

# GAMMA10における セントラル部リミターによるプラズマ制御

筑波大学プラズマ研究センター  
細井克洋、中嶋洋輔

九州大学応用力学研究所  
東園雄太

京都大学エネルギー理工学研究所  
小林進二

## Contents

1. 研究の背景と目的
2. 実験概要
3. 実験結果
4. 考察(シミュレーション解析)
5. 結論

# 研究背景

核融合プラズマの生成において、運転領域の拡大は高性能プラズマの生成において重要である。そのためには加熱系のパワー、タイミングや、プラズマへの粒子供給量の最適化が不可欠である。また運転領域(プラズマ性能)の拡大を進める上で、様々な**問題・困難(プラズマの性能劣化や消滅)**が生じることがある。

タンデムミラー型プラズマ閉じ込め装置GAMMA 10では、電位閉じ込めを行ったプラズマに対して、セントラル部における電子温度の増加を目指した電子サイクロトロン加熱(ECH)を、東ミラーズロットにて行っている。その際、**比較的高いECHパワー**によるプラズマ加熱時に**プラズマ性能の劣化**が観測された。本研究では、この原因を解明するために、リミターとプラズマとの相互作用による水素リサイクリングに着目して、その最適化についてH $\alpha$ 線計測及び、中性粒子輸送シミュレーション解析に基づいて検討した。

# 実験概要

ここでは、リミター径に対するプラズマパラメータの依存性を詳細に調べ、プラズマ・壁相互作用の観点から、プラズマ性能劣化のメカニズムについて考察を行った。

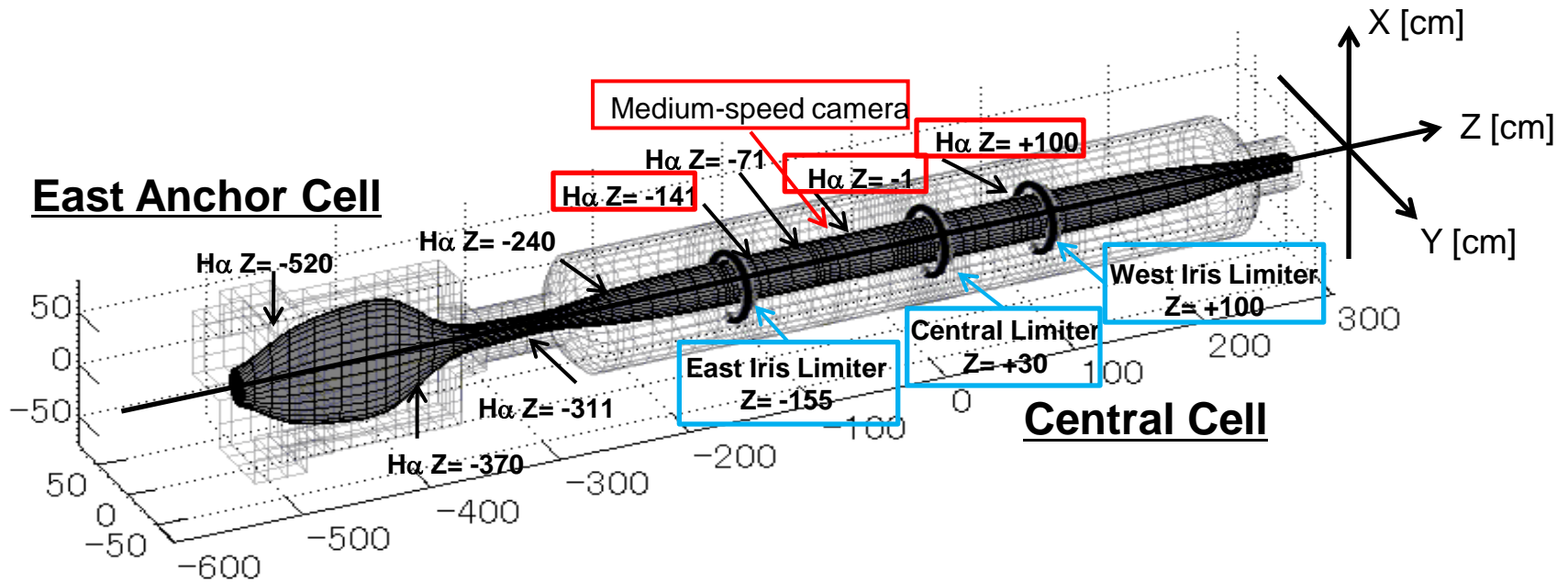
リミター径を通常(360mm)とは異なる配置にして、ECH印加時のプラズマ持続性を調べる

