

PF-ring における偏向電磁石による軌道変動とコイルに関する調査 ORBIT FLUCTUATION IN PF-RING AND STUDY ON COIL OF BENDING MAGNET

東直 ^{*,A,B}, 篠原 智史 ^{A,B}, 原田 健太郎 ^{A,B}, 帯名 崇 ^{A,B}
Nao Higashi ^{*,A,B}, Satoshi Shinohara ^{A,B}, Kentaro Harada ^{A,B}, Takashi Obina ^{A,B}
^{A)} KEK, ^{B)} SOKENDAI

Abstract

PF-ring (Photon Factory Ring) is a 2.5 GeV light source in KEK. In November, 2021, an orbital fluctuation in horizontal direction was observed in user-run. The maximum amplitude of the fluctuation is about 0.1 mm, and this continued on and off afterwards. In order to find out the source of the fluctuation, we scanned the amplitude (magnetic field) and the phase (horizontal tune) of assumed kick source in full-space. As a result, it was estimated that B01 (#01 bending magnet) was the source of the orbital deviation. After that, an investigation on a power supply of the back-leg (steering) magnet of B01 was carried out, however the cause was not be identified. After an end of the user-run, a direct observation of B01 was conducted, and a trace of a leak of cooling water was found. We considered that the cause was this leakage, and B01 upper coil that had the trace was replaced with a backup. Thanks to this, no fluctuation of the orbit is no longer observed. Impedance (LCR) measurements with this removed coil was performed, and compared the result with the ones with other normal coils. In this presentation, the detailed explanation will be provided.

1. はじめに

1.1 軌道変動

Photon Factory ring (PF-ring) は 2.5 GeV の放射光加速器であり、1983 年から共同利用を開始しており、既に 40 年以上が経過している。Figure 1 に PF-ring 全体図を示す。

2021 年 11 月 6 日、突如最大 90 μm 程度の水平軌道変動が発生した。20 時 03 分に発生した最初の軌道変動は 1 分未満程度で収束したものの、再び 20 時 13 分頃に発生し、こちらも 1 分未満という短い時間で収束した (Fig. 2)。PF-ring では常に COD 補正が作動しているが、実際に軌道が跳ねてから COD 補正用の偏向電磁石バックレグコイル電源の電流値が変化していたため、実際に軌道が跳ねているということが確認された。時間関係の一例を Fig. 3 に示す。

この軌道変動の source を探すために、“single kick

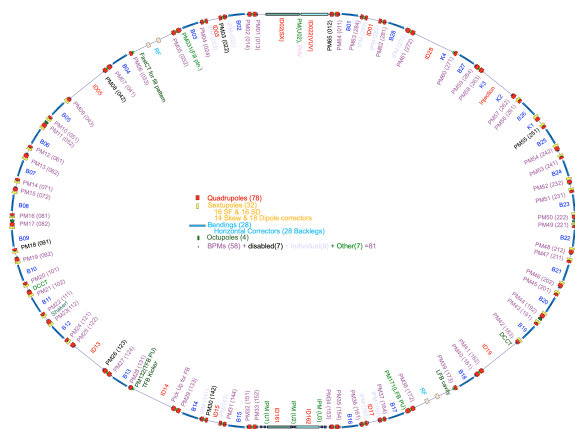


Figure 1: Overall view of PF-ring.

response” の式を使用した。ある点 ($s = s_0$) で $\Delta\theta$ という量の kick があった場合、ある点 s で観測される軌道偏差 $\Delta x_{c.o.}$ は、

$$\Delta x_{c.o.}(s) = \Delta\theta \frac{\sqrt{\beta(s)\beta(s_0)} \cos(|\phi(s) - \phi(s_0)| - \pi Q)}{2 \sin \pi Q}$$

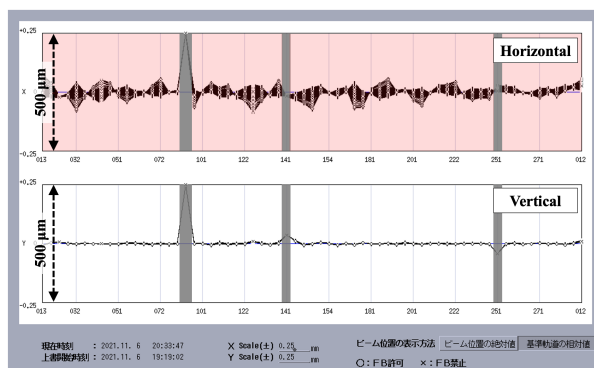


Figure 2: Horizontal orbital deviation observed for the first time. There is no deviation observed in vertical direction. Grey boxes hides false signals.

