

A large Philips MRI machine is shown from a low angle, looking into the bore. The machine is dark blue with a glowing blue ring around the entrance. The word "PHILIPS" is visible on the inner wall of the bore. In the foreground, a computer monitor on a stand displays a software interface. The background is dark with glowing blue lines and particles, suggesting a high-tech, futuristic environment.

PHILIPS

Magnetic Resonance - Whitepaper

BlueSeal magnet technology

Innovation in magnet design:
the hidden engine behind
the progress of MRI in Healthcare

Authors: Matthew J. Voss, Paul R. Harvey

Executive summary

フィリップスはヘリウムフリー運用^{*1} MRIシステムのパイオニアである。2018年に最初のBlueSeal MRIシステムを発売して以来、フィリップスは2,200台以上のヘリウムフリー運用^{*1} マグネットの導入実績を有しています^{*2}。BlueSealマグネットはヘリウム使用量を大幅に削減することで革新をもたらし、従来システムに長年影響を与えてきたヘリウムの価格変動や供給問題への対処において、画質や稼働率を損なうことなく実現を支援しています。

超伝導マグネットは臨床MRIシステムのエンジンです。過去40年間にわたり、液体ヘリウムによる極低温技術¹はマグネット技術の基盤として機能し、世界中で数万台のシステム^{*3}において超伝導を着実に達成してきました。また、これらの極低温技術¹に伴う課題に対するユーザー側の負担を軽減する明確な流れも確認されています。

これらの課題に対処するため、フィリップスは、20年以上にわたりBlueSeal技術の開発に投資をしてきました。製品化可能な設計が選定されるまでに、複数のアプローチ、構造、試作機が検討されました。その目標は常に、ヘリウムのバスクーリングの制約からMRIを解放しつつ、卓越した画質と稼働率を提供することでした。

フィリップスは、Ingenia Ambition 1.5Tの販売開始時に、初めてBlueSeal技術を導入しました。このシステムは、従来マグネットを使用したシステムと比較して、ヘリウム消費量を99.5%削減しています^{*4}。

BlueSealの利点を明確にするため、いくつかの観点が議論されており、特に以下に焦点が当てられています。

- 密閉型マグネットとは何か、どのように動作するのか。
- BlueSeal技術はどのような問題を解決するのか。
- バスクーリングに代わる他のアプローチには、どのようなものがあり、それらの違いは何か。
- BlueSeal技術を高磁場へ容易に拡張可能にしている要素は何か。
- BlueSeal開発の歴史はどのようなものか。

BlueSealマグネット技術と利点

はじめに

液体ヘリウムは40年以上にわたり、MRIマグネット技術の中核を担ってきました。ほぼ絶対零度に近い温度で液体として存在できるその特性により、ニオブチタン合金を効率的に冷却し、超伝導特性を生み出し、強力な電磁作用を可能にしています。

しかし、液体ヘリウムに関しては、価格変動、供給状況、地政学的な不安定性が増しており、新たなマグネット技術が必要とされています。

マグネットに求められる構造と性能

ヘリウムに依存しないマグネットへの移行は、技術におけるパラダイムシフトを意味するため、臨床ニーズを満たすには従来のマグネット要件を慎重に再考する必要があります。これらの要件は、3つの重要な領域に要約することができます。

持続可能な冷却システム設計	運用継続性への耐性	臨床的有用性
冷媒が密閉された構造	停電に対する対応力	コンパクトかつ軽量
ヘリウムの補充が不要	冷却水停止に対する対応力	1.5Tおよび3.0Tへの対応
クエンチ排気配管が不要	高負荷スキャンへの耐久性	70 cmのボア径
効率的な電力消費	自動的かつスマートな復旧ロジック	ベストインクラスの画質 ^{*5}
	UPSなしでの磁場の維持	

表 1：マグネットの主な要件

ゼロボイルオフ (Zero Boil-off) マグネット構造

ー 従来のアプローチ

ゼロボイルオフマグネットの基本的な極低温設計¹は、通常、外側真空容器内に吊り下げられた液体ヘリウム容器から構成されます。液体ヘリウム容器の中には、超伝導コイル巻線が収められており、数百から数千リットルの液体ヘリウムに浸されています。真空スペースを通過する熱放射を遮断するために、熱シールドが必要です。

2段式ギフォードマクマホン型クライオクーラーが使用され、一方の段が放射シールドを冷却し、もう一方の段が蒸発したヘリウムガスを再液化します。また、このマグネットは、クエンチが発生した際にヘリウムを検査室外へ導くための配管を必要とします。

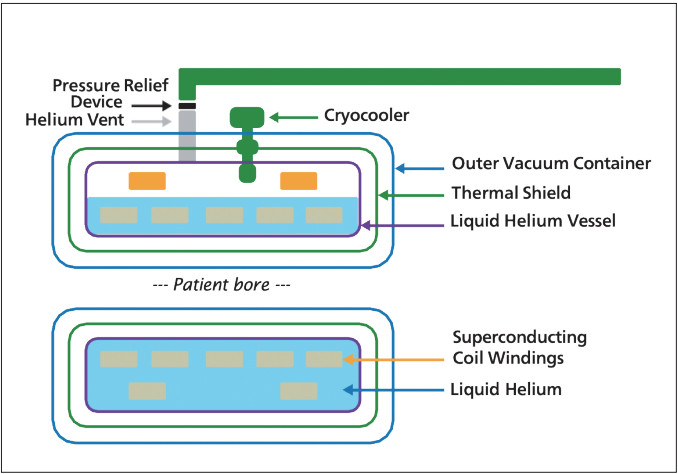


図 1：ゼロボイルオフマグネットの断面図

- ゼロボイルオフ(ZBO)構造において液体ヘリウムが果たす3つの機能は、
- (1) 容器全体をほぼ均一で、一定の温度に維持する
 - (2) 超伝導コイルをクライオクーラーと熱的に結合する
 - (3) エネルギーを吸収して温度上昇を抑制するための熱的ヒートシンク (バッファ) を形成する

ことになります。

大量のヘリウムは、システムが大きな熱エネルギーを吸収することを可能にし、冷却が中断された際に重要な「ライドスルー時間」を提供します。クライオクーラーが再液化できる限度以上の熱が加わると、液体ヘリウムは単に蒸発し、圧力が上昇し、最終的にマグネットから排出されます。一方で、容器内に液体ヘリウムが存在する限り、超伝導コイルは動作温度に維持されます。

Cryocooler クライオクーラー	極低温温度に到達し、それを維持するために設計された独立型の機械式冷凍装置
------------------------	--------------------------------------

Outer Vacuum Container 外側真空容器	熱断熱を提供し、吊り下げられた超伝導磁石を収容する主要な真空容器
----------------------------------	----------------------------------

Thermal Shield 熱シールド	外側真空容器と低温部の間に配置され、外部からの熱放射を遮断する高伝導性の遮蔽物
-------------------------	---

Zero Boil-off (ZBO) ゼロボイルオフ	蒸発した気体を再液化するために能動冷却を用い、液体量の純減を発生させない極低温管理方式
--------------------------------	---

Bath Cooling バスクーリング	超伝導コイルを液体冷媒の中に直接浸し、動作温度を維持する冷却方式
-------------------------	----------------------------------

Ride Through ライドスルー	クライオクーラーによる冷却が停止した後に、超伝導磁石が磁場を維持できる時間
------------------------	---------------------------------------

