

MRI用超電導磁石

Superconducting Magnets for MRI

MRI(Magnetic Resonance Imaging: 磁気共鳴イメージング)システムは、原子の磁気的な共鳴現象(核磁気共鳴)を利用して人体の断層撮影を行うもので、医療画像診断装置の分野でX線CT(Computed Tomography)装置に代わる次世代装置として注目されている。

MRI用超電導磁石は、従来の実験室用超電導磁石にない高均一(5 ppm/30 cmdsv)、高安定(0.1 ppm/h)な磁場が要求される一方、医用超電導磁石のため、高い信頼性とメンテナンスフリー、使い勝手の良さが要求される。

日立製作所では、これまでのMRI用超電導磁石の製作経験とその他の超電導技術を結集して、このほど画期的なコンパクト型0.5 T MRI用超電導磁石を開発した。

佐伯 満* Mitsuru Saeki
森田隆昌* Takamasa Morita
宮島 剛** Gô Miyajima
佐保典英*** Norihide Saho

1 緒 言

MRI(Magnetic Resonance Imaging: 磁気共鳴イメージング)システムは、生体組織中の原子核の磁気共鳴現象を応用した人体の断層撮影装置で、従来のX線装置やX線CT(Computed Tomography)スキャナと比較して、(1)X線など放射線をいっさい使用しないこと、(2)骨によるアーチファクト(障害陰影)がないこと、(3)軟組織に対する識別能が高いこと、(4)任意方向の断面の画像が得られること、などの特長を持っている。

磁石はMRIの重要な構成要素であり、磁場の強度、空間均一度・時間安定度についてきわめて高度な特性が要求されている。現在は、MRI用磁石として低磁場強度(≤ 0.3 T)の永久磁石、中磁場強度(0.5~1.0 T)の小型超電導磁石、高磁場強度(≥ 1.5 T)の超電導磁石とそれぞれ利用されていて、正にMRI普及期にさしかかっている。

このほど開発した0.5 T MRI用超電導磁石は、超電導磁石の特長である、(1)高磁場強度(0.5 T)、(2)高均一磁場(5 ppm/30 cmdsv)、(3)高磁場安定(0.1 ppm/h)、(4)軽量(5.8トン)を生かし、永久磁石に劣らぬ、(5)小型(1.6 m立方体)、(6)メンテナンスフリー、(7)低ランニングコスト(液体ヘリウム平均蒸発量0.05 l/h)を達成した。本稿では、このコンパクト型超電導磁石の特長と仕様について述べるとともに、新たに開発した技術を概説し、その研究結果を紹介する。

2 特長と仕様

本超電導磁石ユニットおよび寝台の外観を図1に、また仕

様一覧を表1に示す。

大きさは高さ1.7 m、幅1.76 m、奥行1.86 mで、質量は6.2トンである。磁石単体では高さ、幅、長さとも1.6 m(磁気シールド含む。)で、幅1.8 m以上の入口から搬入可能となった。また、必要天井高さは2.4 mである。磁場均一度は5 ppm/30 cmdsvで、本クラス磁石では最高級の仕様をハイブリッドシムによって達成した。2ステージ冷凍機(空冷式)を標準装備し、超電導磁石仕様でポイントとなる液体ヘリウム蒸発量を0.05

