

解説

実験室で使える新しい高温超伝導技術

小川 雄一, 三戸 利行¹⁾, 柳 長門¹⁾

東京大学高温プラズマ研究センター, ¹⁾核融合科学研究所

(原稿受付: 2006年9月29日)

液体ヘリウム温度まで冷却する必要のない高温超伝導線材は、低温超伝導線材に比べて取り扱いが比較的簡単であるので、講座レベルの実験装置でも導入しやすい。しかも近年、BSCCO や YBCO などの高温超伝導線材の進歩は著しく、コイル化が可能な長尺ケーブルが製造できるようになった。一方、GM 冷凍機を中心とした低温化技術も目覚しく、比較的簡便に極低温状態が得られるようになった。まず、これら高温超伝導線材や冷凍機技術の進歩をまとめた。このような高温超伝導線材や低温技術の進展を踏まえ、高温超伝導線材を用いたプラズマ実験用の内部導体装置 Mini-RT/RT-1 が建設された。本装置では、低温ヘリウムガス用のトランスファーチューブやチャッキ弁、着脱式の電流リード、高温超伝導線材を用いた永久電流スイッチなどが開発された。ここではこれらの要素技術を紹介するとともに、Mini-RT/RT-1 装置で達成された高温超伝導コイルの総合性能についてまとめた。最後に、ここで開発された要素技術は、講座レベルの実験装置にも応用可能であり、様々な研究へと活用されることを期待する。

Keywords:

high temperature superconductor, BSCCO, YBCO, cryocooler, persistent current switch, magnetic levitation

1. はじめに

一般的に、低温超伝導コイルは、液体ヘリウムの調達や冷凍機設備の運転などの問題があり、それを専門とする研究室や研究所などでないと導入しにくかった。それが高温超伝導材料の発見により、超伝導コイルを数十 K レベルに冷却するだけで利用できるようになった。最近では 1 km を超える長尺のビスマス系高温超伝導線材が量産され、劣化の少ないコイル化技術も確立してきている。また取り扱いが非常に簡便な GM 冷凍機などの小型冷凍機が格段に進歩してきており、高温超伝導コイルを講座レベルの研究室でも導入しやすくなった。本解説記事では、高温超伝導コイルをプラズマ閉じ込め実験装置に応用した磁気浮上内部導体装置 Mini-RT [1, 2] および RT-1 [3] を中心として、高温超伝導線材の開発状況、小型冷凍機や各種コンポーネントの開発、さらに色々な実験装置や計測機器等への応用について紹介する。

最初に、ビスマス系およびイットリウム系の高温超伝導線材の現状を概観し、将来的な開発の方向性を紹介する。次に、ヘリウムフリーを謳い文句に近年著しく進歩してきている小型 GM 冷凍機について紹介し、併せて高温超伝導コイルを数十 K に冷やすための冷却方式についても吟味する。Mini-RT/RT-1 装置では、真空容器内に設置された高温超伝導コイルを 20 K まで冷却し、コイル電流を励磁し、長時間・高精度で磁気浮上させた上でプラズマ実験を行う必要があった。このためには、高温超伝導コイルの製作のみならず、冷却や励磁において、様々な工夫がなされている。

Advanced Technologies Related to a High Temperature Superconductor for Small Laboratory Experiments

OGAWA Yuichi, MITO Toshiyuki and YANAGI Nagato

corresponding author's e-mail: ogawa@ppl.k.u-tokyo.ac.jp

ここでの経験と実績は、他のプラズマ実験装置や他分野への応用を考える上で大変参考になると思われるので、その詳細を紹介する。因みに MIT/Columbia 大学の共同プロジェクトとして最近、建設された磁気浮上内部導体装置 LDX (Levitated Dipole eXperiment) [4] では、浮上コイルではなく引上げコイルに高温超伝導コイルを採用している。また高温超伝導コイルを反磁性ループとしてプラズマ計測用に活用しようという提案もあり、高温超伝導コイルの多様な応用例の一つとして紹介する。

2. 高温超伝導線材の開発

2.1 ビスマス系線材の開発

高温超伝導材料は、1986年に発見された銅酸化物（セラミック）で超伝導特性を有する材料であり、従来の金属系低温超伝導材料が持っていた臨界温度の記録を大幅に塗り替え、いわゆる超伝導フィーバーを巻き起こした。金属系低温超伝導材料を用いるためには、液体ヘリウムによる冷却が必要不可欠であり、特殊な大型研究用途やごく一部の民生応用以外には超伝導の実応用という観点から難しいものがある。しかし高温超伝導材料はその高い臨界温度のために液体窒素を用いた冷却も可能であり、発見から20年を経た現在、超伝導の実用化に向けて大きな原動力となるに至っている。次節で述べるように、最近では、小型の GM 冷凍機の性能が格段に向上してきたこともあり、液体ヘリウムや液体窒素を用いない無冷媒冷凍方式の超伝導機器の開発も進められるようになってきている。また、特に低温では

臨界磁場が金属系超伝導材料と比べて圧倒的に高いことや、併せて、臨界電流密度も高く取れること（図1参照）[5,6]から、高磁場コイルへの適用に有望と考えられる。

高温超伝導材料のうち、ビスマス系材料は、1987年に日本で発見されたものであり[7]、現在、もっとも実用化が進んでいる。Bi₂Sr₂CaCu₂O₈の組成で“Bi-2212”と呼ばれる低温相と、Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O₁₀の組成で“Bi-2223”と呼ばれる高温相の2種類がある。これらに対して、“BSCCO（ビスコ）”という総称もある。ビスマス系材料は、結晶構造に起因した強い2次元異方性を有しているため、高い臨界電流密度を実現するには、結晶のab面が揃ったc軸配向組織とすることが必須である。そこで、原料粉末を銀パイプに充填した後、線引き加工するパウダーインチューブ（PIT）法と呼ばれる製法が主に用いられる。チューブは圧延加工によってテープ状として、銀シースの中にフィラメントがリボン状に配置された多芯線とする加工が確立されている。

ビスマス系材料のうち、Bi-2223については、臨界温度が110 Kと高く、液体窒素による使用が十分に可能であり、すでに世界の数社において単長で1 kmを超える線材の製造が可能となっている[8,9]。現在製造が行われているのは、いずれも幅が4 mm程度、厚みが0.2~0.3 mmのテープ状である（図2）。後に述べるイットリウム系線材と対比して、“第1世代高温超伝導線材”と呼ばれ、大電力輸送用の超伝導ケーブルや変圧器、モータなど、各種の民生用電力機器への応用に期待が持たれ、すでに多くのプロトタイプが試作されるに至っている。単線の臨界電流は、液体窒素温度77 K、自己磁場において、200 Aを超えるものが出現している。シース材としては、当初は純銀が用いられたが、その後、少量の第二元素（マンガン等）を添加した銀合金が用いられるようになり、これによって強度が大幅に向上した。最近では、加圧焼結法の適用によって空隙を大幅に低減させる技術が開発されたり、銀シースの表面にステンレス箔を付加することで強度を上げたりする工夫なども行われ、液体窒素温度における引張応力として300 MPa近いレベルまで到達している。これにより、実用線材として十分なものとなっている。

こうした線材を用いて、本稿でも説明を行っている Mini-RT 装置や RT-1 装置の磁気浮上超伝導コイルの巻線も行われ、良好な特性を得ることができている。また、JRが開発を進めている磁気浮上式リニアモーターカー MAGLEV の車両搭載コイルにもこの線材で巻かれた高温超伝導コイルが用いられ、実際の走行試験において従来のニオブチタンコイルと遜色のない結果が出るに至っている。一方、Bi-2223 線材を用いた超伝導送電ケーブルについては、世界中で精力的に開発が進められている。実際、数百 m 長の超伝導ケーブルの試作とそれを用いたフィールド試験も実施されている[10]。

