解 説

MgB₂ 線材の超伝導接合松本 明善^{*1,†}, Dipak Patel^{*2}Superconducting Joint Technologies of MgB₂ WiresAkiyoshi MATSUMOTO^{*1,†} and Dipakummar J. PATEL

Synopsis: Magnesium diboride (MgB₂) has a high critical temperature ($T_c = 39$ K) as a metal-based superconductor and is expected to be used as a superconducting material for liquid helium-free applied equipment. The superconducting joint between MgB₂ wires is an important technology when considering applications of superconducting magnets. In this commentary, we will review the joint techniques that have been applied to MgB₂ wires, and show the results. There are several methods for producing MgB₂ wires, and various methods using wires produced by the in-situ method, ex-situ method, and IMD method were obtained from information from patents and treatises. Some typical methods and problems of some typical ones will be explained. The superconducting joint of MgB₂ wire is relatively easy to accomplish compared to that of other high-temperature superconducting wires, but I_c has not been obtained easily. This is due to the microstructure of the joint interface, and the improvement of those microstructures is considered to be important for the creation of a reliable superconducting joint for MgB₂ in the future.

Keywords: superconducting joint, MgB₂, joint resistance, critical current

(Some figures in this article may appear in colour only in the electronic version)

1. はじめに

二ホウ化マグネシウム (MgB₂) は、金属系超伝導体としては高い臨界温度 ($T_c = 39$ K) を有し、液体ヘリウムフリーで運転する応用機器の超伝導材料として期待されている¹⁻⁷⁾。応用のための材料としての超伝導線材も数社から販売がされてきた中⁸⁻¹²⁾で、超伝導マグネット等の応用を考える上で、MgB₂ 線材同士の超伝導接合は最も重要な技術の一つである¹³⁻²⁴⁾。金属系の超伝導線材の代表である Nb-Ti や Nb₃Sn 超伝導線材については、超伝導接合技術はほぼ確立している。一方で、高温超伝導体における超伝導接合の研究も近年盛んに行われており、RE 線材同士の接合や Bi 系線材同士の接合も報告されている^{25, 26)}。金属系の超伝導接合では大きく分けて直接接合法および間接接合法がある。直接法はシース材を剥がした後に直接フィラメント同士をスポット溶接等によって接合させる方法である。

Nb-Ti や Nb₃Sn が金属であることを利用した手法である。一方で、間接接合法はむき出しになったフィラメントについて超伝導半田等を介して接合する方法がある。このような間接接合法においては T_c や H_c の高い超伝導半田を探索する研究が行われてきた²⁷⁾。一方で、MgB₂ の超伝導接合は期待される温度域が 10 K 以上を期待されることが多く、また、多くの線材において MgB₂ フィラメント内部では粉末が凝集したような形状になっているため Nb-Ti や Nb₃Sn のような接合手法を用いることは困難である。また、RE 同士の接合のようにテープ状の線材同士とも異なり、MgB₂ 超伝導線材の接合はこの材料に合わせた接合方法が研究されている。本解説では現時点での MgB₂ 線材の超伝導接合の研究について解説を試みる。

2. 超伝導接合法および評価方法

MgB₂ の製造方法には粉末を金属管に詰め込んで作製するパウダー・イン・チューブ (Powder In Tube : PIT) 法と原料粉末の 1 つである Mg を金属棒に入れ替えた内部 Mg 拡散 (Internal Mg Diffusion : IMD) 法が現在の主な方法である。PIT 法の中にはさらに初期粉末に反応済みの MgB₂ を利用する ex-situ 法および未反応の混合粉末を入れて熱処理後に MgB₂ を生成させる in-situ 法がある。これらの手法によって作製された 2 本の超伝導線を接合することが必要であるが、接合部分における基本的な構造自体は単純であ

Received June 30, 2021

^{*1} 国立研究開発法人 物質・材料研究機構
〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1
National Institute for Materials Science, 1-2-1 Sengen, Tsukuba,
Ibaraki 305-0047, Japan

^{*2} The University of Queensland
School of Mechanical and Mining Engineering, St Lucia QLD
4072, Australia

[†] E-mail: matsumoto.akiyoshi@nims.go.jp
DOI: 10.2221/jcsj.57.9

Fig. 1 Schematic illustration of typical joint technique for MgB₂ superconducting wires and/or tapes. (a) lap joint (b) indirect joint, and (c) termination joint.

