

総説

NMR 全身像用超電導マグ ネット

Superconducting Magnet for NMR Whole Body Imaging

J. P. Heinrich (Magner, NMR Business Development, Intermagnetics General Corporation)
(訳) 野口照夫 (真空冶金株式会社)

要 旨

磁界中に人体を置いて診断する核磁気共鳴全身イメージングは新しくかつ将来性の豊かな医療診断法である。この目的のため従来の電磁石又は超電導マグネットの何れもが使用される。本論文では以下の4点について論じる。第一に NMR 全身像用として必要な技術上の要件をとりあげる。NMR 全身像用としての超電導マグネットの利点と欠点を論じ、その開発状況について概観する。最後に全身像用マグネットの設置上の問題について論じる。

1 NMR 全身像用マグネットの技術的要件

NMR 全身像用マグネットは数多くの、時には相矛盾する要件を満足しなければならない。最も重要な6つの要件は、(1) 中心磁界強度、(2) 磁界均一性、(3) 磁界の時間的安定性、(4) 大きさと構造、(5) 利用度、(6) 価格、であり、それぞれについて以下に簡単に論じる。

NMR 全身像用として最適の磁界強度をきめることは、高い磁界、低い磁界の双方ともにそれな

りの理由があって容易ではない。NMR 理論から予想される通り高い磁界ほど信号対雑音比が向上し、高品質の NMR 像を得ることができる。高磁界を用いれば医学応用上重要となるプロトン以外のリン、ナトリウムのような自然界により少なく存在する核種を用いてイメージングする際、プロトンよりも強い信号が得られるので有利となる。更に磁界を上げることによる超電導マグネットの価格の上昇は磁界の上昇に比べて相対的に小さい。高磁界用に設計しておく事は将来システムを高度化し得るという意味から経済的であろう。

しかし一方で医学情報として有用な緩和時間は、高磁界ほど組織の性質の差、つまり T_1 の差が小さくなる傾向があるため、低磁界の方が有利となる。使用周波数の技術上の上限又は使用磁界の上限は次の2つの事実から決められよう。すなわち、(1)高周波磁界の人体への侵入の深さは使用周波数が高くなるにつれて浅くなること、(2)全身像用の高周波コイルの設計は周波数の上昇に伴い困難になること、である。更に人体に許容し得る直流磁界の制限、例えば米国政府が最近出した2テスラというガイドライン、もまた使用磁界に制約を与えることになろう。最後に、高磁界マグネットからの外部への漏れ磁界が、全身像用マグネットの設置条件をきびしくすることは忘れてはならないだろう。

磁界の高い均一性が特別に要求される理由はNMR分光学から明らかであるが、NMRイメージングにおいては磁界の均一度がよくなればなる程、画像の品質が向上する。

とは言っても必要十分な均一度は人体組織の帯磁率によってきまり、その値は $1 \sim 2 \times 10^{-6}$ のレンジになろう。得られる最高の均一度はまた、マグネットの大きさ、複雑さ、価格等によって制限され、更にマグネットの設置される場所に存在する鉄類によって大きく左右される。

磁界の時間的安定度は通常のNMR分光に比べると同等のものが要求される。イメージングにおいてはデータが集積されている間の短時間安定度も、画質を保つ上で重要である。

全システムの予測可能な運転状態を保ち、マグネットの再調整や高周波磁界の再調整を最小にするためにはマグネット磁界の安定性は数日間から数週間の長期にわたって保たれる必要がある。

NMR全身像用マグネットの大きさや構造を他の設備及び所期の応用目的を無視してきめることはできない。マグネットは現在の病院のドアや通路を通して輸送し得ることが必要である。加えてマグネットの構造は、診察を受けようとする患

者に心理的圧迫、例えば幽閉恐怖症のようなそれを与えるものであってはならない。

NMRイメージング装置は病院の大きな設備の場合の常として、診断施設として十分な利用率が得られ、かつ適当な期間内でその費用を償却できるものでなければならない。この観点からみて、NMR装置の利用率は、現在受け入れられている値、例えばX線CATスキャナーの95%程度でなければならないだろう。NMRイメージング用のサブシステムの利用率は当然この値以上であることが必要である。

