解 説

強磁場超伝導材料研究センターと小型冷凍機冷却超伝導マグネット開発

渡辺 和雄

The High Field Laboratory for Superconducting Materials (HFLSM) and Development of a Cryocooled Superconducting Magnet

Kazuo WATANABE

Synopsis: The High Field Laboratory for Superconducting Materials (HFLSM), Institute for Materials Research, Tohoku University has demonstrated the first practical cryocooled superconducting magnets using a GM-cryocooler and high temperature superconducting current leads. For high magnetic field research, various kinds of easy-to-operate cryocooled superconducting magnets such as wide bore, high field, and new functional magnets have been constructed. Recently, the HFLSM succeeded in developing a cryocooled 18.1 T high temperature superconducting magnet and a cryocooled 27.5 T hybrid magnet. This paper reviews cryocooled superconducting magnet technology and relevant new research areas.

Keywords: cryocooler, cryocooled superconducting magnet, hybrid magnet, magnet technology, high magnetic field

1. はじめに

温度、圧力、体積の熱力学的関係では、エネルギー保存則として内部の自由エネルギー増加は $dE=TdS-pdV$ で表される。圧力の代わりに磁界 H を印加すると磁化 M になり、熱力学関数としては p を H で置き換え、 $-V$ を M で置き換えた $dE=TdS+HdM$ で表される。つまり、磁場も熱力学的に最も基本的な外部パラメータであり、物性研究の基盤である。強磁場を用いるための強磁場発生技術は、古くはパルスマグネットから始まり、Kapitza がイギリスのケンブリッジ大学キャベンディッシュ研究所で 1924 年に世界で初めての 30 T 強磁場を発生させている¹⁾。定常強磁場では、Bitter がアメリカ合衆国の MIT で 1939 年にいわゆる Bitter 型マグネットによる 10 T 発生を実現させた²⁾。その後、定常強磁場は超伝導マグネットの内側に水冷銅マグネットを組み合わせたハイブリッドマグネットが考案され、1975 年にはイギリスのオックスフォード大学に 16 T 発生のハイブリッドマグネットが建設された³⁾。1981 年には MIT に 30.4 T 発生のハイブリッドマグネットが開発され、定常強磁場として 30 T の時代が到来した⁴⁾。

我が国では、東北大学金属材料研究所がキャベン

ディッシュ研究所から遅れること僅か 11 年で 1935 年に Kapitza 型パルスマグネットで 28 T の強磁場発生に成功した⁵⁾。また、1956 年には 12.5 T 発生の Bitter 型マグネットが設置された。その後、金属材料研究所は 1983 年に我が国で初めてのハイブリッドマグネットを開発し、当時の我が国における最高定常磁場である 20.5 T の磁場発生を達成した。さらに、1986 年に新たなハイブリッドマグネットの開発によって当時世界最高の 31.1 T の磁場発生に成功した⁶⁾。この年に高温超伝導体が発見され、翌年には早速、高温超伝導体の上部臨界磁場評価にハイブリッドマグネットが活用された。

強磁場化の競争はさらに進み、MIT では 1993 年にハイブリッドマグネットで 34.2 T まで到達している⁷⁾。また、我が国では当時の科学技術庁金属材料技術研究所が筑波に新たな強磁場施設を建設し、1999 年に 37.3 T 発生のハイブリッドマグネットを開発している⁸⁾。しかし、同年の 1999 年 12 月には定常強磁場が大幅に記録を伸ばすことになり、マサチューセッツからフロリダへと場所を移して建設された米国立強磁場研究所が、45 T 発生のハイブリッドマグネットを実現させた⁹⁾。ハイブリッドマグネットの発生磁場としては、当分の間この定常磁場値が最高記録として保持される可能性が高い。

強磁場の重要性について、2005 年 1 月にアメリカ合衆国では「強磁場科学における機会 (Opportunities in High Magnetic Field Science)」と題する米国研究諮問委員会 (National Research Council) の報告書を作成してい

Received April 4, 2006

東北大学金属材料研究所

〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1

Institute for Materials Research, Tohoku University,

2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8577, Japan

† E-mail: kwata@imr.tohoku.ac.jp

る¹⁰⁾。米国研究諮問委員会は米国理学アカデミー、米国工学アカデミー、そして米国医学協会の統括機関であり、ワシントン DC で 2003 年の 9 月から 2004 年の 3 月まで 3 回の延べ 6 日間にわたって強磁場研究の戦略的必要性と重要性について議論をする会合を催した。強磁場科学における機会に関する委員会としてエール大学の Peter B. Moore を座長とする 14 人の理工学関係の専門家と、固体科学委員会として MIT の Marc A. Kastner を座長とする 20 人の固体科学分野の専門家、そして物理学と天文学に関する理事会としてスタンフォード大学の Burton Richter を座長とする 18 人の物理学・天文学者からなる総勢 52 人の多岐にわたる著名な専門家で構成された検討委員会である。強磁場が必要な研究項目として、固体物理、材料物理分野の高温超伝導、重い電子系、低次元半導体、有機導体と有機超伝導、強磁場と X 線及び中性子回折の組み合わせなどの重要研究、そして磁性とサイクロトロン共鳴分野で特に生物、化学、材料研究に対する強磁場応用分野の NMR (Nuclear Magnetic Resonance)、MRI (Magnetic Resonance Imaging)、ICR (Ion Cyclotron Resonance)、EPR (Electron Paramagnetic Resonance) の重要研究、そしてそれらの研究を可能にする強磁場発生技術の研究が検討されている。結論としては、アメリカ合衆国は強磁場を用いる研究に対する最高レベルの強磁場施設を常に整備して発展させて行かねばならないとして、次の目標は 30 T の NMR 超伝導マグネット、60 T ハイブリッドマグネットによる定常強磁場発生技術、100 T のロングパルスマグネットの開発研究が国家戦略として重要であるとしている。強磁場に

