

201325010B

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

平成24年度～25年度 総合研究報告書

研究代表者 中井敏晴

平成26(2014)年3月

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

平成24年度～25年度 総合研究報告書

研究代表者 中井敏晴
平成26(2014)年3月

目 次

I. 総合研究報告	
大震災におけるMR I 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	-----1
中井敏晴	
II. 研究成果の刊行に関する一覧表	-----45
III. 研究成果の刊行物・別刷	-----49

I . 総合研究報告

大震災におけるMR I 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

研究代表者 中井 敏晴

独立行政法人国立長寿医療研究センター 神経情報画像開発研究室長

研究要旨

震災発生時に医療機関は救命活動の拠点となるにも関わらず自らも被災するため、医療器機の安全確保が重要である。特にMRI装置は国内で6000台以上が稼働し日常診療で不可欠であるが、低温冷媒、高磁場、高電圧を用いるため震災時には2次災害の原因となりうる。本調査研究では東日本大震災によってMR検査室に発生した被害を定量的に評価し、MR検査室における安全な避難、MR装置の被害の最小化、2次災害の防止措置と、予め考慮すべき防災対策を検討した。被害の大きかった東北・関東の7都県でMRIを保有する984施設を対象とした質問紙調査を行い、456施設に設置された602台のMR装置に関する回答を得た。また、注目される被害のあった施設への訪問調査を行なった。MR装置の19%に被害事象が見られ、その発生度数は震度5以下と6以上で差があった。頻度の高い被害事象はマグネットの移動、チラーや空調の故障、急激なヘリウム量の減少、マグネット装備品の破損などで、クエンチは19件、浸水被害は12件確認された。50%の施設が震災発生後3日以内にMR装置を再稼働させていたが、45%の施設が「MRIメーカーによる点検作業を待てないので、病院スタッフによる点検で再稼働させた」との認識を示し、大震災の発生時には現場で緊急的対処を行うための基準が必要であることが確認された。MR検査室の建屋が免震構造の場合には半損以上の被害発生は無く、震度6以上でも十分な効果があることが確認された。廃棄されるMRI装置を利用したクエンチ誘発要因の検証実験を行ない、地震によりマグネットの排気管が破損した場合の危険因子を推定した。これらの調査結果に基づいて「災害時におけるMR装置の安全管理に関する指針」、「MR検査室の防災指針」、「MR装置の緊急停止システムの仕様統一に関する提言」を策定し、2指針については日本磁気共鳴医学会から平成26年1月15日に公表した。東南海地区におけるMR検査室の防災対策の状況調査では、緊急地震速報システムの導入はまだ本格的に進んでおらず、ほとんどの施設で停電時に液体ヘリウムのモニタが不可能であることなどが判明した。今後の防災対策としては、建屋の免震構造化、緊急地震速報の活用、患者救出を含めた実地訓練、設置されているマグネットに関する正確な情報収集、非常電源、非常照明の確認、停電も含めた非常時における電子マニュアル等の利用方法の確認、立ち入り禁止等、現場の安全確保処置の準備、MR装置の再稼働前の十分な点検、などが重要項目と考えられる。MR検査室においても可能な限りの減災を実現して医療施設の機能維持が果たせれば地域医療への大きな貢献となる。

研究分担者

町田好男・東北大学大学院・教授
磯田治夫・名古屋大学大学院・教授
野口隆志・独) 物質・材料研究機構・研究員
山口さち子・独) 労働安全衛生総合研究所・研究員
土橋俊男・日本医科大学付属病院・技師長

A. 研究目的

MRI 装置は国内で 6000 台近くが稼働し、日常診療でも重要な役割を果たしているが、低温冷媒（ -270°C ）、高磁場（数テスラ）、高電圧（数千ボルト）を用いるため、厳重に管理されている¹⁾。震災時にはクエンチの発生に伴う液体ヘリウムの急激な気化や大型の磁性体吸引、漏電による火災などの危険性があり、2次災害の原因となりうる。過去には、作業ミスで生じた特殊な条件下で低温冷媒容器の爆発事故（圧力破裂）が起き受傷した事例もある²⁾。従って、MR 装置に起因する2次災害を防止するために医療機関が自ら実施すべき緊急的な安全手順を確立しなければならない。本調査研究では MR 装置の東日本大震災による被災状況を調査し、MR 検査室における安全な避難、MR 装置の被害の最小化、二次災害を防止するための緊急的措置についての指針を策定するとともに、効率的な MR 検査室の防災対策を立てる上で考慮すべき事項を集約した防災基準を提案する。また、これまでの調査研究で判明した MR 検査室における震災対策や安全管理に資する知見を普及させ、特に東南海地区の医療施設を対象とした啓蒙活動を行うことにより、地域医療への貢献を目指す。

平成 23 年 3 月 11 日に東日本大震災が発生し、多くの犠牲者と被害を出した。医療機関は震災時の救命活動の拠点となるにも関わらず、自らも被災し設備の損傷を免れ得ない。医療従事者自身も震災による犠牲者、被害者の例外ではなく、津波のために殉職した事例も報告されている³⁾。医療従事者自身が無事であっても、家族、親族に震災の犠牲者、被害者を抱えているケースは少なくない。高台移転と病院の免震化を済ませ、医療施設としてはほぼ無傷であった医療機関であっても、その職員は過酷な現実の元で勤務を続けていた事が報告されている⁴⁾。災害時においても医療従事者は人命救助の使命にあたらねばならないが、それに伴うリスクや負担については、消防や警察など職務の性質上の危険性が当初より明確になっている職種と比べると十分に認知されているとは言えない。医療機関は一般の事業所と異なり、震災が起きても業務を中止することはできず、むしろ医療ニーズは増大する。震災発生の有無とは関係なく、疾病は一定数発生する。震災が発生すれば受傷者が多数発生し、さらには震災後の生活環境の悪化のために慢性疾患の悪化が起きる⁵⁻⁹⁾。このように災害後の医療は、平時とは異なった背景において行われ、「災害後医療」という範疇で理解すべきであろう。

