

抵抗と磁場分布測定による J-PARC MR 偏向電磁石コイルの層間短絡箇所を 特定する試み

ATTEMPT TO LOCATE A LAYER SHORT IN THE J-PARC MR BENDING MAGNET COIL VIA RESISTANCE AND FIELD MEASUREMENTS

岩田宗磨^{#, A)}, 石井恒次^{A)}, 芝田達伸^{A)}, 湯井良介^{B)}, 發知英明^{A)}, 吉井正人^{A)}, 森田裕一^{A)},
三浦一喜^{A)}, 大越隆夫^{A)}, 松本教之^{A)}, 松本浩^{A)}
Soma Iwata^{#, A)}, Koji Ishii^{A)}, Tatsunobu Shibata^{A)}, Ryosuke Yui^{B)}, Hideaki Hotchi^{A)}, Masahito Yoshii^{A)},
Yuichi Morita^{A)}, Kazuki Miura^{A)}, Takao Oogoe^{A)}, Noriyuki Matsumoto^{A)}, Hiroshi Matsumoto^{A)}
^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
^{B)} NAT Corporation (NAT)

Abstract

In May 2024, a layer short occurred in the bending magnet BM116 of the J-PARC main ring. Accelerator operation was resumed approximately two weeks after the magnet was replaced with a spare. BM116 was restored as a new spare magnet in January 2025 by installing a spare coil. The investigation into the cause of the layer short remains ongoing. Due to the coil's radioactive condition, removal of insulation and any grinding or cutting must be kept to a minimum; consequently, the layer short location must be identified by non-destructive methods. No visible abnormalities were observed, and no local temperature rise due to current flow was detected. The coil has a circumference of approximately 14 m and consists of 5 turns \times 6 layers, each with an independent cooling-water channel. Current can be applied to any individual layer via the cooling-water piping connections. Observation of current flow in layers other than the energized one indicated a short-circuit between the fourth and fifth layers. Subsequently, the combination of layers energized was varied, and for each case the voltage and current for the entire energized section, as well as the current for each individual layer, were measured. Based on these measurements, the resistance between the wiring connection point of the fourth or fifth layer and the layer short location was calculated. The analysis suggested that the layer short was located in the saddle-shaped end-turn section where the hollow conductor for the cooling-water connection emerges. This estimation was made under assumptions; however, magnetic-field measurements on the coil surface showed good agreement with simulations based on those assumptions. Furthermore, a helium leak test conducted near the estimated location detected a leak, lending additional support to the assumptions. This suggests the presence of a hole in the hollow conductor, causing a water leak. The insulation at the relevant location is scheduled to be removed in September 2025 for direct inspection.

1. はじめに

J-PARC 主リング(MR) [1]は周長 1567.5 m のシンクロトロンで、偏向電磁石[2] 96 台、四極電磁石 216 台などで構成されており、ハドロン実験施設(HD)とニュートリノ実験施設へ陽子ビームを供給している。施設の概略を Fig. 1 に示す。

2024 年 5 月 5 日、HD へのビーム供給中に Fig. 1 に示す位置の偏向電磁石 BM116 の出力低下でビームロスが発生し、運転停止となった。BM116 のインピーダンス測定により、BM116 の上側のコイルで層間短絡が発生していることが分かった。BM116 については、予備の偏向電磁石と交換し、5 月 20 日に運転を再開した。BM116 は放射化のため放射線管理区域外への搬出はできず、加速器トンネルに繋がる搬入口に置いた。我々は、層間短絡の原因を調査し、その内容次第では対策を検討する必要がある。コイルを磁極から取り外す前の調査として、ホローコンダクター(ホロコン)からの漏水を疑い、6 月にホロコン内の空気圧を 0.6 MPa とし、気密試験を行った。1 週間経過後の気圧低下は 0.01 MPa 未満で、

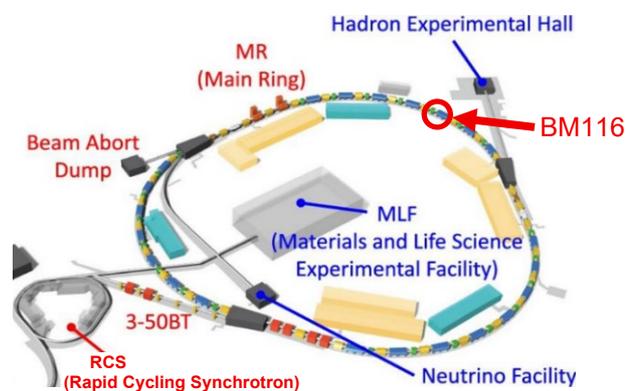


Figure 1: J-PARC MR layout and BM116 location.