る。接合方法においては Brittle 等²⁸⁾がまとめたように大きく分けて 3 つの方法がある。その中でさらに MgB₂ で報告されている主要な 3 つの方法について Fig.1 にまとめた。Brittle によると 1 つは付き合わせて直接接合する方法、2 つめは重ねて接合するいわゆるラップジョイント法であり、3 つめが中間層を介して接合をする間接法に大別できる。付き合わせる方法が可能な場合は最もロスが少なく理想的ではあるが、実際には非常に困難である。一方、重ね合わせて接合するラップジョイント方法は後ほど記述するが、未熱処理線材の単芯線や ex-situ 法の多芯線材接合において報告がされている。最も研究が多いのは 3 つめの中間層を介して接合する手法である。MgB₂ 超伝導線材の接合に関しては Fig.1 に示すように大きく分けて 3 つの報告がなされている。(a)のラップジョイントは ex-situ 線材や IMD 線材で報告がある。(b)の中間層を用いる間接接合の多くは未反応の線材同士の接合に用いられることが多い。最も報告が多いのが、(c)の接合部にコンテナ等を用いて、その中に種々の粉末を線材と一緒に入れるタイプである。それぞれ代表的な初期の接合について以下に述べる。

MgB₂ 超伝導線材において超伝導接合に関する報告を行ったのは日立製作所である^{29, 30)}。このときは MgB₂ と Nb-Ti との接合であった。詳細は特許等で報告されているため論文には記載されていないが、接合部治具の中に MgB₂ の元となる粉末を詰め込み、圧力をかけてキャップをする方法がとられていると考えられる²⁹⁾。その後接合部治具を含め、全てに対して熱処理を加えて MgB₂ を生成させる方法である。

一方で、最初の MgB₂-MgB₂ の接合は Braccini らによって報告がされている³¹⁾。これも詳細な手法は特許情報から取得可能である^{32, 33)}。これらの特許は ASG

Fig. 2 Joint configuration and fabrication steps for unreacted monofilament MgB₂ wires¹⁹⁾.

Superconductor が取得しており、同社の多芯 ex-situ 法のために開発された手法である。それによると多芯線を研磨等により剥き出しにし、その上に MgB₂+X (Xについては報告がない) の粉末を中間層として、2 つの線材を貼り合わせ、熱処理を加える方法である。似た方法は中国科学院の Li によって詳細な図も含めて報告がされている³⁴⁾。一方で、MIT、Bruker、Hypertech Research Inc.では Fig. 1(c)のような接合部治具を用いる手法においてそれぞれの工夫をしながら作製を行っている^{21-23, 35-37)}。基本的には治具の中に線材を 2 本詰め込み、そこに MgB₂ 粉末あるいは Mg+B の粉末を入れて、圧力をかけた後に熱処理を行う手法である。粉末を詰め込むため、ある程度の圧力をかける機構を有した治具を用いており、それぞれに工夫が見られる。

評価方法としては現在のところ、四端子法による I_c 測定および磁場減衰法による測定が行われている。四端子法では接合部を介して線材部分に電圧端子をつけて電流電圧測定を行う。一方で、抵抗測定については上述したような四端子法などによる抵抗測定では $10^{-12} \Omega$ 以下を必要とする抵抗値の評価は困難である。このため、MIT 等で発表されている磁場減衰法による測定が必須である^{38, 39)}。その評価方法および装置図は文献を参照されたい。一般的には接続部を含むコイル形状の試料を用いて、コイル部分に外部磁場からの誘導起電力により電流を試料に印可する。その電流によって作られた磁場の時間変化を計測する。その後、得られた磁場の時間変化から $B = B_0 e^{-(R/L)t}$ (B は磁場、 B_0 は t_0 における磁場、 L はコイル試料のインダクタンスで、 R が接続部の抵抗である) の式から抵抗値の算出を行う。MgB₂ においては測定温度も重要な因子となる。このため、装置自体もガスフローによる温度制御あるいは冷凍機を使った伝導冷却による測定がそれぞれ行われている。詳細については結果とともに記載する。

Fig. 3 Current and voltage characteristics of the jointed (inset figure) and unjoined wires at (a) 20 K, 2 T, and (b) 25 K, 2 T¹⁹⁾. The distance between the voltage taps was 4 cm.

