

機関番号：17102

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20560304

研究課題名（和文） 液化水素用超伝導式液位センサの最適設計と拡張性に関する研究

研究課題名（英文） Research on optimum design and reapplicability of superconducting level sensor for liquid hydrogen

研究代表者

柁川 一弘 (KAJIKAWA KAZUHIRO)

九州大学・超伝導システム科学研究センター・准教授

研究者番号：10294894

研究成果の概要（和文）：従来の研究成果を再現する数値解析プログラムコードを作成し、異なるシース材をもつMgB<sub>2</sub>線材で構成された液化水素用超伝導式液位センサを最適設計した。また、SUS/Fe シース MgB<sub>2</sub>線材を用いて従来構造をもつ超伝導式液位センサを試作し、液化ヘリウムおよび液化水素を用いて試験・評価した。さらに、新構造をもつ液化水素用超伝導式液位センサを提案し、数値シミュレーションにより動作特性を検証した。

研究成果の概要（英文）：The numerical code to reproduce the experimental results carried out previously was established, and the superconducting level sensors for liquid hydrogen composed of MgB<sub>2</sub> wires with different sheath materials were designed optimally. A superconducting level sensor with a conventional structure was also fabricated using an MgB<sub>2</sub> wire with SUS/Fe sheath, and its operations were tested and evaluated in both liquid helium and liquid hydrogen. Furthermore, a new structure of superconducting level sensor for liquid hydrogen was proposed, and its operation was validated by numerical simulation.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：超伝導工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電子・電気材料工学

キーワード：液体水素、超伝導式液位センサ、二ホウ化マグネシウム、最適設計、数値解析、複合超伝導体、熱的安定性、最小伝播電流

## 1. 研究開始当初の背景

(1) エネルギー問題や環境問題を是正する先進技術の1つとして、将来の水素利用社会の可能性が検討されている。燃料電池などで水素を酸化しエネルギーを得るためには、水素を安全にかつ安定的に製造・輸送・貯蔵・移送する必要があり、圧縮ガスとしてだけでなく液化ガスとして水素を利用する形態

も不可欠である。つまり、体積密度が一般に小さい水素の効率的な貯蔵に関して、現行の水素自動車用ボンベの圧力として設定されている350気圧下における常温の水素の密度は、大気圧下における液化水素の密度よりかなり小さいため、それぞれに必要な耐圧構造物と断熱真空容器を考慮しても、液化水素の方が貯蔵容積としては小さくて済む。

(2) 現在、衛星打上げ用ロケットの推進剤として液化水素が主に利用されているが、水素タンク内の液体と気化ガスの界面（液位）を判別する方法として、静電容量式や測温抵抗体が使用されてきた。しかし、静電容量式液位センサは、水素の液相と気相の間の比誘電率にあまり違いがなく、かつ密度自身も小さいために、その使用には別の手段による再校正が必要であるという自己矛盾を含んでいる。また、上下方向にある間隔で複数個配置する測温抵抗体を用いた場合には、離散的にしか液位を知ることができず、安全率を考慮すると貴重で高付加価値を持つ液化水素燃料を無駄に使用することとなる。従って、液位を連続的にかつ高信頼度を持って測定する技術の確立が切望されている。そこで、大気圧下で約 20 K の沸点を持つ液化水素の液位センサとして、約 39 K 以下で電気抵抗がゼロとなる二ホウ化マグネシウム ( $MgB_2$ ) 超伝導体の利用が考えられる。

(3) 極低温液体用の超伝導式液位センサとして、大気圧下で約 4 K の沸点を持つ液化ヘリウム用のものが既に市販化されており、幅広く使用されている。センサの感部には超伝導転移温度（臨界温度）が約 9 K の NbTi 合金の裸線を配置しており、その動作電流は 75 mA である。このような超伝導式液位センサの動作原理は、容器内に鉛直に配置した超伝導線材に適当な直流電流を通電すると、液体に浸された部分は超伝導状態のままで電圧降下がなく、気化ガス中では自己発熱で臨界温度以上に温度上昇することにより抵抗状態となる。そこで、超伝導線材の両端に発生する電圧が液位と 1 対 1 に対応し、液体と気化ガスの境界位置を判別可能となる。この液位センサの正常動作に必要な電流値については、複合超伝導体の熱的安定性理論に基づいて、気化ガス中の最小伝播電流以上、液体中の回復電流以下に設定すれば良いことが実験的に示されている。研究代表者らはこれまでに、 $MgB_2$  超伝導線材を用いた液化水素用液位センサを試作し、その実現可能性を実験的に検証した。しかし、正常動作には比較的大きな電流通電が必要であり、結果として極低温環境での消費電力も大きくなるため、その低減が実用化に向けての課題となっている。

