電磁石コイルのショートトラブルに対する調査方法の研究
THE STUDY OF INVESTIGATION OF THE SHORTED COIL OF MAGNET

芝田達伸、松本教之、佐藤洋一
Tatsunobu Shibata*, Noriyuki Matsumoto, Yoichi Sato
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

A trouble about one of the bending magnet which operate in the beam transport from RCS to MR in J-PARC was happened in March 2019. The cause of the trouble was speculated as layer-short in the magnetic coil of the bending magnet. We investigated the position of the layer-short and cause of the failure two weeks, however we could not get any identification of the source of the failure. As the result the beam operation of MR was stopped in April 24th due to this trouble. There are several magnets for injection and extraction in MR which have same type of coil as the failure coil. It is an important issue to establish a method to identify the failure point reliably and as soon as possible. The goal of the study is establishment of a method of investigation of the magnetic coil which happened the coil short. The first step of our study are measurement of the impedance and inductance of a test-coil which we produced in July 2019, and observation of the inner side of magnetic coil by a endoscope.

1． 研究の背景

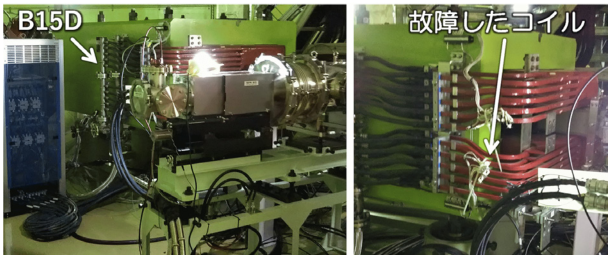

Figure 1: The photographs of the B15D which is located in 3-50BT area in J-PARC.

大強度陽子加速器施設 J-PARC は 400 MeV-LINAC、3 GeV-Rapid Cycling Synchrotron (RCS) と 50 GeV-Main Ring (MR) の 3 基の加速器と物質・生命科学実験施設 (MLF)、ニュートリノ実験施設 (NU)、ハドロン実験施設 (HD) の 3 つの実験施設で構成されている [1]。RCS で加速された 3 GeV の陽子ビームは 3-50BT[1] という約 250 m 長のビーム輸送ラインを通って MR に入射される [2–4]。3-50BT には 3 台の直流偏向電磁石が使用されている。2019 年 3 月 18 日この内の 1 台で B15D と呼ばれている偏向電磁石 (Fig. 1) に異常が発生し、磁極内磁場の強度が 0.2% 程低くなった。0.2% の変化でもビーム軌道への影響は大きく、更に徐々に悪化していったため MR への正常入射が困難になった。異常の原因として電磁石用コイル (コイル) の層間短絡 (コイルショート) が疑われた。B15D のコイルはホローコンダクタ (ホロコン) [2] を使用し、上部磁極用と下部磁極用に分けた 2 つのコイルの巻数はいづれも 120 である。120 巻のコイルは水平方向に 12 巻、垂直方向に 10 巻の構造をしている (12 巻 ×10 層と呼ぶ)。そして縦に 2 層毎に冷却水を流すためのカップリングが付いてる。この 2 層毎の単位を段と呼んでおり、B15D の 1 つのコイルには 5 つの段が存在する。コイル表面はポリミイド材の絶縁物でカバーされているので、通常隣接するコイル同士が導通する事はない。しかしコイルショートとは本来絶縁されているべき絶縁物が何らかの理由で剥がれしまい、隣接するコイル同士が短絡する現象である。コイルショートが起こると巻き数が小さくなるためインダクタンスが小さくなり発生磁場も小さくなるはずである。またホロコン内を流れる冷却水が漏れた結果コイルショートを引き起こしたり、コイルショートを起こした結果ホロコンに損傷が生じ、その損傷個所から水漏れが発生するという事も起こりうる。その場合、ホロコンからの水漏れを検知すればコイルショートの現象を間接的に捉える事ができる。そして B15D の異常を検知してから約 2 週間のコイル調査を行った。目視検査では水漏れ、焦げ目、臭いに関して特に異常は確認できなかった。そしてインピーダンス測定、コイルの段間電圧測定、水漏れの有無を確認する調査を行った。その結果、異常は下部磁極用コイルである可能性が高い事を確認した。しかしコイルショートの直接的な証拠は得られなかった。この時の対策としては下部磁極用コイルで最も異常があると思われた段をバイパスする事でこれ以上の悪化を防ぐという物であった。バイパスした事で減ったコイルの巻数を補うために印加電流をこれまでより 11% 程高い値に変更した。更に下部磁極用コイルの全段間電圧を常時測定し、正常と思われる上部磁極用コイルをリファレンス値として常時モニターする事で異常が発生した場合に即対応できるような