Fig. 4 (a) Schematic illustration of the operating procedure of the field decay measurement method. (b) Time decay curve of the captured magnetic field (y-axis field is the induced field in the closed-loop coil)¹⁹⁾.

3. 超伝導接合結果

代表的な例についてその結果について報告を行う。

3.1 in-situ 未反応線材同士の接合

未反応線材の接合であるから比較的容易であり、いくつか報告もなされている。ここでは D. Patel らの結果を示す¹⁹⁾。彼らは **Fig. 2** に示すように金属製の治具の中に単芯の線材を挿入して、その上から Mg+B の粉末を詰め込みキャップする手法である。その後、熱処理を行って接合部を含んだ MgB₂ を生成させる。接合部も線材の中身においてはそれぞれ充填密度が異なるものの未反応同士からの MgB₂ 生成であるため、十分な接合領域が形成される。実際に SEM による断面観察では明確な界面が形成されているが、ワイヤ部分も治具部内に詰め込んだ粉末も MgB₂ であることが確認されていた。超伝導接合の評価においては接合部に流せる I_c と抵抗測定が重要である。まずは I_c の結果を **Fig. 3** に示す。接合部の I_c は点線で示しているが、いずれも線材 I_c と比較すると 60 %程度しか達成していないことがわかるが、初期の接合部評価としては比較的高い方であ

った。Patel らは接合部を含むクローズループのコイルを作製し、超伝導マグネット内に設置を行っている。その後、**Fig. 4** のように超伝導マグネットにより 1.42 T まで磁場を上げた後保持し、その後減磁することによってクローズループのコイルに誘導磁場が発生する。その後、コイルに配置させたホール素子によって磁場の時間変化を測定した結果を(b)に示す。なお、装置の関係上、4.2 K での評価を行っている。磁場の時間変化の結果および上述した式から得られた接合部の抵抗値は $1.4 \times 10^{-12} \Omega$ (at 4.2 K)であったと報告されている。

3.2 ex-situ 線材の超伝導接合

ex-situ 法であるから元から MgB₂ が形成されており、難易度は高い。ここでは ASG の結果を示す。接合方法については US 特許に記載されており³¹⁾、基本的なアイデアは Fig. 1(b)のラップジョイント型であり、熱処理済みの ex-situ 線材のシース部分を研磨し、フィラメント部分を露出してから混合粉と呼ばれる粉末を間に挟み込んで熱処理を行う手法を用いている。得られた接合部の I_c の温度依存性が得られていることを報告した。これによると 26 K 程度で 300 A

Fig. 5 Joint configuration and fabrication steps for unreacted monofilament IMD MgB₂ wires.

の接合 I_c が得られることを示している。それ以上は電源容量の関係でさらに低温においても同じ値が得られることを示した。磁場減衰法等による抵抗率測定の結果はない。

3.3 in-situ 反応済み線材の接合

in-situ 法で作製されている線材は現在数社の会社から販売され、主流となっているので、この線材の超伝導接合が出来れば大変有意義である。ここでは日立製作所の事例を示す。国際会議等⁴⁰⁾で発表されたものは単芯線材における超伝導接合の結果である。それによると日立製作所は自社製線材を用いて、一度熱処理を行った線材に対して、接合部を作製し、再度熱処理を行った接続部を作製している。接合部における詳細については出ていないが、Fig. 1(c)のような接合方法が US 特許で公開されている。同接合部を含め 1 ターンのコイルを作製し、伝導冷却を行ったクライオスタット中で磁場減衰法による測定を行った。その結果、捕捉電流 185 A 程度で $10^{-13} \Omega$ 以下 (at 22.5 K) の抵抗値が得られていたと報告があった。

