平成24年度合同研究会
筑波大学自然系学系棟B119　平成24年7月23-24日

プラズマ研究センターのダイバータ模擬実験の現状

プラズマ研究センター　　中嶋洋輔,
ガンマ10グループ

CONTENTS

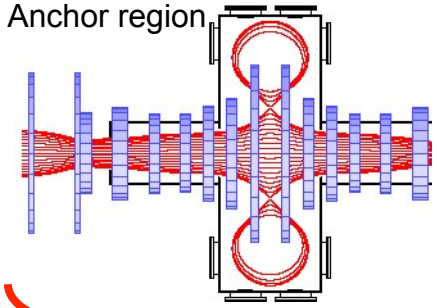
1. はじめに
2. ガンマ10端部における高熱流プラズマ束生成実験
3. ダイバータ模擬実験モジュール用いた最近の実験結果
4. まとめ

新研究計画の概要

既存装置タンデムミラー “GAMMA 10”

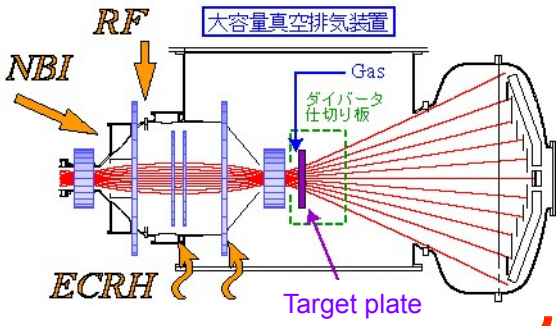
A(X)-Divertor

Anchor region

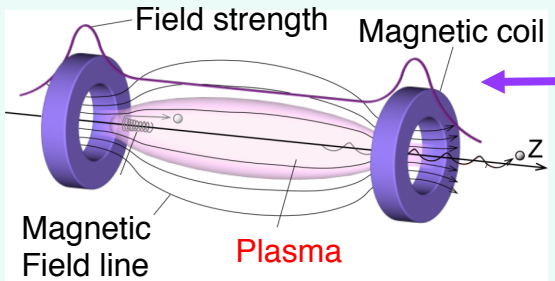


End region

E-Divertor



ミラー閉じ込めの原理



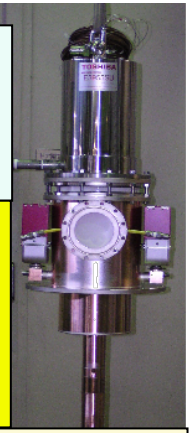
電位形成による閉じ込め改善研究

開放端磁場配位

電位 & 電場

Microwave source for ECH

High power heating systems (RF, NBI)



プラズマ制御のキーツール

これまでの研究の展開を図る為に以下の２つのプロジェクトを開始

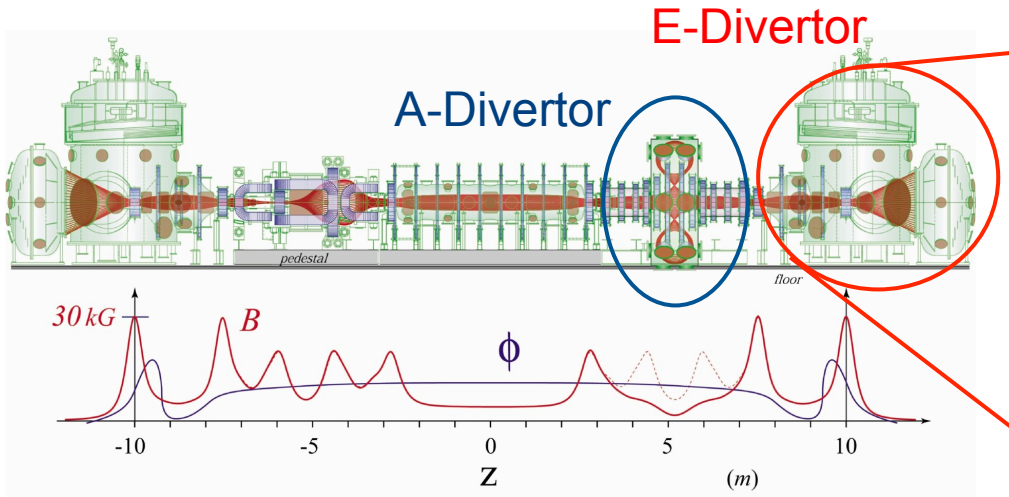
(1) 電位形成によるプラズマ閉じ込め改善研究のコアプラズマから境界プラズマへの拡張

(2) 既存のタンデムミラー装置（GAMMA 10）に新しいダイバータシステム (*A(X)-Div.*, *E-Div.*) を導入し，ダイバータ模擬研究に基づく境界プラズマ研究を進める。

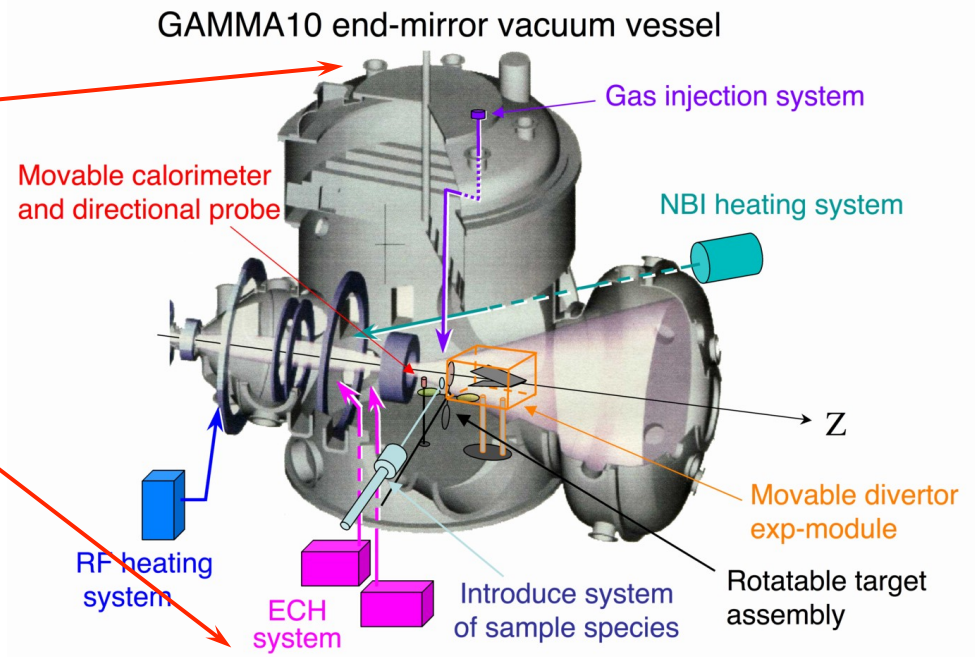
環状プラズマ研究への貢献

開放端磁場を活かした新研究(*E-Div.*)

ダイバータ配位を持つ新しい磁場の設計例

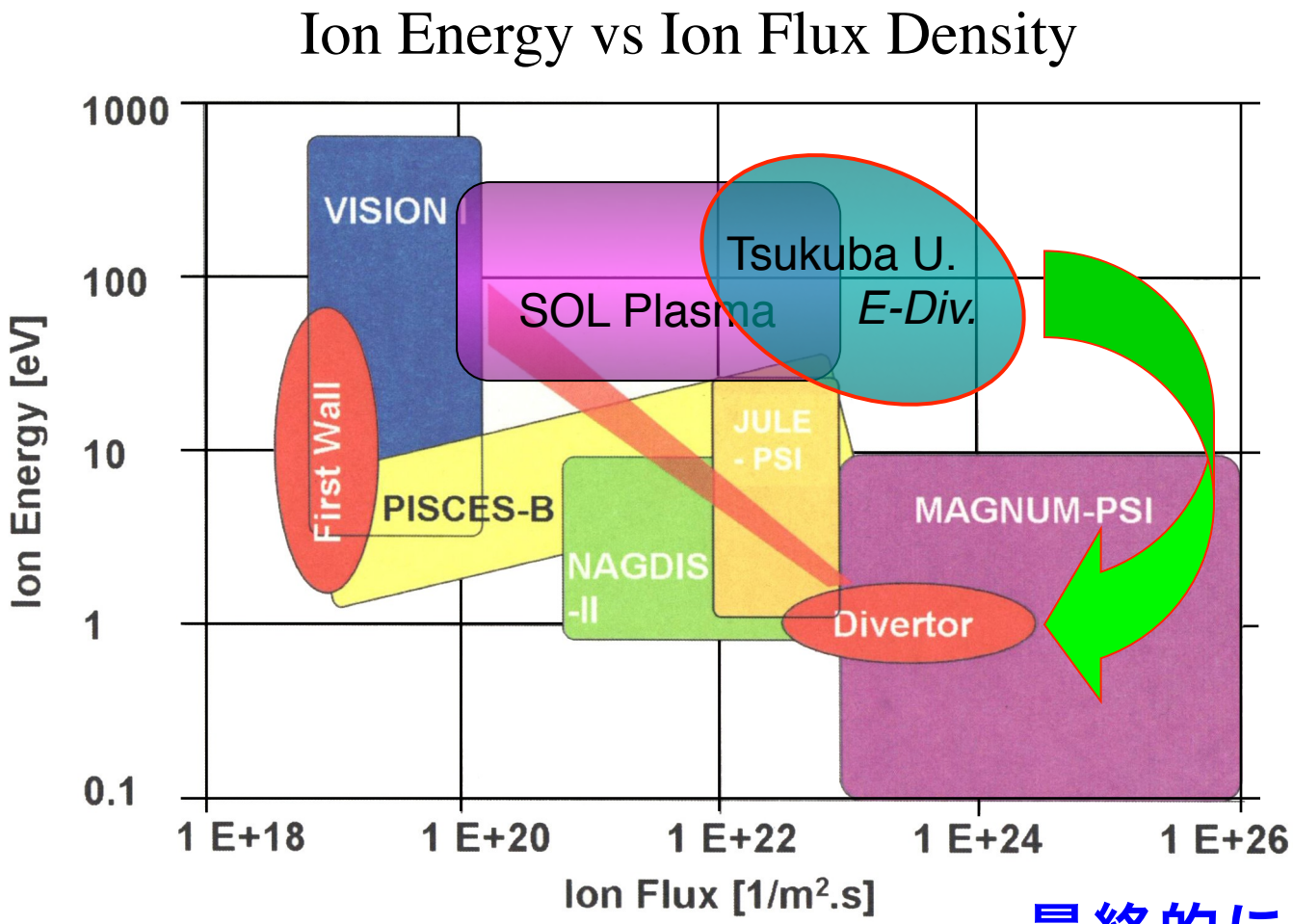


端部ダイバータ模擬実験の概略図



- 既設の大出力ジャイロトロンによる強力な電子加熱，及び大電力イオン加熱装置（ICRF，NBI）を用いた高エネルギーのプラズマ生成が可能で，他の小型ダイバータ模擬実験装置に比べて**大口径・高熱流束が期待**できる。
- 大容量クライオ排気装置を用いたダイバータ排気実験が可能。
- パルス運転を利用した**ELMを模擬した研究など実機プラズマのダイバータに近い環境(強磁場，高イオン・電子温度，端部放電電極等の影響の無い条件下)での，ダイバータプラズマ制御**実験を世界で初めて実施する。

