

ゼロヘリウム MRI を含めた新技術について

富士フイルムメディカル株式会社
MS 事業部 営業技術部 市川 真仁

1. はじめに

現在、主に永久磁石タイプ、超電導タイプの MRI が稼働しているが、従来の超電導タイプである MRI システム ECHELON Smart では、必要な磁場を維持するために磁石を極低温に保つ必要があり、その冷媒として多量の液体ヘリウムを用いる。ヘリウムは産業や科学分野において多様な用途で使われる天然資源で、地球上にわずかな量しか存在しないため、需要に対して供給が安定せず確保が難しい状況にある。一般的な超電導 MRI システムは、何らかのトラブルで磁場が消失した場合に備え、液体ヘリウムの気化により発生する多量のヘリウムガスを屋外に安全に排気するための排気管を設置する必要がある。そのためユーザは、天井裏などに排気管の専用スペースの確保が必要となっている。また、超電導 MRI システム ECHELON Smart は、液体ヘリウムの取り扱いに注意を要するため、磁性体の吸着事故が発生した場合、専門のサービス員に復旧作業を依頼する必要があり、ダウンタイムが発生する。これらの理由により、近年、液体ヘリウムを使用しない超電導 MRI システムに対するニーズが高まっている。

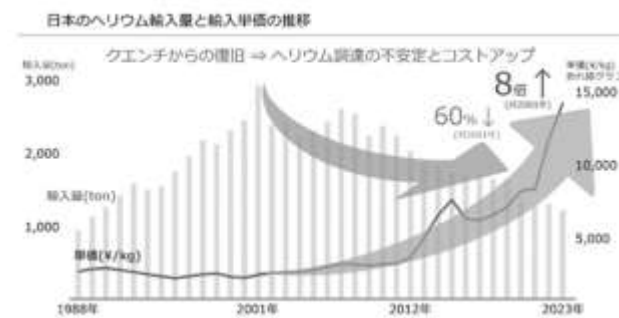


図.1 日本のヘリウム輸入量と輸入単価の推移
(財務省貿易統計より作成)

2. 液体ヘリウムを一切使用しない完全ゼロ液体ヘリウム^{※1}を実現した「ECHELON Smart ZeroHelium」誕生

「ECHELON Smart ZeroHelium」は、液体ヘリウムを一切使用しない完全ゼロ液体ヘリウムを実現した 1.5T 超電導 MRI システムである。「ECHELON Smart ZeroHelium」は、意図せず撮影室に持ち込まれた磁性体による吸着事故が発生した場合にも、専門のサービス員に依頼することなくユーザ自身が復旧作業を行うことが可能となっており^{※2}、検査再開までのダウンタイムを削減して安定稼働に貢献できる。また、ヘリウム排気管の設置が不要なため、天井高の低い部屋や排気管を設置できない高層ビルの一室など、制約のある場所への設置性を向上した。



図.2 ECHELON Smart ZeroHelium

3. 装置の特長について

ここでは、「ECHELON Smart ZeroHelium」に搭載された特長について記載する。

特長 1 液体ヘリウム使用量ゼロへ

水平磁場超電導磁石は液体ヘリウムを全く使わずに冷却されており、液体ヘリウムの使用量は 0L である。従来と同じ圧縮機、冷凍機からなる冷却系統は同様に存在しており、この冷却系統によって得られる低温を、従来の冷媒としての液体ヘリウムに換えて、極低温を効率良く伝達する熱伝導部材を使用し、適切な温度分布となるように磁石を冷却する磁石構造を採用することで、液体ヘリウムを全く使わずに超電導状態を形成する。



