

J-PARC 3-50BT B15D 電磁石の層間短絡

LAYER SHORT ON B15D MAGNET IN J-PARC 3-50BT LINE

白形政司[#], 高野淳平, 森田裕一, 下川哲司, 三浦一喜, 吉井正人, 外山毅, 岡村勝也,
仁木和昭, 石井恒次, 芝田達伸, 五十嵐進, 佐藤洋一, 山本昇, 上窪田紀彦, 山田秀衛,
木村琢郎, 佐藤健一, 富澤正人, 武藤亮太郎, 松本教之, 久保田親,

Masashi Shirakata[#], Junpei Takano, Yuichi Morita, Tetsushi Shimogawa, Kazuki Miura, Masahito Yoshii,
Takeshi Toyama, Katsuya Okamura, Kazuki Niki, Koji Ishii, Tatsunobu Shibata, Susumu Igarashi,
Yoichi Sato, Noboru Yamamoto, Norihiko Kamikubota, Shuei Yamada, Takuro Kimura, Kenichi Sato,
Masahito Tomizawa, Ryotaro Muto, Noriyuki Matsumoto, Chikashi Kubota

KEK/J-PARC

Abstract

In March 2019, the orbit displacement was observed in 3-50 beam transport (3-50BT) line which connects two large and small synchrotrons at the high intensity proton accelerator facility, J-PARC in Tokai village, Ibaraki Prefecture. It was found that the bending angle of the B15D bending magnet at the upstream of the 3-50BT line decreased from the behaviour of the orbit. The magnetic field of the B15D magnet was considered to be decreased by 0.2%, even though there was no abnormality in the monitored value of the power supply current. An interlayer short circuit of the magnet coil was suspected. The orbit displacement was not instantaneous. It occurred slowly over several minutes according to the record of the beam trajectory. This time scale also suggests an interlayer short circuit. Here, we report on various investigations conducted on the power supply and magnet in order to detect the cause of orbital displacement, the contents of the temporary treatment, and various safety measures taken to continue the beam operation. It is difficult to pinpoint the exact location and cause of the failure when no abnormality is observed in the appearance of the failed magnet. However, for the coil which has multiple coil leads, because the voltage measurement can be performed for each part, it is possible to figure out a defective part. The B15D bending magnet lasted for three weeks after the treatment. We also report the monitoring and progress of the beam operation with the modified B15D magnet.

1. 序:ことのはじまり

J-PARC とは、茨城県東海村にある大強度陽子加速器実験施設である。2019 年 1~3 月期は、物質・生命科学実験施設およびハドロン実験施設にビームを供給中であつた。2019 年 3 月 15 日、定例の半日メンテナンスの翌日、J-PARC の速い繰り返しのシンクロトロン(RCS)と遅い繰り返しのシンクロトロン(MR)を結ぶビーム輸送路(3-50BT)[1]において、最大で 4 mm 程度の軌道のずれが確認された。このとき軌道は安定しており、3-50BT ラインにある 3 台の主たる水平偏向電磁石のうち、B15D とよばれる電磁石において電流値を 0.6 A (751.7 → 752.3 A)強くすることで軌道を元に戻すことができた。変動は 0.08 %と僅かではあつたが、電源に何らかの不具合が生じている可能性がある。そのため経過観察としたが、3 日後の 3 月 18 日未明にふたたび軌道のずれが発生した。Figure 1 に 18 日の軌道変化の様子を示す。17 日 22:05 の時点では正常だが、18 日 00:52 から軌道が変化し始め、00:54 には BT ラインに設置してあるビームロスモニターを鳴らす程の変位を起こしている。その 3 分後に確認ショットを撃った際にはビーム位置モニター BPM03 で変位が -9 mm に達しており、事態が進行中であると分かる。軌道の変位は BPM03 から生じており、この原因としては BPM03 の 13 m 上流にある B15D 偏向電磁石がもっとも疑わしい。00:52 から一本調子で変位