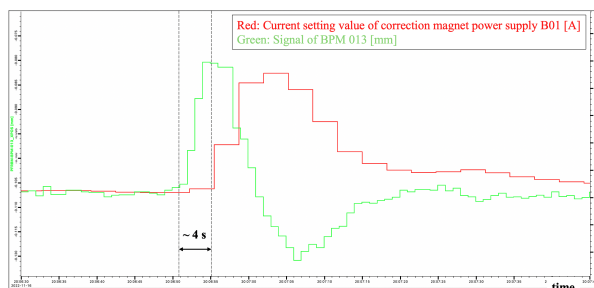


Figure 3: An example of the time difference between the occurrence of horizontal orbital deviation and the change of the current setting value of correction magnet power supply.

* nao.higashi@kek.jp

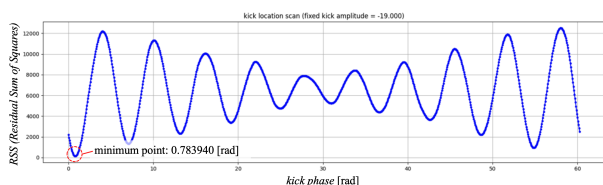


Figure 4: Result of the phase scan with fixed kick amplitude. In this case, the minimum point is around 0.783940 rad.

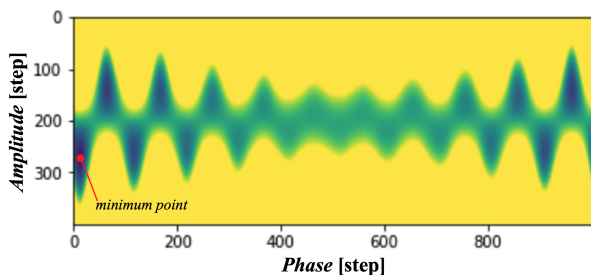


Figure 5: Full space scan in phase and amplitude. Horizontal axis is phase, and 60.30 rad. of one ring circumference is divided in 1000 steps. Vertical axis is the amplitude.

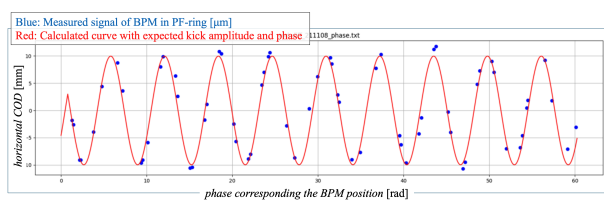


Figure 6: Measured BPM data and calculated curve with expected kick amplitude and phase.

で計算できる [1]。ここで、 β は Twiss parameter の β 関数、 ϕ は betatron 振動の位相、 Q は ring1 周分の tune である。この式の中で、 $\Delta\theta$ (kick amplitude) と $\phi(s_0)$ (kick phase) の 2 つが free parameter となる。

まずは kick amplitude を固定し、kick phase だけ掃引し、測定データと計算値の差の 2 乗和 (残差 2 乗和: RSS (Residual Sum of Squares)) を計算した (Fig. 4)。ここでは local minimum にはまり込まないために、全 phase の scan を実施した。ここでさらに amplitude の scan も加え、2 次元の全空間探索を行った (Fig. 5)。色が明るい方が RSS が大きく、暗いところが小さく、現実を最もよく再現している点になる。この結果、phase = 0.783940 rad (tune としては $NX = 0.124768$) に対応する場所が kick source であると推定された。これは偏向電磁石 B01 が位置しているところに対応している。Figure 6 に全空間探索の結果求められた kick amplitude と phase を使用した計算値と実際の BPM 測定データを重ねて描画した plot を示す。

1.2 不正磁場の調査とその対応

PF-ring の偏向電磁石は 1980 年に製作されたもので、mail coil は上下 2 つに分かれている。Figure 7 にリング内に設置されている偏向電磁石の外観 (B25) を、Fig. 8 に偏向電磁石の断面概略図を示す。この偏向電磁石に

