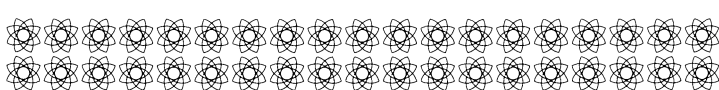


# 総説



## 全身用 MRI の最適磁界強度について

川口 博巳 (富士電機(株)千葉工場医療装置部)

### Optimum Magnetic Field for Whole-body MRI

#### キーワード

MRI の経済性, エンハンス剤, 磁界強度, 静磁場の素材, 冷媒, 新高温超伝導物質

#### 要旨

MRI の日本国内での普及台数は 100 台にせまりつつあるが, 装置の最適磁界強度が未ださだまらず, 更に強い方向へと変化しそうである. この変化は何故おこるのか, さらに今後なにが期待できるのかについて考えてみた. 本論では経済性や供給側の思惑, 技術的發展や新薬の開発, 医学的利用技術の進歩などを概観することにより, 技術の流れをしようとするものである. ただし多くの分野に渡ったため近視眼的であったり, 当をえない面も多々あろうが考察する.

#### 1 はじめに

この課題はながらく論じて来たが, その結論が定かにならないまま MRI の実用期をむかえてしまったようである. あるいは結論がえられたと解釈される識者もおられるかもしれないが, 過去に遡ってこの論点を再考してみると, つぎのような経過をたどったといえよう.

MRI が生体に利用されはじめたころには生体安全性の観点から高い静磁界に歯止めがかけられた. 当時高エネルギー物理領域において 2 テスラ程度の磁界環境下に人体がさらされることがあったため, 一応の目安として 2 テスラが用

いられたようであった. 傾斜磁界は実在する電磁環境を基に考えられたようであった. 高周波磁界は生体の代謝実験より定められた. この時点では余裕をみて実験結果の何割かにとどめられた. 一方 Bottomly 氏の Nottingham 大学での論文では中磁界以上の領域で生体内の渦電流損失により NMR 信号の減衰がはげしく実用にならないとされた. のちに Bottomly 氏によって否定されたが基礎データの少ない当時のことであったため多くの研究者が参考にした. この論文によると 0.3 テスラ程度の中磁界領域迄が実用領域であるかのように思われた. このためであろうが当時多くのメーカーは常伝導磁石システムの研究, 開発に務めた. この時期は全身用超

伝導磁石が開発されはじめたばかりでもあった。最初の装置は0.1テスラと低く常伝導領域の磁界強度であった。これを見て経済性から常伝導を支持する意見と磁場安定性から超伝導を支持する意見の対立が見受けられた。この時期にユニークな発想をするグループがあった。フィンランドのグループで彼らは0.3テスラ領域の超伝導磁石システムを開発しヘルシンキ病院に納め臨床研究をおこなっていたが生体高分子水溶液の緩和時間の磁場強度に対する変化量がとくに低磁界にて顕著になることから0.02テスラの低域にて商品化をこころみた。このように臨床的に見て結論がえられたかのようにみえた磁界強度が再び変化しはじめる兆候があらわれてきた。GE社が再び自説をまげてさらに高磁界である3テスラの装置を先のRSNAに展示したことにもうかがえる。Philips社、Siemens社とも4テスラの装置開発にのりだしており、米国NIHの高磁界装置は900Mヘルツ、21テスラへと計画変更されIGC社にて開発がすすめられている。

## 2 各種タームと磁界強度

### 緩和時間

ダマディアン氏の論文に触発されて生体内での縦横緩和時間の計測がさかんに研究されたが画像化手法の差異や装置状態の差異のため、データが集積されるにともない結論が不明確になってしまった。さらに臨床側のニーズである高いS/N、高速撮像法などが主流となった結果、緩和時間は論題にのぼらなくなった。

ただし被検者の個人差が少ない脳領域の白質、灰白質、CSFおよび血流の影響が少ない筋肉、脂肪などはローカルに意味を持つと考えられている。近年開発されている高磁界装置を用いた緩和時間測定論文はほとんどないため、磁界強度と緩和時間計測の関連付けは実証的には不明である。

### 安全性

生体に対する磁界の直接的影響については現在までのところ顕在化していない。これを反映して各種ガイドラインが改定されておりNRPB (National Radiological Protection Board) [英国] およびFDA (Foods and Drugs Associations) [米国]の安全性ガイドラインは以下のようである。