コイルからの空気漏れは確認できなかった。但し、ホロコンにはガラス繊維が巻かれ、ポリイミド樹脂で含浸されているため、ホロコンに穴が開いていたとしても、空気が漏れない場合がある。以降の調査はコイルの取り外しを待つこととなった。2025 年 1 月に予備のコイルと交換し、BM116 は新たな予備機として復旧した。偏向電磁石の外観と取り外した上コイルを Fig. 2 に示す。取り外した上

[#] soma.iwata@kek.jp

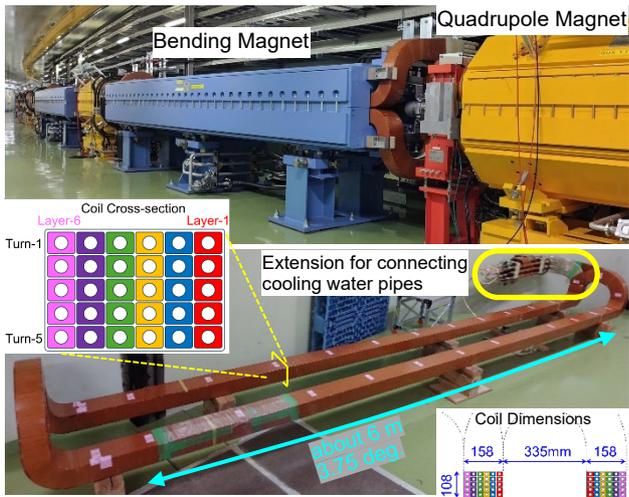


Figure 2: Bending magnet appearance and coil.

コイルの外観に異常はなく、層間短絡はコイル内部で発生していることが分かった。さらに、2月に最大 DC 300 A、10 分程度の冷却水なしの通電を行い、コイル表面に局所的な温度上昇がないか調査したが確認されず、短絡箇所は特定できなかった。2025 年の夏季メンテナンス期間中、コイルを覆っている絶縁層の剥離、状況次第ではコイル切断も行い、調査する方針であるが、コイル周長は約 14 m と大きく、全体の絶縁層剥離は困難である。また、放射化物の破砕粉が出る作業であることから、剥離範囲及び切断回数は最小限にしたい。そのために非破壊の試験で、層間短絡箇所の特定が必要である。コイルに通電することで得られる電気抵抗や表面の磁場分布の情報から、短絡箇所を推定することができたので以下に報告する。

2. 短絡している層の特定

コイルは 5 ターン×6 層の合計 30 ターンで、上から下に Turn-1 から Turn-5、中心から外側に Layer-1 から

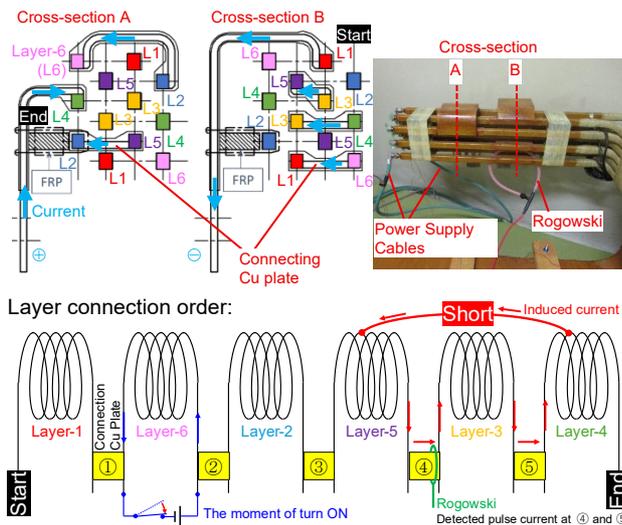


Figure 3: Cross-sections of the emerged hollow conductors for cooling-water piping and layer connection order.

