

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）
分担研究報告書

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

研究分担者 野口 隆志
独立行政法人物質・材料研究機構
超伝導線材ユニット マグネット開発グループ 特別研究員

研究要旨 被災状況の質問紙調査および訪問調査の結果から超伝導マグネットに関わる MR 装置使用者の不安要因を抽出し、クエンチに関連した装置および環境の挙動について工学的調査を実施した。使用者の不安内容は、どのような原因でクエンチするのか、クエンチするとどのようなことが起こるのか、強制的にクエンチさせる基準は何か、消磁(クエンチ)せずに放置した場合のリスクは何か、などであった。それに応えるべく実機を用いて調査した結果、特に消磁および強制クエンチについて工学的知見を得た。装置および環境の挙動は、電源を用いた消磁の場合は特に特記すべき挙動は起こらないが、強制クエンチの場合は、室内へ漏れ出すヘリウム、放出配管外壁での空気の液化、屋外放出口から出る白煙などが観測された。強制クエンチの場合は事前の関係者への周知徹底が必要となる。特に被災時はクエンチする可能性を検討するための、マグネットの諸特性を事前に承知しておかなければならないことが再確認された。

A. 研究目的

本調査研究の目的は MR 装置使用者の被災時の不安要因を解消するための实际的知見を得ることにある。MR 装置のマグネット部分に関する健全性の確認ができればある程度の不安は解消できるが、被災時のマグネットの点検マニュアルは具体化されていない。特にクエンチに至る過程の診断は専門家に委ねるよう指示されているケースが多い。使用者の不安内容は「どのような原因でクエンチするのか」「クエンチするとどのようなことが起こるのか」「強制的にクエン

チさせる基準は何か」「消磁(強制クエンチ)せずに放置した場合のリスクは何か」などであり、これらの不安要因を分析し、不安内容に定性的に応えるために、まずは使用者へ正確な工学的解釈をするための情報を提供することを目的とする。

また MR 装置の無人放置に関する一般的な不安要因は、第一に強磁場による磁性体吸着・吸引の危険、次いで極低温ガス放出の危険が挙げられ、設置環境の重度の被災時には高圧ガス破裂の危険も考えられる¹⁾。すなわち MR 用マグネットを放置する場合

は、無害化処置として「消磁」「昇温」「圧力開放」を施すことを考えなければならない²⁾。その作業はメーカーの技術者など専門家に委ねなければならないが、何らかの無害化実施の必要性については使用者も理解し検討しておくべきである。

特に消磁処置については多くの使用者が迷うところであり、電源を用いた技術者による消磁と、強制減磁装置を動作させての強制クエンチとの違いについて正しく知る必要がある。強制クエンチさせた場合には再立ち上げができない可能性について考慮しなければならず、判断が遅れる可能性があるため、強制クエンチの判断基準を組織的に整えておく必要がある。その判断基準の策定に際し、強制クエンチさせる場合の予備知識として、工学的な理解を深めておくことは重要である。

工学的課題：1. MR 装置およびその設置環境が被災した場合に、被災の程度に応じて何が起こるかを想定しておく。2. MR 装置を放置せざるを得ない場合には、放置の程度に応じて無害化処置を施す。

上記のような工学的課題を MR 装置の使用者に平易に説明することで、MR 装置被災の危険性を把握すると同時に対処法を正しく認識でき、被災時にも冷静な対応が可能となる。正しい危険認識が不安の解消につながることは安全工学²⁾の示すとおりである。

本工学的調査研究で具体的に目標としたのは、東日本大震災により MR 装置に発生した被害事象の調査研究の結果から得た超伝導型 MR 装置固有のクエンチ現象に関する使用者の不安要因を解消することと同時に、当事者としてできる初動のあり方に関

する提言の作成である。

B. 研究方法

調査項目の抽出

被災調査班が実施した質問紙による調査および聞き取り調査の結果から、MR 装置の使用者が持つマグネットの挙動に関する不安要因を分析し、試験研究班の工学的調査課題とした。

工学的調査対象

MR 装置の使用者が持つ不安要因は、主にクエンチ時の装置および環境の挙動が不明、クエンチ原因の推定が困難、クエンチ後の復旧の可能性が不明瞭であることに起因しており、それらを明らかにすることを工学的調査対象とした。研究初年度は主に実機を用いたクエンチ時の装置および環境の挙動について調査することとした。また、クエンチ原因推定のための工学的調査方法およびクエンチ後の装置復旧の可能性について検討するための工学的調査方法について基礎調査することとした。

工学的調査方法

医療機関で装置交換時に廃棄される MR 装置を利用して、実際にクエンチを発生させ、マグネットの発生磁場変化、クライオ内圧挙動、放出配管の表面温度変化、屋外放出口でのヘリウム放出挙動を観測することとした。

マグネットの発生磁場変化：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、クエンチ発生から磁場が消失するまでの時間を記録した。

クライオ内圧挙動：マグネットに備え付

けられた圧力計を用いて平常時の内圧からクエン中の最高圧およびクエンチ終了後の内圧を記録した。

放出配管の表面温度変化：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、平常時からクエンチ終了までの表面温度変化を記録した。

屋外放出口でのヘリウム放出挙動：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。

クエンチ原因推定のための工学的調査方法およびクエンチ後の装置復旧の可能性について検討するための工学的調査方法に関する調査は、上記調査の結果および実際の装置に施せる観測機構から分析検討することとした。

健康危険情報

本研究は個人情報や人・動物等の生命体を調査対象とする研究ではなく、また、何等かの介入を行うこともない純粋に装置を対象とした工学的調査である。しかし調査は既存装置を対象として行うため、調査目的、調査方法、得られた情報の取り扱いについて医療機関およびMR装置の関係者へ事前に説明し了解を得てから実施した。

C. 研究結果

調査項目の抽出

回答数 458 件のうち、被害状況を訊ねた質問で最も多かった被害はマグネットの移動 (12.4%) であり、次いで超伝導型 332 施設のうち、チラー (冷却系) や空調機の故障 32 施設 (表 1)、急激なヘリウムの減少 28 施設 (表 2) であった。そのうち工学的調査課題のために注目したのはクエンチダク

トの損傷 (表 3) が 332 施設のうち 15 の施設で認められた点である。また磁性体の吸着 (表 3) は 7 件であった。ここで注目されるのは、吸着事故は津波被害と関連して発生しており、ロッカー等の什器類や外部から流れ込んだものなど、通常の吸引事故では見られないものが吸着されている点である。設置環境の被災内容によって、広い範囲で磁性体吸着事故を想定しておかなければならないことが分かった。