3.4 IMD 法による超伝導接合

ここでは 2 つの結果について示す。1 つは IMD 法を発展させてきた物質・材料研究機構によるものであり^{5,41)}、100 m 級の長尺化も達成できるようになって来ており、応用を目指す上で超伝導接合は必要不可欠である。Fig. 5 に示すように未反応の IMD 法線材はホウ素とマグネシウム部分が分離している。このため突き合わせ法によるラップジョイントが可能であり、図の手順に示すような簡単な手法で接合部を作製できていることが特徴である。IMD 法で作製される線材は基本的には丸線材であるため、ラップジョイントをしやすくするために端部をプレス等によって潰す。その後、金属シース部分を剥がし、2 本の線材を合わせた後、キャップ金属内に詰め込んで両サイドからさらに押しつぶせば基本的には完成である。Fig. 6 に得られたジョイント部を含む I_c 測定の結果を示す。20 K で $I-V$ カーブが取れ、超伝導遷移していることがわかる。一方で、通常の IMD 線材の特性と比べると 12 % 程度と極端に低いこともわかった。また、これらの接合部の特性を測定するために接合部を含

Fig. 6 $I-V$ curve of one of the joints at 20 K.

む 1 ターンのコイルを作製し、線材に行うものと同じ熱処理条件を用いて作製を行った。このコイルを伝導冷却が可能なクライオスタット内に配置し、その上に誘導起電コイルを配置し、各温度における磁場減衰をワンターンコイル中央部においたホール素子において検出を行った。測定結果の一例を Fig. 7 に示す。左軸はホール素子の電圧から換算したコイルに流れる捕捉電流である。また、右の軸は接合部の温度変化を示す。なお、測定においては誘導コイルに電流を流した後、誘導コイルの電源を切って 1 ターンコイルに電流を誘起させ、長時間温度を保持しながらホール素子によって測定を行った。このときの測定温度は 15 K で行った。磁場減衰が落ち着いた後に Patel 等と同様の式から接合部の抵抗を算出したところ、 $10^{-13} \Omega$ であることがわかった。このことから、電流はそれほど大きくないものの非常に簡便な手法によっても超伝導接合が可能であることを示している。

上記の方法は非常に簡便であるが、接合 I_c が低く、線材の特性を活かし切れてない。Patel 等⁴²⁾は IMD 線材に対して接合治具を使った超伝導接合を行い、接合部 I_c が線材 I_c

Fig. 7 Time decay curve of the captured current at 15 K⁴¹⁾.

Fig. 8 Schematic illustration of the joint fabrication concept for unreacted monofilament IMD processed MgB_2 wires ⁴²⁾. (a) Joint fabrication process involves wire cutting at an angle and placing it in the SS enclosure face down, filling the enclosure with the B and Mg powders, placing an SS plug on top of the enclosure, and sealing all the open sides of the enclosure using the high-temperature sealing material, followed by heat treatment (HT) at 670 °C for 12 h. (b) Schematic illustration of the Mg diffusion/infiltration into the B layer and the formation of highly dense MgB_2 bulk. (c) SEM crosssectional image of the joint cross-section.

の 100 %まで到達したことを示した。その治具の模式図は Fig. 2 と類似している。Fig. 8(a)に示すように基本的にはコンテナと呼ばれる接合部に粉末と断面を出した粉末とを詰め込んで製作を行う。ただし、本論文で行った手法はマグネシウム粉末とホウ素粉末を分離し、線材断面を露出した領域は全てホウ素粉末になるように配置させたことである。その後熱処理によって MgB_2 を作製させるが、その過程においてマグネシウムはホウ素側に拡散し、マグネシウムがあった部分は空隙となり、ホウ素側で高密度な MgB_2 が形成する。このようにして得られた接合部の臨界電流を見ると Fig. 9 に示すようにほぼ線材 I_c と同程度の 100 %を達成していることがわかる。臨界電流は磁場に対しては線材と同程度の特性を示している。また、このような接合部を持つ 1 ターンコイルと作製し、接合抵抗を評価した結果、20 K

Fig. 9 Critical current comparison of the joint and bare wire in different magnetic fields at 20 K (Inset: cross-sectional SEM image of the IMD processed MgB_2 wire (diameter: 0.85 mm) ⁴²⁾).

