

高校生のページ

電力・水素協調エネルギーインフラ (カーボンフリーを目指して)

大学院エネルギー科学研究科 エネルギー応用科学専攻
白 井 康 之

1. 地球温暖化とエネルギー

みなさんもよく知っているように、地球温暖化は全世界的な問題として取り上げられています。現在の科学技術が作り上げてきた私たちが享受している現在の豊かな生活のために、将来の地球環境を犠牲にしてはいけません。よく言われる「持続可能な発展 (Sustainable Development)」とは、「将来の世代の欲求を満たしつつ、現在の世代の欲求も満足させるような発展」と説明されます。政府が発表している「新成長戦略」は「グリーン・イノベーション」と「ライフ・イノベーション」を二大戦略と定めています。経済成長の原動力は技術革新にあるとされますが、持続可能な発展を可能にするイノベーションを生み出して、成長に繋げなければなりません。

日本は2030年の温室効果ガス排出量を2013年比で26%削減するという目標を世界に提示しました。この実現のためには、まず現在の技術で実現できる省エネルギー行動を、産業界と国民が協力して実施することが求められます。2011年3月に発生した東日本大震災の後、省エネルギーは全国に拡がり、例えば電力の使用量は震災前に比べて1割近く減っています。しかしながら、震災以降、原子力発電所の稼働は制限され、その代わりに火力発電所による発電が多くなって、地球温暖化につながる炭酸ガスの排出量は増えてしまっています。

着実に進める省エネルギーの技術とともに、私たち大学の研究者はゲーム・チェンジングな新技術の可能性を探る研究を行い、より早くより高いレベルでより小さな国民負担で温室効果ガス削減を目指す必要があります。「超革新」的なイノベーションを環境エネルギーの分野で生み出すことは、新たな世界の形、価値観を作り出すことにつながり、ひいては世界の平和に資するものだと考えています。この意味で、水素と超伝導はエネルギー分野のパラダイムシフトをもたらすことのできるものだといえます。

2. 電力と水素

電力も水素もその利用時には、炭酸ガスを発生しないクリーンなエネルギーです。我が国の原油・石油製品供給に対する自動車部門の割合はおよそ1/3、発電部門の割合は1/5であり、あわせて半分以上を占めます。20万kWのLNG発電設備では年間約40万t、自動車1台が1日50km走行するとおよそ1.2t/年のCO₂が発生します。これらのエネルギー源を水素に転換することで、非常に大きい低炭素効果が得られることはよく知られています。水素を燃料として、燃料電池（水素を燃焼ではなく、空気中の酸素と化学反応させて電気エネルギーを直接得るもの）で走行する燃料電池車(図1)が販売され、これらに水素を供給する水素ステーションなどの設置が急ピッチで進んでいます(図2)。

これらの水素利用を進めていけば、水素は電力に取って代わるのでしょうか？そう



図1 TOYOTA 燃料電池車 MIRAI

ではありません。水素が我々の利用するエネルギーの大きな部分を占めるようになるためには大量の水素のサプライチェーン（製造・運搬・分配・利用）の整備が必要です。しかし、水素は体積当たりのエネルギーが小さいので、輸送・分配には適していません。したがって、将来の低炭素エネルギーインフラ（基盤）では、輸送や分配に有利な現在の電力系統によるカーボンフリーエネルギーの電力と、貯蔵に有利で自動車などの移動体のエネルギー源に適した水素とを協調したシステムが理想の形態と考えられるのです。

だから、現在は天然ガスや石炭などを燃料とする火力発電所での電力発生時の低炭素化が、あわせて目指されるべきです。すなわち、再生可能エネルギーによる発電や天然ガスや石炭にかわって水素をエネルギー源とした発電の導入を加速しなければならないといえます。

現在の電力エネルギーの大半を占めている天然ガスや石炭による火力発電を水素による発電に転換するためには、先ほど述べた大量の水素のサプライチェーンが必要になります。体積エネルギー密度の小さい大量の水素を運搬するための一つの方法として、水素ガスを液体（ LH_2 ：-253度：20K）にして運ぶことが考えられています。水素ガスは、液体にすると体積がおよそ1/800となります。因みに天然ガスは、-162度の液化天然ガス（LNG：体積1/600）にしてタンカーで大量に輸入されています。これを水素で置き換えるわけです。（図3参照）しかし、大きな問題は液体にするために比較的大きなエネルギーが必要とされることです。LNGでもこの冷熱の有効利用は一つの課題ですが、液体水素ではさらに温度が低いのでその有効利用は大きな課題です。

