

1.水素博士の恋

人呼んで水素博士。横浜国立大学工学部の太田時男教授（47歳）は、いま恋人のことで頭がいっぱいである。

「縁ができたのは二〇年以上も前。ときどき会っては、ため息をついていたんですが、ついに病みつきに……」

ただし、博士のいう“恋人”とは、人類究極の燃料といわれる水素のことである。

“奥さん”に当たる本業の低温物理を放り出して、1973年夏から、水素に熱中。そこへ、秋からの石油危機。“恋人”は、あれよあれよというまに、いまをときめく大スターになってしまった。



第15回世界水素エネルギー会議（2004年、横浜）

この“恋

人”、博士をとりこにするだけの魅力を確認に持っている。

まず、きれいなこと。

石油や石炭などの化石燃料を燃やすと、一酸化炭素、亜硫酸ガス、窒素酸化物。炭化水素類、煙が出て、空気を汚し、光化学スモッグをひき起こしたりする。ところが水素だと。燃やしても空気中の酸素と化合して水になるだけ。燃やす条件をくふうすれば、窒素酸化物の発生も防げる。公害の心配は、ほかのエネルギーに比べてケタ違いに少ない。

第二の魅力は、内に情熱を秘めていること。1グラムあたり、ガソリンの3倍もの熱を出す。（表）

第三は、意外にしとやかなことだ。

「中学校の教科書には、水素と酸素を混ぜると、爆発する、などと書いてありますが、使い方のツボさえ心得ていれば、怖いことはありません。現に、水素ガス50%に猛毒の一酸化炭素40%という都市ガスを、つい最近まで使っていた家庭がたくさんあるのですから……」と、太田博士。

そのうえ、いろいろな才能を持っている。サターン5型ロケットの燃料として人類の月着陸にすでにひと役買ったが、自動車や飛行機の燃料としても有望だ。

米オクラホマ大のショッペル教授、マイアミ大のアッド助教授が、1972年、水素自動車の運転に成功してから、アメリカでは、つぎつぎと無公害の水

素自動車が発表されている。燃料が切れたらガソリンスタンドならぬ“水素スタンド”に立ち寄って水素を注入してもらう。

水素ガスを大量に“吸い込み”、必要なときに吐き出す不思議な金属化合物が、すでに見つかっており「燃料タンク」の有力候補だ。

水素飛行機の方は、次の節でご紹介するように、ボーイング、ロッキード、ゼネラル・エレクトリックなど、アメリカの大手の会社が熱心に研究しており、5年以内に大型のジェット旅客機を水素で飛ばす計画も具体化している。

これまで、エネルギーを遠くへ運んだり、分配したりする手段として、理想的な「二次エネルギー」と考えられていたのは「電力」。光や熱にたやすく変えられるし、情報、通信のエネルギー源としては、かけがえがない。しかも、汚染ガスが出ないクリーン・エネルギーだからである。

ところが、エネルギー需要が増すにつれ、電力の欠点がクローズアップされてきた。

第一は、電力だと、余っても貯蔵しにくいという点。大量の電力をたくわえる蓄電池は、まだ実用化されていない。「揚水発電」というのがあって、夜間の余った電力でポンプを回して、ダムの下の池の水をくみ上げておき、電力需要の多いとき、これで水力発電をする方式が実用化されてはいるが、応用できる地形が限られている。

「貯蔵できない」という電力の欠点は、原子力開発にとっても深刻だ。いったん“原子の火”をともしたら、需要におかまいなく、昼夜の区別なく一定出力で運転するのが原子炉や核融合炉の特徴なのだから。また、燃料の取り替えや点検のため、年間のある一定期間は、運転を止めなければならないからでもある。

ところが、水素なら、余った分は、たくわえておける。天然ガス同様、地下に貯蔵する方法、液体水素にしてタンクに貯蔵する方法、マグネシウム、コルト、ニッケルなどを含んだ特殊な物質の原子間に水素ガスを“吸収”させておく方法……。

「電力」のもう一つの欠点は、輸送中のロス。電線には抵抗があるので、電気エネルギーの一部は電熱器と同じ原理で、熱エネルギーに変わって逃げてしまう。大量を長距離輸送するようになると、これがバカにならない。

