

第3回「高エネルギー電磁ビームに誘起される放電とその工学的応用」研究会

第5回 マイクロ波ロケット研究会, 13-14/Sep./2017

量子科学技術研究開発機構 六ヶ所核融合研究所

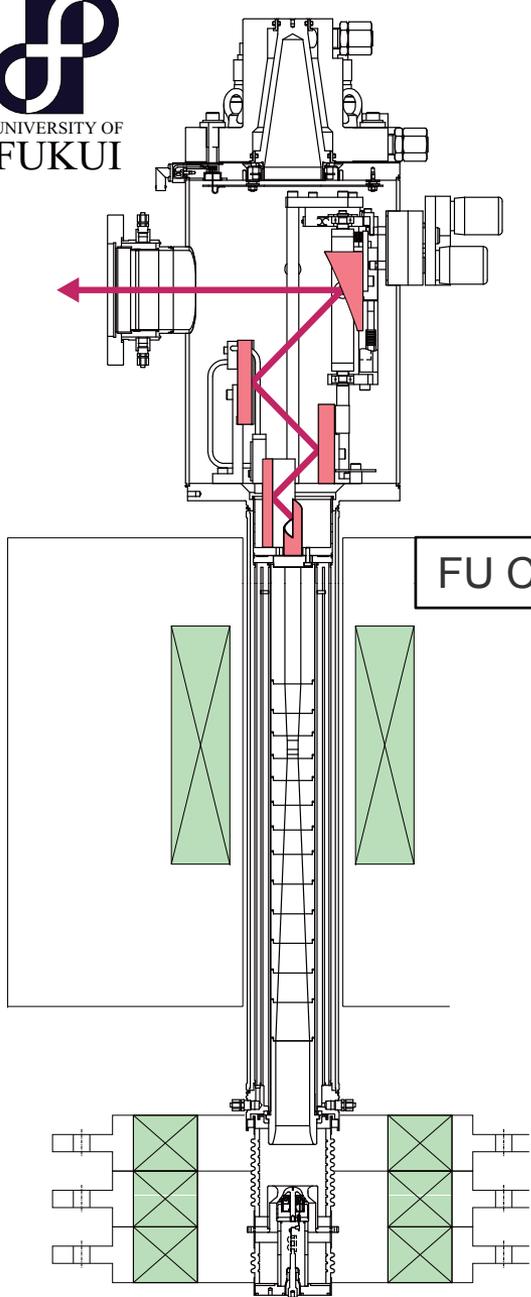
セッション I ジャイロトロンとミリ波放電, 14:40-15:00, 13/Sep./2017

高周波ジャイロトロンにおける電子ビームの 高性能化と制御

Generation and Control of High-Quality Electron Beams in High-Frequency Gyrotrons

山口裕資, 立松芳典, 福成雅史, 齊藤輝雄
福井大学 遠赤外領域開発研究センター

- 内容
- 多周波発振ジャイロトロン(FU-CW-GV)
 - ラミナー電子流の形成と空間電荷効果の抑制
 - まとめ -1
 - ジャイロトロン遠隔操作機器の整備
 - ヒータ電流の PID 制御実験
 - まとめ -2



多周波数発振ジャイロトロン

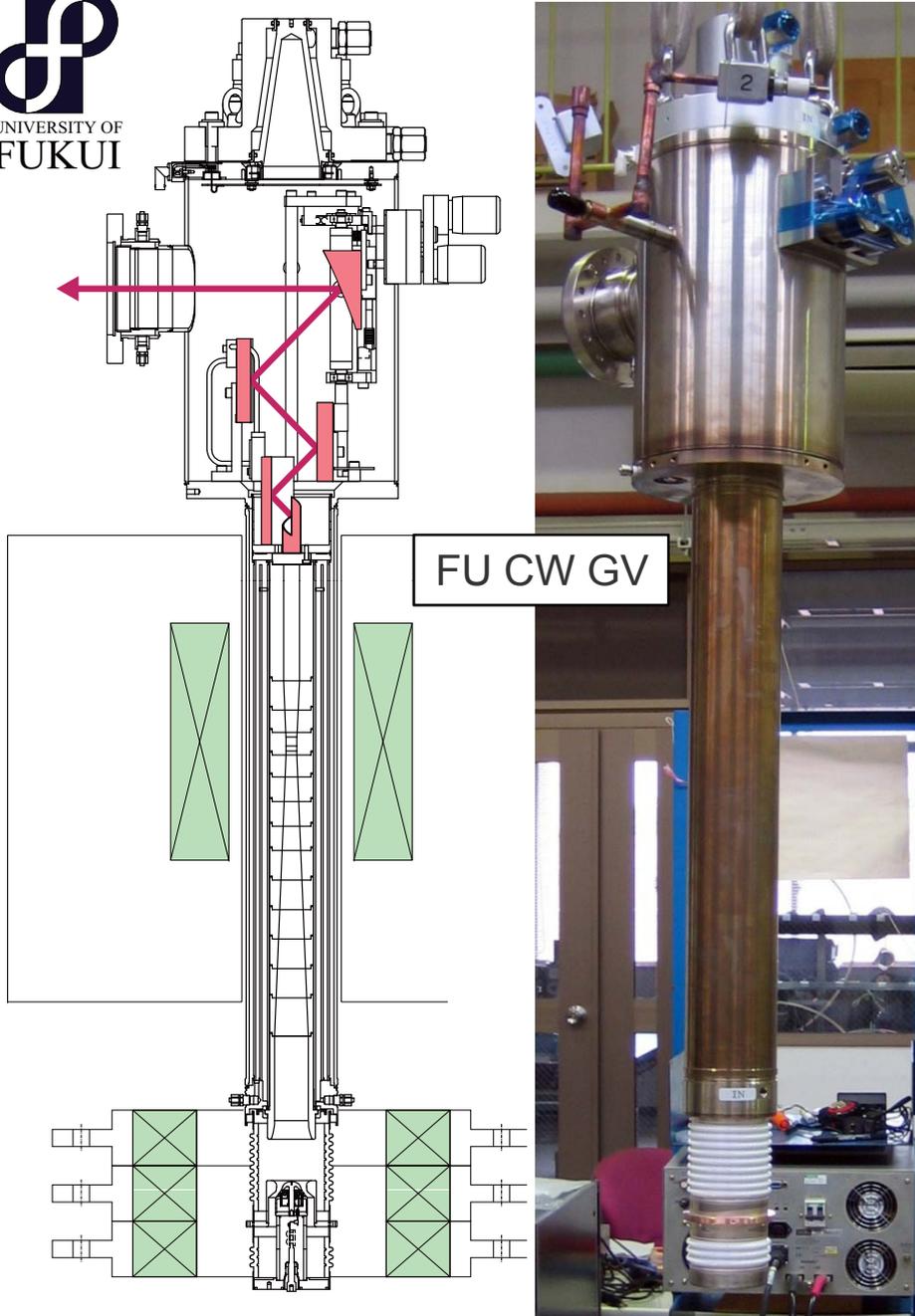
背景

Sub-THz ~ THz 帯の光源開発

課題

汎用性の向上 (周波数可変性の付加)





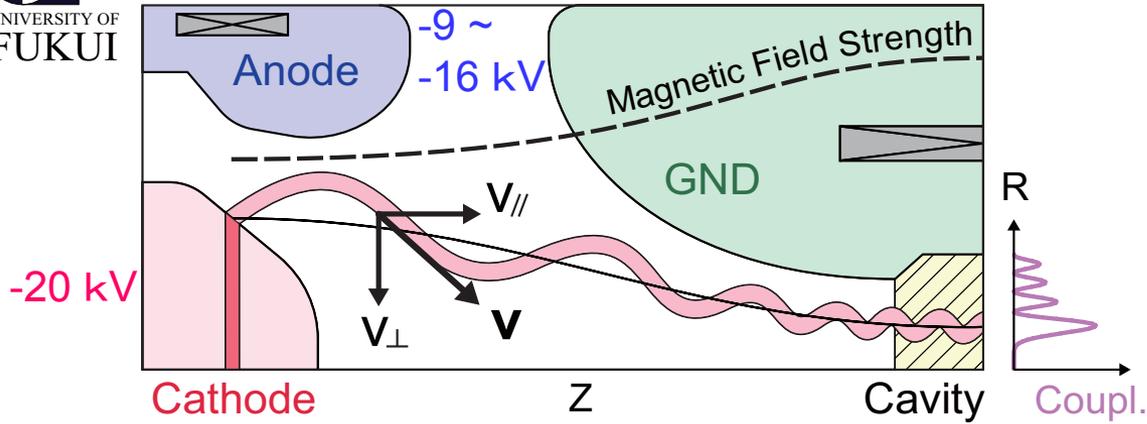
段階的な周波数可変

共振器部の磁場を変え、
サイクロトン周波数を調節

▶ 周波数の異なる共振器モードへ、
電子ビームを選択的に結合

Mode	Freq. [GHz]	B_C [T]	R_B [mm]
TE _{10,6}	265.0	9.71	1.93
TE _{9,6}	253.6	9.29	1.81
TE _{8,6}	242.1	8.86	1.69
TE _{7,6}	230.4	8.44	1.55
TE _{9,5}	224.7	8.23	2.05
TE _{8,5}	213.4	7.82	1.91
TE _{7,5}	202.0	7.39	1.77
TE _{6,5}	190.5	6.97	1.61
TE _{7,4}	173.2	6.35	2.07
TE _{6,4}	161.9	5.94	1.89

三極マグネトロン入射型電子銃



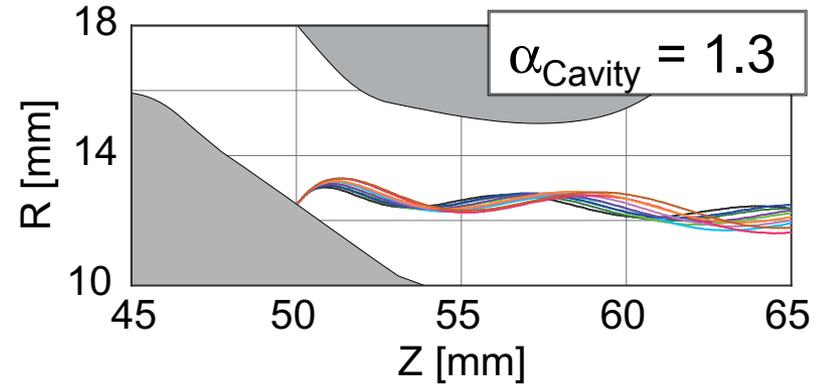
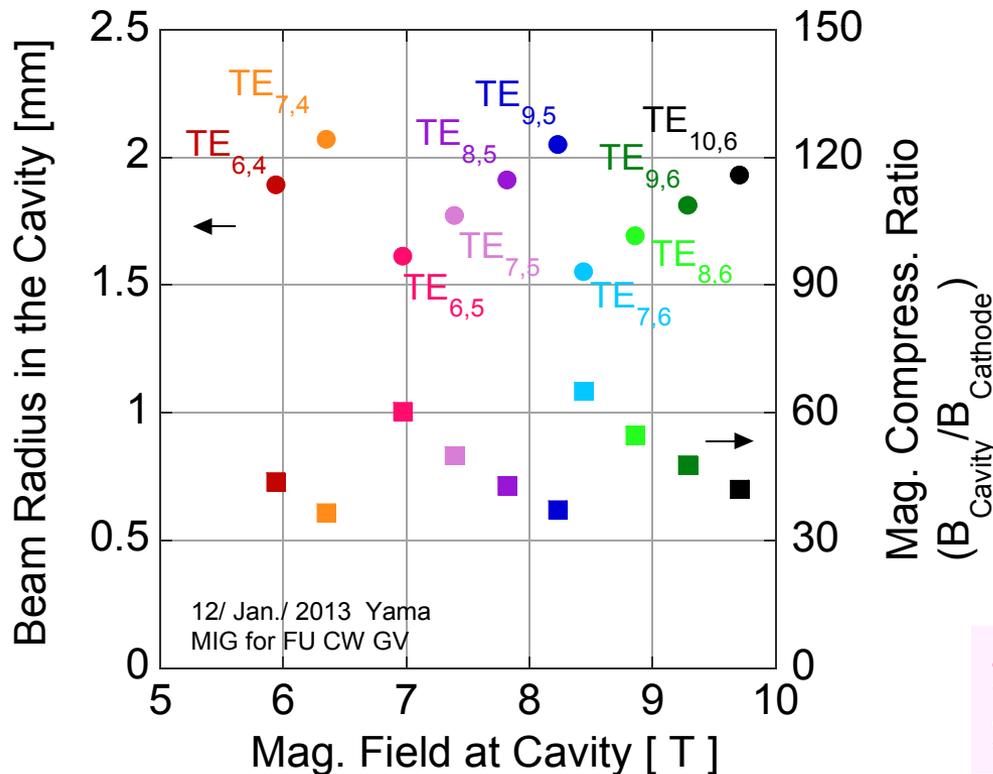
速度ピッチファクタ → 大

$$\alpha \equiv \frac{V_{\perp}}{V_{\parallel}} \quad \left(V_{\perp K} \propto \frac{E_K}{B_K} \right)$$

