

# “グリーン水素”を推し、 “ブラック水素”を排す

市川 勝 (北海道大学教授、理学博士)

聞き手／高橋孝輝 (サイエンス・ライター)

## 始まりは「石油の合成」だった

——「水素社会」というコンセプト、及びその「水素社会」を可能にする「有機ハイドライド」利用というアイデア、技術について、これからお話をうかがいます。よろしく願いいたします。まず本論に入る前におうかがいしたいのですが、市川さんは触媒化学がご専門でいらっしゃいますよね。それがなぜ「水素」あるいは「水素社会」というものに関わるようになったのでしょうか。

市川 直接のきっかけは10年ほど前、メタンをできれば触媒によって効率的に石油に変えられないかと思って、研究を始めたことにあります。なぜそんなことを思ったかという、これは「水素社会」というコンセプトの根幹にも関わってくるのですが、基本的には、「石油という限りのある資源に代わるものがほしい、作りたい」ということでした。

そこで様々な代替エネルギー資源の候補を見渡すと、「メタン」が浮上してきた。メタンは天然ガスという形で膨大な埋蔵量がある。もしメタンを石油化できれば、少なくとも石油資源の不足という問題は解決できると考えたのです。

というわけでメタンという物質に改めて目を向けてみますと、化学記号は $\text{CH}_4$ 、つまり炭素1個に水素が4つ結合したものです。ですから、水素をいくつ

か剥ぎ取って炭素を残し、重合させていけば、石油から石油化学原料となるベンゼンとかナフタレンができる。

ところがメタン( $\text{CH}_4$ )という分子は、化学的に最も安定していて構造を変えにくいため、これまでは利用が難しい物質だったのです。そういう、“高難度ウルトラC”の物質を効率的に、例えば、有

用な石油などに作り変えるのが触媒の醍醐味なのです。

まあそれでいろいろやってみているうちに、メタンからベンゼンを直接合成するプロセスを開発できた。それは従来の石油から作るベンゼンの合成法よりはるかに経済的で、工業化も可能な画期的プロセスだったのですが、残念ながら当時



の化学業界は今さらベンゼンを作っても余ってるし、という雰囲気でした。

ただ、このMTB (methane-to-benzene) プロセスでは同時に大量の水素もできます。これまでの水素製造法では必ず水素の他にCO<sub>2</sub>ができるのですが、このプロセスでは、CO<sub>2</sub>がまったく出ないで代わりに有用なベンゼンができる、この意味でも画期的なことでした。

やがて燃料電池が実用化に近づき、メディアや産業界で注目されて、私の開発したメタンからベンゼンと水素を合成するプロセスを、高く評価してくれる人も出てきた。それからですね。水素とか、水素社会ということ自分の問題として考えるようになったのは……。

——なるほど。でもそれにしても世の中ではなぜ「水素」ということになったのでしょうか。太陽などの自然エネルギーや、原子力だって考えられたはずですけど……。

**市川** 実はこの水素は、我々の宇宙の始まりであるビッグバンの後に、最初にできた物質です。しかも今宇宙にある物質の75%を占めているのです。この地球にエネルギーを与えている太陽は、その水素の核融合反応でエネルギーを作り出しているわけですし、まあ、水素は人類にとって意外なほど身近な物質(元素)とっていいと思います

ただ、「今なぜ水素なのか」と問われれば、もう少し違う切り口からお話ししなければなりません。

## 限界が見えてきた 炭素循環型社会

**市川** エネルギーということという人間は昔から、延々とモノを燃やすことで得てきました。大昔は木を燃やし、産業革命以降は石炭を燃やし、今は石油を燃やしている。これはいずれも炭素(C)を燃やしているということですね。ところがこの数十年間というスパンで見て、

炭素を燃やすことには炭酸ガス(CO<sub>2</sub>)の問題が浮上してきました。

炭素を燃やせば熱エネルギーが得られますがCO<sub>2</sub>もできる。かつてそのCO<sub>2</sub>は植物や植物プランクトンが固定し、再び燃料や食糧になるという循環がうまくいっていたわけですが、20世紀初頭以降の急速な工業化、自動車の普及、人口の急増という要因から、炭素=化石燃料の利用が急増した。そのため、固定される炭素より、CO<sub>2</sub>として大気中に放出される炭素のほうが圧倒的に多くなった。つまり、炭素循環のプロセスがうまくいかなかったというわけなのです。

