筑波大学におけるジャイロトロンの開発

假家 強, 今井 剛, 南龍太郎, 沼倉友晴
　：　筑波大学・プラズマ研究センター
図子秀樹, 花田和明, 出射 浩
　：　九州大学・高温プラズマ力学研究センター
長崎百伸
　：　京都大学・エネルギー理工学研究所
斉藤輝雄, 立松芳典, 山口裕資
　：　福井大学・遠赤外領域開発研究センター
久保 伸, 下妻 隆, 吉村泰夫, 伊神弘恵, 高橋裕巳
　：　核融合科学研究所
江口 濯, 中澤和寛, 河原崎遼
　：　筑波大学大学院・数理物質科学研究科

1. 研究目的
2. 28GHz−1MWジャイロトロンの改造と28、35GHz発振試験
3. 28GHzジャイロトロンのQUEST実験への適用
4. 14GHzジャイロトロンの設計検討

筑波大学におけるジャイロトロン開発状況

ジャイロトロン

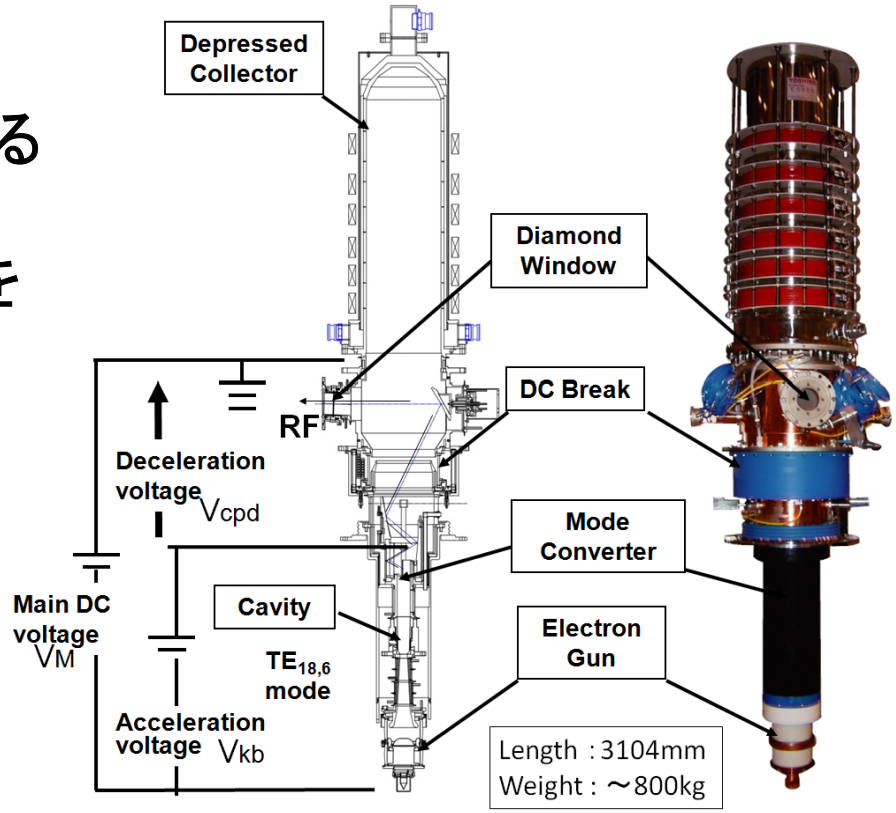
①数10～数100GHzで、MW出力が得られる
大電力発振管
②電子ビーム（80kV-50A）のエネルギーを
マイクロ波に変換

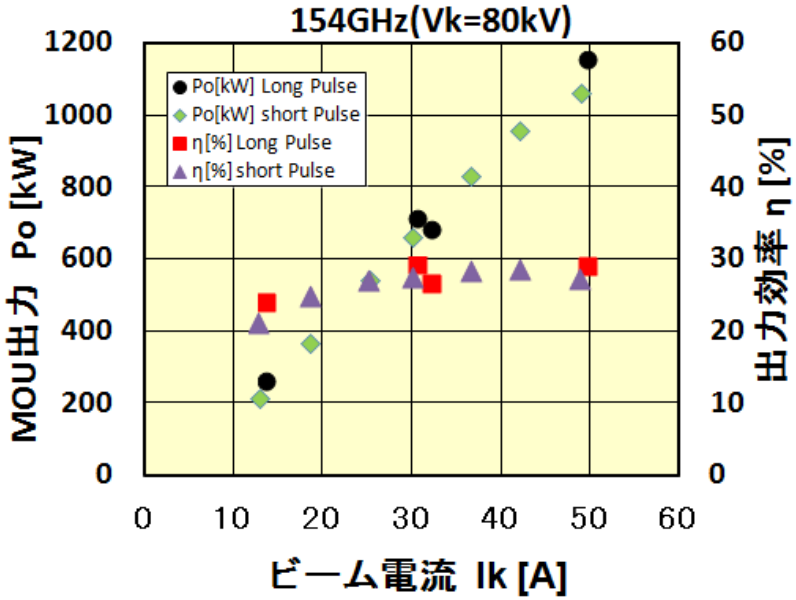
NIFSとのジャイロトロン開発共同研究

①77GHzジャイロトロン　(#1～#3)
1.9MW-0.1s
0.22MW-75min
LHD入射　：　3.4MW
電子温度20ekVの達成

②154GHzジャイロトロン　(#1)
1.16MW-1s
LHD入射　：　1MW-1s
第2高調波加熱の効果確認

77GHz-Wジャイロトロン





双方向型共同研究目的

筑波大学（プラズマ研究センター）
高密度ECH/EBW用 ジャイロトロン開発研究

QUESTにおける加熱検証を効率良く実施

九州大学（高温プラズマ力学研究センター）
QUESTのEBWアンテナ開発と加熱基礎研究

28GHz第2倍高調波共鳴が、プラズマ内側に存在。
28GHzジャイロトロンを用いカットオフ密度以下の適度な密度のプラズマ（2-3x10^{18}m^{-3}）を生成・維持し、
8.5GHz-EBW加熱/電流駆動の実証をおこない、QUESTプラズマの高性能化と定常化を目指す。

