

J-PARC 3-50BT B15D 電磁石におけるレイヤーショートの原因と推察 PROCESS AND GUESS OF THE LAYER SHORT IN B15D MAGNET OF J-PARC 3-50BT LINE

高野淳平^{#, A)}, 白形政司^{A)}

Junpei Takano^{#, A)}, Masahi Shirakata^{A)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

In the 3-50 BT line connecting the two synchrotrons of the J-PARC, electromagnets for bending, quadrupole and steering are installed. The coils of these electromagnets are made of hollow conductors and adopt a direct cooling system in which cooling water passes through the conductors. In the period from March to April 2019, a layer short was caused due to water leakage in the coil of the B15D bending electromagnet, and eventually the beam could not be transported to the downstream synchrotron. After detecting the first failure, various investigations and first aid measures were performed on the B15D. We will introduce the inferences about possible changes in water leakage and layer shorting that have occurred within the coil that are considered from there.

1. はじめに

J-PARC[1]では Rapid Cycling Synchrotron (RCS)で 3GeV まで加速した陽子ビームを、物質・生命科学実験施設 (MLF) と Main Ring (MR) に供給している。まず RCS から出射された陽子ビームは MLF までのビーム輸送系である 3NBT を通り、途中でパルスバンド[2]によって MR へのビーム輸送系である 3-50BT に振り分けられる。ビーム輸送系ではパルスバンド以外の電磁石は直流電流で励磁している。

3-50BT には偏向電磁石が 5 台設置されており、上流から順番に B15U、B15D、BVD1、BVD2、BFIN と呼ばれている。このうち、B15U、B15D、BFIN は水平方向の偏向電磁石であり、BVD1 と BVD2 は垂直方向の偏向電磁石である。今回、3-50BT 内の水平方向のビーム軌道が B15D 以降で正常な状態を維持することができなくなったことから、B15D の磁場強度に異常が発生したことが疑われた。そこで、B15D に対して各種調査を行い、モニタリングシステムを構築し、ビーム利用運転再開に向けた対策を実施した[3, 4]。しかしながら、一時的にはビーム利用運転を再開することができたものの、再び B15D に異常が発生し、MR へのビーム供給を中止せざるを得ない状況となった。今回、B15D で生じた事象の経緯と推察についてまとめた。

2. B15D の構造

B15D は 3GeV の陽子ビームを水平方向に 15 度曲げる重さが約 15t の偏向電磁石である。鉄芯の形状は H 型であり、上下の磁極にコイルが設置されている。コイルの冷却方式は直接水冷を採用しており、銅線はホローコンダクターを使用している。Figure 1 は 1 水路分のコイルの簡単な図である。コイルの巻型にホローコンダクターを 12 回巻き上げ、コイル

の内側 (磁極側) で 1 層目から 2 層目に積み上げて、さらに 12 回巻き上げることで、合計 24 巻のダブルパンケーキ構造を持つコイルを作成する。

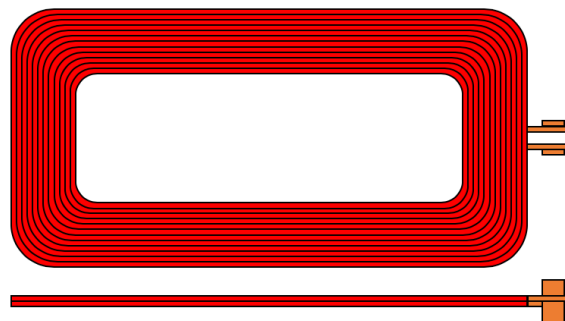


Figure 1: Rough image of a double pancake of the B15D coil.

