

話 題

耐放射線電磁石の製造技術向上と 大強度加速器用電磁石としての実用化と量産

田中 秀之*

Development of Radiation Resistant Electromagnets for High Intensity Proton Accelerator

Hideyuki TANAKA*

Abstract

The production processes of the new types of electromagnet had been developed for the high intensity proton accelerator in J-PARC center. The electromagnets are composed of the high radiation resistance coils with insulating the aluminum strand with polyimide resin or using the mineral insulation cable (MIC). We have heard that the high intensity proton accelerators have been working without any troubles with the electromagnets.

1. はじめに

このたびは第15回加速器学会において特別功労賞を受賞致しまして身に余る栄誉を賜り誠に有難うございます。これまでご指導頂きました先生、各方面でご協力頂きました皆様に心より厚く御礼申し上げます。

今後の更に発展を期待される技術開発の参考の一助になればと考え、主に電磁石の開発と製造に関して記述いたします。

2. 開発の背景

私どもが加速器用電磁石を本格的に手掛け始めたのは約50年前、筑波の高エネルギー物理学研究所（現 高エネルギー加速器研究機構、KEK）の12 GeV 加速器の建設が始まった頃です。その頃はエポキシ樹脂をコイル絶縁に使用され始めた時代で、まだ国産の絶縁材料は海外に劣っておりました。コイルに使用する含浸用、あるいはモールド用のエポキシ樹脂の開発を国内の樹脂メーカーにお願いしたり、エポキシプリプレグテープをガラステープメーカーに開発して頂いたりして新しい経験をしました。

当時の先生方は海外の大型加速器を見学されており、なんとか国内のメーカーを育てようとする姿勢が強く伝わってきました。そして熱心にご指導を頂きました。

電磁石のヨークなど純鉄の加工はNC加工機の飛躍的な進歩や刃物の技術が向上して精度の良いものができるようになりましたが、コイルは手加工であり、工法など私どもが工夫のできる余地がありました。主に輸送系や実験エリアの収斂電磁石や偏向電磁石を手掛けました。その後、加速器施設でのメンテナンスを行うようになり色々な経験をしましたが、放射線の環境下では被曝を少なくするためには種々の問題の中でも大きく二つの重要な知見を得ました。

一つはコイル内での導体の繋ぎはしてはならないこと、あと一つは冷却水の水漏れが各社とも意外と多く運転あるいは停止のサイクル、高圧冷却水のウォーターハンマーなどによるストレスにも耐え得る冷却水接合部の安全性の重要性です。

従来以上の耐放射線電磁石は二十数年前から手掛けるようになりましたが、何故このような難しいことが要求されるのか、初めのうちは十分理解できませんでした。

* 元 株式会社トーキンマシナリー Formerly Tokin Machinery

(Hideyuki Tanaka E-mail: hide2t@kvp.biglobe.ne.jp)