実験1      Iris-E: 350 mm   Iris-W: 350 mm

実験2      Iris-E: 380 mm   Iris-W: 380 mm

この実験ではセントラル部プラズマの高性能化を目指して、より高いパワーのECH(P: 380kW、C: 150kW)を入射している。

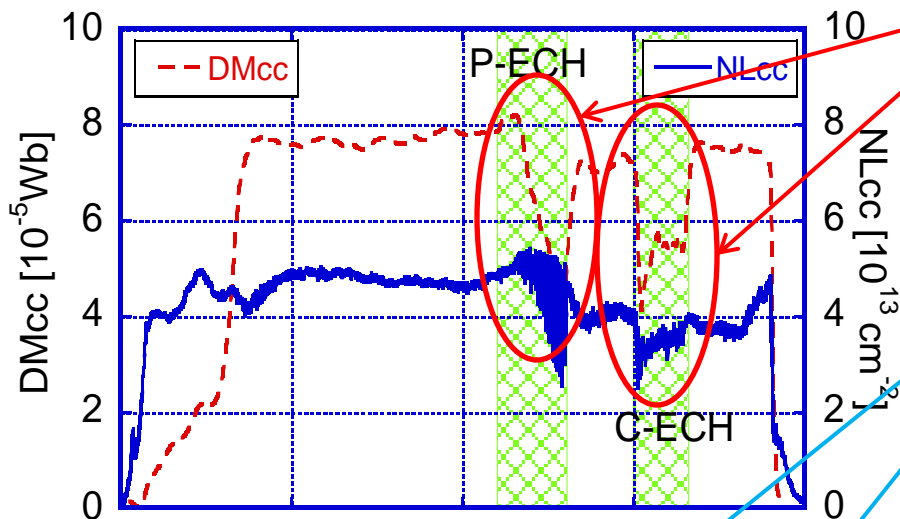
# リミター & H $\alpha$ 線検出器



- セントラル部にある**三つのリミター**でプラズマ制御を行っている。
- 東西のアイリスリミターは可動式リミターである。
- セントラルリミターは固定式で、その径は400mmである。
- 実験結果で用いる**H $\alpha$ 線検出器**はリミター近傍のものを使用した。