で $2.01 \times 10^{-13} \Omega$ であることがわかった。Fig. 7 の結果と比べて多少高いように思えるが、20 K での結果であり、MRI マグネット等も十分な値 ¹⁵⁾であることを示した。

4. 接合部界面近傍の組織

これまで接合方法といくつかの事例についてまとめてみた。基本的には未反応線材同士の超伝導接合はそれほど困難ではないことがわかってきている。しかしながら、いくつかの事例にもあるように $I_c / I_{c \text{ wire}}$ の値が低い場合が多い。特徴的な組織を Fig. 10 に示す ⁴³⁾。これによると線材と接合治具内の混合粉末によって生成した MgB_2 バルク界面が明確に認識できる。これは線材内部とバルク体の充填率の違いが大きいと考えられる。線材は伸線縮径過程において充填率が上昇するが、接合部における充填率の向上は限界がある。また、一方で、Fig. 11 に示すように突き合わせ法で作製した場合においては界面近傍においても不純物相やクラックの発生も多数観察される ⁴¹⁾。このように充填率を上げるために圧力をかけ過ぎるとクラック等が発生し、電流経路が形成されない場合もあり、トレードオフの関係にあると考えられる。 $I_c / I_{c \text{ wire}}$ の値が 100 %近くに達した IMD 線材の接合部界面の Fig. 12 を示した ⁴³⁾。(a)の白い部分は鉄シースで、熱処理後、線材は中央部分にあったマグネシウムがホウ素側に拡散してホールが出来ている典型的な IMD 線材の特徴を示している。この中央部付近においては組織が乱れているが、コンテナ部分と接している界面をさらに詳細にピックアップし、その部分を FIB-SEM ⁴⁴⁾によって深さ方向に削り出しながら、見た図が (b)、(c) の SEM 像である。白い矢印部分が、界面近傍と思われるがもはやこの図ではほとんど界面を認識することは困難であることがわかる。

Fig. 10 (a) The cutting location of the joint. (b) SEM cross-sectional image of the joint. (c) Magnified SEM cross-sectional image of the selected location in figure (b). The interface between one of the filaments of the MgB_2 filament core and the MgB_2 bulk is shown by the elongated circle. Cracks in the MgB_2 bulk are shown by yellow arrows and descriptions⁴³⁾.

超伝導接合においてキーとなるのは超伝導コア同士が接する界面の制御であることはこれらの組織観察からも明らかである。 MgB_2 は他の高温超伝導体と比べても比較的容易に超伝導接合が達成することが出来ているが、より効率の高い手法のためにはやはり界面の組織制御が重要である。特に今後反応済みの多芯線材の超伝導接合確立のためには界面近傍に形成される酸化物等をどのように除去して、清浄な界面同士で接合させることが出来るかが重要になると考えられる。また、現時点では接合治具の大きさ等については議論されていないが、将来的にはよりコンパクトなマグネット製作のために接合治具自体のサイズも含めた形状については今後も検討が必要であると考えられる。このためにも接合界面部分の有効な超伝導電流経路の確保が課題

Fig. 11 Longitudinal cross-sectional SEM images of the superconducting joint for IMD-processed MgB_2 wires⁴¹⁾.

Fig. 12 SEM image of the cross-section of the joint (inset: magnified SEM image of the interface). (b, c) SEM image of the specimen prepared using the hybrid FIB-SEM.

