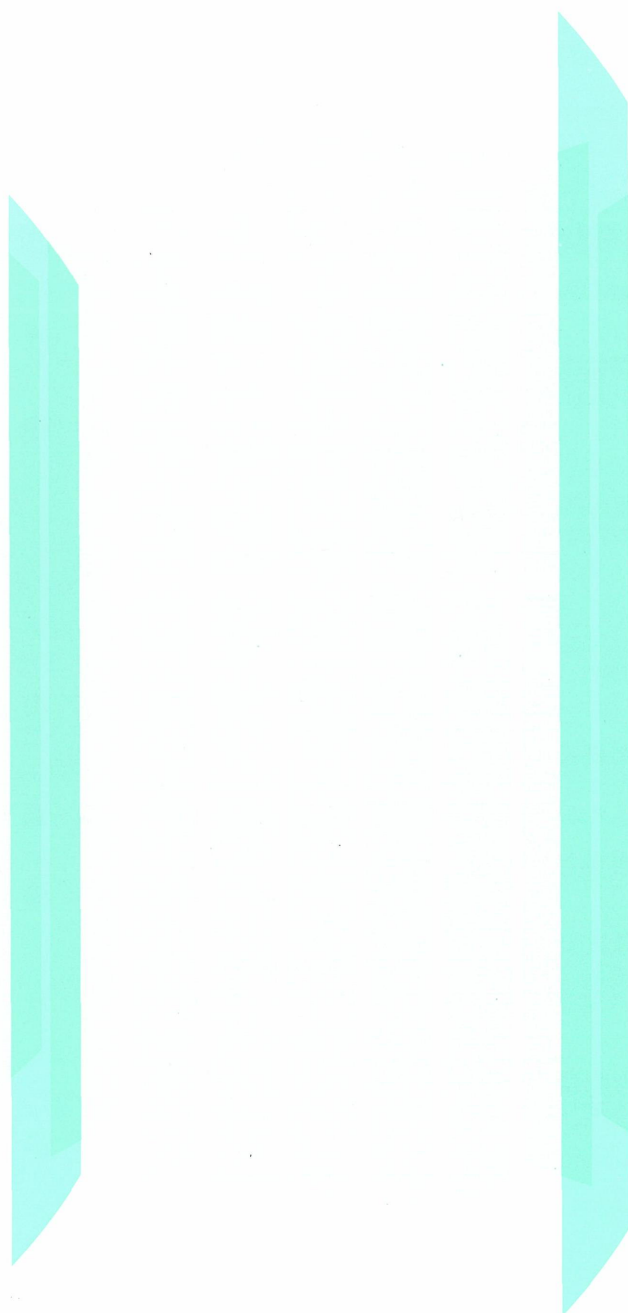


季報 エネルギー総合工学

Vol. 28 No. 2 2005. 7.



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

目 次

【巻頭言】 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

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

市 川 祐 三 (社)日本鉄鋼連盟
専務理事



日本鉄鋼連盟は、中国鋼鉄工業協会と共催で、7月4日から5日にかけて、北京で、「日中環境保全・省エネルギー先進技術交流会」を開催した。この交流会は、本年1月に日中両国の鉄鋼業界首脳が会談した際、その開催が合意されたものである。

日本側からは、三村日本鉄鋼連盟会長を含む高炉5社の社長や担当役員、経済産業省高官、研究者など総勢80名余が参加し、中国側からは、謝中国鋼鉄工業協会会長を始めとする各社の会長・社長や担当役員、中国政府高官、研究者など総勢110名余が参加した。

私は、この交流会において、日本側モデレーター役として、司会進行及び総括とりまとめを担当し、議論全体の流れを見守る立場にあった。この交流会は、先述の規模等だけでなく、議論の内容においても、特筆すべき点が多々あり、大変有意義な交流を果たせたと考えている。ここでは私の印象に残った3点について述べたい。

まず、第1は、日中両国鉄鋼業界において、ともに「両国の環境保全・省エネルギーに関する技術交流は、両国のみならず、世界的な規模での持続的発展に寄与する」との認識の共有を確認できたことである。三村会長は、その挨拶で「中国と日本は、世界鉄鋼業の安定発展と持続可能な社会の構築に向け、ともに責任を有する」とし、謝会長からも、その挨拶で「両国における環境・省エネルギーに関する先進技術・関連政策の交流を図ることは、両国鉄鋼業の持続的発展を促し、日中両国民及び全世界人類の幸福をもたらす」との基本認識が示された。

中国鉄鋼業は、既に、わが国の3倍近く、世界第1位の生産実績を有し、今後とも拡大が予想されている。その業界首脳が、環境保全・省エネルギー問題を世界的規模において捉え、日本との技術交流の必要性を提起している。その意義は、今日において、そして将来において、大変に大きい。

第2には、今回の交流会を通じ、環境保全や省エネルギーに向けての中国側の強い意欲を感じとることができた。その背景として、中国側は環境保全や省エネ

ルギーに向けて、大きく舵を切り、政策転換を図ったものと判断される。これは、参加した日本側首脳の共通した感想でもあった。

中国側の積極性は、交流会の各場面を通じて感じられた。例えば、中国側からは、自らの後発性等を理由として対策の遅れを正当化したり、あるいは、地球温暖化に対する先進国の責任を追及したりするなどの後ろ向きの議論は見られなかった。むしろ、中国側の業界関係者や研究者の日本の先進技術に関する真摯な質問が印象的であった。

中国政府からも、一定規模以下や一定の環境保全・省エネ設備の装備されない高炉や転炉については、設備の新設を一切認めず、更には、既存設備についても、適宜淘汰を進める方針であることが、明らかにされた。

第3は、交流会における講演の全体を通じ、わが国の鉄鋼業が、世界最高水準と自負する環境保全・省エネ技術を獲得するに至った理由・背景を、明らかにし、中国側に伝えられたことである。それは、わが国鉄鋼業が、

イ) 環境保全・省エネ設備等のコストを真に必要な社会的コストとして認識し、適切に負担したこと。

ロ) ナショナルミニマムである環境規制に対して、受動的に対応したのではなく、それを超えて、自ら目標を定め、自主的に取り組みを進めたこと。

ハ) また、以上を可能とすべく、個々の企業内にあってはトップ自らをヘッドとする関係組織の形成、他企業との間にあっては環境技術の情報共有・共同開発等の連携、政府との間では規制と併せて税制・政策金融等による支援策形成、社会との間では環境問題に積極的に取り組む企業が正当に評価されるためのコミュニケーション形成を図ったこと。

等であり、これらの努力を、複層的に積み重ねていった結果である。

この稿を終えるに当たり、三村会長の挨拶を再度引用したい。同会長は、交流会を、「世界最大の生産実績を有する中国鉄鋼業と、世界最高水準の環境・省エネ技術を有する日本鉄鋼業が、双方の思いを一致させ、ともに手を携え、新たなスタートを切ることとなった」と意義付け、「それぞれの努力と相互の協力を通じて、世界的視野において、持続可能な経済発展に大きく寄与できる」と期待を寄せられた。

日中両国のこの分野での交流の道は、将来に向かって、必ずしも平坦でなく、また、中国側の環境・省エネ面の取り組みも、紆余曲折が予想されよう。しかし、この交流会が、困難な時期にあって、両国間の新たな協力関係をスタートさせた歴史的イベントとして、関係者に長く深く記憶される事を確信し、また、この交流会の成功に向け力を寄せて頂いた関係各位に心から感謝申し上げ、本稿を終えたい。

水素社会の実現を目指して

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 教授)

藤井博信 (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)

堂免一成 (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)

渡辺正五 (財団法人自動車研究所 FC・EVセンター
主席研究員 次長)

池松正樹 (新日本石油(株) 新エネルギー本部
FC事業部長)

神谷祥二 (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
坂田 興 (財団法人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))



はじめに

司会 今日はお忙しいところありがとうございます。本日は、「水素社会の実現を目指して」というテーマに関してお話をうかがおうということで、水素エネルギーの研究開発や事業化でそれぞれの分野の権威である方々にご参加いただいております。

初めに、太田先生に、「現代における水素エネルギーの位置づけと期待」ということでお話を賜わればと思います。

水素エネルギーへの期待—横浜国大モデル

太田 現在、エネルギーに関連して資源問題と

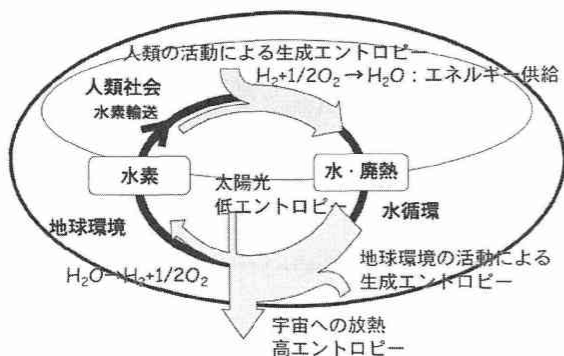


図1 水循環と水素エネルギー社会

表1 炭素と水の循環量

	炭素	水
全量	20,000Gt 炭素	1,400,000Tt 水
大気中存在量	750Gt 炭素	12,900Gt 水
大気からの年間移動量	157Gt 炭素	520,000Gt 水
大気中の平均滞留期間	5年	10日

- ・水の存在量は炭素の7万倍
- ・水の大気からの移動量は炭素の3,300倍

環境問題の両面が大きな課題となっています。

私は、その根本的な解決策は水素エネルギーの利用ではないかと思っています。地球温暖化の原因とされる二酸化炭素（CO₂）は一旦排出してしまうと温暖化だけでなく、循環すら満足にされません。一番いい例が植物に吸収されるCO₂ですが、木が成長する100年～200年と言う遅いサイクルでは「循環型社会」「持続型社会」はとても成り立たないと思います（図1参照）。私どもの計算では、水素－水の循環を使うことによって、循環量を炭素循環の数千倍にするこ

表2 炭素と水素の環境負荷の比較

	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	0.86	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。

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

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



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 教授）

とが可能になります（表1参照）。

環境に対する負荷も水素－水の形で循環していれば、地球レベルでは、炭素循環の300分の1～400分の1になると思います。水素－水の循環の方が非常に環境に優しいと言えるのではないかと思います（表2参照）。

再生可能エネルギー利用が理想

太田 水素－水の循環の時に、利用する一次エネルギーが大きな問題になります。再生可能エネルギーを使って水素を製造することが理想なのですが、現実路線として化石エネルギーを利用することは当然あり得ます。その場合、水素製造技術の効率を今よりも上げないと京都議定書が求める「炭酸ガス排出の大幅削減」につながらない。効率改善を燃料電池で図るのか、水素製造で図るのか、もあると思います。いずれにしろ効率改善が達成されるまでの間、副生水素で何とかできれば、と思います。さらに、利用する一次エネルギーは、化石から原子力、再生可能へとという筋書きは日本で共通の認識だと思います。

司会 今回の太田先生のお話について、ご質問、ご意見はありませんでしょうか。

神谷 太田先生がおっしゃった「水素—水の循環速度は炭素循環速度よりも非常に大きい」という考え方は、欧米でも共有されている考え方なのではないでしょうか。

太田 正直言って、この地球レベルのダイナミクスで水素を捉えるというのは我々、横浜国立大学のオリジナリティだと思います。しかし、この話はヨーロッパでもアメリカでもさせていただいています。定量的な部分はまだ詰めなくてはいけないところもありますが、ドイツで発表した時は、炭酸ガスの循環速度はもっと遅いのではないかと言われ、色々な数値が出てきました。



神谷 祥二

(川崎重工(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)

水素エネルギーに係る国内外動向

国際ビジネスの対象になってきた水素

司会 水素エネルギーに対する取り組みは日本国内でも非常に活発ですが、国際的にも相当広く展開されていると思います。国際動向について、また太田先生から一言いただければ幸いです。

太田 水素エネルギーは、約30年前にヨーロッパ、アメリカ、日本などで国家レベルの取り組みが始まったと認識しています。その後、一時期停滞しましたが、日本は地道にやってきました。ここ数年、自動車用燃料としての水素の研究開発が非常に活発になされています。昔は北アメリカ、日本、ヨーロッパが軸となっていた水素エネルギーの研究でしたが、最近では、中国、韓国などアジア圏で取り組みが活発化してきています。少なくとも中国

は真剣に自国の環境問題を考えて出しています。

今年の3月、神谷さんと一緒に、水素エネルギー協会の「アルゼンチン風力／水力／水素調査団」の団員としてアルゼンチンに行ったのですが、彼らも水素を強く意識しています。パタゴニア州を「21世紀のキューバ」と呼び、豊富な風力を使い発電し、液体水素を製造しそれを世界に輸出すると言っていました。そのために、ヨーロッパ、アメリカ、日本と色々とコンタクトをとり始めています。国際的な動きが非常に活発になっていると言えるでしょう。

神谷 1993年から2002年までに行われたWE-NET*では、海外からの水素の輸入を検討しました。先日のアルゼンチンでの会議では、それと同じように、民間レベルで水素を輸出しビジネス化しようという話がありびっくりいたしました。やはり2030年とか2050年に向けて、確実に水素エネルギーが国際ビジネスの対象になってきているのではないかと思います。

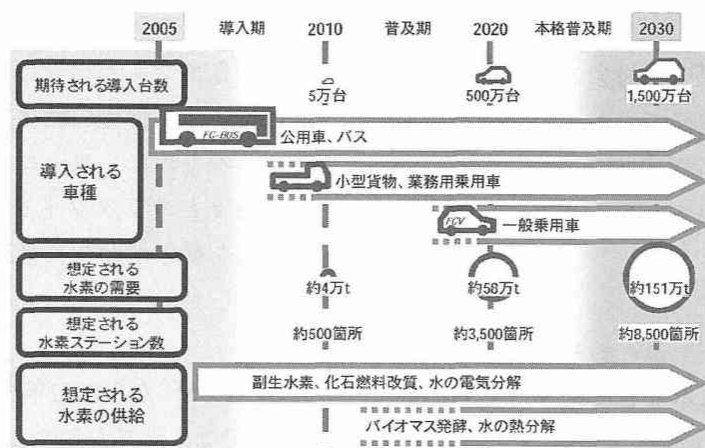
*WE-NET (World Energy Network: 水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術)。石油等の化石エネルギーに替わるクリーンな再生可能エネルギーの利用は、資源や環境面での持続可能性が期待できる。地球上には、風力、水力、太陽熱などの再生可能なエネルギーが存在するが、低いエネルギー密度、長距離の輸送や貯蔵ができないため、利用が進んでいない。そこで再生可能エネルギーを一度別の形(二次エネルギー)に変えることで、地球規模で効率的に利用する方法が考えられている。この二次エネルギーとして水素を利用することで企画立案されたプロジェクト(1993~2002年)。

藤井 現時点での私の理解では、水素エネルギーは二次エネルギーとして使うという理解でいます。要するに、色々な一次エネルギーを水素エネルギーに変えて電力との間でうまくやりとりして使っていくことになるかと理解しています。水素の場合、非常に速く循環させることができる。それが大きなメリットだと思います。

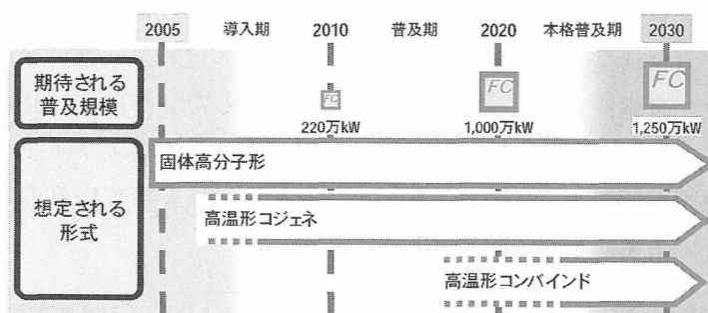
池松 水素は将来のエネルギー源としてのポテンシャルは非常に大きいのですが、二次エネルギーということに間違いありません。水素製造技術は、エネルギー変換のキーテクノロジーだと思っています。水素については国際的にもエネルギー業界を挙げて前向きな姿勢が見られます。石油産業も「水素推進派」です。水素の将来に対する期待が大きいことは事実だと思います。

司会 日本の水素エネルギーのシナリオについて簡単に紹介します。『2030年のエネルギー需給展望』総合資源エネルギー調査会需給部会、平成17年3月)の第2部に、「2030年に向けた中長期的なエネルギー戦略のあり方」があります。その第1章に、エネルギー需給見通しを踏まえた4つの戦略が出ています。3番目の戦略が「3. エネルギー供給の分散と多様化による変化への対応の強化」というところに水素のことがまとめて記載されています。

ガス体エネルギーや原子力、再生可能エネルギー等との並びで水素も書いてあります。具体的には、経済産業省資源エネルギー庁長官の私的諮問機関である「燃料電池実用化戦略研究会」の図が「期待される導入目標」ということで、政策のベースになるような共有データとして扱われています(図2参照)。また、「2030年にお



(1) 燃料電池自動車



(2) 定置用燃料電池

(出所:『2030年のエネルギー需給展望』)

図2 水素エネルギー社会に向けたシナリオ

ける燃料電池の普及の見通しとしては、これまでの政府における検討結果を踏まえ、燃料電池自動車、2030年度末時点の推定保有台数1,500万台、水素ステーション数8,500カ所、定置用1,250万kWの実現を目指して、民間と政府が協調して努力していく」と書かれています。これが日本のシナリオと思っています。

渡辺 自動車分野における燃料電池の導入について、前述の「燃料電池実用化戦略研究会」の目標はかなり期待を含めた数字だと思います。2010年5万台という数字は現実的に達成が少し難しいと思います。ただ、2030年に1,500万台というのは可能性が十分ある数字だと思います。なぜなら、水素を使う必然性が2030年代には間違いなく出てくると思うからです。2030年頃になってくると、石油資源にいつまで頼れるかという議論が真剣味を帯びてくるでしょう。このことが、2010年の5万台よりも2030年の1,500万台導入をどう達成するか自動車業界が今必死に取り組んでいることの背景だと思っています。

司会 確かに環境制約と資源制約は時間の経過とともに切迫してくる可能性がありますから、近い目標より遠い目標の方がより必然性が出てくる可能性はありますね。

池松 私は「燃料電池実用化推進協議会」のメンバーとして資料をまとめる作業をやっていましたので導入目標値については提案側です。

自動車に関しては国際動向が導入目標の設定に非常に大きい影響を与えていると思います。概観すると、アメリカは非常に積極的な水素シナリオを書いていますし、ヨーロッパは環境対策が前面にないともはや政策を語れないという状況になっています。水素に対する期待は、技術者から見ると過剰なぐらい高くなっています。そういう国際状況の中で国際商品である自動車が水素に対応するために、燃料電池自動車は日本がクリアしなければならない重要技術課題です。



池松 正樹

(新日本石油(株) 新エネルギー本部
FC事業部長)

さらに向上すべき水素製造の効率

池松 エネルギー供給者としては、現実問題として日本の中で日々エネルギーが必要とされていて、原子力以外ほとんど資源国のない日本において、我々の最大の使命は、エネルギー資源を諸外国から集めて日本に安定供給することです。その中で水素への期待の中に総合エネルギー効率の向上があります。化石燃料から水素を作って利用した場合の効率がそのまま化石燃料を利用した場合よりも効率が低いとなれば、エネルギー供給として成り立たなくなる。水素製造技術の効率向上は重要です。現在は水蒸気改質反応が主体で、例えば、石油精製工場では日本の総水素生産量の約半分の水素を作っています。そこでの効率は、熱回収も含め80%程度です。燃料電池は、小型で各地に分散したシステムですが、同程度の効率を達成できるかが大きな課題だと思っています。

貯蔵・輸送面の画期的技術が必要

池松 もう1つ、エネルギー供給者から見て水素の大きな課題は貯蔵と輸送です。よく「水素の場合パイプラインにすればいい」という意見が出されますが、水素より容積当りのエネルギー

一密度の高い天然ガスでも現在日本の国土面積の5%しかパイプラインネットワークができていないのが実態です。水素にしますと、さらに配管は太くなり、工事費が上がり、材料面では水素脆性が問題になってきます。水素を海外輸入するにしても輸送、貯蔵技術がキーです。エネルギー供給から見ると水素の容積当たりのエネルギー密度が非常に低いことが大きな課題です。したがって、水素の高密度技術に革新的なブレークスルーを期待しています。

水素実用化の研究導入状況

オンサイト、オフサイト、電気分解

司会 現在、水素は製油所や製鉄所で副産品として作られています。水素の製造技術の一般的な動向につきましてお話し願います。

池松 現在、JHFCプロジェクト（Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration Project）で水素ステーションの整備を推進しています。水素の作り方には大別して2種類あります。サイト（例、水素ステーション）で一次原料から水素を作り出す（オンサイト方式）か、サイトに水素または水素化合物（例、副生水素）を運んでくる（オフサイト方式）かです。どちらがより効率的か現在精査中です。

オンサイト方式の場合、天然ガス、石油といった化石燃料から水蒸気改質反応で水素を作っています。これが現在最も効率が高い方法です。

他に水の電気分解がありますが、日本の場合はコスト面で現在厳しい状況にあります。

期待されているのがオフサイト方式です。副生水素は、2020年、燃料電池自動車の普及目標500万台に対して供給する量が現在既にあります。ただ、この副生水素をどうやって効率的に運んで供給するか、そこに大きな技術課題があります。



堂 免 一 成

（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）

水素製造用エネルギーの主流は当面化石燃料

司会 水素を何から作るかというところは、短期、中期、長期で変わってくると思うのですが、触媒化学の専門家でもいらっしゃる堂免先生に改質反応、水の光分解も含めてお話をいただければと思います。

堂免 私、大学で基礎研究をやっているのですが、客観的に見て、当面、化石資源から水素を作るというのが現実的な選択肢だと思います。ただ、将来的には化石資源から脱却しなければいけない時代がくるだろうということで、再生可能エネルギーに期待がかかるわけです。風力発電はエネルギー量が大きいといっても利用の絶対量はあまり大きくありません。一番大きい、本当に使えるのは太陽エネルギーだと思います。ただ、非常に広い面積で受け止めないといけないエネルギー源ですから、どうやって使いこなすか課題があります。もう少し先の水素社会を考えると、その辺の技術開発と研究を進めていかなければならないと思います。

太田 「水の循環」ということになると、再生可能エネルギーだけで何とかするというのが基本です。そこに到達できて初めて持続型

成長ができるのではないかと思います。その意味で、堂免先生の光触媒による水素製造を来年にでも実現して頂きたいものです。エネルギー開発というのは非常に長い時間がかかりますが、基本は一刻も早くスタートすることです。

司会 エネルギーは普及に時間がかかるというお話ですが、まったく同感です。商品の寿命とその商品を開発する研究期間（リードタイム）は比例するという説があるようですが、エネルギーの交代時期は長いです。ですから、インフラ整備まで含めると、リードタイムは非常に長くなりますね。2030年、2050年ぐらいに化石燃料から離脱しなければいけないとなると、研究はずっと遡ってやる必要があるということをお話いただいた感じがします。

化石燃料と手を結べる水素

池松 今日と未来をつなぐのが明日です。より有効に化石燃料を使って、水素にシフトしていく道筋をどうつけていくか。化石燃料から高効率で水素を作り、それを高効率で輸送するというのが大きな課題だと思います。

水素の輸送というのを考える時に、化石燃料を水素リッチにして水素キャリアーとして有効利用するのは、あり得ると思います。具体的には、フィシャー・トロプシュ合成（FT合成）で、天然ガスを液体燃料化してガソリンを作る、つまりエネルギー密度を高くして輸入するという方法があります。これは島国日本にとって有効な手段です。さらに、例えばオイルサンドやオイルシェールは現在、地中に埋まっているものを一部燃やして、溶け出した部分を原料にして、ガソリンを作っています。これは非常に非効率的です。海外で生産した水素を海外のオイルサンドとかオイルシェールにくっつけて軽質化を図り、日本にデリバリーする。より水素リッチな化石燃料を作ってそれをデリバリーする。これが明

日という近い将来の極めて有効な戦略になり得るんじゃないかと思います。

我々が一番嫌っているのは「水素対化石燃料」という図式です。マスコミ的には面白いかも知れませんが、技術者としては、両方コンバインドしてより現実になることを期待しています。

太田 問題は、水素エネルギーも化石燃料、特に石油の価格と連動してブームになったり、下火になったりしてきています。オイルショックの時に水素が注目を集めました。石油価格が下がってきたら下火になってしまいました。今、石油資源のピークがいつなのかという議論がなされていますが、時期の特定は難しいものなのではないでしょうか。

池松 石油連盟の公式見解では、炭化水素資源は280年以上あるとなっています。そこで、技術開発の進め方としては、化石燃料がなくなるから水素に移行するというのではなく、化石燃料があっても水素の方がいいというようにしていきたいものです。

勿論、コスト競争力で見るとやはり中東原油等はかなり強力です。しかし、利用まで含めて水素の総合エネルギー効率を倍にすれば価格が倍でも成り立つ。そのような技術開発をしないと国際競争力を維持できないと思っています。

期待の大きい再生可能エネルギー

司会 今、化石燃料を中心に少しお話をいただきましたが、堂免先生と太田先生に再生可能エネルギーについてお話を伺いたいと思います。

堂免 まさに環境制約ということを考えますと、できるだけ再生可能エネルギーを使えるようになった方がいいでしょうし、そういう要求は今後どんどん出てくると思います。

再生可能エネルギーの中で、地熱というのは莫大な量がある。それを徐々に取り出しても日

表3 太陽エネルギー量 (J/年)

放出エネルギー量	1.2×10^{34}
地球への照射量※	5.5×10^{24}
地球表面への供給量	3.0×10^{24}
人類のエネルギー消費量	3.0×10^{20}
地球上の光合成量	3.0×10^{21}
全化石資源量	地球表面供給量×10日

※太陽定数：1367 W/m² = 1.96 cal/cm²・min

本の数十年分の電気は大丈夫だという話もあります。風力は今どんどん開発されていますが、導入量は化石資源と比べると全然少ないです。太陽電池は風力と比べてもまだ少ないです。そうは言っても、絶対量から考えるとやっぱり太陽エネルギーが非常に大きいし、太陽エネルギーを一時、ほんのしばらく、人間が使う間だけ水素エネルギーに変えて、またもとの水に戻すというシステムができてしまえば、環境的にも資源的にも問題ないということはある得ます。

実際、植物の光合成は人間が使っているエネルギーの1桁ぐらい上のエネルギーを固定しています(表3参照)。

「来年には実用化」というわけではありませんが、我々としては、基礎研究レベルから早く実用化に向けた研究段階へと進んでいきたいと考えています。

太田 私も化石燃料は化学資源としてとってにおいて、再生可能エネルギーで水素を製造して使うというストーリーは絶対必要なことだと思います。色々壮大な計画があります。例えば、自然エネルギーには、太陽、風力だけでなく潮流もあります。この海流を利用する発電も1つでしょう。その他にも「海洋温度差」とか、色々なアイデアがあります。

ただ、現在の石油価格を考えると実現できそうなのはまず風力、そして太陽光発電となるでしょう。日本向けには太陽電池に期待したいです。導入価格が現在の200万～300万円から10万円程度に下がれば、全家屋に太陽電池が付けられていく。できた電気をバッテリー

ーに貯めるのか、水素の形にして貯めるのかという選択肢が出てくると思います。

水素の貯蔵・輸送技術

【最近の動向】

司会 次に、水素の貯蔵・輸送技術に関しまして話を進めていきたいと思っています。藤井先生、お願いします。

藤井 確かに水素という燃料は最もかさばる燃料です。メタンやエタンに比べてもはるかに体積をとってしまう。いかにコンパクトにして輸送するかがキーになっているわけです。今、①液体にして運んで使う、②高压の状態で貯めておいて使う、③貯蔵材料、いわゆる媒体に貯蔵させて使うという、3つの方法が考えられています(図3参照)。それぞれ世界的にかなり開発が進んできて、②は350気圧のタンクが開発され十分使える状況になってきていると理解しています。

ただ、自動車に乗せるとなると、今以上にコンパクトなタンクが必要だということで、700気圧の高压タンクが考えられていますが、計算してみると、思ったほどコンパクトにできないのです。ですから、日本やヨーロッパで考え始められているのが、350気圧のタンクの中に水素貯蔵合金を入れてコンパクト化を図るという方法です。

現状としては、どの方法が水素自動車に適用されるのか予断を許さない状況にあります。①の液体水素も捨て難い。問題は、液化温度が-250℃と低いために特殊な容器が要ること、熱が入ってくると、自動車を走らせなくても蒸発してしまうということですが、容器の改良もどんどん進んでいて、ドイツでは非常に良い容器が開発されています。サイズにもよりますが、比表面積を小さくした大型車、あるいは長期間多量に貯蔵するという大型タンクの場合には当然使われると思います。材料開発もかなり最近進んできています。

③の媒体貯蔵方式も、安全性や取り扱いが比較的簡単で注目されています。私も水素貯蔵材料の研究に20年以上携っていますが、その目標値が非常に高いものですから5年前までは「これをクリアするなんてとんでもない」と思っていました。ところが、最近は目標値をクリアできる可能性が出てきました。それだけ技術開発が進んできたのだと理解しています。

その他、ナトリウムボロハイドライド (SBH) とかは水と反応させれば水素が出てくるので、ナトリウムボロハイドライドを安く作る方法を開発して、それを媒体にして蓄えておくということも考えられています。



藤井 博信

(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)

[求められるガソリンと同等の利便性]

司会 自動車に水素を積むという目的に限定しますと、複数のオプションがあるという藤井先生のご指摘ですが、自動車業界の立場からはどうお考えでしょうか。

渡辺 あるべき姿としては、今我々が使っているガソリンと同じように使えるということです。車の場合ですと、すぐに使えて急激な変化にも対応でき、すぐに停まるということが要求されます。そういう意味では、化学反応を伴う貯蔵放出の形態、外から熱を供給しなければいけない形態というのは、自動車向けの貯蔵媒体として採用しにくいのではないかと思います。

水素をエネルギーの輸送媒体として捉えた場合には、一概に自動車向けの貯蔵だけに目標を絞るのではなく、もう少し色々な形態での貯蔵・輸送という選択肢を考えていく必要があると思います。

総合的に見て、今、高压水素が一番使いやすいということで実用化が一番進んでいますが、製造・輸送、自動車への充填・貯蔵、使用というところまで見ると、液体水素というのがかなり有力ではないかと個人的には思っています。問題は、車を停めている間でも液体水素が蒸発して気体化する(ボイルオフ)ということです。しかし、水素を家庭でも使うということになれば

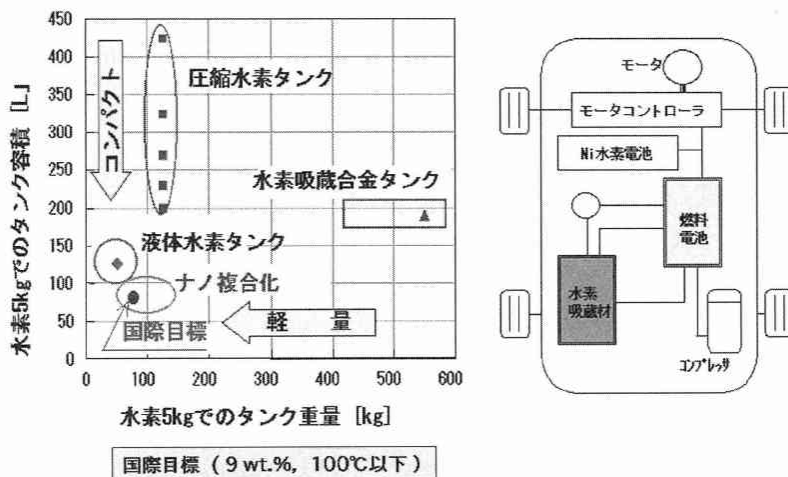


図3 水素貯蔵技術の開発状況と今後の展開

ば、車を停めておく間に出てくる水素は家庭で消費するとか、貯蔵スタンドでのボイルオフ分はスタンドで消費するエネルギーの発電に使うということがあり得ると思います。そういう色々な利用形態が混ざってくれば、液体水素も今後有望かなと思います。

[液体水素による輸送・貯蔵]

司会 目的に応じて色々な手法の可能性があるという話でしたが、最後のところで液体水素の話がありました。それに関連して神谷さんから話を伺えますでしょうか。

神谷 製造、輸送・貯蔵、利用という流れがありますが、どういう輸送形態が最適かは、その後に来る利用系の用途で変わると思います。今、水素エネルギーは主に自動車を対象にしていますが、将来、利用系が電車や船、航空機に拡大した場合、それら利用系に適した輸送貯蔵方式が要求されると思います。

今、液体水素の話でしたが、液体水素の技術は、米航空宇宙局（NASA）のロケット燃料として1960年代のアポロ計画の頃から始められた、ある意味、古い技術です。ただ、非常に大きな液化動力を消費するとか、コストが高いとかで民間で使えるまでになっていません。それで、液体水素を今後広めていくためには、システムエネルギー効率を高めること、ボイルオフを最小限にすることが欠かせません。ボイルオフを最小限にする断熱方法として従来と異なる新材料が開発され、新しいコンセプトの断熱システムが出現するかも知れません。

司会 以前、WE-NETの時代に、カナダから液化水素をタンカーで大量に持ってくるという構想がありました。そういったことに関する技術的な展望はいかがでしょうか。

神谷 WE-NETでは、液化天然ガス（LNG）の技術をベースに液体水素をタンカーで運ぶための技術的課題を検討しました。



渡辺 正五

（財）日本自動車研究所 FC・EVセンター
主席研究員 次長

液体水素の断熱は、貯蔵量が小容量よりも大容量のほうが容易です。貯蔵容積当りのタンク表面積が小さくなり、単位貯蔵量当りの入熱が少なくなるからです。LNGの液化に必要な温度は -160°C 、液体水素の場合は -250°C です。液体水素タンクは、LNGタンクの10倍断熱性を高める必要がありますが、それは基本的に難しい話ではないと思います。

燃料電池車に搭載する小さいタンクを大量に且つ安く作る方が技術的には難しいと思います。

司会 以前、ドイツの自動車メーカーBMWの展示会に参りましたら、3 cmぐらいの厚さの断熱材のタンクを展示してあって、ポリスチレンに換算して9 mぐらいの断熱能力があると言っていました。今のお話だと、新素材で作るともっと新しい展開も期待できるということですね。

神谷 私はそう思います。

[開発が進む水素吸蔵材料]

太田 水素がメタルハイドライドに重量パーセント（wt%）でいっぱい入るようになったと聞いています。私が勉強した頃は1 %台だったの

ですが、今はどのくらいまで可能なのですか。

藤井 今、世界が目標にしているのは前述のとおり9 wt%です。また、反応速度も速くなってきています。ですから、私は水素貯蔵材料の開発に関しては今は黎明期だと言っているのです。色々な化合物を混ぜ合わせる「ボールミリング処理」と言う手法で、ナノメーターの世界で化合物を接触させていきます（図4参照）。リチウムなどの軽い元素を含む化合物は融点が100℃～200℃になってきますから、化合物としての形を保ちながら、非常に軟らかくなり、分子が100℃以下でさえナノ複合化材料の中で動

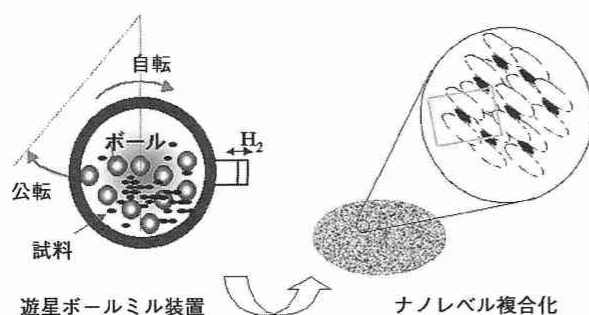


図4 ボールミリング処理の概念図

いているのです。良い触媒を見つけると、分子間の反応速度も非常に加速されてきます。最近では日本でも200℃以下で水素を吸放出する6～9 wt.%の材料も見つかっています。非公開情報ですが、アメリカでは100℃以下で7～8%程度の材料が出てきていると聞いています。ただ、反応速度はまだまだ改善しないといけないと言われています（図5参照）。

日本でもアメリカ、ヨーロッパ、シンガポールでも、精力的にやっており、いわゆる貯蔵材料の開発競争というのは非常にエキサイティングな状況になってきています。

太田 太陽電池で発電して水素を作った時に、その水素を蓄えないといけないとなると、メタルハイドライドやケミカルハイドライドに吸蔵させる方法もあると思います。そういうのを含めて、私の想像以上に技術が進歩していますね。昔、私は授業でアルカリ金属のハイドライドについて、「イオン結合が強いからなかなか分解しない」と教えていたものですが、最近はどうもそうではなさそうな雰囲気ですね。

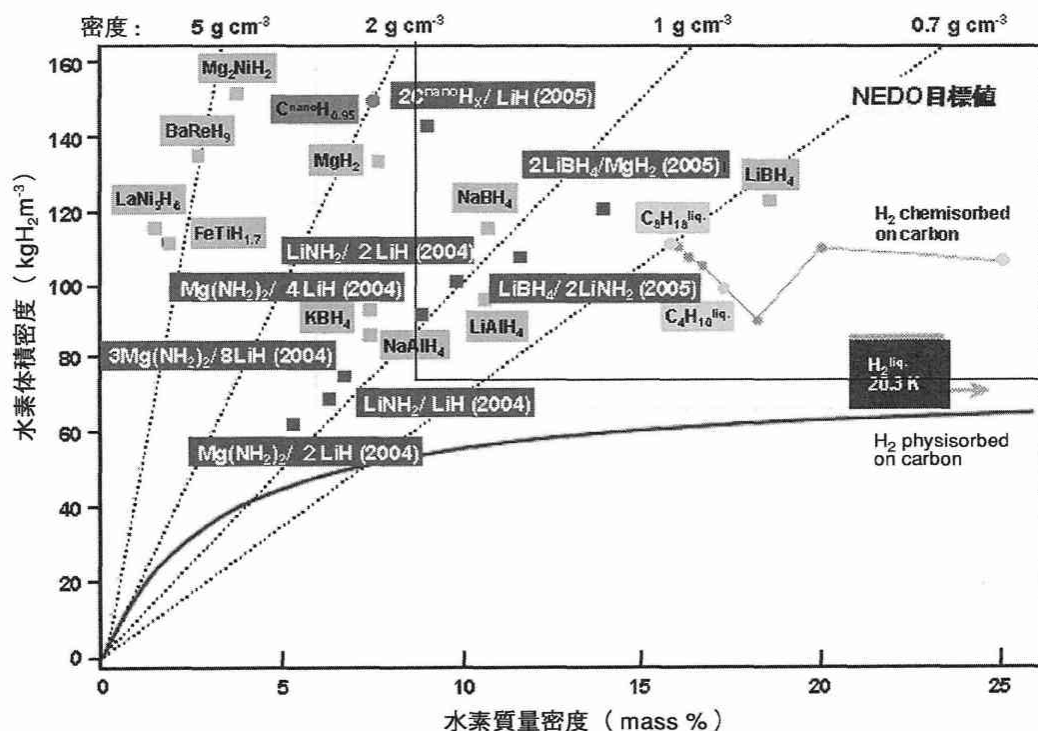


図5 ナノ複合化した水素貯蔵材料の新展開

藤井 確かに、イオン結合は強いので、そのままでは容易に分解しませんが、極性のある分子を近づけると分解し、水素を放出し、新しい化合物となり、その間の反応が可逆的になるのです。最近では、マグネシウム化合物の水素が室温で5 wt%程度、15秒ぐらいで出るものも見つかっています。そういうものを例えば液体水素のボイルオフ水素の発生するところへもって来ると1気圧で水素が吸蔵されます。ただ、放出させるには300℃の温度が必要ですが、別の余剰熱源を使う形で、水素を無駄なく使うための材料として有望であると思います。使用側から要求された材料をいかに設計するか、という時代がこれから来るという気がしています。

神谷 まさしくそうだと思います。例えば、船であれば、多量のバラスト（おもし）を必要とする場合もあります。だから、用途によって貯蔵方法を変えないといけません。

渡辺 先週ワシントンDCで米エネルギー省（DOE）のプログラムレビュー作業部会がありました。そこで貯蔵の部分を傍聴してきたのですが、藤井先生がおっしゃったようなリチウム、マグネシウムの研究を非常に広範囲にやっていました。モデルや分子の設計、反応メカニズムですとか、基礎的なところに相当力を入れて研究しているという感じでした。そういう貯蔵に関する根本的な課題の解決は、高いリスクを伴いますが、総合的な取り組みがアメリカではなされている。日本もうかうかしてられないという印象を持ちました。

水素利用技術—最近の動向

[大規模実証が始まる定置用燃料電池]

池松 今年は定置用燃料電池にとっては画期的な年です。向こう3年間をかけた大規模実証がいよいよ始まるからです。経済産業省の強い後押しをいただいて、一気に燃料電池を

400台実証し、それを3年間で数千台規模に引き上げていこうという計画です。我々がこの計画に非常に期待しているのは、太陽電池の成功事例があるからです。日本の太陽電池の生産量がアメリカの半分以下だった十数年前、政府が住宅に太陽電池をつけるのに思い切った助成を行うという普及政策をとりました。普通ですと、技術開発支援などの研究費を出していただけるんですが、機器を取り付ける側を支援していただいた。これによって太陽電池が一気に使われるようになりました。すると技術が進歩し、値段も下がっていきました。私の記憶では、日本は今、アメリカの3倍ぐらいの太陽電池を製造している世界最大の太陽電池生産国になっていると思います。それと同じような成功事例を燃料電池でもやっていきたいと思っています。

これは、恐らく各ご家庭で実際に水素が利用される初のケースでもあります。各ご家庭の身近な場所で水素から電気、熱ができるということです。東京ガスは都市ガス用の燃料電池を今年2月に実用化し、今年200台の設置が予定されています。私どもはLPG（実証用プロパンガス）を用いて今年3月に実用化して、今年度は、LPG燃料電池150台を関東圏を中心に展開したいと考えています。正直言うと、コスト、耐久性でまだまだ大きな技術課題をかかえています。本年を突破口に実証試験が終わった2008年には、自立に近い形ができるようにしたいと思います。この3年間の技術開発が非常に重要です。

司会 燃料に関しましては今のフェーズですと、LPGと都市ガスが先行しているのですね。

池松 各ご家庭へのエネルギー供給を考えますと、今使われているエネルギーを有効活用して水素にするのが一番現実的です。理由は、供給インフラが既にできているからです。供給インフラを作り替えるとなると実用化までには30年、50年かかってしまいます。

それから、容積当たりのエネルギー密度が供給にとってはとても重要です。例えば、車のガソリントank（60ℓ）に貯めることができる水素は350気圧条件で1kgです。それに対して60ℓのLPGから、水を混ぜて水蒸気改質を行うと約20kg、約20倍の水素が取り出せるわけです。できるだけ水素を含有したエネルギーキャリアで利用サイトまで運び、一気に水素を作って使った方がエネルギー効率がいい、経済的だと思います。

[コスト高が課題の自動車用燃料電池]

渡辺 定置用燃料電池の大規模実証が始まったということで、当然燃料電池車の導入促進への期待が非常に高まっています。しかし、今のところ、自動車の場合、定置用燃料電池ほど踏み込んだ取り組みはできません。定置用ですと必要な出力は1kWのレベルですが、自動車では100kWの数字になります。当然、1台当たりのコストが補助金では埋められないほど高くなるのです。

自動車メーカーが今やっていることは、コスト削減に向けた、燃料電池の材料部分の開発です。電解質に使われているフッ素系の膜に代えて炭化水素の膜を使うとか、触媒量を減らす、あるいは代替触媒を使うとか、セパレーターにしても低コストな材料、加工方法などについて、もう少しじっくり取り組んでいくという局面に入ったと思います。

今まで燃料電池で車が動くということの実証が重要な取り組みだったのですが、そのあたりは済みました。やはり、この先にコスト、耐久性、信頼性といったところにもう一度立ち戻り、そのこのところを見極めた上で、定置用燃料電池の大規模実証試験の後を追おうというのが、今の自動車業界の取り組み方だと思います。