Layer-6 とする。1 層ごとに冷却水流路を持ち、Turn-1 と Turn-5 がコイルの外に引き出される。これを引き出し口と呼んでいる。Layer-1 の Turn-1 のホロコンがコイルから引き出され、分岐する箇所をコイル巻きの始点と定め、以降の各層各ターンの始まりも始点に重なる点とする。引き出し口には、冷却水配管接続部までの途中に、層間の電流受け渡しをする銅板がロウ付けされている。これを渡り導体と呼ぶ。コイル断面を Fig. 2 に、引き出し口の渡り導体の配置と各層の接続順を Fig. 3 に示す。渡り導体による層の接続順はコイルの巻き順通りではないので、注意が必要である。短絡は巻き順で隣接する層間で生じるが、回路上は接続順の離れた層と短絡していることがある。

2.1 コイル層間の渡り導体の誘導電流調査

まずはどの層が異常なのか把握する必要がある。層ごとに通電するように配線し、通電開始の瞬間、通電層が発生させる磁場で、通電対象外の層には誘導起電力が生じる。短絡が無ければ、コイル端部は開放されているので、電流は流れない。短絡があれば該当層間でループができ、誘導電流が流れる。短絡している層に直接通電した場合は、当然、短絡先の層にも電流が流れる。層間を繋いでいる渡り導体にログスキーコイルを設置 (Fig. 3) し、電源 ON の瞬間の電流変動の有無を調査した。結果を Table 1 に示す。Layer-5 と Layer-3 間(④)、Layer-3 と Layer-4 間(⑤)で電流変動が検出され、Layer-4 と Layer-5 間の短絡が明らかになった。この試験では Layer-3 と Layer-4 間の短絡は判断できないが、Layer-3、4、5 通電時において、いずれの場合も Layer-3 の入出力 (渡り導体は含まない範囲) で電流値に差がなかったことから、Layer-3 の短絡は無いと判断した。

Table 1: Current Fluctuation Survey Results

Energized Layer	Connection Cu Plate No. (See Fig. 3)				
	①	②	③	④	⑤
Layer-1	×	×	×	Detect	Detect
Layer-2	×	×	×	Detect	Detect
Layer-3	×	×	×	Detect	Detect
Layer-4	×	×	×	Detect	Detect
Layer-5	×	×	×	Detect	Detect
Layer-6	×	×	×	Detect	Detect

2.2 短絡箇所とその前後の抵抗値算出

前述の試験で、短絡した層は分かったが、どの位置かは分からない。短絡箇所までの抵抗値を求めることで、相当するホロコンの長さから位置が推定できると考えた。Figure 4 に示す 6 通りの通電パターンで、回路全体の印加電圧 V_{total} と電流 I_{total} 、Layer-3 に流れる電流 I_{L3} をそれぞれ計測し、 R_{L1L} , R_{L4H} , R_{L5L} , R_{L5H} , R_x を計算で求める。いずれの通電パターンでも通常の経路と短絡した経路で並列回路ができる。それぞれの電流を I_{normal} , I_{short} とすると、 $I_{total} = I_{normal} + I_{short}$

$$P1, P2, P4, P5 \text{ の場合: } I_{L3} = I_{normal}$$

$$P3, P6 \text{ の場合: } I_{L3} = I_{short}$$

それぞれの経路の両端の電位差が等しくなることから、式(1)~(6)が得られる。加えて、回路全体の合成抵抗は

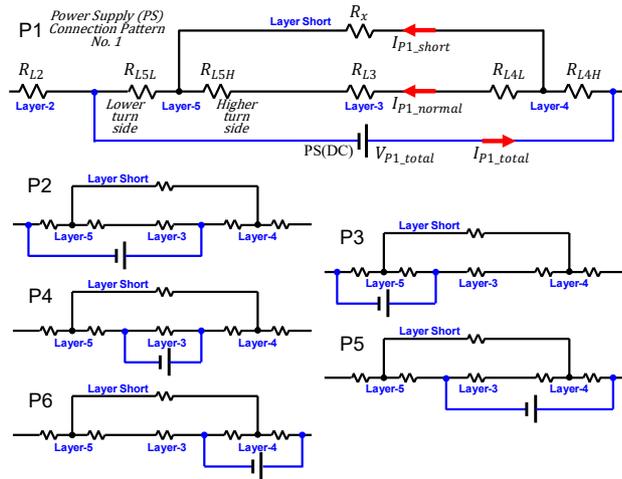


Figure 4: Power supply connection pattern.