## 2. 研究の目的

本研究は、超伝導技術と水素利用社会を効果的に融合することによるエネルギー問題や環境問題の解決へ向けた基礎的研究開発の一環として、将来の水素利用社会において貯蔵密度の観点から有利な形態である液化水素の容器内残存量を、超伝導技術を有効活

用して計測する手法の確立を目的とする。つまり、種々の超伝導材料を金属と共に長尺化した複合線材におけるゼロ抵抗性と熱的安定性を上手く利用して、貯蔵容器内の液化水素の残量を外部から正確に把握する、現在は未開発の信頼性が高い計測技術を広く社会に提供することである。

そこで、従来の研究成果である  $MgB_2$  線材を用いた液化水素用液位センサに関する予備的な動作確認試験に基づいて、本研究では特に、次世代クリーン燃料の 1 つとして考えられている液化水素に関連して、液化水素と気化ガス間の境界位置を高精度に高信頼度で検出する超伝導式センサの開発を目指した基礎的研究を実施する。具体的な研究内容をまとめると、次のようになる。

(1) 衛星打上げロケット推進用液化水素タンクや水素ステーション用液化水素貯槽での使用を想定した、 $MgB_2$  超伝導線材を用いた液化水素用液位センサを最適設計する。

(2) 得られた要求仕様を満足する  $MgB_2$  線材を入手してセンサを試作し、液化水素を用いた動作実証試験を実施する。

(3) これまでに得られた知見を有効活用した新しい原理に基づく異相境界判別センサの可能性について検討する。

## 3. 研究の方法

(1) これまでに得られた実験結果を数値的に再現するプログラムコードを作成する。次に、この数値解析コードを用いて、液化水素用液位センサにおける通電電流や消費電力の低減に向けた  $MgB_2$  線材の設計指針を提案する。その際、化合物である  $MgB_2$  超伝導体の線材化にはシース材が不可欠なため、このシース材の候補として考えられる複数の金属材料の物性値（特に、電気抵抗率）が液位センサの動作に与える影響についても検討する。

(2) 液位センサとして適用する SUS/Fe シース  $MgB_2$  線材における抵抗の温度依存性を測定し、従来構造の液位センサを試作する。試作した  $MgB_2$  液位センサの健全性を確認するために、液化ヘリウムを用いた予備実験を実施する。次に、液化水素を用いた本試験を実施し、充填の際の液位上昇時および加圧排出の際の液位下降時における液位センサの挙動を観測する。

(3) 液化水素用の超伝導式液位センサとして、様々なシース材を持つ  $MgB_2$  線材を適用したものがこれまでに試作、試験されている。

通常の超伝導式液位センサの動作原理は、液体と気化ガスの冷却特性の違いを利用して、鉛直に配置した超伝導線に適切な直流電流を通電すると、ガス中の発熱と冷却の熱的なバランスにより、ガス中に配置された部分のみが抵抗を有する常電導状態となり、超伝導線の両端電圧を測定することで液面の位置（液位）を把握できる。しかし、水素は可燃性ガスのため、特に加圧排出の際に不活性ガスであるヘリウムが使用される状況も想定され、充填時の純水素ガス雰囲気も併せて、複数の種類のガス中で液位センサが正常に動作することが要求される。そこで、冷却特性の異なるガス中でも出力が一定となる新しい構造の超伝導式液位センサを考案し、数値解析を用いた動作特性の予備的検証を実施する。

#### 4. 研究成果

(1) 細長い超伝導線を鉛直に配置し、その断面内の温度が均一とみなせる場合、線長方向のみを考慮した1次元熱平衡方程式を用いて、温度分布の時間変化を評価できる。この熱平衡方程式を数値的に解くために、差分法により離散化した。数値計算パラメータを表1に示す。MgB<sub>2</sub>線のシース材の候補として、ここでは3種類の金属材料（Cu-30Ni, Cu-10Ni, SUS）を選定した。図1に、文献より得られた各シース候補材料に対する抵抗率の温度特性とその近似曲線を示す。また、MgB<sub>2</sub>超伝導体の常電導抵抗率も、併せてプロットしている。図1からわかるように、MgB<sub>2</sub>超伝導体の常電導抵抗率と同程度の値を持ち、かつ抵抗率の温度変化が少ないものを条件に選んだ。