ところが、水素ガスなら、天然ガスと同じ技術を使って、パイプラインで損失なく送ることができる。

そして、電力がほしいときには、水素エネルギーをたやすく電力に変えることができる。たとえば、電気分解とさかさまの原理で水素から電気をつくる「燃料電池」は、すでに実用段階にはいっている。(85 ページ)

石油の代わりに水素を燃やして発電する。“水素発電機”の開発も始まっている。

おまけに、水素の原料は、無尽蔵の海水だ。

水を分解すれば、水素と酸素になることは、中学生でも知っている。それなのに、こんな魅力あふれる水素が、これまで燃料として使われなかったのは一。

「人びとが、石油を燃やすことの汚なさに無神経だったためでもあり、石油

と競争できるほど安く水素をつくる技術がなかったためでもあります」と。太田博士はいう。

水素は、化学工業の原料などとして、現在すでに売られている。しかし、それは、水を電気分解したり、石油や天然ガスに熱い水蒸気を吹きこんだりしてつくられている。これだと、1立方メートルあたり小売値で100円から500円。石油に立ち向かうには、30円まで下げねばならない。

それに石油を分解したり、石油を燃やして発電した電気で水を分解したりして水素をつくったのでは、まわり道して、とどのつまり石油を使っているのと同じこと。これでは、エネルギー危機や環境汚染の解決にはならない。

ところが、第三節で紹介するように、太陽の光や原子力を使って水素をつくる道が次第に開けてきた。

太田博士は、太陽エネルギーと核エネルギーから水素と電力を得て、たがい欠点を補い合う図のようなシステムを提案している。

これらの計画を実現するには、いくつかの障害を越えねばならないだろう。

たとえば、水素分子は小さいので、細かいすきまから逃げやすく、しかも、広がる速度が速いので、漏れ出た場所からかなり離れたところの火によっても引火するおそれがある。発火温度は高いのだが、発火に必要なエネルギーは少ないので電気火花でも火がつく。そして、燃える速度が気体の中で最も速い。水素はまた高温、高圧の状態だと鋼材を腐食する。鋼の中の不安定な炭化物と、侵入した水素が反応してメタンができ、そのため小さなヒビがはいて、鋼がもろくなるのだ。ふつうの温度でも、鋼に水素が吸収されると伸びや絞りなどの延性が低下する現象があり「水素ぜい化」という名前までついている。

未知の部分を秘めている水素を使いこなすには、だから、多くの基礎的な研究が不可欠である。

2、水素で飛ぶジェット機

1954年から数年間、日本は、原子力ブームに包まれた。ネコもシャクシも原子力、といわれたほどで、人びとは、すっかり原子力にとりつかれ「自動車も飛行機も、そのうちに原子力で走るようになるそうだと、うわさしあった。

が、それから20年もたつのに。原子力自動車も、原子力飛行機もさっぱり実現しない。

原子炉は、けっこう重くて大きいからである。しかも、放射線という困ったものを出す。それを防ごうと思えば、原子炉のまわりに、重いコンクリートの壁を築かねばならない。

そんな防護壁まで自動車や飛行機に積み込んだら、それだけで重すぎて、とても走り出せないだろう。まして、飛行機にいたっては、飛び立てないかもしれない。

そのうえ、事故もこわい。原子力飛行機が墜落したら、そこらじゅう“死の灰”だらけで、手がつけれなくなってしまう。

アメリカの科学者たちは、「水素時代」は、まずジェット機から始まるだろうと予測している。

水素ジェット機については、すでに、いろいろな研究が行われ、試験飛行もすんで、技術的に可能なことは実証済みだからである。

その実験を行ったのは、米航空宇宙局（NASA）の前身である全米航空諮問委員会（NACA）。

この委員会に所属するルイス飛行推進研究所（いまのNASAルイス研究センター）のシルバースタイン所長らが、1955年ごろから熱心に研究した。もちろん、当時は軍用機を水素で飛ばすつもりだったから、研究はすべて極秘にされた。論文が公開されたのは最近のことである。

このとき、ルイス研究所では、B57という双発ジェット機のつばさの端に液体水素のタンクを取りつけた。離陸して一定の高度に達するまでは、ふつうの灯油で飛び、飛行の途中で、片方のジェット・エンジンを、水素燃料に切り替えた。ふつうのエンジンを、水素で動かしてみたのである。

