

超電導オープン0.7T MRI Altaireの開発

Development of Superconductive Open High Field MRI Altaire 0.7T

津田 宗孝	Munetaka Tsuda	永井 静	Shizuka Nagai
吉野 仁志	Hitoshi Yoshino	鈴木 正慶	Masayoshi Suzuki
竹内 博幸	Hiroyuki Takeuchi	宮脇 昇一	Syouichi Miyawaki
小林 靖宏	Yasuhiro Kobayashi	西村 博	Hiroshi Nishimura

株式会社日立メディコ MRIシステム本部

超電導磁石を用いた高磁場オープンMRI Altaire (0.7T)を開発した。ガントリー開口部を広くとり、被検者にやさしい検査環境を提供している。高均一度磁石を実現させたことによりRFパルスによる脂肪抑制が適用でき、垂直磁場採用により磁場強度に比し高S/Nが得られ、従来型の水平磁場方式高磁場機に匹敵する画質を得ている。傾斜磁場強度やSlew Rateも大きく設定しており、超高速撮像のSingle shot EPIやDiffusion / Perfusion Weighted Imagingを可能にしている。

磁石を自己シールド方式で実現しているため、質量は重い漏洩磁場を抑えており、比較的狭い部屋にも設置可能である。He消費量は極めて少なく、維持運転経費も低く抑えられる。Altaireの開発により高性能な高磁場オープンMRIが完成した。

We have developed the high field open MRI Altaire 0.7T using vertical field superconductive magnet which has a patient friendly examination environment due to a wide open aperture of the gantry. Altaire has high homogeneity magnet which enables fat saturation using RF excitation pulse. It uses the vertical field SCM which also enables high signal to noise ratio compared with the conventional horizontal magnet at the same magnetic field. It has high gradient field and high slew rate capability to produce single shot Echo Planer Imaging and Diffusion/Perfusion weighted imaging.

Although the magnet of Altaire is composed of self-shield iron so that the weight of the magnet is high, it has a small fringe field to be able to install it in a relatively small room. He consumption is small and its running and maintenance cost are also low. Introduction of Altaire opens a high performance and high field open MRI.

Key Words: MRI, MRA, Diffusion, Perfusion, Fat Saturation

1. はじめに

超電導磁石を用いたMRI装置は、一般的に高い磁場強度と高い磁場均一度によって高画質・高機能を有し広く普及している。ところが、被検者は狭くて長いトンネル状のガントリー内に入らなければ検査を受けられず、閉所恐怖感を訴える患者や小児の検査には不向きであった。

一方、主に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

広くし、被検者に優しい検査環境を実現している。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・経済性等の特長も有しており急速に普及した。これまで、MRIの市場は磁場強度でクラス分けされていた状況から、高磁場MRI装置とオープンMRI装置という二つの大きな潮流となっている。

このようなMRI装置の市場動向から、被検者に優しい検

査環境と高画質・高機能を併せ持ち、かつ、将来の拡張性にも充分対応できるオープン構造を有した高磁場超電導MRI装置 Altaire を開発したので報告する。

2. Altaire 概要

超電導オープン MRI 装置の開発にあたり、以下のコンセプトを重視した。

- (1) 垂直磁場方式を採用したオープンMRI装置なので、磁場強度は水平磁場での1.0TのMRI装置と同等以上のS/Nが得られる0.7Tを採用。
- (2) オープンの特徴を生かすため、ガントリー開口部はギャップを広く、開口横幅もゆったりとさせた115cmとし、患者閉所恐怖感を緩和。
- (3) 漏洩磁場の広がり、従来の永久磁石方式MRI装置のもつ設置性に近いレベルを確保。
- (4) 高機能計測ソフトをサポートするだけの充分な高強度、高 Slew Rate の傾斜磁場を装備。
- (5) 脂肪抑制が効果的に適用できる高均一度磁石の採用。

図1に、Altaireの外観を示す。ガントリー開口部(幅：115cm)が広く、ギャップも広い(47cm)ので、閉所恐怖感を感じることは非常に少ない。また、開口部が広いので、放射線科のみならず脳神経外科などでのInterventional/Intraoperative MRIとしての応用が期待される。



