

永久磁石型オープンMRI Apertoの開発

Development of Permanent Magnet Open MRI Aperto

吉野 仁志	Hitoshi Yoshino	武田也寸志	Yasushi Takeda
川崎 真司	Shinji Kawasaki	鈴木 克法	Katsunori Suzuki
竹内 博幸	Hiroyuki Takeuchi		

株式会社日立メディコ MRIシステム本部

永久磁石を用いたオープンMRI装置Aperto (0.4T)を開発した。磁気回路(ガントリー部)をシングルピラーとすることで開放性を増し、患者にやさしい検査環境を提供している。0.4Tと高静磁場強度にしたことに加え、傾斜磁場強度やSlew Rateも大きく設定したことで、超高速撮像のSingle shot EPIやDiffusion Weighted Imagingを可能にし、一般臨床撮像においても高磁場装置に相当する画像を提供している。

磁石に新技術を導入し、磁場強度を上げても軽量化、小型化を実現した上、漏洩磁場も狭く抑えており、狭い部屋にも設置可能である。まさに、高磁場機の性能と機能、汎用機の設置性と経済性を兼ね備えた高性能オープンMRI装置Apertoを完成した。

We have developed a 0.4T vertical field permanent magnet open MRI system "Aperto", which offers a patient friendly examination environment on the strength of the single pillar structure of the magnetic circuit and gantry. The combination of the 0.4T strong static magnetic field, the powerful gradient magnetic field strength and the high gradient magnetic slew rate enables the ultra high-speed sequences such as the single shot EPI/Diffusion Weighted Imaging. Besides, this combination provides the image quality of routine examinations comparable to that of high field systems.

Our newly developed technology enabled the lightweight and small size gantry with its higher strength of the static magnetic field. It also enabled the installation in a small examination room by constricting the fringe field within a small area.

We have completed the open MRI system "Aperto", which has both the performance and functions of the high field system and the installation requirements and economical efficiency of the mid/low field system.

Key Words: MRI, MRA, EPI, Diffusion Weighted Image, Balanced SARGE

1. 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系と、3Tに代表される超高磁場クローズドタイプの超伝導水平磁場系に2極化の様相を呈している。AIRIS 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ー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。オープンという言葉を用いるようになったのもAIRISからである。また、磁束の方向が垂直なことから磁場強度に比して高いS/Nが得られることや、設置性・経済性などの特長も有しておりオープン

MRI装置は急速に普及した。市場はより磁場が高く、より高性能で、より開放的で、より経済性の良いものを求めている。保険点数改定の影響もあって経済性への要求は特に強くなっている。磁石の奥行きを短くし、患者の圧迫感を軽減する思想で開発したMRP-20からのオープンへのこだわりを究極的に進化させ、高画像化技術によって高磁場装置に相当する高画質を有する永久磁石型MRI装置Apertoを開発したので報告する。

2 . Apertoの概要

以下のコンセプトを重視した。

(1) 高画質化の実現

- 1) 高画質化技術と磁場強度アップで高磁場装置に相当する画像が得られることを目標にし、磁場強度0.4Tを採用。
- 2) 高機能計測ソフトをサポートするだけの充分な高出力、高Slew Rateの傾斜磁場を装備。

(2) 患者にやさしいシステムの実現

- 1) 磁石(ガントリー)構造をシングルピラーとすることで、開口横幅無限大を実現し、患者閉所恐怖感をさらに緩和。
- 2) 操作性の向上、患者の負担軽減を追求した寝台を実現。

(3) 設置環境に柔軟に対応するシステムの実現

- 1) 磁場強度が上がっても漏洩磁場の広がり、従来から当社が推奨している最小設置面積である4m x 5mの撮影室から0.5mTが漏洩しない、高い設置性レベルを確保。

図1に、Apertoの外観を示す。ガントリー開口部(横幅：)が広く、閉所恐怖感を感じることは非常に少ない。放射線科のみならず脳神経外科などでInterventional /Intraoperative MRIとして応用が期待される。Apertoから当社の各モダリティ共通化を図ったアクセントカラーであるミレニアムブルーを採用し、ガントリーと寝台に一体感を持たせたデザインとした。



