

MR 検査の安全性に関する Q & A

Emanuel Kanal¹, 妹尾 淳史²(訳)

¹Department of Radiology, University of Pittsburgh Medical Center, Pittsburgh, PA, USA

²東京都立保健科学大学放射線学科

はじめに

MR 検査における安全性に関する問題は非常にシビアであるにもかかわらず、医療の現場では毎日直面している問題でもある。また、安全性の論議を行うためには問題となる事例について、一つずつ理論的に検証する必要がある。そこで、MR 検査の安全性についての第一人者であるピッツバーグ大学メディカルセンターの Dr. Emanuel Kanal がインターネットのホームページ上 (<http://kanal.arad.upmc.edu/mrsafety.html>) に掲載されていた内容のうち、RF に関する部分を許可を得て日本語訳したものを紹介する。これは過去の膨大な資料や経験をもとにして、それぞれの質問に対しても具体的に回答しているので参考にしていただきたい。

Q1

MR スキャンによる熱傷は、どのくらいの頻度で起こるか？

A1

RF の振動磁場が患者の組織内で誘発された電圧や二次的な電圧降下によって熱傷を誘発したという報告がアメリカで複数報告された。これらは、実際には 1.0T 以上の MRI 装置に限

定されているようである。この問題に関する我々自身の調査と FDA が調査したデータベースの中で、我々は 1985～1993 年の間に MR スキャナーの中で明白に起こった 200 を超える RF と関連した熱傷を明らかにすることができた。しかしながら、米国だけで毎年およそ 700 万以上の MR 検査を実行していることを心にとめておいていただきたい。したがって、MR 撮影で RF と関連した熱傷は、ほとんどがまれな出来事である。しかし、それは必ず起こる可能性がある。また、特に最近より強い RF 磁場強度の MR 装置の出現でそのような熱傷の発生率が増加したことは、高速スピノエコーのような日常的な臨床の MR 撮像プロトコルでは注意しなければならない。

Q2

永久的なアイラインを入れ墨した患者を撮影するのは安全か？

A2

永久的な入れ墨でアイラインをした患者について、第二度の熱傷（すなわち、水ぶくれになる）の報告を受けた。これらの患者が RF 送信を頭部コイル若しくはボディコイルを利用して検査されたかどうかに関しては明確ではない。

キーワード MRI, safety, RF power, heating effects, burns

*これは、日磁医誌 19 巻 5 号に掲載された特集「MRI の安全性とその実際」の補遺である。

それにもかかわらず、RF パワーが原因でそのような局所的な熱傷の事件が起こったと仮定しなければならない。特により高い静磁場の MR 画像処理システムで患者を検査することに先立ち、すべての可能な予防措置をとることは、もちろん賢明である。より高い静磁場システムは、同様により高い RF 送信周波数と関連する。患者への熱伝導は、送信、受信周波数の 2 乗に比例する。

そのような予防措置としては、危険/利益の比率を考えて危険が大きいときは検査を行ってはいけない。たとえ直接の RF パワーの蓄積がこの入れ墨をした部位の温度を上昇させたとしても、あらかじめ氷のうなどで局所を冷やすことはある程度効果的である。また、検査を行う場合にはインフォームドコンセントをとる必要がある（検査を行うことによって患者は十分な利益を得ることができる）。

Q3

残存している神経刺激線（neurostimulator wire）で腰部脊柱管の中でバッテリーパックを除去された患者に対する MR 検査について

A3

被害が起こるか否かは不確かであるが、強磁性材質を含む場合には磁場による移動や RF パルスによる熱伝導などによって非熱傷障害あるいは熱傷が起こり得る。また誘導電圧/電流で隣接組織（神経節、後根神経節など）の神経刺激を誘発することもある（速度の速い勾配磁場の変換による影響も含まれる）。強磁性材質を含まず、検査部位が神経刺激線から離れている場合のみ検査を行う。1.5T でもバッテリーなしの患者で行ったことがある。この場合、RF あるいは/および勾配磁場により神経刺激線が励起されなかったために、事故は起こらなかった。しかし、検査部位に神経刺激線がある場合には個人的には検査を行わないようにして

いる（一般的に安全とされても）。どうしても行わなければならない場合には、個々の患者で危険/利益を検討する必要がある。1995 年の RADIOLOGY に読者の質問に答える MRI 装置内での RF パワーに関するすばらしい報告がある。