# 実験結果1 (通常より狭いリミター径)

$$\Phi_{\text{iris}} = 350 \text{ [mm]}$$



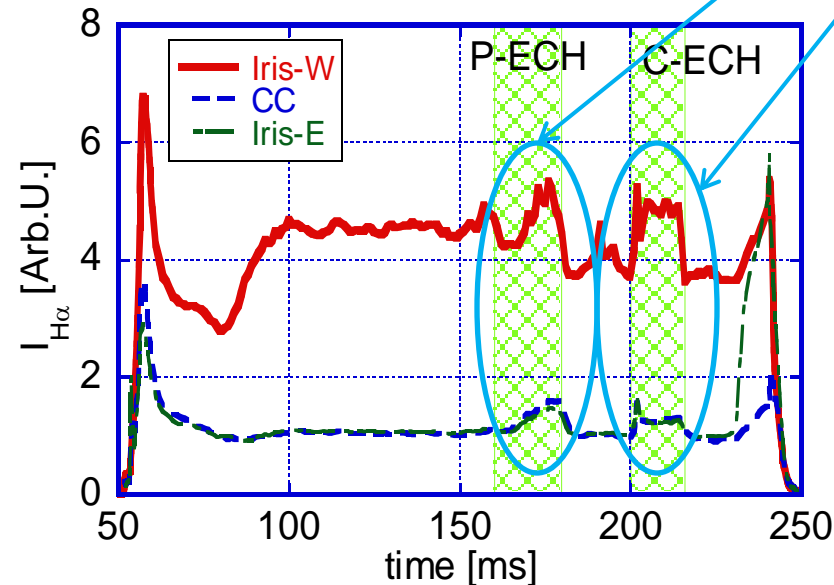
各ECH印加時にDMが減少



H $\alpha$ 発光輝度が増加



リサイクリングによる  
プラズマの冷却

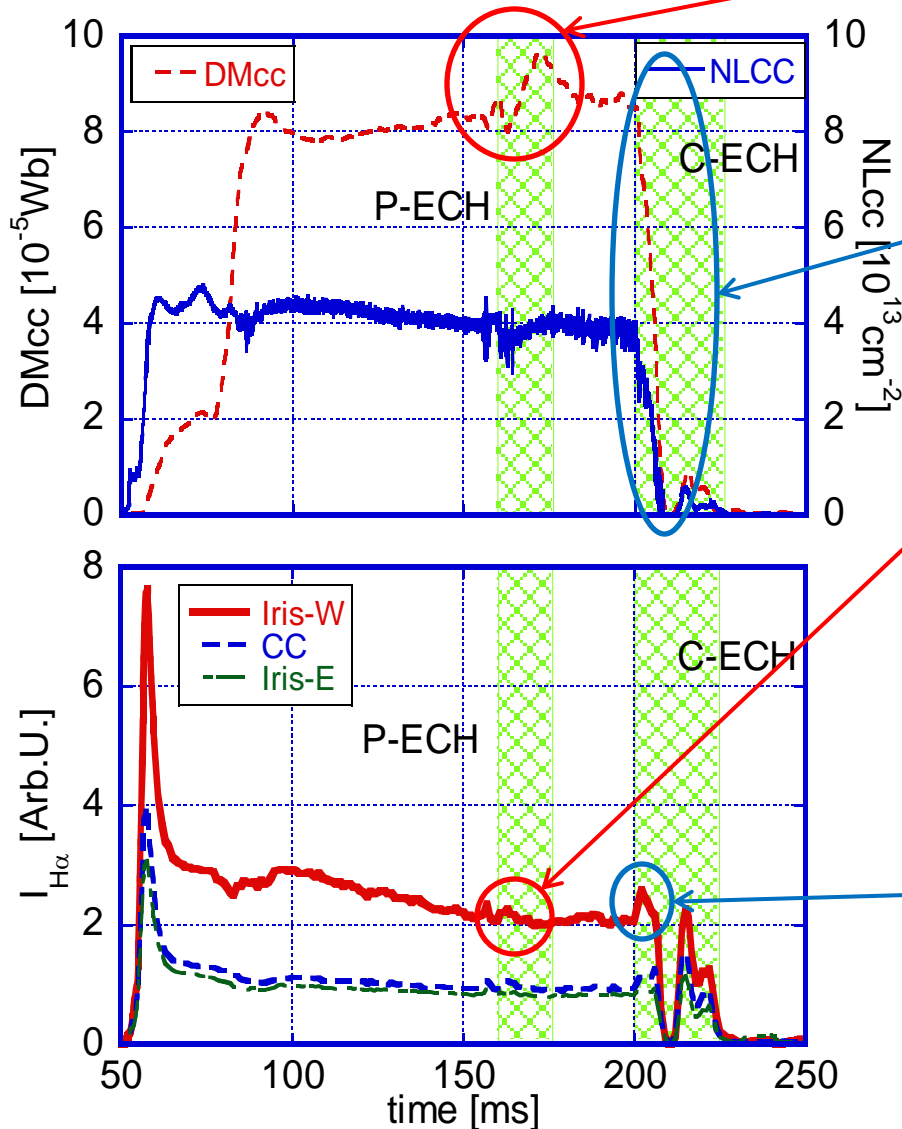


各ECH印加時にH $\alpha$ 発光輝度が増加することから、各ECH印加に伴い、リミターとの強い相互作用が引き起こされていると考えられる。

# 実験結果2(通常より広いリミター径)

$\Phi_{\text{iris}} = 380$  [mm]

