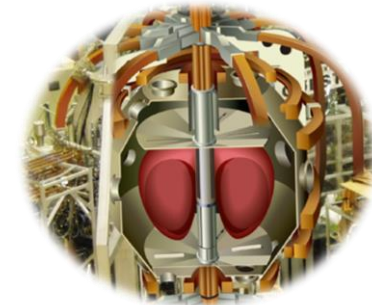


コア・SOL（・ダイバータ）を有する 高温プラズマの定常化研究

現状分析
対策
他の項目

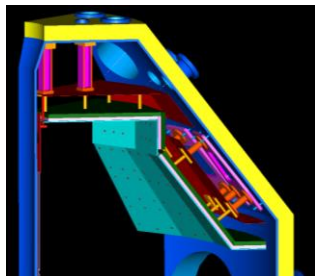
（定常）核融合炉開発



粒子ハンドリング

ITEM

定常トカマク QUEST
定常電源・ブスバー



高温壁

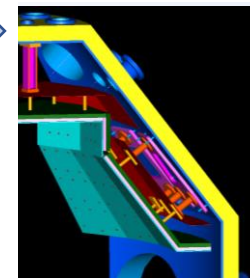
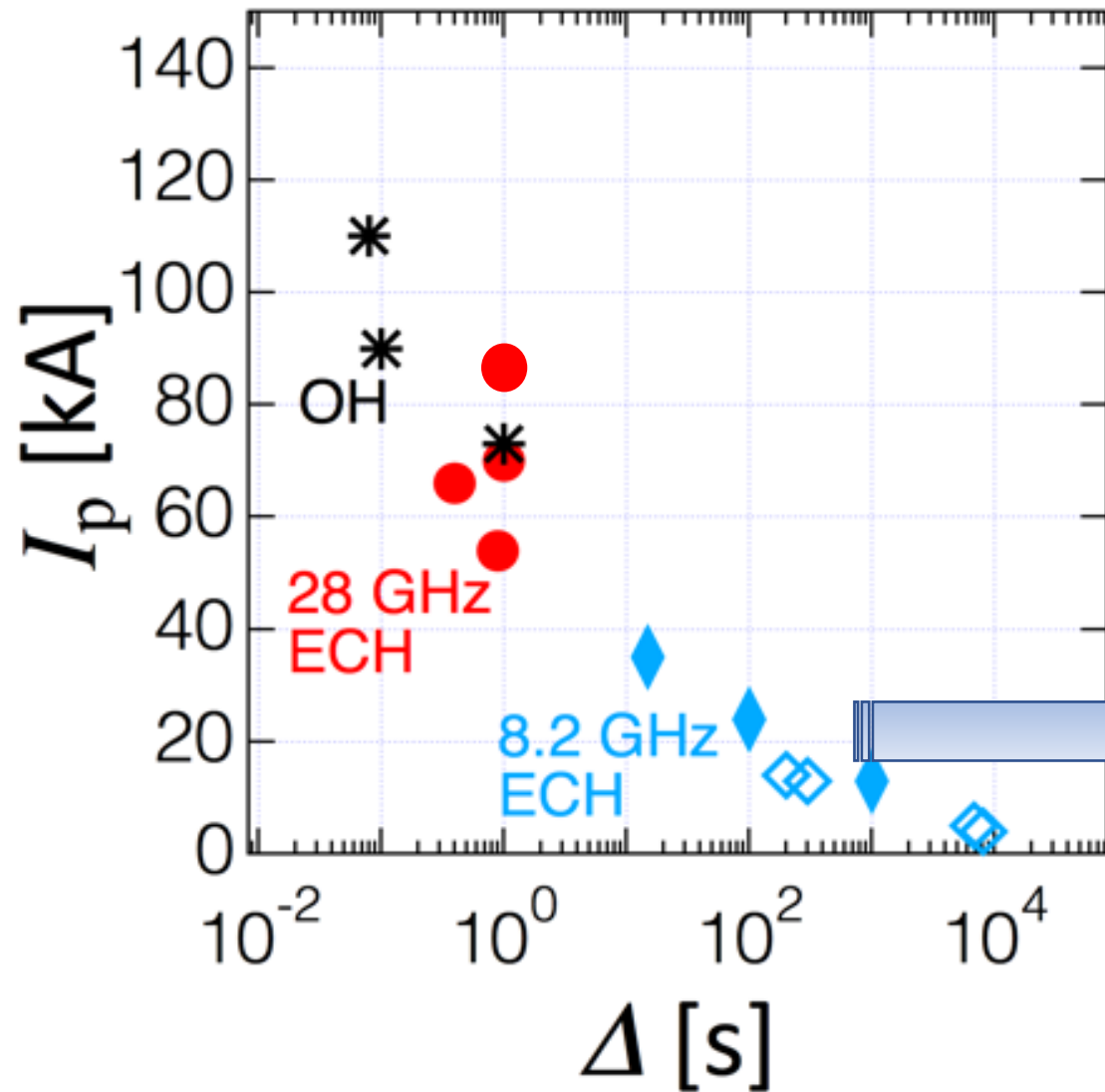
核融合炉環境を模擬

能動壁温度制御

ダイバータ

加熱

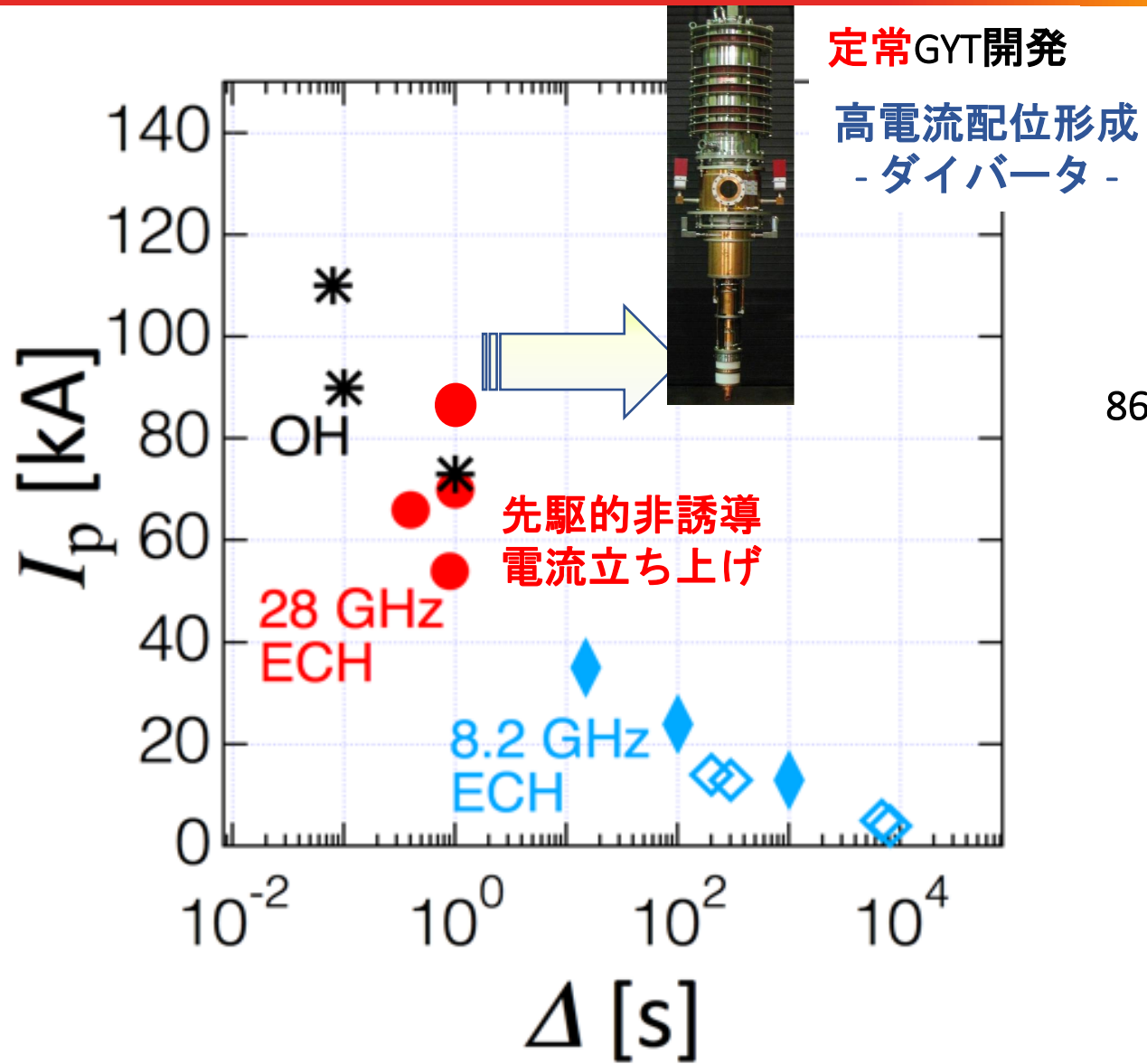
QUEST 今後の歩み (現状分析)



定常核融合炉環境での
粒子ハンドリング

高温壁：周囲環境を
含めた能動統合制御

QUEST 今後の歩み (現状分析)



54 kA : EFIT

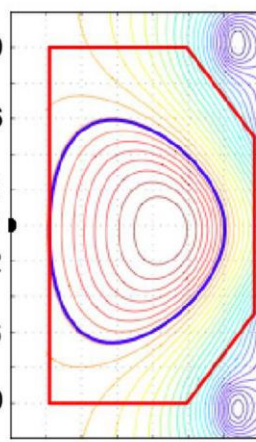
低電子密度

- ・ 温度
- $\sim 10^{17} \text{m}^{-3}$
- $< 10 \text{ eV}$

高圧力・高速電子
200 Pa

Z [m]

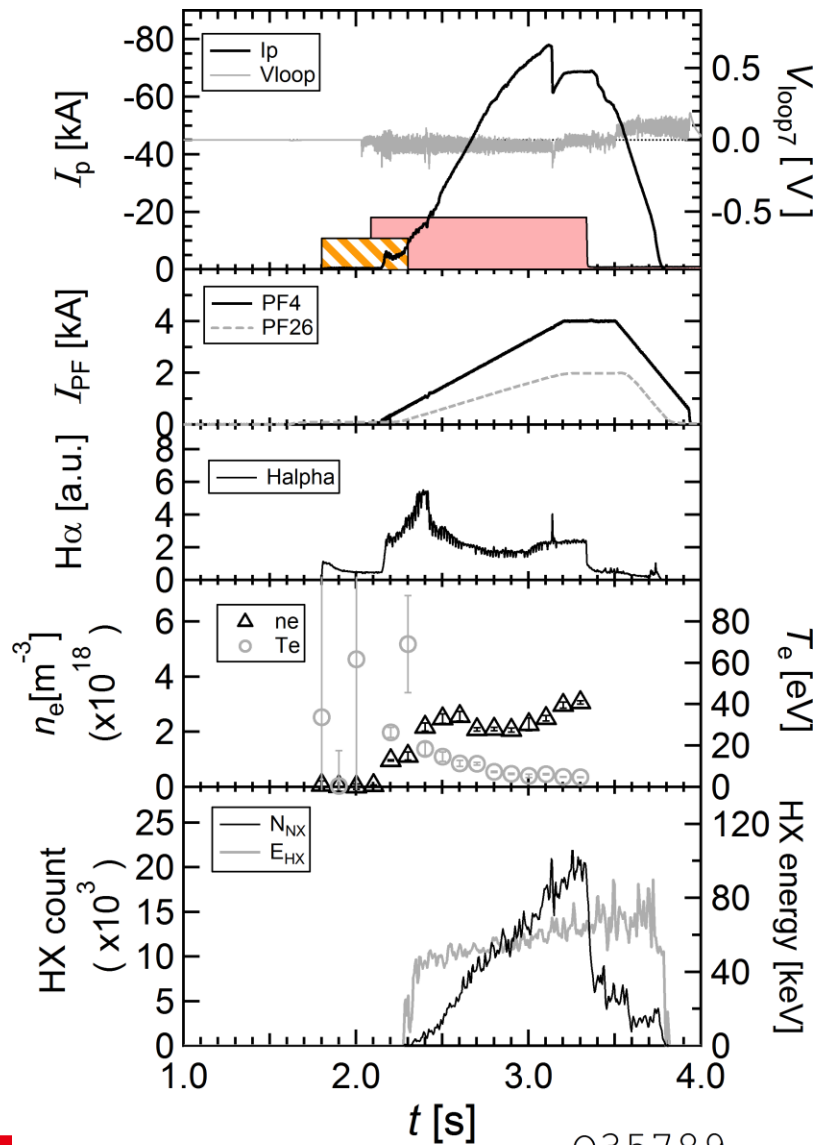
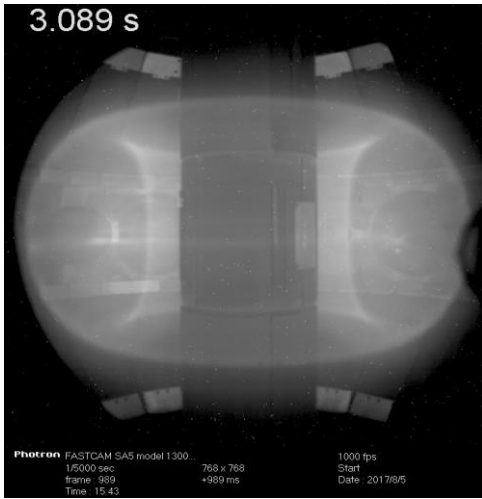
R [m]



