



# J-PARC主リングにおける陽極電流の計算 と加速空洞の駆動高周波位相角の最適化

August 7<sup>th</sup>, 2025

清矢 紀世美

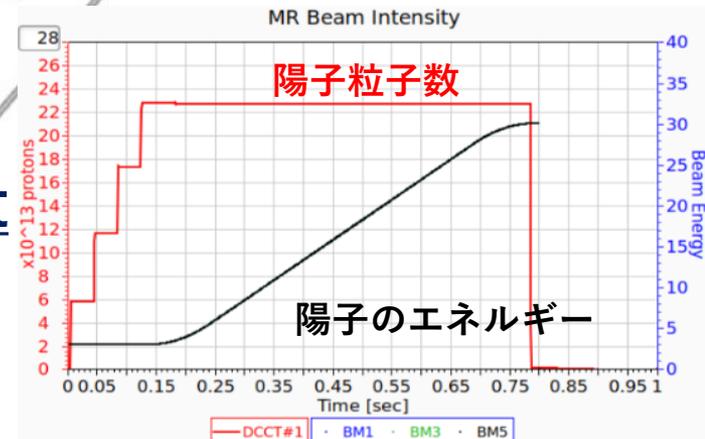
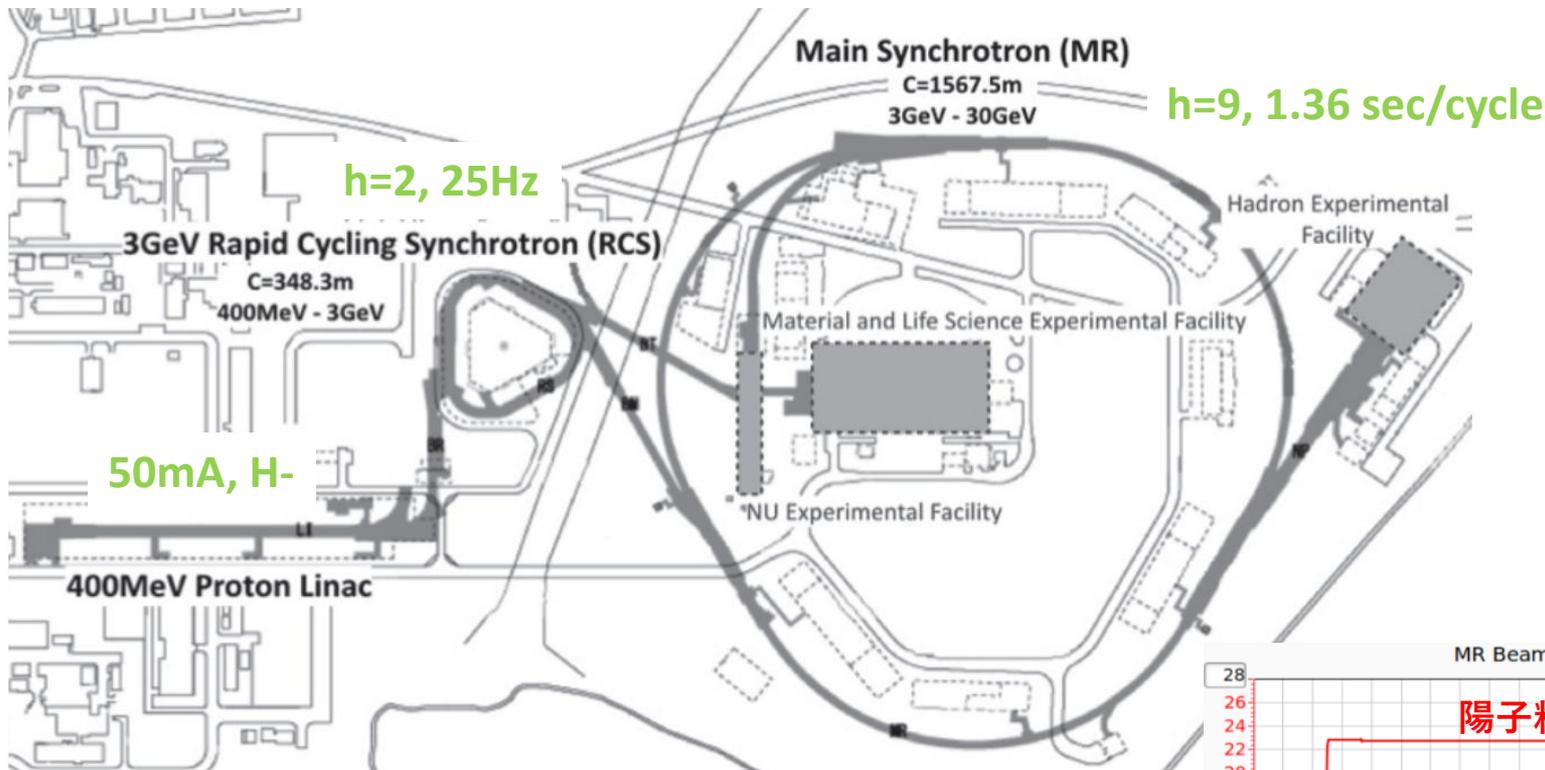
(J-PARC Ring RF group)