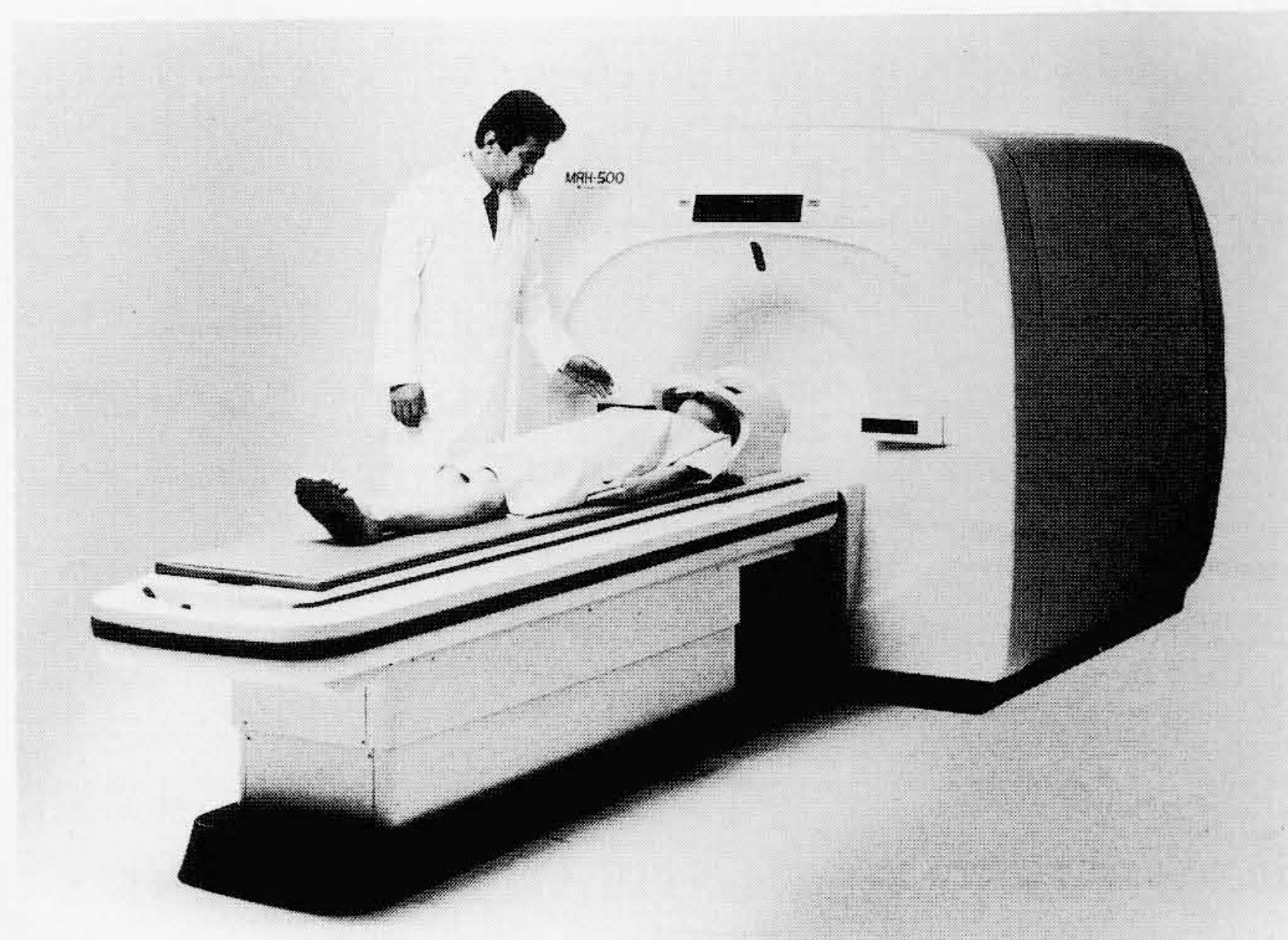


図1 超電導磁石ユニットおよび寝台の外観 超電導磁石ユニット寸法は高さ1.7 m、幅1.76 m、奥行1.86 mで、質量は6.2トンである(磁石単体では、高さ、幅、奥行とも1.6 m、質量は5.8トンである)。

* 日立製作所日立工場 ** 日立製作所那珂工場 理学博士 *** 日立製作所機械研究所

表1 仕様一覧 磁場均一度は5 ppm/30 cmdsv, 冷媒蒸発量は0.05 l/h (平均蒸発量)である。

No.	項目	仕様	備考
1	静磁場強度	0.5 T	—
2	大きさ	高さ	1.6 m
		幅	1.6 m
		長さ	1.6 m
3	必要天井高さ(最小)	2.4 m	—
4	質量	5.8トン	磁気シールド含む
5	磁場均一度	5 ppm/30 cmdsv	—
6	冷凍機	2ステージ	—
7	冷媒蒸発量	液体ヘリウム 0.05 l/h (平均蒸発量)	液体窒素槽なし
8	磁気シールド	鉄ヨーク	—
9	漏れ磁場領域	2.5 m×4 m	0.5 mTライン
10	シミング	ハイブリッドシム	—

l/h, 液体窒素不要とし、長期間のメンテナンスフリーを可能とした。
以下、主な項目について、その内容を説明する。

3 開発内容

(1) 超電導コイル

MRI用超電導磁石は、医用のため高信頼性が第一に要求される。超電導コイルは高均一磁場発生が可能な6コイル配置とし、超電導線は実績のある高銅比、直径1mm NbTi線とした。超電導線はワニス含浸により機械的安定化を図った。

(2) 磁気シールド

漏れ磁場を縮小する磁気シールドとして、鉄ヨーク型自己磁気シールドを採用した。断面構造を図2に示す。

(3) クライオスタット

本磁石のクライオスタットは、小型化、軽量化、低熱侵入を追求したため、徹底的に合理化した寸法構成とした(図2参照)。超電導コイルを含む液体ヘリウム槽は、二重の中間温度シールド(第1シールド、第2シールド)に囲まれている。中間温度シールドは、2ステージ冷凍機によって冷却され、液体ヘリウム槽への熱侵入を低減している。給電用パワーリードおよび冷媒注入管の集合するサービスポートは、日立製作所独自の端部埋込み方式を採用し、高さを1.6m以内に抑えている。冷凍機ユニットも水平方向に装着され、自己磁気シールド板から構成される四角形断面の角部空きスペース内に設置される。