DMが上昇している



プラズマが消滅

H $\alpha$ 発光輝度が大きく増加しない



強い相互作用が起きていない

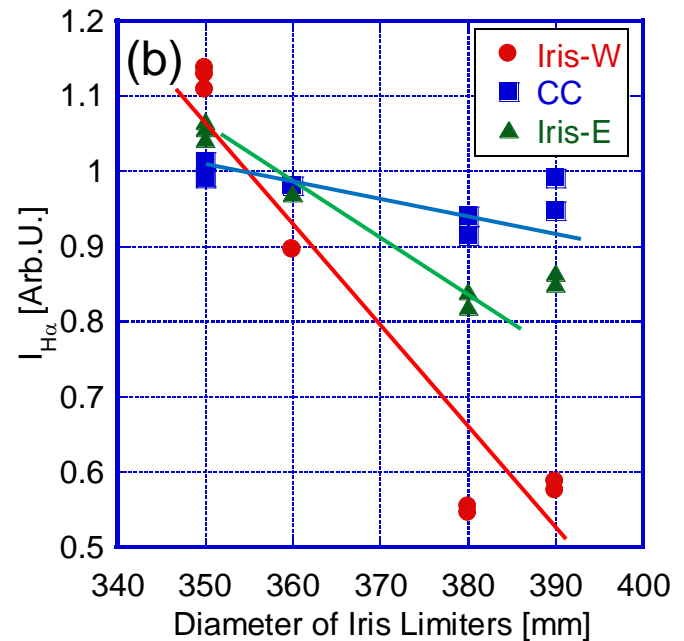
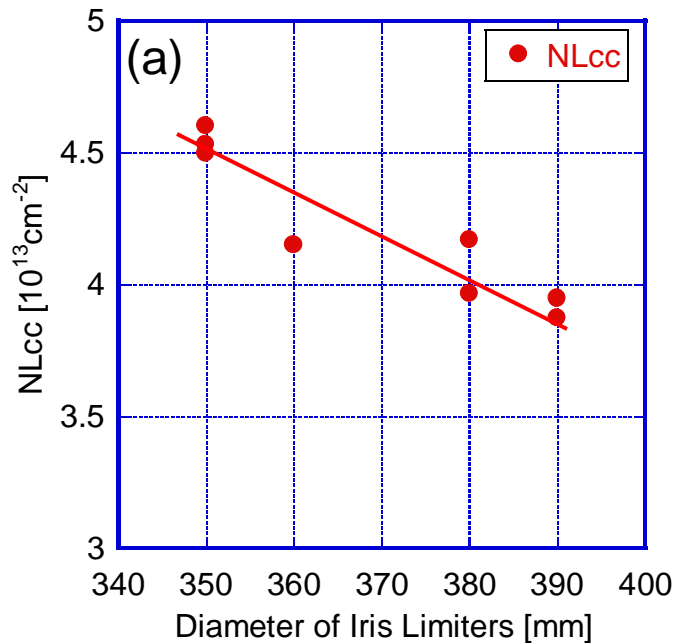
H $\alpha$ 発光輝度は大きく増加する



リミター径を広げたにも拘わらず  
C-ECH直後に強い相互作用

# 実験結果3

ECH印加前のプラズマ状態における  
NL & H $\alpha$ 発光輝度のリミター径依存性



NLもH $\alpha$ 発光輝度も共に、リミター径が増加するにつれて減少する

リミター径によって生成されるプラズマ状態が異なる

# 考察1

## P-ECHによるプラズマ性能劣化のメカニズム

実験結果1 (リミター径: 350mm)

P-ECH印加時DM減少 + H $\alpha$ 発光輝度増加 (リサイクリング増加)

実験結果2 (リミター径: 380mm)