近年は建築技術が進歩し、医療機関の建物もほとんどが耐震・免震化されており、建物の倒壊や崩落による被害は少なくなった。一方で、医療機器も複雑化、電子化が進み、医療職にある者は日常の業務において多くの電子機器の操作している。電子機器は、一定の

耐久性を持つように設計、製造されているとはいえ、震災時に発生する強度の振動や、転倒、落下による衝撃、突然の停電による影響は無視できない。震災における医療器機の安全は、大きく2つの視点から捉えることができる。ひとつは、医療器機そのものが震災により周囲にいる患者や職員に危害を与える危険性であり¹⁰⁾、もうひとつは震災の影響で生じた不具合が事故や致命的な故障の原因となる可能性である。今回の大震災で見られたように震度6や7の強度の影響を受けた場合、医療機器が外見上明らかに破損していなくても想定外の故障が発生していたり、すぐには異常が明らかにならなかつたりする可能性を考慮しなければならない。従って、診療再開の絶対的な必要性という医療機関の立場からは、震災後に医療機器を使用する上での安全性担保が大きな課題となってくる。

医療器機の影響度分類¹¹⁾によれば、災害時には機器の移動・転倒・落下等により、現に使用中の患者や職員に対して重大な人的危害を与えるおそれがある「危害型」や、機器震害での機能停止により、診療機能に重大な影響を与えるものであり、かつ他に代替できるものがないか、使用中の患者や新たな患者に対して緊急の用途に供する必要がある「緊急型」など、5型の分類がなされている。このような観点から、MRIは影響度分類をあてはめるならば、「危害型-管理系 (I-B)」に分類されると考えられるが、今回の東日本大震災で実際にどのような被害がMR装置に発生したかを明らかにし、より具体的なリスク予測を行う必要がある。

日本磁気共鳴医学会の安全性評価委員会(委員長 研究代表者)は今回の震災発生4日後(平成23年3月15日)に「災害時のMR検査の安全に関する緊急提言」を提案し、厚生労働省を通じて2次災害の防止対策が各都道府県に通知された¹²⁾。この提言はMR装置の安全管理に関する物理工学的知識を基にして、震災現場において起こりうると考えられる事項を中心に緊急的対処について提案したものであったが、被災現場の状況についての具体的な状況が確認できないため、あくまでも理論的に考える範囲で作成されたものである。その後、代表研究者らは東北3県を中心としたMR装置被災の事例収集を行い(協力機関約20)、今回の震災において実際に発生した事象の定性的な情報を得た。その結果を第39回日本磁気共鳴医学会で「緊急報告—震災時におけるMRIの危機管理」として報告した(平成23年9月30日、小倉、興梠征典大会長)。

このような予備調査活動では、MR装置の破損が具体的にどのように生じているのかについては分かったが、その背景要因や個々の施設が直面した問題が何であるかについては十分な情報が得られなかった。また、津波被害の著しい地域に関する具体的情報は限られており、クエンチの発生についても情報が限られており実体がつかめなかった。本調査研究では、MR装置の被害状況だけでなく、発災当時に検査担当者が取った処置や行動、検査現場の視点から捉えたMR装置復帰過程の状況や課題、今後の防災対策に対する考えなどを調査し、可能な限り定量的な評価を行う。阪神淡路大震災でもMR装置の被害調査は行われ

たが¹³⁾、被災した装置の規模が異なるだけでなく、MR装置の高性能化が進んだため静磁場強度が高い装置(3T装置)が普及したことなど、当時と比較するとかなり状況が変わってきている。また、今回の震災では三陸海岸沿いを中心とした津波の被害が著しく、医療施設が津波に巻き込まれた事例も多数報道されており、家具や什器類の転倒と火災の被害が大きかった阪神淡路大震災とは状況が異なる。

従って、今回の震災被害を受けた太平洋沿岸地域に対して大規模調査を実施し被害事象ごとに定量的な評価を行ない、その発生に関連が深い因子を探索する。特に注目される被害が報告された施設に対する訪問調査を行い、より詳細な問題抽出を行う。また、都市型の被害としての特徴があるかどうかの検討を行う。震災時や震災後の管理において関心の高いクエンチの発生リスクを予測するための指標を探索するための分析と試験研究を行う。

これらの結果を基に、先に出された緊急提言を改訂し、発災時の緊急対処、平時の防災対策などを定めるMR検査室の防災指針を策定する。そのために、医療従事者のMRの安全に関する基礎知識の実情調査、発災時のMR検査室における検査担当者の行動分析、MR装置の仕様上の問題点の分析、東南海地区におけるMR検査室の防災対策の現状について概況を調査する。これらの作業を進める過程で、得られた情報を地域的な取組の中に取り入れるための啓蒙活動を行う。このような調査研究は世界的にも例が無いが、今後予想される南海・東海地震等への対策としても不可欠である。

B. 研究方法

研究体制

本調査研究は以下の体制で調査研究を進めた。研究分担者(コアメンバー)5名に加え、準コアメンバー3名、東北・関東の太平洋沿岸7都県(岩手、宮城、福島、茨木、千葉、東京、埼玉)各2名、中部7県(富山、石川、福井、岐阜、静岡、愛知、三重)各2名、南海3県(和歌山、徳島、高知)4名の研究協力者、超伝導工学グループ(物質材料研究機構、3名)、総計43名で調査研究を実施した。各地の研究協力者を介して、地域のMR研究会や診療放射線技師会、放射線技術学会の支部等の協力を得た。また、策定しようとする指針に対する客観的評価を得るための「MRの防災に関わる専門家会議」の専門委員7名、特別委員2名から貴重な情報とご指摘をいただいた。

