

●解 説●

MRI 検査中の人工呼吸器

八反丸善裕・森 雅俊・下田純平・土井研人

キーワード：MRI 対応人工呼吸器，患者搬送，MRI 撮影時の人工呼吸器，MR conditional

I. はじめに

呼吸補助の方式としては、酸素投与、バギング、ネーザルハイフロー、非侵襲的陽圧換気（noninvasive positive pressure ventilation：NPPV）、間欠的陽圧換気（intermittent positive pressure ventilation：IPPV）がある。MRI 検査を行う際には、後述する磁場の影響を受けるため、酸素投与、バギング、IPPV の3つの方法のみが行える。IPPV を選択する場合には、MRI 環境に対応した機種を選択する必要がある。MRI 対応の人工呼吸器の構成は人工鼻（heat and moisture exchanger：HME）を用いた加温加湿を行う回路のみを用いることができ、現在販売されている MRI 対応人工呼吸器は、酸素供給のみで駆動できる搬送可能の機種となっている。多くの MRI 対応人工呼吸器はガス駆動方式であり、電磁弁を用いない機種となっているため、ICU で使用されるような電磁弁制御式の人工呼吸器と比較し、換気量や PEEP の誤差が大きくなってしま¹⁾。しかし、自発呼吸がない患者では強制換気が必要になるため、バギングもしくは IPPV を選択する必要がある。1 回の検査で約 20～40 分程度かかり、用手換気による安定した呼吸管理は容易ではないため、MRI 対応の人工呼吸器が選択される。MRI 対応であっても、強い磁場に影響を受けるため、人工呼吸器によって使用できる範囲が異なる。そのため、保有している人工呼吸器がどのような条件で使用することができるかをあら

かじめ確認しておく必要がある。MRI 装置により、静磁場の広がりには差があるが、我々が測定した結果では 1.5T において、マグネットより 1.0m 離れたところでは、約 30mT の磁場が確認された²⁾。

現在使用可能な MRI 対応の人工呼吸器を表 1 に示した。ガス駆動方式である PARAPAC は強い磁場環境下でも駆動することが確認されている。一方、電磁弁制御式の MR1、Servo i (MRI) は磁場強度の制限が大きいが、動作精度が高く、ICU 専用機とほぼ同等な精度がある。MRI 対応機は通常機種と比較し高額であるため、事前に使用できる範囲をマーキングするなど運用方法を決めておく必要がある。

II. MRI 対応の規格

MR 環境下における機器の使用に関する評価方法を、American Society for Testing and Materials (ASTM) international が出している (表 1)。MRI 対応の機器は ASTM F2503-08 に示される、MR safe、MR conditional、MR unsafe に分類される (表 2)。現在販売されているすべての人工呼吸器はこの分類において、条件付きである MR conditional に該当する。平成 25 年に厚生労働省より、磁気共鳴画像診断装置に係る使用上の注意の改訂が出されており、MR 検査室内に持ち込む可能性のある医療機器は、条件付きで MR 装置に適応性が認められた機器のみ、使用可能となっている。しかし、MR conditional における使用可能条件の規定はなく、そのため MRI 対応人工呼吸器は各医療機器メーカーによる、MR 環境下での動作報告をもとに、各使

表 1 MRI 対応の人工呼吸器一覧

機種名	MRI	SERVOi	PARAPAC	CAREvent
駆動方式	電磁弁制御式	電磁弁制御式	ガス駆動方式	ガス駆動方式
MRI 環境	1.5、3.0T	1.0、1.5、3.0T	3T まで	3T
最大対応磁場強度	50mT	20mT	—	—
最大傾斜磁場強度	—	80mT/m	750 ガウス /cm	40mT/m
使用可能距離	1m	—	30cm	—
その他		NAVA 使用不可		CAREvent MRI のみ使用可能

機種によって対応できる MRI 環境の表記方法が異なる。

対応できる MRI 環境は正常動作を保証するものではないため事前の動作確認が必要。

表 2 MRI 対応機器の分類

分類	MRI 検査	表記
MRI safe	条件なしで検査可	□ 下記に記載
MRI conditional	条件付きで検査可能	△ 〃
MRI unsafe	使用不可	⊙ 〃