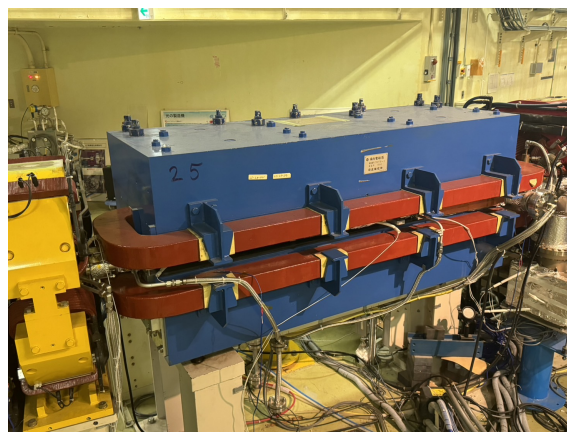


Figure 7: Bending magnet installed in PF-ring (B25).

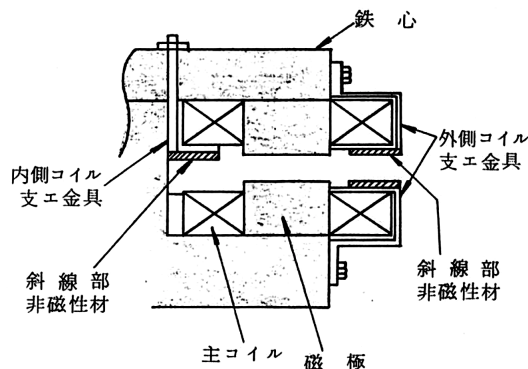


Figure 8: Cross-sectional schematic view of bending magnet.

は補助コイルが巻かれており、bump 軌道や COD 補正などで常時励磁電流が調整されている。

Figure 1 に示したように、PF-ring は合計 28 台の偏向電磁石があり、主コイルは全て直列に接続され、1 台の電磁石電源で励磁されている。もしも今回の B01 偏向電磁石における不正磁場の原因がこの主コイルの電源だとすると、ring 全周に渡って大きな影響が観測されるはずである。そこでまずは B01 の補助コイルを励磁している電磁石電源の調査を行ったが、出力電流は安定しており、電源を交換したが、水平軌道変動の発生は止まなかった。さらに制御系を疑い、制御を担う VME ボードの交換も行ったが、これも無関係であった。

その後、高速化、水平と垂直の分離、B01 back-leg のみを用いた補正などの COD 補正の修正を行い水平軌道変動に対処していたが、変動事象発生頻度が増え、BL19 の STXM 実験が実施できない状況となったため、抜本的な問題解決への対応が必須となった。Figure 9 に時間と共に悪化する水平軌道変動の一例を示す。

2. B01 コイルの交換

2023 年 1 月 6 日に B01 偏向電磁石の上部を外す半割作業を行い、詳しい観察を行った (Fig. 10)。その結果、上部コイル (ホローコンダクター) 表面にクラックと白色の析出物を発見した (Fig. 11)。これを化学分析した結果、酢酸マグネシウム等の酢酸系成分と推定された。

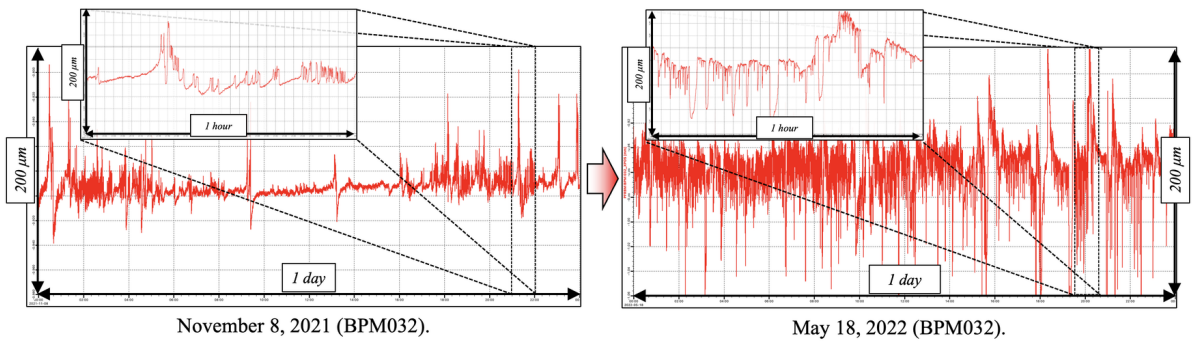


Figure 9: An example of horizontal orbit fluctuation that got worse over time.



