

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

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

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 東日本大震災における MR 装置の被災状況に関する質問紙による調査および訪問聞き取り調査をとおして、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た結果、その多くがクエンチに関連した不安であることが 2012 年度の調査で明らかとなった。

本年度の工学的調査は、主にクエンチ予知のために必要な MR 装置固有の工学的特性を、定量的に把握するための装置情報について調査した。その結果、そのほとんどは使用者に提供されておらず、使用者自ら調査し、それぞれの“数値”を想定する必要があることが分かった。

クエンチに至る過程のどの位置に現在在るかを判断するには、「液位」「液位減少速度」「最低液位」「消磁に要する時間」を、“数値”的に想定する必要がある。またクエンチ発生の前に、「カバーの取り外し」「クライオスタット内圧放出口周辺」「室外放出配管の接続部」「建物内放出配管経路」「屋外放出口周辺」の点検が必要となる。と同時に、それら工学的情報の意味と活用法を明確にすべきであることが分かった。

A. 研究目的

クエンチという超伝導マグネット固有の事象について工学的資料を調査すると同時に、2012 年度に実施した超伝導マグネットおよびクライオスタットのクエンチ時の挙動に関する工学的調査結果を精査し、実際に有効な使用者の不安要因解消のための情報にまとめることを目的とした。

2012 年度の工学的調査では、主にクエンチがもたらす MR 設置環境の変化を中心に調査

を行った。クエンチという事象そのものの設置環境への侵襲挙動を装置使用者が正しく知ることによって、“何が起きるか分からない不安”については解消できると考えたからである。結果としてクエンチ事例の画像・映像から、“この程度のことが起こる”という説明資料が得られた。

しかし 2012 年度の被災調査の結果を精査すると、クエンチに関わる不安要因には“何時それが起こるか分からない不安”や“クエ

ンチに備えて何をすれば良いか分からない不安”も強くあることが分かった。

そこで工学的調査班は、“クエンチ予知のための診断方法”と“クエンチ発生リスクを低くするための手段”について検討することとした。

## B. 研究方法

### 工学的調査方法

2012 年度に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およびクライオスタットの挙動に関する不安要因を分析した結果、クエンチに関わる不安内容が多かった。その内、“クエンチによる MR 装置設置環境への侵襲挙動が分からない不安”については提供すべき資料収集できたが、“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が分からない不安”については、詳しい情報入手には至らなかった。

2013 年度は前年度に実施した工学的調査結果を精査しかつ不足情報については昨年度同様、強制クエンチによる消磁作業に立会い補った。また MR 装置メーカーからの聞き取り調査を実施した。

## C. 研究結果

### 工学的調査項目の抽出

“何時クエンチに至るかが分からない不安”解消のためには、現在の MR 装置の状態把握が不可欠となる。すなわちクエンチ発生原因となりうる必要確認項目について調査し、現

在 MR 装置の超伝導マグネットが、クエンチに至る過程のどの状態に在るかを判断する必要がある。

クエンチ発生原因のうち、『液体ヘリウム液位の低下』に起因したクエンチ予知に際し、把握が必要とされる項目を検討した。クライオスタット搭載冷凍機の停止も、真空劣化による断熱不良の発生も、クエンチ発生の直接原因とはならず、それによって液位低下が起きた結果、クエンチに至るという基本は変わらない。

具体的には以下の項目を“量”的に確認あるいは想定する必要がある。

1. 液体ヘリウム液位
2. 液位減少速度
3. 最低液位
4. 消磁に要する時間

また予測されたクエンチ発生の前には、MR 装置設置環境の以下の各項目の点検と確認が必要となる。

5. 液体ヘリウム槽内圧確認のためのマグネットカバーの取り外し方法
6. クライオスタット内圧放出口周辺および室外放出配管の接続部
7. 建物内放出配管経路
8. 屋外放出口周辺

以上各項目の点検および確認手段、手順、器具について調査対象とした。

### 工学的調査結果

1. 液体ヘリウム液位の確認  
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。

平常時の液位は、撮像コンソール画面、機械室内に設置された液体ヘリウム専用の液位計(通常液面計と呼ばれている)で確認できる。しかしコンソール画面でのみ確認できるMR装置もあり、コンソールを立ち上げてからでしか確認できないこともある。また停電時の液位は確認できないMR装置が多い。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<sup>1)</sup>が用いられている。正常な動作には液位表示画面を持つ専用の電源が必要であり、テスター等で電圧や抵抗を測定すればよいものではないことを知っておく必要がある。その動作原理については資料1.を参照のこと。

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。

本項目の調査結果は「MR 検査室の防災指針 4.4 液体ヘリウムの残量確認方法」に反映させた。

## 2. 液位減少速度の確認

液面計が動作可能であればそれを使って残量確認するのは当然として、稼動できない場合も、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、異常発生