このダブルパンケーキのコイルを 5 段積み上げて、合計 120 巻の 1 磁極分のコイルとなる。Figure 2 は 1 磁極分のコイルの断面図である。

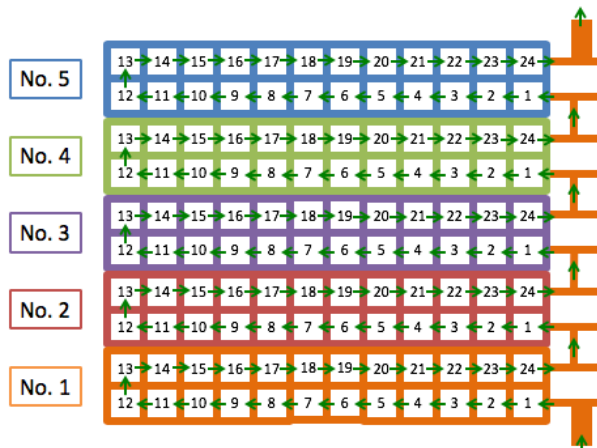


Figure 2: Cross section of the coil.

[#]junpei.takano@j-parc.jp

このコイルを製作した 2003 年当時はホローコンダクターの製造上の制限から、1 水路分の長さを持つホローコンダクターを入手することができなかった。そのため、1 層目から 2 層目に層が変わる付近 (Fig. 2 の巻数 12 番目または 13 番目) でホローコンダクターを銅口付けすることで継いでおり、1 磁極分のコイルは 5 箇所のホローコンダクターの継ぎ目があることになる。

3. 事象の経緯

3.1 1 回目のビーム停止事象

ビーム軌道のアーカイブデータを確認したところ、2019 年 3 月 11 日から B15D 以降の水平方向のビーム軌道に微小な変化が見られた。ビーム軌道の変化量から、B15D のビームを曲げる角度が足りないことが分かり、3 月 15 日に B15D の電流量を 0.6A だけ上げる方向で微調整して対処し、要経過観察とした[3]。この時点では電磁石と電源のどちらに原因があるのか不明であった。

しばらくの間は安定してビーム利用運転ができていたが、3 月 18 日にビーム軌道が水平方向に大きく動き、MR の入射直線部のアドレス 10 番でビームロスの Machine Protection System (MPS) [5]が発報し、MR のビーム運転が停止した。この時も B15D 以降の水平方向のビーム軌道が大きく変化しており、ビームを曲げる角度が足りない状態になっていたことが分かっている[3]。

3.2 各種調査

まず、B15D 本体の目視点検を実施した。しかしながら、特に水漏れ等の問題は見つからなかった。また、各ダブルパンケーキに対して対地の高電圧メータ測定や電圧・抵抗の調査も実施したが、これらの調査でも問題点は無かった。

次に地上にある電源の調査を実施した。まずは電源の出力電流の計測系に誤作動がないかについて調査するため、出力ケーブルに DCCT を取り付けて通電試験を行った。また、B15D の電源を同規模の電磁石である BFIN に接続し、通電試験を行った。その結果、電源に異常は無く、B15D の電磁石側に不具合が生じているものと考えられた[3]。

外観上は問題なかったものの、B15D 電磁石のコイルはホローコンダクターの継ぎ目があることから、漏水によるレイヤーショートが原因である可能性が高いと推察できた。そこで、冷却水を抜いた上で各水路にコンプレッサーで空気を加圧し、半日程度空気圧の低下率を測定した。しかしながら、この調査でも著しく空気圧が低下する水路は無く、問題点を特定することはできなかった。ただ、LCR メーターを用いたインピーダンス測定を実施したところ、上の磁極と下の磁極のコイルの測定結果に差異があった。同じインピーダンス測定を BFIN でも実施したところ、上下のコイルで結果はほぼ同じであった。B15D と BFIN のインピーダンス測定の比較から、この段階において B15D の下コイルに問題があるというところまで特定することができた[3]。さらに下

コイルのうち、どのダブルパンケーキに問題があるのか特定することが重要である。そこで、上と下の両方のコイルについてビームダクトを中心に対称のダブルパンケーキを短絡させてインピーダンス測定を行った。その結果、下コイルのリターンヨーク側から 1 段目と 2 段目に問題があるという結果を得ることができた[3]。しかしながら、同じ磁極にコイルが設置されていることから、カップリングの影響があり、1 段目と 2 段目のどちらに問題があるのか特定することは困難であった。

