



IQ変調器を用いた高周波パルスの 振幅位相平坦化による電子ビームの高品質化

山田志門、柏木茂、長澤育郎、南部健一、高橋健、日出富士雄、三浦禎雄、武藤俊哉、
(M2) 鹿又健、柴田 晃太郎、濱広幸

東北大学電子光理学研究センター・加速器ビーム物理研究部

- 研究背景・目的
- t-ACTSのシステム
 - 極短パルス電子ビーム生成
 - ハイパワー高周波システム
 - RFパルスの波形
- IQ変調器を用いたRFパルス平坦化
 - LLRFシステム
 - RF振幅位相平坦化
- ビームを使ったパルス平坦化の評価
 - 加速前の電子ビーム評価
 - 加速後の電子ビーム評価
- まとめ

研究背景・目的

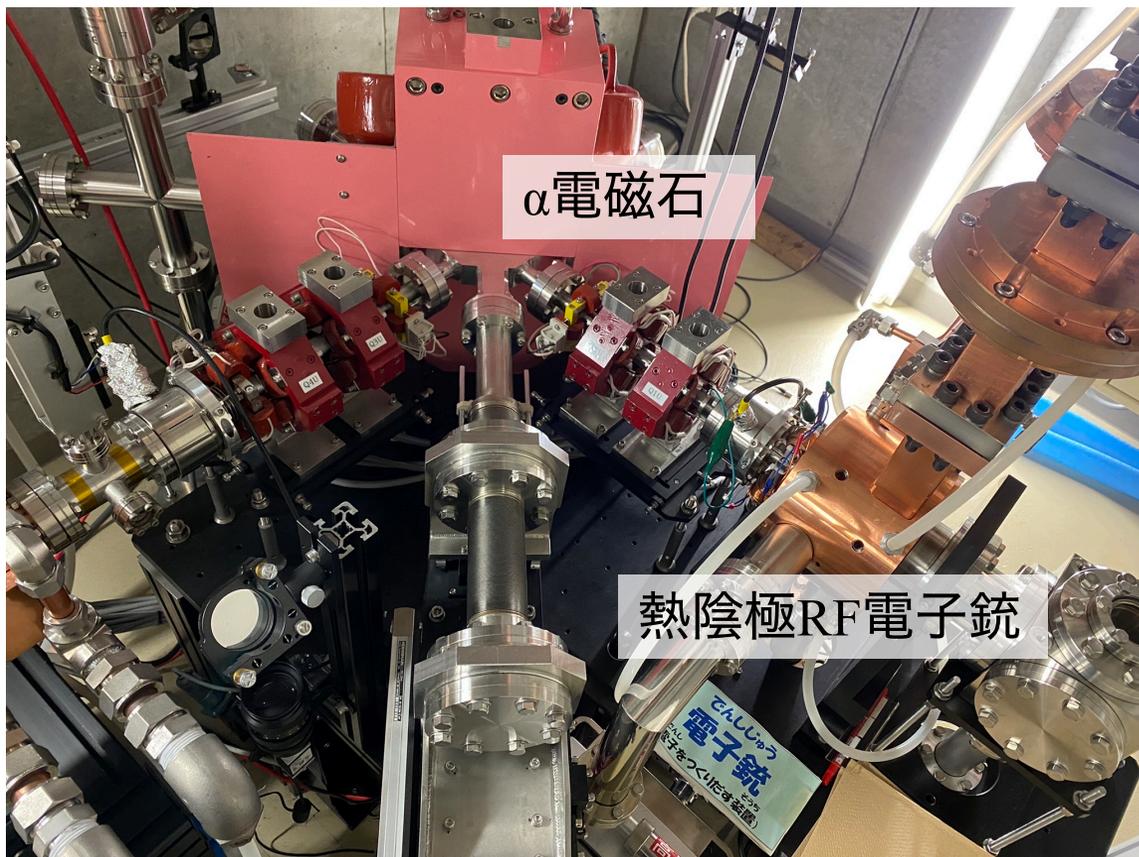
背景

- 極短パルス電子ビームによる、テラヘルツ帯域のコヒーレント放射発生に関して研究している
- 電子バンチを圧縮するため、進行波型加速管中でのVelocity Bunchingを採用している

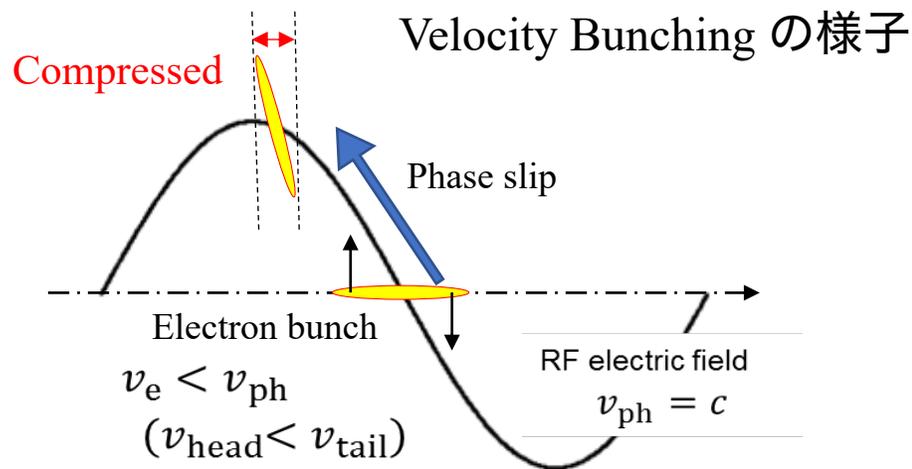
目的

- 1つのRFパルス内で、Velocity Bunchingに適した運動量分布が均一かつ狭い電子ビームの生成
 - パルス内の極短バンチの状態を揃え、コヒーレント放射の高輝度化を図る
- ➡ ローレベル高周波システムにIQ変調器を導入し、熱陰極RF電子銃及び加速管に供給する高周波パルスの振幅、及び位相の平坦化

テラヘルツ帯域のいろいろなコヒーレント放射発生の
研究が行われている電子線形加速器



極短パルス電子ビーム生成

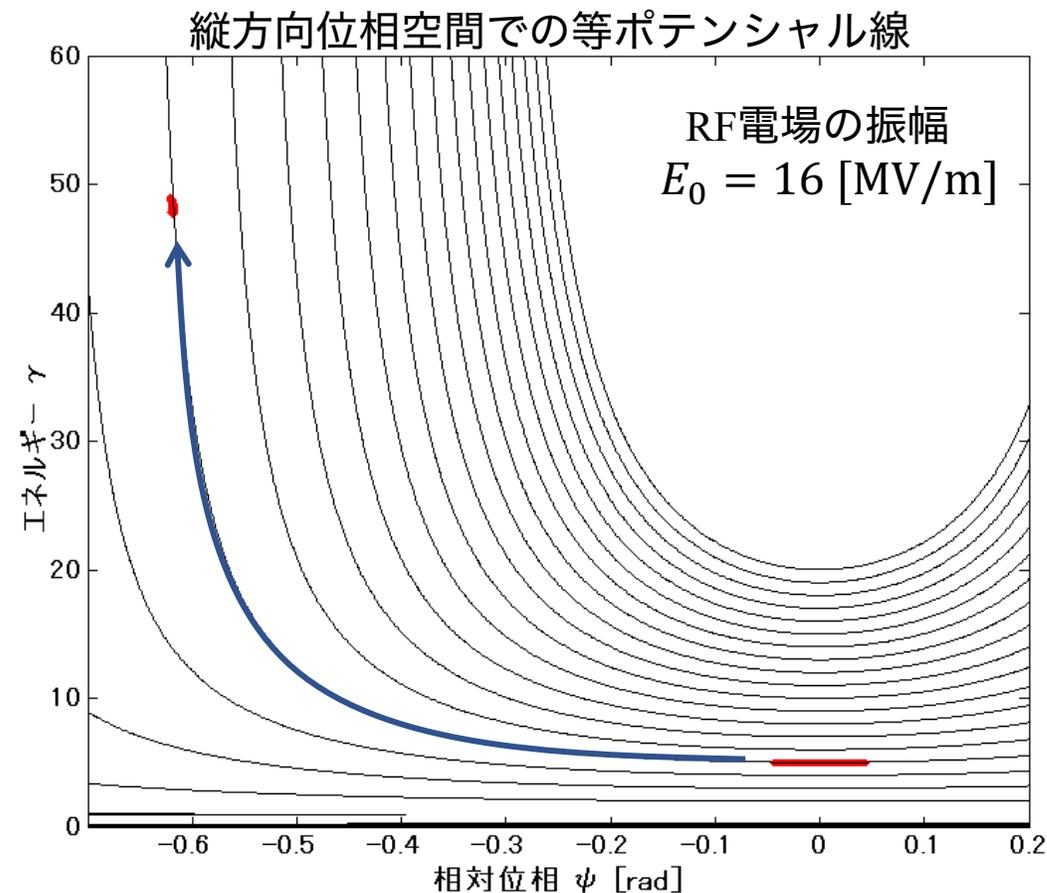


進行波型加速管に高周波の位相速度よりも
僅かに遅い電子ビームを入射

バンチ内電子の速度差により、バンチ長が圧縮される

高周波の方が速いため、バンチ全体として加速位相へ移動する
(phase slip)

