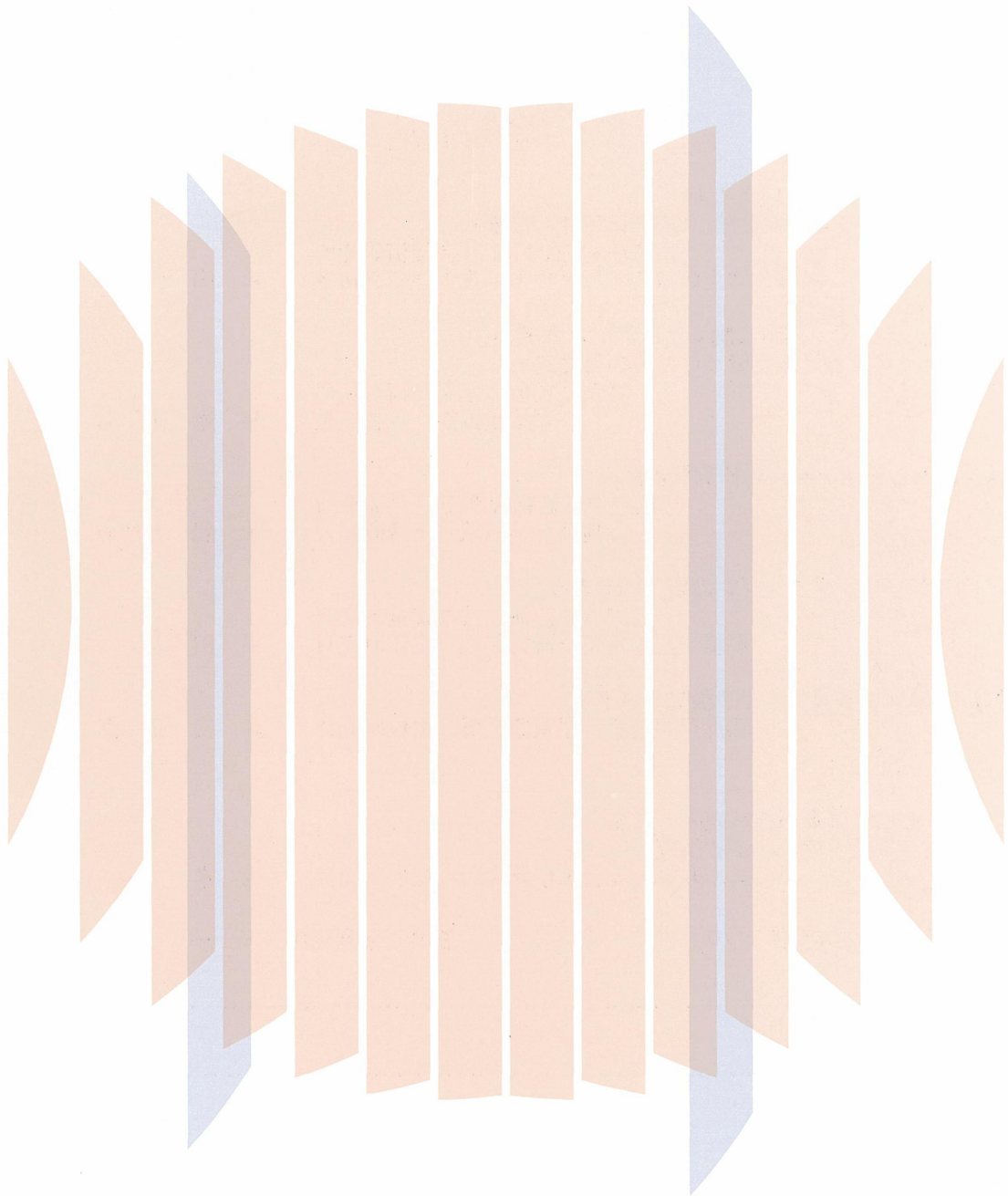


季報 エネルギー総合工学

Vol. 29 No. 1 2006. 4.



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】馬の文化	経済産業省 原子力安全・保安院 院長 広瀬 研 吉 ……	1
【理事長対談】		
「いのち」と「サイエンス」の接点	科学ジャーナリスト 東 島 和 子 (財)エネルギー総合工学研究所 理事長 秋 山 守 ……	3
【寄稿】燃料電池の開発動向	横浜国立大学大学院 工学研究院 機能の創生部門 教授 太 田 健 一 郎 ……	19
【寄稿】形式は合意、実質は破綻 ーモンテリオール会議（COP/MOP1）報告ー	(財)電力中央研究所 社会経済研究所 温暖化防止政策の分析と提言 重点課題責任者 杉 山 大 志 ……	31
【寄稿】CO ₂ の貯留・隔離に関する政策的な取組み ーIPCCにおける位置づけと国内外動向ー	経済産業省 産業技術環境局 環境政策課 課長補佐 西 尾 匡 弘 ……	37
【寄稿】CO ₂ の貯留・隔離の研究開発動向	(財)電力中央研究所 地球工学研究所 地圏科学領域 上席研究員 大 隅 多加志 ……	45
【寄稿】スターリングエンジンの研究開発動向	(独)海上技術安全研究所 環境・エネルギー研究領域 主任研究員 平 田 宏 一 ……	54
【寄稿】100kW小型貫流ボイラ発電システム	(株)神戸製鋼所 機械研究所 主任研究員 満 田 正 彦 ……	61
【調査研究報告】		
「分散型電源を系統へ連系した場合の 系統安定に関する調査」について	(財)エネルギー総合工学研究所 主任研究員 細 木 訓 ……	67
【事業計画】平成18年度 事業計画	(財)エネルギー総合工学研究所 ……	75
【研究所の動き】	……………	80
【第28巻通巻目次】	……………	82
【編集後記】	……………	86

巻頭言

馬の文化

広瀬 研吉

(経済産業省
原子力安全・保安院院長)



エネルギーの大きさというのは、なかなかつかみにくいものですが、馬力というのはなんとなく実感できます。1馬力といいますと、一頭の馬が汗をかいて荷物を引っ張っているときの姿を思い描きます。このように、馬は動物の中でエネルギーの単位にまで使われるほどになっていますが、これは、馬という動物が人の生活に深く根ざしてきたからだと思います。

斎藤茂吉の「万葉秀歌」(岩波書店)の最初に掲げられている歌は、

たまきはる宇智の大野に馬並めて(うまなめて)朝踏ますらむその草深野

中皇命

です。「万葉秀歌」は、万葉集の巻第一から順に茂吉の選ぶ歌が並べられており、上に掲げた歌は、巻第一の前の方にあることから、最初になっているという都合はあろうかと思います。しかし、「万葉秀歌」の中で、茂吉が最も深い思いを寄せているのもこの歌だと思えます。私には、茂吉がこの歌を冒頭にもってくことを考えて、「万葉秀歌」を著すことにしたのではないかという気がします。朝早いすがすがしい草原の中で馬のはく白い息が身近に感じられます。

俳句の世界では、一般に動物よりも植物をとりあげるのを得意としているようです。馬の場合も例外ではなく、季語としては、秋の「馬肥ゆる」があるぐらいです。

牧の馬肥えにけり早も雪や来ん 虚子

秋風が吹くころになると、肥った馬の高い嘶きが天に高くひびきます(虚子編「新歳時記」(三省堂))。

馬の絵では、昔から戦場や競争の場で、躍動する馬の姿が描かれています。「一之谷合戦図屏風」では、鶴越えをする源義経の騎馬武者ぶりが、「長篠合戦図屏風」

では、織田鉄砲隊に突撃する武田騎馬隊が、「蒙古襲来絵詞」では、蒙古軍に立ち向かうために集結する騎馬武士がそれぞれ勇壮に描かれています。また、「流鏑馬図鑑」、「犬追物図鑑」、「賀茂競馬図屏風」などに、様々な競争の馬の姿が生き生きと描かれています。

このような絵とは対照的に、人の生活を支え、人に寄り添って生きる馬の姿も数多く描かれています。葛飾北斎の「富嶽三十六景」中の「甲州犬目峠」では、富士山を背景に峠をゆっくりと荷を背負う馬と人が歩いている姿が描かれています。近代では、川合玉堂の絵の中によく馬が描かれています。「晩帰」（1899年）、「二日月」（1907年）、「雑木山」（1913年）、「小雨の軒」（1921年）、「峰の夕」（1935年）、「秋山晚晴」（1937年）、「高原深秋」（1941年）、「山雨一過」（1943年）などで、馬が描かれています。わけでも、「二日月」は明治40年の東京勸業博覧会で一等賞を受け、「玉堂独自の様式の誕生でその後の進路を決定づけた」（「川合玉堂」〔巨匠の日本画〔3〕河北倫明，平山郁夫監修，草薙奈津子編集，学研〕とされています。二日月の下の帰り道，二人の農夫が三頭の馬を引いて歩いているが，そのうちの一頭の背には仕事に疲れた農婦が休んでいます。また，「峰の夕」では，山仕事の帰路でありましょうか，人に引かれて山道をゆっくりと下っていく馬の姿が描かれています。どの絵にも描かれている人と馬が山道を歩いている姿は，どれも静かで，平安に満たされています。

絵本の「スーホの白い馬」（大塚勇三再話，赤羽末吉画，福音館書店）は，馬頭琴の物語です。馬の競争の場面での飛ぶようにかける馬たち，スーホのところに戻ってきた矢をあびた白い馬，広々としたモンゴルの草原で馬頭琴をかなでるスーホが美しく描かれています。赤羽末吉には，「だいくとおにろく」（松居直再話，福音館書店）など数多くの絵本の傑作がありますが，この「スーホの白い馬」はその中でも最もすばらしいものの一つだと思います。

神と人と馬が結びついて生まれたものに絵馬があります。神の乗り物としての馬を神事に献上していましたが，そのうち生きた馬を献上する代わりに，馬を描いた絵を献上するようになってきました。最初は，神馬が描かれていましたが，次第に庶民の様々な願望が描かれるようになってきたということです。庶民の絵馬の中には，子供が散髪をいやがらないように祈願する子供の月代の絵など，見えてほほえましいものがあります。

冒頭の馬力のエネルギーのところからおおいに脱線してしまいましたが，エネルギーの関係の皆様が日本と世界のエネルギーの発展を目指して天かける馬のようにご活躍いただくことを心から祈念いたします。

東 嶋 和 子 (科学ジャーナリスト)

(科学ジャーナリスト)

秋 山 守 (財)エネルギー総合工学研究所
理事長

(財)エネルギー総合工学研究所
理事長



私は、犠牲になられた方々の遺体が出てくる坑口で、ご遺族の方々に取材する役割を与えられたのですが、出て来た遺体に抱きついて泣くご遺族の方々の姿を目のあたりにして大きな衝撃を受けました。人の命が一瞬にして失われてしまうということを、大学を出てすぐ感じたのです。同じ年の8月には、日航123便の御巣鷹山墜落事故があり520人が亡くなられました。

新聞記者が一番最初にやる「警察回り」（警察への取材）の中では、色々な事件、事故を取材し、その後、医療問題や経済問題も担当しましたが、やはり、夕張の炭坑事故取材の時に受けた、人が亡くなっていく時の衝撃がその後の私のジャーナリストとしての原点になったように思います。

科学技術と社会との関りという切り口

秋山 今おっしゃったことを背景にお仕事を進めてこれ、著書を何冊も書いておられますね。その中で、特に『遺伝子時代の基礎知識』では、遺伝子情報の持つプラスの効用などをどう捉えればいいのか色々示唆されていますね。著書に限らず、映像関係、ご講演などでも大変ご活躍ですが、どのような形でご自分の興味を表現されているかお話し願えますか。

東嶋 表現の姿勢としては、サイエンスの分野で専門家でない一般の人たちが、初めてサイエンスの成果に接したときに、それをどう理解したらいいとか、新しい科学のメリット、デメリットをどう評価したらいいかということを常に念頭に置いています。

フリーになってからも新聞記者時代の経験を基に、特に医療と環境問題を扱ってきました。最初に書いた本が『緩和医療の現場から』です。これは医療の取材と福祉の取材をしていた1996年頃、まだ介護保険制度もなく、福祉の現場の人たちと医療の現場の人たちの活動の場が重なってなくて、連携がうまくい



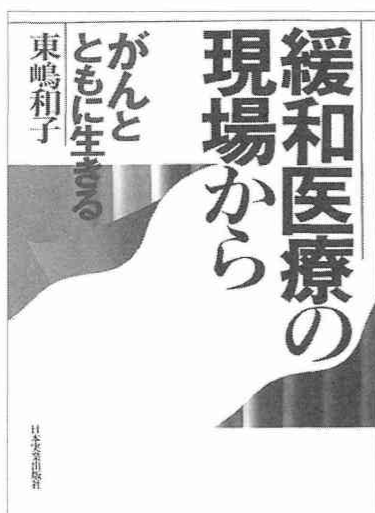
東嶋和子
(科学ジャーナリスト)

ってなくて、お年寄りや患者さんが取り残されるという状況がありました。何とかその接点を見つけることはできないかと取材している時に「緩和医療」というものに出会いました。これは、癌患者の痛みを取る、和らげるという医療で、たとえ病気は治せなくても痛みを和らげたり、生活の質を上げることはできるだろうという精神で行う医療です。この「緩和医療」は福祉分野と重なっていき、緩和医療を目指して福祉の人、医療の人、一緒になってチームを作ってやるということが出てきたので、1冊の本にしてみましたというわけです。

遺伝子操作の役割

秋山 遺伝子操作に関わるテーマは後でまとめて取り上げますが、その前段としてお聞きします。遺伝子操作の技術は、現実困っておられる方を助けるという意味で非常に有益だと思いますが、クローン胚で人間を作ったなどの話になると、「神の領域」に人間が入っていくことになります。それがどこまで許されるのかについては、どのようにお考えですか。

東嶋 遺伝子工学の専門家でない方々は、クローン人間について「倫理的に大丈夫なのか」



という不安や危惧を持つと思いますが、実際に医療現場でやろうとしていることは、「神の領域」云々というところまでは行かないと私は思っています。例えば、日本では、ある遺伝子が働かないために病気になってしまった子供にその遺伝子を補ってあげる遺伝子治療がおこなわれています。また、薬の効きめはそれを飲む人の遺伝子によって異なりますから、例えば、抗癌剤を飲む時にその薬の効き方と副作用の程度を確かめて処方量を決めるとか、癌患者の遺伝子タイプによって癌の性格も違うので、その患者には、放射線と手術とどちらが有効なのか、あるいは両方やった方がいいのかを調べて、最適な治療法を選ぶなどに使われているのです。

東嶋 原子力について、私が何も知らなかった学生時代には、核分裂だの核融合だの分からないので、「昔はこれ以上は分かれれないと言われたアトム（原子核）を人為的に壊して、放射線を出しながら発電をやる必要があるのか」と疑問を抱いていました。それこそ「クローン人間」に対すると同じように原子力は「神の領域」、つまり、自然に反することのように思っていたわけです。しかし、実際に原子力発電の中身を知ってみると、実は、「神の領域」云々の話ではなく、非常に合理的かつ実用的で、心配にはあたらなかったことが分かりました。

技術的な是非，社会的な是非

東嶋 技術として是非を見る視点と、社会的に是非を見る視点の両方が必要だと思います。そのあたりが遺伝子工学についても原子力工学についてもごちゃまぜになってしまっているのではないのでしょうか。遺伝子工学についても原子力についても、技術という視点からは、大きな可能性を秘めた素晴らしい技術だと私は思っています。ただ、社会的な視点からすると、まだ議論が成熟していないし、理解も低い。

例えば、お腹の中の子供が遺伝的な障害を持つ確率が分かる出生前診断という技術があります。その技術そのものの是非を問われれば、それはあってもいいでしょう。ただ、技術を提供する医療側が、「生まれてくるお子さんが障害を持つ確率は30%です。どうしますか」と伝えるだけで、その障害をもった子はどんな生活をしているのか、どんな支援体制があるのかといったことを伝えなければ、母親は「障害をもって生まれる子」をネガティブにしか考えられなくなってしまう。だから、それを受けとめられない母親はほとんどが中絶してしまっていたのです。でも、障害をもって生まれることが、生まれないことより不幸でしょうか？ 技術を安易に使う前に、私たちはそのことを真剣に問わなければいけない。そこが問題になって「遺伝カウンセリング」が重要だという話が出てきました。技術によって得られた情報について、患者や市民が自ら評価・判断できる材料をきちんと伝えることが大切だと思っています。

原子力についても同じことが言えます。例えば、「この事象は、国際基準ではレベル1ですよ」と言われただけでは、安心していいのかどうか、情報の受け手は判断できないのです。情報の受け手が評価・判断し、選択できるような指標を与えない限り、情報はネガティブにしか受け取られない。技術が一人歩きするから使わない方がいいという話になるのです。

秋山 全く同感ですね。

秋山 ところで先日、東京大学大学院総合文化研究科の藤垣裕子先生からお話を聞く機会がありました。そこでは、不確実性があっても現時点である程度の判断をしなければいけない問題、例えば、BSE：牛海綿状脳症（狂牛病）や原子力安全について、科学者は内輪の議論だけではなく、リスクとベネフィットのバランスを考えたもう少し合理的な判断を外部に対して示せるのではないかという話がありました。それについてはどうお考えになりますか。

東嶋 おっしゃるとおりだと思います。今まで専門家の間だけで議論がされてきました。地球温暖化の話でも、BSEの話でもそうですね。今になって「実は地球温暖化はない」、「温暖化しても構わない」、「BSEはプリオン蛋白質が原因じゃないかも知れない」という議論も出てきています。そのあたりは専門家たちが途中の過程で「今不確実なところですが」と前置きしながら、世の中に情報を出していったら、常に議論の中に一般の人を巻き込んでいかないと、結論だけが唐突に出された印象を受け、予防的な対策が遅れてしまうのではないのでしょうか。

秋山 新しく出てくる情報について、その都度、専門家が分析し、得られた情報を社会にオープンにして、それをどういう形で受け容れるかは然るべき方法で一般の方が決定していくということになるのでしょうか。その時に、やはりメディアの役割は非常に重要だと思います。

遺伝子工学の最前線

解明されつつある癌の遺伝子要因

秋山 東嶋さんの著書『遺伝子時代の基礎知識』でも述べられていますが、人間の個性に影響を及ぼす遺伝子の話、ヒトゲノム解明やDNAの

最前線のことを、私ども素人にも良く分かるように教えていただければありがたいです。

東嶋 ヒトを初めとしてさまざまな生物の全遺伝情報（ゲノム）の解読作業が続けられてきています。ヒト、イネ、センチュウ、チンパンジーなど主要な生物については解読作業が終了しています。ただ、辞書のように文字が並んでいるだけでは使えません。今は辞書に書いてある文字を単語に区切って、その単語がどういう意味を持っているか探っているところです。

因みに、理事長はお酒はお強いですか。

秋山 「弱い」と言うことにしていますが、本当は中間ぐらいです。

東嶋 お酒の強い弱いは遺伝子の違いに起因します。それも、4つある文字のたった1つの違いで、アセトアルデヒドの分解能力の差が出てくるのです。アセトアルデヒド脱水素酵素には、アセトアルデヒドが高濃度になってはじめて働くⅠ型と、低濃度でも働くⅡ型があって、遺伝的なものです。Ⅰ型は皆持っていますが、Ⅱ型は日本人の4割で部分的に欠けている。1割は、まったく持っていない「下戸」です。つまり、わずか1カ所の塩基の違いでお酒に対する感受性が違ってくる。この1文字の違いをSNPs（スニプス）と呼んで、



分類	死亡要因	統計をとった年度	死亡率 (10万人当たり)
病気	がん(悪性新生物)	2000	240
	心疾患(高血圧を除く)	2000	120
	脳血管疾患	2000	100
	肺炎	2000	68
	自殺	2000	23
自然	老衰	2000	18
労働 災害	鉱業	1999	240
	林業	1999	79
	漁業	1999	40
	建設事業	1999	17
事故	不慮の事故	2000	31
	交通事故(事故後24時間以内死亡)	2000	7.1

(出所：中西準子，益永茂樹，松田裕之編『演習 環境リスクを計算する』岩波書店)

日本人の死因ランキング

いま世界中でSNPs探しが進められています。日本では、40種類の病気を決め、30万人の血液を集めて、遺伝情報のどこの文字が違って、それが何に関係しているかという、日本人のSNPsデータベースをつくっているところです。それが分かってくると、個々人に効く薬を使い、副作用を避けるために量を調節することができますし、薬の開発にもつなげることができます。「オーダーメイド医療」と呼ばれるものです。

秋山 個体の属性の遺伝子が特定の病気を決定していくということは理解できるのですが、生活習慣病だとか、外的要因も複雑に絡んでくると思います。ある集団で、後天的に努力をして改善に努める場合、統計的に有意な効果が出てくる可能性がありますね。

東嶋 実は、1つの遺伝子ではほぼその病気になると運命づけられてしまう「家族性」の癌は、全体の5%に過ぎないんです。他の95%の癌では、遺伝子の関わり方が弱く、環境や生活習慣の影響の方が大きい。多くの癌や生活習慣病では関連遺伝子が30～40個関わって、それらがある程度そろって発症すると考えられています。

秋山 両方が効いてくるということですね。

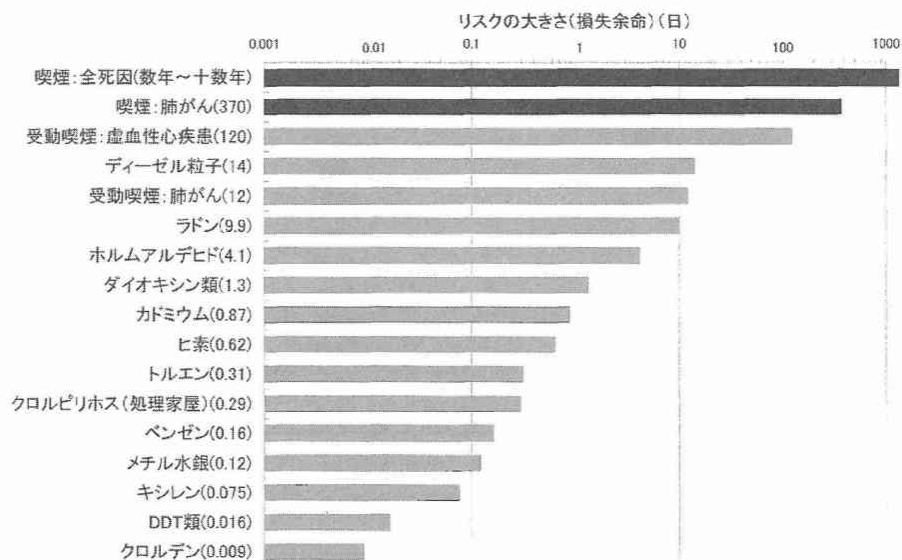
東嶋 癌関連遺伝子を持っている人に対して

「癌になり易いから、タバコやお酒などはやめなさい」と指導することで、個人のリスクに合わせたオーダーメイドの予防策ができ、社会全体のリスクを下げていくことができるというのを国立がんセンターが取り組んでいるところです。

「タバコが最強の癌原因物質である」というのはずっと言われていますが、国民全員に「タバコをやめなさい」と言ってもあまり効果がないじゃないですか。実は、癌治療において日本が先進国の中で一番失敗しているのです。欧米では、癌の罹患率は90年代よりも下がってきているんです。どうしてかということ、喫煙を減らしたからなんです。

秋山 禁煙区域も増え、喫煙者にはかなり厳しい情勢になっていますが、それでも日本人の喫煙率というのはあまり減ってないのですか。

東嶋 50%弱ぐらいです。日本は、結局、タバコ税が財源なので厚生労働省が強く言わなかったとか、日本医師会も海外ほど熱心に取り組まなかったとかで喫煙率低下に失敗したんです。喫煙者の肺癌リスクは、吸わない人に比べ男性で13倍、女性で18倍。肺癌だけでなく、他の癌のリスクも上がります。とにかく、タバコ対策が癌患者を減らす決定打なのです。



(出所: 中西準子, 益永茂樹, 松田裕之編『演習 環境リスクを計算する』岩波書店)

化学物質のリスクランキング

タバコは最強の損失余命リスク

東嶋 さっきのリスクの話とも関係しますが、(独)産業技術総合研究所の中西準子先生が出されたデータで見ますと、タバコはどの化学物質に比べても最強の損失余命リスクになっています。

東嶋 原子力発電に関する取材で感じることは、人はタバコのように自分の身の周りにありふれたもののリスクはあまり大きく受け取らずに、放射能のように目に見えず、未知のリスクについては大きく受け止めるということです。

私は、原子力関係のシンポジウムでコーディネーターをすることがありますが、反対派の方々が休憩時間に廊下でタバコを吸っているのを見ると、「放射線が不安なあなたなら、タバコを吸わない方が合理的で、長生きできますよ」と言いたくなります。

ゲノム解読競争に敗れた日本

秋山 話は変わりますが、日本学術会議で私も世話になった和田昭允先生が二十数年前に色々な所に声をかけてゲノム解読プロジェ

クトを立ち上げようとしたがうまくいかなかったと聞いたことがあります。1つは彼が化学から物理へと、またさらに「生物物理」へと進んだ研究者であって、医学分野からの壁があったこと、また、役所の方が「これは大学で特許申請するよりも、公益に資するものだから特許を取らないでもっとオープンにした方がいい」と言って、特許を取らなかったとか、日本がゲノム解読の国際競争で後塵を拝した原因をいくつか著書『物理学は越境する—ゲノムへの道—』(岩波書店, 2005年)の中で指摘しています。我々は、こういったことから教訓を得なければいけないと思います。

もしも、和田先生の構想が希望どおり実現していれば日本の状況は格段に進んでいたでしょうね。

東嶋 和田先生の話聞いたアメリカの人たちが驚愕し、焦ってゲノム解読を進めたという話もあるようですね。

秋山 和田先生の本の中での表現で面白いのは、「日本人は、概して、止まっている鳥は射つけれども、飛んでる鳥を射つ度胸がない」という箇所です。要するに、当たる確率が低いものは手を出さないという意味だと思います。二番手、

三番手でもいいから確実なところで利益を得ようという、一等国としては物足りない国民性があるんじゃないでしょうか。

東嶋 リスクのあるものに対する投資があまりなされないので、今、特に医療機器では日本が危機的状況に陥っているんです。ペースメーカーなどは100%アメリカからの輸入です。

体内に入れるものを作って1万人が恩恵を受けても、1人それで死んでしまったら企業は槍玉に上げられる。そのリスクを取れないので、日本国内でいくらい研究があっても、医療機器については企業がやりたがらないということです。

アメリカが握る日本人の「いのち」

東嶋 薬品、ゲノムに関係する特許についても、これはアメリカに「いのち」を握られているようなものなんです。

例えば、あくまでも仮定の話ですが、資源争奪で戦争になり、アメリカがペースメーカーや医療機器を日本に輸出しない時、日本はすぐに代替品を作れません。ですから、30万人のゲノム解析をやっている東京大学医科学研究所の中村祐輔先生は、「彼らが特許を持っている分、こちらもこれから追いついて、特許を取っていかないと、交換できるカードがない」と言っています。

秋山 知的技術や知的情報など知的財産は、やはり分野ごとに集中的にストックを持っていないといけませんね。例えば、植物関係ですと、シーズバンクなどはアメリカに比べると日本は相当遅れているのではないかと思います。

東嶋 今、遅ればせながらやり始めました。

秋山 アメリカではセレーラ社がどんどんヒトゲノムの解析を行ったこと、その背後にDNAの集積チップのデータベースを持っているアフ

イメトリックス社があったことなどが『遺伝子時代の基礎知識』の中で紹介されていますが、情報技術とヒトゲノムの解析との連携について少し詳しくお話し頂けますでしょうか。

東嶋 アフィメトリックス社のDNAチップは国立がんセンターも使っているんです。東芝などもDNAチップを作っていますが、10万人規模となるとアフィメトリックス社のDNAチップを使っています。研究しようとする、その研究のための測定機器が必要ですけど、それがほとんどアメリカなどの海外の機器になってしまっている。

秋山 和田先生の著書の中にも確かそれと同じようなことが書いてあったと思います。色々な技術に基づく製品が、アメリカにかなり握られていると書いてありました。

情報整備の重要性

東嶋 最近、「ニューロインフォマティクス」といって、色々な脳科学の研究成果を1つのデータベースにまとめようという国際的な動きが出てきています。「木を見て森を見ず」という言葉がありますが、例えば、視覚の研究をしている人が、脳全体としてどうなっているか知りたい時、自分の専門領域以外のデータも容易に得られるようにしようということです。日本でも、理化学研究所が「日本ノード」というネットワーク拠点をいち早く立ち上げて、多様で膨大な脳科学の研究成果を1つにして、それを色々な人が使えるような情報基盤にする活動を行っています。

東嶋 ゲノム情報における「バイオインフォマティクス」同様、これも脳科学の成果を情報に置き換えて、色々なデータを集積し、コンピュータ上でやっていこうというような考えですが、日本も頑張っています。エネルギーでもやっておられるような、例えば色々な

失敗のデータとか、色々な実証データを集めて色々な人に提供しようというのと同じです。

秋山 当研究所では、原子力を初め、化石エネルギー、自然エネルギー、省エネルギーなどを対象に、技術の面から調査研究をしているのですが、全体に亘っての技術情報基盤を整備していこうという計画を持っています。中にはいい加減な情報もありますから、集めた情報はやはり吟味、評価しなくてははいけません。

東嶋 プラットホーム作りをやりながら、評価する力を持った、エネルギー総合工学研究所のようなところが情報を提供することが大事ですね。

秋山 評価吟味した情報を、いかにわかりやすい魅力ある形でお伝えし、皆さんに使っていただくかが鍵になると思います。

ヨーロッパ・エネルギー探訪

ヨーロッパにおける「脱原発」の実相

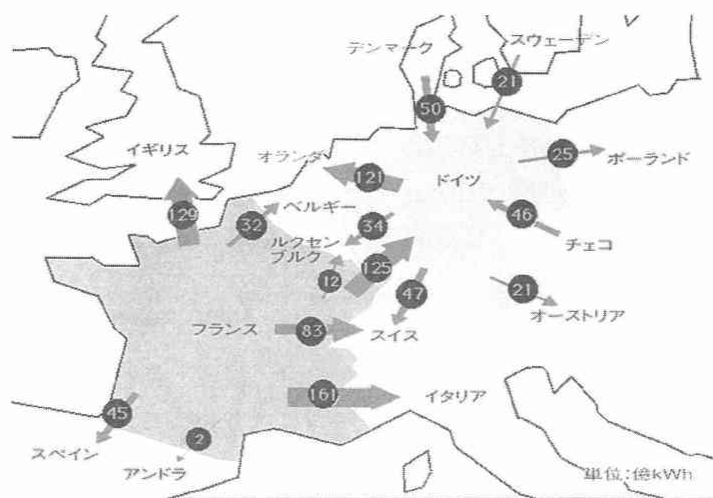
秋山 環境・食糧・エネルギーを含めた、世界との関わりで東嶋さんのご活躍のほどをお

伺います。文部省交換留学生から始まって、先ほどの「遺伝子の基礎知識」に関係した海外の調査、それから原子力関係ではチェルノブイリ、そしてフィンランドのオルキルオトに行かれたということですね。それらの中で、特にご関心、ご興味を引かれた国とか場所がありましたら、その理由も含めてお話をいただきたいと思います。いかがでしょうか。

東嶋 私が一番大事にしていることは、機会があるなら当事者に会うとか、現場に行くということです。遺伝子組換の時もアメリカの遺伝子組換の大豆を作っている現場や研究所に行ったりしました。

現場に行かなければ本当のところは分からない、人伝えに聞いている情報だけでは誤解があったり、遅れた情報であったりするということを、2002年から2004年まで、エネルギーの取材で欧州5カ国とアメリカに行った時に強く感じました。

行く前は、日本で色々な新聞記事を読んできましたから「ヨーロッパは脱原発の流れ」と思っていたんです。行きましたら、例えばフィンランドは5基目の原子力発電所をオルキルオトに作るとか、スウェーデンも1980年に脱原子力発電を決めたものの、最近の国民投票では8割ぐらいの人が原子力賛成になっていることを知ったのです。実際に、エネル



(出所：海外電気事業統計)

フランス、ドイツを中心としたEU諸国の電力輸出入（1998年）

ギー関係の人、それから一般市民の方、市議会の方とかいろんな立場の方に会って本音が聞けました。スウェーデンで脱原子力について聞いたら、「それは政策的に決めたことだけど、代替エネルギーがまだ見つからないから、そうはいかない」という返事でした。フィンランド、スウェーデンにいた時は、自分が持っていた情報が間違っていたんだということを痛感したのです。

秋山 今のお話は貴重で、新しい発見だと思います。にもかかわらず、国の意思決定といった最終的な場面では、原子力に関してやや否定的になるのは何故でしょうか。

東嶋 原子力は、さっきの遺伝子工学と一緒に、純粋な技術の部分と社会的・政治的な部分の両方があると思います。ドイツでもそれを強く感じました。例えば、シュターデという街に行った時のことです。この街にはドイツで2番目に古いシュターデ原子力発電所(2003年11月閉鎖)があったのですが、「脱原子力法」(2002年4月施行)で最初に閉鎖になると日本で聞いていました。ところが、市議会の方に話を聞くと、脱原子力法のためというよりはむしろ経済的な理由で閉鎖が決まったと言うのです。産業の空洞化で、エルベ川流域のアルミニウム工場が中国に移転して電力需要が大きく減ったこと、欧州連合(EU)の電力自由化で、チェコやフランスから安い電気が入ってくるようになったことなど、主に経済的な要因で閉鎖したわけで、「脱原子力法」ができたから閉鎖したわけではないということです。

秋山 事実は鵜呑みにした情報と大分異なる、ということが往々にしてあると思います。

東嶋 「脱原発」を掲げている国でも、政策的なところと実際の運用とをうまく使い分けているという感じです。

秋山 一面的ではない相当したたかな部分が

ありますね。ですから、ある時点で出てきた現象や姿を彼らの哲学だと固定的に捉えると間違ってしまうです。

ともかく、ヨーロッパというのは文化面、経済面で、世界に相当な影響力を持っている地域ですから、彼らが原子力を含めてエネルギー・環境問題への活動をどう進めていくか、私どもも大変注目しているところです。

ユーラヨキ市民の冷静な受け止め方

秋山 フィンランドで5基目の原子力発電所(オルキルオト3号機)が建設されるユーラヨキ市オルキルオトの印象はどうでしたか。

東嶋 オルキルオト原子力発電所1号機、2号機の隣に3号機が建設されますが、同じ場所に地層処分場も決まり、研究のための試掘を行っています。2010年ぐらいから運用開始をするという話を伺いました。

このフィンランドで5基目となる3号機



ユーラヨキ市オルキルオトの位置



(出所：テオリスーデン・ボイマ社「環境影響報告書」，2001年1月)

オルキルト3号機の完成予想図



(東嶋和子撮影)

最終処分場の概要を説明する担当者

(2002年5月に承認)も最終処分地もユーラヨキ市が立候補したということなので、理由を市の方に尋ねましたら、「以前はお金を払ってロシアで使用済み核燃料を処分してもらっていたけれど、自分たちでやった方が経済効果がある。放射性廃棄物の処分は自分たちの責任でもある」という答えでした。

原子力施設に関する情報も市民に広く行きわたっていて、例えば、お母さんなんかに話を聞いても「家庭でも原子力発電や核廃棄物の処分の話をします」とおっしゃるんです。ロシアに払っていた分のお金を自分たちが受け取った方がいい、雇用も2,000人増えて街も潤うからいいじゃないか、と非常に冷静に考えています。

秋山 情報を提供する側はどんな努力をしているのですか。受け取る側が感情的でなく冷

静に受けとめているということですが、やはり1万年先までを念頭に地下に最終処分していくといった話を聞くと、普通は「大丈夫かな」という反応が出てくると思います。情報を提供する事業者側として、どのように適切なコミュニケーションの方式、そしてコンテンツを工夫しているのでしょうか。