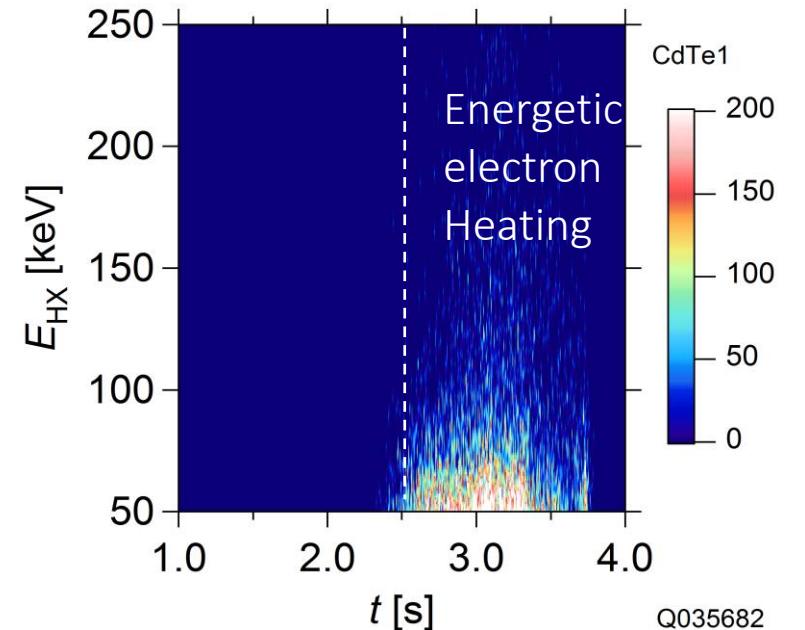
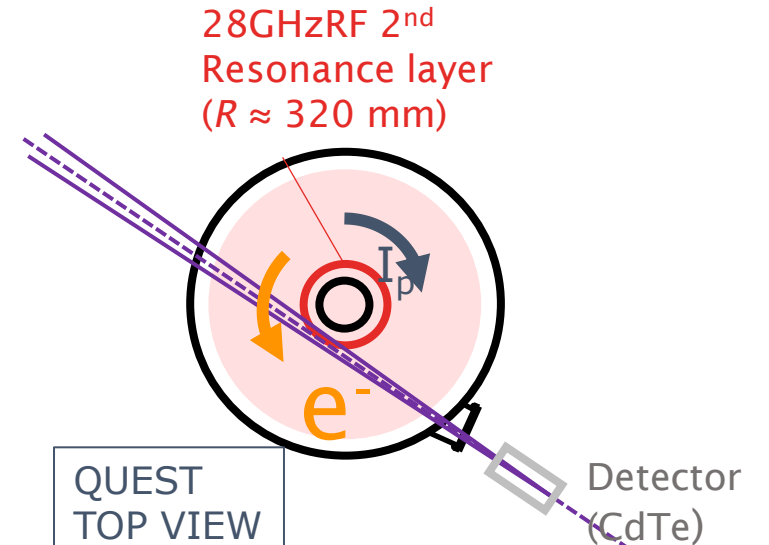
86 kA

5cm径ビーム
高密度化 $< 5 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$

~ 80 kA I_p Ramp-up



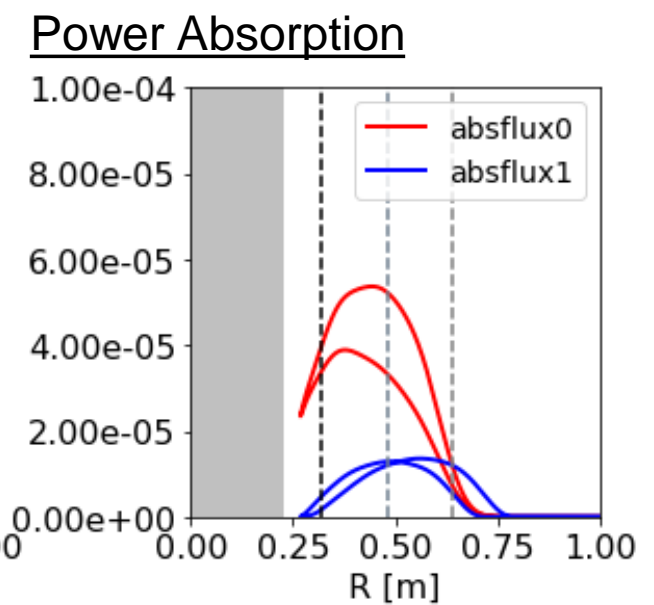
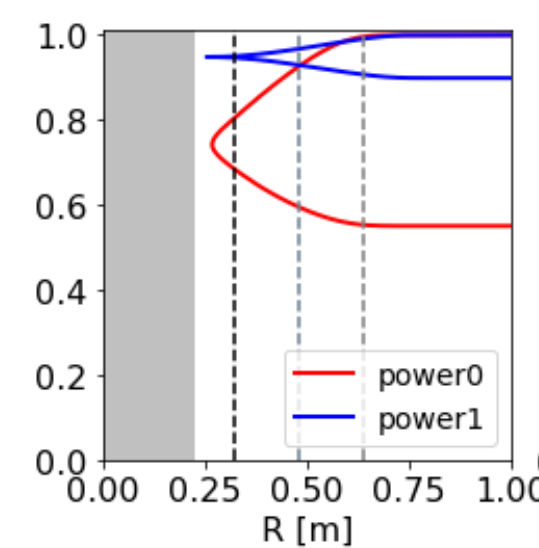
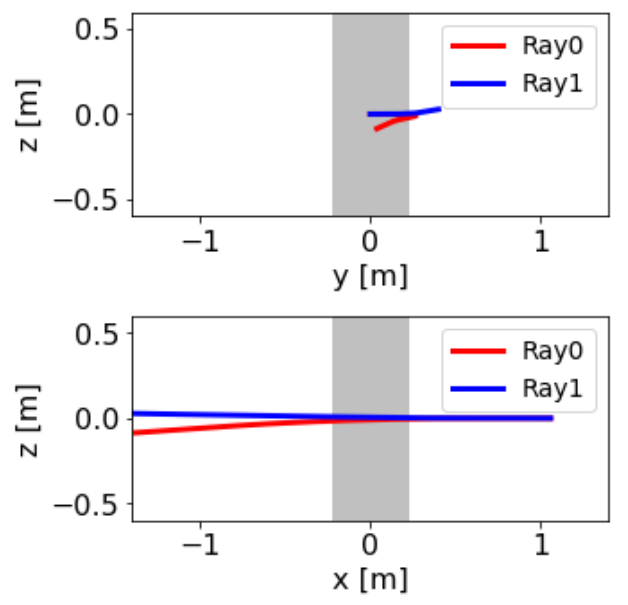
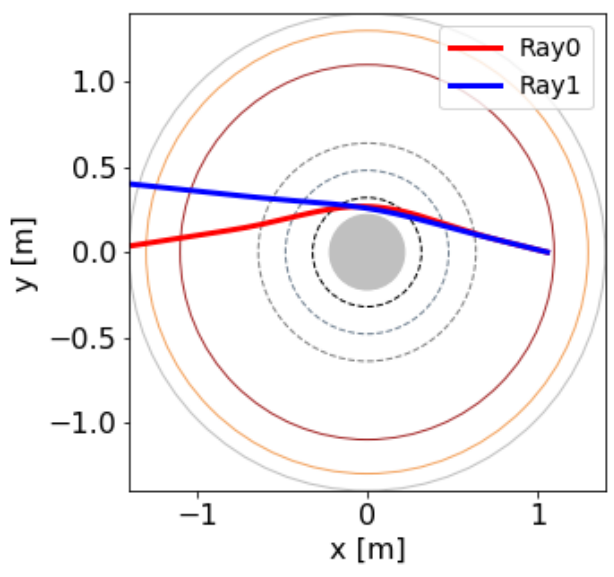
Q35789



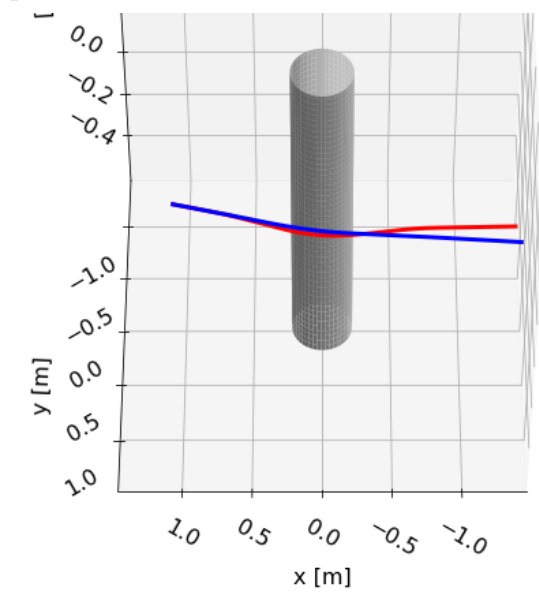
Q035682

28GHz-EC波光線追跡 (TASK-WR)

- Ray0: X-mode
- Ray1: O-mode

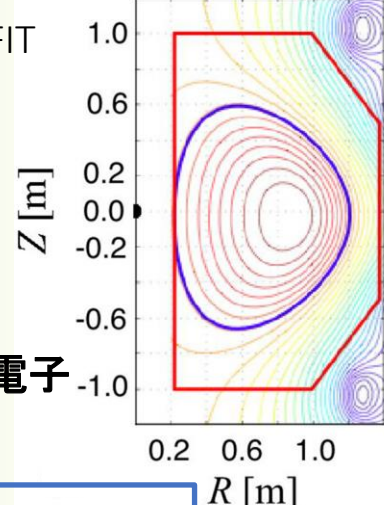


- 密度分布 (高速電子: 3%)
 $n = n_0(1 - \rho^2)^1$
 - 温度分布
 $T_e = T_0(1 - \rho^8)^1$
- ❖ $n_0 = 2.0 \times 10^{18}$
 - ❖ $T_0 = 30 \text{ eV}$, 高速電子 $T_e = 60 \text{ keV}$
 - ❖ 閉磁気面領域 ($R = 0.22 - 0.82 \text{ m}$)



QUEST 今後の歩み (現状分析)

