

# 総論：固体を用いる水素貯蔵

秋葉 悦男

九州大学大学院工学研究院機械工学部門、カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所  
〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744

## Solid State Hydrogen Storage: General Discussion

Etsuo Akiba

Department of Mechanical Engineering, International Institute for Carbon-Neutral Energy Research  
744 Motooka, Nishi-ku, Fukuoka, 819-0395 Japan

**Abstract:** Initiation of the HYDRO-STAR (Advanced Fundamental Research Hydrogen Storage Materials) Project itself and what have happened throughout the course of the project are introduced. This project aimed for fundamental research on hydrogen storage materials but the situation around the project dramatically changed during the project.

**Keywords:** Hydrogen storage materials, National project, Fuel cell vehicle

### 1. はじめに

この特集は、タイトルとして「固体を用いる水素貯蔵」となっているが、数編の寄稿は2007年度から2011年度までNEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）事業として行われた水素貯蔵材料先端基盤研究事業（通称:HYDRO-STAR） [1]の成果の一端である。

本稿は、HYDRO-STARのプロジェクトリーダー（PL）として、どのように本事業が始められ、終了し、さらにはどのような方向へ今後向かうかを紹介するものである。今後の水素関係のプロジェクトフォーメーションの一助にして頂ければ幸いである。

### 2. 固体を用いる水素貯蔵

水素は二次エネルギーとしてあるいは燃料として、電力と共に今世紀後半以降、主要なものになると考えられている [2]。水素は常温常圧では気体であるため、液体燃料と比較して、体積エネルギー密度では大きく劣ることが知られている。ガソリンと比較すると、体積当たり（但し、水素は1気圧、室温）の体積エネルギー密度はガソリンの3000分の1にすぎない。そのため、高い密度で水素を貯蔵輸送する方法が求められてきた。

水素貯蔵材料は固体の内部あるいは表面に水素を貯える物質で、圧縮水素あるいは液体・固体水素に比べて、原子状の水素が物質と結合することで、水素 - 水素間距離を短くすることができる。すなわち、圧縮水素、液体水素および固体水素に比べて体積水素密度が高い状態で水素を保有することが可能である。

金属の水素化物は圧縮水素や液体水素より高い水素密度で水素をその内部に含むことから、金属と水素の化合物（金属水素化物）に関しては原子力用途での開発が第二次大戦後に進められた [3]。

1970年代になって、いわゆる「石油ショック」が発生し石油代替燃料としての水素が注目された。現在と違ってと言うと余りに語弊があるが、当時の関係者は「水素は燃料（二次エネルギーあるいはエネルギー媒体）である」ことを明確に認識していた事実は、驚くべき見識の高さと言えよう [4]。国家事業としてサンシャイン計画が発足し、水素の製造、貯蔵・輸送、利用に関して幅広い研究開発がすすめられたが、水素貯蔵材料は「水素を固形化して高い密度で水素を輸送・貯蔵する」媒体として研究が進められた。

「石油ショック」に僅かに先立つ1960年代後半にJim Reillyらによって $Mg_2Cu$  [5] 及び $Mg_2Ni$  [6] 合金が報告され、1970年にはPhilips によって $LaNi_5$ が室温で作動す

る水素貯蔵材料として報告された [7] ことが水素貯蔵材料の研究開発にとって幸いしていたと言えよう。

わが国、特に通産省、後には経済産業省では、サンシャイン計画発足当時から、1年も途切れることなく水素貯蔵材料の研究開発に資金を提供してきた。その成果として、今日のわが国の水素貯蔵材料に関する世界的な実績がもたらされた事は間違いない。

### 3. HYDRO-STAR事業の端緒

2000年代の半ばから後半にかけて、燃料電池および水素に関して基礎基盤研究からブレークスルーを期待して五つの事業が開始された。「燃料電池の梁山泊」を燃料電池の専門家ではない研究者を集めて構築するとの燃料電池先端科学研究事業 (FC3) が2005年度に発足したのを皮切りに、2009年度まで毎年、一つずつの事業が開始された。

