

表 11-3. クエンチが起きた装置に磁性体の吸着があったか (該当事例のみ)

	度数	割合 (%)
有	2	10.5
無	17	89.5
無回答	0	0
合計	19	100.0

今回の震災発生時やそれ以降にクエンチが発生した事例で、マグネットに見られた磁性体の有無。割合 (%) は該当事例数に対する比率を示す。

表 11-4. 今回の震災以前におけるクエンチ発生の有無 (施設単位, 超伝導装置のみ)

	度数	割合 (%)
有	37	11.1
無	275	82.8
無回答	20	6.0
合計	332	100.0

今回の震災以前にクエンチを経験している施設の数。「無」は分からない場合を含む。割合 (%) は超伝導型 MR 装置を設置している全施設に対する比率。

表 11-5. 今回の震災以前に発生したクエンチののべ回数 (施設単位, 超伝導装置のみ)

	度数	割合 (%)
1回	28	75.7
2回	5	13.5
3回	2	5.4
4回	0	0.0
5回	1	2.7
6回以上	0	0.0
無回答	1	2.7
合計	37	100.0

今回の震災以前にクエンチを経験している施設におけるクエンチの発生回数。各度数の割合 (%) は、クエンチを経験している施設数に対する比率。

が指摘された。

災害時の MR 検査の安全確保に関する指針

問 12 では 2011 年 3 月 15 日に日本磁気共鳴

表 11-6. 今回の震災以前に発生したクエンチの原因 (施設単位, 超伝導装置のみ)

	度数	割合 (%)
設置時に発生	4	10.0
通常の運転時に発生	7	17.5
施設のトラブルに関連して発生	7	17.5
メンテ作業時に発生	4	10.0
天変地異に関連して発生	0	0.0
原因不明	18	45.0
無回答	0	0.0
合計	40	100.0

今回の震災以前にクエンチを経験している施設におけるクエンチの発生原因。各度数の割合 (%) は、延べの報告数に対する比率。

医学会が出した「災害時の MR 検査の安全に関する緊急提言」⁵⁾の震災地への普及程度を評価した。同提言を読んだとする回答が 43.2% であり、震災の急性期でありインフラ障害 (電気, 水道, 通信) の影響が大きい発災後 1 週間以内に読んだ回答者は 16.6% であった (表 12-1)。一方で、震災後 1 年 3 か月を経過した時点で緊急提言を知らなかったとする回答者も 50.4% に達した。緊急提言を読んだとする回答者で、緊急提言が何等かの役に立ったとする回答は 78.8% であり (表 12-2), 具体的に役に立った項目の記入は 89 件で (問 12-③), 指摘事項は「点検項目が具体的に記載されていた」(34 件), 「今後の震災対応や安全管理の参考になる」(18 件), 「災害対策マニュアルの作成資料として活用」(11 件), 「今回の震災時に行った判断の妥当性を確認できた」(10 件), 「緊急対応マニュアルとして利用した」(9 件), 「クエンチに関する情報が役だった」(7 件) に分類された。他には「機関内で震災対策のための説明資料として利用できた」「他に情報がない中でこのような情報があることが心強かった」(3 件), 「目立った被害がない場合はユーザーの自主点検により再稼働させざるを得ない」などの意見もあった。「緊急提言」を知った機会

東日本大震災によるMR装置の被害

表 12-1. 「災害時のMR検査の安全に関する緊急提言」を読んだか（施設単位）

	度数	割合 (%)
公表後1週間以内に読んだ	76	16.6
1週間後以降に読んだ	55	12.0
1ヶ月後以降に読んだ	67	14.6
その緊急提言は知らなかった	231	50.4
無回答	29	6.3
合計	458	100.0

回答者が「災害時のMR検査の安全に関する緊急提言」を読んだか、読んだ場合はその時期について。公表（2011年3月15日）は日本磁気共鳴医学会のホームページで行われ、翌16日に厚生労働省から各都道府県に通知された。割合（%）は全回答数に対する提言を読んだとする回答の伝達時期別の比率（施設単位）。

表 12-2. 「緊急提言」は役に立ったか（読んだ回答者のみ）

	度数	割合 (%)
大変役に立った	56	28.3
一部分が役に立った	100	50.5
役に立たなかった	32	16.2
無回答	10	5.1
合計	198	100.0

「災害時のMR検査の安全に関する緊急提言」を読んだとする回答者の提言の有用性に関する印象。割合（%）は提言を読んだとする198件の回答に対するそれぞれの回答区分の比率（施設単位）。

は日本磁気共鳴医学会のホームページが最も多かったが（「読んだ」とする回答の38.9%）、それ以外にもさまざまな情報源から緊急提言について情報を得ている（表12-3）。今後このような指針に追加すべき事項の記入は12件で、このような緊急情報の周知の手段は複数必要である。MR検査従事者以外でも理解できる資料の必要性、施設ごとに追加情報を整備して実情に合ったマニュアルに直す必要性等の意見がよせられた。

表 12-3. 「緊急提言」を知ったのはどのような機会か（読んだ回答者のみ）

	度数	割合 (%)
日本磁気共鳴医学会のホームページ	77	38.9
その他のインターネット情報	29	14.6
職場での伝達	31	15.7
行政機関からの通知	21	10.6
MRメーカーからの案内	27	13.6
学会や技師会等からの連絡	23	11.6
知人を通して	11	5.6
その他	9	4.5

「災害時のMR検査の安全に関する緊急提言」を読んだとする回答者が緊急提言をどのようなソースから入手したか。度数は重複回答を含む全回答を示し、割合（%）の母数は回答施設数（198件）。

今後の震災への備え

問13：今後このような指針に追加すべき事項の記入は106件で、災害対応マニュアルの整備（33件）、災害対応方針の確認と見直し（17件）、定期的な防災訓練・避難訓練の実施（15件）、MR検査室の再整備（12件）（コイルの落下防止、マグネットの固定、建具の改修等）、非常電源の確保（8件）（MR装置の冷却系等の非常電源への接続、自家発電機の導入など）、懐中電灯やハンマー等の非常用備品の整備（3件）の回答がよせられた。事情によりまだ今後の震災対策への取組みを開始できていないとする回答が9件あった。建物の免震化、津波対策としての防水工事や施設の移転、MR室での地震速報の受信等情報収集体制の強化、職員の安否確認システムの導入などの取組みも報告された。今後のMR装置の機種選定には、震災時の対応も考慮に入れたいとの意見も見られた。

考 察

震災にかかわるMR装置の安全対策は大きく分けて、1) 震災を想定した防災対策、2)

発災時の危機管理, 3) MR 装置の復帰における安全管理, の3点からとらえられる。さらに, 発災時の危機管理は, 患者や検査担当者の安全確保, MR 装置の被害の最小化, 二次災害の回避の3要素が含まれる。本調査以前に地域レベルでの調査⁶⁾や個別の事象⁷⁾が速報されているが, 今後の防災対策を考える上では震度や津波の状況, MR 装置が設置されている建物の構造などの要因との関係を明らかにした上で定量的に評価しなければならない。また, MR 装置に生じた具体的な事象だけでなく, 発災時やその後に MR 検査担当者が実際にどのような事態に遭遇し判断を迫られたかを明らかにしなければ, 解決すべき問題が何であるかが分からず, つまり, 防災対策の具体的な目標が策定できない。本調査ではこれらの着目点を考慮した設問構成を考えた。

MR の安全のガイドラインは MR の物理量に関する規制値の形で IEC (国際電気標準会議, International Electrotechnical Commission) 規格: IEC60601-2-33/JIS-Z4951 (第3版)⁸⁾に集約されている。震災時における MR 装置の危機管理や安全対策を考える上で, MR 装置の安全規格の根拠となっている物理工学的な知識は不可欠である。しかし, IEC 規格は大震災がほとんど見られない欧米で作成されたものであり, 結果として平時における MR 装置の安全規格になっており, 天災に対する対策については記述がない。今回の調査においても震災時においては平時においては起こり得ない事象が確認された。さらには震災時においては MR 装置を保有する施設が自ら危機管理に乗り出さざるを得ない実情が明らかになった。今回のような広域の大震災では, 通常通りに近いメーカーの即時的な対応が可能であったのは被害が軽微な地域やサービス拠点から近くて交通が遮断されていない地域, あるいはサービスマンがたまたま来院していたなど, 限られた条件下にあった施設に限られた。震災後にメーカーのコールセンターに通じず「支障が大きかった」

