

Eddy-current type septum magnet用 ビーム結合インピーダンス対策部品の評価の進捗

18 Oct 2022

小林愛音

高エネルギー加速器研究機構 (KEK)

第19回日本加速器学会年会 講演番号TUOB01

共著者：外山毅¹、中村剛¹、菖蒲田義博²、石井恒次¹、富澤正人¹、佐藤洋一¹、竹内保直¹

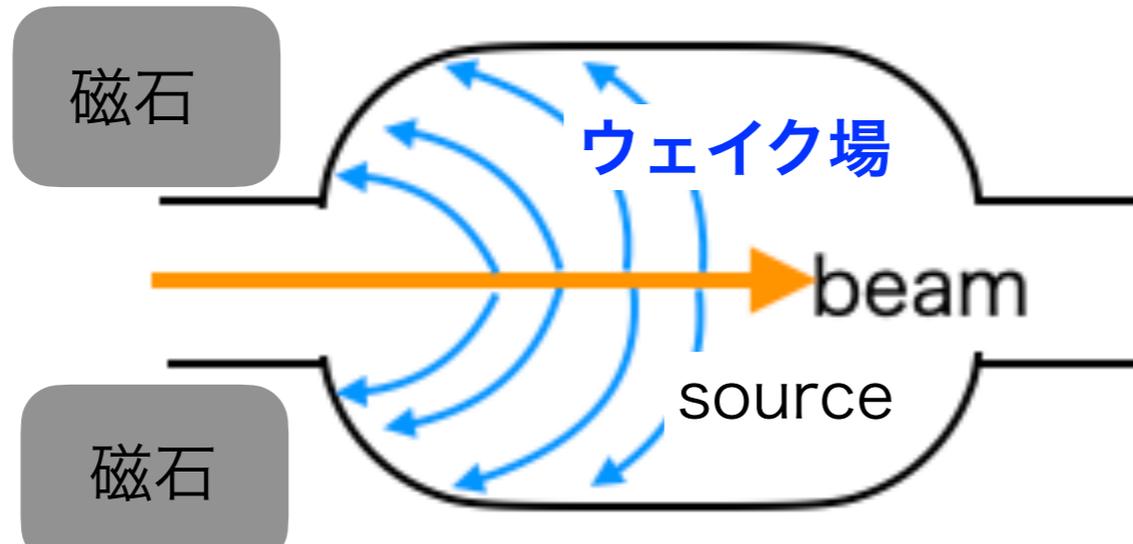
1: KEK, 2: JAEA

目次

- 研究背景
 - ビームロスの原因になる加速器内の構造の影響
 - MRビーム増強に向けたビーム不安定性の課題
- インピーダンスのビームへの影響
 - debunch時のビーム不安定性
- 新FXセプタムのビーム結合インピーダンスの対策
 - 対策方法
 - インピーダンス対策の実機の評価
 - ワイヤー法によるインピーダンス測定
 - ビームへの影響
- まとめと今後

加速器内の構造のビームへの影響

構成要素（ダクトや加速空洞、磁石、各装置の構造）



鏡像電磁場による空間電荷効果

ダクトの壁の抵抗性

ウェイク場：

ビームが加速器の各構成要素の中を通るときにそれらと相互作用してできる電磁場

Fourier変換

ウェイク場（時間の関数） \Leftrightarrow ビーム結合インピーダンス（周波数の関数）

→ビームに影響を与える（チューンシフト^[1] →ビームロスにつながる
ビーム不安定性

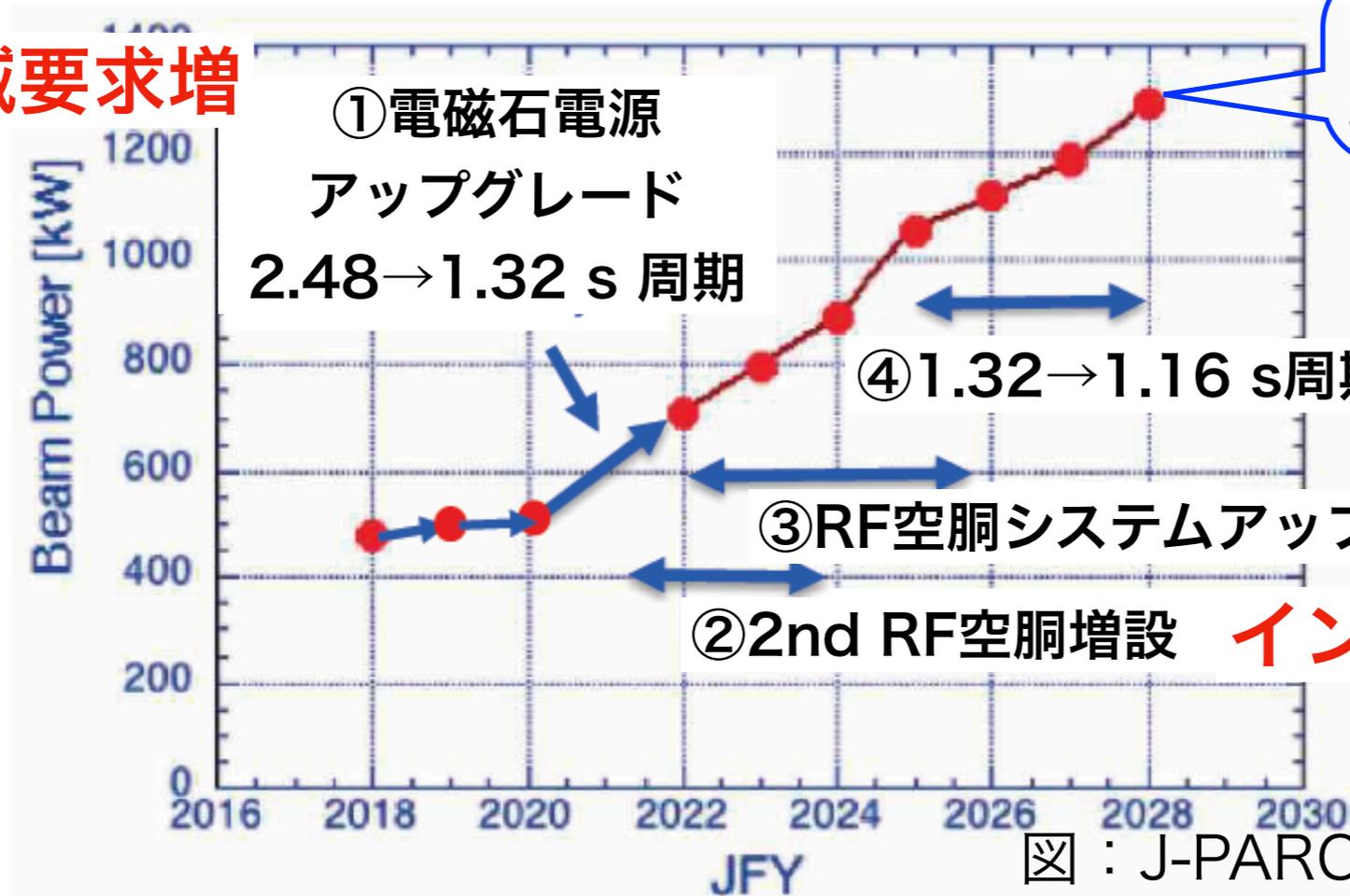
インピーダンスはビームに影響を及ぼし、ビームロスを引き起こす

→影響量は見積もることができ、対策すればロスを防げる

J-PARC MRビーム増強への課題

今年度からFX >750 kW、SX >70 kW運転を目指した調整が始まった
ビーム不安定性抑制にとって厳しい条件になる

ビームロス削減要求増



**粒子数3割増
不安定性増大**

インピーダンス源増加

図：J-PARC TDRより

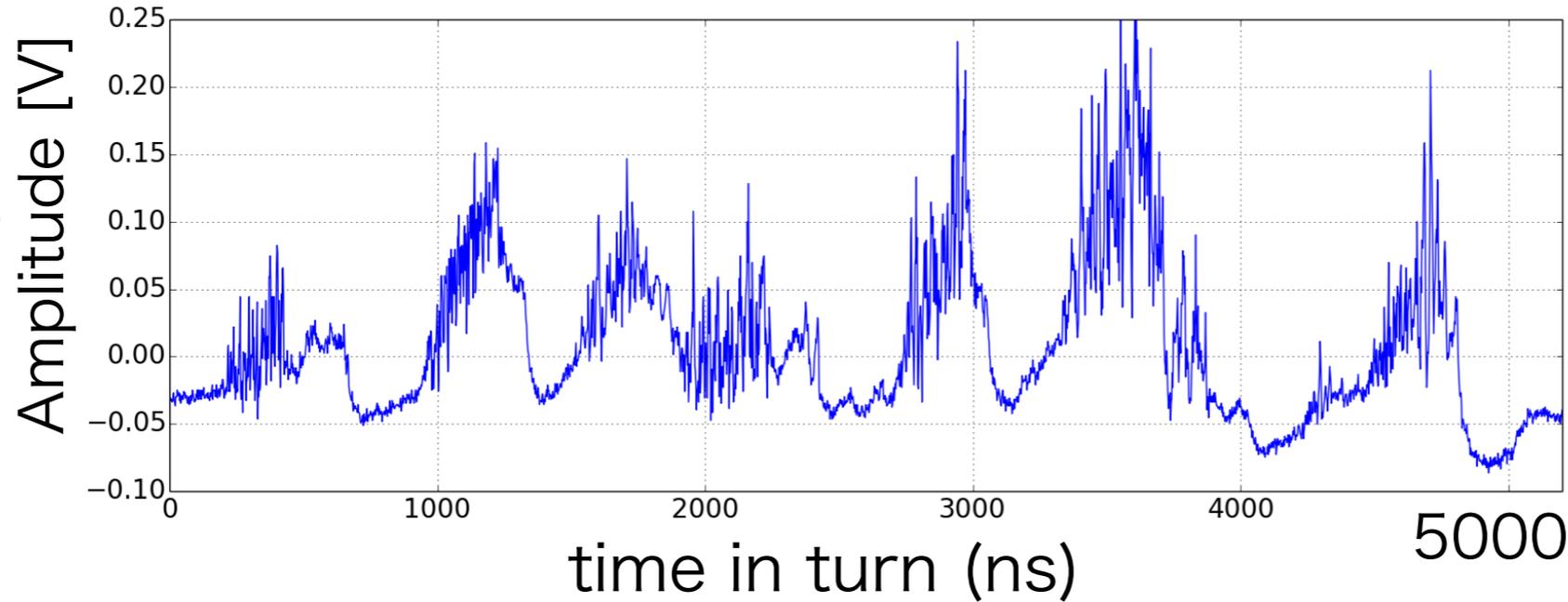
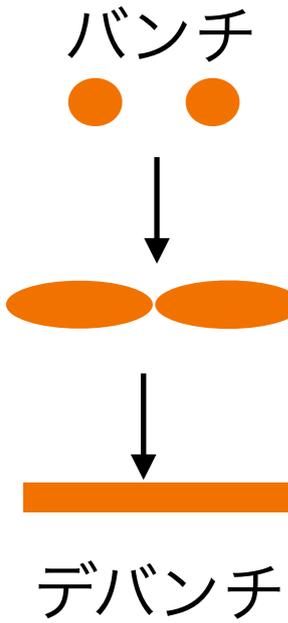
インピーダンス対策によるビームロス削減は大強度化には不可欠
2027年度の運転までの対策が鍵