54 kA : EFIT



低電子密度

- ・ 温度
- $\sim 10^{17} \text{m}^{-3}$
- $< 10 \text{ eV}$

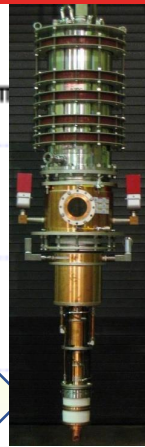
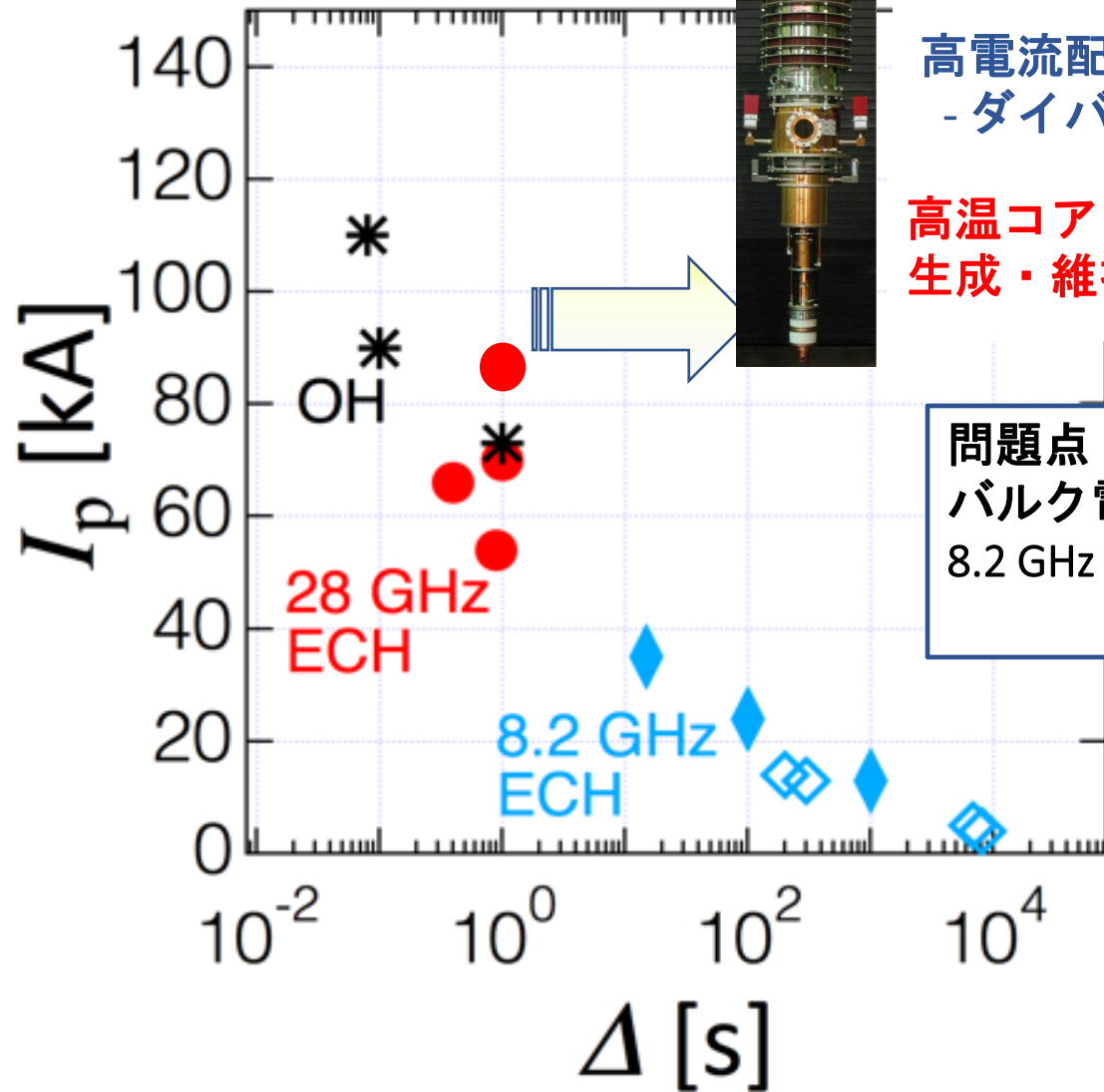
高圧力・高速電子
200 Pa

5cm径ビーム
高密度化 $< 5 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$

定常GYT開発

高電流配位形成
- ダイバータ -

高温コアプラズマ
生成・維持が困難



問題点：

- バルク電子圧力が低い ($< 10 \text{ Pa}$)
- 8.2 GHz 重畳 バルク電子温度は若干、上昇
- 高速電子圧力上昇

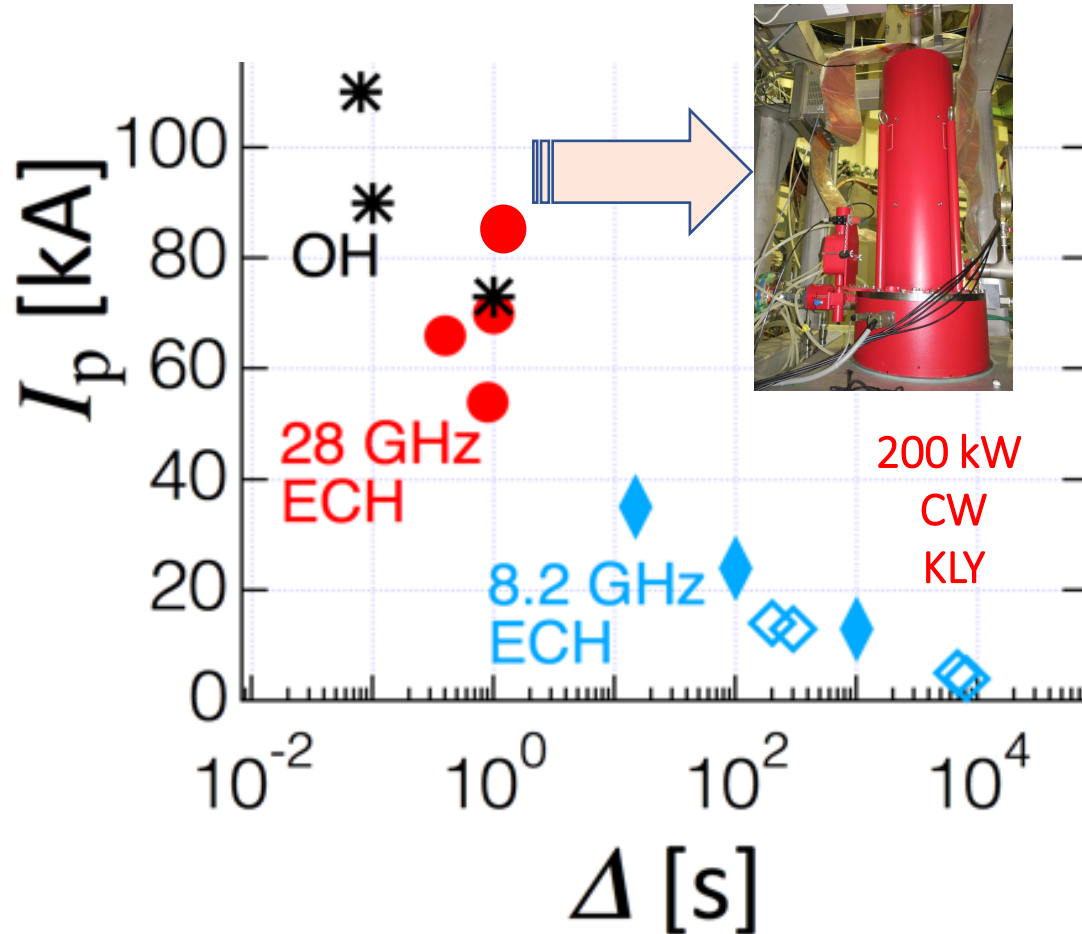
QUEST 今後の歩み (戦略)

Q1. 圧力が高い高速電子成分が生成された後、いかに球状トカマク・コアプラズマを形成・維持するか？

Target : 28 GHz プラズマ

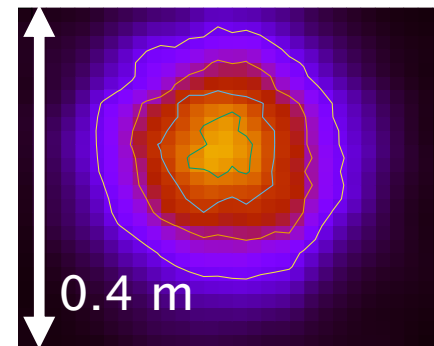
高電流 ~ 86 kA
高密度 $< 5 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$

オーバードレンス

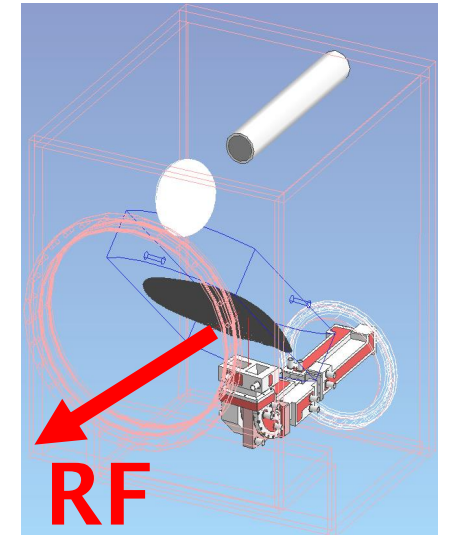


8.56 GHz O-X-B EBWHCD

集束アンテナ



Low power test



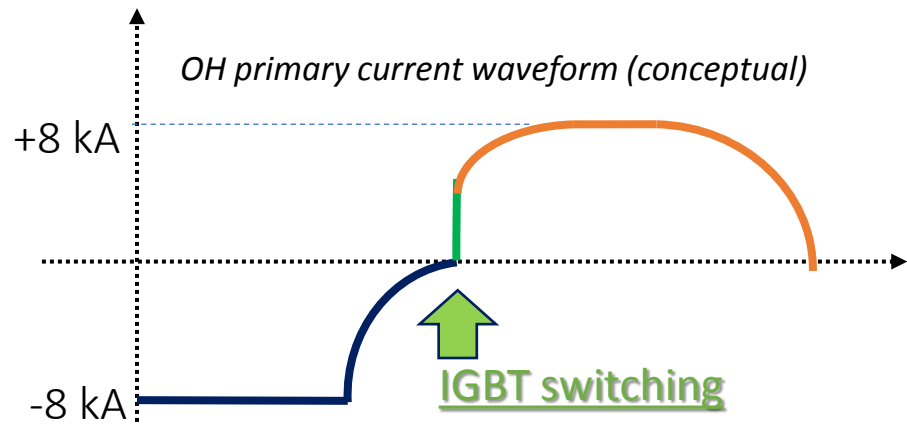
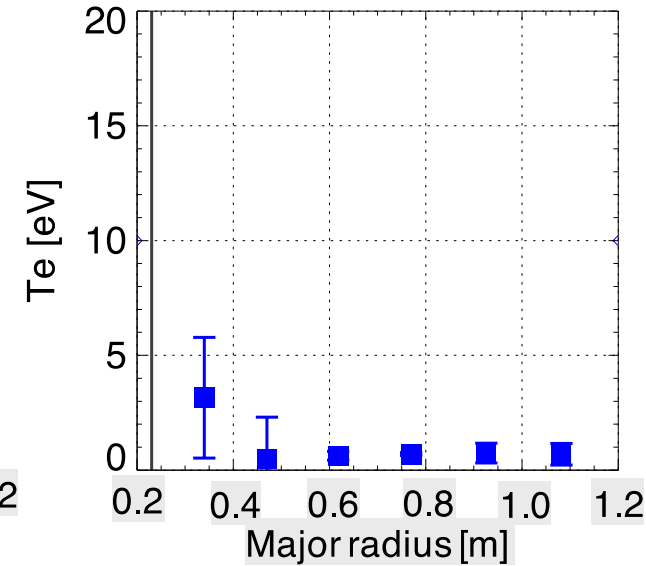
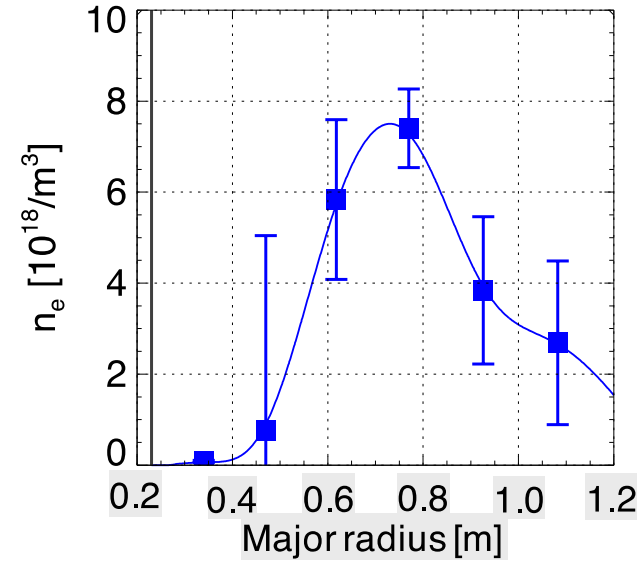
入射角制御
楕円偏波制御 が必要

QUEST 今後の歩み (戦略)

Q2. 圧力が高い高速電子成分を生成せずに、いかに球状トカマク・コアプラズマを形成・維持するか？

CHI + OH + 8.56 GHz

CHI (PPPL・ワシントン大との共同研究)
Ip~50 kA 達成 (閉磁気面形成は未確認)
高密度プラズマ生成 $[8 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}]$
高速電子がなく、高密度プラズマ生成可能



両振 OH
1 段目のCS立ち上げで 60 kA 程度の電流を立ち上げ
2 段目のCS立ち上げで有効に誘導加熱

QUEST 今後の歩み (戦略)