関係する研究でノーベル賞を得た受賞数を数えてみると、超伝導現象の発見で 1913 年の K. Onnes が受賞して以来これまでに 19 件にも及び最近では 2003 年に MRI に関する医学分野で P. Lauterbur, P. Mansfield が受賞していると報告をまとめている。強磁場を用いた研究が、まさに基礎から応用まで先端研究の宝庫であることを裏付けている。

以上のような定常強磁場の重要性から、本稿では新たな定常強磁場発生方法として開発されてきた小型冷凍機冷却超伝導マグネットの発展状況に着目したい。金属材料研究所付属強磁場超伝導材料研究センターで概算要求が認められ、小型冷凍機冷却ハイブリッドマグネットと小型冷凍機冷却高温超伝導マグネットの開発プロジェクトで得られた性能試験結果を中心に、小型冷凍機冷却超伝導マグネットによる定常強磁場発生技術について解説する。

2. 定常強磁場施設の現状

定常強磁場の戦略的重要性から世界の強磁場施設建設が再編成されつつある。上述したように、アメリカ合衆国はフロリダに巨大な国立強磁場研究所を建設し、32MW の水冷銅マグネット用直流電源を設置している。Table 1 に示すように、世界の定常強磁場施設は米国に続いて、軒並み 20 MW 以上の直流電源設備を持つようになった。最近では、経済発展の目覚ましい中国が合肥のプラズマ研究所に水冷マグネットの直流電源容量は不明だが総受電容量 40 MVA の施設を建設し始めて、40 T ハイブリッドマグネット開発に乗り出している。

Table 1 世界の主な定常強磁場施設の比較（各施設年次報告書等より）

施設名	国	電力(MW)	WM(T)	HM(T)	職員数	利用課題 2004 年
HFLSM	日本(仙台)	8	20	31	14	72(72) *
TML	日本(つくば)	15	32	37	49	86(85) *
HFML	オランダ	20	33	40(計画)	26	—
GHMFL	フランス	24	30	40(計画)	56	75
NHMFL	アメリカ	32	33	45	476	335(103) *
	中国(合肥)	40MVA(総受電 容量の計画)	30(計画)	40(計画)	—	—

WM：大電力水冷磁石、HM：ハイブリッド磁石=WM+超伝導磁石、( ) *定常強磁場

Table 2 2004 年各施設における定常強磁場磁石の運転実績（各施設年次報告書等より）

施設名	国	2004 年運転数			
		WM&HM	SM	CSM	合計
HFLSM	日本(仙台)	54 日	420 日	1303 日	1777 日
TML	日本(つくば)	149 日	691 日	1096 日	1936 日 *
HFML	オランダ	未公表	未公表	—	
GHMFL	フランス	208 日	未公表	—	
NHMFL	アメリカ	722 日	727 日	—	1449 日

SM：超伝導磁石、CSM：無冷媒超伝導磁石、*NMR 用磁石を除く

Table 3 教育的・学術的貢献（各施設年次報告書等より）

施設名	国	博士取得数 (01-04 年)	発表論文数 (2004 年)
HFLSM	日本(仙台)	14	78(36) *
TML	日本(つくば)	未公表	99(42) *
HFML	オランダ	7	20(3) *
GHMFL	フランス	14	154(6) *
NHMFL	アメリカ	77	392(40) *

(*)は発表論文数に含まれる超伝導及び磁石開発関連論文数

運転実績を見てみると、Table 2 に示すように我が国の定常強磁場施設は小型冷凍機冷却超伝導マグネットの運転が独特である。金属材料研究所も物質・材料研究機構もそれらのマグネットの運転延べ日数が 1000 日を越えており、多くのマグネット数を誇るフロリダの運転日数合計 1450 日を遙かに上回る 1800 日から 1950 日に及んでいる。この結果は、小型冷凍機冷却超伝導マグネットの運転長所を最大限に発揮している現れであると考えられる。Table 3 は、研究のアウトプットとしての論文数と人材育成にどれだけ貢献しているかという教育的尺度で見た場合の施設間の比較である。施設を利用して年間に生み出される論文数は、米国立強磁場研究所が圧倒的に多いが、我が国は仙台とつくばを合わせてフロリダの 1/2 程になっている。2001 年からの 4 年間で博士の学位取得数は仙台とグルノーブルが同数の 14 人であるがフロリダはその 5 倍以上である。この差は、強磁場施設に携わる職員数に關係しており、フロリダの職員数は仙台の 34 倍であり、アメリカ合衆国は国策として如何に強磁場が重要と捉えているかが見てとれる。