以降、時間の経過と共に液体ヘリウム残量は不確かなものになってくるので、設置環境の被災の程度にもよるが、MR装置の被災状況の第一印象が“軽度”であれば、1時間ごとからの液面計の記録を取り続けることが望ましい。

このことから液面計の単独動作機能は重要であると思われる。

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曖昧な表現であった。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とのことであった。

本項目の調査結果も「MR 検査室の防災指針 4.4 液体ヘリウムの残量確認方法」に反映させた。

## 3. 最低液位：クエンチ発生の限界残量

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。

A: 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。

B: 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。

C: メーカーなどの専門技術者が補充するならば補充可能な液位。

D: 専門技術者がクエンチリスクを承知で補充可能な液位。

E: すぐにクエンチしてしまうであろう最低

液位。  
というように最低液位には必要対応内容によって段階がある。<sup>2)</sup>ここではDないしEの液位を調査した。

各メーカーが取扱説明書などで明示している最低液位はBまでであり、Cについてはサービス窓口にご相談することを促すにとどまっている。DおよびEについては、他の状況によっても数値が異なるため、一概に参考データを示すことはできないとのことであった。あるメーカーは電源による消磁作業が可能な液位を示している。消磁するにしても一定以上の液位が必要となるとのことであった。

以上の調査結果も「MR 検査室の防災指針 4.4 液体ヘリウムの残量確認方法」に反映させた。

#### 4．消磁に要する時間

昨年度の工学的調査で2件の電源による消磁に立会い、その1件は機材到着から1時間半で消磁が始まり、そこから約30分で完了したことを報告している。<sup>2) 164P</sup> またもう一件も点検を含む準備作業が1時間ほど長いだけで約3時間ですべての作業が完了した。

強制クエンチによる消磁作業は、準備に約1時間、磁場消失まで数秒、クエンチ影響が環境から消えるまで約1時間であった。

しかしこれら作業は、手配から機材搬入までに要する時間がまちまちであり、メーカーも平常時の緊急対応にのみ標準対応時間を示しているが、災害時の状況によっては不確定となることが述べられている。

被災時にMR装置がなんらかの異常を示し、

避難時に無人放置が予想される場合や、液位減少率が増加して持ち時間が限られることが予想される場合は、強制クエンチ法により消磁することを直ちに検討しなければならないと予想される。またあるメーカーは、社の方針として磁性体吸着引き剥がしには一切応じられない旨、発言があったことも考慮しておく必要がある。

強制クエンチについても、「MR 検査室の防災指針 4.9 緊急消磁ボタン(クエンチボタン)の確認」に反映させた。

#### 5．液体ヘリウム槽内圧確認のための マグネットカバーの取り外し方法

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り、通常運転時には確認できない。また各社各様のカバーであり、取り付け取り外し要領も異なっている。昨年度および今年度調査で、既設MR装置撤去を他社メーカーのサービス員の手で行われるケースを4件経験したが、いずれもカバー取り外しには苦戦し、撤去を前提にしていたゆえ、一部を破壊しなければ外せないケースもあった。このことから、メーカーごとにカバーの形式が異なることを承知しなければならない。ただしメーカーが提供するメンテナンスマニュアルにはその手順が記

載されているので、それを確認すれば“壊す”ことは避けられよう。

クライオスタット上部のカバー内の様子と圧力計の例を資料2に示す。中には比較的簡単にカバーが外せる構造のものもあるが大半は厄介であり、液体ヘリウム槽内圧と内圧放出配管周辺を日々点検記録するのは困難が予想される。

#### 6. クライオスタット内圧放出口周辺

および室外放出配管との接続部の点検  
これも同じく資料2を参照のこと。

クエンチ前にこの部位の点検が必要な理由は、クエンチ時に発生する配管外表面での空気の液化時に、液体となった空気成分：液体酸素、液体窒素が、流れ落ちる先に受け皿となる部分が在るか否か知っておくことにある。また外観上、修復・補強が必要な箇所には事前に作業をしておきたい。あるいはそこからガスヘリウムが多少漏れ出す可能性を承知しておく必要がある。実際、強制クエンチ立合い調査で、多少ではあるが3例の漏れ出しを観測している。

#### 7. 建物内放出配管経路

MR用超伝導マグネットの設置室内から、屋外放出口までの、建物内ヘリウムガス放出配管経路を、よく承知している使用者は少なかった。この経路が長いかわりに、何処を通過して何処で曲がり、何処から屋外に出ているかは、クエンチ前に承知しておきたいことのひとつである。この天井裏配管の表面でも、大量の空気が液化し流れ落ちる様子を観測し

ている。その様子を資料3に示す。

通常は天井裏点検口から一部が確認できる。できれば経路となる部屋、廊下などの壁貫通位置についても、図面で資料を用意しておきたいところである。MR装置保有機関の施設課に図面資料がある場合もあるが、建て屋施工図であることが多く、素人には分かり辛いので、専門家、メーカーサービス員などの第三者に説明できる資料を予め用意しておくことが望ましい。中にはMR装置メーカーがサイト情報として持っている場合もある。