P-ECH印加時DMが減少しない  
(リミターリサイクリングが増加しない)

実験結果3 (NL & H $\alpha$ 発光輝度のリミター径依存性)

ECH印加前の時点で、リミター径が狭いとリサイクリングが多い



リミターリサイクリングによる  
プラズマの冷却が原因と考えられる



## 考察2

### C-ECHによるプラズマ性能劣化のメカニズム

実験結果1 (リミター径: 350mm)

DM減少 + H $\alpha$ 発光輝度増加

実験結果2 (リミター径: 380mm)

プラズマ消滅 + H $\alpha$ 発光輝度増加

実験結果3 (NL & H $\alpha$ 発光輝度のリミター径依存性)

ECH印加前で、リミター径の拡大とともにリサイクリングが低下

リサイクリングによる粒子供給が不十分だと何らかの粒子損失機構によってプラズマ粒子が減少



過大なC-ECHによる粒子損失の助長が原因で、プラズマの消滅が起こっている可能性がある

# 中性粒子シミュレーションを用いた粒子生成量の評価

実験結果の考察により得た仮説に対して、中性粒子輸送モンテカルロコード DEGAS を用いて粒子生成量の計算を行い、仮説の検証を行った。

仮説1 P-ECH印加時のプラズマ性能劣化は  
リサイクリングによるプラズマの冷却



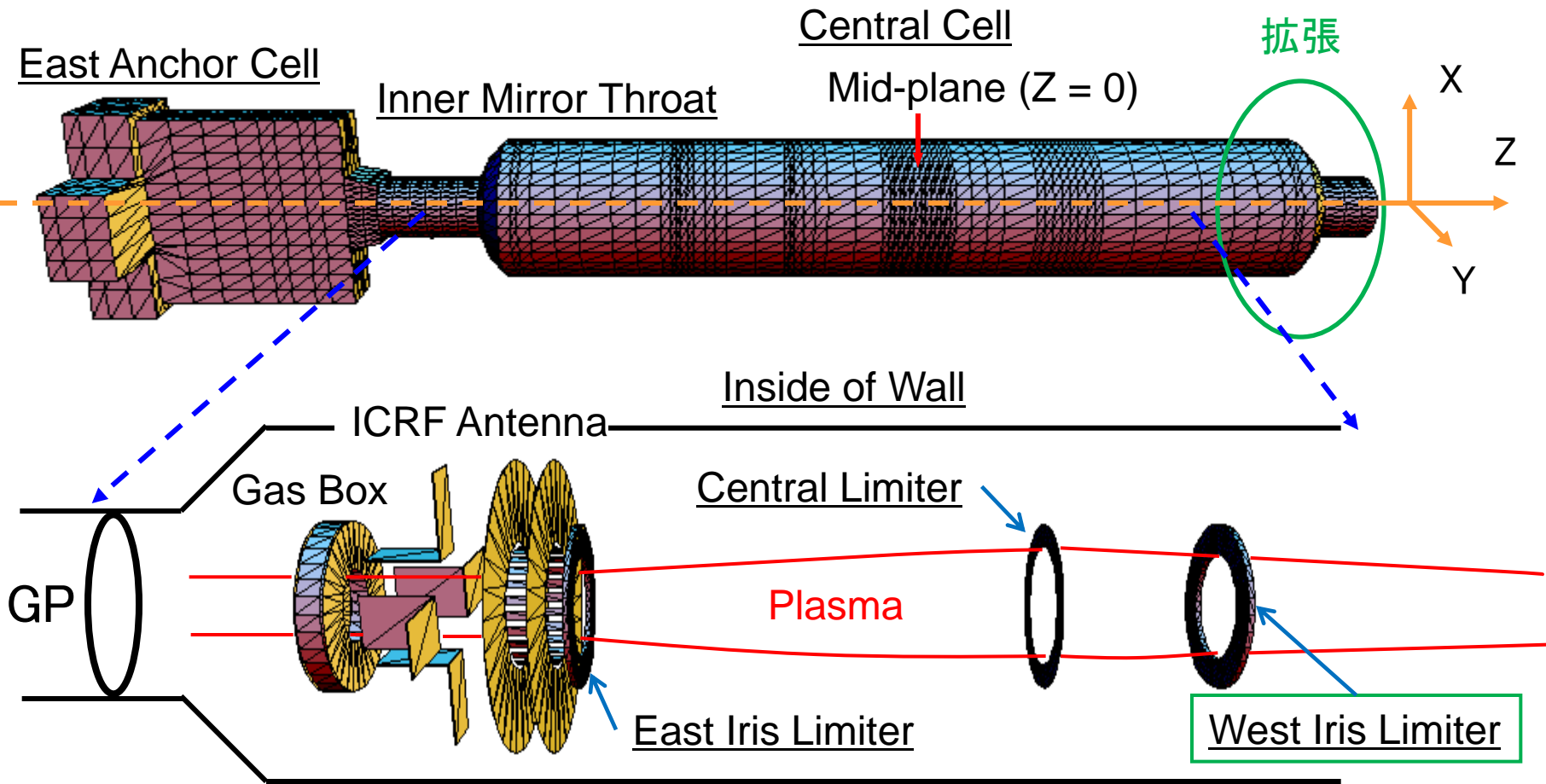
リミター径によるリサイクリングの定量的な依存性を  
DEGASの計算から導き、その効果を検証する。