Heat Pipe ヒートパイプ	流体の相変化に伴う潜熱を利用し、小さな温度差でも効率的に熱を移送する高性能な熱伝達装置
---------------------	---

Thermosiphon 熱サイフォン	機械的なポンプを使用せず、自然対流と重力による浮力によって冷却流体を循環させる受動型の熱交換機構
------------------------	--

Quench Pipe クエンチ配管	クエンチ発生時に急速に膨張する極低温ガスを、磁石クライオスタットから外部大気へ適切に排出するための専用排気管
-----------------------	--

Spaceframe スペースフレーム	撮像中に磁石内部の電流の発生を抑えるよう設計された、マグネットコイルの支持構造
------------------------	---

表 2：技術用語集

密閉型マグネットの構造

密閉型マグネットの設計は、マグネット内部に単一の密閉されたヘリウム容積が存在することによって定義されます。このヘリウム容積は、クライオクーラーと熱的に接続されています。真空中に配置された超伝導コイルの巻線は、このヘリウム容積と熱的に接続されています。これらの接続は、伝導リンクやヒートパイプ、熱サイフォンなどの流体系リンクによって構成されています。

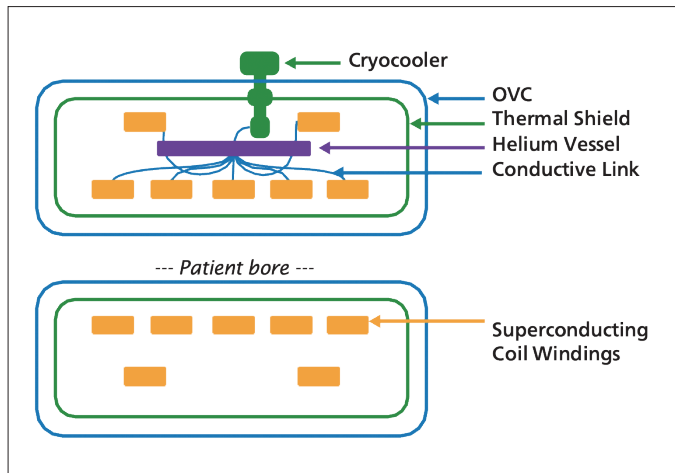
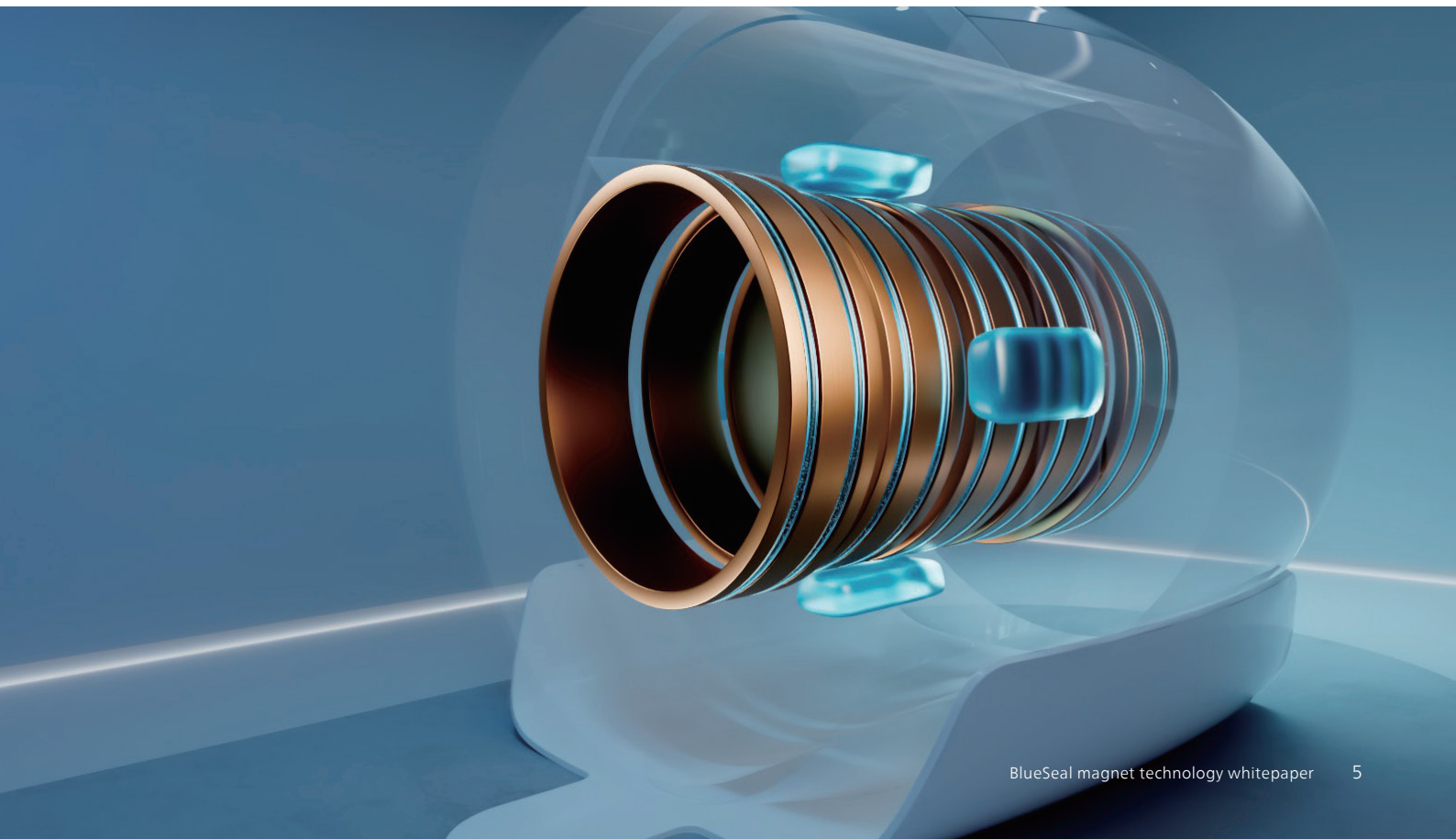


図 2：密閉型マグネットの断面図

クライオクーラーは、ヘリウム容器と超伝導巻線の両方を冷却します。仮に、クライオクーラーが停止した場合でも、ヘリウム容器はゆっくりと温度上昇し、超伝導巻線は臨界温度以下に保たれます。固定体積の容器内に固定量のヘリウムが存在するため、その密度は一定に保たれます。

磁石が冷却されるにつれて、容器内の圧力は低下します。このシステムには十分な密度が確保されており、システム稼働温度において約 7 リットルの液体ヘリウムが生成されます。液体ヘリウムの相変化が、このシステムに熱容量、すなわち温度変化に抵抗する能力を提供するメカニズムです。

主要な工学的課題は熱伝達の問題にあります。大きな表面積と質量を絶対零度に近い温度で維持する必要があり、熱は精密に管理されなければなりません。必要とされるシステム稼働温度での許容誤差は非常に小さくなります。



BlueSeal技術により期待される課題解決

課題1:液体ヘリウムの価格変動と持続可能性

過去10年間にわたり、液体ヘリウムの価格変動と供給の安定性は課題となってきました。米国やカタールでの供給停止、ロシア施設での火災に例示されるように、地政学的緊張の高まりやインフラ問題がヘリウム供給に対する圧力を増大させています²。