研究項目

本調査研究は平成24、25年度の2年間を実施期間としたが、初年度はMR装置と検査室の被害状況の解明、2年度はその結果に基づくMR検査室の防災指針の策定を中心として進めた。平行して、関連項目の調査とクエンチ対策に必要な基盤知識を整備するための試験研究を行った。

平成24年度の調査研究は、MR装置の被災調査と、被災後のMR装置の安定性の評価指標を探索するための試験研究の2項目を実施した。被災調査は、得られたデータの総合的評価研究、注目される被害が認められた個別施設への訪問調査研究、建物要因に関する分析

研究、都市部の特徴に関する分析研究、震災後の検査担当者の行動分析研究の5課題に分けて分担研究を行った。

平成25年度は、MR検査室の震災対策のための指針を整備するだけでなく、東南海地区に震災被害の詳細やリスク因子に関する情報を提供し、防災に向けた活動を支援することも活動の目標とした。そのために以下の5課題の分担研究を行った。また、それぞれの分担研究の中で重点的に検討すべきと考えられる技術的な5テーマを取り上げて調査班内に横断的な分科会を構成し検討を進めた。

- ① 緊急停止ボタンの規格標準化（分担研究25-1）
- ② 免震技術・設置上の課題（分担研究25-1）
- ③ 発災直後の緊急対応訓練（分担研究25-1）
- ④ 標準的な復帰手順の策定（分担研究25-2）
- ⑤ 緊急地震速報の活用（分担研究25-4）

（24-1）東日本大震災によるMR装置被災状況に関する質問紙調査の報告（国立長寿医療研究センター、中井敏晴）

平成23年に行った予備調査の結果から判明したMR装置に見られる被害事象を中心に、東日本7都県の太平洋沿岸部に設置されている984施設を対象とした質問紙による調査を平成24年7月より開始し、10月に調査票の回収を完了し12月に一次集計結果をとりまとめた。東北厚生局、関東甲信越厚生局で保健医療機関として登録されている施設から、協力組織が把握している施設、商業誌で公表されているMR装置の設置状況等の情報を元にMR装置を保有する施設を確認の上、

調査票の送付対象を確認した。調査票は国立長寿医療研究センターを最終的な発着点とした。施設単位の調査であり、同一施設からの重複回答は含まれない。

調査内容は14項目からなり、①施設の基本情報と設置されているMR装置の種別、②確認された被害事象、③装置ごとの被害状況（設置方法、建屋の状況を含む）、④装置ごとの復帰状況と問題点、⑤発災時の業務状況と緊急対応の内容、⑥人的被害の有無、⑦今後の対策、が主な質問内容である。調査票の詳細は分担研究「東日本大震災によるMR装置被災状況の質問紙調査」の報告に記載する。平成24年度は、全体的な傾向の把握、特に津波被害の特徴分析と分担研究3～5で使用するデータの抽出を行った。

（24-2）岩手・宮城・福島の前北3県のMRI被災調査（アンケートおよび聞き取り調査）

（東北大学大学院医学研究科 町田好男）

平成24年度11月から平成25年1月までの期間に東北3県で特に注目される被害（津波、建物の大きな損壊、クエンチ、その他MR装置の目立った被害など）が報告された25施設に対して訪問調査を行った。訪問調査では震災発生時の対応についての詳細の聞き取り、痕跡が残っている施設については現場の視察、今後の震災対策に関する問題意識等の聞き取りを行った。18の質問項目（分担研究報告を参照）を準備したが、あらかじめ調査項目を送付し施設として重要と考えられる項目について重点的にインタビューを行った。

(24-3) 東日本大震災によるMR装置被災調査の背景要因に関する研究（労働安全衛生総合研究所 山口さち子）

地震発生から最も初期に精度の高い場所・時間情報を得ることが可能なパラメータである「震度」に着目し、東日本大震災におけるMR装置被災の背景要因を探索した。データは東日本大震災によるMR装置被災調査の全国集計¹⁴⁾を利用した。震度は震度5未満、震度5、震度6以上の3群とし、主に震度と被害内容の関係性について検討した。震度は震度5未満、震度5、震度6以上の3群とした。東日本大震災によるMR装置被災調査結果から、調査地域のMR装置ごとで回答構成される台数ベース(N=603)のデータ(アンケート回答票1及び2)と調査地域の施設ごとの回答で構成される施設ベース(N=458)のデータが得られている。

まず、台数ベース(N=603)のデータについて、回答票1より①MR装置の被害状況と震度との関連、②アンカー固定とMR装置の被害状況との関連、③設置建屋とMR装置の被害状況との関連、回答票2より④復帰状況と震度との関連、⑤検査時の状況と復帰状況との関連について χ^2 検定を行い検討した。次に、施設ベース(N=458)のデータについて、⑥MR装置の破損状況(問2-⑤)と震度との関連、⑦復旧の状況(問4-①、4-③)と震度との関連、⑧災害時のMR検査の安全確保に関する指針(問12-①)と震度との関連について、 χ^2 検定を行って被害の背景要因と推定される事項が何かを検討した。

(24-4) 首都圏における大震災によるMRI装置の被害傾向 —東日本大震災における被害状況：東京都・埼玉県を中心に—（日本医科大学 土橋俊男）

東日本大震災では広範囲に渡って被害が発生したが、都市部と地方でMR装置の被害状況や復帰過程の相違点を明らかにし、都市部でのMR室の防災対策を考える上で考慮すべき観点を抽出するための分析研究を行った。データは東日本大震災によるMR装置被災調査の全国集計¹⁴⁾を利用し、首都圏(東京埼玉)と全体データの比較を行った。その上で、臨床検査の現場の視点から今後の防災対策として必要な事項の検討を行った。

