

粒子加速器に於ける MgB₂ 応用の進展山本 明^{*1}Advances in MgB₂ Applications for Particle AcceleratorsAkira YAMAMOTO^{*1}

Synopsis: Advances in applications of MgB₂ superconductor for particle accelerators are reviewed. The MgB₂ superconductor provides its unique features of much higher critical temperature and critical field than that of NbTi with a potential for the competitive cost for the production. It may contribute to expand superconducting technology applications with improved energy balance with hither temperature operation combined with conduction cooling technology. The recent advances in MgB₂ applications for particle accelerators and associated devices are overviewed in this paper.

Keywords: MgB₂ superconductor, superconducting magnets, superconducting link/Power-transmission, particle accelerators.

1. はじめに

2001年 MgB₂ 超電導体が発見されて以来、その超伝導特性を生かした技術開発が進展している¹⁻⁵⁾。「臨界温度 39 K」の特色と「伝導冷却技術」との組み合わせによって、冷却効率、エネルギーバランスに優れた超伝導磁石、大電流送電への開発が試みられている。MgB₂ (T_c=39 K, B_{c2} = 28 T) 超伝導体に焦点を当て、NbTi(T_c = 9.3K, B_{c2} ≈ 13T), Nb₃Sn (T_c=18.3K, B_{c2}=29T) と比較しつつ、本解説では、粒子加速器及びその周辺技術への応用展開に焦点を絞り、その進展を紹介する。また、将来期待される応用展開の広がりをも簡潔に述べる。

2. MgB₂ 超電導体・超伝導線開発の進展

MgB₂ 超伝導線開発は、大学・研究機関での取り組みと共に、欧州に於ける Columbus 社（現在、ASG）、米国に於ける Hyper Tech 社、そして日本における日立製作所などで企業における開発が進められている⁵⁻¹²⁾。ASG 社は、所謂 Exsitu 法を採用し、大電流導体の開発で先行する。HyperTec は Insitue 法を採用し、フィラメントの細線化、交流応用に特色を持つ。日立では、改良型 Insitue 法を用

い、高電流密度、高磁場応用に力を注いでいる。これまでに開発されている MgB₂ 線特性比較例を Fig. 1 に示す。

3. MgB₂ 応用の進展

3.1 CERN HL-LHC 加速器磁石への超伝導リンク

欧州原子核研究機構・ラージハドロンコライダー・ビーム輝度向上計画 (CERN-HL-LHC) では、ビーム強度・輝度向上計画を進めている¹³⁾。この結果、加速器トンネル内での放射線レベル上昇（特に中性子線上昇）に伴う電子機器の誤作動 (Single shot event) 増加を回避するため、Fig. 2 に示すように電磁石電源（制御システムを含む）の設置場所を、高さも変えて 100m 以上遠方に引き離し放射線遮蔽が十分な中間トンネルに移設する計画が進行している¹⁴⁾。このため、総計 100 kA を超える電流の送電に MgB₂ 超伝導線が採用されている。LHC ビーム衝突点に向けビームを最終収束する超伝導四極磁石 (Q1-Q3)、二つの陽子ビーム軌道を衝突に向けて一軌道（同一磁石口径内）にまとめるための二極磁石 (D1)、更にビーム軌道、磁場精度調整のための補正磁石など、合計 21 回路の電流を、Table 1 に示すパラメータの MgB₂ 線を基本ベースとしつつ、Fig. 3 に示すように一つのケーブルとしてまとめる。これをフレキシブルな蛇腹状のクライオスタット（フレキシブルトランスファーチューブ）内に収め、100 m に亘り蛇行させつつ、電線敷設の要領で敷設する。基礎技術開発から約 10 年を経て、地上試験施設に於けるプロトタイプ通電実証に成功している (Fig. 4)¹⁵⁾。

Received June 28, 2021

^{*1} 高エネルギー加速器研究機構 (KEK)
〒305-1810 茨城県つくば市大穂 1-1
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
1-1 Oho, Tsukuba, 305-0801, Japan

