

# GAMMA 10ECH実験における 粒子バランスの研究

筑波大学プラズマ研究センター  
細井克洋 GAMMA 10グループ  
京都大学エネルギー理工学研究所  
小林進二

## Contents

1. 研究背景と目的
2. 実験装置
3. セントラルECH実験
  - 3-1 典型的な実験例
  - 3-2 電位による閉じ込め効果
  - 3-3 リミターの効果
  - 3-4 ICRFパワーとプラズマ持続性との関係
  - 3-5 ガス入射量とプラズマ持続性との関係
4. 考察(シミュレーションに基づく粒子バランス解析)
5. 結論

# 研究背景

- ・ GAMMA 10では初期プラズマをプラズマガンにより生成し、イオンサイクロトロン共鳴加熱(ICRF)により加熱、維持している。

Ti  $\gg$  Te  電子ドラッグ  プラズマ高性能化を阻害

電子ドラッグ…イオンと電子とのクーロン衝突により高温イオンから低温電子にエネルギーが遷移すること

- ・ GAMMA 10では電子サイクロトロン加熱 (ECH)がセントラル部とプラグバリア部で行われている。セントラル部では**電子加熱**を、プラグバリア部では**閉じ込め電位形成**を目的として運用されている。

セントラル部でのECH印加時に、効果的な電子加熱が行われた場合、プラズマの蓄積エネルギーの上昇が観測される。しかしながら、ECH印加時に蓄積エネルギーの減少が観測されることがあり、同時に電子線密度も減少している。

このプラズマ性能劣化は、**ECH印加に起因する粒子損失**によるものであると推測される。

本研究ではプラズマ性能劣化と粒子損失との関係を明らかにするためにセントラル部と両エンド部において損失粒子を測定した。

# 粒子バランス方程式

GAMMA 10 における粒子バランス方程式を簡単に書き表すと以下のようなになる。

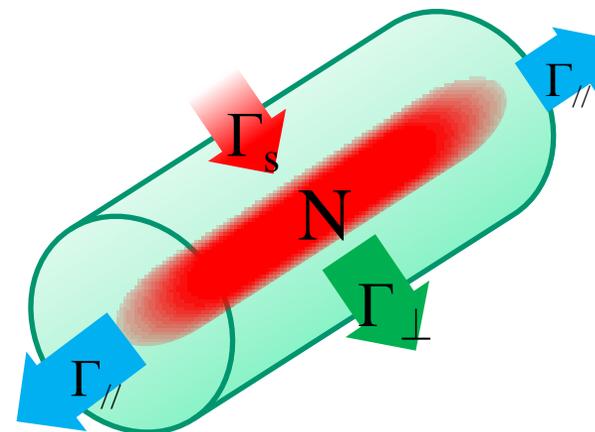
$$dN/dt = \Gamma_s - \Gamma_{\perp} - \Gamma_{//}$$

$N$  : プラズマ粒子の総数

$\Gamma_s$  : 粒子生成項

$\Gamma_{\perp}$  : 径方向の損失項

$\Gamma_{//}$  : 軸方向の損失項



粒子バランスの模式図

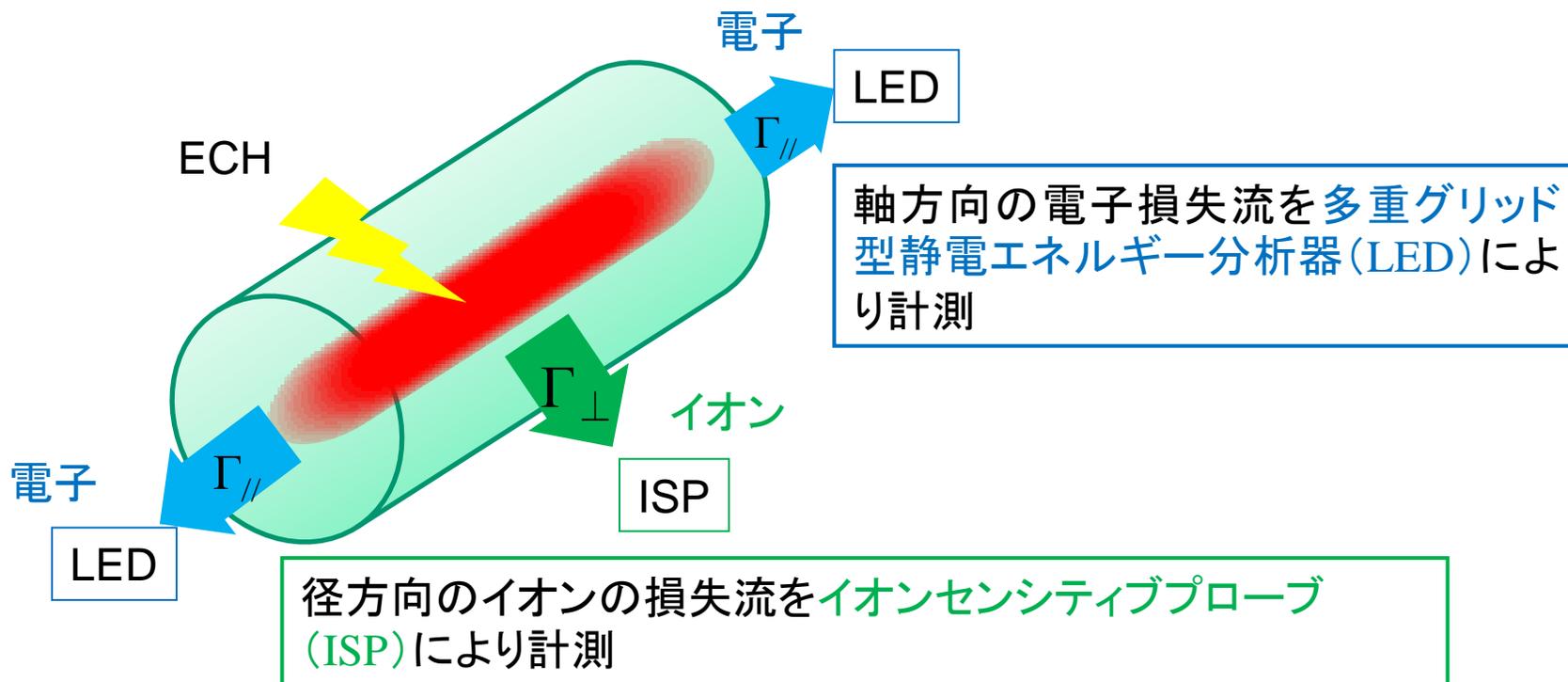
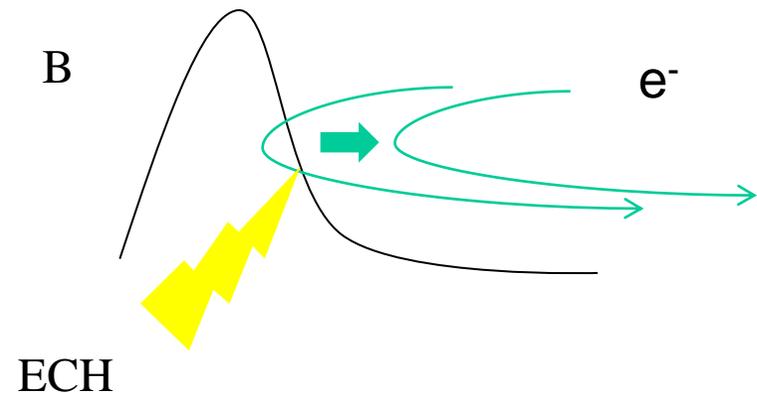
C-ECH印加に伴い、径方向と軸方向共に、損失流が増えてしまうことが問題。