とする回答は 14.8%であったが, コールセンターへの不通は実際にはもっと高率であったと推測される。コールセンターに連絡が通じても被災現場で何が起きているか実情が十分に分からない状態で適切な指示が出ているのかどうか疑問視する意見も見受けられた。MR 装置の遠隔モニタシステムも通信障害のために機能しなかった実例も報告されている。このように, 被災現場の判断だけで対処しなければならない期間が最大2週間程度は続いていたことが判明した。43.9%の施設で「MR 装置メーカーによる点検作業を待てないので, 病院(施設)スタッフによる点検で再稼働させた」との認識を示しており, 53.0%の施設が3日以内に装置の再稼働を行っているのに対し, メーカーによる復旧作業が発災後3日以内に開始されたのは 29.2%の施設に留まっている。今回の調査結果は震災時における MR 装置の再稼働の要請に対処する指針が不可欠であることを如実に示している。特に, 震災時の危機管理に関しては装置メーカーや機種に依存しない汎用性のあるガイドラインであることが重要で, その内容を個々の施設の実情に合わせて運用できるものが望ましい。阪神・淡路大震災の被災調査報告でも, 「医療機関の MR 担当者からの要望として, メーカーごとではなく共通の機器の安全基準, 機器設置の安全基準, 災害対応マニュアルの作成が強く望まれている」と報告されているが, 15年経ってもこの課題は未解決のままであった^{9),10)}。

被害事象の発生傾向

今回の調査対象となった7都県では 94.7%の施設が震度5弱以上の地震にみまわれており, 日常的に経験する震度1~4程度の震度であった地域から十分な比較対象サンプル数が得られていない。特に震度3以下の施設は皆無であった。したがって, 震度5弱以上の地震と津波による被害をそれ以下の震度であった地域と厳密に比較して論じることができない。施設の所在地域の震度は, 気象庁が観測地点ごと

に計測した値で最も近い地点の数値であり、施設が建築されている地盤や建物の構造によりMR装置が実際に受けた衝撃そのものを正確に反映していない可能性がある点には留意すべきである。地震によるMR装置への影響は、震度だけでなく、その地点に到達した地震波形の物理的な特徴、地質や地形、建築物の状況（構造、施工方法、建築時期）、MR装置の設置状況、津波や火災の影響など多くの因子が関係すると考えられるが、施設ごとにこれらの条件が異なるため、実際の影響は極めて複雑と考えられる。特に免震構造の施設ではMR装置が実際にさらされた震度は最寄りの地震計の示した数字とは異なるため、免震構造の施設ではその建物に設置された地震計で測定した値でなければ正確な評価ができない。建築や地震の専門家ではない回答者を対象とした大規模調査でこのような詳細情報について多数の回答を得ることは困難と予測されるため、本調査の対象者が回答可能な範囲である建物の基礎情報とMR装置の設置状況、破壊力の主因などを質問項目とした。

筧・中山らの報告では、医療機関の機器被害としては画像診断部の被害が目立ち、震度6弱で30%の施設に被害が発生し大破の例が見られ始め、震度5と6の間に被害程度の境界があるとの所見を得ている¹⁾。今回の調査結果では、震度5弱と5強の間に被害程度の差が見られたが、調査対象がMR装置のみであること、MR装置が建物一体型の装置であり装置本体以外の設備部分の被害も含まれること、被害事象の尋ね方がMR装置に固有のより詳細な内容を問うている、などの違いを考慮すれば、ほぼ一致した結果であったと考えられる。

個別の被害事象としては、マグネットの移動(12.4%)、チラーや空調機の故障(9.6%)、急激なヘリウム量の減少(8.4%)の頻度が高かった。また、クエンチダクトの損傷(4.5%)や撮影室の電波・磁気シールドの破損、機能低下(6.1%)のような特に深刻な被害事象の発生も

少なからず見られた。マグネットの移動は、MR装置の寝台が動作不良になるだけでなく、磁気シールドを施されている撮影室では静磁場のバランス不良を引き起こす可能性がある。架台の破損や架台からの脱落を生じて水平からマグネットが傾いた場合は、問題が深刻であり修復が不可欠になる。これらの被害事象と比べて、コイル等の落下による破損の発生率(3.7%)の方が少なかった。この傾向から震災によるMR装置の被害事象はシステム全体へのダメージという特徴をもっていると言えよう。なお、ユーザーによる目視では気付かないシステムの内部的な損傷や、アンカーの緩み、その他軽微な損傷、ユーザーが気付く前にメーカーの補修により形跡がなくなった軽微な破損などがあったことは当然予測される。本調査で報告された被害事象の発生率は、最小値の目安と理解すべきであろう。

建物構造との関係

建築構造との関係では、東日本大震災では免震構造の建物ではMR装置の重大な被害が発生していないことが確認された。MR装置の被害が半損(軽度)以上であった29施設には免震構造の建物(MR装置単位で全回答の9%)に設置されていた事例は一つもなく、1例(制震構造にて軽度半損)を除いて、すべてが免震や制震以外(耐震構造、その他、無回答)の構造であった。医療施設に免震構造が有効であることはこれまでも指摘されている。筧・中山らは、耐震建築は画像診断機器の大破の発生率とは関係しなかったが、免震構造は大破のリスクを下げる傾向があったと報告している¹⁾。佐藤らは大規模振動実験設備を使った医療施設の被害発生を模擬する実験を行い、阪神・淡路大震災をモデルとした短周期波(最大加速度の80%)を加えたところ、耐震構造ではX線CT(1.7トン)が数センチ移動しモニタの落下が見られたが、免震構造ではいずれも見られなかった¹¹⁾。長周期波(三の丸波、想定新東海地震波)では重量物であるX線CTの移動

は見られなかったが、短周期地震ではいずれの構造でも60~70センチ程度であったキャスト機器（自由に移動）が、免震構造では最大3メートル程度移動し多数の衝突が見られた。筧・中山らの報告によれば、東日本大震災による施設への被災調査に回答した医療機関のうち、施設全体が免震構造であったのは7%、一部免震を含めても15%であった。さらには、免震構造を採用していても2次部材の被害がある例も確認された¹⁾。これらの結果から、免震構造はMR装置の致命的な被害を防止する上で効果が期待できるとは言え、我々の調査結果とも一致する。ただし、長周期波の影響が強い場合は患者救出のために開けた撮影室のドアからキャスト付きの診療器具が飛び込みマグネットに吸着される、撮影室内で一定距離を置いて使用することになっている周辺器機がマグネットに衝突する、などの事故が起こりうることに注意すべきであろう。

クエンチ

クエンチとは貯留された電磁気的エネルギーが熱に変換される現象である¹³⁾。目に見える現象としては発熱による冷媒（液体ヘリウム）の沸騰、気化に象徴されるが、大規模なヘリウムの気化を伴わないで磁場が消失する場合もある。高温超伝導素材を使用し低温の気体ヘリウムを冷却に使用しているマグネットでは液体ヘリウムの急激な沸騰現象が観察されないため目視ですぐにクエンチと分からない。MR装置の設置においてはクエンチが生じても気化した液体ヘリウムによるトラブルが起きないように、専用の排気経路だけでなく撮影室の強制排気システムを設けるなどの対策が行われているが、震災時は排気経路や強制排気システムのトラブルが発生する可能性がある。本調査では19件のクエンチ事例が報告されており、そのうち、即時クエンチは5件であった。そのうちの1件は津波による浸水事例（後述）、残りの4例は第一波の地震の発生をきっかけとして生じたものであった。強制クエンチは2件

あり、そのうち1件は浸水被害後の措置である。それ以外は10例が冷媒不足等による遅延クエンチ（地震発生から24時間後かつ一か月以内のすべてのクエンチか、一か月以降でかつ震災との関連性が明確なもの）、4件が原因不明のクエンチ（地震発生から一か月以降で震災との直接の関連が不明なもの）であった。東日本大震災において地震そのものをきっかけとして発生した即時クエンチ（5例）の発生率は1.1%（超伝導型472台に占める割合）である。回答が寄せられた施設における過去のクエンチ経験は11.1%であり、クエンチ自体が決して稀な事象ではないが、MR装置の運転日数を考慮すれば1日に5件の発生は高い確率と言える（MR装置の平均運転日数を3年と仮定して試算すると χ^2 testで $p < 0.001$ ）。低温物理学的には温度・磁場・電流密度のバランスが保たれている限り超伝導は安定であり¹²⁾、地震による震動そのものがこれらの臨界値を越える直接の原因となるとは考えにくい。今回の調査結果からはクエンチは震災において非常に高頻度で発生するわけではないが一定の注意を払うべき事象であることが確認された。もともとクエンチの潜在リスクが高まっていた装置に発生しやすいのか、地震波の特徴や建物構造や設置方法による影響があるのか、それ以外の要素が関与するのかなど、今後解明すべき事項が残されている。

震災時においてはクエンチが正常な過程を取らない可能性がある点に注意しなければならない。一つは排気経路の異常で、マグネットの移動に伴ってクエンチダクトの破損が少なからず発生することが今回の調査でも明らかになった。さらには、強制換気装置も非常電源に接続されていない場合は停電により動作しなくなるので、そのような状態でクエンチが生じると気化したヘリウムが撮影室内に充満する危険性が高まる。排気経路に破損が生じた場合は建物内の思わぬところにヘリウムが漏出する可能性もあるので、マグネットが移動するような大きな