その結果、20世紀後半になると、大気中のCO<sub>2</sub>濃度の上昇が「温暖化」を引き起こし、放置すれば「海面上昇」や大規模な「気候変動」という事態に至って、人類が減びるのではないかとまでいわれるようになった。CO<sub>2</sub>の発生量を総量規制しようという「京都議定書」は、主にその危機感からまとめられたものですね。

また、化石燃料にも、特に最も重要なエネルギー燃料である石油に、量的な限界とコストの増大といった問題が明らかになってきました。

——ただ「石油枯渇説」には、1970年代に提唱されて以後、採掘技術の進化のためか、「可採埋蔵量がちっとも減っていないじゃないか」という議論もあります。

**市川** ええ。それに温暖化説にも、CO<sub>2</sub>が温暖化に拍車をかけている程度についてはまだ議論があります。とはいえ、少なくともこの先永遠に、石炭や石油という化石燃料に頼っていくわけにいかないことだけは確かでしょう。

そういうところから、エネルギーを得るのに化石燃料を使わない方法はないか、という問題意識が生まれてきました。そして出てきた答えが、炭素-CO<sub>2</sub>循環に代わる「水-水素循環」というものだったというわけです。

## 水-水素循環という考え方

**市川** 水素は、この宇宙で最もありふれた物質ということの他にも、非常におもしろい働きをする物質でして、まず電気エネルギーと互換性がある。つまり、水素は、電気と相互に置き換えることができる。これは水を電気分解して水素と酸素を得るとちょうど逆の反応で、水素と酸素を化学結合させると、電気と熱のエネルギーを発生して水に戻るといったことなのです。

それから、水素は最も軽い物質ですが、物質当たりの発生熱量で見ると、たとえばメタンやプロパンといった石油由来のガスに比べると3倍近くになる。つまり、非常にエネルギー密度が高い物質なのです。だから、エネルギーを運ぶキャリア(媒体)として優れている。

そこで、この水素をキャリアとした、エネルギーの循環的な利用法を考えましょう。それは、たとえばこういうことです。地球では水素は「水」という形で存在していますから、まず水から水素を取り出す工夫をする。たとえば、太陽エネルギーや風力エネルギーで作った電気エネルギーで水を電気分解し、水素を得る。消費者や産業は、その水素から、燃料電池という仕組みで電気(と熱)エネルギーを取り出して、生活やものづくりに利用する。水素を燃料として使う燃料電池から出てくるのは、電気と熱エネルギーの他には水だけです。

水から始まって水で終わる、水-水素循環のエネルギー利用サイクルが完成していますよね。水-水素循環は炭素(C)というものが介在せず、したがってCO<sub>2</sub>が発生しないサイクルです。先ほど、炭素、化石燃料によるエネルギー循環は崩れた、うまくいかなかったといいました。これから我々はエネルギーの利用ということに関しては、この水-水素循