特に危険を感じた事象として回答項目に記載されていない事象など MR 装置の破損状況についての自由記述は 34 件あった。そのうちクエンチの不安 (8 件) が最も多く、その背景は停電 (浸水被害を含む) による液体ヘリウム液位の低下である。液体ヘリウム液位が低下すればクエンチ発生の可能性は増すという定性的な理解は広く行き届いていることがうかがえる。しかし具体的な液位の下限值について承知されておらず、不安のみが先行した可能性がある。またクエンチの不安に関連して、ヘリウムの撮影室への窒息性低温気体漏出の不安 (3 件) があげられ、その根拠として排気管の破断が指摘されている。実際、クエンチダクトの損傷は 15 施設から報告 (表 4) されており、正しい危険認識と思われる。

以上から、まず被災事例の記録において以下の点に注視することとした。

- ・冷凍機用冷却水の循環停止
- ・急激なヘリウムの減少
- ・クエンチダクトの損傷
- ・磁性体の吸着
- ・液体ヘリウム液位の低下に起因するクエンチ発生の不安
- ・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

表 1 チラー（冷却系）や空調機の故障
（施設単位、超伝導型装置のみ）

	度数	割合(%)
有	32	9.6
無	291	87.7
無回答	9	2.7
合計	332	100.0

表 1 急激なヘリウムの減少
（施設単位、超伝導型装置のみ）

	度数	割合(%)
有	28	8.4
無	293	88.3
無回答	11	3.3
合計	332	100.0

表 3 磁性体の吸着（施設単位）

	度数	割合(%)
有	7	1.5
無	432	94.3
無回答	19	4.1
合計	458	100.0

表 4 クエンチダクトの損傷
（施設単位、超伝導型装置のみ）

	度数	割合(%)
有	15	4.5
無	309	93.1
無回答	8	2.4
合計	332	100.0

磁場停止措置に関する事項

クエンチボタンの扱いについて訊ねた質問(表 5)に対して、震災直後にクエンチボタ

ン（消磁ボタン）を押したとする回答は 1 件のみで、理由は地震によるパニックであった。クエンチボタンを押さなかった理由については 18 件のコメントがあり、被災した緊急的状況で検討の余裕すらなかった（6 件）、明確な判断基準が無かった（5 件）、停電の発生（3 件）、不必要と判断（3 件）などが挙げられた。また、費用の問題、排気口の損傷による重大事故発生リスクを指摘する回答もあった。

以上から、工学的調査の課題抽出では「磁場停止措置の明確な判断基準が無い」とのコメントに注視した。これは MR 装置設置施設の組織上の課題であると同時に、工学的情報の不足による検討項目の不明瞭性に起因するものと考えられる。

表 5 震災直後にクエンチボタン
（消磁ボタン）を押したか
（施設単位、超伝導装置のみ）

	度数	割合(%)
押した	1	0.3
押さなかった	316	95.2
無回答	15	4.5
合計	332	100.0

初期点検と復旧

MR 設置施設 468 件、MR 装置台数 602 台に対して復旧の担い手についての質問で、39.5%の施設（39.7%=239 台の MR 装置）において病院（施設）スタッフのみによる点検で再稼働させており、メーカーも関与したが病院（施設）スタッフ主導で再稼働させたとする回答も合わせると 51.3%の施設（51.3%=309 台の MR 装置）においてスタッフ主導で復旧させていた事実が判明

した。すなわち初期対応はもとより、復旧作業すら医療施設スタッフの手で行われたケースが5割あるということであり、施設スタッフこそ初期診断のための工学的情報を必要としていることになる。

MR装置の復旧過程で判断に迷った事例への自由記述に対して69件の回答があり、最も多かった回答は震災時におけるMR装置の再稼働時の注意事項が不明(16件)という指摘であった。またクエンチのリスクに関する状況判断の難しさや不安(9件)を示す回答や、メーカーに連絡がついても被災地の状況をどれだけ理解して回答しているのか不安であるとする指摘に注視することとした。また物資の供給不足として液体ヘリウム供給不足について3件の指摘があったことにも注視することとした。

被災に対する初動から装置復旧に至るまで、設置施設のスタッフ手動で実施されたという事実は重く受け止めなければならない。超電導型MR装置の復旧において、マグネットにかかわる部分の損傷を診断するには低温工学・超電導工学的高い技能が要求されるが、施設スタッフの初動診断に必要な点検項目について、MR装置の工学的知見から厳選した被災時の点検項目を一般化しておく必要があると判断された。

抽出課題のまとめ

被災状況調査の結果から以下の項目に注目し、さらに各項目の関連付けを行った。工学的調査から得られるどの様な知見によって不安要因が軽減できるか検討した。

- (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

工学的調査対象の選定

被災調査で注目した各項目のほとんどは、クエンチを起こすのではないかと不安に結びついている。次いでクエンチ発生後に起こり得る不都合に対する不安である。磁性体の吸着に対する不安はそれ程多くない。MRの環境を第三者に明け渡さない限り、関係者が注意を払えば磁性体の吸着事故は発生しないと分かっているからである。すなわち事故の発生原因が明確であれば、不安になることはないと思える。

クエンチについては、その発生原因は特定できていない。さらには、クエンチは危険な現象であるとの事前情報から、場合によっては二次的被害を引き起こしかねないと考えてしまう。そして大半のクエンチに対する不安は、再立ち上げが不能となったり、大きな費用負担が強えられる可能性があること知らされているからである。

実際、被災調査から抽出した不安要因の9割が、クエンチ原因となり得る事象への不安と、クエンチを起こした後の二次的被害に関する不安であった。

そこで工学的調査として、実際にクエン

チを起こさせてのシステムと設置環境の挙動について調べることにした。同時に、「消磁」「昇温」「圧力開放」の無害化処置を実際にどの様に行うべきか検討するため、撤去される MR 装置を用いて工学的調査を実施した。

年間 100 台以上の MR 装置が交換のために撤去される。そのうち所有機関およびシステムメーカーの了解が得られた 8 装置について調査が実施できた。うち 4 台については撤去作業前に撮影、磁場測定および温度変化測定が可能であった。

工学的調査結果

1. 電源による消磁事例

1-1. マグネットシステム概要

主コイル発生磁場： 1.5T

アクティブシールド型

運転電流：510.90 A

インダクタンス：約 26.1 H

蓄積エネルギー：約 3.4 MJ

シム方式：ボア内シムプレート式

クライオスタット：4K 冷凍機

内容量：2120 L

常用内圧：1.01 bar

3.0 bar *test pressur

1-2. 電源による消磁

作業工程

機材到着から約 1 時間半で消磁が始まり、そこから約 30 分、作業開始から約 2 時間で消磁が完了する。

磁場調整用電源およびケーブル類の敷設の後、電源操作はすべてコンピュータから行われ、表示画面に出る逐次情報を確認するだけで、自動的に消磁が終了する。

作業手順を追って写真撮影した。

ベッドの中央部から磁場減衰の定点観測

を試みた。その結果を資料 1 に示す。作業経過時間は以下の通りである。

17:10 消磁機材セッティング開始

17:50 電源セットアップ&動作確認

18:10 冷凍機停止 *

18:30 消磁開始

18:50 消磁完了

19:00 消磁作業完了

*：クライオ内圧を上昇させるため
4K 冷凍機を停止させる。

電源による消磁の場合、液体ヘリウム温度のマグネットへ電流を流す電流リードを装着しなければならないが、本ケースの場合はあらかじめ電流リードは装着されているので、その常温部分を冷却するためヘリウムガスが使われる。そのガス源を確保する目的で、冷凍機を止めマグネット内圧を一定以上に高めておく必要がある。