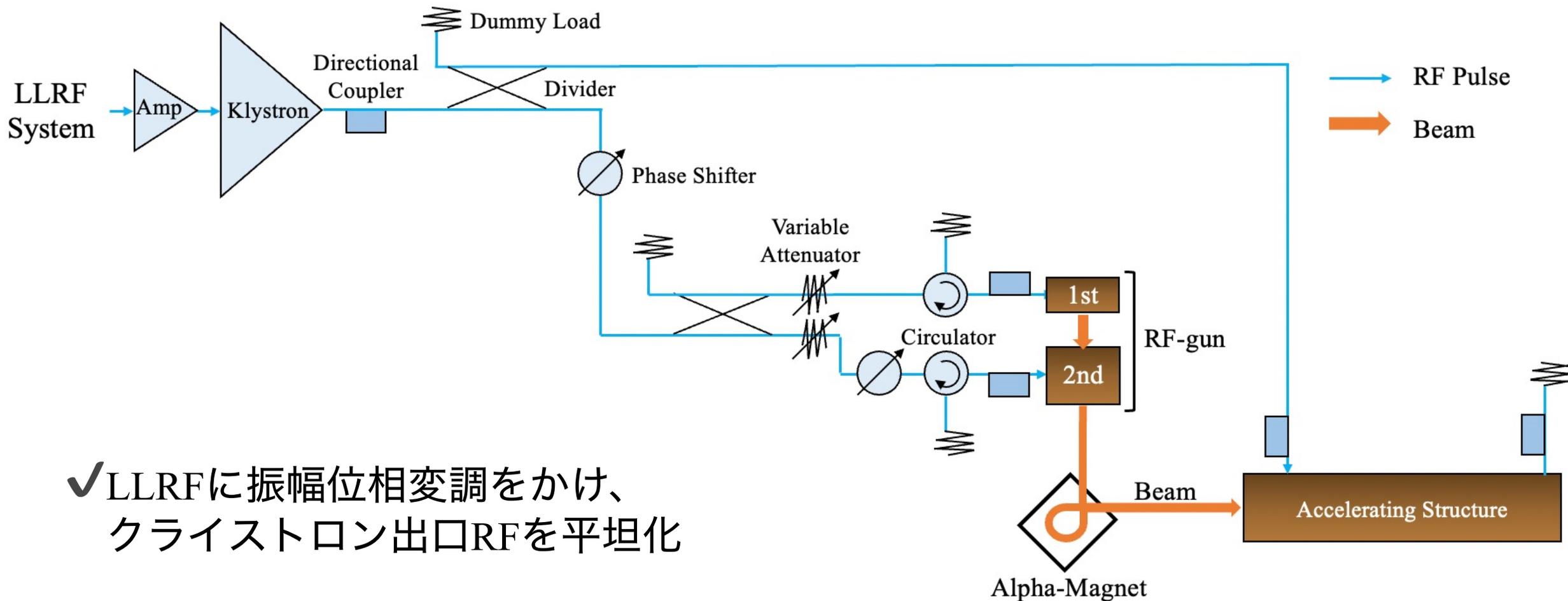
加速管内部で電子ビームの加速と圧縮が可能



運動量分布が均一かつ狭い電子ビームを相対位相が 0° 付近に入射

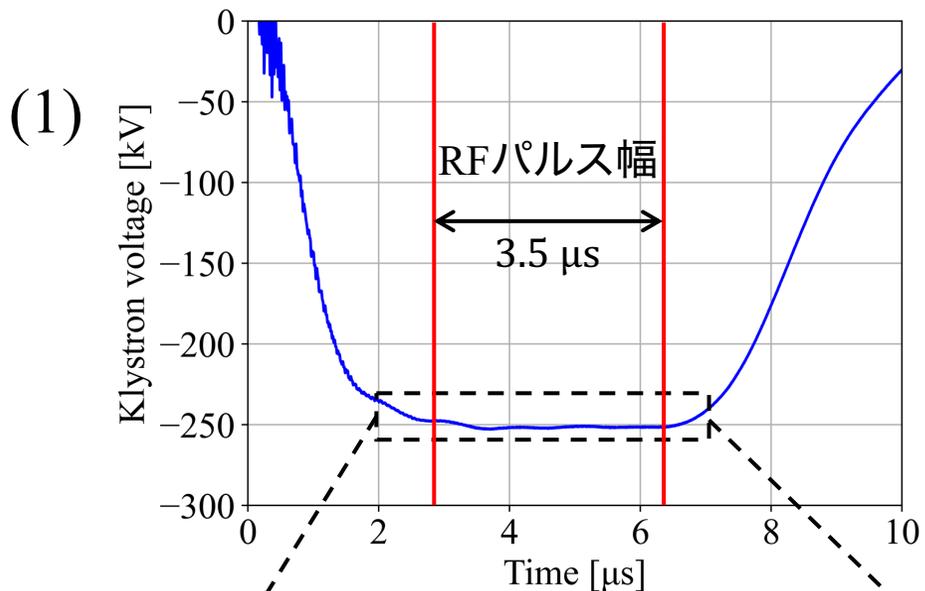
Velocity Bunching によるバンチの圧縮が効率的に可能

ハイパワー高周波システム



✓ LLRFに振幅位相変調をかけ、
 クライストロン出口RFを平坦化

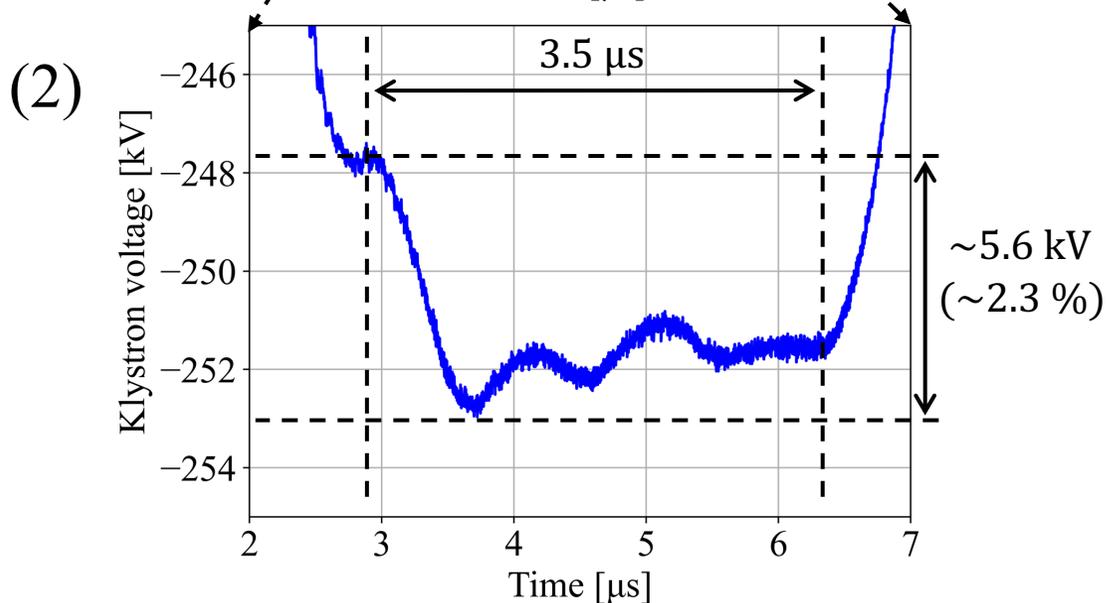
クライストロン高圧波形



