新エネルギーシステム構築のための液体水素冷却 MgB₂ 超伝導線を用いた電力変換システムの研究開発

濱島 高太郎^{*1,†}, 白井 康之^{*2}, 熊倉 浩明^{*3}, 津田 理^{*4}, 新富 孝和^{*5}, 高尾 智明^{*6}, 槇田 康博^{*7}, 花田 一磨^{*8}, 岩城 勝也^{*9}, 稲谷 芳文^{*10}, 達本 衡輝^{*11}, 木須 隆暢^{*12}

Development of Advanced Superconducting Power Conditioning System Using Liquid Hydrogen-cooled MgB₂ Superconductor for New Energy System

Takataro HAMAJIMA^{*1,†}, Yasuyuki SHIRAI^{*2}, Hiroaki KUMAKURA^{*3}, Makoto TSUDA^{*4}, Takakazu SHINTOMI^{*5}, Tomoaki TAKAO^{*6}, Yasuhiro MAKIDA^{*7}, Kazuma HANADA^{*8}, Katsuya IWAKI^{*9}, Yoshifumi INATANI^{*10}, Hideki TATSUMOTO^{*11} and Takanobu KISS^{*12}

Synopsis: The construction of new energy infrastructures utilizing globally friendly hydrogen and power systems is attractive and important for sustainable development. An advanced superconducting power conditioning system composed of a hydrogen system and superconducting magnetic energy storage devices is proposed for effective use of renewable energy, and its verification test will be carried out. Superconducting coils of this system are wound with MgB₂ wire and cooled by liquid hydrogen. The basic technology for the liquid hydrogen cooling system was developed and established under a high magnetic field. The MgB₂ superconducting wire, which is economical and has high performance characteristics, has been intensively developed. This R&D should lead to a large reduction in the amount of carbon dioxide. In this paper, some important results obtained so far are described.

Keywords: MgB₂, liquid hydrogen, renewable energy, power conditioner, carbon dioxide
(Some figures in this article may appear in color only in electronic version)

1. はじめに

科学技術振興機構（JST）では、先進的低炭素化技術開

発事業（ALCA）が 2010（平成 22）年度から始まり、その一環として、(1)「未来の水素利用社会を支える低コスト高性能 MgB₂ 線材の開発」（代表者：熊倉浩明）、(2)「新

Received August 31, 2014

^{*1} (株)前川製作所 技術研究所

〒302-0118 茨城県守谷市立沢 2000

MAYEKAWA, 2000 Tatsuzawa, Moriya, Ibaraki 302-0118, Japan

^{*2} 京都大学 エネルギー科学研究科

〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町

Kyoto University, Yoshida-honmachi, Sakyo-ku, Kyoto 606-8501, Japan

^{*3} 物質・材料研究機構 超伝導線材ユニット

〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1

NIMS, 1-2-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-0047, Japan

^{*4} 東北大学 大学院工学研究科

〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻青葉 6-6-5

Tohoku University, 6-6-5 Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8579, Japan

^{*5} 日本大学 大学院総合科学研究科

〒102-8251 東京都千代田区五番町 12-5

Nihon University, 12-5 Goban-cho, Chiyoda-ku, Tokyo 102-8251, Japan

^{*6} 上智大学 理工学部

〒102-8554 東京都千代田区紀尾井町 7-1

Sophia University, 7-1 Kioi-cho, Chiyoda-ku, Tokyo 102-8554, Japan

^{*7} 高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

KEK, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

^{*8} 八戸工業大学 工学部

〒031-8501 青森県八戸市大字妙字大開 88-1

HIT, 88-1 Ohbiraki, Myo, Hachinohe, Aomori 031-8501, Japan

^{*9} 岩谷産業株式会社 水素エネルギー部

〒105-8458 東京都港区西新橋 3-21-8

IWATANI, 3-21-8 Nishi-shimbashi, Minato-ku, Tokyo 105-8458, Japan

^{*10} 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1

JAXA, 3-1-1 Yoshinodai, Chuoh-ku, Sagami-hara, Kanagawa 252-5210, Japan

^{*11} 日本原子力研究開発機構 中性子源セクション

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

JAERA, 2-4 Shirakatashirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1195, Japan

^{*12} 九州大学 大学院システム情報科学研究所

〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744

Kyushu University, 744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan

† E-mail: hamajima@ecei.tohoku.ac.jp

DOI: 10.2221/jcsj.49.566

しいエネルギーインフラのための液体水素冷却超伝導機器に関する研究」(代表者: 白井康之), (3)「自然エネルギー有効利用のための先進超伝導電力変換システム」(代表者: 濱島高太郎)の3課題は別々の開発目標に向けて研究開発を進め、重要な成果を出してきた。この3課題は基礎から応用に至るまでの範囲で水素や MgB_2 線材などをキーワードにしているため、毎年3課題合同で成果報告会を開催して相互に協調しながら進めてきた。昨年度末に、JST からの指示により、一緒に進めることのできるテーマに関して相乗効果を発揮しやすいように、3課題を一体化し、「新エネルギー構築のための液体水素冷却 MgB_2 超伝導線を用いた電力変換システム」の課題として取り組むことになった。

新課題では、次世代の持続可能な地球環境調和型ハイブリッドエネルギーインフラの基盤技術の創出を目指して、その基礎となる経済性のある高性能 MgB_2 超伝導線材の開発、液体水素冷却超伝導大容量電力機器の開発、およびそれらで構成する再生可能エネルギーを有効利用する先進電力変換システム技術を開発することとした。