田中秀之氏は第15回日本加速器学会特別功労賞を受賞されました。

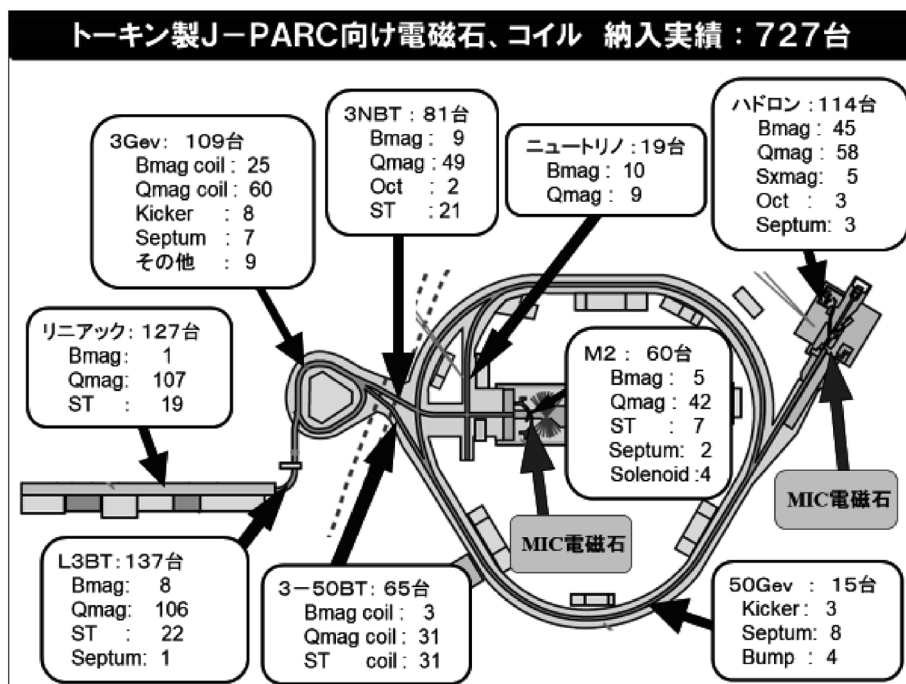


図1 J-PARCにおけるトーキン製電磁石、コイルの納入実績（2017年3月現在）。



図2 3 GeV シンクロトロンに配置されたポリイミド樹脂コイルを使用した電磁石群（日立製作所殿製）。

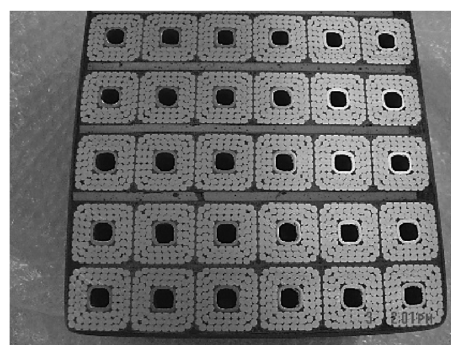
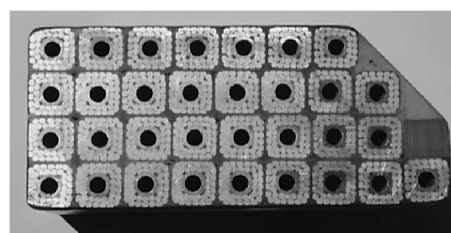


図3 3 GeV シンクロトロン用四極電磁石、偏向電磁石のポリイミド樹脂コイル切断面。

我々がJ-PARCの計画を知る前から、セメントコイルをはじめ無機絶縁コイルなど試作のお手伝いをさせて頂きましたが、J-PARCにおける耐放射線磁石の重要性や必要性など、田中万博先生から講義やご指導を何度も頂きながら理解が進んでいき、開発から量産技術の重要性を認識することに至りました。

改めて田中万博先生の先見性のある研究開発に敬意を表するものです。

代表的な耐放射線電磁石としては以下に記載しております「ポリイミド樹脂を使用した耐放射線

コイルの電磁石」「ミネラル・インシュレーション・ケーブル（MIC）をコイルに使用した電磁石」があげられます（図1）。

3. ポリイミド樹脂を使用した耐放射線コイルの電磁石

現在一般的に使用されているエポキシ樹脂に代

わってその放射線強度が十数倍強いとされるポリイミド樹脂を使用し、OFC（無酸素銅）ホローコンダクターを使用したコイルにも用いましたが、ここでは、内部に冷却パイプを有するアルミストランド線を導体としたコイルを代表例として、その開発と量産について述べます（図2）。

3.1 ポリイミド樹脂

ポリイミド樹脂はなかなか難物で当初は常温では固形状態であり、温度によっては非常に粘性がなくなり、含浸してもコイル内に樹脂を保持することができず、硬化中に垂れ落ちてしまうなど扱いが難しいものでした。また樹脂の厚みによっては加熱硬化中に部分的に異常発熱硬化を起こして発煙するなど取り扱いがかなり厄介なものでした。何度も失敗を繰り返しながらその性状や癖を習得し製造工程を確立するに至りました。

まずは常温における性状を樹脂メーカーにお願いしてハチミツ程度の粘度に変性してもらい供給して頂くことにしました。温度と粘性を調べ、含浸性を確保するためには、かなり高い温度まで加熱する必要性もつかみました。そしてポリイミド樹脂を使用したプリプレグガラステープ、ガラス積層板などもメーカーに開発して頂き、コイルの製作に反映させていきました。