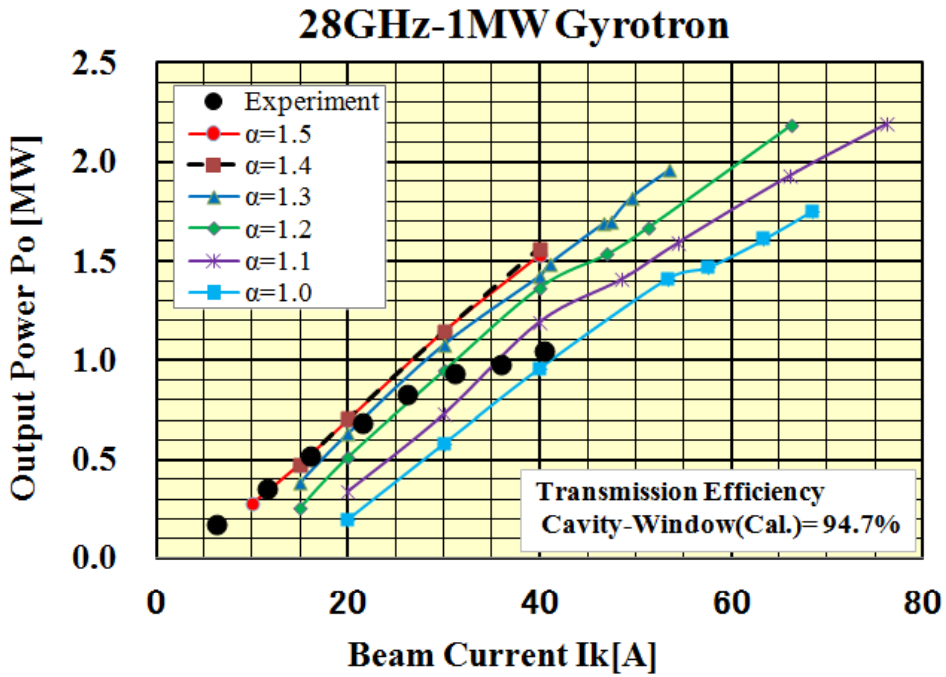
核融合科学研究所LHD　SDC等高密度プラズマ加熱・制御

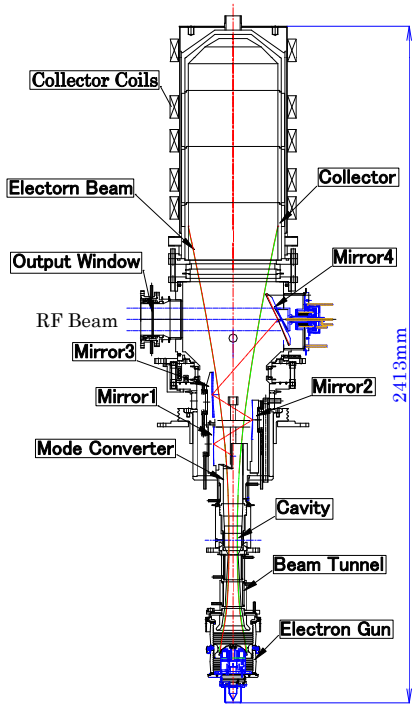
京都大学（エネルギー複合機構研究センター）
Heliotron-JでのEBW加熱/電流駆動研究

（例 SDC型原型炉等）
定常環状プラズマ型核融合炉
（大型高密度プラズマ炉）

筑波大学　28GHz−1MW−1s　ジャイロトロン

28GHz 1MW 1s Gyrotorn for PRC(Tsukuba)	
Frequency	28GHz
Output Power	1MW
Pulse Width	1s
Output Efficiency	35% (W/O CPD)
Beam Voltage	80kV
Beam Current	40A
MIG	triode
Cavity Oscillation mode	$TE_{8,3}$
Built-in Mode Converter	with
Output mode	Gaussian like
Output Window	Sapphire Single Disk
	Aperture diameter 112mm
Collector	W/O CPD
	Sweeping coils





これまでの試験結果

① 1.05MW−1ms
② 0.54MW−2s（試験電源とダミーロード容量により制限）
③ サファイア窓温度上昇　9K（0.45MW−2s）
　→　tan δ ～3.3×10−5　（at 28GHz）
　→　サファイア・シングル窓で、2MW−数秒出力可能

