

## 液体水素を移送する超伝導ポンプシステムの開発

柁川, 一弘  
九州大学超伝導システム科学研究センター

中村, 武恒  
京都大学大学院工学研究科電気工学専攻

小林, 弘明  
宇宙航空研究開発機構研究開発本部ジェットエンジン技術研究センター

和久田, 毅  
株式会社日立製作所日立研究所

他

<https://doi.org/10.15017/27446>

---

出版情報：九州大学低温センターだより. 7, pp.8-13, 2013-03. 九州大学低温センター  
バージョン：  
権利関係：

## 液体水素を移送する超伝導ポンプシステムの開発

柁川一弘<sup>1</sup>、中村武恒<sup>2</sup>、小林弘明<sup>3</sup>、和久田毅<sup>4</sup>、田中和英<sup>4</sup>

<sup>1</sup>九州大学 超伝導システム科学研究センター

<sup>2</sup>京都大学大学院 工学研究科 電気工学専攻

<sup>3</sup>宇宙航空研究開発機構 研究開発本部 ジェットエンジン技術研究センター

<sup>4</sup>(株)日立製作所 日立研究所

### 1. はじめに

水素を燃料に発電した電気でモータを駆動して推進する次世代車として、燃料電池自動車が開発中であり、我が国では2015年にその市販化が開始される計画である。また、燃料電池自動車に水素を補充するインフラとして、特に4大都市圏（東京、愛知、大阪、福岡）を中心に水素供給ステーションの整備も進行中である。水素は主に、地球上で有機化合物や水の形で存在しており、化石燃料の改質や水の電気分解等を経て生成されるため、電気エネルギーと同じ2次エネルギーに分類される。そこで、将来的な水素エネルギー社会を実現するためには、水素の製造から利用に至るトータルシステムを構築することが不可欠である。燃料電池自動車に搭載される燃料タンクとして最大70 MPaの圧縮ガスを充填可能な水素容器が開発されているが、その密度は大気圧下にある液化ガスよりもかなり小さいことが知られている[1,2]。従って、将来の水素エネルギー社会において、特に貯蔵や輸送の際には、より密度の大きな液体の状態の水素を利用する方が効率的である。この液体水素の沸点は約20 Kであり、その保持には真空断熱層を有する極低温容器が必要となるが、電気抵抗ゼロの超伝導体も利用可能となる。このような超伝導体の候補の1つとして、我が国で2001年に発見された二ホウ化マグネシウム ( $MgB_2$ ) [3] があり、その線材化や高特性化に関する研究開発も盛んに行われている。将来の水素エネルギー社会で必須となる液体水素利用を省エネルギー性に優れた超伝導技術に基づいて実現するために、特に貯蔵や輸送の際に必要な容器内にある液体水素の充填量計測、および別容器へ液体水素を簡便に移送できる電動ポンプの開発を目指している。

本論文では、 $MgB_2$ 線材を用いて製作した超伝導式液面計、および $MgB_2$ モータを組み込んだ超伝導ポンプシステムの概要について述べる。製作した液面計とポンプシステムを用いて実施した予備的な液体ヘリウム試験と、実際の液体水素試験の結果についても簡単に紹介する。

### 2. 超伝導式液面計の製作・試験

液体水素用の超伝導式液面計を製作するために、線径が異なる2種類の $MgB_2$ 線材（0.0925 mm径および0.155 mm径）を用意した。図1に、0.155 mm径線材の断面写真を示す。シース材はCuNiであり、その内側に単芯の $MgB_2$ フィラメントが配置されている。図2に、短尺試料線材の抵抗の温度依存性を示す。シース材にCuNiを使用しているため、常伝導抵抗の温度依存性が非常に小さい。常伝導抵抗が急激に減少し始める直前の値の50%で臨界温度を定義すると、0.0925 mm径線材で30 K、0.155 mm径線材で33 Kと見積られる。

