

超電導磁石方式 1.5T MRI システム ECHELON Vegaの開発

Development of 1.5T Super-conductive Magnet MRI System ECHELON Vega

中西 彰¹⁾ Akira Nakanishi
齊藤 安正¹⁾ Yasumasa Saitoh
磯部 正幸²⁾ Masayuki Isobe
堂本 拓也³⁾ Takuya Domoto

川崎 真司¹⁾ Shinji Kawasaki
井上 和明¹⁾ Kazuaki Inoue
山田 光良²⁾ Mitsuyoshi Yamada
高橋 哲彦⁴⁾ Tetsuhiko Takahashi

¹⁾株式会社日立メディコ MRシステム本部
²⁾株式会社日立メディコ ソフト開発本部
³⁾株式会社日立メディコ パワーエレクトロニクスセンター
⁴⁾株式会社日立メディコ 技術研究所

新型操作卓に高機能アプリケーション搭載した1.5T 超電導磁石方式MRIシステム ECHELON Vega^{*1}を開発した。

日立メディコの“ペイシェントフレンドリー”のコンセプトを維持、強化するため、ショートボア磁石を採用、ガントリーデザインおよびカラーリングに工夫し開口部を広くとって被検者の圧迫感を軽減した。高傾斜磁場強度、高Slew rateの傾斜磁場システム、2.5MHzサンプリング・8チャンネルRFシステム、超高速画像処理装置、および全身イメージング対応の長ストローク寝台を標準仕様とし、DWI、拡散テンソル(FA)、造影Perfusion、遅延造影、心筋Perfusion、全身MRI/MRAおよびSpectroscopyと多くの機能を搭載した。

テーブル上でのコイル接続および自動認識方式を採用するなど、実用性が高く操作性にも優れたMRIシステムである。

A 1.5T super-conductive magnet MRI system ECHELON Vega^{*1}, which incorporates highly functional applications in its operation console, was developed.

To keep and fortify the concept of “Patient-Friendly” of Hitachi Medical Corp., the short-bore magnet was adopted, the gantry was designed on the comfortable coloring concept and for wider gantry aperture to alleviate examinee’s oppressive feeling. This new system features high gradient magnet field strength, high slew-rate gradient magnet field system, 2.5MHz-sampling 8-channel RF system, ultra-high-speed image processing unit, and a long-stroke bed compatible with whole-body imaging as standard specifications, and incorporates such various functions as DWI, Diffusion Tensor (FA), Contrasted Perfusion, Delayed Contrasting, Myocardium Perfusion, Whole-body MRI/MRA and Spectroscopy.

It is a system with high practicality and excellent operability due to the adoption of its new functions such as coil-connection and automatic coil recognition system on the patient table.

Key Words: MRI, MRI/MRA, Super-Conductive Magnet

1. はじめに

MRI装置は、オープン構造を生かした中・低磁場垂直磁場系と1.5T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系に大きく分類される。日立メディコは1996年にAIRIS^{*2}を発売、その設置性の良さ、オープン性から好評を得て、「オープンMRIの日立」と言われてきた。

一方、超電導水平磁場1.5T装置は、現状国内外の市場で主流となっていること、市場はさらに高磁場へと向かい今後

3T装置の飛躍的な伸びが予測されることから高磁場機の開発は必須の状況にある。

そこで、0.2Tから1.5Tまでのシステムラインアップをそろえることを目的とし、“ペイシェントフレンドリー”のコンセプトを維持、強化するとともに高機能アプリケーションに対応するハードウェアを搭載した1.5Tシステムを開発した。

2. システムの開発

システムの開発にあたり以下の開発方針を重視した。

- (1) “ペイシエントフレンドリー” のコンセプトの下、被検者に優しい検査環境を提供する。
- (2) 高機能アプリケーションをサポートし、かつ将来の拡張性に対応できるハードウェアとする。
- (3) 高機能アプリケーションを良好な操作性で支援するユーザーインターフェイス。充実したリモートメンテナンス機能を備える。

