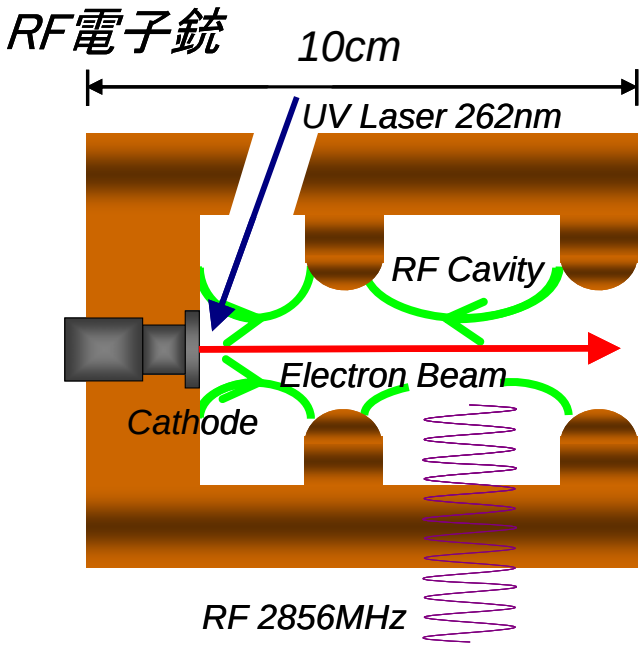
極短バンチ生成を目指した高周波電子銃開発

早稲田大学　理工学術院
坂上和之

共同研究者
小柴裕也、水柿将貴、鷲尾方一　(早稲田大学)
浦川順治、高富俊和　(KEK)
黒田隆之助、平義隆　(AIST)

Background



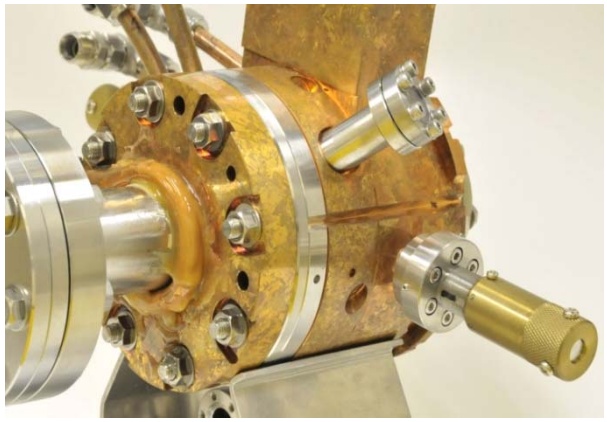
光陰極高周波電子銃

〇高品質な電子ビームの生成が可能
・レーザーにより初期電子の形状がコントロール可能
・生成後即座に加速することにより、空間電荷効果を最小限にできる
〇小型な加速器が構成できる　＞早稲田大学では利用研究等に用いている