インピーダンスの問題の克服が必須

MRに点在するインピーダンス源の対策背景

SX運転のフラットな連続ビームを作る過程におけるビーム不安定性→ビーム強度を上げる妨げ

縦方向ビーム不安定性があるときのビーム波形の例

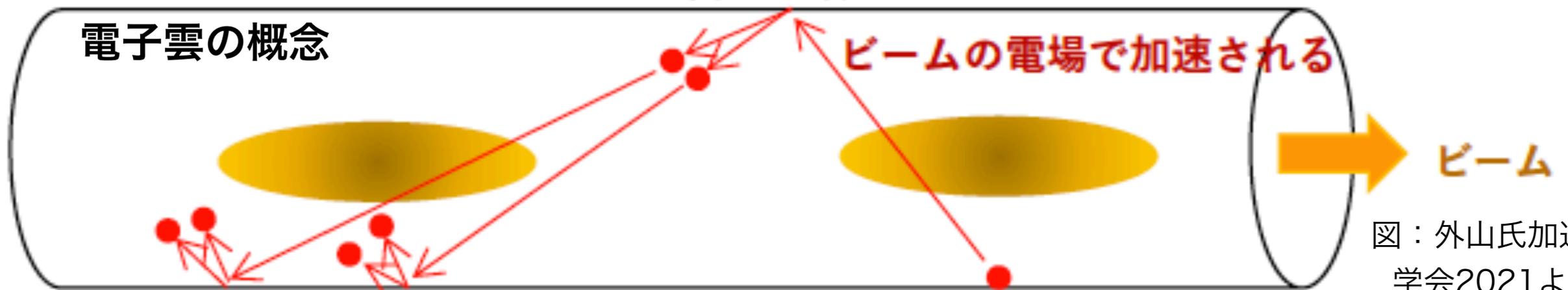


Wall current monitor
の信号@デバンチ開始

RF電圧オフから60 ms後
杉山氏による測定

不安定性と電子雲発生が密接に関係している

2次電子放出



図：外山氏加速器
学会2021より

電子が増殖し電子雲が成長する

起源：ビームロス、残留ガスとの衝突

真空悪化
ビームロス

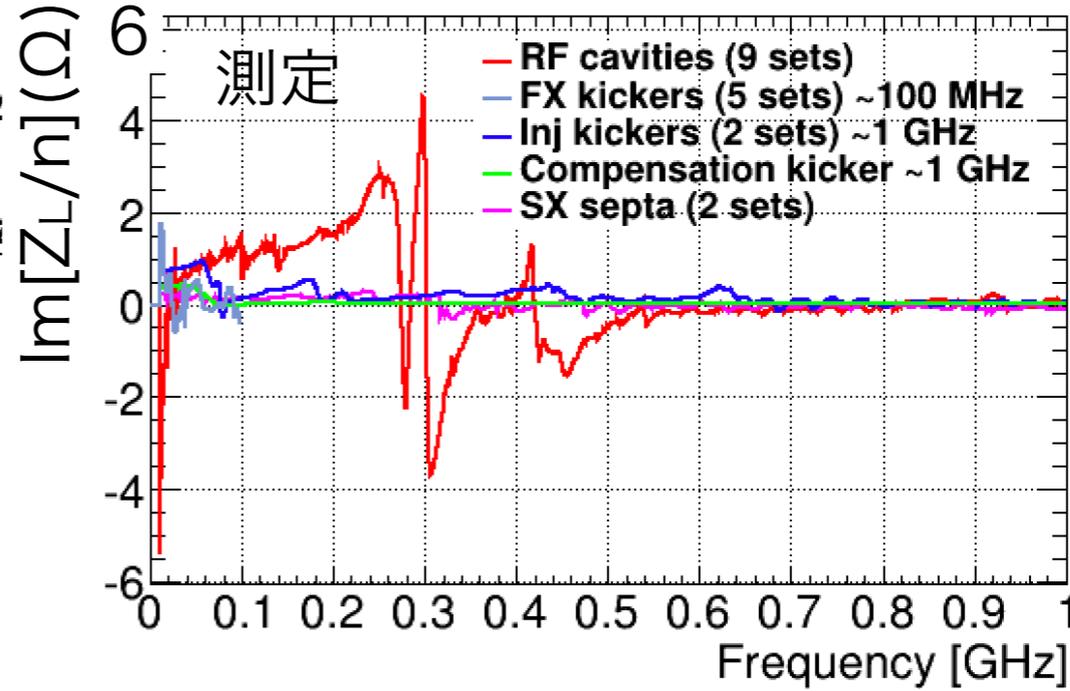
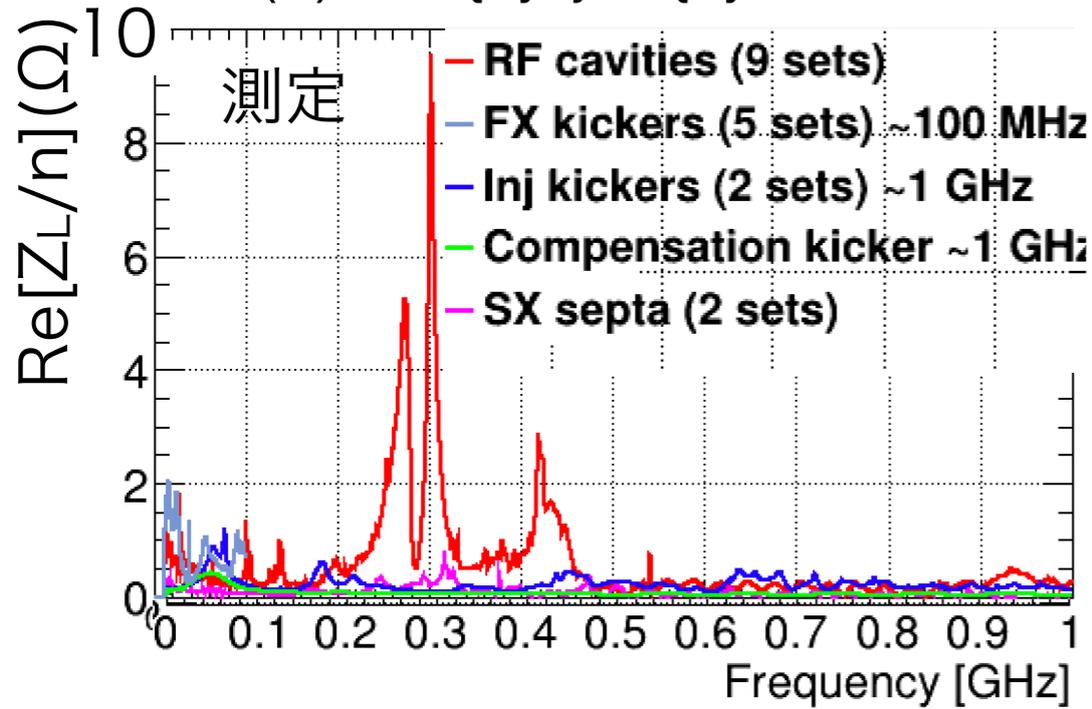
横方向不安定性

今後FX運転でも問題になる可能性が高く、
ビーム不安定性の原因解明と対策が必須

MRに点在するインピーダンス源の影響

$$Z(\omega) = \text{Re}\{Z\} + j \text{Im}\{Z\}$$

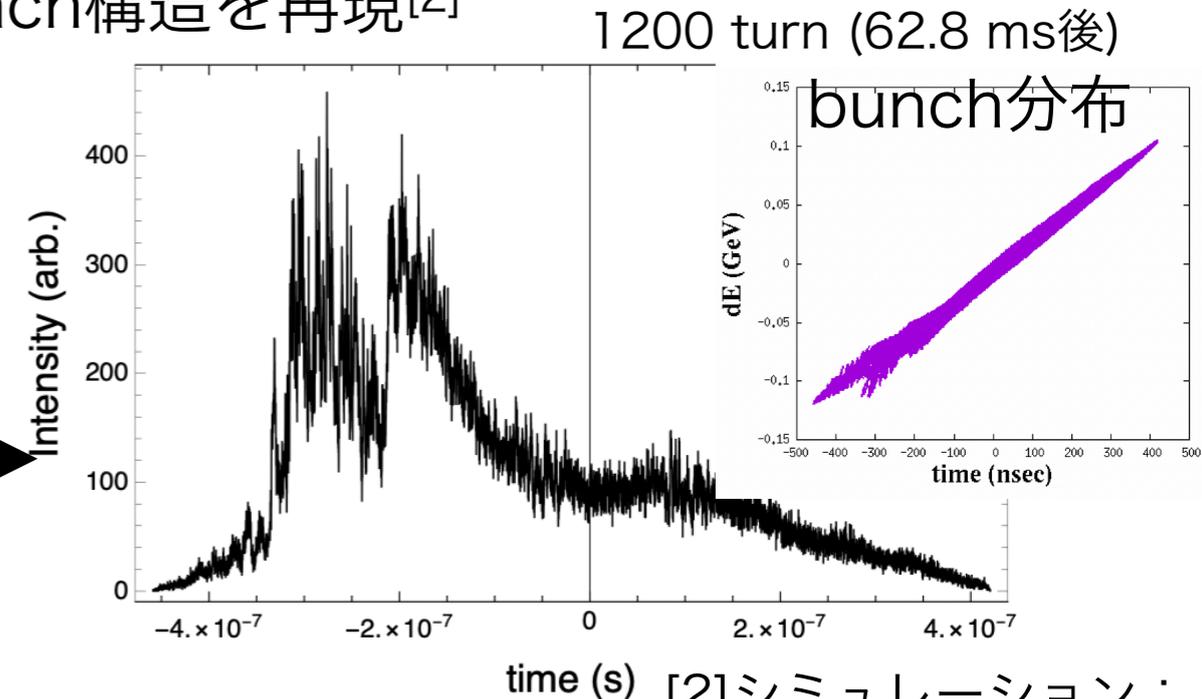
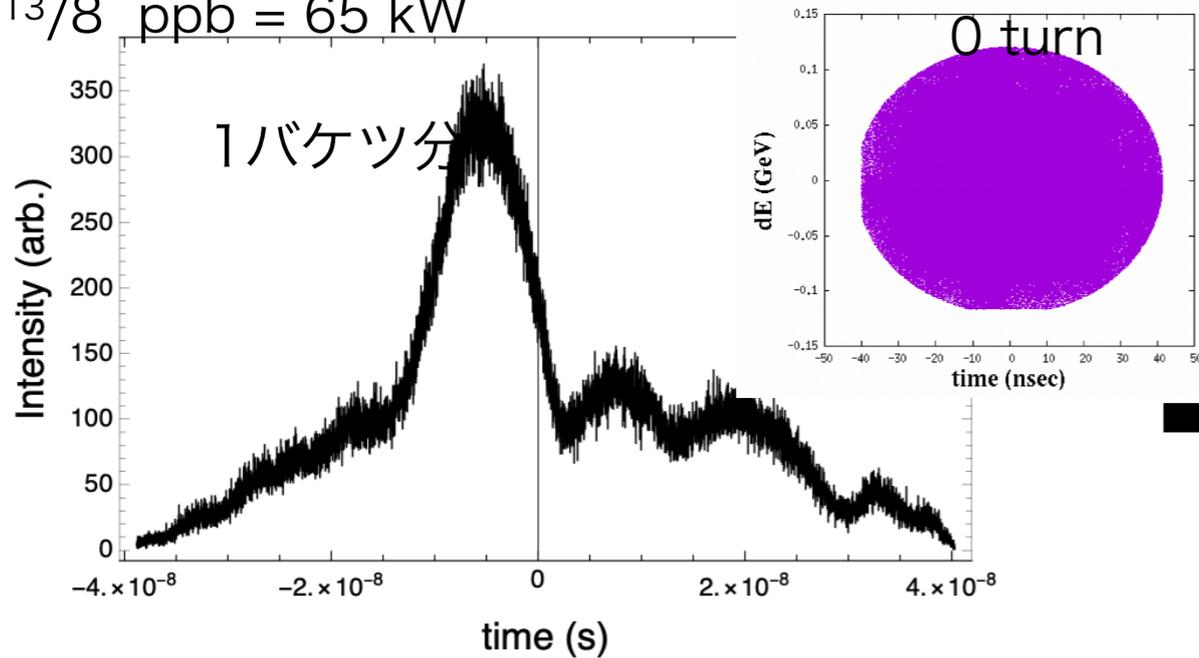
$$n = \text{周波数}f / \text{周回周波数}f_{\text{rev}}$$



