

## 【隔月連載記事】

### 超電導と MRI / NMR (その1—原理と構造)

(社団法人) 低温工学協会  
副会長 堀上 徹

#### 1.1 はじめに

今号より1年間、「超電導とMRI/NMR」について隔月連載するようにと編集局から要請があった。筆者は、超電導とは長年付き合ってきたが、MRIやNMRの専門家ではない。それにもかかわらず執筆をお引き受けしたのは、MRIやNMRを通じて超電導の魅力が読者に伝わればとの思いからである。

超電導研究の歴史は古く、2年後の2011年は超電導現象が発見されて100年になる。

また、高温超電導体が発見されて今年は23年目である。発見からこれだけの年月が経過しているにもかかわらず、実用化という点ではMRIとNMRへの適用以外には大きな市場を形成していない。超電導の技術開発に直接・間接に40年以上も携わってきた筆者には些か忸怩たるものがある。それはさておき、高温超電導体が発見後、実用化するための材料開発に世界中の研究者が懸命に努力しても20年以上の月日を要した。努力の甲斐があって、ここにきて何とか高温超電導材料を用いて機器開発ができる状況になってきた。

今後、高温超電導体を用いた実用機器が徐々に開発されていくことが期待されており、とりわけこの連載で取り上げるMRIとNMRは既に大きな市場を形成しているが、高温超電導体がこれらの機器に適用できるようになれば新たな応用も含めて普及が飛躍的に進むことが期待される。

本連載では、MRIやNMRの原理、超電導とのかかわり、これらが現在どのようなところで使われているのか、その市場規模はどの程度なのか、国内外の状況はどうか、今後どのような方向に展開していきそうなのかといったようなことを中心に書く予定である。

最後までお付き合いいただければ幸いです。

#### 1.2 MRI とは、NMR とは

「MRI (Magnetic Resonance Imaging : 磁気共鳴画像法) は、核磁気共鳴 (Nuclear Magnetic Resonance) 現象を利用して、生体内部の情報を画像化する方法である。」とされている。核磁気共鳴現象については後で説明する。

MRI 装置 (以下 MRI) は、それが市場に投入される直前までは核磁気共鳴画像診断装置と呼ばれていた。しかし、「核」という言葉に対するアレルギーから、特に医療現場で使用するものに「核」という言葉は相応しくないのではないかとという理由で Nuclear の使用をやめ、Magnetic Resonance (磁気共鳴) とし、画像表示にて診断するので、Imaging という言葉が使われるようになった。画像化して情報を得る以外に、核磁気共鳴によるスペクトルを観測して物質の原子や分子の結合状態などの情報を得る分光法 (MRS : Magnetic Resonance Spectroscopy) もある。これが所謂 NMR といわれているものである。

NMR 装置 (以下 NMR) は、化学分析の手法として用いられるため、物理現象そのものの「核磁気共鳴」という言葉がそのまま用いられている。したがって、MRI も NMR も同じ物理現象を利用していることになる。

通常 MRI は医療用の診断装置として病院で用いられる。1980年代に MRI が臨床に用いられるようになった。断層画像という形で生体内部を可視化して診断する。断層画像という点では X 線 CT

と一見よく似た画像が得られるが、CTとは全く異なる物質の物理的性質に着目した撮影法であるために、CTでは得られない情報が多く得られる。

その特長は、

- ① X線などの放射線を照射しないため、放射線被爆がない  
(但し、MRIでは磁石を用いるので、磁界の人体への影響については懸念がないわけではないが、今までのところ影響は現れていない)
- ② 画像のコントラストがX線CTよりも高い
- ③ 造影剤を用いなくとも血管画像が撮影できる
- ④ 骨による画像への影響がない。
- ⑤ X線では診断できない椎間板ヘルニアや靭帯損傷、骨軟部腫瘍などの異常を診断できる等である。

余談ではあるが、筆者はMRIが商品として世の中に出る前から装置開発に関係していた。

当事、人気診断機種であったX線CT(今では単にCT)と競合するのではないかとということで、MRIの市場投入時期について日米の企業幹部が悩んでいたのを思い出す。先に述べたように、MRI装置の大半は医療現場で用いられているが、過去に産業応用ということで、西瓜や桃の熟れ具合を非破壊で検査するとか、鮭の雌雄判別に用いるというようなことが検討された時期があったがコスト面で普及しなかったようである。

さて、今回はMRIやNMRの原理を理解するために必要な‘核磁気共鳴現象’の説明から始めよう。

‘核磁気共鳴現象’を簡単に表現すると、強い磁界の中におかれた原子核が特定の周波数の電波のエネルギーを吸収するという物理現象である。この現象を利用した画像診断法をMRIと呼んでいる。以下にもう少し詳しく説明する。

少々厳密性に欠ける表現になるが、原子は原子核と負の電荷を持つ電子から構成される。

原子核は正の電荷をもつ陽子と電氣的に中性な中性子とから成る。原子核は正の電荷を持って回転しているため磁石の性質(図1a)を持つが、複数の陽子が存在する場合は磁極が逆向きの陽子2個で1対となり、磁力を打消しあう。陽子の数が奇数になる原子では原子核全体で磁気モーメントを持つ(核磁気モーメント)。これらの原子核に外部から磁界(静磁界)をかけると、磁界の強さに応じて核磁気モーメントは磁界の方向と平行な軸を中心とした歳差運動(コマの首振り運動)を行う(図1b)。この歳差運動に共鳴するような周波数の高周波磁界を外部から照射するとそのエネルギーを吸収して首振り運動の開き角度が大きくなる。この現象を核磁気共鳴現象と呼んでいる。

首振り運動の開き具合は物質により異なると同時に外から加えた磁界の強さに比例する(図1c)。

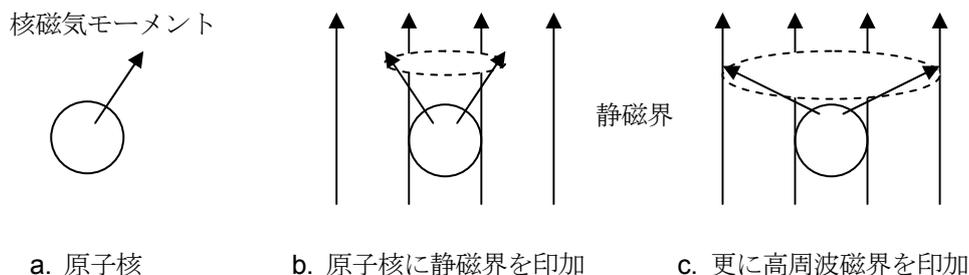


図1 核磁気共鳴現象：静磁界中に置かれた核磁気モーメント (b) と外部から加えた高周波磁界との共鳴現象 (c)

例えば静磁界が1テスラ (T) の場合、水素の原子核<sup>1</sup>H (プロトン) の共鳴周波数は42.6 MHz となっている。静磁界の強度を  $B$  (T) とした場合のプロトンの共鳴周波数  $f$  は (1) 式に表せる。

$$f=42.6 \cdot B(\text{MHz}) \quad \dots \dots (1)$$

共鳴現象を起こしている状態で、外部の高周波磁界を切ると、原子核は電磁波を放出しながら元の状態 (図 1b) に戻る。高周波磁界を切った後、原子核が定常状態に戻るまでの時間 (緩和時間) が物質の化学的な結合状態や物理状態と関係する。実際にはこの高周波磁界はパルス的に加えられる。体内のそれぞれの組織 (例えば良性の腫瘍と悪性の腫瘍) によって緩和時間が異なる。これをある数学的手法を用いて画像化したものが MRI である。

人体の約 75 %が水分であるため、通常の MRI では水素原子の核磁気共鳴現象を利用して、水の分布状態を周囲の分子との結合状態を反映させて画像化する。水素原子のみならず体内に存在する炭素 (<sup>13</sup>C) やリン (<sup>31</sup>P) などの画像化も行われている。

一方、NMR は共鳴周波数を測定して原子や分子の結合状態に関する情報を得るので、NMR 分光法とも呼ばれることは先に述べた。MRI が緩和時間を測定するのに対して、NMR は同じ原理を利用して共鳴周波数を測定し、試料に含まれる原子や分子の同定や結合状態などの情報を得るものである。最近では、数万の分子量を持つたんぱく質の構造解析にも有効な手段として必要不可欠なものとなっている。

### 1.3 MRI (装置) の構造

MRI は基本的には 3 種類の磁界発生コイルで構成される。

①静磁界コイル ②傾斜磁界コイル ③高周波磁界コイル である。

それぞれは図 2 に示したような配置となる。

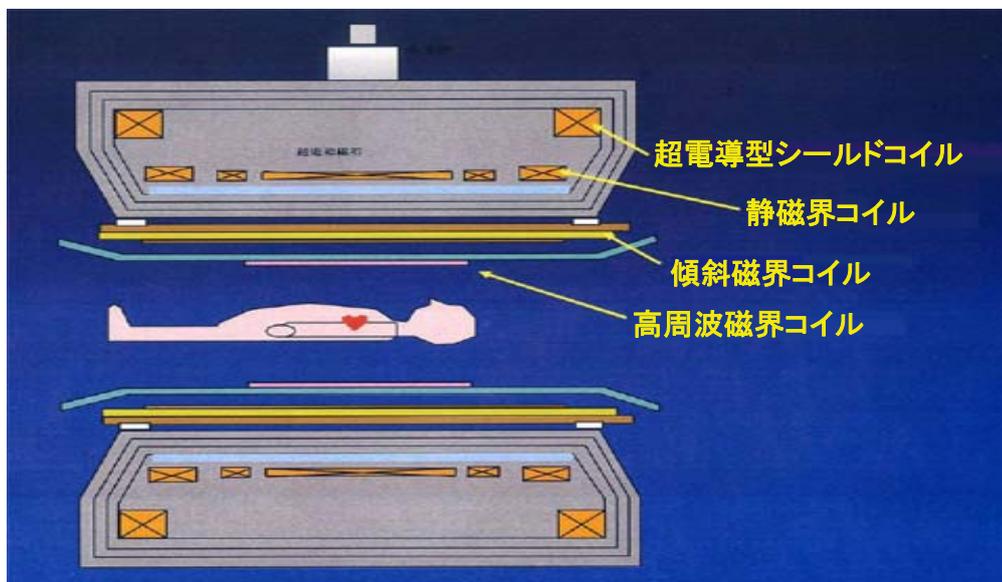


図 2 MRI 装置を構成する 3 つの磁界 (提供 東芝メディカルシステムズ(株))

