

# NIMS NOW

NATIONAL INSTITUTE FOR MATERIALS SCIENCE

No.1  
2016

世界最高磁場

# NMR

～1,000MHzの壁を超えて～

# 世界最高磁場 NMR

～1,000MHzの壁を超えて～

2011年3月11日—

世界最高磁場を目指すNMR開発プロジェクトは、  
装置の完成を間近に控えていた。

世界で誰も超えたことがない1,000MHzという磁場を超える。

その目標は、まさに手の届くところにあった。

そこに襲い掛かる自然の脅威—

なんとか復旧のめどを立て、さあこれからもう一度という時、  
今度は、開発に心血を注いできたチームリーダーを病魔が襲う—





数々の困難に立ち向かいながらも、  
超えなければならなかった1,000MHzの壁とは？  
NMRは人類の未来に何をもたらすのか？

最高磁場達成に執念を燃やした  
プロジェクトチームの証言をもとに、  
その開発の歴史と、世界最高磁場達成の裏側に迫る。



特別対談

# 超1GHz-NMRへの

前田秀明

理化学研究所  
ライフサイエンス技術基盤研究センター  
NMR施設 施設長

# 挑戦

清水 禎

物質・材料研究機構  
中核機能部門  
強磁場ステーション ステーション長

構造生物学や分析化学、材料科学など幅広い分野の研究に欠かせないNMR(核磁気共鳴)装置。高精度な測定を実現するために、より高い磁場の発生を目指した競争が繰り広げられてきた。そして2014年、NIMSと理研などからなる共同研究チームは世界最高磁場となる1,020MHz(24.0T)<sup>\*</sup>を発生できるNMR装置の開発に成功。プロジェクトを牽引した二人が、世界最高磁場達成までの道のりと、今後の展望を語り合う。

<sup>\*</sup>NMRでは磁場の強さを周波数(Hz:ヘルツ)で表します。

T=テスラ

## NMR装置は レーダー研究から生まれた

**清水** 私たちが1,020MHzという世界最高磁場のNMR装置の開発に成功するまでには実に長い苦難の道のりがあるわけですが、まずはNMR装置の歴史を振り返ってみましょう。

**前田** NMR装置が、第二次世界大戦中に行なわれていたレーダー研究の副産物として生まれたことは、あまり知られていませんね。レーダーもNMRも携帯電話も仕組みは同じで、相手に電波を送って、返ってきた信号を受け取るものです。

**清水** 戦時中アメリカで、軍事目的としてレーダー研究を行っていた科学者の中に、パーセル、ブロッホがいました。戦後、大学に戻った彼らは、磁場中に置かれた原子核が固有の周波数の電磁波と相互作用する核磁気共鳴（NMR）という現象を、それぞれ独立に発見しました。そして、スタンフォード大学でブロッホに学んだバリアンが、1948年にバリアン社をつくり、NMR装置の製造販売を始めました。バリアン社はスタンフォード大で初の大学発ベンチャーです。でも当初の主力製品はレーダー用の真空管でした。

バリアン社では初めからNMR装置に力を入れていたわけではなく、指導教官への義理で始めたのではないかという気がします。NMR装置が目されるようになったのは、1950年に分子の構造を調べることができると分かってからです。さらに医療で使われるMRI（核磁気共鳴画像法）にまで発展するとは、バリアンはまったく想定していなかったでしょう。

**前田** 1956年、日本電子、現在のJEOL RESONANCE（以下、JEOL）がNMR装置の製造販売を開始。10年ほどしてドイツのブルカー社が参入しました。日本は、NMR装置の製造販売では世界2番目、MRIの製造販売は世界初です。そして現在は、シェアトップの座はブルカー社に譲ってしまっている状況ですね。

## 超伝導磁石の実現 ブレークスルーは日本発

**清水** NMR装置の構造は現在に至るまでほぼ同じで、大きな違いは磁場の強さですね。

**前田** そうです。NMR装置では、試料が強い磁場の中にあるほど、きれいな信号が返ってきます。NMR装置の開発は、いかに強い磁場を発生させるかの歴史でもあります。1970年代までは鉄芯に銅線を巻いた電磁石に電流を流して磁場を発生させていて、200MHzにも届いていませんでした。超伝導体を使った超伝導磁石ならば高い磁場を発生させることは分かっていたのですが、超伝導体の線材をつくる技術がなかったのです。大きなブレークスルーをもたらしたのが、金属材料技術研究所（現 NIMS）の太刀川恭治さんです。以前はニオブチタンという超伝導材料を使っていたため、400MHzまでの磁場しか作れませんでした。しかし彼のおかげで500MHz以上の高磁場が実現できるようになったのです。<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>詳しくは10ページをお読みください。

## プロジェクトは三度目の正直

**前田** 1990年代になると、900MHzを超えるというのが世界の目標でした。熾烈な競争の中、NIMSの木吉さんと清水さんが2001年に920MHz、さらに2004年に930MHzを達成しました。見事でしたね。

**清水** 1988年から始まった科学技術庁の「超伝導材料研究マルチコアプロジェクト」の一環でした。

**前田** その成功を受けて、木吉さんと私で科学技術振興機構（JST）の先端計測分析技術・機器開発プログラムに応募しようという話になったのです。950MHzを目指すという計画を出しましたが、採択されませんでした。次に970MHzで出したのですが、また落ちてしまった。もっと技術的な改革がある計画でないと採択されないだろうと、金属材料技術研究所（現NIMS）の前田弘さんが1988年に発見したビスマス系の銅酸化物高温超伝導体を使って、まだ誰も到達していない超1GHzを目標に掲げました。そして三度目の正直で、ようやく今回の「超1GHz-NMRシステムの開発」プロジェクトが2006年からスタートしたのです。

**清水** 「超伝導材料研究マルチコアプロジェクト」が始まって1年もしないうちに銅酸化物高温超伝導体が見つかりました。そこで計画を練り直して銅酸化物高温超伝導体も研究対象とし、目標磁場も超1GHzに引き上げました。しかし、銅酸化物高温超伝導体は瀬戸物、セラミックです。力を加えるとポキンと割れてしまう。細く長い線をつくり、巻き棒に巻いてコイルにするのは、Nb<sub>3</sub>Snよりはるかに難しいことです。そのため、そのプロジェクトでは高温超伝導磁石の実現には至りませんでした。