Figure 10: B01 magnet divided in two parts (actually, this photo was taken when the two parts were being put back together.).

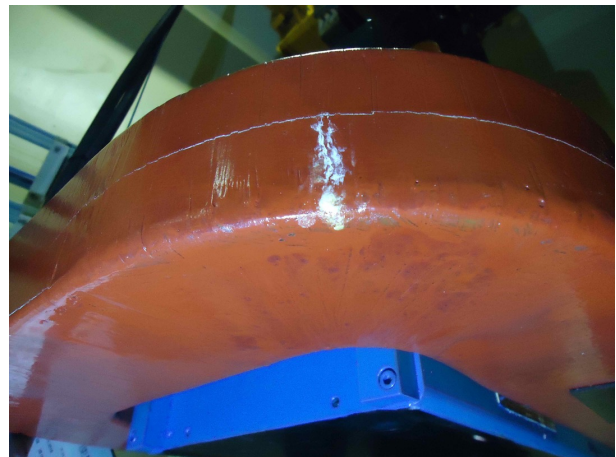


Figure 11: The white precipitate found on the upper coil of B01.

酢酸マグネシウム塩が生成された過程は不明であるが、コイルに穴が開き、そこから冷却水が漏洩していたのではないかと推定した。

1月は半割と半割戻しを行い、コイルの交換は実施せず、改めて2023年7月にバックアップとして保管していた偏向電磁石から同じ上部コイルを外して、交換作業を実施した。また、その間のPF-ring運転中は、新たにカメラを設置し冷却水が漏洩したと思われる箇所を監視、またトンネルに入域できる際には当該箇所とその付近が濡れていないか確認したものの、新たな漏洩は確認できなかった。

交換後のPF-ringの運転では、これまで発生していたような水平軌道の変動は観測されなくなった (Fig. 12)。

3. 漏洩コイルのインピーダンス測定と其の比較

これまでのPF-ringにおける電磁石系のトラブルは電磁石電源に起因するものがほとんどであったが、運転開始から40年程度が経過し、電磁石そのものにも不具合が出てくるようになった。これが個体依存な現象であったのか、他の偏向電磁石にも発生しうる問題なのかは不明だが、今回のような軌道変動が発生した際に、その問題が偏向電磁石そのものに起因しているものか

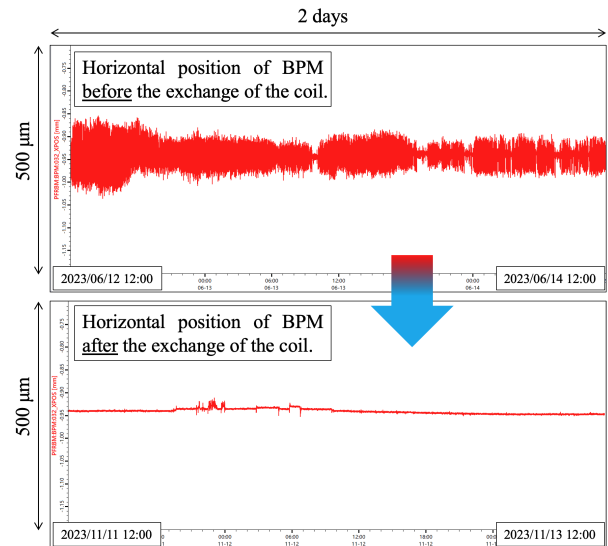


Figure 12: Before and after of the signal of horizontal position of a BPM in PF-ring. Small deviations found in the “after” plot are due to IDs’ mode changes.

どうか判定できる手段を持つておくのは無駄ではないだろう。

2022年の日本加速器学会では、J-PARCのRCSとMR

Table 1: Setting of LCR Measurement

| | |
|--------------------------------|------------------------|
| Measuring equipment | HIOKI LCR meter IM3536 |
| Measurement terminal structure | 2 Terminal Connection |
| Voltage | 1 V |



Figure 13: The broken coil placed on the return-yoke of # 13 bending magnet.