3. 高強度 Nb₃Sn 超伝導線材の開発

強磁場超伝導マグネットの研究には、超伝導線材の開発を避けて通れない。10 T 以上の強磁場発生に不可欠な超伝導体 Nb₃Sn は化合物にするための高温長時間の熱処理が必要であり、熱処理された Nb₃Sn 化合物線材は非常に脆い。安全のためコイル状に巻いてから熱処理をすることが一般に行われており、150 MPa 以下の電磁力の範囲内で実用になっている。しかし、超伝導マグネットの強磁場化を進めていくと、巨大な電磁力を如何に克服するかが決め手になる。小さな冷凍能力しかない小型冷凍機冷却超伝導マグネットは、コンパクトなマグネット設計が不可欠であるために、線材の外径をあまり太らせないで内部に補強効果を持たせる内部補強法線材が必要になる。我々は、古河電工との共同研究によって機械的強度に優れる Nb₃Sn 化合物線材を実現させるために、CuNb や CuNbTi などでも内部補強した高強度 Nb₃Sn 化合物線材を開発してきた^{11,12)}。これらの線材

Fig. 1 High strength Nb₃Sn wire reinforced with CuNb composite, and its wire structure.

は、650℃で 240 時間程度の熱処理をしてもこれまでの約 2 倍の機械的強度を持ち NbTi 合金線材に匹敵する強度が実現できた。現在までに、いずれの補強法でも 20 km の長さを持つ線材開発に成功している。Fig. 1 に、CuNb で内部補強した高強度 Nb₃Sn 化合物線材の断面と構成を示す。CuNb の Nb は、Cu に固溶しないでデンドライト状に分散しているため、線引きすることで Nb が絡み合った状態で伸び、機械的には Cu の補強繊維のような効果を持っている。加工度 10⁶ まで強加工をした Cu-20wt%Nb に対して高温長時間の熱処理における機械的特性では、ブロンズ法 Nb₃Sn の生成熱処理に相当する 650℃で 240 時間の熱処理を経験させても、220 MPa の降伏力を保つことが分かった。坩堝溶解した Cu-20wt%Nb をあらかじめ 4x10³ 程度の加工度を加えて銅シースに挿入し、中心に Nb または Ta バリヤーを持ったブロンズマトリックス中の Nb コアを配置した。その構成で最終線径が 1 mm 直径まで線引きし、Cu-20wt%Nb の加工度が 10⁶ まで強加工を実施した。あらかじめ加工した Cu-20wt%Nb を用いることで、10⁶ までの強加工として現実的な開始インゴット径を採用できる。Fig. 2 に、4.2 K で測定された応力と臨界電流の關係について、内部補強のない Cu/Nb₃Sn 線材と CuNb 内

Fig. 2 Stress dependence of the normalized critical current for multifilamentary Nb₃Sn wires with and without CuNb reinforcement.

部補強の高強度 CuNb/Nb₃Sn 線材を比較した。200 MPa の電磁力が加わった場合、Cu/Nb₃Sn 線材で巻いた超伝導マグネットは臨界電流が約半分にまで劣化してしまうことが分かる。それに対して、CuNb/Nb₃Sn 線材で巻いた超伝導マグネットは臨界電流の劣化が全くないどころか、さらに線材の長手方向において残留歪ゼロの状態に近づくため、むしろ残留歪状態での臨界電流よりも大きくなり、残留歪ゼロに相当する状態で臨界電流は最大となる。10% I_c 劣化が生じる 90% I_{cm} で比較すると、Cu/Nb₃Sn 線材では 120 MPa までの応力範囲であるものが CuNb/Nb₃Sn 線材では 250 MPa までに拡大される。また、内部補強法高強度線材を用いることでマグネットの空間電流密度を大きくすることができるため、作製されるマグネットの重量を大幅に減らすことができる¹³⁾。そこで、線径の細い高強度 CuNb/Nb₃Sn 線材を用いることにより、これまでの 1/3 までの極めてコンパクトな大口超伝導マグネットが作製できるようになった¹⁴⁾。現在、CuNb/Nb₃Sn 線材に対して超伝導特性を向上させる繰返し曲げ歪効果があらたに見出されて、リアクト & ワインド法による超伝導マグネット作製に有望視されている。

更に大口径化と強磁場化を進めるためのより高強度な線材を得るために、CuNb の代わりに CuNbTi を内部補強材として線材の中心に配置した CuNbTi/Nb₃Sn を開発した。0.2%耐力で 300 MPa までの機械的特性が得られている。線材開発の詳細は、本特集で紹介される¹⁵⁾。この CuNbTi/Nb₃Sn 線材を用いて、本センターの小型冷凍機冷却ハイブリッドマグネットと小型冷凍機冷却高温超伝導マグネットの建設が行われた。

