

SIV-7.1

高磁場超伝導マグネット研究の進め方と試験設備 High-field superconducting magnets development and its test facilities

竹内孝夫
Takao Takeuchi

物質・材料研究機構
National Institute for Materials Science (NIMS)

はじめに

昨年(2011)は、電気抵抗がゼロとなる超伝導現象が発見されてから100年の節目にあたり、関連する学会では多くの祝賀行事が実施された。1954年に超伝導性が発見された Nb_3Sn 化合物は、1970-80年代の線材・導体化のための基盤研究を経て、今まさに高磁場発生用超伝導線材としてITERに大きく貢献しようとしている。また、1986年以降に発見された高温超伝導体(Y系、Bi系ほか)も、~20年間の基礎研究を経て漸く実用線材の仲間入りを果たそうとしている。高温超伝導体は臨界温度が高いので、その特長を最大限活かして冷却負荷の少ない高温(20-77 K)運転での磁場応用が数多く検討されている。また、臨界磁場(4.2 K)が、従来の金属系超伝導体の~25 Tと比べるとずっと高く100 Tを越えることから、金属系超伝導体では不可能な30 T以上の高磁場を発生する超伝導マグネット建設計画も進行している。しかし、あらゆる応用に使える万能な超伝導線材は未だ世の中に存在しない。そのため高磁場超伝導マグネットの開発にはそれに適した超伝導導体の開発が必要になる。本講演では、物性研究や高エネルギー粒子加速器の分野における高磁場超伝導マグネット計画とそのための超伝導導体開発の現状を紹介し、次いで、それらを発展させた核融合原型炉に向けた導体開発の例を紹介する。

1. 定常高磁場施設

30 Tを越える高い定常磁場下の物性研究は、米国Tallahassee(45 T)、仏国Grenoble、東北大(30 T)、NIMS(35 T)の高磁場研究所に設置されているハイブリッドマグネット(超伝導マグネットによる室温バックアップ磁場空間に水冷銅マグネットによる磁場を重畳するマグネット)により実施されている。これらの施設ではそれぞれ更なる高磁場発生を目指したアップ

グレード計画が進む。東北大とNIMSは、共同で、伝導冷却した超伝導マグネットにより400 mm Φ の室温空間に20Tの磁場を発生させ、その中に水冷銅マグネットにより27 Tの磁場を追加して、合計47 Tを32 mm Φ の空間に発生させる定常磁場マグネットを設計している。この超伝導マグネットは大きなフープ応力(270 MPa)に耐えるように力学的に補強した Nb_3Sn 導体で巻かれた外層コイル(13 T分担)と8枚のY系テープを共巻きした内層コイル(7 T分担、最大フープ応力373 MPa)から構成され、900 Aの定格電流で一括励磁される。一方、Nb-Ti/ Nb_3Sn 外層コイルの発生する15Tの空間に、補強とターン間絶縁を兼ねてゾルゲル法で絶縁処理したステンレステープをY系テープと共巻きしたパンケーキコイル(最大フープ応力450 MPa)で17 Tを追加して、超伝導マグネットだけで32 Tを発生する計画が、米国Tallahassee高磁場研究所で進んでいる。高磁場超伝導マグネットの導体としてY(RE)系超伝導体が期待されるのは、高い臨界磁場に起因して高磁場下でも大きいまま維持される臨界電流密度特性にある。それに加えて、高磁場化に伴う大きな電磁力に対してY系テープの Hastelloy 基板が耐えることができるからである。ただし、Hastelloy 基板とY系超伝導層の間には結晶配向に不可欠な中間層が成膜されており、その中間層からY系超伝導層が剥離してしまうという問題が指摘されている。

2. 高エネルギー粒子加速器

CERNが建設した世界最大の衝突型円型加速器(LHC)で、加速粒子の衝突確率を高めるための改造計画が進んでいる。加速粒子そのものの数を増やすことに加え、衝突点で粒子ビームを細く絞ることが重要である。そのために衝突点前後に設置された2極マグネット(最大経験磁場→11 T)と4極マグネット(最大経験磁場→