が大きくなっており、その大きさは 15 日の比では無い。電磁石の曲げ角が明らかに減少しているにもかかわらず電源の電流モニター値に変化が見られないことから、当初想定よりも深刻な事態が起きている可能性があると判断し、MR のビーム運転を停止、当該電源を立ち下げた。

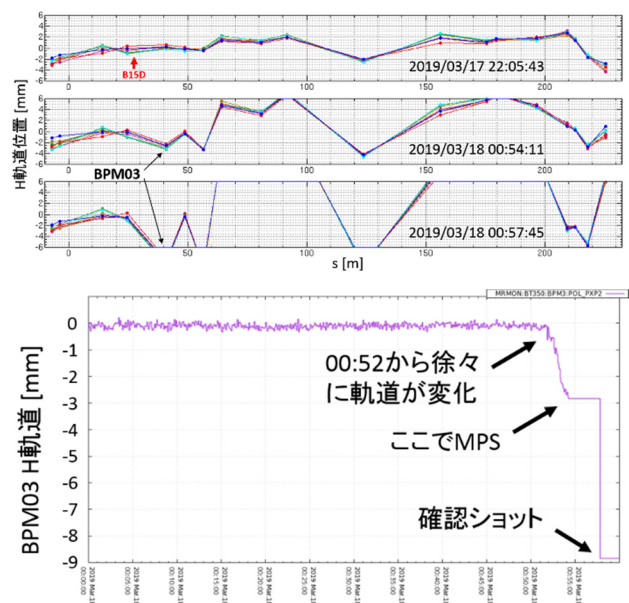


Figure 1: Observed orbit displacement.

[#] masashi.shirakata@kek.jp

2. 不具合箇所の調査

2.1 B15D 偏向電磁石

B15D 偏向電磁石は、負荷に対して専用の電源を持つ 1 対 1 のシステムとなっている。電流は DCCT によるモニター値をほぼ 1 秒間隔でアーカイブしており、後からでも電源出力に変動があったかを確認できる。ただし、電圧は記録していない。B15D 偏向電磁石本体を Fig. 2 に示す。直流電磁石であるためラミネート構造は採用しておらず、バルクの鉄芯による H 型の二極電磁石である。上下二分割可能な構造で、2 個のコイル(上コイルと下コイル)をもつ。外形 $16.7\text{-}\Phi 12.6\text{ mm}$ のホローコンダクタを 12 ターン 2 層巻いたものを一段とし、それを五段重ねて全体を樹脂でモールドしたものがひとつのコイルを形成する。なお、各段がそれぞれ独立な、冷却水路となっている。不具合発生後に現場にて外観調査を行ったが、水漏れ、変色、臭いなどの異常はまったく認められなかった。

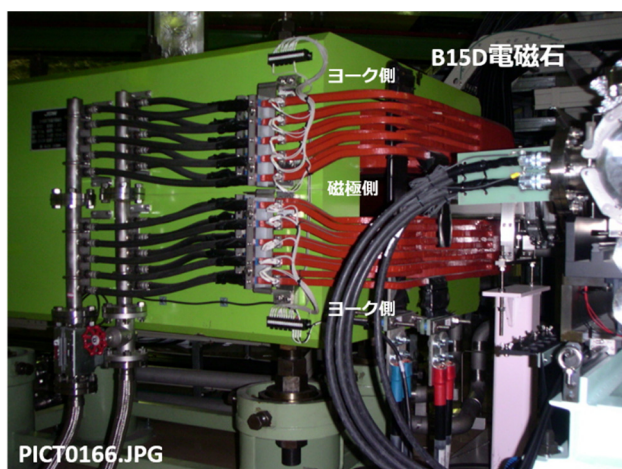


Figure 2: B15D bending magnet.

