

金属材料技術研究所強磁場ステーションでの強磁場発生技術の進展

金属材料技術研究所強磁場ステーション

木吉 司、浅野稔久、松本真治、中山博之、小菅通雄、湯山道也、伊藤喜久男、和田 仁

1. はじめに

金属材料技術研究所強磁場ステーション (Tsukuba Magnet Laboratory、以下ではその略称である TML を使用する) は世界でも有数の強磁場発生施設として知られている。1998 年 4 月からは共同研究施設として主要設備が外部の研究者にも開放されており、1999 年には外部の研究者から 73 件 (大学 58 件、公的研究機関 7 件、民間企業 8 件) の利用申し込みを受けた。

冷凍機伝導冷却型超伝導マグネットの開発等に伴い強磁場を比較的容易に発生できるようになり、従来見過ごされてきた常磁性や反磁性の物質に対する磁気効果が着目されてきた。これに伴ってより強い磁場での検証が必要になっている。さらに磁気効果によってはこれまでとは異なる磁場の設計・製作や実用化を念頭に置いた磁場発生技術の開発が必要となる。

TML の強磁場発生施設は当初酸化物系高温超伝導材料の特性評価と超伝導発現機構の解明を目的として整備されたものであるが、同時に新しい磁気効果への貢献も重要な研究領域であるとの認識から本共同研究促進事業に参加し、各種のマグネットを開発してきた。本稿ではそれらについて報告する。

2. 汎用強磁場マグネット

2.1 ハイブリッドマグネットおよび水冷銅マグネット

TML には超伝導マグネットの内側に水冷銅マグネットを組み込んだハイブリッドマグネットおよび単独の水冷銅マグネットがそれぞれ 1 台稼動しており、それらを励磁するために出力 15MW (35kA、430V) の直流電源と水冷銅マグネットを冷却するための 15MW の冷却水システムを設置している。

ハイブリッドマグネット用超伝導マグネットは 400mm^φの室温ボアに 14.2T を発生する。通常はこの内側に水冷銅マグネットを組み込んで運転するが、水冷銅マグネットのケース以外の部分を取り外すことにより 360mm^φの空間が利用できる。1999 年にはこの空間を利用した MHD 推進の基礎実験を神戸商船大、中国・電工研究所と共同で実施した[1]。

初期のハイブリッドマグネット用水冷銅マグネットは円筒状の一層コイルを同心円状に配置するポリヘリックス型として製作された。室温ボア 30mm^φの水冷銅マグネットは 1995 年に 36.5T の磁場を発生し、定常磁場の世界記録を更新することに成功した[2]。また室温ボア 50mm^φの水冷銅マグネットも 32.3T という、この口径では最も強い定常磁場を発生した。