液体ヘリウムレベルは 63.3 %、クライオ内圧は 16.45 PSI g、1.5T の主磁場は 22 分 18 秒で 0 となった。

1-3. 配管表面温度観測

上で説明したとおり、消磁作業には電流リード冷却のためのヘリウムガスが必要であり、クライオ内圧を開放しつつ消磁用電流印加をしなければならない。それに伴い、各経路の配管表面温度がどこまで下がるか計測によって確認した。

電流リードを冷却するガス配管出口温度は -60°C 、室外放出配管付近の表面温度は -58°C まで下がったが、大気圧での空気の液化温度：78.8K (ケルビン)⁴⁾ すなわちマイナス 194°C まで下がることを確認した。その様子を資料 2 に示す。

1-4. その他マグネット周辺情報

被災時を想定して MR 設置環境の調査記

録上、必要と思われる周辺状況について記録した。クライオ上部配管、冷凍機、アンカー／除振機構、室外放出配管、その他機構などを撮影記録した。

2. 強制クエンチによる消磁事例 ケース1

2-1. マグネットシステム概要

主コイル発生磁場：1.5T

アクティブシールド型

運転電流：約 380 A

インダクタンス：約 7.9 H

蓄積エネルギー：約 5.7 MJ

シム方式：ボア内シムプレート式

クライオスタット：シールド冷却型

ヘリウム内容量：1650L(0-100%)

フル容量 1800L

内圧：65hPa

2-2. 強制クエンチによる消磁工程

およびマグネットの無害化工程

磁場の吸引実験、消磁作業見学、真空解放作業見学、マグネット温度測定：作業手順を追って写真撮影した。

2-2-1. 強制クエンチによる消磁

MR 室には緊急減磁装置(*1)を作動させる赤いボタンがある。形状、配置、注意書きなどについて資料3を参照のこと。

*1: 緊急減磁装置のスイッチを押すことにより、マグネットの上部に配置されているクエンチヒーターに通電される。ヒーター加熱によってメインコイルの一部が温まり、その部分の超伝導線が超伝導から常伝導へ転移してクエンチが発生する。この緊急減磁装置には蓄電池が内蔵されており、日頃から充電されているので停電時も起動できる。その形状や配置につ

いては資料3に示した。

.....

このケースの消磁のための強制クエンチは、システムに附属する緊急減磁装置によって行った。またマグネット室内で磁場の消失を確認するため、マグネットのボアに磁性体小型スパナをつり下げておき、磁場が無くなると落ちる仕掛けを施した。その様子を撮影した。

緊急減磁装置のスイッチを押すと、ガスの流れる音がだんだん大きくなり、1秒以内に磁性体は落下し、磁場の方向に向くが10秒以内にゆっくりと重力方向を向いて静止する。その間放出ガスは、数秒で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排出される。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。

配管表面温度変化については資料4に、室内配管表面の様子については資料5に示す。

このケースでは、既に調査開始前にシステムの電源が落とされ、配線切断などの作業が行われていたため、ヘリウムのレベルは測定できない状況であった。

作業経過時間は以下の通りである。

当日
16:30 吸引実験のために機材セッティング開始
16:50 吸引実験開始
17:20 マグネット配管付近の温度センサーセッティング
17:30 温度測定開始
17:38 圧力開放バルブオープン

- 17:38 冷凍機停止
 17:49 消磁
 緊急減磁装置による強制クエンチ
 ほぼ1秒以内に0磁場となる
 18:00 クライオスタット内真空解放作業
 開始
 18:20 冷凍機のカス抜き処理
 18:37 真空解放作業完了
 19:00 真空解放後の処置作業完了
 20:30 真空解放後のマグネットの
 状況確認
- 翌日
- 8:30 真空解放翌日のマグネットの
 状況確認
 9:00 搬出の為のマグネット上部解体工事
 12:30 マグネット周辺解体工事確認

2-2-2. 配管表面温度観測

消磁作業の前に各経路の配管表面温度を計測した。通常は圧力開放バルブをバイパスした逆止弁を通してヘリウムガスは排出される。この状態でマグネット内圧 65 hPa であった。圧力開放バルブを開くことによって内圧は 20 hPa 以下に落ちる。この圧力開放バルブは液体ヘリウムを注入する際や励減磁を行う際にカレントリードを挿入するときに開放する。

配管表面に温度センサーを取り付けた後、圧力開放バルブを開き、内圧を下げてから冷凍機を停止した。クエンチが発生したときにはバースティンクディスクが破れ、バイパスラインや圧力開放バルブのラインにはヘリウムガスは流れなくなる。それに伴い、各経路の配管表面温度の差が出始めることを計測した。また、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、温度が低下することを観測するためにマグネット表面にも温度センサーを取り付けて計測した。その温度変化の様子を資料 4 に示した。

2-2-3. 真空断熱層の大気圧開放

本作業工程は強制クエンチによる「消磁」作業とは無関係だが、マグネットの「無害化」には必要な工程である。

通常液体ヘリウム槽は真空断熱層に覆われているので、外面からの熱侵入はほとんど無い。クエンチ後もこの槽に液体ヘリウムが残っていて低温状態にある。この真空断熱層にヘリウムガスを入れるとヘリウム槽外面への熱侵入量は増大し、液体ヘリウムが一気に気体になる。これによる内圧上昇はクエンチ以上の破壊力(*2)になることがある。

.....

*2: 真空断熱層へヘリウムガスを導入すると、液体ヘリウムそのものへの熱流入速度はクエンチによるコイルの発熱分の熱流入速度を上回る場合がある。

MR 用超伝導マグネットの破裂事故は、ほとんどが真空断熱層の破壊に起因して発生している。クエンチによる破裂事故はクエンチが真空断熱破壊を誘発しない限りほとんどない。

.....