ちなみに配管系統図にとどまらず、医療機関の電源系統図もある程度用意しておいてほしいとのメーカーからの要望も聞かれた。緊急対応を要請する場合に備えて、予め用意しておくことが望ましい。

#### 8. 屋外放出口周辺

屋外放出口の周辺もクエンチ前に点検しておく必要がある。放出口周辺に、MR装置設置時には無かった建造物が追加配置されているケースがある。また設置計画時にはクエンチ時の極低温ヘリウムガスの放出口であることが考慮されていないケースや、放出ヘリウムガスの届く範囲の正確な予想ができていないケースがある。なるべく多くの事例を調査し、類似のケースに照らし合わせて、既設屋外放出口の噴出状況を想定する必要がある。

屋外放出口の例と、クエンチ発生時のヘリウムガスの様子を資料4に示す。ここには今回映像分析をした昨年度(2012)の調査情報と、今年度(2013)追加調査した情報を紹介する。

## 2013 年度実施調査記録

### 1. 強制クエンチによる消磁事例 ケース 5

\* ケース番号は 2012 年度からの通算

#### 1-1. マグネットシステム概要

主コイル発生磁場：1.5T 鉄シールド型

シム方式：電流シム方式

クライオスタット：20K 2stage 冷凍機

20K / 50K シールド冷却型

ヘリウム内容量：フル容量 1000 L

内圧：0.4 psi

#### 1-2. 作業

##### 1-2-1. 作業工程

消磁のための強制クエンチ作業、昇温のための断熱真空解放作業、すべての圧力開放作業について作業手順を追って写真撮影した。

12:30 緊急排気出口の確認

13:00 撮影機材セッティング打ち合わせ

13:20 撮影機材セッティング

13:30 クエンチ前の準備

13:40 圧力開放バルブオープン

13:45 冷凍機停止

13:55 強制クエンチによる消磁

14:20 クライオスタット断熱真空の

解放作業開始

14:30 冷凍機のガス抜き処理

15:20 真空解放作業完了

15:30 真空解放後の処置作業完了

15:45 真空解放後の状況確認

翌日、全圧力が開放されていることおよびすべての部位が昇温方向に向かっていることを確認した。

##### 1-2-2. 屋外放出口の確認

消磁作業の前にヘリウムガスの排気口の確

認を行った。排気口は病院裏手にあり、マグネットからの配管長さは約 5m 程度で、ヘリウムの排気量はかなり多いため、排気のフードが飛ぶ可能性もあり、また、排気口の金網も目詰まりしている状況だったので、フードや金網を取り外した。マグネットの内圧は 0.4 psi で、クエンチさせる前に開放し、内圧を下げて、排気の確認を行った。

##### 1-2-3. 消磁のための強制クエンチ

このケースの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設置した。

クエンチを発生する前のヘリウムのレベルは 49.8%、クエンチ後は 1.1% となった。しかし真空解放時のヘリウムの排気管の状況から考えると、実際にはクエンチ後、ほぼ空になっていたと思われる。

##### 1-2-4. クエンチ中の周囲観測

屋外放出口からの冷たいヘリウムガスの噴出する様子を、このケースでは、周辺建物の全景が映し込める画角で撮影した。また室が良放出配管の外表面で液化する空気の様子も撮影した。

噴出する白煙(冷たいヘリウムガス)は、隣接する高層階病室からも観察されたとのことであった。また室外放出口の配管とクライオスタット放出口は鉛直の直管で、途中にベロ-形状のフレキシブルホースがあり、その外面では大量の液体空気が発生した。

以上の映像から得た画像を資料 5. に紹介する。

## 2. 強制クエンチによる消磁事例 ケース 6

本ケースでは強制クエンチ実施が夜間になり、クエンチダクトおよび屋外放出口付近のヘリウム噴出状況の撮影ができなかった。

### 2-1. マグネットシステム概要

主コイル発生磁場：0.5T 鉄シールド型

シム方式：電流シム方式

クライオスタット：20K 2stage 冷凍機

20K / 50K シールド冷却型

ヘリウム内容量：フル容量 530 L

### 2-2 作業

#### 2-2-1 工程記録

- 17:00 消磁のための準備作業開始
- 17:10 クエンチダクト出口の確認
- 17:20 圧力開放バルブオープン
- 17:35 冷凍機停止
- 18:00 強制クエンチによる消磁準備  
緊急減磁装置動作不良
- 18:10 断熱真空層真空解放作業開始  
ヘリウムを蒸発させて強制的にクエンチさせた。
- 18:30 冷凍機のカス抜き処理
- 18:45 冷凍機取り外し作業完了
- 19:30 真空解放作業完了
- 19:50 真空解放後の処置作業完了

#### 2-2-2 強制クエンチによる消磁

MR マグネット室の壁に設置された緊急減磁装置はバッテリーが劣化し、チャージランプも点灯せずバッテリーチェックでもランプは点灯しない状態であった。さらにはマグネットヒーターと接続するケーブルも短くて接続できないと思われたので、緊急減磁装置で

