

RCS バンプ電磁石磁場測定用プローブの検証

EXPERIMENTAL VERIFICATION OF MAGNETIC FIELD MEASUREMENT PROBE FOR RCS BUMP MAGNET

杉田萌^{#, A)}, 植野智晶^{B)}, 堀野光喜^{B)}, 高柳智弘^{A)}, 小野礼人^{A)}, 山本風海^{A)}, 金正倫計^{A)}
Moe Sugita^{#, A)}, Tomoaki Ueno^{B)}, Koki Horino^{B)}, Tomohiro Takayanagi^{A)}, Ayato Ono^{A)}, Kazami Yamamoto^{A)},
Michikazu Kinsho^{A)}
A) Japan Atomic Energy Agency
B) NAT Corporation

Abstract

In the J-PARC 3 GeV Rapid Cycling Synchrotron (RCS), shift bump magnets are used to merge the injection beam from the LINAC with the circulating orbit of the RCS. The bump magnets are excited with a trapezoidal pulse waveform, that the rise and fall times and the duration of the flat section can be changed. The injection bump orbit is created by the pulse waveform to produce a 1 MW, high intensity beam at a repetition rate of 25 Hz. An issue to achieve the 1 MW beam is suppression of the beam loss. Therefore, a requirement of the accuracy of the magnetic field is less than $\pm 0.2\%$. Since the time structure of the pulse is so fast, we needed a test to select a magnetic probe with a suitable response. In this report, we will show the results of comparing the search coil, Hall probe and integral fluxmeter. The result indicated that the integral fluxmeter with a small measurement error is suitable.

1. はじめに

J-PARC の 3GeV シンクロトロン(RCS)[1]では、水平シフトバンプ電磁石を用いて線形加速器(LINAC)からの入射ビームを RCS の周回軌道に合流する[2]。周回ビームと入射ビームを水平方向に偏位させる軌道を入射バンプ軌道と呼ぶ。バンプ電磁石の励磁パターンは台形型のパルス波形で、立ち上がり・立ち下がり部の時間を 150 ~ 500 μs 、フラット部の時間を 100 ~ 800 μs の間で変更可能である。ビームの要求条件に合わせたパルス波形を形成し、入射バンプ軌道をつくることで 1 MW 大強度ビームを生成する。

1 MW 大強度ビームの運転には、ビームロスによる放射化の低減が求められる。入射バンプ軌道の乱れに起因したビームロスを低減するため、バンプ電磁石の磁場分布を $\pm 0.2\%$ 以下の精度で測定し、高精度な入射バンプ軌道をつくる必要がある。そこで、バンプ電磁石の速いパルス励磁に対応可能な高速応答性に優れた磁場測定器の選定評価試験を実施した。本発表では、計測の原理と手法が異なる 3 種の磁場測定器(サーチコイル、フラックスメータ、ホールプローブ)の比較検証結果について報告する。

2. 磁場測定器

2.1 サーチコイル

サーチコイルは、ファラデーの電磁誘導に従い、磁束の時間変化によって生じる誘導起電力 V を測定する。本試験では、誘導起電力 V をオフラインで積分し磁場を算出した(Eq. (1))。

$$\int V_{coil} dt \propto N\phi \quad (1)$$

V_{coil} : コイルから生成される瞬時電圧
 N : コイルの巻き数
 ϕ : 磁束

使用したサーチコイルは自作品であり、仕様を Table 1 に示す。

Table 1: Specification of Search Coil

Turn	20
Coil diameter	20 mm
Wire diameter	0.1 mm

2.2 フラックスメータ

原理はサーチコイルと同様、ファラデーの電磁誘導から磁束を算出する。サーチコイルとの相違点は、コイルの起電力を積分回路を通し、磁場値を電圧値として算出できる点にある。使用したフラックスメータの仕様を Table 2

Table 2: Specification of Fluxmeter

Manufacture	Lake Shore
Model	480 Fluxmeter
Mode	AC
Accuracy	$\pm 1\%$ of reading $\pm 10 \mu\text{Vs}$ (10 Hz ~ 10 kHz, 15 ~ 35°C) $\pm 5\%$ of reading $\pm 10 \mu\text{Vs}$ (2 Hz ~ 50 kHz, 15 ~ 35°C)
Frequency Range	2 Hz ~ 50 kHz

