

SIMULATIONS OF BEAM WAKE AT INJECTION/EXTRACTION DEVICES OF J-PARC MAIN RING

Yoshinori Hashimoto^{#,A)}, Takeshi Toyama^{A)}, Tadashi Koseki^{A)}, Masahito Tomizawa^{A)}, Hiroshi Matsumoto^{A)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK), 1-1 Oho, Tsukuba Ibaraki, 305-0801

Abstract

Beam wakes at injection/extraction devices in main ring of high power proton accelerator of J-PARC has been calculated. This report has two contents of wake simulations of electric septum and 1st magnetic septum for slow extraction.

J-PARC MR の入出射機器におけるビームウェイクの計算機シミュレーション

1. はじめに

大強度陽子加速器 J-PARC のメインリング(MR)の入出射機器におけるビームウェイクの計算機シミュレーションを、CST Studio Suite^[1]を用いて行っている。計算しているのは、入射キッカー電磁石、速い取り出し用キッカー電磁石、入射セプタム(2種)、速い取り出し用セプタム電磁石(3種)、遅い取り出し用静電セプタム、遅い取り出し用セプタム電磁石(3種)、コリメータ(3種)である。これらは、ビームから見える電磁場境界としての形状変化が大きいものばかりである。特に磁石では、フェライト、積層珪素鋼板、鉄などの磁性体要素を持っているため、磁性体としての特性も計算に含めている。また、その励振コイルの導体がビームから頭に見えているものは、それに接続しているケーブルや電源機器が負荷インピーダンスとなるのでそれらの影響も計算に含めている。

本報告は、これらのうち遅い取り出し用静電セプタム(ESS)と、遅い取り出し用セプタム電磁石 1 (SMS1)について行う。

2. ESS

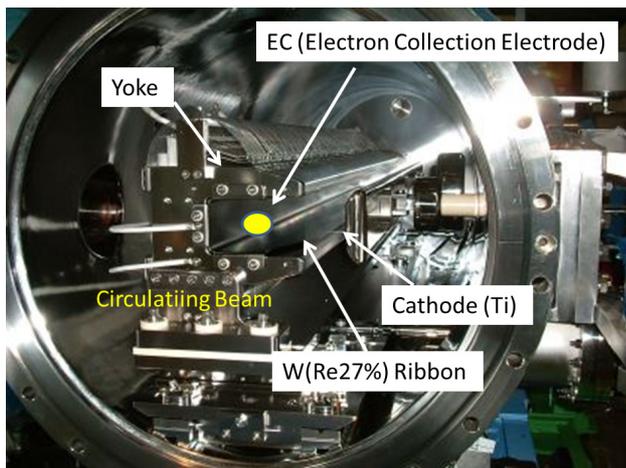


図 1: ESS のビーム走行空間。

ESS^[2]は、遅い取り出しラインの最上流部に位置し、静電電極で遅い取り出しビームをセパレートする役割をもつ。MR を周回するビームに対してのウェイクを計算する場合、高圧印加用のチタン電極(Cathode)はビームからは露わに見えない。ビームから見えるのは、セプタム面を形成するリボン電極と、それをサポートするステンレス製のヨーク、ヨークの内側に電子収集用に取り付けられた電極(EC)だけである。これらの断面におけるビームスペースは、 $116.4^H \times 66^V \text{ mm}^2$ である。ヨークのビーム方向の長さは、1500 mm であり、1700 mm 長さのタンクに収められている。(図 1)

2.1 ESS の計算モデルとテストビーム

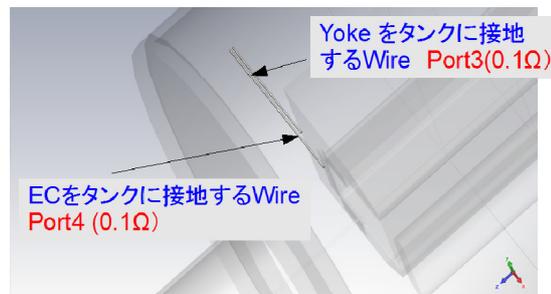
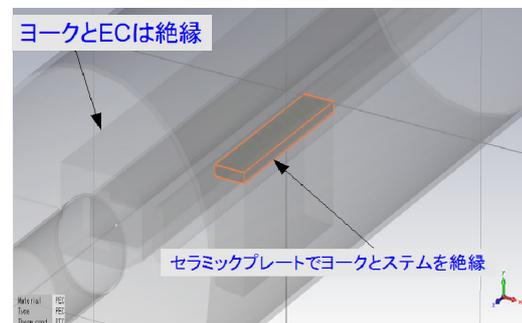