具体的な目標として、高性能 MgB_2 超伝導線材の開発では、100 m級の長尺化と超伝導接続技術を開発する。液体水素冷却システム技術の開発では、液体水素の冷媒としての特性把握から液体水素冷却の高温超伝導線材特性や超伝導機器技術開発と、実用化に不可欠な安全性、関連法規の規制の課題も明らかにする。再生可能エネルギーへの有効利用では、再生可能エネルギーを対象として水素貯蔵と液体水素ステーションで冷却される超伝導電力貯蔵装置(SMES)で構成されるハイブリッド貯蔵システムを用いて制御された電気出力に変換するシステム技術を開発する。

本解説では、これまでの研究開発成果を中心に述べる。

2. MgB_2 超伝導線材開発

2.1 単芯線材の作製

単芯線材を内部 Mg 拡散法 (Internal Mg Diffusion (IMD) 法)¹⁾で作製した。Fig. 1 に IMD 法による MgB_2 線材作製法を示す。 MgB_2 線材においては、B サイトのカーボン置換が臨界電流密度 J_c の改善に有効であることが知られており、このために出発原料粉末に SiC ナノ粉末を添加することが広く行われている。このため、ここでも最初に SiC 添加した線材を作製した。しかしながら SiC 添加した線材では、強磁界側の J_c は向上するが、低磁界側の J_c はむしろ添加によって劣化することがわかった。そこで、この原因を探るべく走査型ホール素子顕微鏡 (SHPM) 観察ならびに走査電子顕微鏡 (SEM) 観察を行った。結果の一例を Fig. 2 に示す。同図(a)に示す残留磁界分布を見ると、点線で囲った領域において局所的に特性が低下していることがわかる。同じ部位に対して SEM 観察を行った結果を(b)に示してい

Fig. 1 Fabrication of MgB_2 wire by the internal Mg diffusion (IMD) method.

るが、丁度そこには白い析出物が存在していることがわかる。エネルギー分散型 X 線分析 (EDX) による元素分析の結果、その析出物からは(c) Mg と(d) Si の信号が検出されており、これは Mg_2Si と認められる。その他の J_c 特性が低下している部分においても同様に、 Mg_2Si と思われる析出物が検出されており、これが本線材における臨界電流の主な制限因子であることが明らかとなった。Si の由来は C の導入を狙って添加された SiC であり、カーボン添加形態の見直しが必要であることがわかった。

そこで次にカーボン添加法としてカーボンコート B 粉末を用いることとし、米国 SMI 社の 4 mol%カーボンコート B ナノ粉末を採用した。ただし、この SMI 社の B 粉末は BCl_3 を原料として作製されており、粉末中にかなりの BCl_3 が残留していることがわかった。そこで、使用前に

Fig. 2 Comparison between (a) remanent magnetic field distribution measured by SHPM and (b) SEM image. EDX mapping is also shown for (c) Mg and (d) Si.

この B 粉末にキシレン (C_8H_{10}) を混合して BCl_3 を C_8H_{10} に溶出させるという予備的な処理を行い、できるだけ Cl を取り除いた²⁾。外径 6 mm、内径 4 mm の鉄管の中心に径 2.0 mm または径 1.8 mm の Mg 棒を配置し、Mg 棒と鉄管との隙間に上述の予備処理をした B 粉末を充填した。この複合体を溝ロールならびにカセットローラーダイスを用いて径 0.6 mm のワイヤーに加工した。加工した線材を長さが 40 mm の短尺線材に切断し、ゴールドファーンズを用いて Ar 雰囲気中において 675°C で 8 時間の熱処理を行った。

線材の断面組織ならびに MgB_2 反応層の微細組織を光学顕微鏡で観察したところ、 MgB_2 層厚は 30~40 μm でほぼ均一であり、これまでの 1.0~1.3 mm 径の線材の場合³⁾よりも薄いために Mg が B 層に十分に供給され、これまで観察された未反応の B や B リッチな不純物相は見られなかった。しかしながら後述するように走査電子顕微鏡 (SEM) による高倍率の観察では微細な B リッチ不純物相が依然として認められる。2.0 mm 径の Mg 棒を使った場合、線材の横断面における MgB_2 の占積率は約 7% であり、鉄シースが 75% を占めている。一方、1.8 mm 径の Mg 棒を使った線材では、 MgB_2 の占積率は 11.8% と、2.0 mm 径の Mg の場合よりも高い値が得られた。X 線回折の (110) ピークから計算された a 軸長は 3.0738 Å であり、この値から Lee らによる MgB_2 の格子定数と B サイトの C 置換量との関係を用いて評価すると⁴⁾、カーボンコート B 粉末を用いて今回作製した MgB_2 の B サイトの C 置換量は 3% であった。この値はこれまでの IMD 法による 10 mol% SiC 添加した線材における C 置換量 ~10%⁵⁾ よりも少ない。

2.2 臨界電流特性

線材の臨界電流 I_c は通常の直流四端子法で測定した。温度は 4.2 K から 30 K の範囲で変化させた。 I_c は 1 $\mu V/cm$ の電界基準で定義し、臨界電流密度 J_c は I_c を未反

応 B や B リッチな領域も含めた MgB_2 層の断面積で除して求めた。また実用的にはより重要な線材全断面積あたりの J_c (Engineering critical current density J_{ce}) は、 I_c を線材全断面積で除すことによって求めた。