真空槽を安全に大気圧にするためには真空引きポートに専用の治具を取り付けて、まずは治具のセッティングに問題がないこと、配管に漏れが無いことを確認してから、少しずつヘリウムガスを真空槽に注入していき、真空槽の真空度を徐々に劣化させていく。液体ヘリウムの蒸発量を見ながら慎重にヘリウムガス注入しなければならない。真

真空断熱層が大気圧になったかどうかは、真空排気口に取り付けた圧力計で確認する。

大気圧になった後は治具を取り外し、真空ポートをマーキングする、この部分からはしばらくは温まったヘリウムガスが排出されるため、注意喚起する必要がある。この部分を閉じてしまうとクライオスタット内圧が上がり、ある程度圧力が高くなると、マグネット容器の弱い部分が破裂する危険性がある。

2-2-4. 真空解放後の点検

ヘリウムガスによって真空槽を大気開放されたことによって、クライオスタットの断熱効果がなくなり、ヘリウム容器が温まり、外側の容器が冷却される。真空開放直後はマグネット表面は霜が付着し、ずっと触ると低温火傷をしてしまうので注意する必要がある。

本ケースでは真空開放の翌日まで部屋に空調を効かせていたので、マグネット表面はほぼ常温となっていた。また、結露により、水が床に溜まることも無かった。

マグネットを搬出するために、周辺部品の取り外し、また、搬出経路で上部が開口部に接触するため、マグネット上部を切り取る作業を実施していたのでその状況を確認した。

3. 強制クエンチによる消磁事例 ケース 2

3-1. マグネットシステム概要

主コイル発生磁場： 1.5T

アクティブシールド型

運転電流：約 380 A

インダクタンス：約 7.9 H

蓄積エネルギー：約 5.7 MJ

シム方式：ボア内シムプレート式

クライオスタット：シールド冷却型

ヘリウム内容量：1500L

(1400 L 0-100%)

真空容器： 1100L

3-2. 消磁及び無害化作業

3-2-1. 作業工程

磁場の吸引実験、消磁作業見学、真空解放作業見学、マグネット温度測定：作業手順を追って写真撮影した。

当日

13:00 吸引実験のために機材セッティング開始

13:30 吸引実験開始

15:20 マグネット配管付近の温度センサーセッティング

15:30 温度測定開始

15:40 圧力開放バルブオープン

15:50 冷凍機停止

16:10 消磁

緊急減磁装置によるクエンチ

16:20 冷凍機のガス抜き処理

16:30 クライオスタット内真空解放作業開始

17:00 真空解放作業完了

18:00 真空解放後の処置作業完了

8:00 真空解放翌日のマグネットの状況確認

翌日

8:30 冷凍機の取り外し

9:30 測定機材等の搬出作業

3-2-2. 配管表面温度観測

消磁作業の前に各経路の配管表面温度を計測した。通常は圧力開放バルブをバイパスした逆止弁を通してヘリウムガスは排出される。この状態でマグネット内圧 90hPa であった。通常は 69hPa 前後だが、冷凍機

の能力低下の可能性もあり、ボイルオフも多いことが予想された。しかし、チェックしたところ、マグネットモニターのヒーターがスイッチ(B0)(*3)がONになっていたことが確認され、不測の事態が発生しているわけではないことが確認された。

.....

*3: B0 スイッチとは B0 コイルのスイッチコイルのヒータースイッチで、ヒーターを炊く事により中心磁場を補正するシムコイルのスイッチコイルをノーマルにする。これにより通常は中心磁場のリセットに使用されるが、内圧が低いときに内圧を上げる目的で使用されることもある。このスイッチがオンになるとヘリウムの蒸発量が増えるのでONにされないように注意書きがしてあり、通常テープで固定してある。

.....

B0 スイッチをオフにしたところ、内圧は段々下がってきて、逆止弁の排気ラインの霜も少なくなってきた。

マグネットの配管表面にセンサーを取り付けた。本ケースではさらにMR I 室の天井の配管及び外のクエンチ配管出口にも温度センサーを取り付けた。クエンチが発生したときにはバースティイニングディスク(破裂弁)が破れ、バイパスラインや圧力開放バルブのラインにはヘリウムガスは流れなくなる。それに伴い、各経路の配管表面温度の差が出始めることを計測した。また、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、温度が低下することを観測するためにセンサーを取り付けて計測した。その温度変化を資料 4 に示す。

3-2-3. 強制クエンチによる消磁工程

本ケースでも消磁はシステムに附属する緊急減磁装置によって行った。

強制クエンチ前にマグネットのボアに磁性の点滴台を吸着させておき、磁場が無くなると落ちる仕掛けを施してそれを撮影した。この点滴台は底部の十字キャスター部分が磁性体できており、他はすべて非磁性金属で覆われているため磁性体であると気づき難い。その様子を資料 6 に示す。

液体ヘリウムの液位はクエンチ前が 37%で、クエンチ後は 11%であった。このクエンチで蒸発した液体ヘリウムは約 364 リットルと計算された。放出配管(クエンチパイプ)の出口は MR 室のすぐ横で放出経路長は短く、屋外放出口は下向きにフードがある。配管はストレートであった。反射板は無いため、下にベニヤ板をひき、通常は金網があるが、事前に取り外してあった。いろいろなサイトでの屋外放出口の形状および配置について資料 7 に示す。またクエンチ時の放出ガスの様子は資料 8 に示す。

3-2-4. 真空断熱層の開放

「消磁」とは無関係な作業であるが、無害化処置のためには必要な作業である。クライオスタット全体の「昇温」「圧力解放」の目的で実施される。

3-2-5. 真空解放後の点検

ヘリウムガス導入で真空槽が開放されたことによって、クライオスタットの断熱効果がなくなり、ヘリウム容器が温まり、真空外装が冷却される。真空開放直後、真空外装表面は霜が付着し、直接接触り続けると低温火傷をしてしまうので注意する必要がある。

真空開放の翌日、一度冷えた真空外装は

ほぼ常温となっていた。また、結露により、水が床に溜まることもなかった。

センサー類を取り外し、サービスタレットに組み込まれている冷凍機のコールドヘッドを取り外した。マグネットを搬出する為に、マグネット上部の高さをなるべくしなければ行けないので、このように取り外す事の出来るものはなるべく取り外す。コールドヘッドを取り外したあとは専用のフレンジを取り付けておく。

4. 強制クエンチによる消磁事例 ケース 3

4-1. マグネットシステム概要

主コイル発生磁場：1.0T 鉄シールド型

シム方式：電流シム方式

クライオスタット：4 K 冷凍機による

50K シールド及びヘリウム容器冷却型

ヘリウム内容量：フル容量 2000 L

内圧：0.8 ber

4-2. 作業

4-2-1. 作業工程

磁場の消磁作業、真空解放作業：作業手順を追って写真撮影した。

16:50 消磁のための準備作業開始

17:00 クエンチパイプ出口の確認

17:20 圧力開放バルブオープン

17:25 冷凍機停止

18:00 消磁

緊急減磁装置によるクエンチ

18:02 クライオ内真空解放作業開始

18:20 冷凍機のガス抜き処理

18:40 真空解放作業完了

18:45 冷凍機コールドヘッド取り外し

18:55 真空解放後の処置作業完了

19:00 真空解放後のマグネット点検

4-2-2. 屋外放出口の確認

屋外放出口は病院の裏手にあり、駐車場に面しているが、下出しでガス流反射板があり、周辺にヘリウムガスが噴出しないように配慮されていた。また、金網が張っており、鳥や虫などが入らないように配慮されているが金網の部分にペンキが塗られて目詰まりしていたので、金網を外すことにした。屋外放出口の形状は資料 7 に示す。

