

■9 群 (電子材料・デバイス) - 10 編 (真空・低温・強磁場技術)

3 章 強磁場

(執筆者: 木吉 司) [2011 年 10 月 受領]

■概要■

永久磁石の表面磁束密度は 1.5 T が上限であり, Halbach Cylinder (Magic Cylinder) のような磁気回路を別にすると, 実用上使用可能な磁場は 0.5 T 程度にとどまる. また, 鉄心の電磁石も鉄の飽和磁束密度 (2.15 T) を超えると効率が悪くなる. 「強磁場」の範囲について明確な定義はなく, 利用する立場によって捉え方は大きく異なるが, 磁場発生立場からは, 永久磁石や鉄心電磁石で対応困難な磁場領域とみなす場合が多い.

永久磁石, 鉄心電磁石で困難な磁場の発生には, 超伝導磁石, 水冷磁石, 超伝導磁石と水冷磁石を組み合わせたハイブリッド磁石, そしてパルス磁石が使用される. 水冷磁石では莫大な電力を消費するため, 長時間に渡る磁場の維持は現実的でない. しかし, 導体に抵抗がない超伝導磁石であれば, 電力消費を激減することが可能となり, 10 年といった長時間の運転も実施できる. 一方, 磁場の発生が短時間であれば, 使用するエネルギー (電力量) は少なくできる. このためパルス磁石は他の強磁場磁石より遙かに強い磁場を発生する.

一般に磁場は発生時間を短くするほど強い値が得られる. 図 1 に磁場と発生時間の概略の関係を示す. 超伝導磁石は抵抗がないため磁場の長時間発生に適しているが, 電流を変化すると交流損失が生じ, コイルの温度を維持することが困難となるため, 短時間での磁場発生は不得手である. ハイブリッド磁石は定常的な磁場の発生には最も有効な手段であるが, 短時間での磁場発生が困難という超伝導磁石の欠点と長時間の磁場発生が困難という水冷磁石の欠点も併せ持つ. このように強磁場磁石はそれぞれ得手不得手があり, 応用の観点からは, この得手不得手を把握し, 適切な磁石を選択することが重要である.

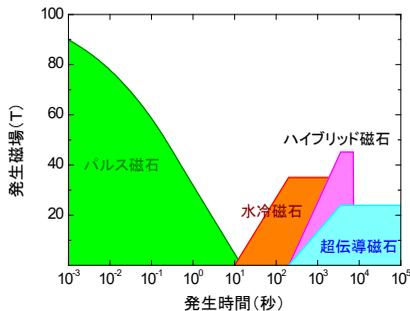


図 1 各種強磁場磁石の発生磁場と発生時間の関係

【本章の構成】

本章では以下について解説する.

- 3-1 超伝導磁石
- 3-2 水冷磁石・ハイブリッド磁石
- 3-3 パルス強磁場

■9 群-10 編-3 章

3-1 超伝導磁石

(執筆者：木吉 司) [2011 年 10 月 受領]

3-1-1 超伝導磁石の構成と概要

(1) 超伝導線材

ある種類の物質は温度を下げることで超伝導となる。超伝導状態では電気抵抗が零となるため、通常の電磁石と異なり、ジュール発熱を気にすることなく通電できる。超伝導状態は 3 つの臨界値（臨界温度、臨界磁場、臨界電流密度）で規定される超伝導臨界面の内側でしか生じない。磁石に通電すると電流に比例して磁場が発生するが、磁石を構成する超伝導線材にも磁場が印加される。電流を増加し続けると線材の超伝導臨界面に到達し、超伝導状態が失われる。これがその超伝導磁石の発生磁場の上限となる。通常は図 1・1 のように温度が一定の条件で磁場と臨界電流の関係をプロットする。現在実用化されている線材は数 100 A/mm^2 という非常に高い電流密度で磁場中でも通電することができ、永久磁石や鉄心電磁石では得られない強い磁場を発生することが可能である。

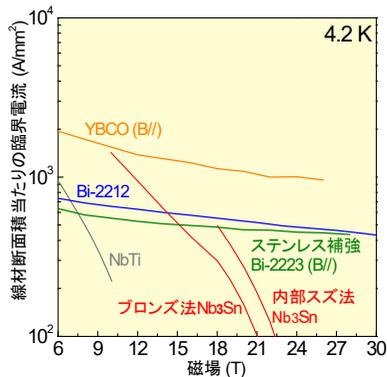


図 1・1 各種超伝導線材の 4.2 K での臨界電流密度の磁場依存性

臨界電流密度は臨界電流を線材全体の断面積で割った値。B//はテープ線材のテープ面が磁場に平行な場合での値を示しており、一般にテープ面に磁場が垂直に加わる方が臨界電流は小さくなる。

超伝導臨界面は物質によって、更に製造方法によっても異なる。例えば、最初に超伝導現象が確認された水銀の臨界温度が 4.15 K であるのに対して、酸化物系高温超伝導材料の一つである水銀系酸化物 ($\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+\delta}$) は 164 K (圧力 30 GPa 下) と非常に高い。実用としてはすべての臨界値が大きいたことが望ましいが、特に臨界電流密度は同じ材料でも製造方法により大きく異なるため、その改善のため多くの研究がなされている。

超伝導材料は丸、平角、テープなどの線材に加工され、コイルの形状に巻くことで磁石となる。現在、超伝導磁石に使用される線材は例外を除くと低温超伝導線材（金属系超伝導線材と称されることも多い）である NbTi と Nb₃Sn の 2 種類だけである。NbTi 線材は合金で機械的

性が優れているため最も広く使用されている。ただし、液体ヘリウムの沸点 (4.2 K) では 10 T で実用的な電流密度を得ることが難しいため、10 T 以上の磁場では Nb₃Sn 線材が使用される (後述するように運転温度を 2 K 程度に下げて NbTi 線材で 12 T 近傍の磁場まで発生することも行われる)。Nb₃Sn は金属間化合物で機械的に脆く、NbTi 線材に比べて高価なため、弱磁場部に NbTi 線材、強磁場部に Nb₃Sn 線材と組み合わせて 10 T 以上の磁石を構成するのが通常である。ピスマス系酸化物及びイットリウム系 (最近の線材ではイットリウムの代わりにガドリニウムなどが用いられるため、総称して希土類系と呼ばれることが多い) 酸化物に代表される高温超伝導材料は、臨界温度が高く 20 K 以上でも実用的な電流が流せ、また 4.2 K 近傍では強磁場で優れた特性を示すことから試作コイルの開発が進んでいる。また、Nb₃Al 線材や MgB₂ 線材もほぼ実用化の段階まで開発が達している。