**前田** 高温超伝導磁石を使えば、理論上1.5GHzまで出ます。しかし、NMRの学会などで高温超伝導磁石の話をする、「うまくいくはずがないから、やめた方がいい」と散々言われました。NMR装置の磁場は非常に高い安定度が求められます。高温超

## 1GHzを超えると 新しい世界が拓けてくる。 私たちは、その入り口に 一歩踏み入れたのです。

前田秀明



伝導磁石でそれができるのか、正直なところ自信はありませんでした。

**清水** 素晴らしいですね。昨今は計画書通りの実現が評価されます。しかし、もし計画書の通りに実現できたのなら、それは元々の計画が大したものではなかったことを意味していて、不可能と思われていたことの実現こそが素晴らしいのです。

**前田** 私は東芝で超伝導磁石の研究開発をやっていたときからずっと、世界で一番磁場の高い装置をつくることを生きがいとしてきました。当時の超伝導技術のフロンティアは高温超伝導磁石です。ならば、挑戦してみようと思ったのです。

## ついに1GHzを超えた

**清水** 「超1GHz-NMRシステムの開発」プロジェクトは、NIMSと理研、神戸製鋼、JEOLというベストメンバーで実施しました。NIMSは超伝導磁石の基本設計や運転を担当し、神戸製鋼は超伝導線の巻き線技術を開発し、超伝導磁石を製作しました。超伝導線は、住友電気工業が開発したものです。JEOLはNMR装置、分光器、プローブの開発・製造を、理研は電源や磁場の品質向上のための装置開発と、タンパク質の計測を担当しました。

**前田** 磁場が出たときは感無量でしたが、それまではビクビクでしたよね。

**清水** そう、ビクビクでした。1ヶ月かけて毎日少しずつ磁場を上げていき、1,000MHzを超えたときから、今日が最期の日になってしまうかもしれないと心配で毎日のように記念写真を撮っていました。そして2014年10月17日に1,020MHzを達成できたのです。

**前田** タンパク質の立体構造解析も行ないました。700MHzのNMR装置と比べて、感度と分解能が大きく向上していることが確かめられました。世界最高磁場が出たというだけでなく、NMR装置としてきちんと機能することを示すのは重要です。そうして初めて、生命科学のコミュニティにも認められるのです。

**清水** 「超伝導材料研究マルチコアプロジェクト」から20数年。ようやく1GHzを超

えるという目標を達成できました。今回は920MHzのNMR装置を改良して、超伝導磁石の一部をビスマス系の高温超伝導磁石に置き換え、Nb<sub>3</sub>Snとニオブチタン(NbTi)の超伝導磁石を併用しています。高温超伝導磁石を増やせば、もっと高い磁場を出すことができます。

**前田** 学会でこの成果を発表したとき、アポロのアームストロング船長の月面の足跡の写真を映し、「この一歩は小さな一歩だけれども、将来に向けた非常に大きな一歩なんだ」と言ったら、とても受けていました。高温超伝導磁石で1GHzを超えられることは実証できたので、あとは最適化していくだけです。

**清水** 今や世界の目標は1.5GHzです。それを達成できれば、これまで不可能だった無機材料の解析も可能になります。

**前田** タンパク質の解析でも1.5GHzは魅力的です。感度や解像度が上がるだけでなく、計測時間が大幅に短縮できるので、研究を効率的に進められるようになります。

## 度重なる苦難を超えて

**清水** このプロジェクトを振り返ると、東日本大震災とリーダーだった木吉さんが亡くなられたことが大きいですね。NMR装置の組み立てが終わり1ヵ月後に磁場を出そうとしていたときに、あの地震が起きたのです。多くの重要箇所が壊れてしまいました。しかも、木吉さんが地震の2年後に急に亡くなられてしまった。その後、私がリーダーを引き継ぐことになったのですが、壊れたNMR装置は表面上直っても磁場は出るかどうかわからないとも言われました。しかし、日本の超伝導研究の集大成ともいえる物を、もう一歩のところまでできていながら諦めてしまうなんてバカなことはない。そう思い、13人の特別チームをつくり、2年かけて復旧しました。磁場が出たときは、本当にうれしかった。前田さんは、プロジェクトを振り返ってどのように感じていますか。

**前田** 私は先端計測プログラムに2回落ちながらようやく決着を見たということで、画竜点睛だと感じています。しかし、感慨に浸ってはいられません。アメリカやヨーロッ



## 日本の超伝導研究は世界トップクラス。あとはいかに戦略を立てるか。

清水 禎

パでは1.2GHzのNMR装置の開発計画があると聞きます。私たちは、すぐ追い抜かれてしまうかもしれません。そうならないように、日本も戦略を立てる必要があります。向こうの動きのさらにその先を読んで動くくらいのことをしないと駄目でしょう。

**清水** 日本では超伝導の研究が盛んで、基礎理論、応用、実用化のすべてで世界トップクラスの研究者がいます。今回培った技術は、MRIや核融合、リニアモーターカー、超伝導送電線などに応用されていくでしょう。しかし、欧米に比べて戦略がないというのも事実です。NIMSとしても早急に対応していきたいと考えています。

(文・鈴木志乃/フotonクリエイト)

# 超伝導体の果てしなき探索

## 電気抵抗がゼロになる夢の物質

超伝導とは、物質の電気抵抗がゼロになる現象である。冷却していくとある温度で超伝導状態になる物質を「超伝導体」、その温度を「臨界温度(または超伝導転移温度)」という。

電気抵抗がゼロなので、超伝導体を送電線に使えばエネルギーを損失することなく、大量の電気を送ることができる。また超伝導体をコイル状に巻いて超伝導磁石をつくれば、銅線を巻いた従来の電磁石よりはるかに強い磁場を発生できる。こうした特性を持つ超伝導体は、電力輸送などのエネルギー分野、リニアモーターカーなどの輸送分野、そしてNMR(核磁気共鳴)装置やMRI(核磁気共鳴画像法)装置などの生化学や医療といった、さまざまな分野で応用されている。