価格は、その装置を提供する側、購入する側の双方にとって、彼らのあらゆる意志決定に重大な影響を及ぼすので、一つの技術的パラメーターとして分類してもよいであろう。

他の診断用イメージング装置の場合同様、NMRイメージング装置の価格は、その診断の有用性によって正当化されるべきものでなければならない。更に言うならば、医療機器としてその費用は、初期投資であれ、運転費用であれ、X線CAT装置のように発展して来た装置のそれをはるかに越えるようなことは許されない。

2 全身像用としての超電導マグネットの利点と欠点

NMR全身像システムは比較的初期の開発段階にある。今迄に数台のシステムが稼動に入ったばかりである。しかし現時点で、超電導マグネットの常電導マグネットに対する利点と不利な点とを、上述した要請を満たす上で検討することは可能である。

常電導全身像用マグネットの中心磁界は、利用できる電力と、適当な時間内で必要十分なプロトンイメージを得られるような電力密度とによって0.15~0.2テスラに制限される。しかし超電導マグネットなら1.5テスラはおろか、それ以上の磁場を得ることができる。したがって適当な時間内

で頭部及び胴体部の高分解能のイメージを得られるだけでなく、医学上興味のあるリンやナトリウムの他の核種をイメージングに利用することも可能となる。

磁界の均一性を得るために個々のコイルを調整する精度から言って、常電導マグネットの全身像用として必要な空間内での磁界均一性はほぼ 1×10^{-4} をもって限度とする。それ故与えられたイメージ技術の下では、主マグネットの磁界不均一性を補償するためにはより大きな勾配磁界が必要となる。全身像用超電導マグネットでは、しかし、小さな勾配磁界で十分な 1×10^{-5} の均一度を超電導シムコイル及び常電導シムコイルの組み合わせによって容易に得ることができる。

全身像用常電導マグネットの中心磁界の時間安定性は電源の雑音によってきまる 1×10^{-5} のオーダーに抑えられてしまう。しかし超電導マグネットでは永久電流モードの採用によって 1×10^{-7} /時の単純減衰に止まることは容易である。また常電導マグネットの磁界変動が電源ノイズから来るランダム変動であることは注意されてしかるべきである。一方超電導マグネットのわずかな磁界減衰は一定の割合で起こる純粋に指数関数的なものであり、したがって容易に補償され得るものである。

大きさと構造においては常電導マグネットの方に分がある。全身像用常電導マグネットは比較的小型であり、部品としてバラして供給されたものを現地で組み立てることができる。通常使用されている4コイル構造は比較的開放的であり幽閉恐怖症を最小限にすることができるだろう。超電導マグネットは一般的に全身像用としては常電導マグネットよりも大きい。しかし現在ある病院内に設置し得ることは実証されつつある。全身像用超電導マグネットはその本性からして常電導マグネットほど開放的構造をとることができない。がしかし適当な人間工学的手法により心理的に受け入れられるようにすることはできるはずである。

超電導、常電導を問わず全身像用マグネット利用度に関するデータは現在のところ極く限られている。しかしどちらのタイプも利用され得ると考えることが当を得ていよう。

全身像用常電導マグネットは比較的簡単な構造をしており、したがって起こり得る故障は、マグネットそのものよりも、電源又は循環水に関わるものと考えて差支えないだろう。超電導全身像用マグネットは、可動部分を一切もたず、冷媒の連続的供給以外には周囲との連結性を一切有しないので、むしろ概念的には簡単なものと言ってよい。長期間にわたって信頼性よく運転されている超電導マグネットの例は後程紹介されよう。

常電導全身像用マグネットの初期投資額は今の処、超電導マグネットに比べ著しく小さい。しかし現在得られている全身像用超電導マグネットの価格は非常に小台数の生産を基礎にしており、生産台数が大規模になり、そして生産者がラインに沿って働くようになれば低価格になることは疑い得ない。電力にして40~60kW、冷却水20l/分を必要とする常電導マグネットの運転費用と、1時間に0.5lの液体ヘリウムと1lの液体窒素を必要とする超電導マグネットのそれとの相対比較は、電力及び冷媒の価格に大きく依存する。米国では超電導マグネットの方が一般的に低廉であるが、液体ヘリウムのコストの高い他の国では現在のところ、常電導マグネットの方が安くつくだろう。クローズドサイクルの冷凍器の使用は超電導マグネットの運転費用を大幅に減少させる可能性をもつ。また次のことは注意されるべきであろう。即ち高磁界超電導マグネットからの漏れ磁界のため、より広い設置場所が必要になり、したがって超電導マグネットの運転を高いものにするかも知れないということである。

