

MEASUREMENT OF CURRENT RIPPLE ACROSS KEKB MAIN-RING MAGNETS

Toshiyuki Oki [#]), Tsuyoshi Sueno, Noboru Tokuda
 High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

Abstract

Current ripple distributed in KEKB main-ring magnets is measured by using a Fluke i2000 Rogowski coil. The results show standing waves. Impedance of the magnet-network is also measured, and the series resonant frequency of the LC ladder circuit is consistent with the frequency of the ripple component.

KEKB 加速器における電磁石励磁電流リップルの分布測定

1. はじめに

加速器の電磁石を励磁する電流のリップルは、ビームの質や安定性を左右する。近年、IGBT などのスイッチング素子が電磁石電源に適用されるようになり、そのスイッチング動作による高調波ノイズやリップルの理解が重要であると認識されつつあって、コモンモードとノーマルモードとの結合や配線の対称化などと話題になっている。

ところで、電磁石とビームとの間にはビームダクトがある。ビームダクトの材質は、加速器の種類によって適切に選択される。例えば、J-PARC RCS は、25 Hz の速い繰り返しのシンクロトロンなので、時間的に変化する磁場に応答できるようにセラミックダクトが採用された。また、2 秒程度かけてゆっくりと磁場を上げ、加速する J-PARC MR では、ステンレスが採用された。一方、電子・陽電子コライダーである KEKB 加速器では、磁場は一定でよいが、むしろ放射光によるダクトの発熱、二次電子やガスの放出を小さくする必要から、銅が採用された。

電磁石電源の電流リップルによって生じる磁場リップルは、ビームダクトによって減衰されるが、減衰の程度はダクトの材質と形状で定まる。図 1 は、銅、アルミ、ステンレスの同一形状のダクトにおける、磁場リップルの減衰率を比較したものである。ダクトの材質が銅やアルミの場合には減衰の効果が大きいので、電流リップルに対する要請はそれほど厳しくなくて済む。ステンレスダクトの KEK PS では、ダクトの渦電流でクロマティシティの変化が生じたが^[1]、KEKB 加速器では、電流リップルでビームの性能が制限された経験はないとのことである。

しかしながら、ビームに対する影響が小さいからと言って、電流リップルに注意しなくていいというわけではない。一般に電磁石システムは、静電容量を介して大地や他のケーブルなどと結合し、閉じた系になっていない。このため、交流側と直流側の双方にノイズをまき散らし、外部機器に影響を与えてしまう。例えば、PF-AR の偏向電磁石電源では、交流側のサージアブソーバーを損壊するトラブルが報告されている^[2]。また、KEKB 電源棟に設置した各

電源から第一種接地板へ配線した接地線にクランプメーターを取り付けて流れる電流を測ると、AC 50 Hz の誘導で 20 A 程度流れているところもあった。これはリップルとは直接関係はないが、閉じた系になっていない例である。こうした外部への影響や、ノイズ、リップルをどの程度に抑えればよいのかという明確な指針はないが、状況を把握しておくことが、いざ対策をとるためには必要である。

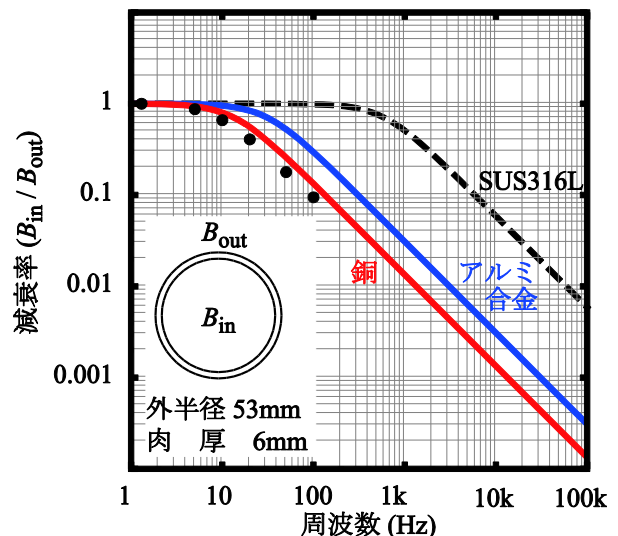


図 1: ビームダクトによる磁場リップルの減衰率。ダクト内外の磁場の比である減衰率は、 $1/\sqrt{1+(\mu_0\pi fbt/\rho)^2}$ に従う^[3]。 μ_0 : 真空の透磁率、 f : 周波数、 b : 外半径、 t : 肉厚、 ρ : 体積抵抗率。形状は、KEKB 陽電子リングのウィグラー電磁石部ダクトを想定した。黒丸は実測値 (銅ダクト)。