表1 数値計算パラメータ

線径	0.3 mm
臨界温度	36 K
水素の沸点	20.4 K
液化水素の熱伝達係数	1 W/cm <sup>2</sup> ·K
水素ガスの熱伝達係数	0.07 W/cm <sup>2</sup> ·K

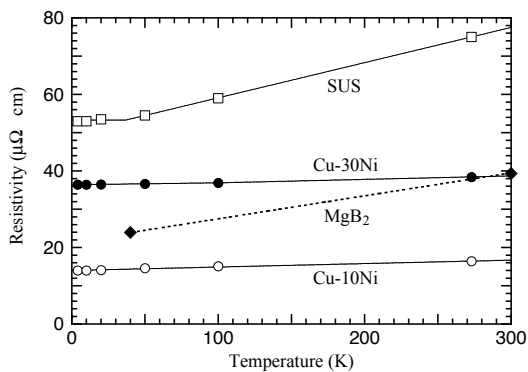


図1 各種材料における抵抗率の温度特性

数値解析により得られた液位センサの正常動作電流の最小値をガス中の最小伝播電流  $I_p$  と定義し、各シース材を持つ MgB<sub>2</sub> 線材の常電導抵抗率  $\rho_n$  に対する依存性を、図2に示す。また、冷却安定性に基づく理論曲線も、実線で示す。両者は良く一致しており、線材抵抗率の 1/2 乗にほぼ反比例する。しかし、発熱量自体は  $\rho_n I_p^2$  に比例するため、シース材の違いは消費電力の抑制にあまり寄与しないといえる。

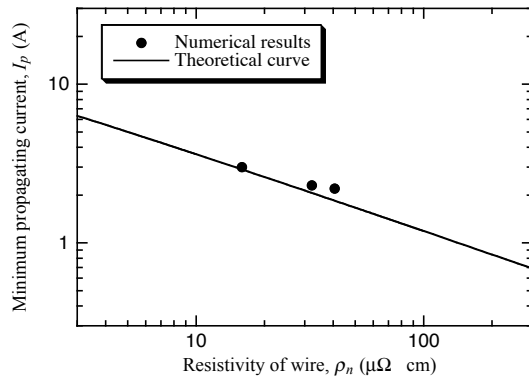


図2 最小伝播電流の線材抵抗率に対する依存性

(2) 実験に使用した試料線材は、MgB<sub>2</sub>超伝導体の周りを SUS/Fe シースで覆った単芯線構造を有し、線径は 0.1 mm である。試料線材を用いて測定した抵抗率の温度依存性を図3に示す。図3から、臨界温度は 36 K であり、常電導抵抗率の温度依存性が非常に大きいことがわかる。これは、シース材に Fe を使用しているためである。この線材をベークライトの中空パイプ内に配置し、有効長 300 mm の超伝導式液位センサを試作した。MgB<sub>2</sub>線材の上端には、マンガン線ヒータを取り付けた。

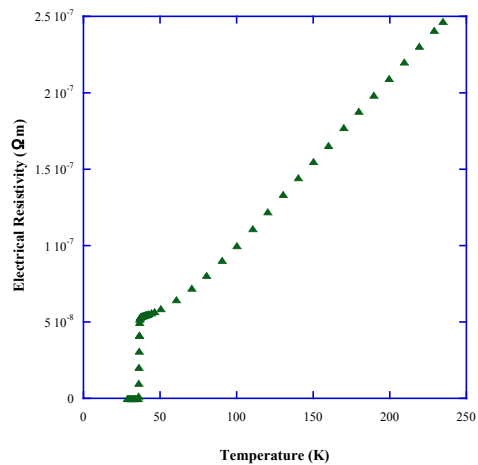


図3 SUS/Fe シース MgB<sub>2</sub> 線材における抵抗率の温度依存性

予備実験として、液化ヘリウム中で液位センサの動作確認を行った。予備的評価の結果から、ヒータ線へは 350 mA もしくは 400 mA、MgB<sub>2</sub>線材へは 1.0~1.2 A の直流電流を通電した。測定は、液の充填時と自然蒸発時に行った。自然蒸発時の実験結果の一例を図 4 に示す。MgB<sub>2</sub>線材への通電電流が 1.0 A のとき、不連続な結果が得られた。そこで、通電電流を 1.1 A もしくは 1.2 A に増加すると液位と出力電圧が 1 対 1 で対応し、液位センサとして動作することが確認できた。ただし、液位センサ上端から 60 mm と 190 mm の位置にバップル板があり、出力電圧がその影響を多少受けていることも確認できる。