# Outline



- J-PARC加速器とMain Ring RFシステムの紹介
- 必要な陽極電流の計算
- 空洞共振周波数変更による陽極電流低減の検討
- まとめ・今後の予定

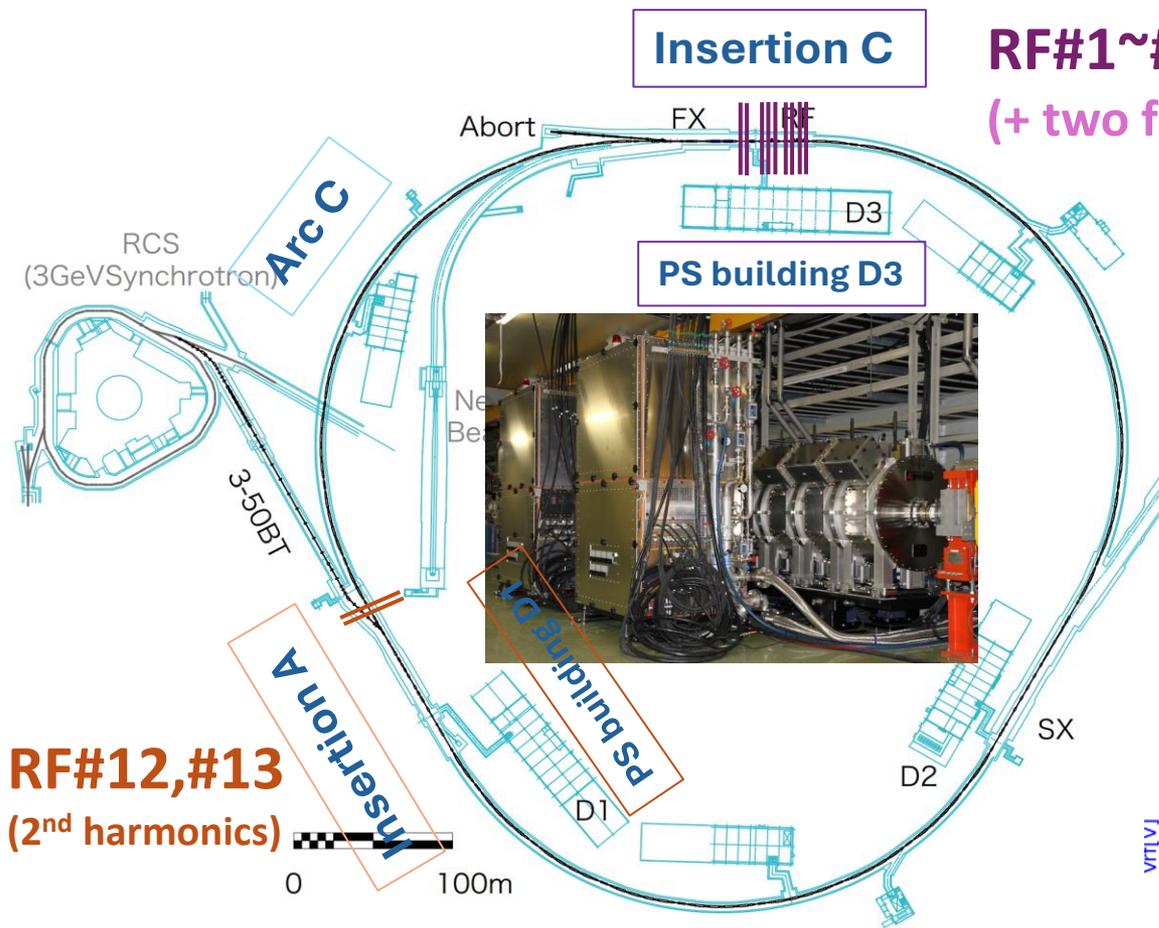
# J-PARCの加速器とMR FX運転



## MR fast extraction for T2K experiment

8バンチ入射、 $2.3E14$  ppp  
3GeV陽子を30GeVまで加速  
1.36秒サイクル  
運転ビームパワー 830kW

# J-PARC MR RF system

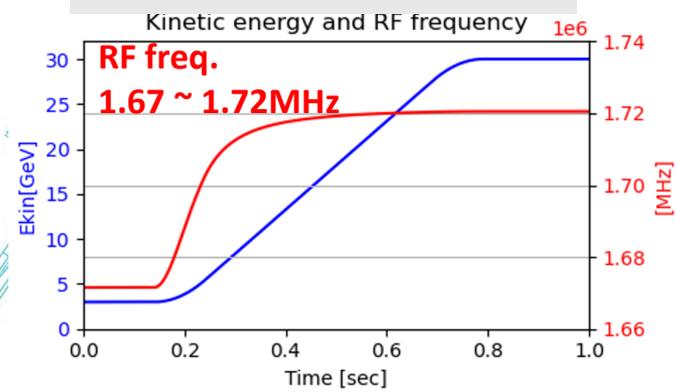


**RF#1~#9**

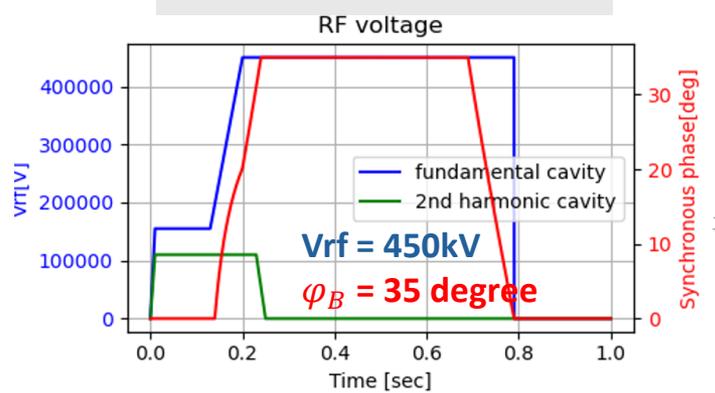
(+ two future cavities #10, #11)

**RF#12,#13**  
(2<sup>nd</sup> harmonics)

**運動エネルギーとRF周波数**



**ギャップ電圧と同期位相**



# Hyper-Kニュートリノ実験に向けた 目標ビーム強度

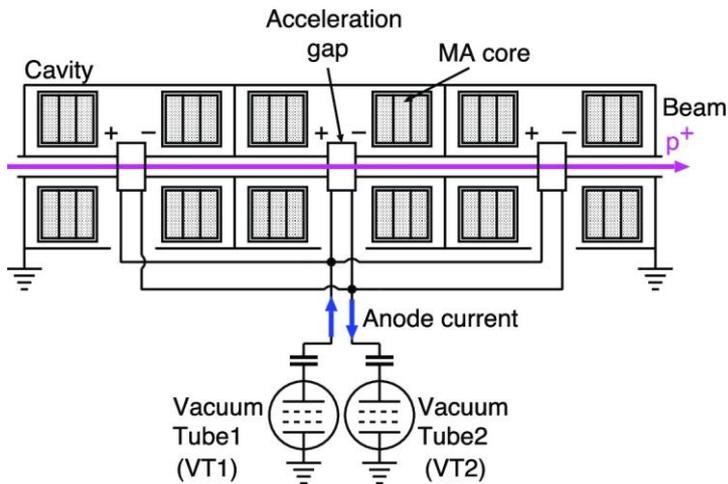


MR cycle	1.36 sec	1.28 sec	1.16 sec
Intensity	2.35E14 ppp	2.7E14 ppp	3.15E14 ppp
RF voltage	450 kV	510 kV	550 kV
Anode_I	121 A	121 A	127 A
2 <sup>nd</sup> RF voltage	110 kV	110 kV	110 kV
2 <sup>nd</sup> RF Anode_I	65A	85A	110 A

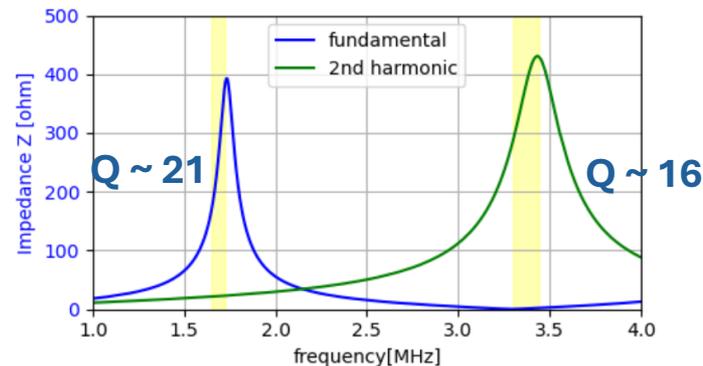
## RF systemの課題

- Space charge effectsを考慮し、十分なRFバケツを確保する  
→ 加速空洞の増設
- ビームローディング補償のためにアノード電流の増強  
→ アノード電源インバーターの増設