## 次々に発見される超伝導体

超伝導現象は、1911年に発見された。水銀(Hg)を冷却していくと、4.2K(K:絶対温度、0K=-273.15°C)で電気抵抗が突然なくなったのだ。その後、ニオブ(Nb)

や鉛(Pb)などの金属元素が超伝導状態になることが分かった。1950年代になると、合金のニオブチタン(NbTi)や金属間化合物のニオブ3スズ(Nb<sub>3</sub>Sn)など、新しい超伝導体が次々と発見された。

NbTiは9.9K、Nb<sub>3</sub>Snは18Kと、新しい超伝導体が見つかるたびに臨界温度は高くなっていった。しかしこれらの金属系超伝導体を臨界温度まで冷却するには、希少で高価な液体ヘリウムが必要になる。超伝導を広範に応用する際の足かせとなるため、さらに臨界温度の高い超伝導体が求められた。

## 臨界温度の高い超伝導体を探せ

多くの研究者たちが探索を続けた結果、1986年、銅酸化物が超伝導状態になることが分かった。金属系の超伝導体より臨界温度がはるかに高い「高温超伝導体」の発見だ。これをきっかけに起きた高温超伝導体の探索フィーバーの中、1988年にNIMSの前身である金属材料技術研究所の前田弘が、ビスマス(Bi)を添加した銅酸化物が超伝導状態になることを発見。臨界温度は110Kだ。

銅酸化物高温超伝導体が注目されるのは、豊富で安価な液体窒素で超伝導を実現できるからだけではない。超伝導状態の物質に、ある強さ以上の磁場がかかると、臨界温度以下でも電気抵抗が生じ始める。そのときの磁場の強さを「臨界磁場」という。金属系の超伝導磁石で発生できる磁場は23.5T(約1,000MHz)が限界。一方、銅酸化物の高温超伝導磁石ならば、理論的には50T(約2GHz)まで発生可能になるのだ。

## 新しい鉄系の高温超伝導体も発見

1993年には臨界温度134KのHgを添加した銅酸化物高温超伝導体、また金属系超伝導体では2001年に臨界温度39Kの2ホウ化マグネシウム(MgB<sub>2</sub>)が発見されている。2008年には、まったく新しい鉄系の高温超伝導体が発見された。臨界温度は58Kである。

今後、冷却を必要とせず常温で超伝導となる物質が見つければ、応用は一気に進む。新しい超伝導体の探索はこれからも続く。

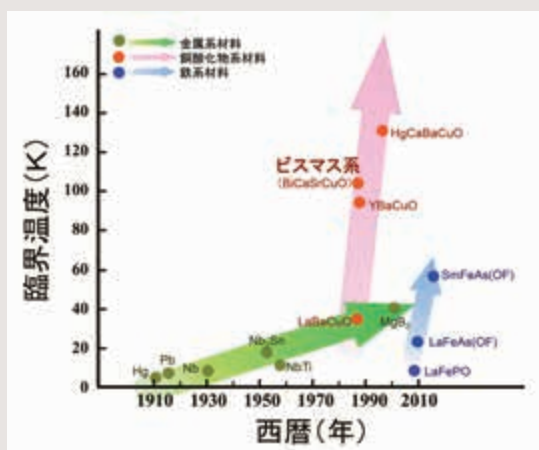


図1 超伝導体臨界温度の推移



図2 ビスマス系高温超伝導体

# NMR装置を解剖する

NMRとは、Nuclear Magnetic Resonance (核磁気共鳴) の略。

磁場の中に置いた試料に高周波の電磁波を照射すると、試料中の原子の原子核と相互作用して電磁波のエネルギーの一部が吸収・放出される。この核磁気共鳴という現象を利用すると、原子同士がどのように結合しているかという分子構造や、物性を決める電子の状態などが分かる。NMR装置は、磁場を発生させる「超伝導磁石」、試料への電磁波の照射と核磁気共鳴による信号の検出を行なう「プローブ」、電磁波の発生や照射を制御する「分光計」、データを処理する「コンピュータ」で構成される。



## 超伝導接続

コイル状に巻いた超伝導線の端と端の2本をつないだとき、つなぎ目部分も超伝導状態になっていることを超伝導接続という。すべてのつなぎ目が超伝導状態となっている場合、超伝導磁石全体が完全に超伝導状態となり、流した電流は減衰することなく永久に流れ続ける。ビスマス系銅酸化物高温超伝導体は、まだ超伝導接続を実現できていない。

## 超伝導磁石

ビスマス系高温超伝導磁石

ニオブ3スズ超伝導磁石

ニオブチタン超伝導磁石

冷却していくと電気抵抗がゼロになる超伝導体<sup>※1</sup>でつくった線材<sup>※2</sup>をコイル状に巻いたものを超伝導磁石という。超伝導磁石に電流を流すと、中心に強い磁場が発生する。従来のNMR装置では、ニオブチタン (NbTi) とニオブ3スズ (Nb<sub>3</sub>Sn) という金属系超伝導体が主に使われている。世界最高磁場1,020MHzを達成したNMR装置では、中心部にビスマス (Bi) -2223という銅酸化物高温超伝導体を使用。高温超伝導体を使った超伝導磁石は、より強い磁場を発生することができる。