図1 水-水素循環模式図

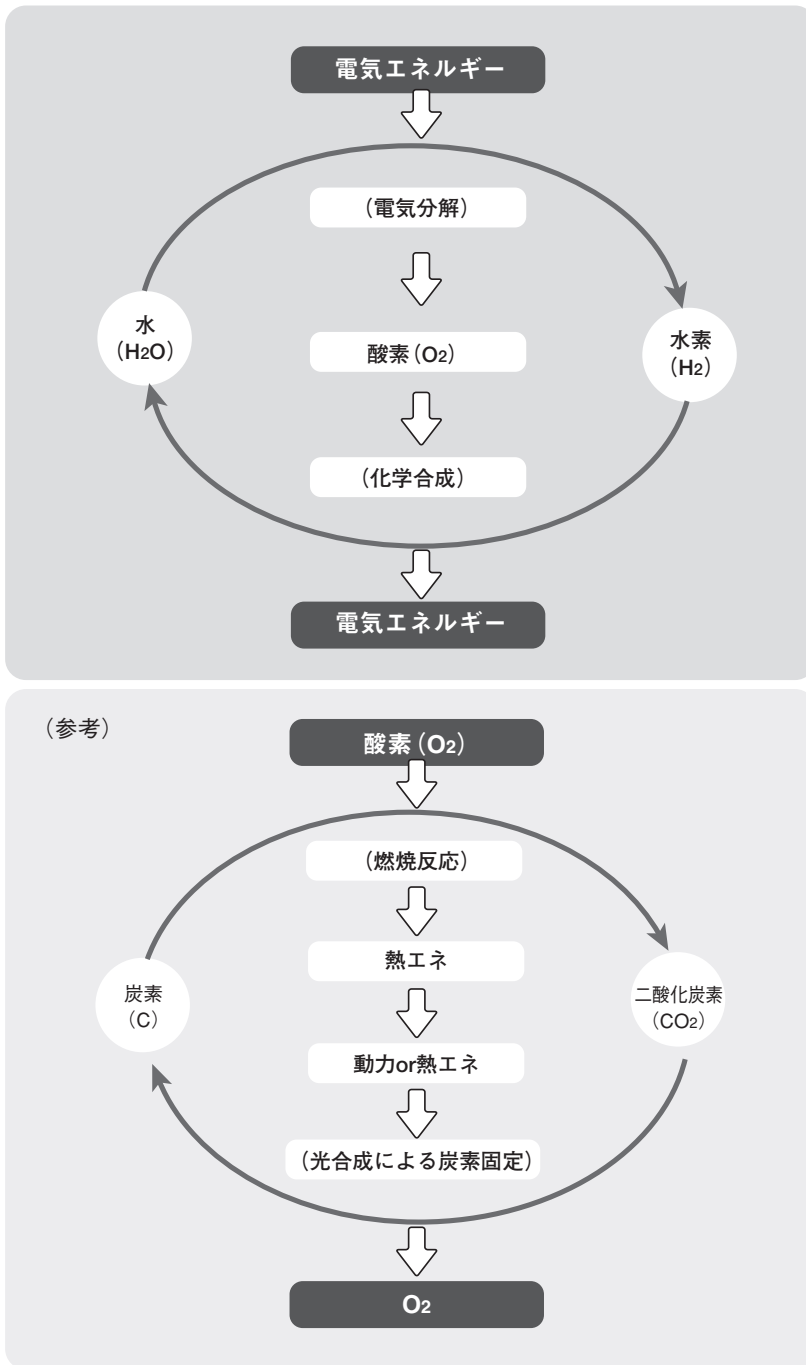


図2 水素のエネルギー密度 (メタンやプロパンとの比較)

|                                       | 真発熱量    |                      | 理論空気量                              |     | 理論排煙量Nm <sup>3</sup> /燃料Nm <sup>3</sup> |                 |  |
|---------------------------------------|---------|----------------------|------------------------------------|-----|---|-----------------|--|
|                                       | kcal/kg | kcal/Nm <sup>3</sup> | Nm <sup>3</sup> /燃料Nm <sup>3</sup> | 水蒸気 | N <sub>2</sub>                          | CO <sub>2</sub> |  |
| 水素 (H <sub>2</sub> )                  | 28,570  | 2,570                | 2.38                               | 1   | 1.88                                    | 0               |  |
| メタン (CH <sub>4</sub> )                | 11,930  | 8,550                | 9.52                               | 2   | 7.52                                    | 1               |  |
| プロパン (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> ) | 11,070  | 22,350               | 23.8                               | 3   | 18.8                                    | 3               |  |

出典：NEDO海外レポート

環で生きていくしかない、生きていくべきではないかというのが、水-水素循環という考え方の根本なんです。

—— 原理的に考えて、水-水素循環が最も環境負荷が低く、かつ効率的なエネルギーサイクルモデルであるというわけですか。

市川 それが水素エネルギーというのが注目される最の理由ですね。



高橋孝輝氏

## エネルギーとものづくりを分ける

市川 それともう一つ、私はもともと触媒の研究をやってきた人間です。それも、天然ガスやバイオガスなどのメタン資源から石油化学原料を作る、触媒の研究をしてきました。そうした観点から考えると、石油がエネルギー媒体としてすっかり使われなくなるということには、一抹の寂しさを感じないではない(笑)。

しかし実は、今後来るべき水素社会でも、石油がまったく使われなくなるということではないのです。化石燃料として、内燃機関やボイラーで燃やしてエネルギーを作るためだけに利用するのではないということです。

