

◆ 第 35 回技術予測シンポジウム講演録

原子力高度利用の可能性

エネルギー高度利用研究会
原子力水素研究会
代表 堀 雅夫

1. 原子力の輸送用利用

1 次エネルギーのうち電力に使われている割合は、日本やフランスで 40% 以上、OECD 全体で 35% ぐらい、世界全体だと約 30% となる。残りの約 70% が電力以外に使われているわけで、そこに原子力が特に輸送用にどのように入っていけるか、あるいはどのように役立っていけるかについて考えてみたい。

日本の電力部門と輸送部門のエネルギー構成を見ると、電力部門は化石燃料の占める割合がかなり減ってきているのに対し、輸送部門は石油が 98% を占めている。輸送部門で消費されるエネルギーは日本でも世界全体でも最終エネルギーの約 4 分の 1 に当たる。これを原子力で供給できるようになると、電力の場合と同様、地球環境保全、エネルギー自給への効果は非常に大きい。ちなみに、新国家エネルギー戦略の中では、2030 年に石油エネルギーを 80% まで削減するという目標値を掲げている。

では原子力で輸送用エネルギーを供給するというのはどういうことか。現在使われている輸送用のエネルギー媒体はほとんどがガソリンや軽油など石油起源の炭化水素を使っている。これに代わる有望なものは水素、電気、合成燃料 (DME、FT 油など)、バイオ燃料 (エタノールなど) が挙げられているが、原子力エネルギーはほとんどが熱エネルギーなので、その熱エネルギーをこれらのエネルギー・キャリアに転換することが必要になってくる。すなわち、原子力単独、あるいは化石燃料、バイオマスとの協働によって、水素、電気、合成燃料、バイオ燃料等を作り、これを自動車、航空機、鉄道、船舶に使っていくことになる。

自動車を例にとって考えてみると、図 1 のように、プラグインハイブリッド車や電気自動車、あるいは水素の燃料電池車では原子力や再生可

能エネルギーが入っていく可能性が高くなる。一方、原子力で炭化水素燃料の製造を助けることもできる。

2. エネルギー媒体としての水素

原子力で水素を作って、それを輸送用に使う技術の現状はどうなっているのだろうか。水素を輸送用エネルギー媒体として使う場合、燃料電池とエンジンの燃料の 2 つがある。自動車ではすでに両方が使われているし、鉄道でも現在 JR が燃料電池のハイブリッド車両を開発しているところである。おそらく 2~3 カ月後には試験走行を始めるだろう。航空機もすでに燃料電池の航空機が試験的に飛んでいるし、水素エンジンの航空機も試験的に飛んでいる。船も燃料電池のボートが企画されているようである。

特に日本の場合、輸送用エネルギーの 87% を自動車が消費しているので、自動車の影響は非常に大きい。経済産業省の諮問機関である燃料電池実用化戦略研究会が 2004 年に作った燃料電池車の普及構想では、2010 年に 5 万台、2020 年に 500 万台、2030 年には 1,500 万台に増やしていくと想定している。ただ、現在、

