

インコヒーレントチューンスプレッド測定にむけた高周波二極磁場エキサイタの開発 DEVELOPMENT OF THE MAGNETIC DIPOLE EXCITER FOR THE INCOHERENT TUNE SPREAD MEASUREMENT

加藤新一^{#,A)}, 原田寛之^{B)}, 發知英明^{B)}, 岡部晃大^{B)}, 大森千広^{C)}, 田村文彦^{B)}, 金正倫計^{B)}
Shinichi Kato^{#,A)}, Hiroyuki Harada^{B)}, Hideaki Hotchi^{B)}, Kota Okabe^{B)}, Chihiro Ohmori^{C)}, Fumihiko Tamura^{B)},
Michikazu Kinsho^{B)}

^{A)} Graduate School of Science, Tohoku University

^{B)} JAEA/J-PARC

^{C)} KEK/J-PARC

Abstract

For the high intensity hadron accelerator, the incoherent tune spread occurs by the space charge force. When the incoherent tune satisfies a betatron resonance condition, the beam emittance growth and the beam loss might occur. So it is necessary to reduce and control the incoherent tune spread as much as possible. To achieve this condition, it is desired to measure the incoherent tune spread directly. From the simulation results, it became clear that the incoherent tune spread size could be detected when the mono frequency dipole exciter was adopted. However, a huge input power is required when the exciter which kicks particles by the electric field is constructed because the necessary kick angle is large. Therefore, the new type magnetic dipole exciter has been examined. In order to estimate the necessary power, the shunt impedance of the test core which is scale down model was measured. As a result, it is supposed that the necessary input power is approximately several kW.

1. はじめに

大強度陽子加速器施設である Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC)^[1]は、181 MeV リニアック、3 GeV シンクロトロン(RCS)、50 GeV シンクロトロン(MR)の3基の加速器群から構成される。これらは世界最高クラスの大強度陽子ビームを物質・生命科学、原子核・素粒子、ニュートリノの各実験施設に供給し、最先端の実験を可能にする。特に RCS は、ミュオン生成標的及び中性子生成標的へのビーム供給と、MR の入射器という二つの役割を担っており、25Hz という速い繰り返しで、リニアックから入射された陽子ビームを3 GeV まで加速する。リニアックのエネルギーは今夏 400 MeV にアップグレードされ、RCS は、陽子シンクロトロンとしては世界初の出力領域である、従来の陽子シンクロトロンと比較して一桁大きい、1MW のビーム出力を目指している。

陽子加速器では、ビーム出力はビームロスによって制限される。なぜなら、ロスとなった陽子ビームは、真空ダクトや周辺の機器を放射化し、加速器のメンテナンスを困難にしてしまうからである。つまり、大強度出力を実現するためには、ビームロスを低減させることが最重要である。

大強度陽子加速器でのロスの起源として、空間電荷力によるインコヒーレントチューンスプレッドがある。Figure 1 に、RCS におけるチューンダイアグラムとチューンスプレッドを示す。電荷密度が増加すると、各々の粒子が持つ電荷による反発力(空間電

荷力)によって、外部磁場による収束力が弱められる。そのため、各々の粒子のベータatronチューンが減少する。さらに、各々の粒子が受ける空間電荷力は違っているため、チューンの減少量がそれぞれ異なり、チューンは広がってしまう。これがインコヒーレントチューンスプレッドである。チューンスプレッドによってチューンが共鳴条件に抵触することは、ビームロスの原因となり得る。そのため、チューンスプレッドを抑制、制御する必要がある。

RCS では、入射ビームを多周回に分けて入射することで大強度化を可能としており、この多重入射中に入射ビームを周回軌道中心から徐々にずらし周回ビームを意図的に太らせることで、電荷密度を抑制し、チューンスプレッドを抑制している^[2]。しか

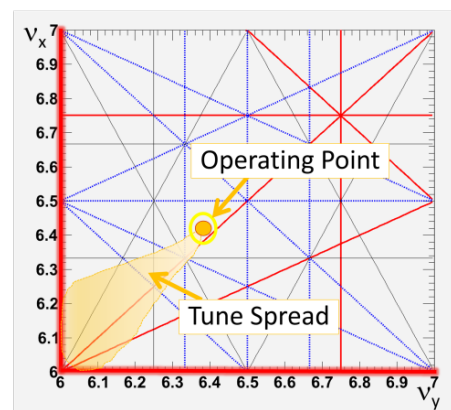


Figure 1: The tune diagram and the incoherent tune spread. Lines indicate the resonance conditions up to the 4th order.

