

+++++
研究ノート
+++++

「核融合炉と超電導工学」

岡 田 東 一*

高温プラズマを磁気容器で閉じ込めるためには、磁場が強いほど有利であることは直観的に分るし、又その通りでもある。強い磁場を得るにはコイルに強い電流を流せばよいのであるが通常の銅コイルを用いているのでは限度がある。例えば米国 MIT の国立磁石研究所では、現在世界最強の定常磁場を出せる銅マグネットがあるが、内径 5.4cm のソレノイドに 23T を出すための電流を供給するためには 2.5MW の発電機 (図 1) 4 台を全力運転すると共に大蝸がのたうちまわる如き水冷管による冷却に意をつくさねばならない (図 2)。

このように常電導マグネットによる強磁場の発生には膨大な電力を消費する。従って磁場閉じ込め方式の実用核融合炉用マグネットについてはエネルギーバランスが最初に問題となる。1 例として電気出力 1500MW 級の概念設計例 (ウイスコンシン大学) について考えると、内径 14.8m ・中心磁場 3 テスラの 12 ケの分割マグネット (図 3) から構成されたトロイダルマグネットを必要とする。今このマグネットを常電

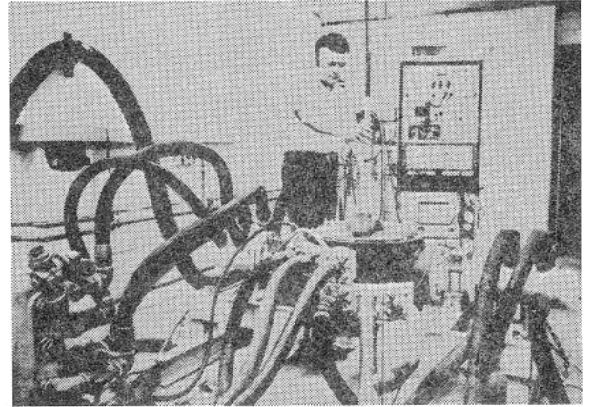


図 2 23T の磁場が発生出来る Bitter 型常電導磁石

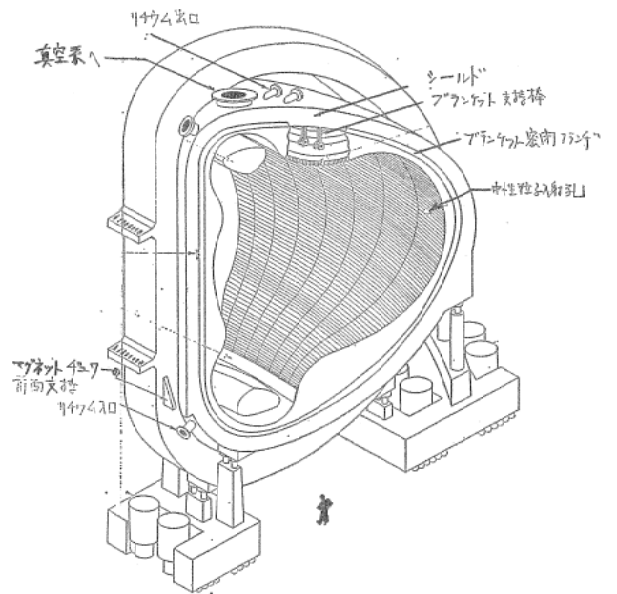


図 3 ウイスコンシン大学の概念設計(UWMAK-I)の超電導コイルの一部

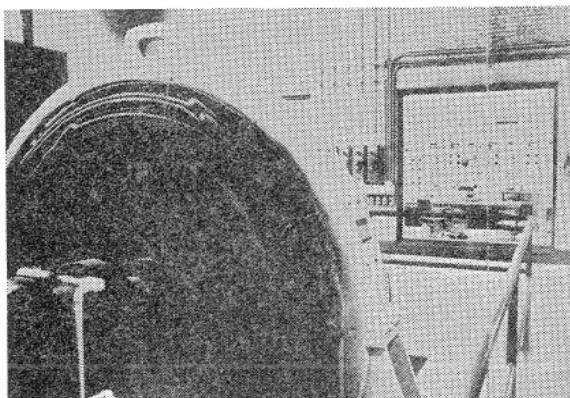


図 1 MIT の国立磁石研究所の 2.5MW の直流発電機

導マグネットで作ろうとすると、この電力は発電炉の出力程にもなり、発電炉としては失格となろう。これを超電導マグネットで作ると、磁場発生のための電力は理論上はゼロであるが、巨大なマグネットを極低温に保つための冷凍機の電力が要る。主たる熱侵入源としては、コイル電流の印加端子、パルス磁場の重畳によ

*岡田東一 (Touichi OKADA), 大阪大学, 工学部, 原子力工学科, 助教授, 工学博士, 核融合工学, 低温工学, 放射線物性学

るAC損失、そして中性子、ガンマ線による Nuclear Heating などがある。これらの全侵入熱は2 KW程度と見積られ、冷凍機の効率を500とすると1 MWの電力となり、核融合炉の全出力の0.1%以下であり、エネルギーバランスとして許容し得る程度となる。

従って核融合炉による発電を有益なものとするには、大型超電導マグネットの建造技術・運転保守・信頼性・安全性などを体系化された一つの工学として、完成させて行くことが強く望まれるのである。ちなみに上に述べたマグネットの例では電磁エネルギー ($L I_2/2$) として240 G Jをもつので、非常の場合この大きなエネルギーをどのように処理するかは、核融合炉全体の安全性にかかわるシステム工学的課題である。このような観点から、将来重要と思われるいくつかの問題をとり上げて、我々の研究室では、次のような基本的な問題に取り組んでいる。

