指数78は生産が2倍になった時、コストが22%低減することを意味する。表7のHBケースで、燃料電池実用化戦略研究会が発表したコスト目標4,000円/kWに近い結果となった。最もコスト低減するHAケースにおけるFCコストを用いたときの車両コスト予測を小型乗用のFCVを例に図10に示す。乗用車は、図4に示したように他の車種に対して比較的導入台数が多いと想定しているのでコスト

低減傾向が特に大きく、170万円/台の現行車に対して2004年初めの2,000万円/台が2010年過ぎにはほぼ現行車価格と等しくなるという結果になった。なお、下限価格として現行車価格を置いている。

② 水素供給コストの検討

水素供給コストは、水素供給ステーションの建設に要するコストと燃料費用などの運転経費からなる。水素供給ステーションの建設に要するコストについて、学習曲線手法を用いて検討した結果、「普及による大幅なコストダウンが予想される構成要素（ディスペンサユニットなど）」の進歩指数0.90から「普及にかかわらずコスト不変（ユーティリティ設備など）」の進歩指数1.00まで4つのグループに構成要素を分類し、進歩指数を想定した⁽²⁾。FCに比べてコスト低減率は比較的小さい。

図11に学習曲線手法を適用して求めた水素供給コストを示す。ステーション規模が

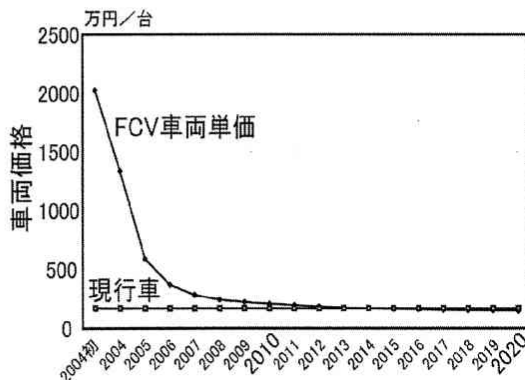


図10 小型乗用の車両価格

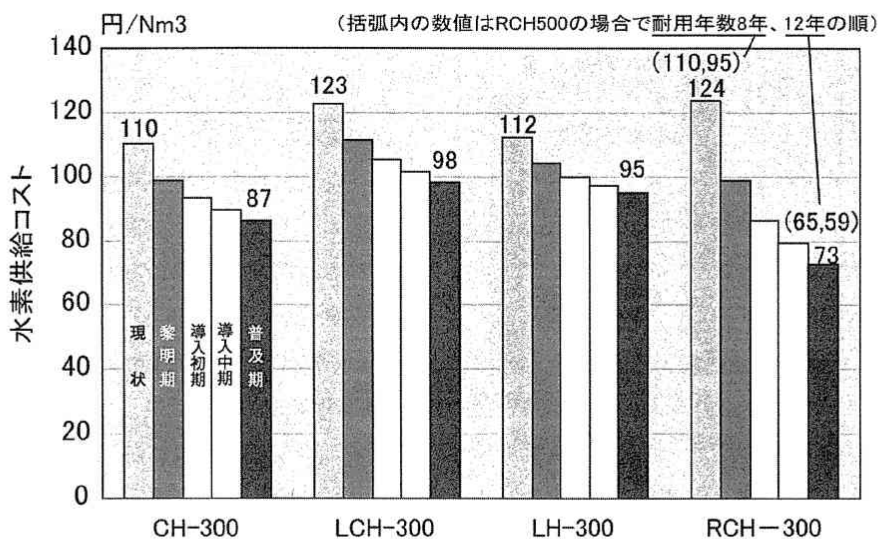


図11 水素供給コスト（税抜き）

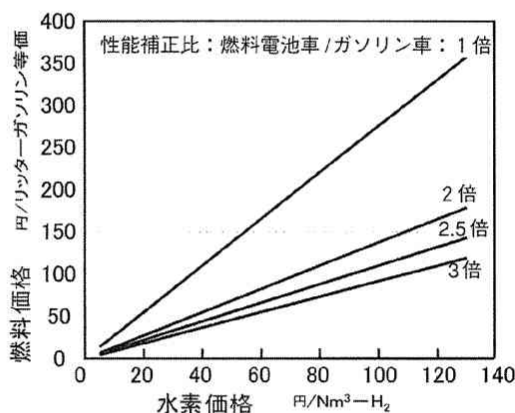


図12 水素価格と燃料価格の関係

300Nm³/hのとき、現時点の水素供給コスト110円/Nm³～120円/Nm³が2020年には天然ガス改質オンサイト形ステーションで約70円/Nm³と推定された。ステーション規模を500Nm³/hとすると耐用年数によっては60円/Nm³くらいになる可能性もある。

水素価格がどれくらいになればガソリン価格と競合しうるか考えてみる。図12の横軸は水素価格（円/Nm³）、縦軸はガソリン熱量等価の燃料価格である。FCVとガソリン車（GV）

の性能が等しい（FCV/GV=1）とすると水素価格100円/Nm³は275円ガソリン熱量等価（高位発熱量で計算）となり非常に高価な燃料ということになる。しかし、水素FCVはガソリン車に対して2.5倍～3倍近い性能向上が期待されている。従って、ちょうど中間の2.75倍の性能が達成されると、ガソリン熱量等価の水素価格は、図12の性能補正比2.5倍と3倍の間となり、おおよそ100円ガソリン熱量等価となる。現在ガソリンは首都圏平均で約105円/リッターで販売されているが、このガソリン価格には税金が含まれている。ガソリン価格105円/リッターの時、ガソリンの税金を除く本体価格は約50円/リッターとなる。従って、図11で見るように水素供給コスト（税抜きかつステーション事業者利益なし）60円/Nm³は、ガソリンの外部コスト（大気汚染税、CO₂排出税およびエネルギーセキュリティコストなど）を考えると、比較的可能性のある価格といえよう。

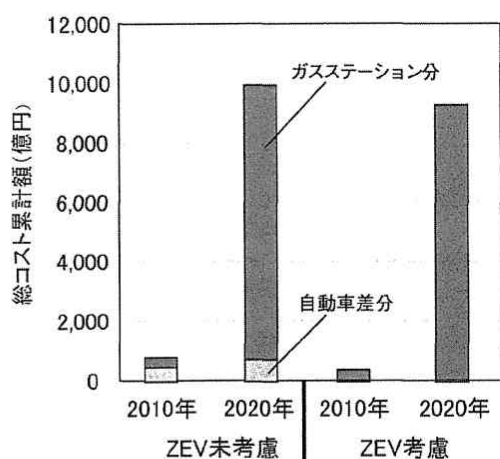


図13 追加的投資コスト

③ 水素FCV導入における追加的コストの検討

図10に示した水素FCVの車両価格とステーションの建設コストをもとに、FCVの導入によって必要となる追加的なコストを計算してみた。ここで、FCVについては現行車の価格との差額を追加的なコストとした。水素供給ステーションについては、新たに整備されるとして建設コストの全額を追加的なコストとして計算した。結果を図13に示す。図でZEV (Zero Emission Vehicles) 考慮とは、カリフォルニア州のZEV規制への対応分だけ水素FCVの生産台数を増加させたケースである。生産台数が増加すると学習効果によって車両価格の低下が加速され、自動車の追加的コストが小さくなり、合計の追加的投資コストが小さくなる。いずれにしても、約1兆円の追加投資となる。この投資を2005年から2020年まで15年かけて行なうと考えると、投資額としてはそれ程大きくないと言えよう。

④ 自立的普及可能性の検討

FCVの受容性には、社会的な要件として、

環境改善効果とエネルギーセキュリティや省エネなどのエネルギー問題改善効果、ユーザサイドの要件として、安全はもとより、性能、利便性そして経済性があることはすでに述べた。安全、性能そして利便性は改善されていくものとして、普及の大きな鍵になると考えられる経済的な視点から水素FCVの普及可能性を検討した。

水素FCVを自立的に普及可能とする条件を、「水素燃料電池自動車ユーザ、水素供給ステーション事業者ともに、現行のガソリンや軽油を利用あるいは販売する時と比較し、経済的なメリットが同等あるいはそれ以上得られるとき」と定義した。そして、経済的なメリットが同等となるときの水素供給コストを損益分岐水素価格とした。ユーザの損益分岐水素価格は、車両取得価格と生涯での燃料代を足したものとして現行の場合と比較した。ユーザの損益分岐水素価格はユーザがこれ以上は出せないという価格なので水素価格の上限値となる。図示しないが、車のタイプ、用途そして燃料の種類で22種類の車種におけるユーザ損益分岐水素価格を分析した。そのデータから普及が比較的容易な車種を見出すことができた。

一方、水素供給ステーション事業者メリットは現在価値換算法 (NPV) を用いて評価した。NPVとは投資と耐用年数内で得られる各年次の利益を割引率で現在価値に割り戻して累積した額を投資と比較して正 (プラス) であれば事業性ありと評価する方法である。割引率は4%を想定した。例えば、この事業でNPVが正になるならこの事業をやる意味があるという判断ができることになる。ステーション事業者の損益分岐水素価格はステーショ

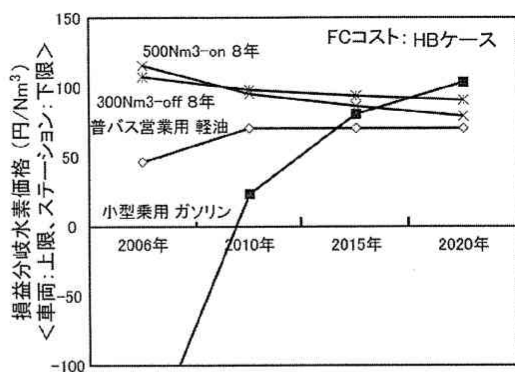


図14 FCVの自立的普及可能性

ン事業者がもうこれ以上は下げられないという価格になるので下限値を与える。

図14に水素FCVの自立的普及可能性の検討結果を示す。図14では自動車として、小型乗用ガソリン代替の水素FCVと普通バス営業用（燃料は軽油）代替の水素FCバスをとり上げた。FCコストは、燃料電池実用化戦略研究会の価格目標である4,000円/kWにはほぼ等しい価格まで低下する表6のHBケースを採った。ステーションは、導入期の可能性をみるために、導入期に多い300Nm³/h規模と普及期に整備が期待される500Nm³/h規模を選んだ。現行エネルギー価格には税金が含まれているが、水素供給コストには税金が含まれていない。