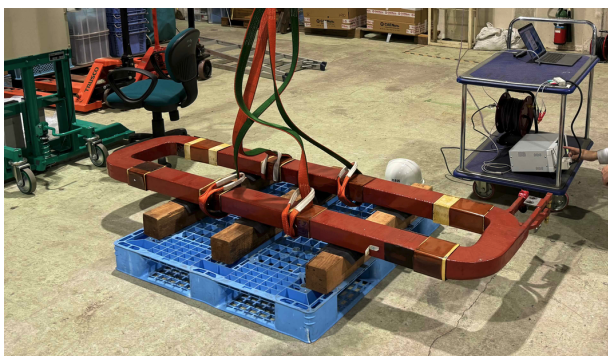


Figure 14: Another measurement setup for the broken coil, placed near the ground.

をつなぐ 3-50BT と呼ばれるビーム輸送路で使用されている電磁石にて、過去に今回の PF-ring と同じ冷却水漏洩が発生しており、電磁石コイルのインピーダンス測定で健全性を評価する、という報告がなされた [2]。これを参考にし、我々も不具合が発生していると思われる B01 の上部コイルと、バックアップとして保管している 3 つのコイルとを比較するインピーダンス測定を行った。

3.1 測定

測定機器のセットアップについては Table 1 にまとめた。今回測定したのは、バックアップとして保管していたシリアルナンバー#13、#27 の偏向電磁石の上、下それぞれのコイルである。ただし、#13 の上部コイルは今般の交換で正常なものを B01 に使用したため、測定時の#13 の上部コイルは B01 で不具合を起こしていたも

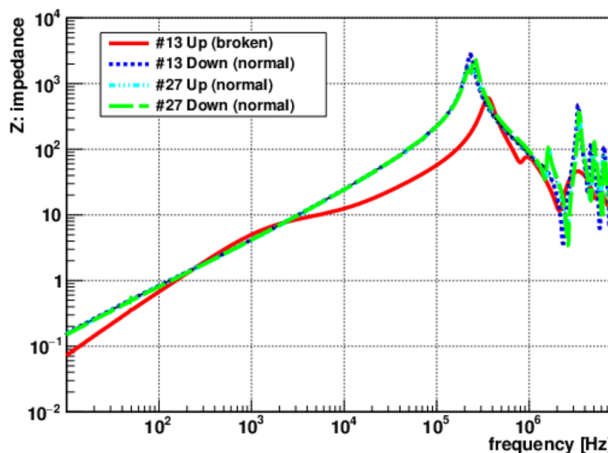


Figure 15: Comparison of frequency dependence of impedance of 4 coils of bending magnet, including broken one.

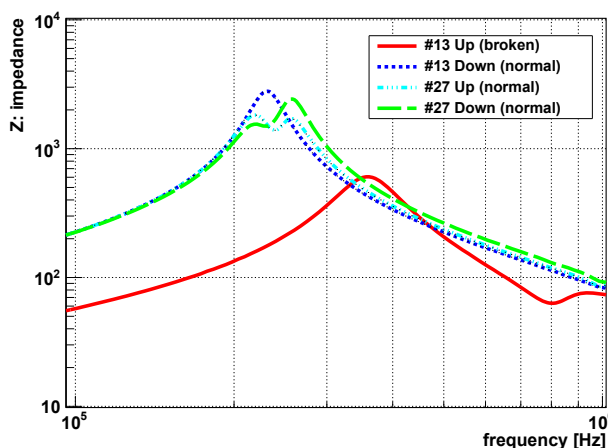


Figure 16: Magnified figure for the point of the resonance.

のになる。また、当該コイルは偏向電磁石として使用されるポジションではなく、リターンヨークの上部に置いた状態で測定した (Fig. 13)。他と測定環境が異なっており、渦電流の影響があるか調べるため、#13 偏向電磁石から離れた、床に近い状態でも測定した (Fig. 14)。

3.2 測定結果

4 つのコイルの測定結果を比較した plot を Fig. 15 に、共振点付近を拡大した図を Fig. 16 に示す。今回不具合を示した coil 以外の曲線はよく一致しており、不具合 coil は共振周波数の違いとともに、1 kHz 周辺でコブ (緩やかな第 2 の peak) を持っている。

また、不具合コイルについて、その他 3 つと測定環境が異なることから、リターンヨーク上に置いた場合と床に置いたプラスチックパレット上で測定した結果の比較を Fig. 17 に示した。この図より、不具合コイルのインピーダンス測定の結果はどちらの場合を用いても大きな差異はなく、渦電流の影響はなさそうである、と言える。

