

LHDにおけるECRHシステムのアップグレード

高橋裕己
核融合科学研究所

- 導入
- 77 GHzジャイロトロンと周辺コンポーネント
- アノード電源改造によるフレキシブルアノード電圧制御
- 77 GHz-1.5 MWジャイロトロンの導入
- まとめ

導入

77 GHzジャイロトロンの新規導入

LHDにおいてはこれまでに計7台のジャイロトロン(**82.7, 84, 168 GHz, 総パワー: ~2.5 MW**)が運用されている。プラズマパラメータの伸張、実験のフレキシビリティの向上を目的とし、より高出力の77 GHzジャイロトロンの導入が進められている。

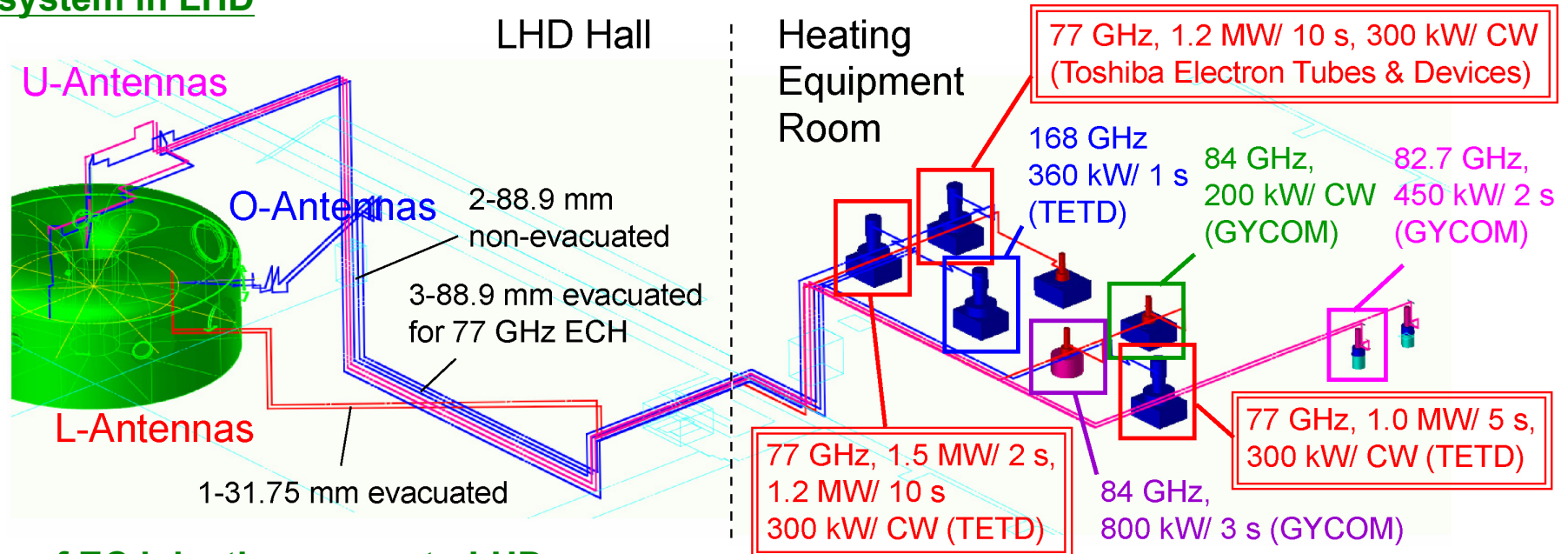
77 GHzジャイロトロンの現状

- 2008年までに2台の77 GHz-1 MWジャイロトロンが導入され、プラズマ実験に供されている。
- ジャイロトロン運転時の安定性・フレキシビリティの向上・効率の改善のためにアノード電源を改造し、**アノード電圧を外部制御できるようにした。**
- 2009年には**1.5 MW管**が導入され、発振試験を行いつつ、プラズマ実験にも使用されている。

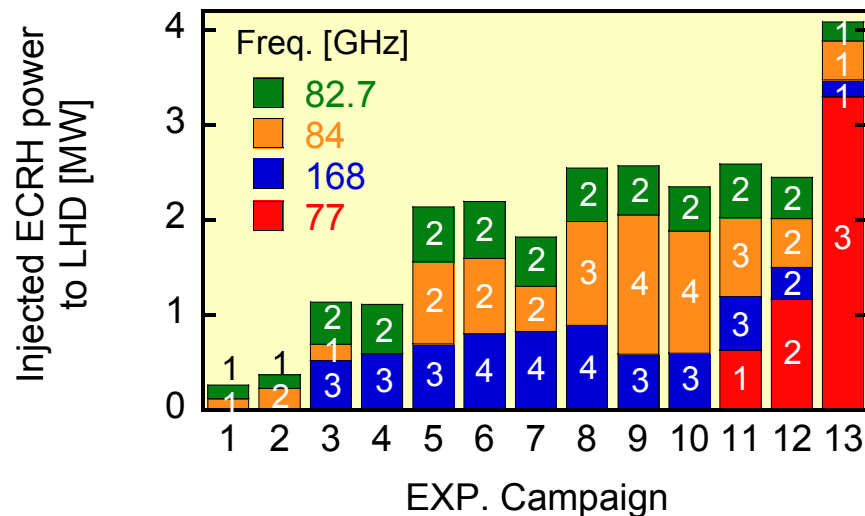
77 GHzジャイロトロンと 周辺コンポーネント

LHDにおけるECRHシステム

ECRH system in LHD



History of EC injection power to LHD



- 7台のジャイロトロンが稼動.
- 年毎に既設ジャイロトロン77 GHz管への交換を行っている.
- 現在までに3台の77 GHz管の導入が完了した.

