



研究ノート

超電導磁石への過渡的放射線照射効果

大阪大学 産業科学研究所

大 脇 成 裕* 岡 田 東 一**

1. はじめに

1911年に、K. Onnes によって超電導現象が発見されてから実用的な超電導磁石が使用されるまで50年以上を要したのは、超電導磁石（以下 SCM と略す）実現には高磁界用超電導材料の開発、超電導現象の解明及び広範な要素技術の開発を必要としたからである。即ち、1950年代末に Ginzburg-Landau や Bardeen-Cooper-Schrieffer らにより理論が確立され、同時に強磁場超電導材料の開発が活発化した。1960年代には高エネルギー実験用（加速器のリング状軌道に荷電粒子を閉じ込める磁場用と素粒子検出のための泡箱やスペクトロメータの磁場用）¹⁾に強磁場・高精度・高安定な大型の SCM の必要性が安定化超電導線材の開発のきっかけとなった。その他、ヘリウム液化機、磁石の極低温冷却方法、極低温使用材料などの開発があって近年ようやく、実験室以外の場所でも SCM が見られるようになった。例えば、SCM を用いた核磁気共鳴吸収医用診断装置（MRI）は世界中に普及しようとしている。もちろん、これで SCM 関連技術開発が終ったのではなく、より高温下で高磁場下で高電流密度で使用できる超電導物質、交流損失の少ない、又、擾乱に対して安定な超電導線材の開発を基本にして、種々の目的の SCM 毎の多数の問題解決のための研究が行なわれている。

核分裂利用の原子力発電の次世代エネルギー源として核融合炉の実現を目ざした研究は巨額の投資を行い、いよいよ隆盛になってきた。現

*大脇成裕（Shigehiro OWAKI），大阪大学産業科学研究所，放射線科学研究部，講師，理学博士，放射線物理

**岡田東一（Toichi OKADA），大阪大学産業科学研究所，放射線科学研究部，教授，工学博士，核融合工学

在、目標としている核融合反応は重水素 D と三重水素 T を約 2 億度の超高温のプラズマにして高密度に閉じ込めることによって達成される。その閉じ込め方法のうち、磁場閉じ込めの研究が盛んに行なわれている。この方式はプラズマを磁力線でとりまき、この中の空間に閉じ込めるのであるから、当然、強い磁場が大きな空間で必要になってくる。このような大型の強磁場発生磁石を常電導磁石で製作すると、それに必要な電力が膨大になり、実用炉では磁石消費電力と核融合による発電電力と同程度となってしまう。従って、磁場閉じ込め核融合炉では、大型の SCM が必要不可欠となる。このため核融合炉用の SCM の開発研究が活発に行なわれているが、他分野の SCM との違いは、大型であること（実用炉のトロイダルコイルは直径約 20m、蓄積エネルギー 100～200 GJ と予想されている）²⁾と、使用中、核融合反応によって発生する放射線が照射されることである。このような使用条件下にあっても SCM が安定に運転されるために、SCM の大きな電磁力による応力/歪み効果と放射線照射効果を把握しておく必要がある。これが我々研究室の研究テーマであるが、そのうちの過渡的放射線照射効果について述べてみたい。

2. 超電導磁石の安定性と擾乱

現在、実用化され、市販されている超電導線材は全て第 2 種超電導物質（Nb-Ti 合金系と Nb₃Sn 化合物系がある）と安定化材（銅又は Al）から成る。磁場下通電中の第 2 種超電導物質では、量子化された磁束が内部にまで侵入し、それらがピン止め中心（合金の析出物、転位網や化合物の結晶粒界）で束縛されて安定状態にある。通電電流が大きくなってローレンツ力がピン止め力を上まわると、この状態を維