司会 水素の流れの中では一番下流である利用部分で、例えば、水素の純度、コストのような諸々の要求事項が出てくるということですね。

[普及に欠かせない安全性の確保・理解]

太田 家庭では、水素の触媒燃焼で温度コントロールをするという使い方が考えられます。水素の燃焼特性を活かしてはどうかと思うのです。ただ、利用のときには安全性が非常に大事です。今度の定置型燃料電池の大規模実証試験の中では、安全性はどうなっているのですか。

池松 実は、家庭用の燃料電池につきまして、もう3年ぐらい前から色々な条件でフィールドテストも行っており、かなりフェールセーフに設計しています。水素は拡散性が高いので、滞留させない限り爆発性はありませんし、扱い方によっては必ずしも危険ではないと我々は認識しています。事実、弊社の石油精製工場では35年以上水素を大量に作っていますが、今まで水素爆発を起こしたことはありません。

ただ、横浜市旭区に水素ステーションを作ったところ、大分離れた所にある民家に訪ねて行って、「すみません。水素ステーションができます」と言うと、どのご家庭も「総論賛成、各論反対」で、異口同音に水素爆発への懸念を言っておられました。当然、水素爆発の確率はゼロではありませんが、ほとんどありませんし、仮にあっても水素の場合、むしろ上方に向うのでお宅の方にこうこうこういう理由で行きませんよと、かなり丁寧に説明する必要がありました。そういうのは恐らくこれから非常に重要になると思います。なぜだか水素爆発の恐れが必ず出てくる。今後、教育も含めて非常に重要な課題かなと思います。

司会 太田先生がご指摘された安全性ということは確かに議題として非常に大きな部分であると思います。それから、池松さんからお話いただいた教育も非常に大きな分野だろうと思います。IPHE**のプロジェクトのタスクフォースの1つにソシオエコノミクス（社会経済）的なアプローチを検討するものがありますが、その大きな柱が教育なのです。教

育というのは必ずしも小学校で燃料電池の模型を見せるということではなく、水素の物性などについてよくご理解いただくということも含まれているように思われます。

インフラの実証状況、規制再点検、基準、標準

[定置用水素ステーションの実証状況]

司会 次にインフラの実証状況、規制再点検、基準、標準に移りたいのですが、安全に関しましてもコメントをいただければと思います。

池松 例えば、500万台の燃料電池自動車の普及のためには水素ステーションが3,000カ所要るということになります。しかし、現実に日本のように土地代の高いところで、ロードサイドの一等地にこれから水素ステーションを3,000カ所作る、インフラ整備を図るというのは、極めて難しい課題です。日本の自動車の保有台数が7,000万台以上ですから、500万台の燃料電池自動車があっても既存車と燃料電池車が併存する時代がかなり長くあるわけです。そうすると、既存のガソリンスタンドに水素ステーションを併設して、言わば「エコステーション」として活用して、同じ人が供給すると人件費の削減になります。それが期待に応えられる一番現実的な方策だと思います。全く別に水素ステーションを作るとなると、非常にコスト高となり、非常に高い価格の水素になるのではないかと危惧します。そういった点から、併設しても安全であることを確認していくのがこれからの大きな課題だと思います。

[自動車用水素ステーション]

司会 渡辺さんは安全、自動車を中心とした安全、規制再点検、基準、標準というすべてのことに中心的に関わっていらっしゃると思いますが、その辺のところでコメントいただけますか。

渡辺 規制再点検の話が始まる以前の2000年度から我々は新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の「ミレニアムプロジェクト」で標準化、中でも安全性の評価に取り組んできました。我々も水素の安全性、特に車の場合、高圧の水素容器の安全性の評価に5年ほど前から取り組み始めました。最初は、外国の試験機関へ行って、相当、過激な試験も実証してみました。その結果、「水素は危険だ」という部分と「安全だ」という部分、両方の経験をしております。「通常環境の中では、水素というのはほとんど安全だ」という実証結果を得ています。具体的には、火災時に容器が破裂するかどうかということもやってきましたけれど、そのようなことは1回もありません。衝突時の実験もしてきましたが、衝突では容器が破壊されることもありませんし、配管が損傷して中の水素が漏れても空気中に速やかに拡散するので、大きな事故は起きないということを確認してきました。

最終的に、茨城県城里町で水素燃料電池の総合的な安全性評価ができる試験場を2年がかりで作りました（図6参照）。そこではかなりリスクの高い、爆発が起こるような条件を設定しても外部に影響を与えない堅牢な建物を作り、その中でいろんな評価ができる体制を作っています。

実験結果を一般の人にどういう形でお伝えしていこうかと考えているところです。確かに条件がそろえばかなりの爆発が起きます。ただ、その条件は起こり得ないものだということのをいかに伝えていくかというのが、なかなか難しい。今、私は水素推進派の方に過激な映像もご覧いただいてご意見を伺ったり、一般的な人も参加するシンポジウムでもそういうことをお伝えしています。私がかかっているのは、天然ガスやガソリンのように、我々が今使っているエネルギーと水素は、必要な知識を身につければ、安全性においてそ

** IPHE（International Partnership for the Hydrogen Economy：水素経済のための国際パートナーシップ）。米国の呼びかけにより、わが国を含む15カ国および欧州委員会（EC）が参加している。

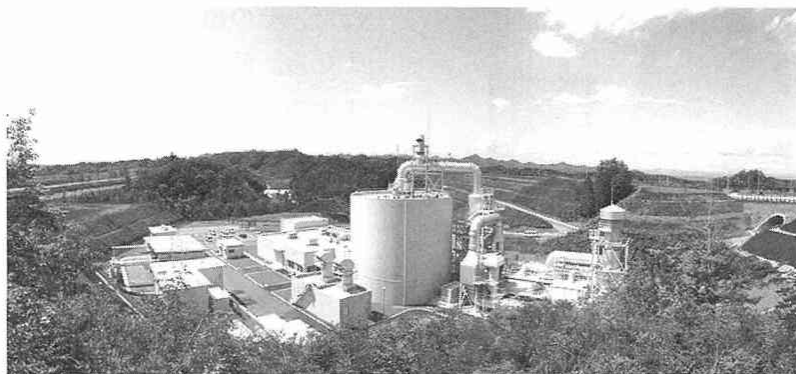


図6 城里テストセンター（燃料電池自動車安全性評価試験棟）の全景

れほど変わるものではないということをお伝えしていきたいと思っています。

司会 国際的にも日本発の標準化，あるいは基準の発信をする，あるいは外国からの受信も相当なさっていらっしゃるわけですか。

渡辺 国内ですと「高圧ガス保安法」，「道路運送車両法」という2つの大きな自動車関連の保安基準・技術基準を新たに作成するために，この2年間は忙しく仕事をやらせていただきました。

水素製造・利用の新技术動向

光触媒による水素製造

司会 水素製造・利用の新技术動向に関して，将来のお話をいただければと思うんですが，光触媒による水素製造について，堂免先生，お願いいたします。

堂免 光触媒を使って水を分解して水素を作ることに取り組んでいます。非常に簡単に言うと人工光合成的なことをやりたいと思っています。その場合， CO_2 を吸収する必要はないので直接水を分解したいということです（図7参照）。使う一次エネルギーは太陽エネルギーです。既存の太陽電池にはかなりエネルギー変

換効率が高いのがありますので，我々が目指している光触媒では，その太陽電池とは若干違う使い方をしたいというのが1つあります。というのは，最終的に太陽エネルギーを使いこなすには広大な面積が必要なので，その時に，光触媒が太陽エネルギーの大規模な利用に向いているというのが我々の考えです。

これがすぐできない理由は，一番大きな問題として，直接水と接触しても安定な材料が見つかっていなかったことです。太陽光の中の可視光を吸収し，なおかつ水を分解して安定性を保つ材料が要求されます。今から20年ぐらい前に光触媒や光電気化学がかなりブームになったことがあるのですが，その後，下火になったのはこのためです。

最近，我々，新しいタイプの材料を見つけてまして，その材料で実際に水の分解をできるよう研究しているわけです。ですから，来年

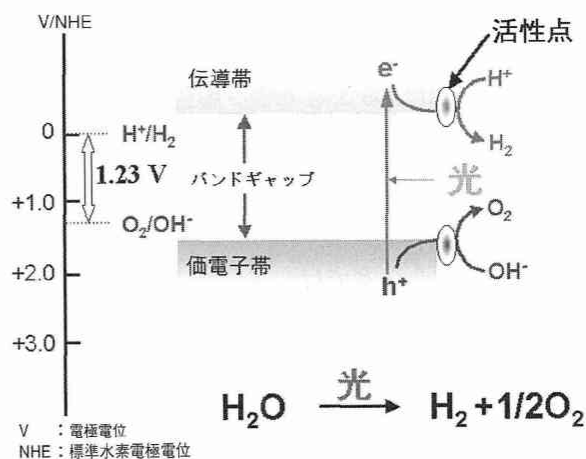


図7 水の光分解の基本原則



坂田 興

(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)

とはいかなくても、それほど長い時間をかけないでかなり高い効率で水を分解できる材料が出てきそうです。

その後、それが現実の世界で使えるか、実用化されるかということに関しては、エンジニアの方々に加わっていただいて研究開発しなければならぬ話だろうと思います。

新しい液化技術の研究動向

「磁気冷凍」への取り組み

神谷 液化の原理は水素ガスを圧縮して断熱膨張させて液化することです。膨張タービン、ガス圧縮機等の改良で、現在約30%のプロセス効率がこれからだんだん上がってくると思います。

一方、米国や日本では、まったく新しい原理で液化する手法「磁気冷凍」への取り組みがなされています。これは、磁性体に磁場を印加、または除去して、冷熱を発生させる方法です。これをやりますと、40%、50%ぐらいまで効率が上がるだろうと言われています。

ただ、その磁性体の性能が室温側で良くありません。低温では非常にいいものができていますので、今までの気体冷凍と磁気冷凍を組み合わせた方式が出てきて、最終的には全部が磁気冷凍になっていくだろうと思っています。問題として、磁性体の劣化や再現性、磁場を加えるためにエネルギーを要するわけですから磁気熱量効果のいいものを開発する必要がありますが、「磁気冷凍」は非常に期待が持てる技術だと思います。

司会 材料が見つかってくると大きなコストダウンにつながる可能性があるということですね。

藤井 私も磁性の研究を色々やってきたのですが、ヨーロッパ、アメリカあたりで磁気冷凍のための良い材料がどんどんできています。ですから、これは期待が持てる技術であると思っています。

司会 神谷さんがおっしゃったように、磁気冷凍では低温でいい材料がだんだん見つかってきています。磁気冷凍の適用できる温度を室温付近までもっていくのはまだまだこれからですか。

神谷 室温付近の磁気冷凍の研究がされてきておりますが、まだエネルギー効率的に劣ります。室温から水素温度までの広範囲の冷凍液化に適用できる効率の高い磁性体の開発は、なかなか難しいですが、磁気冷凍の適用温度範囲を段階的に広げていけば期待できます。

炭素隔離技術、新触媒の開発も重要

池松 私も、太田先生もおっしゃった炭素隔離は重要な技術だと思います。アメリカも最近非常に力を入れている。産業技術総合研究所で開発しているカルシウムに固定させる方法は、面白いと思います。理由は2つあります。古代の

大気はCO₂濃度が高かったのですが、それを固定した主な物質は珊瑚だろうと言われていました。カルシウム固定は自然界で古代からあったわけです。それと、我々の業界のように、大規模に熱を使って水素を大量発生させているところでは、熱源と排ガスから硫化物（SO_x）や窒素酸化物（NO_x）を除く排煙脱臭や脱硫の技術があります。カルシウムでカーボンを固定する方法は、固定する量が全然違いますが、ひょっとするとかなり似通ったプロセスになる可能性があり、現実味があります。

炭素を将来の資源として活用できるまで、ある程度リザーブしておいていいはずです。だから、炭素隔離技術には期待しています。

太田 水素エネルギーシステムのすべての要素について、いい材料が出てきたら実用化に弾みがつくと思います。例えば、燃料電池では触媒として白金を使っています。1kWの燃料電池に約1g使うとすると、白金の賦存量からして世界で2億台の車しか作れません。現在でも8億台とか走っているわけですから、あまりメジャーにならない感じがします。で、白金に代わる触媒を見つける研究が必要と思っています。

司会 この辺の部分については努めてデータを集めて共有化できる仕組みが必要と思っています。

水素社会実現のためのシナリオ提言

国家レベルで水素のテストが必要

太田 水素社会実現のためには、水素のテストをしなければいけません。アイスランドやカナダでは、国家レベルでそれに取り組んでいます。カナダでは、「水素村」とか「水素ハイウェイ」という構想が出てきています。日本でも水素ステーションができていますが、もう少しこれを広げる必要があるという気も

しています。小規模でもいいですから、水素を輸送して使ってみる。副生水素に興味を持ってくれている地方自治体で使ってもらって、技術支援を積極的に行う。そこで、「これはいいな」と思ってもらえれば、次のステップに進むことができると思います。

先週中国の田舎町に行きました。そこで電動スクーターらしきものをいっぱい見たのですが、鉛のバッテリーで動いているらしいのですが、もしニッケル水素電池を使うとなるとこれは水素利用の一端かなと思います。電気分解で水素を作っていい吸蔵材料に貯蔵して、1日30kmとかの走行距離なら、日本でも実現する話だという気もしています。

例えば、車椅子とかで燃料電池を使おうという会社があるわけですが、そういう動きも積極的に推進してあげる。そうすることによってだんだん世間の認識が得られればいいと思うのです。池松さんも述べられたように、今年から始まる定置型燃料電池の大規模実証試験でどの家庭の奥さんも「これはいいね」と言ってくれるようになれば素晴らしいですね。

早く実用的なものを世に送り出す努力

藤井 スケールは小さくてもいいから水素社会の実現に向けてどんどん動いていくことが重要であると考えています。もちろん、規制緩和や安全性のアピールも大いにしながら、我々はなるべく早く実用的なものを世の中に出していく努力をしていかなければいけないと強く感じます。

これは日本だけでなく、世界がやはりこういう問題に取り組んでいくと、そういう姿勢が問われており、確かに現実化してきていると感じています。

最近、私、英国やノルウェーと共同研究をしています。そこでは北海油田の枯渇問題が深刻な問題として捉えられていて、北海原油に換わるものは水素であると認識されていると理解しています。そこで、水素関連予算

がどんどん増加してきています。イギリスは特に積極的で、できるだけ早い時期に世の中に実用的なものを出していこうという姿勢がうかがえます。ですから私はそういう観点でこれから、国もですけど、我々自身も努力をしていくということが大事なというふうに思っております。

「産官学」に加え「民」からのニーズが必要

渡辺 水素を導入していく上で「産官学の連携」ということがよく言われます。実用化を推進する産業界の努力、基礎的なところでそれを支える大学の研究、そして規制の見直しという政府の役割が必要ということです。

先ほど話題になった安全性などを考えると、例えば、「民」、すなわち、一般の人々から「もっと水素を使いたい」とか、「使ってもいいな」「使いたいな」というニーズが出てくれば、もっとそういった政策や技術開発が進んでいくと思いますので、あまり恐れずに、もっと普通の人々にも水素の利用技術について積極的にPRしていく取り組みが必要だと思っています。

エネルギー総合工学研究所への期待

導入期の今、失敗しない選択を

池松 エネルギー総合工学研究所には期待しています。水素には未来のエースとして非常に期待しているんですが、その取っかかりのところで躓いてはいけません。ですから、ライフサイクルアセスメント（LCA）的にエネルギー効率の高いところから着実に伸ばしていく導入期が非常に大事だと思います。LCAの分析、全体を見通せるエネルギー動向というベースをエネルギー総合工学研究所に作っていただくと、我々としても水素の導入ステップや開発シナリオが書きやすくなると思います。

司会 LCAに関しましては、当研究所も真摯に研究の中に取り込もうとしています。

市場で流通する技術を

神谷 日本では「水素シナリオ＝燃料電池シナリオ」と思いますが、もうちょっと長期的視野に立ち、例えば、船舶、鉄道、航空機等の輸送機器の実用化を含めて、2030年頃にどのぐらい水素が必要かとか、もっと幅広い定量的な水素社会を考える必要があると思います。

それから、水素と電気のベストミックス的な検討も必要かと思っています。

いずれにしろ市場に流通していかないといけません。私がアルゼンチンに行った時に非常に印象的だったのは、天然ガス車の導入の経緯です。彼らはオイルショックで1984年ぐらいから天然ガスを導入して、今は天然ガス自動車数が120万台に達しています。日本は1980年代に導入普及に努めて、たった1万台です。アルゼンチンでは政府からの補助金なしでこれだけ普及しています。そういう意味で、やはり市場の自立性は重要だろうと思います。

堂免 燃料電池にしても、触媒にしても普及までには非常に大きな技術的なギャップがあります。化石資源が十分使える間に、できるだけそのギャップを埋めていくような研究を進めていって、使える段階にもっていくのが非常に大事と考えます。

将来の利用形態、用途について

幅が広がる水素利用の形態

司会 今日、大きな話題としては取り上げなかったのですが、水素の利用の可能性、大規模だと水素を使ったタービンという話もありますし、小規模ですと携帯電話やパソコン用という話もあります。それからロボットの

ような新しく起こる産業に使われる可能性もあると思います。そういったところも含めてございましたらよろしくお願いいたします。

太田 利用の幅はものすごく沢山あります。しかし、もともと水素エネルギーが注目された時には、利用形態については化石エネルギーをベースにした今のシステムを変えなくても良いだろうと考えがあったと思います。日本は燃料電池にターゲットを絞り、その導入を図ろうとしています。水素タービン、水素ディーゼルも研究課題としてあります。

池松 燃料電池は、これまで戸建て世帯への設置に努めてきましたが、集合住宅向けには、セントラル改質で水素を作って、集合住宅内で水素配管をし、各世帯に置くのは燃料電池のセルスタックだけという形が考えられます。そうすると、セルスタックは、入口のガスメーターに入るくらいコンパクトにできそうです。問題は、集合住宅の中を水素配管していかどうかです。

太田 法律的な問題はないのですか。

池松 まずは実証実験でやろうとしています。こういう工夫が将来に向けた入口で、LCA的にも十分成り立つ、と思います。あとは安全性ですが、十分注意してやれば大丈夫だと思います。水素ステーションをせっかく作っても、車があんまり来ないので水素が「宝の持ちぐされ」になっている。そこで水素ステーションを活用して地域の水素供給拠点にできないかと考えています。少しずつ実証の範囲が広がっています。

司会 さっきの神谷さんのお話では、航空機とか船舶とか、そういうことの研究というのはどの程度行われているのでしょうか。

神谷 日本は全然やっていません。水素飛行機

について、ヨーロッパのエアバス社、アメリカのボーイング社等が概念設計を行っています。動力は、内燃機関ですからマイナーチェンジすればいい話なのですが、燃料の液体水素は容積あたりのエネルギー密度が小さいため、搭載する液体水素の容積が、通常の航空燃料の約4倍必要とします。で、どのように大量の液体水素を機体に貯めるか問題になります。

司会 「水素社会の実現を目指して」ということで議論をいただいたわけですが、個別に見えてきている部分と、少し先の部分とがあって、それに対する技術も相当リストはそろってきています。攻めやすいところから攻めていくというのが実現を目指す一番力強い方法だという感じを受けました。

どうも今日は本当にありがとうございました。

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

村 上 敬 宜 (九州大学工学研究院 教授)

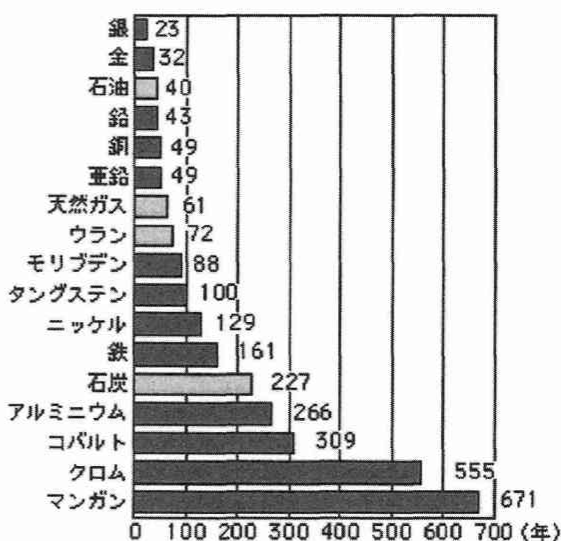


1. 背景

人類は長年にわたって、地球の多くの資源を食いつぶしてきた。

色々な調査によって、石油が使えるのはあと40～50年といわれている(図1)。日本は近い将来、エネルギー確保において大変厳しい状況に置かれることは目に見えている。一方で、地球温暖化も進行している。エネルギー問題も地球温暖化問題も各方面で議論されているが、両者ともに台風や地震被害のように一過性のものではないことを認識しなければならない。問題が顕在化したときには後戻りが不可能である。にもかかわらず、今日明日の問題でないとの認識で毎日少しずつ破局へと向かうのが人間の習性である。このような事情で水素をエネルギーとして利用する社会へ向かうことが必須となっている。

しかし、水素利用社会実現には多くの科学的・技術的課題がある。一方で、社会受容性を高める啓発活動も必要である。国民(一般市民)の協力なしに安全な水素利用社会実現はあり得ない。定置用燃料電池システムの普及にはパイプラインの安全確保が必要であり、車両用燃料電池システムの普及には車両そのものの安全対策の他に利用者の使い方、トンネル、地下駐車場、水素ステーションなどのインフラの安全確保が必須である。安全にかかわる純粋な技術的対策の他にマン・マシンシステムからみた安全対策や啓発が必要である。



平成12年現在(ただし、ウランは平成9年、アルミニウムは平成11年)

残余年数=埋蔵量/生産量

資料: BP Amoco『Statistical Review of World Energy 2001』, OECD/NEA- IAEA, Mineral Commodity Summaries 2001 (一部2000), World Metal Statistics 2001より環境省作成

図1 主要なエネルギー資源・鉱物資源の残余年数

このように考えてくると、水素社会実現のためには基礎から実証までの科学的・技術的研究開発と並行して国をあげての国民の理解を得る活動を早期にはじめることが重要であることがわかる。エネルギーと地球環境問題は、内閣府の主要政策でも取り上げられている。日本の将来の根幹にかかわる問題なのであり、ナノ、バイオ、IT、ロボットなどの科学・技術問題とは次元が異なるものである。

この問題の重要性については吉田邦夫氏⁽¹⁾によっても論じられている。本稿では、水素利用技術の基盤を支える水素と材料に関わる技術的問題を取り上げる。

2. 水素はなぜ材料の強度を弱めるか

私たちは水やお湯をパイプに流しても重大な事故の心配はしない。漏れることはあまりないし、漏れたとしても危険が少ないからである。高温高压の蒸気やプロパンや天然ガスなどが漏れると事故につながるが、それでも防止法は確立している。これに対して、水素は大変やっかい者である。他のガスよりはるかに少ないエネルギーで着火する。空気中の濃度も薄い状態（4%）から濃い状態（75%）までが可燃範囲である。ゴム風船に入れてふくらませても翌日はしぼんでしまうのは、水素がゴムの分子の間を抜けて外に出るからである。水素が素通り、あるいは侵入するのはゴムだけではない。金属にも侵入するのである。

金属に水素が侵入すると、強度が著しく低下することが知られている。破壊を起こしたときの状況はマクロ的には一見金属が脆く壊れたような様相を呈するので「水素脆化」という用語が使用されるようになった（図2）。ところで、金属に侵入した水素は、金属中でどのような振る舞いをするのであろうか。残念ながら正確なことは未だわかっていないのである。よく知られた実験は次のようなものである。

「金属を水素ガス中で極めてゆっくり引張ると、空気中で引っ張った場合と比べて伸びが著しく減少する」

この現象の解釈についても議論が分かれて

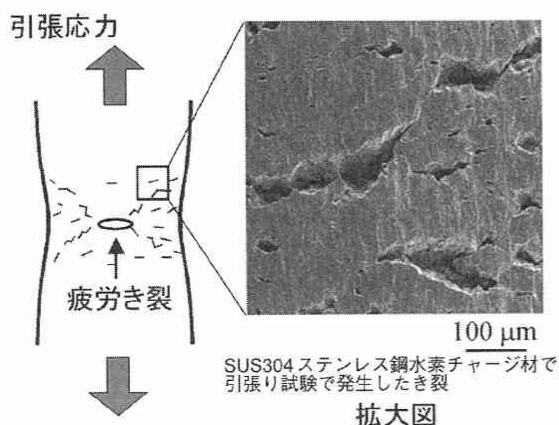


図2 水素チャージ材の引張り試験によるき裂

いるが、水素がいたずらしていることは明らかな事実である。

もう1つのよく知られた実験による現象として次のようなものがある。

「切欠きあるいはき裂を付けた鋼の試験片に水素ガス中で荷重をかけると、荷重が一定値でも時間の経過とともにき裂がゆっくり進展し、最終的には試験片は脆く破壊する」。この現象には「遅れ破壊」という名前がつけられている。

上記2つの例にはいずれも「極めてゆっくり引張ると」、「時間の経過とともに」という時間のファクターが関係しているところが特徴である。このことは現象の解釈に多くの誤解を生む原因になっているが、ここではそのことには触れない。

上に紹介した2つの例は比較的古くから知られているもので、燃料電池システムではなく多くの化学プラントや原子力プラントで話題になってきた。これらの機器では、水素が金属中に侵入することでき裂が発生し荷重負担能力が低下し、破壊事故に至ることが問題とされた。ところが、燃料電池システムにおいては水素と金属の関係はより直接的である。多くの部品や機器が直接低圧、高压の水素に曝されるのである。しかも、これらの部品には繰返し荷重がかかる。繰返し荷重を受ける金属の破壊現象は、「金属疲労」と呼ばれている。金属疲労の研究の歴史は古く、約150年であるが、現在でも破壊事故の80～90%は金属疲労が原因である。多くは空気中の実験データについての研究がなされてきたが、中には液体中やガス中での研究もあり、色々な現象が解明されてきた。

しかし、水素が金属疲労に及ぼす影響についてはこれまでほとんど研究がなされていない。それほど必要にせまられなかったからである。それでは「研究をすればすぐ解決できるのではないか」ということになる。私たちは10年ほど前から関心を持ち、特に、ここ数年は集中的に研究グループの総力をあげて研究を行っている。現在の感想は「これは大変やっかいで難し

い問題」ということである。燃料電池システムに関わるほとんどの企業は、部品や機器、装置の開発は従来技術の延長でいけると考えているふしがある。これは全くの誤りである。「空気中と水素中は別世界」と考えて、技術開発に基礎から取り組むことが解決への近道である。学問的裏づけもなく、部品や機器を製作しては試験する、膨大な試行錯誤はエネルギーの無駄遣いであるばかりでなく、自分たちが前進しているのか後退しているのかわからない状況にはまり込むことになる。

以下では私たちの研究グループの最近の成果の一部を紹介して、この問題について理解をしていただければ幸いである。

3. 水素と金属疲労

(1) 金属疲労とは何か：疲労試験と現象

金属に力を繰返しかけると、やがて破壊する現象が「金属疲労」である。大きい力を繰返すと少ない繰返数 N （疲労寿命という）で破壊する。繰返す力を減らしていくと寿命は延びる。この試験を疲労試験というが、疲労

試験を永遠に続けるわけにはいかないから、どれほどの繰返し数まで実験して、長期間安全に使用できる確証を得るかが問題となる。一般には、疲労試験は $N=10^7$ （1000万回の繰返し）で打ち切る。それには理由がある。通常使用される鋼の試験のデータは図3のようになるからである。 $N=10^7$ に至るまでにそれ以上繰返しても破壊しない兆候が得られるからである。ある限界の力、正確には応力（単位面積当たりが負担する力：記号 σ を用いる）を

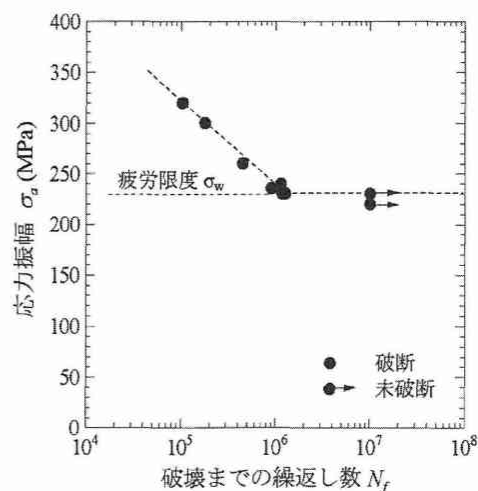


図3 構造用中炭素鋼の回転曲げ疲労試験データ

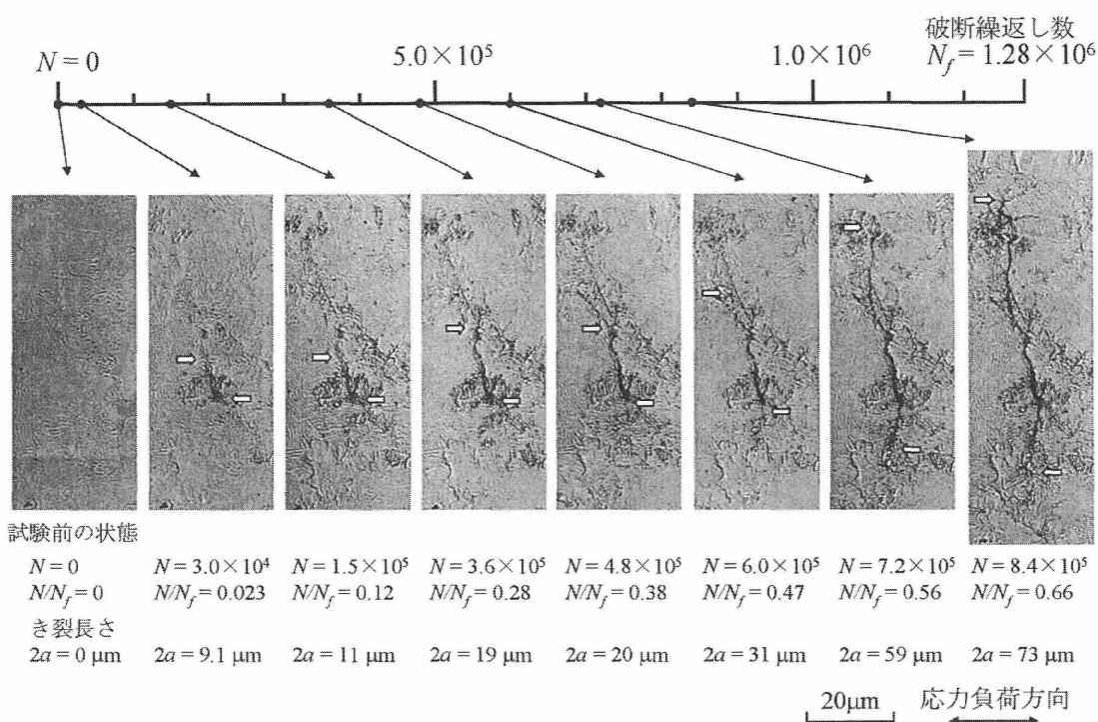


図4 金属疲労の微視的過程：き裂の発生と進展

永久に繰返しても破壊しないと考えられる限界の応力を疲労限度 (σ_w) という。材料ごとに疲労限度を求めることは大変重要なことである。疲労限度は機器を長期間使用しても破壊事故が起こらないように設計するためには欠かせない重要な量である。

ところで、「疲労限度」は金属疲労の長い歴史の中で「力を繰返しかけてき裂が発生する限界」と考えられてきたが、近年の研究で確立されている考え方は「発生したき裂が進展を停止する限界」というものである。「発生したき裂が同じ力を繰返しても、それ以上進展せず停止する現象」は大変奇妙な現象であるが、金属疲労の理解に欠かせない重要な事実である。

疲労限度より大きい力を作用させたとき破壊に至るまでの材料内で起こる現象はどのようなことであろうか。破壊の原因となるき裂の発生は破壊直前に発生するのではない。き裂は疲労試験開始後の早い時期に発生、それが繰返しとともに徐々に拡大していく。図4はこの様子を観察した1つの例である。き裂は疲労寿命 N_f の数パーセントの時期に発生していることがわかる。巨視的には破壊直前まで何の変化も起こっていないように思えるので、疲労破壊は突然起こるように思われているが、実際の現象はそうではないことを理解することが事故防止にも重要である。このように「金属疲労」という現象は「き裂発生までの過程」と「き裂進展・拡大」の過程から成っており、特に巨視的には気づき

難い微小き裂進展の過程が寿命の大半を占めているのである。金属疲労は材料が全体的にくたびれた状態になるのではなく、局所的なき裂の発生、進展現象なのである。

一般には、疲労試験の結果とミクロな現象は図3、図4のようになるが、近年高強度の鋼を $N=10^7$ 回を超えて疲労試験すると、疲労限度の消滅現象が起こることが報告されるようになった。疲労限度が存在しなければ機器の設計は大変困難になる。繰返しを継続すればいつかは破壊するからである。このようなことから $N>10^7$ での疲労強度を決定することが必要になってきた。最近では $N=10^9$ や $N=10^{10}$ までの実験もなされるようになった。 $N=10^9$ の試験には100Hzの繰返し速度でも4カ月を要するので $N>10^8$ の試験には20kHzでの超音波疲労試験機も利用されるようになってきた。

高強度鋼の $N>10^7$ での疲労破壊は超長寿命疲労あるいはギガサイクル疲労と呼ばれている。低い応力を負荷して $N>10^7$ でも疲労限度が得られず、破壊が生じる現象については鋼中の非金属介在物がトラップしている水素が影響していると考えられている⁽²⁾。 $N>10^7$ での高強度鋼の疲労試験の破壊の起点が非金属介在物であり、非金属介在物のまわりに水素の存在が確認されている。図5(a)は疲労破壊起点に観察された非金属介在物であり、(b)はSIMSによる水素の検出結果である⁽³⁾。これらの破壊起点には顕微鏡で観察すると黒く見える領域

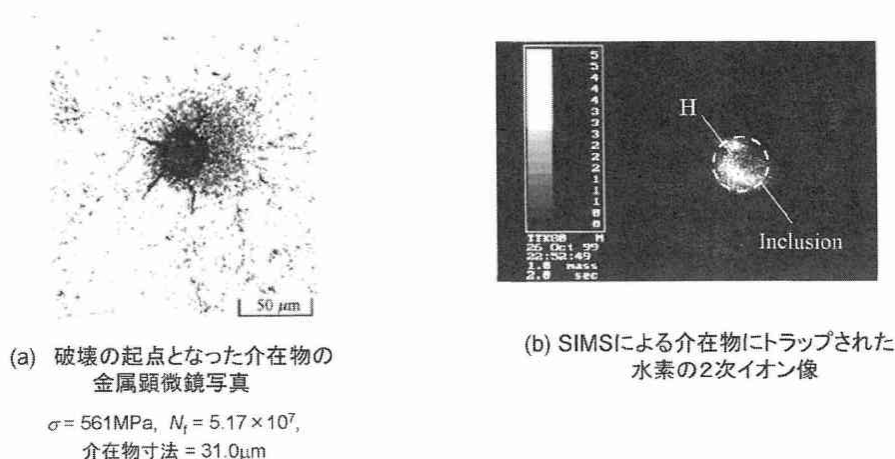


図5 疲労破壊起点となった非金属介在物の金属顕微鏡写真とSIMS像

(ODA / Optically Dank Area) が見られるのが特徴である。介在物と同程度の寸法の微小な人工欠陥を導入した場合や他の組織から破壊した場合にはこのような領域は見られない。1 ppm程度の微量な水素でも、長寿命の疲労試験ではこれほどの重大な影響を及ぼすのである。

燃料電池システムでは種々の機器が直接水素に曝されるから、これらの機器の疲労強度については、長期間使用中の水素の影響を解明することが必要である。残念ながら、現在のところ、水素が金属の疲労強度に及ぼす影響について系統的に実験したデータは世界中にない。

次下では、著者らのグループが得たいくつかの例を紹介し、水素が金属疲労に及ぼす影響がいかに重大かを示す。

(2) 蓄圧器材料：クロモリ鋼 (SCM435)

SCM435は蓄圧器用や水素圧縮機用材料として使用される。これらの機器を長期間使用するとどれほどの水素が材料中に侵入するかはまだデータがない。そこで、人工的に水素をチャージした試験片について疲労試験を行った。図6に、疲労試験の結果を示す⁽⁴⁾。水素チャージ量が微量でも著しい疲労強度の低下、疲労寿命の減少があることがわかる。初期の水素量が10ppmの場合には水素チャージしな

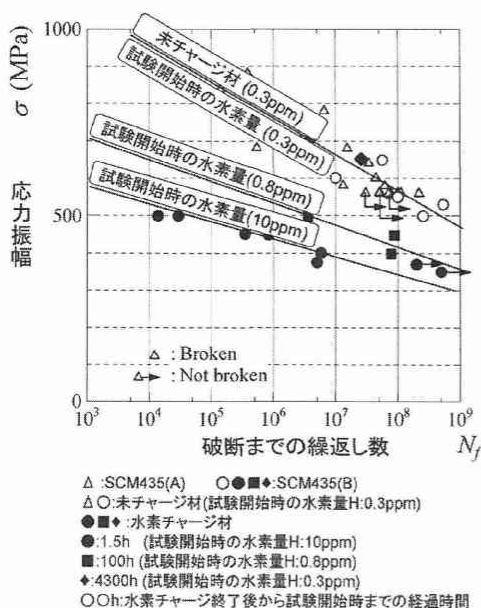


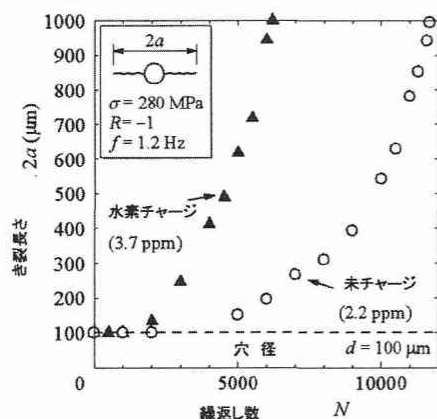
図6 疲労試験データで見る水素の影響

い場合に $N=10^8$ まで耐える繰返し応力の下でも $N=10^4 \sim 2 \times 10^4$ 程度の寿命しかない。寿命は1万分の1程度に縮まるのである。疲労試験中に水素は試験片から抜け出てしまうので、実際の水素量は10ppm以下であることに注意しなければならない。このことから、材料が長期間(5~10年)高圧水素に曝されるとどの程度の水素が材料中に侵入するかを把握する試験が極めて重要になる。

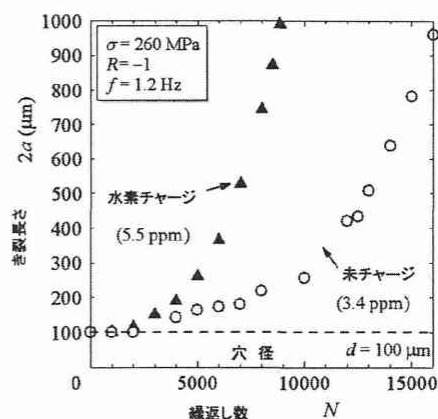
この問題に関して、典型的な誤解は「高圧水素中で疲労試験を実施し、5~10年分の繰返し数に耐えたから大丈夫」と考えることである。高圧水素中で疲労試験を実施し、1万回や10万回繰返すのは1日かせいぜい数日しか要しない。このような実験では、水素はまだ十分に材料中に侵入していないので水素の影響は考慮していないことになる。この問題については多くの研究者、技術者の誤解があるので注意が必要である。

(3) ステンレス鋼 (SUS304, SUS316, SUS316L, SUS405) : 配管系, バルブ, ばねの材料

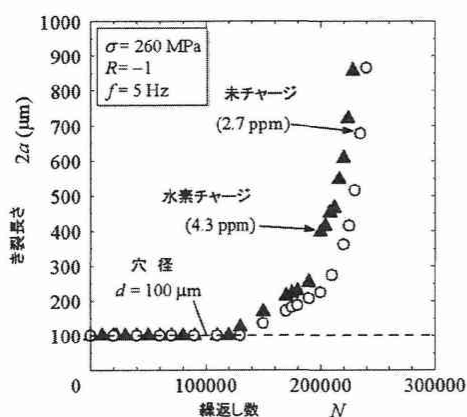
ステンレス鋼は燃料電池システム、水素利用機器分野で重要な材料である。著者らのグループの実験によれば、平滑試験片(切欠き、穴など欠陥のない丸棒状試験片)を使用した場合は、水素をステンレス鋼にチャージした場合も、水素雰囲気中で実験した場合も寿命にさほどの影響は見られない。しかし、SUS304やSUS316で初期から微小な人工欠陥を導入した試験片では、水素チャージした試験片の寿命が水素チャージなしの試験に比べて著しく短くなる。この原因は、人工欠陥を導入した試験片では、試験片のごく初期にき裂が発生し、ほぼ全寿命がき裂進展に費やされることが、水素が材料中に侵入していると疲労き裂の進展が著しく加速されることである。図7に実験結果を示す。この現象はSUS316LやSUS405では目立っていない。この差については、SUS304やSUS316の組織が繰返し応力を



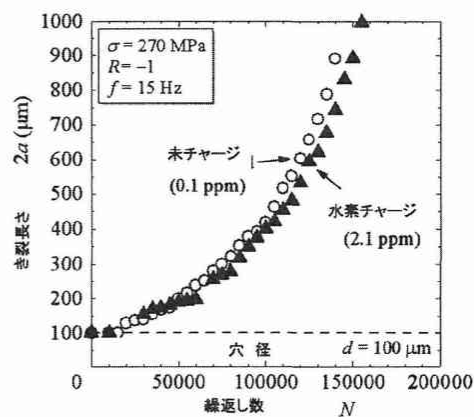
(a) SUS304



(b) SUS316



(c) SUS316L



(d) SUS405

(a) (b) (c) はオーステナイト系ステンレス鋼, (d) はフェライト系ステンレス鋼

図7 人工微小穴（直径100 μm ）からの疲労き裂進展に及ぼす水素チャージの影響

受けると変態してマルテンサイトになる傾向があること、この傾向は水素の存在によって強くなることが関係している。

しかし、これらの実験は加工を受けていない材料から試験片を製作した結果である。多くの機器は通常、製作過程で大きな加工（塑性変形）を受けるから、SUS316Lなどについても今後は加工の影響を調べる必要がある。

紙数の制限から詳細な説明は省くが、結論を要約すれば、SUS316Lは、SUS304、SUS316に比較すると、相対的には耐水素性に優れていること、しかし、水素チャージ量を増し、その後加工を受けた材料のき裂進展特性については、さらに研究が必要である。

(4) アルミニウム合金：高压水素容器のライナー材

車載用35MPa高压水素タンク（図8）のライナー（タンクの内張り）にはA6061-T6アルミ合金が使用されている。タンクの外周は繊維強化プラスチック（CFRP）である。ライナーはスピニング加工で製造される（この方法を採用しないメーカーもある）。スピニング加工すると多くの場合、口金部にしわが生じる（図9）。このしわの存在は耐圧テストの際には目立った影響が見られないので現在のところ特別な注意が払われていない。しかし、疲労強度には著しい影響を与えることに注意しなければならない。

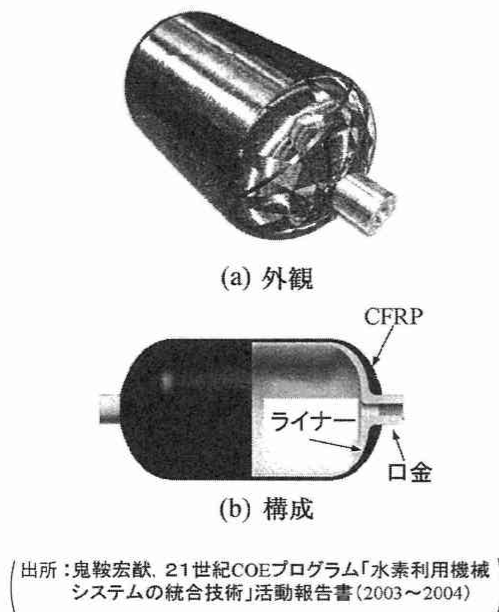


図8 高圧水素容器の外観と構成

図10は試験片に $100\mu\text{m}$ から 1mm までの人工微小穴をあけた試験片の疲労試験結果を示している。 1mm 程度の欠陥は引張り強度にはほとんど影響がないが(表1)、疲労試験では欠陥がない場合に比べて寿命が10分の1以下になることに注意しなければならない。規定となっている「耐力の1.5分の1の繰返し応力で $N_f=11,250$ の保証」の根拠が危ういのである。A6061-T6は水素侵入が少ない材料といわれているが、そのことを詳細に調べた研究は未だない。長期間使用での水素侵入と欠陥やき裂が存在する状態での疲労強度への影響は十分

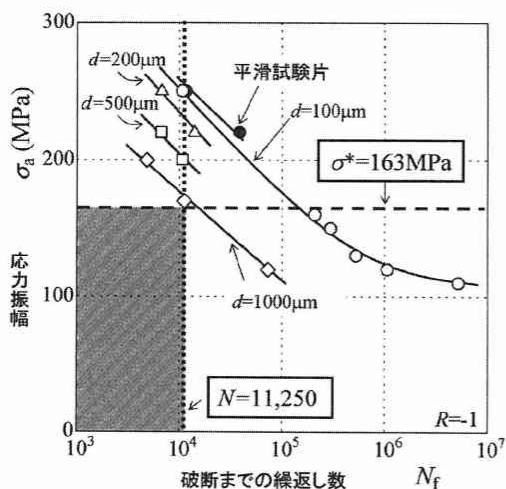


図10 A6061-T6アルミ合金の疲労試験結果



図9 高圧水素容器の外観と構成

追跡調査をする必要がある。

高圧水素用容器については近い将来、安全基準が告示・施行される予定である。その内容の大部分は高圧天然ガス用例示基準に準ずるものになるであろうが、水素と他のガスの決定的な違いが考慮されていないことには注意を要する。水素を天然ガスに置き換えて実験したとしても、規定の繰返し数を満足すればそれでよいという訳ではない。例えば、 $N=11,250$ 回の規定の繰返し数を繰返すテストは1日か長くても数日で終了する。このような短時間で繰返し速度の速い試験では水素は材料中、もう少し具体的にはき裂などの先端には十分侵入していないから、10年程度の長

表1 試験片の引張り強度 (A6061-T6)

	σ_B [MPa]
平滑試験片	318
人工穴付試験片 (穴径 $d=1\text{mm}$)	323

期間に水素が材料中に侵入した状態の影響を調査したことにはならない。実物と同じもので規定の繰返し数だけテストして基準を満足すれば可と判断するのが典型的な誤解である。多くの企業の技術者が、このような考えのもとに製品開発を行っているが、今後はこの問題を正しく認識してもらいたいものである。この問題は压力容器に限らず、水素関連システムの機器全般にかかわる問題である。

4. 結言

紙数の制限のために限られた材料について限られた条件下での水素と疲労強度の問題について述べたが、今後行すべき最も重要な研究は、「材料が長期間水素に曝されたとき、どの程度の水素が侵入するか」を予測することである。そして、一方で「既知の水素量を含む材料の疲労強度やトラボロジー*特性を明らかにし、それをもとに水素機器の長期間の安全を確保する技術を確立すること」である。地味な研究ではあるが、このような研究なく

しては安全な水素社会の実現はあり得ない。ひとたび事故が起これば、日本のエネルギー政策に致命的な打撃となることを技術者の共通認識にしたい。

人間は機械が昨日まで何事もなく運転されていると、今日も、明日も無事に運転されるものと思いつく習性を持っている。金属疲労の世界ではそれはあり得ない。破壊はミクロなところで静かに進行しているのである。このことを認識することが事故を起こさない一番の対策である。

参考文献

- (1) 吉田邦夫「水素エネルギーの展望と課題」エネルギー総合工学Vol.28 No.1, 2005.4.
- (2) Murakami,Y., Nomoto,T., Ueda, T. and Murakami,Y., Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., 23 (2000), 893-902.
- (3) 村上敬宜, 小西寛, 高井健一, 村上保夫, 「鉄と鋼」, 86 (2000), 777-783.
- (4) 村上敬宜, 長田淳治, 「材料」, 54 (2005), 420-427.