東嶋 印刷物やインターネットとか、いろんな方法を駆使しているのは日本と同じです。例えば、地層処分するための土地の調査をする時にヘリコプターを飛ばすにしても、現地の各家庭に行き、飛行スケジュールを伝えとか細かいことを行っています。また、調査員はヘルシンキから来る人で、地元の人達の面識のない人ですから、処分を担当する会社の人が各家庭に同行して挨拶をしてから調査するとか、非常に日本的なきめ細かさがあります。

秋山 そうですか。そのあたりはむしろ、日本から学んだことでしょうかね。

東嶋 顔と顔との関係が大切だということは日本と同じように考えていますね。

それから、高校生の社会勉強のために、授業の中で原子力施設や化学工場など、色々な所に毎年行くのだそうです。ですから、地元の高校生もオルキルト発電所で模擬的に働

いたことがあって、特に原子力施設だという意識ではなく、他の産業施設と同じレベルで「こういう産業もあるんだ」ということを身をもって学んでいるので、広い理解が得られるのかなと思います。

秋山 2月21日付けの電気新聞に出ていましたが、日本でも電力会社が高校生を原子力発電所に招待して、シミュレーターを置いてある別館などを案内したそうです。若い方や女性の方が原子力施設を訪問されるといいと思います。

日本でも高レベル放射性廃棄物の地層処分について、多重バリアの考え方で、放射性廃棄物を厳重な容器に密封した上で、地質学的にも漏れの考えられない場所を選んでいくという方式の研究が進んでいます。日本原子力研究開発機構が端浪超深地層研究所と幌延深地層研究センターで試験計画を進めています。

日本を取り巻くエネルギー事情

「ピークオイル説」

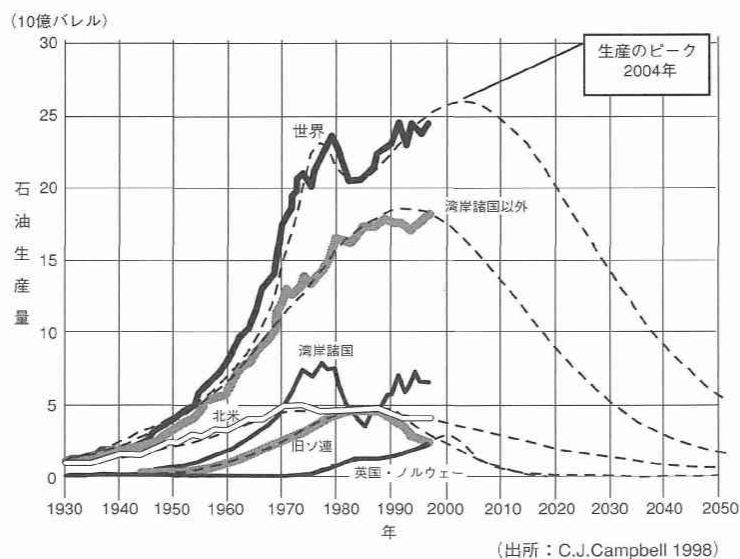
秋山 世界的にエネルギー需要を眺めてみると、まず一番沢山エネルギーを使っている

国はアメリカです。昨年のハリケーンカトリナは大変強烈でしたが、あのメキシコ湾岸はアメリカの石油精製能力の45%が集中している、石油産業のメッカみたいな所です。ハリケーンによる被害だけではなく、アメリカでは石油精製能力が不足していて、最近では液化天然ガス（LNG）の輸入も急に増えています。資源的には、米エネルギー省のサミュエル・ボッドマン長官は「簡単に手に入る石油の時代は終わった」という警告を出しています。

東嶋 最近、世界の石油生産のピーク時期について「ピークオイル説」が話題になっていますが、どういう受け止め方ですか。

秋山 「ピークオイル説」については、意見が分かれていて、石油生産のピークの予想時期にも大きな幅があるようです。日本学術会議や日本工学アカデミーの研究会で一緒にさせていただいた石井吉徳・東京大学名誉教授は、アメリカからの重要な情報として「もう石油生産のピークは来た」と言っておられます。もちろん、存在が確認されている石油ということではなくて、経済的に採れるクリーンな石油の生産という意味です。

当所内に委員会を立ち上げて行った「エネ



「ピークオイル説」

ルギー分野技術戦略マップ」の作成作業では、2100年までを視野に入れて、環境と両立するエネルギーを求めるシナリオを検討しましたが、その時の仮定の1つとして、「2050年にオイルピークがくる」としています。

先ほど申しましたように、「オイルピークはもっと先だ」という説もあって、意見が分かれています。私としては、どれが事実かの議論も大事ですが、対策を講じないまま、「これはどうにもなりません」という事態にならないよう、いささか悲観的に考えて、今から対策に努める方がいいと思います。

激化が予想される資源争奪

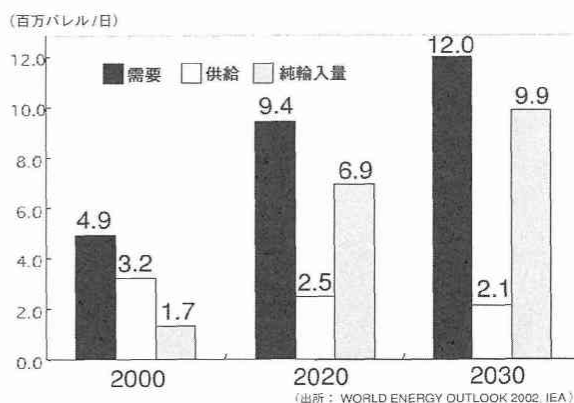
秋山 日本のエネルギーは、現状では化石エネルギー、原子力、自然・再生エネルギーがバランスして、良い線を行っていると思いますが、全体として自給率が低いのが問題です。一方、温暖化対策についても京都会議の開催国であり、とにかく頑張るんだという姿勢を崩せないこともあって、大変厳しい状況だと思っています。

世界のエネルギーの観点からは、アメリカではなくて本当に問題なのは中国、インドなどです。

東嶋 石油を買い漁っていると言われていませんね。

秋山 日本との間では尖閣諸島周辺の境界問題も絡んで厳しい面があります。資源エネルギー問題では、日本は中国との交渉のスタンスをよく考えなければいけないと思います。

尖閣諸島に関連した領海問題では、日本の大陸棚確定のための報告書提出期限が2009年5月となっているそうです。それまでに日本が自分の海洋調査船で大陸棚の地質構造をきちんと分析して、日本の権益を主張できることを説明しなければいけない。それで、京都大学の芦田譲教授が政府にかけ合って調査船



中国の石油需要の推移

建造の予算が付きました。日本の海洋権益、そして資源エネルギーの確保の重要性に鑑みれば、外務省にも頑張ってもらいたいと思います。

秋山 13億人の中国の人々が2030年に今の日本人と同じくらいのエネルギー消費レベルに達すると考えますと、正に膨大なエネルギー量が必要になります。しかし、方向として、国際的な機会均等、平準化を目指す限り、アメリカとアジア諸国の1人当たりエネルギー消費量の差が10倍といった現状を放置することは許されないでしょう。何か対策を取らないといけなくなります。

東嶋 私はカンボジアに1年ぐらいいたことがあります。カンボジアは薪の生活から急に電気の生活になって、1年ぐらいで街中にガソリンスタンドがどんどんできるみたいな時でした。薪の生活の時のエネルギー量を1とすれば、数年で10倍以上になっていく国々がまだアジアにいくつもあるということです。

日本のエネルギー確保と技術の役割 —超長期エネルギー技術ビジョン—

秋山 日本のエネルギーの確保について技術の役割を視野に入れながらの話題に移りますと、このほど国は、2100年を視野に入れ、超長期のエネルギー技術ビジョンを出しました。



秋山 守

(財エネルギー総合工学研究所)
理事長

温暖化を抑制しながらエネルギーを確保していく必要性の背景、超長期のエネルギー技術ビジョンの作業の体制、どんな切り口で作成していくかなどのお話は省略しますが、要するに、2100年をゴールにして、そこからバックキャストしながら技術の要目と内容を提示したことが特色です。

東嶋 産業構造審議会産業技術分科会研究開

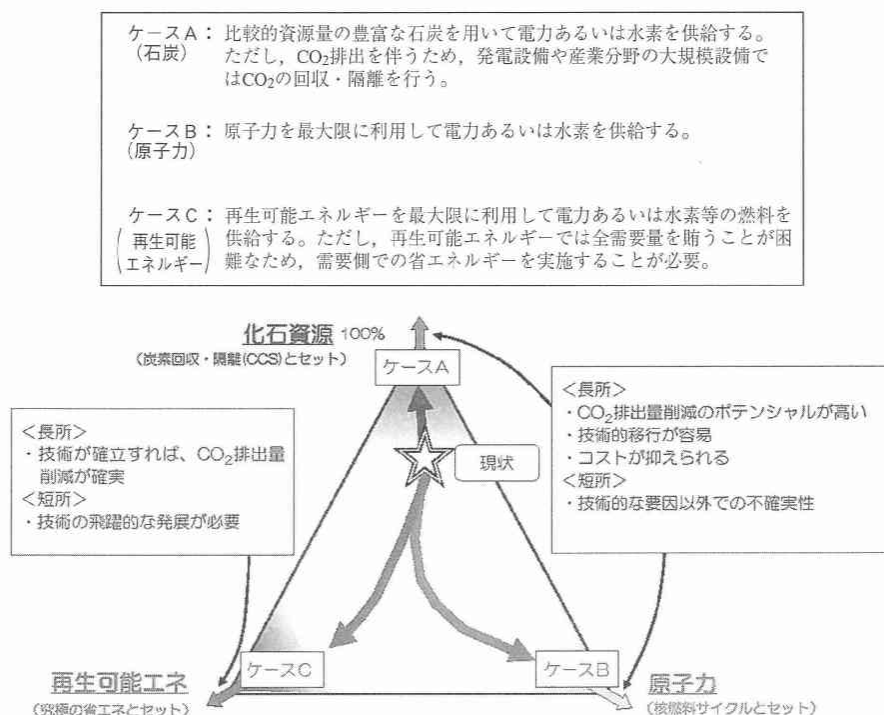
発小委員会の会合で、こちらの研究所が出されたシナリオを初めて拝見しました。石油の終焉を仮定して、ある時点から「バックキャスト」(逆算)するという方法は、素人にも分かり易いなあと思いました。あれはもっと一般に広く知ってもらいたいと思います。

バックキャストという手法は初めてなのか。

秋山 手法そのものは海外で提起され、適用例も海外でいくつかありますが、エネルギー技術分野で使ったのは初めてだと思います。

エネルギー需給部会では、フォアキャストで2030年、さらには2050年頃までのエネルギー需給見通しの中身を詰めようとしています。2020年～2030年あたりで、バックキャストとフォアキャストでの結果にミスマッチがあるので、その部分について今後検討を進め、整合性をもたせようとしているところです。

科学技術サイドから見た、エネルギー社会、あるいはもっと広くライフスタイルとか社会構造のグランドデザインや哲学を提示していくことが大事だと思います。



2100年までを見通した超長期のエネルギー技術シナリオ

エネルギーの取組みに共通して「適切な情報」が極めて大切です。このため、私ども研究所ではエネルギー技術情報基盤の整備に力を入れているところです。

東嶋 是非そうしていただきたいと思います。

低い自給率—エネルギー、食料、木材資源

秋山 日本の将来の課題の中で、エネルギー、食料、それから木材資源の確保など、日本はとりわけ厳しい状況にあることがあまり知られていないというか、知ることを意識的に避けているようにも思われます。

一次エネルギー自給率は、サウジが580%でトップ、中国がぎりぎり100%、アメリカは80%、ドイツ、フランスは40~50%。日本は僅か20%しか自給できていません。

穀物自給率（重量ベース）も日本は悲惨で、アルゼンチンの243%をトップに、オーストラリア（198%）、フランス（186%）、カナダ（120%）、アメリカ（119%）、ドイツ（111%）、中国（101%）と続きますが、日本は28%しか自給できていません。

木材に至っては、森林の間伐をしなければいけないという話題が出る反面、輸入は日本が世界の輸入量の25%を占めている状況です。

こういった厳しい状況、矛盾した状況に対して、東京大学の西尾茂文理事・副学長が2004年3月に持続型社会研究協議会を立ち上

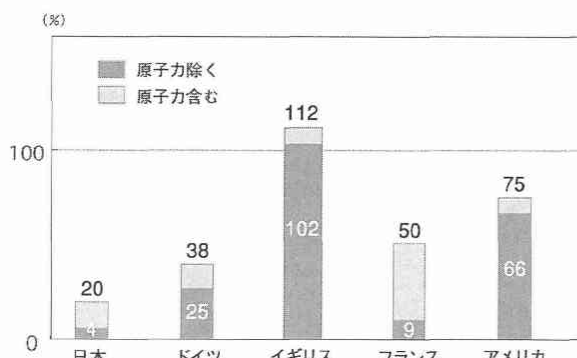
げまして、「持続型社会へ向かうエネルギービジョン」（2005年8月）をまとめました。そこでは「トリプル50」—『エネルギー有効利用率50%』、『化石燃料依存率50%』、『自給率50%』—を提唱しています。

東嶋 どうやってエネルギー自給率50%を達成するのですか。

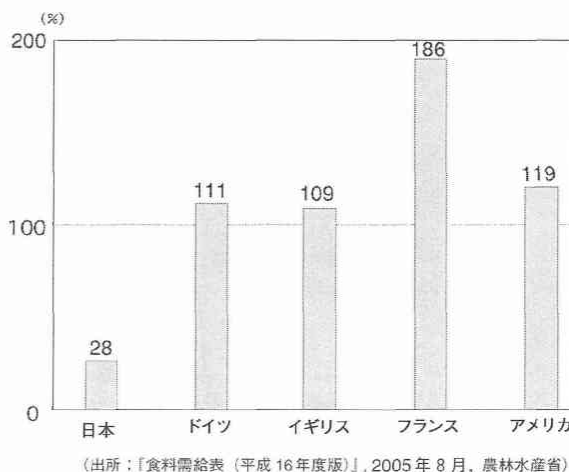
秋山 原子力を増やし、風力、太陽光、地熱などの自然エネルギーをもっと導入していく、などで達成を図ることになります。

誤解されている「戦略」の意味

秋山 世の中に出回っている「戦略」という言葉ですが、往々にして誤解でなければ、意図的にねじ曲げて使っていると思えてなりません。新聞などで「これが戦略だ」という記事が沢山見られますが、そこでも目標を立てて、それで「戦略だ」としている事例が見受けられます。しかし、目標に向かう中で、横槍が入るとか、大異変が起きるとか、計画ルートが駄目になったら、その時にどうするか。その次の手段としてはこうするとか、またさらには、二重、三重、四重ぐらいの深い防御ラインを設けているのが本当の「戦略」だと思うのです。



一次エネルギー自給率（2001年）



穀物自給率（2002年）

東嶋 目標と同義語になっているわけですね。

秋山 「目標＝戦略」では心許ないのではないかと思います。戦略に関しては伊藤憲一先生の『国家と戦略』（85年中央公論社）を常に参考にしておりますが、この本には戦略とは何かということがはっきり書かれています。

人間性と心について

ロボットにも見出される「心」

秋山 社会を動かすのは最終的には人間だと思います。その人間を制するものは人間性だと思います。我々が外から自分自身を見た時に、原点は一体どこにあるかが問題です。何がどこまで分かるのかと自問自答し、改めて、人間を探究するということについては、どんな期待、あるいは限界を感じていますか。

東嶋 私は人間がそれほど特別なものだとは思っていません。自分の仕事は取材活動ですが、取材すればするほど、人の話を聞けば聞くほど、知れば知るほど「知らないということ」が分かります。

人間は自分たちのことについて知らないことばかりです。最近、ロボット学者の方々の取材もよくしています。日本で作られているロボットの代表格は、ホンダの「アシモ」のように人に似せた認識先行型ロボット、例えば、部屋の中の環境のデータをあらかじめコンピュータにインプットして、それを解析して動くロボットです。ところが、マサチューセッツ工科大学（MIT）コンピュータサイエンス研究所のロドニー・ブルックス教授が作っているロボットというのは、昆虫型というか、環境全部を入れなくても、つまづいたら戻るとか、単純な応答反応を担う分散系で動くロボットです。



日本のロボットの場合は、脳、つまりコンピュータが1カ所にありますが、ブルックス教授のロボットは全身にコンピュータを置いています。実際に分散系の方がうまくいって、宇宙や戦場に行ったり、掃除ロボットになったりしています。ロボットの研究が進んでいくと、「人間はコンピュータを自分の体の中に取り込んでサイボーグになる。一方で、物であるロボットが心を持つようになる」とブルックス教授は言っています。

外界との係わりで認識される「心」

東嶋 私たちは「人間だから心を持っている」と思っていますが、実はそう思い込んでいるだけではないでしょうか。例えばソニーが作った「アイボ」を認知症のお年寄りのグループホームに持って行ってコミュニケーション活動をする、お年寄りの方々は「アイボ」をロボットとして見ていたり、犬として見ていたり、あるいは友達として見ていたり、色々です。

つまり、物であれ人であれ、相手に心を感じるというのは自分の脳の働きであって、相手に本当に心があるかどうかはあまり関係ない。やりとり自体が「心」ですから、やりとりが成立すれば、「アイボ」に心があるとも思えるのです。その人の感じ方によって、ロボットも人間になってしまうんですね。

秋山 女の子がお人形さんを可愛がる心理と似ているのかも知れませんね。

東嶋 ロボットも本当に精巧なものができつつあります。優れた人工知能を備え、外見が人間そっくりなものができたら、人間はそのロボットに「心」を見るのではないのでしょうか。

「人間は特別な存在だからロボットには心がない」という人もいますが、私は、人間とやりとりした瞬間にロボットに「心」が生まれると思うんです。いいかえれば、人間性も外界と関わる場所に生まれるのだと思います。

秋山 脳の中に「心」が単独に存在するのではなく、脳が機能して外界とやりとりすることで初めて「心」が認識されるんだということです。原子力発電所のような巨大なプラントでも、

現場の人は愛称をつけて、「今日のご機嫌はどうだね」などと呼びかけているんじゃないでしょうか。

東嶋 フランスのグラブリーヌの原子力発電所では、タービンに「エリザベス」と付けていました。

秋山 今日は大変勉強になりました。これからもよろしくお願いいたします。機会がありましたら色々ご指導のほどよろしくお願いいたします。

[寄稿]

燃料電池の開発動向

太 田 健一郎

横浜国立大学大学院
工学研究院 機能の創生部門
過程の機能と安全分野 教授



はじめに

地球温暖化問題解決の切り札—燃料電池

私は、環境問題と資源問題との両面を持つ地球温暖化問題を解決し、人類が持続型成長を狙うには、水素エネルギー社会は必須であり、その中核である燃料電池の研究開発に取り組んでいます。

その水素の源はやはり水しかないでしょう。その時、太陽光など、再生可能エネルギーで水素製造を行って初めて水素エネルギーの本当の意義が出てきます。人類社会で水素を燃せば水と熱が出てきます。ここで問題の熱を宇宙へ捨てることができれば、図1のように「水の循環」がうまく利用されていると思います。このあたりのことを、少し定量的に計算した結果が表1です。環境負荷係数1というのは、バランスしているということではなく、ほぼ同じ数値だということです。全地球レベルでは0.036、日本の平均が0.88ですから、日本では自然に循環している量と同じぐらいの炭素系燃料を使っているということです。東京都区部の環境負荷係数は3万5,000で、いかに多くの炭素系燃料を使っているかが分かります。この炭素系燃料を全部水素に替えたら、環境負荷係数は地球全体で0.0001、日本だと0.006、東京都区部で0.12（炭素燃料の時の30万分の1）になります。環境へ

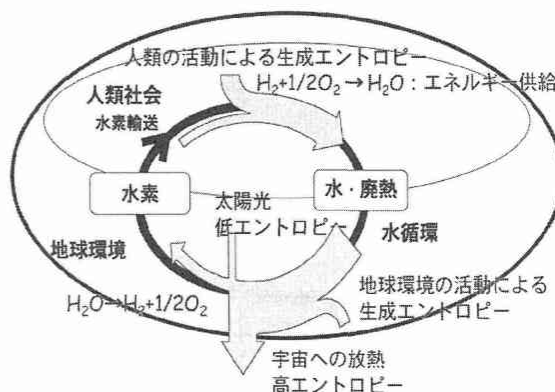


図1 水の循環と水素エネルギー社会

の負荷は水素では圧倒的に小さいと言えます。水素エネルギー社会の到来が望まれる所以はこの辺りにあると思います。

水素エネルギー社会のキーテクノロジーは何になるか。再生可能エネルギーを使った水素製造法もそうかも知れません。しかし、システム全体を考えた時、燃料電池の実用化がなされないと、理想的な水素エネルギーシステムはできないと認識しています。

表1 環境負荷係数でみる水素の優位

	環境負荷係数 (炭素)		環境負荷係数 (水素)
地球	0.036	1/360	~0.0001
日本	0.88	1/150	0.006
東京都区部	35351	1/300000	0.12

※ 再生可能エネルギーを使用した水循環に基づく水素エネルギーシステムは環境保全において格段に優れている。

$$\text{環境負荷係数（炭素）} = \frac{\text{エネルギー起源の炭素放出量}}{\text{自然の炭素放出量}}$$

$$\text{環境負荷係数（水素）} = \frac{\text{水素エネルギーシステムで生成する水の量}}{\text{自然の水の蒸発散量}}$$

* 本稿は、昨年12月16日の当所月例研究会（第241回）におけるご講演を本誌掲載用にテープ起こししたものです。

燃料電池の原理

原理と特徴

燃料電池は図2のような電池反応で発電します。乾電池と異なり、電池容量の制約がなく、エネルギー源となる燃料、酸化剤を外部から連続供給すれば半永久的に電気エネルギーを取り出すことができます。密閉型の乾電池が電気エネルギーを蓄える装置だとすると、

燃料電池は電気エネルギーを得るエネルギー変換装置（発電機）と考えることができます。

このような燃料電池は、使う電解質によって色々な種類に分けられますが、全般的には表2のような特徴があります。

発電能力と効率

燃料電池は、図3に示すように、水1モル当たり286kJのエネルギー（ ΔH ）を取り出すことができます。このエネルギーは、仕事（ ΔG ）と熱（ $T\Delta S$ ）に分けられます（熱力学

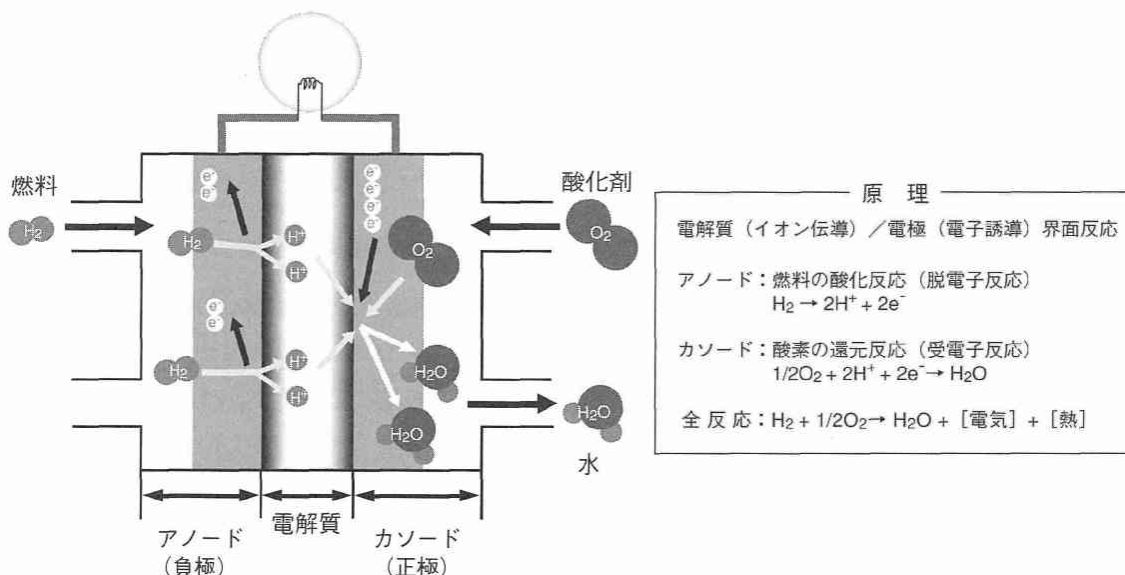


図2 燃料電池の発電原理

表2 燃料電池の全般的な特徴

- ① 理論発電効率が特に低温で高い。
- ② 単セルの電圧が1V以下の直流電源である。
→電気エネルギー（P）は電圧（V）と電流（I）の積だから、例えば、100kWの大出力を得るには、大量の物質を遅滞なく反応させて大電流を得る工夫が必要となります。その電流は、電極と電解質の境目である界面反応（電荷移動反応）から出てくるので、出力に比例した燃料や酸化剤をこの界面でいかにスムーズに反応させるかが大事。
- ③ 電気化学システムは基本的に二次元反応装置であり、体積当たりの利用効率が悪い。
- ④ スケールメリットが少ない代わりに、小型でも効率低下は小さい。
→スケールメリットがないので、大きな電池を追求しても得るところは少ない。
- ⑤ 環境負荷が小さく、低騒音・低公害発電システムである。
→CO₂を排出しないと言われる原子力発電に打ち勝つ力はまだないが、窒素酸化物の排出がなく、騒音、振動も少ないという利点がある。スペースシャトルという閉じた空間で使用して、1～2カ月間、人間が生活できている。

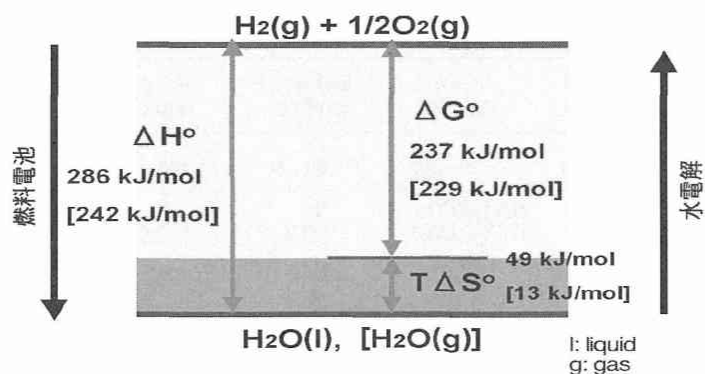


図3 水生成反応のエネルギー変化 (25℃)

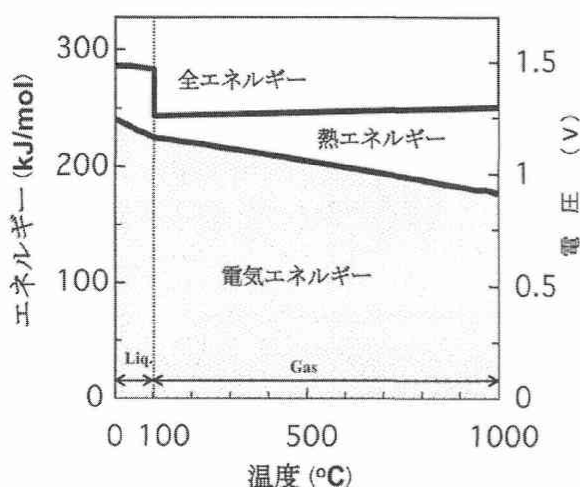


図4 水生成反応の温度依存性

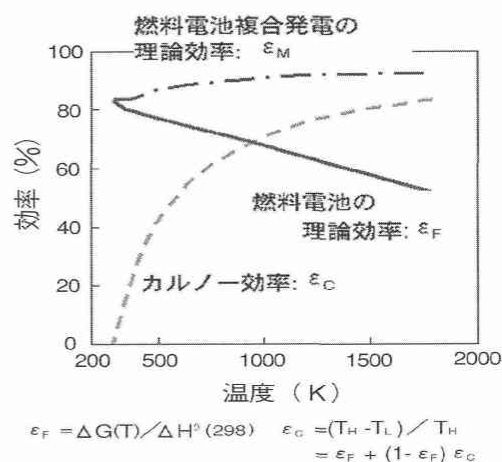


図5 燃料電池理論効率の温度依存性

の第一法則) が, ΔG は 237 kJ です。もし, ΔG が機械的な仕事をせず専ら電気だけを取り出すと ΔG が全て電気エネルギー (237 kJ) となり, 全エネルギーに対する比率は 0.83 になります。25℃で効率 83% で電気が取れるシステムは燃料電池以外にはありません。

水生成反応は発熱反応ですから, 温度によってどう効率がかわるか見てみます。理論ベースの話ですが, 25℃で酸素と水素を入れ, 温度を変えると, 図4および図5のように温度が上がるほど燃料電池の理論効率 (ϵ_F) は下がっていきます。一方, 内燃機関の効率が温度の上昇とともに上がるようになります。カルノー効率 (ϵ_C) は, 25℃ではゼロですが, 温度が 1,000 K (約 700℃) でちょうど理論効率とクロスします。ですから, 700℃以上の温

度で燃料電池を動かす時には, カルノー効率の方が高いのです。

高温型の燃料電池については, ハイブリッドにして熱機関を動かすという考えがあります。それが燃料電池複合発電の理論効率 (ϵ_M) になります。反応速度は考慮しなければいけませんが, 燃料電池複合発電はほとんど温度に依存しないということになります。

燃料電池の種類

燃料電池には, 表3のように使う電解質によって色々な種類があります。リン酸形でかなり成績の良いものが出ています。溶融炭酸塩形は私が非常に注目しているものです。固体酸化物形は動作温度 1,000℃と書いてありま

表3 燃料電池の種類

燃料電池の種類	ヒドラジン形	直接形メタノール(DMFC)	アルカリ形(AFC)	固体高分子形(PEFC)	リン酸形(PAFC)	溶融炭酸塩形(MCFC)	固体酸化物形(SOFC)
温度(℃)	5~60	5~150	5~240	60~80	160~210	600~700	900~1000
燃料酸化剤	ヒドラジン 空気, H ₂ O ₂	メタノール 空気	H ₂ (不含CO ₂) O ₂ (不含CO ₂)	H ₂ 空気	H ₂ 空気	H ₂ , CO 空気	H ₂ , CO 空気
電解質	KOH 水溶液	陽イオン交換膜, H ₂ SO ₄ 水溶液	KOH 水溶液	陽イオン 交換膜	高濃度 H ₃ PO ₄ 水溶液	Li ₂ CO ₃ /K ₂ CO ₃ Li ₂ CO ₃ /Na ₂ CO ₃	ZrO ₂ (Y ₂ O ₃)
電荷担体	OH ⁻	H ⁺	OH ⁻	H ⁺	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻
電極材料	Pd/Ni Pt/C	Pt/C	R-Ni/Ni	Pt/C	Pt/C	Ni NiO	Ni LaNiOx

ですが、最近では800℃かも知れません。アルカリ形はスペースシャトルに使われている燃料電池です。残念ながら、空気中には炭酸ガスがあるので、アルカリ形では純水素と純酸素の組み合わせでないと使えません。直接形メタノールは、これは一時期は自動車用も考えられましたが、現在は、「マイクロ燃料電池」という形で主にパソコン用が考えられています。ヒドラジン燃料電池は、燃料にヒドラジンという活性燃料と酸素を使います。特殊用途で、民生用には向いてないという気がします。

表4で4つの燃料電池を比較して見ました。常温から高温まで作動温度の順に並べてあります。理論効率は低温で高いのですが、化学反応による発電なので、反応速度は高温のほうが速くなります。反応速度を高めるために、温度が低いところでは白金(Pt)触媒を使

ます。500℃を境にしてPtは使わなくて済むだろうと思います。

燃料電池の大きな課題は耐久性です。特に酸性である固体高分子形(PEFC)、リン酸形(PAFC)では、金属系の材料は酸化されますから非常に使いにくいので、構造材として炭素系材料を使うことになります。それを耐久性の高い金属系にするための技術開発が行われていますが、やはり難しいです。

基本的には、低温の方が耐久性の向上を図り易いということから、500℃~600℃で作動する燃料電池が良いと思われます。500℃を超えないと反応速度が上がらないし、600℃以下なら鉄系の安い材料が使える可能性が高いからです。ところが、今度はいい電解質がないのです。私はこれに近い溶融炭酸塩形(MCFC)が有望だと思っています。

表4 各種燃料電池の比較

	常温	中温	高温	超高温	
形式	固体高分子形	リン酸形	溶融炭酸塩形	固体酸化物形	
作動温度	80	200	650	1000℃	
理論効率	高い	←			低い
反応速度	遅い	→			速い
触媒	白金	白金	非白金	非白金	
燃料	水素	低CO	CO可	CO可	
耐久性	高い	←			低い
構造材	炭素	炭素	金属	金属酸化物	

開発の方向性—発電効率の向上

現在、コージェネレーションで使われているように、「燃料電池は発電装置だ」という位置づけで、電気をいかに多く取るかという工夫を徹底的にやっていかなければいけません。複合ガスタービンの51%くらいよりも高い効率が望めるはずです。このガスタービンもちろん発展もします。

図6で示しますが、我々の研究室のターゲット

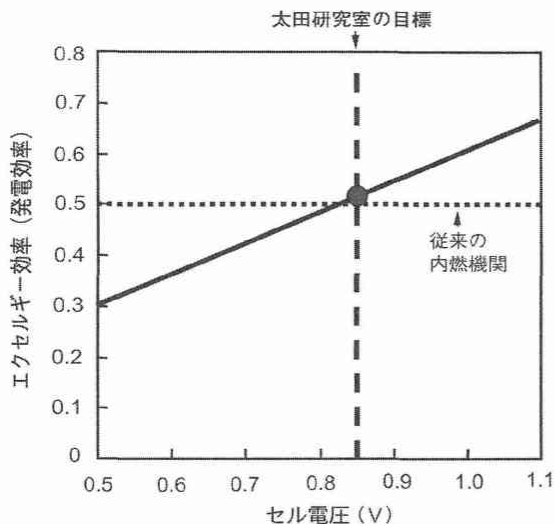


図6 発電効率とセル電圧の関係

ットはセル電圧0.85Vの燃料電池の開発です。0.85Vは、今のいい燃料電池よりも0.15Vぐらい上げることに相当します。勿論、Ptを大量に使えば達成できますが、純水素でもできます。セル電圧が0.85V以上のものが出てくるとCO₂削減に大きく寄与できると思っています。

図7では各種発電装置の容量と発電効率を示しています。1MW当りまでの発電出力なら、燃料電池はマイクロガスタービンとかなり良い勝負ができます。熔融炭酸塩形、固体酸化物形は、温度が変わってもガスタービンなどに結びつけることで効率が50%を超える可能性が十分あります。

開発成果の事例

(1) 熔融炭酸塩形 (MCFC) の研究開発

[MCFC開発の歩み]

MCFCでは、電解質に熔融炭酸塩を使います。図8のように、リチウムやナトリウムが基本仕様ですが、塩ですから500℃ぐらいで融け出します。融点以上でこの燃料電池を作動させると、電解質相の中で炭酸イオンが動きます。そうすると、カソード側からアノード側にCO₂が移動することになります。これをリサイクルしなければいけないというのが溶