## 本研究の目的

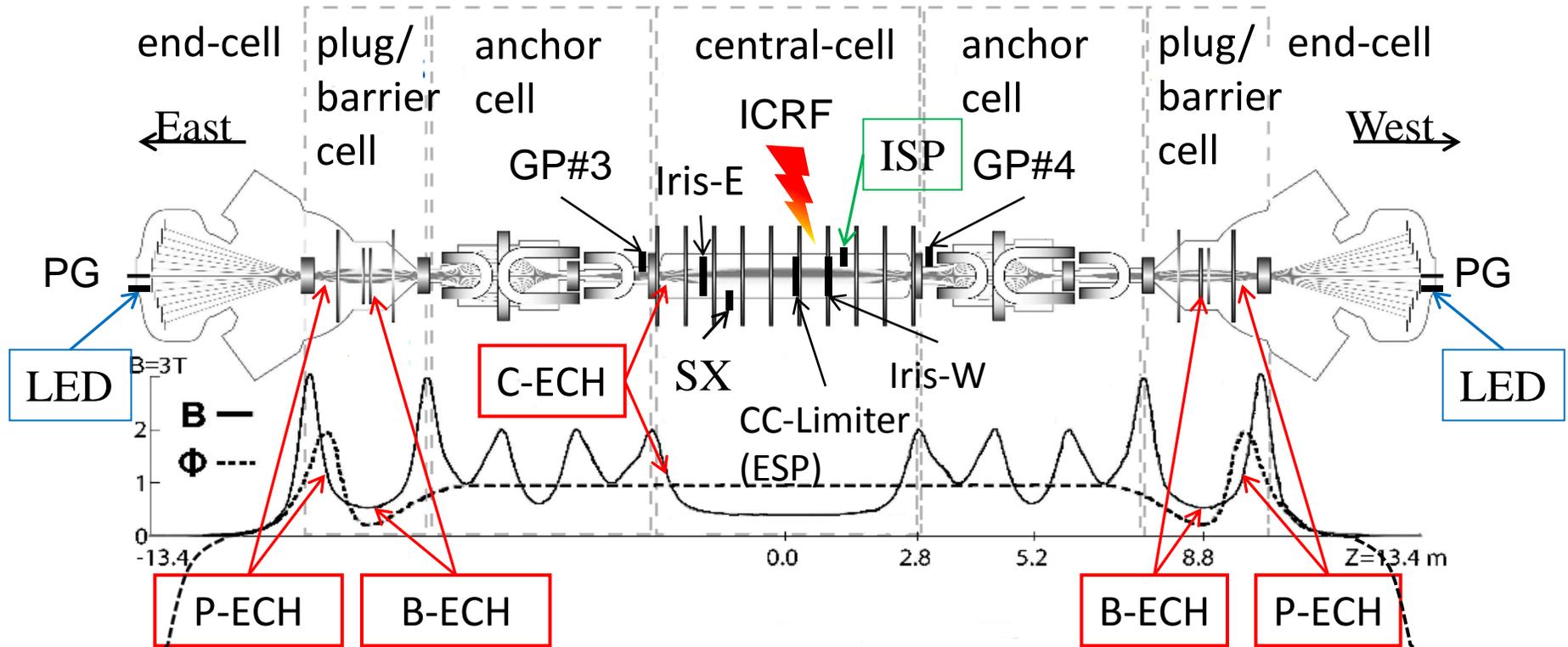
1. セントラル部でのC-ECH印加時間帯においてプラズマ性能が劣化するメカニズムを解明する。
2. 粒子生成量と損失量を定量的に調べることにより、粒子バランスの観点から、実験条件の改善手法を模索する。

# 開放端磁場系の粒子損失の原理

磁場勾配の有るところにECHを印加すると、磁場の弱い方向に電子が吐き出され、その一部が軸方向の損失粒子となる。それに伴い、プラズマの電気的中性を保つために径方向にイオンが損失すると考えられている。



# GAMMA 10全体図



PG: プラズマガン・・・両エンド部から初期プラズマを入射

GP: ガスパフ・・・プラズマへの水素供給

ICRF: イオンサイクロトロン周波数帯発振器・・・プラズマの生成・加熱・維持

C-ECH: 電子サイクロトロン加熱・・・セントラル部での電子加熱

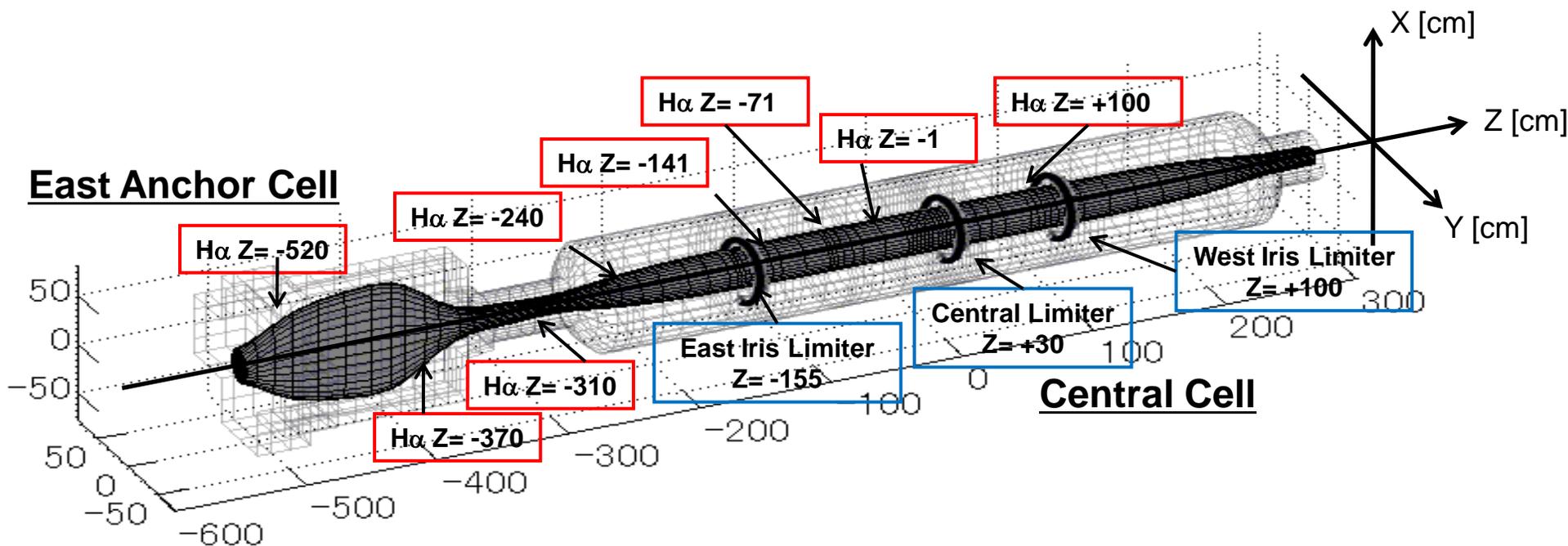
P,B-ECH: 電子サイクロトロン加熱・・・プラグ・バリア部における閉じ込め電位形成