2.2 B15D 電源の健全性

故障状況からみて電源ではなく負荷側の問題であることは当初から予想できたが、可能性をひとつひとつ潰していくため、電源側の健全性を確認した。具体的には負荷特性の似た BFIN 偏向電磁石に電源をつなぎ替え、通電試験を行った。電源の制御に使用している DCCT とは別に、電源出力部に独立な DCCT を用意し、連続通電を行って電流電圧両方の様子を記録した。結果、出力電流の変動はみられず、電源側の健全性は確認された。

2.3 地絡、段間抵抗、電圧

電磁石の故障として考え得るのは、コイルの層間短絡または地絡による磁場出力の減少である。よって、電源側、電磁石側でケーブルを分離、上下コイル間の渡りも外した後、以下の調査を実施した。絶縁不良や地絡の調査には、YOKOGAWA MY40 を使い、125 V と 250 V で確認した。なお、B15D 電磁石通常運転時の負荷電圧は、180 V 以下である。

- 電源-負荷間のケーブルの絶縁不良、地絡の検

査

- 電磁石コイルの地絡検査
- 電磁石コイル段毎の抵抗測定
- 外部電源を用いた定電流通電時の各段の電圧測定(以後、段間電圧測定とよぶ)

コイルの段毎の抵抗の差は、テスターではまったく分からないレベルであった。同様に外部電源を用いた 1~4 A 程度の通電による段間電圧測定では、故障箇所の特定は困難であった。

2.4 インピーダンス測定

インピーダンスアナライザー HIOKI IM3570 を用いて、負荷のインピーダンスを測定した。当初は LCR を個別に測っていたが、インピーダンス Z の周波数特性を見るのがもっとも分かりやすい指標であった。電磁石全体を測定しても、負荷が極端に壊れていたりしなければ、異常を判断することは困難である。電磁石が上下対称である事を利用して上コイルと下コイルの各段を別々に測定したところ、Fig. 3 に示すようにインピーダンスの周波数特性に大きな差があることが判明した。上コイル、下コイル共にヨーク側から一段目、二段目と呼ぶことにすると、対称性から一段目と五段目、二段目と四段目はほぼ同じグラフとなるはずである。上コイルはその通りになっているが、下コイルではヨーク側にいくにつれインピーダンスのピークが無くなっている。正常な電磁石のリファレンスとして BFIN 偏向電磁石でも同様の測定を行い、B15D 下コイルのヨーク側に近い段に不具合があると推測した。各種調査を通して大きな違いを見ることが出来たのは、このインピーダンス測定のみである。

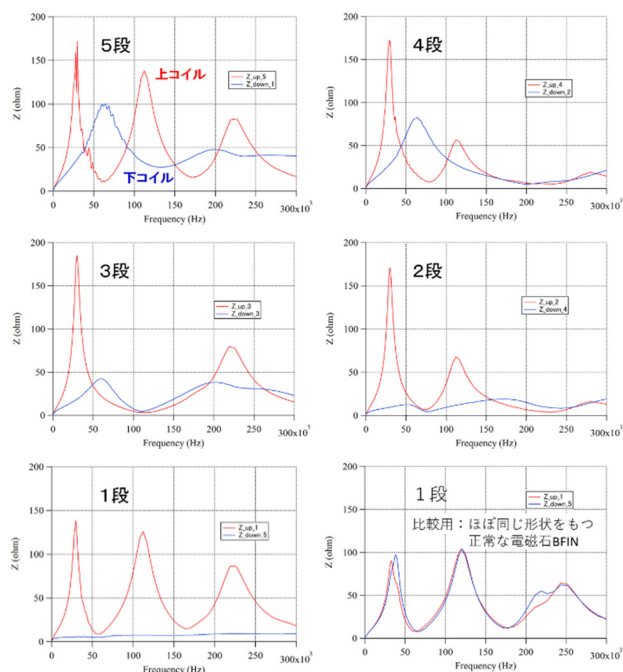


Figure 3: Measured impedances of each coil block.