4. 小型冷凍機冷却超伝導マグネット技術

超伝導マグネットは液体ヘリウムと共に用いられて、液体ヘリウムは超伝導マグネットと切り離せない存在であった。磁場の励磁減磁には、室温部にある電源から液体ヘリウム中にある超伝導マグネットに電流を通电させることが必要である。大きな輸送電流を通电させるには、抵抗発熱の小さな銅電流リードを用いるが、電流量の大きな電流リードは断面積が大きくなってしまう。Wiedemann-Frantz 則に従って、電気良導体は熱伝導も大きくなる。小型冷凍機を用いて電流リードの熱負荷を 1 W 以下に抑えるには、真空雰囲気では 40 A の銅電流リードが限界である。実用の運転電流としては約 1 桁小さい値である。このような状況において、1992 年に、金属材料研究所は住友重機械と共同で Bi2223 電流リードを熱絶縁型の電流リードとして最も効果的に応用できる超伝導機器の開発に着目し、10K-GM 冷凍機と組み合わせた Nb₃Sn 超伝導マグネットの実用化に世界で初めて成功した。38 mm の室温実験空間に 4 T を発生できる

小型冷凍機冷却超伝導マグネットは、400 A の運転電流で実証され、わずか 0.5 W の冷凍能力でこれまでの 40 A の限界から 400 A へと応用範囲を拡大させた意義を持っている¹⁶⁾。

真空状態での固体伝導冷却によって小型冷凍機冷却される超伝導マグネットでは、無冷媒であるため従来まで超伝導体に用いられてきた冷却安定化理論を適用できない。我々は、液体ヘリウム浸漬冷却と小型冷凍機冷却条件で冷却安定性の違いを実験的に明らかにしてきた。すなわち、小型冷凍機冷却条件における Nb₃Sn 線材の最小クエンチエネルギーMQE は、浸漬冷却条件の約 1/3 である。また、浸漬冷却の MQE が低磁場ほど小さくなるのに対し、小型冷凍機冷却の MQE は高磁場ほど小さくなることを見出した。すなわち、超伝導線材に対する冷却安定性の違いは、小型冷凍機冷却の場合は温度マージンが支配的であり、浸漬冷却では冷却マージンが支配的であることを意味している¹⁷⁾。したがって、臨界電流の大きな低磁場と臨界電流の小さな高磁場では冷却マージンは発熱の小さな高磁場領域が大きく、温度マージンは転移温度が大きい低磁場領域が大きい。抵抗の大きな安定化基材を持つ超伝導線材の冷却マージンは小さいが、臨界温度が同じであれば温度マージンに差がない。小型冷凍機冷却超伝導マグネットでは MQE は浸漬冷却に比べて数分の 1 になるが、数 mJ の擾乱に耐えるためフラックスジャンプや線材の動きによる数 100 μ J の擾乱には安定である。また、電流分流が生じれば回復することなくクエンチに至るため、電流マージンを大きくとることが温度マージンを大きくすることに繋がる。小型冷凍機冷却超伝導マグネットの安定性設計は、超伝導線材の運転電流マージンで設計しなければならない。

5. 小型冷凍機冷却超伝導マグネットの発展

これまでに強磁場超伝導材料研究センターで開発した小型冷凍機冷却超伝導マグネットを Table 4 にまとめた。465 A で 38 mm の室温ボアに 4.6 T を発生させた世界初の実用的な小型冷凍機冷却超伝導マグネット 5T-CSM は、その特長を生かした実験に使用された。核融合炉用超伝導マグネットからの漏洩磁場によって低温構造材料であるオーステナイト材が磁場の影響をどのように受けるのかが調べられた。液体窒素温度のような比較的温度の高い熱エネルギー領域でどのような磁場変化を示すのか、磁場によってマルテンサイト変態が生じて機械的強度が劣化することがあるのかが研究課題であった。このような実験には、一定強磁場を極めて長時間保つことが必要であるが、液体ヘリウムを用いる超伝導マグネットでは不都合なためその研究は残されたままになっていた。そこで、世界初の実用的な小型冷凍機冷却超伝導マグネットを用いて、液体窒素温度で 4 T の定常

強磁場中に SUS304 の試料片を 1 ヶ月間保持させる実験を繰り返してマルテンサイト変態の有無が調べられた。長時間の強磁場発生が極めて容易であることが示された実験である。この結果は、更にもう一つの重要な意味を持っている。わずか 0.5 W の冷凍能力しかない小型冷凍機によって 400 A という大きな輸送電流通電が 1 ヶ月間安定に維持され 4 T を発生し続けたことである。大学などでの実験用超伝導マグネットは 100 A から 200 A で運転されており、小型冷凍機によるその電流運転は極めて容易に実現できることを示している。したがって、小型冷凍機冷却超伝導マグネットはその後急速に発展していくことになる。