図14に示すように、小型乗用ガソリン車代替の水素FCVは、導入中期の2015年頃にユーザとステーション事業者の損益分岐水素価格が交差し、2020年に最大約25円/Nm³の税金もしくは利益を計上できる可能性がある。

しかし、軽油代替の水素FCバスでは、日本の軽油価格がガソリンに比べて安価であるということを反映し、両者の交差は見られなかった。すなわち、自立的な普及は検討した車両価格、水素供給コストでは困難があると推

定された。

図示しないが、現行の補助制度を適用したときの自立的普及可能性についても検討してみた。水素FCVには現行車の差額の半分を補助するとした（現在のハイブリッド車に対する補助と同じ）。ステーション事業にはエコステーションプロジェクトと同じく9000万円を上限に補助するとした。その結果、小型乗用ガソリン車代替の水素FCVの場合で両者の損益分岐水素価格の交差は5年ほど早まる傾向がみられた。また、その総額は約4,000億円になった。今回の検討では、ステーションの整備数の仮定に甘さがあることを述べた。現行と同等の補助政策をとるとすると仮に黎明期から導入期のステーション数を数倍にしても前項③の追加的投資コストと同等程度の負担ということがいえる。

図15にはガソリン乗用車代替の場合について、ガソリンの税金を抜いて、損益分岐水素価格を比較した場合の結果を示す。同図には米国の場合も示した。米国のステーション事業者の損益分岐水素価格はCaFCPの検討例⁽³⁾を参考にした。コスト予測時点が不明であるのでコスト一定とした。日本の場合、ガソリ

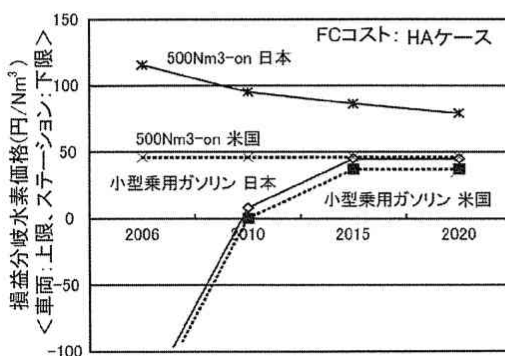


図15 損益分岐価格の日米比較（税抜き）

ン価格から税を抜いた結果、ユーザの損益分岐水素価格（上限値）は下がり、ステーション事業者の損益分岐水素価格（下限値）と交差しない。自立的普及は困難であるという結果となった。米国の場合も両者は交差しないが、その差は比較的小さい。なお、ユーザの損益分岐水素価格が日米で大きく変わらないのは米国のガソリン価格が安価であることを指摘できる。

⑤ 水素供給コスト低減の可能性

前項④の検討により税抜きガソリン価格と比較すると水素FCVの経済性からみた自立的な普及は困難であることが予測された。そこで、水素供給コストのブレークダウンを行った。結果を図16に示す。導入中期から普及期に期待されるオンサイトステーションに

ついてみると、水素供給コストのうち燃料代（天然ガス代と電気代）が水素1Nm³当り約28円を占めている。従って、ステーション建設の固定費は現状では95円/Nm³、2020年では45円/Nm³かかると計算される。一方、図示しないが米エネルギー省（DOE）は税抜きの水素供給コストとして現状（2000年）約40円/Nm³と評価している。また、2020年の水素価格目標を約20円/Nm³としている⁽⁴⁾。燃料代は、それぞれの国のエネルギー事情を反映しており、簡単には下がらない。しかし、固定費は色々な対応は必要であっても近づく可能性があると考ええる。仮に燃料代以外のコストがDOEの水素供給コストに近づくとなれば、2020年では50円/Nm³くらいになることも期待される。

また、米国の研究者は現行自動車燃料の水

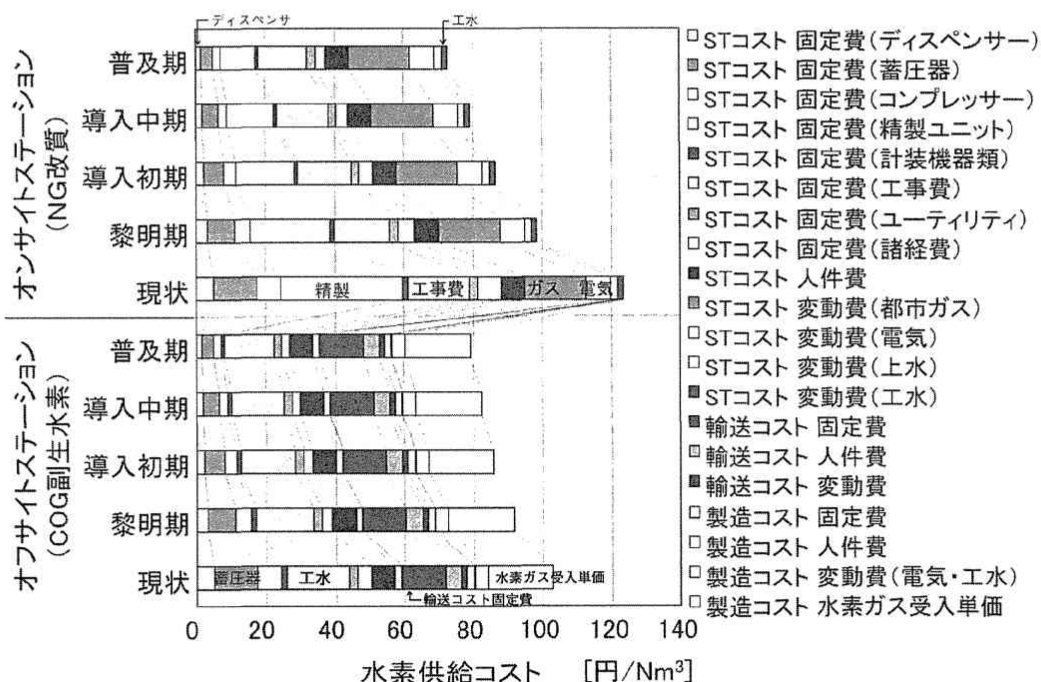


図16 水素供給コストの内訳（ステーション規模300Nm³/hの場合）

素に対する外部コストを検討している。プリンス頓大学のオグデン等によると、大気汚染税とCO₂税だけでガソリン乗用車1台当り生涯で4,000ドルと計算している。米国のガソリン乗用車の生涯走行距離は19万km（12万マイル）であるので、日本のガソリン乗用車の場合（同103万km）は約25万円と計算される（120円/ドルとした）。日本のガソリンの税金は約56円/リッターである。水素FC乗用車の燃費は約100km/kg - H₂と考えられる。従って、水素1Nm³あたりで約25円となり、水素の税金は30円/Nm³くらいになるという計算ができる。この税金は道路補修費などに充てられると考えることができる。先の水素供給コスト低減可能性とこの外部コストを考えると、将来的には利用し得る水素価格の実現も夢ではないと考えられる。

水素価格については、今後、日米の水素供給コスト等を詳細に比較することによって低減の可能性を詰める計画であり、水素供給コスト低減に向け、技術的な課題、法制度的な課題を明らかにしたいと考えている。

4. おわりに

本文中にも述べたが、実現する可能性の高いシナリオを目指し、前提条件を見直すとともに水素供給コスト低減に向けた解析を行なう計画である。外部コストの検討も行なう予定にしている。さらにまた、水素FCVの導入に、より役立つように、黎明期に導入するとよい車種や水素供給ステーションの仕様、整備方法をより具体的に検討したシナリオをつくることにしている。

日本政府は2003年度から新たに、水素安全

利用等基盤技術開発プロジェクトを立ち上げ、インフラ整備に向けた技術開発の促進や安全に関する基準や法制度を整備し、2005年から水素FCVの導入の障害を取り除き普及を確実なものにしようと目論んでいる。この水素FC導入シナリオもその一助になるよう検討を深めていきたいと考えている。

最後に、本調査・研究は新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）からの委託研究としてWE-NETプロジェクトの中で検討してきた途中結果をまとめたものである。本調査・研究の実施に当っては、三井情報開発(株)、岩谷産業(株)、(株)システム技術研究所、川崎重工業(株)、ジャパン・エア・ガシズ(株)（旧日本エア・リキード(株)）および新日本製鐵(株)に協力をいただいている。

参考文献

- (1) 平成12年度成果報告書「水素利用クリーンエネルギーシステム技術（WE-NET）第II期研究開発タスク1システムに関する調査・研究」平成13年3月NEDO - WE - NET - 0001
- (2) 平成13年度成果報告書「水素利用クリーンエネルギーシステム技術（WE-NET）第II期研究開発タスク1システムに関する調査・研究」平成14年3月NEDO - WE - NET - 0101
- (3) Bringing Fuel Cell Vehicle to Market, BEVILACOUA NIGHT, INC. Oct. 2001
- (4) Hydrogen Briefing for Hydrogen & Fuel Cell Annual Review Meeting, Department of Energy, May, 2002

廃止措置に伴う 原子力発電供給量低下の緩和策について

佐藤 正明※

（元(財)エネルギー総合工学研究所
プロジェクト試験研究部 主管研究員）



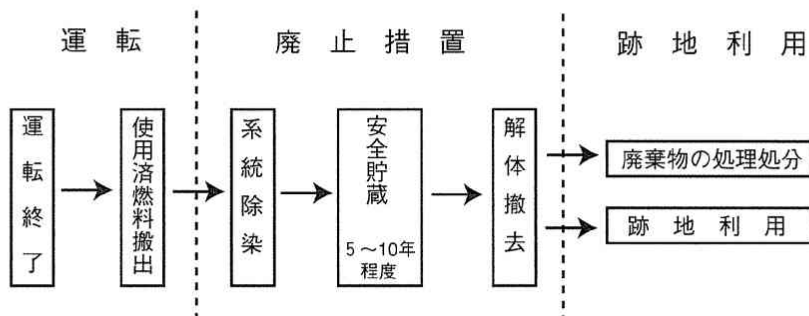
1. はじめに

現在、わが国の商業用原子力発電所は51基ある。総発電設備容量は約4,500万kWで、国内総発電電力量の3分の1を超える電力を供給し、エネルギー自給率の向上およびエネルギーの安定供給に貢献するとともに、二酸化炭素（CO₂）排出量の低減に大きく寄与する基幹電源と位置付けられている。