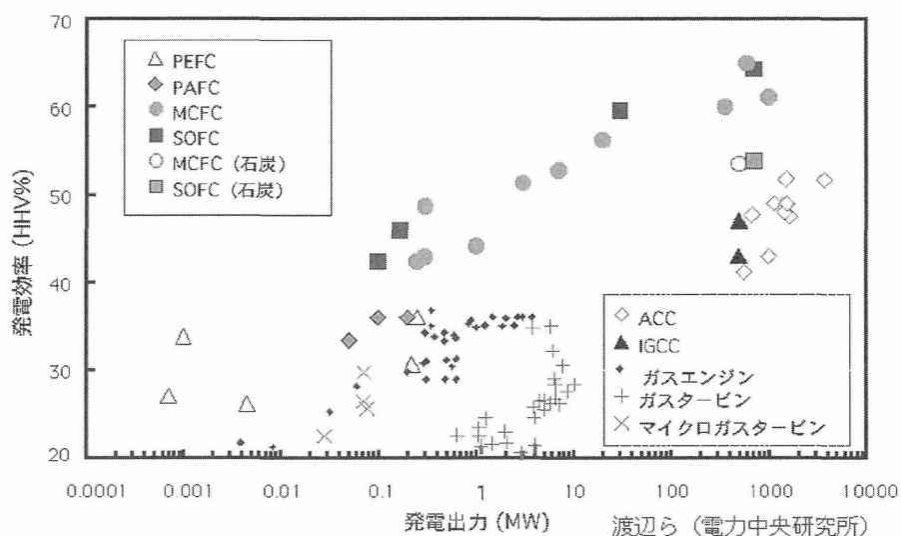
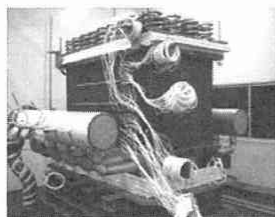
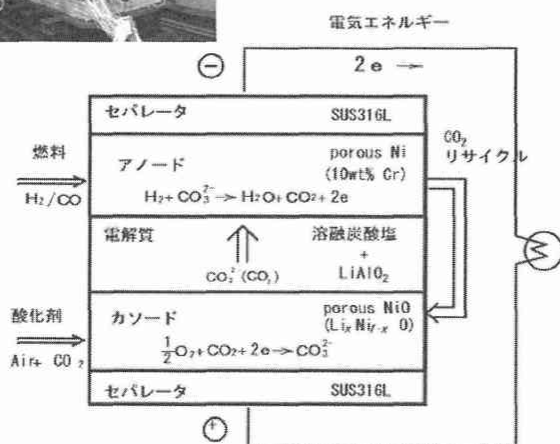


図7 各種発電装置の容量と発電効率の関係



電解質: $\text{Li}_2\text{CO}_3/\text{Na}_2\text{CO}_3$
又は $\text{Li}_2\text{CO}_3/\text{K}_2\text{CO}_3$

電極材料:
アノード: Ni
カソード: Li doped NiO



特徴

1. 最高効率
2. 多種の燃料に対応 (石炭ガス)
3. 非白金触媒
4. 高温廃熱
5. CO_2 濃縮が可能
6. 内部改質が可能
7. 材料安定性が問題

図8 熔融炭酸塩形燃料電池の仕組み

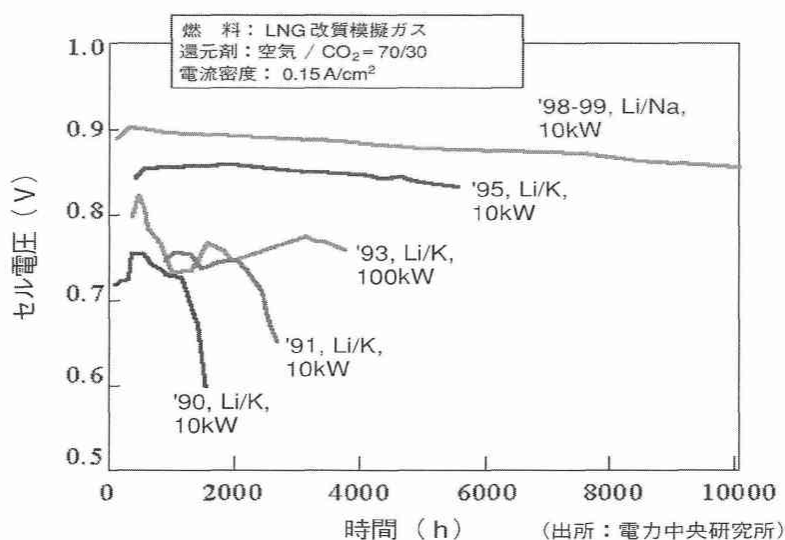


図9 熔融炭酸塩形燃料電池 (10kW) の運転試験結果

融炭酸塩形の欠点でもあるのですが、うまく使うと CO_2 の濃縮ができます。こういうシステムを使うと、セル電圧0.85Vという理想に近い燃料電池になると考えています。

図9は10kWの燃料電池の運転試験結果です。1990年では2,000時間の手前で寿命が尽きていましたが、リチウム、カリウム系で95年までには6,000時間の手前まで、98年になるとリチウム、ナトリウム系でセル電圧0.9Vを実現し、寿命も1万時間以上を達成しています。10kWですが、実用条件でセル電圧0.9Vが出る

電池が既にあることを認識しておいて下さい。

[愛知万博での実績]

MCFCは、日本の技術の結晶として愛知万博 (2005年3月25日～9月25日) に出されました。日本政府館の電源に使われたのです。特に、この時は、木材チップをガス化した燃料と食堂の残渣でメタン発酵をした燃料で電池を動かしましたが、そういう燃料を使って開催期間中無事に動いたということは画期的なことだったと思っています。

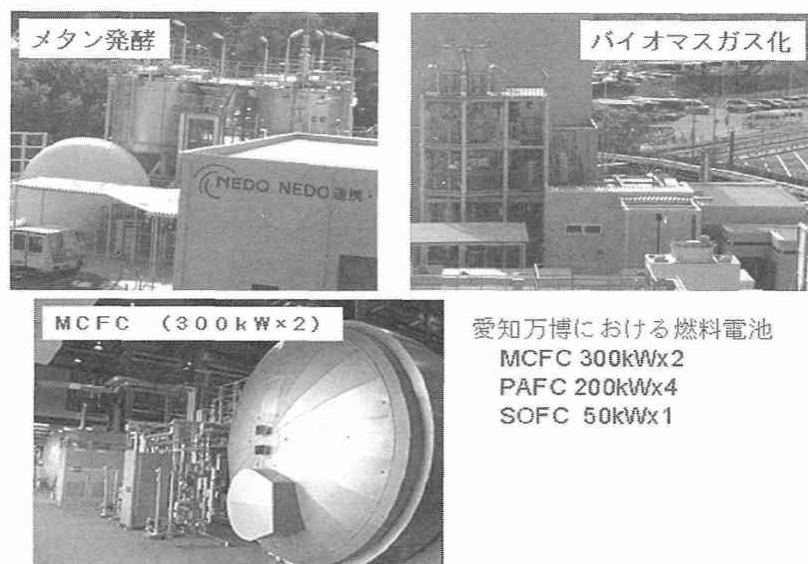


図10 愛知万博における燃料電池

もう1つの成果は、マイクロガスタービンをつなげて発電したことです。これは史上初だと思います。300kWで推定効率が51%ぐらいになっていますが、今の技術で既にそこまで達成しているのは素晴らしいことだと思います。

(2) 固体高分子形 (PEFC) の研究開発

[PEFCの特徴]

固体高分子形は一番注目されていると言っていい燃料電池です。他の燃料電池と違い、電解質にビニールみたいな固体高分子電解質を使います。PEFCの特徴の1つは出力密度の高さです。かさばるMCFCと違って、自動車の床下に積めます。室温で作動し、電解質がビニール状の高分子なため電池の形状を自由に変えることができます。こうなれば、他の燃料電池と違って縦置きにできます。これは

表5 燃料の電気化学エネルギー密度

燃料	体積密度 [kJ/ml]	重量密度 [kJ/g]
H ₂ (liquid)	8.3	117.6
LaNi ₅ H ₆	10.6	1.6
CH ₃ OH	17.5	22.1
N ₂ H ₄	19.9	19.7
Li	21.8	40.8
Zn	34.3	4.8

※ 燃料の燃素による酸化反応の ΔG° (25℃) より計算

液体の燃料電池では絶対できないことです。から面白いと思います。

主な用途として、①携帯用電源 (パソコン用、携帯電話用、移動用小型電源)、②家庭用のコージェネレーション (家庭用、分散型発電)、③自動車用 (乗用車、バス) が考えられています。

①携帯用電源としてのPEFC開発動向

メタノールを燃料にする直接形メタノール (DMFC) 燃料電池ということで開発されています。非常に小さな燃料電池で、メタノールの替りに水素系燃料を使うという話も出ています。

燃料の電気エネルギー密度を見ると、表5に示すように、メタノール (CH₃OH) 系はリチウム (Li) 系に比べて密度が高くありません。ですから、メタノールにしたからといってコンパクトになるわけではありません。ただ、リチウム系と違い、メタノール系では充電の必要がなく、カートリッジ交換だけで使えるという利点があります。

小型化に向けた問題点としては、まず、燃料や空気の送りこみ方があります。普通の燃料電池だと、ポンプで強制的に送り込むのですが、20Wぐらいの発電に、ブローで5～10Wの電力を消費しては意味がありません。

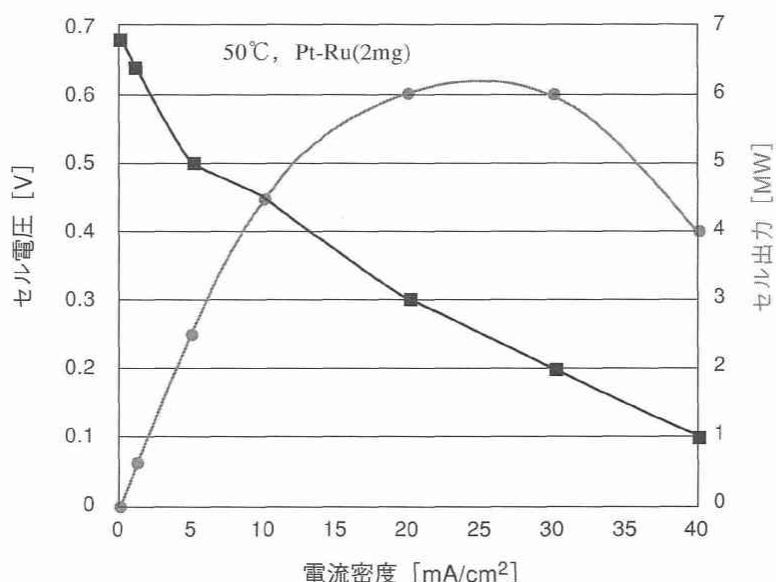


図11 焼酎を燃料に利用する燃料電池

効率的な燃料や空気の供給方式に、機器を使わない方式（パッシブ型）と使う方式（アクティブ型）とがありますが、今のところ、パッシブ方式での開発が進んでいます。

効率が非常に悪いため、熱が出てくるのでうまく冷却する必要もあります。そして、メタノールには毒性があるので、できればエタノールにした方が面白いと思います。例えば、図11のように、焼酎を燃料にしても発電可能であることが分かっています。

②家庭用PEFCの開発動向

ガス、灯油、LPGの3種類の燃料を使って、国が平成17年度から「定置用燃料電池大規模実証事業」を行っています。図12のように燃料電池を据え付けて、熱と電気と両方を使うシステムです。技術課題としては、コストダウン、耐久性の向上、電池効率の向上を挙げることができます。コストダウンは大量生産で解決すると思います。自動車と違って、例えば、システムとして30万～50万円という値段であればかなり

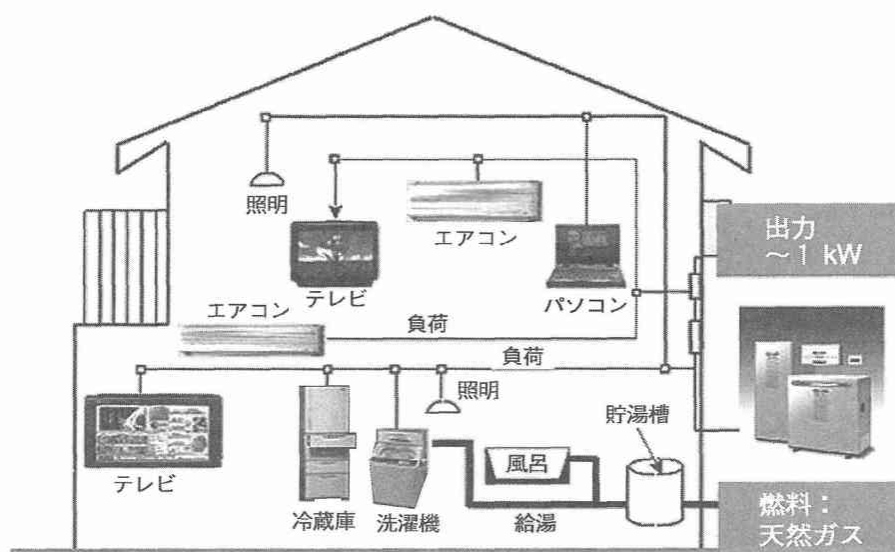


図12 家庭用燃料電池システムのイメージ

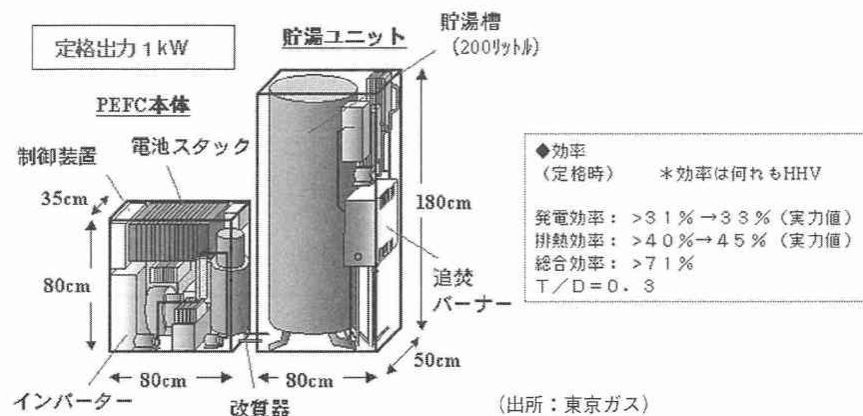


図13 家庭用燃料電池の仕様

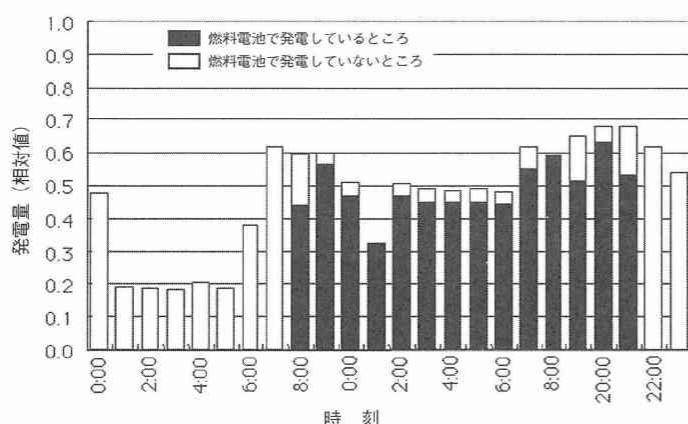


図14 家庭でのPEFC運転の状況 (2005年8月25日)

普及してくるでしょう。耐久性については、家電製品と同じように10年を目標に開発を行っています。最終的には、もっと発電効率を上げなければいけないと思います。

図13は、家庭用燃料電池の仕様です。発電効率は31～33%ですが、ここを平均的な火力発電の効率を超えるレベル (37%) まで上げて、熱は余剰だというスタンスで開発できればということなのです。

図14は、私の家の庭に据え付けて運転している燃料電池の写真と運転データです。日中は燃料電池で発電していますが、夜中は発電していません。熱のデータが出ていませんが、この日でも使ったお湯の90%は燃料電池のお湯です。1日に必ず1回ストップしてスタートするし、窒素パージもせず、ちゃんと動いています。燃料電池はほとんど問題ないということです。

③自動車用PEFCの開発動向

世界で有名な自動車会社で燃料電池の研究開発を行っていないところはまずないと思います。自動車用燃料電池を開発するきっかけを作ったのも1990年頃のトヨタ自動車とメルセデスベンツ社 (現ダイムラー・クライスラー社) でした。当時、トヨタがハイブリッド車を出し、それに対抗する技術として、メルセデスベンツ社が燃料電池自動車という旗を挙げました。我々もびっくりしたのですが、素晴らしい発想だったと思います。メルセデスベンツ社が当時設計した試作車には、既に燃料電池を入れるスペースが入っていました。

自動車用燃料電池の技術開発で最も進歩したのは、体積密度や出力密度です。固体高分子形燃料電池が格段に進み、「マイクロ燃料電池」と言われるところまで見通しが立ってきたというのは、自動車メーカーの開発競争が大きく寄

- ・燃料は高圧水素
- ・コスト削減
- ・効率向上
- ・世界でバス運行試験



(トヨタ、ダイムラー・クライスラーのホームページより)

図15 開発中の燃料電池自動車

与していると思っています。例えば、ダイムラー・クライスラー社の新しいタイプの燃料電池は非常にコンパクトです。5人乗りの燃料電池車が出てきました。バスにしてもそこそこの人数が乗れるということです。

技術課題として残っているのは、まず、コストの格段の削減です。米エネルギー省（DOE）のターゲットは30ドル/kWとされています。2005年夏の会議では、15ドル/kWが可能かどうか真剣な議論も始まっています。ゼネラルモーターズ（GM）社は100ドル/kWは完全に見えていっていると言っています。実際に、どの程度の車ができるか私もよく分かりませんが、当初は1台1000万円ぐらいの車になるでしょう。そこで使える燃料電池が200万～300万円となると目標を達成できるかも知れません。

次の課題は耐久性です。自動車の耐久性は5,000時間とされていますから、走行距離は10万kmになります。燃料電池の耐久性向上では、燃料電池本体の中で触媒を支えるためのカーボンが使われていますが、自動車の運転モードでは、そのカーボンが酸化消耗しますし、条件によってはPt触媒が大量に溶解することも分かってきました。さらに、Ptは埋蔵量（2001年時点で2万8,000トン）の問題もあります。Ptを燃料電池車用（100g/台）に使うとして、3億台分だと言われています。今、

自動車は世界で8億台あるわけですから決して燃料電池車は主流になれないということになります。そこで、自動車用は、Ptに代わる材料の開発が必要です。

それから、効率の向上も課題として残っています。化石燃料をベースにすると2004年までの燃料電池車では、まだディーゼルベースの効率には勝てません。技術が進めば、勝負できる余地が大分あるだろうと思いますが、現状ではまだ難しいかも知れません。

横浜国立大学の研究

Ptとカーボンを使わない燃料電池の開発

私どもは、Ptやカーボンを使わずにうまく発電できるPEFCの研究を続けています。

PEFCの基本構造を図16に示しますが、カーボンの上に触媒としてPtブラック（細かくしたPt）が乗っています。問題は、触媒のPtが乗る辺りのカーボンが非常に腐食しやすく減耗することです。温度を上げると問題が悪化します。さらに、Ptも安定でなく溶け出すことが分かってきました。

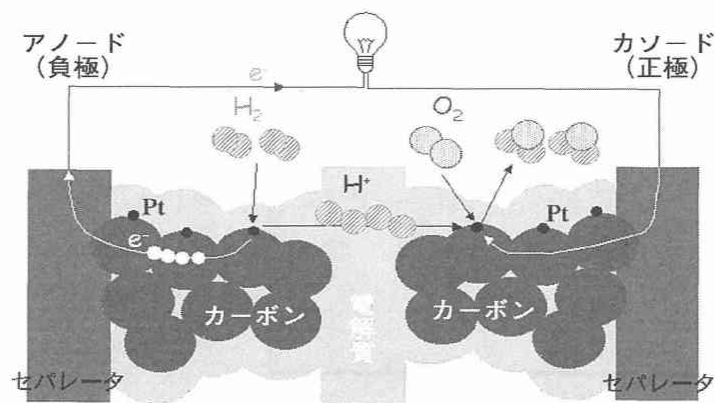


図16 PEFCの構造

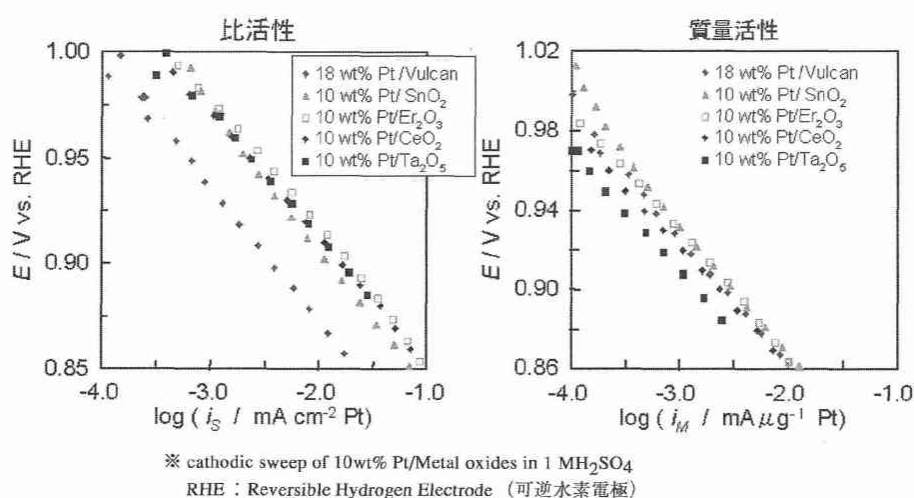


図17 Pt/金属酸化物の比活性と質量活性～溶液法（酸素雰囲気，5mV/s）

（1）カーボンに変わるPt触媒のベース材料

そこで、まず、カーボンに替わってPtのベースになる材料として、酸化錫（ SnO_2 ），酸化エルビウム（ Er_2O_3 ），タンタルオキシライド（ Ta_2O_5 ），酸化セリウム（ CeO_2 ）を比較検討してみました。

図17にカソード側でのPt/Vulcan（カーボン），Pt/ SnO_2 ，Pt/ Er_2O_3 ，Pt/ Ta_2O_5 ，Pt/ CeO_2 の比活性と質量活性を示しました。比活性というのは実面積当たり，質量活性とは質量当たりの活性を意味します。右上に行けば行くほど，また，右下がりの傾きが緩やかであるほど，活性が良いということになります。

Ta_2O_5 は，比活性では他の検討対象材料と遜色がなく，質量活性ではPt/Vulcan（カーボン）よりも活性が高いです。つまり，Pt触媒のベ

ースとしてカーボンの替わりになるということです。ただ，安定性が問題になるので，硫酸に溶かして飽和溶解度を比較してみました。まず， Er_2O_3 は溶けて駄目ですが，セリア，タンタル，錫はより安定的で，導電性も少しあるのでPt触媒のベース材料として使えそうです。

表6 金属酸化物の安定性評価

TiOx	0.02 (50℃)
TaON	0.11 (50℃)
Ta ₃ N ₅	0.13 (50℃)
ZrOx	0.32 (70℃)
Pt black	0.44 (70℃)
[ppm(wt/wt)]	

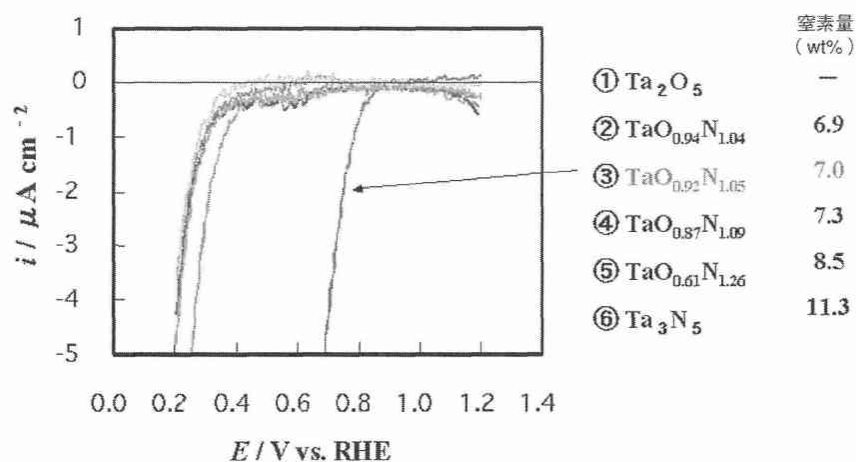


図18 タンタルオキシナイトライドの酸素還元電流密度 (30°C, 5mV/s)

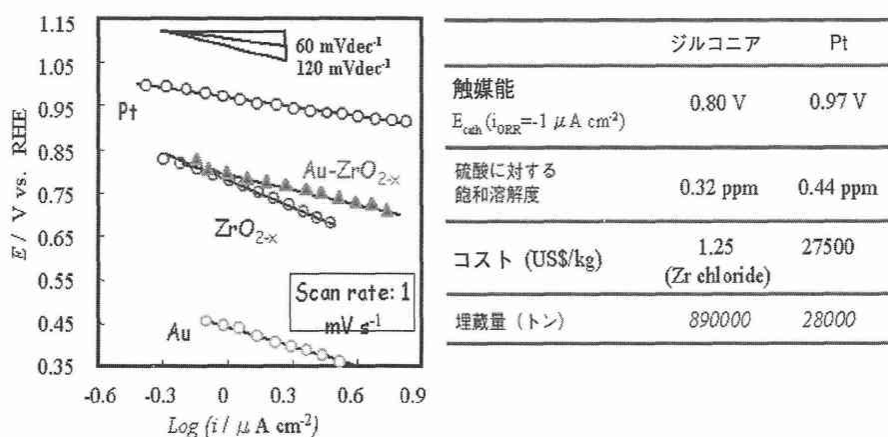


図19 ジルコニアの酸素還元触媒能 (酸素雰囲気)

(2) Pt/カーボンに替わる電極材料

Pt/カーボンに替わる材料として、タンタルオキシナイトライド (TaOxNy) の特性を見てみると、図18のように、組み合わせる窒素量によって酸素還元触媒能が大きく変わります。適正な組成を見つければ触媒能が上がる可能性もあります。溶解度が小さい、安定的であることは強みです。

酸化ジルコニウム (ZrO_2) は、タンタルオキシナイトライドよりもポピュラーな材料ですが、表6に見るように、硫酸に対する溶解度が0.32ppmです。Ptブラックが0.44ppmですから、数字を見る限り、酸化ジルコニウムの方が安定的です。しかし、実際に触媒能を比較すると、図19に示すようにジルコニアは、まだPtには勝てません。しかし、資源量は白金に比べると問題ありません。ひょっとする

と、ジルコニアを使うことで、「脱白金」が実現するかも知れません。かなり近づいていますが、取りあえず電位0.85を達成したいところです。

タンタルオキシナイトライド、ジルコニア以外にも、Ptブラックよりも安定的なものとして、チタン酸化物などがあります。ですから、安定性と触媒能をうまくバランスさせれば、「脱白金」の有力候補が出てくるかも知れません。これが我々が8年間「脱白金」を目指して研究してきた成果です。

やはり水素エネルギーシステムを実現したい。燃料電池の技術をきちんと確立することによって、水素の力が最大限に出てくると思っています。ご静聴ありがとうございました。

(拍手)

[寄稿]

形式は合意、実質は破綻 —モンテリオール会議（COP11/MOP1）報告—

杉 山 大 志

（財）電力中央研究所 社会経済研究所
温暖化防止政策の分析と提言
重点課題責任者



[要約]

モンテリオール会議（COP/MOP1）では、「会議は大成功だった。米国や途上国も参加する形で、京都議定書の路線が2013年以降も継続するだろう」といった論調の報道が多い。しかし、このような理解は間違いだ。京都議定書第2約束期間の交渉は破綻している。本当に温暖化を防止するためには、この事実を直視し、これに代わる枠組みを模索することが必要だ。また、法律臭い議論として敬遠されてきた遵守の問題は、実は2兆円規模の債務を負うか否かという重大なものである。継続審議となったのを契機として、改めて国内で議論すべきだ。

1. 京都議定書の意義と問題点

1997年に採択された京都議定書は、2005年2月16日に発効し、先進諸国は2008年から2012年までの第1約束期間について温室効果ガス削減の数値目標を達成する義務を負うことになった。日本の削減の数値目標は1990年水準に比較してマイナス6%とされている。

京都議定書に大きな意義があったことは間違いない。温暖化問題への政治的関心が高まり、関連する企業活動も始まった（再生可能エネルギーの製造者、省エネルギービジネス、林業セクターなど）。また、低コストの排出削減機会が発見されて、実際に対策もいくらか進捗した。

その一方で、問題点も多く指摘されてきた。

表1 京都議定書に関わる主な出来事

1994年	国連気候変動枠組条約が発効
1995年	第1回締約国会議（COP1）～ベルリン
1997年	第3回締約国会議（COP3）～京都 →「京都議定書」を採択
1998年	「地球温暖化対策の推進に関する法律」制定 「地球温暖化対策推進大綱」（98年大綱）を決定
2001年	第6回締約国会議（COP6再会合）～ボン 第7回締約国会議（COP7）～マラケシュ
2002年2月	米ブッシュ政権が「地球温暖化政策」を発表 →京都議定書から離脱
3月	98年大綱を改定 →「地球温暖化対策推進大綱」（02年大綱）を決定
6月	日本が「京都議定書」を批准
6月	「地球温暖化対策の推進に関する法律の一部を 改正する法律」の公布
2004年11月	ロシアが京都議定書を批准
2005年2月	京都議定書が発効（16日）
4月	「京都議定書目標達成計画」を閣議決定（28日）
2005年11月 ～12月	第11回締約国会議（COP11）、 京都議定書第1回締約国会合（COP/MOP1） ～モンテリオール

米国の離脱、ロシアのホットエア、途上国に数値目標がないことなどが、重要な欠陥として指摘される。また、欧州では数値目標を達成する見込みの国もあるが、これには東欧の経済崩壊など温暖化防止政策以外の要素による寄与が大きい。

2. 「将来枠組み」に関する議論の経緯

他方で、2013年以降については、京都議定書は数値目標を定めておらず、これについての公式な国際交渉が始まった。それが、2005年11月28日から12月9日まで、カナダのモンテリオールで開催された「気候変動枠組条約

第11回締約国会議・京都議定書第1回締約国会合」(COP/MOP1)である^(注1)。

この交渉においては、京都議定書の欠陥が改善されて、より多くの国が野心的な数値目標を持つような新議定書（あるいは京都議定書に対する改正）ができるという期待が、各国の環境省などから寄せられていた。

しかし実際には、京都議定書の基本的骨格である数値目標を中心としたアプローチは破綻しつつある。このことを、以下、具体的に今回の決定文書を紐解きながら説明しよう。

3. 注目すべき事実

日本政府発表（日本政府2005）によると、「Ⅰ. 全体の概要」のところに、「全ての国が参加する実効ある将来枠組みの構築に向けての道筋をつけるものとなった。」とあり、「Ⅱ. 主な成果」の要約には、「2. 将来の行動にかかる対話のプロセスの開始等」という見出しの下で、

(1) 条約プロセスの下で、全ての国の参加による長期的協力のための行動に関する対話の開始について合意。

(2) 議定書3条9に基づく、先進国の更なる約束に関する検討の開始と手順の合意。

(3) 議定書9条に基づく、議定書レビューの準備手続きの合意。

となっている。

さらに本文を見ると、この(1)を「モントリオール行動計画」として議論を開始する旨のパラグラフがある。ここまで見ると、大変に前向きに合意がなされたとの印象を受けるだろう。

しかしながら、重要なのは、目立たない形で書かれたこのパラグラフの最後の一文「なお、この対話は将来の交渉、約束、プロセス、枠組み、マンデートなどの予断を持たずに開催されることとされている」である。この一文こそ、気候変動枠組み条約が実質面で破綻していることの強力な証拠だ。

COPの正式決定文書を見ると、この「但し書き」ははるかに目立つ形で決定本文に挿入してある。さらに、これに続くパラグラフでは、「法的拘束力のない意見交換であり、・・・将来のコミットメントに関する議論を始めるものではない」と駄目押しをしてある^(注2)。この決定文は、どうみても、気候変動枠組み条約のもとでの京都議定書第2約束期間に関する前向きな態度を述べたものではない。「対話はするが、排出削減約束には結び付けない。それどころか、それに結びつきかねないプロセスや、数値目標を決める段取り（マンデート）にも関連させないし、交渉ですらない。拘束性のない（non-binding）、意見交換ないし対話に過ぎない」ということが徹底して書き込まれている。気候変動枠組み条約という「排出枠を被せる仕組み」を見る

注1：COPは気候変動枠組み条約の締約国会議であり、MOPは同条約の下で締結された京都議定書の締約国会合。今回は、11回目のCOPと1回目のMOPが同時並行で開催されたものであるため、COP11・MOP1と併記される。

注2：関連箇所の決定原文は以下の通り（COPおよびMOPの決定はhttp://unfccc.int/meetings/cop_11/items/3394.phpで全て入手できる）。

Decision（COP11決定）：

決定文タイトル：Dialogue on long-term cooperative action to address climate change by enhancing implementation of the Convention
決定文(抜粋)：

The Conference of the Parties,

Resolves to engage in a dialogue, without prejudice to any future negotiations, commitments, process, framework or mandate under the Convention(傍線は筆者による), to exchange experiences and analyse strategic approaches for long-term cooperative action to address climate change that includes, inter alia, the following areas:

- (a) Advancing development goals in a sustainable way
- (b) Addressing action on adaptation
- (c) Realizing the full potential of technology
- (d) Realizing the full potential of market-based opportunities;

2. Further resolves that the dialogue will take the form of an open and non-binding exchange of views, information and ideas (傍線筆者) in support of enhanced implementation of the Convention, and will not open any negotiations leading to new commitments (傍線筆者);

途上国や米国の目がいかに不信感に満ちているかが明らかである。

他方で、MOPの方をみると、先進国の第2約束期間の数値目標について議論が開始されるという決定があった。これは、もともと京都議定書3条9項に書いてあったことを踏襲しただけであり、今回の会議の成果ではない。また、途上国と京都議定書から離脱しMOPには参加すらしていない米国については、数値目標議論の対象外であるために、COPのような但し書きも特段ついていない。

この決定に従って、MOPのもとで交渉が始まることになった。ただし、実際には、米国や途上国を抜きにして、欧州と日本・カナダなどだけで野心的な数値目標に合意することには、各国から強い抵抗があるだろう。欧州は、どこかのタイミングで、米国や途上国の参加をあきらめると思われるが、その時に日本とカナダがどう出るのが重要である。交渉が欧州主導になるために、またもや日本は一方的に不利な条件の数値目標を被ることになりかねない^(注3)。実は産油国であるカナダも、今度は離脱するかもしれない^(注4)。すると、京都議定書は、第2約束期間において、欧州の地域条約に縮小する。欧州は域内で排出権市場を始めた手前、国際的な枠組みによる正統性の付与を常に必要とするので、第2約束期間を放棄することはできないだろう^(注5)。

4. 米国悪玉論は見当違い

モントリオール会議について、日本国内では、

特に一部のテレビ報道で米国を悪玉とし、他を善玉とする論調が日立った。しかし、これは無意味である。京都議定書の抱える問題は構造的な問題であり、米国はたまたま悪玉の役回りになっているにすぎない。これは、1997年当時のクリントン政権が、議会での批准の全く見込みがないにも関わらず、国内政治で環境にやさしいイメージを作り出す都合上、わざわざ自国に不利な形で大規模削減を約束したことに起因している。米国のほうが善玉に見えるような約束の仕方もある。例えば、最近の米国政府発表資料によると、2000年を基準年にすれば日米のほうが排出増加は少なく、欧州のほうが増加しているという。あるいは、国内総生産（GDP）あたりの排出量で言えば、米国ではIT化の進展によって近年急速な改善が見られる。このような指標を用いれば、米国ではなく、欧州を悪玉にすることもできてしまう。

誰が善玉、悪玉ということには意味がない。このように敵対的になってしまう京都議定書の構造こそが問題である。今回のCOP11で米国は席を立つ場面もあったが、その理由についても初日の米国代表のステートメントで明白にしている。「米国のアプローチの原則の1つは、collaboration, not coercion（敵対ではなく、協力）である。そうでなければ、とくに経済成長を必要とする途上国との建設的な議論は期待できない。・・・現在の気候変動枠組み条約における議論は、この原則に反している。現在のところ、この条約のもとでは、将来枠組みについて交渉するつもりはない」（米国政府2005）^(注6)。

注3：米国が抜けると、欧州20数カ国に対して日本など外交上のプレゼンスが小さい数カ国が対峙するということになる。欧州はまず域内で交渉をして全体としてのポジションを固めてから域外諸国と交渉するのが普通であって、この手順は日本などの外部から見ると自分達の都合の良いことに内部で合意して、それを世界に押し付けているように感じる。京都議定書において1990年が基準年になったのはまさにこのような状況によるものであった。

注4：2006年2月に、カナダにおいて、京都議定書支持のリベラル政党から、同議定書には懐疑的な保守党へと政権交代があった。保守党は石油産出州であるアルバータを強固な地盤としており、新環境大臣もこのアルバータ出身のRona Ambroseである。保守党が京都議定書に対してどのような方向性を打ち出すかはいまのところ明らかではない。カナダの数値目標は、国内に石油生産業を抱えていることもあり、日本以上に達成が難しいとされている。今後については、「少数与党であって政権基盤が強いので、明白な脱退をすることは当面なさそうだ。しかし、遵守のための国内措置および排出権調達への予算をつけないなどの形で、サボタージュをする可能性が高い」という見解が多いようだ。

注5：将来枠組みの今後について、詳しくは、巻末参考文献「杉山・シントン2004」、「杉山他2004」を参照されたい。また、筆者らは数値目標の設定方法と各国の排出枠に関する分析ツールを開発したので、これも巻末参考文献「木村・杉山2005」を参照されたい。

この議論は本質を突いている。排出枠を被せあうという京都議定書を採択したことにより、気候変動枠組み条約全体の交渉が非常に敵対的になってしまった。技術開発や技術移転などについても、うかつに口に出すと、後でそれを排出枠と引き換えに交渉材料にされかねないため、実質的な議論が進まない。今回もそうだが、「交渉プロセスを作ります」といった、過去11年の間に、形式的な成果は沢山出て来ているが、それに惑わされると本質が見えなくなる。

5. 日本は2兆円の罰金を支払うのか？

今回の交渉で1つの争点となったのは不遵守の場合の罰則だった。

罰則の内容自体はマラケシュ合意で決まっており、「第1約束期間に数値目標未達成の場合、それを1.3倍した量を第2約束期間の数値目標に上乘せする」となっている。

今回の交渉は、この罰則の法的なニュアンスを巡るものだった。罰則が科された場合、それに従う義務が生じるのか、あるいは罰則というよりは勧告のようなもので、支払う義務はないのか、といった事柄である。これは2年後まで継続して審議することとなった。

ところで、法律臭くて敬遠されがちなこの議論だが、実は重要な内容を含んでいる。賭け金が多いからだ。

日本の排出量は現在基準年（1990年）よりも12%ほど多く、数値目標であるマイナス6%とは大きな隔たりがある。森林吸収や「クリーン開発メカニズム」（CDM）で最大限努力しても、冷静に考えるならば、数値目標に10%程度は足りなくなると予想される。これを金額に換算すると、だいたい2兆円になる^(注7)。

そもそも、京都議定書の数値目標は、達成は難しいかも知れないが、実施に向けて努力するという性質のものだった。京都議定書18条第2文には、罰則を科するためには改正が必要とはっきり書いてある。それが、マラケシュ合意でなし崩し的に罰則が導入されることとなった。まずこれ自体に問題がある。ただし、日本の国会は「マラケシュ合意」を前提として、京都議定書を批准したという事実があるので、法的ニュアンスは別として、この罰則の存在自体は了解したものとして扱わねばならない。しかしながら、国会が批准をした当時、この罰則が2兆円という金額の議論をしていることに気づいていたとは言いがたい。今回モントリオールで議論が始まり、今後2年間継続審議することを契機に、善意によって6%という実施困難な数値目標を掲げたことに起因して、本当にこのような形で2兆円の債務を負うことが適切かどうか、今一度国会で議論すべきだろう。その際には、納税者に支払う意思を問うのみならず、地球

注6：より正確には以下のとおり。まず、米国の方針における5つのキー・コンセプトとして、!途上国の参加、"経済開発、貧困緩和や他の環境問題の解決と一体となった取り組み、#これらの同時解決手段としての技術の重要性、\$敵対的でなく、協調的なとりくみ(we need to pursue our international efforts in a spirit of collaboration, not coercion, and with a true sense of partnership. This is especially true in our relations with developing countries, which have an imperative to grow their economies and provide for the welfare of their citizens)、%民間部門との協働、を掲げている。以上を述べた上で、現在の気候変動枠組み条約の下での京都議定書をベースとした形での国際交渉は、この米国のアプローチと相容れず、(アジア太平洋パートナーシップなどの)技術に関する国際協力によるほうが、同条約の目的とする温暖化防止にも資するとしている。

"However, formalized discussions under the Framework Convention $\hat{=}$ which is the current proposal by some Parties $\hat{=}$ are in fact negotiations. The U.S. position remains constant: we see no change in current conditions that would result in a negotiated agreement consistent with the U.S. approach.