特に、KEKB 加速器では、さらなるルミノシティ向上を目差した増強計画が進められており、電磁石システムの更新が必要となる。去る 2010 年 6 月 30 日には 11 年間続いた運転を終了し、この夏から解体作業が始まる。このため、現状のシステムにどの程度のリップルがあるのかを解体前に測定して把握

[#]toshiyuki.oki@kek.jp

し、更新の指針としておく必要があった。

さて、KEKB 加速器には、周長 3 km にわたって配置された四極電磁石や偏向電磁石を、1 台あるいは 2 台の電源で直列に励磁するものがある。数百 Hz 以上の成分に対しては、こうしたシステムを分布定数として取り扱う必要があり、実際、電流リップルの大きさは全周にわたって一様ではない分布を持つ。これまでにそうした分布の測定は、磁場リップルを測定することで KEK PS^[4]や J-PARC^[5]で行われてきたが、KEKB 加速器では行われていなかった。

そこで、KEKB 加速器のリング 1 周にわたって 40 台配置されている QF4E 四極電磁石のうち、20 台を抽出し、それぞれの電流導入部にログスキーコイルを取り付けて直接電流リップルの測定を行った。同様の測定を、リング 1 周にわたって 112 台配置され、2 台の電源で励磁されている B2E 偏向電磁石についても行った。本報告では、こうして測定した電磁石励磁電流リップル分布の測定結果について、報告する。

2. QF4E 四極電磁石システム

KEKB 加速器は、4 つの直線部（日光、富士、大穂、筑波直線部）と、それら間のアーク部からなる。QF4E 四極電磁石は、電子リングの全周に 40 台（10 台/アーク部）が配置されている。40 台の電磁石は直列に接続され、日光直線部の上部にある電源棟に配置した 1 台の電源で励磁される。なお、行き帰りのインダクタンスを打ち消すように配線を 2 周にすることや、いわゆる対称化配線は行っていない。

電源の方式は、サイリスタ 12 パルス整流のトランジスタ・シリーズ・ドロップ定電流制御方式で、定格は 500 A - 380 V であり、通常 360 A - 240 V で運転している。

2.1 QF4E 電磁石群のインピーダンス

電源棟にて、電源の出力端子（P 端子、N 端子）からケーブルを取り外し、負荷のインピーダンス、すなわち、40 台の電磁石とケーブルからなる系のインピーダンスを、NF FRA5097 周波数特性分析器で測定した。また、比較のため、ケーブルなしの 1 台の電磁石のインピーダンス、および、片道 100 m 程度の長さのケーブルに接続した 1 台の電磁石のインピーダンスも測定した。

図 2 は測定結果で、(a)は P-N 間のインピーダンス (Z_{PN})、(b)は P-N 間を短絡したものと、電源接地端子との間のインピーダンス (Z_G) である。 Z_{PN} の低周波数での測定結果から、電磁石群の合計のインダクタンスが 576 mH、抵抗が 657 m Ω となっている。また、 Z_G の低周波数での測定結果から、P-接地間の容量と N-接地間の容量との総和（対地容量）が 805 nF となっている。さらに、 Z_{PN} の 857 Hz に現れる最初の並列共振周波数とインダクタンスとから、P-N 間に並列に想定される容量の総和（P-N 間容量）が

59.6 nF と算出できる。この共振周波数の上の帯域には、1.7 kHz や 3.5 kHz などの直列共振、2.6 kHz や 4.4 kHz などの並列共振があり、そうした繰り返しの共振構造のある LC ラダー型のインピーダンスになっている。特に、これらの直列共振周波数は、後で示すように、主要なリップルの周波数に一致している。

図 3 は、ケーブルなしの 1 台の電磁石の測定結果である。インダクタンスは 14.6 mH、抵抗は 14.9 m Ω 、対地容量は 12.4 nF、P-N 間容量は 1.58 nF となっている。