図1 : Altaire 外観

表1は今回開発したAltaireの主要諸元を示す。画質に影響を与える均一度は35cmDSVで $\pm 1.5\text{ppm}$ (0.35ppmVrms)を達成しており、高磁場機の仕様としている。さらに、周囲環境の温度変化や生体のもつ反磁性による均一磁場の乱れなどを補正するためのシムコイルも装着し、均一度を補正できる構造とした。また、傾斜磁場特性は最大強度：22mT/m, Slew Rate：55T/m/sと高機能撮像を実現できる仕様とした。一方、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Active shield型の傾斜磁場コイルを採用した。特に、高磁場機では当然要求される、超高速撮像のSingle/Multi Shot Echo Planar Imaging (EPI)を実現するため、傾斜磁場コイルから発生する熱の冷却には水冷式を採用している。

表1 : Altaire 主要諸元

項目	仕様
1. 磁気回路	
1) 磁場強度/方向	0.7T 垂直
2) 形状	非対称2本柱
3) 磁場均一度	$\pm 1.5\text{ppm(p-p)}/35\text{cmDSV}$
4) 磁気シールド	パッシブ方式
5) 磁石重量	41トン
6) 漏洩磁場(5gauss)	3.1 × 3.5m
7) ガントリー開口	47 × 115cm
8) 液体He消費	200リットル/年
2. 傾斜磁場	
1) コイル方式	AS-GC
2) 傾斜磁場強度	22mT/m
3) スルーレート	55T/m/s
3. 患者テーブル	
1) 天板高さ	490 - 970mm
2) テーブル移動	$\pm 100\text{mm}$ 横移動
4. RFシステム	
1) 周波数	30MHz
2) RF電力	10kW
3) 送受方式	デジタルRF
4) RFコイル	8ch Multiple Array Coil
5. 画像処理	
1) コンソール	ワークステーション型操作卓
2) 像再構成時間	0.05s
6. イメージング機能	
1) Fat Saturation	
2) Single shot EPI	
3) Diffusion Image	

2.1 超電導磁石

オープン構造の超電導磁石の開発において重要な技術課題は磁場強度、磁場均一度、漏洩磁場及び磁石構造である。磁場強度と磁場均一度はMRI装置の画像と機能の目標を達成するための最も優先すべき開発課題であり、0.7Tと $\pm 1.5\text{ppm}$ (35cmDSV)にした。

次の技術課題は漏洩磁場の狭小化とガントリー構造を左右する磁場シールド方式である。この磁場シールド方式には、アクティブ方式とパッシブ方式がある。アクティブ方式は主コイルの発生する磁場の漏洩を抑制するためキャンセルコイルを逆方向に巻回し、全体として漏洩磁場を比較的小さくできるが、自己シールドを持たないので、パッシブ方式に比べ漏洩磁場は大きくなり易い。実用には撮影室に磁気シールドを施す必要があり、トータルの設備費が増大する。しかし、この方式では磁石を含め全体の質量を軽量化できるので、据付場所への運搬、搬入などが容易である。

一方、パッシブ方式は自己シールドにより磁路のリターンパスを継鉄内に通すことで、漏洩磁場を磁気回路から外に出さない構造として、漏洩磁場を極めて狭小にすることができる。しかし、この方式では磁石全体の質量が重くなる傾向にある。

Altaireでは、両方式を比較検討し、漏洩磁場の狭小化を重視してパッシブ方式を採用することとした。製品設計において、漏洩磁場を永久磁石並に狭小にすることを目標にし

た。図2は、Altaireの漏洩磁場範囲を示す。自己シールド型を採用したため、0.5mTの漏洩磁場の範囲を磁場中心からX、Y、Zの各方向に対して、それぞれ3m程度を確保することができた。これにより、従来の永久磁石MRI並に設置面積を狭くすることができ、室内への設置性が高まった。