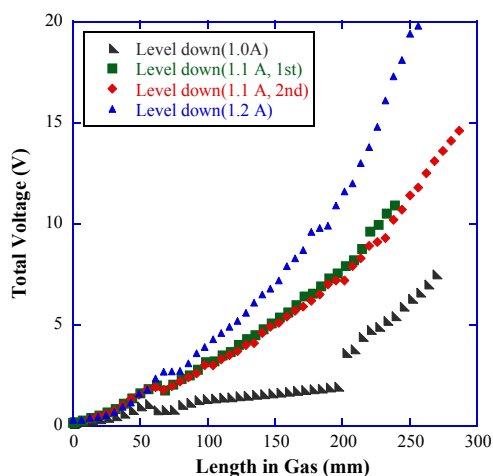


図 4 液化ヘリウム中の実験結果

次に、液化水素中で液位センサとしての動作確認を行った。予備的評価の結果から、ヒータ線へは 300 mA もしくは 400 mA、MgB<sub>2</sub>線材へは 0.5~0.7 A の直流電流を通電した。測定は液の充填時に行い、再充填開始時にタンク内に液が残っている場合と残っていない場合があった。なお、タンク内には測温抵抗体を取り付け、離散的に正確な液位を把握した。液充填時の実験結果の一例を図 5 に示す。MgB<sub>2</sub>線材への通電電流が 0.5 A のとき、不連続な結果が得られた。そこで、通電電流を 0.6 A もしくは 0.7 A に増加すると液位と出力電圧が 1 対 1 で対応し、液位センサとして動作することがわかった。しかし、液の再充填開始時にタンク内に液が残っている場合と残っていない場合で出力電圧の再現性が良くなかった。また、測温抵抗体の出力から、タンク内に液が残っている場合は、液が残っていない場合と比較してタンク内のガス温度が低いことがわかった。このことから、出力電圧の再現性が良くなかった原因として、液位センサの出力電圧がタンク内のガス温度に影響を受けやすいためといえる。

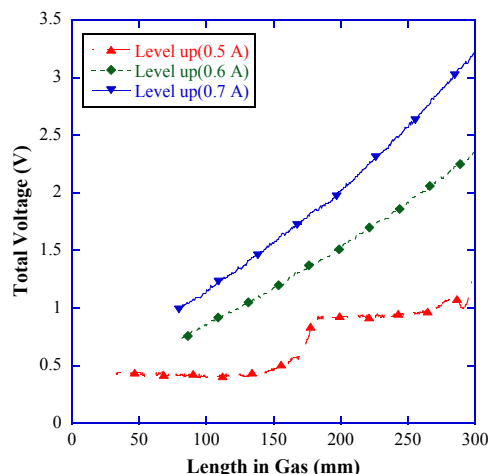


図 5 液化水素中の実験結果

(3) 図 6 に、新しい超伝導式液位センサの基本構造を示す。液位センサの感部は、近接して平行に鉛直配置した 2 本の線材（超伝導線 A と非超伝導線 B）で構成される。非超伝導線 B における抵抗の温度特性は、臨界温度以上にある超伝導線 A の常電導抵抗と全く同一の特性を示すが、冷媒温度下では電気抵抗ゼロの超伝導状態に移行しないものとする。この 2 本の線材を電氣的に直列接続して適切な直流電流  $I$  を通電すると、超伝導線 A は従来の超伝導式液位センサと同様に動作して、液体に浸漬した部分は超伝導状態で電気抵抗ゼロとなって電圧降下がなく、またガス中の部分は臨界温度以上の常電導状態（抵抗状態）となって電圧  $V_G$  を発生する。一方、非超伝導線 B は、全長が常に抵抗状態のままであり、液体中およびガス中のいずれの部分でも電圧を発生する。ただし、ガス中の部分は超伝導線 A と同一の温度分布となり、結果として発生電圧も  $V_G$  で同一となる。また、液体中の部分については、圧力に応じた一定の冷媒温度  $T_b$  における抵抗  $R(T_b)$  を生じ、結果として液体に浸漬した線材長に比例した電圧  $V_L = R(T_b)I$  が発生する。そこで、超伝導線 A の発生電圧  $V_A = V_G$  と非超伝導線 B の発生電圧  $V_B = V_G + V_L$  の差分  $V_B - V_A$  をとれば、非超伝導線 B の液体に浸漬した部分の電圧  $V_L$  のみが観測され、液位を決定できる。

