金属材料技術研究所における 高磁界マグネット群の開発

木 吉 司* 井 上 廉** 前 田 弘***

1. は じ め に

科学技術庁では1988年より、酸化物系高温超電導材料の多面的研究を目的とした超電導マルチコアプロジェクトを開始した。金属材料技術研究所はそのうち5つのコアを担当しているが、その1つである性能評価コアでは、高磁界下での特性評価を行うための各種高磁界マグネットの開発を進めている。マグネットとしては、40 Tの定常磁界を発生する40 T級ハイブリッドマグネットを筆頭に、超電導で20 Tを越える磁界を発生する20 T大口径超電導マグネット、80 Tに至るパルス磁界を発生するためのパルスマグネット用コンデンサバンクシステム、均一度の高い磁界を発生する超精密マグネットシステムが整備される。

さらに金属材料技術研究所のつくば移転と並行して、現在の筑波支所から北へ4 km離れた桜地区に強磁場ステーションの建設が進められている。ここに現在、東京目黒地区、つくば千現地区等に分散して置かれている高磁界マグネットを集散的に配置し、実験棟と一体で建設されるハイブリッドマグネットを中心として磁界利用実験を有機的に行う体制を整える予定である⁽¹⁾⁽²⁾。世界の強磁界施設については、すでに本学会報で解説されているが⁽³⁾、日本では東北大学金属材料研究所の強磁場超伝導材料研究センターに続いてハイブリッドマグネットを有する、世界有数の強磁界利用施設となる。

ハイブリッドマグネットを除いたマグネットはすでに成果が得られ始め、筆者らが中心となって開発した20 T大口径

超電導マグネットは、1991年にシステムを完成した後、発生磁界の向上に努めている。1992年12月の運転では、有効口径50 mmの空間に20.5 Tの磁界を発生し、酸化物系高温超電導材料を始めとする新超電導材料の性能評価に十分な測定磁界環境を提供できるようになった。

この結果を中心に、筆者ら自身の研究から逸脱した部分も含むが、強磁場ステーション全体の概要と進められている研究について紹介する。超電導材料に限らず高磁界を使用した研究が行われる場合に、利用を検討いただければ幸いである。

2. 20 T 大口径超電導マグネット

(1) マグネットシステム

20 T大口径超電導マグネット⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾は、金属材料技術研究所でこれまで開発された17.5 T⁽⁷⁾および18 T超電導マグネット⁽⁸⁾の実績を生かし、その後継機として製作された。開発の主たる目的は、酸化物系高温超電導材料を含む新超電導材料の特性評価であり、短尺試料の特性評価のみならず、コイル形状での高磁界試験も可能となるように設計した。磁界に応じて3段階に測定空間を選択できるため、多様な磁界利用実験に対応可能である。

図1に本マグネットの断面模式図を示す。超電導コイルを収容するクライオスタットが内槽、外槽の2槽に分割されていることが特徴の1つである。しかも、それらが互いに断熱されているため、内槽はコイルを組込むだけでなく、各

* 1992年度日本金属学会奨励賞受賞者；科学技術庁金属材料技術研究所研究員(〒305 つくば市千現1-2-1)

** 科学技術庁金属材料技術研究所サブグループリーダー

*** 科学技術庁金属材料技術研究所総合研究官

Development of High Field Magnets at the National Research Institute for Metals; Tsukasa Kiyoshi, Kiyoshi Inoue, Hiroshi Maeda (National Research Institute for Metals, Tsukuba)

Keywords: *superconducting magnet, water-cooled magnet, hybrid magnet, pulsed magnet, high field, magnetic field*

1993年2月8日受理

種実験用空間としても使用できる。

超電導マグネットは通常液体ヘリウム中で運転されるが、高磁界マグネットでは、臨界電流特性を向上するために、コ

図1 20 T 大口径超電導マグネット断面模式図。

イルの冷却温度を液体ヘリウムの沸点(4.2 K)以下とする手法が用いられる。本マグネットの場合、各槽に貯液された液体ヘリウムを直接油回転ポンプで排気することにより、飽和超流動ヘリウムを生成し、1.8 K 以下で運転される。運転中の到達温度としては1.5 K まで確認されている。超流動ヘリウムを冷媒として採用したため、臨界電流特性だけでなく、コイルに対する冷却能力(超電導状態が破れた時の発熱を除去する能力)についても改善されている。大電流を通電する大型超電導マグネットで、この飽和超流動ヘリウム冷却方式が採用された例は本マグネットが始めてであり、大きな特徴である。