[#] moe.sugita@j-parc.jp

に示す。

2.3 ホールプローブ

ホールプローブは、ホール効果によって発生した起電力の電位差から磁場値を電圧値として算出することができる。半導体であるホール素子に電流が流れている状態で、電流に対して垂直方向に磁場をかける。すると、ホール素子内の自由電子は電流と磁場に垂直な方向にローレンツ力を受ける。この力により片端で正、他の端で負の電荷が生じ、Eq. (2)で表されるホール電圧を発生させる。

$$V_H = \gamma_B B \sin \theta \quad (2)$$

- V_H : ホール電圧
- γ_B : 磁気感度
- B : 磁束密度
- θ : 磁束ベクトルと測定部の確度

Table 3: Specification of Hall Probe

Manufacture	Lake Shore
Model	475 DSP gaussmeter
Mode	Peak (pulse)
Pulse width	20 μ s or more
Accuracy	$\pm 2\%$ of reading > 1% of full-scale range (5 Hz~20kHz)
	$\pm 5\%$ of reading > 1% of full-scale range (20 kHz~50 kHz)
Frequency Range	5 Hz~50 kHz

3. 測定誤差

3.1 測定方法

サーチコイル、フラックスメータ、ホールプローブそれぞれの測定毎の誤差を確認した。Figure 1 に示すように、ホールプローブ、フラックスメータ、サーチコイルを3軸ステージの先端に固定した。また、各測定器の測定部中心が $x=0$ である。この状態で、磁場 B_y を2100回測定した。なお、磁場 B_y は入力電流と出力電流の比により規格化されており、理想的には一定の値をとる。 z 軸上の測定点は $z=-1260, -465, 0, 465, 1260$ の5か所とし、 $z=-465, 465$ が水平シフトバンプ電磁石コイルの直下に相当する。

3.2 測定結果

磁場 B_y を2100回測定した結果を Fig. 2 の度数分布に、その標準偏差を Table 4 に示す。標準偏差が小さい順に、フラックスメータ、ホールプローブ、サーチコイルとなった。

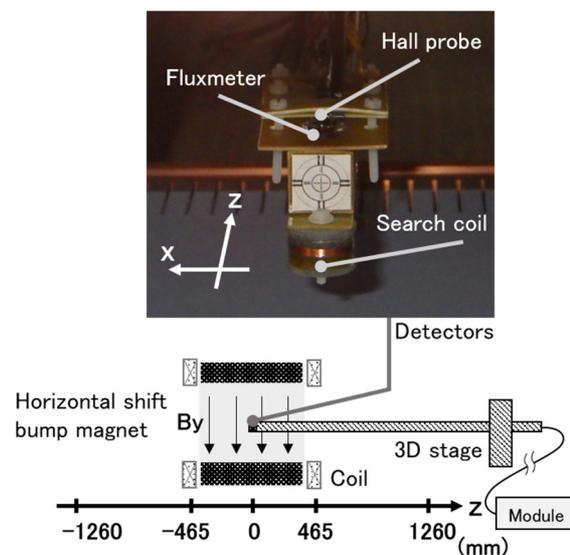


Figure 1: System of measurement.