TML で開発された銅銀合金が板材として優れた高強度・高導電度を有すること[3] および米国・国立強磁場研究所でビッター板を使用した水冷銅マグネットの新しい設

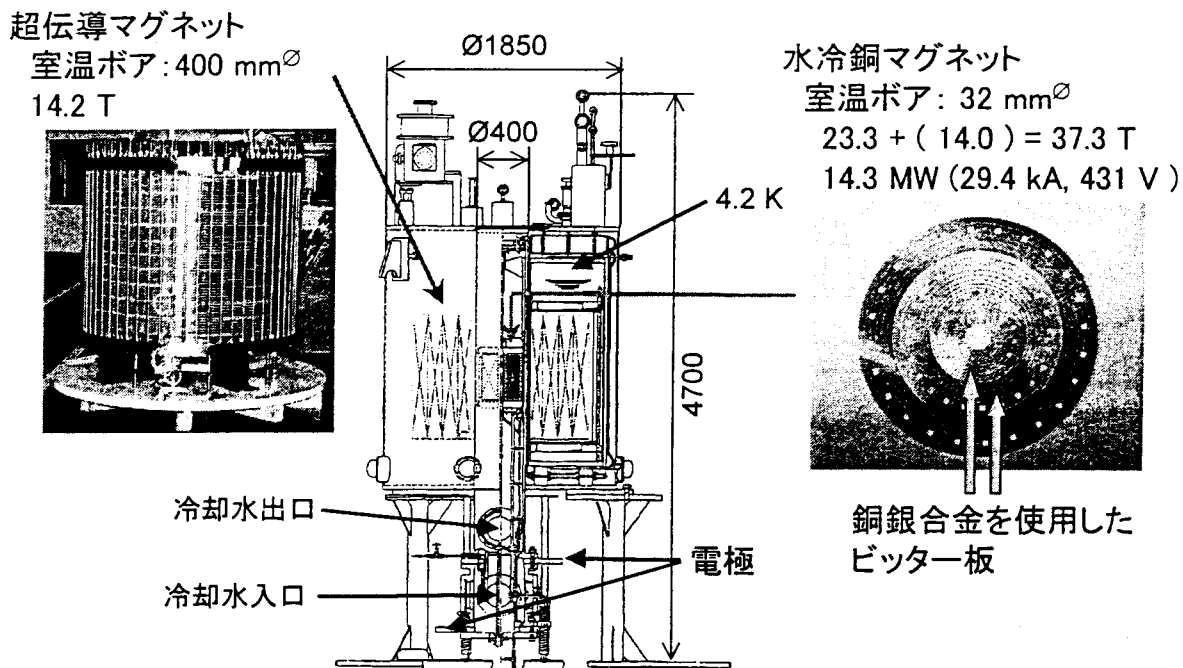


図1 ハイブリッドマグネットの断面模式図。超伝導マグネットと37.3Tを発生した水冷銅マグネットに使用したビッター板の写真も示す。

計の考え方が発表されたこと[4]を踏まえて、TML では新しく銅銀合金を積極的に採用したビッター型水冷銅マグネットの開発に取り組んだ。これに基づき開発した室温ボア 52mm^φのビッター型水冷銅マグネットは 30T までの磁場を定常的にユーザーに提供している。また図1に示した室温ボア 32mm^φの水冷銅マグネットは 1999年9月に中心磁場 37.3T を発生することに成功し、定常磁場の記録を4年ぶりに更新することに成功した。現在はこのマグネットを使用して 35T までの磁場提供が行われている。

さらに室温ボア 32mm^φの単独水冷銅マグネットを、米国・国立強磁場研究所との共同で開発した[5]。本マグネットは 1997年9月に 28.8T を発生している。このときの消費電力は 14.5MW である。ハイブリッドマグネットと比較すると、外側の超伝導マグネットがないため発生磁場は下がるが、高速の励消磁が可能となる点で優れており、現在は 25T までの磁場をユーザーに提供している。

2.2 超伝導マグネット

TML に設置された強磁場大型超伝導マグネットは図2に示すように多層のコイルで構成され、外層および中層コイルで 160mm^φのボアに 18.1T を発生できる。この空間に内層コイルを組み込むことで 1993年に世界で初めて 21T を越える磁場の発生に成功している[6]。本マグネットは主として新しく開発された超伝導線材のコイルとしての実証試験に使用され、1997年にはマトリックス中のスズ濃度を 14wt.%まで増加した Ti 添加 Nb₃Sn 線材の内層コイルを組み込むことにより、61mm^φのクリアボアに 21.7T を発生した[7]。

1998年には図2に示した Bi-2212 線材を使用したダブルパンケーキコイルを内層コイルとして組み込み、61mm^φのクリアボアに最大 21.4T を発生するとともに 50mm^φの試料空間に 21T までの磁場を 35回に渡り安定に発生することによって、酸化物系

