

JASTEC の NMR マグネット

JASTEC 技術開発部

小湊 健太郎

1. はじめに-概要-

1970年代に超電導磁石を採用したNMR分光装置が登場し、課題となっていた測定感度や分解能が向上した。それ以降NMRにおける着実な超電導磁石への需要がある。当社は1990年代前半からこの分野に参入した。これまでの累計出荷台数は2000台を超えており、当社製品群の大きな柱となっている。

この10年の動向として、NMRの適用範囲は従来の化学分野での利用から、バイオ分野へと拡大している。複雑なたんぱく質分子の構造解析を行うためにはNMRの感度と分解能を向上させることが必要となり、特に創薬応用の分野では23.5T以上の超高磁場の要求がある。この磁場クラスでは高温超電導体(HTS)の活用が必須であるが、HTSをNMR用超電導磁石に適用するためには超電導接続など高度な課題を解決しなければならない。こうしたことから、科学技術振興機構ファンドによる研究プロジェクトが立ち上がり、当社も参画している。一方でNMR事業の中心は、生産量の多い400~800MHzクラス超電導磁石である。これらの製品の競争力向上の為、小型化や漏れ磁場の低減などの改良が図られてきた。また世界的な液体He逼迫リスク回避の為の対策も必要となっている。

2. NMR 超電導磁石の要件

NMR測定から要求される超電導磁石に対する主な要件は以下に述べる4件となっている。

- (1)十分に高い磁場が安定して得られること
- (2)磁場が十分均一であること
- (3)磁場が時間的に安定であること
- (4)液体窒素、ヘリウムを長期保持できること

(1)磁場が上がると、原子核集団磁化や遷移周波数の増加などによりNMR測定感度が向上する。すなわち感度は磁場の3/2乗に比例しているため、感度向上のためには高い磁場が必要になる。鉄ヨークを用いた常電導の電磁石では100MHz程度が限界となる。超電導磁石方式となった当初は200MHzクラスの製品であったが、現在では400MHz(9.4T)以上の製品が主力となっている(図1)。

(2)磁場均一度は、分解能(線幅)の向上において重要



図1 JASTEC NMR 超電導磁石シリーズ。400 MHz (9.4T)から100 MHzごとに800 MHz (18.8 T)まで商用機として製品化されている。システムメーカーの日本電子株式会社殿(JEOL)へのOEM販売となっている。

となっている。現代NMRではパルスフーリエ変換方式となっており、ここでは原子核集団磁化の緩和がピークの線幅に影響する。緩和が速いほどブロードなピークとなる。この緩和時定数は磁場均一度に支配されるので磁場均一度はできるだけ良くしなければならない。超電導磁石としては試料空間で 10^{-6} ~ 10^{-7} の磁場均一度が求められる。そこでNMR磁石のコイルは精密なコイル設計と繊細な製品実現が必要である。また改良の為の技術的蓄積も続いている。(3)は(2)とともにNMRに特徴的の要件である。永久電流運転の為に、信頼性の高い超電導スイッチと超電導接続が必要となる。超電導接続部の抵抗は機種によっては 10^{-12} Ω以下が必要となる。この要件は後述の高磁場プロジェクトで極めて重要な課題となっている。

(4)NMR測定は長い場合で2週間に及ぶこともあるなど、寒剤(液体窒素及びヘリウム)の補充は頻繁にはできない。液体窒素は約2週間程度。液体Heは半年程度以上が必要とされている。この為クライオスタットは低熱侵入と重量物支持強度を両立させる最適化が重要となっている。

3. この10年の進展(2014-2023)

高磁場化はNMR測定感度向上に直接つながるので、NMR超電導磁石の歴史は高磁場化開発の歴史でもある。23.5Tを超える為にはHTSが必須となるが、広く知られているように薄いテープ線材であるHTSは扱いが大変難しく、またクエンチ保護も容易ではない。長年多くの研究機関による努力が投入され、2015年にはNIMSらグループによりBi2223を用い