12 T) の高磁場化が検討されている。現状は、Nb-Ti 2(4)極マグネットが1.8Kで運転されている。2022年にこれらマグネットの置き換え工事が予定されている。そのタイムスケジュールに合わせるため、高温超伝導体は巻線としては時期尚早として見送られ、臨界磁場がNb-Tiの約2倍あるNb₃Snが候補材料となっている。加速器マグネットの高磁場化のためには、高い臨界電流密度が導体に優先的に求められる。銅を除いた臨界電流密度が12 Tで3000 A/mm²を越えるNb₃Sn線が開発されたが、低磁界で磁気的不安定性が避けられず、フィラメントの縮径やCu安定化材へのSn汚染を防ぐ改良が尚求められている。大きなマグネット運転電流に対応させるため中空撚り線を平角に成形したラザフォード導体が用いられる。Nb₃Snはもともと超伝導特性が応力ひずみに対して鋭敏に劣化する材料であったが、臨界電流密度の改善に伴いその耐力ひずみ性が更に悪化することも判ってきた。この観点から耐力ひずみ性に優れたNb₃Alの加速器マグネットへの適用が期待され、そのための基礎研究も進む。

3. 核融合応用

核融合超伝導マグネットの特徴は大空間に高磁場を発生させることである。大型超伝導マグネットでは、万が一超伝導状態が壊れて常伝導に転移するときの安全保護のために、コイルのインダクタンスはできるだけ小さく抑え、代わりに運転電流をできるだけ大きくする必要があるのである。核融合炉用超伝導導体には、そのような大電流容量性が必要である。次に、核発熱を除去して高い冷却安定性を確保するための導体構造も必要である。また、非常に大きな電磁力に対して超伝導特性が劣化しないことが求められる。

ITERのトロイダル磁場コイルと中心ソレノイドコイルには、多数のNb₃Sn素線からなる多重撚り線が電磁力支持用のコンジットと呼ばれる金属管に挿入され、コンジットの内部に4.5 Kの超臨界ヘリウムを冷媒として流して高効率で冷却するケーブル・イン・コンジット導体が採用されている。最大経験磁界が12-13 Tで約70 kAを流すことができる大電流導体であり、高い冷却安定性が確保されている。ひずみ感受性や交流損失を抑えるため、銅を除いたNb₃Sn

素線の臨界電流密度は12 Tで約1000 A/mm²であり、高エネルギー粒子加速器用Nb₃Sn線の1/3以下に抑えている。しかし超伝導素線同士の接触点を支点とする電磁力による曲げひずみが避けられず、そのため導体性能を低下させる現象が報告されている。

原型炉では尚一層の高磁場化と大電流容量化が求められ、Nb₃Snでの対応は困難と考えられている。これに対し、我が国が中心となって開発を進めてきたNb₃Alは、ひずみによる臨界電流密度の低下が少ない。また、高温超伝導体と違って、素線形状がNb₃Snと同様に丸線であることからNb₃Snと同様に多重撚り線への成形が容易であり、これまでに蓄積してきたケーブル・イン・コンジット導体技術を継承できる利点を有する。原型炉での最大経験磁場が16 T程度であれば、Nb₃Alは原型炉の有力な超伝導マグネット導体候補に成り得る。

一方、最大経験磁場が20 Tを越えるとなると、高温超伝導体の出番である。そのためには大電流容量化が不可欠である。耐電磁力特性に劣るBi系線材は対応が難しいであろう。その点、前述したように、基板に高強度の Hastelloy を利用している Y(RE)系線材は耐電磁力性では有利である。しかし、テープ形状に限定されているので、これを前提とした大容量導体化技術の開発が求められる。テープ素線を2列に単純積層しCuハウジングに納めた直方体導体、テープ素線の積層導体に捻りを加えることにより可撓性を賦与した Twisted Stacked-Tape Cable、テープ素線を Roebel 形状に切り抜きしそれらを長手方向にスライドさせながら転位集合化した Roebel Cable、フレキシブルな芯の周りにテープ素線を交互に向きを変えて螺旋状に複数層巻き付けた Flexible Cable、などが提案されている。長尺・均流化技術、交流損失、耐力ひずみ性、接続性、クエンチ検出、等々評価すべき課題がある。

以上述べてきたように、高磁場超伝導マグネットの高性能化には超伝導導体の開発が必要で、特に、原型炉のような大型・高磁場超伝導マグネットの開発には、大電流容量導体の電磁力影響の評価が大切になる。大型試験設備の整備および試験法の確立も重要な課題である。