

J-PARC MRの高繰り返し化による ビーム強度増強のための 縦方向シミュレーション

J-PARC
杉山 泰之,

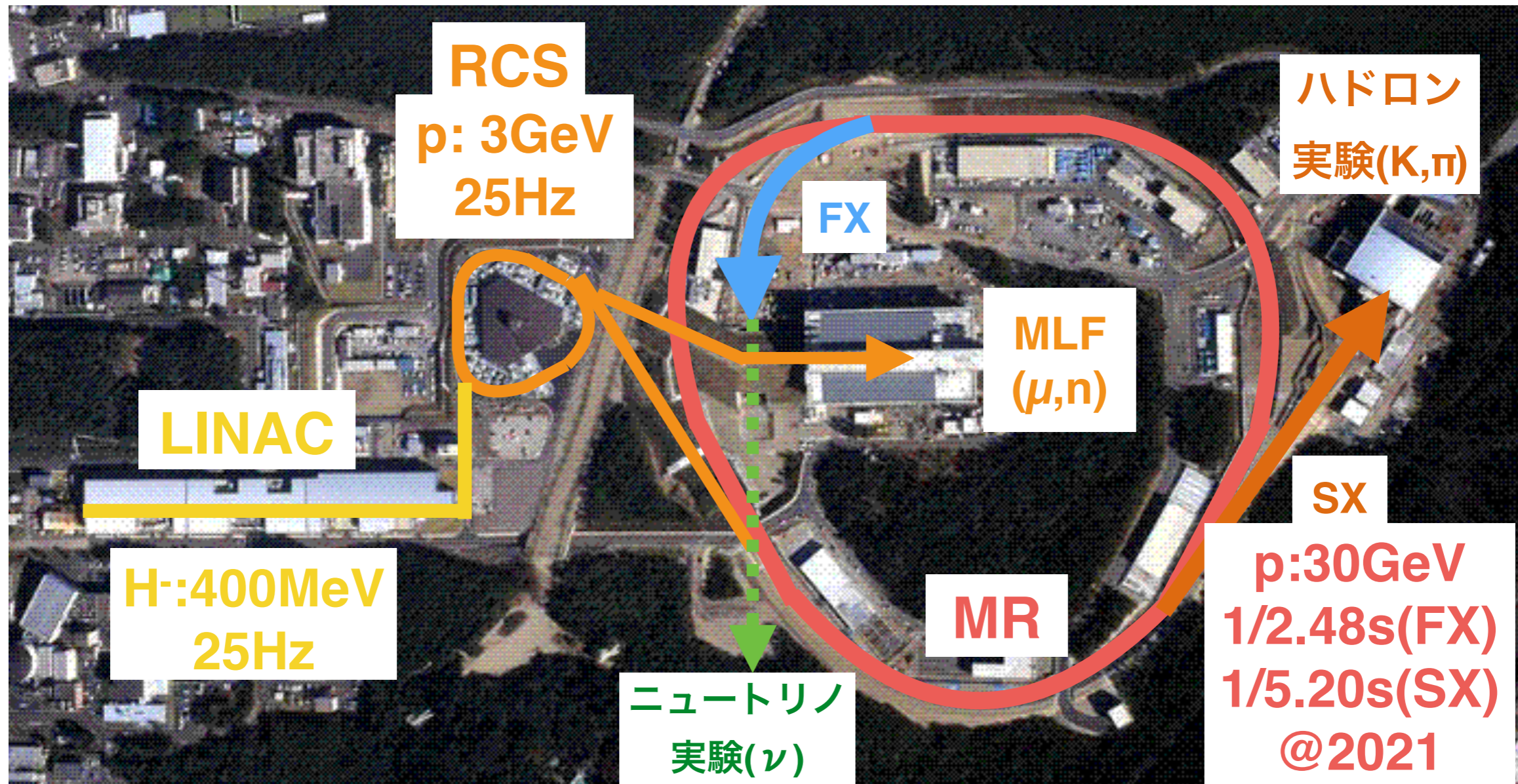
清矢 紀世美, 吉井 正人, 大森 千広, 長谷川 豪志, 原 圭吾,
田村 文彦, 山本 昌亘, 野村 昌弘, 沖田 英史, 島田 太平, 宮越 亮輔



第21回日本加速器学会年会
2024年8月2日(金)

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex)

- ・ 陽子ビームをLINAC、RCS、MRを組み合わせて30GeVまで加速
 - ・ ニュートリノ実験やハドロン実験に陽子ビームを供給
 - ・ ニュートリノ実験へのビーム供給
 - ・ 2.66×10^{14} 個の陽子を2.48秒周期で取出して最大515kW@2021年



MR upgrade scenario

- HyperK実験に向けて、将来的にビーム強度1.3MWが求められる。
- MRとして二段階のアップグレードを計画。
 - **高繰り返し化と粒子数増加**で強度向上を実現。
 - 2021~2022の長期シャットダウンで機器を増強して1.36秒周期に変更
 - 2028年頃から更なる高繰り返し化と粒子数増加で1.3MW目指す

	MR Cycle	Acceleration Time	#of protons	Beam Power
~2021	2.48s	1.40s	2.66×10^{14} ppp	515kW
2023~	1.36s	0.65s	2.1×10^{14} ppp	750kW
2028~(予定)	1.16s	0.58s	3.3×10^{14} ppp	1.3MW

RF upgrade scenario

- アップグレード実現のためにはRFシステム増強も不可欠

- 高繰り返し=短加速時間：より高いRF電圧が必要

- 2021年まではh=9:320kV, h=18:110kV

- 加速空洞追加 基本波空洞(h=9)：7台(~2021)→9台(2022~)→11台(2028~)

- 粒子数増加=ウェイク電圧増加：

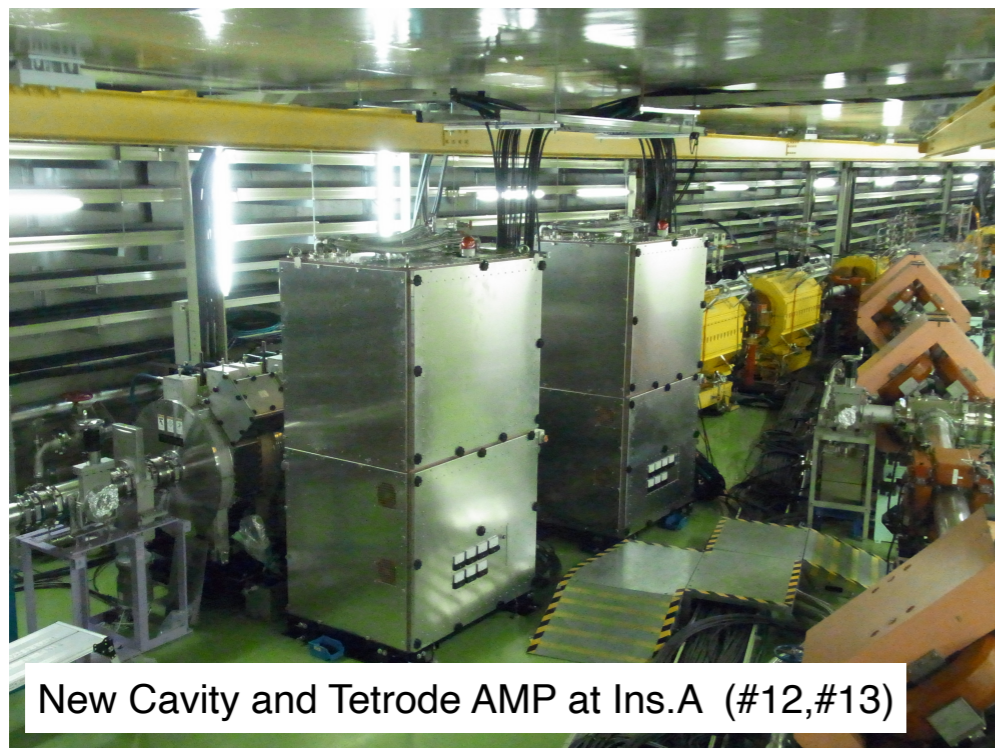
- ウェイク電圧補償用の消費電流増加 →真空管アンプの陽極電源増強

- バンチ結合振動抑制のための、ウェイク電圧補償の高度化が必要。→**新LLRF** (2022年第19回年会)

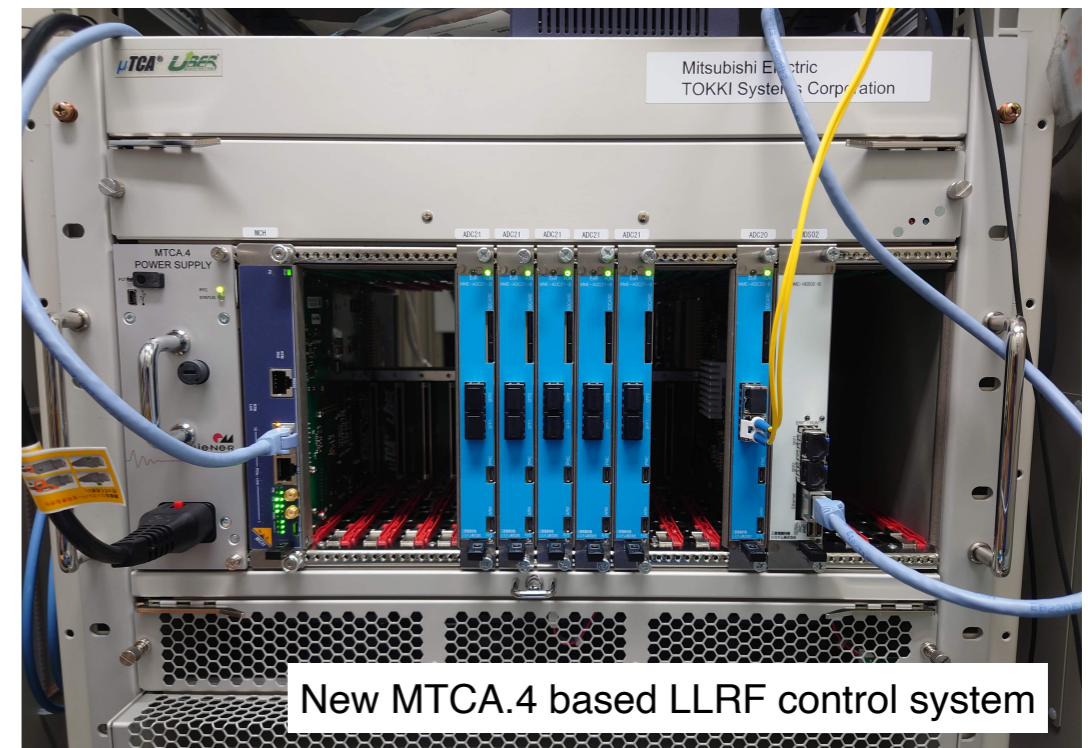
- 増強後の構成で加速に用いる電圧パターンの決定が必要->シミュレーションで評価

parameter	~ 2021	2023~	2028 ~
RF cavity(for $h = 9$)	6~7	9	11
RF cavity(for $h = 18$)	2	2	2
Max V_{RF} [kV]	320	510	600

