

4. 講 演

水分解と集中形太陽受光システム (Water Decomposition and Solar Central Receiver Systems)

ケンタッキー大学 James E. Funk
(訳)電子技術総合研究所 伊原 征治郎

は じ め に

日本のHESSで講演できることを、大変に嬉しくまた光栄に存じます。再度の訪日で、昔の友人や同僚に会えたことは、とても愉快でした。以前に私の学生として一緒に研究し、今は日本で働いている人達と楽しく会うこともできました。この訪日はまことに楽しく、また、日本の力強く活気にあふれた発展をみて、深く感銘を受けました。横浜国立大学と、とくに太田時男先生および太田健一郎先生の、親切なおもてなしに心からお礼申し上げます。そして、今日ここで皆さんにおめにかかれる機会を、太田先生がつくって下さいましたことを、とても幸運に思っております。

昨日、私は富士教育研修所でのエネルギーに関する会合に出席して、多数の大学の研究者と会いました。過去5年の間に、日本の大学ではエネルギーの社会的、経済的な面から、その熱的、化学的プロセスにいたるまで、広い範囲におよぶ研究が行われました。水素の分野では日本の研究者達が、太田教授の指導のもとに、先導的な仕事を行ってきました。日本のサンシャイン計画は広く知られています。化学技術研究所、大阪工業技術試験所、東京大学、横浜国立大学、日本原子力研究所などの熱化学サイクルをはじめ、水素経済の全局面が研究されています。

世界エネルギーの展望

この講演の主題は、太陽エネルギーからエネルギーと水素をつくることに関するものです。けれども、水素に対する世界の関心は、世界的規模のエネルギー情勢や、背景とのタイミングなどに非常に強く依存しますから、ここでまず、シェブロンが完成したばかりの、世界エネルギーの調査報告の結果を、いくつか紹介してみたいと思います。シェブロンは御存知の通り、大きな石油会社です。この調査報告は1985年6月という、ごく最近のものであります。

先進工業諸国における水素への関心は、この数年来、先細りになっていると言えますが、その原因は石油情勢にあると私は信じております。これに関する情報の一端を、これから、石油の価格と供給可能性を示すスライドで、ご覧に入れます。とくに日本と中国の将来の投影について、注目してください。この報告を見て私は気が付いたのですが、日本の成長率の投影値は西欧およびアメリカ合衆国より2倍も大きく、中国の成長率の場合は他の共産圏諸国より2ないし3倍大きくくなっているのです。

アラビアンライト原油の価格は、1965年には1バレルあたり3ドルでした。それが5ドルになり、1982～3年の間に35ドルから40ドルあたりになりました。それ以後は低下の一途をたどっています。この傾向を外挿すると2000年には、1バレルあたり25ドルから50ドルの間に来ます。

私は、アラビア原油価格が太陽エネルギーなどの非枯渇エネルギー、および原子力に対する関心に直接的なインパクトを与えるものであることを信じております。それはまた、水素への関心の世界的な姿勢にも、もろに影響を与えます。

つぎに、世界の原油供給の様子を見ましょう。1912年から2100年の期間を横軸とし、1日あたりの生産量を縦軸にとって描いてみると、生産量のピークはおよそ6,000万バレル/日に達しています。そして、ごく最近に、OPECの生産量が大きく低落しています。アメリカ合衆国の石油生産量は、1970年代の昔にピークを過ぎており、他の国々ではこれから将来にピークを迎えることとなります。

ひとつ注目すべき点がありますが、この石油の盛衰の期間は1900年から2100年という、200年間であることです。1500年代この方の日本の歴史の枠組でこの長さをみると、江戸時代だけで270年間ですから、どのような歴史的時間尺度をもってしても、世界が埋蔵石油を使い果たすまでの時間は、非常に短いものであることがわかります。

これから数年のうちに、先進工業諸国ではよりすくないエネルギーを使って、より多くの生産を行うようになるでしょう。

石油がどこにあるかという点、OPEC諸国の埋蔵量は4,800億バレル、OPEC以外がおよそ2,000億バレルです。OPECは現在、日量1,500万ないし1,600万バレルの割合で生産していますが、生産能力は1日あたり3,000万バレルですから、必要があれば市場に石油を持ち込むに十分な能力を持っているわけです。