揺れの後は排気経路全体に異常がないか確認すべきであろう。もう一つのリスクはクエンチによる発熱に対する冷却が不十分になった場合に発生する超伝導磁石の焼損で、超伝導線材に用いられているニオブチタン (NbTi) の転移温度である 10 K 以上になるとクエンチによる焼損からの保護は困難とされている。今後は強制クエンチを行う場合の焼損リスクが実際にはどのようなものであるかを明らかにする必要がある。

浸水被害

東日本大震災では三陸海岸を中心として著しい津波の被害が発生し、気象庁の発表ではこの地域ではおおむね 7 m 以上の津波高が観測され、大船渡市では 10.7 m (浸水高) を、陸前高田市では 15.4 m (浸水高) を記録している^{14),15)}。津波による破壊力の影響の目安として、木造の場合は浸水 2 m で建物の流出が増加し 4 m で半数が流出するとされ¹⁶⁾、鉄骨構造 (Steel Construction, SC) では枠組みか上層階の一部が残存するのみである¹⁷⁾。鉄筋コンクリート (reinforced concrete, RC) 構造の建物の場合、建物そのものは残存し得るが、特に建物一階部分の内容物流出は避けられない。東日本大震災で MR 装置の浸水被害は 12 施設 (超伝導型 5 台、永久磁石型 7 台) であった。浸水被害については今回の調査結果に加え、浸水範囲概況図¹⁸⁾や衛星写真 (Google Earth) などから総合的に被害状況を判定した。建物が完全流出した事例は 2 施設 (いずれも海岸から 1 km 以内の距離にある診療所で永久磁石型の MR 装置を設置) であるが、1 施設については現場付近でマグネットが発見されていない。その他の 11 施設の浸水の程度はさまざまであるが、MR 装置は浸水したうえで残存しており、浸水が極めて軽微であった 1 施設を除いていずれも廃棄処分になっている。これ以外に、MR 装置の直接浸水はまぬがれたものの、建物の一部が浸水したり、施設の敷地内まで水が入り込んで来たなど、浸水の一手手前であった施

設が 7 施設あった。いずれも、その後 MR 装置を再稼働して使用している。浸水した 5 台の超伝導型の MR 装置のうち即時クエンチを起こしたのは 1 施設であり、他の 4 施設は冷媒不足による遅延クエンチか強制クエンチのいずれかで磁場を停止しており、浸水そのものがクエンチの直接原因にはなっていない。即時クエンチの事例では浸水は 2 m 程度で、撮影室のドアが外れてキャビネットや椅子などの大型の磁性体が流れ込みマグネット周囲に散乱している様子が確認された。これらの磁性体がマグネットにいったん吸着された可能性が考えられる。クエンチの誘因として大型磁性体の吸着による静磁場の攪乱が挙げられるが、水没下で起こった事象の確認は困難と言わざるを得ず、実際に吸着されていたとしてもそれだけでクエンチの原因になったかどうかは不明と言わざるを得ない。サンプル数は限られているが、本調査の結果としては、1) 浸水がクエンチの直接原因になるという明確な証拠は得られなかった、2) しかし冷却システムの破壊による遅延クエンチはほとんど不可避である、と言える。

傷害の発生と発災直後の緊急行動

発災直後の緊急行動で最も重要な事項は患者の安全確保であることは言うまでもない。本調査で得られた回答を 1) 行動開始のタイミング、2) MR 装置までのアプローチの状況、3) 寝台の操作、4) 患者の誘導、5) 地震が収まるまでの待機場所の 5 段階に分けて分類した。すべての回答でこの 5 段階がどのようなであったかが記述されていないために定量的な分類はできないが、大きく分けると本震が収束してから誘導を開始する考え方と、本震中であっても可能なところまで救出活動を進めようとする考え方に分けられる。どのような救出行動が適切であるかは、現場の状況や救助活動を行う職員の体力、防災訓練等により培われた行動スキルにもよるので本調査の結果からはそれぞれの手順の妥当性を直接比較できないが、判断のポイントは 1) 寝台が正常に引き出せるか、2)

引き出した寝台から患者が転落する危険性がないか、の2点であろう。特に寝台からの転落するリスクは患者の運動能力や全身状態、寝台への拘束ベルト使用の有無や寝台の構造などとも関係するので、これらの条件を勘案した総合的な判断が必要である。体重の軽い小児の場合は抱きかかえて移動させることができるが、救出に向かう者にとって患者の体重が支えきれないと予測される場合は慎重に行動する必要がある。今後はこのような状況判断の考え方を整理してゆく必要がある。なお、今回の調査でマグネットの移動は多数見られたが、マグネット本体の支持構造が破壊され内部に患者がいたとすれば危険な状態となったであろうと推定される事例は報告されていない。しかし、現状としては重量物の落下や地震波などによる衝撃等、外力による破壊を想定したマグネットの構造的強度に関する共通の規格はないため、地震が発生した時に患者がマグネット内に留まるリスクを評価できる客観的な証拠となる情報が明らかにされているとは言えず、この点についても今後の検討が必要である。今回の震災においてMR装置に関連した受傷発生例で内容が判明しているものは軽傷者2名のみであった。今回確認された被害事象全体をさらに分析して、震災時にMR装置周辺で起こり得る傷害の可能性を予測し対策を立てる必要がある。

MR装置の安全確保については、電源の遮断とMR室への立入禁止措置、MR装置の緊急点検の3項目が主たる実施項目であり、極めて妥当な判断が下されている。地震速報や津波警報をMR検査室でも受信し、一定震度以上の場合はMR装置の自動停止を行うなどの対策も有効と考えられる。MR装置は電源を遮断しても静磁場は発生し続けることを知らない医療施設の職員も少なからずいるので¹⁹⁾、外部から支援者や捜索者が立ち入る場合も想定して、立入禁止措置を行うための表示や機材等を普段から準備しておくとうまくであろう。想定外の事態への対応も含めて適切な対処能力を高め

るためにも普段からMRの安全全般に関する基礎知識²⁰⁾を十分に習得することが不可欠である。

復旧の状況

当初から予想されたとおり、東日本大震災のような広範囲に渡る大震災では普段のようなMR装置のメーカーによるサポートを受けられる保証はなく、病院のスタッフで待ったなしの復旧作業が必要とされていた様子が明らかになった。通信障害によるメーカーのコールセンターへの不通について「支障が大きかった」とする指摘は14.8%であったが、この数字にも現場主導で復旧作業が進めざるを得なかった状況が反映されている。なお、自由記述の内容を見ると通信障害は問4-④で尋ねた「復旧の障害」というよりも、問4-②で尋ねた「判断で困ったこと」としてとらえられているが、停電は「復旧の障害」として認識されている。

今回の大震災をきっかけとして発生した新たなインフラ問題は「計画停電」である²¹⁾。経済産業省や医療機器センターの調査によれば、多くの医療施設が自家発電装置をもっているにもかかわらず、災害拠点病院や救急救命センターを除けば多くの医療機関が施設全体を補える容量の自家発電装置をもっておらず、MRIを含む画像診断機器は診療上の必要性が高いにもかかわらず稼働できなかったと報告されている^{3),22)}。今回の調査でも自由記述にその状況を裏付ける回答が見られた。今後は、超伝導型MR装置の冷却システムや永久磁石型装置の磁石保温システムなどの運転を維持する最低限の電力だけでも非常用電源から供給できるよう、MR装置の設置段階で対策を考えて行くべきであろう。

過去の震災等によるMR装置の被害との比較

MR装置が本格的に普及し始めてから最初の大規模震災は平成7年に発生した阪神淡路大震災であった。亀井・野口らが行った調査（一部NMR保有施設を含む116施設を対象とし43施設から回答、回答率37%）では、マグ

ネットの移動や冷凍機の停止などの被害が報告されたが、クエンチ、吸引事故や全損の報告はなく、火災による損害もなかったものと推定された^{9),23)}。また、発災当日中に 77% の MR 装置が運転を再開している。阪神淡路大震災では家具等の転倒による圧死事例が死亡者の 87.8% を占めたため²⁴⁾、その後の地震対策では全般的に器物の転倒防止が中心課題となり、放射線機器についてもその観点からの対策が考えられた²⁵⁾。

その後、目立った被害を及ぼした地震は数回発生しているが、MR 装置の被災に関する資料は限られている。滝口らは平成 13 年の芸予地震において即時クエンチが発生した事例を報告しており²⁶⁾、引地は予測される宮城沖地震を念頭において患者の救出訓練の重要性を指摘している²⁷⁾。平成 16 年の新潟県中越地震に関しては事例報告としてマグネットの移動や架台の損傷の報告があり²⁸⁾、豪雨による水没被害の例としては平成 21 年の台風 9 号による全損事例が報告されている²⁹⁾。今回の被災調査では阪神・淡路大震災の 10 倍以上のサンプルが集まったが、これまで断片的に報告されてきた事象のすべてが確認されている。しかし、今回の調査結果も含めて、火災による MR 装置への影響についてはまだ詳細な情報はないので、今後の検討が必要であろう。