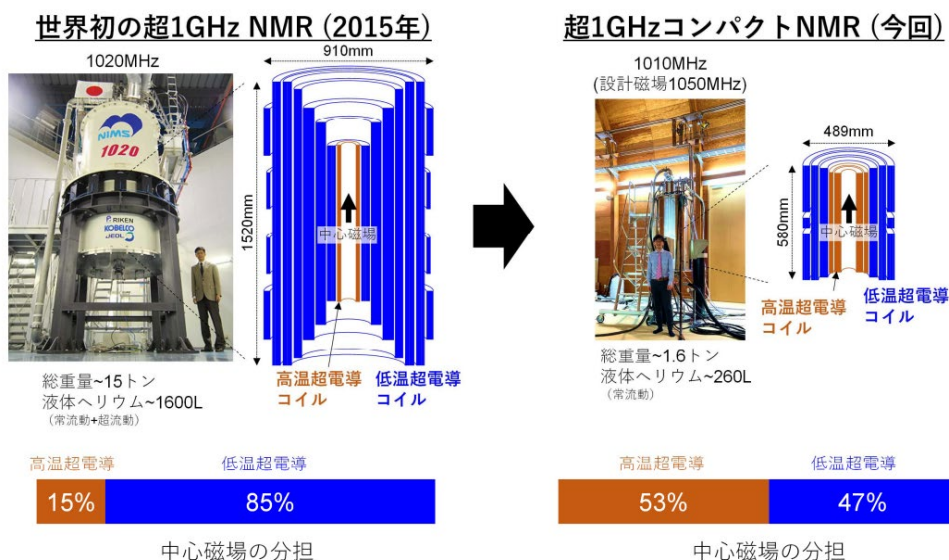


図2 理研グループなどによる HTS を用いた NMR マグネット開発プロジェクト。HTS の活用が一步一步前進している。科学技術振興機構プレスリリース³⁾より。

た初めて 23.5 T を超える NMR マグネットが開発された¹⁾。2019 年には欧州の企業が商用機として初めて HTS 採用 1GHz クラスマグネットを納入した²⁾。この商用機では超電導接続も十分低抵抗を実現できているとのことである。日本でも先の成果に基づき、理研らのグループによって世界最高磁場となる 1.3 GHz (30.5 T) マグネットの開発が推進されている³⁾。この計画では超電導接続の実装を目指すとともに、HTS が高磁場下でも高い臨界電流密度を持っていることを利用して、マグネットを著しく小型化することも計画されており、当社もこのプロジェクトに参画している。図2は2015年の1.02 GHz マグネットに対し著しい小型化が実現できたことを紹介する写真である。

一方、HTS のような活発な研究報告はないが、LTS



図3 冷凍機を用いた NMR マグネット用寒剤蒸発抑制装置“CR-80”(600MHz 機に設置)。He と N₂ 両方に対応。基本的に補充は不要。冷凍機由来振動の影響もない。設置高さを抑える構成になっている⁵⁾。

の Nb₃Sn などでも臨界電流密度の向上が図られてきた。これらの成果とともにコイル設計の最適化も進められ、400 MHz~800 MHz クラスの製品においてコイルの小型化や漏れ磁場の低減が実現された。5 ガウスラインはアクティブシールドのない機種に比べると半径方向で 1/5 程度にまで低減が進んだ。

これまでも液体 He が逼迫することはしばしば発生していたが、最近の国際情勢により状況は悪化し、かつ長期化することが懸念されている。そこで当社では NMR マグネットでも液体 He の補充を不要とする冷凍機搭載蒸発抑制装置の製品化を進め、2023 年度より販売開始した。図3は600MHz 機に設置した状態のもの。NMR のような高感度測定では機械振動や He 槽内の圧力変動がノイズ源となる懸念があり、冷凍機を利用することは簡単ではないが、この装置開発では振動評価を丁寧に進め、冷凍機由来の問題がないことが実際の NMR 測定によって確認されている⁵⁾。

4. 参考文献

- 1) K. Hashi et al.: J. Magn. Reson. **256** (2015) 30-33
- 2) P. Wikus et al.: Supercond. Sci. Technol. **35** (2022) 033001
- 3) 2022 年 10 月 25 日 科学技術振興機構 (JST): プレスリリース
- 4) Y. Yanagisawa et al.: Proc. of Applied Superconductivity Conference 2022
- 5) 松本拓也ら: 2023 年度春季低温工学・超電導学会 研究発表会 1C-03