めの炭素社会から水素社会への転換であるべきだと思うのです。

## 偏在する石油、遍在する水素

市川 それから石油については量的な限界と同時に「偏在(地域にかたよる)」という問題もあります。

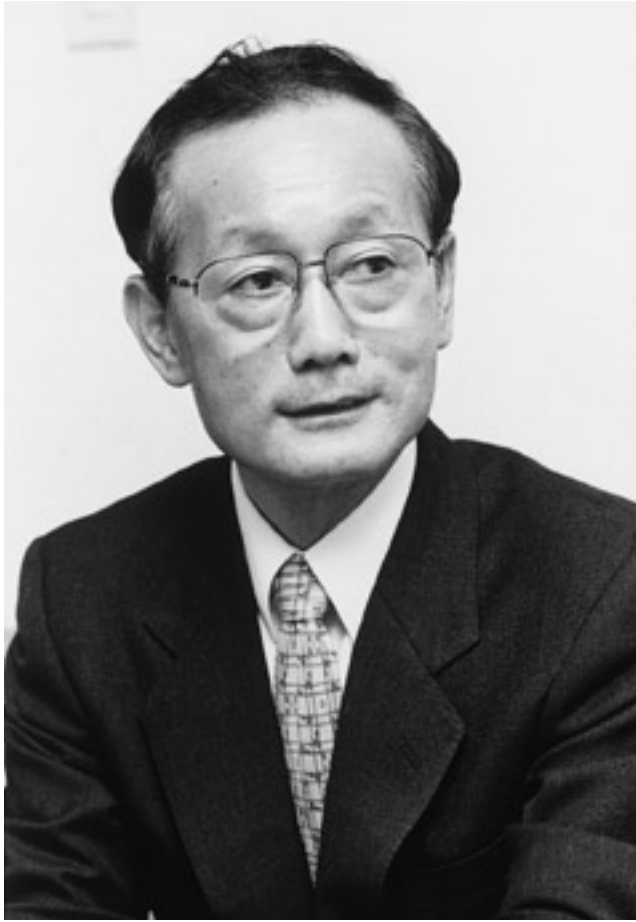
つまり石油は、中東、アメリカ、ロシアなどごく一部の地域にしか採掘可能な油田が存在しない。私が触媒を使ってどこにでもあるメタン資源を使って石油(実際にはベンゼンなどの石油化学原料)を作ろうと発想したのも、資源小国の日本でも容易に石油が得られるようにしたいと思ったためでした。湾岸戦争や最近のイラクでの紛争を見るまでもなく、石油の偏在が、数多くの様々な政治的な問題や国際紛争を引き起こしてもきましたしね。

ところが水素は、地球に「遍在(どこにでもある)」しています。水素はこの地球にあまねく、大量に存在する。まあ水素ガスの姿ではなく、水という形でしょどもね。

——「偏ってある」石油と「遍くある」水素。意味は正反対ですが、字も似てるし同じ読みだし、間違いそうです(笑)。

市川 また、水素は水とは別の形で、たとえば天然ガスやバイオガスの主成分である「メタン」に大量に固定されている。メタンは炭素原子1個に4つの水素原子が結合したもののなのです。その天然ガスの可採埋蔵量は、石油の100倍もの膨大な量といわれています。最近ではさらに大陸棚海底などに、低温・高圧の「メタンハイドレート」という形で、メタンが大量にあるということもわかってきました。メタンハイドレートの分布も世界中に及んでおり、石油のような問題を起こすこともなさそうです。

つまり水素は、地域格差による政治的な争いを引き起こす余地も、石油よりは



市川 勝氏

(1942年東京生まれ。北海道大学触媒化学研究センター教授、理学博士。「有機ハイドライド」を利用した水素エネルギーの貯蔵、輸送、流通システムを提唱。燃料電池を柱とした「水素社会」を実現可能にする具体的アイデアとして注目されている)

20世紀はまさに石油化学の時代だったと思います。そこで実現され、私たちの生活を豊かにしてきたのは、石油から高分子プラスチックや合成繊維を作る、石油化学の技術でした。その結果、石油はいま、エネルギー媒体としてだけでなく、まさしくプラスチック、繊維や薬を作る原料として、大量かつ有効に使われているのです。こうした、石油がものづくりの原料であるという状況は、まだまだ当分続くでしょう。