# 金属磁性体を用いた空洞



## 空洞のインピーダンス



fundamental cavity (3gap)	#1, #2, #9
fundamental cavity (4gap)	#3 ~ #8
2 <sup>nd</sup> harmonic	#12, #13

### Gap voltage

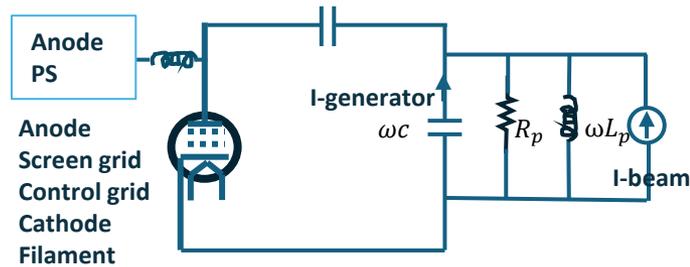
fundamental : 14kV/gap  
2<sup>nd</sup> harmonic : 13.5kV/gap

- Q値が低い
- 無同調空洞（加速周波数に合わせて共振周波数を変えない）

# アノード電源と600kW 四極管



アノード電源



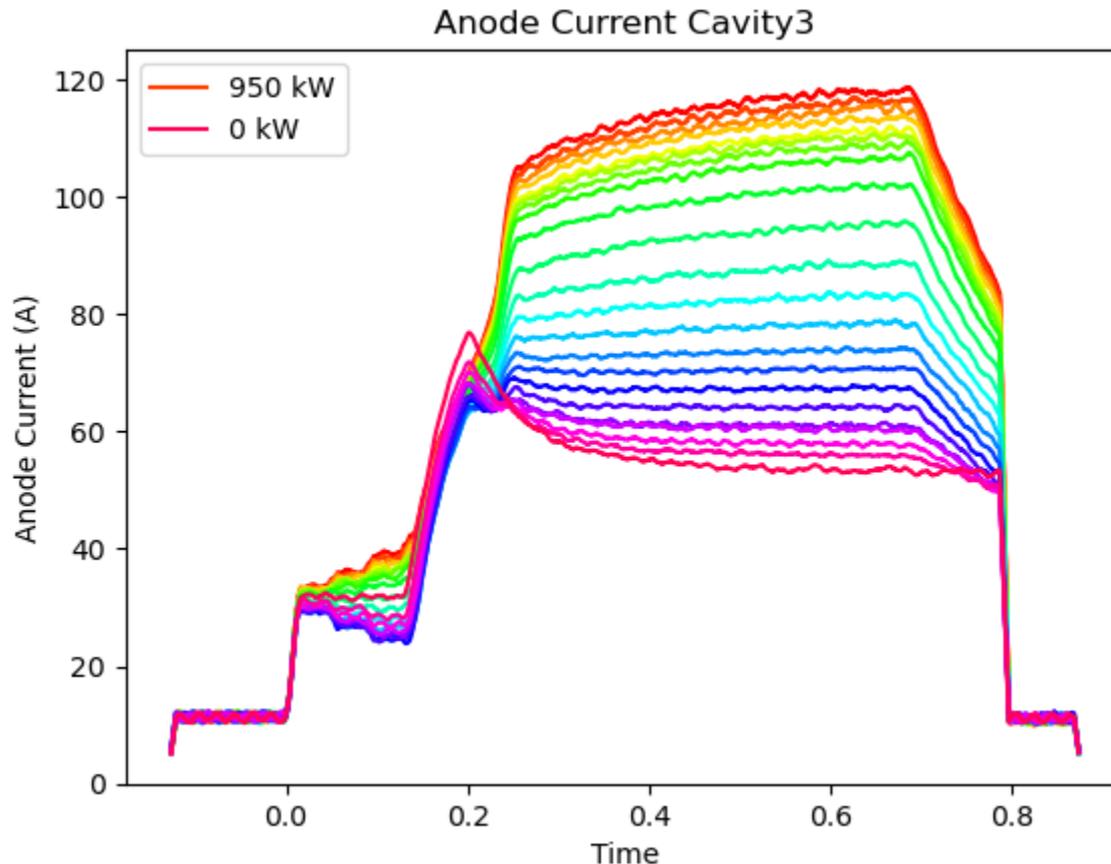
インバーター

$$I_{\text{anode/unit}} = 6.7\text{A}$$



- ビーム増強にともない、ビームローディング補償のためのアノード電流が必要。
- アノード電流はインバーターの数で決まる。
- Maximum anode current = 127 A (6.7 A x 19 units)

# ビームパワーを上げた時の 陽極電流の測定結果



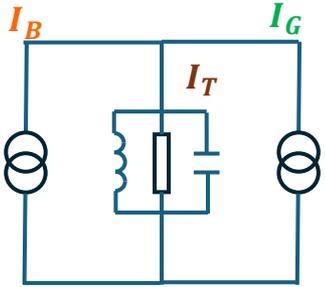
- 2.7E14ppp, 1.36s cycle (950kW)ですすでに120A
- 1.3MWを達成するために必要な電流はいくらか。
- 陽極電流を下げる方法はないか。

# 必要な陽極電流の計算

# 空胴インピーダンスと phasor diagram

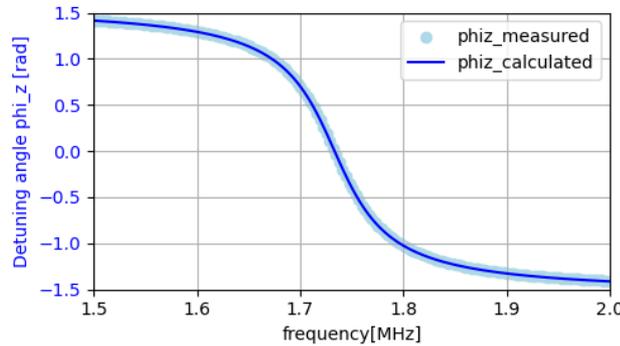


## 空胴（共振器）モデル

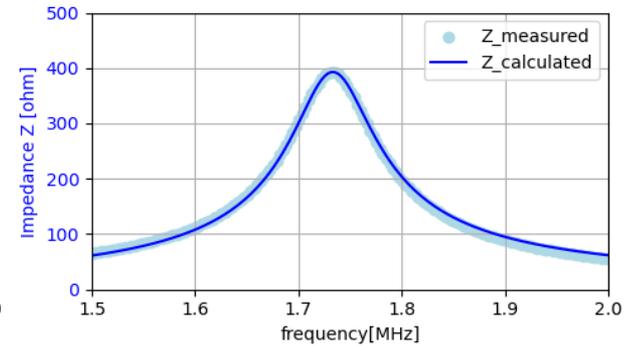


$I_B$ : Beam current  
 $I_G$ : Generator current  
 $I_T$ : Total current

Detuning angle :  $\varphi_Z$

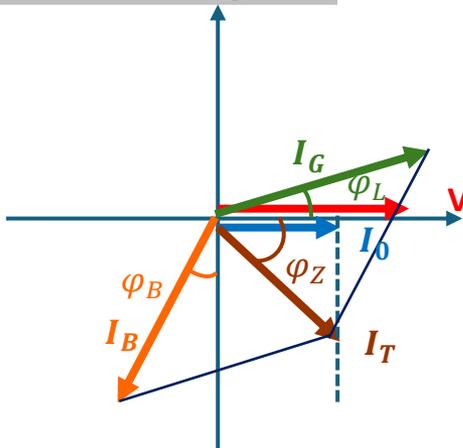


インピーダンス :  $Z$



Resonant frequency : 1.73MHz, Q:21,  $R_p$ :390 ohm (4 gap)