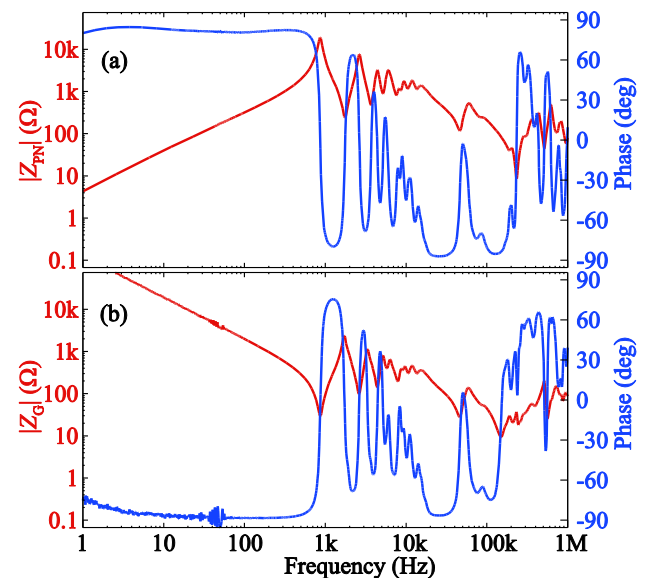


図 2 : QF4E 電磁石群のインピーダンス。(a) : P-N 間のインピーダンス (Z_{PN}) ; (b) : P-N 間を短絡したものと、電源接地端子との間のインピーダンス (Z_G) 。

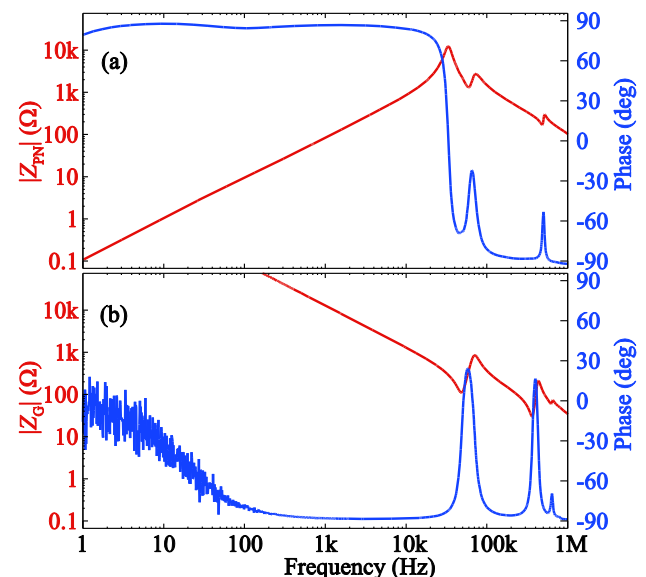


図 3 : 電磁石単体のインピーダンス。(a) : Z_{PN} ; (b) : Z_G 。

図 2 と図 3 の結果を比較すると、インダクタンスは $576 \text{ mH} / 14.6 \text{ mH} = 39.6$ 倍、抵抗は $657 \text{ m}\Omega / 14.9 \text{ m}\Omega = 44.1$ 倍、P-N 間容量は $59.6 \text{ nF} / 1.58 \text{ nF} = 37.6$ 倍となっていて、おおよそ電磁石の台数倍になっていることから、これらに対するケーブルの寄与は小さいと考えてよい。ただし、対地容量の比は、 $805 \text{ nF} / 12.4 \text{ nF} = 64.9$ 倍となっていて、40 からずれており、ケーブルと大地との間の容量が寄与しているようである。

QF4E 電磁石群の等価回路モデルは今後検討する予定であるが、片道 100 m 程度の長さのケーブルに接続した 1 台の電磁石の P-N 間インピーダンスを HP4284A で測定し、その結果を再現するように等価回路モデルを作って比較したものを図 4 に示す。