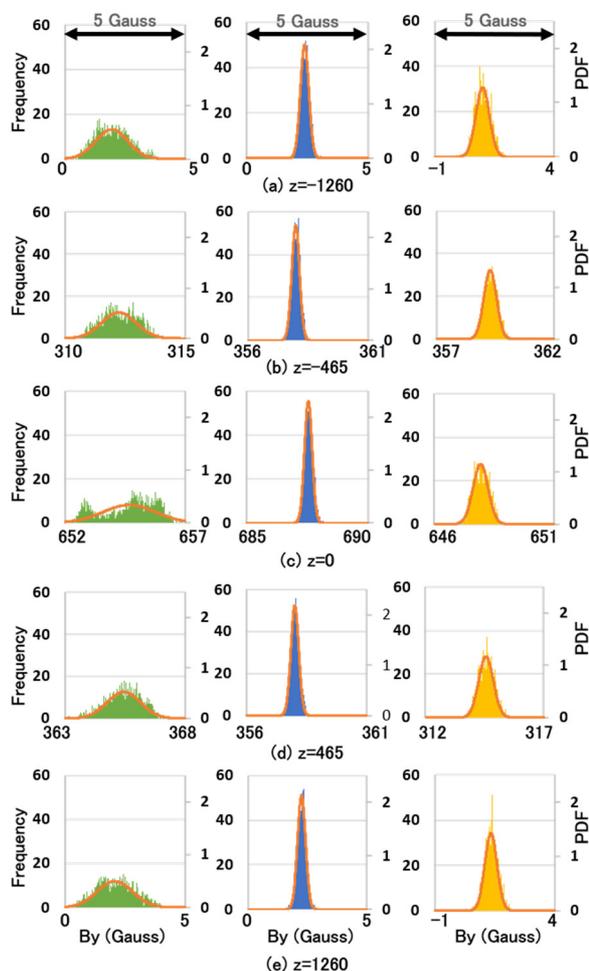


Figure 2: Frequency distribution of the magnetic field measured 2100 shots (Normalized by current value). The first axis represents frequency, and the second axis represents probability density function (PDF).

Table 4: Standard Deviation

Detector	z (mm)				
	-1260	-465	0	465	1260
Search coil	0.73	0.78	1.18	0.76	0.81
Fluxmeter	0.19	0.18	0.17	0.18	0.19
Hall probe	0.31	0.30	0.35	0.34	0.28

入射バンパ軌道を生成する水平シフトバンパ電磁石が作り出す磁場に要求される、パルス波形フラット部の平坦度 $\pm 0.2\%$ を確認するにあたって、度数分布の 3σ を測定値の平均値で割った値を用いて評価をした(Table 5)。

Table 5: Standard Deviation of Normal Distribution ($z=0$)

Detector	1σ (Gauss)	3σ (Gauss)	Average (Gauss)	$3\sigma/\text{Average}$ (%)
Search coil	1.18	3.55	654.93	± 0.27
Fluxmeter	0.17	0.52	687.80	± 0.04
Hall probe	0.35	1.03	648.12	± 0.08

その結果、フラックスメータとホールプローブはそれぞれ $\pm 0.04\%$ 、 $\pm 0.08\%$ となり、必要な $\pm 0.2\%$ の測定は十分可能である。一方、サーチコイルは $\pm 0.27\%$ となり要求を満足できなかった。

3.3 サーチコイルのノイズ低減

サーチコイルは測定誤差が他の測定器よりも大きくなった。測定系に重畳したノイズの影響が大きいことが原因であると考え、サーチコイルのノイズ低減について

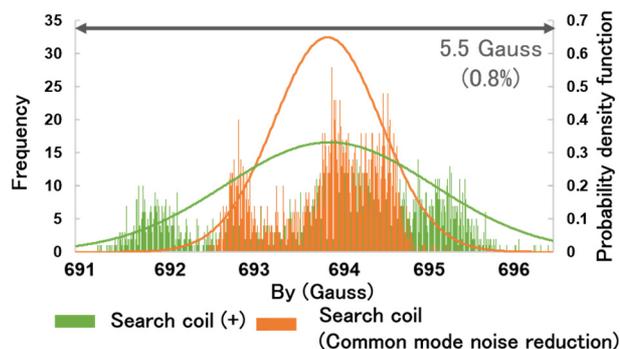


Figure 4: Frequency distribution of the magnetic field before and after common-mode noise removal.

検討した。

サーチコイルに重畳するノイズのうち、コモンモードのノイズは以下の要領で除去することが可能である[3]。コイルからの電圧を測定器のモジュールに接続する位置で、プラスとマイナスの入力を反転させる。この場合、磁場変化によって生じる電圧信号は反転されるが、測定系に重畳するコモンモードのノイズ信号は同相のまま測定される。そのため、反転前後の測定値を差し引くことで、パルス励磁に起因したコモンモードノイズの除去が可能となる。

サーチコイルの所得波形データに対し、コモンモードノイズ除去後の波形を比較したところ、Fig. 3 (a), (b)に示す通りノイズは減少した。また、コモンモードノイズ除去前後において2100回ずつ測定を行った結果をFig. 4に示す。標準偏差は1.18から0.62に、 $3\sigma/\text{平均値}$ の値は $\pm 0.27\%$ から $\pm 0.14\%$ に減少した。これより、コモンモードノイズを除去すれば、サーチコイルも有用であるといえる。