となってくると考える。

5. まとめ

MgB_2 線材の超伝導接合にはそれぞれの線材に合わせた接合部の開発が行われてきた。本解説ではまず、接合方法についてまとめて、代表的な事例を用いて説明を行った。接合結果についても磁場減衰法によって評価した結果、多くの事例で $10^{-12} \Omega$ 以下の接合抵抗を達成していることを示した。最後にそれぞれの事例における接合界面組織について説明を行い、課題を抽出した。以上のことから、PIT 法の in-situ 線材や IMD 法線材の未反応線材同士の超伝導接合はほぼ確立してきたと考えられる。一方で、ex-situ 線材や反応済み in-situ 線材については接合治具等も含めて残された課題が有り、今後の研究の進展を望む。

参考文献

- 1) J. Nagamatsu, N. Nakagawa, T. Muranaka, Y. Zenitani and J. Akimitsu: "Superconductivity at 39 K in magnesium diboride," *Nature* **410**(2001) 63–64
- 2) J. H. Kim, S. Oh, Y. U. Heo, S. Hata, H. Kumakura, A. Matsumoto, M. Mitsuhashi, S. Choi, Y. Shimada, M. Maeda, J. L. MacManus-Driscoll and S. X. Dou: "Microscopic role of carbon on MgB_2 wire for critical current density comparable to NbTi," *NPG Asia Mater.* **4** (2012) e3