供給ショックによる過去の急激な価格上昇率は20～30%に達しています³。さらに、ヘリウムは地殻で生成される速度よりも速く、世界的に消費されています。

したがって、ヘリウムの節約は重要な課題であり、MRI業界はその主要な役割を担っています。

BlueSealマグネットは、ゼロボイルオフマグネットと比較してわずか0.5%のヘリウムで超電導状態を保つ^{*4}

課題2:ゼロボイルオフマグネットの不確実性

液体ヘリウムの損失をゼロに維持するためには、ゼロボイルオフマグネットのクライオクーラーは常に稼働していなければなりません。これを実現するためには、クライオクーラーのコンプレッサに対して電力と冷却水が供給されている必要があります。長時間の停電やインフラ障害が発生した場合、これらのマグネットは液体ヘリウムの気化を開始します。

また、通常、工場からの輸送中にもヘリウム損失が発生します。超伝導状態からの急激な磁場消失によって発生するクエンチにより、数秒のうちにゼロボイルオフマグネットのヘリウムをすべて失うことになります。

さらに、磁石の励磁や消磁の日常的な保守作業においてもヘリウム損失が発生する可能性があります。

BlueSealマグネットは、液体ヘリウムの再充填を必要としない

課題3:設置条件・クエンチ配管・マグネット重量

ゼロボイルオフマグネットでは、検査室からヘリウムガスを安全に排出するために大口径のクエンチ配管が必要になります。これらの配管は、特に既存建築において高コストであり、設置に支障をきたす可能性があります。さらに、複数台の装置を近接して設置する場合には、クエンチ配管を設置するためのインフラは複雑化し、コストはさらに増大します。クエンチ配管のコストと複雑さは、建物内に設置可能なシステムの台数の制約要因となり得ます。

マグネット内の液体ヘリウム容器は圧力容器でもあり、圧力負荷に耐えるために厚みが必要で、その結果としてマグネット重量が増加します。

ヘリウム容器を含むマグネットの重量は、MRIシステム全体の重量を大幅に増加させるため、設置条件の重要な要件となります。その結果、設置場所はしばしば地上階に限定され、新設設計においても必要面積が増えます。

BlueSealマグネットはクエンチ配管を必要とせず、かつ大幅に軽量であるため、設置の選択肢を広げることに貢献

課題4:複雑なマグネットメンテナンス

液体ヘリウムに関連する危険性や複雑性に対応するためには、専門的に訓練された作業者が必要です。さらに、マグネットの励磁と消磁には、専用の機器を現場に持ち込む必要があります。これは、磁性体がボア内に吸着してしまった場合に実施が必要な作業です。

BlueSealマグネットでは、システムコンソールから、病院スタッフが励磁と消磁を行うことができる

課題5:極低温容器に内在する安全性に関するリスク

BlueSealマグネットは、ゼロボイルオフマグネットと比較して、本質的な安全性に関するリスクを低減する設計がされています。一般に、大気圧下での液体ヘリウムは約750倍に膨張するため、完全に閉塞された状態で室温まで加熱された場合、70 MPa (10,000 psi) を大きく超える圧力が発生します。このような高圧に耐える極低温容器を設計することは現実的ではないため、圧力解放装置が使用されます。

したがって、圧力解放装置の適切な動作とともに、クエンチ配管の閉塞や流路制限を防ぐことが、ゼロボイルオフマグネットの安全確保において極めて重要になります。

BlueSealマグネットは、ゼロボイルオフマグネットと比較して、本質的な安全性に関するリスクを低減するよう設計されている

課題6:クエンチ発生時における液体ヘリウムの供給事情

MRIが設置されている世界のすべての地域において、大量の液体ヘリウムが容易に入手できるわけではありません。予期しないクエンチが発生すると、システムは数日から、場合によっては数週間使用不能になる可能性があります。遠隔地への液体ヘリウムの輸送は、時間とコストの両方を要します。補充が遅れると、マグネットは温度上昇してしまう可能性があり、再び冷却するためには、さらに多くのヘリウムと時間、コストが必要となります。

BlueSealマグネットは、液体ヘリウムの輸送に伴う物流上の課題やコストの影響を受けにくい仕組みになっている

結論1

液体ヘリウムバスクーリング型MRIマグネットは、コスト、供給、物流、設置、安全性に関するリスクの各課題が増大する中、代替技術としての重要性がますます高まっている

液体ヘリウムバスクーリングを脱却するためのアプローチ

伝導冷却マグネット方式

伝導冷却マグネットは、おそらくヘリウムフリーマグネット^{*1}の中で最も単純な構造であるといえます。液体ヘリウムとヘリウム容器は、超伝導コイルとクライオクーラーとの間の伝導リンクによって置き換えられます。この熱リンクは、銅導体のような単純なものでもよく、ヘリウムヒートパイプや熱サイフォンなどの流体系導体である場合もあります。

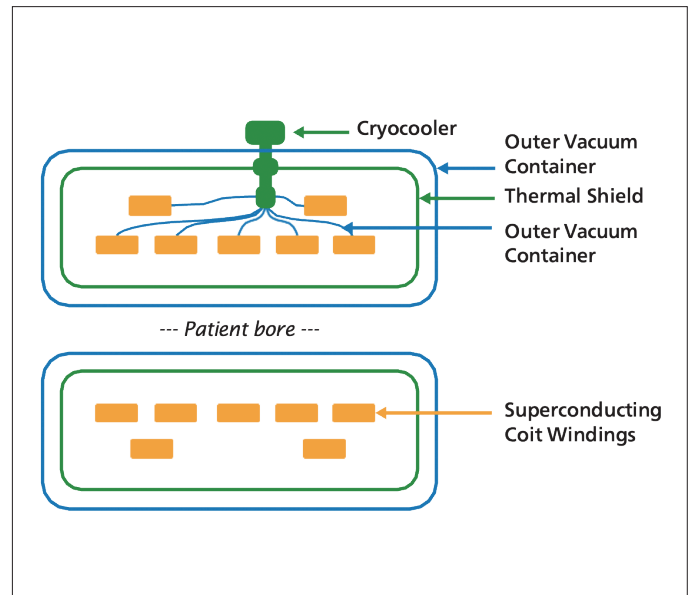
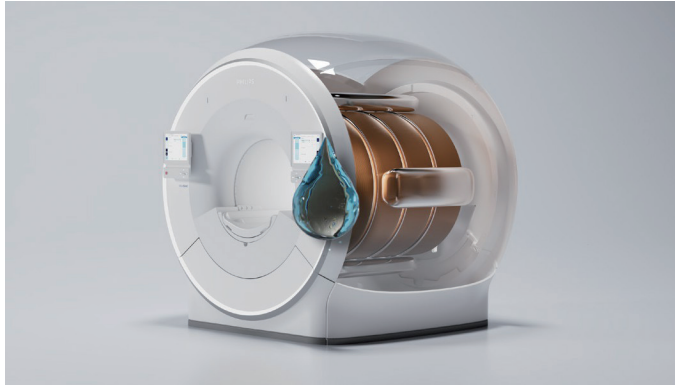