Background

これまでKEKとの共同で高周波電子銃の開発を行ってきた。

BNL TypeⅣ

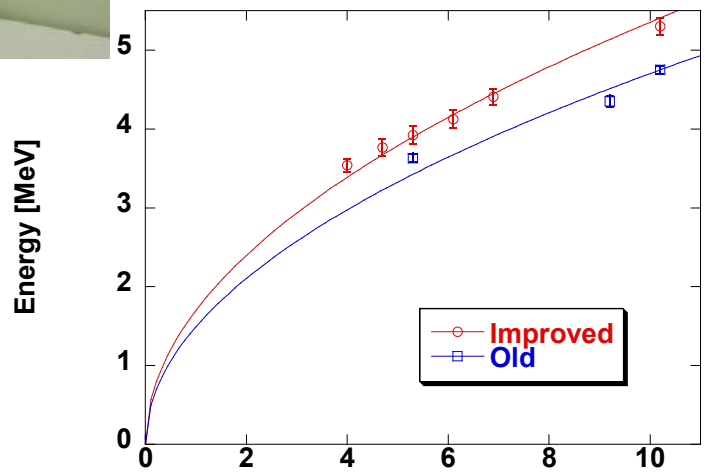


改良型

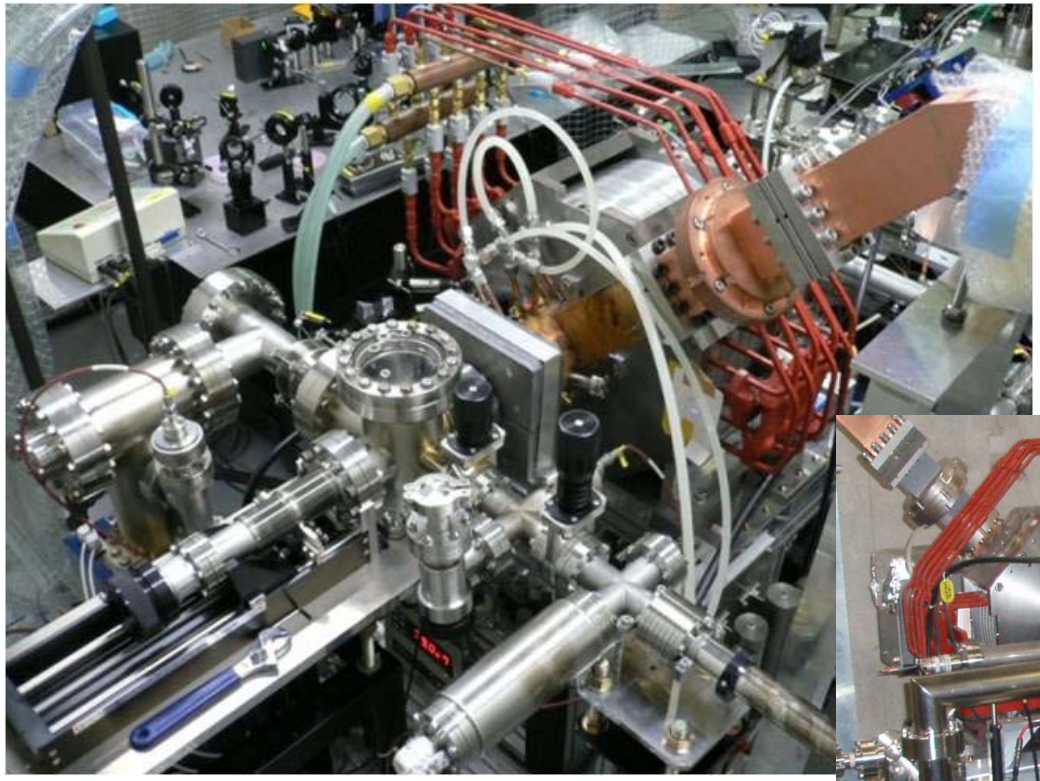
Q値が改善し、加速効率がUPした。

空胴の内形状は同じだが、<u>端板との接合部</u>や

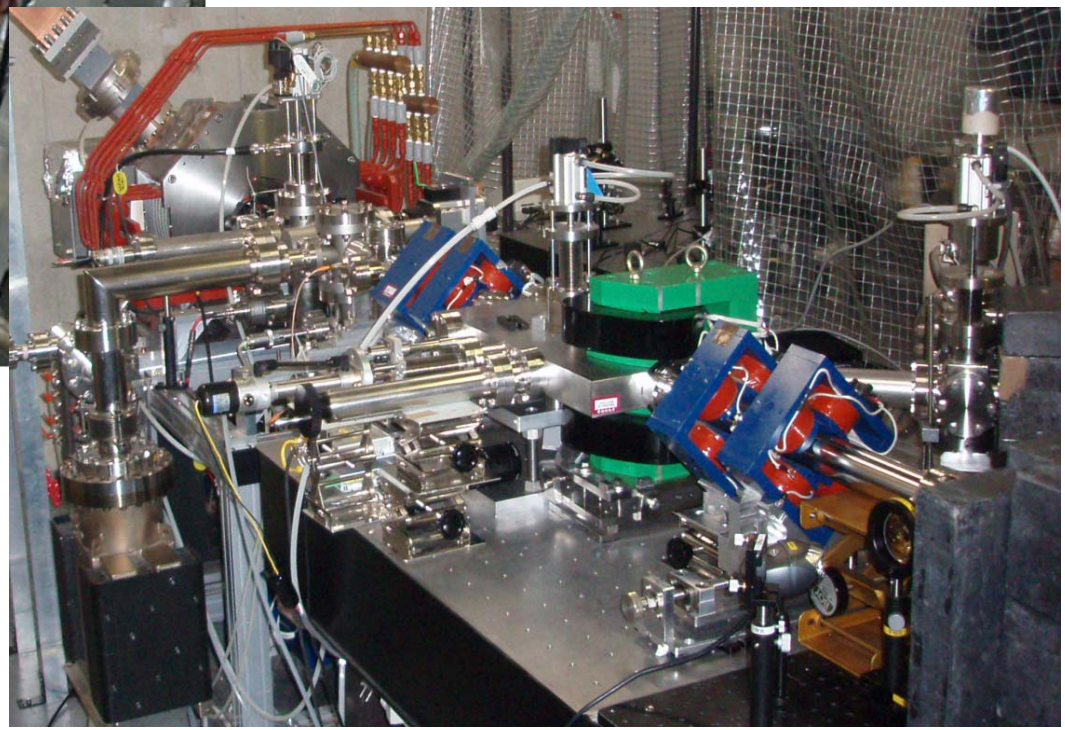
<u>チューナーの形状</u>を改善



Background



光陰極高周波電子銃をベースとした2m×3m程度の小型電子加速器を有している。



高周波電子銃の写真

エネルギー:4~5MeV
電子数:~$10^{10}e^{-}$/pulse
バンチ長:4psec

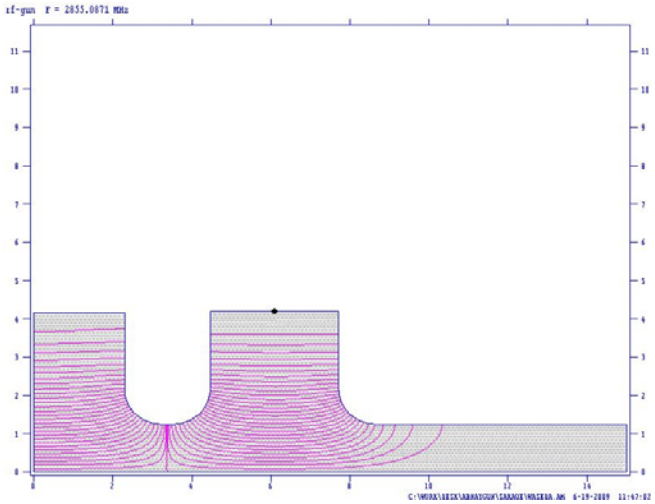
Background

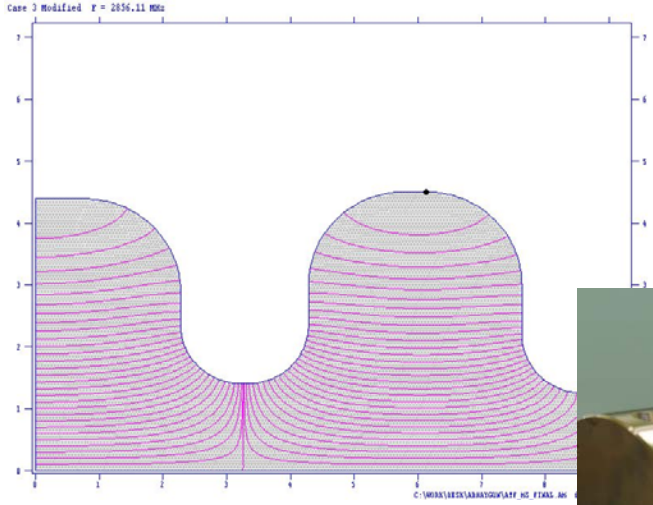
より高品質な電子ビームを生成するために、＞RF-Gun空胴の作製

0-modeとπ-modeのモードセパレーションの大きな空胴を設計

(D. Abhay et al., Nucl. Instr. Meth. A600(2009)361)