速度拡がり → 小

$$\Delta\alpha \equiv \frac{\alpha_{\max.} - \alpha_{\min.}}{\alpha_{\text{average}}}$$

▶ 空間電荷分布を一様化する
ビーム光学系の設計が重要



発振モードの変更
→ 最適なビーム軌道も変化

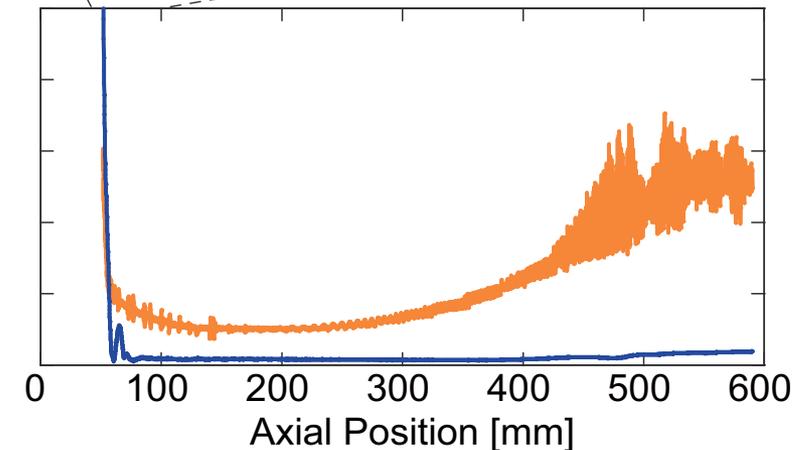
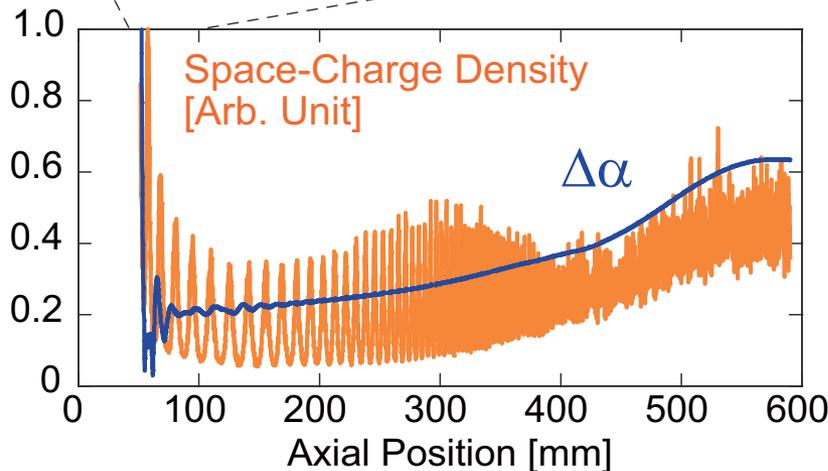
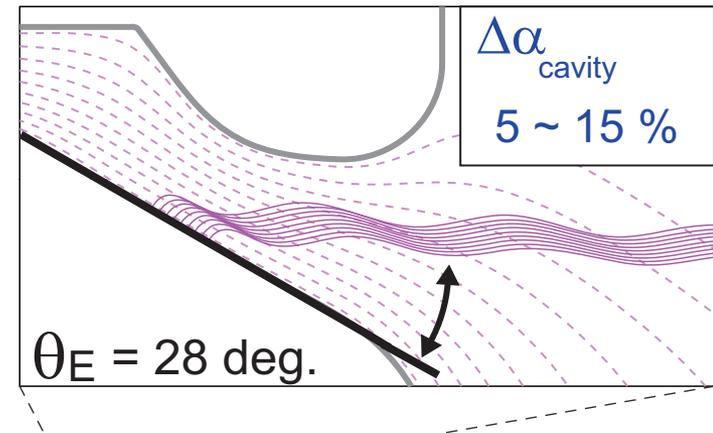
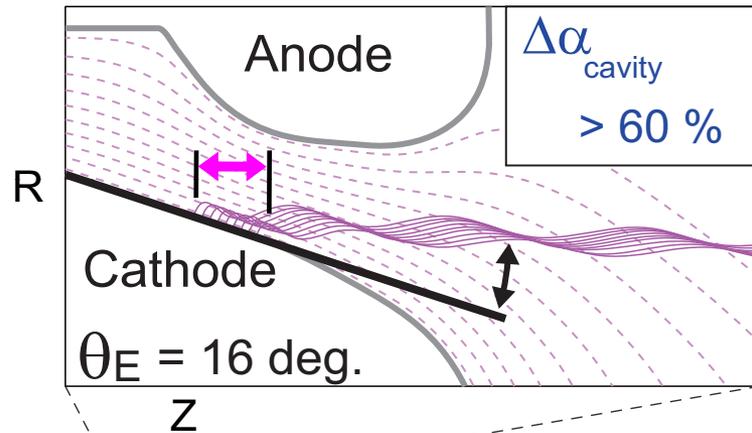
最適動作点からのずれに対し、 $\Delta\alpha$ の
増大を許容範囲内に抑える事が課題

空間電荷効果の抑制： ラミナー電子流の形成

各軌道の起点が異なる
 → 磁力線に垂直な断面内で、
 各軌道の回転位相が異なる。

電流放出面と磁力線の成す角 θ_E を増加し、
 出発点の軸方向のずれを小さくする。

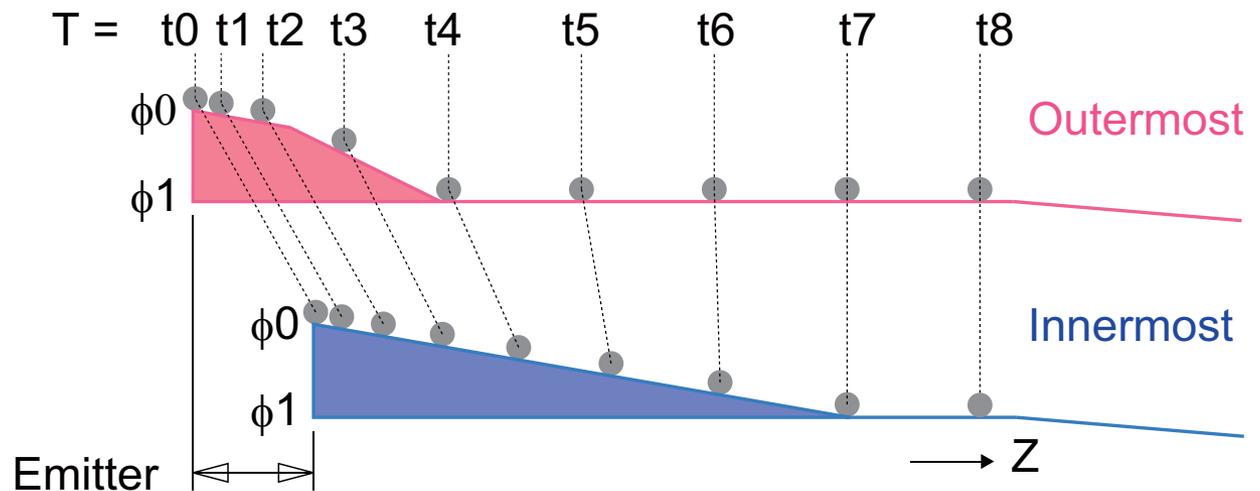
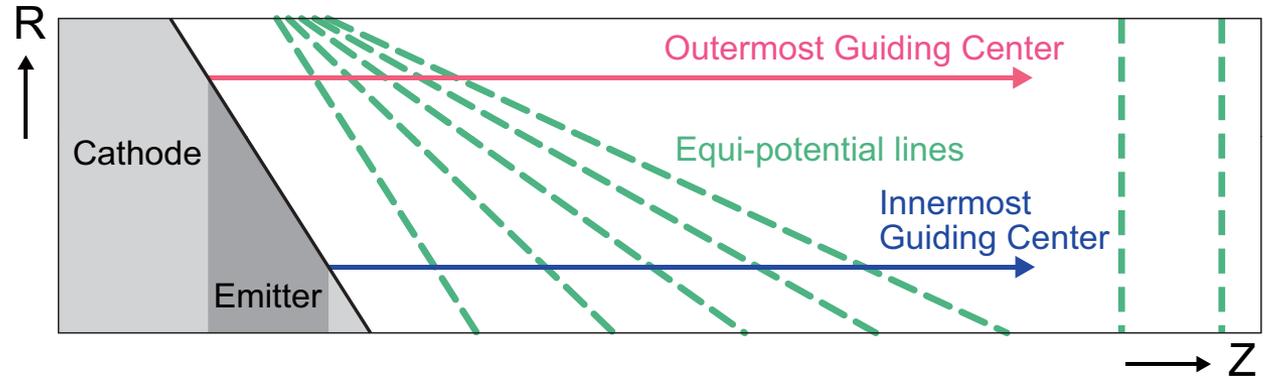
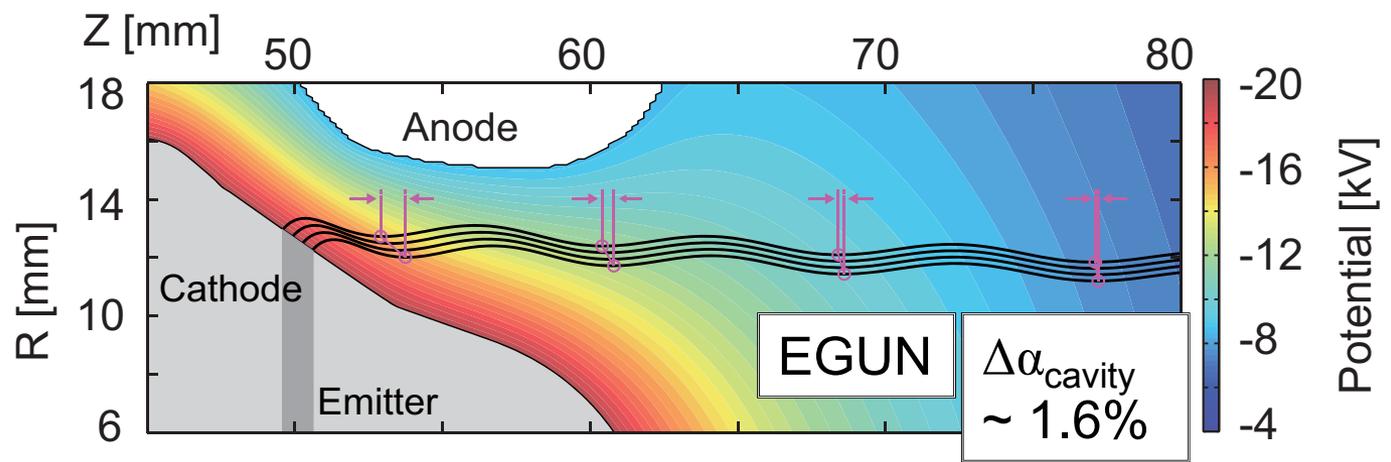
V. N. Manuilov et al., Radio Eng.
 Electronic Phys., **23**, 111-119 (1978)