マグネットは基本的に4つのコイルから構成される。表1に各コイルの諸元を示す。外槽に収容される外層コイル(外層-1, 2 コイル)は、マグネットシステムの中核をなすコイルで、15 T の磁界を安定して発生するように設計されている。いずれの導体も超電導線(NbTi または(Nb, Ti)₃Sn)を撚線し、純アルミニウムと門型銅を安定化材として使用している。これは何らかの擾乱により超電導状態が破れても、周囲の超流動ヘリウムの冷却で回復するように、常電導状態での電気抵抗を小さくし、発生するジュール熱を抑えるためである。

中層および内層コイルはモノリス導体を使用し、コイル電流の高密度化を優先して設計している。内層コイルは、実用化された金属系超電導線材のコイル試験を兼ねて、複数個開発している。これまでに2個のコイルが実際に試験され、さらに2個が製作中である。表1には1個目(#1)および2個目(#2)のコイルの諸元(同一線材、同一巻線)について示している。著者らは、中層および内層コイルを本マグネット固有のコイルとは見なしておらず、超電導線材の特性改善に応じて交換し、磁界の向上を図れるように設計した。そのため2つのコイルは、独立の電源によって励磁される。

(2) これまでの成果

これまでの励磁試験で、外層コイルは15 T の磁界を内径314 mm の内槽空間に安定して発生できることを実証している。さらに中層コイルを励磁することにより、φ160 mm の

表1 20 T 大口径超電導マグネットのコイル諸元。

コイル	内層	中層	外層-1	外層-2
巻線内径(mm)	50	180	380	801
巻線外径(mm)	151.2	291.8	725.6	1175.8
巻線高さ(mm)	220.3	463.5	1230	1293.6
ダブルパンケーキ数	密巻コイル	31	40	41
総ターン数	1760	1364	1520	2296
電流(A)	255.5(#1) 275(#2)	900	4717	4717
最大経験磁界(T)	20.3(#1) 20.5(#2)	18.1	15.2	8.4
超電導線材	ブロンズ法(Nb, Ti) ₃ Sn	ブロンズ法(Nb, Ti) ₃ Sn	ブロンズ法(Nb, Ti) ₃ Sn	NbTi
ストランド数	モノリス	モノリス	11	19
安定化材	Cu	Cu	Al+Cu	Al+Cu
導体寸法(mm)	2.4×2.0	6.0×2.0	13.4×8.15	13.8×6.0

有効空間に 18.06 T が発生できることを確認している。

上述したように、これまで 2 個の内層コイルについて励磁試験を行っている。2 つのコイルは、まったく同一のブロンズ法(Nb, Ti)₃Sn 導体を使用し、同じ形状に巻いている。唯一異なる点は、巻芯として使用するコイルのボビン(SUS304)をコイル#2 ではエポキシ樹脂含浸後、除去していることである。これによりコイルの有効口径が 44 mm から 50 mm に増加している。またコイル#1 は直接マグネット本体に組み込み励磁しているが、コイル#2 は単体で 300 A まで励磁した後、昇温してマグネットに組込んでいる。

図 2 に 2 つの内層コイルを励磁した結果を励磁回数に対して示す。超電導マグネットは、何らかの擾乱により超電導状態が破れ、コイル内に抵抗が発生する場合がある。発生した抵抗が超電導状態へ回復しない場合、コイルの過熱を避けるため電流を瞬時に遮断する。超電導マグネットではこれをクエンチと称する。図 2 の各点は、それぞれの励磁回数において、その磁界に到達した時点で、内層コイルがクエンチしたことを示している。その際、1~7 回目までの励磁では外層、中層コイルで 17.7 T を、また 8~10 回目の励磁では 18 T を付加している。コイル#1 は 10 回の励磁で 20.33 T に、コイル#2 は 8 回で 20.47 T に達したことを意味している。

クエンチの主たる原因としては、電磁力(径方向にはフープ力、軸方向には圧縮力)による超電導線の動きが考えられている。特に試験を行った 2 個の内層コイルは、巻線および熱処理による(Nb, Ti)₃Sn 生成の工程後、エポキシ樹脂を