このような2種類の $MgB_2$ 線材を用いて、超伝導式液面計を各々製作した。準備した当初の線材長は約300 mmである。まず、 $MgB_2$ 線材の両端に、銅線を沿わせて半田付けした。 $MgB_2$ 線材は一般に

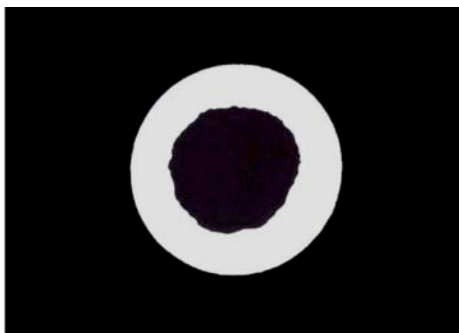


図1 MgB<sub>2</sub>線材の断面写真

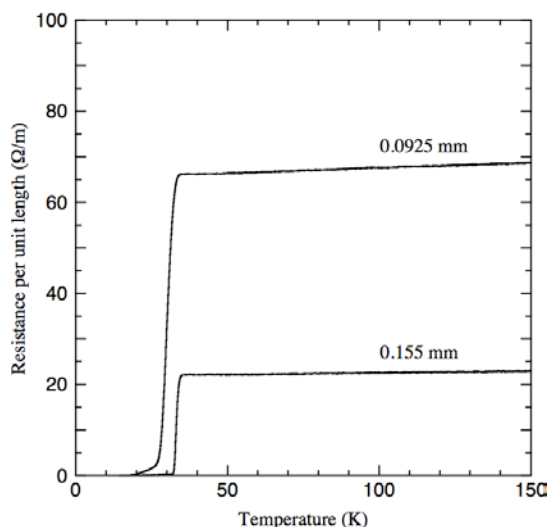


図2 MgB<sub>2</sub>線材の抵抗の温度依存性

曲げ歪みに弱いため、両端部の銅線を用いてベークライト製の中空パイプ内に固定し、MgB<sub>2</sub>線材自身はほぼ直線形状を保つように工夫した。液面計を製作後の検知可能な有効長は、0.0925 mm径線材が260 mm、0.155 mm径線材が280 mmである。また、従来のNbTi線材を用いた超伝導式液面計[4]では上位電極部にヒータ線を併設して常伝導部の芽を生成する必要があるが、製作したMgB<sub>2</sub>液面計では不要である。これは、使用したCuNiシースMgB<sub>2</sub>線材に微小電流を通電するだけで、自動的にガス中の部分が常伝導転移するためである[5]。

図3に、液体ヘリウムの充填時および排出時に計測したMgB<sub>2</sub>液面計の出力電圧を示す。図3の横軸は、NbTi線材を用いた市販のヘリウム用液面計を用いて測定した。予備試験の結果、製作した液面計に用いたMgB<sub>2</sub>線材への通電電流値を、0.0925 mm径線材では250 mA、0.155 mm径線材では600 mAと決定した。図3より、製作したMgB<sub>2</sub>液面計の出力電圧の再現性が非常に良好であり、液位と1対1に対応していることがわかる。図3の実線は、実験結果を用いて導出したMgB<sub>2</sub>液面計の較正曲線である。本較正曲線を利用すれば、製作したMgB<sub>2</sub>液面計の出力電圧を液体ヘリウムの液位に換算することができる。