図.3 ECHELON Smart と ECHELON Smart ZeroHelium の概要

特長 2 予期しない医療リスクの低減（クエンチ、ダウンタイム）

液体ヘリウムを全く使用していないので、クエンチ現象における液体ヘリウムが急速に蒸発し、ヘリウムガスへと気化し、爆発的なヘリウムの放出されることで白い濃霧を引き起こす現象は発生しない（Zero クエンチ）。そのため、クエンチによる復旧にかかるダウンタイムやコストを抑えることができる。また、液体ヘリウムの入手可否に影響されることなく MRI 検査を提供することが可能である。停電した場合、もしくはユーザが緊急ではないが意図的に磁場を消失させたい場合においても、冷却に要する時間を除くと、最大でも 120 分にて撮像可能な状態に戻すことが可能となっている。図.4 でも示すように、静磁場強度が励磁後に正しく 1.5T まで上がっているか、また、静磁場の均一性は消磁前と変化はないかということを確認しており、消磁から励磁をした後に、負荷のかかるシーケンスを 10 時間以上撮像し続け、マグネット自体の温度上昇がないことも確認できているため、励磁した後は磁場調整を行う必要がない^{注 1)}。この様な特長を有する「ECHELON Smart ZeroHelium」によって画像診断情報をより多くの地域へ提供し、予期せぬダウンタイムをより抑えることを目指す。

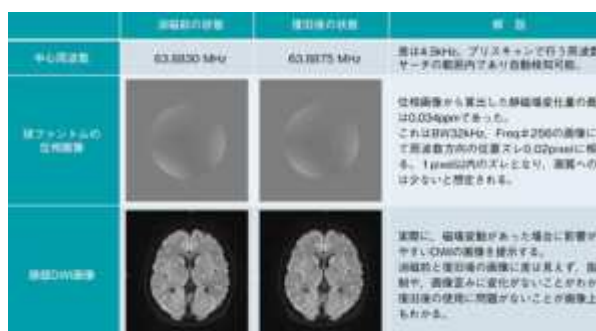


図.4 消磁前と励磁後（復旧後）の中心周波数お

び MR 画像の比較

特長 3 自由度の高い設置、メンテナンス性

従来の超電導 MRI システム ECHELON Smart ではヘリウム排気管や、酸素濃度計、緊急排気設備の設置が必要であったが、ZeroHelium 磁石では、ヘリウムガスが放出されないため、それらの設備をガントリが置かれる部屋に設置する必要がない。また、従来の超電導磁石では意図しない熱侵入を抑制するため、励磁、消磁時のみに作業者がチャージングリード^{※4}を磁石内に挿入する必要があったが、ZeroHelium 磁石では、チャージングリードは磁石内に蔵されているため、励磁、消磁の時にチャージングリードを人が抜き差しする必要が無く、チャージングリードを抜くための天井高さを低くする事が出来る。これらにより、設置の制約とコストを減らすことが可能である。



図.5 自由度の高い設置性、メンテナンス性

特長 4 高速化、高画質化（ソフトウェア:ORIGIN9）

高速化や高画質化を実現するソフトウェア ORIGIN 9 では、アンダーサンプリングにより撮像時間を短縮し、IP-RAPID による繰り返し再構成でノイズやアーチファクトを低減している。さらに Deep Learning 技術を活用して開発した Deep Convolution Neural Network (DCNN) を画像再構成技術に組み込んだ Synergy DLR^{※3}により、さらなるノイズの除去を行い、より診やすい画像を導き出す。IP-RAPID と Synergy DLR を組み合わせることで、画質を維持したまま撮像時間を短縮したり、撮像時間を維持したまま高精細画像を得ることが出来る。