The United States seeks to focus attention on progress toward the shared objectives of the Framework Convention rather than to detour positive approaches toward a new round of negotiations based upon the Kyoto Process. We are not a Party to Kyoto Protocol and we do not support such an approach for future commitments.

U.S. climate policy is founded upon the conviction that actions bring results. We believe that it is best to address this complex issue through a range of programs and technology initiatives that address climate change issues through partnerships based upon both near-term and longer-term sustainable development and clean energy partnerships."

注7：この概算の根拠は以下の通り。(数値目標未達分10%) × (第1約束期間5年分) × (日本の年間排出量10億トン) × (CO₂の価格30ドル) × (110円/ドル) × 1.3倍 = 2兆円。

規模の視点からの議論を喚起することも重要である。困難な数値目標にチャレンジするとその国の債務になって跳ね返ってくるというようなおかしい先例を作ることが、温暖化防止の国際的枠組みづくりに役立つだろうか？ それを見て、米国が、中国が、同じ枠組みに入ろうと思うだろうか？ 京都議定書第2約束期間が仮にあるとして、野心的な数値目標を掲げることが難しくならないだろうか？

6. CDMなど制度整備は進むが、理想には遠い

公正を期するために、今回の「成果」についても触れておきたい。京都議定書にどのような問題点があるにせよ、第1約束期間については国際法として国会で批准したのだから、その達成のために、日本は努力せねばならない。マラケシュ合意の内容を特段の紛糾なしに採択したこと、CDMや「共同実施」(JI)の運営に関するいくつかの政治的判断を下したことによって、第1約束期間のための制度的インフラの整備には進捗が見られた。日本政府が進めている「CDMの将来」などのCDM制度整備補助事業への積極的な言及もあった。

ただし、道のりは遠い。京都議定書採択時には、京都メカニズムは「市場メカニズム」として期待されていた。いわく、数値目標が未達成になりそうな場合には、世界規模の排出市場を活用して、効率よく排出削減ができるというのが謳い文句であった。

現状は、これには程遠い。CDMは、すっかり「政治メカニズム」になってしまい、手続きばかり煩雑で、効率性など消し飛んでしまった。「CDMの将来」を含めて、現在のCDM制度整備のさまざまな活動は、CDMを少しでも当初構想された市場メカニズムに近づけるためのものである。どんなに楽観しても、日本の数値目標の未達成分をすべて補うほどの

排出削減クレジット(CER)を期待することはできない^(注8)。

7. アジア太平洋パートナーシップ

COP・MOPと並行して、2006年1月にシドニーで、日・米・豪・中・インド・韓の6カ国で「クリーン開発と気候に関するアジア太平洋パートナーシップ」に関する政府間会合が開かれた。これは米国主導の枠組みであり、京都議定書とは異なるアプローチとして、技術開発に関する協力を進めるというものである。気候変動枠組み条約の惨憺たる現状を直視すれば、このパートナーシップに限らず、技術開発、そして既存技術の途上国への普及に関する国際的な枠組みを強化していくことが有望な路線であろう。この考え方は、産業構造審議会の下に設置された将来枠組み専門委員会で今秋に提示された。日米と中印は、気候変動枠組み条約では数値目標を被せあう敵同士であるが、クリーンコールテクノロジーや省エネでは共通の課題を持った友人である。敵対的な枠組みを離れ、国産エネルギーの活用や省エネといった共通課題のもとで友好的に取り組むことが、温暖化問題の真の解決にとって、より実効性の高いアプローチといえよう^(注9)。

8. 硬直的な組織となった京都議定書

一人ひとは善意で懸命に働いているのに、全体としては事実が見えなくなり、世論は誤り、その結果として、政治家も判断を誤り、結果として破局を迎える。京都議定書第2約束期間を巡る動向は、まるで敗戦の構図と同じになってきた。

政府は、京都議定書の第1約束期間が既定路線として存在するために、論理的には第2約束期間は全く白紙であるといっても、実務

注8：CDMの現状と問題点について、詳しくは、巻末参考文献「杉山・上野 2005b」を参照されたい。

注9：技術開発を中心とした将来枠組みについて、詳しくは、巻末参考文献「杉山・上野2005a」を参照されたい。

上は大きな路線変更を議論するには勇気が必要
るし、予算措置も京都議定書を継続する方向
性に手厚くなる。国際交渉をすれば、環境大
臣が団長となることもあり、まさか無駄な議
論をして帰ってきましたとは言えない。交渉
は毎回必ず成功したと政府発表される。しか
し、実際には、新しい交渉題目や交渉予定を
作るだけであり、第2約束期間に関する交渉
は、実体面での破綻はもはや明白だ。

しかし、「交渉は成功した、京都議定書路線
は継続する」と政府が発表すると、マスコミ
も、他の情報源が乏しいものだから、だいた
いその論調になる。また、米国という格好の
敵になる題材があると、簡単に敵味方の図式
で割り切ろうとし、京都議定書の構造的な問
題については報道されない。このような、分
かり易いが大変に誤った見方は、マスコミか
ら国民へ、さらには国民を見て行動する政治
家へと反映される。

このままでは、「全ての国が参加する京都議
定書第2約束期間」という幻影を集団催眠状
態で信じて、実際には温暖化防止には意味の
ない枠組みのもとで、2兆円の負債を抱え、
第2約束期間ではさらに厳しい数値目標を日
本だけが背負うということになりかねない。

京都議定書は、実体面では破綻しているが、
組織面では、国際・国内に広がった巨大な魔
物になってしまった。行政・マスコミ・政治
における負の連鎖を断ち切ることは容易では
ないが、決してあきらめず、事実を明らかに
していくことで、温暖化防止に真に資する将
来枠組みを実現していかなければならない。

参考文献

- (1) 木村幸、杉山大志 (2005)「地球温暖化防止の将来枠
組みにおける数値目標設定手法の検討―部門別数値目
標分析ツールの開発と分析―」電力中央研究所研究調
査資料、平成17年10月。
- (2) 杉山大志、ジョナサン・シントン (2004)「条約のオ
ーケストラ-複数の条約による温暖化防止将来枠組みシ
ナリオ 研究報告: Y03013」電力中央研究所、平成16
年3月 (<http://www.bookpark.ne.jp/denken/pdf.asp>)
- (3) 杉山大志他(2004)「地球温暖化防止の将来枠組みシナ
リオ 研究報告 Y03012」, 電力中央研究所
- (4) 杉山大志, 上野貴弘 (2005 a)「技術開発普及を中心
とした将来枠組みシナリオ-京都議定書後の温暖化防
止国際制度論考- 研究報告: Y04023」電力中央研
究所、平成16年3月 ([http://www.bookpark.ne.jp/denken/
pdf.asp](http://www.bookpark.ne.jp/denken/pdf.asp))
- (5) 杉山大志・上野貴弘 (2005 b)「クリーン開発メカニ
ズム (CDM) の現状と課題」, オペレーションズ・リサ
ーチ 経営の科学, 2005年7月号, pp447-452, 日本オ
ペレーションズ・リサーチ学会
- (6) 日本政府(2005)「気候変動枠組み条約第11回締約国会
議 (COP11) 京都議定書第一回締約国会合 (COP/MOP1)
概要と評価 (11/28-12/9 於: モントリオール)
[http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/kankyo/kiko/cop11_2_gh.
html](http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/kankyo/kiko/cop11_2_gh.html)
- (7) 米国政府(2005) "Statement of Dr. Harlan L. Watson,
Senior Climate Negotiator and Special Representative and
Alternate Head of U.S. Delegation, U.S. Department of State,
COP 11/MOP 1 Press Conference Montreal, Canada
November 29, 2005." (2005年11月29日 12:00米国政府代
表団記者会見) [http://unfccc.streamlogics.com/unfccc/agenda.
asp](http://unfccc.streamlogics.com/unfccc/agenda.asp)で、会見の様子を見ることができる。

[寄稿]

CO₂の貯留・隔離に関する政策的な取組み —IPCCにおける位置づけと国内外動向—

西 尾 匡 弘 (経済産業省 産業技術環境局
環境政策課 課長補佐)



はじめに

現在、経済産業省（地球環境対策室）で、IPCC『第4次評価報告書』を策定する作業の支援を進めており、私が担当しております。今日は、大気中の二酸化炭素（CO₂）濃度の現状と対策について簡単に触れた後、IPCC（気候変動に関する政府間パネル）とは何かから始めて、2005年9月にIPCCで承認された『二酸化炭素の回収・貯留に関する特別報告書』（以下、『CCSに関する特別報告書』）の意義についてご紹介したいと思います。

さらに、現在IPCCが行っているCO₂をはじめとする温室効果ガスの排出インベントリーガイドラインの改訂作業について、また、策定中の『第4次評価報告書』におけるCCSの取り扱い方についてご紹介します。

次に、世界と日本の温暖化ガスの排出動向についてお話しします。CCSは、2005年9月に『CCSに関する特別報告書』がIPCC総会で採択されてから、京都議定書第1回締約国会合（COP/MOP1）の間でも、先だってシドニーで開催された「クリーン開発と気候に関するアジア太平洋パートナーシップ」（APP）閣僚級会合でも、CO₂削減のために取り入れられる技術として議論されるようになっていきます。

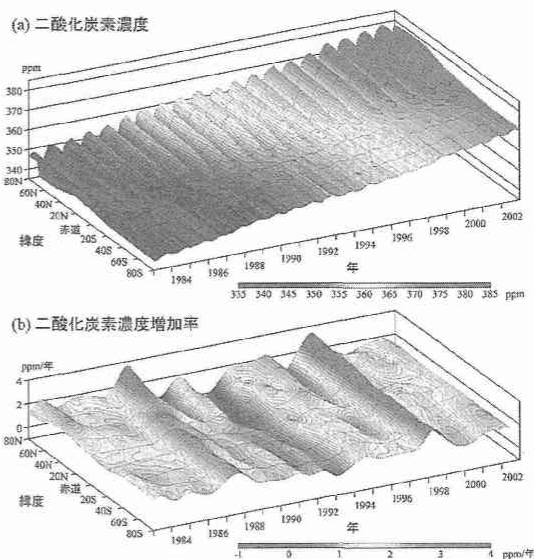
最後に、今後の政策の取組みについて、「国内的な」という意味を若干込めさせて頂き

ます。国内でCO₂の回収・貯留を今すぐにも実施しようという話にはなっていません。そこで、どうCCSに取り組もうとしているのかご紹介させていただければと思っています。

大気中CO₂濃度の現状とCCS

CO₂濃度の経年変化

図1はCO₂濃度の上昇が緯度によって変わってくることを示しています。図2は、1958年からハワイ島のマウナロアでCO₂濃度を測っておられたキーリング博士の観測結果（「キ



（出所：『気候変動監視レポート2004』気象庁）

図1 大気中CO₂濃度の経年変化と緯度

*本稿は、今年1月27日の当所月例研究会（第242回）におけるご講演を本誌掲載用にテープ起こししたものです。

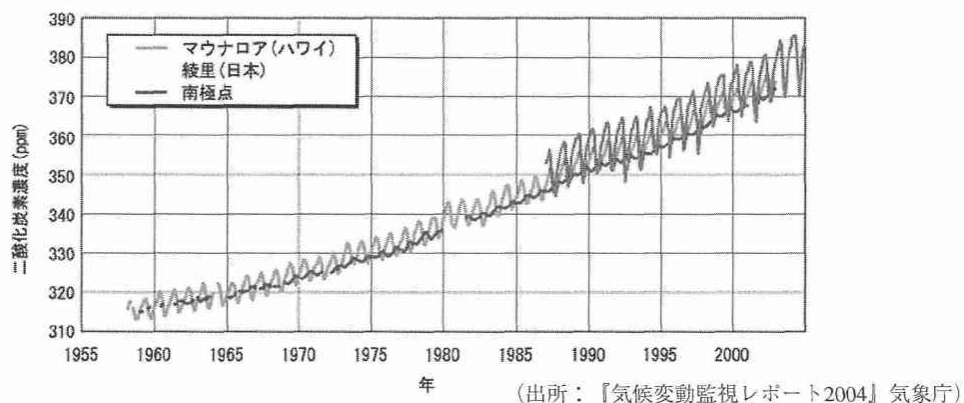


図2 日本、ハワイ、南極点におけるCO₂濃度の経年変化

ーリング・カーブ』)に、日本と南極点でのデータを加えて示しています。日本ではマウナロアよりも振幅が大きく、380 ppmになろうとしています。

CCSの発想

大気中に蓄積されるCO₂を根本的に減らすにはCO₂を出さないエネルギー源の確保が必要です。ですから、「原子力発電」と「再生可能エネルギー」を今後どう使っていくかが大きな課題になっていきます。

一方で、化石資源に頼らざるを得ない部分も多分にありますから、出てきたCO₂を集めて大気に出さない方法、すなわちCO₂を回収・隔離するという方法があります。その場合、CO₂を置く場所は、海中、地中、宇宙の3カ所しかありません。海洋隔離では、海水に溶解させて希釈するか、海底の3,000m以深で湖のような状態を作って溜めておくかがあります。地中貯留では、使わなくなった廃油井や帯水層の中に入れてしまう方法が考えられます。

IPCCによる取り組み

IPCCと評価報告書の影響力

IPCCは、気候変動に関する科学的な評価を

行い、各国政府が進めるべき政策の基礎となる科学的知見を総合的に示すために、世界気象機構(WMO)と国連環境計画(UNEP)主催の下に、1988年11月に設置された機関です。3つの作業部会と温室効果ガス・インベントリー・タスクフォース等で構成されています。気候変動のメカニズム、その対応策、もしくは気候変動による影響について、基本的にはオーソライズ済みの研究成果を集約して、それを評価しています。

IPCCの報告書は、国際的にも国内的にも非常に重要だと認識されてきています。科学者にとっては、多少のタイムラグがあるにしろ科学的な知見が専門家たちによってレビューされることで、研究動向等を把握できるとともに、自らの研究成果をIPCC報告書に反映してもらえることが研究の動機づけにもなります。政策立案・決定者にとっては、国際交渉の際、「IPCCではこう言われている」と引用して自国の論理を補強するために活用されるという側面があります。

例えば、『第1次評価報告書』(1990年8月採択)が出た後、1995年の国連気候変動枠組条約(UNFCCC)で地球温暖化現象が国際的に認知されました。緩和策の検討も行われた『第2次評価報告書』(1995年12月採択)が出た後、1997年にはUNFCCC第3回締約国会議(COP3)で京都議定書が採択されています。『第3次評価報告書』(2001年9月採択)が出た後、2001年11月には京都議定書の運用細則

を定めるルールブックとしての「マラケシュ合意」がCOP 7で採択されています。IPCCの評価報告書が出される度にUNFCCCでも動きがあるということが分かります。

『第4次評価報告書』は2004年から執筆作業が開始されています。『第3次評価報告書』以降の成果を中心に取りまとめており、私の担当している第3作業部会（緩和対策に関する作業部会）では、今、専門家レビューが終わり、7,000件という膨大な数のコメントを『第4次評価報告書』に反映させる作業を始めたところです。2007年4月に本文が完成し、最終的な統合報告書は2007年9月に完成する予定です。

『CCSに関する特別報告書』が出た経緯

2005年に京都議定書が発効したことで、色々な動きが出てきました。また、IPCCでは2005年に2つの特別報告書、すなわち『オゾン層と温暖化に関する特別報告書』と『CCSに関する特別報告書』を発行しました。

『第2次評価報告書』でも『第3次評価報告書』でも「CO₂の回収・貯留はまだ研究段階だけれども有効かつ必要となるオプションである」という記述がいくつかあります。それが、2001年、COP 7の時、産油国サウジアラビアから「地中貯留に関する技術レポートを作ってくれ」という要請がありました。それを受けて、IPCCがCCSに関するワークショップで海洋隔離まで含めた特別報告書の作成を決定し、2年半ほどの年月をかけて、特別報告書が完成・承認されたということです。

『CCSに関する特別報告書』の構成

この報告書は、IPCCが単一の技術について取り上げた初めての報告書です。図3のような表紙の報告書が出ていますが、2005年1月の時点で正式に出ているのは政策決定者向けの要約（Summary for Policymaker）と技術的な

要約（Technical Summary）の部分だけです。本文についてはまだ正式なものはありませんが^(注1)、ようやくこの報告書が完成したところです。

報告書は、表1に示すように全9章で構成されています。図4はCCSの適用概念です。基本的には色々な化石資源を燃やして出てくるCO₂を産業界や発電といった大量排出源から集め、海に入れるのか、地中に埋めてしまうのか、はたまた工業的に使うのか、といった形でCO₂が流れていきます。一方、石炭、バイオマス、ガス、石油といったCO₂を排出

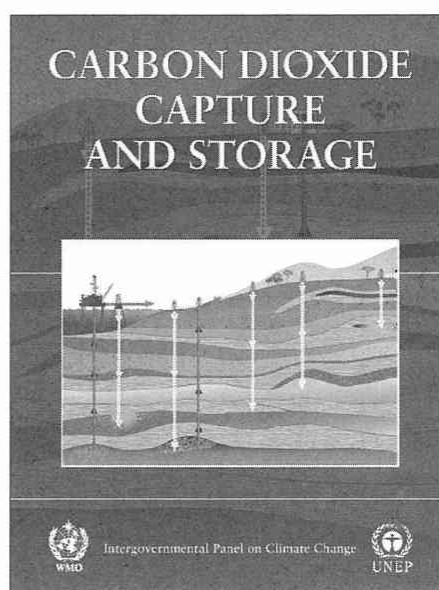


図3 『CCSに関する特別報告書』の表紙

表1 目次

1章：	序 (Introduction)
2章：	排出源 (Sources of CO ₂)
3章：	回収 (Capture of CO ₂)
4章：	輸送 (Transport of CO ₂)
5章：	地中貯留 (Underground geological storage)
6章：	海洋隔離 (Ocean storage)
7章：	炭酸塩化と工業的利用 (Mineral carbonation and industrial uses of CO ₂)
8章：	コストと市場ポテンシャル (Costs and economic potential)
9章：	回収貯留技術の温暖化ガス排出 インベントリーと算定の役割 (Implications of CO ₂ capture and storage for greenhouse gas inventories and accounting)

注1：2006年2月に正式に公開発行された。

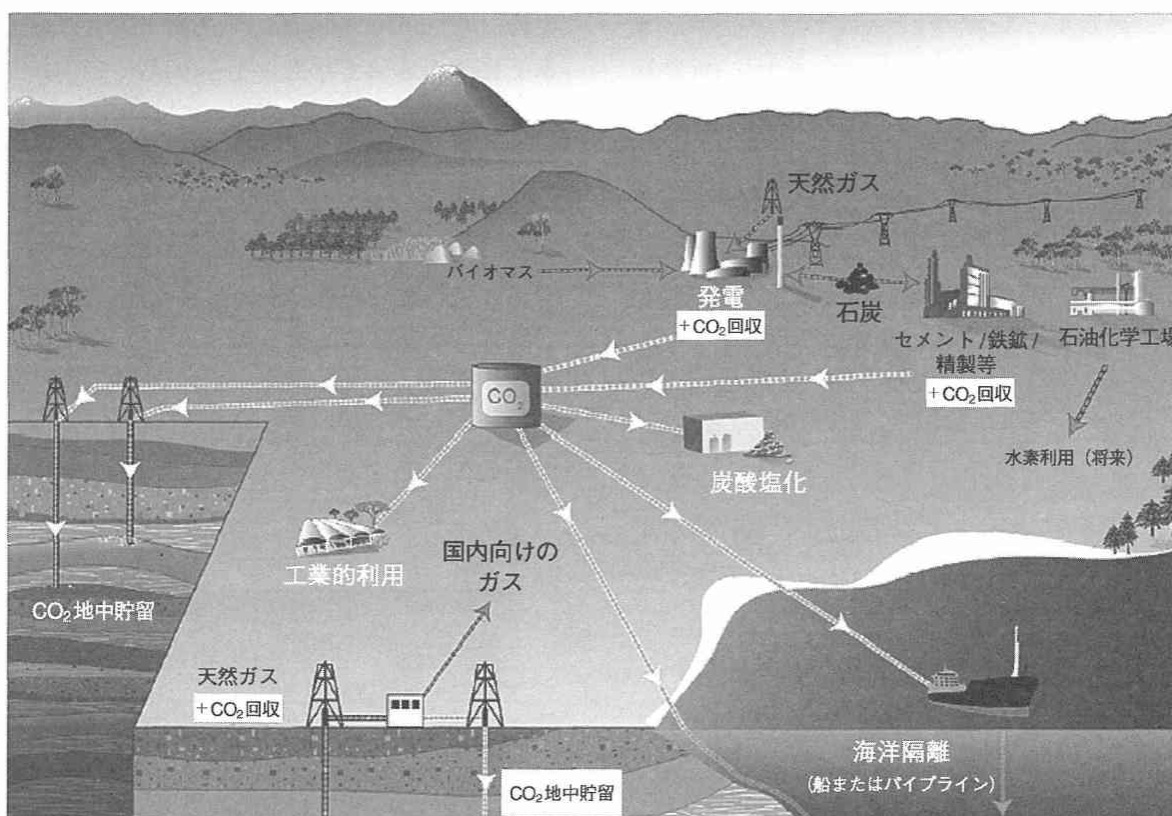


図4 CO₂回収・貯留の概念図

する燃料の流れが示されています。

政策決定者向け要約では、CO₂の回収・貯留とは一体何で、どれぐらい使えるものなのか、どういう特徴があるのかといったことについて、Q&A形式で答えています。次のステップとして、技術的なレベルの紹介と今後の方向性が示されました。

国別排出インベントリーガイドラインの改訂

現在、温室効果ガスの「国別排出インベントリーガイドライン」の改訂が行われています。ガイドラインは温室効果ガスの人為起源排出源からの排出と吸収源による除去を推計するための手法です。『CCSに関する特別報告書』が2005年9月にIPCCで承認されたことで、それを引用しつつ記述がなされています。改訂中のインベントリーガイドラインは、2006年4月のIPCC総会で承認される予定ですが、その中で初めてCCSのガイドラインが1項目設けられようとしています。

実は、CCSに関連したCO₂排出の削減量をどう勘定するかについて国際的な合意はまだありません。例えば、1996年に始まったノルウェーのスライプナー・プロジェクトでは既に帯水層にCO₂を送り込んでいますが、ノルウェーのCO₂排出報告書を見ると、1年間にどれだけのCO₂を入れましたという記述は一切ありません。圧入システムが動いていなかったときに大気中に出ていたCO₂量とユーティリティーから出たCO₂量の和を排出量として報告しています。CO₂の排出量、回収量、圧入量という収支を報告しているわけではないのです。

今後、国際的にCO₂がどれだけ減らせたか議論する際には、それでは駄目で、どうカウントすればいいのかルールづくりをしなければいけません。そうでないと、CCSは使える段階に到達したとは言えません。つまり、京都メカニズムのようなものを使うにしても、途中段階をどう考えるか明確にし、科学的にどれだけ減らしたことになるのかといったガイドラインができることが期待されています。

基本的に改訂中のガイドラインでは、CCSはエネルギーのところで記述されています。ジオロジカル・ストレージ（地質学的貯蔵）という1章が新設されます。その他にステーションナリー・コンバストション（固定燃焼）、インダストリー・プロセス（産業プロセス）のところにも出てまいります。図4のCO₂排出分をどう勘定するかをガイドラインで策定しているわけです。いずれにしろ、産業プロセスの途中で大気に出た場合、「どれだけ排出されているのか測る」というのが基本になっているので、その辺が運用上非常に煩雑だということで議論になっています。

改訂ガイドラインは早晩でき上がります。最終案がそろそろ出てくるはず（注2）。

『第4次評価報告書』とCCS

『第4次評価報告書』の構成を少しだけお話しします（注3）。

『第1次評価報告書』から『第4次評価報告書』までの一連の検討は、気象の専門家たちが中心になってまとめておりますが、新しい報告書では緩和策が中心になりつつあります。緩和策は私が担当している第3作業部会が対応している部分です。緩和策の中では、CCSが今後どう取り扱われてくるかというのが議論の対象です。

今、全体が13章で4部構成になっています。特徴は、セクター別に具体的な排出緩和策やコストを取り上げていることです。実は、農業・林業の章以外の全ての章に、何らかの形で「CCSを使うのが効果的である」という記述が入っています。

例えば、第3章は中長期シナリオの章で、2030年、2050年、2100年にCO₂の排出がどうなるか検討されたシナリオを評価しています。その中で、CO₂排出量を減らしていくには、

原子力に限らず、CO₂を出さない電力源を確保するとか、CCSを使うしかないということが示されてきています。

第4章はエネルギー供給です。本来、エネルギー起源のCO₂の発生が非常に多いこともあって、この章でCCSについての技術的バックグラウンドが紹介されることになっています。

第5章は輸送と輸送インフラの章です。分散排出源である車や飛行機といったものにおいても、CO₂排出を抑制するためにCCSと組み合わせた技術が有効であるということが書かれ、「かなり重要なオプションだ」という言い方がされています。

第7章は産業の章です。アンモニア生産（水素製造）をする際にCCSとの組み合わせが非常に効果的だという記述があります。もちろん、鉄鉱業、セメント産業でもCCSがCO₂排出削減策のオプションであると書かれています。

CO₂排出抑制への国際的な取り組み

アメリカ主導の国際的な取り組み

アメリカは、京都議定書を批准していません。今後、政権が変わっても多分しない、できないだろうと考えられます。国際交渉を担当する身としては、やはりアメリカが参加してくれない枠組みでは実効力ある排出削減策などおぼつかないことは重々承知しています。ですから、アメリカにも色々な形で協力を問いかけているわけです。

今後、中国、インドがCO₂排出量を増やしてくると予測される中で、最大の排出国であるアメリカが何もしないと言われるのは困るので、アメリカがリーダーシップをとっ

注2：2006年3月末に最終案が各国政府に提示された。

注3：『第4次評価報告書』は現在、ドラフト段階であり、本稿で記述されたものが最終的な報告書に掲載されるものかどうかは保証されていない。

表2 クリーン開発と気候に関するアジア太平洋パートナーシップ閣僚級会議の声明文（抜粋）

<概要> ○本パートナーシップは、2005年7月28日に発足。参加国は、米国（主催国）、豪州、中国、インド、韓国、日本の6カ国。2006年1月に閣僚級会合が開かれた。 ○本パートナーシップの目的は、増大するエネルギー需要に対応するとともに、環境汚染、エネルギー安全保障、気候変動問題へ対処すること。具体的には、クリーンで効率的な技術の開発・普及・移転のための地域協力を推進する。 <ビジョン声明の抜粋> ●我々は、増大するエネルギー需要に対応するとともに、大気汚染、エネルギー安全保障、温室効果ガス原単位などの関連する挑戦に対処するため、協力を強化する。 ●この目的に向け、我々は、国連気候変動枠組条約の原則と整合しつつ、クリーンで効率的な技術の開発・普及・移転を図るとともに、環境汚染の減少、エネルギー安全保障と気候変動への懸念に対応するための新たなパートナーシップを創設する。 ●このパートナーシップでは、既存の、又は、現出しつつあるコスト効果的な技術、クリーンな技術やプラクティスの開発・普及・移転を可能とする環境を作り出すために協力する。協力の分野としては、省エネ、クリーン石炭技術、石炭ガス化複合発電、天然ガス、炭素隔離、コージェネ、メタン回収、原子力発電、地熱、遠隔地の電力システム、先進交通、建築、バイオエネルギー、農林業、水力、風力、太陽光、その他の再生可能エネルギーが含まれる。 ●また、このパートナーシップでは、長期的な転換をもたらすエネルギー技術の開発・普及・移転のために協力する。中長期的な協力の分野としては、水素、ナノ技術、先進バイオ、次世代原子力、核融合が含まれる。 ●我々は、このビジョンの要素、その実施に関し、非拘束の協定を策定する。その中で、制度的・資金的な取り決めや、他の関心を有する国々を含める方途を含む枠組みを検討する。 このパートナーシップは、気候変動枠組条約の下での我々の努力に整合的であり、貢献するものである。また、京都議定書を代替するものではなく、これを補完するものである。
--

て、技術で温暖化問題を解決すべきということを主張しています。中でも、CCSに関しては、「炭素隔離リーダーシップフォーラム」（CSLF）が2003年6月から動いています。今、20カ国プラスEUが参加して議論がなされています。

また、アメリカ主導で「クリーン開発と気候に関するアジア太平洋パートナーシップ」（APP）が2005年7月に立ち上がりました。アメリカ、オーストラリア、日本、インド、中国、韓国の6カ国が参加しているということで、かなり大きなインパクトを与えるものだと思います。と言いますのも、CO₂の排出量がこの6カ国だけで世界の約半分を占めているからです。電力消費量もそうです。資源の消費量に関しても、セメントでは6割を消費しているという状況です。

参加6カ国の中で、京都議定書を批准して排出削減義務を負っている国は日本だけです。それ以外の国は京都議定書の排出削減という義務を負っていません。日本が加わってこういう枠組みが作られているということが非常に象徴的な話になります。

表2に示すように、パートナーシップの目標は、高まるエネルギー需要に対応するとと

もに、気候変動問題に対処すること、具体的にはクリーンで効率的な技術の開発・普及・移転のための地域協力の推進です。2006年1月11日、12日にシドニーで閣僚級会議が開催され、協力する分野について共同声明を発表し、石炭のクリーン利用との組み合わせでCCSについても触れられました。

COP/MOP1でのCCS

モントリオールで開催されたCOP/MOP1（2005年12月）でCCSがどう取り上げられていたかお話しします。2005年9月に『CCSに関する特別報告書』が採択されたので、COP/MOP1では「科学および技術の助言に関する補助機関」（SBSTA）とIPCCが合同でサイドイベントを開催しました。そこでは、CCSの現状の説明と特別報告書の宣伝がなされました。

実は、COP/MOP1でも議論になった「CCSを京都メカニズムに使う。クリーン開発メカニズム（CDM）として途上国でのCO₂埋め戻し事業をサポートしてクレジットになる形を作りたい」ということについて、日本から2つの新しい方法論を提案しています。1つは、CO₂を地中に圧入して石油を増産す

るEOR (Enhanced Oil Recovery) を用いた手法に関する方法論、もう1つは帯水層貯留を用いた手法に関する方法論です。それについては、2006年冬に開催されるCOP/MOP 2までに方向を決めておこうという議論がなされました。CCSが排出削減策として認めてもらえるよう議論しているところです。

G 8 サミットでの行動計画

2005年夏のG 8 サミットで、「グレンイーグルス・サミット行動計画」が策定されています。その中で電力分野の低炭素化と国際エネルギー機関 (IEA) の役割強化が合意されました。電力分野の低炭素化というのは、石炭火力から排出されるCO₂について、CCSを推進することで温暖化防止につなげようということが記述されています。IEAの役割強化では、このCCSの石炭火力への適用可能性検討も盛り込まれています。この辺の活動に関しては、2008年に予定されている日本でのG 8 サミットで報告されることになっています。

日本国内における CCS

政府部内でのCCSの位置づけ

現在、日本政府にとっての一番の問題は、京都議定書の目標をどうやって達成するかということです。CO₂排出量を1990年レベルから6%削減しなければいけないのですが、現状で既に1990年レベルを7~8%オーバーしてしまっています。しかし、「京都議定書目標達成計画」の中では、CCSに関する具体的な記述はありません。もともと、これほど早くCCSを使おうという議論が国際的に進むとは考えられていなかったものですから、それは仕方がないことだったと考えます。