ですから、水素化社会になってもそちらは残る。私たちは石油製品を享受できるわけです。石油をただ燃してエネルギーのみに使うことはやめよう。水素化と

いうのはそういう主張なのです。

エネルギーとしての石油と、ものづくりの原料としての石油を分けて考える。人類も、そういう段階にきたということなのだと思います。

いま、地球の総人口は60億超。現存する生物の間で最大の個体数であり、おそらく有史以来最大の個体数でもある。いわば頂点に立ってしまっているわけです。そうすると恐竜とのアナロジーではないですが、滅亡への序曲がもう始まっているのかもしれない。その最初の兆候が、CO<sub>2</sub>による温暖化なのかもしれない。

だからこそ21世紀に考えるべきことは持続可能な社会の構築であり、そのた

はるかに少ない。その一事をとってみても、水素というものをエネルギーの媒体に使うメリットがおわかりいただけるかと思えます。

——なるほど。水素エネルギーがしばしば「究極の」とか「最後の」という形容詞が冠せられることには、それなりの理由があったということなのですね。

## コアテクノロジーとしての燃料電池

——次にお聞きしたいのは、水素エネルギーと燃料電池は、セットなのかということなんです。先生の今の水-水素循環のサイクルをお聞きしていると、一般の生活でも産業レベルでも、エネルギーの利用形態は「電気」で、水素から電気を取り出す装置が「燃料電池」だということを、当然の前提とされているように思えるのですが……。

市川 それは正しいようで、少し考えなくてはいけないことですね。というのも、水素からエネルギーを取り出すには、水素を直接燃焼させて、まずは熱の形でエネルギーを取り出す、「水素ガスタービン」という装置を利用することでも可能だからです。

——1980年代に、ドイツのBMW社や日本でも開発が進められていた「水素燃料自動車」は、まさしく水素の直接燃焼のエネルギー利用でした。

市川 その場合でも水素燃料は、原理的に高効率なエネルギー変換が可能で、自動車エンジンやガスタービン発電機での応用が考えられたのだと思います。

ただですね、水素を直接燃焼させた場合には必ず窒素酸化物(NOx)が発生します。燃料に炭素が含まれていればCO<sub>2</sub>が発生しますし、空気中の窒素が酸化してNOxも発生する。つまり水素エンジンも水素タービン発電機も、CO<sub>2</sub>こそ出ませんが、NOxが出るという意味で完全にクリーンなエネルギー変換プ

ロセスではないのですね。

しかし燃料電池であれば、触媒を使って水素と酸素を低温で反応させて電気(と熱)を得るというものですから、排出されるのは水(水蒸気)だけ。その上、電気と熱エネルギーを利用すると、変換効率は85%ほどになります。燃料電池は水素エネルギーの、完全にクリーンな高変換プロセスということが出来ます。

ですから、水素社会という時には、エネルギー変換システムは燃料電池で進めるべきだと思います。その意味で、水素社会の第一のコアテクノロジーは、燃料電池であると私は考えています。

——すると、やはり最近盛んに「2005年は水素社会の幕開け」などといわれているのは、「燃料電池」の実用化状況を見てということなのですね。

市川 そうでしょうね。トヨタやホンダによる燃料電池自動車の実現、東京ガスによる家庭用燃料電池の発売が、大きなきっかけになっていると思います。

やはり、電気を取り出す時にクリーンで高効率な燃料電池というものがなかったら、水素エネルギーの利用は難しかったし、水素社会などというのも、まだかなり先のことになっていたでしょうね。

——燃料電池は日本だと、1980年代初頭には国家プロジェクトとして開発が始まっていたのですが、製品として実現するまでには、ずいぶん長くかかりました。

市川 燃料電池の原理は、1836年にイギリスのウィリアム・グローブが提唱したものですから、それから数えるともう170年ほど経ってしまっている。初めて実現されたのがアメリカの宇宙計画の、アポロ宇宙船の電源用だったわけですが、それだって原理の発見から120年ほど後です。これは一つには、エネルギーを得るには石炭や石油などの化石燃料が手取り早かったということもありますが、水素というものが、扱いが難しい物質だ

ったということも大きかったと思えます。アポロ宇宙船では推進剤に液体酸素と液体水素を使っていたので、燃料電池での発電が採用されたわけで、推進剤が違う物質だったら実現していなかったと思えます。

## 物質として難しいところもある水素

市川 ここまでの説明では、「高エネルギー密度」とか「遍在性」とか、水素のメリットだけを強調してきました。しかし水素はメリットだけではなくて、不都合なところもいろいろある物質なのですね。