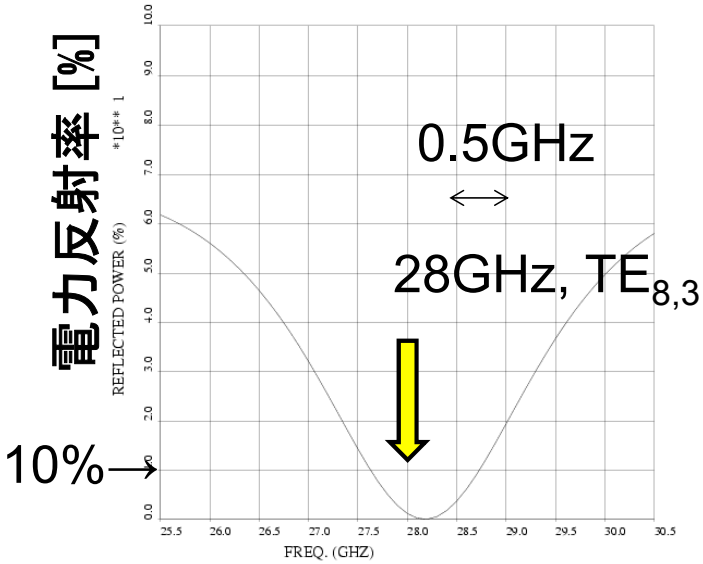
試験結果、共同研究を踏まえた改良、開発指針

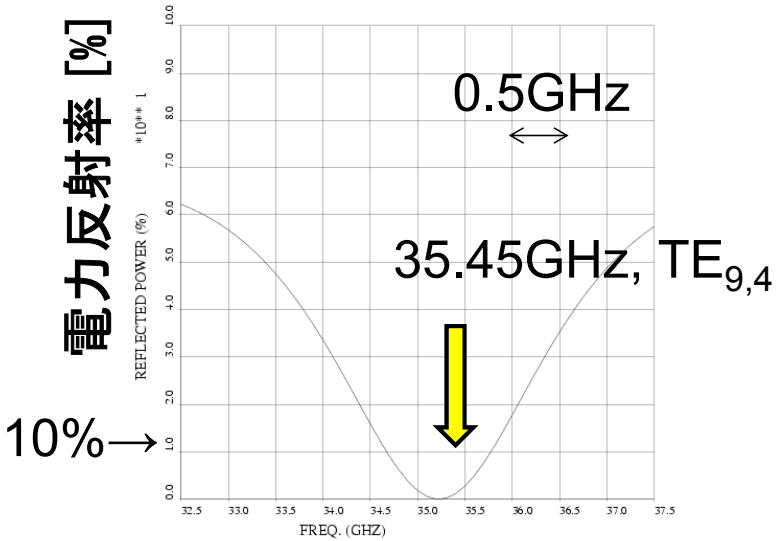
① RF伝送系の高効率化改良
② CW動作設計　：　QUEST
③ 1.5～2MWへの大電力化　：　GAMMA 10、NSTX−U
④ 2周波数動作(28、35GHz)　：　Heliotron J (35GHz)、
⑤ 14GHz発振　：　QUEST、GAMMA 10