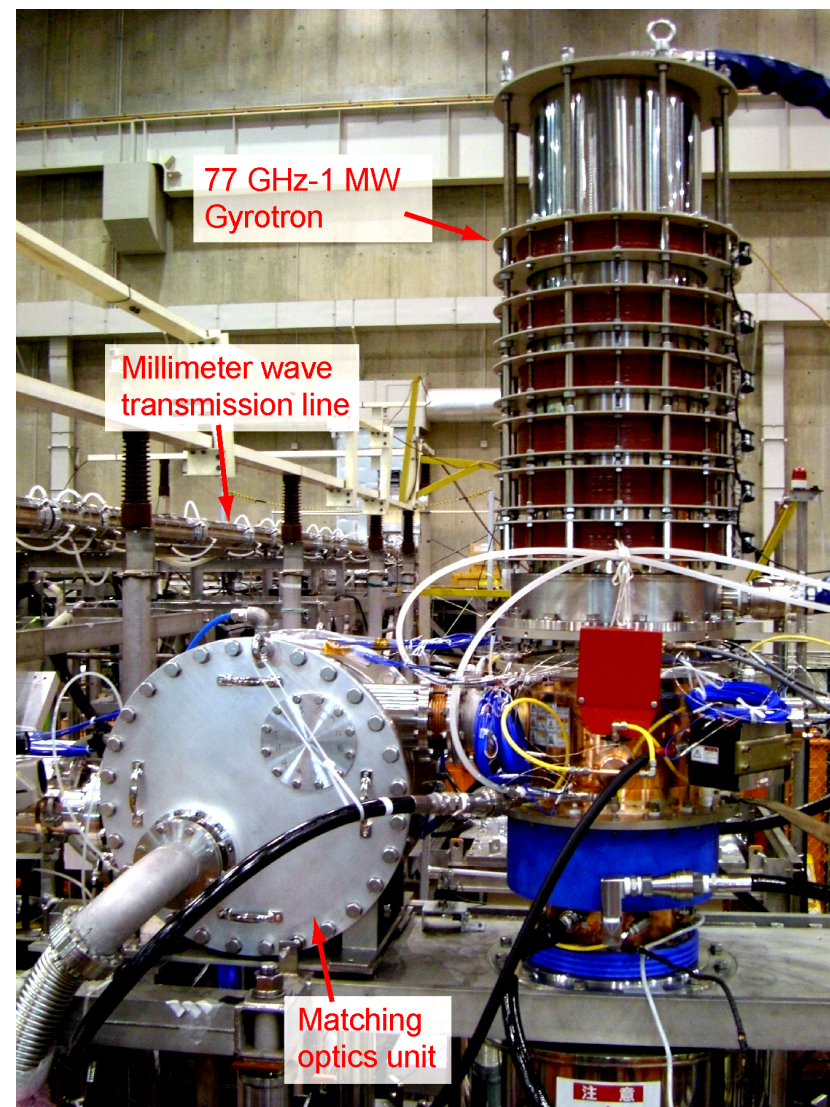
77 GHz-1 MWジャイロトロンの導入

NIFS、筑波大学、JAEA、東芝電子管デバイスとの共同開発研究として、2006年から、LHDへの1 MW-77 GHzジャイロトロンの導入が進められている。

プラズマ実験への寄与

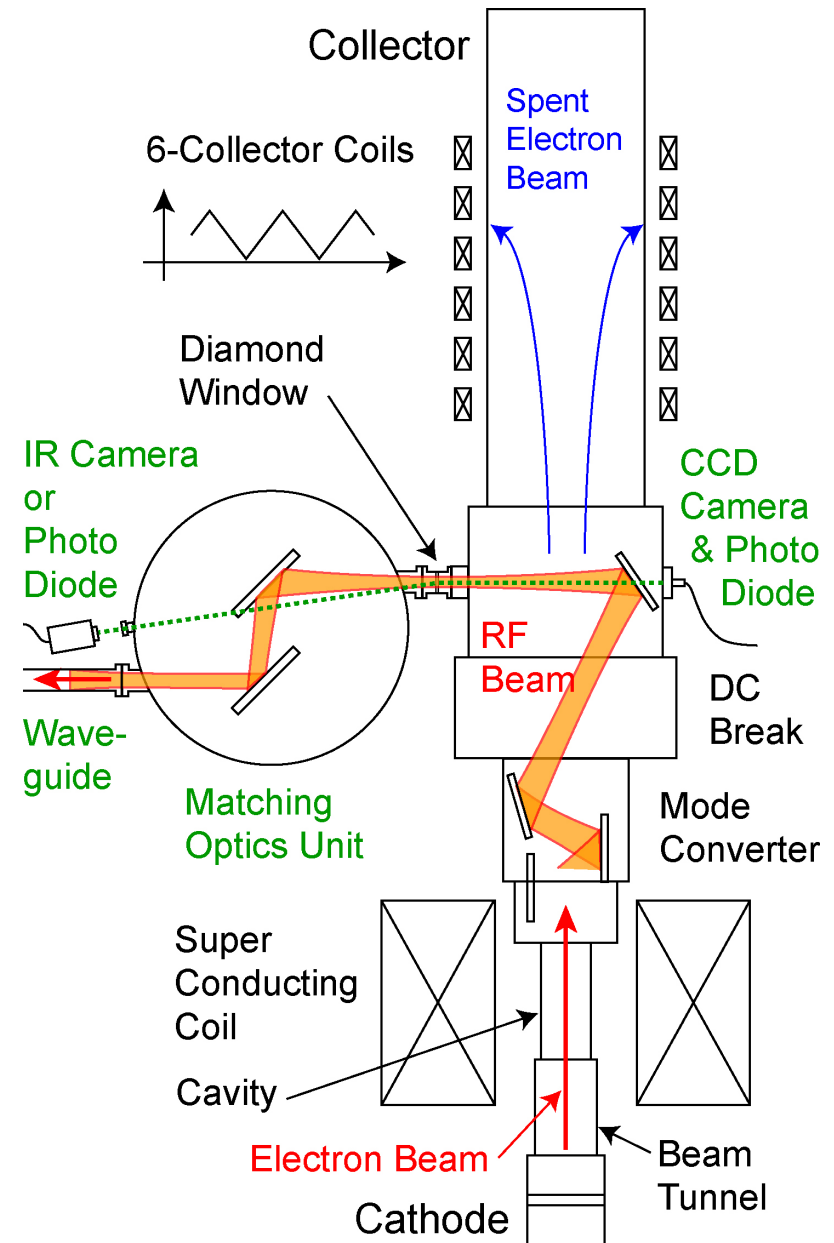
- コア領域での電子温度・圧力の向上.
- 径電場/ 径方向輸送のローカル制御.
- ITB形成に対する局所加熱効果の研究.

項目	設計値
発振周波数	77 GHz
出力/ パルス幅	(#1) 1.0 MW/ 5 s, 300 kW/ CW (#2) 1.2 MW/ 10 s, 300 kW/ CW (#3) 1.5 MW/ 2 s, 1.2 MW/ 10 s 300 kW/ CW
キャビティモード	TE _{18,6}
MIG型	Triode
コレクタ型	CPD
出力窓	CVDダイヤモンド



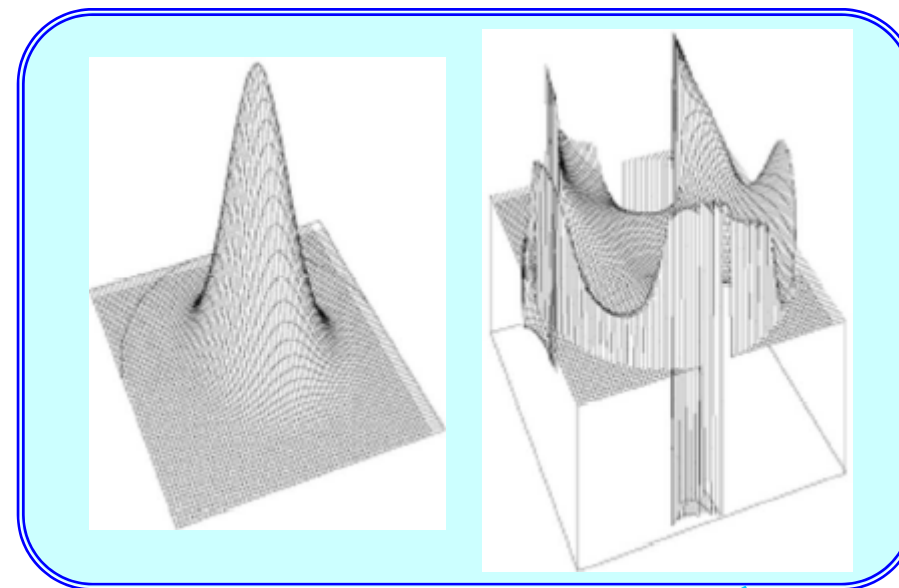
ジャイロトロン周辺コンポーネント

- **出力波整合器**
(Matching optics unit, MOU)
 - > RFビームの位相再構成、ビームのシェイピング
- **フォトダイオード**
 - > アークセンサー
- **IRカメラ**
 - > ダイヤモンド窓の温度分布測定
- **ダミーロード**
 - > パワー評価
- **88.9 mm 真空導波管**
- **導波管スイッチ**
 - > 本体伝送路とダミーロードの切り替え
- **パワーモニターマイターバンド**
 - > 水平電場計測による伝送パワー評価

