

電磁石コイルのインピーダンス測定による健全性評価の検討 EVALUATION OF THE INTEGRITY OF ELECTROMAGNET COILS BY IMPEDANCE MEASUREMENT

門脇琴美^{*,A)}, 白形政司^{A)}, 高野淳平^{A)}

Kotomi Kadowaki^{*,A)}, Masashi Shirakata^{A)}, Junpei Takano^{A)}

^{A)} KEK/J-PARC

Abstract

At J-PARC, breakdown of bending magnet in 3-50 beam transport line (3-50BT) caused more than 2 months beam stop. This trouble was caused by water leak from coil of the magnet. In 3-50BT, there are some magnets of the same type as the breakdown one. It is important to evaluate the integrity of the electromagnets for stable beam operation. From previous results, it was shown that the integrity of electromagnet can be evaluated by impedance measurement for its coils. However, there are some problems for measurement. At first, some magnets have difficulty to approach. Second, it takes time for enter accelerator tunnel if beam is operated. To solve these problems, indirect impedance measurement via a power supply cable was conducted. We compared the results of indirect measurement and direct measurement to check whether indirect measurement could be used for evaluation of magnets. As a result, it showed that the indirect measurement was effective and it can detect short circuit of the coil. In annual impedance measurement, the results were not changed for 2 or 3 years. It indicates that this data can used for years as reference data for evaluation of magnets integrity.

1. はじめに

J-PARC には LINAC、Rapid Cycling Synchrotron (RCS)、Main Ring (MR) の 3 つの加速器が設置されており、RCS と MR を繋ぐビーム輸送路は 3-50 beam transport line (3-50BT) と呼ばれている。3-50BT には振り分け電磁石 1 台、偏向電磁石 5 台、四極電磁石 38 台、ステアリング電磁石 16 台が設置されている [1]。これらの電磁石には、地上にある MR 第一電源棟 (D1) から約 450m の電力ケーブルを通して電力を供給している。電力ケーブルのサイズは消費電力に合わせて 150, 325, 400 sq としている。Figure 1 に 3-50BT および D1 の位置を示す。

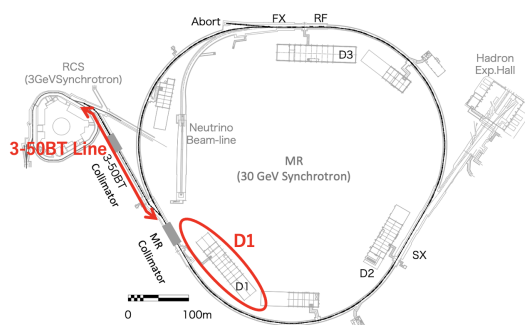


Figure 1: Location of 3-50BT and D1.

2019 年、3-50BT に設置されている偏向電磁石 B15D がコイルからの漏水により故障し、ビーム運転が停止した [2-5]。応急処置や修理等の対応がとられたが、ビーム停止期間は 2 ヶ月以上となった。3-50BT には漏水を起こした電磁石と同様の設計の電

磁石が複数設置されており、今後同様の故障が起こることが懸念されている。

故障した B15D について調査を行った結果、コイル内部にあるホローコンダクターの継ぎ目からの漏水が故障の原因であることが分かった。外観検査や各種測定など様々な調査が行われたが、正常な状態からの変化を捉えるために最も有用な手法なのはコイルのインピーダンス測定であった。故障したコイルでは正常なコイルと比較して共振周波数が大きくなり、インピーダンスが小さくなっていた。この波形の変化は明確であり、インピーダンス測定が電磁石の健全性評価に有効であることが示された [2-5]。

電磁石の健全性を確認するため、現在は 3-50BT 全ての電磁石について定期的にコイルのインピーダンス測定を行っている。しかし、場所によっては直接測定が困難な電磁石があること、また電磁石の台数が多いため測定には最低数日かかる点が課題となっている。さらに、電磁石の不具合調査のための測定を行う場合、加速器トンネル内に入域できるまで時間がかかることも課題である。これらの課題に対応するため、D1 に設置されている各電磁石用の電源から電力ケーブルを通してコイルのインピーダンスを測定することについて検討した。D1 は地上部にあるため加速器トンネル内に入域する必要がなく、さらに各電磁石電源からのケーブルが 1 箇所に集約されているため効率的に測定を行うことができる。本発表では、加速器トンネル内で行った直接測定と電力ケーブルを通した間接測定の比較結果について報告する。

2. 測定方法

電磁石のコイルのインピーダンス測定は、加速器トンネル内で直接コイルに測定端子を接続する直接測定と、D1 から電力ケーブルを介して行う間接測定の 2 つの方法で行った。測定方法の概要を Fig. 2 に