水素貯蔵材料に関しても、その対象となっていたが、具体的なプロジェクトの絵姿は当然ながら無かった。2005年の雪のある日、経済産業省の燃料電池および水素に関する部署の課長さんがお一人で筆者の当時の勤務先へ単身来所され、問いかけをされた。水素貯蔵材料に関しては、拠点を作って研究者を集めると、特に企業では研究開発や生産活動にさえ支障を来すのではないか。サッカーの全日本チームが通年選手を集めていたら、J1のチームの試合はつまらないものになるのではとの例えでお話をした。その結果と思われるが、五つの事業の内、HYDRO-STARだけが、集中研究方式を採用せず、バーチャルな組織を持つことになった。他の四事業では、それぞれの拠点に建物を建築し、そこへ人材を集めたが、本事業ではそのようなことは無かった。また、当時、俎上にあがっていた水素脆化や水素中での疲労現象の科学的解明を目指す事業と水素貯蔵材料に関する事業は明確に分けて推進したいとも言われ、事業の提案の際のフリーハンドを頂いたように思えた。

それから、約一年後、宿題の回答を関係者へお見せして国家事業として推進する原案としていただく事になった。また、2006年末には公募する事業のプロジェクトリーダーとして就任するようにNEDOから要請があり、引き受けることとなった。

研究開発計画を経済産業省およびNEDOが構築する際に、当時建設中の中性子施設J-PARCを活用できないかと

の質問を受けた。水素貯蔵材料の研究に極めて有力であることが判ってきたところであった中性子全散乱装置を建設立案し、製作の審査をうけ採択されていた高エネルギー加速器研究機構(KEK)の大友先生に新規水素貯蔵材料関連事業計画への参加を呼びかけ、快諾を得た。先駆的な中性子全散乱装置であるHIT-IIを高エネルギー加速器研究機構の中性子施設KENSに建設された福永先生には、装置の建設と研究内容についてバックアップをいただく事をお願いした。建設された全散乱装置はNOVAと後に命名され、画期的な性能を発揮することが既に実証されている。

筆者は、1980年から稼働を開始したKENSの設立間もない頃からのユーザーであったので、わが国が世界に誇る中性子施設J-PARCと放射光施設SPring8を真の意味で連携することをこの事業の一つの目標とした。米国や欧州では、相補的に活用されている中性子および放射光が、それぞれに閉じこもっているように感じられたことが動機であった。同時に、水素と物質の相互作用の観点からの切り口を期待して、日本原子力機構の青木先生に事業に関して相談した。幸い、青木先生のバックアップのもと、当時30代であった町田先生が放射光等を利用した水素を含む物質の物性研究のとりまとめを引き受けて頂けることとなった。

欧米における材料研究では、中性子や放射光の大規模施設を頻繁に活用することに加えて、計算科学を材料科学に取り入れている。わが国では、計算科学者の人口が少ないことも一因で、材料科学と計算科学の連携は必ずしも十分では無いとの印象を持っていた。当時勤務していた産業技術総合研究所の池庄司先生に相談し、同じく産業技術総合研究所の小川先生を本事業の計算科学の取りまとめ役としてお願いすることとなった。

材料そのものに関しては、金属を主体とする材料についての基礎基盤研究を当時、筆者のグループ員であった中村先生にプロジェクトリーダーのサポートも含めて依頼した。いわゆる錯体系水素貯蔵材料について幅広く研究を進めていた広島大学の小島先生には、非金属系の水素貯蔵材料についてのとりまとめをお願いした。これらの五名の先生方には事業のサブリーダーとしてプロジェクトリーダーを助けて頂くと共にそれぞれの先生毎のテーマに関しては責任を持って計画を立案して頂くようお願いした。

まだ、若手と言えるサブリーダーの成長を促すため、

各自が担当している分野に関してメンバーの選定を含めて極めて大きな自由度を与えた。年間、1～数億円の研究予算を5年間にわたって、サブリーダーは自分の考え方に従って使うことができるように設計したつもりであった。

2007年の春先にNEDOより本事業の公募があった。上記のような体制で応募したが、採択されるかどうか不安な日々を過ごしたことが思い出される。公募に対して東北大学の高村先生、故前川先生からの素晴らしい提案があって、二つの提案を一つにまとめた形にするとNEDOが決定し、事業が2007年の夏に実質的にスタートした。