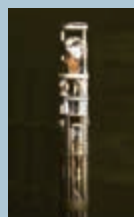
※1 超伝導体について、詳しくは7ページをお読みください。

※2 線材化について、詳しくは10ページをお読みください。



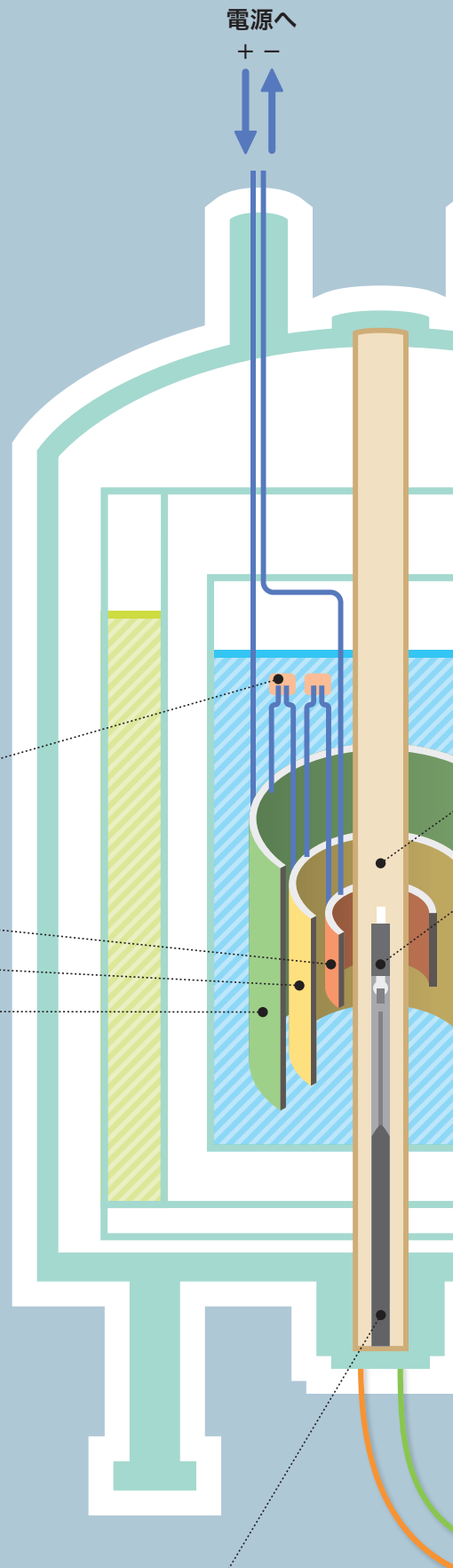
## ■ Bi-2223線材を巻いている様子

総延長約3kmのBi-2223線材を、直径約10cm、長さ約1mのコイル状に巻いていく。この線材は、幅約4mm、厚さ約0.2mmのテープ状である。



## プローブ

電磁波を試料に照射し、核磁気共鳴によって生じるNMR信号を受信する。





液体ヘリウム

液体窒素

### 液体ヘリウム (-269°C)

超伝導磁石は、超伝導状態を維持するために液体ヘリウムで満たしたタンクの中に入れて冷却する。外気温の影響を少なくするため、液体窒素(-196°C)と複数の真空層やアルミ箔、ステンレスで囲まれている。液体ヘリウムと液体窒素は蒸発するので定期的に補充する。

液体窒素 (-196°C)

常温

断熱・真空



### 試料管

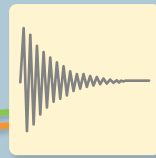
試料は、直径約5mmの細い管に入れる。試料管を高速で回転させることで、より精度の高い解析ができる。

### 分光計

高周波の電磁波の発生と照射を制御する。プローブが受信したNMR信号を増幅してコンピュータに送る。

### コンピュータ

NMR信号をフーリエ変換して、NMRスペクトルを求める。

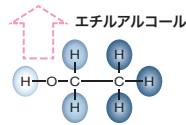


NMR信号



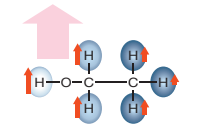
#### ■ 磁場なし

原子核は1個1個が小さい磁石になっている。磁場がないとき、磁石はそれぞれ勝手な方向を向いていて、平均して磁化はない。



#### ■ 弱い磁場

磁場がかかると、磁場の方向に磁化(赤矢印)が発生する。電子には磁場を打ち消す作用があるため、原子核のまわりに電子が多いと磁化の大きさが小さくなる。

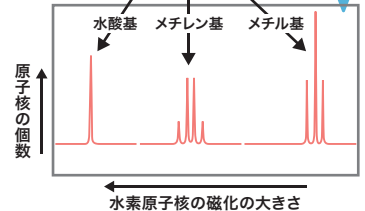
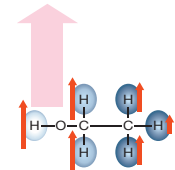


水酸基 : 小  
メチレン基 : 中  
メチル基 : 多

電子数 : 小 中 多  
磁化の大きさ : 大 中 小

#### ■ 強い磁場

磁化の大きさは非常に小さい。磁場を強くすると磁化の大きさが大きくなるため、高精度に測定することができる。



高周波電磁波の照射

NMR信号の受信

### NMRスペクトル解析

NMRスペクトルの横軸は、分子を構成している原子核の磁化の大きさを表している。磁化の大きさが大きいほど左に、小さいほど右にピークが出る。縦軸は、原子核の個数を表す。このNMRスペクトルから、原子同士の結合状態や電子の状態など分子構造に関する情報を

得ることができる。例えば、エチルアルコールのNMRスペクトルからは、エチルアルコールが水酸基とメチレン基とメチル基で構成されていること、水酸基の水素原子核の電子は少なく、メチル基の水素原子核の電子は多いことが分かる。

# 線材化なくして超伝導体の応用はない

## 線材化とは

新しい超伝導体が発見されても、すぐに実用化できるわけではない。送電線や超伝導磁石に使うには、超伝導体を細長い電線状に加工しなければならない。それを「線材化」という。

もちろん、ただ細長い形状に加工すればよいわけではない。超伝導磁石で用いる線材はコイル状に巻くため、曲げても割れず、引っ張りにも強いことが求められる。1本当たりの長さも1km以上は必要だ。そして最も重要なのが、臨界電流密度が大きいことである。超伝導状態の物質に、ある大きさ以上の電流が流れると、臨界温度以下でも電気抵抗が生じ始める。そのときの電流の大きさを「臨界電流」という。臨界電流密度とは、その超伝導体の臨界電流を線材の断面積で割ったものである。その値が大きいほど、電線が細くなっても、大きな電流を流すことができる。それは、超伝導磁石の小型化にもつながる。