* 摩擦, 摩耗, 潤滑の問題を総合的に研究する学問につけられた名前。

燃料電池用水素製造技術の開発*

安 田 勇

(東京ガス㈱ 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)



はじめに

燃料電池には家庭用の据置型燃料電池と自動車用燃料電池があります。本日は、燃料電池車向け燃料としての水素製造技術とその技術開発の最新状況をご紹介します。

内容は、①化石燃料からの水素製造と燃料電池システム、②定置用燃料電池向け燃料処理技術、③PSA方式による水素製造の開発と実証、④水素分離型リフォーマーによる水素製造技術、最後に、今後の展望についてです。

化石燃料からの水素製造と燃料電池システム

化石燃料からの水素製造～3つの方法

色々なエネルギー源から様々なプロセスを経て水素を作ることができるというのが、水素エネルギーの大きな特徴です。再生可能エネルギーから作り出す水素が究極のクリーンエネルギーとして期待されるのですが、やはり再生可能エネルギーは、安定供給の側面やコストの側面、技術の側面で課題があり、一足飛びに実現しそうにありません。

では、現実的なオプションとして何から水素を作るのが良いか。1つが、実績のある燃料

から水素を取り出すということです。私は、産業界が出している「副生水素」を利用する方法と「化石燃料」から水素を作り出す方法の2つが主流になっていくと思います。副生水素は基本的に水素という形で出てきますので、ここでは化石燃料からどうやって上手に水素を作るかに焦点を絞ってお話します。

「化石燃料」から水素を作り出す方法として、既に工業用に使われている「水蒸気改質法」、 「部分燃焼法」、 「オートサーマル改質法」の3つがあります。化石燃料というのは通常、炭素、水素、酸素等が結合した炭化水素ですので、炭素と水素の結合を切って水素を取り出すことになります。その時に何と反応させて結合を切るのかによって分類されます。水蒸気と反応させる場合は「水蒸気改質」、酸素と反応させる場合は「部分燃焼」、両方の利点を合わせた反応は「オートサーマル」と言います。

自動車燃料用水素製造の課題と先進技術

上述の3つの方法は工業用の水素製造については成熟技術ですが、エネルギーとしての水素製造を考えた場合、いくつかの課題があります。

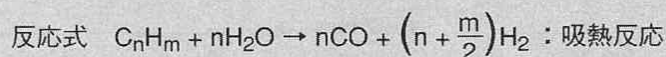
まず、大規模な工業プラントと車に水素を供給するための設備とでは当然求められる大きさが異なってきます。設備の外観も威圧的であっては一般ユーザに受け容れられませんので、できるだけ小さくシンプルに格好よく

*本稿は、今年2月25日の当所月例研究会（第232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。

表1 化石燃料からの水素製造技術

成熟技術	技術課題	先進技術
・水蒸気改質 ・部分燃焼法 ・オートサーマル改質	・小型化 ・シンプル化 ・高効率化 ・低コスト化	・熱分解法 ・Sorbent Enhanced Reforming ・メンブレンリアクター法 －水素透過型 －酸素透過型 ・プラズマ分解法 ・マイクロチャンネル改質器

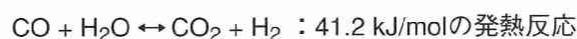
表2 水蒸気改質反応



原料がメタン (CH₄) の場合の反応式は



さらに以下の平衡反応が速やかに生じる。



見せると同時に、高効率且つ低コストでの水素製造などが技術課題になってくるわけです。

こういった技術課題を解決すべく、色々新しい水素製造技術が研究開発されていますが、いくつか例を挙げます。まず、直接炭化水素を、温度を上げて分解して炭素と水素の結合を切る熱分解法、水蒸気改質の一種のバリエーションとして吸着剤で反応を促進させる Sorbent Enhanced Reforming (炭酸ガス吸着型促進改質法)、反応と分離を一緒にやることで水素製造の効率を高めるメンブレンリアクター法、あとプラズマ分解法などがあります。これらを表1に示します。

今後の主要技術～水蒸気改質法

水蒸気改質法は最も経済性が高くかつ効率よく水素を作り出す反応です。そのため、さまざまな工業プロセスや燃料電池用の水素を作る方法として広い実績があります。今後も主要な水素製造形態であり続けられると思われま

すので、やや詳しく紹介しておきます。

炭化水素と水蒸気を反応させる反応式を表2に示しました。最も簡単な炭化水素であるメタンの場合、メタン1と水1を反応(水蒸気改質反応)させると一酸化炭素(CO)1つと水素3つが作られます。できたCOはさらに水蒸気と反応(CO変成反応または水成シフト反応)してCO₂と水素になります。つまり、炭化水素から水蒸気改質反応で作る水素は、炭化水素に縛られていた水素と水から持ってきた水素なわけです。

この2つの反応の大きな違いは、水素を取り出す一段目の「水蒸気改質反応」は吸熱反応で、「水成シフト反応」は、発熱反応であるということです。

さらに、反応温度、反応圧力などの操作因子をうまく組み合わせることによって水素を大量かつ効率よく作っているわけです。

今出てきた水蒸気改質反応で、どのぐらいの濃度の水素がこういった条件でできるのか、計算で求めました。図1は、圧力が0.1MPa

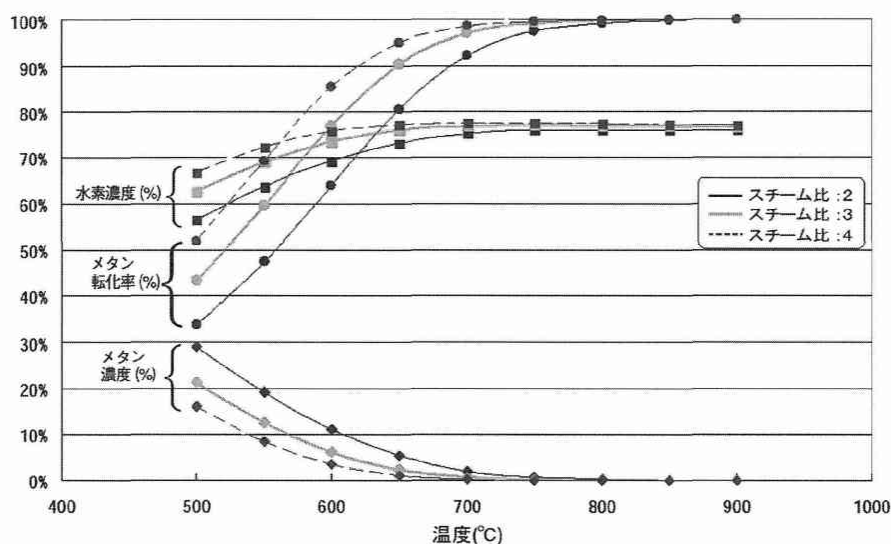


図1 0.1MPa（常圧）での水蒸気改質反応

（1気圧）ですから常圧です。原料はメタンで、スチーム比2，3，4の順に、添加するスチームのメタンに対するモル比を上げています。右下がりにプロットされているのがメタン濃度。右上がりにプロットされているのが転化率で、メタンが反応した割合です。右にフラットになっているプロットが製造ガス中の水素濃度になります。反応温度500℃ぐらいから、反応ガス中のメタン濃度が下がってきて転化率が上がっていきます。その結果、水素濃度も上がっていきます。700～800℃になると、反応ガス中のメタンはほとんどなくなりますし、転化率も95%を超え100%に近づいていく、その結果、水素濃度も飽和してくる

ということになります。

「水蒸気改質反応で水素を作る反応というのは700～800℃で行うのがいい」とよく書かれていますけれども、その理由はこのデータを見ればお分かりいただけると思います。

圧力を上げると、図2のようにかなり様子が変わってきます。1 MPa（10気圧）まで圧力を上げた場合、メタンから水素を作り出す反応では、転化率のカーブが図1に比べて、かなり下がっていることにお気づきいただけると思います。圧力を上げると反応が進みにくくなるのです。つまり、転化率を高くしようと思えば、圧力は低い方がいいわけです。しかし、同じ容積の反応器だと圧力を高くし

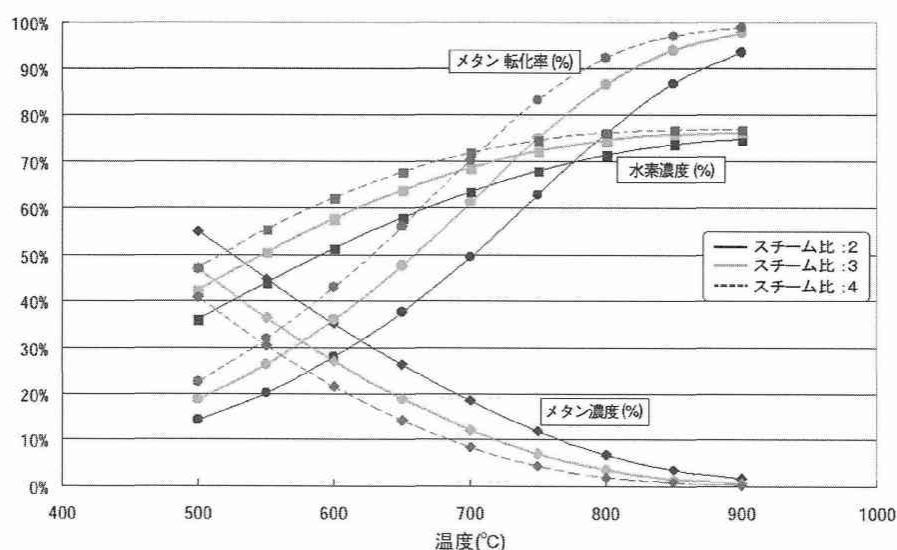


図2 1 MPaでの水蒸気改質反応

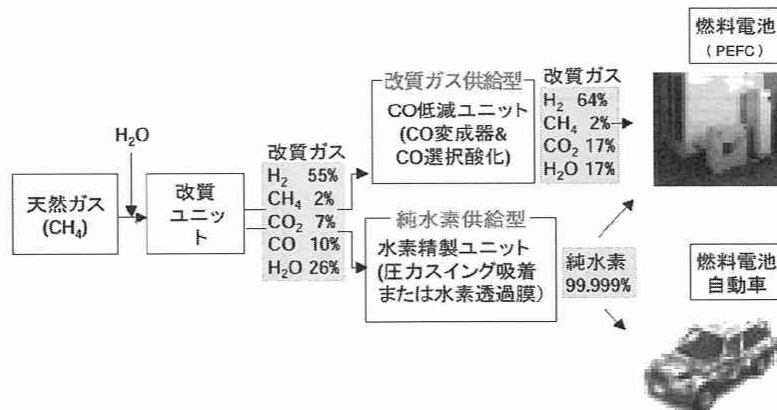


図3 改質ガス供給型と純水素供給型

たほうが原料をより多く詰め込めるので、圧力が高い方が反応器をコンパクトにできます。ということで、実際には、様々な因子を同時に考慮して反応圧力が選ばれているのです。

このようにして取り出した、水素が高い比率で含まれる改質ガス（水素リッチな改質ガス）の典型的な組成は、図3に示すように、水素55%、水26%、残りがメタン、CO、CO₂となります。ところが、改質ガスのままでは燃料電池を動かせません。改質ガスに含まれるCOが燃料電池の電極を痛めてしまうからです。そこで、残っているCOを燃やして除去する選択酸化などを行ったうえで、燃料電池に供給して発電し、熱を取り出しています。

一方、自動車に供給する水素はさらに高純度でなければなりません。そこで、改質ガスを精製して99.99%以上の高純度にして車に供給しています。

燃料電池システムの構成と導入イメージ

図4は定置型家庭用燃料電池の場合のシステム構成と導入のイメージです。民家のすぐ側に燃料電池を置き、燃料電池で発生する電力とお湯を家庭内で利用します。ただし、燃料電池1台で家庭内の電力需要をすべて賄うわけではありません。燃料電池の設備容量は、家庭の電力需要のピークに合わせて決められているわけではありません。そうするとピーク時以外での燃料電池の利用率が低くなってしまいますからです。燃料電池は利用率が最も高くなるように設定されますので、ピーク需要時には電力が足りなくなります。その足りない分は電力会社から買うことになりますから、燃料電池は電力会社の系統と連系して運用されることになるのです。

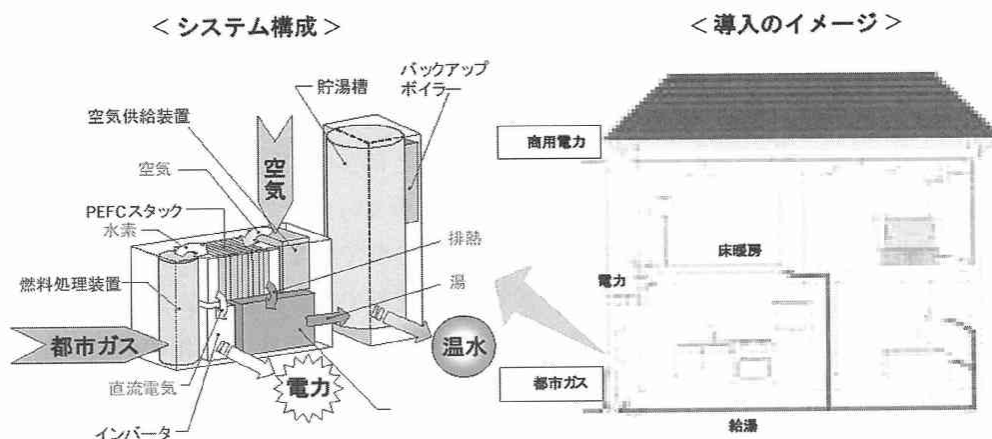


図4 家庭用燃料電池コージェネの構成

定置用燃料電池向け燃料処理技術

3段階のプロセスと高い燃料処理効率

私ども東京ガスで開発している定置用燃料電池向けの燃料処理技術をご紹介します。

原料は都市ガスです。都市ガスには、ガス漏れの時にすぐわかるように硫黄化合物を入れ匂いが付けられています。まず、その硫黄化合物を取り除いて、700℃くらいで水蒸気改質反応を行いメタンを分解し水素を取り出します。出てくるCOは200℃で水蒸気と反応させてCO₂にし、それでも残っているCOを150℃で選択酸化反応させ燃やします。こういった3段階の化学反応プロセスが入っています。しかも温度レベルがかなり違うため、この間で熱のやりとりを上手にしなければなりません。これをうまくやるためには、図5の点線で囲ってある部分を一体的にまとめ上げ、すべての反応を効率よくやるという技術開発が行われています。その例が図6の円筒形の反応器です。容積は19ℓ、でテニスラケットと同じぐらいの大きさですが、これで1kWの燃料電池に相当します。

燃料処理効率を図7に示しました。負荷が100%（1kWの電力出力相当）だと燃料処理効率は80%ぐらいです。それから、負荷を下げていくとやや下がりますが、それでもかなり高い燃料処理効率を維持できています。

発売になった定置用燃料電池パッケージ

このような燃料処理装置を使った定置用燃料電池のパッケージを2005年2月8日から、限定的ながら市場投入を開始しました。図8がその「初期市場投入機」の実物写真です。貯湯ユニットの奥にあるのは、お客様の温水使用量が燃料電池からの熱だけでは賄いきれないほど多い場合に湯切れを起こさないため

一体化構造による高効率・コンパクト化

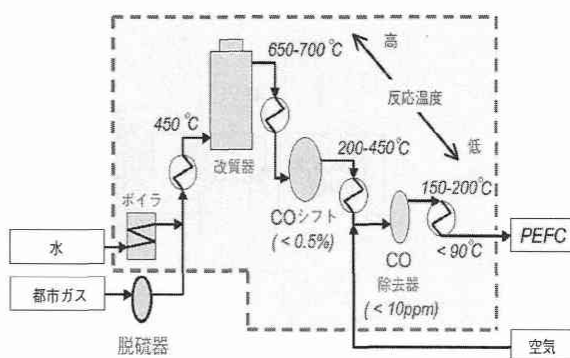


図5 燃料処理装置の構造一体化

	従来型	改良型
構造	10重管	4重管
体積*	19L	19L
重量*	30kg	17kg

* 断熱材を含む

- ・構造のシンプル化
- ・製造コスト低減



⇒荏原バラー社にライセンス供与 <改良型の外観>

図6 一体型燃料処理装置の改良

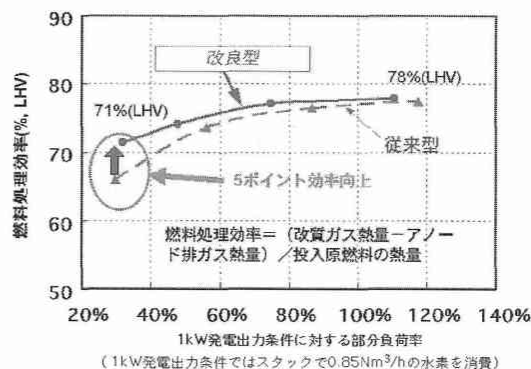


図7 一体型燃料処理装置の効率特性

の「バックアップバーナ」を備えたユニットです。

主な効率の仕様値に示したT/D（ターンダウン）とは、どのぐらいの部分負荷まで運転できるかという値です。定格発電容量は1kWで設計されていますので、最低出力300Wの条件まで運転できる仕様になっています。

最初の2台は小泉首相の公邸に納入されています。今後、一般ユーザーにもお使いいただけるよう準備中です。ユーザーには「燃料電池（FC）パートナーシップ契約」という10

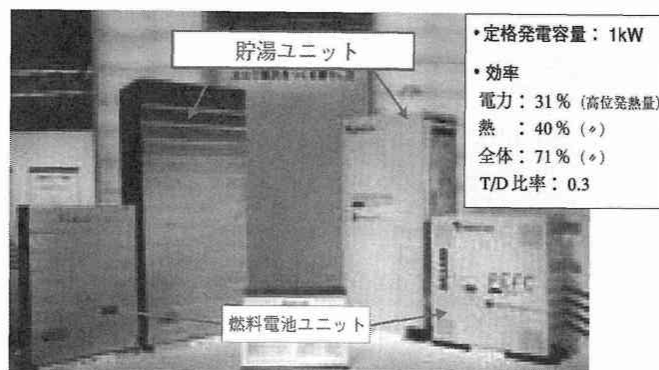


図8 東京ガスの「初期市場投入機」

年間の使用契約をお願いしています。最初に市場投入する機械ですから、色々な情報をフィードバックしていただきたいからです。ちなみに、パートナーシップ契約でお客様にご負担いただく金額は10年で100万円です。

のか図9で説明します。3本の塔の中に水素以外の成分を吸着できる吸着剤が何種類か詰めてあります。水素はそのまま出てきて、結果として高純度に精製されます。

PSA方式では、2つの化学反応器と1つの精製システムの合計3つの機能が必要になります。

PSA方式による水素製造の開発と実証

PSA方式の技術の現状

PSA方式の概略

PSA (Pressure Swing Adsorption: 圧力スイング吸着) システムをご紹介します。この方式の場合は先ほどのと同様に、天然ガスを脱硫して水を入れて水蒸気改質反応を700℃～800℃で行い、出てきたCOを転化させるCO変成を200℃ぐらいで行って、その後、水素の純度を上げるために、PSA装置で水素だけを取り出しています。PSAがどうしても

図10が実際のPSA装置の例です。これは私どもの関連会社が実際に商品として、工場等で水素を使うための装置として販売しているものです。水素製造能力は毎時40m³で、ミニプラントといった仕上がりになっています。3本の塔が建っていますが、ここが精製工程です。水蒸気改質は箱形の炉の中で行っています。現時点でこの装置を使って水素を供給するときのコストは、70円/m³とか、100円/m³ぐらいです。

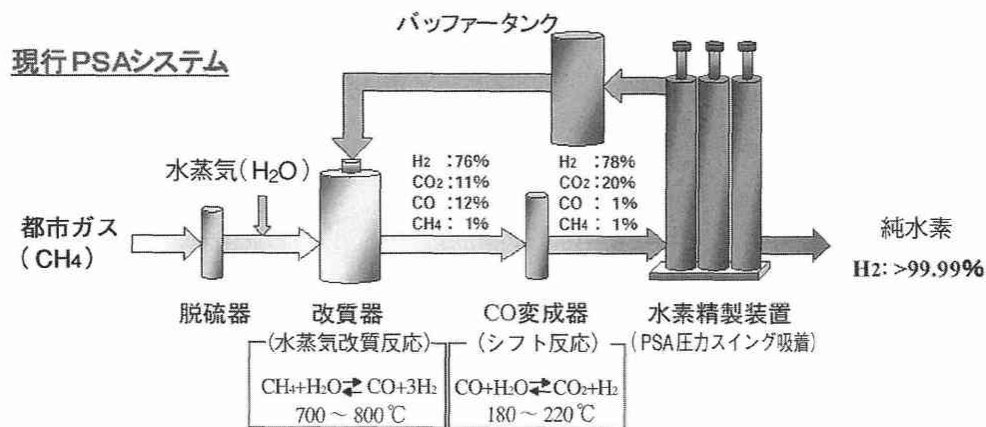
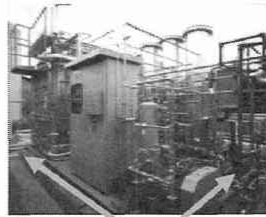


図9 PSA方式の概略

- 都市ガス・LPG から水素を製造
- 全自動運転
- スキッドマウント方式工場組立
- 高純度（99.999%）
- 省エネルギー・低コスト

リジェネレーター適用、スチーム自己製造など
水素製造原価：70～100円/Nm³程度



商用機 10基以上の実績

図10 PSA方式水素製造装置

この種のPSA装置が実際に自動車燃料用の水素製造装置として使われている実績があります。図11は経済産業省の水素・燃料電池実証プロジェクト（JHFC）で東京都と神奈川県に作られた10カ所の水素ステーションの所在地を示しています。このうち化石燃料系の燃料を使っているのは、メタノールも入れると6カ所になりますが、すべてPSA方式の水素製造装置を使っています。

千住水素ステーション

例として、東京ガスの敷地の中に建設されている千住水素ステーションをご紹介します。図12の奥にある2つの箱が水素製造装置です。左側がPSA方式でLPGを燃料とする装置で、

右側が新技術で作ったメンブレンリアクター方式の水素製造装置で、コンパクトで効率もかなり高いものです。

右側の新しい技術で作った装置の燃料は都市ガスです。2つの装置で作った水素は左側の建屋に送られ、400気圧まで加圧されて、建屋内のシリンダーに高压水素の形で貯蔵され、ディスペンサー（ガソリンスタンドの給油装置に相当する機械）を使って燃料電池車に水素供給する仕組みになっています。

2003年5月にオープンして既に2年近く運用していますが、技術面、安全面でもまったく問題がなく、順調に運用できています。自動車もトヨタ自動車とダイムラークライスラーから燃料電池車をリースして使っています。トヨタの車を使い始めたのが2003年8月、ダイムラーは2004年1月からで、今までに2万km程度走り、普段使う分には非常に快適に使えています。

千住ステーションのオープン以来（2003年5月～2005年3月）、車の充填総数は546台です。月当たり二十数台で、供給した水素の総量が7,590m³です。実は、自分たちがリースして使っている2台を充填しているというのが実態です。減多にお客さんが来ないということでも少し寂しい思いをしています。

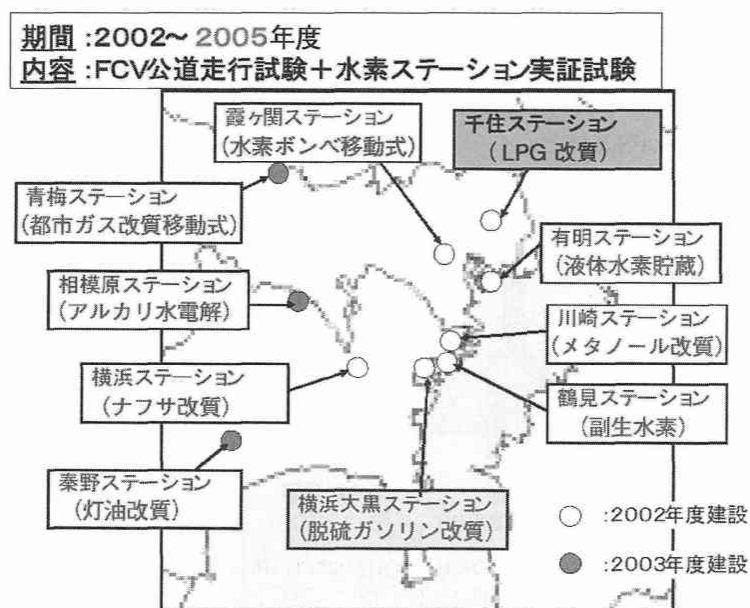


図11 JHFC水素・燃料電池実証プロジェクト



図12 千住水素ステーション

水素製造効率の向上に向けた技術開発

JHFCプロジェクトの公式データによると、水素製造効率は、PSA装置部分で67%，400気圧に圧縮するところで92%，ディスペンサーで車に供給するところで99.8%となっており、総合効率では約64%になってしまいます。燃料電池のメリットである環境性の良さで、ハイブリッド車を含む他のクリーンエネルギーカーに対して圧倒的な優位性を出すには、まだまだ効率を高めていかなければなりません。

PSA装置の効率を上げる方策の1つとして、PSA装置の小型化という技術開発があります。これは新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）から（株）日本ガス協会が受託し、その一員として大阪ガスが中心になって行っています。図13が水蒸気改質とPSAを組み合わせた30m³/時の水素製造装置です。かなりの小型化に成功して非常にコンパクトなパッケージにまとめ上がり、既に大阪ガスで2003年に商品化されています。このプロジェクトでは更なる小型化の技術開発を行っています。PSAに改質ガスを入れる前段にCOを除去する仕組みを入れ、PSAのCO処理に求められる負荷を減らすことでPSA部分を従来の3分の1に小型化するという技術です。間もなくこのプロジェクトが終了しますが、PSA部分は3分の1にコンパクト化できたという成果が得られています。

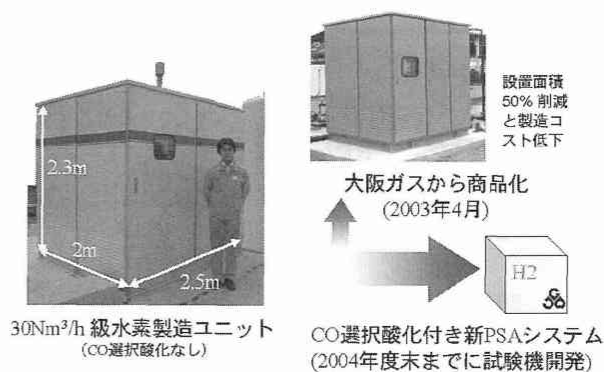


図13 新PSA方式による水素製造技術開発

もう1つ、効率を飛躍的に上げる手段として、新方式の水素製造技術の開発が行われています。「水素分離型改質器」あるいは「水素分離型リフォーマー」です。これについては次項で詳しくご紹介いたします。

水素分離型リフォーマーによる水素製造

原理と開発スケジュール

原理を図14に示しています。水素分離管は、水素だけが通過できる性質を持った材料で作ります。これを触媒槽の中に入れておくと、改質反応、シフト反応でできた水素が反応の都度、このパイプの中に入り込んでいきます。

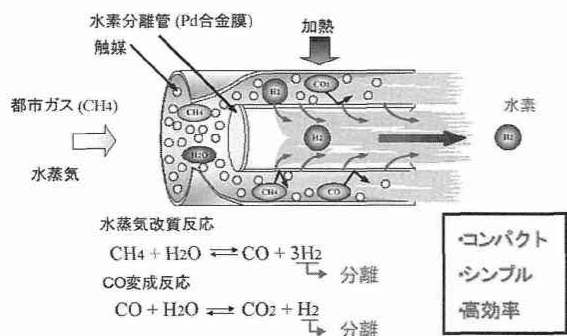


図14 水素分離型改質器の原理

1999	2000	2001	2002	2003	2004
機能実証					
4Nm ³ /h機にて原理実証('92-'96)					
15Nm ³ /h機にて機能実証('97-'99)		国 六 〇			
					
		高効率化技術開発			
		20Nm ³ /h試作機設計・製作・試験 水素吸引ユニット要素試験 懐モジュール製造技術開発			
		40Nm ³ /h級機の開発 設計・製作・試験			

図15 開発経過と国家プロジェクトスケジュール

要するに、反応と分離精製とを同じ場所で一度にやってしまうというコンセプトです。PSA方式では、改質器、シフト反応器、PSA装置という3段階が必要だったわけですが、新方式だと、1段の反応で天然ガスから水素が取り出せるので、装置もコンパクトになり、効率も格段に向上すると期待されます。

この技術開発は現在、NEDOの5年間(2000年~2004年)のプログラムで、(社)日本ガス協会が受託して開発に取り組んできましたが、この技術自体は1992年頃から東京ガスと三菱重工とが共同開発をし、かなりいい成果が出てきたので、技術を高度化すべく国のプロジェクトとして採択されたものです。図15に開発スケジュールを示しますが、前半の3年間のフェーズで効率を高める技術開発を行い、後半の3年間で、40Nm³機の開発を行ってきたものです。

水素分離型リフォーマーの構造

図16にあるように、水素だけを通過できるパラジウム合金の薄い膜（厚さ約20ミクロン）を貼り付けた短冊状のモジュール（幅40mm、長さ460mm、厚さ10mm）を利用しています。前半のフェーズでは、図17に示すように、モジュールを立てて円周上に配置して円筒型の反応器を構成して、 $20\text{m}^3/\text{h}$ の水素を発生させる試験を行いました。図18が実際の反応器の写真です。右端の白い断熱材で巻いてある反応器1段で高純度水素が出てきます。大きさは、断熱材を巻いた状態で直径が約700mm、高さが約1mという非常に小さい反応器です。

運転結果のデータの一例を表3に示します。水素製造量は $20\text{Nm}^3/\text{h}$ で設計したところ、それを上回る $21.5\text{Nm}^3/\text{h}$ となりました。純度は99.999%ということで十分高いです。肝心の効率は70.3%。PSA装置だと60~65%ぐらいでしたから、それよりも5ポイント以上高い数字が出ています。

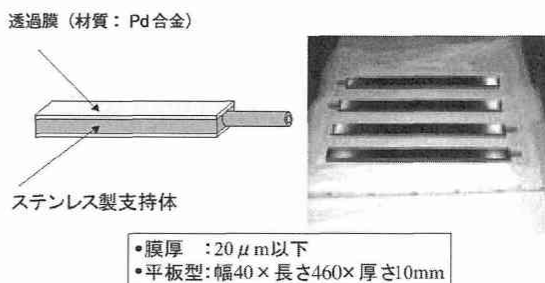


図16 水素分離膜モジュールの形状

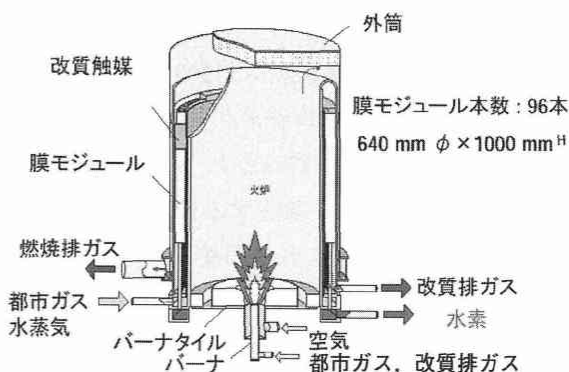


図17 20Nm³/h級改質器の構造

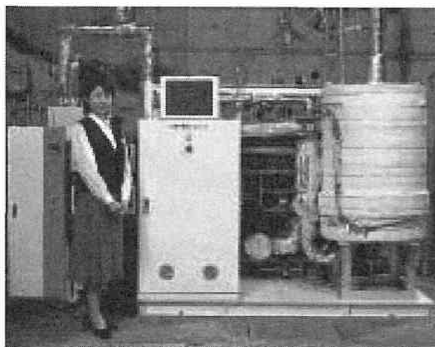


図18 20Nm³/h級改質器の構造

表3 20Nm³/h級改質器の運転試験結果

原料13A流量	6.68 Nm³/h	水素中不純物濃度	
メタン燃料 (3A)	1.52 Nm³/h	CO	ND ^{※1}
メタン燃料 (メタン)	9.2 Nm³/h	CO₂	0.6ppm
空気比	1.3	CH₄	0.48ppm
S/C	3.0	オフガス流量	9.6Nm³/h
改質器温度	550℃	オフガス組成	
反応側圧力	0.83 MPaG	H₂	18.8%
透過側圧力	-0.06MPaG	CO	2.3%
補機動力 ^{※1}	3.81kW	CO₂	59.5%
転化率	76.2%	CH₄	19.3%
水素製造量	21.5 Nm³/h	水素製造効率	70.3%
水素回収率	92.1%	原単位(水素1Nm³あたり)	
水素純度	99.999%	13A	0.381 Nm³/Nm³-H₂
		電力	0.177 kWh/Nm³-H₂

※1 合金動力含まず

※2 検出下限 :CO ; 0.5ppm、CO₂ ; 0.5ppm、CH₄ ; 0.1ppm (FID^{※1}スリム)

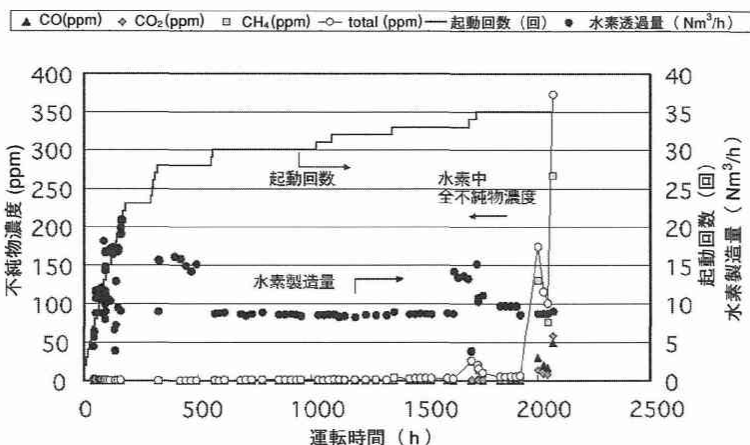
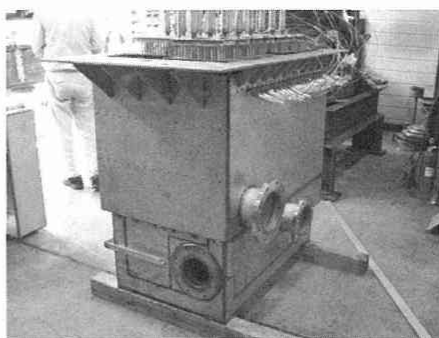
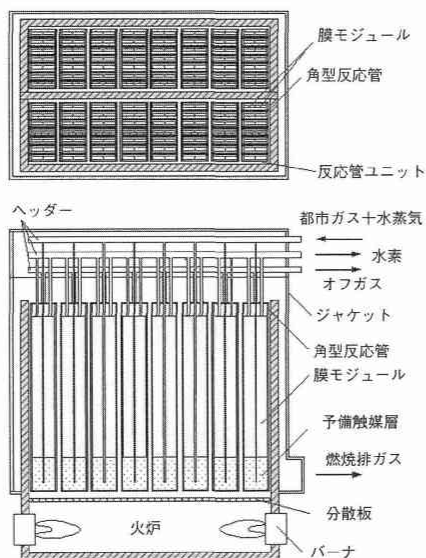


図19 20Nm³/h級改質器運転における不純物推移



幅1.2m×奥行き0.75m×高さ1.35m
(断熱材も含む)

図20 40Nm³/h機の構造と外観

この装置を長い時間動かそうとしたのですが、図19にあるように、2000時間ぐらいから不純物が多く出てくるようになり、心臓部の膜の耐久性に課題があることが分かりました。

40Nm³/h機へのスケールアップ

後半（2002～2004年）の40Nm³/h機へのスケールアップに当たっては、まずモジュールの

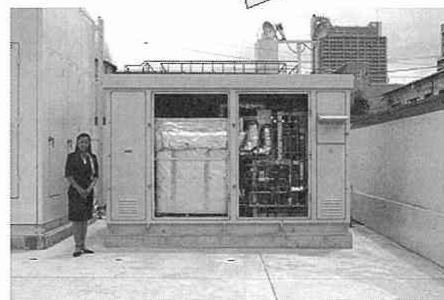
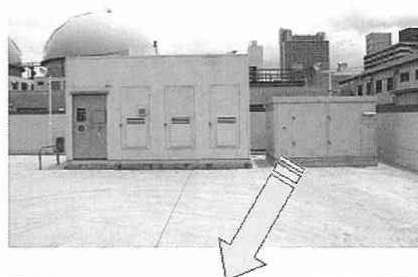
耐久性を高める作業をしました。それから、今後、100～500Nm³/h機へのスケールアップがしやすい構造とすること、さらに、膜モジュールに不具合が生じた場合には交換できるような構造を目指しました。水素製造エネルギー効率については、前半フェーズで既に事業全体が目指した70%という数値が達成されましたので、後半フェーズでは80%ぐらいまで上げることが目標に入れました。

40Nm³/h機では、2つのモジュールを並べて長方形の箱に入れた反応管を縦横に規則正しく並べて反応器を作っています。反応管1本で出てくる水素量が約0.4Nm³/hでしたので、100本程度入れればよいということが分かりました。実際には112本の反応管を縦横に配列させて反応器を作りました。図20の反応器の上部がモジュールが並ぶ反応室で、その下に炉があります。ここで燃料を焚いて水蒸気改質反応に必要な熱を供給します。反応室の上には、それぞれの反応管に原料ガスを分配したり、出てくる水素を捕集したりするためのマニホールドセクションがあるという感じです。

運転試験の結果

図21は先ほどの千住ステーションの写真です。左がPSA装置、右が今の水素分離型改質器です。コンパクトであることがお分かり頂けると思います。運転結果をグラフで示していますが、都市ガスの投入量が11.5Nm³/hの条件で水素が40Nm³/h出ています。この時の水素製造のエネルギー効率は約76%で非常に高いです。もう1つの特徴は、負荷を絞っていても効率がほとんど落ちないことです。負荷率50%でもエネルギー効率は約73%を維持しています。

図22は、いくつかの種類の自動車の燃料効率、車両効率、総合効率を比較したものです。ガソリンハイブリッド車は総合効率でガソリン車の倍以上の32%になります。燃料電池車だと29%です。ガソリンハイブリッド車よりも格段の優位性を出すために、トヨタは3倍ぐらいの総合



幅3.56m×奥行き2.56 m×高さ2.30m
→PSA装置の約1/3の大きさ

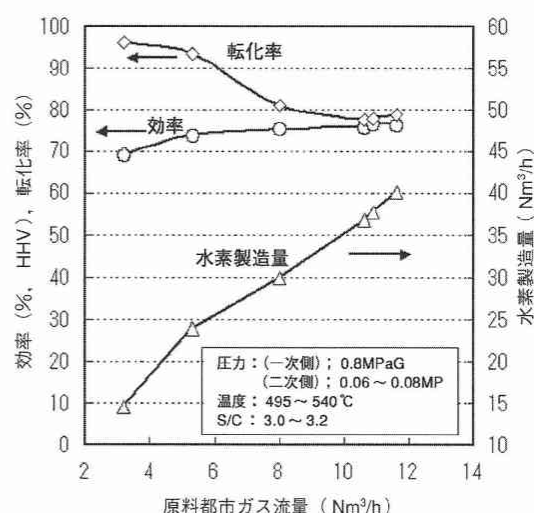
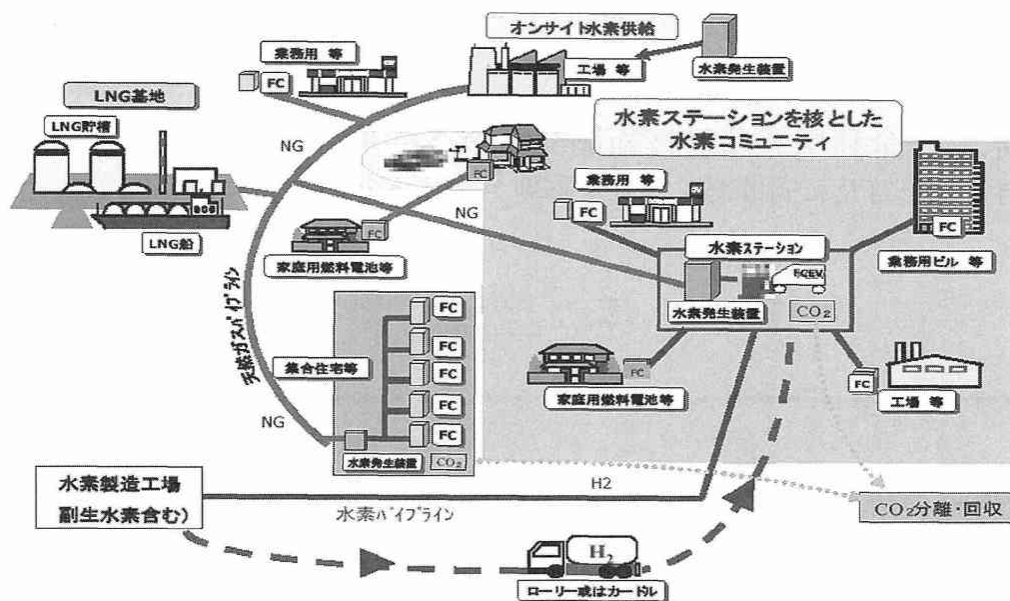