3 超電導全身像用マグネットの開発現況

全身像用超電導マグネットは今のところ極く小

数が動いているに過ぎないけれども、全身イメージ用に匹敵する仕様をもつ大型のマグネットが数台建造されている。IGCで製造されたこのようなマグネットの例を次に示し、それらの設計諸量と、NMR全身像用マグネットの製作について述べる。

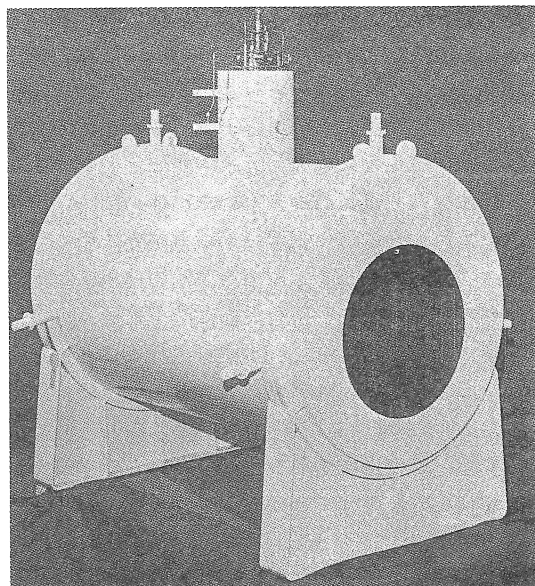
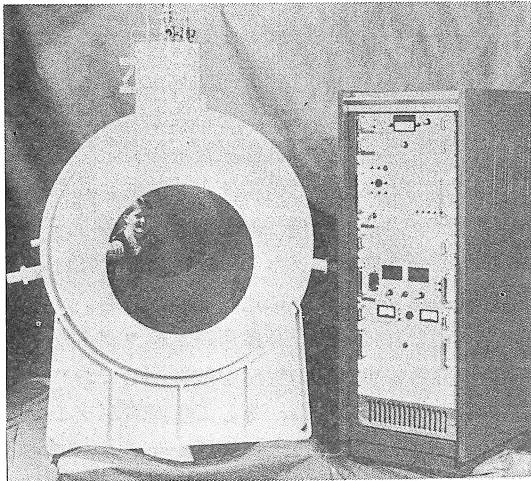


図1 IGC全身像NMR用大口径超電導マグネットシステム

1977年にIGCで設計製作された大規模マグネットを図1に示す。このマグネットはNMRによる血流研究のために設計されたものであり、中心磁界は2テスラ、常温ボアーは65cmである。このマグネットに必要な磁界の均一性は直径10cmの球間で 3×10^{-5} であり、この値は全身像用NMRマグネットに要せられる均一度よりはるかに悪い。本マグネットは現在ウィスコンシン医大でNMR血流実験に使用されている。

図2は1979年にIGCで、同位元素の分離用として設計製作したマグネットである。このマグネットは常温ボアー径50cmであり、2テスラの中心磁界を発生する。磁界均一性は 5×10^{-4} であり、NMR全身像用に比べて低いものとなっている。しかしながら、本マグネットは特別の設計により、上記均一度を直径30cm×長さ2mの空間において保っている。このマグネットは1979年に設置されて運転に入ってから一度も温度を上げたことはおろか磁場を下げたことさえない。これは極めて注目し得ると言わねばならない。このように大型の超電導磁石が、非実験室的環境で十分に長期にわたって信頼し得ることは明らかである。