仮説2 プラズマへの粒子供給不足のときC-ECH  
印加時にプラズマが消滅



DEGASを用いて $H\alpha$ 発光輝度のZ軸方向の分布を調べ、粒子  
供給への寄与がリミター径により差があるかを検証する。

# 3次元シミュレーションモデル

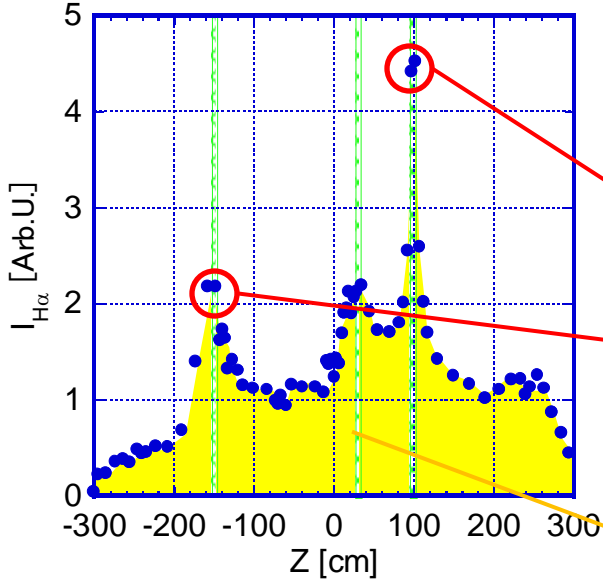


今回検証を行うために、新しくセントラル部西側を西スロート部まで**拡張**し、さらに**西アイリスリミター**をメッシュモデルに取り込んでシミュレーションを行った。