ISP: イオンセンシティブプローブ・・・セントラル部での径方向イオン流を計測

LED: 多重グリッド型静電エネルギー分析器・・・両エンド部にて端損失電子流を計測

SX: 軟X線検出器・・・ECH印加による電子温度上昇を計測

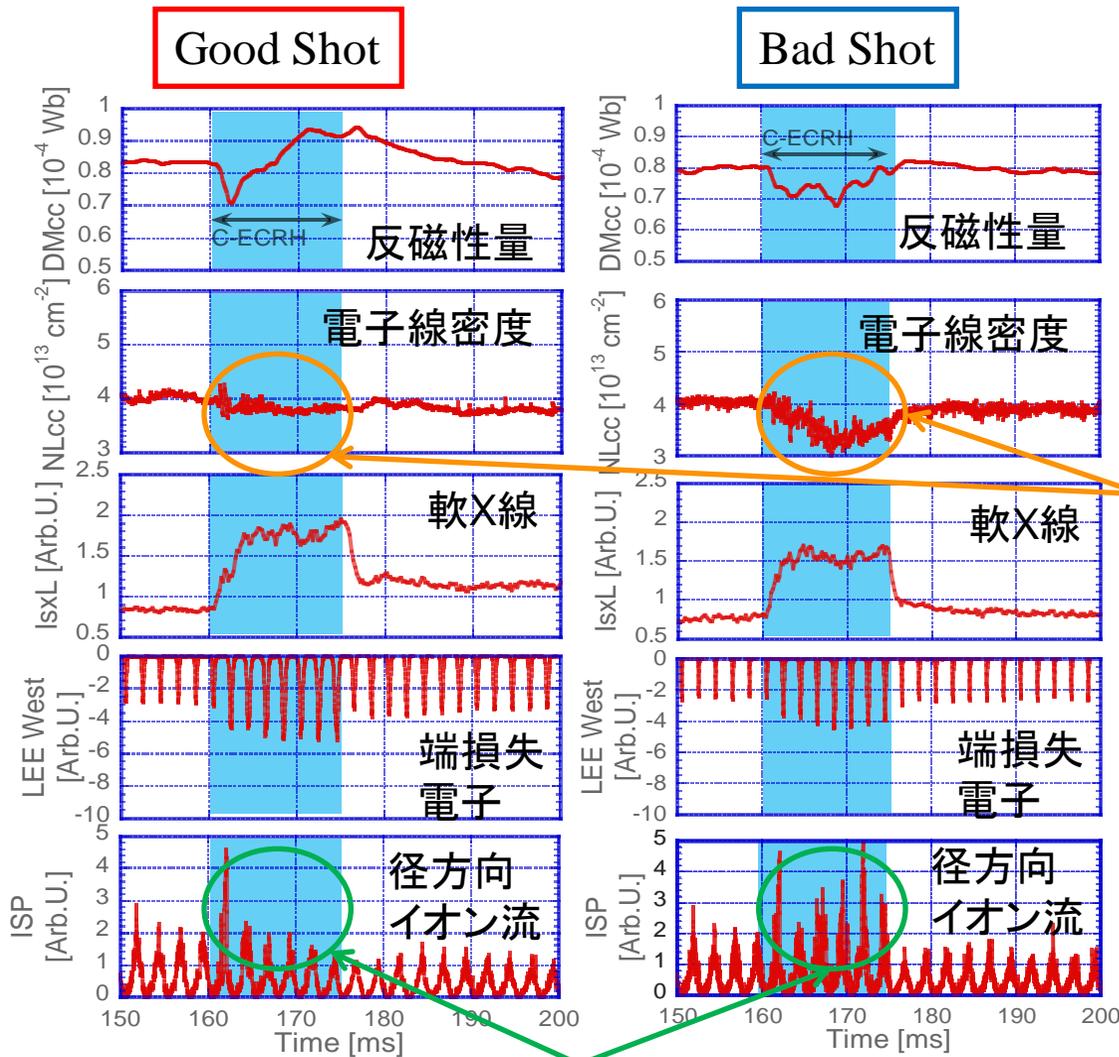
# H $\alpha$ 線検出器 & 各リミターについて



H $\alpha$ 線検出器・・・中性粒子密度を計測。本研究では粒子生成量の指標とした。  
実験における粒子生成量の評価は各検出器近傍での評価となる。  
$$I_{H\alpha} \propto R_1(p) n_H n_e + R_2(p) n_{H_2} n_e$$

リミター・・・プラズマ径を制御。  
セントラルリミター(固定式)・・・ $\phi$ 360mm(昨年までは400mm)  
東西アイリスリミター(可動式)・・・内径を340~400mmで変更可能

# 典型的な実験結果



C-ECH入射時間帯において

- **Good shot** : 反磁性量増加
- **Bad shot** : 反磁性量減少

Bad shotでは電子線密度が減少しているが、Good shotでは減少しない。

プラズマ性能の劣化は粒子損失であると考えられる。

Good shotではBad shotに比べて径方向の粒子損失が少ない。

# 実験条件の改善

粒子バランスの観点から実験条件の改善方法を模索する。

粒子バランス方程式から、

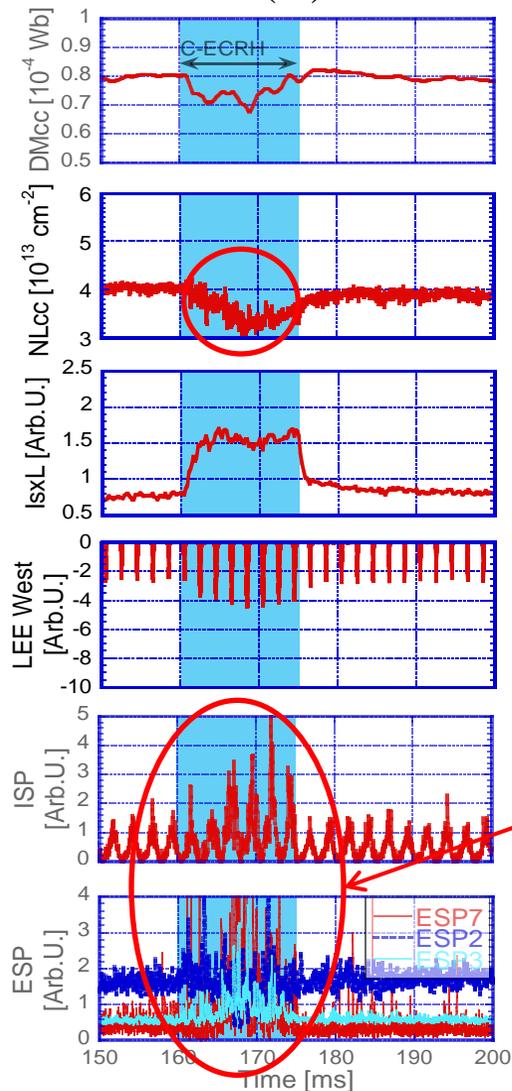
$$dN/dt = \Gamma_s - \Gamma_{\perp} - \Gamma_{//}$$

1. 損失項 ( $\Gamma_{\perp} + \Gamma_{//}$ ) を減らす  
閉じ込め改善: 閉じ込め電位を用いることで軸方向の粒子損失を減少させる
2. 生成項 ( $\Gamma_s$ ) を増やす  
粒子供給量の増加 : リミターリサイクリング増加  
: ICRFのパワーを上げる  
: ガス流入量を増やす

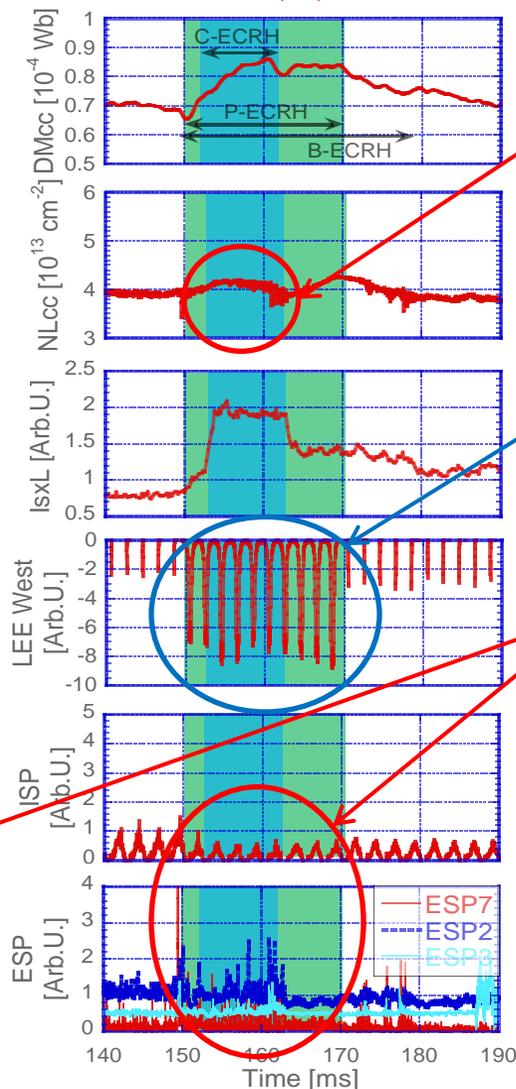
プラズマ性能の改善には、以上の方法が考えられる。

# 軸方向の閉じ込め改善の効果

(A)



(B)



