930 MHz NMR マグネットの開発

吉川 正敏[†], 木吉 司, 松本 真治, 佐藤 明男, 和田 仁^{*1}, 伊藤 聡^{*2}, 三木 孝史^{*2},
尾崎 修^{*2}, 宮崎 隆好^{*2}, 濱田 衛^{*2}, 村上 幸伸^{*3}, 広瀬 量一^{*3}, 野口 隆志^{*4}

Development of a 930 MHz NMR Magnet

Masatoshi YOSHIKAWA[†], Tsukasa KIYOSHI, Shinji MATSUMOTO, Akio SATO, Hitoshi WADA^{*1},
Satoshi ITO^{*2}, Takashi MIKI^{*2}, Osamu OZAKI^{*2}, Takayoshi MIYAZAKI^{*2}, Mamoru HAMADA^{*2},
Yukinobu MURAKAMI^{*3}, Ryoichi HIROSE^{*3} and Takashi NOGUCHI^{*4}

Synopsis: The first 920 MHz high-resolution NMR magnet has been operating at the Tsukuba Magnet Laboratory (TML) of the National Institute for Materials Science since April 2002. It has proved its effectiveness by determining the three-dimensional structures of protein molecules. To accelerate studies in structural biology and solid-state NMR, a second high-field NMR magnet was developed and installed at TML. Although its basic design was based on that of the 920 MHz NMR magnet, some parts have been improved. We applied a 16 wt.% Sn bronze-processed (Nb,Ti)₃Sn conductor for the innermost coil, replacing the 15 wt.% Sn conductor. This enabled a size reduction of 3.50 mm x 1.75 mm in the first magnet to 2.80 mm x 1.83 mm in the second because of an improvement of more than 20% in critical current density. As the magnetic field generated by the innermost coil was increased, at the same operating current of the first magnet, operation at 930 MHz was expected. The magnet was energized up to 21.6 T without any quenching and operated in a persistent mode at 920 MHz for more than one month. On March 24, 2004, it was excited up to 930 MHz. After the central field was increased to 21.89 T once, it was decreased to 21.86 T, and the persistent-mode operation started from a frequency of 930.7 MHz. This is the highest field that the magnets made of NbTi and Nb₃Sn coils have ever achieved. The field stability and the field homogeneity were measured and it was confirmed that this magnet can be applied as an NMR magnet.

Keywords: high magnetic field, nuclear magnetic resonance, NMR magnet, superconducting magnet

1. はじめに

NMR (Nuclear Magnetic Resonance, 核磁気共鳴) は、生体高分子等の複雑な有機化合物の構造を決定する有力な手段として用いられており、その高性能化が期待されている¹⁾。通常 NMR 装置では、外部磁場に対応する水

素の原子核 (¹H) の共鳴周波数を用いて、何 MHz の NMR 装置と呼ばれるのが一般的である。例えば、100 MHz の NMR 装置とは 2.35 T の磁場を発生する超伝導マグネットが用いられている装置である。

NMR では磁場の増加と共に感度と分解能の飛躍的な向上が期待でき、更に TROSY 法と呼ばれるパルスシーケンスでは 1 GHz 付近の強磁場で最も強い効果が得られ、分解能が飛躍的に向上するため、NMR マグネットの強磁場化、特に 1 GHz を目指した研究開発は、世界各国で精力的に進められている。

物質・材料研究機構 強磁場研究センター (TML) では、2001 年に 920 MHz (21.6 T) の高分解能 NMR マグネット (以下では 920 MHz マグネットと称する。) を開発した^{2,3)}。そのマグネットは、分光計と組み合わせて世界最高の 920 MHz 高分解能 NMR スペクトロメータとして稼働しており⁴⁾、未知のタンパク質試料に関する立体構造の決定等に活用されている。TML では、その後も更なる強磁場化に向けた開発に取り組んでおり、今回、920 MHz マグネットを基本として、新たに開発した Nb₃Sn 線材を最内層コイルに適用したマグネットを開発した。このマグネットは、クエンチを経験することなく 930.7 MHz (21.9 T) の永久電流モードによる磁場発生に成功し、NMR マグネットの最高磁場を更新した。21.9 T は、