THP004 長谷川



New Cavity and Tetrode AMP at Ins.A (#12,#13)



New MTCA.4 based LLRF control system

2.48秒周期のデータを用いたシミュレーションの調整

- CERNが開発した縦方向シミュレーションパッケージ**BLonD**を使用

- 空洞電圧パターンはLLRFシステムで用いた設定値を使用。

- 入射時: h=9:155kV, h=18:110kV. 最大電圧 h=9:320kV

- 空間電荷効果とビームローディング効果を考慮して計算実施

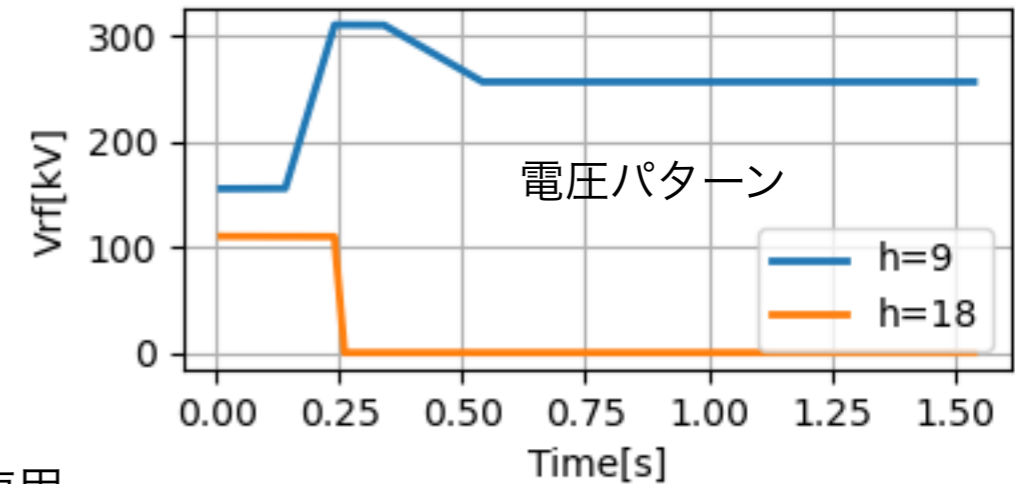
- 基本波空洞7台分のインピーダンス測定値をインピーダンス源として使用

- 空洞電圧FBでビームローディング補償を行っている h=8~10に関してインピーダンスを0Ωにする事で補償を模擬.

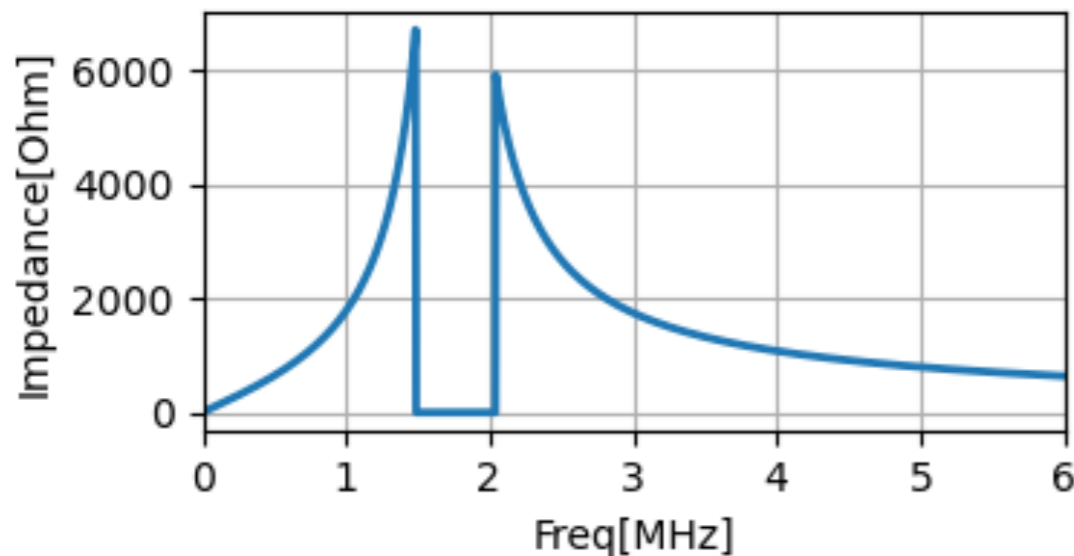
- 2バンチ毎4回のバンチ入射を模擬することで、後続バンチ入射の際のウェイク電圧の影響を反映

- 入射プロファイルは、測定データからトモグラフィ再構成したものに空間電荷効果の補正を行い使用

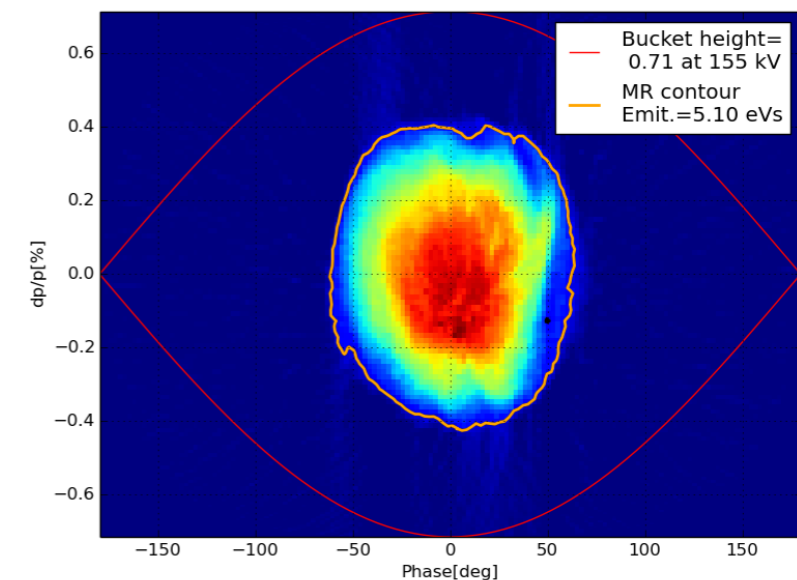
- 1バンチあたりのマクロ粒子数：1万個



空洞合計インピーダンスデータ



入射ビームプロファイル

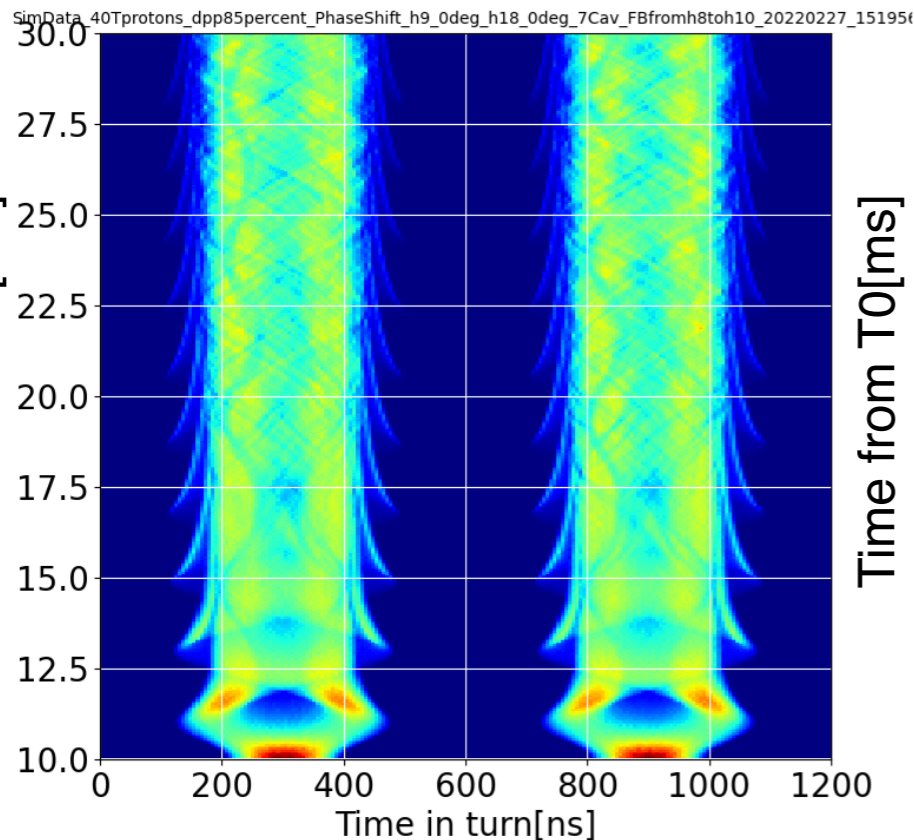


空洞インピーダンスの効果

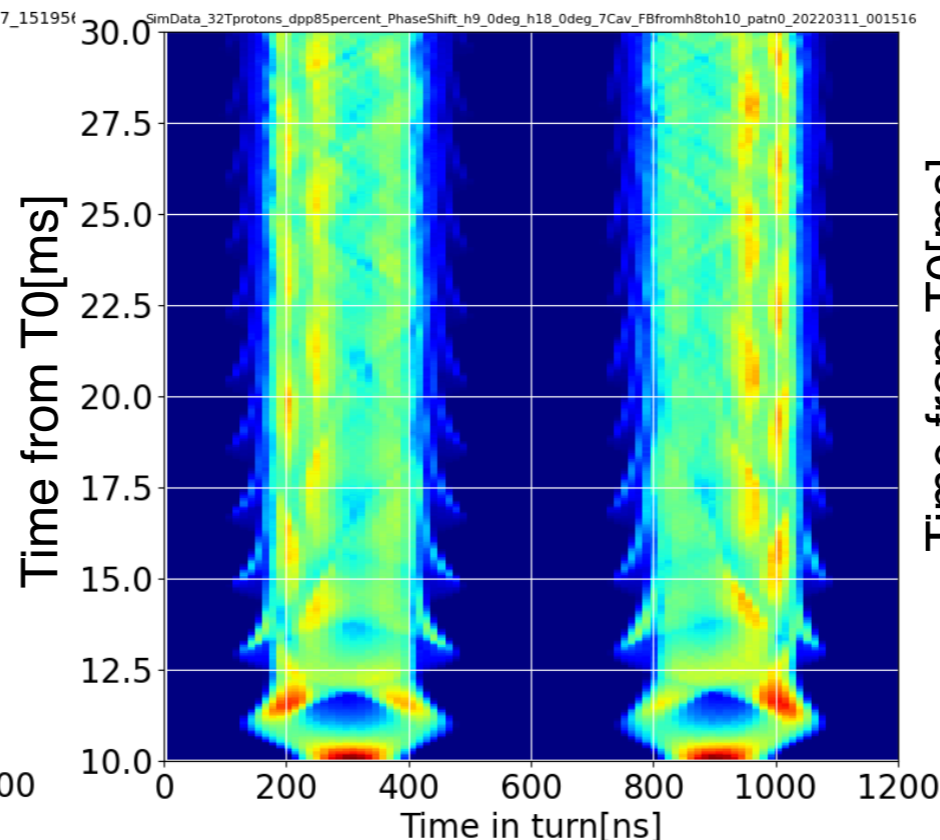
- 2バンチ入射後、実ビームでは左右に分布の偏りが見えるが、インピーダンス無しのデータでは偏りが再現できない。
- ウェイク電圧補償を考慮したインピーダンス情報を加えることで、入射後のビームの偏りをほぼ再現出来た。

