



# GAMMA 10/PDXにおけるICRF加熱による ダイバータ模擬実験に向けたプラズマ制御

1. 研究背景・目的
2. 実験装置
  - GAMMA 10/PDX
  - ICRF System & Antennas
3. ICRF加熱実験
  - 高温イオン生成実験
  - 高密度化実験
  - 端損失イオン加熱実験
4. まとめ

第18回 若手科学者によるプラズマ研究会

平成27年3月4-6日

日本原子力研究開発機構 那珂核融合研究所

筑波大学プラズマ研究センター

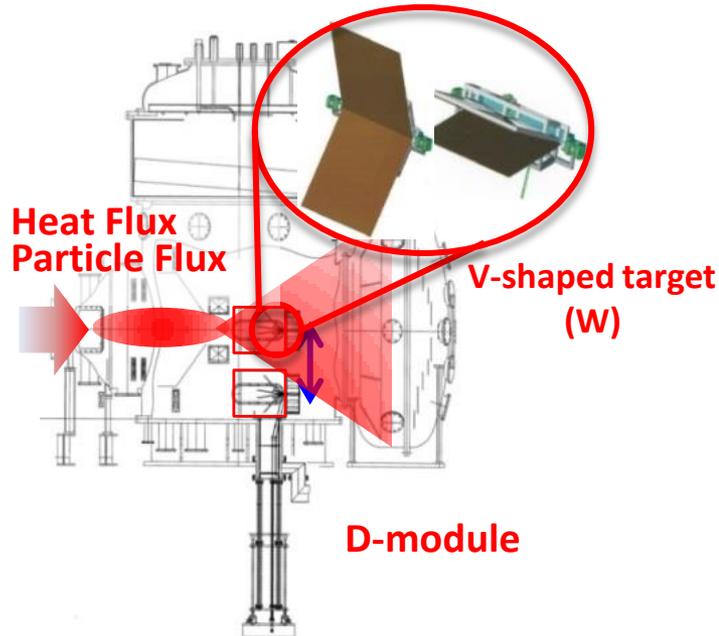
隅田 脩平, ジャン ソウオン

# 1. 研究背景·目的

---



# 1. 研究背景・目的



GAMMA 10/PDX West End

## ◆背景

GAMMA 10/PDXにおいて

- 端部で開放となる磁場配位
- 高熱流束・高イオン温度の端損失を活かした、プラズマ輸送と境界(ダイバータ)プラズマ研究が推進されている。

## ◆目的

イオンサイクロトロン周波数帯(ICRF)加熱を用いてダイバータ模擬実験の運転領域拡張を行う。

- イオンサイクロトロン加熱(ICH)によりセントラル部イオン温度の上昇
- 高密度化による高粒子束生成
- 西端部に隣接する西バリア部に新アンテナを導入し、端損失イオン加熱を高効率化

→ 端損失プラズマの制御

## 2. 実験装置

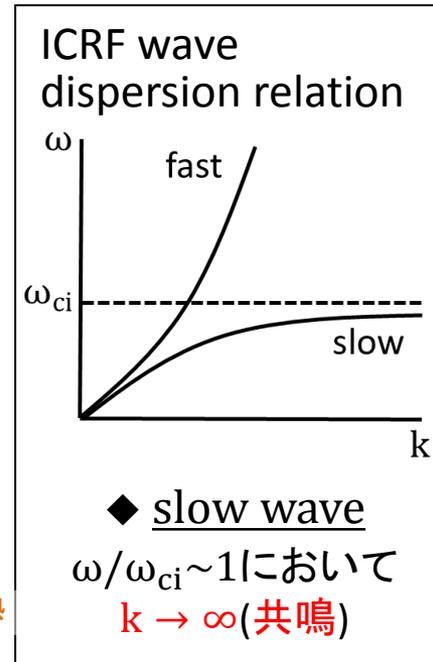
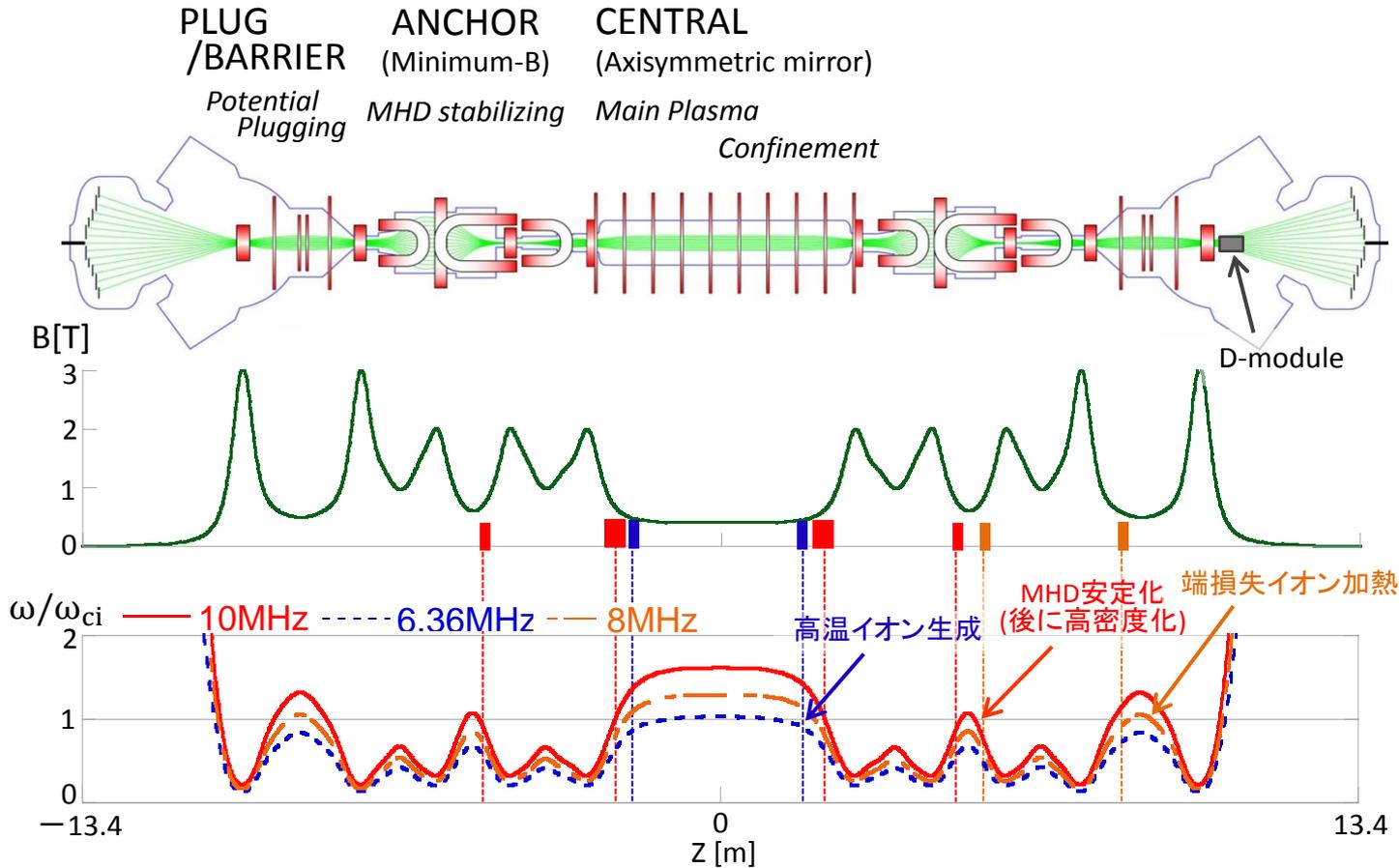
---

- GAMMA 10/PDX
- ICRF System & Antennas



## 2. 実験装置 — GAMMA 10/PDX

### GAMMA 10/PDX



- ◆ GAMMA 10/PDXの各部において $\omega/\omega_{ci} \sim 1$  (イオンサイクロトロン共鳴層) が存在 [ $\omega \sim 6.36\text{MHz}$ : セントラル部,  $10\text{MHz}$ : アンカー部,  $8.0\text{MHz}$ : バリア部]