【表1】 安全性ガイドライン

物理的項目	NRPB	FDA
静磁界強度	2.5 T 以下	2 T 以下
磁界の時間変化量	20 T/sec 以下	3 T/sec 以下
高周波電磁波	1 w/kg 以下	0.4 w/kg 以下

ところで今や研究の中心は上記ガイドラインを越えてなされている。プロトン以外の核を観測するために静磁界強度は上昇をつづけており、高速撮像をより短時間で可能にするため磁界の時間変化量を越えてなされ、高磁界下多量の断面を撮像するため高周波電力量がガイドラインを上まわって投入されている。このような研究の結果上記ガイドラインが再び改定される可能性がある。

### 生体への影響

生体への静磁界の影響については液晶のような組織に対して配慮されたが今のところ短期的な悪影響は顕在化していない。

磁界の時間変化量については神経などの1次元組織への起電力について配慮されたが今のところ同様に顕在化していない。

高周波電磁波による加熱についてはハイパーサーミアよりかなり低い電力量が実効的に使用されており今のところ問題はない。

先のガイドラインをはるかに上まった静磁界の装置がまもなく完成するが、この領域においては高周波にて共鳴させる今の方法では試料側

の温度バランスを保てなくなると思われる。このため磁化の異方性を装置側で作り出して共鳴観測する手法が用いられる可能性がある。静磁界強度を高める理由として試料の化学的な微細構造を知ることにある。ところでこの意味において体液などのサンプリングされた試料を分析用 NMR で観測することとの差異を考慮しておかねばならない。

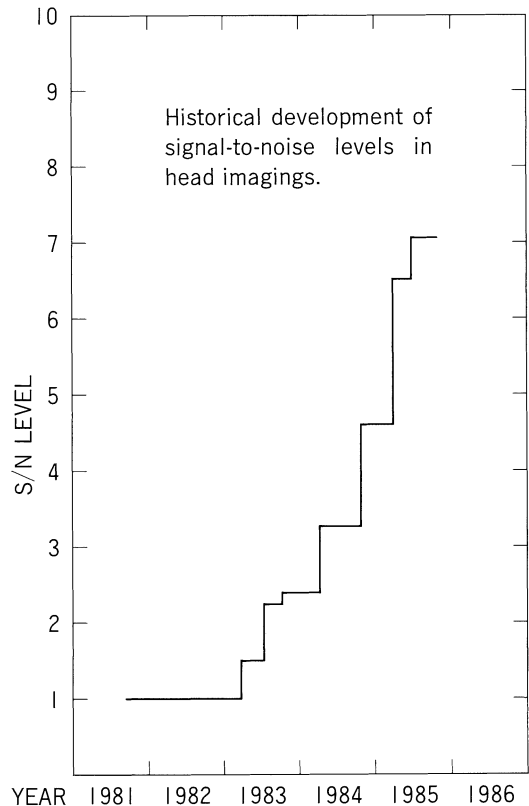
### エンハンス剤

最近、MRI の臨床応用面では X 線装置で用いる造影剤の効果を期待し「緩和効果エンハンス剤」が多用される。代表的なものにシェリング社の Gd-DTPA や緑十字社の人工血液(フッ素化合物)、Mn キレートなどがあげられる。ラジカル性試薬であるニトロオキシル<sup>1)</sup>も注目されている (Diradical nitroxyl spin label contrast agents)。それぞれラジカル (不対電子対) を利用して核の緩和を早める方法で画像上に特徴を出すものである。この分野が進歩すれば低磁界領域の装置でも組織コントラストを付け臨床効果を十分発揮させ得る。

### 3 MR 装置の推移

初期の装置は研究開発の進歩に対応できることを目的とし、拡張性を考慮したものであった。このようなハードウェア上に種々の画像構成法 (ソフトウェア) を組み込み画質の面での技術競争が展開された。どの製品もフーリエ変換ズームグラフィ法に集約されると、次に装置のパワー競争となった。静磁界強度の上昇、高速撮影、多数のマルチスライス像撮像など傾斜磁界システムのパワーが上昇し、データ処理装置記憶容量の大容量化、データ処理速度の高速化へと進んだ。観測対照は水素核からフッ素、リン、ナトリウムなどと、微小信号を求めて開発が進んだ。撮像装置にはスペクトロメータの機