これまでのRF-Gun空胴　　Mode-Separated RF-Gun空胴



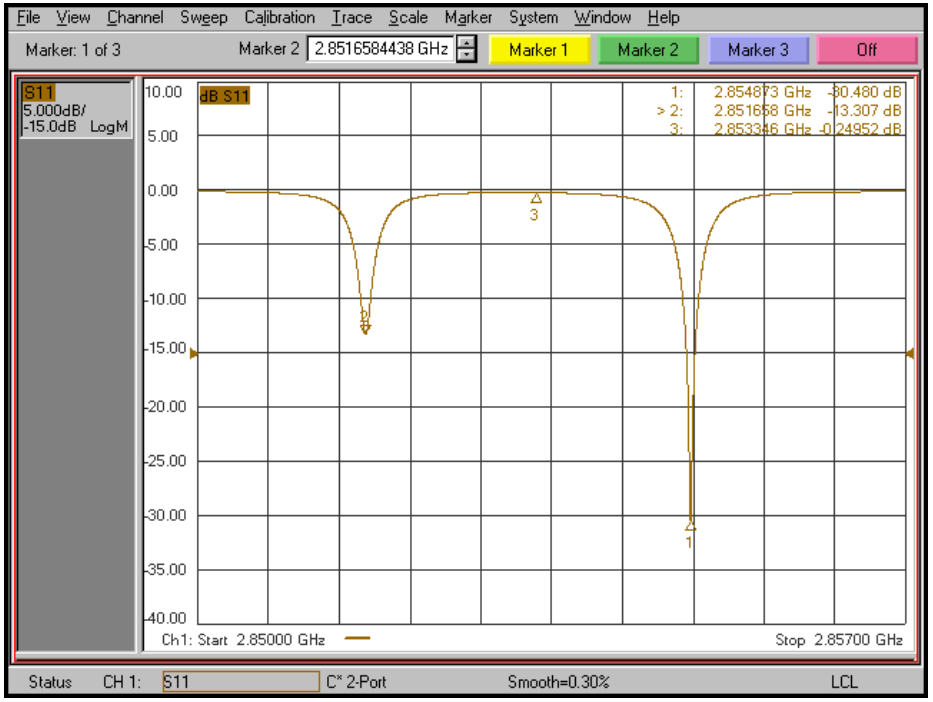


0モードの混じりこみを減らすとともに、Q値を向上させることができる。

Background

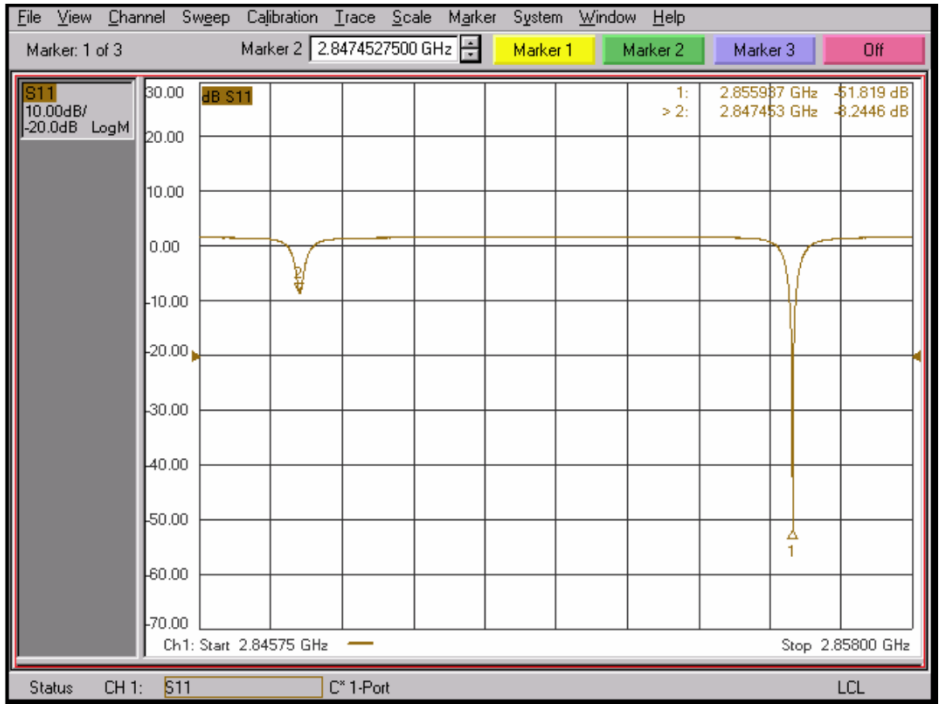
ネットワークアナライザを用いた空洞測定の結果

これまでのRF-Gun空胴



MS=3.3MHz

MS-RF-Gun空胴



MS=8.5MHz

> 実際にQ値も向上していた。

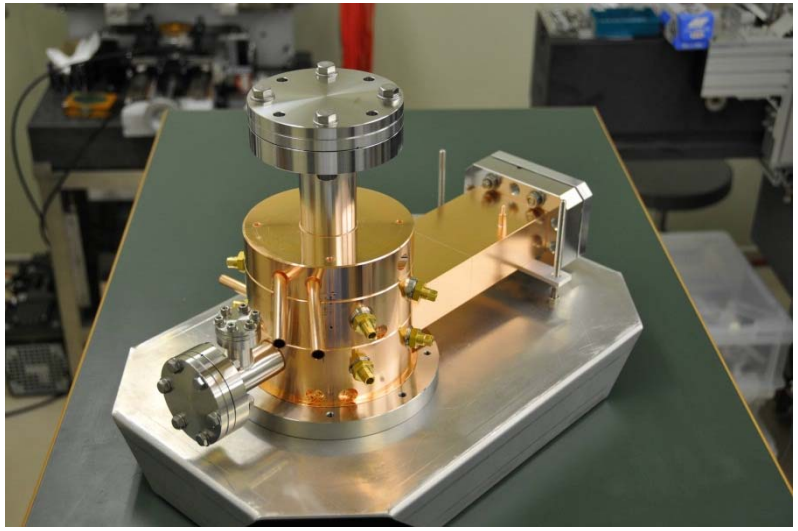
Background

より高エネルギーな電子ビームを生成する電子銃として、

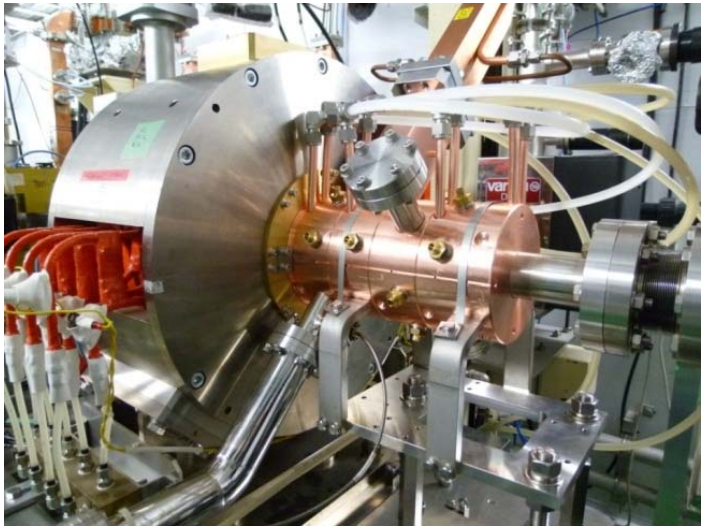
3.6CellのRF-Gunを製作した。

＞MS-RF-Gunの成功により、モード数の多い3.6Cellも可能となった。

1.6Cell RF-Gun

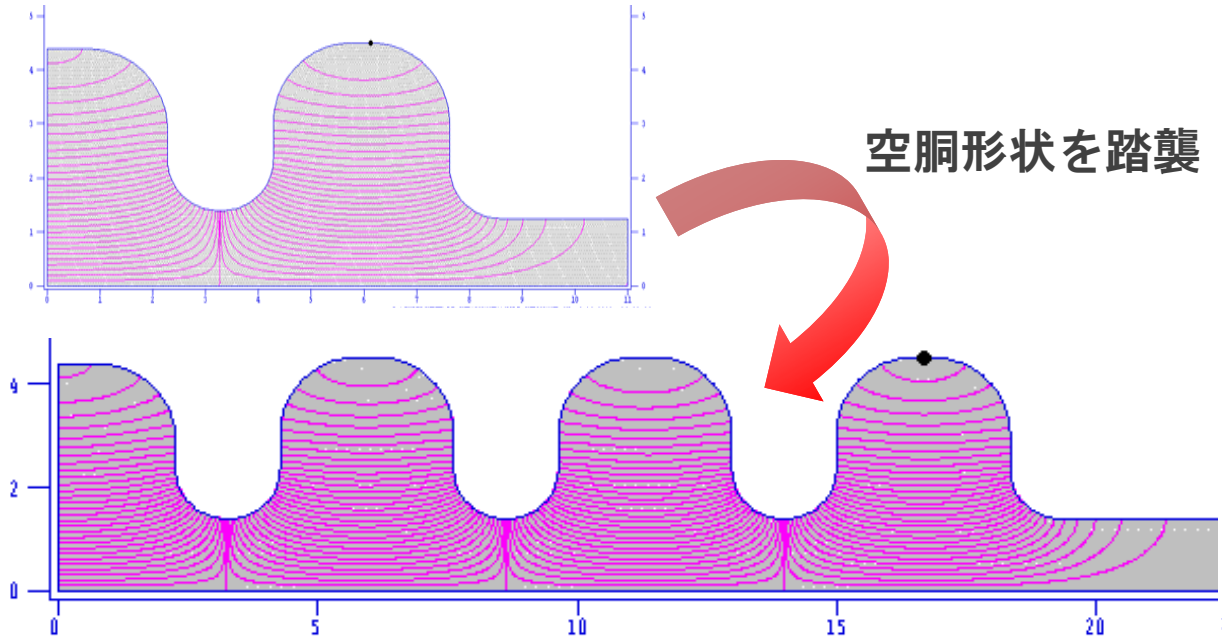


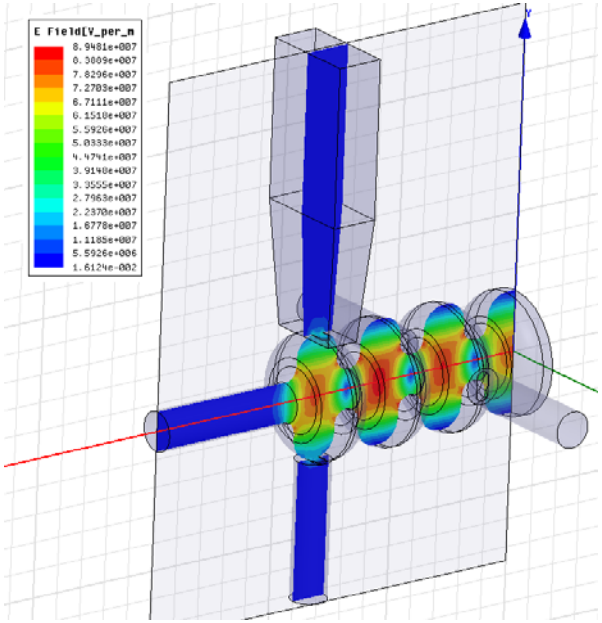
3.6Cell RF-Gun



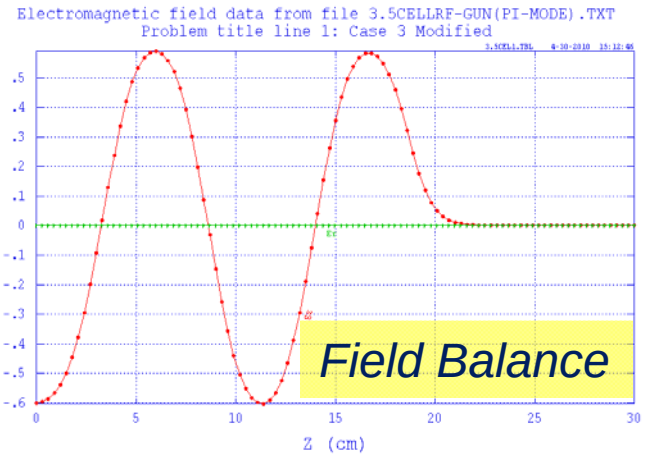
Background

3.6Cell RF-Gun





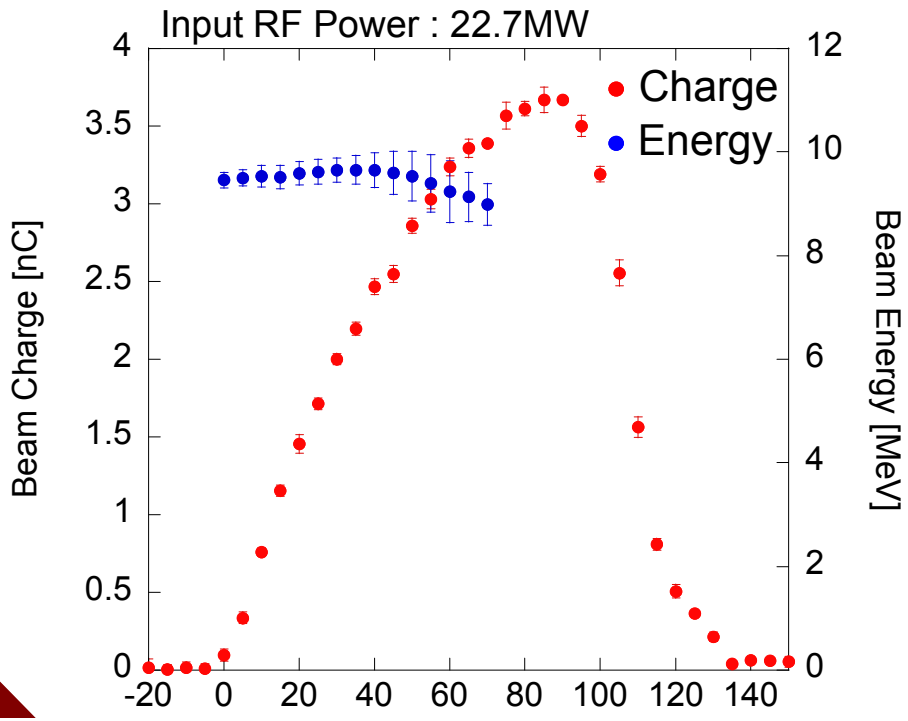
	製作終了後測定値	シミュレーション
π周波数	2856MHz (30℃)	2856 MHz
電場強度比	1:1.02:0.98:0.96	1:1:1:1
β	0.99	1.00
Q値	15000	14500
R/Q	395 Ω	359Ω

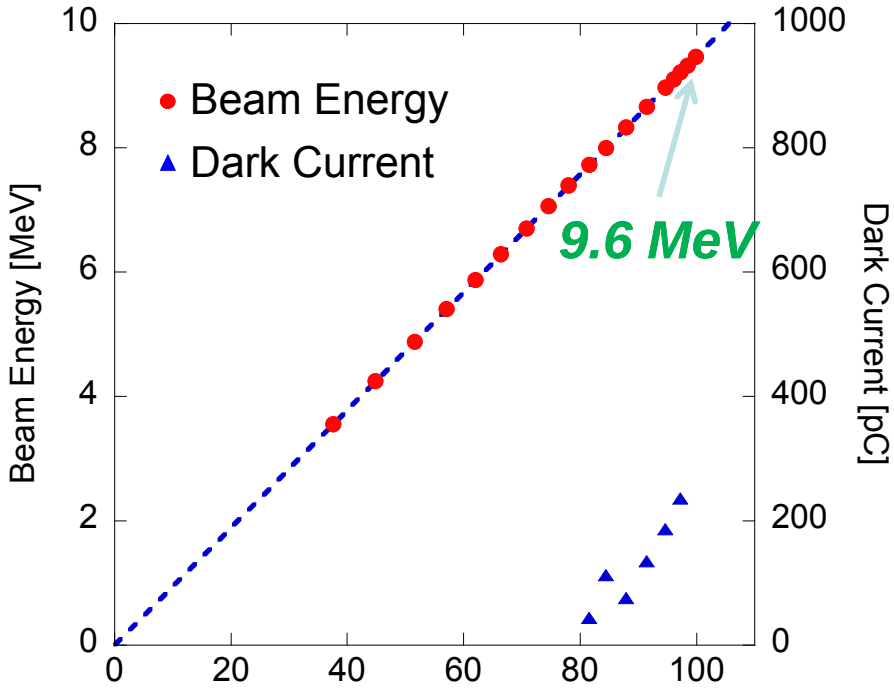


Background

KEK-LUCXにおける加速試験において、約10MeVのビームの生成を確認。

ビームライン上流の電子銃直下にあるICTで電荷量測定を行い、その下流にある偏向電磁石を用いてビームエネルギーを測定した。





Ultra-short bunch generation

従来型電子銃では
・十分な電子数 ($10^9 e^-$/pulse 以上)
・極短バンチ (500fsec 以下)
の同時達成は不可能であった ＞次ページシミュレーション結果

→電子密度が高いと電子同士の斥力で拡がる

→エネルギーが高ければ拡がりにくい

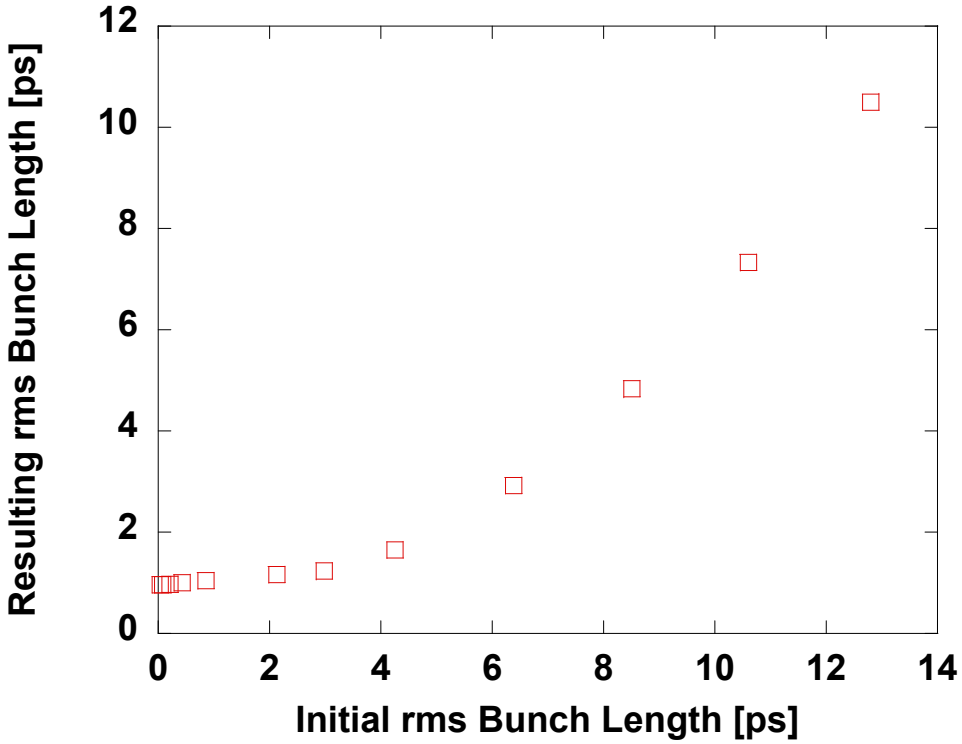
今回紹介する空胴では、
・10cm程度の加速部で生成した電子ビームを速度差によって圧縮
・十分にエネルギーを与えた後、圧縮する
・エネルギー4～5MeV