# 2. 実験装置 — ICRF System & Antennas

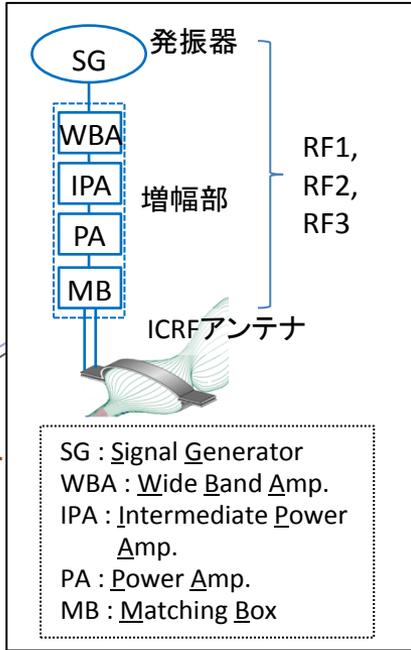
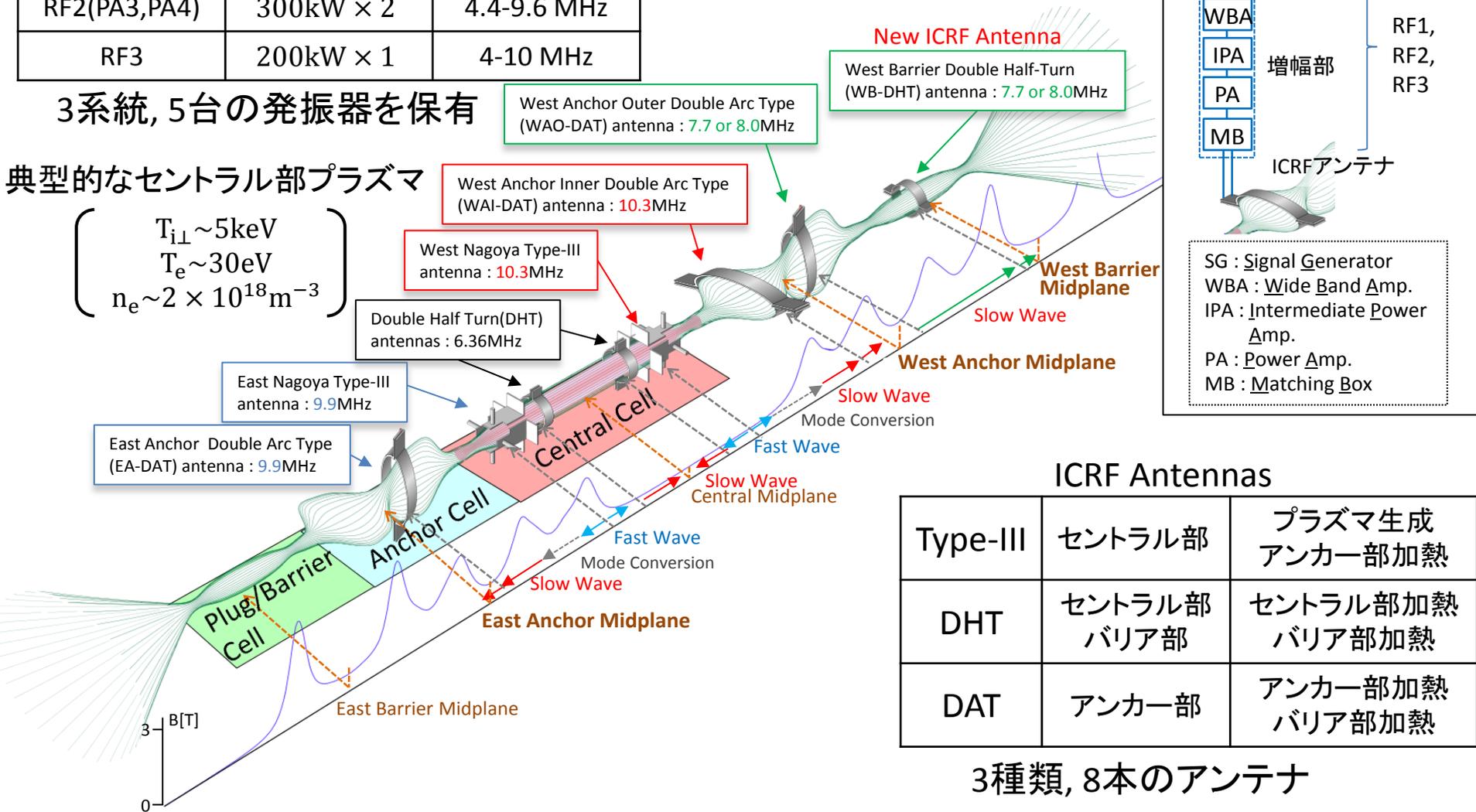
## ICRF System

RF1(PA1,PA2)	300kW × 2	7.5-15 MHz
RF2(PA3,PA4)	300kW × 2	4.4-9.6 MHz
RF3	200kW × 1	4-10 MHz

3系統, 5台の発振器を保有

典型的なセントラル部プラズマ

$$\left( \begin{array}{l} T_{i\perp} \sim 5\text{keV} \\ T_e \sim 30\text{eV} \\ n_e \sim 2 \times 10^{18} \text{m}^{-3} \end{array} \right)$$



## ICRF Antennas

Type-III	セントラル部	プラズマ生成 アンカー部加熱
DHT	セントラル部 バリア部	セントラル部加熱 バリア部加熱
DAT	アンカー部	アンカー部加熱 バリア部加熱

3種類, 8本のアンテナ

### 3. ICRF加熱実験

---

- 高温イオン生成実験
- 高密度化実験
- 端損失イオン加熱実験

### 3. ICRF加熱実験

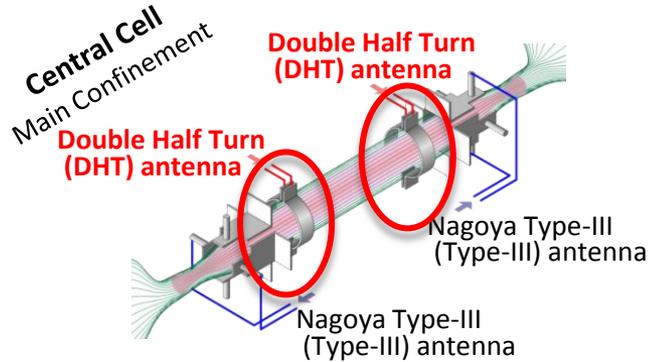
---

- 高温イオン生成実験
- 高密度化実験
- 端損失イオン加熱実験



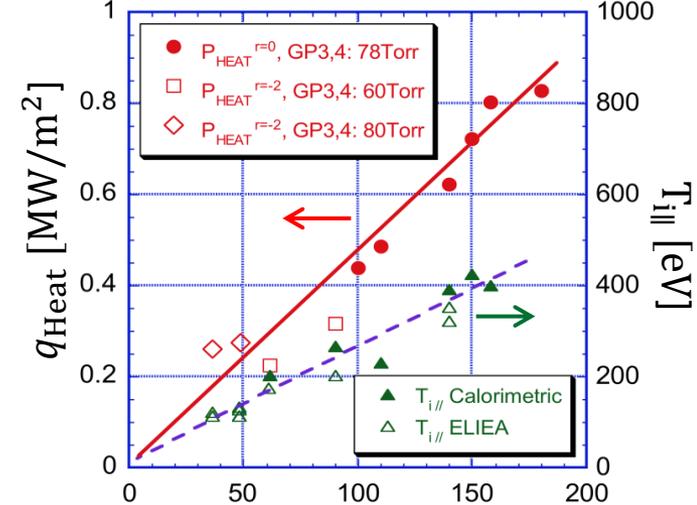
# 3. ICRF加熱実験 — 高温イオン生成実験

◆ セントラル部イオン温度を上昇させ、端損失熱流束の増加を目指す



Type-III	9.9MHz & 10.3MHz	プラズマ生成 アンカー部加熱	} Standard mode ( $T_{i\perp} > 5\text{keV}$ )
DHT	6.36MHz	セントラル部加熱	

セントラル部ICHと端損失熱流束の関係



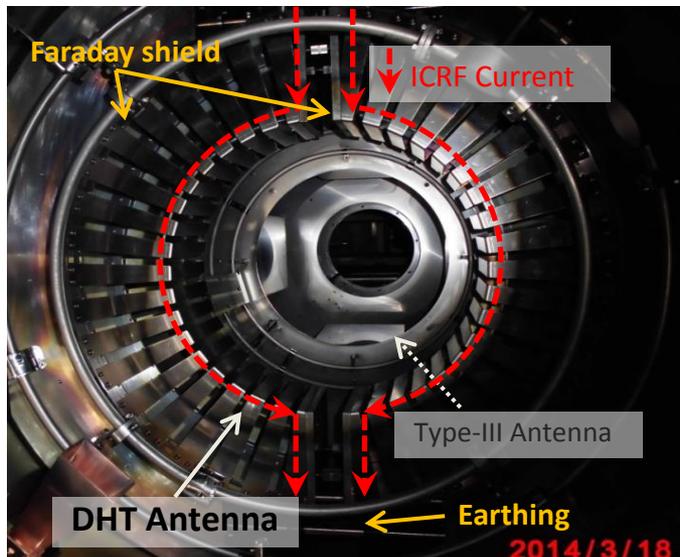
ICRF power with DHT antennas [kW]  
(セントラル部イオン共鳴加熱電力)