† E-mail: akira.yamamoto@kek.jp
DOI: 10.2221/jcsj.57.17

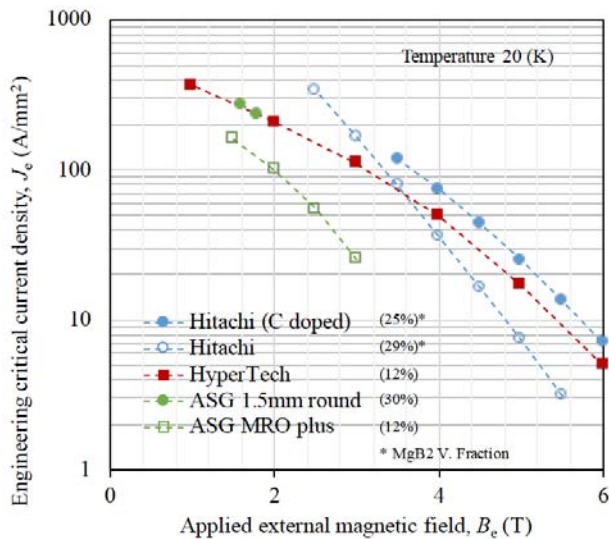


Fig. 1 Typical Engineering current densities (J_e) as a function of magnetic field (B_e), for MgB_2 wires/strands commercially available from ASG, HyperTech and Hitachi³⁻⁵⁾.

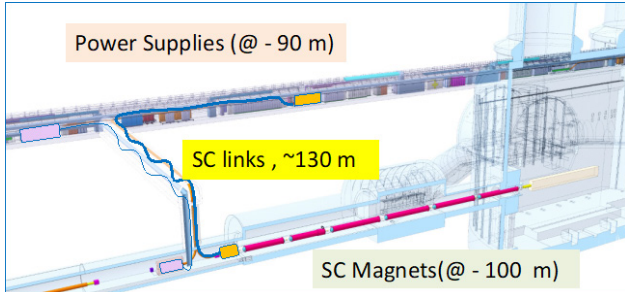


Fig. 2 Superconducting power transmission (SC links) with a current capacity of 150 kA and with a length of 100 m for the CERN HL-LHC IR superconducting magnet beam line.

実績として、約 90 mm の可撓管内に、150 kA の電流をケーブルとして束ね、可撓性のある LHe トランスファーライン内に収め、外径 300 mm の可撓性のある断熱真空配管としてまとめている。また電源側端部には、高温超伝導体を用いたトランジション、そして室温への取り出し部にガス冷却電流リードを配置し、室温での接続を実現している。

この超伝導送電技術は、 MgB_2 の持つ高い臨界温度特性に、余裕を持った 25 ~ 30 K での比熱特性を活かし、極めて安定な超伝導送電を実現している。また様々な安全対策を施した上で、液体水素との組み合わせによって、よりエネルギー効率の良い、広い応用が期待される¹⁶⁾。

Table 1 MgB_2 CERN wire specification for the HL-LHC superconducting link, manufactured by ASG.

Wire diameter	1 mm
Cu fraction	$\geq 12\%$
Filament eq. diameter	$\leq 60\ \mu\text{m}$
Filament twist pitch	100 mm
Tensile strain at RT (with no I_c degradation)	$\geq 0.26\%$
Bending radius after heat treatment	$\leq 100\ \text{mm}$
RRR (Cu)	≥ 100
I_c (@ 25 K, 0.5 Tesla)	$\geq 320\ \text{A}$
(@ 20 K, 0.5 Tesla)	$\geq 480\ \text{A}$

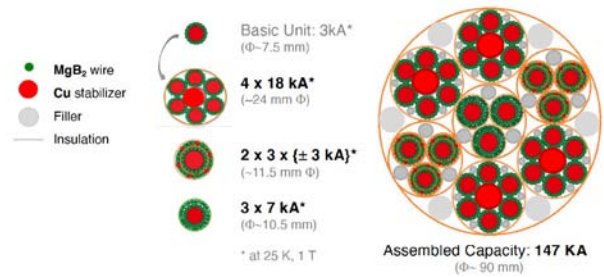


Fig. 3 Superconducting cable assembly¹⁴⁾.

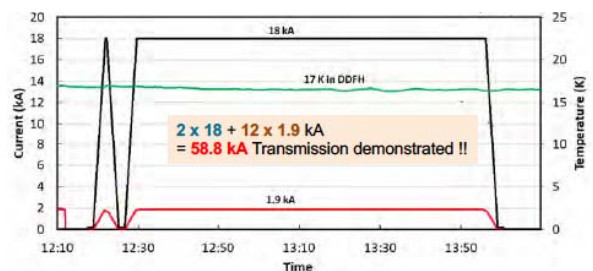


Fig. 4 Superconducting link prototype successfully demonstrated up to 58.8 kA transmission in a flexible 60 m long cryostat at a test station (CERN-SM18) in 2020⁹⁾.