3. 超伝導と水素

一方、話は変わりますが、超伝導は直流電気抵抗がゼロであることに大きな特長があり、それを適用した電力機器における大幅な低損失化、そしてその結果として低炭素化の実現に大きなポテンシャルを有しています。これらを活かして、電力分野ではこれまで超伝導発電機、超伝導電力ケーブル、超伝導エネルギー貯蔵装置などの研究開発が進められ、超伝導技術は従来の技術体系を大きく変える次世代システム技術として極めて有望であることが明らかになっています。また、輸送機器、産業機器、情報機器など電気エネルギーを利用する分野への超伝導技術の適用も重要です。例えば、現在建設が進んでいる中央新幹線の超伝導リニアモーターカーでよく知られている超伝導モーターに大きな技術的可能性があるほか、先端的な各種要素技術と組み合わせることによってエネルギー利用効率を大きく高めることが可能です。

しかしながら、超伝導の状態を実現するためには、図4に示すように三つの条件を満たさなければなりません。すなわち、磁場（磁束密度）と温度によって流せる電流の大きさが制限されます。超伝導の機械（例えば発電機やモーターなど）で扱えるエネルギーを大きくするには、（電流）×（磁場）が大きいたく必要です。そのためには、低い温度が必要となるわけです。実際に超伝導のコイルに使われる

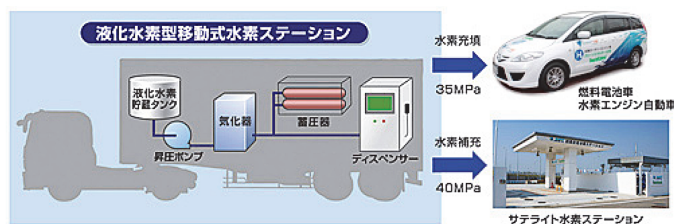


図2 液体水素コンテナによる水素配給とサテライト水素ステーション（岩谷産業）



図3 液体水素タンカーと液体水素コンテナ（川崎重工）

ような超電導材料には、図5に示すようなNbTi、Nb₃Sn、BSCCO、YBCO、MgB₂などがあり、それぞれの超伝導になる三つの条件を持っています。図5は、わかりやすいように、温度をパラメータとして、磁場と電流の平面でそれぞれの材料の超伝導になるための臨界条件の特性を示したものです。材料名に付して示したパラメータとした温度は、冷媒として用いられる液体ヘリウム（沸点4.2K；-269度）、液体水素（沸点20.3K；-253度）、液体窒素（沸点77.3K；-196度）の大気圧での沸点です。このなかでNbTiとNb₃Snは液体ヘリウムで冷却するしかありません。MgB₂は液体ヘリウムでも液体水素でも超伝導になります。BSCCOやYBCOは、いずれの冷媒でも超伝導になり、高温超伝導材料と呼ばれます。高温といっても液体窒素で-196度ですからかなり低温で使わなければなりません。

実際に実用化されている超伝導の機器としては、医療用のMRI-CT（核磁気共鳴断層撮影装置）や先ほど出てきた超伝導リニアモーターカーがあげられますが、これらは液体ヘリウムで冷却したNbTiを使った

超伝導コイルで作られています。しかしながら、ヘリウムは希少な有限資源で枯渇が心配されており、ヘリウムを使わない超伝導機器が期待されており、液体水素や液体窒素で使える高温超伝導材料を使った機器が活発に研究開発されています。

ここで、もう一度図5をみると、BSCCOは液体窒素ではほとんど磁場がかけられませんが、液体水素ではかなり特性がよくなります（赤矢印）し、YBCOでは液体ヘリウムでの特性を大きく損なうことなく液体水素で利用できることがわかります（青矢印）。また、MgB₂は液体窒素では使えませんが、液体水素で超伝導になる比較的安価な新しい超伝導材料です。また、液体水素は蒸発潜熱（気体になるときに奪う質量当たりの熱）がヘリウムの20倍、窒素の2倍以上あり、粘性も窒素の1/10で、冷媒としての優れた特性を有しています。このように、超電導材料にとっては液体水素を冷媒にすることが有利であることがわかります。しかしながら、液体水素冷却の超伝導機器の研究はほとんど進んでいません。これは、ヘリウムや窒素と違って、水素は可燃性のガスで扱いに注意が必要だからです。