28GHz−1MWジャイロトロンの改造と性能評価試験

35GHz発振検証 → 2周波数(28,35GHz)ジャイロトロン開発 → Heliotron J,GAMMA10共用

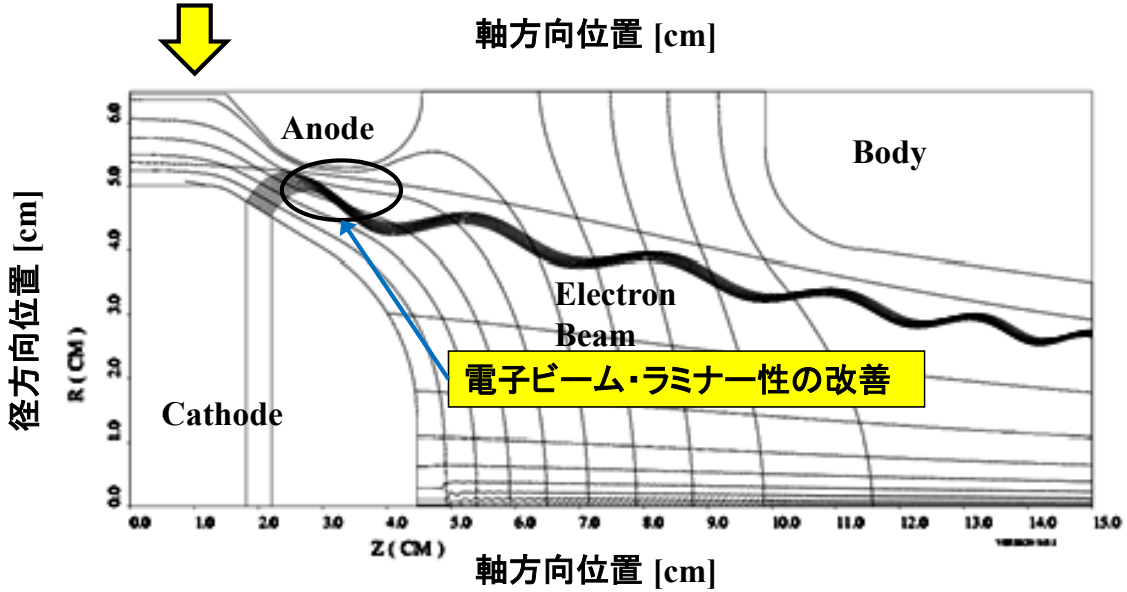
出力窓改造





電子銃改造

部品の共通化のため、NIFS 77 GHz Gyrotronと同一形状設計



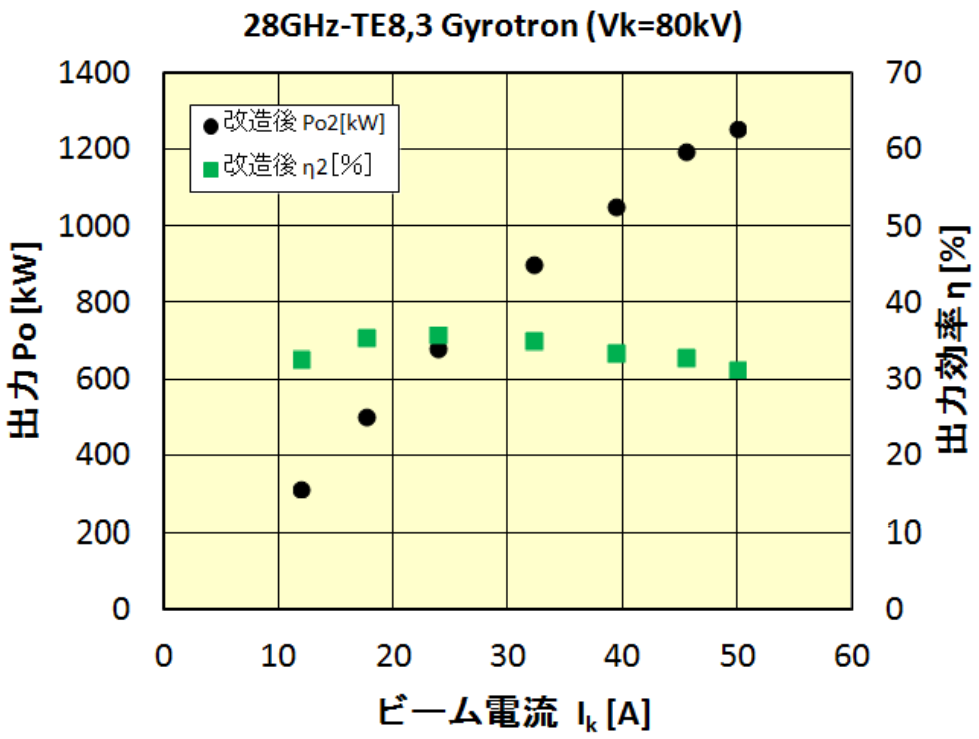
カソード前面での電子ビームラミナー性の改善

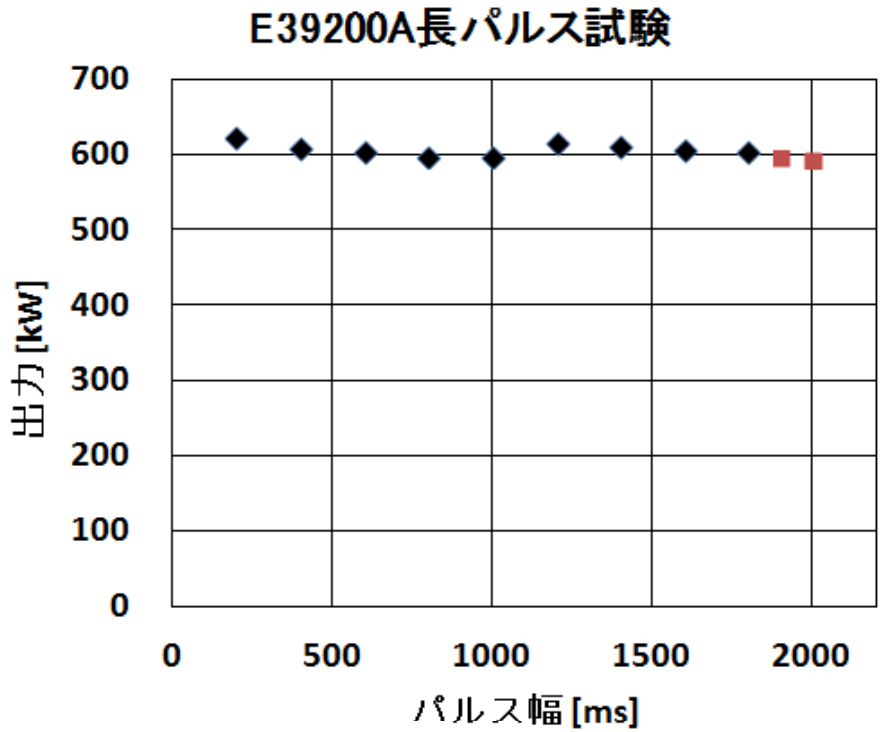
⇒ 大電流領域でのピッチファクターαの低下、

αの分散劣化の抑制

⇒ 出力飽和傾向の改善を期待

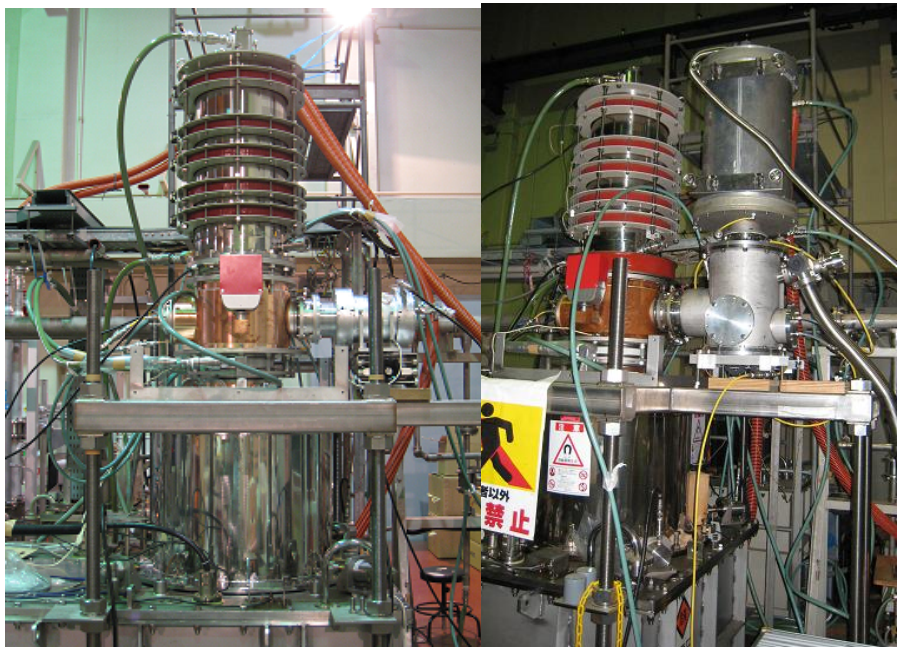
28GHz-1MWジャイロトロンの改造と性能評価試験





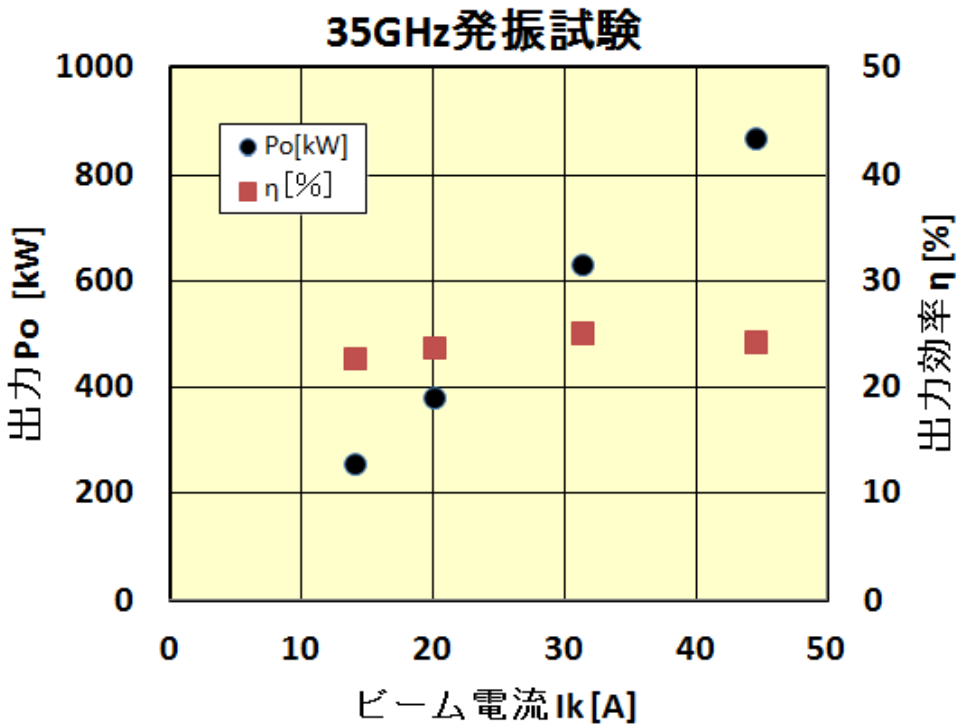
大電流領域（I_k＞40A）で効率改善