図21 千住ステーションにある水素分離型改質器 (40Nm³/h) の外観と運転実績

	燃料効率 Well to Tank (%)	車両効率 Tank to Wheel (%)	総合効率 Well to Wheel (%)	
ガソリン車	88	16	14%	28%
ハイブリッド車	88	37		32%
現在の燃料電池車	58	50		29%
将来の燃料電池車	70	60		42%

(出所：トヨタ自動車資料)

図22 自動車のエネルギー効率比較



（出所：（社）日本ガス協会）

図23 水素エネルギー社会のイメージ

効率を目標にするとのことです。そのために車は50%～60%まで効率を上げるようですが、一方で燃料効率を上げないといけないので、東京ガスは70%という数字を目標にしており、そのためには水素製造装置の製造効率を80%ぐらいにしないといけません。これはPSA方式の改良だけでは難しそうなのですが、水素分離型リフォーマーですと80%を超えられそうです。

その後、この改質器の連続運転試験を継続し、プロジェクト終了の2005年3月末までに約3300時間の運転実績を挙げることができました。

この改質器は、効率が良くてコンパクトでシンプルなのですが、実用化に向けた課題を少しまとめました。コストを下げるとか、耐久性をさらに向上していくといったことが実質的な課題になっています。

さいごに

最後に今後の展望です。ステーションをコアにして、水素を近隣の建物等々に配給するといった「水素コミュニティ」みたいな利用法があり得ます。図23のように、こういった



図24 純水素駆動 家庭用PEFCシステム

コミュニティとコミュニティがつながる形で水素インフラの規模が少しずつ大きくなっていくのが水素エネルギー社会に向かう1つの姿だろうと考えています。化石燃料を使う場合には、非常に高い効率で、かつ経済性よく水素を作ることが大事になってくるわけです。

図24は純水素で動く定置用燃料電池の実証事業です。財新エネルギー財団（NEF）から東京ガスが受託して今運転しているところです。実はこれは千住ステーションと同じ敷地内にあります。水素ステーション近隣の純水素駆動型家庭用燃料電池という設定にもう既になっているということでもあります。こんなことも先取りして運転試験にも積極的に取り組んでいるところです。ご静聴ありがとうございました。（拍手）

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」

乾 昌 弘

(財)エネルギー総合工学研究所
主管研究員



1. はじめに

最近の原油価格の高騰や地球温暖化への世間の関心が一層強くなっている。こうした中、クリーンエネルギーである水素に対して、エネルギーセキュリティの向上、大気汚染や地球温暖化抑止への寄与、産業活性化等の面から注目が集まっている。

一方、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）ではWE-NETプロジェクトを引き継ぐ形で、水素安全利用等基盤技術開発事業を行っており、技術開発及び法整備を図ってきた。

本稿では、上記NEDO事業の一環として水素エネルギー導入・普及の促進に資するために取り組んできた燃料電池車普及に向けたインフラ整備シナリオの検討状況について報告する。

2. シナリオ研究の目的

本研究の目的は、近い将来、訪れるであろう化石燃料との共存時代に水素エネルギーシステムを実現させる方向性・道筋を明らかにし、ステイクホルダー及び国に積極的な関与を促す情報を提供することである。この方法としては、表1の3項目がある。

特に（1）に重点を置き、研究を進めている。具体的には既存エネルギーとの競合条件を現在価値割引法（NPV法）を用いて評価した。本プロジェクトにおける経済性評価法の基本概念を図1に示す。

表1 研究目的を達成する方法

- （1）水素エネルギーの経済的可能性を示す。
- （2）水素の環境優位性を示す。
- （3）エネルギー安定供給への寄与の可能性を示す。

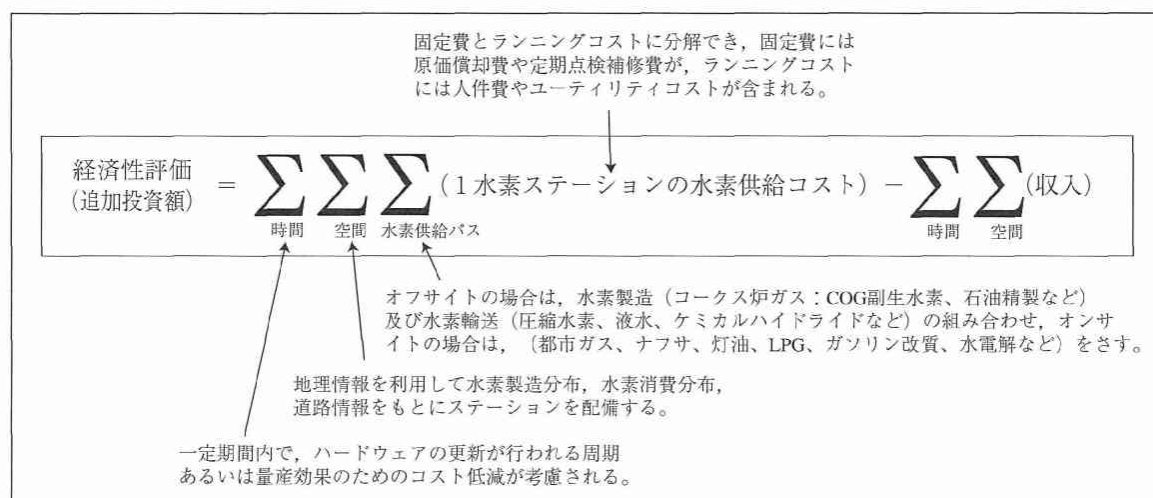


図1 経済性評価法

表2 経済評価で期待できる効果

- (1) ステイクホルダー（利害関係者、特に民間企業）が投資すべきかあるいはビジネスに参入すべきかを判断する。
- (2) 政策的に水素エネルギー導入・普及の促進のために推進すべき項目、内容がわかる。
- (3) 経済性の面から優先すべき技術開発項目が明らかにする。

まず、1ステーションの水素供給コストを水素供給パス（製造からステーションに至るパス）で合計して算出する。それを空間（日本全国に配置されるであろうステーション）で合計して、さらに一定時間（例：2005年～2020年）で積算して支出合計額とする。収入を、ガソリン等価価格とすると、式は水素社会になったときにインフラ側で余計に必要な額（追加投資額）となる。

シナリオ策定の面からいうと、水素導入量（政府ベースなど）に対して追加投資額が最小となる条件を見出し、そこに至る道筋を明らかにすることである。

将来に向けての経済性評価には、仮定した条件及び内容が含まれる。従って、それを明示することによって表2の効果が期待できる。

以下の章では、評価の内容について具体的に述べる。

3. 基本シナリオの策定

図2の流れに沿って策定したシナリオを記述する。ただし、本章では、コストに地域格差はなく、オフサイトの場合は、輸送距離を50kmと仮定している（「基本シナリオ」）。

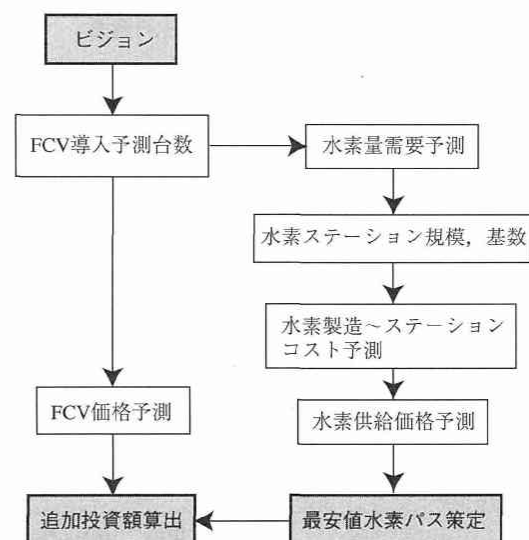


図2 FCV向け水素インフラの経済評価の流れ

(1) ビジョン

ビジョンは、節目ごとの目標あるいは予測をさし、シナリオ策定の重要な出発点となるものである。ここでは、『2030年のエネルギー需給展望』（経済産業省総合資源エネルギー調査会需給部会、平成17年3月）による燃料電池車（FCV）の導入目標（2010年：5万台、2020年：500万台、2030年：1,500万台）及び想定される水素需要量（2010年：約4万t、2020年：約58万t、2030年：約151万t）を用いている。

(2) FCV導入予測台数

ビジョンをもとにしたシナリオの基本的な考え方を表3に示す。2005年～2030年を3つの期間に分け、普及の中心車種を選択しそれぞれの普及方法を設定した。これをもとに各年の車種別の普及台数を算出した。

表3 シナリオ策定の基本的な考え方

期間	黎明期 (2005年～2010年)	導入期 (2011年～2020年)	普及期 (2021年～2030年)
普及の中心	路線バス 公用車 (ステイクホルダー所有の車)	業務用自動車など (含：バン、トラック)	自家用乗用車 軽自動車 タクシー トラック(4t～10t)
対象車種 合計	20万台	1,250万台	5,660万台
普及方法	計画導入	施策実行 (1) 2011年～2015年 3大都市圏の買替の50% (2) 2016年～2019年 全国の買替の50% (3) 2020年～ 買い替えすべてが対象	自然普及

表4 1台当り年間水素消費量

車種	自営別	旧燃料	2005年～ 2012年	2013年～ 2020年
小型貨物車	営業用	ガソリン	2.53	2.11
		軽油	4.75	3.96
	自家用	ガソリン	1.37	1.14
		軽油	2.23	1.86
普通貨物車	営業用	ガソリン	4.00	3.33
		軽油	19.80	16.50
	自家用	ガソリン	1.18	0.98
		軽油	4.27	3.56
バス	営業用	軽油	17.81	14.84
		ガソリン	1.65	1.38
	自家用	軽油	3.36	2.80
乗用車 (純水素車)	自家用	ガソリン	1.12	0.93
		軽油	1.61	1.34

(単位: $10^3\text{Nm}^3/\text{台年}$)

(3) 水素需要量予測

車種別の普及台数から水素需要量を予測した。表4は、1台あたりの年間水素消費量を表している。ガソリン車及びディーゼル車の実績から、2005年と2020年の間でFCVの燃費が50%から60%に改善すると仮定して計算している。

(4) 水素ステーションの規模

ガソリンスタンドの平均販売量は、エネルギー効率も考慮して水素に換算すると1スタンド当たり約 $300\text{Nm}^3/\text{h}$ となる。これに基づいて、水素ステーションの諸元として、表5のように3

表5 水素ステーションの諸元

考慮すべき項目	単位	タイプ1	タイプ2	タイプ3
水素供給能力	Nm^3/h	100	300	500
営業時間*	時間/日	13	13	13
営業日数	日/年	365	365	365
年間総供給可能量	$\text{Nm}^3/\text{年}$	474,500	1,423,500	2,372,500
稼働率	%	85	85	85
年間総供給量	$\text{Nm}^3/\text{年}$	403,325	1,209,975	2,016,625
供給量	$\text{Nm}^3/\text{日}$	1,105	3,315	5,525

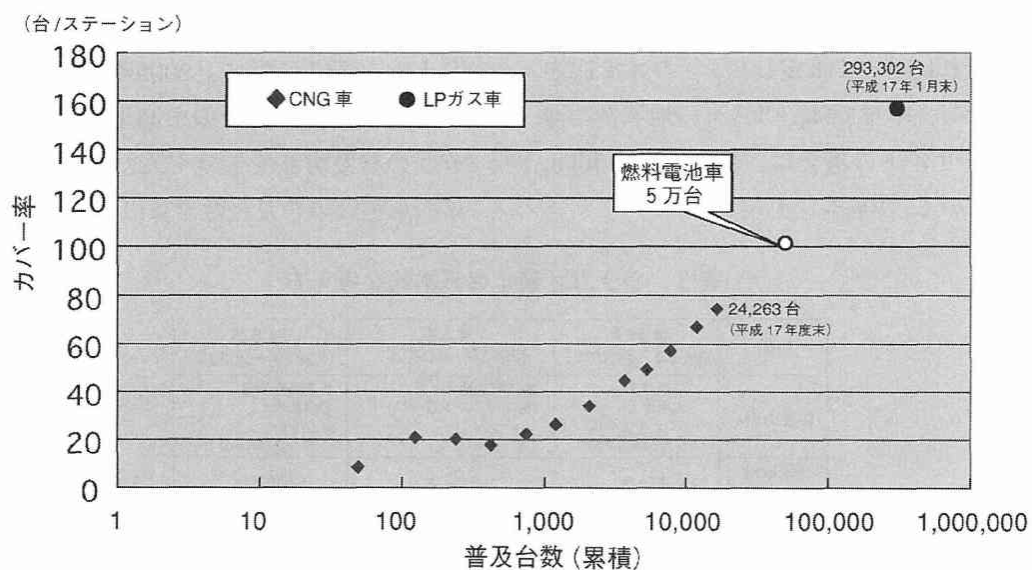
(出所:『給油所経営・構造改善等実態調査』(財)日本エネルギー経済研究所)

タイプを設定した。黎明期は、タイプ1、タイプ2が主流となり、普及期はタイプ3が主流となると仮定している。

(5) 水素ステーション数

黎明期のようにFCVが普及していない段階では、1ステーションでカバーするFCV台数(カバー率)は少ないと考えられる。一定量のステーションの設置は、FCVの普及に先行して行う必要があるからである。FCVの台数が増えるにしたがって、カバー率は徐々に増加していくことになる。

図3に天然ガス車(CNG車)とLPガス車の普及実績とステーションのカバー率の関係を示す。例えば、2010年の導入目標である5万台に対応するカバー率を同実績から推計すると約



(出所:日ガス協会及び日本LPガス協会ホームページのデータを基に作成)

図3 普及台数とカバー率の関係

100となり、500カ所の水素ステーションが必要となる。経済性評価においては、図3を参考に、黎明期のカバー率を設定した。2020年には水素の需給がバランスする（この時のステーション数は3500カ所）と仮定し、2011年～2019年は、カバー率が線形に増加するとして水素ステーション数を設定している。

（6）水素供給価格予測

水素供給パスとして、別の場所で製造した水素を供給するオフサイトステーションではCOG（コークス炉ガス）副生水素を、ステーション内で水素製造をするオンサイトステーションでは都市ガス改質を取り上げる。COG副生水素を精製して水素ステーションに運ぶには、主として圧縮輸送、液水輸送があるが、圧縮輸送の場合を示す。

水素供給価格に影響を及ぼすのは、主に建

表6 稼働率を考慮した水素供給価格予測

ステーション タイプ	規模 (Nm ³ /h)	水素供給価格 (円/Nm ³)			
		2006年	2010年	2015年	2020年
オフサイト (COG)	100	169.3	123.7	117.1	112.2
	300	108.5	84.5	80.8	78.1
	500	—	—	73.5	71.2
オンサイト (都市ガス)	100	181.4	122.0	112.6	106.0
	300	108.9	75.1	69.4	65.4
	500	—	—	59.9	56.6

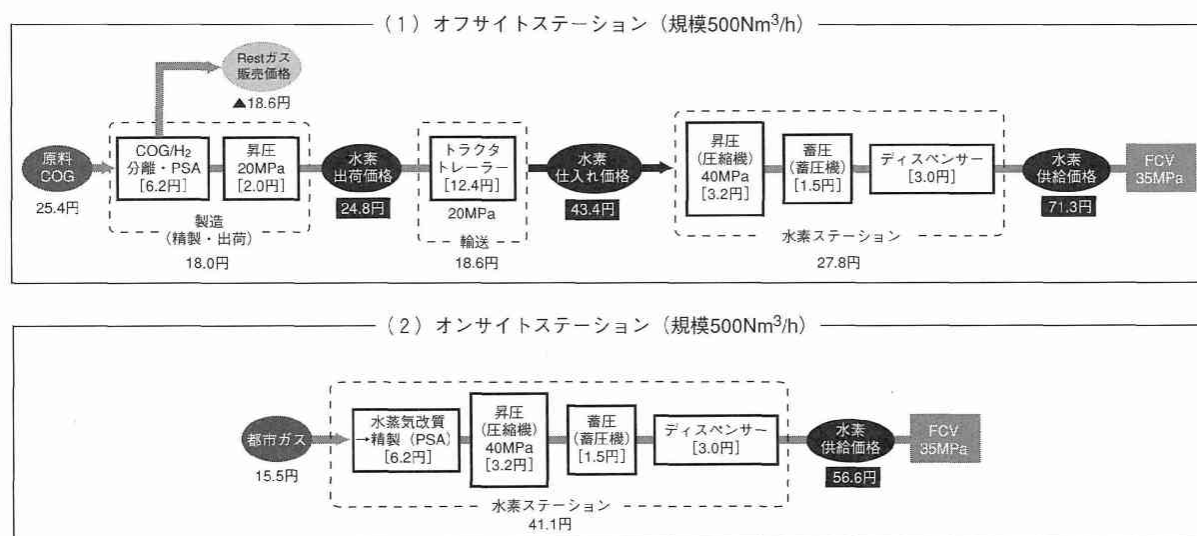
設費、変動費（ユーティリティコスト等）、人件費である。特にステーション建設費には、土木工事だけでなく機器コストも含まれるが、将来予測では、改質器、圧縮機、蓄圧器、ディスプレイについて量産効果によるコスト低減を見込んでいる。

表6に水素供給価格予測結果を示す。図4に2020年時点での予測の内訳を示す。

（7）追加投資額

水素価格をエネルギー効率も考慮に入れてガソリン（102.2円/ℓ）と等価価格（111.3円/Nm³）で販売すると仮定して、追加投資額を計算している（表7参照）。「車両価格差」と「バス償却分」は、インフラ側だけを検討するのであれば除外しても構わない。「外部コスト」について、本対象の場合、水素エネルギーシステムの導入による局所的大気汚染の改善による健康被害の減少やCO₂排出量の削減が「便益」として考えられ、また適切な安全策が採られない場合の水素による事故のリスクなどが「コスト」となる（産業技術総合研究所の研究結果を反映させて算出）。

この結果によると、外部コストを考慮に入れても3兆円程度（オンサイト、オフサイトステーション同数で2030年までの合計）の追



※ [] 内は固定費。価格は水素1Nm³当りの価格で、固定費以外に変動費及び人件費を含む。

図4 2020年時点での水素供給価格の内訳

表7 累積追加投資額の合計

		追加投資額（10億円）								
		オフサイト100%			オンサイト100%			50%ずつ		
		～2010年	～2020年	～2030年	～2010年	～2020年	～2030年	～2010年	～2020年	～2030年
自動車分	車両価格差 ⁽¹⁾	172.8	2,343.1	4,133.2	172.8	2,343.1	4,133.2	172.8	2,343.1	4,133.2
	軽油価格差 ⁽²⁾	152.9	914.1	2,760.7	152.9	914.1	2,760.7	152.9	914.1	2,760.7
	バス償却分 ⁽³⁾	5.4	16.1	16.1	5.4	16.1	16.1	5.4	16.1	16.1
ステーション分 ⁽⁴⁾		-16.4	-1,229.7	-4,734.9	-12.5	-1,492.1	-5,837.0	-13.3*	-1,350.9	-5,256.3
税金減収分 ⁽⁵⁾		29.8	1,488.9	8,002.7	29.8	1,488.9	8,002.7	29.8	1,488.9	8,002.7
合計		344.5	3,532.5	10,177.8	348.4	3,270.1	9,075.8	347.6	3,411.3	9,656.4
外部コスト ⁽⁶⁾		-96.2	-1,658.3	-6,480.9	-96.2	-1,658.3	-6,480.9	-96.2	-1,658.3	-6,480.9
合計 (外部コスト込み)		248.3	1,874.2	3,696.9	252.2	1,611.8	2,594.9	251.4	1,753.0	3,175.5

*表10の基本シナリオの欄に使われている。マイナスは、ガソリン等価価格で水素を販売した時に、建設費、比例費などを考慮しても利益が出ていないことを示す。

- (1) 「車両価格差」 ……FCV価格の将来予測をして車種ごとに合計
(2) 「軽油価格差」 ……ディーゼル車からFCVに代わったユーザへの補填額
(3) 「バス償却分」 ……路線バスを優先的にFCVに代えるために算出
(4) 「ステーション分」 ……図1で示した内容
(5) 「税金減収分」 ……ガソリン税、軽油引取り税を徴収しないという前提での合計
(6) 「外部コスト」 ……ある活動によりもたらされるメリット（便益）あるいはデメリット（コスト）のうち、経済価値として現在の市場経済に反映されていないものを指す。

追加投資額が必要である。また、詳細は省くが『2030年のエネルギー需給展望』を参考に、原油価格が上昇する場合の外部コストを考慮すると、2030年では、追加投資額がすべて回収できる結果になっている。

4. 地理情報システム（GIS）を活用した追加投資額最小のシナリオ策定

前章では、追加投資額まで算出したが、この章で如何に追加投資額を最小とするかを説明する。具体的には、黎明期の基本シナリオについて地理情報システム（GIS）に展開した場合を説明する。2010年のFCVの期待される導入台数は、5万台でありその内訳例を表8に示す。インフラ建設には、コストと時間がかかるため、

地域が限られる。従って3大都市圏、瀬戸内工業地域及び政令都市周辺を想定している。5万台から逆算すると路線バスなどは非常に高い代替率になる。

図5は、首都圏でステーション稼働率が85%、各バスステーションの燃料電池車代替率が50%と仮定した場合の最安価水素供給地を表している。COG副生水素が都市ガス改質水素を圧倒していることがわかる。図6は、ステーション稼働率が100%（計画的に水素を充填すれば可能である）、水素供給価格の低いバスステーションの燃料電池車代替率を100%として全体として50%の代替率にした場合の最安価水素供給地を表している。この場合は状況が逆転していることがわかる。このように条件を変えることによって追加投資額最小

表8 燃料電池車5万台の内訳例

項 目	保有台数	代替率	燃料電池車
3大都市圏の路線バス	30,000台	50%	15,000台
瀬戸内の路線バス	6,000台	50%	3,000台
京都府、福岡県の路線バス	5,200台	約50%	2,500台
その他地域の路線バス	38,000台	4%	1,500台
3大都市圏の公用車	42,000台	約25%	10,000台
3大都市圏のステイクホルダー	(187,000台)	(6%)	12,000台
3大都市圏以外のステイクホルダー			6,000台
合 計			50,000台

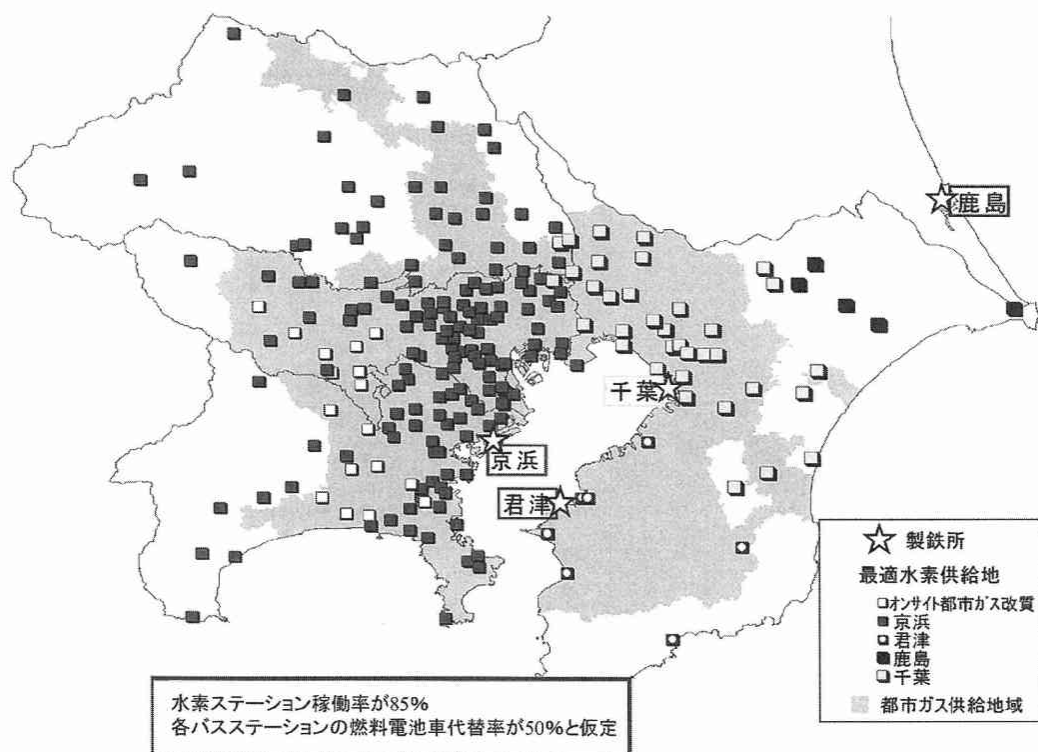


図5 首都圏のケーススタディ1（黎明期）

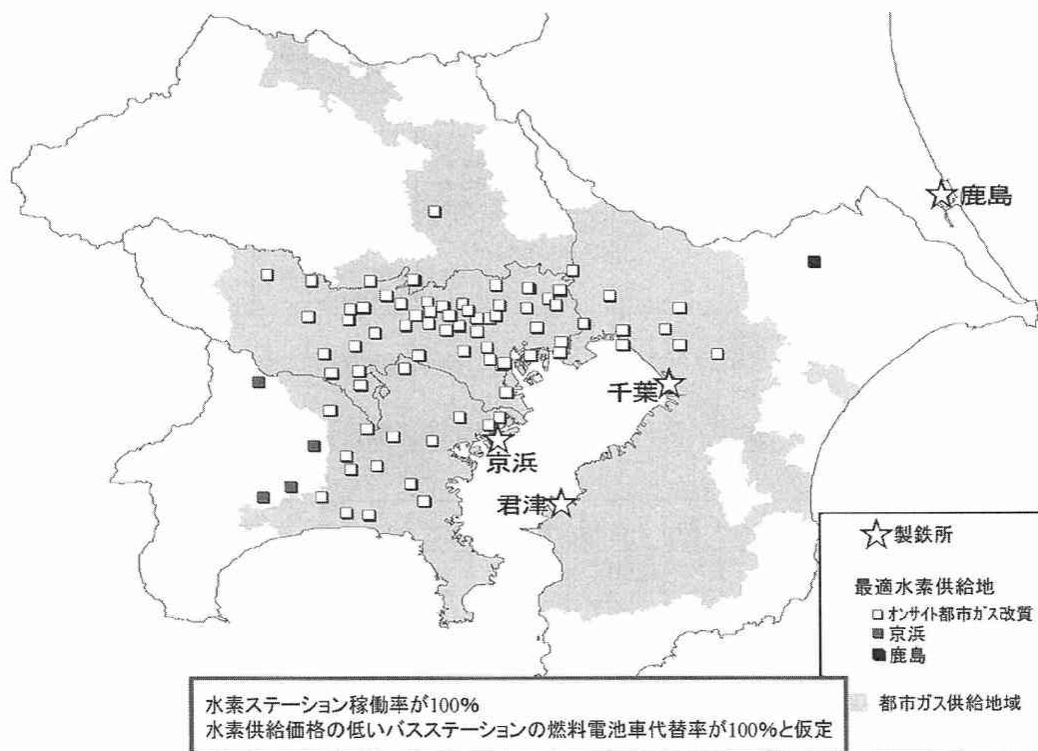


図6 首都圏のケーススタディ2（黎明期）

のシナリオを検討することができる。

次に表9に示すような内容で、追加投資額
最小のシナリオを検討してみた。

表7の「ステーション分」の項目に関して
試算した結果を表10に示す。

表9 算定ケース（3大都市圏）

ケース	ステーション数 ()内は最大稼働率	バスステーション シナリオ	自治体 シナリオ	ステークホルダー シナリオ
1：利便性追求型 (2010年で対象地域の自治体に最低1カ所に導入される)	498 (85%)	全給油所のバスを50%代替 (388カ所)	対象地域内の全自治体にFCVを導入する。 FCVの配分は自治体歳入総額比で行う。 バス用水素ステーションのない自治体には、独自にステーションを設置。	FCVの配分は企業の売り上げ比で行う。
2：シナリオ遵守型A (すべてのバス用給油所に水素ステーションを設置し、他のFCVはそこで給油)	388* (85%)	全給油所のバスを50%代替 (388カ所)	バス用水素ステーションのある自治体にFCVを導入。 FCVの配分は水素ステーションの存在する自治体について歳入総額比で行う。	水素ステーションのある自治体のステークホルダー事業所にのみ導入。 FCVの配分は企業の売り上げ比で行う。
3：シナリオ遵守型B (バス用給油所を選択し、不足分を自治体ステーションを追加)	388* (85%)	給油所のバスを75%代替 (約180カ所) (水素供給価格の低いステーションから順次選択。全体としては、バスを50%代替)	バス用水素ステーションのある自治体にFCVを導入。 さらにバス用水素ステーションのない自治体にも (388に達するまで) 歳入比例で設置。 FCVの配分も水素ステーションのある自治体について歳入総額比で行う。	水素ステーションのある自治体のステークホルダー事業所にのみ導入。 FCVの配分は企業の売り上げ比で行う。
4：供給コスト最小化	139 (100%)	給油所のバスを100%代替 (139カ所) (水素供給価格の低いステーションから順次選択。全体としては、バスを50%代替)	バス用水素ステーションのある自治体にFCVを導入。 FCVの配分は水素ステーションの存在する自治体について歳入総額比で行う。	水素ステーションのある自治体のステークホルダー事業所にのみ導入。 FCVの配分は企業の売り上げ比で行う。

*2010年の基本シナリオを満たすステーション数。

ステークホルダーに関しては、ガス会社、鉄鋼業、石油業、自動車、機械工業など、計141社に導入を想定。

表10 ステーションに対する追加投資額

(単位：10億円)

年	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4	基本シナリオ
2005	1.7	1.0	0.8	-1.0	4.4
2006	4.4	1.6	1.4	-4.7	3.0
2007	6.3	1.9	1.2	-8.8	-0.1
2008	7.8	1.5	0.4	-12.9	-3.0
2009	9.0	1.3	-0.6	-17.8	-6.1
2010	9.6	0.3	-0.5	-19.6	-11.4
合計	38.8	7.5	2.7	-64.7	-13.3

*3大都市圏の導入方法で瀬戸内、福岡まで立地させ、ステーションが燃料税を支払わない場合の概算。

マイナスは、ガソリン等価格で水素を販売したときに建設費、比例費などを考慮しても利益が出ていることを示す。

また、分析結果から以下のことが分かった。

(1) 水素供給価格はステーションの稼働率に大きく左右される。

(2) 導入方針にもよるが需要はある程度偏在するため、同じステーションの数を導入する場合は、地理的要素を考慮すると水素供給価格は上昇する。

(3) オフサイトステーションはオンサイトステーションに比べて初期投資が少なく、需要に応じて水素を購入できるタイプのため、稼働率の変化による水素供給価格の変化が少ない。従って、稼働率が低くなればオンサイトステーションの水素供給価格は大幅に上昇するため、低稼働率ではオフサイトステーションの方が有利である。逆に高稼働率では、オンサイトステーション有利となる。ステーションによっては、最初はオフサイトステーションタイプとし、需要が高まってからオンサイトステーションに転換することも考えられる。

(4) ケース分析では、需要を集中させてステーションの数を少なくすることが、低水素供給価格をもたらすことが確認できた。しかし、最もステーションを少なくし需要を集中させた場合(ケース4)は将来の普及に向けた導入初期のステーションのインフラの基盤としては利便性の面で不足と考えられる。ほぼ同じステーション数のケース2とケース3を比較するとケース3の方が低水素供給価格である。このため、同じステーション数でもある程度需要を集中させた場合と、利便性確保のために分散させる場合との戦略を融合させて立地させる方法が有効であると考えられる。ケース1はステーション数が多いため、利便性は高まるがそれを補う追加投資額は増える。

5. 今後の予定

平成15年度～16年度の検討結果を基に、ステイクホルダーの事業の参考になるように、条件および分析データの透明性を高め、合理的なシナリオに仕上げていく予定である。

6. 謝辞

本検討は、NEDOから受託した「水素シナリオの研究」(平成15年度～平成16年度)の中でおこなわれた内容である。資源エネルギー庁及びNEDOをはじめ、プロジェクト内に設置された委員会およびワーキング委員の皆様感謝の意を表す。さらに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の赤井誠氏には、外部コスト研究結果をはじめ御協力いただいたことに感謝を申し上げます次第である。

参考文献

- (1) 平成15年度～平成16年度成果報告書「水素安全利用等基盤技術開発 水素に関する共通基盤技術開発 水素シナリオの研究」平成17年3月、NEDO
- (2) 平成14年度成果報告書「水素利用クリーンエネルギーシステム技術(WE-NET)第1期研究開発タスク1 システムに関する調査・研究」平成15年3月 NEDO-WE-NET
- (3) Stephen Lasher, and et.al "Fuel Choice for Fuel Cell Vehicles: Hydrogen Infrastructure Costs", FY2004 Progress Report.

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)

坂 田 興

(財)エネルギー総合工学研究所
副主席研究員(プロジェクトリーダー)



1. はじめに

水素エネルギーの社会への導入を図る上で、革新的技術による技術上のブレークスルーが重要であるとの認識が高まっている。将来的には有望と考えられるものの、技術的展開の可能性が不明確なシーズ段階にある革新的技術については、実用化へのプロセスの不確実性が高いため、当面の開発対象から外される傾向がある。しかしこのような革新的・先導的技術が成熟してくる可能性や技術改良等により有望となる在来技術の出現の可能性があるため、技術シーズの収集、検討ならびに評価を継続的に実施することには意義がある。

このような趣旨を踏まえて、我が国では水素エネルギー技術開発に関する国家プロジェクトにおいて「革新的技術の研究」が継続的に実施され、一定の成果をあげている。本稿では、「革新的技術の研究」プロジェクトの意義、枠組および特徴に関して述べ、さらに研究トピックスに関しても触れることにする。

2. 「革新的技術の研究」プロジェクトの意義、枠組、特徴および成果

水素エネルギーに関する最近の国家プロジェクトとして、1993年以降は独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の事業として、「水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術 第Ⅰ期、第Ⅱ期研究開発」

(1993年～2002年)および「水素安全利用等基盤技術開発」(2003年～2007年)が実施されている。なお、前記研究は「水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術」(WE-NET: World Energy Network)として知られている。

「革新的技術の研究」プロジェクトは、WE-NETを構成する9～12タスクのうち1つである「革新的・先導的研究」タスクとして実施された。WE-NETは2002年度で終了したが、2003年度から開始された「水素安全利用等基盤技術開発」においても「革新的技術の研究」プロジェクトは「水素に関する共通基盤技術」の一環として実施され今日に至っている。なお、水素に関する革新的技術の研究プロジェクトは、その時々の枠組によりプロジェクトの名称が変化しているが、本稿では便宜上、「革新的技術の研究」プロジェクトと統一して記載することにする。

「革新的技術の研究」プロジェクトが設置された目的は、革新的技術の収集、調査、研究ならびに評価を行うことにより、水素エネルギープロジェクトの方向付けに有益な示唆・提案を行うことにある。

はじめに「革新的技術の研究」プロジェクトの枠組を図1に示す。この枠組は、WE-NETおよび水素安全利用等基盤技術開発の二つのプロジェクトにおいて、基本的に変化していない。NEDOは、本プロジェクトをエネルギー総合工学研究所に委託し、それを受けてエネルギー総合工学研究所では、研究テ-

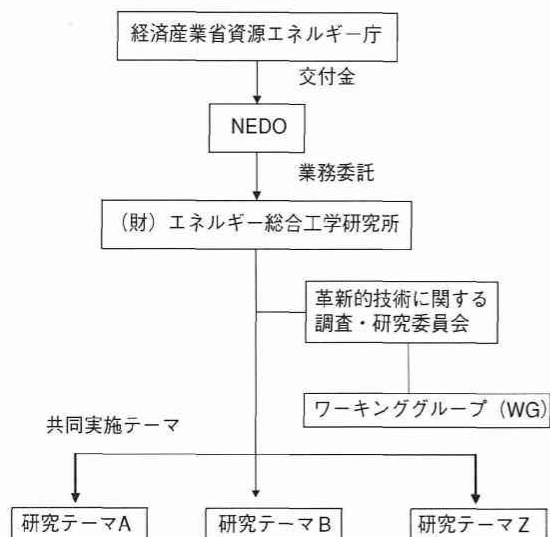


図1 プロジェクトの枠組

マの調査および公募の実施，採択研究テーマの決定，研究実施機関との共同研究を行い，年度末に研究成果の評価を行う。また，上記の業務を実施するために，エネルギー総合工学研究所に外部有識者からなる「革新的技術に関する調査・研究委員会」および「革新的技術に関するワーキンググループ」(WG)を設置している。

「革新的技術の研究」プロジェクトの典型的なスキームを図2に示した。以下にその概要の流れに沿って説明する。まず「革新的技術研究・調査のテーマ」の公募を行う。WE-NETにおけるプロジェクトの発足当初は，学会等の機会を捉えて本プロジェクトの広報を行うことから開始した。近年では，エネルギー総合工学研究所およびNEDOのホームページを利用して公募を行うことにより，広範囲に公募情報を伝達できるようになった。

公募する研究の対象は，実験を伴う研究に限定されず，システムの可能性の検討などの調査研究も含まれている。

応募テーマに対して，「革新的技術に関する調査・研究委員会」が審査を行い，採択テーマを選抜する。研究テーマの採択プロセスに関しては，後述する。採択された研究テーマの担当者は，「革新的技術に関する調査・研究委員会」から研究の方向付けに関する指導と助言を受けつつ，年度末まで研究を実施する。年度末には，WGおよび委員会が研究成果の評価を行う。水素安全利用等基盤技術開発の枠組みの下

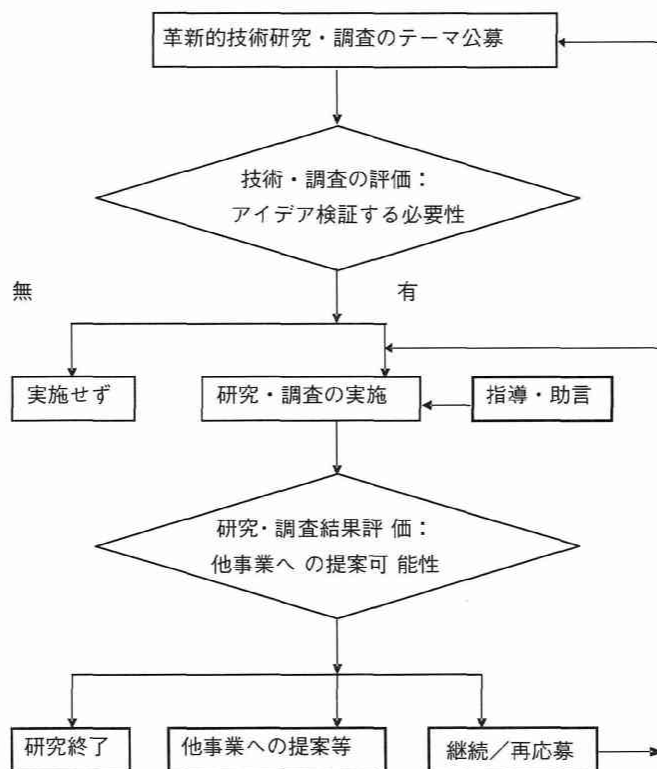


図2 プロジェクトのスキーム

では、研究成果をS (Especially excellent), A (Excellent), B (Good), C (Fair) の4段階で評価 (SABC評価) し、それを基に、① NEDOの大型プロジェクトへの応募の勧奨、② 継続または継続を前提とした「革新的技術の研究」プロジェクトへの再応募(委員会の指導に応じた提案であることが必要)、および③ 研究の終了、の3種類の選択肢を考慮している。平成16年度からは研究成果報告会を開催し、革新的技術の研究成果をさらに広く公開する方針を打ち出している。

次に、このスキームに即して、本プロジェクトの特徴をいくつか列挙する。

まず、「革新的技術の研究」の第1の特徴である研究テーマの採択プロセスに関して説明する。本プロジェクトでは、対象とする研究分野が広範囲にわたり、「水素製造、貯蔵、輸送、利用技術および安全技術」を研究対象としている。また提案されたテーマの社会に対するインパクトの大きさや実用化に至る研究・技術開発期間も、研究テーマにより大きく異なる。この多様性のゆえに、広い範囲の研究分野の研究者が、水素というキーワードを通じて本プロジェクトに関与することができる利点がある。このため、採択テーマの決定にあたっては、審査の公平性に加えて、方向性の異なる個々の研究テーマに対して、如

何に優先順位を付して行くかという点が問題となる。「革新的技術の研究」プロジェクトにおいては、1993年度の開始直後からこの点に関して検討した結果、「階層化意思決定法」⁽¹⁾を採用することによりこの問題を解決する方策を選択した。この点につき、図3を用いて具体的に説明する。

各応募テーマについて、WGの委員が9項目の評価項目に対して5段階の採点評価を行う。一方、研究テーマの持つ属性により、各評価項目に重み付けを行う。属性の具体例は、研究テーマの技術が社会に及ぼす影響の大きさおよび研究開発に要する期間の長短であり、これにより2×2のマトリックスを作成する。象限ごとに前述の9項目の評価項目に対する重みをあらかじめ決定しておく。当初は旧通商産業省工業技術院の企画担当官が重み付けを担当していたが、省庁再編の過程を経て、現在ではエネルギー総合工学研究所が担当している。このようにして、各応募テーマに対する総合得点を付し、これを基に応募テーマの順位付けを行う。WGはこの順位および各応募テーマに関するコメントを、委員会に答申する。委員会では、WGの結果に対して総合的な見地から検討を加え、最終的に採択テーマを決定する。以上の採択プロセスから明らかにように、テーマは本プロジェクトの目的に

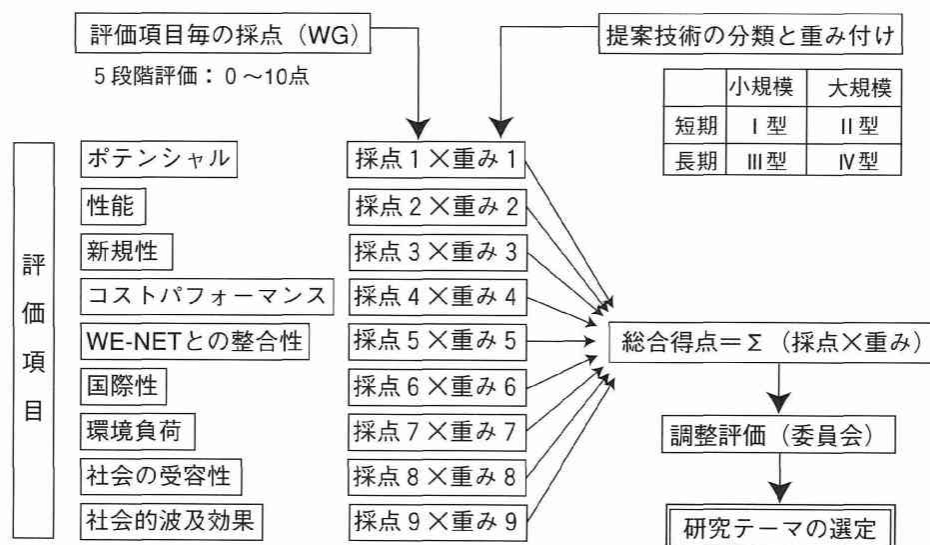


図3 採点評価（階層化意思決定法）と調整評価

表1 2004年度「革新的技術の研究プロジェクト」テーマ

No.	研究テーマ	研究先
1	燃料電池および水素製造用の白金族代替触媒の開発	千葉大学, 工学院大学, 京都大学, 横浜国立大学, 東京工業大学, 三菱重工業
2	ゼオライトの形状選択性を利用した水素製造技術の研究開発	岐阜大学
3	水素遮断性ダイヤモンドライクカーボン膜の研究	高知工科大学
4	水素用磁気冷凍装置の研究開発	金沢大学, 物質・材料研究機構
5	CO ₂ 回収型昇圧純水素製造システムの研究	京都大学, 電力中央研究所
6	発酵菌による水素製造の研究	横浜国立大学, バブコック日立
7	水素透過膜型非平衡反応を利用する低温作動型純水素製造プロセスの研究	九州大学, 石油資源開発
8	超低NO _x 水素エンジンの研究開発	マツダ
9	中温作動一体型マイクロ燃料電池の開発	東京工業大学
10	工業廃熱を利用する安価な大規模水素製造の成立性評価研究	北海道大学
11	磁気冷凍による水素液化のための高性能磁気冷凍用材料の開発	東北大学
12	超音波を利用した水素検出手法の研究	九州大学
13	水素予混合気組成制御による燃焼促進技術の基礎研究	九州大学
14	高効率水素液化技術と液体水素長期安定貯蔵技術に関する調査研究	千葉大学

表2 「革新的技術の研究プロジェクト」への応募提案数と採択テーマ数

年度	応募提案数	累積応募提案数	採択テーマ数	累積採択テーマ数	備考
1993-1998		34		12	
1999	8	42	3	15	
2000	5	47	5	20	
2001	3	50	8	28	
2002	26	76	11	39	
2003	11	87	11	50	H P.
2004	35	122	14	64	H P.