ビームのシミュレーション： wall current monitorによる波形測定結果を初期条件として

インピーダンス測定結果を用い縦方向のmicro bunch構造を再現[2]

$7 \times 10^{13} / 8$ ppb = 65 kW



[2]シミュレーション： 富澤氏 ATAC2022より

装置のインピーダンスとビームの時間構造の関連が

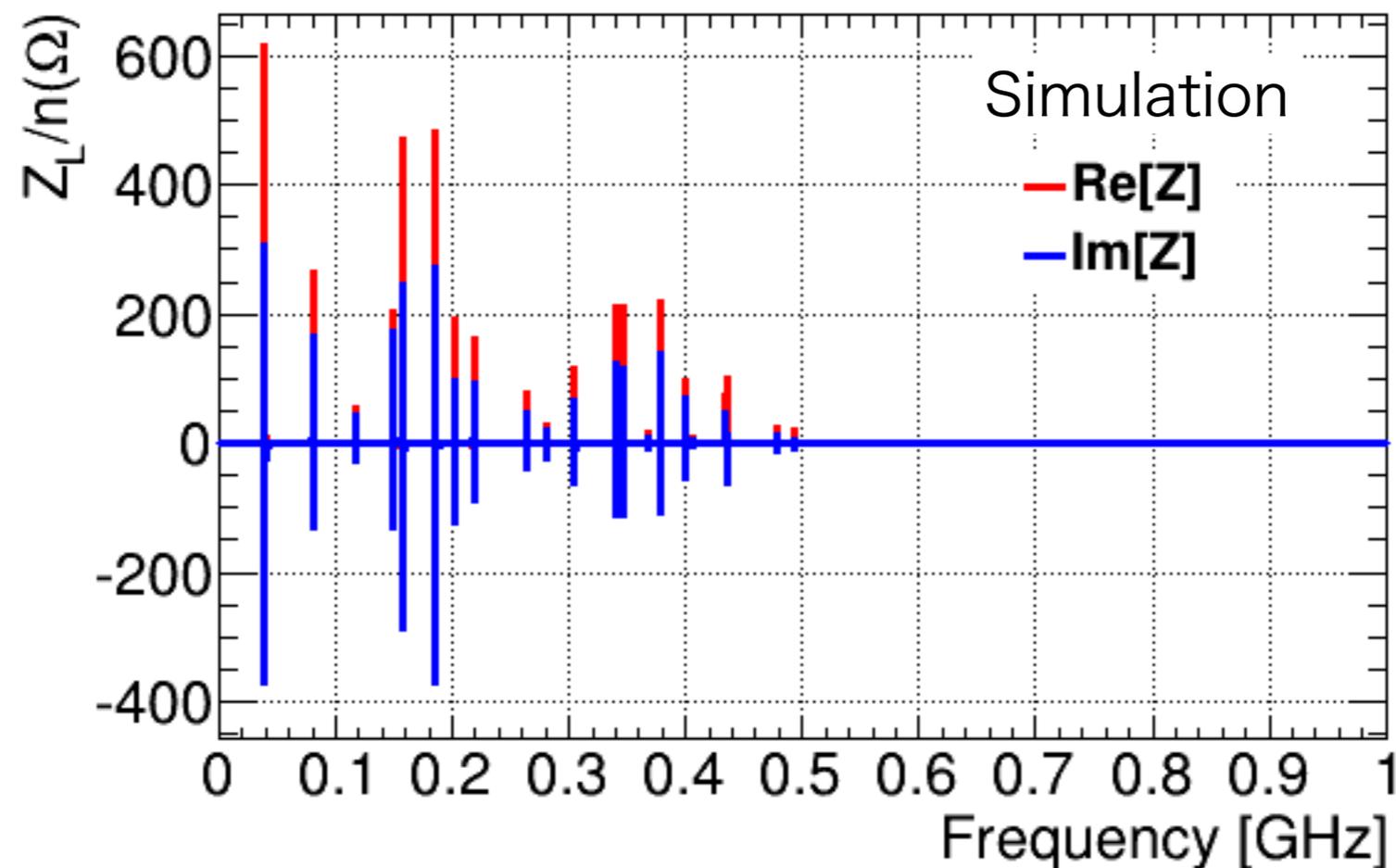
シミュレーションからも示唆されている

インピーダンスの目標値と新しい装置

不安定性抑制に向けた縦方向インピーダンス Z_L の目標@MR : $\left| \frac{Z_L(f)}{n} \right| < 0.5 \Omega$

Keil - Schnell criterion および測定済みの装置のインピーダンスが考慮された値

新しいFXセプタム (Eddy-current type magnet septum) のインピーダンス



基準を満たさず他の装置を大きく上回るインピーダンスを持つことが判明 → 対策の必要がある

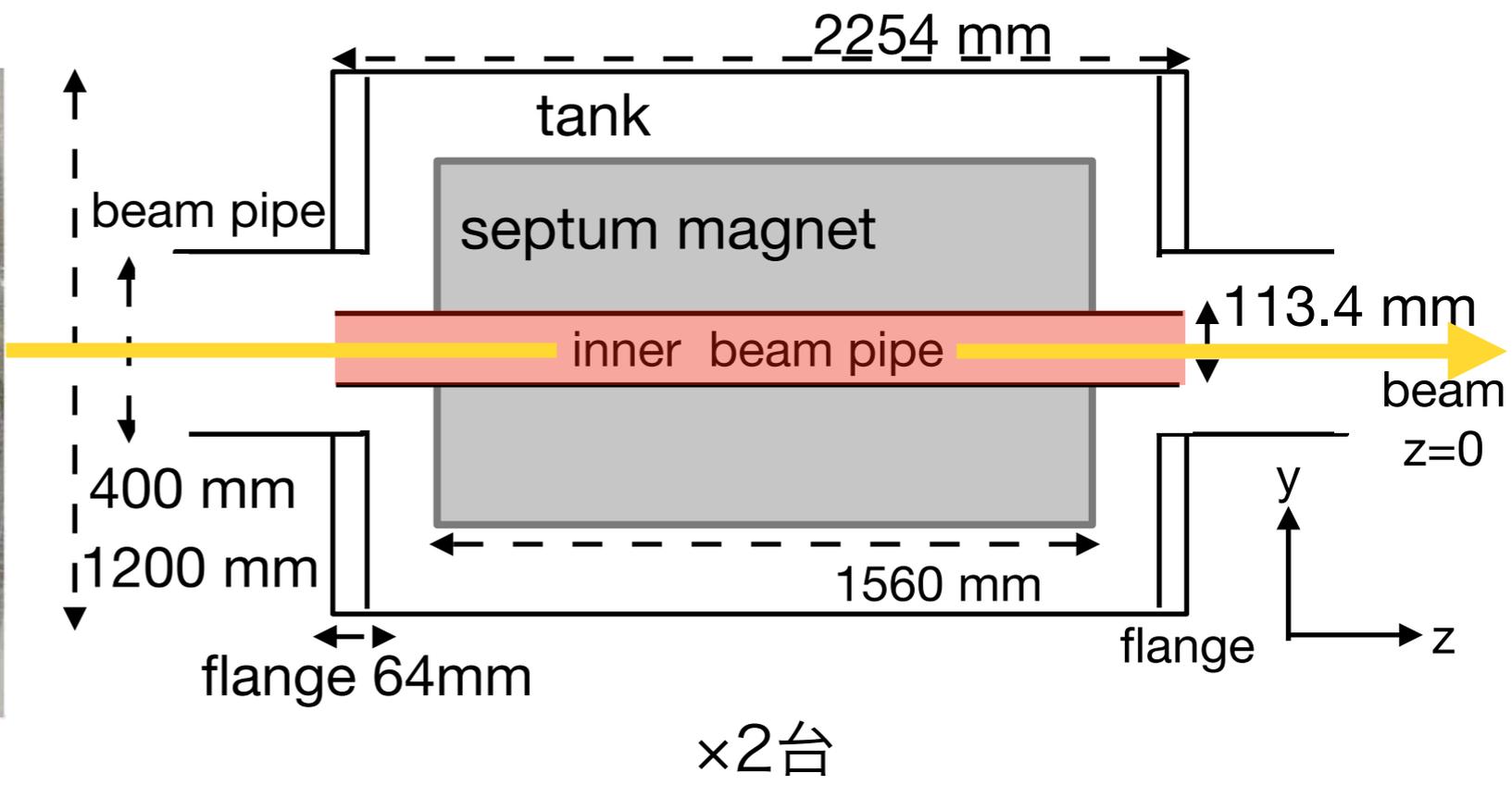
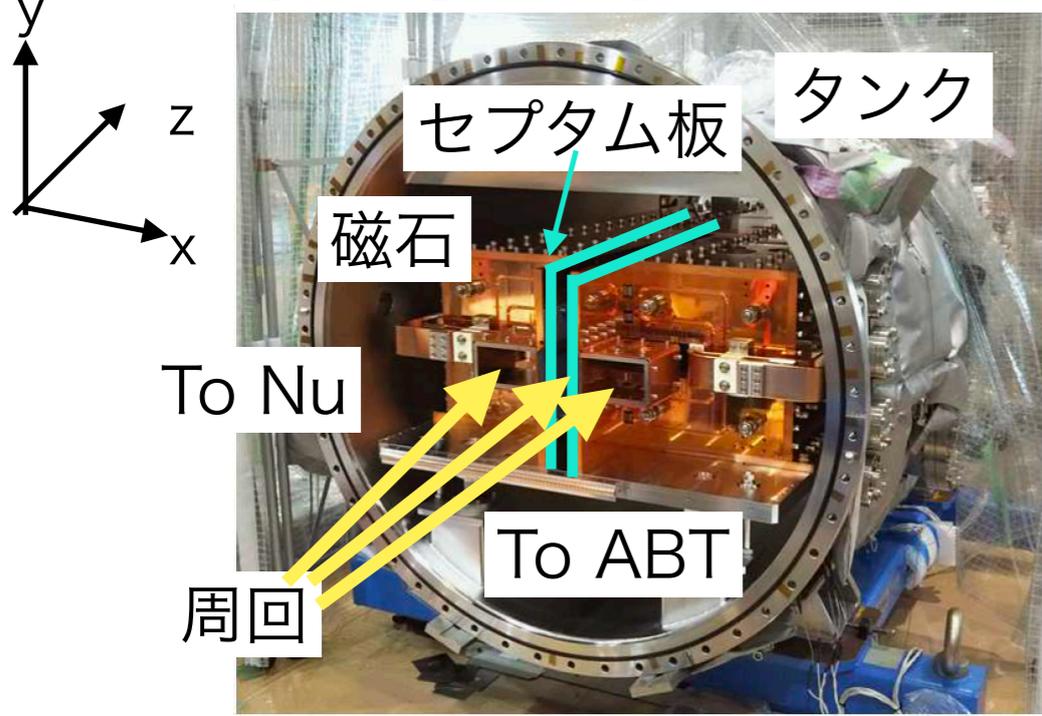
新しいセプタム (FX Eddy-Current Type magnet Septa)⁸