そのほか、この線材の大型超伝導機器への応用としては、常温の外部電源から超伝導コイルに接続するためのインターフェースである電流リードに適用され、すでに80 kA級のものが開発されている。また、小型の電流リードについては、すでに実用化され市販されている。この線材

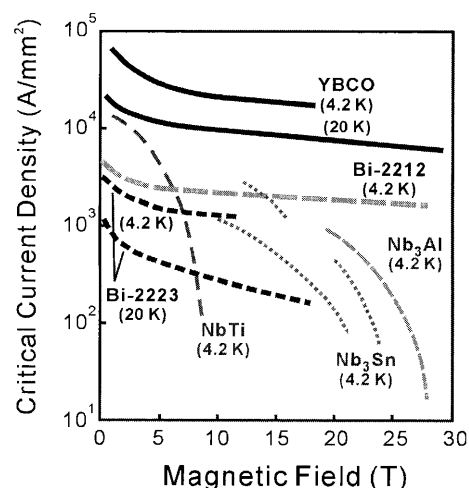


図1 各種超伝導線材の臨界電流特性[5,6]。

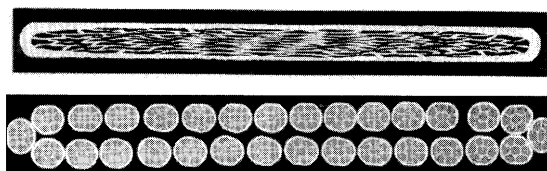


図2 (上段)Bi-2223 テープ線材(幅 4.1 mm, 厚み 0.25 mm;住友電気工業(株)提供)と(下段)Bi-2212 ラザフォードケーブル(幅 13.5 mm, 厚み 1.6 mm;昭和電線ケーブルシステム(株)提供)の断面。

について、今後は、さらなる組織改善による臨界電流密度の向上や、高強度化、コストの低減等の改良が見込まれている。また、フィラメント間にツイスト加工を施したり、高抵抗バリア層を添加したりすることによって交流損失を大幅に低減し、商用周波数以上の領域までもカバーする幅広い超伝導機器への適用をめざして、さらなる発展が期待されている。

一方、もうひとつのビスマス系線材である Bi-2212 は、Bi-2223 に比べて臨界温度は低いものの、低温において磁場中における臨界電流密度が高いのが特長である。そのため、高磁場を発生するコイルへの応用に期待が持たれており、超伝導磁気エネルギー貯蔵装置(SMES)や NMR, MRI などへの適用が進められている。特に、PIT 法で作成された線材をさらに銀合金パイプに挿入して二重に多芯化する製法(ダブルスタック法)なども開発されており、大電流容量化に適している。この線材の場合は、丸線形状でも高い臨界電流密度を得られていることは工学的に重要であり、テープ形状に限定されている Bi-2223 線材と比べると、大電流容量の大型導体を製造する観点で有望である[11]。このため、金属系超伝導導体で開発された技術が適用でき、平角形状の成型燃線(ラザフォードケーブル)が試作されている(図2)。また、3本ずつのケーブルを数十本から数百本撚り合わせたバンドルをステンレス等のジャケットに納めたケーブルインコンジット導体も設計可能であり、10 kA 級の核融合用大型導体の試作開発も行われている[12]。これらの成果を受けて、核融合用大型超伝導マグネットに関しても設計例(導体最大経験磁場 18 T, 導体電

流 180 kA) が提示されるに至っている [13].

2.2 イットリウム系線材の開発

上述のようにビスマス系銀シース線材については、すでに長尺線材の開発に成功するとともに、様々な応用機器が試作されている。しかしながら、特に液体窒素で用いる高温領域では磁場による特性低下が大きいと、実用的には 20 K 程度の低温領域で使用されることが多い。これに対し、希土類 (RE) 系の超伝導材料は、磁場中での臨界電流特性に優れており、コイルとしても使用が可能であるため、将来有望である。希土類元素としてイットリウムを用いた $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ は、YBCO、あるいは Y123 と表記され、“イットリウム系”あるいは“Y系”と称される。これは、1987年2月に米国で発見された酸化物で [14]、90 K の臨界電流を持ち、液体窒素温度より高い温度でも使用可能な本格的な高温超伝導材料として最初に見つかったものであるとともに、現在でも本命の材料となっている。

イットリウム系超伝導材料の特徴として磁場の印加方向に対する特性の大きな異方性が挙げられる。臨界電流特性が結晶方位によって大きく異なることから、結晶構造をできるだけ揃えるための配向制御が必要になる。特に、ビスマス系とは異なり、c 軸配向のみならず、a-b 面内の配向 (二軸配向) も実現する必要がある。このため、線材は、ニッケルやハステロイ、銀などの金属テープの上に薄膜状の結晶を成長させて作られることになり、“薄膜線材 (コートイッドコンダクター)”とも呼ばれる。イットリウム系線材の一般的な構成を図 3 に示す。

YBCO 層を面内配向させるためには、主に次の二つの方法がある。一つは、基板である金属テープを配向させる方法であり、もう一方は無配向の金属テープ上に配向中間層を成膜する方法である。いずれも、まずテンプレートとなる配向組織を作り、その上に、YBCO を成長させるという方式をとっている。前者の方法では、ニッケルや銀などの金属テープに 90% 以上の強加工を施し、その後に適切な再結晶化熱処理を与えることで面内配向した基材 RABiTS (Rolling Assisted Biaxially Textured Substrate) が得られる [15]。基材が銀の場合はその上に YBCO 層を成長させることも可能であるが、ニッケル等の金属の場合には、もうひとつの方法と同様にセラミックスの中間層 (バッファ層) が必要である。中間層を配向させる方法として、代表的なものにイオンビームアシスト蒸着法 IBAD (Ion Beam As-

sisted Deposition) がある。この方法では、スパッタによって成膜する際に、特定の角度 (55°) からイオンビームを照射することにより無配向基板の上に二軸配向した中間層を効率よく成膜することができる [16]。中間層としては、YSZ や GZO が用いられる。この方法によって成膜された中間層は、非常に高い配向組織となり、結晶粒も細かく長尺化に適した特性を示す。中間層の上には、PLD (Pulse Laser Deposition) を用いて YBCO 層が成膜される。YBCO 層の厚みは、現在のところ、1-2 μm となっており、臨界電流密度としては、長尺線材においても、77 K、自己磁場において数万 A/mm^2 が達成されている。これにより、10 mm 幅のテープとして、臨界電流 250 A に至る線材も作製されている。PLD 法をより高速に行うためには、マルチターン・マルチプルームと呼ばれる方法も開発され、成膜の均一化や成膜領域の拡大により線材作製が効率的に行えるようになり、長さ 200 m を超える線材が作製されるようになっていく。IBAD 中間層については、製造速度が遅いことが課題である。そこで、中間層に対しても PLD を用いてさらに CeO_2 層 (キャップ層) を成膜することで、高速に高配向中間層を得る手法も開発されている。