消磁作業の前にマグネット内圧が正常であることを確認した。液体ヘリウムは MR システムから測定し 75.8 % であった。

通常は圧力開放バルブをバイパスした逆止弁を通してヘリウムガスは排出される。圧力開放バルブを開くことによって内圧は低下する。これによってクエンチパイプ出口からヘリウムガスが排出されるのを確認することで、放出配管を経由してヘリウムガスが正常に排出されているか判断できる。この判定のため、圧力開放バルブを開き、クエンチパイプ出口から排気していることを確認した。その後、冷凍機も停止して昇温しを開始した。またマグネットの真空ポートの位置がマグネット背面下部にあることを確認した。

4-2-3. 消磁のための強制クエンチ

このケースでも備え付けの緊急消磁装置(クエンチボタン)で消磁のための強制クエンチを実施した。ここでは緊急消時装置のバッテリーが劣化し、正常に作動しないことも考慮し、真空引きポートに専用の治具を取り付けて、ヘリウムガスを真空槽に注入して液量を低減させてクエンチさせる方法の準備も行った。

マグネットのボアに磁性体(小型スパナ)をつり下げておき、磁場が無くなると落ちる仕掛けを施した。

本ケースの消磁はシステムに附属する緊急減磁装置によって通常通りクエンチさせることができた。すなわち緊急減磁装置は正常に作動した。

屋外放出口からのガスの出方は、すぐには破裂板が破れず、大量のヘリウムガス発生は時間的に遅れた。なおこのシステムは消磁中、ヘリウムのレベルは測定できない状況だった。

4-2-4. 昇温のための真空断熱層の開放

今回のマグネットは 0.5T でありかつクエンチの突入エネルギー放出量が小さいため、クエンチのみではあまりヘリウムは気化しなかった。残留液体ヘリウムを気化させるためクライオスタットの真空槽にヘリウムガスを注入した。徐々にマグネットの内圧が上昇し、クエンチパイプ出口から一気にヘリウムガスが噴出した。その破裂した瞬間を撮影したので図 9 にその経過を示す。

完全昇温と圧力開放のためさらにクライオスタットの真空槽にヘリウムガスを注入していき、真空槽が大気圧になるまでヘリウムガスを注入した。

5. 強制クエンチによる消磁事例 ケース 4

5-1. マグネットシステム概要

主コイル発生磁場：1.0T 鉄シールド型

シム方式：電流シム方式

クライオスタット：4 K 冷凍機

50K シールド及びヘリウム容器冷却

ヘリウム内容量：フル容量 2000 L

内圧：0.8 ber

5-2. 作業

5-2-1. 作業工程

磁場の消磁作業、真空解放作業：作業手順を追って写真撮影した。

15:30 消磁のための準備作業開始

15:40 クエンチパイプ出口の確認

15:50 圧力開放バルブオープン

15:55 冷凍機停止

16:15 消磁

緊急減磁装置によるクエンチ

16:30 クライオ内真空解放作業開始

17:20 冷凍機のガス抜き処理

18:00 真空解放作業完了

18:05 冷凍機取り外し作業完了

18:15 真空解放後の処置作業完了

18:30 真空解放後のマグネット点検

5-2-2. 屋外放出口の確認

放出配管(クエンチパイプ)屋外出口は病院の裏手にあり、排気口と表示されている。通りに面しているが、横出しで反射板があり、道路や周辺にヘリウムガスが噴出しないように配慮されている(資料 7)。また、金網が張っており、鳥や虫などが入らないようにも配慮されている。

5-2-3. 消磁作業前の確認

消磁作業の前にマグネット内圧が正常で陽圧(約 3 psi)であることを確認した。液体ヘリウム液位はシステムで測定し、70.9% であった。内圧開放バルブを開くことによって放出配管屋外出口までの健全性を確認した。その後、冷凍機も停止し、昇温を開始した。

5-2-4. 消磁

このケースも消磁はシステムに附属する緊急減磁装置による強制クエンチによって行った。磁場が無くなったことの確認のためマグネットのボアに磁性体をつり下げておき、磁場が無くなると落ちる仕掛けを今

回も設置した。

緊急減磁装置のスイッチを押すと、ガスの流れる音がだんだん大きくなり、ゆっくりと磁性体が落ち始め、大きな音と共にベースティイニングディスクが破れ、一気にヘリウムガスが排出された。

屋外ではすぐに破裂板が破れたのでクエンチパイプ出口から一気にヘリウムガスが噴出した。破裂した瞬間は撮影できなかったが、大量にヘリウムガスが噴出する映像は記録できた。このシステムもまた、消磁中のヘリウムのレベルは測定できなかった。

D. 考察

被災調査から得られた災害時に関係者が抱えた不安内容から、その直接要因の背景にあるのは超電導マグネットに関する工学的情報不足であると考えられる。一般的に、回避すべき危険の具体的な現象が知らされていないこと、具体的な危険回避方法が不明なこと、危険事象が発生した場合の被害が想定できないことなどが、不安を煽る要因になる。MR装置使用者の不安と超伝導マグネットのクエンチに関する情報は、まさにその例といえる。

多くの工業製品は、規格基準を遵守すればある程度の安全が確保できる。使用者はその基準に従って取り扱うことで安心が得られることになるが、MR装置用超伝導マグネットについてはまだ工学的に成熟途上にあり、特にクエンチに関係した規格基準は未成熟であると云わざるを得ない。それ故、今回の工学的調査で得られた知見は「クエンチ現象に関する定性的理解」へ情報提供できることに価値がある。また、今後必要となる定量的情報を得る方法検討の材料と

もなるだろう。

今回の調査では強制クエンチ作業を調査対象としたため、被災時の具体的なクエンチ原因、有効なクエンチの回避策、前処理のないクエンチ事例などは明らかになっていない。被災時の危険事象予測には、例えば階下へ落下したときのクエンチ、大型磁性体吸引によるクエンチなどの実際の知見を得る必要があるが、その実証試験には多大な費用がかかることが予想される。しかし今回は実施できなかったが、液体ヘリウム液位低下時のクエンチ、真空漏洩発生によるクエンチなどは、現調査の延長で計画可能である。実施には多くの関係機関の了解と協力が必要となる。

医療現場が必要とする情報と超伝導工学

超伝導工学が示すクエンチ現象は、超伝導線材にどのようなディスターバンスが加わると、マグネットはクエンチに至るかという局所現象を明らかにすることに終始している。超伝導マグネットの巻き線部の細部において、常伝導部分の発生に対して超伝導性の維持のための物理的、工学的条件が示されている⁵⁾。常に発熱源と発熱の大きさから局所的常伝導転移が決まり、その後は冷却対自己発熱のバランスの問題となる。また超伝導工学が議論する「コイル保護」については、クエンチ発生からマグネット本体を守るための機構であり、クエンチそのもの発生を防止するためのものではない。市販されている超伝導マグネット応用機器：MR、NMR、物性研究用高磁場マグネットなどは、クエンチ発生に備えて電氣的保護回路網が構成されており、コイルの一部の焼損を、極力防止するよう作られてい