[#] skato@post.j-parc.jp

し、今後この入射過程を用いたチューンスプレッドの抑制手法をさらに発展させていくためには、インコヒーレントチューンスプレッドの大きさや分布を直接測定できることが望まれる。そこで我々は、測定手法の検討と、測定のために必要となる高周波 2 極エキサイタの検討を行っている。以下では、これらの検討結果について報告する。

2. インコヒーレントチューンの 2 極共鳴

チューン測定の手法の一つとして、RF ノックアウト法がある。単色周波数を持つ 2 極エキサイタを励起すると、その周波数がチューンに同期した際、ビームは共鳴しロスとなる。つまり、エキサイタの周波数を走査し、ロスが起きる周波数を得ることで、チューンを測定できる。しかし、インコヒーレントチューンは 2 極キックでは共鳴を起こさないことが導き出される^[3]。そのため、インコヒーレントチューン測定に対して、単純に RF ノックアウト法を適用することは出来ない。しかし、多粒子シミュレーションの結果から、2 極エキサイタの周波数と同期したインコヒーレントチューンを持つ粒子は一時的に共鳴を起こし、ビーム分布が変化することが分かった^[4]。Figure 2 は、シミュレーションより得られた、181 MeV 入射直後の垂直方向のインコヒーレントチューン分布である。オペレーティングチュー

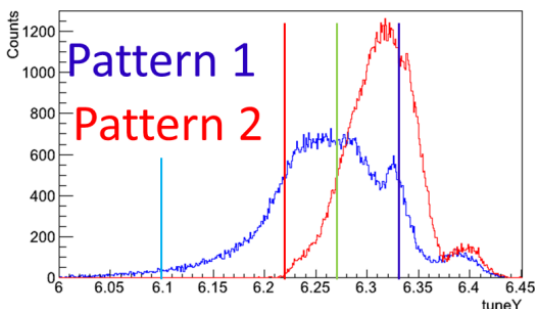


Figure 2: Two patterns of the vertical incoherent tune distribution after injection. Sky blue, red, green and blue lines indicate the $\nu_y = 6.10, 6.22, 6.27$ and 6.33 , respectively.

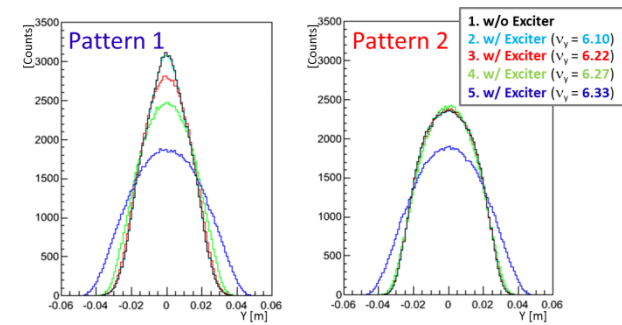


Figure 3: The vertical distributions with or without exciter kick. Black lines indicate the result in the case without exciter kick. Sky blue, red, green and blue lines indicate the result in the case of $\nu_y = 6.10, 6.22, 6.27$ and 6.33 exciter kick, respectively.

ンは(6.43, 6.43)で、ビーム出力 100 kW 相当の場合の結果である。入射パターンによって 2 つの分布を生成している。この分布に対して、Figure 2 に色線で示した 4 つのチューンに対応した周波数の垂直方向キックを与えた時の、垂直方向のビーム分布が Figure 3 である。

チューンに対応したエキサイタキックを与えた時には、ビーム分布が広がることが分かる。例えば、 $\nu_y = 6.22$ のエキサイタキックを与えた時、パターン 1 では分布が変化するが、パターン 2 では変化しない。つまり、高周波エキサイタを用いることで、分布の変化から、チューンスプレッドの大きさを観測することが出来ると考えられる。シミュレーションより、分布の変化を引き起こすためには、エキサイタには最低 100 μrad 程度の大きな蹴り角が必要であることが分かった。

3. 磁場を用いた高周波 2 極エキサイタの検討

高周波で 100 μrad 程度の大角度キックを、電極間の電場によって得ようとする場合、膨大な電力が必要となる。例えば、RCS における電極を用いたエキサイタ^[5]で 100 μrad のキックを得ようとする場合、数 MW もの入力パワーが必要となってしまい、現実的ではない。そこで現在、磁場を用いた高周波 2 極エキサイタを検討している。

エキサイタ周波数とチューンとを同期させるためには、少なくとも周回周波数である 600 kHz 以上の高周波で磁場を励起する必要がある。これに対応するため、磁場エキサイタの芯には、RCS や MR の加速空洞に用いられているファインメットコアを用いることを検討している^{[6] [7]}。これは、厚さ約 18 μm のアモルファスリボンを巻いたもので、コアは層状になっている。高周波磁束密度の高い領域でもコアの特性が変化しないため、従来にない高加速勾配を実現している。

高周波 2 極磁場エキサイタ全体の概要を Figure 4 に示す。コアをレーストラック状に形成し、片方の直線部をカットした C 型コアを二つ向かい合わせにする構造を想定している^[8]。入射直後のチューンスプレッドを測定することを想定し、400 MeV の陽子に 100 μrad 程度の蹴り角を与えることを考えると、

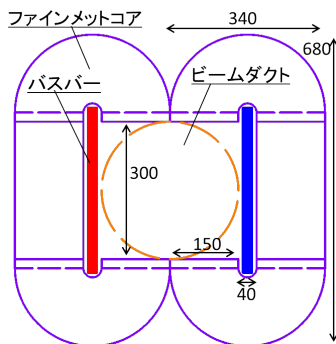


Figure 4: The schematic view of the magnetic dipole exciter. Unit is mm.