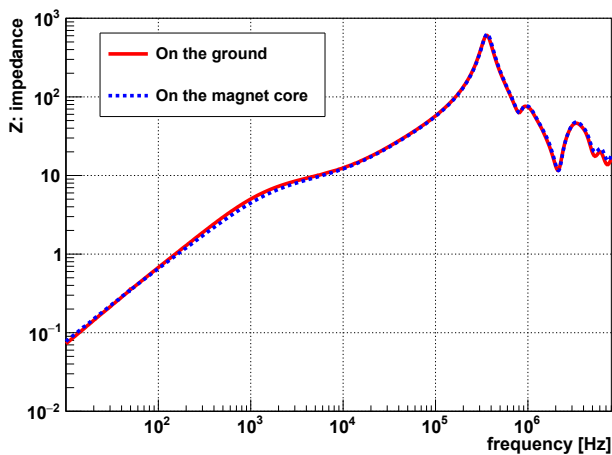


Figure 17: Comparison of the impedance measurement of broken coil with two situations.

3.3 結果考察

Figure 15、16 について、共振周波数の違いは、不具合コイル (#13 up) が他と異なり“空芯”によるインダクタンスの違いが影響していると考えられるが、第 2 の peak については説明ができない。未だ、B01 上部コイルの不正磁場発生の原因は完全に突き止められたとは言えないものの、冷却水の漏洩があったと推定できることから、ホローコンダクター(コイル)が予期せぬ構造上の不具合を起こしている、ということは予測できる。Figure 15 - 17 から、そのような場合は LCR メーターを用いたインピーダンス測定で正常コイルと異常コイルを識別できそうだと、ということも言えるであろう。

4. 今後の課題

PF-ring は運転開始から 40 年以上が経ち、これまでなかったような電磁石そのものの故障がこれから先も発生しうるであろう。その場合に J-PARC で取られた手法を PF-ring でも適用し、異常コイルを特定することは可能であると、今回の結果から言える。

今後の課題としては、

1. コイル本体の調査
2. 異常スペクトルの再現

の 2 つが挙げられる。

4.1 コイル本体の調査

コイルの構造に異常が発生したことで、B01 が不正磁場を持つようになった、と推定できるものの、異常

箇所の観察やその原因については未だ調査が十分に進んでいない。手持ちのスコープカメラで確認しようとしたところ、コイルの曲げ部に対してヘッド部分が追従ができなかったため、ヘッドの小さいスコープカメラが入手できれば、非破壊で内部の観察が可能になる。最終的には切断などを行い、広く観察することで、冷却水によって部材が薄くなっているところや、穴が開く寸前になっているところなどを発見することができるかもしれない。

4.2 異常スペクトルの再現

現在、回路シミュレータの LTSpice [3] を使用し、B01 故障コイルが示した異常なインピーダンス spectrum の再現ができるか、調査を行っている。正常コイルが 200 kHz 程度のところで共振点を持っており、異常コイルが 1 kHz 付近で第 2 の緩やかな peak を持っていることから、集中定数回路的には、余剰なインダクタンス項などを持っているだろうと推察される。

謝辞

今回の偏向電磁石の調査にあたり、KEK 加速器研究施設第 6 研究系の野上隆史さんには温度センサーを設置、モニターをしていただきました。塩澤真未さんには運転中でも偏向電磁石コイルを監視できるようカメラの設置、モニターをしていただきました。長橋進也さんや満田史織さんには偏向電磁石の調査や交換作業に際してご協力賜りました。その他、第 6 研究系の皆様にはこの場を借りて改めてお礼申し上げます。また、白色析出物の化学分析を実施して下さった KEK 放射線科学センター環境計測グループの皆様にも感謝申し上げます。また、実際の偏向電磁石半割作業実施に関して、日立テクノロジーアンドサービス及び三菱電機システムサービスの皆様にも感謝申し上げます。

参考文献

- [1] F. Zimmermann, “Measurement and Correction of Accelerator Optics”, Joint US-CERN-Japan-Russian School on Beam Measurement, Montreux, Switzerland, May 11-20, 1998. <https://www.slac.stanford.edu/pubs/slacpubs/7750/slac-pub-7844.pdf>
- [2] K. Kadowaki *et al.*, “EVALUATION OF THE INTEGRITY OF ELECTROMAGNET COILS BY IMPEDANCE MEASUREMENT”, PASJ2022, Kitakyusyu (Online meeting), Japan, Oct. 2022, pp. 811-814.
- [3] <https://www.analog.com/jp/resources/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>