V_{total} / I_{total} となるので、式(7)~(12)も得られる。
[並列回路の条件]
パターン

$$P1: I_{P1_short} R_x = I_{P1_normal} (R_{L5H} + R_{L3} + R_{L4L}) \quad (1)$$

$$P2: I_{P2_short} (R_x + R_{L4L}) = I_{P2_normal} (R_{L5H} + R_{L3}) \quad (2)$$

$$P3: I_{P3_short} (R_x + R_{L4L} + R_{L3}) = I_{P3_normal} R_{L5H} \quad (3)$$

$$P4: I_{P4_short} (R_{L5H} + R_x + R_{L4L}) = I_{P4_normal} R_{L3} \quad (4)$$

$$P5: I_{P5_short} (R_{L5H} + R_x) = I_{P5_normal} (R_{L3} + R_{L4L}) \quad (5)$$

$$P6: I_{P6_short} (R_{L3} + R_{L5H} + R_x) = I_{P6_normal} R_{L4L} \quad (6)$$

[回路全体の抵抗]

$$P1: R_{L5L} + \frac{R_x (R_{L5H} + R_{L3} + R_{L4L})}{R_{L5H} + R_{L3} + R_{L4L} + R_x} + R_{L4b} = \frac{V_{P1_total}}{I_{P1_total}} \quad (7)$$

$$P2: R_{L5L} + \frac{(R_x + R_{L4L})(R_{L5H} + R_{L3})}{R_{L5H} + R_{L3} + R_{L4L} + R_x} = \frac{V_{P2_total}}{I_{P2_total}} \quad (8)$$

$$P3: R_{L5L} + \frac{R_{L5H} (R_x + R_{L3} + R_{L4L})}{R_{L5H} + R_{L3} + R_{L4L} + R_x} = \frac{V_{P3_total}}{I_{P3_total}} \quad (9)$$

$$P4: \frac{R_{L3} (R_{L5H} + R_x + R_{L4L})}{R_{L5H} + R_{L3} + R_{L4L} + R_x} = \frac{V_{P4_total}}{I_{P4_total}} \quad (10)$$

$$P5: \frac{(R_{L5H} + R_x) (R_{L3} + R_{L4L})}{R_{L5H} + R_{L3} + R_{L4L} + R_x} + R_{L4H} = \frac{V_{P5_total}}{I_{P5_total}} \quad (11)$$

$$P6: \frac{R_{L4L} (R_x + R_{L5H} + R_{L3})}{R_{L5H} + R_{L3} + R_{L4L} + R_x} + R_{L4H} = \frac{V_{P6_total}}{I_{P6_total}} \quad (12)$$

これらの連立方程式を解くと、理想的な測定であれば、一意に各部の抵抗値が得られる。実際は各通電パターンで異なる測定誤差を持つので、各式の左辺と右辺は一致しない。そこで、Microsoft® Excel®のソルバー機能[3]を使って誤差の最小化を行った。各式の左辺と右辺の差の二乗和が最小となる抵抗値を求めた。各部抵抗の初期値は式(1)~(12)の一部を解いた値を使った。ソルバー機能は極小値があると計算が止まる。他にも極小値がある可能性があるため、初期値を変えてみたが、最適値は1つに収束し、以下ようになった。

$$R_{L4L} = 1.051 \text{ m}\Omega, \quad R_{L4H} = 2.222 \text{ m}\Omega$$

$$R_{L5L} = 0.892 \text{ m}\Omega, \quad R_{L5H} = 2.655 \text{ m}\Omega$$

$$R_x = 0.379 \text{ m}\Omega$$

2.3 抵抗値算出の誤差の評価

得られた各抵抗値より式(1)~(12)の左辺と右辺の相対差(絶対値)の平均は 1.5%だった。 V_{L3} , I_{L3} の測定(I_{L3} : 約 30 A)から得られる R_{L3} は 5 回の試行で $3.633 \text{ m}\Omega \pm 1.5\%$ (σ) であり、同じ測定方法で得た電圧/電流値から算出しているので妥当なずれと言える。

尚、ホロコン断面積(測定誤差 $\pm 0.5\%$)および長さ(推定される測定誤差 $\pm 1\%$ 程度)、コイル表面温度(体積抵抗率に換算した誤差 $\pm 0.4\%$)の測定から得られる R_{L3} は $3.622 \text{ m}\Omega \pm 1.1\%$ で、電流/電圧測定で得られた R_{L3} とよく一致している。各層、各ターンのホロコンの抵抗についても同等の誤差を持つ。