3.2 将来加速器への応用

3.2.1 CERN CLIC 加速器・高周波電力源の高効率化

CERN 加速器将来計画候補の一つとなっている電子陽電子衝突・線形加速器、Compact Linear Collider (CLIC) 計画では、第一期計画として電子陽電子衝突エネルギー 380 GeV を目標とした CLIC-380 計画が検討されている (Fig. 5)¹⁷⁾。その為の第一期の高周波加速電界発生源として、技術的に

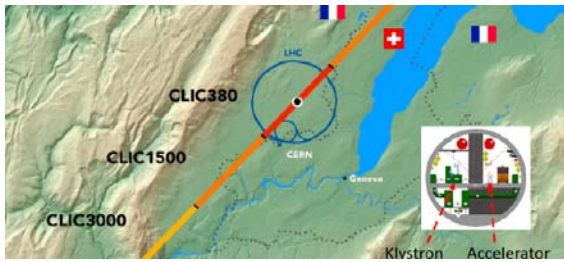


Fig. 5 Layout of the Compact Linear Collider (CLIC) and accelerator cross section with Klystron supplying RF power to accelerating structure for CLIC-380.

最も確立されたクライストロンの採用が検討されている。クライストロンは、高周波(RF)発生源・本体（電子銃、電子加速、高周波電界増幅部）と電子加速部のビーム収束を担うソレノイド磁石（コイル）部本体から構成される（Fig. 6a）。CLIC加速器には、12 GHzのクライストロンが必要となり、このために必要なソレノイドコイルの中心磁場は、0.6~0.7 Tが求められる。従来のクライストロンでは、RF部とCuソレノイドコイル部の電力消費がそれぞれ20 kWであった。このソレノイドコイルにMgB₂を応用することから、クライストロン5000台を必要とするCLIC-380計画では、100 MWレベルの省電力化を図ることが可能となる。このための技術検証として、MgB₂ソレノイドとクライオクーラによる伝導冷却を組み合わせたプロトタイプが開発された（Fig. 6b）^{18,19}。その基本パラメータをTable 2に、MgB₂超伝導線の基本特性、超伝導コイルの運転条件をFig. 7に示す。

プロトタイプ MgB₂超伝導ソレノイド磁石は、MgB₂超伝導線の臨界温度特性を保持し、1 Tに於ける臨界温度30 Kに対して5 K程度のマージンを持つ25 Kでの安定な運転が可能であることを確認した。これによって、Cu磁石に対して、運転電力比率10%レベルにまで省電力化できることを実証した²⁰。また、NbTi磁石とした場合の4.5 Kに於ける運転と比較しても、運転温度差による熱効率の大幅な改善を図ることができ、運転電力を大幅に節約できることが

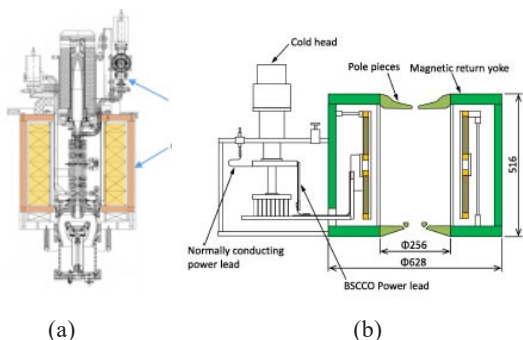


Fig. 6 (a) 12 GHz Klystron assembled with conventional (Cu) solenoid, and **(b)** MgB₂ solenoid prototype replacing the Cu solenoid.

Table 2 Main parameters of the MgB₂ prototype solenoid for the 12 GHz Klystrons.