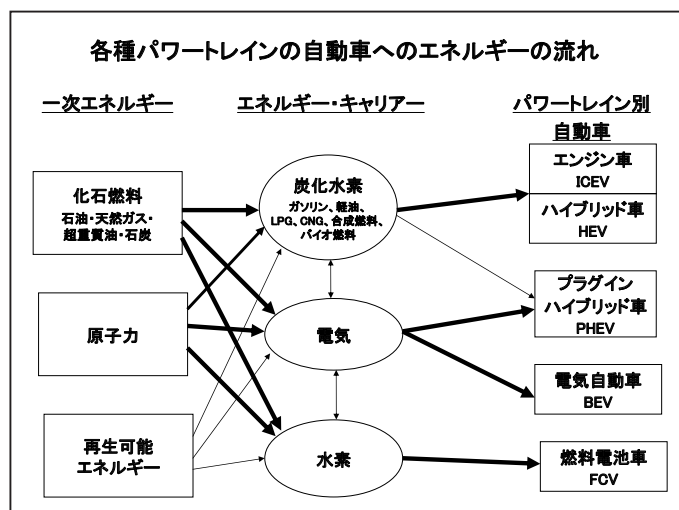


図 1 各種パワートレインの自動車へのエネルギーの流れ

導入ペースはこれより相当遅れていくのではないかという懸念が出てきている。もう少し幅広く水素を使っていく方が良く、あるいはこれらの用途が先行する可能性がある。

水素の航空燃料（ジェットエンジン用）としての利用の可能性も大きい。この場合はちょうど NASA の宇宙船と同じように液体水素として貯蔵していくことになる。欧州共同体とエアバスインダストリーとによるクライオブレインプロジェクトが3年ほど前に出した報告書によると、水素利用の特長として、液体水素は普通の航空燃料のケロシンに比べて単位重量当たりのエネルギーが2.8倍と大きく、重量を減らして最大積載量を大きくできることを挙げている。ただし、燃料搭載スペースを設けたり、構造的な変更が相当必要なため、実用化には15～20年かかるとしている。

環境効果としては、水素の燃焼で排出する水も温室効果ガスだが、炭酸ガスに比べて成層圏における滞留時間が2桁ほど短いので環境上のデメリットも少ない。当然ながら水素の製造においても炭酸ガスを排出しない方法を検討していかなければならないわけで、現在のところ化石燃料ベースではCCS（炭酸ガスの回収・貯留）をしない限りはうまくいかない。このところはかなり難しいという表現が出ている。ただ、エアバスの報告書では原子力には一切触れていないが、ハブ空港が要求するような大量の水素需要は原子力の得意とするところなので、利用の仕方によっては最も適した供給源になるのではないかと考えられる。

3. 原子力による水素製造

水素は電力と同じようにいろいろなエネルギーから作ることができる。再生可能エネルギーから作れば炭酸ガスの問題はまったくないし、原子力から作る場合も炭酸ガスは出てこないが、化石燃料から作る場合は炭酸ガス固定とセットで考えていく必要がある。現在、コストを含めいろいろな議論が行われている。

水素を原子力から作るメリットは何かというと、電気を原子力から作るメリットとまったく同じである。炭酸ガスを排出しないので環境保全に優れている、長期大量の持続的供給が可能である、そしてエネルギー密度が非常に高く、貯蔵することができるのでエネルギーセキュリティに優れていることである。エネルギー基本

計画でも「将来的には二酸化炭素を極力排出しない手段、例えば原子力や太陽光、バイオマスを活用した水素の製造等が期待される」と表現されているように、国の計画の一環として取り組まれている。

原子力から水素を作る方法はこれまでいろいろな方法が研究され提案されている（図2）。前述したように原子力は熱エネルギーなので、一番簡単なのは熱をタービン、発電機で電気に換え、水を電気分解して水素にするという方法である。この方法は現時点でも実用的に可能だが、水素にしたものを燃料電池で電気にするということで、二重のパスが生じるので無駄なことをやっているという議論もある。

原子力の高温の熱で水を熱化学分解するという方法は、熱分解と違って化学反応サイクルをいくつか組み合わせて分解するので、熱分解より低温で分解できる。現在、最も有望視されているのがISプロセス法と高温ガス炉の組み合わせで、原料は水だけで済む上、効率が高いことから各国で期待されている。このISプロセス法については、今、原子力機構が一番進んでいて、すでにベンチ試験を終わって、パイロット試験の準備をしている。その次のステップで原子炉と組み合わせることになるわけだが、2010年代半ば頃には高温ガス炉と結合して、実際のシステムとして水素を出していく予定になっている。

