

フィリップスが提供する持続可能な MRI の未来

松島 諒人^①、内海 一行^②

フィリップス MR モダリティセールススペシャリスト^①、シニアプロダクトマネージャー^②

BlueSeal の革新と MRI 技術の未来

はじめに

磁気共鳴画像診断装置（MRI）は、非侵襲的に体内の詳細な画像を取得できる画期的な技術として、現代医療において欠かせない診断ツールとなっている。しかし、従来の MRI 装置は、大量の液体ヘリウムを消費する構造となっており、ヘリウムの供給リスクやコストの問題が長年の課題とされてきた。こうした背景のもと、フィリップスが開発した BlueSeal は、当社の MRI 技術における一大革新をもたらした。本稿では、BlueSeal の登場に至る経緯と、従来の MRI 装置の課題、BlueSeal の技術的な特徴とそのメリット、そして将来的な展望について詳述する。

ヘリウムフリーMRI 登場の背景と BlueSeal

MRI 技術は 1970 年代に登場し、以降、技術革新とともに高精細な画像を提供できるようになり、医療分野での活用が拡大してきた。しかし、従来の MRI 装置にはいくつかの大きな課題がある。その中でも特に深刻な課題が、ヘリウムの使用に関するものである。

ヘリウムは、天然ガスの副産物として産出される希少な非再生資源である。世界的にヘリウムの供給量が減少しており、その価格は近年急激に高騰している（図 1）。特に MRI 装置はヘリウムの消費が大きく、世界中で約 50,000 台の従来型 MRI 装置が稼働していることから¹⁾、持続可能な MRI 運用のためにはヘリウム依存からの脱却が求められていた。

さらに、ヘリウムの供給不足により、MRI 装置の運用コストが年々増加しており、特に予期せぬヘリウム不足が生じた際には、MRI の稼働が一時的に停止してしまう可能性があるという問題も発生していた。

ヘリウムの枯渇が叫ばれる中で大きな課題がクエンチである。クエンチとは、超電導磁石が突如として常電導状態に戻る現象であり、この際に大量のヘリウムが気化し、一気に排出される。クエンチが発生すると、ヘリウムを補充しなければならず、その費用は高額になる。さらにクエンチ後の再稼働には数日を要し、その間 MRI 検査ができなくなる。また医療機関では MRI 検査の予約が多いため、ダウンタイムが長引くと経済的な影響も大きい。

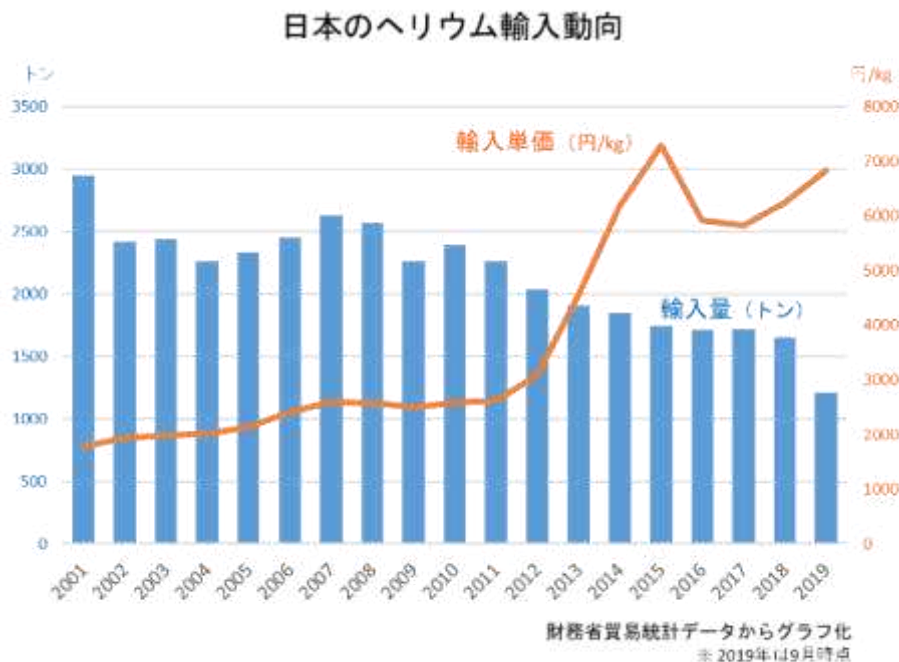
MRI 装置におけるヘリウムの消費は、環境負荷と MRI 検査の持続可能性の観点から問題視されている。ヘリウムの消費は持続可能な医療システムの構築を妨げる要因となっており、ヘリウムフリーMRI の開発が急務とされていた。