- 構造

高繰り返し (1 Hz) 化へ対応できるものに新規入れ替えされた
漏れ磁場低減のためセプタム板の間に鉄製インナービームパイプ[3]

[3] T. Shibata et al., JPS Conf. Proc. 33, 011033 (2021)

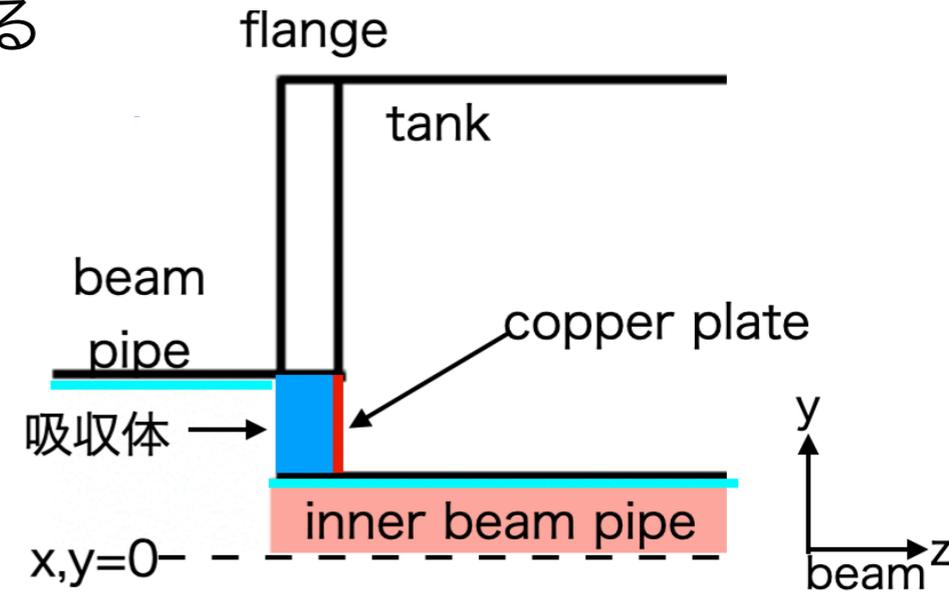
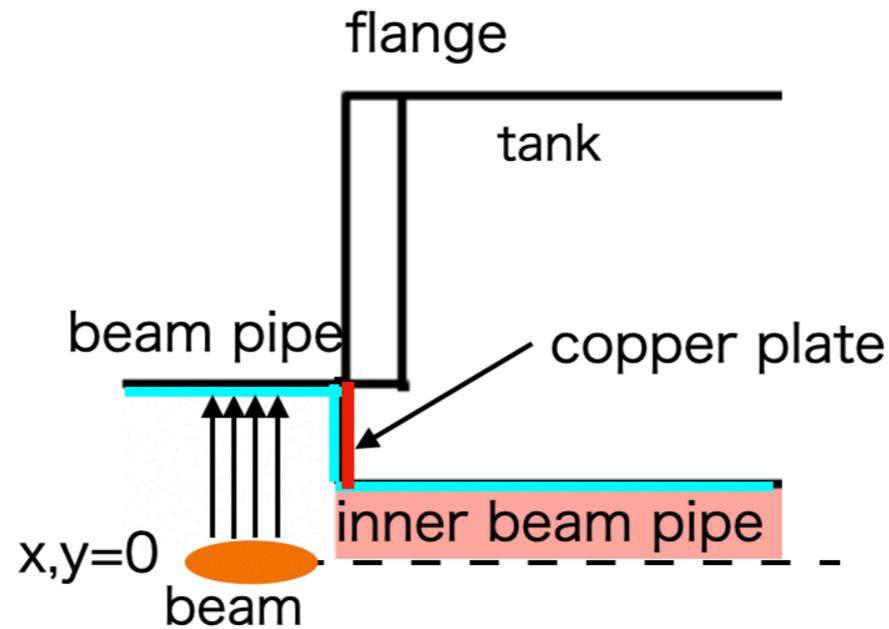
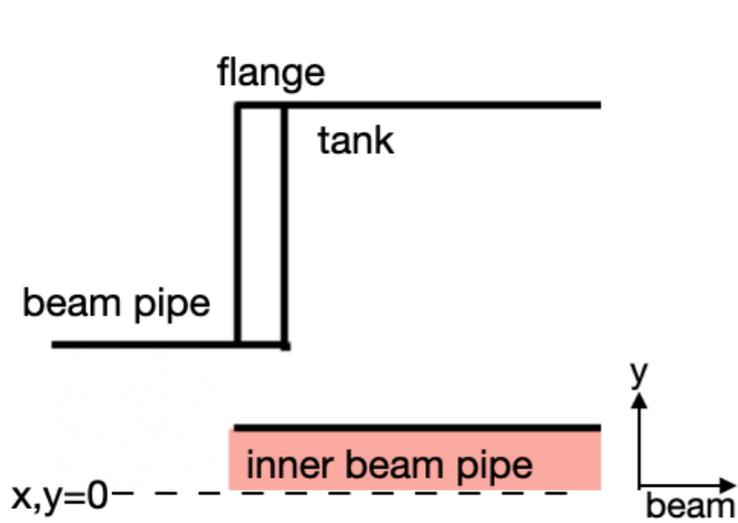
写真：芝田氏加速器学会2021より



ビームパイプとインナービームパイプがスムーズにつながっておらず
ミラー電流がタンクの中に流れ込むことが大きなインピーダンスの原因

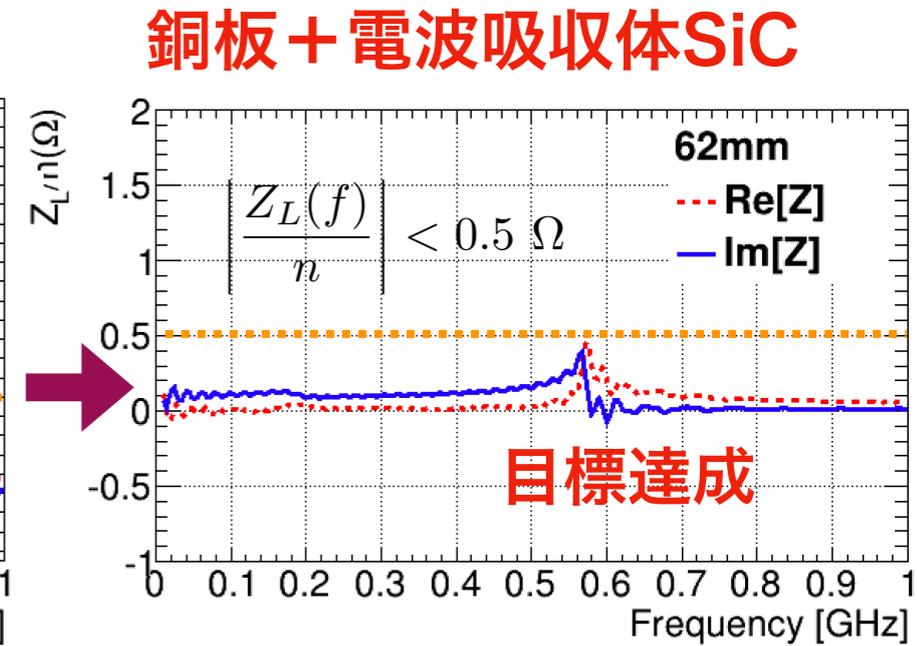
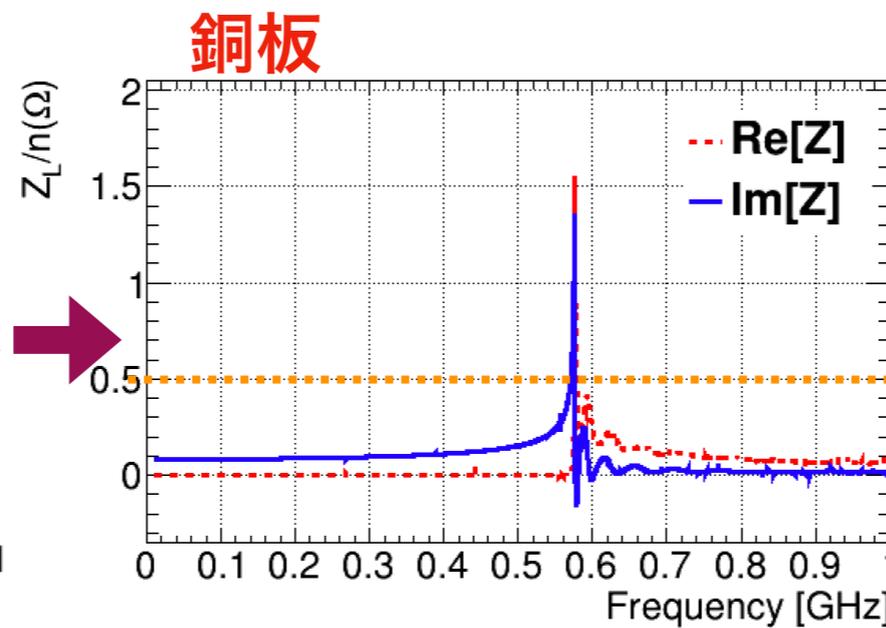
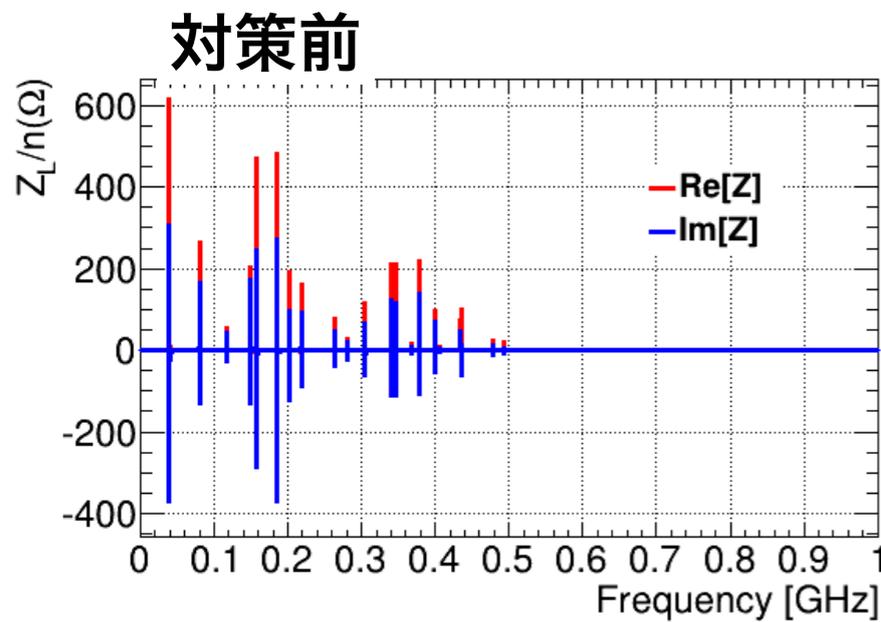
銅板 + 電波吸収体SiCによる削減効果