Fig. 3 に、2.0 mm 径ならびに 1.8 mm 径の Mg 棒を使って作製した MgB_2 線材の 4.2 K における J_c -B 特性を示す。ここで、SMI+D とあるのはキシレン前処理した B 粉末を使用した線材であり、SMI はキシレン前処理を行っていない購入 B 粉末をそのまま使用した線材である。また、SMI+D latest は 1.8 mm 径の Mg 棒を使用した線材であり、他は 2.0 mm 径の Mg 棒を使用した線材である。参考のために SMI 社の B 粉末を使用してオハイオ州立大のグループが作製した線材の特性も示した⁶⁾。購入 B 粉末をそのまま使用した線材では J_c 値は低いが、キシレン前処理によって J_c 特性はかなり上昇し、キシレン前処理 B 粉末を使用した線材では 4.2 K、10 T で最高 1.3×10^5 A/cm² の J_c を示す。これは MgB_2 線材の J_c としては現在のところ最高の値である。オハイオ州立大のグループもほぼ同様な J_c 特性を得ており、カーボンコート B 粉末が高 J_c を得るのに有効であることがわかる。

Fig. 4 には、 C_8H_{10} で処理した SMI 粉末を用いた MgB_2 線材の、種々の温度における J_c -B 特性を実線で示す²⁾。比較のために、以前に作製した 10 mol% SiC 添加した IMD 法による 7 芯 MgB_2 線材の 4.2 K ならびに 20 K におけるデータを点線で示す⁷⁾。ただし、この 7 芯線材は Sigma-Aldrich 社製の高品位 B 粉末を用いて作製したものである。本実験で作製した線材の J_c -B カーブの傾きは、SiC 添加 7 芯線材の値よりも大きい。これは SiC 添加線材の方が B サイトの C 置換量が多く、そのために B_{c2} がより高くなっているためである。4.2 K、10 T における J_c は 10^5 A/cm² を超えており、SiC 添加 7 芯線材よりもやや高い値が得られた。20 K においては、6 T 以下の磁界中では本実

Fig. 3 J_c -B curves at 4.2 K of MgB_2 wires fabricated with C-coated B powder.

Fig. 4 Temperature dependence of J_c -B curves on MgB_2 wires fabricated with C-coated B powder.

験の線材の方が SiC 添加線材よりも J_c が高くなっており 5 T の磁界では 7.6×10^4 A/cm², 4 T では 10^5 A/cm² を超す高い J_c が得られた。これらの J_c 値も MgB₂ 線材としてはこれまでで最も高い値である。このように、今回の MgB₂ 線材が SiC 添加線材よりも高い J_c を示す一つの理由は、SiC 添加した線材では MgB₂ 層の中に Mg₂Si 結晶が析出しており⁸⁾、これが超伝導電流の阻害因子になると考えられるのに対して、カーボンコート B 粉末を用いた線材ではこのような阻害因子が存在しないためと考えられる。このような観点から、B サイトの C 置換を導入する方法としては SiC 添加よりも B 粒子の C コートの方が有利であると考えられる。

Fig. 5 には、1.8 mm ならびに 2.0 mm 径の Mg 棒を用い、SMI 社の B 粉末を使って作製した線材の 4.2 K における J_c -B 曲線を示す。試料の表記の仕方は Fig. 3 と同じである。比較のために、オハイオ州立大学のグループが同じ SMI 社のカーボンコート B 粉末を使って得た IMD 法による線材の特性も示した⁶⁾。1.8 mm 径の Mg 棒を使った線材では、充填した B 粉末層の厚さを大きくすることができるために MgB₂ 超伝導層の線材に占める比率を上げることができ、 J_c は 4.2 K, 10 T で 1.13×10^4 A/cm² と、2.0 mm 径の Mg 棒を使った線材よりも高い値が得られた。しかしながらオハイオ州立大が得た J_c よりも低い値であり、これは我々の線材においては MgB₂ の占積率が 11.8% と、依然として十分高くはないためである。今後 J_c の更なる増大のためには更なる MgB₂ 充填率の増大が望まれる。

2.3 多芯線材の作製

Fig. 1 に示すように IMD 法による単芯線材を複数本 Cu-Ni 合金管に挿入して加工・熱処理をすることにより 7-37 芯の MgB₂ 多芯線材を作製した⁹⁾。ただし、ここでは純度が 99%、325mesh の B 粉末を用い、B 粉末に対して 10 at% の SiC 微細粉末を添加している。Fig. 6 にこれらの多芯線材の断面写真を示す。フィラメントが不規則な形状を

Fig. 5 J_c -B curves at 4.2 K of MgB₂ wires fabricated with C-coated B powder.

Fig. 6 Cross sections of IMD processed multi-filamentary MgB₂ wires.

Fig. 7 Cross sections of mono- and 37-filamentary MgB₂ wires.

しているが、これは溝ロール圧延を適用したことによると考えられる。

Fig. 7 には 37 芯線材と単芯線材におけるフィラメント断面の SEM 像を比較して示す。いずれも MgB₂ 層内には暗い粒子画像が認められるが、これらは EDX の結果、未反応の B や B リッチの化合物であることがわかった。単芯線材には大きな未反応 B や B リッチ化合物が数多く認められるが、37 芯線材では未反応 B や B リッチ化合物の大きさははるかに小さい。単芯線材においては MgB₂ 反応層の厚さは約 100 μm あり、これは Mg の拡散距離が長くなることを意味している。一方の 37 芯線材においては MgB₂ 層厚は 20 μm 程度とはるかに小さく、それだけ B 層には十分な Mg が供給されて未反応 B や B リッチ化合物の大きさが小さく、かつこれらの量も少なくなると考えられる。

Fig. 8 にはここで作製した多芯線材ならびに単芯線材の

Fig. 8 J_c -B curves at 4.2 K of IMD processed multi-filamentary MgB₂ wires.