図 2: ヨークと EC の計算モデル。

計算に用いたモデルを図 2 に示す。実機と同じくヨークは ESS タンク中央部でタンク内のサポート架台とセラミックプレートで絶縁してあり(実機で

[#] yoshinori.hashimoto@kek.jp

は絶縁する位置が上下流方向の2か所であることが異なる), またヨークと EC は, セラミックスペーサで 3mm のギャップを持たせた絶縁方法を用いている. さらに, ヨークと EC は, は, それぞれ独立に, 4 mm 径のワイヤーにより ESS タンクに接地されている. 電圧と電流の励振をモニターしたいのでこのワイヤーには, 抵抗分 0.1Ω の Discrete Port として扱った. 尚, 計算には, 各構成要素の材料成分として, 金属部材とワイヤーの電気伝導度, セラミックの誘電率を考慮した. 総メッシュ数は, 324 万メッシュであった.

ウェイクフィールドを計算するための一次元ビーム (テストバンチ: 図 3) は, 光速比 β を 0.99 とし, 進行方向の電荷分布はガウス型で, σ は 10 ns (長さ 3m) とした. 総電荷量は, $2.4e-8$ C とした. その周波数成分は, 40MHz 程度までの分布である. 計算は, 同図(a)にあるようにビーム通過後の 130ns までを行った.

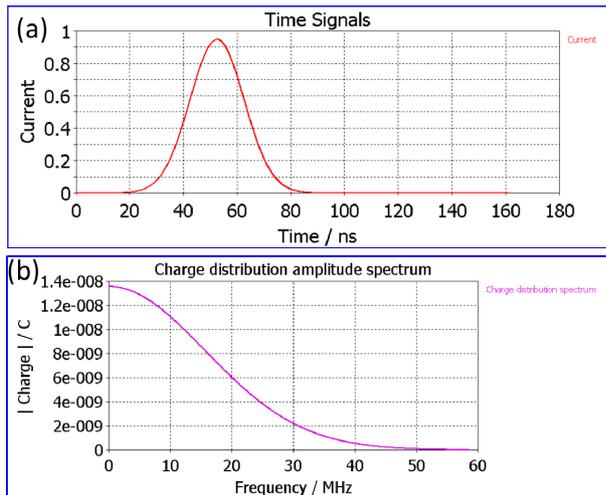


図 3: テストバンチの (a) 時間領域と (b) 周波数領域の電荷分布.

2.2 ESS 実機モデルのウェイクフィールド

ウェイク積分路をビーム軸 (以下同じ) とした場合の計算されたウェイクポテンシャルの空間方向成分を図 4 に示す. テストバンチの通過後に, X 方向 (水平方向) にビームポテンシャルの 50%以上の大きさを持つ顕著な振動が誘起されており, 減衰時間は長い. 位相が 90 度程度ずれて, Z 方向 (ビーム進行方向) にもビームの 1/5 程度のポテンシャル振動が誘起される. Y 方向 (鉛直方向) の振動は殆ど無い.

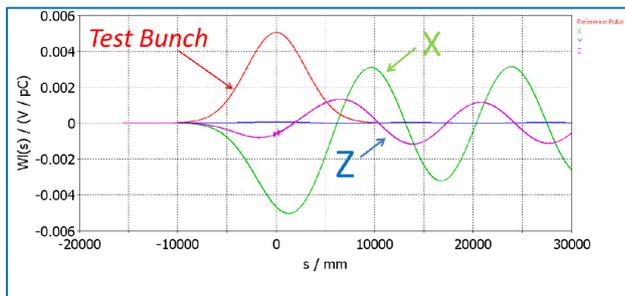


図 4: ESS 実機モデルのウェイクポテンシャル.