こうした課題を解決するために開発されたのがフィリップスのヘリウムフリーMRI 技術となる BlueSeal である。BlueSeal は、ヘリウム使用量を大幅に削減し、持続可能な MRI 運用を実現するための画期的な技術を採用している。

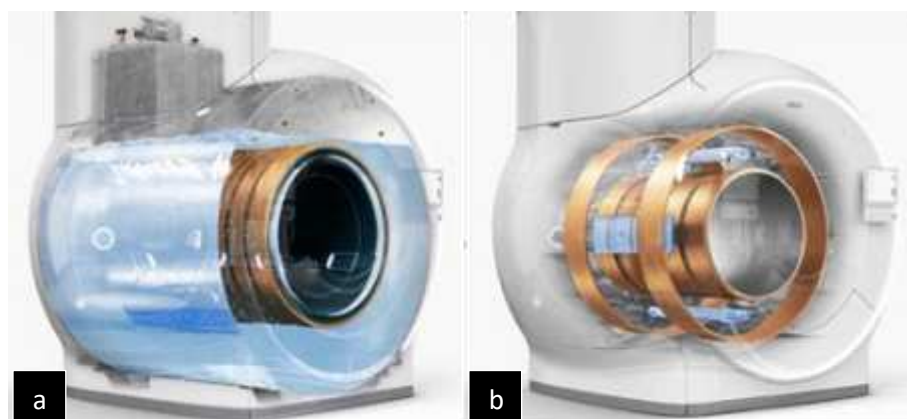
フィリップスが開発した BlueSeal は、従来の MRI 装置で約 1500 リットル必要とされていた液体ヘリウムをわずか7リットルで超電導磁石の冷却を維持できるように開発された（図2）。この技術の最大の特長は、密閉型設計によるヘリウムの封入である。従来の MRI 装置では、運用中にヘリウムが徐々に減少するため、定期的な補充が必要であった。しかし、BlueSeal は、製造時に封入された7リットルのヘリウムが永久に密閉された状態で維持されるため、運用中にヘリウムを補充する必要がない。また、ヘリウムが完全に密封されているため、クエンチが発生してもヘリウムが外部に漏れることがない*。これにより、液体ヘリウムが気化した場合においても、再度ヘリウムを冷却することで恒常的な超電導状態の維持が可能になる。

7リットルの液体ヘリウムで超電導状態を維持できる要因に新たに採用された Micro-cooling 技術の導入がある。BlueSeal は、従来型のプールボイル冷却ではなく、効率的な熱交換を行う Micro-cooling 技術を採用している。加えて冷却システムを最適化することで、最小限の液体ヘリウムでも超電導状態を維持している。

一方で静磁場の安定性は従来装置よりも向上し、均質な磁場を維持することで、高精細な画像を提供できる技術が組み込まれている（図3）。



(図1) 日本におけるヘリウム輸入量と輸入単価の推移



(図2) a、従来MRIの液体ヘリウム約1500リットル b、BlueSealの液体ヘリウム7リットル

BlueSealのメリット

前述のようにヘリウムは非再生資源であり、その供給は限られているため、価格が年々高騰しており、医療機関のコストの大きな負担となっていた。しかし、BlueSealは、わずか7リットルの密封型ヘリウムで磁場を維持できるため、ヘリウムの補充が不要になり、年間数百万円規模のコスト削減が期待される。またクエンチが発生してもヘリウムが漏れない密封構造を採用しており*、クエンチリスクの回避や装置停止による検査遅滞のリスクにおいて、より安全で効率的な運用が可能になる。