(24-5) 東日本大震災における「MR検査の患者の安全確保」と「MR装置の安全確保」について・(25-4) 震災時のMR検査室の防災対策について（名古屋大学大学院医学研究科、磯田治夫）

平成24年度に実施した東日本大震災による被災施設調査¹⁴⁾の中で、調査項目「8 発災直後に取った措置：8-① 患者の安全確保」と「8 発災直後に取った措置：8-② MR装置の安全確保」の自由記述の内容を、患者の安全確保では検査担当者の行動を経時的なステップで分解して行動パターンを分類し、MR装置の安全確保では処置内容で分類を行った。自由記述の分類であるため該当数の積算までとし、25年度に実施する防災基準策定で検討すべき項目の抽出を行った。また、中部地区(7県)における今後の調査、啓蒙活動を行うための地域連携に関する予備調査を行った。

平成 25 年度は被災調査結果から得られた情報¹⁴⁾を活用して、首都直下型や東南海地震を念頭においた MR 検査室の防災対策に役立てるために、以下の調査研究を行なった。①パブリックコメント募集：第 41 回日本磁気共鳴医学会大会（徳島）においてワークショップを開催し、今回策定する指針への意見募集に加えて、開催地周辺の南海地区での MR 検査室に関する防災対策の概況調査を行う。②緊急地震速報（Earthquake Early Warning; EEW）の有効性に関する調査：東日本大震災の発生時に緊急地震速報を受信していた施設を対象として、その設置状況や施設内での利用形態、東日本大震災の発生時において確認できた有用性、緊急地震速報の利用を前提とした防災訓練、小さい地震の受信や誤報への対応状況などについての詳細調査を行う。③東南海地区における MR 検査室の防災対策の状況調査：中部地区 7 県（富山、石川、福井、岐阜、静岡、愛知、三重）と南海 3 県（和歌山、徳島、高知）の 10 県で MR 装置を保有する 780 施設を対象として、MR 装置の設置状況、MR 検査室の防災計画の状況、緊急地震速報の利用状況に関する調査を行い、津波被害のリスク予測や防災体制の整備を考える上での基礎情報を整備するとともに、調査対象地域に対して東南海地震を念頭においた啓蒙活動を行う。

(24-6) 被災時の超伝導型 MR 装置の不安要因解消のための工学的知見と提言・(25-5) 超伝導型 MR 装置使用者へ提供すべきクエンチ予防のための工学的情報について（物質材料研究機構 野口隆志）

本項目は 2 年間の継続課題として実施した。医療機関で装置交換時に廃棄される MR 装置を利用して、クエンチや消磁過程におけるマグネットの動態変化を観測、分析した。マグネットの発生磁場変化は磁束計を用いてマグネット開口部付近での定点磁場観測を実施し、クライオ内圧はマグネットに備え付けられた圧力計を利用した。放出配管の表面温度変化はマグネットの内圧放出口付近の構造物に極低温用温度計を取り付けて行い、クエンチ発生からクエンチ終了までの屋外放出口の目視観察および映像撮影を実施した。これらのデータを基に、「何時クエンチに至るかが分からない不安」や「何を施せばクエンチ発生を回避できるか分からない不安」などの MR 検査室担当者が抱える問題の背景要因の分析と、早期にその兆候を把握するためのポイントに関する考察を行った。また MR 装置製造メーカーの聞き取り調査から得られた情報に対する物理工学的な検討を加え、MR 検査室の安全管理に必要な物理工学的な事項を整理し、防災指針に反映させた。

(25-1) MR 検査室における震災対策 — 防災対策と緊急対処のための 2 指針 1 提言について（国立長寿医療研究センター、中井敏晴）

平成 24 年に行った MR 検査室の震災被害調査¹⁴⁾の結果を基にして、平成 23 年 3 月 15 日に公表した緊急提言（災害時における MR 装置の安全管理に関する提言）を改訂した「災害時における MR 装置の安全管理に関する指針」と、MR 検査室における今後の防災対策で重要と考えられる事項を集成した「MR 検査室の防

災指針」の2指針の原案を作成し、1) 今回の大震災による被害状況について熟知しているMR検査の当事者(調査班員や、その協力組織)、2) 必ずしも大震災による高度の被害を体験していない日本磁気共鳴医学会会員全般、中部、東南海地区(9県)の本調査研究の協力者、3) 医療、建築、防災等が専門の外部有識者(MRの防災に関わる専門家会議の委員)、4) MR装置の製造メーカー5社、の独立した4体制で指針案を検討した。

磁気共鳴医学会会員全般からの意見募集は第41回日本磁気共鳴医学会大会で指針原案を配布し、その内容の説明とパブリックコメントの募集を行うワークショップを開催した。MR装置メーカー5社からは、指針に対する意見に加え、マグネットの設置方法、火災への対処、液体ヘリウムの減少特性等、MR検査室の防災対策に関連する10項目についての情報提供を依頼した。MR装置の緊急停止システムの仕様統一については、MR装置5社が現時点で販売している代表的なMR装置に装備されている各種緊急ボタンの仕様調査とその比較検討を行なった。MRの防災に関わる専門家会議では、放射線医学、生体計測、電気工学、建築学、防災学、地震観測の各分野の有識者を委員として選任し指針案に対するご意見をいただいた。以上の手順により作成された最終案は日本磁気共鳴医学会に報告され、確認された。

(25-2) 東日本大震災によるMR装置の被害状況からみた発災後のMR装置の復旧手順に関する検討(東北大学大学院医学研究科 町田

好男)