必要な磁場は $5.00 \times 10^{-4} \text{ T} \cdot \text{m}$ となる。磁極長(コアの厚さ)を 1 m とすると、必要な電流は、 120 A となる。

この系にコンデンサを並列につなぎ、共振させることを考えている。なぜなら、入力電流を $1/(Q \text{ 値})$ 倍に減らすことが出来るからである。適切な共振周波数は、実現可能なコンデンサ容量で決まってくる。コアの Gap 間距離と面積から、コアの厚さを 1 m とした時、インダクタンスは $1.26 \mu\text{H}$ となる。一方、真空コンデンサをつなぎ合わせることで実現できるコンデンサ容量は最大で数 nF 程度である。そのため、実現可能な共振周波数は、最低で数 MHz 程度となる。例えば、 3 MHz で共振させるとき、必要なコンデンサ容量は 2.24 nF である。

エキサイタに必要な入力パワーを見積もるためには、コアのシャントインピーダンス(R_p)がどの程度になるかを知る必要がある。そこで、スケールダウンしたテストコアを作成し、シャントインピーダンスの測定を行った。

4. テストコアと測定装置

テストコアとして、Figure 4 に示した実機を $1/4$ スケールに縮小した C 型コアを製作した。つまり Gap 長は 75 mm となる。厚さは 35 mm とした。

また、テストコアを測定するための装置を製作した。テストコアと測定装置の実際の写真を Figure 5 に示す。Gap を広げた際に磁束が広がったり漏れたりしないようにすること、実際の系に近い構造とすることを考慮し、コアの側面と上下を銅板で囲い、中心にバスバーを突き通す構造とした。バスバーは、コアの中心孔を十分に埋められる幅となっている。バスバー上部に入力した電流は、底面板、側面板、上面板へと流れるようになっている。底面板は可動式で、最大 3 個のコアを重ねることが出来る構造である。

5. 測定結果

テストコアのシャントインピーダンス測定の結果を、Figure 6 に示す。測定装置をネットワークアナライザに直列に接続し、インピーダンスの実数項 R_s 、



Figure 5: The picture of the test core and test stand.

虚数項 X_s から、シャントインピーダンス R_p を以下の式、に従って算出している。

$$R_p = R_s \left(1 + \left(\frac{X_s}{R_s} \right)^2 \right) \quad (1)$$

また、このコアを拡大した際に R_p は変わらず、コアの厚さ分だけ増加するとして、実機のインダクタンス L 、必要電流 I を用いて、並列共振回路での Q 値、最大入力パワー W をそれぞれ以下の式より算出した。

$$Q = \frac{R_p}{\omega L} \quad (2)$$

$$W = \left(\frac{I}{Q} \right)^2 R_p \quad (3)$$

(2)、(3)式より、パワー W は周波数 ω の 2 乗に比例し、 R_p に反比例することが分かる。Figure 6 の測定結果より、 R_p の周波数に対する増加率は、周波数の 2 乗よりも緩やかであるので、周波数が小さいほど必要パワーは少なくて済むことが分かる。実現できるコンデンサ容量との兼ね合いから、 3 MHz での共振を想定すると、Figure 6 より $R_p = 27 \Omega$ となった。この R_p を、実機で想定しているコアの厚さである 1 m 分になるように 28.6 倍し、実機のコアのインダクタンス $L = 1.26 \mu\text{H}$ と共に(2)、(3)式に代入した結果、 $Q = 65$ 、 $W = 5.3 \text{ kW}$ と計算された。

次に、この Gap 長 75 mm のコアを 3 つ重ねて、 32 nF の積層セラミックコンデンサを測定装置に並列に接続し、共振させて R_p と Q 値を測定した。測定結果を Figure 7 に示す。結果より、共振周波数は 3.09 MHz となり、共振のピーク値より $R_p = 35.9 \Omega$ 、共振の幅より $Q = 23.5$ という結果になった。つまり、

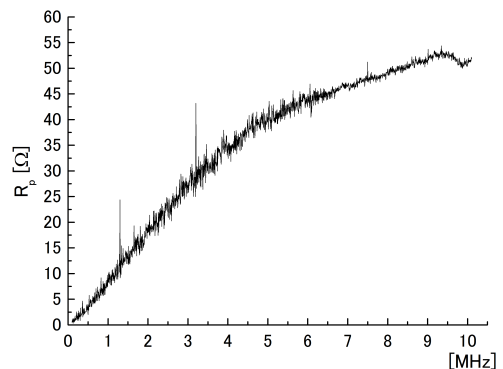


Figure 6: The results of the measurement of the shunt impedance of the test core.