従来のMRI装置では、クエンチダクトの設置が必要であり、これが施設の構造上の制約となる場合があった。特に高層階や限られたスペースではMRI装置の導入が困難な場合があった。BlueSealはクエンチダクトが不要なため、設置の自由度が向上し、導入コストの削減にもつながる。また、ヘリウムの使用量を99%以上削減することで、環境負荷を大幅に低減し、持続可能な医療運用を実現する。

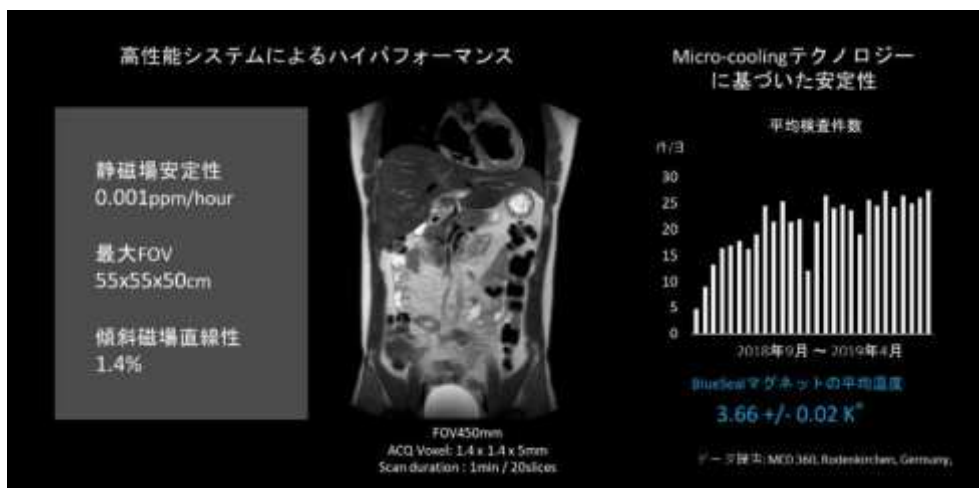
地震や停電などの災害時には、MRI装置の冷却システムが機能しなくなることで、超電導状態が維持できなくなり、ヘリウムが気化してしまうリスクがあった。特に東日本大震災時には、多くのMRI装置が被災し、ヘリウムの消失や運用停止が発生した。BlueSealでは、システムがダウンした場合でも、密封された7リットルのヘリウムが急激に蒸発することなく、一定時間の超電導状態を維持できる設計となっている。これにより、停電や緊急時にも短時間での復旧が可能となり、磁場が急激に失われるリスクを低減できる。この機能は、医療機関にとって緊急時のMRI運用継続において大きな利点となる。

またBlueSealにはEasySwitch機能が搭載されており、オペレーターが自ら装置の消磁を行うことが可能である。これにより、従来はメーカーの技術者が到着するまで待つ必要があったが、BlueSealでは災害時や緊急時に即座に対応が可能となり、また迅速な対応によりダウンタイムの短縮を見込みながら、安定した稼働によっていかなる場合も医療の提供に貢献できる。

フィリップスは、ヘリウムフリーMRI 技術のパイオニアとして、持続可能な医療技術の発展に貢献し続けている。BlueSeal マグネットを搭載した MRI 装置は、わずか7リットルのヘリウムで運用可能であり、従来の MRI 装置と比べて環境負荷を大幅に低減しながら、安定した高品質な画像を提供する。さらに、BlueSeal を搭載したすべての装置は 70 cm ボアを採用しており、広い開口径によりさまざまな臨床のニーズに対応できる設計となっている。