液体水素の場合の試験結果を、図4に示す。図4の横軸は、市販の静電容量式液面計[6]を用いて測定した。静電容量式液面計は測定毎に再較正が必要なことが知られており、出力の信頼性を確保するためには細心の注意を要する。また、試験の都合上、静電容量式液面計の下端がMgB<sub>2</sub>液面計の下端よりも数十mm上の位置となっており、MgB<sub>2</sub>液面計の検知範囲を全て網羅していない。ただし、MgB<sub>2</sub>液面計の下端と同じ位置にPtCo温度センサも併設した。PtCoセンサは、自己発熱と冷却の関係から、液中にあるかガス中にあるかを判断することができる。従って、PtCoセンサに基づいて液位が通過した時刻を把握すれば、その瞬間のMgB<sub>2</sub>液面計の出力電圧を評価できる。予備試験の結果、製作した液面計に用いたMgB<sub>2</sub>線材への通電電流値を、0.0925 mm径線材では150 mA、0.155 mm径線材では300 mAと決定した。図4より、液体水素の充填時における製作したMgB<sub>2</sub>液面計の出力電圧の再現性が非常に良好であり、液位と1対1に対応していることがわかる。図4の実線は、静電容量式液面計に基づいた実験結果を用いて導出したMgB<sub>2</sub>液面計の較正曲線である。本較正曲線を外挿すると、PtCoセンサに基づく実験結果と良く一致することがわかる。つまり、今回測定した範囲では、静電容量式