超伝導線材は銅、アルミニウム、銀などの低抵抗材 (安定化材) と超伝導材料 (多くの場合はフィラメント形状) の複合材として製作されている。安定化材は超伝導材料の超伝導状態が破れて高抵抗となったときに電流をバイパスし、線材が焼損することを防ぐ役目を果たしている。

(2) 冷却方法

超伝導磁石は超伝導状態を維持するために低温で維持しなくてはならない。酸化物系超伝導線材を使用した一部の例外を除くと、4.2 K 近傍かそれ以下の温度で運転されている。超伝導磁石の冷却方法は現在 2 種類に大別される。液体ヘリウム中に磁石を入れて運転する浸漬冷却は古くからある方式で、現在でも殆どの磁石で採用されている。更に、ヘリウムが超流動状態となる λ 点 (2.17 K) 近傍まで冷却すると、金属系超伝導線材である NbTi 及び Nb₃Sn の場合、2 T 程度発生磁場の増加が可能となるため、20 T を超える磁場を発生する磁石では 2 K 程度まで温度を下げて運転することが一般的である。小型冷凍機を使用し、熱伝導で冷却する冷凍機伝導冷却は、酸化物系高温超伝導材料の発見を期に急速に進展した方式で、その実現は、酸化物系高温超伝導材料の電流リードへの適用と、極低温で大きな比熱を有する蓄冷材の開発によって可能となった。浸漬冷却と異なり液体ヘリウムなどの冷媒を補充する必要がないことが大きな利点である。

(3) 超伝導磁石の特徴

超伝導磁石の利点は、強い磁場を、大きな空間に、長期間にわたって発生できることである。超伝導で抵抗がないため、一旦通電した磁石は、冷却以外のコストをほぼ必要とせず、磁場を発生し続けることが可能である。特に永久電流モードは超伝導磁石ならではの運転方法であり、超伝導磁石を電源によって励磁した後、その両端を短絡する (通常は磁石と並列に接続された超伝導線材を励磁中はヒータで常伝導状態とし、磁石に規定電流が通電された後に超伝導状態に戻し短絡する) ことによって 100 年運転しても磁場の変化が 1% 以下という極めて安定した磁場の発生が可能である。これは永久磁石も含めて他の磁石では得られない利点である。

超伝導磁石の特徴としてクエンチという現象がある。これは何らかの原因で磁石の一部分の超伝導状態が破れて常伝導となり、その部分で発生した熱が周囲に伝播することで全体が常伝導となる現象である。これは極めて速く進行し、大型の磁石でも数秒程度で終了する。クエンチが生じると磁石に蓄積されていた磁気エネルギーが熱の形で放出されるため、液体ヘリウム浸漬冷却では蒸発ヘリウムガスの大気放出、冷凍機伝導冷却では磁石温度の上昇を生じる。特に蒸発し、磁石外部へ放出されたヘリウムガスは酸欠事故につながる危険性があるため、適切

に換気することが必要である。現在の超伝導磁石はこのクエンチが生じても致命的なダメージが生じないように設計されているが、過去に多くの線材の溶断、絶縁破壊などの事故が報告されており、無用なクエンチは可能な限り避けることが望ましい。

(4) 強磁場化の推移と今後の動向

図 1・2 に代表的な強磁場超伝導磁石の最高磁場の推移を示す。

超伝導磁石の発生磁場は主として 2 つの要因によって決定されている。一つは電磁力で、励磁時にコイルには径方向に拡大する力と軸方向に圧縮する力が加わる。径方向に拡大する力の結果、超伝導線材の長手方向にフープ応力が加わるが、現在のところ、この許容応力が 200 MPa 程度に抑えられている。フープ応力は、磁場、電流密度、巻線径に比例するため、フープ応力一定の条件では、強磁場化とともに磁石のサイズは加速度的に増加する。

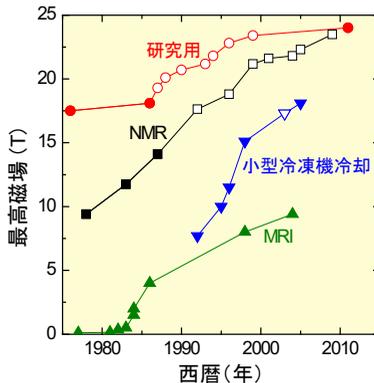


図 1・2 各種超伝導磁石の発生磁場の推移
白抜きは 2 K 近傍、それ以外は 4 K 近傍で達成されている。

もう一つの要因は強磁場領域での臨界電流密度である。NbTi 線材の場合、4.2 K で 10 T、2 K で 12 T を発生することは困難である。このことは MRI 磁石の最高磁場に大きく影響を与えている。Nb₃Sn 線材も 2 K で約 24 T が限界と考えられており、NMR 磁石の最高磁場に大きく影響を与えている。

これら制約を緩和する手段として酸化系高温超伝導線材が有望視されている。図 1・1 に示したように、ピスマス系及び希土類系超伝導線材は 30 T の磁場中でも実用的な臨界電流を得ることが可能である。更に、ハステロイ基板の希土類系超伝導テープ線材は 600 MPa 以上のフープ応力が加わっても超伝導特性に影響が殆どなく、強磁場中での臨界電流密度とフープ応力双方を向上できると期待されている。2011 年に達成された超伝導磁石の最高磁場 24.0 T は NbTi 及び Nb₃Sn コイルで 17.2 T を発生し、希土類系超伝導テープ線材の一つである GdBaCuO 線材を巻線した最内層コイルを励磁して達成された¹⁾。4.2 K での最高磁場の発生は 1986 年以来である。

NMR 磁石は要求される磁場の時間的安定度を満足するために臨界電流に対して十分な余裕 (6~7 割) を持った永久電流モードで運転されることから、研究用磁石と比較すると発生磁場の向上は更に困難であるが、23.4 T と極めて強い磁場まで製品化されている。これは強磁場

NMR に対する強い市場の要請に起因している。

小型冷凍機冷却型超伝導磁石も急速に発生磁場を増加しており、現在の最高磁場 18.1 T は最内層に Bi-2223 コイルを使用して得られている²⁾。

人体用 MRI 磁石は脳研究を主たる目的として強磁場機の開発が進められており、最高磁場は 9.4 T に到達し、超流動ヘリウムで冷却する 11.7 T 磁石の開発も開始されている³⁾。