また、電気分解の1つの方法だが、熱と電気の両方を使って高温の水蒸気を電気分解する方法もある。本来高温になっているので効率は高くなる。

さらに、原子力と化石燃料の両方を使う「協

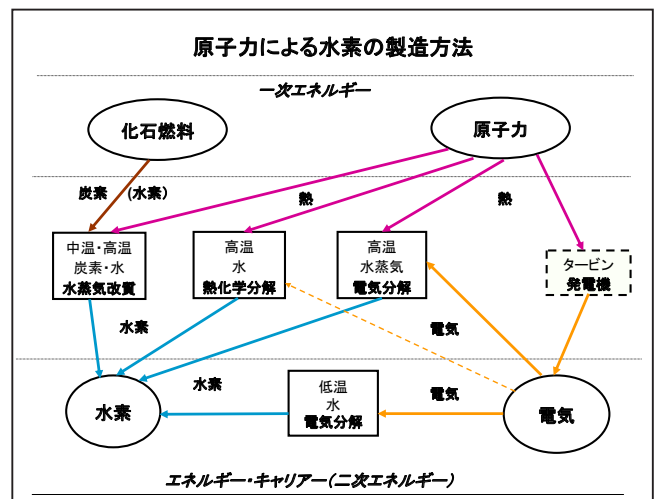


図2 原子力による水素の製造方法

働的」方法もある。現在、水素を作る場合に一番標準的に使われているのは天然ガスを水蒸気改質して水素を作る方法で、このときに熱が必要になる。その熱を原子力から与えることによって化石燃料の消費が30%ぐらい減ってくる。また、原子力の熱コストが相対的に安くなってきていることから、経済的にもかなり有望な方法である。

では、現段階での原子力による水素の製造コスト予測はどうなっているだろうか。アメリカの工学アカデミーの報告書によると、化石燃料から作る場合の供給コストはキログラム当たり1.7～1.9ドル、IS法原子力で作る場合は2.4ドルとある。キログラム当たり2.1ドルぐらいならガソリンと競合できるので、IS法原子力は競合範囲に入っているわけである。

水素供給への原子力の対応としては、もし早い時期での対応であれば原子力発電による電気分解がすでに実用技術になっている。ただし、水素製造コストは従来法の天然ガス改質水素より高くなる。また、早い時期にかなりの需要があるなら、原子力加熱の天然ガス水蒸気改質という方法での対応が考えられる。炭酸ガス排出がゼロではないが、技術的に問題がなく、低コストの水素を供給できる。さらに、水しか使わなくて済む水の熱化学分解法は、将来の本格的な水素利用の究極的・基幹的な方法と期待されている。その中でも現在最も有望視されているIS法と高温ガス炉の組み合わせは各国が開発を進めており、おそらく2020年代には実用化できると思われる。

他にもいくつかの新しい方法が提案されており、市場が要求する水素供給の規模・時期・コストや資源・環境規制に応える原子力利用方式の幅広い探査的研究は今後とも継続されていくはずである。

4. プラグインハイブリッド車への期待

次に、原子力からの電気を輸送用にどう使っていくかについて述べてみたい。ご承知のようにハイブリッド自動車はガソリンエンジンからの動力を電気に直して、電気とエンジン動力の両方で走るわけだが、走行のエネルギー源は全てガソリンになる。これに対してプラグインハイブリッド自動車は、外部から充電するための差込みプラグを備え、商用電源からの供給を可能にしている。走るときは電池容量が続く限り

は電力走行をし、充電量が減少するとエンジン駆動の走行に切り替える。すなわち、動力源は電力とガソリンの両方になる。

アメリカでは自家用車の平均的なドライブパターンを見ると、1日の走行距離が20マイル以下の車が50%以上だという。ということは、20マイル走れるだけの電池を持てば半数の車は電気だけで走ってくれることになる。アメリカでは石油の大部分は輸送セクターが使用している。一方、電力は石炭が50%、原子力が20%、石油は2%なので、電気で車が走るようになれば石油の使用をかなり減らすことができる。

というわけで、アメリカではここ3～4年、プラグインハイブリッド車に対するいろいろな研究が盛んに行われている。2006年には大統領の一般教書でプラグインハイブリッド用の新型電池開発を発表しているし、エジソン電気協会（日本の電事連に相当）もプラグインハイブリッド車開発の支持を表明した。また、地方自治体も環境のために取り組み始め、例えばニューヨーク州では州所有の600台のハイブリッド車をプラグインハイブリッド車に改造するために約11億円の予算を計上している。