E-Divertorのパラメータと物理目標



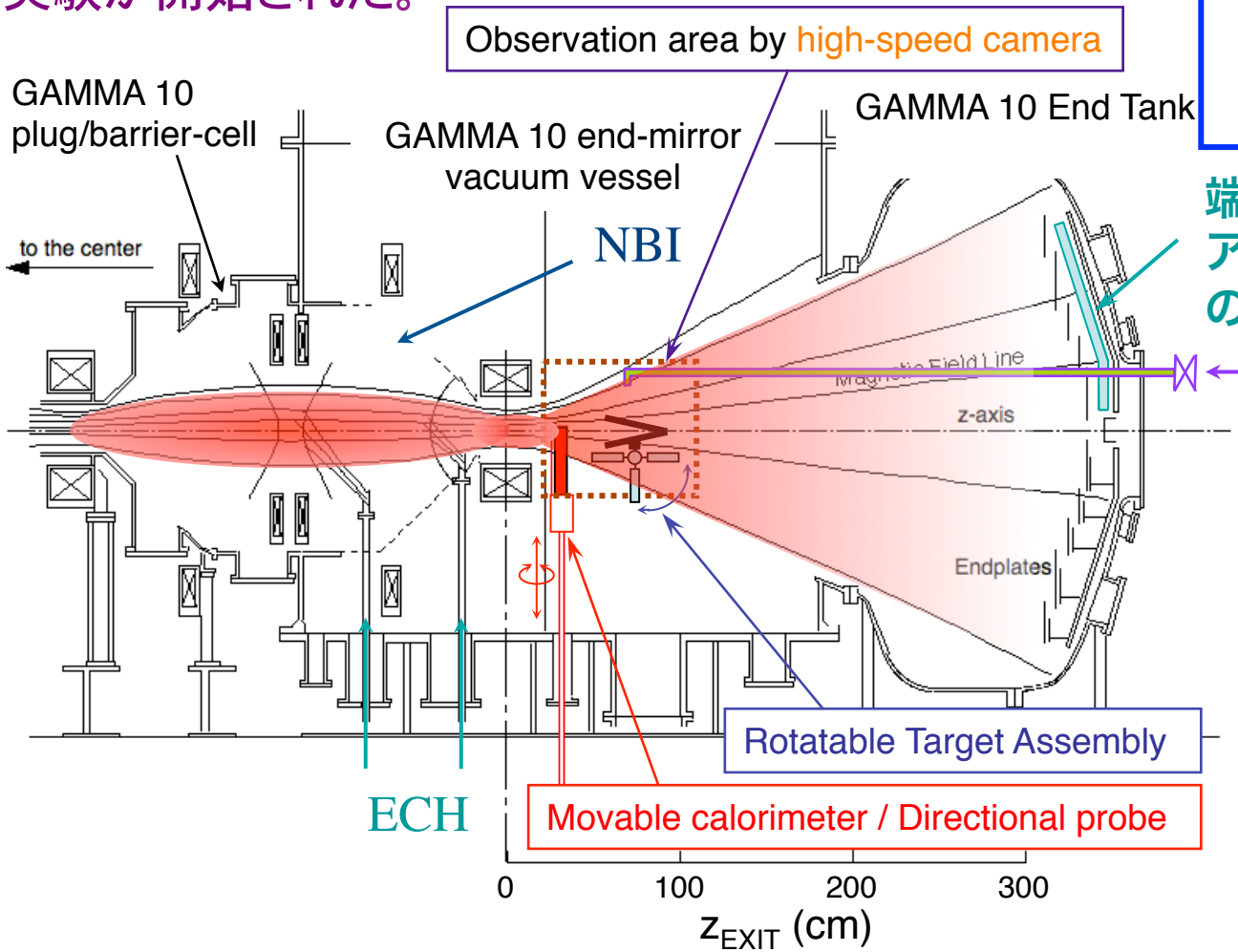
Uytdenhouwen I. et al,
Plasma & fusion Science 996 (2007) AIP proc. 17th RUSFD, pp 159-165)

- タンデムミラー端部で生成されるイオンのエネルギーは，トカマクのSOLプラズマに匹敵する程度に高い。
- エンド部において，ガス導入，リサイクリング促進を図ることにより，放射冷却についての機構を解明し，非接触プラズマ実現へ向けての知見を得る。

最終的に，環状系プラズマにおける非接触プラズマの定常維持達成に貢献する。

ダイバータ模擬実験を目指したE-Div. 実験

双方向型共同研究に基づいて、タンデムミラー端部を用いた高熱流束生成の為の基礎実験が開始された。



西エンド部真空容器と実験装置の配置

端損失イオンエネルギー分析器アレイによる軸方向イオン温度の評価

He, Ne, Ar ガス入射による不純物輸送実験及び放射冷却，非接触プラズマ実現に向けた基礎実験

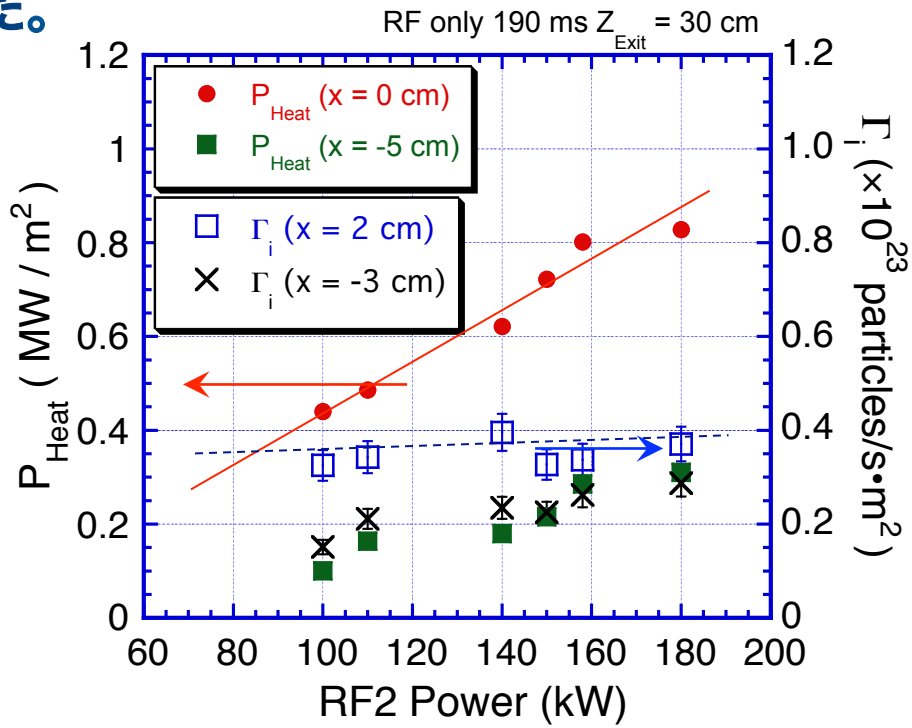
高速カメラによるプラズマとターゲット材料との相互作用の計測

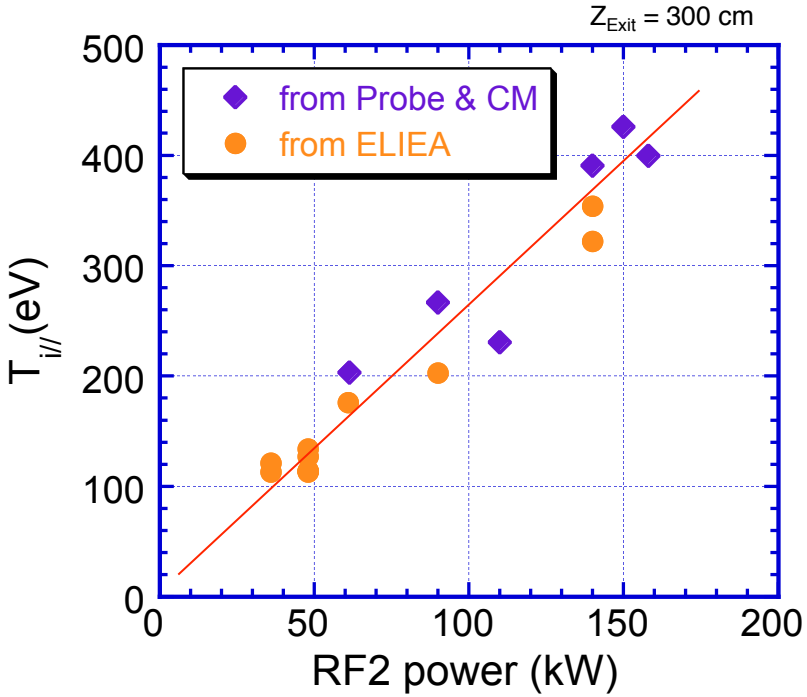
カロリーメータ／方向性プローブによる端損失粒子の粒子束密度・熱流密度の計測

ガンマ10によるダイバータ模擬研究への見通しの確立と共に，計測技術、照射技術に関するノウハウを蓄積する。

ICRFによる高熱流束生成実験結果

典型的なホットイオンモードプラズマ ($n_e(0) \sim 2\times10^{18}$ m^{-3}, $T_i(0) \sim 5$ keV), において端部ミラー出口及びエンドプレート上で熱流束・粒子束密度，及びイオンエネルギーの直接計測が行われた。