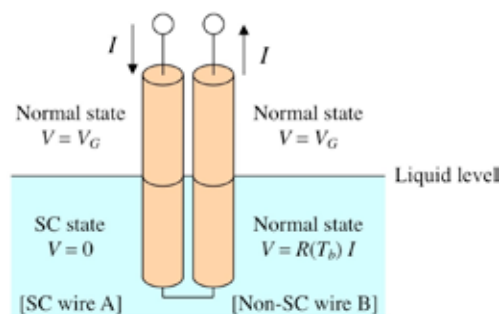


図 6 考案した新構造液位センサの基本構造

図7に、数値シミュレーションによる結果を示す。ただし、線材全長は300mmである。超伝導線Aの出力 $V_A$ （破線）は、従来の液位センサと同様にガス中の線材長と1対1に対応するが、常電導抵抗の温度変化に起因して線形性を示さない。一方、非超伝導線Bの出力 $V_B$ （点線）との差分である新しい液位センサの出力（実線）は液体中の線材長に比例し、液位センサとして非常に優れていることがわかる。

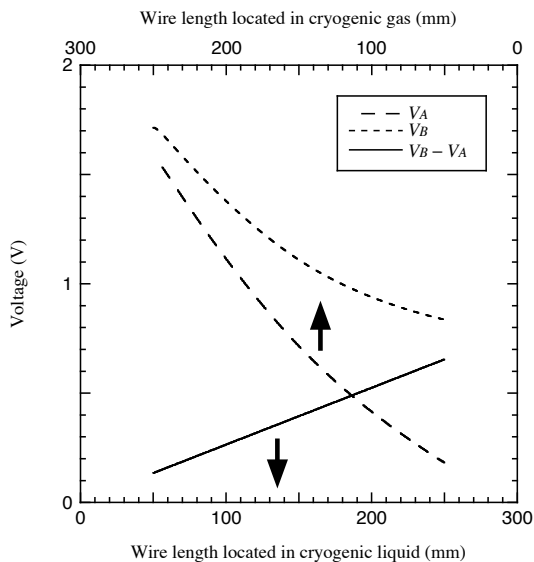


図7 数値シミュレーション結果

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計5件)

- 1) A. Jokinen, K. Kajikawa, M. Takahashi and M. Okada, Automatic development of normal zone in composite  $MgB_2/CuNi$  wires with different diameters, J. Phys. Conf. Ser., 査読有, Vol. 234, 2010, pp. 012021-1~7
- 2) 山田豊, 金澤昌哉, 根本豊, 太刀川恭治, 柁川一弘, 村瀬暁, 熊倉浩明, ステンレス鋼/純鉄シース  $MgB_2$  細径線材の加工性と超伝導特性, 日本金属学会誌, 査読有, Vol. 74, No. 7, 2010, pp. 434-438
- 3) 戸町恭平, 柁川一弘, 松尾政晃, 佐藤誠樹, 田中和英, 船木和夫, 熊倉浩明, 岡田道哉, 中道憲治, 木原勇一, 神谷卓伸, 青木五男, 液化水素液位センサ用  $MgB_2$  線材の最適化の指針, 低温工学, 査読有, Vol. 44, No. 8, 2009, pp. 366-372
- 4) K. Kajikawa, K. Tomachi, K. Tanaka, K. Funaki, T. Kamiya, M. Okada and

H. Kumakura, Numerical simulation of a superconducting level sensor for liquid hydrogen with  $MgB_2$  wire, Proc. of 22nd Int. Cryogenic Engineering Conf. / Int. Cryogenic Materials Conf. 2008 (ICEC22-ICMC2008), 査読有, 2009, pp. 425-430

- 5) 柁川一弘, 戸町恭平, 田中和英, 船木和夫, 液化水素液位センサに要求される二ホウ化マグネシウム超伝導線材の特性, 九州大学大学院システム情報科学紀要, 査読有, Vol. 14, No. 1, 2009, pp. 25-30

[学会発表] (計12件)