今後も基幹電源としての活用が期待される原子力発電であるが、1966年に最初の商業用原子力発電所の運転が開始されて以来既に30数年が経過しており、近い将来運転を終了する原子力発電所が徐々に増えてくることが予想される。商業炉では、日本原子力発電(株)の

東海発電所（ガス炉）が1998年3月に運転を終了、2001年12月には廃止措置に着手しており、商業用原子力発電所の運転終了・廃止措置は現実のものとなってきている。なお、沸騰水型軽水炉の初号機である同社敦賀発電所1号機も2010年に運転停止すると2002年5月に発表されたが、本稿には反映されていない。

わが国の原子力発電所の廃止措置の考え方を図1に示す。運転終了後に敷地内から全ての使用済燃料の搬出を終了した時点で廃止措置の段階に入る。作業者の被ばく低減などを考慮して直ちに解体撤去を行わず、系統除染の後5～10年の安全貯蔵期間を設け、その後、設備・施設を解体撤去して跡地を原子力発電所用地として引き続き利用することとしてい



出典：総合エネルギー調査会原子力部会報告書（平成9年1月）

図1 商業用原子力発電施設の廃止措置の標準工程

※平成11年7月～平成14年6月まで(財)エネルギー総合工学研究所に出向。
現在、日本原子力発電(株) 研究開発室次長

る（標準工程）。したがって、廃止措置期間およびその後の新たな発電所の建設期間を含めた15～20年間は、その分設備容量が低下することになる。一方、原子力発電所の新規立地は、電源確保、CO₂排出量の低減等の観点から相当数が計画されているが、期待どおりの進展が見られていない状況にある。

これらの状況を踏まえ、本稿では、近い将来予想される原子力発電による電力供給の低下量を予測するとともに、低下緩和策の1つとして、高経年化対策による長期運転や廃止措置のやり方を想定して評価した結果を紹介する。

2. 電力供給低下量の予測

一廃止措置標準工程では1000MWe低下

将来予想される原子力発電による電力供給低下量を以下の前提を置いて評価した。

① 既設および計画中のプラント（「現状プラント」—別表参照）を対象に、運転終了後に

プラントを解体撤去して、その跡地に新たなプラント（「建替プラント」）を建設する。

② 現状プラントの運転年数は40年と仮定し、また、建替プラントの出力は現状プラントの出力によらず一律150万kWe級とする。なお、本評価の目的は、現状プラントから建替プラントへ移行する際の電力供給量低下の程度を把握することにあるため、建替プラントの運転年数は特に設定する必要はないが、ここでは評価モデルの条件として60年と仮定する。

③ 廃止措置は、現在考えられている標準工程をベース（安全貯蔵準備期間1年、安全貯蔵期間5年、解体撤去期間5年と想定）とし、また、建替プラントの建設期間は5年とする。

④ 評価対象期間は、現状プラントから建替プラントへの移行時期を考慮して2000年～2100年とする。

評価結果を図2に示す。電力供給量（設備

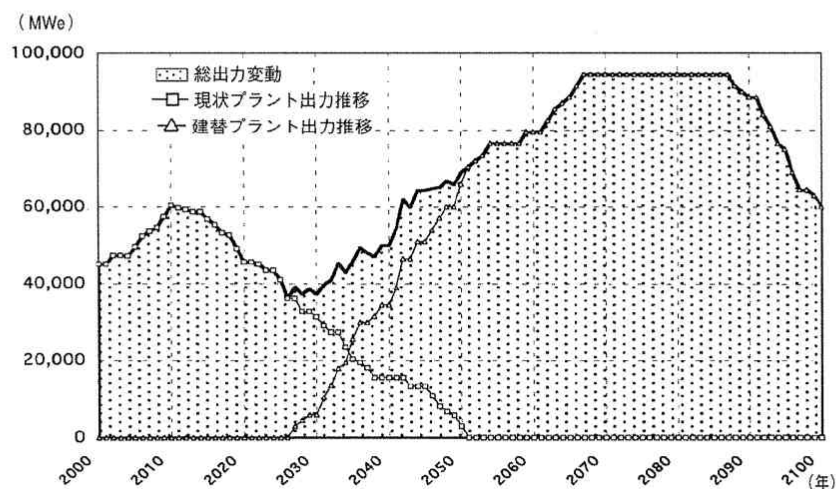


図2 評価結果（ケース1）

表1 評価条件

現状プラント	運 転 年 数					
	ケース 1	ケース 2	ケース 3	ケース 4	ケース 5	ケース 6
50万kWe級	40	60	40	40	40	40
80万kWe級	40	60	60	40	60	60
110万kWe級	40	60	60	60	80	60
130万kWe級	40	60	60	60	80	60
150万kWe級	40	60	60	60	80	60
廃止措置方式	標 準 工 程					即時解体

容量)は、2010年をピーク(設備容量約6,000万kWe)にそれ以降運転終了するプラントが増加するため徐々に低下する。これは既設プラントの最も早い運転終了が40年運転として2010年であること、また、計画でプラントは2010年までに運転開始するプラントを対象にしていることによる。建替プラントは、16年(安全貯蔵準備期間1年、安全貯蔵期間5年、解体撤去期間5年、建設期間5年)の時間遅れで増加してくるため、2030年頃から供給量は増加に転じ、2030年代半ばには2000年レベルまで回復する。2010年のピークと最低供給量(2026年)との差は約2,400万kWeとなる。

この結果から、現状プラントを40年運転して、その後に現在考えられている標準工程に従って廃止措置を実施した場合、2020～2030年代にかけて、原子力発電による電力供給量は現状レベル(約4,500万kWe)から最大1,000万kWe程度低下した状態が約15年間にわたって続くこととなる。

3. 低下緩和策の検討

高経年化対策による長期運転や廃止措置のやり方を想定することにより、上記の電力供

給量の低下を緩和するための方策を検討した。検討に際しては、現状プラントをその出力規模(50万kWe級、80万kWe級、110万kWe級、130万kWe級、150万kWe級)に応じて区分けし、条件設定を行った(表1)。

(1) 一律に運転年数を変更した場合

—運転年数60年に変更でも低下避けられぬ

各出力規模のプラントとも、高経年化対策によりその運転年数を一律に40年運転から60年運転に変更した場合(ケース2)を評価した。評価結果を図3に示す。

本ケースでは、全ての現状プラントの運転年数が20年延長されるため、2010年のピークの継続期間が20年延び、供給量低下の出現が20年後ろにシフトすることとなる。その後の低下の傾向はケース1と同様であり、2010年のピークと最低供給量(2046年)との差は約2,400万kWeとなり、低下そのものを緩和することはできない。

高経年化対策により長期運転化を図り、出力規模によらず一律に運転年数を変更した場合は、供給量低下時期を後年にシフトすることができ、その間にその他の有効な低下緩和

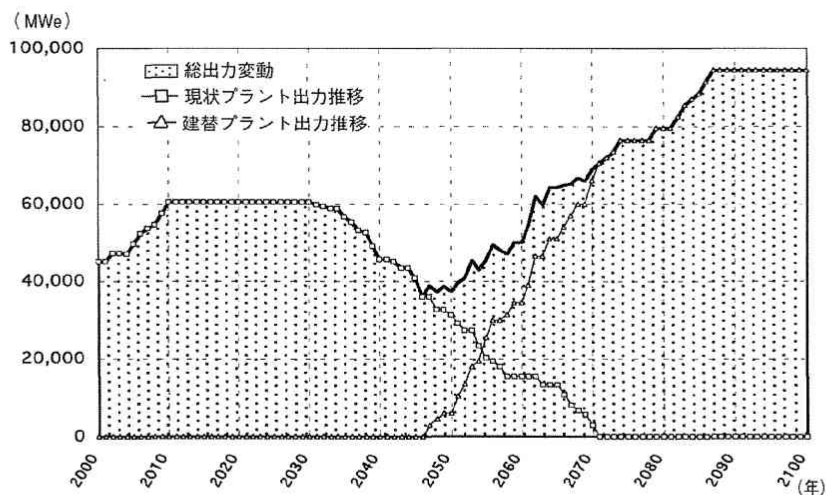


図3 評価結果（ケース2）

策を施す時間的余裕を確保することは可能であるが、いずれ供給量低下が起こることは避けられない。

（2）出力規模により運転年数を変更した場合
—供給量低下は緩和、低減される

現状プラントの出力規模により運転年数を変更し、50kWe級プラントのみ40年運転、それ以外のプラントは60年運転（ケース3）、

50kWe級および80kWe級プラントは40年運転、それ以外のプラントは60年運転（ケース4）とした場合を評価した。評価結果をそれぞれ図4、図5に示す。

ケース3では、40年運転の50kWe級プラント（計14基、約700万kWe）が2010年以降順次運転終了するため、供給量は2010年をピークとして低下し始めるが、80kWe級以上のプラントの運転が20年延長されているため、その低下勾配はケース1に比べると緩やかで

