

NMR 装置の安全管理を再考する

山本 昭彦

ブルカー・バイオスピン KK

今日では超電導磁石を利用している分析用の NMR 装置は、国内だけで優に二千台を超え、多くの研究施設で日常的に使用されている。この流通により、利用者の裾野が大きく広がったことは喜ばしいことである。一方、このことは NMR のハードに不案内な方の利用や、部屋への出入りの機会が増えたことを意味している。しかし、場合によっては、生命を脅かすまでの危険を伴うものであることは意外に知られていない。NMR の入門書にもそのような危険性や対処法に言及されたものは少なく、すでに頻繁に装置を使うようになった方も、これまでにその危険性を特に意識したことがないかも知れない。昨今、実験室での安全性の確保については、大学、企業を問わず、以前よりも盛んに叫ばれるようになっており、NMR 装置についてもその例外ではない。昨年、日本は東日本大震災という未曾有の災害を被り、防災に対する意識は一段と高まっ

た。NMR に携わる者として、安全対策を講じるにも、NMR 装置の、どこにどのような危険が潜んでいるかを把握しておくことが肝要である。本稿では、すでに周知の部分を含め、NMR 装置が潜在的に持っている危険性を掘り起こし、その安全管理について今一度、考えたい。

NMR メーカーにエンジニアとして勤めている筆者の経験から、想定できる危険性を、生じる可能性の高いと思われる順に挙げる。大怪我や生命の危険があるのは、いずれも超電導磁石関連であるので、それを中心に述べることになる。超電導磁石の基本設計は、商品として流通を始めた 1970 年台から本質的に変わっておらず、以前と同様な危険性を有している。

- 1) 漏れ磁場による磁性体の引きつけ
- 2) 冷媒による低温やけど
- 3) 冷媒による酸欠
- 4) 大地震の際の倒壊
- 5) 冷媒の閉塞による真空容器の爆発

これらの項目について、順に紹介する。

- 1) 漏れ磁場による磁性体の引きつけ

NMR 装置の頻繁な利用者は、この危険を日々念頭に入れながら行動されていることと思う。また最近では磁場遮蔽型の磁石が増えてきた。それゆえ、実際の磁性体の、磁石への引きつけを経験されていない方が多いと推察する。確かに遮蔽型は、非遮蔽型に比べると、磁性体の引きつけに対する配慮は少なく

て済む。しかし、遮蔽型と言っても漏れ磁場がないわけではなく、遮蔽効果は容器の側面方向よりも上下方向で比較的低くなる。プローブ交換のように磁石に最接近する場合には、非遮蔽型の時と同様の注意が必要である。したがって、遮蔽型の磁石でも十分に生じうる危険を、以下で述べる。例えば、液体窒素充填の際に、トランスファーラインの付け外し用のスパナが鉄製であった場合、誤ってプローブ近辺にまで近付けると、磁石に引きつけられてしまう。その力は磁石の中心に向かうので、プローブやシムコイルを破損する可能性がある。さらに磁性体と磁石の間に人体が位置していた場合には、深刻な怪我にも繋がる。スパナ程度の磁性体となると、磁石に引きつけられた場合には、もはや一人の力では外すことができず、ロープを利用して数人掛かりで引き剥がすことになる。ましてや、もっと大きな磁性体の場合には、その引き付けの力は飛躍的に大きくなる。筆者の知る限りでも、磁性体をぶつけて後述するクエンチにまで至る事故が国内で、年に1、2回の頻度で発生している。

NMR 装置の頻繁な利用者が、この磁性体の引きつけの危険を意識していても、頻度の少ない利用者や、施設の保守業者など、通常は滅多に磁石に近づかない方についてはその限りではない。保守業者であれば、作業に必要な工具を不用意に持ち込んだ場合に、引きつけ事故の確率が上がる。それらの方にはその危険性を事前に装置の管理者から作業者に徹底して通達する、装置付近への立ち入りを制限するなどの安全管理システムを確立して遵守すべきである。

2) 冷媒による低温やけど

冷媒としての液体窒素は、一般的な実験での取り扱いについて認知されているので、その低温やけどの危険性そのものについては、本稿では多くは触れない。液体窒素は誤って皮膚に触れても、突沸することで気体の断熱層が生成され、一瞬であれば低温やけどには至らない。液体ヘリウムによる低温やけどの危険性は、液体窒素に比べると高いので取扱いはより注意が必要となる。液体ヘリウムは、皮膚に付着する性質があるので、少量といえども触れると危険である。手袋や長袖での作業が基本だが、軍手などの目の粗い生地の場合、液体がしみ込んで危険である。生地の細かい化学繊維や、合成皮革の製品を用いて作業すべきである。