3-1-2 NMR・MRI

超伝導磁石で最も市場に普及している製品は、核磁気共鳴 (Nuclear Magnetic Resonance: NMR) 現象を利用した NMR 分光計と MRI (Magnetic Resonance Imaging) である。磁場中において、核スピンを持つ原子核はスピンの方向が量子化され、エネルギー準位が分裂する。この状態で、外部磁場に対して垂直方向の振動磁場を照射すると、磁場 (分裂したエネルギー準位の差) に比例した周波数で共鳴が生じ、基準状態の原子核の一部が励起状態に移行する。この共鳴は原子核が感じる磁場に精度良く対応しており、化学結合による原子核周囲の電子分布の変化 (化学シフト) や原子核周囲の他の原子核のスピンの反転による微小な磁場の変化 (スピン結合) を検出できる。また、振動磁場の照射後、励起された原子核は時間とともに基準状態に戻る (緩和) が、この緩和過程も原子核の周囲の状態の影響を受ける (例えば人体の腫瘍と正常部位では緩和時間が異なる)。これらを利用することで、化学物質の構造解析や医療応用が可能となる。NMR が原則として試料全体に均一な磁場を印加して測定を実施するのに対して、MRI では均一な外部磁場に対して、測定時に x, y, z 方向の傾斜磁場を時間的に制御して加えることで、NMR 信号に位置情報を付与し、イメージングを行っている。

実用的な核種では ^1H が最も感度が高く、生体、高分子材料に含まれているので、測定の対象核種となることが多い。 ^1H の場合、2.35 T での共鳴周波数は 100 MHz で、共鳴周波数は磁場に正比例する。核磁気共鳴の弱点は感度が低いことであり、その解決の有力な手段が発生磁場の増加である。理論的には磁場の 3/2 乗に比例して感度が上昇するとされており、磁場の増加で画像の SN 比の改善、スペクトルの精細化ができる。図 1-2 に示したように、NMR スペクトロメータ、MRI とも最高磁場は超伝導技術の進展とともに増加している。磁場の強さが性能に大きく影響を与えることから、特に NMR スペクトロメータの場合、発生する外部磁場に対応する ^1H の核磁気共鳴周波数を用い、例えば 11.7 T の装置を 500 MHz の NMR スペクトロメータと呼称することが慣習的に行われている。MRI の最高磁場が 9.4 T であるのも ^1H の共鳴周波数 400 MHz に対応していることが理由の一つとなっている。

NMR スペクトロメータとは主として有機材料の構造解析に使用され、タンパク質の立体構造・機能解明を目的に開発が加速されたが、固体材料への適用も進展している。NMR は表面、界面やアモルファスに対しても適用できるため、X 線回折などの他の分析手段に対する相補的な役割を果たすことができる。

NMR 磁石は前述したように、NbTi 及び Nb_3Sn という金属系低温超伝導線材を使用して 1 GHz (23.5 T) まで到達している。この磁場は Nb_3Sn 線材で得られるほぼ上限であり、今後大幅な増加は期待できない。このため 30 T 以上の磁場中でも実用的な臨界電流が得られる酸化物系高温超伝導線材に期待が寄せられている。酸化物系超伝導線材の場合、永久電流モードで必要な磁場安定度を得ることが困難であった。しかし、Bi-2223 コイルを内層コイルとする 500 MHz NMR 磁石を安定度の優れた電源で駆動した結果として、従来の永久電流モードで運転さ

れる金属系超伝導線材を使用した NMR 磁石に匹敵する NMR 計測が可能であることが実証され、強磁場 NMR 磁石への酸化物系超伝導線材の適用が加速している⁴⁾。日本では図 1・3 に写真を示した 920 MHz NMR 磁石の最内層 Nb₃Sn コイルを Bi-2223 コイルと交換し、1.03 GHz (24.2 T) にアップグレードする計画が進行中であり、更に 1.2~1.3 GHz (28.2~30.5 T) を目標とする NMR 磁石の検討が世界各国で行われている。

MRI は放射線による被曝がない、骨や空気による影響を受けないため脳の内部や脊髄などを鮮明に診断できるなどの利点があり、国内では 5000 台以上が病院などで稼働している。現在は 1.5 T 程度を発生するソレノイド超伝導磁石を用いる機種と、オープン MRI と呼ばれる、診断中に閉塞感を感じないように配慮された機種に大別される。オープン型は永久磁石を用いた 0.3 T 程度の機種が主流であったが、現在では超伝導磁石による強磁場化が図られている。

これまでの MRI は殆ど解剖学的な形態計測 (1H の計測による水の状態分布) に使用されてきたが、今後は機能計測にも適用されると期待されており、この観点から強磁場 MRI の開発が進められている。化学シフトの情報を利用して代謝機能を解析する MRS (Magnetic Resonance Spectroscopy) では強磁場化に伴い、³¹P や ¹³C といった代謝に重要な役割を果たす核種の利用が可能となる。また、刺激に伴う脳内の血流変化を磁化率の変化として観測、マッピングし、脳の活動部位を推定する fMRI (functional MRI) では、強磁場化に伴う磁化率効果の増加も期待でき、脳機能の解明は、世界の強磁場 MRI の加速原因となっている。7 T の人体用 MRI は新潟大学脳研究所などに設置されている。米国では強磁場 MRI の導入が積極的に行われており、7~8 T の人体用 MRI はかなりの拠点機関に設置されつつある。現時点で最強磁場である 9.4 T (1H の共鳴周波数で 400 MHz) の MRI は University of Illinois や University of Minnesota に設置されている。フランスでも脳研究の拠点“NeuroSpin” (Intense Field Neuro-Imaging Center) が建設され、その一環として 11.7 T 人体用 MRI の開発が進められているが、NbTi コイルを超流動ヘリウム中で運転する設計である³⁾。



図 1・3 920 MHz NMR 磁石 (物質・材料研究機構)

3-1-3 小型冷凍機冷却型超伝導磁石

液体ヘリウムを使用しない小型冷凍機冷却型超伝導磁石 (無冷媒超伝導磁石、ヘリウムフリー超伝導磁石と呼称されることもある) は 1980 年代から検討されていたが、小型冷凍機の到達温度と銅製電流リードからの熱侵入の問題で実用には至らなかった。しかしながら、磁石への熱侵入量を 1 桁以上低減できる酸化物電流リードと 4 K まで冷却可能な GM (Gifford-McMahon) 小型冷凍機の開発によって、実用レベルの超伝導磁石の開発が可能となり、1990 年代に急速に強磁場化が進められた。