次に、電圧/電流測定の誤差を評価する。電圧測定にはデジタルマルチメータ(nfDM2561A)を用いた。電源出力は 204 A 定電流モードで、電圧出力は通電パターンごとに異なり 0.5~1 V 程度だった。測定の再現性は 0.1 mV 程度で無視できるが、ドリフトによる影響の方が大きかった。コイルの温度が安定するまで 20~30 分かかるので、その後測定するようにしているが、それでも 10 分程度で 1 mV 変動することがあった。影響は 0.1%程度と見込まれるが、抵抗値算出の誤差に比べると十分小さい。一方、電流測定にはクランプメータ(FLUKE 337)を用いた。測定の再現性は ± 0.5 A 程度で、抵抗算出の 1.5%の誤差を説明できるほど大きくない。しかし、コイルや周辺のホロコンが作る磁場で、測定値がオフセットしているようだ。コイル通電時は、なにもクランプしてなくてもコイル周辺での測定表示値が 0 ± 1 A の範囲で変動する。Layer-3 の電流測定は引き出し口で行うが、他層のホロコンが近接しており、P1~P6 によって各ホロコンの電流の大きさと向きが異なるので、それらの磁場の影響を評価するのは難しい。この影響は測定電流の大きさに依存しないので、小さい電流を測定するときに問題となる。ここで、得られた R_{L4L} , R_{L4H} , R_{L5L} , R_{L5H} , R_x と P1~P6 における V_{total} から、各層に流れる電流を逆算し、実測電流と比較してみた。ずれが最大だったのは P1 における I_{P1_normal} で実測 10.8 A に対し、計算は 10.1 A (-6.5%) だった。オフセットは ± 1 A 程度と推定でき、再現性と合わせると、抵抗値算出の誤差相当になり、電流測定の誤差が支配的であることがわかった。

式(1)~(12)の実測電流値を ± 1 A 変化させて、誤差の最小化をやり直すと、 R_{L4L} , R_{L4H} , R_{L5L} , R_{L5H} , R_x の値は、最大で 2%ほど変動することが分かった。よって、各抵抗値の精度は $\pm 2\%$ 程度と言える。

2.4 抵抗値算出結果の評価

得られた各抵抗値について考察した。まず、 R_{L4L} と R_{L4H} の和、 R_{L5L} と R_{L5H} の和がいずれも Layer-4, Layer-5 の合計抵抗 R_{L4_Total} , R_{L5_Total} よりも有意に小さいことから、複数のターンで短絡が起きていると言える。

$$R_{L4L} + R_{L4H} < R_{L4_total} = 3.685 \text{ m}\Omega \quad (13)$$

$$R_{L5L} + R_{L5H} < R_{L5_total} = 3.716 \text{ m}\Omega \quad (14)$$

一方で外観に異常がなく、通電時の局所温度上昇も見られないことから、Turn-1, Turn-5 での短絡はないと予想される。その上で R_{L4L} , R_{L4H} , R_{L5L} , R_{L5H} と各ターンの抵抗値(例えば Layer-4 の Turn-1 の抵抗を R_{L4T1} とする)を比

較すると、

$$R_{L4T1} < R_{L4L} < R_{L4T1} + R_{L4T2} \quad (15)$$

$$R_{L4T4} + R_{L4T5} < R_{L4H} \simeq R_{L4T3} + R_{L4T4} + R_{L4T5} \quad (16)$$

$$R_{L5T1} < R_{L5L} < R_{L5T1} + R_{L5T2} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} &R_{L5T3} + R_{L5T4} + R_{L5T5} \\ &< R_{L5H} < R_{L5T2} + R_{L5T3} + R_{L5T4} + R_{L5T5} \end{aligned} \quad (18)$$

となっていたことから、短絡の1点目はTurn-2の途中、2点目はTurn-3の途中にあると考えるのが妥当である。短絡箇所的位置は、短絡発生が突然であったことから、コイルの複数の場所に分散しているとは考えにくいので、1か所に集中していると考え、短絡1点目と2点目はちょうど1ターン差ということになる。この仮定に沿うようにFig. 4の回路図を見直す。短絡点はY型となっているが、これをデルタ・スター変換でΔ型にし、Fig. 5の回路図を得る。短絡1点目と2点目間のホロコンの抵抗 R_{L4S} 、 R_{L5S} は、1ターン差であることから、

$$R_{L4S} = R_{L4T2} + \delta_{L4}, \quad R_{L5S} = R_{L5T2} + \delta_{L5}$$

で得られる。ここで δ_{L4} 、 δ_{L5} はTurn-2とTurn-3のホロコン曲げ半径の違いによる抵抗の差の補正項であるが、影響は小さいので、最初は共に0として仮の短絡位置を求める。次にその位置までのホロコンの曲げ回数に応じて δ_{L4} 、 δ_{L5} を求め、再度短絡位置を計算し直した。

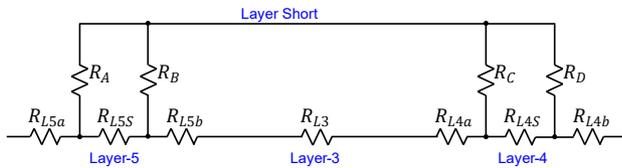


Figure 5: Circuit reflecting the assumed layer short configuration.