Ultra-short bunch generation

光電子を生成するレーザーのパルス幅を短くすることによって短バンチを狙う

＞空間電荷効果で制限される

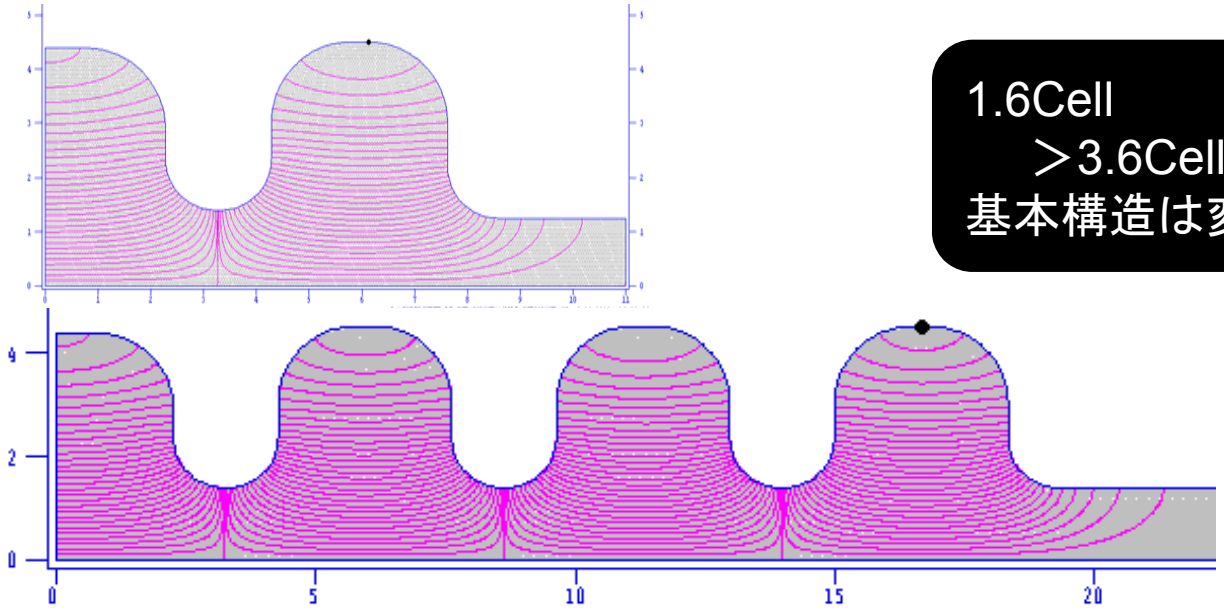
＞下のシミュレーション結果では約1psで制限されている



ECC-RF-Gun

これまでの電子銃は進行方向の構造に関してはほぼ元の設計を踏襲した形を取っており、エネルギーが高く、エネルギー広がりが小さくなるような設計がなされていた。

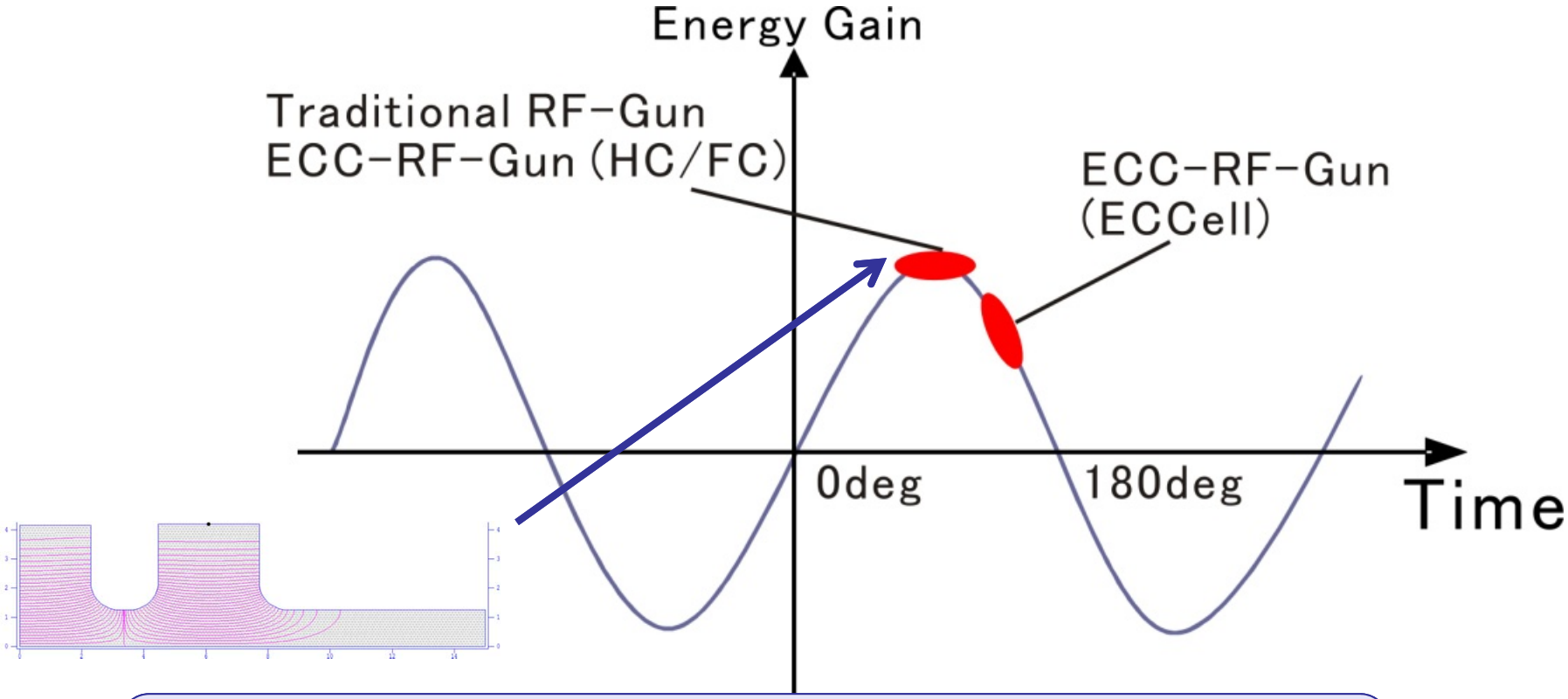
＞この構造を変更することで、バンチ長の短いビームを生成できる電子銃を検討した



1.6Cell
＞3.6Cell
基本構造は変更していない

ECC-RF-Gun

圧縮する手法としては、電子バンチ内における速度差（エネルギー差）を用いる

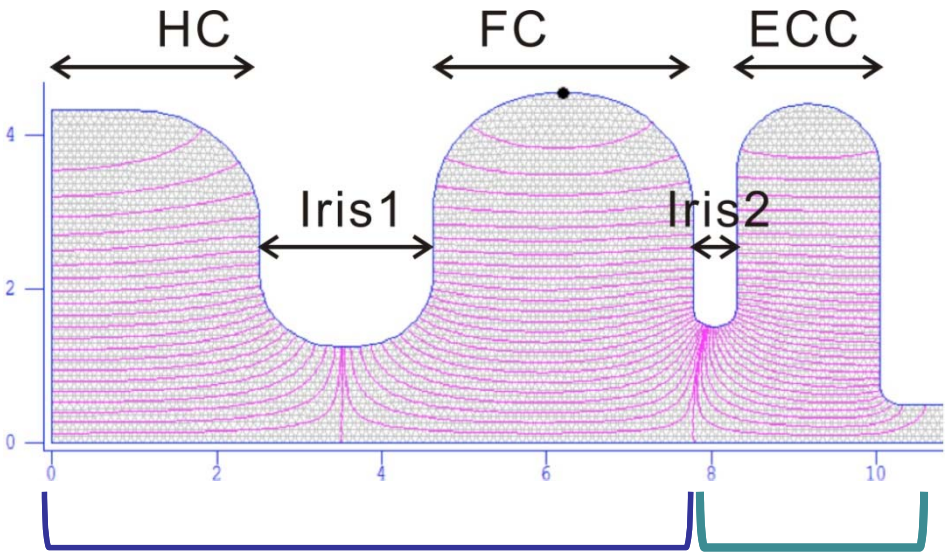


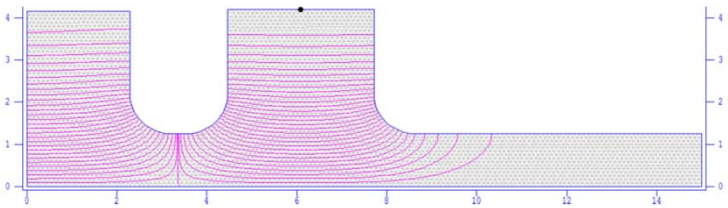
本原理の流れ
1. 十分なエネルギーを得るために従来型同様に加速
2. 最終Cellにおいてエネルギー差を付加する