試験飛行は、1956年から数年間にわたって、カナダとの国境に近いエリー湖の上空1万5000メートルのところで何回も繰り返され、マッハ0.75の飛行を続けることができた。燃料タンクが小さかったので、水素で飛んだ時間は、1回あたり20分ぐらいだったが、エンジンの回転などは順調そのものだった。

この試験飛行と並行して、もっと大がかりな開発計画も進められた。担当したのは、ロッキード航空機会社の研究者たちで、最終目標はマッハ2.5で飛び超音速の二人乗り偵察機CL400を作ることだった。航続距離は4000キロと予定されていた。これに使う水素エンジンは、プラット・アソド・ホイットニー（PW）社が開発した。これも極秘計画で、その成果が公開されたのは、1973年5月のことだった。

この偵察機づくりは1956年に始まったが、その当時は、液体水素を取り扱う技術はアメリカにもまったくなかった。「液体水素」などというシロモノは、研究室のなかで、科学者たちの好奇心をいささか刺激するほどのものでしかなかった。

開発は難儀をきわめたが、予想された問題点は、つぎつぎに解決された。エンジンのほうは、実物大のものを使って試運転をするところまでこぎつけ、機体のほうも、いよいよ本物をつくろう、というところまでできた。しかしー。

政府と会社は、その製作をあきらめた。理由は、液体水素がかさばって航続距離を延ばせないこと、全世界の空港に液体水素の供給設備を作ることは、技術的にも経済的にも不可能であること、の二つであった。

技術者たちは、涙をのんで、この計画から手を引いた。

それから17年以上たったいま、その研究成果は、あらためて高い評価を受けている。

それはなぜか。その後、月に人間を送るという壮大な宇宙開発計画のおかげで、液体水素の安全性、貯蔵法、輸送技術などの研究が大幅に進み、いまや水素は、ガソリン並みに安全なものになったからである。

月に人間を送ったアポロ宇宙船は、サターン5型という高さ110メートル

ル、直径 10 メートルもある巨大なロケットで打ち上げられたが、このロケットの二段目と三段目は、液体水素を燃料として使った。二段目には 98 万リットル、三段目には 24 万リットル。これらの液体水素は、西海岸のカリフォルニア州サクラメントにあるユニオン・カーバイド社の工場で作られ、東海岸のケネディ宇宙センターまで列車やトレーラーで運ばれた。だが、水素だから特に危険、と思われるような事故は一度もなかった。

ただ一回、1972 年の 10 月に、フロリダ州のタラハシーを走っていた液体水素運搬トレーラーが信号無視の乗用車にぶつかられて横転するという事故があった。運転手と助手は軽傷ですんだが、トレーラーの液体水素タンクはかなりの損害を受け、魔法びんのように二重に作られたタンクの真空のところが破れ、液体水素は蒸発しはじめた。まずジーゼル・エソジソの燃料に火がつき、それが水素に燃え移った。だが、NASA の専門家がかけつけるまえに、町の消防車が火を消し、大破したトレーラーを、ふつうのレッカー車で無事に引き起こした。

というようなわけで、液体水素の製造や運搬にたずさわっている人たちは「ガソリンよりも危険なことは、なにもない」と考えている。将来、ジェット機の燃料として使われる場合でも、いまの燃料である灯油よりも危険なことは、たぶんないだろうと予測されている。

この技術を背景にして、アメリカでは、水素ジェット機の具体的な計画が、いま練られている。

たとえば、ボーイング社は、ジャンボ・ジェット機のボーイング 747 の胴体をさらに大きくして、客室の上下に、液体水素を積み込むことを考えている。前の節で述べたように、液体水素は灯油に比べて格段に軽いから、満タンにして離陸するときの重量は、灯油の場合の約 350 トンに比べ、約 270 トンと軽い。そのため、離陸のときの滑走距離は、灯油のときの約 3.6 キロに比べ、半分ほどの 1.6 キロですむ。

ロッキード社は、エアバスの DC10 または L1011 クラスのジェット機を水素化しようと考えている。この場合、胴体の中に液体水素を積む計画のほか、つばさの先端に大きな水素タンクを取りつける計画もある。DC10 の場合は、タンクの直径は約 3.7 メートル、長さは約 23 メートルになる。これは、胴体の半分に近い長さで、かなりぶかっこうだ。