一方、内閣府の総合科学技術会議では、他

のCO₂排出削減対策とともに、CCSがどれだけ使える技術なのか、どれぐらい資金をかけて技術開発をすべきかといった議論がなされています。先日終了した「温暖化対策調査検討ワーキンググループ」の中で、技術開発と普及促進策の必要性について評価が示されました。CCSは技術開発を行うことが重要であり、将来、日本での使用だけでなく海外でも普及させることも検討されています。

資源エネルギー庁で2005年に出された「超長期エネルギー技術ビジョン」では、2100年までの展望の中で、ケースA (化石資源100%、ただしCCSとセット)、ケースB (原子力100%、ただし核燃料サイクルとセット)、ケースC (再生可能エネルギー100%、究極の省エネルギーとセット) 3つの極端なケースを想定したシナリオを検討しています。ケースAではCCSが1つのオプションとして考えられています。他にも色々な所でCCSが話題になりつつあります。

仮に、「京都議定書目標達成計画」の中でCCSが絡んでくることがあるとすれば、「京都メカニズム」という枠を使って、海外との協力でCO₂を減らす方策を考えるべきだろうということで色々検討しています。

CCSに関する技術開発

技術開発については、経済産業省『地球温暖化防止新技術プログラム』でプロジェクトを運営しています。「海洋隔離プロジェクト」、

表3 CO₂固定化・有効利用技術の開発

○基盤的研究
プログラム方式二酸化炭素固定化・有効利用技術開発 [継続]
○回収・隔離・貯留
低品位廃熱を利用する二酸化炭素分離回収技術開発 [継続]
分子ゲート機能CO ₂ 分離膜の技術研究開発 [新規]
二酸化炭素の海洋隔離に伴う環境影響予測技術開発 [継続]
二酸化炭素地中貯留技術研究開発 [継続]
二酸化炭素炭層固定化技術開発 [継続]
二酸化炭素大規模固定化技術開発 [継続]
○国際協力
地球環境国際研究推進事業 [継続]
地球環境国際連携推進事業 [継続]

「地中貯留プロジェクト」、それから「炭層固定プロジェクト」等です。現在、CCSの実用化を図るために「CO₂固定化有効利用技術戦略マップ」を出していますけれども、そのブラッシュアップ作業をしている最中です。

具体的に、実際に技術開発でCCSが関連しているところだけ表3に示しました。

海洋隔離の重要性

現在、議論されているCCSは地中貯留が中心であり、勿論、そちらから着手されていくということになります。しかし、わが国では海洋隔離を実現できると量的可能性が高くなりますから、CCSに関する現在の議論では少しトーンダウンしている海洋隔離もしっかり位置づけて、サポートしていくべきではないかという議論はあります。

先ほど触れた「超長期のエネルギー技術ビジョン」では、地中貯留・海洋隔離をエネルギー転換部門、産業部門でのCO₂削減技術の1つとして位置づけています。

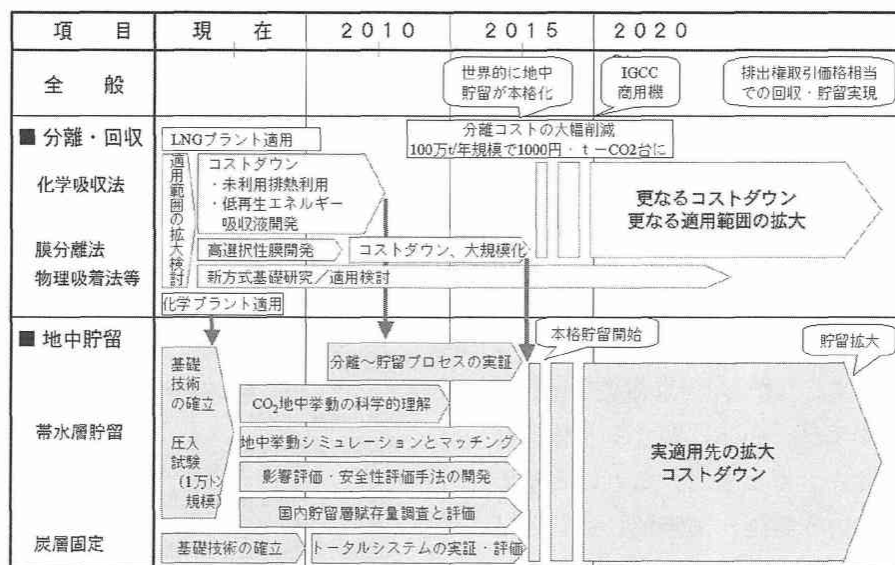
図5に示したのは、昨年産業構造審議会・産業技術分科会で出されたロードマップ

で、分離回収と地中貯留の部分を抜粋したものです。CCSは、今すぐに実行しろと言われても、技術面、コスト面等を考慮してどこが問題になってきて、いつ頃どういうふうに見えるようになるのか考えなければいけません。

さいごに

2010年が目前に迫ってきました。京都議定書第1約束期間（2008～2012年）にCCSを使えるかどうかということには議論もありますが、少なくともわが国の研究開発から見たときには、コストダウンという課題をどうクリアしていくかが重要です。それから、日本近海、もしくは日本の国土の中でCCSが使えるのかということも検討していかなければいけません。こういったことも含めて、CCSが有効な政策ツールの1つであるということはず間違いなさだろうと考えます。

ご静聴ありがとうございました。（拍手）



（出所：産業構造審議会産業技術分科会研究開発小委員会資料より抜粋）

図5 CO₂分離・回収と地中貯留のロードマップ

[寄稿]

CO₂の貯留・隔離の研究開発動向

大 隅 多加志 (財電力中央研究所 地球工学研究所
地圏科学領域上席研究員)



はじめに

1986年に、アフリカのカメルーンのニオス湖で、一晩のうちに30万~40万tという二酸化炭素(CO₂)が湖水から吹き出して谷を流れ下り、1,600人が亡くなり、2~3万頭の家畜が一瞬のうちに死ぬという大変なことが起こりました。私も、大学に職を得ていた関係で、現地で色々な調査をしました。CO₂というのは植物の光合成に必要となるもので、本来は毒物ではないのですが、大量に一カ所に突然出てくると、窒息という思わぬ事態に至ることが分かりました。

「気候変動に関する政府間パネル」(IPCC)は、2005年9月に『二酸化炭素の回収・貯留に

関する特別報告書』(SRCCS)を承認いたしました。図1のような表紙の報告書が2006年に正式に出版されますが、カメルーンでの災害のことを考えますと、二酸化炭素の回収・隔離(CCS: Carbon dioxide Capture and Storage)は議論を呼ぶ技術だと思います。SRCCSがIPCCから出されるに至ったことについて、私は正直なところ驚いています。と言いますのも、世界中でCCSを真剣に考え始めて20年も経っていないので、「気がついたらこの技術でCO₂が回収されて貢献している」という目立たない存在であってよいというのが世界の主流の考え方だと思っていたからです。そんな訳で、このSRCCSは、重要な書物になるだろうから、少しでも多くの方々がアクセスし易くなるようにと、経済産業省の肝入りで、日本語版の出版も予定されています。表1にその目次を示します。

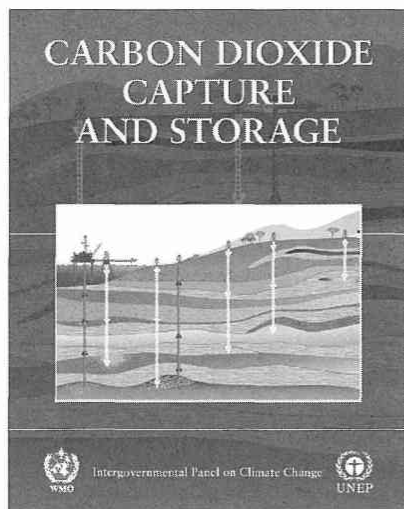


図1 SRCCSの表紙

表1 報告書の全体構成

- | | |
|---|--|
| 1 | 序
(Introduction) |
| 2 | 発生源
(Sources of CO ₂) |
| 3 | 回収
(Capture of CO ₂) |
| 4 | CO ₂ の輸送
(Transport of CO ₂) |
| 5 | 地下地質貯留
(Underground geological storage) |
| 6 | 海洋貯留
(Ocean storage) |
| 7 | 鉱物炭酸化と工業利用
(Mineral carbonation and industrial uses of CO ₂) |
| 8 | 費用と市場性
(Costs and economic potential) |
| 9 | 二酸化炭素回収貯留の温暖化ガス収支と
計数への関連
(Implications of CO ₂ capture and storage for
greenhouse gas inventories and accounting) |

*本稿は、今年1月27日の当所月例研究会(第242回)におけるご講演を本誌掲載用にテープ起こししたものです。

実は、私は、海洋隔離の章（第6章 Ocean Storage）の執筆者の1人として、この報告書の作成に係わって参りました。今日お話しする地中貯留の第5章の執筆には直接関係していませんが、執筆者たちの作業が隣室で行われていたことや執筆者たちと顔なじみでもあることから、地中貯留に関して行われた色々な議論を知る立場にありました。今日はそれらの議論の一端をお伝えするとともに、研究者としてSRCCSをどう受け止めているのかをお話しできればと思います。

CO₂地中貯留

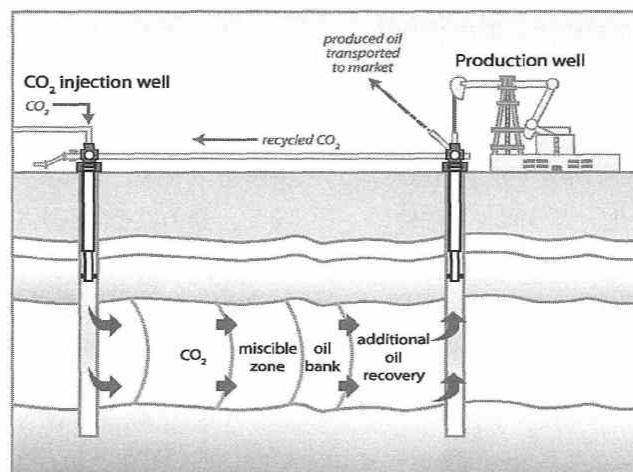
温暖化対策としてのCCS

私は、CCSが地球温暖化問題に関心を持っている人たちの目に止まったことでこの技術が表舞台に出てきたのだと思います。

実は、石油増進回収（EOR:Enhanced Oil Recovery）という技術が北米大陸で確立されています。1970年代から石油生産の際、図2のように、天然に産出するCO₂を地中に圧入して、油層を押し、石油の粘性を低くして石油を増産してきました。

CCSに関する議論は表2のように流れてきました。当初、地球温暖化問題に関心を持つ人たちは、海洋隔離しか知らなかったのですが、「地中貯留はもうやっている」ということに気づいて、EORで使うCO₂を火力発電所から分離回収すれば、温暖化対策になると言い始めたわけです。

実際にEORを行ってきた場所は、水より軽い石油が地下に数百万年以上という長期間溜まっていた場所ですから、浮力を持った臨界状態のCO₂でも地表に出てきにくい場所であることが実証されていると言えます。しかし、「EORは石油がある場所でないと意味がない」という話を拡大解釈して、石油、天然ガスが溜まるような構造を仮定しなくても、将来使



（出所：IPCC, SRCCS）

図2 EORの仕組み

表2 CCSに関する議論の歴史的な流れ

1982年：海洋隔離 vs 地中貯留	M. Steinberg（米国）
1987年：温暖化対策としてのEOR	E. Lindeberg（ノルウェー）
1990年：CO ₂ 帯水層貯留	小出 仁（地質調査所）
1992年：帯水層貯留概念の定式化	Gunter（カナダ）

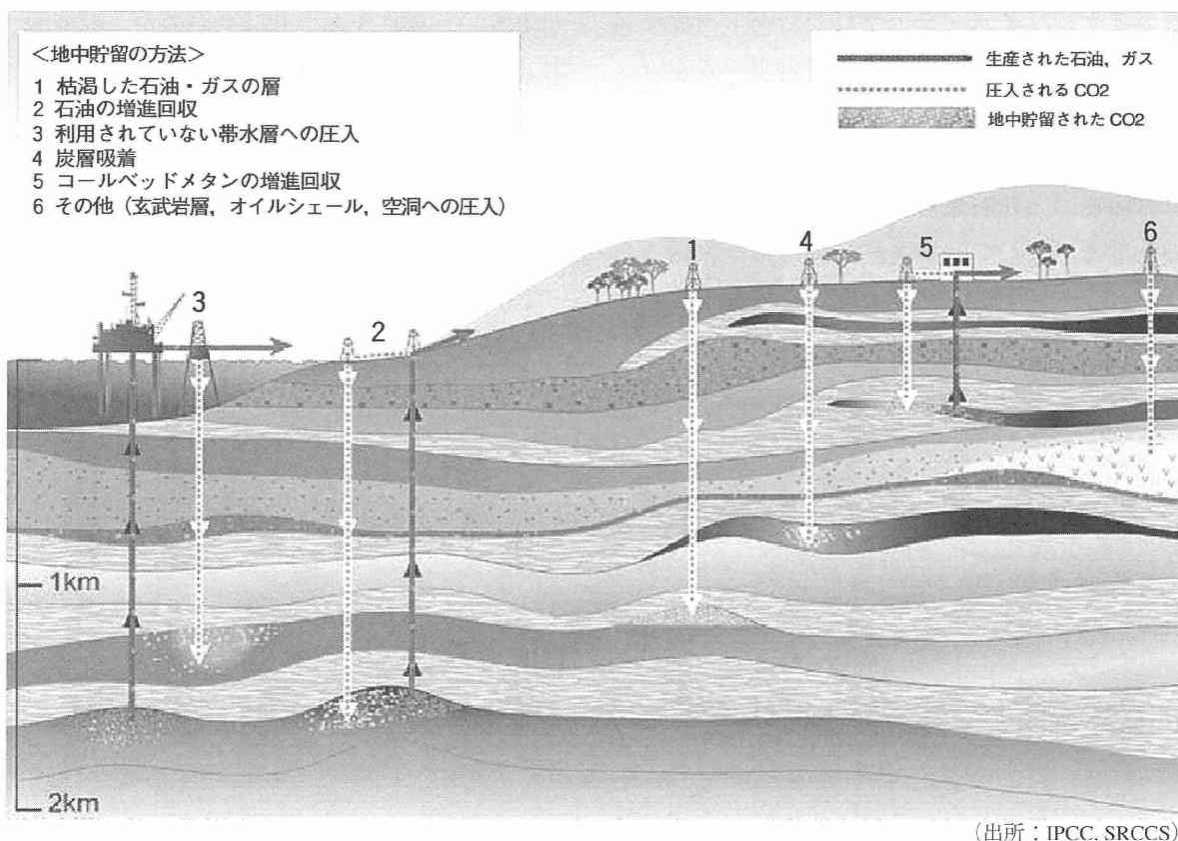


図3 CO₂貯留の方法

うことがないだろう地中の深いところにある帯水層にCO₂を圧入すればいいということになったのです。比較的浅いところにある帯水層は井戸水などの地下水源として利用されますが、深いところ、特に、堆積盆地の中にある帯水層は塩分が高くて地下水源として利用されない水の層です。世界中にはそういう場所がいくらかでもあるから、そういう所に液化したCO₂を押し込めば、大量のCO₂でも地下に入れられるという概念（帯水層貯留概念）を、1992年にカナダのアルバータ州の研究者であるウィリアム・グンターという人が中心にまとめた本の中で主張しました。CCSについて、SRCCSでは図3のように色々な方式を説明していますが、炭層吸着や炭層メタンの増進回収などにはあまりページ数が割かれていません。私は、表2の流れで、EORと帯水層貯留が第5章の中心に据えられたと見ています。

SRCCS第5章では、表3のようにまず序節で、炭素隔離技術についてこれから知ろうと

表3 第5章の構成

5.1 序
(Introduction)
5.2 メカニズムと安全性
(Storage mechanisms and storage security)
5.3 対象地層・容量・分布
(Storage formations, capacity and geographical distribution)
5.4 性能評価
(Characterization and performance prediction for identified sites—site integrityへの影響因子)
5.5 圧入操業
(Injection well technology and field operations)
5.6 モニタリング
(Monitoring and verification technology)
7.5 リスク
(Risk management, risk assessment and remediation)
5.8 Legal issuesと社会受容
(Legal issues and public acceptance)
5.9 コスト
(Costs of geological storage)
5.10 課題
(Knowledge gaps)

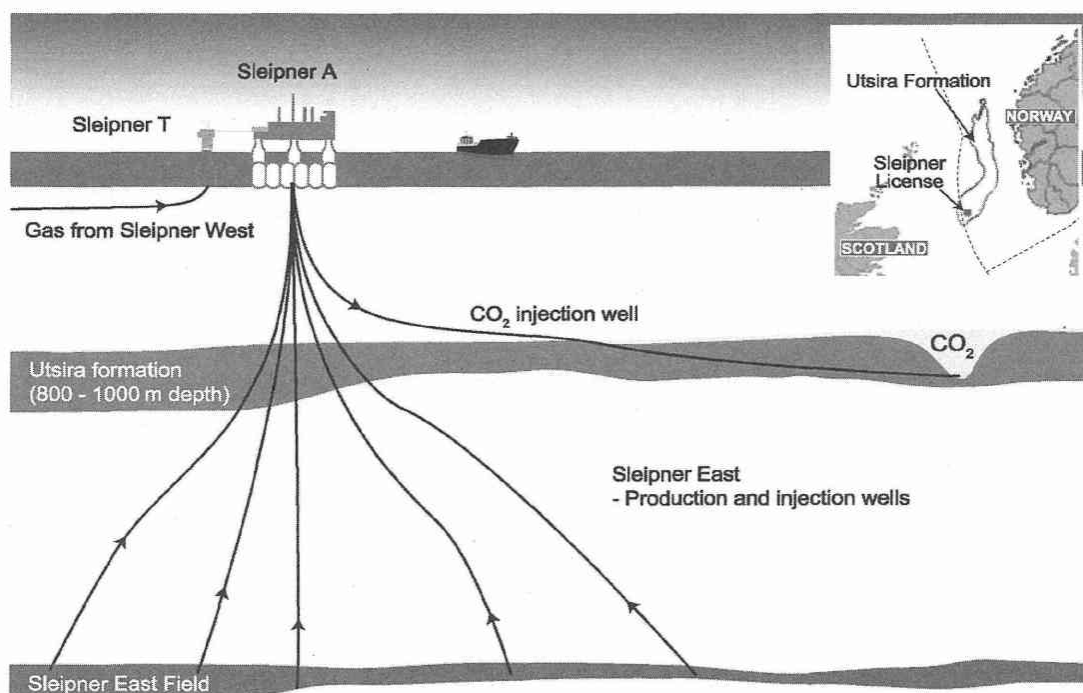
いう人のために、1996年から北海で帯水層にCO₂を圧入しているスライプナー・プロジェクトと2000年からEORでCO₂を圧入しているカナダのワイバーン・プロジェクトを紹介し

ています。ワイバーン・プロジェクトの成果は、温室効果ガスの排出量の算定ルールを定める国別温室効果ガス収支報告書の作成の基準（インベントリガイドライン）の改定作業との関連で、化石燃料由来のCO₂をEOR事業で地下に圧入して、事業終了時に地下に残ったCO₂でクレジット（排出権）を獲得するに

はどういう要件を満たせば良いのか、政策的、技術的な課題を国際的に検討するためにも活用されています。

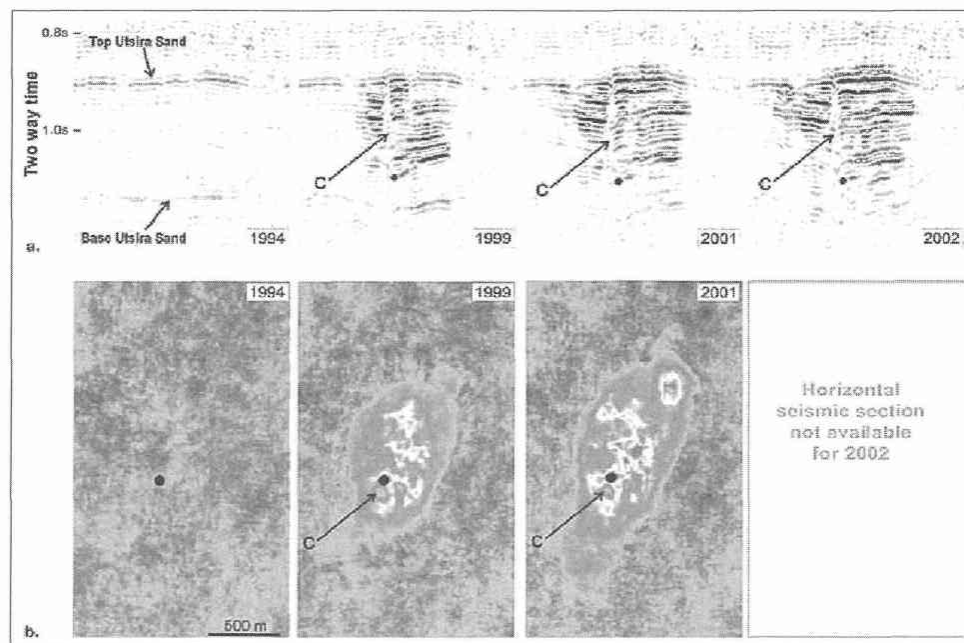
スライプナー・プロジェクト

1996年からスタートしているスタットオイ



(出所：IPCC, SRCCS)

図4 スライプナー・プロジェクトの概要



(出所：IPCC, SRCCS)

図5 スライプナー・プロジェクトで圧入したCO₂の状態

ル社（ノルウェー国有の石油会社）のこのプロジェクトでは、図4に示すように、北海のスコットランドとノルウェーの間にある東西50km、南北300kmの砂の地層（Utsira Formation）に、年間100万トンのCO₂を圧入しています。この砂岩層は、海底の地下800mから1,000mの深さに広がり、厚さが200mあります。地温勾配から考えて、CO₂は100気圧50℃ぐらいで超臨界状態となり周りの水を押しのけながら井戸の先から出てきます。比重は0.5～0.6くらいと軽いので砂の層の中を上へまっすぐ上がっていき、すぐ上の泥岩層の下で止まるのです。SRCCSはこういう実例を積み重ねて書かれています。

2001年には、図5のように地震探査のデータが出始めて、地下のCO₂の存在状態が可視化されたデータが公開されています。

スタットオイル社は、ノルウェーでCO₂排出に税金が課せられるようになったため、スライプナーガス田でのガス生産で分離されるCO₂を地中に圧入することにしたのです。ところが、プロジェクト現場が、人員交替をヘリコプターで行うとか、補給船は北海の荒波を越えていくとか、孤立無援のプラットホームで行われており、見学に行くのが困難な場所なために、研究者にとっては実地の研究がなかなか困難であるという不満がありました。

ワイバーン・プロジェクト

そこで、カナダのパン・カナディアン社（現エンカナ社）が始めたのが、ワイバーンでのCO₂-EORプロジェクトです。図6は、カナダのワイバーン・プロジェクトの現場です。EORは北米大陸で普通に行われている事業ですが、ワイバーン・プロジェクトでは、CO₂を325km離れた米国ノースダコタ州の石炭ガス化工場からパイプラインで運んできて使っています。

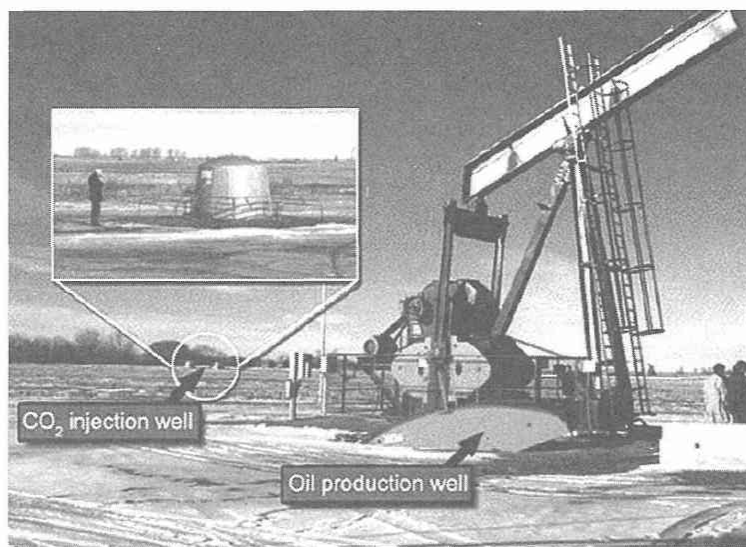
180km²という広大な面積を持つ同サイトでは、2000年末からCO₂の圧入を開始しましたが、2001年には、現地に見学者コースまででき、パンフレットを配って事業の意義を宣伝しています。現在、1日に約1,000tのCO₂を圧入し、約1万バレルの原油を生産しています。

地中貯留されたCO₂

地下での動き

地中でのCO₂の動き、変化についての科学的知見は以下のようにまとめられています。

- ① 圧入に起因する圧力勾配による移動、
- ② 自然に存在する圧力勾配による移動、



（出所：IPCC, SRCCS）

図6 ワイバーンの地上設備

- ③ 浮力に起因する移動,
- ④ 拡散,
- ⑤ 分散あるいはフィンガリング (指状に延びること)
- ⑥ 地層流体への溶解,
- ⑦ 鉱物化,
- ⑧ 孔隙へのトラップ,
- ⑨ 有機物質への吸着,

地中のCO₂が地上に出て来ては困るわけですから、SRCCSにはどこで止まるのかちゃんと書かれています。カナダのワイバーン・プロジェクトでは、「十分遠くに持っていけば大丈夫、横に動くスピードは非常にゆっくりだ」という専門家の間でコンセンサスがある事項については、きちんと書いてあります。

その他にまだ実験室レベルの話とか理論的なレベルの話とかが混在して教科書的に書かれている報告書になっています。

CO₂を地中に留めるトラッピング

CO₂を地中に留めるメカニズムを「トラッピング」と呼んでいますが、層位的・構造的トラッピング (Structural & Stratigraphic Trapping) と水理的トラッピング (Residual CO₂ Trapping)、地球化学的トラッピング (Solubility Trapping, Mineral Trapping) が図7のように示されています。

層位的・構造的トラッピングでは、下に伏せたお椀みたいな地層の構造の下にCO₂がトラップされ、水理的トラッピングでは、CO₂が毛細管みたいなものの中にトラップされます。スポイトの先のガスが浮力があっても置き換わらない現象と同じメカニズムです。

地球化学的トラッピングのうち、Solubility Trappingは、水を一緒に圧入して、CO₂を水に溶かし込む場合には最大限に期待できます。そうなれば浮力の問題はなくなります。しかし、これを人為的に行おうとすれば、経済性が失われます。つまり、化石燃料を燃して出てきたCO₂を水に溶かして地下に圧入すると

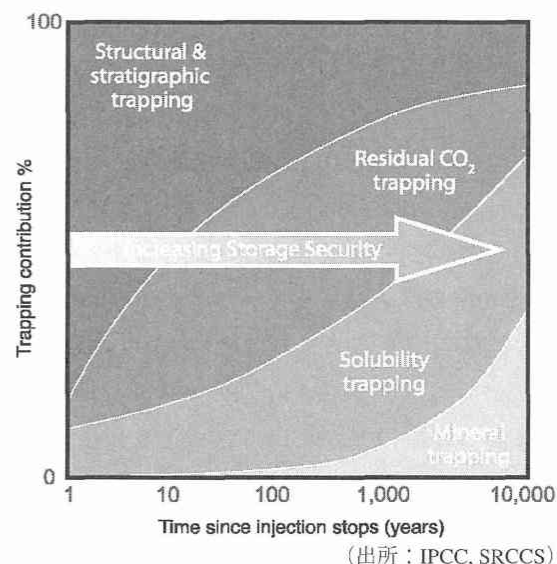


図7 様々なトラッピング

いうことは、熱力学的に考えて、燃焼で獲得したエネルギーのほとんどがそれに費されることになって経済的には不可能に近いからです。ですから、報告書でいうSolubility Trappingは地下で周りの水に溶けてくれることを期待するという概念で、圧入から1000年後、1万年後の状態に期待するというものです。

「最後は鉱物になるかも知れません」というMineral Trappingは、シミュレーション研究や室内実験という状況証拠を強く訴えるだけの書き方で終わっています。

地中貯留に関するその他のキーポイント

困難な貯留容量の推定

SRCCSでは、石油・天然ガス田への圧入、採掘不能な炭層への圧入 (ECBM)、地下深部の帯水層への圧入について、表4のように貯留容量を推定しています。しかし、容量推定は大きな不確実性を伴うため困難であると書かれています。例えば、石油・天然ガス田の容量は、それらが枯渇した後でなければ判明しないのですが、いつ枯渇するのか分かりません。CO₂貯留容量は、石油・天然ガスの資源量に基づいて推

表4 地中貯留の推定容量

Reservoir type	Lower estimate of storage capacity (GtCO ₂)	Upper estimate of storage capacity (GtCO ₂)
Oil and gas fields	675 ^a	900 ^a
Unminable coal seams (ECBM)	3-15	200
Deep saline formations	1000	Uncertain, but possibly 10 ^a

^a These numbers would increase by 25% if "undiscovered" oil and gas fields were included in this assessment.

(出所：IPCC, SRCCS)

定されるわけですが、その資源量が公表されないと推定自体が困難なのです。それでも、SRCCSはこの課題の重要性に鑑みて、容量を推定している文献がいくつかあるという書き方になっています。帯水層貯留法では、世界が2,000億～56兆トン、日本が15億～800億トンという推定容量を紹介しています。

リスク

リスクは何なのかとか、人々がCCSをどう受け止めるだろうかということについては、執筆者たちの期待を込めて書くのではなく、どう思われているか書くという方針だったため、非常に客観的な書き方になっています。「こういう可能性がある」とも書けないので、「こういう意見がある」という感じで書かれています。

地中貯留に関するリスク評価についても、何かの形式にのっとった評価は、まだやった人がいないと書かれています。その主な理由は、何に基づいてCO₂放出の確率を議論できるか分からないからです。議論のベースとすべき候補として、天然ガス、天然CO₂、石油資源の賦存状況、地下ガス貯蔵・液体廃棄物の地中圧入事業の経験、基礎的な物理化学原理、コンピュータ・シミュレーション、現実のプロジェクトなどが挙げられていますが、リスク評価の決定版が存在しているわけではないと正直に書いてあるのです。

コスト

SRCCSは、システム全体としてコストを最小にしようという意識では書かれていません。

EORの専門家、海洋隔離の専門家、地中貯留の専門家が集まって「お互いにリンクージュしましょう」という趣旨で執筆者会合がもたれるのですが、集まって議論をしても、結論的内容については、誰かが言っているのを見つけて引用しなければいけないルールなので、結局、章と章の間のリンクージュはできませんでした。

スライプナー・プロジェクトもワイバーン・プロジェクトも、純粋なCO₂を地下に圧入するという話です。では、どのぐらいまでの不純物なら入っていても大丈夫なのか。コストダウンがどのぐらいできそうなのかといった話、産業界で必要となる話は誰も研究していません。ですから、SRSCCには載っていません。

表5は貯留だけのコスト（米ドル／t）です。CO₂の回収に関しては多分、火力発電所ベースで考えれば、1トン当たり3,000円～5,000円という価格になっていると、第3章に書かれています。

表5 CO₂貯留コスト

		(USドル/tCO ₂)
●陸域塩水帯水層		
豪	0.2～<0.5>～5.1	
欧	1.9～<2.8>～6.2	
米	0.4～<0.5>～4.5	
●海域塩水帯水層		
豪	0.5～<3.4>～30.2	
北海	4.7～<7.7>～12.0	
●米国枯渇油田		0.5～<1.3>～4.0
●米国枯渇ガス田		0.5～<2.4>～12.2
●欧州陸域油・ガス田		1.2～<1.7>～3.8
●北海油・ガス田		3.8～<6.0>～8.1

(出所：IPCC, SRCCS)

日本国内の地中貯留プロジェクト

新潟県長岡でのプロジェクト

日本でも、(財)地球環境産業技術研究機構(RITE)が平成12年度から16年度まで、新潟県長岡で地中貯留の経験を積むプロジェクト(長岡プロジェクト)を行っています。しかし、

IPCCの報告書の引用文献の締め切り日には成果報告が間に合わず、SRCCSには載っていません。

場所がCO₂貯留に適していることは、帝国石油(株)が保証しています。シミュレーションをやった上で、この地下1,100mの深さの帯水層にCO₂を入れています。図8はサイトの場所、図9はプロジェクトの概略です。地下1,100mのところに2003年7月から2005年1月までCO₂を1万トン入れました。キャップロックが山形にな

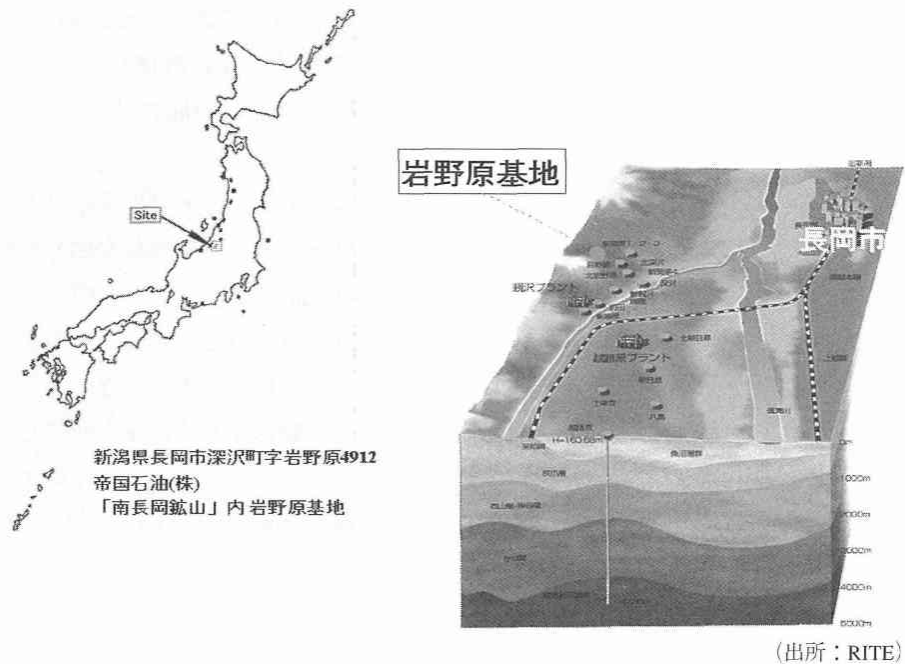


図8 長岡プロジェクトの圧入実証試験サイト

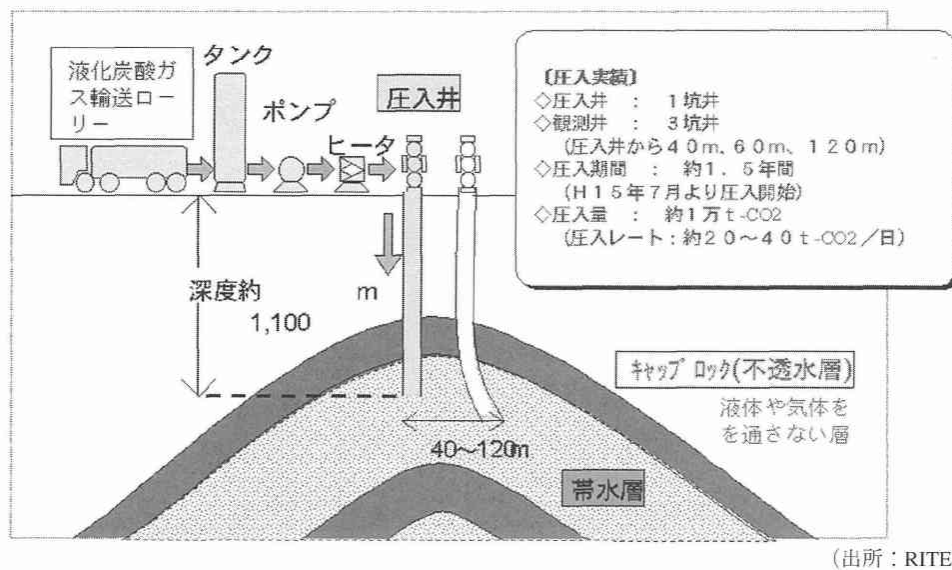
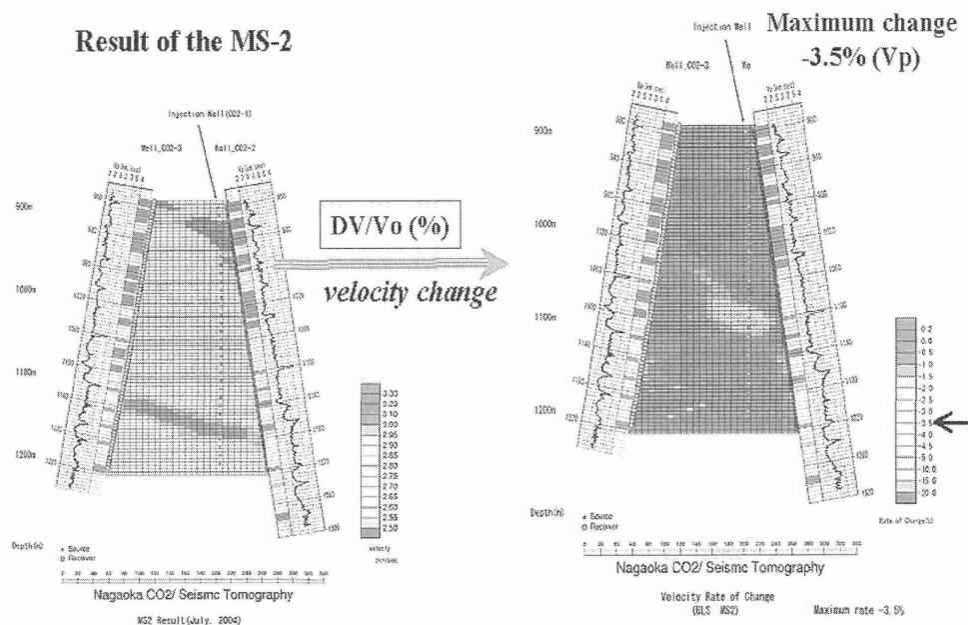