* tatsunobu.shibata@j-parc.jp

[1] 3-50BT は 3 GeV から 50 GeV リングへの Beam Transport の略である。

[2] ホロコンとはコイルを構成する銅線の直接水冷を可能にするため中心に水を流すための中空構造を施した銅線の事である。

準備を整えた。この対策によって B15D を用いてビーム運転ができる状態に復旧し 4 月 4 日ビームの利用運転を再開したが約 20 日後に症状が悪化し、ビーム運転の継続ができなくなった。B15D トラブルについての詳細は [5,6] を参照されたい。

J-PARC の MR には B15D と同じホロコンを用いた電磁石が多数使用されている。今回故障した B15D は 2003 年製造の電磁石であり、J-PARC 開始時から 10 年近く使用し続けていた。今後 MR も含め電磁石の老朽化等により同類のコイルショートの発生が懸念される。コイルの故障はビーム運転の長期停止に繋がる非常に深刻なトラブルである。しかし異常発生から故障箇所の特定、故障の具合、対策方法、そしてビーム運転再開に向けた方針の決定までの時間をより短縮する事は重要な事である。にも拘わらずコイルショートの症状は余り研究がされておらず、有効な調査方法が確立していないのが現状である。そのため故障時の調査方法の確立が非常に重要な課題であると考えた。本論文はコイルショート発生時に備え、コイルショートを起こした場合の調査方法と簡単な基礎研究の結果について論ずる。

2． コイルの電気的特性の測定

コイルショートが発生した場合、必ず通電中の電圧値や電流値に異常が発生する。その異常は電磁石が直流電流であってもパルス電流であっても同じである。またコイルショートは一旦発生すると徐々に症状が悪化するため電圧値が徐々に減少したり、電流値が上昇したりする。コイルショートが疑われた場合は通電を即座に停止してコイルの調査が必要である。コイルの調査において B15D の調査方法を参考に次の電気的特性を測定する。

- 段間電圧：コイルショートの有無に対して最も信頼性がある物理量は電圧である。B15D においても段間電圧がコイルショートの判断や経過観察するのに有効であった。コイルは低抵抗負荷であるため定電流モードで運転する。そのためコイルショートが発生しても電流値が変化する事はなく変化するのは電圧である。またコイルの段は基本的には同じ構造をしているため、電気的特性は同じである。よってコイルの段毎の電圧を比較する事でどの段でコイルショートが起こっているかの判断が付く可能性がある。但し実電源をそのまま使用する事も可能であるが調査用の電源を用いる事ができれば安全に調査ができる。特にパルス電磁石の調査を行う場合は高圧かつ大電流になる場合が多くパルス電圧や電流をリアルタイムで測定する装置と環境が必要になり準備も時間を要する。B15D の場合も低圧電源を用いて段間電圧の測定を行った。コイル調査時では段間電圧に異常が見られなかったが、4 月 4 日以降のビーム運転では常に段間電圧を監視した。そしてコイル状態の悪化は段間電圧が変化によって知る事が出来た。
- インピーダンス測定：インピーダンスはインピーダンスアナライザのみで容易に測定が可能な量である。コイルショートが発生した場合、インピーダンスに変化が見られると予想できる。インピーダンスは直流抵抗成分、インダクタンス成分、静電容量の成分が含まれており周波数特性を測定する事が重要である。ショートする事で直流抵抗が低下するだけでなく、インダクタンスの低下、層間に存在する浮遊容量の変化が混在して発生するため周波数解析をする事が必要である。

2.1 試験コイルの製作とコイルショート試験

Figure 2: The photograph of the test-coil for study the impedance of the layer-shorted coil.