小型冷凍機冷却型磁石は、冷媒を使用しないため通常の実験室でも設置が容易であり、冷却・低温保持が自動化されているため、液体ヘリウムの取り扱いに不慣れなユーザーでも強磁場の実験が可能である。クエンチが生じても蒸発ヘリウムガスの突沸がなく安全であり、冷媒に浸漬されていないことから磁石の向きを必要に応じて回転させることもできる。更に、原則とし

て試料空間が室温で提供されているため、室温や高温での実験が容易であり、これまでの強磁場超伝導磁石の主たる用途であった超伝導と物性研究以外の分野で盛んに使用されている。冷媒の補充を必要としないことから長時間の測定に適しており、磁場中でのタンパク質の結晶成長など数週間を要する実験にも使用されている。

現在、小型冷凍機冷却型超伝導磁石として最も強い磁場を発生する磁石は、直径 52 mm の室温ボアに 18.1 T を発生している²⁾。コイルは 6 個で構成されており、最外層の NbTi コイル、中央部の 4 個の Nb₃Sn コイル、最内層の Bi-2223 コイルはそれぞれ別の電源で励磁される。冷却は 1 段の GM 冷凍機 2 台と GM-JT 冷凍機 (4.3 K での冷凍能力 4.3 W) によって行われる。今後も GdBaCuO 超伝導テープ線材などの酸化物系超伝導線材を適用することにより、発生磁場の増加が期待されるが、磁石の大型化とともに励磁時のコイル内温度の不均一性や電流リード・冷凍機への漏洩磁場の問題がより深刻となるので、液体ヘリウム冷却と比べると発生磁場の点では不利な条件にある。

小型冷凍機冷却型超伝導磁石は現在～13 T を直径 100 mm の室温ボアに発生し、なおかつ磁石の向きを変化できるタイプが標準品として市販されている。現状での冷凍機冷却型磁石の問題点として、GM 冷凍機の発生する振動とそれに伴う騒音があげられる。しかしながら、GM 冷凍機と比較して低振動のパルス管冷凍機の商品化が開始されており、振動・騒音の問題については大幅に軽減されると期待される。また、漏洩磁場の問題についても磁石の大型化に伴い、現在の MRI や NMR 磁石で採用されているアクティブシールドを取り入れることでの改善が期待される。

小型冷凍機は 20 K 以上では比較的大きな冷凍能力を得ることができる。このため、臨界温度の高い Bi 系酸化物線材と 20 K 冷凍機の組合せも試みられており、8.1 T を直径 200 mm の室温ボアに発生する冷凍機冷却型磁石が、Bi-2223 線材を使用して製作されている³⁾。

3-1-4 バルク超伝導磁石

GdBaCuO に代表される希土類系超伝導体は、液体窒素中で数 T まで強いピン止め力を有するバルク材が作られており、磁石への応用も図られている。バルク材に磁場を印加して磁束線を導入し、それを固定すると、永久磁石に類似した超伝導バルク磁石が実現でき、永久磁石と比較して遙かに高い表面磁束密度が得られる。これまでに、YBaCuO 円盤 (直径 26.5 mm、高さ 15 mm) を外部磁場中で 27 K まで冷却し超伝導状態とした後、外部磁場を下げることで 17.24 T を捕捉した例が報告されている⁶⁾。

バルク超伝導体の着磁方法としては、上述の磁場中でバルク超伝導体を冷却し、超伝導状態とした後、外部磁場を零まで減磁する磁場中冷却着磁法 (Field Cooled Magnetization) のほかにパルス着磁法 (Pulsed Field Magnetization) が行われている。磁場中冷却着磁法は捕捉磁場が高い利点があるが、着磁に外部磁場を印加するための磁石 (通常は大口徑を有する超伝導磁石) を必要とする点に問題がある。パルス着磁法は超伝導状態のバルク超伝導体にパルス磁場を印加する手法で、高価な超伝導磁石の代わりにパルス磁石を使用できる利点がある。磁場中冷却着磁法と比較すると捕捉磁場は低くなるが、複数回のパルス磁場を組み合わせることで捕捉磁場の向上が行われている。

バルク超伝導磁石は、超伝導状態が失われると磁束も失われてしまうため、着磁後は常時低温を保つ必要がある。また、室温で磁場を利用するためには、バルク超伝導体との間に断熱空

間を設ける必要があり、利用できる磁束密度の減少は避けられない。一方で、通電の必要がないため電流リードが不要となり、熱侵入が小さい。このため 1 段ステージの軽量な冷凍機を使用して、永久磁石より高い 3 T 程度の磁束密度を室温空間で得ることが可能である。マグネトロンスパッタ装置、磁気分離、ドラッグデリバリー、電力貯蔵用フライホイール、磁気浮上輸送システムや卓上型 NMR などへの応用が進められている。

バルク超伝導体が反磁性であることを利用した取り組みもなされている。バルク超伝導体の中空円筒に外部磁場を印加しても、円筒の周方向に遮蔽電流が流れ、円筒内部に磁束が入らないが、周方向の電流を抑制するように円筒にスリットなどを入れると、反磁性体であるバルク超伝導体を避けるように円筒内部に磁束が侵入する。スリットを入れ円筒内側面が囲む面積が中央部で最小となるように加工した GdBaCuO バルク超伝導体に、液体ヘリウム中で 2 T の外部磁場を印加することで、バルク超伝導体中央部の磁束密度が 5.6 T まで濃縮された結果が得られている⁷⁾。

■参考文献

- 1) プレスリリース, <http://www.nims.go.jp/news/press/2011/09/p201109070.html>
- 2) G. Nishijima, S. Awaji, S. Hanai, and K. Watanabe : "18.1 T cryocooled superconducting magnet with a Bi2223 high-Tc insert," *Fusion Eng. Des.*, vol.81, no.20-22, pp.2425-2432, 2006.
- 3) P. Veldine, et al. : "Iseult/INUMAC whole body 11.7 T MRI magnet status," *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, vol.20, no.3, pp.696-701, 2010.
- 4) Y. Yanagisawa, H. Nakagome, K. Temmei, M. Hamada, M. Yoshikawa, A. Otsuka, M. Hosono, T. Kiyoshi, M. Takahashi, T. Yamazaki, and H. Maeda : "Operation of a 500 MHz high temperature superconducting NMR: Towards an NMR spectrometer operating beyond 1 GHz," *J. Magn. Reson.*, vol.203, no.2, pp. 274-282, 2010.
- 5) K. Ohkura, T. Okazaki, and K. Sato : "Large HTS magnet made by improved DI-BSCCO tapes," *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, vol.18, no.2, pp.556-559, 2008.
- 6) M. Tomita and M. Murakami : "High-temperature superconductor bulk magnets that can trap magnetic fields of over 17 tesla at 29 K," *Nature*, vol.421, no.6922, pp.517-520, 2003.
- 7) T. Kiyoshi, S. Choi, S. Matsumoto, T. Asano, and D. Uglietti : "Magnetic flux concentrator using Gd-Ba-Cu-O bulk superconductors," *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, vol.19, no.3, pp.2174-2177, 2009.