ここで、工業国およびその他の国々の、経済成長率の将来への投影を眺めてみると、とくに注意したいのは、アメリカ合衆国とカナダの年間実質GNP成長率が2.5%、西ヨーロッパでは2%、日本の場合には4%という数字です。他に大きな数値として、東南アジア諸国の5%がありますが、基点の大きさはかなり小さなものです。アメリカ合衆国、西欧、日本などの場合には成長の基点が大きな値になっています。日本の、2000年に至る14年間の経済成長が年率4%

であるのは、非常な大きさです。

さて、私は先に、われわれはよりすくないエネルギーでより多くの生産をするようになる、と言いましたが、ここで生産量1単位あたりに要するエネルギー消費量が、1970年以後どのように低下するか、数字を挙げてみます。2000年までに、日本ではGNP単位あたりのエネルギー消費量が、1970年と比較してわずか50%になるでしょう。これがアメリカ合衆国では65%、西ヨーロッパなどでは85%程度でしょう。このように先進工業国では、よりすくないエネルギーを使いながら、より多くの製品やサービスを産出するようになるものとみられます。

アメリカ合衆国のエネルギー消費の伸び率を、2000年迄投影してみると、それは非常に大きな値ではなく、年あたり1.3%と推定されます。石油と天然ガスの消費量は一定値に留まり、合成油が市場に入るのはほんの僅かで、したがって、この増加には石炭と原子力が当てられることになるでしょう。

アメリカでは、これから建設が予定される原子力プラントはありません。1978年以降、原子力プラントへの新しい注文がないのです。したがって、これから市場に入る原子力発電容量は、現在工事中のもの、新しく運転開始されたものだけです。

発電についていえば、アメリカ合衆国の今後20年間の発電用エネルギー源を供給するのは、原子力と石炭ということになります。

非共産圏諸国の全エネルギー消費量は、アメリカ合衆国では僅かに、西ヨーロッパではごく僅かに増加し、日本でも急速な増加は見られません。世界の全エネルギー消費量のうち、日本が占める割合はおよそ8%を維持し、アメリカは2000年までに38%から33%へ減少します。石油消費量についてはアメリカ、西ヨーロッパ、および日本では一定値に落ち着いていますが、自由世界の他の国々が石油消費量を増加させる可能性があります。共産圏諸国のうち、ここで注意したいのは中国のエネルギー消費量です。中国では小さな生産量から立上ってはいますが、GNPは年4.5%という大きな値が投影されており、エネルギー消費量の伸び率では3.9%です。

原油生産量は、前にも述べましたように、OPECの生産量は著しく削減され、アメリカ合衆国と西ヨーロッパの生産量は増加しません。メキシコではすこし増加しますが、将来必要が生じたときには、OPECが石油供給を支配することになります。

アメリカ合衆国の石油供給の見通しは暗いものであります。おわかりのように、国内生産量は急速に低下しており、これからの需要に対して新規の内陸および沖合海底の石油生産をあて込んでいます。これに加えて穏やかでない予測があり、2000年までにアメリカは石油需要の50%を輸入することになろう、ということです。私は、この予測はきわめて疑わしいものに思います。1979年に私達は石油の43%を輸入しましたが、この大きさが直接原因となってアメリカには大混乱が生まれました。主としてOPECから、需要量の50%を輸入することが許容できるとは思えません。

天然ガスですが、アメリカ合衆国内の天然ガス生産は低下しようとしています。西ヨーロッパでは、ほんの僅かのパーセント増加する傾向があります。世界的には、今後15年間の天然ガス生産量は強い勢いで増加する方向にあります。さきほどの昼食の際に、私達は今日の新聞記事の話をしていました。その記事によれば、日本はオーストラリアから、今後19年間にわたって大量の天然ガスを輸入する計画である、とのことでした。

世界のエネルギー源の構成を見ると、石炭が伸び率3.2%で著るしく増加し、天然ガスの伸び率は2.5%です。そして原子力は5.6%で急速に増加する見込みですが、これはおそらく、主としてフランスの計画によるものでしょう。フランスは2000年までに、電力需要の78%を原子力で供給する計画だったと思います。アメリカでは原子力は全く伸びる傾向がありません。