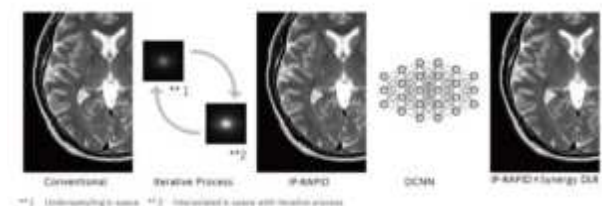


図.6 IterativeProcess と Deep Learning^{※3} を活用したノイズ除去技術

特長 5 自動化（ソフトウェア：ORIGIN9）

自動化を実現する機能として、撮像の条件設定や撮像位置決め（AutoPose Brain^{※5}）、頭部 MRA のクリッピング画像を自動で作成する画像処理（AutoClip 処理^{※6}）、画像表示、画像保存、画像転送の機能をまとめて登録することにより高度な自動化を実現し、ワンクリックによる頭部検査実施を可能とする機能（AutoExam^{※7}）も搭載されている。これにより撮像位置決め（AutoPose）後の本撮像開始までの時間をユーザが任意に設定可能で、その間に位置決めの微調整や、操作者が任意で、撮像の停止・修正・再開も可能となっている。

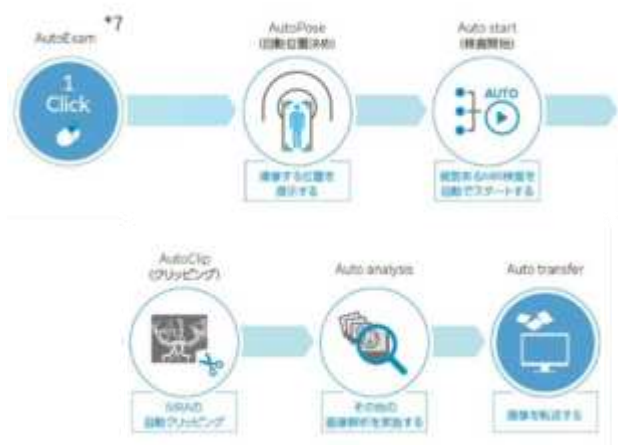


図.7 AutoExam Brain

特長 6 撮像位置決め（AutoPose Brain）

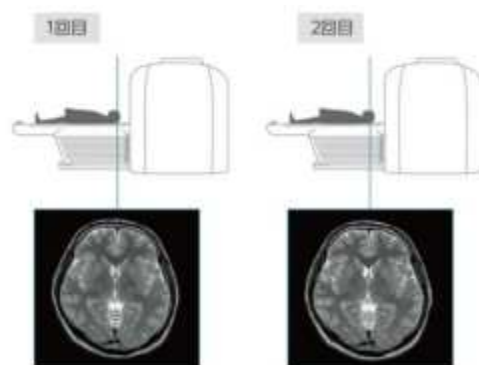
撮像位置を決めるために予め専用の撮像を高速に実施し、撮像された画像から特徴点抽出を行い、頭部部位の特定の断面位置の情報を操作者に提示する機能である。操作者に提示した位置に天板の自動送りや、ユーザが断面位置と角度を、設定画面を使用して事前に最大 5 断面設定可能となっている。複数の設定断面のどの位置を撮像に使

用するかはユーザが撮像パラメータで設定することができ、撮像位置を決めるための専用撮像終了後に、AX/SAG/COR 断面の撮像位置を同時算出する。算出した撮像位置を示すラインを、位置決めの画面に表示する機能である。図.8 a)

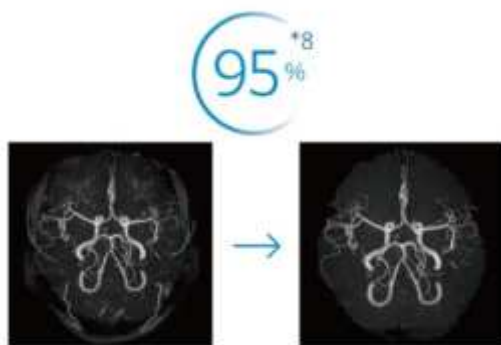
特長 7 頭部 MRA のクリッピング画像を自動で作成する画像処理（AutoClip 処理）

AutoExam を実施したときに頭部 MRA 画像のクリッピング画像を自動で作成するデジタル画像処理機能である。特徴量に基づいて、入力データから抽出対象を識別し、クリッピング画像の 95% は手動修正なしで MIP や VR 処理可能となっている。AutoClip 処理を使用しないで手動でクリッピングした場合と自動クリッピングの場合を比べると、マウスクリックの回数は最大 100% 減少することができる（0 回になる）。