① 静磁界：前に説明したように核磁気モーメントを持つ原子核に静磁界を印加して歳差運動を生じさせるための磁界。この磁界は前に式 (1) で示した  $B$  に相当するもので、共鳴周波数は  $B$  に比例するので、非検体の領域で磁界強度が一樣であることが要求される。どの程度の一樣さが要求されるかの説明は次回に譲る。

- ② 傾斜磁界：得られた信号が非検体のどの場所から出てきたものかを知るために必要な磁界である。この情報がないと断層画像を得ることができない。
- ③ 高周波磁界：共鳴現象を発生させるために必要な磁界。送信用高周波コイルにより、高周波磁界を被検体に照射する。共鳴後、高周波磁界を切ると原子核は電磁波を放出しながら元の状態（図 1b）に戻る。このときの放出された微弱な高周波磁界（MR 信号）は受信コイルにより検出される。

#### 1.4 NMR（装置）の構造

(1) 式で表したように、共鳴周波数は外部から印加した磁界強度に厳密に比例するので、共鳴周波数を高精度に測定できれば原子や分子の化学結合状態を反映したスペクトルの僅かなズレの情報が取得できる。装置としては、試料に強い磁界を印加するためのコイルと高周波増幅器などを収納した信号の送・受信装置及びデータ処理用のコンピュータ等から構成されている。

#### 1.5 第1回目を終えるにあたって

今回は MRI や NMR の原理について、やや厳密性には欠けるが部分もあるが、概略を紹介した。基本的には磁界を用いるということである。

次号ではこれらの装置と超電導との関わりや、超電導に要求される条件などについて紹介する予定である。

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

超電導と MRI / NMR (その 2—MRI/NMR と超電導とのかかわり)

(社団法人) 低温工学協会  
副会長 堀上 徹

2.1 はじめに

前号で、MRI や NMR には静磁界が必要だと書いた。磁界の強さが単に強いだけでは MRI や NMR の要求仕様を満たすことはできないが、静磁界の強さは要求される信号強度、言い換えれば得られる画像の質やスペクトルの高分解能と強い関係にあるので、より信頼できる結果を得るためには強磁界が必要となる。

今号では、主に静磁界の強さと分解能の関係、強力な静磁界を得るために必要な超電導および MRI や NMR には必要不可欠な超電導マグネットの永久電流モード実現の方法について解説する。

2.2 MRI/NMR の分解能と静磁界

前号で核磁気モーメントを持つ原子核に外部から静磁界を加えると核磁気モーメントは歳差運動をすることを述べた。この歳差運動をラーモアの歳差運動といい、このときの角周波数  $\omega$  をラーモア角周波数という。

一方、MRI の画像の質に影響を与える因子の一つとして信号強度と雑音強度の比 (SN 比) がある。前にも述べたように信号を検出するのは RF コイルである。RF コイルの半径を R、共鳴周波数を  $\omega$  とすると試料全体からの信号強度 S は

$$S \propto R^2 \omega^2 \dots\dots\dots(2-1)$$

と表わせることが分っている。

ここで、信号強度がラーモア角周波数の二乗に比例しているということが重要で、この二乗のうちの一つは核磁気の大きさがラーモア角周波数によるものであり、ラーモア角周波数は静磁界強度に比例している。前号で述べたように水素の原子核であるプロトンの場合、静磁界 1 T のラーモア周波数 (共鳴周波数) は 42.6 MHz である。もう一つの方は RF コイルに電磁誘導の法則に従って検出される電圧が、ラーモア周波数に比例するということから導かれる。詳細に式を導出することは複雑になるので、ここでは信号強度、即ち MR の分解能は静磁界の大きさに比例するということが超電導技術との接点であるということにとどめておこう。更に鮮明な画像なり、精密な化学分析 (分光法にて) を行うためには試料空間 (人体用 MRI では体内の検査したい部位) において、磁界強度が時間的に変動しないこと、及び空間的に一様性が保たれることが求められる。とりわけ静磁界の時間的安定性に関しては後述する超電導の永久電流状態が不可欠となる。

NMR 装置を用いてある物質を分光分析した場合、静磁界の強度が大きくなると共鳴周波数  $f$  も  $f=42.6 \cdot B$  (MHz) の関係に従って高くなることは前号で述べた。共鳴周波数が高くなると分解能が向上する例を図 2.1 に示した。図から分かるように共鳴周波数が高くなるほど共鳴スペクトルが鋭く分離も明確になっていることが分る。即ち化合物判別の精度が上がるわけである。

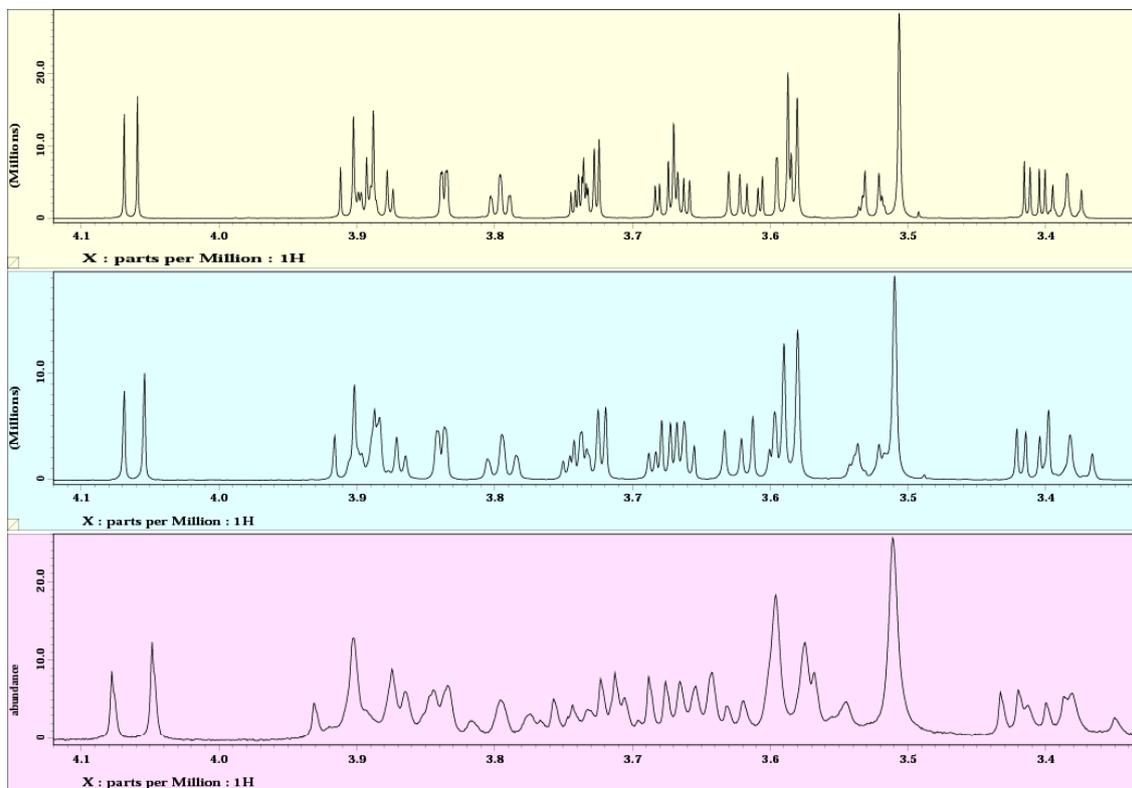


図 2.1 ある物質の NMR スペクトル (横軸：周波数、縦軸：スペクトル強度)  
(データ提供：(独) 物質・材料研究機構)

(プロトンの共鳴周波数が下から 300 MHz (磁界 約 7 T)、600 MHz (同 14 T)、900 MHz (同 21 T)。 共鳴周波数が高くなる、即ち静磁界が強くなるに従ってスペクトルが鋭くなり分解能が上がっていることが分る)

## 2.3 用途

ということで、分解能をあまり必要としない対象物の画像なり、分析を目的とする場合、例えば汎用 NMR の場合、予測した化合物が有るか無いかのみを知りたいというような要求には、分解能が少々低くともスペクトルにピークがあるか否かだけで判断できるので、強い磁界を必要としない。

磁界発生装置としては永久磁石や銅線で作製した電磁石などがある。永久磁石は、強い磁界は出せないが磁界の強さは時間的に安定しているように思えるが、実際はそうではない。永久磁石は環境温度の変化により発生する磁界が微妙に変化する。この磁界変化が MRI や NMR の分解能に影響を及ぼすのである。また、銅線で巻線したコイルの場合には、コイルに外部電源から電流を供給する必要があるが、この場合も電源の安定性が直接磁界の安定性に影響する。