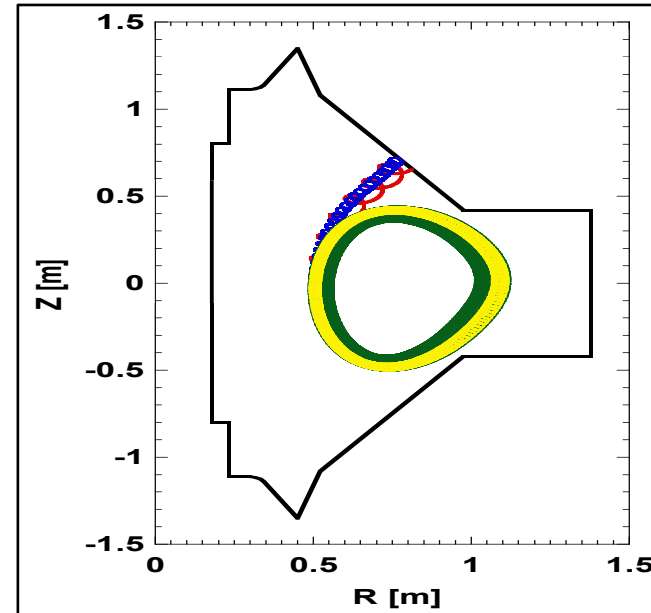
Q2. 圧力が高い高速電子成分が生成せずに、いかに球状トカマク・コアプラズマを形成・維持するか？

CHI + OH + 8.56 GHz
(28 GHz)
+ NBCD



DNB

CHS DNB の活用



[40keV, 0.5T , 100kA]

[40keV, 0.25T, 100kA]

[40keV, 0.25T, 200kA]

[10keV, 0.25T, 100kA]

Beam Energy $E_b < 45$ keV

40 kV: 101 kW
20 kV: 31 kW

Extracted current $I_b < 3$ A

Divergence angle 1 degree at 30 keV

Focal length 3.24 m at 30 keV

イオン源の改良
定常化
高電力化

- ・ 高密度化 $\sim 1.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$
- ・ 高電流化 > 100 kA
- ・ 高エネルギー化 $\sim > 10$ keV

QUEST 今後の歩み (高性能化)

Q3. トロイダル磁場を上げられるのか?
【28 GHz 中心加熱の可能性】

0.5 T / 1s

MG 再生

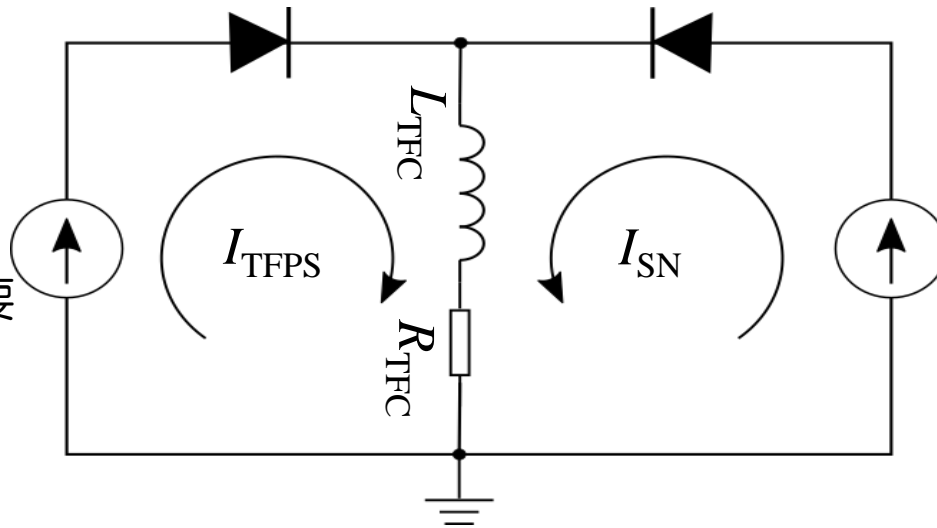


これまでの計算機制御が困難
高速 AO / AI が扱える PLC の活用

2017年度 :
新たな PLC 制御で
補機運転を確認

TFC 電源改造

より高い電圧が必要
【TR等の要改造】

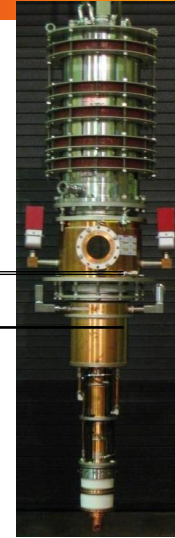


ブスバー
取り合い改造

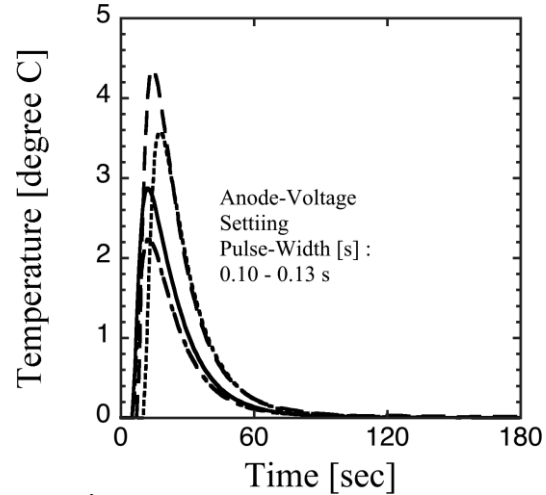


QUEST 今後の歩み (高性能化)

Q4. 定常ジャイロトロン開発は 28 GHz で良いか？



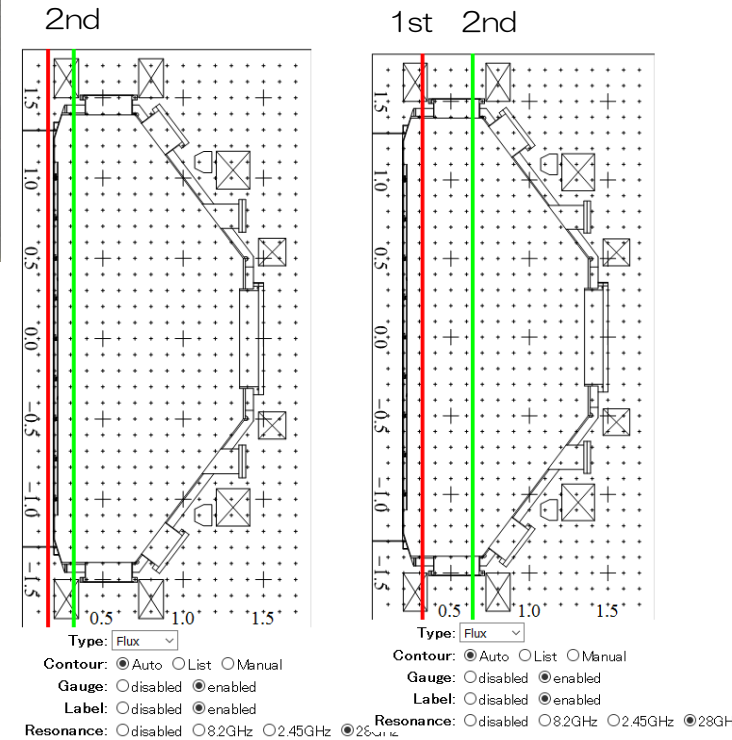
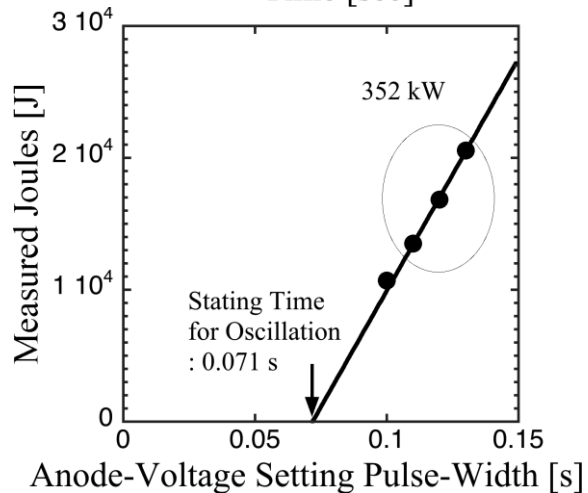
少なくとも
バックアップ管が必要



28GHz 1MW 1s Gyrotron for PRC(Tsukuba)

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

Kyushu Univ. HVPS
75 kV / 25 A =>
max. 0.4 MW



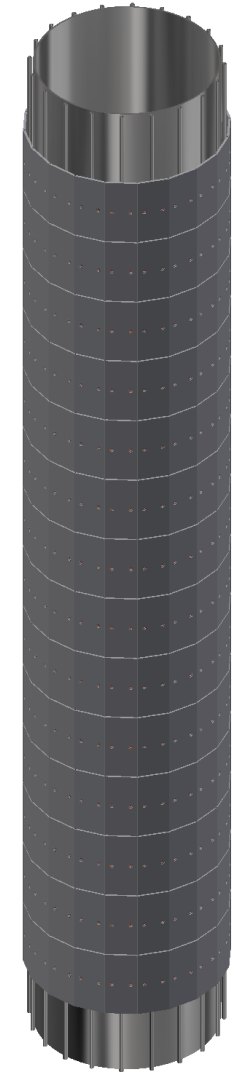
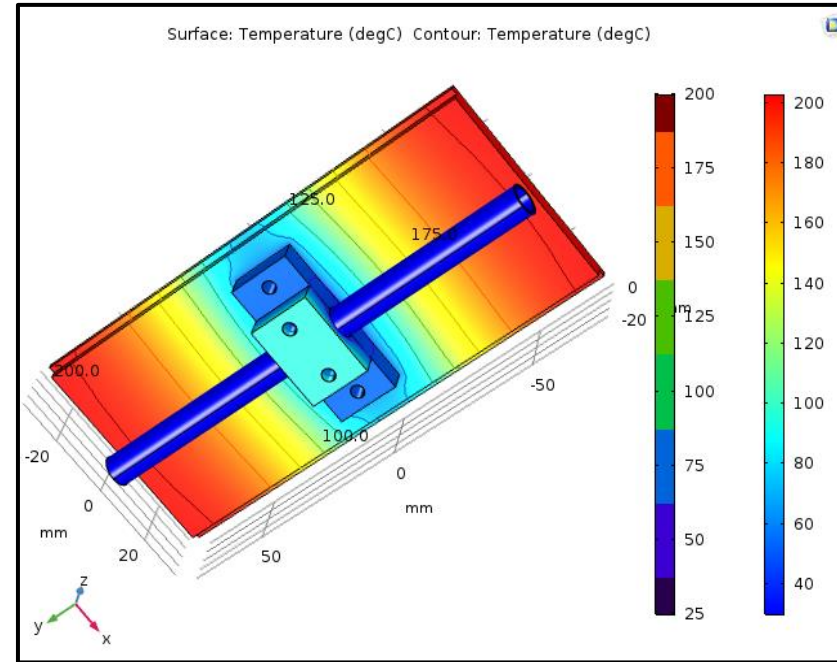
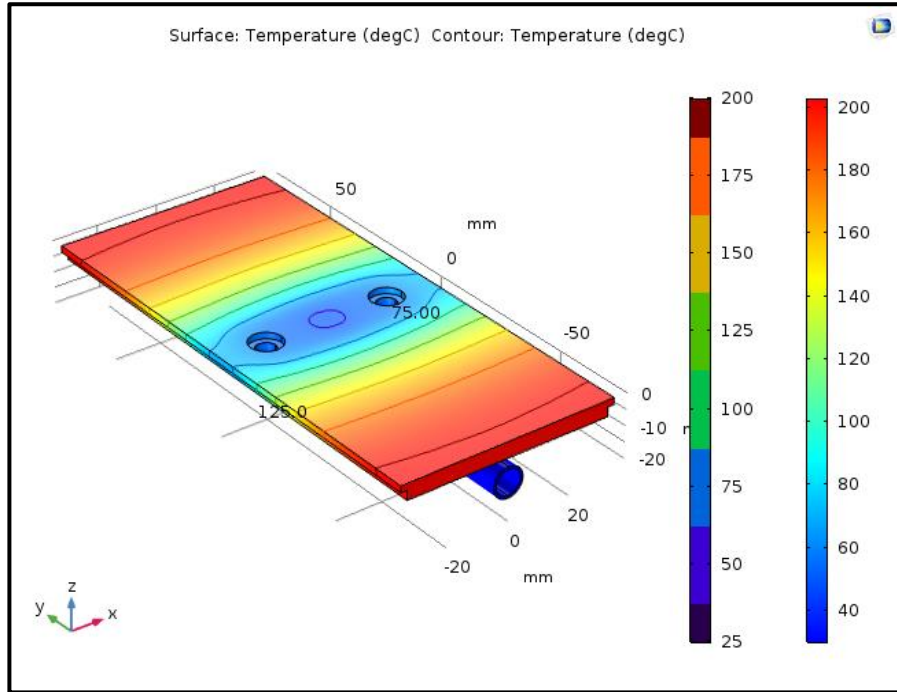
0.25T
CW