〔1〕 超電導マグネット材料の耐放射線性はどうか、又これがマグネットの全性能にどのような意味をもつか。

この間に答えるために最も代表的な合金系超電導材として NbTi 材、化合物系材料として Nb₃Sn 多芯複合線を中性子照射し、その結果超電導性質がどのように変化するかを研究している。いずれも照射は、極低温で行わなければシミュレーションにはならないと思われるが、極低温での照射と、常温付近での照射効果に大差がみられないことが分っている。このことは現在我が国に充分強力な極低温照射装置を持たない我々研究者にとっては、いささか幸なことである。というのは6~20Kといった極低温で 10^{18} n/cm² (これは実用核融合炉の超電導マグネット部に20年間照射される全中性子線量に相当する) の中性子照射を行うには、たとえば 10^{12} n/cm²/sec の速中性子束をもつ低温照射孔の中で約2週間の照射が必要であり、もっと弱い中性子束の場合には、更に長期間の照射が要る。これに対して常温又は原子炉温度照射では格段に実験が楽になるからである。

ところで合金超電導材料の臨界温度 (T_c)、臨界電流密度 (J_c) といった超電導性質が、さ

ほど照射温度に敏感でない理由は、そんなに明確に理解されている訳ではない。臨界電流密度は超電導体内の量子磁束線のピン止め力密度によって決まるが、照射によって導入される欠陥の内原子の大きさ程度のもはあまり利き目がなく、量子磁束線の有効太さ (ξ : コヒーレント長さ) と同程度の格子欠陥がピン止め点として有効である。従って低温照射では、小さな原子状の大きさから、もっと大きな集合物からなる欠陥まで導入されるが、前者によっては、著しい影響を受けないと考えられる。

一方化合物系超電導材の A-15型では、速中性子総量が 10^{19} n/cm² 程度になると急激に T_c が低下し、 5×10^{19} n/cm² では0°K 近くへ落ちていく。これは例えば Nb₃Sn の場合 Nb 原子の一次元に並んだ鎖が中性子照射のノックオン過程でちぎれ Nb→Sn 原子の交換が起るため、即ち Long Range Order (LRO) の破壊に起因するものと考えられている (図4参照)。我々も京都大学原子炉実験所で 3×10^{18} n/cm² の中性子照射を行った Nb₃Sn の臨界温度が10% 低下することを見出したが、この結果は他の研究者のそれとよく一致している。

〔2〕 超電導コイル材に強い応力が作用すると超電導特性はどのようになるのであろうか。

この疑問が出る理由を説明するために $B = 4$

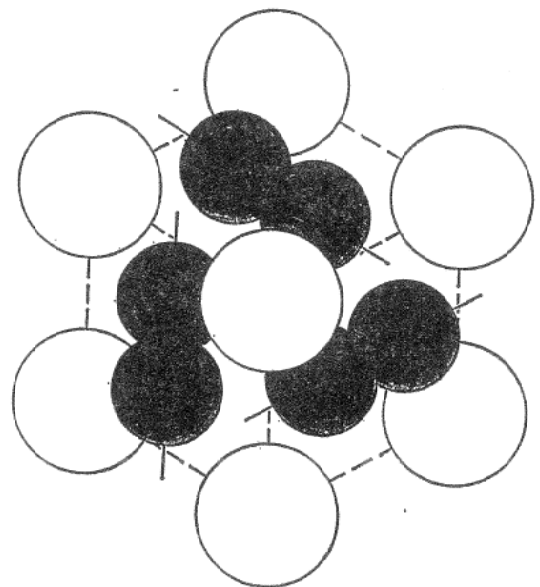


図4 A-15型化合物超電導体の結晶構造 A₃B (例えば Nb₃Sn の場合は黒丸が Nb 原子、白丸が Sn 原子を表す)。

テスラの磁界に垂直方向に10,000アンペアの電流を流している導体に働く力を考えてみると1 m当り約4,000トンという数値となる。従って実用マグネットでは超電導線材が強い応力下で運転されることが予想され「応力による特性劣化」の問題がクローズアップされるようになった。特にトカマク炉ではパルス運転されるので、この応力効果は更に複雑となる。我々は合金系と化合物系線材について研究を行い、既にいくつかのデーターを発表している。

〔3〕 絶縁材料に対する照射効果

マイラー及びエポキシは、超電導マグネットによく用いられる重要な絶縁材料なので現在低温照射による機械的・電気的特性の劣化を調べている。

〔4〕 超電導マグネットの安全性に関する研究

先に述べたような超大型の超電導マグネットでは、トロイダルマグネットを構成している1ヶのマグネットの破損が構造秩序の破壊を誘発し全トロイダルマグネットの崩壊をもたらすかも知れない。そこで(i)要素マグネットの超電導破壊に関する研究、(ii)緊急時の信号検出、(iii)信号検出より保護動作への応答系、(iv)蓄積エネルギー取り出しなど、材料学的素過程から電磁システム工学的な領域まで一連の超電導マグネットの安全工学を推進しつつある。

以上述べたような研究は、超電導マグネット工学のほんの一部ではあるが、エネルギー開発の国家的長期 R&D において重要な分野となり得ると考えられる。本研究課題に対していささかでも、興味を抱かれる方が増え、又本文が大阪大学でこの方面の研究協力の芽が伸びるきっかけともなれば幸である。

(昭和52年3月10日)