日本でも自動車研究所がワークショップを開いたら、大勢の人が集まった。また、トヨタ自動車も積極的な対応を進めていて、プラグインハイブリッドの研究開発推進を表明した。さらに、プラグインハイブリッド車の成否は電池のコスト、容量、信頼性に係っているので、経済産業省も電池の開発に向けて50億円の研究開発費を提供している。

プラグインハイブリッド車導入のメリットとしては、燃料配送のインフラが不要で、唯一のインフラは延長コードだと言っても良いくらいインフラ整備が楽だということ、石油輸入問題解決に短期的に大きな効果を及ぼし得ること、現在検討中の水素などより技術的に速くできそうということ、走行経費もガソリンの5分の1程度の値段に抑えられること、炭酸ガス排出が相当減少できること、などが挙げられる。

日本には自家用乗用車が5,400万台ぐらいあるが、小型・普通車は年間平均1日27キロぐらい走るが、走ってない日もあるので、走る日は1日40キロぐらい走る。走行パターンを見ると、約半分の車は1日20キロ以下なので、例えば7割を電気で走らせようとした場合、平均的な軽自動車ですら35キロ走ってくれるバッテ

リー、小型・普通車の場合約 60 キロ走って
くれるバッテリーを積みば良いことになる。

7割を電気で走った場合、5,400万台でどの
くらいの電気が必要になるか。夜間8時間充電
するとして35ギガワット。別の計算の方法だ
と20ギガワットとなるので、20ギガワット
から35ギガワットぐらいのオーダーで考えれ
ばよいであろう。これは百万キロの発電所20
～35基に相当する。

日本の電力需要は日中にピークが来て、夜間
は減る。日中と夜間の差は50ギガワット以上
あるので、仮に日本の乗用車が全部プラグイン
ハイブリッドになって、7割を電気で走らせる
ようになって、現在の電力キャパシティの中
で電力供給ができることになる。

ただし、現在の電力の需要供給の割合は図3
のように、日中の需要ピーク時に水力発電、火
力発電が入っている。深夜時間帯電力の相当部
分は原子力発電の定格負荷運転によって供給さ
れているので、プラグインハイブリッド車によ
る夜間の電力需要増に対応するには火力発電を
もっとたくさん焚かなければいけないというこ
とになる。環境的な問題を考えるなら、やはり
ここは原子力発電の比率を上げていくことが望
ましいといえよう。

前述したように技術のネックは電池である。
リチウムイオン電池の良いものができるかどう
か。現在かなりの改良が行われていて、経済産
業省の研究会が昨年まとめたデータによると、
1キロワットアワー当たり20万円という電池
のコストを7分の1に下げることがあるとい
う。7分の1というのは1キロワットアワー当
たり3万円ぐらいだが、このぐらいになると、

10年間保有のライフサイクルコストで普通の
自動車よりも有利になるし、ハイブリッドより
も有利になるという。これが達成できるかどう
か。現在、世界各国がこぞって電池開発に取り
組んでいるので、その成果に期待したい。

5. V2G：車から系統への電力融通

もう1つ、エネルギー的に見たときに関心
があるのはV2G（ビークル・トゥ・グリッド）
である。これまではガソリンをエンジン自動車
に給油していたわけだが、プラグインハイブリ
ッド車ではガソリンと電気を自動車に供給する
ので、自動車が電気エネルギーを持つことにな
る。もし系統側が必要とした場合は車の電池か
ら電力を融通する。これがV2Gである(図4)。

統計によると自動車は使っている時間の96
%は駐車しているという。この96%の時間に
プラグインしておいてもらえば、あとは系統側
が適当に電気を使わせてもらい、その分は何
らかの金銭的なペイバックをしていくわけであ
る。最近アメリカの電力会社がプリウスの改造
型のプラグインハイブリッド車から家庭に電気
を送って、家庭のメータが逆に回るのを確認す
るというデモを行ったが、すでにそうした検討
が行われている。