(ASTM F2503-08 参照)

表 3 MRI 適合性に関する国際規格

ASTM-	内容	因子
F2052	変位（移動）について	傾斜磁場
F2213-06	回転について	静磁場
F2119-07	アーチファクトについて	周波数
F2182-11a	発熱について	RF 波、SAR
F2503-08	ラベリングについて	—

主にインプラント製品に対する検査規格。

用可能条件が示されている（表 3）。

機器取扱説明書もしくは添付文書に記載されている MR 環境の条件として、①検査範囲における静磁場の強さ [T] (1.5T or 3.0T)、②機器が受ける磁場の強さ [mT]、③傾斜磁場 [T/m]、④使用可能距離 [m] があげられる。①の記載は、対応する MR 検査装置を指すものであり、人工呼吸器が安全に使用できる環境条件ではないことに注意が必要である。一方、②、③の記載は人工呼吸器が安全に使用できる環境条件を示すことになる。④の記載は過去の使用実績を示すもの、もしくは②、③の目安の距離を示すものであり、安全な距離を示すものではないことに注意が必要である。MR 装置ごとに②、③に規定される範囲が変わるため、



図 1 検査室内の磁場確認

機器導入前に使用できる範囲をあらかじめ確認しておくことで安全に使用することができる。

あらかじめ検査室内を測定し、可視化しておくことが有効である（図 1）。

Ⅲ. MRI の特徴、注意点

1. 非磁性体について

MRI 対応の医療機器は磁性体を含まない機器であるという印象を与えるが、これは正しくない。外部磁界に対する磁化の仕方によって、①強磁性体、②常磁性体、③反磁性体に分類される。

1) 強磁性体

磁性体と一般的に呼ばれるものが強磁性体（ferromagnetic）である。

外部から磁界を加えると磁界と同じ方向の磁気を強

く帯びるとともに、外部からの磁界をゼロにしても強い磁気が残る永久磁石になるものと、磁化の影響が少ししか残らないものがある。

鉄、コバルト、ニッケルなどの遷移金属などがあげられる。

2) 常磁性体

外部から磁界を加えると磁界と同じ方向の磁気を弱く帯びるが、外部からの磁界をゼロすると磁気がなくなる。

アルミニウム、白金、空気などがあげられる。

3) 反磁性体

外部から磁界を加えると磁界と反対方向の磁気を弱く帯びるが、外部からの磁界をゼロにすると磁気がなくなる。

水、銅、亜鉛、チタンなどがあげられる。

これ以外に、一般的によく聞く名称として「非磁性体」があるが、これは強磁性体ではない物質のことを指す。

具体的には、②常磁性体、③反磁性体と、④反強磁性体である。

4) 反強磁性体

物質内部で、原子レベルで磁気モーメント（棒磁石）がそれぞれ反対方向を向いて整列することで、全体として磁性を持たない。

酸化マンガンや酸化ニッケルなどの絶縁体があげられる。

MR装置によって作り出される静磁場、傾斜磁場は一般的な環境と大きく異なるため、常磁性体であっても影響を受けると考えたほうがよい。MRI対応の医療機器は、強磁性体の使用を極力抑えることと、強磁性体を常磁性体の筐体で囲うことで、磁場の影響を受けにくくしている。MR1 (Hamilton Medical、スイス) を例にすると、本体部分は常磁性体のアルミニウムとマグネシウムの合金を用いて中の基盤などに使われる強磁性体の影響を小さくしている(図2)。電磁弁は常磁性体にするのは現段階の技術では難しく、電磁弁には強磁性体がいわれている。そのため、電磁弁がついている側面をMR装置から離れるように向けるほうが、磁場の影響を受けにくくなる。過去に報告されている事例として、規定されている磁場よりも強い磁場を受け、内部の基盤部分に故障が見られたことがある。当院で行った実験においても、架台の電源供給の



図2 磁場に対する影響の軽減
常磁性体の筐体でカバーすることで磁場の影響を軽減している(MR1)。

(日本光電工業社より提供)