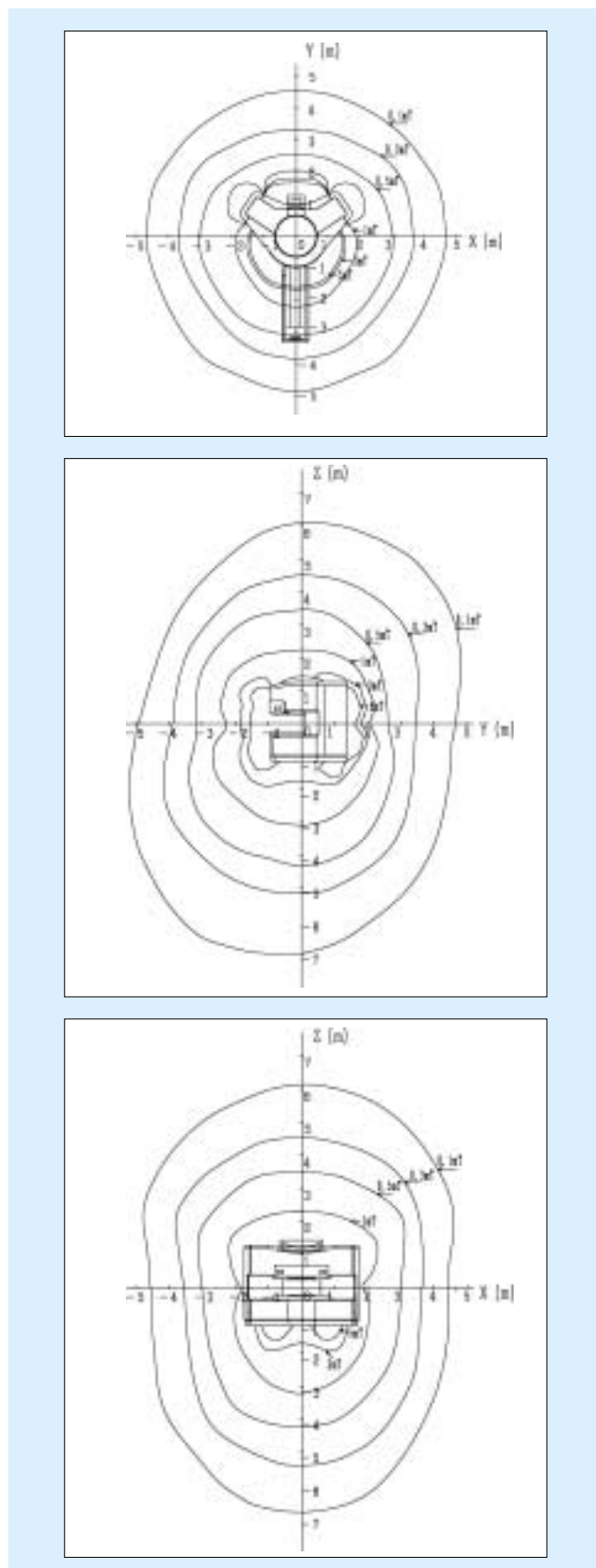


図2：漏洩磁場分布

磁石構造は、磁場特性から対称構造が選択されるべきであるが、ガントリー開口部を大きく取ることでパノラマオープンの開放感を持たせるため、上下の超電導コイルの連結管を前後に非対称に配置する構造とした。開放型超電導磁石は対向させた超電導コイルの中央部において、側面を開放にする必要がある。このため、磁場均一度を得るのに都合の良い位置にコイルを配置できなくなり、磁場の発生効率が低く、大きな起磁力が必要となる。製品設計においては起磁力をできるだけ低く抑え、高い磁場均一度を実現できる超電導コイルの配置を求める必要があり、最適な配置をシミュレーションし、実験検証を行った。

2.2 高画質

Altaireは、垂直磁場方式を採用しているため、従来の水平磁場方式に対して高いS/Nを持つ。垂直磁場方式は、水平磁場方式に対して、S/Nがおおよそ1.4倍高く、この値は、理論的にも実験的にも検証されている。従って、Altaireの垂直磁場での磁場強度0.7Tは、S/Nの面から水平磁場のおおよそ1.0Tに等しいと言える。各種パルスシーケンスの工夫により高S/Nを実現しており、水平磁場の1.5Tに近い画質も得られており、まさに高磁場機仕様と言える。

高画質を実現する要素として重要なものの1つに磁場均一度がある。高い磁場均一度は、広い範囲にわたって歪の少ない画像を提供できることを意味する。特に、脂肪抑制をRFパルス照射で実現する際に重要である。水に結合したプロトンと脂肪に結合したプロトンは周囲の磁場環境が異なるため、わずかに共鳴周波数が異なる。これを化学シフトと表現するが、脂肪と水とのプロトンの共鳴周波数は約3.5ppmだけ異なる。わずかに異なる共鳴周波数の差を利用して、脂肪だけを予め飽和させた上で、通常の撮像シーケンスで撮影すると、脂肪が抑制された画像が得られる。これをRF Saturation、略称RF SatあるいはRF Sup(Suppressionの略)と呼ぶ。この手法を有効にするには、高い磁場均一度が必要であり、それにより広範囲にRF Satの効果が得られる。Altaireでは、この効果を実現するため、35cmDSVで±1.5ppm(peak to peak)あるいは0.35ppm(V-rms)の均一度を達成しており、標準仕様としている。