X, Z について, ビームから見たインピーダンスを図 5 に示す. いずれも, 21 MHz に最初のピークがあり, X 方向では 400Ω を超える大きな値であり, Z 方向も 160Ω 程度で比較的高い値となった. Y 方向は, 5Ω 以下であった.

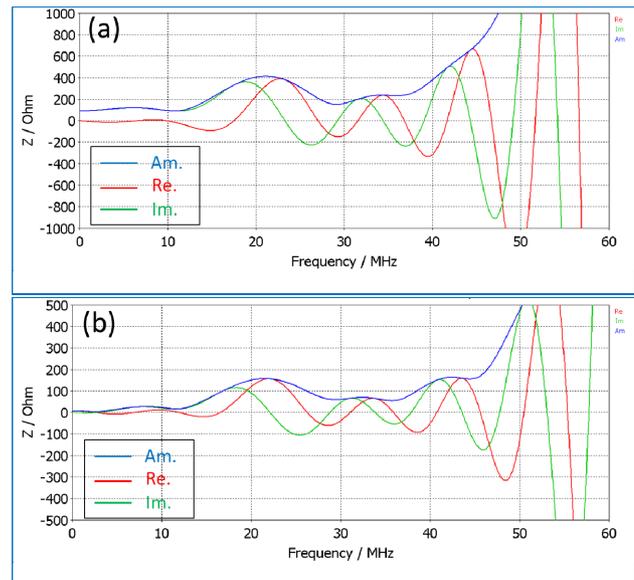


図 5: ESS 実機のビームから見たインピーダンス: (a) X 方向, (b) Z 方向.

ビーム通過時と通過後の電場 (E_{Total}) のコンタープロットを図 6 に示す. ビーム通過時には, タンクエンドとヨークの間に, 26kV/m の電場が発生している. ビーム通過後は, ヨークの端部とヨークとステムの間の電場の振動が顕著であり, 振幅のピークでは 1.5kV/m 程度の電場が発生する.

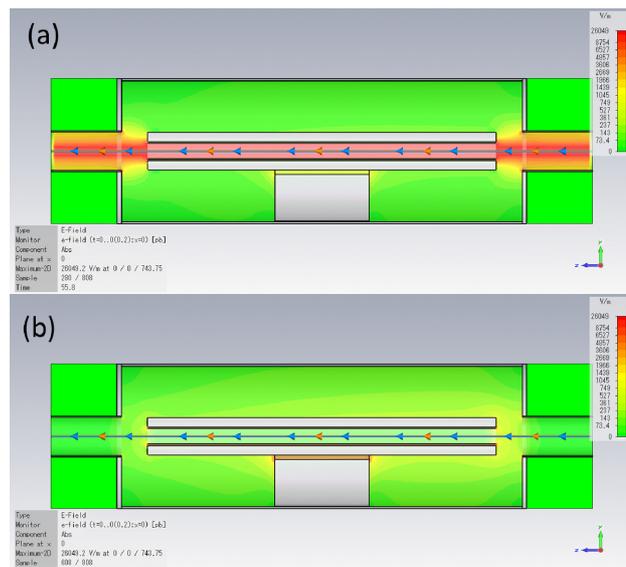


図 6: (a) ビーム通過時と, (b) ビーム通過後 70ns 後の E_{total} .

Port3 (ヨーク, タンク間のワイヤー), Port4 (EC, タンク間のワイヤー) の 0.1W の抵抗に発生する電圧モニターのデータを図 7 に示す. ビームに近い

EC に発生する電場は、ヨークに発生する電場の 4 倍程度大きく、いずれの電場も 21.7 MHz の振動である。また、振動波形から減衰の時定数はビーム時間幅よりもかなり長いことが予想される。

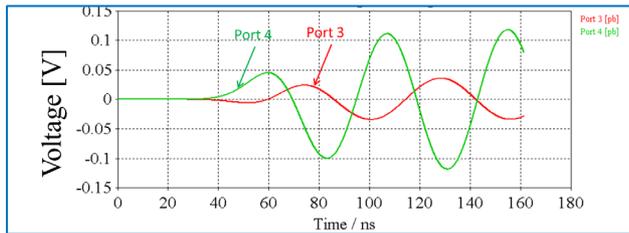


図 7: Port でモニターしたビーム通過後の電圧波形。ビーム中心は、50ns の時刻に通過している。

以上のことは、図 8 のような等価回路で生じる振動の可能性がある。ヨークとステム (ステージ) 間の並列共振回路にヨークと EC 間の直列共振回路が乗った形である。共振回路には、ワイヤーの抵抗 (図示していない) 以外には減衰機構が無いため、長い時間にわたる振動になっていると考えられる。