1.25MW出力（I_K=50A）確認

筑波大学試験電源の制限
　短パルス　：　I_k<50A
　長パルス　：　I_k<25A
ダミーロードの制限
　600kW-2s



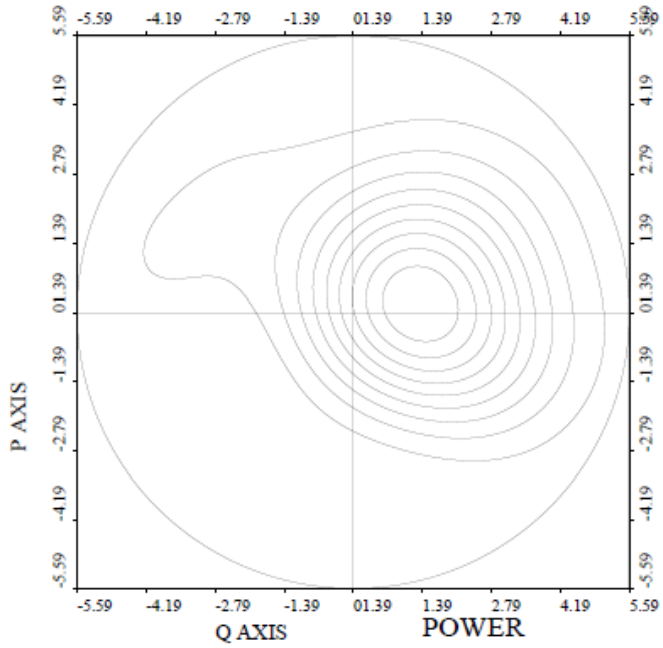
28GHz-1MWジャイロトロンにおける35GHz発振試験
（Heliotron Jへの適応を見込んだ2周波数ジャイロトロン開発）

35.45GHz　TE9,4モード



f=35. 46GHz

窓フランジ



放射器-出力窓間伝送効率＝72%

P_o=0.869MW　→　P_o=1.21MW

η =25.%　→　η =35.1%

設計、製作手法に問題無し

28GHz-1MW-1sジャイロトロンのQUEST実験への適用

ジャイロトロン動作確認

①QUEST電源定格（Vk=70kV, I=25A）以内での動作、出力確認

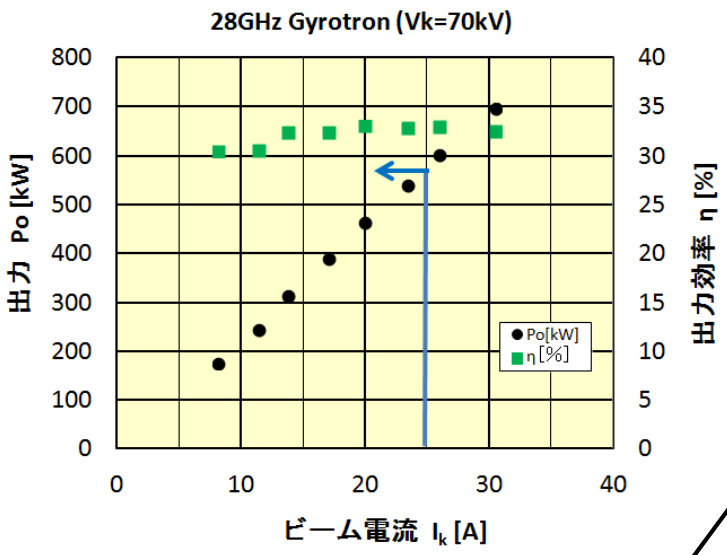
600kW-2s (Vk=70kV, I=24A)