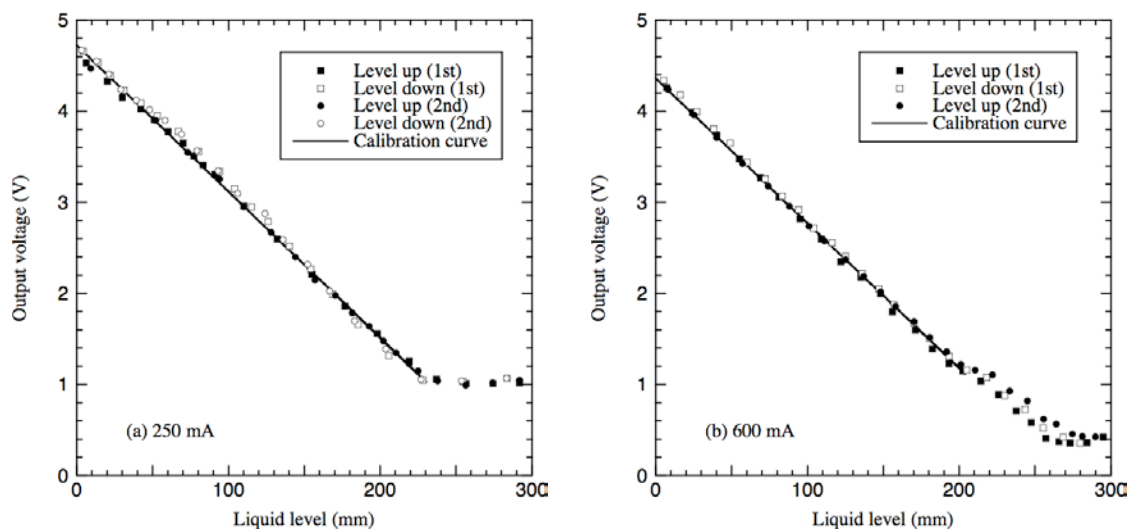


図3 MgB<sub>2</sub>液面計の較正（液体ヘリウムの場合） (a) 0.0925 mm (b) 0.155 mm

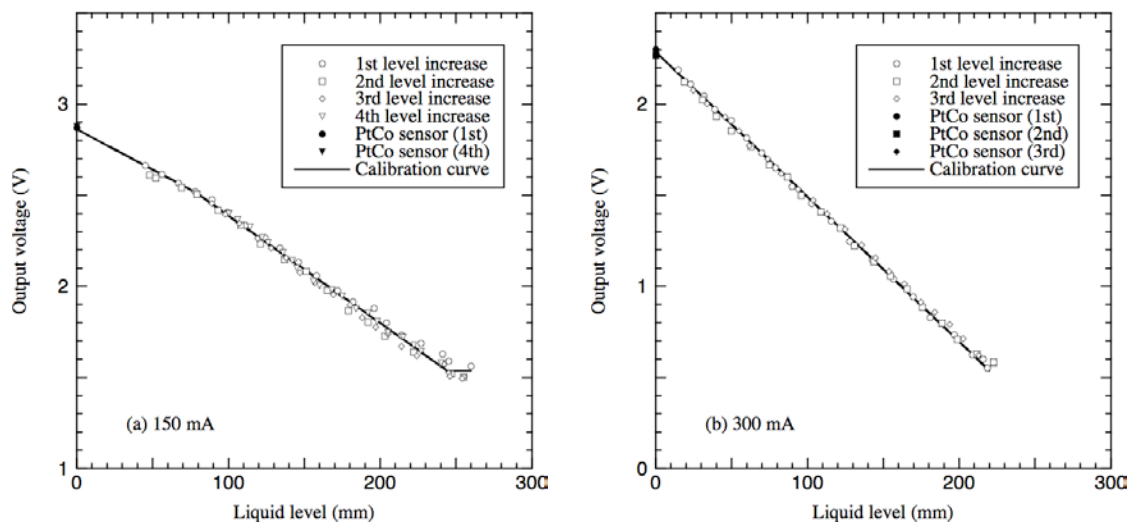


図4 MgB<sub>2</sub>液面計の較正（液体水素の場合） (a) 0.0925 mm (b) 0.155 mm

液面計の出力を信頼しても良いと思われる。また、得られた較正曲線を利用すれば、製作した MgB<sub>2</sub> 液面計の出力電圧を液体水素の液位に換算することができる。

### 3. 超伝導ポンプシステムの製作・試験

MgB<sub>2</sub>線材を用いて、かご型回転子を製作した。使用線材は3層構造単芯線であり、MgB<sub>2</sub>フィラメントの周囲にNbシース、さらにその外側にCuシースが配置されている。線径は0.8 mmであり、臨界電流は液体ヘリウム温度4 Kで534 A、液体水素温度20 Kで336 Aである。MgB<sub>2</sub>線材単線が無酸素銅製の門型治具内に設置し、半田を用いて固定することで計44本のロータバーを製作した。また、無酸素銅製の円筒型巻棒治具に10ターンのMgB<sub>2</sub>線材を巻き付けた後に半田で固定し、計2個のエンドリングを製作した。さらに、市販誘導機の回転子鉄心に設けられた各スロットにロータバー1本を挿入し、その両端部をエンドリングと半田接続することで、かご型回転子を製作した。固定子については、銅巻線からなる市販誘導機のをそのまま使用した。なお、製作したMgB<sub>2</sub>モータの詳細に

については、文献[7]を参照して欲しい。誘導モータのかご型回転子巻線に  $\text{MgB}_2$  線材を用いることで、永久電流の誘起により、低損失で高効率な同期回転を実現できる。

前述の  $\text{MgB}_2$  液面計と  $\text{MgB}_2$  モータを組み合わせ、液体水素を移送する超伝導ポンプシステムを構築した。図 5 に、構築したポンプシステムの概略図を示す。 $\text{MgB}_2$  モータの片方のシャフトにアルミ製の羽根車（インペラ）を取り付け、その周囲をケーシングすることで、遠心ポンプを形成した。このインペラ付きの  $\text{MgB}_2$  モータを金属製のクライオスタット内に鉛直に配置し、もう一方のシャフトを室温部まで延長して回転速度およびトルクを計測した。また、メタルクライオスタット内に 0.155 mm 径の  $\text{MgB}_2$  液面計を鉛直に配置し、液体水素の液位を測定した。ただし、液体ヘリウムを用いた試験では、有効長がより長い市販の NbTi 液面計[4]を使用した。メタルクライオスタットから移送される液体を受け入れるために、別のガラス製容器を準備した。このガラスデュワーとメタルクライオスタットを有効内径 10 mm のトランスファーチューブで接続した。ガラスデュワー内には 0.0925 mm 径の  $\text{MgB}_2$  液面計を鉛直に配置し、液体ヘリウムおよび液体水素の液位を測定した。