自由世界の石炭消費量は、アメリカ合衆国と西ヨーロッパでは非常な勢いで増加しようとしています。日本の場合にはそれほどではないようです。

原子力については、アメリカでは現在建設中のプラントが完成すれば、その後は原子力が増加しなくなって、増加曲線は平らになりますが、西ヨーロッパではフランスと西ドイツの計画によって増加します。両国とも相当大きな計画を持っています。日本の計画も大きなもので、今後20年間に65~75%の増加を示します。

合成油についてみると、カナダの主としてアサバスカのタールサンド地帯からの生産、ラテンアメリカでは、ブラジルのさとうきびからエタノールを生産する計画、アメリカではオイルシェール、タールサンド、および石炭液化などの生産、などが見込まれます。

石油精製について簡単にふれますと、現在の石油精製事業には大きな問題があります。というのは、精製能力は最近拡充されておらず、また将来も大巾に拡充されることは期待されておられません。

太陽・水素エネルギーの計画

ここで、最初の石油価格の話に戻りますが、おそらく石油の値段が急速に上昇することはないであろう、という状況を私達は見ました。もし、石油価格が1バレルあたり15ドルとか10ドルに低下すれば、エネルギー市場には混乱が生じて、非枯渇エネルギー源の利用に関するすべての研究、とくに水素の研究計画などに、決定的な打撃を与えることは必至であろうと考えられます。

水素エネルギーシステムにとって、このことはどんな意味を持つでしょうか？ それは、水素を生産し利用するシステムを開発し完成するための、時間的余裕をいまずこの間持っていることを意味しています。

熱化学法の研究は、世界中どこでも沈滞しています。アメリカでも、西ヨーロッパでも沈滞しており、おそらく日本でもいくぶんか縮小しているでしょう。昨年トロントで開催された世界水

素エネルギー会議には、熱化学的水素製造に関する論文が13件提出されましたが、新しいサイクルの紹介はなく、主として既知のサイクルの改良を扱ったものばかりでした。

熱化学プロセスには、二つの大きな問題があります。

第一の問題は、1次エネルギー源の必要条件に関する事です。

1次エネルギーは原子力すなわち核分裂か核融合、あるいは太陽でなければならないでしょう。ドイツでは、原子力をプロセス熱に用い、核エネルギーから水素をつくるプログラムに集中しています。アメリカには太陽エネルギー利用に関する、いくつかの計画があります。

それらの計画では太陽とのインターフェイス、すなわち太陽エネルギーを利用するやり方、を含む実験と研究が行われています。太陽は大規模な鏡のフィールドで集められ、中央の受光器へ集光されます。この受光器の内部には、ある種の熱交換器が設置されていて、受光器で集熱された熱を化学プロセスへ伝達するのです。

現在、アメリカ合衆国エネルギー省の、この太陽エネルギー利用計画には、3社が契約しておりますが、カリフォルニア州リバーモアにあるサンディア国立研究所が、それぞれの計画の管理を行っています。仕事は3個所で行われ、その一つはジェネラル・アトミック社のGAテクノロジー、他の一つはギャレット・エアー・リサーチ、もう一つがフォスター・ウィーラー社、これはアメリカの大きなエンジニアリング会社です。

このうちGAのプロジェクトは、化学プロセスへ太陽エネルギーを伝達するのに用いる熱交換器を、評価することが目的とされています。この熱交換器はインコロイ (Inconel) 800 H製のチューブで、触媒が充填されており、硫酸の熱分解で生じるSO₃の水の混合物がこの中を流れていきます。チューブは中央受光器の内側に設けて置きますので、混合物が500℃程度の温度から900℃程度の温度に加熱され、その結果SO₃がSO₂と酸素に分解されるのです。

この分解反応は熱化学プロセスの1段階でありまして、GAプロセスの場合には、もう2段階の化学反応が必要です。その一つは、ヨウ素と水とSO₂の反応によって硫酸とヨウ化水素を生成するもので、他の一つは、ヨウ化水素の分解反応です。このように3段階の熱化学反応があるわけですが、高温段階の反応がSO₃の分解で、これが中央受光器の中に集光された太陽エネルギーを用いて行われるのです。

ギャレット・リサーチ社で実施中のプロジェクトは、硫酸を加熱沸とうするためのシリコン・カーバイド製の熱交換器の開発に関するものです。硫酸の加熱沸とうには、大変やっかいな材料問題があります。普通の鉄も材料としては使えますが、伝熱面積の大きな熱交換器を作るのは困難です。そういうわけで、ギャレット・エアー・リサーチでは、硫酸の加熱沸とうと熱分解のための熱交換器を、シリコンカーバイドで作ろうとしているのです。

