

【隔月連載記事】

超電導マグネット開発のこれまでとこれから (その1)

独立行政法人 理化学研究所
生命分子システム基盤研究領域 NMR 装置技術研究チーム
チームリーダー 前田秀明

本連載では、はじめに超電導マグネット技術の歩みを簡単に紹介します。次に実用的な超電導マグネットの開発について述べ、最後に、高温超電導マグネットの技術課題と今後の方向について述べます。

1. Kammerlingh Onnes の試み

1911年に Kammerlingh Onnes は超電導を発見した直後に、鉛のワイヤで小さなコイルを作り、液体ヘリウム中で通電しました。これが世界初の超電導マグネットです(図1)。結果はさんざんで、少しの電流を流しただけでコイルが常伝導に転移してしまい、数百ガウスしか磁場を発生できませんでした。鉛の臨界磁場を越えることができなかったわけです。これにより、彼は超電導線を用いてマグネットを作ることは不可能であると考えました。彼が製作したマグネットは今でもオランダの博物館に展示してあります。このころ、彼は「30 cm 径の超電導マグネットで10 テスラ (10 T) の磁場を得る」という夢を語っています。夢の実現には、半世紀の歳月が必要でした。



図1 Kammerlingh Onnes の超電導コイル¹⁾

2. 超電導マグネットの黎明期

Kammerlingh Onnes による挫折の後で、長いブランクを経て、1950年代にニオブ (Nb) ワイヤによる超電導マグネットが試作されました。Nb は第2種超電導体で、0.4 T の上部臨界磁場を持ちます。当時は第2種超電導体という認識はありませんでしたが、高磁場まで耐える線材として注目されていました。1954年にイリノイ大学の Yntema らが Nb 線を鉄芯に巻いた超電導コイルで 0.71 T の発生に成功しました²⁾。また、1960年には MIT の Autler らが空芯で 0.43 T、鉄芯で 1.4 T の発生に成功しています³⁾。Autler のマグネットを図2に示します。これらは大変大きな技術の飛躍であり、新しい時代の先駆けとなりました。

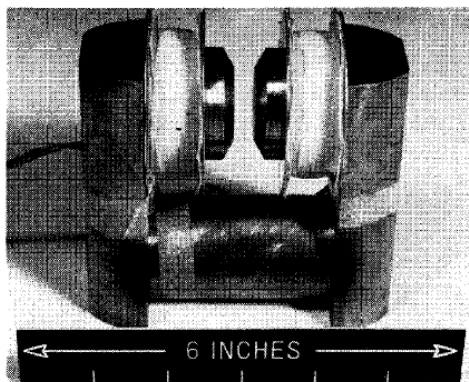


図2 Autler による Nb 線を巻いた 1.4 T 鉄心マグネット³⁾

1960年代は超電導マグネットにとって画期的な時代でした。1961年にBell研のKunzlerら⁴⁾が、Nbのチューブに Nb_3Sn またはNbとSnの粉末を入れて加工して Nb_3Sn の線材化に成功しました。同じころ、WestinghouseのHulmら⁵⁾が合金系のNbZrを用いた超電導線材を開発しました。金属間化合物系の Nb_3Sn 線材と合金系のNbTi線材は、今に至る二つの実用超電導線材の流れを形成しています。両者がほぼ同じ時期に発明されたのは大変興味深いことです。1961年にMITで開催された高磁場会議は、さながらマグネット磁場の競技会になりました。Kunzlerらは Nb_3Sn マグネットで6.8 T、HulmらはNbZrマグネットで6 Tの中心磁場を報告しています。図3に、Kunzlerらによる世界初の超電導マグネットの特許を示します⁶⁾。

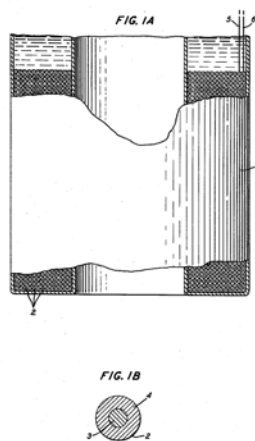


図3 世界初の超電導マグネットの特許、上はマグネット、下は Nb_3Sn 線材⁶⁾

粉末法による Nb_3Sn 線材は、その後、拡散テープ線材として独自の発展を遂げました。これはNbとSnを直接反応させてテープ表面に Nb_3Sn 層を生成するもので、IGC社から10テスラ以上の高磁場マグネットが製品化されました。但し、フラックスジャンプによるクエンチが発生しやすいこと、遮蔽電流による磁場ヒステリシスが大きいことなどの欠点がありました。後者は、テープ線材に特有の現象であり、現在の高温超電導マグネットでも問題になっています。これらの欠点のために、拡散法の Nb_3Sn テープマグネットは現在では使用されていません。1970年代に、金属材料技術研究所の太刀川ら⁷⁾の研究などによりNbとSnの間に銅を介在させることで、低温で効率よく線材を製造できることが明らかになりました(ブロンズ法)。現在では、この製法の Nb_3Sn 線材がマグネットに広く使用されています。