4. 水素と電力を協調したエネルギーシステムの実現のためには

先に紹介したように、地球温暖化防止を目的とした水素社会に向かって大きな変革が進みつつあります。液体水素が大量の水素エネルギーを運搬する手段として社会の中に組み込まれていくということは、これを超伝導機器の立場から見ると、ヘリウムや窒素では冷却のためだけにこれらを液体にする必要があったのに対して、液体水素という優良な冷媒が存在することになります。運搬のために液化しないといけないわけですが、この冷熱を無駄にせず真に有効に使えるのは超伝導機器の冷却といえるわけです。

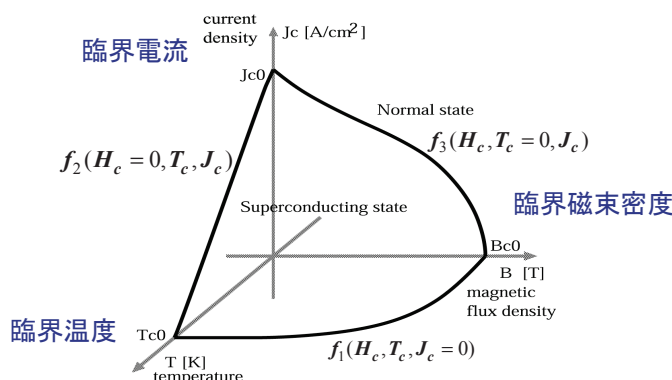


図4 超伝導の現れる条件（上記の曲面の内側）

Jc-B characteristics of superconductors

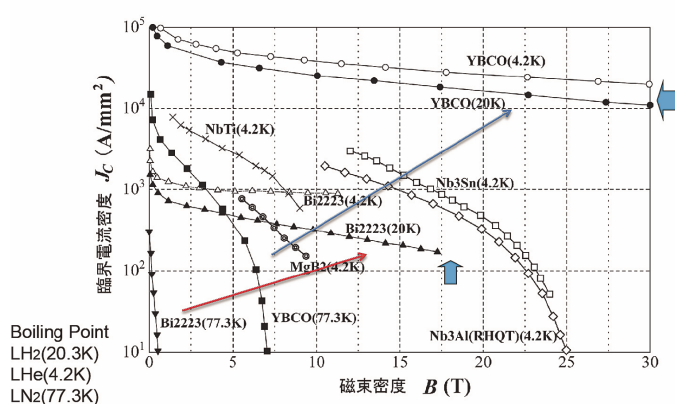


図5 超伝導材料と磁場 - 電流特性（パラメータ：温度）

例えば、図6のようなシステムが考えられます。液体水素がタンカーによって受入基地（現在のLNG受入基地のような形）に入り、貯蔵タンクに蓄えられ、これを気化して水素燃焼ガスタービン発電を行います。この発電機を液体水素で冷却し高効率でコンパクトな超伝導発電機とします。これによって蒸発したガスは当然燃料として使用します。受入タンクは、水素のサプライチェーンの基軸となり液体水素コンテナやトレーラで水素ステーションに分配し、水素自動車などへの供給を行います。（実は、現在の超伝導でない発電機の中には水素ガスで冷却されているものがあります。水素もちゃんと管理して使えば問題の無いことの実証でもあります。）

このように、液体水素で冷却した超伝導応用エネルギー機器をキーとした現在の電力エネルギーの大きな変革と、水素エネルギーと協調した新しい低炭素化エネルギー供給基盤の構築は、将来の環境に優しいエネルギーシステムの究極の形だと考えています。

しかしながら、私たちが研究を始める前（2008年）は、液体水素を超伝導機器の冷媒として利用する研究はほとんど行われておらず、液体水素冷却超伝導機器を設計・製作するに際して、例えば液体水素中へどのように電流を導入すればいいのか、そのときの安全性の確保はどうすればいいのか、そもそも超伝導線材を冷却する液体水素の熱流動特性そのものはどうなのかなど、多くの技術的課題がありました。これらの問題を解決すべく、私たちは、科学技術振興機構の支援を得て、液体水素冷却超伝導機器を想定した実験機器を設計製作し、宇宙航空研究開発機構（JAXA）の能代ロケット実験場で実際に実験を実施してきています。例えばパワーリード（電流導入端子）のブラケット構造（万が一の水素漏れによる爆発を避けるために、電流ケーブルそのものを窒素ガスで封入する）などを提案・製作して、県庁から認可を受けました。液体水素を使った冷却特性試験、超伝導特性評価実験をこれまで15回（2015/07現在）実施し、安全な運用実績を作ってきています。