2.5 大電流通電時の段間電圧測定

インピーダンス測定により明らかに下コイルに不具合があると判断されるものの、小電流による段間電圧測定

では異常箇所の特定にはまったく至らなかった。そこで配線を通常に戻し、ビーム運転時の条件に近い 700~750 A の電流で段間電圧をモニターした。不具合があると分かっているコイルに大電流を流すため、現場は有人監視運転とし、サーモカメラ等で温度をモニターしながらの通電とした。そのため、最長でも 4 時間の連続通電である。結果を Fig. 4 に示す。

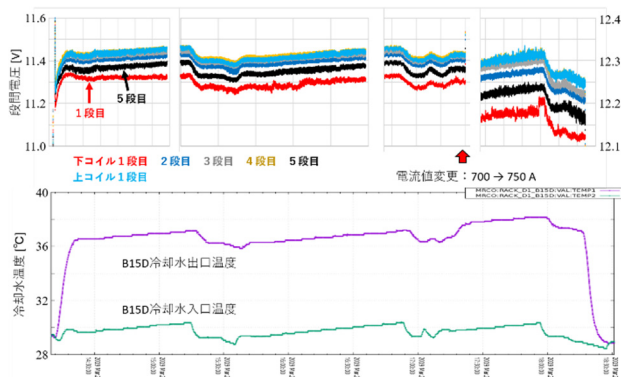


Figure 4: Coil block voltages and water temperature.

全体のうねりは、冷却水温度の変動により負荷状態が変化することによるものである。赤線がもっともヨーク側に近い、一段目の電圧トレンドである。他の段に比べて電圧が低い、各段の個性と呼んで差し支えない程度の差しかない。ただし、振る舞いが若干他と異なっている点は注視すべきである。

2.6 空気圧変化

電磁石コイルが層間短絡を起こす原因の多くは、冷却水漏れである。B15D 偏向電磁石のコイルは一段分のホココン長が 140 m あり、途中をユテクロッド 1804 で継いでいる。今回この部分から水がしみ出し、コイル線間の絶縁不良を起こしたものと推測する。漏水は 3 月 28 日の時点で確認できていなかったが、漏れ箇所の同定のためにコイルの各段に圧力計を取り付け、圧縮空気を 0.5 MPa で封入して圧力変化を測定した。結果を Fig. 5 に示す。

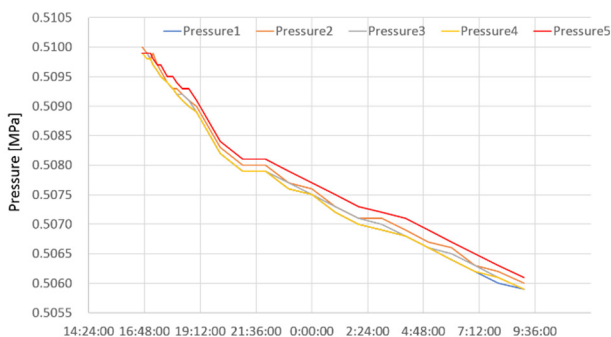


Figure 5: Trend of air pressure in five water circuits.

3 月 28 日 16:30 から翌 29 日 9:00 まで様子を見たが、圧力減少は個々のばらつきの範囲内であり、水漏れ箇所の特定には至らなかった。電磁石本体の外観調査でも水漏れが確認できていないことから、この時点での水漏れはあったとしてもごく僅かであると考えられる。

3. 応急処置とビーム運転再開

3.1 絶縁不良箇所のバイパス

3 月 29 日の時点では、層間短絡の状態はまだ初期症状であると考えられた。通常運転時より 13 % 高い 850 A の電流値で 4 時間の連続通電を行った際も段間電圧の差異はばらつきの範囲内であり、現状のまま運転して様子を見ることも選択肢としてはあったが、議論の結果下コイルの五段目をバイパスし、冷却水の通水も止めることとした。