平成24年度に実施された東日本大震災でのMR被害のアンケート調査報告¹⁴⁾とその後実施した宮城、福島、岩手の被災三県での訪問調査(聞き取り調査)結果を基にして、震度と復旧・復旧の関係、復旧や機器装置の安全な保全管理上で注目される事項、検査の休止期間と診療への影響、安全維持に関する被害施設からの自由意見を詳細に検討した。また、国内の主なMR装置販売メーカー5社からのヒアリングを行い、各メーカーのユーザーに対する防災情報発信状況や復旧に対する立場等について検討し、特に復旧手順の作成指針に有用と思われる事項を抽出した。以上の調査結果をもとに、復旧手順作成に関するチェック項目のリストを作成した。

(25-3) 医療系職員の磁気共鳴画像技術の利用における安全意識調査—MR装置の安全に関するリスクコミュニケーションと震災時にすべき事項—(労働安全衛生総合研究所 山口さち子)

医師、看護師、診療放射線技師を含む医療職246人を対象として実施したMRの安全に関する設問への回答を解析対象として、医療職の職種とMRの安全に関する基礎知識の傾向を分析した。この調査は、医療施設の管理者やMR検査の担当者がMR検査室を管理する上で、施設に勤務する他の医療従事者にどのようなリスク因子があるかを明らかにし、震災時にMR検査室で起こりうるリスクの予測に資するものである。

調査票は、回答者の基本属性(年齢、性別、

職種)とMR検査の経験有無、MRIの安全に関する20の質問事項から構成され、「聞いたことがある内容も理解している」、「聞いたことがある」、「断片的に聞いたことがある」、「知らない/初めて聞いた」の4段階で評価した。一次集計後、職業に関しては、診療放射線技師群とその他医療職群の2群として扱った。また、過去のMR検査の有無に関しては、MR検査の専門知識を有しない集団における影響を検討するために、その他医療職の集団の該当者のみ、経験なし群として取扱った。全回答、職業別、MR検査を受けた経験あり/なしの各集団における尺度得点を算出し、職業及びMR検査を受けた経験あり/なし間の平均得点について、それぞれt-testで有意差検定を行った。続いて、各設問の得点に関する因子を検討するために、主因子法・プロマックス回転による因子分析を行った。職種(診療放射線技師、その他医療職)又はMR検査を受けた経験(あり、なし)別に下位尺度得点を求めた。下位尺度得点の統計解析は、各集団の因子間の平均得点について、職種(診療放射線技師、その他医療職)又はMR検査を受けた経験(あり、なし)それぞれについて二元配置分散分析を行った。下位検定として、交互作用に有意性が認められた場合、因子ごとの対応についてt-testを行ない、有意な因子の主効果が認められる場合には、Tukey-kramerの検定を行った。

(倫理面への配慮)

本研究の対象は個人情報や人・動物等の生命体ではなく、何等かの介入を行うことも無

い匿名調査であるが、調査票に調査の主旨説明と同意確認を行うための文書を添付し、回答票の提出を持って同意とした。特に訪問調査は対面調査であり施設の現場調査も含むため、事前に倫理委員会(国立長寿医療研究センター)で承認を受けたプロトコルに従って、個別に書面をもって同意の確認を得た。また、東南海地区のMR装置保有施設の調査については、別途、分担研究者が調査研究に関する倫理審査(名古屋大学)を受け承認を得た。

C. 研究結果

(24-1) 東日本大震災によるMR装置被災状況の質問紙調査の報告

発災後2週間の動向

東日本大震災が発生してから2週間以内に震災時におけるMRの安全に関して国民向けに公表された情報の調査を行った(表1)に示す。本調査結果では、2週間とは、津波等の激甚被害にあった医療施設にMR装置メーカーの担当者が到達できた時期であり、激甚被害地区以外で社会インフラがおおむね復帰した時期に相当する¹⁵⁾。1日1回以上の頻度でMR装置メーカー5社および日本医療画像システム工業会のホームページにアクセスし、一般国民向けとして公表が確認できる情報を収集した。日本磁気共鳴医学会が公表した「災害時におけるMR装置の安全管理に関する提言」¹²⁾以外には、被災したMR装置に近づかないよう注意を呼びかける情報がMR装置メーカー1社および業界団体から出されている。また、上記提言を引用する形での情報提供が別のMR装置メーカー1社から出されている。

これ以外に、顧客のみを対象として自社製品の取り扱い説明書の一部を抜粋し、計画停電についての資料として配布を開始した例があった。

施設の被災状況に関する調査結果

岩手、宮城、福島、茨城、千葉、東京、埼玉の7都県でMR装置を保有する983施設を対象として、MR装置に発生した破損の種別、発災時の様子や緊急的対処の内容、再稼働における問題点などについて調べる無記名調査を実施し458件の回答を得た。19%のMR装置に何らかの被害事象が見られ、震度5以下と6以上で発生率に有意の差があった($p < 0.001$)。マグネットの移動(12.4%)、チラーや空調の故障(9.6%)、急激なヘリウム量の減少(8.4%)、マグネット装備品の破損(7.6%)などが代表的な被害事象である。クエンチは19件確認され、即時クエンチは5件であった。

注目事項の第一はインフラ障害(資料2)による二次的な被害の発生で、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うること、外部からの支援が無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である。大地震の後では、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装置メーカーの支援を受けられる保証は無いので、現場の検査

担当者やMR装置管理者が安全確保のために積極的に行動せざるをえない状況であり、そのための指針が重要であることが本調査で数値として確認された。

注目事項の第二は津波被害である。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、大船渡市では10.7m(浸水高)を、陸前高田市では15.4m(浸水高)を記録している。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。建物が完全流出した事例は2施設(いずれも海岸から1km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、浸水の一步手前であった施設が7施設あった。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台であり、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。サンプル数は限られているが、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。