図 3：伝導冷却マグネットの断面図

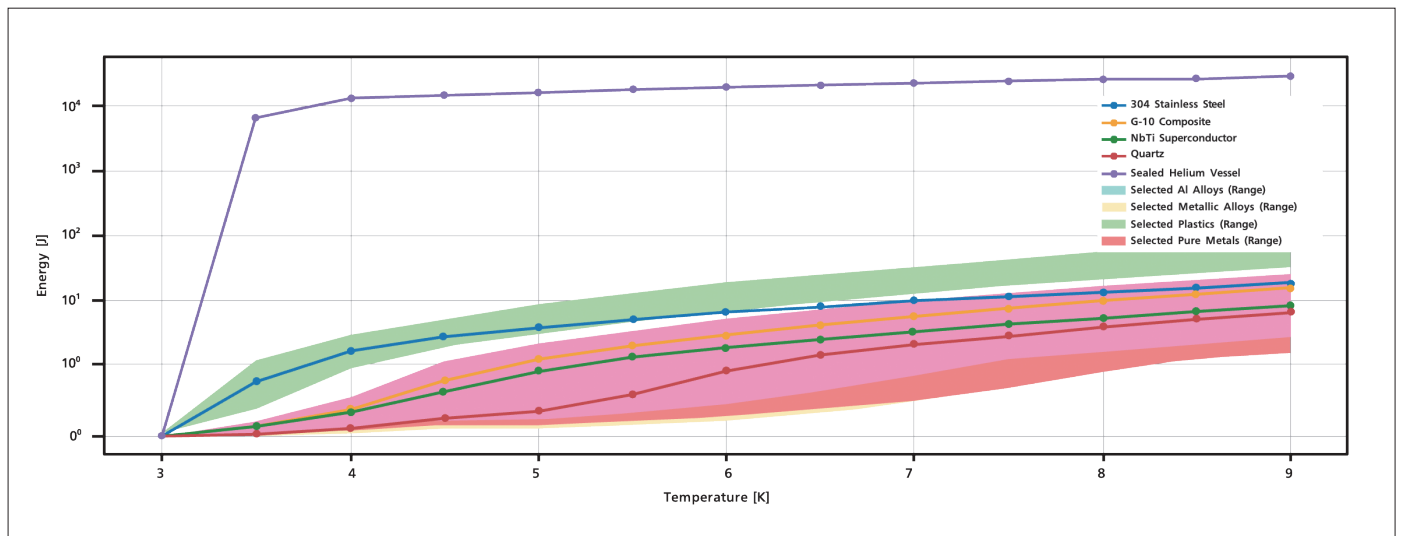


図 4：素材別熱容量（3K の各素材 1 kg を加熱するために必要なエネルギー）

このコンセプトのシンプルさは魅力的である一方で、重要な熱バッファ機能を担うための熱容量が不足しているという大きな問題があります。

図4が示すように、工業用固体材料には非常に小さな熱容量しか存在しません。熱容量が小さく、熱的バッファが十分でない場合、冷却が停止するとマグネットの温度は急激に変動することになります。その原因としては、例えば、停電や、冷却水の停止を含む冷却システムシステムの故障などが挙げられます。

さらに重要な点として、スキャン中のグラジエントコイルの出力によって超伝導コイルは温度変化にさらされます。その結果、グラジエントの振幅やスルーレート、許容周波数、撮像デューティサイクルに大きな制限が必要となり、画質や検査効率が損なわれる可能性があります。

外部容器付きドライマグネット方式

外部容器付きドライマグネット方式では、ヘリウムガスは2つの容器に充填され、1つは常に室温に保たれる外部容器、もう1つはクライオクーラーに接続され最終的に4ケルビン以下に冷却される内部容器です。システムの充填圧が十分に高く、内部容器と外部容器の体積比が適切であれば、内部容器内で液体ヘリウムが生成されます。密閉型マグネットや伝導冷却マグネットと同様に、超伝導コイルはもはや液体ヘリウム中に浸されておらず、「ドライ」状態になります。コイルは、伝導またはクローズドループ流体系統によって内部ヘリウム容器と熱的に接続されます。

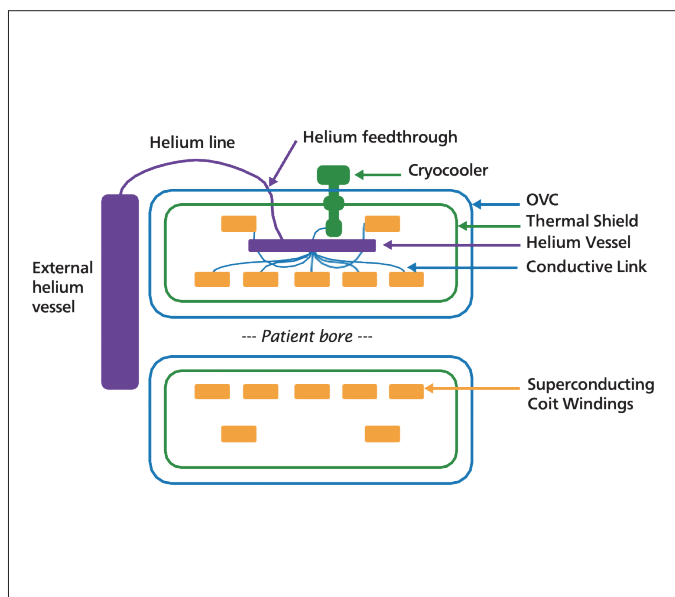
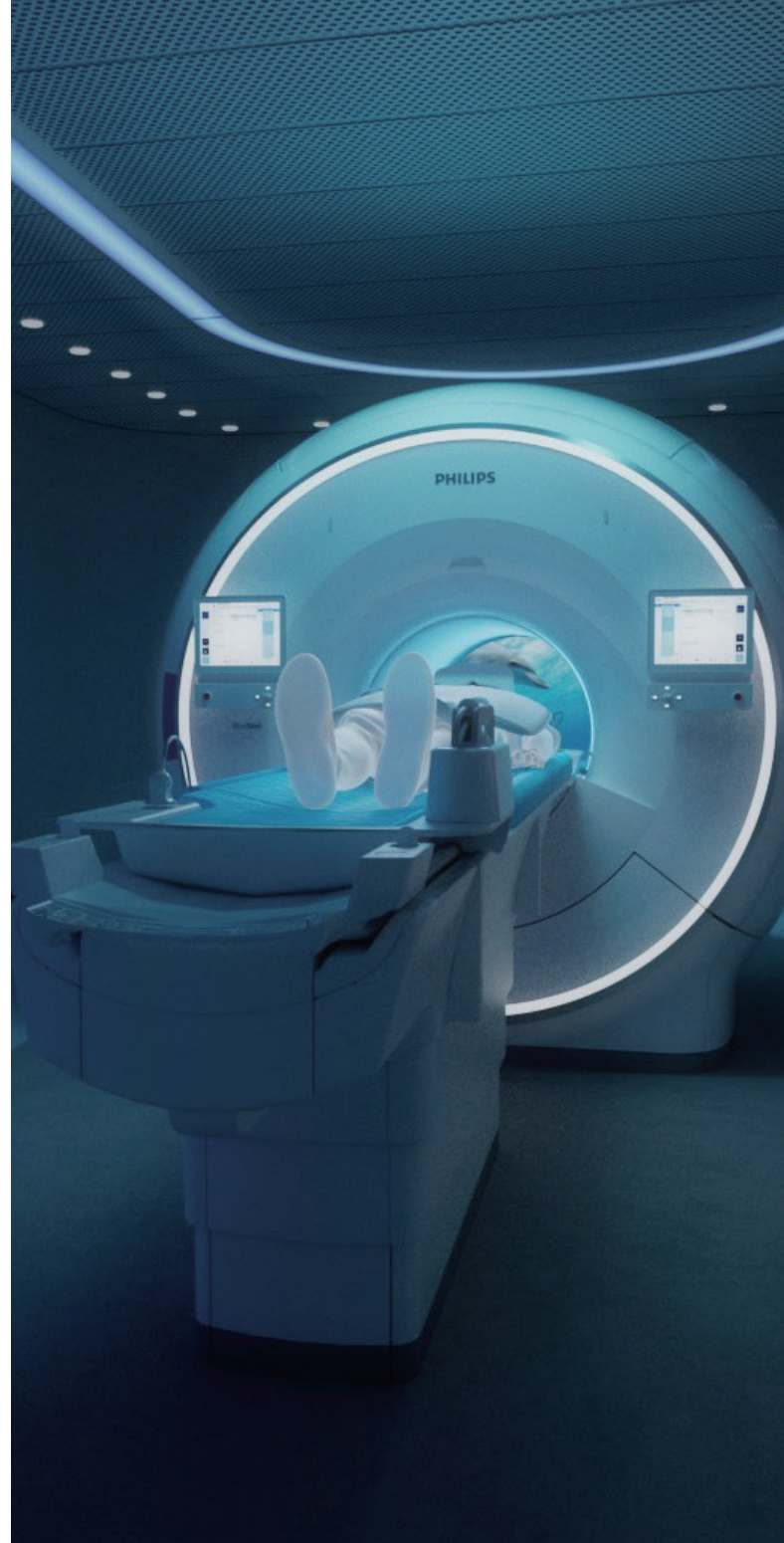