* kadowaki@post.kek.jp

示す。各電磁石には複数のコイルが設置されており、その数は偏向電磁石およびステアリング電磁石が2つ、四極電磁石が4つである。これらのコイルは通常全て接続されている。特に断りがない場合、以降の測定結果はコイル全体をまとめて測定したものである。測定は全ての偏向電磁石および四極電磁石について、2019年から2022年にかけて行った。

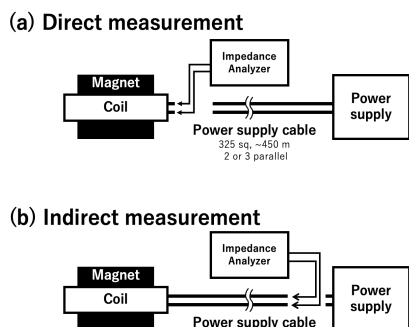


Figure 2: Configuration of impedance measurement.

直接測定では、電磁石に繋がっている電力供給用のケーブルを切り離して測定を行った。直接測定では電磁石のコイル全体の測定だけでなく、コイル毎の測定も行うことができる。各コイルの健全性評価を個別に行うことができるのが直接測定の利点である。ただし前章で述べた通り欠点もあり、遮蔽体の中に設置されている四極電磁石7台については測定を行わなかった。

間接測定では、電磁石に電力を供給している電力ケーブルを介して測定を行った。電源側からの測定であるため、遮蔽体の中にある四極電磁石も測定することができる。ただし、1つの電源で複数の電磁石に電力を供給している場合はそれらの電磁石をまとめて測定することになる。電磁石と電源の一覧をTable 1に示す。

Table 1: Power supply system of electromagnets. The star (*) shows the magnet that could not measure by direct measurement.

	BVD1, BVD2, B15U, B15D, BFIN
Single load	QDE1, QDE2, QFE1, QFE2,
power supply	QDA1, QDA2, QFA1, QFA2,
	QDB1*, QDB2, QFB1, QFB2,
	QFC1, QFC2, QDC1,
	QDI1, QDI2, QDI3, QDI4,
	QFI1, QFI2, QFI3, QFI4,
Serial loads	QDS (QDS1*, QDS2*, QDS3*)
power supply	QFS (QFS1*, QFS2*, QFS3*)
	QDT (QDT1, QDT2, QDT3, QDT4, QDT5)
	QFT (QFT1, QFT2, QFT3, QFT4)

測定にはインピーダンスアナライザー (IM3570, HIOKI E.E. CORPORATION, Japan.) を用いた。測定範

囲は 400 kHz から 1 MHz である。

3. 結果と考察

3.1 直接測定と間接測定の比較

Figure 3 に偏向電磁石および四極電磁石のインピーダンス測定の結果を示す。上段が直接測定、下段が間接測定の結果である。間接測定では直接測定に比べて共振周波数 f およびピークにおけるインピーダンスの値 Z が小さくなっていた。四極電磁石を含む全ての電磁石で同様の傾向が見られた。直接測定では同型の電磁石グループではほぼおなじ周波数特性をもっていたが、間接測定では同型の電磁石グループでもばらつきがあった。例として、QDA, QFA, QDI, QFI の 12 台の電磁石グループでは直接測定で $f=102.2$ (2.6) kHz, 間接測定で $f=17.3$ (5.2) kHz となり、間接測定の方がばらつきが大きい。このばらつきは電力ケーブルの長さの違いが影響していると考えられる。間接測定では電力ケーブルが長いほど f は小さくなっていると推察したが、電力ケーブルの詳細な長さが分からなかったため、電力ケーブルとの関係を定量的に評価することは出来なかった。

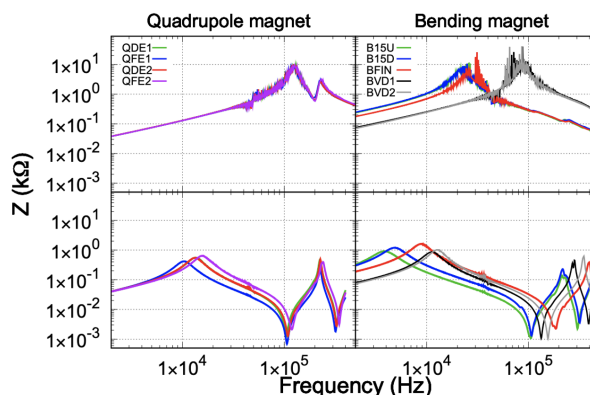


Figure 3: Results of impedance measurement. Upper panels indicate direct measurement and lower panels indicate indirect measurement.

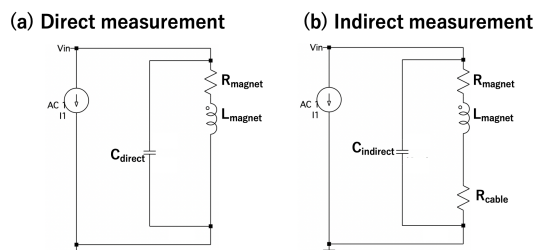


Figure 4: Equivalent circuit of electromagnet coils.