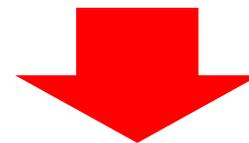
(A) 閉じ込め電位無しの場合のECH印加

(B) 閉じ込め電位有りのECH印加

閉じ込め電位による閉じ込め改善がなされ、電子線密度の減少が抑えられた。

閉じ込め電位の形成のために吐き出された電子を計測しているため、C-ECHによる閉じ込め性能劣化では無い。

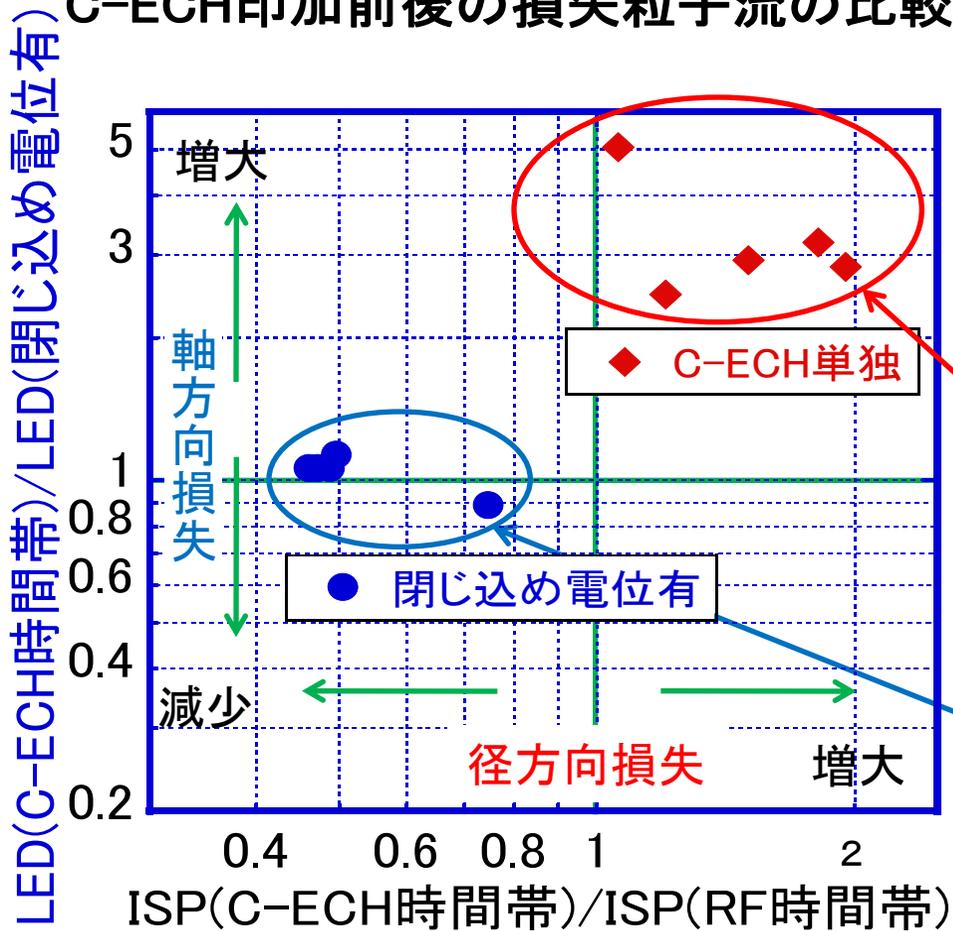
C-ECH時間帯で径方向損失が増えているが、閉じ込め電位がない時に比べると軽減されている。



閉じ込め電位による閉じ込め改善により、プラズマ性能が向上した。

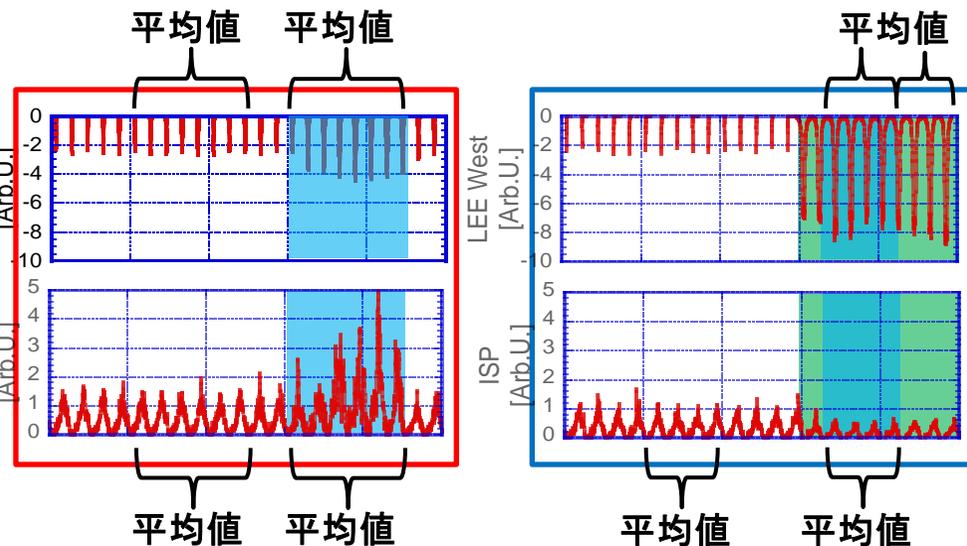
# 閉じ込め電位による損失粒子の変化

C-ECH印加前後の損失粒子流の比較



閉じ込め電位形成時にC-ECHを印加しても端損失電子は増加しない。

LED(C-ECH時間帯)/LED(RF時間帯)