一方、PLD 法よりも高速に YBCO 層を形成する手法としては、金属有機堆積法 (MOD; Metal Organic Deposition) や金属有機化学気相堆積法 (MOCVD; Metal Organic Chemical Vapor Deposition) がある。MOD 法では、有機金属塩を溶媒に溶解して基板上へ塗布して焼成することにより超伝導層を形成する。このため、真空容器を必要とせず、高速化とともに低コスト化が期待される。原料にトリフルオロ酢酸塩を用いたプロセス (TFA-MOD 法) では、高い配向組織が得られる [17]。最近では、マルチコート法と呼ばれる複数回塗布と仮焼を繰り返した後に YBCO 層形成のための熱処理を加える方法が考案され、熱処理条件の適正化を行うことにより臨界電流密度を低下させることなく厚膜化に成功している。

上述のように、イットリウム系線材はビスマス系線材と比べて、臨界電流密度が格段に高く、また、温度が高い状態でも磁場中において臨界電流密度が急激には低下しないため、磁場を発生するコイルとして用いることにも有望である。例えば、小型で大出力の超伝導モータやトランスなども可能となるため、輸送機器等への適用の期待も大きい。また、現在のものよりもさらに効率の高い超伝導送電ケーブルの製作にも期待が持てる。このため、イットリウム系線材は、ビスマス系線材と対比して“第2世代高温超伝導線材”と呼ばれ、各国で開発競争に凌ぎが削られている。今後、交流損失や安定性について、十分な検討が進められる必要がある。コイルに用いられる場合には、コイル内で導体への磁場の印加角度が変化するため特性が変化し、十分な検討が必要とされる。大型の核融合装置用超伝導コイルへの適用を考えて、イットリウム系線材を集合、および、転移した導体が試作されている [18]。また、イットリウム系線材を用いた大電流容量導体を想定した核融合炉の設計も一部行われている [19]。

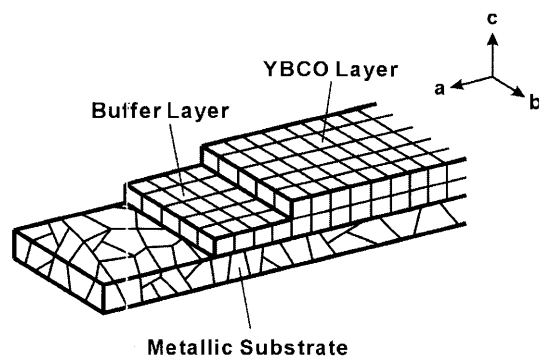


図3 YBCO テープの断面組成。

3. 小型冷凍機とコイル冷却方式

3.1 小型冷凍機の進歩

超伝導の一般への応用を妨げている要因として、冷却に伴う煩雑さが占める割合は大きい。スイッチさえ入れれば手軽に極低温までの冷却が可能な小型冷凍機の出現は、超伝導応用の重要なブレークスルーとなっている[20, 21]。

ここでは、現在主流となっている小型冷凍機として、GM (ギフォード・マクマホン) 冷凍機の動作原理を説明する。GM 冷凍機は、1959年にギフォードとマクマホンによって発明された蓄冷式熱交換器を使用する冷凍機で、図4に示すように、圧縮機、蓄冷器、膨張機と切り替え弁で構成される。圧縮機で圧縮した冷媒ガスを膨張機によって膨張させて冷却を行うことは、一般のクーラーや冷蔵庫と同様の原理である。ただし、圧縮機と膨張機の間に粒状またはメッシュ状に加工した蓄冷材を充填した蓄冷方式の熱交換器がある点が極低温冷凍機の特徴となっている。常温で圧縮された冷媒ガス（通常はヘリウムガス）が蓄冷器内を通過する間に蓄冷材と熱交換して冷却され、低温ガスとなって膨張機に入る。膨張機でガスが膨張する際に寒冷が発生し、冷却ステージを冷却する。膨張して低压となったガスは再び蓄冷器を逆方向に通り、蓄冷材から熱を奪って常温となって圧縮機へ戻る。この際、蓄冷器は冷熱を一時的に蓄える役割と熱交換器の両方の役割を果たしている。

GM 冷凍機の冷凍サイクルは次のとおりである。図4の(A)の状態では、圧縮機で P_H (通常 2 MPa 程度) まで圧縮したヘリウムガスが吸気弁を介して膨張機へ送られる。膨張機内では、ディスプレーサがシリンダ内を移動し、体積最大 V_{max} の(B)の状態となる。ここで、吸気弁を閉とし排気弁を開とすると、体積最大のままガスの圧力最小 P_L (0.8 MPa 程度) の状態(C)へ移行する。この際、膨張機内でガスが膨張することによって寒冷が発生する。次に、圧力最小のまま、ディスプレーサが移動し、体積最小 V_{min} の状態(D)へ移行する。最後に、排気弁を閉じ、吸気弁を開けることで、再び(A)の状態へ戻る。

実際に広く使われている GM 冷凍機では、蓄冷器がディスプレーサ内に含まれた同軸状の構造をしており、膨張機を2段組み合わせることでより低い温度を達成している。1段、2段の冷却ステージの温度は、それぞれ 30~80 K 程度と 8~20 K 程度である。蓄冷材には、それぞれの温度領域で熱容量（体積比熱）の大きな材料が選定され、通常第1段蓄冷器には、リン脱酸銅のメッシュが蓄冷材として積層されており、第2段蓄冷器には鉛の球が蓄冷材として充填されている。

上記の構成の GM 冷凍機では、最低到達温度は 8~10 K 程度に限られていた。鉛等の金属の体積比熱は極低温域では温度の3乗に比例して減少するため、10 K 以下の温度では鉛の比熱が急激に減少し、ヘリウムガスの体積比熱よりも小さくなってしまい、蓄冷材としての役割を果たせなくなる。この限界を打破する方策として、磁性体が極低温において磁気熱量効果による比熱のピークを持つことを利用し、磁性体を蓄冷材に用いることにより、1980年代後半になって GM 冷凍機による 4 K レベルの冷凍が可能となった。

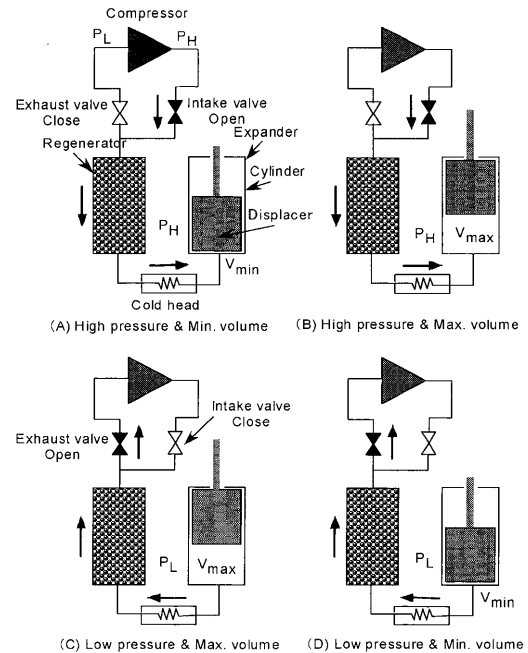


図4 GM 冷凍機の動作原理。

その後、様々な改良が加えられ、現在では 4 K での冷凍能力が 1.5 W を超える GM 冷凍機が市販されている。4 K-GM 冷凍機の出現により、金属系の低温超伝導体を用いた超伝導コイルでも、液体ヘリウムを必用としない伝導冷却方式の超伝導マグネットが実用化され、取り扱いの容易さからその応用範囲を広げている。