含浸して製作している。4.2 K 近傍では導体の比熱が小さく(〜1 kJ/m³・K)、そのため樹脂と導体間の剥離、応力による樹脂内でのクラック発生に伴う数 mJ のエネルギー放出がクエンチの大きな原因となってしまう。

図 2 から明らかなように、2 つのコイルとも励磁回数とともに、到達磁界が上昇している。これはトレーニングと呼ばれる現象で、クエンチに伴い、その原因が次第に解消されるためと考えられている。コイル#2 の方が同じ励磁回数では、より高い磁界でクエンチを生じており、トレーニングの観点からは大きく改善されている。これはボビンを除去することにより、巻線とボビンの間の剥離の問題がなくなることと、先に液体ヘリウム温度までの熱履歴を加えることで、樹脂内のクラックを事前に生じさせたことが寄与していると判断される。ボビンの除去によりトレーニング特性が向上することはこれまで指摘されており⁽⁹⁾、似た形状のコイルで比較した例もある⁽¹⁰⁾。しかし、ボビン部以外は全く同一の 2 つのコイルを製作し、高磁界でその比較を行った例は本実験が初めてである。

通常の超電導マグネットでは、コイルの 1 部がクエンチするとマグネット全体に波及し、再び励磁を行うには再冷却のため多量の液体ヘリウムと時間を要する場合が多い。しかし本マグネットの場合、バックアップ磁界を 17.7 T に下げた 7 回目までの励磁については、内層コイルがクエンチしても外層、中層コイルとも磁界を保持し続けた。さらにコイル#1 のクエンチでは、バックアップ磁界 18 T で中層コイルが誘発されたクエンチを起こしたものの、コイル#2 のクエンチでは、中層コイルの誘発されたクエンチは一切生じていない(コイル軸中心のより完全な一致と運転温度の低下が改善の原因と考えられる)。いずれの場合でも、即座に再励磁が可能であった。短時間でコイルの特性評価試験を繰返し行うことができるため、コイル試験には理想的な環境である。

(3) 利用の可能性と今後の計画

図 3 に本マグネットのコイル赤道面での磁界分布を示す。内層コイル#2 を組み込み、最高磁界を発生した時の計算値である。

外層コイルを単独で使用した場合、φ314 mm の内槽内を 15 T の磁界空間として使用可能である。この場合、外槽とは断熱真空層で仕切られているため、外槽と無関係に温度を変化させて実験することが可能である。

中層コイルを組み込んだ場合、有効口径 160 mm の空間に 18 T を発生することができる。内層コイルの励磁試験で実証されたように、これは実用化に向けた高磁界用超電導線材のコイル試験には理想的なプラットフォームである。また、この中層コイル内に組込む、室温空間として φ84.9 mm を確保できる測定用デューを用意している。

内層コイルを組み込むことにより、20 T 以上の磁界発生が

図 2 20 T 大口径超電導マグネット内層コイルのトレーニング。

図3 20 T 大口径超電導マグネットのコイル断面図と赤道面での磁界分布。

可能である。現在、いくつかの超電導マグネットで20 Tを発生したという報告がされているが⁽¹¹⁾⁻⁽¹³⁾、有効口径として50 mmを確保できるマグネットは本マグネットのみである。また20.47 Tという最高磁界は、20 Tを安定して発生するためには十分なマージンであり、測定に供する環境が整ったと判断している。有効口径50 mmに組み込む測定用デューワー(内径30 mm)と臨界電流測定用のプローブが、現在のところ用意されている。さらに $\phi 50$ mmの空間は、試作が進められている酸化物系超電導線材の小コイルに適当な広さである。次回の運転では、当研究所で開発中のBi系超電導線材を使用したコイルを組み込み、発生磁界の向上に挑戦する予定である。

現在さらに2つの内層コイルを製作中である。1つは現在最も高磁界特性に優れているとされるチューブ法(Nb, Ti)₃Sn⁽¹⁴⁾を使用したコイルであり、もう1つは従来のブロンズ法線材でさらにNb中にTaを加えた(Nb, Ti, Ta)₃Snである。これらコイルについても、今後の運転で特性評価を行うとともに発生磁界の向上を図っていく予定である。