4.2 K における J_c - B 特性を示す。 J_c は芯数が多くなるとともに、言い換えれば MgB_2 層厚が小さくなるとともに増大する傾向を示すが、これは芯数が増えるとともにフィラメントの大きさが減少し B 粉末層の厚さも減少するため、上述したように Mg コアから十分な Mg が B 層に供給されるようになり、これによって未反応の B や B リッチな化合物が減少するためと考えられる。このように、拡散法における Mg の短い拡散距離という問題点を解決する一つの方法として、フィラメント径を小さくして多芯化することが有効と考えられる。今回得られた 37 芯線材の J_c は 4.2 K, 10 T で 7.6×10^4 A/cm² であるが、この値は高純度 B ナノ粉末を使った Fig. 4 の単芯線材の J_c より低いものの、同じ B 粉末を使って作製した単芯線材の値と比べるとはかに高い値となっている。今後高純度 B 粉末の使用や線材加工法の工夫によるフィラメント形状の改善、等により更に高い J_c が得られるものと考えている。

2.4 今後の展望

MgB_2 線材の作製においては MgB_2 の充填率を上げることが重要であり、この観点から IMD 法が有望であることがわかった。これまで筆者らが行ってきた研究は全て短尺線材に関するものであったが、現在はこれまでの成果を基にして IMD 法により 100 m 級長尺線材の作製に取り組んでおり、線材加工はほぼ終了している。今後は、この 100 m 級線材を用いた小型コイルの試作と励磁試験を行う予定である。また、IMD 法で J_c , J_e ともに PIT 法を大きく上まわる値が得られているが、実用の観点からはまだ十分なレベルには達していない。今後は特に実用上重要な J_e について、IMD 法や PIT 法の更なる改良により更なる特性の向上を図ることとしたい。

3. 液体水素冷却超伝導線材の通電特性

3.1 目的

電力・水素協調エネルギーインフラをめざした液体水素冷却超伝導機器に視点を置いた実験研究を、京大、JAEA、

JAXA のグループで進めている。このプロジェクトでは、液体水素の冷媒としての特性把握から、高温超伝導機器冷却形態の検討とその冷却システムの設計、および、冷却システム要素技術開発、さらに、液体水素中での高温超伝導線材特性、導体設計までを視野に入れている。また、液体水素を民生応用のステージに持ってくる上での安全性、関連法規による規制などの課題・問題点を、超伝導電力機器冷媒の観点から明らかにしたいと考えている。

3.2 実験装置の概要

熱流動試験を主に実施する「液体水素熱伝達試験装置」と磁界下の液体水素冷却超伝導材料の特性測定試験を目的とした「液体水素冷却超伝導材料特性試験装置」を製作し、JAXA 能代ロケット実験場の防爆実験室に設置している。Fig. 9 にその概要を示す。全部で 3 台の液体水素槽を持ち、液体水素供給系、水素ガス加圧系、ベントラインなどを共通としている。防爆実験室の隣室に、試験用の電源、この制御や各種制御バルブの制御などを行う制御装置およびデータ監視計測装置を設け、これらを 100 m 程度離れたコントロールルームで光 LAN による遠隔で運用する。磁界印加用マグネットの漏洩磁界によるバルブや計測・制御系への影響を検討し、適宜シールドなどを設置した。圧力異常および漏洩等の異常時には、(1) 供給電源遮断、(2) 系内水素の放出、(3) 液体水素の移送を中断するインターロックを構築した。超伝導マグネットの励磁系電源の異常時操作、クエンチ時の対応は、これとは別に設定している。

3.3 液体水素熱伝達試験

Fig. 10 に「液体水素熱伝達試験装置」を示す。実験槽（設計圧力 2.0 MPaG、直径 406 mm、高さ 1495 mm、貯液容量 50 L）とサブタンク（同 2.0 MPaG、60 L）を、流調弁付断熱液体水素輸送配管により連結し、2 つのタンクの差圧と流調弁開度によって、流量制御した強制対流を一定時間流すことができる。その流路の一端の実験槽内には、種々の試験発熱体流路を直列設置して、液体水素・超臨界水素の熱流動特性試験が実施できる。流動実験中、実験槽の圧

Fig. 9 Overview of experimental setup for thermal-hydraulics properties of LH₂ for HTC superconductor cooling and electro-magnetic characteristics of LH₂ cooled superconductors.

Fig. 10 LH₂ thermal-hydraulics test set-up.

力はドーム型減圧弁で一定に保ち、質量流量は、実験槽を載せた重量計 (Mettler Toledo WMHC 300s ; 精度 2 g) の重量変化で求め、圧力維持のための供給ガス流量を補正して求める。液体水素温度は、実験槽下部に設けたシースヒータにより調整でき、サブクール度を設定できる。

試験発熱体には、管径や長さの影響を系統的に調べるため、内径 3~8 mm、長さ 50~250 mm、厚さ 0.2 mm の SUS316 製薄肉パイプを用い、その外側を FRP ブロックで断熱し、トランスファーチューブの一端に接続し、垂直または水平に支持した。トップフランジに 500 A の電流導入端子を 4 本設け、一度に 3 体の試験体を設置できる。電流導入端子は、電源ケーブルとともにブランケットで覆い、内部を窒素ガスで微陽圧に保持、パージした。この円管発熱体を直流電流加熱し、予め測定した電気抵抗の温度依存性からその電気抵抗変化を測定し発熱体平均温度、表面温度を求める。Fig. 11 に強制対流水素の熱伝達特性実験例 (圧力 0.7 MPa, サブクール度 5 K) を示す。圧力とサブクール度をパラメータとして、強制対流熱伝達を測定し、流速に対する DNB 熱流束の評価などを実施してきている¹⁰⁻¹⁴⁾。

3.4 液体水素冷却 MgB₂ 線の通電特性

MgB₂ 線の通電特性実験で用いる「液体水素冷却超伝導材料特性試験装置」を Fig. 12 に示す。液体水素実験槽 (内径約 310 mm, 61 L), 500 A の電流導入端子を 3 端子

Fig. 11 Forced flow heat transfer test of LH₂.