MR 装置が導入されるようになった当初は十分な面積を有する専用の建物が設けられることが多かった。その後 MR 装置が普及するにつれ、装置の小型化やマグネットの自己磁気シールドの性能、あるいは撮影室のシールド技術の向上に伴ってより狭い面積での設置が可能になった。同時に使用される静磁場強度も上昇した。狭いスペースへの設置は経済的である反面、単位スペース当たりの蓄積エネルギー量の増加、マグネット周辺での緊急作業スペースや退避スペースの相対的減少、室内にヘリウムが漏れた場合の濃度上昇速度の上昇も意味する。本調査でも事例が報告されたように、震災時に

はクエンチ時のヘリウムガス排気設備も損傷を受けるため、防災対策を十分考慮した MR 装置の設置計画を考えるべきであろう。

ま と め

これまでの地震対策は建物の耐震化と画像診断装置を設置する時の固定方法が議論の中心であったが、今回の東日本大震災では従来の想定を越えた被害が発生した。特に震災後のインフラ障害が MR 装置の稼働復帰の妨げになるだけでなく新たなリスク要因となり得ること、外部からの支援がない状態で施設のスタッフによる安全点検、復帰作業の試みが不可避となった点が注目される。しかし、診療再開の前に、マグネットが発生する静磁場の状態だけでなく電気系統や機械部分（冷却システムの動作、漏電の有無、寝台の動作）、撮影室のガス配管なども含めて総合的な点検が必要である。今回のように震度 5 以上の激震が広範囲で発生する大震災では安全確保の考え方を変えねばならない。特に、地震の第一波が到来した時にどのように患者を避難誘導すべきかは今後の重要な検討課題である。

謝 辞

本調査は東日本大震災発生直後に行われた MRI/NMR/MEG 被災調査連絡会議における議論を基にして提案され、平成 24 年度厚生労働科学研究費補助金地域医療基盤開発推進研究事業「大震災における MRI 装置に起因する 2 次災害防止と被害最小化のための防災基準の策定」により実施されました。本調査を実施するにあたって回答をいただきました各施設の方々、全面的なご支援をいただいた各地域の研究会（岩手 MRI 研究会、宮城 MR 技術研究会、福島県 MRI 技術研究会、茨城県技師会 MRI 研究会、千葉撮影技術研究会 MRI 基礎勉強会、東京 MR 励起会、SAITAMA MRI Con-

ference) に厚く御礼申し上げます。また、調査にご支援をいただいた岩手医大の吉岡邦浩先生、調査票の発送や回収、データ集計に尽力いただいた国立長寿医療研究センターの津村千穂氏、森久乃氏にも感謝申し上げます。

文 献

- 1) 笈 淳夫. 大規模災害に対応した保健・医療・福祉サービスの構造, 設備, 管理運営体制等に関する研究 平成 23 年度厚生労働科学研究費補助金報告書. 2012
- 2) 宮城県放射線技師会. 東日本大震災での宮城県内医療施設における放射線機器関連被害レベル状況. 平成 23 年 7 月 26 日, <http://www.rad-tech-miyagi.or.jp/>
- 3) 経済産業省商務情報政策局 ヘルスケア産業課 医療・福祉機器産業室 平成 23 年度医療機器等の開発・実用化推進のためのガイドライン策定事業 (医療機器の安定供給に関する調査事業) 報告書. 平成 24 年 3 月, http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/shoujo/iryoku_antei/report_001_01.pdf
- 4) 土木学会地震工学委員会. 東日本大震災におけるライフライン復旧概況 (時系列編) 2011 年, <http://committees.jsce.or.jp/2011quake/>
- 5) 日本磁気共鳴医学会安全性評価委員会. 災害時における MR 装置の安全管理に関する提言. 2011 年 3 月 15 日, <http://www.jsmrm.jp/>
- 6) 清野真也, 高濱英彰, 樵 勝幸, 他: 防振材設置前後における撮像時の騒音と振動の測定. 日磁医誌 2011 ; 31(Suppl) : S449
- 7) 石森文朗, 砂森秀明, 高倉 有, 本元 強, 佐藤雅之: 東日本大震災発生時の茨城県内 MRI 稼働施設の実態調査報告. 日磁医誌 2011 ; 31(Suppl) : 228
- 8) IEC60601-2-33 <http://www.iec.ch/> (JISZ4951 磁気共鳴画像診断装置 基礎安全及び基本性能 <http://www.jisc.go.jp/>)
- 9) 亀井裕孟: 阪神・淡路大震災における MR 装置の被災状況調査結果. 日磁医誌 1995 ; 15(Suppl), 141-142
- 10) 社団法人 日本放射線機器工業会 医用放射線機器等の対地震設置に関する動向調査研究報告書 (平成 9~11 年度) http://www.jira-net.or.jp/commission/hyoujunka/fr_information_01.html
- 11) 佐藤栄児: 震災時における建物の機能保持に関する研究開発 文部科学省委託研究 首都直下地震防災・減災特別プロジェクト 総括成果報告書 2012 ; 46-59
- 12) 仁田旦三, 超電導エネルギー工学 9-13 頁, オーム社 2006 年 ISBN978-4274202810
- 13) Wilson MN, Superconducting Magnets, Oxford Science Publications, 1983, ISBN 0198548109
- 14) 地震火山部地震津波監視課 現地調査による津波観測点付近の津波の高さについて 報道発表資料 平成 23 年 4 月 5 日: <http://www.jma.go.jp/jma/press/1104/05a/201110405.html>
- 15) 中央防災会議 東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会, 資料 今回の津波被害の概要 平成 23 年 5 月 28 日
- 16) 気象庁 東北地方太平洋沖地震による津波被害を踏まえた津波警報の改善 平成 24 年 3 月: http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/tsunami_keihou_kaizen/
- 17) 日本建築学会鋼構造運営委員会 東日本大震災鉄骨造建物被害調査報告書 平成 23 年 6 月 9 日: http://news-sv.aij.or.jp/kouzou/s3/AIJ-REPORT/CYOSA_REPORT.htm
- 18) 国土地理院, 2 万 5 千分 1 浸水範囲概況図: <http://www.gsi.go.jp/kikaku/kikaku40014.html>
- 19) 山口さち子, 中井敏晴: 磁気共鳴画像装置 (MRI) の安全に関する意識調査. 日磁医誌 2012 ; 32(Suppl) : 306
- 20) 中井敏晴, 上野照剛: MRI の安全性 (総論). 日本磁気共鳴医学会 安全性評価委員会・他監修, MRI 安全性の考え方, 第一版, 東京, 日本, 学研メディカル秀潤社, 2010 ; 14-22
- 21) 社) 日本医療画像システム工業会, MR 装置の停電時の対処方法について, 平成 23 年 3 月 18 日: <http://www.jira-net.or.jp/anzenkanri/top/index.html>
- 22) 財団法人医療機器センター附属医療産業研究所 計画停電 (発電容量不足) に伴う医療機器等の使用状況に関する緊急調査, リサーチペーパー No. 4, 2011 年, http://www.jaame.or.jp/mdsi/mdsirp004_summary.pdf
- 23) 社) 低温工学協会 平成 7 年度 被災調査臨時委員会, 阪神・淡路大震災における低温・超電導機器被災調査報告, 社) 低温工学協会, 1996
- 24) 警察庁編 平成 7 年警察白書 第 1 章 サリン・

- 銃・大震災に対峙した警察 第3節 阪神・淡路大震災と警察活動 表1-11「死亡者の死因」, 2005, <http://www.npa.go.jp/hakusyo/index.htm>
- 25) 宮本唯男. 放射線部門の地震対策ハンドブック. 医療科学社, ISBN4-900770-41-8 C3047 1995
- 26) 滝口裕章: 学術フォーラム MRI 検査におけるリスク管理 地震によるクエンチの経験. 労働福祉事業団放射線技師会雑誌 2003; 22: 69-73
- 27) 引地健生: MRI 検査における安全管理 その2 地震によるクエンチに備えて. 宮城MR技術研究会誌 2005; 5: 37-42
- 28) 佐藤栄児. 首都直下地震防災・減災特別プロジェクト ②都市施設の耐振性評価・機能保全に関する研究 平成19年度報告書. 2008; 9-21
- 29) 中野 晋, 宇野宏司, 高西春二, 騎馬貴子. 平成21年台風9号の豪雨災害による事業所等の被災と対応. 安全問題研究論文集 2010; 5: 17
- 軽微: サブシステム*単位の交換はなく, 部品の交換や点検で修理が完了した場合
 - 半損(軽): マグネットを除くMR装置のサブシステムの交換が半分以下の場合.
 - 半損(重): マグネットを除くMR装置のサブシステムの50%以上が交換になる場合(製品として新しい機種になるかどうかは関係ない).
 - 全損: MR装置(システム)が全面的に交換になる場合. マグネットが再使用不能になり, 交換が必要な場合.