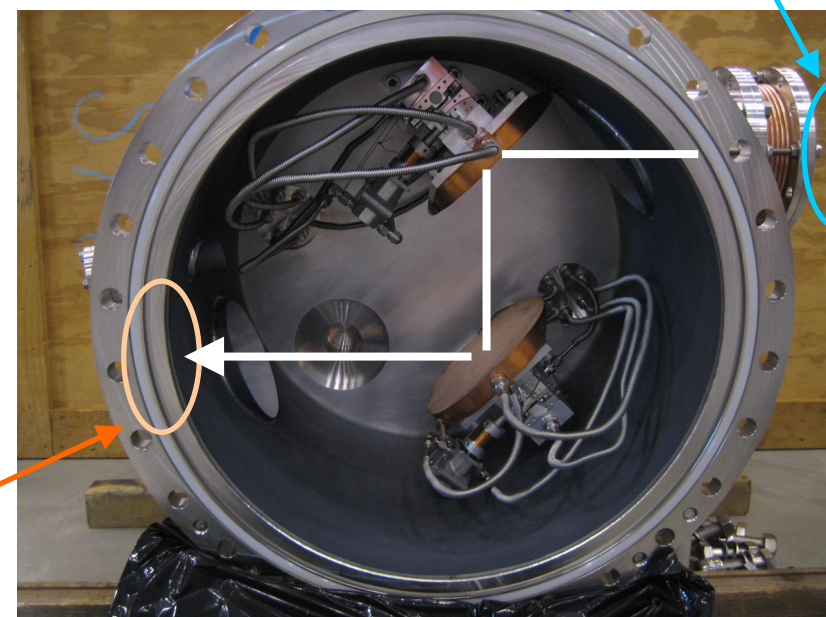
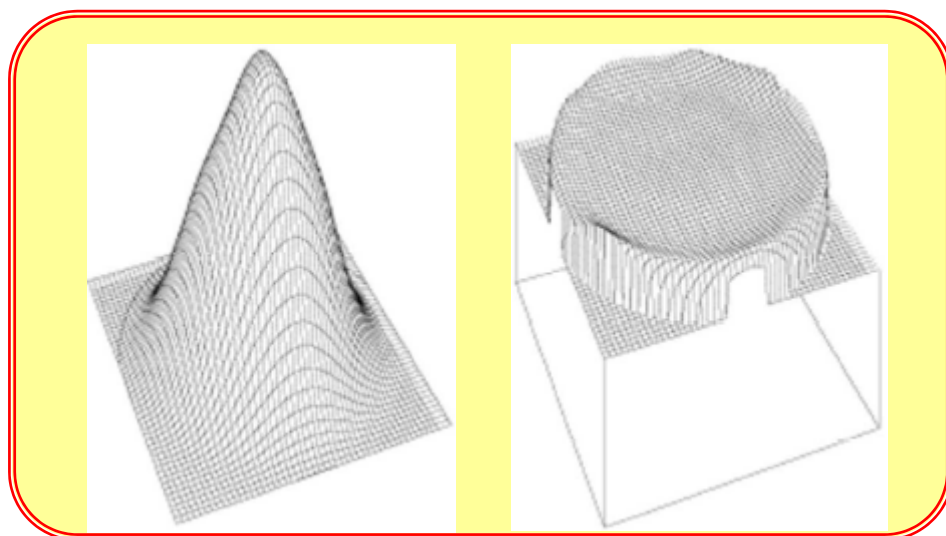


出力波整合器 (MOU)

- 真空容器と二枚のCuミラーで構成.
- 容器とミラーは水冷.
- ミラー角は真空を破ることなく外部から調子可能.
- 浮遊RF吸収のために内壁にTiO₂をコーティング.



Items	設計値 [%]	実評価値 [%]	
		#1	#2
HE ₁₁ 純度	99.2	-	-
伝送効率	99.6	-	-
総合効率	98.8	> 93	> 98

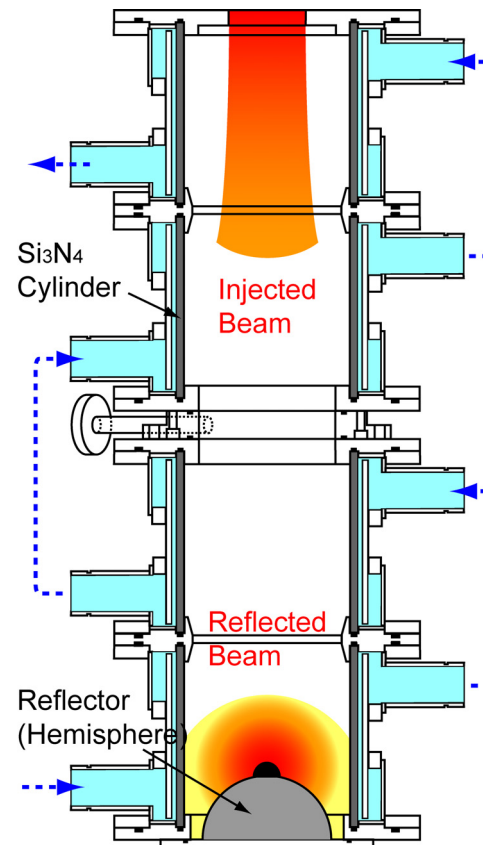


ダミーロード

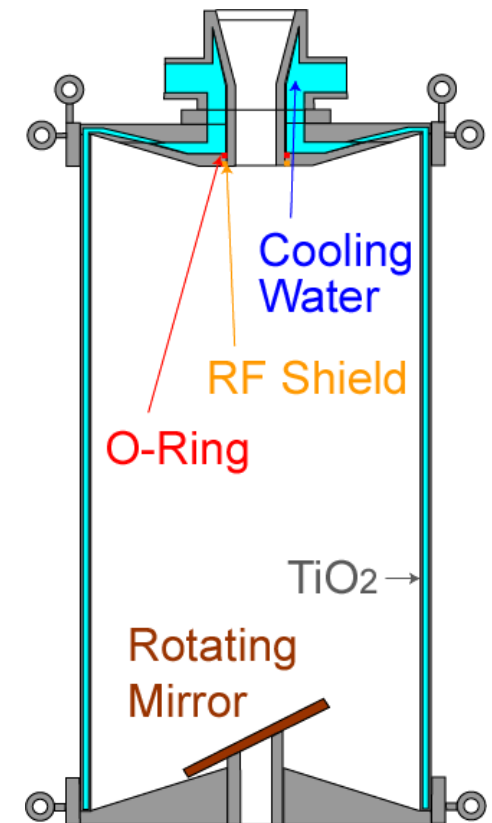
コンディショニングのために、二台のダミーロードを使用。反射波の吸収のために、ダミーロード上部にプレダミーを設置。