の強制クエンチを断念し、断熱真空層に微量のヘリウムガスを注入し、液体ヘリウム蒸発量を増加させて液位低下によるクエンチ誘発法を実施した。しかし液体ヘリウム液位はシステムが落ちていたので測定することはできなかった。システムを落とす直前の記録から約 50%と推定した。

断熱真空層へ微量のヘリウムガスを注入すると、蒸発ガスの流れる音が大きくなり、放出配管表面に着氷が観測され、内圧計も上昇したがバースティングディスクは破れなかった。バースト圧より低く設定されている逆止弁が作動して室内にヘリウムガスが噴き出したので逆止弁を抑え、室内にヘリウムガスが排出しないように処置した。

液位は確認できなかったがマグネットがクエンチしたのは、おそらく液体ヘリウムが完全に無くなった以降も、しばらくは超伝導状態を維持していたと考えられる。そのことはバースティングディスクが動作しなかったことと、配管内を通るガス量に変化する様子があったことから推察された。

### D. 考察

今回の工学的調査で得られた情報は、クエンチ予知に必要な定性的な情報ばかりで、定量的な情報の多くは得られなかった。必要な定量的情報は、各 MR 装置固有のものが多く、MR 装置メーカーも提供に苦慮するものが多いことがうかがわれる。

冷凍機が停止しているときの、液位減少速度など、重要な“数値”が提供されていない。

### 液位下限界(E)について

例えば液位下限界(E)については、MR 装置メーカーすら経験的にしか承知していないケースが多く、ましてや公式な提供数値の提供は不可能な様子であった。

実際、低温工学的に解釈を施しても、仮定が多すぎて一般化は難しい。例えば液面計による液位表示にしても、メーカーが違えば同じ管理数値は適応できない。理由は液体ヘリウム槽内のコイル配置形状が異なり、同じ液位でもクエンチの発生リスクは異なること、液面計の配置も、槽内上部にしか配置しない設計と、槽内上下すべてにわたって液位測定する設計がある。また、コイルのコンポーネントの内、ガス層に露出させられない部位の高さも、設計によって異なっているので、同じ液面計の配置であっても、設計によっては異なる液位下限界(E)が存在する。

液位下限界の明示については、装置の性能を保障する設計の自由度の中で、固有の特性を法や基準で定めることも困難と思われる。しかし保障を伴わないある程度の参考値は提供可能と考えられるので、使用者、提供者の相互の歩み寄りが必要と思われる。

### 液位減少速度の確認について

設置環境の被災の程度にもよるが、MR 装置の被災状況の第一印象が“軽度”であれば、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と被災後の詳細な内圧記録から、現時点の液位予測は可能である。

液位が一定に低下する MR 装置

一定期間ごとに液体ヘリウムを補給しなければならぬ MR 装置は、この記録が有効である。実際メーカーによっては「液位ログシート」を用意して定期的な記録付けを推奨している。この記録は表形式になっているが、できれば同時にグラフ化しておくことが望ましい。それによって日々の変化に異常の無いことが一目で確認できる。液位記録のみで液位減少速度が確認できるのは、常に蒸発ヘリウムガスを系外へ放出している MR 装置に限られる。

何らかの異常がクライオスタットに生じた場合、それが液体ヘリウム槽への熱侵入量の増加、シールド冷凍機の冷凍能力低下など、液体ヘリウム減少速度に関係するか否かの診断には、この液位記録から作成されたグラフが有効な材料となる。

- ・減少の傾きが大きくなっている場合は熱侵入量が平常時より増えたことを表している。
- ・ある時、降下曲線に減少方向へのトビがあった場合は、一時的な内圧放出があった可能性があり、その後の傾きに変化は無ければ、熱侵入量の増減は無いといえる。

以上は、平常時に液位記録を使用する簡単な診断方法であり、被災時の診断にはさらに詳細な記録分析が必要となる。すなわち熱侵入量増加や冷凍機能力異常の有無の判定だけでなく、その増加や異常が進行しているか否かも分析し診断する必要が生じる。液位減少速度の時間変化の記録が必要となるので、被災後は、記録時間間隔を 1 時間程度に変更



する必要がある。正常であることの診断が出るまでこの記録を取り続け、液位減少速度に変化が無いことを確認する。

- ・たとえ熱侵入量増加の傾きが得られても、その傾きに変化が無ければ不具合の進行は無いと判定できる。

- ・もし液位減少速度曲線が上に凸の場合は、さらに液位減少速度が増加する可能性があり、持ち時間計算の根拠を推定することが難しくなる。

この場合は何らかの熱侵入量が時間と共に増加している可能性と、冷凍機の冷凍能力の低下が進行していることが疑われる。

すなわち変化の変化を記録しないと、現状の不具合が変化するものなのか否かがつかめない。

#### 一定液位保持型のMR装置

定期的に液体ヘリウムの補給を必要としない超伝導マグネットについても、週に1回程度の液位記録は有用である。この場合、液位計(液面計)の指示値記録の他に、液体ヘリウム槽内圧の記録も必要である。