Fig. 12 Test set-up for electro-magnetic properties of LH₂ cooled superconductors.

設け、電源ケーブルとともにブランケットでカバーして内部を窒素ガスで若干陽圧保持しパージを行う。実験槽の設計圧力は 2 MPa で、内部にシースヒータ (500 W) と LHe サブクール冷却ループによって 14 K から 31 K の温度範囲を設定でき、均温化のためのバブリングポートを設けている。この実験槽内のテストセクションに外部磁界を発生させるため、外側に設けた液体ヘリウム槽に超伝導マグネット (112.4 H, 175 A : 7 T) を設置した。最大内径、高さとも 400 mm である¹⁵⁾。

このテストセクションに、PIT 法で作られた 0.83 mm 径の Cu シース、Nb バリアの単芯 MgB₂ 短尺試料を水平に設置し、液体水素で浸漬冷却した状態で *I*-*I* 特性を測定した実験例を紹介する。Fig. 13 は外部磁界が 0.41 T (線材に垂直方向) の時の実験結果である。実験条件は圧力 1.1 MPa

Fig. 13 *V*-*I* characteristics of MgB₂ short wire under a magnetic field (0.41 T) cooled by LH₂ with temperatures of 21, 24, 27 and 29 K.

Fig. 14 Critical current of LH₂-cooled MgB₂ short wire under magnetic field.

とし、液温は 21, 24, 27, 29 K とした^{16,17)}。外部磁界を変更して、臨界電流を求めた結果が **Fig. 14** である。このように、液体水素冷却の超伝導材料の磁界下（～7 T）での通電特性試験が行える実験環境が整った。

3.5 まとめ

高温超伝導材料の液体水素冷却に関して、液体水素の熱流動特性、液体水素冷却超伝導材料の特性などの測定実験ができる実験設備と実験例を紹介した。これから基礎データを積み上げ、液体水素冷却超伝導大容量機器の開発、実用化へつなげたいと考えている。

4. 再生可能エネルギーの有効利用

4.1 先進超伝導電力変換装置の概要

地球規模での CO₂ 削減は持続可能性社会を構築する上で重要な喫緊の課題であり、そのために、地球に優しい再生可能エネルギーの導入が望まれるが、再生可能エネルギーは確率論的にランダムに激しく変化するので、商用電力システムへ直に連系する量が多くなると周波数変動の発生が懸念され、連系できる量に制約が発生する。この制約をなくすには、電力貯蔵装置を有効に活用して一定に制御した電力に変換する必要がある。**Fig. 15** に示すように、大電力の入出力応答性と繰り返し耐久性に優れた超伝導電力貯蔵装置（SMES）と、大容量貯蔵に優れた水素貯蔵システム（電気分解装置、水素貯蔵タンク、燃料電池）とで構成するハイブリッド貯蔵システムは激しく変動する再生可能エネルギーを一定の制御された電力へ変換するのに適している¹⁸⁻²³⁾。さらに、SMES の線材に経済性の高い MgB₂ を用いると、液体水素で冷却できることになり、近い将来の燃料電池車のガスステーションとして経済性と環境性が期待できる液体水素ステーションの冷媒を利用できる。これらの装置を構成要素とした先進超伝導電力変換装置（ASPCS：Advanced Superconducting Power Conditioning system）を提案した²⁴⁻²⁹⁾。

4.2 ASPCS の効率と規模

SMES と水素貯蔵システムの機能を発揮するには、再生

Fig. 15 Concept of ASPCS.

可能エネルギーをそれぞれに適した成分に分解する必要がある。ランダムに変動する風力波形はその変化する電力の平均のトレンド成分と変動成分に分解し、トレンド成分は比較的ゆっくりとした変動であるが、大きな貯蔵容量を必要とするので水素貯蔵システムに適しており、変動成分は頻繁な入出力となるので SMES に適する。平均トレンド波形は比較的滑らかであるから、カルマンフィルタを用いて信頼性高くトレンドの予測が小型コンピュータで可能となる^{24,25)}。**Fig. 16** に、20,000～22,000 秒の間の時間における、風力波形 P_{wind} と一定の出力波形 P_{out} 、風力の変動の平均トレンド予測電力波形 P_{pred} を上部に示し、燃料電池（FC）からの出力 $P_{FC} = P_{out} - P_{pred}$ 、電気分解装置（EL）への入力 $P_{EL} = P_{pred} - P_{out}$ 、SMES への入出力波形 $P_{SM} = P_{wind} - P_{pred}$ に分解したときの各成分波形を下部に示す。図から、トレンド波形は風力波形の変動の平均値に少し遅れるが、良く変化に対応しながら予測していることがわかり、また、SMES への入出力は頻繁であり、水素貯蔵システムは大容量でゆっくりとした入出力であることがわかる。

Fig. 16 Waveforms of wind power, predicted trend power, output power and I/Os of SMES, FC and Electrolyzer.

Fig. 17 Efficiency of ASPCS as a function of output power to utility.

Fig. 18 Layout of a 5 MW class ASPCS.