Fig. 6 にバイパスの様子を示す。下コイル四段目の下層に電極を新たに取り付け、給電部に締結する。五段目の電極は、ループをつくらぬ様、絶縁材により電氣的に切り離れた。

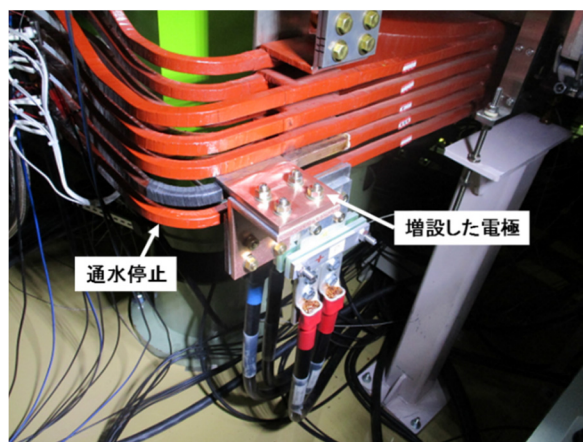


Figure 6: Bypass way of B15D magnet.

3.2 運転状態監視系の整備

ビーム運転を再開するにあたり、現場を無人にした状態での通電の安全を担保するため、通電時のリスク評価と監視体制の整備を行った。B15D 電磁石コイルの層間短絡の様子を Fig. 7 に示す。一層あたりの巻き数は 12 であり、最小で 1 周分、最大で 12 周分のコイルが短絡し、局所的な発熱を起こす。電流値は一定なので、層間絶縁不良が発生すると、電源電圧の低下となって現れる。発熱量が最も大きくなるのは絶縁不良が中途半端に進行したときであり、電圧低下を検知してインターロックをかければ発熱量を抑えることができる。

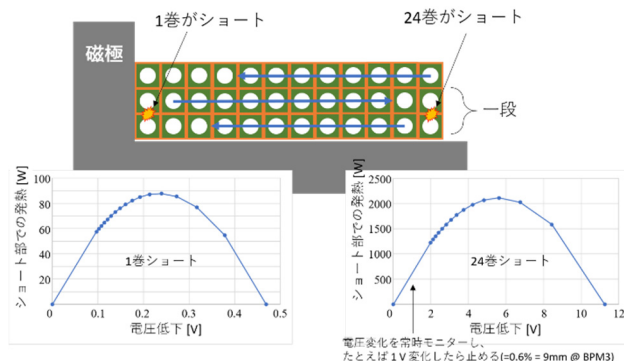


Figure 7: Generated heat estimation at the short point between layers.

B15D 電磁石はコイルの段間電圧を個別に測れるので、下コイル全五段と参考に上コイル一段をメモリハイコーダ Hioki MR8847A で取り込み、MR 制御システムから常時値を読み出してアーカイブする仕組みを構築した。モニタリングと同時に、アラームも設定できる。念のために、ウェブカメラで B15D 電磁石本体とメモリハイコーダの画面も常時中央制御室に表示するようにした。その様子を Fig. 8 に示す。

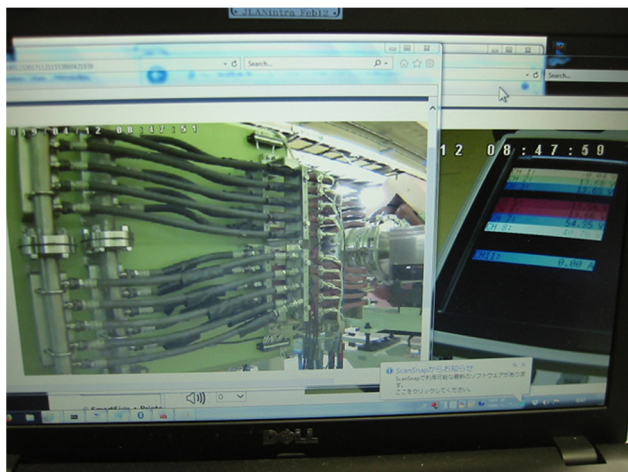


Figure 8: Alert and watching system.