Altaireではこの手法以外に、脂肪抑制した画像を得る水・脂肪分離画像撮像法も搭載しており、水画像、脂肪画像を別個に得ることができる。RF Satを含め、有効な脂肪抑制手法である。

当社は、従来から中低磁場オープンMRIの技術を培ってきており、高磁場オープンMRIには、それに加え新開発技術を適用した。今回、特に照射コイルを新たに開発し、従来のQD型平板コイルから一歩進んだマルチモードの共振型の平板コイルを実現した。この照射コイルの特徴は、従来のQD型平板型コイルと比較し、照射の均一領域が広いことが挙げられる。これにより、最大視野での核スピンを励起するフリップ角の精度が向上し、脂肪抑制などがRFパルスにより効果的に適用できる。

一方、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

ーコイル型などが、そのまま周波数をシフトする調整だけで0.7Tに利用可能である。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Parallel Imaging機能にも対応する構造を採用している。

図3は、Altaire用に開発したRF受信コイルの一例を示す。多種類のコイルを各部位ごとに用意しており、最適な画質を各部位で得ることができる。特に、高感度が期待できるマルチプルアレーコイル(MAC)は、いわゆるフェイズドアレー型であるので、広範囲の撮像領域に対して十分な感度を有する。さらに2チャンネルマルチプルアレーコイルを標準で装備しており、広範囲の領域で高感度が期待できる。



図3：各種RF受信コイル

2.3 傾斜磁場

MRI画像の画質を決める重要な因子に傾斜磁場特性がある。速いスイッチング特性と高い最大傾斜磁場強度が多彩な高機能撮像を可能とする。Altaireはオープン構造の高磁場機として位置付けており、アクティブ・シールド型の傾斜磁場

コイルと渦電流補正コイルを組み込み、低歪みで高速の傾斜磁場を発生している。即ち、渦電流による傾斜磁場の歪み：0.2%以下、傾斜磁場強度：22mT/m、Slew Rate：55T/m/sであり、十分な高機能撮像が実現可能である。例えば、最短のTR時間は8ms、最短のTE時間は1.8msを実現した。

2.4 高機能・高速撮影

傾斜磁場強度とSlew Rateを高く設定できるので、高機能パルスシーケンスを実現することが容易である。また、超高速撮像法であるSingle/Multi Shot Echo Planar Imagingが可能であり、Diffusion Weighted Imaging(拡散強調画像)に必要なMotion Probing Gradientを高くとることができ、初期脳梗塞の診断に有用である。さらに、通常のGradient Echo法のTEも短縮でき、特に血管描写法であるMR Angiographyに有効で、血流コントラストを高くとることができ、血管描写能が向上する。これにより、造影剤がなくとも主幹動脈のみならず第2、第3分枝までも鮮明に描出できるようになった。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MRAも搭載しており、多彩なMRA撮像要求に応える仕様を実現している。

一方、臨床上通常使用するSE、GrE、FSEなどのパルスシーケンスで短いTEの採用が可能となった。高速撮像のFast Spin Echoでは、Inter Echo Time 5.2msと短く設定でき、Single shot Fast Spin Echoが可能であり、MRCP(Cholangiopancreatography)の描出能が向上する。また、Fast Recovery FSE法により、画像コントラストが向上した画像を短時間で得ることが可能である。さらに、Perfusion Weighted Imaging(脳微小循環強調画像)を可能とした。

3. 開発成果

Altaire開発で最も重要なコンポーネントは超電導磁石である。オープン構造で垂直磁場方式の高磁場超伝導磁石の開発は、当社においてこれまでの技術を革新する開発であり、新しいことへの挑戦の連続であった。磁場均一度を高くするため、磁石側で均一度を高めることとし、使用する超電導コイルの数を決定した。実際には、超電導コイルに加えてシムピースで製品の磁場均一度を調整しているが、磁石側で予め粗磁場の均一性を高めてあることが重要である。