図5：外部容器付きドライマグネットの断面図

外部ヘリウム容器は、外側真空容器（OVC）を貫通するヘリウム導入部を介して内部ヘリウム容器と接続され、低温容器（内部）と常温容器（外部）の圧力が同一に保たれる必要があります。

外部容器は膨張タンクとして機能します。マグネットが冷却されるにつれて、ガスは温かいヘリウム容器から低温側の容器へ移動します。この方式の利点は、内部容器のみの場合と比較して、常温時のより低い充填圧で内部容器内に液体を生成できる点にあります。さらに、低温ヘリウムタンクは、温度上昇時にヘリウム分子を外部（温）タンクへ押し出すことで追加のエネルギー蓄積効果を得られますが、その結果としてヘリウム蒸気の顕熱は失われます。

この構造では、ヘリウムがマグネットを出入りするため、真の意味で密閉されているとはいえません。そのため、システムへの汚染リスクが存在し、それが信頼性低下につながる可能性があります。この構造の一例は、2014年にフィリップスによって検討されました⁴。



最も効率的なアプローチの検証

提示された3つの方式について、以下の条件で比較検討を行いました。

1. 超伝導線の基本材料として約1,000 kgの銅を使用した伝導冷却マグネット
2. システム稼働温度において0.7リットルの液体を生成できる圧力と体積の外部容器付きドライマグネット
3. システム稼働温度において7リットルの液体ヘリウムを生成できる充填圧力と内部容積を持つ完全密閉型マグネット

ライドスルー時間

ライドスルー時間（冷却喪失後に磁場を維持できる時間）は、ヘリウムフリー運用^{*1} マグネットにおける重要な設計パラメータです。マグネットは、さまざまな理由で冷却機能を失う可能性があり、その中でも特に一般的なのは主電源の喪失と、ヘリウムを圧縮するコンプレッサ用の冷却水の喪失になります。ゼロボイルオフマグネットとは異なり、冷却機能の喪失は超伝導コイルの温度上昇を引き起こします。

ある時点でコイル温度が超伝導遷移温度を超え、クエンチを引き起こすような状況において、BlueSealマグネットでは、コントロールされた消磁が開始されることで、クエンチの回避を図ります。

図 6 は、3 つの例示された構造におけるエネルギー蓄積能力の大きな差を示しています。7 リットルの密閉型システムは大幅に高いエネルギー貯蔵能力を有します。ライドスルー中の平均熱負荷を 1 ワットと仮定すると、このシステムは 4.5 ケルビン以下を維持しながら 5 時間以上のライドスルーを達成します。

これに対して、外部容器付き 0.7 リットルのドライマグネットは同じ温度範囲で 30 分未満しか達成できず、伝導冷却マグネットは数分程度にとどまります。

外部容器付きドライマグネットと伝導冷却マグネットの短いライドスルー時間は、主電源喪失時の冷却停止を防ぐために外部発電機を用いることで補うことができます。しかし、外部発電機には設置負担の増加や、発電機自体の保守の自己負担、信頼性に対する課題がともないます。さらに、外部発電機は、冷却水の中断や故障によるコンプレッサ過熱など、他の冷却喪失原因に対しては補償されないため、このような状況では、マグネットに本来備わっているライドスルー性能（0.7 リットルの外部容器付きドライマグネットでは 30 分以下）がそのまま現れることになります。

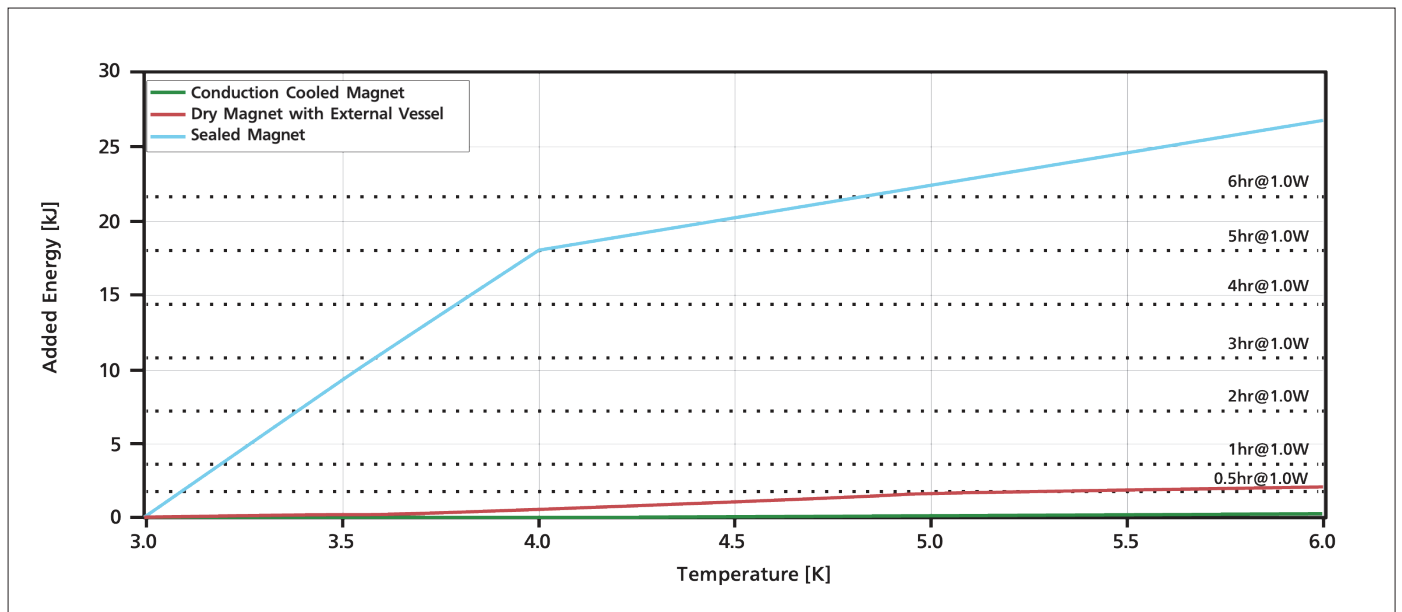


図 6：ライドスルーシミュレーション

結論2

BlueSealマグネットは、UPS（無停電電源装置）を用いずに、ほとんどの停電時に対応する

稼働率とバックアップ構造

電力の信頼性に加えて、冷却水の信頼性も考慮する必要があります。冷却水は、歴史的に、クライオクーラーのコンプレッサを冷却するために使用されてきたため、冷却水の供給可否はクライオクーラーの稼働に直結します。冷却水の供給状況は、地域や設置条件によって大きく異なる可能性があります。