製作元	NIFS	Calabazas Creek
ジャイロトロン	77 GHz #1	77 GHz #2 (-> #3)
RF吸収機構	Si ₃ N ₄ を透過させ水に直接吸収	内壁にコーティングされたTiO ₂ で吸収
RF反射機構	底部に固定されたSUSの半球	波状表面を有する回転Cuミラー
サイズ	L973 x φ214 (Si ₃ N ₄ : L214-217 x φ167 x t10)	L1680 x φ600
負荷実績	1 MW/ 5 s 110 kW/ 560 s	1 MW/ 5 s, 100 kW/ 1800 s
冷却水流量	185 l/min	164 l/min

CW-Dummy Load
designed by NIFS



CW-Dummy Load
designed by
Calabazas Creek Res.



77 GHzジャイロトロンの運転実績

77 GHzジャイロトロンの運転実績

➤ 長パルス

#1: **0.11 MW/ 560 s**

#2: **0.10 MW/ 1800 s**

➤ 1 MW/ 短パルス

#1: **1.01 MW/ 5.0 s**

#2: **1.02 MW/ 5.0 s**

ミッションクーリングによる**ビーム電流低下**
-> **時間的な出力の低減**, 異常発振停止

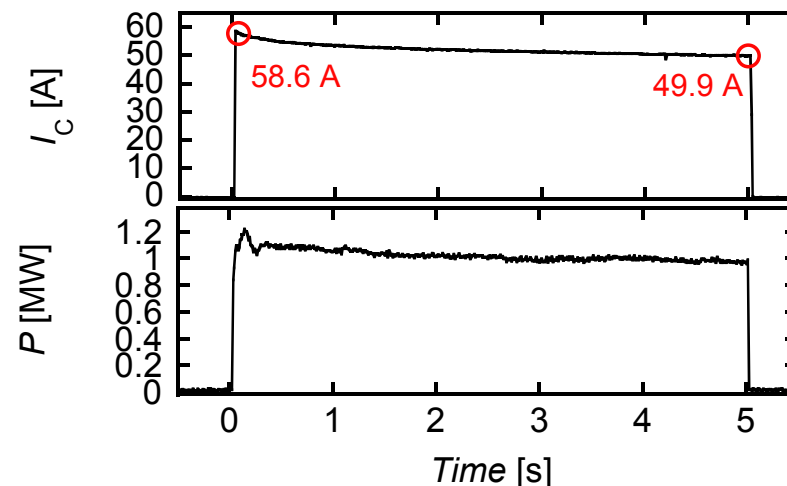
➡ **ヒーターパワーのフィードバック制御、或いは
プレプログラミング制御が必要**

➤ 長パルス運転 -> マニュアル制御

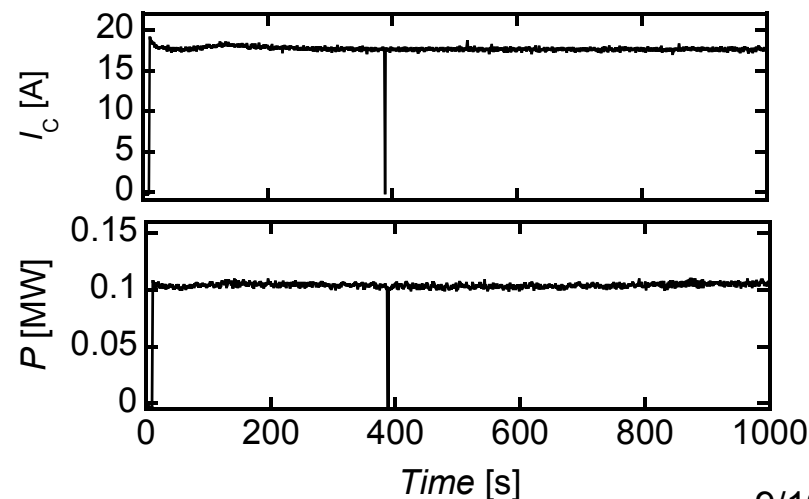
(1) 発振の立ち上がり: ヒーターパワー増加.

(2) I_C 回復後: 通常値にセット.

1.02 MW/ 5 s



0.10 MW/ 1800 s



アノード電圧外部制御

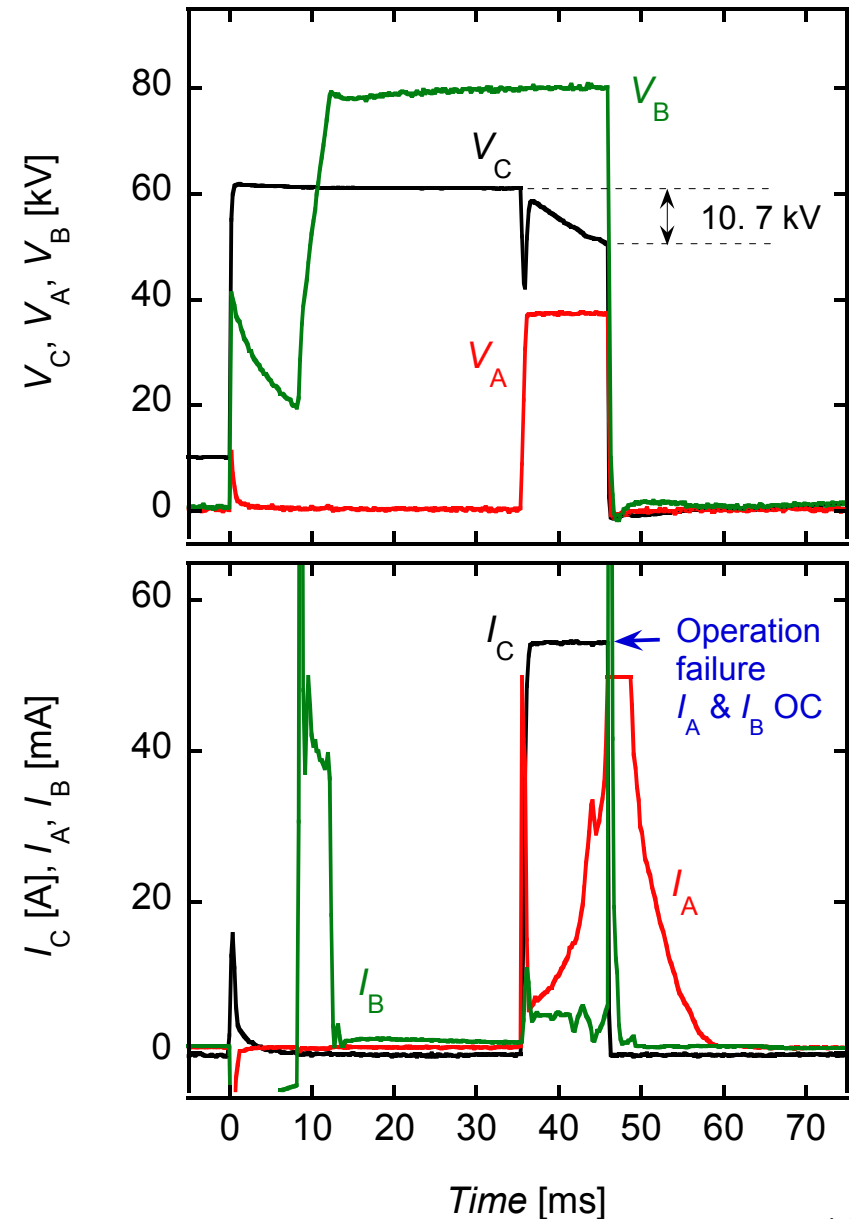
RFスタートアップ時における V_C ドロップ

コレクタ電圧ドロップ問題

コレクタ電圧制御を行っているサイリスタの応答時間が遅い(~100 ms)ため、発振開始時に8~16 kV程度の電圧降下が常に発生.