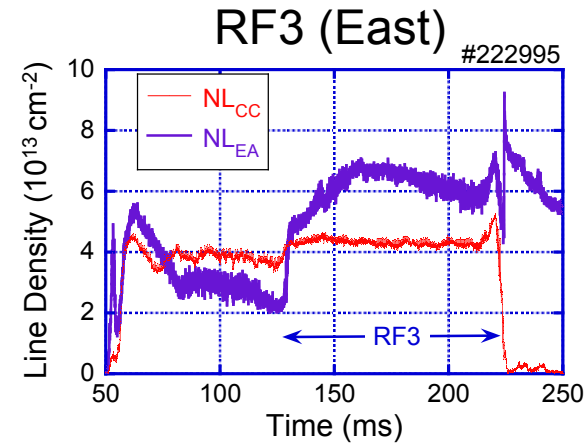


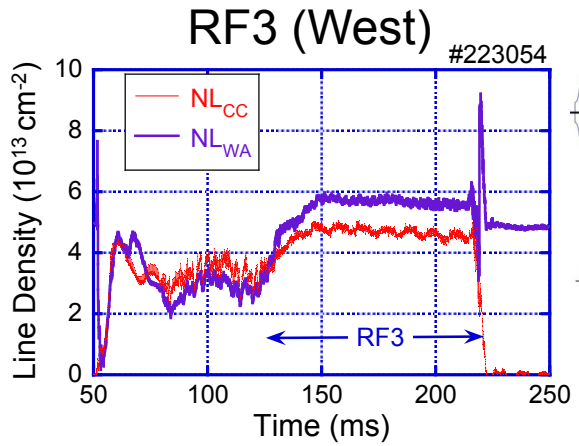


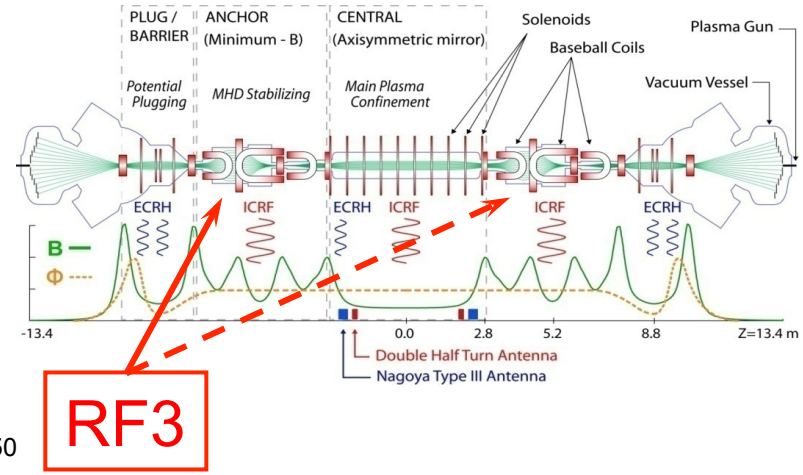
- ICRF加熱時，熱流束密度 0.8 MW/m^2 粒子束密度 4×10^{22} H/s•m^2 が中心軸上で得られ，熱流束はRFパワーの増加と共に増加することが分かった。
- 端部ミラー出口近傍（Z_{EXIT} = 30 cm）で測定した軸方向（磁力線方向に沿った）イオン温度 $T_{i//}$ とエンドプレート近傍（Z_{EXIT} = 300 cm）で測定した $T_{i//}$ は，ICRFパワーと共に増加し、お互いに良い一致を示した。

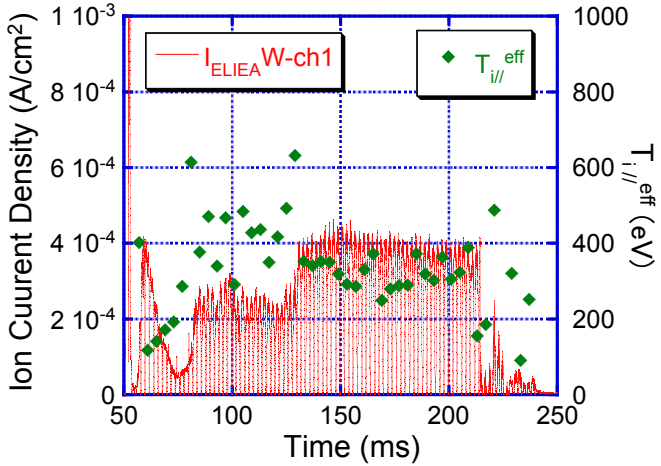
ICRFによる高熱流束生成実験結果

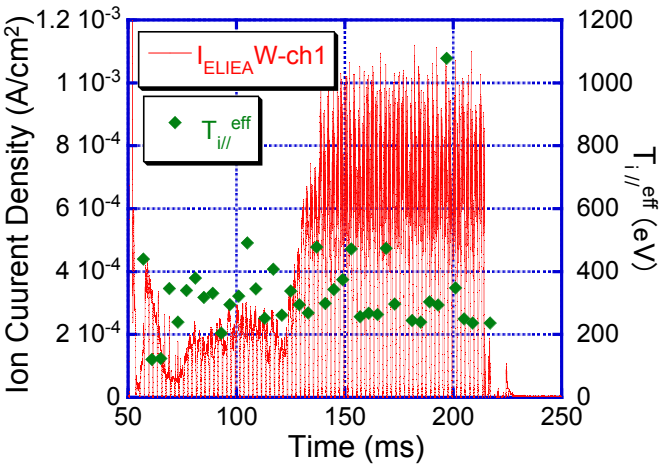
粒子束密度の更なる増加を目指して極小磁場アンカー部にICRF（RF3)による追加熱実験を行った。