3.3 ビームへの影響

B15D 電磁石は下コイルの 1/5 をバイパスしたので、磁場の多極成分が増加したはずである。この効果を見積もるため磁場計算をおこない、想定される多極成分を取り入れたビームトラッキングシミュレーションでビームエミッタンスの増大を評価した。

Poisson による磁場計算結果を Fig. 9 に、ビームエミッタンスの測定結果を Fig. 10 に示す。ビームエミッタンスの増大は horizontal 方向、vertical 方向ともに rms エミッタンスで 2% 程度と予想された[2]が、4 月 2 日のビームスタディ時の測定により 1 月 23 日に比べて 2σ で horizontal 4 % 程度の増加に留まり、vertical では変化が見られなかった。ハドロン実験へのビーム供給には支障が無いと判断し、4 日からの営業運転再開を目指すこととなった。

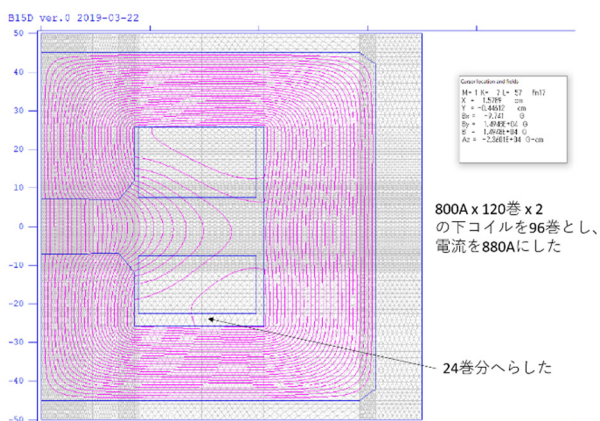


Figure 9: Magnetic field calculation. Scale: [cm].

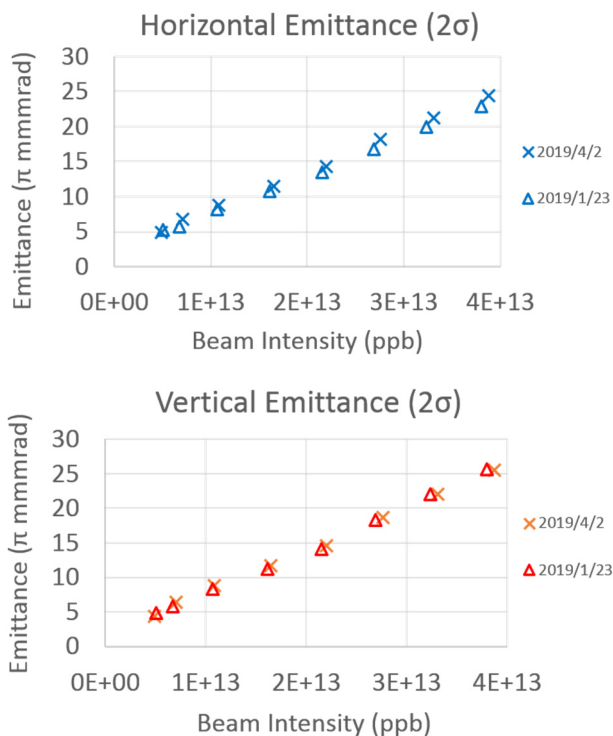


Figure 10: Measured beam emittances. (Multipole effect due to the current bypass on B15D magnet).