## Phasor diagram

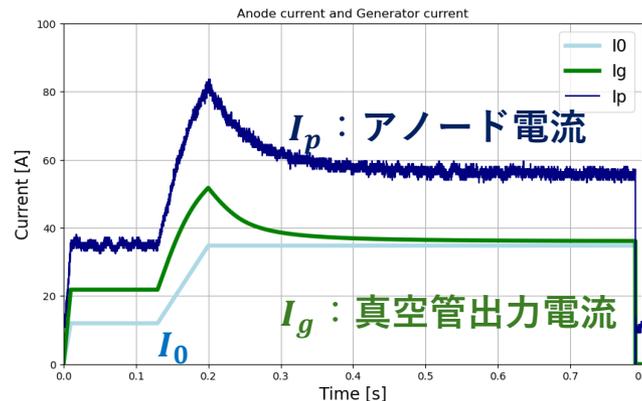


$V$ : ギャップ電圧

$$I_0 = \frac{V}{R_p}$$

$$I_T = \frac{I_0}{\cos \varphi_Z}$$

ビームがない時 ( $I_B = 0$ )  $I_T = I_G$



$I_p$ : アノード電流

$I_g$ : 真空管出力電流

$I_p \propto I_G$   
 $I_G \sim I_p * 0.65$   
 真空管の効率は65%

# 真空管出力電流の計算

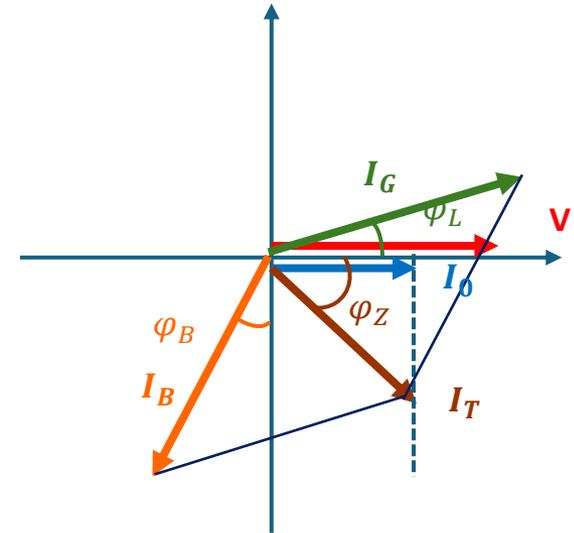


ビームがある時、  $I_T = I_G + I_B$

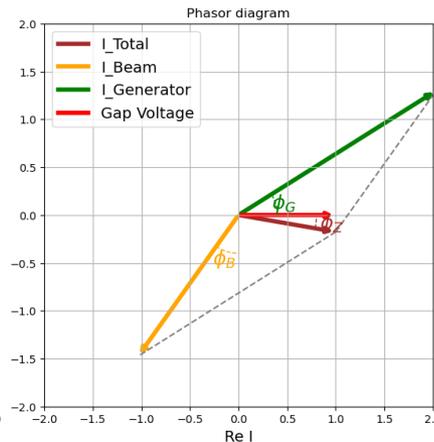
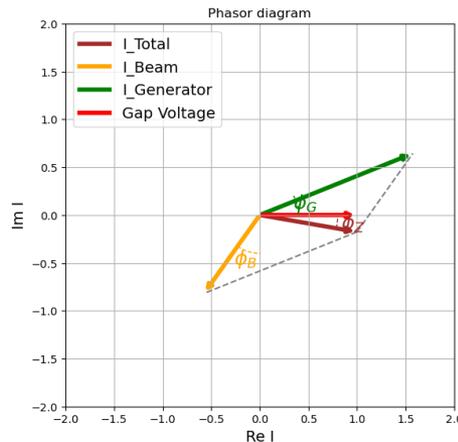
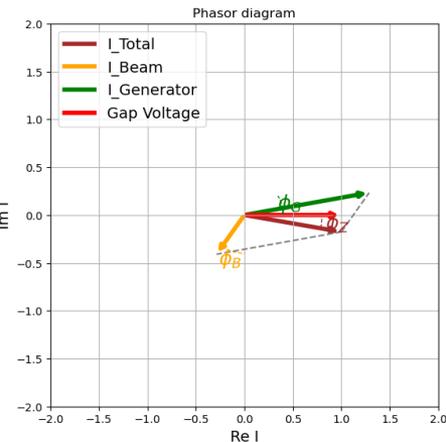
$I_G$  : Generator current

$$\tan \varphi_L = \frac{I_0 \tan \varphi_Z - I_B \cos \varphi_B}{I_0 + I_B \sin \varphi_B} = \frac{\tan \varphi_Z - Y \cos \varphi_B}{1 + Y \sin \varphi_B}$$

$$I_G = \frac{I_0 - I_B \sin \varphi_B}{\cos \varphi_L} = \frac{I_0(1 + Y \sin \varphi_B)}{\cos \varphi_L} \quad (\text{when } Y = \frac{I_B}{I_0})$$



$I_B$  : Beam current  
 $\varphi_B$  : synchronous phase  
 $\varphi_Z$  : cavity phase



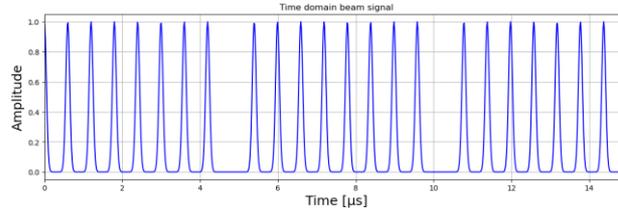
ビーム電流が変化してもギャップ電圧Vを保つようにgenerator電流とその位相を変える