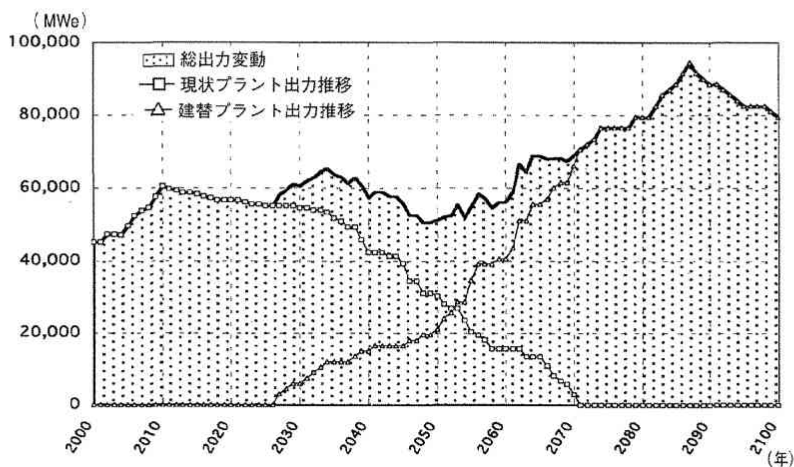


図4 評価結果（ケース3）

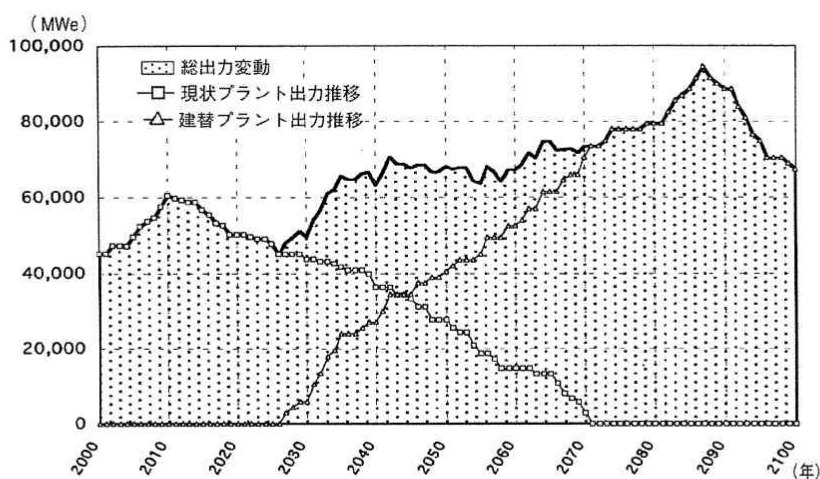


図5 評価結果（ケース4）

ある。80万kWe級以上のプラントは2034年以降運転終了してくるが、一方、50万kWe級プラントの建替プラントは、16年の時間遅れで2026年以降立ち上がってきているため、この供給量低下分を補完することができ、ケース1あるいはケース2で現れたような大きな供給量低下は緩和される。2010年のピークと最初の最低供給量（2025年）との差は約500万kWeとなるが、現状レベル（約4,500万kWe）を上回った供給量の確保が可能である。

ケース4では、40年で運転終了するプラントが50万kWe級プラントの他に80万kWe級プラント（計17基、約1,400万kWe）が加わるため、供給量の低下勾配はケース3よりも大きい。110万kWe級以上のプラントの運転が20年延長されているため、最初の建替プラントが立ち上がる2026年までの低下量はケース1ほど大きくはないが、ケース3と比べると3倍の低下量となり、ケース3ほどの低下緩和効果はない。2010年のピークと最低供給量（2026年）との差は約1,500万kWeとなる。ただし、現状レベル（約4,500万kWe）の供給量維持は可能である。

上記2ケースからは、小規模プラント（50万kWe級プラント）は比較的早めに運転終了して大規模プラントに建て替え、中規模プラント（80万kWe級プラント）以上は高経年化対策により長期運転を行うことが供給量低下を緩和するひとつの方策であることがわかる。

（3）超長期運転を想定した場合 —より安定した供給量

高経年化対策をさらに推し進めて超長期運転を想定した場合を評価した。ここでは超長期運転として、40年運転終了後に廃止措置を行わず、短期間で原子炉容器の一体撤去・交換が可能であるとして、原子炉のみの交換後に早期に同一プラント出力に復旧して、さらに40年運転を行う80年運転を想定した。

現状プラントを一律に80年運転とした場合の傾向はケース2と同様であり、ピークの継続期間はケース2よりさらに20年延長されるが、低下量の緩和には影響がない。

そのため、ここでは供給量低下の緩和効果が大きいケース3に超長期運転を適用して、

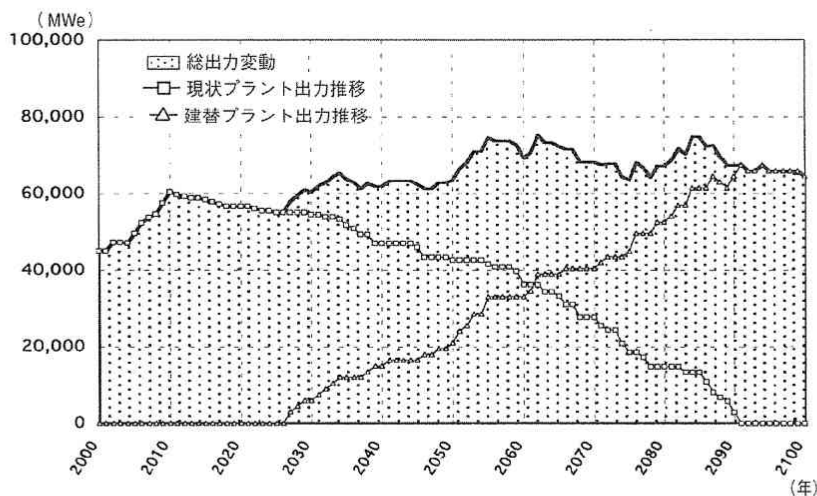


図6 評価結果（ケース5）

50万kWe級プラント40年運転，80万kWe級プラント60年運転，110万kWe級以上のプラント80年運転として評価（ケース5）した。評価結果を図6に示す。

本ケースでは，110万kWe級の初号機が60年目を迎える2038年まではケース3と同様の出力推移をたどり，最初に現れる供給量低下に対する緩和効果もケース3と同等で，2010年のピークと最低供給量（2025年）との差は約500万kWeとなる。2038年以降は，110万kWe級以上のプラントの運転年数がケース3に比べさらに20年延びた分，出力推移はなだらかとなり，ケース3ほどの供給量の変動は発生せず，ほぼ安定した供給量が得られる。

（4）安全貯蔵せず即時解体した場合 —初期の供給量低減を緩和

これまでの評価においては，廃止措置として標準工程をベースとした条件で評価を行ってきた。ここでは，廃止措置の方法として，廃止措置期間を短縮するため安全貯蔵期間を設けずに，系統除染後直ちに解体撤去を行う

即時解体（準備期間1年，解体撤去期間5年）方式を設定（ケース6）して，この条件をケース3にあてはめて評価した。評価結果を図7に示す。

本ケースでは，安全貯蔵（5年）を行わずに即時解体するため，建替プラントの立ち上がり時期が5年早まることとなり，ケース3に比べ供給量の低下を5年早く埋め始めることができる。その結果として，これまでの評価のうちで初期の供給量低下を最も緩和することができるケースとなり，2010年のピークと最低供給量（2018年）との差は約400万kWeとなる。

（5）運転開始時期により運転年数を変更した場合—供給量低下は緩和されない

ここでは，現状プラントを出力規模により区分けするのではなく，運転開始時期により運転年数を変更する場合，すなわち，古いプラントは高経年化対策による長期運転を行わずに廃止措置・新規プラントへの建て替えを

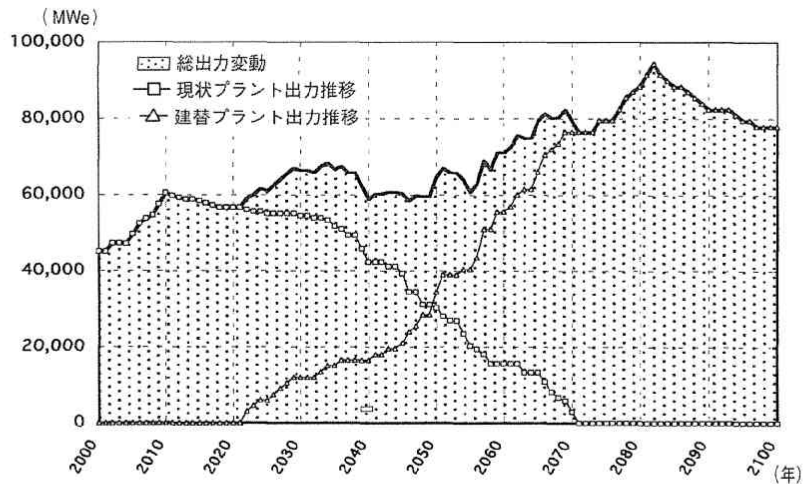


図7 評価結果（ケース6）

行い、比較的新しいプラントは長期運転を行うとした場合を想定した。なお、廃止措置は標準工程をベースとした。

評価ケースとして、1979年以前の運転開始プラントは40年運転、1980年以降の運転開始プラントは60年運転と設定した（ケース7）。評価結果を図8に示す。

1979年以前は小規模プラント（50万kWe級

プラント）が運転開始し始めた時期であることから、出力推移はケース3と似た傾向を示す。しかし、40年運転としているプラントは、ケース3では50万kWe級プラントのみ（計14基、約700万kWe）であるのに対し、本ケースでは、1979年以前に運転開始のプラント計20基、約1,500万kWe（50万kWe級プラント8基、80万kWe級プラント8基、110万kWe級プラン

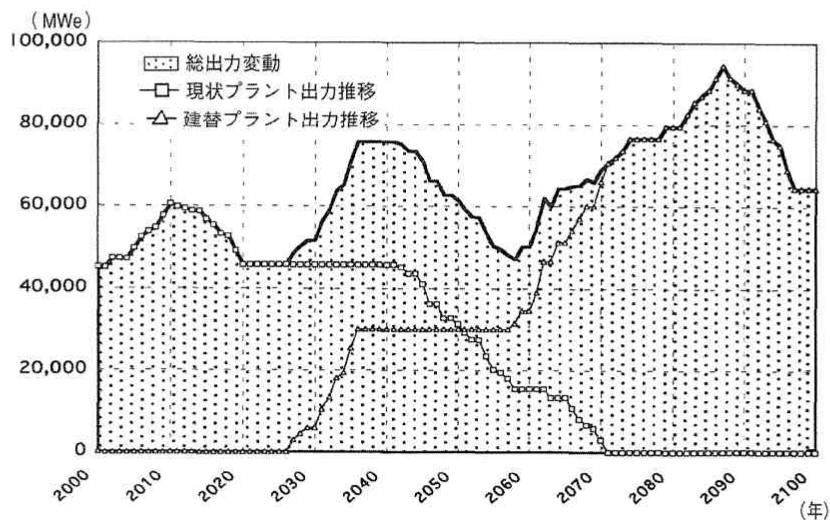


図8 評価結果（ケース7）

ト4基)となり、ケース3と比べると、40年で運転終了するプラントの基数が多く、かつ中・大規模プラントも含まれることから出力合計も大きい。その一方、小規模プラントの一部には60年運転を行うプラントもあることとなる。このため、供給量の低下勾配はケース3よりも大きく、ケース3ほどの低下緩和効果はない。2010年のピークと最初の最低供給量(2020年)との差は約1,500万kWeとなる。