医療用 MRI の場合は、人体がすっぽり入るような大型マグネットの中の検査部位において、0.5 T 以上の磁界強度と磁界の空間的・時間的安定性が必要となる。一方、汎用 NMR の場合、先のスペクトル図で示したように、共鳴周波数が 300 MHz のスペクトルを得るためですら静磁界が 7 T という強い磁界を必要とする。但し、この場合は直径 5 cm 程度の球体の試料空間に発生する磁界である。

このような強い磁界を安定に発生させるためには超電導マグネットを用いる以外に方法はないのである。

MRI 現象の医学診断への最初の試みは、1971年のニューヨーク州立大学のダマディアン(Damadian)博士が、悪性腫瘍組織と正常腫瘍組織とで緩和時間(前号で説明したように高周波磁界を切った後、原子核が定常状態に戻るまでの時間)が倍程度異なるとの報告から始まった。現在ではMRI装置は既にご存知のように、医療用として医療現場で人体断層像を撮影するのに広く用いられている。

余談になるが、1980年代前半、企業が医療用MRIの開発を開始した当初、それまで企業の研究所で磁気浮上鉄道用超電導線材やマグネットの開発に関わっていた筆者に、ある日突然、医療機器開発事業部門の技師長から電話があり、超電導の説明をして欲しいとの要請があった。技師長からは、銅線で巻いた電磁石を用いたMRI装置を普及型と位置づけ、超電導線材で巻いた電磁石(超電導マグネット)を高級型と位置づけるという趣旨の説明を受けたことを今でもはっきり覚えている。それが数年を経ずして超電導マグネットを用いたMRI装置が市場の大勢を占めるようになり現在に至っている。当初MRIは1機約6億円といわれていたが(今では1億円程度と推測するが正確なところは当事者でないと分らない)、それにも関わらず超電導MRI装置が発売開始から短期間で市場の主流を占めるようになったのは、それだけ超電導現象がMRIに要求される性能に適合しているという証左であろう。

一方、高分解能NMR装置は、分子構造について詳細な情報を得ることができるため、例えば、たんぱく質や核酸などの生体高分子や、有機化合物等の構造を同定することができる。たんぱく質の構造解析に用いられるX線結晶構造解析法では、たんぱく質を結晶化する必要があるが、NMR法は溶液の状態で測定できるため、結晶化が困難なたんぱく質の解析が可能である。また、開発中の薬剤化合物を迅速に分析することができるため、医薬品の開発等に大いに貢献している。

## 2.4 超電導

良質な画像や高性能な分析結果を得ようとすれば強い磁界が必要であることを述べた。MRIでは現在マグネットの中心部で磁界強度が0.5テスラ(T)を発生する装置が主流であるが、最近ではより高磁界化の傾向にあり、1.5Tから3Tの市場が伸びてきている。一方汎用NMR装置では、共鳴周波数が300MHz以上(磁界強度7T以上)の装置が主である。

このように強い磁界が必要とされるために超電導が用いられるのである。逆に言うと超電導でなければ実現しない装置なのである。

よく知られていることではあるが、超電導とはある種の物質をある温度以下に冷却すると電気抵抗がゼロになるという特徴がある。このため、超電導線材で巻かれたコイルに電流を流して磁界を得る場合、電気抵抗が原理的にはゼロであるために大きな電流を流すことができ、その結果強い磁界を得ることができる。

MRIやNMRには強い磁界の他に、磁界の空間的・時間的均一性が要求される。空間的に均一な磁界を得るためにはマグネットの設計と補助コイルの追加をうまくすれば実現できる。一方、磁界の時間的な均一性、言い換えれば時間の経過と共に磁界の強さが変化しないようにするためには、電気抵抗ゼロという超電導の特長を用いて磁石を永久電流状態にすることによって実現できる。超電導磁石を永久電流状態にする方法を次章で簡単に解説する。

## 2.5 永久電流状態の実現

永久電流状態実現のために不可欠なものが永久電流スイッチというものである。

超電導線を通常の銅線で巻いた電磁石と同じように巻き線し、外部の電流電源から電流を供給した後、何らかの方法で永久電流のモードにすればよい。そのために永久電流スイッチというものを

使うのである。

永久電流スイッチに要求される性能は、外部電流電源から超電導コイルに電流が通電されている間は **off** 抵抗が大きく、所定の電流値に達した後は抵抗がゼロであるような性質を備えたものである。この要求を満たすために考えられたのが (1) 機械式スイッチと (2) 熱式スイッチである。機械式スイッチは現在ほとんど使われていないので説明を省略する。

熱式スイッチの基本構造は、超電導線と抵抗線が無誘導に共巻きしたものである。この巻き線部周辺に加熱用ヒーターを配し、スイッチが **off** の状態をヒーター加熱で超電導線を常電導状態としておき、**on** 状態にするときには加熱を止めて超電導状態にするというのが基本である。

そのようなスイッチを超電導コイルの励磁過程との関係で図 2.2 に示した。図中、A (超電導コイル) や B (永久電流スイッチ) の外周を点線で四角で囲んである部分は極低温環境におかれている部分である。

その動作は以下のような順序で実現される。

- ① 超電導コイルに電源を接続する。  
このとき、永久電流スイッチは開(**off**)の状態である

(開の状態とはヒータを通电加熱し、超電導線を非超電導状態とすることで、電気抵抗を発生させること)

- ② 設定電流値まで通電する
- ③ 永久電流スイッチを閉(**on**)の状態にする

(閉の状態とは、ヒータ加熱を止め、超電導線を超電導状態、すなわち電気抵抗ゼロの状態にすること)

- ④ 電源電流を徐々に下げていく。  
このとき超電導コイルの電流は設定値のままで、電源に流れる電流との差の電流だけ永久電流スイッチ (超電導状態) の方に流れる

- ⑤ こうして電源からの電流をゼロに下げると超電導コイルと永久電流スイッチとの閉回路の中で永久電流が循環し続ける
- ⑥ この状態で電源を切り離す。

現実には超電導線同士の接続部等があるために抵抗部分があるので、通電電流は厳密には永久電流ではなく時間と共に減衰していく。減衰の度合いが、MRI や NMR の要求仕様を満たせば実用面で問題はない。

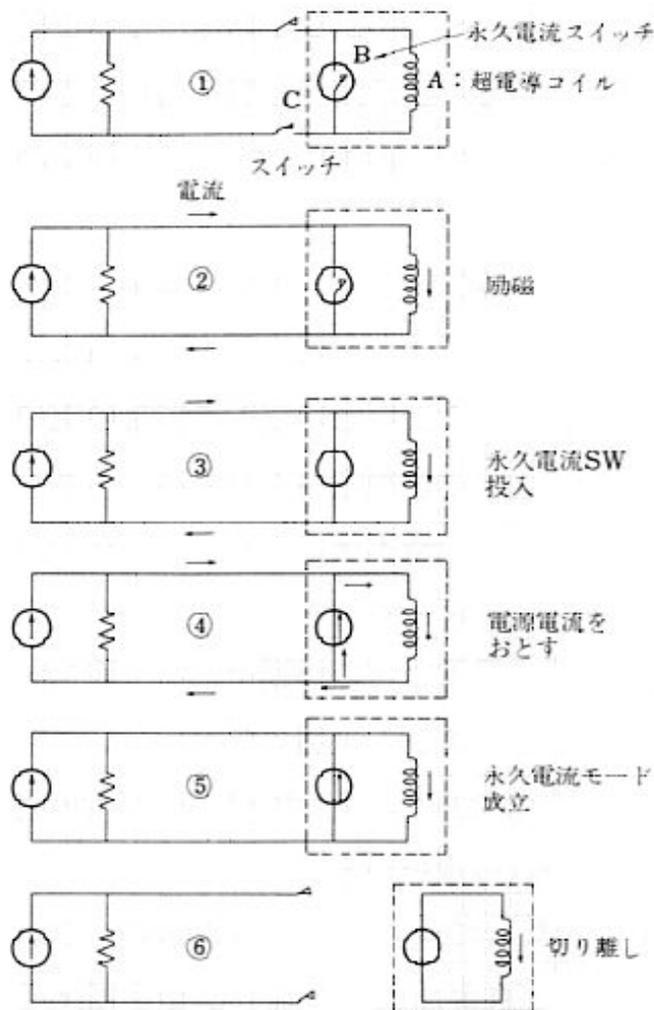


図 2.2 永久電流スイッチの動作原理

(出典: 「応用超電導」 荻原宏康 編著 日刊工業新聞社)

## 2.6 第2回目を終えるに当たって

今回はMRIやNMRに必要とされる分解能が磁界強度と大きく関係すること、従って超電導マグネットが有用であることを中心に解説した。更にMRIやNMRには磁界強度の大きさ以外に磁界の空間的均一性や時間的安定性も要求されるために、特に時間的安定性を得るために用いられている超電導マグネットの永久電流モードの基本について説明した。

次回は実際に使用されているMRIやNMRの性能を中心に超電導との関わりを解説する予定である。

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

超電導と MRI / NMR (その 3—磁界の均一性と強度)

(社団法人) 低温工学協会  
副会長 堀上 徹

3.1 はじめに

前回までに、MRI や NMR には強力な磁界が必要で、更にその磁界も単に強いだけでなく、空間的にも時間的にも均一でなければならないことを述べた。強い磁界や磁界の均一性を得るためには超電導を用いて永久電流状態にすることが必要であることも述べた。