図1 : Aperto外観と撮影イメージ

表1は今回開発したApertoの主要諸元を示す。0.4Tによる高画質化に加え、傾斜磁場特性を高出力、高Slew Rateとすることで、更なる高画質化と高機能撮像を実現できる仕様とした。正確な傾斜磁場特性を実現するために、渦電流の発生を抑制するEddy Current Suppress型傾斜磁場コイルを採用

表1 : 主要諸元

項目	仕様
1. 磁気回路	
1) 静磁場強度	0.4T 垂直磁場
2) 磁石方式	永久磁石・シングルピラー
3) 質量	13トン
4) 漏洩磁場 (0.5mT)	(+X:2.0m, -X:1.6m) x (+Y:1.8m, -Y:1.5m) x (Z:2.5m)
5) ガントリー開口	380mm x
2. 傾斜磁場	
1) 傾斜磁場強度	22mT/m
2) 渦電流抑制	渦電流フリーボールピース + Eddy Current Suppress型傾斜磁場コイル
3. 寝台	
1) 天板高さ	450 ~ 775 mm
2) 横移動	± 150 mm (ガントリー内で横移動可能)
4. RFシステム	
1) RF電力	5kW
2) 送受方式	デジタルRF
3) RF照射コイル	ラジアル型高照射効率コイル
4) RF受信コイル	2ch Multiple Array Coil (標準) 4ch (オプション)
5. 画像処理	
1) コンソール	ワークステーション型操作卓、LCDモニター
2) 画像再構成時間	0.05 s
6. イメージング機能	
1) DWI (EPI)	
2) パラレルイメージング	
3) T/R Body Coil	

用した。Single/Multiple Shot Echo Planar Imaging(EPI)、拡散強調EPIの超高速撮像の搭載に加え、送受信兼用コイル(T/R Body Coil)を装備し、開口を有効に使用できるようにした。

3 . 主要開発内容

3.1 磁気回路

永久磁石方式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患者でも気軽に検査を受けられる世界一開放性のあるシングルピラー磁気回路を開発した。従来の磁気回路は図2に示すように、上下に

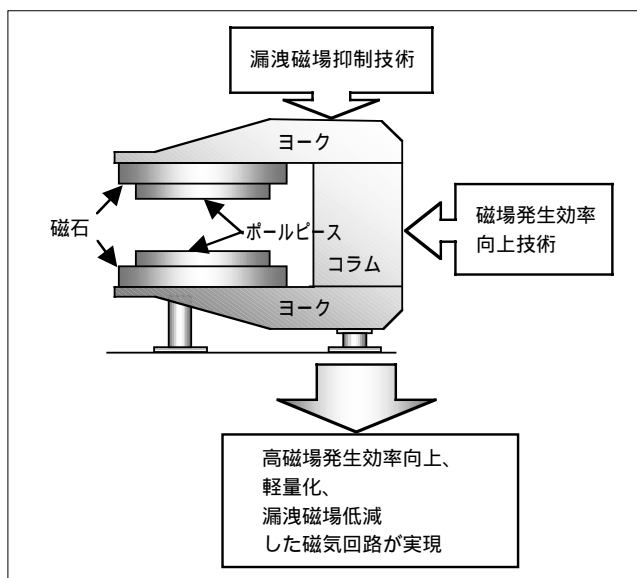


図2 : 磁気回路構成

配置した永久磁石、その開口側に均一度を改善するポールピース、反対側には磁束を通すヨーク、それらの間隔を保持するコラムで構成し、磁束を鉄製のヨーク、コラムに通し、磁気回路を形成していた。従来の構成で0.4Tを設計した場合、重量、漏洩磁場の面で実用的でなくなる。そこで2つの新技術を開発し、実用的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、撮影空間内の磁場強度を向上させるものである。これはヨーク内の磁束密度低減にも効果がある。この技術によって、磁石量低減、薄いヨークの使用が可能になり、0.4Tにもかかわらず13tonという軽量化を実現した。

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。図3に本技術による漏洩磁場抑制効果を示す。Apertoでは0.4Tに磁場が上がっても従来の4m × 5mの撮影室内に0.5mTを納めるため後ろ側の漏洩抑制と Interventional /Intraoperative時に有効である前側の漏洩抑制に用いた。