3.3 運転再開に向けた対策

B15D の電源は最大電流が 855A であり、通常の運転電流は 751.7A であるため、1 段目までのダブルパンケーキが欠如した場合でも電流を 11%増やして電磁石を励磁することでビームを 15 度曲げることが可能である。そこで、2 段目のダブルパンケーキに電力ケーブルの端子板から直接電力を受け取ることができるよう電極を取り付け、1 段目を電氣的に切り離せるようにバイパス処置を実施した。また、冷却水も 1 段目のみ停止した。この場合、上下の磁極のコイル巻き数が非対称になるため、磁極間の磁場にスキュー成分が生じてしまうが、ビーム輸送系ではビームが 1 回しか通らないため、MR へのビーム供給に対して大きな問題はない[4]。

さらに、下コイルの各ダブルパンケーキの電圧をモニタリングとアーカイブを行うシステムを構築し、電圧が第一閾値を超えて下がった場合、アラーム音声で知らせるようにした。また、第二閾値を超えた場合は MPS が発報し、ビーム運転を即座に停止するシステムを構築した。

以上の対策を取った上で、3 月 30 日から 4 月 1 日にかけて B15D の連続通電試験を行い問題ないことを確認した。また、4 月 2 日から 4 月 4 日にかけてビームスタディを実施し、ビーム利用運転を再開した。

3.4 2 回目のビーム停止事象

上記のように B15D に以上が生じたらすぐにビーム運転を停止できるような態勢を整えた上でビーム利用運転を再開した。Figure 3 は 4 月 16 日～4 月 22 日の BPM3 (B15D の下流側 1 つ目の Beam Position Monitor) (上段) と下コイルの 2～5 段目のダブルパンケーキの電圧のアーカイブデータである。このプロットから 2 段目の電圧が他の段に比べて不安定であり、BPM3 の値も連動して不安定であることが分かる。また、4/20 の 22:00 頃を境に 2 段目と 3 段目の電圧が連動するようになり、4/21 の 16:00 頃には 2 段目と 3 段目の電圧にスパイク状の電圧降下が 2 回発生し、ビーム軌道も同様に变化した。ただし、この時点ではビーム停止の目安としている第一閾値には達していなかった。しかしながら、その後も 2 段目と 3 段目の電圧は連動して不安定なままであった。