(1) クライストロン高圧波形

赤線：クライストロンに入力するRFパルスの幅

(2) 平坦部拡大図



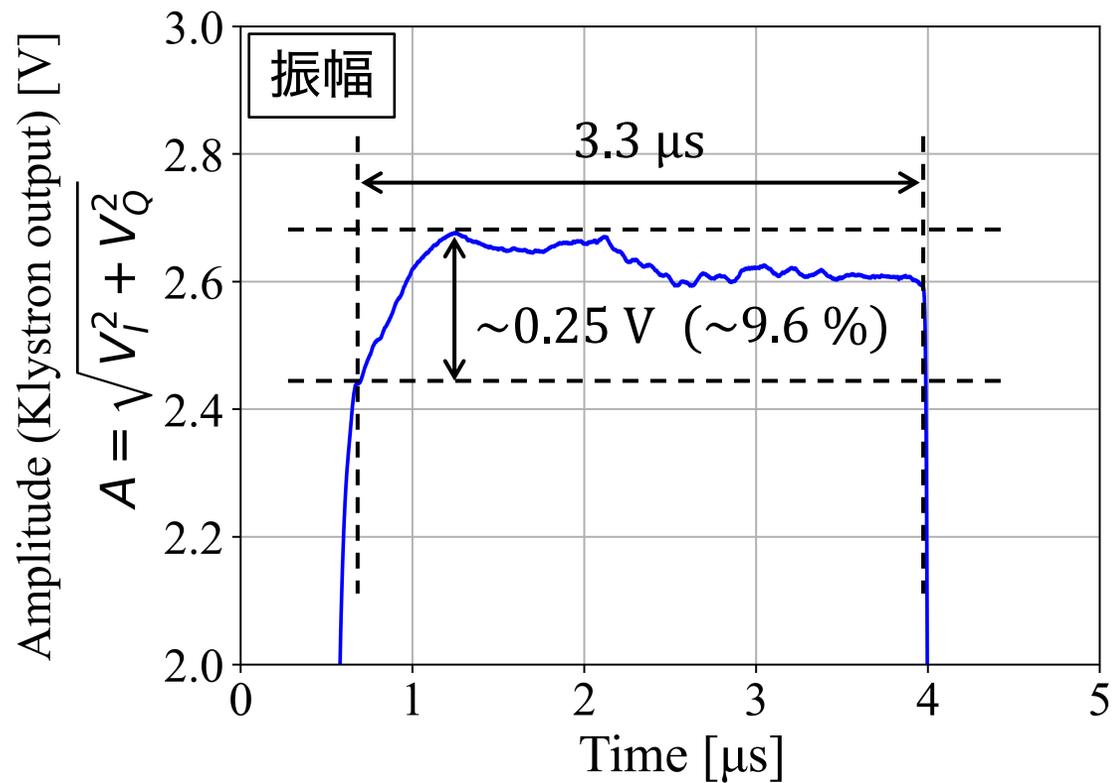
平坦部 (範囲：3.5 μs)

~2.3% (p-p)

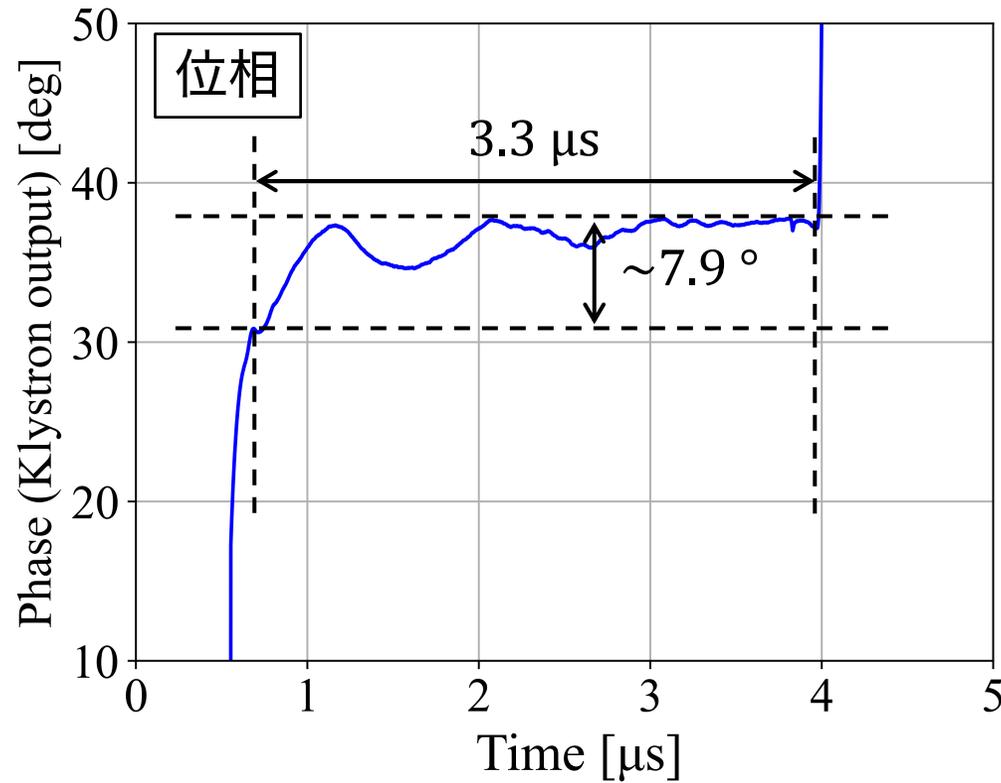
クライストロン出口RFの振幅、位相への影響

RF振幅・位相波形 (変調なし)

クライストロン出口でのハイパワーRF



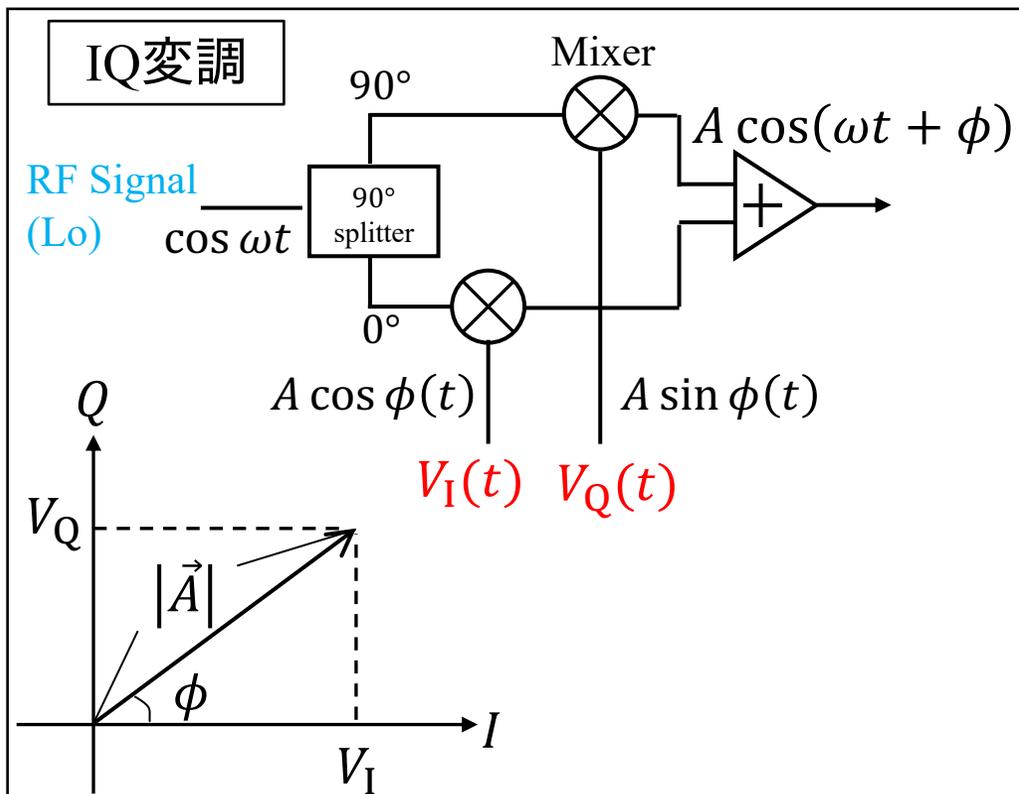
範囲： 3.3 μs
(今回IQ変調をかけた時間幅)