ラインに使われている金属がMR装置に引かれることを確認している²⁾。

2. 吸引力について

MR装置に強磁性体を近づけるとガントリーに吸着されることは周知の事実である。したがって通常は、持ち込み品の検査によって、MRI検査室には強磁性体が検査室に意図的に持ち込まれることは基本的にはない。しかし、先に示したとおり、MRI対応の機器の一部に強磁性体を使用されており、これらが意図的に検査室内に持ち込まれることになる。また、影響は小さいながらも、常磁性体もマグネットに引き寄せられる。そのため、あらかじめ吸引にかかわる因子を知っておく必要がある。物質の吸引力は次の式に示される³⁾。

$$F = V \frac{\chi}{\mu_0} B \frac{dB}{dl}$$

F = 吸引力、 V = 体積、 χ = 磁化率、

μ_0 = 真空の透磁率、 B = 静磁場強度、 l = 距離、

$\frac{dB}{dl}$ = 傾斜磁場

物質によって体積と磁化率は既定され、環境によって静磁場強度、傾斜磁場が変化する。

物質は一定であるため、持ち込んだ機器とガントリーとの位置関係によって、吸引力が決まる。磁場強度

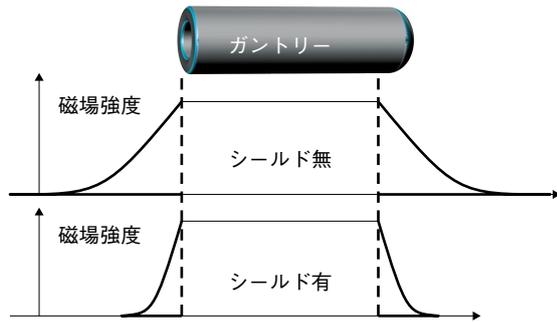


図3 シールドによる磁場強度の変化

シールドの効果によってガントリー外に広がる磁場強度は抑制される。一方でガントリー近位での磁場強度の変化が急峻になるため注意が必要。

は距離に反比例し、減衰するため、静磁場を発生させているガントリーから距離が遠くなるほど物質が受ける吸引力は小さい。また、近年、MR 検査装置は開口部のシールドによって、漏洩磁場の範囲が狭くなるように設計されているため、よりガントリーに近い位置での人工呼吸器を含む機器の使用が可能になっている。しかし磁場の影響を受けにくい範囲が広がった一方で、ガントリー付近の傾斜磁場の変化が大きくなっていくため、ガントリー付近での吸引力が急激に大きくなっていくことに注意する必要がある(図3)。そのため、MR conditional の機器は確実に架台の固定が行われた状態で検査を行うことが大切である。

IV. 磁場による影響

MR 検査室に機器を持ち込む影響は大きく分けて3つになる。1つは、持ち込んだ機器が何らかの障害を受けて動作不良に陥ることである。もう1つは、持ち込んだ機器またはそれらが生じる磁場の変化によって検査画像に影響が出ることである。最後は、持ち込んだ機器もしくはそれらの一部がマグネットに吸引され、検査が行えなくなることである。

持ち込んだ人工呼吸器が影響を受けた例として、テスラパイと呼ばれる磁場監視装置の電源が切られていることに気づかず強い磁場にさらされたというものがある。強磁場にさらされた人工呼吸器は内部基盤の損傷が見られ、基盤交換が必要となった⁴⁾。

検査画像への影響はノイズとして発生することが知られている。ノイズの有無に関しては、Coherent Noise test がある。MR1 を例にあげると、タービンに負担が

かかる設定(高 PEEP、 $F_{I}O_2$ 0.21)では、ノイズが発生することがわかっている。

機種によっては、MRI 対応機と非対応機に共通して使用ができる MRI 非対応の物品が存在しており、それらを誤って MRI 検査室内に持ち込むとマグネットに吸着されてしまう。一度マグネットに吸着した金属を取り外すのは容易ではなく、いったん MRI 装置の電源を落とす必要がある。復旧には数時間から1日を要し、他の検査に与える影響は大きい⁵⁾。