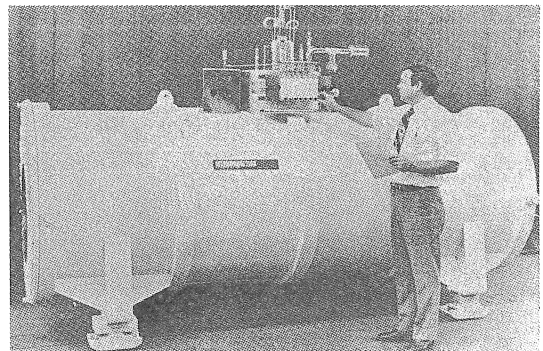


図2 同位元素分離用大口径超電導マグネットシステム

図3は1977年にIGCで設計製作された小ボアー径、高磁界の超電導マグネットシステムであ

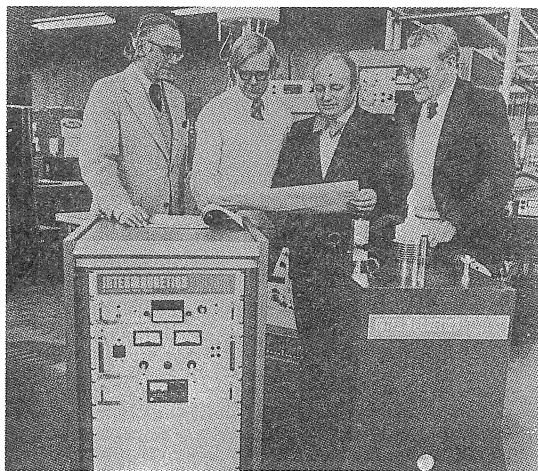


図 3 核燃料棒品質管理に用いられている超電導マグネット

る。このマグネットは核燃料棒の品質管理の一部として用いられており、工業的環境下で過去5年の間、連続運転されていることに注意すべきである。液体ヘリウムの補給を減らすためこのマグネットシステムは小型の冷凍器を備えており、液体ヘリウムの蒸発量は10cc/時となっている。このため液体ヘリウムの追加は2ヶ月に1回行うだけでよい。冷凍器自身も5ケ年にわたり定期的な保守を行ったのみで連続的に運転されて来た。

以上の例からわかるように、冷凍器を備えた超電導マグネットが長期的信頼性のある運転をなし得ることは間違いない。冷凍器が、イメージ用マグネットの運転に支障を来たすか否か、あるいはその逆はどうか等の技術的問題は目下積極的に研究中であり、ヘリウム冷凍器付きの全身像用超電導マグネットが市場にあらわれるのは遠い将来のことではないだろう。



図 4 *in-vivo* NMR 分光用超電導マグネット

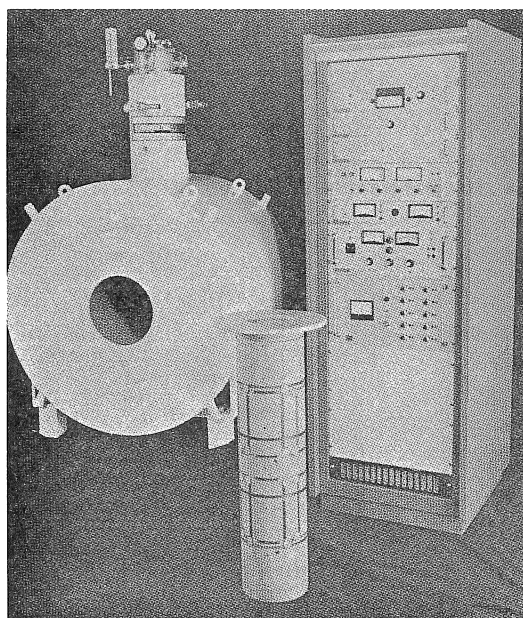


図 5 動物及び組織切片のための NMR イメージング超電導マグネット

総 説

図4は *in-vivo* NMR 分光実験用として IGC 社で設計製作されたマグネットであり、30cmの有効ボアに2.5テスラの中心磁界を発生する。このマグネットの特徴は種々の身体末端部分の測

定が容易に行えるようクライオスタットが非常に短いことである。本マグネットは最近人体のリン分光を *in-vivo* で行うために用いられている。

図5は1982年1月にIGCが米国ニューヨーク

表 1 IGC NMR イメージングマグネットの仕様

	SCM 30-30	SCM 65-20*	SCM 100-15	SCM-100-5
<u>MAGNET PARAMETERS</u>				
Maximum Central Field	30kG	20kG	15kG	5kG
Homogeneity (shimmed)	1×10^{-6} in 7×5 cm oblate spheroid	1×10^{-5} in 20 cm DSV	1×10^{-5} in 30 cm DSV	1×10^{-5} in 40 cm DSV
Persistent Mode Decay	$< 10^{-7}$ /hr.	$< 10^{-7}$ /hr.	$< 10^{-7}$ /hr.	$< 10^{-7}$ /hr.
Bore Size	25 cm (10")	65 cm (25.6")	100 cm (39.4")	100 cm (39.4")
<u>CRYOSTAT PARAMETERS</u>				
Diameter	91.4 cm (36")	~139.7 cm (55")	165.2 cm (65")	177.8 cm (70")
Length	86.4 cm (34")	~170.2 cm (67")	243.8 cm (96")	233.7 cm (92")
Height (with stack)	137.2 cm (54")	~182.9 cm (72")	203.2 cm (80")	208.3 cm (82")
He Boiloff	$< .1$ L/hr.	$< .5$ L/hr.	$< .6$ L/hr.	$< .5$ L/hr.