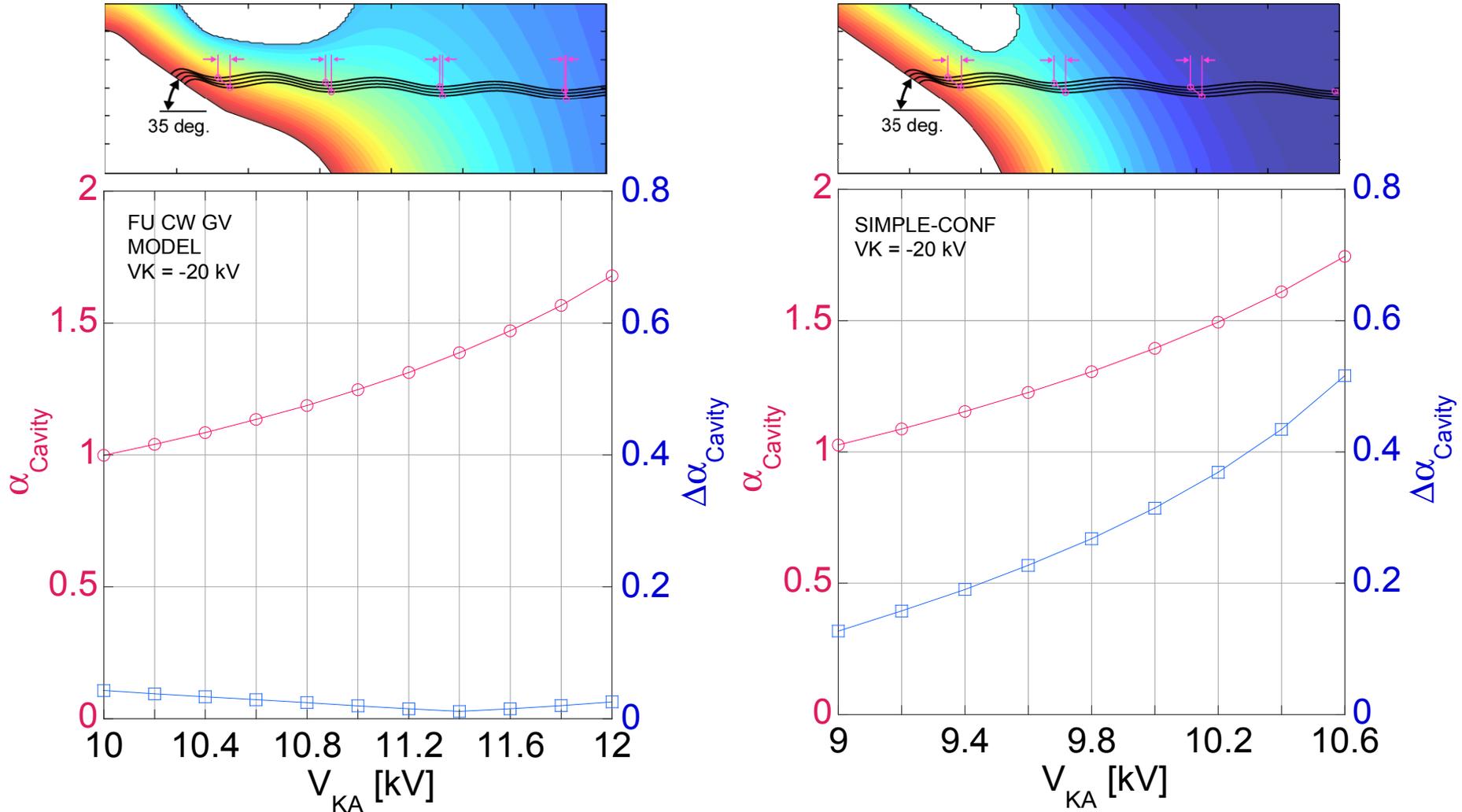
ラミナー性の調整

— 磁力線に垂直な断面内 —

各軌道が、同じ
回転半径と
回転位相を持つ

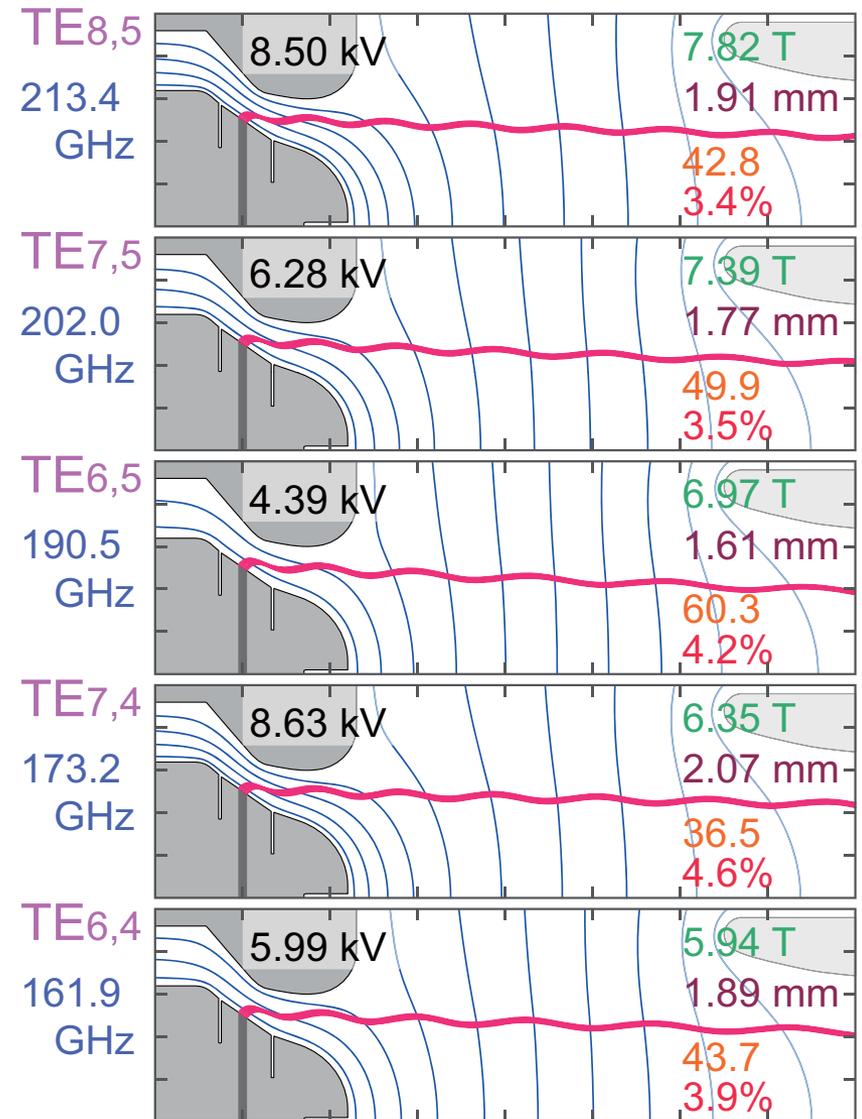
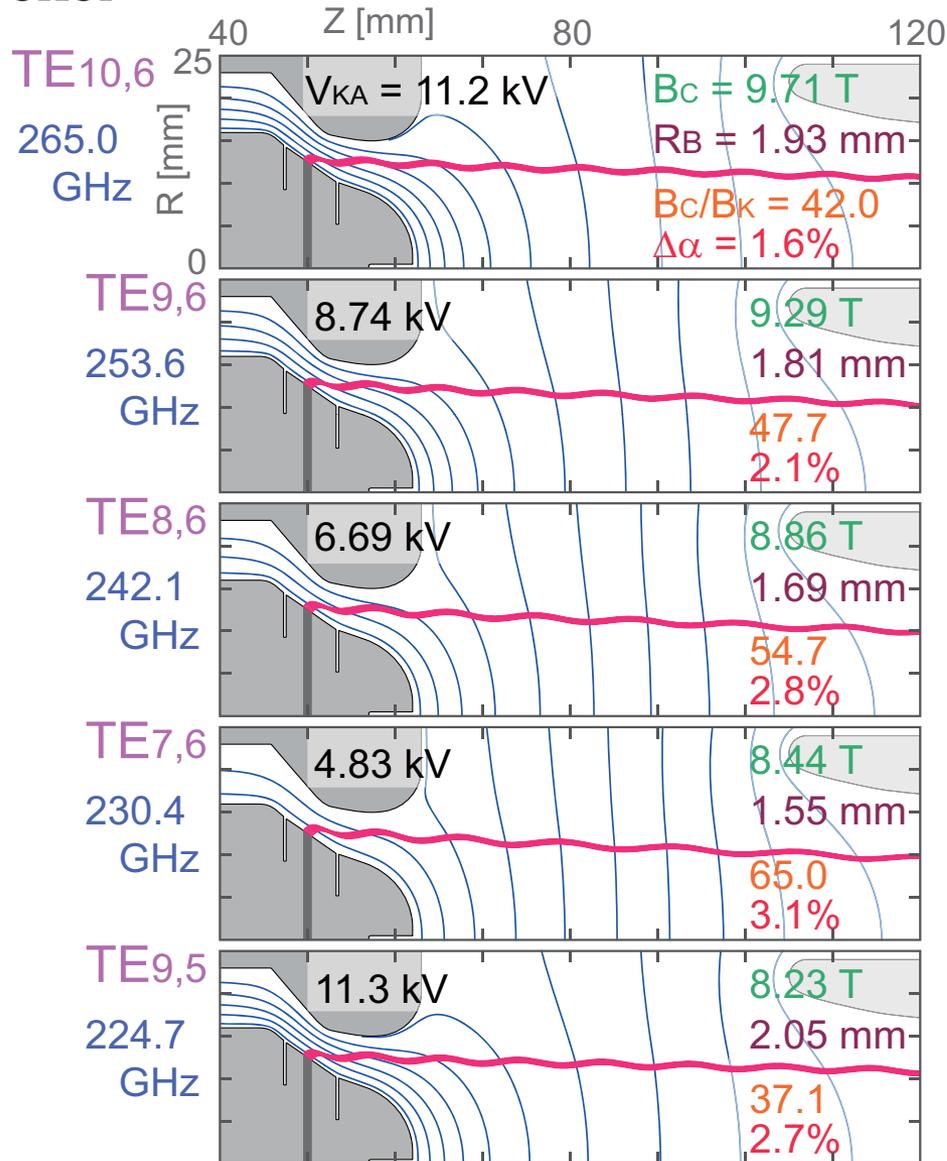


共振器における電子ビーム特性の比較

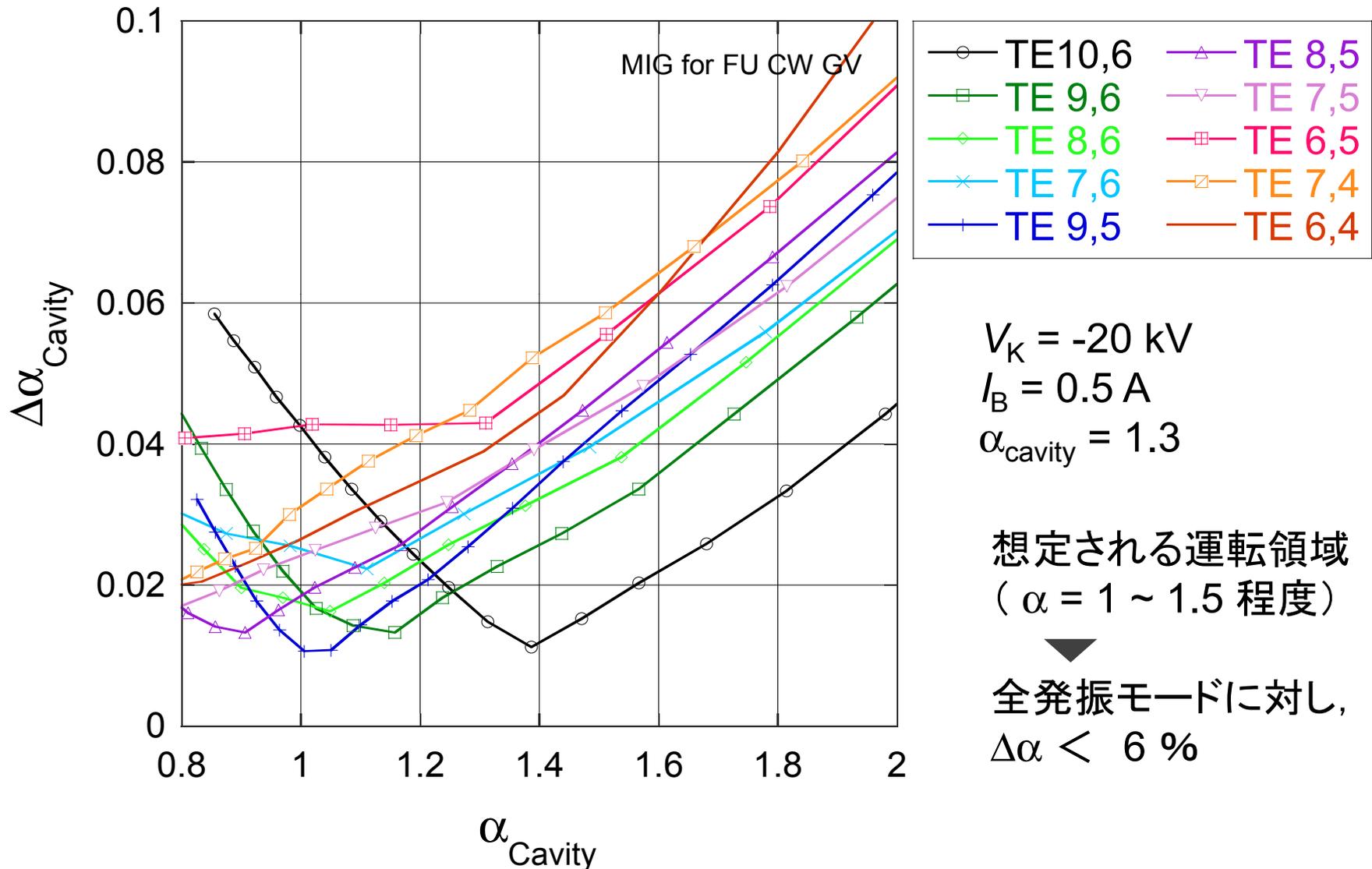


▶ ラミナー性の良い電子流では、電子銃の広い動作領域において、速度分散の低い状態が維持されている。

GV への適用 ($V_K = -20$ kV, $I_B = 0.5$ A, $\alpha_{\text{cavity}} = 1.3$)