表1にECHELON Vega^{*1}の主要仕様を示す。

表1：ECHELON Vega主要仕様

ユニット	項目	仕様
マグネット	静磁場強度	1.5T 超電導水平磁場
	ヘリウム消費	ゼロボイルオフ
傾斜磁場	傾斜磁場強度	30mT/m
	スリューレート	150T/m/s
寝台	ストローク	2800mm(天板長2350mm)
画像処理	画像再構成	5,500イメージ/秒

磁石長150cmのショートボア、ヘリウムゼロボイルオフ磁石を採用、傾斜磁場強度、Slew rateともに高機能撮像をサポートできる仕様とした。RFシステムは標準8chを装備、将来最大32chまでの拡張を可能としている。高速画像処理は1.5T MRI市場の2倍以上の画像再構成速度を実現した。

2.1 磁石・ガントリー

図1にシステムの外観を示す。

Aperto^{**3}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、61cmと大きな内径を持つ送受信コイル(T/R Body Coil)を装備、またデザインを工夫することで開口を広くとり被検者の圧迫感を軽減した。

ボア内には照明、換気ブローを備え検査中の「居心地」の向上を図った。



図1：装置外観

2.2 寝台

設置性を損なわず全身スキャンが可能な寝台を目標とし、テーブル全長2350mm、天板移動距離2800mmの寝台を開発した。

全身スキャンには長いストロークが必要であるが、従来の寝台の天板は本体内のチェーンやベルトなどの駆動機構に連結されているため、駆動機構の全長を超える移動はできなかった。すなわち従来の構造で天板移動距離2800mmを実現しようとする、テーブル本体は2800mm以上が必要であった。しかし、設置性を考慮すると寝台長は短いことが望ましい。そこで、Apertoなどの従来装置と同じ全長2350mmのテーブルで、目標とする天板移動距離2800mmを実現するため2段構造天板を開発した。図2に今回開発した2段構造天板の構造を、展開した状態の立体図で示す。2段の天板と寝台本体はベルトで連結され、下天板を駆動することで、同時に上天板も駆動する構造である。この2段構造天板により、全長2350mmのテーブルで、2800mmの天板移動を可能にした。



図2：2段構造天板

2.3 傾斜磁場システム

本傾斜磁場発生系の特徴は、マルチレベルインバータ方式アンプを採用して高出力電圧と高速スイッチングの両立を実現したことにある。マルチレベルインバータ方式は、新幹線などの鉄道用インバータにおいて実績があるが、GCアンプのような高い精度が要求される電流アンプなどの分野での実績はなく、本開発において最大傾斜磁場強度30mT/m、最大Slew rate 150T/m/sを達成できた。また、より小型化を実現するため、水冷方式を採用した。

図3にGCアンプ全体の回路構成を示す。GCアンプはX、

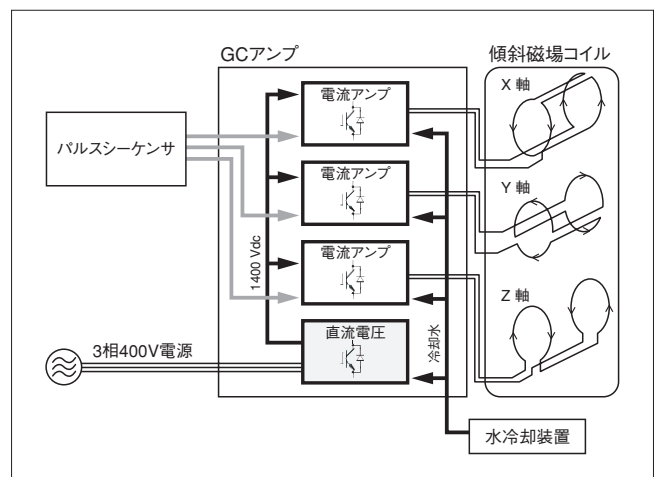


図3：GCアンプ全体構成

YおよびZ軸の傾斜磁場コイルにそれぞれ電流を供給する3つの電流アンプ部と1400Vの直流電圧を生成する直流電源部とで構成される。

2.4 画像処理ユニット

新型画像処理装置を次の仕様により開発した。

- (1) 画像再構成スピード5500枚/秒
- (2) ISCへの対応
- (3) パラカルエラーの排除
- (4) Acquisition Plan機能への対応
- (5) プリスキャン高速化