AutoClip 処理では、脳および血管の抽出マスク算出を行う。算出した 2 つの抽出マスクを統合し抽出対象を識別し、抽出マスク算出は、あらかじめ決められた閾値が用いられている。この閾値を用いて入力画像データに対して演算処理を行うことで、抽出対象を識別することができる。自動クリッピング処理後の画像に対し、表示画面上でユーザは確認を行い、MIP タスクを用いて、追加で手動クリッピング処理を行うことが可能となっている。（図.8 b）



a) AutoPose Brain



b) AutoClip 処理

図 8. 自動機能について

4. 新技術について

ここでは、ECHELON Synergy に搭載された新技術について記載する。

4-1. IQ Retouch

本機能は、撮像中に各チャンネルの画像や感度データ、補正用のデータを保存しておき、撮像後、出力された画像の再構成に関連するパラメータを変更して、再度画像を出力することができる。変更できる再構成に関連する特長的なパラメータを紹介する。



図 9. IQ Retouch の操作画面

4-1-1. DLR Clear

パラレルイメージング「RAPID 計測」で得られた画像に対して、畳み込み演算を活用した再構成処理を適用し、画質を維持しながら位相エンコード方向、周波数エンコード方向、スライスエンコード方向のサンプリング不足により発生するトランケーションアーチファクトを低減することで高画質化する画像処理機能である。

「SynergyDLR」を併用して 512 よりも大きな再構成マトリクスの高分解能撮像も可能で超解像 (Super-Resolution) とも呼ばれる。



図 10. DLR Clear の適用効果

4-1-2. DLR Rise

「RAPID 計測」で得られた画像に対して、畳み込み演算を活用した再構成処理を適用し、画質を維持しながらノイズを低減することで高画質化する画像処理機能。ノイズを低減する際に背景信号のノイズ分布を用いて画像を規格化することで安定したノイズ低減効果を得ることができる。繰り返し演算 (Iterative Process) を活用した再構成処理 (IP-RAPID) の併用も可能である。

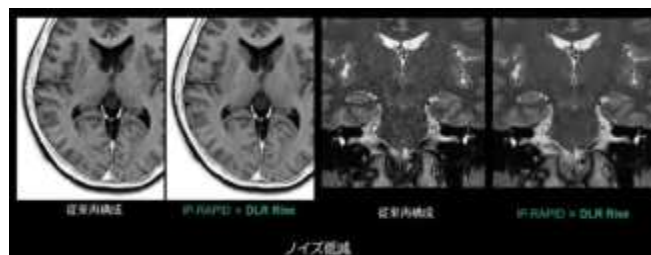


図 11. DLR Rise の適用効果

4-1-3. Exp. RAPID

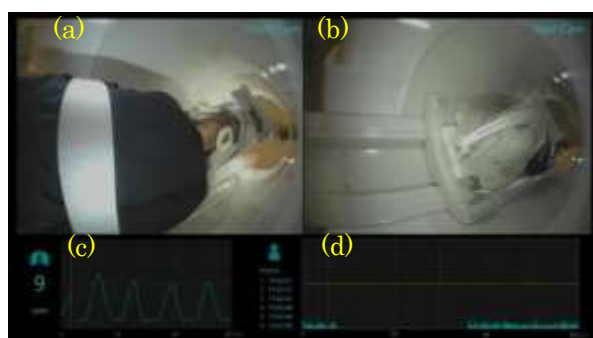
パラレルイメージングを用いた撮像で、位相エンコード方向の撮像視野サイズパラメータを誤って設定した場合、撮像視野外の信号が多重折り返しアーチファクトとして画像に残留する。本機能は、指定した再構成視野拡大率に応じてパラレルイメージングの再構成視野を拡大して画像再構成をやり直すことで、再撮像せずに多重折り返しアーチファクトを除去することができる。