それ以来、小型冷凍機冷却超伝導マグネットの発展は目覚ましいものがある。強磁場超伝導材料研究センターでは、小型冷凍機冷却超伝導マグネットの開発を機能性化、強磁場化、大口径化の 3 点に着目した。超伝導マグネットの機能性に関しては、これまでに強磁場が必要とされそれとの組み合わせが超伝導マグネット側の原因で困難であったところに小型冷凍機冷却超伝導マグネットを適用して解決できないかという点にある。X 線回折実験は、まさにその候補の 1 つである。高圧、高温、または低温の組み合わせた X 線回折装置が実現されているが、強磁場と組み合わせられた X 線回折装置は希である。液体ヘリウムを使用する超伝導マグネットを用いて慶応大学のグループが X 線回折実験を実施しているが、長時間の実験を要する X 線回折実験のために液体ヘリウムの補給等で苦勞をしている。5T-CSSM は室温部のギャップを持ったスプリット型小型冷凍機冷却超伝導マグネットと X 線回折装置を組み合わせた低温強磁場 X 線回折装置である。スプリット型 NbTi 超伝導マグネットは 60 mm ギャップと 80 mm ボアを持っており、室温ギャップ 10 mm で 50 mm 室温ボア中心に 5 T を発生できる。その室温ボアに GM 冷凍機による低温クライオスタットを挿入し、銅製試料ホルダーに粉末試料をセットすることで 8 K から 300 K までの温度調節が可能である。クライオスタットは Be 窓を用いることで、透過 X 線の減衰を小さくしている。開発した低温強磁場 X 線回折装置は、磁場誘起相転移現象の直接測定に威力を発揮している¹⁸⁾。これまでに、形状記憶合金 Ni₂MnGa の強磁場中プレマルテンサイト変態の発見や、Ce(FeCo)₂ の強磁場による反強磁性—強磁性転移の測定など興味深い現象を見出すことに成功している。さらに、スプリット型小型冷凍機冷却超伝導マグネットは強磁場中性子回折実験へと発展し、原研では 8 T の強磁場中性子回折装置が小型冷凍機冷却超伝導マグネットでは実現できるようになった。

11T-CSM は強磁場化を試みて開発された小型冷凍機冷却超伝導マグネットである。52 mm の室温ボア中心

Table 4 強磁場超伝導材料研究センターで開発された小型冷凍機冷却超伝導マグネット(CSM) および小型冷凍機冷却ハイブリッドマグネット(CHM)

	実験用室温ボア(mm ϕ)	発生磁場(T)	特 徴
5T-CSM	38	4.6	世界初の実用 CSM
6T-CSM	220	5.7	化学反応磁気科学
8T-CSM	220	7.5	リアクト&ワインド法 CSM
5T-CSSM	$\phi 50 \times 10$ gap	5.0	強磁場 X 線回折
11T-CSM	52	10.7	1200°C 熱処理
11T-CSM	52	11.0	強磁場 CVD
15T-CSM	52	15.1	物性実験用
18T-CSM	52	18.1	物性実験用
23T-CHM	52	22.7	7.0T, $\phi 360$ 大口径 CSM
29T-CHM	32	27.5	10.0T, $\phi 360$ 大口径 CSM

に 10.7 T を定常で発生できることを示した。この段階では 4K-GM 冷凍機として 4 K で 0.5 W の冷凍能力が精一杯であったことから 2 台の冷凍機と組み合わせたが、その後の GM 冷凍機の進歩により 1 W の冷凍能力が可能となり 10 分で 11 T までの励磁速度に対して 1 台の冷凍機で十分に冷却できるようになった。これらの 11T-CSM は 1200°C の熱処理炉と組み合わせられ Y123 パルクの強磁場シード法による配向改善の研究や、Y123 の強磁場 CVD 法による薄膜作製に用いられている¹⁹⁾。いずれにおいても 11 T の強磁場中で 1200°C の温度を長時間保持することが容易であるため、新磁気科学という新しい学問領域が形成されるに至った。10 T クラスの定常強磁場が極めて容易に長時間使えるようになったことは

Fig. 3 Progress of a practical cryocooled superconducting magnet with an experimental room temperature bore. ● : developed at the HFLSM (○, ▲, ■ : other groups' work).

画期的なことである。**Fig. 3** は、実用的な実験ボアを持つ小型冷凍機冷却超伝導マグネットが発展してきた時系列を示している。強磁場化は 11 T の段階から 15 T そして 18 T へと進んで行ったことが分かる。52 mm 室温ボアに 15.1 T を発生させた 15T-CSM は、15 T の強磁場を手軽に発生できる小型冷凍機冷却超伝導マグネットとして物性研究に十分活用されている²⁰⁾。小型冷凍機冷却超伝導マグネットとしての更なる強磁場化は、高温超伝導インサートコイルを用いることで進めることができる。詳しくは、52 mm 室温ボアに 18.1 T を発生した 18T-CSM の性能試験結果について本特集論文で紹介される²¹⁾。