3.2 アルミストランド線

OFC ホローコンダクターを使用したコイルの製作経験はかなりありましたが、アルミストランド線は扱いが初めてであり試作によって巻き線時の変形やほぐれ状態、最小可能な曲げRなど実際の巻き線を想定したテストを繰り返し、その都度切断面を確認して巻き線時の諸条件を確立しました。また端末の端子の電気接続はストランド巻のピッチを考慮して何層かの線材全ての導通を考慮した長さのアルミプレートにTIG溶接を行い、当然ながら断面を確認してその妥当性と条件を確認しました。

アルミストランド線は試作時にご支給された線材、実機製作時にご支給された他メーカーの線材にはそれぞれの性状（癖）に違いがあり試作段階で得られた経験からその線材にあった条件を確定しました。

3.3 巻き線

巻き線ではコイル内での接続はしないようにするためにパンケーキの中央から一層目の巻き線を始めるように二層目分は巻き線治具の上部に十分

に大きな半径でフープ状にあらかじめプールをしました。素線絶縁はポリイミドプリプレグガラステープを1/2 オーバーラップ2層とし自社製作のテープ巻線機にて行いましたが、テープの性状から温風で加熱を行う方法を採用しました。二層目の立ち上がりは経験した知見からレイヤーショートを避けるためにその形状に合わせたガラス積層ブロックを製作して層替えを行いました。巻き線においては線材のスプリングバックが強いため従来よりも固定のための治具を多く用い、更に素線絶縁を痛めないように慎重に巻回を行いました。

R部の膨らみは避けることができずその空間は積層板を敷いて層間の空間を埋め高さの均一化を図りました。その後所定の巻き回数を行い、そののち仮キュアを行い巻き線の仮固定化（接着）を行いました。含浸の前にコイル全体にテフロン離形テープを外周全面に巻きましたが、その際端末部の空間にはポリイミド樹脂で作ったパテ状の樹脂で空間部を埋めるようにして部分的な異常発熱硬化を防ぐ対策を行いました。

3.4 ポリイミド樹脂の含浸

素線絶縁テープを施し仮キュアした線間を固着したサンプルコイルの外周に離形テープ処理を行い、コイル内部、素線内部まで樹脂の含浸が可能であるかのテストや条件の確認を行いました。勿論切断面に残る気泡の有無などを細部まで調査を行い満足のゆく条件を確立しました。

樹脂の性質上次のような真空含浸タンクの改良を行いました。はじめに樹脂含浸が可能な粘度にするために温水による加熱ができる樹脂のタンクを準備し、更に真空中でコイルを加熱できるようにストランド線の内部の冷却通水管を利用して温水加熱通水ができる設備を準備しました。コイル外形形状に合わせた含浸用の金型にでき上がったコイルをセットしてコイルに温水を通水し、十分に温度が上昇した状態にした後、あらかじめ温めて真空脱泡をした状態のポリイミド樹脂を真空中で金型に注入を行いました。注入は少量ずつ時間をかけて極力気泡を巻き込まないようにしました。

当初は脱泡の状態を確認しながら含浸を行いましたが一昼夜かけてもなかなか満足しない状態であるため、含浸用金型全体を振動させることにより含浸時間を約半分以下とすることが可能となりました。

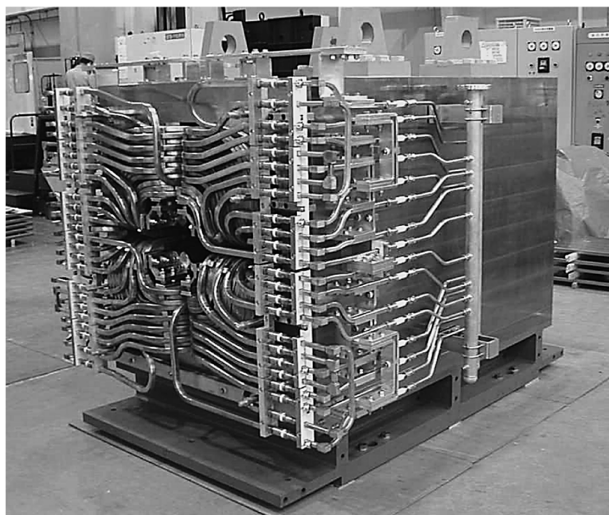


図4 MICを使用したコイルを有する四極電磁石.