Received July 8, 2004

物質・材料研究機構 強磁場研究センター

〒305-0003 茨城県つくば市桜 3-13

Tsukuba Magnet Laboratory, National Institute for Materials Science, 3-13 Sakura, Tsukuba, Ibaraki 305-0003, Japan

^{*1} 東京大学

〒277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5

University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba, 277-8561, Japan

^{*2} (株) 神戸製鋼所 電子技術研究所

〒651-2271 兵庫県神戸市西区高塚台 1-5-5

Kobe Steel Ltd., 1-5-5 Takatsukadai Nishi-ku, Kobe, Hyogo, 651-2271, Japan

^{*3} ジャパン スーパーコンダクタ テクノロジー (株)

〒651-2271 兵庫県神戸市西区高塚台 1-5-5

Japan Superconductor Technology Inc., 1-5-5 Takatsukadai Nishi-ku, Kobe, Hyogo, 651-2271, Japan

^{*4} 池上技術

〒263-0043 千葉県千葉市稲毛区小仲台 8-22, 3-306

Ikegami Technology, 3-306, 8-22 Konakadai Inage-ku, Chiba, 263-0043, Japan

[†] E-mail: yoshikawa.masatoshi@nims.go.jp

NbTi と Nb₃Sn を使用したマグネットで達成された世界最高の磁場でもある。更に、磁場安定度と磁場均一度の測定を行った結果、開発したマグネットが NMR マグネットとしての基本的な性能を有していることを確認した。本報では、マグネットの概要と試験結果を中心に報告する。

2. マグネットの概要

2.1 設計

今回開発したマグネットは、4 個の Nb₃Sn コイルと 3 個の NbTi コイルおよび 2 組の補正コイルから構成されており、最内層の Nb₃Sn コイルを除いて 920 MHz マグネットと同一の設計である。主要諸元を **Table 1** に示す。

920 MHz マグネットでは、最内層コイルにブロンズ法 Nb₃Sn 線材を用い、マトリックスには Cu-15wt.%Sn-0.3wt.%Ti ブロンズを用いた²⁾。一方、今回開発したマグネットでは、新たに開発した Nb₃Sn 線材を最内層コイルへ適用した。ブロンズ法 Nb₃Sn 線材の臨界電流密度 J_c は、ブロンズ中のスズ濃度に依存し、スズ濃度が高いほど J_c が高くなる⁵⁾⁷⁾。しかしながら、ブロンズ中のスズの固溶限は 15.8 wt.%であり、固溶限付近では溶解後のブロンズインゴット中に金属間化合物の析出がみられるようになる。この化合物は、伸線加工時の断線要因であるとともにフィラメントサイズの不均一性の一因でもある。そのため、固溶限近くのスズ濃度を持つブロンズ法 Nb₃Sn 線材の製造は極めて難しい。今回、固溶限を超えた Cu-16wt.%Sn-0.3wt.%Ti ブロンズを用いた Nb₃Sn 線材を工業規模で開発し⁸⁾、それを用いて最内層コイルを製作した。

開発した 16 wt.%Sn ブロンズの Nb₃Sn 線材の J_c の測定結果を **Fig. 1** に示す。Fig. 1 には、920 MHz マグネットの最内層コイルに用いた 15 wt.%ブロンズの線材の測定結果も合わせてプロットした。16 wt.%Sn ブロンズの線材の 4.2 K における J_c は 15 wt.%Sn ブロンズの線材よりも 20 %以上向上したことが分かる。

Table 1 Main parameters of the 930 MHz NMR magnet.

Cold bore diameter (mm)	74
Room temperature bore diameter (mm)	54
Maximum outer diameter of windings (mm)	909.5
Maximum height of windings (mm)	1520
Weight of Nb ₃ Sn conductor (kg)	1384
Weight of NbTi conductor (kg)	3449
Inductance (H)	1126
Operating current (A)	243.9
Central field (T)	21.86
Stored energy (MJ)	33.5
Operating temperature (K)	< 1.6