BlueSeal の構造は、冷却水障害に対するバックアップ構造を内蔵しており、すべてのシステムに標準搭載されています。

コンプレッサの状態をリアルタイムで詳細に監視することで、冷却水供給に問題が発生した場合には、自動的にコンプレッサの放熱を空冷モードへ切り替えます。これにより、マグネットは磁場を維持したまま、動作範囲内に保たれます。

結論3

BlueSealマグネットは、冷却水チラーの故障に対するバックアップ機能を標準装備として設計に組み込み、高い稼働率の維持に寄与する

スキャンによる熱的影響

撮像中には、マグネットに熱負荷が加わる可能性があります。これは、グラジエントコイルからの漏れ交流磁場、あるいは低温構造体の機械的励起によって生じるものであり、いずれも渦電流の発生につながる可能性があります。

マグネット構造は、これらの熱負荷を吸収し、温度上昇を防ぐ能力に影響を与え、その結果、グラジエント振幅やスキャンデューティサイクルの制限、クエンチにつながる可能性があります。

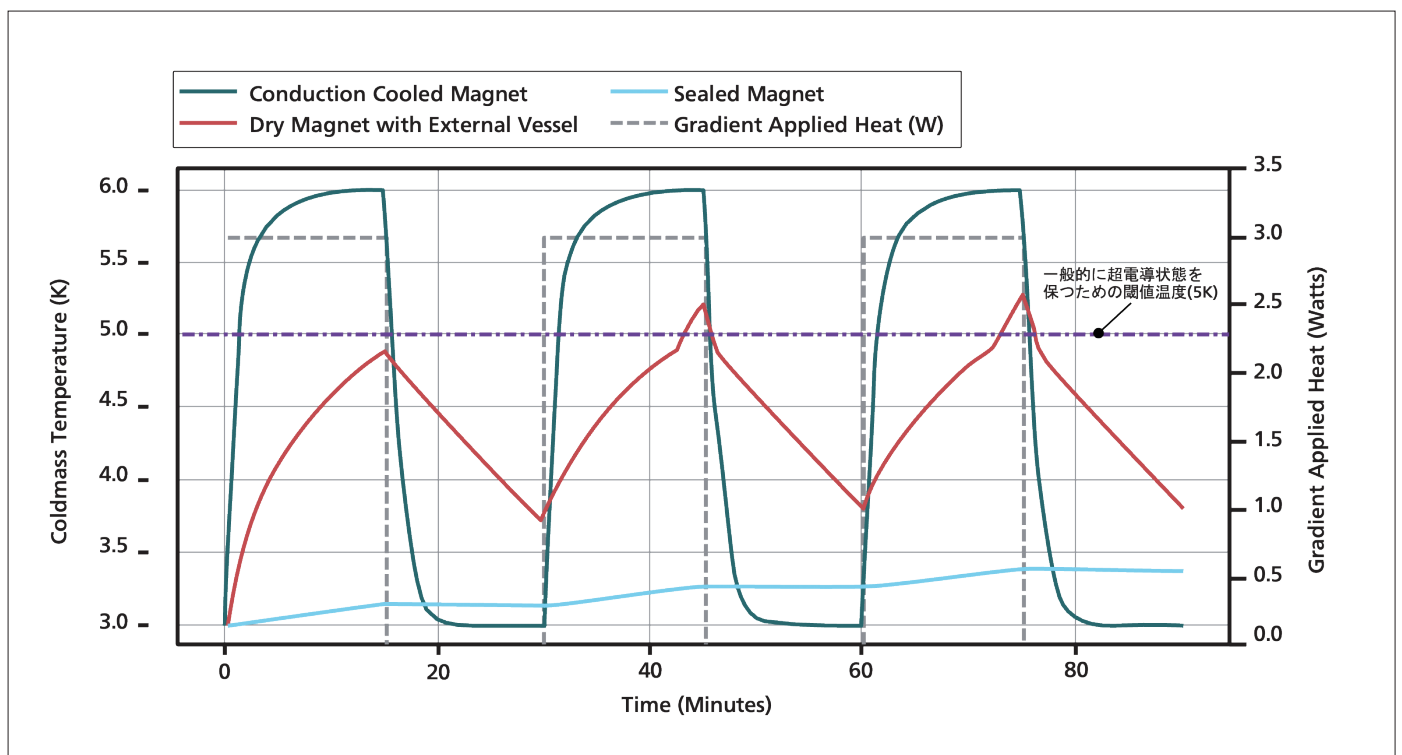


図 7：グラジエントに起因する加熱による熱応答のシミュレーション

図7は、3つの異なるマグネット構造にスキャン時の熱負荷を与えた場合のシミュレーションを示しています。これは、高負荷なスキャンを想定したシミュレーションで、スキャン時の熱負荷を3ワットと定義しています。また、15分のスキャンと15分の回復を模擬するために、デューティサイクルを50%と設定しました。

このシミュレーションは、マグネット構造ごとに温度応答に顕著な違いがあることを示しています。熱容量が非常に小さい伝導冷却マグネットは、熱入力に対して急速に応答します。スキャン開始後まもなく、マグネットの温度は臨界レベルに近づくため、クエンチを防ぐために、グラジエントコイル出力の抑制やランブダウンなどのスキャン制限が必要となります。

外部容器付きドライマグネットは比較的耐性があるものの、今回のような重負荷スキャンを2サイクル乗り切るまでの十分な熱容量を持ち合わせていません。

この構造では、外部タンク内に蓄積された室温のヘリウムガスを再冷却する必要があるため、熱容量に対して回復時間が比較的長くなります。最後に、密閉型システムは、スキャン時の熱負荷に対して最も耐性があり、温度上昇を抑えつつ、減磁やクエンチ温度以下に維持されることが示されています。

超伝導コイルを支持する機械構造の設計は、渦電流の発生を助長する場合もあれば抑制する場合もあります。フィリップスの BlueSeal マグネットでは、超伝導コイルの支持構造が再設計されています。新しい構造である Spaceframe は、分離したコイル支持機構を用いることで、撮像中の渦電流の発生を抑える設計がされており、これにより、高振幅のグラジエントを用いた高デューティサイクルのスキャンを支援します。