ECC-RF-Gun

極短バンチ生成の原理

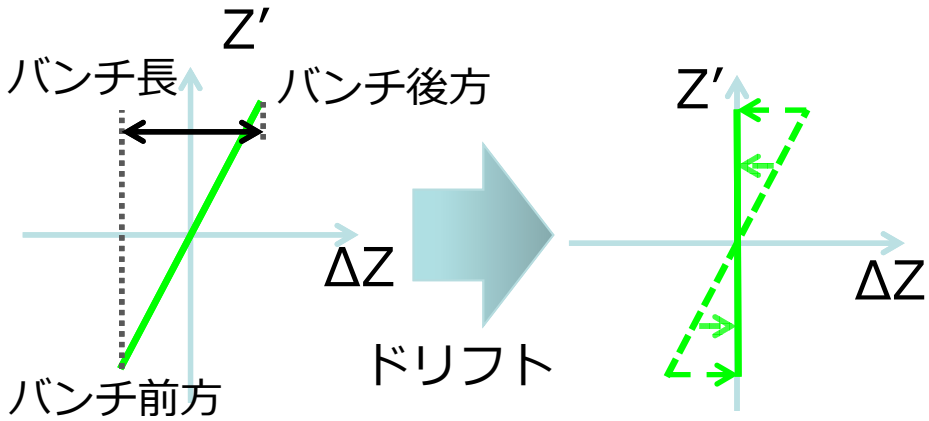
今回設計したECC-RF-Gun





従来型のRF-Gun空胴

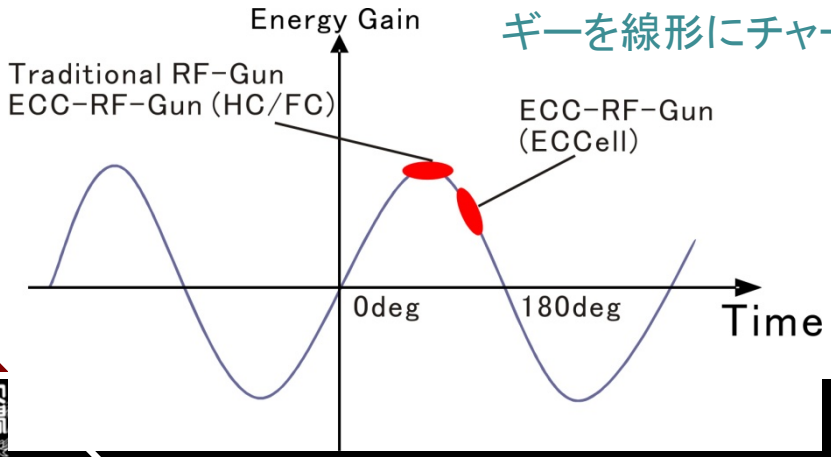
線形なエネルギー分布を持った
電子バンチは距離を飛ばすことで
速度差によって圧縮される



Velocity Bunching

従来部で高輝度電子を生成

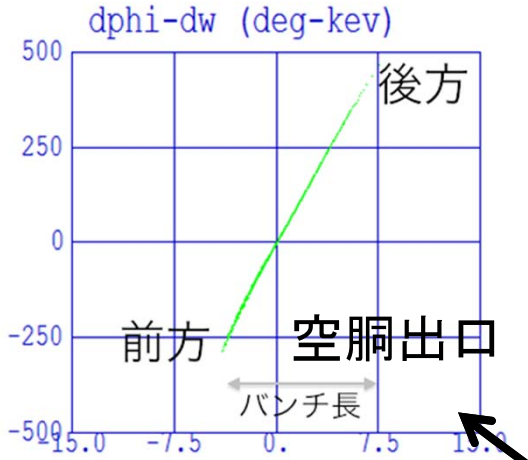
付属のECCでエネルギーを線形にチャープ

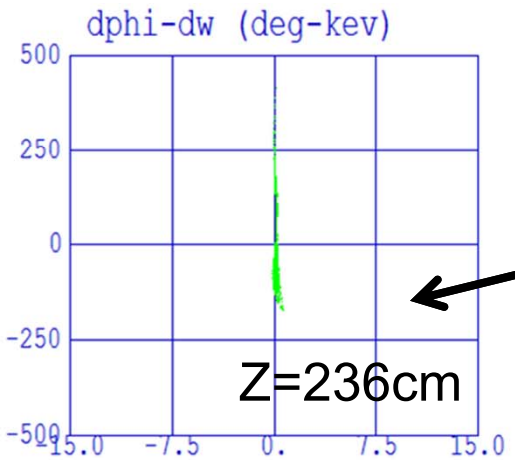


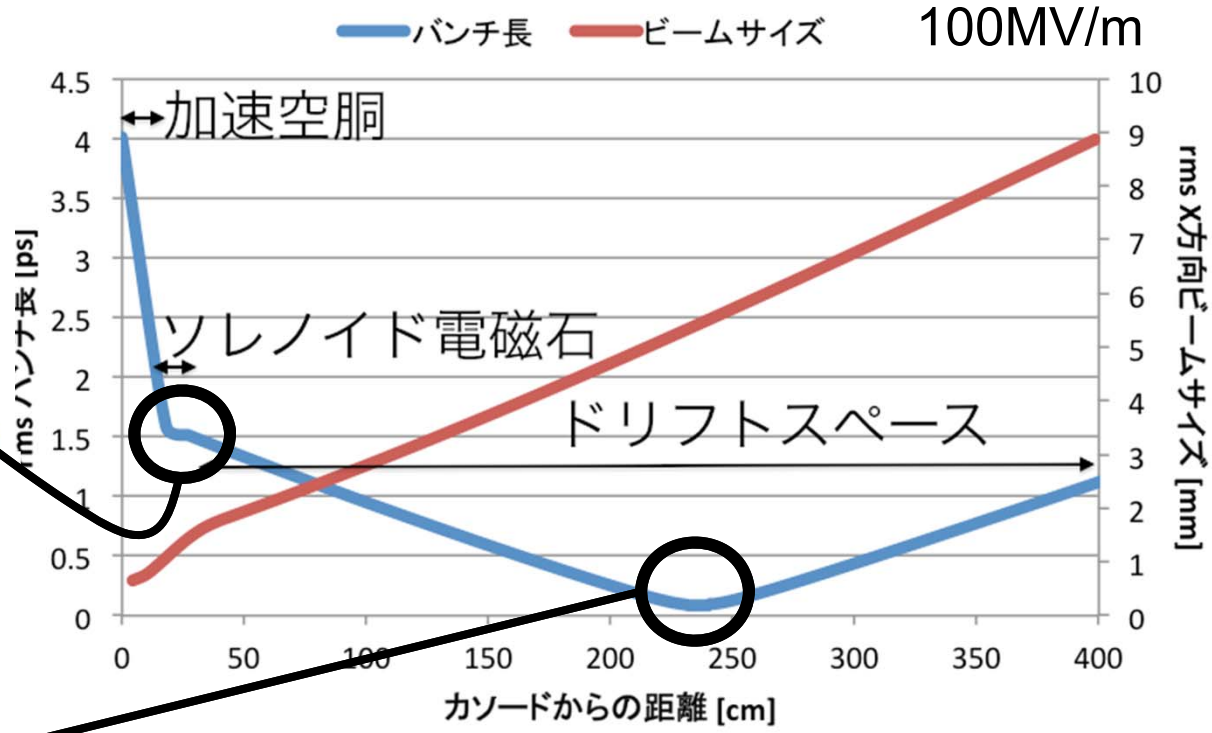
ECC-RF-Gun (Simulation)

- ビームトラッキングコード PARMELA

0.1nC
100MV/m





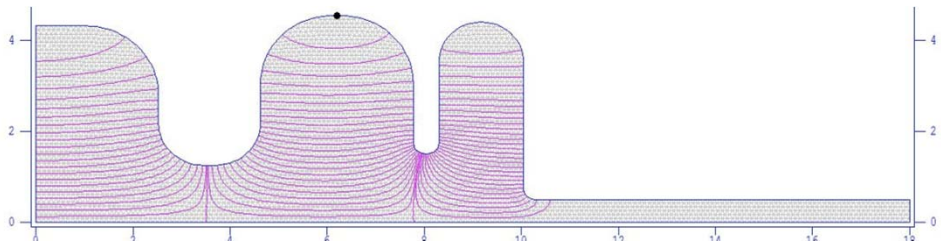


バンチ長86fs(rms) エネルギー4.4MeV

ECC-RF-Gun (Simulation)

Phase	Distance	Bunch Length	Energy
136deg	271cm	167fsec	4.39MeV
138deg	276cm	144fsec	4.45MeV
140deg	281cm	152fsec	4.50MeV