MgB ₂ : conductor configuration diameter (w/ insulation)	MgB ₂ /Cu/Fe/Monel 0.67 (0.83) mm
SC solenoid coil Inner diameter, Length Current Central field Stored energy	0.34, 0.3 m 57 A 0.8 T 11.8 kJ
Cryostat and Cryo-cooler Warm-bore ID, Yoke OD, Hight Cooling capacity AC-plug-power	0.25, 0.63, 0.52 m 4W at 20K < 3 kW

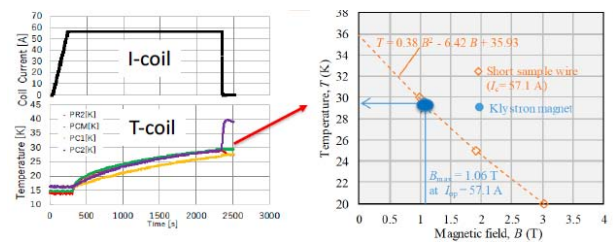
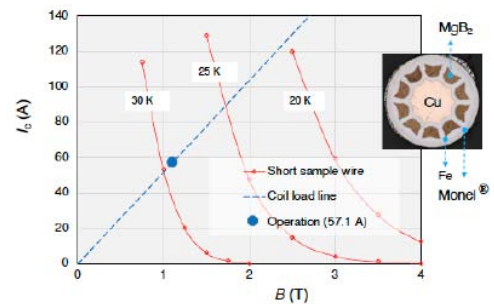


Fig. 7 MgB₂ superconductor operational characteristics.

わかる²¹。将来、HTSの線材コストダウンが図られた場合、更に電力の節約が可能であるが、その効果は、5%レベルまでの範囲と想定される為、MgB₂磁石が、総合的には、とても効果的な選択となることがわかる（Table 3）。

3.2.2 ILC計画;主線形加速器・超伝導磁石

国際リニアコライダー計画（ILC）は、エネルギーフロンティア電子陽電子・衝突型加速器の将来構想として発案さ

Table 3 Relative power consumption of Cu and SC coils.

Coil Material	unit	Cu	NbTi	MgB ₂
Coil				
Central field	T	0.6	0.7	0.8
Current	A	2x300	< 50	57
Voltage	V	35	0	0
Power	kW	20	0	0
Cooling				
Method		Water	Cooler	Cooler
Operation Temp.	K	300	4.5	25
Cooling capacity	W	n/a	1	> 4
AC-plug power	kW	n/a	6	< 3
Total Power	kW	> 20	6	< 3
Reference		[20]	[21]	[19]

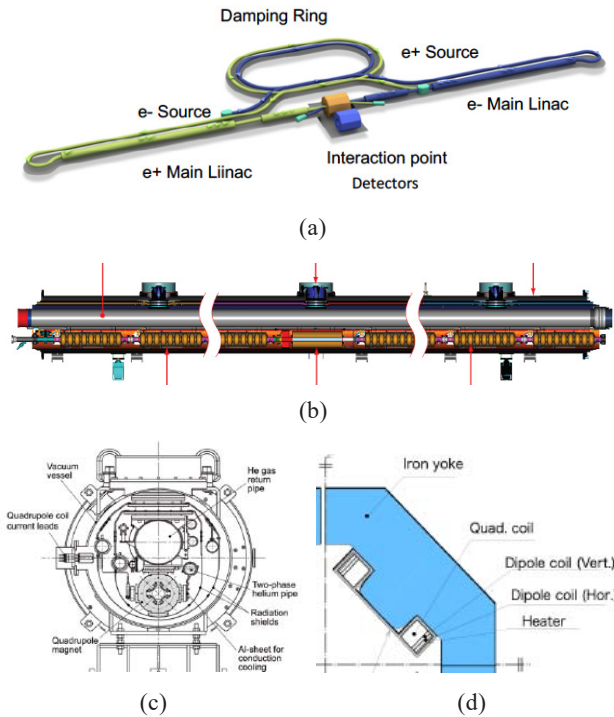


Fig. 8 (a) ILC Superconducting RF linear accelerator layout, **(b)** superconducting magnet installed between SRF cavity string, **(c)** cross section of the cryomodule with the SC magnet, and **(d)** the cross-section of the superconducting magnet with super-ferric configuration.