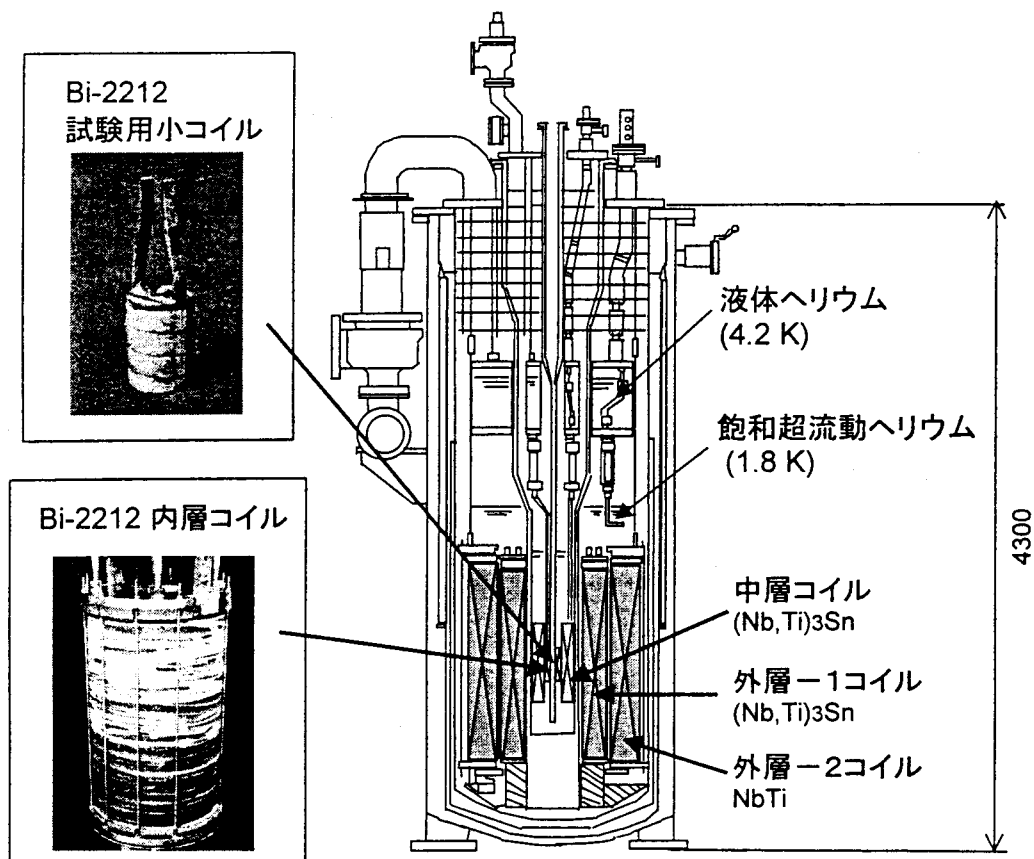


図2 TML の強磁場大型超伝導マグネットの断面模式図。組み込んだ 2 個の Bi-2212 ダブルパンケーキコイルの写真も示す。

高温超伝導材料が強磁場発生用内層コイルとして使用可能であることを世界で初めて実証した。さらに図 2 に示すように 50mm° の試料空間に Bi-2212 ダブルパンケーキの試験用小コイルを追加することによって、 13mm° のクリアポアに 23.4T を発生した [8]。この値は超伝導マグネット単独での最高磁場であるとともに、金属系および酸化物系超伝導コイルを組み合わせることで後述する NMR マグネットが目標とする 23.5T を実現できることを裏付けるものである。

現在でも 21T の磁場中で外径 49mm° までのコイルのクエンチ試験が可能な超伝導マグネットはこれが世界で唯一であり、急熱急冷法 Nb_3Al 線材の小コイルを 21.2T のバックアップ磁場中で運転することにより金属系超伝導線材で最高の 22.5T の発生するなど着実な成果が得られている [9]。

3. 応用指向型マグネット

3.1 1GHz 級 NMR マグネット

生物および化学の分野において強磁場 NMR スペクトロメータは、益々重要となっている。特にポストゲノムとして有力視されているタンパク質の機能解明研究において、機能を司る立体構造の解析が必要であるが、NMR スペクトロメータは微細構造解析に必須のツールとなっている。NMR スペクトロメータの欠点は解析可能となるタンパク質の分子量に上限があることであり、これを克服する手段は発生する磁場の増加である。特に最近になって TROSY という新しい手法が提案された [10]。この手法は ^1H 原子核の共鳴周波数 1GHz (23.5T) 近傍で解析可能となるタンパク質の分子

量を劇的に増加することを予測しており、強磁場 NMR スペクトロメータの開発により加速がかかる状況となっている。

TML では 1995 年より 1GHz 級 NMR マグネットの開発を行っている。本マグネットは金属系外層マグネットと酸化物系内層マグネットで構成され、それぞれ並行して開発されている。室温ボアは 54mm^{ϕ} で、外層マグネットは 132mm^{ϕ} のクリアボアに 21.1T を、内層マグネットは 2.4T を発生する設計である。2つのマグネットは同一のクライオスタットに組み込まれ、加圧超流動ヘリウムによって冷却される。