■9 群-10 編-3 章

3-2 水冷磁石・ハイブリッド磁石

(執筆者：浅野稔久) [2011年10月 受領]

水冷磁石は定常強磁場を発生するために、強い電磁力に耐えうる機械的強度と同時に、大電流を流せる導電率の高い常伝導材料で構成された空芯コイルである。コイルに大電流を流して、超伝導磁石が発生する磁場よりも高い磁場を利用する目的で設置される。大電流によるコイルで発生するジュール熱を除去するため、コイル表面を直接、流水で冷却し、昇温した冷却水を冷却し、放熱するための大型施設と、大型の安定化した直流電源を維持運営する必要がある。稼働環境の材料強度の限界に対する余裕が小さく、コイル寿命は比較的短い。

発生磁場を高めるには大型の多重同心水冷磁石を作る。その際に、外側の水冷磁石の一部を超伝導磁石で置き換えハイブリッド磁石の構成とすることにより、更に強磁場をより効率良く発生できる。このための超伝導磁石は室温部分の口径が大きく、内側の水冷磁石からの擾乱などに対する安定性など、求められる性能もより高くなる。水冷磁石運転のための設備のほかに、超伝導磁石を冷却するための設備の維持が超伝導磁石の励磁用電源とともに必要である。定常強磁場を提供する施設と技術水準の維持と向上には、予算などの面で国家的運営と支援が重要である。

3-2-1 水冷磁石

水冷磁石は電源や冷却設備の初期設置費用が大きく、運転経費も大きいため世界的にも数は少ない。水冷磁石の発生磁場の上限の基本的な大枠を決定するのは、コイル導体に用いられる導体の特性とコイルの構造、コイル冷却設備の能力及び励磁運転に大電力を安定的に投入できる直流電源の定格電力である。発生磁場の向上は、水冷磁石の設計技術の改善、高機械的強度と高導電率を兼ね備えた材料の生産と加工技術の開発、及び電源や冷却施設の性能改善努力などの総合的な所産である。これらは、水冷磁石の更新のときの改善を取り入れた実際の設計と、コイルの製作と運転を通して実証される繰り返しのなかでノウハウの蓄積が行われている。更に、それぞれの定常強磁場発生施設では節目ごとには直流電源の増強と高度化が図られている。

水冷磁石は磁場の増減の掃引速度は大きくできるため、磁場の上下回数を多く必要とする利用には通常超伝導磁石やハイブリッド磁石の数倍以上の利用機会を提供することができる。更に、使用目的に特化した仕様の水冷磁石を同時に整備することにより従来不可能だった環境への定常強磁場の利用を広げることができる。

汎用構造の水冷磁石の単独運転で、室温空間に世界の最高級の磁場を提供する代表的な最先端の水冷磁石の現状は以下(表 2・1)のとおりである。コイルの形式はフロリダ (Tallahassee) とナイメーヘンは多重ビッター型、グルノーブルはポリヘリックス+ビッター型である。

表 2・1 単独水冷磁石の例

	室温内径 [mm]	発生磁磁場 [T]	励磁電力 [MW]
Tallahassee	32	36.2	19.7
	50	31	18.1
Grenoble	34	35	22.5
Nijmegen	32	33	17

コイルに投入できる最大電力の上限に対して発生できる最大の磁場 B は解析的に求められている¹⁾。制約の関係式には以下のようなものがある。最大電力を W 、コイルの、導体の抵抗率を ρ 、内径を a_1 、外径を a_2 、高さの半分を b としたとき、ピッター型水冷磁石の最大磁場は

$$B = G(a_1, a_2, b) \sqrt{\frac{W\lambda}{\rho a_1}}$$

で与えられる¹⁾。 G はコイル形状により決定する因子である。ピッター盤内部での電流密度は半径の逆数に比例する。内径での電流密度を ΔT 、内径での磁場 B_{in} 、外径での磁場 B_{out} 、ピッター盤内径、周方向にかかる張力 σ は

$$\sigma = j_0 a_1 (K_1 B_{in} + K_2 B_{out})$$

で与えられる。ここに、 K_1 、 K_2 はコイル形状と材料によって決まる定数である¹⁾。

水冷磁石の発生磁場を制限するコイル側の要素には、導体が耐えられる最大応力と運転時の冷却水が沸騰しない冷却面や水路の確保などがある。単位時間当たりの冷却水の流量を F [m^3/h] のとき、コイル入り口と出口の温度差は $\Delta T = 0.86 W/F$ 、導体壁と冷却水との温度差は熱伝達係数を h 、冷却面積を A とすると $\delta T = W/(Ah)$ で与えられ²⁾、(入り口温度) $+ \Delta T + \delta T$ が沸騰する温度より低くなければならない。

水冷磁石により定常強磁場を発生するには、強い電磁力に耐えるための機械的強度とともに、限りある運転電力で最大限の効率を達成するために、高い導電率を同時に兼ね備えた材料でコイルを製作する必要がある。このための材料には強加工した純銅や銅-ジルコニウム合金、アルミナ分散銅などの銅を主成分とした合金などが多く用いられる(表 2・2)。なかでも特に強磁場を発生する部分のコイルの材料として、銅銀合金材料が重要な役割を担っている。

表 2・2 コイル導体用銅合金の例

材 料	導電率 (%IACS)	熱伝導率	強 度
アルミナ分散銅	87 %	320 W/m/K	580 N/mm ²
OMCLISH	82 %	316 W/m/K	(0.2 %YS) > 520 N/mm ²
C15ISH	> 90 %	360 W/m/K	> 40 0N/mm ²
CuAg	72 %	300 W/m/K	(0.2 %YS) 800 N/mm ²

これらの材料によって現在製造される水冷磁石の主な形式には、ポリヘリックス型とピッター型的水冷磁石がある。

(1) ポリヘリックス型水冷磁石

コイル設計方面では電流密度の向上と応力の緩和、変形防止が重要事項である。応力の上限内で発生磁場を高めるには円筒コイルを同心多重分割が有効で、ヘリックスコイルを同心的に多重に配置した水冷磁石であるポリヘリックスコイルの場合、形状的にはより忠実にこの仕様を実現しやすい³⁾。