しかし、中身の液体水素は軽いので、全体の重さも軽く、胴体のうしろについている三つ目のエンジンはなくても飛ぶことができる。両翼の二つのエンジンで十分なのである。

そのほか、ロッキード社では、水素を燃料とする新型超音速旅客機 (AST) も考えており、この研究には、すでに NASA から研究費が出されている。

ボーイング社は、マッハ 2.7 で飛ぶ超音速旅客機 (SST) を開発していたが、環境問題に大きな関心が寄せられた 1971 年春に「SST は公害をまき散らす。ひとにぎりの人にしか奉仕しない SST の開発に大金を投じる必要はない」と、議会の議決によって開発費を断たれ、計画を中止した。

灯油を使うSSTは、確かに大気を汚染し、騒音をまき散らす。しかし、水素を使うASTなら離陸距離も短いし、SSTよりもっと高いところを飛べるし、炭酸ガスや硫黄酸化物もまき散らさないし……と、ロッキード社の技術者たちは、まき返しをはかっている。

公害が少ないことは、水素ジェット機一般にいえる、とアメリカの研究者たちはいう。

水素の燃えかたは速いので、空気中の窒素を有害な酸化窒素に変える心配も少ないし、ススや悪臭をまき散らすこともない。機体が軽いので、滑走距離が短く、急上昇も可能なので、空港周辺への騒音の影響も小さくなる、というわけだ。

これまでの予備的な実験によると、ジェット・エンジンそのものは、ほとんど手を加えないで、そのまま水素用として使える。問題は、超低温の液体水素をどのようにしてタンクに納め、気化してエンジンに供給するのだが、これまでの研究によると、発泡ポリウレタンなどの断熱材をタンクの内側または外側に厚さ15センチぐらいはっておけば、低温に保つことができそうだという。

軽いかわりに、灯油の3、4倍はかさばるところが、水素の欠点で、ジェット機の場合は、空気抵抗がふえて困るが、機体が軽くなる分をてんびんにかければ、十分におつりがくるという。

水素ジェット機が実際にお客を乗せて飛ぶのは、1990年ごろからと推定されているがそのころには、自動車にも、家庭の冷暖房や調理にも水素が使われるようになっていくかもしれない。

水素で自動車を走らせるのは、意外に簡単だ。エンジンは、いまあるものを、ほとんどそのまま使えるし、ススなどが出ないから、たぶん水素のほうが、エンジンは長持ちする。

燃料タンクがかさばるのを、どう始末するかが課題である。

家庭用の燃料として使う場合、水素は燃えても有害なガスを出さないので、煙突はいらない。そのため熱効率は、いまの都市ガスより30%は上がるはずだ。燃えてできる水蒸気は、部屋にほどよい湿気を与えるのに役立つだろう。

水素は触媒燃焼によって、摂氏100度の低い温度で燃やすこともできるので、料理法にも革命が起こるかもしれない。

もちろん、すべては閉じた容器の中で、自動調節装置をフルに活用して行われ、安全が何よりも優先されて設計されるはずである。

3. 安く水素をつくる法

「太陽を輸出したい」と、突拍子もないことをいい出した男がいる。かれはいった。「オーストラリアは、世界でも有数の太陽輸出国になれるはずだ」と。

この男、そこらのヤマ師ではない。南オーストラリアのフリンダース大学物理化学教授ジョン・ボッグリス博士である。

「太陽を輸出するなんて……」と、不思議に思う人も多いただろうが。ボッグリス博士の計画は、いいかげんなものではない。「太陽エネルギーを液体水素に変えて、各国に輸出したい」という現実的な提案なのだ。

博士によると、オーストラリアの内陸部には、広大な空き地があり、毎日、強い日射しにさらされているという。ここに、太陽電池を並べて、太陽光を電気に変える。

その電気で海水を電気分解して水素ガスをつくる。このガスは、都市ガスと同じように、パイプでどこへでも送ることができる。近くの港まで送ったら、液化してタンカーに積み、先進国へ送り出す。