る。しかしクエンチ発生から完全にコイル破損を保護できる保証は無く、メーカーも補償の対象にはし難いのかもしれない。

MR 装置を所有する医療施設が必要とする工学的情報は、超伝導工学が示す学術的情報ではなくもっと実際的情報であることが明らかになった。実際に当事者からの聞き取りでは、クエンチを発生させる外的原因についての疑問が多く出された。例えば水没した場合にすぐにクエンチするのか、火災にあった場合にクエンチするのか、大きな磁性体が吸着された場合、強い振動があった場合、建築構造物が落下してきた場合、マグネット本体が階下に落下した場合…などクエンチ原因と被災の因果関係を知りたいとの思いが見えた。しかしこれに超伝導工学が答えることはできそうもない。というより製品の信頼性工学の様なところで考えてゆくべき課題なのかもしれない。例えば機械工学的に MR 用超伝導マグネットの容器の強さはいくらかでも保証できるように考えられる。実際、MR 用マグネットの設計・製造に関係する工学として、冷凍機や圧力容器に関わる部分は機械工学が規格基準を持っている。

しかし今必要な情報は、学術的情報ではなく、むしろ体験的事例報告が重要であると思える。事例報告を互いに関連付けてゆく過程で思い込みや勘違いに陥らないよう、何らかの工学的解釈で裏付ける必要はありそうだが、重大事故を未然に防ぐには、多くのインシデント情報から重大事故発生の予測をしておくのが有効である^{6,7)}。しかしインシデント情報が収集し難いのも事実である⁶⁾。

安心のための工学的知見として

日々できるクエンチ回避策はメーカーが示す通常点検を怠らないことだが、被災時という非日常的な状態では、追加の点検項目を設定する必要がある。また平常時の点検およびその診断とは異なる結果が出る可能性もある。

東日本大震災の MR 装置被災調査において、調査対象 MR 装置 602 台に対して、309 台の MR 装置が設置機関の職員主動で復旧されたという事実は、たいへん重いものと受け止めなければならない。そこに工学的情報が正しく伝わっていれば、検討材料がなく想像で迷うことも少なくなるだろう。難しい学術的情報ではなく、MR 装置用超伝導マグネットという製品の特性情報を基に、平易に考えられることすら提供されていないように思われる。

『液体ヘリウム液位が減少すればクエンチに至る』ということは自明として良い。まず必要なマグネットの固有情報として、通常使用しているレベル計の表示値で、クエンチに至る可能性のある最低レベル(*4)は知っておく必要がある。

.....

*4: ヘリウムの液面計(液位計)指示値は、管理上のいくつかの下限値を持っている。ひとつは通常の管理下で、液体ヘリウム補充を考えなければならない液位:A%、次いで使用者がうっかりして下げてしまっても使用者自らの手(判断)で、補充をして良い液位:B%、メーカーなどの専門技術者が補充するなら補充可能な液位:C%、専門技術者がクエンチリスクを承知で補充可能な液位:D%、すぐにクエンチしてしまうであろう最低液位:E%、という

ように、最低液位には段階がある。

ここ 10 年以内に出荷された MR 装置のマグネットはヘリウム消費量はほぼゼロとうたわれているが、この場合は A%、B%は無く、C%を喫水線と考えることになる。実際、ヘリウムの急激な低下があった場合は、メーカーの技術者へ報告することになるだろう。しかしその下に、D%、E%があることも承知しておく必要がある。ただしここで言う各液位は、マグネットの磁場の強さで決まっている訳でもなく、システム型式で決まっているものでもない。ある意味でマグネット設計の個性で決まってくるものである。それ故それは性能として保証されるものではないことも合わせて承知しておかなければならない。

現在の液位が記録でき、現在の液位減少率が測定できれば、マグネットの個性である下限液位までの持ち時間が推定できることは、おそらく多くの使用者が承知している。しかし被災時の液位減少率は、その場で計測しなければならない可能性もある。また例えば停電が約束されている場合には、冷凍機停止から液位低下率がどの様に変化するかを予め知っておかなければ、持ち時間の計算による推定は困難である。もし冷凍機停止後、定常蒸発にならずに液位低下率が増加してゆくならば、低下率変化を時間積分した総量と現在液位の比較で持ち時間が決まることになる。すなわち冷凍機停止後の液位低下率の変化を、マグネットの個性として承知しておかなければならない。このような工学的情報は、マグネットメーカーから提供されなければ、実験によって

もとめるしか方法はなさそうに思える。また同時に冷凍機再稼働から液位低下率が正常に戻るまでの液位低下率変化も承知しておきたい。

また大型磁性体吸着時に、電源による消磁が可能となるまでの持ち時間も承知しておきたい情報であるが、被災時にはこれも一概に決められない情報だろう。その場合、どのくらい力でどの方向に引っ張っても、マグネットの構造(*5)上、内部が破壊されなにかについても、ある程度の予備情報は承知しておきたい。

*5: マグネットの構造という言い方は、低温工学の専門分野では超伝導コイルの構造のことを言う。MR 装置の関係者の多くは、クライオスタット(マグネットを保冷する断熱容器および装置)を含めてマグネットと呼ぶが、それは異分野間の情報伝達において誤解の元となる可能性がある。正確な情報伝達のためには、MR 装置のマグネット=超伝導コイル+クライオスタット(低温恒温槽)であることを承知しておく必要がある。カバーを外した状態で見えているあるいは触れるものはすべてクライオスタットの一部である。冷凍機も上部の内部アクセスポートもクライオスタットの一部でありマグネットではない。

本報告書の中で、その必要のない部分では MR 装置関係者の使う“マグネット”を、クライオスタットを含めた全体の呼称としてきたが、正確な工学的情報を得ようとするなら、各部位の名称も一定程度正確でなければならぬと考える。

2012年度の調査に継続して、機会があるならば実測しておきたい工学的調査項目として『最低液位での自然クエンチ現象』がある。これは同時に『冷凍機停止時の液位低下率変化』の測定も可能である。また液位低下時の自然クエンチの外的観測も可能であろう。さらに欲を言えば、再冷却して再立ち上げも確認してみたい。

以上の調査実験は、機会さえあれば撤去するマグネットを用いて安価に実施可能と考えられる。そんな機会の条件は、MR装置休止から、撤去に至るまで期間が20日間ほどあり、設置場所も稼働している施設から若干離れている必要がある。病院建屋の移設で、新築建屋が並行して建設されるケースなどはその条件に合うと考えられるが、関係者の了解を取ることが難関となるのかもしれない。

クエンチ現象の理解のために

今回の工学的調査で得られた画像、映像情報は、そのまま現場に提供できる情報としては品質が悪い。その映像情報から誤解が生じる可能性もあり、ある程度の解説付きで公表する必要がある。今後の作業課題としてクエンチ現象の解説用資料を作ってゆくことも医療関係者の安心を得るために有効と思われる。