三つ目のプロジェクトは、米国フォスター・ウィーラー社で行われていますが、これはGAプロセスを太陽エネルギー源に結合する場合の、工学的設計とプロセス・コストの推定に関するも

のです。すなわち同社では、設備の諸元の決定、設備の配置設計、プロセス形態などに関する研究、および、プロセスの効率とコストの推定に必要な工学面の作業、などが行われております。

現在、熱化学プロセスの効率は、ご存知のように多くの推定値があり、GAプロセスについて私が知っている値は、25%から50%の範囲にわたっています。これでは広がりがありにも大きく、プラント建設にとって許容できる状況ではありません。しかしながら、このプロセスには明確な改良の余地がないわけではなく、それらに関して西ドイツのアーヘン工科大学のクノッヘ（Knoche）教授が研究を続けています。GAプロセスの研究は日本でも行われており、またイタリーのイスブラ研究所でも行われています。すぐ利用できるいくつかの改良法があり、これらによってプロセス効率は45%あたりに向上するかも知れません。

熱化学プロセスの第二の問題は、コストに関する問題です。

コストはとりわけ不確定な状況にあります。信頼しうるコストの推定値を、明らかにして提示するための工学的作業には、非常に多額の資金と長い期間を必要としています。けれども、現在の研究のスポンサー達は、概して、このような種類の工学的作業に資金を投入することを嫌っています。どちらかといえば資金は、もちろん大変重要なことではありますが、化学研究に関する方面や材料研究の方に流れがちです。

石油の時代、世界に石油がだぶついている時代には、過剰供給のゆえに、研究を支援すべき政府は、第1に多額の費用がかかり不確定要素の多い研究計画、そして第2に確かな1次エネルギー源がない研究計画、などを支援すべきであると強く感じる事が無いのです。しかし確実に、絶対確実に、いつかは自然エネルギー源から、すなわち太陽や核融合などの更新性エネルギー源から、エネルギーを生産しなければならないでしょう。その時がいつかということは、多く議論の分かれるところではあります。

私達のアメリカ合衆国では、2年ごとに下院議員選挙があり、4年ごとに大統領選挙があり、6年ごとに上院議員選挙があつて、このような制度のもとでは、長期的研究開発計画を維持して行くことが困難です。

それにひきかえ、もっと大規模な長期計画が進行している所があります。たとえばカナダは水素の強力なプログラムを持っており、それには、全く明白というわけではありませんが、つぎのような理由があります。カナダは大量の水力発電所を開発したがっていて、その電力をアメリカ合衆国の北東部に輸出したいと考えているのです。その場合に余剰電力ができるわけですが、ここでその余剰電力を使って水の電気分解を行うことが魅力的な投機とみなされているのです。このようにカナダは、余剰水力を持つことになりそれによって水素を生産しようということから、今後数年の間に、いわゆる水素経済の多くの分野を開発するものと期待されます。カナダのエレクトロライザー社は、水素開発をきわめて活発に積極的に遂行しつつあります。

ドイツでは、電解セルを約1000℃で運転する高温水電解法の開発が、過去8年にわたって

ホット・エリー (Hot-Elly) という名前のプロジェクトのもとで進められてきました。同社ではこのセルを、 300 mA/cm^2 の電流密度において 1.1 V の電解電圧で運転できるようになっていますが、これらの値は非常に魅力的な効率とコストの見通しを与えるものであり、したがって、水電解水素の新しい市場が開かれるかも知れません。

水素の貯蔵や末端需要機器に関する重要な問題についての研究も続けられています。私は今日、ミッシュメタルを使った小型の金属水素化物貯蔵システムの写真を見ました。それは、この日本で使用されているものですが、非常に興味深いものでした。このような成果と並行して、自動車エンジンや末端需要機器などについての成果が、世界水素エネルギー会議や、国際雑誌 Hydrogen Energy や、日本の H E S S の会誌などに定期的に発表されています。

本日の講演の題名は太陽に関するものですが、私の国ではこの分野の仕事が大切であると、私は思います。そして実際に私達は、太陽エネルギーを利用する方法について研究しています。プロジェクトは、材料問題、設計問題、熱伝達と化学反応速度論の問題、などの局面を包括しており、アメリカ合衆国エネルギー省が支援する研究開発計画の中で取り上げられているのは、このような種類の問題です。