端損失イオン温度  $T_{i||}$  & 熱流束  $q_{\text{Heat}}$   
 $\propto$  セントラル部イオン共鳴加熱電力

$$q_{\text{Heat}} = \frac{1}{2} \Gamma_i T_{i||}$$

$\Gamma_i$ : 端損失イオン束

→ 更なる高熱流束を得るためには  
**粒子束の増大及びイオン温度の上昇が不可欠である。**



### 3. ICRF加熱実験

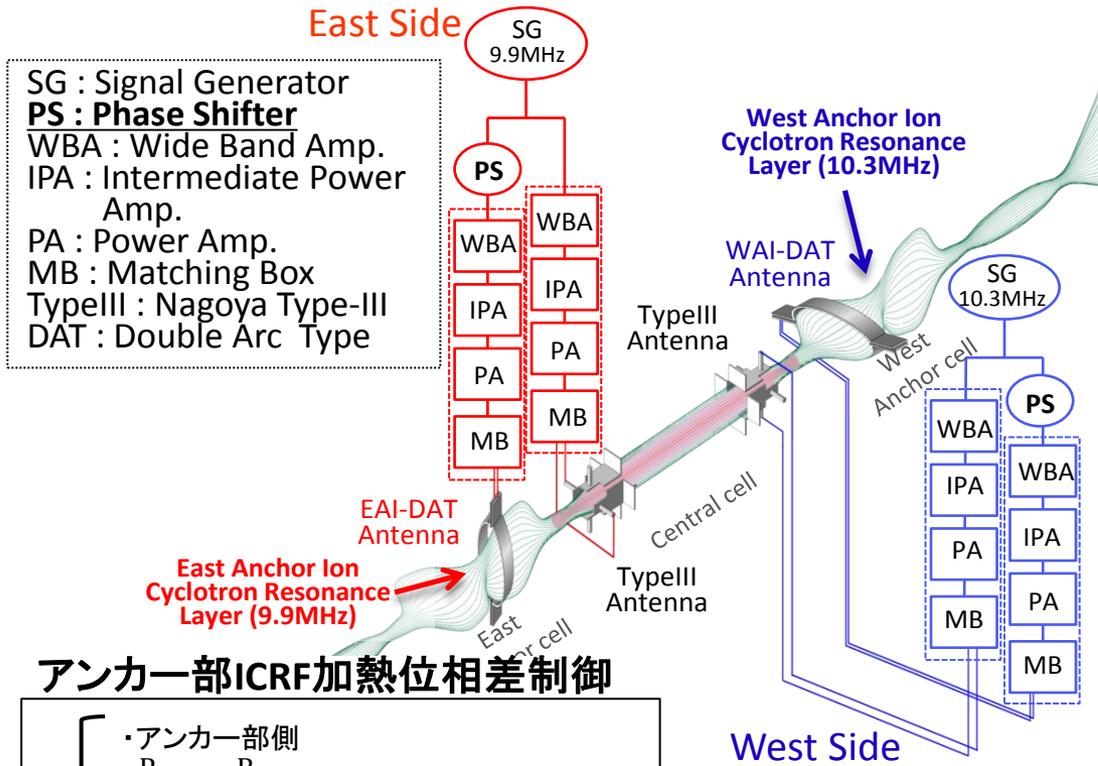
---

- 高温イオン生成実験
- 高密度化実験
- 端損失イオン加熱実験



# 3. ICRF加熱実験 — 高密度化実験

- ◆ 軸方向閉じ込め電位形成によってセントラル部高密度化を促し, 高粒子束生成を目指す  
 → 東西両アンカー部において同時にICRF加熱の位相差制御を行う



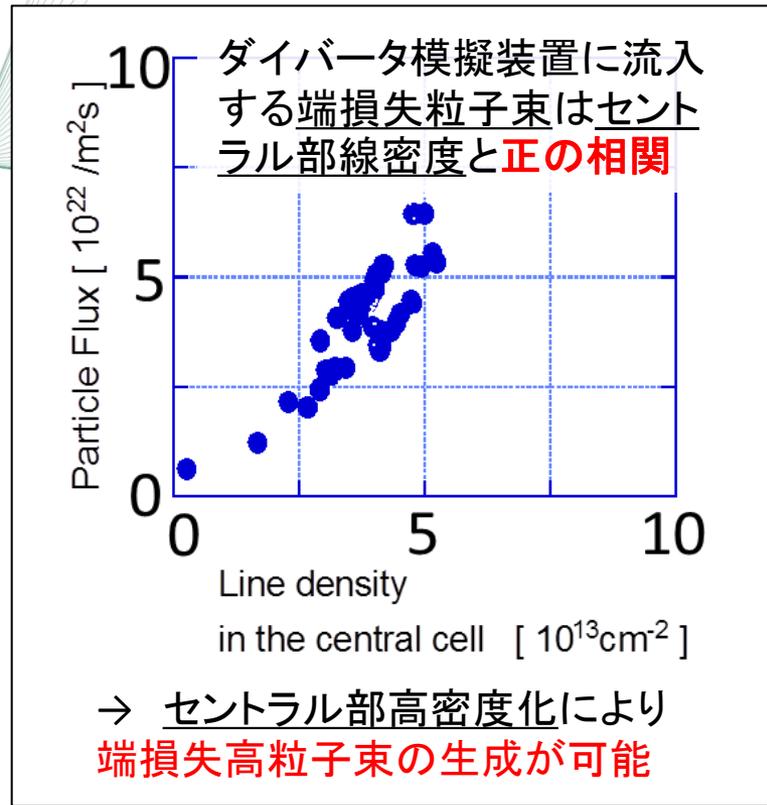
## アンカー一部ICRF加熱位相差制御

- ・アンカー一部側  

$$\frac{P_{DAT}}{P_0} = \frac{R_{DAT}}{R_0} = 1 + \cos(\delta - k_z d)$$
- ・セントラル部側  

$$\frac{P_{TypeIII}}{P_0} = \frac{R_{TypeIII}}{R_0} = 1 + \cos(\delta + k_z d)$$

$\delta$  : アンテナ間の位相差,  $k_z$  : ICRF波動の波数  
 $d$  : アンテナ間の距離,  $P_0$  : 単独アンテナでの電力  
 $R$  : アンテナ負荷



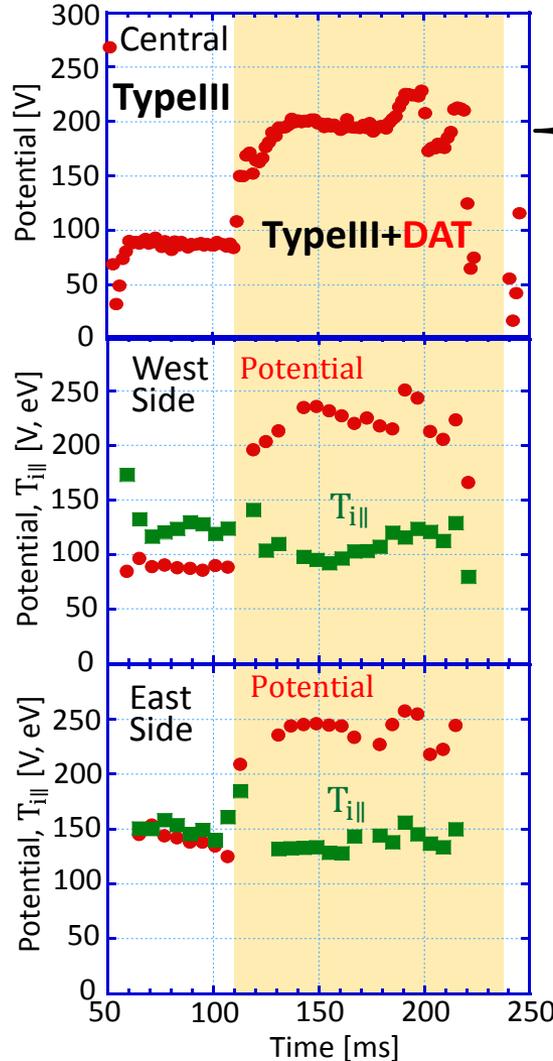
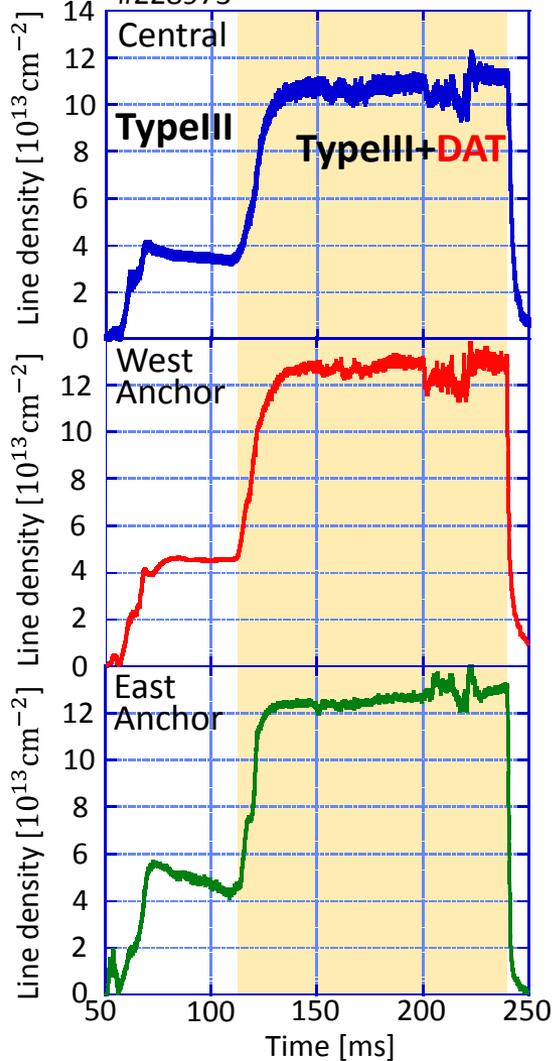
Type-III	9.9MHz & 10.3MHz	プラズマ生成 アンカー部加熱
DAT	9.9MHz & 10.3MHz	アンカー部加熱