持てず、常電導転位してしまう。このときの電流密度を臨界電流密度 J_c と云う。又、超電導物質の結晶構造や電子構造などで決まる臨界温度 T_c 以下で、そして結晶の不規則性に依存する上部臨界磁場 H_{c2} 以下の領域でのみ超電導状態となる。即ち、図1の原点と T_c , H_c , J_c に囲まれた曲面内で超電導性を示すことができる。今、超電導状態にある物質に何らかの外部擾乱が与えられて、その状態がこの曲面から飛び出すことになると、超電導状態が破れることになる。何かの擾乱の結果、局部に常電導状態が発生すると、その部分の電気抵抗が大きくなり、更に、熱発生→常電導部の拡大→磁石全体の超電導クエンチに至る。これを防止する目的で、超電導電流をバイパスし、線材の熱容量と機械強度を保持する安定化材の銅又はAl中に細い超電導線が埋め込まれた線材が実用的に用いられる。具体的な外部擾乱としては、急速な熱侵入、励磁時の線材の動き、線材間の絶縁物の剝離やクラック等が指摘されている²⁾。

ここで放射線照射による擾乱を考えてみると、一般に、照射効果として、過渡的照射効果と熱効果（定常と非定常）および照射終了後も効果が残る蓄積効果（永久損傷と放射化）に分類される。永久損傷とは、超電導物質や安定化材中に放射線照射によって格子欠陥や結晶の不規則性の増大や電子構造に変化を与え、 T_c , H_c , J_c の低下を招くことを云い、照射線量（使用年月）と共に増大する。定常熱効果とは、磁石に吸収された放射線エネルギーは最終的には熱となるから、これを核加熱と呼び、定常的な熱侵入として扱われている。過渡的照射効果に

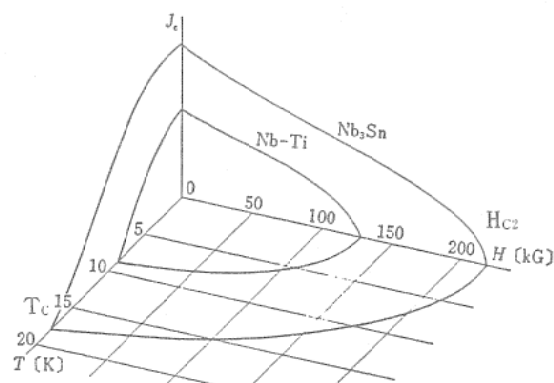


図1. Nb-Ti と Nb₃Sn の超電導特性²⁾

についてはあまり扱われていないので以下に詳述する。

3. 核融合からの放射線

核融合炉中で起る核融合反応は



で、He と中性子の運動エネルギーを熱エネルギーとして取出し利用する。3.5 MeV He は、金属の薄い層で止まってしまうが、14 MeV の中性子は、遮蔽材の物質との相互作用の中で各種元素と (n, γ) 反応を繰返し起す。従って核融合プラズマの格納容器（ブランケット）から離れた場所では、最大14 MeV で低いエネルギー領域に分布を持つ中性子と、広いエネルギー分布のγ線が照射されることになる。磁場閉じ込め方法のうち、最有力法であるトカマク方式の概念図を図2に示す。図からわかるように、トロイダル・ポロイダル SCM は、ブランケットシールドの外に設置されるので、上記のような放射線が照射される。更に、ブランケットには各種の貫通孔があって、ここからあまり減速されない高速中性子の放出（ストリーミング）が予想される。又、プラズマが時間的・空間的に変動すると、SCM 領域の放射線は、パルスの、バースト的なものになる。最近、プラズマからかなりエネルギーの高い（数10 MeV）run away 電子が飛び出してきても分ってきた³⁻⁵⁾。このように核融合炉のSCMには中性子やγ線が定常的に照射されると共に、プラズ