図4に簡単な構成図を示す。

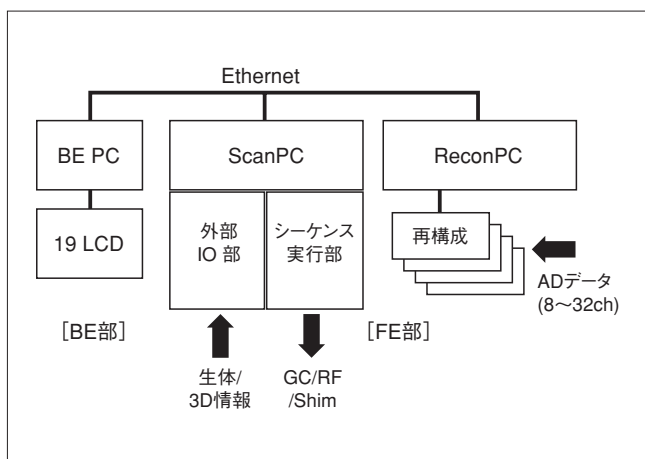


図4：画像処理ユニット構成

FE部とBE部の独立性を向上させ、さらにFE部はパルスシーケンスをコントロールするScanPC部と再構成をコントロールするReconPC部の2つのパートで構成し、それぞれのプログラム開発の容易性を向上した。ScanPC部は、高速シーケンスの実行可能な半自走式のシーケンス実行部、心電などの生体情報やIVRを行うための3D情報を収集する外部IO部からなり、画像撮像中に外部情報をもとにシーケンスを高速に切替え、実行する機能を備える。ReconPC部は、チャンネルごとに再構成を行うスケーラブルな再構成部(標準8ch、最大32ch)と、MAC合成、ポスト処理を行うReconPCからなる。また、各パートに独立したCPUを搭載することで、最大負荷においてもパフォーマンスの低下が起こらないように設計した。

BE部は、FE部とEthernet^{*4}で接続し、シーケンス情報や再構成した画像などを転送する。BE部は、ユーザーIF用のコンソールで、スキャン条件の設定、スキャン実行、画像の表示、MIPなどの後処理、アーカイブ(DVD-RAM)などを行う。BEソフトウェアは他のモダリティに適用できるように配慮した設計となっている。

2.5 RFシステム

RFレシーバ部は8chを標準装備とし、高倍速Rapid撮像を可能とした。チャンネルごとに、16bit/2.5MダイレクトデジタルサンプリングのADコンバータを備え、最大バンド幅

700kHzの高速信号を処理可能である。

また将来の多チャンネルコイルをサポートするため、RFレシーバ部は高密度実装しており、同一筐体内に最大32chまで拡張できるよう設計した。

操作性を考慮し、被検者の体位などに応じて天板上の6箇所のコネクタを自由に使用できるようにした。この機能を実現するため、コントロール部はコイル種類、コネクタ位置の自動認識を行い、6箇所(計48ライン)のデカップラー電流出力制御、受信ライン切替え制御を自動で行う。32ch時には、天板上の4箇のコネクタを任意の位置に接続して撮像を行う。

送信部は、デジタル制御(周波数/位相/振幅)されたRFパルスを最大出力20kWのRFパワーアンプにより照射を行う。

安全面では、被検者に吸収されるRF電力を自動計測する機能を搭載した。これにより、SARの自動計測が可能となり、被検者の安全を確保したうえで、装置性能を最大限に引き出す高速シーケンスでの撮像が可能となった。