tank内に流れ込むのを防止
ミラー電流が滑らかに流れる



段差があると電磁場が溜まる

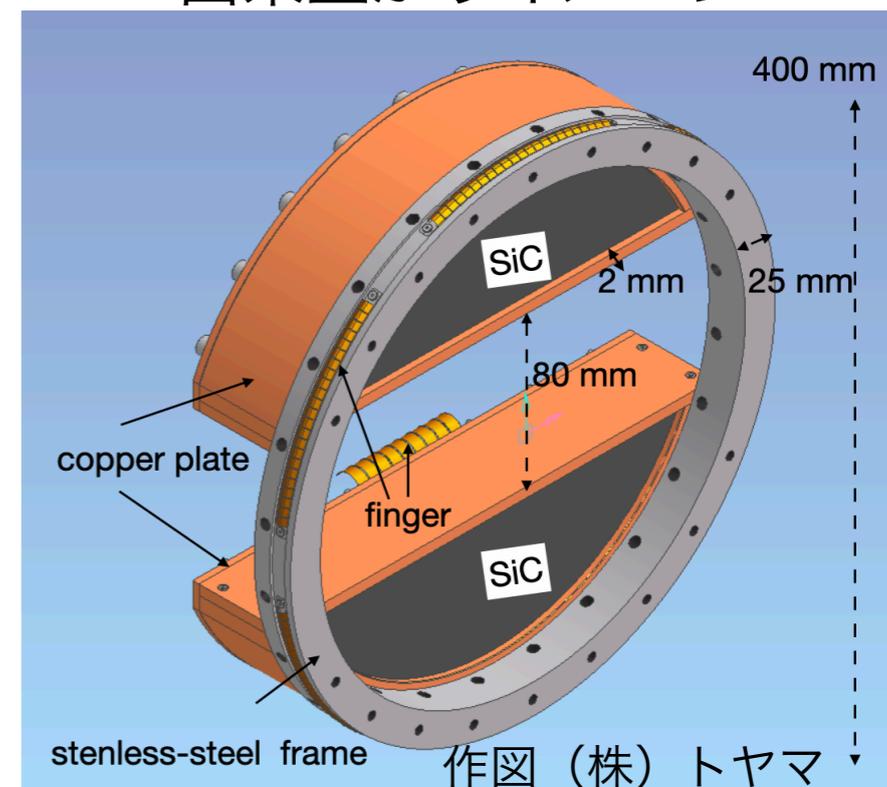
電波吸収体SiCで吸収



インピーダンスを大幅削減できる方法を考案・製作した^[4]

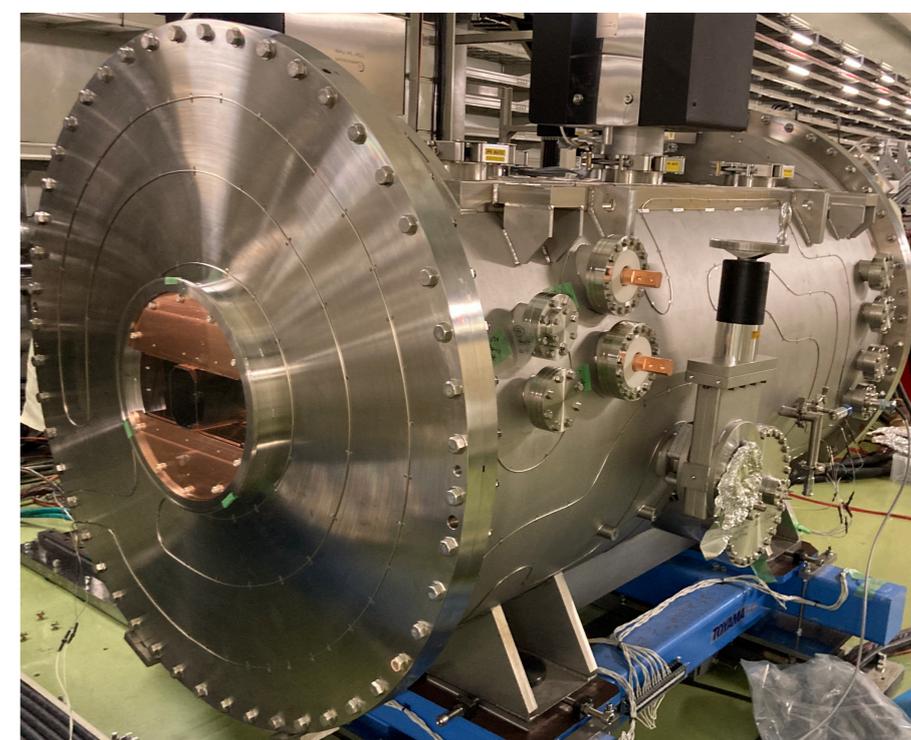
インピーダンス対策の実用的な評価

出来上がりイメージ



1. 実機用SiCの特性評価
 - i. 製作したSiCの比誘電率測定
 - ii. 測定値を用いたシミュレーション
2. 実機のワイヤー法インピーダンス測定
 - i. ジグの設計、シミュレーション
 - ii. インピーダンス対策の有無の比較
3. ビームを用いた評価
 - i. debunched beamへの影響
 - ii. bunched beamへの影響

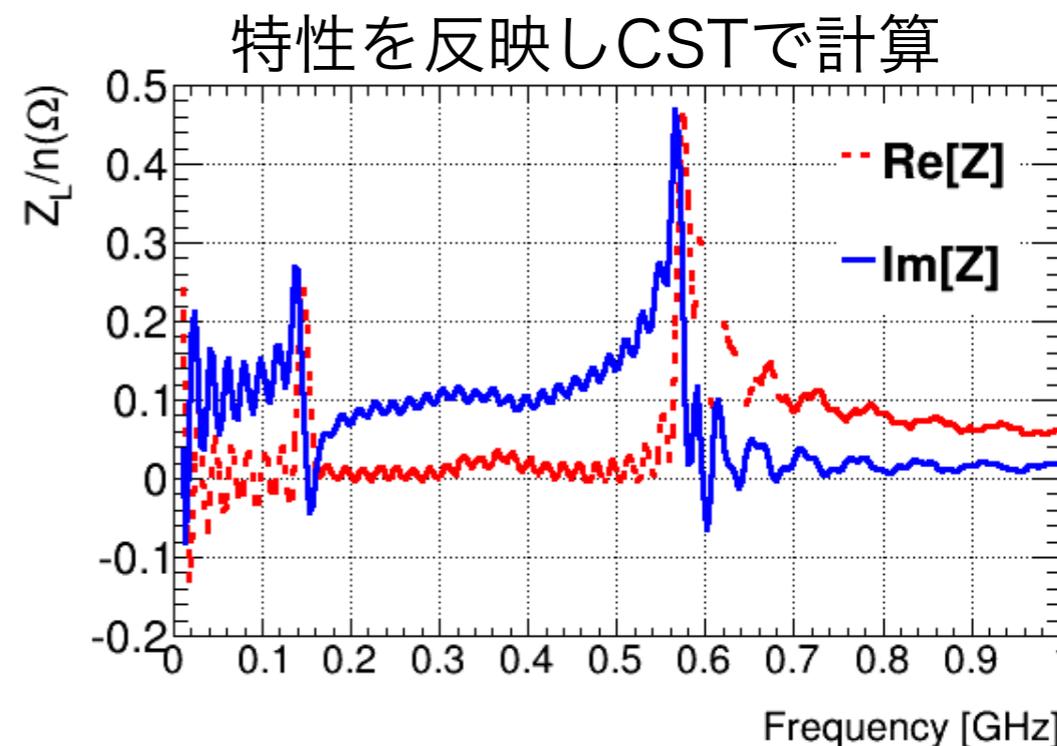
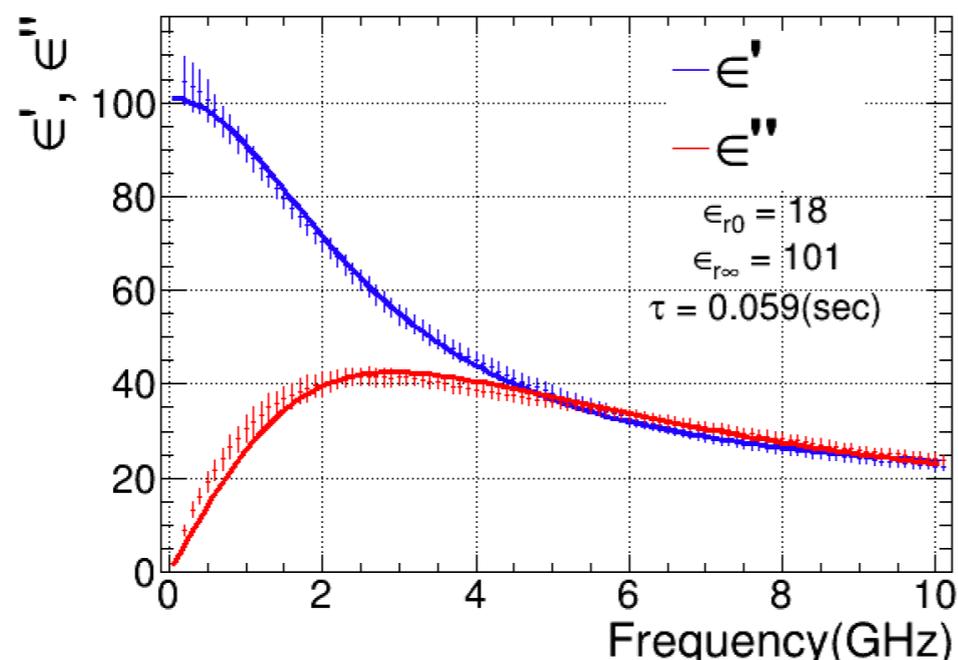
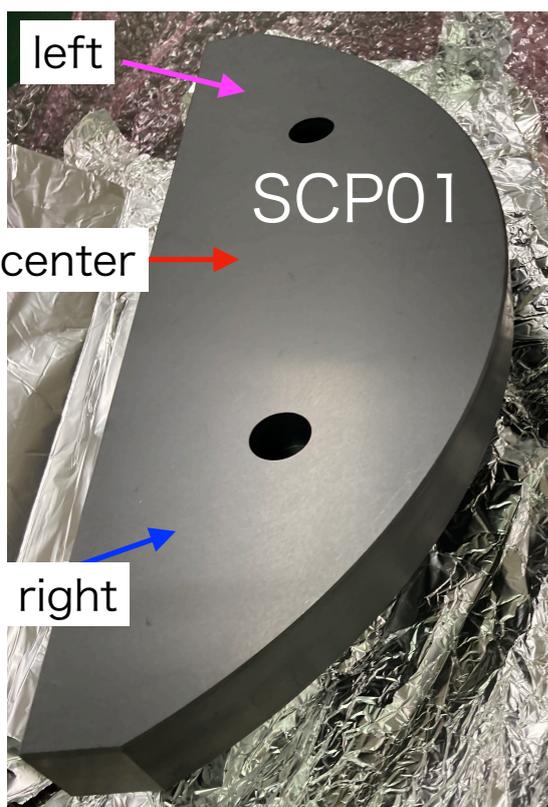
設置後