これまで新しい超伝導体が発見されるたびに、高性能の線材をつくるための技術開発が繰り返されてきた。

## NIMSで生まれた線材化技術

超伝導体ではニオブチタン(NbTi)が、いち早く線材化に成功。室温でも延性に富んでいることが幸いした。現在世界中でも普及している超伝導線材である。

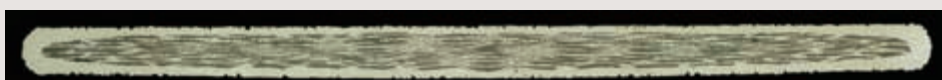
ニオブ3スズ(Nb<sub>3</sub>Sn)はNbTiと同じ金属系超伝導体だが、加工が難しく、線材化技術の確立までには、さまざまな手法が検討された。現在主流となっているのが、NIMSの前身である金属材料技術研究所(以下、金材研)の太刀川恭治が開発したブロンズ法である。銅(Cu)とSnの合金であるブロンズの基剤の中に芯となるNbを入れ、それを複数まとめ、熱処理によってブロンズとNbの界面にNb<sub>3</sub>Sn層を生成させる。この方法でつくられた線材は、1本の中に非常に細い超伝導線が多数埋め込まれている。このような構造の線材を多芯線という。多芯にすることで、たとえ1つの線に不具合が生じても他の線でカバーすることができ、超伝導線材の安定性が高まり、超伝導磁石としての応用も可能となる。

## 硬くてもろい物質で、曲げても折れない線材をつくる

高温超伝導体で最も早く線材化に成功したのは、金材研(現NIMS)の前田弘が発見した、ビスマス(Bi)-2223という銅酸化物高温超伝導体である。臨界温度が110Kと高いことに加え、通電特性にも優れていることから、発見直後から実用化に近い物質として注目されていた。

しかし、銅酸化物は瀬戸物と同じで、硬くてもろい。そのような物質を曲げても折れないようにしなければいけないのだから、非常に難しい。さらにこの物質は、Biとストロンチウム(Sr)、カルシウム(Ca)、銅(Cu)、酸素(O)の5種類の元素から成る複雑な構造をしている。苦勞の末、2005年に住友電気工業がBi-2223線材の製品化に成功。世界最高磁場を達成した1,020MHz-NMRの高温超伝導磁石にも、この線材が使われている。Bi-2223線材は、臨界電流密度が非常に高いことから送電線への応用も進んでいる。

今後も新たな線材の開発や高性能化によって、超伝導の実用化が早まり、応用範囲も広がっていくだろう。



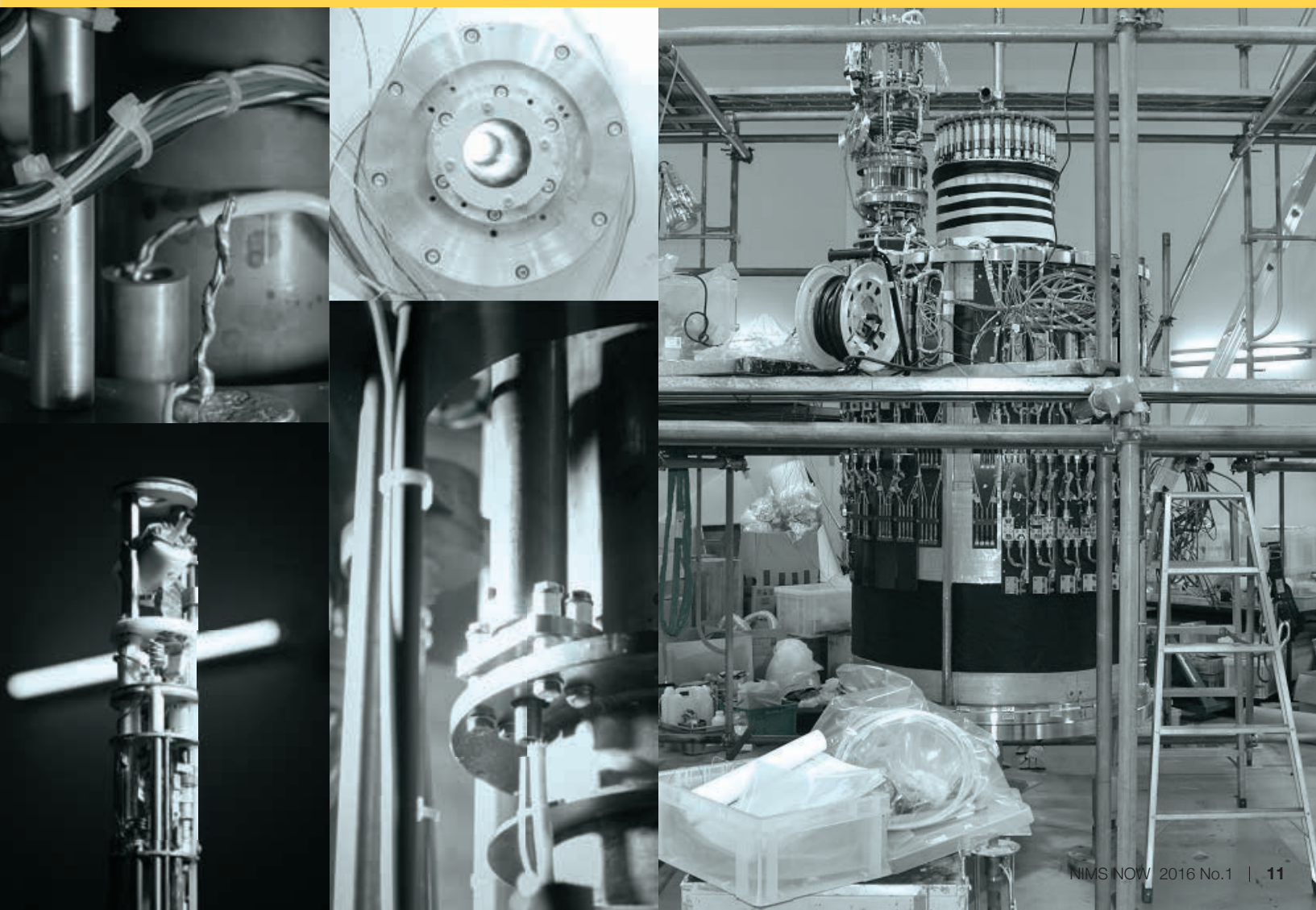
Bi-2223線材とその断面

Bi-2223の線材は、幅約4mm、厚さ約0.2mmのテープ状である。数 $\mu\text{m}$ から数百 $\mu\text{m}$ の超伝導体の非常に細い線が、銀の基材の中に数十から数百本埋め込まれた、多芯線という構造になっている。