加速器で使用される電磁石は通常 2 つ以上のコイルが対になっているため測定すべき対象はそれら 1 つ 1 つのコイルである。但し同じ構造の複数のコイルを測定する事で正常なコイルと異常なコイルを区別する事が可能になると言える。B15D でも上部磁極用コイルと下部磁極用コイルの比較を行い下部磁極用コイルの異常を認識した。一方コイルショートした時のインピーダンスの変化の仕方についてはデータが乏しく、比較以外に異常かどうかの区別を付ける方法はまだ確立されていない。そこで 2019 年 7 月に試験コイル (Fig. 2) を製作し、コイルショートを起こさせて電気的特性の変化を測定した。試験コイルはりん脱酸銅[3]製のパイプを長円形に 10 巻したコイルである。長辺の外寸法は 182 mm、短辺の外寸法は 112 mm、高さは 121 mm である。銅パイプの厚さは 2 mm で内径は 6 mm であり、表面には 0.5 mm 厚のセミキュアテープを巻いて絶縁処理がされている。コイルの総長は約 5 m で設計した。またコイルの各段には M4 のタップがありこのタップを使ってどの段とも短絡処理を施す事が可能になっている。この試験コイルを用いて各段を短絡しながら電気的特性の測定を行った。電気的特性としてインピーダンスと直流インダクタンス (インダクタンス) の 2 つを測定した。測定には日置製のインピーダンスアナライザ (IM3570) を用いた (Fig. 3)。インピーダンス、インダクタンスともに周波数特性があるため 4 Hz から 5 MHz の範囲で周波数解析を行った。層間短絡処置は主に上下に並んだ 2 層間と、1 層飛ばした 2 層間の 2 通りで測定した。上下に並んだ 2 層間のコイルショートについては短絡させる層の場所依存を見るた

[3] りん脱酸銅とはリンを 0.03% 含ませて脱酸させた銅の事である。

めに 1-2 層間、2-3 層間、中間の 5-6 層間と 9-10 層間の短絡で測定した。ここで層の番号は一番上の層を 1 段目として一番下が 10 層目と定義した。以上の条件でコイルショートさせた試験コイルのインピーダンスとインダクタンスの周波数特性の結果を Fig. 4 に示す。コイルショート無しを基準に比べると明らかにコイルショートさせた場合の方がインピーダンスもインダクタンスも下がる傾向にある事が確認できた。インピーダンスは 100 kHz 以上の高周波領域で大きな差が発生した。インダクタンスは低周波領域から差が見えており、1 kHz 上で大きな差が発生した。またコイルショートさせた層の場所によっても特性が異なる事が分かった。1-2 層間と 9-10 層間のショートの結果は試験コイルがほぼ上下対称であるため似た値になった。中央の 5-6 層間をショートさせた場合が最も値が下がっている事が分かった。つまりコイルショートの影響が最も大きいのが中間地点でのコイルショートである。1-3 層間ショートは 2 層分のショートになるため、1-2 層間や 2-3 層間のショートよりも大きな減少が見られた。以上の事から今回の測定で分かった事は、コイルショートさせた場合インピーダンスもインダクタンスも両方周波数が高くなるに従って大きな減少傾向が見られた。短絡する層の場所にも依存し、中間の層が一番大きく減少した。この測定結果はコイルショートによる抵抗値の減少やターン数減少によるインダクタンスの低下で理解できる結果であるが、まだ実際の電磁石コイルの状況を再現したとは言えない。例えば電磁石コイルは強磁性体の電磁石コアに巻かれる場合も多く、電磁石コアの影響を考慮に入れたインダクタンス測定をしなければならない。今後強磁性体に巻いて実際の電磁石コイルの形を想定した測定も必要である。他にもコイルショートの状況としてコイルに僅かな穴が空き、その穴からの水漏れを通してコイルショートが発生した場合の測定も必要である。また今回は圧着端子と電線を通してコイルショートを起こしたが薄い銅板を使用する方が良いと考えている。今後はコイルショートの方法を変える、電磁石コアに巻くなど様々な状況を作りインピーダンスとインダクタンスの測定を行う予定である。

Figure 3: The photograph of the setup of the measurement of the impedance and inductance of the test-coil.