共振器における電子ビーム特性



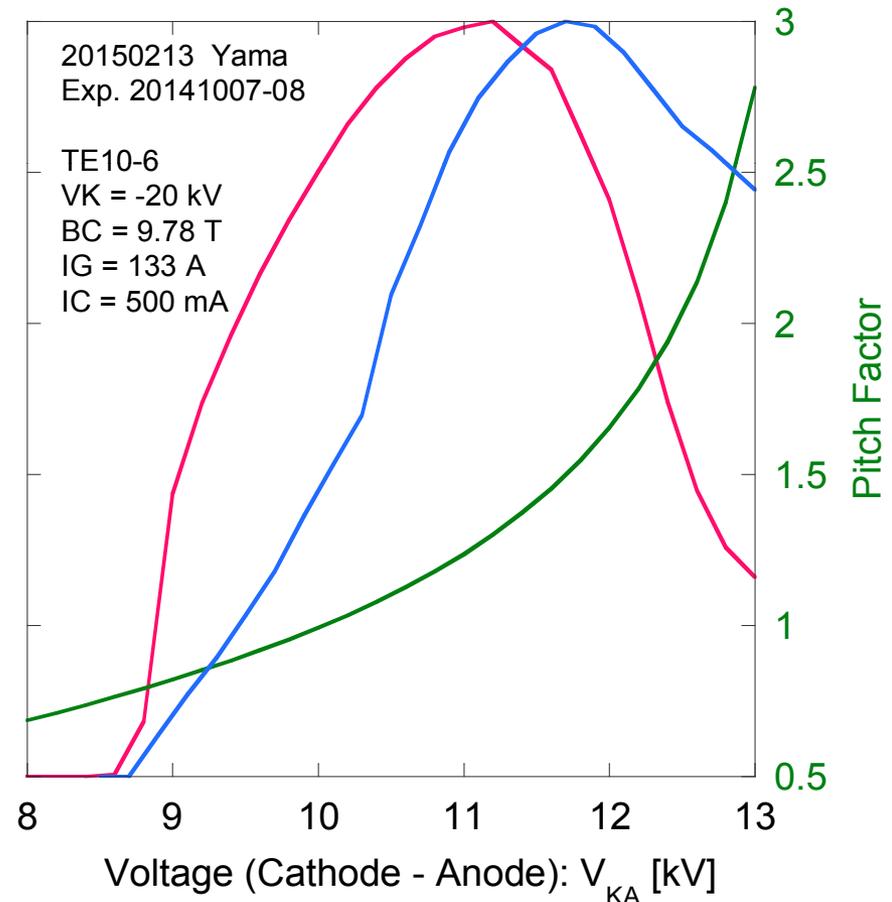
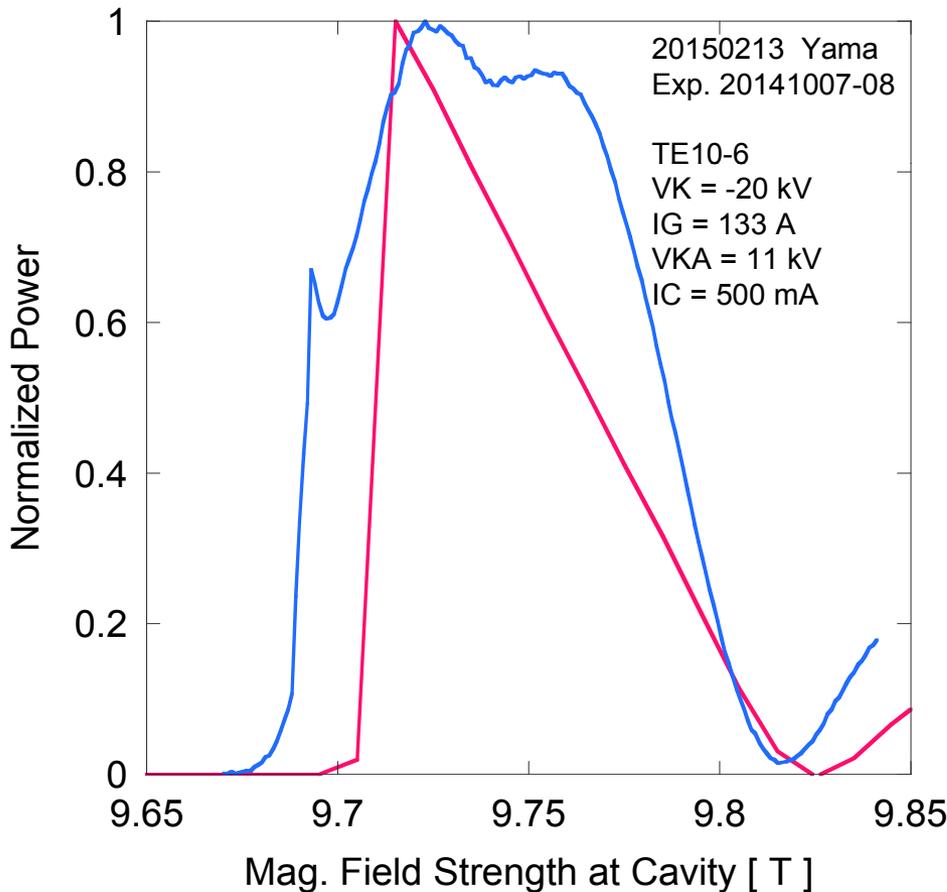
計算結果と実験結果

TE_{10,6} (265.0 GHz)

- ・ 電子ビーム内磁場 (EGUN)
- ・ 電子ビーム径 (EGUN)
- ・ ビーム電圧 (EGUN)
- ・ 速度ピッチ因子 (EGUN)
- ・ モード競合 (無視)
- ・ 速度拡がり (無視)
- ・ 電子ビーム厚さ (無視)
- ・ 軸方向モード数1, 周波数一定を仮定

出力
計算

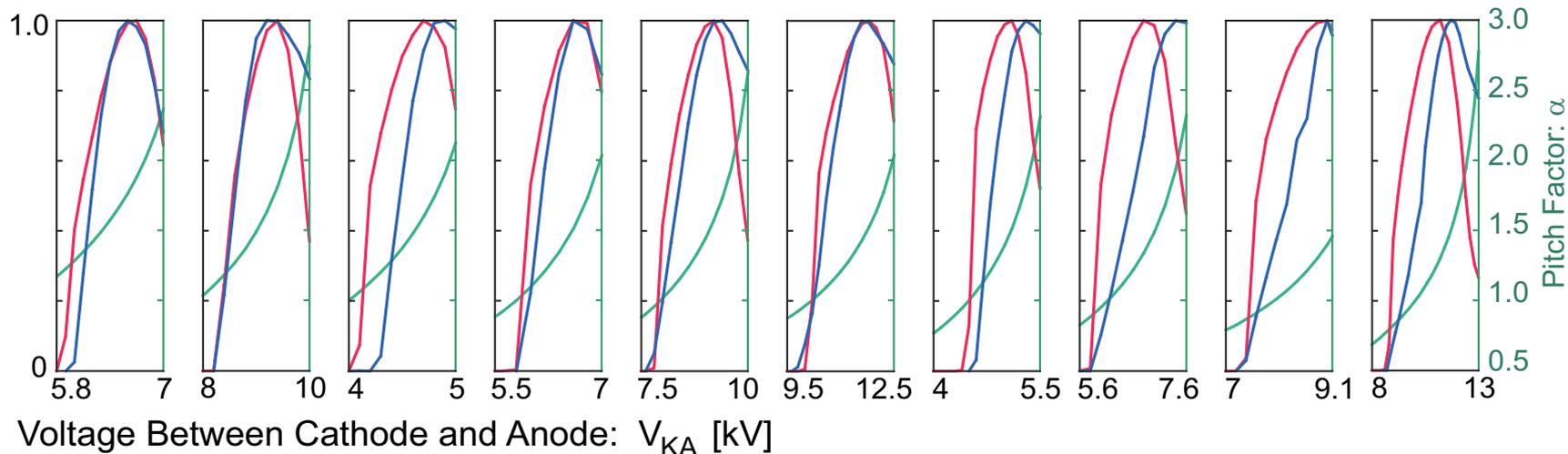
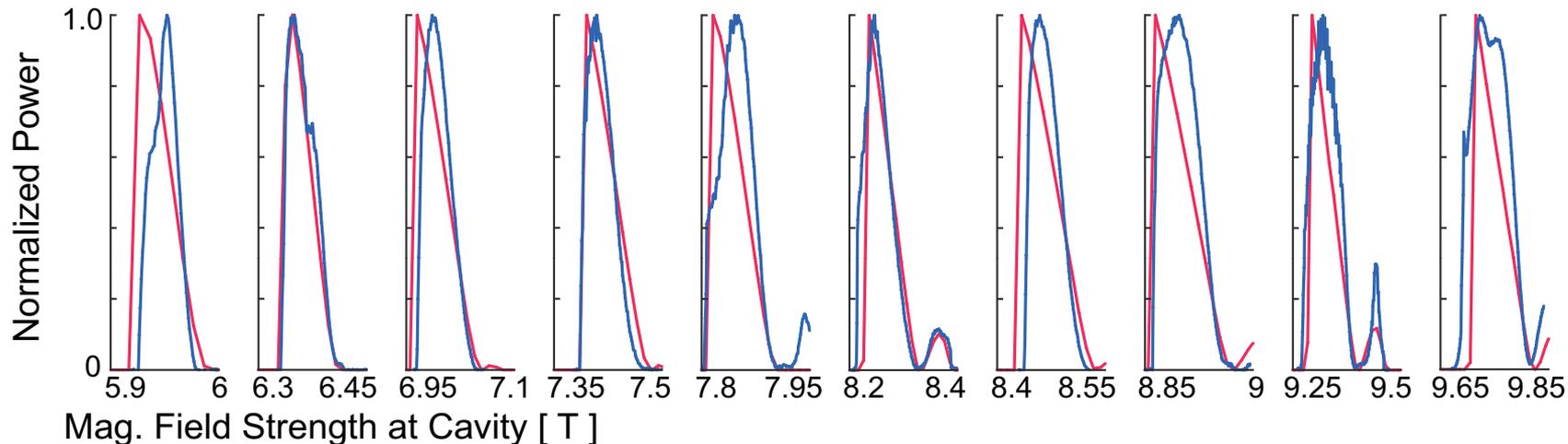
Calculated 265.0 GHz 2.9 kW
Measured 265.0 GHz 1.2 kW





計算結果と実験結果の比較 (全設計モード)

	TE _{6,4}	TE _{7,4}	TE _{6,5}	TE _{7,5}	TE _{8,5}	TE _{9,5}	TE _{7,6}	TE _{8,6}	TE _{9,6}	TE _{10,6}
$F_{exp.}$ [GHz]	161.9	173.3	190.4	202.0	213.4	224.8	230.4	242.0	253.6	265.0
$P_{exp.}$ [kW]	1.3	0.92	1.0	0.70	1.3	1.1	1.2	1.2	1.1	1.2
Exp. / Calc.	59%	37%	29%	22%	46%	35%	39%	39%	37%	41%



まとめ -1

Sub-THz 帯 多周波数発振ジャイロトロン (FU CW GV) の
電子銃を開発した.

- 空間電荷効果に起因する速度拡がり $\Delta\alpha$ を抑制する為、
ラミナー流を形成する電極構造を作成した。
 - ▶ 広い動作領域において機能し、
全設計モードに対し低 $\Delta\alpha$ を実現した.

- 発振試験の結果より
 - 全設計モード(周波数: 162 ~ 265 GHz) の
安定発振(0.7 ~ 1.3 kW)を観測した.
 - 電子ビーム特性の変化に対し、動作範囲と出力変化が、
計算結果と定性的に良く一致した.

- 最後に
非常に汎用性の高い電子銃であり、他の管への適用も可能。
 - ▶ FU CW GIA (203 GHz) にも採用し、高出力化に成功している.