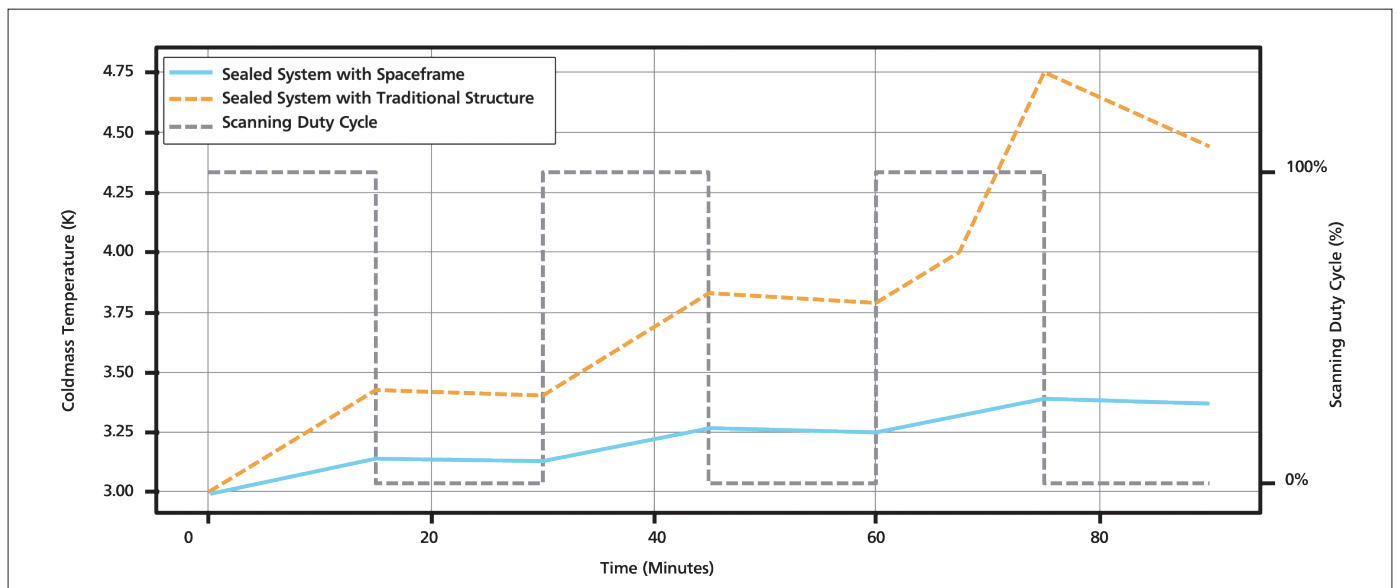


図 8 : Spaceframe構造と従来構造のグラジエント出力に対する熱応答の比較

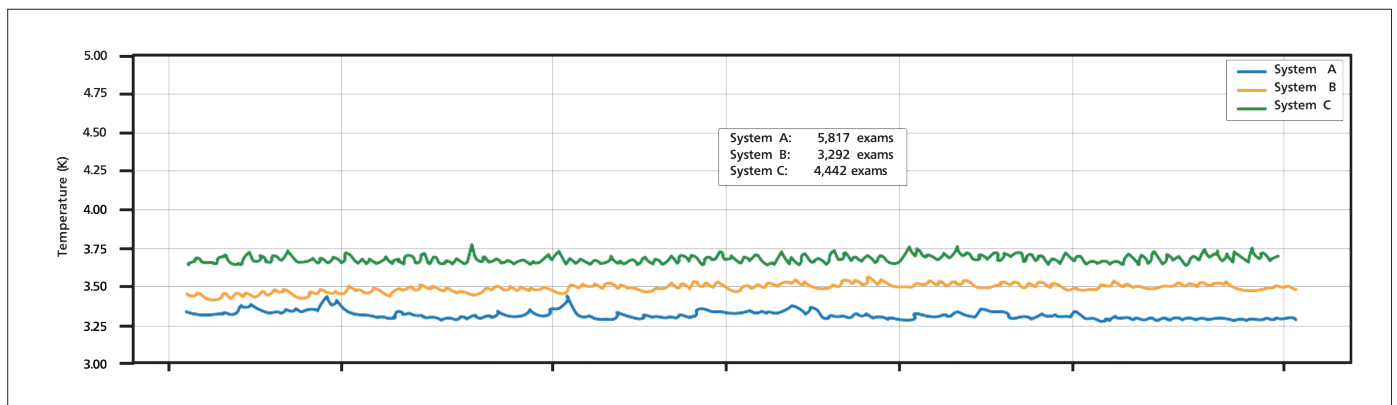


図 9 : 無作為に選択されたBlueSealマグネット別温度安定性

結論4

BlueSealの構造は、高いグラジエント性能、高いスキューデューティサイクル、および高いシステム安定性の両立を支援する

消費電力

超伝導マグネットに関連する電力消費は、クライオクーラーに加圧されたヘリウムガスを供給するクライオクーラー用コンプレッサに起因します。コンプレッサに必要な電力は、クライオクーラーに求められる冷却性能に依存します。ここで議論されている新しいマグネット構造では、マグネットが励磁され運転状態にある場合、冷却に必要な性能は概ね同程度となります。

励磁時には、励磁システムに追加の負荷が発生することを、マグネット設計において考慮する必要があります。

伝導冷却マグネットは、励磁プロセス中の熱容量が限られているため、追加の冷却能力を必要とし、その結果、コンプレッサ電力消費が増える可能性が高くなります。

結論5

熱的要求が増大しているにもかかわらず、BlueSealマグネットの電力消費はゼロボイルオフマグネットと同程度である

BlueSeal技術の高磁場への拡張性

BlueSealの構造は、運用性能への影響を抑えつつ、高磁場への拡張性を持つように設計されています。MRIの磁場強度が高くなるにつれて、より高いグラジエント出力が求められ、それによりマグネットの熱管理に対する要求も高まります。

さらに、マグネットの励磁のプロセスでは、高磁場において、より強固な熱安定性が必要となります。

BlueSeal技術の大きな熱容量は、これらの課題に対して効果的に対応します。Spaceframe技術は、高磁場へ拡張された場合にも、高いグラジエント出力による熱エネルギー吸収をさらに低減します。最後に、電源や冷却水のバックアップシステムにより、高磁場MRIシステムのユーザーが求める高い信頼性要件を満たすことを目指しています。

結論6

BlueSealの構造は、高磁場への拡張が容易である

BlueSealマグネットの開発の歴史

1980年代以降、超伝導MRIマグネットにおける極低温技術¹は簡素化の方向へと明確な傾向を示してきました。

年代	冷却方式	定期的な補充	クエンチ時の補充
1980s	Bath	要:Lhe・LN2	要
1990s	Bath	要:LHe	要
2000s	Bath	不要	要
2018	Sealed	不要	不要