このタイプの装置には4K(ケルビン)の冷却が可能な冷凍機が搭載されていて、冷凍機は常に最大冷凍能力で液体ヘリウムの蒸発を抑えている。液体ヘリウム槽内圧の変化は、その一定の最大冷凍能力(ワット)に対して、熱負荷の増減を示すことになる。その冷凍能力は冷却している対照の温度によって多少異なるので、大まかな異常診断にしか適応できないことが多い。

MR装置の使用者と提供者の間に信頼関係があれば、保障を伴わない数値の提供はあり得ると考えられる。災害発生時の双方の切実度を考えると、工学的情報の提供は必要と思われるが、双方共に専門的知識を備える必要性が感じられる。

#### E. 結論

本継続調査で、追加実験実施および得られている工学データの精査を通して、「MR検査室の防災指針」策定の根拠となる多くの工学的知見を得た。さらに継続的に調査研究は行わなければならないが、調査対象については確定方向に向かっていると思われる。しかし2年目の工学的調査として、昨年度出した結論に付加すべき新たな結論は出ていない。すなわち昨年度の結論の冒頭の「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」の確信を深めるにとどまった。

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も継続すべき課題である。

## 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、榎田喜正、松本浩史、栗田幸喜、藤田 功、礪田治夫、小山修二、村田和子、水口紀代美、木戸義照、野口隆志、梁川 功、町田好男 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 指針について 日本磁気共鳴医学会雑誌 (投稿中)

### 2. 学会発表

- ・野口 隆志、端 健二郎、大木 忍、中井 敏晴 被災時に MR 装置の運転・管理関係者へ提供すべき超伝導マグネットの工学的情報の検討、第 88 回 2013 年秋季低温工学・超電導学会 抄録集 109 (低温工学 第 48 巻)、2013 年 12 月 5 日、名古屋
- ・野口隆志、端健二郎、大木忍 MR 装置の運転・管理者へ提供すべき超伝導マグネットの工学的情報の検討、第 41 回日本磁気共鳴医学会大会 #O-3-310、日本磁気共鳴医学会雑誌 33、S328、2013
- ・山口さち子、町田好男、土橋俊男、礪田治夫、野口隆志、中井敏晴、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、第 41 回日本磁気共鳴医学会大会 P-2-173、日本磁気共鳴医学会雑誌 33、S419、2013

## 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) 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、134 頁、液面計測の実際、オーム社。平成 5 年 11 月 30 日、ISBN 4-274-02255-2
- (2) 中井敏晴他、平成 24 年度 厚生労働科学研究日補助金 総括・分担研究報告書、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、172 頁、平成 25 年 3 月

## 研究協力者一覧

中井敏晴 国立長寿医療研究センター

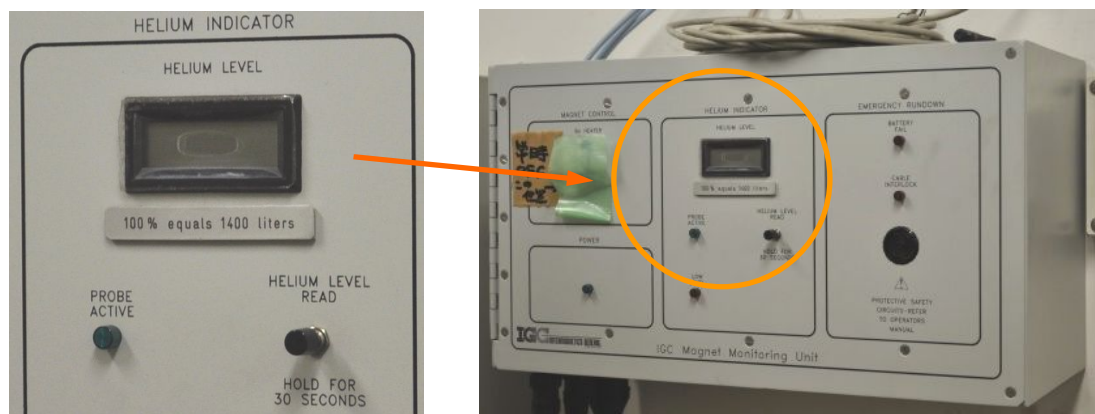
端健二郎 物質・材料研究機構

大木 忍 物質・材料研究機構

酒井修二 物質・材料研究機構

## 資料1 超伝導式液体ヘリウム液面計

液体ヘリウム液面計はMR装置メーカーによって異なるばかりではなく、装置の型式、マグネットメーカーによっても異なる場合がある。設置場所も各メーカーによって異なるかあるいは医療施設によってことなる。多くは機械室に設置されており、目立つ場所に設置されているケースは少ない。