3.2 コイル冷却方式

4 K まで冷却できる GM 冷凍機により、超伝導コイルの冷却方式として、液体ヘリウムを用いた浸漬冷却、超臨界圧ヘリウムを用いた強制冷却、2 相流ヘリウムによる間接冷却等の従来の冷却方式に加えて、小型冷凍機を用いた直接伝導冷却方式が可能となった。高温超伝導体の発見により、コイル冷却方式の選択肢は更に広がり、液体窒素による冷却も可能となっている。しかし、高温超伝導線材として、現在長尺線材を入手可能な Bi-2223 テープ線材を磁場発生コイルに用いる場合、温度を 20 K 程度まで下げて使う方が臨界電流の低下が少なくその性能を発揮することができる。

冷凍機の熱効率を示す指標として成績係数 (COP: Coefficient Of Performance) があり、冷凍機の冷凍能力と冷凍機の入力仕事の比として、理想的な熱サイクルであるカルノーサイクルでは以下のように表される。

$$COP_{\text{Carnot}} = \frac{T_{\text{in}}}{T_{\text{out}} - T_{\text{in}}} \quad (1)$$

ここで、 T_{out} は冷凍機の排熱温度、 T_{in} は冷凍温度である。排熱温度を 300 K、冷凍温度を 4.2 K とすると、 COP_{Carnot} は 0.0142 となり、300 K での 1 W の入力仕事に対し、4.2 K では最大でも 0.0142 W の冷凍能力しか取れないことを示している。冷凍温度が 20 K まで上がれば、 COP_{Carnot} は 0.0714 となり、同じ入力仕事に対して 5 倍の冷凍能力を得ることが可能となる。実際の 4 K-GM 冷凍機で

は、冷凍機固有の熱・機械損失により、理想的なカルノーサイクルの効率の1.6%程度の効率(%カルノー)しか得られていない。したがって、冷凍温度を上げて運転できる高温超伝導コイルのメリットは更に大きくなる。ちなみに、大型ヘリカル装置(LHD)の超伝導システムを冷却するヘリウム液化冷凍装置のような大型冷凍システム(9 kW@4.2 K)では、4.2 Kでの%カルノーとして20%以上の高い値が得られており、小型冷凍機の更なる効率向上は今後の研究課題として残されている。

高温超伝導コイルを小型冷凍機で冷却する場合、冷凍機のコールドヘッドとコイルとを高熱伝導率の金属の編線などで接続し、直接伝導で冷却する方式が最も構成が単純で取り扱いが容易であり、信頼性が高い方式である。しかし、コイルと冷凍機のコールドヘッドを同じ断熱真空容器中の近くに設置する必要があり、漏れ磁場による冷凍機への影響や、冷凍機の機械振動が磁場空間へ伝わる影響などの制限から、常に採用できるわけではない。また、プラズマ真空容器中で、高温超伝導コイルを磁気浮上させるMini-RTやRT-1装置の場合、プラズマ真空容器中で着脱可能な熱接触を室温のコイル容器を貫通して行うことは非常に困難であることから、小型冷凍機で熱交換した20 Kの低温ヘリウムガスを着脱式のトランスファーチューブ(以下T.T.と略す)を介してコイルに添付させた冷却配管に循環する方式を採用した。この低温ガスの強制循環による冷却方法は、冷凍機および熱交換器部分とコイルを離して設置することが可能であり、小型冷凍機の到達温度、冷凍能力および台数を選択することで、様々な温度および冷凍負荷のコイルの冷却に用いることができる自由度の高い方式である。寒冷の発生は、小型冷凍機で行うため、低温の専門家でも容易に取り扱うことができる。この方式の欠点として、T.T.の熱負荷が、1 m当たり1 W程度と大きく、数mの長さの往復のT.T.を用いても、数W~数十Wの入熱になってしまい、小型冷凍機の冷凍能力の大部分を占めてしまうことである。したがって、冷凍能力の小さい4 K-GM冷凍機を用いた低温超伝導コイルの冷却に、この冷却方式を用いることはできない。

4. 冷凍・励磁用コンポーネント開発

内部導体装置では、真空容器内で高温超伝導コイルを20 Kまで冷却し、定格電流まで励磁する必要がある。Mini-RT/RT-1装置では低温ヘリウムガス冷却、直接通電励磁方式を採用した。それに伴い冷凍・励磁用に特殊な機能を有するコンポーネントの開発が必要となった。ここではその内の主要な課題について紹介する[22-26]。

4.1 着脱式低温ヘリウムガス導入システム

我々はGM冷凍機で20 Kまで冷却された低温ヘリウムガスをコイル内に導入し冷却する方式を採用した。したがって、高温超伝導コイル内に設置された冷却パイプと外部からのT.T.とを真空容器内で遠隔操作によりジョイントさせるシステムを開発した。基本的な動作原理は、真空断熱層を有するT.T.と同じであるが、①超高真空中での着脱であり、しかも数気圧の低温ヘリウムガスに対して室温から低

温までの冷却中も常に高い気密性を要する、②プラズマ実験中にコイル内の昇温に伴うガスが真空容器内に流出しないような逆止弁(チェックバルブ)をコイル側に設ける必要がある、③高々数cm程度のコイル断面内に真空シール部を設置するためT.T.の断熱距離を十分に確保する余裕がない、④T.T.を下方からコイルに差し込む機構となるため低温ヘリウムガスが下方のシール部に流れやすい、などの課題を克服しなければならなかったため、何度かの失敗を繰り返した。

Mini-RT装置で開発した逆止弁とT.T.を図5に示す。逆止弁内のT.T.の差込部はねじ込み構造となっている。逆止弁をT.T.先端中央部の突起で押し開けると同時にT.T.先端のKel-F製O-ringでヘリウムガスの真空容器へのリークを防止している。当初は、T.T.をねじ込む際に先端のO-ringも一緒に回転する機構としたが、それでは回転によってO-ringに傷をつけ、リークが発生する場合があったので、O-ring部は回転しないような構造に改良した。

T.T.と逆止弁のシール部からのヘリウムリーク量は、室温での着脱試験で、 10^{-5} Torr·l/sec以下を確保できた。しかし、浮上コイル冷却中、このシール部は20 Kまで冷却され、冷却途中の熱収縮によってシール部からのリーク量が増大する場合がある。この際、T.T.を増し締めすることに

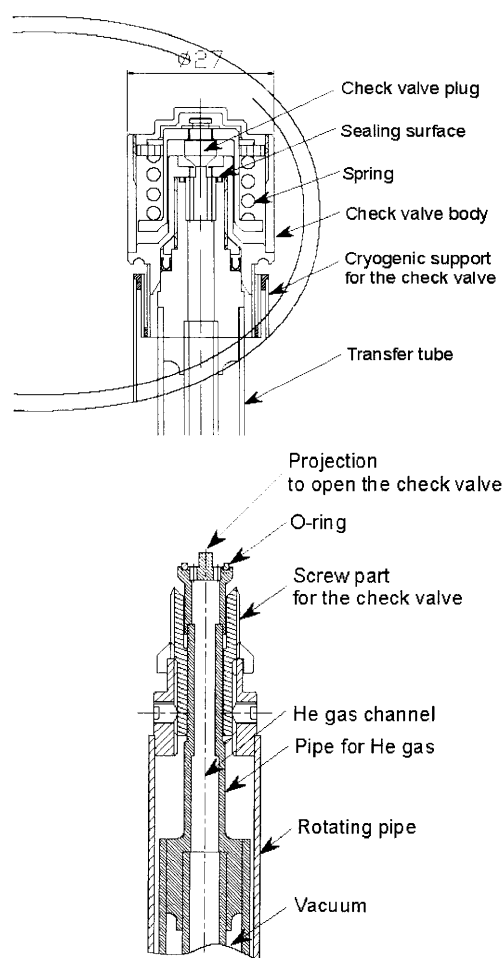


図5 Mini-RT装置の着脱式トランスファーチューブとチェック弁[22].