図9 CO₂圧入実証試験の概略



(出所：RITE)

図10 サイトの地上部分の設備



(出所：RITE)

図11 地中CO₂を可視化した図

っている裾の部分にCO₂を圧入してみました。非常にスムーズに圧入できました。

図10はサイトの地上部分の写真です。手前に圧入坑井の口元，奥にこれから圧入するCO₂を貯蔵するタンクが見えています。

実証試験で一番重要なのは，CO₂の地下挙動をどのように観測するかという話です。SRCCSにも書いてあることですが，弾性波探査も実施し，さらに直接流体採取も2005年12月に長岡で実施しました。

地中の様子をモニターできて，図11は長岡の地中のCO₂を可視化した図です。超音波診断みたいな仕組みで，地中のCO₂を数メート

ルの空間分解能でコンピューター上に可視化できました。

さいごに

SRCCSが出版にこぎつけ，今まで専門家の中だけの話だったのが，安心してみんなに議論してもらい，「分からないことがあったら報告書を読んで下さい」と言える状況に今やっています。

ご静聴，ありがとうございました（拍手）

[寄稿]

スターリングエンジンの研究・開発動向

平 田 宏 一 (独)海上技術安全研究所
環境・エネルギー研究領域 主任研究員



1. はじめに

スターリングエンジンは、高熱効率性、低公害性、使用熱源の多様性などの優れた特徴を持つ外燃機関である。このエンジンは、1816年にスコットランドの牧師ロバート・スターリングによって発明されて以来、幾度かの発展と低迷を繰り返しながら高性能化・実用化への挑戦が試みられてきた。そして、省エネルギーや環境問題が深刻な社会問題となっている現在、スターリングエンジンへの期待が再び高まってきている。

本報では、当研究所で進めている排熱利用スターリングエンジンに関連した研究をはじめ、国内外で研究・開発が進められている高性能スターリングエンジンの現状、バイオマスや太陽熱を利用した関連研究について解説する。

2. スターリングエンジンの基本構造と特徴

図1にスターリングエンジンの基本構造を示す。スターリングエンジンは、一対のピストンと熱交換器等から構成されている。作動ガスを高温空間と低温空間の間を移動させることにより圧力変化を生じさせ、膨脹・圧縮を繰り返して運転している。

圧力変化によって効率よく動力を得るためには、作動空間内に高圧の作動ガスを封入し、運転するのが一般的である。また、伝熱性能の向上や熱交換器における圧力損失の低減の

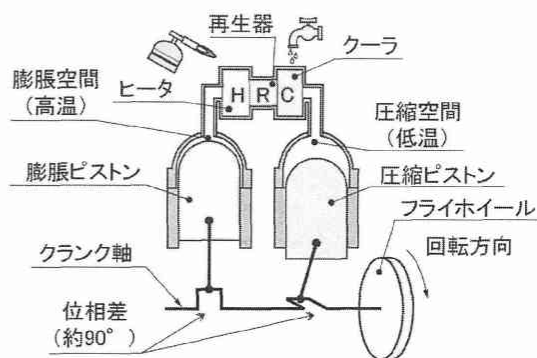


図1 スターリングエンジンの基本構造

観点から、ヘリウムや水素等の分子量の小さい作動ガスが用いられることが多い。

図2は各種エンジンの出力レベルと熱効率の関係を模式的に表している。スターリングエンジンは、比較的低い出力レベルにおいて、高い熱効率を得られやすいという特性がある。このような特性をうまく活かすことで、スターリングエンジンは様々な用途で活躍できるものと考えられる。

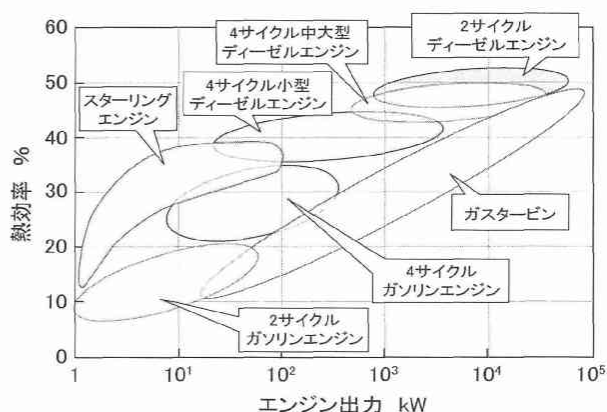


図2 各種エンジンの出力と熱効率

3. スターリングエンジンの技術

スターリングエンジンの歴史は古い。第二次大戦中には、オランダのフィリップス社によって可搬式発電機が開発されている。その後、様々な技術が導入され、現在に至っている。

(1) ハーメティック式エンジン

前述の通り、スターリングエンジンを高出力化するためには、エンジン内部を高圧に保つ必要がある。図3(a)に示すように、作動ガスを密閉するにはメカニカルシールなどのシール装置が使われてきたが、小出力のエンジ

ンでは、その摩擦損失の割合が大きく、出力性能に大きく影響する。そこで、図3(b)に示す発電機を圧力容器に内蔵したハーメティック式と呼ばれる形式が、最近の小型エンジン発電機の主流となっている。

図4は、出力100 W程度の実験用ハーメティック式エンジンである。ハーメティック式とすることで、発電出力は40 %程度も向上できることが確認されている⁽¹⁾。

(2) 多段式排熱利用エンジン

図5は著者らが提案している多段式スターリングエンジンである⁽²⁾。図5(a)において、3台

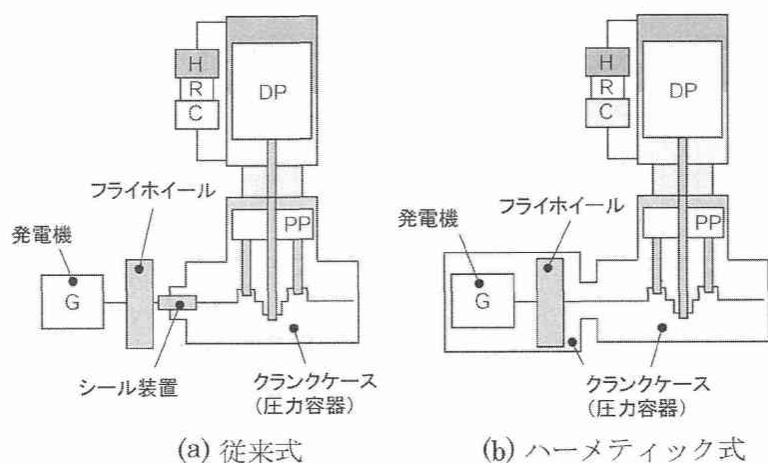


図3 従来式エンジンとハーメティック式エンジン

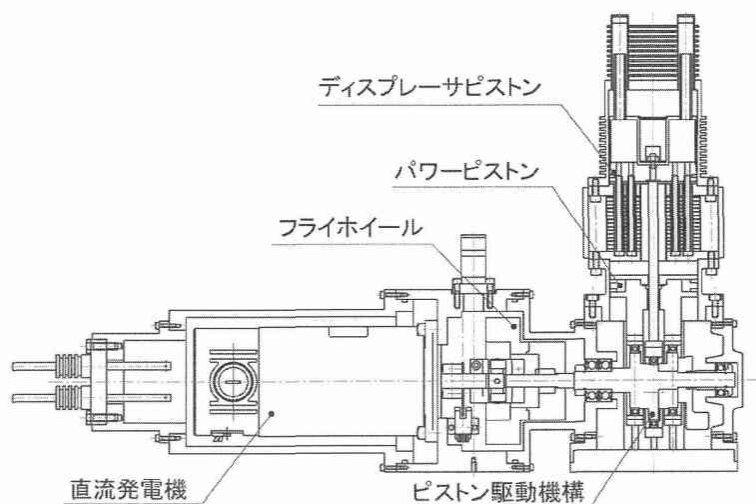
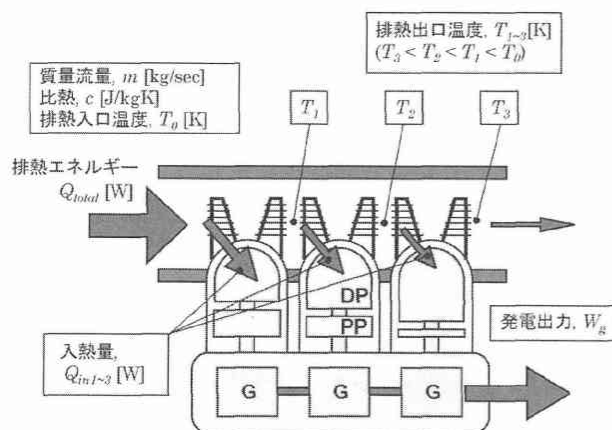
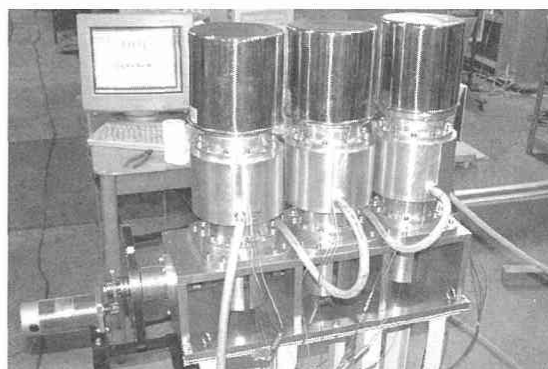


図4 100W級実験用エンジン (海上技術安全研究所)



(a) 多段式エンジンの概念図



(b) 実験用エンジンの外観 (海上技術安全研究所)

図5 多段式スターリングエンジン

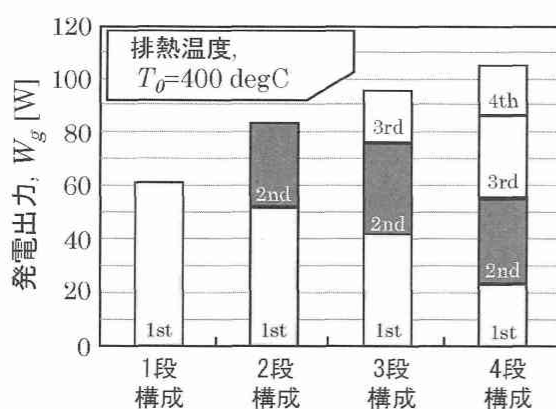


図6 多段式エンジンの出力試算結果

のエンジンが直列に配置され、排熱は左から右の方向に流れる。各エンジンで熱エネルギーを回収するため、排熱の温度は徐々に低下する。このようなエンジン形式にすることで、エンジン全体として多くの温度落差を利用できる。図6は理想的な条件のもとで、多段式エンジンの出力性能を試算した結果の一例である。これより、多段式エンジンは、1段で構成されたスターリングエンジンより、排熱エネルギーを有効に利用できることがわかる。多段式スターリングエンジンにおいては、それぞれのエンジンの動作温度並びに出力レベルが異なるため、ディスプレイサおよびパワーピストンの行程容積を適切に設定する必要がある。

(3) フリーピストンエンジン

スターリングエンジンの小型化を目指す場

合、図7に示すようなフリーピストン式と呼ばれる特殊なエンジン形式が利用されることがある。これは、ピストン系の共振現象を利用して作動するエンジンであり、クランク機構を持たないのが特徴である。往復運動を行うピストンとリニア発電機を一体構造とすることでエンジン発電機の小型化を図ることができる。さらに機構部の摩擦損失が大幅に低減されるため、高効率化が可能となる。当初、この形式のエンジンは宇宙分野での開発が盛んであったが、最近では国内外の関連企業によって民生用途での製品化が進められている。

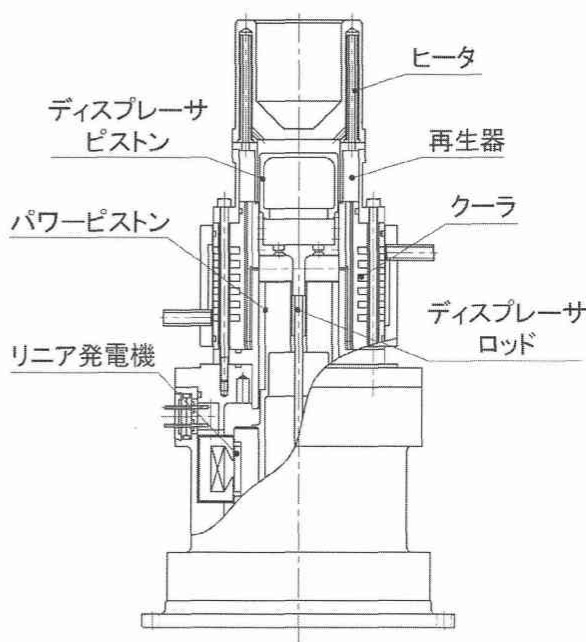


図7 フリーピストンエンジンのイメージ

2005年4月に松下電器産業社のベンチャー企業として発足したeスター社では、セラミックス製熱交換器や新型リニア発電機など、高性能化・量産化のための新しい技術開発を含めて、フリーピストン式エンジンの開発を進めている⁽³⁾。

4. スターリングエンジンの用途開発

スターリングエンジンの優れた性能を活かすことができれば、主動力源や排熱利用、コジェネレーションなど、様々な用途開発が可能である。以下、スターリングエンジンの用途開発について考えてみる。

(1) 主動力源（交通機関への適用）

スターリングエンジンを交通機関の主動力源として適用可能性を検討した例を紹介する。図8は大型船舶用スターリングエンジンの概念図である⁽⁴⁾。出力は20,000 kWであり、経験則やシミュレーション計算を利用して概念設計を行った。本エンジンは、同出力レベルのディーゼルエンジンと比べて高さ寸法は概ね同じであるが、クランク軸方向の長さが約2倍の寸法となっている。また、熱効率について

も、現在のディーゼルエンジンに対する優位性は確認されなかった。図2に示したように、スターリングエンジンは、比較的低い出力レベルにおいて高い熱効率が得られやすいという特徴がある。これはエンジンを大出力化する場合、圧力容器構造の制限によってエンジンの構造部材の肉厚が増大し、それに伴う熱損失が増大するためである。

図9は、200 kW級スターリングエンジンを搭載した観光用水陸両用船の概念図である⁽⁴⁾。このように、静粛性・環境調和性を要求される用途では、スターリングエンジンの利用価値は高いと考えられる。しかし、製作コストや信頼性を考えると、現在のスターリングエンジンが自動車・船用エンジンに対抗するのは極めて困難であり、さらなるブレークスルー技術が必要不可欠である。

(2) 排熱回収システム

多様な燃料から動力を取り出すことができるといふ、このエンジンの特徴を活かすことで、排熱利用発電が可能となる。排熱には、工場排熱や内燃機関の排ガスなどがあり、一般に温度が低い。低温度熱源を利用するスターリングエンジンの実用化には、高性能熱交

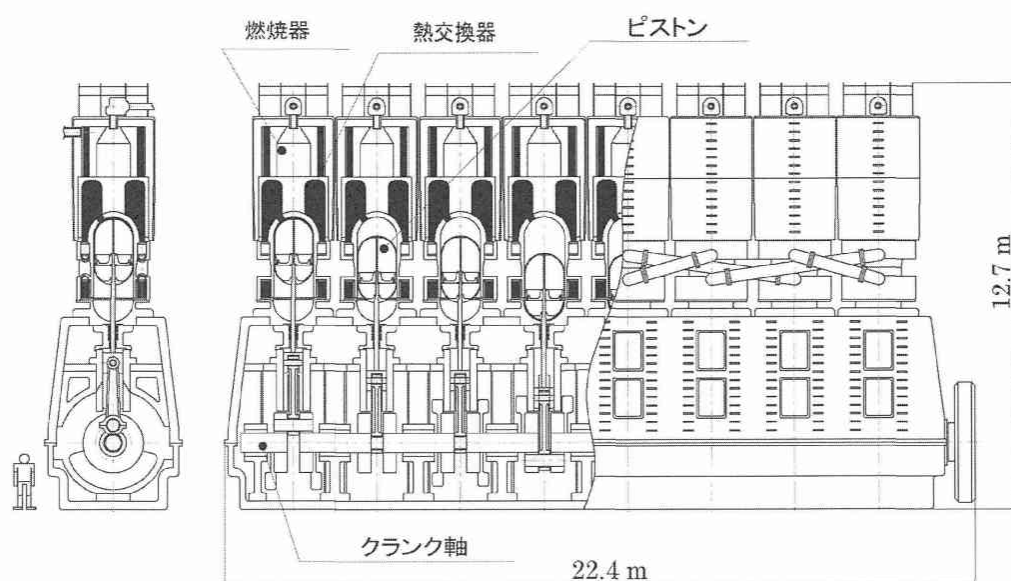


図8 大型船舶用スターリングエンジンの概念図

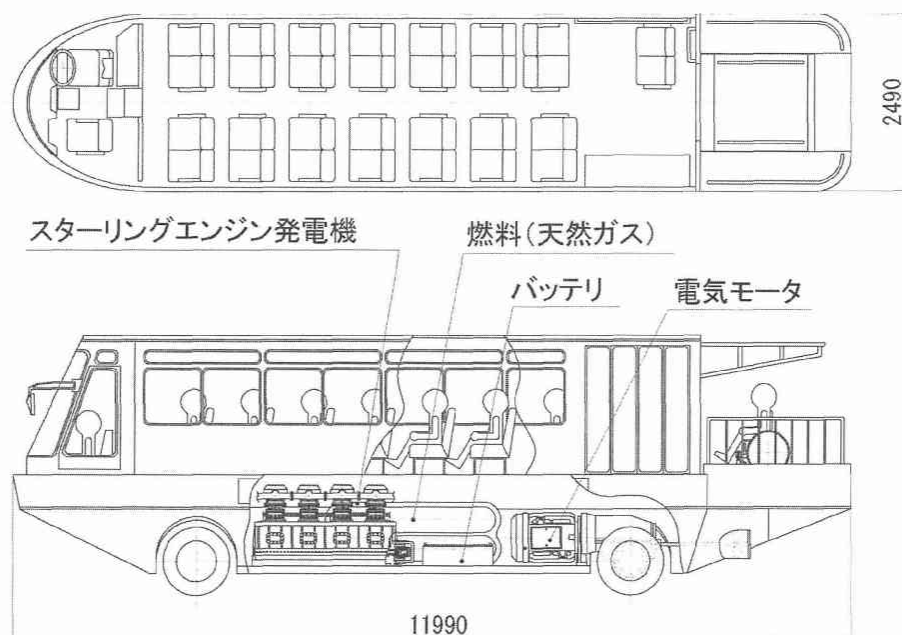


図9 観光用水陸両用船の概念図

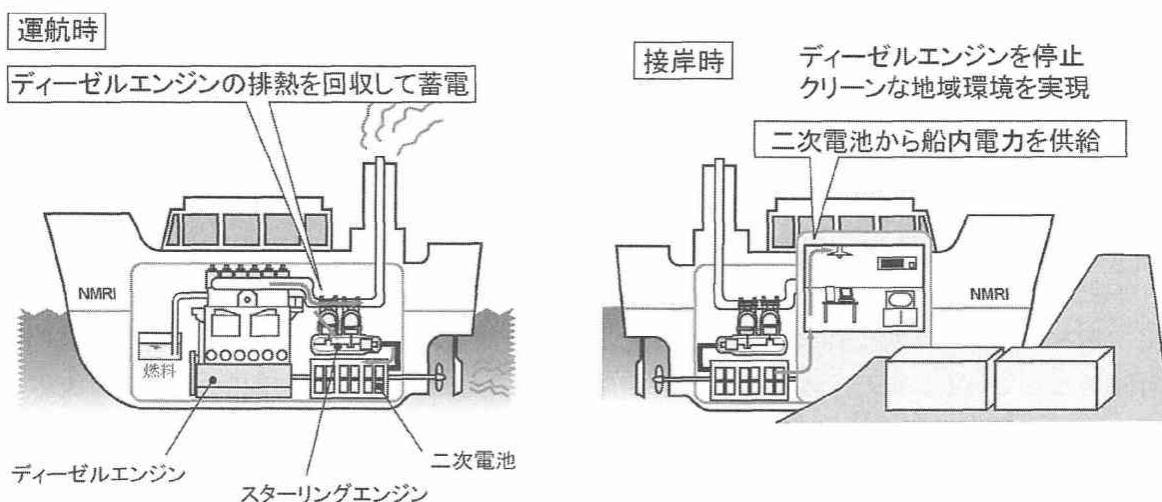
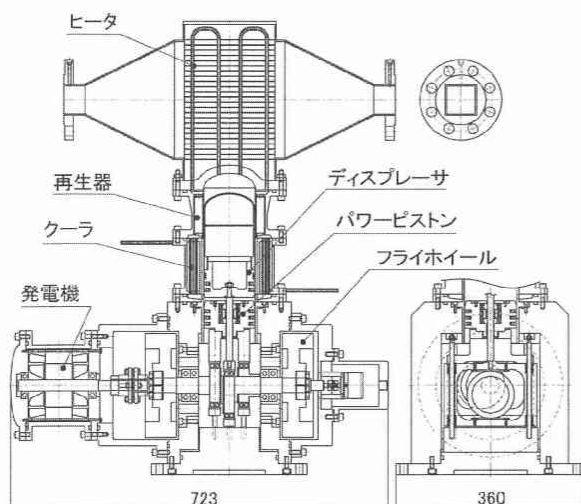


図10 船舶用排熱回収システムのイメージ図

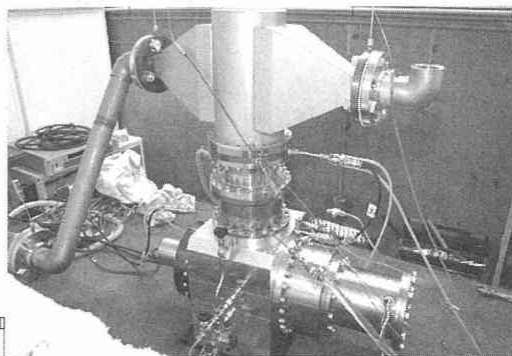
換器の開発など、様々なブレークスルー技術が必要であるが、排熱の総エネルギー量は極めて大きく、300～400℃程度の排熱を有効に回収する技術が確立されれば、その用途は極めて広い。

図10は、その一例として、「鉄道建設・運輸施設整備支援機構：運輸分野における基礎的研究推進制度」のもとに、著者らが研究・開発を進めている船舶用排熱回収システムの概要である⁽⁵⁾。本排熱回収システムは、港湾地域の環境汚染を改善することを目的とし、運

航中の推進に使うディーゼルエンジンの排熱エネルギーをスターリングエンジンによって回収し、電気として蓄え、停泊中の船内電力に使用する。したがって、船舶が停泊している際、発電用ディーゼルエンジンの運転が不要となり、港湾地域の環境汚染が改善され、クリーンな地域環境を保つことができるようになる。現在までに、図11に示す実験用エンジンを設計・試作し、300～400℃程度の熱源による試験運転並びに性能評価を進めている。



(a) 実験用エンジンの構造



(b) 実験用エンジンの外観

図11 排熱利用スターリングエンジン

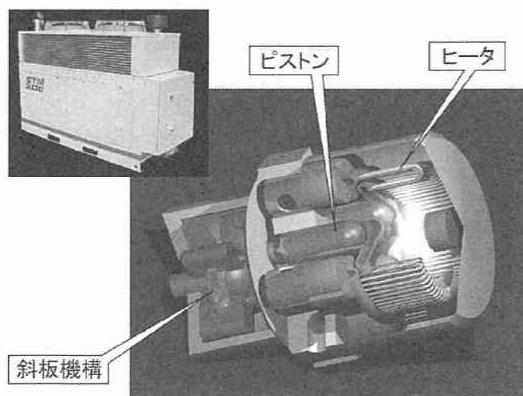
(3) コージェネレーションシステム

小型で高効率なエンジンが開発されれば、業務用あるいは家庭用コージェネレーションシステムの普及が期待できる。これは燃料が持つ熱エネルギーを発電と給湯に効率よく変換するものであり、エネルギーの有効利用が可能となる。図12に示したエンジンはコージェネレーションシステムへの適用を目指して製

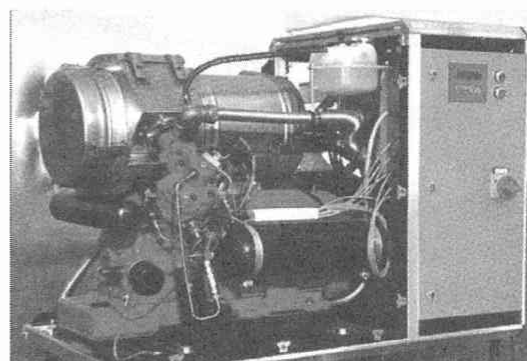
品化されつつあるエンジンである。コージェネレーション用エンジンは、出力や効率の性能ばかりでなく、社会への普及を考慮したシステム構成が重要になるものと考えられる。

(4) バイオマス利用システム

一方、木質チップや発酵メタンなどを利用するバイオマスエネルギー利用システムの研



(a) 55kWコージェネシステム (STM社) ⁽⁶⁾



(b) 10kWコージェネシステム (SOLO社) ⁽⁷⁾



(c) 0.75kWエンジン (WhiperGEN社) ⁽⁸⁾

図12 コージェネレーションシステム用スターリングエンジン

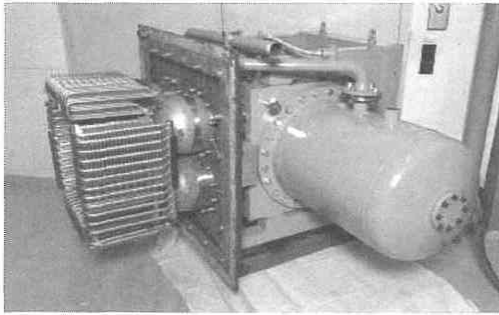


図13 35kWバイオマス利用エンジン⁽⁹⁾

究・開発も活発に行われている。図13はデンマーク工科大学のカールセン教授らが開発している35kW級バイオマス利用スターリングエンジンであり、システムの製品化を目指した研究・開発が進められている。国内においても、いくつかのバイオマス利用システムのフィールドテストが進められており、スターリングエンジンに対する期待は高い。

(5) その他の用途開発

その他の用途として、スターリングエンジンの高熱効率性や低騒音といった特徴を活かした、海中動力用スターリングエンジンの研究・開発などが進められている。スウェーデンのコッカムス社で開発された75kWスターリングエンジンは、40%以上の熱効率に達し、数機の軍事用潜水艦に搭載されている。

また、スターリングエンジンを用いた太陽熱利用システムの研究・開発も活発に行われている（図14）。このような自然エネルギーの有効利用は、将来の地球環境保全に役立つのは間違いない。

さらに、発展途上国や山岳地向けのエンジン開発も有望である。そのような用途では、低コスト化とメンテナンス性の向上が重要な課題となる。

5. おわりに

以上、スターリングエンジンの優れた特徴をやや強調して、関連技術や用途開発について解説してきた。高熱効率性、低公害性、使

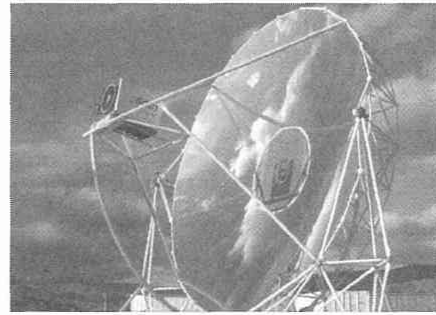


図14 太陽熱利用エンジン⁽⁷⁾

用熱源の多様性などの優れた特徴を持つスターリングエンジンは、様々な分野で活用される可能性があることは間違いない。しかし、このエンジンにはいくつかの問題点もある。例えば、高効率化のためには、耐熱性・耐圧性が高い特殊材料を使用する必要があり、製作コストが高くなること、過去に開発された高性能スターリングエンジンの技術（ノウハウ）が継続的に伝承されていないこと、さらに運転実績に乏しく信頼性が十分でないことなどである。これらの課題を克服し、スターリングエンジンが様々な分野で活躍することを期待している。

参考文献

- (1) HIRATA, K., Mechanical Loss Reduction of a 100 W Class Stirling Engine, Proc. of 11th International Stirling Engine Conference, p.338-343, 2003.
- (2) HIRATA, K. and KAWADA, M., Development of a Multicylinder Stirling Engine, Proceedings of 12th International Stirling Engine Conference, p.315-324, Sept. 2005.
- (3) 赤澤輝行, 村尾景司, 平田宏一, 星野健, 高効率スターリングエンジンの開発, 日本機械学会第9回スターリングサイクルシンポジウム講演論文集, p.105-106 (2005).
- (4) HIRATA, K. and KAWADA, M., Discussion of Applicative Marine Stirling Engine Systems, 7th International Symposium On Marine Engineering, Oct. 2005.
- (5) 平田宏一, 加納敏幸, 川田正國, 赤澤輝行, 井上敏彦, 飯田光利, スターリングエンジンを用いた内航船用排熱回収システムの提案, 日本機械学会第9回スターリングサイクルシンポジウム講演論文集, p.97-98 (2005年).
- (6) STM社ホームページ, <http://www.stmpower.com/>, 2005.
- (7) SOLO社カタログ, 2005.
- (8) Whisper Tech社カタログ, 2005.
- (9) M. Passon and H. Carlsen, Development of a Wood Powder Fuelled 35 kW Stirling CHP Unit, Proc. of 11th International Stirling Engine Conference, 2003.