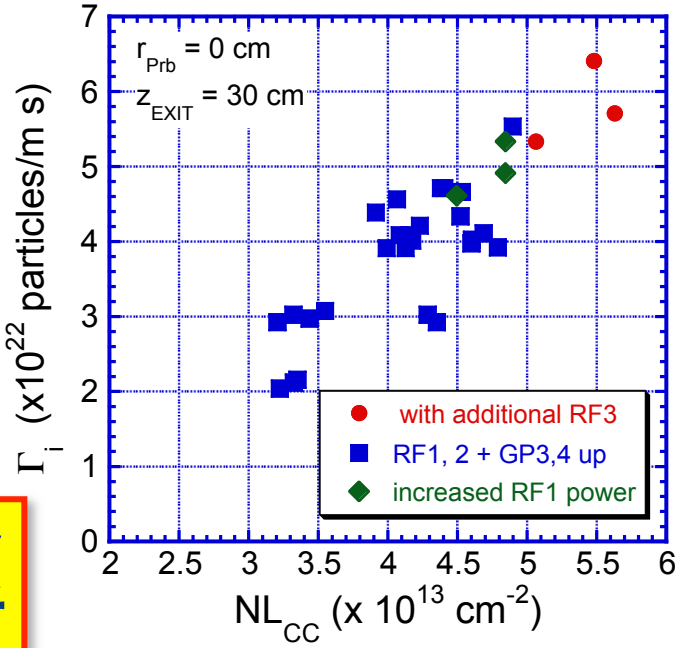








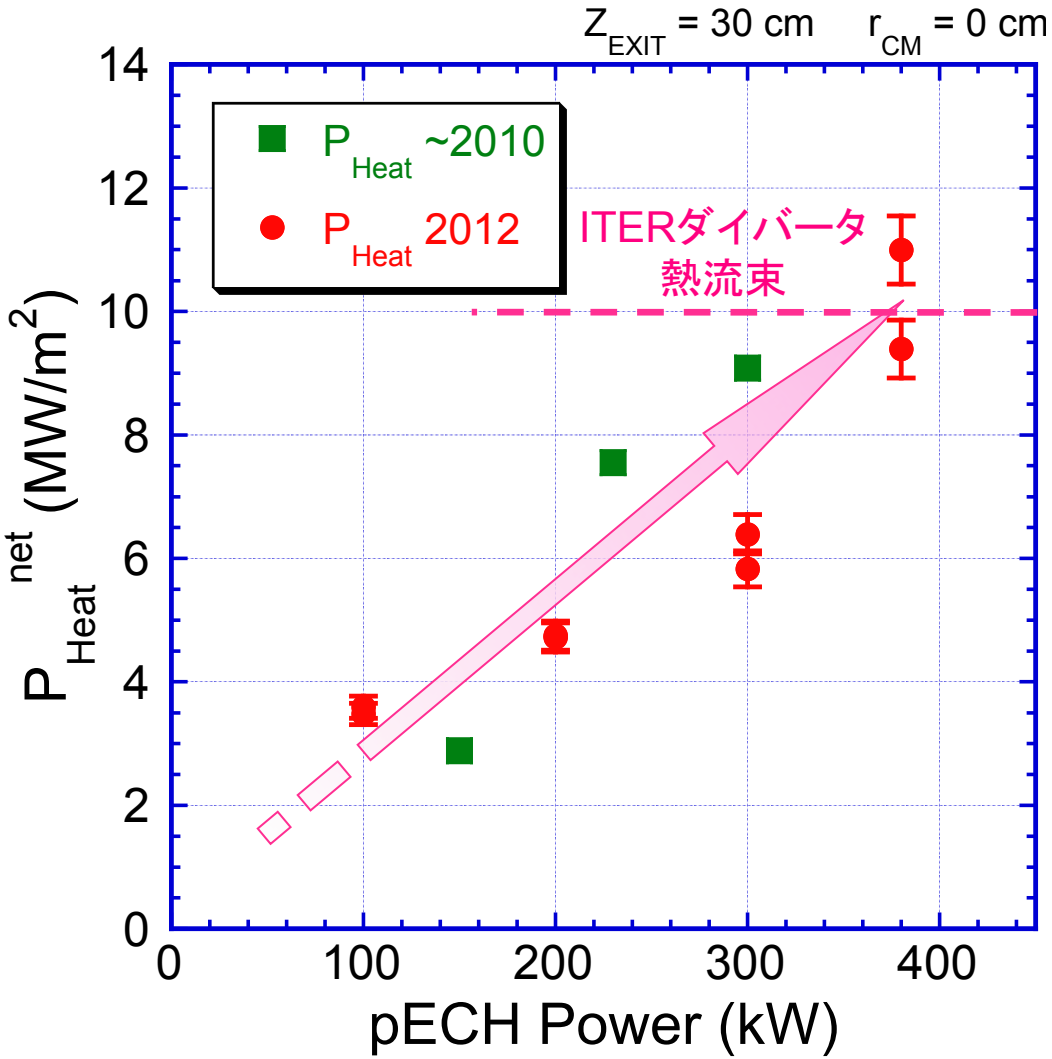




アンカー部へのICRF加熱により，同部並びにセントラル部における顕著な密度増加を観測し，同時に端部粒子束密度の増加が認められた。→隣接セルへの追加熱効果

ITERリリバントな熱流束の発生

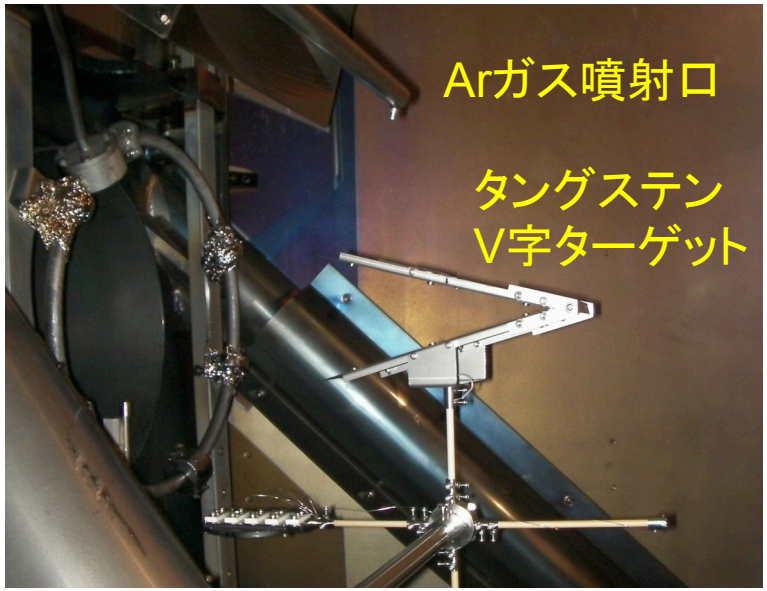
ピーク熱流束密度のECHパワー依存性



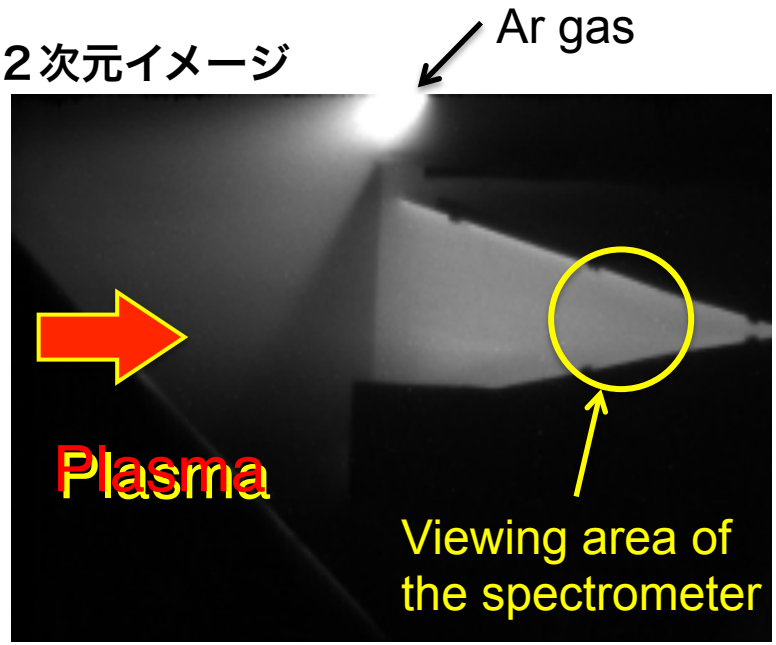
- ICRF生成プラズマ（n_{eCC} = 2 ~ 3 × 10^{18} m^{-3}, $T_{i//}$ ~ 5 keV）において，短パルス（5 ~ 25 ms）のECHを印加することにより，端部ミラー出口近傍（コイルの下流30cm）で，端損失プラズマ流の熱流束の計測を行った。
- 380 kWのECH重畳により，ITERにおけるダイバータ板上の熱流密度に匹敵する値（≥ 10 MW/m^2）を達成した。
- 現有の出力でITERリリバントな熱流密度レベルに達したことから，今後の端部プラズマ加熱系の増強により，更なる高熱流束の発生，長パルス化の見通しが得られた。

高速カメラを用いたPWIによる可視発光の2次元イメージ計測と初期分光計測

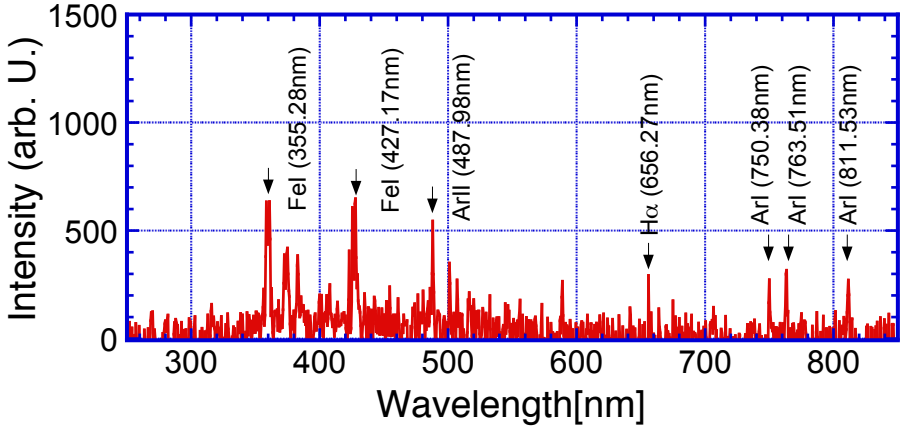
端部ミラー出口に設置したV字ターゲット



可視光の２次元イメージ



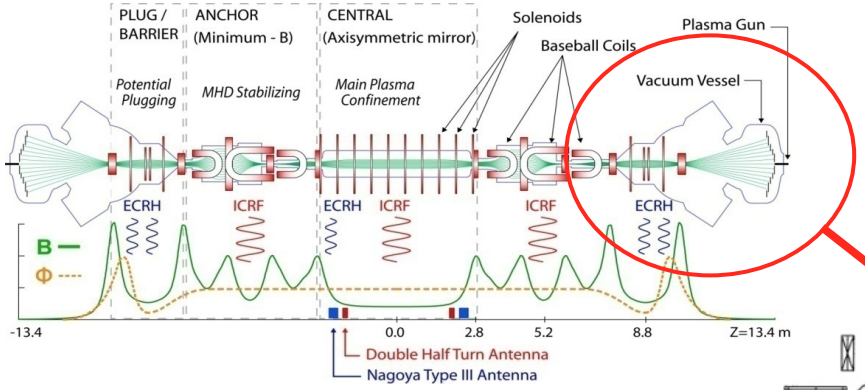
分光スペクトル



- タングステン製V字ターゲットを新たに端部ミラー出口に設置して，プラズマとの相互作用光を高速カメラでとらえた。
- ターゲット前面にアルゴンガスを照射し，ターゲット内の分光スペクトルを初めて測定した。

ダイバータ模擬実験装置(D-module)の設置

昨年度末ガンマ10西エンド部にダイバータ模擬実験装置(D-module)が設置された。



- 閉ダイバータ化に伴う中性粒子圧縮とリサイクリング促進，排気
- ダイバータ内ガス導入による放射冷却機構の研究
- ダイバータ角度変更機能による磁力線との角度依存性の研究

ガンマ10西エンド部真空容器

ダイバータ模擬実験モジュール(D-module)

昇降システム

タングステンターゲットの角度は，15°～80°で可変

プラズマ流束入射口φ200

放射冷却用ガス入射口（He，Ne，Ar）

ダイバータ模擬実験モジュール(D-module)

＜モジュールの諸元＞

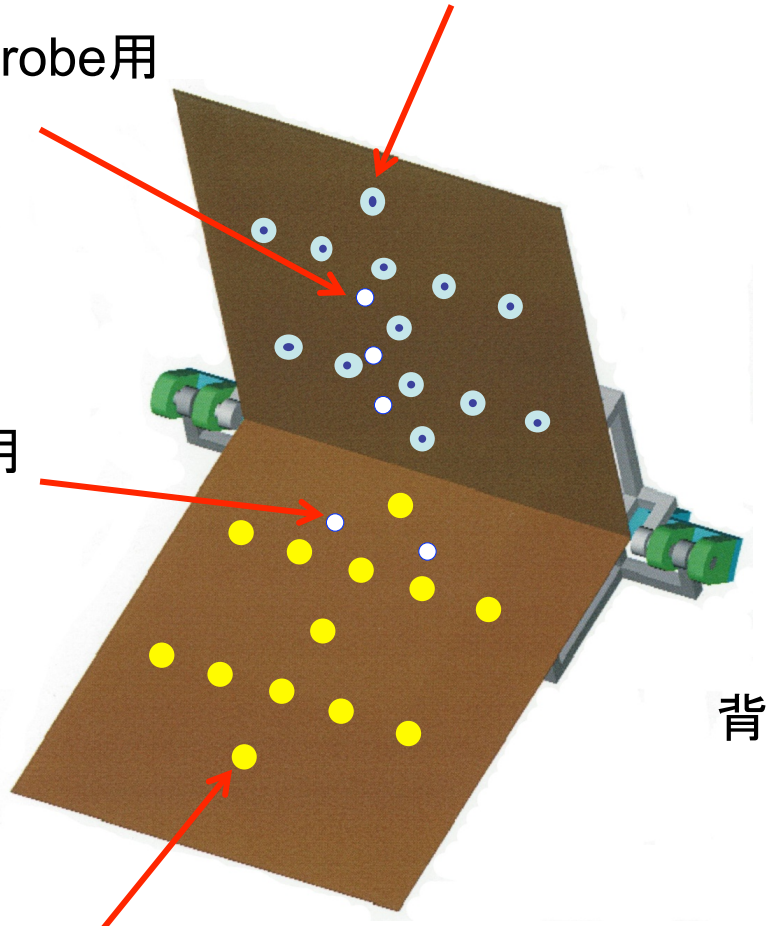
- D-module：W500mm×H480mm×L700mm
  前面プラズマ導入口径　200mmφ
  後部排気口150mm×340mm
  （開口部扉式可変）
  側面プラズマ観測窓（W700mm×H200mm）
- V字ターゲット：タングステン製，
  300mm×350mm×0.2t
  ラングミュアプローブ（上面）　13個
  カロリーメータ（下面）　13個
  角度調節機構15° ～ 80°
  （ ±7.5° ～ ±40°）
  真空度測定用高速イオンゲージ　1台
  ガス導入系　放射冷却実験用　2個
  ヘリウム分光計測用　3個
- 昇降装置：ベローズ式モーター駆動，
  ストローク：850mm，速度：4mm/秒