ポリヘリックス型水冷磁石は、円筒状となるヘリックスコイルの肉厚や軸方向のコイル 1 回転当たりの高さを変化させながら、円筒型導体から放電加工により製作されている。形状の自由度の大きさはコイル内での電流密度分布の調整に有利で、発生磁場に対する電力の効率向上を

追求しやすい。電流密度が高い部分は円筒状のコイルの軸方向の流水による外側と内側だけの冷却だけでなく、放電加工による螺旋状の隙間に設置する絶縁膜に半径方向の流水路となる隙間を設けることにより、更に冷却表面積を増大することが可能となって高い電流密度を実現している⁴⁾。強い電磁力による周方向への引っ張り力によるコイル直径の膨らみ防止には、**図 2・1(a)**のように軸方向に隣り合う巻き線となる導体同士が周方向にすべらないよう、滑らかな螺旋切れ目とせず部分的に高さを出入りを設け、上下同士が組みあい周方向の動きに対して固定されるように工夫されている⁵⁾。この結果、ピッター型水冷磁石の外層の内側に組み込んだポリヘリックス型水冷磁石は 35 テスラの磁場を発生している。

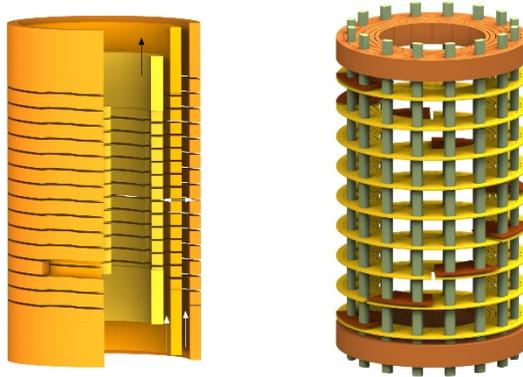


図 2・1 構造の例。ポリヘリックス型水冷磁石 (右) とピッター型水冷磁石 (左)

(2) ピッター型水冷磁石

ピッター型水冷磁石は冷却孔を持つ中空円盤の一か所に半径方向に切れ目を入れたピッター盤と、同じ冷却孔配置を持つ絶縁膜をピッター盤の切れ目と絶縁膜の配置を調整して、螺旋状の電流経路となるよう**図 2・1(b)**のように積層したものをボルトで締め付けて圧着接続する方式のコイルである。ピッター型水冷磁石には単層形式のほか、コイルへの電力分配や電磁力の調整のため、多重ピッター磁石の形式で同心配置した形式が製作される。

製作が比較的容易なことと、導体材料の性能向上と近年の研究によるピッター盤の設計法の進歩や積層法の工夫をはじめとする基本主要技術の進展の蓄積の結果、コイル内での従来以上の高電流密度と最大電磁応力の低減が実現可能となり、その後新たに作られたピッター型の単独運転用の水冷磁石や内挿水冷磁石を用いたハイブリッド磁石は定常強磁場記録を次々と更新してきた。主要な改善には、ピッター盤内の冷却孔の改善⁶⁾⁷⁾による電流密度の向上と応力緩和⁸⁾、ピッター盤の積み上げ方式の改良による低電流密度域低減による最大応力増加なしの磁場の向上などがある。世界記録は 36 テスラを超えている⁹⁾。

水冷磁石は基本的に超伝導磁石より遙かに寿命の短い消耗品であり、運転時間がある程度を過ぎると修理や新規更新が必要となる。この際のピッター型水冷磁石のもう一つの利点は、早めに異常を見つければ傷んだところのピッター盤だけを交換することが可能で、少なめの部品でコイルを修理できることである。

3-2-2 ハイブリッド磁石

超伝導状態で大電流を流して発生する磁場には上限があるため、それ以上の定常磁場を発生する一つの手法として水冷磁石がある。すべての磁場を水冷磁石だけで発生すると運転電力が膨大なものとなるため、外側の一部を超伝導磁石で置き換えたものがいわゆるハイブリッド磁石である。図 2・2 左に物質・材料研究機構のハイブリッド磁石本体の断面模式図を示す。超伝導磁石である程度広い室温空間に可能なだけの強磁場を発生しておき、この室温空間に空心の水冷磁石で更に強磁場を発生し、最高域の強度の定常磁場を発生する。このため超伝導磁石はかなり大型となり、大型冷凍設備が必要となるほか、運転の際の蓄積エネルギーも大きく、内挿水冷磁石からの擾乱に対して高い安定度を保つ必要があるなど、設計条件も厳しくなる。また、水冷磁石自体が分担する発生磁場も通常の単体の超伝導磁石の発生磁場を上回る程度になり、3-2-1 水冷磁石の項の表 2・1 の励磁電力の欄にあるように数 MW から 24 MW 程度の電力を必要とする。この電力による発熱を大量の冷却水を送り冷却する設備も必要である。このような大型施設は建設と運転、維持にかなりの経費がかかるためその数は自ずと限られる。用途にもよるが、汎用のハイブリッド磁石の現在の最高発生磁場はフロリダ NHMFL の 45 テスラである。

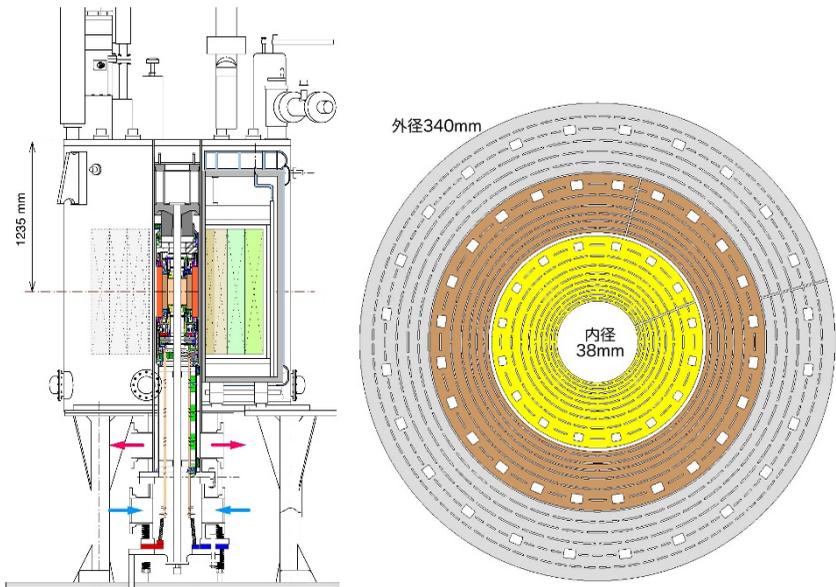


図 2・2 ハイブリッド磁石の断面模式図 (左) とその内挿水冷磁石のビッター盤 (右)