Simulation 3.24e13ppb

Wakeなし

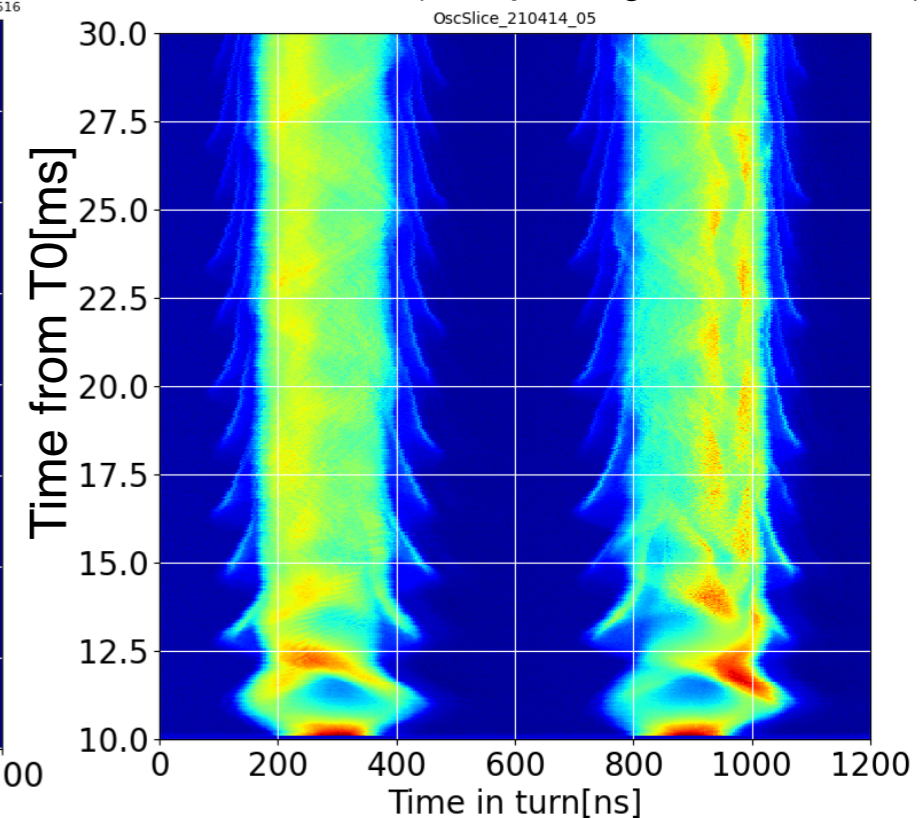


Impedance for 7 RF cavities (0Ω for $h=8\sim 10$)



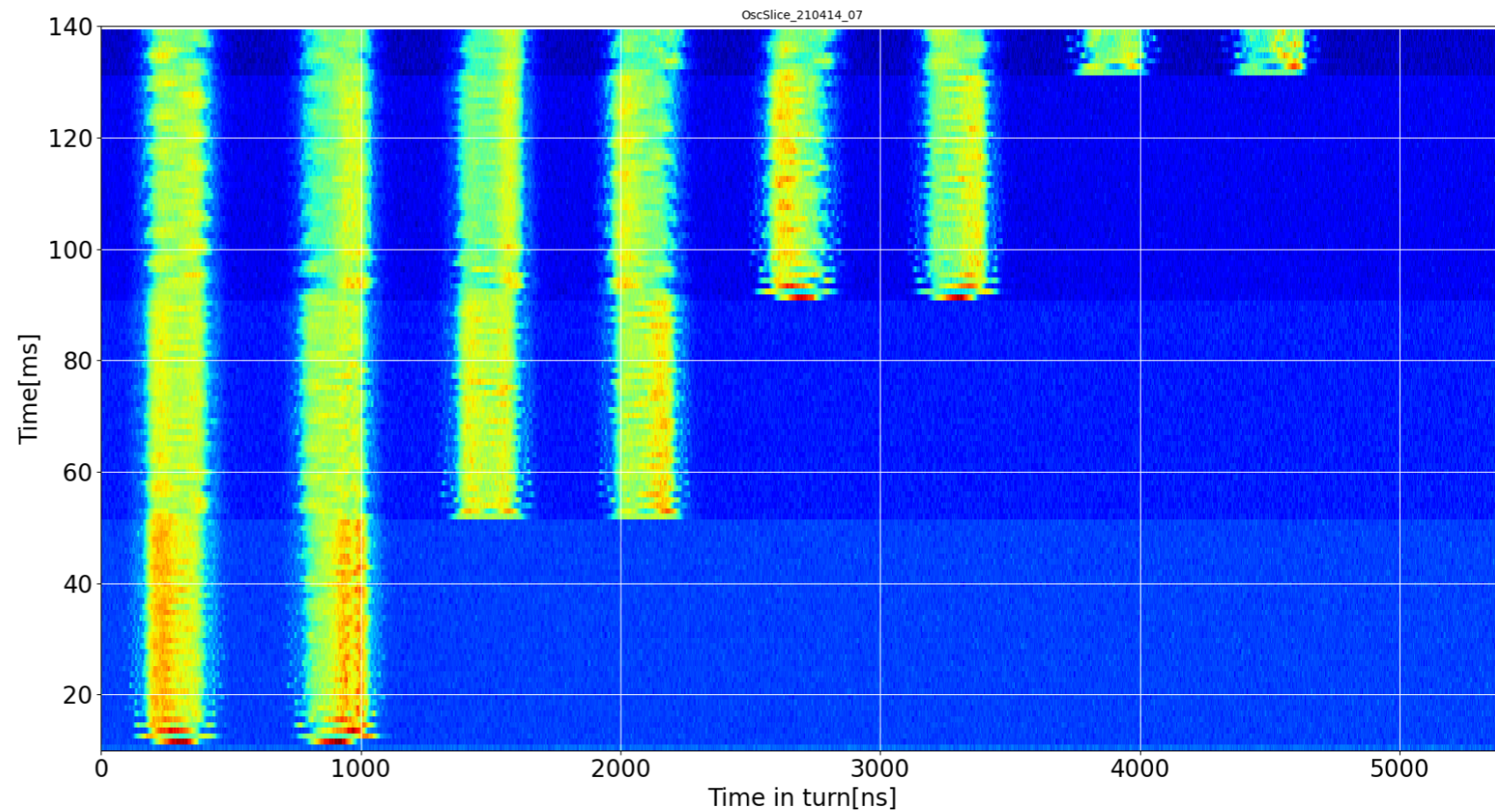
Measurement 3.24e13ppb

Use 7 RF cavities (Cavity Voltage FB for $h=8\sim 10$)

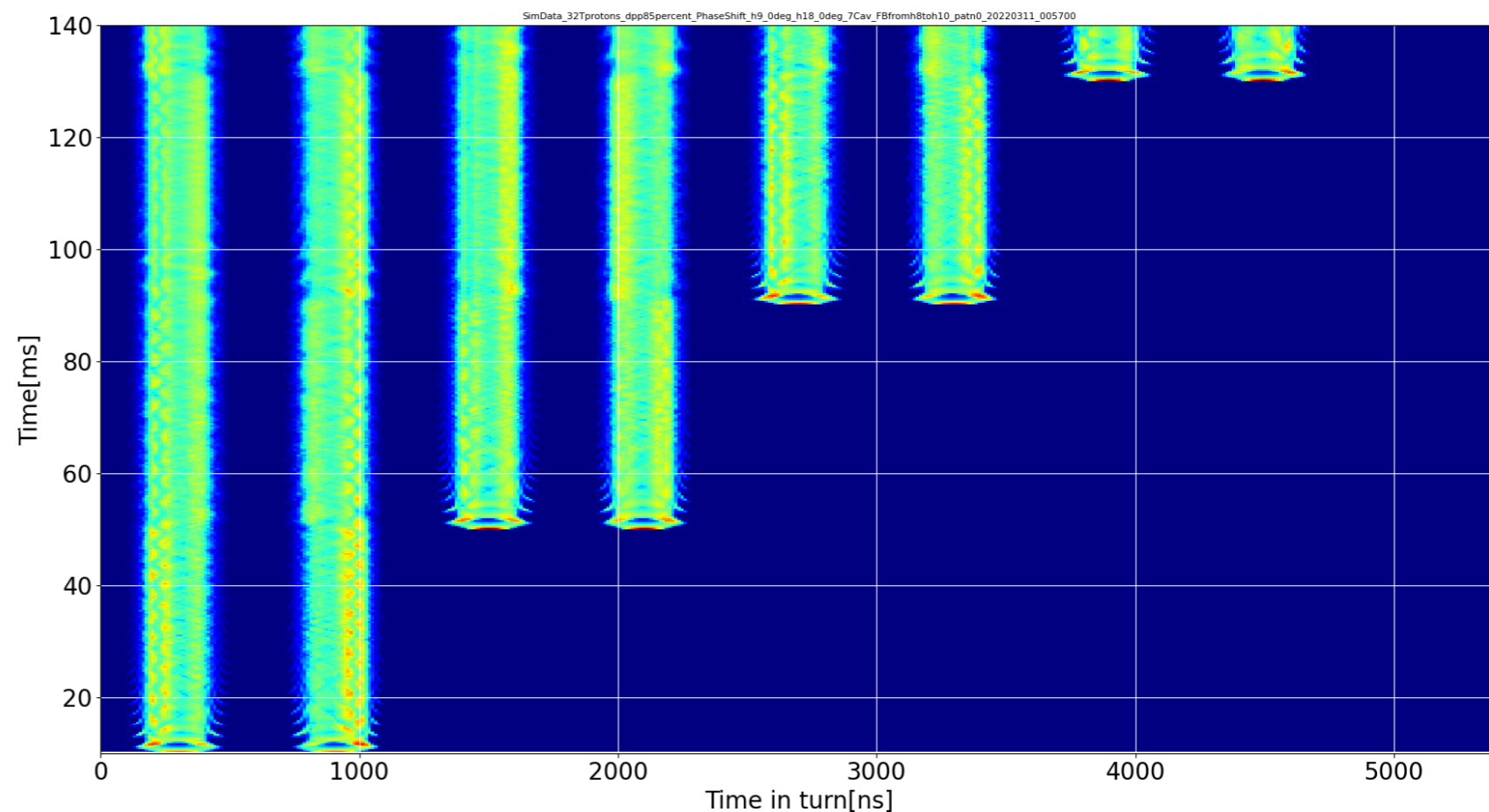


各入射での ウェイク電圧の影響

- MRでは40ms毎に上流のRCSから2バンチ入射が行われる。
- 後続バンチ入射時のウェイク電圧の急激な変化に伴って周回バンチの偏りに変化が生じる。
- 空洞インピーダンスとウェイク電圧補償の効果を加えることで、後続バンチ入射時の変化もよく再現出来ている。