【注3: 建物被害の分類】(村尾・山崎式に基づく被害率の分類を援用)

- 全壊: 建物の損壊, 焼失もしくは流出した部分の床面積がその住家の延床面積の70%以上に達した程度のもの, または建物の主要構造物の被害額がその建物の時価50%以上に達した程度のもの.
- 半壊: 建物の損壊が甚だしいが, 補修すれば元通りに再使用できる程度のもの. 具体的には損壊部分が建物の延床面積の20%以上70%未満のもの, または建物の主要構造部の被害額がその建物の時価20%以上50%未満のもの.
- 一部損壊: 半壊の基準には至らないが, 建物の補修を必要としたもの.
できるだけ医療設備, 医療器機の被害を含めない建物だけの被害状況で回答してください. 専門機関等による評価結果がない場合や正確な判断が難しい場合は, できるだけ現場を熟知している複数名の見解を回答者がまとめてください.

【注4: 検査時の状況の分類】

- 震災時の状況で「1: スキャン中」とは, ガントリー内に患者が入っている状況を言う.
- 震災時の状況で「2: 検査中」とは, 検査室内に患者はいたがガントリー内には入っていない状況を言う.

付 録

【注1: 建物構造の分類】

- 耐震: 建物の強度や靱性を向上させて地震による破壊や損傷を防ぐ方法で, 建築基準法にのっとって施工されている建物は耐震構造になっている.
- 制振: 建物にエネルギー吸収機構を組み込み, 建物の変型を抑え損傷を軽減する方法で, 各種のダンパーにより地震が入力しても振動を抑制する.
- 免震: 建物の基礎部分に免震工事(地盤と建物との物理的な絶縁処置)を行う方法で, コロやゴムを使用する.
耐震, 制振, 免震は建物のもつ異なった機能で, 併用されるものです. 本調査では一般的な実情に合わせて「耐震構造」は耐震の機能のみ, 「制振構造」は耐震機能も含む, 「免震構造」は耐震機能と制振機能も含むと分類します.

【注2: MR装置被害の分類】(本調査のための暫定的な分類)

- 被害なし.

- 「3：始業前・終業後」とは、装置に電源が投入されシステムは稼働しているが実際の検査業務が行われていない場合を言う。
- 患者の入れ換え時間は検査中と見なし、検査予定が入っていない空き時間（患者が不在の時間）は「3：始業前・終業後」に分類する。
- 非稼働状態とは始業前や終業後でシステムがシャットダウンにある状態（長期的に使用されていない場合も含む）。

【注5：クエンチの分類】（本調査のための暫定的な分類）

- 即時クエンチ：地震による振動や津波による浸水、建物の崩壊などの物理的な衝撃が発生している最中や、そのような事象が発生してから24時間以内にクエンチが発生し、震災のエネルギーがクエンチの直接の引き金になったと考えられる場合。
- 遅延クエンチ：震災により生じた装置の不具合やヘリウムの急激な減少に供給が追いつかず冷媒不足になったなどの間接的（2次的）な原因によると考えられるクエンチで、おおむね本震や余震の24時以降に発生したものの。
- 原因不明のクエンチ：装置にクエンチの原因となる具体的な損傷やトラブルが見あらず震災との関連性が不明であるが、平成23年3月11日以降に発生したクエンチで、かつ本震や余震の4週間を過ぎてから発生したクエンチ（原因不明だが4週間以内のものは遅延クエンチに分類）。

*サブシステム：いくつかのシステムが集まって一つの機能を実現している場合に、それ自身がシステムでありながら同時に他のシステムの一部でもあるようなものをサブシステムという。今回の調査では、MR装置を構成するもので〇〇装置と呼称できるもの（例 機械室にある機器類、操作卓、制御用コンピュータ、冷却器のポンプなど一つのキャビネット（筐体）単位）をサブシステムと考えてください。

Survey of Damage to 602 MR Scanners after the Great East Japan Earthquake

Toshiharu NAKAI¹, Sachiko YAMAGUCHI-SEKINO², Toshio TSUCHIHASHI³,
Humio MAEYATSU⁴, Takeo HIKICHI⁵, Shinya SEINO⁶,
Hajime TANJI⁷, Koshiro ADACHI⁸, Yasunori MUSASHI⁹,
Makoto HISHINUMA¹⁰, Yoshihiro ABE¹¹, Fumio ISHMORI¹²,
Hideaki SUNAMORI¹², Yoshimasa MASUDA¹³, Hiroshi MATSUMUTO¹⁴,
Kouki KURITA¹⁵, Isao FUJITA¹⁶, Haruo ISODA¹⁷,
Takashi NOGUCHI¹⁸, Isao YANAGAWA¹⁹, Yoshio MACHIDA²⁰

¹*Neuroimaging and Informatics, National Center for Geriatrics and Gerontology
36-3 Gengo, Moriokacho, Ohbu, Aichi 474-8511*

²*Division of Health Effects Research, National Institute of Occupational Safety and Health
3-7,9-16,¹⁹Departments of Radiology, ³Nippon Medical School Main Hospital, ⁴Izumi Hospital,*

⁵*Kurihara Central Hospital, ⁶Fukushima Medical University Hospital, ⁷Northern Fukushima Medical Center,
⁹Iwate Prefectural Central Hospital, ¹⁰Sendai Kousei Hospital, ¹¹Sendai Medical Center, ¹²Memorial Hospital,*

¹³*Mito Saiseikai General Hospital, ¹⁴Chiba University Hospital, ¹⁵Saiseikai Kurihashi Hospital,*

¹⁶*Saitama Municipal Hospital, and ¹⁹Tohoku University Hospital*

⁸*Department Medical Technology, Morioka Red Cross Hospital*

¹⁷*Department of Radiological and Medical Laboratory Sciences, Nagoya University Graduate School of Medicine*

¹⁸*Magnet Development Group, Superconducting Wire Unit, National Institute for Materials Science (NIMS)*

²⁰*Medical Imaging and Applied Radiology, Tohoku University Graduate School of Medicine*

An earthquake of 9.0 magnitude, the largest in modern Japanese history, struck east Japan on March 11, 2011. We investigated hazards and observations related to magnetic resonance (MR) scanners in this earthquake to evaluate potential risks and consider further prevention or minimization of damage from and injury of patients in such large earthquakes.

The investigation team funded by MHLW sent questionnaires to the 984 facilities with installed MR scanners in the 7 prefectures of east Japan (Iwate, Miyagi, Fukushima, Ibaragi, Chiba, Tokyo, Saitama) and collected 458 responses (46.6%) with information on 602 MR scanners (144 units \leq 0.5 tesla; 31 one-T units; 371 1.5-T units; and 56 units \geq 3T). Significant differences in damage were observed between seismic scale 5 and 6 (χ^2 test, $P < 0.001$ for all items of damage checked). The frequencies of typical damage were displacement of magnets (12.4%), failure of the chiller or air conditioning (9.6%), rapid decrease in liquid helium (8.4%), damage to magnet enclosure and its equipment (7.6%), damage to shielding of the MR scanner room (6.1%), damage to the quench duct (4.5%), breakage of devices anchoring system cabinets (4.4%), damage to the magnet base (3.9%), and flying of metal components (1.5%). Twelve facilities reported flooding by the subsequent tsunami, and quench was confirmed in 19 facilities. No fire damage was reported. It was confirmed that no one was severely injured in MR scanners, and base isolation of the building was very useful in completely preventing damage even at seismic scale 7. In the future, training for evacuation and establishment of a standard protocol for emergency shutdown of MR scanners, onsite checking by MR operators, and emergency power plant equipment to maintain chiller for MR scanners will further ensure MR safety in an earthquake.

