

# 永久磁石 MRI 開発の歩み

(株)日立製作所 マーケティング本部  
青柳 和宏



## 【はじめに】

近年 MRI 装置はオープン構造を生かした垂直磁場装置と、3T(テスラ：磁場強度の単位)に代表される高磁場クローズドタイプの超電導水平磁場装置に2極化の様相を呈している。日立のAIRIS(エアリス)シリーズに代表される永久磁石を用いた中低磁場強度のMRI装置では、その磁石の特徴を最大限に活かしてガントリ開口部を広くすることで、被検者に優しい検査環境を実現している。オープンMRIという表現を用いるようになったのもAIRISからである。また、磁場の方向が垂直であることから磁場強度に比して高い画像S/N比が得られ、高い設置性、経済性などの特徴も有しており、オープンMRI装置は急速に普及した。市場はより高機能で、より開放的で、医療費抑制政策の影響もあって経済性への要求は特に強くなっている。

## 【永久磁石 MRI の歴史】

### 1. オープン MRI 開発の歴史

1987年に初めて製品化された日立の永久磁石MRI装置MRP-20(図1)は、80年代に開発された最強の永久磁石であるネオジウム磁石の登場が大きく影響している。

それまでのフェライト磁石に対しておよそ10倍のパワーを有するネオジウム磁石はMRIガントリの質量を10分の1に低減して実用化を加速した。

我々が永久磁石型MRI装置の実用化にこだわったのは、垂直磁場方式が実現できるからである。一般的なMRI装置は、筒型の超電導磁石を使用するため磁場の方向が水平となる水平磁場方式である。図2に示すように、この場合MRIの撮像原理から、信号を受信する受信コイルの方向に制限が生じ、高感度な受信コイルの利用が困難となる。これに対して永久磁石による垂直磁場方式は受信方向が被検者の体軸方向であり、高感度なソレノイド型受信コイルを利用することができる。MRIの受信感度は磁場強度に応じて上昇するが、この高感度受信コイルがあれば磁場強度が低い永久磁石方式でも、十分な画質が得られると想定した。



図1 日立永久磁石MRI装置「MRP-20」1987年

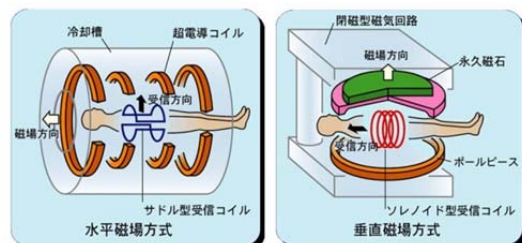


図2 高感度ソレノイド受信コイル

この永久磁石MRI装置の市場投入の結果、当時普及していた0.5Tの超電導MRI装置は市場から姿を消した。

永久磁石型MRI装置の開発にあたり、まず重要な決定をしなければならない。それはガントリギャップサイズの決定である。このサイズが大きいほど撮像時の居住性は向上するが、磁石の大きさと質量が増加する。これを人体の体格統計データから38cmに決定した。このサイズは現在の最新型オープンMRI装置でも変わらず用いられている。また、磁場強度は画質、磁石のコスト、画像コントラストの要求性能から0.2Tに決定した。磁場強度はその後0.3T、0.4Tへと強化されている。

永久磁石ガントリ実用化の技術的な最大の障壁はネオジウム磁石の温度変動特性である。数 ppm以下という高精度な磁場均一性を要求するMRI装置の磁石に対して、ネオジウム磁石の温度変動係数は-1,100ppmもあり極めて大きい、この温度変動を10トン以上あるガントリにおいて高精度に制御を行うことでコントロールする必要がある。当時の技術者はこのために多くの実験を行い数々の特許も取得している。図3に当時の永久磁石MRI装置のプロトタイプと初めて撮像された人体頭部画像を示す。

次に我々が目指したのはコンパクト化である。超電導MRI装置は漏洩磁場範囲が大きく、さらにMRIシステムの電源ユニット、コンピュータユニットなどを設置する機械室も必要となり、広大な設置スペースを要求する。この設置スペースは特にMRI導入時の問題点になっていた。

永久磁石によるガントリは図4に示すように開口部の上下にネオジウム磁石が配置され、垂直方向に磁場を発生するが、その上下をつなぐ鉄製のヨークとコラムから形成される磁路を閉じた閉磁路構造となっている。基本的に磁場強度が小さいことと、この閉磁路構造により永久磁石型MRIガントリの漏洩磁場範囲は約2m以下ととても小さい。さらに、電源システムにコンパクトなスイッチング電源を採用することで、MRI電源ユニットの1ラック化を図り、機械室も不要とした。ノイズの多いスイッチング電源をMRIに採用したのは、この装置が初めての試みであると考えている。