C-ECH印加時に損失粒子が増加

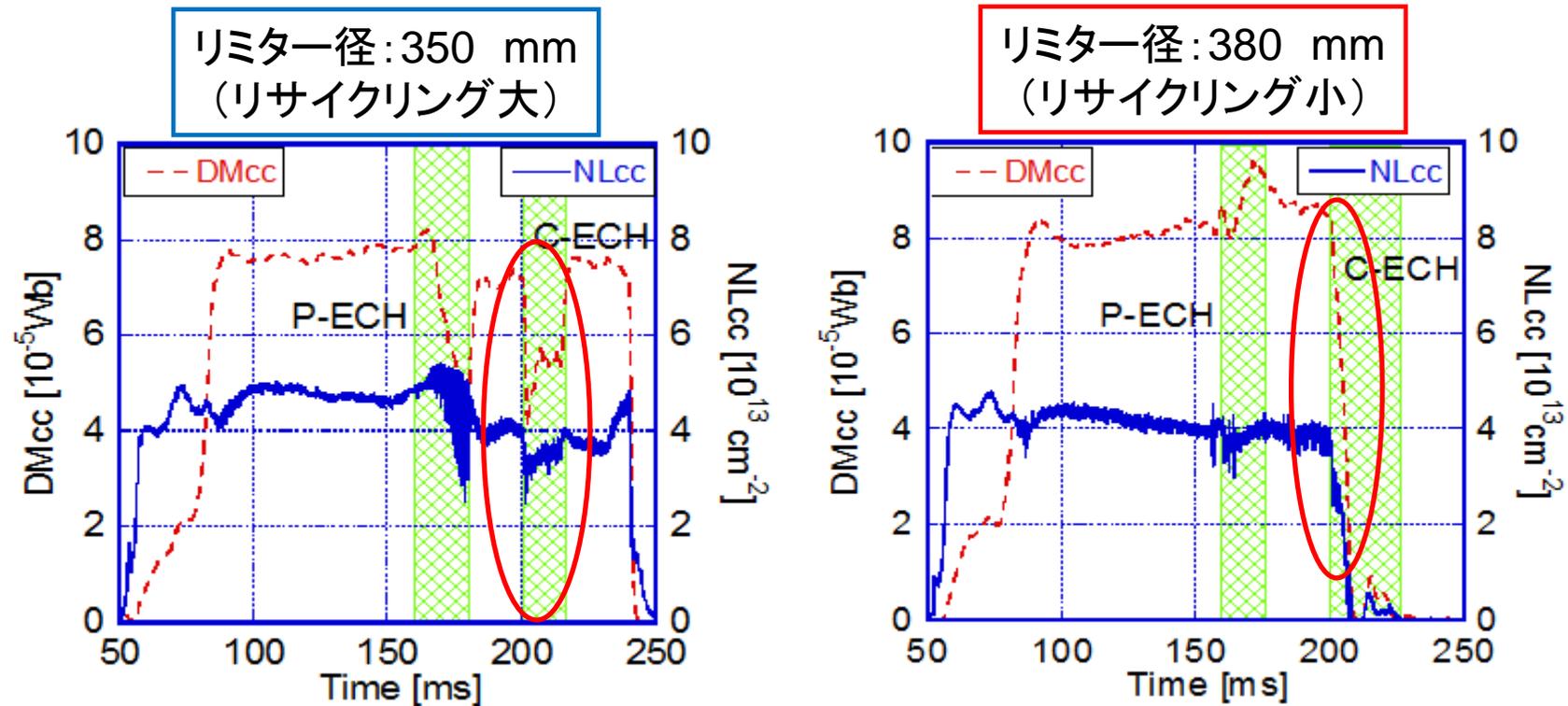
閉じ込め電位がある場合  
C-ECH印加時の径方向損失粒子が減少

軸方向閉じ込め電位により  
軸方向損失だけでなく、径方向損失をも減らすことができる。



# リミターリサイクリングによる粒子供給

リミターリサイクリングによる粒子生成量を変化させるため、リミター径を変化させた実験を行った。

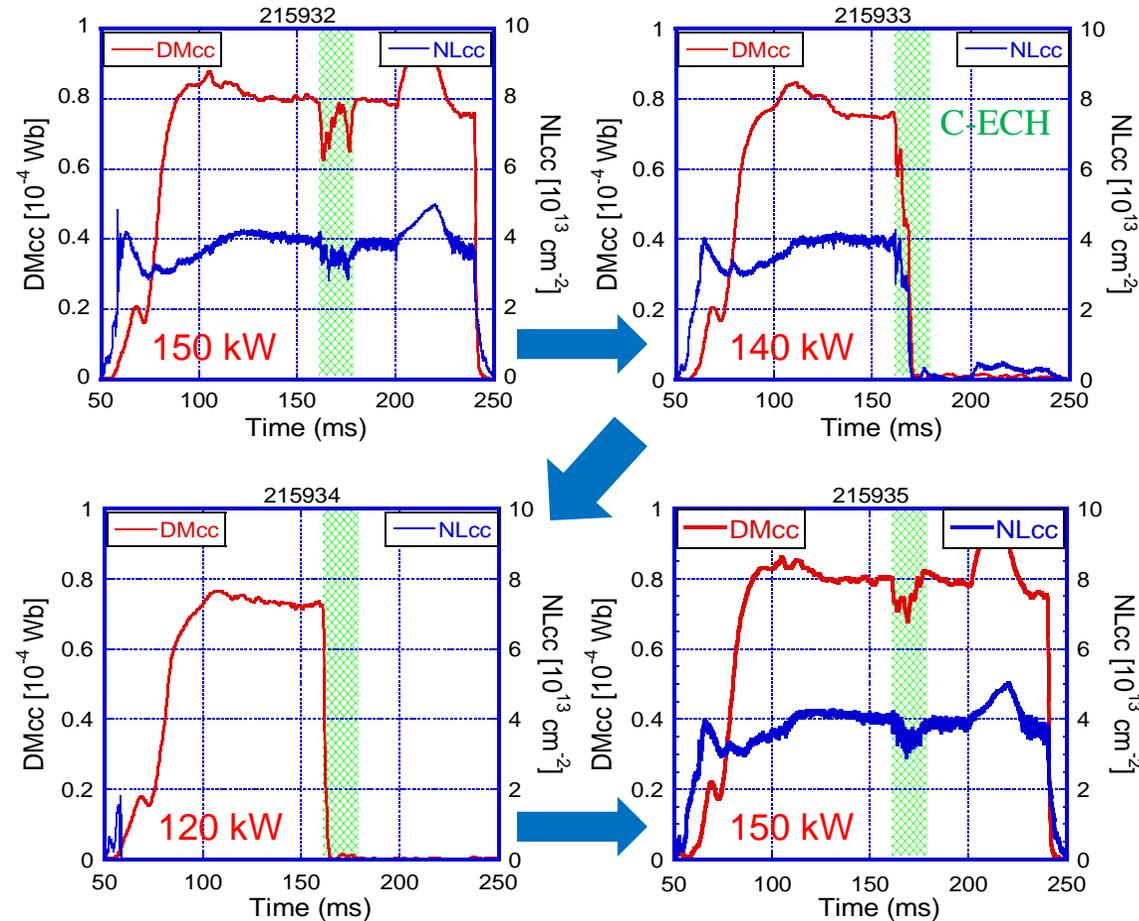


- リミター径が狭い場合、C-ECH印加によるプラズマの消滅を回避出来た。
- リミターリサイクリングによる粒子生成量の増加が、C-ECH印加に伴って増加する損失粒子を補填していると考えられる。

# ICRFパワーとプラズマ持続性の関係

## ICRFパワーに対する依存性

➡ : 矢印の順番で連続したShot



ICRFのパワーを下げると  
⇒イオン温度が低下  
⇒リサイクリング係数が減少  
⇒電離効率も低下



粒子生成量が減少すると、  
⇒プラズマが維持できなくなる  
⇒プラズマが消滅

実験条件は以下で統一

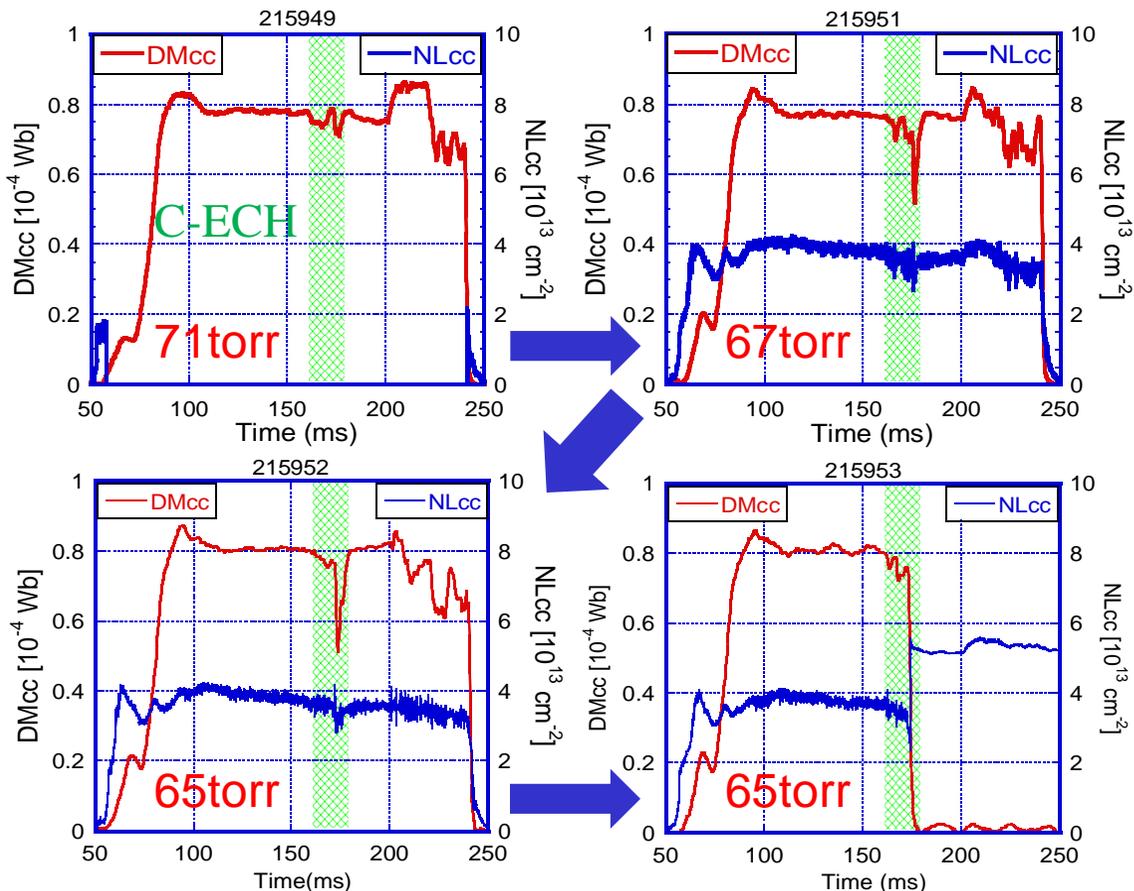
C-ECH : 160-175ms 150kW, GP#3,4 : 73 torr

Iris-E : φ350mm, Iris-W : φ400mm

# ガス流入量とECH時のプラズマ持続性の関係

## ガスパフのリザーバ圧に対する依存性

➡ : 矢印の順番でほぼ連続したShot



ガスパフのリザーバ圧を下げていくと、(71→67→65 torr)