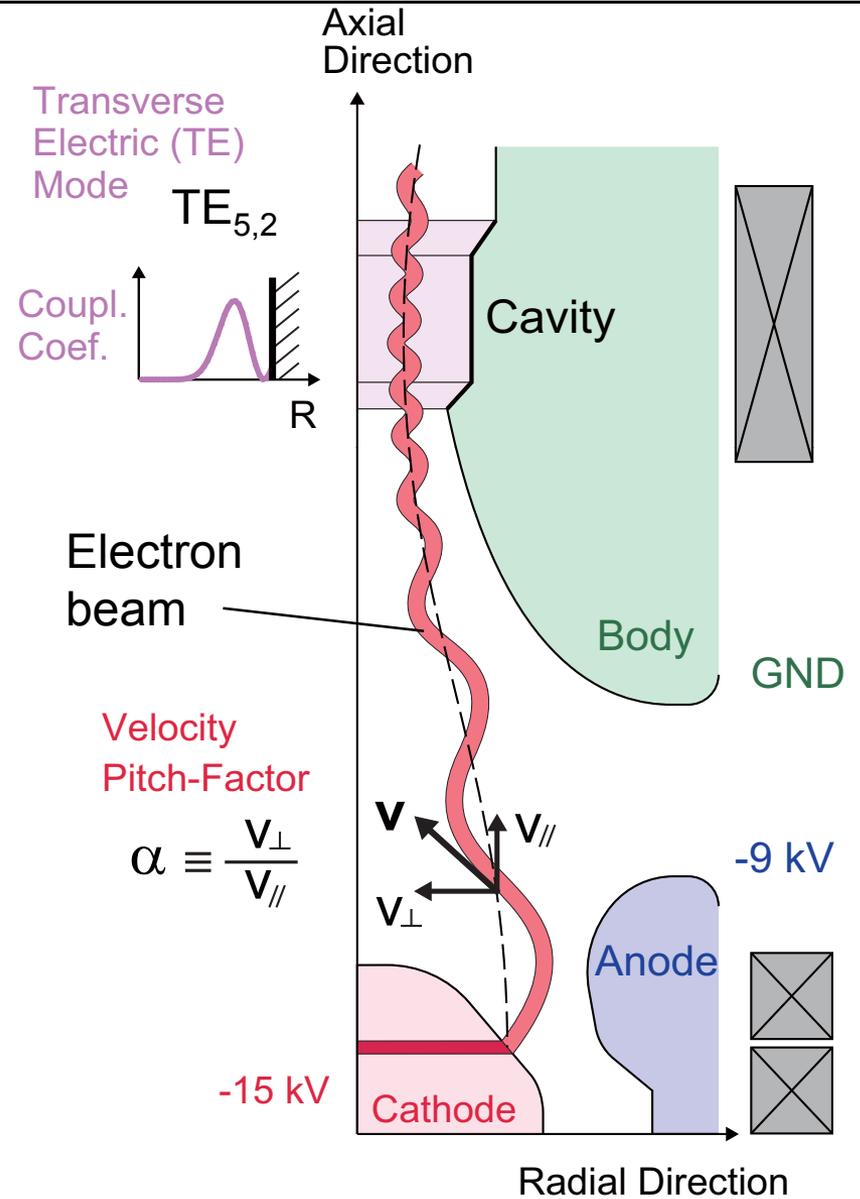
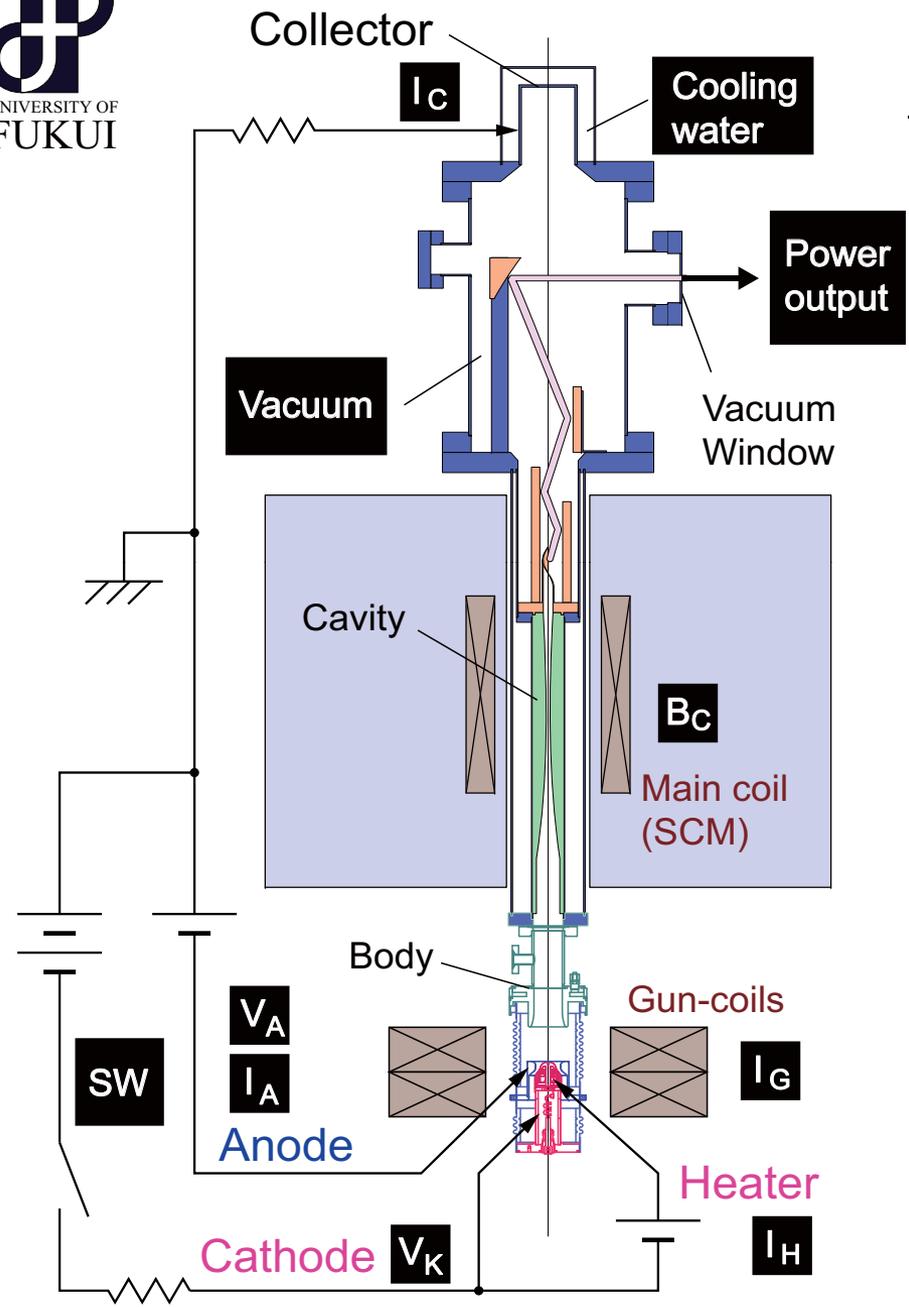
ジャイロトロン制御の遠隔操作機器の整備

- ジャイロトロン運転の概要
 - 電子管の構造
 - 駆動装置群の運転体制の現状と課題

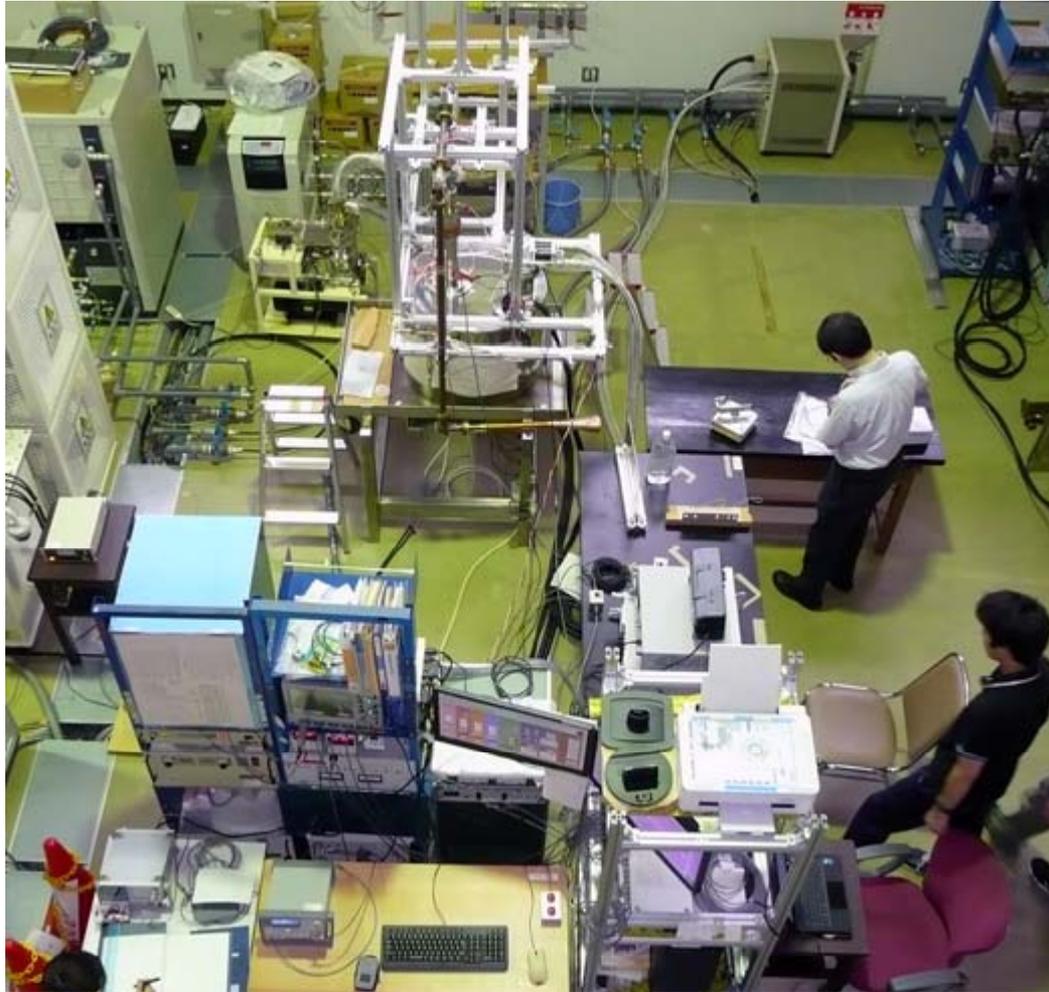
- 遠隔操作系の構築
 - 駆動装置群 ~ ADC (~ 計算機) の接続
 - 緊急停止機構, インタロックの作成
 - LabVIEW を用いたインタフェースの構築

- 操作補助機能の例
 - PID 制御の導入
 - 長時間の安定化
 - 目標値の追随性
 - 外乱に対する耐性

電子管の構造と運転パラメタ



ジャイロトロン^①の運転体制の現状と課題



ジャイロトロン^①の運転

- 電子管の真空排気
- 強磁場の発生
- 高圧, 大電流電子ビームの生成
- 出力波の管理
- 状態遷移の計測, 監視, 記録

→ 複数の人員で協力して操作

課題

- × ジャイロトン発振の安定維持
 - × 突発的な系の不安定化への対処
 - × 電子管の損傷回避機能の付加
- 特にインタロック等, 安全装置の整備が不十分

本研究の目的

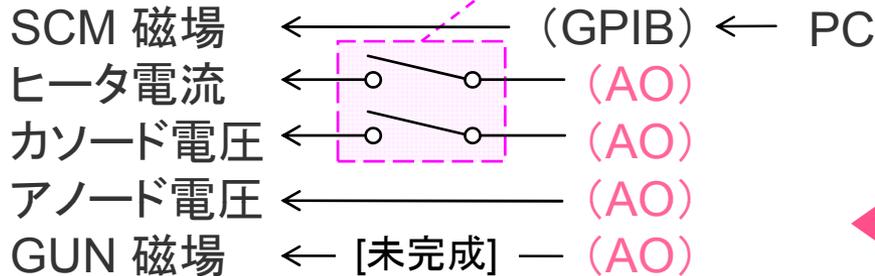
→ 運転の自動化,
ユーザーフレンドリーな
操作系の構築を目指す.