超電導マグネットの高磁界化は、高磁界特性に優れた超電導材料の開発に非常に強く依存している。この点が、施設の所有する電源、冷却水システムによって大きく制約を受ける水冷銅マグネットと異なる点である。酸化物系高温超電導材料は最も有力な候補であるが、長尺試料での均一性、安定化材・補強材の複合や電流リードとの接続方法等の問題を克服していくことが、今後の課題である。

3. 40 T級ハイブリッドマグネット

(1) ハイブリッドマグネットシステム

現在開発が進められている40 T級ハイブリッドマグネット⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾の断面模式図(計画図)を図4に示す。超電導マグネットが発生できる磁界は、上述したように20 T程度であり、それ以上の磁界の発生は水冷銅マグネットを必要とする。水冷銅マグネットは銅合金のコイルに大電流を流すことで高磁界を発生する。励磁で生じる数～数10 MWのジュール熱は水で冷却され、コイル温度を一定に保つ。発生磁界は使用する導体の導電率と強度に大きく依存するが、それ以上に施設の所有する直流電源と冷却水システム的能力によって制約される。そこで消費電力が少なく、大空間に磁界を発生できる特徴を持つ超電導マグネットの内側に水冷銅マグネットを組み込み、発生磁界を増加するシステムが提案された⁽¹⁷⁾。これがハイブリッドマグネットである。

定常磁界の最高値としては、昨年12月にMITのフランススピッター国立磁石研究所で $\phi 30$ mmの測定空間に34 T(超電導マグネット13 T, 水冷銅マグネット21 T)を発生

図4 40 T級ハイブリッドマグネット断面模式図(計画図)。

表2 40 T級ハイブリッドマグネットの諸元.

超電導マグネット	
分担磁界	15 T
定格電流	1476.1 A
巻線方式	ダブルパンケーキ58枚
室温空間	φ400 mm
運転温度	4.2 K
蓄積エネルギー	63 MJ
水冷マグネット	
a-コイル	
分担磁界	25 T(中心磁界40 T)
定格電流	33.34 kA
巻線方式	ポリヘリックス18層
室温空間	φ30 mm
材質	アルミナ分散銅
b-コイル	
分担磁界	20 T(中心磁界35 T)
定格電流	31.7 kA
巻線方式	ポリヘリックス15層
室温空間	φ50 mm
材質	クロム銅+アルミナ分散銅
直流電源	
最大電力	15 MVA
最大電圧	430 V
最大電流	35 kA
冷却水システム	
冷却能力	15 MW
消費電力	6 MW
入口温度	283 K
流量	194.4 kg/s

したという報告がある⁽¹⁸⁾. 金属材料技術研究所で現在開発が進められているハイブリッドマグネットは, 超電導マグネットでは15 T, 水冷銅マグネットでは25 Tを発生し, 中心磁界40 Tを発生する計画である. 各マグネットの諸元を表2に示す.

(2) 超電導マグネット

超電導マグネットは, 4種類の導体(NbTi導体2種類, (Nb, Ti)₃Sn導体2種類)でグレーディングしたダブルパンケーキ58枚で構成され, 液体ヘリウム中で運転される. 安定した磁界発生を行うため, 20 T大口径超電導マグネットの外層コイルと同様に, コイルの一部が常電導状態へ転移してもクエンチに至らず, 液体ヘリウムの冷却により超電導状態へ復帰するように設計されている.

15 Tを発生し, 室温ボアとしてφ400 mmを確保できるマグネットはこれまでに例がなく, 室温で大口径の測定空間を必要とする実験にも適用可能である.

(3) 水冷銅マグネット

ハイブリッドマグネットの水冷銅マグネットは単体で励磁する場合と比べ, 経験磁界の増加分だけ厳しい条件で運転される. 現在は用途別に2種類のコイルを作製中である. a-コイルは有効口径30 mmに25 Tを発生し, b-コイルは有効口径を50 mmと拡大して, 20 Tを発生する. 両コイルともらせんコイルを同心円状に配置したポリヘリックス型⁽¹⁹⁾のコイルで, a-コイルは18層, b-コイルは15層のらせんコイルによって構成される.