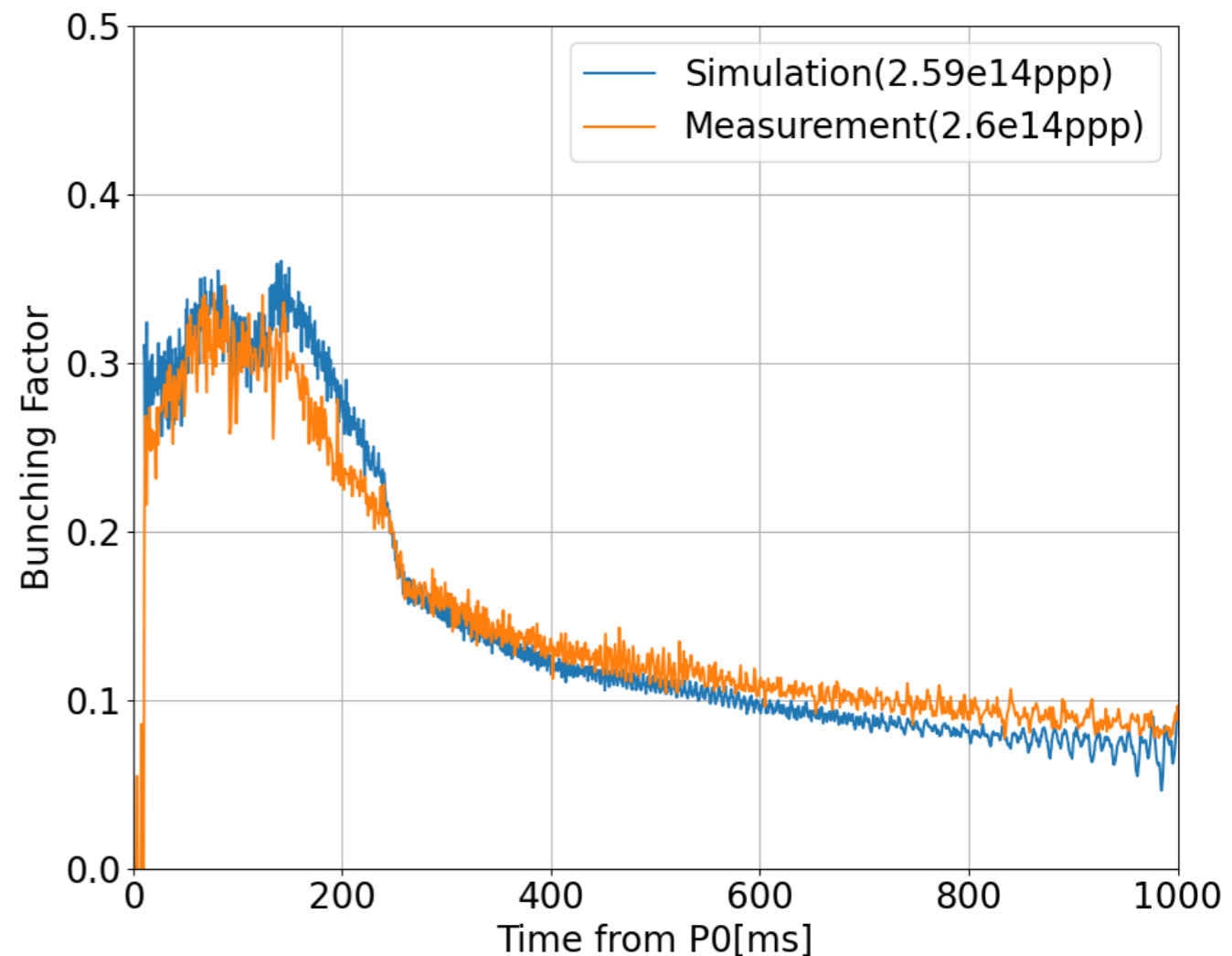
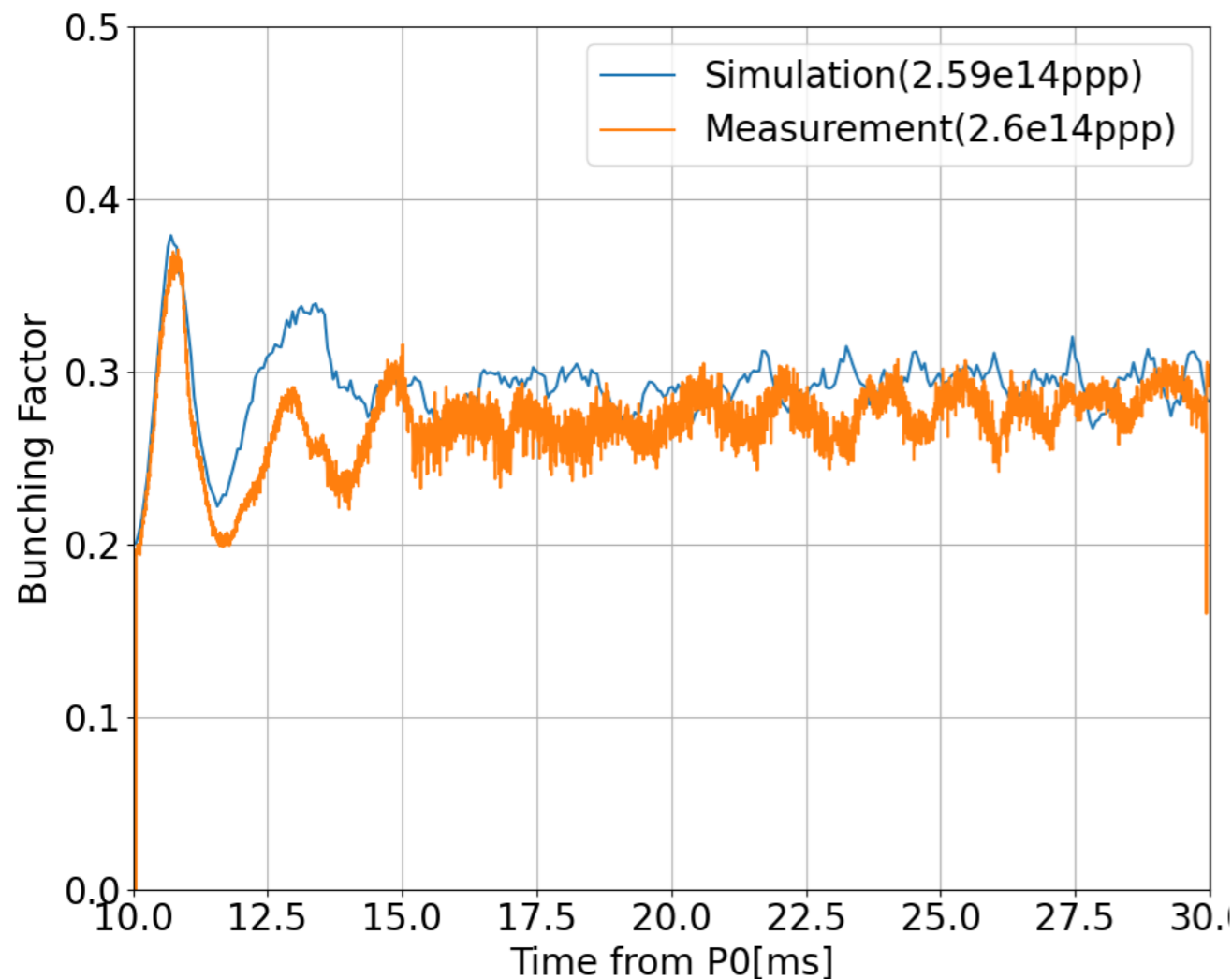


Simulation 3.24e13ppb (Impedance of 7 cavities, 0Ω for h=8~10)



Bunching factor の比較

- 細かな構造は再現出来ていないが大規模な構造は数%の精度で再現出来ている。
- ビームの分布やBunching Factorがほぼ再現出来たので、このシミュレーション環境を用いて高繰り返し化後の電圧パターンの評価を行うこととした。