遠隔操作機器の構築

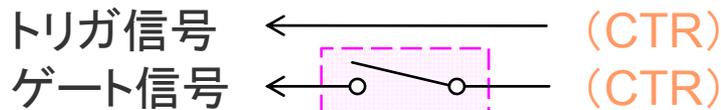
単独 / 統括切換 (DIO)
非常停止 (機械SW) -----



電源駆動



パルス生成 (半導体スイッチ制御)



インタロック



アナログ出力 (AO):

4 ch, 2.86 MS/s, 16 bit, ± 10 V

カウンタ出力 (CTR):

4 ch, 32 bit

デジタル入出力 (DIO):

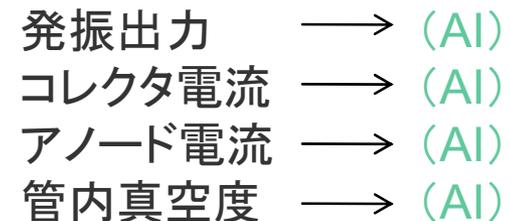
48 ch, 10 MHz

アナログ入力 (AI):

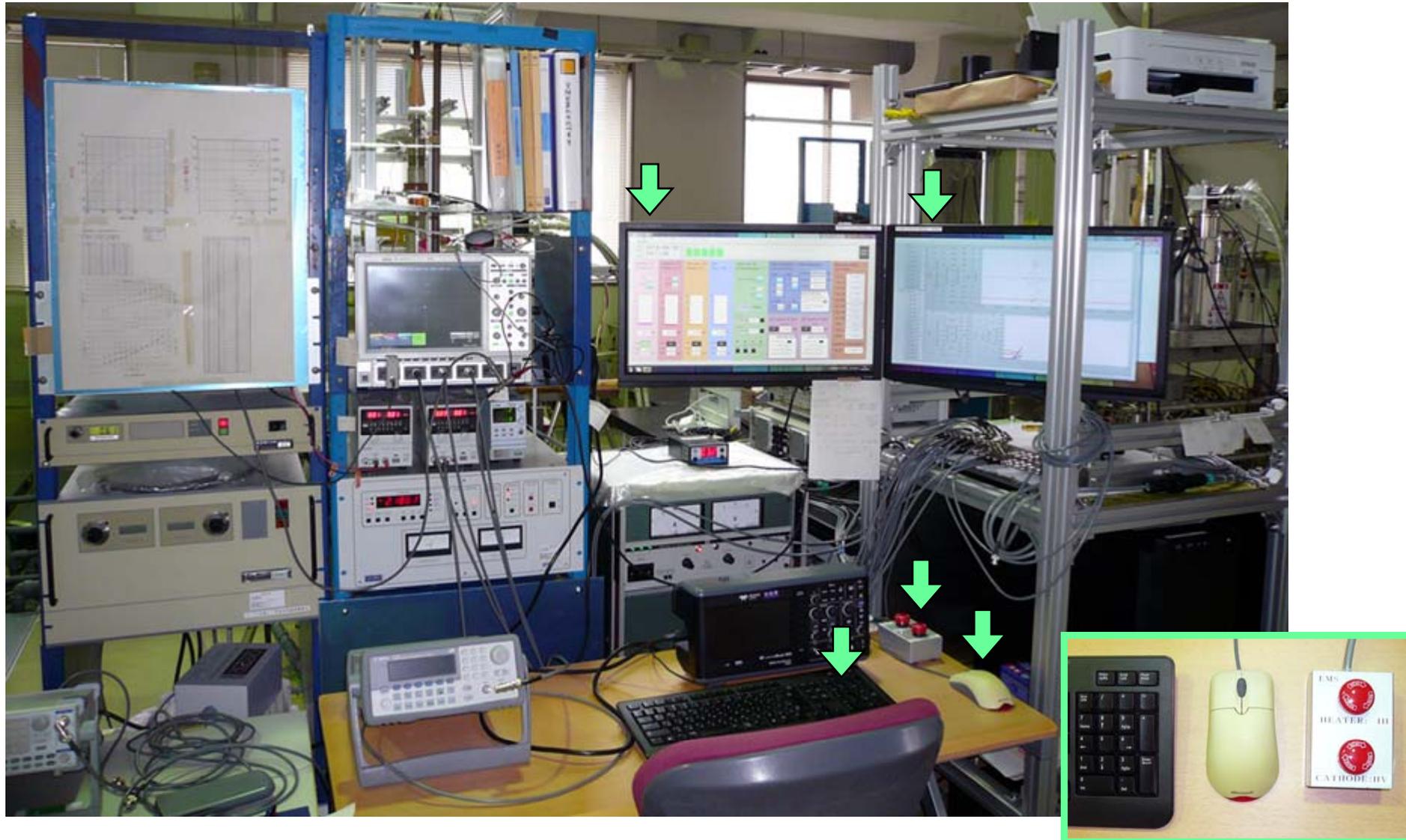
32 ch, (1.25 MS/s), 16 bit, ± 10 V



ジャイロトロンの状態計測



遠隔操作機器の組み込み



インタフェースの構築 (遠隔制御盤)

インタロック

異常発生時に警告音を発するとともに、
↓ 問題箇所と対処法を表示

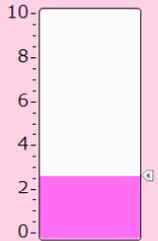
CLEAR /
RESET

Power Down
OFF
2016/08/30
10:11:10

TREK VAC FIL WATER AUX

Spellman: IH
Current [A]

LOCAL
REMOTE

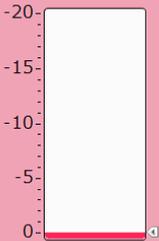


2.61 A

Assist OFF
Target 2.700
Delta 2.0E-3 A/s

Spellman: HV
Voltage [kV]

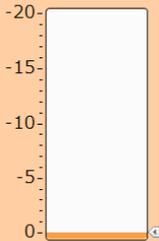
LOCAL
REMOTE



-0.00 kV

Assist OFF
Target 0.000
Delta 1.0E-1 kV/s

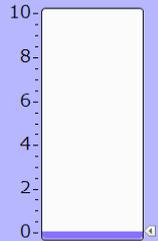
Trek Amp.: VA
Voltage [kV]



0.00 kV

Assist OFF
Target 0.000
Delta 1.0E-1 kV/s

XXX
Phys. [Arb.]



0.04 V

Assist OFF
Target 0.000
Delta 1.0E-1 V/s

Oxford IPS: BC
B-Field Strength [T]

GPIB- Connection
LOCAL
REMOTE

7.1600 Tesla

SET-POINT 7.1600
SET-RATE 0.5000

HOLD- GOTO- GOTO- QUENCH-
ZERO SET

Data Acquisition / Pulse Generation /
Data Recording

Trigger Pulse Repetition 2.0 Hz
Int. Trig. 1.0 Hz
Duration 1.0m s
Wave Forms Trend Data

Path to the storage folder
C:\Users\PID\Desktop#\OUT
File name (Trend Data)
PARM.txt

PID Control: IC (IH)

TARGET IC 400.0 mA

GAIN LIMIT ADV DISP
OUTPUT LIMITS
MAX. 2.75E+0 A
MIN. 2.60E+0 A
MAX. RATE 8.00E-2 A/s

PID Control: P (VA)

TARGET P 0.000 W

GAIN LIMIT ADV DISP
INITIALIZATION
P-GAIN 7.00E-3
I-TIME [min] 5.00E-2
D-TIME [min] 3.00E-1

Measured Values
(Averaged)

IH_A 2.64E+0
HV_kV -1.41E+1
VK_kV -1.31E-2
VA_kV -6.99E+0
IK_mA 3.64E+2
IC_mA 4.02E+2
IB_mA -1.72E+1
IA_mA 6.32E+0
VAC 1.45E+0
PYR_V 7.25E-1
PWM 4.92E-1