より、リーク量を抑えることとした。ただしこれではコイル冷却中のリーク量を常時監視している必要があり、運転上の問題として残った。

RT-1装置でも、着脱式のT.T.を用いた低温ガスヘリウム冷却方式を採用した。当初はO-ringを2段階で設置し、その中間部を排気する構造としたが、T.T.の熱収縮によるO-ring部からのリークを抑えるのが大変困難であった。そこでO-ring方式を放棄し、金属パッキンのVCR方式とすることとした。真空容器の外部からVCRを遠隔で締められるような構造を工夫し、RT-1装置に取り付けた。金属パッキンを毎回、取り出して交換しなければならないという問題点は残るが、冷却中のリーク量は格段に減り、信頼性の高い着脱式T.T.による低温ヘリウムガス冷却方式が確立した。

4.2 着脱式電流リード

超伝導コイルの励磁方式として外部コイルを用いた誘導励磁方式と、外部電源からの直接励磁方式とがある。永久電流運転のためなら、外部電源との接続部や永久電流スイッチなどが不要な誘導励磁方式の方が好ましい。過去のレビトロンやスフェレータ、また最近のLDX装置では誘導励磁方式で永久電流を達成している。

誘導励磁方式では、まず超伝導コイルを昇温し常伝導状態にし、外部コイルの磁束を超伝導コイルの円環内に浸入させておく。その後、超伝導コイルを冷却し超伝導状態にした後、外部コイル電流を減衰させ、超伝導コイルに電流を誘起する。ここで高温超伝導コイルを用いた場合、常伝導状態にするためには100 K以上に昇温しなければならない。したがって、励磁の度ごとに、高温超伝導コイルを100 kまで昇温し、さらにそれを20 Kまで再冷却する必要がある。かなりの時間(数時間以上)を要することとなる。ここでは高温超伝導線材の臨界温度が高い、ということが災いしている。したがって、我々は誘導励磁方式ではなく、直接励磁方式を採用した。

コイル電流の直接励磁方式では、外部電源と主コイルとを連結するための電流リードが必要となり、以下の項目に留意し設計・製作をした。

- ・着脱式電流リード部の接触抵抗の低減
- ・外部電源(室温部)からの超伝導コイルへの熱浸入の低減
- ・真空容器内での着脱が容易な機構

着脱式の電流リードであるため、十分な圧縮力で接続することができない。したがって、着脱部での接触抵抗が高く、それが熱源となり超伝導コイルを加熱してしまう可能性がある。特にMini-RT装置では、装置が小型であるため既製品の電流リードでは十分低いレベルまで接触抵抗を下げるのが難しかったので、何種類かの金属での試験を繰り返し、ハステロイ製のスプリングコンタクトを5本巻きつけた電流リード(直径6 mm)を開発した[27]。一方、RT-1では、MultilamTMコンタクトを採用した。その結果、いずれの装置でも、接続抵抗を0.2 mΩ程度まで低減でき、100 A通電に対して、数Wレベルに発熱量を抑えることができていた。

超伝導コイルの励磁時は、外部電源(室温)と超伝導コ

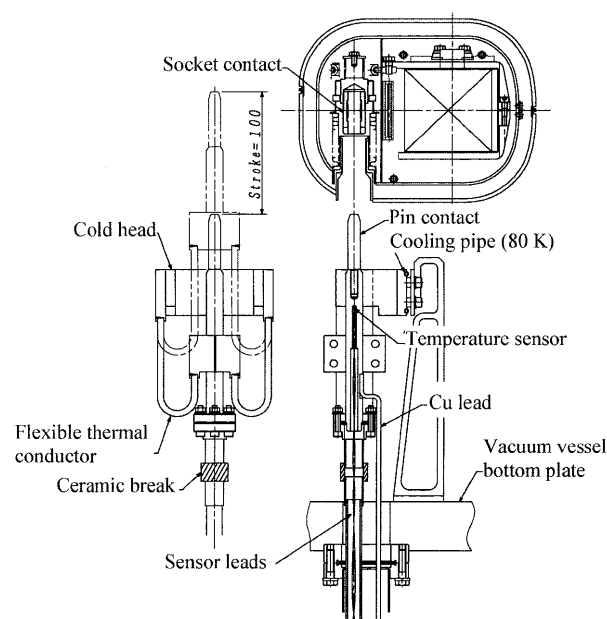


図6 RT-1装置の着脱式電流リード[26]。

イル(20 Kレベル)が電流リードを介して機械的につながっているため、室温部からの熱浸入および接触抵抗による発熱に対して熱シールドをいかに確保するかが問題となった。その対策として、

- ①電流リードと超伝導コイル間の渡り線での熱絶縁特性の向上を図る

②着脱式の電流リードを低温(数十 K)に冷却するを考えた。①の対策のみで条件を満たすなら装置的に簡素化できて喜ばしい。そこでMini-RT装置では、電流リードとして熱抵抗がやや高い金入りBi-2223線材を用いたが、それだけでは十分ではなかった。そのため②の対策として、着脱式の電極を液体窒素で冷却した。その結果、熱浸入が格段に低減でき、定格電流での永久電流モードが達成できた。したがってRT-1装置でも、着脱式の電流リードを常時冷却することとした。なおMini-RTでは液体窒素冷却であったが、RT-1ではGM冷凍機の1段階(50–70 Kレベル)で冷却された低温ヘリウムガスを循環させて冷却している。参考までに図6にRT-1の着脱式電流リードの断面図を示す。

4.3 永久電流スイッチ

コイル励磁として外部電源による直接励磁方式を採用したため、外部電源を切り離れた後に永久電流モードでの運転とするための永久電流スイッチ(PCS; Persistent Current Switch)が必要となる。一般的にPCSとして超伝導線材が用いられており、超伝導線材を昇温し常伝導化させ高抵抗状態としてスイッチオフ状態とし、超伝導コイル電流が励磁された後に、PCSを再冷却し超伝導化しスイッチオン状態としてPCS機能を発揮させている。したがって、低温超伝導コイルでは低温超伝導線材をPCSとして使っているが、ここでは高温超伝導線材の温度領域で作動するPCSが必要となる。

Mini-RT装置ではBi-2223線材を、RT-1装置ではYBCO

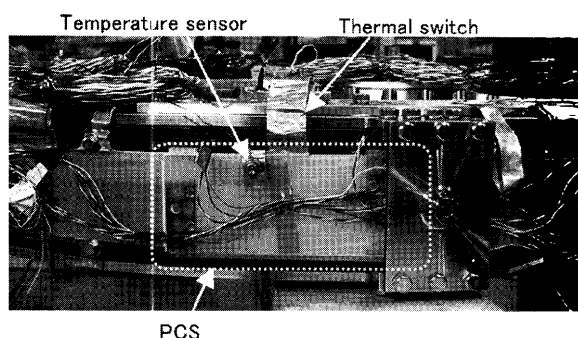


図7 ART-1装置のYBCO 薄膜製永久電流スイッチ[25].