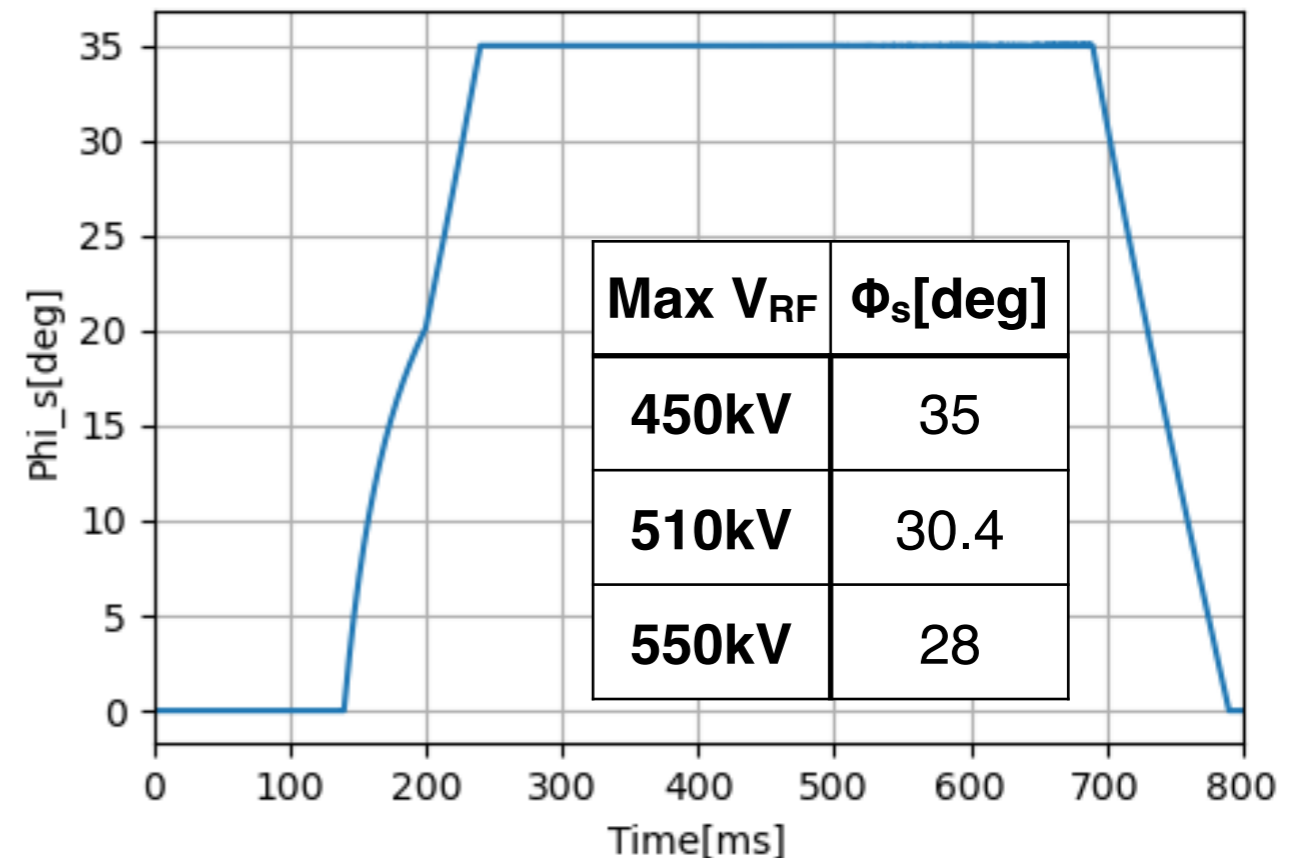
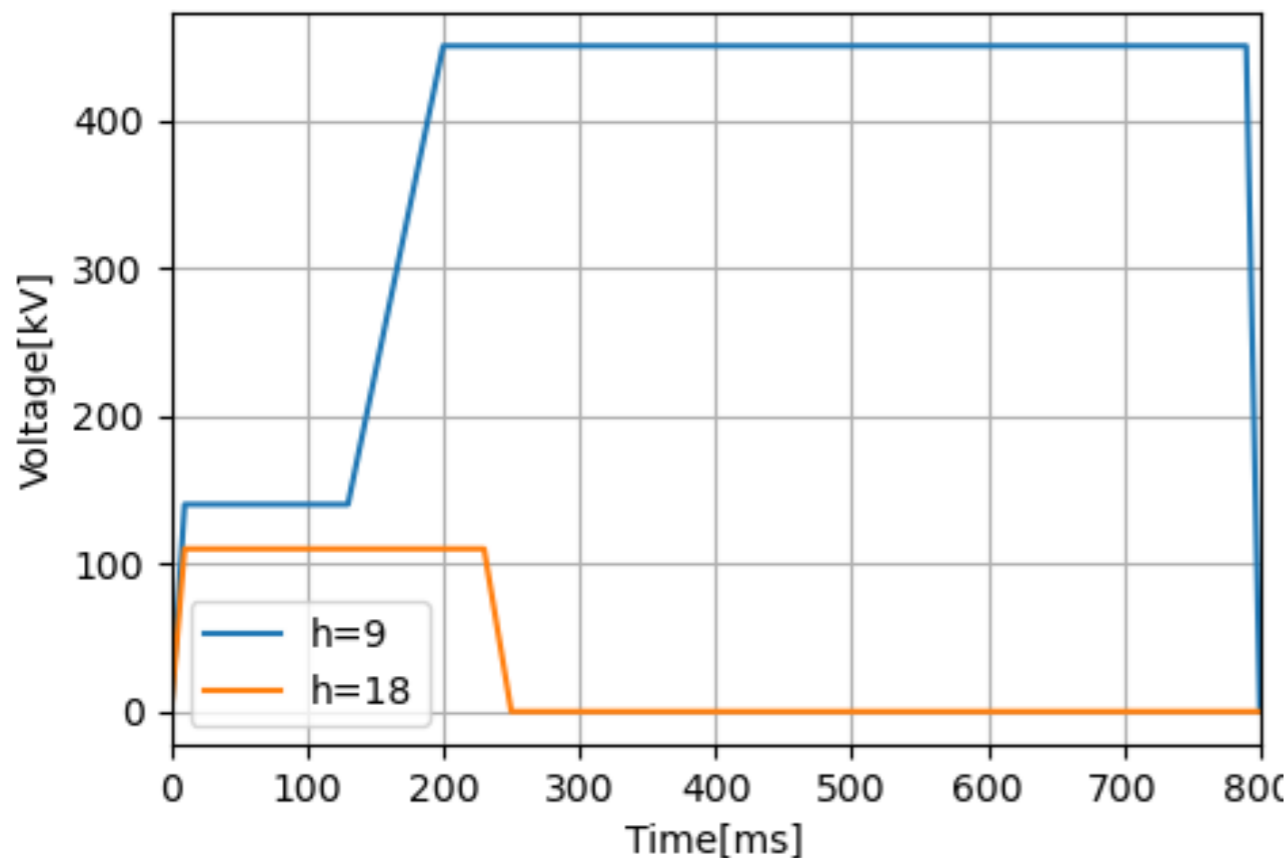
1.36秒周期の電圧パターンの評価

- 1.36秒周期(650ms加速)での電圧パターンをシミュレーションを用いて評価した
 - 空間電荷効果とビームローディング効果を考慮して計算
 - 2021年までの基本波空洞7台分のインピーダンス合計値をスケールすることで、空洞11台分のインピーダンス情報として用いた。
 - LLRFで空洞電圧FBを行う周波数領域に対してはインピーダンスを 0Ω とした
 - ビームの入射に関しては2.48秒周期と同様に行った。
- 評価条件
 - Bunching Factorに加えて、MomentumFillingFactorも評価。
 - **Momentum filling factor (= Maximum beam momentum / bucket height)**
 - 目標: 最大値 <0.9
 - **Bunching Factor: (= Average beam current / Peak beam current)**
 - 目標: $>\sim 0.3$ @加速直前

1.36秒周期の電圧パターン

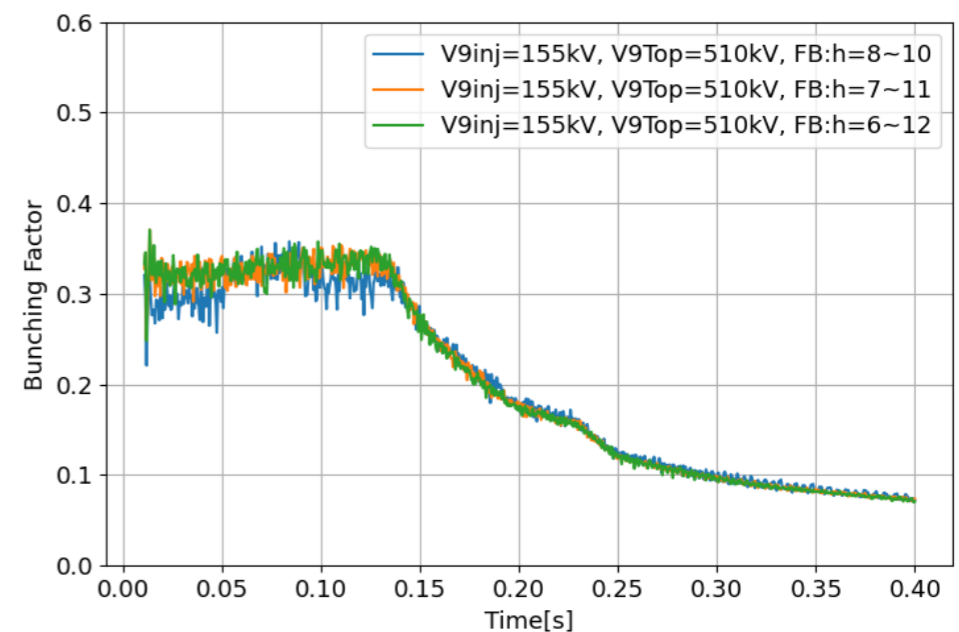
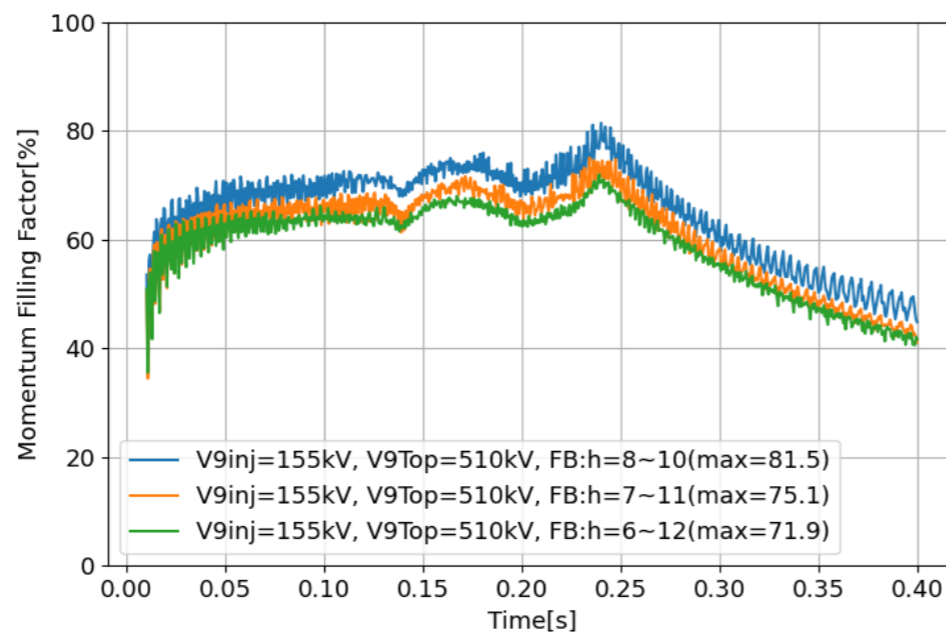
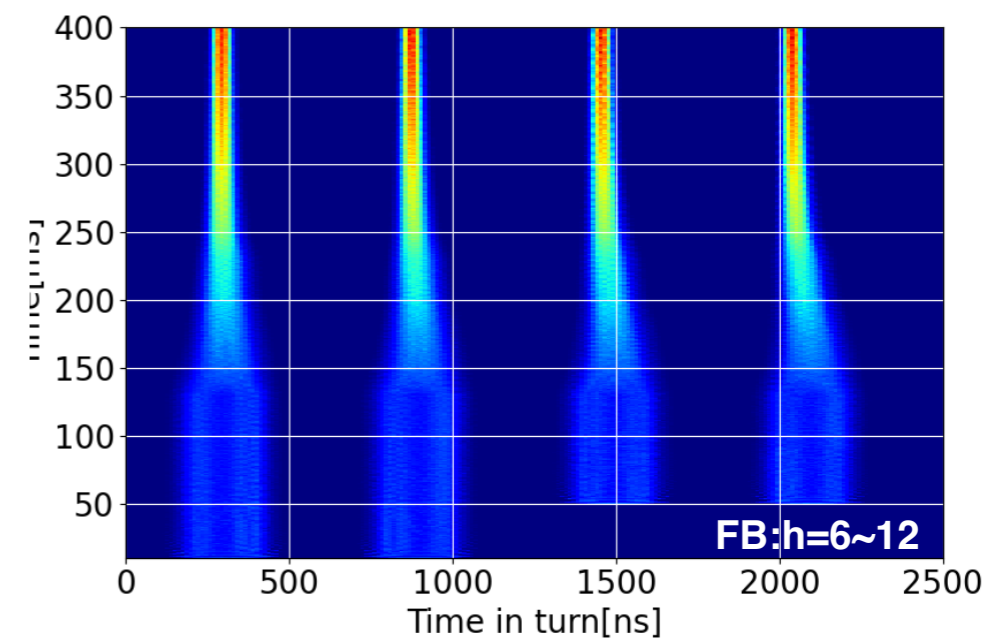
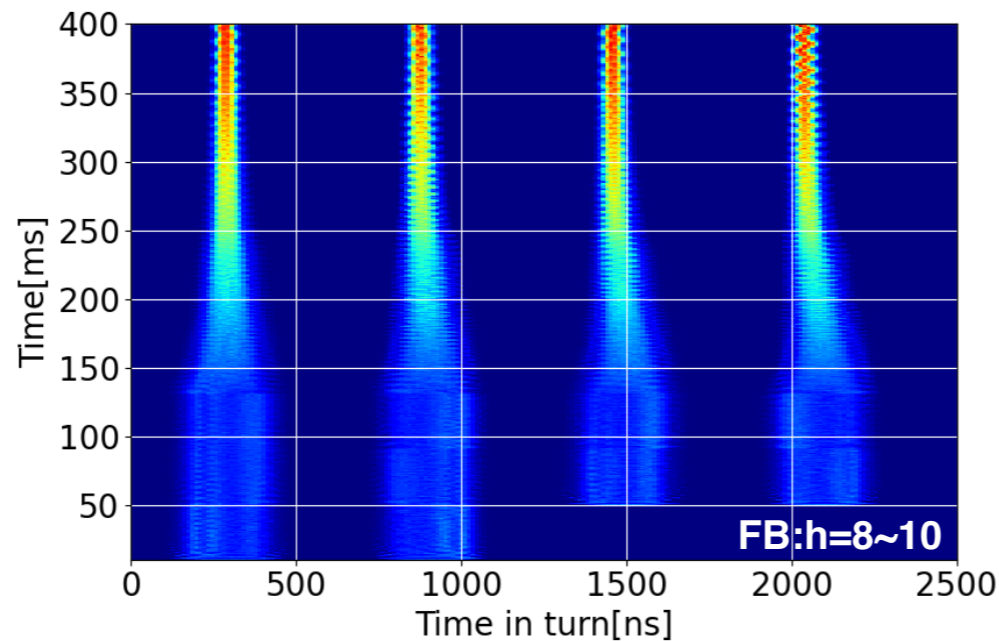
- 入射期間: h9=155kV, h18=110kV (2.48秒周期と同様の値)
- 加速期間:
 - h=9: 8バンチ入射完了後(t=130ms)から昇圧、t=200msで最大電圧に達し、取り出しまで維持。
 - h=18: t=230msから降圧開始し、t=250msで0kV.
- 電圧位相は同期位相 ϕ_s に追従させることで、 ϕ_s の急激な変化に伴うビーム振動を抑制。
 - 高繰り返し化に伴って同期位相 ϕ_s が30度程度まで大きくなる