# アノード電流の計算

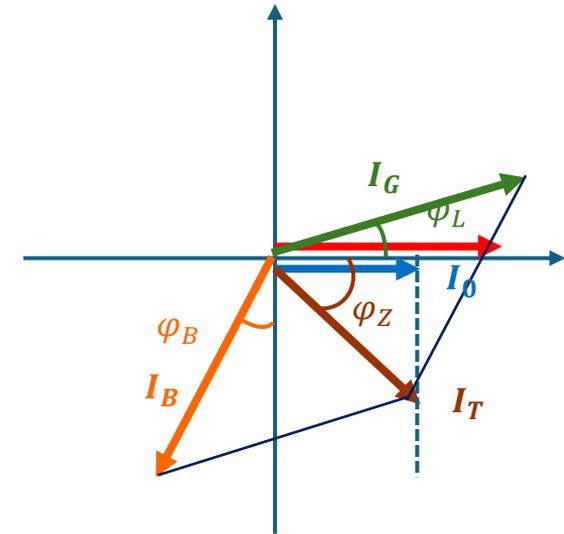
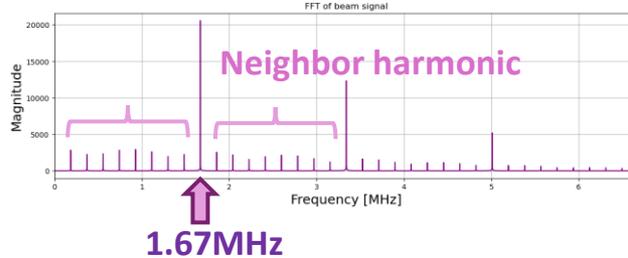


ビーム信号、8バンチ、harmonic number = 9

Time domain



Frequency domain



$I_p$  : Anode current

$$I_p - I_{neighbor} \propto I_G$$

\* Neighbor harmonicの陽極電流への  
寄与を除いたものが比例と仮定

$I_B$  : Beam current

$\varphi_B$  : synchronous phase

$\varphi_Z$  : cavity phase

$$I_p = a I_0 \frac{(1 + Y \sin \varphi_B)}{\cos(\text{atan}(\frac{\tan \varphi_Z - Y \cos \varphi_B}{1 + Y \sin \varphi_B}))} + I_{neighbor}$$

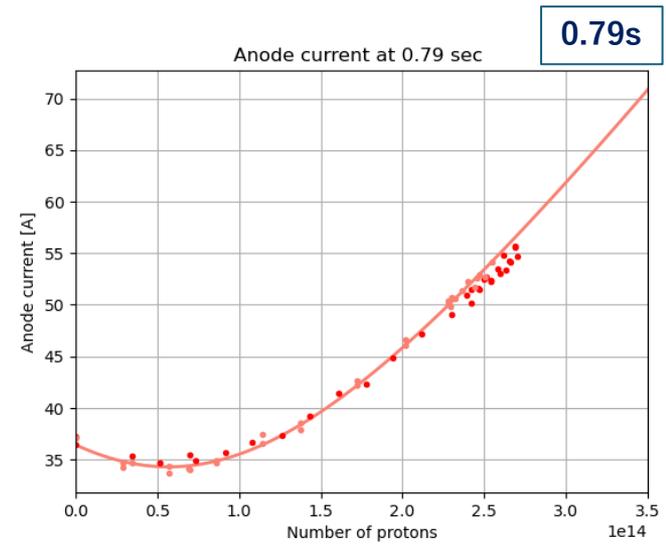
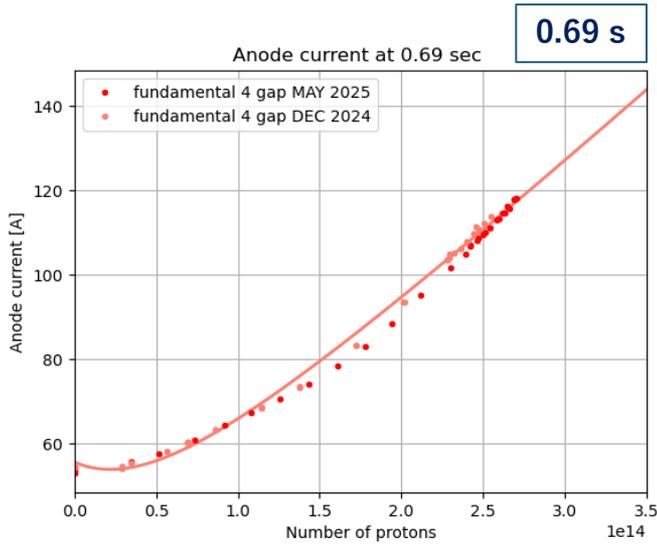
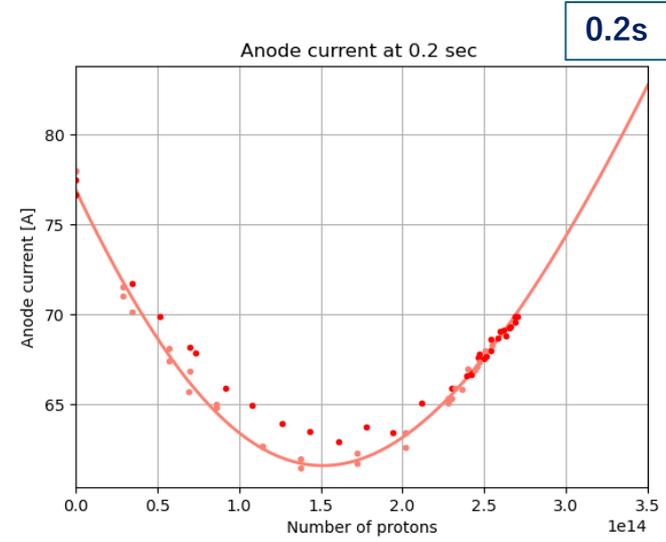
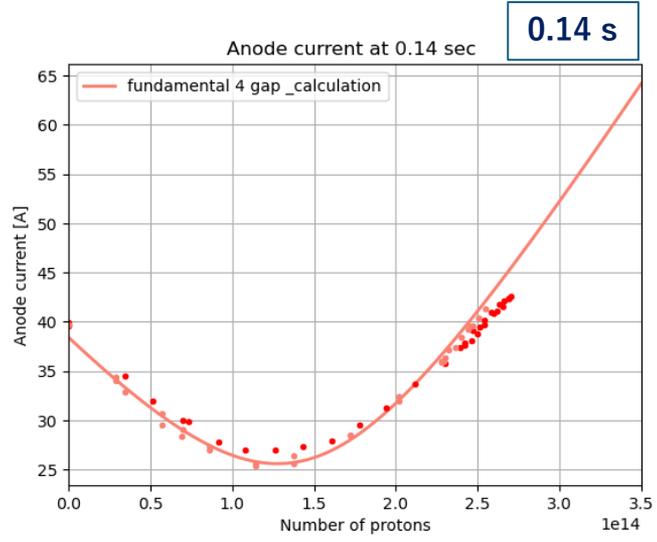
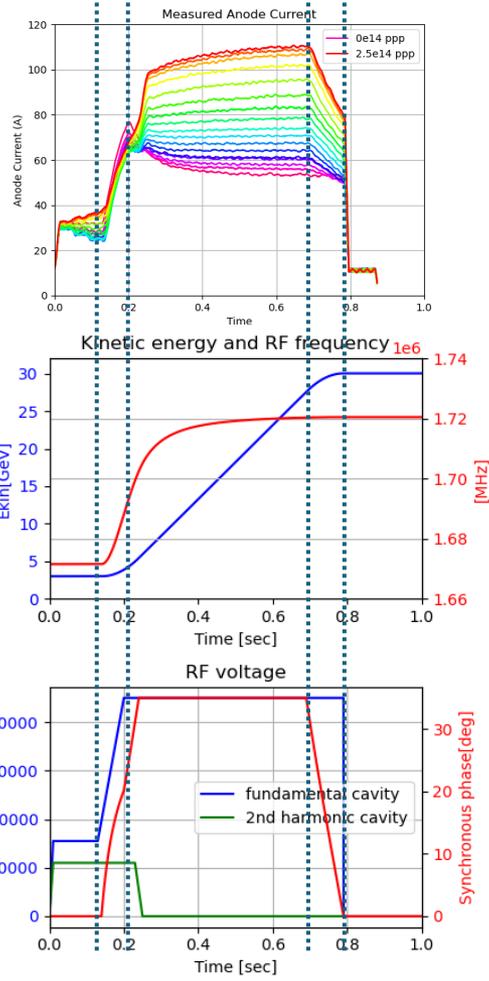
$$Y = \frac{I_B}{I_0} = \alpha N, \quad I_{neighbor} = \beta N \quad (N : \text{number of protons})$$