ダイバータ模擬実験モジュール(D-module)

ラングミュアプローブ（上面）

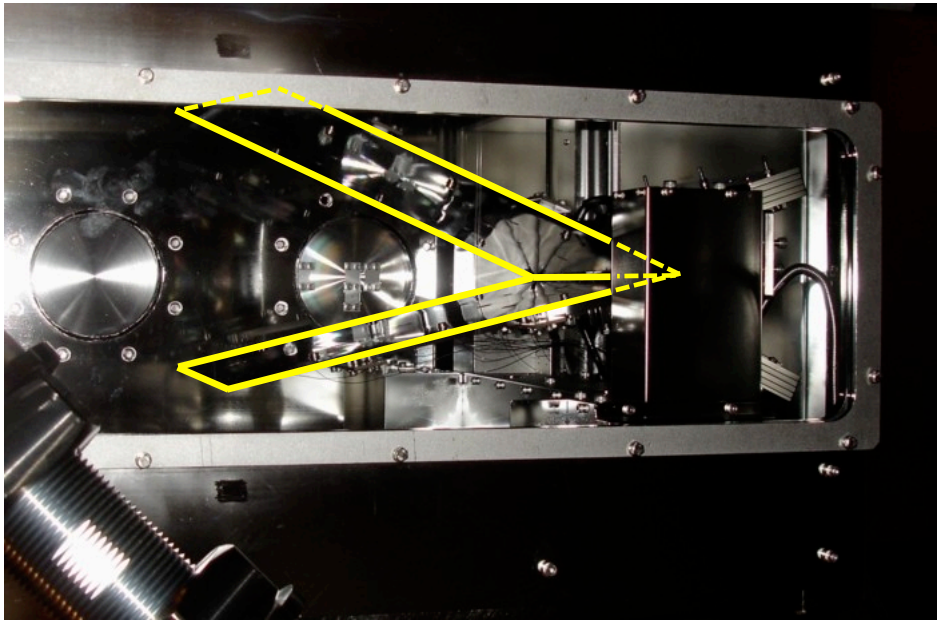
He beam probe用
ガス供給

放射冷却用
ガス供給

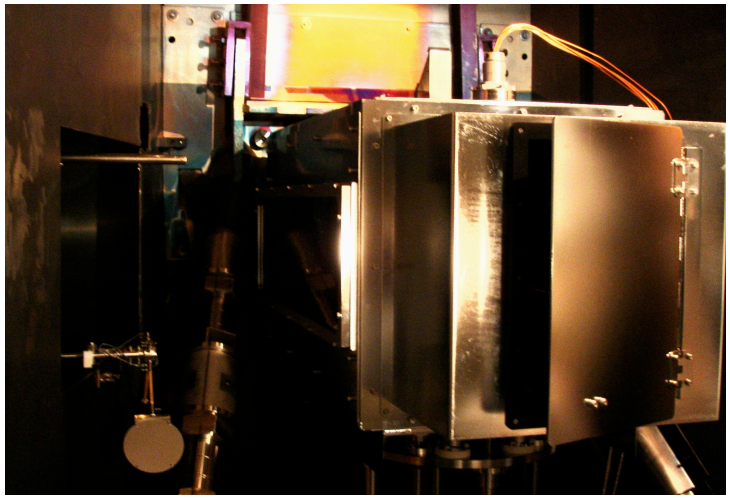


カロリーメータ（下面）

V字ターゲット

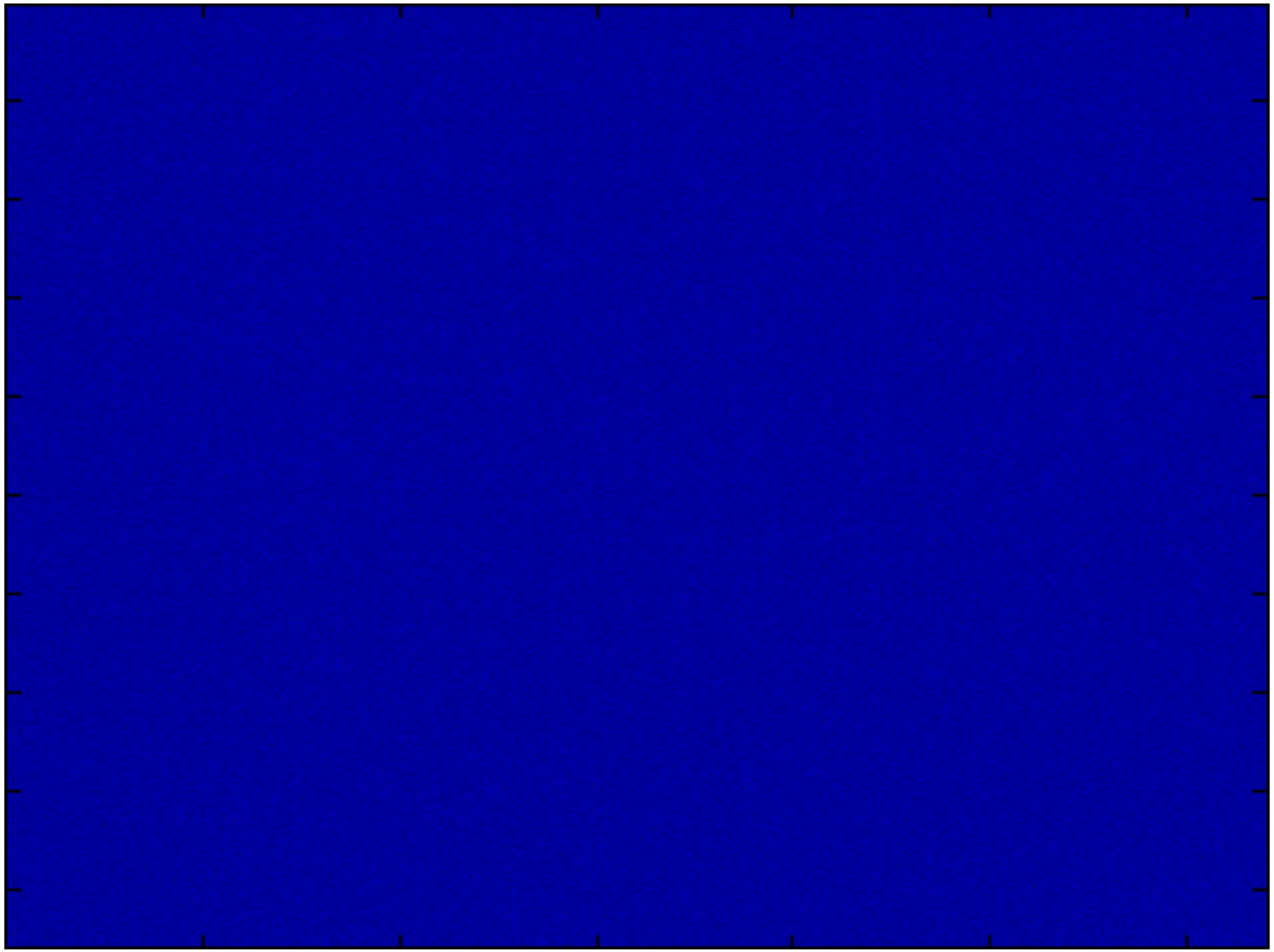


背面排気口



D-moduleを用いた最近の実験結果

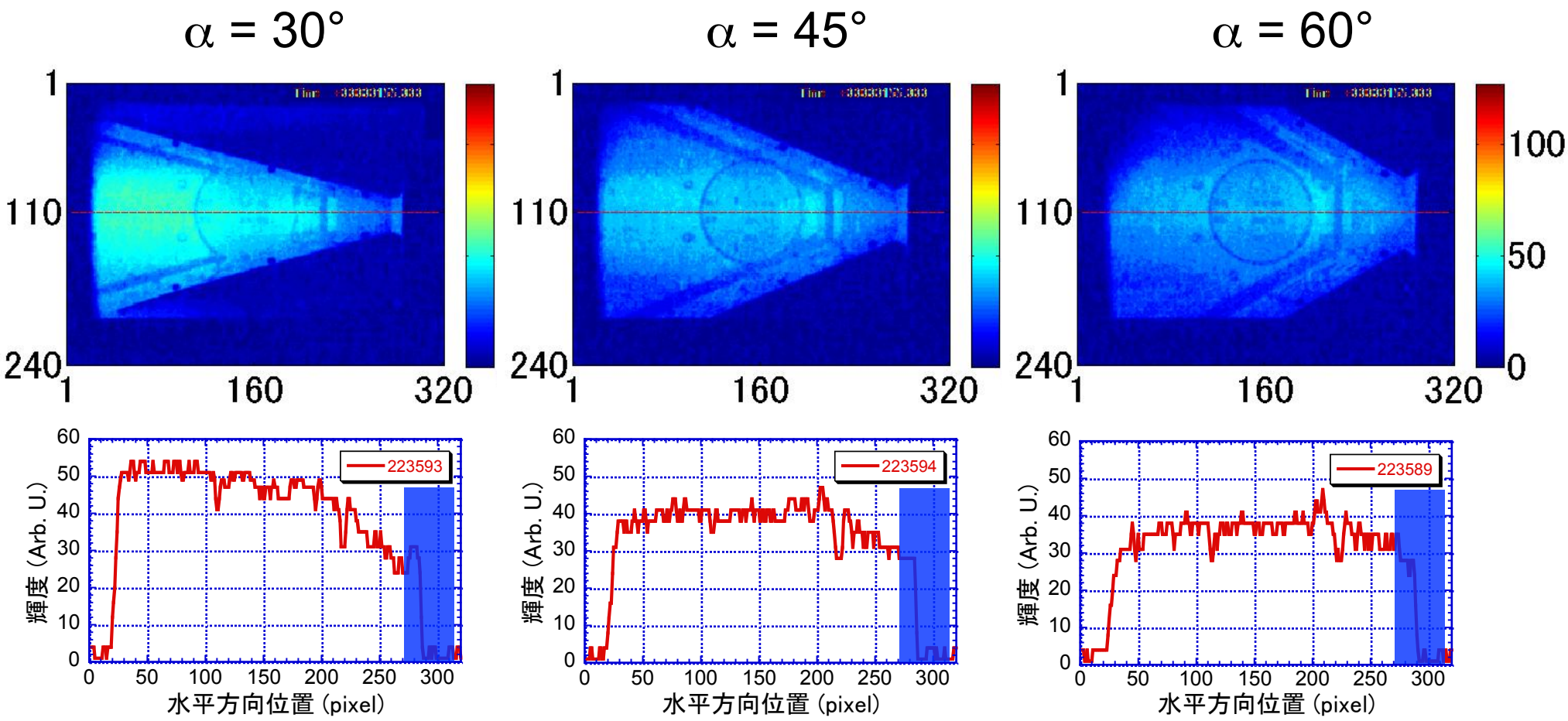
- 高速カメラによる可視光2次元イメージ計測「木暮，細井，中嶋，他」



Shot No.: #223324
Camera:
Phantom v710
Image size:
640×480 pixels
Shutter: Open
Frame rate:
10,000 fps
Filter: Without

D-moduleを用いた最近の実験結果

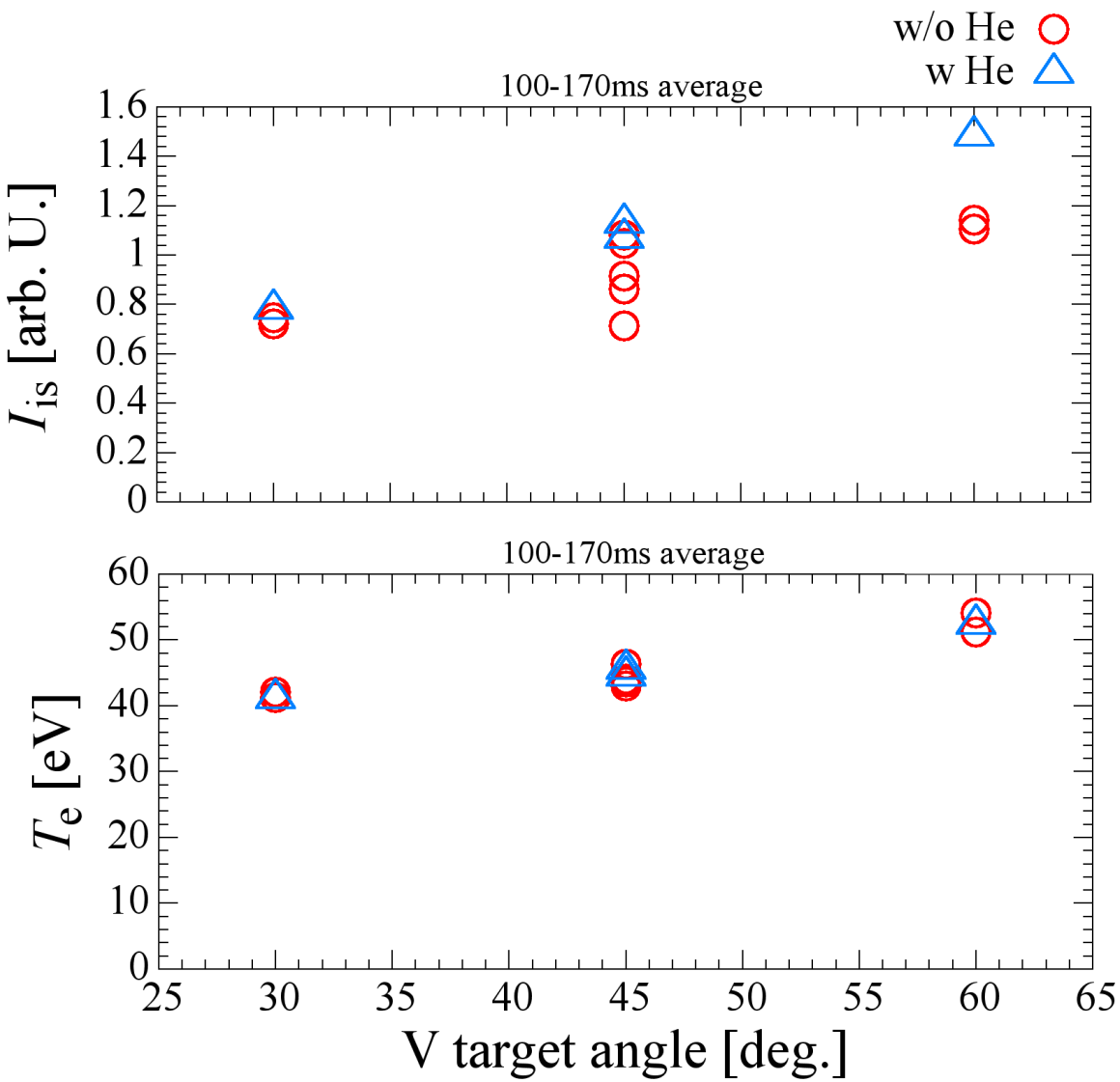