「緊急減磁装置」「Z<sub>0</sub>シム PCS スイッチ」と一体ボックスになった壁掛け型



左は他の機能機器との組み合わせ型 右は液面計単独型 AC100V で単独動作可能

### 超伝導型液体ヘリウム液面計の動作原理の簡単な紹介

液体ヘリウム槽内の液面に対して垂直方向に張られた超伝導線の、上下両端抵抗を測定することで、液面深さを検出する原理だが、テスターなどで測定可能な電気抵抗ではなく、一定の電流を通电しながら上下両端に発生する電圧を測定し、抵抗に換算した後、液面を表示させる。

素子全長： $L$  液中に没している超伝導線の長さ = 液深さ： $L_f$

液面が素子下端にあるときの抵抗： $R_0$

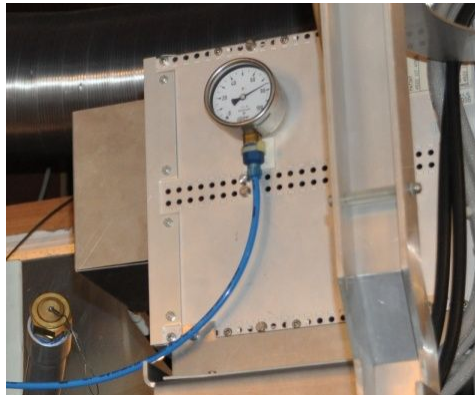
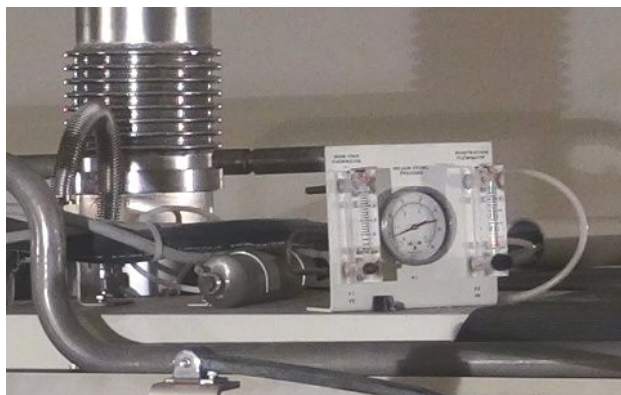
液面が素子の途中( $L_f$ )にあるときの抵抗： $R_g$  とすると 深さ( $L_f$ )は

$$L_f = L / R_0 \times (R_0 - R_g) \quad \text{と表せる。}$$

\* 抵抗： $R_g$  はガス層に露出した超伝導素子の常伝導部分の抵抗である。

これが成り立つためには、超伝導線の超伝導部分と常伝導部分の境目が、ちょうど液面と一致していなければならない。すなわち抵抗測定電流( $I_{op}$ )は、ガスで冷却された部分は常伝導に転移し、液中はすべて超伝導のままであるような電流値でなければならない。その値は 50mA ~ 250mA、波形は定電流あるいは矩形波と様々である。

資料2 ヘリウム槽内圧確認用圧力計 および内圧放出口周辺の霜着き例



ヘリウム槽の内圧確認用圧力計は、ほとんどマグネット上部カバー内に設置されている。上の写真2枚は、いずれも強制クエンチ前の、通常の圧を示している。



上の写真は2枚とも、強制クエンチ終了直後の様子で、圧力はともに大気圧付近を示している。クエンチ直後なので大量に霜が着いているが、ガス放出時に、霜が何処に着くかを考える参考なる。



左の写真は、あるMR装置のマグネットの上部カバーとサイドカバーを外した状態で、中身は古いタイプのマグネットだが、カバー外形と外し方などはあまり変わっていない。

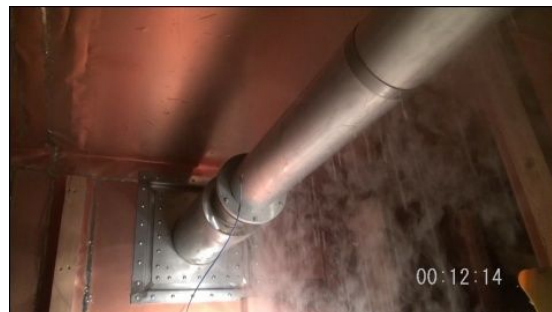
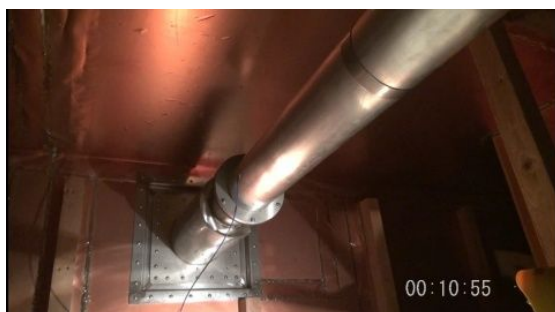
メーカー、型式によって外し方は異なるので、取扱説明書で確認しておく必要がある。