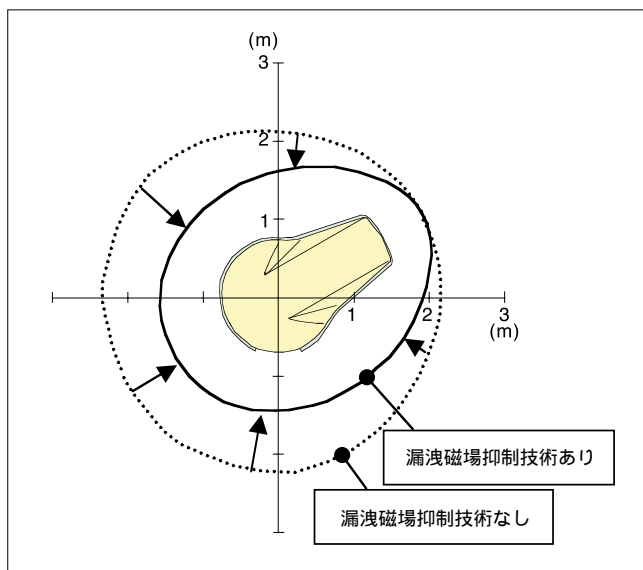


図3：0.5mT漏洩磁場分布

この他にハイグレードネオジウム磁石を採用し、より安定な磁場発生を可能にした。最高水準の磁気回路技術で高磁場、高設置性を実現した上に、被検者の居住性にも考慮しシングルビラーとした。

図4にAIRIS-IIとApertoとの開放性比較を示す。コラム配置を左右二本から片側一本に変更することで連続した320°にも及ぶ広い開放域を可能にした。患者にやさしいシステムということだけでなく Interventional や Intraoperative MRIにも好適なシステムとした。

3.2 ガントリー

0.4Tによる高画質化と患者にやさしいシステムを重要コンセプトとし、次の項目を開発した。

- (1) 従来の渦電流フリーポールピースに加え、高磁場開放型MRI装置ALTAIREで構築した渦電流抑制技術(渦電流の発生を抑制するEddy Current Suppress型の傾斜磁場コイルを採用した。)を採用し高画質化を図った。

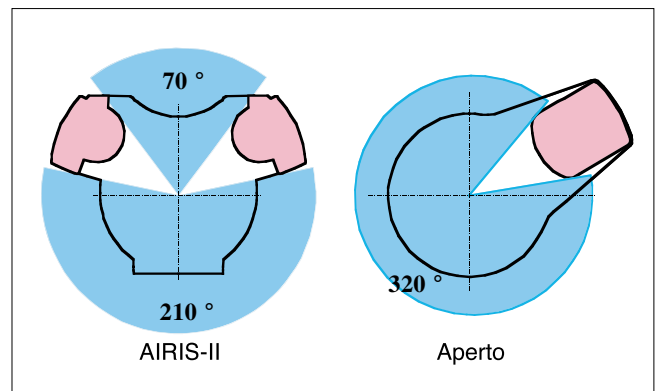


図4：開放性比較

- (2) 高傾斜磁場強度、高Slew Rateを実現する新型傾斜磁場コイルを開発し、高性能撮像を実現できる仕様とした。
- (3) ラジアル型新照射コイルを開発し、照射効率向上、照射均一度向上を図った。
- (4) 色彩による親しみのあるデザインを採用した。各モダリティ共通化を図ったミレニアムブルーの他に、Apertoでは、装置を「人間的で親しみある色彩」とすることを目的に、開口部にミレニアムベージュを採用した。人間的、家庭的な印象、活力を出すなどの効果を実現した。

3.3 寝台

患者にやさしく、操作者の使い勝手の良い寝台をコンセプトに次の項目を開発した。

- (1) 従来はガントリー内で一方方向の天板移動に限定されていたが、あらゆる方向の移動を可能とする新構造を開発し、ガントリー内でもフローティング動作を可能にした。これによって、肩、膝などの縦、横方向の位置決めが磁場中心で行えるようになり、スルーボットの向上、使い勝手の向上、患者の負担を軽減した。
- (2) 横移動範囲±150mmとし、天板の上で患者に移動してもらうことなく両肩の撮像を可能にした。
- (3) 操作盤の1つのタッチキーだけで、位置決め位置までのセットアップを可能(INキーだけで上昇、投光器点灯、縦移動が可能)にし、さらに、フットスイッチを設けることで、操作性の向上と従来以上の患者へのケアを可能にした(図5)。