ASPCS の電気効率は再生可能エネルギーと実効的な貯蔵エネルギーの比として求め、出力 P_{out} を変化させたときの結果を **Fig. 17** に示す。ただし SMES, EL, FC の効率はそれぞれ 95, 80, 40% とした。この図の条件では、風力を直接に電力系統へ供給できるので、最大 82% に達する²³⁾。

風力定格出力を 5 MW に設定した場合の SMES の入出力波形から、SMES 容量を算出し、 MgB_2 線の目標値 ($I_c = 100 \text{ A @ } 5 \text{ T}$) を用いてコイル設計を行った²⁵⁻²⁹⁾。SMES の冷却には液体水素ステーションからの冷媒を用いたサーモサイフォン間接冷却方式を用いた³⁰⁾。全体の ASPCS の概略規模を **Fig. 18** に液体水素ステーションと一緒に示す。図から、ステーションとはほぼ同程度の規模で実現可能であることがわかった。

4.4 実証小型 ASPCS 装置

本提案の ASPCS の機能を実証するために、実際の液体水素ステーションに隣接した岩谷産業中央研究所の実験室で小型 ASPCS 装置を組み立てて試験する。**Fig. 19** に実証小型 ASPCS の概念図を示す。本装置では、再生可能エネルギー源として 1 kW 級の太陽光発電を用い、SMES には、 MgB_2 線材の性能がまだ高くないので、Bi-2223 線材で巻線し、液体水素温度 (20 K) で運転できる 10 kJ の容量のパンケーキ巻線で製作した。窒素温度での試験では、定格を出力できることを確認した。SMES コイルの冷却には、高純度 Al 熱伝導板に冷却パイプを接触させた液体水

Fig. 19 Concept of a small ASPCS for verification test.

Fig. 20 Preliminary test results of controlled output power using a capacitor instead of SMES.

素の循環型サーモサイフォン間接冷却方式を液体水素に対して初めて採用した。コイルの熱負荷の代わりにヒータで加熱する予備実験を実施した結果、約 200 W 程度の入熱まで液体水素は循環することが確かめられた。また、ASPCS の制御には、太陽光発電波形のトレンド予測にカルマンフィルタを用い、SMES の運転を不能としないために、貯蔵容量の限界を考慮した SOC (State of Current) - Feedback 方式を採用してハイブリッド貯蔵装置の機能を十分に生かす運転をできるようにしている。この制御方式の妥当性を検証するために、製作中の SMES の代替装置として電気二重層キャパシタを用いて SOC-Feedback を適用した予備制御実験を実施した。定格 300 W の再生可能エネルギー源を 1 時間運転した時に、出力 100 W を目標に設定して制御運転した結果を **Fig. 20** に示す³¹⁾。図から、実際の出力は目標値に近く制御でき、キャパシタの容量をオーバーして運転不能になることなく、目標出力の数%程度の誤差であることがわかる。

実証小型 ASPCS 装置の単体での性能評価を実施して確認が取れたので、今後は、岩谷産業中央研究所 (尼崎) にて組合せの実証試験を実施する予定である。

5. まとめ

昨年度までは、3 課題が相互に成果を報告しながら、それぞれ独自の目標に向かって推進してきたので、本解説ではその主要な成果を述べた。特に、MgB₂ 線材の高性能化はほぼ達成し、長尺化の課題が明確になってきた。また、液体水素の基礎特性の把握では、熱伝達特性等貴重なデータを取得してきた。さらに、世界に先駆けて磁界下での MgB₂ 線の詳細な臨界電流－温度－磁界特性も取得できるなど液体水素に関する基礎技術を確立した。また、再生可能エネルギーを有効利用するために、液体水素冷却 SMES を用いた小型 ASPCS 装置を実証する段階になった。

今後は、3 課題が一緒になった相乗効果として将来の大電流化に対応できる MgB₂ 撚り線や小型コイルなどの特性試験を磁界下において実施するとともに、これまでに進めてきた目標の達成に向かって推進する予定である。

本研究は科学技術振興機構の先進的低炭素化技術開発事業（ALCA）の支援を受けて行われた研究開発の主要な成果をまとめたものである。なお、本研究プロジェクトは下記の研究分担者の協力の下で遂行されている。（前川製作所）山本恵一、駒込敏弘；（上智大学）谷貝剛；（岩谷産業）宮崎淳、繁森敦、谷義勝、梶原昌高、廣瀬順之、藤川静一、辻上博司、仙波利晃、牧平尚久；（中部電力）平野直樹；（京都大学）畑幸一、塩津正博；（JAXA）成尾芳博、小林弘明、野中聡、丸祐介、八木下剛；（JAEA）大都起一、櫻山久志、川上善彦；（NIMS）松本明善、瀧川博幸、戸叶一正、新田隆二、葉術軍、張雲超；（九州大学）井上昌睦、東川甲平、Shyam Mohan、今村和孝。