資料3 天井裏の屋外放出配管と大量放出時にできる液体空気の様子

クライオスタットのヘリウム放出口の配管は、天井から天井裏へ向かう配管と取り合い、屋外に面した壁の、屋外放出口へ続く。この室外へ出る部分もマグネットカバーを外さないと目視できない。

右の写真は、マグネット室内の天井裏点検口から見上げた、天井裏配管である。このケースの点検口は開口部がかなり広い。



左は強制クエンチ前、右は強制クエンチの約1分半後の液体空気が流れ落ちる様子



上部カバー内でも液体ヘリウム槽内圧の放出口周辺で、液体空気が流れ落ちている。この液体空気が流れ落ちる先が凹状の形をしていると、そこに液体窒素、液体酸素の混合液が溜まり、やがて窒素が蒸発し液体酸素のみとなって危険である。

資料4 屋外放出口形状とクエンチ時の放出ヘリウムの振る舞い例



クエンチ前の屋外放出口 00:15



クエンチ直後のヘリウムの様子 00:18



約 30 秒後の様子



約 5 分後の治まり始めた頃の様子

このケースの場合、屋外放出口は軒下の奥に設置されている。また放出方向(このケースでは下方向)に平板が取り付けられているので、放出口下は、冷たいヘリウムガスが直接吹きかかることはないが、ヘリウムの白煙は軒下を埋め、窓のある建屋外面を舐めるように上昇して行く。事前にこのような流れの行く先についても予測をしておきたい。



放出口の様子 1 . 05:04



放出口の様子 2 . 05:19

資料5 2013年度実施調査取得情報

クエンチ時の屋外放出口の様子



屋外放出口の設置場所



屋外放出口を下から覗いた内部の様子



屋外放出口部分は建屋の隙間にある。



その隙間内は敷地から離れると見えない。



このケースの場合、強制クエンチ前に屋外放出口を点検したところ、金網の網目は細かくかつゴミが付着していた。パースティングディスクが破裂したときの最大噴出量によって配管内圧が高まる可能性があったので、事前に金網を外した。放出配管：クエンチダクトの内圧が高まると、経路の途中で継ぎ目が外れる可能性があった。

また建屋外壁に取り付けられた放出口カバーも、接合部分が傷んでいたことと、下向きに放出すると他の配管など建造物を傷

める可能性があったので事前に取り外した。そのため放出ヘリウムガスは、建屋壁面から水平に噴出することとなった。



## 高層病棟とクエンチ時に放出されるヘリウムの白煙



00:00:54 クエンチ直前



00:05:56 クエンチ直後



00:06:10 クエンチ発生約 15 秒後 既に白煙は建屋上にまで広がっている。

上の写真 2 枚は、左がクエンチ 2 秒後の白煙が開始した時、右は約 15 秒後の放出がピークに向かう頃のもので、建屋全体との比較から、白煙はかなり遠方からも確認できることを承知しておく必要がある。ちなみに写真手前は車が行き来する構内道路である。

屋外放出口から噴射する白煙は、遠方から見ると火災発生時の煙のように見える。強制クエンチを実施する際は、院内関係者はもちろん、遠くの病棟、近隣住宅、消防関係者にも知らせておく必要が感じられる。



屋外放出口ほぼ正面から見た噴出ヘリウムの様子



04:22 強制クエンチ直前



04:22a クエンチ発生直後



04:23 風に影響される白煙



04:29



04:45



04:55 撮影機材を白煙が覆った瞬間

今回、安全のために屋外放出口のカバーを外したので、放出口付近では建屋壁面から水平に噴出したが、壁面から離れたヘリウムの白煙は風に流され、方向を変えながら上昇していった。

## 室内放出配管：クエンチダクト



クエンチ前



クエンチ発生数分後



00:00



00:11

クエンチによる内圧放出が治まりかけたときでも、しばらくは配管壁面での空気の液化は続いている。このケースではマグネット設置室内へのヘリウムの漏れ出しは無かった。しかし大量の空気の液化現象は観測でき、その流れ落ちる先がマグネットを覆うカバー内部であり、視界から消えてしまうことが分かった。

マグネット上部の放出配管表面で液体空気・固体空気ができる様子



クライオスタット上部を真上から見た写真

クエンチによって増加した内圧は、クライオスタット上部のメインの放出配管に付いた破裂板：バースティングディスクを動作(破裂)させ、室外放出配管(クエンチダクト)を通して室外へ出てゆく。その間に放出路の配管表面に液体空気ができる。



メイン放出配管

左の写真は上の写真の“メインの放出配管”を拡大したものであり、表面が濡れたようになっているのが分かる。これは液化された液体空気であり、配管下に回って流れ落ちている。