いちばんのデメリットが、水素が常温常圧では希薄なガスであることと、その爆発力の強さです。これらはエネルギー密度の大きさなどそのメリットに対して、コインの裏側に相当する性質なのですがね。

困ることを具体的にいうと、第一に、水素はタンクなどから漏れて適当な量の空気と混合した時、爆発力が最も強くなります。ただ、水素ガスは非常に拡散しやすい性質がありまして、万が一漏れた場合でも宇宙の彼方まで速やかに拡散してしまうので、戸外に限って言えば、爆発の危険性は石油やガソリンより低いといつてよいでしょう。

しかしその拡散しやすさが、水素の保管や持ち運ぶこと(流通)を考えた時に、大きな課題になるのです。たとえば燃料電池自動車に搭載するにしても、非常に機密性の高いタンクと、そのタンクへの高圧充填が必要になるのです。そのためコストも危険性も、何倍かに高まるという結果になる。

——ロケット燃料のように超低温で液化しておくという手もあるのではないですか？

市川 液化するにはガス圧縮と冷却に、水素の20%近い電力エネルギーを投入しなければならないので、コスト的に割に合いません。



## プロセスでも クリーンな水素を

—— それで、昨年東芝やNECで試作された携帯電話用の燃料電池などは、メタノールを改質して水素を作るという、ひと手間を多くかけた仕組みにしているのですね。

市川 それから東京ガス、大阪ガスで市販を開始した家庭用燃料電池では、天然ガス（都市ガス）のメタンを改質器にかけて水素を取りだし、酸素と反応させる発電プロセスを採用しています。

ただ私は、メタノールにしてもメタンにしても、化石燃料系のものを燃料に用いて改質水素を製造するのは、問題があると思っています。

その理由は、まず改質器にコストがかかる上に、燃料電池システムの容積が大きくなってしまうこと。それと、もっと大きな問題は、結局、水素をつくる時にCO<sub>2</sub>が発生してしまうことです。化石燃料改質型の燃料電池は、炭素循環から完全には断ち切れていないのです。それでは水素社会に向けての真に新しいテクノロジーとはいえないでしょう。

私は水素にも「グリーン水素」と「ブラック水素」というものがあると思ってい

るのです。水素であるからといって、全てクリーンと考えてしまってはいけません。水素を作る、貯蔵する、輸送して利用するそれぞれの過程でCO<sub>2</sub>やNO<sub>x</sub>を出さない、そうした水素社会を実現すべきだと思っているのです。

考え方としては「無農薬野菜」などと同じでしてね、「入り口から出口まで無農薬でありCO<sub>2</sub>発生なし」という、そういう「グリーン水素」の実現をこそ目指さなければいけない。「水素はクリーンなエネルギーです」で終わってしまっただけで、「どうやって作ったの?」と、そこまで聞かなければいけないのです。

さいわい、自動車用の燃料電池システムは、現在では世界的にも改質型から純水素型に移行しています。

それから、これは次回に詳しくご説明させていただきますが、私どもが開発したメタン直接改質技術では、メタンから水素を抽出して、残った炭素はベンゼンなどの石油化学原料に変換しますので、プロセスとしてCO<sub>2</sub>ゼロで、水素を取り出すことが可能です。太陽熱や風力発電など自然エネルギーによる水素製造も、「グリーン水素」づくりとして広がるでしょう。ですから、「ブラック水素」から

「グリーン水素」への転換は、決して不可能なことではないのです。せつかくの水素社会構想ですから、水素製造プロセスまで含めてクリーンであるということを追いかけてほしいのです。

—— いや、「ブラック水素」ということには初めて気づかされました。燃料電池を活用する暮らしでは、水素の揺りかごから墓場まで、環境への負荷に目を向けていかねばならないのです。

さて今回は、いわば水素社会というものの理念をお聞きしたわけですが、世の中では、水素社会構想とは単なる理念的産物で、技術的にも経済的にもとうてい実現不可能だという見方も根強く残っています。市川さんが提唱されている、「有機ハイドライド」という物質をキーにした水素社会構想は、水素の流通、運搬問題に焦点を当てた画期的な技術なのですが、まさに、そういう悲観的な見方に一石を投ずるものであるように思えます。

次回はいよいよその「有機ハイドライド」について、詳しくお話をうかがいたいと思います。ありがとうございました。

(いちかわ・まさる)

(たかはし・こうき)

写真/円山幸志