4. 評価のまとめ

上記検討結果から以下のことが言える。

① 現状プラントを一律に40年運転して、その後標準工程をベースとした廃止措置を実施した場合、2020～2030年代にかけて、原子力発電による電力の供給量は現状レベル(約4,500万kWe)から最大1,000万kWe程度低下した状態が約15年間にわたって続くこととなる(ケース1)。

② 高経年化対策により一律に運転期間を延長した場合(60年運転、80年運転等)は、供給量の低下そのものを緩和することはできない。しかし、低下開始時期を何十年か遅延させ、その間にその他の有効な低下緩和策を実施する時間的余裕を得ることは可能である(ケース2)。

③ 高経年化対策による長期運転や廃止措置のやり方を適切に組み合わせることにより、つまり廃止措置時期の集中を避け、長期運転や建替プラントにより低下分を補完することにより供給量の低下そのものを緩和し、少なくとも現状レベル(約4,500万kWe)以上の供給量

を確保することは可能である。その方策として以下がある。

● 小規模プラントは早めに廃止措置を行い大規模プラントに建て替え、また、中規模以上のプラントは高経年化対策による長期運転を行うことにより低下は緩和できる(ケース3, 4, 5)。

● 廃止措置のやり方として即時解体方式を採用することにより、より緩和効果が得られる(ケース6)。

● 超長期運転を適切に組み入れることにより、より長期的な観点からは安定した電力の供給が可能である(ケース5)。

5. 今後の課題

20年後、30年後の電力需要がどの程度になるかは不明であるが、少なくとも現状レベル以上の原子力発電による電力供給量を確保したいとするならば、原子力発電全体を見通した何らかの対応策を採る必要がある。高経年化対策による長期運転や廃止措置のやり方を適切に組み合わせて今後の原子力発電所のリブレースを進めていくことがその1つの対応策になりうると思われる。そのためには以下のような検討を進めておくことが必要であろう。

(1) 高経年化対策による長期運転の可能性検討

高経年化対策に関する検討は、「高経年化に関する基本的な考え方」(平成8年4月、資源

エネルギー庁）が示され、この方針に基づき、運転期間30年を迎えるプラントでは、評価対象期間を60年と仮定した場合の技術評価がなされるなどの健全性確認が行われている。今後さらに検討が進められることにより、60年運転も可能になってくるものと思われる。原子炉容器等の主要機器を交換することによる80年運転等のさらなる長期運転の可能性は、時間的裕度をより確保するという観点から、選択肢のひとつとして検討を進めておく必要があると思われる。上記高経年化対策の検討と合わせ、まずは技術的成立性検討や技術開発課題の抽出、経済性評価等の検討が考えられる。

（２） 原子力発電全体を見据えたりプレースのあり方の検討

高経年化対策による長期運転や廃止措置のやり方を適切に組み合わせて電力供給量の低下を緩和していくためには、原子力発電全体を見据えたりプレースのあり方の検討、言い換えると各原子力発電所の運転期間や廃止措置時期等を一元的に捉えたりプレースシナリオを検討していく必要があると思われる。ただし、運転期間や廃止措置時期の決定等は基本的には電気事業者が判断すべき事柄であることから、このリプレースシナリオをわが国のエネルギー政策の中にどう取り込んでいけるかが課題と言えよう。

（３） 廃止措置方式の諸検討（廃棄物量・処分方策、廃止措置費用、技術開発等）

即時解体方式は、跡地の有効利用・供給量の低下緩和の観点からは有利であるが、作業

者の被ばくや放射性廃棄物量などの課題がある。即時解体方式を含めた廃止措置方式の検討は、総合エネルギー調査会原子力部会の報告（昭和60年7月）に合わせてなされているが、その後の規制動向や技術開発動向、諸外国の動向等を踏まえ、改めて諸検討を進めることが必要と考えられる。

また、現在関係機関において検討が進められているが、今後増加してくるであろう廃止措置をより円滑に実施していくためには、廃止措置に伴って大量に発生する解体廃棄物の処理・処分方策の検討（クリアランスレベルに関わる諸制度の確立や再利用促進のための諸施策の検討・理解促進など）が着実に進められる必要があろう。

さらに、運転終了から廃止措置段階に移行する際には、使用済燃料の発電所敷地内からの搬出を円滑に進めることが必要であり、そのためには、使用済燃料の受け入れ先となるであろう再処理施設や中間貯蔵施設の計画を着実に進めていくことも必要であろう。

本稿は、経済産業省資源エネルギー庁からの委託研究として（財）エネルギー総合工学研究所が実施した「実用発電用原子炉廃炉技術調査」の一環として、平成12年度に検討した内容を整理・加筆したものである。

別表 評価対象プラント

(No.1及びNo.53以外の軽水炉について評価)

(出力の単位: MWe)

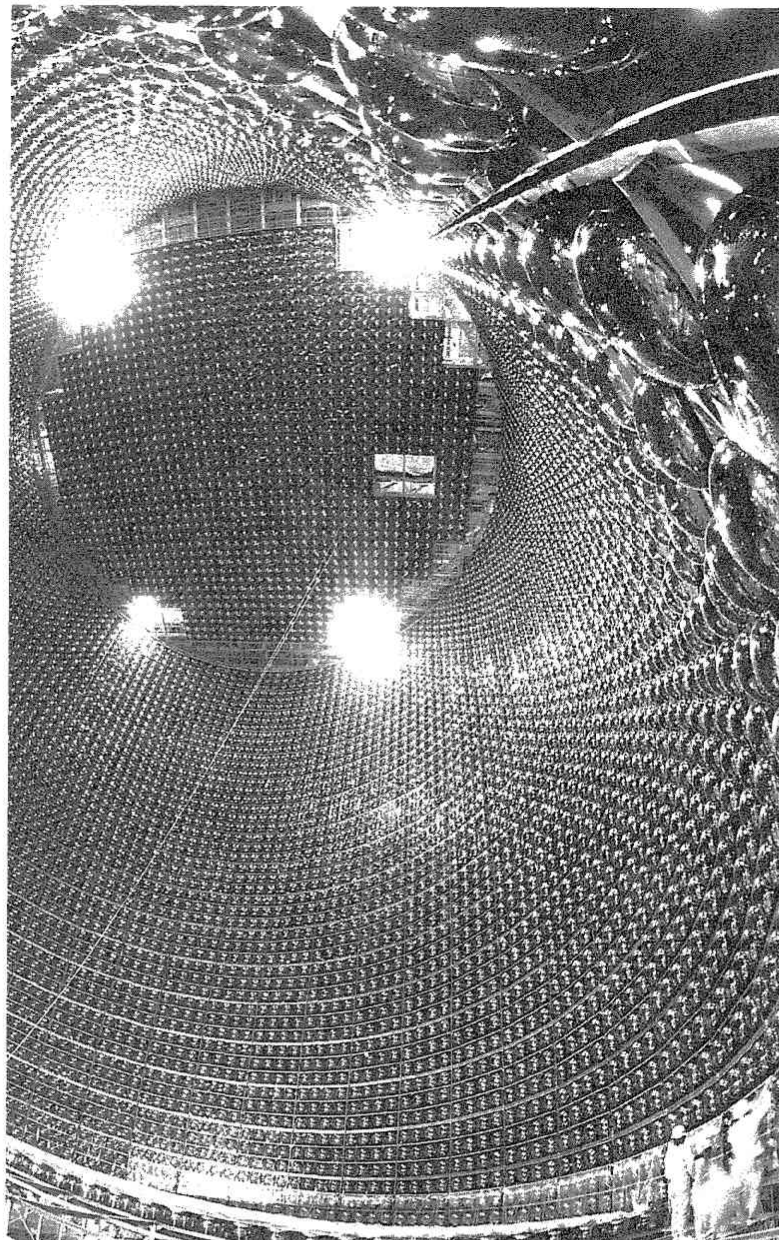
No.	電力	サイト	号機	所在地	炉型	出力	運転年	停止年	備考
1	原電	東海		茨城県東海村	GOR	166	1966	1998	
2		東海第二		茨城県東海村	BWR	1100	1978		
3		敦賀	-1	福井県敦賀市	BWR	357	1970		
4			-2	福井県敦賀市	PWR	1160	1987		
5	北海道	泊	-1	北海道泊村	PWR	579	1989		
6			-2	北海道泊村	PWR	579	1991		
7	東北	女川	-1	宮城県女川町 牡鹿町	BWR	524	1984		
8			-2	宮城県女川町 牡鹿町	BWR	825	1995		
9	東京	福島第一	-1	福島県大熊町 双葉町	BWR	460	1971		
10			-2	福島県大熊町 双葉町	BWR	784	1974		
11			-3	福島県大熊町 双葉町	BWR	784	1976		
12			-4	福島県大熊町 双葉町	BWR	784	1978		
13			-5	福島県大熊町 双葉町	BWR	784	1978		
14			-6	福島県大熊町 双葉町	BWR	1100	1979		
15		福島第二	-1	福島県富岡町 樽葉町	BWR	1100	1982		
16			-2	福島県富岡町 樽葉町	BWR	1100	1984		
17			-3	福島県富岡町 樽葉町	BWR	1100	1985		
18			-4	福島県富岡町 樽葉町	BWR	1100	1987		
19		柏崎刈羽	-1	新潟県柏崎市 刈羽村	BWR	1100	1985		
20			-2	新潟県柏崎市 刈羽村	BWR	1100	1990		
21			-3	新潟県柏崎市 刈羽村	BWR	1100	1993		
22			-4	新潟県柏崎市 刈羽村	BWR	1100	1994		
23			-5	新潟県柏崎市 刈羽村	BWR	1100	1990		
24			-6	新潟県柏崎市 刈羽村	ABWR	1356	1996		
25			-7	新潟県柏崎市 刈羽村	ABWR	1356	1997		
26	中部	浜岡	-1	静岡県浜岡町	BWR	540	1976		
27			-2	静岡県浜岡町	BWR	840	1978		
28			-3	静岡県浜岡町	BWR	1100	1987		
29			-4	静岡県浜岡町	BWR	1137	1993		
30	北陸	志賀	-1	石川県志賀町	BWR	540	1993		
31	関西	美浜	-1	福井県美浜町	PWR	340	1970		
32			-2	福井県美浜町	PWR	500	1972		
33			-3	福井県美浜町	PWR	826	1976		
34		高浜	-1	福井県高浜町	PWR	826	1974		
35			-2	福井県高浜町	PWR	826	1975		
36			-3	福井県高浜町	PWR	870	1985		
37			-4	福井県高浜町	PWR	870	1985		
38		大飯	-1	福井県大飯町	PWR	1175	1979		
39			-2	福井県大飯町	PWR	1175	1979		
40			-3	福井県大飯町	PWR	1180	1991		
41			-4	福井県大飯町	PWR	1180	1993		
42	中国	島根	-1	島根県鹿島町	BWR	460	1974		
43			-2	島根県鹿島町	BWR	820	1989		
44	四国	伊方	-1	愛媛県伊方町	PWR	566	1977		
45			-2	愛媛県伊方町	PWR	566	1982		
46			-3	愛媛県伊方町	PWR	890	1994		
47	九州	玄海	-1	佐賀県玄海町	PWR	559	1975		
48			-2	佐賀県玄海町	PWR	559	1981		
49			-3	佐賀県玄海町	PWR	1180	1994		
50			-4	佐賀県玄海町	PWR	1180	1997		
51		川内	-1	鹿児島県川内市	PWR	890	1984		
52			-2	鹿児島県川内市	PWR	890	1985		
53	JNC	ふげん		福井県敦賀市	ATR	165	1979	2003	
54	北海道	泊	-3	北海道泊村	PWR	912	2008		*)
55	東北	女川	-3	宮城県女川町 牡鹿町	BWR	825	2002		*)
56		東通	-1	青森県東通村	BWR	1100	2005		*)
57	東京	福島第一	-7	福島県大熊町 双葉町	BWR	1380	2006		*)
58			-8	福島県大熊町 双葉町	BWR	1380	2007		*)
59		東通	-1	青森県東通村	BWR	1385	2010		*)
60	中部	浜岡	-5	静岡県浜岡町	BWR	1380	2005		*)
61	北陸	志賀	-2	石川県志賀町	BWR	1358	2006		*)
62	中国	島根	-3	島根県鹿島町	BWR	1373	2010		*)
63	電源開発	大間		青森県大間町	BWR	1383	2007		*)
64	原電	敦賀	-3	福井県敦賀市	PWR	1538	2009		*)
65			-4	福井県敦賀市	PWR	1538	2010		*)