冷媒が原因で、低温やけどを負う事故は、冷媒充填作業中が最も多い。最近では、液体窒素の再凝縮装置の導入で、充填が不要になっている場合も多い。特に日本での普及率は高く、ここ数年では新設する NMR 装置の 80 %以上に装備されている。液体窒素の再凝縮装置の運用は、充填作業や、それによる実験の中断からの解放という大きな長所以外にも、冷媒層内外の窒素の出入りが無いため、前述の低温やけどや、後述の酸欠の回避といった安全管理上の観点からも好ましい。冷媒としての液体ヘリウムは、多くの NMR 利用者にとっては、日常的に実験で使用することは少ない。技術の発展により液体ヘリウムの充填間隔が 3~10 ヶ月と長くなったことにより、取り扱い時の危険に曝される回数は減った。さらに危険を減らすには、より取り扱いに慣れた冷媒業者に充填を委託するのも一つの手である。

3) 冷媒による酸欠

気化した冷媒が NMR 室に充満し、酸欠によって生命が脅かされることはご存知のことであろう。酸欠の知識として、酸素濃度が 10 %程度になると、死に至る危険があるということを把握しておかなければならない。このレベルの低酸素濃度では、体内循環において逆に血液中の酸素が取り出されてしまい、血中の酸素濃度が更に低下する。その結果、意識を喪失するので、手遅れになる危険がある。安全性を考えると、18 %を切った場合には危険領域と考えて、部屋からの避難、部屋の換気を行うべきである (Table 1)。

平常時の冷媒の蒸発は酸欠にとって問題にはならないことが多い。窒素蒸発量は 400 MHz クラスで、液体で毎時 0.3L 程度、大型の 800 MHz クラスで、毎時 1L 以下である。ヘリウム蒸発量は、窒素の 1/10 から 1/20 程度である。建物に付随する一般的な空調設備では、循環する空気に 10 %程度の外気が取り込まれるので、順調に空調が稼働している場合には、酸欠の観点で危険な状態にはならない。ただし、外気を取り込まない気密性の高い実験室では注意が必要になる。施設担当者に NMR 実験室の空調の仕様について問い合わせて把握しておくべきである。

強い地震が起こった時など、酸欠の危険を伴うクエンチという現象が発生することがある。このクエンチは、磁石容器の高真空状態の解除の結果、断熱効果が失われ、液体ヘリウムが噴出し、超電導状態が破られる現象である。クエンチが起きた場合にすぐに排出されるのはヘリウムである。窒素が出てくるの

は数時間程度の時間差がある。クエンチは、液体ヘリウムが勢いよく排出されるので見た目に派手だが、磁石容器は十分に耐圧を考慮して設計されているので、いわば想定内のできごとである。圧力を逃がす安全弁の排出方向も、ヘリウムが人に吹きかからないように、上を向いている。ヘリウムガスは比重も軽く、部屋の上部から溜まっていく。これらのことを憶えておいて、吹き出す冷媒と、狭い部屋での一時的な酸素濃度低下に注意して、冷静かつ速やかに避難すれば、まず命の危険はないだろう。加えて、強い地震発生時に NMR 室に居合わせず、地震後にそこに入室する際には、クエンチが起こったことを想定して酸欠の危険に留意することを忘れないようにすべきである

最近の磁場遮蔽型の磁石を設置する NMR 室は、その漏れ磁場の少なさから狭くなる傾向にあるが、酸欠を防ぐ観点からは、必ずしも好ましいことではない。換気扇の設置は、通電時には有効だが、震災時に停電することも想定すれば、部屋の広さを確保することが、最も単純で効果的な対策である。装置の新規の設置あるいは、移設の際には、設置場所の確保に腐心いただきたい。

窒息死の例としては、米国・ニューヨーク州で磁石の納品作業中に、エンジニアが死亡するという事故が発生している。立ち上げ時の液体窒素量は、磁石の大きさ、設計などで使用量は違うが、250 L 程度を、3-6 時間で使用する。使用する窒素量によっては、換気が不十分だと酸欠に陥る可能性が十分にあることを念頭に置いておくべきであろう。

以上、酸欠に関連して述べてきたが、この危険に対して欠かせない対策とし

ては、酸素濃度計の設置である。ヘリウムガスは空気に対して比重が小さいので、天井方向へ拡散するが、窒素ガスは比重が大きく床から充満する。人が倒れた時に備えて低い位置での酸素濃度が重要なので、床から 1 m 以下の場所へ酸素濃度計のセンサーを設置することを推奨する。酸素濃度計のセンサーには寿命があり、バッテリー交換も含めて、定期的な交換が必要である。酸素濃度計を導入しても、有事の際に動作しないということがないように、日頃の管理を徹底されたい。