3. 新型コンソールとソフトウェア

ECHELON Vegaは、当社で初めてのMMC(Multi Modality Console：マルチモダリティコンソール)を採用し、将来的なステップアップにも対応した、これまでとまったく違った新しい環境をユーザーに提供する。

- (1) 操作性に優れたユーザーインターフェイス。
- (2) XEON^{®5} Dual プロセッサ搭載による、高速な画像処理と快適な操作性の両立。
- (3) MAC(Multiple Array Coil)に最適化された並列再構成演算ユニットによる、最大再構成速度5500枚/秒という高速な画像再構成の実現。
- (4) イン트라ネット、インターネットなどネットワーク環境との高い融合性。

以上の高いポテンシャルは、今後展開される超高速撮像や高度な画像再構成などの高機能アプリケーションにも、十分対応可能となっている。

図5に、新型コンソールの構成図を示す。MMC対応新型コンソールは、イントラネットとは別に、ローカルに用意されたネットワーク接続を基本とした、ユーザーインターフェイスユニットと計測制御および画像再構成演算ユニット間接続形態をとる。このため、コンソールの設置場所を選ばず、柔軟

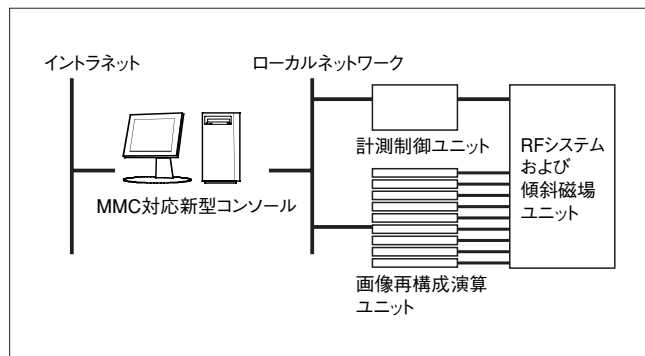


図5：ECHELON Vega用新型コンソール構成

な設置を可能とする。

ECHELON Vegaは、以下に示す新しいユーザビリティ向上機能を提供する。

(1) Acquisition Plan 機能

T1、T2、FLAIRなど、決まったルーチンの複数の撮像に対して、一度のスタートボタン押下で実行を可能とする。また、これらの撮像をひとつにまとめて保存・読み込みといった管理が可能。

(2) Suggestion 機能

他の撮像条件の制約により、入力した撮像条件が設定できない場合、代替となるいくつかの選択枝をユーザーに提示する。ユーザーは、この中から目的にあったものを選択することができる。また、選択枝を出さず、自動的に優先的な代替撮像条件を設定することもできる。

(3) リモートメンテナンス機能

ブロードバンドを用いた24時間監視機能や自己診断機能により、高いメンテナンス性とセキュリティの両立を実現する。

以上の新しいコンセプトによる機能は、ユーザビリティの向上を可能とし、結果的として患者スループットの向上を実現する。

また、計測機能は、以下の機能が新しく開発された。

(1) 最適化傾斜磁場パルスデザイン機能

多種多様な撮像条件に、より最適な傾斜磁場強度とSlew rateを選択し、パルスをデザインすることで、最小限の動作音とdB/dtを実現した。

(2) 静音化モード

さらに、静音を求める場合、傾斜磁場強度とSlew rateを絞り、音圧を大きく下げた静音性を実現するモードを選択可能である。

画像アプリケーションは、コンベンショナルなT1、T2、FLAIR、TOFはもとより、DWI、RAPID、BASG、さらには、MR Spectroscopyといった、機能診断用シーケンスを装備している。

4. 画像例紹介

本開発のECHELON Vegaおよび海外仕様機の画像例を以下に紹介する。

図6に頭部ルーチン画像を示す。同図(a)はT1強調画像、(b)はT2強調画像、(c)はFLAIR画像、(d)は3D TOF MRAの例である。特にT2強調画像はParallel Imagingを併用し1分49秒で画像を得ている。3D TOF MRAは6分強で末梢まで良好に描出されている。