0.50T
1s

QUEST 今後の歩み (内蔵物)

Q4. QUEST本体装置内で改造はあるのか？

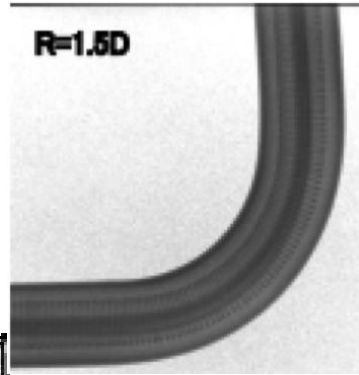
センターポストカバー



熱輸送シミュレーション結果 (熱源400°C, 溶接座CP面 100°C, 水温30°C)

延び解析から 2mm 程度のスペースが必要か？

QUEST 今後の歩み（内蔵物）



D : 10 mm

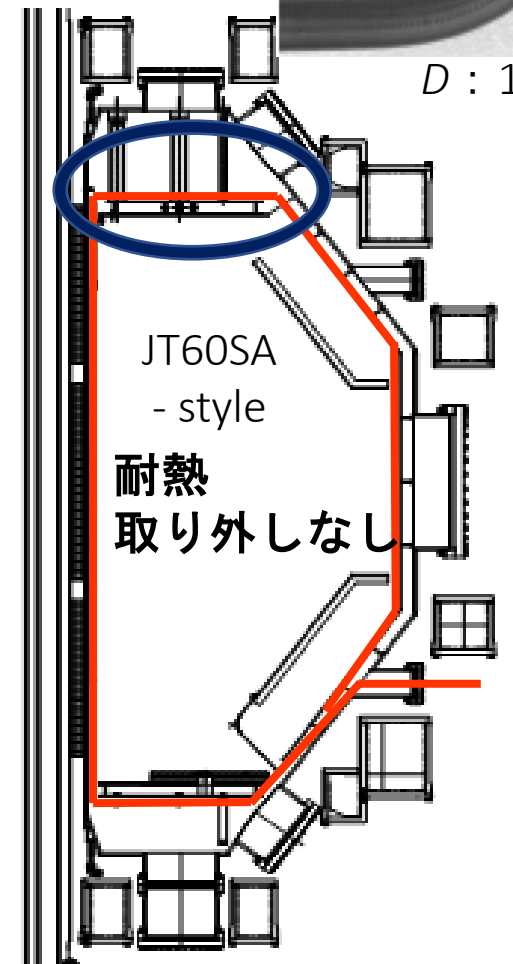
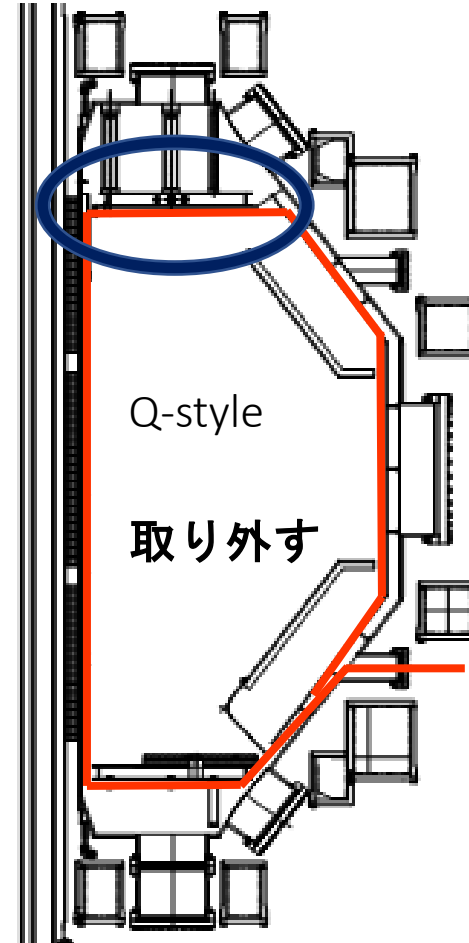
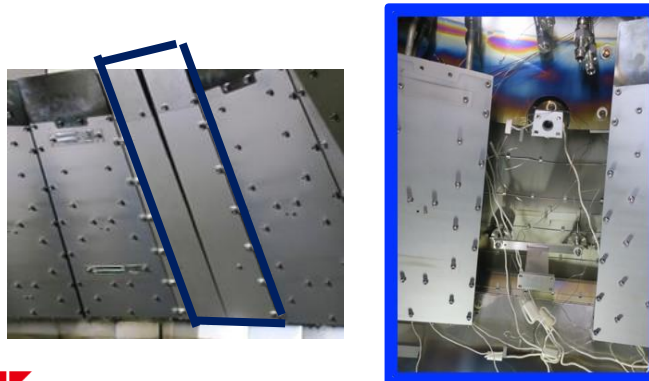
Q5. QUEST本体装置内で改造はあるのか？

Rogowski Coil

	従来	従来仕様	CHI仕様	耐熱
長さ	6.9m	6.3m	6.3m	6m
巻き数	~16k	~14k	~7k	~13k
鎖交面積 /turn	~50m ²	~50m ²	~50m ²	~22m ²

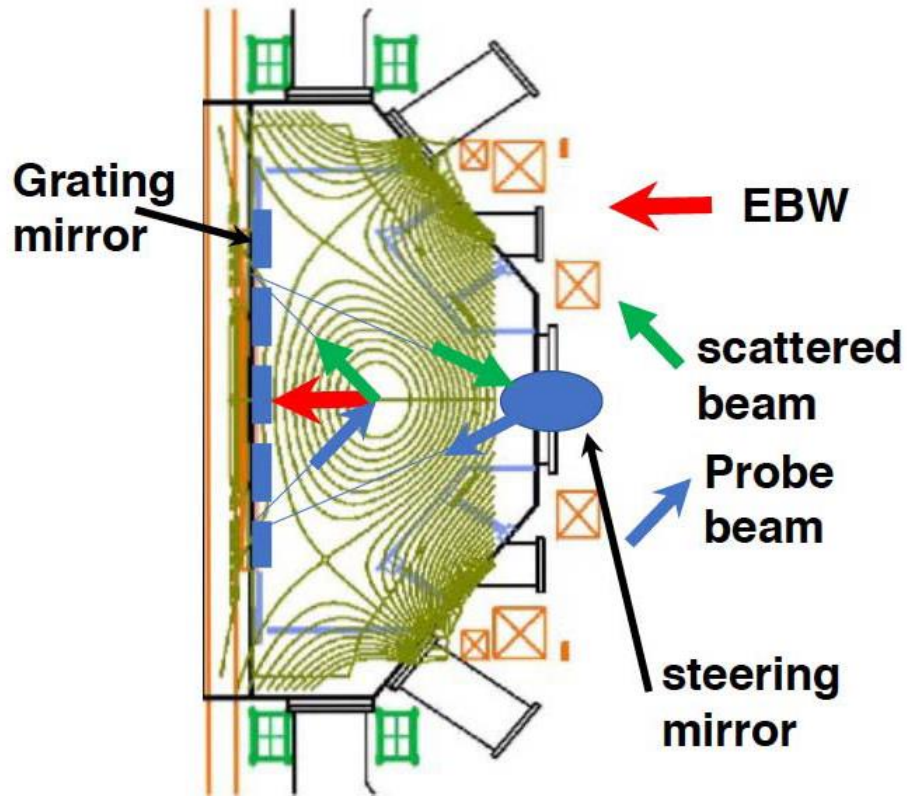
耐熱

パネル 1 枚取り外す
設置・撤去作業を
簡便に



QUEST 今後の歩み (計測)

EBW直接散乱波計測



Grating 鏡を使ってプローブ・散乱ビームを制御

磁気計測

ロゴスキーコイル (プラズマ電流)

ミルノフコイル (磁場揺動, 平衡解析)

フラックスループ (平衡解析) 熱流束・壁温度計測

静電プローブ群

熱電対群

赤外線カメラ

プラズマ温度・密度計測

トムソン散乱 (双方向)

マイクロ波干渉計 (双方向)

静電プローブ群

プラズマ分光 (双方向)

中性粒子計測

QMS

材料分析

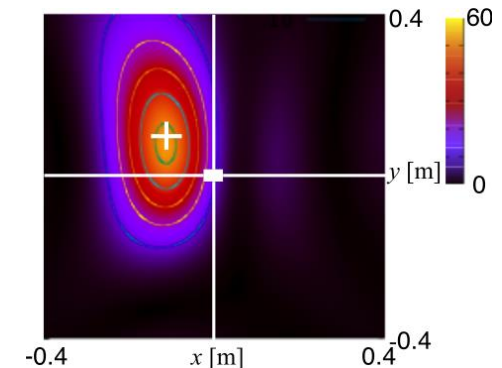
TDS

GDOES

EBW散乱直接計測 (NIFS・福井大)

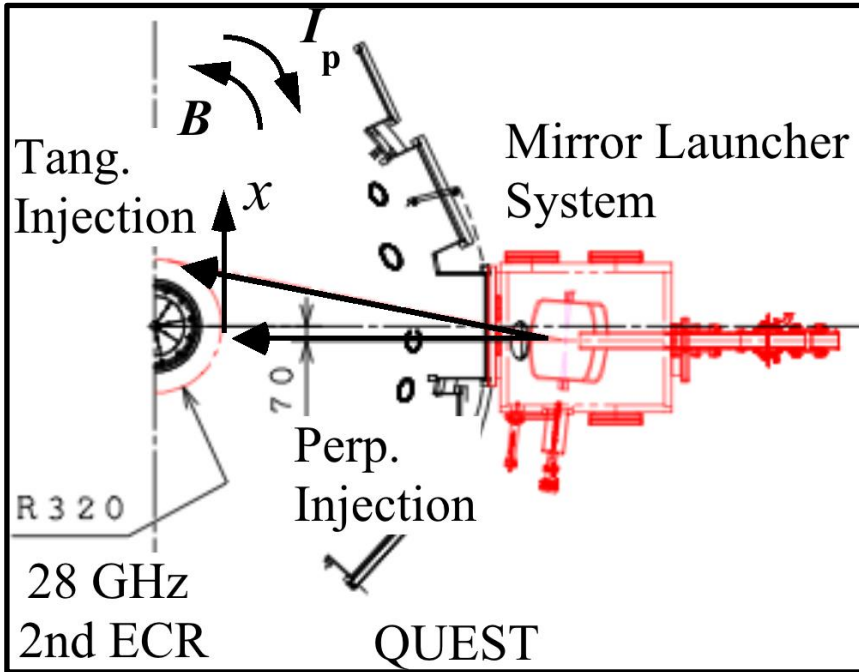
輻射計測

模擬輻射源を用いた
アダプティブアレイ解析



参考資料

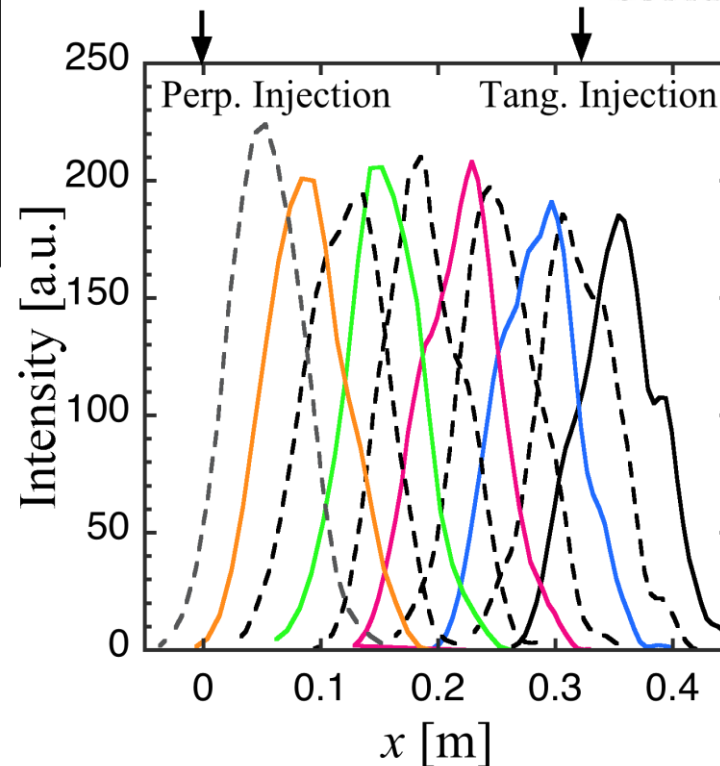
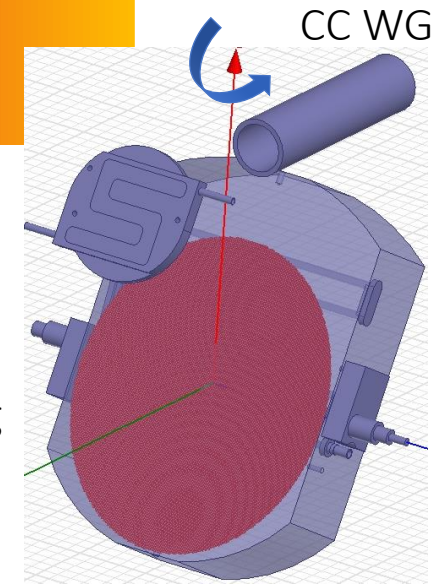
Beam Steering



The beam can be steered mainly in the toroidal direction to have the refractive parallel index $N_{//}$ from 0 to 1.