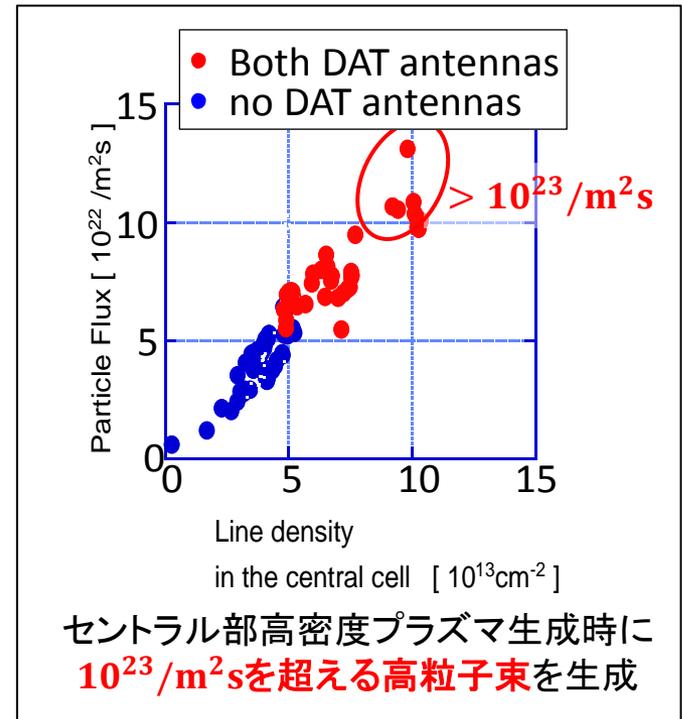
# 3. ICRF加熱実験 — 高密度化実験

## ◆ 東西両アンカー一部同時ICRF加熱位相差制御実験の典型的な放電(#228973)

#228973



- ・東西両アンカー部高密度プラズマ生成により  
セントラル部高密度化を確認  
→ 軸方向閉じ込め電位形成が要因の一つ
- ・放電を通して高いイオン温度( $T_{ii} > 100\text{eV}$ )  
を維持



### 3. ICRF加熱実験

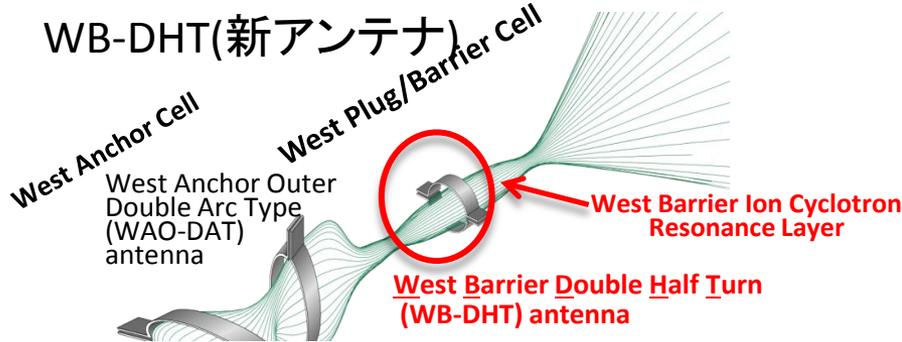
---

- 高温イオン生成実験
- 高密度化実験
- 端損失イオン加熱実験

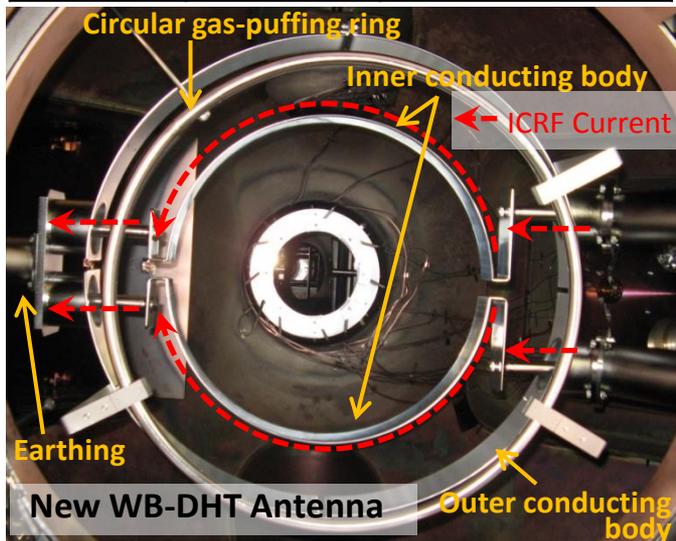


# 3. ICRF加熱実験 — 端損失イオン加熱実験

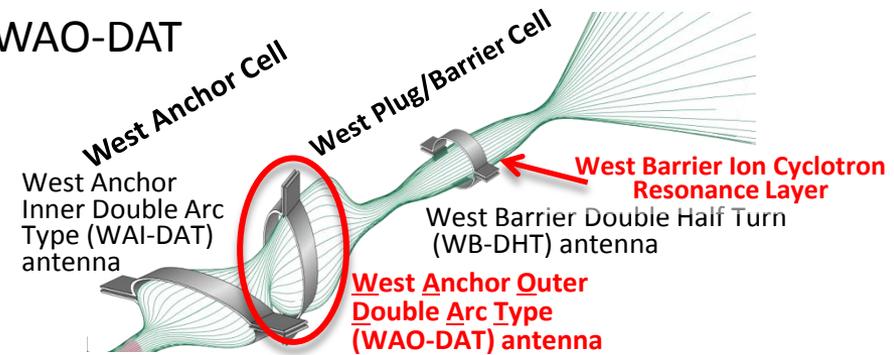
◆ 新アンテナによる端損失イオン加熱効果を他アンテナによる加熱効果と比較し評価する  
WB-DHT(新アンテナ)



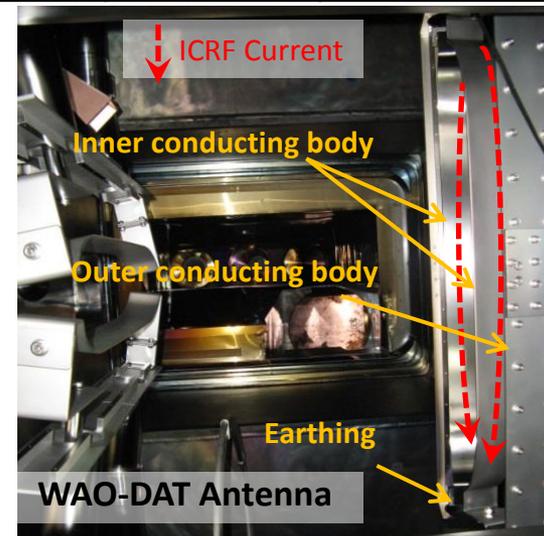
Type-III	9.9MHz & 10.3MHz	プラズマ生成 アンカー部加熱
DHT	6.36MHz	セントラル部加熱
WB-DHT	8.0MHz	バリア部加熱



WAO-DAT



Type-III	9.9MHz & 10.3MHz	プラズマ生成 アンカー部加熱
DHT	6.36MHz	セントラル部加熱
WAO-DAT	7.7MHz	バリア部加熱