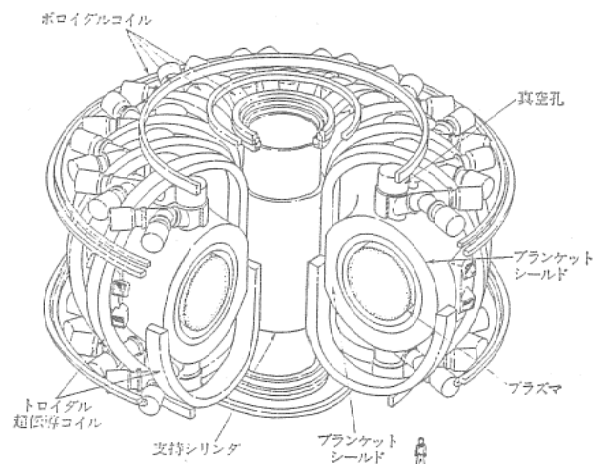


図2. トカマク実験炉の概念図²⁾

マ不安定性の発生に呼応して、その照射線量が時間的、空間的に変動し、局部的に平均よりも高線量のパルス状或いはバースト状の放射線をうけることになる。ここでは、SCMの局所に対するパルス放射線照射効果が現在の定常冷却の評価で十分であるか否かを調べ、その安定性の確立に寄与すべく研究を行っている。

4. 超電導磁石に対する短パルス電子照射効果

上述の研究目的で産研放射線実験所の電子線型加速器（ライナック）からの短パルス電子線を液体 He 中で動作している SCM に照射する実験が行なわれているが、次のような現象が磁石内で起ることが予想されている。

1) 非定常熱効果

入射電子のエネルギー（最大30 MeV）のほとんどは透過や散乱によって系外に散逸するが、SCMに吸収されたエネルギーは最終的に熱になる。このエネルギーがどれくらいの領域に付与されるかを電子線の吸収エネルギー損失 dE/dx から求め、実際に30 ps 幅の電子パルスを照射すればどの範囲に常電導状態が発生し、どのような条件下では、それが拡大・伝播し、磁石全体のクエンチに至るかを実験している。

2) 電子パルスの作る変動磁場の超電導磁石におよぼす効果。

電子が直線走行すると、その経路を中心とした円周上（半径 a ）に磁束密度 $B = \mu_0 I / 2\pi a$ （電流 I ，透磁率 μ_0 ）が発生することは、よく知られている。今、ライナックからの電子パルス（パルス幅、30 ps，電荷量50 nC）が走行したとすると、電子線から1 cm離れた円周上では、 $B \approx 2 \times 10^{-2}$ [T] が30 ps 以内に発生し、消滅する。この際の磁束変動率は、 $dB/dt \approx 1 \times 10^9$ [T/S] となる。このような電子パルスの超電導物質内通過は、局所電場の誘起とそれによる束縛磁束の擾乱→発熱→局所常電導発生につながる

ることが予想される。

3) ピン止め点の擾乱

放射線粒子との衝突によって前述の超電導体内量子磁束のピン止め点が損傷をうけ、磁束が動くことになると超電導状態が擾乱されることになる。結晶粒界の界面や転位セルのような巨視的領域をパルスのように変化させるには、電子線よりも、中性子やイオンの方が効果的であるので、強度の大きい中性子パルス照射と電子線照射が比較される。

5. おわりに

以上のような実験目的で、液体 He 中にある試料に電子線を照射するためのクライオスタットを製作し、照射を受けた He の蒸発ガスは、再利用するので、その安全管理システムを完成した⁶⁾。又、ナノ秒幅の可視光によるパルス加熱したときの超電導体の発生電気抵抗の過渡的挙動についての研究は終了した⁷⁾。現在、研究はこのような段階にあって、データの積重ねに努力している。

なお、本研究には、低温センターに液体 He の供給で、産研放射線実験所には電子パルス照射でお世話になっている。末筆ながら、両所の関係各位に厚くお礼申上げる次第である。

参考文献

- 1) 平林洋美；日本物理学会誌 38 (1983) 458
- 2) 日本物理学会編；「超電導」(1979) 丸善
- 3) 渡辺健二編；「核融合実験装置の放射線ドシメトリと管理」ワークショップ報告，文部省科研エネルギー特別研究（核融合）総合総括班成果報告書 昭和56年3月
- 4) 藤田順治編「核反応プラズマ実験における放射線」文部省科研エネルギー特別研究（核融合）総合総括班報告書 昭和59年3月
- 5) T. Ide, Y. Seki and H. Iida ; JAERI-M6475
- 6) 大脇成裕，片桐一宗，岡田東一，中原住雄，杉原清；低温工学 21 (1986)
- 7) 田原恭幸，大脇成裕，岡田東一；低温工学 19 (1984) 264