H P：公募にホームページを利用。1993-1998年度：WE-NET 第Ⅰ期, 1999-2002年度：WE-NET第Ⅱ期, 2003-2004年度：水素安全利用等基盤技術開発

合致するものを採択する観点で審査されており、必ずしも提案テーマの科学的、技術的な優劣を論じるものではない。なお、2004年度に採択された14件の研究テーマを表1にまとめた。

本プロジェクトの第2の特徴は、研究テーマの一部を毎年入れ替える仕組みを有することである。図2のスキームに記載したとおり、年度末に研究成果の評価を行い、研究テーマの一部がプロジェクトから抜ける一方、公募

により新規テーマを採用する。このような年度単位の評価システムは、新規に発生する技術を効果的に収集するためにデザインされている。

本プロジェクトの成果を下記の3点から考察することができる。

- (1) 応募テーマ数
- (2) 論文等の研究成果の公開数
- (3) NEDO等の大型プロジェクトへの転進

応募テーマ数は、本プロジェクトの成否を判断する上で、重要な因子である。年数の経過とともに増加しているが、とくにホームページを利用して研究テーマの公募を実施する方式を採用して以来、応募件数の増大が著しい(表2)。

本プロジェクトにおいて生み出された研究成果に関する論文数などを、表3にまとめた。2002年度から外部発表数が急増しているが、採択テーマ数の増大に対応するものと考えられる。「革新的技術の研究」プロジェクトからNEDOの他のプロジェクトおよび企業のプロジェクトへと展開できたテーマ数は、2001～2003年度において4件であり、2004年度にはさらに増加する見込みである。

今後は、応募テーマ数の増大、研究成果に由来する論文・発表数の増大、および水素エネルギーに向けた大型プロジェクトへ展開できるテーマ数の増大を目指して施策の検討を行う。

表3 プロジェクトから生まれた発表、論文および特許出願

年度	口頭発表	論文発表	特許出願
1999	0	0	0
2000	2	0	0
2001	6	4	0
2002	43	13	1
2003	33	14	7
2004	44	28	6
合計	128	59	14

1999-2002年度：WE-NET 第Ⅱ期

2003-2004年度：水素安全利用等基盤技術開発

3. 研究トピックス

「革新的技術の研究」プロジェクトの活動状況を例示するため、3件の研究テーマを取り上げて紹介する。なお、ここで引用するデータ等は、2004年9月以前に公表済みのものである。

- (1) 固体高分子形燃料電池の新規陽極素材としてのタンタルオキシナイトライド⁽²⁾
(横浜国立大学、東京工業大学)

固体高分子形燃料電池の理論効率は高いものの、カソードにおけるオーバーポテンシャルによるエネルギーおよびエクセルギー損失により、実効率は高くない。市販のカソード触媒は、現在のところ炭素粉末に白金または白金合金を高分散したものが一般的である。白金は多くの分野で広く触媒として利用されているが、酸素還元反応の触媒活性は、高いエクセルギー効率を得るには不十分である。そのうえ、白金の賦存量は、燃料電池システム、とりわけ燃料電池自動車を製造するには、極めて少量である。したがって、将来燃料電池システムが広く普及するためには、白金を代替する触媒の開発が不可避である。

固体高分子形燃料電池のカソード触媒として必要な条件は、①酸性・高電位で安定、②酸素還元能がある、③電気伝導性がある、の3点である。これらを満たす白金代替触媒の探索の一環として、可視光領域で光触媒としての機能を有することが知られているタンタルオキシナイトライド(TaO_xN_y)およびタンタルナイトラ

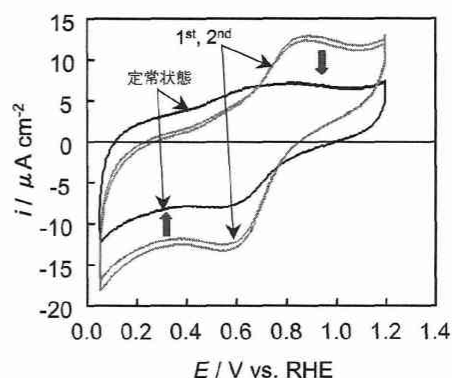


図4 $\text{TaO}_{0.96}\text{N}_{1.04}$ のサイクリックボルタモグラム

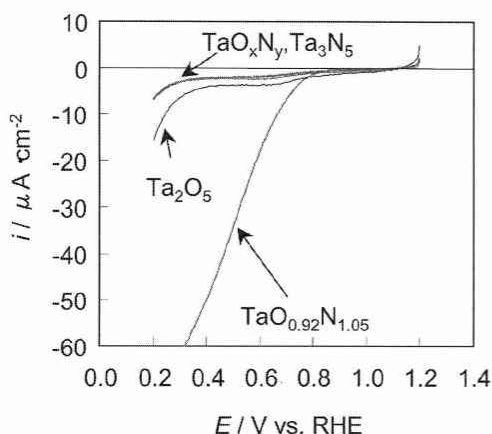


図5 酸素還元反応の電圧—電流曲線

イド (Ta_2N_5) に関して検討した。

図4にタンタルオキシナイトライドの窒素雰囲気、スキャン速度 50mVs^{-1} における典型的なサイクリックボルタモグラムの示した。最初の数回のサイクルにおいては、 0.9V のアノードピークおよび 0.6V のカソードピークが観察されたが、電圧を数回サイクルさせた後は、電圧電流曲線は変化しなくなり定常状態となった (図3)。このことからタンタルオキシナイトライドは酸性電解質中で腐食耐性が高いことが分かった。同様に、 Ta_2O_5 および Ta_3N_5 も酸性溶液中で高い腐食耐性を有することが分かった。

図5に酸素雰囲気下におけるスロースキャン (スキャン速度 5mVs^{-1}) のボルタモグラムの示した。 $\text{TaO}_{0.92}\text{N}_{1.05}$ (窒素含量 7 質量%) を除き、 Ta_2O_5 、 Ta_3N_5 および上記以外の TaO_xN_y は、酸素還元反応に対する触媒活性がほとんど検出されなかった。しかし、 $\text{TaO}_{0.92}\text{N}_{1.05}$ については、酸素還元反応の還元電流が、 0.8V vs. RHE 以下の範囲で観測された。窒素雰囲気下では、還元電流が観測されなかったことから、この還元電流は酸素還元反応に起因すると考えられる。

全試料中、 $\text{TaO}_{0.92}\text{N}_{1.05}$ のみが触媒活性を示したことから、触媒活性は、全組成および/または表面状態に敏感であることが示唆された。図6に、 $\text{TaO}_{0.92}\text{N}_{1.05}$ の酸素還元反応に対するTafelプロットを示す。このプロットにお

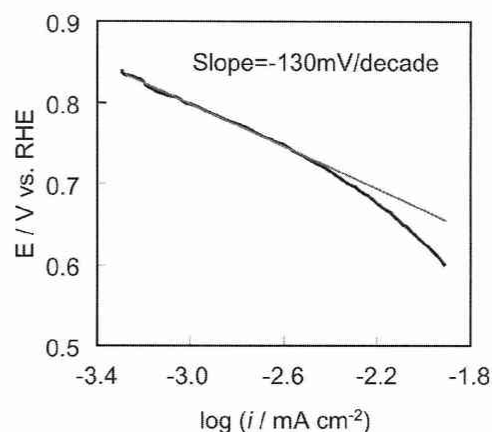


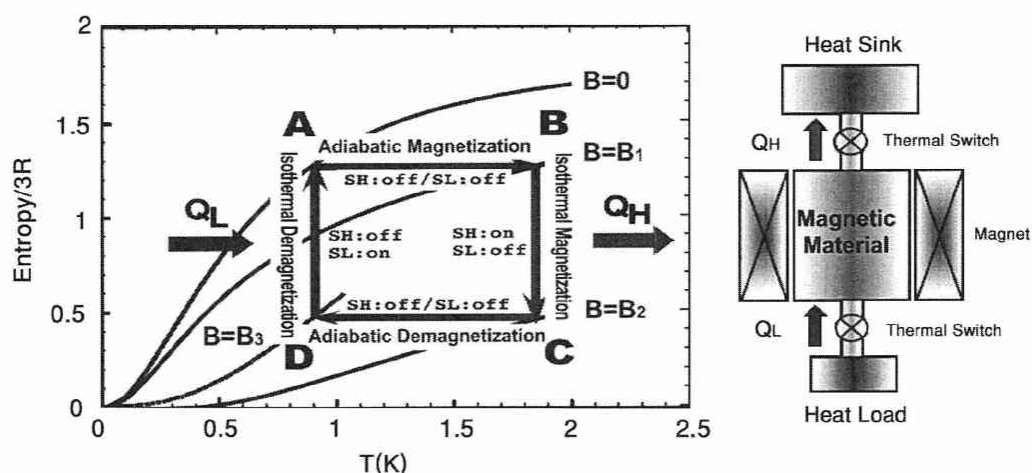
図6 酸素還元反応におけるTafelプロット

いては、電流値は、酸素雰囲気中での還元電流と窒素気流中のその差となる。Tafelスロープは約 -130mV/dec であったが、これは律速段階において移動する電子数が1であることを示している。X線光電子光分析の結果、触媒上の酸素種 (例えばヒドロオキシイドイオン) が、酸素還元反応に対する触媒活性に影響を与えていることが分かった。

非白金のタンタルオキシナイトライドが白金代替カソード触媒としての可能性を持つことを明らかにできた。今後は、性能の向上と機構の解析を進める予定である。

(2) 磁気冷凍による水素液化⁽³⁾⁽⁴⁾ (独立行政法人物質材料研究機構, 国立大学法人金沢大学)

液体水素は、重量密度および容積密度に優れるため、水素貯蔵・輸送の有力候補である。しかし、従来の水素ガスの液化システムでは、J-Tバルブあるいは 20.7K の液体水素温度における熱交換器を用いるが、効率が高くないという問題点がある。より高効率の液化を実現する技術として、磁気冷凍が可能性あると考えられる。その理由は、液体水素温度よりも低温の磁性体表面を用いることにより、水素を圧縮することなく気体水素を直接液化することができるからである。ヘリウム液化の研究から、水素の磁気冷凍の液化効率は 50% 以上になることが期待される。



カルノーサイクルの運転

1. 断熱磁化 (A→B) : 磁場B=0からB1に。
2. 等温磁化 (B→C) : 磁場B=B1からB2に。
3. 断熱消磁 (C→D) : 磁場B=B2からB3に。
4. 等温消磁 (D→A) : 磁場B=B3から0に。

図7 カルノーサイクル磁気冷凍

カルノー磁気冷凍法を用いる水素液化の原理を図7に示した。磁場中に磁性体を置き、磁場強度を変化させると、磁性体の磁気モーメントの配向が変化しエントロピーが変化する（磁気熱量効果）。これを利用して、図7の1～4のステップを行うことにより、磁性体の温度を低下させることが可能となる。磁気熱量効果による磁気冷凍法は、実験室レベルで1mKまで到達できるユニークな技術であるが、1K以上の温度への適用に関しては、検討課題がある。特に、20Kにおける水素液化のための磁気冷凍の磁性体材料の選定には課題多い。その理由は、従来磁性体として使用されてきた金属化合物は、水素雰囲気中で水素との反応性を持つことにある。

一方、水素との反応性の低い酸化物磁性体の中には、希土類ガーネットがある。これは一般的に水素中で安定であることから、実用性を考慮して、下記の点に留意して研究を進めた。

- ①大量生産の可能性を有する多結晶体の磁性物質を利用する。
- ②比較的安価な磁気システムで得られる6T（テスラ）の磁場強度で作動する磁性体 $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ （GGG）は、低温における磁気

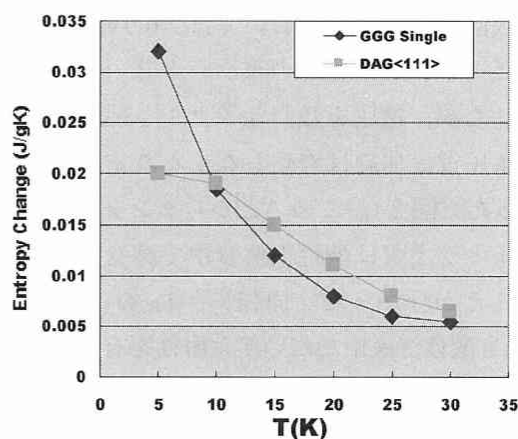


図8 単結晶（GGGとDAG）のエントロピー変化

冷凍の標準的物質であり、本研究ではGGGよりも大きな磁気熱量効果が期待できる物質の探索を行う。

GGGは水素液化温度（20K付近）における磁気熱量効果は大きくない。これに対して、磁気異方性を有する $\text{Dy}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ （DAG）は、図8に示すように、単結晶の軸方向に磁場をかけると大きな磁気熱量効果を与える。しかし、これらの多結晶体については、異方性が平均化するため、磁気熱量効果が減少する。そこで異方性成分を等方性成分に置換することにより磁気異方性が増大すると考え、材料探索を行った。

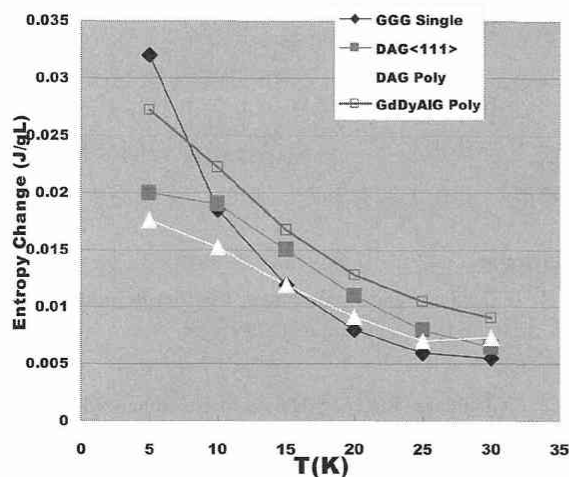


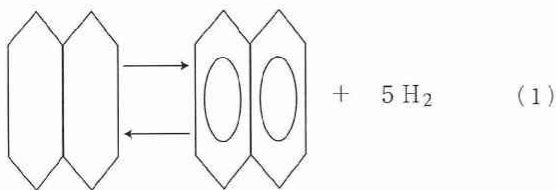
図9 多結晶 (DAGとGdDyAlG) のエントロピー変化

その結果、 $(\text{Gd}_x\text{Dy}_{1-x})\text{Al}_5\text{O}_{12}$ は異方性を弱めるだけでなく、磁気飽和エントロピーを増大させる点で有用である (図9)。 $x=0.2$ の試料は6 Tの磁場中で、20 Kにおいて約260 J/Kgの磁気熱量効果を示した。これはGGGに比較して80%の磁気熱量効果の増大であり、磁気冷凍による水素液化に実用可能な物質である可能性を示唆した。

今後は、材料開発を実施するとともに、システムの実証を行う予定である。

(3) 過熱液膜方式触媒反応による有機ハイドライドからの燃料電池用水素の水素の供給⁽⁵⁾ (東京理科大学, 新日石総研)

環境の観点から見ると、燃料電池用水素は有力な代替エネルギーと考えられるため、移動体における水素貯蔵技術のブレークスルーが求められている。本研究では効率的な水素貯蔵、供給方法としてデカリン脱水素反応/ナフタレン水素化反応 (式1) を提案している。



デカリンの重量当たりおよび容積当たりの貯蔵能力は、7.3 wt%, 64.8 kg- H_2/m^3 であり、米国エネルギー省の目標値6.5 wt%, 62.0 kg- H_2/m^3

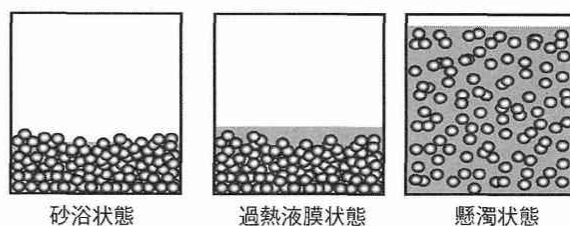


図10 還流条件における触媒反応の状態

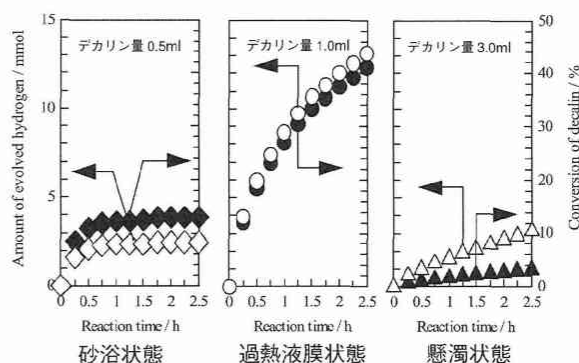


図11 回分式反応でのデカリンからの水素発生量

を超える性能を有している。デカリンの利用に関しては、水素の効率的な発生方法が課題となっている。

回分式反応においてデカリンの脱水素反応の検討を行った。炭素に白金を担持した触媒 (Pt/C, 0.30 g) 量を固定し、デカリンの量を変化させて還流条件 (210℃) で反応を行った。反応液の状態を図10に示した。デカリンが3.0 mlの場合には懸濁状態、1.0 mlの場合には過熱液膜状態、0.5 mlの場合には砂浴状態となった。懸濁状態では水素初期発生速度は低く、2.5時間後の転化率も低かった (図11)。過熱液膜状態では、触媒は懸濁せず、触媒表面が基質溶液で湿潤する状態となった。この場合に、最大の水素初期発生速度およびデカリン転化率を得ることができた。砂浴状態では、反応時間の経過とともに、触媒表面における基質の供給不足となった。還流条件では、過熱液膜状態での触媒表面温度は沸点よりも高くなる。一方、懸濁状態では、全体の沸騰温度と触媒温度は同等となる。以上から、液膜上の過熱状態の活性サイトは、液状のデカリン脱水素反応に関して、懸濁法よりも利点があることが判明した。

連続法において、デカリン供給速度を変化させて反応を行ったところ、定常的に高効率で水素発生させる反応器の設計が可能であることが判明した。

現在のところ、移動体用の水素貯蔵としてのデカリン／ナフタレンに関する進展を以下にまとめた。

① 炭素上に白金を担持した触媒系において、「過熱液膜触媒反応」による回分式実験において、210－280℃の温度範囲で、効率的な水素発生が見られた。

②連続式反応においても、同様の「過熱液膜条件」において、広い範囲のデカリン供給速度に関して、同様の結果が認められた。

③連続式の反応結果ではワンパス転化率は70%以上である。反応系の改善により、燃料電池自動車への利用も可能であると考ええる。

4. 謝辞

「革新的技術のプロジェクト」は独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構の委託により実施された。ここに謝意を表する。

引用文献

- (1) T. L. Saaty and J. Alexander: Conflict Resolution, the Analytic Hierarchy Approach, Praeger, New York, USA, 1989.
- (2) A.Ishihara, K.Lee, S.Doi, S.Mitsushima, N.Kamiya, M.Harac, Kazunari Domend, Kenzo Fukudae and Ken-ichiro Otab : Tantalum Oxynitrides for New Cathode of Polymer Electrolyte Fuel Cell, WHEC 15, 29K-09.
- (3) K. Matsumoto, S. Abe, K. Kamiya and T. Numazawa: Thermal and Mechanical Properties of Magnetic Materials for Regenerative Magnetic Refrigeration on Hydrogen Liquefaction, WHEC 15, P06-29.
- (4) T. Numazawa, K. Kamiya, S. Abe and K. Matsumoto: Thermal and Mechanical Properties of Magnetic Materials for Carnot Magnetic Refrigeration on Hydrogen Liquefaction, WHEC 15, P06-33.
- (5) Shinya HODOSHIMA, Shigeki TAKAIWA, Hiroaki NAGATA, Atsushi SHONO, Kazumi SATO and Yasukazu SAITO: Hydrogen Storage by Organic Hydrides and Hydrogen Supply to Fuel Cells with Superheated Liquid-film-type Catalysis, WHEC 15, 29B-04.

RPS法と風力発電系統連系対策について

中 島 恵 理

（経済産業省 資源エネルギー庁
省エネルギー・新エネルギー部
新エネルギー等電気利用推進室 室長補佐）



1. はじめに

電気の小売を行う電気事業者は毎年一定量以上の新エネルギー等による電気の供給を義務付ける「電気事業者による新エネルギー等の利用に関する特別措置法」（RPS法）が施行されてから2年が経過した。本稿では、RPS法の2年間の施行状況と義務量（表1）達成のために重要な風力発電系統連系対策について説明する。

2. RPS法の概要と施行状況

（1）RPS法の概要

RPS法は、新エネルギーの発電分野の市場を拡大することにより新エネルギーの導入を促進するため、平成15年4月より完全施行されている。RPS法においては経済産業大臣が、8年間の各年度毎の全国の新エネルギー等^{※1}電気の利用目標を定めた上で、電気事業者に対して、毎年度、その目標量を基礎として各社の販売電力量に応じて算定される一定割合以上の新エネルギー等電気（認定された新エネルギー等発電設備によって発電された電気）を利用することを義務づけている。電気事業者とは電気を小売する一般電気事業者、特定電気事業者、特定規

模電気事業者であり、平成17年3月現在31社となっている。電気事業者は、新エネルギー等を利用して得られた電気を組み合わせて義務履行を行うことが求められている。

電気事業者は、①自ら発電した新エネルギー等電気を利用する方法、②他の事業者から購入した新エネルギー等電気を利用する方法、または、③他の事業者から新エネルギー等電気相当量を購入する方法等により義務履行を行う。「新エネルギー等電気相当量」とは、RPS法の義務履行に使える価値に相当するもので、発電事業者が地域を越えて電気事業者との取引を行うことを可能にするものである。電気事業者は、経済性などの点を考え、もっとも優れた方法を選んで新エネルギー等電気の利用を行うことにより、結果として効率的に我が国全体の新エネルギー等電気の利用目標量を達成する。

（2）RPS法の施行状況

新エネルギー等による発電設備の認定に関しては、平成16年度においては57,819件の設備認定を行ない、平成17年3月31日現在における総認定設備は199,027件となった（表2）。すべての種類の発電設備がそれぞれ増大しており、継続的に新規の新エネルギー発電設備

表1 RPS法義務量

年度（平成）	15	16	17	18	19	20	21	22
義務量（億kWh）	32.8	36.0	38.3	41.5	44.4	64.2	88.9	122.0

* 下線部以外は推計値

※1 RPS法の対象となる新エネルギー等とは、太陽光、風力、バイオマス、水力、地熱である。このうち水力はダムを伴わない水路式の1,000kW以下の中小水力、地熱は熱水の噴出量が相当程度減衰されていないものが対象。

表2 設備認定状況（平成17年3月31日現在）

発 電 形 態	認 定 件 数			設 備 容 量 (kW)		
	平成16年度		総 数	平成16年度		総 数
	認定	廃止		認定	廃止	
風力発電設備	40	4	243	247,760	3,590	920,529
太陽光発電設備	57,723	378	198,159	215,217	1,430	741,278
（住宅用太陽光を除く）	438	7	1,150	10,293	114	28,990
バイオマス発電設備	26	2	247	2,277,301	8,930	5,028,008 ^(※1) (1,343,466) ^(※2)
地熱発電設備	1	0	1	2,000	0	2,000
中小水力発電設備	23	1	359	10,606	100	163,549
複合型発電設備	6	1	18	1,163	408	3,180
合 計	57,819	386	199,027	2,754,047	14,458	6,858,544 ^(※1) (3,174,002) ^(※2)
（住宅用太陽光を除く）	534	15	2,018	2,549,123	13,142	6,146,256

（備考）※1．表中のバイオマス発電設備の設備容量は発電設備全体での出力であり、バイオマス比率は考慮されていない。

※2．（ ）の設備容量は、バイオマス発電設備全体の出力（上記※1）に投入燃料のバイオマスカロリー比率（平成16年度実績）を乗じた出力。

（出所 資源エネルギー庁「電気事業者による新エネルギー等の利用に関する特別措置法の平成16年度の施行状況について」）

表3 平成16年度新エネルギー等電気供給量

（単位：kWh）

新エネ等電気供給総量	風力発電	太陽光発電	中小水力発電	バイオマス発電	地熱発電	複合型発電
4,908,658,745	1,439,744,347	346,517,418	913,557,262	2,207,404,677	279,360	1,155,681

（出所：資源エネルギー庁「電気事業者による新エネルギー等の利用に関する特別措置法の平成16年度の施行状況について」）

が設置されてきているといえる。

平成16年度における新エネルギー等発電設備から電気事業者に供給された電気の総量を表3に示す。平成16年度の新エネルギー等電気の供給総量は、前年（約40億kWh）より約10億kWh増大したことから、設備数の増大に伴い新エネルギー等発電設備による発電量も着実に増大しているといえる。

平成16年度にRPS法の義務が課せられた電気事業者は、電力会社10社、特定電気事業者6社、特定規模電気事業者15社の計31社である。これら電気事業者に課された平成16年度の義務量（平成16年度の調整後基準利用量＋平成15年度ポロウイング量）の総量は3,599,756,000kWhであったが、電気事業者31社のすべてが平成16年度におけるRPS法の義務を履行した。

平成16年度の義務履行にあたっては、当該年度に供給された新エネルギー等電気供給量に加え、平成15年度からのバンキング量（785,980,000kWh）を用いることができる。電気事業者、発電事業者は、積極的に新規の発電設備からの電気を発電、供給を行ったため、電気事業者31社のうち17社が次年度にバンキングを行い、バンキング総量は2,062,952,000 kWh（電気事業者17社：1,939,275,000 kWh、発電事業者10社：123,677,000kWh）であった。

さらに、平成16年度における新エネルギー等電気相当量の記録総量は、2,901,271,000 kWhであった。また、取引された新エネルギー等電気相当量は、157,513,000 kWhであり、取引件数は33件となり、記録総量、取引総量、取引件数ともに平成15年度より大幅に増大している。

RPS法下における新エネルギー等電気の電気や新エネルギー等電気相当量の取引価格は、事業者間の相対取引で決定せられているが、RPS法の施行状況の実態を把握するため、現在、電気事業者、発電事業者に対し、任意の調査を行っているところである。

2. 風力発電系統連系対策について

(1) 風力発電の系統連系対策について

RPS法の利用目標達成のために導入拡大が期待されている風力発電は、平成16年度末には92.7万kWに達し、運転開始はしていないが受給契約を締結しているものも含めれば、142万kWとなるなど、着実に拡大してきている。一方、風力発電は出力が大きく変動するため、大規模導入は周波数変動等電力の質に悪影響を与える可能性がある。そのため、北海道電力は25万kW、東北電力は47万kW、四国電力は20万kWを当面の風力発電の連系可能量とし、また、九州電力は、毎年一定量の制限を設けて受付けを行うなど、新規の風力発電の連系が制約される状況になってきている。RPS法の義務量は、風力発電の系統連系対策が講じられるまでの間は、対策を講じなくても達成できるレベルの義務量で良いとされて

いるが、2010年の義務量達成のためには、風力発電の系統連系対策を実施していくことが必要不可欠な状況になっている。

そこで、平成16年4月より、「総合資源エネルギー調査会新エネルギー部会」に「風力発電系統連系対策小委員会」を設置し、新エネルギー導入目標（うち風力発電の平成22年度における導入目標：300万kW）及びRPS法の利用目標を踏まえた風力発電の系統連系対策を確実に進めていくための具体的な系統連系対策について検討を進めた。昨年7月には、『風力発電系統連系対策小委員会中間報告書（案）』（以下「H16年中間報告書」）が取りまとめられた。

ここでは、風力発電の系統連系に係る対策として、「系統全体にわたる問題である周波数変動にかかる対策」および「送電線の送電容量を有効活用しながら円滑に連系を進めていくための送電容量等対策」の2つの論点について具体的な対策オプションの検討が行われた。

周波数変動対策については、表4のとおり具体的な対策オプションが提示され、対策ごとに技術的实施可能性、対策費用、実施にあたっての課題が整理された。平成16年度には、「H16年中間報告書」を受け、電力会社、風力発電事業者、経済産業省がそれらの課題について詳細な検討を行った。

表4 風力発電における周波数変動対策のオプション

	系統サイドの対策	風力発電サイドの対策
特段の新たな設備対策が不要な対策	● 周波数変動の観点からみた風力発電連系可能量の正確な把握 ● 調整力の拡大に向けた電源運用	● 調整力不足時期の風力発電機の計画解列・出力抑制 ● 調整力不足時期の風力発電機の予定解列・出力抑制 ● 周波数変動による導入制約のない地域への風力発電立地の誘導
場合によっては新たな設備対策が必要となる対策	● 会社間連系線の活用	
新たな設備対策が必要な対策	● 蓄電池等の導入	
新たな調査研究が必要な対策	● 気象予測に基づく風力発電予測システムの導入	

（出所：総合資源エネルギー調査会 新エネルギー部会 風力発電系統連系対策小委員会「風力発電系統連系対策小委員会中間報告書（案）平成16年6月23日」）

そこで、本年の小委員会では、「H16年中間報告書」に盛り込まれた周波数変動対策及び送電容量等対策について進捗状況のレビューを行い、今後の対策の方向性を示した「風力発電系統連系対策小委員会中間報告書（案）―「H16年7月27日中間報告書」に盛り込まれた対策のレビュー結果」（以下「中間報告書」）が本年6月末にとりまとめられた。

（２）「中間報告書」の概要

本年の小委員会においては、「H16年中間報告書」に掲げられた7つの周波数変動対策オプションについて、技術面、制度面での実施可能性の検討に加え、経済性の比較検討を加え、優先順位付けが行われた。

その結果、「中間報告書」においては、平成17年度から講じることが期待される対策として、①導入拡大のための具体的対策、②導入量拡大に向けた基盤的対策、③今後継続検討を行っていく対策が整理された（表5）。

① 導入拡大のための具体的対策「蓄電池対策と解列枠の導入」

（a）小委員会での検討結果

小委員会では、解列枠^{※2}、短周期、長周期等の蓄電池対策^{※3}に必要なコストと追加導入可能量等について検討・整理を行った（表6）。その結果、解列枠の方がそれぞれの対策コス

トが安いことが、追加導入可能量は、蓄電池対策の方が大きくなることが明らかになった。また、蓄電池対策を講じて風力発電を導入した場合でも、風力発電の出力変動がゼロにならない限り、系統側の既存の調整力が必要となる。解列枠も、解列時間以外は系統側の既存の調整力が必要である。したがって、蓄電池等の導入及び解列枠は二者択一的な対策となり、単純に2つの対策を導入することはできず、対策の性質に応じ組み合わせながら導入していくことが必要であること、その組み合わせ方により、風力発電の導入量等が異なることが明らかになった。

（b）蓄電池対策と解列枠の組み合わせ方

蓄電池対策と解列枠の組み合わせ方は、電力会社の系統制約の状況によって異なってくる。まず、以下に3タイプの電力会社に分けて組み合わせを示す。この中で、「短周期対策の蓄電池」とは、風力の出力の短周期変動を平滑化するための蓄電池、「長周期対策の蓄電池」とは、夜間風力の出力を蓄電池にフル充電し、昼間は風力の出力を平滑化させながら放電するための蓄電池、「長周期フラット運転の蓄電池」とは、夜間風力の出力を蓄電池にフル充電し、昼間は風力の出力を一定にさせながら放電するための蓄電池をいう。

表5 平成17年度から講じることが期待される対策

平成17年度から講じることが期待される対策	継続検討を行っていく対策
（導入量拡大のための具体的対策） <u>導入制約がある地域</u> ・ 解列枠の募集 ・ 蓄電池等の導入 <u>導入制約のない地域</u> ・ 周波数変動による制約のない地域での風力発電立地	（引き続き検討） ・ 会社間連系線の活用 （電源構成、需要状況の変化に応じて検討） ・ 調整力の拡大に向けた電源運用
（導入量拡大に向けた基盤的対策） ・ 周波数変動の観点からみた風力発電連系可能量の正確な把握 ・ 気象予測に基づく風力発電予測システムの調査研究	

（出所：総合資源エネルギー調査会 新エネルギー部会 風力発電系統連系対策小委員会
「風力発電系統連系対策小委員会中間報告書（案）平成16年6月23日」）

※2 系統側において風力発電の出力変動に対応する調整力が不足する時間帯に、解列または出力を抑制することを条件に、新たな風力発電機を連系することを認める枠

※3 蓄電池を風力発電に併設することにより風力発電の出力を平滑化する対策

表6 風力発電系統連系対策の費用対効果について（概算）

○現時点において技術的、制度的に導入可能な対策について、それぞれの対策を講じた場合の費用及び追加風力発電導入可能量について整理。
○なお、蓄電池及び解列枠については、以下の対策を今後最初に且つ単独で行った場合を示しており、組み合わせ方によりそれぞれの導入量は異なり、単純な足し算には必ずしもならない。

対 策		追加風力発電導入kW 当りの系統連系対策コスト	追加風力発電導入kW 当りの系統連系対策コスト		追加風力発電導入 可能量（試算値）	算定にあたっての前提	留意点
			kWhコスト	kWh当りの コストアップ分			
解列枠	10% （北海道は16%）		11.1円/kWh （北海道は11.9円/kWh）	1.1円/kWh （北海道は1.9円/kWh）	計：23万kW 北海道：5万kW 東北：10万kW 四国：3万kW 九州：5万kW	いずれかの解列時間で1回のみ受け付ける場合の導入可能量を試算。（例：20%解列の導入可能量は10%解列を行っていない前提で試算）	
	20%		12.5円/kWh	2.5円/kWh	計：31.5万kW 北海道：5万kW 東北：15万kW 四国：4万kW 九州：7.5万kW		
	30%		14.3円/kWh	4.3円/kWh	計：40万kW 北海道：5万kW 東北20万kW 四国：5万kW 九州：10万kW		
	60%		25円/kWh	15円/kWh	北海道：10万kW		
会社間連系線				東北・東京：相馬双葉幹線5～10円/kWh程度	5万kW程度 （ベース潮流25万kW当り）	ベース潮流を流すための増分コスト（ベース潮流kW）×ベース潮流送電時間率（8760時間に対する割合）/活用効果0.2×風力設備利用率	ベース潮流を流すための増分コストは需給状況や電源運用状況等により変化する。
蓄電池	短周期対策①：縮小率40%	3万円/kW	11.1円/kWh	1.1円/kWh	九州：3.3万kW	九州電力の通常枠5万kWを短周期蓄電池枠に置き換えた場合	追加風力発電導入可能量は、通常枠5万kWからの追加量
	短周期対策②：縮小率40%	3万円/kW	12.3円/kWh	2.3円/kWh	九州：8.3万kW	九州電力の10%解列枠+短周期蓄電池枠を実施した場合	
	長・短周期対策：夜間充電・昼間縮小率70%	基本ケース*1	21万円/kW 17.5円/kWh（25%） 14.6円/kWh（30%） （カッコ内は風力発電設備利用率）	7.5円/kWh（25%） 6.3円/kWh（30%） （カッコ内は風力発電設備利用率）	計：63万kW 東北：33万kW*4 四国：5万kW 九州：25万kW	東北、四国は10%解列を、九州は20%解列を蓄電池に置き換えた場合	
		容量節約ケース*2	17万円/kW 16.1円/kWh（25%） 13.4円/kWh（30%） （カッコ内は風力発電設備利用率）	6.1円/kWh（25%） 5.1円/kWh（30%） （カッコ内は風力発電設備利用率）			
	長・短周期対策：夜間充電・昼間フラット運転	基本ケース*1	27万円/kW 19.6円/kWh（25%） 16.3円/kWh（30%） （カッコ内は風力発電設備利用率）	9.6円/kWh（25%） 8.0円/kWh（30%） （カッコ内は風力発電設備利用率）	東北：一定量まで制限なし 四国：5万kW*4 九州：周波数変動に影響を与えない電源として随時連系協議が可能	蓄電池容量については風力発電所容量の130%（7～8時間）で試算（夜間完全充電、当日数時間前通告を前提としたものであり、前日通告の場合の蓄電池容量については別途検討が必要である。）	フラットで前日通告での運転を行うことができれば、卸電力取引市場に電気を販売することも可能。その場合の電気価格はスポット取引価格実績より7-10円/kWhと想定。電力会社の電気のみ買取価格は平均3円/kWhであることから4～7円/kWh買取価格が上昇する。この買い取り価格上昇分を考慮すれば、蓄電池設置によるコストアップ分を吸収できる可能性がある。
		容量節約ケース*3	15万円/kW 15.3円/kWh（25%） 12.8円/kWh（30%） （カッコ内は風力発電設備利用率）	5.3円/kWh（25%） 4.5円/kWh（30%） （カッコ内は風力発電設備利用率）			
周波数変動制約のない地域への風力発電立地			（陸上） 10～13円/kWh （洋上） 15円/kWh-		（陸上） 50万kW程度 （洋上） ？万kW	追加風力発電導入可能量は、H16経済産業省委託調査による風力事業者アンケート調査より（風況調査、電力会社との事前協議等を行っている事業計画のうち半数以上が実現すると見込んだ数値）	

（備考）

- 費用算定にあたっての前提は、風力発電設備利用率 25%、金利 4%、投資回収年数17年、系統制約のある地域における風力発電の発電コストは、試算にあたり、これまでの実績を踏まえ10円/kWh（利用率30%の場合は、8.3円/kWh）と仮定した。なおkWWhコストはそれぞれの対策の相対的な比較を行うために整理したもので、この値自体は実際の立地状況により変わらうものであることに留意。
- 周波数変動制約のない地域への風力発電立地については、設備利用率は計画地毎の想定設備利用率（20～25%）で試算。
- 試算にあたっては、風力発電設備・蓄電池とも設置補助金を考慮せずに計算を行った。
- 蓄電池関係：コストは、蓄電池がある程度普及した際の蓄電池設備費、設置コスト、充放電ロスも考慮したものの。
- *1 軽負荷期の夜間に風力発電から最大定格出力が出ること想定し、全て充電することを想定。
- *2 経済産業省委託調査において、過去の風力発電量のデータを踏まえたと蓄電池容量（kWh）を60%に削減できる可能性があることが示されたことから、基本ケースから60%に容量を削減。
- *3 風力発電事業者によって実際の風力発電量のデータから蓄電池容量（kW）を70%に削減できる可能性が検討されたことから、基本ケースから70%に容量を削減。このケースにおいては風力発電所定格の70%以上の出力がなされた時は解列することを想定。
- *4 下げ代制約により決定される値であるため、将来の需給状況によっては試算結果よりも追加連系可能量が少なくなる場合がある。

タイプ1：最初に短周期面のみ制約が生じ、その後、長周期（下げ代：夜間）面での系統制約が生じる可能性がある電力会社

費用が安い対策により風力発電を導入する組み合わせは、通常枠が残っている場合は通常枠、その次に解列枠を導入し、さらに長周期対策の蓄電池を導入するものであるが、他の組み合わせに比べ導入量はそれほど多くならない。最も導入量が多い組み合わせは、短周期対策の蓄電池導入枠の後に、長周期対策の蓄電池導入枠を講じるものである。

タイプ2：最初に短周期、夜間の長周期（下げ代）の制約が生じ、その後、昼間の長周期（下げ代）制約が生じる可能性がある電力会社

費用が安い対策で風力発電を導入する組み合わせは、通常枠が残っている場合は通常枠、その次に解列枠、そして長周期対策の蓄電池を導入するものであるが、導入量は他の組み合わせに比べ多くはならない。最も導入量が多い組み合わせは、長周期対策の蓄電池を導入した後に解列枠を講じるものである。一方、昼間下げ代の問題が早い段階で生じる場合は、それが制約となるため、必ずしもこの組み合わせで導入量が最大とはならない。

タイプ3：短周期、長周期（下げ代：夜間）長周期（調整速度等）の制約が生じる電力会社

蓄電池対策により追加風力発電の導入を図るためには、長周期フラット運転の蓄電池対策を行うことが必要である。この場合、既存の調整力とは別の調整力を活用し通告変更に対応することになる。このため、解列枠を蓄電池枠に変更しても、導入量は増加せず、したがって、それぞれ個別に検討していくことができる。

これに従って整理した、具体的な電力会社毎の導入組み合わせ例を表7に示す。

(c) 小委員会が推奨する方策

小委員会においては、風資源の有効活用と風力発電導入量の拡大の観点から、解列枠よりも蓄電池対策を優先し、追加風力発電の導入量が最大になるように組み合わせる方針で、各電力会社が系統連系受け入れを実施することが適当である旨の議論がなされた。「中間報告書」には、「導入制約がある電力会社においては、速やかに、蓄電池と解列を追加風力発電の導入量が最大になるような組み合わせを整理し、解列については平成17年度から、蓄電池については平成18年度から導入枠を設け

表7 解列と蓄電池対策の組み合わせ方と追加的風力発電導入量

【九州電力】

九州電力では、まずは①の短周期面のみ制約が生じ、その後に②長周期（下げ代：夜間）での制約が生じることから、以下の組み合わせで対策を講じていくことが可能。また、九州電力は来年度5万kW程度の通常枠を予定。短周期蓄電池枠は風力の短周期変動を完全に吸収できない（縮小率が40～50%）ことから、通常枠又は解列枠を活用して受け付け枠を設定することとなる。

導入順	対策A		対策B		対策C		対策D		対策E		対策F	
1	通常枠	5万kW	通常枠	5万kW	短周期蓄電池	8.3万kW	短周期蓄電池	8.3万kW	短周期蓄電池	8.3万kW	短周期蓄電池	8.3万kW
2	解列枠10%	5万kW	解列枠10%	5万kW	解列枠10%	5万kW	解列枠10% 短周期蓄電池	8.3万kW	解列枠10% 短周期蓄電池	8.3万kW	長周期蓄電池	16.7万kW
3	解列枠20%	2.5万kW	長周期蓄電池	8.3万kW	長周期蓄電池	8.3万kW	解列枠20%	2.5万kW	長周期蓄電池	8.3万kW	長周期蓄電池	8.3万kW
4	長周期フラット蓄電池	α kW	長周期フラット蓄電池	α kW	長周期フラット蓄電池	α kW	長周期フラット蓄電池	α kW	長周期フラット蓄電池	α kW	長周期フラット蓄電池	α kW
合計 (追加 導入量)	12.5万+ α kW (7.5万+ α kW)		18.3万+ α kW (13.3万+ α kW)		21.6万+ α kW (16.6万+ α kW)		19.1万+ α kW (14.1万+ α kW)		24.9万+ α kW (19.9万+ α kW)		33.3万+ α kW (28.3万+ α kW)	