これらのプロジェクトは推進されるでしょう。しかし、アメリカ合衆国における研究支援の体質からみると、どれくらいまで推進されるかということに、疑問の余地が残ります。研究開発資金をどの分野で使うべきかについては、経済界がそれを決めるべきである、というのが最近の強い気風になっているのです。経済界の短いタイム・コンスタント (時定数) に見合う研究に対しては、これは良い方法であると思いますが、長期的プロジェクトを採用することも、疑問の余地なく、十分に理にかなっています。

水素エネルギーシステムに向けて

水素にとって非常に大切だと思われることがあります。それは、工業国のうちのある一国のエネルギー・ミックスの中に、水素を導入する戦略を探ることです。

私達は特殊な場所、それも高度に管理できる特殊な場所、を見つける必要があると思います。たとえば航空機ですが、水素燃料航空機が陸地に墜落する惨事を見る心配がないように、一方の沿岸の空港から海を越えて地方の沿岸の空港まで飛べるような場所を、探す必要があります。私は、大阪が港湾の外に空港を建設しようとしていることを聞きましたが、ここなどは水素燃料航空機を導入するのに恰好の場所かも知れません。

他に可能性があるものとしてバス、タクシー、荷物自動車などの高度に管理された状況で運転される輸送機関が挙げられましょう。ここで大切なのは、保守や運転の手続きが適切に行われるように、高度に管理されていなければならないことです。

このような状況で仕事を進めることによって、保守やコストに関するデータも込んだ運転条件

が把握でき、それを通して他の人々の水素利用に対する理解と信頼が得られるようになるでしょう。私達は、このような仕事を行なうための時間的余裕を、いくらか持っています。石油のだぶつきがあと10年は続こうとしていますから、時間的な余裕はあるのですが、問題は、この種のプロジェクトに着手するために、適切な状況と適切な政治的機会を見つけ出して、計画資金をつくることであります。

私達は水素に対する長期的な必要性に、留意しなくてはなりません。炭化水素の供給は先細りになろうとしています。炭化水素のコストは増加することでしょう。そして、炭酸ガスの問題が懸念されます。大気中の二酸化炭素濃度は、毎年2ppmの速さで増加しています。この二酸化炭素が大気の放射と吸収の特性に影響して、太陽熱の収支を変えるかも知れないと心配されています。また、炭化水素の燃焼によって空気中に大量に放出される汚染物質の、大気汚染の問題もあります。

石油のだぶつきはしばらく続きそうだ、と私は言いましたが、それはOPEC以外の石油産出国が、できる限りの速さで生産しているからです。これに対してOPEC諸国が生産量を削減しているのは、非常に異常な状態であり、良いことではありません。なぜなら、OPEC以外のすべての国が力をつくして生産量を上げれば上げるほど、OPECは削減に削減を重ねます。これではOPEC以外の国の石油を枯渇させる方向に、加速的に進むことになり、一方のOPEC諸国が、おそらく以前にもまして支配的な立場で、返り咲くことになってしまいます。このような事態を、問題に対する明らかに合理的で賢明な反応、とみなすわけにはいきません。

水素は私達が生きている時代に不要だとしても、私達の子供達の生きる時代には、おそらく必要になることでしょう。そして、私達が現在できることは、水素のように、汚染のない再生可能なエネルギー・キャリアを利用するために、基礎を築くことです。私達は、ほぼ完全にとは言えないまでも、きわめて沢山の知識を明らかにしてきました。それらの上に私達は基礎を築くべきです。人類全体の利益となるであろう水素経済が構築できるように、その基になる環境と研究開発計画をつくることは、私達の義務であると思います。

太陽エネルギー、核融合と核分裂、などは重要な1次エネルギー源です。これらのエネルギー源に関する仕事を続けるための方法を見つけ、そしてまた、それらのコストを低下させるためのプロセスについて、仕事を続けるための方法を見出すならば、私達は現在の状況の中で最善をつくしていることになるのであろう、と思います。

御清聴ありがとうございました。

* * * *

本講演は、第50回定例研究会（昭和60年8月3日、学士会館）において行われたものである。訳文は、その録音テープから作成した。