例えば青森県などでは風力発電が盛んだが、
風力発電は変動電源なので、それをプラグイン
ハイブリッド車の電池が吸収する。あるいは逆
に変動需要への対応もある。例えばサンフラン
シスコにBARTという地下鉄があるが、発進の
ときには電気をたくさん使うし、停止のときは
電気が余ってくる。それを駅前に停めてある車
がプラグインしてバッファ機能を果たせば、電

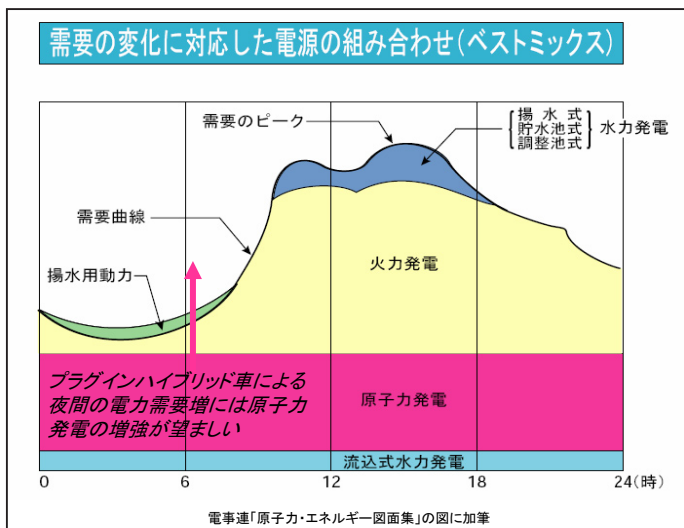


図3 需要の変化に対応した電源の組み合わせ

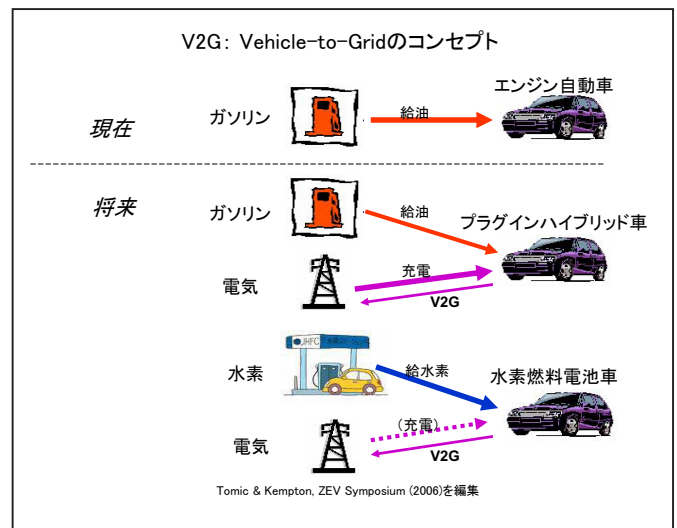


図4 V2Gのコンセプト

国	乗用車 台数 [万台]	V2G電力 @15KW/台 [GW]	全発電電力 (平均) [GW]	V2G/全発 電電力 [-]
フランス	2922	438	50	8.85
ドイツ	4465	670	58	11.49
イギリス	2845	427	40	10.81
米国	19100	2865	417	6.86
日本	5444	817	113	7.23

Kempton, W. and A. Dhanju, "Electric Vehicles with V2G: Storage for Large-Scale Wind Power" Windtech International 2 (2), pp 18-21 (March 2006)の図に日本のケースを加筆・編集

図5 主要国のV2Gポテンシャル

力会社との契約料金を下げることができる。このようなかたちで変動電源や変動需要に対して車のバッテリーのバッファが効いてくる可能性がある。

図5はその可能性の計算例である。乗用車1台1台が車を動かすぐらいの電池を持っているので15キロワットぐらいの出力が使える。それに台数を掛けたものが、自動車融通できる総電力ということになる。そのV2G電力と、その国が平均的に発電している電力とを比べてみると、日本やアメリカではV2G電力が約7倍になる。多い国だと10倍以上になる。つまり、自動車がある割合でプラグインしておいてくれるだけでも相当な電力が系統側へ融通できることになる。このあたりも自動車が電気で動くことによるエネルギー的な1つの効果だといえよう。