製作した  $\text{MgB}_2$  ポンプシステムにおける送液量の実験結果を、図 6 に示す。まず、事前に実施した液体ヘリウムの場合の結果を、図 6(a)に示す。 $\text{MgB}_2$  モータの回転速度を一定に保ったまま、ガラスデュワー内に設置した  $\text{MgB}_2$  液面計の出力電圧がほぼ一定速度で減少（液位がほぼ一定速度で増加）する範囲の測定値を送液量に換算した。図 6(a)では、 $\text{MgB}_2$  モータを回転し始める直前のメタルクライオスタット内の液位を、 $\text{MgB}_2$  モータ上端からさらに 150 mm もしくは 300 mm 上の位置に固定した。 $\text{MgB}_2$  モータの回転速度とともに液体ヘリウムの送液量も単調に増加し、定格回転速度 1800 rpm では約 7 リットル毎分であった。液体ヘリウムと液体水素を比較すると、ポンプの動作点（吐出抵抗）が同じなら、相似則より体積流量とヘッドは同一なことが期待される。一方、ポンプの軸動力やモータ回転摩擦損失は密度に比例するため、液体水素 ( $70.8 \text{ kg/m}^3$ ) の方が液体ヘリウム ( $125 \text{ kg/m}^3$ ) よりも小さくなることが予想される[2]。さらに、蒸発潜熱は液体水素 ( $443 \text{ kJ/kg}$ ) の方が液体ヘリウム ( $20.4 \text{ kJ/kg}$ ) よりも一桁以上大きいため、冷媒の蒸発量が大きく減少することも期待できる。図 6(b)に、液体水素の場合の送液量の実験結果を示す。シャフトなしの場合は  $\text{MgB}_2$  モータの回転速度を直接計測できないため、入力周波数をそのまま回転速度に換算した。750 rpm 以下では全く送液できなかったが、900 rpm 以上で回転速度とともに送液量も単調に増加した。定格回転速度 1800 rpm における送液