Q4

子宮内避妊器具（IUD）を装着している患者に対する検査について

A4

子宮内避妊具はプラスチックや金属など、種々の材質のものがあり、受精卵の着床を阻害する避妊具である。銅附加 IUD（7 の字型、T の字型）あるいは金属性の IUD では、誘導電流発生又は発熱の危険性がある。これらにより妊娠を望んで IUD を外したとしても、子宮内膜の繊維性瘢痕形成などによって不妊になる原因ともなる。ただし、これは MRI ではなく IUD 自身の副作用として知られているが、これを MRI のせいにする患者もでてくるであろう。MRI の検査部位から離れている場合には IUD 内の電流や熱は少ないので、最悪でも少なくする努力が必要であろう。1987 年の RADIOLOGY 162, p311-314 には 40 ml の水中の IUD によるアーチファクトは少なく、発熱も少なく検査が安全であることが報告されている。しかし、この報告は RF コイルと IUD の位置関係には触れていない。また、水中内の熱の特性や希釈度や RF パワーには触れていない。しかも、10 年後の現在は FSE などのシーケンスの出現により、更に RF パワーが大きくなっている。私の個人的な意見では IUD による電流や熱発生は大したものではないと考えている。ピッツバーグ大学メディカルセンターでは、金属性の IUD の患者でも躊躇なく検査を行っている。特に頭部や膝では問題は更に少ない。避妊リングについての知識は少ないが、底

部に強磁性体部分を含んでいて、移動による避妊の失敗（妊娠）の可能性があるために、このような情報をあらかじめ患者に知らせる必要がある。

Q5

ペースメーカは装着されていないが、心臓ペースメーカのリード線のみが残存している患者の検査は安全か？ リード線が関心領域外であったら安全か？

A5

リード線に関する文書がまだないのが現状である。リード線に関する懸念として以下の3点がある。

1. 強磁性体としての相互作用：強磁性なのかどうかよく知らないが、動きに関しては私は個人的には安全と考えている。
2. 発熱効果：特に1.5Tでは明らかにある。リード線が血管内にある場合（大部分）には熱が拡散するため余り問題とならない。血管外のリード線では局所的な組織の熱傷が起こる可能性が高い。リード線への熱蓄積は、RFの強さ、RF送信器とリード線の距離などの要因によっている。送信/受信四肢用コイルでは熱蓄積はゼロに近い。しかし腰椎や胸椎の検査で、駆幹用コイルでは強い熱蓄積がある。
3. 不整脈：リード線内に生じる誘導電圧/電流による。

犬の実験 (American journal of Cardiology 57: 437-440, 1986) でDDD pacemaker およびリード線で不整脈が生じた。これはRF変動磁場で生じ、勾配磁場の変動では生じなかった。Cordis 415A pacemaker (AAI mode) とリード線の実験 (American journal of Cardiology 10: 782-786, 1987) で rapid cardiac pacing は心室内にリード線がある場合にRF変動磁場で生じた。ペースメーカなしでリード線のみでは不整脈は生じにくい。より強い誘導電圧/電流

が必要であろう。しかし、だからといって安全とは言にくい。

まとめると、リード線のみでは不整脈は起こりにくいと考えているが、検査部位とリード線の存在する部位が同じであるか近い場合には、個人的には検査を避けるようにする。これが遠い場合には検査を行ってよいと考えられる（送信/受信四肢用コイルの場合など）。ただし、上記の論文のデータは10年前のMRI装置での結果で、現在の装置の勾配磁場変動 (dB/dt あるいは磁場の変動時間) と比べると5~10分の1と考えられる。新しい装置での再検討が必要である。

Q6

ペースメーカ装着者の検査は安全か？

A6

ペースメーカに関する懸念として以下の4点がある。

1. 強い静磁場の中での動き
2. 一時的あるいは永久的なペースメーカ機能の誤作動
3. RF変動磁場によってリード線内に生じる発熱効果
4. リード線内および/あるいは心筋内に生じる誘導電圧/電流

今までに少なくとも24例の症例でペースメーカを装着したまま検査が行われている。そのうち5例で死亡している。これらの死因は不明であるが、静磁場によるリードスイッチ回路の閉鎖によると推定されている。リードスイッチ回路は15 Gauss前後で閉じ、新しいペースメーカでは5~7 Gaussで閉じる。リードスイッチ回路が閉じると非同期モード（あらかじめ設定されたペースで作動する）に入る。しかしこれが死因ではないと考える。なぜなら何千人ものペースメーカ装着者は外来で一時的に非同期モード状態におかれているが、大きな問題