* 長周期フラット蓄電池による対策を講じる場合（導入量 α kW）は、周波数変動に影響を与えない電源として随時連系協議が可能。
* 通常枠が5万kWで導入限界量に達すると仮定した試算。

【東北電力・四国電力】

東北電力・四国電力では、①短周期、②長周期（下げ代：夜間）面による制約であるため、対策は以下の通りとなる。なお、四国電力では昼間にも長周期（下げ代）問題が生じる。

（東北電力）

導入順	対策A		対策B		対策C		対策D	
1	解列枠 10%	10万kW	解列枠 10%	10万kW	長周期 蓄電池	33万kW	長周期 蓄電池	33万kW
2	長周期 蓄電池	10万kW	解列枠 20%	5万kW			解列枠 20%	5万kW
3	長周期 フラット 蓄電池	α kW	長周期 フラット 蓄電池	α kW	長周期 フラット 蓄電池	α kW	長周期 フラット 蓄電池	α kW
合計 (追加 導入量)	10万+ α kW		15万+ α kW		33万+ α kW		38万+ α kW	

*長周期フラット蓄電池による対策を講じる場合（導入量 α kW）は、他電力管内に販売・小売される場合には、東北電力において短周期・長周期変動面での制約なし。東北電力に販売される場合には、東北電力の昼間の長周期（調整速度、調整幅）面での制約が生じるまで連系可能。（販売・購入に関しては、IPP、PPS電源と同様、相対交渉）

（四国電力）

導入順	対策A		対策B		対策C		対策D	
1	解列枠 10%	3万kW	解列枠 10%	3万kW	長周期 蓄電池	5万kW	解列枠 20%	3万kW
2			解列枠 30%	2万kW			長周期 蓄電池	3万kW
3	長周期 フラット 蓄電池	α kW	長周期 フラット 蓄電池	α kW	長周期 フラット 蓄電池	α kW	長周期 フラット 蓄電池	α kW
合計 (追加 導入量)	3万+ α kW		5万+ α kW		5万+ α kW		6万+ α kW	

*長周期フラット蓄電池による対策を講じる場合（導入量 α kW）は、他電力に販売・小売される場合には、四国電力において短周期・長周期変動面での制約なし。四国電力に販売される場合には、対策A、Bについては四国電力の昼間の長周期（下げ代）の問題が生じるまで連系可能であるが、対策C、Dについては α はゼロとなる。

【北海道電力】

北海道電力では、①短周期、②長周期（下げ代：夜間）、③長周期（調整速度等）面による制約であるため、対策は以下のとおり。（蓄電池は、縮小率100%のフラット制御での導入が必要。）

導入順	対策A		対策B	
1	解列枠 16%	5万kW	解列枠 16%	5万kW
2	長周期完全 フラット運転	α kW	長周期完全 フラット運転	α kW
3			解列枠 60%	5万kW
合計 (追加 導入量)	5万+ α kW		10万+ α kW	

（出所：総合資源エネルギー調査会 新エネルギー部会 風力発電系統連系対策小委員会）
「風力発電系統連系対策小委員会中間報告書（案）平成16年6月23日」

て、受付・導入を行うことについて及び経済産業省においては、上記蓄電池の募集にあわせ、平成18年度からの蓄電池導入に係る支援

施策の強化を行うことについてそれぞれ検討を行うこと」が盛り込まれた。また、長周期フラット型の制御を行う風力発電は、周波数

変動に影響を与えない電源として、他の電源と同様、電力系統利用協議会ルール及び各電力の系統アクセス基準に則って随時連系協議の受け付けを行うことが盛り込まれている。

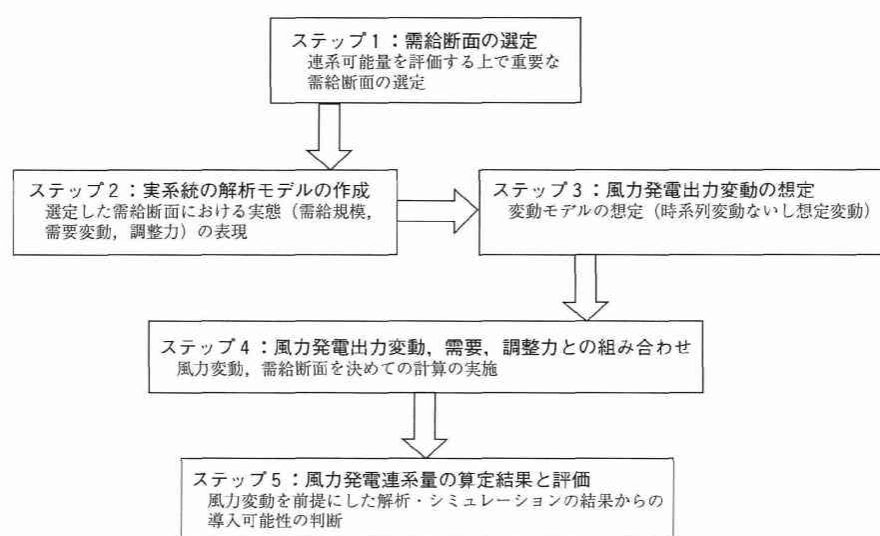
「周波数変動による導入制約のない地域での風力発電立地」に関しては、10～13円/kWhの発電コストで2010年までに、経済産業省調査結果より約50万kWの導入が見込まれることが示され、「中間報告書」には、導入制約のない電力会社において、事前相談及び詳細な連系検討を随時受け付けるなどの対応を行う中、系統連系にあたっての費用対効果の高い代替案の提案など、新規風力発電立地における系統連系手続きを丁寧に行うこと、風力発電事業者においては、今後、導入制約のない地域における風力発電の適地を開発していくなど当該地域での事業性の向上に向けた一段の努力が行われることが盛り込まれた。さらに、経済産業省においては、平成18年度より導入制約のない地域において風況の優れた場所を探すために風力発電事業者による風況調査に対する必要な支援について検討を行っていくとともに、風況の優れた場所での風力発電立地を円滑に進めるために、関係省庁等に対し、土地利用規制の緩和や運用の円滑化を引き続き働きかけていくこととされた。

② 導入量拡大に向けた基盤的対策

導入量拡大に向けた基盤的対策としては、「周波数変動の観点からみた風力発電連系可能量の正確な把握」、「気象予測に基づく風力発電量予測システムの調査研究」が挙げられる。

「中間報告書」には、「周波数変動の観点からみた風力発電連系可能量の正確な把握」は、系統連系対策を進めていくに当たっての前提となる必要不可欠な対策と位置づけており、昨年度経済産業省の委託調査で整理された風力発電の平滑化効果、連系可能量把握のためのシミュレーション手法の手順を踏まえ、今後、適時電力会社は連系可能量の正確な把握を進めていくことが盛り込まれた。(図1)

「気象予測に基づく風力発電量予測システムの調査研究」に関しては、昨年度経済産業省の委託調査で整理された風力発電量予測システムの活用目的に資し、わが国において研究開発すべきシステムを樹立できるよう、本年度より(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)において研究開発を進めていくことが盛り込まれた。これを踏まえ、NEDOでは公募を行い具体的な研究機関を選定し、平成19年までの3年間で風力発電量予測システムの調査研究を進めていくこととしている。



（出所：総合資源エネルギー調査会 新エネルギー部会 風力発電系統連系対策小委員会
「風力発電系統連系対策小委員会中間報告書（案）平成16年6月23日」）

図1 周波数変動の観点からみた風力発電連系可能量の正確な把握のステップ

表8 会社間連系線の具体的な活用方策

[短周期変動対策としての連系線活用方策]	[長周期変動対策としての連系線活用方策]
案Ⅰ 短周期変動分離 短周期変動対策として会社間連系線を通じて他社管内のLFC調整力を利用	案A 長周期変動分は風力発電分を同時同量で他系統に通告送電（託送）
案Ⅱ ベース潮流送電 短周期変動対策として会社間連系線を通じて一定の潮流を送電することで、自社管内のLFC調整力を増加させる。	案B 下げ代確保対応として電力会社がベース潮流を他系統に融通
案Ⅲ 蓄電池併用 短周期変動は蓄電池で吸収 （→他社には長周期変動対策のみを期待）	

（出所：総合資源エネルギー調査会 新エネルギー部会 風力発電系統連系対策小委員会「風力発電系統連系対策小委員会中間報告書（案）平成16年6月23日」）

③ 今後継続検討を行っていく対策

今後継続検討を行っていく対策としては、「会社間連系線の活用」と「調整力の拡大に向けた電源運用」が挙げられる。会社間連系線の活用に関しては、表8のような具体的な活用方策が議論された。

会社間連系線を活用する場合には、上記の短周期変動対策及び長周期変動対策としての連系線活用方策を組み合わせることが必要となるが、小委員会では、以下の（a）（b）の通り課題を整理した。

（a）「案Ⅰ+案A」、 「案Ⅰ+案B」

総合資源エネルギー調査会電気事業分科会報告「今後の望ましい電気事業制度の詳細設計について」（平成16年5月）では、連系線の利用にあたり、（i）全ての系統利用者、取引形態に有利/不利にならない仕組みを確保するため、中立機関が入った形で手続きがなされること、（ii）先着優先、（iii）空おさえの禁止、

という大原則を定めており、これを踏まえて電力系統利用協議会ルールが定められている。しかし、「案Ⅰ+案A」、「案Ⅰ+案B」の方策はこうした原則やルールに基づかずに風力発電の出力を連系線を通じて流すことにつながりうるもので、制度上の課題がある。

（b）「案Ⅱ+案B」、 「案Ⅲ+案A」

これら方策に制度的、技術的な課題はない。

なお、「案A」、「案B」を実施するには、精度の高い風力発電予測技術が必要であり、さらに、予測などに基づく通告値と実際の長周期変動分との差異に対する電源の追従性等技術面での検証も必要である。また、「案Ⅱ」や「案B」においては、導入制約がある電力会社において焚き増す^{※4}電源、会社間連系線を通じてベース潮流を買い取る電力会社において焚き減らす^{※5}電源の種類によっては、二酸化炭素排出量が結果として増大する可能性がある。

表9 連系線活用による費用と効果

	連系線活用量 a	連系可能量増加分 b	活用効果 b/a (%)	主な増分コスト	備 考
案Ⅰ+A, B	10万kW	+10万kW	100%	中給改修（数銭/kWh程度）	費用負担および連系線利用ルールとの関連（全エリア共通）
案Ⅱ+B	25万kW （これ以下では効果が低い）	+5万kW	20%	DSS（Daily Start Stop）火力機を新たに連系してベース潮流を流すための増分コスト	・持ち替え電源種別次第でCO2排出量が増加の可能性 ・25万kWの空容量確保 ・費用負担のあり方
案Ⅲ+A	10万kW	+10万kW	100%	蓄電池コスト	今後の詳細検討・検証が必要

（出所：総合資源エネルギー調査会 新エネルギー部会 風力発電系統連系対策小委員会「風力発電系統連系対策小委員会中間報告書（案）平成16年6月23日」）

※4 域内の調整力を拡大するために火力発電の出力を上げる（燃料を焚き増す）という方策をとる。

※5 電気を他の電力会社から買い取ることになるため、結果として自社管内の火力発電の出力を低下（燃料を焚き減らす）させる必要が生じる。

また、以上の各対策のコスト及び追加連系可能量についての整理も行った。表9は、相馬双葉幹線を想定した場合のものである。

費用効果的に風力発電を導入していける活用策である「案I+案A」、「案I+案B」は、総合資源エネルギー調査会電気事業分科会報告「今後の望ましい電気事業制度の詳細設計について」（平成16年5月）及びそれに基づき有限責任中間法人電力系統利用協議会が定めたルールに整合せず制度上の課題があるため、報告書においては、このような制度的な課題に関して、風力発電の導入状況と現行の電気事業制度の運用状況を踏まえつつ、風力発電事業者、電力会社、特定規模電気事業者（PPS）、中立者、経済産業省等が参加する適切な場で、風力発電を含む新エネルギーの電気事業制度における取り扱いについて検討していくこととされた。

調整力の拡大に向けた電源運用に関しては、様々な具体的方策の検討を行ったが、現段階では技術的に可能な方策がなかった。しかし、今後の需給状況等によっては技術的に可能な方策が出てくる可能性があるため、中間報告書においては、導入制約がある電力会社は、電源の効率的運用や将来の電源構成や需要状況の変化を踏まえて、可能な限り調整力を拡

大するような電源運用を行うことを検討していくこととされた。

4. まとめ

RPS法の2010年の義務量である122億kWhを達成するために必要不可欠な対策である風力発電系統連系対策に関し、本年6月に取りまとめられた「中間報告書」においては、2010年までの風力発電300万kWの導入を可能にする技術的方策が明らかにされた（表10）。

今後は、「中間報告書」に盛り込まれた対策を、関係者が着実に実施していくとともに、必要に応じ、進捗状況のレビューを行いながら、RPS法の利用目標の達成に向けて風力発電の導入を進めていくことが期待される。

また、本年12月は、RPS法の評価・検討を行う法施行後の3年目にあたる。平成15年度、平成16年度の2年間の施行状況や風力発電の系統連系対策の検討状況を踏まえ、新エネルギー等電気を着実に拡大していくという観点から、RPS法の評価を行い、その結果、必要があれば、RPS法の制度や運用の見直しを図っていくこととしている。

表10 2010年までの風力発電300万kWの導入を可能にする技術的方策

風力発電系統連系対策なしの導入	風力発電容量
①現在の風力発電の導入量 (平成17年3月末までに建設済み—NEDO調査)	92.7万kW
②建設はされていないが、電力会社が風力発電の需給契約の締結を行っている風力発電量	49.3万kW
③平成17年度以降の風力発電追加契約予定量	24万kW (内訳) 九州電力17年度分 6.2万kW 東北電力52万未達分 5万kW 四国電力分 12.8万kW
④風力発電導入量及び今後の導入見込み量 (①+②+③)	166万kW

今後の風力発電系統連系対策による導入	今後の見込み（試算値）
①導入制約がある地域	蓄電池枠、解列枠等により 25万～82万kW+αkW
②導入制約のない地域	50万kW (H16年度経済産業省による風力発電事業者へのアンケート結果：現段階で計画されている事業のうち風況調査を行っているものや電力会社との系統連系協議、補助金申請等を行っているものを合わせた事業の半数以上が実現すると仮定した場合)

（出所：総合資源エネルギー調査会 新エネルギー部会 風力発電系統連系対策小委員会）
「風力発電系統連系対策小委員会中間報告書（案）平成16年6月23日」

[寄稿]

拡大を続けるLNG市場と事業者の対応

奥田 浩二 (大阪ガス株式会社
資源事業部 課長)



1. はじめに

液化天然ガス (Liquefied Natural Gas 以下 LNG) とは、メタンを主成分とする天然ガスを -162°C まで冷却して液化したものである。液化することで体積は600分の1程度になる。

日本によるLNG輸入は、1969年にアラスカからのLNG船が東京に入港して以降、着実に増加してきた。今日、日本の天然ガス利用の97%はこのLNG輸入によるものである。2004年の日本のLNG輸入量は約5,700万トンであり、世界全体 (約1億3,000万トン) の約43%を占めている。

本稿では、LNG需給の現状と展望についての全体像を紹介し、続いて拡大を続けるLNG市場に対する米国での事業者の対応について述べる。

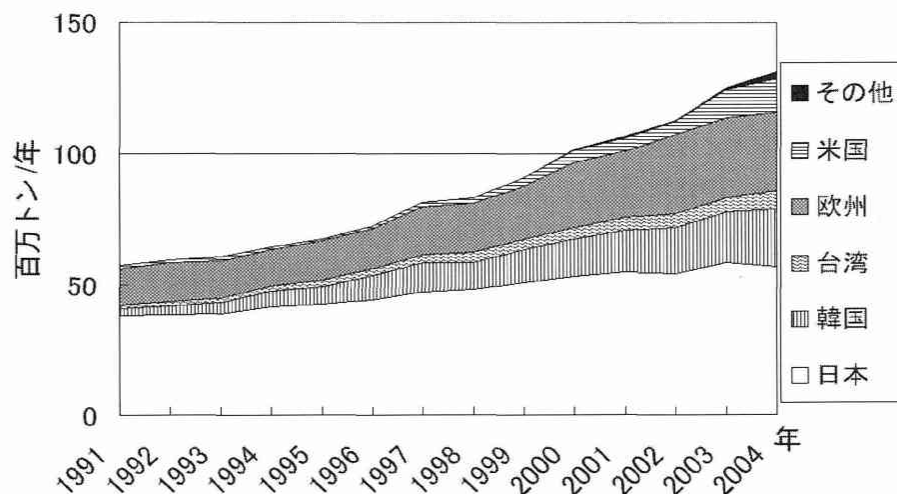
2. LNG市場の拡大

(1) LNG需給

LNGの取引量は年々拡大してきており、1993年から2003年までの10年間の伸びは年率7.3%となっている。これは、同時期における総エネルギー消費並びに天然ガスの伸び (各年率1.7%と2.2%)。出典：BP統計2004年版) を大きく上回る。

図1に示すように、1994年以降の10年間で、取引総量も約6,500万トンから約1億3,000万トンへと倍増し、LNG輸入国数は9カ国から14カ国に、輸出は8カ国から12カ国に増えた。

このようなLNGの伸びは、図2に示すように今後も継続する見込みである。図2は、過去からのLNGの伸びに加え、各種の情報から将来のLNG需要展望をまとめたものである。



(出所：The LNG Industry各年版を基に作成)

図1 LNG輸入量の推移

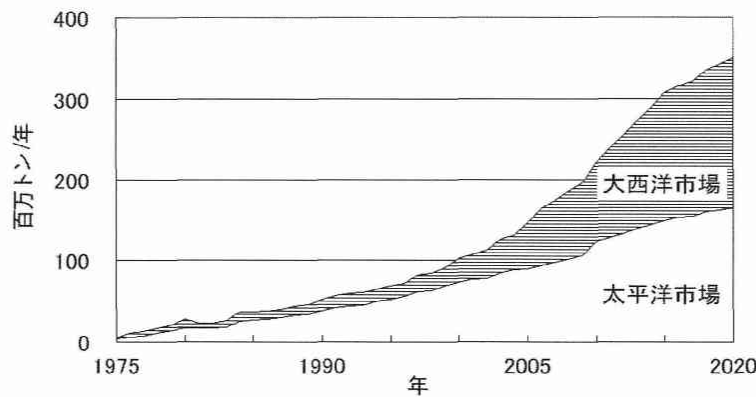


図2 LNG輸入量の展望

2020年には世界のLNG輸入量は、近年の約3倍にあたる約3億5,000万トンに達する見込みである。LNG輸入量の増加により、中心となる地域も変わってくる。今まではアジア（日本、韓国、台湾）がLNG輸入の中心であったが、今後は太平洋・大西洋の両市場において下記のような変化が見込まれる。

【大西洋地域】

韓国・台湾での増加が続くと共に、新たなLNG輸入国として中国とインドでの取引が増加する。インドは2004年より新たにLNG輸入を開始し、その後も新基地の計画が進展しつつある。中国においても10を超える新規LNG輸入基地計画があり、数年以内に新たにLNG輸入を開始する予定である。結果として、太平洋市場では、年率4%程度の増加が続く。

【大西洋市場】

欧州での増加に加え、米国での輸入が大きく増加する（米国での輸入拡大については3. で述べる）。大西洋市場での伸びは年率9%程度となり、2010年代半ばには太平洋市場での取引を越える。

LNGの供給面については、今日ではインドネシアなどアジアからの輸出が中心であるが、今後は図3のように、特に中東やアフリカでの供給の拡大が見込まれ、地域の多様化が進展する。

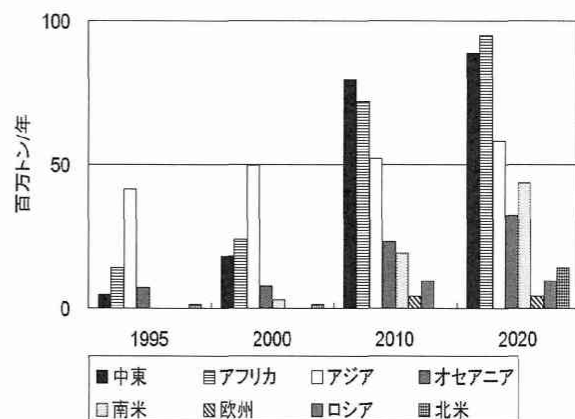


図3 LNG地域別供給量の展望

(2) LNGビジネス環境の変化

LNGの拡大にともない、ビジネス環境にも変化が起きている。まず、従来のLNGビジネス環境について簡単に述べる。

LNGビジネスは、図4のように、生産・液化・輸送・気化のプロセスに大別できる。年間約600万トンのLNGを供給する従来のプロジェクトでは、このLNGチェーン全体で約40～50億ドル程度の投資が必要であった。内訳の目安は、生産・液化部分で約60%、輸送部分で約25%、気化部分で約15%となっている。

このような大規模な投資が必要であるため、LNG取引には表1のような特徴がある。



図4 LNGバリューチェーン

表1 LNG取引の特徴

- 長期契約（20年超の契約期間）が中心である。
- 日本では買主がグループを形成して購入する。
- 各年での引き取り数量の変動や荷揚げ地（仕向地）に制約がつく厳密な引き取り条件が付与されている。

表2 LNG取引における最近の変化

- 契約期間については、長期契約が今なお中心であるが、契約期間のより短い契約やスポット取引が増加基調で推移している。
- 各買主による個別交渉が増加している。
- 厳密な引き取り条件についても、仕向地条件の緩和などが進みつつある。

近年、LNG市場が拡大するにつれ、また自由化の進展等により事業者単位でのLNG需要の不透明感が高まるにつれ、上記の特徴に表2のようないくつかの変化が出てきている。

このように、LNG市場が拡大するとともにビジネス環境も変化してきたことから天然ガスビジネスに新たな展開が出てきつつある。

以下では、米国を例に、どのような変化があるのかについて見てみよう。

3. 米国における市場の変化とその対応

（1）米国におけるLNGの展望

米国におけるLNGビジネスの状況を見る前に、まず米国でのLNGがどのような状況になっているのかについてみておこう。

米国における2004年までのLNG輸入量を図5に示す。近年の輸入量をみると、2002年以前には年間約500万トン以下のLNG輸入であったものが、2003年には約1,050万トン、そして2004年には約1,300万トンにまで急増している。

このようなLNG増加の背景には、米国における天然ガスの需給バランスの変化がある。米国エネルギー情報局（Energy Information Administration）によると、天然ガス需要は今後も増加していくが、それに対応する供給面については、国内生産は成熟化のため今後の

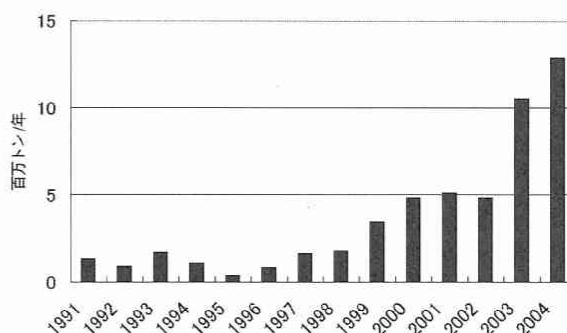
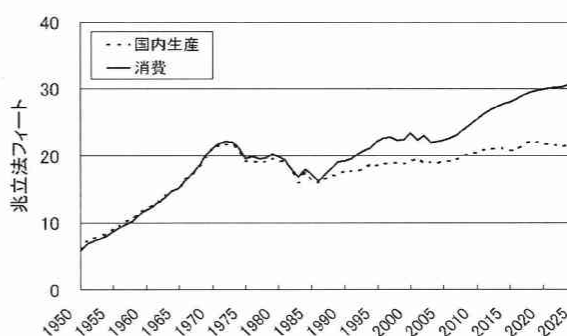


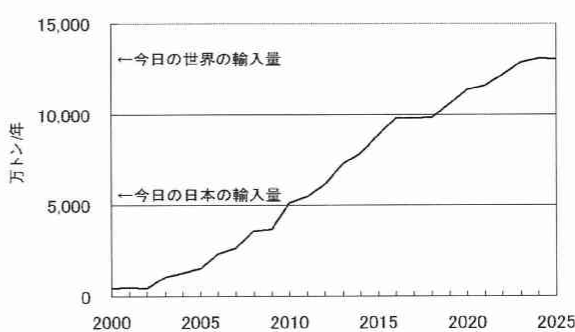
図5 米国におけるLNG輸入量の推移



（出所：米国エネルギー情報局）

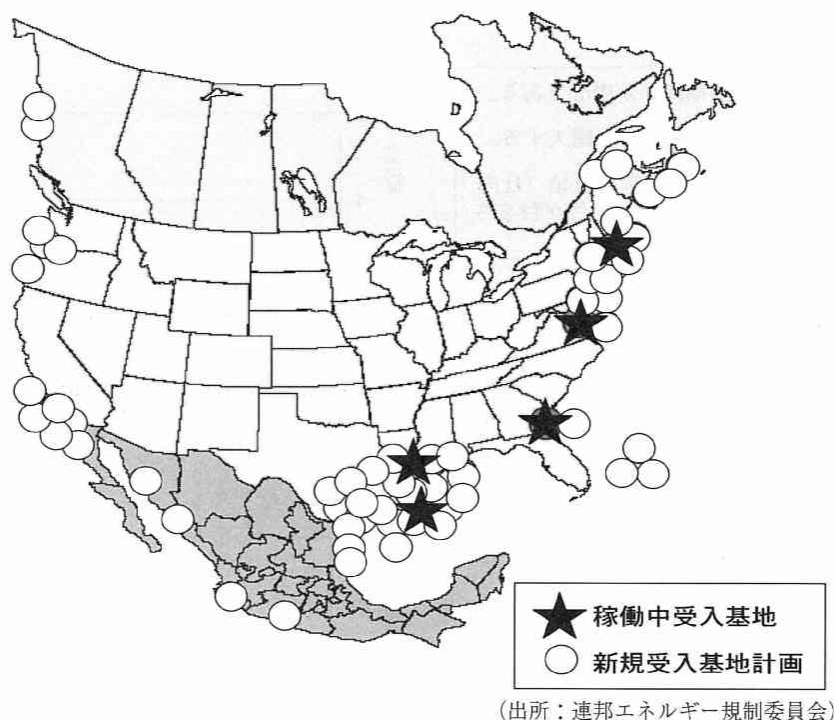
図6 米国における天然ガス需給ギャップの拡大

大幅な増加は期待できない状況になっている。この結果、天然ガスの需給ギャップは図6のように拡大する見込みである。このギャップを埋める方策としては、カナダからのパイプラインによるガスの輸入とLNGの輸入がある。しかし、カナダからのパイプラインガスの輸入については、カナダ国内でのガス需要の高まりやオイルサンドの生産への天然ガス利用の増大などにより、今後の増加は期待できない状況になっている。よって、米国における天然ガスの需給ギャップを埋める主な手段は



（出所：米国エネルギー情報局）

図7 米国におけるLNG輸入量の展望



(出所：連邦エネルギー規制委員会)

図8 北米地域におけるLNG輸入基地計画

LNGとなり、今後さらに輸入量が増加する見込みである。図7に示すように、今後5年程度で今日の日本のLNG輸入量相当に達し、今後20年程度で、今日の世界のLNG取引量を凌駕する程度の成長を見込んでいる。

このようなLNGの輸入増に対応すべく、輸入基地の計画も進んでいる(図8)。米国には本年3月に稼働を始めたものを含め5カ所のLNG輸入基地が存在(マサチューセッツ州、メリーランド州、ジョージア州、ルイジアナ州、メキシコ湾沖合に各1カ所)しているが、これらに加えて、既存基地の拡張並びに新規の輸入基地建設計画が58件存在している。(2005年5月17日時点)

(2) 米国における新たなバリューチェーンの構築

北米地域における多くの輸入基地建設計画を見ると、これらは全てが同じ考えで計画されているわけではなく、従来とは異なる新たなバリューチェーンの構築努力もみられる。従来は、生産・液化部分(以下「上流」と、気化部分(以下「下流」と)に大きく大別され、輸送については上流事業者が手配する場合と

下流事業者が手配する場合が混在していた。しかし、米国での輸入基地計画の内容を見ると、従来とは異なる概念の計画が含まれている。以下では、その中で特徴的な①垂直統合型、②新技術活用型、③新規参入型の3つのタイプについて見ていこう。

① 垂直統合型

これは、上流事業者による下流進出や、下流事業者による上流進出といったバリューチェーンの相互浸透の試みである。

まず、上流から下流への展開例としては、スーパーメジャーズによるLNG輸入基地への投資があげられる。

例えば、BPやロイヤルダッチシェル社、エクソンモービル社等のスーパーメジャーズは、米国における輸入基地への進出を進めており、各々複数の輸入基地計画を進めている。特に、エクソンモービル社はカタールに年間780万トンのLNGを製造できる大規模な液化プラントを複数系列建設するなど特徴的な動きをしている。今日の大規模液化プラントは年間500万トン程度以下の規模であるので、50%超の大

規模化である。エクソンモービル社の計画等によると、カタールにおいて、稼働中並びに計画中のLNG液化能力の総量は2008年には6,000万トンを超える見込みとなっている。プラント規模を大規模化することで規模の経済効果を利用し、価格競争力のあるLNGを供給することを目指しているものとみられる。

一方、下流から上流への参加例としては、エネルギー配給会社による上流への進出もあるが、米国で特徴的なのは化学会社のダウケミカルによる輸入基地への進出であろう。これは米国の産業用ユーザ初のLNG事業参画例である。同社はテキサス州にて現在建設中のフリーポートLNG輸入基地において20年間に亘って年間360万トンのLNGを輸入する予定である。フリーポートはダウケミカルが世界最大級の工場を有している場所であり、近年の高ガス価格への対応策の1つと考えられる(原料として天然ガスを利用する場合は、ガス価格の上昇がそのまま製品価格の高騰となり、価格競争力低下につながる)。

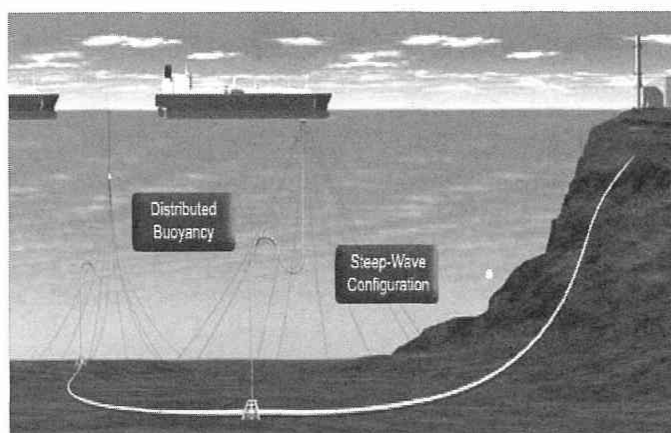
② 新技術の導入

本年3月に新たなLNG輸入基地が稼働し始めた3(1)で述べたが、それがメキシコ湾沖合約190kmの場所に建設された輸入基地である。これはエネルギーブリッジ(Energy Bridge: EB)と呼ばれるシステムを利用した

ものである。EBは、LNG船に気化設備を付属し、船上で気化したガスを海底のパイプラインを通じて払い出していくシステムであり、LNGのバリューチェーンでの輸送部分と気化部分を統合する新たな技術である。

今回はじめて実用化された技術であるが、この背景には輸入基地建設に対する根強い地元の反対が影響していると考えられる。これはNIMBY (Not In My Back Yard) やBANANA (Build Absolutely Nothing Anywhere Near Anyone) に代表される運動であり、景観や漁業への影響、さらにはテロの標的となることの脅威等から、特に東西海岸の陸上の輸入基地建設に反対するものである。実際、このような反対運動で中止となったLNG輸入基地は東西海岸を中心に8カ所程度存在している。

EBの導入により、陸上の輸入基地は不要となるので、このような地元の反対運動を克服できるのではないか、というのがEBに対する期待のひとつであろう。陸上での気化設備の建設が不要になることから全体としてのコストが抑えられる点もメリットである。しかし、船の建造コストが高まることに加え、船上で気化して送り出す関係で払い出しには通常の数倍にあたる6日程度かかってしまう。さらにEB船がパイプラインと接続されているときのみ供給が可能であることから、継続的な供給を行うには、EB船が沖合ポイントに適宜入船してくる必要



Distributed Buoyancy: (船との) 接続用ブイ

Steep-Wave Configuration: 波による衝撃安定化機構 (出所: Excelebrate Energyホームページ)

図9 エネルギーブリッジ

がある。このようなことを可能とするには、多くのEB船の同時運航や、LNG調達先の近隣への限定（例えばトリニダード・トバゴ）などが必要となろう。これらの制約をどのように克服するかが課題と考えられる。

③ 新規参入

最後に、新規参入について見てみよう。ここでの特徴的事業者はシェニール（Cheniere）である。シェニールは現在4件の新規輸入基地計画を保有しており、そのうち3件についてはすでにFERCから承認を得ている。

シェニールの特徴の一つは「容量創出ビジネス」を目指したものであることだ。これは、米国でのLNG需要は高まるものと考え、できるだけ早く基地を実現させることで基地容量を確保し、LNG事業におけるポジションを固めようというものである。ここでの特徴は、表3の3点と考えられる。

表3 LNG事業強化の特徴

- 輸入基地に焦点を絞ったビジネスモデルの確立を目指している。
- 基地規模が大きい。現在、承認済みの3基地のうち2つは年間輸入量が約2,000万トン、もう1つは年間約1,000万トン程度の規模である。しかもこの約1,000万トン規模のものはすでに約2,000万トン超への拡張計画が立てられている。さらに申請中の基地は年間約2,500万トンの規模となっている。実に4基地で約8,500万トンものLNGが輸入可能となる計画である。
- 輸入基地の実現性を高めるために、地元の反対が少ないメキシコ湾に建設計画を集中させている。

以上、現在米国において展開しつつある新たなバリューチェーンの構築努力について述べた。ただし、これらは全て成功が約束されたものではない。前述の通り、米国には60件に迫る輸入基地計画があるが、これらが全て実現されると年間5億トンものLNG輸入が可能となる。現在すでにFERC等の承認が得られているものだけの合計でも年間1億8,000万トン程度の規模となっている。図7に示したように米国エネルギー情報局による将来のLNG輸入見通しでは、2025年に約1億3,000万トンである。この数字自身、今日の全世界の輸入量

に相当するものであり、今後の急成長の結果としての数字である。この数字から考えると、2010年時点での北米におけるLNG輸入基地数は既存基地を含め10～12（すなわち、今後できるものは5～7）程度と見られているので、まさしく米国のLNG輸入基地計画は過当競争にあるといえよう。すでに述べたようにNIMBY等の地元反対により輸入基地建設には極めて時間がかかる状況であるが、逆によりそのおかげでLNG輸入基地建設スピードが調整され、結果として輸入基地乱立の混乱が抑えられているとも考えられる。この意味で、ここで述べた新たなバリューチェーンの構築努力は、事業者が先行実現を狙いつつ試行錯誤を重ねている結果とみることもできよう。

4. おわりに

本稿では、LNGの需給やビジネス環境の変化について述べ、その変化に事業者がどのように対応しつつあるのかについて米国を例に述べた。かつて日本向けの特種なエネルギー形態としてみられることも多かったLNGは、供給と需要の両面における面的広がりによって支えられた量的拡大により、まさしく未曾有の成長をとげつつある。このようなLNG市場の拡大は、事業者の戦略にも影響を与えており、米国では現在、各事業者が試行錯誤を行いつつ陣取り合戦を展開している状況であるといえよう。

参考文献

- (1) K. Okuda : Bridging the Future: LNG Strategies for changing time, Proceedings in the 19th World Energy Congress in Sydney, 2004
- (2) GIIGNL : The LNG Industry 1991年版～2004年版
- (3) BP統計2004年版（BP Statistical Review of World Energy 2004）
- (4) 米国エネルギー情報局ホームページ（<http://www.eia.doe.gov>）
- (5) 連邦エネルギー規制委員会（FERC）ホームページ（<http://www.ferc.gov>）
- (6) エクセラレート社ホームページ（<http://www.excelerateenergy.com>）
- (7) （財）日本エネルギー経済研究所：アジア・太平洋及び大西洋市場の天然ガス需給動向調査報告書

ピークオイル説を検証する

本村 真澄

（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）



1. 石油の楽観論と悲観論

石油資源の供給予測について、最近では対照的な2つの見解が公表され、大きな論争が展開されている。

一般に多く引用される国際エネルギー機関（IEA）の予測⁽¹⁾、米国エネルギー省エネルギー情報局（EIA）の予測⁽²⁾は、2000年に発表された米国地質調査所（USGS）によるP50値である3兆バレルという究極可採埋蔵量評価を前提⁽³⁾としており、当面供給危機は起こらないと結論している。

一方、最近話題になることの多いキャンベルらの「ピークオイル説」は、1.8兆バレルという究極可採埋蔵量に基づいた予測で、2010年までには石油生産のピークを迎えるというものである。但し、彼の予測する生産ピークは、最初に発表された時は90年代後半であり、最近では2000年代後半まで後へとずれ込んでいる。キャンベルの議論を初めて聞いた人は鮮烈な印象を受けるだろうが、当時からの議論を知るものには狼少年的な言説に見える。詰まるところ、この議論の分かれ道は、地球における石油の究極資源量をどの程度に見積もるかに尽きると言えよう。以下、石油埋蔵量の予測の方法論に遡って双方の見解を比較してみたい。

2. 石油の悲観論とは？

（1）最近の石油悲観論について

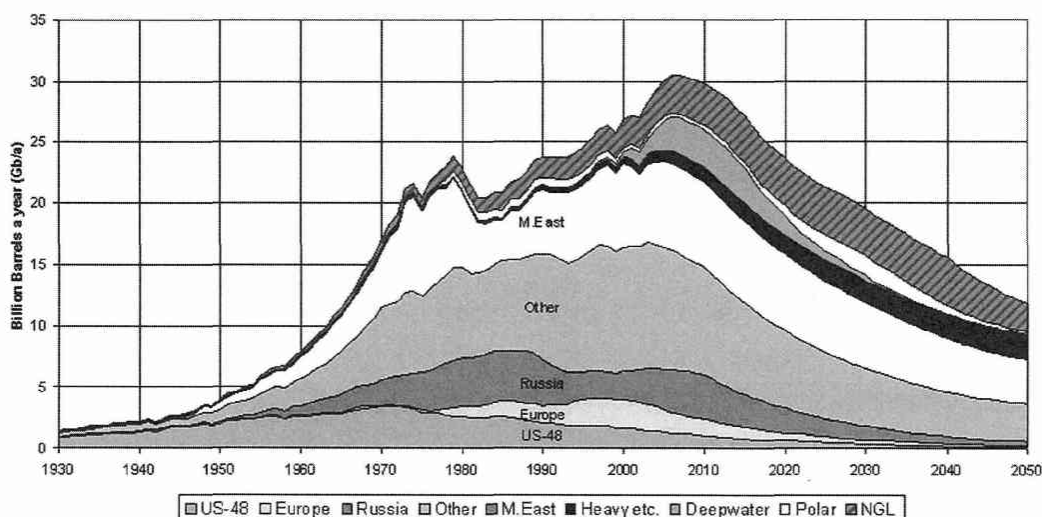
2000年代後半に石油生産量がピークを打つ

という予想は、キャンベルとラエレルという2人の地質学者による『安い石油がなくなる（The End of Cheap Oil）』（Campbell & Laherrere, 1998）という論文の中で述べられているもので、サイエンティフィック・アメリカン誌に掲載され、大いに話題を呼んだ。論文の図では、2004年がピークとなっている。

但し、2005年第1四半期の世界の石油生産量は、IEAの統計によれば日量8,384万バレル、対前年比2.4%増で、2005年に入っても増産基調は維持している。勿論、これをもってピークオイル説が否定されたと言うつもりはない。世界の石油需要は、その時の経済状況に大きな影響を受けるし、油価の動向によっても需要水準は変動する。四半期毎では季節的な要因も入る。ピークといってもそれは短期的な変動を含んだ、なだらか高原状を呈する生産動向であろう。よって近い将来、石油生産量が対前年を割ったとしても、それによって直ちにピークオイルが来たと言断することもない。歴史的な石油生産のピークを認定するには、何年かの生産量の動向を追跡して初めて可能と思われる。

最近のキャンベルは、ピークの時期を2010年までと修正して来ている（図1参照）。ピークオイルは徐々に「逃げ水」のように遠ざかっている印象である。彼らは、「今度こそ本当に狼はやって来る」と言いたげだが、「ただ、ちょっと遅れ気味で」と一言付け加える必要があるかも知れない。

勿論、石油資源は有限なのだし、いずれピ



(出所: <http://www.asponews.org/>)

図1 キャンベルらによる原油生産予測

ークオイルは必ず来る。楽観論に近いEIAは、ピークの時期を標準ケースで2030年代と言っている。問題は、石油の次を担い得る新しいエネルギーが、その頃までに市場の占有率や安定的な供給体制においてエネルギーの太宗となっているかであろう。勿論、それまでの時間が十分でないと、エネルギー市場での混乱は避けられない。

(2) 最近の油価の高騰の理由と資源枯渇の言説

2004年から5年にかけての油価の高騰は、石油の需給が十分バランスしているにもかかわらず進行している。石油輸出国機構（OPEC）も大方の石油関係者も、市場に供給は足りていると表明しているにもかかわらず高騰は止んでいない。一般には、昨年は以下のような理由が、石油市場のリスクを高め、プレミアムとして本来の適正な価格に上乘せされたと言われている。即ち、イラク戦争による中東の政治リスク、ロシアのユコス問題、ナイジェリアの治安悪化、ベネズエラの政状不安、米国メキシコ湾のハリケーン「アイパン」による生産設備被害、米国の州毎に異なるガソリン品質基準による製品の流通阻害、米国における恒常的な製品在庫不足などである。そして、これらを不安材料とした投機資金の流

入、即ち石油市場のカジノ化がより本質的な高騰の原因と思われる。投機資金は、価格の動きをいち早く読み解くのが勝負で、市場心理は勢い石油供給の懸念の生むリスクに着目する。そして、この懸念は市場関係者の間で増幅されがちである。投機資金が大量に流れ込むことにより、必然的に石油価格は乱高下する傾向が続く。この流れの中で、ピークオイルの議論も不安の材料と見なされるようになった。

3. キャンベルらによるピークオイル説

図1は、ASPO（The Association for the Study of Peak Oil and Gas）のニュースサイトに掲げられているもので、ここでは世界の石油生産のピークは2006年頃を想定している。この図で見ると、米国（アラスカ、ハワイを除く48州）や欧州の減退は現実の傾向を示していると言えるが、ロシアも、大水深域も、更には中東までもが2000年代後半には一斉に石油生産の減退期に入るとされている。

これを逐一検証して行く作業は大変だが、例えば、ロシアについて見ると、キャンベルは、既にソ連時代に経験した1987年の生産ピークがロシア全体の生産ピークに他ならず、2010年までに一時的に生産量が回復しても、

今後は大きな減退に見舞われるとしている。実際、90年代初めのソビエト連邦の崩壊前後から石油生産量は急落したのだが、10年の低迷を経て2000年からは力強い回復基調にある。

キャンベルの推定の根拠とは、ロシアの可採埋蔵量が660億バレル、今後追加発見される量が130億バレルというもので、これを前提に生産予測カーブを描いている。しかしこれは、USGSが2000年に推定している可採埋蔵量1,375億バレル、未発見埋蔵量774億バレルに比較して遥かに低い。多くの専門家は埋蔵量の試算プロセスの内容から米国地質調査所の推定を支持している。キャンベルの手法の問題点は、まず前提としている石油埋蔵量（Reserves）が、不当に低く評価されている点にある。次に、究極資源量（Resources、内容は後述）についても、現在の価格と現在の技術で回収可能な資源総量として、あくまで静的なものと定義しており、後述するように埋蔵量の評価というものが、「埋蔵量成長」を含む動的なものであることを無視している点である。