図 12. Exp. RAPID の適用効果

4-2. Synergy Vision

AI 技術※3 を活用して開発した被検者の体動を検知する被検者監視システム「Synergy Vision」を搭載した。ボア内の前後に設置した2つのカメラにより被検者の状態を視覚的に観察することができる。また、体幹部の動きから呼吸の動きを推定し、呼吸動波形・回数も表示する。更に、被検者がガントリから抜け出してくるような大きな動きや咳などの小さな動きを検出し通知音と画面表示で通知することで、操作者に気づきを促し、体動によるアーチファクトの出現を予測する一助となりうる。



(a) フロントカメラ映像 (b) リアカメラ映像
(c) 呼吸動波形と呼吸数 (d) 体動情報



図 13. Synergy Vision の画面と大きな体動を感じた時の通知画面

4-3. StillShot

IterativeRAPID による繰り返し演算を活用した再構成処理で StillShot Mask により除外された部分が補間され、せき、くしゃみ、不随意運動、息止め不良といった動いた後に元の位置に戻る体動アーチファクトを低減できる。撮像時に体動を検出するためのナビゲーターパルス (Motion Navi) を印加し、基準値に対するナビゲーターエコーの値が一定の閾値を超えるものを除外するマスク (StillShot Mask) を作成する機能を Navigated StillShot、ボア内に設置されたカメラ2台の映像からボア内の体動を検出し、一定の閾値を超えるものを除外するマスク (StillShot

Mask) を作成する機能を Visual StillShot とよぶ。Visual StillShot と Navigated StillShot (カメラを用いない体動検出処理) は併用が可能である。

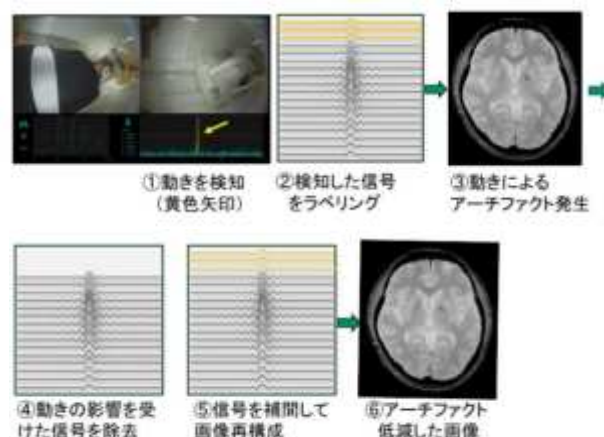


図 14. Visual Stillshot の概念図

- ※1 液体ヘリウムを一切用いずに超電導状態を維持できる。
- ※2 緊急時を除く。一部サービス員が必要な場合がある。
- ※3 AI 技術のひとつである Machine Learning を用いて開発した。導入後に自動的に装置の性能・精度が変化することはない。
- ※4 常温から極低温の超電導コイルに電流を導入する構造。
- ※5 最終的に操作者が提示されたスライス位置を確認し、必要に応じて手動で調整する。
- ※6 自動クリッピング処理後の画像に対し、最終的に操作者が表示画面上で結果を確認し、必要に応じて MIP タスクを用いて手動クリッピング処理を行う。
- ※7 検査・処理を自動で行うもので、診断を自動で行うものではない。操作者の確認が必要。
- ※8 手動修正なしで MIP や VR 処理可能な割合。検査状況によって異なる。

注 1) INNERVISION 2024 Vol.42 から引用

ECHELON Smart ZeroHelium は ECHELON Smart の新しい超電導磁石を搭載したモデルの呼称。

販売名：MR イメージング装置 ECHELON Smart
認証番号：229ABBZX00028000

販売名：MR イメージング装置 ECHELON Synergy
認証番号：305ABBZX00004000

ECHELON Synergy、StillShot は富士フイルムの登録商標。