3.1 脂肪抑制

水および脂肪に関係したプロトンの共鳴周波数は、水素原子核の周囲の磁場環境がわずかに異なるため、微妙に異なる。これは、化学シフトと呼ぶが、3.5ppmの周波数差がある。一方、臨床画像上で、脂肪は T_1 強調像、 T_2 強調像とも高信号で描出され、診断上 unnecessaryな場合がある。この場合に、脂肪を抑制した画像は診断し易くなる。一般的に脂肪を抑制するには、RFパルスによって事前に脂肪信号を選択的に励起し、飽和させることで実現できる。3.5ppm離れた水と脂肪のスペクトルを選択的に分けて励起するには、均一性の高い静磁場が必要である。撮像視野35cm DSVで、 ± 1.5 ppm(peak to peak)の磁場均一性はこの視野で脂肪抑制が可能であることを示す。

図4は、RFパルスを用いた脂肪抑制の例である。視神経周囲の眼窩脂肪体が十分抑制されており、視神経周辺の発生し得る腫瘍性病変の識別能を向上させることができる。また膝部においても、脂肪抑制効果で半月板領域の診断の有効性が向上する。

3.2 水・脂肪分離画像

前節の脂肪抑制法はRFパルスを事前に照射し、脂肪信号を抑制し、通常の撮像を実施する方法である。一方、水と脂肪信号は計測時3.5ppmの化学シフトの違いから、TEによって同相になったり、反対位相になったりする。0.7Tでは4.8ms毎に同相、反対位相を繰り返す。このことから、同相と反対位相の画像の加減算により、水画像と脂肪画像が得られる。この場合においても、磁場の均一度が高いことは非常に重要な因子となる。図5は水脂肪分離画像の一例である。水画像、脂肪画像とも磁場の均一性が高いので、頭部、膝部とも分離も良好であると言える。

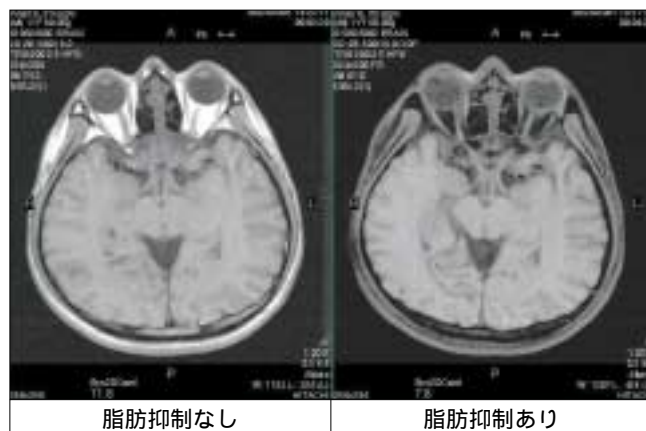


図 4-a : 脂肪抑制画像例(頭部)

SE TR : 500、TE : 16、3.5mm厚、10スライス
撮像時間 : 3分20秒



図 4-b : 脂肪抑制画像例(膝部)

SE TR : 500、TE : 22、4mm厚、12スライス
撮像時間 : 3分44秒

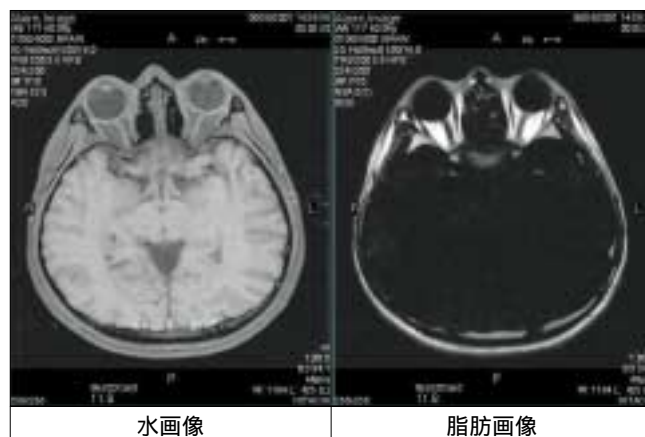


図 5-a : 水脂肪分離画像例(頭部)

SE TR : 500、TE : 16、3.5mm厚、10スライス
撮像時間 : 3分20秒



図 5-b : 水脂肪分離画像例(膝部)