今回は、実用超電導材料の現状について簡単に説明した後、超電導磁石としてどの程度の均一性が必要とされるかについて説明する。これに関しては、Web21 の 2009 年 1 月 5 日号の「読者の広場」にて (独) 物質・材料研究機構の木吉氏が簡単に述べられているので、そちらも併せてご参照ください。

3.2 実用超電導材料

1911 年に水銀が超電導特性を示すということが発見されて以来今日まで、数千種類の物質が超電導性を示すことが分かっている。しかし、その中で実際に使いものになっているのは極めて僅かである。

物質の分類で表せば、表 3.1 に示すように、ごく僅かの金属系の物質と酸化物系の物質が線材として実際に使われているか、あるいは使われる直前にあるという状況である。

表 3.1 実際に実用化されているか又はされようとしている超電導材料

		材料	臨界温度	線材 (長さ)
金属系	合金系	Nb-Ti	9 K	自由長
	化合物系	Nb <sub>3</sub> Sn	18 K	
		MgB <sub>2</sub>	39 K	数100 m
酸化物系	Bi系	BiSrCaCuO (2:2:2:3)	110 K	自由長
		(2:2:1:2)	90 K	
	Y系	YBaCuO	93 K	~1 km (RE : 希土類元素)
		REBaCuO (1:2:3)		

表から分かるように金属系の物質はそれを構成する元素数が 2 種類と少なく、銅線のような線状に加工することが比較的容易であるのに対して、酸化物系の物質は 4 種類から 5 種類の元素から構成され、結晶構造も大変複雑であり、線状に加工することが大変困難であった。しかし開発者の努力で、酸化物系の中でも Bi 系材料は、金属系材料と同様な方法で長尺の線材を安定して製造できるようになった。一方、Y 系 (RE 系) 材料に関しては同様な製造方法が適用できず、開発者達の懸命な努力にも関わらず実用化が遅れていたが、最近になって長さが 1 km 級の線材が製造できるようになり、それを用いてコイル等の機器開発を進めことができるような状況になってきている。

現在普及している MRI に用いられている超電導線材は Nb-Ti のみで、NMR の場合は Nb-Ti と

Nb<sub>3</sub>Sn の線材である。表中に示すように Nb-Ti や Nb<sub>3</sub>Sn の臨界温度は 9 K と 18 K である。そのため、MRI や NMR の運転温度は絶対零度に近い 4.2 K の液体ヘリウムが用いられるか、またはヘリウム冷凍機を用いた伝導冷却方式（説明は略す）が用いられている。

現状では多くの場合液体ヘリウムを冷媒として用いている。特に MRI の場合は 4.2 K の冷凍機を装備しており、蒸発してくるヘリウムガスを冷凍機で再度凝縮して液体ヘリウムにする方法が採られている。930 MHz というような NMR では温度を 1.5 K まで下げて運転している。

臨界温度が高い Bi 系や、Y 系の線材を MRI や NMR に適用できれば、運転に必要な冷却温度を現状よりも高くでき、必ずしも液体ヘリウムを用いなくてもよい状況が実現できる。同時に Bi 系や Y 系の材料は超電導状態を維持できる磁界（臨界磁界）が金属系に比べて極端に高いという特徴があり、強い磁界の発生には適した材料であるので、現在 Bi 系線材を用いた NMR 装置の開発が試みられている。（磁界と超電導材料の関係については次号で説明する予定である）

### 3.3 必要とされる磁界の安定性（MRI の場合）

前号で説明したように MRI や NMR には、磁界の時間的安定性が非常に厳しく要求される。そのため永久電流状態を実現しているわけであるが、実際、超電導線でコイルを巻き線にする際には線と線の接続部分を避けることができないので、その部分での接続抵抗を極端に低減することが要求される。

MRI の場合、マグネットの大きさは患者の体格により決まる。従来は患者が入る常温の空間が直径 60 cm 程度であったが、最近では 70 cm 程度になっているようである。

図 3.1 に装置の写真を示す。円筒中心部の空間の直径が 70 cm 程度である。



図 3-1 1.5 T MRI 装置（提供 東芝メディカル株式会社）

温度 4.2 K の超電導マグネットと 300 K 程度にある常温空間との間には、断熱材料や傾斜磁界コイル、高周波磁界コイル等が入る空間必要となる（前々回（その 1）図 2 参照）。それを考慮すると超電導マグネットの内径は 100 cm 程度となる。

磁界の空間均一度は、患者の撮像空間において 10 ppm 以下が必要とされる。例えば、診断領域において 0.5 T の磁界であれば、0.05 ガウス（5,000 ナノ T）（地磁気は約 50,000 ナノ T）以下の均一性を保たなければ画像の均一性が劣る。前に述べた MRS、即ち体内分子の化学結合状態をスペクトルで観察するような目的の場合には、更にもう一桁均一度を上げないと、正確な化学結合状態を

調べることができない。

一方、時間的安定性に関しても1時間あたり10 ppm以下の磁界減衰率、通常は1 ppm程度が要求される。先に述べた超電導線材の接続技術等の進展に伴い、現在では余りにしなくてもよい項目となっている。それは、通常の磁界の減衰に関してはMRIの装置側で共鳴周波数を磁界の減衰に応じて自動的に調整できるようになっているからである。

### 3.4 必要とされる磁界の安定性 (NMR の場合)

NMR の場合、必要とされる常温空間は、通常5 mm 直径の円筒状のサンプル管が入り、長さで20 mm 程度の空間で1 ppb (MRI の場合と比べて3桁高い) の均一度であることが要求される。図3.2には共鳴周波数600 MHz用のNMR装置の写真を示した。高さ約3 m、重量約1トンである。タンク形状の容器の中心上下に常温空間が設けられている。



図3.2 共鳴周波数600 MHz (中心磁界強度 約14 T) のNMR装置  
(提供: ジャパン・スーパーコンダクター・テクノロジー株式会社 (JASTEC))

均一度が約1 ppm程度までは超電導シムコイルというもので補正するが、これ以上は室温シムコイルにより補正する。空間均一度が一桁下がると、NMR信号の分解能と感度に影響する。前回(その2)の図2.1で示したNMRスペクトルで見られるように、空間均一度が一桁下がると、判別できるピークの細さが一桁悪くなるということを意味する。さらにスペクトルのピークの幅が広がるとピークの高さも低くなり、ピーク信号とノイズの比(SN比)が低下する。これは感度が低下することを意味する。

次に、磁界の時間的安定性がNMR測定に与える影響はどうだろうか? 要求される磁界安定性は1時間あたり0.1 ppb( $10^{-10}$ )である。永久電流マグネットで実現できるのは10 ppb程度で、これ以上は補正コイルを用いて「磁界ロック」という方法で減衰した電流分を補正コイルに電流を流して補正する方法がとられている。減衰した電流をどのように計測するかということに関しては専門的になり過ぎ、筆者の理解も十分ではないのでここでは説明しない。

ここまで述べたように、NMRに要求される磁界の強さや均一性はMRIに比べて桁違いに厳しいものである。

磁界強度が強くなると当然のことながら漏洩磁界も大きくなるため、通常はコイルの外側に主磁界と逆方向の磁界を発生するシールドコイルを設けて、外部への漏洩磁界を強制的に小さくするようにしている。(これをアクティブシールド方式と呼ぶ)

### 3.4 磁界の強さ

今まで MRI や NMR にはどの程度の磁界の安定性がどうかについて解説してきた。

最後に MRI や NMR に使われている磁界の強さがどの程度のものであるかを簡単に紹介する。医療用 MRI に関して現在主流となっているのは 1.5 T 機である。これは測定部位における磁界強度が 1.5 T である装置のことである。MRI 製品が市場に出回った当初は 0.5 T 機が主流であったが、分解能や感度の点において 1.5 T 機が主流を占めるようになった。

しかし、最近では外国のメーカーが 3 T 機の製品を市場に投入しており、これが徐々に伸びてきている。前にも述べたように磁界が高くなればなるほど空間分解能が上がり、化学物質質量などの分析精度もよくなるとか、撮像時間が短縮されるという利点があるが、一方で、余り共鳴周波数が高くなると高周波の人体に与える影響が無視できなくなるといった問題や、価格が上昇するという問題も生じてくるので、一概に磁界が高ければ高い程いいとは言えないようである。

一般的な医療診断用にはむしろ、装置の長さが短く（短軸化）や常温空間の直径が大きい（大口径化）及び軽量化が強く望まれているようである。短軸化が望まれる理由のひとつには、図 3.1 で見られるように患者が入る空間がトンネルのようになっているので、患者の閉塞感を和らげるという目的もあるようである。閉塞感緩和という目的に対しては別号で説明予定のオープン型の MRI というものが製品化されているが、このタイプのものは 1 T 強のものしかなく、1.5 T 級のものの開発は大変難しいということのようである。何故難しいかは別途説明する予定である。

NMR に関しては、現在 950 MHz までの NMR 装置が開発されており、1 GHz 機（発生最高磁界 23.5 T）は開発中である。

NMR は当初分子量の小さい有機化合物の構造を決定することを目的として用いられていた。超電導マグネット技術の進展による高磁界の発生が可能となり、それに伴って分子量の大きい分子構造、とりわけ蛋白質の立体構造解析がなされるようになった。

NMR 装置の高磁界化技術は積極的に進められているが、市場で多く出回っている装置は数百 (700~800) MHz クラスのものである。

### 3.5 第3回目を終えるに当たって

今回は、MRI や NMR に要求される磁界の強さや空間均一度及び時間安定性について説明した。そしてそれらの要求を満たすには超電導を用いるのが適していること、しかし、実際に適用できる超電導材料は極めて限られていることを述べた。