# 計算結果(仮説1の検証)

仮説1: リミターリサイクリングによるプラズマの冷却

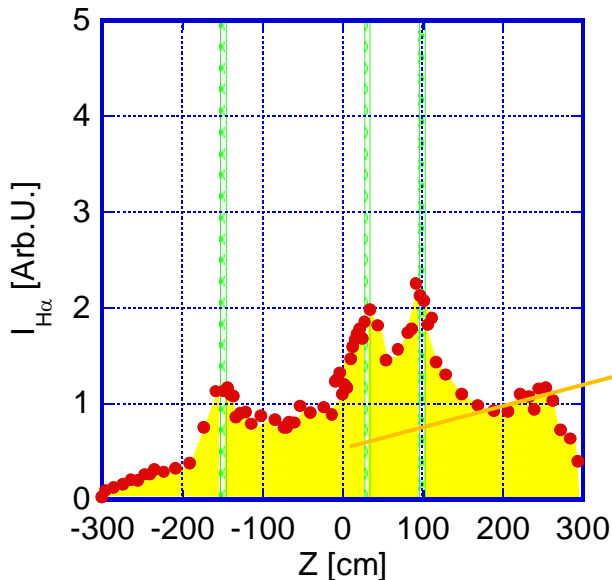
E340:CC400:W340



2種の異なるリミター配置での  
H $\alpha$ 発光輝度のZ軸方向の分布

リミター径を狭くすると  
各リミター近傍で強いピーク

E400:CC400:W400



トータルのリサイクリング量の比較

リミター:狭

98

リミター:広

70

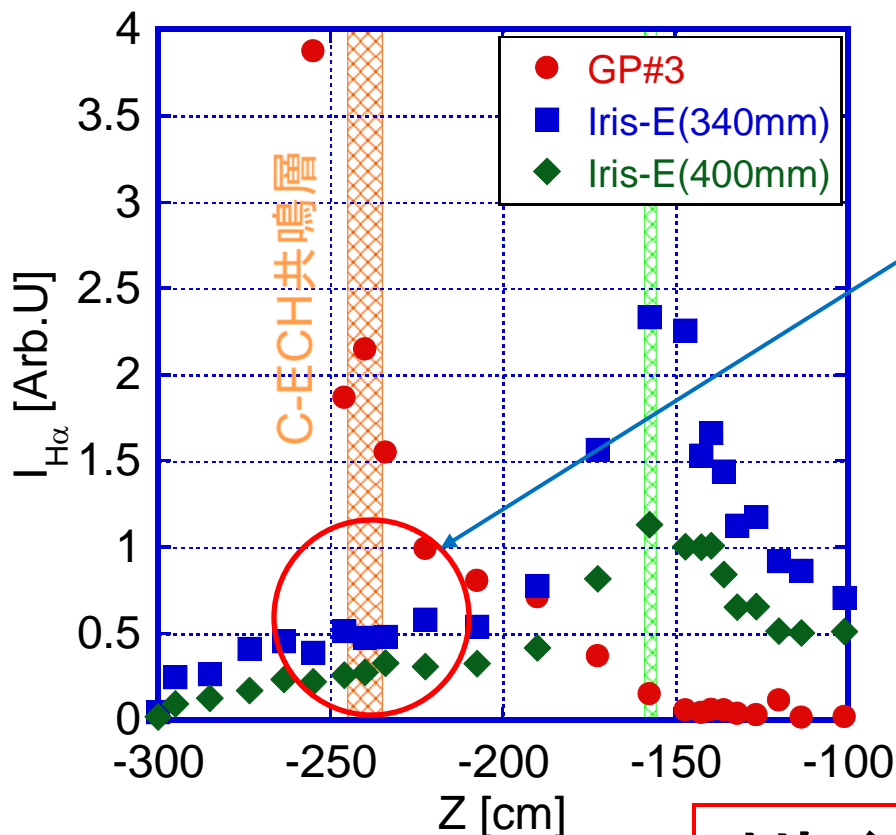
約1.4倍

リミターが狭い場合、リサイクリング過多  
によるプラズマの冷却が起きやすい状  
況であると示唆される

# 計算結果(仮説2の検証)

東スロート部における各ソース源からの粒子供給量の計算結果

仮説2: プラズマへの粒子供給不足のとき  
C-ECH印加時のプラズマが消滅



C-ECH共鳴層においても  
リミター径の違いが顕著に  
表れている

C-ECH共鳴層での粒子供給量の割合  
リサイクリング起源/GP#3起源

||  
約20%

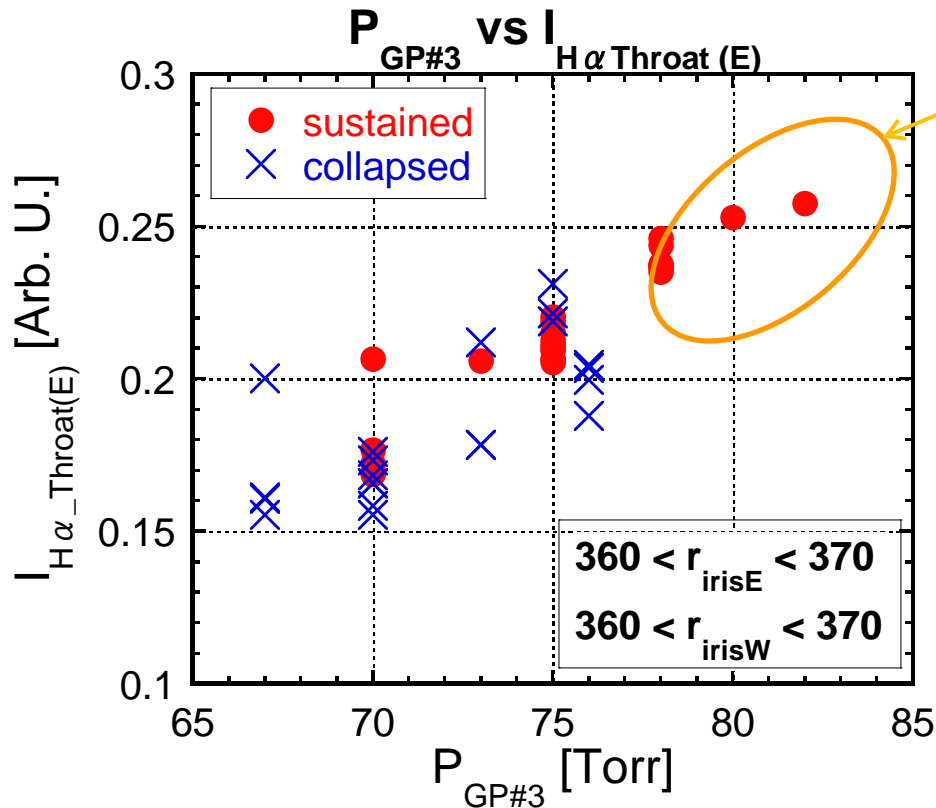
ソース源  
GP#3  
Iris-E(340mm)  
Iris-E(400mm)

リサイクリング起源の粒子供給が、プラズマへの粒子供給源としてかなりの量を占めている。

# ガスパフ#3入射量依存性

プラズマが持続したショット、持続しなかったショットそれぞれについて、GP#3入射量とECH印加直前の東スロート部近傍におけるH $\alpha$ 線の発光強度の依存性を取った。