ヘリウムの補充が不要な密閉構造により、運用コストの削減やダウンタイムの短縮が可能となり、施設の効率的な運用にも貢献している¹⁾。これからの医療において、環境に配慮した技術の導入は避けて通れない課題である。フィリップスは、その最前線で革新を続けることで、持続可能な未来を築きながら、より多くの患者に質の高い医療を提供することを目指している。今後も、ヘリウムフリーMRI のリーディングカンパニーとして、さらなる技術革新を進め、医療の現場に貢献していく。

*稀なケースとして、マグネットの密封が損なわれた場合でもヘリウムの量はわずかであるため、漏れたヘリウムが室内の酸素レベルに影響を与えることは実質的にありません。



(図 3) BlueSeal によるハイパフォーマンス

MRI 撮像技術の進化と次世代高速化技術「SmartSpeed」

MRI は、人体の詳細な内部構造を非侵襲的に撮像できる医療技術として広く利用されている。その優れたコントラスト分解能や軟部組織の描出能力により、多くの疾患の診断や治療計画に貢献してきた²⁾。しかし、MRI は撮像に時間を要するという課題があり、高画質を維持しながら撮像時間を短縮する技術の開発が求められてきた。

MRI 検査の高速化は、診断の迅速性や患者の快適性を向上させるだけでなく、医療機関の検査効率を高める重要な要素となる³⁾。特に、救急医療や小児科領域では短時間での撮像が求められるケースが多く、高速化技術の発展は臨床現場において不可欠である。本稿では、MRI の高速撮像技術の進化を概観し、AI 技術を統合した次世代高速化技術「SmartSpeed」について詳しく解説すると共に SmartSpeed へ継承された、これまでの高速撮像技術を説明する。

MRI の高速撮像技術の発展

並列イメージング技術 (SENSE)

SENSE (Sensitivity Encoding) は、受信コイルの複数のチャンネルを利用し、撮像時間を短縮する技術である²⁾。通常、MRI では k 空間の情報を一つずつ収集するが、SENSE では受信コイルごとの感度情報を活用し、取得するデータ量を削減しながら正確な画像を再構成できる。この技術により、撮像技術の高速化が実現した。

また、SENSE の技術は多チャンネル化の進展とともに発展し、高分解能の画像を短時間で取得できるようになった。臨床応用としては、脳神経疾患の診断や腹部検査など、多様な分野で有用性が認められている³⁾。

圧縮センシング (Compressed SENSE)

Compressed SENSE は、画像のスパース性 (冗長な情報が少ないこと) を活用することで、必要なデータ量を削減しながら高品質な画像を再構成する技術である⁴⁾。圧縮センシングのアルゴリズムにより、欠損したデータを補完することで、撮像時間を短縮しながらも高画質を維持できる。従来の SENSE と比較して、さらに撮像時間を 50% 短縮できる可能性がある⁴⁾。

この技術は特に、心臓や血管系の画像取得において有効であり、リアルタイム性が求められるダイナミック MRI などにも応用されている⁴⁾。また、小児や高齢者など、長時間の撮像が困難な患者にとっても大きなメリットがある。

高速化のための統合プラットフォーム

これらの技術を基盤にししながら、MRI の高速化をさらに進めるために統合型プラットフォームが開発された⁵⁾。AI 技術の活用により、データの最適化とノイズ除去を自動化し、従来技術と比較してより短時間で高品質な画像を取得することが可能となった。

特に、近年のディープラーニング技術の進展により、画像の再構成過程が劇的に向上している。AI を活用した再構成技術では、従来の物理モデルを超えた高精度なノイズ抑制が可能となり、さらなる高速化と高画質化が両立するようになった⁶⁾。