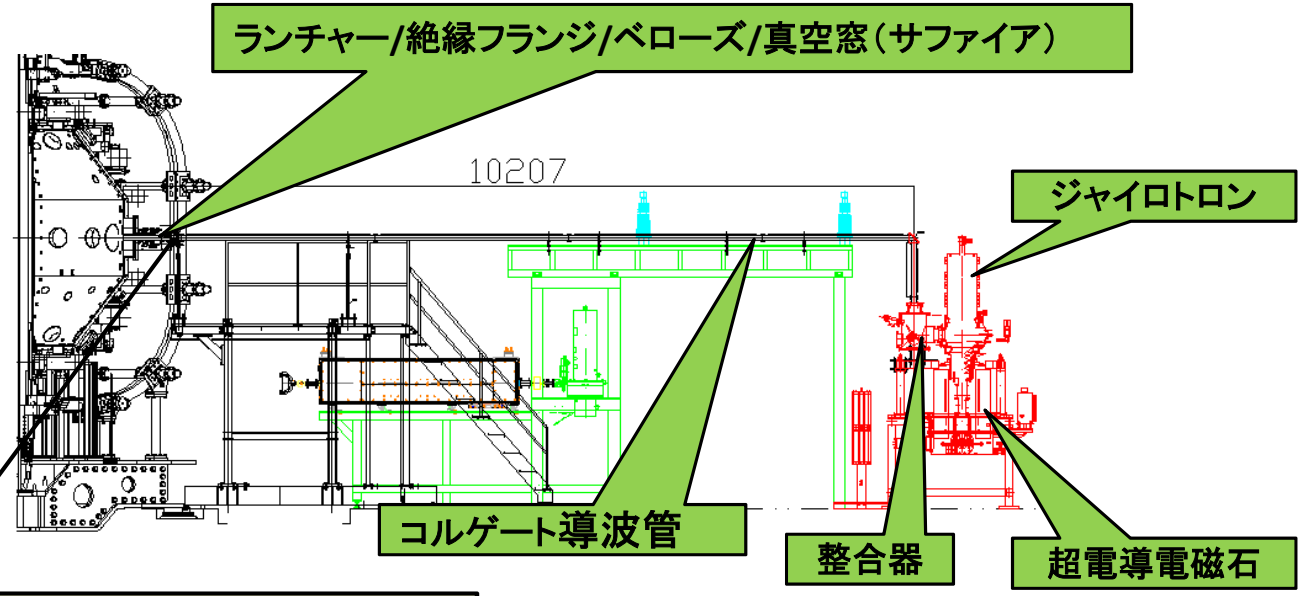
伝送系設計・製作

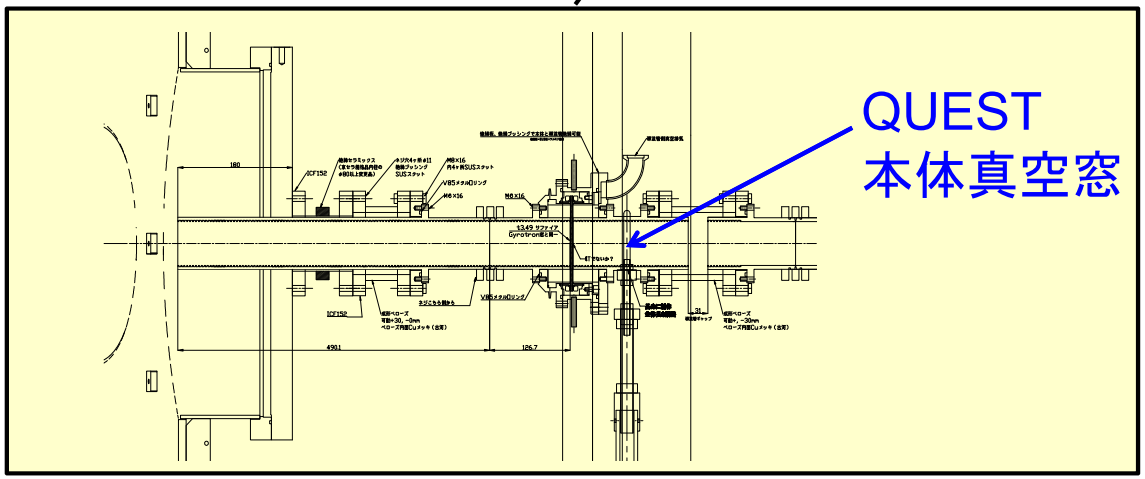
①伝送系製作完了

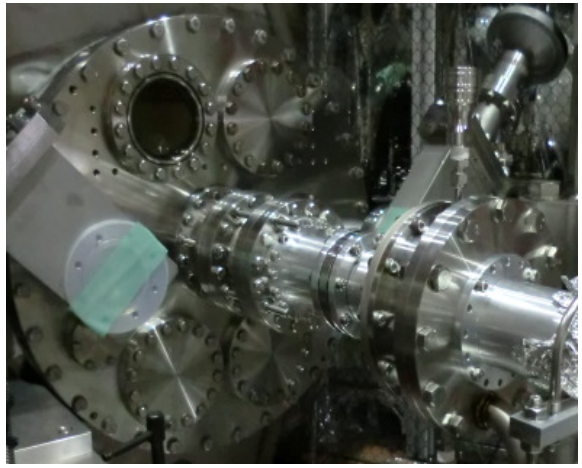
②QUEST本体真空関連部分 → QUESTに取付済み

（ランチャー／絶縁フランジ／ベローズ／真空窓）

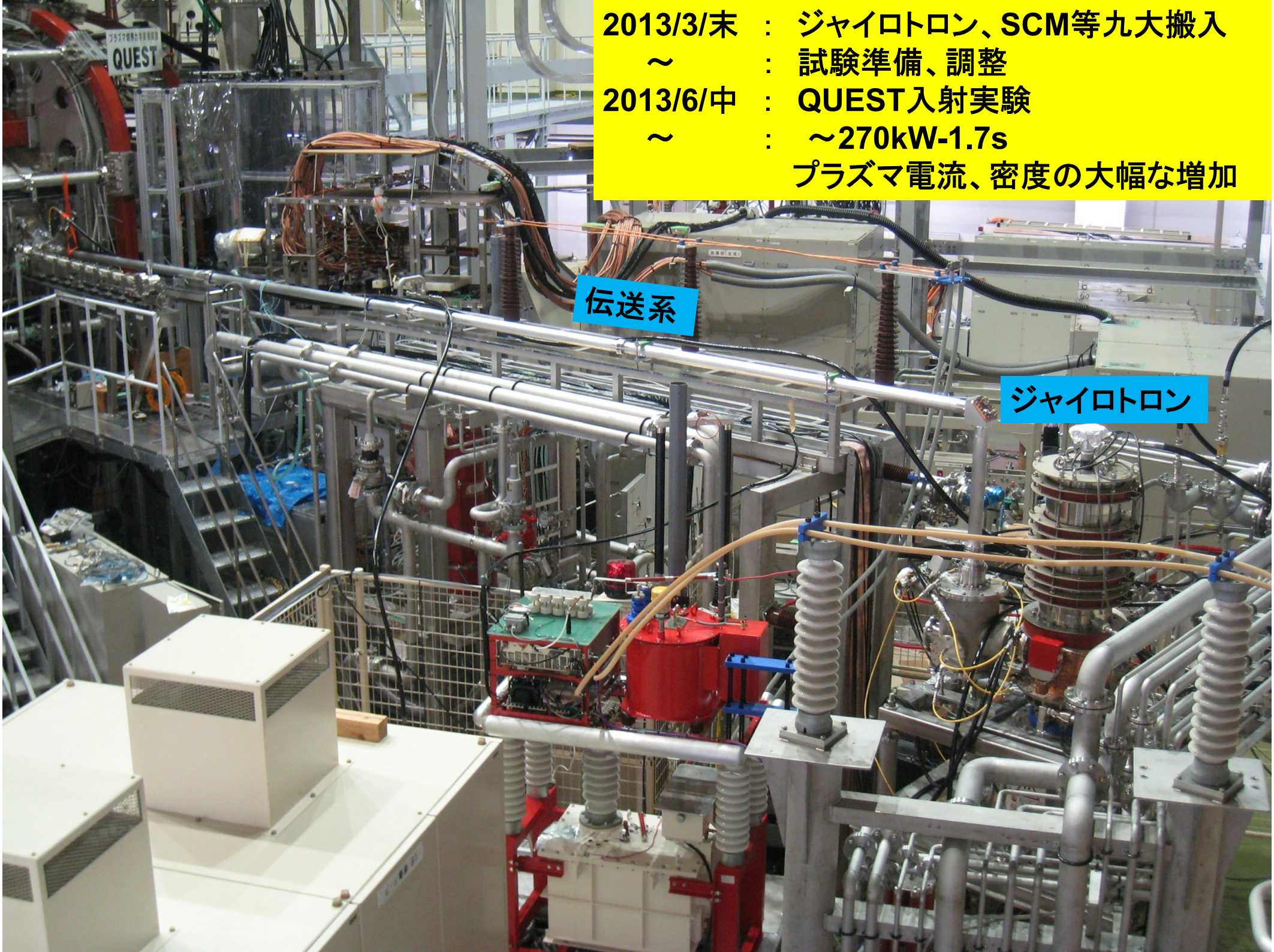








2013/3/末　：　ジャイロトロン、SCM等九大搬入
～　：　試験準備、調整
2013/6/中　：　QUEST入射実験
～　：　～270kW-1.7s
プラズマ電流、密度の大幅な増加



14GHzジャイロトロンの設計検討

14GHz, 28GHz　2周波数動作の検討

周波数	TEm,n	f[GHz]	Rc[mm]	Re[mm]	Q	θ r[deg]	MIG	窓反射	コメント
28GHz	TE8,5	28.049	41.91	14.6	490	71.01(0)	○	1%	E39200MIG
14GHz	TE4,3	14.514	41.91	13.81	152	71.61(0.6)	※	8%	0.6MW
					※　Vakで軌道が大きく変わり制御できない				
周波数	TEm,n	f[GHz]	Rc[mm]	Re[mm]	Q	θ r[deg]	MIG	窓反射	コメント
28GHz	TE12,3	28	38.56	21.86	−	57.98(0)	×	1%	E39200MIG