参 考 文 献

- 1) H. Kumakura, J.M. Hur, K. Togano, A. Matsumoto, H. Wada and K. Kumura: "Superconducting properties of diffusion-processed multifilamentary MgB₂ wires", IEEE Trans. Appl. Supercond. **21** (2011) 2643–2648
- 2) S.J. Ye, M. Song, A. Matsumoto, K. Togano, M. Takeguchi, T. Ohmura and H. Kumakura: "High-performance MgB₂ superconducting wires for use under liquid-helium-free conditions fabricated using an internal Mg diffusion process", Supercond. Sci. Technol. **26** (2013) 125003(1-10)
- 3) K. Togano, J. Hur, A. Matsumoto and H. Kumakura: "Microstructure and critical currents of single- and multifilamentary MgB₂ superconducting wires fabricated by an internal Mg diffusion process", Supercond. Sci. Technol. **23** (2010) 085002 (7pp)
- 4) S. Lee, T. Masui, A. Yamamoto, H. Uchiyama and S. Tajima: "Carbon-substituted MgB₂ single crystals", Physica C **397** (2003) 7-13
- 5) K. Togano, J.M. Hur, A. Matsumoto and H. Kumakura: "Fabrication of seven-core multi-filamentary MgB₂ wires with high critical current density by an internal Mg diffusion process", Supercond. Sci. Technol. **22** (2009) 015003(1-5)
- 6) G.Z. Li, M.D. Sumption, M.A. Susner, Y. Yang, K.M. Reddy, M.A. Rindfleisch, M.J. Tomsic, C.J. Thong and E.W. Collings: "The critical current density of advanced internal-Mg-diffusion-processed MgB₂ wires", Supercond. Sci. Technol. **25** (2012) 115023(1-8)
- 7) H. Kumakura, J.M. Hur, K. Togano, A. Matsumoto, H. Wada and K. Kimura: "Fabrication and superconducting properties of diffusion processed 7-core MgB₂ wires", J. Japan Inst. Metals **74** (2010) 439–443
- 8) Y. Shimada, Y. Kubota, S. Hata, K. Ikeda, H. Nakashima, A. Matsumoto, K. Togano and H. Kumakura: "Electron microscopy observations of MgB₂ wire prepared by an internal Mg diffusion method", Physica C **471** (2011) 1137–1141
- 9) S.J. Ye, A. Matsumoto, K. Togano, T. Ohmura and H. Kumakura: "The critical current properties of 37-filament internal Mg diffusion-processed MgB₂ wires", Supercond. Sci. Technol. **26** (2013) 105027(1-6)
- 10) H. Tatsumoto, et al.: "Forced convection heat transfer of subcooled liquid nitrogen in a vertical tube," J. Phys. Conf. Ser. **234** (2010) 032057
- 11) Y. Shirai, et al.: "Forced flow boiling heat transfer of liquid hydrogen for superconductor cooling," Cryogenics **51** (2011) 295–299
- 12) Y. Shirai, et al.: "Boiling heat transfer from a horizontal flat plate in a pool of liquid hydrogen", Cryogenics **50** (2010) 410–416
- 13) M. Shiotsu, et al.: "Equation of DNB heat flux for upward forced flow of cryogenic liquids," Physics Procedia **36** (2012) 1390–1395
- 14) Y. Shirai, et al.: "DNB heat flux in forced flow of subcooled liquid hydrogen under pressures," Adv. Cryo. Eng., AIP Conf. Proc. **1434** (2012) 1067–1074
- 15) H. Tatsumoto, et al.: "Development of an experimental system for characterization of high-temperature superconductors cooled by liquid hydrogen under the external magnetic field", J. Phys.: Conf. Ser. **507** (2014) 022042
- 16) Y. Shirai, et al.: "Over current properties of HTC superconducting wire cooled by liquid hydrogen," Physics Procedia **36** (2012) 1384–1389
- 17) Y. Shirai, et al.: "Cooling stability test of MgB₂ wire immersed in liquid hydrogen under external magnetic field", J. Phys.: Conf. Ser. **507** (2014) 022031
- 18) K. Strunz and E.K. Brock: "Stochastic energy source access management: infrastructure-integrative modular plant for sustainable hydrogen-electric co-generation", Int. J. Hydrogen Energy **31** (2006) 1129–1141
- 19) Y. Makida, et al.: "Design of SMES system with liquid hydrogen for emergency purpose", IEEE Trans. Appl. Supercond. **17** (2007) 2006–2009
- 20) H. Hirabayashi, et al.: "Liquid hydrogen cooled superconducting magnet and energy storage system", IEEE Trans. Appl. Supercond. **18** (2008) 766-769
- 21) T. Nakayama, et al.: "Micro power grid system with SMES and superconducting cable modules cooled by liquid hydrogen", IEEE Trans. Appl. Supercond. **19** (2009) 2062–2065
- 22) M. Sander and R. Gehring: "LIQHYSMES-A novel energy storage concept for variable renewable energy sources using hydrogen and SMES", IEEE Trans. Appl. Supercond. **21** (2011) 1362–1366
- 23) T. Nakayama, et al.: "Optimization of SMES compensation capacity for stochastic power using a Kalman filter", TEION KOGAKU **45** (2010) 99–106 (in Japanese)
中山知紀ら：「カルマンフィルタ予測による変動電力補償用

SMESの容量最適化の検討」, 低温工学 **45** (2010) 99–106

- 24) T. Hamajima, et al.: “Application of SMES and fuel cell system combined with liquid hydrogen vehicle station to renewable energy control”, IEEE Trans. Appl. Supercond. **22** (2012) 5701704(1-4)
- 25) T. Shintomi, et al.: “Design study of SMES system cooled by thermo-siphon with liquid hydrogen for effective use of renewable energy”, IEEE Trans. Appl. Supercond. **22** (2012) 5701604(1-4)
- 26) T. Hamajima, et al.: “Advanced superconducting power conditioning system with SMES for effective use of renewable energy”, Physics Procedia **27** (2012) 396–399
- 27) T. Iwasaki, et al.: “Operation methodology of advanced superconducting power conditioning system to compensate fluctuating renewable energy”, ICEC 24 – ICMC2012 (2012) 759–762, Fukuoka, Japan
- 28) T. Shintomi, et al.: “Design study of MgB₂ SMES coil for effective use of renewable energy”, IEEE Trans. Appl. Supercond. **23** (2013) 5700304(1-4)
- 29) K. Hanada, et al.: “Wind power forecasting using an artificial neural network for ASPCS”, Asia Pacific Power Electrical Engineering Conference 2013 (APPEEC2013) (2013) 90851, Beijing
- 30) Y. Makida, et al.: “Design study of the cooling scheme for SMES system in ASPCS by using liquid hydrogen”, Physica C **494** (2013) 208–212
- 31) 岩崎辰哉ら: 「ハイブリッド電力貯蔵システムを用いた自然エネルギー出力変動補償の検証」, 平成25年度電気学会電力・エネルギー部門大会 (2013) 132