3.5 加熱硬化と外周絶縁

含浸の終わったコイルは含浸の金型治具にセットした状態で加熱硬化を行いました.

硬化終了後離形テープにより余分な樹脂を取り除きその後外周対地絶縁のテーピングを行いました. ポリイミド樹脂のプリプレグテープの性質上離形テープを剥がした状態で粘度の低いパテ状のポリイミド樹脂を外周に塗りながら対地絶縁のテーピングを施しました. 更に離形テープを巻き回して金型によって圧着し加熱硬化を行いました. この工法の正当性を確認するために十分に水分を含ませた布をコイル全体に巻き、導体と外周との耐電圧試験にてリーク電流を計測することにより安全性の確認を行いました(図3).

4. ミネラル・インシュレーション・ケーブル (MIC) をコイルに使用した電磁石

MICを使用したコイルを用いた電磁石は放射線強度の強いターゲット周りや終段に設置される電磁石としては究極の無機絶縁電磁石になると思われます.

MICの調達に関しましては、国産は価格が高く、ロシアから安価に購入できるとのご教授を受け、ロシアまで出張しましたが、雪にかぶった線材そして長さも知らされたものとは違い短く、何度か設計変更を余儀なくされてコイルを輸入した苦い経験もありました.

国産では日立電線(現 日立金属)殿にご苦労頂いて長尺(60 m)のMICを供給頂きました. これ

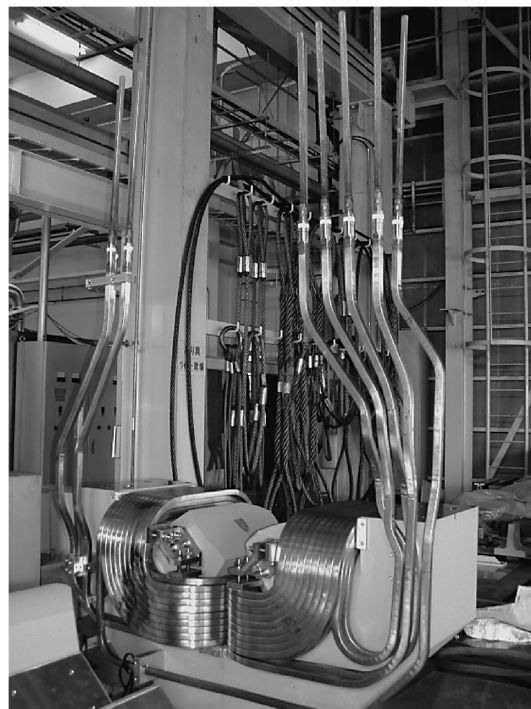


図5 MICコイルによる四極電磁石組立て途中.

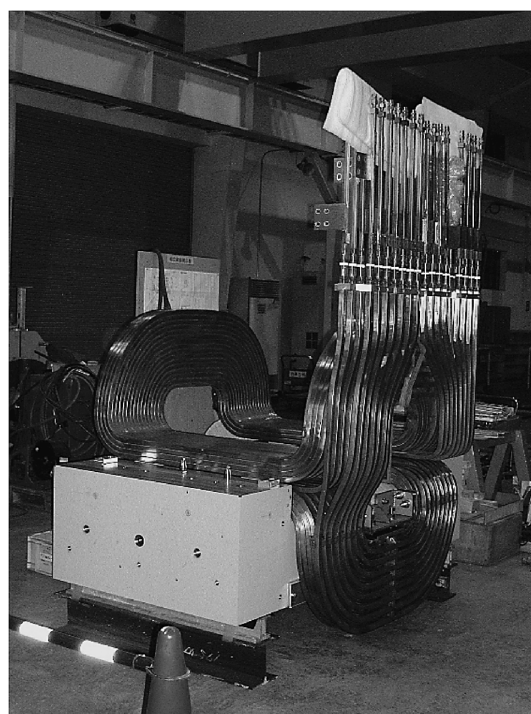


図6 MICコイルによる偏向電磁石組立て途中.

によって設計上のバリエーションが広がり、かなり難しいコイル形状の製作が可能となりました.