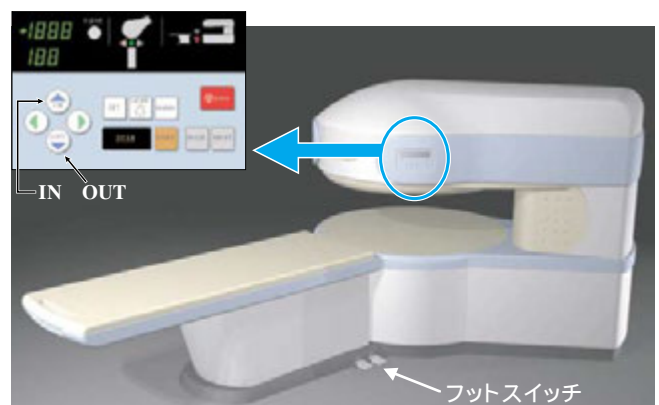


図5：寝台

(4) 乗り心地の改善のため、ソフトスタート/ソフトストップ機能を備え、患者への「やさしさ」に配慮した。

3.4 RFコイル

受信RFコイルについては、永久磁石方式で培った技術に基づき、ソレノイド型、QDコイル型、マルチプルアレーコイル(MAC)型などが、そのまま周波数をシフトする調整だけで0.4Tに利用可能である。また、新コイルとしてT/R Body Coilを開発、装備した。図6に簡単な原理図を示す。RF照射コイルを照射後、送受信切り替えスイッチで受信ラインに切り替えて受信するものであり、ApertoではQD照射を行っているため、信号をQD合成、上下コイルの信号をMAC合成し画像化している。Bodyコイルなどを装着する必要がないので、開口を広く使用できる利点がある。また、個々の感度領域の異なるコイルの組み合わせで、k空間の分割撮像で撮像時間を短縮できるパラレルイメージングのコイル感度を計測するのに適している。

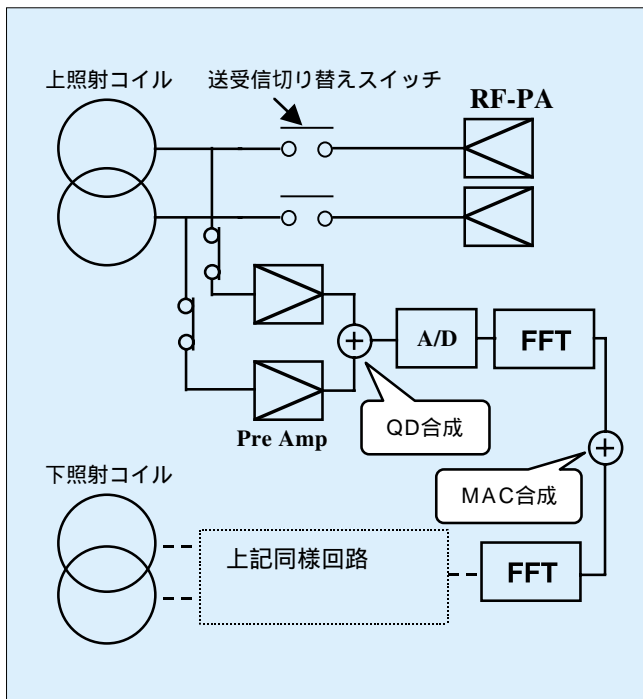


図6：原理図

3.5 高機能・高速撮影

傾斜磁場強度とSlew Rateを高く設定したため、傾斜磁場パルスを短時間で高強度に立ち上げることが可能である(図7)。そのため各種高速/高機能シーケンスを高いレベルで実現している。

(1) Single/Multi Shot Echo Planar Imaging

超高速撮像法であるSingle/Multi Shot Echo Planar Imaging (SS/MS EPI)が可能であり、その応用機能であるDWI-EPI(Diffusion Weighted Imaging：拡散強調画像)を用いることにより初期脳梗塞の診断に有用である。EPI、DWI-EPIでは強力な傾斜磁場による信号計測時間の短縮により、歪を抑制した画像を得ることができる。