次号では MRI や NMR の高磁界化と超電導材料についても解説する予定である。

謝辞：本稿執筆に当たっては、MRI に関しては東芝メディカル株式会社 MRI 開発部の杉本博主幹から、NMR に関しては独立行政法人理化学研究所 生命分子システム基盤研究領域チームリーダーの前田秀明博士から情報を提供して頂いた。謝意を表します。

[超電導 Web21 トップページ](#)

## 【隔月連載記事】

### 超電導と MRI / NMR (その 4—高磁界化)

(社団法人) 低温工学協会  
副会長 堀上 徹

#### 4.1 はじめに

MRI も NMR も技術的には高磁界化の方向にある。技術的には、と書いたのは、現時点では市場面からはコストの観点から必ずしも高磁界化の方向にあるとは言えないからである。

MRI は、現在国内では 1.5 T 機が主流であるのに対し、欧米では 3 T 機の市場が伸びてきている。市場規模から見れば 3 T クラスが今後主流になるとみられているが、脳の働きなどを更に鮮明に画像化したり、今まで観測できなかったものを観るためにはさらなる高磁界 (10 T クラス) が必要とされており、探索研究という観点から世界的に高磁界化の開発が進められている。

NMR においても同様に高磁界化が要求されているが、市場規模は 700~800 MHz 機が主流である。一方では高磁界化することにより、測定時間の短縮、測定精度の向上はもとより、より大きな分子量を持つ物質の分析が可能となるので、高磁界化の開発も進められており、現在は 950 MHz (磁界強度 22.3 T に相当) 機が既に開発され、今後は 1 GHz 超の装置開発が世界的に活発になると考えられている。MRI も NMR も高磁界化すれば装置の大型化、重量やコストの増大等を伴うが、研究・開発により高磁界化技術が成熟すれば、いずれ市場に浸透するものと期待される。

#### 4.2 高磁界用超電導材料

機器の新機能性付与や高性能化は材料開発と密接な関係にある。超電導マグネットの場合も例外ではない。前号では超電導現象が生じる温度 (臨界温度) について記載したが、臨界温度以外に、ある温度のもとで、超電導線材にある磁界を外部から印加したとき、どれだけ大きな電流を流せるか (臨界電流値) と、どれだけ高い磁界まで超電導性を保存することができるか (臨界磁界) が高磁界化の実現には重要となる。

図 4.1 に各種超電導線材の印加磁界と臨界電流値の関係を示した。それぞれの材料を線材形状にした場合、その線材に外部から磁界を印加した状態で電流を流す。磁界強度が増すにつれ、流し得る電流値 (臨界電流) が減少している。実用超電導材料としては、できるだけ強い外部印加磁界のもとで、できるだけ大きな臨界電流値を持つ材料が高磁界化には適している。

図では材料間の性能比較をするために、横軸の印加磁界に対して縦軸には線材の単位断面積あたりの電流値、即ち臨界電流密度を示してある。

図中、各グラフに温度が記載されていない場合は 4.2 K での測定結果である。例えば、 $\text{Nb}_3\text{Sn}$ (Bronze) の場合、温度 4.2 K では磁界が 23 T 程度で超電導電流がほとんど流れないのに対して、最近開発が急速に進みつつある酸化物超電導体の Y 系 (YBCO) の場合は 30 T でも未だ十分な電流を流し得るといことが分かる。MRI などでも多用されている Nb-Ti 材料は 10 T 程度で超電導状態から常電導状態に転移してしまう。即ちこの材料で作製したマグネットでは 4.2 K で 10 T 以上の磁界を発生させることはできないということを意味する。

今更言うまでもないが、図から分かるように、MRI や NMR に限らず高磁界化のためには、高温超電導材料が非常に適しており、今後の実用化開発が期待されているところである。高温超電導体は、液体窒素温度以上でも超電導現象を示すことも魅力の一つではあるが、外部からの大きな印加磁界に対しても大きな電流を電気抵抗なしに流せるということも応用に際しては大いなる魅力の一つなのである。

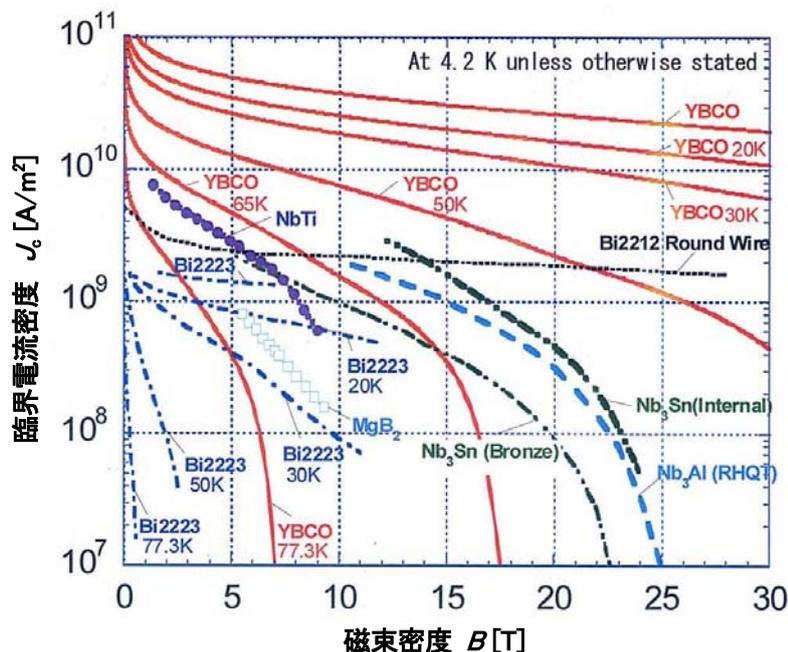


図 4.1 各種超電導材料の外部印加磁界と臨界電流密度との関係  
(提供 九州大学 木須隆暢 教授)

### 4.3 MRI の高磁界化

少し古い情報になるが、2007年4月19日の日経産業新聞に「欧米の医療機器各社 MRI、3 Tesla時代到来?」という見出しで、「国内、一気に普及も」というサブタイトルのついた記事が出た。

この記事では、3 T機は、現在主流である 1.5 T機に比べて、血管や海馬の輪郭などがよく見える。脳腫瘍の組織内の化学物質の量などもより詳しく見えると説明している。

また、今年(2009年)4月に横浜で開かれた「2009 国際医用画像総合展」においても、東芝メディカルシステムズ、GE 横河メディカルシステム、シーメンス旭メディックスやフィリップスエレクトロニクスジャパン等の各社が主に 3 T機の MRI を出展していた。この様子から見ても分かるように世界的に 3 T機への移行が進んでいる。

一方、医用 MRI では従来から円筒形状(ソレノイド形状)のマグネットが用いられているため、患者はトンネルの中に居るような感覚になり、特に閉所恐怖症の人には精神的な負担になっていたようである。欧米ではその傾向が強いらしい。MRI の形状は、前号の図 3.1 に示したように随分と短軸化してきているものの円筒形状であり未だ十分ではないようである。2 個のコイルを対向させて配置すれば円筒形状よりは空間を確保できる。そのような形状をした装置は既にオープン型の MRI として 0.5 T機では商品化されている。しかし、高磁界化が進めば進むほど 2 個のマグネット間に働く電磁気力が巨大となり、2 個のマグネットを支える支持構造材料の量が莫大となり、重量的にもコスト的にも商品化することは困難とされている。この状況がある程度克服したのが、株式会社 日立メディコから「オアシス」という商品名で売り出されているものである。先の横浜での展示会において出展された。

この製品の謳い文句は①オープン型としては世界最高の 1.2 T の磁界強度 ②270 度の開放感とベッド横移動による広い撮像可能範囲 ということになっている。装置の写真を図 4.2 に示した。この装置では静磁界の発生方向が上下方向となっている。



図 4.2 オープン型 1.2 T MRI  
(提供 株式会社 日立メディコ)

MRI のさらなる高磁界化開発は国内外で行われている。ドイツやフランスでは 9.4 T や 7 T の MRI が設置されている。わが国でも東大が中心となって「Super-MRI コンプレックス」というプロジェクトを立ち上げようとしている。ここでは 11.7 T 級の MRI を開発し、スーパーコンピューターを活用して糖尿病、がん、脳梗塞、心臓病、アルツハイマー病などの疾患を正確に診断することやテーラーメイド医療の実現等を目的としている。(「2008 東京大学の提案 Super-MRI コンプレックス」パンフレットより)

#### 4.4 NMR の高磁界化

NMR 装置の高磁界化は図 4.3 に示すように、1960 年代半ばから急速に進展し、現在は 1 Ghz 級の装置がドイツの Bruker 社から販売されるに至っている。

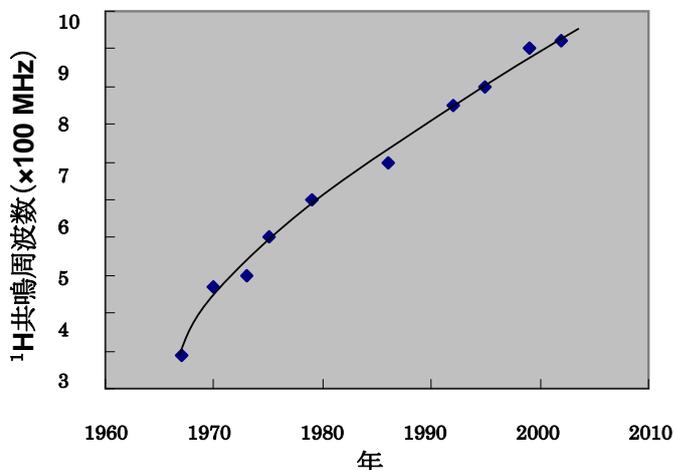


図 4.3 NMR 装置の高磁界化傾向 (共鳴周波数  $f$  は  $f(\text{MHz})=42.6 \times B(\text{T})$ ,  $B$  は印加磁界)