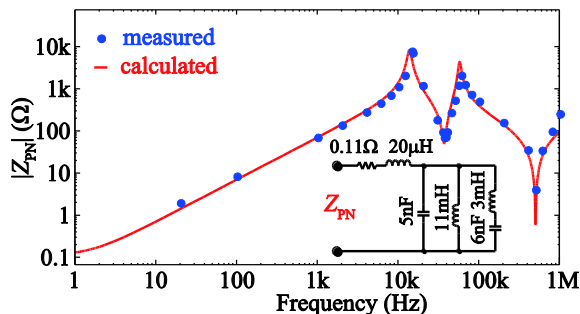


図 4 : 片道 100 m 程度の長さのケーブルに接続した 1 台の電磁石のインピーダンス測定結果と等価回路モデルの計算結果との比較。

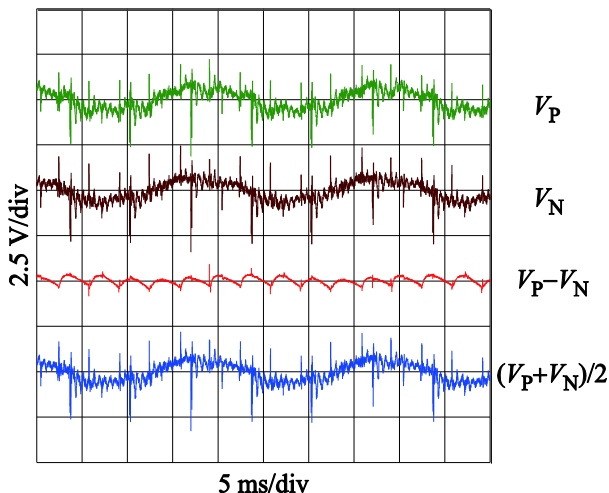


図 5 : 電圧リップル (QF4E 電源、360 A - 240 V 出力時)。

2.2 電源の電圧リップル

360 A 通電時に、電圧リップルを測定した結果を図 5 に示す。電源接地端子から見た P 端子電圧 (V_P) と、N 端子電圧 (V_N) を測定し、それらの測定値から、差 (ノーマルモード電圧) と平均 (コモンモード電圧) を算出した。図 6 に FFT したものを示す。ノーマルモード電圧には、サイリスタ整流による 300 Hz 成分と高次が見られる。一方、コモン

モード電圧の方がノーマルモードよりも大きく、50 Hz 成分に加えて、1.6 kHz、3.3 kHz 近傍の成分が多く見られる。これらは、QF4E 電磁石群のインピーダンスの直列共振周波数に一致している。

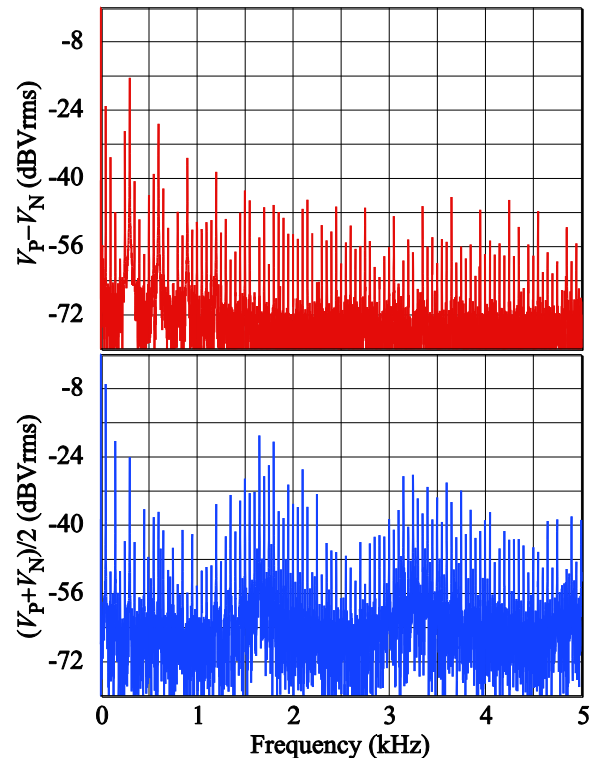


図 6 : 電圧リップルの周波数分布 (QF4E 電源、360 A - 240 V 出力時)。

3. 電流リップル分布測定

3.1 ロゴスキーコイル

電流リップル分布測定には、Fluke i2000 (20A レンジにセット) ロゴスキーコイルを用いた。これを電力ケーブルに 3 重に巻き付け、小野測器 CF-7200 FFT アナライザに接続して電流リップルを測定した。3 重巻にしたのは、S/N を向上するためであり、実効的に 0.3 V/A の利得となる。この章では、電流リップルの測定値を、ゼロピーク振幅値で表す。