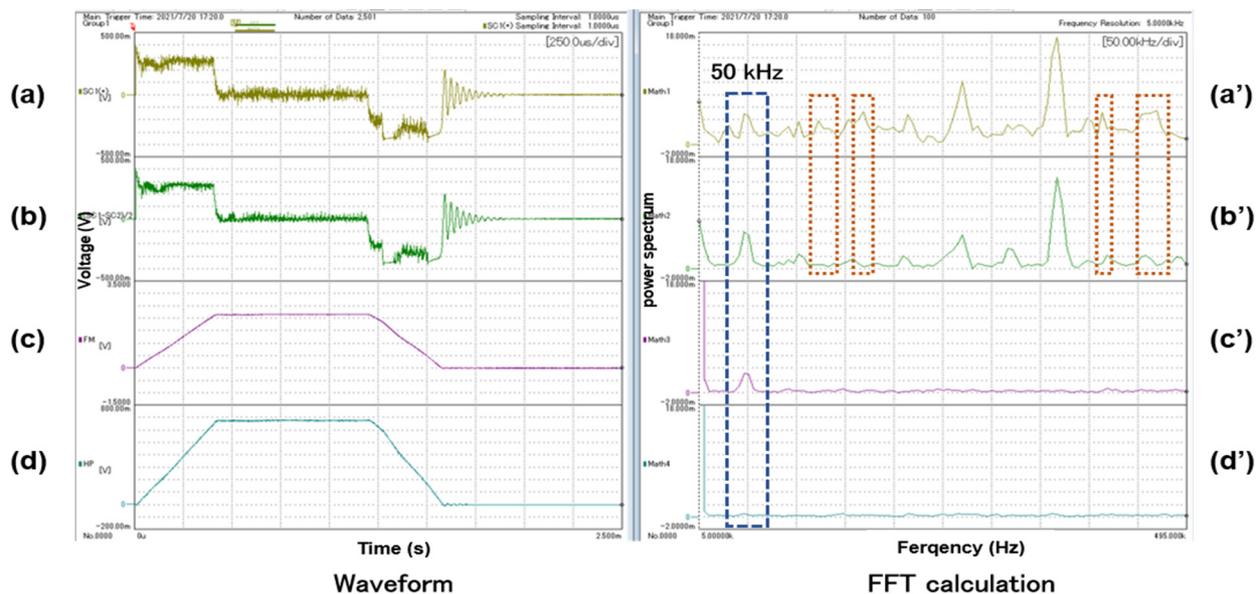


Figure 3: Measurement waveform and frequency distribution of magnetic field by. (a) and (a') Search coil (Before removing common mode noise), (b) and (b') Search coil (After removing common mode noise), (c) and (c') Fluxmeter, (d) and (d') Hall probe.

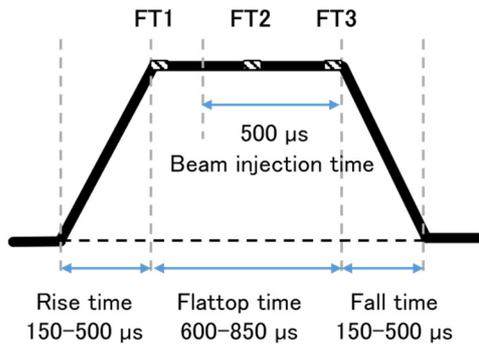


Figure 5: Excitation waveform by horizontal shift bump magnet.

4. 磁場測定器の特徴

4.1 ノイズ除去とFFT解析

使用した各測定器の取得波形に対し、 $x=z=0$ におけるサーチコイルの共通モードノイズ除去前後、フラックスメータ、ホールプローブそれぞれにFFT演算を行なった。その結果、サーチコイルの波形に関しては、共通モードノイズ除去前後において、ピークを示す周波数の減少と強度の低下を確認した。また、各測定器の周波数成分を比較すると、サーチコイルの共通モードノイズ除去前の結果においてのみ、複数の周波数でピークが確認できる。そして、ノイズ除去後の結果には、50 kHz、95 kHz、150 kHz の周波数でピークが生じているのがわかる。50 kHz は、本試験で使用したスイッチング電源の基本周波数であり、その高調波が電流リップルとして検出されたと考えている。フラックスメータとホールプローブは、電源のスイッチング周波数(50 kHz)のピーク値が小さく、且つ 50 kHz 以外の周波数成分はほとんど見えなかった。フラックスメータやホールプローブは測定した磁場値を電圧値に変換する回路が組み込まれており、その過程で電流リップルとノイズが低減されたと考えられる。また、ホール素子と積分回路の周波数特性が影響しているとも考える。