れた。2013年に基本技術設計が出版され、段階的に1 TeV (1,000 GeV)までアップグレードを目指す計画となった (Fig.8a)²²⁾。2017年には、第一期計画を、衝突エネルギー250 GeVからスタートすることとし、日本がホストを目指す将来計画となった²³⁾。全長20.5 kmに達する振動の少ない地下トンネルに設置され、超伝導線形加速器によって電子・陽電子を直線的に向き合って加速し、中央部で正面衝突させる。超伝導加速空洞によるビーム加速とともに、超伝導磁石によるビーム収束・軌道制御が求められる (Fig. 8b, c, d)。

主線形加速器では、26台の超伝導加速空洞 (9連) に対して1台の周期 (約40メートル毎) で超伝導磁石が設置される。その基本パラメータを Table 4 にまとめる^{24,25)}。超伝導磁石は、伝導冷却で冷却され、ビーム収束 (四極磁場) 主要機能としつつ、ビーム軌道制御 (二極磁場) 機能を複合することが求められる。磁場強度が口径内で、~2 T、コイル内での最高磁場が~3 Tとなる。

この超伝導磁石の技術課題の一つが、上流に位置する多連超伝導加速空洞内の高周波電界から自然発生する電界放出電子流 (dark current と呼ばれる) の入射に伴う発熱である^{26,27)}。その様子を Fig. 9 に示す。電子流は加速空洞電場で加速され、超伝導磁石に入射後、その磁場によって偏向し、ほぼ全流束が超伝導コイルに入射し、そのエネルギーがコイルに吸収される。これによるコイル内温度上昇は、

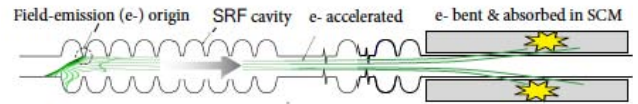


Fig. 9 Field emitted electrons accelerated by SRF cavity and bent by magnetic field and absorbed in SC magnet (SCM).

Table 4 Main parameters of the SCQ combined with dipole correctors for the ILC main linac.

Items	Parameters
Physical length	1 m
Magnetic length	0.95 m
Inner pole radius	0,045 m
Outer yoke radius	0.2 m
G: Field gradient	40 T/m
B: Corrector dipole field	0.11 T
Maximum magnetic field in Coil	~ 3T
Operational Temperature	2 K

Table 5 Characteristics of NbTi, Nb₃Sn, and MgB₂ wires for ILC-ML-SCQ to sustain under dark current heat absorption.

Item	unit	NbTi	Nb ₃ Sn	MgB ₂
Strand diameter	mm	0.5	0.6	0.55
Insulated diam.	mm	0.55	0.75	0.71
Cu / SC ratio		2	1	0.8
I _{op} at 3T	A	100	100	100
T _c at 3 T, 100 A	K	7	13	15
C _p at T _c	J/kg/K	~ 0.3	~ 2	~ 2.5
Δh at 3 T	J/kg	~ 0.8	~ 6	~ 8
(ΔT = T _c - 4K)				
Fabricator		Furukawa	Furukawa	Hitachi

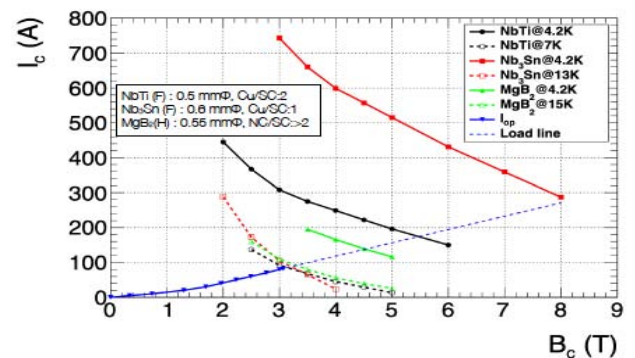


Fig. 10 Critical current as a function of field for NbTi, Nb₃Sn, and MgB₂, and a load-line of the SCQ package.

短時間に NbTi 超伝導体の臨界温度を超える可能性がある。この対応策として、臨界温度の高い Nb₃Sn、または MgB₂ を超伝導コイルに用いることで、クエンチを回避し、高周波電場および加速器電子ビームを時間的な猶予を持って、安全に停止することが可能となる。Table 5、Fig. 10 に示されるように、Nb₃Sn、MgB₂ 磁石を採用する事で、≥13 K まで臨界温度 (@ 3 T, 100A) を高め、より安定な運転が可能となる²⁸⁻³¹⁾。