650ms Acc.
(1.36s cycle)



バンチ結合振動

- 空胴電圧FB対象 $h=8\sim 10$ の場合は加速が進むに従ってバンチ結合振動が発生
 - $h=8\sim 10$ でのFBだと最大450kVの場合で途中でバケツ溢れ発生
- 空胴電圧FBの対象範囲を広げることで振動抑制出来る。
 - 高繰り返し化での安定な加速には空胴電圧FBの対象を $h=6\sim 12$ まで広げることが不可欠。



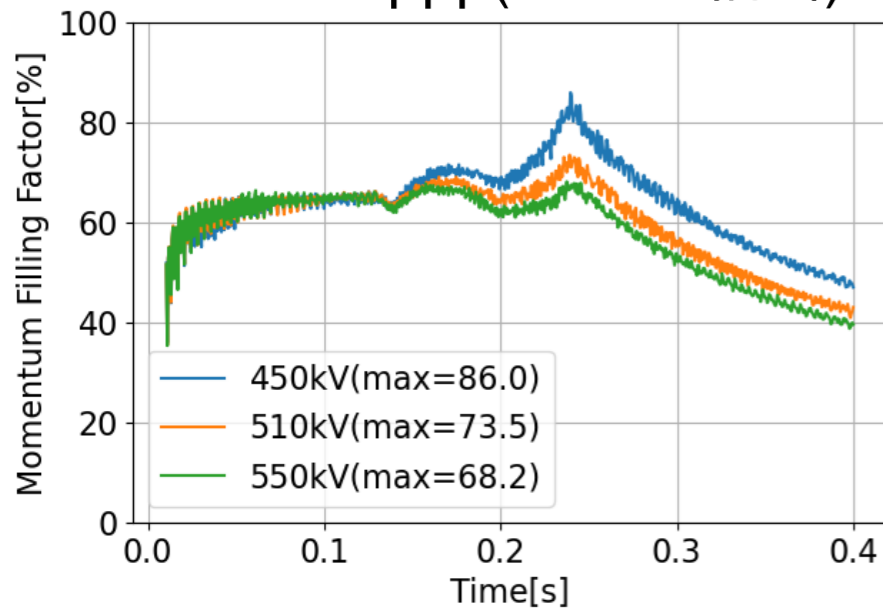
Intensity: $2.04e14$ ppp

V_{RF} at injection:
155kV($h=9$), 110kV($h=18$)
Max V_{RF} :510kV
Impedance: 11 RF cavities
With space charge effect.

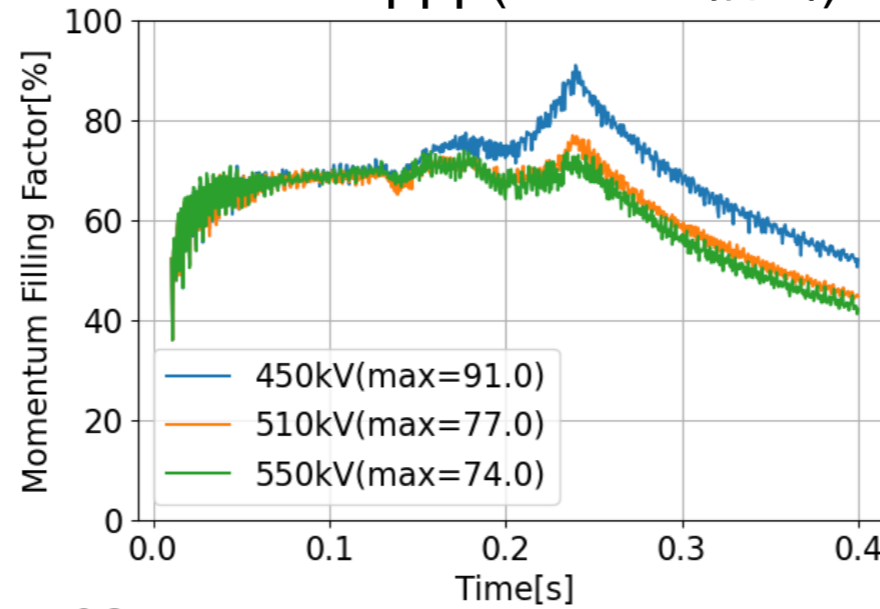
各パラメタの比較

- 粒子数増加に伴ってMomentum Filling Factorが増えていく。
- 2.1×10^{14} ppp(750kW相当)であれば、最大電圧450kVでも加速可能
- 2.6×10^{14} ppp以上を加速するには最大電圧が510kV 以上必要

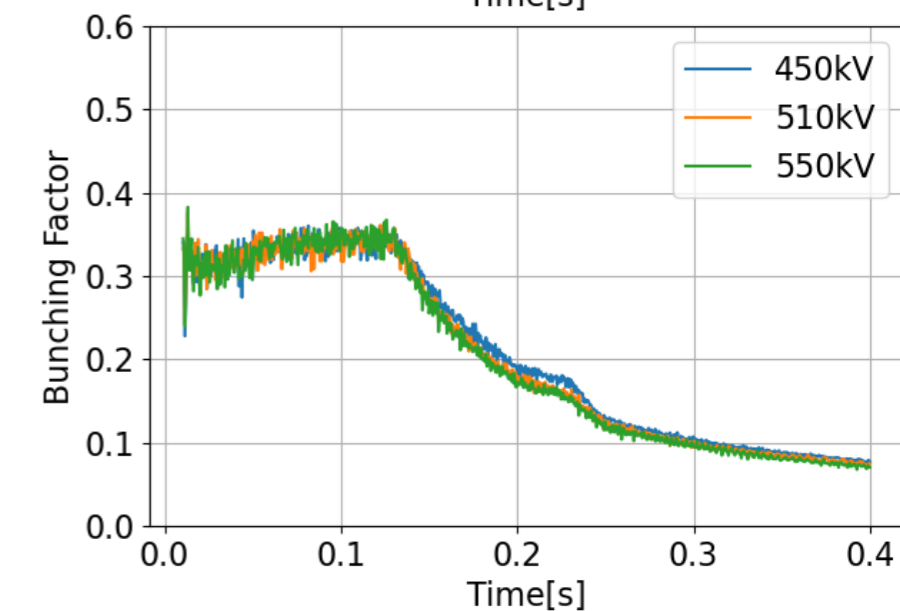
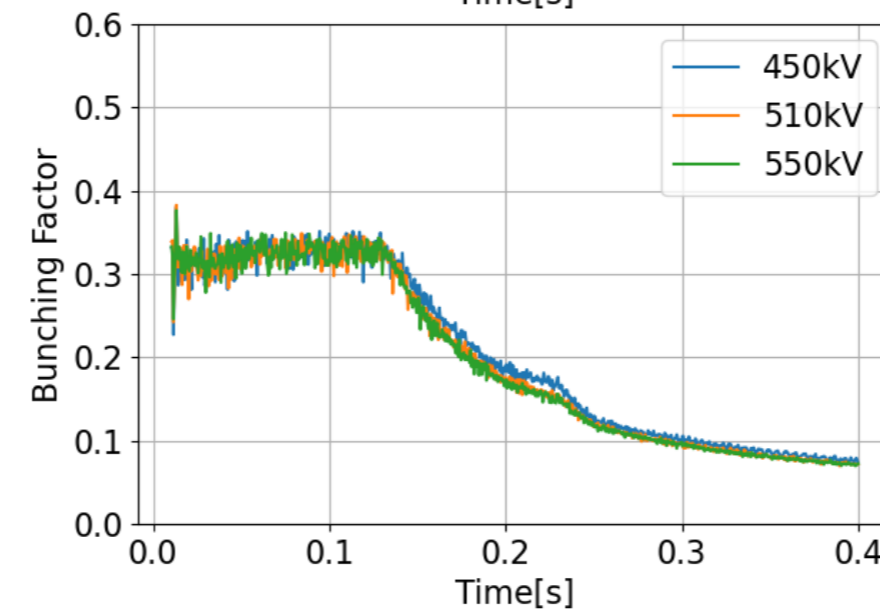
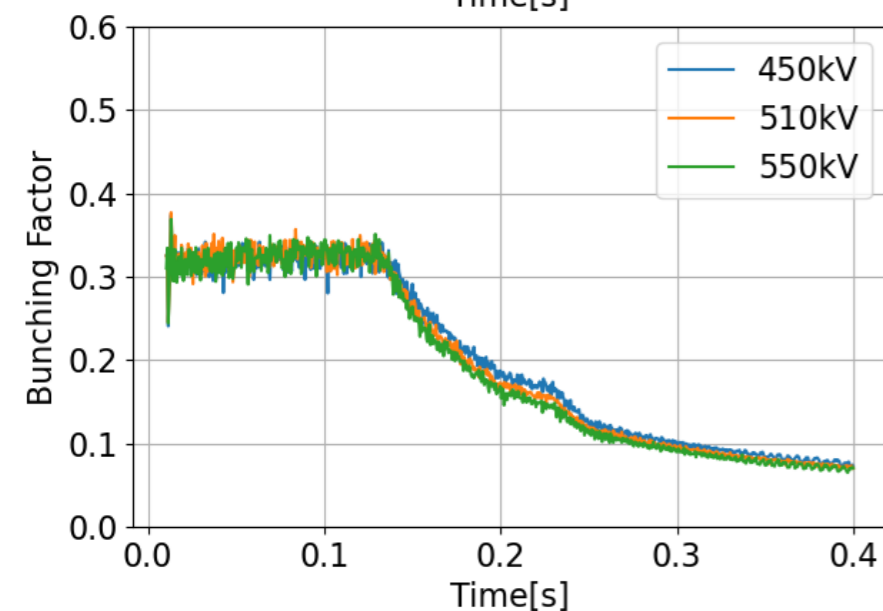
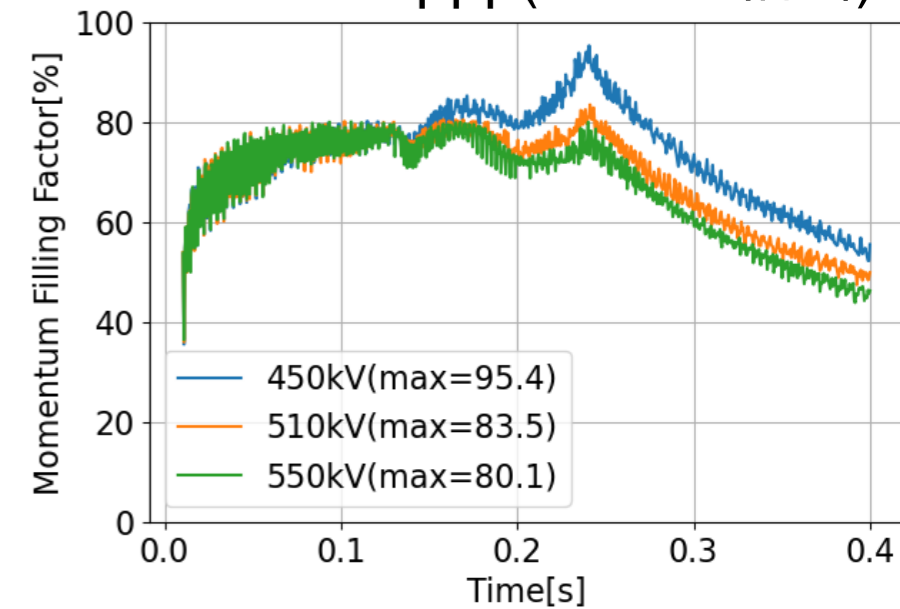
2.1×10^{14} ppp(750kW相当)