# Development History of High-Field NMR System over 1GHz

## プロジェクトはハプニングの連続！ 満身創痍の 「超1GHz-NMR装置」 開発ヒストリー

構想から約20年。2014年10月17日、科学技術振興機構(JST)の先端計測分析技術・機器開発プログラム「超1GHz-NMRシステムの開発」の下、研究チームは遂にNMR装置として世界最高磁場となる1,020MHz (24.0T)を達成した。この偉業を成し遂げるまでには、東日本大震災による完成直前の壊滅的な損壊とそれに伴う開発プロジェクトの中断、チームリーダーの急逝、世界的なヘリウムの供給危機など幾多の苦難があった。それらを奇抜なアイデアと強い意志で見事に乗り越えたメンバーを代表して4人がプロジェクトを振り返る。



## 完成直前に発生した 東日本大震災

**松本** 「超1GHz-NMRシステムの開発」は、2006年秋に5カ年計画でスタートしたプロジェクトで、2013年1月に急逝したNIMSの木吉さんの強いリーダーシップの下、進められてきました。この4人のメンバーの中では私だけが木吉さん直属の部下になりますね。

**西島** 本来、2011年度中に完了予定のプロジェクトだったわけですが、完成直前に東日本大震災が発生して2年間の中断を余儀なくされましたよね。ようやく復旧工事完了の目途が立ちプロジェクト再開という矢先に木吉さんが急逝されたことを知りました。当時違うグループにいたので、まさか自分が引き継ぐとは思っていませんでした。前職の東北大学で強磁場磁石開発に携わっていた経験を買われてのことですが、NMR用超伝導磁石は普通の強磁場磁石とは設計思想がかなり違うため、多少不安がありました。

**大木** 私は元々NMR装置を使って試料を測定する技術者で、木吉さんからチームリーダーを引き継いだ清水禎さんのチー

ムのメンバーでした。木吉さんにとって私は、NMR装置のユーザーという立場でしたから、私もまさか超1GHz-NMR装置(以下、超1GHz)の開発に携わるとは夢にも思いませんでした。きっかけは東日本大震災です。超1GHzと我々清水チームが測定に使っていた930MHz-NMR装置(以下、930MHz)の2台がともに損壊してしまったため、復旧工事を行なうことになったのです。同年4月から木吉さんが別の案件を担当しなければならなくなった上、2台とも神戸製鋼所が開発していたことから、清水さんが復旧工事のリーダーに任命され、私も作業に加わったといういきさつです。

**端** 私も清水チームのメンバーで、大震災の直前までは、NMR装置を使って無機物の測定などを行なっていました。いきさつは大木さんと同様です。木吉さんとの思い出はかなり前にオランダの大学に強磁場施設を一緒に見学に行ったこと。いつも笑顔を絶やさない人で、誰とでも仲良く話している姿が強く印象に残っています。

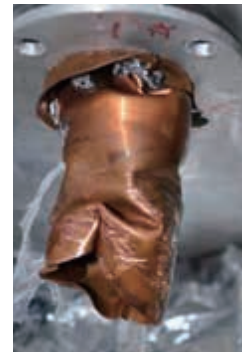
**松本** 木吉さんは生前「超1GHzの開発は20年越しの再チャレンジだ」とよく言っていました。木吉さんは2001年に、当時世界最高磁場となる21.6T、920MHz-NMR装置の開発に成功したのですが、そのとき、本当はBi(ビスマス)-2212という酸化物系超伝導線材を使って超1GHzを達成したかったのです。しかし、コイル開発が困難であったため、改良したNb<sub>3</sub>Sn(ニオブ3スズ)という金属系超伝導線材を使って920MHzを達成したのです。現在でも、実用的なBi-2212は誰も開発に成功しておらず、今回はBi-2223という別の酸化物系超伝導線材を使って超1GHzを達成したのですが、木吉さんはそれを確認することができず、非常に残念に思っています。

## 予期せぬ余震と チームリーダーの急逝

**西島** 震災日当日の午前中、木吉さんはフランスからの研究者をNIMSに招き、完成間近の超1GHzに案内していました。彼らは3月14日から仙台で開催予定だったNIMSと東北大学とフランスの強磁場研究

者が集まるワークショップに出席するために来日したのですが、後日、超1GHzの被害を心配して連絡をくださいました。

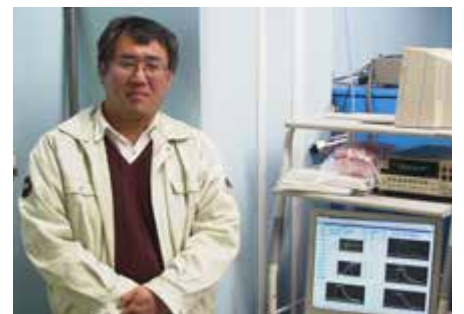
**端** 震災により、超1GHzの方は完全に損壊しましたが、930MHzの方は磁石が稼働している状態でした。930MHzは1度励磁したら磁石に流れる電流を下げない限り、消磁することができません。ところが、電流を下げるために必要な電源につながるソケットが装置内部の1.2m下にあり、さらに液体ヘリウム中にあるソケットが固体空気



磁石の室温ボアチューブ  
(直径56ミリ長さ4メートルの銅製)  
震災により重さ10トンの磁石の激しい横揺れを  
直接受けて断裂と座屈を生じ、真空破壊に至った。