⇒ 反磁性量の減少が大

粒子供給量を少なくしすぎると

⇒ プラズマが消滅

ECH印加時間帯に、十分に粒子生成量を確保しないと

⇒ 供給・損失粒子のバランス崩壊

⇒ プラズマが消滅

実験条件は以下で統一

C-ECH : 160-175ms 100kW, RF2 : 150kW

Iris-E :  $\phi$ 350mm, Iris-W :  $\phi$ 400mm

# 実験結果のまとめ

1. 損失項 ( $\Gamma_{\perp} + \Gamma_{\parallel}$ ) を減らす

閉じ込め改善: 閉じ込め電位を用いることで軸方向の粒子損失を減少させる

⇒ 軸方向だけでなく、径方向の損失粒子が抑制できることが分かった。

2. 生成項 ( $\Gamma_s$ ) を増やす

粒子供給量の増加: リミターリサイクリング増加  
: ICRFのパワーを上げる  
: ガス流入量を増やす

⇒ 粒子生成量を増やすことで、C-ECH印加に伴うプラズマ消滅は回避出来る。これは異なる粒子源からの粒子供給においても同様に成立する。しかし、これはあくまでH $\alpha$ 線検出器近傍の議論しか出来ない。

径全体での粒子生成量の評価する必要がある

## 中性粒子シミュレーションを用いた粒子生成量の評価

各実験条件に対する $H\alpha$ 線発光輝度の依存性から粒子生成量を評価した。しかし、粒子生成量は $H\alpha$ 線検出器近傍でしか議論が出来ない。

セントラル部全体の粒子バランスを定量的に議論するために、中性粒子輸送モンテカルロコード(DEGASコード)を用いてセントラル部全体の中性粒子密度の算出を行った。

# DEGASコードについて

DEGASコード(中性粒子モンテカルロシミュレーションコード)は、プラズマ中の中性粒子密度・温度をモンテカルロ法を用いて求める

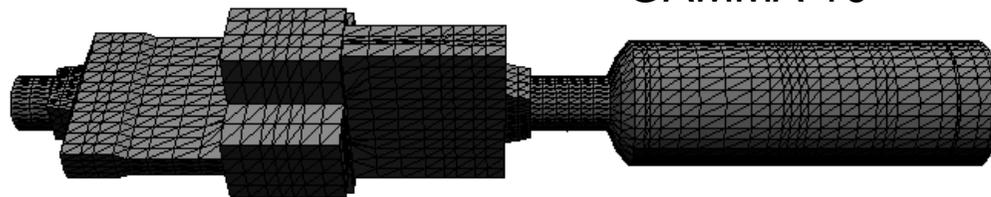
- シミュレートする領域→メッシュ状に区分
- 各ボリューム(cell)にプラズマの密度、温度等を入力

中性粒子の原子・分子過程を考慮し、その軌道を追う

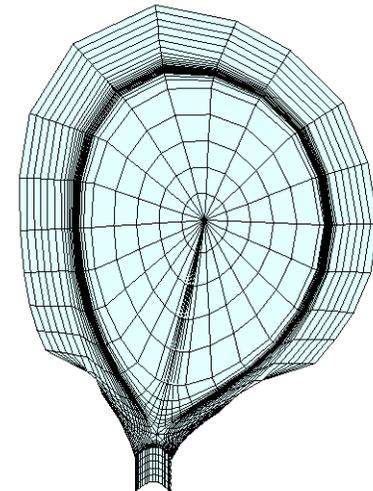
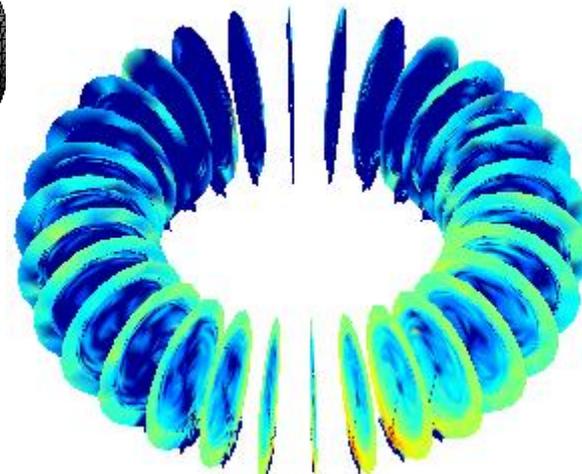
D. Heifetz, D. Post, M. Petravac et al., J. Comput. Phys. **46**, 309 (1982).