NMR は、分子量の大きなタンパク質の構造解析に有力なツールであるだけでなく、開発中の薬剤化合物の迅速な分析等大変広く分析化学の分野では普及している。共鳴周波数が高ければ高いほど、即ち磁界強度が高ければ高いほど分析精度や感度の向上、分析時間の短縮等が図れるが、「コスト対効果」を考慮すると共鳴周波数が高ければ高いほどよいというわけにはいかない。

独立行政法人 物質・材料研究機構と神戸製鋼所は2004年に930 MHz（磁界強度21.9 T）機を開発し、タンパク質の構造解析に大いに貢献した。最近では科学技術振興機構の「先端計測分析技術・機器開発事業」により高温超電導を用いた1.05 MHz (25 T) クラスの開発が進められている。このように国の主導で技術開発が進められ、それが一般産業に展開するという図式が期待される所である。

#### 4.5 第4回目を終えるに当たって

今までの解説で、超電導という特性がMRIやNMRの発展に大いに貢献してきたことをご理解いただけたと思う。次号では世界の情勢や市場について書く予定である。

[超電導 Web21 トップページ](#)

## 【隔月連載記事】

### 超電導と MRI / NMR (その 5- 「技術戦略マップ」と世界の動向)

(社団法人) 低温工学協会  
副会長 堀上 徹

#### 5.1 はじめに

経済産業省は NEDO と連携して、平成 16 年度に、わが国が戦略的に取り組むべき 20 の技術分野の道筋を示した「技術戦略マップ」を作成し、17 年度以降はそれらのマップのローリング (改訂) を行っている。当初は「超電導技術」は採り上げられていなかったが、翌平成 17 年度に新たに「超電導技術分野」が追加された。現在では 31 の技術分野が対象となっている。

本号では「超電導技術分野」の中で採り上げられている「MRI」と「NMR」について紹介する。これにより、国が支援する、しないに関わらず技術開発の方向性を見て取ることができる。併せて世界の開発状況についても簡単に紹介する。

#### 5.2 技術戦略マップとは

平成 17 年 7 月 27 日の「日刊工業新聞」には、超電導が技術戦略マップに採り上げられた理由として、「新たに追加予定の超電導は、最近、先端的な研究成果が認められ、エネルギーや医療、デバイス関連など用途の範囲が広く「市場化を期待できる」(経産省)とみている」と書かれている。

技術戦略マップは、新産業を創造していくために必要な技術目標や製品・サービス・コンテンツの需要を創造するための方策を示したもので、経済産業省での研究開発マネジメントに活用するとともに、幅広く産学官に提供し、ビジョンや技術的課題の共有、異分野・異業種の連携、技術の融合の促進に寄与することが作成の目的となっている。

対象としている 31 の技術は以下の 8 つに分類されている。(詳細は以下のホームページ参照)

(<http://www.nedo.go.jp/roadmap/>及び <http://www.nedo.go.jp/roadmap/2009/ene2.pdf>)

31 の技術分野は以下の 7 つのカテゴリーに分類されている。①情報通信(半導体等 6 技術分野)、②ナノテクノロジー・材料 (4 分野)、③システム・新製造 (ロボット等 5 分野)、④バイオテクノロジー (創薬・診断等 5 分野)、⑤環境 (CO<sub>2</sub> 固定化等 4 分野)、⑥エネルギー (超電導技術等 2 分野)、⑦ソフト (人間生活技術等 3 分野)、⑧融合戦略領域 (持続可能なものづくり分野等 2 分野)

技術戦略マップは①導入シナリオ、②技術マップ及び ③技術ロードマップの 3 点セットで構成されている。

超電導技術分野においては、超電導技術が幅広い産業分野に適用できることから、「エネルギー・電力」、「産業・輸送」、「診断・医療」及び「情報・通信」の 4 産業分野に分類し、それぞれの産業分野における導入シナリオ、技術マップおよびロードマップが作成され、それらの技術を支える基盤技術として、超電導線材技術、超電導バルク技術、超電導デバイス技術及び冷凍・冷却技術が検討されている。本稿で採り上げている MRI や NMR は上記産業分野の中で「診断・医療」分野において検討されている。

3点セットの最初の「導入シナリオ」においては、超電導技術分野の目標と将来実現する社会像を明確にし、戦略的な機器について、開発・導入に係る想定シナリオを時系列で示されている。

また、関連施策の取組みとして、導入普及促進策、関連産業連携策、規制緩和、標準化等の関連施策や超電導技術の実用化を促進するため、高圧ガス保安法、電気事業法などの規制について導入促進

のための規制緩和などについても考慮されている。その他、国際標準化や広報・啓発などの促進についても言及されている。

「技術マップ」では、効率的かつ導入目的に合致した研究開発を行うため、技術のカテゴリ分けが行われ、更に開発すべき重要技術が明確にされている。

「技術ロードマップ」では、技術マップに示された各技術課題のうち、重要技術として選定されたものについて、2020年頃迄を目途に、中長期的視点から各技術課題に必要と考えられるマイルストーンが示されている。繰り返しになるが、これら3点は毎年見直しが行われている。

### 5.3 超電導分野の技術戦略マップ

超電導分野における技術戦略マップでは、上記4産業分野に共通して「社会に役立つ超電導技術」という謳い文句で「2020年の社会像」を予測して作成されている。

「診断・医療」の技術分野においては、「健康長寿生活の実現」を目標として、「早期診断、精密診断、創薬等のニーズに応える先進医療機器の実現」というコンセプトで検討されている。(図5.1)

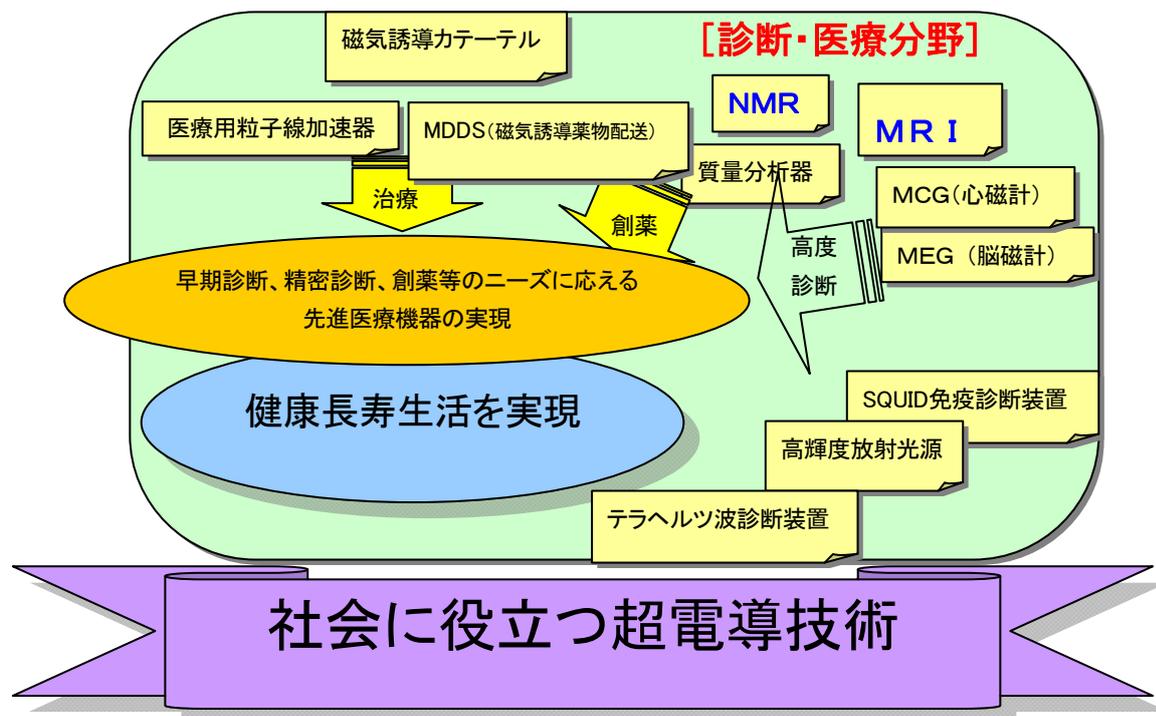


図 5.1 「診断・医療分野」における開発されるべき診断・医療機器

MRI や NMR は早期診断や創薬等に有用であるということで、技術戦略マップの中の「診断・医療」分野で個別装置として採り上げられている。

「診断・医療」分野におけるマップによれば、MRI に関しては、既に磁界強度 3 T の装置が導入されているが、現状はコイル軸長が 1.5 m から 2 m と長く、磁界時間減衰率も 1 ppm/h 程度というものを、2012 年ごろまでには軸長を 1 m と短軸化し、磁界減衰率も 0.1 ppm/h 以下にすることを目標としている。これは汎用機としてこのような仕様の機器の開発が望まれるということ予測しているものである。同時に先端研究用としては MRI 用 10 T 機の技術も完成させ 2015 年までには実用化に入るとしている。