$a, \alpha, \beta$  を変数としてfittingを行い、陽極電流と粒子数の関係を求めた

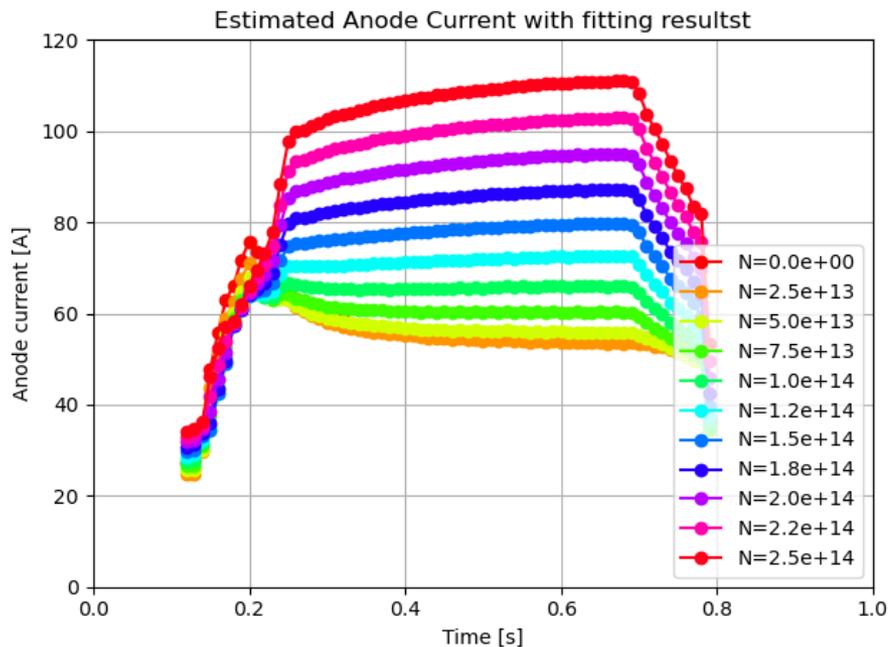
# Fitting の結果



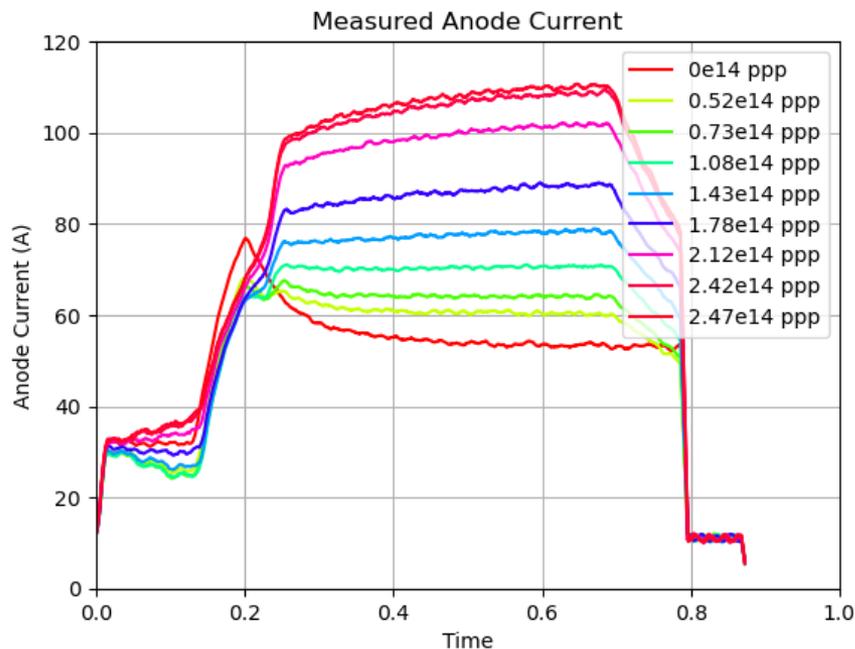
0.14 s    0.2s    0.69 s    0.79s



## Fitting結果をもとに再構築した電流



## 測定結果



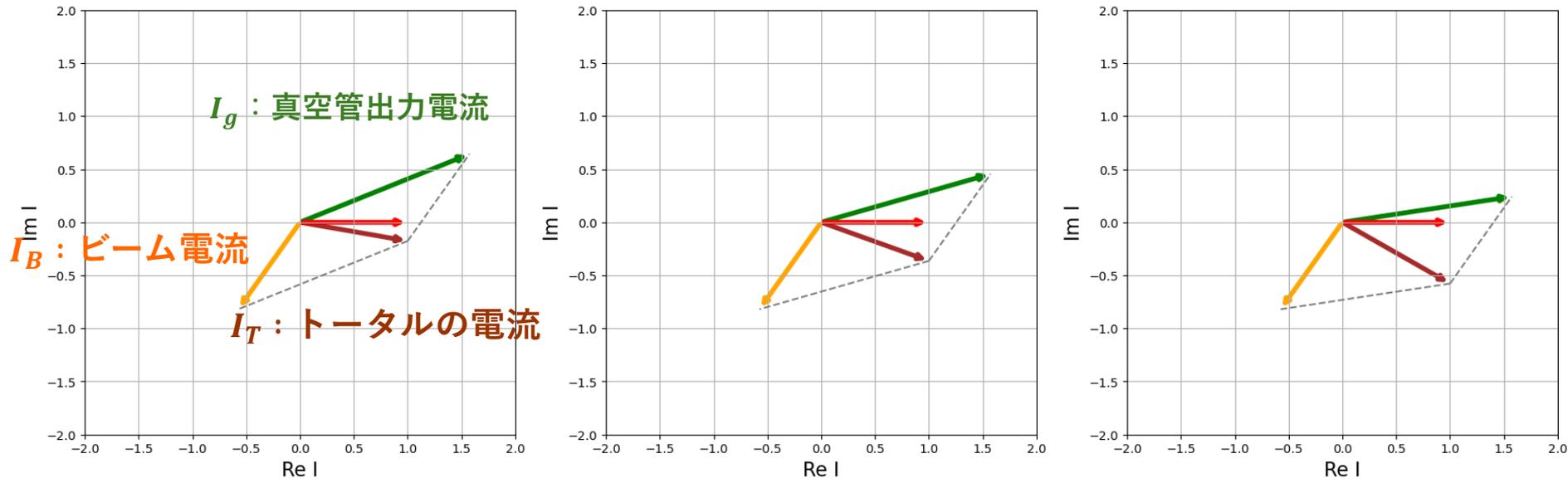
- Fitting結果をもとに再構築したアノード電流は測定結果を再現している。
- Fittingを使った計算は信頼できると判断する。