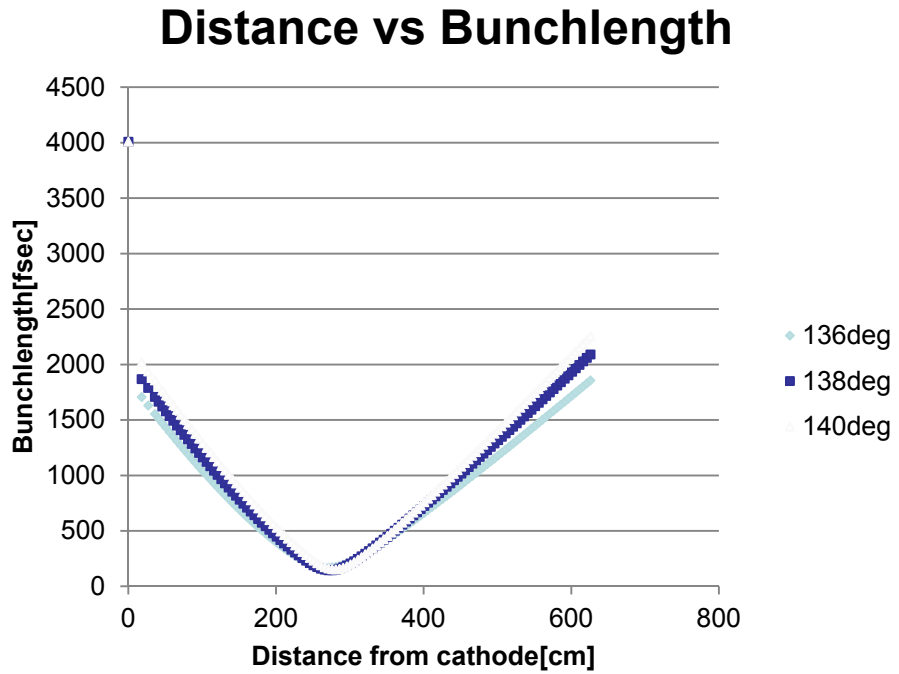
100MV/m at cathode



2nd iris = λ/20

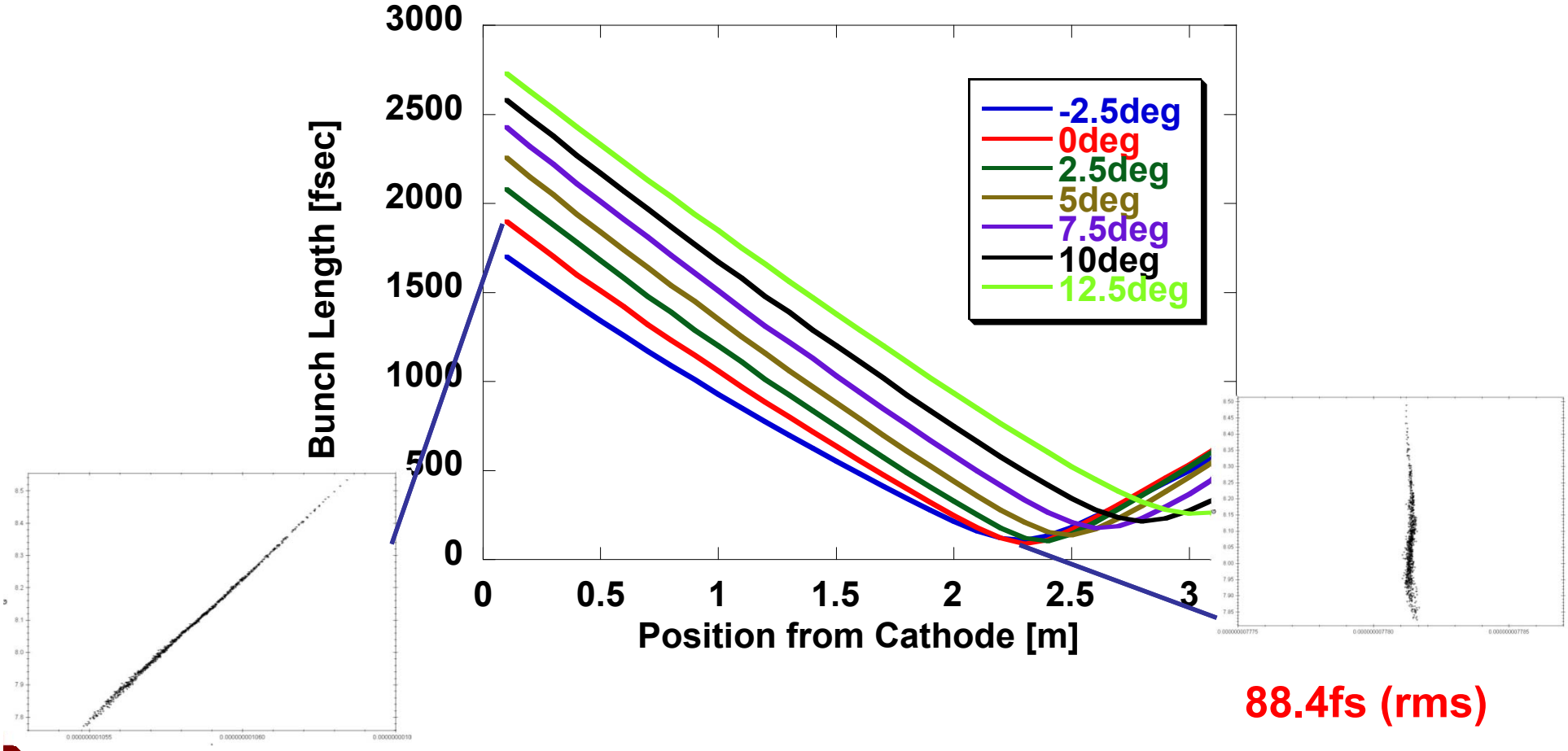
2nd cell = λ/6

Q = 13289.6



ECC-RF-Gun (Simulation)

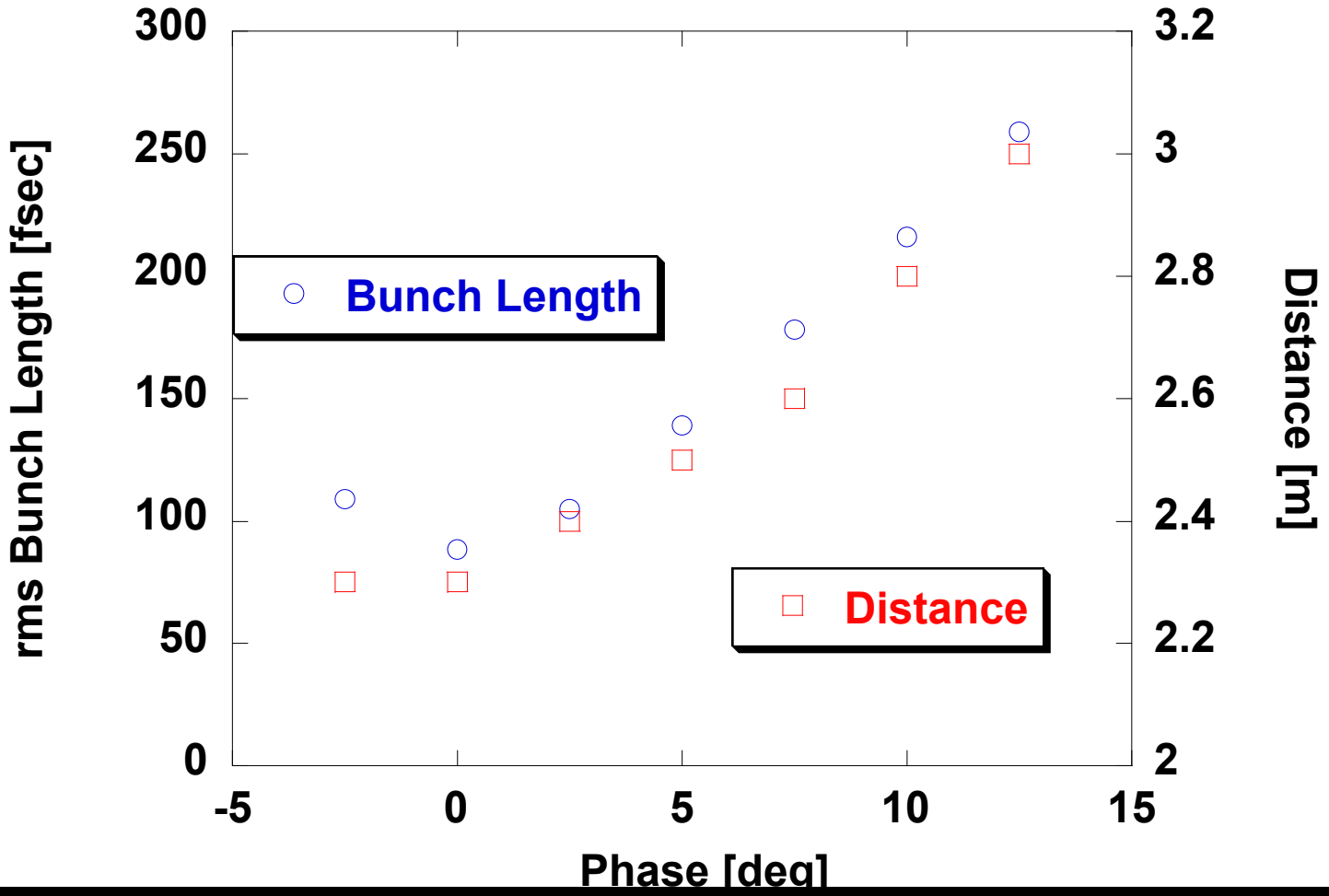
PARMELAだけでは心もとないので、GPTも使って、確認してみる。
＞ほぼ同様の結果が得られる。



88.4fs (rms)

ECC-RF-Gun (Simulation)

うまく位相やレーザー照射サイズなどを選んでやると、100fsecを切るようなバンチも観測(Simulationで)できる。



ECC-RF-Gun (Simulation)

シミュレーションのまとめ
最小バンチ長として100fsを切る85.9fsec (rms)が計算結果として得られている。
表にはそれぞれのパラメータの許容範囲も示したが、どれも達成困難な値はない

パラメータ	最適値	備考
位相	135deg	±5degまで許容
電荷量	100pC/bunch	ほぼ線形に変化
ソレノイド磁場 (電流値)	70A (1050Gauss)	±10Aまで許容
初期ビームサイズ	600μm (rms)	±200μmまで許容
電場強度	100MV/m	90MV/m以上で許容
到達バンチ長	85.9fsec (rms)	2.36mの距離で最小値

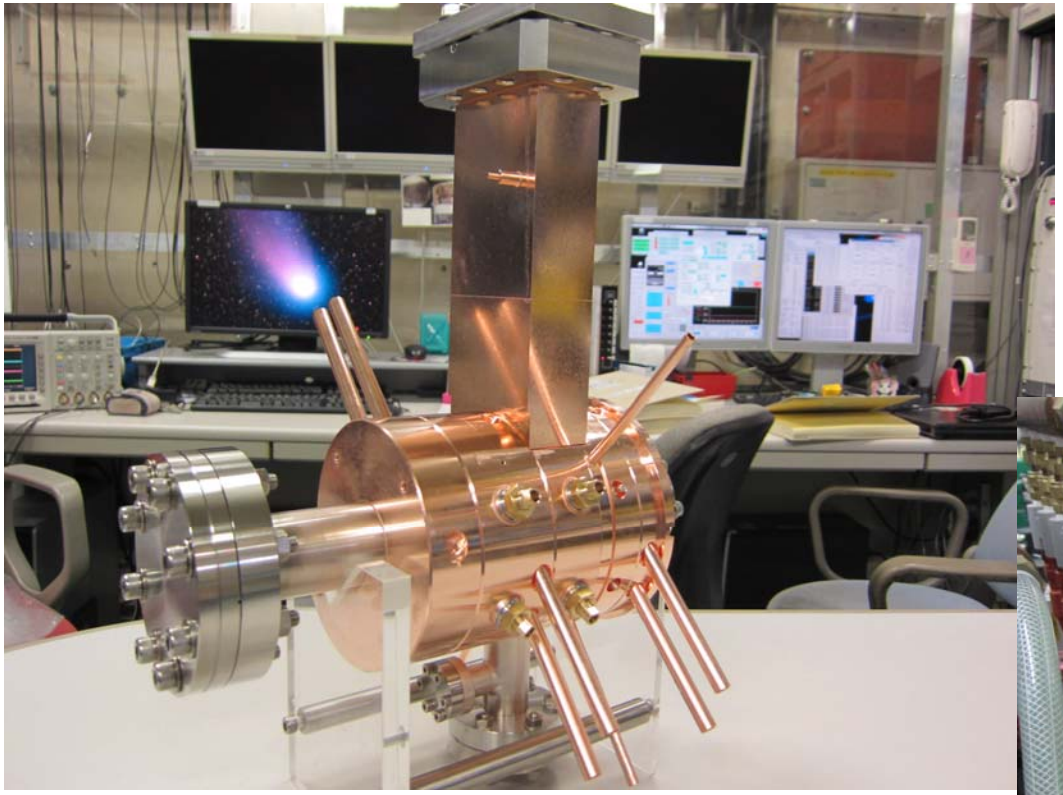
PARMELA同様にGPT (General Particle Tracer)でもシミュレーションを行い、ほぼ同等の成果が得られている(バンチ長として88.4fs)ことから、非常に実現性の高い計算結果であることを確認