4.2 測定器への要求

水平シフトバンプ電磁石が生成する入射バンプ軌道には、フラットトップの平坦度の精度に加え、電流リップルに応じて周回ビームが共振した問題も生じている[4]。従って、要求仕様の $\pm 0.2\%$ の磁場値に対しては、固定軌道に影響する磁場分布と、時間変化(スイッチング周波数)に起因する電流リップルを含めた評価をすることが重要である。以上のことから、水平シフトバンプ電磁石の磁場測定においては、磁場分布や電流リップルの確認など目的に応じて測定器(サーチコイル、フラックスメータ、ホールプローブ)を使い分ける必要があることが分かった。

5. 磁場の影響

$x=y=0$ の状態で z 軸上の $z=-1260\sim 1260$ の間で磁場分布を測定した。この際、 z は 15 mm ずつ変化させた。また、Fig. 5 に示すように、励磁波形のフラットトップにおいて、3 か所(FT1~FT3)の磁場値の平均値を算出し(期

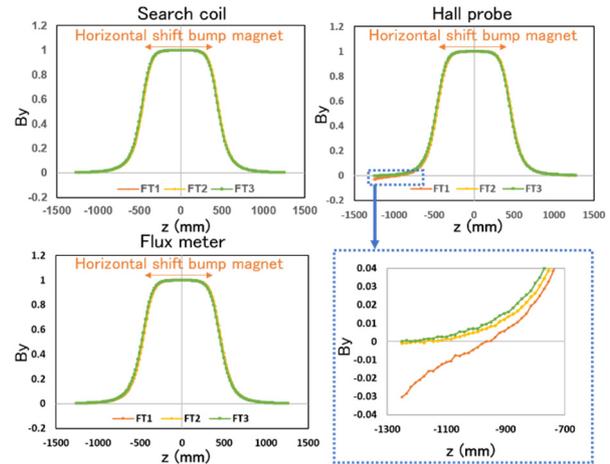


Figure 6: z-distribution of the magnetic field (Normalized with respect to the value of the magnetic field at $z=0$).

間 10 μ s、分解能 1 μ s)比較を行った。

測定結果を Fig. 6 に示す。サーチコイルとフラックスメータの測定結果に差は見られなかった。しかし、ホールプローブには $z=-800$ より奥の位置、且つ励磁波形区間 FT1 で乱れが確認された。プローブが奥に挿入され、ホールプローブの回路部がコイルに近づいたこと、且つ、立ち上がりからフラットトップへの移行箇所において変化が大きい磁場の影響を強く受けたことで生じたと考える。

6. まとめと今後の展望

入射バンプ軌道を生成する水平シフトバンプ電磁石の磁場分布の確認には、測定誤差が小さいフラックスメータが適していることが分かった。また、励磁波形の立ち上がり部など短時間で大きく変化する磁場の測定にはホールプローブは適さない。一方、サーチコイルは共通モードノイズを除去すれば、磁場分布の測定、及び、電流リップルの測定に有用であることが分かった。ただし、測定誤差を示す度数分布において他の測定器には見られない二つのピークが存在しており、その原因に関しては今後調査を行う。

現在、J-PARC RCS では半導体スイッチング電源を用いた新しいキッカーシステムの構築を計画している。キッカー電源の出力波形はバンプ電磁石よりもさらに速いマイクロ秒の高速励磁波形であり、電源が出力するパルス波形と磁場の分布との関係を高精度に測定するのは難しい。今回の知見を活かし、新キッカーシステムに最適な磁場測定器を選定し、磁場分布を高精度に確認する。

参考文献

- [1] <https://j-parc.jp/c/facilities/accelerators/rcs.html>
- [2] T.Takayanagi *et al.*, "Design of the shift bump magnets for the Beam injection of the 3-GeV RCS in J-PARC", IEEE Transactions on applied superconductivity, Vol.16, No.2, June 2006, pp. 1366-1369.
- [3] T. Takayanagi *et al.*, "J-PARC 3GeV RCS 入射バンプ電磁石の磁場測定", Proceedings of the 4th PASJ, B-22.
- [4] T.Takayanagi *et al.*, "New Injection Bump Power Supply of the J-PARC RCS", Proceedings of IPAC2015, WEPMA058, 2015.