短絡経路の合成抵抗 R_x は、 R_A 、 R_B 、 R_C 、 R_D から構成されるものとした。 R_{L4L} 、 R_{L4H} 、 R_{L5L} 、 R_{L5H} もデルタ・スター変換でそれぞれが分割されることになる。Δ型に含まれない成分を R_{L4a} 、 R_{L4b} 、 R_{L5a} 、 R_{L5b} とした。これらの合成抵抗は、元のY型の抵抗の構成に一致しなければならないので、式(19)~(23)を得る。

$$\frac{R_A R_B}{R_A + R_{L5S} + R_B} + \frac{R_C R_D}{R_C + R_{L4S} + R_D} = R_x \quad (19)$$

$$\frac{R_A R_{L5S}}{R_A + R_{L5S} + R_B} = R_{L5L} - R_{L5a} \quad (20)$$

$$\frac{R_{L5S} R_B}{R_A + R_{L5S} + R_B} = R_{L5H} - R_{L5b} \quad (21)$$

$$\frac{R_C R_{L4S}}{R_C + R_{L4S} + R_D} = R_{L4L} - R_{L4a} \quad (22)$$

$$\frac{R_{L4S} R_D}{R_C + R_{L4S} + R_D} = R_{L4H} - R_{L4b} \quad (23)$$

次にLayer-4, 5の全体の抵抗は、式(24), (25)で表せなければならない。

$$R_{L5a} + R_{L5S} + R_{L5b} = R_{L5_total} \quad (24)$$

$$R_{L4a} + R_{L4S} + R_{L4b} = R_{L4_total} \quad (25)$$

加えて、短絡点と同じ位置という条件から、式(26), (27)も得られる。 δ_1 、 δ_2 はLayer-4とLayer-5のホロコン

曲げ半径の違いによる抵抗の差の補正項である。

$$R_{L5a} - R_{L5T1} = R_{L4a} - R_{L4T1} + \delta_1 \quad (26)$$

$$R_{L5b} - R_{L5T4} - R_{L5T5} = R_{L4b} - R_{L4T4} - R_{L4T5} + \delta_2 \quad (27)$$

式(21)~(23)の右辺について、 R_{L4a} 、 R_{L4b} 、 R_{L5b} を式(24)~(27)から R_{L5a} の関数に置き換え、 R_A 、 R_B 、 R_C 、 R_D それぞれを R_{L5a} の関数で表す。それらを式(19)に代入すると、 R_{L5a} の二次方程式が得られるが、実数解はなかった。極小値となる R_{L5a} (0.709 mΩ)のとき、式(19)の左辺、右辺の差は0.048 mΩで、 R_x の誤差の範囲とは言えないが、全く外れた結果でもない。Excel®のソルバー機能で、最適解を探してみた。この時の初期値は極小値となる R_{L5a} を使って得た R_{L4a} 、 R_{L4b} 、 R_{L5b} 、 R_A 、 R_B 、 R_C 、 R_D とした。収束は1点に限られたが、短絡1点目はTurn-1の途中、2点目はTurn-2の途中を示し、 R_D は負の値(-0.116 mΩ)で、有効なものではなかった。つまり、Fig. 5の回路ではないということになる。

2.5 抵抗値算出結果の評価

短絡位置を得るはずの計算で解がなかったが、各部抵抗値のおよその傾向から、Fig. 5の回路を見直すことにした。

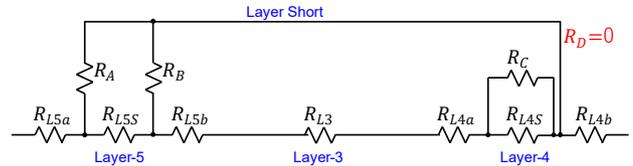


Figure 6: Modified circuit of Fig. 5.

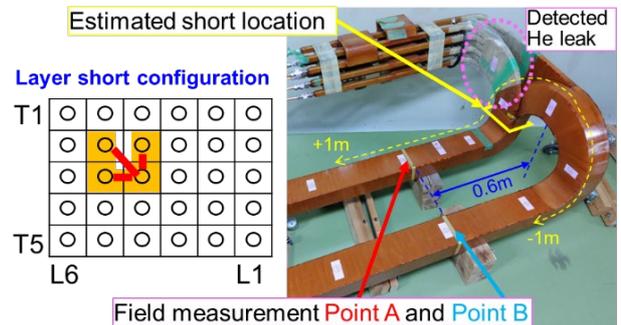


Figure 7: Estimated layer short location and cross-section.