- 3) E. W. Collings, M. D. Sumption, M. Bhatia, M. A. Susner and S. D. Bohnenstiehl: "Prospects for improving the intrinsic and extrinsic properties of magnesium diboride superconducting strands," *Supercond. Sci. Technol.* **21** (2008) 103001
- 4) S. X. Dou, W. K. Yeoh, O. Shcherbakova, D. Wexler, Y. Li, Z. M. Ren, P. Munroe, S. K. Chen, K. S. Tan, B. A. Glowacki and J. L. MacManus-Driscoll: "Alignment of carbon nanotube additives for improved performance of magnesium diboride superconductors," *Adv. Mater.* **18** (2006)785–788
- 5) S. Ye, H. Kumakura: "The development of MgB₂ superconducting wires fabricated with an internal Mg diffusion (IMD) process," *Supercond. Sci. Technol.* **29** (2016) 113004
- 6) P. Kováč, I. Hušek, A. Rosová, M. Kulich, J. Kováč, T. Melišek, L. Kopera, M. Balog and P. Krížik: "Ultra-lightweight superconducting wire based on Mg, B, Ti and Al," *Sci. Rep.* **8** (2018) 11229
- 7) A. Matsumoto, H. Kumakura, H. Kitaguchi, B. J. Senkowitz, M. C. Jewell, E. E. Hellstrom, Y. Zhu, P. M. Voyles and D. C. Larbalestier: "Evaluation of connectivity, flux pinning, and upper critical field contributions to the critical current density of bulk pure and SiC-alloyed MgB₂," *Appl. Phys. Lett.* **89** (2006) 132508
- 8) Hyper Tech Research, Inc.
<http://www.hypertechresearch.com/index.htm> (参照 2021-06-29)
- 9) ASG SUPERCONDUCTORS
<https://www.asgsuperconductors.com/> (参照 2021-06-29)
- 10) Sam Dong <https://samdongamerica.com/> (参照 2021-06-29)
- 11) Western Superconducting Technologies Co., Ltd.
<https://www.wstitanium.com/> (参照 2021-06-29)
- 12) Hitachi ニュース&イベント
<https://www.hitachi.co.jp/rd/news/topics/2019/1008.html> (参照 2021-06-29)
- 13) M. Parizh, Y. Lvovsky and M. Sumption: "Conductors for commercial MRI magnets beyond NbTi: requirements and challenges," *Supercond. Sci. Technol.* **30** (2017) 014007
- 14) T. C. Cosmus and M. Parizh: "Advances in whole-body MRI magnets," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **21**(2011) 2104
- 15) Y. Lvovsky, E. W. Stautner and T. Zhang: "Novel technologies and configurations of superconducting magnets for MRI," *Supercond. Sci. Technol.* **26**(2013) 093001
- 16) M. Modica, S. Angius, L. Bertora, D. Damiani, M. Marabotto, D. Nardelli, M. Perrella, M. Razeti and M. Tassisto: "Design, construction and tests of MgB₂ coils for the development of a cryogen free magnet," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **17**(2007) 2196
- 17) S. Mine, H. Song, M. Xu, J. Marte, S. Buresh, W. Stautner, C. Immer, E. T. Taskaris and K. Amm: "Test coil for the development of a compact 3 T MgB₂ magnet," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **22**(2012) 4
- 18) J. Bascuñán, H. Lee, E. S. Bobrov, S. Hahn, Y. Iwasa, M. Tomsic and M. Rindfleisch: "A 0.6 T/650 mm RT bore solid nitrogen cooled MgB₂ demonstration coil for MRI –a status report," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **16**(2006) 1427–30
- 19) D. Patel, M. S. Al Hossain, K. W. See, X. Xu, S. Barua, Z. Ma, S. Choi, M. Tomsic and J. H. Kim: "MgB₂ superconducting joints for persistent current operation," *Supercond. Sci. Technol.* **28** (2015) 065017
- 20) D. Patel, M. S. Al Hossain, M. Maeda, M. Shahabuddin, E. Yanmaz, S. Pradhan, M. Tomsic, S. Choi and J. H. Kim: "A new approach to a superconducting joining process for carbon-doped MgB₂ conductor," *Supercond. Sci. Technol.* **29** (2016) 095001
- 21) W. Yao, J. Bascunan, S. Hahn and Y. Iwasa: "A superconducting joint technique for MgB₂ round wires," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **19** (2009)2261–2264
- 22) D. K. Park, J. Ling, M. Rindfleisch, J. Voccio, S. Hahn, J. Bascunan, M. Tomsic and Y. Iwasa: "MgB₂ for MRI Magnets: Test Coils and Superconducting Joints Results," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **22** (2012) 4400305
- 23) J. Ling, J. Voccio, Y. Kim, S. Hahn, J. Bascuñán, D. K. Park and Y. Iwasa: "Monofilament MgB₂ wire for a whole-body MRI magnet: Superconducting joints and test coils," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **23**(2013) 6200304
- 24) X. H. Li, L. Y. Ye, M. J. Jin, X. J. Du, Z. S. Gao, Z. C. Zhang, L. Q. Kong, X. L. Yang, L. Y. Xiao and Y. W. Ma: "High critical current joint of MgB₂ tapes using Mg and B powder mixture as flux," *Supercond. Sci. Technol.* **21** (2008) 02501
- 25) K. Ohki, T. Nagaishi, T. Kato, D. Yokoe, T. Hirayama, Y. Ikuhara, T. Ueno, K. Yamagishi, T. Takao, R. Piao, H. Maeda and Y. Yanagisawa: "Fabrication, microstructure and persistent current measurement of an intermediate grown superconducting (iGS) joint between REBCO-coated conductors," *Supercond. Sci. Technol.* **30** (2017) 115017
- 26) Y. Takeda, T. Motoki, H. Kitaguchi, T. Nakashima, S. Kobayashi, T. Kato and J. Shimoyama: "High I_c superconducting joint between Bi2223 tapes," *Appl. Phys. Express* **12**(2019) 023003
- 27) Y. Tsui, E. Surrey and D. Hampshire: "Soldered joints—an essential component of demountable high temperature superconducting fusion magnets," *Supercond. Sci. Technol.* **29**(2016) 075005
- 28) G. D. Brittles, T. Mousavi, C. R. M. Grovenor, C. Aksoy and S. C. Speller: "Persistent current joints between technological superconductors," *Supercond. Sci. Technol.* **28** (2015) 093001
- 29) Y. Ichiki, T. Wakuda and K. Tanaka: "Joint of superconducting wires and method for joining superconducting wires," U. S. Patent 0090264295 A1(2012)
- 30) M. Takahashi, K. Tanaka, M. Okada, H. Kitaguchi, and H. Kumakura: "Relaxation of trapped high magnetic field in 100 m-long class MgB₂ solenoid coil in persistent current mode operation," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **16** (2006) 1431
- 31) D. Nardelli, R. Marabotto and A. Laurenti: "Superconducting coil having a granular superconducting junction." U. S. Patent 20090264295 A1(2009) 209–217
- 32) V. Braccini, D. Nardelli, R. Penco and G. Rasso: "Development of ex situ processed MgB₂ wires and their applications to magnets," *Physica C* **456**(2007) 209
- 33) D. Nardelli, S. Angius, A. Capelluto, D. Damiani, R. Marabotto, M. Modica, M. Perrella, M. Tassisto and A. Cables: "Persistent mode MgB₂ short windings," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **20** (2010)1998–2001
- 34) X. H. Li, L. Y. Ye, M. J. Jin, X. J. Du, Z. S. Gao, Z. C. Zhang, L. Q. Kong, X. L. Yang, L. Y. Xiao and Y. W. Ma: "High critical current joint of MgB₂ tapes using Mg and B powder mixture as flux," *Supercond. Sci. Technol.* **21**(2008) 025017
- 35) S. Hahn, Y. Iwasa, J. Bascuñán, J. P. Voccio, J. Ling, J. Song and Y. Kim: "Persistent-mode MRI magnet fabricated from reacted, monofilamentary MgB₂ wires and joints," (PCT/US2014/046526) Chapter 2: Literature Review **94**(2015)