2.6×10^{14} ppp(900kW相当)

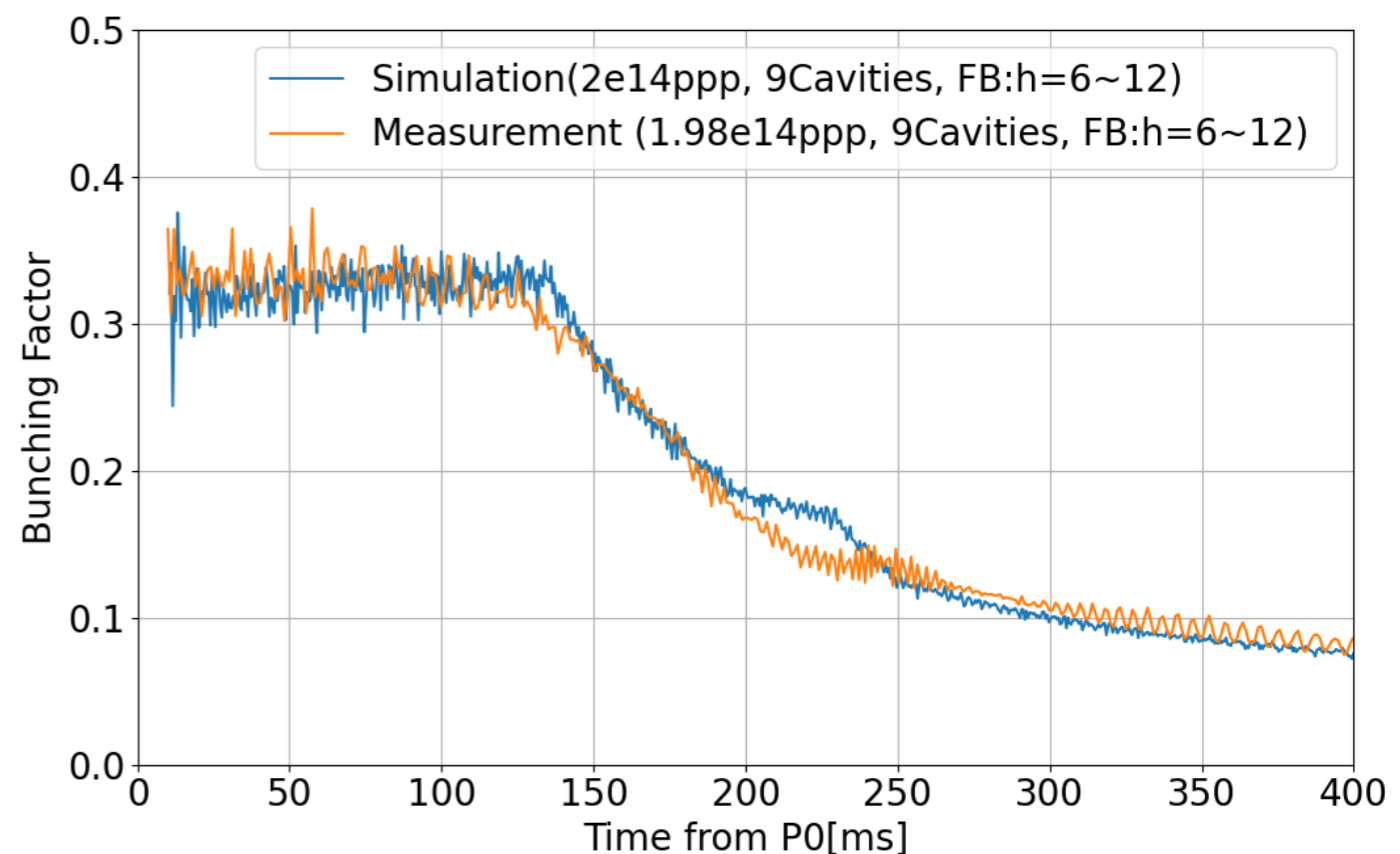
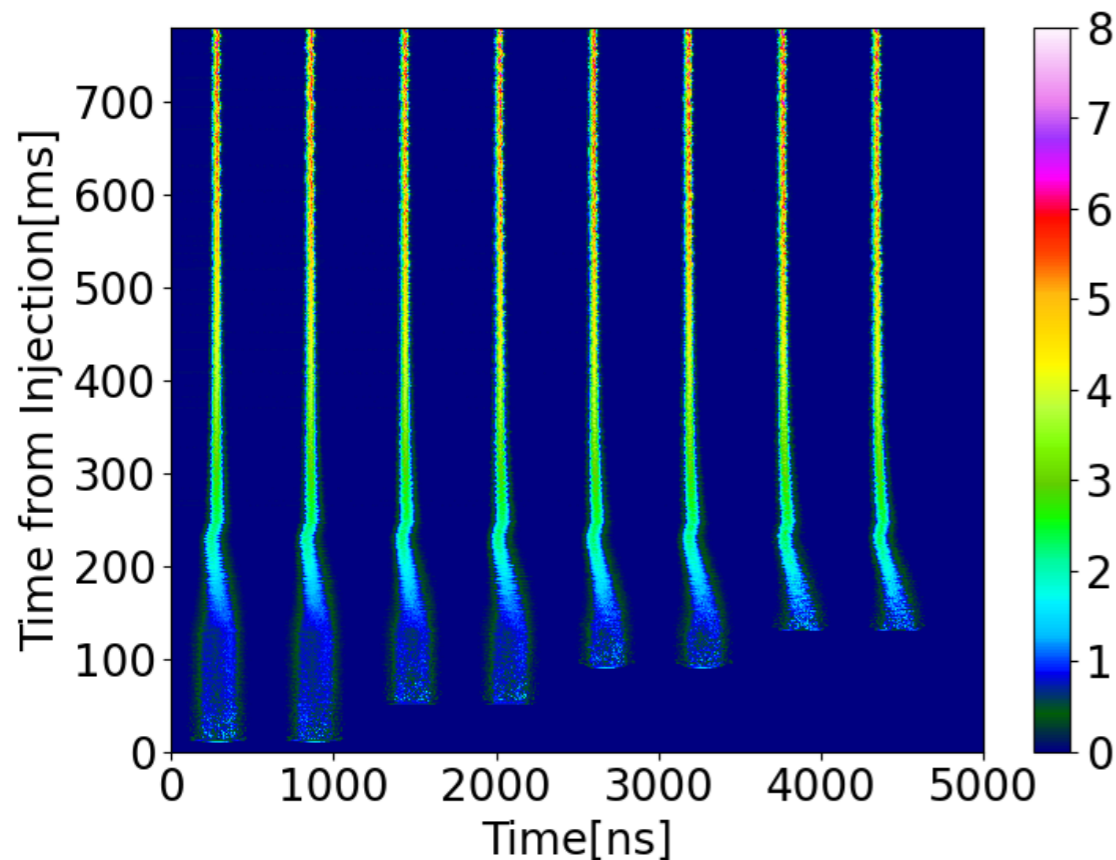


3.3×10^{14} ppp(1.1MW相当)



1.36秒周期の利用運転

- 評価した電圧パターンを用いて、2024年6月に**800kW(2.26x10¹⁴ppp)**の利用運転を実現。
 - 基本波空洞9台で最大電圧450kV。
 - シミュレーションから450kVでも700kW程度が十分加速可能とわかったので、加速空洞ギャップ数の最適化を行い、陽極電源負荷を低減できた。
- Bunching Factorはシミュレーションをほぼ再現。
 - ビーム位相フィードバックのゲインが0から最大値まで変化するt=180ms~230msでズレあり。
 - シミュレーションにはビーム位相フィードバックは考慮していない