- 高速カメラ計測（開口角度α依存性）「木暮，細井，太田，中嶋，他」



開口部角度が狭くなるにつれて先端部分の発光強度が増加し、ターゲットの奥に入ってゆくにつれて減少する傾向が見える。

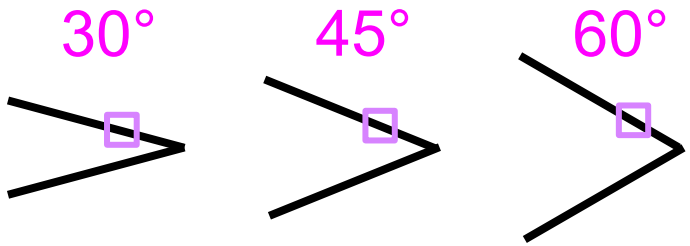
D-moduleを用いた最近の実験結果

- 静電プローブ計測（開口角度依存性）　「大木，赤羽，坂本，他」



He非入射時のショット

He入射時のショット



角度が大きい程：

T_e, I_{is} (n_e?) が上昇する傾向

↓

高速カメラ計測との相関あり？

↓

位置に対する依存があるか？

D-moduleを用いた最近の実験結果

- 高速カメラ計測（希ガス入射実験）

「木暮，細井，太田，他」

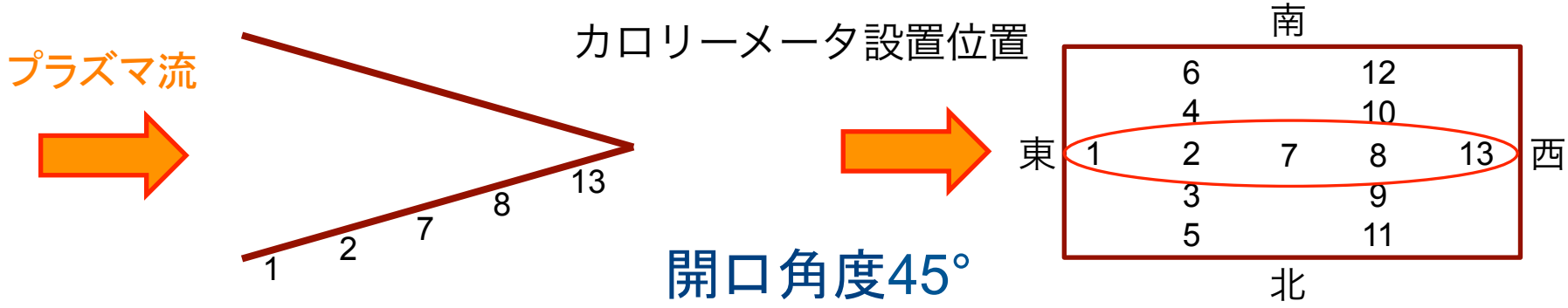
Ar 500mbar, t = 4.5 sec ~ 5.4 sec）

Shot No.: #223608
Camera: GX-1 plus
Shutter: Open
Frame rate: 10,000 fps
Image size: 320×240 pixels
Filter: Without