このプロジェクトで整備した液体水素冷却超伝導機器を想定した実験設備（図7）は、液体水素浸漬

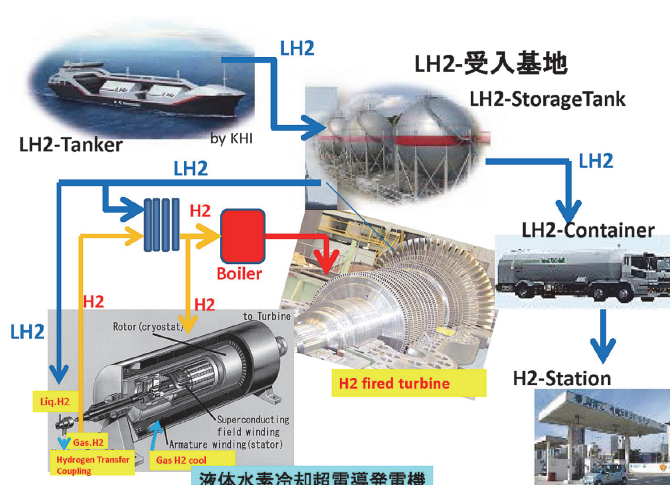


図6 水素と電力を協調したエネルギーシステムの構成例

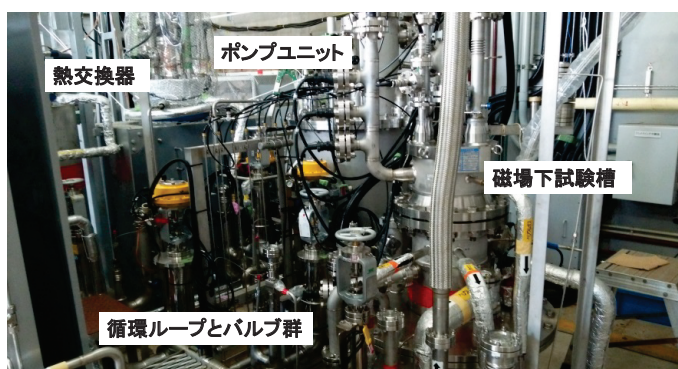
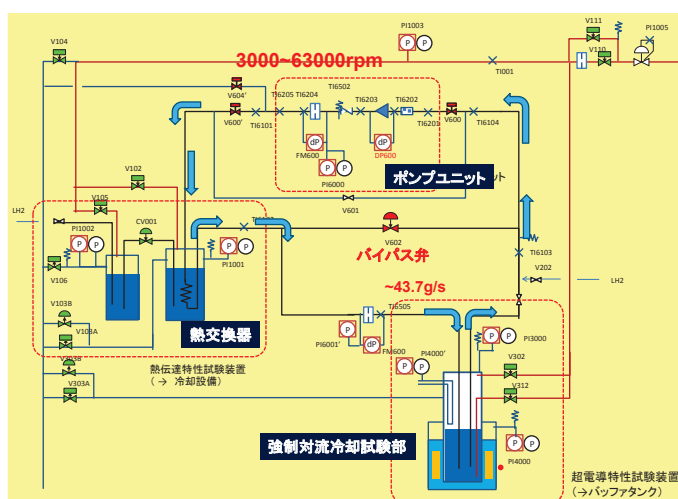


図7 液体水素冷却超伝導機器の実験設備の系統図と外観写真

冷却超電導機器、強制対流冷却超電導機器（超伝導ケーブルや CICC 導体など）の実験ができます。これらの設備は世界で最初のもので、このような試みを実際に実施し、実績を積み上げて安全な液体水素冷却超伝導機器システムの設計・法的整備に貢献し、社会への実装につなげていきたいと考えています。

5. まとめ

2011 年 3 月に発生した東日本大震災以降、日本のエネルギーに関する議論が活発になり、その重要性が再認識されています。原子力発電は停止し二酸化炭素の排出が多い火力発電の割合が増えています。地球温暖化抑止のため再生可能エネルギーの導入促進が急ピッチで進み、水素社会の実現も加速しています。水素と電力とを協調した理想のエネルギー供給基盤をめざした研究に、君たちも参加してみませんか？