* Under Development

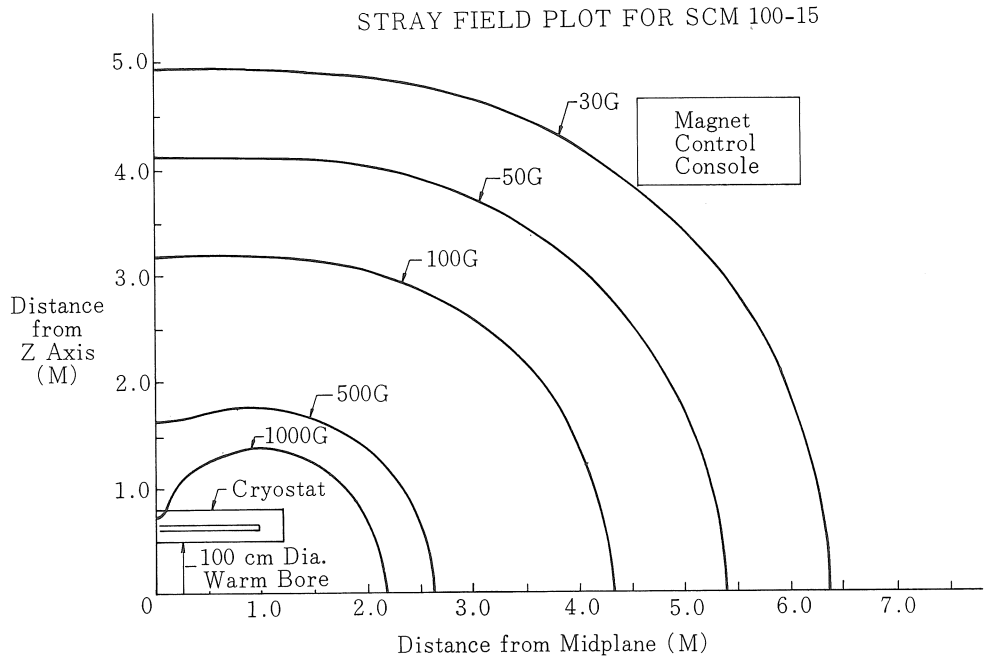


図 6 1.5T 全身像用マグネットによる外部漏れ磁界

クのロンビア長老教会医療センターの生理学研究所 (Neurological Institute of Columbia Presbyterian Medical Center) に納入した NMR イメージングマグネットである。このマグネットのボアは 25cm, 中心磁界は 3 テスラである。本マグネットは工場での試験において、中心磁場、永久電流減衰率、ヘリウム蒸発量、及び磁界均一度の何れについても、それらの仕様を大きく上回る結果を得た。現在上記研究所において動物のリン、ナトリウム、及び水素の *in-vivo* イメージを得るために使用されている。

このマグネットは全身像用マグネットのモデルとして基本的な設計の全てを含んでいる。このマグネットの成功に基づき IGC では NMR マグネットの製造を開始した。表 1 は現在製造中の 3 種のマグネットの主たる仕様を表わす。SCM 30-30 は先の生理学研究所に納入したものと同一のモデルであり、この他に SCM 100-15 及び SCM 100-5 という 2 機種があり、何れも 1m のボアを有する。SCM 100-15 の中心磁界は 1.5 テスラ、磁界均一度は 1×10^{-5} (直径 30cm の球内) であり、SCM 100-5 は 0.5 テスラの中心磁界、直径 40cm の球内で 1×10^{-5} の磁界均一度となっている。双方とも永久電流の減衰率は 1×10^{-7} /時、液体ヘリウム蒸発量は 0.6l/時以下である。両マグネットともに超電導シムコイルをもっており、このため大きな鉄を含む設置環境であっても仕様の磁界均一度を達成できるようになっている。