また拡散強調画像の後処理としてADC(Apparent Diffu-

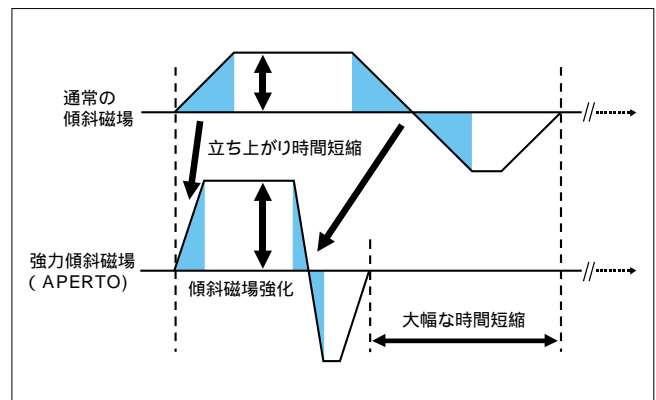


図7：強力傾斜磁場による効果

sion Coefficient)マップ/Trace像算出機能も備えており、より診断に有効な情報を得ることができる。

(2) Balanced SARGE

(Steady State Acquisition with Rewound Gradient Echo)

Balanced SARGEシーケンスは真のSSFP(Steady State Free Precession)状態を利用して短時間で高S/N、高コントラストの画像を得るシーケンスである。このシーケンスでは特有のアーチファクトを抑制するためにTRを数msと従来シーケンスに比較して大幅に短縮することが必要である。Apertoでは強力な傾斜磁場の恩恵により最短TR4msを実現した。これにより息止め下での心臓シネ撮像をはじめとする高速撮像が可能であり、またその高速性を利用しての短時間での3D撮像などに有効である。

(3) MR Angiography

強力な傾斜磁場は血管撮像法であるTOF(Time of Flight)MR Angiographyに対しても有効であり、TEを短縮することにより屈曲部や高速流による信号欠損を抑制し、鮮明な血管像を高コントラストに得ることができる。これにより造影剤を使用しないTOF MR Angiographyでも主幹動脈のみならず分枝までも鮮明に描出可能である。また近年注目されている短時間に3次元血管像の得られる造影MR Angiography、血流速の遅い血管描出に適したPC(Phase Contrast) MR Angiographyも搭載しており、多彩なMR Angiography撮像要求に応える仕様を実現している。

(4) Fast Spin Echo

臨床で通常使用するパルスシーケンスにおいても強力傾斜磁場により大幅な画質向上を実現した。特に一般臨床で多用されるFast Spin Echo(Fast SE)では、傾斜磁場パルスの印加時間短縮により生じた余裕時間を有効に活用することで1.4~1.5倍程度のS/N改善が得られており、1.0T機に匹敵する画質の実現に大きく貢献している。またInter Echo Time(Echo間隔)を最短で6msと短く設定でき、腹部息止め撮像などの短時間撮像で威力を発揮する。

Single shot Fast SEももちろん実施可能であり、MRCP(Cholangiopancreatography)、MR Urographyなどに有効である。また、信号計測終了後に残った横磁化を強制的に縦磁化に回復させるDriven Equilibrium Fast SE(DE FSE)法により、T2強調画像の撮像時間の大幅な短縮や、T2コントラストを改善することが可能である。

4. 画像例

以下にApertoで撮像された画像例を示す。

(1) 頭部T1、T2強調画像

図8は頭部T1、T2強調の通常画像である。T1像はSE法(Dual Slice 併用)、T2像はFast SEで撮像している。T1像、T2像ともに5mmスライス厚の画像を3分弱で得ている。SE法で併用したDual Sliceは同一TRでスライス枚数を2倍に増加する機能であり、任意のオプリーク/スライスギャップが設定可能なため臨床に有効である。