6T-CSM は大口径の室温ボアを持つ小型冷凍機冷却超伝導マグネットとして開発された。化学反応に対する磁場の効果を調べようとすると、例えば 20℃などの一定の温度設定が必要であるためマグネットの室温ボア内に恒温槽が挿入される。その水平方向に試験管が並べられることになるので、必然的に大きなボアが要求される。220 mm の室温ボア中心に 6 T そして 8 T の中心磁場発生が可能な大口径小型冷凍機冷却超伝導マグネットが開発された。8T-CSM には 8 T で 1600℃の高温熱処理が可能な強磁場中電気炉が組み合わされている。電気炉のヒーターには電磁力を緩和させるために円筒型のグラフィートヒーターを用いて磁場と平衡方向にヒーター電流を通電させている。さらに大口径の 360 mm の室温ボアを持つ小型冷凍機冷却超伝導マグネットはハイブリッドマグネット 23T-CHM として大電力の水冷銅マグネットと組み合わせられ、世界で初めての小型冷凍機冷却ハイブリッドマグネットが実証された。52 mm の室温ボアに 22.7 T までの定常磁場発生が達成されている²²⁾。6 T の大口径小型冷凍機冷却超伝導マグネットと 15.5 T の水冷マグネットの組み合わせであった。この小型冷凍機冷却ハイブリッドマグネットは 30T-CHM のプロトタイプとして作製されており、外側の大型小型冷凍機冷却超伝導マグネットはグレードアップされて 10 T を分担し、内側は更に 19 T 水冷マグネットと組み合わせられる設計である。大口径小型冷凍機冷却超伝導マグネットについては、性能試験結果として本特集論文で詳細に紹介されるので²³⁾、ここでは 32 mm 室温ボアに 27.5 T を発生した 28T-CHM ハイブリッドマグネットとしての特徴をまとめるだけにしたい。

32 mm 室温ボアに 19 T を発生できる 2 重ビッター型水冷銅マグネットが使用できるように、水冷銅マグネットのコイルケースをあらたに作製して既存の 15.5T 水冷銅マグネットを置き換えた。2 重ビッター型の 19 T 水冷銅マグネットは金属材料研究所の自作である。当時の科学技術庁金属材料技術研究所で開発された Cu-24wt%Ag 高濃度銀組成の高強度板は、まだ 150 mm を

越す幅広板材が作製できなかったもので、金研、神戸製鋼、コベルコ科研が共同で開発した 350 mm 幅広の Cu-24wt%Ag 圧延板材が使用されている²⁴⁾。

小型冷凍機冷却大口径超伝導マグネットの初期冷却特性については、冷却質量 3200 kg の超伝導マグネットが室温から 207 時間後に約 3 K まで冷却することができた。従来型の 30 T ハイブリッドマグネットは、初期冷却に 35 L/h のヘリウム液化機を直結して 80 時間ほどで 5 K の温度まで冷却しているが、その後は、約 500 L の液体ヘリウムを毎日補給することになり、人的労力は想像以上に変である。ヘリウム液化機のシステムとしても複雑で、回収設備も含めると大がかりな設備になることは避けられない。高温超伝導体の発見が、高温超伝導電流リードに活用されて小型冷凍機冷却超伝導マグネットとしてここまで発展してきたことは、大変に驚異的であったようにも思われる。ハイブリッドマグネットの運転コストを **Table 5** で比較してみた。ヘリウム液化機と小型冷凍機のメンテナンスコストを同等として考えていないが、2 週間の運転で比較した場合、小型冷凍機冷却ハイブリッドマグネットは従来型の液体ヘリウムを用いるハイブリッドマグネットと比べてわずか 5%のコストで運転できることが分かる。ハイブリッドマグネットのように膨大な液体ヘリウムを用いるマグネットと比較すると、小型冷凍機冷却超伝導マグネットのコスト削減効果は際だって大きい。

小型冷凍機冷却大口径超伝導マグネットの発生磁場 8.5 T と水冷銅マグネットの発生磁場 19 T によって 32 mm の室温実験空間に 27.5 T の定常強磁場発生に成功した²⁵⁾。**Fig. 4** に新開発の小型冷凍機冷却ハイブリッドマグネットを示す。小型冷凍機冷却ハイブリッドマグネッ

Table 5 液体ヘリウム冷却 31T-HM と小型冷凍機冷却 29T-CHM での 1 ヶ月あたり 2 週間運転の冷却コスト比較

	31T-HM	29T-CHM
35 L/h 液化機の電力料	57,00 kWh×8 円 = 0.46 百万円	—
GM 冷凍機の電力料	—	7 kW×4×30 days =20,200 kWh×8 円 =0.16 百万円
液体ヘリウム (大学からの供給)	1,000 L×290 円 =0.29 百万円	—
液体ヘリウムロス の購入分	8,000 L×10%loss ×1000 円 =0.8 百万円	—
液体窒素の購入分	35,000 L×38.5 円 =1.4 百万円	—
合計	2.95 百万円	0.16 百万円
コスト比率 (31T-HM を 100%)	100%	5%

Cryocooled wide bore superconducting outsert (360 mm RT bore, 10 T)

Copper busbar for the water-cooled resistive insert (23 kA, 350 V)

Fig. 4 Unique cryocooled hybrid magnet consisting of an outer cryocooled wide bore superconducting outsert and an inner water-cooled resistive insert.