3.2.3 J-PARC MR 高機能化・ストレッチャリング磁石

JAEA と KEK の協力により建設された J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) 加速器は、多機能加速器として、素粒子・原子核物理、物性科学、生命科学実験に様々な粒子 (ニュートリノ、K 中間子、中性子、ミュオン) を提供し研究支援への要求が高まり続けている。特に、J-PARC 陽子シンクロトロン・主リング (MR) では、瞬発的な陽子ビームパワー (速いビーム取り出し) を要求する「T2K/T2HK: 長基線ニュートリノ振動実験」と、出来る限り平滑で連続した二次ビーム (K 中間子、ミュオン等のための遅い取り出しビーム) を要求する素粒子・原子核実験への並行したビーム提供を図る主リング高機能化が、将来計画として検討されている³²⁾。ここでは、現在の主リング・シンクロトロン加速器の上部に、超伝導磁石によるストレッチャーリングを増設し、速い取り出しと遅い取り出しビームを並行して稼働し、全体として提供するビーム強度の電力効率が良い増強を目指す (Fig. 11)。

ストレッチャーリングには、MgB₂ または高温超伝導体を用いた超伝導磁石を採用することで、電力効率を高めつつ、高機能化を図ることが可能となる。現状の提案では、二極磁場 1.15 T と四極磁場 40 T/m を同時発生させる鉄ヨーク・磁極形状と、CERN-HL-LHC 計画で採用されている超伝導リンク (超伝導送電) のコンセプトを応用した MgB₂ 超伝導コイルを組み合わせた結合機能型の Super-ferric 磁石によってコスト効果の高い磁石設計を目指すことが出来る³³⁾。

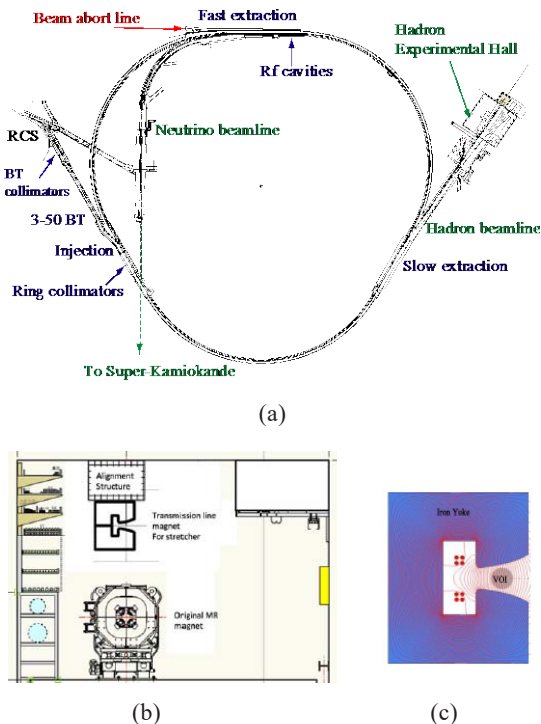


Fig. 11 (a) Layout of J-PARC Main Ring and (b) the accelerator tunnel cross section with the existing MR magnets (bottom) and (c) a possible stretcher-ring magnet X-section using MgB₂ superconducting cable technology.

4. MgB₂ 応用の将来展望

癌治療・重イオンシンクロトロン加速器およびガントリー・ビームライン (角度可変ビーム照射を可能とする) の小型化を目指した超伝導化が注目される^{34,35)}。MgB₂ の採用により、温度領域 <~25 K、磁場領域 <~3 T での特性を活かし、電力効率を高め、より経済的ながん治療の高機能化を図ることが出来る。これらの加速器応用を基盤とし、更なる社会・産業応用展開が提案され、広い分野での基礎研究が進展している^{7-9,15,36-38)}。更に将来、宇宙・素粒子観測磁場利用では、MgB₂ の低密度特性を生かし、軽量かつ粒子透過性能に優れた超伝導磁石への応用が期待される³⁹⁾。

5. まとめ

粒子加速器およびその周辺機器に於ける MgB₂ 超伝導体の応用の進展を紹介した。それらの応用は運転温度約 20 K での比熱の増大による安定な運転、高電力効率、<~3T での応用が特色となる。大電力送電、中間磁場領域での応用の展開が期待される。運転温度を高める事で、水素冷却应用を含み、電力の効率化が期待でき、大きなメリットとなる。更なる将来への展望として、素材となるマグネシウムおよびホウ素が資源として豊富であり、コスト低減が期待されるが、応用の発展にはその実証が不可欠である。また、粒子加速器分野では耐放射線性について詳細な検証が求められる。一般的にホウ素と中性子の相互作用断面積が大きいことは良く知られており、臨界電流安定性の検証は重要な課題となる。