- 過剰なディプレッション電圧印加.
- 運転パラメータを制限.
 - > より低い V_C に合わせたパラメータ設定を余儀なくされる.



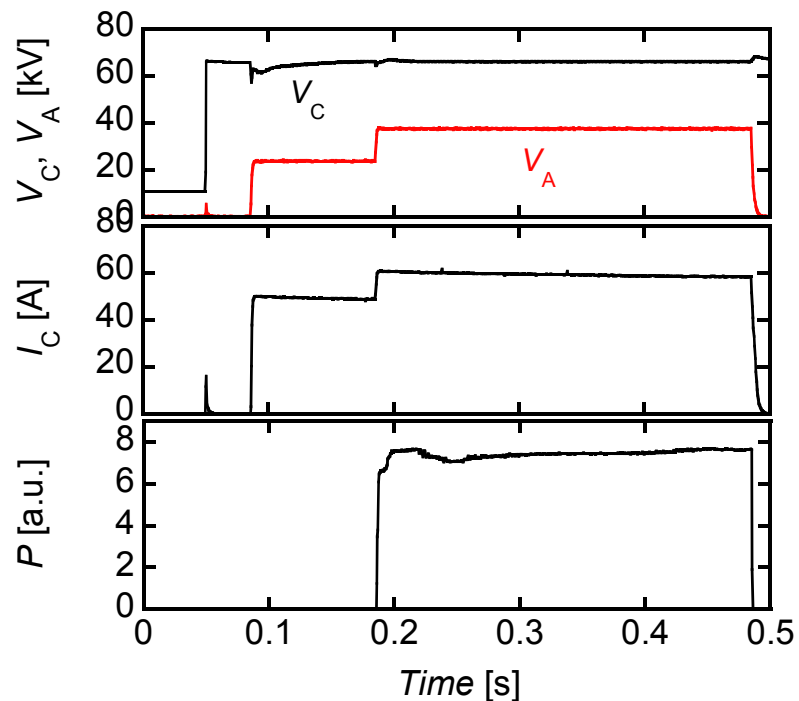
アノード電源改造による V_A 外部制御

#2-77 GHz管用のアノード電源を試験的に改造を行い、アノード電圧を外部制御できるようにアップグレードした。

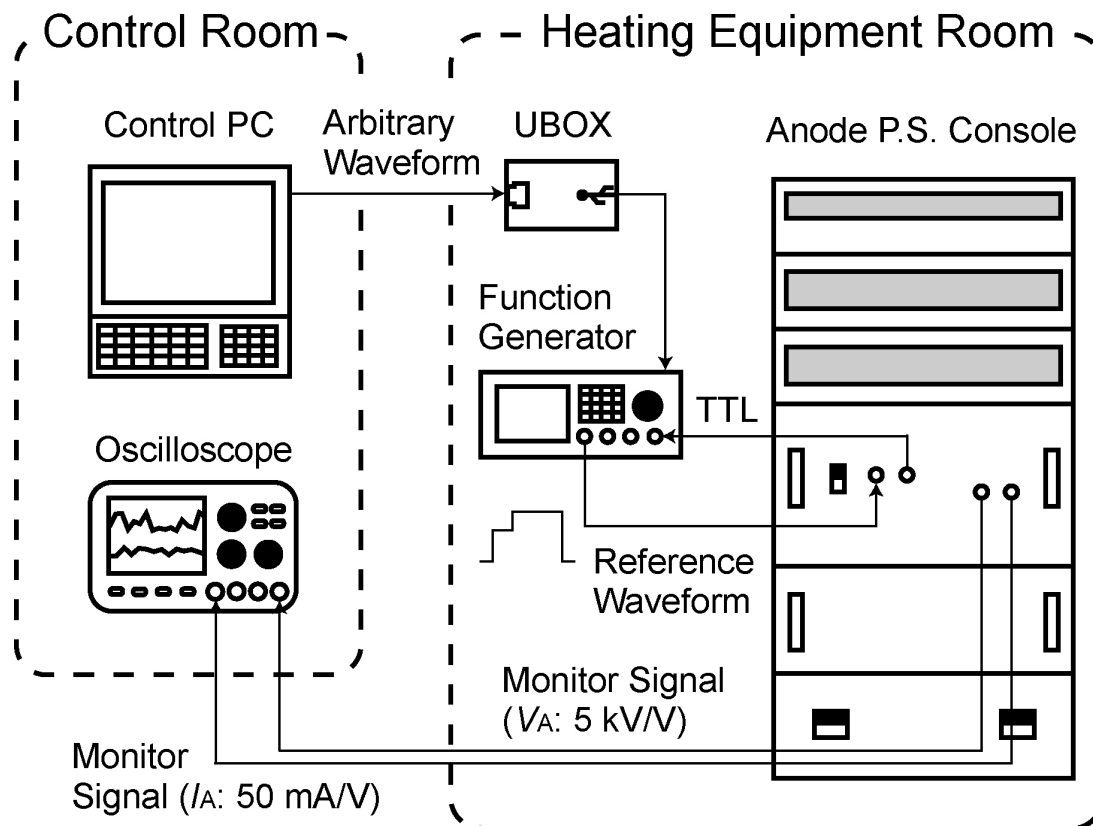
-> V_C ドロップフェイズでの V_A 二段階立ち上げ.

0-100 ms: 発振が起こらない程度の低いアノード電圧

after 100 ms: 規定のアノード電圧



→ 発振時の V_C ドロップの低減に成功.