IGC では種々の製造段階にある全身像用マグネットを数多くもっており、第一号機として SCM 100-15 がこの秋に生理学研究所に納入される予定である。引き続き他のマグネットもそれぞれの顧客に向けて出荷されるだろう。

4 全身像用マグネットの設置要件

全身像用超電導マグネットからの大きな外部磁界はマグネットの設置場所の選定に制限を課す。

これらの制限は一般的に言って次の 3 つに分類できる。即ち、磁界均一度に対する、可動又は不動の強磁性物質の影響、附近にある他の機器へのマグネットの影響、及び強磁性物質がマグネットに引きつけられて飛んで来る事故の危険性である。

図 6 は 1.5 テスラの全身像マグネットによる外部磁界のマップである。強磁性物質で固定されていないものはこのマップの 50 ガウス等高線の外側に置かれるべきである。この地点にある物体に及ぶ磁界はその物体をマグネットの方に引き込むだけの強さをもっているからである。各種の機器

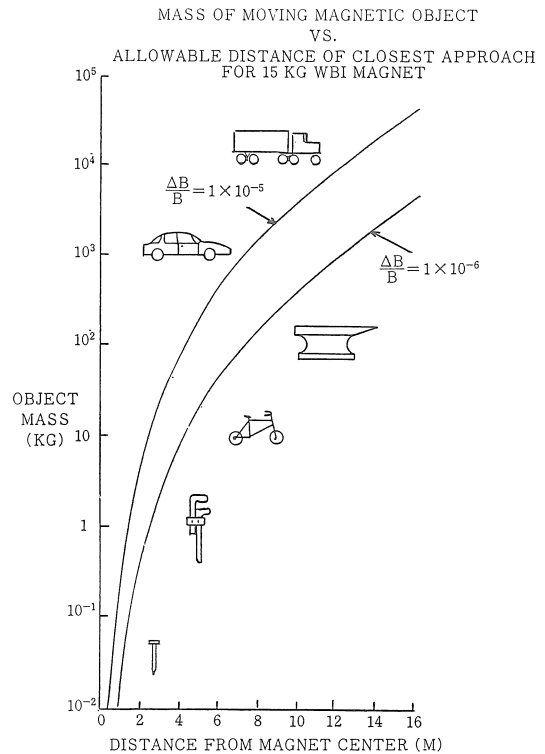


図 7 1.5 T 全身像用マグネットに許容される強磁性物体の大きさと位置

に許される直流磁界の強さは、それら機器によって大幅に異なっている。計算機用の磁気テープや磁気ディスクのような磁気記録は200 Gaussまでの直流磁界を許容する。一方低い方の限度として他の医療機器に使われている光電子増倍管を例にとると、シールドなしでは1 Gaussの直流磁界を許容するに過ぎない。建造物中に通常含まれている強磁性物質の影響は、超電導シムコイルの大きな調整容量によって補償することができる。しかし動いている強磁性物質はイメージングを行っている領域の磁界を揺動させ、もってイメージの品質に影響を与えることになる。

図7は強磁性物体がイメージング領域の磁界にどの程度の不均一性をもたらすかをその物体の大きさとマグネットからの距離とによって表わしたものである。許容される不均一性は使用するイメージング技術によって異なるけれども、トラックやその他の大きな車の類は、イメージに妨害を与

えないためには、一般的にマグネットの中心から少なくとも12m 離れていることが必要である。

図8と図9は、0.5 Tesla, 1m ボア-の全身像用マグネットについて同様のデータを示したものである。この場合、固定されていない強磁性物体はマグネットから半径3m 以遠に遠ざけられなければならない。その他の機器類も前述の計算に基づく磁界等高線の外側に置かれていなければならない。動いている強磁性物体で、マグネットの磁界を揺動させ画質を悪くするような位置にあつてはならないものが図9に再び示されている。

5 結論

全身像用超電導マグネットは、中心磁界、磁界均一度、及び磁界の時間的安定性について常電導マグネットをはるかに上回る利点をもつ。これらの利点は与えられた時間内でのイメージ画質を改