は生じていない。したがって、静磁場だけの問題ではないであろう。

Cordis 415A pacemaker の実験 (Journal of the American College of Cardiology 10 : 782-786, 1987) で RF パルスを止めると、非同期モードにも設定されたペースにも移行しないで、全く機能が停止してしまった。Pacesetter model 283 と Intermedic model 283-01, Medtronic model 7000A の実験 (American Journal of Cardiology 57 : 437-444, 1986) で、0.5T (20.91 MHz) 下で 10 kW の RF パルスでペースメーカからの信号が全くなくなった。

その他、動物や人での実験で頻脈性不整脈および/又は低血圧が生じたとの報告がある。これらはリード線に生じた誘導電圧/電流によって心筋の電氣的、生理学的収縮機能が不十分となるためと考えられている。ある放射線学者は選択した TR のペースで心拍動をペースングしたと報告しているが、RF 変動磁場の変動サイクルは TR よりずっと速いため、私にはこの現象が信じられない。にもかかわらず、頻脈性のペースングは心拍出量を不十分にするため、これが MR 検査中の死亡の原因になることは考えられる。興味あることに、1.5T 装置で、RF 変動磁場は頻脈性のペースングを生じさせるが、勾配磁場の変動は生じさせないと報告されている (Cordis 415A pacemaker の実験 (Journal of the American College of Cardiology 10 : 782-786, 1987, by Hayes DL, Holmes DR Jr., Gray JE)。発熱効果はペースメーカあるいはリード線近くの組織 (心筋あるいは心内膜) に熱傷を生じさせる可能性がある。

いずれにせよペースメーカは MRI 検査の絶対禁忌と見なさなければならない。しかし、今後の症例や情報の蓄積でこの判断は変化する可能性がある。統一見解 (心臓学者と放射線学者の間の (恐らく Institutional Review Board および/あるいは Human Rights Committee)) ではないが、不整脈とペースメーカの機能不

全、死亡の可能性を説明した上でのインフォームドコンセントなしに、また例外的に強に強い MRI 検査の必要性があったにしても、今日においてペースメーカは MRI 検査の絶対禁忌と見なさなければならない。ペースメーカに依存性のない患者で、躯幹用コイルを使用しない場合、積極的なモニターを行いながらの検査であれば安全性が高いのではないかとの意見がある。安全に検査が行えるプロトコールが既に作成されつつある。Dr. Rod Gimbel (Cleveland Clinic) や Dr. Shellock (University of Pittsburgh Medical center) に相談することを勧める。にもかかわらず、5名の死亡症例があること、そのうち1名はペースメーカに依存性のない患者であったことを忘れてはいけない。

Q7

Swan-ganz カテーテルを挿入されている患者の検査は安全か？

A7

カテーテルの皮膚への挿入部でカテーテルが溶解してしまった1症例の報告がある。恐らく誘導電圧/電流によってカテーテルの電気伝導体 (electrical conductor) 内に生じた熱によるものであろう。単純 X 線フィルムで検知される金属を有するカテーテルでは MRI 検査を行わないようにしている。ただし、検査部位 (RF ラジオ波が照射される部位) がカテーテルの挿入部位から離れているとき (膝など) は問題ない。高磁場では周波数の高い RF 波を用いているが、この場合は磁場の高さに関係なく上記の方法で検査の適応の有無を決定している。しかし、個々の症例についてそれぞれ危険/利益のバランスを考慮して臨床 (あるいは研究) MRI 検査の実施の有無を決定していくことが重要である。

Q8

関節器具 (金属製の装具、挿 (移) 入れ物、物質) は安全か？

A8

以下の3点が問題となる。

1. 強い静磁場の中での回転性および/あるいは移動性の引きつける力。
2. 金属内あるいは隣接する組織内に流れる誘導電圧/電流による発熱効果。主として撮像中のRF変動磁場によっている。撮像していない間は問題ない。
3. 金属内あるいは隣接する組織内に流れる誘導電圧/電流による神経筋刺激による。

大切なのはどのコイルがRF送信に使用されているかを知ることである。自分の施設のMRIで確認する必要がある。(ちなみにピッカー社製のMRIでは躯幹用コイルがすべての検査でRF波を送信している。)次に大切なのはRF波を送信するコイルと体内金属との距離である。RF波によるパワーの蓄積は静磁場強度あるいは送信周波数に比例する。低磁場ほど、また低フリップ角(グラディエントエコー法で用いる)ほどそのパワーは弱く、特に180度パルスが多く用いる高速SE法では非常に大きい。表面近くに埋め込まれている金属については手で持てる強い磁石で強磁性体かどうかの確認は容易である。磁石で引きつけられないことを確認の後、ゆっくりと装置内へ入れる。次に同時に患者に引っ張られるような感じあるいは押されるような感じ、また異常な感じがあったときはすぐに知らせるようにしてもらう。非強磁性体からなる関節内金属による副作用の報告はない。1984,5年からピッツバーグ大学メディカルセンターでも多くの非強磁性体からなる関節内金属を有する症例で検査を行っているが、問題は生じていない。磁石に引きつけられるような強磁性体でなければ、個人的には検査を行うようにしている。