6. 原子力による合成燃料、バイオ燃料の製造

電気だ、水素だといっても炭素分を含む燃料、特にガソリン・軽油のような液体燃料はエネルギー密度が非常に高く、水素や電気よりも運搬・貯蔵が楽で輸送用としては扱いやすい。環境が許す限りは使っていきたいという思いがあることは事実だろう。

ただ、液体燃料はこれまで主として石油を精製して作られてきたが、価格や供給面での懸念が出て来た。そこで、その代替策の取り組みがなされているわけだが、そこに原子力が貢献できるのではないかと考えている。今考えられている代替策としては、1つはオイルサンドなど超重質油の合成原油化で、これにはどうしても水素添加が必要なためそこに原子力の水素を供

給する。もう1つは、天然ガス、石炭などの液化・ガス化による燃料合成で、これにも吸熱反応と水素が必要な部分があるためそこに原子力を入れる。3つ目はバイオマスからエタノールを製造する方法で、このプロセスで熱が必要になる。例えばアメリカの場合だとトウモロコシから作るプロセスでかなりの天然ガスを消費しているが、原子力発電所から一部熱を渡すことでこれを減少させることができる。

図6にあるように、液体燃料はエンジンで成分の炭素が燃焼されることによりテールパイプからCO₂を出すわけだが、製造段階でもCO₂を排出する。軽質の原油からの蒸留精製で製造されるガソリン・軽油などでは製造段階でのCO₂排出は少ないが、重質の原油や石炭から製造される合成燃料などでは水素添加・加熱に原料・エネルギーが必要なため製造段階でのCO₂排出は多くなる。

これをできるだけ減らしていくために、重質原油に水素を添加してガソリン・石油などを製造する場合、オイルサンドなどの超重質油に水素添加して合成原油にアップグレーディングする場合、あるいは石炭から合成燃料を製造する場合に、化石燃料からの水素に代わって原子力水素を利用していくことが検討されている。

合成燃料などの製造における原子力の役割を考えると、水素供給と熱供給が中心になり、エネルギー量としては補助的になるが、化石燃料を燃やす必要がなくなるので炭酸ガス排出を低減できる。化石燃料と原子力と両方のエネルギーをうまく使うことによって資源節約になる。原子力の熱はほかのエネルギーの熱よりも相対的に安くなってきているので経済性が期

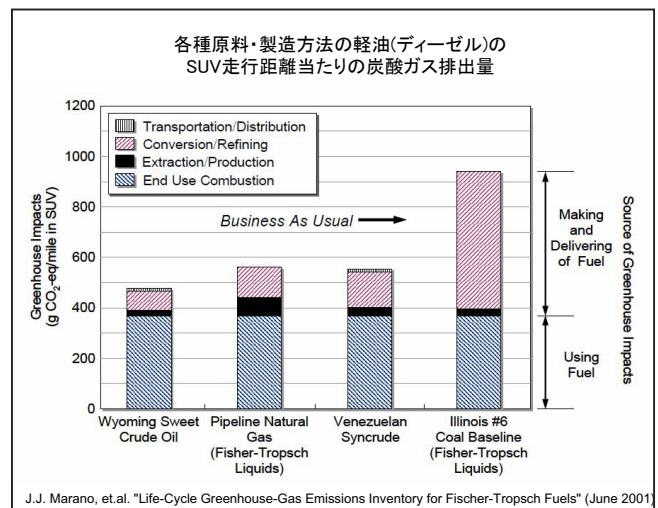


図6 各種原料・製造方法の軽油の炭酸ガス排出量

待できる、といった効果がある。

これは化石燃料との協働だけでなく、バイオマスとの協働プロセスでも同様の効果が期待できる。そもそも熱エネルギーを電気や水素に換えるときには半分以上のエネルギーが熱エネルギーとして損失されてしまう。ところが、例えば化石燃料などの化学エネルギーの吸熱反応のプロセスに原子力の熱を加えてやれば、もとの化石燃料のエネルギーはそのままエネルギーとして蓄えられていくので、エネルギー効率は高くなるわけである。