これまでにGAMMA 10 だけでなく、JT-60やHeliotron-Jに適応され、中性粒子輸送等の研究に多大な貢献をしてきた。

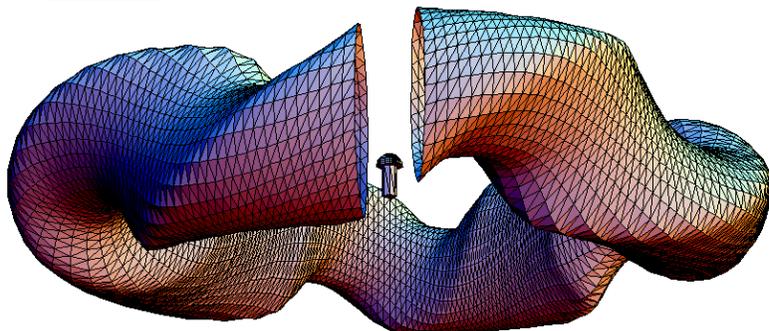
GAMMA 10



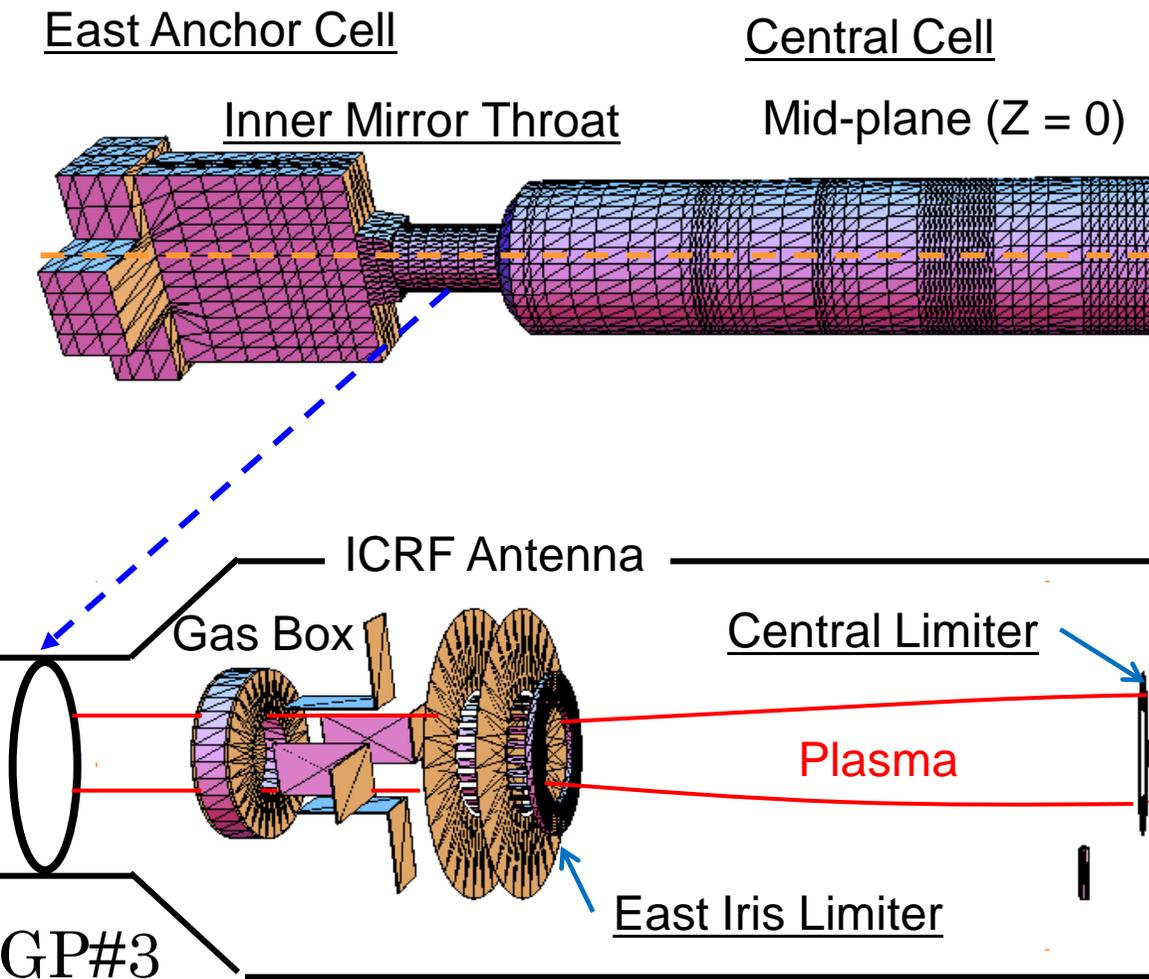
JT-60



Heliotron-J

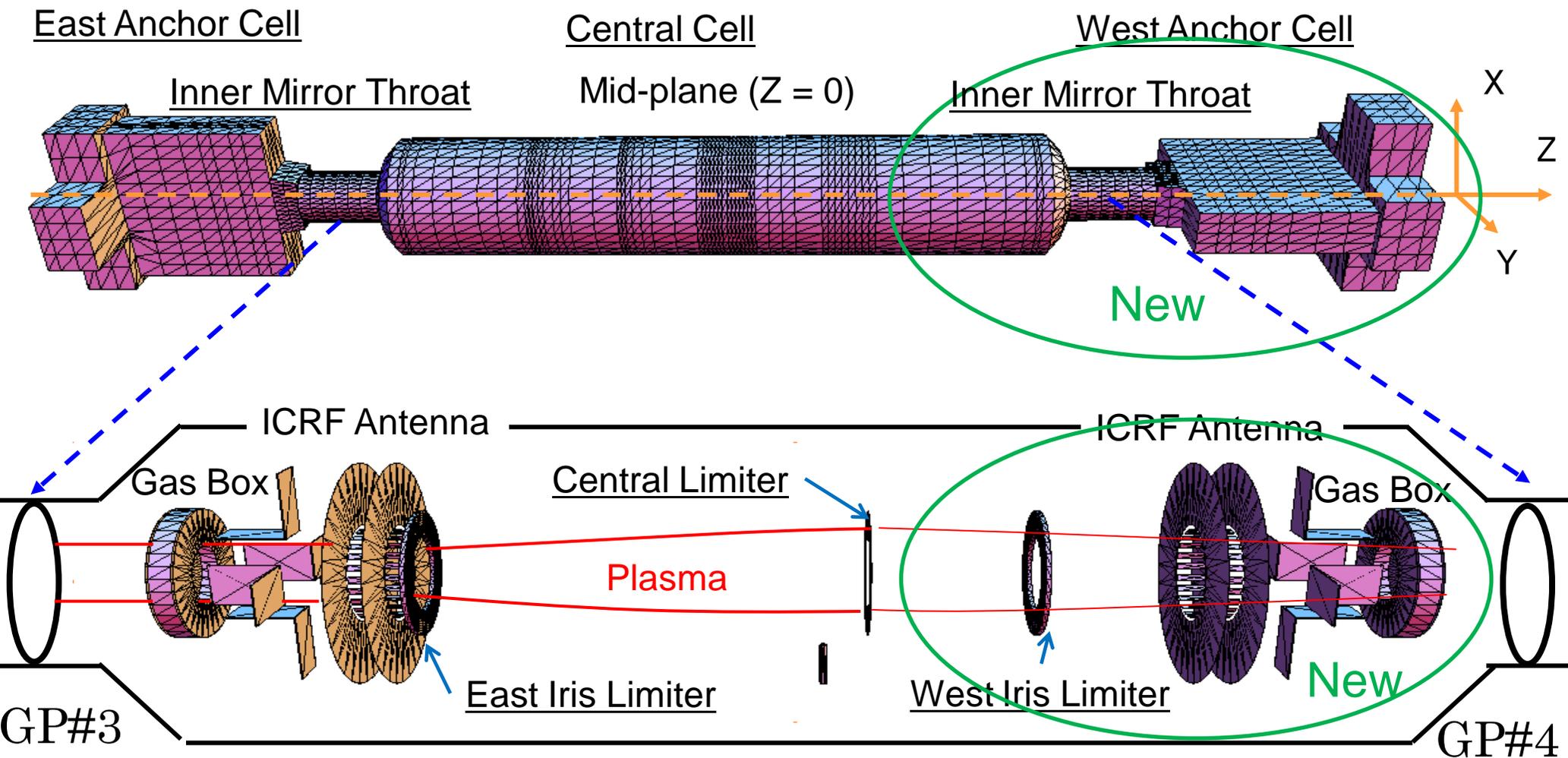


# 3次元シミュレーションモデル



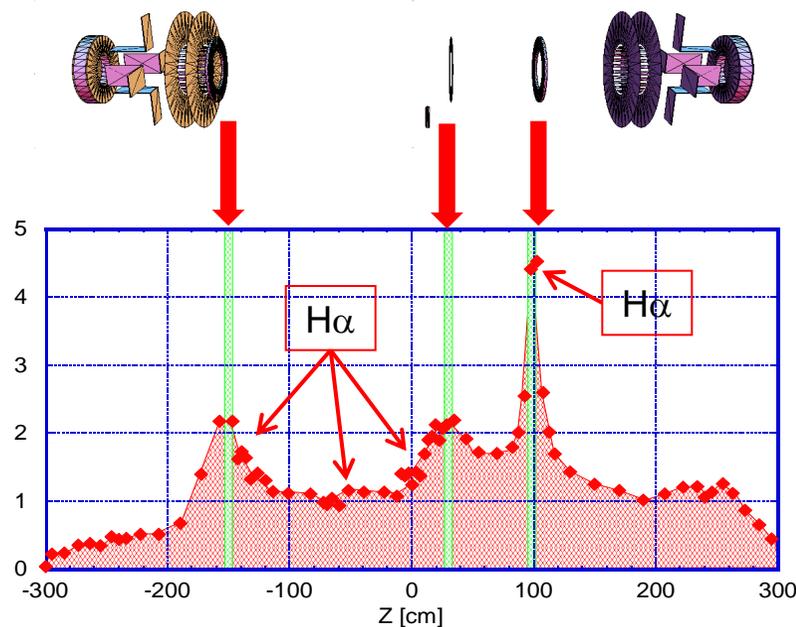
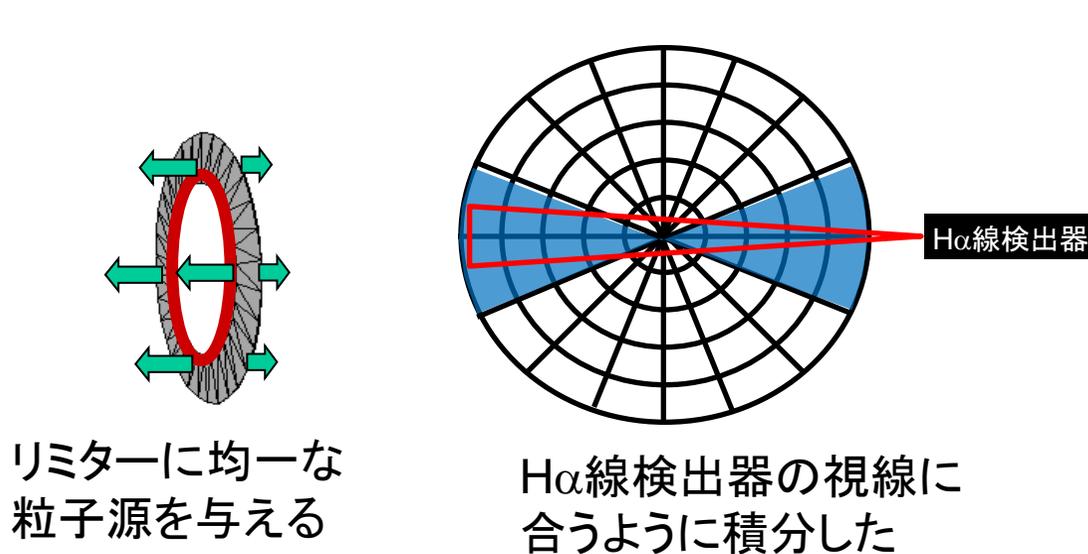
以前はセントラル部の片側の内部構造のメッシュしかなかったが、今回セントラル部全領域において、内部構造を模擬したメッシュが完成した。

# 3次元シミュレーションモデル



# DEGASコードによる粒子生成量の評価

真空容器内の特定の構造物(リミター等)に粒子源を与え、中性粒子密度分布を算出し、求めた中性粒子密度から $H\alpha$ 発光強度を求める。 $H\alpha$ 線検出器の視野と同等の視野を持つように視線方向に積分した値を算出し、実測値に合うように規格化した。この値を粒子生成量の指標とした。