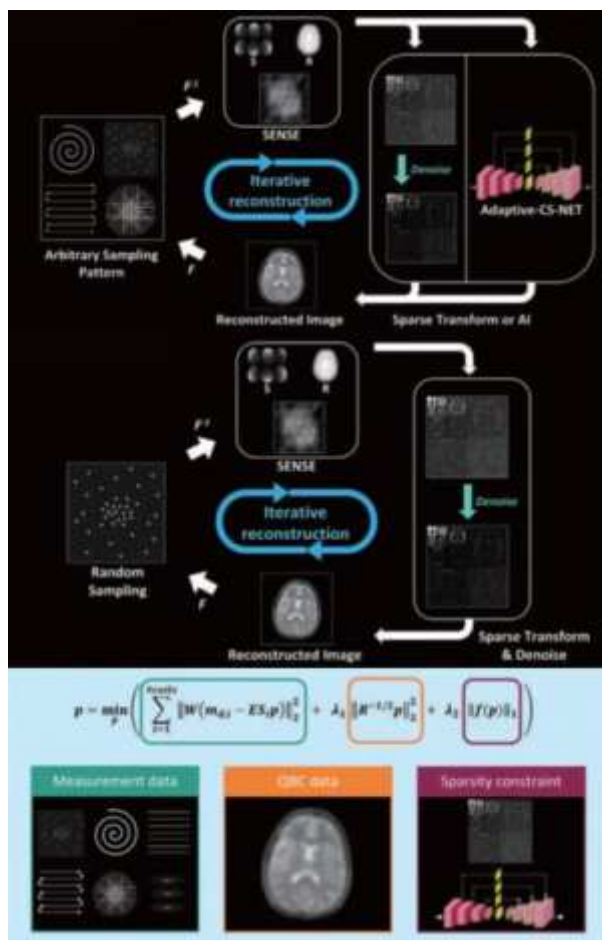
次世代高速化技術「SmartSpeed」の特徴

SmartSpeed は、SENSE や Compressed SENSE の技術を統合し、AI を活用することで、MRI 撮像の高速化と高画質化を両立する次世代技術である⁷⁾。この技術では、ディープラーニングを活用した画像再構成が最適化され、ノイズやアーチファクトを効果的に低減しながら診断に適した高品質な画像を生成する⁷⁾。AI が過去のデータを学習し、撮像時に発生するノイズパターンを認識することで、適切な補正を行うことが可能になる (図 4)。

また、SmartSpeed は、従来の Cartesian サンプリングに加え、Radial や Spiral といった多様

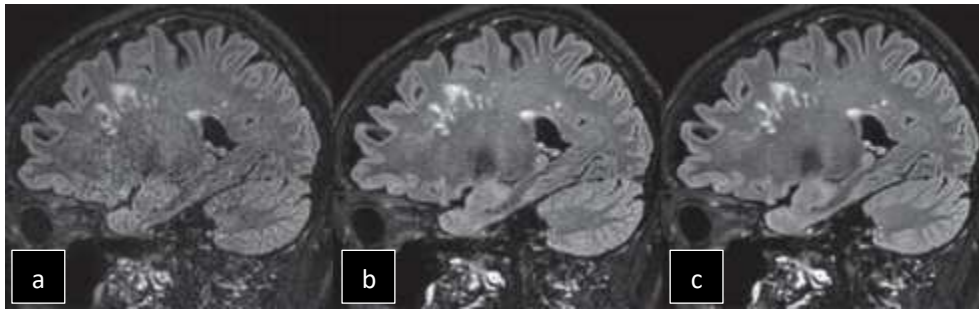
なサンプリング手法に対応しており、これにより臨床用途に最適な撮像方法を柔軟に選択することができる⁷⁾。従来の技術では撮像時間の短縮と画質の向上がトレードオフの関係にあったが、SmartSpeed ではAI がノイズ抑制やデータ補完を行うことで、撮像時間を短縮しながらも高画質を維持することが可能となった⁸⁾ (図5)。

さらに、SmartSpeed の統合プラットフォームは、AI との融合に加えてサンプリングへの自由な対応を実現しており、従来困難とされていた動きの影響を抑えた自由呼吸下での3D撮像や拡散強調画像、金属アーチファクトの低減など、さまざまな臨床シナリオでの適用が可能となる⁸⁾。