(4) 冷凍機ポート

冷凍機ポート部を図3に示す。冷凍機は本磁石で機械的に1年間連続運転をし続ける部品であり、その高信頼性はもと

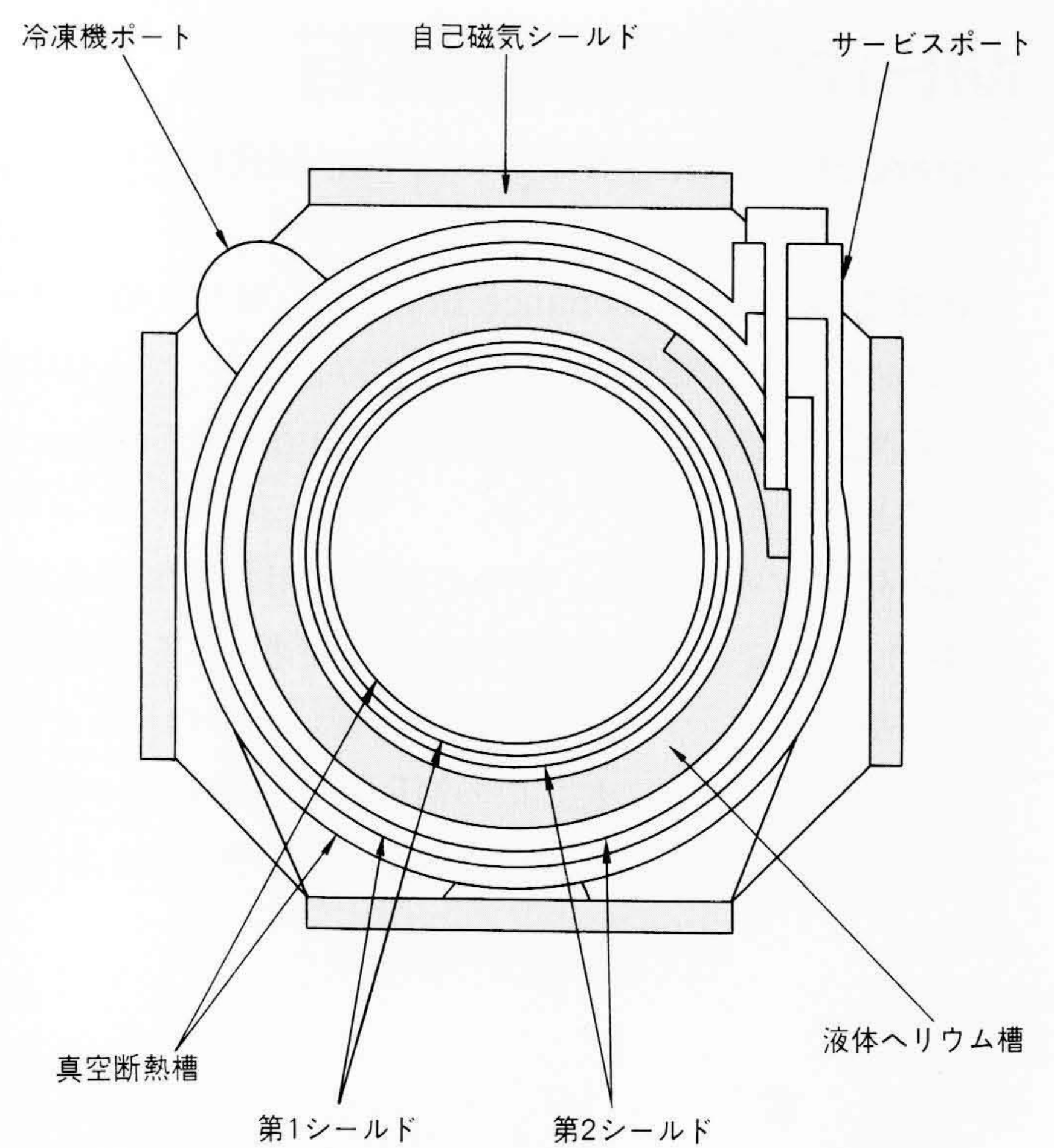


図2 超電導磁石断面 1.6m立方体内に、機能的に各要素が配置されている。

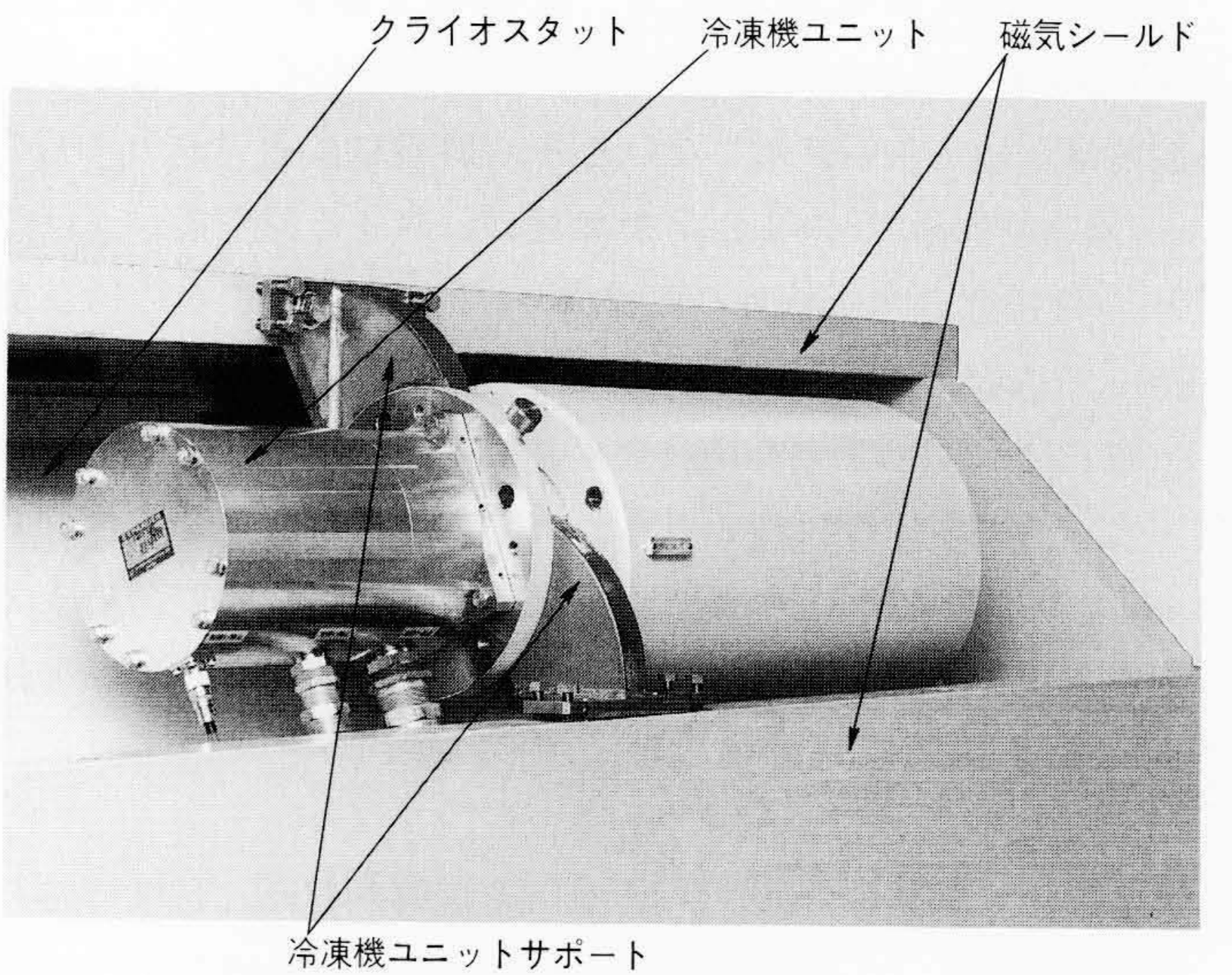


図3 冷凍機ポート 日立独自の冷凍機ポート構造によって、騒音を約55 dB(Aレンジ)に抑えている。自己磁気シールド板より構成される四角形断面の角部空きスペースを利用している。

よりメンテナンスフリー、低騒音が要求される。本磁石では、完全空冷式冷凍機の採用によって、冷却水をいっさい不要とし、日立製作所独自の消音形冷凍機ポートの採用により騒音を約55 dB(Aレンジ)にすることに成功している。

(5) 配管系統

本磁石の配管系統図を図4に示す。排気配管は、集合配管によって1本の配管で蒸発ガスヘリウムを室外へ排出している。冷媒である液体ヘリウムの蒸発量を抑えるため、断熱真

空容器内の真空度は、常に高真空に維持する必要がある。本磁石では、完全溶接構造の採用によって断熱真空容器をパッキングレスで閉じ切っており、外部からの微小なリークも防止し高真空を維持する構造としている。また、冷媒の蒸発量が少ないため、外気の気圧変動によっては、外気がクライオスタット内へ逆流し空気中の水分が凍ることにより内部配管が凍結する可能性がある。本磁石では、排気部に逆止め弁を設け、内部を一定の圧力に維持することによって、その危険性を排除した。また、サービスポートは、クライオスタット寝台側端部に位置することによって、注液を含むすべての作業を容易にしている。サービスポートおよび配管部を図5に