Q9

ステンレス針は安全か？

A9

以下の4点が問題となる。

1. 強磁性体で静磁場に引きつけられる。
2. 発熱効果。
3. RF波あるいは勾配磁場の変動磁場によって金属針内に流れる誘導電圧/電流。
4. 金属針によって起こる磁場の不均一性によるアーチファクト。

シールドなしの1.5T装置で試した結果、金属針に強磁性効果はなかった。しかし、検査前に体内に入っているものと同じサンプルを取り寄せ、事前にテストしておくことは重要である(ガラス板の上に置くかつるしてMRIの中に入れ調べる)。アーチファクトは多くの場合小さく問題とはならない。1例で上腕の皮膚の縫合部での疼痛の報告があるが、この場合1.5Tの装置でRF送信に躯幹用コイルが使用されていた。発熱効果によるものか？閉鎖回路における神経筋刺激によるものか？原因は不明であるが、そのような有害な感覚が生じ得るということは知っておかなければならない。検査を行う場合には氷のうあるいは冷湿布が有効的である。また頭部用コイルは躯幹用コイルより安全である。直線偏波コイルより円偏波あるいは直交偏波コイルの方が安全である。

まとめると、皮膚にステンレス針を有する症例では検査はなるべく行わないようにするが、インフォームドコンセントを得て、特に高磁場で躯幹用コイルを用いるときには氷のうあるいは冷湿布であらかじめ冷やしておいて検査を行う必要がある。

Q10

心バイパス術後の心外膜内心臓ペースメーカーのリード線は安全か？

A10

これは非常によい質問である。まだ議論されている段階でもあるため、明確な解答ができる

かどうか不安である。心臓外科手術では細い金属ワイヤーを一端は心外膜(心筋に非常に近い)に、他端は前胸壁に置き、緊急時の電氣的コントロールに利用する。

何事も起こらない場合にはワイヤーは容易に胸壁から引き抜かれる。ときにワイヤーが取り外せないことがある。そうした場合、外科医はワイヤーの出口部の皮膚を圧迫して、ワイヤーを切ることによって、胸壁深くに埋めて見えなくしてしまう。いわゆる“残存する心外膜内のペースメーカーのリード線”状態となる。

ピッツバーグ大学メディカルセンターの外科医の1人は、1人の患者についてリード線を残したまま退院させたと言っている。西海岸で勤務する名声高い尊敬すべき放射線科医は常に、ルーチンで“残存する心外膜内のペースメーカーのリード線”状態の患者を見ると訴えている。誘導電圧が心外膜(心筋)端と皮下組織端との間に生じ、ワイヤーが良好な導線状態となる危険がある。

私の考えでは、(考え以上のものではなく、事実ではないが、)この可能性を軽く見てはいけなく考える。心外膜リード線が残存する心臓が RF パルスや勾配磁場の中に存在する場合の危険性は高い。何百、何千の心外膜リード線が残存する患者が MRI 検査を既に安全に行っており、全く安全であるという意見がある。

私の意見では

1. 今までが安全であったからと言って、将来的に安全であるとは言えない。慎重に扱わなければいけない問題である。
2. 更に、本当に何人の症例がワイヤー部の MRI 検査 (RF/勾配磁場の活動中) を行っていて、その結果はどうであったのか? 今までにも MRI 検査中の説明の不十分な重篤な副作用、痙攣、死亡などが数多く報告されている。
3. これらがここで問題にしている体内金属によっていないとは言いきれないのではないか。

4. これまでの再現性のある実験結果が正しければ、MRI システム中では残存するワイヤーに間違いなく誘導電圧が生じる。熱傷、火傷の危険性もある。これは低磁場より、例えば 1T などの高磁場で、より大きい。

まとめると、“残存する心外膜内のペースメーカーのリード線”状態の症例では十分な注意と検査前の検討が必要である。MRI を行う利益と、危険性、代わりに行わなければならない検査法の侵襲性などを考慮することが重要である。私は絶対の禁忌とは考えないが、よほど強い検査適応がない限りは MRI 検査を行わない。私より賢く、経験があり、名声のある医者がこれらの症例の検査を行っていることを強調する。

この問題は将来的にも消滅しないであろう。静磁場、勾配磁場の立ち上がり時間、振幅の最大値、RF パワーは更に上昇していくと考えられ、読者は誰の意見に従ったらよいかを判断すること。

Q11

金属ガイドワイヤーによる血管内の温熱で最も重要なことは何か?