4. その後の推移

4.1 ビーム軌道と段間電圧の推移

B15D 電磁石下コイルバイパス後の 3 月 30 日 15:45 頃から試験通電を開始し、ビームの無い状態で 4 月 1 日 09:15 まで連続通電して異常が無いことを確認した。2 日からビーム運転を開始し、ビームスタディの後 4 日 23:30 過ぎにハドロン実験チームにビームを渡している。

当初は順調だったが、4 月 8 日頃からビーム軌道に変動が見られるようになった。Fig. 11 に 4 月 4 日夕方から 22 日昼までの BPM01, 02, 03 のトレンドを示す。4 月 8 日の午前中に MR の QDN 電磁石トラブルでしばらく停止した後、B15D 電磁石上流の BPM01, 02 が安定であるにもかかわらず、BPM03 の軌道のみがふらふら動いて見える。変動幅は ± 0.5 mm 程なのでビーム運転に支障をきたすほどでは無いが、良くない傾向である。絶縁不良を起こした部分を切り離し、通水を止めたにもかかわらず症状が進行しているということで、じつは漏水部は五段目ではなかった可能性が高い。段間電圧を見ると、これまで異常無かった四段目の電圧に変動が見られ、層間絶縁不良が進行していた[3]可能性が高い。

4 月 23 日 06:50 と 07:25 になって、これまでの四段目だけでなく、三段目と四段目が同時に電圧低下するという新しい事態が発生した。電圧低下は 0.1 V 未満という小さなものではあったが、BPM03 における軌道変位は 3 mm を超え、B15D 電磁石での電流調整だけでは対応できないことから、ステアリング電磁石 2 台を使って軌道を戻したが、この時点で 7 月第一週までの運転継続の可能性は、ほぼ無くなったと思われる。

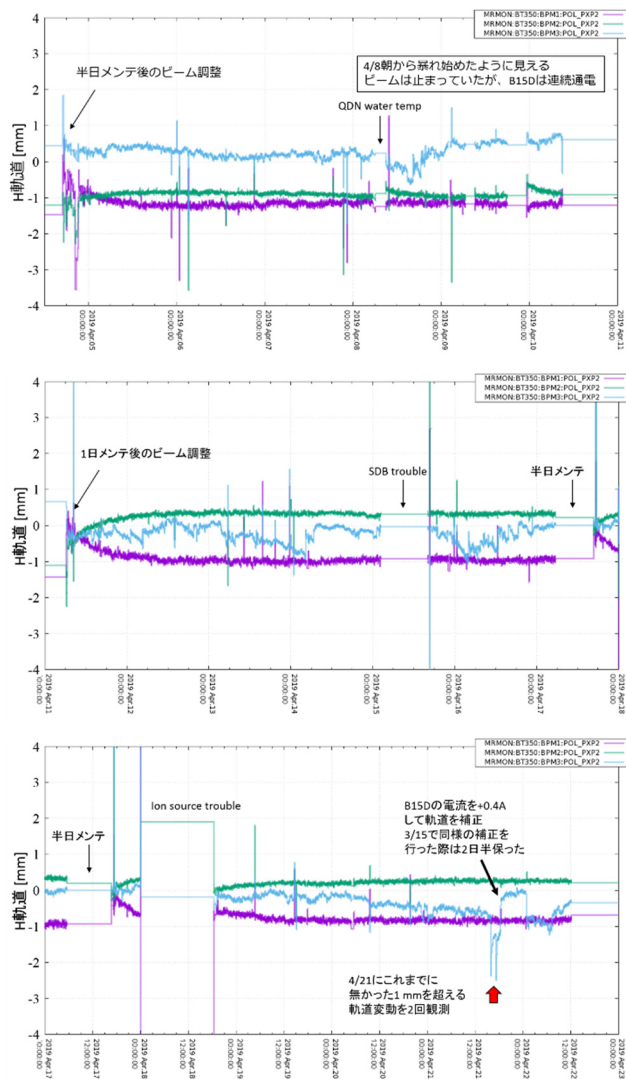


Figure 11: Trend of orbit at BPM01, 02, 03.