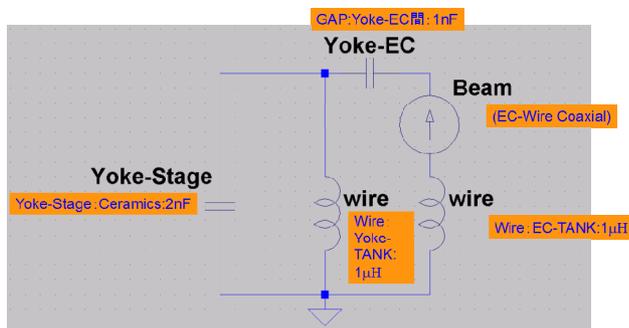


図 8: 電場振動機構の推測図。

2.3 修整を加えた ESS モデルのウェイクポテンシャルとビームから見たインピーダンス

上で見てきたように実機のモデルのウェイクフィールドの計算では、ビーム通過後に X, Z 方向の電場振動が誘起され減衰しなかった。ヨークは、静電セプタムとして機能する場合には、グラウンド側の電位となるので、ワイヤーでなく直接タンクに接地しても良いと考えられる。また、EC は、リボンに陽子ビームがヒットした際に発生する 2 次電子を収集する役割を持つが、あえてヨークに直接取り付けられた場合も考えてみる。

この 2 つの箇所 (ヨークとステム間, EC とヨーク間) で、実機での絶縁を止めて、導通状態 (ワイヤーなどの線での接合でなく金属板による面での接合) にした場合を修整モデルとして計算してみた。その結果のウェイクポテンシャルを図 9 に、X と Z のビームから見たインピーダンスを図 10 にそれぞれ示す。ウェイクポテンシャルは、ビーム通過後の振動が皆無である。ビームから見たインピーダンスは、実機モデルで 20 MHz の周波数で 400 Ω を超えていた X 方向の値は、15 Ω まで小さくなり、同じ

く Z 方向は、20 MHz で 160 Ω あったピークは消えて、通常のロスだけが見えるカーブとなり 20MHz での値は、65 Ω まで小さくなった。

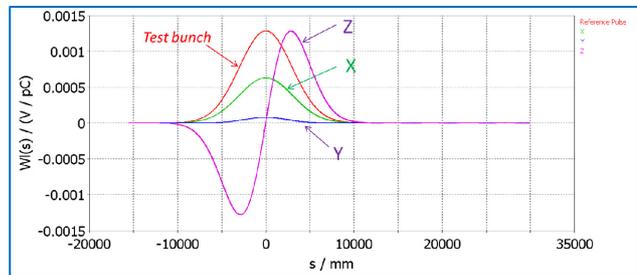


図 9: 修整モデルでのウェイクポテンシャル。

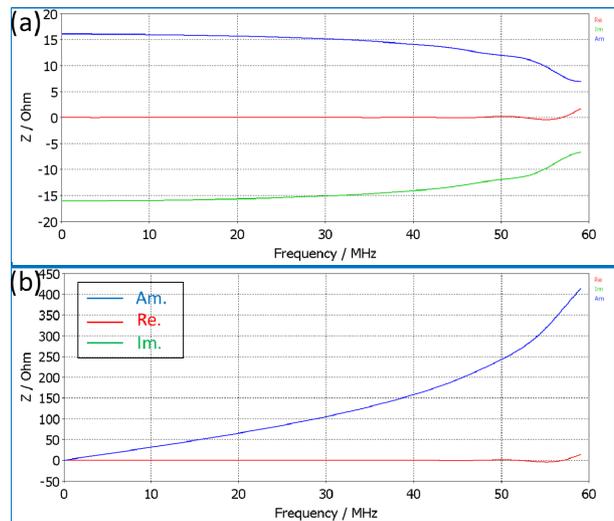


図 10: 修整モデルでのビームから見たインピーダンス, (a) X 方向, (b) Z 方向。

このように、ヨークをタンクに接地し、EC をヨークに直付けするモデルでは、ウェイクフィールドの振動などが無く、ビームから見たインピーダンスも小さなほぼ理想的な構造であることがわかる。