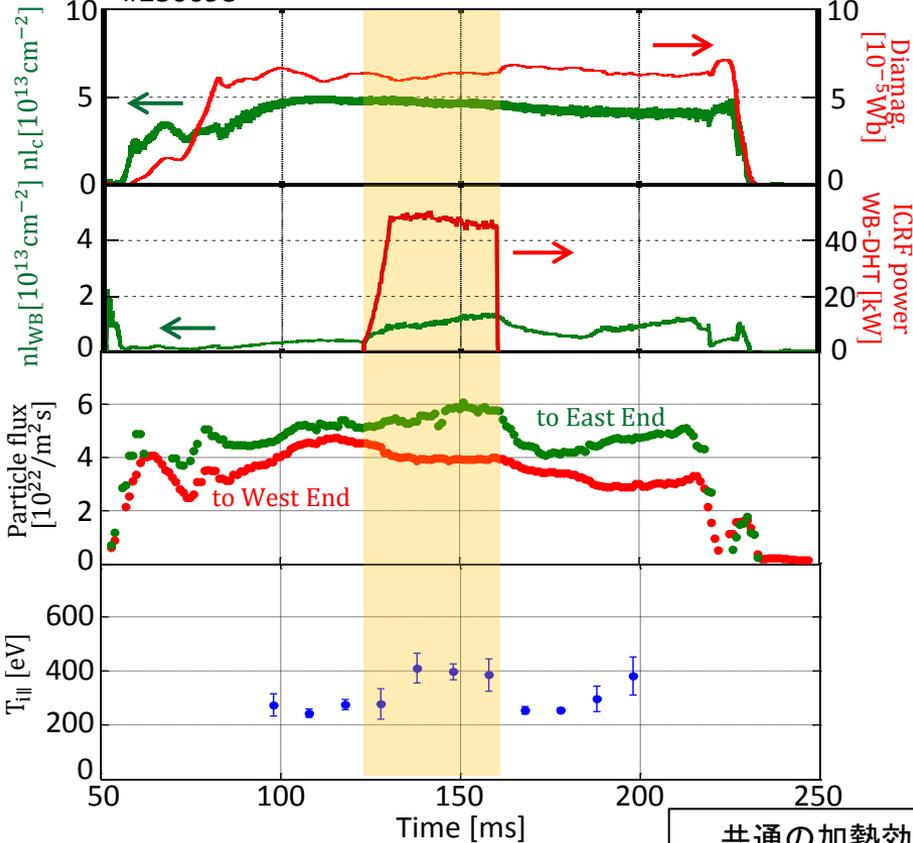


# 3. ICRF加熱実験 — 端損失イオン加熱実験

◆ 端損失イオン加熱実験の典型的な放電 (#230698:WB-DHT, #231803:WAO-DAT)

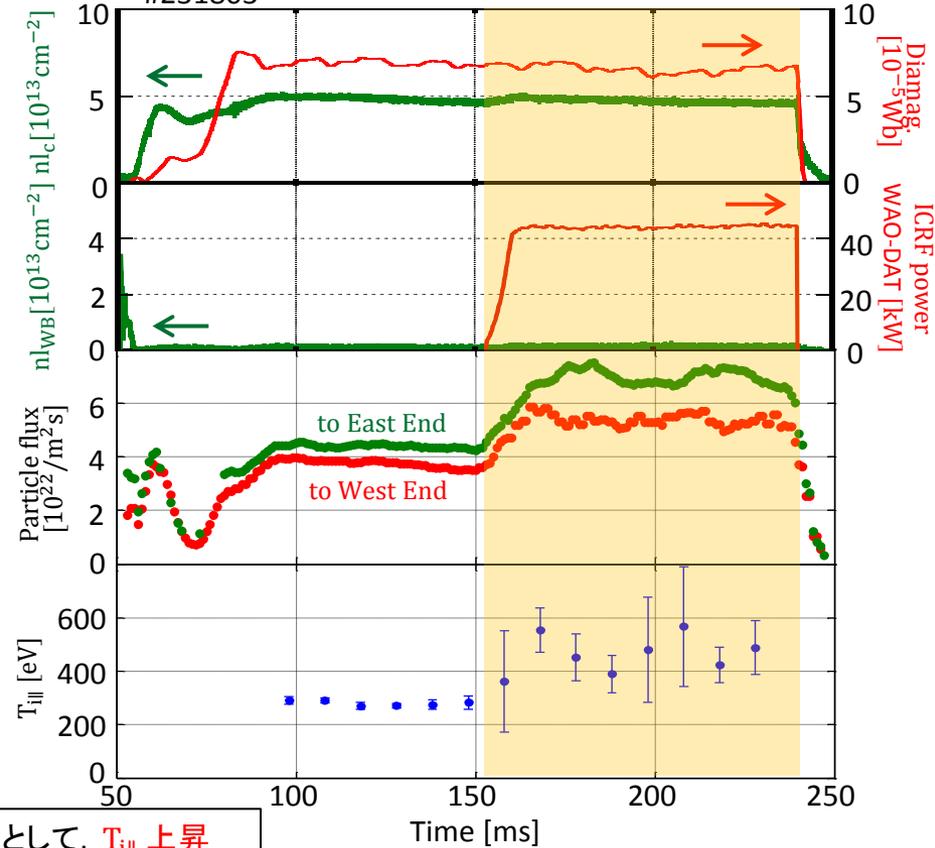
## WB-DHT(新アンテナ)

#230698



## WAO-DAT

#231803



共通の加熱効果として,  $T_{||}$  上昇

- ・西バリア部線密度  $nl_{WB}$  が上昇
  - ・西端部への粒子束の減少, 東端部への粒子束の増大
- 磁力線に垂直な方向に加熱され, **西バリア部ミラー磁場に捕捉されたことが要因の一つ**

- ・西バリア部線密度  $nl_{WB}$  はほとんど変化なし
  - ・両端部への粒子束の増大
- セントラル部に存在する悪い曲率の共鳴層の加熱効果

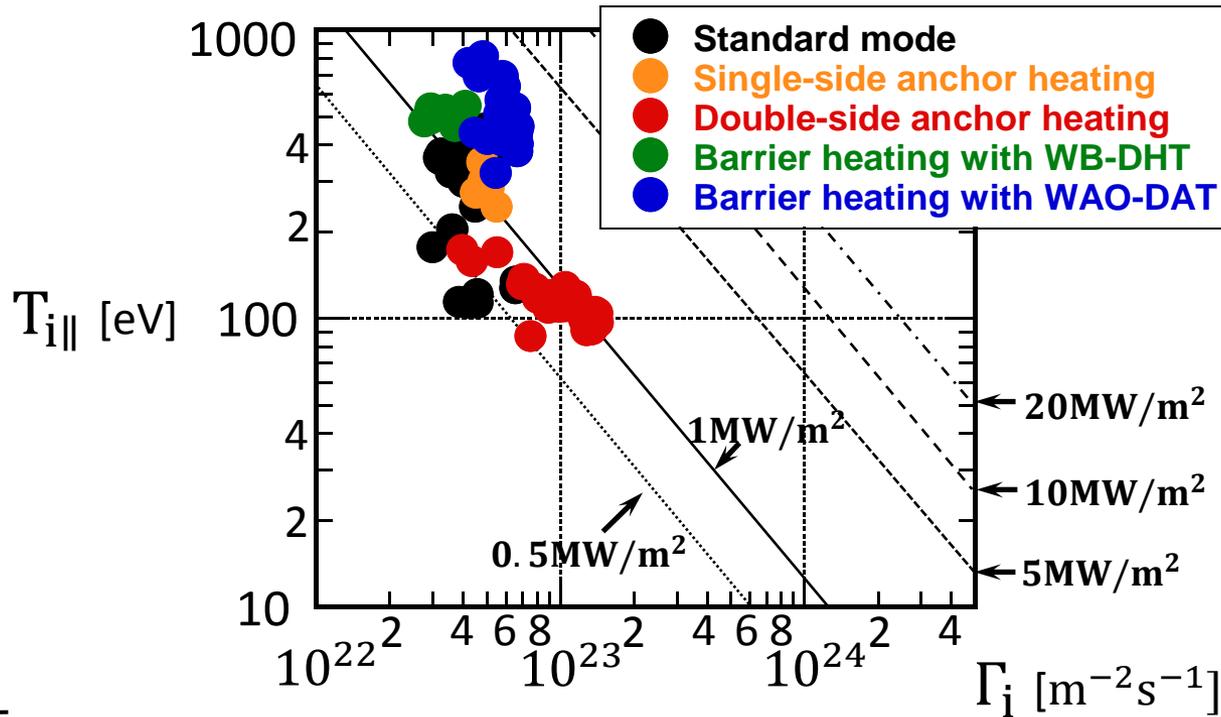
## 4. まとめ

---



# 4. まとめ

端損失プラズマの制御を目的としたICRF加熱実験により  
拡張されたダイバータ模擬実験の運転領域



- セントラル部イオン加熱や端損失イオンの直接加熱により、端損失イオン温度は十分に高い領域(~1keV)まで拡張した。
- セントラル部の高密度化によって、端損失粒子束を目標の一つであるITER定常運転時に想定されるSOLプラズマの領域( $10^{23} \sim 10^{24} / \text{m}^2 \text{s}$ )まで拡張することが出来た。