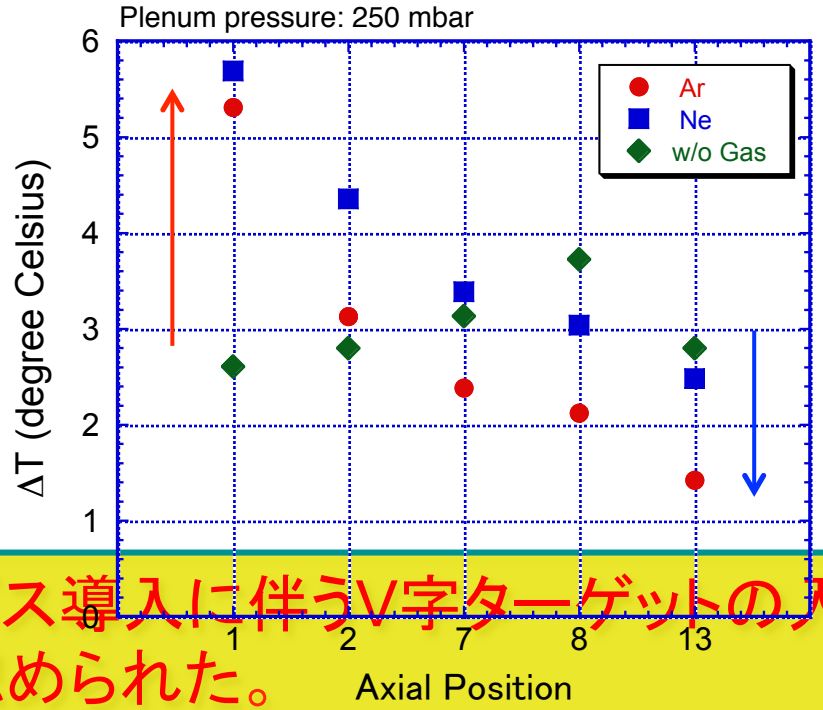
D-moduleを用いた最近の実験結果

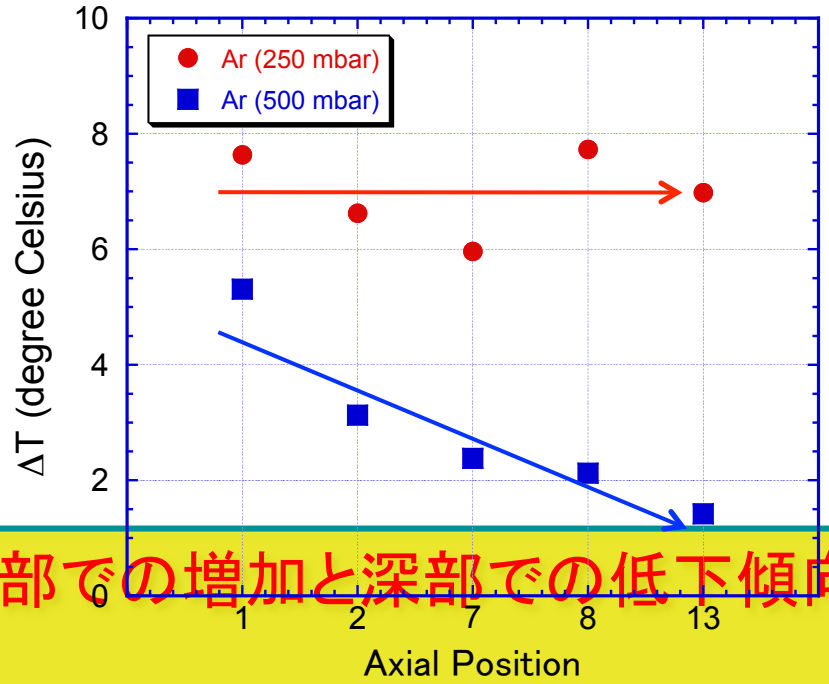
- カロリーメータによる熱流計測　　「武田，岩元，中嶋，他」

（希ガス入射による放射冷却の基礎実験）



開口角度45°



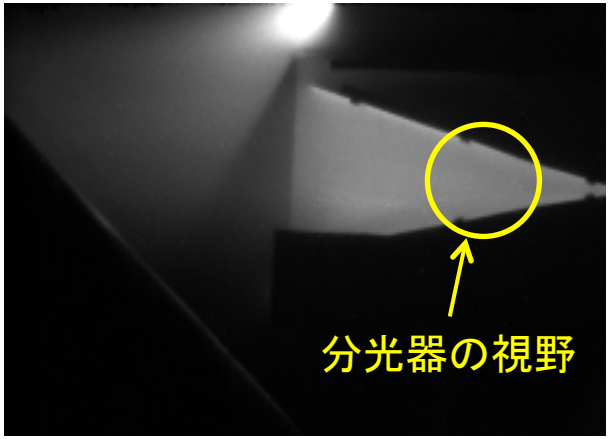


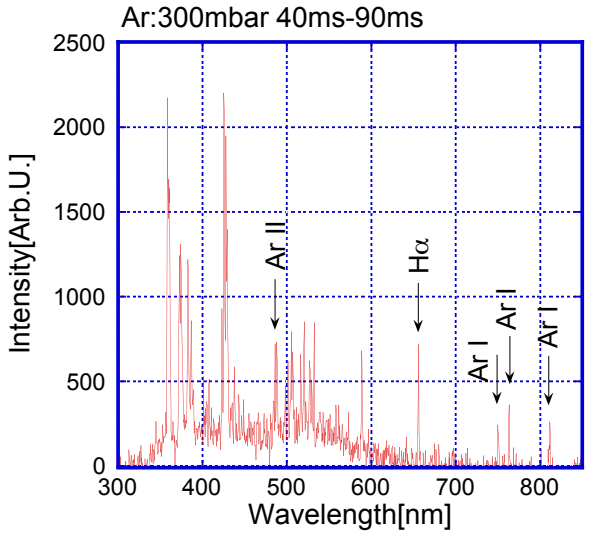
ガス導入に伴うV字ターゲットの入口部での増加と深部での低下傾向が認められた。

D-moduleを用いた最近の実験結果

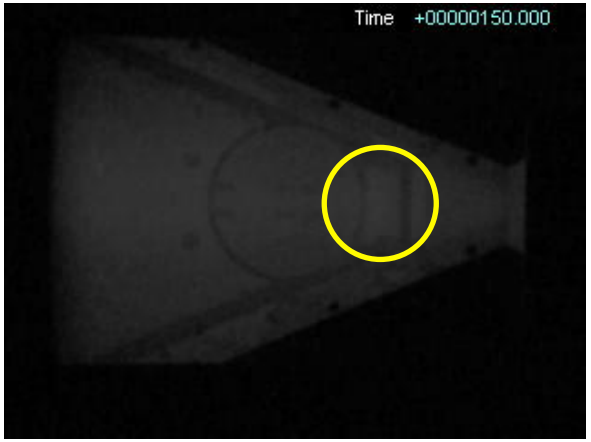
- **ガス導入実験における分光計測**　「細井，中嶋，細田，他」

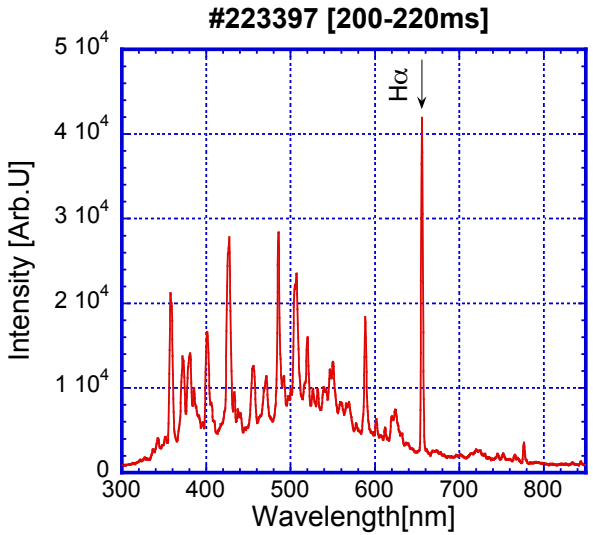
V字ターゲット簡易BOX付き



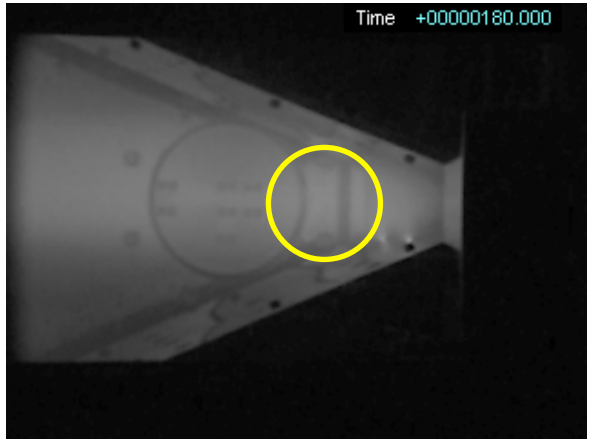


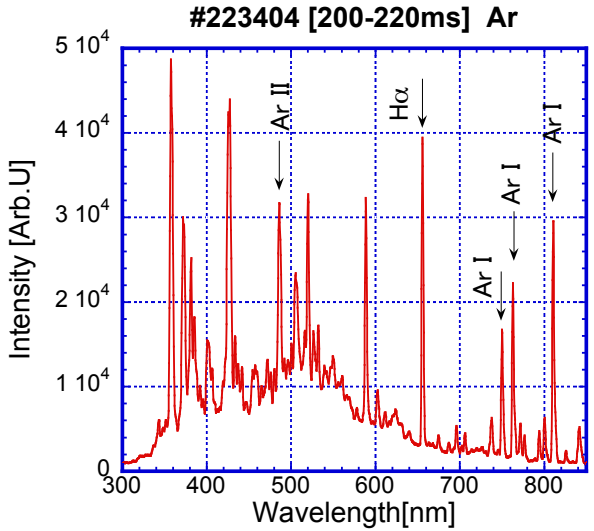
ダイバータモジュール
(without Gas)





ダイバータモジュール
(with Gas)

