

液体水素冷却超電導機器の研究開発

京都大学 大学院エネルギー科学研究科

白井 康之

1. はじめに

水素エネルギーは、1次エネルギーの90%以上を化石燃料に依存する我が国のエネルギー供給構造を変革させ、大幅な低炭素化を実現する手段として期待されている。しかし水素は既存のエネルギーに比べてコストが高く、低コストの実現には、安価な製造原価で大量に製造・輸送するためのサプライチェーンの構築、モビリティや発電等、大量利用に向けた取組が必要である。関西では、液化水素をはじめとする極低温ガスを扱う企業や大学が多く集まっており、産学官が一体となって、国内水素サプライチェーン構築支援事業等が実施されている。

このような中で、京都大学を中心とした我々のグループは、液体水素と超電導電力機器をむすびつけた水素・電力協調エネルギーインフラを提案し、そのために必要となる技術開発を科学研究費、JST(科学技術振興機構)の低炭素化プロジェクト(ALCA)、NEDO(先導研究プログラム/エネルギー・環境新技術先導研究プログラム)を通じて15年にわたって進めてきている。

2. 液体水素と超電導

超電導応用電力機器は、従来の技術体系を大きく変える次世代エネルギーシステム技術として有望であることが明らかになっているが、極低温で運用するため冷却設計が大きな課題である。超電導材料(Bi2223やREBCO)の臨界電流や構造材料の比熱を考えると、これらの超電導特性を効率よく利用できる温度域は15~40Kである。この温度域に対して、小型機器であれば冷凍機伝導冷却も候補となるが、比較的容量の大きい電力機器では液体水素(20.3K@1atm)が冷媒として最も適していると考えられる。液体水素の蒸発潜熱は液体ヘリウム約20倍、液体窒素の2倍以上あり、粘性も液体窒素の1/10で、冷媒としての優れた特性を有している。

さらに、液体水素が水素エネルギーキャリアとして社会インフラに組み込まれれば、超電導機器冷却後の蒸発ガスは水素エネルギーとして利用されるので、再凝縮の必要は無いことになる。逆に言えば、超電導機器の冷却は、液体水素の冷熱の有効な利用法の一つといえる。

我々のグループでは図1のようなシステムを提案している。最近、液体水素をタンカーからローディングし貯蔵タンクに蓄え、これを気化してエネルギーとして利用する水素燃焼(混焼・専焼)ガスタービン発電の開発が進んでいる。この発電

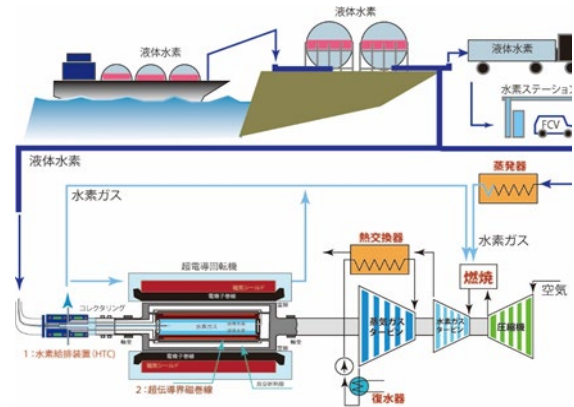


図1 水素エネルギーインフラと液体水素冷却超電導発電機(低温工学:テーマ解説)

機の界磁巻線を超電導化し、液体水素で冷却して高効率超電導発電機とすれば、蒸発ガスは電機子巻線を冷却して回収し、燃料として使用するワンスルーの高効率なシステムとすることができる。

3. 超電導機器冷媒としての液体水素

水素はその爆発範囲が広く、水素脆性の問題もあり、極低温冷媒としての研究例が少ないのが現状である。提案する水素・電力協調エネルギーインフラ構築を実現するためには、超電導機器冷媒としての基礎特性の把握、超電導線材の特性評価、液体水素冷却超電導機器・冷却システムの要素技術・設計法開発、システム導入効果検討、防爆設計・安全性技術基準の確立、社会実装のための法整備などが必要である。

従来、液体水素の利用は、主に宇宙用ロケット燃料として進められてきたため、利用条件の異なる超電導機器冷却を想定した冷却特性、熱流動特性については十分な研究が無かった。我々は、ま

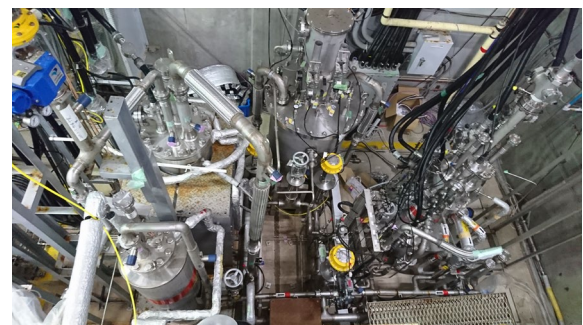


図2 超電導機器冷媒としての液体水素熱流動特性測定および液体水素冷却超電導材料特性測定のための実験設備(JAXA 能代ロケット実験場)