右の円形フランジ内には破裂板が挟み込まれている。



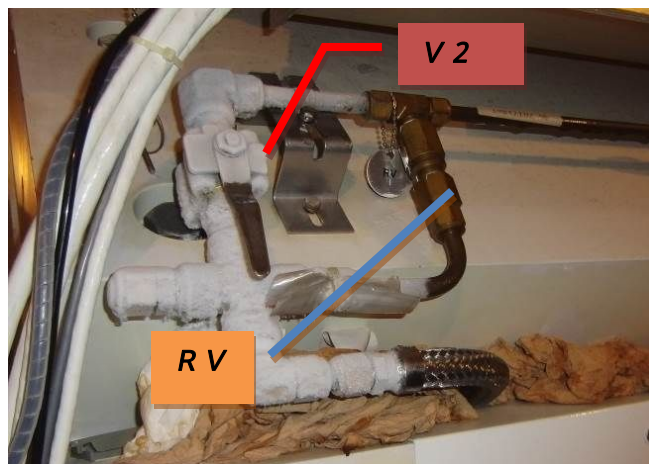
メイン放出配管表面の拡大写真

さらに表面を拡大すると、流れる液体空気に混ざって、酸素、窒素以外の気体が白い固体となって流れる様子が分かる。

この液体空気は重力にしたがって流れている。内圧が弱まるとこの液化現象も終わり、表面は白い霜で覆われる。



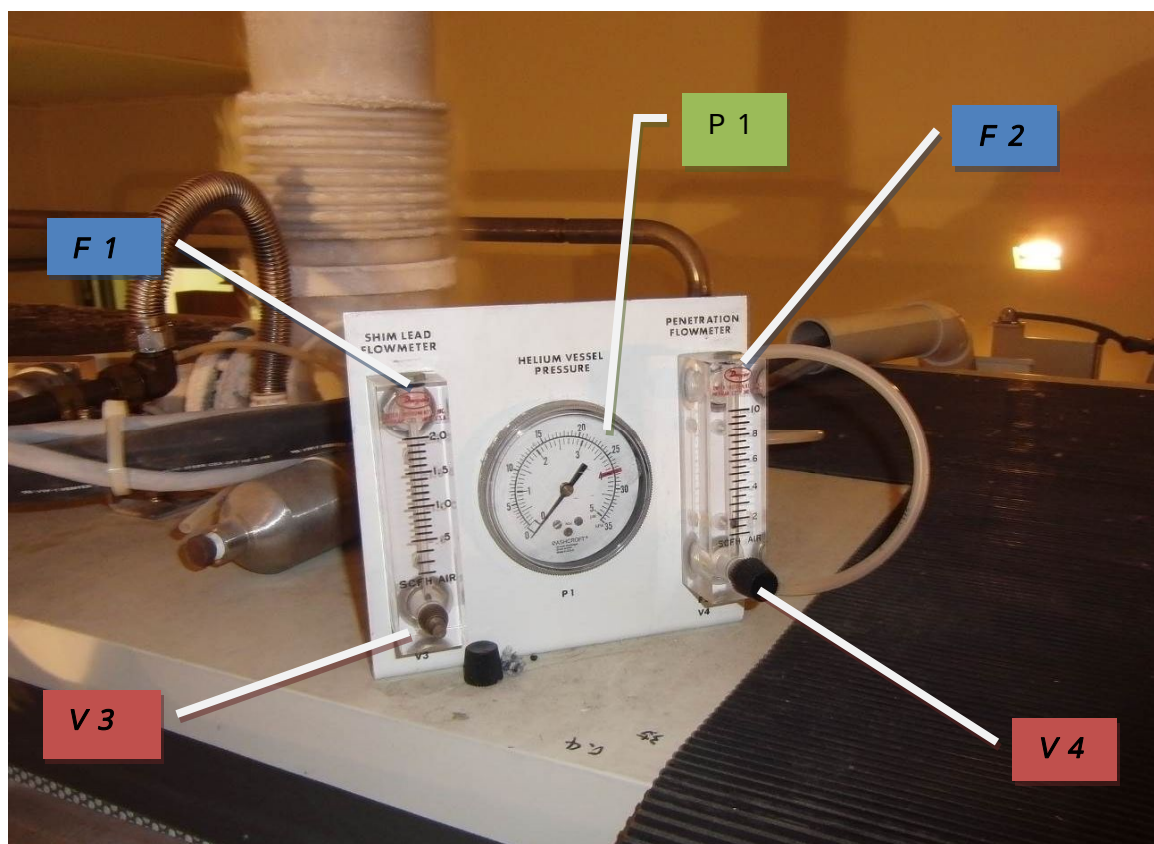
マグネットカバー内の圧力計、バルブ、内圧放出配管



ヘリウム排気系写真

ヘリウム注入系写真

RV : 逆止弁 V2 : 内圧開放弁 V1 : 内圧保持型注液ポート元弁



クライオスタット上部 写真

F1 : シムリード冷却用ガス流量計 F2 : アクセスポート冷却用ガス流量計  
 V3 : シムリード用流量調節弁 V4 : アクセスポート用流量調節弁  
 P1 : ヘリウム槽内圧計