14GHz	TE6,2	14.52	38.56	21.1	−	59.25(1.27)	△	8%	E39200MIG
周波数	TEm,n	f[GHz]	Rc[mm]	Re[mm]	Q	θ r[deg]	MIG	窓反射	コメント
28GHz	TE10,3	28	34.46	18.2	−	57.98(0)	×	1%	E39200MIG
14GHz	TE5,2	14.57	34.46	17.4	−	59.25(1.27)	?	8%	E39200MIG

1) 発振周波数による窓の反射
2) 放射角の違い若干有り･･･RF伝送損出
3) 電子銃部磁場が小さく電子銃動作不可

14GHz 単独発振ジャイロトロンの検討を行う

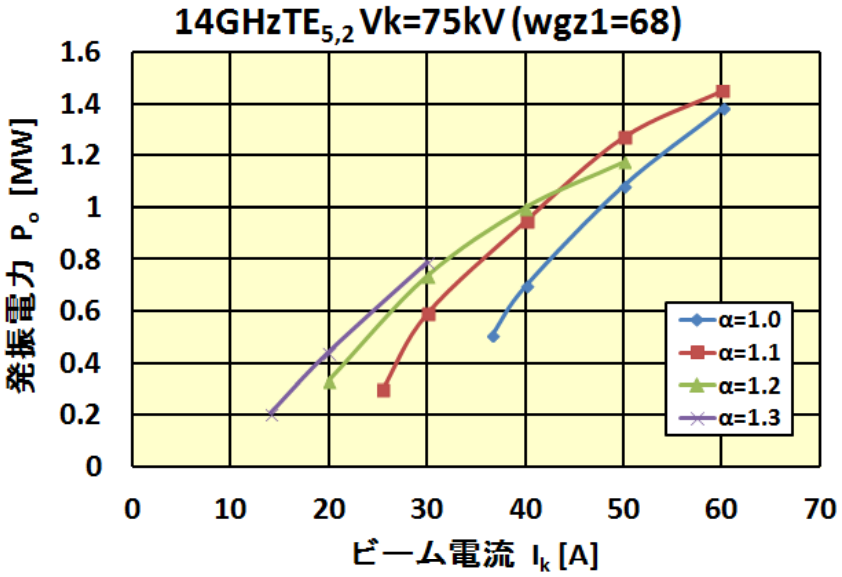
周波数	TEm,n	f[GHz]	Rc[mm]	Re[mm]	Q	Zc[mm]	Po[kW]	E39200 MIG	コメント
14GHz	TE5,1	14.062	21.87	18.12	243	69	817	△	アノード変更
	TE6,1	14.086	25.57	21.87	248	69	908	○	E39200MIG
	TE7,1	14.063	29.23	25.57	249	69	985	※	アノード変更
	TE4,2	14.054	31.65	14.32	249	69	1046	※	カソード径を小さくする
	TE5,2	14.048	35.85	18.12	249	69	1074	△	アノード変更
	TE6,2	14.054	39.99	21.87	251	69	1058	○	E39200MIG