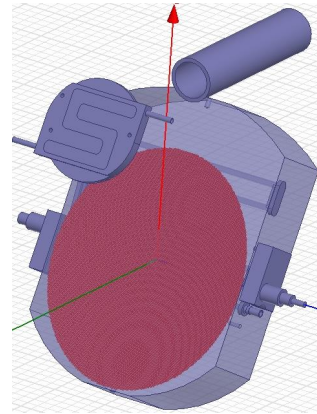
1st Convex Mirror

2nd Focusing Mirror



Low power test results

Beam Focusing

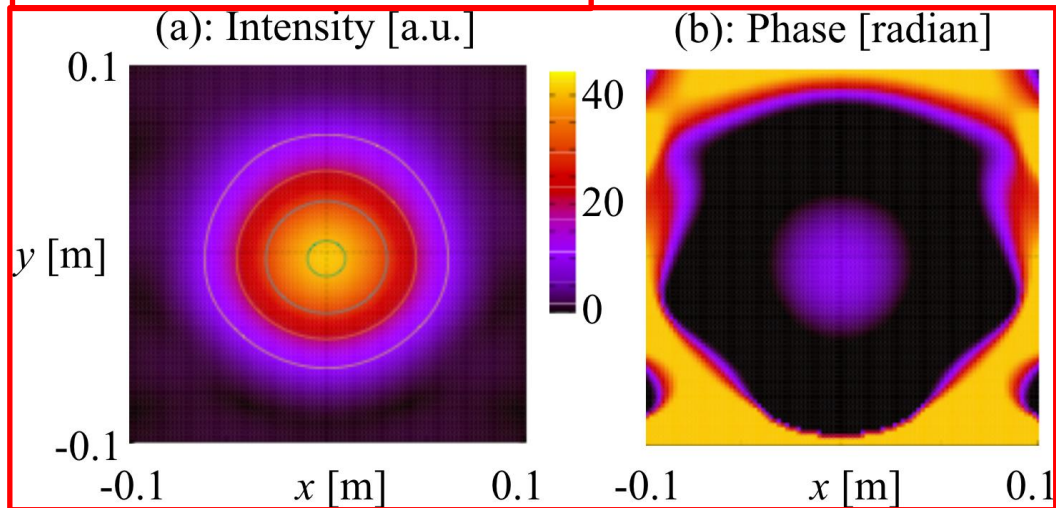


The irradiant HE11 beam was converted to Gaussian beam and expanded at the 1st mirror. The mirror was designed on the phase surfaces to be matched between the incident HE11 and output Gaussian beams using a developed Kirchhoff integral code.

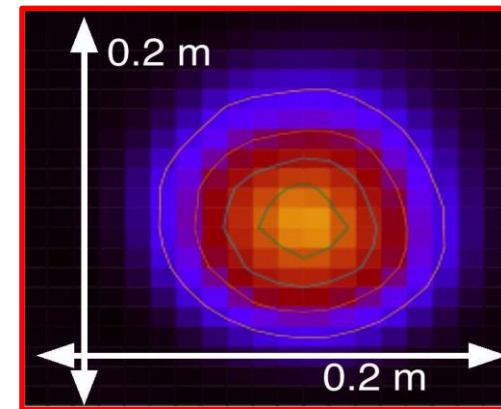
The 2nd large mirror sharply focused the expanded Gaussian beam to a narrow beam with a 5-cm waist size at the ECR layer.

Full wave simulation

at the ECR layer for a launching beam from a 2.5-inch CC WG.



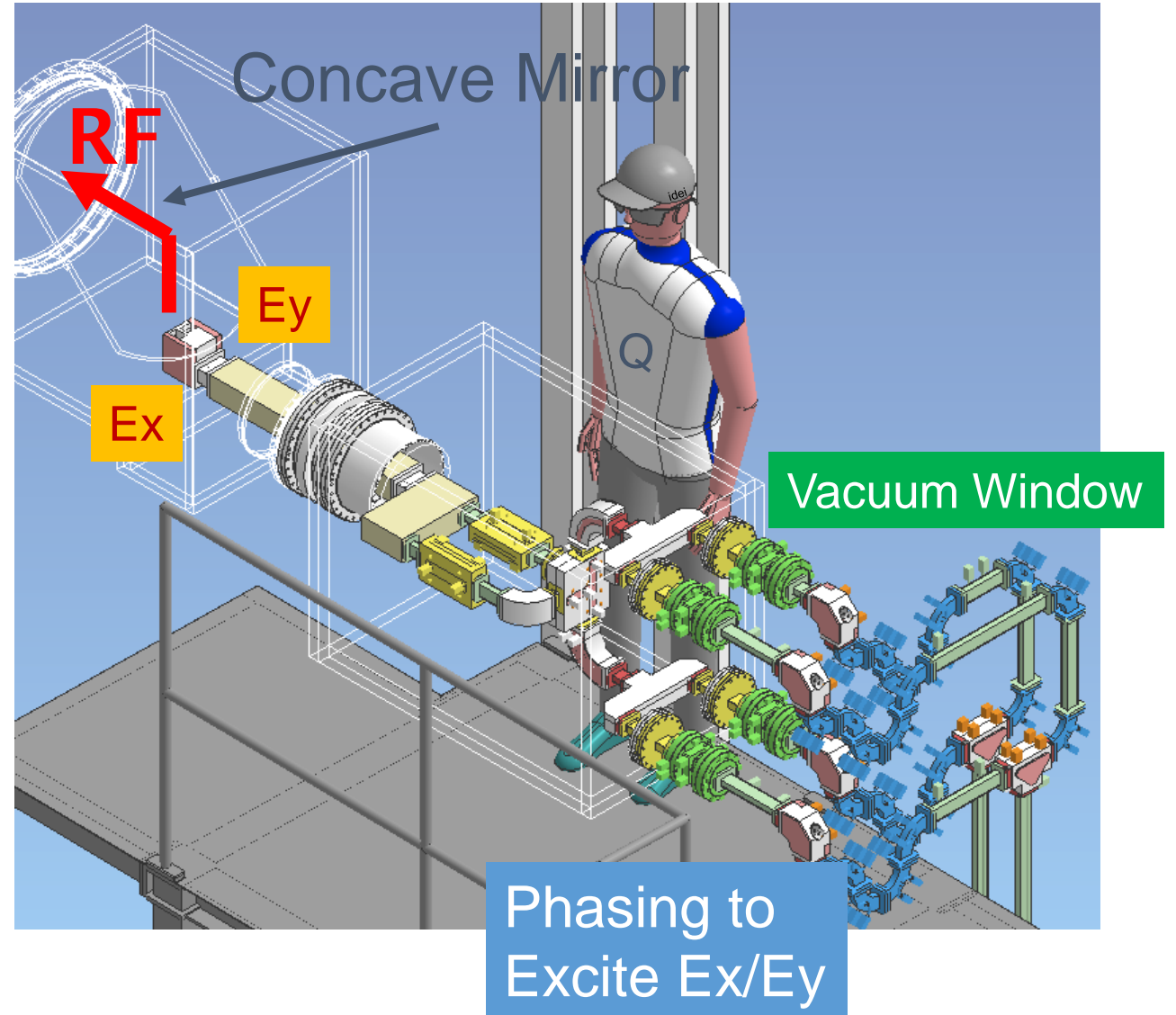
Low power test results



8.56 GHz ECH system

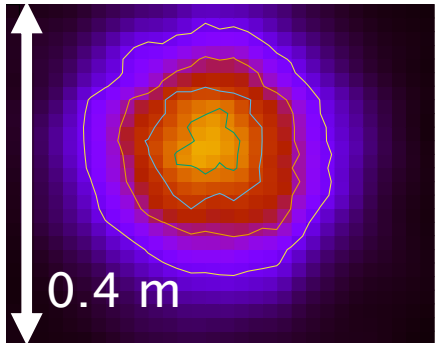


- ❖ Model : VKX-7864B1, CPI
- ❖ Peak frequency : 8.56 GHz
- ❖ Run time : CW
- ❖ Max. power & Gain : < 250 kW, 44dB

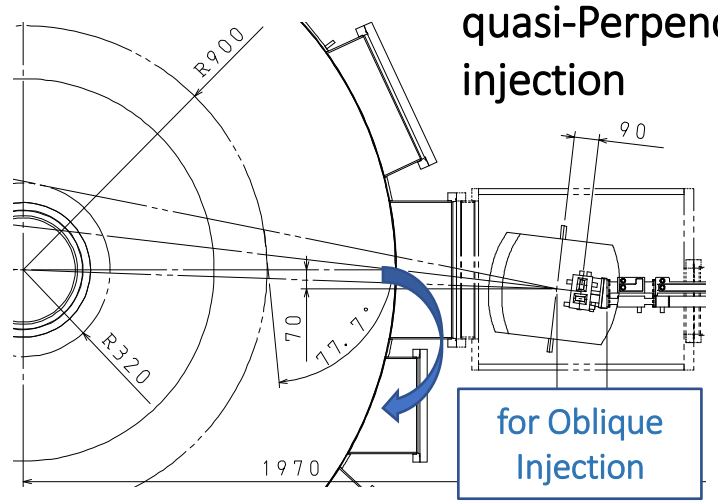
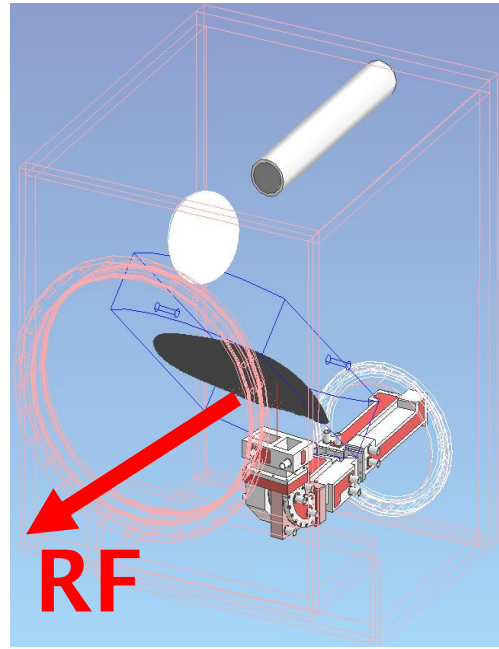