(図4) Philips が開発した高速化のための統合型プラットフォーム

- a: Compressed SENSE は、SENSE と Compressed Sensing を画像再構成の繰り返しループの中に組み込む“One-Go”プラットフォームを採用している。
- b: 次世代高速化技術 SmartSpeed では、(a) の One-Go プラットフォームをベースに、AI との融合や多様なサンプリングパターンへの対応を実現した。
- c: One-Go プラットフォームでは、サンプリングされたデータを展開する MRI Physics 項 (第一項)、リファレンススキャンによる背景信号認知項 (第二項)、そしてスパース変換や AI を用いたスパース化 (or AI) 項 (第三項) に分かれており、すべてを統合して最小化問題の式の最適解を繰り返し計算により求めていく。



(図 5) SmartSpeed AI の臨床画像例
 3 D FLAIR を 1 . 1 mm アイソボクセル、10 倍速、2 分 24 秒で撮像した SENSE (a) 、Compressed SENSE (b) 、SmartSpeed AI (c) の矢状断元画像を示す。SmartSpeed AI では SENSE と比較してノイズが低減され、Compressed SENSE と比較して多発白質病変と白質との境界が明瞭となりコントラストが改善している。(画像提供：東京警察病院)

SmartPath による MRI 検査環境の最適化と持続可能な運用

SmartPath プログラム

MRI 技術は日々進化しており、高精細な画像の取得、診断精度の向上、検査効率の最適化が求められている。しかし、新規装置の導入には高額なコストがかかるだけでなく、システムの入替に伴う長期の工事やダウンタイムにより、検査スケジュールの遅延や診療の中断を引き起こす可能性がある。このような課題を解決するため、フィリップス社は SmartPath という MRI のアップグレードプログラムを提供している。SmartPath では、既存の MRI 装置のマグネットを活用しながら、最新のハードウェアやソフトウェアを導入することで、装置全体を入れ替えることなく短期間で高性能な検査環境の実現を図る。

SmartPath の最大の利点は、新規装置の購入と比較してトータルコストを大幅に低減できる点にある。MRI システムを完全に更新する場合、多額の投資に加え、新旧装置の搬出入や設置スペースの整備など工事に長い期間を要するが、SmartPath では既存のマグネットを活用することで工事期間の短縮やダウンタイムの最小化が実現する。さらに、これまでに施設で導入されたアプリケーション・オプションは継続して使用できるため、施設が培ってきた技術や運用ノウハウを活かせる点も大きなメリットである。

SmartPath には既存の MRI 装置に応じた複数のバリエーションが用意されている。例えば、使用中の装置がアナログ時代の MRI (Intera 1.5T, Achieva 1.5T/3.0T) である場合、SmartPath to dStream を利用することで、最新のデジタル MRI 技術 (dStream) を搭載した Ingenia へアップグレードが可能となる。次に、既にデジタル MRI である Ingenia 1.5T/3.0T を使用している施設向けには、ワークフローを改善し、より効率的な検査環境を実現する SmartPath to Evolution 1.5T/3.0T が提供されている。さらに、Ingenia 3.0T の場合は、傾斜磁場システムを最新の VEGA グラディエントへ交換することで、拡散強調画像 (DWI) への対応力が一層増した高性能 MRI へと進化させる SmartPath to Elition X が用意されている。このように、SmartPath