7. 原子力高度利用の見通し

では、原子力が今言ったようないろいろなプロセスにエネルギーを与えるだけの余力があるか、あるいは資源量があるかという問題だが、図7は世界エネルギー協議会のBケース（中庸ケース）で予測したものである。2100年時点では、ほとんどの原子力は発電に使うということで、世界の1次エネルギーベースで原子力は4分の1ぐらいになり、発電の2分の1が原子力発電になるという。

これだけの供給を賄うには現在の陸上ウランの1,700万トンベースでは足りないので、どうしても燃料リサイクルが必要になる。リサイクルするにあたって高速炉を使う場合、プラントの設計によって増殖比の調整が可能なので、リサイクルの条件をできるだけ良くしたプラントを造っていくことによって、我々が使うエネルギーを十分に増やすことができるのである。原子力積極利用の試案によると、世界エネルギー協議会のBケースの1.5倍から2倍ぐらいのエネルギーを原子力から供給できる。すなわち、輸送用、水素用、あるいは合成燃料用のエネルギーを供給する余力は十分にあるということになる。

これまで原子力はほとんど発電用に使われてきた。21世紀はそれに水素、そして合成燃料が加わってくるはずである。電気の使われ方も電子機器や電気機器だけでなく自動車にも供給される。

では、その技術的な見通しはどうかというと、図8のように水素は自動車での燃料電池技術はまだブレークスルーが必要だというのが大方の見方で、その意味では輸送燃料の本命ではあるが長期的導入を狙っていくということになる。一方、途中の段階で原子力起源の水素は

合成燃料の方で必要になってくるので、むしろこうした産業用利用がかなり増えていくだろうと思われる。

電気は、転換技術としてはすでに軽水炉の発電は実用段階にあるし、プラグインハイブリッド車は2010年から2015年ぐらいに導入されると想定されるので、最も速く短期的に導入されていくだろうと思われる。と同時に、これは電気と内燃機関以外の燃料電池などとの組み合わせが可能なので、他のキャリアと組み合わせることで継続的に利用されていく可能性がある。

合成燃料は、原子力利用の転換技術はまだ提案と研究の段階にあるが、自動車での利用技術は内燃機関ですでに利用可能になっている。合成燃料は炭素を含んでいるのでどうしてもテールパイプから炭酸ガスが出るが、環境が許す限りは継続利用されていくことになると思われる。

以上、お話ししてきたように、原子力は電気、

	1990年	2050年	2100年
化石燃料	6.9	12.7 → 11.4	15.0 → 5.0
原子力	0.45	2.7 → 4.0	8.3 → 18.3
水力、再生可能	1.6	4.4	11.4
合計	9.0	19.8	34.7

図7 原子力によるエネルギー供給可能量

一次エネルギー	エネルギーキャリア	技術の現状		期待見通し
		原子力利用の転換技術	自動車での利用技術	
原子力 (化石燃料 バイオマス と協働)	水素	研究・開発段階	燃料電池のブレークスルー必要	長期的導入 輸送用燃料の 本命
	電気	実用段階	プラグインハイブリッド車 数年内	短期的導入 他キャリアと組合 せて継続利用
	合成燃料 (含バイオ燃料)	提案・研究段階	内燃機関で 利用可能	中期的導入 環境許容下で 継続利用

図8 原子力による輸送用エネルギーの見通し

水素、合成燃料を通じて、輸送部門へエネルギー供給が可能であること。自動車の電動化を推進していくときには、どうしても原子力発電の方にシフトしていかないと自給、資源、環境に効果が発揮されないということ。原子力にはこのようなエネルギー供給の余力はあるということ。輸送用エネルギーを原子力から供給することによって、その分の化石燃料消費を削減できるということ。技術としては、原子力と化石燃料、あるいは原子力とバイオマスとの協働的プロセスは両エネルギーの効果的使用による資源節約、CO₂削減、コスト低減などの効果が期待でき、今後の研究開発の成果を期待しているところである。

(ほり まさお)

※尚、本稿は、2007年4月19日に開催された第35回技術予測シンポジウムの講演内容を要約し、取り纏めたものです。