8.56 GHz ECH system

EC wave focused by a quasi-optical mirror



Low power test

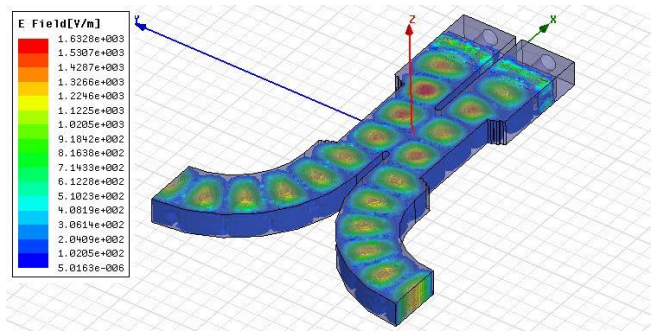


for EBWHCD
Oblique Injection with Optimized $N_{//}$

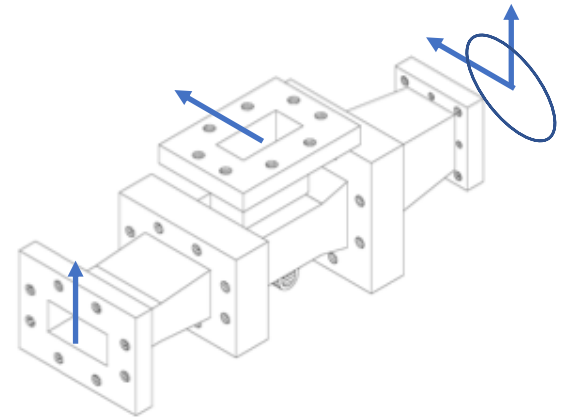
for EBWHCD
Elliptical-polarization Control

Ex, Ey: using 4-port Magic-Tee with Power Combiner for 1st O-mode / 2nd X-mode ECHCD

Focusing Beam

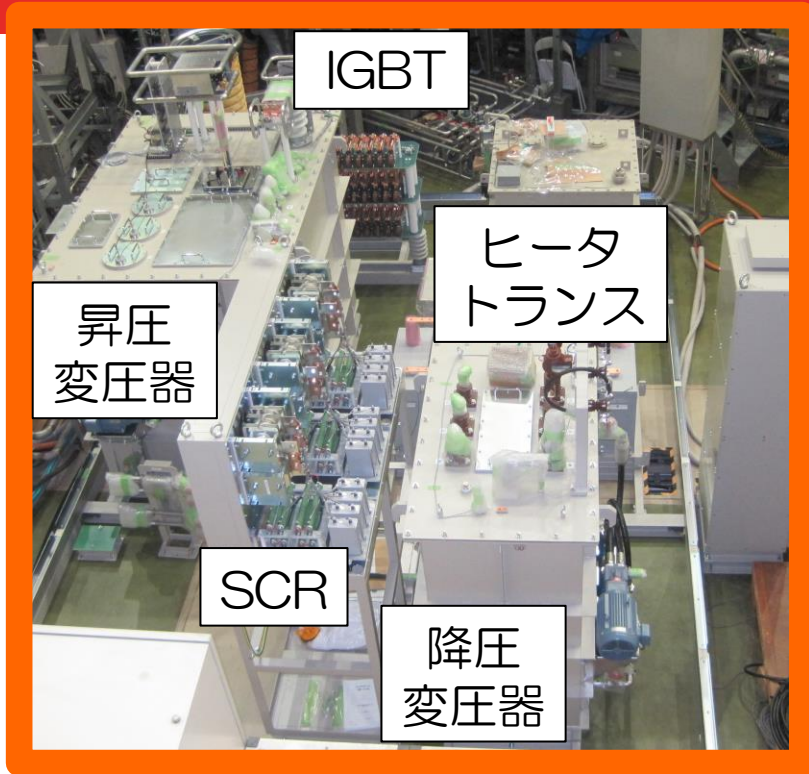


4-port Hybrid Phase-Shifter



Ortho-mode Transducer

8.56 GHz クライストロン電源



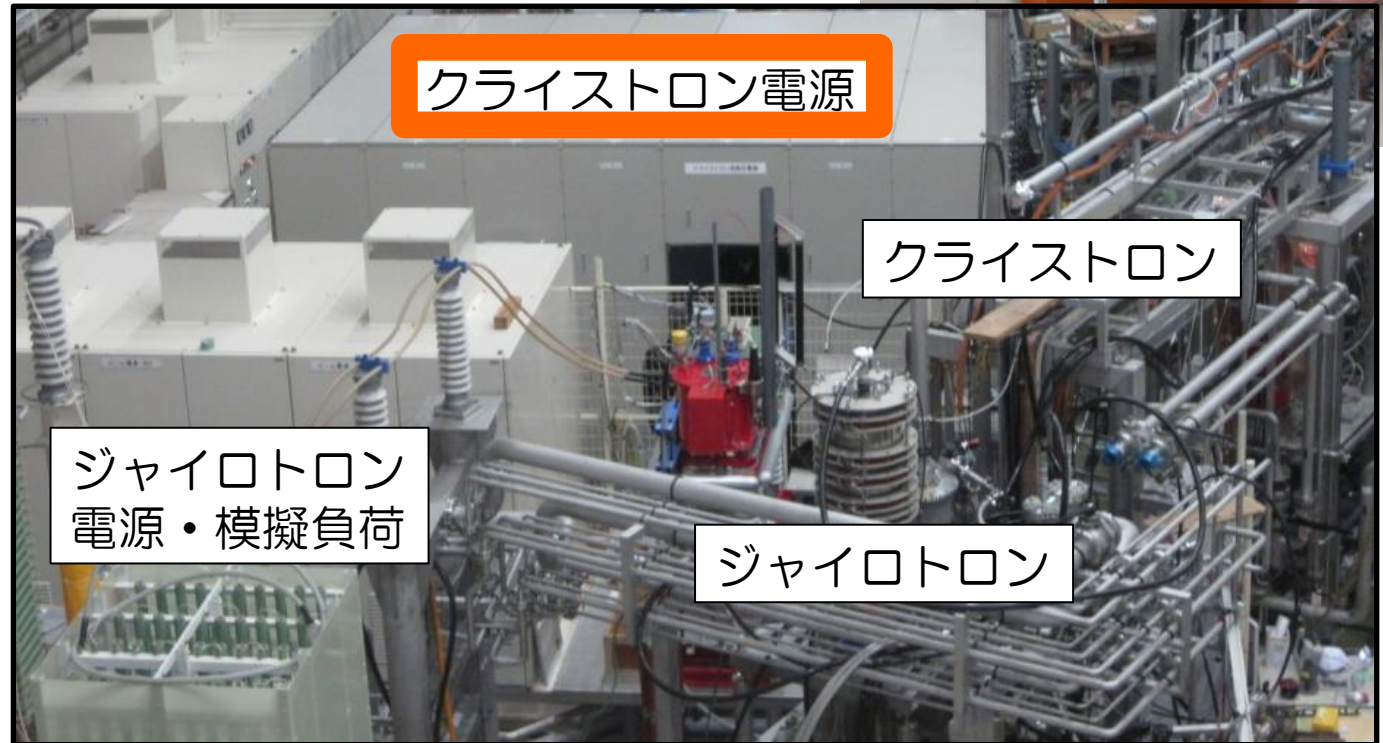
54 kV / 13 A
高圧電源

QUEST で取り合いの
高圧スイッチ・IGBTを
開発



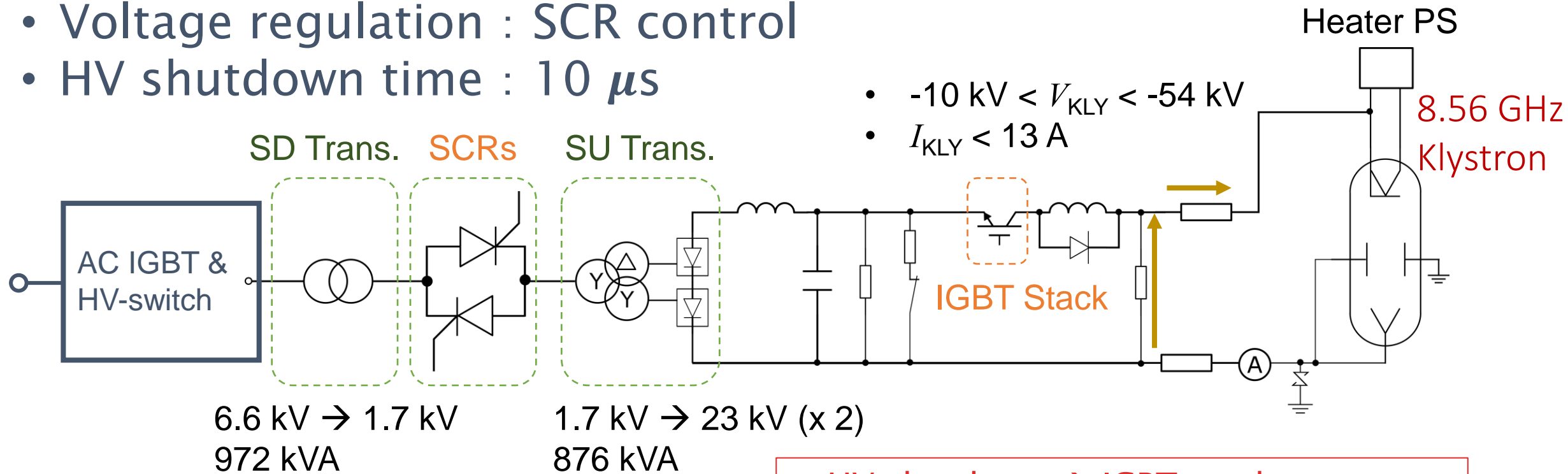
28 GHz システム
同時入射が可能に

8.56 GHz KLY システム
を用いた 定常実験を計画



Power supply for the Klystron

- Output voltage : 10 ~ 54 kVDC
- Polarity : Negative
- Output current : 13 A max
- Voltage regulation : SCR control
- HV shutdown time : 10 μ s



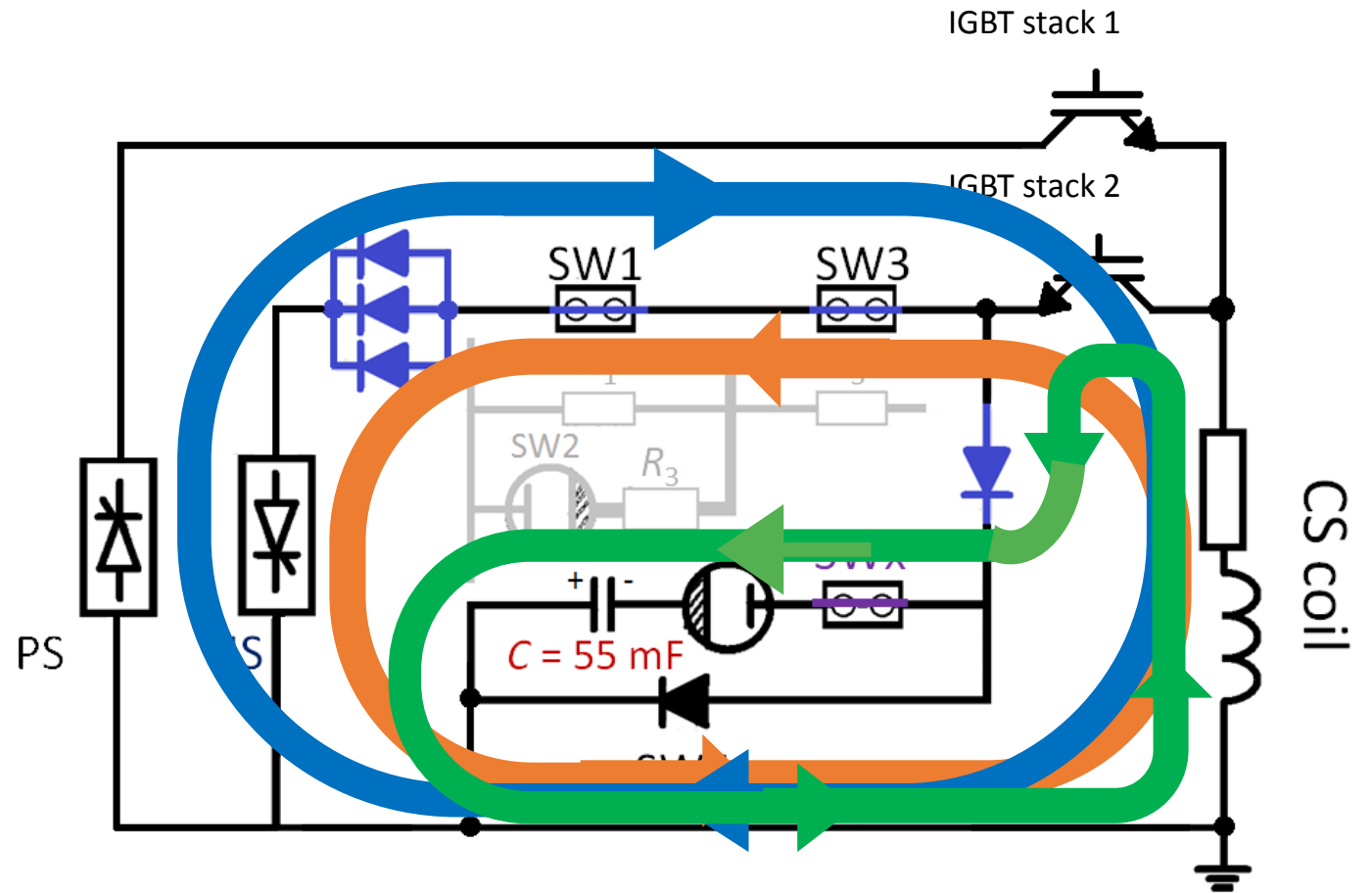
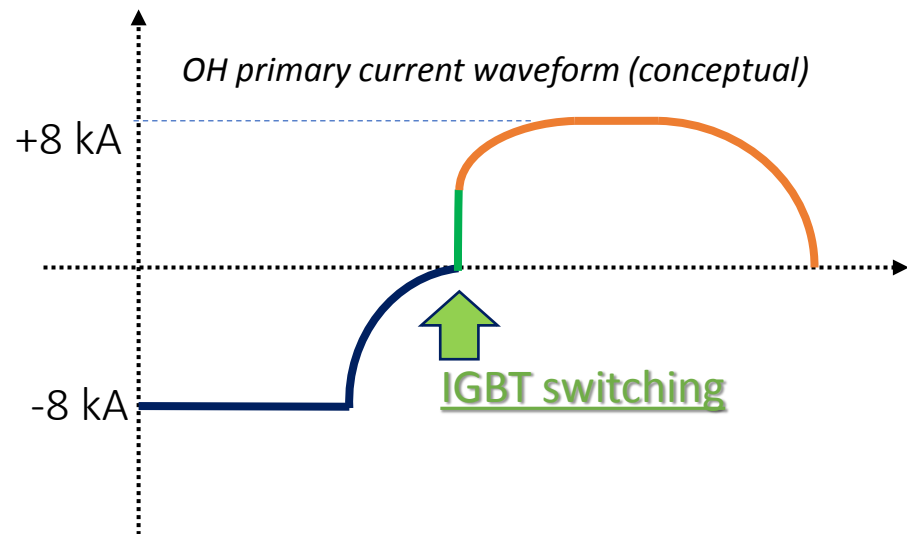
- HV shutdown \rightarrow IGBT stack
- AC shutdown \rightarrow AC IGBT & HV-switch