1.5T装置では既にルーチンとなっているDWI(Trace)およびADC mapを図7に示す。b=0の他に直交3軸にMPG(b値=1000)を印加している。計測マトリクスは128を用いている。

図8はC-spine コイルを用いて撮像したC-spineのT1強調画像(a)およびT2強調画像(b)である。T1強調画像は2分40秒、T2強調画像は2分55秒でそれぞれ3mm厚の画像を得ている。広い領域で均一な信号強度が得られていることがわかる。

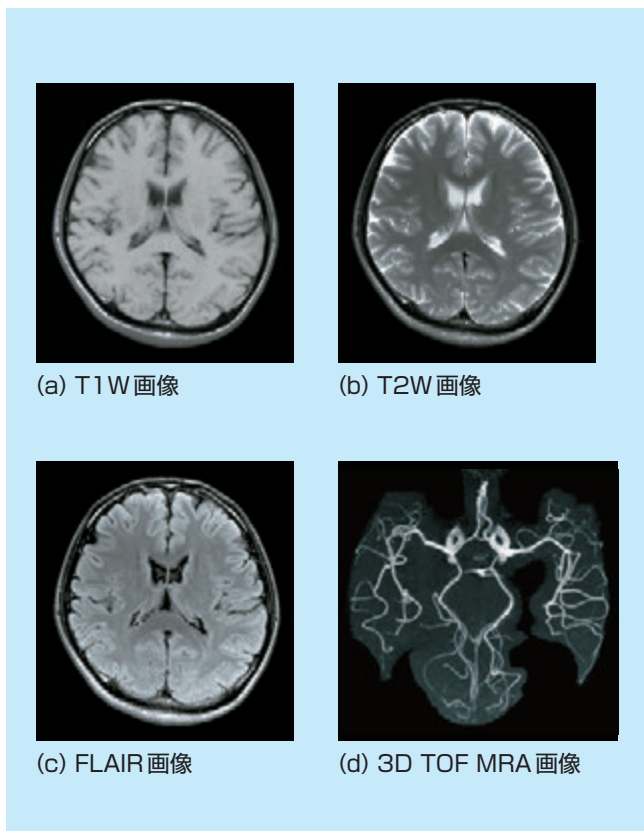


図6：頭部ルーチン画像

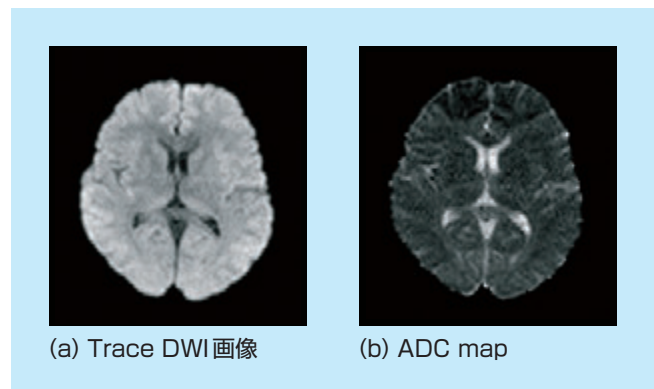


図7：頭部画像

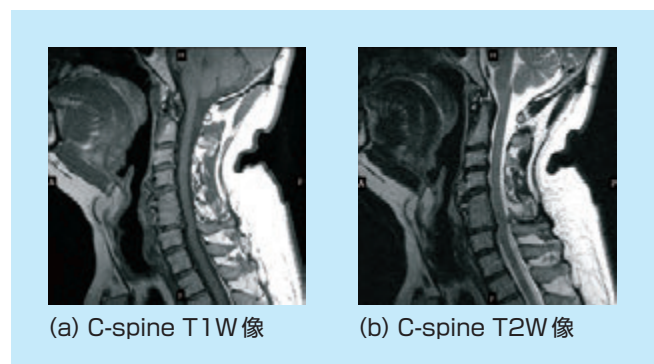


図8：頸椎のC-spine画像

図9はT-spineの画像である。同図(a)はT1強調(2分40秒)、(b)はT2強調(3分10秒)である。独自に開発したCTLコイルを用い、それぞれ340mmの領域を320×320のマトリクスで撮像している。スライス厚は3mmとしている。広い領域の脊髄が一度の撮像で得られている。