振幅 $\sim 9.6 \%$ (p-p)

位相 $\sim 7.9^\circ$ (p-p)

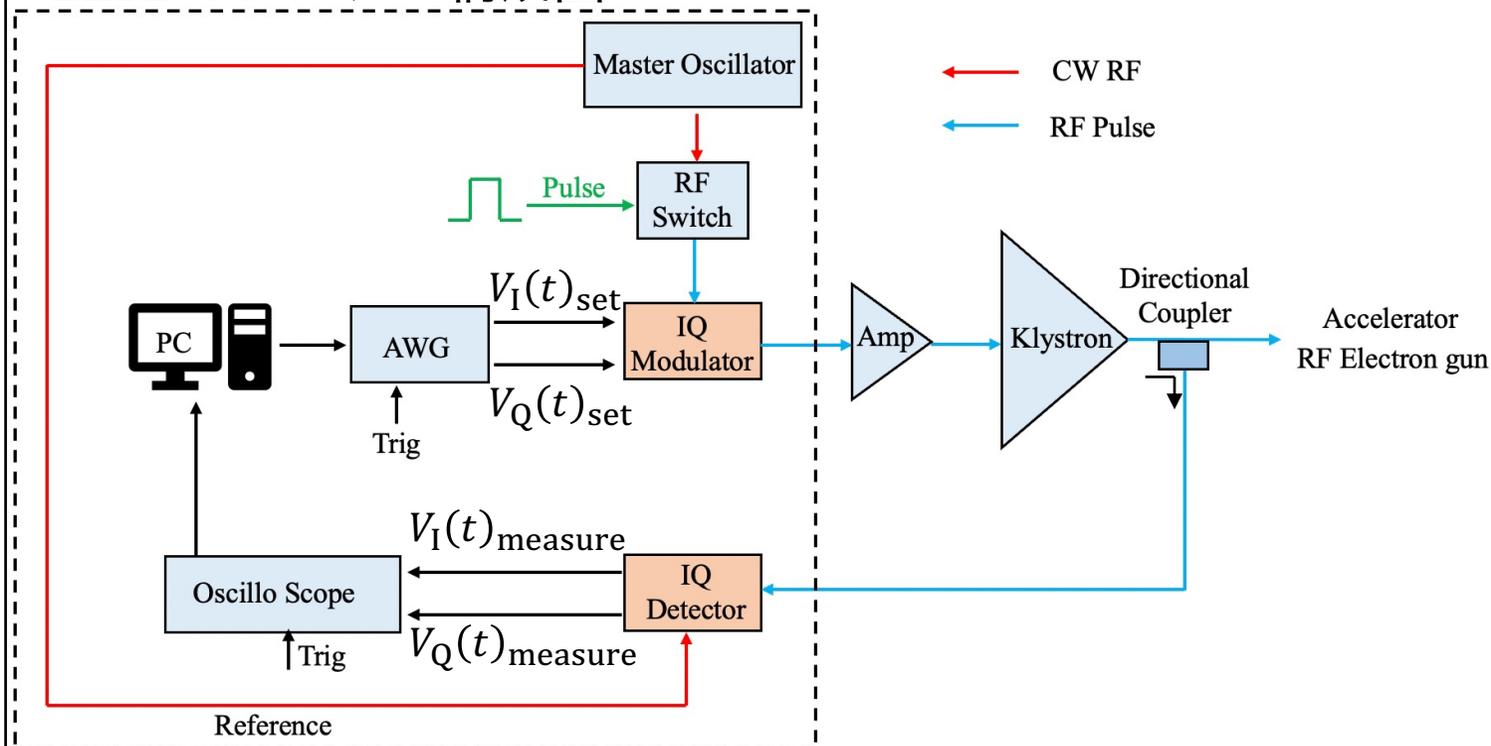
LLRFシステム



$|\vec{A}|$: 振幅 $|\vec{A}| = \sqrt{V_I^2 + V_Q^2}$

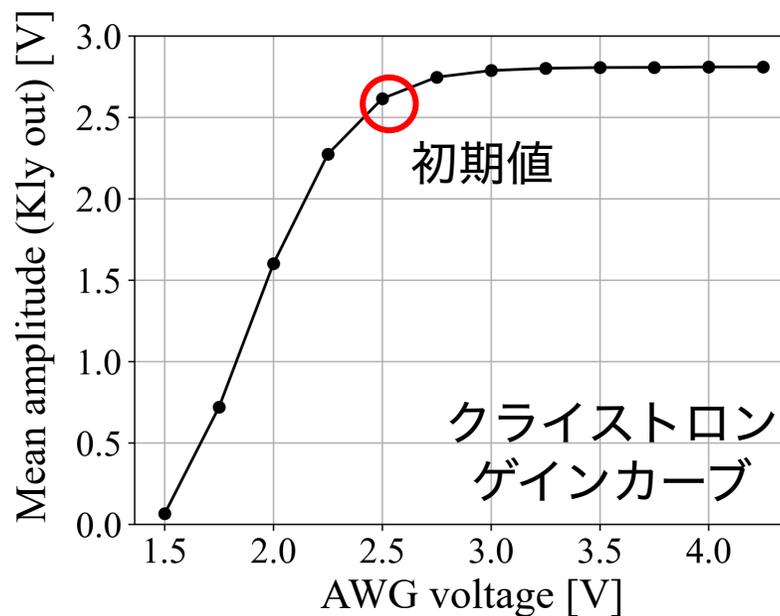
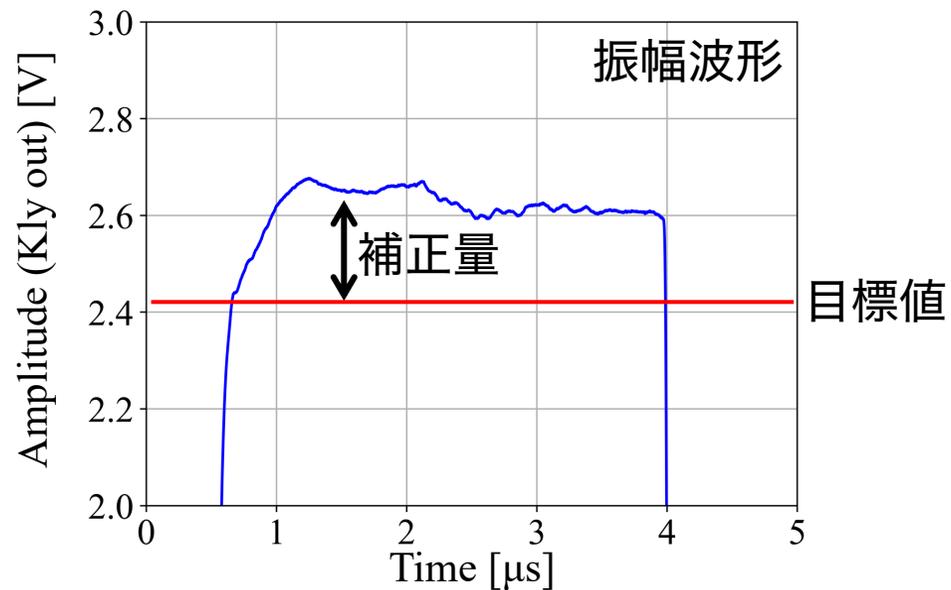
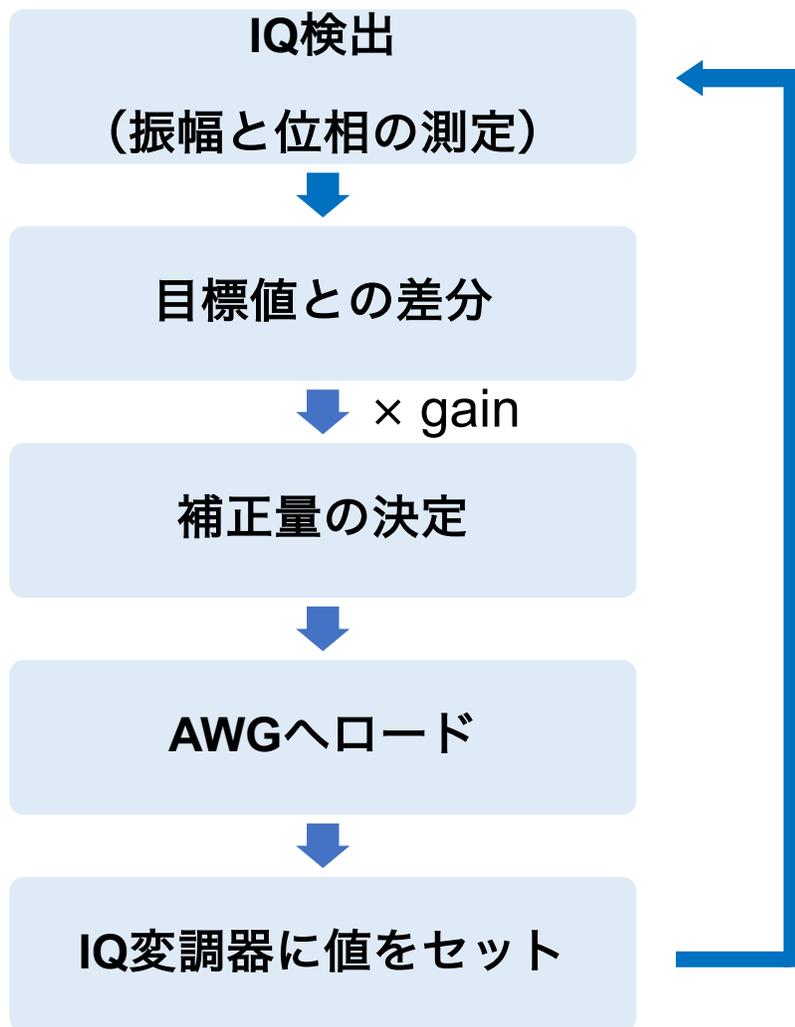
ϕ : 位相 $\phi = \sin^{-1} \frac{V_Q}{|\vec{A}|}, \cos^{-1} \frac{V_I}{|\vec{A}|}$