図示しないが、いくつかのテクニカルチョイスもあることを考えてさらに 2 つのモデルも計算している。実機モデルに対して、(1) ヨークだけをタンクに接地するモデル、(2) EC だけをヨークに接地するモデルである。これらの計算結果を要約すると次となる。(1)では、ビーム通過後の振動は残り、X と Z のビームから見たインピーダンスは実機モデルの半分以下(X:200 Ω, Z: 40 Ω @20MHz)になる。(2)では、ヨークでの接地ワイヤーも外したフロート状態にする条件のもとでは、上でみた修整版モデルとほぼ同じ、ビーム通過後の振動は消え、ビームから見たインピーダンスも上の計算とほぼ同じ状態になった。

これらの結果からわかることは、EC がフロート状態であるが、インダクタンス (ワイヤー) でグラウンドに結ばれていることが、実機モデルで見たビーム通過後のポテンシャル振動と高いインピーダンスをもたらしていることである。(2)の方法は、

ヨークは静電セプタムとして機能させる場合のグラウンド電極であることから、完全なフロート状態にはできないため、使用は適さないと思われる。

他の方法として、ウェイクによる電場の振動を減衰させる方法が考えられる。対策として振動回路に大きなダンピング抵抗を入れることを考えても良いが、X, Z のインピーダンスを減じる効果は低い可能性がある。

3. SMS1

SMS1^[3]は、遅い取出しラインの ESS 2 台の次に位置するセプタム電磁石である。鉄の C 型電磁石の開口部に絶縁を設け、薄いセプタム導体を配置してある。遅い取出しビームは、C 型のヨークとセプタム導体で囲まれた均一磁場内を通過し、周回ビームは、セプタム導体の外側の磁場フリーの領域を走る。電磁石のヨークの長さは 1600 mm で、1852mm の長さのタンクに収められており、2 台のタンクを連結した構造になっている。本計算は、電磁石 1 台の場合に、電磁石を励磁しない場合の計算とし、周回ビームだけを扱ったものである。

3.1 SMS1 の実機計算モデル

SMS1 の計算モデルを図 11 に示す。C 型電磁石は、タンクのステージとは、セラミックスで絶縁してある。セプタム導体の外側の周回ビームの走行空間には、断面が半円形の rf シールド (直径 180 mm) が配置されている。これはアルミ材質であり、真空のコンダクタンスを低下させないためのパンチングメタルである。半円の開口部は、C 型電磁石のヨークに向き合うが、この部分は、絶縁ワッシャを介してヨークに接続されている。また、半円のドーム側からは、直径 4 mm のワイヤーでタンクに接地されている。

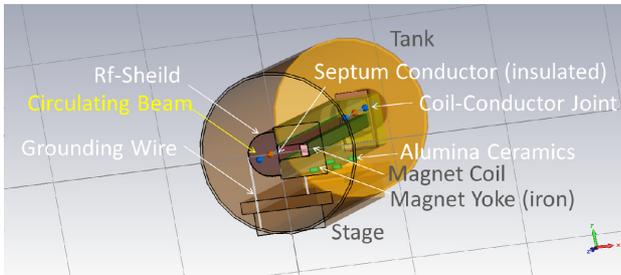


図 11: SMS1 の計算モデル。タンク中央部断面から見たスケルトン図。電流フィードポートは、反対側に位置する。

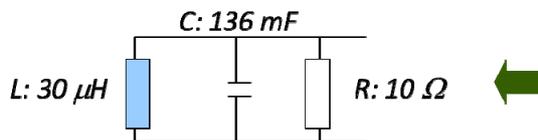


図 12: ビームから見た電源の等価回路。

SMS1 では、ビームからセプタム導体を通して DC 電源が見えているため、ビームから見た電源の等価回路 (図 12) を入れて計算を行った。ただし、SMS1 から電源までの電源ケーブル (単線) は考慮していない。また、計算に用いるテストビームは、2.1 で述べたものと同じである。各構造部材の電気特性を ESS と同じく計算に含めた。総メッシュ数は、870 万メッシュであった。