図10は肩の画像例である。同図(a)は3mm厚のSagittal T1強調画像で分解能は0.5mmである。同図(b)はAxial T2*画像、同図(c)はAxial プロトン密度像(脂肪抑制)である。

図11は専用Wrist コイルを用いた手首のCoronal断面である。同図(a)はT1強調画像、(b)はT2強調画像でありそれぞれ

2分50秒、2分32秒で分解能0.4mmの画像を2.5mm厚で得ている。

図12は膝の画像である。膝用Multiple Array Coilを用いた。同図(a)は3mm厚のT2強調画像(2分12秒)、(b)は脂肪抑制プロトン密度画像(3分13秒)である。同図(c)は分解能0.5mm、3mm厚のT2*強調画像である。微細な構造や関節軟骨が良好に描出されている。

図13はBreastコイルを用いた乳房画像である。同図(a)はAxial T2強調画像(1分57秒)、(b)は脂肪抑制T1強調画像である。

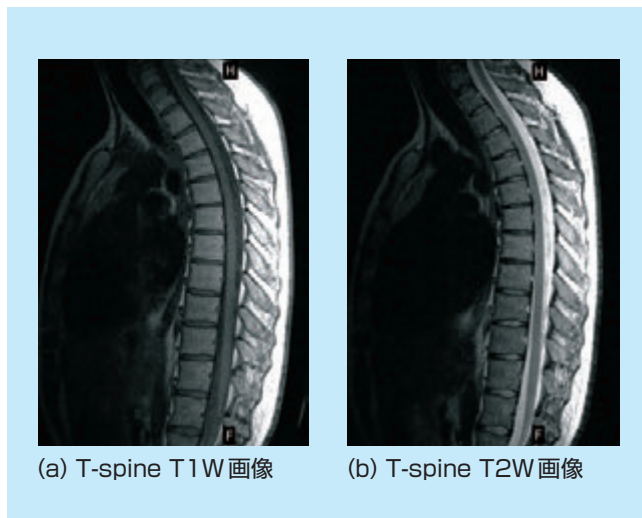


図9：脊髄のT-spine画像

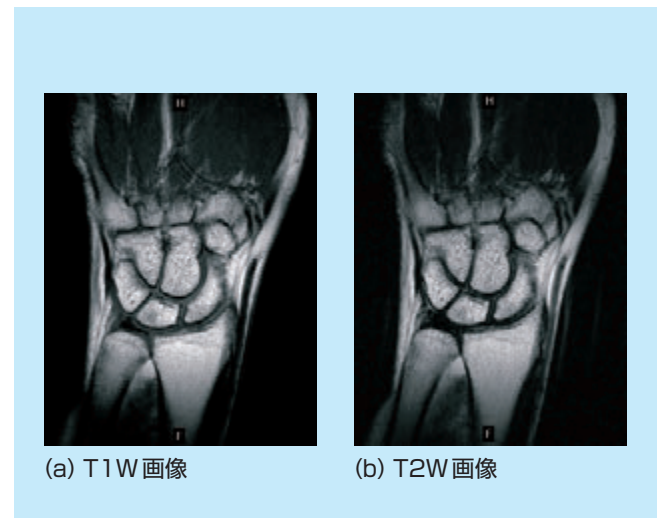