まず、 R_{L4b} 、 R_{L5b} に注目した。Turn-3, 4, 5の抵抗の和よりも小さい必要があるが、それぞれ2.8%、2.9%大きい。推定している精度より大きい、あり得る範囲である。ここで R_{L4H} もTurn-3, 4, 5の抵抗の和にほぼ等しい(相対差0.2%)ので、

$$\begin{aligned} R_{L4b} (2.290 \text{ m}\Omega) &\simeq R_{L4T3} + R_{L4T4} + R_{L4T5} (2.227 \text{ m}\Omega) \\ &\simeq R_{L4H} (2.222 \text{ m}\Omega) \end{aligned}$$

加えて、式(18)に示すように R_{L5H} が大きいので、Turn-3に短絡2点目があるとすると R_B が大きくなければならないが、 R_x の制約、 R_{L5a} と R_{L5L} の兼ね合いから限界があり、2点目は極力Turn-2側に近くなくてはならない。以上より、短絡2点目はTurn-2とTurn-3の境目にあると考えるのが妥当で、 $R_{L4b} = R_{L4H}$ 、 $R_D = 0$ となる。この条件に沿う

回路図を Fig. 6 に、短絡箇所断面と推定位置を Fig. 7 に示す。この仮定は、直接短絡位置を決定してしまっているが、根拠となる R_{LH} の精度が $\pm 2\%$ と見積もられているので、推定短絡位置の精度は ± 1 m 程度と言える。

3. 短絡位置推定結果の検証

前述の通り、短絡位置は計算によらず、抵抗値の組み合わせから推定したため、どの程度信頼できるのか不明である。裏付けのため、以下の 2 つの手法で検証した。

3.1 コイル表面の磁場分布測定による検証

短絡位置推定条件における各層、各ターンの電流を計算し、それぞれが作る磁場から、コイル表面の磁場分布を計算した。これをコイル表面の磁場分布実測データと比較し、短絡状況の仮定が正しいか確認した。

短絡状況の仮定においては、Fig. 6 以外の可能性がないか調査している。その中で、Fig. 8 に示すように、Turn-2,3,4 の 3 点で短絡するパターンも計算上は解がある。この時の磁場分布も併せて比較する。

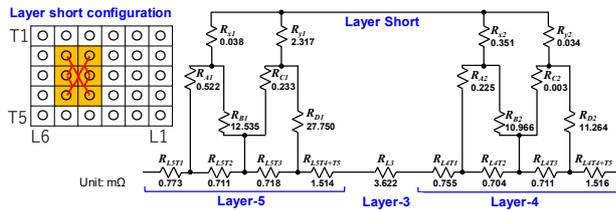


Figure 8: Three-point short pattern with Turn-2, -3 and -4.

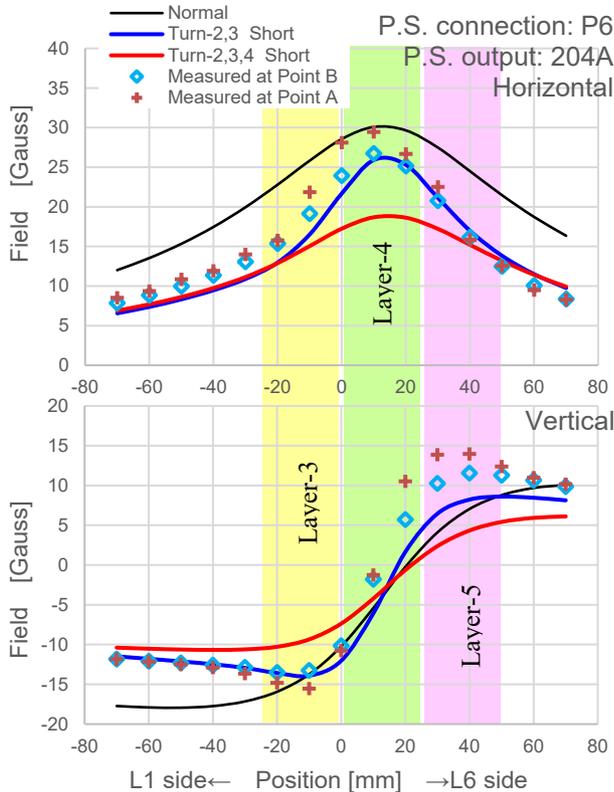


Figure 9: Simulated and measured field of the coil surface.