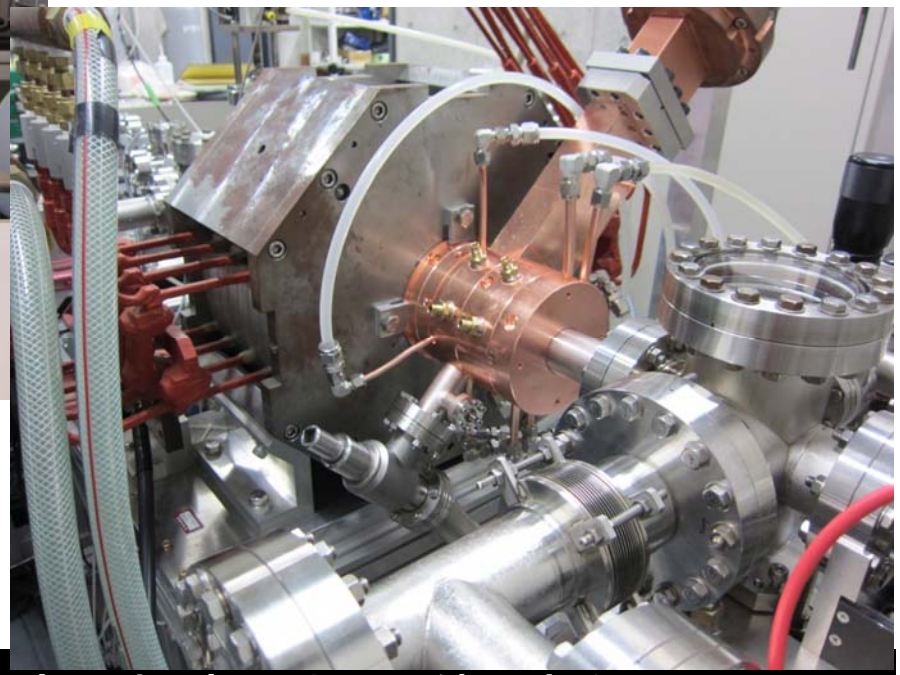
シケイン電磁石を用いた磁気圧縮も可能であることを確認し、1mの距離で100fs程度のバンチ長が得られる目処がついている

⇒ 2m四方程度のサイズで高強度テラヘルツ光源が実現できる可能性を示した

ECC-RF-Gun

このように設計したECC-RF-Gun空胴を作製し、早稲田の加速器施設内で試験した

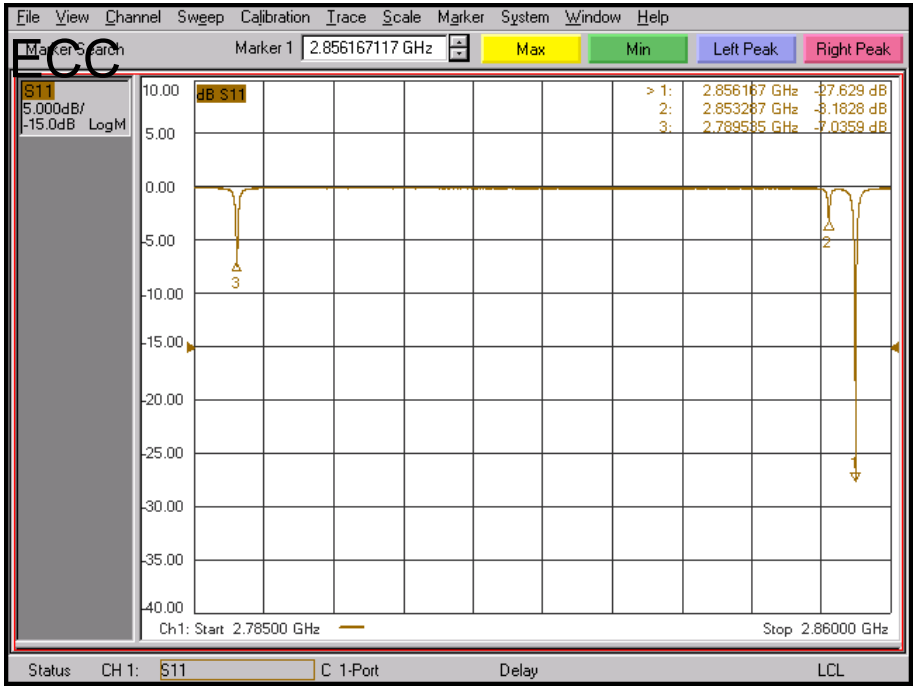


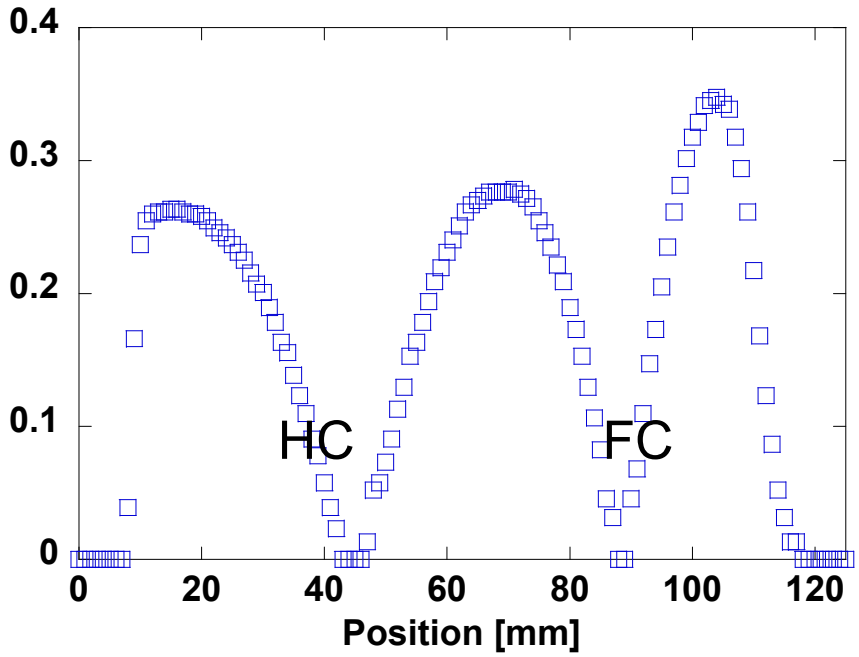


ECC-RF-Gun

製作したECC-RF-Gun空胴の評価
ほぼ設計通りのパラメータが得られている

＞ビーズ計測によるフィールド分布
↓反射法によるモード計測

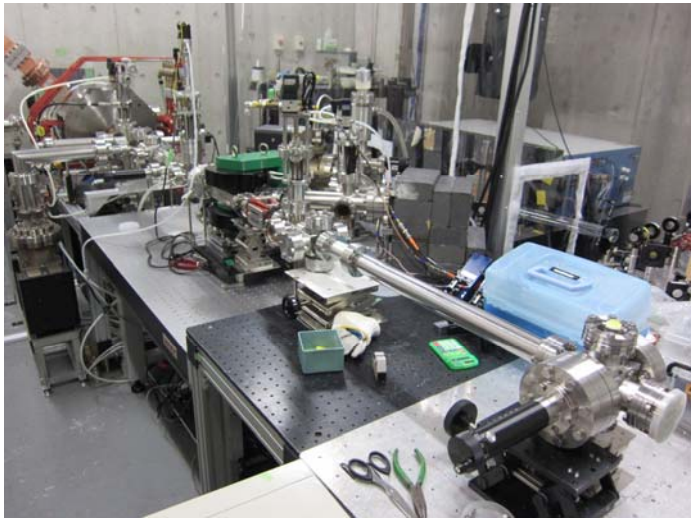




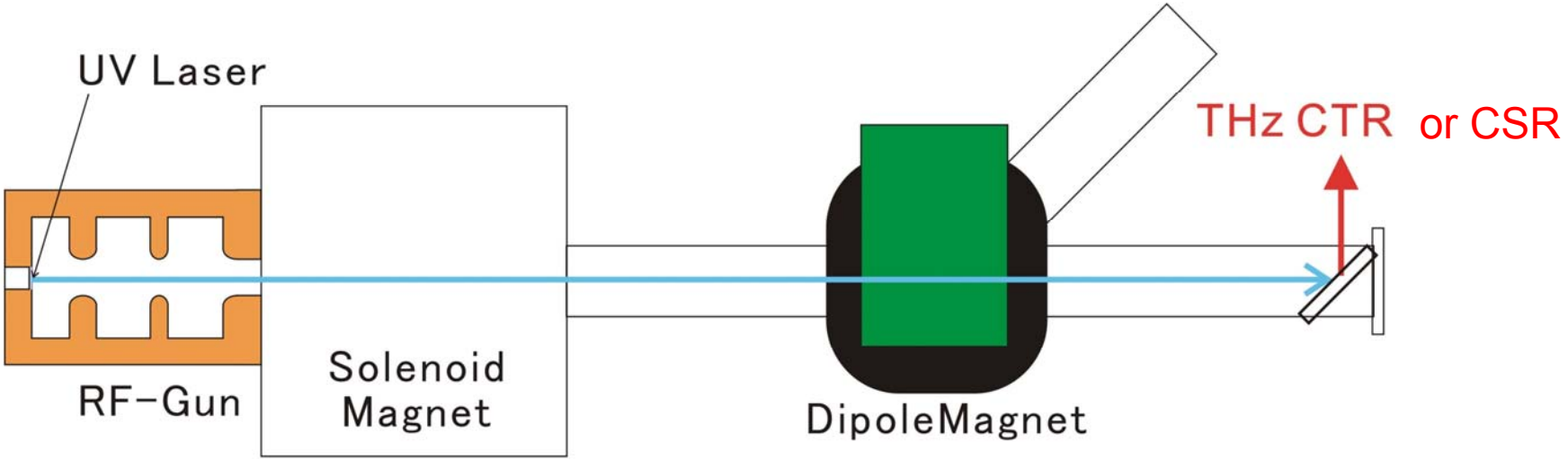
Frequency
2856MHz
Q-value
10600
Coupling
~1
Field Balance
1:1:1.25