金属系外層マグネットには新たに開発したマトリックス中のスズ濃度を 15wt.% まで増加したブロンズ法 $(\text{Nb}, \text{Ti})_3\text{Sn}$ 線材を最内周部の強磁場領域のコイルに、Ta を組み込むことで機械的強度を向上した $(\text{Nb}, \text{Ti})_3\text{Sn}$ 線材をその外側の電磁力が強大となる領域のコイルに使用した。外層マグネットの開発は既に終了しており、1999 年 12 月に最初の試験を行った。この試験では酸化物系内層マグネットの代わりに、15wt.% スズ濃度のブロンズ法 $(\text{Nb}, \text{Ti})_3\text{Sn}$ 線材で作製した内層マグネットを組み込んで、図 3 に示すクライオスタットを使用して運転を行った。マグネットは 21.20T まで励磁された後、21.17T で永久電流モードに移行した。これは ^1H 原子核の共鳴周波数 901MHz に相当する。

酸化物系内層マグネットの開発は本プロジェクトで最も困難な部分である。磁場の発生に関しては前述したように、金属系コイルと酸化物系コイルを組み合わせることで 23.4T を発生している。しかし NMR マグネットの場合、発生する磁場の強さだけでなくその空間的な均一度と時間的安定度も要求される。特に 0.01ppm/h 以下という時間的安定度を満足することが最も重要である。この点を解決するために、巻線部に接続を持たず、磁場の均一度の点でも実績のある密巻きコイルの開発を進めている。これまでに、Bi-2212 線材同士および Bi-2212

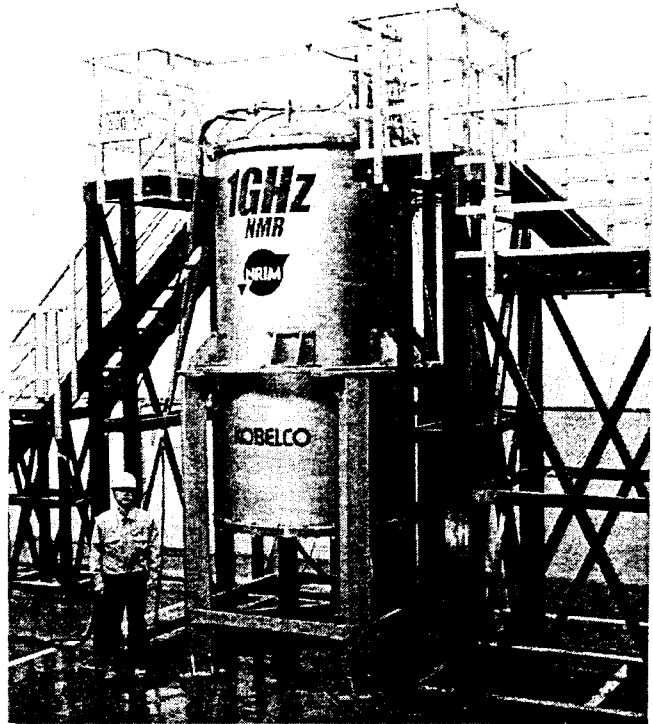


図 3 1GHz 級 NMR マグネット本体写真。

Bi-2212線材-NbTi線材
間接続(半田)