表 3：MRI マグネットの世代による冷媒

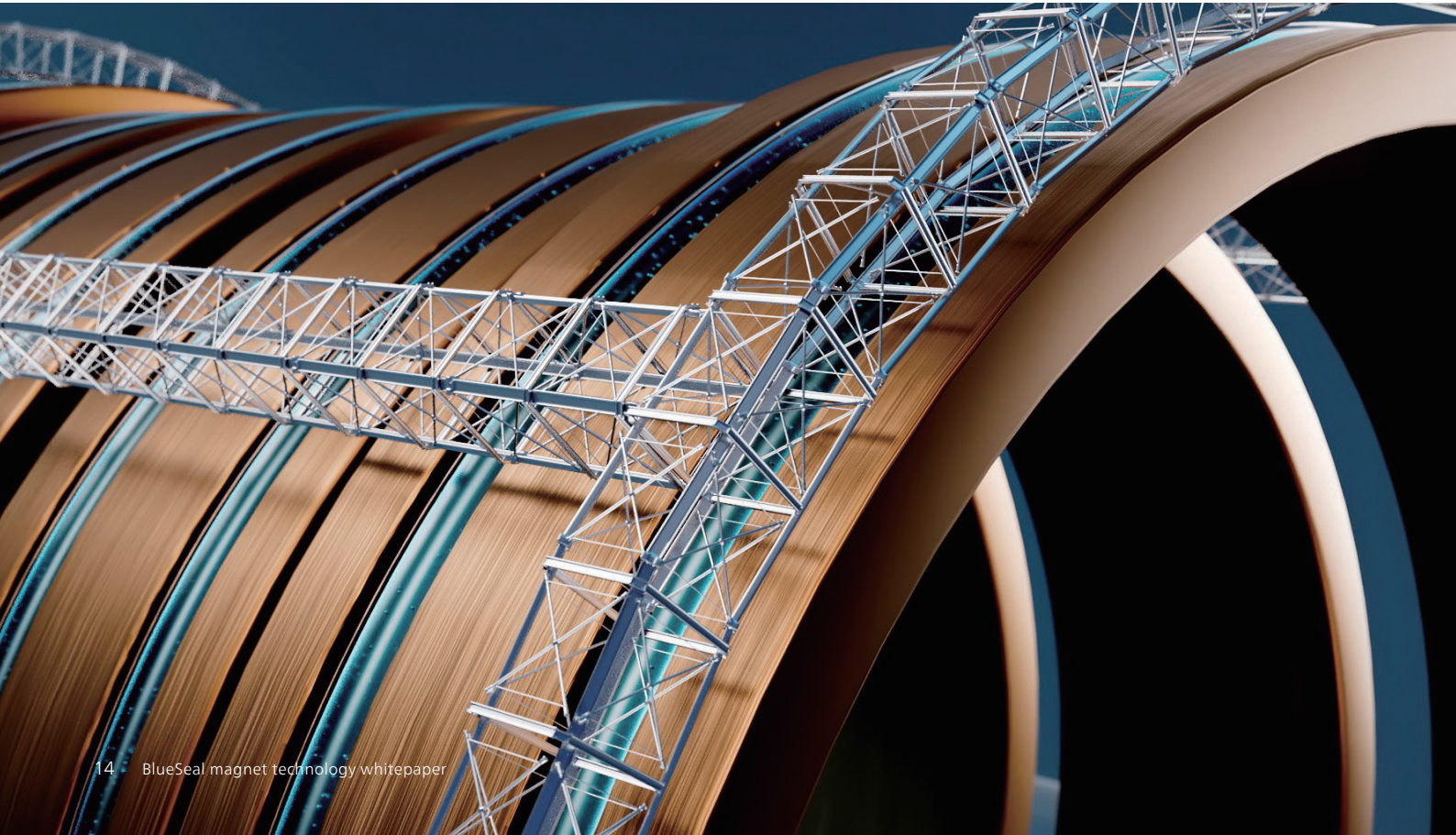
表3に示されるように、初期のMRI用超伝導マグネットでは、液体ヘリウム（LHe）と液体窒素（LN2）の2種類の冷媒が必要でした。これら2種類の冷媒は時間とともに蒸発し、定期的に補充する必要がありました。技術の進歩により、液体窒素は不要となり、最終的に、ゼロボイルオフ設計の導入により、液体ヘリウムの定期補充も不要となりました。このように、各世代ごとに極低温技術¹は簡素化されてきました。

2005年に、フィリップスは液体ヘリウムバスキングマグネットの代替技術の検討を開始しました。BlueSealマグネットの開発の歴史は以下の表に示されています。

年	開発動向
2006	1st Dry Coil experiment
2007	1st Dry Magnet prototype
2010	2nd Dry Magnet prototype
2012	Sealed technology advanced development
2014	First Sealed 60cm prototype
2015	First Sealed 70cm prototype
2016	First Sealed Spaceframe 70cm prototype
2018	Ingenia Ambition 1.5T commercial launch
2022	First 3.0T Sealed 70cm prototype

表 4：フィリップスの BlueSeal マグネット開発の歴史

表4は、過去20年間に理論的検討だけでなく、実際に試作・実験を行った、さまざまな構造アプローチを示しています。



さまざまなタイプのマグネット構造比較のまとめ

2018年の導入開始以来、2,200台以上のBlueSealが導入されたことで^{*2}、BlueSealの構造が、前述の主要要件をどの程度満たしているかについて、確固たるデータが存在しています。

さらに、スペインとポルトガルで導入済みの装置は、2025年年初の地域的な大規模停電の際に、すべての設計要素が完全に問題なく機能したことが報告されています。

	BlueSeal	Dry Magnet + Ext. Vessel	Conduction Cooled	ZBO
持続可能な冷却フレームワーク				
液体ヘリウムの密閉封入	●	●	○	●
将来的なヘリウムの補充	●	●	●	●
クエンチ配管	●	●	●	●
効率的な電力消費	●	●	●	●
安定稼働能力				
停電に対する対応力	●	●	●	●
冷却水喪失に対する対応力	●	●	●	●
高負荷スキャンへの耐性	●	●	●	●
自動化された復旧機能	●	●	●	●
UPSなしでの磁場の維持時間	●	●	●	●
臨床的有用性				
サイズおよび重量	●	●	●	●
1.5Tおよび3.0T への対応	●	●	●	●
70cm ボア	●	●	●	●
ベストインクラスの画質 ^{*5}	●	●	●	●

表 5：主要な機能比較

各要求事項に対する機能評価を示す。

●：十分に満たす、●：限定的に満たす、●：満たさない、○：該当しない

参考文献

1. M. E. G. M. P. M. McRobbie DW, The Basic Stuff. In: MRI from Picture to Proton, Cambridge University Press, 2017.
2. M. Henderson, "rsna.org," 25 January 2023. [Online]. Available: <https://www.rsna.org/news/2023/january/helium-shortage-for-mri>.
3. Y. Lvovsky, E. W. Stautner and T. Zhang, "Novel technologies and configurations of superconducting magnets for MRI," Superconductor Science Technology, p. 2, 2013.
4. R. A. Ackermann, G. G. Pfeleiderer, P. A. Jonas and M. Voss. Patent US10403423B2, 2014.

- * 1. 7 リットルのヘリウムで超電導を維持
- * 2. 2026 年 4 月時点の推定稼働台数
- * 3. OECD の人口 100 万人あたりの MRI 装置保有台数（2024 年：OECD 諸国比較）をもとに推計。
- * 4. 従来マグネットで使用する液体ヘリウムを 1,500 リットルとして算出。
- * 5. フィリップス製 MRI 装置の中での比較



製造販売業者

株式会社フィリップス・ジャパン

〒106-0041 東京都港区麻布台1-3-1
麻布台ヒルズ森JPタワー15階

お客様窓口 0120-556-494
03-4334-7637

受付時間 9:00～18:00
(土・日・祝祭日・年末年始を除く)

www.philips.co.jp/healthcare

改良などの理由により予告なしに意匠、仕様の一部を変更することがあります。あらかじめご了承ください。詳しくは担当営業、もしくは「お客様窓口」までお問い合わせください。記載されている製品名などの固有名称は、Koninklijke Philips N.V.またはその他の会社の商標または登録商標です。

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