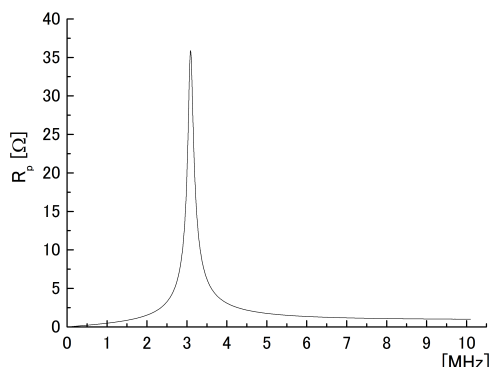


Figure 7: The results of the shunt impedance measurements connecting capacitor in parallel.

コア一つあたりの R_p は 12Ω となり、Figure 6 の測定結果よりも小さくなった。このため、 Q 値も減少し、この結果を(3)式に当てはめると、 $W = 18 \text{ kW}$ となり必要なパワーが増加することになる。

これは、接続したコンデンサの直列抵抗(R_s)が大きいため、コンデンサの $R_{p \text{コンデンサ}}$ が小さくなってしまい、

$$\frac{1}{R_{p \text{全体}}} = \frac{1}{R_{p \text{コア}}} + \frac{1}{R_{p \text{コンデンサ}}} \quad (4)$$

の関係式より、回路全体の $R_{p \text{全体}}$ が減少することによると考えられる。実際、接続したコンデンサを直接ネットワークアナライザで測定した結果、 3 MHz で $R_{p \text{コンデンサ}} = 66.3 \Omega$ であり、 $R_{p \text{コア}} = 27 \times 3 \Omega$ を(4)式にあてはめると、 $R_{p \text{全体}} = 36.5 \Omega$ と計算される。つまり、必要な入力パワーを小さくするためには、直列抵抗の小さなコンデンサを使用することが分かる。

6. まとめ

J-PARC RCS では、 1 MW もの大強度出力を目指している。そのためには、ビームロスの低減が必要である。ロスの原因の一つとして、インコヒーレントチューンスプレッドが挙げられる。そこで、これを抑制、制御するために、インコヒーレントチューンスプレッドの測定を目指している。シミュレーションの結果、高周波 2 極エキサイタを用いることで、プレッドの大きさを観測できることが分かった。そこで現在、エキサイタの開発を行っている。 3 MHz 程度の高周波で、 $100 \mu\text{rad}$ もの大きな蹴り角を実現するために、従来の電場を用いたものではなく、ファインメットを芯にした磁場エキサイタを検討している。今回、想定している実機をスケールダウンしたテストコアを作成し、シャントインピーダンスの測定を行い、必要な入力パワーの見積りを行った。その結果、直列抵抗の小さなコンデンサを並列に接続することで、必要な入力パワーは数 kW

程度に抑えられることが分かった。今後は、より精密な見積り可能とするために、Gap 長に対するコアのシャントインピーダンスの変化の測定などを行っていく。

6. 謝辞

本研究にあたり、野村昌弘氏、吉井正人氏、山本昌亘氏をはじめとする J-PARC RF グループの皆様、多くのご協力を頂きました。また、山本風海氏をはじめとする RCS グループの皆様からも、多くのアドバイス等頂きました。深く感謝いたします。

参考文献

- [1] Accelerator Technical Design Report for High-Intensity Proton Accelerator Facility Project, JAERI Report No.JAERI-Tech 2003-004 and KEK Report No.2002-13.
- [2] H. Harada, KEK Report No.2009-7.
- [3] S. Machida, OHO Accelerator Seminar Text (2000).
- [4] S. Kato et al., Proc. IPAC'13, China, MOPME020 (2013).
- [5] T. Miura et al., "Measurement of betatron-tune in the KEK 12GeV-PS/J-PARC" Proc. The 1th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Funabashi, E-6 (2004)
- [6] Y. Yoshizawa, S. Oguma, and K. Yamauchi, J. Appl. Phys. 64, 6044 (1988).
- [7] C. Ohmori et al., "HIGH GRADIENT MAGNETIC ALLOY CAVITIES FOR J-PARC UPGRADE" Proc. IPAC'11, Spain, p.2885 (2011).
- [8] C. Ohmori, "A low impedance kicker for high intensity proton rings" Proc. The 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Osaka, p.478 (2012).