NMR については現在 1 GHz の装置が開発されているが、2015 年までに 1.1 GHz 機が、2020 年

までには 1.5 GHz 機が実用化されるであろうとの予測である。1.1 GHz 機を達成するためには 25.8 T の磁界を発生する必要があり、さらに、磁界の 1 時間当たりの減衰率は 20 ppb 以下という仕様を満たす技術を 2012 年までに確立しておく必要があるとしている。

#### 5.4 わが国の開発状況

外国では 3 T 機が主流であるのに対して、わが国で 1.5 T 機が主流である。これは、わが国においては MRI 全体の市場が減少してきているからであるとの見方もある。因みに「新医療」2008 年 6 月号によると、2006 年の国内での 3 T 機の導入実績が 49 台であるのに対して 2007 年度は 36 台となっている。MRI 全体の納入台数に対する 3 T 機の導入比率は夫々 8.1 %、8.7 % となっている。ということで、ここ暫くは 1.5 T 機と 3 T が並行して普及していくものと考えられる。

更なる高磁界化開発に関しては、先端研究用として、東大の「Super MRI コンプレックス」という計画があるが、残念ながら予算面から実現の可能性はそう高くなさそうである。

先述の技術マップでは、2015 年までには全身用の 10 T の MRI が実用化されると描かれている。MRI を高磁界化すれば、高解像度、超微量分析が可能となるなどの他に水素の原子核であるプロトン以外の核種 ( $^{13}\text{C}$  や  $^{17}\text{O}$  など) の分光が可能となる。さらにヒトや動物の脳や脊髄の活動に関連した血流動態反応を視覚化することも出来るようになる。即ち、脳で行われる様々な精神活動において、脳内の各部位がどのような機能を担っているのかということや、正常状態と比べることで、脳の病気の診断にも用いることができる。このように測定領域が大きく広がるのが高磁界化の魅力なのである。以前にも触れたが、先端研究用として機器開発技術が成熟すれば、いずれはそれらの技術を活用した汎用機が出現するのであるが、残念ながら現時点ではわが国では 10 T 程度以上の高磁界化 MRI の開発はほとんど進んでいないようである。

NMR の高磁界化に関しては、(独)物質・材料研究機構と(株)神戸製鋼所が共同開発した 930 MHz (磁界強度 21.9 T) がわが国の製造での最高磁界を有する NMR である。最近では科学技術振興機構の「先端計測分析技術・機器開発事業」により、高温超電導体を用いた 1.05 GHz (24.6T) NMR 装置の開発が(独)理化学研究所、(独)物質・材料研究機構、(株)神戸製鋼所、日本電子(株)などが共同で開発を進めている。超電導マグネットの提供は(株)神戸製鋼所の関係会社であるジャパン・スーパーコンダクター・テクノロジー(株)(JASTEC)が担っていることが多いが、残念ながらわが国で用いられている高磁界 NMR の大半が外国メーカー製である。

NMR の磁界を高くすれば MRI の場合と同様に、従来は計測が困難であった多核種の計測が可能となる。例えば、たんぱく質の活性や機能の中心となっている酸素や金属原子の核種の NMR 計測が可能になると、標的たんぱく質の阻害剤を選択することが可能になり、創薬技術の進展が期待できるなど様々な分野で計測範囲が広がり、新材料の開発などにも繋がるという利点がある。更に、従来固体サンプルでは精度の高い計測が出来なかったが、1 GHz 超の測定が出来るようになると固体サンプルの計測も可能となる。しかし、機器の開発が技術マップ通りに進むかどうかは定かではない。

#### 5.5 外国の開発状況

MRI では、ドイツのマックスプランク研究所の高磁界 MR センターに人体用の 9.4 T 機と動物用の 16.4 T 機が既に設置されている。これらは、先述の脳の活動に関連した血流動態反応を観察し、脳生理学と神経科学との関連を調べることを目的としている。フランスでは、超流動ヘリウムを冷媒とした核融合炉用超電導マグネット開発で実績がある、サクレー国立研究所が神経画像検査を目的とした高磁界マグネットを開発している。ここでは全身用の 11.7 T のマグネットを開発中である。このマグネットも温度 1.8 K の超流動ヘリウムで冷却する。

NMR 用高磁界発生超電導マグネットに関しては圧倒的に海外メーカーが進んでいる。先号でも

触れたが、ドイツのブルカー・バイオスピン社が既に 1 GHz の装置を市販している。ブルカー・バイオスピン社の他に夫々 950 MHz 機の納入実績を有する、米国のバリアン社及び英国のオックスフォード・インスツルメンツ社が寡占しており、夫々超電導マグネットは主に傘下の EAS 社、マグネス社及びオックスフォード・スーパーコンダクター・テクノロジーズ (OST) 社が供給している。わが国の JASTEC 社も一部超電導線材をブルカー・バイオスピン社に提供しているようである。

米国では、MIT の NMR 装置開発が進んでいる。ここでは、2012 年までに 1.1 GHz 機を開発し、成功すれば 2018 年までに 1.3 GHz 機を開発することになっている。

いずれにしても、1 GHz (23.5T) 以上の NMR には高温超電導体が不可欠で、上記各開発機関では、低温超電導体と高温超電導体のハイブリッド型の超電導マグネットを開発中である。

## 5.6 第 5 回を終えるに当たって

今回は主に、経済産業省と NEDO が作成した技術戦略マップの紹介と、彼我の開発状況について駆け足で説明した。最近になって低磁界（地磁気程度の静磁界）の MRI/NMR の研究が各国で進展してきている。これについては、「超電導 Web21」2009 年 8 月号に ISTEK の蓮尾特別研究員が「ISEC2009」という電子デバイス関連の国際会議での会議報告で簡単に触れておられる。今後ウオッチしておく必要があると考えている。

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

超電導と MRI / NMR (その 6—市場)

(社団法人) 低温工学協会  
副会長 堀上 徹

6.1 はじめに

今回が連載の最終回となる。冒頭お断りしたように、筆者は超電導技術との付き合いは長い、MRI や NMR に関しては専門家ではない。したがって、本連載も超電導技術に偏った記載が多くなったことをお詫し頂きたい。とはいえ今まで述べてきたように、超電導なしでは多くの MRI や NMR が成立しないことも確かである。

今回は超電導製品及び MRI や NMR の市場規模について紹介する。

6.2 超電導の世界市場規模

そもそも超電導関連機器の市場規模がどの程度のものであるかを示しておこう。

超電導関連市場の規模は大きくないので関連情報は少ないが、CONNECTUS<sup>\*1</sup> という欧州の超電導関連企業で構成されている団体が定期的に発表している資料が参考になるので紹介しておきたい。

(図 6.1)

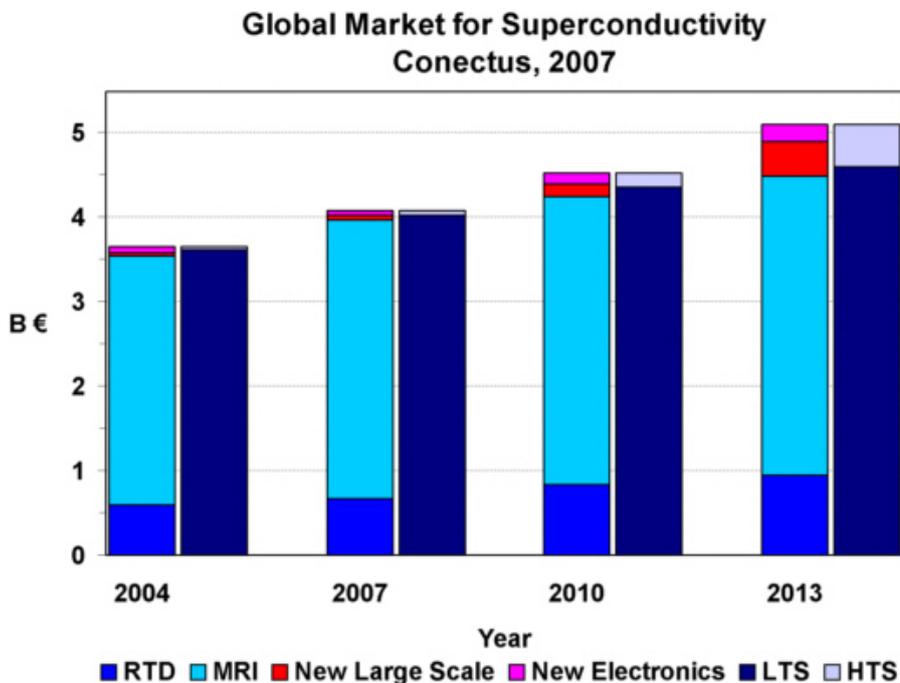


図 6.1 2004 年から 3 年毎の世界の超電導市場 (実績と予測)  
(CONNECTUS の HP <http://www.conectus.org> より引用)

\*1: CONECTUS (CONSORTIUM OF EUROPEAN COMPANIES DETERMINED TO USE SUPERCONDUCTIVITY の略) 超電導の実用化を念願する有志が、EC 内における諸国間の連帯を図る目的で、1993 年に組織した団体 (ISTEC の HP より一部抜粋)。現在 17 社が加入している。

この調査は3年に一度行われているようで、図6.1では2004年と2007年が実績、それ以降は予測である。実績がどのようにして調べられたかは不明であるが、多分加入企業が夫々の業界の個別調査結果から得たものであろうと推測している。予測調査の方は、CONNECTUSに参加している企業を対象にデルファイ法によって得られたものであると以前CONNECTUSの代表を務めていた人から聞いたことがある。各年に2本の縦棒グラフがあるが左側は対象製品別、右側は各超電導製品に使用されている低温超電導材料（金属系）と高温超電導材料（酸化物系）の比率が示されている。市場規模は右肩上がりで、2007年の約4B（ビリオン）ユーロ（5,300億円、1ユーロ130円換算）に対して、2010年には4.5Bユーロ（5,870億円）、2013年には5.1Bユーロ（6,600億円）と予想している。