→ 今後ICRF加熱実験配位を組み合わせて、更なる運転領域の拡大を目指す。



## 4. まとめ

- GAMMA 10/PDXにおいて実施されているダイバータ模擬実験の運転領域拡張に向けた、端損失プラズマの制御を目的とするICRF加熱実験を行った。
- セントラル部イオン加熱により、端損失イオン温度が上昇し熱流束が増大した。
- 東西アンカー部アンテナを用いてセントラル部における高密度化に成功し、 $10^{23} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$  を超える高粒子束が生成されることを確認した。セントラル部高密度化の要因の一つとして東西両アンカー部における軸方向閉じ込め電位形成が示唆される。
- 端損失イオン加熱の高効率化のために新アンテナ(WB-DHT)を導入した。WB-DHT加熱は、既存アンテナ(WAO-DAT)の場合と同様にイオン温度上昇に効果的であるが、WAO-DATが両端部への粒子束を増大させた結果に対し西端部への粒子束を減少させた。WB-DHT加熱により西バリア部密度が上昇したことから、端損失粒子が西バリア部ミラー磁場に捕捉されたと考えられる。

### ◆今後の展望

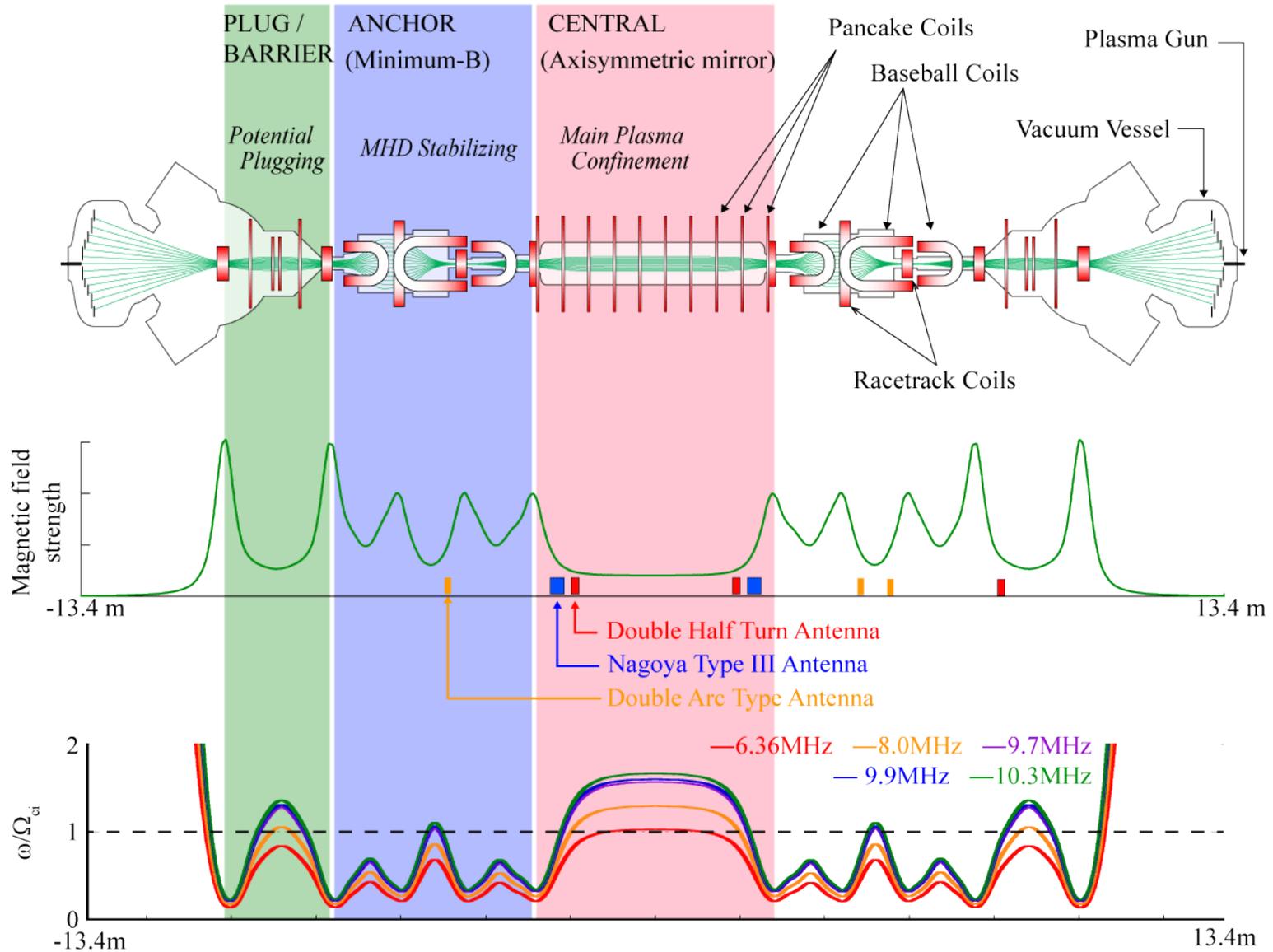
- 更なるセントラル部高密度化には、より高密度プラズマを東西両アンカー部で同時に生成する必要がある。
- 端損失イオン加熱をより有効的に活用するために、新アンテナによる加熱効果を詳細に調べ、形状の改造を含めて検討する。
- 以上のICRF加熱実験配位を組み合わせ、更なる運転領域の拡大を目指す。