4月24日01:04、再び三、四段目の同時電圧低下が起り、1Vを超えて電圧が下がり続けたことから電源を停止、ハドロン実験へのビーム供給も中止とした。

4.2 再度の現地調査

ビーム停止後、翌25日がメンテ日であったため、現場に立ち入りB15D電磁石本体の調査を行った。Figure 12に示す様に、これまでに確認出来なかった漏水跡が確認され、下コイルが濡れていることも判明した。また、インピーダンス測定によっても明らかに下コイルの劣化が確認されたことから、B15D電磁石のこれ以上の運転継続は不可能と判断した。

5. まとめ

2019年3月18日未明、3-50BTラインのB15D偏向電磁石の下コイルで層間の絶縁不良が発生し、ビーム運転が停止した。層間の絶縁不良は僅かであり、インピーダンス測定によってのみ不良箇所の推定が可能であった。層間絶縁不良の原因はコイルからの水漏れであると思われるが、空気による加圧試験では5水路のうち

どこで水漏れしているかの特定は出来なかった。

絶縁不良を起こしたと見られる下コイルの最下段をバイパスし、ビーム利用運転を再開した。水漏れが当該段で起きている可能性が高いので、不具合の進行を止めるために最下段は通水も停止した。

4月4日よりビーム運転を再開したが、層間絶縁不良は第4、3段目まで進行し、4月24日未明でMRはビーム停止した。応急処置による延命は20日間であった。

電磁石コイルの層間絶縁不良は、電磁石の種類によっては症状が軽くてもビーム運転を止めざるを得なくなる。層間絶縁不良に対し、不良箇所の特定に有効な調査方法が種々考案されている[4]が、いまのところ効果的なのはインピーダンス測定のみである。なお、層間絶縁不良を起こした電磁石の監視には、電圧のモニタリングが有効である。

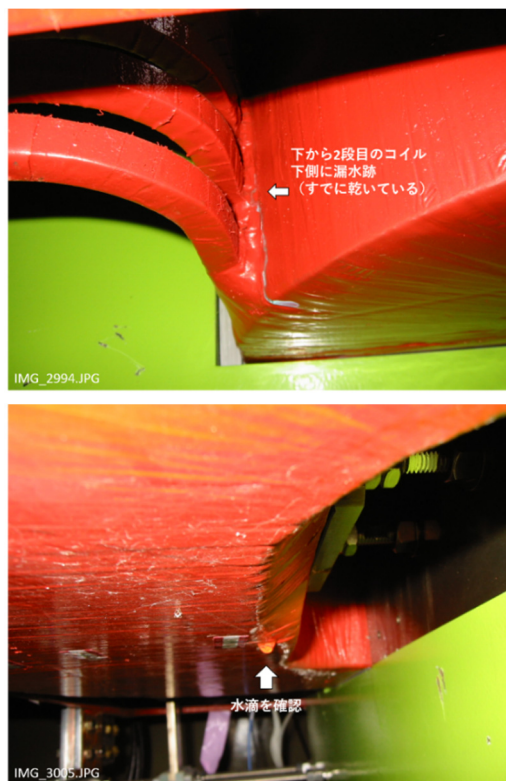


Figure 12: Observed water leak.

謝辞

本調査においては、リニアック、RCSなどから多大なるサポートを頂いた。とくに3NBTグループには、多くの便宜を図っていただきました。ここに感謝します。

参考文献

- [1] Accelerator Technical Design Report for J-PARC, KEK-Report No. 202-13, March 2003.
- [2] M. Tomizawa *et al.*, Proceedings of PASJ16, Kyoto, Japan, July 31-Aug. 3, 2019, WEP1044.
- [3] J. Takano *et al.*, Proceedings of PASJ16, Kyoto, Japan, July 31-Aug. 3, 2019, WEPH037.
- [4] T. Shibata *et al.*, Proceedings of PASJ16, Kyoto, Japan, July 31-Aug. 3, 2019, WEPH029.