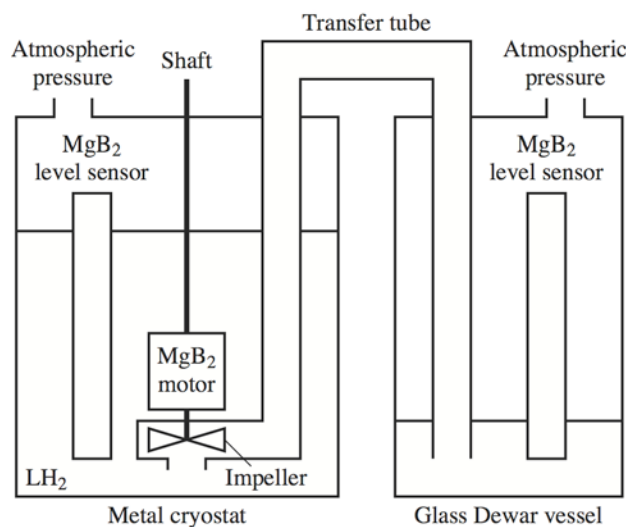


図 5 構築した超伝導ポンプシステムの概略図

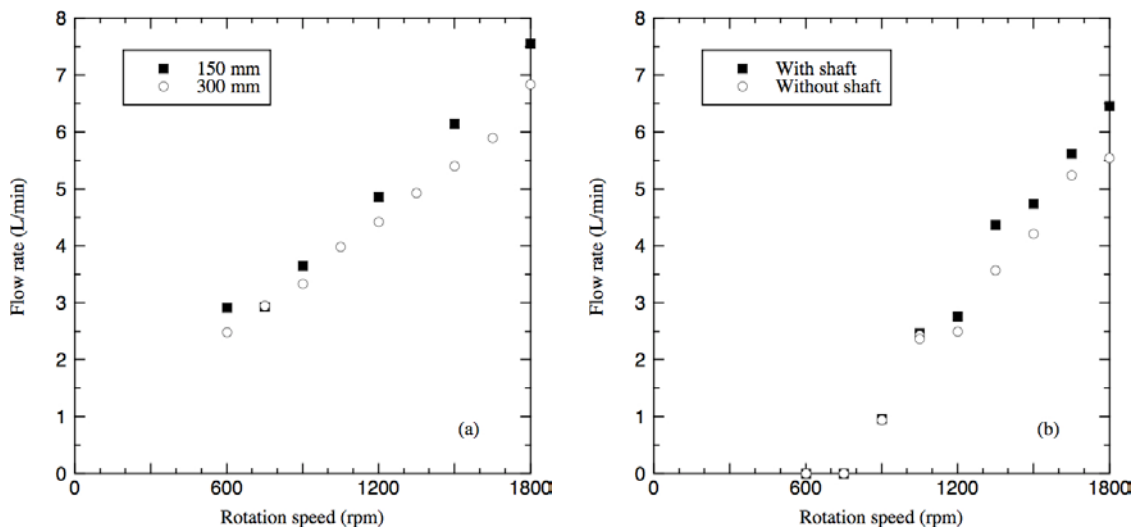


図6 送液量の実験結果 (a) 液体ヘリウムの場合 (b) 液体水素の場合

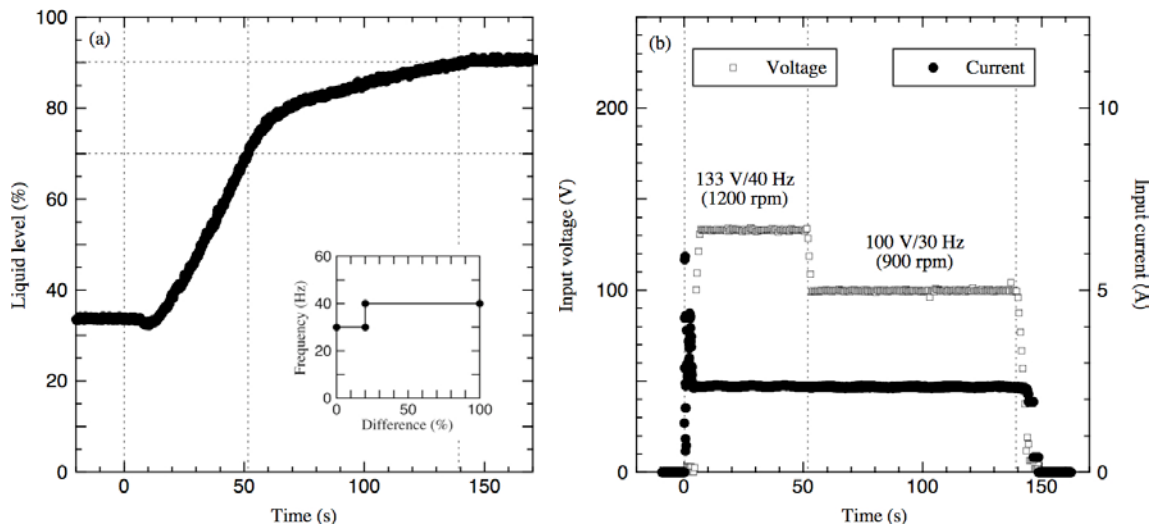


図7 液体水素の自動送液試験結果 (a) ガラスデュワー内の液位 (b)  $MgB_2$  モータの入力電圧・電流

量は約6リットル毎分となり、液体ヘリウムの場合とほぼ同等な結果が得られた。図6の結果を相互に比較するとわずかな相違がみられるが、送液量の実験値はわずかな内圧の変化や液の残量等の個別の条件に敏感に影響を受けるため、より詳細な考察が必要である。