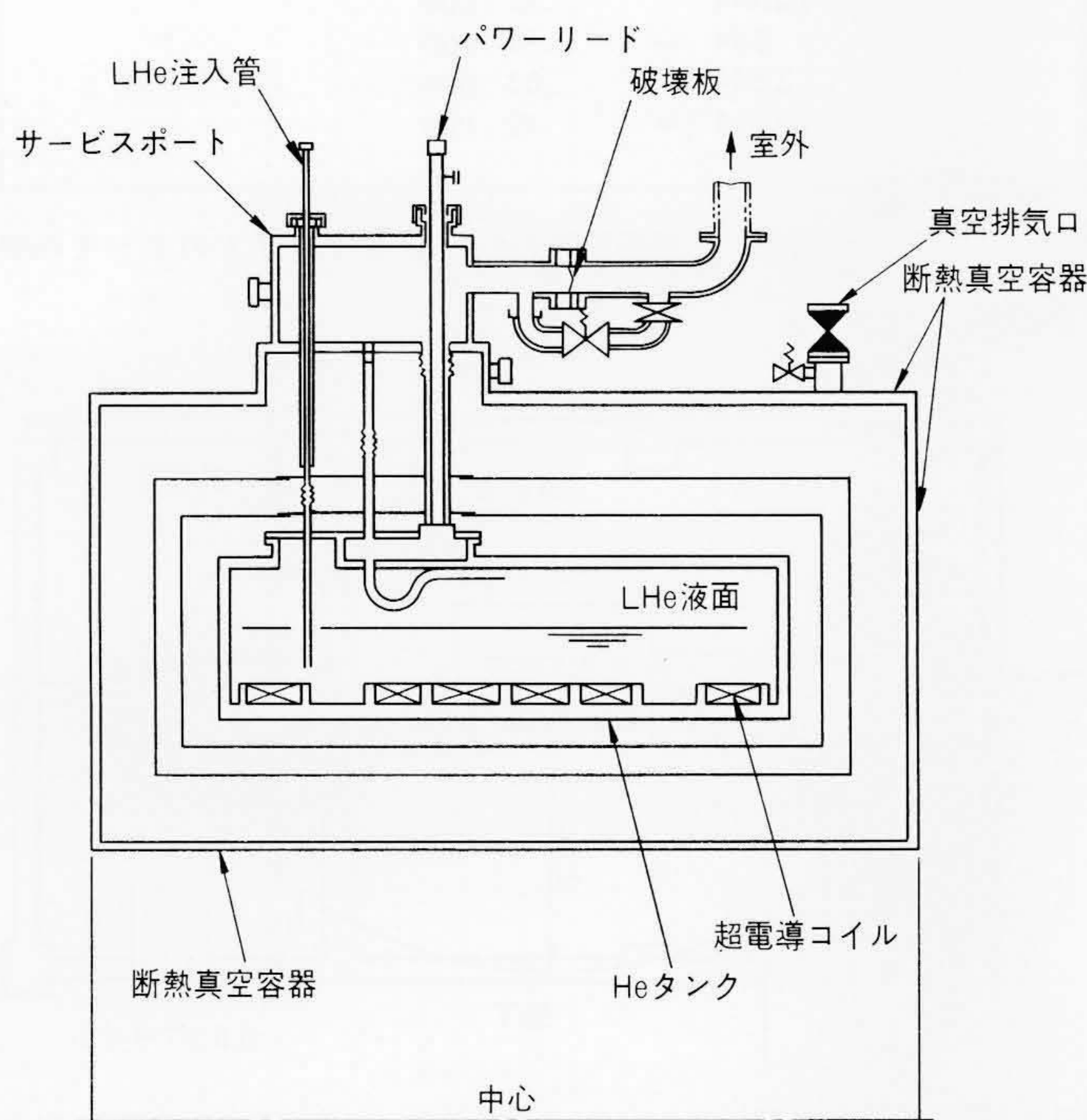


図4 配管系統図 ガスヘリウム配管は集合配管とし、逆流防止に逆止め弁を設けた。クライオスタットは全溶接構造の採用によって、断熱真空容器をパッキングレスで閉じ切っている。

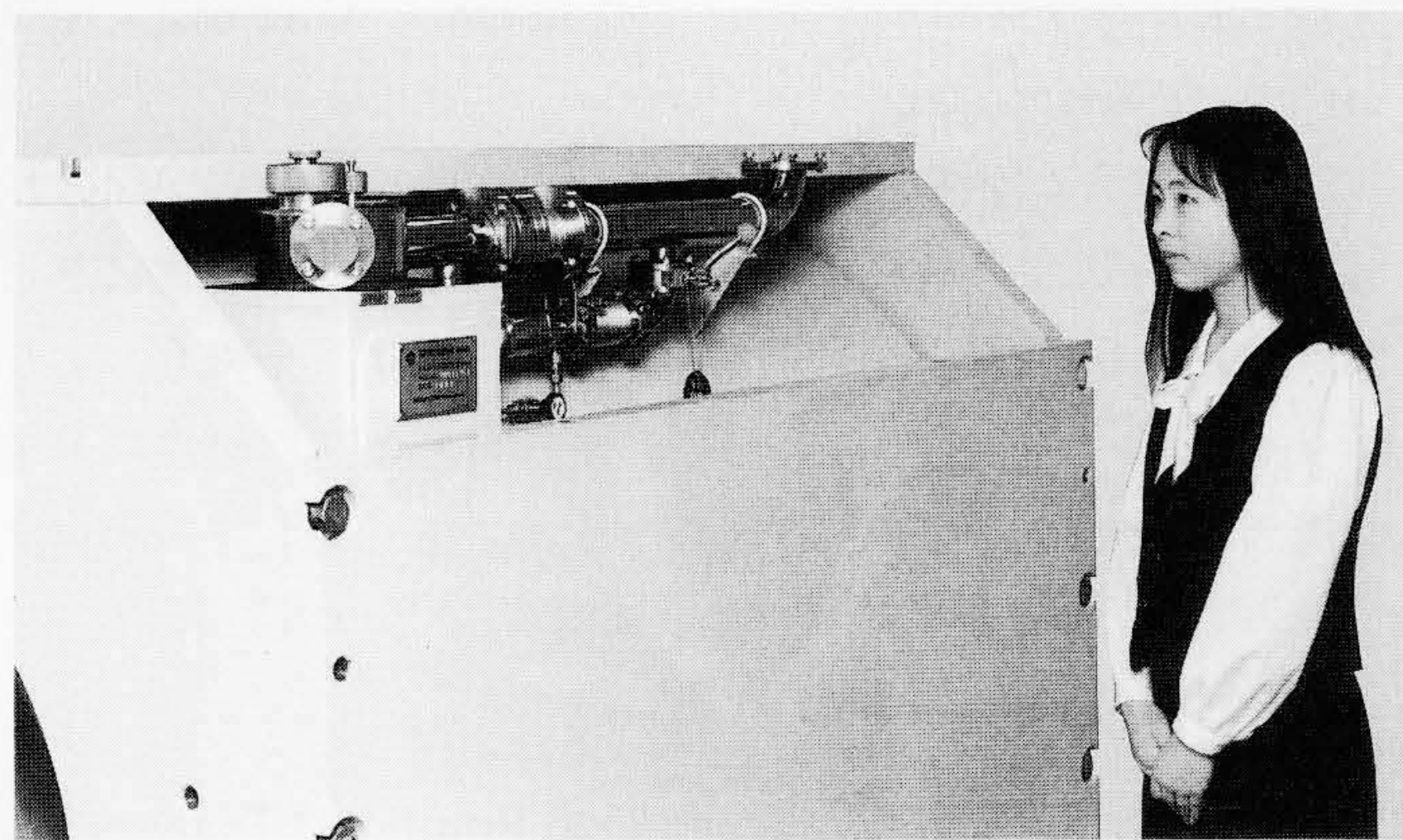


図5 サービスポートおよび排気配管 サービスポートは前面端部に設置し、排気配管は集合配管としている。

示す。

(6) 中間温度シールド

近年、傾斜磁場コイル運転時の冷媒蒸発量増加が問題となっており、日立製作所では開発項目の一つとして、これに積極的に取り組んでいる。傾斜磁場コイル運転による冷媒蒸発量増加は、傾斜磁場の変動磁場による液体ヘリウム槽の渦電流損失である。液体ヘリウム槽に至る変動磁場を途中で電氣的に遮蔽(へい)するためには、中間温度シールドに渦電流を流す必要がある。中間温度シールドの渦電流減衰時定数をパラメータに、冷媒蒸発量増加をプロットしたものを図6に示す。冷媒蒸発量増加は、傾斜磁場強度にも依存しているが、理論上5 mT/mの傾斜磁場強度で、増加が0.01 l/h以下になるように、その材質と板厚を決定した。