3． コイル内の直接観測

コイルショートが発生した場合、その原因が水漏れであれ絶縁材の劣化であれ、コイルには相当の損傷が見られると推測できる。B15D の場合においてもコイルショートした箇所はホロコンの内外面にも大きな損傷が見られると予想されるが、その損傷部分を確認するにはコイルを解体が必要がある。B15D のコイル調査ではコイルを解体せずにコイル内の水漏れの有無を確認するために、コイル内の水を抜き、0.5 MPa 程度の加圧空気を封じ込めた。水漏れを起こす穴があれば時間と共に空気が抜けコイル内の圧力は低下すると予想した。しかし約 1 日後の圧力低下量を測定したが特に有意な圧力低下は見られなかった。コイルに水漏れの跡が初めて確認できたのは 4 月 25 日である [5]。約 1 ヶ月後に水漏れの跡が確認できたのはコイル内の損傷が更に激しくなった結果であると考えている。もっと早くコイル内の損傷箇所を直接確認する事ができれば非常に有効な方法である。そこでコイル内を内視鏡で調査する方法を考案した。内視鏡による直接観察は単純で大掛かりな装置も必要ない。問題はホロコンの内径が電磁石によって様々であるが比較的小さい事である。そのため口径の小さな内視鏡が必要になる。また電磁石用コイルは非常に長く、例えば B15D のコイル 1 台当たりの全長は約 700 m になるので内視鏡のケーブル長も相当長い物を用意する必要がある。B15D のコイルの場合、ホロコンの内径は 12.6 mm であり、1 段当たりの長さは約 140 m 程度で、冷却水の入口と出口それぞれから内視鏡を挿入する方法を使えば 70 m 長でコイル全体を調べる事が可能である。今年 5 月まず試験的に内視鏡を 1 台購入した (Fig. 5)。購入した内視鏡のカメラ口径は 4.6 mm、カメラの信号ケーブル長は 5 m である。映像信号は USB 変換され、ノートパソコン上で見て映像を確認する事ができる。また信号ケーブル長は最高で 100 m まで製作が可能である。2019 年 7 月に速い取り出し用高磁場セプタム電磁石の電磁石用コイルの中を購入した内視鏡で観察した (Fig. 6)。高磁場セプタム電磁石もホロコンを使用し、空洞の内径は十分挿入可能であった。ホロコンの内面を鮮やかに観測する事ができたが、内視鏡の先端部の約 30 mm 分は曲げる事ができない構造になっているため、ホロコンの 90 度の曲げの部分で引っ掛かってしまい、それ以上奥を観察する事ができなかった。内視鏡の課題としては曲げる事ができない先端部の長さができるだけ短い内視鏡にする事である。最後に、B15D は 2019 年 7 月に解体が始まり、秋には新しいコイルの交換が行われる。そのため今年秋頃には故障したコイルの内面を内視鏡を使って観察が可能になる。それまでに内視鏡の曲げの問題の解消を目指し、B15D の観察を目指す。