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) G. Giunchi et al.: "High performance new MgB₂ superconducting hollow wires", *Supercond. Sci. Technol.* **16** (2003) 285-291
- 3) S. Ye and H. Kumakura: "The development of MgB₂ superconducting wires fabricated with an internal Mg diffusion (IMD) process", *Supercond. Sci. Technol.*, **29** (2016) 11304
- 4) H. Kumakura et al.: "Development of NbTi superconducting magnet for generating uniform magnetic force fields", *TEION KOGAKU* **56** (2021) 317-326 (in Japanese)
熊倉浩明他: 「MgB₂ 超伝導体の開発進展」, *低温工学* **56** (2021) 317-326
- 5) H. Kumakura: "Improvement of J_c for MgB₂ wires - Parameters that influence critical current properties", *Abstract of CSJ Conference* **101** (2021) 50
熊倉浩明: 「MgB₂ 線材における高 J_c 化研究—臨界電流特性に影響を及ぼす各種因子について—」, 第 101 回 2021 年度春季低温工学・超電導学会講演概要集 (2021) 50
- 6) H. Tanaka and M. Kodama: "Development of insitu-processed MgB₂ superconducting wires", *TEIONKOGAKU*, **56** (2021) 327-334 (in Japanese)

田中秀樹、児玉一宗: 「In-situ MgB₂ 超伝導線材の開発」, 低温工学 **56** (2021) 327-334

- 7) G. Grasso: "ASC Superconductor", URL available (2021-11-27), <https://www.asgsuperconductors.com/>
- 8) T.A. Prikhna, M. Eisterer, M. Rindfleisch et al.: MgB₂ wires and bulks with high superconducting performance", IEEE Trans. Appl. Supercond. **29** (2019) 6200905
- 9) T. Baig et al.: "Conceptual designs of conduction cooled MgB₂ magnets for 1.5 and 3.0 T full body MRI systems", Supercond. Sci. Technol. **30** (2017) 043002
- 10) M.D. Sumption: "AC loss of superconducting materials for very high-density motors and generators of hybrid-electric aircraft", AIAA Propulsion & Energy Forum (2019) 10.2514/6.2019-4495
- 11) H. Tanaka et al.: "Conduction-cooled MgB₂ coil in maximum self-magnetic flux density 2.3 tesla made with 300-meter-long multifilamentary MgB₂ wire", IEEE Trans. Appl. Supercond. **27** (2017) 4600904
- 12) H. Tanaka et al.: "Performance of MgB₂ superconductor developed for high-efficiency klystron applications," IEEE Trans. Appl. Supercond. **30** (2020) 6200105
- 13) I. Bejar, P. Fessia, L. Rossi, O. Bruning et al. (eds): "HL-LHC technical design report V.0.1", CERN-I 2017-007-M (2017)
- 14) A. Ballarino et al.: "Development of superconducting links for the Large Hadron Collider machine", Supercond. Sci. Technol. **27** (2014) 044024
- 15) A. Ballarino: "Cold powering systems – MgB₂ high-current power transmission lines for the HL-LHC magnets: from concept to prototype validation", invited talk at Int. Particle Acc. Conf. **IPAC'21** (2021), and announced by CERN news "Electricity transmission reaches even higher intensities", URL (2020-6-24), <https://home.cern/news/news/accelerators/electricity-transmission-reaches-even-higher-intensities>
- 16) Al Ballarino et al.: "The best paths project on MgB₂ superconducting cables for very high-power transmission", IEEE Trans. Appl. Supercond. **26** (2016) 5401705
- 17) M. Aicheler et al. (editors): "Compact Linear Collider (CLIC) Project Implementation Plan", CERN Yellow Reports, CERN-2018-010-M (2018), online available; <https://doi.org/10.23731/CYRM-2018-004>
- 18) A. Yamamoto et al.: "Applying superconducting magnet technology for high-efficiency klystrons in particle accelerator RF systems", IEEE Trans. Appl. Supercond. **30**, (2020) 4101304
- 19) H. Watanabe et al.: "Development of prototype MgB₂ superconducting solenoid magnet for high-efficiency klystron applications", IEEE Trans. Appl. Supercond. **30** (2020) 4601206