SE TR : 500、TE : 18、4mm厚、12スライス
撮像時間 : 3分44秒

4 . 臨床画像

Altaireで得られた画像を図6に示す。Altaireの高画質は、高磁場で高S/Nであるので、高速撮像や薄いスライスの撮像を可能にする。図6-aは、Fast Spin Echoで得られた薄スライス撮像であり、高精細モードで撮像している。微細な構造が識別できる。図6-bは、非造影MRAの画像である。短TEを使用可能であり、乱流の影響を排除し易くなっており、特に屈曲部の信号欠損も無く、動脈が抹消部分も含め良好に描出されている。図6-cは、Single shot EPIによる頭部画像を示す。図6-dは、Multi shot EPIにMPG(Motion Probing Gradient)を印加したDiffusion Weighted Imagingへの適用症例を示す。DWI画像に脳梗塞の病変が認められる。図6-eは、高速グラジエントエコーGrE法による画像例である。息止め併用で動きのアーチファクトの無い鮮明な画像である。図6-fは、同様にSingle shot FSEを腹部に適用した例である。息止めの効果と高速撮像により、動きや血流のアーチファクトも無く良好な画像が得られており、コントラストも十分ついている。

図6-gは、腰椎の矢状断像であり、 T_1 強調、 T_2 強調像とも十分なコントラストが得られており、Presaturationパルスの適用により呼吸動のアーチファクトも無く、良好な画質である。また、図6-hは同様に薄スライスの腰椎の軸断像を示す。 T_1 強調、 T_2 強調像とも十分なコントラストが得られており、 T_2 強調像では馬尾神経も脊柱管に認められる。

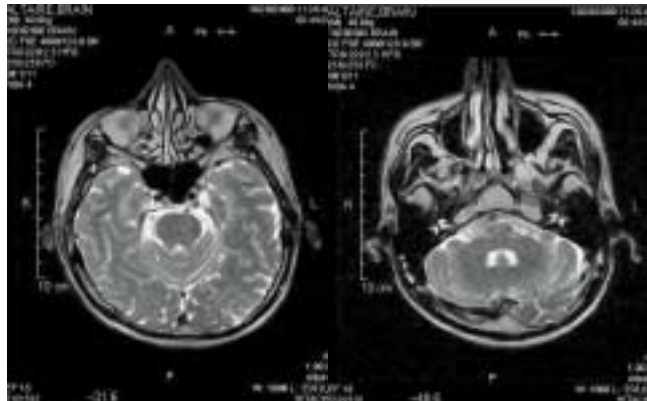


図 6-a : T_2 強調画像例(頭部)

FSE TR : 4000ms、TE : 128ms、2.5mm厚
撮像時間 : 3分44秒

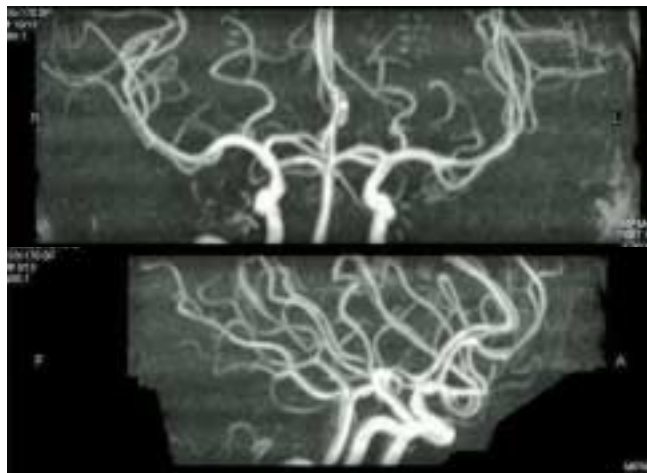


図 6-b : 3D TOF MRA 画像例(頭部)

TR : 28ms、TE : 3.0ms、撮像時間 : 6分20秒

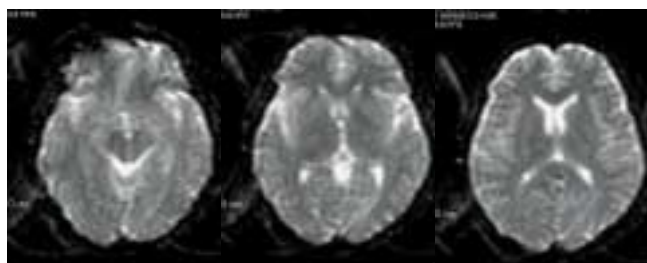


図 6-c : Single shot EPI 画像例(頭部)