a-コイルの1~9層は還元法によるアルミナ分散銅のインゴットから円筒を切り出し, 放電加工によりらせんを切ることとで計画している. 10~18層は内部酸化法によるアルミナ分散銅を使用し, 線引きした導体を巻軸に巻付け, 側面加工, 焼鈍の工程を経てコイルを作製している. 方式が異なるのは還元法のアルミナ分散銅の場合, 大型インゴットを得ることが困難であったためである.

b-コイルについては, 電源的に余裕があるため, 1~6層をクロム銅のインゴットから円筒を切り出して作製している. 7~15層については, 当初クロム銅で検討していたが大型のインゴットでは強度にばらつきが生じたため, a-コイルと同様に内部酸化法のアルミナ分散銅を使用した.

使用した材料の特性を表3に示す. 水冷銅マグネットの方式としては大きく3種類が提案されているが, 板材を使用するビッター型⁽²⁰⁾を除いて, ポリヘリックス型, モノヘリックス型⁽²¹⁾とも電気伝導度と強度に優れ, なおかつ大型のインゴットが得られる材料が必要とされる. このような材料の開発が水冷銅マグネットの特性向上には不可欠であり, 当研究所の研究課題の1つである.

(4) 水冷銅マグネット用ユーティリティ

水冷銅マグネットを励磁するためには, 大規模な直流電源と冷却水システムが必要となる. 水冷銅マグネットの性能はこの電源と冷却水システムで決定されるといっても過言ではない.

当研究所では, 容量15 MW(430 V-35 kA)の電源を建設

表3 水冷マグネット材料の諸元.

材 料	アルミナ分散銅(還元法)	アルミナ分散銅(内部酸化法) 焼鈍(1023 K-7.2 ks)後	クロム銅
組 成	0.73質量%Al ₂ O ₃	0.5質量%Al ₂ O ₃	0.7質量%Cr
引張強度(MPa)	498~499	478~526	472~491
耐力(MPa)	432~452	392~470	413~435
最大フープ応力(設計値)(MPa)	337	335	293
電気伝導度(%IACS)	88	88	86

中である。また通電で発生するジュール熱を水で冷却するため、15 MW の冷却能力を有する冷却水システム(消費電力 6 MW)を同時に建設中である。このため最大負荷での定常的な磁界発生が可能である。

これらの水冷銅マグネット用ユーティリティは、ハイブリッドマグネットだけでなく、単独の水冷銅マグネットの励磁にも使用可能であり、強磁場ステーションでは 4 台の水冷銅マグネットを設置できるように計画されている。

4. パルスマグネットシステム

40 T を越える磁界を必要とする測定のために、パルス磁界発生用の 2 種類のコンデンサバンクシステムが用意されている。コンデンサバンクシステムに蓄えられた電荷は、イグナイトロンをスイッチとして瞬間的にコイルへ放電され、パルス磁界を発生している。コイルは銅合金を密巻きし、エポキシ樹脂で含浸した後、金属ケースに納めることで作製されている。電気抵抗を下げ、放電による温度上昇を抑制するため、コイルは液体窒素に浸漬される。

図 5 現在発生されている 60 T を越えるパルス磁界の 1 例。

コンデンサバンクシステムの 1 つは、蓄積エネルギーとして 0.125 MJ (10 mF, 5 kV) を有している。電気容量が比較的小さいためパルス幅が短くなるが、コンパクトなコイルで高い磁界を得ることができる。現在のところ、後述する銅銀合金を使用したコイルで 63 T が発生可能である⁽²²⁾。発生したパルスの 1 例を図 5 に示す。このコイルの測定空間は $\phi 13$ mm である。

もう 1 つのコンデンサバンクシステムは、1.6 MJ (0.128 F, 5 kV) と 10 倍以上の蓄積エネルギーを持っている。これは、80 T の磁界を数十 ms のパルス幅で発生することを目的に用意されたシステムである。コイルに投入されるエネルギーが増加するため、放電後の温度上昇を抑えるには、使用する導体を太くし、さらにコイル自体の体積も大きくする必要がある。小型コイルで良好な結果が得られている銅銀合金を使用し、このコンデンサバンク用に最適設計したコイルを現在計画中である。