受け取った先進国では、この液体水素を燃料電池に入れて電気に戻したり、飛行機や自動車の燃料にしたりする。

ボッグリス博士の計算によると、375平方キロの土地があれば、西暦2000年ごろアメリカが必要とする全電力を、水素の形でらくに供給できるだろうという。

太陽電池が実用化されていることは、12ページの節ですでに述べたし、燃料電池が実用の域に達しつつあることは、85ページの節でみたとおりである。

要は経済性だが、12ページの節で述べたように、近い将来、太陽電池の値段が下がれば、採算ベースにのるだろう。

ボッグリス博士は、計算の基礎をこまかくは述べていないが、「オーストラリアに太陽光発電所をつくるとすれば、建設費は1キロワットあたり五万2000円から九万1000円ぐらいであがるだろう」と、いっている。

100万キロワット級の原子力発電所の建設費が1キロワットあたり5万9000円から7万3000円であることを考えれば、太陽光発電所は、決して割高ではない。なぜなら、原子力発電所の場合、ウラン燃料をずっと供給しなければならぬが、太陽光発電所では、燃料はいらないからである。

だが、このように、電気をつくって、それで水を分解するというのは、もっとも初歩的な方法といってよいだろう。

原子力の場合も同じだ。原子力発電をして、その電気で水を分解すれば、確かに水素ができる。しかし、この場合、ウランが出す熱エネルギーの30%か40%しか電気に変わらず、その電気エネルギーの70%から90%ぐらいしか水素に変わらない。つまり、全体として、ウランのエネルギーの20%から35%ぐらいしか水素にならないのである。

そこで、科学者たちは、太陽エネルギーや原子力をいったん電気に変えるのではなく、それらを使って、じかに水素をつくる方法を見つけることに熱を入れている。

なかでも、世界的に注目されているのは、東大生産技術研究所の本多健一助教授と神奈川大学工学部の藤嶋昭助教授が発見した原理。水の中に半導体を沈め、太陽光線を当てると、水素と酸素が出てくるだけでなく、電気も流れる、という一石二鳥の方法である。

ところが、ノーベル賞をもらった江崎玲於奈博士のトンネル効果発見のときと同様、この研究も、1972年7月、イギリスの科学専門誌「ネイチャー」に発表されたときには、日本ではほとんど注目されなかった。だから、1973年夏、パリで国際太陽エネルギー利用会議が開かれたとき、出席した日本の科

学者たちは、外国の数多くの研究者たちから「フジシマの研究はどう進んでいるか」と質問されてすっかり困ってしまった。フジシマが、いったいどのだれやら分からなかったからだ。

この話を聞いてから半年ほどたったある日、やっとのことでフジシマ氏を見つけた。東大生産技術研究所出身の藤嶋昭さんだった。暗幕をはった暗い部屋で、実験を見た。

実験装置は、まだ、手のヒラにのるほどの小さなプラスチックの水槽。この水の中に、模造ダイヤモンドと同じ酸化チタンの単結晶でできた半導体（N型）と黒色の白金板が入れられ、導線でつながれていた。

鏡のように光る半導体に青白い光を当てると、電流計の針が大きく動き、しばらくすると、二つの極からこまかなアワが出てきた。光を当てた極から出てきたのは酸素、もう一つの極から出てきたのは水素ガス。

光を当てたことによって電気と水素ガスが同時に発生したのだ。

ある種の半導体に光を当てると、電流が発生することは、一九世紀に発見され、これを応用して太陽電池が実用化された。

しかし、半導体が水素ガスを発生させるというのは、まったく新しい発見であった。

この原理は、ごく偶然の機会に見つかった。水を電気分解するとき。電極に半導体を使い、光を当てたら効率が上がるのではないか。という予想をたて、実験を進めていったところ。効率が上がるどころか、電気なしでも“電気分解”が起き、おまけに電気まで発生する、という奇妙な現象を発見したのだ。

一方、大阪大学工学部の田村英雄教授と米山宏講師は、半導体を電極にした新しい太陽電池を作ろうと研究を進めていた。ところが、光を当てると、電池の溶液の中にガスが発生してしまう。「困ったな」と思ったが、ガスを調べてみると酸素と水素。「これは新発見」と、喜んだのだが、アメリカから取り寄せた文献を読んでいるうちに、同じ日本で、ひと足お先に本多助教らが同じ原理を発見していたことを知り、驚くやらがっかりするやら……。