(7) ハイブリッドシム

ハイブリッドシムとは、磁性体の磁化を利用して磁場補正を行うことである。本磁石では、従来常電導シムコイルを用いて行っていた高精度の磁場補正(5 ppm/30 cmdsv)を、磁石ボア内に磁性体を配置することによって可能にした。ハイブリッドシムを使用することによる利点は次のような点が挙げられる。

- (a) シムコイルおよびシムコイル用電源が不要になることによって、電源スペースの省略およびランニングコストの低減が達成される。
- (b) 経時変化がないので、信頼性の高い磁場補正が可能となる。

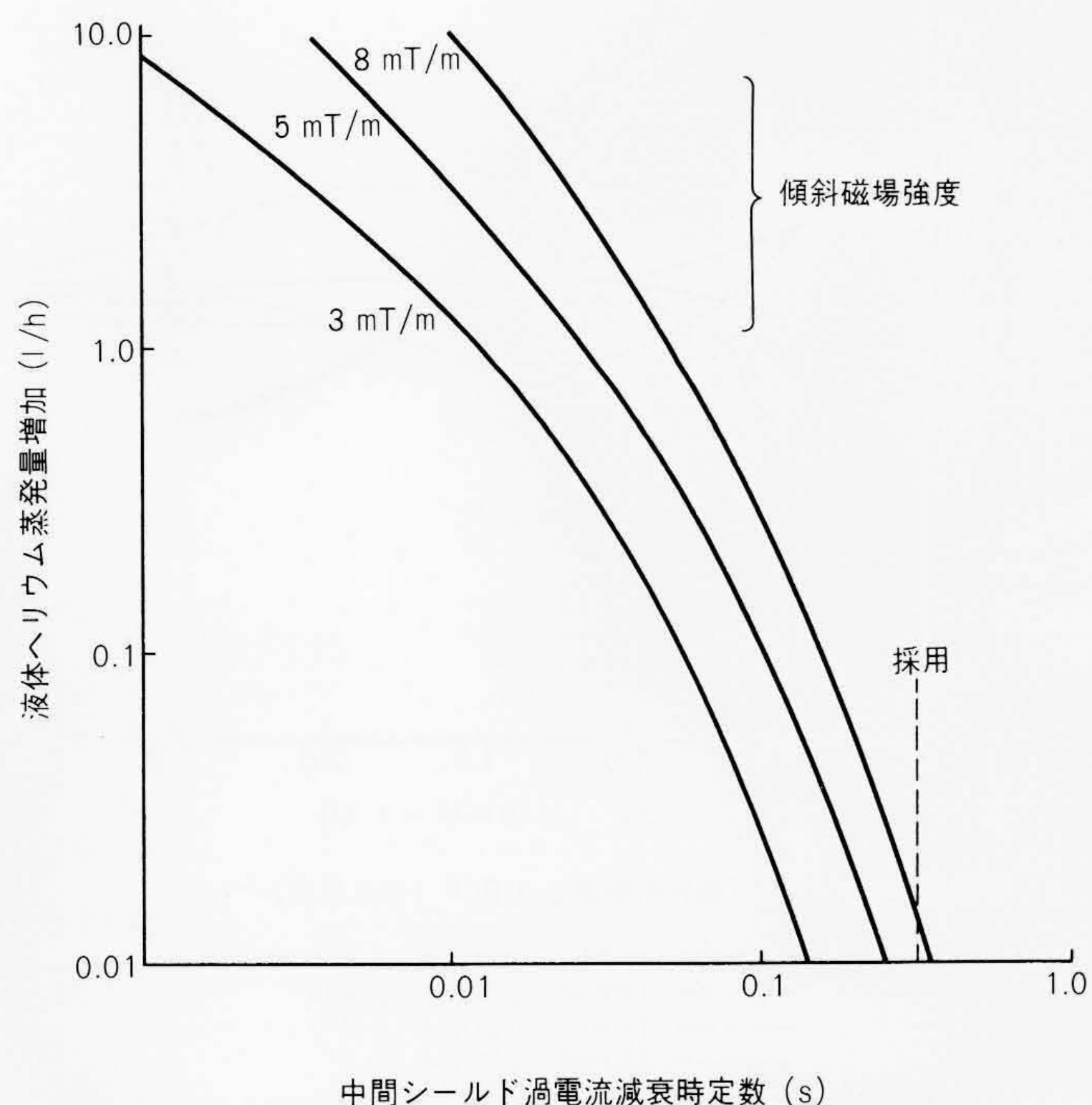


図6 傾斜磁場運転時液体ヘリウム蒸発量増加 5 mT/mの傾斜磁場強度運転に対し、0.01 l/h以下の増加となるよう中間温度シールドの材質と板厚を決めた。

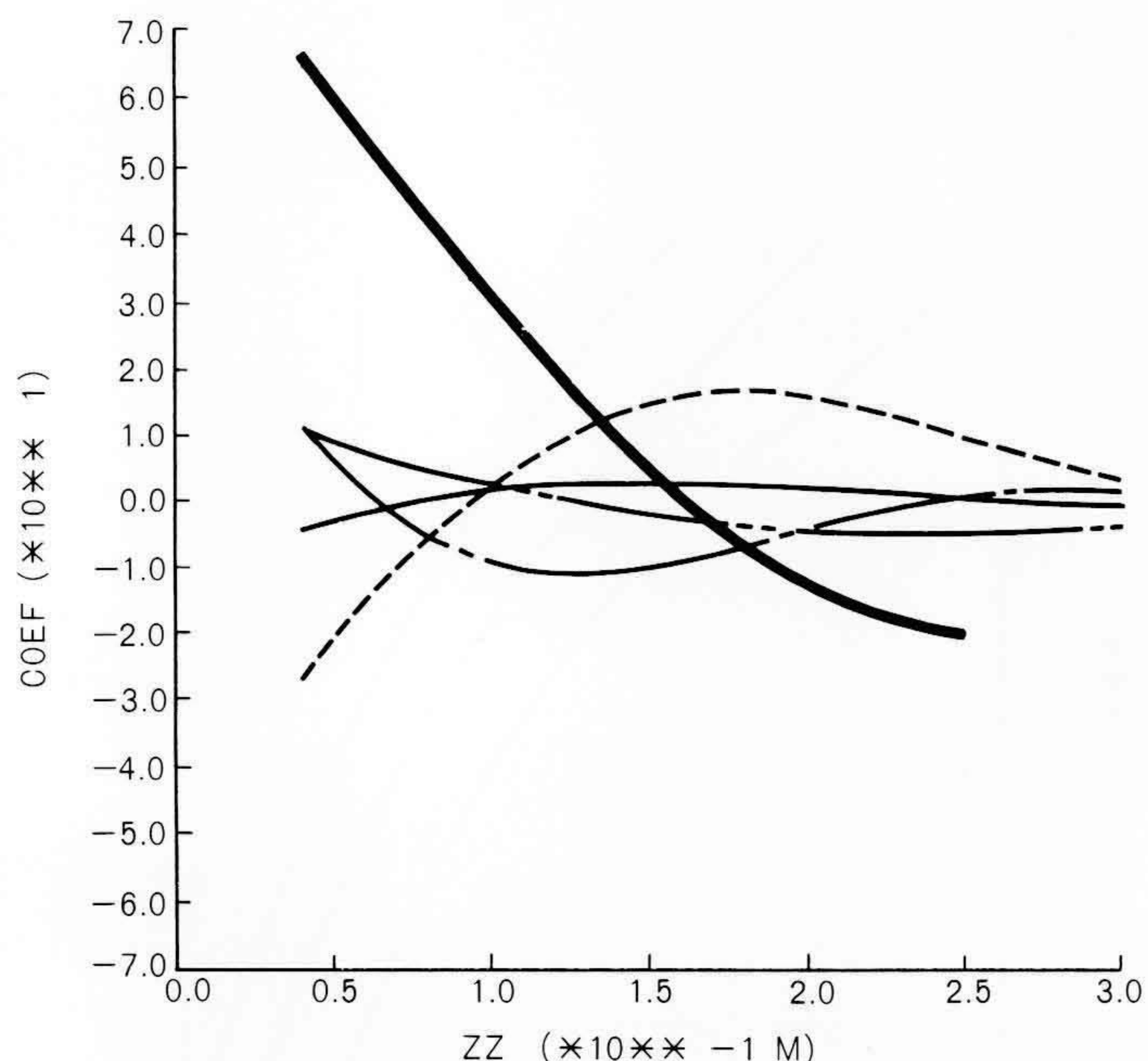
ハイブリッドシムの概念は、文献1)に詳しいが、日立製作所ではそれを発展させ、球面関数展開の $n=6$ 、 $m=4$ までのすべての項に対して磁性体配置を求め、詳細な実測によってその妥当性を確認した。その一例の $n=4$ 、 $m=4$ 配置(A44項)、および $n=6$ 、 $m=4$ 配置(Z^2A44 項)の感度係数を図7に示す。