<トピックス 3>

MRI装置の被災状況と今後の課題

The disaster situation of MRI systems and the future problems

物質・材料研究機構 マグネット開発グループ

野口 隆志

Magnet Development Group,

National Institute for Materials Science

T. Noguchi

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震により、多くの医療機関においてMRIも被災した。その被災の状況を調査すべくMRI医療関係者で調査グループを組織し、混乱の治まりを待って調査を開始した。その一部は本会講演会第79回ワークショップ「3.11震災を乗り越えて」で報告した。まだ集計は完了していないが、調査対象の医療機関数を以下の表1に示す。2012年9月24日現在、調査票調査対象件数984件に対する回答数は45%の443件となった。

表1. 調査対象地区と対象医療機関数

調査地区	対象数	回収数	回収率
岩手県	85件	60件	72%
宮城県	105件	58件	55%
福島県	74件	48件	65%
茨城県	124件	65件	52%
千葉県	214件	85件	40%
埼玉県	151件	46件	30%
東京都	231件	81件	35%
合計	984件	443件	45%

*2012年9月24日現在

調査内容は主に地震発生時の状況と被害の程度、当日の行動、事後の処置、今後の対策への提言などである。“被災”の詳細や地震に起因した“事故”については、個別の二次調査となる。

本稿ではその二次調査前に明らかとなった事実と、特に低温工学関係者にとって、今後考えてゆかなければならない超伝導応用機器としてのMRI装置に関する新たな課題を紹介する。

2. 工学的調査の主旨

MRI本体および設置環境が正常であれば、日常の安全管理の手順に示されている現象以外、想定外の危険現象が発生するのはごく稀なことである。たとえば

MRIに使用される超伝導マグネットで、日ごろから注意を払わなければならないのは“強磁場による磁性体の吸着・吸引”である。また“突然のクエンチ”も、日ごろから意識しておかなければならない。

これら十分認識されている“危険現象”については、その“危険回避機構”が本体や周辺設備に備えられており、その点検と事後の安全行動は標準化されている[1]。しかしそんな日常においても、インシデント事例は少なからず報告されている[2]。

日常的な環境であればインシデントで治まる事例も、非常時には重大事故につながる恐れがある。大型地震に遭遇した場合など、装置そのものの正常動作を疑い、環境自体の正常さも疑わなければならない。

例えばクエンチの発生事態は様々な安全機構が危険を回避するが、被災により設置環境が正常でなければ、クエンチは危険な現象となり得ると言わざるを得ない。

激しい振動が加わり、大きな磁性体が吸着した場合の、あるいは水没した場合のマグネットの挙動、火災にあった場合、撮像室の天井が崩れてきた場合、床と共に落下した場合のマグネットの挙動など、できる限り“想定”しておく必要がある。

今回の被災状況に関する工学的調査と検証は、そういった特殊環境下でMRIはどういう振る舞いをするかに注目しており、特殊環境下でMRIに何が起こるのかを、今回の調査で得られる知見から“推定”することが、工学的調査の主目的である。

3. MRIの被災状況

回収された調査票および伝聞情報から、個別の事例として「クエンチ」「浸水・水没」「磁性体吸引」について聞き取り調査した。

被災しクエンチしたものの14件について表2に簡単にまとめた。クエンチ発生原因の詳細については、二次調査で明らかになる予定である。

表2. クエンチ事例数とクエンチ発生時期

クエンチ確認事例	14件について
数時間以内に発生	6件
半日から数週間	7件
未確認・未確定	1件

半日から数週間後にクエンチが発生したもののほとんどは、液体ヘリウムの液位低下による自然クエンチと思われる事例である。液体ヘリウムのサブクール型4 K冷凍機は、その熱設計によって、数日も持たないものがある。シールド冷却型冷凍機の場合は、液体ヘリウ

ムの蒸発量増加がゆっくりと進むため、冷却不足によるクエンチ発生に至るまでに数週間を要したものもある。

いずれにせよほとんどの超伝導型MRI用マグネットにはヘリウム冷凍機が搭載されており、そのほとんどが水冷式であることから、停電のみならず断水によっても冷凍機が停止してしまう事態となったようである。

この表2の内、浸水・水没したものについて、件数およびクエンチ有無を表3に示した。これによると水没しただけでは直ちにクエンチに至ることは稀であろうと推察できる。ただしここに挙げた事例が、冠水したものの可否については二次調査で明らかとなる。また、数時間以内にクエンチした1例は、強制クエンチ回路が水没によって誤動作したものであり、数日以内にクエンチした2例は、いずれも強制クエンチ回路の人為的作動によるものである。

ちなみに超伝導型MRI以外、永久磁石型MRI 6件の水没が確認されており、浸水・水没MRIの計10件すべては全損となった。水没したMRIの画像[3]をY. Satohが紹介している。

表3. 浸水・水没事例とクエンチ発生件数

浸水・水没確認事例	4件について
数時間以内にクエンチ発生	1件
半日から数日後にクエンチ	2件
クエンチせず	1件

*この4例は超伝導型MRIのみ

このほか、磁性体の吸引・吸着についても多くの事例が確認されたが、人身の損傷に結びついた事例は確認されていない。また、懸念された重大事故として“高圧ガス破裂”と推定できる事例も確認されていない。

4. 医療機関における課題

通常の診療中であった医療機関では、患者の避難誘導が直ちに行えたところと、何らかの障害があったところがあった。またメーカーと連絡が取れず、その間に“緊急停止処置”を取らなければならない事態となり、マグネットを強制減磁させるか否かの判断に躊躇があった様子が伺えた。

冷凍機が自然停止し、その後、液体ヘリウムの蒸発量増加がどのような固有値で変化するかの情報がなく、クエンチ発生までの猶予時間の見積もりができないところも問題となり得る。

4.1. 緊急停止ボタンに関連した課題

通常、緊急減磁装置:クエンチボタンについては人

身にかかわる緊急事態に備えて装備されている。その動作後のシステム挙動について情報が少ないことがうかがえる。

以下などが懸念される問題点であり、いろいろ必要情報が明確になっている必要がある。

1. クエンチボタンや緊急電源遮断ボタンの名称が、メーカーによって異なる
2. 同一メーカーであっても、クエンチボタンの表記や形状が操作室と撮影室で異なる
3. 同一メーカーであっても、ボタンの表記とマニュアルの表記が異なる
4. 同一のマニュアルの中でも呼称が一定しない、異なった呼称を用いている例がある
5. 2つのボタンが近くに設置されていて紛らわしいケースが見受けられる
6. いずれのボタンも表記が具体的に何を意味するのか直感的につかみにくい
7. マニュアルや参考資料にはボタンの機能は説明されているが、判断の基準については記載されていない
8. 緊急撮影停止ボタンは各社により異なり、統一した基準が無い
9. 筐体の赤色ボタンと操作卓のボタンが同一機能でない事例がある

4.2 MRIの防災対策における今後の課題

1. 激震下で撮影装置から患者を救出する方法
2. どのような場合にマグネットを強制クエンチさせるべきかの基本指針の確立
3. 大規模火災が発生した場合の処置
4. 消磁のソフト化、励磁の低コスト化
5. 装置の緊急停止の標準化、段階化、自動化
6. 自己チェック機能(ネットワーク遮断への対策) 停電対策(特に冷却系)
7. 検査室が実施する緊急点検プロトコルの策定 リスクコミュニケーションの確立

震災に関しては医療機関の防災計画全体の中で、その医療機関の実情を基にしてMR検査室で起こりうる事象を予測し、震災時の対処方針を考える必要があり、地震情報をいち早く現場に周知する体制が望まれる。

5. 低温工学に関連した課題

MRI装置のメーカーは医療機器の専門メーカーであり、最近では超伝導マグネットを自社で製造しない例も増えている。超伝導マグネットの専門メーカーへ製造を委託しているというより、MRI装置として必要な“磁場発生装置”を外注しているに等しい。すなわち表

向きの仕様についてはMRIメーカー側で設計するが、要求される仕様をどの様に満たすかはマグネットメーカーに委ねられることがあるようだ。

こういった背景から、マグネットおよびクライオスタットの内的固有特性について、MRIメーカーが知らないことも増えてきているように思える。たとえば超伝導維持のための液体ヘリウム液位の最下限値、冷凍機停止時の液体ヘリウム蒸発量の変化固有特性、クエンチ発生時の焼損リスクの定量化方法など、緊急事態に備えて使用者が知っておきたい技術情報が、MRIメーカーから、あるいはメーカーのサービス技術員から満足に得られないこともあるように思える。

そんな中で、超伝導応用技術の普及を目指す低温工学関係者には、MRI用マグネットをシステムと捉えて新たな課題を発掘する姿勢が望まれる。

5.1 永久電流方式マグネットの『無害化処置』の標準化

そのまま放置することは“危険”であるとの認識の下で

1. どの様に『消磁』するか。
2. どの様に『昇温』するか。
3. どの様に『圧力開放』するか。

システムを廃棄することなく『無害化』する手段を検討する課題がある。この内、消磁に関しては使用者が操作可能な機構である必要がある。

クエンチボタンと称する“緊急減磁装置”のスイッチの多くは、強制クエンチを起こさせる機構である。その作動の決断は“人身にかかわる緊急事態”、あるいは確実にその場を退避しなければならない火災などの場合に限られる。しかし今回の震災で、水没など装置の全損が明らかな場合を除き、その場を善意の第三者へ明け渡す事態となった場合に、すなわちそこそこの猶予時間がある場合に、マグネットを安全・非侵襲的に消磁・減磁する機構が備わっていれば、使用者の迷いが生じない分、安全性は高まると思われる。