合金系線材では、加工性に優れ臨界磁場が高い NbTi 線が利用されるようになりました。1965 年には Hulm らが、NbZr と NbTi 線材を用いて 10 T を発生したことを報告しています。

3. 超電導マグネット基礎技術の構築

1960 年代の技術革新により超電導線材が製造され、容易に入手できるようになると共に、多くの超電導マグネットが製作されました。それに伴って、超電導マグネットに固有の問題が明らかになってきました。中でも、線材の臨界電流よりずっと低い電流でマグネットが突然常伝導に転移するクエンチが開発者を悩ませました。クエンチが起こると、電源が落ち、液体ヘリウムが蒸発するばかりか、コイルが焼損することもありました。

第 2 種超電導体に外部から磁場を加えると磁場を遮蔽する超電導電流が流れます。外部磁場の増加と共に磁場は超電導表面から徐々に内部に侵入しますが、瞬間的に外部磁場が線材内部に侵入することがあり、これをフラックスジャンプといいます。このころクエンチは主にフラックスジャンプにより生じることが明らかになってきました。

1965 年に米国 AVCO-Everett 研究所の Stekly らは、超電導線材に銅材をたくさん付加し、液体ヘリウムによる冷却を十分にとれば、たとえ線材の一部が常伝導になっても再び超電導状態に復帰できることを示しました⁸⁾。これを完全安定化法といいます。クエンチさせたくない大きなマグネットでは今でも広く使われています。

完全安定化を採用すればクエンチは防げますが、マグネットの電流密度は低くなります。そこで、クエンチの原因であるフラックスジャンプを防ぐ手法が研究されました。1970 年に英国 Rutherford 研究所の Wilson らは、安定化銅マトリクスの中に数十ミクロンの細い超電導フィラメントを多数埋め込んで線材を作り、よじり加工を施せば、フラックスジャンプを抑制できることを示しました⁹⁾。これを複合多芯線と呼びます (図 4)。この手法は、今でも、超電導線材の基本的な製造方法になっています。

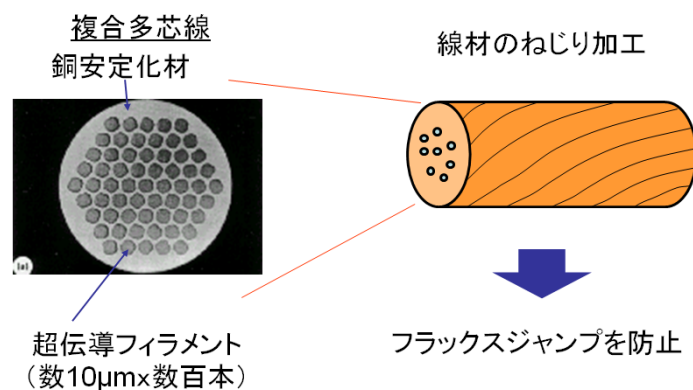


図 4 複合多芯線

線材の複合多芯化によりフラックスジャンプは防止できるようになりましたが、クエンチは依然として残っていました。このクエンチは、電磁力で超電導線材がわずか (数ミクロン) に動き、摩擦熱で温度が上昇して生じることが分かってきました。巻き線をエポキシ樹脂で含浸すると、電磁力による線材の動きを抑える上で有効なのですが、この場合も電磁力による剥離でクエンチが生じます。この種の発熱を機械的擾乱と呼びます。1980 年代に、岩佐ら¹⁰⁾により、機械的擾乱によるクエンチの研究がなされましたが、今に至るまで低温超電導の課題として残っています。

4. まとめ

以上のように構築された超電導マグネット技術が基礎になり、たくさんの超電導プロジェクトが立ち上がりました。今回は、この種の実用超電導マグネットについて2回に分けて解説します。

参考文献:

1. <http://www.physicscentral.com/explore/pictures/supercoil.cfm>
2. G. B. Yntema, Superconducting winding for electromagnets **98**, Physical Review, 1197 (1955).
3. S. H. Autler, Superconducting electromagnet, Rev. Sci. Inst. **31**, p369 (1960).
4. J. E. Kunzler, Superconductivity in High Magnetic Fields **33**, p501 (1961).
5. H. Riemersma et al., A variable composition, high field solenoid, J. Appl. Phys. **33**, 3499 (1962)
6. USP 3,124,455
7. 太刀川恭治、金属系超伝導線材[1]研究開発の歩み、低温工学、**44**, p456(2009).
8. Z. J. J. Stekly and J. L. Zar, IEEE Trans. **NS12**, 367 (1965).
9. Superconducting Applications Group, Experimental and theoretical studies of superconducting composites, J. Phys. D: Appl. Phys. **3**, 1517 (1970).
10. H. Maeda, O. Tsukamoto and Y. Iwasa, The mechanism of frictional motion and its effects at 4.2K in superconducting magnet, Cryogenics **22**, 287 (1982) .

[超電導 Web21 トップページ](#)