# 空洞共振周波数変更による 陽極電流低減の検討

# Detuning angleを上げて 陽極電流を低減する



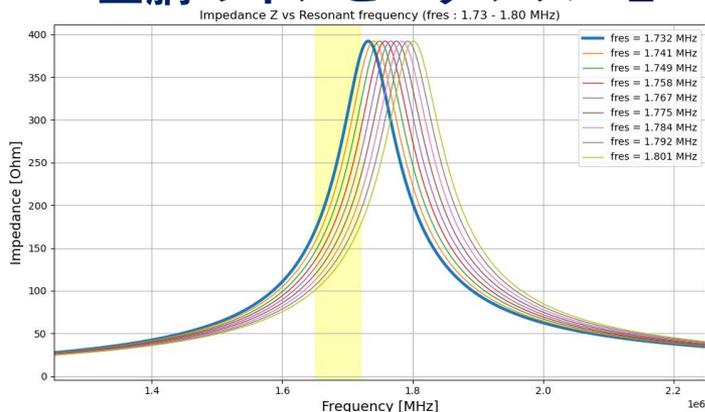
## Detuning angleを上げた時の陽極電流の変化



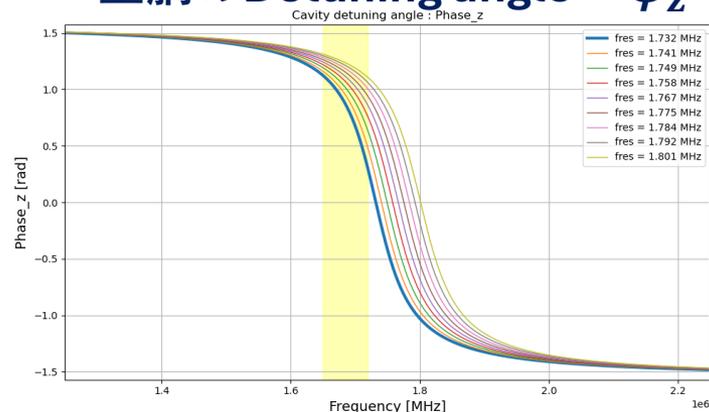
# 共振周波数を変えた時の Detuning angleの変化



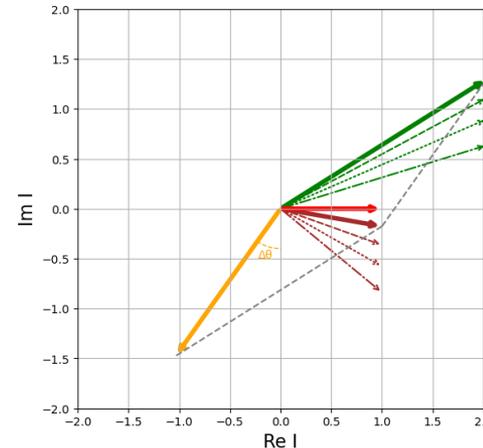
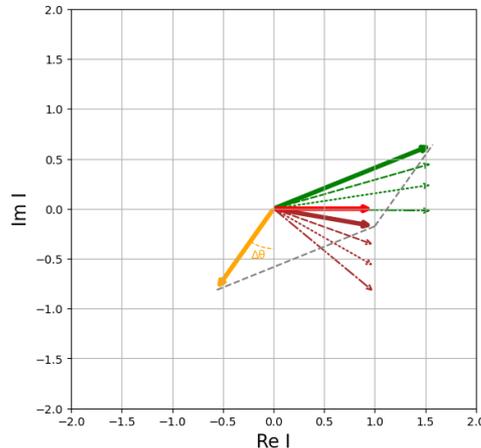
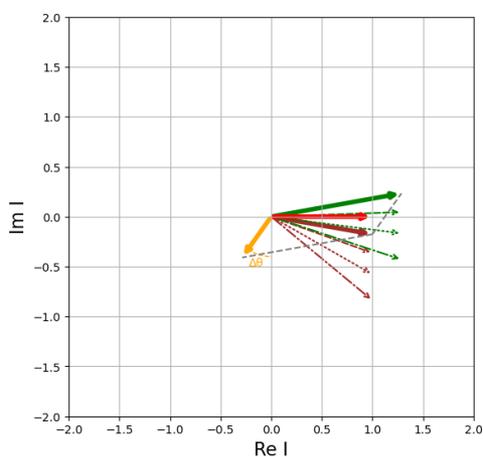
## 空洞のインピーダンス： $Z$