図3 プロトタイプと初めての画像

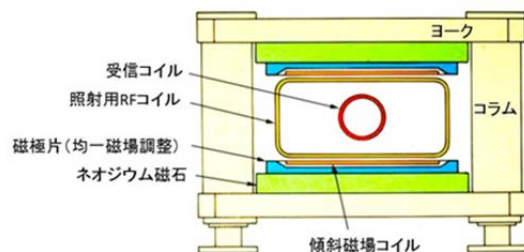


図4 永久磁石ガントリの構造

このコンパクト化は低消費電力化にも寄与し、ランニングコストのかかる超電導磁石の冷凍機と、放熱設備である水冷チラーユニットが全く不要な永久磁石ガントリとともに、画期的な省エネルギーMRIシステムを実現したのである。

MRI撮像ではアプリケーションの充実も重要である。高機能撮像シーケンスの開発において、我々は多くの永久磁石装置特有の問題に遭遇した。磁石の精度の問題、傾斜磁場パルスへの影響の問題、外来の変動磁場の影響など、これらの多くの問題を一つ一つ確実に解決し、画質の向上と高機能撮像シーケンスの搭載を実現した。ここで得た数多くのノウハウこそが、他社の追従をゆるさない日立独自の永久磁石MRI技術を確立したのである。

垂直磁場方式のMRIを実現するためには、それまで筒型であった傾斜磁場パルスを人体に印加する傾斜磁場コイルをフラットタイプにする必要がある。このためコンピューターシミュレーションを駆使して複雑な配線パターンを設計し、傾斜磁場のリニアリティと磁場発生効率を両立(図5)。このフラットなコイル構造がMRIガントリのオープン化を実現するキーとなった。図6のように当初4本であったコラムを後

方 2 本にすることで、横方向を広く開放したガントリが実現できる。こうして1996年に従来になかったコンセプトのMRI装置、オープンMRI「AIRIS」(図 7)を完成させた。



図5 フラットタイプ傾斜磁場コイル

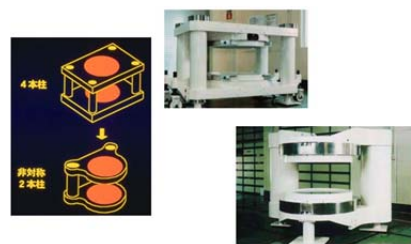


図6 磁石のオープン化



図7 オープン MRI 装置「AIRIS」1996年

## 2. シングルピラーオープン MRI APERTO(アペルト)の開発

究極の開放性を目指して開発されたオープンMRI装置「APERTO」は以下のコンセプトを追究した。

### <高画質化>

- 高画質化技術と磁場強度の増加により超電導MRI装置に匹敵する画質を得ることを目標にしてオープンMRI最大の磁場強度0.4Tの採用
- 高機能計測アプリケーションをサポートする十分な高出力傾斜磁場電源の装備

### <被検者にやさしいシステム>

- ガントリ構造をシングルピラーとすることで横方向の開放範囲を拡大し、被検者の閉鎖感をさらに緩和
- 操作者、被検者の負担軽減を追求した被検者テーブルの実現

### <設置環境に柔軟に対応>

- 磁場強度を増加しても漏洩磁場範囲を拡大しない高効率磁石構造
- 従来の設置面積である撮影室を拡大しない高い設置性レベルの確保

図 8 にオープンMRIのハイエンド装置「APERTO Lucent」の外観を示す。ガントリ開口部が広く、閉鎖感を低減。治療対応MRIとしても応用が期待されている。

0.4Tによる高い画像SN比に加え、傾斜磁場パワーを高出力化することで、更なる高画質化と高機能撮像を実現した。また、高精度な傾斜磁場性能を実現するために、渦電流の発生を抑制するEddy Current Suppress傾斜磁場コイルを採用している。

### <磁気回路>

永久磁石MRI装置の最高峰を狙うコンセプトから、磁場強度0.4Tによる高画質化と閉所恐怖症の被検者でも検査の可能性を広げる、開放性の大きなシングルピラー磁気回路を開発した。しかし、従来の構成で0.4Tガントリを設計した場合、質量、漏洩磁場範囲の点で増大が問題となる。そこで2つの新技術を開発し実用的な磁気回路を実現した。

一つは磁場発生効率向上技術であり、漏洩する磁束を開口内に戻し、撮像空間内の磁場強度を向上するものである。この技術によって、磁石量の低減と薄い鉄材の磁気回路が可能になり、0.4Tにもかかわらず13トンという質量を実現した。

もう一つは漏洩磁場抑制技術で、任意の場所の漏洩磁場を所望の値にすることができる技術を開発した。APERTOでは0.4Tに磁場強度が増加しても従来の4m×5mの撮影室内に0.5mTの漏洩磁場範囲を納めることができる。