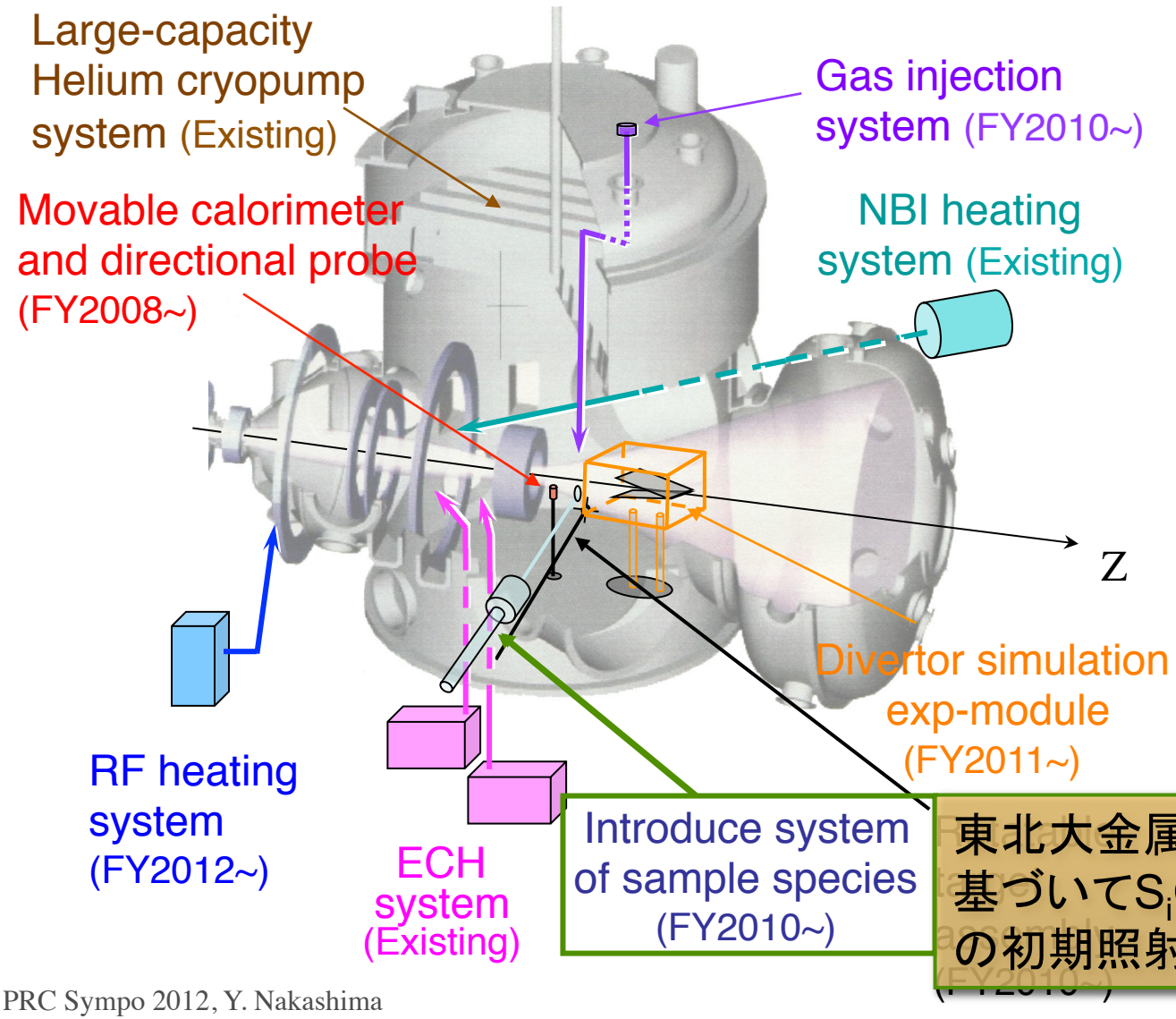




ダイバータ領域のクローズド化により発光強度の顕著な増加が認められた。

ダイバータ研究の今後のスケジュール

GAMMA10 end-mirror vacuum vessel

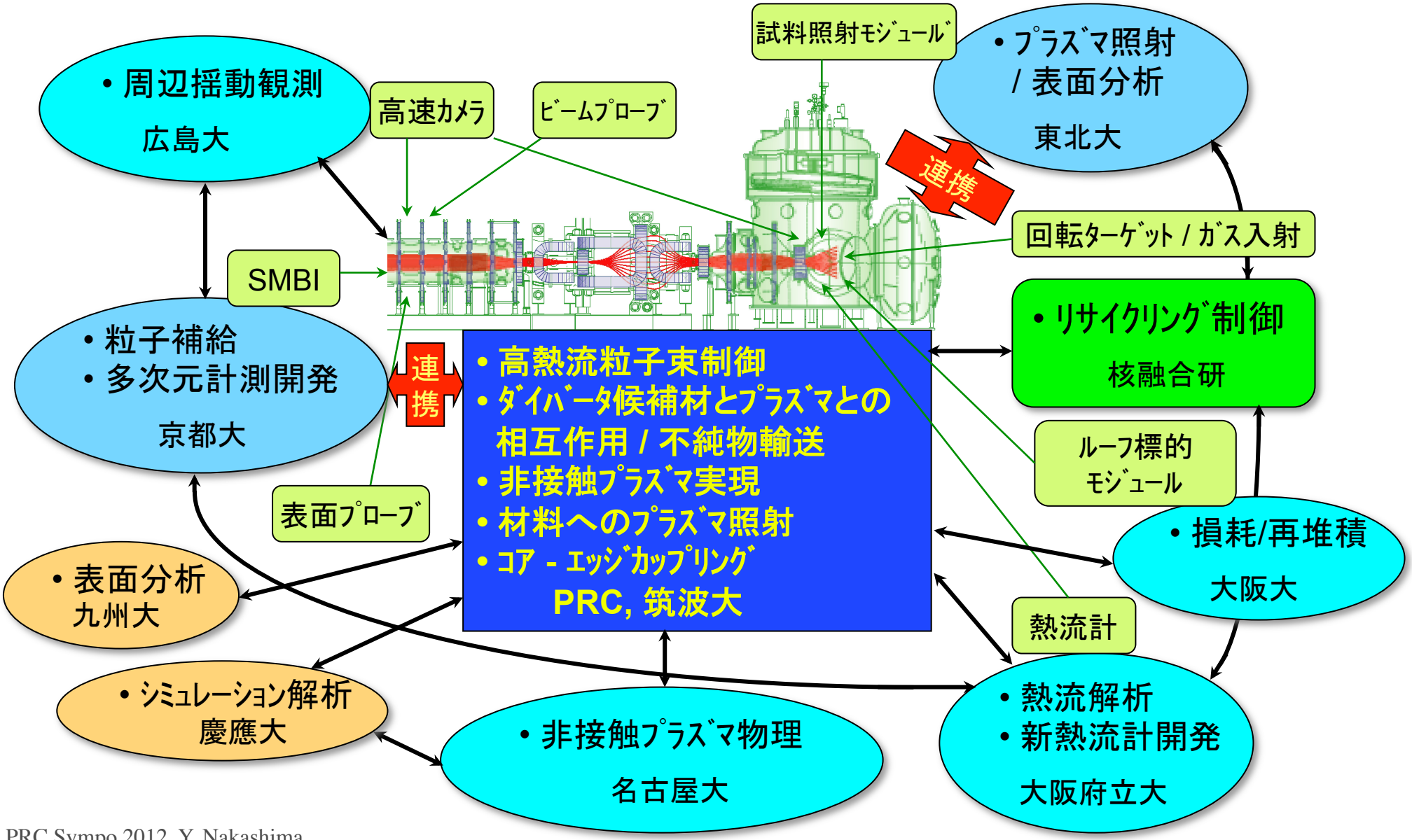


研究項目

- ダイバータ模擬実験モジュール (D-module)を用いたガス入射による放射冷却,デタッチメントの基礎実験
- 試料導入装置の設置とD-モジュールへの試料導入,高熱流束の照射及び表面分析の試行
- 大容量ヘリウムクライオ排気装置を用いたダイバータ排気の模擬実験とダイバータ板の高温化実験
- 高周波発振器の増強及びア

東北大金属材料研究所との連携協力に基づいてS$_i$C試料への端部プラズマ流の初期照射実験が開始された。

今年度ダイバータ模擬研究計画



まとめ

本研究では，境界プラズマにおける粒子輸送制御研究を，新たな研究課題に掲げ，既設ミラー端部に発生する高熱流粒子束を利用したダイバータ模擬実験研究（*E-Divertor*）についてガンマ10西エンドミラー部にて実験的検証を行ってきた。

- 典型的なプラズマ（セントラル部プラズマ密度 $2\sim3\times10^{18}$ m^{-3}，イオン温度 ~5 keV）において，端部ミラー出口近傍で端損失プラズマ流の粒子束密度，熱流束密度の計測を行い，**粒子束密度 4×10^{22} H/s•m^2 が得られた。**また，ECH印加中にはITERにおけるダイバータ板の熱流密度に匹敵する値（**≥ 10 MW/m^2**）を達成し，ダイバータ模擬研究の為に必要な熱流密度を発生できる見通しが得られた。
- 極小磁場アンカー部におけるICRF追加熱により粒子束密度が **6.5×10^{22} H/s•m^2** まで増加し，端部熱流・粒子束の増強に，隣接するセルにおける追加熱が効果的であることを示した。
- 端部真空容器内にV字ターゲット板を設置し，Arガスを入射することによりプラズマ-ガス-ターゲット材表面との相互作用発光を，高速カメラ計測及び分光計測を初めて行った。

まとめ（続き）

昨年度末に，ガンマ10西エンド部への設置が完了したダイバータ模擬実験モジュール（*D-module*）を用いて閉ダイバータ化模擬実験が開始され，高速カメラ，カロリーメータ，静電プローブ，分光器を用いた初期計測が行われた。

- 以前のターゲット照射実験に比べて，プラズマ-壁相互作用による発光強度が顕著に増加し，クローズド化によるリサイクリングの増加が認められた。
- モジュール内に設置したV字型タングステンターゲットの開口角度を狭めるにつれて，プラズマ発光強度が増加していることが分かり，中性ガスの圧縮効果を示唆する結果が得られた。
- ターゲット板の深部近傍のラングミュアープローブによるイオン飽和電流及び電子温度も開口角度が狭まるにつれて下がる傾向を示している。
- 希ガスを用いた端損失プラズマ流の放射冷却実験が行われ、カロリーメータによる熱流計測の結果，ガス入射に伴うターゲット入口部での増加と深部での熱流束の低下傾向が認められた。

これらの結果は、当初目標としてきた放射冷却ダイバータの機構と定性的に矛盾しないものである。今後，双方向型共同研究の元で様々な共同研究を実施しつつ，更なる高熱流束の達成と非接触プラズマ状態の実現等，環状系閉じ込め装置のダイバータ実現に向けての研究を進めてゆく。