昇温と圧力開放については、マグネット撤去の際に取られる手段であるが、再起動を前提とした昇温と圧力開放は、具体的に検討されていないように思われる。被災時に必要な処置として、使用者だけで作業可能な『無害化処置』法を、検討しておきたい。

5.2 使用者のための『安全知識』の整備

クエンチを伴わない『減磁方法』の検討が重要な理由として、MRI関係者がクエンチについて誤った情報を持っていることが挙げられる。最近では多くのクエンチ映像がWebで提供されているが、病院に設置された状態で、各部がどのような挙動を示すかを理解するには不十分といえる。不十分なばかりではなく、正しく挙動

を理解する妨げとなるような映像も多い。

例えば、冷媒が勢いよく放出されるときに放出配管の外壁で生じる空気の液化など[図1]は、意識的に教育的映像を意図して撮影したものでなければならない。また配管の閉塞例、クライオスタット内の閉塞条件についても、映像を交えた模擬体験と講義が必要だろう。

強磁場・高磁場勾配による磁性体の吸引・吸着の回避方法や、吸着させてしまった後の処置方法についても、使用者が一時対応可能なように“教育的映像”が有効である。

これらの資料製作については、第三者機関が取りまとめる必要があり、マグネットメーカー、MRIメーカーの参画はもとより、公的機関の主導を検討したい。



図1. 強制冷媒放出時の配管外壁に流れ出した液体空気場によっては窒素は凍り付き、流れ落ちるのは酸素だけとなる。

6. まとめ

MRIの被災状況調査の内、工学的調査に特化して報告した。まだ様々な事例が二次調査・個別取材によって明らかになると思われる。

たとえば3.11の震災後、数回の余震ごとにクエンチを起こすマグネットの事例がある。これについては具体的な調査を計画している。

また廃棄される実際のMRI用超伝導マグネットを用いて、極限現象の検証を試みる計画もある。と同時に“教育的映像”作成も試みようと考えている。

MRIを使用する当事者に、『安全マニュアル』ではなく状況判断のための正しい知識と現象観を持っていただけるよう、低温工学の一関係者として努力したい。

参考文献

- [1] (社)日本画像医療システム工業会規格(JESRA)
<http://www.jira-net.or.jp/publishing/jesra.html>
- [2] 土井、山谷、上山、錦、小倉、川光、土橋、松田、熊代:日本放射線技術学会雑誌、第67巻8号(2011)895-904
- [3] Yusuke Satoh “The dividing line between life and death”
A record of medical support in the area affected by the Great East Japan Earthquake and Tsunami,
<http://blog.140b.jp/satoh/wp-content/uploads/2011/10/english.pdf>

平成 24 年 2 月 28 日

東日本大震災における MR 装置の被災とMRの安全管理

中井敏晴、山口さち子

独) 国立長寿医療研究センター研究所・神経情報画像開発研究室

独) 労働安全衛生総合研究所・健康障害予防研究グループ

1. はじめに

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災では、地震や津波により大きな被害が発生した。医療機関も甚大な被害を受け、特に沿岸部では、全壊、あるいは津波により建物ごと消失してしまった事例も報告されている。医療機関は、震災時における救命活動において重要な役割を果たす一方で、自らも被災するため、医療器機の安全管理が重要な課題となる。特に、MRI 装置は第一線の診断でも重要な役割を果たしているが、低温冷媒、高磁場、高電圧を用いる装置であり、クエンチや吸引事故などにより人命に影響を与える可能性がある。東海地区でも震災の発生が予想されており、今回の震災で実際にどのような事象が発生したかを確認し対策を考える必要がある。

2. 予備調査

震災により MR 装置に発生した被害の概要を確認し本調査の質問項目を策定するために、MR 装置の直接的な被害が伝えられた医療機関の MR 装置担当者から、電子メールや電話、一部面談により MR 装置の被害状況の聞き取り調査を行った。今回は、事象の定性的な確認が中心である。

予備調査で報告された事象は以下の通りである。即時性の被害としては、1) 全損、半損(建物の崩壊、津波による建物の消失、浸水などによる著しい破損)、2) 即時クエンチ、3) マグネット懸架不良(架台損壊)、4) マグネットの移動、5) エンクロージャや寝台の損壊、6) チラーや空調機の故障、7) クエンチダクトの損傷、8) 電源喪失による急激なヘリウム量の減少、9) システムキャビネットのアンカーの破損、10) 屋外機の設置状態の異常(地盤の変動)、シールドの損傷、床の破損など建物・付帯設

備の破損、11) 制御システムの障害(起動しない、動作不良)。遅延性の事象としては、1) 二次クエンチ(停電等による冷媒減少が原因)や磁場消失、2) クエンチ回路用のバッテリー消耗。

3. MR の安全管理と防災対策の違い

MR 装置は 1980 年頃に実用化され 1985 年頃から国内の大学病院等で用いられるようになった。一般病院に本格的に普及し始めたのは 1990 年頃からであり、MR 装置の歴史は 30 年程度である。この間に、何回かの局地的な大地震が発生しているが、広範囲に渡る大震災は今回が初めてである。阪神淡路大震災の時に MR 装置等の被害に関する事例調査が行われているが、それ以外には組織的な調査報告は我々が知る限りは見られない。今回の震災は広範囲に渡る大規模な津波が大きな特徴であるが、MR 装置に関する津波被害の報告は今回が初めてであろう。

震災被害を考える上で留意すべきことが 2 つある。ひとつは、MR 装置は電離放射線を用いない非侵襲的な検査であることが利点と言われて来たが、そのような検査の健康に与える影響の有無と装置の持つ潜在的なリスクは次元の異なる事項であり、今回の大震災では通常の安全管理やしばしば起きる地震による影響の範囲では想定されない事象が実際に起きていることが確認された。もう一点は、我国における MR 装置の設置状況の特徴である。欧米では、このような高度画像診断機器は、大学病院や地域の中核病院に集中して配置されているが、我国では中小病院や一般のクリニックでも高性能の MR 装置を所有している例が見られる。さらには、人口あたりの設置台数が多く(2010 年 4 月の集計で 6153 台が稼働;

医療機器システム白書)、「いたる所に MR 装置が存在する」状況と言える。従って、震災時においては、レスキュー(消防、警察、自衛隊等)が震災現場において被災した MR 装置に遭遇する可能性が高い点である。

今回の予備調査では、クエンチが震災により実際に起きることが判明した。マグネットの移動は多くの施設で発生したが、アンカーによる固定は却ってマグネットの損傷を起こす原因にもなりうるが、移動が著しいとクエンチダクトや冷却系に破損が生じ、危険性が増すなど、補助的な防災対策は、一定限度を越えると一長一短になる可能性がある。また、MR 装置は他の X 装置や放射線治療の装置と異なり、電源を遮断しても静磁場は発生し続けるだけでなく、クエンチを生じた場合には一時的に周囲の酸素濃度が低下する。また、診療再開の前に、電気系統や機械部分(冷却システムの動作、漏電の有無、寝台の動作)、あるいは撮影室のガス配管なども含めて総合的な点検が必要である。

しかし、今回のような大震災においては、多くの装置が同時に被災し、かつ余震の発生や震災現場での安全確保の必要上、行動が制限される状況での作業となるため、メーカーが全ての装置を完全に点検して回るにはかなりの日数を要する。マグネットの設置状況、ピットの浸水や配線の異常の有無など、作業員が目視しなければならない作業も少なくない。MR を使った画像診断は、今日の医療において極めて重要な役割を担っており、震災後の MR 装置を再稼働させる場合に、その安全性の確認は一次的には施設側で行わざるを得ない状況になるので、各施設において被災の状況を把握して MR 装置の安全点検を行う体制を整備してゆく必要がある。

4. MR 装置の安全管理

①MR 装置の高性能化に伴う状況の変化

MRI は電離放射線による被曝が無い、極めて「非侵襲的な」イメージング方法とされてきた。1990 年代初頭まで MRI の現実的な危険性は静磁場による吸引事故であるという認識が一

般的であったが、その後 MR の安全性を取り巻く事情に2つの大きな変化が生じた。ひとつは MR 装置で使用される静磁場強度の上昇に伴うラジオ波の出力の増大と、高速イメージングに必要な傾斜磁場の出力化である。近年重度の火傷例の報告が見られるようになったことには注意が注意を要する。