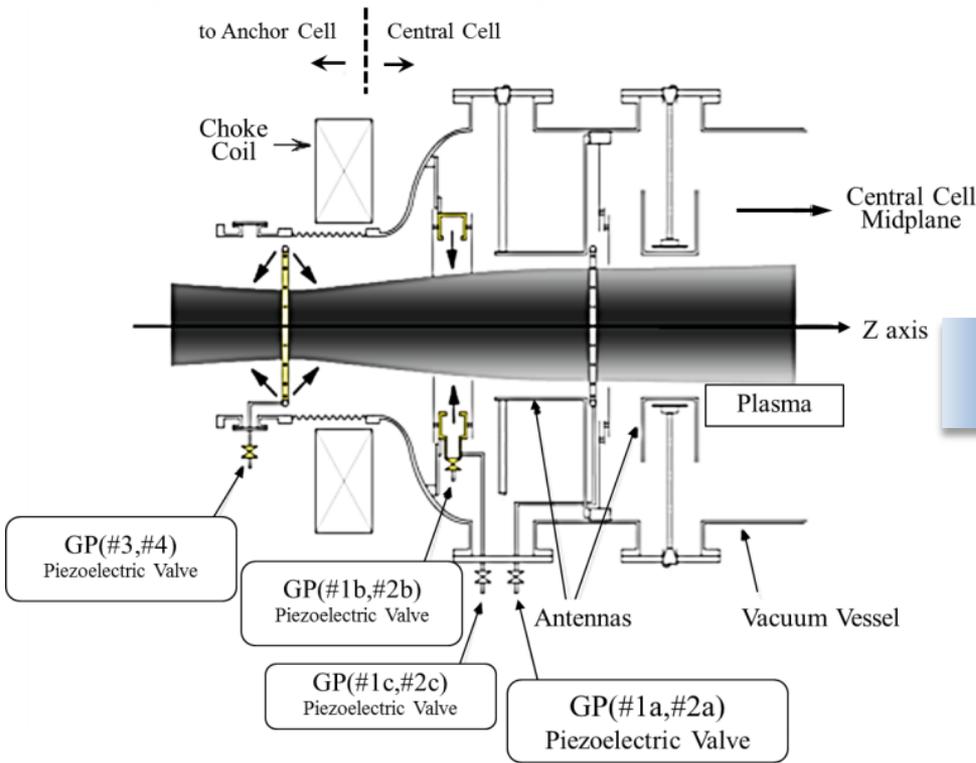


## 2. 実験装置 — GAMMA 10/PDX

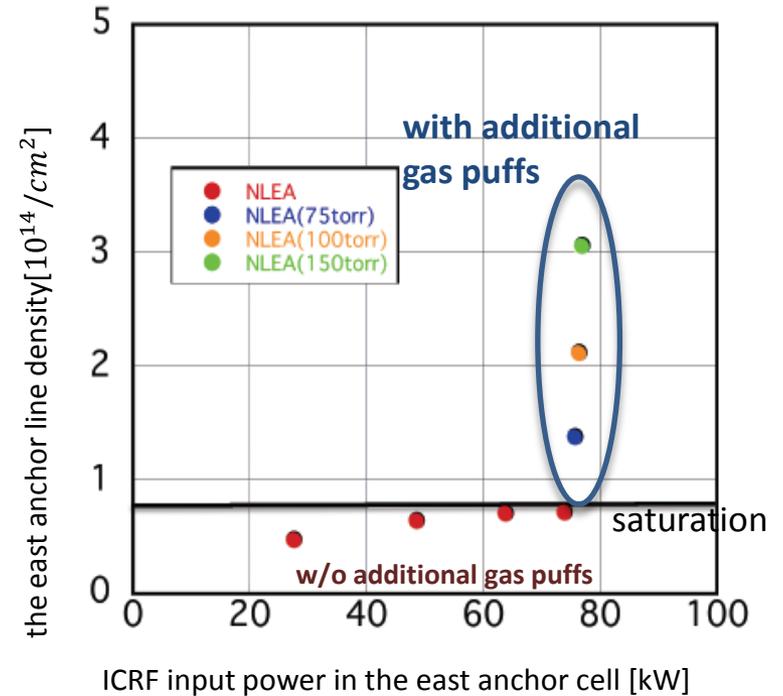




## 2. 実験装置 — GAMMA 10/PDX



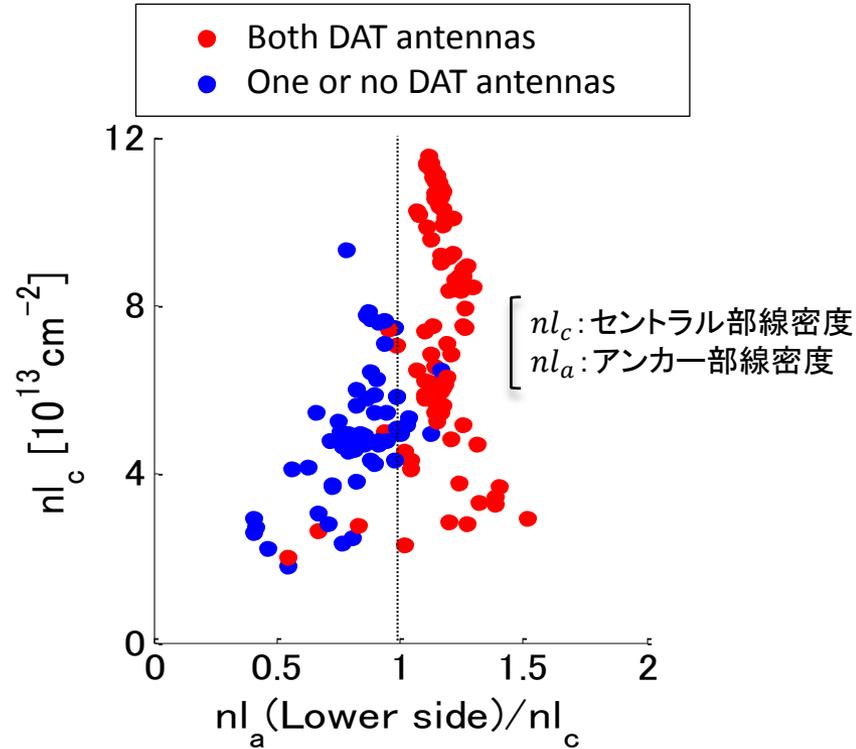
H<sub>2</sub>ガスパフ(リング型, ボックス型)はセントラル部とアンカー部間に設置されている。



H<sub>2</sub>ガスの追加ガスパフにより高周波加熱では飽和していたプラズマの密度を上昇させる。



# 3. ICRF加熱実験 — 高密度化実験



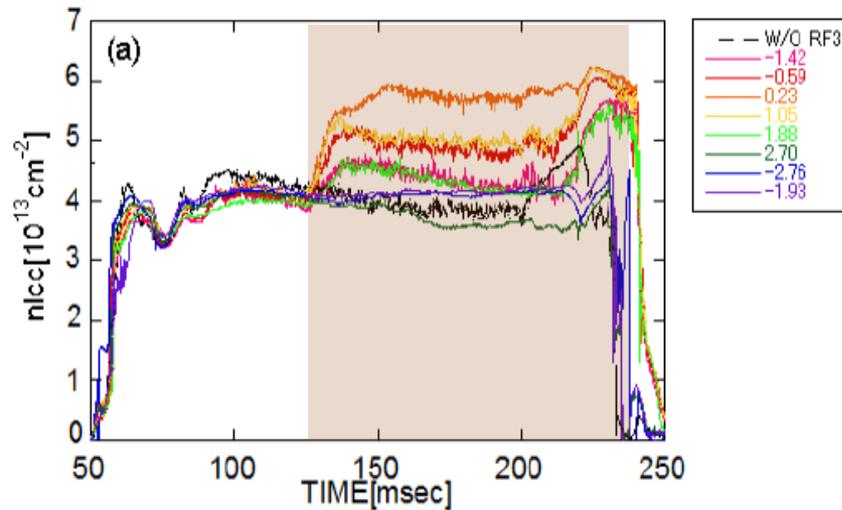
セントラル部高密度化の条件  
低側アンカー部密度 > セントラル部密度

アンカー部とセントラル部間に  
軸方向閉じ込め電位形成を示唆

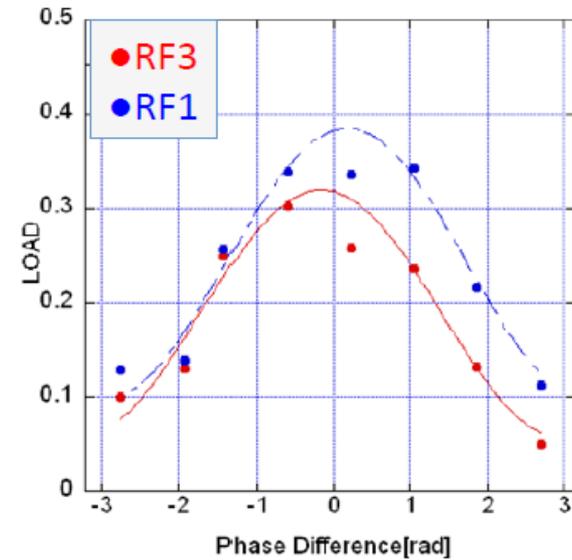


## 2. 実験装置 — 高密度化実験

東側位相制御



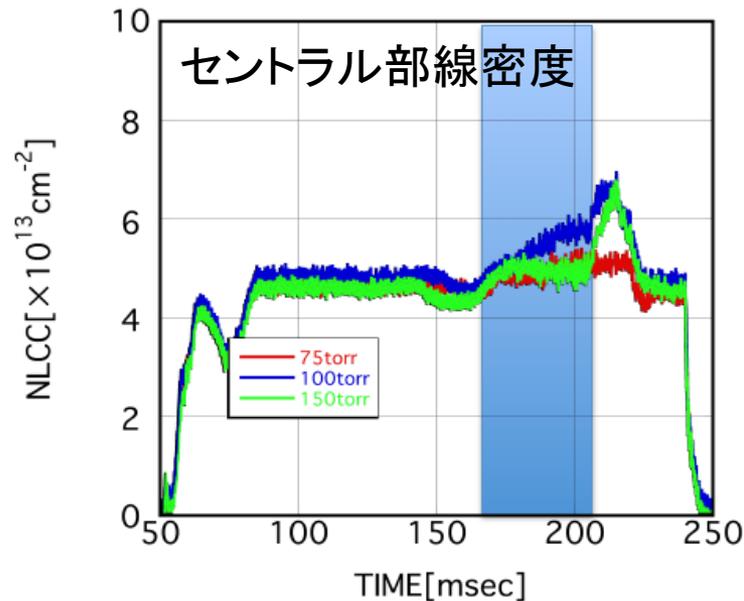
位相とLOAD



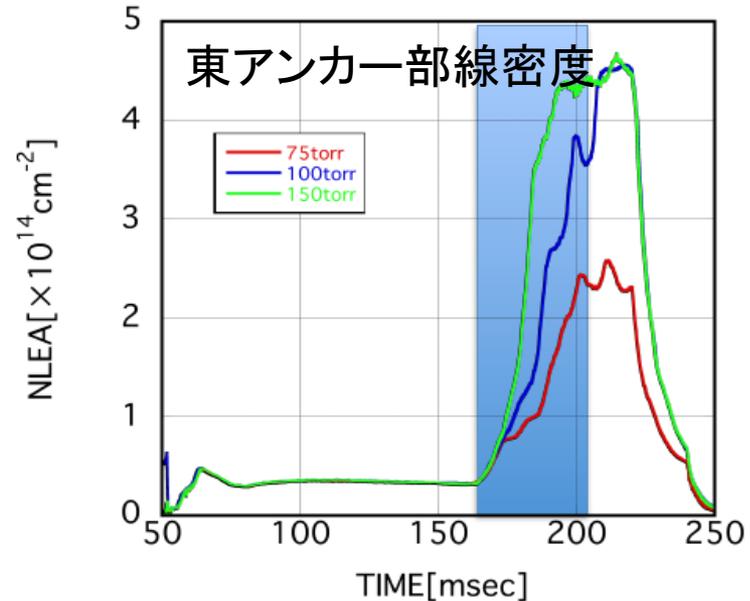
ICRFアンテナに流れる電流の位相差を変更することで  
プラズマパラメタを制御可能