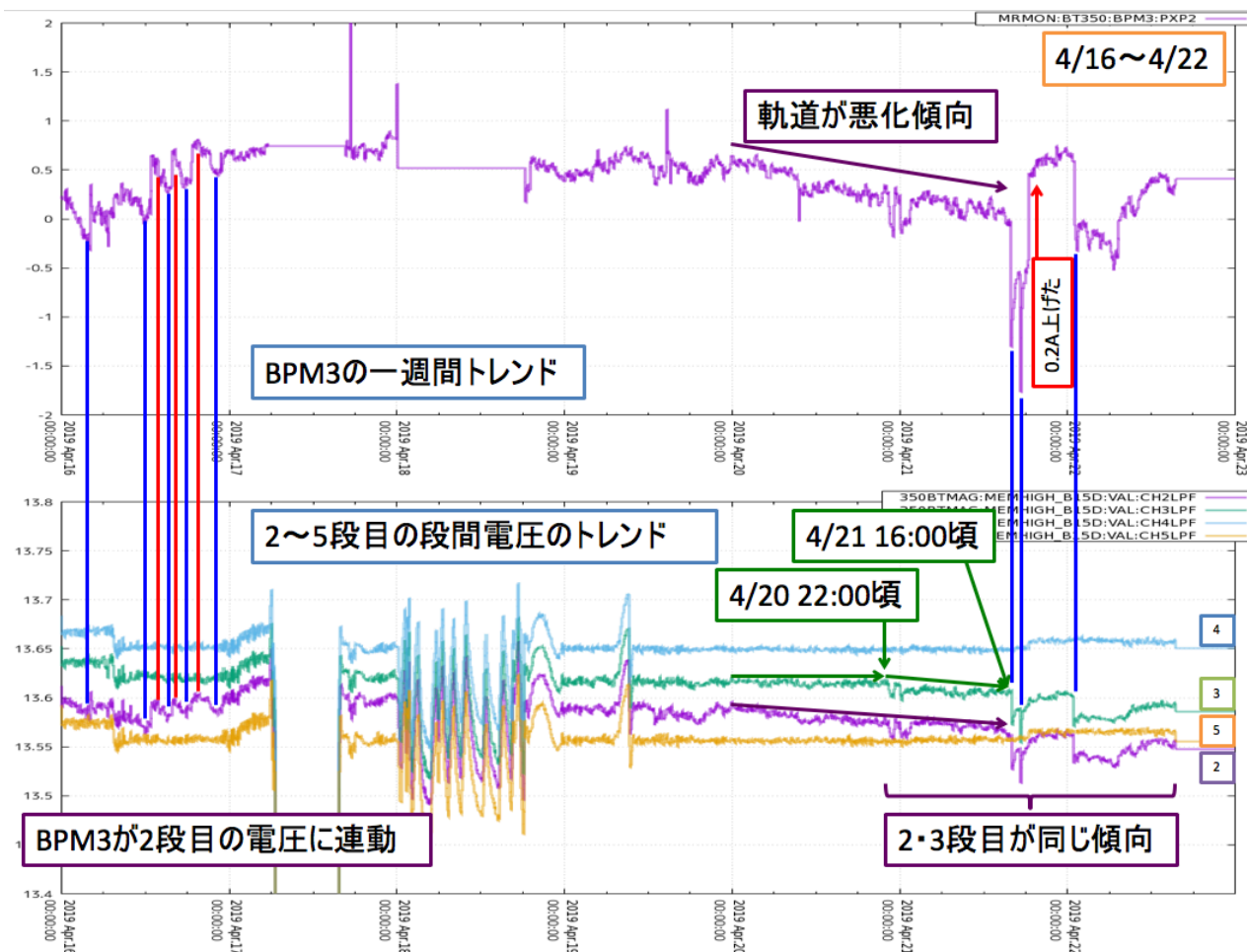


Figure 3: Trend plots of horizontal beam position at BPM3 and voltages of the B15D double pancakes.

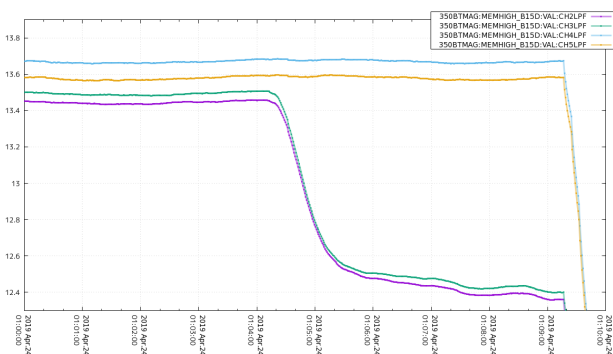


Figure 4: Voltage drop of 2nd and 3rd double pancakes.

Figure 4 は 4 月 24 日の 1:04 に発生した 2 段目と 3 段目の電圧降下のプロットである。1 分程度で第一閾値および第二閾値を超える急激な電圧降下が発生し、MPS によってビーム運転は停止となった。また、ビーム軌道やビームロスも 1 回目のビーム停止の状況と同じであった。B15D の電源はその後 1:09 に停止した。

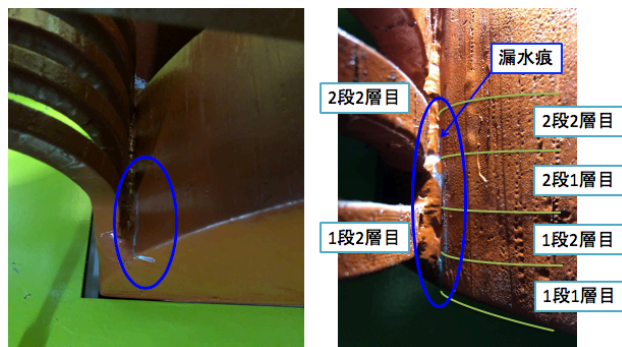


Figure 5: Water leakage of the B15D coil.