3.2 SMS1 実機モデルのウェイクフィールド

計算された SMS1 実機モデルのウェイクポテンシャルを図 13 に示す。X 方向のポテンシャルが、ビーム通過後に、ビームポテンシャルとほぼ同じ大きさで振動を起こす。Y と Z のポテンシャルの振動はの振幅はその 1/6 以下程度である。

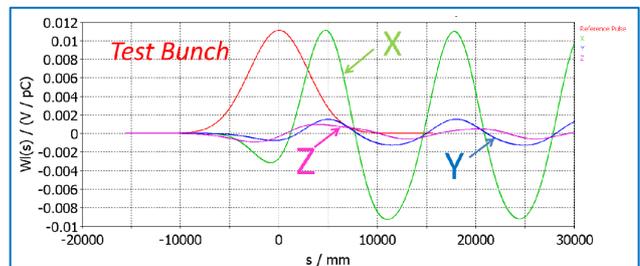


図 13: SMS1 実機モデルのウェイクポテンシャル。

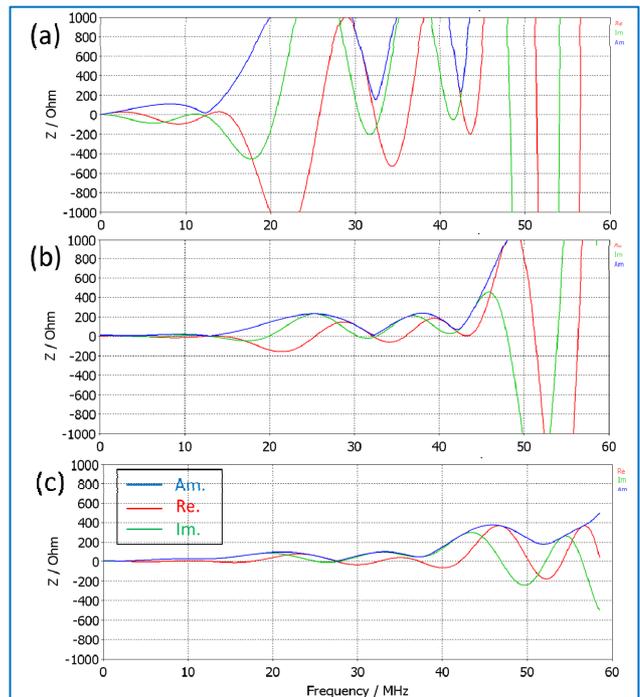


図 14: SMS1 のビームから見たインピーダンス。(a) X 方向, (b) Y 方向, (c) Z 方向。

次にビームから見たインピーダンスを図 14 に示す。X 方向が他と比べて顕著に大きい。X 方向では、DC から 13 MHz までは、130 Ω 程度の範囲であるが、

13 MHz を超えると大きく成長し、20 MHz では、1000 Ω を超えてしまう。Y 方向は、13 MHz までは、ほとんどゼロに近いが、13 MHz を超えると 26 MHz に 220 Ω のピークがあり、42 MHz 以上では大きく成長し、50 MHz では 1000 Ω を超える。Z 方向では、37 MHz あたりまで 100 Ω 以下であり、47 MHz で 400 Ω のピークがある。

ウェイクの電場(E_{TOTAL})を図 15 に示す。ビーム通過時には、最大 3.8 kV/m の電場が、rf-shield とヨーク、セプタム導体、タンクエンドとの間に発生している。ビーム通過後 60 ns でもこの rf-shield と他部との電場が残る。主に X 方向の電場である。