能も付加された。このように装置はより大規模なものとなり高額化していった。この高額商品の採算を合せるため、より多量の患者スループットが要求された。多数の断面像が数秒で再生画像として CRT 上に表示されることが要求された。装置を管理運営する側は装置の処理能力に応じた患者回転率を確保する必要にせまられた。ところで実用装置の開発とは最高の技術を全て集大成するのではなく装置の機能バランスを目的環境下に整合させることにある。病院のたまたまいを導入装置に合わせるのではなく、病院に装置を合わせることを重要であると考え。メーカーのショーウインドウとしての病院である [表 2]



[J.C. Hoenninger, et al, IEEE Trans N.S. NS-34 NO 1 Feb 1987]

以前に病院の経済活動の中で「部品」として新技術を導入すると再検討がなされるようになった。この結果装置は目的に応じて多極化してきた。一方には研究目的をさらに追求しより高磁界指向装置となり、他方水素核の専用撮像装置としての低、中磁界装置へと二極化した。一般診断行為に必要な処理能力を持ち、しかも病院の経営に資するものとしての小型装置の開発に拍車がかけている。MR に対する冷静な評価が定着しもはや新技術ではないがいま一步のところで基盤技術に至らない位置にあるといえよう。研究用装置は主に P や Na の専用装置として位置づけられその目的には 2 T 程度の静磁界で充分な情報を引き出し得ないためさらに高磁界領域へと研究中心がシフトしつつある。装置側の改良によって S/N の改善も続いている。[表 2]

#### 4 超伝導体、強磁性体（永久磁石） （工業的側面および物性的側面）

MRI, MRS 装置の原価構成比中約 50 % を占めるのは磁気システムである。たびたび論じられているが常電導、超伝導、永久磁石の三つのタイプに分類される。ところで昨年春から超伝導の分野で技術的変化が急であった。このためシステムの特徴とは別に材料技術レベルにもどって再考せねば今後の展開を予測しえない事態となっている。そこで磁界発生メカニズムを材料レベルにて比較検討する。

##### 強磁性体

固体は規則正しく配列した原子核（これを格子と呼ぶ）のあいだを負電荷を持つ電子が分布している。この電子が自由運動しているのが金属である。Band 理論にて統一的に論ぜられる。つぎに自由電子によらずそれぞれの原子核に極在する電子により結合する物質には共有結合とイオン化結合によるものがある。これらはいず

れも非金属化合物である。格子の規則性を持つものを結晶、乱れたものをアモルファスな状態という。この状態は格子を構成する原子の「電荷」と「サイズ」によって定まる。格子が有する軌道電子の個数は格子の電荷による。このとき電子の持つ全エネルギーは系がゆるされる最低レベルのエネルギーになる。これを量子数の概念で表現すると次の四種類の量子となる。エネルギー量子、軌道角運動量の量子、この角運動量の方向成分をさらに量子化する量子、電子のスピンのよるスピン角運動量の量子である。ところで強磁性は電子のスピンの互いに消去しきれないことにより巨視的に現われてしまうのである。この点を「強（反強）磁性体の Heisenberg 模型」では以下の様に示している。電子スピンの交換相互作用を電子のスピン角運動量  $S$ 、電子の交換積分を  $J_{ij}$  とするとスピンの依存する部分のハミルトニアンは下式であらわせる。右辺第二項の符号を考えると、 $H = \sum_{i>j} -2J_{ij} (S_i \cdot S_j)$

交換積分  $J_{ij}$  が「正」のときは電子のスピンの平行になる場合のほうが低エネルギーレベルである。この性質が巨視的にあらわれると強磁性体となる可能性を持つ。 $J_{ij}$  が「負」のときは電子スピンの反平行になると低エネルギーレベルとなるため反強磁性体になる可能性を持つ。

次に格子原子のサイズによって結晶構造がきまる。電子スピンの平行反平行を格子構造にて空間的に特徴付けた結果、巨視的な磁気特性が定まる。実際にはつぎのようである。

（強磁性を示す鉄系元素）

Ti（チタン）、V（バナジウム）、Cr（クロム）、Mn（マンガン）、Fe（鉄）、Co（コバルト）、Ni（ニッケル）、Cu（銅）

（強磁性の希土類金属元素）

[La（ランタン）]、Ce（セリウム）、Pr（プラセオジウム）、Nd（ネオジウム）、Pm（プロメシウム）、Sm（サマリウム）、[Eu（ユーロピウム）]、Gd（ガドリニウム）、Tb（テルビウム）、Dy（デ