震災で亀裂が生じ、真空破壊を起こしたベロー



2004年に930MHz-NMRの開発が終了した頃の木吉さん



松本真治

環境・エネルギー材料部門 超伝導線材ユニット  
マグネット開発グループ 主幹研究員



## 西島 元

環境・エネルギー材料部門 超伝導線材ユニット  
マグネット開発グループ 主任研究員

がるか分からない緊迫した状況でした。

**大木** 強磁場が発生した状態のまま、ソケットを掘り起こす必要があったわけですよ。しかし、装置内部のことは外からは見えませんから、極低温の環境下でも稼働するCCDカメラが必要で、それを端さんが作ってくれました。

**端** これは清水さんのアイデアで、「液体窒素の中に試みにLEDの懐中電灯を浸けてみたら問題なく光り続けていたので、CCDでも大丈夫だろう」と(笑)。そこで、CCDカメラにヒーターを取り付けて装置内部に投入してみたところ、うまくいったのです。しかもこのカメラ、超1GHzの開発でも大活躍するんですよ。

**松本** 結局、復旧工事を開始できたのは2012年4月でした。最初に930MHz、次に超1GHzという順番で作業を進めていきましたが、超1GHzも修復作業が完了するという矢先の12月7日、震度4の地震に見舞われ、超1GHzがまたしても一部損壊してしまったりは茫然としました。

**端** それに追い打ちをかけるように、2013年1月に木吉さんが突然亡くなられて。途方に暮れていると、NIMSの理事もJSTの担当者も口を揃えて「超1GHzの開発プロジェクトは重要な案件なので、是非とも続けてほしい」と言われ、まずは復旧工事を完了させ、同年4月に新チームリーダー清水

さんの下、2年ぶりにプロジェクトを再開させたのでした。

**西島** そのタイミングで私もプロジェクトに参加することになったわけですが、その直後、さらなる苦難が待ち受けていましたね。米国からのヘリウム供給が激減したために発生した「ヘリウムショック」です。2013年6月頃からは日本でもヘリウムが入手困難になり、修復した磁石の冷却がなかなか始められなかった。そこで、研究機関や企業に協力してもらい、9月にどうにか装置を液体ヘリウムで満たすことができたため、次の段階に進めるようになりました。

**大木** その前にもう1つ大きな苦難がありましたよね。超1GHzは励磁の際に液体窒素と液体ヘリウムの2段階で冷却するため、液体窒素は1万リットルほど用意する必要があります。この量を通常の液体窒素容器で行なうには手間と時間がかかります。そこで、タンクから直接液体窒素を輸送する真空断熱配管を検討しましたが、配管工事に数カ月、数千万円の費用がかかるというので断念。苦肉の策として、直径16mmの市販のプラスチック製チューブを買ってきて、その周りを断熱材で3重にくるみ、太さ約20cm、長さ80mの簡易断熱配管を作りました。その中に液体窒素を通すことにしたんですよ。何度かテストをしてうまく液体窒素が流れることを確認して、大丈夫だと。

**西島** これなら業者に頼むのに比べて費用も約20分の1以下。ただ、このただらと長いチューブを、皆で運んでいる姿は長崎くんち祭りのようでした(笑)。しかもこんな太いチューブを床に置くと邪魔なので、スチールラックを買ってきて皆で組み立て、頭上に配管しましたよね。これはこれで楽しい思い出です。

**端** また、9月と2014年1月の2回にわたり、冷却作業に失敗したことは大きかったですね。そこで、930MHzの復旧工事で活躍したCCDカメラを使って装置内部を調べてみたところ、1メートル以上下に想定外の部品があることを発見し、除去することになったのでした。ほんの小さな部品ですが、それがあって巨大な装置全体が台無しになるところでした。その後は冷却工程も



簡易断熱配管の開発をしている作業風景



ヘリウム容器の通路を確保するため、簡易断熱配管をスチールラック上に配管



## 端 健二郎

先端的共通技術部門 極限計測ユニット  
強磁場NMRグループ 主任研究員



## 大木 忍

中核機能部門 強磁場ステーション  
強磁場グループ 主任エンジニア

進み、無事通電テストに持ち込むことができました。

**大木** とはいえ、冷却に関しては苦勞しましたよね。予想以上に発熱が多く、減りの激しい液体ヘリウムを、ほぼ毎日メンバーが交代で毎回250リットル補充し続けなければなりませんでしたからね。その作業は結局、2014年9月から2015年5月の連休前まで続きましたよね。

## 遂に超1GHzを達成

**松本** 停電が起こっても不具合が生じないように、安全装置も開発しましたね。装置が異常を検知した際にはメンバー全員の携帯電話が鳴るようなシステムも用意しました。清水リーダーの「年中無休、24時間体制でやり抜く」との号令の下、2014年10月1日、遂に1GHzを超えることができました。この日は皆、大喜びで記念撮影をしましたが、その翌日からはさらなる記録更新を目指し、電流を増やしていきましたね。

**端** そして2014年10月17日、24T、1,020 MHzに到達しました。NMR装置としては世界記録です。ただしこの磁場が想定外に不安定で、このままでは「タンパク質のデータを高精度で計測する」というプロジェクトの最終目標が不可能でした。そこで、新た

に磁気補正装置も開発しましたが、その結果、年末年始も稼働させ続けることになり、液体ヘリウムの補充が一苦勞でした。年明けの1月にタンパク質のデータを計測できたときはホッとしました。

**西島** NMR測定が全て終わった2015年4月14日には、24.2T発生にも成功しました。これは、実用超伝導磁石の当時の世界最高磁場です。途中で常伝導に転移する可能性もあり、緊張しながらの運転でした。

**大木** そして、5月の連休前にはプロジェクトが完了する予定でしたが、4月15日夕方、なんとシステム異常を感知した際に鳴る携帯電話が初めて鳴りました。それは落雷による瞬間停電を知らせるもので、十数分後にはメンバー全員が現場に集合していましたね。これまであらゆる災害に備え、万全の体制を取ってきたことが功を奏し、超1GHzは何の不具合もなく稼働していることを全員で確認することができました。これは幾多の苦難を乗り越え、ブラッシュアップしてきた成果ですね。