## 空洞のDetuning angle： $\varphi_Z$



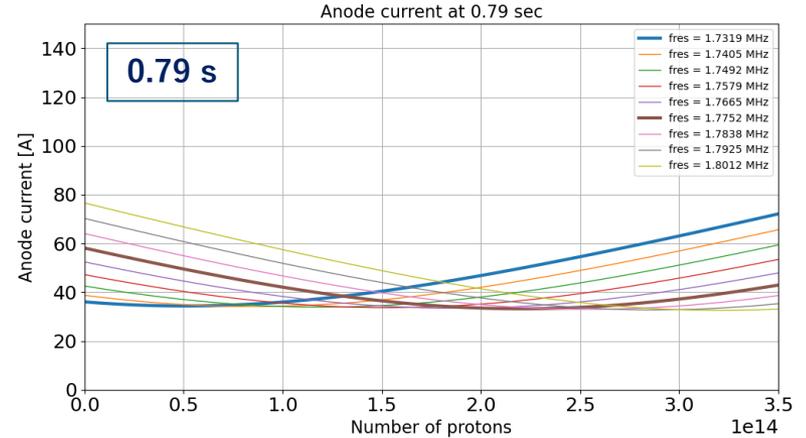
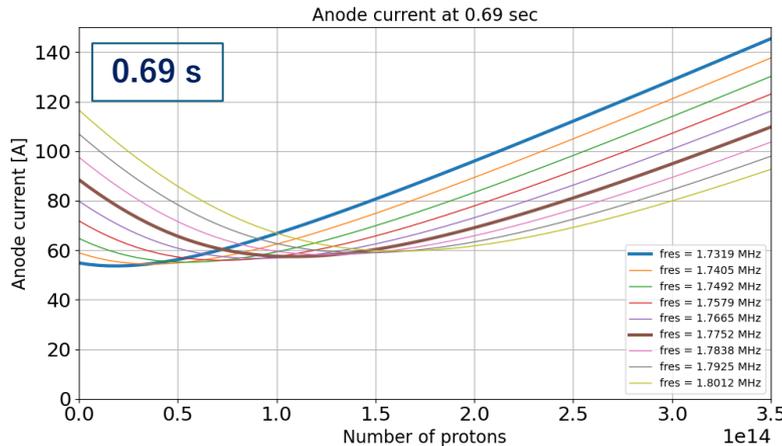
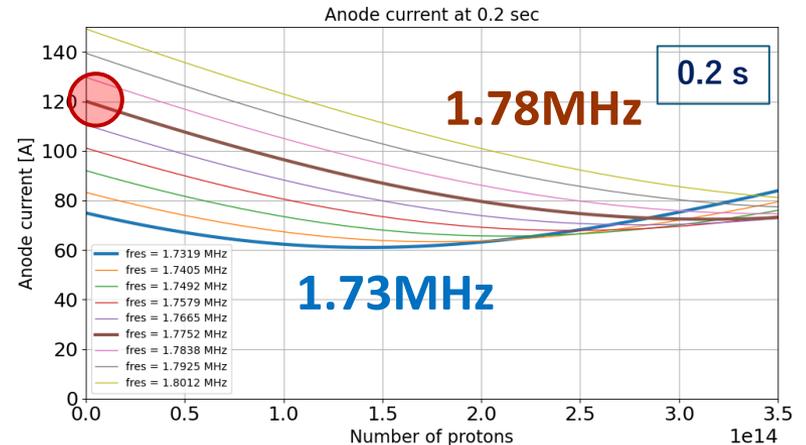
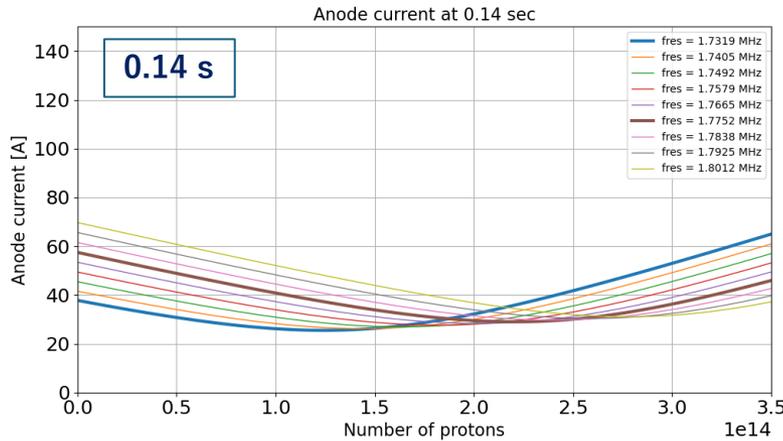
## ビーム電流と Detuning angle を変えた時の phasor diagram



# 共振周波数を上げた時の 陽極電流の計算

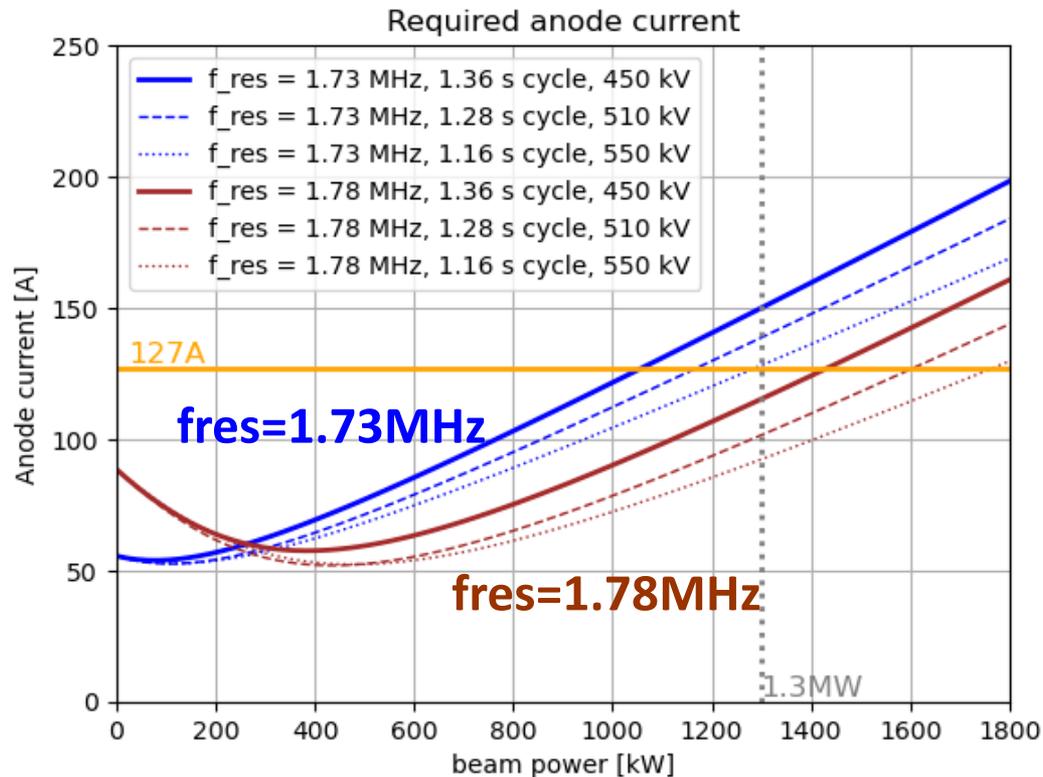


1.80MHz  
↑  
1.73MHz



- 共振周波数を1.73MHzから1.80MHzに上げた
- Fittingより求めた $a, \alpha, \beta$ を用い、0.14 s, 0.2 s, 0.69 s, 0.79 sにおける陽極電流を計算
- $fres = 1.78\text{MHz}$ とすると、ビームのない時0.2 sで120Aに達する

# 共振周波数1.73MHzと1.78MHzでの ビームパワーに対する陽極電流の比較



最大陽極電流  
127A (インバーター19台)

- 繰り返しを1.36 sから1.16 sに、ギャップ電圧を450kVから550kVに上げた時の最大ビームパワー

共振周波数 1.73MHz : 1.3MW

共振周波数 1.78MHz : 1.8MW

- 既存の陽極電源を用い、さらにビームパワーを増強できる可能性がある。

# まとめと予定



- J-PARC Main Ringは2028年までに1.3MWビームパワーをニュートリノ実験に送る予定である。
- ビームパワー増強にともない、beam loadingの効果が増えるため、さらに陽極電流が必要となる。
- 必要な陽極電流をphasor diagramを用いて計算した。
- 加速空洞の共振周波数を変え、必要な陽極電流値を下げる検討を行った。
- シャットダウン終了後（11月以降）にビーム試験を行い、陽極電流と共振周波数の検証を行う。