パルスマグネットの場合、水冷銅マグネットと同様に高強度で高導電率を有する導体の開発が重要である。水冷銅マグネットのようなコイル大のインゴットの必要性は少ないが、電源とマッチングするためにはある程度太い導体が望ましい。また、パルスマグネットでは、導体間をいかに絶縁するかが大きな問題である。現在はポリイミド系樹脂等を使用しているが、放電後のコイルの許容温度はこの絶縁材で決定されており、絶縁材料と絶縁方法の開発が重要な要素である。

5. 中型超電導マグネット群

金属材料技術研究所は、高磁界用超電導材料とそれを使用した超電導マグネットの開発において、世界をリードしてきた実績を有しており、本強磁場ステーションにおいても各種超電導マグネットを提供する予定である。表 4 に主要な超電導マグネットの一覧を示す。なお、この表では小型超電導マグネットは除外している。

均一度に優れた高磁界を提供する超精密マグネットシステム⁽²³⁾は目的に応じて設計された 3 つのマグネットシステム

表 4 強磁場ステーションの主要超電導マグネット。

	発生磁界 (T)	運転温度 (K)	有効口径 (mm)	備 考
20 T 大口径超電導マグネット	20.5	1.8	50	
	18	1.8	160	
	15	1.8	314	
40 T 級ハイブリッドマグネット 超電導マグネット部	15	4.2	400(室温)	
超精密磁界マグネットシステム				磁界均一度
① 量子振動測定用	16	2	65	10 mm 直径球内で 10^{-4} 以下
② 固体広幅 NMR 用	15.5	2	70	10 mm 直径球内で 10^{-6} 以下
③ 固体高分解能 NMR 用	11.75	4.2	89(室温)	20 mm 直径球内で 2.6×10^{-6} 以下
18 T 超電導マグネット	18.1	4.2	30	V_3Ga を最内層に使用
スプリットマグネット	12	4.2	30	径方向有効ギャップ 35 mm

に細分化される。NMR, NQR, ド・ハース-ファン・アルフェン効果等の測定プローブも整備され、世界で初めて静止質量の120倍の有効質量を持つ伝導電子の観測に成功する⁽²⁴⁾など、重要な成果が得られ始めている。

18 T 超電導マグネットは、世界で初めて 18.1 T の磁界を発生したマグネットである。4.2 K で運転され、 $\phi 30$ mm の空間を利用して、 Nb_3Al や酸化物系高温超電導材料の臨界電流特性の測定に主として利用されている。

スプリットマグネットは、コイルの軸方向だけでなく、径方向からも磁界中心にアクセスできるため、測定の自由度を広げることができる。2つのコイル間に働く力のサポートが難しいため、高磁界を得ることは困難であるが、12 T を発生するスプリットマグネットを用意する予定である。

これら超電導マグネットを運転するためには液体ヘリウムが必要である。強磁場ステーションでは2台のヘリウム液化・冷凍機が設置される。1台は $69 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ のヘリウム液化能力を有しており、液体ヘリウムの汲み出しと 18 T 超電導マグネット等の冷却に使用される。他の1台は $42 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ の液化能力を有し、20 T 大口径超電導マグネットと 40 T 級ハイブリッドマグネットの超電導マグネットの専用液化機として閉ループで使用される。2台のヘリウム液化・冷凍機は全く独立したシステムで、同時運転が可能である。

6. 高磁界マグネット用材料開発

金属材料技術研究所では、 V_3Ga ⁽²⁵⁾と $(\text{Nb}, \text{Ti})_3\text{Sn}$ ⁽²⁶⁾を開発して 17.5 T 超電導マグネットおよび 18 T 超電導マグネットを製作した伝統に基づき、高磁界マグネット本体の開発のみならず、高磁界マグネット開発に必要な材料開発を行っている。

高磁界用超電導材料としては現在、ニオブチューブ法による Nb_3Al ⁽²⁷⁾と当研究所で発見されたビスマス系酸化物⁽²⁸⁾の線材化の研究が行われている。ビスマス系を始めとする酸化物系高温超電導材料は液体ヘリウム温度での高磁界特性に優れており⁽²⁹⁾、超電導マグネットの発生磁界を大きく向上させる可能性を有している。ディップコート法による Bi-2212/Ag テープ線材を使用して小コイルが作製されており、25 T の磁界中で 0.36 T を発生することに成功している⁽³⁰⁾。近々 20 T 大口径超電導マグネットの内層コイルの内側に組み込み、発生磁界の向上に挑戦する予定である。