Additional Informations

IG_A 5.00E+1

ヒータ
電流

カソード
電圧

アノード
電圧

GUN
磁場

SCM
磁場

パルス制御, データ計測

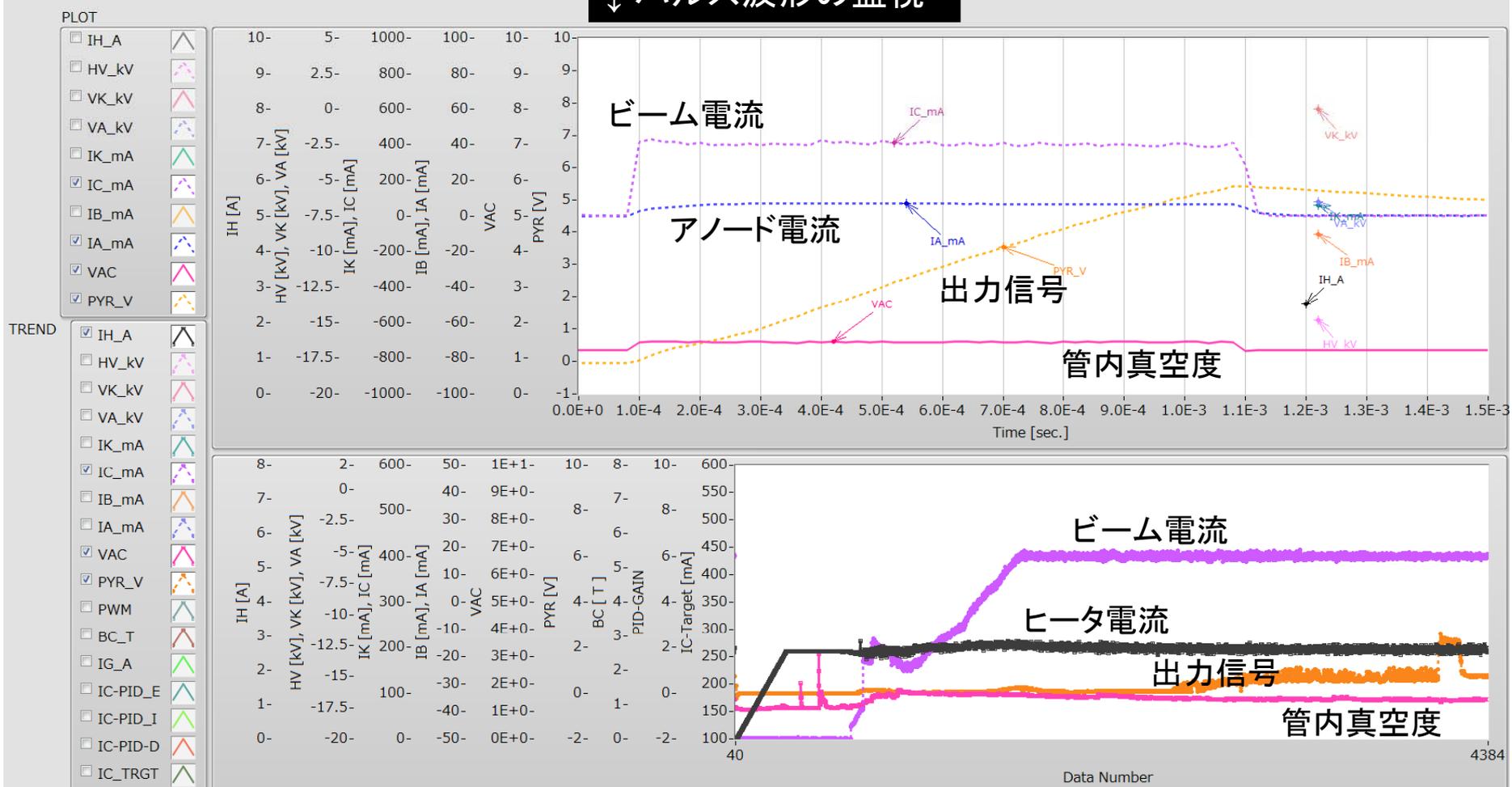
計測値表示

ビーム電流
PID制御

出力の
PID制御

インタフェースの構築（諸量の時間変化の監視）

↓ パルス波形の監視



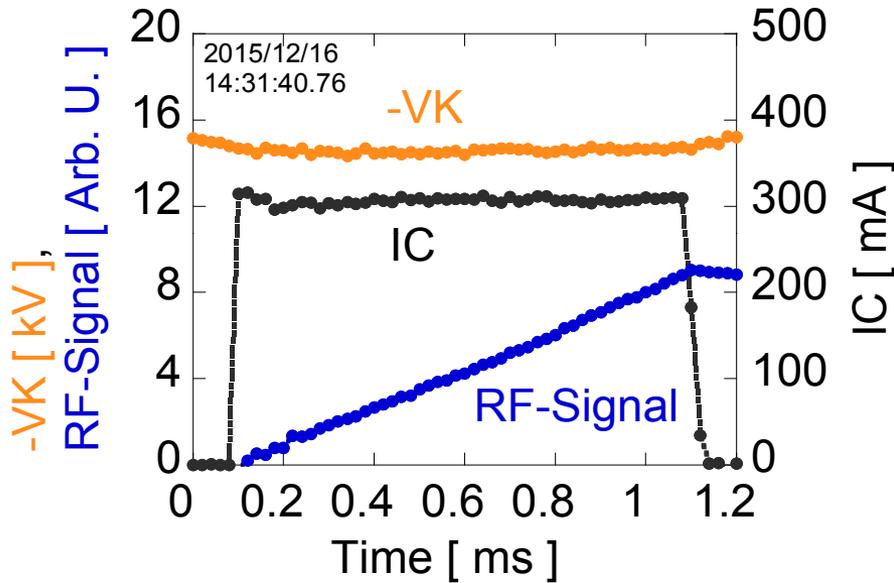
↑ 表示パラメタの選択

↑ 各パルス波形における代表値の時間遷移の監視

ジャイロトロン発振の自動制御に向けて

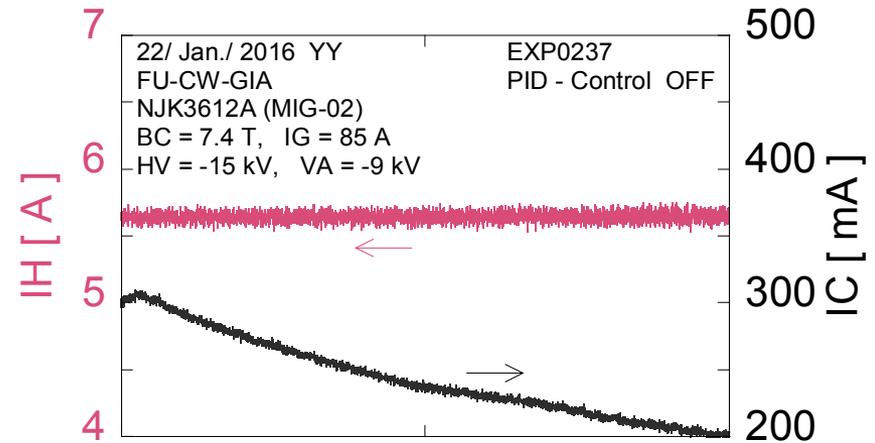
発振周波数, 出力 ▶ 調節, 長時間の安定制御の自動化が期待される.

発振出力の安定化における課題

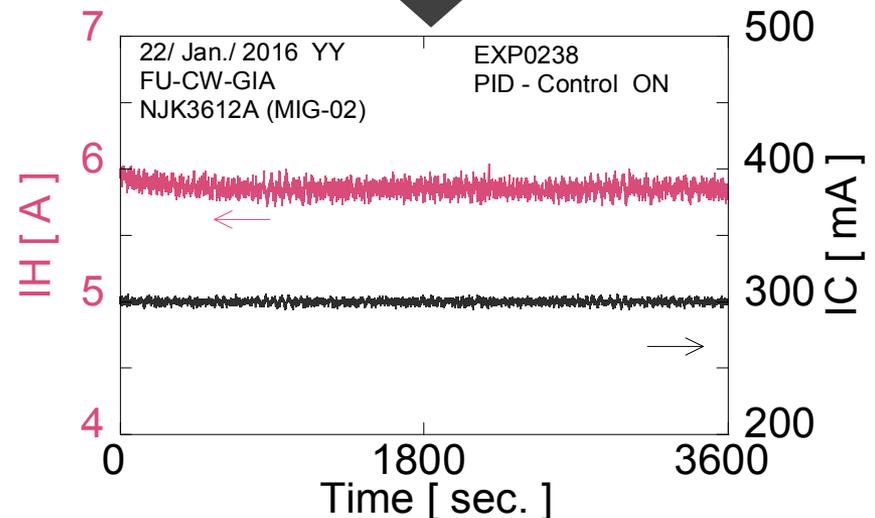


出力(P)
= 効率(η) · 電圧(VK) · 電流(IC)

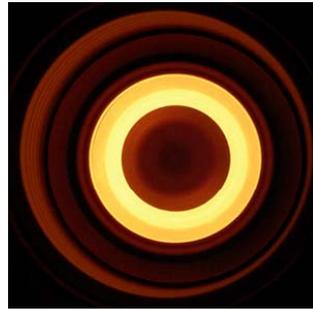
IC はヒータ電流 (IH) により調節されるが, 発振管の外気温等にも影響を受け, 時間的に変動してしまう.



IC が一定となる様, IH をPID制御



PID 制御による電流 (IC) の自動調節



Side-view
熱カソード

Top-view

ヒータ点灯

ヒータ電流の変更

- カソードの温度変化
- 熱電子放出の変化

応答に時間遅れがある。

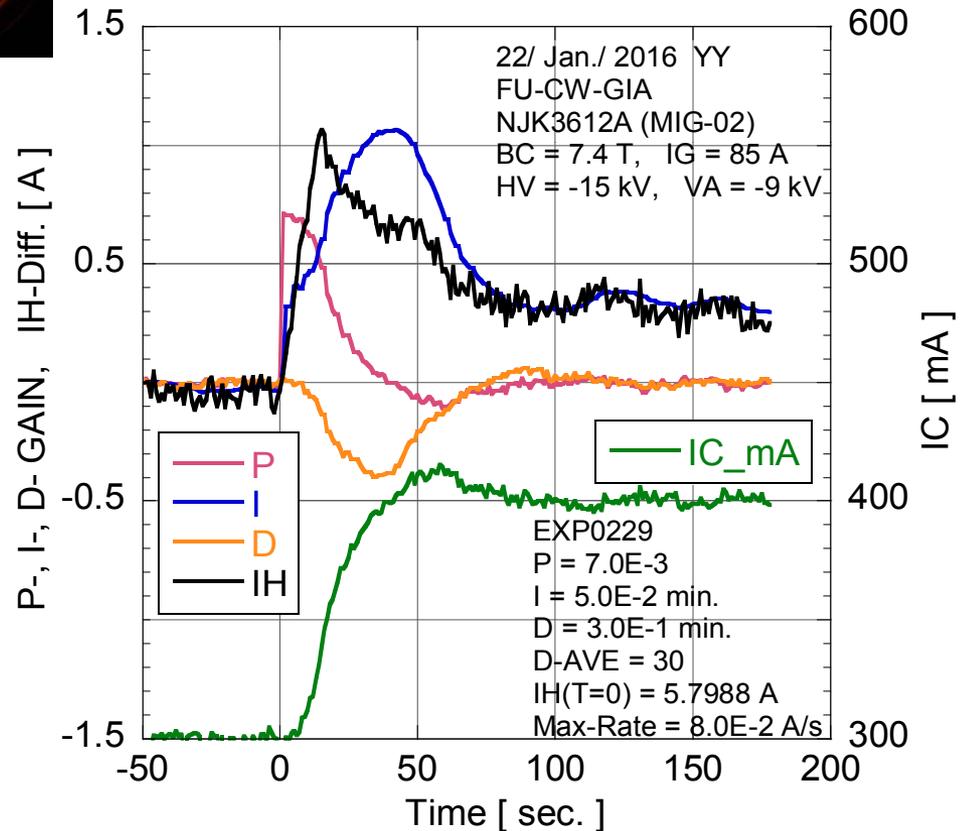
手動による温度の安定維持は困難。

$$m(t) = [P \cdot e(t)] + \left[\frac{P}{I} \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + m_0 \right] + \left[P \cdot D \cdot \frac{d}{dt} e(t) \right]$$

$m(t)$: 操作量 (ヒータ電流: IH)

m_0 : 操作量の初期値

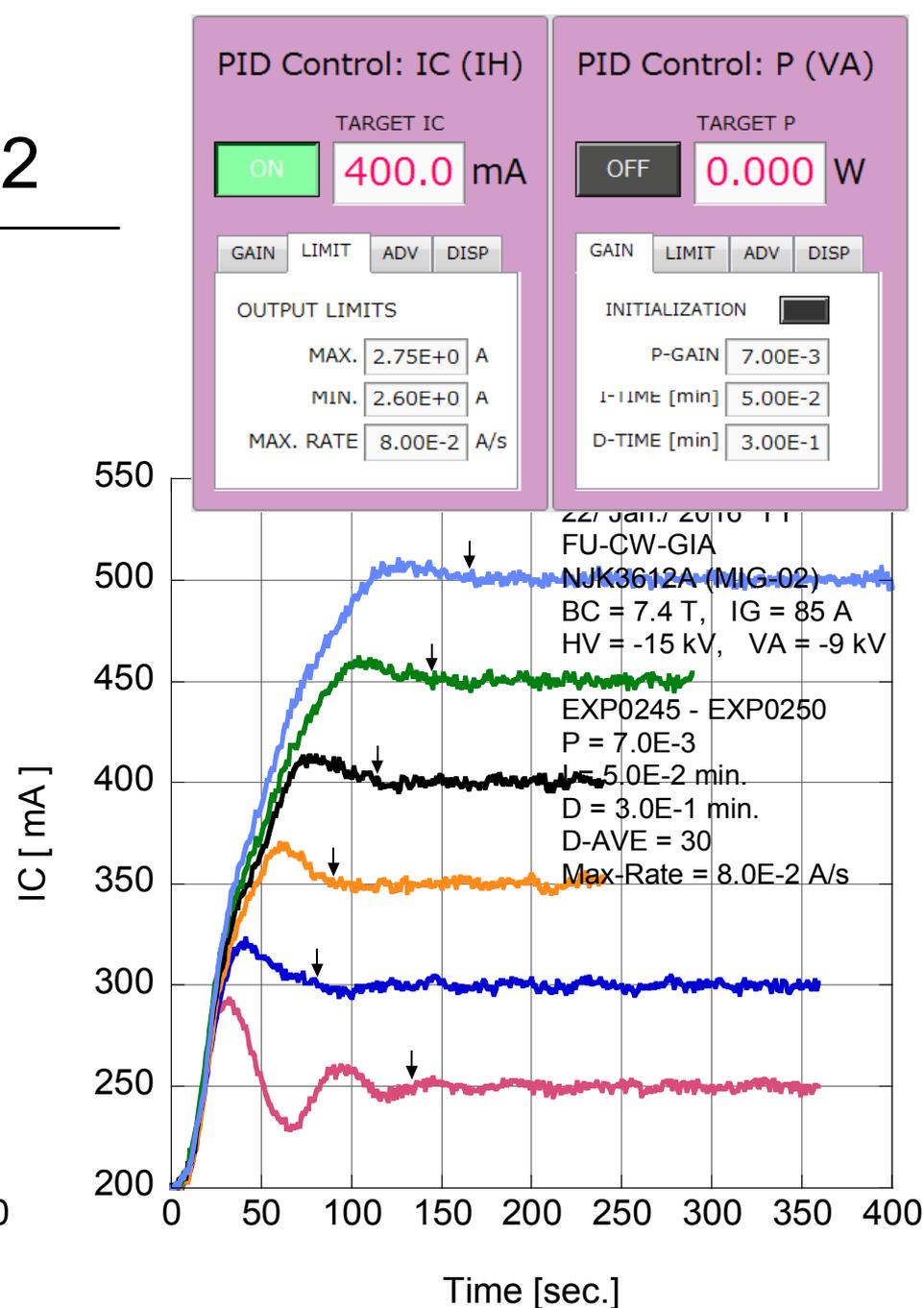
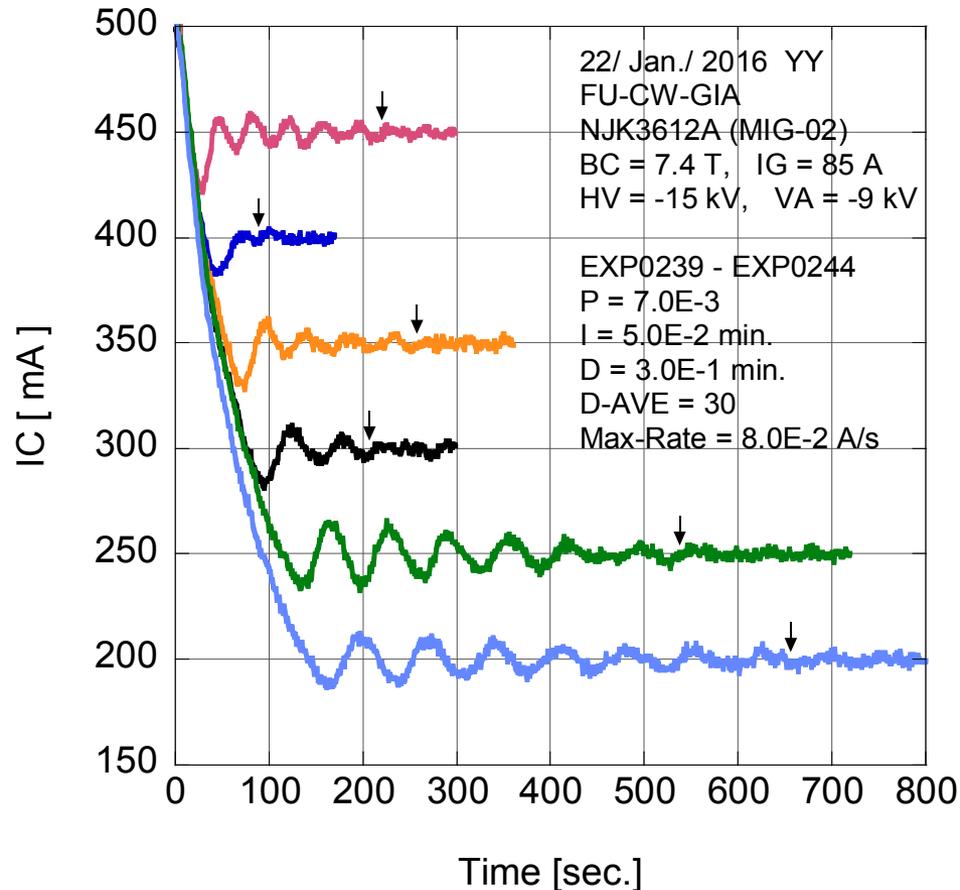
$e(t)$: 制御偏差
(IC の目標値 - 現在値)