LLRFのシステム構成図



IQ変調は、直交するベクトルを合成し振幅と位相を得る

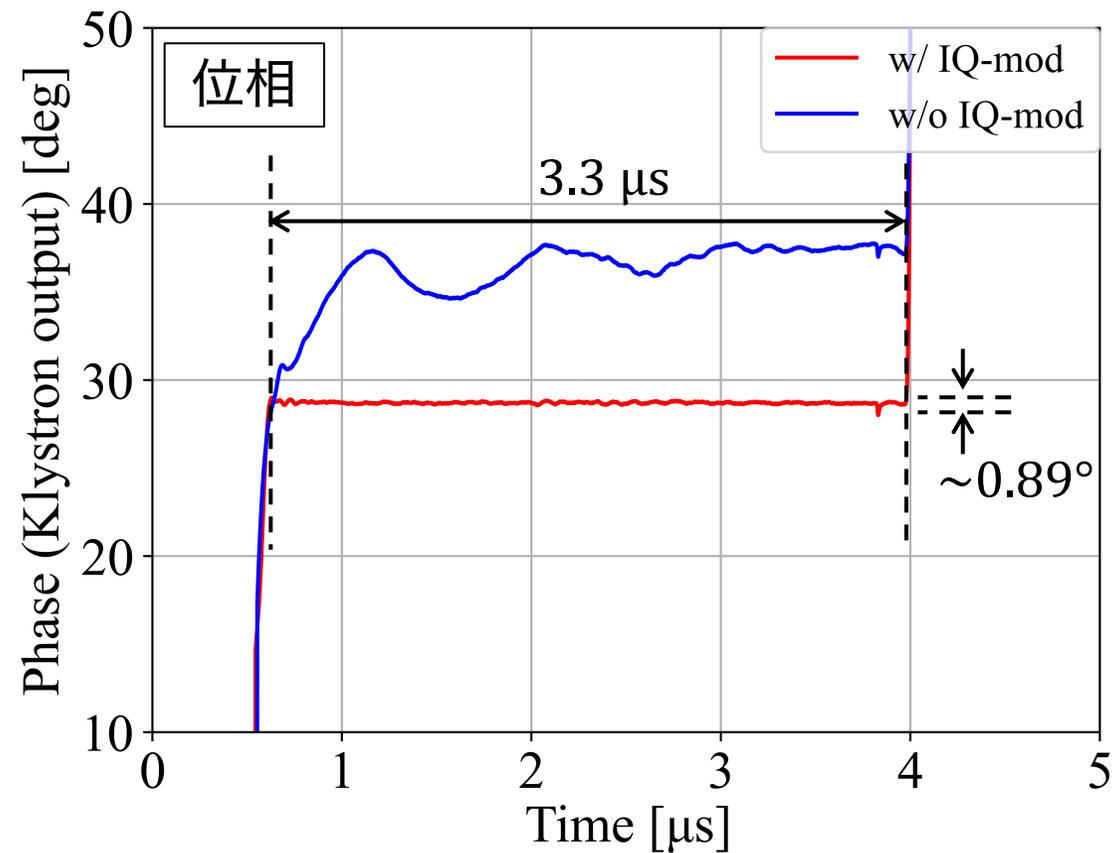
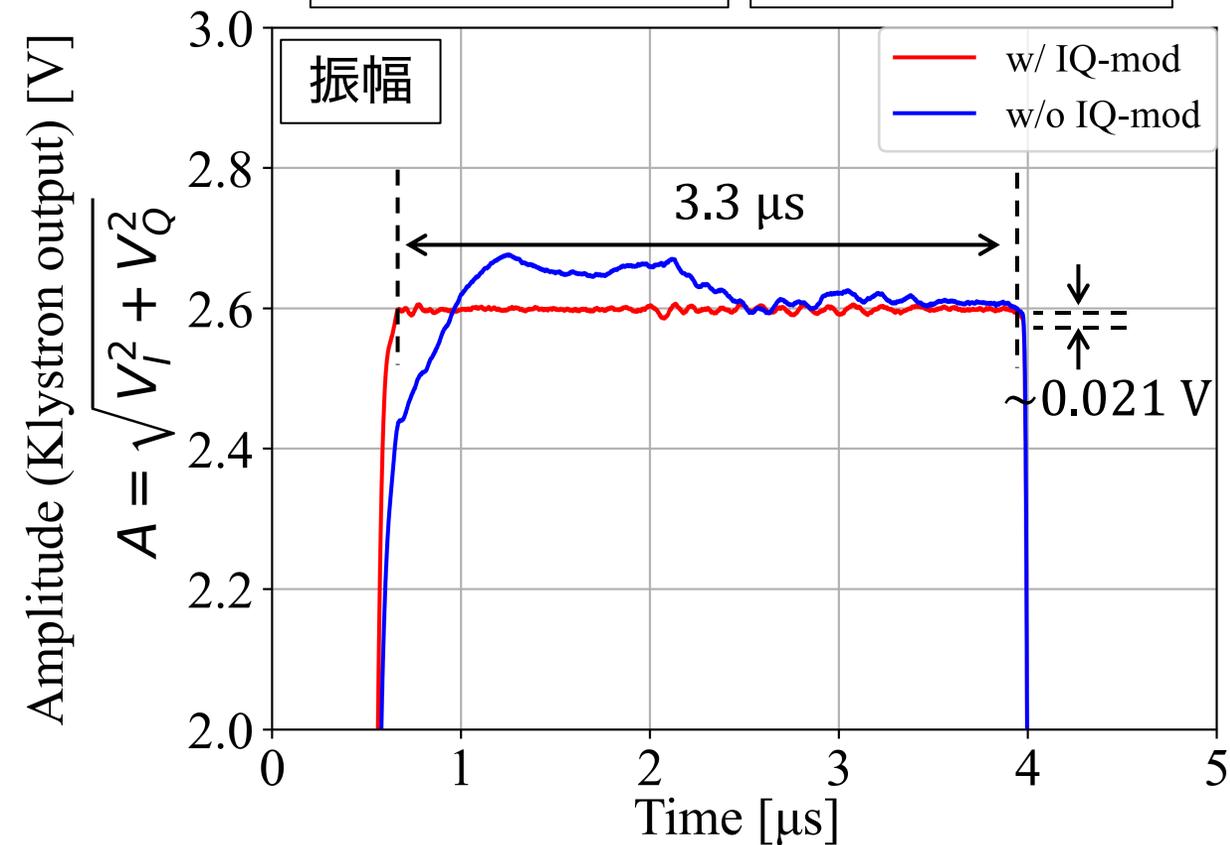
IQ変調フロー