濱 島 高太郎 1948 年 2 月 7 日生。1977 年東京工業大学大学院理工学研究科博士課程修了。同年 4 月 (株) 東芝に入社。1999 年 4 月山口大学工学部電気電子工学科教授。2003 年 10 月東北大学大学院工学研究科教授。2012 年 3 月東北大学定年退職, 東北大学名誉教授。2012 年 4 月八戸工業大学教授, 2014 年 4 月前川製作所技術顧問。現在に至る。主として核融合装置, 超電導応用機器の技術開発, 超電導応用の研究に従事。電気学会, IEEE, 低温工学・超電導学会, プラズマ・核融合学会会員。工学博士。

白 井 康 之 1957 年 6 月 20 日生。1985 年京都大学大学院工学研究科博士課程単位修得退学。同年 4 月京都大学工学部助手。1996 年 5 月京都大学大学院エネルギー科学研究科助教授, 2008 年 6 月同教授, 現在に至る。主として超電導応用機器, 極低温冷媒熱流動, 電力エネルギーシステムの研究に従事。電気学会, IEEE, 低温工学・超電導学会, 日本エネルギー学会会員。工学博士。

熊 倉 浩 明 1952 年 5 月 27 日生。1976 年東京大学工学部金属材料学科卒業。1978 年同大学院工学系研究科修士課程 (金属材料科学専攻) 修了。同年科学技術庁金属材料技術研究所 (現物質・材料研究機構) 入所。超伝導材料の研究開発に従事。2005 年超伝導材料センター長。2013 年より特命研究員。低温工学・超電導学会, 応用物理学会, 日本金属学会, 電気学会会員。工学博士。

津 田 理 1967 年 1 月 15 日生。1995 年早稲田大学大学院理工学研究科同博士後期課程修了。1994 年早稲田大学助手, 1996 年 MIT 客員研究員 (日本学術振興会海外 COE 派遣研究者, 日本学術振興会海外特別研究員), 1999 年早稲田大学理工学総合研究センター客員講師, 2000 年山口大学工学部助手, 2004 年山

口大学工学部助教授, 2005 年東北大学大学院工学研究科助教授を経て, 2012 年東北大学大学院工学研究科教授, 現在に至る。主として超電導応用に関する研究に従事。低温工学・超電導学会, 電気学会会員。工学博士。

新 富 孝 和 1939 年 8 月 5 日生。1965 年東京工業大学理工学研究科修士課程修了。同大学理学部助手。1972 年高エネルギー物理学研究所 (現高エネルギー加速器研究機構) 勤務。2003 年同機構定年退官。2005 年日本大学総合科学研究科教授。2014 年 8 月同大学定年退職。KEK, 総合研究大学院大学名誉教授。主として超伝導磁石の開発研究に従事。低温工学・超電導学会, 日本物理学会, 電気学会, 加速器学会会員。理学博士。

高 尾 智 明 1964 年生まれ。1987 年横浜国立大学工学部電気工学科卒業, 1992 年横浜国立大学大学院工学研究科博士後期課程修了, 同年上智大学理工学部専任講師, 2003 年教授, 現在に至る。超伝導コイルの研究, 超伝導応用機器開発に従事。低温工学・超電導学会, 電気学会, IEEE 会員。工学博士。

植 田 康 博 1962 年 8 月 2 日生。1987 年大阪大学工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年より高エネルギー物理学研究所 (現高エネルギー加速器研究機構) 勤務。主に粒子検出器用超伝導磁石の開発, 超伝導磁石冷却用大型冷凍システムの開発に従事。低温工学・超電導学会。工学博士。

花 田 一 磨 1978 年 12 月 15 日生。2005 年東京農工大学大学院工学教育部博士後期課程修了。2006 年八戸工業大学工学部助手, 2009 年同講師。現在に至る。電力系統工学, 再生可能エネルギーに関する研究に従事。電気学会, 電気設備学会, エネルギー・資源学会会員。博士 (工学)。

稲 谷 芳 文 1953 年 6 月生。1983 年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。同年 4 月宇宙科学研究所衛星応用工学研究系助手。2001 年システム研究系教授。高速飛行体の空気力学および宇宙輸送システムの研究に従事。M-V ロケットやはやぶさ帰還カプセルの開発研究に従事。2003 年 10 月改組により宇宙航空研究開発機構, 宇宙科学研究所, 宇宙航行システム研究系教授。大量高頻度宇宙輸送と水素エネルギー社会インフラ構築を目指す研究に従事。日本航空宇宙学会, 日本ロケット協会, AIAA 各会員。工学博士。

達 本 衡 輝 1973 年 9 月 29 日生。2002 年京都大学大学院エネルギー科学研究科博士課程修了。同年 4 月高エネルギー加速器研究機構博士研究員。2003 年日本原子力研究所 (現 日本原子力研究開発機構) 入所。J-PARC センター, 中性子源セクションに所属。主に, 核破砕中性子源用水素システムの研究開発及び液体水素冷却の研究に従事。低温工学・超電導学会, 日本伝熱学会会員。エネルギー科学博士。

木 須 隆 暢 1991 年九州大学院博士課程了。1990 年日本学術振興会特別研究員, 1991 年九州大学助手, 1996 年同助教授, 2007 年同教授, 現在に至る。超伝導システム科学研究センター, 低温センター併任。iSTERA 主管研究員。1999 年 Wisconsin 大学訪問研究員, 2000 年 Twente 大学訪問研究員。この間, 超電導薄膜, SQUID, 臨界電流特性に関する研究などに従事。2006 年超伝導科学技術賞授賞。低温工学・超電導学会国際交流委員会委員長, ICEC Board Member, ASC Board Member。低温工学・超電導学会, 応用物理学会, 電気学会, MRS, IEEE, ACerS 各会員。工学博士。