4.1 設計上の留意点

コイルの設計にあたりコストを抑えるために、制約された長さでできるだけ半端を出さなく流路

を等しくした経済的なコイルの形状が求められます。そのため1種類の電磁石コイルに限定することなく他種の電磁石コイルの組み合わせを考慮してできるだけ線材の無駄を省く工夫をしました。設計はMICの構造による巻き線時に制約される条件を十分に把握して行いました。

つまり中空導体 (OFC)、それを取り巻く無機絶縁材 (MgO)、外周のシース材 (Cu) より構成される構造は日立電線殿のご努力により、より巻き線のしやすいものとなりました。とはいえ、設計に必要な制約条件は実際に曲げ、ひねりなど行って中空導体の変形、絶縁材の偏り、シース材へのダメージなどその極限を幾度となくテストをして把握しました。要求されたコイル形状はこれまでのホローコンダクターでの収斂電磁石や偏向電磁石に求められた鞍型コイルや端末の扇型の基本的な構造は変わりなく、そのため、メンテナンスの経験から得られた知識、製造現場の技量など設計と一体となって全体の構造設計に反映させました。特に端末部分での無機絶縁材の吸湿への対策、水路長のより等しく且つ磁場の乱れを生じさせないための導体の引き回し、端末絶縁の構造などに工夫を凝らしました (図4, 5, 6)。

4.2 コイル巻き線成形

MICの線材の性格上巻治具は従来に比べかなり強度の強い構造とし、曲げ治具などもできるだけ線材にストレスやダメージを与えないような工夫を凝らしました。

直径1.8mのフープ状で支給されたMICは1層目の必要線材長の半分から巻き線を開始して残りは巻き線治具上にプールをしました。当然のことながら巻き線機は三次元の巻き線のできる装置を準備しできるだけ巻き線機に負担をかけないように曲げるための治工具に工夫を凝らしました。治具での固定だけでは外した時の変形を起こすため、それを防止する目的でシース同士をリン銅ロウによってロウ付けを適所に行い固定をしました。特に偏向電磁石の鞍型の直角の巻き線部においては線材のスプリングバックを読み込んで治具は直角より倒した構造で製作をしました。

4.3 端末処理と組み立て

非常に高い放射線の環境下に設置される電磁石は事実上メンテナンスが不可能です。中には4mものコンクリートシールド下に設置されるものもあ

り、水漏れは絶対に許されるものではなく細心の注意を払いロウ付けなどをして配管処理を行いました。使用した絶縁セラミックパイプは長期間の使用により内壁に銅イオンが付着し、リーク電流を生じさせる状況になります。経験値からセラミックパイプの内径対長さを割り出し長期間の運転に耐え得る十分なものを準備して使用しました。組み立て後の各流水路は流路長の違いやヘッダーの入水方向などによる水量やコイルのパンケーキごとの発熱量が一定になるように配管を行いました。

5. む す び

J-PARCでのこれまでにない高放射線の過酷な条件で使用されている電磁石、つまり3 GeVや50 GeVのリング、そしてハドロン実験設備、ニュートリノビームライン、3NBTライン、ミュオン実験施設などで問題なく使用されて運転されていることは製作者として誠に嬉しい限りです。

これらを含めJ-PARCには数多くの電磁石やコイルを納入させて頂きました。

しかしながら、近年は価格を優先されて海外からの輸入も多くなっている状況ですが、国内の技術を育て、人を育てる物作りを継続することが非常に大切なことは言うまでもありません。

メーカでは技術標準や作業手順書などで品質の維持を図るようにしておりますが実際には経験した人からの手ほどきが必要となります。本稿が幾分かでも後輩にその補充の一助になればと筆を執りました。

新しい材料を使いこなすことがまた次の技術開発に繋がってゆくものと信じております。

謝 辞

KEK 筑波での12 GeV建設時代にご指導とお世話になった平林洋美先生、その時分以来J-PARCまで長年にわたり指導を賜り、このような技術開発のチャンスを与えていただきました田中万博先生へ重ねて感謝申し上げます。

そして難しい材料開発にご尽力頂いた各メーカの皆様に御礼申し上げます。

今後益々加速器技術並びに学会のご発展を祈念いたします。