この他に新開発のハイグレードネオジウム磁石を採用し、より安定した磁場発生を可能にしている。

図9にAIRISとAPERTOの開放性比較を示す。コラムを二本から片側一本にすることで、320°にもおよぶ広い開放範囲を実現し、被検者にやさしいシMRIシステムを具現化した。

### <被検者テーブル>

被検者にやさしく、操作者に使い易い被検者テーブルをコンセプトに次の点を開発した。

- 前後左右方向の移動を可能とする新機構を開発しガントリ内でもフローティング動作を実現した。これによって、肩、膝関節などの撮像時に縦、横方向の容易な位置決め操作が行え、画質の向上、スループットの改善を実現
- 横移動範囲を左右に15cmに拡張して両肩関節の撮像も容易に行える
- フットスイッチを設けることで操作性の向上と被検者のケアを可能にした

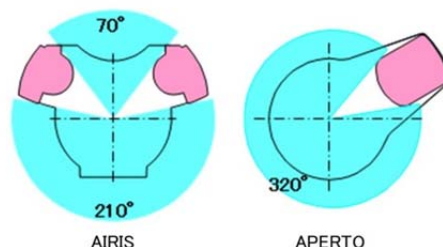


図8 シングルピラーオープン MRI 装置「APERTO Lucent」

図9 オープン MRI の開放比較

## 3. 高磁場 MRI 装置用アプリケーションの永久磁石 MRI 装置への搭載

MRI装置においては、体動、脈拍、呼吸などのモーションアーチファクトが問題になっている。特に永久磁石MRI装置は高磁場MRI装置に比べ撮像時間が長くなるため、モーションアーチファクトが問題になる場合がある。そこで、高磁場装置に搭載しているRadial Scan技術「RADAR」を永久磁石MRI装置にも搭載をした。「RADAR」はk空間を回転状にScanすることでモーションアーチファクトを低減する技術である。この効果は位相エンコード方向に特異的に収束するアーチファクトの分散効果とk空間中心部を常にデータ取得することによる加算効果がある。(図10)

RADARは多数のシーケンス、全身コイル、任意の断面での撮像に対応し、使いやすさを追求した体動アーチファクト低減機能である。

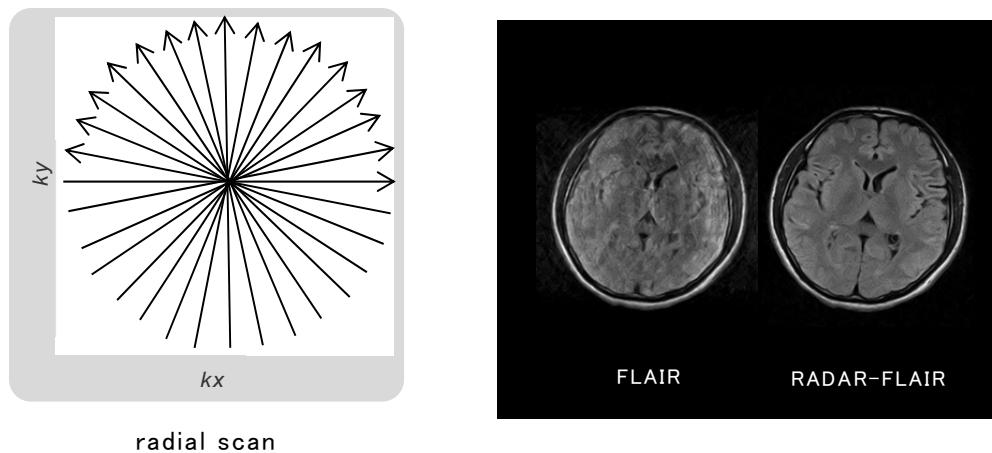


図10 radial scan RADAR

【まとめ】

永久磁石方式による高性能オープンMRI装置「APERTO」は磁気回路をシングルピラーとすることで、より大きな開放性を実現し、被検者にやさしい検査環境を提供した。さらに、磁場強度を増加しても軽量化、コンパクト化を実現し、漏洩磁場範囲も狭く抑えることで、高い設置性も維持している。また、高磁場装置MRIに搭載しているモーションアーチファクト低減機能「RADAR」を搭載することで検査の失敗を低減し、検査時間短縮の可能性を高めた。

2016年に発売した最新の「APERTO Lucent Type ORIGIN5」(図11)、「AIRIS Vento Type ORIGIN5」(図12)は、頭部のスライス設定支援機能「AutoPose」等を搭載し、さらなる臨床価値と使いやすさを実現した。

高磁場MRI装置の画質、撮像機能と永久磁石MRI装置の高い設置性とすぐれた経済性を兼ね備えた高性能オープンMRI装置の登場により、今後、オープン性を活かした治療対応MRIシステムなどの発展を進め、画像診断以外の臨床応用においても、オープンMRIが活躍することを願って止まない。



図11 APERTO Lucent Type ORIGIN5



図12 AIRIS Vento Type ORIGIN5