#### 4. 燃料電池自動車の実用化などの情勢の変化

HYDRO-STAR事業が実質的に開始して丁度1年が経過した2008年7月、燃料電池実用化推進協議会（FCCJ）が燃料電池自動車と水素供給ステーションの普及を2015年から開始すると発表した。公表されたシナリオとその説明の中で、2011年頃から大規模社会実証試験の実施の必要性や具体的内容について国や地方自治体、関係機関と検討を開始することとされていた。すなわち、2015年の燃料電池自動車・水素供給ステーションの普及開始と水素貯蔵材料の基礎基盤研究の整合性を取る必要が「社会的要請」として現れた。また、2015年時点で（水素充填圧力について当時は議論があったが）圧縮水素を燃料電池自動車の水素タンクに利用することは既定の事実であった。「水素貯蔵材料を何のために基礎研究するのか？」という問いを、それ以後、この事業は必然として抱えることになった。

また、2007年の発足当時はNEDOの先行事業として水素安全利用等基盤技術開発事業が推進されており、その中では水素貯蔵材料の開発研究が精力的に行われていた。そのため、HYDRO-STARの発足に当たってはその事業とは異なることを明示する必要があったため、材料開発を行わず基礎研究、特に解析評価の研究に注力すること、またそのため必然的に目標値を持たないこととなった。しかしながら、2007年度で水素安全利用等基盤技術開発は終了し、2008年度から開始された水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発では水素貯蔵材料の開発は状況に鑑み、縮小されることになった。従って、「車の両輪」の一つとして開始したものが、間もなく「一輪車」となって水素貯蔵材料に関する全てを感覚としては背負うようなことになってしまった。

FCCJはその後、2010年3月には改訂したシナリオを公開し2025年における普及目標値を示した（図1参照）。また、2011年1月には水素関連の13社の企業が2015年に燃料電池自動車を量産することと、四大都市圏に約100カ所の水素供給ステーションを建設することを新聞発表した。

そのため、HYDRO-STAR事業の目的として「産業界へ高性能水素貯蔵材料の設計指針を提供する」ことが特段に注目されるようになった。事業企画時の議論は議論として、それからの状況の変化を察知して柔軟な態度で行動に移すことが、参加した基礎研究者の多くにとっては困難であったことは想像に難くない。

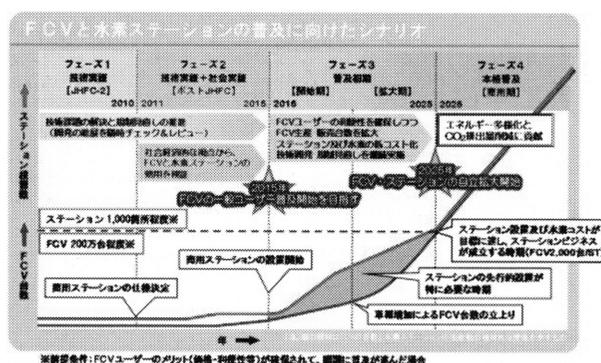


図1. 燃料電池実用化推進会議作成の導入シナリオ  
(<http://www.fccj.jp/jp/information.html#data>)

#### 5. HYDRO-STARの対応とその評価

HYDRO-STARに限らず、NEDO事業は事業の中間段階で評価を受けることになる。HYDRO-STARの場合は2009年の7月に行われ、比較的高い評価を得ることができた。しかしながら、解析・評価中心の研究に偏っていたことから、材料研究者の参加を求めることや事業内外の連携の強化を図るよう強く指摘された。

そのため、幾つかの参加者には参加の終了をお願いし、その一方で公募により中間評価で指摘を受けた分野を中心に新しい参加者を迎え入れた。その中には、高い比表面積を持つ炭素を合成して室温で2質量%以上の水素吸蔵量を有する吸着材料を開発した東北大多元研の京谷先生や数万気圧という高い圧力で新しい水素化合物を数多く創成された東北大亀川先生、産業技術総合研究所竹市先生などが含まれている。

しかしながら、サブリーダーを含めて基礎研究に携わる研究者が産業界の水素貯蔵材料へのニーズや解決する

べき課題にアプローチすることは困難である上、事業中にプロジェクトリーダーとサブリーダーの間で連携をはかるべき箇所が全く機能しなくなったこともあって、産業界と個別の研究者の連携は多数あったにも関わらず、事業全体としての印象は外部からは薄く見える残念な結果となった。図2および3には、開始当時および終了時の事業構成メンバーを示した。本事業が状況の変化にもがきつつ対応したことが垣間見えるかもしれない。