薄膜を用いたPCSを開発した。Bi-2223線材でのPCSは、主コイルとはほぼ同寸法の無誘導巻き方式のコイルを0.3%Mn添加のBi-2223線材で製作した。線材の長さは約21 mでありオフ状態での抵抗として約1 Ω が確保できている。一方、RT-1では、MAGLEVで開発されたYBCO 薄膜製のPCSを採用した[28]。サイズは幅6 mm、長さ76 mm、膜厚300 nmと非常にコンパクトであり、オフ抵抗は0.67 Ω が確保できている。ここでRT-1装置のPCSを図7に示す[25]。

PCSの昇温は、PCSに取り付けられたヒーターで行い、冷却は低温ヘリウムガスや超伝導コイルからの伝導冷却で行う。Mini-RTでは比較的大型のPCSであるため、昇温に数分、冷却に20–30分を要する。一方RT-1では、YBCO 薄膜であるため、昇温に約30秒、冷却にも高々2分程度で十分である。

5. 実験装置への応用

5.1 内部導体装置 Mini-RT/RT-1への応用

内部導体コイルを用いたプラズマ実験装置は、超伝導コイルを精度良く長時間磁気浮上させることが必須であり、すでに1960年代にスフェレータやレビトロンなどで様々な装置が建設されプラズマ実験に供してきた[29–33]。ここでは低温超伝導線材を用いた比較的大きな主半径コイルを建設し、トーラス内側領域にプラズマを生成して、平均極小磁場配位、磁気シア、プラズマ閉じ込め特性などの研究を進めてきた。しかし1970年代に入ると、トカマク研究の隆盛と相俟ってこれらの装置はシャットダウンされた。

一方、1990年代に入ると、人工衛星ボイジャーやパイオニアなどによる木星での超高ベータプラズマの観測[34]や長谷川らによる運動論的緩和理論[35]、Mahajan-Yoshidaによる2流体緩和理論の提唱[36, 37]などに触発されて、内部導体トーラス装置でのプラズマ研究が復活した。具体的には、Columbia大学とMITの共同プロジェクトとしてLDX装置[4]が、また東京大学においてはProto-RT/Mini-RT/RT-1装置群が建設・運転[38]されている。これらの装置では、様々な緩和理論に基づいた超高ベータプラズマの生成・制御を目指しており、過去のスフェレータやレビトロンと異なり、内部導体コイルよりもトーラス外側領域にプラズマを生成するものである。したがって、大きな真空容器内に比較的小さな主半径の内部導体コイルを浮上させており、浮上コイルの制御が難しくなっている。

LDXでは浮上コイルに低温超伝導線材であるNb₃Snを採用している。また誘導方式での励磁としており、NbTi製の低温超伝導コイルが設置されている。ただし引上げコイルとしてBi-2223線材を用いた高温超伝導コイルを採用している。これは銅コイルと比べて定格電流での発熱量が極端に低減できるとともに、帰還制御による電流変動に伴うACロスも許容できるレベルであると見積もられているためである。なおこの高温超伝導コイルは冷凍機からの直接伝導冷却であり、電流も電源と直結して制御されている。

Mini-RT/RT-1装置では、浮上コイルとして高温超伝導線材を採用した。その理由の一つとして、実験室規模において大量の液体ヘリウムを取り扱うのを避けたい、という点があげられる。したがって、小型冷凍機のみでのコイル冷却が可能となった。因みに、Mini-RT装置ではGM冷凍機(16.5 W at 20 Kの冷凍能力)を2台で、RT-1装置では3台でコイルを冷却しており、室温から20 Kまで冷却するのに、Mini-RTでは約10時間[39]、RT-1でも約48時間[40]で冷却可能である。代表的な例として、Mini-RT装置での冷却システムを図8に示す。

高温超伝導コイルと永久電流スイッチとの組み合わせによる永久電流運転としては、MAGLEVも同様である。ただしMAGLEVではGM冷凍機を車両に搭載し、常に高温超伝導コイルを伝導冷却している。一方、Mini-RT/RT-1装置では、高温超伝導コイルの冷却・励磁を真空容器の下部で行った後に、冷却用低温ヘリウムガスの供給を停止し、真空容器中央部までリフトアップし磁気浮上させる。浮上中に超伝導コイルは徐々に温度が上がってゆく。したがって20 Kまで冷却された高温超伝導コイルは、数時間程度のプラズマ実験終了時点で30–40 K程度の温度領域に抑えられている必要がある。ここでは20 Kに冷却された超伝導線材とプラズマに直接さらされるコイル容器との間に、輻射シールド板を設けるとともに、複数枚のサーマルインシュレータを巻いた。また超伝導コイルの支持構造にも熱絶縁が十分確保できるような工夫を施した。代表的な例として、RT-1装置のコイル断面を図9に示す[26]。20 Kで放置された高温超伝導コイルの自然昇温時間として、Mini-RTでは、4 K/h程度、RT-1では1.6 K/h程度であった。Mini-RTではコイル断面が小さいため、熱絶縁の距離や方策が十分施しきれず、比較的早い昇温時間となった。ただしそれでも、数時間のプラズマ実験を行うには十分な

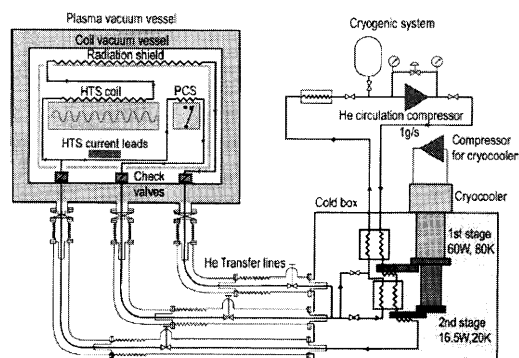


図8 Mini-RT装置のコイル冷却システム[22].

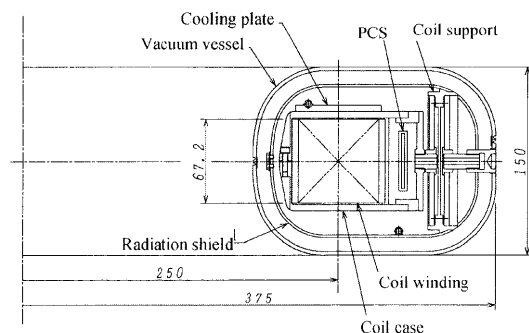


図9 RT-1装置の浮上コイル断面[26].

熱シールド特性を有しているといえる。

次に高温超伝導コイルの永久電流の減衰特性について考察する。低温超伝導線材は臨界電流以下で運転していれば、ほとんど電流は減衰しない。例えばNbTi製の医療用MRIでは、1年間で0.1%程度しか減衰しない[41]。一方、高温超伝導線材は臨界電流値近傍で残留抵抗が残っている。したがって、 $V = V_c (I/I_c)^n$ と近似的に表せるような電圧が臨界電流値近傍で発生する。そのため臨界電流値も、発生電圧が $V_c = 1 \mu\text{V}/\text{cm}$ となった時の電流値として定義されている。また前述の式のべき乗の n 値が残留抵抗の特性を表す指標として用いられており、代表的な n 値は $n = 20 \sim 30$ 程度である。コイル化に際して、高温超伝導線材の個々の特性のばらつきや巻き線の過程における臨界電流や n 値の劣化、などにも十分に注意を払う必要がある。例えばRT-1装置で高温超伝導コイルを製作するに当たり、線材単体およびコイル化の過程において線材の特性を全品チェックした。この内で代表的な線材のI-V特性を図10に示す。ここでは残留抵抗を $10^{-6} \sim 10^{-9} \text{ V}/\text{cm}$ の広い領域で測定し、線材の特性が劣化していないことを確認した。因みにMini-RT装置では、20時間の電流減衰時定数であり、設計値よりかなり短かった。その原因として、 n 値の劣化が予測される。一方、RT-1装置では、8時間で1%程度の電流減衰であり、残留抵抗から予測された減衰率程度に抑えられた[25]。これは線材の選定やコイル化の過程において、すべての線材およびコイルの n 値を常時管理していた賜物であろう。