MR装置メーカーが自主的に製作したMR用超伝導マグネットの紹介ビデオには、たいへん良くできたものもあり、それらの映像を収集して公の立場から監修する方法も考えられる。しかし映像や画像からの印象は、実際の立会いとはずいぶん違ったものとなる可能性もある。特に磁性体吸着については、自分の手で持って引いてみるの

が一番良いかもしれない。できればMRマグネットの撤去に合わせて、関係者体験実験プログラムを実施していただきたい。プログラム設計の試行も継続して調査しておきたい課題である。

ヘリウムの流通について

2012年度後期に社会問題化したヘリウム不足⁸⁾についてもここで触れておきたい。実際今回の被災調査で不安事項のひとつに、ヘリウムの供給不足に関する指摘が3件上げられている。分析用NMR用超伝導マグネットも調査対象とした阪神・淡路大震災の被災調査では、ヘリウム流通に関する諸問題が震災直後顕在化したがついた混乱もなく沈静化したと報告されている⁹⁾。

20年近く前のMR装置用超伝導マグネットは、1台当たり年間で300L～3500Lの液体ヘリウム消費量であった。阪神・淡路大震災は被災エリアは広域ではなかったが、東西からの流通ルートが分断され、液体ヘリウムの供給が心配された。近隣地域の関係者の協力で事無きを得ている。現在(2012)は年間0L～500Lの消費量に下がっているので、液体ヘリウム供給作業そのもの知らない使用者も増えている。今後ますます増えるものと思われる。

そんな中で、被災時に液体ヘリウム液位低下の不安をどの様に解消してゆくか、考えなければならない。メーカーの対応が得られない状況での液位減少に対する不安は、液体ヘリウムの入手、マグネットへの注液器具類の入手、注液方法と作業技術情報の収集である程度解消できるだろう。もちろん施設職員の手で注液が実施できるなら不安は解消できる。しかし液体ヘリウムあつ

ての話であり、昨年(2012年)発生した日本国内総ヘリウム不足の事態は、地域のMRの使用者、地域ガスサプライヤー、MRメーカーの努力では対応できない問題である。

E. 結論

撤去されるMR装置の超伝導マグネットを用いて、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について調査した。主にクエンチに関わる工学的情報の収集を行ったが、机上で想定できる現象の確認にしかならなかった事項も多い。また定性的現象の説明資料が多く、それらを定量化するためにはさらなる調査研究が必要となることが確認された。

上記考察で述べたように、例えば冷凍機を停止させると液位低下率＝ヘリウム蒸発率は増加するという定性的確認はできた。しかしそれをどのくらい液位低下率が増加するのか、それはどのような経緯で変化するのかなどの定量化された値を知らなければ、被災時の初期調査に入る医療現場の担当者への、有効な工学情報とはいえない。

しかし不安材料が、現象を机上の想像でしか知らされていないことに起因しているならば、より臨場感のある情報は入手できたと思える。さらには続く調査対象と得べき工学的情報も、本調査研究で明らかになってきたといえる。

定量化できる工学的情報を、機会あるごとに取得することが今後の課題である。

G. 研究発表

1. 論文発表およびレビュー

- ・中井敏晴、山口さち子、土橋俊男、前谷

津文雄、引地健生、清野真也、丹治 一、安達廣司郎、武蔵安徳、菱沼 誠、阿部喜弘、石森文朗、砂森秀昭、榊田喜 正、松本浩史、栗田幸喜、藤田 功、磯田治夫、野口隆志、梁川 功、町田好男 東日本大震災によるMR装置被災調査の実施報告 日本磁気共鳴医学会誌、Vol.33 No.2 (2013) p92-119

- ・野口隆志 MRI装置の被災状況と今後の課題、(社)未踏科学技術協会 FSST (Forum of Superconductivity Science and Technology News) NEWS 135、10-13、2012

2. 学会発表

- ・中井敏晴、山口さち子、磯田治夫、土橋俊男、町田好男、野口隆志 東日本大震災における津波によるMR装置の被害に関する調査研究、日本医学放射線学会第153回中部地方会、豊明、2013.2.2
- ・中井敏晴、山口さち子、磯田治夫、土橋俊男、町田好男、野口隆志 東日本大震災によりMR装置に見られた被害事象の概況報告、日本生体医工学会・東海地方会抄録集 34 2012
- ・野口隆志、中井敏晴 震災報告 東日本大震災によるMR装置の被災調査報告 被災時のクエンチと課題、日本磁気共鳴医学会第40回大会、京都、2012.9.8
- ・野口隆志 MRIの被災状況とそこから見えてきた課題、未踏科学技術協会超伝導科学技術研究会 第79回ワークショップ「3.11 震災を乗り越えて」、東京、2012.7.19

H. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得
なし
2. 実用新案登録
なし
3. その他
なし

引用文献

- (1) 三森文行、上野 照剛 MRI 装置撤去時の爆発事故に関する調査経過報告 日本磁気共鳴医学会雑誌 24(2), 92-94, 2004-04-15
- (2) 野口隆志 MRI 装置の被災状況と今後の課題、社)未踏科学技術協会 FSST (Forum of Superconductivity Science and Technology News) NEWS 135、p12-13、2012
- (3) 道上勉、向殿政男、信頼性・安全性工学 147 頁、オーム社 2011 年 ISBN978-274-20756-9
- (4) 社) 低温工学協会 信貴豊一郎 編、超伝導・低温工学ハンドブック、1021 頁、寒剤の物性値、オーム社。平成 5 年 11 月 30 日、ISBN 4-274-02255-2
- (5) 松下照男 編 超伝導応用の基礎、216 - 243 頁、安定性とコイル保護、米田出版。2005 年 2 月 19 日、ISBN 4-946553-18-5
- (6) 日本学術会議 安全工学専門委員会報告、事故調査体制の在り方に関する提言、18 頁、平成 17 年 6 月 23 日
- (7) 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 5、37-42、2005
- (8) 大家 泉、ヘリウム需給の見通し、日本

高圧力学会 高圧力の科学と技術
Vol. 22, No. 3 (2012)

- (9) 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・超伝導機器被災調査報告、社) 低温工学協会、1996 p43