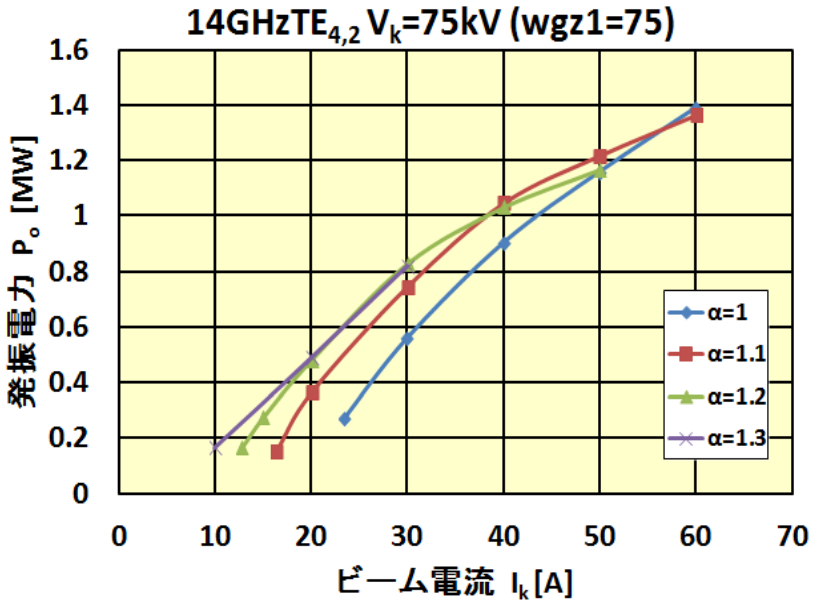
14GHzジャイロトロンの設計検討

14GHz−$TE_{5,2}$

14GHz−$TE_{4,2}$

空胴共振器



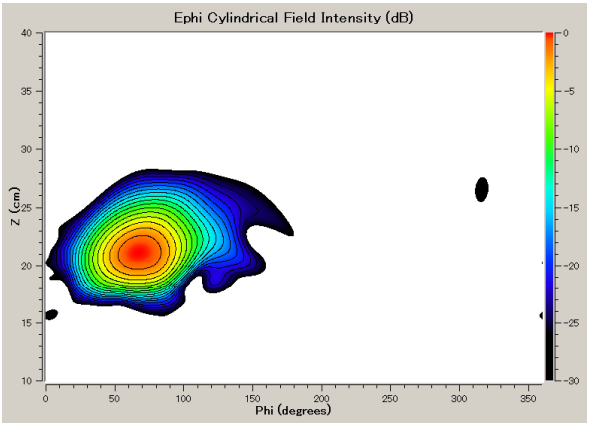


電子銃

既設28GHz用電子銃使用可
電子ビーム径大 ➡ ミラー位置外に出す
コレクタ入口DCコイル

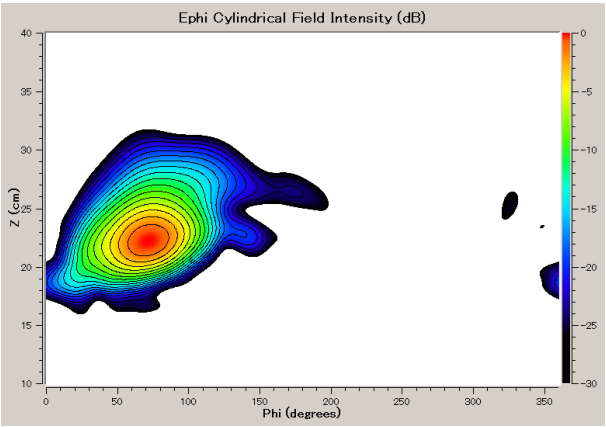
電子銃部の磁場を強くし、
カソード径を小さくする必要あり
➡ カソード径Φ95→Φ75
電流密度1.28倍

放射器放射電力分布



伝送効率(M1)
:98.7%

ガウシアン成分
:99.52%



伝送効率(M1)
:97.8%

ガウシアン成分
:99.47%

まとめ、今後の予定

1) 高効率化、2周波数発振試験のための28GHzジャイロトロンの改造を行った。
大電流領域での発振効率を改善し、1.25MW(I_k=50A)の出力を得た。
600kW-2s動作を確認。
35GHz発振を確認、設計から予想される結果と一致。

2) QUESTにおけるEBW/ECCD実験への適用を目的に、
筑波大28GHzジャイロトロンの移設を行い、QUEST実験に適応、
プラズマパラメータの大幅な改善が得られた。
⇒ QUESTでの実験を進める

3) GAMMA 10、NSTX-U、QUEST、Heliotron J
: 28GHz大電力化、CW動作設計開始
28、35GHz-2周波数動作設計開始
QUEST、GAMMA 10(Central Cell midplane)
: 14GHzジャイロトロン設計開始
⇒ 設計を詰めていく

”双方向型共同研究”(NIFS11KUGM050, NIFS11KUGM053)による。