磁場分布の測定は、Fig. 7 右の写真に示す Point A, B の 2 か所で行い、プローブ(ホール素子)はコイル上面を横断方向に 10 mm ステップで動かした。取得データはコイル横断方向の水平成分と垂直成分である。

結果を Fig. 9 に示す。実測データに最も近いのは、Fig. 6 の条件で計算した磁場分布(青線)だった。Figure 8 のような短絡(赤線)ではないと言える。尚、Fig. 6 の分布と実測データとは完全に一致していない。Point A, B はコイル端部の折り返し部分から 0.6 m 離れているが、折り返し部分や引き出し口が作る磁場が計算には反映されていない。その影響は大きくても 2~3 Gauss 程度と見積もられるが、全体的なずれとなるので、Layer-4, 5 の周りで大きくなるずれを説明できない。これは短絡状況に起因するずれと思われる。Figure 6 の抵抗の構成は、短絡部分の詳細な状況を反映したものではなく、経路の合成抵抗を示したに過ぎない。そのため、短絡部分が複雑な経路を持つとすると、短絡 2 点間に挟まれた Turn-2 の電流は、計算とは異なっている可能性がある。この違いを見積もることは難しいが、合成抵抗 R_A , R_B , R_C は一致しなければならないので、電流が極端に違うことは考えにくい。しかし、Turn-2 は磁場測定面に近いので影響は大きく、範囲も Layer-4, 5 に限られるので、実測とのずれの原因の一つと思われる。これは Fig. 6 の条件を覆すような問題ではないので、Turn-2, 3 の各始点で短絡しているという仮定は正しいと考えられる。

3.2 He リーク試験による検証

推定された短絡箇所付近について、引き出し口の立ち上がり途中に、ホロコンをロウ付けで継いでいる箇所がある。施工不良などで漏水が発生しやすい箇所である。漏水の可能性は層間短絡発生当初より疑っており、微小な漏れを検知できるよう、2025 年 7 月に He リーク試験を実施した。ホロコン内に He ガスを充填し、Turn-1 側の引き出し口のホロコン継ぎ目付近をビニールシートで覆い、スニファープローブを挿入した。結果、Fig. 7 右の写真に示す場所で He リークが検出された。引き出し口で漏れた水は、ホロコンと絶縁膜の間を浸透し、コイル側に到達、Turn-1 と Turn-2 が重なる、あるいは隣接する層と密接するところの絶縁膜にも浸透し、層間短絡が発生したと考えられそうである。推定した短絡位置は、その引き出し口がコイルに合流する箇所であるので、これを強く裏付ける。

4. まとめと今後の予定

BM116 の上コイルで層間短絡が発生した。原因調査では、放射化物であるため、破碎粉・切削粉の出る作業を最小限にしたい。コイルの周長は約 14 m と大きいので、短絡箇所を特定することが求められ、短絡箇所までのホロコン抵抗値から位置を推定することにした。その結果、Turn-1, 2 の境目と Turn-2, 3 の境目の 2 点で、1 つの場所に集中していると推定された。しかし、短絡状況を仮定した上での推定なので、検証を行った。コイル表面の磁場分布を測定したところ、それらの仮定をもとにシミュレーションした分布と概ね一致した。加えて、He リーク試験も実施し、推定場所付近でのリークが確認された。よって、短絡位置の推定は信頼できると判断した。2025 年 9 月に短絡推定箇所の絶縁被覆を剥がし、短絡箇所の目

視確認を目指す。

謝辞

BM116 コイルの短絡箇所調査は、株式会社 NAT の木村氏、佐藤氏、吉浦氏にサポートいただいた。

参考文献

[1] Y. Sato, H. Hotchi, “J-PARC 主リングにおける FX 830 kW, SX 90 kW の利用運転達成と今後の展望”, Proc. 22nd

- Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2025), Tokyo, Japan, Aug. 2025, FRO603.
- [2] K. Niki *et al.*, “J-PARC 50GeV-MR 電磁石とその製作状況について”, Proceedings of the 14th Symposium on Accelerator Science and Technology, Tsukuba, Japan, Nov. 2003, pp.81-83.
https://www.pasj.jp/web_publish/sast2003/2CB-1.pdf
- [3] <https://support.microsoft.com/en-us/office/define-and-solve-a-problem-by-using-solver-5d1a388f-079d-43ac-a7eb-f63e45925040>