ロゴスキーコイルは、コイル部が電流の時間微分を検出し、それを積分器で積分することで電流を測定する。コイルに生じる誘導起電圧は周波数に比例するため、低域での S/N は悪い。どの程度までの低電流を検出できるかを、信号発生器と広帯域精密シャント抵抗 (アルファエレクトロニクス PCX5R0000F、5 Ω 、2 W、帯域 10 MHz) を用いて CF-7200 で調べた。結果を図 7 に示す。1 mA 以下の電流に対しては、50 Hz、100 Hz に大きなノイズがあるが、数百 Hz 以上ならば 0.1 mA 以下の電流でも測定できる。ただし、電源が作る電流リップルの主成分は 50 Hz なので、電源の性能を十分に評価するには、50 Hz のノイズを減らす必要がある。なお、高域遮断周波数は積分器の性能で定まるが、別の測定によると、145 kHz (-3 dB)であった。

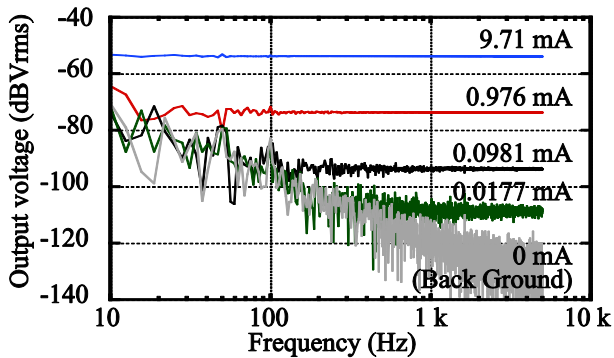


図 7: Fluke i2000 ロゴスキーコイル (3 重巻) の出力特性。9.7~0.018 mA (シャント抵抗での測定値) を流したときの i2000 の出力電圧を測定した。灰色は 0 mA 時の出力で、バックグラウンドノイズ。

3.2 QF4E 四極電磁石システムの電流リップル分布

QF4E 四極電磁石の 40 台から、1 台おきに合計 20 台を抽出し、電磁石の電流導入部にロゴスキーコイルを 3 重巻に取り付けて 360 A 通電時の電流リップルを測定した。典型的な測定結果を図 8 に示す。電源出力部での測定を含むすべての結果を付録に示す。

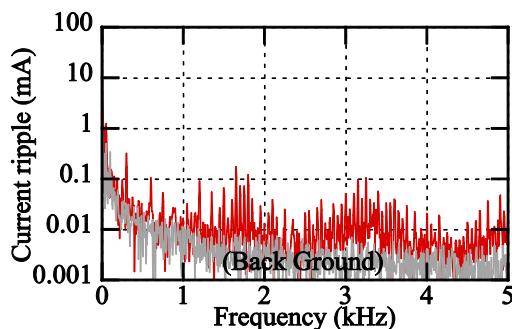


図 8: QF4E 電磁石 (QF4E.7) の電流リップル (360 A 通電時)。灰色はロゴスキーコイルのバックグラウンドノイズ。

図 8 からわかるように、300 Hz と高次の成分に加えて、1.6 kHz、3.3 kHz 付近の成分が見られる。

図 6 によると、300 Hz と高次の成分はノーマルモード電圧に多く含まれていた。また、1.6 kHz、3.3 kHz 付近の成分は、図 2 の直列共振に由来し、コモンモード電圧に多く含まれていた。これらノーマルモードとコモンモードの成分が、ともに電磁石に流れていることがわかる。

第 1 章でも述べたように、これら数百 Hz 以上の成分に対して電磁石システムは分布定数回路網であるので、電流リップルの大きさは全周にわたって様々ではない分布を持つ。そこで、いくつかの周波数成分について、電流リップル分布をまとめたのが図 9 である。節-腹-節を半波長として、1650 Hz の成分で 1 波長の分布を示し、定在波になっている。

3.3 B2E 偏向電磁石システムの電流リップル分布

同様の手法で、KEKB 加速器のリング 1 周にわたって 112 台配置されている B2E 偏向電磁石のうち、

20 台を抽出し、600 A 通電時にリップルの分布測定を行った。その結果を図 10 に示す。B2E 偏向電磁石は、日光、大穂に配置した 2 つの電源 (50 Hz × サイリスタ 24 パルス整流) で励磁しており、1200 Hz が主成分である。こちらは 600 Hz の成分で 1 波長の分布になっている。