- 36) F. Tenbrink, A. Aubele, V. Gluecklich, B. Sailer and K. Schlenga: "Superconducting connection between MgB_2 superconducting wires via a compressed element made from HTS powder," (US: Google Patents 2010) US8709961 B2 (2014)
- 37) D. W. Doll and M. Tomsic: "Low loss joint for superconducting wire," US8812069 B2 (2014)
- 38) Y. Iwasa: "Superconducting joint between multifilamentary wires 2. Joint evaluation technique," *Cryogenics* **16**(1976) 217
- 39) T. Tominaka, S. Kakugawa, N. Hara and N. Maki: "Electrical properties of superconducting joint between composite conductors," *IEEE Trans. Magnet.* **27**(1991) 1846
- 40) K. Tanaka, et al.: "Workability and transport properties of Cu-coated Fe-sheathed MgB_2 wires", *Proceedings of the ICEC24-ICMC2012* (2012) 865-869
- 41) A. Matsumoto and H. Kumakura: "Superconducting joints made with internal-magnesium-diffusion-processed MgB_2 wires," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **28** (2018) 6200104
- 42) D. Patel, A. Matsumoto, H. Kumakura, T. Moronaga, Y. Hara, T. Hara, M. Maeda, Md. S. A. Hossain, Y. Yamauchi, S. Choi and J. H. Kim,: "Superconducting Joining Concept for Internal Magnesium Diffusion-Processed Magnesium Diboride Wires," *ACS Appl. Mater. Interfaces* **13** (2021) 3349
- 43) D. Patel, A. Matsumoto, H. Kumakura, G. Nishijima, M. Maeda, S.-H. Kim, S. Choi and J. H. Kim,: "Tailored joint fabrication process derived ultra-low resistance MgB_2 superconducting joint," *Scripta Materialia* **178** (2020) 198
- 44) T. Hara, K. Tsuchiya, K. Tsuzaki, X. Manc, T. Asahatac and A. Uemoto: "Application of orthogonally arranged FIB-SEM for precise microstructure analysis of materials," *J. Alloys and Comp.* **577S** (2013) S717-S721

松 本 明 善 1992 年九州大学工学部冶金学科卒業。1997 年同大学院総合理工学研究科博士後期課程修了。1997 年科学技術庁金属材料技術研究所入庁。2001 年物質・材料研究機構。主に超伝導線材開発に従事。低温工学・超伝導学会，日本応用物理学会会員。工学博士。

PATEL Dipakkumar Jayantibhai 2005 年 Hemchandracharya North Gujarat University, India 卒業。2010 年 Annamalai University, India 修士課程修了。2016 年 University of Wollongong, Australia で PhD 取得。2017 年助手 School of Physics, University of New South Wales。2018 年 JSPS 外国人特別研究員，物質・材料研究機構で MgB_2 超伝導接合の研究。2020 年より Postdoctoral Research Fellow, The University of Queensland, Australia, PhD。