(No.54～65)は、建設中または建設準備中のプラントを示す。

*)出典:総合エネルギー調査会原子力部会(第75回:H12.7.13)資料(ただし、運転年が2010年までのプラントを評価対象とした)

*)以外:「電源開発の概要」H10年度

東京大学 神岡



(神岡宇宙素粒子研究施設パンフレットより)

スーパーカミオカンデ

(Super-Kamioka Neutrino
Detection Experiment)

2002年10月8日、小柴昌俊
東京大学名誉教授がスウェー
ーデン国立科学アカデミー
より2002年ノーベル物理学
賞を受賞しました。受賞理
由は「天体物理学、とくに
宇宙ニュートリノ検出への
パイオニア的貢献」です。

■ はじめに

女性研究員（金子、木村）は11月21日、「東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設」をめざして東京駅から「Maxあさひ」で出発しました。越後湯沢で特急「はくたか」に乗り換え、富山でJR高山本線の一両編成のバスのような電車で山の中をトコトコ乗ること50分、ようやく猪谷駅に到着しました。電車を乗り継ぎ乗り継ぎ、およそ4時間半の長い旅でした。

冷たい雨の中、猪谷駅で私達を出迎えて下さった東京大学宇宙線研究所の後藤正八郎さんの運転で、紅葉のピークを少しだけ過ぎてはいましたがまだまだ美しい山々を車窓から眺めながら、岐阜県神岡町スーパーカミオカンデをめざしました。

宇宙素粒子研究施設

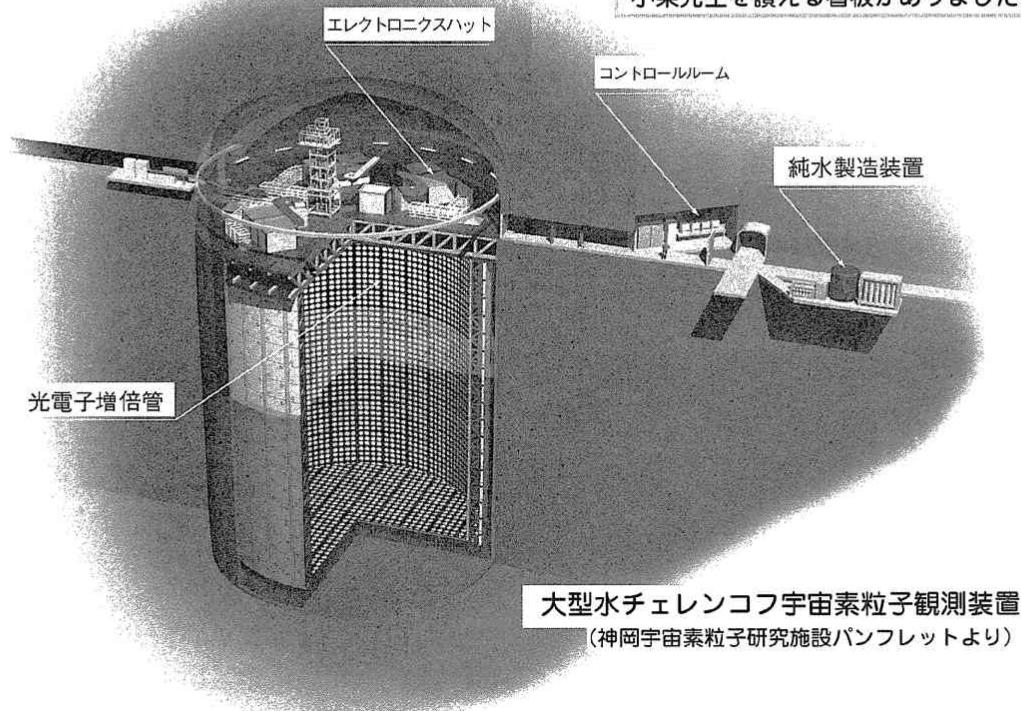
■ 鉱山を利用

スーパーカミオカンデまでは・・・ヘルメットをかぶり、車に乗り込み、鉱山の入口から真っ直ぐな坑道を約1.7km入って行きました。車を降りると山の中には、純水製造装置、コントロールルームがありました。そしてここから、高エネルギー加速器研究機構の小林さんの説明を受けながら、さらにその先を歩いていくとようやくスーパーカミオカンデの屋根の上の部分にたどり着きました。



鉱山の入口

小柴先生を讃える看板がありました。



大型水チェレンコフ宇宙素粒子観測装置
(神岡宇宙素粒子研究施設パンフレットより)

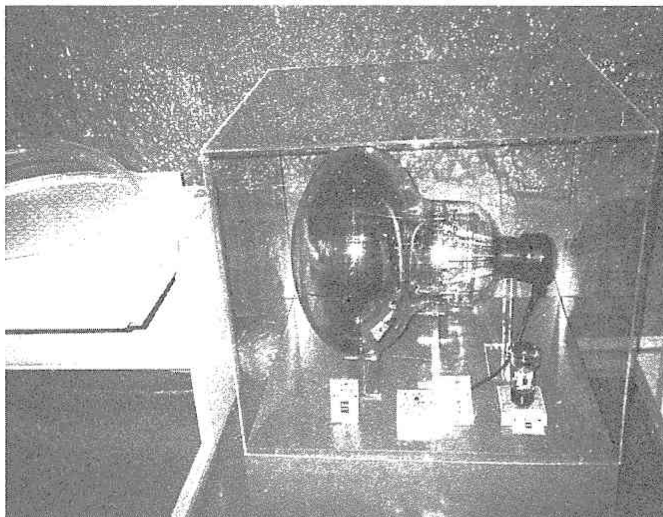
光電子増倍管

直径50cm, 世界最大。水槽の内壁いっぱいに光電子増倍管が張りめぐらされています。1本30万円以上します。

光電子増倍管は、極微弱な光まで検出でき、チェレンコフ光のような光を光電面で受けて、電子を放出します。

昨年の事故で11146本のうち半分以上が壊れましたが、1つ1つ手作りで製作に時間がかかるため、現在は半分の性能で観測を再開しています。

左に半分ほど写っているのは、事故後すべての光電子増倍管に取り付けている、壊れないように防護するカバーです。



■ 水槽は開いていた！

ちょうど私達が行ったまさにその日から、防護カバーの取り付け作業のために水槽を開けていたので、思いもよらず水槽の中を見ることができました。

おそろおそろのぞいてみると、壁全面に光電子増倍管がびっしりと張りめぐらされ、水の中でキラキラと青白く輝いていました。中は水がたっぷりと入り、ゴンドラで降りた作業員の方々がゴムボートに乗り、マットを浮かべて作業をされていました。