パルスマグネットおよび水冷銅マグネット用導体としては、銅銀合金が開発中されている⁽³¹⁾。銀を 16~24 質量% 加え冷間伸線加工および中間熱処理を繰返し行うことで、引張強度 1000 MPa、電気伝導度 80% IACS を越える特性が得られている。表 4 に示した水冷銅マグネット用の使用材料と比較すると、強度の点で大幅に向上していることが明らかであろう。パルスマグネット用導体としての使用はすでに開

始されており、先に述べたように 63 T を発生している。また、板材としても有望であり⁽³²⁾、現在定常磁界としては世界最高の磁界を発生する MIT フランシスビッター国立磁石研究所の HYBRID III の水冷銅マグネットに今年度組込まれる予定である⁽³³⁾。冷間加工後にコイルサイズのインゴットが得られれば、ポリヘリックスおよびモノヘリックス型的水冷銅マグネットの導体として使用できるため、研究が続けられている。

7. お わ り に

高磁界用マグネットの性能は大きく2つの要素によって決定される。施設の所有するユーティリティ(直流電源、コンデンサバンク、ヘリウム液化・冷凍機等)とマグネット用材料である。マグネットの種類によって、いずれに大きく左右されるかは異なっており、一般的に超電導マグネットは材料の占める比重が大きく、水冷銅マグネットではユーティリティに大きく依存している。パルスマグネットは両者の中間であろうか。いずれにしろ高磁界マグネットの開発において、材料研究は欠かすことのできない要素である。

欧米の強磁界発生施設が、内部に材料開発部門を所有しないに比べ、日本の場合、東北大学金属材料研究所の強磁場超伝導材料研究センターそして金属材料技術研究所の強磁場ステーションとも、その母胎が材料研究であり、マグネットと材料それぞれの開発成果を互いにフィードバックできる点が大きな特徴であり、優れた点である。

これまで述べてきたように、20 T 大口径超電導マグネットを始めとする各種高磁界マグネットは、着々とその整備が進められ、成果が得られている。平成6年度に立ち上げを終了する予定の 40 T 級ハイブリッドマグネットも含め、強磁場ステーションの各種マグネットは、順次国際的な共同研究に使用される予定である。超電導、ハイブリッド、パルスとそれぞれの分野で世界最高水準の高磁界マグネットを1カ所に集約した研究施設は他に例がない。利用を検討される一助になれば幸いである。

文 献

- (1) K. Inoue, T. Kiyoshi, T. Asano, K. Itoh, T. Takeuchi, H. Wada and H. Maeda: *Physica B*, **164**(1990), 21.
- (2) K. Inoue, T. Asano, T. Kiyoshi, Y. Sakai, T. Takeuchi, K. Itoh and H. Maeda: *Physica B*, **177**(1992), 7.
- (3) 中川康昭: 日本金属学会会報, **31**(1992), 406.
- (4) T. Kiyoshi, K. Inoue, K. Itoh, T. Takeuchi, H. Wada, H. Maeda, K. Nii, K. Kuroishi, F. Suzuki, T. Takizawa and N. Tada: *Proc. 11th Int'l Conf. Magnet Technology*, (1989), 1330.
- (5) T. Kiyoshi, K. Inoue, K. Itoh, T. Takeuchi, H. Wada, H. Maeda, K. Kuroishi, F. Suzuki, T. Takizawa and N. Tada: *IEEE Trans. Mag.*, **28**(1992), 497.
- (6) T. Kiyoshi, K. Inoue, K. Itoh, T. Takeuchi, H. Wada, H.

