

MRI に向けた MgB₂ 超伝導磁石

MgB₂ Superconducting Magnet for MRI

日立 ○児玉 一宗, 青木 学, 田中 秀樹

Hitachi, Ltd., R&D Group, Motomune Kodama, Manabu Aoki, and Hideki Tanaka

E-mail: motomune.kodama.yf@hitachi.com

MRI 市場では, 1.5 T 機が 70%, 3 T 機が 20% を占め, 1500–2000 リットルの液体ヘリウムにより冷却される NbTi 磁石が主に適用されている。MgB₂ は 2001 年に超伝導体であることが発見されると[1], 粉末を金属管に詰めて伸線加工する Powder-in-Tube (PIT) 法線材の開発が進められ, 現在では数キロメートルの長尺線材を製造可能である[2]。高い臨界温度 ($T_c = 39$ K) をもつ MgB₂ 線材は MRI の省冷媒化を容易にすると期待されるが, 現時点では ASG Superconductors から無冷媒の 0.5 T オープン型 MRI が製品化されているのみである[3]。本報告では, MRI 磁石に対する MgB₂ 線材の適用性を, NbTi 線材との比較を交えて議論する。

- **電流性能** : 我々は, 原料粉末, 添加材, 加工・熱処理条件の適切な選択により $J_c(10$ K, 5 T) = 1200 A mm⁻² を得ている[4]。この電流性能は 1.5 T 機(最大経験磁場: 3–5 T) への適用に十分な水準である。また, E – J 特性も良好であり, 線材部分の発生電界は永久電流モード運転を可能な水準である[5]。
- **機械特性** : 金属間化合物の MgB₂ は脆性材料であり, MgB₂ 線材の許容歪は NbTi 線材と比較して小さい。このため, コイル巻線時の曲げによる電流性能の劣化に注意を要する。我々のステンレス鋼を補強材に適用した線材では, 線径 1.16 mm に対して半径 58 mm の一回曲げを与えても電流性能が維持される[6]。この曲げ半径は, MRI 磁石の典型的なコイル半径 500 mm と比較して十分に小さい。
- **超伝導接続** : 複数の研究機関により, MgB₂ 線材の超伝導接続の開発が進められている[7]。典型的には, 露出させたフィラメント周囲に詰めたマグネシウムとホウ素の粉末を熱処理により MgB₂ に変化させて接続する。永久電流モード運転が可能な水準の低い接続抵抗値が実証されているが, 製品水準には引き続き開発が必要である。
- **クエンチ保護** : MgB₂ 線材は常伝導領域伝播速度が遅いため, クエンチ検知後に瞬時にコイル全体を加熱して局所的な焼損を防止する能動的な保護方式が検討されている[8]。一方, 熱的安定性の高い MgB₂ 線材では, そもそも機械

的擾乱によるクエンチリスクを無視できるのではないかという議論がある[9,10]。ただし, その場合であっても, 装置故障(特に冷凍機停止)や緊急減磁などの異常事象に起因するクエンチへの対策が必要であり, 特に省冷媒磁石ではその対応が一層困難となる。しかしながら, MgB₂ 磁石の高い熱的安定性を利用すると, 10 s 程度でのクエンチを伴わない急速消磁が可能である[11]。異常事象が生じた場合に急速消磁してしまえば, 問題を取り除いた後に短時間で復旧することが可能になる。

MgB₂ 線材の適用温度範囲は高温側に広いため, NbTi 線材のように磁石全体を均一に 4.2 K に冷却する必要がない。熱的安定性に優れるため, 機械的擾乱や傾斜磁場コイルとの相互作用に起因したクエンチリスクを無視できる。また, 異常事象に対しても急速消磁を上手く活用すればクエンチのない運用が可能となる。これらの性質は, MRI 磁石の省冷媒化に非常に有利に働く。さらに, 従来の MRI は静磁場を常に発生し続けるが, 急速励消磁が可能な MgB₂ 磁石では必要なときだけ磁場を生成する運用が可能であり, 移動式 MRI や術中 MRI に適すると考えられる[12]。

参考文献

- [1] J. Nagamatsu et al. *Nature* **410** (2001) 63
- [2] H. Tanaka et al. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **30** (2020) 6200105
- [3] M. Razeti et al. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **18** (2008) 882
- [4] M. Kodama et al. *Supercond. Sci. Technol.* **30** (2017) 044006
- [5] M. Kodama et al. *Supercond. Sci. Technol.* **34** (2021) 025018
- [6] H. Tanaka et al. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* Submitted
- [7] G. D. Brittles et al. *Supercond. Sci. Technol.* **28** (2015) 093001
- [8] T. Baig et al. *Supercond. Sci. Technol.* **30** (2017) 043002
- [9] M. Parizh et al. *Supercond. Sci. Technol.* **30** (2017) 014007
- [10] Y. Iwasa *Supercond. Sci. Technol.* **30** (2017) 053001
- [11] M. Kodama et al. *Supercond. Sci. Technol.* **34** (2021) 074003
- [12] M. Aoki et al. presented at ISS2020 (2020, Tsukuba)