ノーベル賞の報道の時テレビニュース等でよく見かけた映像は水が入っていないものでしたが、ちょうど事故の修復をしていて水を抜いていた時期だったからなんだそうです。

しばらく作業をした後、また蓋を閉じて観測を再開するそうなので、次に開けるのは3年後だそうです・・・本当にラッキーでした！

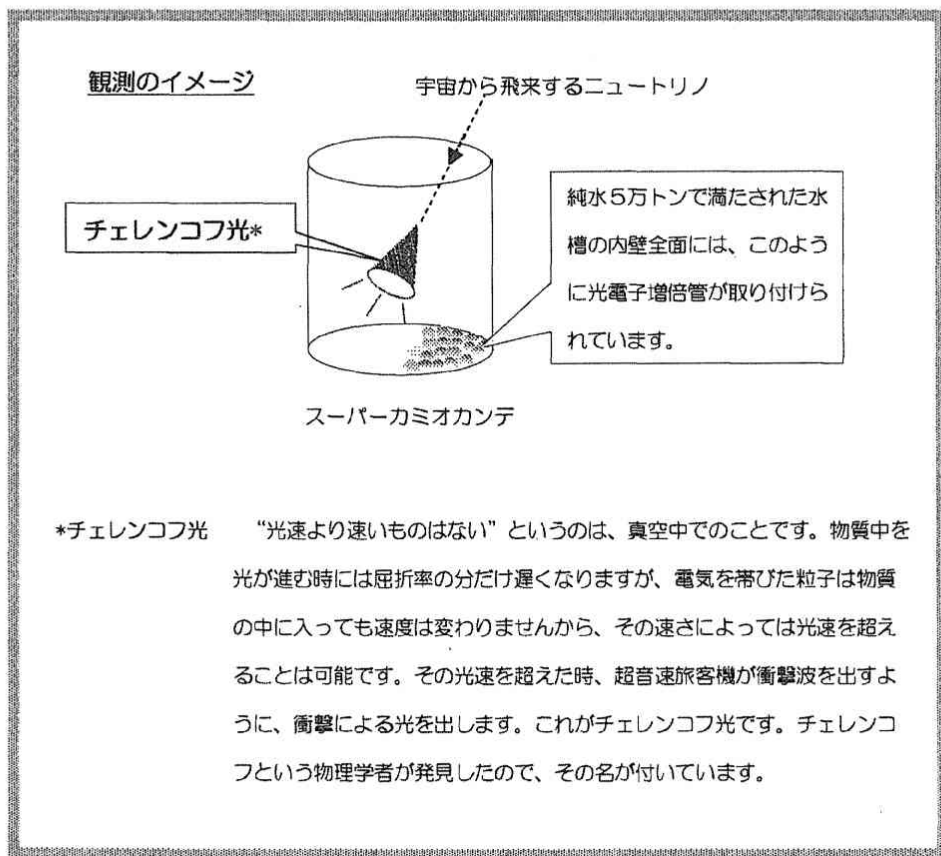


水槽を上からのぞいた様子

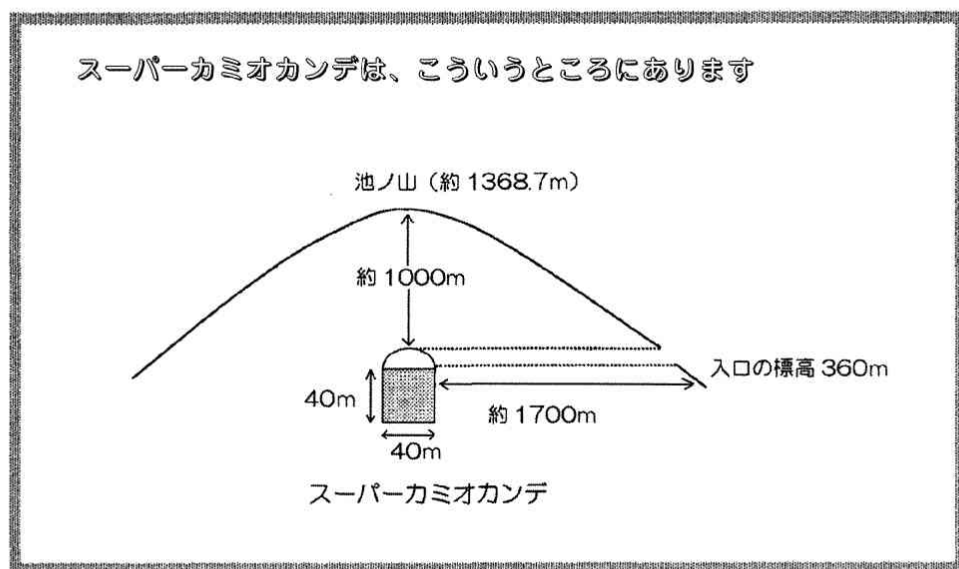
■ ニュートリノって何？

物質をとことん細かくしていくと最後にたどりつくのが素粒子。こうしている今も、宇宙からいろいろな素粒子が無数に降り注いでいます。ニュートリノもそのうちの1つですが、電気を帯びていないため他の物質と反応することもほとんど無く、地球も私たちの体も何でも通り抜けていくという不思議な性質のおかげで観測が難しく、謎の多い粒子だそうです。

ただ、ニュートリノは水と反応すると、電気をもった粒子が叩き出されることがあります。その時かすかに青白い光（＝チェレンコフ光*）が円錐状に発し、その光は壁に当たると、ちょうどドーナツのような光の輪となります。スーパーカミオカンデでは、その光の輪を水槽の内壁全面に取り付けた11146本の光電子増倍管（前頁写真参照）というセンサーで捉えることで、ニュートリノの種類や飛来方向などを観測しています。（下図参照）



そして、この反応はごく稀にしか起きませんから、より多くの反応を検出するためには大量の水、それも反応を邪魔する物質がなく、微弱なチェレンコフ光を確実に観測するために、純水が必要です。因みに、スーパーカミオカンデのタンクは、カミオカンデ（スーパーカミオカンデの前身の検出器、1983年から1996年まで観測）の約11倍の大きさです。また、この施設が1360mの山の頂上から真下1000mのところにあるのも、観測に邪魔な宇宙線が周りの石に吸収されるからです。



■ 大発見！ ニュートリノに質量（重さ）がある

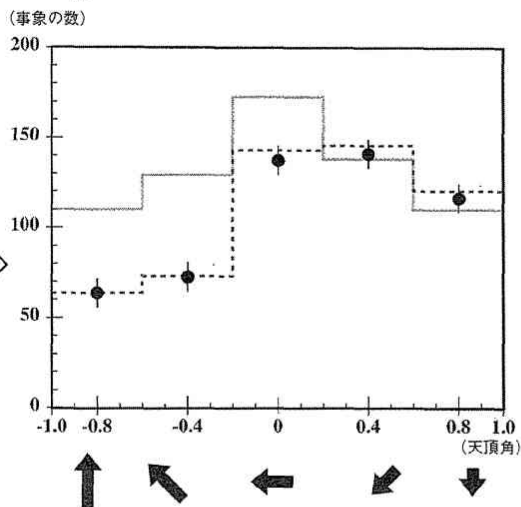
スーパーカミオカンデでは宇宙からやってくるニュートリノを観測していますが、それには、太陽中心部の核融合反応によって放出される太陽ニュートリノ、宇宙線が地球の大気と衝突して生まれる大気ニュートリノや、超新星爆発で飛来するニュートリノがあります。その中でも、特に「大気ニュートリノ」の観測で大変な発見があったそうです。

ニュートリノは他の物質と反応をしませんから、全方向から等しく地球に降りそそぐ「大気ニュートリノ」は、理論上は上空からくるものも地球の反対側から通り抜けて下方からくるものも、同じ数になると予想されます。ところが、平成8年から観測をはじめて2年後、地球の反対側からやってくるニュートリノの数が、上空からやってくるものの半分程度しか観測されていない、ということがわかりました。

■ さまざまな角度から飛来するニュートリノ



■ ミューニュートリノ事象の天頂角分布



黒丸が観測された大気ニュートリノの数、実線がニュートリノの質量が0のときの予想値、点線がニュートリノに質量が存在するときの予想値を表す。矢印はニュートリノの到来方向。ニュートリノが長く走る上向き的事象で観測量が減少している。このことはニュートリノに質量が存在する証拠となる。

(東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設パンフレットより)

数に違いができるのは、何故でしょうか？ ニュートリノが長い距離を飛ぶ間に性質の違うニュートリノに変化するためで、この変化はニュートリノに質量（重さ）がないと起こらないことだそうです。そして、このニュートリノに質量（重さ）があるということは、今までの物理学の前提となっている理論を覆すかもしれない大発見だそうです。

★ 長基線ニュートリノ振動実験 ★

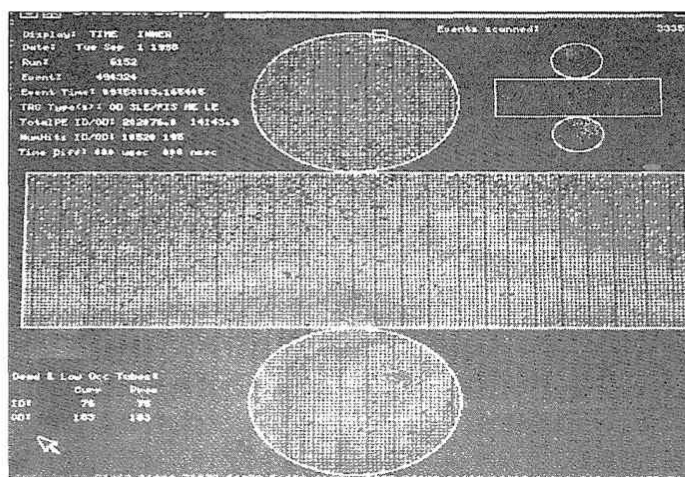
平成11年から、ニュートリノに質量（重さ）があることを、実験によって確かめることも行われています。長基線ニュートリノ振動実験といいます。つくばの高エネルギー加速器研究機構で人工的ニュートリノを発生させ、250 km離れたスーパーカミオカンデに向け発射します。発射した時とスーパーカミオカンデでの観測時で、ニュートリノの数に変化があるかどうかを調べるものです。人工的に作り出したニュートリノは、ニュートリノの元々の性質しか持ち合わせていませんから、その実験結果には信頼性があります。これまでの実験でも、理論上の数と観測された数に違いがあり、ニュートリノに質量（重さ）があることを裏付ける結果が得られています。

■ ニュートリノを調べると何がわかる？

ニュートリノは、暗黒星雲だろうと何だろうと通り抜けてまっすぐに飛んでくるので、その逆をたどっていけばどこから来たのかが分かります。飛んでくる途中も影響を受けませんから、生まれたところの情報をそのまま持ってきます。ですからニュートリノを観測することで、今までの光学的観測では不可能だった塵や暗黒星雲などで見えなかったところで起きた超新星爆発の観測や、星を外側からしか観測できなかったのが、星の内部を観測することもできますから、宇宙の進化の謎にせまることが可能になるそうです。このニュートリノという素粒子を観測することによる天文学が「ニュートリノ天文学」です。小柴東京大学名誉教授は、これまでの可視光線や電磁波で研究を行ってきた天文学に、新たにこの「ニュートリノ天文学」の分野を切り開いたことへの功績によってノーベル物理学賞を受賞されたのです。