Figure 5 は 2 回目のビーム停止後に実施した電磁石の外観調査の際に撮ったコイル口出し付近の写真である。このとき初めて 2 段 2 層目の口出しの根元付近から漏水痕が見つかった。また、コイル下面から水が滴っている状況であった。

4. コイル内で起きた事象の推察

4.1 1回目のビーム停止までの推察

まず、最初に微小なビーム軌道の変化が観測されていたが、この時すでに2段目の12番と11番の間でホローコンダクターの継ぎ目からの漏水による小さなショートが始まっていたものと考えられる。その後、1段目の13番にも漏水が達し、1段目の13番と2段目の12番の間に新しく電気的なパスが出来たため、1段目の14番から24番および2段目の1番から11番まで通電されない状況となり、急激な磁場の減少を引き起こしたものと考えられる。Figure 6は1回目のビーム停止の際に起きたと考えられるレイヤーショートのイメージ図である。

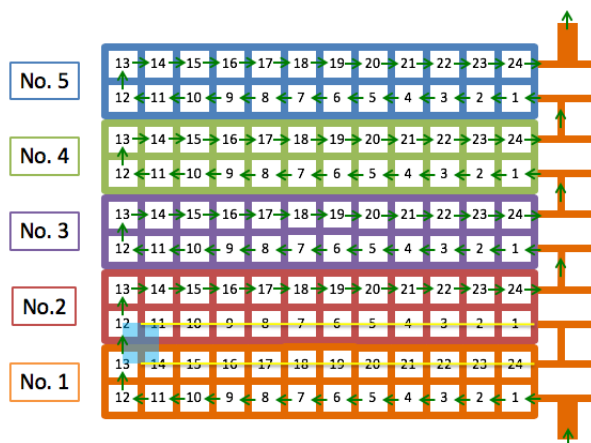


Figure 6: Image of layer short at the first crash.

4.2 2回目のビーム停止までの推察

1回目のビーム停止の後、各種調査を実施し、ビーム利用運転に向けた対策を実施した。その際に、Fig. 7のように1段目のダブルパンケーキに対してバイパス処置を実施し、冷却水を停止した。

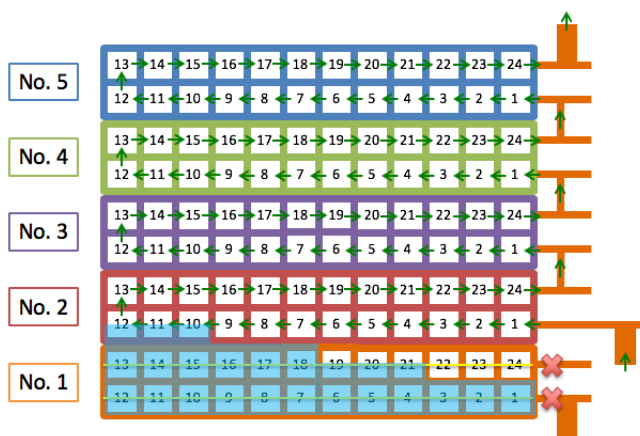


Figure 7: Water leakage after the first aid.