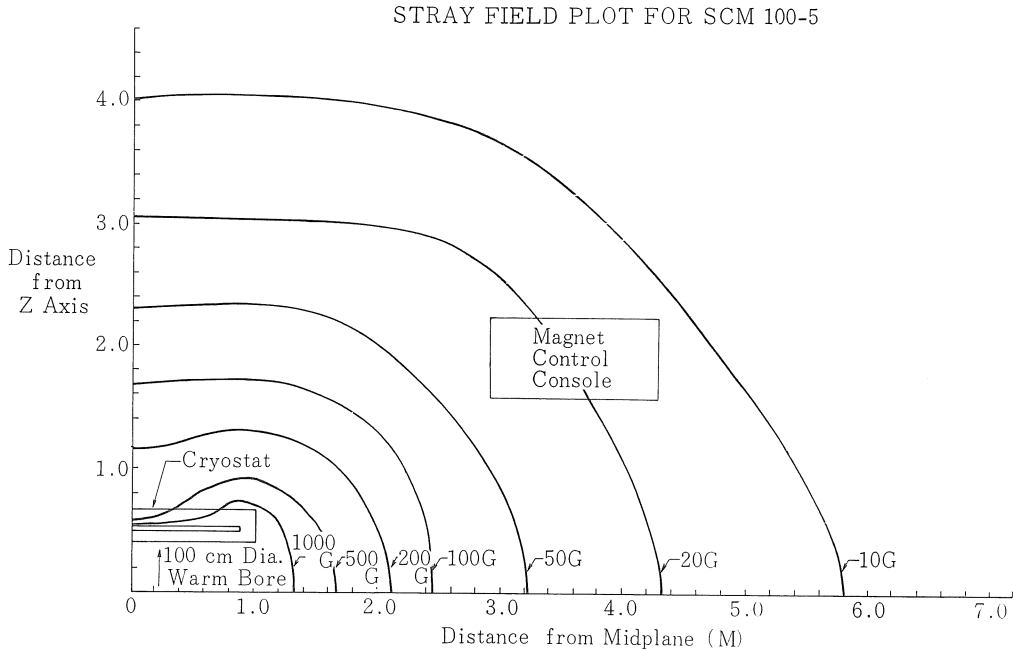


図8 0.5T 全身像用マグネットによる外部漏れ磁界

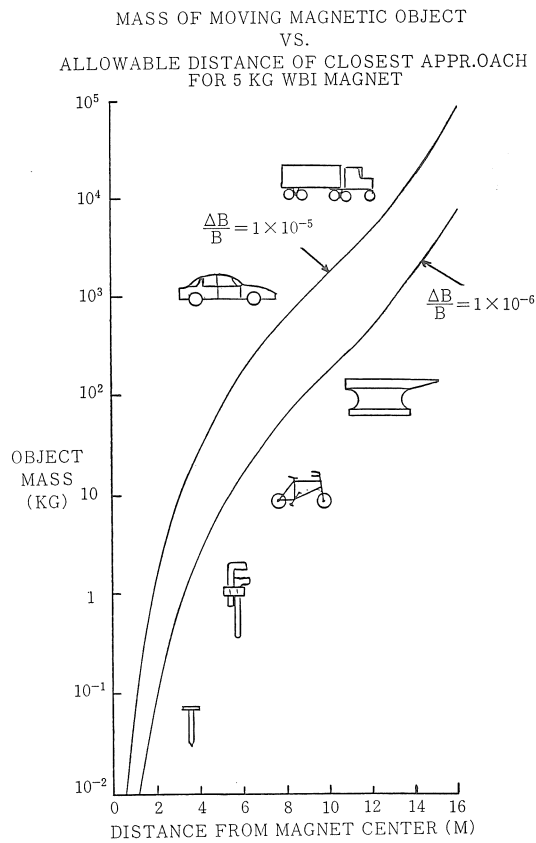


図 9 0.5T 全身像用マグネットに許容される強磁性物体の大きさと位置

良するであろうし、また医学上興味ある他の核種によるイメージングを可能にするであろう。超電導マグネットの価格は将来の生産規模の増大に伴って低下するにせよ、常電導マグネットに比べて高価なものに止まるだろう。高磁界の超電導マグネットは、設置場所、設置条件に特別の要求を課すことになるだろう。しかしながら、超電導マグネットシステムによってもたらされる医学上の利点は、その欠点を十分にカバーし、かくして超電導マグネットはNMR 全身イメージングの市場に重要な地位をしめることになるであろう。