(1) 内挿水冷磁石励磁電源

超伝導磁石励磁用の低電圧の直流電源のほかに必要となるのが水冷磁石励磁用の大電流を安定的に出力できる直流電源である。単独水冷磁石の場合もほぼ同様な仕様が必要である。定格出力は 600 V 程度までで、数 kA から 30 kA 程度の、単一もしくは複数のユニットで構成される。負荷が超伝導磁石の場合、コイルの大きなインダクタンスによる電流のリップルの低減

が期待される。しかし、水冷磁石の場合、電源からみた負荷は抵抗が数十 $m\Omega$ 、インダクタンスはせいぜい mH 程度と小さいため、電流の雑音は磁場に現れやすい。磁場の質を上げるためにも水冷磁石の電源は高安定度と雑音低減に特に配慮した構成をとり、受動的なフィルタのほかにも能動的なフィルタなどが組み込まれている。

水冷磁石は消耗品であるため、最終的にはコイルに不具合が生じ、部分的に短絡が発生することになる。水冷磁石の破壊はハイブリッド磁石内の磁束密度の高い領域での磁束の急変動や磁束分布の対称性の破壊などを生じ、電磁応力の急激な増加などにより水冷磁石の破壊が加速されたりする。同時に、外側の超伝導磁石にも電磁力が及ぶ。磁束分布の急変は超伝導磁石に起電力を生じ、コイル電流が急増する場合がある。このような事態に備えて、早めに現象を認知して、必要な遮断が自動的に可能な仕組みを装備する必要がある。

(2) 水冷磁石冷却系

単独の水冷磁石にも同様の設備が必要である。水冷磁石はコイル内の冷却水路表面を直接冷却水が高速で流れ熱をコイルの外に運び出している。コイルと熱交換器を循環するこの水路には電気的な腐食を防ぐため脱イオン水を用いる。温度の上がった脱イオン水の熱は熱交換機を介して更に外側に移される。熱交換機には川などの自然の水が汲み上げられて冷却水として使われるほか、大きめの貯槽に蓄えられた市水を脱イオン水の熱交換器に循環させて熱を運び去る。市水の貯槽は別の熱交換器を介して大型冷凍機で冷却される。冷凍機を用いる場合は更に放熱用の冷却塔などが必要となるが、磁石冷却能力に季節の変動を受けなくなる。夏期の自然水の水温が高い場所で年間を通した運転を予定するところでは大型冷凍機が必要となる。水冷磁石などから脱落した微小片が冷却孔をふさいだり圧送ポンプを傷めたりしないようメッシュフィルタが水路に取り付けられる。

(3) 超伝導磁石と電源

3-1 節で述べられている超伝導磁石の設計上の条件に付加される事項としては、水冷磁石の損傷やの遮断により発生する磁束分布の急激な変化により、コイル電流の増加やコイルの温度上昇を引き起こす危険性ははらんでいる。水冷磁石には水冷磁石の電源の雑音は現れやすく、相互インダクタンスに応じて超伝導磁石にもノイズを引き起こす。これらに対して線材の安定化の強化や超伝導磁石の保護が必要となる。また、水冷磁石の異常から生じる応力は水冷磁石と超伝導磁石の間に力を及ぼし、最終的には低温容器を通して床に固定されるため、低温容器には、これらの電磁力に耐える強度も必要である。

内挿水冷磁石は材料特性に対する設計上の余裕が少なく、寿命は長くはなく、運転中に突然壊れることもある。水冷磁石に異常が生じたとき被害を最小限にするため、水冷磁石の電源は遅滞無く遮断される。 I_W を遮断前の水冷磁石の通電電流、 M を超伝導磁石と水冷磁石の相互インダクタンス、 L が超伝導磁石のインダクタンスであるとき、超伝導磁石電流の増加分 ΔI は超伝導磁石の抵抗成分が無視できるものとする $\Delta I = IW/(ML)$ と表せる。運転電流と ΔI の和が臨界電流を越えないようにすることでクエンチには至らない。しかし、相互インダクタンスは非常に大きいので、水冷磁石からの擾乱による影響は大きく、超伝導磁石を励磁中の内挿水冷磁石の掃引は単独励磁のときと比べてかなり遅くする必要がある。水冷磁石の外径より外で超伝導磁石に及ぶ水冷磁石の磁場は、水冷磁石の遮断とともに消失し超伝導磁石の発熱を引き起こす。水冷磁石の遮断時の減衰時定数を τ_W 、超伝導体の損失定数を τ_S 、水冷磁石からの漏洩磁場を ΔB として、超伝導体の断面積を S とすると、単位長さ当たりに生じる熱量 W は

$$W = \frac{(\Delta B)^2}{2\mu_0} \cdot \frac{\tau_S}{\tau_S + \tau_W} \cdot S$$

となる τ_W は水冷磁石の抵抗とインダクタンスで決まり、 τ_S は超伝導体のフィラメントの時定数でほぼ決定され、導体横方向の抵抗、銅比、フィラメントのツイストピッチなどで決まる。冷却方式によって閾値が異なるが、導体の温度が多少上昇しても暴走しないで元の状態に回復する範囲内に収まるような余裕を確保する⁸⁾。

3-2-3 世界の定常強磁場施設

現在、超伝導磁石と水冷磁石を組み合わせて強磁場を定常的に発生する主な施設には以下(表 2・3)のようなものがある。詳細はホームページを参照されたい^{11)~13)}。括弧付きの到達磁場は建設中または予定の数値である。いずれの施設においても、利用目的に応じた各種周辺装置や、付帯設備の整備がされており、または予定されていて、外部の利用も受け付けている。そのため、設備の仕様や磁場分布の較正結果なども開示されている。