TR : 、TE : 129.4ms、13スライス、撮像時間 : 3秒

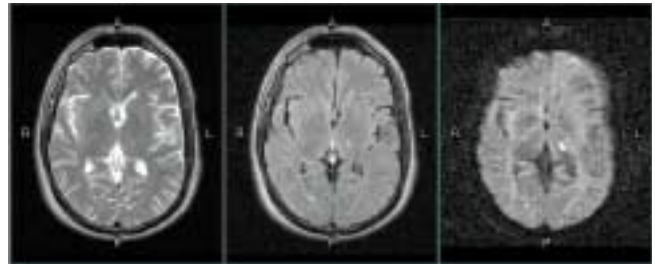


図 6-d : Multi shot DWI 画像例(頭部)

(左)FSE TR : 5100、TE : 120

撮像時間 : 2分43秒

(中)FLAIR TR : 14000、TE : 120、TI : 2300

撮像時間 : 3分44秒

(右)DWI TR : 7640、TE : 101.2、撮像時間 : 46秒

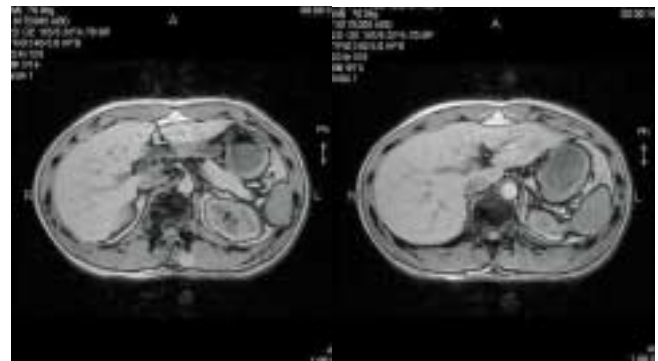


図 6-e : 高速GrE 画像例(腹部)