A11

ワイヤーの長さは何の位か? 静磁場との角度は? 素材は何か? これらは重要な問題である。静磁場が高いほど周波数も高くなり、発熱効果は上昇する。

$$\text{電圧 (V)} = \text{電流 (I)} \times \text{抵抗 (R)}$$

水流で考えると電圧は全体の水圧に相当し、電流はある地点を通過する水流速度、抵抗は水流に対する抵抗に相当している。

$$J = I^2 \times R \times T = \text{仕事} = \text{エネルギー} = \text{熱} = \text{力} \times \text{距離}$$

ここで J はジュール、T は時間とする。

$J/s = \text{仕事/時間} = \text{ワット} = \text{力}$

長さは長いほど、ワイヤーの径は大きいほど、抵抗は少ないほど、RF 磁場に垂直なほど発熱効果は大きい。心拍出量が低下するほど発熱は大きい。

また TR, TE, フリップ角, 単位時間当たりのスライス数やパルス数が熱発生の決定的な要因となる。

Q12

冠動脈バイパスグラフト (CABG) を行った症例の MRI 検査は安全か？

A12

数千の冠動脈バイパスグラフト (CABG) を行った症例が問題なく MRI 検査を行っている。しかし、最近、非常に速いスイッチングの勾配磁場下で不整脈を生じた1症例の報告 (ドイツのグループ, 1996年 ISMRM にて) がある。パルス系列と不整脈の関係がありそうである。私個人としては冠動脈バイパスグラフト (CABG) を行った症例で胸部の検査を行う場合でも安全と考え検査を行っている。しかし EPI 法を含めた非常に速いスイッチングの勾配磁場を用いる検査法下での安全性の検証は続けていく必要がある。

Q13

ボディピアスを装着している患者は MRI 検査時に金属を外す必要があるか？

A13

比較的最近装着したために、容易に外せない

症例もある。どの部位に装着しているかわかりであろう。0.3T の装置においても事情は同じである。

ボディリングによる危険の可能性は以下に示す3点ある。

- 1) 強磁性体では組織の障害, 疼痛, 不快感を生じさせる。
- 2) 誘導電圧/電流は組織の発熱および/又は神経筋刺激を生じさせる。
- 3) アーチファクトによる診断の障害。

我々のピッツバーグ大学メディカルセンターでは手で持てる強力な磁石で強磁性か否かの検査を行う。非強磁性で検査範囲に入らない場合は検査を行う。一方、非強磁性で検査範囲に入る場合は氷のうあるいは冷湿布で局部を冷やして、熱傷を防ぐようにして検査を行う。宝石類, 装飾具なども同様に扱い、外してから検査を行う。この場合、上記の理論の説明を行い、検査を行うか否かの判断を患者にしてもらようにする。私は危険について説明後、患者が断った場合、どのように検査を行う意味があっても MRI 検査を行わないようにしている。患者の自主的な拒絶があった場合には検査を勧めないし、また医学的アドバイスに対して患者が喜んで望む形でのインフォームドコンセントなしにも検査を行わない。低磁場では強磁性効果や発熱効果は減少するが、問題は低磁場でも同様である。MRI 検査の適応, 金属の存在部位, 危険/利益のバランス, 代わりに行う画像検査あるいは診断法を十分に考慮して個々の症例ごとに検査前に最も良い最終決定を下すようにする。

Questions and Answers on the Safety of MR Examination

Emanuel KANAL¹, Atsushi SENOO²(translation)

*¹Department of Radiology, University of Pittsburgh Medical Center
Pittsburgh, PA, USA*

²Department of Radiological Science, Tokyo Metropolitan University of Health Sciences

There are not only the daily problems relating to the safety measures in the medical field, but also the problems on the safety in the MR inspection are very critical. In order to discuss the safety problems they must be verified one by one. Dr. Emanuel Kanal of the University of Pittsburgh Medical Center, who is well known for the safety of MR inspection, has reported its importance in the internet's home page. Thus, a part of his contents is translated into Japanese.