ECC-RF-Gun (Beam Test)

製作した空胴を早稲田にインストールし、試験した。
＞カソードから適切な距離にアルミターゲット
(及び偏向電磁石)を設置し、TR及びSR光を
検波器によって計測した。



現時点で極短バンチを計測する手法を
持ち合わせていないため、狭帯域の検波器を
用いて、どの程度の高周波まで検出できるかで
推測をした。

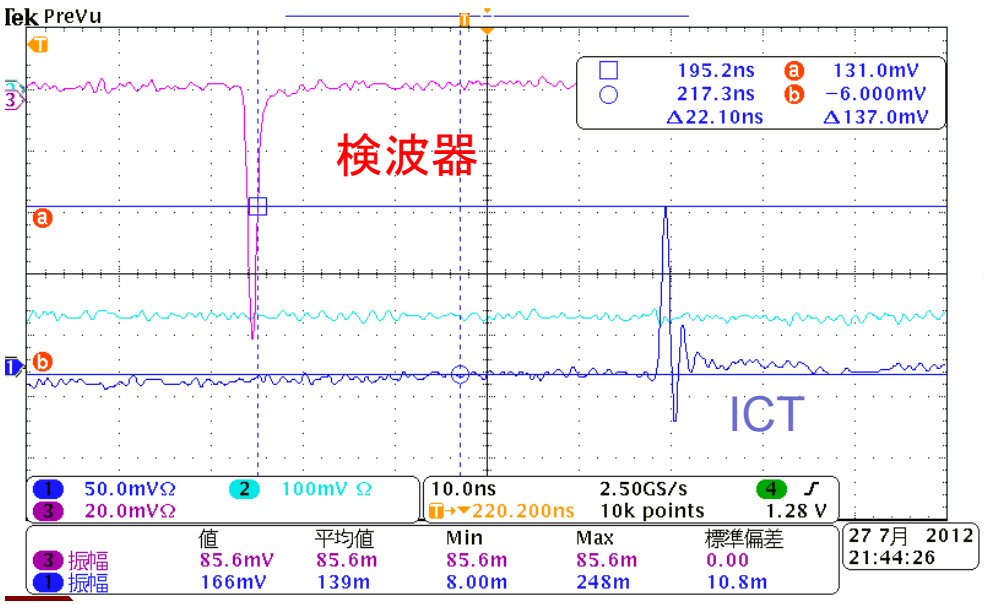


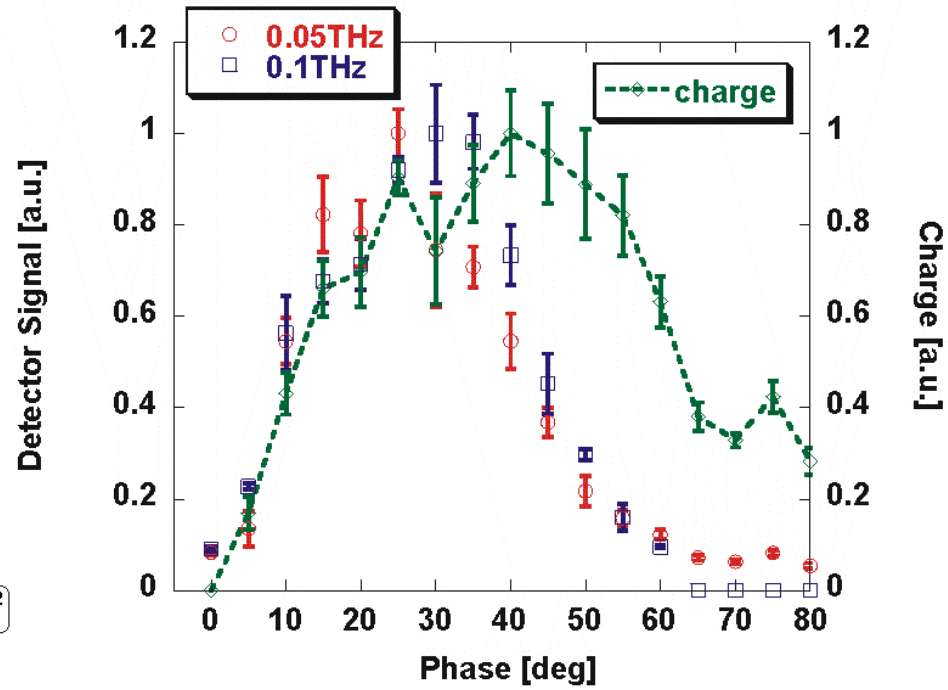
ECC-RF-Gun (Beam Test)

生成したTRおよびSR光を放物面鏡で集め、狭帯域の検波器で検出した。

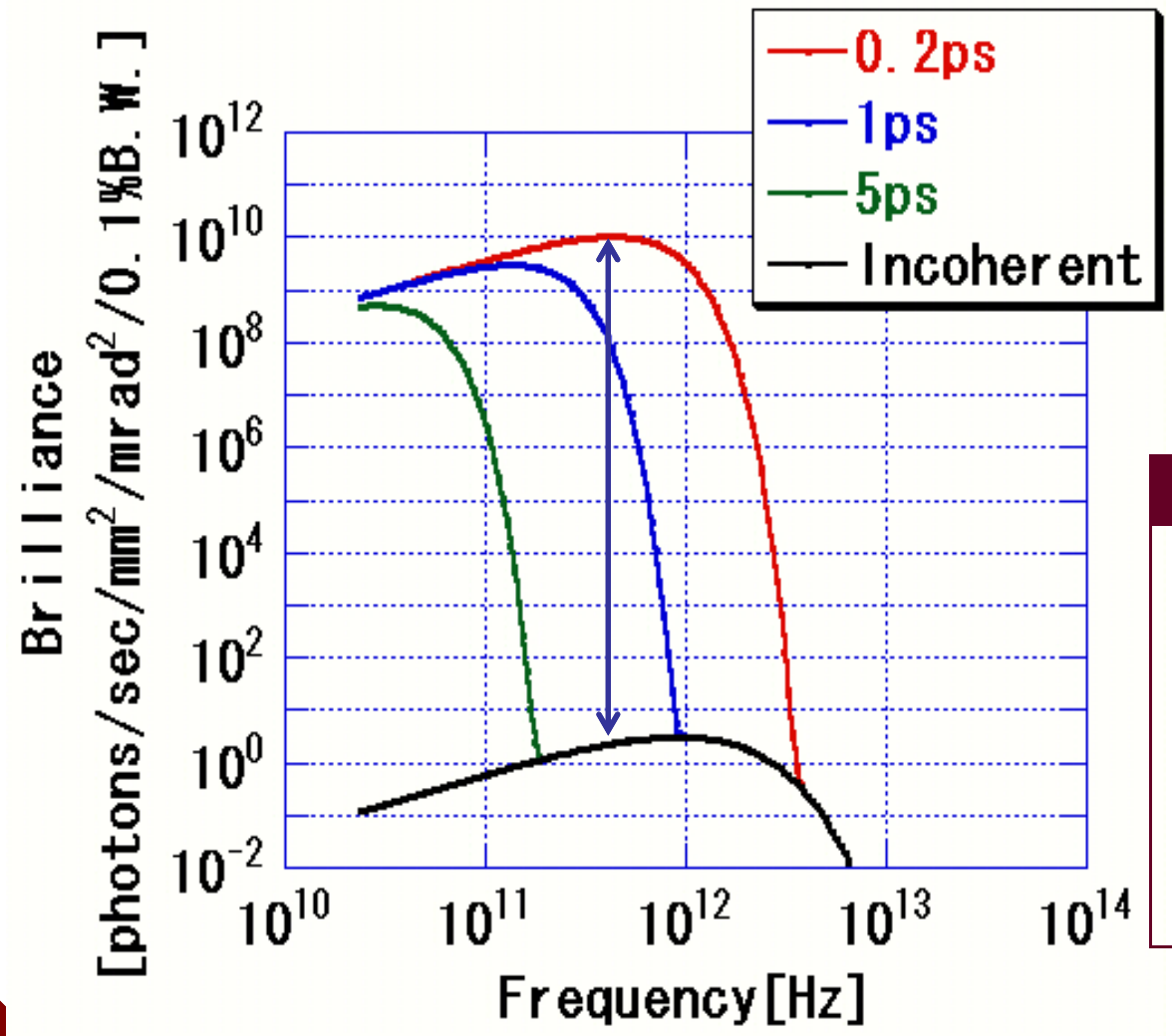
0.1THzまでの放射を確認　＞　0.1THzまではコヒーレント放射している
⇒約1ps程度までは圧縮できている
(カソード照射レーザー光のパルス幅は5ps程度)

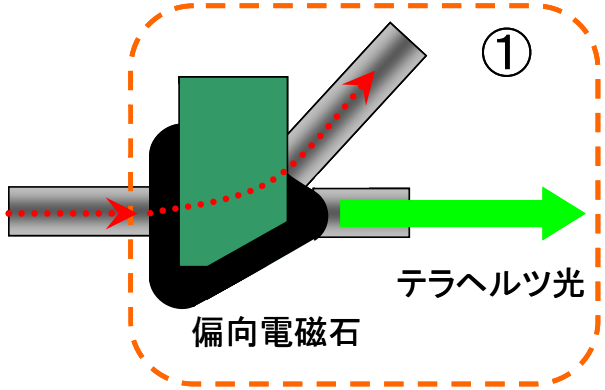
＞現時点ではまだ空胴の調整に問題があったため、今後再試験を予定している。





CSR from 5MeV electron





放射光計算パラメータ	
エネルギー	5MeV
電荷量	100pC/bunch
バンチ数	100/train
繰り返し	5Hz
磁場強度	0.17T
観測点までの距離	10cm

Summary

極短バンチ(数100fsec：100μm以下の長さ)の電子ビームが生成可能な電子銃の設計・開発を行っている。

- ○ 高密度の電子ビーム
- ○ テーブルトップサイズ　(2m×4m)
- ○ 最低限のエネルギー　(～5MeV)

電子銃空胴を製作し、試験を行った。
現状で、圧縮されていることは確認できたと考えているが、まだ試験不足
来週からもう一度試験を行う予定
＞小型高強度テラヘルツ光源や他のアプリケーションなどを見込む

- ○テラヘルツ帯 (数mm～数十μm波長帯)の光をコヒーレントに生成
- ○平均強度　mW
- ○ピーク強度　kW

本電子銃後に加速管で加速することで、より応用に供するビーム生成が可能であると考えている。