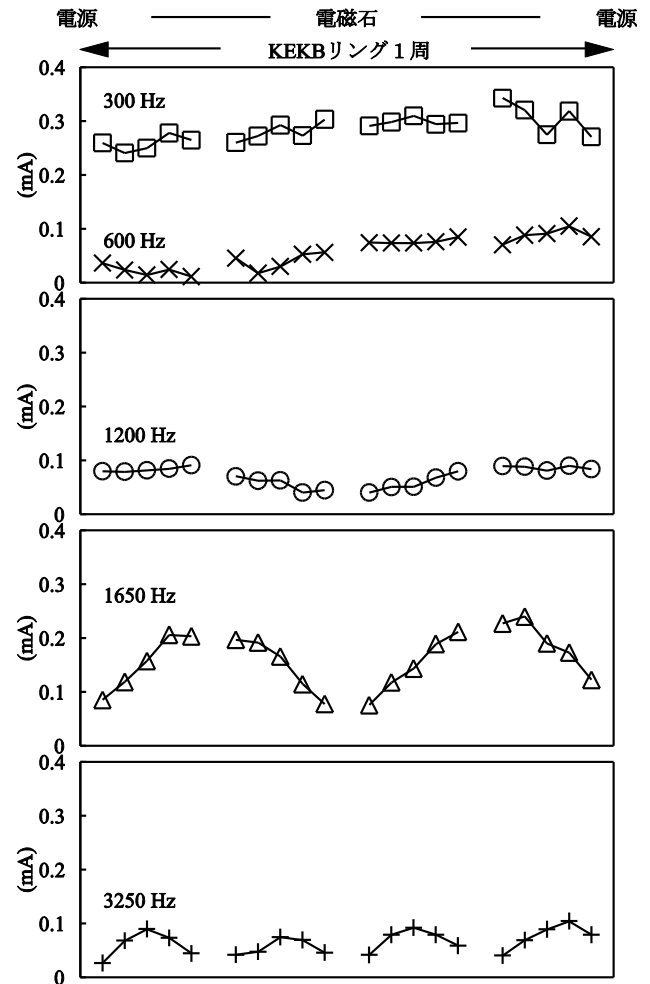


図 9: QF4E 四極電磁石システムの電流リップル分布 (360 A 通電時)。横軸は電磁石の配置位置。日光、富士、大穂、筑波は直線部を示し、日光に配置した電源で励磁。

4. まとめ

KEKB 加速器のリング 1 周にわたって配置されている QF4E 四極電磁石および B2E 偏向電磁石について、ロゴスキーコイルを用いて電流リップルの分布を測定した。

QF4E 四極電磁石群のインピーダンスは LC ラダー型になっており、その直列共振周波数は、電源電圧のコモンモード成分および主要な電流リップル成分の周波数に一致している。

リング一周にわたる電流リップルの分布は定在波となっており、波長と周波数から伝搬速度を求めると、光速の 1.6% (QF4E)、0.6% (B2E) となっている。