TR : 165ms、TE : 5.0ms、14スライス、撮像時間 : 16秒

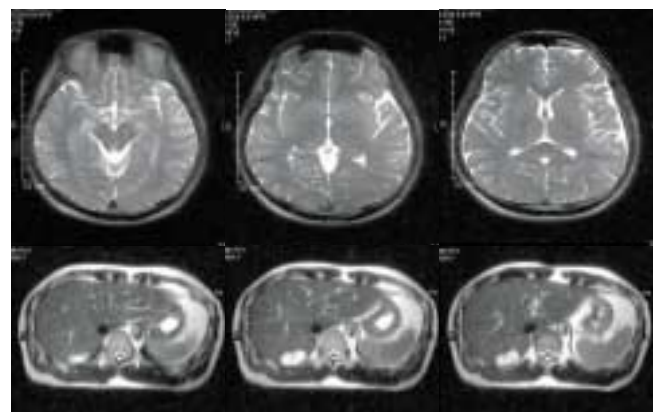


図 6-f : Single shot FSE 画像例

上段 : 頭部 TR : 8000ms、TE : 86.4ms、16スライス
撮像時間 : 8秒

下段 : 腹部 TR : 9000ms、TE : 91.8ms、18スライス
撮像時間 : 9秒

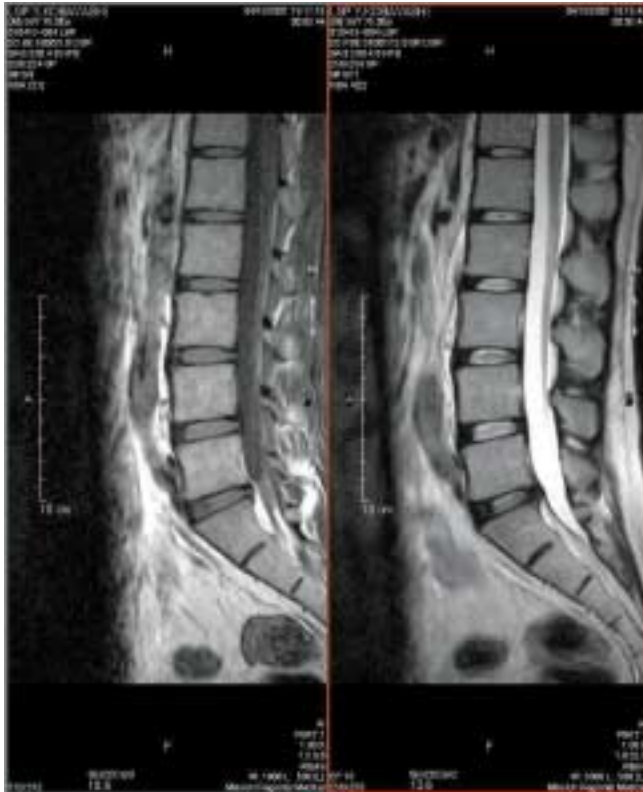


図 6-g : 腰椎画像例

SE TR : 500ms、TE : 25ms、4mm厚
撮像時間 : 3分44秒

FSE TR : 3500ms、TE : 112ms、4mm厚
撮像時間 : 3分44秒

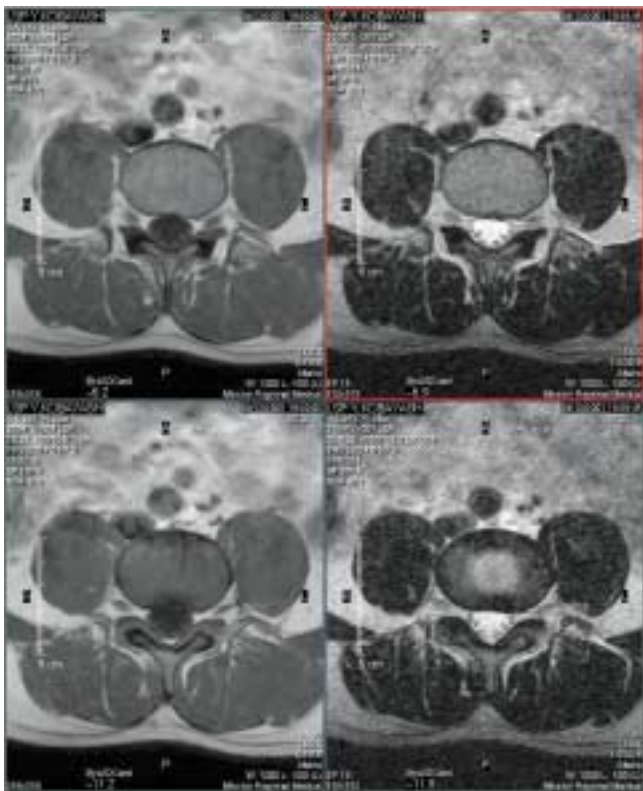


図 6-h : 腰椎軸横断

SE TR : 500ms、TE : 15ms、4mm厚
撮像時間 : 6分24秒

FSE TR : 4000ms、TE : 112ms、4mm厚
撮像時間 : 3分44秒

5. 考察

超電導型オープンMRIは過去に類を見ない、非常にワイドでオープンなガントリー構成を採っており、被検者にやさしい診断装置を提供できた。この装置の開発にあたり、幾つかの技術的ハードルがあった。

第1には、これだけ大型の垂直磁場型超伝導MRIはこれまでの技術を革新する開発であり、新しい経験が多い製品であった。この超電導磁石は、垂直磁場を採用しているため、超電導コイルを納めるCryostatが上下に分割されて対向し、S極、N極を構成し、強い電磁気力が発生するため、この電磁気力に持ちこたえるだけの強度を備えている必要がある。

第2に、オープンな磁石構造を損なわず、高強度、高Slew Rateの傾斜磁場を発生する傾斜磁場コイルの開発である。この傾斜磁場コイルには、前後非対称のCryostat内で渦電流の影響を最小限に抑えることが要求される。そこで、上下に分割された平板型で初めてActive Shielded傾斜磁場コイルを開発した。これにより、画質に影響する渦電流を抑制できたので、さまざまなパルスシーケンスのパラメータを自由に選択してもアーチファクトの無いクリアな画像を得るとともに、今後臨床に適用される新しいアプリケーションにも対応できる拡張性を持たせることができた。

第3に、メンテナンス性である。上下に分割されたCryostatは表面積や超電導磁石支持構造により、従来型の超電導磁石に比べ熱進入が多くなる。He冷凍機は冷凍能力の優れた3段GM式冷凍機を採用した。これにより、時間当たりのHe消費量は0.02ℓ/時以内を実現できた。これは、年間のHe消費量は200ℓ以内を意味し、年1回程度のHe注入を実現した。

6. おわりに

垂直磁場超電導MRI Altaire(0.7T)を開発し、オープン構造で高画質、高機能の装置を実現できた。当社が中低磁場垂直磁場MRIで培ってきた技術が有効に適用でき、水平磁場1.0T並以上の画質を得ることに成功した。今後、高磁場オープンMRIを有効に活用できる、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いきたい。