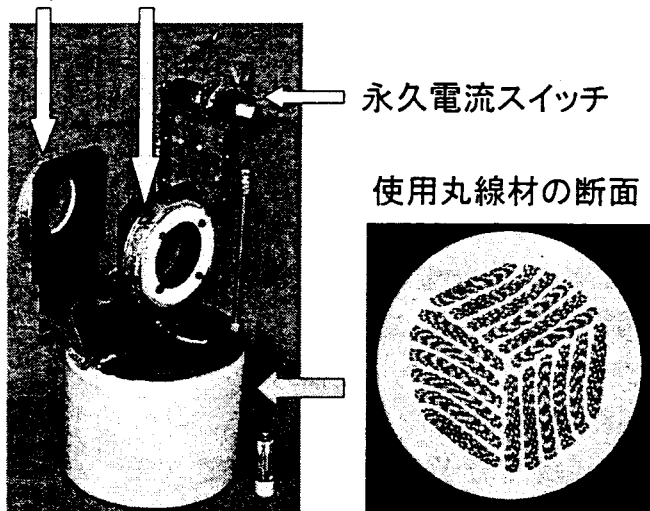


図 4 Bi-2212 丸線材を使用した密巻きコイル。

線材と NbTi 線材の間の超伝導接続技術を開発した。また図 4 に示すような 254m の丸線材を使用した密巻きコイルを作製した。本コイルは 4.2K で外部磁場のない状態で、酸化物系の密巻きコイルとしては最も高い 2.8T を発生した。NbTi/CuNi で巻かれた永久電流スイッチが Bi-2212 線材と NbTi 線材の半田接続を介して取り付けられている。2.43T から開始した永久電流モードの試験では 50 時間後に 1.4T の中心磁場を維持していた。しかしながらこの時点での磁場の安定度は 6720ppm/h であり、NMR としての使用を考慮するとさらなる向上が必要となる。

3.2 均一磁気力場発生マグネット

タンパク質立体構造解析のもう一つの手段が X 線回折であるが、これは溶液で測定する NMR スペクトロメータと異なり、結晶化が必要となる。この結晶化は方法論が確立されておらず、良質の結晶を作製することが立体構造解明と等価であると言われてきている。タンパク質溶液の対流を抑制することが良質な結晶を得るために効果的であるとして、NASA のスペースシャトルを利用した微小重力環境での実験が精力的に行われている[11]。

多くのタンパク質は反磁性であるので磁気力を利用して対流を抑制することが提案されている[12]。磁気力は物質の磁化率と磁気力場 $B_{grad}B$ (B は磁束密度) に比例する。タンパク質の結晶成長のためには重力と反対方向に磁気力を均一に加えることが望ましい。そこで TML では科学技術振興事業団の戦略的基礎研究推進事業の一環として、生命工学工業技術研究所および物質工学工業技術研究所と共同で試料空間内に均一な磁気力場を発生する超伝導マグネットを開発している。円筒の試料空間では軸方向と径方向の磁気力場が存在するが、重力に平行な軸方向の磁気力場を大きくかつ均一に、径方向の磁気力場を最小とするような磁場分布が必要であり、全く新しいタイプのマグネットである。タンパク質の結晶成長には 1 週間程度の長期間に渡って連続して磁場を発生することが必要であり、液体ヘリウムを冷媒として使用しない冷凍機伝導冷却型マグネットとして開発している。

均一な磁気力場を発生するマグネットを実証し、早期に実験に提供するために、1 号機は NbTi 線材のみで作製した。図 5 に示すようにマグネットは通常と異なり内側のコイルの軸長が長い特徴を有している。図から明らかなように z 軸上の磁気力場は 40mm に渡り均一となっている。この磁気力場の分布は実験的に検証

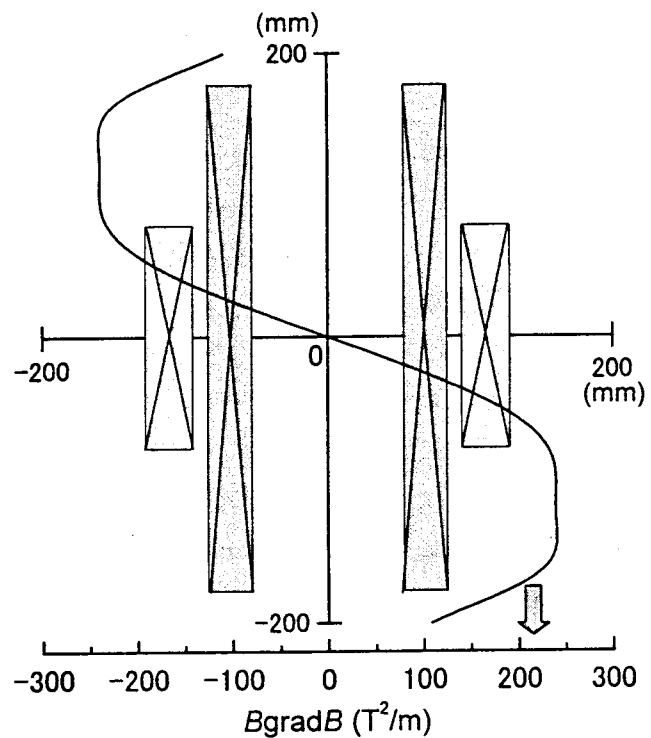


図 5 均一磁気力場発生超伝導マグネット 1 号機の
コイル断面と z 軸上の磁気力場分布。

している。直径 10mm、高さ 10mm の試料空間内で z 方向磁気力場の変化は 0.4%以下であり、径方向磁気力場の大きさは z 軸方向磁気力場の 1.9%以下である。最大 $224\text{T}^2/\text{m}$ (中心磁場 8.7T) を発生することが可能で、1999 年 10 月から 2000 年 4 月まで休むことなく $202\text{T}^2/\text{m}$ の磁気力場を発生するなど順調に稼動している。