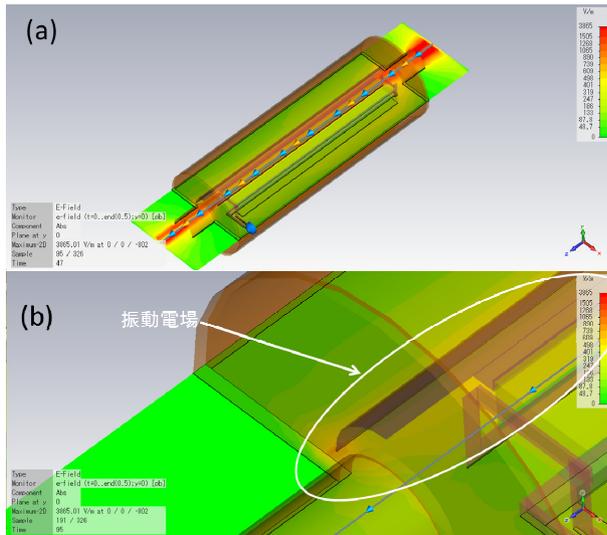


図 15: 水平断面でみた E_{TOTAL} . (a)ビーム通過時のタンク全体, (b) ビーム通過後 60 ns 後のタンクエンド部。Rf-shield からセプタム部とタンクエンドに向けて振動する電場が残っている。

負荷とした電源回路で見た電圧波形を図 16 に示す。ビーム中心が 50ns の時刻に通過したのちに、20 MHz の振動が誘起されている。

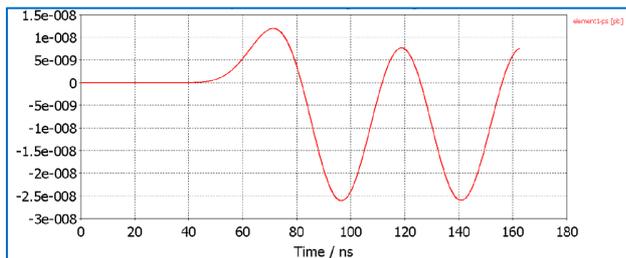


図 16: 電源回路でモニターした電圧波形。縦軸スケールは、arbit. .

これらから、特に rf-shield と対向部であるセプタム導体、電磁石ヨークに対して電場が誘起され、対向部との間のキャパシタンスと、rf-shield とグラウンドとの間のワイヤーのもつインダクタンスが共振

していると考えられる。対向部のうち、ヨークがグラウンドと絶縁していることがあり減衰時間が長いと思われる。セプタム導体には、図 12 の電源回路がつながっており、それらとの間でエネルギーのやり取りが行われ、最後は電源側の 10 Ω で減衰すると思われるが、減衰の様子があきらかに小さいのため、かなりの時間を要するとみられる。

ここでは、図示しないが、電源側がオープンであるとした場合の計算も行っている。その場合でも、X 方向の電場の振動が誘起されるが、周波数が異なり 50 MHz 程度の振動であった。また、X 方向のビームから見たインピーダンスは、20 MHz で 200 Ω 程度であり、35 MHz 以降で、1000 Ω オーバーに向かう急激な上昇が見られている。Y 方向、Z 方向のビームから見たインピーダンスは、いずれも 100 Ω 以下で 35 MHz あたりまで変化が少ない。このことから、ビームの後方時間で振動する電場には明らかに電源の影響が大きいことがわかる。

Rf-shield は、周回ビームからタンク内の大きな空間が見えないようにするための境界を与える役割を持っている。インダクタンスが発生しない程度の太い導体を用いてのグラウンドの方法が対策のポイントになると考えられる。

4. まとめ

MR では、145 kW のビームパワーとなり、さらなる増強が続けられている。そのような中でビーム不安定が見られている。横方向の問題も顕著になっている。ビームから見て特にインピーダンスが高い大型の構造を持つ機器では、対策の必要なものも出てくると考えられる。今回、計算と考察を加えた ESS や、SMS1 においてもシミュレーションにおいては、ビーム後方時間にいずれも 20 MHz 程度の周波数の主に横方向の振動する電場が現れている。過去の MR のビームデータをあたって、ビームスペクトルは 30MHz 以上までブロードであり、20 MHz あたりに突出するようなピークは無い。さらに、ロスファクターや、後方のビームがウェイク電場でうけるキックの時間領域でのシミュレーションを行い、ここで述べた問題をもう少し深く検討する予定である。

SMS1 の計算では、構造と電源の仕様について KEK・武藤亮太郎氏、岡村勝也氏にコメントをいただいた。

参考文献

- [1] CST studio suite, <https://www.cst.com/2011/>
- [2] Y. Arakaki, et al., proc. of IPAC'10, Kyoto, Japan, p.3900.
- [3] R. Muto, et al., 2009 年加速器学会プロシーディングス.