[寄稿]

100kW小型貫流ボイラ発電システム

満田正彦 (株)神戸製鋼所 機械研究所
主任研究員



1. はじめに

小型貫流ボイラは国内に25万台程度（販売シェアで90%以上，発生蒸気容量で85%以上）普及しているが，これらのユーザはボイラを熱源機器としてしか使っていない。

我々が提案する小型貫流ボイラ発電システムは，ボイラで発生した蒸気を，蒸気タービンで発電してからプロセス（蒸気利用機器）に供給するシステムである。このシステムのリパワリング効率は78%であり通常の火力発電所の約2倍の効率である。本システムは，食品，製紙，化学，繊維，硝子などの中小工場やホテルや病院などの民生分野への普及が期待される。

また，発電システムだけでなく，圧縮機や送風機などの動力源としての用途も可能である。

2. 基本仕様

本システムの概念図を図1に示すが，この

システムは，小型貫流ボイラ，蒸気過熱器，マイクロ蒸気タービンから構成される。

小型貫流ボイラの一般的な使用ケースを現状ケースとする。この事例ではボイラ2台から合計3 t/h，0.25MPaの蒸気をプロセスに利用している。ボイラ熱効率を95%と仮定するとボイラ出力2,194kWに対して2,309kWのボイラ入力（燃料）が必要となる。

小型貫流ボイラ発電を提案ケースとする。提案ケースでは，ボイラに蒸気過熱器とマイクロ蒸気タービンを追加することで，現状ケースと同じ2,194kWの熱出力のほかに113kWの発電出力を追加することができる。現状ケースに比べてボイラ入力が144kW増えて2,453kWとなるが，そのかわりに113kWの発電出力を得ることができる。追加した燃料（入力）分と発電（出力）の比を「リパワリング効率」と定義すると，この効率は78%になる。

本システムの蒸気線図を図2に示す。横軸に蒸気エントロピー，縦軸に蒸気エンタルピ

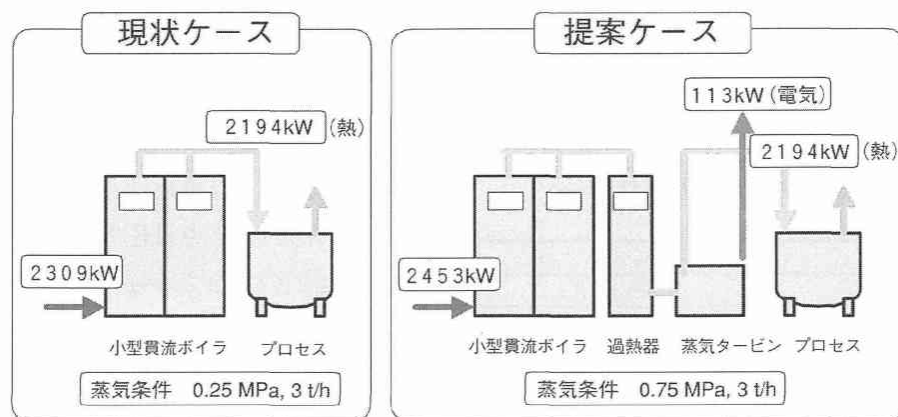


図1 小型貫流ボイラ発電システムの概念図

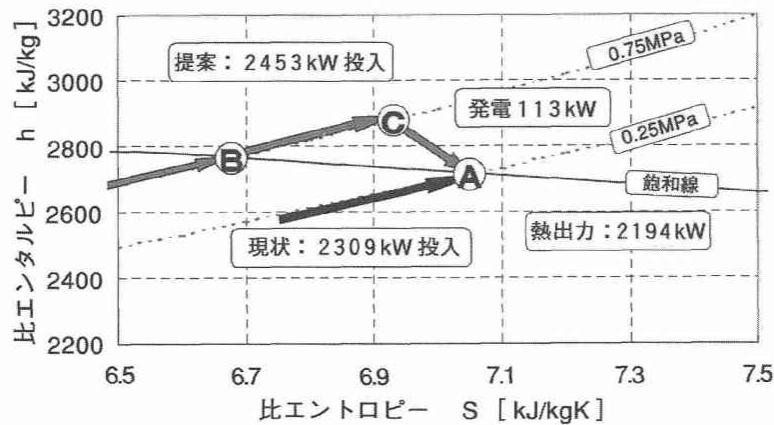


図2 本システムの蒸気線図

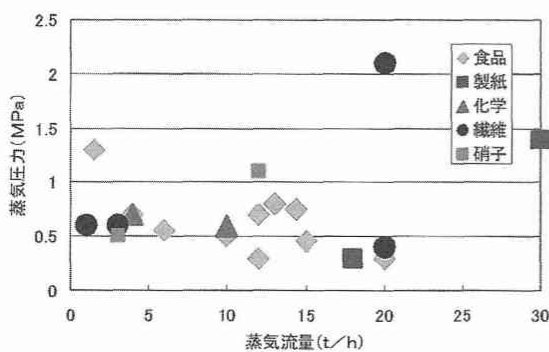


図3 蒸気需要の調査結果

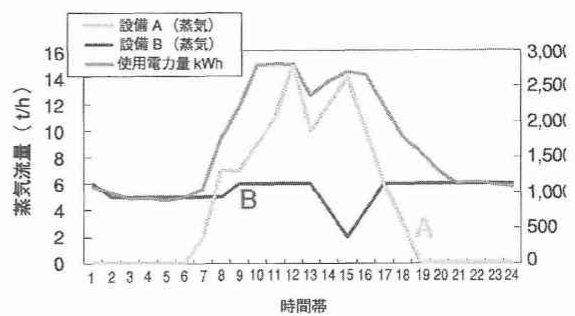


図4 蒸気・電力需要の日間変動

ーを示す。蒸気過熱器により過熱蒸気を得てタービンで膨張させ、タービン出口で飽和蒸気をえることができることを示している。

食品、製紙、化学、繊維、硝子業界などの中小工場で使用している蒸気条件を調査した結果を図3に示す。蒸気利用条件の多くは流量が2 t/h～20 t/h、圧力が1 MPaまでの範囲であり、小型貫流ボイラを多缶設置することで供給されている事例が多い。多くの場合はボイラから発生する蒸気を減圧弁で圧力を減圧して各プロセスに供給しており、この減圧弁

の代わりに蒸気タービンを接続することで発電が得られる。蒸気需要の事例を図4に示すが、24 時ほぼ時間一定の需要がある場合や、昼間だけの需要しかない場合などさまざまなケースが見受けられる。そのため、本システムの、基本仕様を3 t/hとし蒸気流量の変動に対しては台数制御で対応することにした。本システムの基本仕様を表1に示す。

3. 蒸気タービン

図5に2 t/h級～10 t/h級の既存の蒸気タービンの発電効率（発電出力/蒸気断熱熱落差）を示す。○印の大きさは圧力比（入口圧力/出口圧力の比）の大きさを示す。ラジアル式は軸流式より効率がよく、かつ小さな圧力比でも高出力が得られているため本システムではラジアル式蒸気タービンを採用した。3 t/hの蒸気流量ではタービンが小型化し、粘性の影響

表1 本システムの基本仕様

	本システム
蒸気圧力	1MPa 以下
蒸気流量	3t/h
圧力比	3
出力	100kW
リパワリング効率(*)	78%

(*) 発電出力/追加投入燃料エネルギー

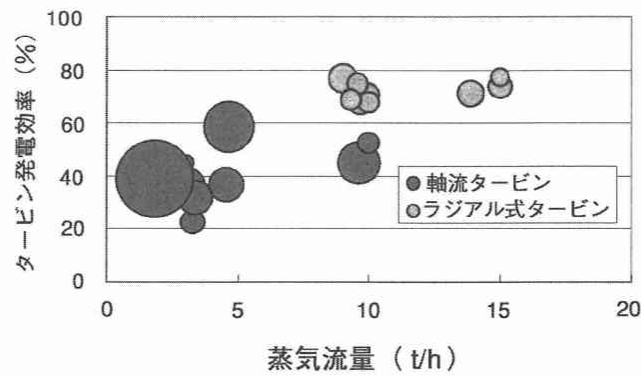


図5 蒸気タービンの発電効率

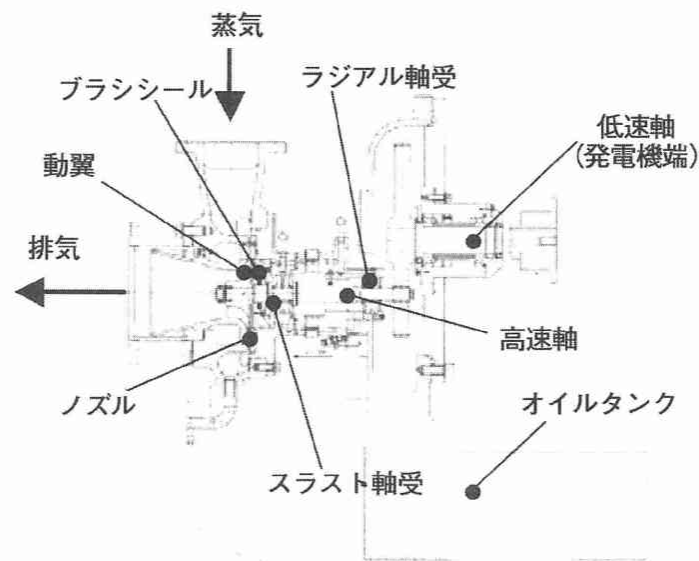


図6 蒸気タービンの基本図

で空力性能が悪化することが懸念されたが空力解析を活用してタービン形状を最適化した。

小型貫流ボイラ発電に使用する蒸気タービンの基本図を図6に示す。蒸気タービンはノズル（静翼）、インペラ（動翼）、減速機、発電機から構成され、ノズルで加速した蒸気が

インペラを回転させ、その動力が高速減速機、発電機へと伝達され発電する。

蒸気タービンの基本仕様を表2に示す。目標リパワリング効率78%を達成するタービン断熱効率、減速機機械効率、発電機効率をそれぞれ77%、89%、93%に設定した。

表2 蒸気タービンの基本仕様

蒸気タービン	
タービン型式	ラジアル
蒸気流量	3t/h
蒸気温度	216℃
入口圧力	0.75MPa
出口圧力	0.25MPa
材質	チタン合金
直径	Φ160mm
回転数	48300/min
断熱効率(*)	77%以上

(*)軸出力/蒸気断熱熱落差

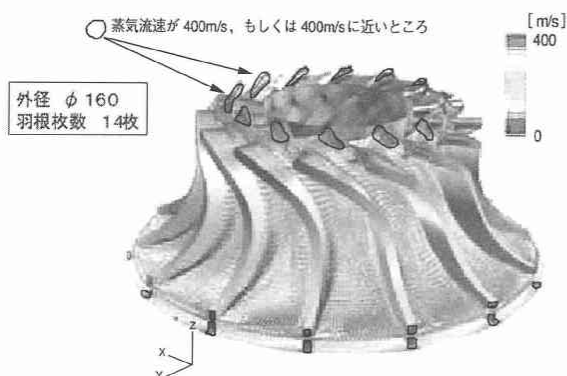


図7 蒸気タービン周りの蒸気流速分布

図7にタービン周りの蒸気流速分布を示す。回転しているタービンからみると回転軸に垂直に蒸気が流入し、タービンによって向きがかわり約400m/sまで加速している。タービン表面の流れのはく離域をできるだけ小さくすることで損失の低減を図っている。

図8にタービン表面の応力分布を示す。回転数が48,300rpmと高いため、タービンに遠心力にともなう引張応力が作用するが、タービン形状を適正化することにより応力を緩和することができる。

4. 蒸気過熱器

通常の蒸気過熱器の熱効率74%程度である。蒸気過熱器の熱効率を95%まで改善するには蒸気過熱器の排ガスをボイラ給水加熱器

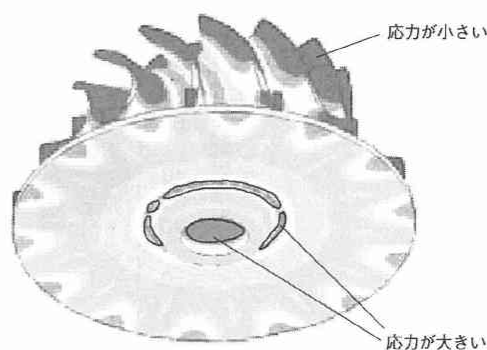


図8 蒸気タービン表面の応力分布

に利用するか、蒸気過熱器の排ガスをボイラ燃焼器に直接投入する方法が考えられる。図9は前者のダイアグラムであるが、熱バランス的には成立するが給水加熱器が大きくなる、一方、後者の方法はボイラ燃焼器全体の熱損失がさがりボイラ自身の伝熱面積を低減でき給水加熱器も不要になる。

5. 本システムの経済性と省エネ性

図4に示した設備Bの蒸気需要と電力需要のパターンに対して、100kWの小型貫流ボイラ発電システム2台を導入した場合の経済性と省エネ性を検討した。システム（蒸気過熱器、蒸気タービン、設置工事、5%メンテナンス費）のコストを21万円/kWと仮定した。燃料価格はコージェネ特約の料金、電力料金

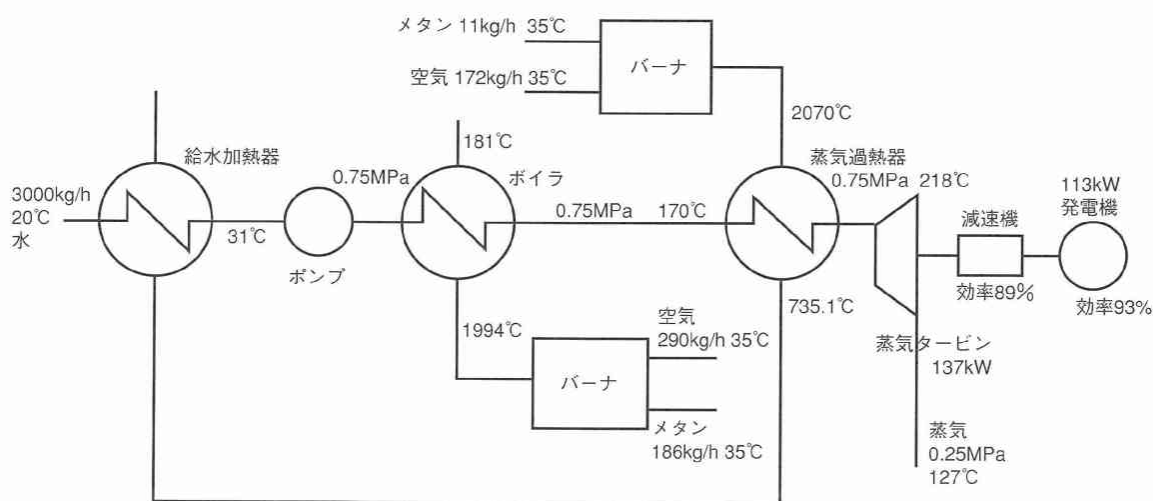


図9 蒸気過熱器の排ガスを給水加熱器に利用するダイアグラム

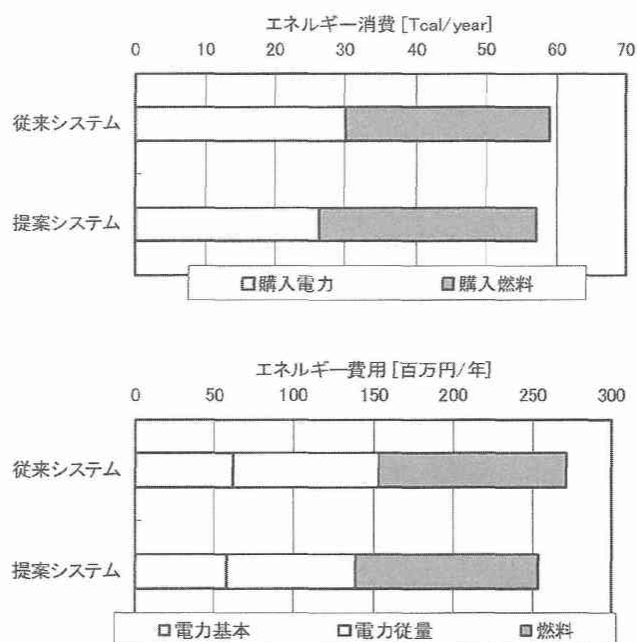


図10 エネルギー消費量・費用の比較（設備B）

は高圧Aの料金を仮定した。図10にエネルギー消費量と費用の従来システムと提案システムの比較を示す。燃料のエネルギー消費量が増えるが、電力の消費量が減るため合計するとエネルギー消費量は低減される。設備Bにシステム2台を導入した場合の単純投資回収年数は3.5年である。システム1台の導入の場合は2.4年になるが省エネ効果は小さく、逆に3台導入の場合は5.5年になるが省エネ効果は大きい。設備Aの場合にはボイラ負荷率が低いいため、システムの回収年数は、図11のように8～12年と長くなり経済性が悪い。

国内全体の省エネポテンシャルを試算した。小型貫流ボイラが25万台普及している。その中で2t/h級ボイラのユーザの割合が50%，比較的低い圧力条件の蒸気を使用しているユーザの割合が30%，ボイラの稼働率が50%（年間稼働時間が3,600時間）と仮定すると，16.2TWhの年間発電量が得られる。この発電量分だけ系統電力が減ることによる石油削減量は412万kl（商用電力換算係数0.254kl/MWh）となる。一方，この発電量をリパワリング効率78%で製造する場合のエネルギーは，193万klであり，差し引き219万klの省エネルギー効果となる。

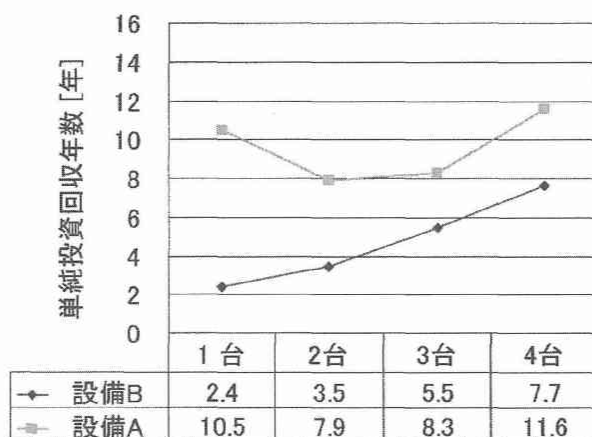


図11 設備A、Bの単純投資回収年数の比較

6. 本システムへの適用法規

本システムにおいて発電機を系統連系する場合には蒸気タービン、発電機、制御システムには電気事業法が適用される。しかし小型貫流ボイラと蒸気過熱器は電気事業法ではなく、「排気を発電用以外の用途にのみ供する発電用の蒸気タービンに蒸気を供給するボイラの取扱いについて（内規）」（平成15年1月21日原院第3号通達）を適用する。この通達によれば、蒸気圧力が1 MPa以下で蒸気流量が10t/h以下であること、蒸気全量を工場用動力等で利用すること、蒸気全量をバイパスできる配管を有すること、ボイラ制御が蒸気利用状況に基づくことの4要件を満足すれば、電気事業法の適用でなく労働安全衛生法の適用となる。

7. NEDO 実用化研究試験設備

2004 年度から新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）との実用化研究共同研究を実施しており、神鋼神戸総合技術研究所内

発電所（発電出力100kW）を建設中である。試験設備の外観を図12に示す。左側からボイラ2台、蒸気過熱器制御盤、分電盤、系統連系保護盤、タービン制御盤を配置している。蒸気タービンの外観を図13に示す。左側からラジアル式蒸気タービン、高速減速機、誘導発電機を配置している。2006 年度には定格運転、部分負荷運転を行い、蒸気変動に対する発電システムの性能を明らかにする計画である。

〔謝辞〕

本小型貫流ボイラ発電システムの研究開発は、経済産業省からの交付金を原資とし「エネルギー使用合理化技術戦略的開発」事業の1つとして実施するNEDOとの（実用化開発フェーズ）共同研究である。蒸気過熱器のシミュレーションに関しては産業技術総合研究所の古谷主任研究員、発電システムの経済性・省エネ性の検討に関してはエネルギー総合工学研究所の蓮池主管研究員に大変お世話になりました。ここに謝意を表します。



図12 神鋼神戸総合技術研究所内発電所

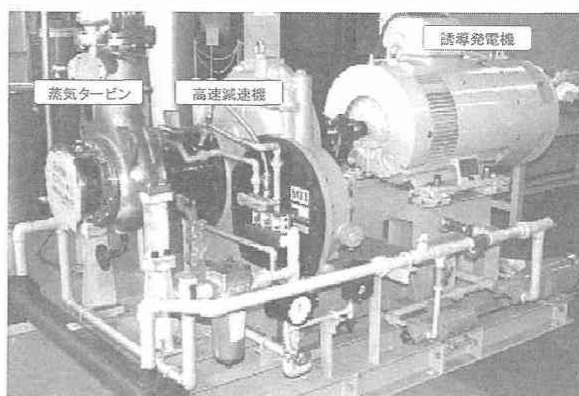


図13 ラジアル蒸気タービン発電機

「分散型電源を系統へ連系した場合の 系統安定に関する調査」について

細 木 訓 (財エネルギー総合工学研究所
主任研究員)



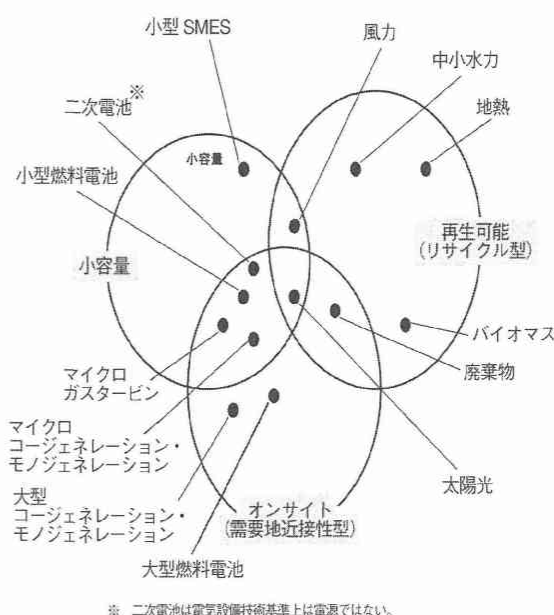
1. はじめに

わが国においては、平成16年4月より高圧500kW以上、さらに平成17年4月より高圧50kW以上の需要家を対象とした電力小売自由化が実施され、また、中立機関（電力系統利用協議会）の設置、卸取引電力市場の開設、振替供給料金の廃止など、電気事業制度改革が進められている。また、平成15年夏の関東圏における需給逼迫対応への懸念を踏まえ、「エネルギー基本計画」（平成15年10月）では、分散型電源の導入促進、ピーク需要抑制のための対策、電力の広域融通の体制整備等、一層安定的な電力供給システムの実現を目指すため必要な措置を検討し講じていくとされている。一層安定的な電力供給システムを目指すには、分散型電源の需給逼迫時における効果を見極めつつ、分散型電源導入が拡大したときの電力系統への影響等を踏まえることが重要であると考えられる。

これらの調査を行うため、弊所は、経済産業省資源エネルギー庁の委託により、「電力系統関連設備形成等調査（分散型電源を系統へ連系した場合の系統安定に関する調査）」を平成16年度から17年度にかけて実施した。本稿では、この調査結果の概要について、特に17年度調査の成果を中心に述べる。

2. 調査対象の分散型電源

分散型電源には図1に示すように様々なも



(出所：「電気協同研究」第56巻第4号を基に作成)

図1 各種分散型電源の特徴

表1 調査対象とした分散型電源の種類

		調査する分散型電源
再生可能 (リサイクル型)	太陽光発電	○
	風力発電	
	中小水力発電	
	地熱発電	
	廃棄物発電	
	バイオマス発電	
化石燃料型	蒸気タービン	○
	ディーゼルエンジン	○
	ガスエンジン	○
	ガスタービン	○
	マイクロガスエンジン	○
	マイクロガスタービン	○
	燃料電池	○
二次電池	NAS電池	○
	レドックスフロー電池	○

のがあがあるが、本調査では、需給逼迫対応としての分散型電源の可能性を効果的に調査するため、表1に示す分散型電源に絞り込んだ。絞り込みは、以下の観点で行った。

- 需給逼迫は電力需要が最も大きくなるピーク時（13時～16時）に最も発生しやすいため、ピーク抑制効果の可能性がある（ピーク時に確実に出力を出せる）ものを選定する。
- オンサイト（需要地近傍）に設置できるものを選定する。
- モジュール化等が可能な比較的小規模なものを選定する（10MW程度以下）。
- 燃料が異なるが、発電機の連系という意味では他の発電機と同様となるものは対象外とする（例えば、バイオマスは発電機の連系という意味ではディーゼルエンジン等と同様）。

3. 分散型電源大量導入時の系統安定に関する可能性検討（平成16年度調査）

大規模電源と分散型電源の協調に関連し、配電系統以下について弊所は、平成13年度～平成15年度にかけて、主に電圧変動面についてシミュレーションを実施し、課題解決に向けた将来のシステムについて検討した。また、平成16年度からは、NEDOにて実施中の「新電力ネットワークシステム実証研究」により技術評価が行なわれている。

一方、基幹系統に関しては、検討がほとんど行われていないのが現状である。そこで、電力技術に係る有識者の方々と構成した「分散型電源と系統安定に関わる技術検討会」を設置し、電力系統への影響について様々な意

見交換を行った。

この結果、分散型電源の系統安定に関して、表2に示す可能性を抽出した。

4. 分散型電源大量導入時の系統安定に関する詳細調査（平成17年度調査）

平成17年度は、平成16年度調査において更に検討を進める必要があるとされた事項について詳細調査を行った。

（1）分散型電源の効果（需給逼迫時における供給力）に関する検討

本調査では、「分散型電源の需給逼迫時における供給力」とは、需給逼迫時において、分散型電源が通常時に発電している出力以上に出すことができる発電能力（応答速度、周波数調整能力は考慮せず、出力できるkW値のみを評価）のこととした。

この時、需給逼迫時における分散型電源の活用法には、表3の3通りの方法が考えられるが、それぞれの活用法に関連し、必要なデータとして分散型電源の発電パターン等を調査し、その結果を基にそれぞれの活用方法の可否等について検討した。

表2 分散型電源の系統安定に関する可能性

① 需給逼迫時における供給力
② LFC※1能力減少による周波数変動
③ 需要地近傍に設置できる分散型電源による送電損失の減少
④ 需要家構内自立運転による停電範囲の縮小
⑤ 広域的な分散型電源の解列による影響
⑥ 同期化力※2を持たない分散型電源の増加による影響
⑦ 短絡容量への影響
※1 需給不均衡に起因する周波数変動等を感知し、需給不均衡を解消するために給電システムから行う自動的な発電機出力制御。
※2 同期機が並列運転している状態で同期状態を乱す系統擾乱があった場合などに、元の状態に戻そうとする復原力。

表3 需給逼迫時における分散型電源の活用法

(a) 現状の分散型電源の余力（分散型電源が停止・部分負荷運転している場合）の活用	分散型電源が通常時に停止・部分負荷運転をしている場合、需給逼迫時における供給力として即座に期待できる可能性がある。
(b) 分散型電源の新規設置	需給逼迫が予測された場合には、短工期で設置可能な分散型電源を活用することで、一時的に系統全体としての供給力を増加させることが期待できる可能性がある。
(c) 非常用電源の活用	非常用電源は、通常時には停止しているため、需給逼迫時における供給力として即座に期待できる可能性がある。

① 分散型電源の発電パターンの調査結果

代表的な需要パターンを基に、分散型電源の発電パターンを作成することとし、分散型電源の効果的な導入に関するノウハウを有するオンサイト事業者等へ、分散型電源の運用実態（設計・運用する考え方）に関するヒアリングを実施した。なお、ここでは、需要家の需要パター

ンについては、低圧連系については家庭用の需要パターン、高圧連系については、フラット需要（24時間一定）およびピーク需要（昼間にピーク発生）で代表させた。ヒアリング調査結果を踏まえると、個々の分散型電源の発電パターンは、そのパターンになる理由が異なるものの、概ね表4のパターンに分かれる。

表4 分散型電源の発電パターン

	適用先	発電パターン例
(a) 終日フラット（フル出力）運転	・ ガスタービン、燃料電池（PAFC） ・ 高圧フラット需要に設置するディーゼルエンジン、ガスエンジン、マイクロガスエンジン（高圧、低圧民生用）、マイクロガスタービン	
(b) 昼間フル出力、夜間停止（充電）運転	・ 二次電池 ・ 高圧ピーク需要に設置するディーゼルエンジン、ガスエンジン、マイクロガスエンジン（高圧、低圧民生用）、マイクロガスタービン	
(c) 負荷追従運転	・ 燃料電池（PEFC）	
(d) 熱主電従運転（主に夜間運転）	・ マイクロガスエンジン（低圧家庭用）	

ピーク時（13時～16時）の余力については、（c）負荷追従運転：燃料電池（PEFC）および（d）熱主電従運転：マイクロガスエンジン（低圧家庭用）にあるが、この余力を活用しようとすると発電出力が需要を上回るため、逆潮運転を行う必要がある。燃料電池（PEFC）については、逆潮可能な（有効電力が発電設備等設置者の構内から系統側へ向かって流れることが可能な）設備となっているために可能であるが、マイクロガスエンジン（低圧家庭用）については、機器の設計段階において機械的な仕様の変更を行う必要がある。また、いずれの場合も余剰熱処理を検討する必要がある、省エネルギー性を無視することになる。

② 分散型電源の需給逼迫時における供給力の
検討結果
分散型電源の発電パターン等の調査結果を

踏まえて、分散型電源の需給逼迫時の供給力
について検討した結果を表5-1、表5-2、表
5-3に記すが、以下のような特徴があり、需

表5-1 需給逼迫時における分散型電源の余力活用による供給力

	現状の導入量	夏期ピーク時（13時～16時） の余力の有無	夏期ピーク時（13時～16時） の余力の活用可否※2	備 考
太陽光発電	63.7万kW (2002年度)	なし	—	日射量次第であり、必要に 応じて出力を増加すること ができない。
自家用火力発電※1	分散型電源の 総設備容量の 大半を占める。	なし	—	昼間にはフル出力。 二次電池も同様。
マイクロガスイ ン（家庭用）	全体（常用自 家用発電設備、 コージェネレ ーション）の 1％程度。	昼間に停止しており、 設備容量の100％の余 力あり。	機器の設計段階において以下の 機械的な仕様の変更を行う必 要あり。 ・ 余熱処理設備（ラジエータ等） の設置 ・ 逆電力継電器のマスク ・ 制御アルゴリズムの変更	
燃料電池（PEFC）	燃料電池（PEF C以外も含む） の総設備容量は、 2002年において 1万kW未満。	昼間に部分負荷運転し ており、設備容量の40 ％程度の余力あり。	逆潮可能な設備であり、可能。た だし、余熱処理を含めた省エネルギー 性の検討が必要。	将来、新エネの導入推進により、 導入が進む可能性がある。

※1 ディーゼルエンジン、ガスエンジン等で、マイクロガスイエンジン（家庭用）を除く。

※2 昼間に発電するインセンティブの付加や、必要に応じ昼間に運転モードを切替えることが可能なように分散型電源の設置計画段階において
契約に盛り込むといった環境整備により、余力の活用が可能になっていくものと考えられる。

表5-2 需給逼迫時における分散型電源の新規設置による供給力

	工 期	新規設置による年間の供給力増加量 [kW]		
		年間の生産能力（過 去設置実績の最大値）	夏期ピーク時 （13時～16時） の常時出力	新規設置による 年間の供給力増 加量[kW] ※3
太陽光発電	3ヶ月程度※2	20万kW程度	最低限15％程度 （余力は増加し ない）	3万kW程度 （余力は増 加しない）
自家用火力発電※1	長くて12カ月	100万kW程度 ※ 大半が高压 以上の比較 的大型のも の	フル出力（余力 は増加しない）	100万kW程度 （余力は増 加しない）
マイクロガスイ ン（家庭用）	4カ月程度※2		停止（余力は 100％増加）	
燃料電池（PEFC）	3カ月程度※2 の見込み	1万kW未満	60％程度（余力は 40％程度増加）	1万kW未満
二次電池	7～10カ月程度	数万kW程度	フル出力（余力は 増加しない）	数万kW程度（余 力は増加しない）

※1 ディーゼルエンジン、ガスエンジン等で、マイクロガスイエンジン（家庭用）を除く。

※2 ライン生産により即納であり、連系協議に3カ月を要するとした。

※3 分散型電源の新規設置により供給予備力が一時的に増加するが、長期的に見ると電力会社等の発電設備
計画により一定の供給予備力に落ち着くことになると考えられる。

表5-3 需給逼迫時における非常用電源の活用について

	非常用専用設備	非常用常用兼用設備
現状における 設置台数	・ 150,000台程度※ ・ 1,800万kW程度※	・ 600台程度※ ・ 30万kW程度※
需給逼迫時の 活用	- 需給逼迫時に非常用電源を常用電源 として運転する場合、様々な事項を クリアする必要があると考えられる。 - 特に受電回路の改修、非常用電源を 2台以上設置、発電機のメンテナ ンス（1時間程度以上の連続運転可否 の確認）、ばい煙等の排出基準の遵 守といった、現状設備の改修に関わ る事項がネックになると考えられる。 - 平成18年4月に消防法が改正される 予定となっており、この改正内容よ っては柔軟化が図られ、需給逼迫時 における活用のために必要な事項が 緩和される可能性がある。	消防法上2台以上設置することと されており、場合によっては、常 時負荷が発電機2台分もない箇所に 非常用常用兼用設備が2台設置 され、常時は1台停止または部分 負荷運転となっている場合もあり 得る。この場合には、常時停止ま たは部分負荷運転となっている分 を、需給逼迫時における供給力と して期待できる可能性がある。

※設置台数の累計であり、廃止される設備を考慮していない。

給逼迫時に分散型電源を活用しようとした場合、法的な環境整備等により、需給逼迫時の供給力を備えるインセンティブを付加しておくことが必要であると考えられる。

●分散型電源の余力の活用に関しては現状において大きな量が期待できない。

●分散型電源の新規設置により、分散型電源が通常時に発電している出力分だけ、系統全体としての供給力が増加する。また、分散型電源が部分負荷運転を行っている場合、出力を抑制している分が余力として増加する。ただし、供給予備力が一時的に増加するが、長期的に見ると電力会社等の発電設備計画により一定の供給予備力に落ち着くことになると考えられる。

●需給逼迫時に非常用電源を常用電源として運転する場合、様々な事項をクリアする必要があると考えられる。

(2) 分散型電源の基幹系統へ与える影響に関する検討

① 広域的な分散型電源の解列による影響

分散型電源はその系統連系方式により回転機直接連系およびインバータ連系の2通りに分かれる。本検討においては、回転機直接連系の分散型電源に比べて、電力系統において故障（瞬時電圧低下等）が発生した場合に不要な解列をする可能性の高いインバータ連系の分散型電源について、その解列条件を模擬したシミュレーションを行い、基幹系統へ与

える影響の確認を行った。この解列条件については、解列の要因となり得る様々な保護継電器を模擬したシミュレーションにより検討したものをを用いた。なお、シミュレーションには標準的なモデルを用いた。図2はシミュレーションに用いた系統図である。

この結果、以下のことが明らかとなった。

●基幹系統に故障が発生した時、広域的に電圧が低下する。分散型電源の解列の感度が高い場合（今回のケース：電圧が80%を下回る（電圧低下が20%より大きい）と解列）、大量の分散型電源が解列する。

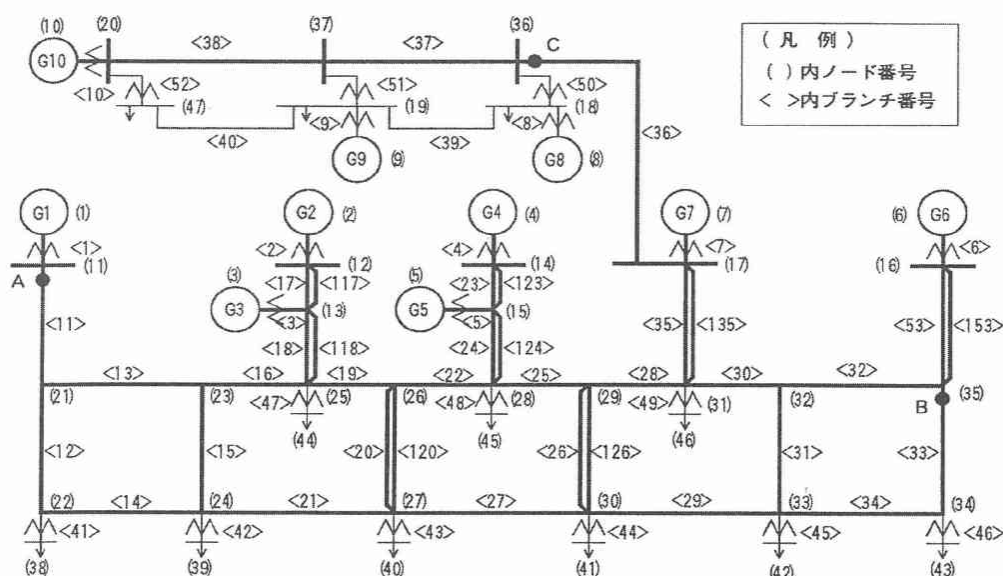
●分散型電源が大量に導入されている場合、広域的な分散型電源の解列により、以下のように電力系統の安定度に影響を与える場合がある。

- ・負荷端電圧の大幅低下が継続する。（図3）
- ・系統電源が脱調する。（図4）

●広域的な分散型電源の解列の影響は、模擬する負荷の負荷特性の違いにより大きな影響を受ける。今回の解析では、電圧低下により負荷が減少するような負荷特性の場合の方が、安定である傾向があった。詳細な解析を行なうためには、電圧の大幅な低下時を含めた負荷特性の模擬手法の検討が必要であると考えられる。

●今回の解析では、インバータ連系の分散型電源のモデルが定電流特性の負の負荷モデル（電圧低下時に出力を抑制する）の場合、分散型電源を導入するだけで、分散型電源の広域的な解列が発生しなくても安定度の悪化が見られた。これは、後述する同期化力を持たない分散型電源の増加の影響に関連するものであると考えられる。

●今回の解析では、インバータ連系の分散型電源のモデルが瞬低時も解列しない負の定電力特性の場合、電力系統の安定度が向上する結果となった。したが



（出所：電気学会技術報告「電力系統の標準モデル」、第754号、1999年11月）

図2 シミュレーションに用いた系統図（電機学会EAST10機系統モデル）

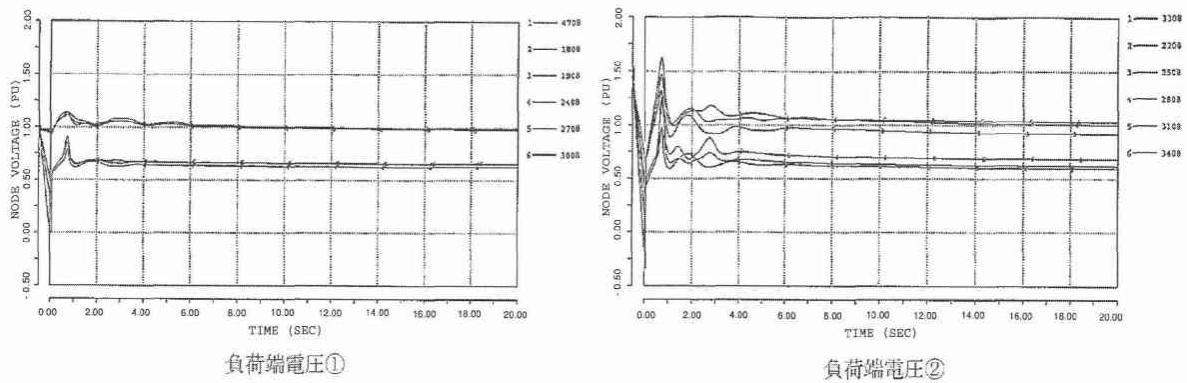


図3 シミュレーション波形図（電圧低下継続の例）

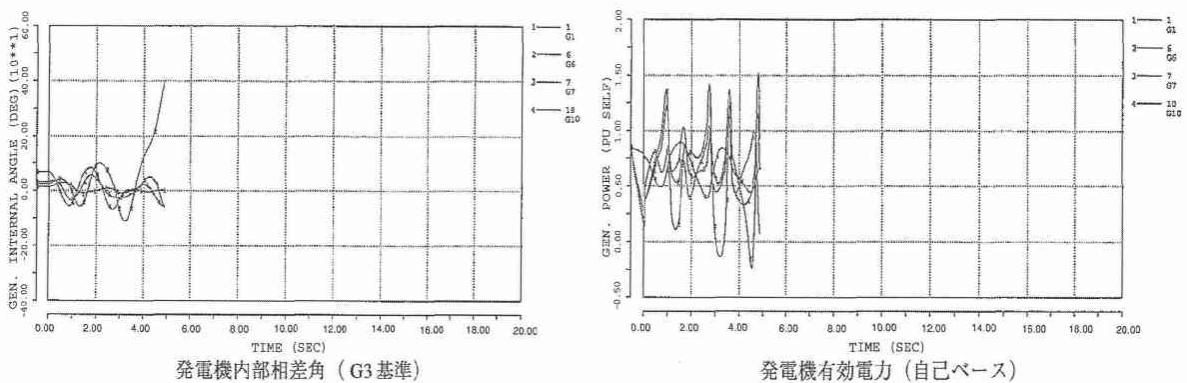


図4 シミュレーション波形図（系統電源脱調の例）

って、分散型電源の性能を、電圧が低下した場合も解列せず、一定の出力を出すことができるものにするこで、電圧低下による不安定要素の緩和が期待できると考えられる。

●今回の解析では、電源脱落による周波数変動は0.05Hz以内であり、周波数低下に関する保護継電器の動作は確認されなかった。ただし、実系統では、より大きな周波数変動が発生した例があり、場合によっては0.2Hz以上の周波数変動が発生し得る。単独運転検出装置の整定が瞬時であるという最も解列しやすい条件であった場合に、電源脱落が発生すると周波数低下による分散型電源の解列が発生する可能性がある。