- Maeda, K. Kuroishi, F. Suzuki, T. Takizawa, N. Tada and H. Mori: Trans. Appl. Superconductivity, in print.
- (7) K. Tachikawa, Y. Tanaka, K. Inoue, K. Itoh, T. Asano and Y. Iijima: IEEE Trans. Mag., **MAG-21**(1985), 1048.
- (8) 太刀川恭治, 井上 廉, 佐伯 満, 相原勝蔵, 藤永高正, 橋本 宏, 齊藤龍生: 低温工学, **22**(1987), 116.
- (9) M. N. Wilson: *Superconducting Magnets*, Oxford University Press, Oxford, (1986), 314.
- (10) H. Maeda, M. Urata, H. Ogiwara, S. Miyake, N. Aoki, M. Sugimoto and J. Tani: Proc. 11th Int'l Conf. Magnet Technology, (1989), Elsevier Scie. Pub. Ltd., (1990), 1114.
- (11) P. Turowski and Th. Schneider: Physica B, **155**(1989), 87.
- (12) Intermagnetics General Corporation, Immediate Release.
- (13) Oxford Instrument Limited, Press Release.
- (14) H. Shiraki, S. Nakayama, M. Tanaka, S. Murase, N. Aoki, M. Ichihara, K. Watanabe, K. Noto and Y. Muto: MRS Int'l Mtg. on Adv. Mats, Vol. 6, (1989), 43.
- (15) K. Inoue, T. Takeuchi, T. Kiyoshi, K. Itoh, H. Wada, H. Maeda, K. Nii, T. Fujioka, Y. Sumiyoshi, S. Hanai, T. Hamajima and H. Maeda: Proc. 11th Int'l Conf. Magnet Technology, (1989), Elsevier Scie. Pub. Ltd., (1990), 651.
- (16) K. Inoue, T. Takeuchi, T. Kiyoshi, K. Itoh, H. Wada, H. Maeda, T. Fujioka, S. Murase, Y. Wachi, S. Hanai and T. Sasaki: IEEE Trans. Mag., **28**(1992), 493.
- (17) D. B. Montgomery: Solenoid Magnet Design, Robert E. Krieger Publishing Company, Florida, (1980), 107.
- (18) 岩佐幸和: 私信.
- (19) H.-J. Schneider-Muntau, IEEE Trans. Mag., **MAG-17**(1981), 1775.
- (20) F. Bitter: Rev. Sci. Instr. I, **1**, 479; II, **7**, 482; III, **8**, 318; IV, **10**, 373 (1936-1939).
- (21) R. J. Weggel, J. E. C. Williams, M. J. Leupold, E. S. Bobrov and J. A. Dalessandro: Proc. 9th Int'l Conf. Magnet Technology, (1985), SIN, Zürich, (1985), 439.
- (22) T. Asano, Y. Sakai, K. Inoue, M. Oshikiri and H. Maeda: to be published in J. Appl. Phys. Lett.
- (23) 青木晴善, 宇治進也, 清水 禎: 低温工学, **27**(1992), 21.
- (24) H. Aoki, S. Uji, A. K. Albessard and Y. Onuki: J. Phys. Soc. Jpn., **61**(1992), 3457.
- (25) K. Tachikawa and Y. Tanaka: J. J. Appl. Phys., **6**(1967), 782.
- (26) K. Tachikawa, K. Itoh, K. Kamata, H. Moriai and N. Tada: J. Nucl. Mater., **133&134**(1985), 830.
- (27) 竹内孝夫, 小菅通雄, 飯嶋安男, 長谷川 晃, 木吉 司, 松本文明, 井上 廉: 日本金属学会誌, **55**(1991), 472.
- (28) H. Maeda, Y. Tanaka, M. Fukutomi and T. Asano: Jpn. J. Appl. Phys., **27**(1988), L209.
- (29) H. Sekine, K. Inoue, H. Maeda and K. Numata: Proc. 11th Int'l Conf. Magnet Technology, (1989), Elsevier Scie. Pub. Ltd., (1990), 1396.
- (30) J. Shimoyama, K. Kadowaki, H. Kitaguchi, H. Kumakura, K. Togano, H. Maeda and K. Nomura: Appl. Superconductivity, **1**(1993), 43.
- (31) 坂井義和, 井上 廉, 浅野稔久, 前田 弘: 日本金属学会誌, **55**(1991), 1382.
- (32) 坂井義和, 井上 廉, 前田 弘: 日本金属学会秋期大会講演概要, (1992), 781.
- (33) Y. Iwasa, M. J. Leupold, R. J. Weggel, J. E. C. Williams and S. Itoh: Trans. Appl. Superconductivity, in print.

略 号

IACS: international annealed copper standard, %導電率.

NMR: nuclear magnetic resonance, 核磁気共鳴.

NQR: nuclear quadrupole resonance, 核四重極共鳴.