次に、コイルの等価回路を Fig. 4 に示す LCR 共振回路とし、共振周波数 f 、電磁石のインダクタンス L 、電磁石およびケーブルの抵抗値 R から C の値を算出した。 f は測定値、 L, R は電磁石およびケーブルの設計値を使用した。また、計算結果を用いて LTSpice[®] によるシミュレーションを行い、計算の妥

当性を確認した。計算結果は偏向電磁石のみ、四極電磁石のみの2通りで平均値を計算した。計算結果を Table 2 に示す。間接測定では電力ケーブルの影響から、直接測定よりも C が数十倍大きくなっていった。そのため、直接測定で見られる偏向電磁石と四極電磁石の違いが間接測定では見えなくなっている。すなわち、直接測定では電磁石の構造による違いが測定結果に反映されるのに対し、間接測定では電力ケーブルによる影響が反映される。

Table 2: Calculated C value. Parentheses indicate standard deviation.

	Bending magnet	Quadrupole magnet
Direct meas. [pF]	76.9 (23.6)	39.5 (5.4)
Indirect meas. [nF]	2.38 (1.20)	2.31 (1.42)

各パラメータの直接/間接測定における相関関係を Fig. 5 に示す。 f は強い正の相関、 Z, C は相関なしとなった。直接測定の共振周波数を f_D 、間接測定の共振周波数を f_I とすると、次式で表すことができる。

$$f_I = 0.119 \times f_D + 3.11 \quad (1)$$

インピーダンス測定による健全性の評価には共振周波数の情報が重要である。共振周波数について直接測定と間接測定で線形性が保たれていることから、間接測定による健全性評価が可能だと考えられる。

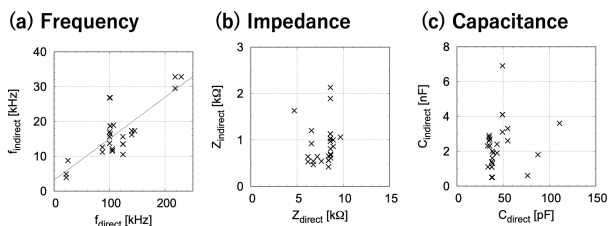


Figure 5: Relationship of direct/indirect measurement. Each correlation coefficient is 0.80, 0.05 and 0.19.

3.2 模擬コイルの測定

間接測定により故障によるコイルの状態変化を捉えることができるかを確認するため、故障を模擬したコイル（以下模擬コイルとする）の測定を行った。模擬コイルは偏向電磁石の一部にジャンパー線を取り付けショートさせたものである。測定結果を Fig. 6 の黒線に示す。直接測定、間接測定どちらも正常なコイルと比べて f が大きくなり、 Z が小さくなっていった。これは故障したコイルと同様の変化であり、間接測定でもコイルの故障を捉えることができることが示された。

3.3 経年変化

3-50BT では電磁石の健全性確認のため、定期的にインピーダンス測定を行っている。2020 年から 2022 年の測定結果を Fig. 6 に示す。どちらの測定方法でも波形がほとんど重なっており、結果はほぼ同

じである。時間変化はほとんどないことから、あらかじめ測定しておいたデータは比較対象として有用であり、波形に変化があった場合は電磁石のコイルに異常が生じている可能性があるかと判断することができる。

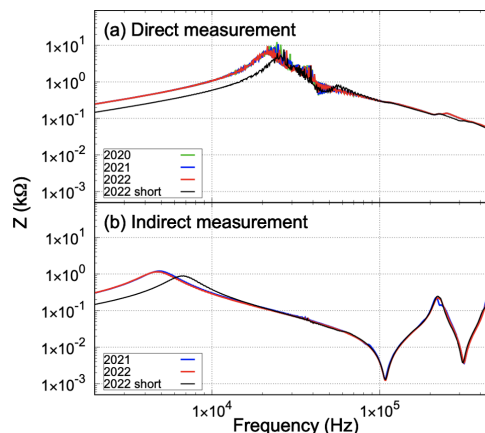


Figure 6: Results of impedance measurement. Color lines show the results of normal coils. Black line shows the results of Z shorted coil.