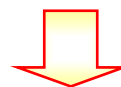
V_A 二段階立ち上げによる出力・効率の改善

アノード電圧二段階立ち上げ運転で、運転パラメータの再調整・発振特性の再評価を実施した結果、出力・効率をこれまでより向上させることに成功した。

V_A : 39.5 -> **39.7 kV**
 I_M : 102.3 -> **102.08 A**
 V_{CPD} : 18 -> **26 kV**

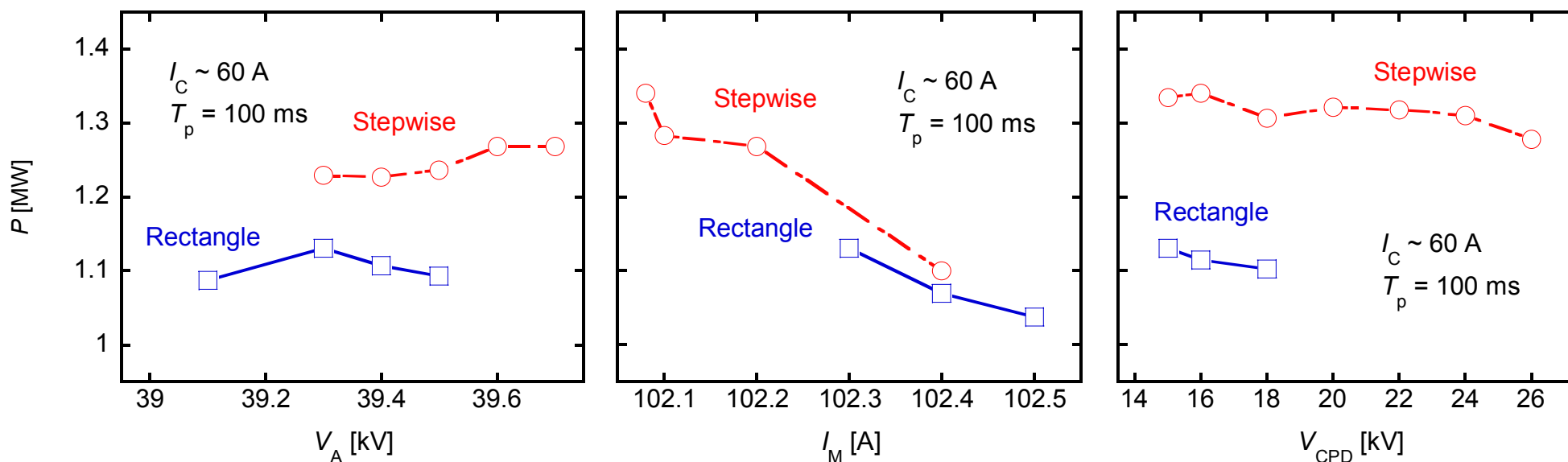


高出力、高効率化



1.31 MW/ 100 ms, 38.2 %

($I_C = 61.3$ A, $V_C = 56$ kV)



Achievement of 1.3 MW/ 1 s oscillation

安定かつ高出力運転のためのパラメータ調整を行った。

(1) 低ディプレッション電圧(高 V_C).

-> 発振効率は低減するが安定.

出力は大きくは変わらない.

(2) 高アノード電圧.

-> ピッチファクターが増加し、出力も向上.

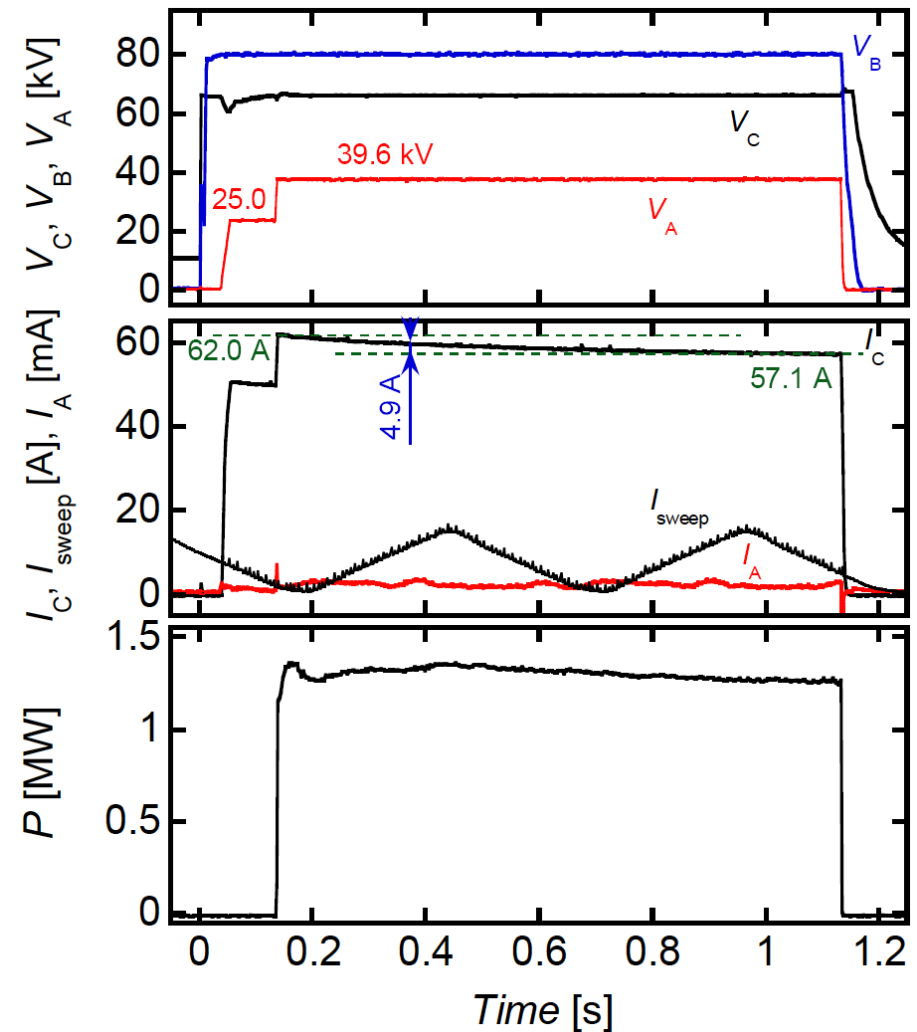
(3) 低磁場.

-> 出力向上.



1.30 MW/ 1.0 s, 34.0 %

($I_C = 58.9$ A, $V_C = 65$ kV)