RF振幅・位相変調波形

青：IQ変調なし

赤：IQ変調あり



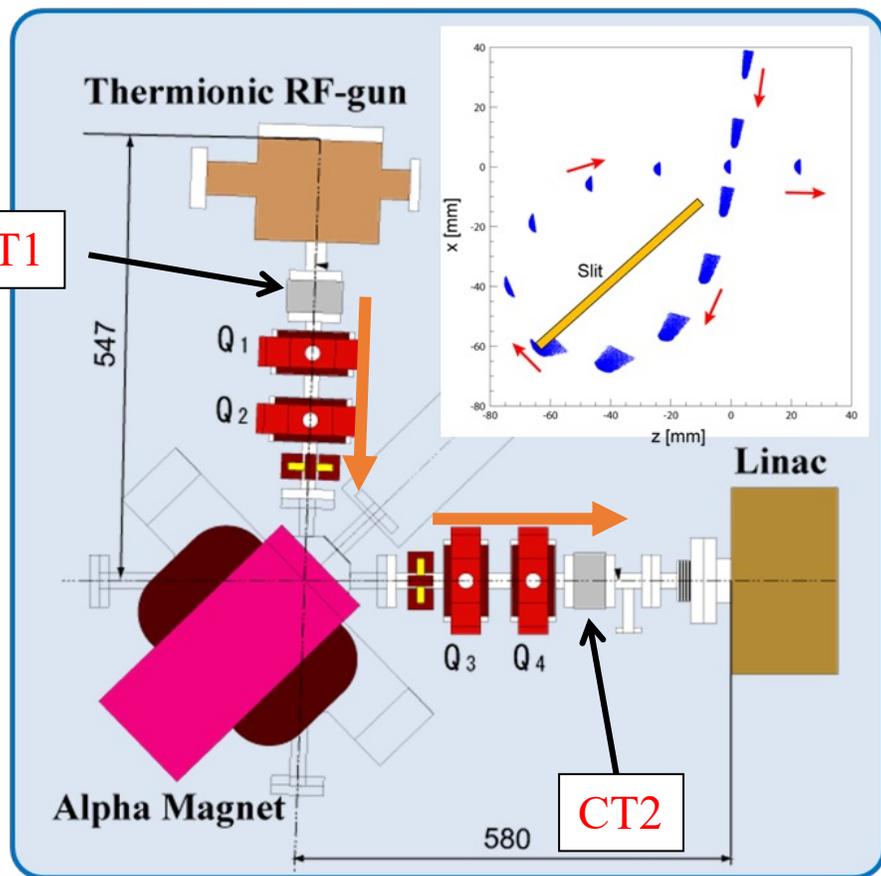
範囲： 3.3 μs

振幅 $\sim 9.6\%$ (p-p) \rightarrow $\sim 0.81\%$ (p-p)

位相 $\sim 7.9^\circ$ (p-p) \rightarrow $\sim 0.89^\circ$ (p-p)

加速前の電子ビーム評価①-1

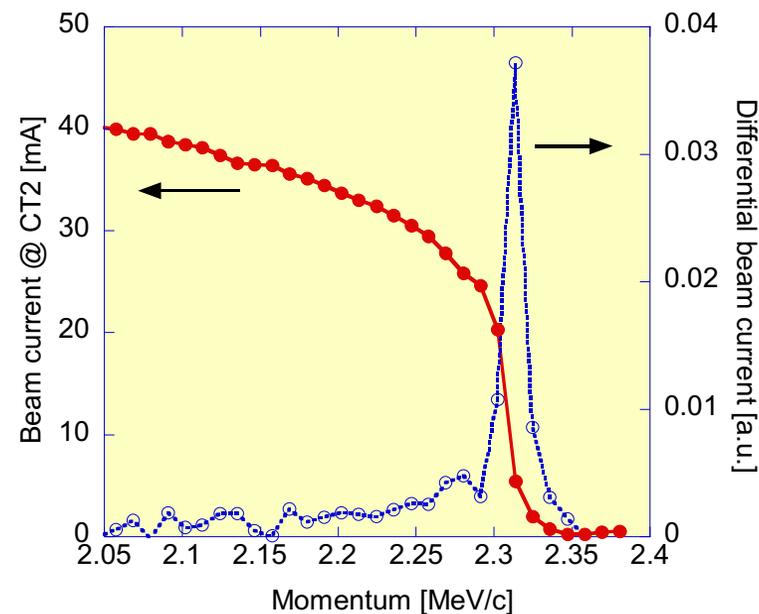
加速前の電子ビームの運動量分布測定



電子ビームは α マグネット内で運動量に応じた軌道を描く



スリットを挿入し、電子をエネルギーの低い方から削る



赤丸：スリットの挿入量に対するCT2での測定値

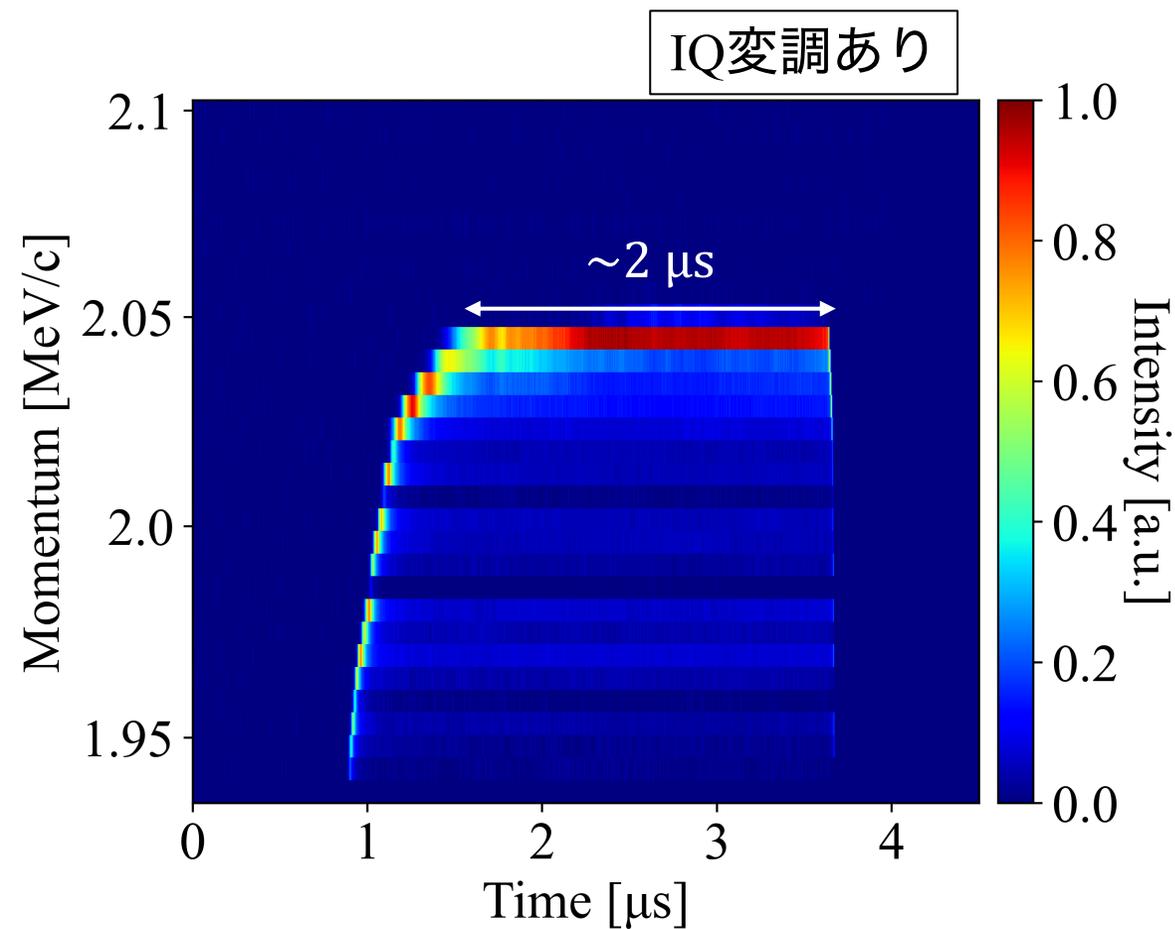
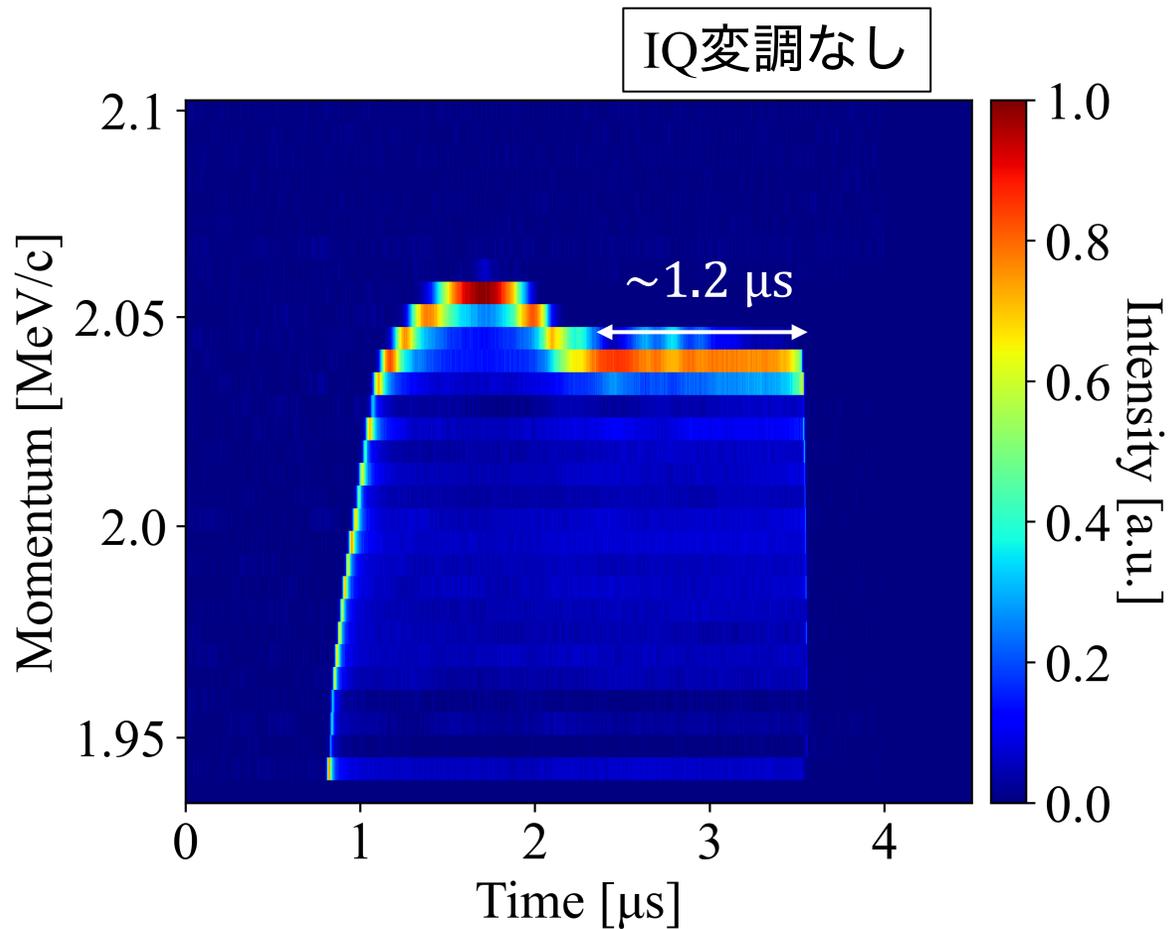
青丸：隣接する赤丸の差