準備・検討を進めてきた

実機用 電波吸収体SiC(SCP01)の特性評価

比誘電率測定装置 (HP 85070B Dielectric Probe Kit) で
実機用SiCの特性を測定した



各場所・それぞれ3回以上測定

Debyeの式 : $\epsilon_r(\omega) = \epsilon_{r\infty} + (\epsilon_{r0} - \epsilon_{r\infty}) / (1 + j\omega\tau)$ (1)

$\epsilon'_r = \epsilon_{r\infty} + (\epsilon_{r0} - \epsilon_{r\infty}) / (1 + \omega^2\tau^2)$ (2)

$\epsilon''_r = \omega\tau(\epsilon_{r0} - \epsilon_{r\infty}) / (1 + \omega^2\tau^2) + \sigma / (\epsilon_0\omega)$ (3)

SiC-B^[5]とは特性は異なるが
ほぼ同等の効果を得た

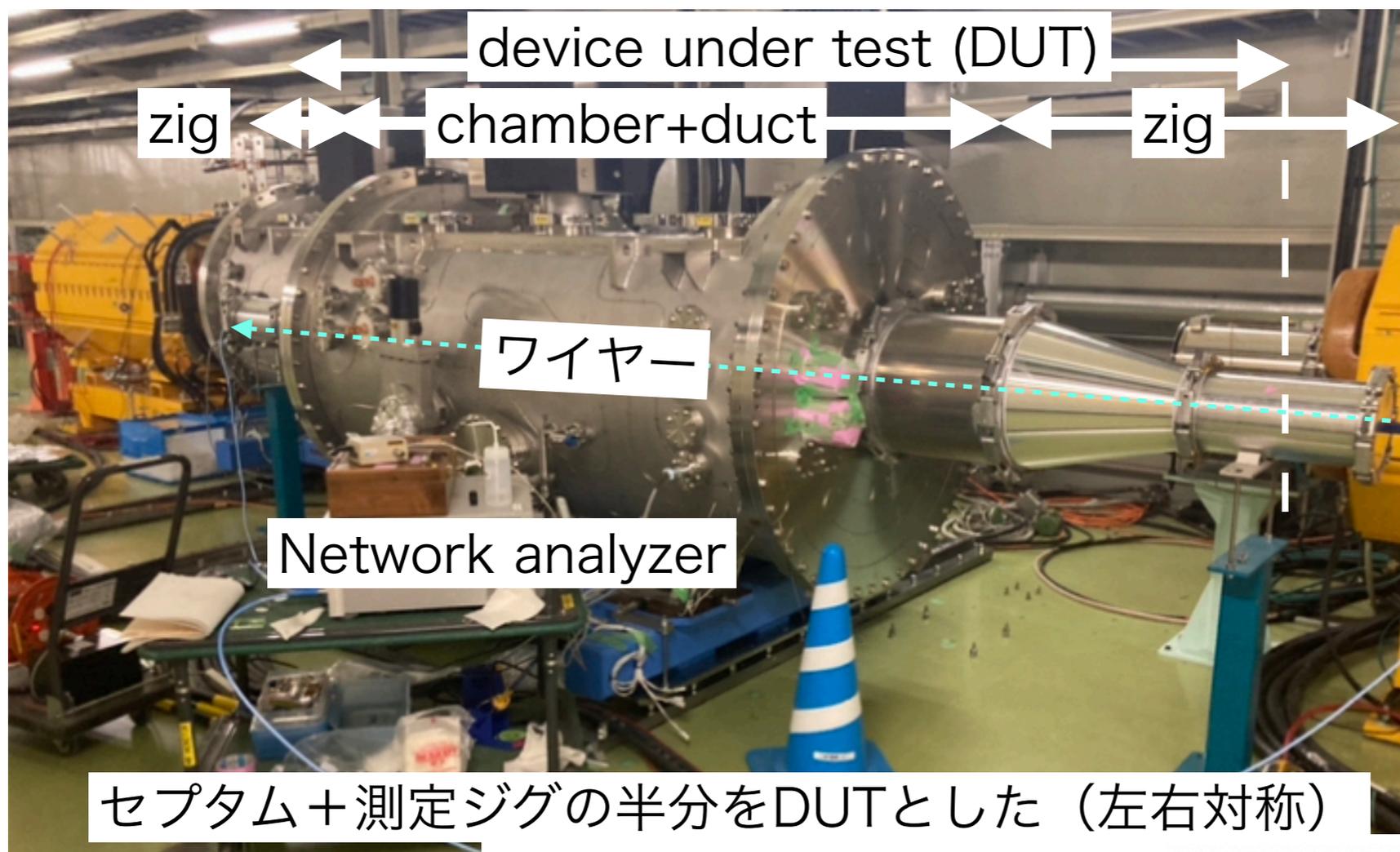
温度特性は16~46度の測定範囲では10 %以内の変化
温度はほとんど変わらない見込みで性能に影響ない

選定した製品でインピーダンス対策に用いることができることを評価

[5] Takeuchi et al., PAC2005

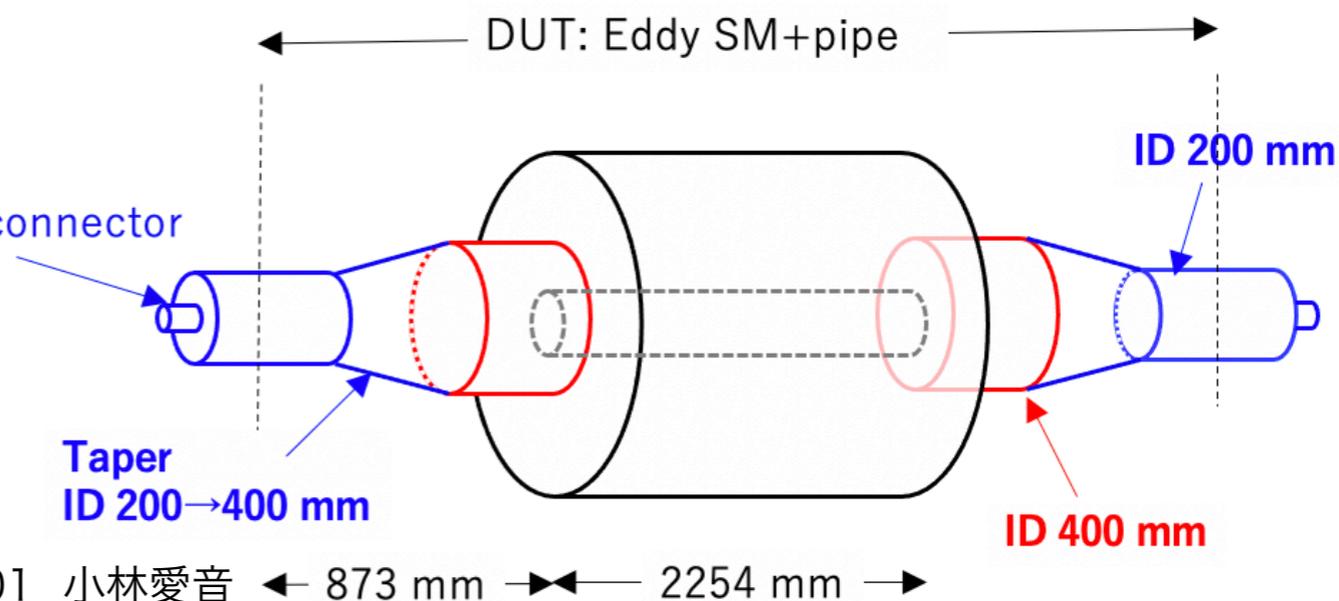
ワイヤー法によるインピーダンス測定

ビームの代わりにワイヤー(Φ0.16 mm)を通し、透過係数を測定、インピーダンスを導出した
(Stretched wire method [6, 7])