Upgrade of OH Power Supply

©To achieve $I_p > 100$ kA

- Primary CS current (± 8 kA)

1. Ramp down (PS, +8 kA)
2. Fast ramp-up (Cap. Bank, ≤ 2 kV)
3. Slow ramp-up (NS, -8 kA)

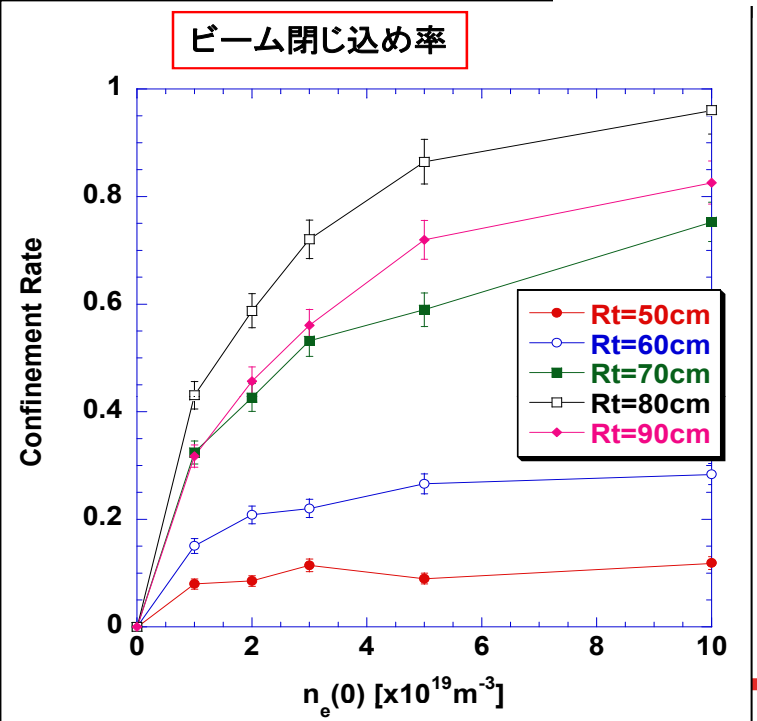
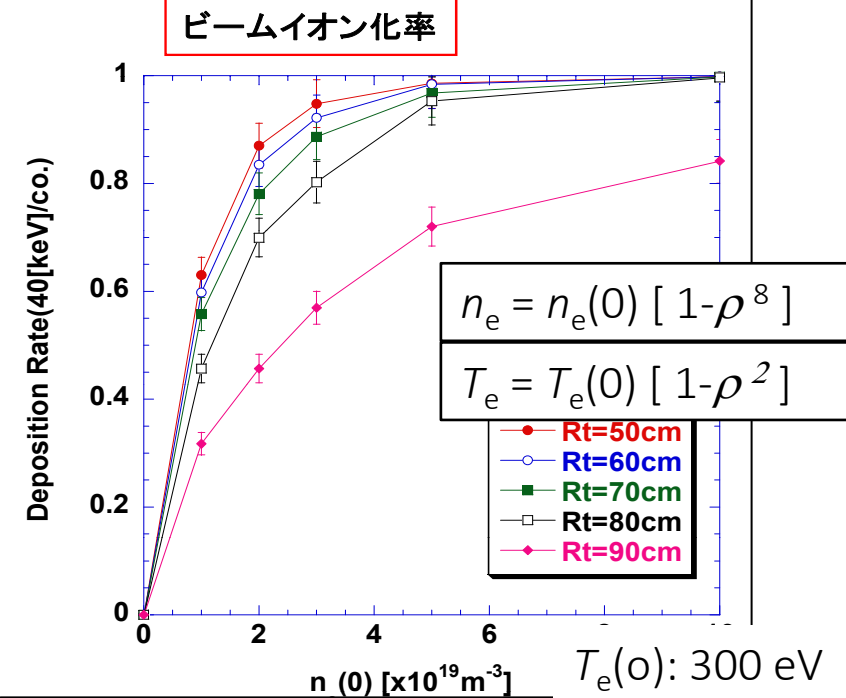
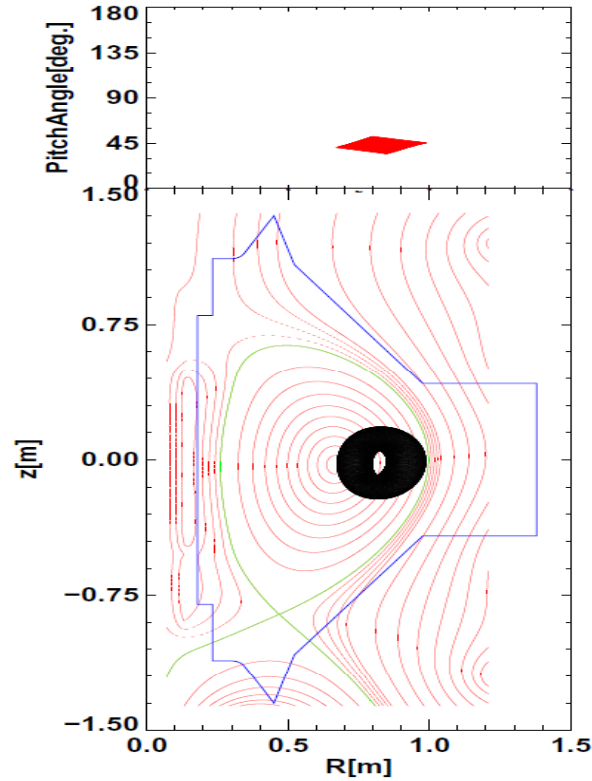
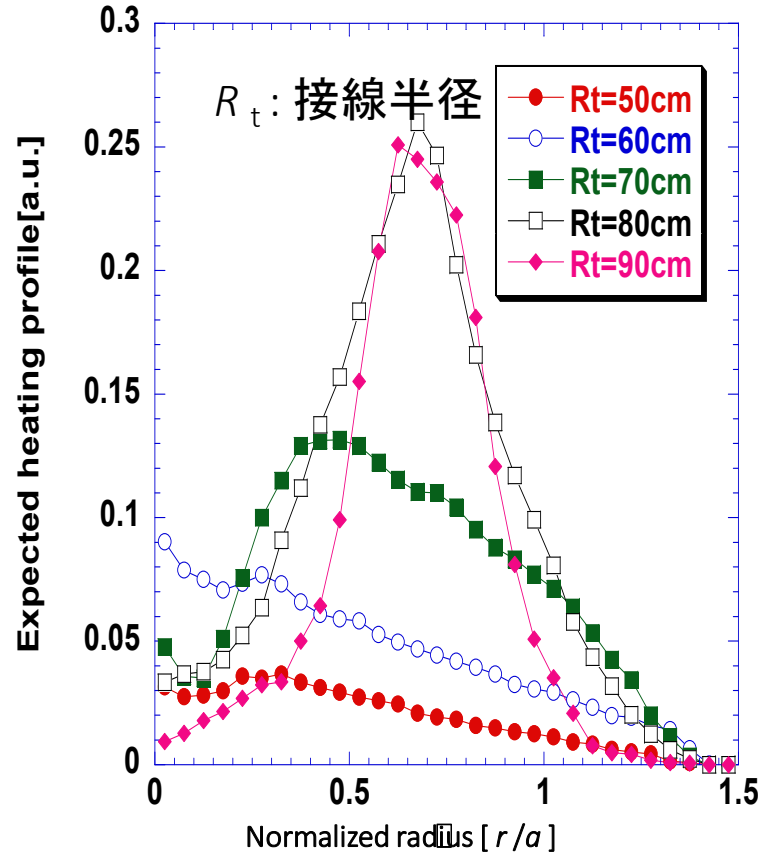


Circuit diagram of upgraded OH

NBI 軌道・加熱計算 [40 keV]

T. Osakabe, Y. Takeiri

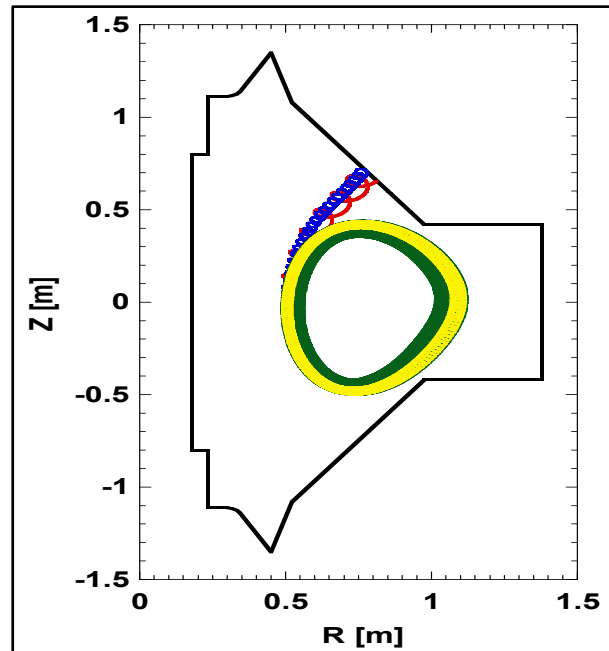
QUEST(Bt=0.25[T]/Ip=100[kA])



QUEST プラズマでは
電子へDeposition → NBCD

40keV中性水素ビームを5割程度
イオン化するには $1 \times 10^{19} [m^{-3}]$
以上の中心電子密度が必要

NBI 検討



[40keV, 0.5T, 100kA]

[40keV, 0.25T, 100kA]

[40keV, 0.25T, 200kA]

[10keV, 0.25T, 100kA]

- 高密度化 $\sim 1.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$
- 高電流化 $> 100 \text{ kA}$
- 高エネルギー化 $\sim > 10 \text{ keV}$

2015年度 :

NIFS: 東北大:

九大: で打ち合わせを始める

2016年度 : 具体的な方法について検討を開始

2017年度 : CHS-DNB の活用を模索

九大で経験を積む

(< 30 keV: 100 kW ベース)

2017-2018年度 :

NIFS でイオン源アーク放電の確認

(九大の実験参加)

2016年度 : OH-Cbankを用いた高周回電圧実験

2017年度 : 高密度・電流プラズマの達成

【28GHz】 80 kA, $4 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$

【CHI】 40 kA, $8 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$

2018年度 : 両振りOH電源回路開発