- 1) 井上拓郎, 渡辺和樹, 柁川一弘, 金澤昌哉, 山田豊, 青木五男, 非超伝導線を併設した新構造液位センサの特性評価, 平成23年電気学会全国大会, 2011/3/5, 大阪大学 (震災の影響により開催中止)
- 2) 井上拓郎, 柁川一弘, 山田豊, 小林弘明, 成尾芳博, 青木五男,  $MgB_2/Fe/SUS$  線材を用いた液化水素液位センサの実験的評価, 第83回2010年度秋季低温工学・超伝導学会, 2010/12/1, かごしま県民交流センター (鹿児島県)
- 3) 柁川一弘, 井上拓郎, 山田豊, 青木五男, 新しい動作原理に基づいた超伝導式液位センサの提案, 第83回2010年度秋季低温工学・超伝導学会, 2010/12/1, かごしま県民交流センター (鹿児島県)
- 4) 井上拓郎, 渡辺和樹, 柁川一弘, 金澤昌哉, 山田豊, SUSシース  $MgB_2$  線材における抵抗の温度依存性に与える曲げ歪みの影響, 2010年(平成22年度)応用物理学会九州支部学術講演会, 2010/11/27, 九州大学
- 5) 井上拓郎, 柁川一弘, 山田豊, 小林弘明, 成尾芳博, 青木五男,  $MgB_2/Fe/SUS$  線材を用いた液化水素液位センサの実験的評価, 平成22年度電気関係学会九州支部連合大会(第63回連合大会), 2010/9/25, 九州産業大学
- 6) K. Kajikawa, T. Inoue, Y. Yamada, H. Kobayashi, Y. Naruo and I. Aoki, Experimental Investigations of a Superconducting Level Sensor for Liquid Hydrogen with an  $MgB_2/Fe/SUS$  Wire, Int. Cryogenic Engineering Conf. 23 - Int. Cryogenic Materials Conf. 2010 (ICEC23-ICMC2010), 2010/7/22, Wroclaw University of Technology (Poland)
- 7) 金澤昌哉, 山田豊, 太刀川恭治, 井上拓郎, 柁川一弘, 熊倉浩明, ステンレス鋼シース  $MgB_2$  細径線材の加工性と超伝導特性, 第82回2010年度春季低温工学・

- 超伝導学会，2010/5/13，川崎市産業振興会館（神奈川県）
- 8) 柁川一弘，A. Jokinen，高橋雅也，和久田毅，CuNi シースをもつ MgB<sub>2</sub> 線材における常伝導部自動生成の測定，第81回2010年度秋季低温工学・超伝導学会，2009/11/20，岡山大学
  - 9) 柁川一弘，MgB<sub>2</sub> 線材の液化水素応用 (invited)，低温工学協会2009年度第2回 MgB<sub>2</sub> の材料特性向上に関する調査研究会，2009/11/20，岡山大学
  - 10) A. Jokinen，K. Kajikawa，M. Takahashi and M. Okada，Automatic development of normal zone in composite MgB<sub>2</sub>/CuNi wires with different diameters，9th European Conf. on Applied Superconductivity (EUCAS2009)，2009/9/15，Dresden University of Technology (Dresden, Germany)
  - 11) K. Kajikawa，T. Inoue，A. Jokinen，Y. Yamada and I. Aoki，Experimental Study on Superconducting Level Sensors for Cryogen Composed of MgB<sub>2</sub> Wires with Stainless Steel Sheath Material，12th Int. Superconductive Electronics Conf. (ISEC2009)，2009/6/18，九州大学
  - 12) 柁川一弘，戸町恭平，田中和英，船木和夫，MgB<sub>2</sub> 線材の仕様が液化水素用液位センサの正常動作に及ぼす影響，平成21年電気学会全国大会，2009/3/17，北海道大学

〔産業財産権〕

○出願状況（計2件）

名称：超伝導液位センサ  
発明者：柁川一弘，山田豊，青木五男  
権利者：国立大学法人九州大学，  
学校法人東海大学，  
株式会社ジェック東理社  
種類：特許  
番号：特願2010-082419  
出願年月日：平成22年3月31日  
国内外の別：国内

名称：超伝導液位センサ、及び超伝導液面測定方法  
発明者：柁川一弘，山田豊，青木五男  
権利者：国立大学法人九州大学，  
学校法人東海大学，  
株式会社ジェック東理社  
種類：特許  
番号：特願2010-129953  
出願年月日：平成22年6月7日  
国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.sc.kyushu-u.ac.jp/~kajikawa/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柁川 一弘 (KAJIKAWA KAZUHIRO)  
九州大学・超伝導システム科学研究  
センター・准教授  
研究者番号：10294894