線材の J_c が向上すれば、線材サイズを小さくすることができる。そのため、コイルの巻数が増加でき、同じ運転電流値 I_{OP} でより強い磁場を発生することが可能となる。従って、920 MHz マグネットの最内層コイルに J_c の高い線材を適用すれば、同じ I_{OP} でより強磁場を狙うことが可能となる。**Table 2** に 920 MHz マグネットと同じ I_{OP} で 930 MHz, 935 MHz, 940 MHz の磁場を発生するために必要な最内層コイルの仕様を示す。 I_{OP} が同じであるため、強磁場ほど最内層コイルの発生磁場割合が大きくなる。そのため、NMR マグネットとして要求される磁場均一度を確保するためには、コイル長さを長くする必要がある。また、発生磁場割合を大きくするには、最内層コイルの巻数を増やす必要があり、線材サイズを小さくする必要がある。しかしながら、磁場安定度を確保するには I_{OP}/I_c を高くする事はできず、0.5 程度以下に抑え

Fig. 1 Magnetic field dependence of non-Cu J_c for the Nb₃Sn conductor with 16 wt.%Sn bronze. Non-Cu J_c for the conductor with 15 wt.%Sn bronze is also plotted for comparison.

Table 2 Specifications for the innermost coil to achieve higher magnetic field with the same operating current of the 920 MHz magnet.

Target frequency	930 MHz	935 MHz	940 MHz
Coil			
Maximum field (T)	21.85	21.96	22.08
Inner diameter (mm)	78.4	78.4	78.4
Outer diameter (mm)	125.9	126.0	126.0
Height (mm)	638.0	652.0	668.0
Conductor			
Width (mm)	2.80	2.99	2.73
Height (mm)	1.83	1.55	1.55
Cu/nonCu ratio	≥ 0.1	≥ 0.1	≥ 0.1
Critical current (A)			
at 22 T, 1.8 K	≥ 450	≥ 450	≥ 450
n-value			
at 22 T, 1.8 K	≥ 30	≥ 30	≥ 30
Length (m)	≥ 860	≥ 970	≥ 1080

Table 3 Specifications of the innermost coil.

	920 MHz	930 MHz
Conductor		
Material	(Nb,Ti) ₃ Sn	(Nb,Ti) ₃ Sn
Size (mm)	3.50 × 1.75	2.80 × 1.83
Cu/nonCu ratio	0.3	0.3
Coil		
Inner diameter (mm)	78.4	78.5
Outer diameter (mm)	124.3	125.6
Height (mm)	599.1	637.9
Number of turns	1953	2579
Operating current (A)	244.2	243.9
Current density (A/mm ²)	40.3	48.3
Coil constant (mT/A)	4.039	5.016

Fig. 2 Cross-sectional photos of (a) 15 wt.% Sn Nb₃Sn conductor with a size of 3.50 x 1.75 mm and (b) 16 wt.% Sn Nb₃Sn conductor with a size of 2.80 x 1.83 mm.

そのため、 I_{OP} が同じであれば、線材に要求される I_C も同じとなる。すなわち、920 MHzマグネットの最内層コイルに用いた 15 wt.%ブロンズの線材と銅比が同じ場合には、930 MHz, 935 MHz, 940 MHzの磁場を発生するためには、それぞれ、20 %, 33 %, 46 %以上の J_C の向上が必要となる。

以上の検討結果を踏まえ、Fig. 1 に示した J_C の測定結果より、930 MHz を目標とすることにした。Table 3 に 920 MHz マグネットと今回開発した 930 MHz マグネットに用いた最内層コイルの諸元を示す。Fig. 2 にそれぞれの線材の断面写真を示す。

2.2 設置

Fig. 3 A frontal view of the 930 MHz NMR magnet.

TML では 920 MHz が設置されている実験棟(第 1NMR 実験棟)の隣に新たに実験棟(第 2NMR 実験棟)を建設し、今回開発したマグネットはその実験棟に設置した。外観写真を Fig. 3 に示す。マグネットは加圧超流動ヘリウムにより約 1.5 K に冷却されている。クライオスタットの外観は 920 MHz マグネットとほぼ同一であり、直径 54 mm の室温ボアを有し、床面からクライオスタット最上部までの高さは約 5 m、胴部直径は約 2 m、冷媒を含めた全重量は約 17 t である。

マグネットは磁気シールドが施された室内に設置され、排気ポンプ、液体窒素製造装置などの運転に必要な機器類はマグネット室の隣の部屋に設置されている。また、停電時に備えて非常用発電機が屋外に設置されている。

3. 試験結果

3.1 冷却

超伝導マグネットの上下に温度センサーを取り付け、温度差が 50 K 以下となるように冷却を行った。Fig. 4 に室温からの冷却過程を示す。室温からの予冷には液体窒素を用い、マグネット下部温度が 77 K となった時点で液体窒素の供給を止めた。真空排気とヘリウムガス置換による精製運転後、液体ヘリウムによる冷却を行った。液体ヘリウムの貯液完了後、超流動ヘリウム温度への冷却を開始し、Fig. 5 に示すように 2 日間で約 1.5 K に到達した。室温から 1.5 K までの冷却には、約 9000 L の液体窒素と約 6500 L の液体ヘリウムを使用した。

Fig. 4 Cooling process from room temperature.