$$Z_L(\omega) = -2Z_C \ln \frac{S_{21}(\text{DUT})}{S_{21}(\text{REF})}$$

ID200 Al pipe
+ end plate with connector



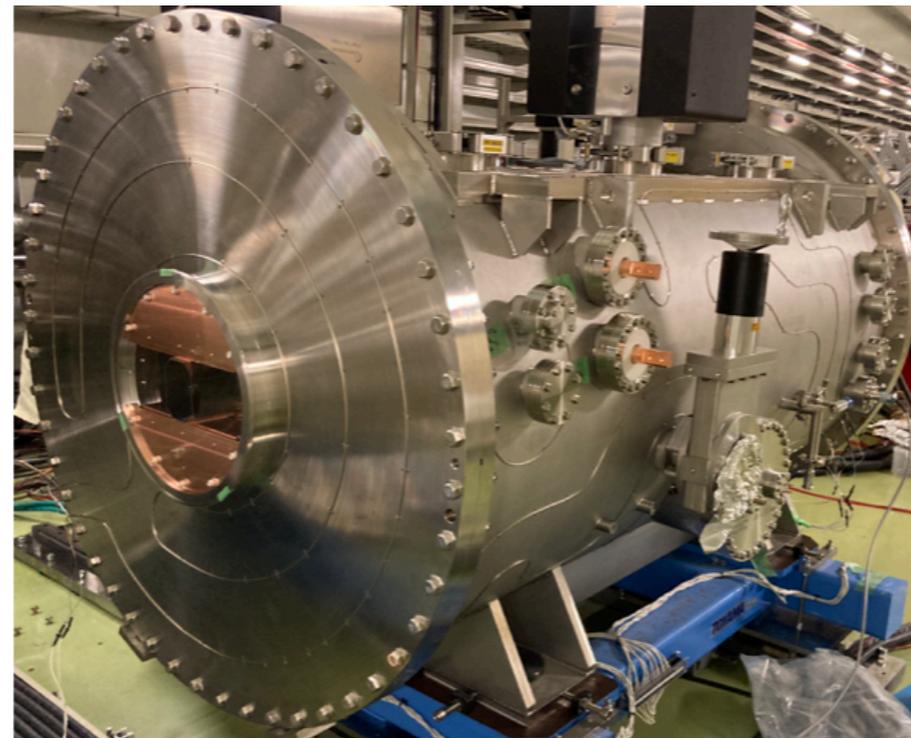
[6] F. Caspers, IEEE 1985

[7] T. Toyama, PASJ 2021

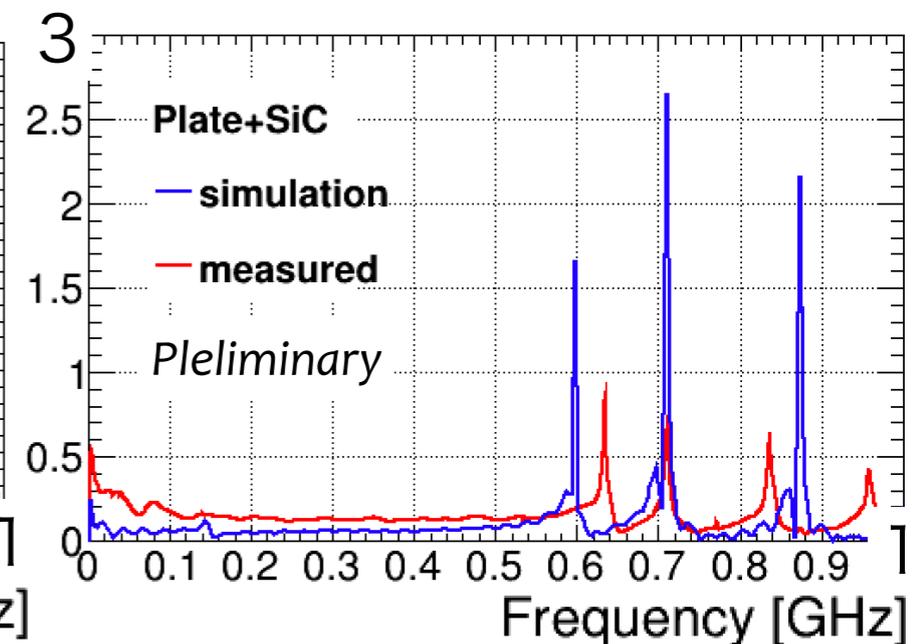
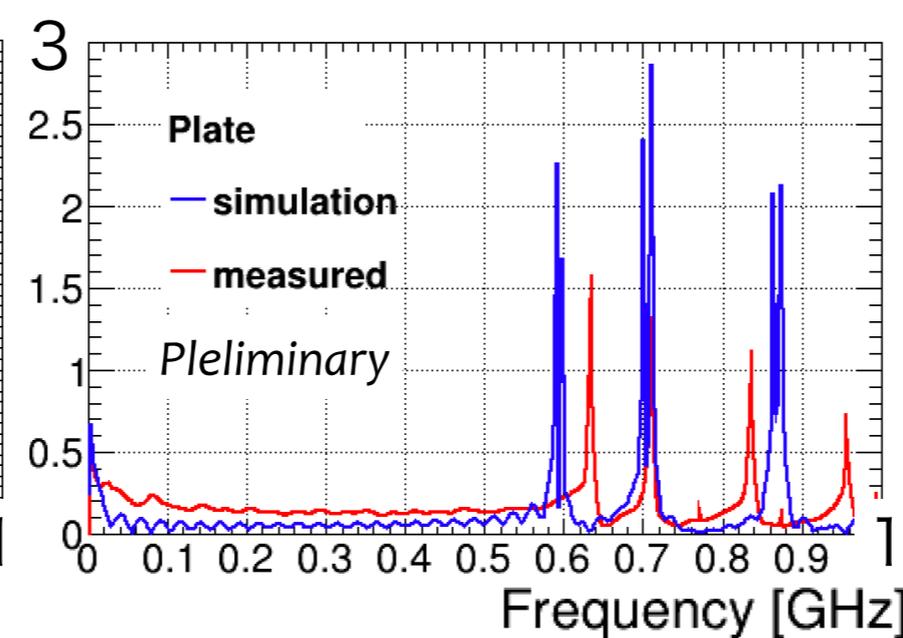
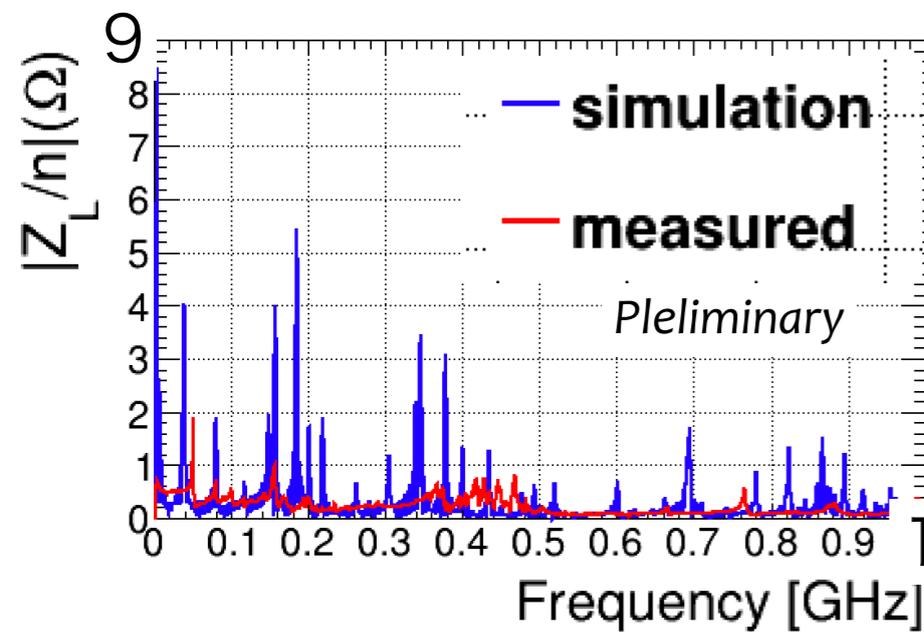
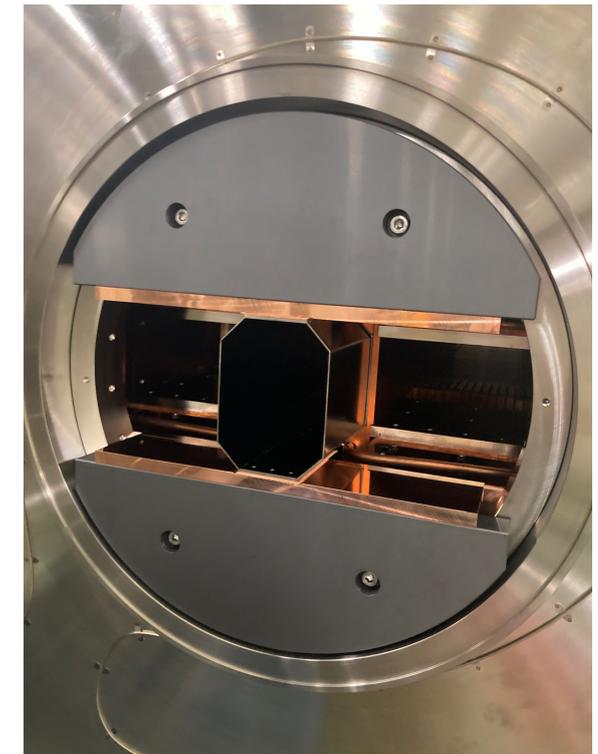
対策なし



対策：銅板のみ



銅板+SiC片側のみ



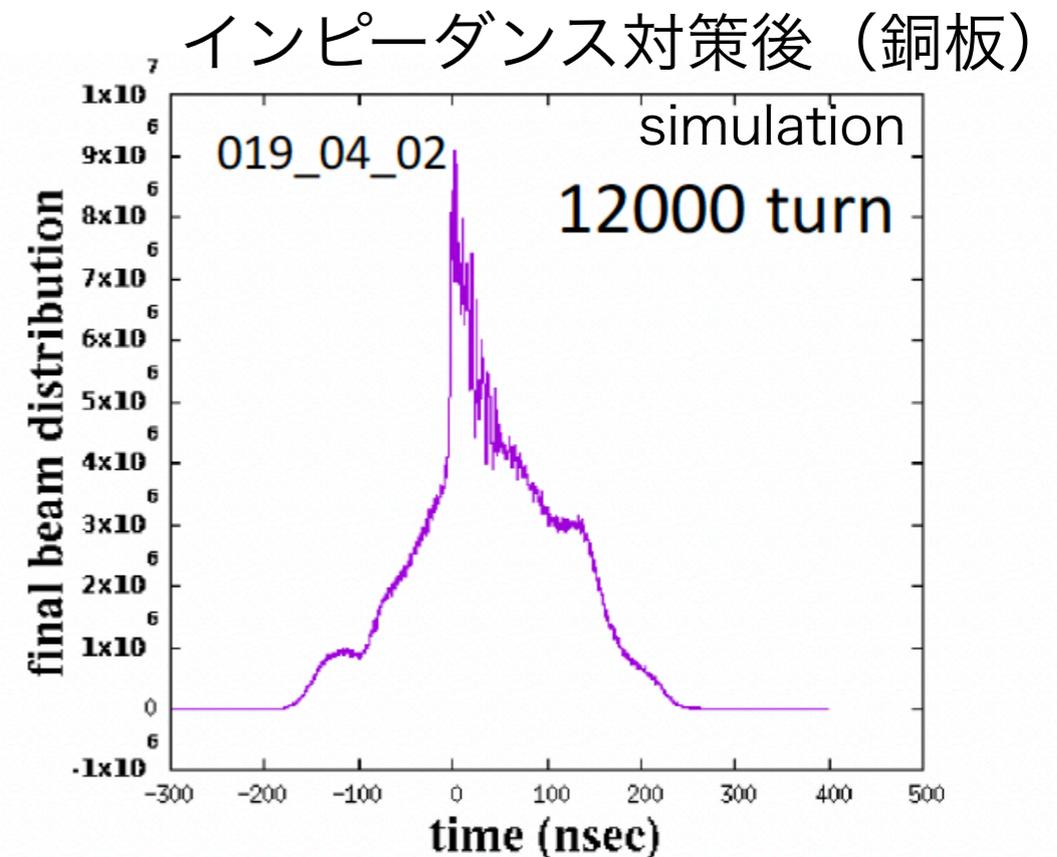
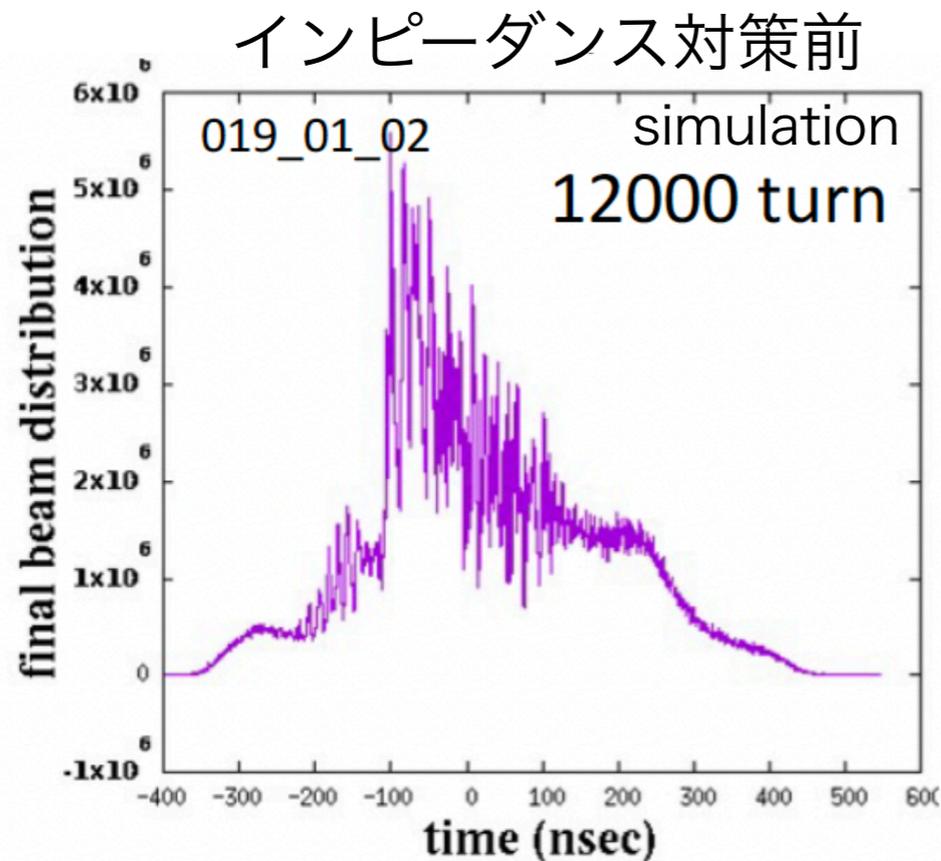
インピーダンス削減効果が測定で確かめられた