浸水被害のリスク分析は以下のとおりである。全調査対象(984施設)に対しては1.2%

の浸水率(浸水に瀕した事例を含めると1.9%)であるが、津波の被害を受ける可能性がある三陸海岸沿岸部を対象に考えてみると全く異なった数字になり、宮城、岩手の沿岸から5km以内を母数とすれば36%、4km以内では41%の浸水率になる。海岸より4km以内で浸水を免れている施設は海拔が12m以上(設置場所としては14m以上と想定)であるか、浸水しにくい特別な地形的特徴が見られた。また、浸水によるMR装置の全損例は建物崩壊による全損よりも遥かに事例が多く、建物は耐震や免震であっても耐水ではないことを銘記すべきであろう。

また、浸水被害によるリスクとしては、以下の点があげられる。

1. 流入した大型磁性体による吸着事故
2. 異常なクエンチ(遅延クエンチは不可避)
3. マグネットの流出や露出による二次被害
4. 軽微な浸水の場合は再稼働時の電気回路の安全性

注目事項の第三はクエンチの発生リスクである。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はすぐにクエンチと分からない。クエンチそのものは、MR装置の撤去時に行われるように管理された状態で発生する限りはそれほど危険な現象ではないが、現実的な危険の原因は液体ヘリウムの急激な気化現象である。

本調査では19件のクエンチ事例が確認されており、そのうち、即時クエンチは5件であった。1件は津波による浸水事例(前述)、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件は浸水被害後の安全確保のための措置である。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時間後かつ一ヶ月以内の全てのクエンチか、一ヶ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(地震発生から一ヶ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。遅延クエンチも含めると4.0%になる。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極めて稀な事象では無いが、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になる。低温物理学的には地震による震動そのものがクエンチを起こす直接の原因になるとは考えにくいとされるが、今回の調査結果からはクエンチは震災において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的リスクが高まっていたMR装置に地震による衝撃が加わると発生しやすいのか、地震波の特徴、建物構造や設置方法などの施設固有の条件が影響するのか、それ以外の要素が関与するのかなど、まだ未解明の部分があり、今後の検討を要する。

(24-2) 岩手・宮城・福島の東北3県のMRI被災調査（アンケートおよび聞き取り調査）

被災施設への訪問調査（聞き取り調査）は原則として2名の研究協力者が調査員として訪問する形で行った。調査対象は岩手4施設、宮城14、福島10、計28施設で、アンケート調査の結果で注目された施設を抽出し、訪問調査の承諾を改めて取った。

岩手の4施設では施設の立地条件の違いにより、発災直後の様子が異っている様子が明らかになった。地震による建物被害が大きかった施設ではMR検査が行われておらず、装置の状況把握のみが行われ立ち入り禁止措置が取られていた。地震発生後、25～30分で津波の襲来を受けた施設では装置の被害状況把握すらできていない。今後はこの短時間内に行なうべきことの優先順位を検証する必要がある。本調査の対象ではないが、ある県立病院（MRI装置は未設置）では、揺れが収まった時点で放射線機器の点検を行っていた時「津波が来た」との声が聞こえたために慌てて避難し、難を逃れたとの事例が報告されている。

宮城県はほぼ全域が6弱以上の震度を記録した。建屋が激しく揺れる最中、ボア内から患者救出を行うのは非常な困難を伴った。患者の稼働性やスキャン中の体位、使用されていたコイルの種類は多様であり、緊急的な救出の支障になる要素はさまざまであった。マグネット本体の移動により途中から患者の載る寝台を引き出すことができなかった、大型のコイルがガントリの内壁に引っかかり、引き出せなかった等の事例が報告された。このような状況で、患者をガントリ内部で待機さ

せるべきか、激しい揺れの中で危険を冒しながらも引き出してテーブルから降ろし、スキャンルーム外に誘導すべきかについては議論があった。

今回の調査の中で、病院全館に「緊急地震警報」のシステムを備えた施設が3施設あった。ある施設では、災害時の対応として、「緊急地震警報」の放送がなったならば直ちにスキャンを停止して患者を救出する訓練が徹底されていた。また、別の施設では、以前は誤報等の理由でこのシステムが活用されていなかったが、3月9日の前震を経験していたために、大きな揺れが来る前にスキャンルームに入って患者救出を開始することができたと報告している。もうひとつの施設では、S波到来までの予測時間をカウントダウンするシステムであった。いずれもの施設でも患者救出の観点で「緊急地震警報」のシステムは有効であったと報告している。

震災対策としての免震構造の有効性を明確に示す注目すべき事例があった。震度7でも免震構造の建屋に設置された装置には全く損傷はなかったが、耐震構造の別の建屋に設置された装置は台座からマグネットが脱落して移動してしまい、患者テーブルの軸方向がずれてしまった。

マグネット本体の設置方法と被害との関係ではアンカー止めしない装置でマグネット本体の移動や回転が見られた。このようなマグネット本体の損傷は、クエンチダクトの破断など重大な2次的被害を引き起こした。建屋の耐震性能や、地盤等の立地条件を考慮したマグネット本体の設置方法についての指針が

求められる。

ほとんどの施設で停電を経験したが、商用電源が復電までの間冷却システムが停止したままの施設が多数あった。そのために液体ヘリウムの蒸散が通常より増加し、そのためにクエンチの発生を危惧していた施設がいくつかあった。自家発電設備を有しているものの、MR装置の冷却システムへは電源供給されない施設や、本来電源供給されるはずであったにもかかわらず切り替え設備の不具合で供給されなかったなど、実際に震災が発生して想定外の事態に直面した。

多くの装置メーカーが、MR装置の復旧に直ぐには対応できない状況であった。仙台市は各メーカーが東北地方のサービス拠点を置いているが、被災地にあるメーカーの拠点やそこで働くサービスマン自身も被災者であったという視点を忘れてはならない。そのためにも、ユーザー自身による適切な対応を行うための災害時マニュアルが求められる。