Fig. 5 Cooling process from 4 K to superfluid helium temperature.

3.2 励磁

マグネットの励磁過程を Fig. 6, Fig. 7 に示す。中心磁場はホール素子と METROLAB 社製の NMR テスラメータとで測定した。励磁とともにテスラメータでホール素子を校正し、テスラメータの測定上限である 19 T 以上では、ホール素子のみで測定した。

励磁中はマグネットの AC ロスによる発熱で加圧超流動ヘリウム槽の温度は上昇する。そのため、永久電流モード運転を間に挟みながら、徐々に電流値を増加し、励磁を行った。励磁中および永久電流モードでの保持中もコンピュータによる JT 弁開度の自動制御⁹⁾により、効率的に冷却することができ、実質 8 日間でクエンチすることなく 21.6 T (920.4 MHz) に達した。920 MHz の永久電流モードで約 6 週間保持し、磁場安定度の測定と磁場均一度の調整を実施した。その後、引き続き励磁を行い、オーバershoot による最大磁場 21.89 T に達した後、21.86 T (930.7 MHz) で永久電流モードに移行した。920 MHz から 930 MHz への励磁には 2 日間を要した。永久電流モードに移行した時の加圧超流動ヘリウム槽の温度は

Fig. 6 Excitation process.

Fig. 7 Excitation process from 21.6 T to 21.9 T.

Fig. 8 Field stabilities at the beginning of the persistent-mode operation for 920 MHz and 930 MHz.

1.506 K であった。

開発したマグネットの発生磁場 21.86 T は、NMR マグネットとしての世界最高を更新するのみならず、NbTi と Nb₃Sn を使用した超伝導マグネット、更に室温ポアを有する超伝導マグネットで達成された世界最高磁場でもあ

Fig. 9 Field mapping data on a surface with a 8.5 mm radius after field correction with superconducting shim coils. A calculated curve on a 5 mm surface is also plotted.

る。

3.3 磁場安定度

920 MHzおよび930 MHzで永久電流モードに移行してからの中心磁場の時間変化をFig. 8に示す。920 MHz, 930 MHz いずれの場合も永久電流モードへの移行直後は中心磁場が増加していたが、約5日目にピークを迎えた後は減少に転じている。この中心磁場が増加する原因は、線材内部の電流分布が変化することによるものと考えられるが、具体的なメカニズムは解明されていない。しかしながら、永久電流モードへの移行直後からの磁場減衰がないことは、コイルの熱処理や超伝導接続等のマグネット製作が良好に行われたことを示している。

3.4 磁場均一度

磁場均一度の測定は、920 MHzマグネットに用いたものと同じ装置を用いた²⁾。1 mm³のH₂O試料を組み込んだプローブを半径 8.5 mmの円筒表面上を螺旋状に移動させ、¹HのNMR信号から磁場を測定し、得られた磁場分布の測定結果を級数展開し、磁場の誤差成分を求めた。開発したマグネットでは、920 MHzマグネットと同様

軸方向： Z^0, Z^1, Z^2

径方向： $X, Y, ZX, ZY, XY, X^2-Y^2$

の各成分を補正するための超伝導シムコイルが含まれている。磁場均一度の測定結果から得られた各成分に基づいて、それぞれの超伝導シムコイルの電流値を変化させ、磁場均一度の調整を実施した。調整後の磁場分布の測定結果をFig. 9に示す。高分解能 NMR マグネットでは、直径 10 mm、高さ 20 mm の領域における磁場の均一性が ± 0.1 ppm 以下であることが要求される。半径 8.5 mm で