もうひとつは医用材料の多様化である。ステント類のように体内に包埋されるものだけでなく、コンタクトレンズのように生体に密着して使用されるものもある。磁性や導電性を持つ材料が必然的に、あるいは偶発的に MR 検査の現場に存在する可能性が高まっているにもかかわらず、磁性や導電性が不明なものが少なくない。そのひとつの原因は、医用材料の多くが輸入品であることと関係している。一方、MR 撮影室内に持ち込まれる医療器材や電子機器も増えた。MR 適合性を考慮して製造された器材や材料もあるが、MR 適合性を明らかにすることが薬事審査の必要条件では無いため、通常の処置に使用されるものはその限りではない。これまで、従来 1.5T 以下の静磁場では問題にならなかったものについても、3T 以上の高磁場で安全上問題がないかどうか再検討の必要が生じたのである。しかし、個々の医療現場で MR 適合性の判断を行うことは非常に困難であり、医用材料・機器の MR 適合性の評価を専門に行う専門機関の役割が重要になってきた。

②IEC 規格と ASTM の試験項目

医療機器の安全管理には、何をどのような手順で確認し、その結果を判断する基準を明らかにする標準的な指針が不可欠である。MR 装置に関しては、医用電気機器としての安全規格(IEC 60601-1 とその副通則群、主要な部分は JIS T 0601-1 とその副通則群に収録)に加えて、MR 装置に固有の安全規格が必要になる。その MR 装置固有の安全規格として、MR の物理的要素である静磁場、傾斜磁場、ラジオ波と MR 装置の発生する騒音の安全基準を定める IEC 規格 60601-2-33 が制定された。IEC 60601-2-33 は MR 装置の国際的な

安全基準であり、JIS 規格 (JIS Z 4951) として採用されている。IEC 規格の特徴は、MR 装置の「操作モード」という概念により、MR 装置の製造者と使用者が守るべきガイドラインを示している点である。それぞれの操作モードの基準値を定めるだけでなく、関連する用語を定義し、傾斜磁場強度 (dB/dt) とラジオ波エネルギーによる組織の熱吸収 (Specific Absorption Rate, SAR) の測定方法を定めるなど、詳細な標準化が行われている。一方、米国材料試験協会 (American Society for Testing and Materials, ASTM) の試験項目は MR 適合性の評価基準であり、変位力 (F2052)、回転力 (F2213)、発熱 (F2182)、アーチファクト (F2119) の4項目の評価方法を定めている。FDA は ASTM の試験項目をインプラントの評価などを行うためのガイドラインに指定している。このように、IEC 規格と ASTM の試験項目は相補的な関係にあると言える。

関連する公的機関の取組みとしては、米国の FDA や英国の医薬品医療機器管理機関である MHRA (Medicines and Healthcare products Regulatory Agency) が、独自の MRI の安全基準を制定している。FDA のガイドラインは IEC 規格のような詳細な標準化ではなく、静磁場、SAR、傾斜磁場、騒音の制限値を制定するものである。MHRA のガイドラインは、IEC、ASTM、国際非電離性放射線防護委員会 (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection; ICNIRP) などの制定した安全基準を総括して、実務者向きに作成されている。ICNIRP とは放射線防護活動の国際組織である国際放射線防護学会 (IRPA) が、非電離放射線を取り扱う組織として 1992 年に設立したものであり、非電離放射線の生物影響を調査し、その曝露限度に関する国際指針を作成する活動を行っている。

MR 装置の安全の安全に関して最近注目されている事柄はクエンチであり、2005 年に IEC 規格の修正条項 (amendment) としてクエンチへの対策についての記述が正式発行されている。クエンチは MR 装置の設置時や点

検時などに発生することが多いが、通常の検査中にクエンチが発生する可能性も皆無ではないし、今回の震災においても事例が報告されている。臨床用の MR 装置ではクエンチが発生した場合に気化したヘリウムガスが配管を通して強制的に排気されるように設計されている。しかし、排気システムが働かなかった場合のことも想定した対応計画や、クエンチを想定した訓練を行うことが推奨されている。

③MR 装置周辺の安全

MR 装置の周囲には漏洩磁場が見られ、5 Gauss (0.5mT) の漏洩磁場が見られる部分までが、MR 装置の範囲と定義されている。その内外には MR 装置そのものには含まれないさまざまな物品が存在する。そのような MR 装置周辺の要素としては、患者 (被検者) にかかわるものとして体内に埋め込まれる医用材料や埋込型の機器類、体表に塗布される医薬品や装着される機器類、患者の搬送に用いる寝台や車いす、点滴台などの医療用具があげられる。特に、3T 装置の普及に伴って医用材料の MR 適合性の検証の方法が課題となっている。また、MR 装置の周辺で用いる機器類 (血圧や呼吸のモニタ、造影剤の注入装置、視聴覚提示装置など) や、撮影室の構造体 (建築に用いられた材料やその施工方法) も含まれる。MR 装置が発生する物理作用が医用材料に与える力学的・電磁気的影響を通して患者の身体に組織損傷を与えたり、医用器機 (患者の体内・対外に装着する装置やモニタ類などの MR 周辺で使用される全ての機器類) の吸引、誤動作、あるいは破壊による問題を起こす危険性があるかどうかを判断する「MR 適合性」という概念で捉えられてきた。

MR 適合性は、その試験方法だけでなく、その結果の表記法を標準化することが重要である。1995 年に、JIS Z 4950「診断用磁気共鳴装置-図記号及び標識」により、MR 装置の設置された場所に表示する安全標識に用いる記号が定められた。具体的には、強磁場に対する注意、ペースメーカー装着者の入室禁止、鉄

製小物持込み禁止などの 12 の注意事項を図記号で示すもので、MR 装置の設置されている施設の出入口付近に表示されることになっている。2005 年に ASTM は MR 適合性の試験結果を表示するための標準規格 (F2503) を定め、それまで用いられていた「MR compatible」という用語の曖昧さを回避し、「MR Safe」「MR Conditional」「MR Unsafe」の 3 分類とその表示マークが策定された。「MR Safe」とはいかなる MR 環境においても既知の危険性を持たない物品であることを意味し、非導電性かつ非磁性のプラスチック製品や完全な木製品が挙げられる。「MR Conditional」とは、予め定められた使用条件を守る限り、特定の MR 環境においては既知の危険性が無いことが実証されている物品で、安全性に影響を与える要因を漏れなく列挙し安全性が損なわれる条件を明記することが義務づけられる。医用材料や医用器機類の多くがこれに該当する。「MR Unsafe」とはあらゆる MR 環境で既知の危険性が発生することが判明している物品で、鉄製の鉗やポンペなどが代表例である。

④MR 装置使用者の安全

MR 装置の使用者やその周辺での業務従事者の日常業務における怪我の防止と、長期的な健康管理の 2 つに分けられる。日常的な事故として最も起こりうるのは吸引事故であるが、MR 装置は、撮影していない状態でも強力な静磁場が発生していることを知らない医療従事者もいる。もともと MR 検査従事者の健康管理については、電離放射線のような法律に基づく厳重な管理体制は決められていなかったが、2004 年に European Union (EU) の Physical Agents Directive (PAD) が労働者の暴露される静磁場強度 (全身で 2T、四肢で 5T、24 時間積算で 0.2T) および動磁場 (dB/dt; 25-820Hz の範囲で $25 \mu\text{T}$ / 動磁場の周波数 (kHz)、暴露制限値 4-1000Hz の範囲で 10mA/m²) を勧告したことをきっかけに関心が高まった。

5. 再び震災の影響を考える

そろそろ震災から 1 年経とうとしているが、詳

細な震災被害調査は、まだその端緒についたばかりである。ひとつには、被災地の負担や、大きな被害があった施設ほど直接現地に赴いて調査しなければならないという事情があり、調査体制を確立するために時間を要しているからであるが、安全問題には現実的な利害関係が影響する点も無視できない。

震災における被害をもととの原因で大まかに分類すると、地震による施設や MR 装置への直接の破壊的作用とその二次的な影響、磁性体の吸引によるもの、停電によるものに分けられる。特に、津波の被害を受けた場合は、大型磁性体が思わぬところから押し流されてきて撮影室のドアを突き破り吸着した事例がいくつも確認されていることには留意すべきである。今のところ、大型磁性体の吸着による人的被害の報告は確認されていないが、普段の安全管理では全く想定していない事象である。クエンチは、震災時に発生した即時クエンチと、震災後に発生した遅延性クエンチが見られたが、個々のケースがどのような要因によるものかは今後の検討課題である。このような問題の根本的な解決方法は、津波被害が起きない地区で建物を免震構造にする以外に方法は無いことを銘記すべきであろう。

震災による MR 装置の被害は、潜在的な危険性は知られているものの想定を遥かに越えたレベルで発生する点の特徴と言えるが、これは MR 装置に限ったことではないだろう。中長期的には震災前と比較して、MR 装置の故障やクエンチの頻度が高くなるかどうかにも注意してゆかねばならない。そのような情報は、MR 装置の品質、特に耐久性の向上にも有用と期待される。

謝辞 本稿の執筆にあたって、宮城県 MR 技術研究会、物質材料研究機構の野口隆志先生、および、関連医療機関の方々のご協力をいただきましたことをここに感謝申し上げます。