V. 検査中の人工呼吸器

検査中の人工呼吸器設定は基本的に ICU または病棟と同じで問題はない。検査中の安静が保てない場合などは、体動の影響が MRI に出てしまうため、あらかじめ鎮静をかける必要がある。これらの鎮静によって、自発呼吸が弱くなる場合には、前もって強制換気に設定する。実際には、人工呼吸器管理中に MRI 検査を行う背景として、脳梗塞の評価が一番多く、自発呼吸が弱いことから強制換気を行うことが多い。

MRI 対応人工呼吸器は非対応機に比べ高価であるため、専用機として用いられることが多く、検査時のみ使用することになる。そのため、ベッドサイドで使用している人工呼吸器からの切り替えが必要になる。現在使われている MRI 対応の人工呼吸器はコンプレッサー内蔵の搬送可能機であるため、ベッドサイドから使用することも可能である。この際注意する点として、酸素ポンベの取り扱いがあげられる。まず、通常の搬送と同様に設定酸素濃度、換気量、ベースフローによって消費される酸素量が規定されるため、搬送前あらかじめ計算し、余裕を持たせることができるか確認しておくべきである。必要に応じて、設定変更、ジャクソンリースマスクの使用も検討する。ほかにも注意すべき点としては、酸素ポンベを検査室に持ち込まないことである。酸素ポンベは MRI 検査装置に吸着する危険があるため、リカバリールームなどの前室でポンベを外す必要がある。

また、MRI 検査室内は磁場の影響があり、不安定な環境であるため、患者使用前に検査室内で動作確認を行うことが推奨されている。長い回路が搬送時の取り回しに困ることを考えると、前室まで搬送用の人工呼吸器もしくは用手換気で搬送したあと、検査室で MRI 対応人工呼吸器に切り替えることが望ましい(表4)。

表4 人工呼吸器の切り替え

	病棟	搬送	検査室
ガス供給	 医療ガス配管	 酸素ポンペ	 医療ガス配管 (酸素)
換気方法	ICU 機	用手換気 搬送用 MRI 対応機	用手換気 MRI 対応機

人工呼吸器の切り替えは通常2回必要になることが多い。MRI 対応機で搬送することで人工呼吸器の切り替えが1回で済む。しかし搬送中に使用した酸素ポンペの検査室内への持ち込みはできない。

検査中はトラブルに対応できるように、検査室内に1人以上はいたほうがよい。鎮静をかける場合、シリンジポンペを用いた投与ができないため、定期的にシリンジで直接投与する必要がある。

そのほかの注意事項として、ループによる熱傷があげられる。体を介したループ構造が作られている場合、検査中の強い磁場変化によって、誘導起電力が生じる。発生した誘導起電力によってループ内に電流が流れ、抵抗が大きい箇所にて熱を生じることになる。そのため、検査中の体位や人工呼吸器の回路の取り回しには注意する必要がある。

VI. ま と め

MRI 対応の人工呼吸器の性能の進歩は大きく進み、大きな恩恵を受けられるようになった。しかし一方で複雑化する構造のため、安全な使用方法が煩雑化している。「MRI 対応」の記載を過信することなく、事前のシミュレーション、患者接続前の動作確認を行うことが、安全性を第一に考えるうえで必要となる。

本稿の全ての著者には規定された COI はない。

参 考 文 献

- 1) Chikata Y, Okuda N, Izawa M, et al : Performance of ventilators compatible with magnetic resonance imaging : a bench study. *Respir Care*. 2015 ; 60 : 341-6.
- 2) 森 雅俊, 八反丸善裕 : MRI 対応人工呼吸器の安全な導入について. 日本呼吸療法医学会第 41 回学術集会抄録集. 大阪, 2019.
- 3) 鎮西清行 : 手術支援と MRI Compatibility. *BME*. 1997 ; 11 : 72-7.
- 4) 宮庄浩司 : MRI 対応人工呼吸器 HAMILTON-MR1™ の使用経験. *人工呼吸*. 2017 ; 34 : 94.
- 5) Greenberg KLZ, Weinreb J, Shellock FG : "MR conditional" respiratory ventilator system incident in a 3-T MRI environment. *Magn Reson Imaging*. 2011 ; 29 : 1150-4.