4) 大地震の際の倒壊

1995 年 1 月 17 日の阪神淡路大震災と 2011 年 3 月 11 日の東日本大震災で被害を受けた NMR 台数の正確な数字は出ていないが、東日本大震災では磁石の倒壊まで生じたことが報道されたことは記憶に新しい。地震の揺れは、地盤と建物の構造でも大きく違いが出るので、震源地から離れていても磁石の倒壊は生じうる。磁石が倒壊した場合に、人が下敷きにならないようにするには、台座をアンカーで固定して、磁石を天井からロープで繋ぎ止めるという古典的な手法しか既存の設置機器に施せる対策はない。より危険を回避するためには、機器の低層階（冷媒容器の運搬が比較的容易な 1 階）への設置が望ましい。分光計やエアーコンプレッサーなども転倒に備え、他の什器などと同様に固定が必要である。日本の建築技術は建物全体を免震構造にする工法を既に確立している。人命と高価な研究資産を守るために、今後そのような免震構造をもった研究施設が増えることを希望したい。

5) 冷媒の閉塞による真空容器の爆発

超電導磁石で最も危険なことは、クエンチではなく、窒素やヘリウムのガス排出ポート閉塞による爆発事故である。以下で述べる事故例は、スイスのチューリヒにある、Bruker-Spectrospin 社（現 Bruker-Biospin 社）で 30 年程前に起きた事故である。事故当時の写真を掲載するが、爆発の凄まじさを容易に想像できる（Fig. 1, Fig. 2, Fig. 3）。当時の最高磁場の 600 MHz 磁石は、英国 Oxford 社の製品を使用していた。全ての性能検査が終了して消磁を行い、数日の時間を掛けて昇温させる途中で、液体窒素槽を閉塞させ爆発事故に至った。この時、本来であれば、冷媒の液体窒素をサイフォンにより完全に取り出す作業を行った後に、断熱真空層を破り、昇温するのが手順である。しかし、作業が既に金曜の午後に差し掛かったこともあり、時間を短縮させるために、真空層を破ることで冷媒放出を同時に行い、そのまま放置して爆発事故を招いた。不幸中の幸いで、爆発は深夜に発生し、死傷者は出さずに済んだ。この事故は Bruker 社と Oxford 社で情報を共有し、事実を公開して既に設置されていた製品にも、爆発時に圧力を逃がす余裕を持たせる対策を無償で施す通知が出された。世の中では事故が発生すると、隠蔽されてしまう場合もあるが、この対応は危険性を公開して事故を未然に防いだという点で適切なものだったと言えるだろう。この情報により、これ以降、全てのメーカーの超電導磁石のデュワーには、圧力を逃がす破裂弁が真空層に装着されることとなった。以後に分析用 NMR で

は同様の事故例は報告されていない。

しかし、臨床用の MRI では 2003 年に福島いわき市で磁石の爆発事故が起きた。新規装置への入れ替え作業の際に手順を誤って閉塞させ爆発を引き起こした。このような場合に備えた破裂弁が装備されていたが、人為的なミスでそれを閉じてしまったために爆発事故にまで至った。作業責任者 2 名を含む計 6 名が重軽傷を負う事故となった。この作業を行った責任者 2 名に対して、一審無罪、二審で執行猶予付き禁固 6 ヶ月の有罪判決が下った。この爆発事故は、人為的なミスで本来の安全機能を発揮できずに爆発した事故例である。冷媒を大量に保持する NMR 磁石では、安全装置が付いていようともこのような生命を脅かす爆発事故が起こる可能性があることを、NMR 装置に関わる人たちに周知させるべきだろう。

「天災は忘れた頃にやって来る。」と言われる。ほとんどの利用者は、NMR 実験室で、潜在的な危険性を、毎日考えながら測定はしていないと思う。しかし、具体的に、どの様な潜在的な危険あるかを知っておくことは心の準備になる。ここで紹介したことが、NMR 装置の利用者が安全管理を考えるヒントになれば幸いである。

表

Table 1: 各酸素濃度において人体に現れる症状

酸素濃度	症状
18%	安全性の下限界：換気が必要
16%	呼吸・脈拍増加、頭痛、吐き気
12%	めまい、吐き気、筋力低下
10%	中枢神経障害、意識喪失、嘔吐
8%	失神、死亡
6%	即失神、心拍停止、短時間で死亡

図



Fig. 1: 冷媒の閉塞による真空容器の爆発後の実験室

手前に見える筒状のものが磁石の内部容器、奥のものが、磁石の外側の部分である。散乱している破片は、断熱材のアルミ蒸着フィルムである。頑丈なアルミダイカスト製の架台が破壊されるほどのエネルギーである。



Fig. 2: 2 トン以上の耐荷重を有するベースプレートの爆発による破壊。



Fig.3：爆発の影響が天井（5 m）まで到達した痕跡

著者略歴

山本 昭彦（やまもと あきひこ）

1981 年 国際基督教大学 教養学部理学科 卒業、同年 日本ブルカー株式会社（現 ブルカー・バイオスピン KK）入社、現在、ブルカー・バイオスピン KK 取締役・技術本部長として NMR、MRI の技術サポートを行っている。
2002 年 日本核磁気共鳴学会会員。

受領日：8月14日

受理日：8月18日

編集委員：鳥澤拓也

日本核磁気共鳴学会機関誌 [NMR] Vol. 3 特別号