イスプロシウム), Ho (ホルミウム), Er (エルビウム), Tm (ツリウム), Yb (イットレルビウム), Lu (ルテチウム)

(酸化物として磁性を示すもの)

YIG, YAlG, YGaG, ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, LiFe<sub>5</sub>O<sub>8</sub>, Co<sub>2-x</sub>Fe<sub>x</sub>O<sub>3</sub>, Z-Ba<sub>2</sub>Zn<sub>2</sub>Fe<sub>12</sub>O<sub>22</sub>

などがある。特に希土類磁性体は近年脚光をあびているが表3のように単位体積当りの保磁力が強く MRI 用にも商品化されている。永久磁材はどれも磁気特性を持つ要素の集合によって消去しきれない場合に巨視磁化があらわれるという意味で低能率的であるといえよう。

【表3】 永久磁石の比較 (昭57年)

材 料	保 磁 力	年間生産量	単 価
アルニコ系	0.006~0.2(T)	2,445(t)	
フェライト系	0.2~0.35(T)	49,900(t)	0.7円/g
希土類合金系	0.5~1(T)	200(t)	40円/g
他	—	4(t)	

### 超伝導体

1911年オランダの物理学者 Kamerling Onnes が水銀の電気抵抗値が約 4 k でゼロになることを発見し超伝導技術が始まった。

最近では 1000 種類以上の化合物が常圧下で超伝導体になることが確認されているが、近年までは超伝導体は経験的に以下の定義がなされていた。

- ① 金属である。
- ② 強 (反強) 磁性体は含まれない。
- ③ 金属超伝導体では価数 2~8 である。  
化合物超伝導体は上の価数よりわずかに広い範囲の価数を持つ。

この 10 年間ほどで希土類 Chevrel 硫化物<sup>2)</sup> (RE) Mo<sub>6</sub>S<sub>8</sub> (ただし RE=Gd, Tb) など。超伝導下での反強磁性状態が観測されることによって②項が否定された。つぎに (TMTSF)<sub>2</sub>PF<sub>6</sub><sup>3)</sup> (TMSF)<sub>2</sub>ClO<sub>4</sub><sup>4)</sup> など有機超伝導体が一次元伝導系を反映して 30 K 当りから超伝導のゆらぎを示しはじめることが知られるようになった。高

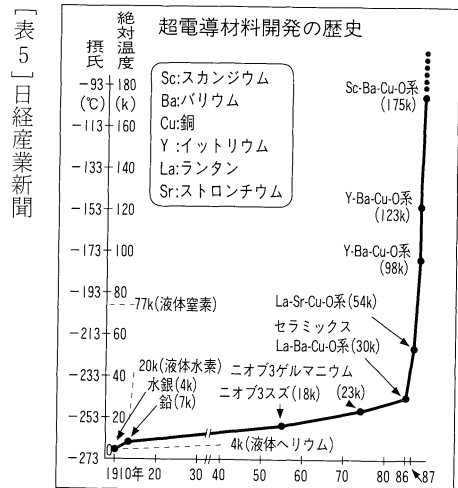
圧下では β- (BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub> が 1.3 kb 圧力下で超伝導体となり [表 4] ①が否定された。こ

【表 4】 有機超伝導体 (電荷移動錯体)

化 物	特 徴
TTF-TCNQ	金属的有機物 (1973)
(TTF) <sub>x</sub> (TSeF) <sub>1-x</sub> TCNQ	有機合金 (1975)
(TMTSF) <sub>2</sub> X X: PF <sub>6</sub> or ClO <sub>4</sub>	高圧下有機超伝導体 (1980)
(BEDT-TTF) <sub>2</sub> ClO <sub>4</sub> (Cl <sub>2</sub> C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> ) <sub>0.5</sub> β-(BEDT-TTF) <sub>2</sub> PF <sub>6</sub>	二次元構造有機金属
(BEDT-TTF) <sub>2</sub> ReO <sub>4</sub>	常圧下有機超伝導体 (1983)
(BEDT-TTF) <sub>2</sub> I <sub>3</sub> (TC 上昇)	常圧下有機超伝導体 (1984)