次に将来の生産量であるが、2003年にロシアの産業エネルギー省が発表した予測によれば、中庸ケースで2005年は840万バレル/日、2010年には890万バレル/日、2020年に900万バレル/日と徐々に横ばいになるとの見通しだが、これまでの生産実績はこれを上回って推移しており、将来的にも同省の予測を上回って推移すると見られている。これに対して、キャンベルは2010年は670万バレル/日、2020年は430万バレル/日に急落するという予測を立てている。これは、これまでの主要油田の生産履歴に照らして説得力のある予測とは言えない。当初設定した埋蔵量があまりに過少評価であり、当然の結果と言えよう。

中東も、2000年代半ばをピークに緩やかに減退してゆくと予想されている。しかし、サウジアラビアは、昨年、Qatif油田、Abu Safah油田の開発を行い生産能力を日量1,100万バレルまで引き上げたところである。更に、今年からはShaybah、Khurais等の4油田の開発工

事に着手し、アブドラ皇太子はブッシュ大統領に対して2008年までに生産能力を1,250万バレルまで嵩上げする計画を表明した。ヌアイミ大臣は、最終的には生産能力を1,500万バレルとする方針を述べている。イラクは、いずれ治安の安定化を待って、石油開発が軌道に乗るであろうし、イランも増産計画を有している。クウェートは、昨年240万バレル/日の生産能力を270万バレル/日まで上げたところであるが、将来的には400万バレル/日を目指している。こうして見ると、中東地域が近い将来減産に転ずるという見通しは、個々の国の投資実績や見通しからは懸け離れたものと言える。

こうして、国、地域を個別に検討してゆくと、近々ピークオイルが来るという説は、各国が取り組んでいる増産計画と大きく乖離した予測を根拠としていることが分かる。

勿論、継続的な投資努力や、技術の進歩がなければ、このカーブの様に、近いうちに石油生産は減退に向かう。しかし、各国政府、石油各社の取り組む姿勢がある限り、2006年にピークが来るという予測カーブは杞憂に終わると言える。

4. 資源悲観論の根拠とは

（1）新マルサス主義の系譜

地球の資源が有限であるという議論は、昔から繰り返しなされている。

1972年、ローマクラブの発表した報告書『成長の限界』では、「人口増加と経済成長が空前のレベルに達した現在（と言っても30年以上も前のことだが）、人類は地球の大きさの有限性とその上での人間の生存と活動の限界を考慮しなければならない」と警鐘を発し、資源の有限性を指摘した上で、「成長の継続」のみに拠らない代替策を求めている。

しかし、これすらも初めて現れた見解ではない。この種の議論の始祖は、イギリスの経済学者トーマス・ロバート・マルサス（1766

～1834年)が発表した『人口論』(1798年)まで遡る。これは、人口が等比級数的に増加するのに対して、食料は等差級数的にしか増加しえず、人類社会は将来的に破綻に瀕するというものである。

このことから、資源の有限性を強調するグループを「新マルサス主義者 (Neo-Marthusians)」と呼ぶことがある。

石油における新マルサス主義の議論では、石油の埋蔵量に関しては既に知られた固定的な量として把握可能であり、ハバート曲線に基いて過去の生産履歴から生産量のピーク時期を求めることが可能となると主張がなされている。

現在の地球は、マルサスの言うように破綻していない。この理由として、その後米国等の新大陸に渡った人が多かったなどと説明されることがあるが、当時の推論の前提であった農業技術がその後長足の進歩を遂げ、耕地整備、灌漑技術の進展、更に今世紀「緑の革命」が実現したことが大きいと思われる。問題の解決を「市場と技術」に求める態度は、ローマクラブのメンバーからも批判されているが、一方でこれを無視した議論は単なる暴論でしかない。技術革新の齎す変革力、その受け皿となる市場の力を軽視するべきではない。「市場と技術」が有効な範囲と、その限界を見極める作業が必要である。

昨今の資源悲観論は、流石に資源がすぐ無くなるとは言えないのが分かって、生産のピークが来ることによる需給逼迫という考えで世に警鐘を鳴らしているという点が多少目新しいと切り口と言えるであろう。

(2) ハバート (Hubbert) 曲線とは

悲観論者の殆どがその根拠としているハバート曲線というのは、シェル社の地質学者キング・ハバート (Marion King Hubbert, 1903-89) が1956年に発表したものである。地質学者としての彼は、シカゴ大学で7年間講師を勤めた後、シェル社に25年奉職し、退職後は

表1 ハバートの考えの要約

- 石油の生産量推移は、ロジスティック曲線(固体数に対する増加率の減少を直線と仮定したもの)という左右対称のベル型のカーブを呈する。
- 累計生産量の増加に伴い、増加率は直線的に減少し、増加率0で生産は停止する。
- 増産期と減産期の累計生産量は一致する。
- 初期の生産履歴が確定すれば、ピーク時期、ピーク生産量、究極資源量が決定できる。
- 石油生産量推移は、発見量推移を数年～数十年遅れでそのまま繰返す。

(出所: 井上, 2004)

米国地質調査所に在籍しつつ、時にスタンフォード大学で教鞭を採った。

ハバートの考えを要約すると表1の通りである。

(3) ハバートによる米国の石油生産予測

この考えに基づきハバートは、遅くとも1970年頃に米国本土48州 (Lower 48) の生産量がピークを示すと予言した。この議論は当初、殆ど注目を集めることはなかったが、実際に、米国本土の生産量が1970年にピークを示したことから俄かに注目を集めることとなった。

本来ならば、対象となる国、或いは堆積盆地の究極可採埋蔵量が与えられれば、当然ベルカーブを描くことが可能になるが、もしも途中までの生産履歴から、かなりの確度で生産量ピークが予測できるのであれば、社会的にも重要な情報を与える手法となりうる。但し、ハバート自身による予測も、米国の埋蔵量について1,500億～2,000億バレルとある程度幅のあるものとなっている。

(4) ハバート曲線理論の問題点

しかしこの考えについては、厳密な議論で組み立てられたものではなく、一種のカーブフィッティングに過ぎない(井上, 2004)という批判がある⁽⁹⁾。さらに、生産量の伸びに伴い、増加率が直線的に減少するという仮定は、探鉱

密度が高く、政治・経済面で安定しており需要と開発投資の伸びに関して隘路が生じない北米のような地域ではじめて有意であると思われる。世界の他の地域は、アクセス、インフラ、市場までの距離から、探鉱密度は米国よりも遥かに低く、契約条件や、政治的な影響から開発投資の推移は著しく不安定であり、生産量推移は地質ポテンシャル以外のさまざまな投資環境の変動を反映したものとなり、北米のような解析を直ちに行える訳ではない。

キャンベルらは、1998年の論文で世界の石油生産を予測する際に、生産履歴から埋蔵量を求めるのではなく、別途の手法で既存油田の残存埋蔵量と堆積盆地における未発見資源量を求め、地球の石油資源量を1.8兆バレルとした。そして、そこから生産ピークの時期を予想している。その意味では、代表的なピークオイル論者であるにも関わらず、既にハバート理論の「修正主義」となっている。

5. 資源楽観論

(1) 資源量をピラミッド・モデルで表現する

新マルサス主義などの悲観論と対照的な資源楽観論を唱えるグループを“Cornucopian”と言っている。「コルヌコピア」とは、ゼウスが幼少の砌、乳を飲んだとされる山羊の角のことで、若いゼウスが吸うと乳が止め処もなく湧き出たという伝説に基づき、資源を基本

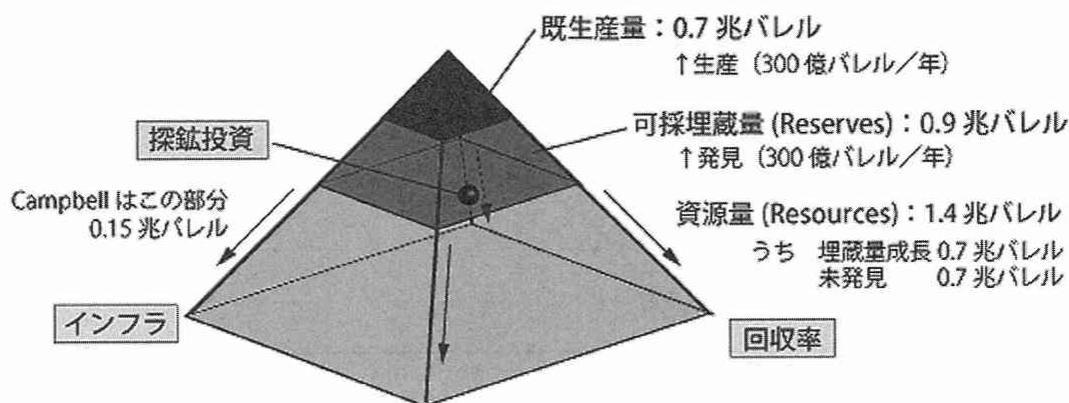
的に楽観的に捉えるグループに対して名付けられたものである。ギリシャ神話では「豊穡の角」と言っているが、ここでは取り敢えず「資源長期有望論」と意識して置く。

この元になる考えは、図2の資源ピラミッド・モデルで良く表現できる。ここでは資源量とは固定的なものではなく、埋蔵量成長、技術革新、インフラ整備、政策的誘導、その時の経済性などで上乗せされるという前提に立っている。なかでも、埋蔵量成長の役割は特に大きい。実務サイドや多くの研究機関は基本的にこの立場を採っていると言って良い。

図2の最上の部分は既生産量で、人類は既に0.7兆バレルの石油を消費した。特に頂部付近は高品位の鉱床であり、アクセスが良く、鉱床が浅部にあり、貯留岩性状が良好で採取の容易な、バクーやペンシルバニアのような歴史的に初期から産業化した部分である。下位に行くほど、鉱床としては品位は低下し、生産して行くには、より高い技術、より大きな投資が必要となるが、在来型の技術で対応可能である。

(2) 埋蔵量あるいは確認可採埋蔵量 (Reserves)

既生産から1つ下の層が、確認可採埋蔵量 (Reserves) として各石油企業において「在庫」扱いになっている量で、現在このカテゴリーから石油生産が行われている。この量が0.9兆バレルあるが一部により多い試算もある。石



(出所: McCabe, 1998に加筆)

図2 資源ピラミッドモデル

油は、毎年約300億バレルが生産され、石油企業による生産活動により既生産量と可採埋蔵量との境界面は徐々に下に押し下げられる。石油の可採年数（R/P）が30年から40年というのは、全可採埋蔵量を毎年の生産量で割った値であるが、後述するように、埋蔵量と資源量の境界も下がって行くので、可採年数自体の変動は急激ではない。

石油会社では、この埋蔵量カテゴリーから生産し出荷した原油を、次に述べる資源量から、新規埋蔵量の発見という形で「置き換え（Replacement）」、在庫の維持を図る。つまり、通常100%を超えていなくてはならない訳だが、年によって新規発見が少なく100%を大きく割り込むこともある。この「置き換え値」がある意味で、石油会社の成績表である。

学生時代、「石油はあと30年」と聞いていたが、30年経てみたら、何とあと40年と言っている、増えているじゃないか、一体どうなっているのか、とはよく受ける質問である。これは石油の可採埋蔵量をその年の生産量で割った年数が30年～40年なのを、究極可採埋蔵量から割った年数と取り違えたものであるが、可採年数というのは「在庫」が維持される期間ですよ、と説明すると疑問は氷解する。

但しこれは、現在の知識、知見で回収可能とみられるものに限定された量であり、油田開発の進展による可採埋蔵量の積み上げ、技術革新によるコストダウン、インフラ整備の

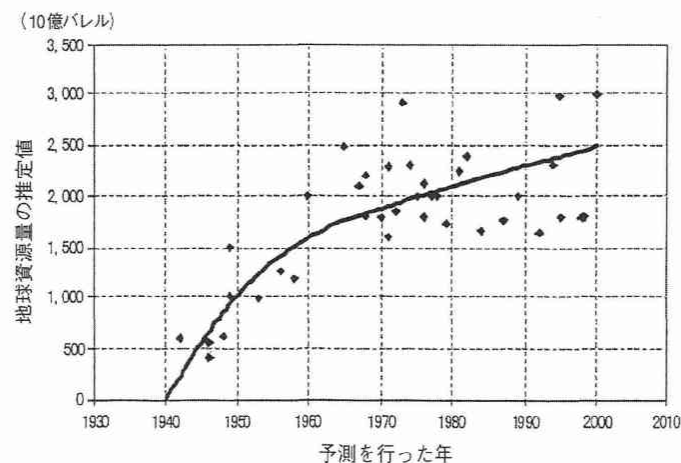
効果等によるアップサイドの影響は除外されている。これらは広義の埋蔵量成長といわれるが、往々にしてこれが等閑視されたまま議論されることがある。

（３）資源量あるいは究極可採埋蔵量（Resources）

更に下位が資源量（Resources）で、今後発見されると期待される量を示している（厳密には、資源量は既生産量と確認可採埋蔵量までを含む）。これは、探鉱活動と周辺環境の変化、即ち4つの稜線で示す各要素（探鉱投資、インフラ整備、価格/財務条件の改善、技術革新等による回収率の増大）により、可採埋蔵量へと転化して行くもので、可採埋蔵量と資源量の境界は徐々に下に押し下げられて行く。この量は、新規発見と既往油田における「埋蔵量成長」で、現在は生産量にほぼ等しく、年間約300億バレルである。同時に、資源量の裾野の部分もより下位へと拡大して行く。これから発見されるであろう未発見埋蔵量は0.7兆バレル、埋蔵量成長分が0.7兆バレルと推定されている。即ち、資源量という豊富な予備軍が控えており、埋蔵量は生産して減量する一方、資源量から供給される。

（５）実際の究極資源量評価は増加傾向

図3は、1942年以來の世界の究極可採資源量評価の変遷をプロットしたものである。



（出所：CGES, 2002）

図3 世界の資源量評価値の推移

2000年時点で最も高い評価を与えたのが米国地質調査所（USGS）の3兆バレル、直近の悲観的な評価として、資源悲観論に立つキャンベルら（1998）が、2000年代後半にもピークオイルが来ることの根拠にした1.8兆バレルという埋蔵量推定がある。

しかし、全体の傾向は増加基調にあり、実際の産業の動向を反映したものと言える。キャンベルら（1998）の推定した1.8兆バレルという究極資源量の評価は、近年では最も低い値であり、全体の傾向に比べると非常に悲観的なものと言える（CGES, 2001）。

6. 埋蔵量 3 兆バレルでの生産予測（EIA）

図4は、米国エネルギー省エネルギー情報局（EIA, Energy Information Administration）のJay Hakesが、2000年4月のAAPGで行った講演“Long Term World Oil Supply”において示した将来の石油の生産予測である。この前提となる究極可採資源量は、同年米国地質調査所（USGS）が発表した3兆バレルである。

これはあくまで毎年2%で需要が伸び、且つ円滑な供給がなされた場合を想定した生産予測で、世界の石油可採年数（R/P）が10年を

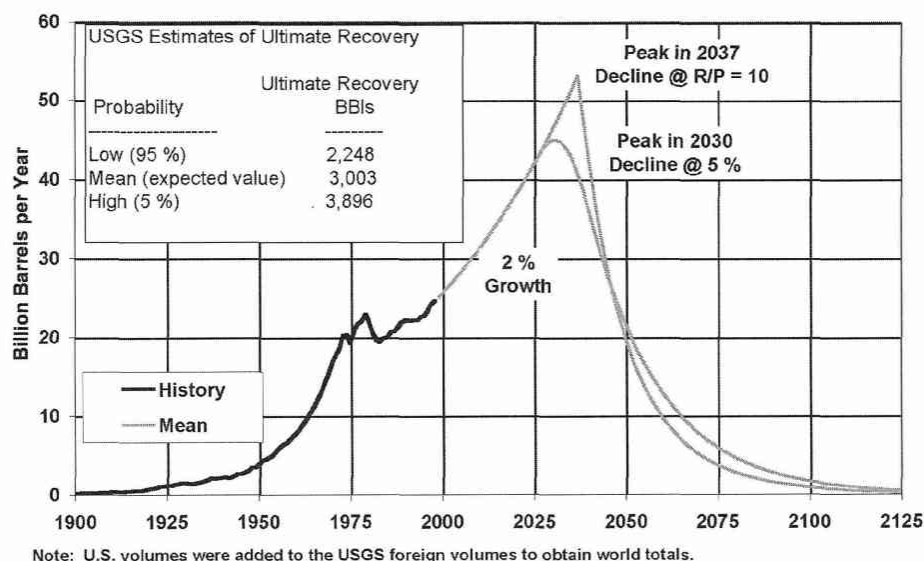
切る2037年で、世界的な危機意識が高まり、R/P=10年を維持するために、消費量の制限が行われ、需要の急速な減退を見せるというシナリオである。今ひとつの円滑化されたカーブは、ほぼ類似のシナリオながら、2030年にピークを打ち、それ以降は年率5%で減退するというものである。

世界の石油資源量を3兆バレルとした米国地質調査所（USGS）の評価は、いわゆる資源楽観論の代表的なもので、IEA, EIAはじめ多くの公的機関が採用している見解であり、各国政府もこれをほぼ前提とした政策を立案しているものと解されている。

しかし、このような楽観論をもってしても、ピークオイルは高々30年程度延期されるに過ぎない。そして、この30年は、人類にとって持続的なエネルギー源を確保するための猶予期間と認識しておくべきであろう。

7. 石油のあるうちに石油投資と新エネルギー開発の推進を

人類は火を使用するようになって以来、再生可能なエネルギー資源を細々と使い続けて生きて来た。つまり、その消費するエネルギ



（出所：EIA, 2003）

図4 3兆バレルを前提とした生産予測

一の量は、年々降り注ぐ太陽エネルギーの範囲内に限定されていた訳である。ところが、18世紀後半の産業革命以来、まずは石炭から化石燃料を使い始め、19世紀後半からは更に便利な石油も加わった。そして20世紀半ばに中東で豊富な石油の埋蔵量が見つかる、世界的に石油の大量消費の時代に入った。エネルギー的に見ると、その年の太陽エネルギーから人類が使える総量を遥かに超えた、長期間の太陽エネルギーが蓄積された化石燃料というものを一時に使用できる状況が生まれた訳で、まるで月々の収入の範囲内でつつましく生活を送って来たサラリーマンが、ある時宝くじに当たって急に派手な生活を始めたようなものである。

宝くじに当たればさぞラッキーであろう。そして21世紀の私たちも、古代や中世の人々よりも遥かに幸福な生活を送っているのだという事実を認識せねばなるまい。この分不相応な幸福は、エネルギー収支から言いつつまでも続けられる筈がない。化石燃料は量に限界があり、再生不可能な資源である。いつまでも浮かれていないで、そろそろ自分の貯金通帳とにらめっこする時期が来ているようだ（この道徳的なご宣託については、ピークオイル論者の意見は正しい）。

当面着手すべきは、燃料の天然ガス転換を進め、特に天然ガス発電を推進すること、省エネ技術を普及させ、エネルギー消費の無駄を省き、将来的な石油需要の伸びを抑えることであろう。特に後者の指標である「原油原単位」（＝原油消費量/実質国内総生産）は、1990年の米国を100としたもので、当時既に日本は42、2003年時点で米国が81と改善しているが、日本は更に改善が進み35となった。中国に至っては、2003年時点で174と石油ガブ飲み経済である。日本発の省エネ技術が世界的に普及する日が期待される。

太陽電池、風力発電などは、その時受け取る太陽エネルギーの範囲の量なのだから、化石燃料の持つ効率には遥かに及ばない。今後

は、原子力を含めた新規のエネルギー開発に努力を傾注する必要がある。石油はすぐにはなくなる。時間が十分にあるとは言えないが、石油が安定的に消費できる間に、今まで以上に石油の探鉱・開発への投資と技術開発の努力を傾注するとともに、省エネルギーの推進と新エネルギーの技術開発へ向けて、更なる努力を振り向ける必要がある。

参考文献

- (1) EIA (2004), International Energy Outlook 2004, 244p.
Hubbert, King M. (1956): "Nuclear energy and the fossil fuels", Shell Development Company Publication 95, 40 p.
- (2) IEA (2004), World Energy Outlook 2004.
- (3) USGS (2000): "U.S. Geological Survey World Petroleum assessment 2000-Description and Results" USGS Digital Data Series DDS-60, Multi Disc Set Version 1.0 2000.
- (4) BP (2004), BP Statistical Review of World Energy 2004
- (5) Campbell & Laherrere (1998): "The End of Cheap Oil", Scientific American, March 1998, p.78-83.
- (6) Campbell (2005): <http://www.asponews.org/>
- (7) CGES (2001): "Global Oil Report", CGES v.12, n.1, Jan.-Feb.2001.
- (8) EIA (2003), Long Term World Oil Supply, AAPG Presentation.
- (9) 井上正澄 (2004), 「石油資源の将来」, 石油技術協会誌, 2004, v.6
- (10) McCabe, Peter J. (1998): "Energy Resources - Cornucopia or Empty Barrel?", AAPG Bull. v. 82, n.11, p.2110-2134.

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—

山 田 英 司 (財)エネルギー総合工学研究所
主席研究員兼企画部長



1. 「冬の時代」から回復基調へ —その時代背景

(1) 1980—90年代：「冬の時代」

米国の原子力産業は、1979年のスリー・マイル・アイランド (TMI) 原子力発電所事故以降、「冬の時代」に入った。既設あるいは建設中プラントは、安全確保の観点から設備変更が必要となり、これが建設期間の長期化、ひいては建設コストの高騰を招来し、また、反原子力の社会的な要因も加わり、発電用原子力プラントの新規発注は途絶え、既設発電所の稼働状況も低迷した。米国において、1980年代から90年代にかけては、事実上、原子力モラトリアム（執行猶予）の状況にあったと言える。

上記のような時代環境の下、原子力発電事業者である電力会社は、コスト低減努力、投

資の凍結及び見直しを実施した。90年代半ば以降、米国において進展した電力自由化は、競争原理の下、電力会社に電気料金の低減を要請することとなり、建設期間及びコストに不透明性が伴う電源とみなされた原子力発電は、投資対象とはなり難い状況にあった。

(2) 1990年代半ば以降：回復基調

90年代半ば以降、米国の原子力発電所の稼働状況は回復し、近年では、90%程度の高設備利用率と低発電コストを達成している（表1参照）。発電電力量は1980年の約3倍となり、また、1990年に比べると、100万kW級原子炉23基分に相当する発電電力量が増加している（図1参照）現在、原子力は米国の総発電電力量の約20%を供給し、石炭に次ぐ第2位のシェアとなっている。

表1 米国における原子力発電所の稼働状況の推移

年	1990	1995	2000	2003	2004
設備利用率 (%)	66.0	77.4	88.1	87.9	90.5
発電コスト (セント/kWh)	3.08	2.42	1.94	1.72	1.69

(出所：設備利用率は米国原子力協会 (NEI)、発電コストは連邦電力規制委員会 (FERC/EUC)、但し2004年の数値はNEI)

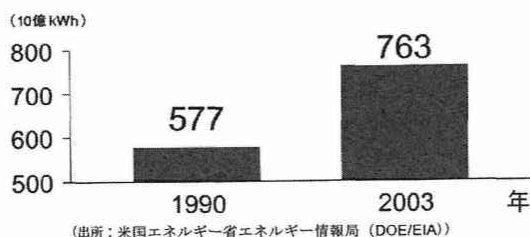


図1 原子力発電による発電電力量の推移

表2 米国原子力発電所好稼働への寄与要因

事 項	米国の状況
運転サイクルの延長	従来は12カ月程度であったが、最近では殆どの発電所が18～24カ月サイクルに移行
定期検査期間の短縮	1990年頃 → 現在 100日程度 40日程度
定格出力増強	米国原子力規制委員会（NRC）承認済 105件（2005年4月現在）
運転認可期間の延長（40年→60年）	NRC認可済30基，審査中18基（2005年4月現在）

（出所：米国原子力協会（NEI），（社）海外電力調査会）

米国の原子力発電所の設備利用率向上等順調な稼働に寄与している要因は表2に示すとおりである。これらの要因の背景には、米国の原子力安全規制に係る変化がある。例えば、非常用ディーゼル発電機の点検など停止時に実施されていたものが運転中の検査（オンライン・メンテナンス）に移行したことが、定期検査期間短縮の一要因となっている。これは、電気事業者が、米国原子力規制委員会（NRC）が定める規則に従ってリスク評価を行い、影響が軽微と認められる場合には運転中検査に移行できるよう改善したものである。

このような良好な運転に加え、原子力発電所の運転期間の延長（40年→60年）が認可されるようになったことから、1998年以降、TMI1号機を皮切りに原子力発電所の売買が活発化しており、2003年末現在で16基が売却されている。筆者は、1998年から3年間、米国において電力・原子力に係る調査業務に従事し、1998年3月にカリバートクリフ原子力発電所の運転認可期間の延長をNRCに申請している電気事業者の責任者にインタビューを行った。その際、同氏は、これまで10年余に亘り本件に関しNRCに説明してきているが、申請認可までに更に10年は要するとの予測を述べていたが、実際には翌年に認可がなされた。これは、NRCが進めてきた確率論的リスク評価の適用など規制環境の変化を示すものである。

また、使用済燃料処分については、政府が引取義務を有することが定められ、ネバダ州

のユッカマウンテン処分場計画が進められているところである。同計画については紆余曲折があるが、電気事業者の観点からは、安全規制や使用済燃料処分に係る不透明性が解消してきたことで、原子力発電所は良好な電力資産であると評価されるようになったと考えられる。

（3）回復に伴う原子力発電業界構造の変化

かかる環境好転の下、原子力発電所を電源として積極的に活用する事業者による寡占化が進行している。例えば、2000年に、原子力発電に積極的であったユニコム社（旧コモンスウェルス・エジソン社、本拠地シカゴ）とPECOエネジー社（旧フィラデルフィア電力、本拠地フィラデルフィア）が合併し、エクセロン社となり、原子力発電を電源の中核とする発電ビジネスを推進している。現在、計17基、約1,840万kW（米国の原子力発電容量の約18%）と米国最大手の原子力発電電気事業者となっている。さらに同社は、現在、パブリック・サービス&ガス社（PSEG）との合併を計画しており、実現する場合には計20基、約2,180万kW（同上約21%）を保有することとなる。また、南部の大手電気事業者であるエンタジー社も1998年以降、5基の原子炉を買い取り、計9基約800万kW（同上約8%）の原子力発電所を有している。

かつて、米国の原子力発電は、小規模の電気事業者が少数基の原子炉を所有しており、

運転ノウハウの共有が困難とも評されたが、現在では、これら中小規模の電気事業者も連携し、運転保守人材やノウハウの共有を進めている。例えば、STARSは、ウェスティング・ハウス（WH）社製の原子炉を有する電気事業者5社により設立された共同運用組織で、現在はWH以外の原子炉を有する事業者も参加し、計11基、1,360万kWの原子力発電所を共同運用している。一方、中西部の原子力発電所所有会社により構成されるNMCは8基、約450万kWを共同運用しているが、一部の炉を大手の原子力発電事業者へ売却する動きもある。2003年現在、16社で米国の原子力発電容量の約8割を所有・運用しており、寡占化が進行している。

電気事業者は、電力自由化環境の下、コスト削減の観点から、従業員数の抑制を進め、また、発電所の運転保守技能の内製化を図っている。従来は、電気事業者は、メーカーの勧告を受け入れていたが、現在では参考にはするが、自らの運転保守経験を基に判断を行うようになっており、この面でも電気事業者－メーカーの関係に変化が見られる。

2. 原子力「冬の時代」と原子力産業

（1）米国原子炉メーカーの経営状況の推移

商業レベルの原子力発電に最初に供されたのはガス冷却炉であったが、その後、世界の原子力発電の主流となったのは、米国が開発した軽水炉である。軽水炉には、ゼネラル・エレクトリック（GE）社が製造する沸騰水型炉（BWR）とWH社をはじめ3社が製造する加圧水型炉（PWR）の2タイプがある。

なお、わが国では、東芝・日立がGEからの技術導入によりBWRを製造し、東京、中部、東北、中国、北陸等の電気事業者が発電に利用する一方、三菱重工業はWHから技術導入してPWRを製造し、関西、九州、四国、北海道等の事業者が発電に利用している。

1960年代後半以降、米国内外で軽水炉の建

設・運転が活発化し、70年代には、GE、WH各社とも米国内で平均2基、米国外で1基の原子炉が運転を開始した。1979年のTMI原子力発電事故以降、新規受注が途絶えたものの、80年代には既受注分により建設が続いたが、90年代以降は建設が中断している。

新規受注が途絶えた1980年代以降の「冬の時代」における両社の経営状況を見ると、明暗が分かれる。GEは、名経営者とされるジャック・ウェルチ会長の「選択と集中」の経営方針の下、1980年代前半から、原子炉製造に代わり、燃料供給とサービス事業を強化し、90年代には米国の好景気を反映し、同社の原子力部門も含む電力部門の売上は10年間で3倍増と好調であった。

一方、WHは、80年代には金融やメディアへの事業展開を図り、90年代には家電部門は収益性が低いと切り捨てたが、原子力ビジネスは事業展開上重要として存続させ、CBS（米国3大テレビネットワークの1つ）とWH Electric Company（電力部門）を並立させて事業運営がなされた。しかしながら、電力部門の売上は低迷し、97年には電力関連事業の売却を決定し、タービン部門は独シーメンス社に、また、原子力部門は英国BNFL社に、それぞれ売却された。（図2、表3参照）

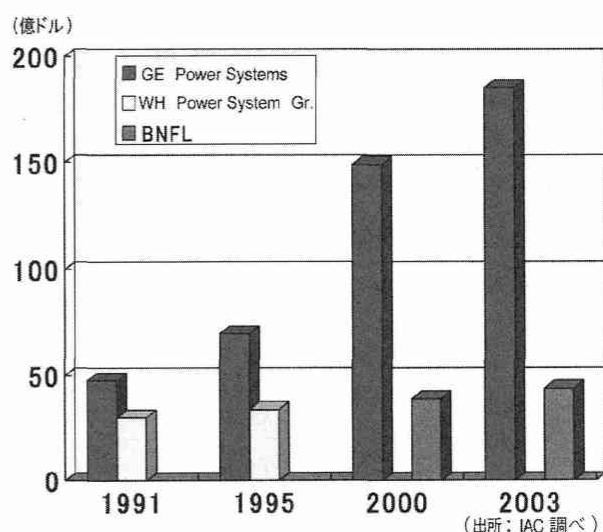


図2 GE、WHの電力部門売上高の推移

表3 GE, WHの経営状況の推移

時 期	G E	W H
80年代	ウェルチ会長の選択と集中の経営の下、サービス事業を強化	金融及びメディアへの事業展開 中国への原子力プラント輸出差止
90年代	米国景気を反映して好調	経営不振で電力関連事業を売却
2000年以降	BWR燃料製造会社を世界的規模で再編 次期炉としてESBWRを推進	BNFL社が、WH、ABB、CEを取得し、 燃料事業に加え原子炉事業を展開 AP1000を推進（NRCの設計認証を取得済）

(2) 「冬の時代」にメーカーが維持したもの、
失ったもの

米国における原子力「冬の時代」は、1980年代以降既に20数年に及んでいる。現在では原子力発電は回復基調にあり、その先には新規発注の胎動も見えるような状況に至っている。筆者は、本年3月、ワシントンにおいて、原子炉メーカー及び電気事業者の元幹部経営者に、「冬の時代」が原子力産業の技術開発力及び原子炉製造能力に如何なるインパクトを与えたか、新規発注が実際になされた場合、米国原子炉メーカーは如何に対応するか等についてインタビューを行った。以下にポイントを記す（表4参照）。

① 原子炉メーカーの業容

[サービス業への重点シフト]

1980年代以降の原子炉の新規発注が途絶えた時期に、原子炉メーカー各社は、原子力機器製造業から、原子力関連サービス業へと事業展開を行い、(a) 燃料の製造及び供給、(b) プラント保守サービス、(c) NRC規制認可取得（定格出力増強、運転認可期間延長等）に係る電力会社へのサポート及びコンサルティングで事業収入の確保に努めた。1980年代は、受注済みのプラントの建設工事もあり、原子

力事業は収益のあがる部門であった。

また、この時期は、電気事業者もプラント運転保守能力を内製化しようとしていた時期でもある。メーカーは、電気事業者が実施する入札に参加し、落札の場合は複数年契約を締結し、電気事業者との協調の下、コスト削減努力を重ねた。メーカーは各発電所サイトにエンジニアを配置し、迅速な連絡調整に努めた。

[失った機器製造能力、総合管理ノウハウ]

「冬の時代」の苦しい時期にも、中核となる原子炉設計者、原子炉設計評価分析の技術者、規制対応の技術者の人材は維持するよう努める一方、原子力機器製造能力、プラント建設に係る総合管理ノウハウ、設計を検証する試験施設は失った。

このうち、プラント総合管理ノウハウは、ベクテル社、ストーン・アンド・ウェブスター（S&W）社などの建設エンジニアリング会社と組むことで対応可能と考えている。また、設計評価には試験が必要であり、米国エネルギー省（DOE）及びメーカーが資金拠出したオレゴン大学の研究施設を活用した。DOEから大学に金が流れ、研究施設が充実されたことは評価される。

表4 原子力「冬の時代」の米国原子炉メーカーへの影響

維持したもの	失ったもの
○中核となる原子炉設計者	○原子力機器製造能力
○原子炉設計評価分析の技術者	○プラント建設に係る総合管理ノウハウ
○規制対応の技術者	○設計を検証する試験施設

② 米国原子炉市場が復活した場合の対応

喪失した原子力機器製造能力について、まず、原子炉機器製造会社が米国内に出現することを期待したいが、そうでない場合は、国外メーカーから調達することになる。候補は、日本、韓国、フランスなどのメーカーであろう。PWRの場合は競争があり、WHは主契約者としての受注獲得に努めることとなる。

③ 今後の米国市場における原子炉

当面、GEはESBWR、WHはAP1000が主力候補となる。今後の開発の方向性は、単純化であり、それが、安全と経済性の向上につながる。天然ガス火力発電と競合できることが炉型選択の重要な基準である。

米国では、電力自由化環境の下、コストがかかる送電線の新規建設は容易でない。大規模発電容量の原子炉を採用する場合には、既設の送電容量を考慮することが必要である。

(3) 「冬の時代」が原子力分野の人材に与えた影響

2004年5月、米国原子力協会(NEI)は、原子力の各セクターにおける年代別人材構成について調査を行っており、遠くない将来引退する人材の代わりを如何に補充していくかが重要な課題であると指摘している。

セクター間で相違はあるが、概して言うと、1970～80年代の大量雇用、その後の「冬の時代」

により、人員構成が高齢化しており、30才代以下の人材の層が手薄である(図3参照)。

セクター別では、メーカーや大学では、今後、5年間で大量の引退が見込まれるとしている。米国においては、大学が原子力研究開発の大きな部分を占めており、大学の研究施設や研究事業には、DOEが積極的に資金供与を行っている。

人材は、エンジニア、技能者、プラント運転員、放射線管理者に大別される。このうち、確保が困難とされる熟練溶接工確保に向けて、政府(労働省)と産業(電気事業者)が共同で資金を拠出して、オハイオ州の地域大学(コミュニティ・カレッジ)に養成コースを設置すべく準備中である(来年スタート予定)。また、組合が、溶接工のスキルアップのための研修コースを設けている。

3. 米国における新規炉建設に向けた動き

(1) 米国の原子力技術開発予算

米国は、エネルギーの大消費国であるが、石油等化石エネルギーの一大資源国でもあり、エネルギー自給率約80%と概ね自給状態にある。かかる環境の下、米国には、わが国で言うような「総合的エネルギー政策」は存在せず、米国のエネルギー政策の中核は石油政策と核不拡散政策であり、いずれも、米国の安全保障に直結する案件である。核不拡散は国防問題の核心で

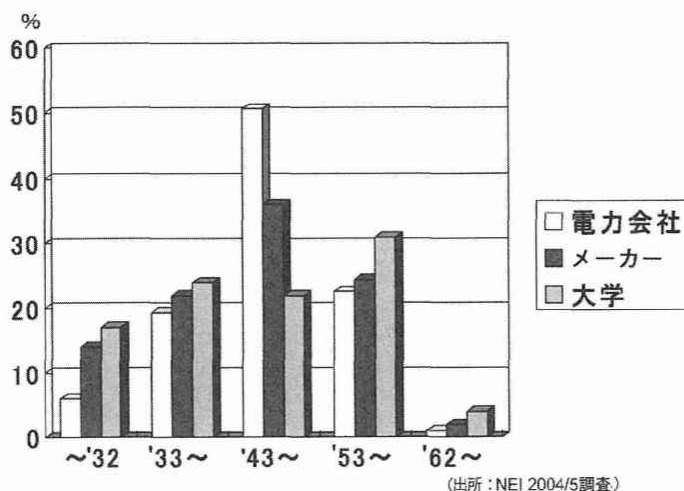


図3 米国原子力セクター別の年代別人材構成

あることは言うまでもなく、一方、石油は、国民生活に不可欠な自動車用の代替不能な燃料である。近年、原油の国内生産は1970年をピークに低減しており、それに伴い、原油輸入が増加し、ペルシャ湾岸諸国からの輸入割合が20%程度にも達している。

DOEは、核兵器向け核燃料物質を生産・管理する機能を有し、併せて、原子力の平和利用に関しても権限を有し、原子力発電政策を総括し推進する立場にある。1990年代、同省は使用済燃料処分場の立地推進やロシアの解体核の処分に傾注し、米国の原子力発電の将来も不透明となったため、1998年には同省の

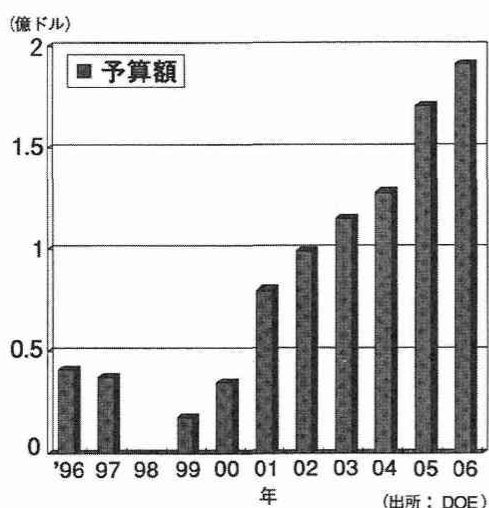


図4 原子力技術開発予算推移

表5 2006年度予算政府案の内訳

事 項	米国政府予算案 (2006) (単位: 億ドル, () 内は億円※)
原子力発電2010	0.56 (62)
第4世代炉開発	0.45 (50)
核燃料サイクル	0.70 (77)
原子力水素	0.20 (22)
計	約1.9億ドル (約210億円)

(出所: DOE資料) ※ 1ドル=110円で換算

表6 NRCの先行許認可プロセス

早期サイト承認 (ESP)	炉型決定前の立地審査
標準設計認証 (DC)	立地サイト決定前の標準設計の審査
建設・運転一括許認可 (COL)	建設許可と運転認可を一括して実施 (わが国では段階的な安全審査を実施)

原子力技術開発予算は皆無となった。その後、1999年度導入の原子力研究開発イニシアティブ (NERI) をはじめ各種のイニシアティブ (新政策) を立上げ、2006年度予算政府案では、約1.9億ドル (約210億円) のレベルまで回復している (図4, 表5 参照)

(2) 新規炉建設に向けたDOEの政策

ブッシュ政権は、原子力発電を推進する方針の下、2001年10月に官民合同の委員会により “Nuclear Power 2010” と題する報告書を発表している。

同報告書に基づき、2002年2月から、2010年代初頭に少なくとも1基の新型軽水炉の建設及び運転開始を目指した「原子力発電2010プログラム」が推進されており、「第3プラス世代」の軽水炉開発を目指している。同プログラムでは、所要コストの2分の1をDOEが負担する (上記予算案のうち、0.56億ドル (約60億円) を充当) との前提で、表6のNRC先行許認可プロセスの実証を実施することとしている。これにより、原子力発電新規建設に係る財政上の不確実性低減手法の開発も目指すこととしている。

① 米国における原子力発電推進上の課題

本年3月、DOEにて入手した資料によると、以下の4つを課題と指摘している。

(a) 恒久的な使用済燃料処分方策の確立

1982年以来、ユッカマウンテン使用済燃料処分場計画が進められており、2002年、連邦議会において同地が処分場サイトとして選定されている。政府は、2010年の供用開始を目指しているが、地元の反対、科学技術的な議

論もあり、計画通り進捗するか予断を許さない状況にある。

(b) プライス・アンダーソン法（米国原子力損害賠償法）による原子力事故損害賠償制度の期限切れ

2003年12月31日以降に建設認可された新規プラントについては、同法による原子力事故に係る損害賠償が適用されない。

(c) 原子力規制に係る不確実性

NRCの先行許認可プロセスを一括した「ワン・ステップ・ライセンス」制度は、検証されておらず、追加規制の有無について確証が得られていない。

(d) 財政上の不確実性

ウォール街（米国証券業界）の財務担当者や電力会社は、実際に建設・運転した場合、どの程度のコスト、また、どの程度の年数を要するのか確証が得られていない。

筆者は、2000年に、ドミニオン社（旧バージニア電力）の15万kW×4基、計60万kWの天然ガス発電プラントを視察した。同社の冬季のピーク対応電源であったが、驚いたのは、同発電所は、意思決定から建設までたったの2年であったということである。立地地点は、同社の基幹送電線と、天然ガスパイプラインの交点の近傍であり、燃料や送電の新規投資は不要、また、燃料タンクもないことからサイト面積も小さく農場を購入したということで土地所有者も1名、各プラントは、2つのパートが工場で作製され現地で組立て、プラントコントロールもパソコンレベルというものであった。ピーク対応電源であることから、特に簡便ではあったろうが、一応60万kWの電源である。最近原油価格高騰に連動して燃料費が上昇しているというが、原子力発電が、コスト面で、また、時間的な機動性の面で、天然ガス発電プラントと競争していくのは並大抵ではないというのが実感であった。

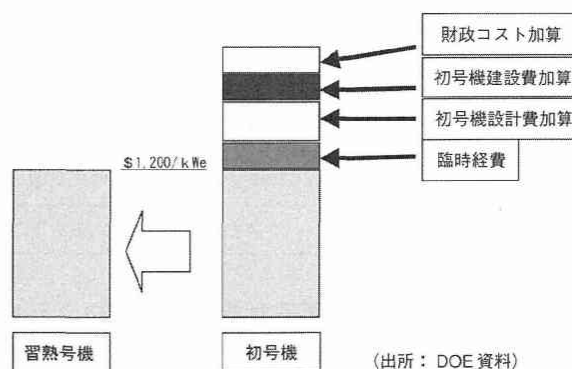


図5 原子力発電のコスト試算（資本費の比較）

② コストに係る課題

電力自由化環境の下、発注者たる電気事業者の最大の関心はコストである。原子力発電に係るコストは、燃料費割合が小さいことから安定的であることは火力発電に勝るが、(a) 他の電源に比し安価、少なくとも遜色がないこと、また、(b) 将来予測について不確実性が低いことが要請される。

加えて、初号機は、一般にコストが嵩むのが通例である。DOEの試算（図5参照）によると、単位容量当たりの資本費は、初号機は習熟機に比して5割増しと見込まれている。また、回復初期段階のプラントは、電力自由化環境では所要の技術開発費を電気料金に転嫁できないこと、規制や立地に係る政府（連邦及び州）の動向に不確実性がつきまとうこと等から高目になるものと見込まれている。

③ DOE担当者の見解

筆者は、本年3月、DOEの原子力政策担当者にインタビューを行ったので、以下、そのポイントを記す。

(a) 米国の原子力開発技術力

原子炉メーカーは、規制対応サービスや、海外での原子炉建設経験を通じて、プラント建設管理ノウハウを蓄積している。米国内に製造能力はないが、世界的に見れば製造能力は十分にあり、機器調達について悲観していない。