その内訳を数値で示したのが表6.1である。これも上記HPより引用した。

因みに、先月号で紹介したわが国の「技術戦略マップ」では、超電導の国内市場は2013年で約1,000億円、2020年で2,250億円程度と予測している。

表6.1 超電導のビジネス分野毎の世界市場内訳

Global Market for Superconductivity (in M€) Conectus, 2007				
Business Field	Year 2004	Year 2007	Year 2010	Year 2013
Research & Technological Development (RTD)	600	660	835	955
Magnetic Resonance Imaging (MRI)	2950	3300	3410	3525
<b>TOTAL of RTD &amp; MRI</b>	<b>3550</b>	<b>3960</b>	<b>4245</b>	<b>4480</b>
New Large Scale Applications	35	65	150	410
New Electronics Applications	65	60	125	210
<b>TOTAL of Emerging New Businesses</b>	<b>100</b>	<b>125</b>	<b>275</b>	<b>620</b>
<b>TOTAL MARKET</b>	<b>3650</b>	<b>4085</b>	<b>4520</b>	<b>5100</b>
Market Shares for Low-Tc Superconductors	3610	4025	4350	4600
Market Shares for High-Tc Superconductors	40	60	170	500

この表で、RTDとは研究・技術開発分野の市場で、大学や研究機関（含む軍用）が主な対象である。（核融合炉開発や加速器開発等も含まれると思われる）。

もともと超電導は大学や研究機関での利用から発展してきたものである。この表から分かるように、2007年ではMRIの全市場に占める割合は80%超となっている。更に、この2分野（RTDとMRI）だけで3,960Mユーロ（5,140億円）となり、これは超電導市場規模全体の約97%を占める。

表中、新規事業の総計（TOTAL of Emerging New Businesses）に含まれるTOTAL of Emerging New BusinessesとはRTDやMRIのように従来から超電導が利用され、既に成熟した産業分野ではなく、エネルギー（例えば電力機器等）、情報・通信、産業及び交通分野への超電導応用のことを指している。この分野は既に競合製品が多くあるので、性能／コストの比較競争になる。

一方、高温超電導材料と低温超電導材料との利用比率は2004、2007、2010、2013年に対して夫々1.1%、1.5%、3.9%、10.9%と上昇し、高温超電導の比率が急速に伸びていくと予測していることは注目に値する。前に述べたように高温超電導材料が容易に使用可能になると、それを用いた応用製品が爆発的に拡大することを期待している。

### 6.3 MRI/NMR の市場規模

#### 6.3.1 国内

MRI の国内納入台数を磁界強度別、年度別に示したのが図 6.2 である。

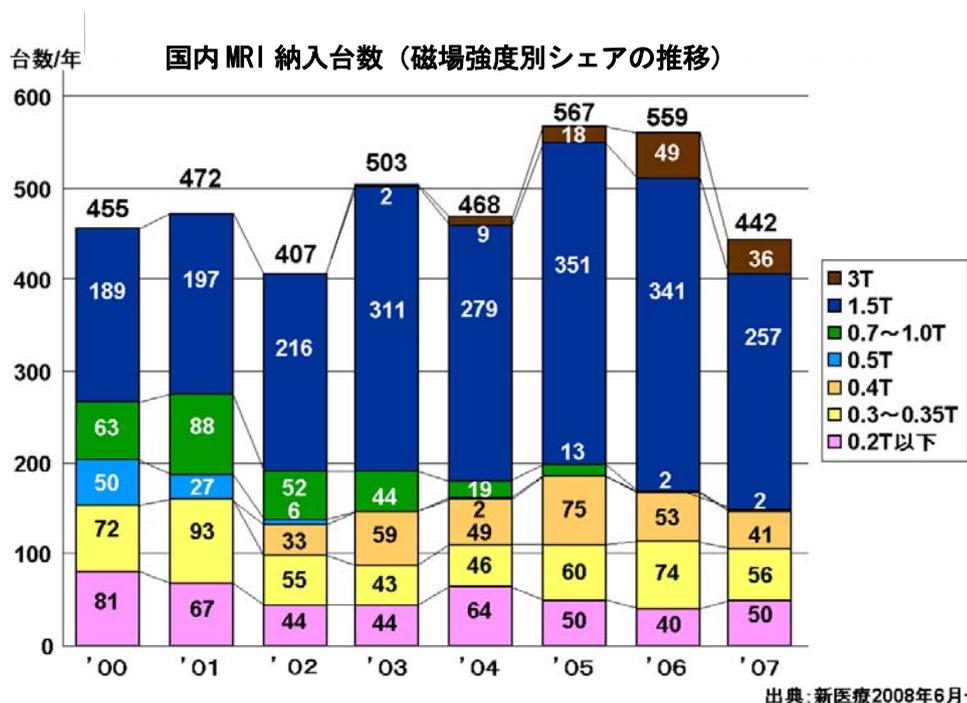


図 6.2 磁界強度別の MRI の国内納入台数  
(出典 新医療 2008 年 6 月号)

図から分かるように国内では 1.5 T 機が主流で、2003 年以降では全体の約 60% を占めている。以前にも書いたように実際の販売価格は当事者でないと正確には分からないし、必ずしも安定した販売価格ではないので、ここでは、やや乱暴ではあるが各磁界強度機種を平均して 1 億円/1 機とすると、国内での市場は年間大体 400 億円から 600 億の範囲ということになる。MRI の世界市場の 10% 強 (2007 年、金額ベース) が国内の市場規模ということになる。

NMR に関して最近の国内市場規模に関する公表されたデータがなかなか見当たらないが、2002 年では年間約 120 億円規模であった<sup>\*2</sup>。

\*2: 「高温超電導市場調査」報告書 (高温超電導市場開拓委員会) 平成 17 年 3 月 (財)国際超電導産業技術研究センター発行

#### 6.3.2 世界

MRI の世界市場は 6.2 で述べた通りである。NMR の世界市場規模に関しては残念ながら信頼できる最近のデータを得ることができなかった。

### 6.4 超電導材料の適用先

各種の超電導材料 (「本連載-その 3」で記載) がどの機器にどの程度用いられているかをグラフにしたのが図 6.3 である。ここでは超電導材料の線材形状での適用に限っている。

少々古くて恐縮だが、これは 2004 年度 (2003 年 10 月~2004 年 9 月) のデータである。米国応

用超電導学会（ASC）で発表されたものである。専門家によれば材料重量にして年間 3,000 トン程度の材料が用いられているとのことである。

このうち材料の種類別では、NbTi が 97.3 %、Nb<sub>3</sub>Sn が 1.5 % を占めているということになっている。

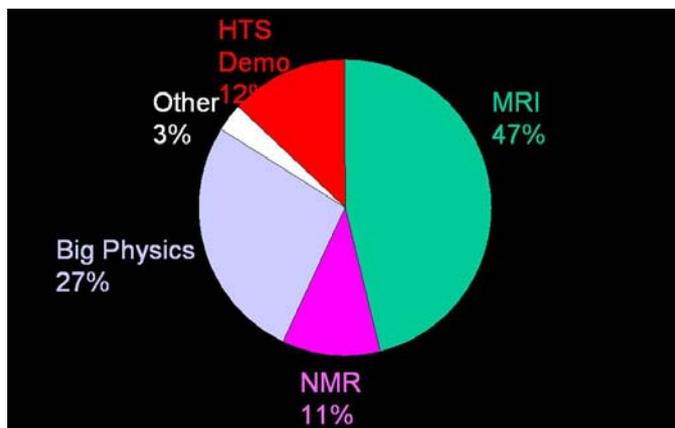


図 6.3 超電導材料の機器への適用比率  
(出典：ASC2004 2MW05 K. Marken)

材料の適用先としては MRI がほぼ半分で、NMR が 11 %、Big Physics が 27 %で、これは加速器や核融合炉等のことで、先述の CONECTUS が表現した RTD や Large Scale Application に相当するものである。先の大型応用では機器の台数は少ないが 1 機あたりに使用する材料が多いのでこのような結果になるのであろう。

## 6.5 連載を終わるに当たって

本連載は第 1 回目の「構造と原理」から始め、「超電導とのかかわり」、「磁界の均一性と強度」、「高磁界化」、「技術戦略マップ」と世界の動向」そして今回の「市場」を書くことにより MRI/NMR と超電導の接点を一通り解説したつもりである。

現時点で超電導が唯一大きな市場を形成しているのは残念ながらこの分野だけであるが、既に核融合実験炉（ITER）の建設計画が実行に移されていることや 2025 年には超電導リニアが商業運転される見込みであること、更には米国の超電導送電ケーブル計画など大型プロジェクトの実施が現実味を帯びてきていることなどから今後大きな市場が開けることが期待できる。また、高温超電導材料の実用化も近づきつつあるということが、大型プロジェクトのみならず超電導産業という大輪の花の咲く時期がそう遠からず来ることを期待させる。

経済産業省や文部科学省なども超電導の技術開発には強い関心と支援及び大いなる期待を示している。超電導機器を使用すれば省エネルギー効果が大きいことも知られている。

一刻も早い超電導市場の拡大を期待しつつ本連載を終了する。

調査が十分行き届かなかった点が多々あったことをお詫びするとともに、最後までお付き合いいただきまして誠にありがとうございます。ありがとうございました。

[超電導 Web21 トップページ](#)