の測定結果から半径 5 mm の領域を計算した磁場分布は ± 72.5 Hz (± 0.078 ppm) 以下に収まっており、磁場の均一性は高分解能 NMR マグネットとしての要求仕様を満足していることが明らかとなった。

4. まとめ

ブロンズの固溶限を超える 16 wt.%スズのブロンズを用いたNb₃Sn線材を開発した。この線材を用いた超伝導マグネットを開発し、21.86 Tの永久電流モードによる磁場発生に成功した。これは、¹Hの共鳴周波数で930.7 MHzに相当し、NMRマグネットとしては世界最高磁場である。磁場安定度と磁場均一度の測定を行った結果、開発したマグネットがNMRマグネットとしての基本的な性能を有していることを確認した。

今後は、NMR分光計と組み合わせて、NMRスペクトロメータとして、タンパク質などの構造・機能解析および固体触媒など材料研究に活用される予定である。また、スズ濃度増加と添加元素の追加によるブロンズ法Nb₃Sn線材の改良、および、Nb₃Al線材や新たな線材の開発を行い、更なる強磁場化にも取り組んでいく予定である。

参 考 文 献

- 1) H. Maeda, Y. Ito and S. Yokoyama: "Application of Superconducting NMR for Protein Structure Determination," J. Cryo. Soc. Jpn. **37** (2002) 2-9 (in Japanese)
前田秀明, 伊藤 隆, 横山茂之: 「ポストゲノム研究で活用される超伝導 NMR」, 低温工学 **37** (2002) 2-9
- 2) T. Kiyoshi, et al.: "Persistent-Mode Operation of a 920 MHz High-Resolution NMR Magnet," IEEE Trans. Appl. Supercond. **12** (2002) 711-714
- 3) T. Kiyoshi, et al.: "Operation of a 920-MHz High-Resolution NMR Magnet at TML," IEEE Trans. Appl. Supercond. **13** (2003) 1391-1395
- 4) T. Kiyoshi, et al.: "Present Status of 920 MHz High-Resolution NMR Spectrometers," IEEE Trans. Appl. Supercond. (to be published)
- 5) T. Miyazaki, et al.: "Development of Superconductors for 1 GHz NMR Magnet -High Critical Current Density (Nb, Ti)₃Sn Conductor-, " J. Cryo. Soc. Jpn. **33** (1998) 724-732 (in Japanese)
宮崎隆好ら: 「1 GHz級NMRマグネット用超電導導体の開発 - 高臨界電流密度 (Nb, Ti)₃Sn導体- 」, 低温工学 **33** (1998) 724-732
- 6) H. Sakamoto, et al.: "Very high critical current density of bronze-processed (Nb,Ti)₃Sn superconducting wire," IEEE Trans. Appl. Supercond. **10** (2000) 971-974
- 7) G. Iwaki, J. Sato, S. Inaba and K. Kikuchi: "Development of bronze-processed Nb₃Sn superconducting wires for high field magnets," IEEE Trans. Appl. Supercond. **12** (2002) 1045-1048
- 8) T. Miyazaki, et al.: "Development of High Sn content Bronze Processed Nb₃Sn Superconducting Wire for High Field Magnets," IEEE Trans. Appl. Supercond. (to be published)

- 9) T. Miki, et al.: "The Measurement and Control System for 920 MHz NMR Magnet," IEEE Trans. Appl. Supercond. (to be published)

吉川 正 敏

1965年9月17日生。1988年大阪府立大学工学部電子工学科卒業。1990年同大学大学院工学研究科電子工学専攻博士前期課程修了。同年(株)神戸製鋼所入社。2002年より物質・材料研究機構に出向中。主として超伝導マグネットの開発に従事。低温工学協会会員。

木 吉 司

1959年8月4日生。1983年東京大学工学部原子力工学科卒業。1988年同大学大学院工学系研究科博士課程修了。同年4月より科学技術庁金属材料技術研究所(現独立行政法人物質・材料研究機構)勤務。現在、同機構強磁場研究センター副センター長。主として強磁場超伝導マグネットの開発に従事。低温工学協会、日本金属学会、日本MRS、応用物理学会会員。工学博士。

松 本 真 治

1968年5月19日生。1992年大阪大学基礎工学部物性物理工学科卒業。1998年同大学基礎工学研究科博士課程修了。CREST研究員を経て、1999年4月より科学技術庁金属材料技術研究所(現独立行政法人物質・材料研究機構)に勤務。現在同機構強磁場研究センター研究員。主に強磁場発生技術の研究に従事。低温工学協会会員。理学博士。