横軸は軸方向位置である。このような感度曲線はすべての項に対してプログラムに入力されており、実際のシミング作業では最適な磁性体配置をマトリックス状に出力し、磁性体の取り付け作業の効率を高めている。

4 試験結果

本磁石のプロトモデルは1年の長期運転を終了し、良好な結果を示している。

超電導コイルは高安定性を示し、定格値まで5分で励磁可能である。ヘリウム蒸発量も仕様値を達成し、傾斜磁場運転に伴う増加もきわめて少なかった。ハイブリッドシムによる磁場調整結果を図8に示す。球面関数 $n=6$ 、 $m=4$ までのすべての項に対して調整がなされていることがわかる。

漏れ磁場の実測(0.5 mTライン範囲)を図9に示す。仕様値である4 m×2.5 m以下を達成していることがわかる。



注：略語説明ほか ZZ (軸方向距離), COEF (補正感度)

——	TERM	CODE=34 Z^2A44
----	TERM	CODE=32 A44
- - - -	TERM	CODE= 6 Z^6
----	TERM	CODE= 4 Z^4
——	TERM	CODE= 2 Z^2

図7 ハイブリッドシム補正配置感度係数 球面関数の $n=4$ 、 $m=4$ (A44)および $n=6$ 、 $m=4$ (Z^2A44)に対応する磁性体配置の、軸方向距離に対する感度係数の変化を示す。