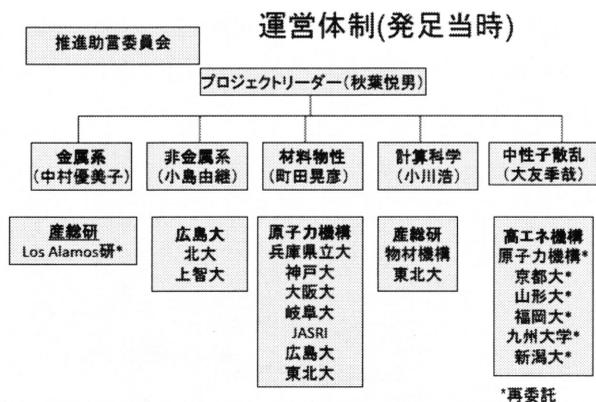


図2. HYDRO-STAR発足当時の運営体制

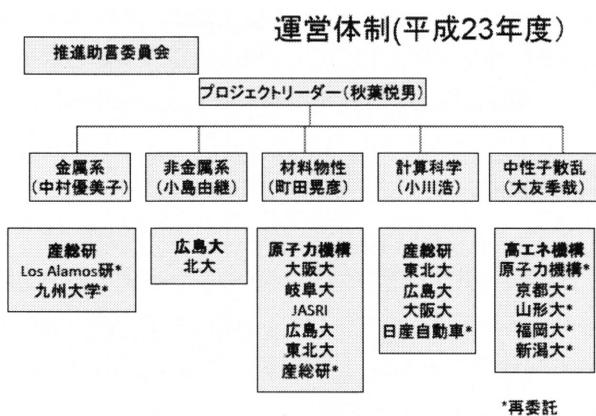


図3. HYDRO-STAR終了年度の運営体制

本事業の事後評価委員会が本年7月に開催され、評価委員からは基礎研究としての成果は多くあるが、事業の最終的な目的である「産業界への高性能水素貯蔵材料の開発指針の提供」については、課題も残っているのではないかと指摘があった。

6. 今後の水素貯蔵材料の研究開発

2012年2月をもって終了した水素貯蔵材料に関する基礎基盤研究であるHYDRO-STARに続く水素貯蔵材料の

研究開発がどのような方向で進められるかは、水素エネルギーの研究開発にとっても極めて重要と言える案件である。

現在、NEDOでは、平成24年度一年間、NEDOの運営費交付金により「燃料電池自動車用水素貯蔵材料の調査研究」事業が進められている。この調査研究では、HYDRO-STARで培った基礎基盤研究の成果と事業の中で設計製作した先端的な水素貯蔵材料を評価解析する技術を最大限に活かして、燃料電池自動車搭載用として実用化の見込みのある水素貯蔵材料について調査する事となっている。また、それと共に水素貯蔵輸送技術に関するロードマップの改定を行うこととなっている。この調査研究で抽出された課題について、来年度以降、燃料電池自動車の大量生産の時期に実用化が期待される材料系について企業を主体にして研究開発事業が開始されることが強く期待されている。

その一方で、水素貯蔵材料に関する基礎研究は、当然ながら継続する必要がある。現状では基礎研究は文部科学省の所掌という風潮があり、経済産業省およびNEDOでは基礎基盤研究の推進がしにくい環境となっている。

本分野の次世代のリーダーとなるべき研究者が、自らの責任を理解しつつリーダーシップを発揮してわが国のアカデミアを中心に水素貯蔵材料の基礎基盤研究プロジェクトを起ち上げることを強く期待しているところである。

謝辞とお願い

本誌では、西宮委員長を初め編集委員会の英断で実際に研究を担った諸君からのvividな研究成果を掲載するように求められた。西宮委員長初め皆様のご高配に感謝するとともに、読者諸兄姉には是非、本事業で次世代を担う研究者が育っていることをご理解頂きたい。

参考文献

1. <http://hydro-star.kek.jp/>
2. <http://www.iae.or.jp/research/result/cho06.html>
3. W. M. Mueller, D. Blackledge, and G. Liebowitz, Metal Hydrides, Academic Press (1964).
4. 「サンシャイン計画10年の歩み」サンシャイン計画10周年記念事業推進懇話会. p. 443, 1984.
5. J. J. Reilly, R. H. Wiswall, Jr., Inorg. Chem., 6, 2220-2223 (1967).
6. J. J. Reilly, R. H. Wiswall, Jr., Inorg. Chem., 7, 2254-2256 (1968).
7. J. H. N. van Vught, F. A. Kuipers, H. C. A. M. Bruning, Philips Res. Rep.25, 133 (1970).