の有機超伝導体の研究の延長上に今話題のセラミック材料がある。スイス IBM チューリッヒ研究所グループ<sup>5)</sup>が昨年 La-Ba-CuO 系で 30 K を上まわる温度下で超伝導体であることを発見した。この物質は酸化物 (セラミック) であるため①を否定した例となる。

今や超伝導体は③の物質であればよいことになる。日本、中国、ドイツ、ソ連など各国が競って原子半径のわずかに異なる希土類元素を種々利用して多くの成果を発表しつづけた。特に Y-Ba-Cu-O 系や Sc-Ba-Cu-O 系 (表 5) は液



体チッソ温度 (77 K) よりも高温にて超伝導の試料<sup>6)</sup> となったため産業的に大きなインパクト要因であるとされた。

ここで永久磁石材料や超伝導材料あるいは MRi エンハンス剤としてこの分野で多用されて

いる希土類元素について化学的な側面を整理するとつぎのようである。

Y (イットリウム) と Sc (スカンジウム) はともに非常によく似た元素であり、希土類元素ともよく似た化学的性質を持っている[表6]。  
[表6]

元 素	原子番号	軌 道 電 子	M <sup>3+</sup> イオン半径
Sc	21	3 d <sup>1</sup> , 4 S <sup>2</sup>	1.44 Å
Y	39	4 d <sup>1</sup> , 5 S <sup>2</sup>	0.90 Å
Nd	60	4 f <sup>1</sup> , 5 d <sup>1</sup> , 6 S <sup>2</sup>	1.00 Å
Sm	62	4 f <sup>1</sup> , 5 d <sup>1</sup> , 6 S <sup>2</sup>	0.96 Å
Gd	64	4 f <sup>1</sup> , 5 d <sup>1</sup> , 6 S <sup>2</sup>	0.94 Å

特に 5 d 軌道と 4 f 軌道はエネルギー的に接近しており化学的な差異はほとんどない。このため昨今の超伝導体研究は先の IBM グループの成果に対してほとんどオリジナリティーを持たない研究であるといえる。産業的には上記新物質群が線材レベルで単位面積 (cm<sup>2</sup>) あたり 1,000 (A) 程度を達成目標として開発されつつある。しかし高温超伝導の理論的構築はいまだなされていない。

(なぜ超伝導であるのか)

超伝導の理論的モデルは Cooper<sup>6)</sup> によって概念化され BCS<sup>7)</sup> 理論によって構築された。

ここでは 2 コの電子が Fermi エネルギーを中心にして幅  $h\omega_0$  のエネルギー範囲にある電子の対 (Cooper 対) を考える。(電子は負の電荷を持つため、そのままでは 2 コの電子は互いに反発するが正の電荷を持つ格子と負の電荷を持つ電子がほぼ同量あれば全体は電気的に中性になる。このような中性の空間内で極所的にゆらいている電子はある瞬間にはその前の瞬間に置かれていた位置から移動している。ところで正電荷を持つ格子は質量的には電子より充分大きいいため、電子の瞬間移動と同時に正の電荷分布を移動させ得ない。

この正と負電荷のタイムラグによってある電子から隣接電子を見ると正電荷であるように見える。ところで 2 コの電子がその状態からさらに接近すると互いが負電荷を持つため反発することになる。(この対を作る範囲が  $h\omega_0$  のエネルギー内におさまることを言う。) この Cooper 対はしたがって電気的に中性な粒子でありその質量は電子の質量の 2 倍であると考えられる。ところで実際の電荷は -2 価であるためマクロな電界内ではクーロン運動をし電流となるが Cooper 対のサイズレベルでは無電荷の粒子と考えられ散乱可能な粒子として取りあつかえる。無電荷対であることはさらに対の速度が充分おそくても良いことを意味する。対の速度が物質内の音速 (格子の音響分枝にともなう) よりも低速度となる。全てのクーパー対が物質内の音速より低い速度となると対のエネルギーは保存されさらに対と対とが位相ロックされると超伝導の試料となる。ところで「温度」とは格子振動にほかならないため高温超伝導物質とはクーパー対相互の位相ロックが高温による格子振動によっても破られないような物質であることを意味する。一方 Cooper 対の位相ロック状態について考えてみる。Cooper 対よりも少し大きな広がりバルク試料の内部では全空間にわたって位相ロック状態となる場合でもこのバルク体積が大きくなるにつれて全空間にわたって位相ロック状態にすることは困難となるものと考えられる。空間的にも三次元より二次元、二次元より一次元領域内での位相ロックのほうがより安定となろう。Cooper 対を作ることができる格子系であってもその特性が連続的な空間広がりを持つものであれば任意の点からの位相差が無視できなくなる。