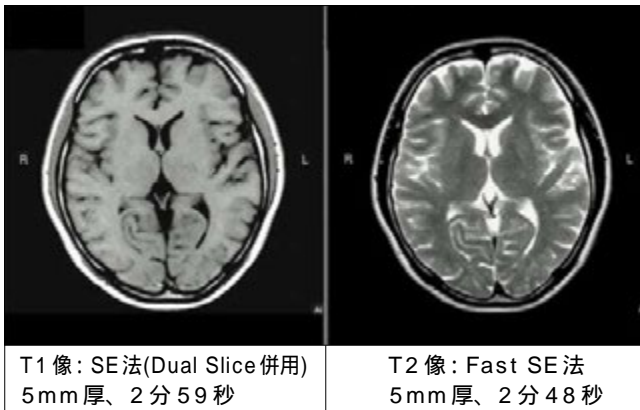


図8: 頭部T1、T2像

(2) 頭部3D TOF MR Angiography像

図9は頭部の3D TOF MR Angiography像である。マルチスラブ計測で撮像しており、頸動脈の屈曲部から抹消血管まで良好に描出されている。特に強力な傾斜磁場によるTE短縮効果により屈曲部や分岐部での信号欠損がない画像が得られている。

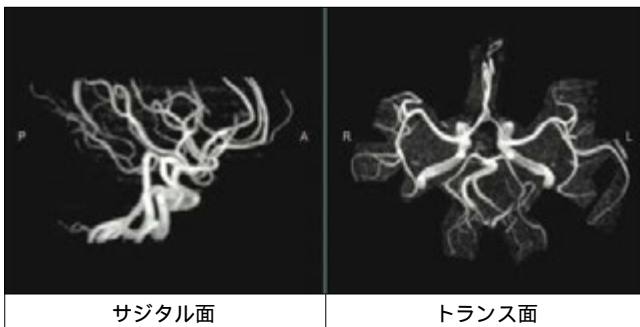


図9: 頭部3D TOF MR Angiography像

(3) 頭部EPI / DWI画像

図10と図11にSingle Shot EPI/DWI画像およびMulti Shot EPI/DWI画像を示す。Single Shot EPI/DWIでは1枚当り200ms程度の撮像時間で超高速に画像を得ており、Single Shot EPI特有の画像歪みが認められる。図11のMulti Shot EPI/DWIではそれぞれ約30秒、1分程度の撮像時間で10数枚の画像を得ているが、Single Shot画像に比べて歪みが少なく、細部の構造まで良好に描出されている。