モデルとの違いの追求は今後行う

ビームによるインピーダンスの評価

1. debunched beamの時間構造の変化の調査

simulation[8]によるとEddy-current type septum magnetのインピーダンス対策によりビームの時間構造が改善することがわかった



[8] Tomizawa et al., ECloud workshop 2022

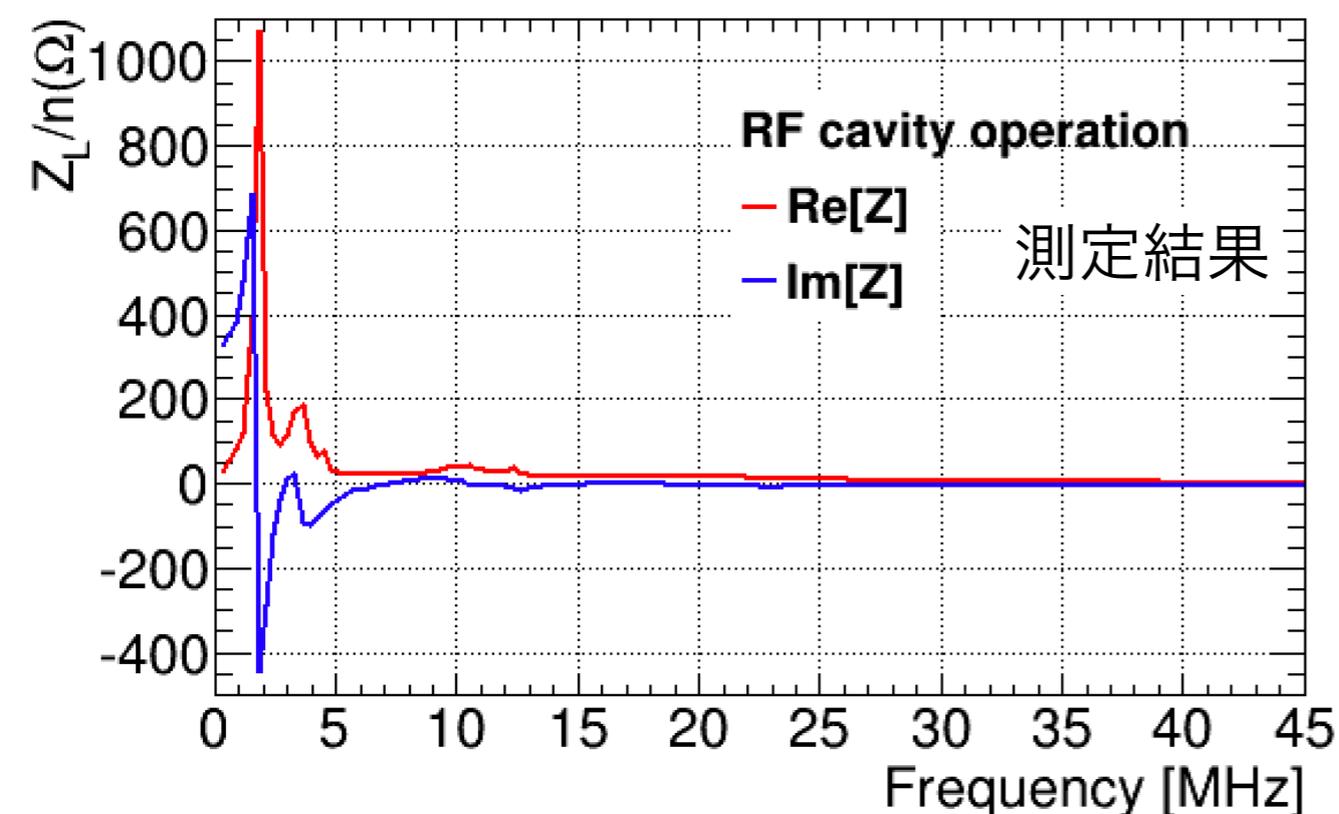
2022年6月に予定していたdebunched beamでの試験は行えなかったため、対策前のビームの変化を調べることは今後難しいが、冬以降の試験で想定通りビームに悪影響ないかを調べる

ビームによるインピーダンスの評価

2. bunched beam (~ 30 MHz) への影響

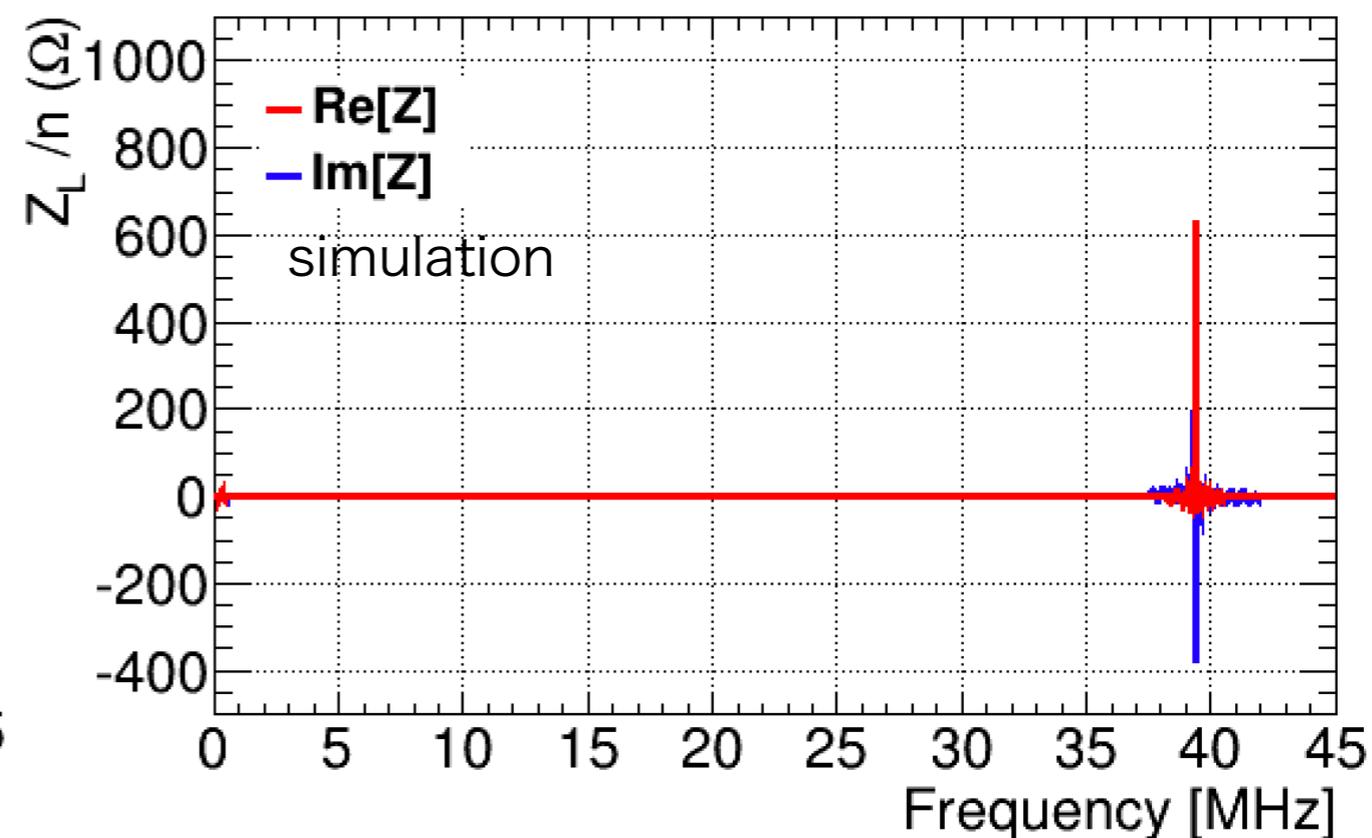
既にある他のインピーダンス（例：RF cavity）が大きいため、
Eddy-current type septum magnet の影響は小さいと考えられる

RF cavityのインピーダンス@低周波



Eddy-current type magnet septum

(対策なし) のインピーダンス@低周波



bunched beamには影響を与えない程度の大きさである

確認のための対策前後の測定の比較を予定している

まとめ

MRビームパワー増強のためにはビームロス削減が必須である

大きなビーム結合インピーダンスはビームロスをもたらすため低減させる必要がある

今年新しくインストールしたFXセプタムに対してインピーダンスの見積もり・低減方法を考案、設置に向け準備を行った

実機用の電波吸収体SiCの特性を測定しインピーダンス対策に使えることを評価した
ワイヤー法によるインピーダンス測定を行いインピーダンス対策の効果があることを評価した

対策後ビームへの影響はほとんどないと考えている

今後

ビームスタディー評価も行い、シミュレーションも合わせて理解を深める

他の装置（FXキッカー、RF空洞）の影響も含めインピーダンスとビームの関連の調査や対策を関係者と検討を進めていく