福島県内では津波による被害を受けた施設は無かったが、原子力災害によって非難区域となった施設の状況や、発災当初の対応についての指摘が主であった。調査対象10施設のうち装置自体が被害を受け検査停止を余儀なくされた施設は6施設であり、再稼働までの日数は、装置が復旧しても病院の運営上の問題で遅れたケースがあった。震災後にMRIの操作室が患者の一時避難所や一般の技師室として利用されていたケースがあり、その妥当性について検討する必要がある。

(24-3) 東日本大震災によるMR装置被災調査の背景要因に関する研究

汎用的な指標である震度に着目し、東日本大震災におけるMR装置被災¹⁴⁾の背景要因を探索した。MR装置の被害が「影響なし」と「影響あり(軽微、半損(軽)、半損(重)、全損)」の二群に分類し震度との関連を検討したところ、震度の上昇につれてMR装置への影響が有意に増大していた($p < 0.001$)。

「アンカー固定なし」と「アンカー固定あり」の二群に分類し、「影響なし」と「影響あり」の二群に分類して検討した結果、「固定あり」で被害事例は13.0%であったのに対し、「固定なし」では36.4%で有意差が認められた($p < 0.001$)。

設置建屋を「耐震構造」、「制震、免震構造」、「その他」の三群に分類し、影響の有無による二群に分類し解析したところ、影響が少なかったのは「制震、免震構造」であった($p < 0.05$)。「耐震構造」と「制震、免震構造」間においても、「制震、免震構造」で有意な被害減少が観察された($p < 0.01$)。

復帰状況と震度については、メーカーによる(発災から)復旧作業(修理)開始までの期間、(発災から)機械が使用可能となるまでの復旧期間、(発災から)検査を再開するまでの期間のいずれにおいても、震度と関連した有意な復帰遅延が観察された($p < 0.001$ 、表4)、震度の上昇とMR装置被災後の自己復旧率の低下及びメーカー関与の必要性の増加が確認された。

発災時に検査が行われていた状況を示す「スキャン中」及び「実験中」を「稼働中」

とし、それ以外の状況（始業前、就業後及び非稼働状態等）を「それ以外」と分類すると、MR装置が使用可能となるまでの復旧期間（発災から）、MR検査を再開するまでの期間において、「稼働中」に対して「それ以外」の群で復旧遅延傾向が示された（ $p < 0.001$ ）。

MR装置の破損状況を、震度別（震度5未満、震度5、震度6以上）でカイ二乗検定を行ったところ、磁性体の吸着とシステムキャビネット等のアンカーの破損を除き有意差が観察された。クエンチ関連事項（チラーや冷凍機の故障、クエンチダクトの損傷、急激なヘリウム量の減少、屋外機の設置状態の異常）についても有意差が観察された（ $p < 0.05$ ）

復旧作業の状況について、震度別（震度5未満、震度5、震度6以上）で検討を行うと、「病院（施設スタッフ）による点検のみによる再稼働（178件）」の割合は震度5以下で高かったが、「MRメーカーによる再稼働（31件）」、「両者関与するもメーカー主導の再稼働（82件）」、「再稼働不能（20件）」は震度6以上で増加を示した。カイ二乗検定を行うと、これらに有意差が観察された（ $p < 0.05$ ）。

このように、震度は被害事象や復旧状況と統計的に有意の関連性がある事が確認された。

(24-4) 首都圏における大震災によるMRI装置の被害傾向 —東日本大震災における被害状況：東京都・埼玉県を中心に—

首都圏（東京、埼玉）ではMR装置を2台以上保有する施設が35%を占め（全体20.5%）、複数の装置が設置されている割合が高かった。設置建物の制振・免震化率は東京都で21.6%

であり、全体の8.2%よりも高い比率であった。一方で、6以上の震度であったのは2%であり、全体の30%と比較するとかなり低かった。マグネットの移動は4.6%（全体12.4%）、マグネット装備品の損壊0.8%（全体7.6%）、クエンチダクトの損傷0.8%（全体4.5%）、MR検査中の患者受傷が1.5%（全体2%）であった。首都圏でも即時クエンチが1件発生している。一方で、浸水（全体3%）や火災被害の報告は無かった。

首都圏では免震構造および制震構造の建屋の装置には今回の震災による被害が発生しておらず、震度6強の強い揺れがあった免震構造の施設でも全く被害が発生していなかった。一方、耐震構造では震度4あるいは震度5弱で被害が発生しており、免震構造の施設と差があった。震災に伴うMR装置の被害の発生率低減に免震構造が有用である点が明らかになった。ビルの9階に設置されていた超伝導型の装置（アンカー止め無し）の事例では、クエンチダクトを中心に50cm程度回転性の移動が生じた。今回の調査では、回答を容易にするために移動の有無のみを尋ねたので、どのような移動であったかについての詳細情報が得られていないが、今後は建物の階との関係や移動の方向についての検討を進める必要があると考えられる。

東北地方と比較すると相対的に高い制振・免震化率と低い震度のために、MR装置の被害程度に差が認められたと考えられる。しかし、停電等のインフラ障害による二次的なトラブルの発生については建物構造や震度とは関係なく影響を受けるので、まず共通の防災対策

を考えねばならない。今回は報告されていないが、医療施設専用でないビル（複合ビルのクリニックなど）に設置されたMR装置がクエンチを起こした場合の周囲への影響についても十分な検討が必要と考えられる。