典型的な反磁性物質である水の場合、重力を相殺するには $1400\text{T}^2/\text{m}$ の磁気力場が必要となる。発生する磁気力場の増加を目的として、現在 NbTi 線材だけでなく Nb₃Sn 線材も使用する 2 号機の製作を行っている。本マグネットは中心磁場 17.1T で $880\text{T}^2/\text{m}$ の磁気力場を発生する設計となっている。直径 10mm、高さ 10mm の試料空間での z 方向磁気力場のゆらぎは 1%以下であり、径方向磁気力場は z 軸方向磁気力場の 2%以下である。

3.3 その他のマグネット

冷凍機伝導冷却型超伝導マグネットは材料プロセス等の長時間の実験を液体ヘリウム等の補充を行うことなくできる点で優れている。TML では NbTi 線材を使用した、室温ボア 400mm^{ϕ} に 7T の中心磁場を発生する伝導冷却型マグネットの設計を行っている。室温ボア径は既存のハイブリッドマグネットと同じであるため、水冷銅マグネットを組み込み、より強い磁場、磁気力場の提供も可能である。水冷銅マグネット励磁中の遮断等の事故に対して安全に保護されるように運転電流、保護回路を検討している。

実験によっては磁場の方向が非常に重要なパラメータとなる。テープ状超伝導線材の臨界電流は磁場の方向に強い依存性を示し、タンパク質の結晶も磁場による配向が観測されている。試料の回転が一般に採用されている手法であるが、引張試験のような応力と磁場や、重力と磁場という 2 つのパラメータを考慮する実験系では適用できない。このため TML では試料に対する磁場の向きを 360° 回転できるマグネットを現在製作中である。本マグネットは図 6 のように 4 個のソレノイドコイルで構成されており、対向するコイルを 1 組として、2 つの電源で運転される。電源の運転電流を変化することで磁場の回転が可能となる。1 号機は NbTi 線材で作製されており、 50mm^{ϕ} の室温ボアに 1.2T を発生する設計である。均一度は 10mm 直径球で 0.6%以下、30mm 直径球で 6%以下となっている。

4. おわりに

磁場の利用は今後益々活発となると期待され、使用する磁場に対する要求も質、量ともに増大していくと予想される。これまでに述べたように TML では磁場効果の新規探索を目的とした基礎的な実験

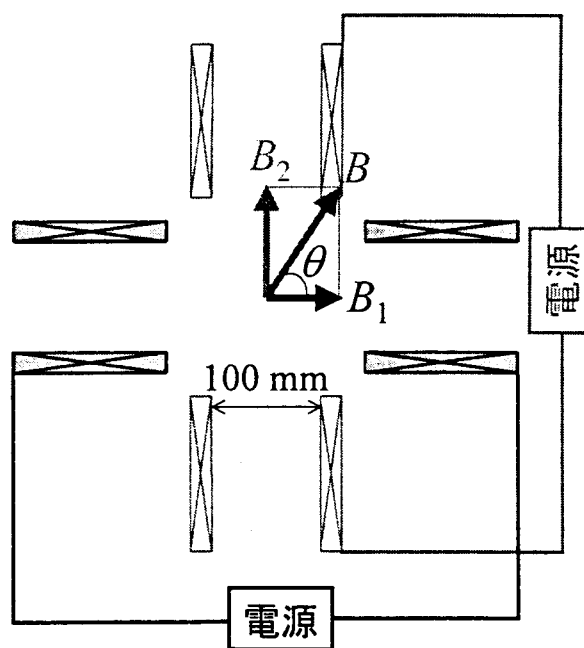


図 6 磁場印加方向可変マグネットの概念図。

に必須な汎用的な強磁場環境を提供するとともに、それらの応用を見越したマグネット開発を行ってきた。今後ともこの方針のもと、世界有数の強磁場施設として既存装置の維持・改良に努めるとともに利用者のニーズに沿ったマグネット・周辺機器の開発、さらに新しい磁場効果の産業応用への橋渡しも含めて新磁気科学の発展に貢献したいと考えている。