1.5 MW-77 GHz ジャイロトロン

1.5 MW管のデザイン

2009年6月から77 GHz-1.5 MW管の導入が開始された。

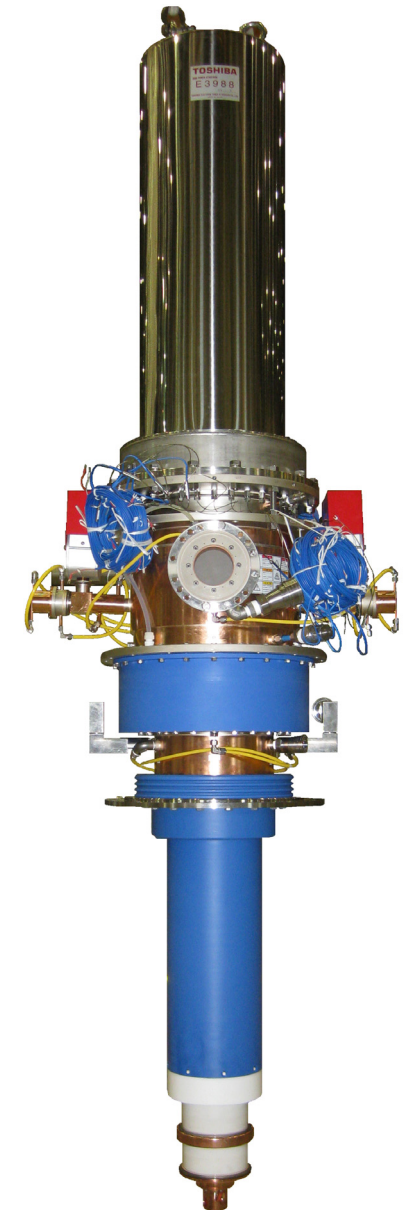
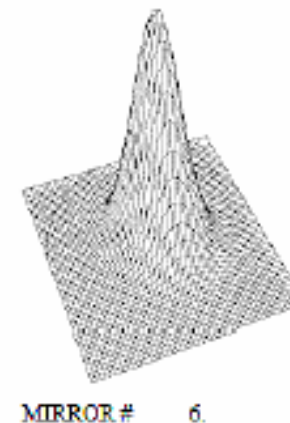
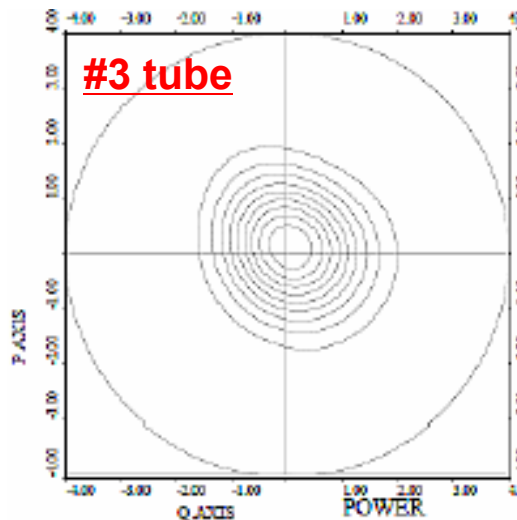
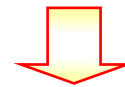
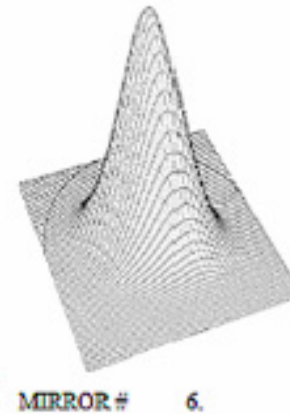
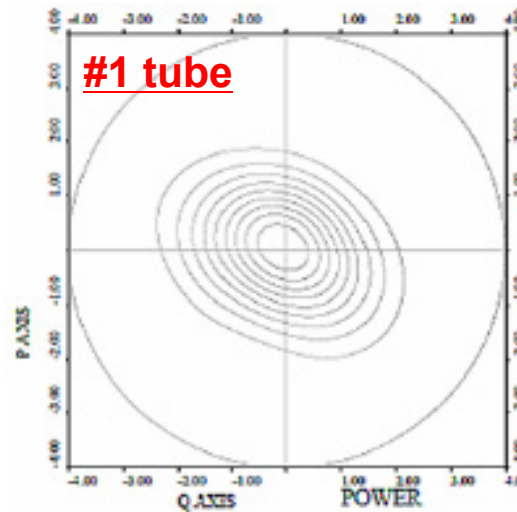
#1, #2号管からの主な変更点

(1) 発振効率改善のためのピッチ角増加

- エミッションベルトの面積を増加.
- カソード表面角を変更し、ビームのラミナー性を向上.

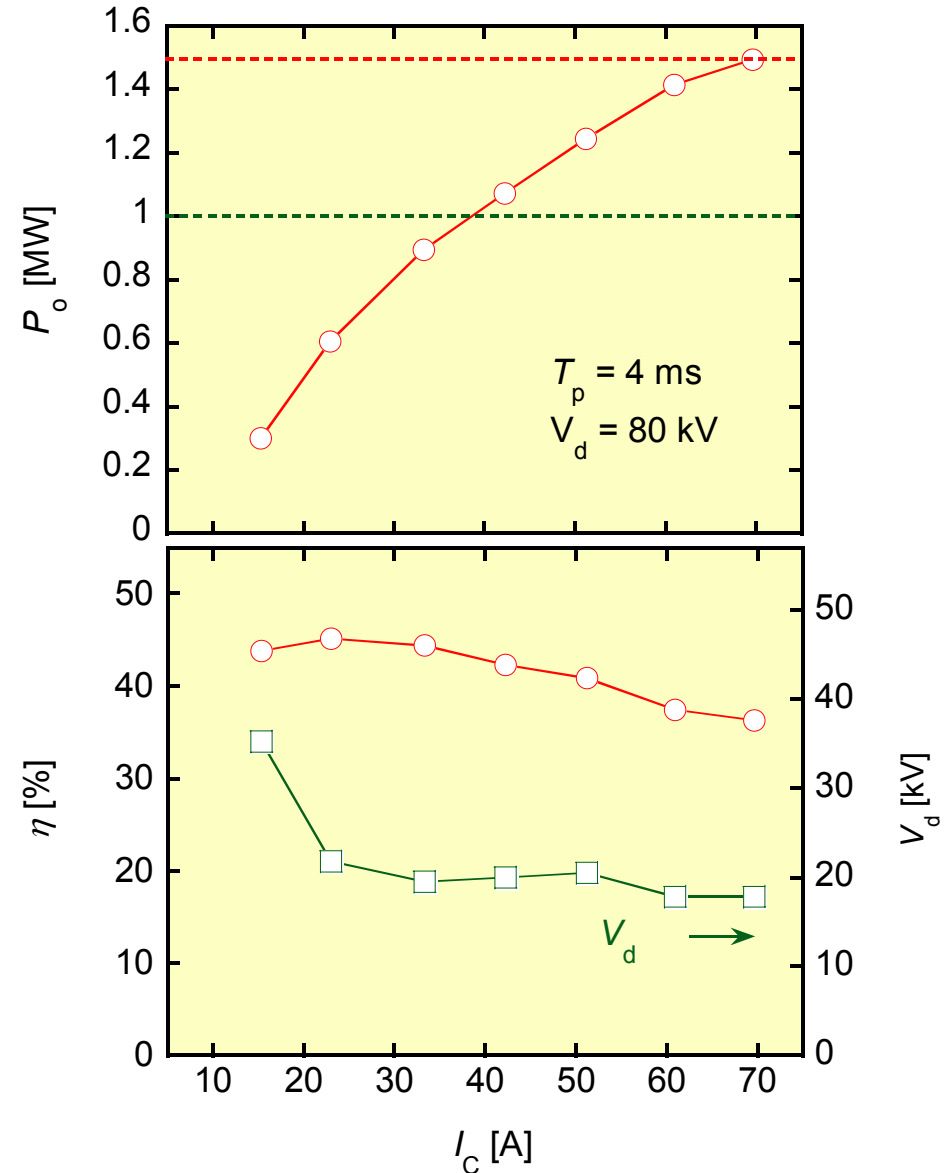
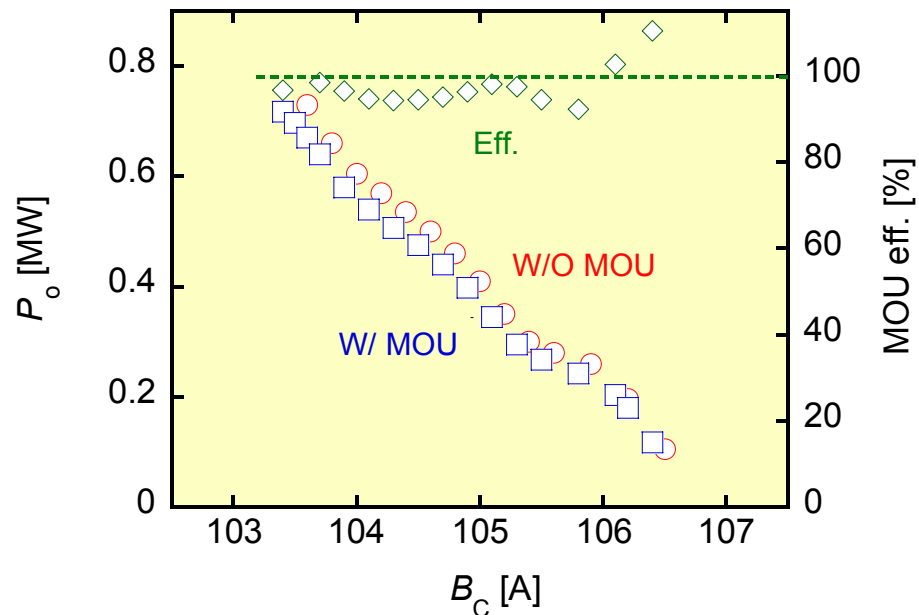
(2) ビームの円形度の向上

