

超伝導が実用化されるまでの歩み

高エネルギー加速器研究機構功労職員

理学博士 和 気 正 芳

経 歴: 大阪大学大学院博士課程中退、1974年、建設間もないつくばに出来た高エネルギー物理学研究所に採用される。フェルミ国立加速器研究所、SSC研究所などの海外プロジェクト、トリスタンなどのつくばでの超伝導プロジェクトに従事。

1. はじめに

リニア新幹線やMRIに使われている超伝導は、最新の先端技術とされているようですが、歴史は古く、実は100年前に発見されたものです。100年の間、ずっと未完成にとどまり、先端技術であり続けているというものが、他にあるでしょうか。発見から実用までの長い道のりを少し解説してみます。遅々として実用化が進まないにも関わらず見放されなかったのは、現象の意外性、学問的興味面白さによるものです。

2. 驚きの超伝導

1911年、超伝導が出現する極低温の生成に初めて成功したのはオランダのカルメリンオンネスです。さっそく水銀の電気抵抗を測る実験をしました。温度を下げて行くと、徐々に抵抗は下がって行くのですが、絶対温度4.2度をに近づいたところで、突然、抵抗がゼロになったのです。抵抗が小さくなったのではなく、どう計ってもゼロになります。誰も予想しなかった実験結果に世界中の物理学者が衝撃を受けました。当然のごとく、この発見にはノーベル賞が与えられました。

理論的には謎としか言いようがなかったのですが、抵抗がゼロで、モーターをまわせば、電気代もいらなくなりますから、超伝導磁石は誰でも思いつく応用です。カルメリンオンネス自身も、さっそく鉛でコイルを作り、超伝導磁石を試みています。結果は、見事な失敗でした。少し電流を流して、磁場が出てくるとすぐに超伝導が破れてしまうのです。

超伝導は磁場と共存できないという事実は、応用としては落胆を与えるものですが、今日マイスナー効果と呼ばれ、理論的解明には、大きなヒントになりました。その後も実用の困難が起こるたびに理論的進展が生まれるという関係が続きました。結局、BCS理論を初め超伝導関連のノーベル賞は5回にも及んでいます。

奇異な現象が研究者を引き付けたことで実験研究が進み、いくつもの金属に超伝導を見出して行きました。その中でニオブは絶対温度9度で超伝

導になり、しかも0.4Tまで磁場と共存することがわかりました。普通の電磁石でも2Tまで磁場が出るのですから、高磁場ではありませんが、ともかくも磁場と共存できる超伝導があるということは大きなことです。これがまた量子磁束などの理論につながりました。ニオブのような第二種超伝導体は、磁力線を小さな束にして内部に取り込んでしまうことが出来るので磁場と共存できるのです。

超伝導体の探索は続けられ、Nb3Snと言う化合物で、24Tという驚異的な磁場での超伝導が見出されました。これで、いよいよ超伝導磁石が実用化されるとも思えたのですが、何分化合物は、もろく、コイルに巻くことが出来ません。実用化が始まったのは、NbTiという合金が12Tの磁場に耐えられるとわかってからです。しかも、NbTiにはかなりの電流が流せました。超伝導の発見からここまでで、50年が経過しています。

3. 電流が流れない超伝導

第二種超伝導体は磁場と共存できるといっても、単に磁束を取り込んだのでは電流になりません。電流を流そうとすれば磁束が動き、発熱してしまいます。だからNbTiにある程度電流が流せるということのほうがむしろ理屈に合わないのです。

臨界電流、つまりどこまで電流を流せるかには、大きなばらつきがありました。同じ成分のNbTiで



■超伝導加速器TEVATRON

フェルミ国立加速器研究所に建設された直径2kmの周回道路に沿った土盛りの中にトンネルがあり約1,000台の超伝導磁石が設置された。現在では直径9kmのLHCがフランスとスイスの国境に建設されているが、全て地下なので、このような全景は見えない。

も臨界電流が大きく違うのです。純度を高めたものより、むしろ不純物があったほうが臨界電流が大きく、曲げたり伸ばしたりして歪みを加えると、流せる電流は多くなる。これも不可解な事象ではありました。