具体的には、下記の項目が挙げられる。

- ・ハイブリッドマグネット・水冷銅マグネットの高性能化
磁場の増加だけでなく、測定可能空間の拡大、発生磁場の均一性・安定性の向上、磁気力場に着目したマグネットの開発等も行う。
- ・強磁場超伝導マグネットの高性能化
新超伝導材料を使用して更なる磁場の向上を目指すとともに、測定空間の拡大も行う。
- ・NMR マグネットの開発
2002年3月に向けて現在の1GHz級NMRマグネットの開発を継続するとともに、さらなる磁場の増加に向けた研究を行う。また、NbTi線材では実現できない人体用強磁場MRIマグネットの開発に向けた研究を行う。
- ・均一磁気力場発生超伝導マグネット
現在製作中の2号機を完成させ、実験に提供するとともに、仮想的な微少重力環境を実現するために、さらなる磁気力場の増加を目指す。
- ・伝導冷却型超伝導マグネット
大口径マグネット、磁場印加方向可変マグネットの完成を目指すとともに、ユーザーの要望に沿ったマグネットの開発を行う。
- ・プロセス検証用マグネット
新しく発見された磁気効果を産業応用に適用するには、強磁場・大空間でプロセスを検証する必要がある。この環境を提供するための汎用的な強磁場・大空間マグネット群の開発を行う。

これらには構想段階のものも含まれているが、磁場の利用という観点からは必要なものであり、本共同研究促進事業で芽生えた新磁気科学を大きく成長させるために、実現に向け努力していく予定である。

参考文献

- [1] K. Nishigaki, C. Sha, M. Takeda, Y. Peng, K. Zhou, A. Yang, D. Suyama, Q. J. Qing, L. Yan, T. Kiyoshi, H. Wada, *Cryogenics*, in print.
- [2] K. Inoue, T. Kiyoshi, T. Asano, Y. Sakai, G. Kido, H. Maeda, in: Proc. ICEC16/ICMC, eds. T. Haruyama, T. Mitsui, and Y. Yamafuji (Elsevier Science, U. K., 1997) 1089.
- [3] Y. Sakai, K. Inoue, H. Maeda, *Acta Metall. Mater.*, **43** (1995) 1517.
- [4] B. J. Gao, H.-J. Schneider-Muntau, Y. M. Eyssa, M. D. Bird, *IEEE Trans. Magn.*, **32** (1996) 2503.
- [5] M. D. Bird, S. Bole, Y. M. Eyssa, H.-J. Schneider-Muntau, T. Kiyoshi, T. Asano, Y. Sakai, K. Inoue, H. Wada, in: MT-15 Proc., eds. L. Liangzhen, S. Guoliao, and T. Lu-guang, (Science Press, Beijing, 1998) 642.
- [6] T. Kiyoshi, K. Inoue, K. Itoh, T. Takeuchi, M. Oshikiri, M. Kosuge, Y. Iijima and H. Maeda, *IEEE Trans. Mag.*, **30** (1994) 2110.
- [7] R. Hirose, T. Kamikado, O. Ozaki, M. Yoshikawa, T. Hase, M. Shimada, Y. Kawate, K. Takabatake, M. Kosuge, T. Kiyoshi, K. Inoue, H. Wada, in: MT-15 Proc., eds. L. Liangzhen, S. Guoliao, and T. Luguang, (Science Press, Beijing, 1998) 874.
- [8] T. Kiyoshi, M. Kosuge, M. Yuyama, H. Nagai, H. Wada, H. Kitaguchi, M. Okada, K. Tanaka, T. Wakuda, K. Ohata, J. Sato, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, **10** (2000) 472.
- [9] T. Takeuchi, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, **10** (2000) 1016.
- [10] K. Pervushin, R. Riek, G. Wider, K. Wüthrich, Proc. Natl. Acad. Sci. USA, **94** (1997) 12366.
- [11] E. H. Snell, S. Weisgerber, J. R. Helliwell, E. Weckert, K. Hölzer, K. Schroer, *Acta Cryst.*, **D51** (1995) 1099.
- [12] N. I. Wakayama, M. Ataka, H. Abe, *J. Crystal Growth*, **178** (1997) 653.