トのメリットは磁場の長時間保持とヘリウム注液による実験中断が無いことであり、磁気浮上実験、超伝導線材などの臨界電流測定など、高磁場を保持して行う実験に適している。磁気浮上実験に関しては、本特集で詳細に説明される²⁶⁾。磁気浮上実験に対しては最大 4500 T²/m の磁気力場を発生できることが分かり、反磁性磁化率が小さな半導体などの磁気浮上状態での材料プロセッシングが行える可能性が実証された。

6. 今後の展望

強磁場を用いた物性研究は、物質材料開発の分野で世界のトップの座にある我が国の基盤となっている。ここでは、我が国が誇る独創的な巨大磁気抵抗効果や磁場誘起超伝導の研究、定常強磁場を応用した半導体などの新機能材料開発研究及び定常強磁場中でのスピン物性や ESR 研究などの展開が求められている。しかし、世界で建設されている膨大な電力を使用する定常強磁場施設に追従することは、電気代の高価な我が国の実情に合わない。さらに、環境や省エネルギーの問題にも配慮することが求められている。社会が求めるニーズに応えるために、我が国としては、超伝導技術を駆使した定常強磁場研究施設が必要である。今後、我が国独自の定常磁場発生に優れる省エネルギー型 35 T 小型冷凍機冷却ハイブリッドマグネットや、長時間運転に最適で X 線回折や中性子回折実験と組み合わせ可能な 20 T 小型冷凍機冷却超伝導マグネットの開発を行うことが我が国の戦略として重要である。

本センターの小型冷凍機冷却超伝導マグネットの開発では、線材開発が古河電気工業(株)と、18T-CSM が(株)

東芝と、それ以外の多くのマグネットが住友重機械工業(株)との共同研究で実施されており、関係者の皆様に感謝の意を表します。世界の定常強磁場状況調査は、本センターの小山助教授がまとめました。貴重な資料の準備をしていただき有り難うございます。

参考文献

- 1) P.L. Kapitza: "A method of producing strong magnetic fields," Proc. Roy. Soc. London **A105** (1924) 691-710
- 2) F. Bitter: "The design of powerful electromagnets: part IV. The new magnet laboratory at MIT," Rev. Sci. Instrum. **10** (1939) 373-381
- 3) P.E. Hanley: "The design of a 15. T hybrid magnet," Proc. Applied Superconductivity Conf., Annapolis (1972) 302
- 4) M.J. Leupold, J.R. Hale, Y. Iwasa, L.G. Rubin and R.J. Weggel: "30 tesla hybrid magnet facility at the Francis Bitter National Magnet Laboratory Massachusetts Institute of Technology," IEEE Trans. Magn. **MAG-17** (1981) 1779-1782
- 5) Y. Tanabe: "Apparatus for obtaining strong magnetic fields and its character," Bulletin of the Research Institute for Scientific Measurements, Tohoku University **2** (1952) 1 (in Japanese)
田辺彌佐久:「強磁場発生装置と其の特性に就いて」、東北大学科学計測研究所報告 **2** (1952) 1
- 6) Y. Muto, Y. Nakagawa, K. Noto, S. Miura, A. Hoshi, K. Watanabe, G. Kido, H. Ichikawa, T. Fujioka, Y. Sato, O. Osaki and H. Takano: "General survey of Tohoku hybrid magnet system," Sci. Rep. RITU **A33** (1986) 221-237
- 7) Y. Iwasa, M.G. Baker, J.B. Coffin, S.T. Hannahs, M.J. Leupold, E.J. McNiff and R.J. Weggel: "Operation of hybrid III as a facility magnet," IEEE Trans. Magn. **30** (1994) 2162-2163
- 8) T. Asano, K. Koyanagi, S. Matsumoto, T. Kiyoshi, M. Kosuge, M. Yuyama, A. Sato, H. Wada, M. Hoshino and Y. Dozono: "Resistive insert magnet for a 37.3 T hybrid magnet," Physica B **294-295** (2001) 635-638
- 9) M.D. Bird, S. Bole, I. Dixon, Y.M. Eyssa, B.J. Gao and H.J. Schneider-Muntau: "The 45 T hybrid insert: recent achievements," Physica B **294-295** (2001) 639-642
- 10) "Opportunities in High Magnetic Field Science," The National Academies Press, Washington, D.C. (2005)
- 11) H. Sakamoto, S. Endoh, Y. Nagasu, K. Wada, A. Kimura, S. Meguro, S. Awaji, K. Watanabe and M. Motokawa: "(Nb, Ti)₃Sn superconducting wire with CuNb reinforcing stabilizer," IEEE Trans. Appl. Supercond. **12** (2002) 1067-1070
- 12) K. Miyoshi, S. Endoh, S. Meguro, G. Nishijima, S. Awaji and K. Watanabe: "Development of high-strength Nb₃Sn conductor," IEEE Trans. Appl. Supercond. **14** (2004) 1004-1007
- 13) K. Watanabe, S. Awaji, N. Kobayashi, T. Fukase, M. Motokawa, K. Koyanagi, Y. Sumiyoshi, M. Urata, M. Tezuka, S. Nakayama and S. Murase: "Highly strengthened superconducting magnet for a 40 T compact hybrid magnet," Sci. Rep. RITU **A42** (1996) 403-405
- 14) K. Watanabe, S. Awaji, K. Takahashi, G. Nishijima, M. Motokawa, Y. Sasaki, Y. Ishikawa, K. Jikihara and J. Sakuraba: "Construction of the cryogen-free 23 T hybrid magnet," IEEE Trans. Appl. Supercond. **12** (2002) 678-681