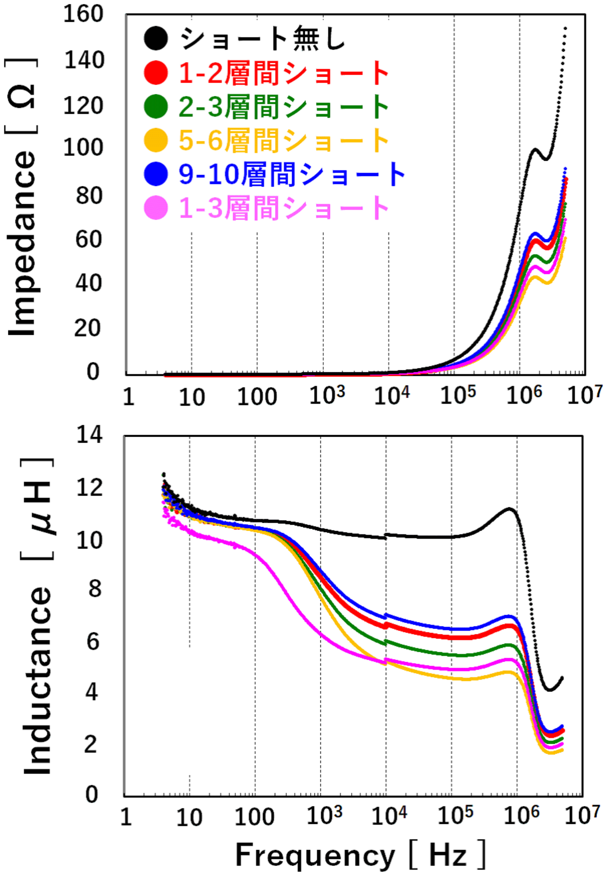

Figure 4: The results of the measurement of the impedance and inductance which the situation of the coil-short is difference.

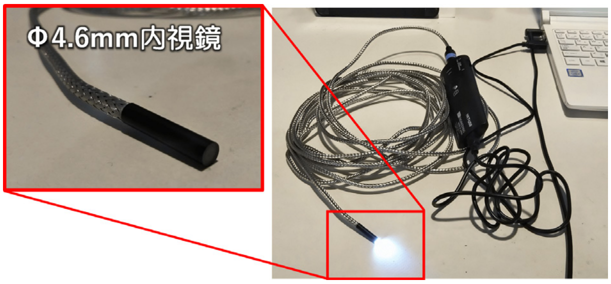

Figure 5: The photograph of the endoscope of which the diameter is 4.6 mm and its cable length is 5 m.

4. 今後の展望

本研究は B15D の故障を切っ掛けに始まったばかりの小規模な研究である。今後は試験コイルを用いたインピーダンスやインダクタンスの測定だけでなく電源を使用した段間電圧、電流の測定による基礎データ取得も行う。その基礎データを基にコイルショート特有の特徴等を調べ、将来起こりうるコイルショートトラブルの際にはどのような調査方法が有効なのかを確立する事を目指す。一方内視鏡を使って試験コイルや既存の MR 関係の

Figure 6: The observation of the inner side of the magnet coil of the FX Septum magnet by the endoscope.

電磁石コイルの観察した結果、映像の鮮やかさについては有効性を確認したがホロコンの 90 度の曲げの部分でカメラが引っ掛かる問題を解決させなければいけない。秋以降には実際に B15D のコイルの観測を行いたいと考えている。他にもコイルショートの調査方法として発生磁場の測定がある。発生磁場の異常は磁場の位置依存性を精度よく評価する必要があるためマッピング装置も必要になる。今後磁場測定によるコイルショート調査についても検討していく予定である。

5. まとめ

J-PARC の MR は 2019 年 3 月に RCS から MR へのビーム輸送経路上にある偏向電磁石の 1 つにコイルショートと思われる故障が生じた。故障時の症状、その後 2 週間にわたる調査の末、コイルショートである事は疑う余地がないという結論であったが、直接のコイルショートの証拠は得られなかった。今後他の電磁石でも同じコイルショートが発生した場合に備え、コイルショートの基礎データを取得するため試験コイルを製作しインピーダンスとインダクタンスの測定を行った。またコイルであるホロコンの中を直接観察するための内視鏡を試験的に購入し、MR の速い取り出し用高磁場セプタム電磁石の電磁石コイル内を観察し、観察上の問題を確認した。今後更なる基礎データの取得や問題を改善させた内視鏡コイルを使ったコイル内観察試験を行う。

参考文献

[1] http://j-parc.jp/
[2] M.Shirakata, Proc. of PASJ, 2014, p312-315.

[3] H.Harada *et al.*, Proc. of PASJ, 2013, p39-43.
[4] M.Shirakata *et al.*, Proc. of PASJ, 2013, p49-53.
[5] M.Shirakata *et al.*, Proc. of PASJ, 2019, THOH06.
[6] J.Takano *et al.*, Proc. of PASJ, 2019, WEPH037.