自作の簡単な制御プログラムを用いて実施した液体水素の自動送液試験結果の一例を、図7に示す。図7(a)はガラスデュワー内に設置した  $MgB_2$  液面計の出力の時間変化、図7(b)は  $MgB_2$  モータの入力電圧と入力電流の時間変化である。また、プログラム上で設定した  $MgB_2$  モータの制御シーケンスの例を、図7(a)の挿入図に示す。事前に設定したガラスデュワー内の液位の目標値に対して、実際の液位が  $MgB_2$  液面計の有効長の20% (52 mm) 以下またはそれ以上だけ低ければ、 $MgB_2$  モータの回転速度を30 Hz または40 Hz に設定する。 $MgB_2$  モータを駆動するPWMインバータは200 V/60 Hz で  $V/f$  制御したため、30, 40 Hz の周波数 (回転速度 900, 1200 rpm) はそれぞれ 100, 133 V の入力電圧に相当する。図7中の縦の点線は、 $MgB_2$  モータの回転速度が変化し始めた時刻を表す。ガラスデュワー内の液位は当初34%であったが、事前に入力した液位の目標値90%に対して、時刻0 s で移送開始ボタン



を押すとすぐに MgB<sub>2</sub> モータは回転し始め、回転速度 1200 rpm まで一定速度で上昇した。トランスファチューブ内の温かい水素ガスの影響で多少液位は下降したが、すぐに上昇に転じ、ほぼ一定の速度で液体水素が充填された。その後、液位が 70% になると自動的に MgB<sub>2</sub> モータの回転速度は 900 rpm へ変化し、液位の上昇速度も鈍化した。さらに、液位が最終的な目標値である 90% になると MgB<sub>2</sub> モータは自動的に停止し、液位もほぼ 90% 程度で一定となった。一方、入力電流は MgB<sub>2</sub> モータの始動時に瞬間的に 6 A 程度流れたが、その後は 2.35 A でほぼ一定となった。

#### 4. まとめ

MgB<sub>2</sub> 線材を用いた超伝導式液面計を製作した。CuNi シース線材を利用することにより、ヒータ不要で簡便な超伝導式液面計を構成することができる。液体ヘリウムおよび液体水素を用いた液面計の動作模擬試験を実施した結果、出力の再現性が非常に良好であり、液位と 1 対 1 に対応することを実証した。また、MgB<sub>2</sub> 液面計と MgB<sub>2</sub> モータを組み合わせた超伝導ポンプシステムを構築した。MgB<sub>2</sub> 液面計は、容器内にある寒剤の液位を計測するだけでなく、その出力を基にした MgB<sub>2</sub> モータの回転制御にも利用した。製作したポンプシステムを用いて、液体ヘリウムおよび液体水素の移送試験を実施し、定格回転速度でほぼ同等の流量を送液できることがわかった。

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の平成 20 年度産業技術研究助成事業 (課題番号 : 08B38006a) の一環として実施したものである。

#### 参考文献

- [1] <http://www.nedo.go.jp/content/100099088.pdf>
- [2] 低温工学協会編：「超伝導・低温工学ハンドブック」，オーム社，東京 (1993) 1021.
- [3] J. Nagamatsu, N. Nakagawa, T. Muranaka, Y. Zenitani and J. Akimitsu: Nature **410** (2001) 63.
- [4] <http://www.americanmagnetics.com/hesensors.php>
- [5] A. Jokinen, K. Kajikawa, M. Takahashi and M. Okada: J. Phys. Conf. Ser. **234** (2010) 012021.
- [6] <http://www.americanmagnetics.com/lisensors.php>
- [7] T. Nakamura, Y. Yamada, H. Nishio, K. Kajikawa, M. Sugano, N. Amemiya, T. Wakuda, M. Takahashi and M. Okada: Supercond. Sci. Technol. **25** (2012) 014004.