は各施設のニーズに応じたアップグレードオプションを提供し、最適な MRI 環境の実現をサポートしている（図 7）。

すべての SmartPath に共通する特長として、前述した SmartSpeed による高速化・高画質化に対応できる点、また、MRI 検査のワークフローを向上させる SmartWorkflow への対応が挙げられる。MRI の臨床適応は年々広がっており、頭部や脊椎・脊髄、四肢関節領域、骨盤領域に加え、上腹部、心臓、乳房、全身の血管（MRA）、さらには DWIBS（全身の拡散強調画像）など多岐にわたる。また、MRI は各領域の検査において多様な撮像法（撮像シーケンス）を用いることで、さまざまな生体内情報を画像化することが可能である。しかし、適応範囲の拡大とともに、MRI 検査の手技は高度に専門化・複雑化しており、検査領域ごとに適切な撮像設定や操作を行うことが求められる。このような背景のもと、オペレーターの負担を軽減しながら検査の効率化を実現し、かつ精度の高い検査を提供するためには、MRI のワークフローの向上が不可欠である。

SmartWorkflow はその課題を解決するために開発された。



SmartWorkflow

（図 7） SmartPath プログラムのバリエーション Ingenia システムの例 自動化、ならびに操作室における検査計画・撮像・群付処理の最適化を目的としたソリューションである（図 8）。まず、検査室では、VitalEye、VitalScreen、SmartTouch、SmartStart といった技術により、オペレーターと患者の負担を軽減しながら検査が開始する。

VitalEye は、赤外線カメラと AI 技術を活用した非接触型の呼吸同期システムであり、最大 100 ポイントの身体部位を認識し、微細な呼吸の動きをほぼリアルタイムで検知する（図 9）。これにより、不規則な呼吸パターンや突発的な咳の影響を排除し、安定した呼吸同期撮像を可能にする。従来の呼吸同期では呼吸ベルトを使用する必要があったが、VitalEye の導入により、外部センサーの装着が不要となり、セットアップの簡素化と検査効率の向上が実現する。

VitalScreen は、バーチャルコーチによるガイダンスを提供する検査セットアップ支援機能である。タッチパネルを活用し、患者情報、体位、生体信号センサーのセットアップを直感的に行うことで、セットアップの迅速化が図られる。これにより、オペレーターは技術的な操作に煩わされることなく、患者への対応に集中することができる。SmartTouch は、従来手動で行われていた患者の位置合わせ作業を自動化することで、短時間で適切な位置決めが可能となり、オペレーターの負担軽減と患者の快適性向上に貢献する。さらに、SmartStart は、検査室内でスキャン

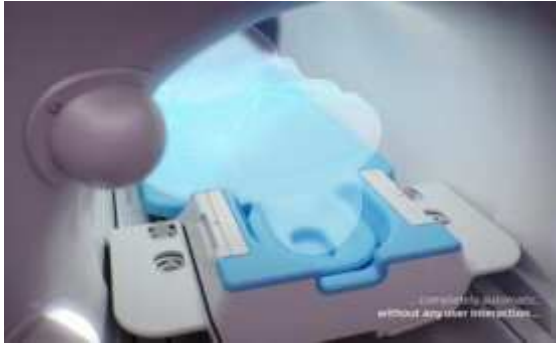
を開始できる機能であり、オペレーターが操作室に戻ることなく撮像プロセスを開始できる。これにより、患者セットアップ後の待機時間が短縮され、スムーズな検査の流れが確保される。

次に操作室における最適化では、検査計画、撮像、解析処理の自動化により、MRI 検査の標準化と効率化が図られる。SmartExam は、解剖情報読み取りアルゴリズムを活用し、オペレーターの経験に依存せずに一貫性のあるスキャン結果を提供する自動計画・撮像機能である。これにより、検査の標準化とスループットの向上が期待される。AutoVoice は、検査中の患者ガイダンスを自動化することで、オペレーターの負担を軽減し、患者の不安を軽減する役割を果たす。例えば、呼吸指示や撮像時間のアナウンスを自動的に行うことで、検査の流れを円滑にし、コミュニケーションの効率を向上させる。また、SmartLine は、繰り返し行われる解析処理を自動化する機能であり、検査結果の標準化とスループットの向上に貢献する。加えて、ScanWise Implant は、MR 条件付きインプラントを使用する患者に対し、適切な検査設定を自動適用することで、可能な限り安全性を確保しながら検査を実施する。これらの機能により、オペレーターの作業負担は軽減され、MRI 検査の信頼性と生産性が向上する。