ここでは、リミター径の影響が強くないように東西アイリスリミター径を通常配置の $360 \leq \phi \leq 370$  mmとした。



この実験の条件下では、ガスパフ#3入射量が $P_{GP\#3} \geq 78$  [Torr]では全てのショットで**プラズマが持続した**。

このことから、C-ECHでプラズマが持続しないショットに対して、ガスパフなどの**外部からの粒子供給**によって、プラズマの消滅を回避することができる。

ガスパフによる粒子供給の増加分は、シミュレーションの結果と概ね一致する。

# 結論

本研究では、比較的高いECHパワーによるプラズマ加熱時に生じるプラズマ性能の劣化の原因を解明するために、リミターとプラズマとの相互作用による水素リサイクリングに着目して、その最適化についてH $\alpha$ 線計測及び、中性粒子輸送シミュレーション解析に基づいて検討した。

その結果、以下のことが明らかになった。

- P-ECH印加時のプラズマ性能の劣化は、**リミターリサイクリングによるプラズマの冷却**が原因であると考えられる。
- C-ECH印加時のプラズマ性能の劣化は、過大なC-ECH印加による**粒子損失の助長**が原因である可能性があり、リミターが広い場合に粒子供給不足によりプラズマが消滅する。この場合、外部からの供給粒子量を増やすことで防ぐことが可能な場合がある。
- 実験結果から導いた仮説をシミュレーションにより検証した。シミュレーションの結果は**仮説を裏付ける**ものであった。

**以上の結果から、効果的なECHの運用に必要なリミター径の最適値を模索する上で有益な知見を得た。**