1.16秒周期(580ms加速)の検討

- 1.36秒周期でシミュレーションが上手くデータを再現したので、1.16秒周期の電圧パターンの評価も同様に実施した。

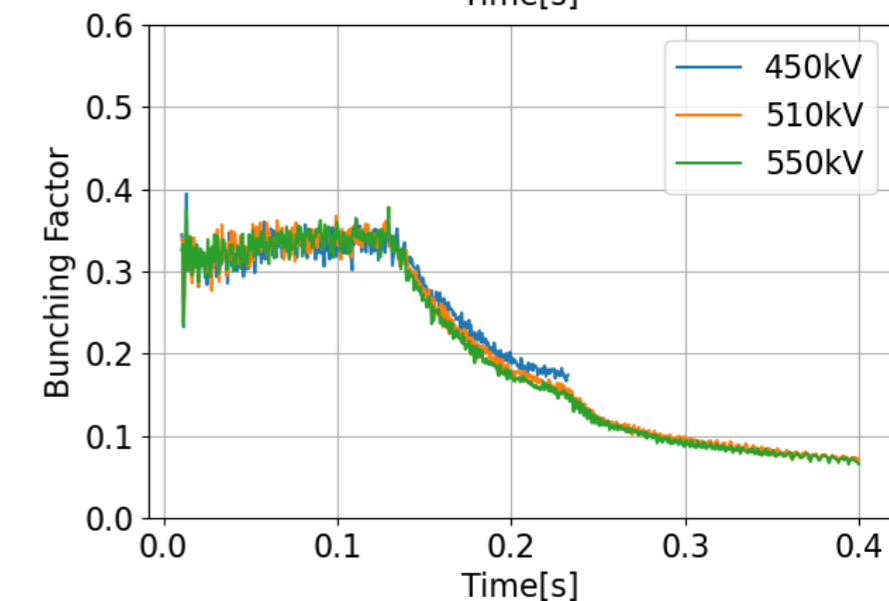
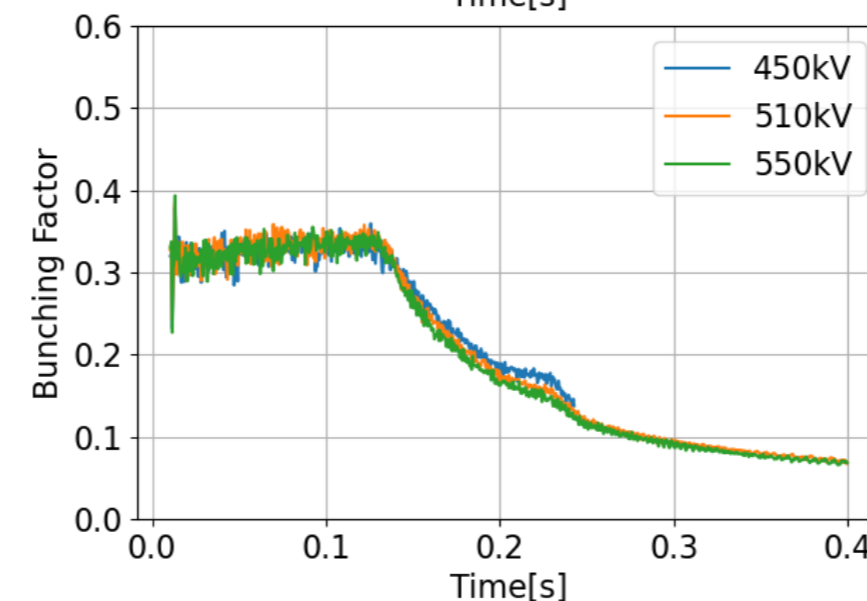
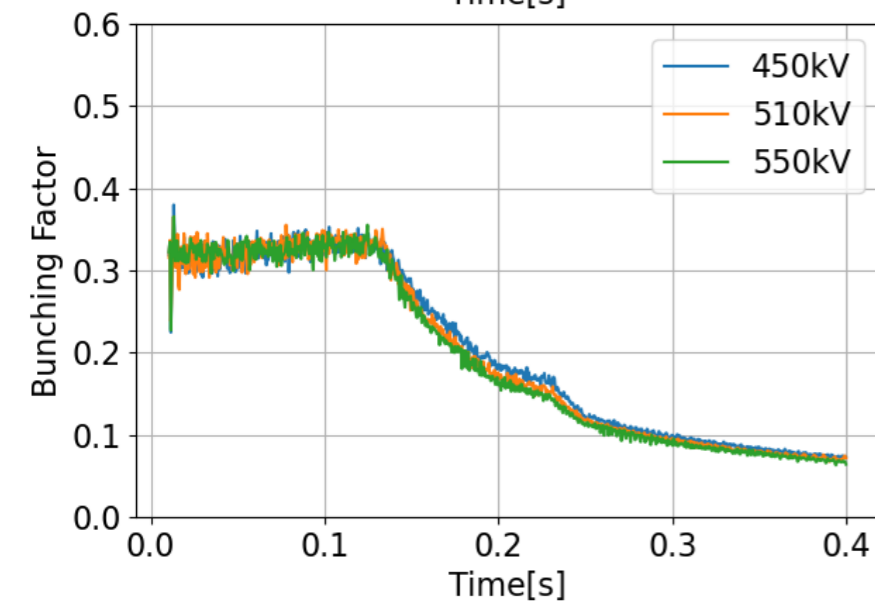
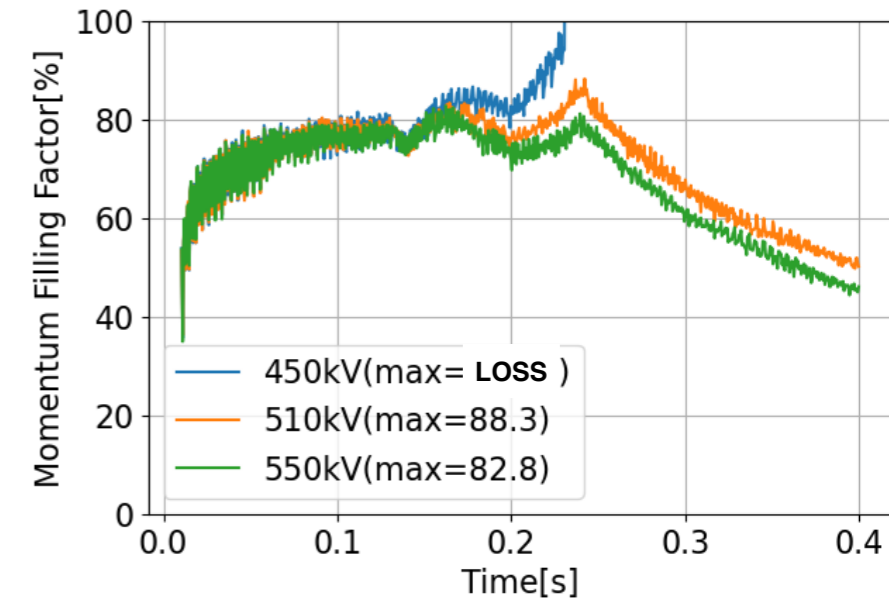
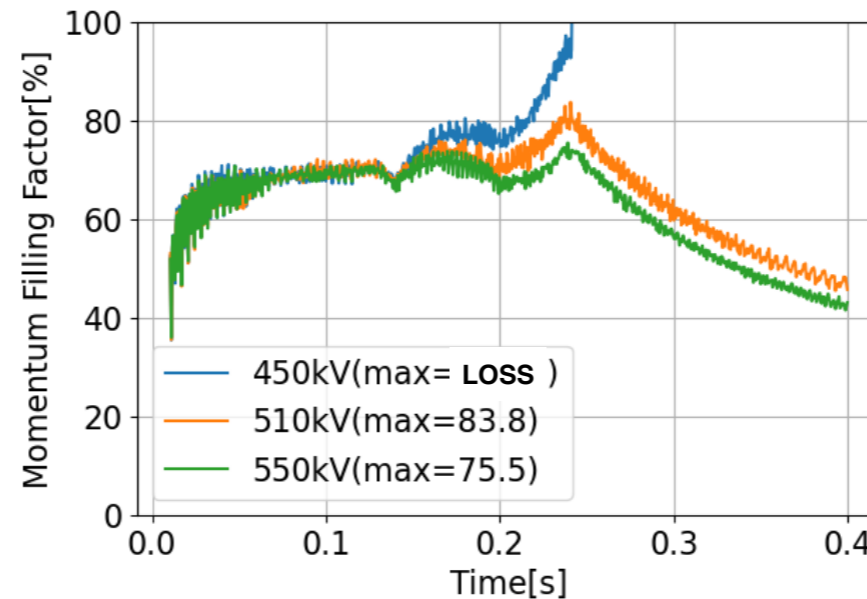
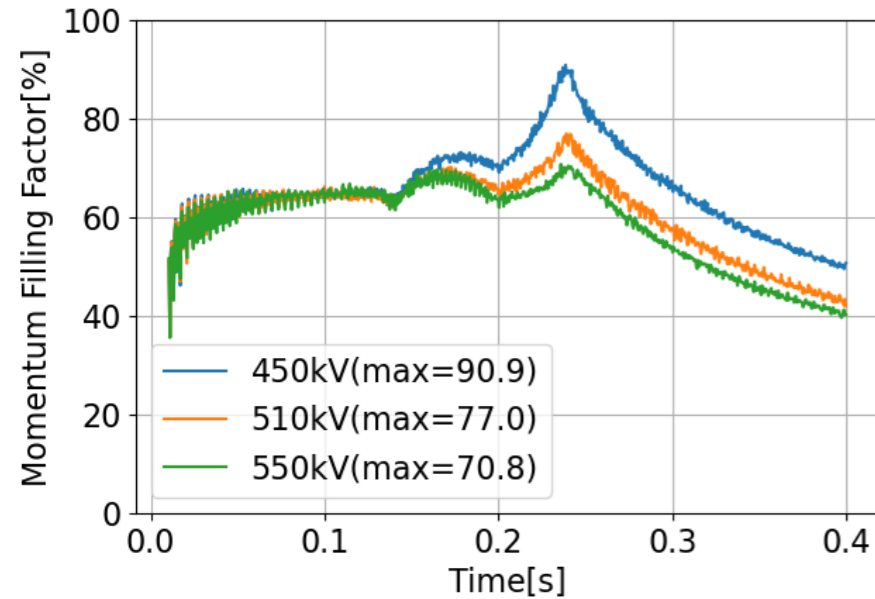
Max V_{RF}	Φ_s [deg]
450kV	38.6
510kV	33.4
550kV	30.7

- 1.36秒周期の電圧パターンのうち、取り出しタイミングのみ変更。

- 最大電圧510kV 以上あれば、 3.3×10^{14} ppp(1.3MW)も加速可能
2.1 $\times 10^{14}$ ppp(820kW相当)

2.6 $\times 10^{14}$ ppp(1.0MW相当)

3.3 $\times 10^{14}$ ppp(1.3MW相当)



Summary

- 1.36秒周期での加速電圧パターンの評価を縦方向シミュレーションを用いて行った。
- 2.48秒周期でのデータを用いて縦方向シミュレーションの調整。
 - 空洞インピーダンスの効果を取り入れることでウェイク電圧によるバンチ内の分布の変化やBunching Factorがデータを再現できるようになった。
- 調整したシミュレーション環境で1.36秒周期での加速にもちいる加速電圧パターンを評価
 - バンチ結合振動の抑制のためには、 $h=6\sim 12$ の範囲での空洞電圧FBが不可欠
 - 最大電圧が450 kV以上あれば750 kW相当加速可能
 - 最大電圧が510 kV以上あれば1.1 MW相当の加速可能
- シミュレーションで評価した電圧パターンを用いて2023年に750 kW加速に成功
 - Bunching Factorはシミュレーションとよく一致
- シミュレーションを用いて将来の1.16秒周期の場合の電圧パターンの評価を行った。
 - 評価の結果最大電圧が 510 kV以上あれば 1.3 MWでの加速が可能であるとわかった。