➡ 運動量分布

↪ スリット挿入量を運動量に換算

加速前の電子ビーム評価①-2

縦軸：運動量[MeV/c]、横軸：時間[μs]



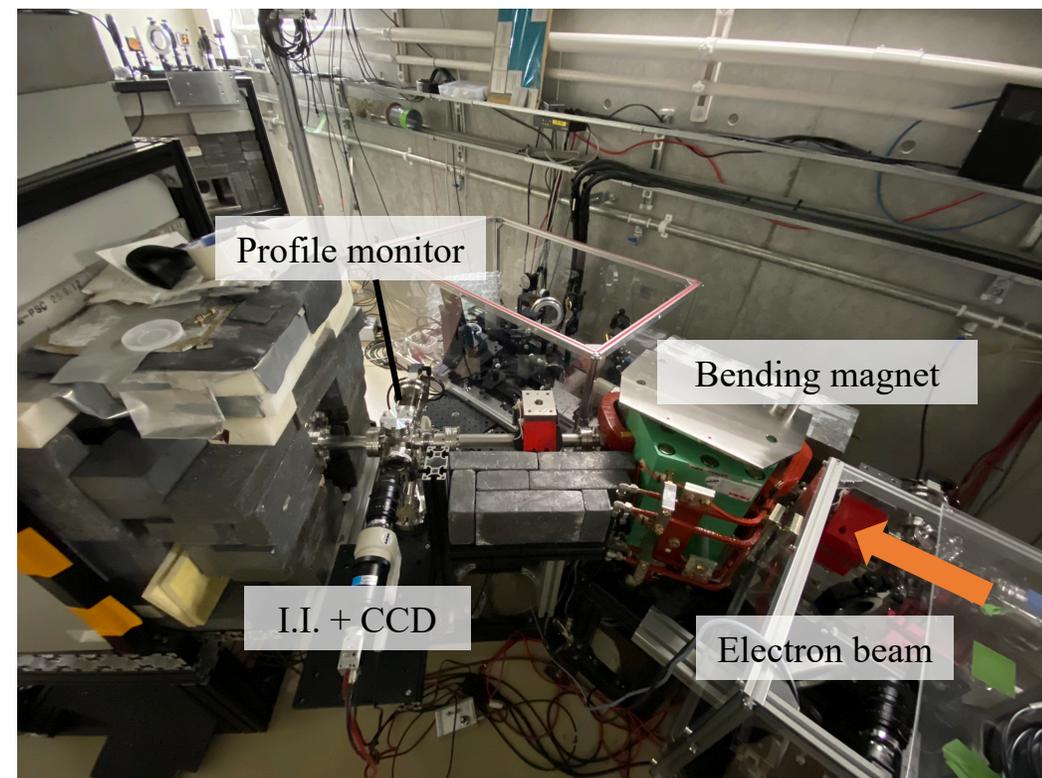
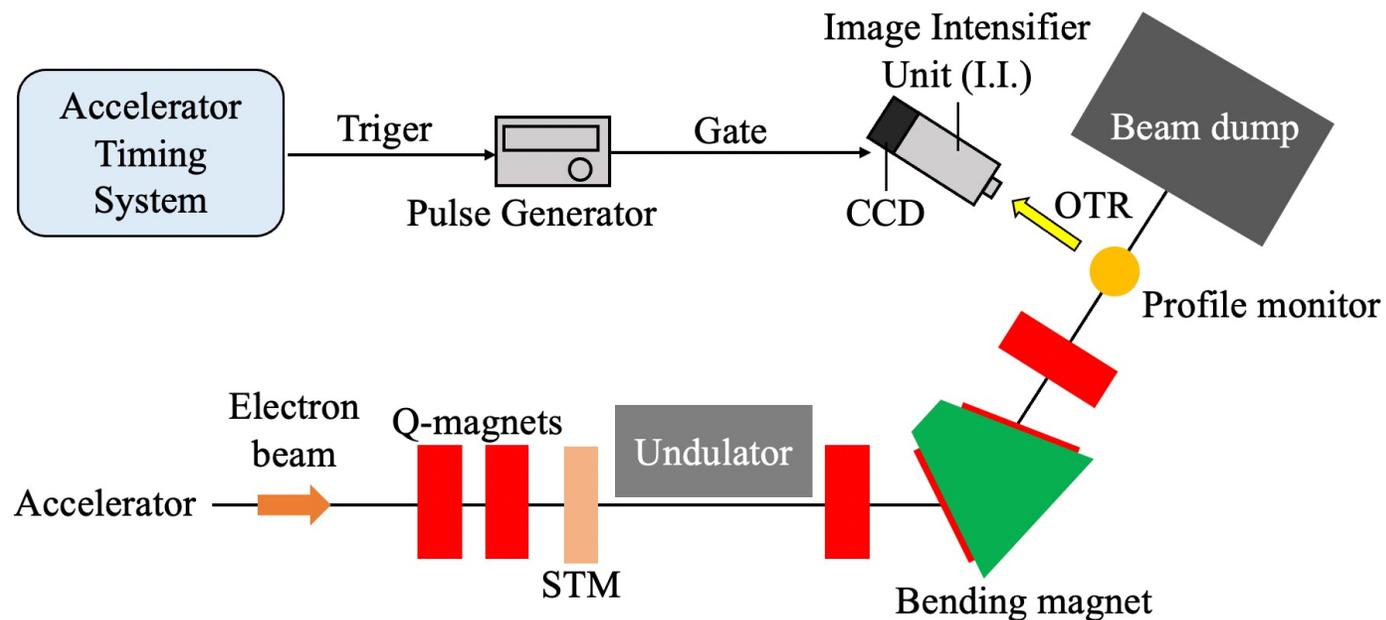
IQ変調により、運動量分布がより平坦化
Velocity Bunchingに適した電子ビームを生成できた