■ 訪問を終えて

スーパーカミオカンデの訪問を終えたあと、私たちは、研究施設から車で約20分、国道41号線沿いの神岡町「星と旅人の駅 スカイドーム神岡」にも案内していただきました。こちらでは、土産物コーナーの隣にニュートリノコーナーが併設されていて、スーパーカミオカンデの50分の1の模型や光電子増倍管のレプリカが展示されています。また、スーパーカミオカンデとオンラインで結び、研究者がモニターしているものと同じ画面をリアルタイムに表示しています。神岡宇宙素粒子研究施設は、一般の方の見学はできませんが、こちらの「スカイドーム神岡」ではニュートリノ観測の最前線を垣間見ることができます。



これはスーパーカミオカンデのコントロールルームにあるモニターパネル（カラー）ですが、これと同じ画面を「スカイドーム神岡」で見ることができます。

（東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設パンフレットより）

『スカイドーム神岡』を後に猪谷駅に向けて車が走り出すと、あっという間に外は暗くなりました。お天気さえよければ、無数の星がきらめく夜空を見ることができたはず・・・、と思いながら私達は帰路に着きました。

最後に、今回の訪問の窓口になってくださった東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設の後藤正八郎さん（写真左）、施設内でご説明くださった高エネルギー加速器研究機構の小林隆さん（写真右）に心から御礼を申し上げます。



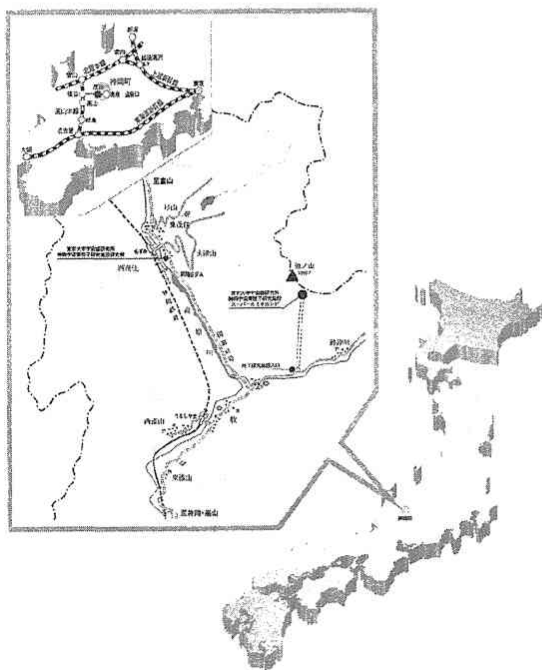
スーパーカミオカンデのコントロールルームにて

東京大学宇宙線研究所附属神岡宇宙素粒子研究施設



〒506-1205 岐阜県吉城郡神岡町東茂住
TEL.0578-5-2116
FAX.0578-5-2121

<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/>



((財)電力中央研究所 経済社会研究所
主任研究員 杉山大志氏)

研究所のうごき

(平成14年10月1日～12月31日)

◇ 第2回高効率廃棄物発電技術に関する セミナー

日 時：12月12日(木) 9:40～17:30

場 所：abc会館ホール

テーマ：高効率小規模ごみ発電への期待

◇ 月例研究会

第206回月例研究会

日 時：10月25日(金) 14:00～16:00

場 所：航空会館 7階 702・703会議室

テーマ：

1. 燃料DMEの特徴とディーゼル新燃料としての利用
(茨城大学 工学部 機械工学科 教授
梶谷修一氏)
2. 燃料電池自動車の導入シナリオ(中間報告)
(WE-NETセンター 主管研究員 小林 紀)

第207回月例研究会

日 時：11月29日(金) 14:00～16:00

場 所：航空会館 7階 702・703会議室

テーマ：

1. 風力発電の技術開発・普及動向について
(独立行政法人 産業技術総合研究所 エネ
ルギー利用研究部門 主任研究員
松宮 輝氏)
2. 太陽光発電の技術開発・普及動向について
(新エネルギー・産業技術総合開発機構
太陽・風力技術開発室 主任研究員
加藤和彦氏)

第208回月例研究会

日 時：12月20日(金) 14:00～16:00

場 所：航空会館 7階 702・703会議室

テーマ：

1. 『電気事業者による新エネルギー等の利用に
関する特別措置法(RPS法)』について
(経済産業省 資源エネルギー庁 省エネ
ギー・新エネルギー部 新エネルギー等電気
利用推進室 室長 堀 史郎氏)
2. 『地球温暖化取り組みの最新動向』について

◇ 主なできごと

10月1日(火)・第1回品質別電力供給WG

3日(木)・第2回実用発電用原子炉廃炉技
術調査委員会

4日(金)・第1回電力系統制御WG

8日(水)・第2回エネルギー経済環境予測
検討委員会

10日(木)・第1回分散型電源の統合制御WG

16日(水)・第4回高効率発電技術開発検討
WG

17日(木)・第1回電力技術企画委員会

24日(木)・第2回高効率廃棄物ガス変換発
電技術評価委員会

31日(木)・第2回分散型電源の統合制御WG
・第2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

11月1日(金)・第1回WE-NETタスク1システ
ム評価に関する調査・研究委員
会&WG

5日(火)・第2回品質別電力供給WG

6日(水)・第2回電力系統制御WG

7日(木)・第2回天然ガス供給インフラ整
備研究会

8日(金)・第2回高性能蓄熱材料による熱
搬送・利用システム検討委員会

20日(水)・第2回ソーラーフューエル研究
推進委員会

22日(金)・第5回高効率発電技術検討会

25日(月)・第3回高温ガス炉プラント研究
会

・第1回日米の原子力発電施設の
保守点検に関する規制およびそ
の運用の比較分析調査委員会

26日(火)・第2回高効率廃棄物ガス変換発
電技術開発導入調査委員会

28日(木)・第2回マイクロコージェネレー
ション検討委員会

12月3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

4日(水)・第3回木質系バイオマスによる
小規模分散型高効率ガス化発電
システムの開発推進委員会

9日(月)・第3回分散型電源の統合制御WG

・第2回水島コンビナート省エネ

- ルギー調査委員会
- 12月10日（水）・第3回エネルギー経済環境予測
検討委員会
- 12日（木）・第3回実用発電用原子炉廃炉技
術調査委員会
・第3回電力系統制御WG
- 13日（金）・第3回品質別電力供給WG
- 16日（月）・第2回日米の原子力発電施設の
保守点検に関する規制およびそ
の運用の比較分析調査委員会
- 18日（水）・第2回多様なニーズに対応する
フレキシブルタービンシステム
に関する研究開発委員会
- 20日（金）・第3回新システム技術評価分科
会
- 25日（水）・第5回高効率発電技術開発検討
WG

◇ 人事異動

○10月1日付

（出向採用）

波多野 守	プロジェクト試験研究部 主管 研究員
-------	-----------------------

○12月1日付

（出向解除）

井上和茂	プロジェクト試験研究部 主管 研究員
------	-----------------------

○12月2日付

（出向採用）

麻島 健	プロジェクト試験研究部 主任 研究員
------	-----------------------

編集後記

本号の巻頭言は、関西電力(株)副社長佐藤和夫氏より「地球環境問題と電気事業」のテーマで寄稿いただきましたが、同問題が今日如何に重要で、その解決のために関係者が日夜如何にご苦勞されておられるかの一端を窺い知れるのではないでしょう。

理事長対談に登場いただきました養老孟先生は、医学界は勿論のこと、言論界などでも幅広くご活躍されておられることは周知のとおりです。今回本誌にご登場いただくことになった背景は、同先生が解剖学者であると同時に（人を医療対象の視点のみで見ることではない）人間科学の提唱者、さらに昆虫採集の「虫」として環境問題にも深い関心をもっておられるという情報を入手したこと、また困難なエネルギー・環境問題に遭遇しておられる当季報の読者のため是非にとお願いしたことによります。

環境に関する最近の話題の中で、過日「国内で一羽だけになったトキが絶滅のふちから、25羽にまで増え、2003年度から野生復帰に向けた取組みが始まる（朝日新聞1月4日付）。」という久々の朗報が伝えられました。しかし、純粋な日本産のトキは1981年にメスのトキ（キン）一羽だけになっており、さらに年齢的なこともあり卵を産めず、結局中国からのつがいのトキ（友友、洋洋）による繁殖に頼った訳で、手放しでは喜べないものを感じます。その背景には、それまでの乱獲もさることながら、近年における農薬の普及で、餌のドジョウなどが減ったた

めといわれております。今後、トキの野生復帰のためには「自然環境に近い環境を再現した『順化ケージ』で環境に慣らし、徐々に野生に戻す。」という計画が立てられておりますが、それにかかる人的面、資金面、および時間がいかほどかかるかは別にしても、トキが安心して飲める水、口にできる餌が自然状態で得られるのか疑問が残ります。

トキの例をあげるまでもなく、種が保存されるためには自然界における生物の連鎖反応により一見何の役にも立ちそうにないものでも、回り回って役に立っているものが多いことが指摘されております。動植物合わせて今まで確認された生物種は、150万種（未確認を入れると6,000万種）あるとされておりますが、近年絶滅する種が急激に増大しており、既に50万種が絶滅しているとの発表もあります。それらの多くがエネルギー消費を伴った人間活動に起因した地球温暖化と何らかの関係を有しているといわれますが、ここに養老先生が対談でも述べておられる「手入れの思想」あるいは「田んぼ里山」の思想が、人間と自然との係わり方を考える時、さらにエネルギーのあり方を考える時においてもヒントになるのではないのでしょうか。もっとも、余りにもどっぷりと現代文明に浸りすぎている我々にとって、現代的な「田んぼ里山」を新たに構築する必要があるのかもしれないが・・・

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4号

平成15年1月20日発行

編集発行

財団法人 エネルギー総合工学研究所

〒105-0003 東京都港区西新橋 1-14-2

新橋SYビル (6F)

電話 (03) 3508-8894

FAX (03) 3501-1735

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

(印刷) 和光堂印刷株式会社

無断転載を禁じます。