表 2・3 世界の代表的な定常磁場施設

定常強磁場施設 所在地	ハイブリッド磁石		水冷磁石		施設電力 [MW]
	B_{\max} [T]	室温直径	B_{\max} [T]	室温直径	
Tallahassee (米)	45.2	32 mmφ	36.2	32 mmφ	56
Tsukub (日)	37.8	32mmφ	29	32 mmφ	15
	35.5	52 mmφ			
Sendai (日)	31.1	32mmφ	19.1	32 mmφ	8
	27.5	32mmφ無冷媒			
Grenoble (仏)	(42	34 mmφ)	35	34 mmφ	24
			(37	34 mmφ)	
Nijmegen (蘭)	30	50 mmφ	33	32 mmφ	20
	(45	32 mmφ)			
Hefei (中)	(40	32 mmφ)	(33	32 mmφ)	20
			(25	50 mmφ)	

現在稼働中のハイブリッド磁石施設を水冷磁石を含めて概観すると、最大規模の設備整備を進めているのは米国フロリダの国立強磁場研究所である。32 mm の室温空間に 45 T を提供するハイブリッドマグネットは 25 ppm/mm の均一度を持ち、水冷磁石のみで 36.2 T の記録を打ち出した水冷磁石をはじめ、室温内径 32 mm や 50 mm などの各種汎用水冷磁石のほか、20 T、1 ppm/mm 均質磁場水冷磁石など特徴ある水冷磁石群を形成している。更に、特徴ある定常強磁場磁石として、NMR、凝縮系物理学、生物学及び化学などの用途に、内挿水冷磁石と外層の超伝導磁石を直列に接続し、1 つの電源で励磁して、40 mm の室温空間に 36 T を直径 10 mm の球面内に 1 ppm の均一度で発生するハイブリッド磁石を開発中である。冷却水容量の増大と変圧器の交換を含め電源を定格出力 56 MW (14 MW×4 台) に増強し、また、水冷磁石の連続運転時間の長時間化も含めた冷却設備の増強を行っている。将来的には、この電源の 2 台並列運転による 28 MW 運転で励磁し、ハイブリッド磁石で 50 T の発生を、また、室温内径 32 mm の空間に水冷磁石で 40 T 目指している。

仙台にはハイブリッド磁石用に無冷媒超伝導磁石が開発され、水冷磁石を組み込みハイブリッド磁石として稼働しており、液体ヘリウムの供給なしに連続運転が可能である。つくばでは

水冷磁石の運転電力が小さめであるが、外層超伝導磁石の分担磁場が高く、直径 32 mm の室温空間に 37.8 T、直径 52 mm の室温空間に 35.5 T を発生している。最近、電源の安定化の改良と冷却系電力と励磁電力のピークがずらせるように、間接冷却熱交換器などを取り入れ、契約電力の低減を図った。均一磁場空間の広めの組合せも実現したほか¹⁰⁾、現在、外層超伝導磁石による 14 T と合わせて、15 MW で直径 32 mm の室温空間に 40 T を発生するために、水冷磁石の設計をし、ビッター盤を打ち抜くための金型の製作を終え、銅銀合金導体¹¹⁾ 打ち抜きの手待ち状態にある。

オランダのナイメーヘンでは直径 32 mm または 50 mm の室温空間に 30T-33 を発生するビッター型水冷磁石を現在 4 台稼働させている。更に、直径 32 mm の室温空間に 45 T を発生するハイブリッド磁石を計画中である。フランスのグルノーブルのハイブリッドマグネットは現在開発中で、ビッターコイルと軸流方向と半径方向の冷却水路方式のポリヘリックスコイルを組み合わせた水冷コイルにより、2012 年までに 37 T を発生し、並行して開発中の 8.5 T (室温空間直径 800 mm) 外層超伝導磁石と組み合わせて 42.5 T のハイブリッド磁石の完成を目指している。中国では 40 T を発生するハイブリッド磁石を建設中である。

■参考文献

- 1) D.B. Montgomery : "Solenoid Magnet Design," Robert E. Krieger Publishing, Florida, pp.1-130, 1980.
- 2) 例えば、星 彰、武藤芳雄 : 核融合研究, 第 53 巻, pp.101-122, 1985.
- 3) H.-J. Schneider-Muntau and S. Prestemon : "Poly-Bitter Magnets," IEEE Trans. Mag., vol.28, no.1, pp.486-488, 1996.
- 4) F. Debray, W. Joss, and F. Rubb : "First tests of the 27 T, 34 mm bore, radially cooled magnet," Proceedings of the fifteenth international conference on magnet technology MT-15 Proceedings Science Press, pp.676-679, 1997.
- 5) C. Auternaud, F. Debray, F. DiChiaro, T. Disparti, J. Dumas, M. Kamke, S. Labbé-Lavigne, J. Matera, R. Pfister, C. Trophime, E. Verney, N. Vidal, and J.M. Tudela (SERAS, CNRS, Grenoble, France) : "Towards a homogeneous magnet," Grenoble High Magnetic Field Laboratory Annual report, p.104, 2008.
- 6) R. Weggel : MIT Annual Report 90, Jul. 1980-Jun. 1981.
- 7) Y. Nakagawa : IEEE Trans. Mag., MAG-17, pp.1786-1789, 1981.
- 8) B.J. Gao, H.-J. Schneider-Muntau, Y.M. Eyssa, and M.D. Bird : IEEE Trans. Mag., MAG-32, pp.2503-2506, 1996.
- 9) J. Chen, M.D. Bird, S. Bole, S. Gundlach, J. O'Reilly, and Y.L. Viouchkov : "Resistive Solenoid Development at the NHMFL," IEEE Trans. on Supercond., vol.20, no.3, p.636, Jun. 2010.
- 10) T. Asano, H. Yoshioka, S. Matsumoto, and T. Kiyoshi : "Improvement in field uniformity of the hybrid magnet," JOURNAL OF PHYSICS CONFERENCE SERIES, vol.51, pp.587-590, 2007.
- 11) Y. Sakai, K. Inoue, and H. Maeda : "High-Strength and High-Conductivity Cu-Ag Alloy Sheets: New Promising Conductor for High-Field Bitter Coils," IEEE Trans. Magn., vol.30, pp.2114-2117, 1994.
- 12) アメリカ合衆国国立強磁場研究所, <http://www.magnet.fsu.edu/>
- 13) グルノーブル強磁場研究所, <http://ghmfl.grenoble.cnrs.fr/>
- 14) ナイメーヘン強磁場研究所, <http://www.ru.nl/hfml/>
- 15) 中国科学院強磁場科学中心, <http://www.hmfl.ac.cn/>
- 16) 東北大学金属材料研究所, <http://www.hflsm.imr.tohoku.ac.jp/>
- 17) 独立行政法人 物質・材料研究機構, <http://www.nims.go.jp/TML/>