佐 藤 明 男

1979年 東京工業大学理工学研究科(応用物理学専攻)博士課程修了。(株)東芝を経て、1994年科学技術庁金属材料技術研究所(現独立行政法人物質・材料研究機構)に入所。2002年6月 物質・材料研究機構 強磁場研究センター低温発生技術グループリーダー。現在に至る。強磁場研究施設にて大型マグネット運転チームを率いる傍ら極低温システムを研究している。920 MHz NMRの超流動ヘリウム冷却システムの開発を担当した。最近の関心は2 K 冷凍機。冷凍機による高磁場 NMR/magnet を目指している。低温工学協会企画担当理事。理学博士。

和 田 仁

1945年生。1974年東京大学大学院冶金専門科博士課程修了。同年科技厅金属材料技術研究所(現物質・材料研究機構)に入所。2002年強磁場研究センター長。2004年東京大学大学院新領域創成科学研究科教授。超伝導国際標準化委員。マグネットテクノロジー(MT)国際組織委員。低温工学協会、日本金属学会、MRS、日本MRS、米国セラミクス学会会員。工学博士。

伊 藤 聡 1963年10月生。1987年横浜国立大学工学部機械工学科卒業。同年神戸製鋼所入社。以来、ヘリウム液化機、クライオスタットの研究・開発に従事、現在に至る。同社技術開発本部電子技術研究所超電導研究室主任研究員。低温工学協会会員。

三 木 孝 史

1964年11月12日生。1988年大阪市立大学理学部物理学科卒業。1990年3月大阪市立大学大学院理学研究科修士課程修了。同年4月(株)神戸製鋼所入社。主として超電導応用・低温関連機器の開発に従事。低温工学協会会員。

尾 崎 修

1965年8月16日生。1989年神戸大学理学部物理学科卒業。1991年同大学大学院自然科学研究科物理学専攻修士課程修了。同年(株)神戸製鋼所入社。1997~2002年物質・材料研究機構に出向。2004年4月より東京大学大学院新領域創成科学研究科共同研究員。主として超電導マグネットの研究開発に従事。低温工学協会会員。学術博士

宮 崎 隆 好

1965年7月23日生。1989年九州大学理学部物理学科卒業。1991年3月同大学大学院理学研究科修士課程修了。同年(株)神戸製鋼所入社。1998年12月科学技術庁科学技術政策局へ出向、2000年12月帰任。2004年3月九州大学大学院システム情報科学府博士後期課程修了。主として金属系超電導線材の研究開発に従事。低温工学協会会員。工学博士。

濱 田 衛

1955年3月5日生。1977年3月大阪大学理学部物理学科卒業。1979年3月大阪大学大学院理学研究科物理学専攻前期課程修了。同年4月(株)神戸製鋼所入社。1989年11月ジャパンマグネットテクノロジー(株)へ出向。1999年4月(株)神戸製鋼所へ帰任。現在、電子技術研究所に勤務。主として超電導マグネットの開発に従事。低温工学協会、日本物理学会会員。工学博士。

村 上 幸 伸

1967年8月28日生。1992年3月神戸大学大学院工学研究科機械工学専攻修士課程修了。同年4月(株)神戸製鋼所入社。2002年4月よりジャパンスーパーコンダクタテクノロジー(株)へ出向。主に超電導線材の開発に従事。低温工学協会、日本機械学会会員。

広瀬 量一

1955年10月23日生。1981年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。同年(株)神戸製鋼所に入社、技術開発本部勤務。1999年関連会社のジャパンマグネットテクノロジー(現ジャパンスーパーコンダクタテクノロジー)に出向、高磁場NMR用超電導マグネットおよび無冷媒超電導マグネットの設計・開発に従事。

野口 隆志

1950年生。1975年日本大学理工学部物理学科卒業。1977年日本大学大学院理工学研究科修士課程修了。(株)鈴木商館、古河オックスフォードテクノロジー(株)を経て、現在極低温技術コンサルティング事務所「池上技術」。主に低温、真空の基礎技術指導に従事。低温工学協会、日本真空協会、日本磁気共鳴医学会会員。