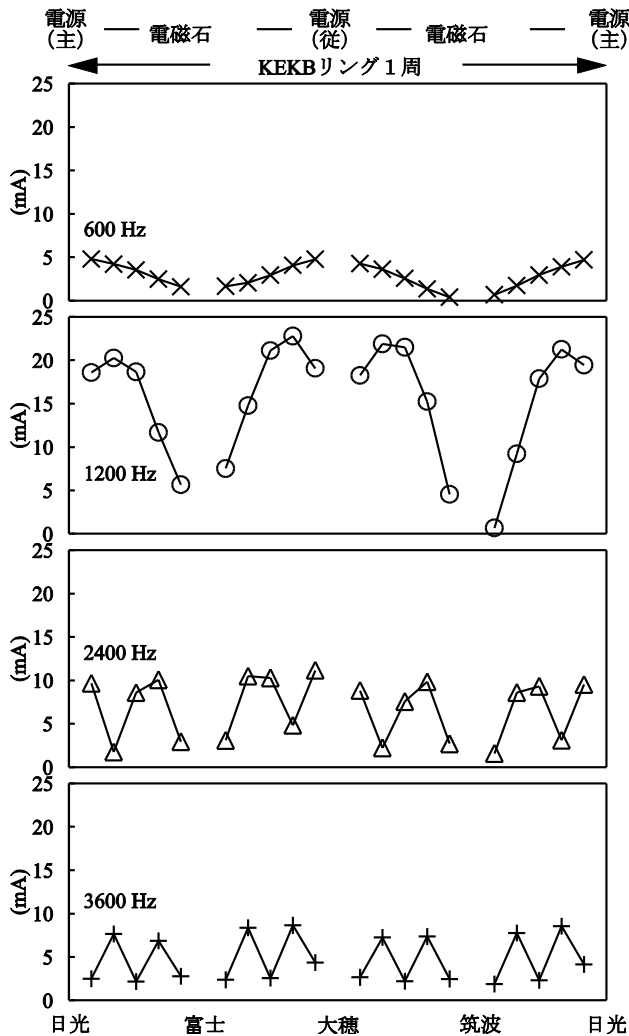


図 10 : B2E 偏向電磁石での電流リップル振幅の分布 (600 A 通電時)。

参考文献

- [1] 主リング偏向電磁石中の真空パイプの渦電流の効果、外山毅、KEK PS 加速器報告書 SR-474 (1999). (加速器報告書は次の URL からダウンロードできる。
<http://www-accps.kek.jp/AllOK/kek-staff/>)
- [2] PF-AR 偏向電磁石電源の更新、尾崎俊幸ほか、第 4 回 加速器学会年会 (2007).
- [3] A.W. Chao and M. Tigner, Editors, Handbook of Accelerator Physics and Engineering, Second printing, World Scientific, Singapore (1998), p. 264.
- [4] 主リング各 B 電磁石のリップルと P2 直後の磁場のばらつき、末野毅、KEK PS 加速器報告書 SR-415 (1997); γジャンプ電源系による PS 主リング電磁石系への影響、五十嵐進ほか、KEK PS 加速器報告書 ASN-439 (2001).
- [5] J-PARC MR の主電磁石の磁場リップル測定、五十嵐進ほか、第 6 回 加速器学会年会 (2009).

付録

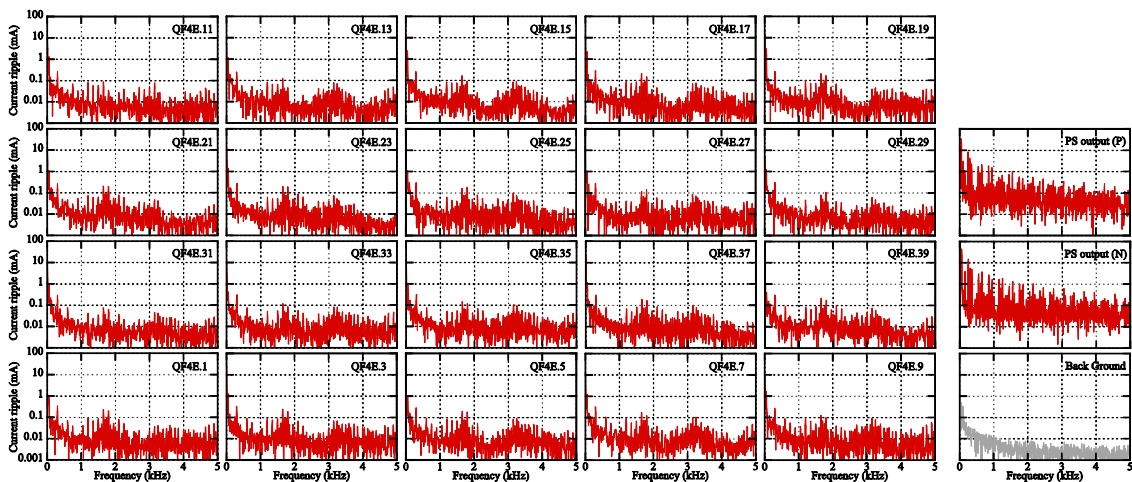


図 A : QF4E 四極電磁石システムの電流リップル (360 A 通電時)。磁石の配置と配線は次の通り。電源 P 端子 (日光直線部) → QF4E.11 ~ QF4E.20 → (富士直線部) → QF4E.21 ~ QF4E.30 → (大穂直線部) → QF4E.31 ~ QF4E.40 → (筑波直線部) → QF4E.1 ~ QF4E.10 → 電源 N 端子 (日光直線部)。