ずこの解明を目的とした実験装置（図 2）を世界に先駆けて、宇宙航空研究開発機構(JAXA)能代ロケット実験場に製作・設備した¹⁾²⁾³⁾。実験条件として、圧力(大気圧 \sim 2 MPa(G)), 温度(20 \sim 32 K), 強制対流(\sim 43 g/s)が設定可能である^{8),9)}。これらを用いて系統的な実験を行い、超電導機器の水素冷却設計を念頭に、浸漬冷却, 強制対流冷却について、サブクール, 超臨界条件を含めて、熱伝達特性のデータベースを整備した⁴⁾。

4. 液体水素冷却超電導機器の開発

4.1 液体水素冷却超電導材料の Jc-B 特性

液体水素を用いた直接あるいは間接冷却では、冷凍機伝導冷却, ガスヘリウム冷却に比べて、冷却安定性の改善が期待される。これを検証するため、液体水素に浸漬冷却した超電導材料あるいは超電導コイルなど要素機器の外部磁場下における通電特性を測定・評価できる試験設備を設計・製作した⁵⁾。液体水素槽の超電導材料に 500A までの通電ができ、7T までの外部磁場を印加できる。温度は 20 \sim 32K の範囲で調整でき、超電導材料の Jc-B-T (臨界電流-磁場-温度) 特性が測定できる。

4.2 液体水素冷却超電導マグネットの励磁特性

超電導発電機の研究開発は、1988 年 \sim 1999 年にかけてニューサンシャイン計画の一環として、液体ヘリウム冷却 NbTi 超電導界磁発電機として実施されたが、実用化には至っていない。しかし、低炭素化に親和性の高い液体水素冷却への転換が実現できれば、冷却ペナルティから解放して実用化を目指せる技術環境にあるといえる。そのためには、液体水素環境への大電流・電磁エネルギー(マグネット)の導入、回転子(回転する低温容器)への液体水素の給排などの液体水素冷却にする技術の開発が必要である。さらに、液体水素冷却超電導機器の冷却系の防爆対応・安全性の確保は重要な技術的課題である。

液体水素冷却超電導発電機の要素技術開発として、2 極 MgB₂ レーストラックコイルの設計製作および液体水素浸漬冷却下での励磁実験を行った。液体水素浸漬冷却下で、圧力を変え飽和液温を 21 K から 30 K まで変えて通電試験を行い、ロードラインを求め、クエンチ試験を行い、安定な励磁およびクエンチ後の健全性を確認した⁶⁾。

4.3 回転体(回転子)への液体水素給排

液体水素冷却にする重要な技術として、回転子(回転する低温容器)への液体水素の給排が挙げられる。液体水素給排システムの基本的な設計の考え方は、液体ヘリウム冷却の回転機開発で進められたものを踏襲すればよいが、物性の違い、再

凝縮を伴わないワンスルーシステム、さらに冷却系の防爆対応・安全性の確保は重要な技術的課題である。そこで、回転界磁超電導機を想定し、要素技術開発を目的として、軸径 504 mm, 幅 160 mm の円柱形回転低温容器への液体水素給排試験装置(図 3)を設計・製作し、試験を実施した⁷⁾。

その結果、常温からの冷却および貯液が安定して行え、液体水素の送液量を調整することで 1800 rpm で回転子内の液面を安定に維持できることを確認した。実験を通じて水素の漏洩は検出されず、設計製作した構造で安定な液体水素の給排が可能なることを確認した。

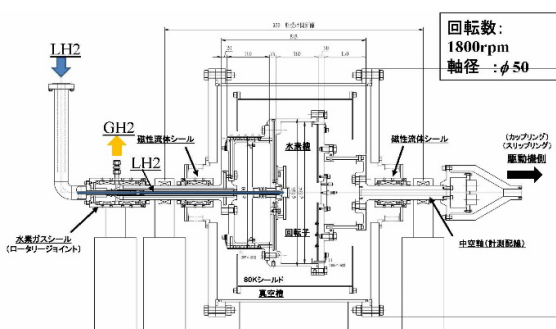


図 3 円柱形回転低温容器への液体水素給排試験装置の概略断面図

4.5 液体水素冷却超電導発電機デモ機の製作

以上進めてきた研究成果をもとに、現在、NEDO プロジェクトにおいて、10kW の液体水素冷却界磁超電導発電機のデモ機の設計製作を進めている。

5. おわりに

開発成果として液体水素冷却超電導機器のためのマグネット技術、水素のハンドリング技術、冷却システム技術、安全性技術の基本的指針を明らかにしてきた。研究開発で得られた知見をもとに、液体水素を冷媒とした種々の超電導機器のプロトタイプ機の開発が可能となると考えている。

6. 参考文献

- 1) Y. Shirai, et al.: *Cryogenics* **50** (2010) 410–416.
- 2) Y. Shirai, et al.: *Cryogenics* **51** (2011) 295–299.
- 3) Y. Shirai, et al.: *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. and Eng.* **278** (2017) 012036.
- 4) Y. Shirai, et al.: *Cryogenics* **92** (2018) 105–117.
- 5) H. Tatsumoto, Y. Shirai, et al.: *J. Phys.: Conf. Ser.* **507** (2014) 022042.
- 6) Y. Iwami, Y. Shirai, et al.: *IOP Conf. Ser.* **1559** (2020) 012147.
- 7) Shintaro Hara, et al.: *IEEE Trans. on Appl. Super.*, **31**, (2021).