4. インピーダンス測定による電磁石の健全性評価

2019 年の B15D 電磁石の故障から、インピーダンス測定により電磁石のコイルの健全性を評価することができることが分かった。その後生じた 2 件の電磁石のトラブルおよび 1 件の電源のトラブルについて、インピーダンス測定による健全性評価を行ったのでそれぞれ報告する。

4.1 QFB2

2019 年 12 月、3-50BT のビーム軌道が水平方向に 0.7 mm、鉛直方向に 0.2 mm ずれていることが判明した。該当する区間の電磁石を調査したところ、四極電磁石 QFB2 のコイルから水が滴っていることが分かった。原因はホローコンダクターと通水パイプの継ぎ目からの漏水であり、漏水部からコイルの口出し部分を通してコイル本体まで水が到達していた。コイルの内部まで浸水しているかは外観からは不明であったため、直接測定によるインピーダンス測定を行ったため、直接測定によるインピーダンス測定によるコイルの健全性評価を行った。比較のため、QFB2 と同様の構造を持つ健全な電磁石 QDB2 についても測定を行った。QDB2 および QFB2 は四極電磁石であるため、それぞれ 4 つのコイルが設置されている。

Figure 7 に各コイルのインピーダンス測定結果を示す。赤線で示した QFB2-3 が漏水していたコイルである。QFB2-3 以外はほぼ同様の周波数特性を示すのに対し、QFB2-3 は明らかに異なる結果を示している。このことから QFB2-3 は異常がある、すなわち内部まで浸水が及んでいると判断された。

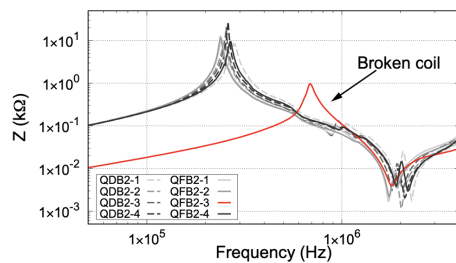


Figure 7: Results of impedance measurement. The dashed line shows the results of normal operated magnet coils. The red line shows the result of broken coil.

4.2 QFC1

2022年4月、四極電磁石 QFC1 全体に泥水状の汚れがあることが発見された。発見された時点で汚れは乾いていた。調査の結果、1年以上前に汚れが生じていたことが分かった。記録によると汚れが生じた後も加速器は運転されており、QFC1 の動作に異常はなかった。しかし、電磁石全体が水を被ったことが予想されたため、念の為直接測定によるインピーダンス測定を行った。2020年の結果と2022年の測定結果を比較したところほとんど変化はなかったため、コイル内部に異常がないと判断した。

原因ははっきりとは分かっていないが、QFC1 付近の天井には地震等によるひび割れがあり、そこから地下水の漏洩が起こった可能性がある。また、付近には排水溝があり、地震により排水溝から水がはねた可能性がある。QFC1 の健全性が確認された後に本体および床面の清掃を行い経過観察を行っているが、2022年7月現在までこの汚れは再現していない。

4.3 QFS

2022年6月、四極電磁石 QFS 電源の温度異常等が発報し、電源が入らなくなった。電源側の異常だと考えられたが、念の為間インピーダンス測定を行った。当時は RCS が運転中であり加速器トンネル内に入域できなかったため、地上から間接測定を実施した。2021年と2022年の結果を比較したところほとんど変化はなかったため、故障したのは電源のみであると判断した。その後予備電源への切り替えを行ったため、ビーム運転が停止することはなかった。この事例では2021年の間接測定の結果があったため、加速器トンネル内への入域や他の電磁石の測定を行う必要がなく、迅速に対応することができた。

5. まとめ

本発表では、電磁石のコイルのインピーダンス測定による健全性評価を行った。加速器トンネル内でコイルを直接測定する方法と電力ケーブルを介して地上から間接で測定する方法を比較した結果、間接測定でも問題なく健全性評価を行うことができることが示された。また、3-50BT では定期的なインピーダンス測定による電磁石の健全性評価が行われてお

り、定期測定で問題がないことが確認されている。不具合が起こった時にもインピーダンス測定が行われており、適用例3件を挙げて実用性を示した。今後も故障の早期発見のため、直接測定と間接測定を組み合わせた定期測定を続ける予定である。

参考文献

- [1] Acc. Group JAERI/KEK, KEK-Report 2002-13, JAERI-Tech 2003-044, J-PARC 03-01 (2003). <https://cds.cern.ch/record/747209/files/34072617.pdf>
- [2] M. Shirakata *et al.*, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, Jul. 31-Aug. 3, 2019, pp. 90-94.
- [3] J. Takano *et al.*, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, Jul. 31-Aug. 3, 2019, pp. 394-398.
- [4] J. Takano *et al.*, Proceedings of the 3rd J-PARC Symposium (J-PARC2019), JPS Conference Proceedings 33, 011037 (2021); <https://doi.org/10.7566/JPSCP.33.011037>
- [5] K. Kadowaki *et al.*, Proceedings of the 3rd J-PARC Symposium (J-PARC2019), JPS Conference Proceedings 33, 011038 (2021); <https://doi.org/10.7566/JPSCP.33.011038>