図11：手首のCoronal画像

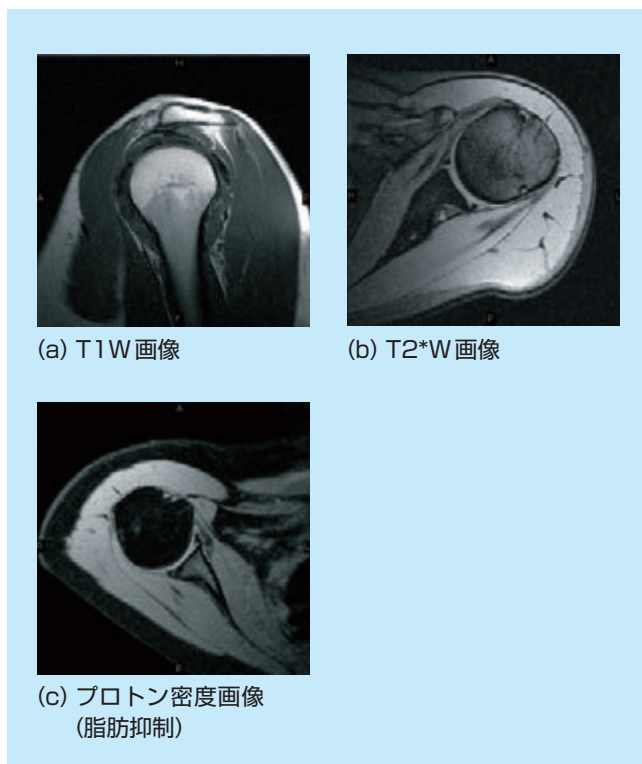


図10：肩の画像

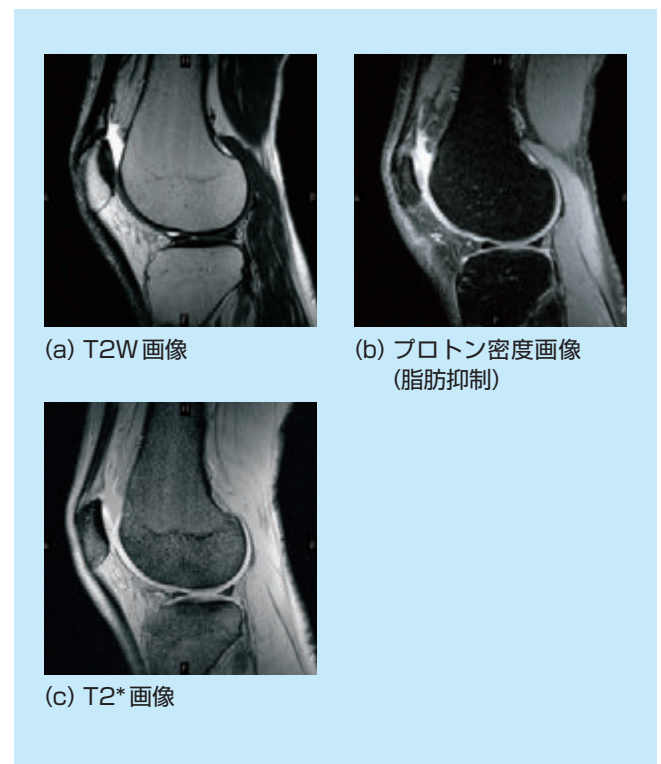


図12：膝の画像

図14は冠状動脈画像である。心電同期を用いたBalanced SARGEシーケンスと脂肪抑制法の組み合わせにより冠状動脈を良好に描出している。

図15はMR Spectroscopyの解析画面例である。臨床の場で徐々にその重要性を増しているMR Spectroscopyにも対応している。

以上、ECHELON Vegaは今日1.5T装置に求められる画質と基本機能は十分に達成していると言える。

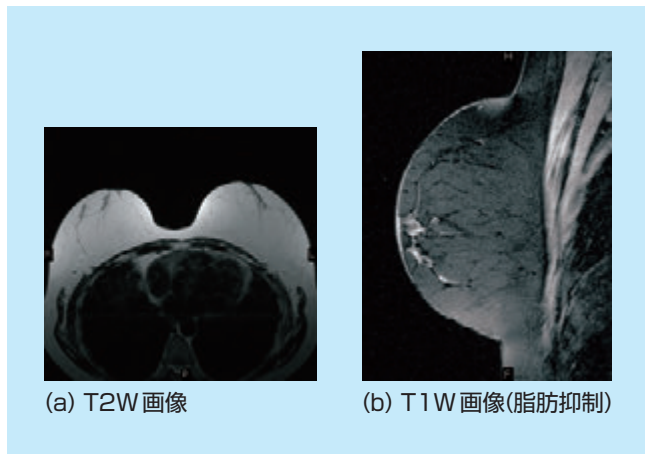


図 13：乳房画像

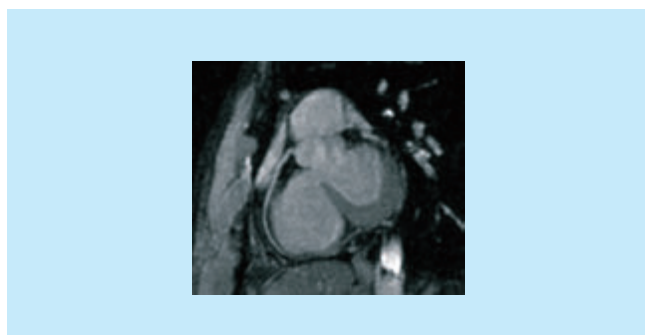


図 14：冠状動脈画像

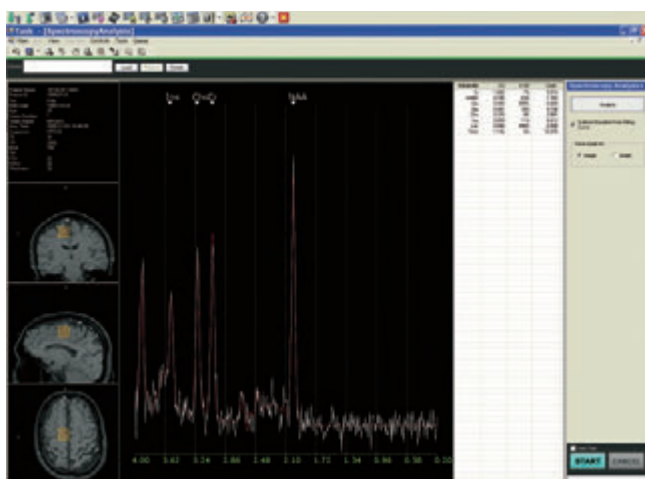


図 15：MR Spectroscopy 解析画面例

5. まとめ

MRI市場における高磁場化の傾向はますます強くなりつつあり、超電導磁石方式のMRI装置の開発は必須の状況で新型1.5T装置の開発を行った。

磁石をはじめ、画像処理を含むすべてのハードウェアおよびソフトウェアを一新することはこれまでに経験の無い開発であり、多くの技術的ハードルがあった。その中で標準構成において全身撮影に対応し、多チャンネル化されていくコイルをサポートして大量の画像データを高速処理するハードウェアを備え、操作性に優れた高画質・高機能アプリケーションの1.5T超電導磁石方式MRI装置を開発することができた。また高画質化における1.5T特有のアーチファクトの低減技術の開発は中・低磁場では経験の無いもので、今後の高磁場開発における礎となる技術である。

今後、実際の臨床の場での使用において操作性の良い、実用性の高い装置であることが認められ、多くの医療機関で広く使われることを希望する。

※1 ECHELON Vega、※2 AIRIS、※3 Apertoは株式会社日立メディコの登録商標です。

※4 Ethernetは富士ゼロックス株式会社の登録商標です。

※5 XEONは米国Intel社の登録商標です。