以上の考えは薄膜超伝導体のほうが臨界磁場や臨界電流を高く取ることができる事実などからもうなづける。超伝導的にかたい物質である第 1 種超伝導体が、スポンジのような構造を持

つ第 2 種超伝導体よりも低い臨界磁界をもつことも同様に位相差の増大として考えられるのではなからうか。今回発見された新高温超伝導物質の構造は銅と酸素から成る層が三重になり上下の層は二次元的に広がる銅の酸化物層でそのあいだに一次元構造の銅の酸化物が存在し酸素の欠落部分があると考えられている。これは上下の二次元的な銅の酸化物面によって一次元構造上にできた Cooper 対の位相が保護されるようなシールド壁を作っているのではなからうかと思われる。

#### 山側の事情

超伝導磁石、永久磁石の今後の発展を考える場合には「山側」の事情を無視できない。Y-Ba-Cu-O 系の一例<sup>8)</sup>では組成比は 0.4, 0.6~1, 2, 3 である。銅の 40% 相当のイットリウムが必要である。銅および希土類の地殻中の存在率はそれぞれ 50 ppm, 1~46 ppm である。

銅は単離しやすいが Y, Sc を含めた希土類 17 元素は化学的に単離しにくくウランの分離と似た手法を用いる。イオン選択性溶媒（酸性抽出剤 Versatic acid, D2EHPA, 中性抽出剤 TBP）やイオン交換樹脂法を用いさらにゾーン精製法、熱分解法、溶融塩電解法、アーク融解法、電子ビーム融解法など高度に科学的でエネルギー多消費的なプロセスを用いなければならない。希土類の生産量は 1980 年統計によると米国 14,000(t), オーストラリア 7,400(t), ソ連 2,300(t) である。特に高純度イットリウムは全世界で年産 200(t) の生産量である。その大部分は希土類蛍光体として使われ ( $Y_2O_3SiX$  X=Eu<sup>3+</sup>, Tb<sup>3+</sup>, Tm<sup>3+</sup>) 小量は YIG レーザーの発振子となる ( $Y_3Al_5O_{12}$ :Nd<sup>3+</sup>)。

希土類の主な鉱石はペグマタイト系のモナズ石 (Ce, La, Nd) ( $PO_4$ )、ゼノタイム ( $YPO_4$ ) やカーボナイト系のバストネサイト (Ce, La)

( $CO_3$ ) F などから採取する。海底マンガン団塊の中にも濃縮されている (Nd:0.026%濃縮率 9.3 倍 Y:0.051%濃縮率 170 倍)。これに対して現世代の超伝導材料は主に NbTi である。Nb は地殻中に 20 ppm 存在するがブラジルの Araxa 鉱山では 1.5~2% の高率で含有され安く採取されている。埋蔵全量と 2000 年までの累積需要は Nb 8.4 倍, 希土類 5.2 倍である。これ等の材料は採取、精製技術は充分開発されているため今後飛躍的にコストダウンされることはなからう。

#### 工業製品としての MR 用磁石

先へのべたとおり近年磁石材料技術が急変しつつあるため応用製品としての MR 用磁石の経済的得失を論ずることはむづかしいが、かりに同じ静磁界強度、空間の広がり、均一性を考えた場合には超伝導磁石は永久磁石の半額の原価となると考えられている。ところで永久磁石材料は常温で利用出来るため構造的に小型にできる利点がある。超伝導磁石用寒剤（液体ヘリウム）は米国や欧州では 1 l 5 \$ である。欧州と同様に米国からの輸入に頼っている我国の場合、流通過程末端で 2 倍の 1,500 円程度になっている。新高温超伝導磁石が実用機となったおりに寒剤は液体チッソとなるためランニングコストは現世代機の  $\frac{1}{20}$  程度となる。ところで一般工業製品は開発期間が終ると製品原価は材料単価の和に一定の係数を乗じたものとなる。