（24-5）東日本大震災における「MR検査の患者の安全確保」と「MR装置の安全確保」について

平成23年3月11日に発生した東日本大震災で被災したMR装置に関連してなされた被災調査の自由記述の内容を解析し、震災時の「MR検査の患者の安全確保」と「MR装置の安全確保」を解析した。強い揺れに伴い、MR検査担当者が患者に近づけないこと、寝台の引き出しや寝台からの患者を降ろす過程で困難があることなどが判明した。寝台上の患者の安全を確保する方法、MR検査室から寝台ごと室外へ運び出せるシステムなどが重要と思われた。また、緊急地震速報により、本震襲来よりも早期に患者救出を行う訓練をする必要もあると思われた。震災によるMR装置の損傷を最小限に留め、二次災害を防ぐ手段とし、MR検査室の施錠、立入禁止措置、冷凍機関係のチェック、クエンチに対処するための措置があり、今後、防災対策において考慮すべき内容と考えられた。

防災基準の策定の準備として、中部地方の震災対策の現状については、15施設（7県）を対象とした予備調査を行った。その結果、地震対策全般についての施設レベルでの対策は取られているが、MR装置に関連したものは少なく、特に東日本大震災クラスの震災を想

定したものが無いことが分かった。また、各地区や学会におけるMR装置に関連した震災対策についても、MR装置に関連したものはなかった。震災対策として今後取組が必要と思われる事項としては、防災訓練、震災時の患者救出マニュアル、被災直後の復旧～安全確認までのMR装置のチェックリスト、MR装置メーカーの震災対策、被災状況の情報共有・連絡網の構築など指摘された。

（24-6）被災時の超伝導型MR装置の不安要因解消のための工学的知見と提言・（25-5）超伝導型MR装置使用者へ提供すべきクエンチ予知のための工学的情報について

震災後に医療施設のMR検査室の担当者がクエンチのリスクについて少しでも予測できるようにするために、MR装置の被害調査アンケートの結果から、MR装置のクエンチに関する不安要因を抽出したところ、以下の10項目にまとめられた。

- (1) 冷凍機用冷却水の循環停止、
- (2) 急激なヘリウムの減少、
- (3) クエンチダクトの損傷、
- (4) 磁性体の吸着、
- (5) 液体ヘリウム液位の低下に起因するクエンチ発生による不安、
- (6) 排気管の破断によるヘリウムの撮影室への窒息性低温気体漏出の不安、
- (7) 液体ヘリウムの供給不足、
- (8) 磁場停止措置の明確な判断基準が不明、
- (9) 震災時におけるMR装置の再稼働時の注意事項が不明、
- (10) クエンチのリスクに関する状況判断の難しさや不安

本調査研究の最終目標である防災指針において、震災後の緊急的対処を考え上でのリスク評価を行うために、撤去されるMR装置を

利用したクエンチ（消磁）時に見られる現象の計測を13台のMR装置を対象として行った。

液体ヘリウムの急激な蒸発を伴わない電源装置を使った消磁の場合1.5Tの主磁場は22分18秒で0となった。配管表面温度観測では、電流リードを冷却するガス配管出口温度は-60℃、室外放出配管付近の表面温度は-58℃まで下がったが、空気の液化温度まで下がらないことを確認した。

強制クエンチによる消磁事例では、次のような現象が再現された。緊急減磁装置のスイッチ（クエンチボタン）を押すと、配管内をガスの流れる音がだんだん大きくなり、1秒以内に磁場減衰効果の評価用に人工的に吸着させてあった磁性体が落下した。次に大きな音と共にバースティイニングディスクが破れ、一気に低温のヘリウムガスが室外に排出された。同時に配管が急激に冷やされるため、廻りの空気が配管壁面で液化した。また、室内配管のつなぎ目などからヘリウムガスが漏れ出た。急速な低温ガスの排出により大気中の酸素が液化し、マグネット表面に流れ、温度が低下した。マグネット上部の放出配管周辺の温度は、最大-150～-200度まで低下し、-100度以下の状態が1時間程度は続くことが確認された。また、屋外排気口周囲の温度も、-100度以下に下がることが確認された。バースティイニングディスクが破れるまでの時間は、装置により異なるが、概ね数秒程度であった。

MR装置の超伝導マグネットは、液体ヘリウムでの十分な冷却状態が常に必要となる。十分な冷却状態は、液位が許容最低液位以上に貯蔵されていることで確認する。ほとんどの

MR装置の超伝導マグネットで使用されている液体ヘリウム液面計は、連続表示型超電導式液面計が用いられており、専用の電源が必要である。しかし、液面計の停電時の動作についてMR装置メーカーの回答は様々であり、バッテリー駆動が可能な装置はなく、単独電源で駆動可能であるとの明確な回答も無かったので、病院の非常電源の利用も困難な状況である。液面計が稼働できない場合も、被災前の最終液位記録と日頃の液位減少特性および液体ヘリウム槽内圧変動特性から、現時点の液位予測はある程度可能である。しかし何らかの異常があった場合には、日頃の液位減少特性は変化するので、液面計の単独動作機能は重要であると考えられる。また平常時の液位推移記録が参考にならない場合の、異常時の液位変化特性についても明確な回答を数値で出せるメーカーは無く、冷凍機停止後、数日は液位がクエンチ発生下限界を下回ることはないなどの表現であった。装置ごとに固有の液位減少速度変化を持つことから、一概に参考データを示すことはできないなど、ユーザーが必要な情報が十分に得られない状況であることが分かった。

被災時の超伝導マグネットの状態診断には液体ヘリウム槽の残留液量（液位）の確認と同時に、液体ヘリウム槽の内圧確認が必要となる。また内圧に何らかの異常が確認されたら、クライオスタットからの内圧放出配管周辺の様子を観察する必要がある。それら圧力計、内圧放出配管類はMR装置のマグネットカバーの内側にあるタイプの装置が増えているが、各社各様であり、取り付け取り外し要領も異