- 放射器とモードコンバータ設計の変更
 - > 窓エッジの電界を減少させアーキングのリスクを低減.



三号管 短パルス試験結果

- **発振特性評価**
-> 規定の周波数でレギュラーモードで発振していることを確認。
- **短パルス試験**
-> **1.5 MW/ 4 ms.**
- **MOU設置と特性評価**
-> ミラー角調整を完了。総合伝送効率が96 %程度であることを確認。
- **CPD試験**
-> **0.6 MW発振時、最大の45 %の発振効率を確認。**



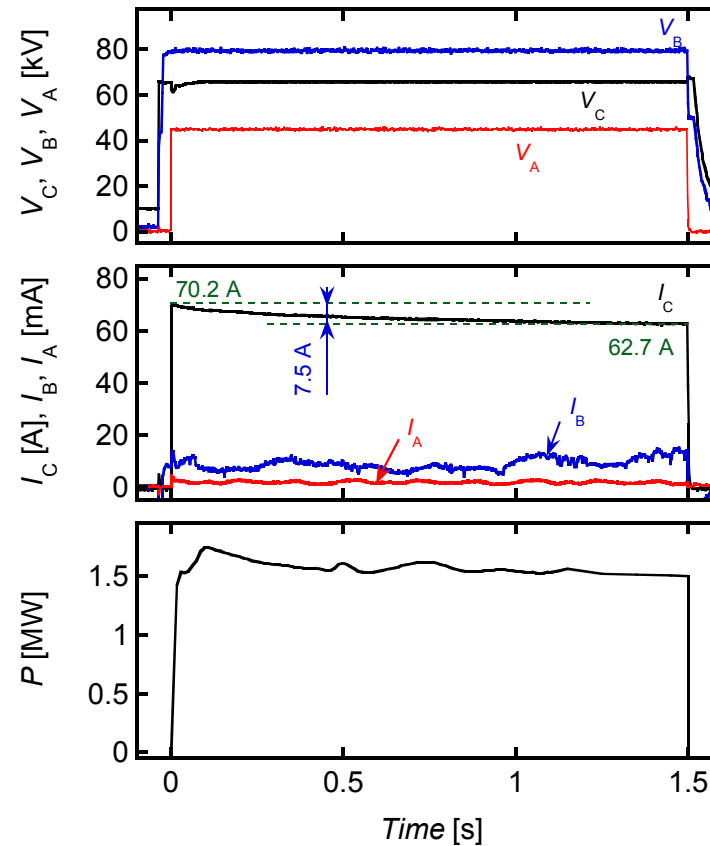
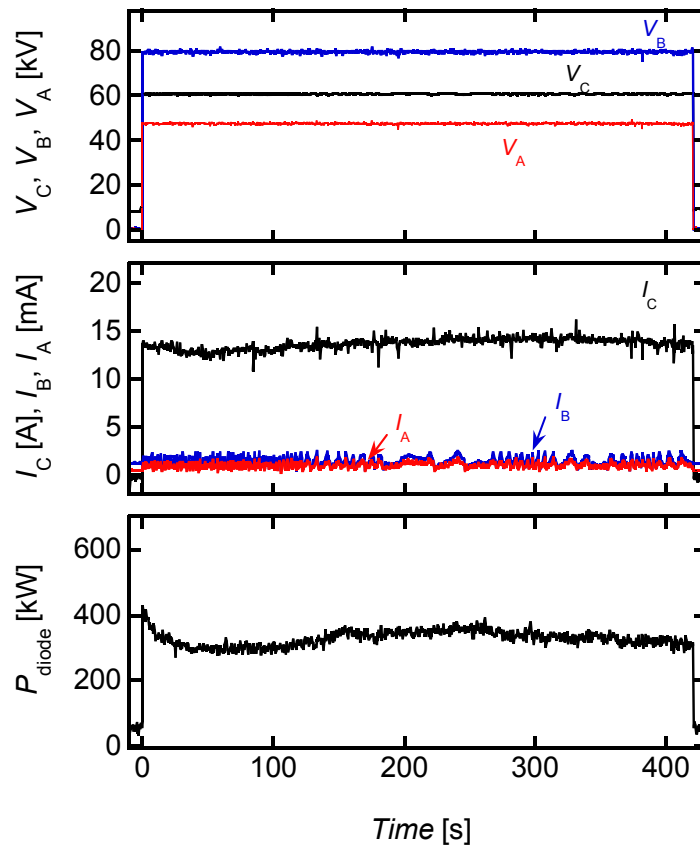
77 GHz 三号管の運転実績

➤ 長パルス

-> **0.37 MW/ 180 s, 0.33 MW/ 420 s**

➤ 短パルス

-> **1.0 MW/ 5.0 s, 1.53 MW/ 1.6 s, 1.6 MW/ 0.5 s**



まとめ

77 GHzジャイロトロンの現状:

- 77 GHz-1 MW管、ならびにその周辺コンポーネントの導入はほぼ完了した。
- 二台の既設77 GHz管の現在までの運転実績は,
 - #1: **1.0 MW/ 5 s, 0.11 MW/ 560 s**
 - #2: **1.0 MW/ 5 s, 0.10 MW/ 1800 s**
- 今後は主として、CW運転のためのコンポーネントのアレンジメントを行っていく予定。

発振安定化のためのアノード電源アップグレード:

- V_A の二段階立ち上げにより、 V_C ドロップフェイズを避けた、安定した運転が可能となった。
- 出力・効率の改善に成功し、**1.3 MW/ 1.0 s**運転を行うことができた。

77 GHz-1.5 MWジャイロトン:

- 2009年から導入が開始され、現在も発振調整を行っている。
- これまでに**1.6 MW/ 0.5 s, 1.5 MW/ 1.6 s, 0.33 MW/ 420 s**までの運転を行った。