## 2. 実験装置 — 高密度化実験



RF3:160-220 [msec],76 [kW]  
c-ECH:220-225 [msec](75torr)  
205-210 [msec](100torr)  
205-215 [msec](150torr)  
GP1a:150-200 [msec]



ICRF加熱位相差制御と追加ガスパフを  
組み合わせることにより  
東アンカー部線密度が  
従来より約10倍まで上昇した



# 3. ICRF加熱実験 — 高密度化実験

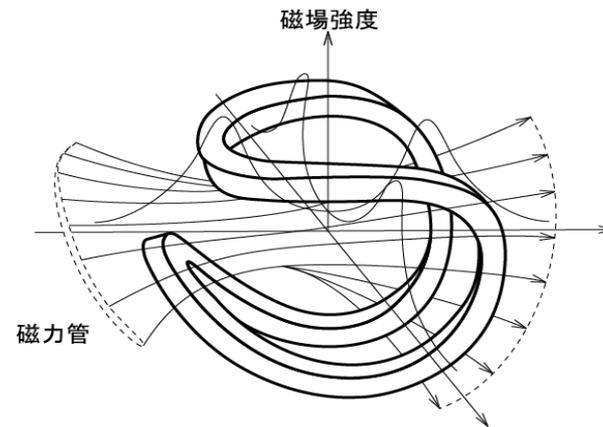
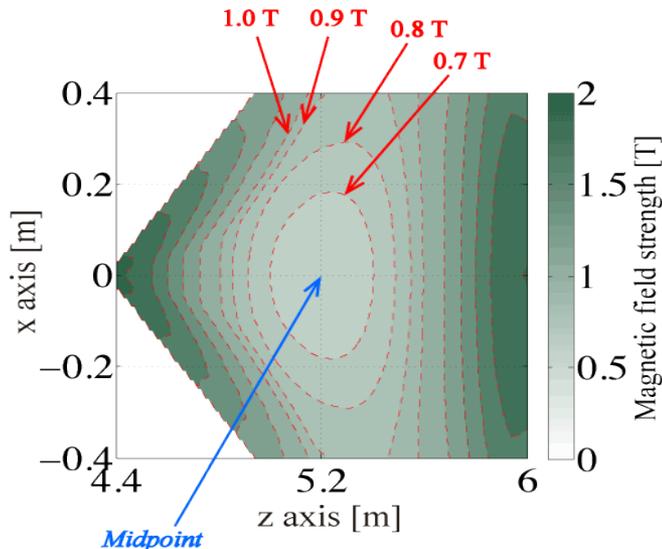
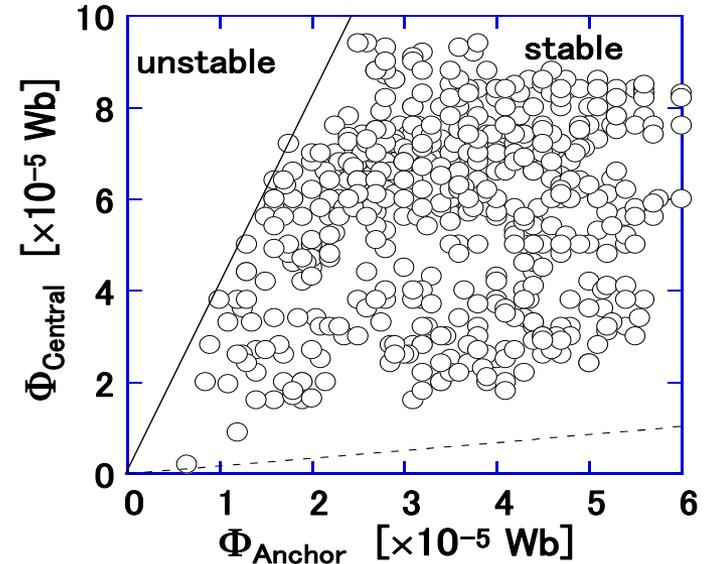
## Minimum-B Configuration in the Anchor Cell

セントラル部は単純ミラー磁場配位であり、  
磁力線は悪い曲率を擁する。  
そのため、MHD安定性を確保するために  
極小磁場を形成するアンカー部が不可欠である。

Estimation of MHD stability of whole device

$$\Gamma = \int_0^L \frac{p}{B^2} \mathbf{B} K_\phi dz$$

If  $\Gamma > 0$ , stable.

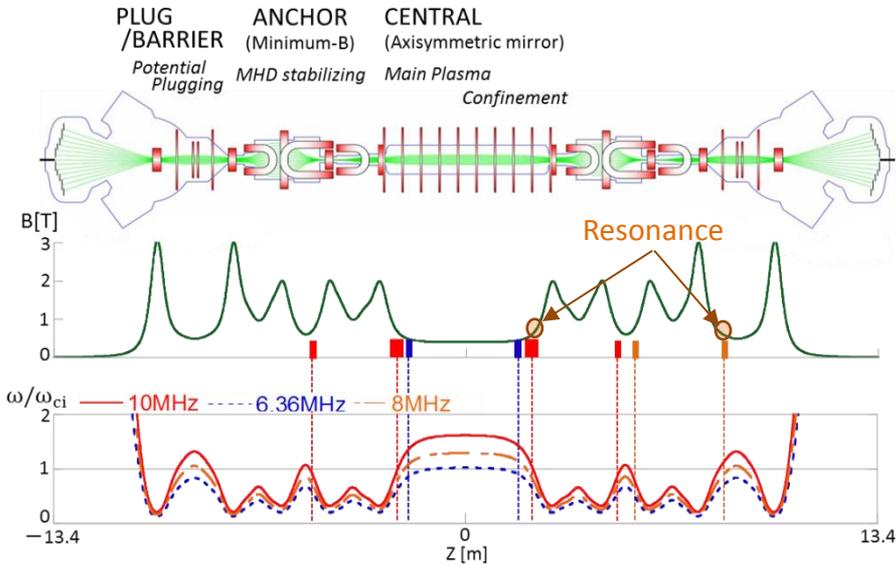




# 3. ICRF加熱実験 — 端損失イオン加熱実験

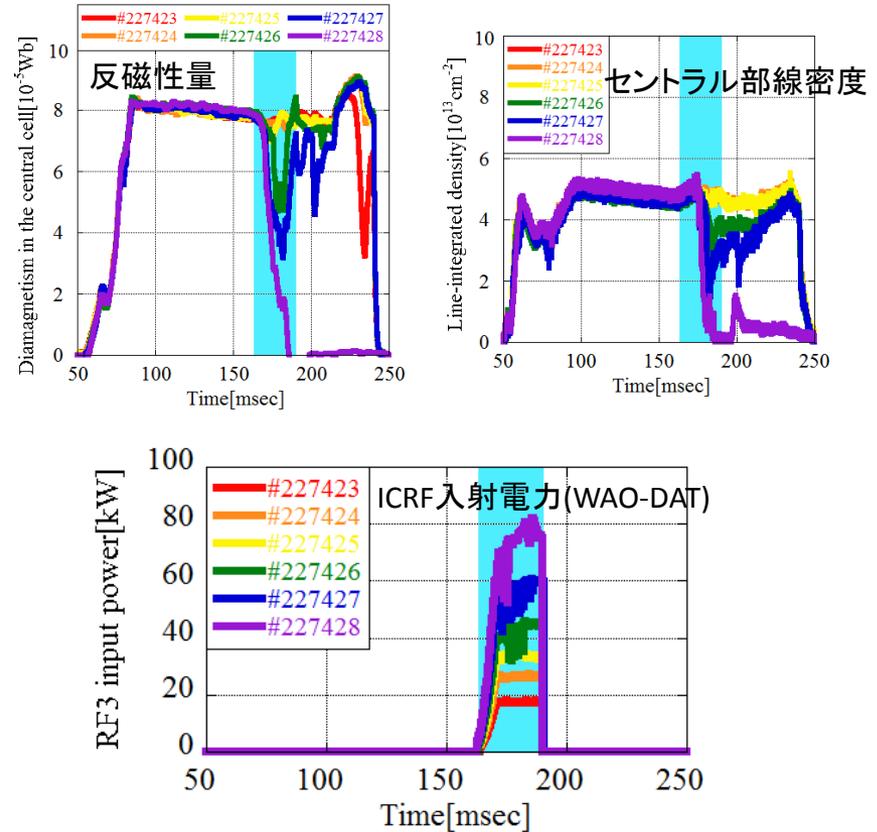
## ◆ 端損失イオン加熱実験の典型的な放電

### WAO-DAT(バリア部加熱)



$\omega \sim 8.0\text{MHz}$  のとき  $\omega/\Omega_{ci} \sim 1$  の共鳴層はバリア部のみならず、セントラル部に存在する。

単純ミラー磁場配位では共鳴層は悪い曲率を擁する。



ICRF入射電力(WAO-DAT)を増大させると、プラズマが不安定性(フルート型)により潰れる。