*** PASSIVE SHIMMING PPM CALCULATION ***			
Plotting Radius	=	15.00	cm
Center Field	=	4958.432	Gauss
PK to PK Homogeneity	=	4.5	ppm
M=3	A33	=	.80 ppm
	ZA33	=	.11 ppm
	Z2A33	=	.07 ppm
	Z3A33	=	.07 ppm
	B33	=	-.02 ppm
	ZB33	=	-.20 ppm
	Z2B33	=	.02 ppm
	Z3B33	=	-.03 ppm
M=4	A44	=	-.42 ppm
	ZA44	=	.18 ppm
	Z2A44	=	.17 ppm
	B44	=	.17 ppm
	ZB44	=	.03 ppm
	Z2B44	=	.12 ppm

図8 磁場調整結果 球面関数の $n=6$ 、 $m=4$ までのすべての項に対して調整がなされている。

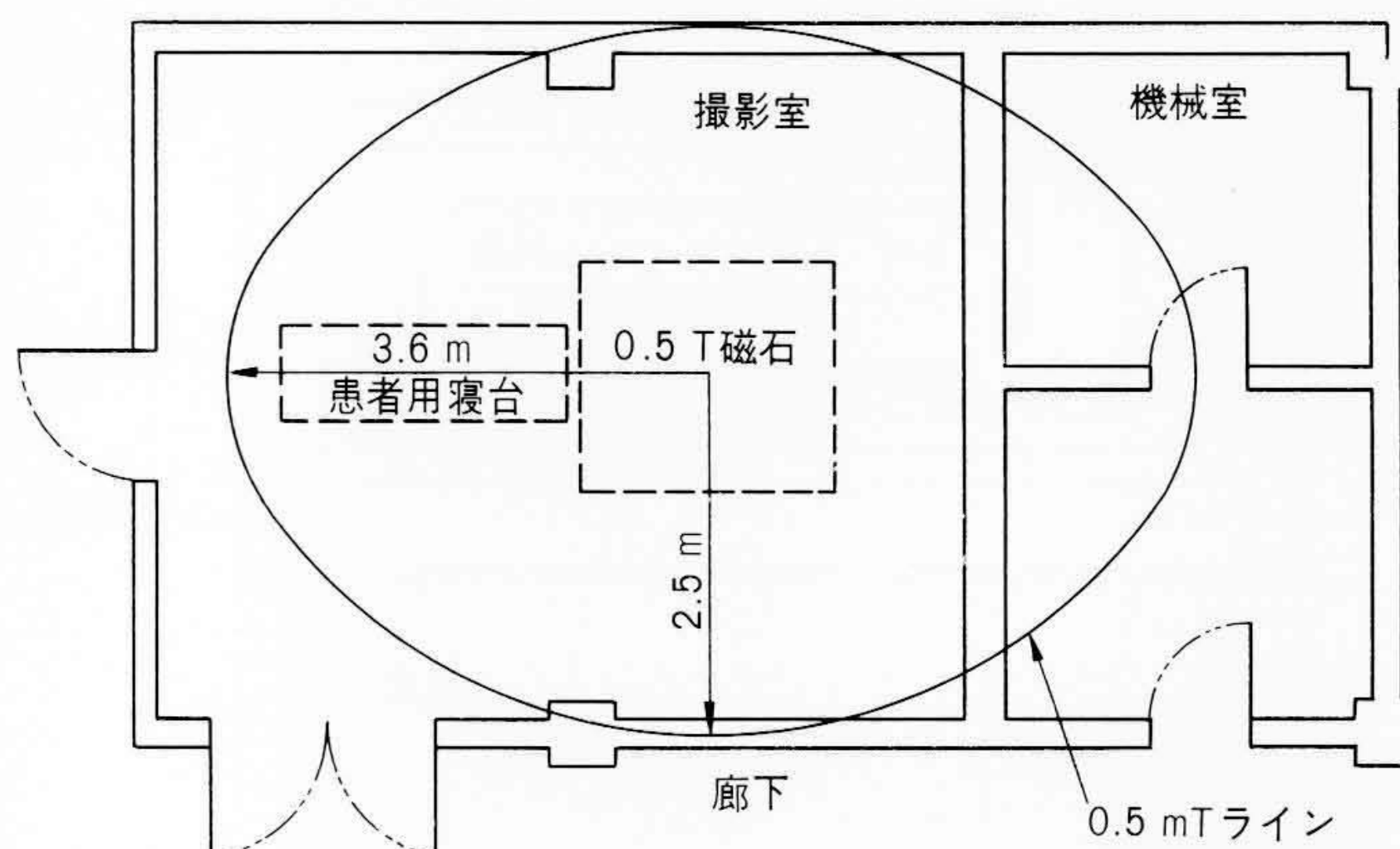


図9 漏れ磁場実測値 0.5 mTラインは、4 m×2.5 m以下となっている。

5 結 言

日立製作所が開発したコンパクト型0.5 T MRI用超電導磁石について紹介した。

MRIシステムは性能面、価格面で現在急速な改善が図られており、X線CTスキャナと同様爆発的に普及する時代にさしかかっている。超電導技術は日進月歩であり、今後も、よりいっそう高い完成度を目指して、性能向上と高信頼性の追求を進めるため研究開発を続けてゆく。

参考文献

- 1) F. Romeo, et al.: Magnet Field Profiling: Analysis and Correcting Coil Design: Magnetic Resonance in Medicine 1, 44~65(1984)