何年か後に MR 用磁石の原価が底値となったと仮定して常電導、超伝導、永久磁石を比較してみるとつぎのようになる。

#### 常電導磁石

$\{(3.5 \text{ ton} \times 33 \text{ 万円/ton}) \times 3\} \times 2 \approx 700 \text{ 万円}$

#### 超伝導中磁界磁石

$\{4 \text{ ton} \times 33 \text{ 万円/ton}\} \times 3 + 600 \text{ 万円} \times 2 \approx 2,000 \text{ 万円}$

#### 超伝導中磁界磁石 (鉄シールド付)

$\{(4 \text{ ton} \times 33 \text{ 万円/ton}) \times 3 + 600 \text{ 万円} + 700 \text{ 万円}\} \times 2 \approx 3,400 \text{ 万円}$

超伝導中磁界磁石 (アクティブシールド付)  
 $\{6\text{ton} \times 33\text{万円/ton}\} \times 3 + 2,000\text{万円}\} \times 2 \approx 5,188\text{万円}$   
 超伝導高磁界磁石

$\{7\text{ton} \times 33\text{万円/ton}\} \times 3 + 2,000\text{万円}\} \times 2 \approx 5,400\text{万円}$   
 永久磁石低磁界 (小口径)

$6,800\text{万円} \div \frac{1.5\text{ KG}}{4\text{ KG}} \approx 2,600\text{万円程度か?}$

永久磁石中磁界 (小口径)

(鉄シールド超中磁界  $\times 2$ )  $\approx 6,800\text{万円程度か?}$

上記は Al および NbTi の材料費を積み上げたものであり電源, 傾斜コイル, などは含まない。永久磁石については現希土類磁石よりかなり安く見積られている。希土類磁石材料単価は 2.5~3 円/g (鉄を多量に含むため) と推定した。開発のための諸経費は一切含まない。

### MRi の付加価値

単位重量あたりの工業製品単価を比較してみると MRi およびその関連素材はつぎのようである。

[表 7]

(1円/g)	(10円/g)	(100円/g)	(1000円/g)
Al 0.33	Ti 1.5	イットリウム 21 25	ユーロビウム 420
Cu 0.4	Ti 二次 5.5	MRi システム	
ナイロン 0.8	MR 用永久磁石システム 2.5 3	サマリウム 19	
フェライト磁石材料 0.7	MR 用常電導磁石システム 2	MR 用超伝導磁石システム 12	
	自動車	希土類合金磁石材料 40	
	テレビ	パソコン	
		ビデオ	ジェット機
			カメラ

## 5 結言

MRi 技術は臨床応用, 装置技術, 材料技術のどれを取っていても今なお開発の途上にある。このため最適磁界強度はさらに変化するものと思われる。

## 文 献

- 1) Ehman R.L., et al, D630A Invest Radiol (USA), 21 [2] 125-131 (1986)
- 2) Chevrel R. and Sergent M. "Chemistry and Structure of ternary molybdenum chalcogenides", in ref. 82Fl, 25-55 (1982)
- 3) Kagoshima S. and Fukuyama H.; "Superconductivity in a synthetic organic conductor (TMTSF)<sub>2</sub>PF<sub>6</sub>", Kotai Butsuri, 15, 311 (1980)
- 4) 山地邦彦 "TMTSF 塩の電子構造と秩序相" 固体物理 18 555 (1983)
- 5) K.A. ミューラー, J.G. ペドノーツ, ツァイトシュリフトファーフィジーク (1986) 日経新聞二次情報
- 6) L.N. Cooper, Bound electron in a degenerate Fermi gas, Phys Rev., 104 1189-1190, 15 nov. (1956)
- 7) J. Bardeen, L.N. Cooper, J.R. Schrieffer, "Theory of superconductivity," Phys. Rev., 108 1175-1204, 1 Dec. (1957) (Nobel Physics Prize 論文)
- 8) 東芝 読売新聞二次情報

(注) 言葉の定義

超伝導体: Superconductor 物質総称

超伝導の試料: Superconductive

超伝導状態にある。電流は流れていなくてもよい。

超伝導になる: Superconducting

superconductive なものに電流が流れている。