(4) 腹部息止め画像

図12に腹部息止めでのFast SE T2像を示す。15秒の息止めで15枚の画像を得ている。強力傾斜磁場の効果により良好なS/Nが得られている。

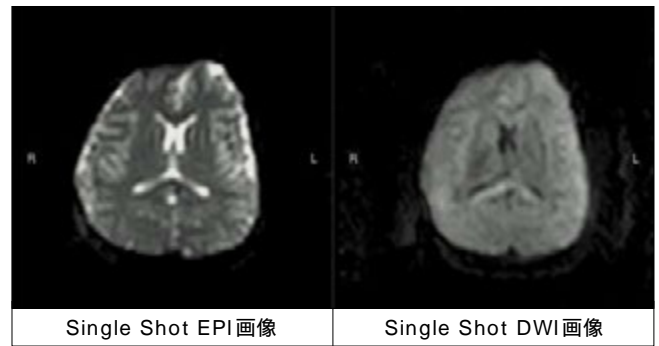


図10: Single Shot EPI/DWI画像

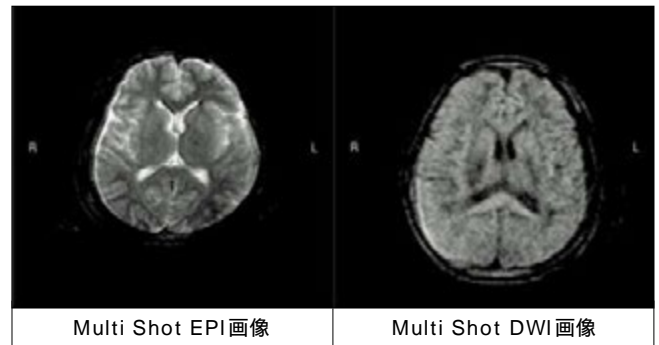


図11: Multi Shot EPI/DWI画像

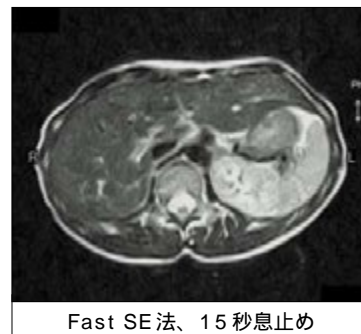


図12: 腹部息止めT2像

(5) 心臓画像

図13はBalanced SARGEシーケンスにより心臓を撮像した画像である。TR5.4ms、TE2.7msという高速撮像により16秒の息止め時間で11フェーズのシネ画像を得ている。このような短時間での撮像にもかかわらず心筋/内腔の良好なT2様コントラストが得られており、左心室内腔の乳頭筋なども鮮明に描出されている。

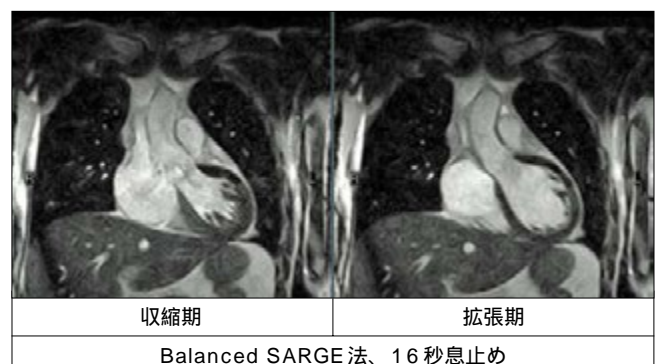
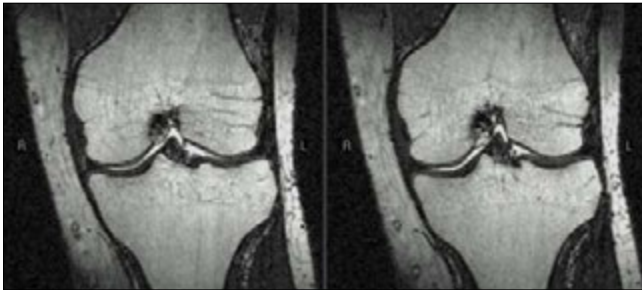


図13: 心臓シネ撮像

(6) 膝部画像

図14はBalanced SARGEシーケンスにより膝部を撮像した画像である。Balanced SARGEによる高速撮像3分6秒間に2mm厚×64枚の画像を得ている。骨髄内部の構造も明瞭に描出されていることが確認できる。



Balanced SARGE法、3分6秒、2mm厚×64枚

図14：膝部撮像

5. 考察

永久磁石を用いたオープンMRI装置 Aperto (0.4T)を開発した。磁気回路(ガントリー部)をシングルピラーとすることで開放性を増し、患者にやさしい検査環境を提供できた。0.4Tと高静磁場強度にしたことに加え、傾斜磁場特性の増強によって、超高速撮像のSingle shot EPIやDiffusion Weighted Imagingを可能にし、一般臨床撮像においても高磁場装置に相当する画像を提供できた。

本装置の開発において、特に磁気回路に多くの技術的ハードルがあった。高磁場、シングルピラーとしたことによる重量、漏洩磁場の増大である。モデル試作を繰り返し上記問題を解決する2つの新技術の発明に至った。磁場強度を上げて軽量化、小型化を実現した上、漏洩磁場も狭く抑えることが可能で、狭い部屋にも設置可能にした。

まさに、高磁場機の性能と機能、汎用機の設置性と経済性を兼ね備えた高性能オープンMRI装置 Apertoを開発した。

6. おわりに

永久磁石型MRI装置 Aperto (0.4T)を開発し、世界一のオープン構造で高画質、高機能の装置を実現した。静磁場強度、傾斜磁場強度、Slew Rateの増強、シーケンスの最適化で、水平磁場1.0Tに匹敵する画質を得ることに成功した。今後、オープン性を生かし、Interventional/Intraoperative MRIの利用を進め、放射線科のみならず脳神経外科や他の各科の利用を推進できる環境をいち早く実現して行きたい。

AIRISは株式会社日立メディコの登録商標です。