とはいうものの、田村教授らの実験で、白金電極の代わりに半導体のリン化ガリウム（P型）を使うと、さらに効率よく水素ガスが発生することがわかった。

ホンダ・フジシマ効果と呼ばれるこの現象は、植物の葉緑素の働きにたとえられる。

葉緑素は、太陽光で、水と二酸化炭素（炭酸ガス）からでんぷんを作るが、この光合成の過程で、水を酸素と水素に分解する。本多、藤嶋両博士は、半導体に葉緑素の働きをさせることに成功したわけだ。不思議なことに、葉緑素も半導体の性質をもっている。

この方法はまだ効率が低く、いまずぐ実用にはならない。だが、1831年にイギリスのファラデーが発電機の原理を発見したときも、磁石とコイルを使い、ほんの一瞬、電気を起こすことができたただけだった。「半導体で作ったイカダを海に浮かべ、太陽の光で海水から直接、大量に水素を取り出すことができるようになるかもしれない」と田村教授は夢みる。

このほか、将来有望なのは、太陽炉や核融合炉で2500度以上の高温をつくり、水を酸素と水素に熱分解する方法。余熱も利用できるので効率は非常に高い。

2500度という高温をつくることは、不可能ではない。

「びんのなかの太陽」の章（97ページ）で紹介した核融合炉ができれば、たちまち解決するし、現在の技術でも、おわんのような放物面反射鏡で太陽の光を一点に集めれば、3000度ぐらいの高温が得られる。フランスのピレネー山中には、すでに直径50メートルの世界最大の太陽炉があるし、日本にも東北大学科学計測研究所に直径10メートルの太陽炉がある。

ただ、実用化するには、これよりさらに大きな直径の炉が必要になる。

この炉で分解した水素と酸素を、二つの元素の性質の違いを利用してよりおけるのだが、それには、三つの方法が考えられている。

第一は、分子の大きさの差を利用する方法。水素分子は、酸素や水蒸気の子と比べると非常に小さいので、多孔質の膜や素焼きの筒を通りやすい。これを利用して水素だけを外に“こし出す”。

第二は、質量の差を利用する方法。遠心力は質量に比例するので、混合ガスを円筒に入れて高速回転すれば、水素は回転軸の近くに集まる。これを取り出す。

第三は、磁性の差を利用する方法。

だが、いずれの場合も超高温に耐える材料の開発がカギになる。

現在さかんに研究されているのは、これより低い数百度の温度で、触媒を使って水を分解する方法。

たとえば、欧州原子力共同体（ユーラトム）のイスプラ研究所では、原子炉の熱を使い、臭素と水銀を触媒に、水を分解する方式を見つけ出した。これを皮切りに、つぎつぎと新しい反応を発表している。

また、アメリカのアルゴンヌ国立研究所でもリチウムとヨードを使って、水から水素を取り出す方法を発表している。

また、水素博士の太田時男・横浜国立大学教授と神谷信行助手は、触媒を使ったこの反応に、太陽の熱と光を併用し、さらに効率よく水を分解する方法の開発に取り組んでいる。

太田博士は、また、半導体の熱電素子で巨大なイカダを作って南太平洋に浮かべることにも考えている。

東大の本多助教授らの方法が太陽の光を利用するのに対し、こちらは太陽の熱を使う。

図のような装置をたくさんつないで海に浮かべる。すると、上の面は太陽の熱を吸って摂氏200度ぐらいになるが、下の面は海水に接していて、冷たい。この温度差を利用して、半導体で電気を起こし、その電気で海水をただちに電気分解する、という方法である。

効率を10%とすれば、2キロ4方のイカダで、年に3億3500立方メートルの水素が発生する。これを貯めておいて、定期的に取りに行く。このイカダを1000個浮かべれば、それだけで西暦2000年に日本が必要とするエネルギーの半分をまかなえるという。

このような開発が成功をおさめ「水素文明の時代」がやってくるのは、1990年代といわれる。

その時代、石油は燃やしてしまったりはしない。衣服や住宅など、身の回りの品々の原材料として大切に使われ、子孫のために残しておかれるはずである。