## プロジェクトはハプニングの連続！ 満身創痍の「超1GHz-NMR装置」開発ストーリー

**端** 超1GHzや24.2Tを達成できたのは素晴らしいことですが、NMR磁石のユーザーである私としては「それにより、これまで計測できなかったことが計測できるようになった」ということの方が重要だと考えています。今回は記録への挑戦でしたが、今後は計測技術の開発にも期待したいですね。

**松本** 超1GHzは、現実的には金属系超伝導線材では不可能で、1988年に当時の金属材料技術研究所の故・前田弘さんが初めて酸化物系超伝導体を発見したことで、開発が始まりました。木吉さんはその線材を使って超1GHzを開発するという目標を約20年前に掲げ、挑戦してきたわけですから、実に約20年越しの夢が叶ったことになります。今後もNIMSにおけるNMR装置開発の歴史を途絶えさせることなく継承し、端さんが言うような成果を出していきたいと思っています。

(文・山田久美)

## Development History of High-Field NMR System over 1GHz



プロジェクトチームメンバーで記念撮影(NMR分光計も含めたシステム全体の動作確認日)

## バーディーンさん

文:えとりあきお

題字・イラスト:ヨシタケシンスケ

超伝導という現象は、1911年オランダの物理学者カマリン・オンネスが発見しましたが、なぜこうした現象が起こるのかについて、当時の物理学では解明できませんでした。この現象を、新しい学問である量子論を用いて理論的に解き明かしたのが、ジョン・バーディーン博士です。

博士は大学卒業後、一時、石油会社に勤めましたが、博士号取得のためプリンストン大学、ハーバード大学で数学・物理学を学び、1938年からミネソタ大学の助教授になりました。1945年にベル研究所に入り、1948年、ウィリアム・ショックレー、ウォルター・ブラッテンと共にトランジスタの開発に成功。この功績で、3人は1956年にノーベル賞を受賞しています。

1951年にはショックレーたちとの半導体の研究から離れ、イリノイ大学教授となって本格的に超伝導理論の研究をはじめます。そして1957年、レオン・クーパーをプリンストンから招き、大学院生のジョン・ロバート・シュリーファーとも組んで、超伝導の標準理論ともいわれるBCS理論(3人の頭文字をとって)を導きました。

その業績によって、3人は1972年にノーベル物理学賞を受賞しました。数あるノーベル賞受賞者のなかでも、物理学賞を2回受賞したのはバーディーン博士ひとりだけです。これは、博士の物理学に対する貢献がいかに大きかったものであるかを示す、ひとつの証拠といえるでしょう。

バーディーンさんは大の親日家で、何度も日本を訪れていますが、1953年に東京と京都で開かれた国際理論物理学学会を牽引していた中嶋貞雄東大名誉教授の電子

フォノン理論に着目し、それをもとに論文を発表しました。この論文がのちのBCS理論の土台となり、中嶋教授とは生涯にわたり交流が続くこととなります。

バーディーンさんに直接お話をうかがってみたいと思った私は、晩年の博士に会うため、30年あまり前、イリノイ大学アーバナシャンペーン校をたずねました。校内には、超伝導現象を扱ったBCS理論の提出と、それによる博士の2回目のノーベル物理学賞受賞を記念して建てられた碑がありました。

バーディーンさんはとてもスマートで、気さくな人柄の持ち主でした。私を喜んで出迎えてくれ、「まず研究室をお見せしよう」と、80歳近い年齢を感じさせない身軽さで、せまい階段を最上階まで、トコトコと歩いてのぼって行きました。あわてて息を切らしながら行くと、「ここが私の研究室だよ」と小さな部屋に案内してくれました。

その部屋は、何の変哲もない、ごく普通の大学教授の研究室といった趣きで、とてもノーベル賞2回受賞の大先生のいる場所には見えませんでした。

これまでの研究についてのエピソードを語りながら、「BCS理論が社会のために役

立ってくればこんなうれしいことはない。実はその一例として、NMRが実用化に近づいている。明日案内するので、ぜひ見て行ってほしい」と、翌日、大学付属病院にあるNMR装置を見せてくれました。そして熱心に、その有用性と将来性を私に語ってくれたのです。

NMRは現在、MRI装置として体内の診断や脳の状態を調べる医療に大きな貢献をしているのは、皆さんご存知のとおりです。

バーディーンさんはまた大のゴルフ好きで、「最近、私はゴルフ場の中に家を建てたんだ。見て行くかい」と私を誘ってくれました。ゴルフ場の中といっても、コースに隣接したところですが、もちろんプレイしている人が家の中からよく見えます。たまにはボールが打ち込まれることもあるのですが、まったく意に止めません。「最近は何歳をとったので、ハーフしかまわらないことが多いよ」と言いながら、そんな暮らしを心から楽しんでいるようでした。

バーディーンさん(こう呼びするのがぴったりの感じでした)の人柄にすっかり魅了されながら、私はシカゴを後にしたのです。



えとりあきお: 1934年生まれ。科学ジャーナリスト。東京大学教養学部卒業後、日本教育テレビ(現テレビ朝日)、テレビ東京でプロデューサー・ディレクターとして主に科学番組の制作に携わったのち、『日経サイエンス』編集長に。日経サイエンス取締役、三田出版株式会社専務取締役、東京大学先端科学技術研究センター客員教授、日本科学技術振興財団理事等を歴任。



International Nanotechnology Exhibition & Conference

# nano tech 2016

## 国際ナノテクノロジー 総合展・技術会議

2016

**1/27**(水) ~ **1/29**(金)

東京ビッグサイト東4・5・6ホール&会議棟

NIMSブース: 東5ホール ブース番号5R-12

文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム: 東5ホール ブース番号5W-12

NIMSは今年も充実の内容で出展いたします。

構造材料から、ナノバイオ、高感度センサーまで。

ポスター 20点以上、講演も多数開催いたします。

皆様のお越しをお待ちしています。

<http://www.nanotechexpo.jp/>



NIMS NOW vol.16 No.1 通巻156号 平成27年12月発行

国立研究開発法人 物質・材料研究機構



古紙配合率100%再生紙を  
使用しています



植物油インキを  
使用し印刷しています