② 同期化力を持たない分散型電源の増加による影響

同期化力を持たない分散型電源（インバータ連系の場合）が増加し、同期化力を持つ分散型電源が相対的に減ることにより、安定度に影響する可能性があると考えられる。そこで、図5のような単純な系統を用い、潮流条件等、その他の影響をなくしたモデルにて、分散型電源の有無、インバータ連系の分散型

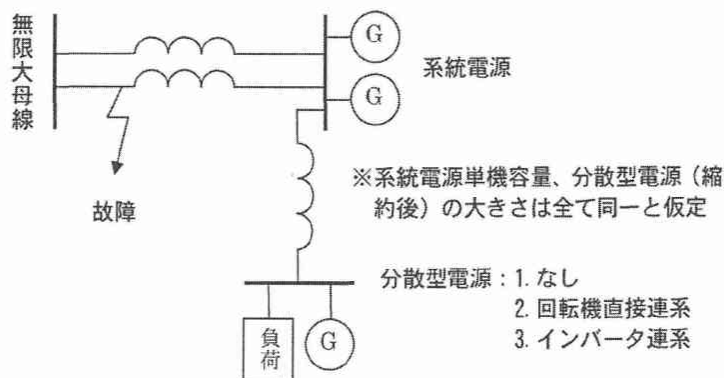


図5 同期化力を持たない分散型電源の増加による影響の検討モデル

電源の有無による臨界故障除去時間の比較（故障の除去時間を長くしていき、安定限界になる時間を見極め、その長さで安定度を比較する）を行った。

今回の解析では、電力系統の安定度は概ね「分散型電源なし」＞「回転機直接連系の分散型電源あり（系統電源の減少）」＞「インバータ連系の分散型電源あり（系統電源の減少かつ、同期化力を持たない分散型電源の増加）」の順で良いという結果となった（表6）。これにより、「系統電源の減少」および「同期化力を持たない分散型電源の増加」により、安定度が悪化する場合があることが示された。また、回転機直接連系の分散型電源のAVR（自動電圧調整器）を電圧一定制御とした場合、安定化するケースがあった。これは、基幹系統故障により電圧（特に末端）が低下することになるが、末端に分散型電源が接続され、基幹系統故障時に電圧を支えることで、負荷の減少を抑え、これにより系統電源の加速を抑えることができ、安定度が向上するためであると考えられる。

③ 分散型電源の電圧制御の安定度へ与える影響

今回、分散型電源の基幹系統へ与える影響について、2つの事象の検討を行った。この2つの事象に対し、電圧低下時の負荷の振舞（分散型電源の電圧制御方式）の与える影響が以下の通り異なってきた。

●電圧低下時に負荷が減少しない（分散型電源が電圧を支えた）場合、分散型電源の基幹系統へ与える影響は、以下のように2通りに分かれる。

- ・ 今回の広域的な分散型電源の解列のような需給不均衡による不安定要素が大きいケースでは、電圧低下による負荷の減少を妨げ、供給力不足を助長し、不安定方向に向かう。
- ・ 今回の同期化力の解析のように系統電源側に負荷と分散型電源がある場合には、電圧低下による負荷の減少を妨げ、系統電源の加速を緩和し、安定方向に向かう。系統電源が加速し続けると、同期発電機の機械的入力と電氣的出力のバランスが一時的に崩れ、不安定な運転状況（脱調）に陥ってしまう。

従って、安定度解析に関するケーススタディーを積み重ねることで検討を進めることが重要であると考えられる。

表6 臨界故障除去時間の検討結果

故障継続時間 (ms)	1. 分散型電源なし	2. 回転機直接連系の分散型電源		3. インバータ連系の分散型電源
		力率一定制御	電圧一定制御	
150	○	○	○	○
160	○	○	○	×
170	○	○	○	×
180	○	○	○	×
190	○	×	○	×
200	○	×	○	×
210	○	×	○	×
220	○	×	○	×
230	○	×	○	×
240	○	×	○	×
250	×	×	○	×
	...			
310	×	×	×	×

○：安定 ×：不安定（系統電源第一波脱調）

5. おわりに

分散型電源（特に風力発電）の導入が進んでいる欧州（特にドイツ）では、分散型電源の基幹系統へ与える影響として、安定度（風力発電の解列による影響）、周波数変動等が顕在化しつつあり、その対策に着手し始めており、日本においては影響が顕在化する前に、その対策の検討を進めておくことが重要であると考えられる。

本調査では、需給逼迫対応の対策のひとつとして分散型電源を考慮する際の特性、および、分散型電源大量導入時の系統安定（安定度面への影響）について検討を進めたが、今後は、今回明らかとなった分散型電源の基幹

系統へ与える効果・影響に対して、効果の向上、影響緩和対策の調査（要因分析、対策の方向性の検討等）を進めていく必要があると考えられる。

最後に、本報告書の取りまとめに当たり、本検討会の委員長をお引き受け頂いた三谷康範九州工業大学教授をはじめ、ヒアリング調査を含め精力的にご協力いただいた委員各位に心より謝意を表す次第である。

参考文献

- (1) 「平成16年度電力系統関連設備形成等調査—分散型電源を系統へ連系した場合の系統安定に関する調査—報告書」(エネルギー総合工学研究所, 平成17年3月)
- (2) 「平成17年度電力系統関連設備形成等調査—分散型電源を系統へ連系した場合の系統安定に関する調査—報告書」(エネルギー総合工学研究所, 平成17年12月)

平成18年度 事業計画

(財) エネルギー総合工学研究所

1. 基本的な考え方

(1) エネルギー資源の大部分を海外に依存し、かつ、大量に消費しているわが国が、国家存立の基盤であるエネルギーを将来に亘り安定的に確保していくためには、長期的かつグローバルな観点から、戦略的なエネルギー政策を立案し、それを実施していくことが必要である。

技術は、わが国が国際社会で優位性を維持向上する上で不可欠な資産であり、エネルギー技術は、将来のリスクに対応し得る強靱なエネルギー戦略の構築・実現に貢献するものと考えられる。

(2) 当研究所は、わが国のエネルギー工学分野の中心的な調査研究機関として、エネルギーの安定供給、効率的変換及び利用、地球環境問題への対応等、内外の諸問題について、産・学・官の緊密な連携の下、各技術分野における専門的な知見を集め、技術的側面から総合的に研究を行い、その成果の普及に努めてきている。

(3) 昨今、原油価格の高騰、京都議定書の発効等、わが国は資源確保及び地球環境対応の両面で課題に直面しており、有限の地球に住む我々としては、今世紀中にも顕在化が懸念される人類共通のリスクである、資源制約及び環境制約に如何に対処していくかは大きな課題である。当研究所は、エネルギーの未来を拓くのは技術であるとの認識の下、これら

の制約克服に資する技術について調査研究に取り組んでいく。

当研究所は、昨年10月、2100年を展望した「超長期エネルギー技術ビジョン」をとりまとめ、資源制約及び環境制約の克服に大きな役割を果たすと期待される重要な技術群を抽出し、ロードマップを作成したところであるが、今後とも、長期的、かつ、グローバルな視点に立った調査研究を行なっていくこととする。

「情報」と「評価」は、技術開発戦略を策定していく上で基盤を成すものである。当研究所は、エネルギー技術情報基盤の整備を図り、最新の技術情報を収集・整理するとともに、それらを分析評価した技術的知見を、適時、国、会員企業をはじめとする関係各位に提供していく。また、合理的な技術評価のあり方についても調査研究を実施する。

(4) 当研究所は、次のような点に留意して、調査研究事業を行う。

- ① 21世紀というタイムスパンを念頭に、また、グローバルな視点で事業を行う。
- ② 適確な政策形成や技術開発の企画立案に資するため、体系化された技術情報基盤の構築や合理的な技術評価手法の整備を図る。
- ③ 技術と社会との係わりを考慮して、学際的な調査研究の実施、異分野の調査研究機関との連携等による総合的なアプローチを進める。

- ④ 当研究所を巡る経済・社会環境は厳しいものがあることを十分に認識し、安定的な経営を可能とする基盤の強化を図る。
- ⑤ 調査研究活動の推進に不可欠なコンプライアンス、人材育成等を図る。また、個人情報保護についても適切な措置を講ずる。

2. 各エネルギー分野における調査研究テーマ

以上のような基本的な考え方を踏まえ、平成18年度においては、以下の調査研究を実施する。

(1) 総合的な見地からの調査研究

① エネルギー技術情報基盤の整備

技術開発戦略を策定していく上で基盤を成す「情報」については、資源制約及び環境制約の克服に資する有望なエネルギー技術について、関連する情報を収集・整理し、技術的見地から分析・評価を行ない、技術開発戦略の企画立案等に資するように体系化したエネルギー技術情報基盤の整備を図る。また、同情報基盤に関し、広範なユーザーがインターネットを通して、簡便に検索・運用できるように、データベースの設計を行なう。

② エネルギー技術開発戦略策定に資する技術評価手法に関する調査研究

同様に、技術開発戦略を策定していく上で基盤を成す「評価」については、諸制約克服に資する有望なエネルギー技術について、その属性を精査し、評価を行い、限られた技術開発資源の最適配分に関し優先度付与を可能とする合理的な技術評価手法について調査研究を行なう。

また、昨年策定した超長期エネルギー技術ビジョンについては、各技術分野における現行の技術開発プログラムとの整合性確

保するための調査研究を実施する。

③ エネルギー技術開発動向及びその将来性評価に係る調査研究

今後の開発が期待される、時のエネルギー技術を選び、最新の技術開発の動向、エネルギー供給や環境問題緩和に係るポテンシャル、経済性、社会的受容性等の評価、それらを踏まえた将来展望について調査研究を行う。18年度においては、次の2テーマを対象として実施する。

- 1) ガスタービン発電技術
- 2) 自動車用エネルギー

④ エネルギーシステムの評価手法開発に係る調査研究

エネルギー需給の将来想定や新しいエネルギーシステムの導入影響評価のツールであるエネルギーモデルに関し、新しい分析手法について検討評価を行ない、従来の手法では評価が難しかった問題への適用可能性について検討を行なう。

⑤ エネルギーに関する公衆の意識調査研究

エネルギーに関する公衆の意識に関し、アンケート調査により定期的に調査・分析を実施する。

(2) 原子力関連

原子力は、実用的な非化石エネルギー源であり、世界の今後の経済成長を担う上で重要なエネルギーとして開発利用が見込まれる。一方、放射性廃棄物処分、安全確保、核拡散に係る懸念等原子力の開発利用を取り巻く環境は厳しい状況にある。

18年度は、新たに次世代軽水炉に係るフィージビリティ調査を開始するとともに、現行の原子力発電システムに係る分析評価、将来の原子炉コンセプトである第4世代炉開発に係る国際的な共同研究への参画を行う。

また、プルトニウムのリサイクル、放射性

廃棄物処分、安全確保等の重要な課題に関し調査研究を実施し、社会科学系の調査研究機関との連携により、社会と原子力のテーマに対しても取り組むこととしている。

さらに、革新的な原子力技術の提案公募型研究開発事業を実施することにより、最新の原子力技術に係る情報収集を図るとともに、評価能力の向上を図る。

(ア) 次世代原子炉技術開発等に関する調査研究

- ① 原子力発電システムのライフサイクル分析に係る調査研究
- ② 原子力に係る長期エネルギーシステム評価に係る調査研究
- ③ 第4世代原子力システム開発に関する国際研究協力
- ④ 次世代軽水炉フィージビリティ調査
- ⑤ 高温ガス炉プラントの位置づけ・可能性に関する調査研究

(イ) 核燃料サイクルに関する調査研究

- ⑥ 核燃料サイクルのシステム評価に係る調査研究

(ウ) 放射性廃棄物の処理・処分に関する調査研究

- ⑦ 放射性廃棄物処分におけるリスク情報に基づく意思決定に係る調査研究
- ⑧ 放射性廃棄物処分における安全確保の合理的体系化に係る調査研究
- ⑨ 低レベル放射性廃棄物安全評価に係る調査研究

(エ) 原子力安全に関する調査研究

- ⑩ 国内外の原子力法制度に係る調査研究

(オ) 将来に向けた原子力技術に関する調査研究

- ⑪ 革新的実用原子力技術開発に係る提案公募事業の運営管理

⑫ 原子力技術基盤に係る調査研究

(3) 化石エネルギー関連

化石エネルギーは、今後ともエネルギー供給の大宗を占めていくと考えられるが、資源量が豊富な石炭については、環境保全を念頭に、一層の効率的利用の拡大、ガス化やクリーンな液体燃料への転換に係る技術の調査研究に取り組むこととしている。

18年度においては、石油関連では、輸送用燃料の合理的な規制確立に資する調査研究を、また、天然ガス関連では、ハイドレード化技術を利用した効率的な輸送方法に関する調査研究を行う。

石炭関連では、下水汚泥をスラリー化し石炭ボイラーで燃焼し熱回収する技術、石炭乾留ガスを改質しクリーン燃料とする技術、利用が十分に行われていない褐炭等の低質炭化水素エネルギー資源の改質利用技術等に係る調査研究を実施する。

(ア) 石油系エネルギーに関する調査研究

- ① オフロードエンジンから排出される環境汚染物質の測定法標準化に係る調査研究

(イ) 天然ガス系エネルギーに関する調査研究

- ② 天然ガスハイドレード実証に係る調査研究

(ウ) 石炭の利用技術に関する調査研究

- ③ 加圧型流動床ボイラー（PFBC）における下水汚泥混焼技術に係る調査研究
- ④ 無触媒石炭乾留ガス改質技術に係る調査研究
- ⑤ 褐炭からの超粘結炭製造技術に係る調査研究
- ⑥ ガス化技術を核とした物質再生可能プロセスに係る調査研究

(4) 新エネルギー・エネルギーシステム関連

新エネルギーは、資源存賦に地域性が大きく、また、利用形態も分散型エネルギー、系

統電力への併入，熱電併給等多様であり，エネルギー供給システムの最適化を図りつつ，長期的な視点から技術開発を推進していくことが必要である。

18年度においては，電力・ガスに跨る分野，及び，バイオマスエネルギー分野において，総合的な技術開発戦略の策定を行うとともに，新エネルギー等による分散型電力と系統電力との調和がとれた電力ネットワークのあり方について調査研究を実施する。

新しい二次エネルギーとして期待される水素エネルギーについては，関連技術の実用化に関し調査研究を実施するとともに，水素技術開発の発展に資する国際研究協力の推進を図る。

(ア) 新エネルギーに関する調査研究

- ① バイオマスエネルギー技術に係るロードマップ策定に係る調査研究
- ② バイオマスフュエル・ロータリー・ガスエンジン・システムに係る調査研究

(イ) 電力システム等に関する調査研究

- ③ 電力・ガス総合技術開発戦略に係る調査研究
- ④ 系統安定に資する電力系統関連設備形成等に係る調査研究
- ⑤ 新電力ネットワーク技術に係る総合調査研究
- ⑥ 風力発電電力系統安定化等技術開発の整合性評価に係る調査研究

(ウ) 水素エネルギーに関する調査研究

- ⑦ 水素安全利用に関する基礎物性に係る調査研究
- ⑧ 水素シナリオ策定に係る調査研究
- ⑨ 水素エネルギーの革新的技術に係る調査研究
- ⑩ 水素エネルギー技術に係る国際協力研究
- ⑪ 水素エネルギー技術に係る内外の開発動向調査

(５) 地球環境関連

地球環境問題は，17年2月の京都議定書の発効により，現在，対応が最も急がれている課題であり，各エネルギー分野からの対応が必要とされている。エネルギー技術全般に関し専門的な知見を有する当研究所としては，地球温暖化対策技術に関する調査とその技術の導入効果の評価，エネルギー予測モデルを用いたシミュレーション等に係る調査研究を実施する。

18年度においては，地球環境問題に係る国際的な動向調査を実施しつつ，わが国の対応について調査研究を行なう。また，資源の有効利用に資する観点から，金属資源の長期的な需給モデル作成，化石燃料資源賦存量を踏まえた化学原料代替及び新燃料製造のあり方について調査研究を行う。

(ア) 地球温暖化対策技術等に関する調査研究

- ① 二酸化炭素回収・隔離技術の政策的位置付けに係る調査研究
- ② 地球温暖化問題に対する国際的な対応策・政策に係る調査研究

(イ) 資源の有効利用，原料代替に関する調査研究

- ③ 金属資源に係る地域間フローモデルに係る調査研究
- ④ 原材料，化学品，リスクの相関性と定量化に係る調査研究

3. 調査研究成果に係る情報発信

(1) 前号の事業で得られた成果のうち，技術情報として有用度の高いものを編集し，情報提供を行なう。これらの調査研究に係る活動内容や成果は，寄稿・投稿，講演会，学会発表，ホームページへの掲載等により公表し，広く利用に供することとする。

(2) 当研究所では、下記の手法により、調査研究成果に係る情報発信を行なう。

- ① エネルギー技術に係る情報を編集した冊子
(新エネルギーの展望シリーズ等)の作成・配布
- ② 定期刊行物(季報エネルギー総合工学)の刊行
- ③ エネルギー総合工学シンポジウム、月例研究会等の開催

4. その他

(1) 産・学・官の緊密な協力体制の下、エネルギー技術上の諸問題について、関係各分野の専門家による情報交換と共有を実施する場を提供し、適宜、エネルギー技術開発のあり方について提言を行なう。

(2) 海外の調査研究機関との交流・連携を深めるとともに、国際プロジェクトへの参画等により、国際協力の一端を担う。

(3) 当研究所に関し、時代に即した適切な調査研究テーマを発掘・企画立案する能力及び情報発信能力の向上を図る。

研究所のうごき

(平成18年1月1日～4月2日)

(財電力中央研究所 理事待遇 CS推進本部
チーフオルガナイザー 工学博士 新田 義
孝 氏)

◇ 第24回評議員会

日 時：3月9日(木) 11:00～11:55

場 所：経団連会館(9階) 901号室

議 題：

第一号議案 平成18年度事業計画および収支予算
(案)について

第二号議案 理事および監事の選任について

第三号議案 評議員の一部交替について

第四号議案 その他

◇ 第66回理事会

日 時：3月16日(木) 11:05～12:10

場 所：経団連会館(9階) 901号室

議 題：

第一号議案 平成18年度事業計画および収支予算
(案)について

第二号議案 理事4役の互選について

第三号議案 評議員の一部交替について

第四号議案 顧問の委嘱について

第五号議案 事務局長の委嘱について

第六号議案 退任常勤役員に対する退職金の支
給について

第七号議案 その他

◇ 月例研究会

第242回月例研究会

日 時：1月27日(金) 14:00～16:00

場 所：航空会館7階 701・702会議室

テーマ：

1. CO₂の貯留・隔離に関する政策的な取組み
ーIPCCにおける位置付けと国内外動向
(経済産業省 産業技術環境局 環境政策課
課長補佐(地球環境対策室担当) 西尾 匡弘
氏)
2. CO₂の貯留・隔離の研究開発動向
(財電力中央研究所 地球工学研究所 地圏科
学領域 上席研究員 大隅 多加志 氏)

第243回月例研究会

日 時：2月24日(金) 14:00～16:00

場 所：航空会館7階 701・702会議室

テーマ：

1. オーストラリア キーアンズランド州から
見た日本ーエネルギー資源面、特に石炭を
中心として
(オーストラリア キーアンズランド州政府
駐日代表 安達 健 氏)
2. コアラプロジェクト：石炭を介した日豪補
完環境保全プロジェクトの提案

第244回月例研究会

日 時：3月31日(金) 14:00～16:00

場 所：航空会館 5階501・502会議室

テーマ：

1. 木材利用の環境的意義とエネルギー利用の
あり方
(独) 森林総合研究所 木材特性研究領域
物性研究室長 外崎 真理雄 氏)
2. 自動車用燃料におけるバイオマス利用
(新日本石油(株) 研究開発本部 開発部
燃料技術室長 斎藤 健一郎氏)

◇ 主なできごと

- | | |
|----------|---|
| 1月10日(火) | ・第2回エネルギー技術情報基盤
検討委員会 |
| | ・第2回原子力LCAに関する委員
会 |
| 12日(木) | ・第3回「廃棄物発電及び廃棄物
ガス変換発電導入普及に関する
調査」導入戦略委員会 |
| 16日(月) | ・第1回原子力技術基盤調査委員
会 |
| 17日(火) | ・第2回電力・ガス総合技術作業
会 |
| 25日(水) | ・第3回電力ネットワーク技術総
合調査委員会 |
| 26日(木) | ・原子力水素研究会 |
| 27日(金) | ・第1回核燃料サイクル関連技術
調査委員会 |
| 2月3日(金) | ・第2回長期エネルギーシステム
評価に関する委員会 |
| 6日(月) | ・第3回電力・ガス総合資源・環
境技術分科会 |
| 8日(水) | ・第3回電力・ガス総合国内安定
供給技術分科会 |
| 10日(金) | ・第4回高温ガス炉プラント研究
委員会 |
| 16日(木) | ・第4回リスク情報検討委員会 |
| 17日(金) | ・第1回次世代軽水炉ブレFS研究
会 |
| 20日(月) | ・第3回電力・ガス総合技術検討
会 |
| 21日(火) | ・第3回革新的技術に関する研究
委員会 |
| 23日(木) | ・第2回原子力技術基盤調査委員
会 |
| 24日(金) | ・第3回風力発電電力系統安定化
等技術開発実行委員会 |
| 28日(火) | ・第3回エネルギー技術情報基盤
検討委員会 |

3月2日(木) ・第3回電力・ガス総合技術作業会

4日(土) ・第2回軽水炉等技術開発推進事業公募審査委員会

7日(火) ・第3回「下水汚泥の高効率ガス変換発電システムの開発」技術開発推進委員会
・第4回革新的技術に関する研究委員会

8日(水) ・第4回電力ネットワーク技術総合調査委員会

9日(木) ・第4回エネルギーモデル検討委員会

10日(金) ・第4回品質別電力供給システム総合調査委員会
・第3回原子力LCAに関する委員会

13日(月) ・第4回電力・ガス総合資源・環境技術分科会
・第2回オフロードエンジンから排出される未規制物質測定法の標準化に関する調査研究委員会
・第2回オフロードエンジンから排出される未規制物質測定法の標準化に関する調査研究委員会

14日(火) ・第4回700℃級超々臨界圧プラント(A-USC)技術開発 経年石炭火力発電所の高効率化とそれに伴うCO₂排出削減研究
・第3回長期エネルギーシステム評価に関する委員会

22日(水) ・第3回原子力技術基盤調査委員会
・第4回電力・ガス総合国内安定供給技術分科会

23日(木) ・第3回水素インフラ技術開発ロードマップ検討WG

27日(月) ・第4回電力・ガス総合技術検討会

28日(火) ・第3回水素貯蔵技術開発ロードマップ検討WG

29日(水) ・第4回超長期エネルギー技術戦略研究会
・第5回全体WG
・第2回核燃料サイクル関連技術調査委員会

◇ 人事異動

○1月1日付
(出向採用)

岡田康宏 プロジェクト試験研究部 主管研究員

○2月13日付
(採用)

石本祐樹 プロジェクト試験研究部 研究員

○3月31日付
(退任・解嘱)

荒井行雄 専務理事兼プロジェクト試験研究部長

(プロジェクト試験研究部部長 解嘱)

高倉 毅 理事兼プロジェクト試験研究部部長

(解嘱)

松井一秋 研究理事

(出向解除)

山田英司 企画部長兼プロジェクト試験研究部部長

佐藤保和 プロジェクト試験研究部 主管研究員

○4月1日付
(就任)

松井一秋 理事

坂田 興 プロジェクト試験研究部部長副主席
研究員

蓮池 宏 プロジェクト試験研究部部長副主席
研究員

坪井 仁 経理部 副部長

半田卓己 プロジェクト試験研究部 主任研究員

(出向採用)

中村恒明 プロジェクト試験研究部 プロジェクトリーダー・主管研究員

(採用)

都筑和泰 プロジェクト試験研究部 主任研究員

○4月2日
(就任)

山田英司 専務理事兼企画部長兼プロジェクト試験研究部長

第 28 卷 通 卷 目 次

VOL.28, NO. 1 (2005.4)

【巻頭言】	エネルギー戦略の視点 経済産業省 資源エネルギー庁長官 小 平 信 因	1
-------	--	---

-----【特集 シンポジウム「日本のエネルギーに未来はあるか」】-----

【概要】	「日本のエネルギーに未来はあるか」 —有限の地球に生きる—	3
【基調講演】	安く豊かな石油時代が終わる —“石油ピーク”の意味するところ— (社)日本工学アカデミー 環境フォーラム代表 東京大学名誉教授、富山国際大学教授 石 井 吉	4
【講演】	エネルギー政策をめぐる諸問題 (社)日本工学アカデミー エネルギー基本戦略部会部会長 三菱マテリアル(株)名誉顧問 秋 元 勇 巳	14
【講演】	新しい文明への移行—“人類と地球”の世紀 (株)モリエイ代表取締役会長 (財)日本学術協力財団理事 内 田 盛 也	29
【講演】	水素エネルギーの展望と課題 東京大学名誉教授 田 邦 夫	39
【講演】	日本列島をめぐる領土と資源エネルギー 日本学術会議第5部会員 京都大学大学院教授 芦 田 讓	48
【総括とアピール】	(社)日本工学アカデミー エネルギー基本戦略部会副部会長 (財)エネルギー総合工学研究所 理事長 秋 山 守	58

【寄稿】	省エネルギーに向けた ヒートカスケディング技術の展開 東京農工大学大学院 共生科学技術研究部助教授 秋 澤 淳	61
------	---	----

【寄稿】	最近の省エネルギー対策の動向 (財)省エネルギーセンター 調査第2部長 佐 藤 文 廣	67
------	--	----

【事業計画】	平成17年度 事業計画 (財)エネルギー総合工学研究所	74
--------	-----------------------------	----

【研究所の動き】		78
----------	--	----

【第27巻通巻目次】		80
------------	--	----

【編集後記】		84
--------	--	----

【巻頭言】 環境保全・省エネルギーに向け 大きく舵を切った中国鉄鋼業 (社)日本鉄鋼連盟 専務理事	市 川 祐 三	1
【座談会】 「水素社会の実現を目指して」 横浜国立大学大学院 工学研究院 機能の創生部門 教授 広島大学自然科学研究支援開発センター 特任教授・名誉教授 東京大学大学院 工学系研究科 化学システム工学専攻 教授 (財)日本自動車研究所 FC・EVセンター 主席研究員 次長 新日本石油(株) 新エネルギー本部 FC事業部長 川崎重工業(株) 技術研究所 化学技術研究部 エネルギーグループ長 (参与) 司会 (財)エネルギー総合工学研究所 プロジェクト試験研究部 副主席研究員 (プロジェクトリーダー)	太 田 健 一 郎 藤 井 博 信 堂 免 一 成 渡 辺 正 五 池 松 正 樹 神 谷 祥 二 坂 田 興	3
【寄稿】 水素利用技術の難題—水素は如何に材料の強度を弱めるか 九州大学工学研究院 教授	村 上 敬 宜	22
【寄稿】 燃料電池用水素製造技術の開発 東京ガス(株) R&D本部 水素ビジネスプロジェクトグループ 技術開発チームリーダー	安 田 勇	30
【調査研究報告】 NEDO水素安全利用等基盤技術開発事業への取り組み ①「燃料電池車普及に向けたインフラ整備シナリオの検討」 プロジェクト試験研究部 主管研究員	乾 昌 弘	42
【調査研究報告】 NEDO水素安全利用等基盤技術開発事業への取り組み ②「革新的技術の研究」(枠組と研究トピックス) プロジェクト試験研究部 副主席研究員 (プロジェクトリーダー)	坂 田 興	50
【寄稿】 RPS法と風力発電系統連系対策について 資源エネルギー庁 省エネルギー・新エネルギー部 新エネルギー等電気利用推進室 室長補佐	中 島 恵 理	59
【寄稿】 拡大を続けるLNG市場と事業者の対応 大阪ガス(株) 資源事業部 課長	奥 田 浩 二	69
【寄稿】 ピークオイル説を検証する 独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構 石油・天然ガス調査グループ調査チーム 主席研究員	本 村 真 澄	75
【内外情勢紹介】 米国における原子力開発利用の動向 —原子力「冬の時代」からの回復への足取り— 主席研究員兼企画部長	山 田 英 司	83
【調査研究報告】 温室効果ガス削減基準としての「ブラジル提案」の動向 プロジェクト試験研究部 副部長兼主管研究員 (財)地球環境産業技術研究機構 主席研究員	黒 沢 厚 志 友 田 利 正	93
【行事案内】 第21回エネルギー総合工学シンポジウム		100
【研究所の動き】		101
【編集後記】		103

【巻頭言】 石油業界の直面する課題	石油連盟 専務理事	山 浦 紘 一	1
【理事長対談】 江戸に学ぶ ―普遍的な人間のあり方とエネルギー問題― 作家, 江戸のエネルギー, テクノロジー紹介者 (財)エネルギー総合工学研究所 理事長		石 川 英 輔 秋 山 守	4
【寄稿】 エネルギー分野の技術戦略マップの策定について 経済産業省 資源エネルギー庁 長官官房 総合政策課 課長補佐		蘆 田 和 也	17
【調査研究報告】 エネルギー分野の技術戦略マップ策定の背景 (財)エネルギー総合工学研究所 主管研究員		角 本 輝 充	34
【寄稿】 京都議定書目標達成計画と地球温暖化対策 経済産業省 産業技術環境局 環境対策課 課長補佐		豊 島 厚 二	42
【寄稿】 バイオマスへの期待と現実 ―森林バイオマスのエネルギー利用をどう進めるか― 岐阜県立森林文化アカデミー 学長		熊 崎 實	51
【寄稿】 バイオマスエネルギーの技術動向と展望 東京大学大学院 農学生命科学研究科 生物・環境工学専攻 教授		横 山 伸 也	61
【寄稿】 農畜産業系バイオマスの利用と課題 (独)農業工学研究所 地域資源部 資源循環研究室 室長		柚 山 義 人	69
【調査研究報告】 「バイオマスエネルギーテクノロジー・ ロードマップ策定に関する調査」について (財)エネルギー総合工学研究所 主任研究員		田 村 隆 之	79
【調査研究報告】 次世代原子力技術開発とわが国の取組の概況 (財)エネルギー総合工学研究所 主管研究員		小 泉 真 範	88
【調査研究報告】 ディーゼルエンジンの排出ガス規制と対応技術について ―ディーゼル車の復権なるか― (財)エネルギー総合工学研究所 主管研究員		横 山 昌 宏	94
【研究所の動き】			103
【編集後記】			104

【開会挨拶】	(財)エネルギー総合工学研究所 理事長	秋 山 守	…… 1
【来賓挨拶】	経済産業省 資源エネルギー庁 省エネルギー・新エネルギー部長	高 原 一 郎	…… 3
【基調講演】	ビジョンに牽引されたエネルギー需給構想 東京大学 理事・副学長	西 尾 茂 文	…… 5
【講演】	超長期の視点からのエネルギー技術開発戦略 —検討の枠組みと途中経過について— (独)産業技術総合研究所 エネルギー技術研究部門 分散システムグループ長	赤 井 誠	…… 17
【特別講演】	原子力安全を考える —「情報の非対称性」と「コミュニケーション的行為」— 原子力安全委員会 委員長代理 東京大学名誉教授	鈴 木 篤 之	…… 25
【講演】	巨大技術開発の5W1H 読売新聞東京本社 論説委員	井 川 陽次郎	…… 33
【講演】	原子力は地球環境を救えるか (財)エネルギー総合工学研究所 研究理事兼主席研究員	松 井 一 秋	…… 42
【講演】	世界の原子力開発動向とわが国の将来展望 (社)海外電力調査会 会長	榎 本 聰 明	…… 51
【閉会挨拶】	(財)エネルギー総合工学研究所 専務理事	荒 井 行 雄	…… 64
【研究所の動き】	……		65
【編集後記】	……		67

編集後記

今年の早春は、トリノ・オリンピックにおける荒川静香選手の金メダルとWBC（ワールド・ベースボール・クラシック）における王ジャパンの優勝に、日本全体が久しぶりに喜びに沸きました。さらに、余り騒がれなかったにせよトリノ・パラリンピックにおける小林深雪選手（ノルディックスキー・バイアスロン（12.5キロ）女子視覚障害）と大日方（おびなた）邦子選手（アルペン女子大回転座位）の2個の金メダルも快報でした。彼らの活躍を見て何故我々が無条件に喜ぶのか。それは、日本人としての同胞意識によるものでしょうし、さらにその奥に潜む日本人独特の遺伝子あるいはDNAが影響している故ではないでしょうか。

本稿の「理事長対談」で登場いただきました東嶋和子氏は、食品関係の「遺伝子組み換え」への不安から、遺伝子、DNA等の基礎的なことはもとより、その食品の輸出元（例えば、米国）まで調査に行かれるほど、遺伝子、医療問題、さらにエネルギー問題等へと活動領域を拡げられている方です。「遺伝子組み換え」は、将来の食糧増産、さらにバイオマスエネルギー生産等への応用も考えられ、まさに未来技術として期待されているものですが、一方では本来自然界に存

在しないために不安視される要因を含んでいると考えられます。同氏が遺伝子とエネルギー問題を同一視点で捉えられるのも、両者ともその本質と限界を明らかにし、それを人々に分かりやすく情報提供することが重要であるとの理解に立っていることと思われます。

話が前後した形となりましたが、本稿の巻頭言は、広瀬研吉原子力安全・保安院院長より「馬の文化」の題でご寄稿いただきました。馬といえば、人類史上、労働、交通、連絡手段等、およそ人が力または速さ（最近では娯楽）を必要とする場合に最もお世話になっており、同時に非常に相性がよく心も通える動物であり、その点もっと評価されてしかるべきと思っていたところですが、同稿では細やかに、情感豊かに、同時に馬力あふれる紹介をしていただき、事務局一同感動した次第です。

外部寄稿およびテープ起し査読の方々におかれては、時節柄大変ご多忙な時でありましたが、いずれもエネルギー問題の重要性の認識に立ってご協力いただきましたことに対し、誌上からではありますが、心からの感謝を申し上げます。

編集責任者 小川紀一郎

季報 エネルギー総合工学 第29巻第1号

平成18年4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 (8F)

電話 (03) 3508-8894

FAX (03) 3501-8021

<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。