- 15) A. Kimura, K. Miyoshi, S. Endo, O. Seki, S. Meguro, G. Nishijima, S. Awaji and K. Watanabe: "Development of high strength Nb₃Sn wire for a high field magnet Nb₃Sn wire reinforced with Cu-NbTi intermetallic compound," TEION KOGAKU **41** (2006) 328-333 (in Japanese)
木村昭夫, 三好一富, 遠藤 壮, 関 収, 目黒信一郎, 西島 元, 淡路 智, 渡辺和雄:「強磁場マグネット用高強度 Nb₃Sn 超電導線材の開発—Cu-NbTi 系化合物強化型 Nb₃Sn 超電導線—」低温工学 **41** (2006) 328-333
- 16) K. Watanabe, Y. Yamada, J. Sakuraba, F. Hata, C.K. Chong, T. Hasebe and M. Ishihara: "(Nb, Ti)₃Sn superconducting magnet operated at 11 K in vacuum using high-*T_c* (Bi, Pb)₂Sr₂Ca₂Cu₃O₁₀ current leads," Jpn. J. Appl. Phys. **32** (1993) L488- L490
- 17) K. Watanabe, S. Awaji, M. Motokawa, T. Kaneko, T. Seto, S. Murase, S. Shimamoto and T. Saito: "Quench behavior of Nb₃Sn wires in a cryocooled superconducting magnet," Adv. Cryo. Eng. **46** (2000) 951-956
- 18) K. Watanabe, Y. Watanabe, S. Awaji, M. Fujiwara, N. Kobayashi and T. Hasebe: "X-ray diffraction investigation in high fields at low temperature for Nd_{0.5}Sr_{0.5}MnO₃," Adv. Cryo. Eng. **44** (1998) 747-752
- 19) K. Watanabe, S. Awaji and K. Kimura: "Development of high field heat-treatment equipment and relevant applications," Jpn. J. Appl. Phys. **36** (1997) L673 -L675
- 20) K. Watanabe, S. Awaji, M. Motokawa, Y. Mikami, J. Sakuraba and K. Watazawa: "15 T cryocooled Nb₃Sn superconducting magnet with a 52 mm room temperature bore," Jpn. J. Appl. Phys. **37** (1998) L1148-L1150
- 21) G. Nishijima, S. Awaji, K. Watanabe, M. Kyoto, K. Tasaki, M. Takahashi, T. Kurusu, H. Takigami and S. Hanai: "Development of an 18 T cryocooled high-*T_c* superconducting magnet," TEION KOGAKU **41** (2006) 322-327 (in Japanese)
西島 元, 淡路 智, 渡辺和雄, 京藤 誠, 田崎賢司, 高橋政彦, 来栖 努, 瀧上浩幸, 花井 哲:「小型冷凍機冷却 18 T 高温超伝導マグネットの開発」、低温工学 **41** (2006) 322-327
- 22) K. Watanabe, G. Nishijima, S. Awaji, K. Takahashi, K. Koyama, M. Motokawa, M. Ishizuka, T. Hasebe and J. Sakuraba: "Advances in the first cryogen-free hybrid magnet," IEEE Trans. Appl. Supercond. **14** (2004) 388-392
- 23) S. Awaji, G. Nishijima, K. Watanabe, T. Ito, M. Ishizuka and J. Sakuraba: "Development of a large-bore cryocooled superconducting magnet for hybrid magnets," TEION KOGAKU **41** (2006) 310-315 (in Japanese)
淡路 智, 西島 元, 渡辺和雄, 伊藤智幸, 石塚正之, 櫻庭順二:「小型冷凍機冷却ハイブリッドマグネット用大口径超伝導マグネットの開発」、低温工学 **41** (2006) 310-315
- 24) S. Miura, K. Watanabe, S. Awaji, M. Motokawa and S. Ishikawa: "Development of large area and high-strength CuAg alloy plates for high-field bitter coils" J. Japan Inst. Metals **63** (1999) 1290-1294 (in Japanese)
三浦成人, 渡辺和雄, 淡路 智, 本河光博, 石川清一:「高磁場ビッターコイル用大型高強度銀銅板の開発」、日本金属学会誌 **63** (1999) 1290-1294
- 25) K. Takahashi, S. Awaji, Y. Sasaki, K. Koyama and K. Watanabe: "Design of an 8 MW water-cooled magnet for a 35 T hybrid magnet at the HFLSM," IEEE Trans. Appl. Supercond. **16** (2006) 977-980
- 26) K. Takahashi, S. Awaji, Y. Sasaki, K. Koyama and K. Watanabe: "Development of a cryocooled 34 T - 8 MW hybrid magnet and application in magneto-science," TEION KOGAKU **41** (2006) 316-321 (in Japanese)
高橋弘紀, 淡路 智, 佐々木嘉信, 小山佳一, 渡辺和雄:「小型冷凍機冷却 34 T - 8 MW ハイブリッドマグネットへの発展と磁気科学応用」、低温工学 **41** (2006) 316-321

渡 辺 和 雄

昭和 25 年 5 月 17 日生。昭和 50 年東北大学理学部物理学科卒業。昭和 52 年同大学院修士課程(物理学専攻)修了。真空冶金(株)勤務。昭和 56 年 4 月から東北大学金属材料研究所助手。講師, 助教授を経て平成 13 年 4 月から, 同研究所教授。低温工学協会, 応用物理学会, 日本金属学会, 応用磁気学会会員。工学博士。