IH の時間変化率に制限有 (< 0.08 A/s)

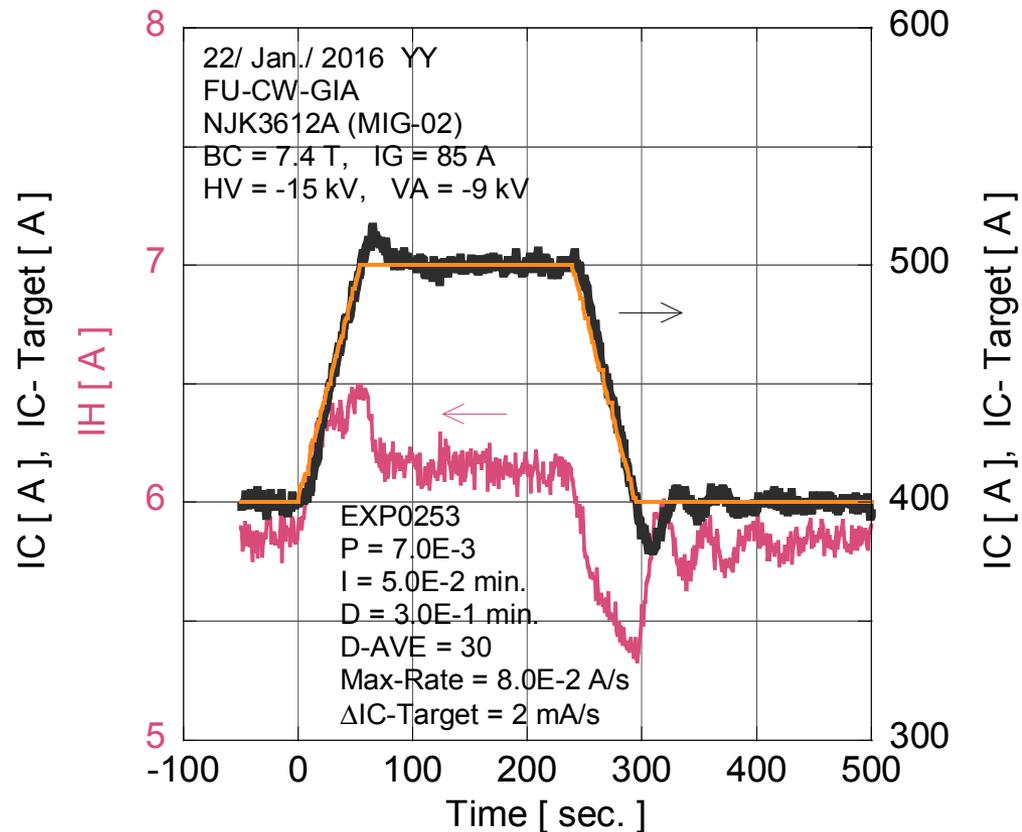
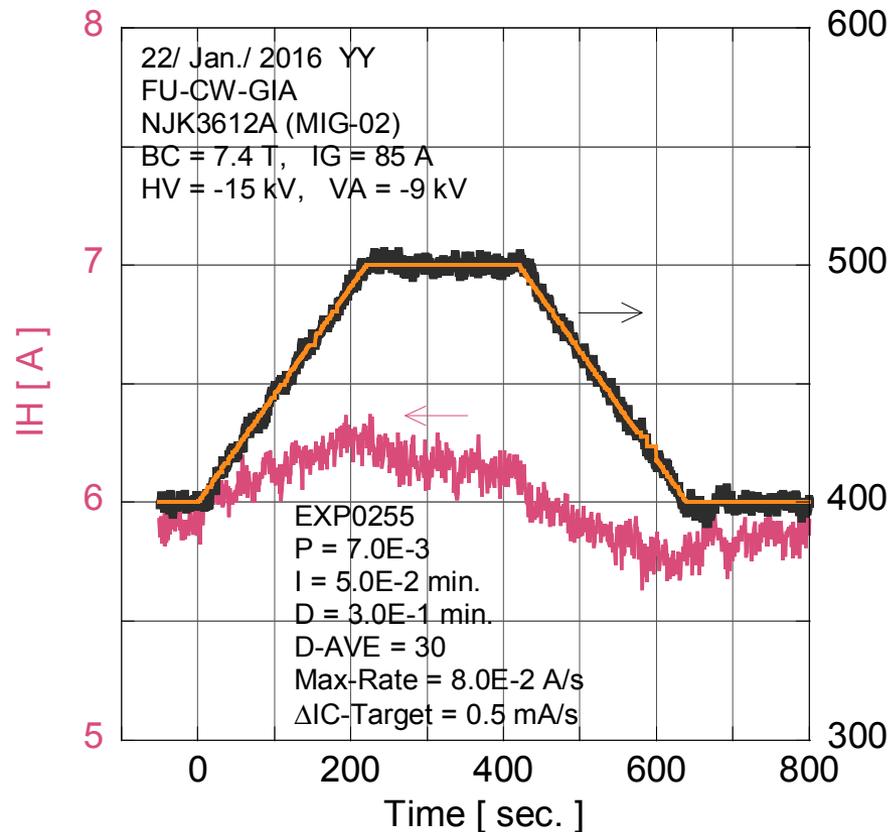
PID 制御による 電流 (IC) の自動調節 2

目標値が異なる場合の IC の時間変化



PID 制御による電流 (IC) の自動調節 3

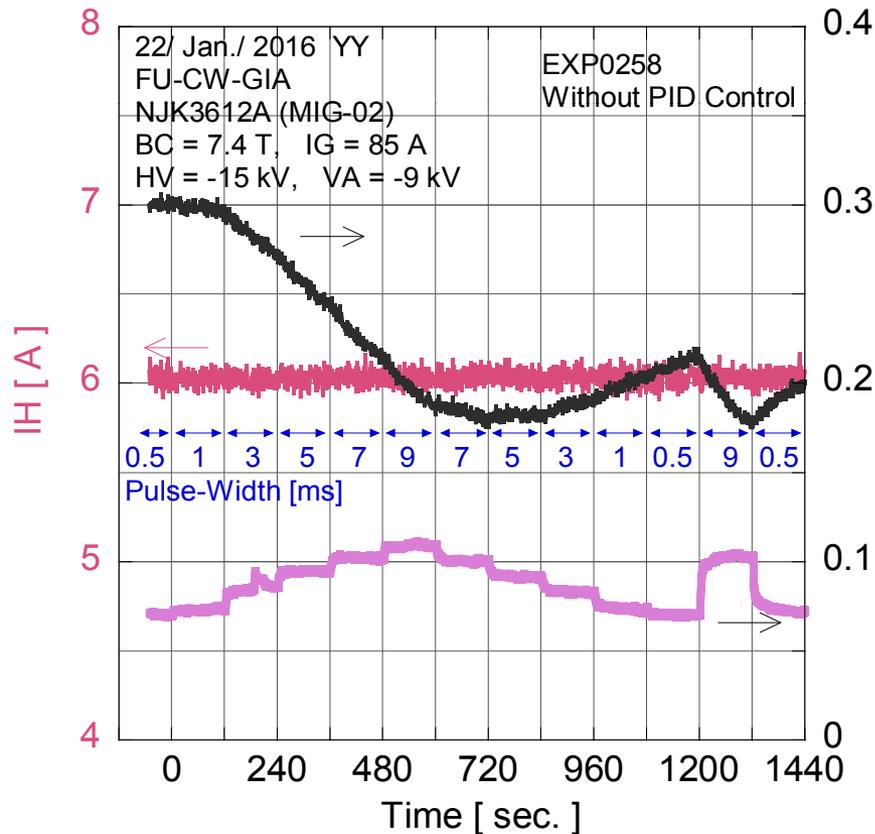
目標値が時間変化する場合の IC の追従性



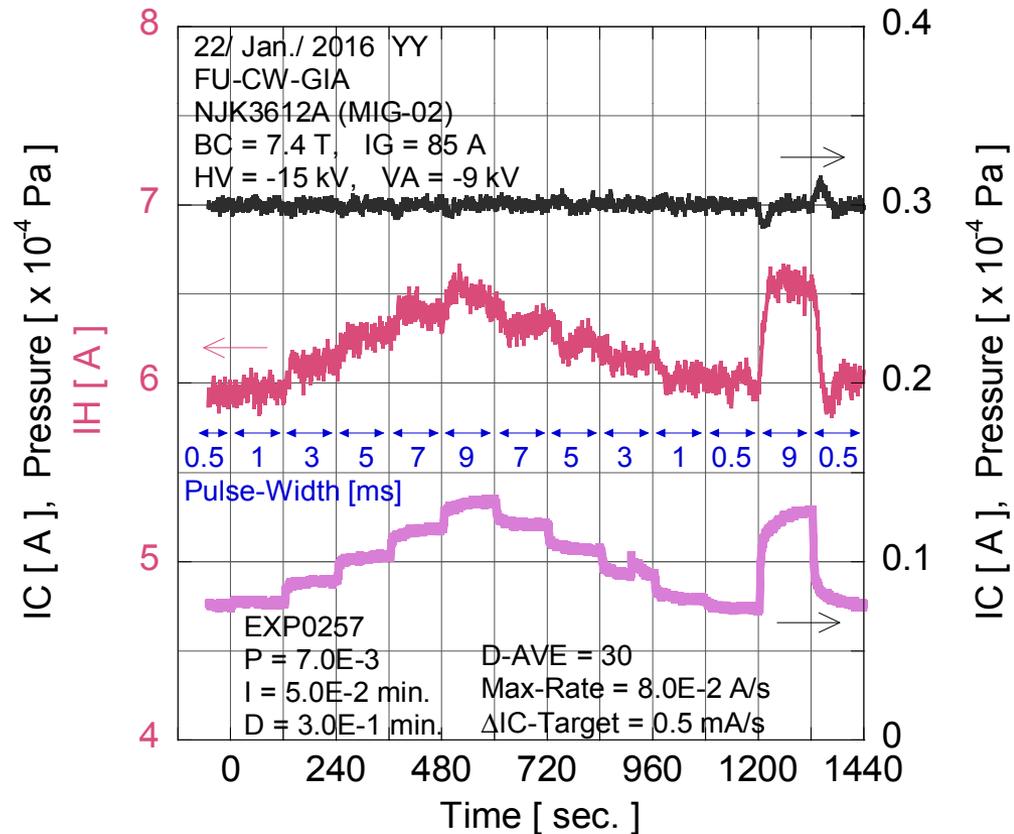
PID 制御による電流 (IC) の自動調節 4

長時間の安定化制御 (外乱がある場合)
 発振パルス幅を伸長 → コレクタからのガス放出が増大し真空劣化
 → カソード表面が汚染され, 熱電子放出が阻害される.

PID 制御 OFF



PID 制御 ON



まとめ -2

ジャイロトン制御の自動化を目指し、遠隔操作および状態遷移を監視するための機器を構築した。

- ▶ 多チャンネルのアナログ – デジタル 変換器 (ADC) を導入, 各種の電源装置群を計算機へ接続し, 遠隔操作を可能とした.
- ▶ 問題発生時に, ジャイロトン発振を自動停止する機能を作成した.
- ▶ 運転員一名で全ての操作, 監視が可能となる制御盤を構築した.
- ▶ 複雑な操作を補助する機能を追加し, よりユーザフレンドリーな装置とした.

今後の課題

より高速の ADC の導入, PID 制御の最適化により, 制御の高速化を図る.