もし、1段目からの漏水が原因で1回目のビーム停止に至っていたのであれば、1段目の冷却水停止

処置でビーム利用運転の仮復旧は完了だった。しかしながら、実際には漏水箇所が2段目であったため、Fig. 7に示したように漏水が継続し、2段目の電圧トレンドが不安定な状態になっていたものと思われる。

漏水が続いた結果、Fig. 8のように2段2層目まで浸水し、4月20日の22:00頃からは3段目の1番や2番などのレイヤーショートによって、小さな電圧降下を起こしたり、2段目と3段目の電圧が変動して不安定になったりしていたものと考えられる。また、4月21日の16:00頃に発生したスパイク状の電圧降下も同様な小さなレイヤーショートが原因と考えられる。

最終的に4月24日に2段目の13番と3段目の12番がレイヤーショートを起こし、大きな電圧降下が発生し、ビーム運転の停止に至ったものと考えられる。

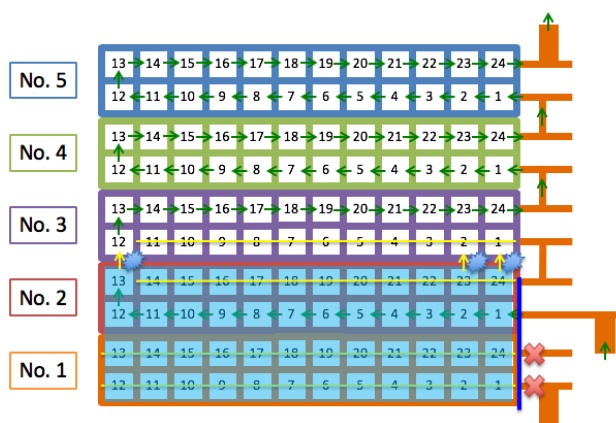


Figure 8: Image of layer short at the second crash.

その後、Fig. 5にも示したように2段2層目のコイル口出し付近からの漏水痕があることも確認でき、漏水が継続していたことから、漏水箇所は1段目ではなく2段目であった可能性が極めて高いと考えられる。

5. 今後の予定とまとめ

今回、漏水によってレイヤーショートを起こしたB15Dの下コイルは7月17日に鉄芯から取り出し、仮置きしてある。今後コイルの解体調査を行う計画であるが、その前に内視鏡を用いた調査[6]も実施する予定である。この手法を確立することによって今回のように症状が拡大する前に不具合箇所の特定を迅速に行うことができることを期待している。

現在、B15Dの下磁極用のコイルを新規で製作している。これは今回起きたレイヤーショートの教訓から、前回のコイル製作時より長いホローコンダクターを入手し、継ぎ目の無いコイルを導入する予定である。この新コイルを9月中にインストールし、11月から始まるビーム利用運転に対応する。

これまで3-50BTは安定的にビーム運転ができていたが、経年劣化による影響を無視できない時期を迎えているものと思われる。B15Dの上磁極に取り付けられているコイルはホローコンダクターの継ぎ

PASJ2019 WEPH037

目のあるコイルのままであり、他の電磁石も複数台同様に継ぎ目を持つコイルであることが分かっている。今後のビーム利用運転のスケジュールを安定的に進めるためには、予防的にこれらのコイルを継ぎ目の無いものに早い段階で順次交換していくことが肝要である。

謝辞

今回、B15D コイルのレイヤーショートが発生した際、多くの方々に電磁石電源の調査、コイルのインピーダンス測定、各種モニタリングシステムの構築など多大なご協力をいただきました。この場を借りて御礼申し上げます。

参考文献

- [1] Acc. Group JAERI/KEK, “Accelerator Technical Design Report for J-PARC”, KEK-Report No. 202-13, JAERI-Tech 2003-044, J-PARC 03-01, March 2003.
- [2] K. Koseki *et al.*, Proc. of the EPAC 2006, TUPLS106.
- [3] M. Shirakata *et al.*, Proc. of the PASJ 2019, THOH06.
- [4] M. Tomizawa *et al.*, Proc. of the PASJ 2019, WEPI044.
- [5] T. Kimura *et al.*, Proc. of the ICALEPCS 2017, TUMPA04.
- [6] T. Shibata *et al.*, Proc. of the PASJ 2019, WEPH029.