SmartWorkflow の機能は統合的に使用することで、MRI 検査のワークフローを一層改善することが可能となる。例えば、SmartStart、SmartExam と SmartLine を統合することで、患者セットアップ後にコンソール操作を行うことなく撮像が完了する「Zero Click Exam」も実現可能となる。このような完全自動化のアプローチにより、オペレーターの負担を最小限に抑えながら、検査の生産性と精度を向上させることができる。特に、経験の浅いオペレーターでも安定した MRI 検査を臨める環境を提供する点は、現在の臨床現場において重要な意義を持つと考えられる。



(図 8) SmartWorkflow MRI 検査の信頼性と生産性を支えるソリューション



(図9) VitalEye 赤外線カメラとAI技術を活用した非接触型の呼吸同期システム

販売名：フィリップス 1.5T 超電導磁気共鳴イメージング装置
医療機器認証番号：223ACBZX00012000
設置管理医療機器／特定保守管理医療機器管理医療機器

販売名：フィリップス MR5300 1.5T
医療機器認証番号：231AFBZX00015000
設置管理医療機器／特定保守管理医療機器管理医療機器

販売名：フィリップス MR5300 1.5T
医療機器認証番号：231AFBZX00015000
設置管理医療機器／特定保守管理医療機器管理医療機器

販売名：フィリップス 3.0T 超電導磁気共鳴イメージング装置
医療機器認証番号：223ACBZX00013000
設置管理医療機器／特定保守管理医療機器管理医療機器

販売名：フィリップス Elition 3.0T
医療機器認証番号：230ACBZX00009000
設置管理医療機器／特定保守管理医療機器管理医療機器

販売名：フィリップス Elition 3.0T
医療機器認証番号：230ACBZX00009000
設置管理医療機器／特定保守管理医療機器管理医療機器

販売名：フィリップス 1.5T 超電導磁気共鳴イメージング装置
医療機器認証番号：223ACBZX00012000
設置管理医療機器／特定保守管理医療機器管理医療機器

販売名：フィリップス Ambition 1.5T
医療機器認証番号：231AFBZX00015000
設置管理医療機器／特定保守管理医療機器管理医療機器

参考文献

- 1) Philips. (2023). BlueSeal: The new reality in MR. Philips Healthcare.
- 2) Pruessmann KP et al: SENSE: Sensitivity encoding for fast MRI. Magn Reson Med 42 (5) : 952-62, 1999
- 3) Pruessmann KP et al: Advances in sensitivity encoding with arbitrary k-space trajectories. Magn Reson Med 46 (4) : 638-51, 2001
- 4) Geerts-Ossevoort L et al: Compressed SENSE Speed done right. Every time. Philips FieldStrength Mag. Published online: 1-6, 2018
<https://philipsproductcontent.blob.core.windows.net/assets/20180109/619119731f2a42c4ac-d4a863008a46c7.pdf> [2025.03 参照]
- 5) Knoll F et al: fastMRI: A Publicly Available Raw k-Space and DICOM Dataset of Knee Images for Accelerated MR Image Reconstruction Using Machine Learning. Radiol Artif Intell 2 (1) : e190007, 2020
- 6) Knoll F et al: Advancing machine learning for MR image reconstruction with an open competition: Overview of the 2019 fastMRI challenge. Magn Reson Med 84 (6) : 3054-70, 2020
- 7) Pezzotti N et al: Adaptive-CS-Net: FastMRI with Adaptive Intelligence. arXiv (NeurIPS) . 2019 <http://arxiv.org/abs/1912.12259> [2025.03 参照]
- 8) Pezzotti N et al: An Adaptive Intelligence Algorithm for Undersampled Knee MRI Reconstruction. IEEE Access 8: 204825-204838, 2020