DOEの原子力研究は国立研究所で実施してい

表7 3つの早期サイト承認（ESP）プロジェクト

電気事業者	ESP対象サイト	サイトの状況
ドミニオン	ノースアナ	PWR 2 基が運転中
エンタジー	グランド・ガルフ	BWR 1 基が運転中
エクセロン	クリントン	BWR 1 基が運転中

表8 「原子力発電2010プログラム」に参画するコンソーシアムの概要

グループ	電気事業者	メーカー	炉型	検討対象サイト
NuStart Gr.	エクセロン、エンタジー サザン等9社	GE, WH	ESBWR (DC申請予定) AP1000 (DC取得済)	—
ドミニオンGr.	ドミニオン	GE, ベクテル等	ESBWR (同上) 150万kW	ノースアナ (既設) (バージニア州)
TVA Gr.	TVA	GE, ベクテル等	ABWR (DC取得済)	—

(出所：DOE資料)

るが、研究所の運営を民間委託しており、これにより民間に原子力研究ノウハウが移転できる。(本年2月、原子力研究が集約されるアイダホ研究所の運営をバットル研究所、電力研究所(EPRI)等に委託する契約を締結した由。)また、大学への研究事業資金は安定的に拠出している。

(b) DOE-産業の協調について

民間事業には資金拠出をしないというのがDOEの方針ではないかという当方の質問に対し、同プログラムは、民間とのコストシェアであり、しかも初期の規制対応に限定していること、長期に亘るR&Dプロジェクトであるとの説明等から議会の承認が得られたとの回答であった。

(3) 新規炉建設に向けた民間の動き

① 2000年代初頭、エクセロン社により、南アフリカで開発中の高温ガス炉(ペブル・ベッド型ガス冷却炉：PBMR)導入の検討がなされた。同炉は、炉心溶融が起こらないという固有の安全性を有する一方、大型化が困難でコスト面で難があり、導入には至っていない。

② 表7の3つのサイトについて、NRCの早期サイト承認(ESP)が審査されており、2006年の承認が期待されている。

③ 上記「原子力発電2010プログラム」の新規プラント認可プロジェクトには、表8の3つのコンソーシアムが参画している。DOE資料によると、上記のうち、ドミニオンGr.とNuStart Gr.の2つのプロジェクトに関し2014年運転開始が可能(New plant possible by 2014)と記載があり、DOE自身、新規建設を期待する一方、楽観視していない状況が伺われる。

4. 世界の原子力発電の動向

(1) 各地域の動向(図6参照)

① 欧米

2004年末現在、世界で434基の原子炉が運転中である。大きなシェアを占める米国(約27%、発電容量ベース)では、前述のように回復基調にあるものの、1979年のTMI事故以降新規発注がない。

一方、欧州(EU及びスイス、約37%)では、1986年の旧ソ連チェルノブイル事故以降、新規着工は3基と大幅にペースダウンし、現在、原子力発電推進国(フランス、英国、スイス等)と脱原子力を政策とする国(ドイツ、スウェーデン、ベルギー)が拮抗しているが、2004年には、フランス及びフィンランドで、それぞれ欧州加圧水型原子炉(EPR)の建設が決定されている。

日 本 (原子力比率 約27%) 基 数 運転中52基+建設中5基 メーカー BWR:東芝,日立, PWR:三菱重工 炉 型 ABWR (3基運転中+1基建設中) APWR (2基準備工事中)	米 国 (原子力比率 約20%) 基 数 運転中103基+建設中0基 メーカー BWR:GE, PWR:WH+CE→BNFL傘下 PWR:B&W→フラマトム傘下 炉 型 AP1000, ESBWR, ABWR等 2010年頃の新規炉建設を推進中 カナダ (原子力比率 13%) 基 数 運転中17基+建設中0基 炉 型 CANDU
アジア [東アジア+南アジア, 日本除く] (原子力比率:中国2%, 韓国37%, 台湾19%, インド3%) 基 数 運転中50基+建設中14基 メーカー 韓国:PWR:斗山重工 (Doosan) 中国:外国企業/自国企業の混在 台湾:米国企業が受注 インド:自国企業で建設	欧 州 [EU+スイス] (EU原子力比率 約34%) 基 数 運転中137基+建設中0基 メーカー PWR:フラマトム+シーメンス, KWU (合併)→フラマトムANP 炉 型 EPR→2基の建設計画

(出所:日本原子力産業会議「世界の原子力発電開発の動向」2004年次報告等を基に作成。
 原子力比率は、2002年の発電量に占める割合でIEA資料による。)

図6 世界の原子力開発動向

②日本

わが国(約12%)においても、2000年頃までは年間1～2基のペースで運転開始されたが2000～10年の間には運転開始は5基と、2000(平成12)年度以降の電力自由化環境の下、原子力発電の着工は大幅に減少する見込みである。リプレイス需要が見込まれる2030年頃以降までは多くの新規発注は見込めない(図7参照)、いわゆる「冬の時代」を迎えており、将来のリプレイス需要に向けて、原子力発電システムに係る技術開発力及び製造能力を如何に維持していくかが重要な課題となっている。

「経済産業省長期エネルギー需給見通し中間とりまとめ」(2004年10月)において、原子力ケースに係る低成長ケース(図中「10～30低」)は2030年に約5,600万kWを、また、高成長ケー

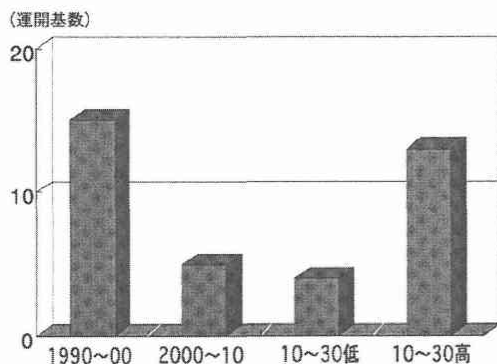
ス(同「10～30高」)は2030年に約6,800万kWを見込んでいる。

③アジア(日本除く)

アジア市場は原子力発電が拡大中であり、特に、中国、韓国等の東アジア市場は成長市場である(表9参照)。韓国(運転中19基、建設中1基)は1990年代以降自国企業(斗山重工)により建設がなされており、中国(運転中9基、建設中2基)は、これまでは主に外国企業(フランス4基、ロシア、カナダ各2基)が受注しており、本年2月にも100万kW級4基を国際入札しているが、入札に当たって同国への技術移転を要件としており、中長期的には自国企業による建設へと移行していくものと見込まれる。

(2)世界の原子力産業の再編(図8参照)

原子力発電に係る事業環境変化に対応して、欧米においては、国境を越えて、原子力機器メーカーの再編が進行してきている。米国には、原子力発電開発最盛期には、BWRはGE1社、PWRにはWH、コンバッション・エンジニアリング(CE)、バブコック・アンド・ウィルコックス(B&W)3社があったが、原子力「冬の時代」に、上述したようにWHは英国BNFL社の傘下に入り、CEは欧州(スイス・スウェーデン)のABB社による買収を経て、



(出所:「長期エネルギー需給見通し中間とりまとめ」を基に作成)

図7 原子力発電所の運転基数の実績と予測

表9 最近の東アジア市場における着工/発注/入札動向

年	ユニット(万kW)	炉型	発注者	主契約者
1999	尉珍5・6号(各100)	PWR	韓国水力原子力	斗山重工
	龍門1・2号(各135)	ABWR	台湾電力	GE(東芝・日立)
	田湾1・2号(各106)	VVER	江蘇公司	露原子力省
2002	新古里1・2号(100)	PWR	韓国水力原子力	斗山重工
2005	三門2基(100級)	入札	仏アレバ社(EPR),米WH社(AP1000), 露アトムスロイエクスポート社 (VVER-1000/-1500)の3社が応札	
	陽江2基(100級)			

(出所：日本原子力産業会議「世界の原子力発電開発の動向」)

WH同様、BNFL社の傘下に入っている。また、B&Wは仏フラマトム社に買収され、フラマトム社は米国市場進出の足掛かりを得ている。

一方、欧州においては、2000年、独シーメンス社の原子力部門と仏フラマトム社が合併し、フラマトムANP社が発足し、更に、2002年に発足した持株会社アレバ社は、同社及び核燃料のコジェマ社を傘下に入れている。一方、スウェーデンの原子炉メーカーであったアセア社は、スイスのブラウン・ボベリ社と合併しABB社となったが、同社の原子力部門は英国BNFL社に売却され、また、上述のようにWHの原子力部門もBNFL社に売却されており、アレバ社及びBNFL社の傘下に、原子力発電システム製造から核燃料サービス供給まで包含するグループが形成されている。

以上のような再編を経て、欧米の原子炉メーカーは、現在、GE、BNFLグループ、アレバ・グループの3社/グループに集約されている。

一方、韓国(斗山重工、CE社型のPWR)、カナダ(AECL、カナダ型重水炉)、ロシア、インドなどでは、自国企業による建設・輸出を目指している。

以上、米国を中心に原子力発電に係る国際的な動向を概観したが、欧米での長い原子力「冬の時代」を経て、現在では、アジアでは経済成長を背景に原子力発電が拡大基調にあり、また、欧米でも回復の兆しが見られるようになっている。この「冬の時代」の間に、原子炉メーカーは国際的な再編が進んできている。日本は、「冬の時代」に入りつつある時期であ

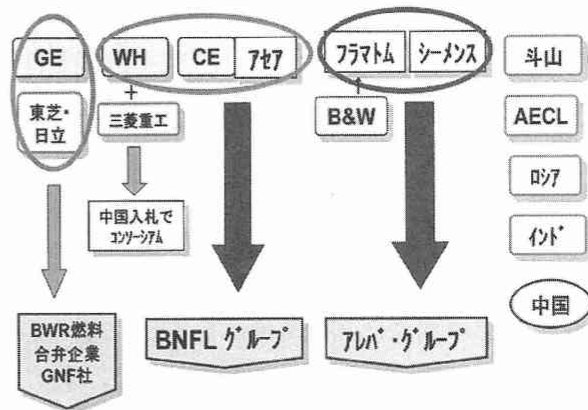


図8 世界の原子力産業の再編

り、変動激しい国際的市場動向に如何に対応し、技術ポテンシャルを維持向上していくかが大きな課題となっている。

参考文献

1. (社)海外電力調査会「海外電力」2002年7月号、2005年2月号等
2. 米国エネルギー省(DOE)「Strategic Plan for light water reactor research and development」(2004年2月)
3. 同省ホームページ
4. 同省エネルギー情報局(DOE/EIA)資料
5. 米国原子力協会(NEI)「NEI Work Force Survey」(2004年5月)
6. 同協会ホームページ
7. 資源エネルギー庁、原子力新長期計画策定会議(第21回)資料第1号「エネルギー政策における原子力発電」(2005年3月)
8. 資源エネルギー庁「長期エネルギー需給見通し中間とりまとめ」(2004年10月)
9. 日本原子力産業会議編「原子力年鑑」
10. 同「世界の原子力発電開発の動向」
11. ビート・V・ドメニチ「ブライター・トゥモロー」ERC出版、2005年3月
12. ジャック・ウェルチ「わが経営」日経ビジネス人文庫、2005年5月

温室効果ガス削減基準としての
「ブラジル提案」の動向

黒沢 厚志[※] (財)エネルギー総合工学研究所
プロジェクト試験研究部 副部長

友田 利正^{※※} (財)地球環境産業技術研究機構
システム研究グループ 主席研究員

※

※※



1. まえがき

地球温暖化をはじめとして、長期気候変動に関する関心が高まっている。先進国を中心として諸国の温室効果ガス排出に一定の制限を設ける京都議定書^{*}は、アメリカやオーストラリアの枠組からの離脱もあり、その発効が疑問視されていたが、鍵を握っていたロシアが批准するに至って、2005年2月に正式発効した。京都議定書が想定している削減目標達成時期は、第1約束期間が2008年から2012年となっているものの、温暖化防止に関するそれ以降の国際合意は存在せず、内外で多様な方式が提案されている。

京都議定書は、温室効果ガスの基準年排出量に対して、国別の事情に応じて、一定割合を削減することを求めている。しかし、京都議定書に至る排出量割当方法については、一定割合削減以外にも、様々な提案がなされている。本稿では、その際に提案された1つの方式である「ブラジル提案」に着目した。その提案は、気候変動に関する温室効果ガス削減負担分担は、産業革命以降の排出履歴等を加味した基準とすべきであるというものである。ブラジル提案に基づく排出量割当は、ポスト京都議定書の国際枠組のオプションの1つとなりうる可能性もあり、国際的に再度注目を集めている。

筆者らは、2002年以降、ブラジル提案に関する動向をフォローし、関連の専門家会合にも参加して活動を行ってきたので、以下では、最近の動向を報告する。

2. ブラジル提案に関する国際動向

京都議定書では、各国の温暖化ガス排出削減量を政治的に決定し、ブラジル提案の主張は採用されなかった。しかし、2001年以降ブラジル提案再評価の動きがみられる(表1参照)。2002年には、気候変動枠組条約の常設補助機関の1つである、「科学的・技術的な助言に関する補助機関(SBSTA)」において、気候モデル比較作業が実施された。また、それに前後して、2001年5月、2002年9月に気候変動枠組条約事務局が主催する専門家ワークショップが開催されている。

2002年、ニューデリーにおいてCOP8と並行して開催されたSBSTA17会合では、ブラジル提案の科学的および方法論的側面について、科学コミュニティによる活動継続およびピアレビューを受けた出版物に基づく作業などによる方針が定められ、「地球圏-生物圏国際協同研究計画(IGBP)」、「世界気候研究計画(WCRP)」、「地球環境変化の人間・社会的側面に関する国際研究計画(IHDP)」、「気候変動に関する政府間パネル(IPCC)」などの科学コミュニティの

^{*}「国連気候変動枠組条約」の目的を達成するため、1997年12月に京都で開催された第3回国連気候変動枠組条約締約国会議(COP3)で採択された。先進国等に対し、温室効果ガスを1990年比で、2008年～2012年に一定数値(日本6%、米7%、EU8%)を削減することを義務づけている。また、同削減を達成するための京都メカニズム等を導入。わが国は平成14年6月4日締結。

表1 「ブラジル提案」に関する経緯

1997年	気候変動枠組条約に関する温室効果ガス削減基準交渉において、ブラジルは、今後の気候変動に関する各国の温室効果ガス削減負担分担は、産業革命以降の排出履歴等を加味した新たな基準とすべきであるという提案（ブラジル提案）を行う。
2001年5月	第1回専門家ワークショップ（ボン、ドイツ）
2002年前半	気候変動枠組条約の常設補助機関の1つである、「科学的・技術的な助言に関する補助機関」（SBSTA）において、気候モデル比較作業を実施
2002年9月	第2回専門家ワークショップ（ブラックネル、イギリス）
2002年11月	SBSTA17 ブラジル提案の科学的および方法的側面について、科学コミュニティによる活動継続、ピアレビューを受けた出版物に基づく作業方針を定め、国際科学コミュニティの協力を依頼することになる。 その後、この科学コミュニティによるアドホックな活動をMATCH（modelling and assessment of contribution to climate change）と呼ぶことになる。
2003年6月	SBSTA18 IGBP（地球圏－生物圏国際協同研究計画）およびWCRP（世界気候研究計画）から活動に肯定的な返答
9月	第3回専門家ワークショップ（ベルリン、ドイツ）
2004年5月	第4回専門家ワークショップ（ケルン、ドイツ）
6月	SBSTA20 ブラジル提案に関するサイドイベント
2005年4月	第5回専門家会議（リオデジャネイロ、ブラジル）
（以下、予定）	
2005年後半	SBSTA23 活動報告に基づき、活動継続についての判断をSBSTAで審議

（出所：各種データをもとに独自に作成）

協力を依頼することになった。同会合では、ブラジル、イギリスは、2003年にワークショップを開催することを提案し、その後ドイツ、ノルウェーも支援を表明した。

2003年6月のSBSTA18において、IGBPおよびWCRPから肯定的な返答があり、ブラジルとイギリス政府は全枠組条約締約国に対して、2003年9月のベルリンで第3回専門家ワークショップが開催される旨通知した。その後、2004年5月にケルンで第4回専門家ワークショップが、同6月のSBSTA20ではブラジル提案に関するサイドイベントが開催されている。イベントでは、活動の中間報告が行われ、気候パラメータの種類、分析期間、排出シナリオ、温室効果ガスの選択、寄与度評価方法による違いが議論された。あわせて、気候パラメータについては、排出量、濃度、放射強制力、温度変化、海面上昇の間に図1に示すような因果関係があることが示されている。

2005年になってからは、4月にブラジルで第5回専門家ワークショップが開催された。さらに、2005年後半のSBSTA会合で活動報告

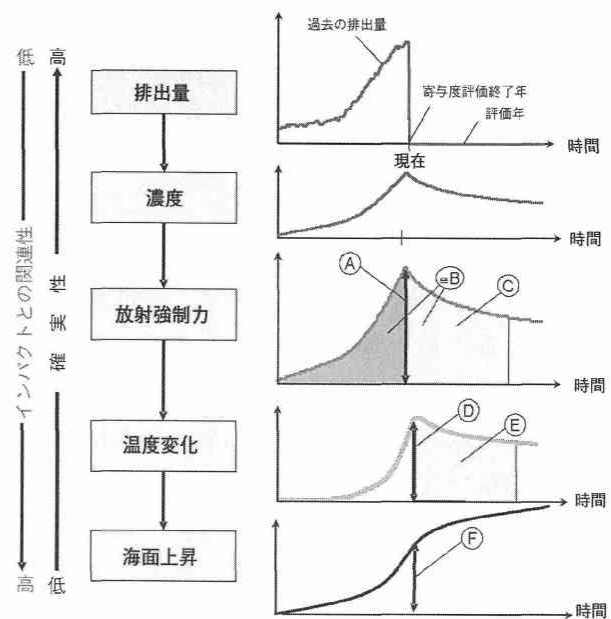


図1 気候パラメータ間の因果関係

を行い、継続については政策担当者が同会合で別途議論することになっている。

このように、現在のブラジル提案を巡る活動は、従来の国連気候変動枠組条約のもとではなく、科学コミュニティによるアドホックな活動として継続されている。このグループの略称は、MATCH（Ad-hoc group for the

Modelling and Assessment of Contribution to Climate Change) と名付けられ⁽¹⁾、2005年後半に予定されているCOP/MOP1にあわせて開催されるSBSTAへの報告を意図した科学論文作成作業が活動の中心となっている。

3. 簡易気候モデルを用いた分析⁽²⁾

ブラジル提案に基づく評価を実施するためには、過去から現在にわたる世界的な温室効果ガス排出量データベース、簡易気候モデル、および温室効果ガス排出の気候変動に対する寄与度算定方法などのツールが必要である。そのうち、気候モデルは、将来の気候変動の程度を予測し、気候変動問題を議論する際の重要かつ基本的なツールの1つであり、気候変動政策からの要請もあって、近年進展の著しい分野である。モデルを利用して導く結論は、科学的知見の蓄積につながるとともに、気候変動政策の判断材料となるため、重要な意味を有している。しかし、排出量データベース、気候モデル、および寄与度算定方法などのツールには、それぞれ温室効果ガス排出量推定手法、気候パラメータ間の関係、および寄与度算定方法選択において、大きな不確実性があり、手法やデータが異なると全く異なった結論が導かれることも容易に予想される。

以下では、世界地域分割を有する温室効果ガス排出量データベース、および簡易気候モデルによる、気候変動に関する地域寄与度分析例を紹介する。

(1) 温室効果ガス排出シナリオと気候パラメータ

過去の温室効果ガス排出履歴、特に産業革命開始以降の履歴は、現在の温室効果ガス濃度のレベルや、気候モデルの検証を実施する上で貴重なデータである。分析では、1751年以降の人為起源の二酸化炭素(CO₂)、メタン、亜酸化窒素の排出量の推移データを用いて評価を行った。これらの排出量データは、アメ

リカORNLのCDIACデータベースの二酸化炭素排出データに加え、オランダRIVMのEDGAR-HYDE1.4データベースに含まれる、CO₂、亜酸化窒素、メタンの排出量を用いる。各データベースについては、カバーする年、地域区分が異なる他、データベース間の整合性がよくない場合がある。その場合は比率による比例配分、補間等の処理を行い、データの連続性が損なわれないように配慮した。地域寄与度試算は、EDGARデータベースの排出量が存在する1890年以降について可能であるので、地域排出量をそれ以降について整理した。また、メタンおよび亜酸化窒素については、人為起源の排出と比較して無視できないレベルの天然起源の排出があるが、その値は別途推定した。

なお、以降の記述に含まれる地域区分の定義は表2の通りであり、世界を13地域および1つの国際活動(国際輸送に伴うバンカー燃料消費、バンカー)に分割している。

EDGARデータベースが整備されている1890年以降かつ20世紀末以前の地域別排出量シェアを図2、3、4に示す。1900年頃のCO₂排出量は、アメリカ、西欧、ラテンアメリカのシェアが高かったが、20世紀中頃になるとCIS、

表2 分析に用いた地域区分

地域名略称	定義	気候変動枠組条約での扱い
USA	アメリカ	附属書I国 (途上国に先行して温室効果ガス削減義務あり)
CAN	カナダ	
WEU	西欧	
JPN	日本	
OCE	オセアニア (オーストラリア、ニュージーランド)	
EEU	東欧	
CIS	独立国家共同体 (ロシア等)	
CHN	中国	非附属書I国 (現時点において温室効果ガス削減義務なし)
IND	インド	
SEA	東南アジア	
ME	中東	
AFR	アフリカ	
LAM	ラテンアメリカ	
BNK	地域排出に含まれない 国際輸送活動(BUNKER)	現在のところ規定なし

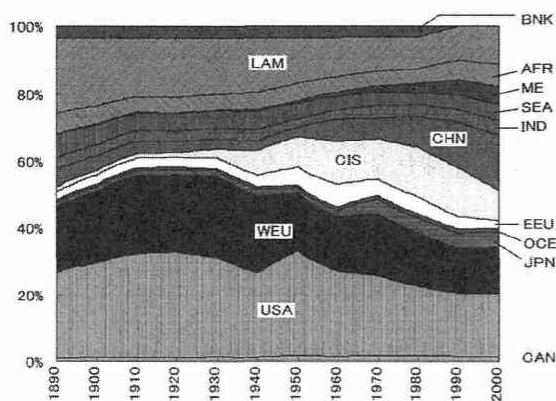


図2 地域別CO₂排出シェア

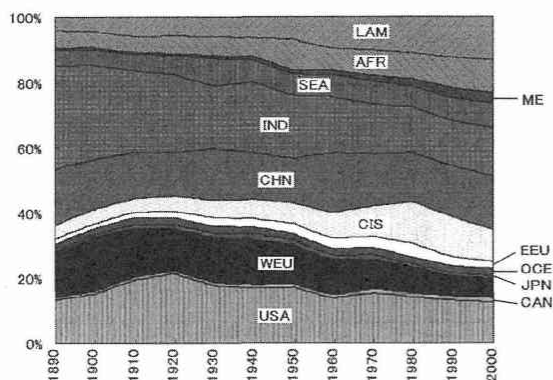


図3 地域別メタン排出シェア

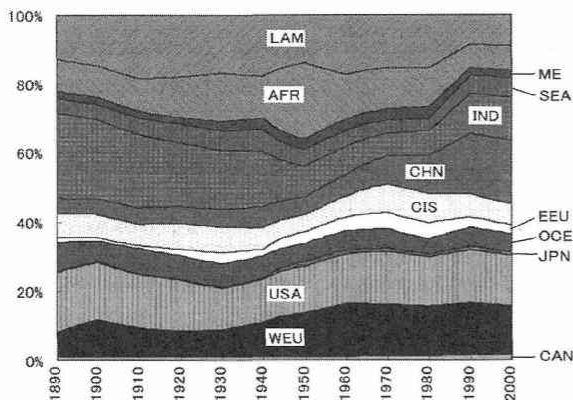


図4 地域別亜酸化窒素排出シェア

東欧のシェアが増加し始め、1980年代以降は、中国のシェアの伸びが認められる。メタンや亜酸化窒素については、20世紀の全期間を通じて途上地域のシェアが二酸化炭素のそれより高い。これは、メタンやCO₂に関しては、農業起源の排出の寄与が大きいためであると推定される。20世紀後半においては、おおよ

かにみた場合の附属書I地域のシェアは、CO₂で約6割、メタンで4割、亜酸化窒素で5割といったところである。

これらの排出量を用いて、全球平均簡易気候モデルにより、気候パラメータについての推定を行った。まず、排出された温室効果ガスのうち大気中に残存するものと、そうでないもののバランスを考慮した方程式により、排出量を与えられると大気中温室効果ガス濃度を求められる。そして、濃度、放射強制力、全球平均地表温度および海面上昇といった気候パラメータの関係式により、それらの値を求めた。海面上昇の原因には、海水熱膨張、極地域の雪氷融解などが考えられており、ブラジル提案に関する気候モデル比較作業では熱膨張による海面上昇のみが比較対象となっていたため、熱膨張による海面上昇値を推定した。

(2) 過去の温暖化ガス排出による気候変動地域寄与度

次に、過去の温暖化ガス排出による現在の気候変動の地域寄与度を導出する分析を行った。評価にあたっては、20世紀の評価を意図して、排出開始評価年を1900年、終了評価年を2000年、寄与度評価年を同じく2000年とした。そして、前述した世界13地域および国際輸送活動について、各種パラメータに対する地域別寄与度を試算した。対象とした温室効果ガスはCO₂、メタン、亜酸化窒素の3種類であり、その他の温室効果ガスやエアロゾルの効果は寄与度試算の対象から除外した。気候システムには非線形性があり、それに応じて寄与度評価方法にも様々な手法が提案されている。ここでは、計算は複雑になるが、タイムスライス法と呼ばれる、評価期間内の各年排出量の効果を算出可能な方法による結果を紹介する。

a. 温暖化ガス累積排出量

温室効果ガス累積排出量の地域別寄与度を

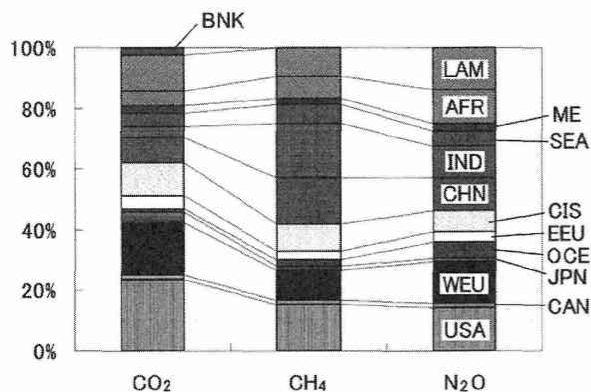


図5 温室効果ガス累積排出量の地域寄与度 (1900~2000年)

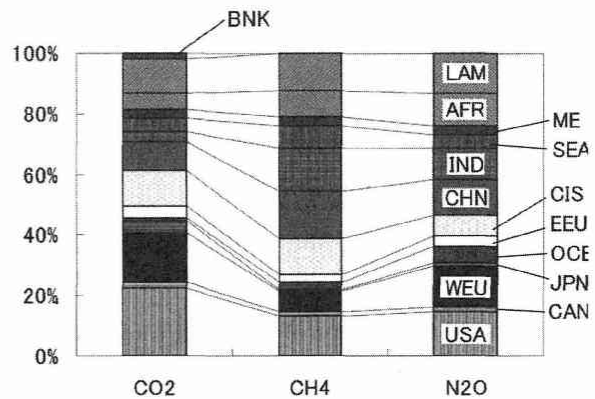


図6 温室効果ガス濃度の地域寄与度 (1900~2000年)

図5に示す。CO₂については、過去には先進国の寄与が大きく、附属書I地域の寄与は、62%となっている。それに対し、メタンや亜酸化窒素の附属書I地域の地域寄与度をみると、非附属書I地域の寄与は附属書Iのそれを上回っている。

過去のCO₂の累積排出において寄与度が10%を上回っているのは、排出量の履歴を反映して、大きい順に、アメリカ(24%)、西欧(17%)、ラテンアメリカ(12%)、CIS(11%)となっている。同様に、メタンの累積排出において寄与が10%を上回っているのは、インド(18%)、中国(16%)、アメリカ(16%)、西欧(10%)である。亜酸化窒素については、アメリカ(15%)、ラテンアメリカ(14%)、西欧(14%)、アフリカ(11%)、中国(11%)、インド(10%)がいずれも10%を上回っており、その他の国や地域の寄与度は小さい。なお、過去の日本の寄与はCO₂3.4%、メタン1.2%、亜酸化窒素0.9%となっており、メタン、亜酸化窒素と比較すると、相対的にはCO₂の寄与が大きい。これは農業からの排出量の少なさを反映しているものと考えられる。

b. 温暖化ガス濃度

タイムスライス法ではガスの寿命に応じた減衰を考慮しているため、メタンのように寿命の短いガスと、CO₂や亜酸化窒素のような長寿命ガスで寄与度の現れ方が異なる。附属

書I地域の過去の寄与は、CO₂で61%、メタンで39%、亜酸化窒素で49%となっている(図6)。世界地域別にみると、CO₂については、アメリカ23%、西欧16%、CISおよびラテンアメリカがそれぞれ11%、中国10%といった地域の寄与が10%を超えている。同様にメタンをみると、中国16%、インド14%、アメリカ13%、西欧12%、CIS11%などの寄与が大きい。亜酸化窒素の寄与分については、アメリカ15%、西欧14%、ラテンアメリカ13%、中国12%、アフリカ11%、インド10%などが主要な寄与源となっている。日本の寄与はCO₂で3.7%、メタンで0.9%、亜酸化窒素で1.0%となっており、累積排出量の寄与度に近い値となっている。

c. 温度上昇と海面上昇

温暖化ガス濃度上昇は、地球のエネルギー収支変化量を示す指標である放射強制力の変化を

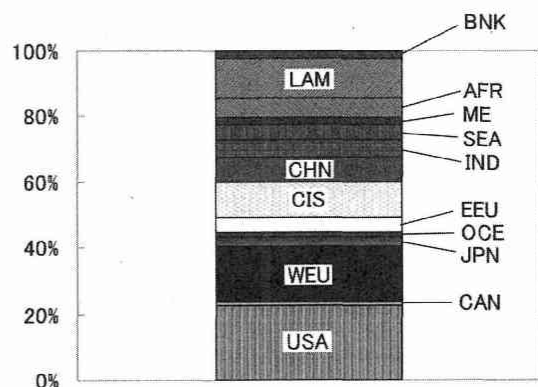


図7 温度上昇の地域寄与度 (1900~2000年)

通じて、大気温度に影響を与える。放射強制力－温度の関係は多少の時間遅れがあることが知られている。温度上昇の寄与度評価結果をみると、アメリカ（22%）、西欧（16%）、ラテンアメリカ（12%）、CIS（11%）の4地域の寄与が10%を超えている（図7）。日本の寄与度は2.7%である。

また、海面上昇のモデルにおいては、減衰時定数が数千年の要因が支配的であり、評価対象とした時間範囲では過去の放射強制力の影響が長時間にわたって継続するようになっている。そのため、過去の温室効果ガス排出量が相対的に多かった地域の、現時点における寄与度は、大きめに算出されている。寄与度を地域別にみると、アメリカ（25%）、西欧（18%）、ラテンアメリカ（14%）などの地域の寄与が大きいことがわかる。過去に排出量が少なく、近年排出量が急増している中国などの地域では、相対的に海面上昇への寄与が小さめに算出される。日本の寄与度は2.3%となった。

d. 地域寄与度のまとめ

以上の結果をもとに、気候パラメータ変化への寄与度が上位5地域を大きい順に並べてみた（表3）。アメリカは、CO₂および亜酸化窒素の累積排出量・濃度、気候変動の統合的パラメータである放射強制力、温度上昇、海面上昇でいずれも最上位である。メタンは累積排出量でインド、濃度で中国が最上位となっており、人口大国での農業活動の大きさや、米作による影響が伺える。その他の地域では、各種のパラメータで西欧、ラテンアメリカ、CIS、中国の寄与が大きく、上位5位までにランクされる場合が多い。そのうちラテンアメリカは、土地利用変化によるCO₂や農業活動によるメタンや亜酸化窒素が上位となった原因と考えられる。

CO₂累積排出量、放射強制力、温度上昇、海面上昇といったパラメータにおける寄与度の順序はアメリカ、西欧、ラテンアメリカ、CIS、中国と一致したことが興味深い。そのうち、放射強制力、温度上昇、海面上昇の3つ

表3 1900年～2000年の気候変動に対する寄与度が大きい国・地域（上位5位）

累積排出量			大気中濃度			放射 強制力	温度 上昇	海面 上昇
二酸化炭素	メタン	亜酸化窒素	二酸化炭素	メタン	亜酸化窒素			
アメリカ 23.5%	インド 17.5%	アメリカ 14.5%	アメリカ 22.5%	中国 15.9%	アメリカ 14.6%	アメリカ 20.2%	アメリカ 22.4%	アメリカ 24.8%
西欧 17.1%	中国 15.6%	ラテン アメリカ 13.8%	西欧 16.4%	インド 14.4%	西欧 14.1%	西欧 14.4%	西欧 16.4%	西欧 18.2%
ラテン アメリカ 11.8%	アメリカ 15.6%	西欧 13.7%	CIS 11.4%	アメリカ 13.4%	ラテン アメリカ 13.2%	ラテン アメリカ 11.7%	ラテン アメリカ 12.2%	ラテン アメリカ 13.6%
CIS 10.9%	西欧 10.1%	アフリカ 11.3%	ラテン アメリカ 11.3%	ラテン アメリカ 12.0%	中国 11.7%	CIS 10.9%	CIS 10.5%	CIS 8.4%
中国 8.4%	ラテン アメリカ 9.2%	中国 10.8%	中国 9.6%	CIS 11.4%	アフリカ 10.8%	中国 10.8%	中国 8.0%	中国 5.9%
(参考) 日本								
3.4%	1.2%	0.9%	3.7%	0.9%	1.0%	2.8%	2.7%	2.3%

（出所：各種データをもとに独自推定）

は関連の深いパラメータである。温度および海面はある時点の放射強制力の大きさが、平衡に達するまでの長時間にわたり影響するので、過去の履歴を積分する効果を有しているためである。

4. おわりに

最後に、調査分析から得られた示唆をまとめてみたい。

(1) 気候パラメータ変化への寄与度

世界13地域の温室効果ガス排出データと簡易気候モデルを用いた分析により、アメリカ、中国、インドなどの国別や、地域別の気候パラメータの寄与度が明らかとなった。1900年から2000年までの範囲を対象とした分析においては、気候変動の統合パラメータである放射強制力、温度上昇、海面上昇の寄与度について地域別の傾向は類似したものになり、アメリカ、西欧、ラテンアメリカ、CIS、中国の順に寄与度が大きいことが明らかとなった。

また、別途実施した2000年から2100年の範囲の将来を対象とした分析の結果、排出シナリオにも依存するが、附属書I地域の影響が過去と比較して相対的に低下する傾向があることが確認された。

(2) ブラジル提案と温室効果ガス割当排出方式

京都議定書の温室効果ガス削減目標交渉における議論においてブラジルが提案した、「今後の気候変動に関する温室効果ガス削減負担分担は、産業革命以降の排出履歴等を加味した新たな基準とすべきである」とする主張以来、長年にわたって議論されている地域の気候変動寄与度評価を試みた。この提案は、人口比例、GDP比例、既得権継承など、これまでになされた温室効果ガス排出量割当方式の

1つのオプションであり、途上国を含めた過去の地域別寄与を評価することが可能であるなどのユニークな特徴を有している。しかし、排出算定開始年、利用データ、気候モデルのパラメータなどによって、結果が恣意性を持つ可能性も大きいので、寄与度評価に当たっては細心の注意が必要である。

(3) 不確実性評価の重要性

分析は多くの前提条件のもとに実施したものであり、特に将来排出量シナリオ、過去の非CO₂温室効果ガス排出量などの不確実性は大きい。評価手法、温室効果ガス排出量データ、評価すべき気候変動要因の範囲（エアロゾル、吸収源等）、気候モデル（炭素循環と温度変化の相互作用、CO₂肥沃化効果、気候や生物地球化学的循環のもたらすフィードバック等）、将来の排出シナリオ、他の科学分野からの経験（環境やライフスタイルのもたらす健康への複合的影響等）に対する感度分析を行うことが必要であると考えられる。

謝辞

最後となるが、活動にあたっては、経済産業省産業技術環境局環境政策課地球環境対策室をはじめとした関係者の方々に多大な協力をいただいた。ここに深謝する次第である。本稿は、平成16年度に新エネルギー・産業技術総合開発機構の委託によって地球環境産業技術研究機構が実施した、「2013年以降の温暖化対応方策に関する調査研究」の成果の一部を含むものである。

参考文献

- (1) <http://www.match-info.net>
- (2) 2013年以降の温暖化対応方策に関する調査研究、新エネルギー・産業技術総合開発機構、委託先 地球環境産業技術研究機構、平成17年3月、04001161-0

● 行 事 案 内 ●

第21回 エネルギー総合工学シンポジウム

テーマ：『日本のエネルギーの未来を拓く』（仮題）
—超長期のエネルギー技術戦略と原子力の将来像—

開催日時：平成17年10月3日（月）10：00～17：00

会場：経団連ホール（定員500名）
東京都千代田区大手町1－9－4 経団連会館14F

参加費：無料

プログラムは8月中旬に発送の予定です。

問合せ先：（財）エネルギー総合工学研究所シンポジウム事務局
電話：03－3508－8894／FAX：03－3501－1735
E-mail：sympo@iae.or.jp

研究所のうごき

(平成17年4月2日～7月1日)

◇ 第22回評議員会 (臨時)

日 時：6月14日 (火) 12:00～12:10

場 所：経団連会館 (9階) 906号室

議 題：

第一号議案 理事の一部改選について

◇ 第65回理事会

日 時：6月23日 (木) 11:00～12:00

場 所：経団連会館 (9階) 906号室

議 題：

第一号議案 平成16年度事業報告書および決算報告書 (案) について

第二号議案 評議員の委嘱について

第三号議案 常務理事の互選について

第四号議案 事務局長の委嘱について

第五号議案 退任常勤役員に対する退職金の支給について

第六号議案 その他

◇ 月例研究会

第234回月例研究会

日 時：4月22日 (金) 14:00～16:00

場 所：航空会館 7階 701・702会議室

テーマ：

1. 平成17年度 供給計画の概要—電力各社供給計画の集約結果—
(電気事業連合会 電力技術部長 西 亨 氏)
2. わが国における電力自由化の現状と課題
(財電力中央研究所 理事待遇 社会経済研究所所長代理 矢島 正之 氏)

第232回月例研究会

日 時：5月26日 (木) 14:00～16:00

場 所：航空会館 地下1階 101会議室

テーマ：

1. 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 環境政策課課長補佐 豊島 厚二 氏)
2. 省エネ・省CO₂をエネルギー需給全体「エネルギーチェーン」で考える
(財電力中央研究所 理事 研究所管掌 浜松 照秀 氏)

第236回月例研究会

日 時：6月24日 (金) 14:00～16:00

場 所：航空会館 5階501・502会議室

テーマ：

1. 原子力の役割とポテンシャル
(プロジェクト試験研究部 主幹研究員 氏田 博士)
2. 原子力水素の役割と効果
(エネルギーシンクタンク (株) 代表 田下 正宣 氏)

◇ 主なできごと

- 4月8日 (金) ・第3回「原子力発電の技術開発の在り方」研究会
- 13日 (水) ・第5回超長期エネルギー技術研究会
- 22日 (金) ・原子力水素研究会
- 25日 (月) ・第1回天然ガスハイドレート技術の国内市場への適用可能性調査委員会
- 26日 (火) ・第1回下水汚泥流体化技術の火力発電所への適用に関する調査研究委員会
- 5月11日 (水) ・第4回「原子力発電の技術開発の在り方」研究会
- 30日 (月) ・第1回超長期エネルギー技術戦略研究会
- 6月2日 (木) ・第1回風力発電電力系統安定化等技術開発実行委員会
- 3日 (金) ・第2回天然ガスハイドレート技術の国内市場への適用可能性調査委員会
- 7日 (火) ・高温ガス炉プラント研究会総会・第1回研究会
- 8日 (水) ・第1回電力ネットワーク技術総合調査委員会
- 10日 (金) ・第2回下水汚泥流体化技術の火力発電所への適用に関する調査研究委員会
- ・第5回「原子力発電の技術開発の在り方」研究会
- 17日 (金) ・原子力水素研究会
- 20日 (月) ・第1回エネルギーモデル検討委員会

◇ 人事異動

○ 4月30日付

(退職)

三谷優子 プロジェクト試験研究部 研究員

○ 5月1日付

(異動)

坂口弘子 プロジェクト試験研究部 研究員
エネルギー技術情報センター兼務

横尾友美 業務部 研究員 総務部兼務

○ 6月30日付

(退任・解職)

杉井 喬 常務理事兼事務局長兼総務部長

(退職)

片山優久雄 研究理事

(出向解除)

横山 博 プロジェクト試験研究部 主管研究員

水谷栄吾 プロジェクト試験研究部 主任研究員

○ 7月1日付

(就任)

佐藤憲一 常務理事兼事務局長兼総務部長

(出向採用)

曾根英文 プロジェクト試験研究部 主任研究員

(採用)

鳥飼誠之 プロジェクト試験研究部 副部長 主管
研究員兼企画部

(異動)

蓮池 宏 プロジェクト試験研究部 副部長
主管研究員 企画部兼務

黒沢厚志 プロジェクト試験研究部 副部長
主管研究員 企画部兼務

下岡 浩 エネルギー技術情報センター
主管研究員 企画部兼務

編集後記

本号は、ご覧いただきましたように「水素エネルギー」を集中的に取り上げました。前号（平成17年4月号）は、実質的に石油ピークが中心議題でしたが、未来への夢が描き難くなったと懸念する声もあり、明るい話題を提供しようと考えた次第です。資源の制約もあり石油ピークがいずれ（時期の特定は別にして）到来することは間違いないでしょうが、エネルギーの供給・利用面で「水素エネルギー」時代がいずれ到来することも定説になりつつあります。どちらが早く到来するかで、世界のエネルギー需給構造は大いに異なるでしょうが、どうも「石油ピーク」が早く到来しそうだという処に現代の悩みがあるようです。

さて、水素の特徴として、「生成物（水）が、大気環境・循環に悪影響を及ぼさないクリーンである」、「原料である水が無尽蔵に近い」、「発電用等エネルギーとしての利用のみでなく、液体燃料あるいは石油代替製品も製造可能である」などが挙げられておりますが、一方では水素は天然には存在しない二次エネルギーであり、その製造のエネルギー（一次エネルギー）を如何に確保するかという大きな課題があります。

しかしながら「水素エネルギー」時代を迎えるためには、できるだけ早い時期にその全貌を描きつつ、課題・問題を掘り下げるのが肝要であります。そうい

う意味で、本号は、「座談会」においても、またそれに続く「寄稿」、「報告」等においても、それぞれの専門の方々からその特徴と同時に、課題・問題点も出来るだけ率直に紹介していただいております。水素をバラ色として捉えるのみでなく、その難しさを十分知って取り組む必要があると判断されるためです。それに続く、各話題も一見水素と関係ないようではありますが、RPSの話、LNGの話、石油資源の話、その他の報告も全て昨今わが国がおかれている厳しいエネルギーと環境問題という1つの線上に位置されるものです。

本問題に対する読者の理解をお助けし、又は深めて頂くことを願って、それぞれ多忙な中から原稿を纏めてくださった各執筆者の方々に紙面を借りて心から御礼申し上げます。

ところで、気象庁の長期予報によりますと、今夏の予想気温は、平年並みかそれ以上とする地方が多いと発表されており（気象庁HP）、再び暑い夏がやってきそうです。風鈴も金魚売りの声も聞こえなくなった殺風景なこのごろの夏ですが、せめて希望あふれる明るい話題で暑さを乗り切っていただこうとの期待を込めて本号をお届けします。

編集責任者 小川紀一郎

季報 エネルギー総合工学 第28巻第2号

平成17年7月20日発行

編集発行

財団法人 エネルギー総合工学研究所

〒105-0003 東京都港区西新橋 1-14-2

新橋SYビル（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。