さらに低い負荷電流状態では高温超伝導線材の接続抵抗が問題となってくる。将来、線材間の接続抵抗を現在の値と比べて低くすることができれば、永久電流の持続時間を長くすることが可能となる。ただし、その場合には、今度は、コイルの励磁に伴って線材内に誘起される磁気遮蔽電流が線材の n 値によって時間的に減衰し、これが原因となって主磁場を作るコイル電流が増減する現象が観測されるものと予想される[42]。このため、フィラメントのツイスト等によって、磁気遮蔽電流を軽減した線材の開発が必要とされる。それが達成できれば、最終的に、線材の n 値そのものに起因した永久電流の減衰が見えてくる領域となる。

最後に図11にRT-1装置の全体図を示す。真空容器下部に設置された高温超伝導コイルにT.T.を下部から挿入し低

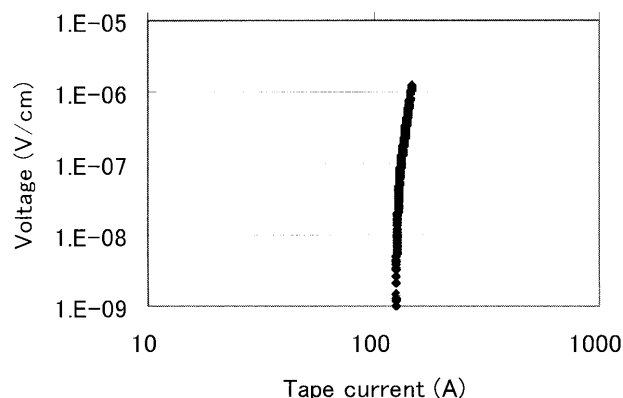


図10 RT-1装置のBi-2223テープ線材の電流-電圧特性。

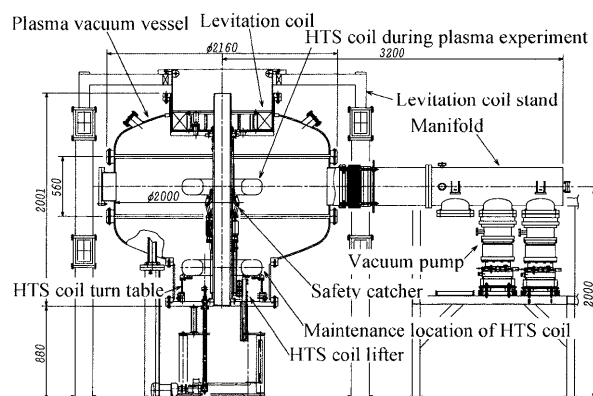


図11 RT-1装置の断面図[26].

温ヘリウムガスで冷却する。その後、電流リードを挿入し永久電流モードを達成し、メカニカルに真空容器中央部までリフトアップする。最後に、真空容器上部に設置された引上げコイルを駆動させ内部導体コイルを浮上させる。なおRT-1装置では内部導体コイルを100ミクロン以下の精度で1時間以上にわたり安定に浮上させ、8.2 GHzの高周波によるプラズマ実験が開始されている[3]。

5.2 計測器への応用

以上のように、高温超伝導線材は急速に進歩してきており、プラズマ核融合実験装置に対しても一部実際に適用が始まるとともに、将来の大型マグネットを指向した大電流導体の開発研究も始まりつつある。一方で、高温超伝導線材をプラズマの磁気計測に応用することも一部検討されているので、ここでは簡単にその紹介を行う。これは、高温超伝導線材で形成した短絡ループに誘起される永久電流によって、微小磁場変動の測定を行うものであり、将来、様々な応用も考えられる。

磁場閉じ込め核融合実験装置では、プラズマの蓄積エネルギーを測定するために、プラズマを取り囲むように設置された常伝導ループを用いて、プラズマの反磁性に起因した磁束を計測する。この際、反磁性ループに誘起される電圧を積分することによって、ループに鎖交する磁束を求める方法が確立されている。しかしながら、数時間を超える定常運転を考えた場合、長時間にわたり高精度な計測を継続することは信号処理に使用される積分器がドリフトする特性を持っているため難しい面があり、各種の対応方法が

検討されている[43]。これに対し、超伝導線材で構成したループを用いて、磁束の変化を電流に変換して計測するシステムを考えることができる[44]。このシステムでは、超伝導ループの作る永久電流を検出するため、原理的にドリフトが無く、長時間の計測が可能である。ただし、超伝導ループのみで検出器を構成した場合には、超伝導ループがプラズマの反磁性効果によって作られる磁束をすべて遮蔽しようと電流を誘起してしまう。そこで、超伝導ループに対して巻数比が十分に大きな別の超伝導コイルをプラズマから離れた位置で直列に接続し、電流を制限することによってプラズマに対する反作用磁場を小さくすることが必要となる。また、プラズマ閉じ込め用コイルの立ち上げ時の磁場変化によって誘起される電流を遮断したり、任意の時点で電流を初期化したりするために、永久電流スイッチを使用する方法が有効である。また、超伝導ループを流れる電流を計測する方法としては、超伝導コイルの作る磁場をホール素子で測定する方法や電流回路の一部に DCCT を設置する方法などが考えられる。この方法を用いた反磁性計測システムの概念図を図12に示す。ここで、計測用の超伝導ループを閉じ込め磁場発生用の超伝導コイルの近傍に設置することを考えるならば、ループに対する冷却配管等は不要となるが、超伝導コイルとは熱絶縁された場所や、場合によって、プラズマ真空容器の内部に設置することまでを想定するならば、臨界温度の高い高温超伝導線材を用いることが有望と考えられる。

そこで、高温超伝導ループを用いた模擬的な反磁性検出システムの試作を行い、原理検証実験を行った[45]。高温超伝導線材として銀シース Bi-2223 線材を使用し、80 ターンのダブルパンケーキ 2 個でループを形成した。これを GM 冷凍機で伝導冷却し、ヒータを用いることによって動作温度として 20 K に制御した。また、GM 冷凍機の第 2 ステージに銅安定化 NbTi 線材を用いた電流制限用の超伝導コイル、および、永久電流スイッチを設置する構成を採用し、Bi-2223 線材と NbTi 線材間の接続抵抗を 1 ヶ所当たり 1 nΩ まで低減した。このシステムに対して、プラズマの反磁性磁束を銅コイルによって模擬したところ、超伝導閉ループの減衰時定数として数百時間を得るとともに、銅コイルの微小な電流変化を正確に捉えることに成功し、原理検証をするに至った。

6. まとめ

高い電流密度を有する超伝導線材は、比較的小型のコイ

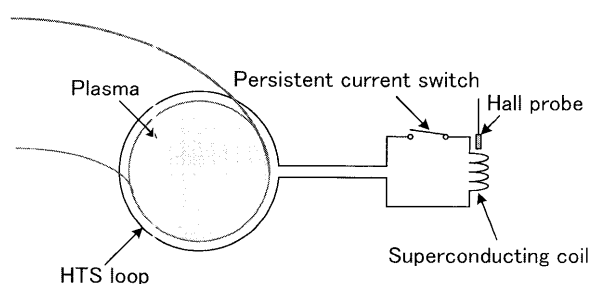


図12 超伝導コイルを用いた反磁性ループ測定の原理。

ルでも大きな磁場が発生させられる、などの利点があり、講座レベルの実験室規模においても超伝導コイルを用いた応用の可能性は高い。本解説記事では、まず高温超伝導線材の最近の開発状況、および小型冷凍機の進展をレビューした。次にプラズマ実験装置として設計・建設された内部導体装置 Mini-RT/RT-1 への応用例として、そこで開発された様々な低温機器に対する要素技術、および総合性能試験結果を紹介した。また最後に計測機器としての応用の可能性も例示した。講座レベルの実験室でも高温超伝導線材を導入できるようになってきていることから、今後も様々な実験装置や計測機器への応用を期待する。