- 20) F. Peauger et al.: "A 12 GHz RF power source for the CLIC study", Proc. Int. Particle Acc. Conf., **IPAC'10** (2010) THEPB053
- 21) S. Yokoyama, et al.: "Cryogen free conduction cooled NbTi superconducting magnet for a X-band klystron", IEEE Trans. Mag. **32** (1996) 2633-2636
- 22) A. Abada et al.: "International Linear Collider (ILC) Technical Design Report", KEK **2013-1** (2013), URL (2013-6-15), <https://inspirehep.net/literature/1240418>
- 23) P. Bambade et al., "The International Linear Collider ---A Global Project", submitted to ESPPU'20, (2019), URL available (2019-3-5); arXiv:1903.01629v3 [hep-ex], updated 5 Apr 2019
- 24) V. S. Kashikhin et al.: "Superconducting splittable quadrupole magnet for linear accelerators", IEEE Trans. Appl. Supercond. **22** (2012) 4002904
- 25) N. Andreev et al.: "Conduction Cooling Test of a splittable quadrupole for ILC cryomodules", IEEE Trans. Appl. Supercond. **23** (2013) 3500305
- 26) Y. Li, K. Liu, R. Geng and A. Palczewski: "Research on field emission and dark current in ILC cavities", Proc. **SRF2013** (2013) TUIOA06
- 27) A. Sukhanov, I. Rankhno, N. Solyak et al.: "Dark current study in ILC main linac", Proc. **LINAC2016**, (2016) THPLR007
- 28) A. Yamamoto and N. Solyak: "Dark current electrons and irradiation heating of superconducting magnets for high-gradient SRF linacs", presented at TESLA Technology Collaboration meeting (2021), URL available (2021-1-20), <https://indico.desy.de/event/27572/timetable/#20210120.detailed>
- 29) Y. Arimoto et al.: "Study of conduction-cooled superconducting quadrupole magnets combined with dipole correctors for the ILC main linac", Proc. **IPAC'21** (2021) TUPAB017
- 30) H. Shimizu et al.: "Study on conduction cooling of superconducting magnets for the ILC main linac", presented at MT27 (2021), and submitted to IEEE Trans. Appl. Supercond.
- 31) A. Takagi, private communication with Furukawa Elect. (2021)
- 32) M. Tomizawa et al.: "Beam optics design of stretcher ring and transfer line for J-PARC slow extraction", **IPAC'18** (2018) TUPML055, and IOP Conf. Series; Journal of Physics **1067** (2018) 042004
- 33) T. Ogitsu et al.: "Design study of superconducting transmission line magnet for J-PARC MR Upgrade", IEEE Trans. Appl. Supercond. **27** (2017) 4003705
- 34) Y. Hirao et al.: "Heavy ion medical accelerator in Chiba – a design summary and update", **NIRS-M-89** (1992)
- 35) H. Souda et al.: "Construction of east Japan heavy ion center, faculty of medicine, Yamagata University", Kasokuki, **17** (2020) 1140150
- 36) M. Boll et al.: "A holistic system approach for short range passenger aircraft with cryogenic propulsion system", Supercond. Sci. Tehnol. **33** (2020) 044014
- 37) S. Kalsi, K.A. Hamilton and R. A. Badcock: "Superconducting rotating machines for aerospace applications", presented at 2018 Joint Propulsion Conference (2018), pages not available
- 38) Y. Terao, M. Sekino, and H. Ohsaki: "Electromagnetic design of 10 MW class fully superconducting wind turbine generators", IEEE Trans. Appl. Supercond. **22** (2011) 5201904
- 39) A. Yamamoto: "Advances in superconducting detector magnets and the future prospect", J. PASJ **16** (2019) 295-302 (in Japanese)

山本 明: 「素粒子実験・粒子検出器用超伝導ソレノイド磁石と将来」 加速器 **16** (2019) 295-302

山本 明



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: KEK)。素粒子物理実験・粒子加速器における超伝導応用・研究開発に従事。CERN-LHC、ILC超伝導国際協力を推進。2013年～CERN客員教授。現、KEKダイヤモンドフェロー・名誉教授。日本物理学会、低温工学・超電導学会、日本加速器学会員。理学博士。