加速後の電子ビーム評価②-1

加速後の電子ビームの運動量分布測定

- 分散部で電子ビームの運動量分布を時間分解して測定
- プロファイルモニタースクリーン：アルミニウムミラー（OTRを発生）
- I.I.とCCDカメラを使用（ゲート幅：100 ns）

加速管下流のレイアウト



加速後の電子ビーム評価②-2

縦軸：運動量偏差[%]

横軸：時間[μs]

運動量偏差の基準値：19.8 MeV/c

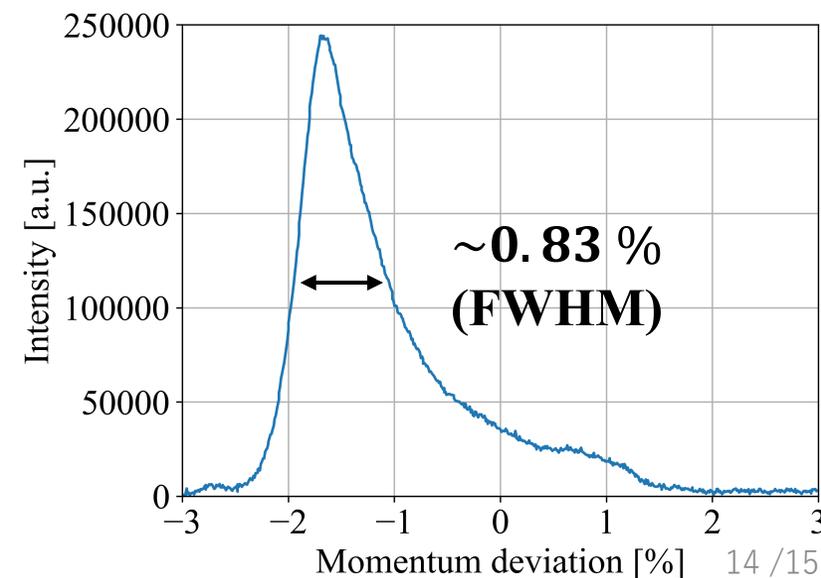
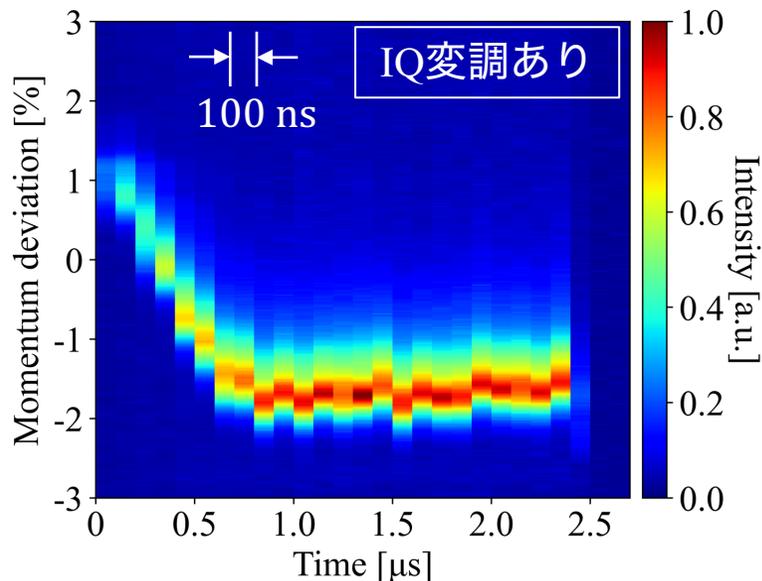
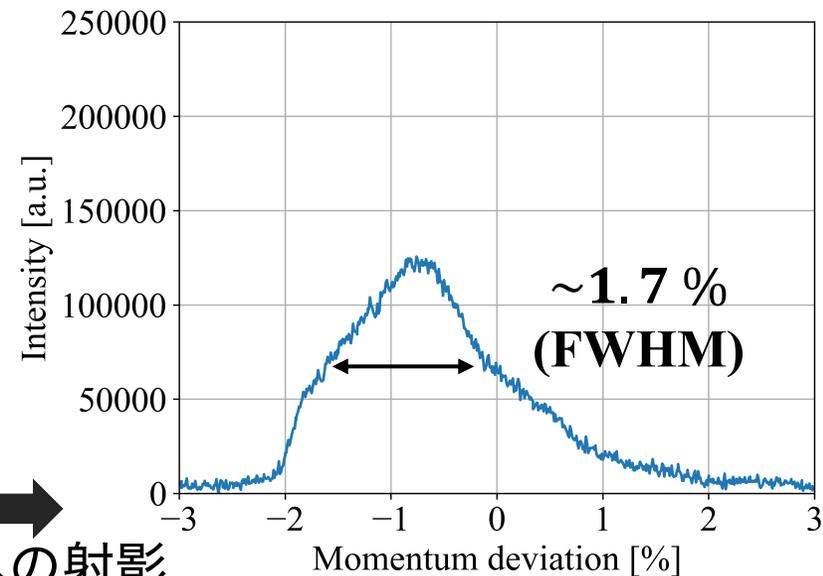
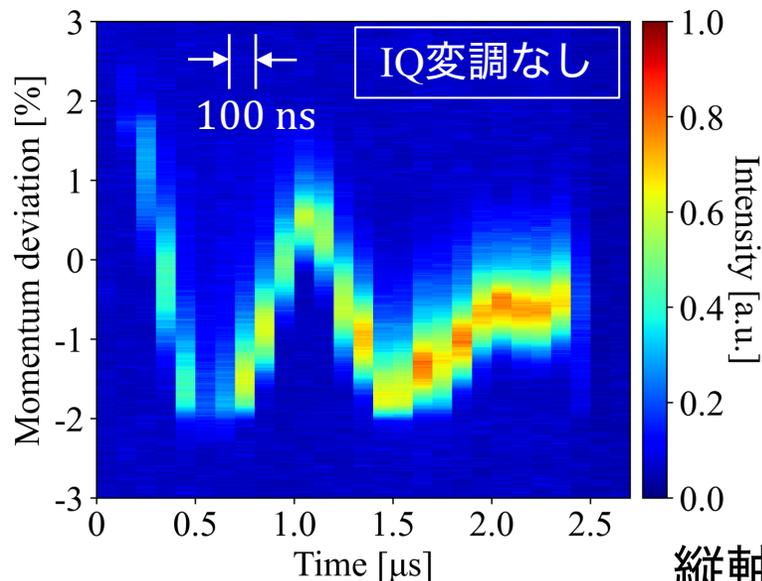
分散関数 $\eta = 0.490 \text{ m}$

ベータ関数 $\beta_x = 0.019 \text{ m}$

エミッタンス $\varepsilon_x = 0.165 \mu\text{m}$

パルスピーク電流 $\sim 20 \text{ mA}$

バンチ電荷 $\sim 7 \text{ pC}$



まとめと今後について

まとめ

RFパルス

- IQ変調器を導入し、クライストロン出口のRFの振幅位相平坦化を行った
- 幅 $3.3 \mu\text{s}$ で振幅のp-pはおよそ $9.6\% \rightarrow 0.81\%$ 、位相のp-pはおよそ $7.9^\circ \rightarrow 0.89^\circ$ に平坦化できた

電子ビーム

- 加速前において、約 $2 \mu\text{s}$ にわたって運動量分布が均一かつ狭い電子ビームの生成に成功した
- 加速後の電子ビームにおいて、パルス内の運動量偏差が約 0.8% まで小さくなった

今後

- 加速後の電子ビームからのコヒーレント遷移放射の強度を測定し、振幅位相平坦化による効果を評価する
- 現在RFパルスの振幅位相平坦化に機械学習の導入を試みており、今後も継続して行う