謝辞

高温超伝導コイルを磁気浮上させた内部導体装置の設計・建設では東京大学の吉田善章先生、森川惇二氏、九州大学の岩熊成卓先生、および核融合科学研究所の辺見 努氏に感謝致します。またMini-RTおよびRT-1装置の製作では富士電機システムズ(株)、(株)東芝に感謝いたします。

参考文献

- [1] Y. Ogawa, J. Morikawa, T. Mito *et al.*, J. Plasma Fusion Res. **79**, 643 (2003).
- [2] 小川雄一, 森川惇二, 大國浩太郎他: 低温工学 **39**, 175 (2004).
- [3] Z. Yoshida, Y. Ogawa, J. Morikawa *et al.* Plasma Fusion Res. **1**, 008 (2006).
- [4] J.H. Schultz *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **9**, 378 (1999).
- [5] M. Inoue *et al.*, Physica C, **392-396**, 1078 (2003).
- [6] P. Lee, <http://www.wisc.edu/>
- [7] H. Maeda, Y. Tanaka, M. Fukutomi and T. Asano, Jpn. J. Appl. Phys. **27**, L209 (1988).
- [8] T. Kaneko *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **9**, 2465 (1999).
- [9] L. Masur *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **11**, 3256 (2001).
- [10] M. Yagi *et al.*, J. Physics: Conference Series **43**, 849 (2006).
- [11] T. Hasewaga *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **12**, 1136 (2002).
- [12] T. Isono *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **13**, 1512 (2003).
- [13] T. Ando, S. Nishio and H. Yoshimura, IEEE Trans. Appl. Supercond. **14**, 1481 (2004).
- [14] M.K. WU *et al.*, Phys. Rev. Lett. **58**, 908 (1987).
- [15] A. Goyal *et al.*, Physica C, **357-360**, 903 (2001).
- [16] S. Miyata *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **15**, 2671 (2005).
- [17] P.C. McIntyre *et al.*, J. Appl. Phys. **71**, 1868 (1992).
- [18] W. Goldacker *et al.*, J. Phys. Conf. Ser. **43**, 901 (2006).
- [19] F. Dahlgren *et al.*, Fusion Eng. Des. **80**, 139 (2006).
- [20] 低温工学概論, 荻原広泰編集 (東京電気大学出版局, 1999年).
- [21] 低温工学「特集・磁性蓄冷材を使用した小型冷凍機」, Vol. 31, No. 4, 1996年.
- [22] 三戸利行, 柳 長門, 小川雄一他, 低温工学 **39**, 182 (2004).
- [23] 柳 長門, 三戸利行, 森川惇二他, 低温工学 **39**, 193 (2004).

- [24] 柳 長門, 森川惇二, 三戸利行他, 低温工学 **39**, 201 (2004).
- [25] T. Tosaka, Y. Ohtani, M. Ono *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **16**, 910 (2006).
- [26] S. Mizumaki, T. Tosaka, Y. Ohtani *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **16**, 918 (2006).
- [27] 大國浩太郎, 小川雄一, 森川惇二他, 低温工学 **38**, 560 (2003).
- [28] T. Tosaka, K. Tasaki, K. Marukawa, *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond **15**, 2293 (2005).
- [29] R. Freeman *et al.*, "Confinement of plasmas in the spherator", IAEA-CN-28/A-3 (Madison) (1971).
- [30] S. Skellett, CLM-P427 (1975).
- [31] O.A. Anderson *et al.*, "Plasma production and heating in the superconducting levitron", IAEA-CN-28/A-8 (Madison) (1971).
- [32] T. Ohkawa *et al.*, Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research (Tokyo) **1**, 281 (1975).
- [33] S. Yoshikawa, Nucl. Fusion **13**, 433 (1973).
- [34] S.M. Krimigis, *et al.*, Science **206**, 977 (1979).
- [35] A. Hasegawa, *et al.*, Nucl. Fusion **30**, 2405 (1990).
- [36] S.M. Mahajan and Z. Yoshida, Phys. Rev. Lett. **81**, 4863 (1998).
- [37] Z. Yoshida and S.M. Mahajan, Phys. Rev. Lett. **88**, 095001 (2002).
- [38] Z. Yoshida, Y. Ogawa, J. Morikawa *et al.*, CP498, Non-Neutral Plasma Physics III, edited by J. J. Bollinger, AIP Conference Proceedings **498**, 397 (1999).
- [39] 森川惇二, 大國浩太郎, 堀 暖他: 低温工学 **39**, 209(2004).
- [40] Y. Ohtani, T. Tosaka, M. Ono *et al.*, ICEC21, July 2006.
- [41] G. Morrow, IEEE Trans. Appl. Supercond. **10**, 744 (2000).
- [42] T. Hemmi, Y. Yanagi, G. Bansal *et al.*, Fusion Eng. Design, *to be published*.
- [43] 榊原 悟, 栗原研一, J. Plasma Fusion Res. **80**, 364 (2004).
- [44] K. Yamazaki and O. Fedyanin, *Private communication* (2002).
- [45] 辺見 努他, 2006年度春季低温工学・超電導学会 2P-p32.



お がわ ゆう いち
小 川 雄 一

1981年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了(工学博士)。名古屋大学プラズマ研究所, 核融合科学研究所, 東京大学工学部を経て, 1999年より東京大学高温プラズマ研究センター教授。2005年4月から東大柏キャンパスに移転。



や な ぎ な が と
柳 長 門

1989年12月京都大学大学院工学研究科博士後期課程中退。現在, 大学共同利用機関法人自然科学研究機構核融合科学研究所大型ヘリカル研究部炉システム・応用技術研究系助教授。大型ヘリカル装置(LHD)のヘリカルコイル用超伝導導体の開発および電磁現象を中心とした特性研究, 高温超伝導線材の核融合装置応用に関する研究などに従事。



み と と し ゆ き
三 戸 利 行

1983年九州大学大学院工学研究科博士課程修了。1983年4月高エネルギー物理学研究所助手, 1988年8月京都大学ヘリオトロン核融合研究センター助教授, 1989年5月核融合科学研究所大型ヘリカル研究部装置技術研究系助教授, 平成1998年12月同研究所教授, 1999年4月総合研究大学院大学数物科学研究科核融合科学専攻教授併任, 2003年4月核融合科学研究所大型ヘリカル研究部装置技術研究系研究主幹, 2004年4月大学共同利用機関法人自然科学研究機構核融合科学研究所大型ヘリカル研究部炉システム応用技術研究系研究主幹, 同教授, 国立大学法人総合研究大学院大学物理科学研究科核融合科学専攻教授併任, 現在に至る。主として先進超伝導導体および超伝導コイルの開発研究, 大型低温システムの最適化研究, 高温超伝導の核融合装置への応用研究に従事。低温工学協会, プラズマ・核融合学会, 電気学会会員, 工学博士。