セントラル部の全領域における粒子生成量を評価した。

# シミュレーション解析結果

プラズマ持続

プラズマ消滅

C-ECH印加実験において、プラズマが**続いたショット**と**消滅したショット**に対する粒子生成量をDEGASコードから算出した軸方向のH $\alpha$ 線発光強度を用いて比較した。

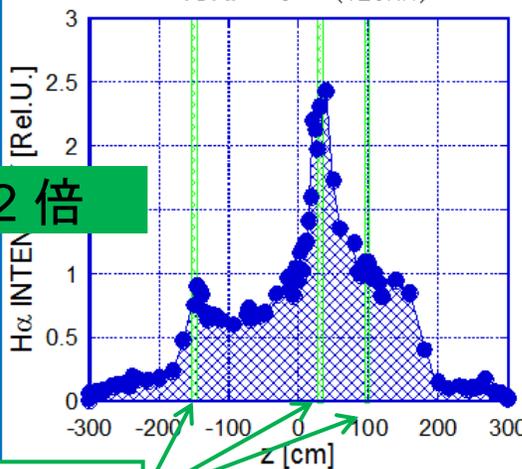
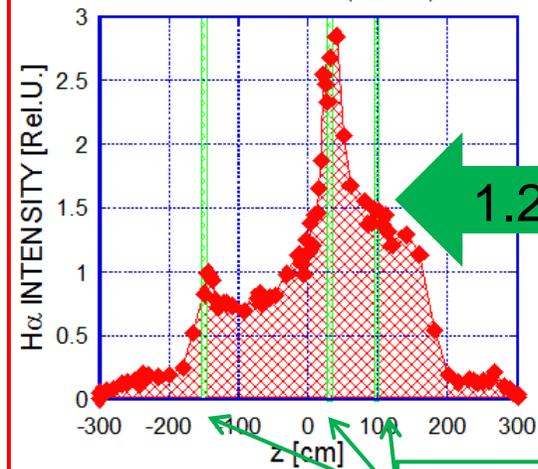
$$\text{粒子生成量の評価} = \frac{\Sigma \Gamma_s(r, z)}{\Sigma \Gamma_s(r, z)}$$

どの結果も20~30%の粒子生成量の増加でプラズマの消滅を回避していることが分かった。

中性粒子シミュレーションを用いることで、実験条件最適化の定量的な指針を得られることが分かった。

ICRFパワー (150kW)

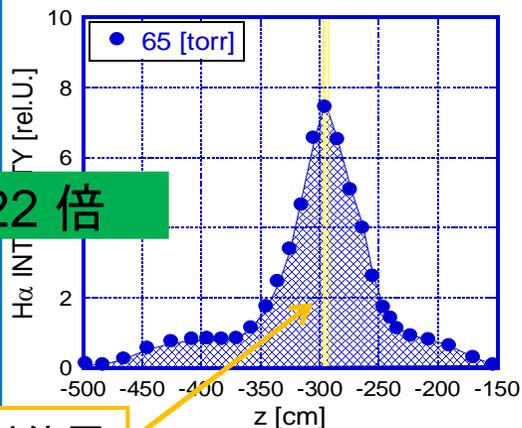
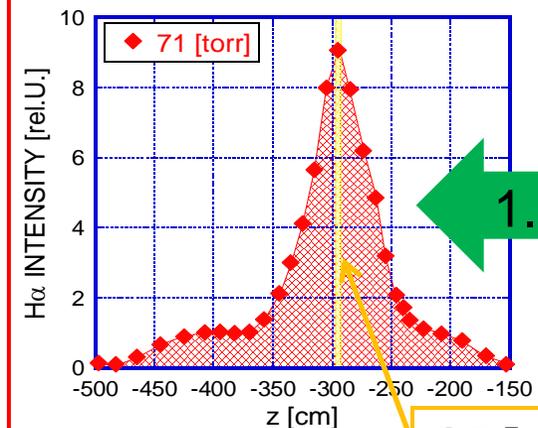
ICRFパワー (120kW)



各リミター位置

ガス流入量: 大

ガス流入量: 小

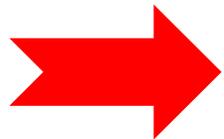


GP入射位置

# 結論

C-ECH印加時間帯におけるプラズマ挙動とプラズマ性能劣化について詳細な調査を行った。LED、ISP、 $H\alpha$ 線検出器等の計測結果から以下のことが分かった。

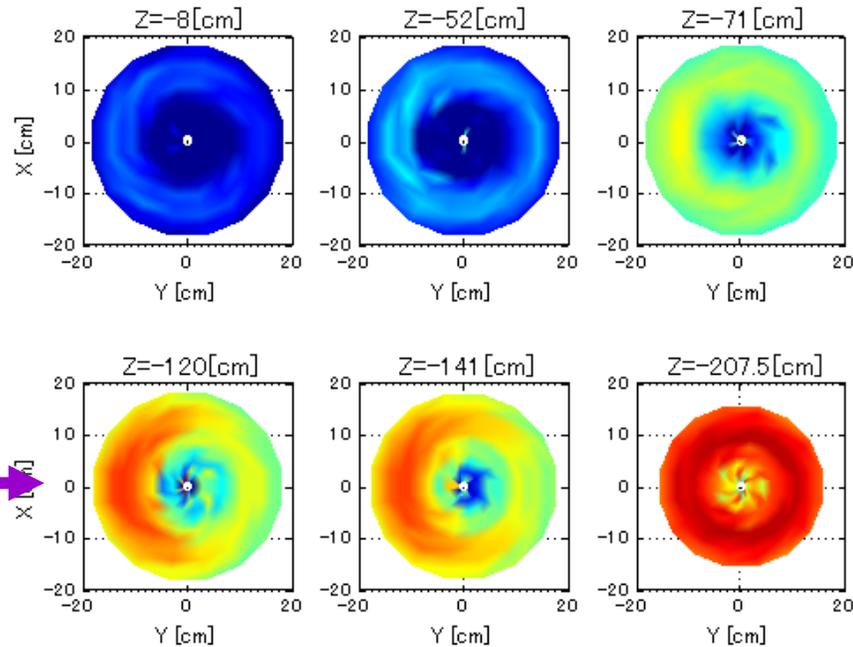
- C-ECH単独印加時に粒子損失が助長され、それによりプラズマ性能の劣化が引き起こされる。
- 軸方向の閉じ込め電位形成により、粒子閉じ込めは軸方向だけでなく、径方向にも改善される。
- リミター径、ガス流入量、ICRFのパワーにより、粒子生成量を制御し、プラズマの消滅を防ぐことが出来た。
- DEGASコードを用いて、プラズマ生成量の全量を評価することにより、中性粒子輸送シミュレーションがプラズマの実験条件の最適化のための有効な手段となり得ることが示せた。



粒子バランスの観点から、C-ECH印加実験におけるプラズマ性能の改善を行い、実験条件最適化に向けた有益な知見を得ることが出来た。

# 今後の展望

## SMBI実験における中性粒子挙動解析に向けて

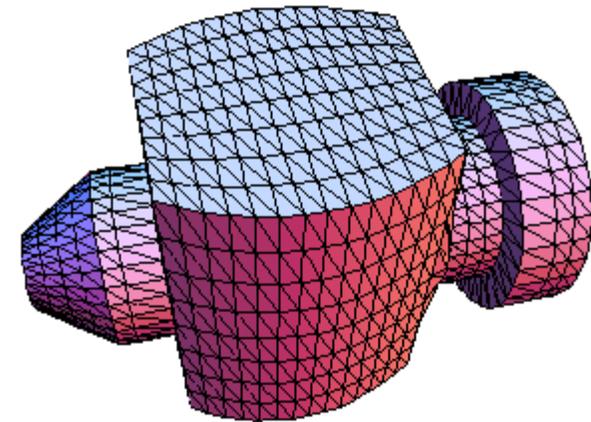


NBI入射に伴う中性粒子挙動

NBI入射に伴う中性粒子の輸送がシミュレーションにより明らかになった。

SMBIにおいても同様のシミュレーションを行うことで、中性粒子の挙動を詳細に解析することが出来る。

## エンドダイバータ模擬実験における中性粒子挙動解析



西エンド部の第一壁を模擬したメッシュ

現在第一壁の簡単なメッシュは完成している。今後内部の詳細な構造物等を作り、ダイバータ周辺領域の中性粒子挙動の解析を行っていきたい。