超伝導体中の磁束の動きが研究され、次第に仕掛けが明らかになって行きました。電流を流すには、不純物や格子欠陥に磁束を拘束して磁束分布に傾きを与えなければならないのです。これが「汚い」超伝導体のほうが電流を流せる理由です。加工歪で磁束を拘束すれば大きな電流が流せる。太い棒を無理やり引き伸ばして線にする工法が採用され臨界電流が上がりました。

しかし、高臨界電流がまた1つのジレンマになります。電磁石は電流をゼロから上げて行かなくてはなりません。電流を変化させると、やはり磁束が動いてしまい、摩擦熱のようなものが必ず発生して、超伝導が破れます。臨界電流が高いほど、発熱も大きく超伝導電流は本質的に不安定だと言う事になります。またもや挫折。やはり大電流は流れないのです。

磁束の移動を小さくするには、線そのものを細くすればいいのですが、当然ながら細い線には少ししか電流は流れません。この問題を解決して、直径1mmの銅線の中に、きわめて小さな超伝導線を何万本も埋め込むというような技術が開発されたのは1970年代です。金太郎飴と同じ手法で、太い銅棒に穴をあけてたくさんの超伝導線を差し込み、巨大な押し出し装置でこれを線に引き伸ばすのです。これでやっと電流を流せる超伝導線が使えるようになりました。

4. 磁石が出来ない超伝導

ところが、これでもまだ問題は解決しません。線材が出来ても電磁石が出来ないのです。磁石を作って、線材に電磁力が働けば、微小といえども線材が動きます。動けば発熱が起こり、わずかでも発熱すればその部分の超伝導が破れます。それがまた発熱の原因になり、どんどん超伝導が破れていく。クエンチと呼ばれる爆発的な超伝導の破れが、時には大事故を引き起こしました。

微小な動きを許さない緻密な設計が超伝導磁石では必須です。これは泥臭い技術の積み上げで解決するしかありません。極低温でしか使えない超伝導磁石の実用化を担ったのは、開発コスト云々ではなく、何が何でも高磁場がほしい物理学実験の研究でした。中でも加速器が大型磁石の開発を牽引しました。アメリカのフェルミ国立加速器研究所が、超伝導で直径2kmのTevatronをつくりあげ、これがトップコークの発見につながって超伝導の威力が示されることになりました。

10cm位の小さな超伝導磁石しか実用化されて

いない時代に、6m磁石を1,000台並べるという計画は、壮大過ぎて実際のところ外部からは本気とは受け止められていませんでした。正式な予算はなく、受注できるメーカーもないので、全部、研究所内での手作りです。大学院を出たばかりの筆者は、いきなりこのプロジェクトに遭遇してしまったのですが、所内は、だれもがこれに不安を感じない不思議な熱気に包まれていました。ここで過ごした3年間は何物にも替えがたい貴重な経験となっています。

テバトロン成功に続いて、各国の加速器計画に超伝導磁石が使われるようになり、線材の性能も上がってきて、大型磁石が実用になって来ました。日本でも、つくばの高エネルギー研で、当時世界最大の検出器磁石が作られました。といっても、これらは実験装置であり、日常生活に影響を及ぼすようなものではありません。その意味では、実用化ではないかもしれません。超伝導磁石は所詮科学者の玩具にとどまるのではないかという見方が一般的になっていました。

5. 実用化への道

ここでまた大きな飛躍があり、超伝導への期待が加速されることになりました。高温超伝導の発見です。-190℃というのは、「高温」ではないのですが、これまでの-270℃に比べれば圧倒的に高温で、非常に発生が楽な温度です。90年代に超伝導はブームになりました。しかし、これまでの経過で見てきたように、超伝導磁石にとって超伝導物質の発見はごく一部の段階でしかありません。磁石として使えるまでには、同様な開発の道を辿らねばならないのです。

いまだに高温超伝導は実用化されてはいません。しかし、MRIや磁気浮上列車のような応用も生まれて来ています。何事も道は平坦ではあり得ません。超伝導の技術は、何度も挫折しながら、そのたびに新たな科学が生まれて、興味を持続させてきたのです。