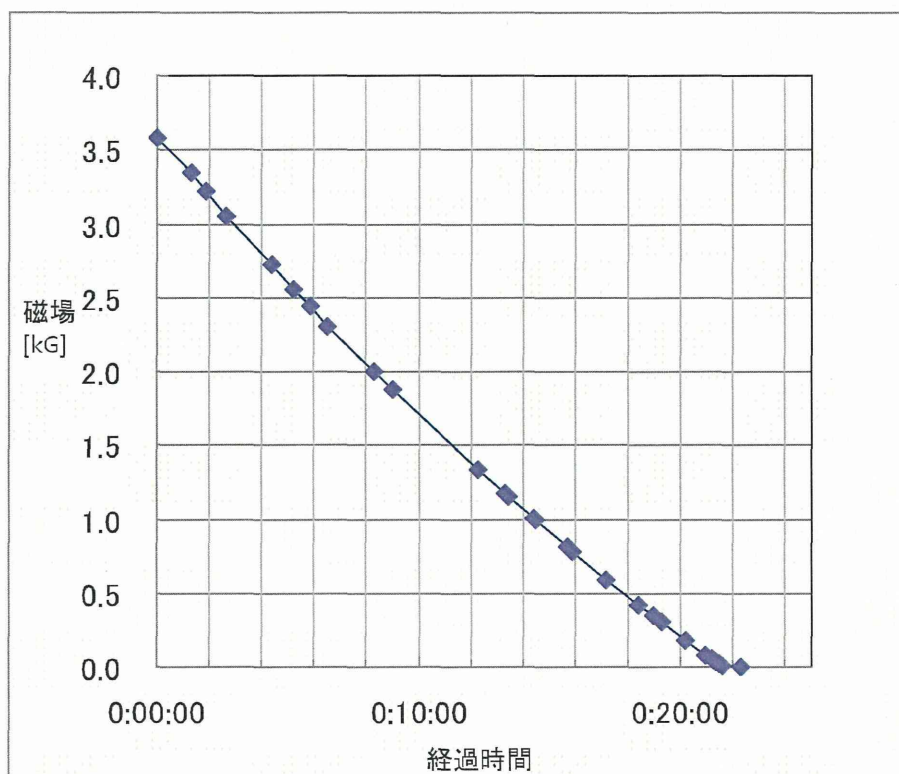
研究協力者一覧

清野真也 福島県立医科大学付属病院
引地健生 栗原市立栗原中央病院
中井敏晴 国立長寿医療研究センター
藤沢 一 古河電工アドバンストエンジニアリング
端健二郎 物質・材料研究機構
大木 忍 物質・材料研究機構

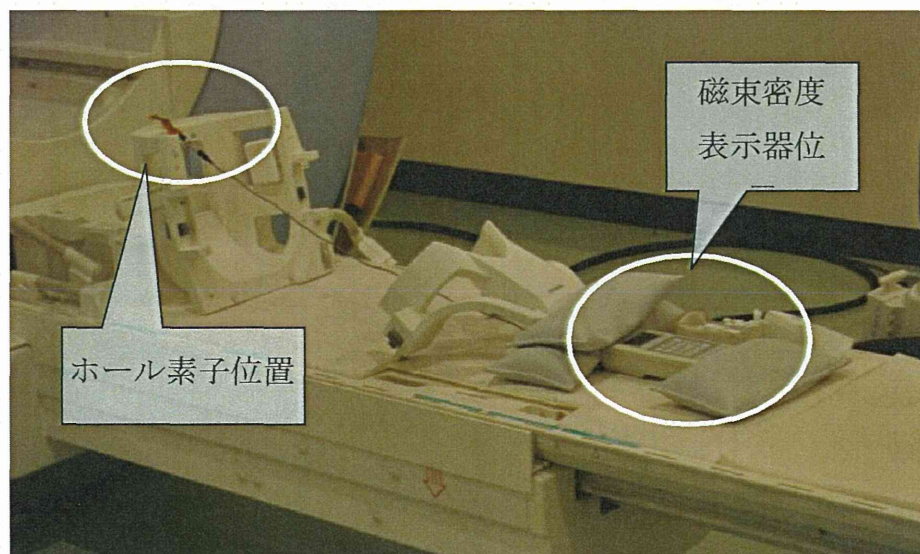
資料1 電源による消磁特性 磁場測定結果と測定機材

経過時間	磁場 [kG]
0:00:00	3.58
0:01:16	3.35
0:01:52	3.22
0:02:40	3.05
0:04:22	2.72
0:05:14	2.55
0:05:52	2.44
0:06:30	2.3
0:08:18	2
0:08:58	1.88
0:12:18	1.33
0:13:20	1.171
0:13:26	1.153
0:14:22	1.01
0:14:28	0.993
0:15:40	0.811
0:15:54	0.781
0:17:10	0.593
0:18:24	0.42
0:18:58	0.345
0:19:16	0.301
0:20:12	0.181
0:20:58	0.0821
0:21:12	0.0556
0:21:18	0.0414
0:21:22	0.0331
0:21:28	0.0222
0:21:34	0.0121
0:21:36	0.0072
0:22:18	0.0013

定点磁場の時間変化特性



消磁中磁場測定：ベッド中央付近での磁場変化測定



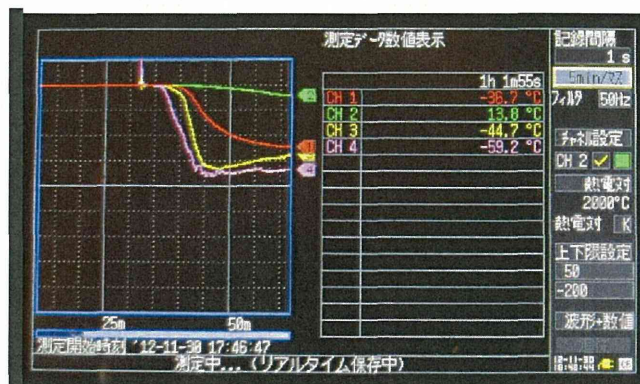
1.5T の主磁場は 22分 18秒でほぼ0となった。

資料2 電源による消磁時の消磁機材とヘリウムガス放出

電流リード冷却ガス配管出口温度 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$

室外放出配管マニホールド表面温度 $-58\text{ }^{\circ}\text{C}$ となった。

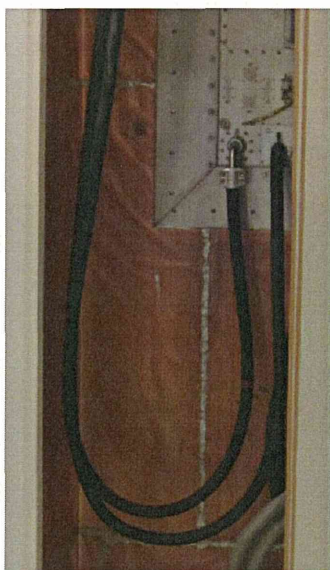
消磁中配管表面温度測定：ガス放出配管各系統



クライオ上部配管温度計取り付け位置

温度計測画面 4点計測

消磁作業中はクエンチ発生の可能性が増すので、万が一発生すると本温度測定点の温度は、空気が固化する温度(約 $50\text{ K} = -220\text{ }^{\circ}\text{C}$)以下となる可能性がある。



マグネット室内ケーブル



電源接続用ケーブル



ポータブル電源

電源による消磁は10年以上前のマグネットだとマグネット槽内に電流リードを挿入しなければならないが、最近のマグネットでは、電極は常に室温部分に取り出されており、マグネット/RF シールド壁/用意した電源を、それぞれケーブルでつなぐだけで消磁が可能となっている。全作業時間も2時間以内で終了する。