

# GAMMA 10 におけるPWI研究

プラズマ研究センター 中嶋洋輔

## 双方向型共同研究課題

### -- 開放端磁場配位を用いたダイバータプラズマ模擬に関する基礎研究 --

研究代表者：筑波大学プラズマ研究センター 中嶋洋輔

研究協力者：名古屋大学工学研究科 大野哲靖

大阪大学工学研究科 上田良夫

日本原子力開発研究機構 朝倉伸幸

慶應義塾大学理工学研究科 畑山明聖, 藤間光徳

核融合科学研究所 相良明男, 廣岡慶彦, 増崎 貴, 庄司 主

広島大学工学研究科 西野信博

東京大学工学研究科 門 信一郎

大阪府立大学工学研究科 松浦寛人

東北大学金属材料研究所 四竈樹男, 永田晋二, 趙 明

東海大学工学研究科 利根川昭, 小向広泰, 飯島貴朗

筑波大学数理物質科学研究科 坂本瑞樹, 片沼伊佐夫, 市村 真, 假家 強, 吉川正志, 武田寿人

市村和也, 石井 貴

NIFS所内世話人：廣岡慶彦

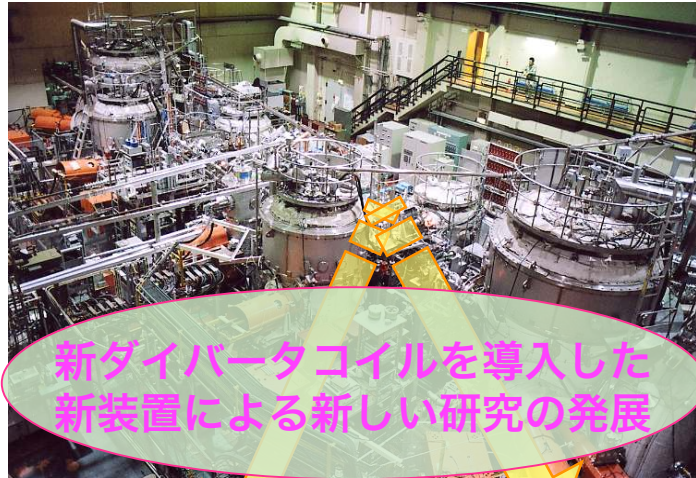
青字は今年度新規参加

# 研究の背景と目的

- プラズマ研究センターにおける第2期中期計画における主要な柱として、新ダイバータ装置を導入した境界プラズマにおける粒子輸送制御研究を課題に掲げ、ダイバータ模擬の研究を進めている。
- 上記研究計画では、2つのダイバータ装置が挙げられ、一つはセパラトリックスを有するトロイダルダイバータ様の磁場配位を持ち (A(X)-Divertor)、もう一つは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研究 (E-Divertor) である。
- 本研究の目的は、タンデムミラープラズマ閉じ込め装置ガンマ10のダイバータプラズマの模擬装置としての可能性を探るために、端部ミラー (E-Div.) における基礎実験及び数値計算に基づいた検討を行うことである。これによって、開放端磁場配位を活かし、ダイバータ開発における課題解決に向けた貢献を行う。

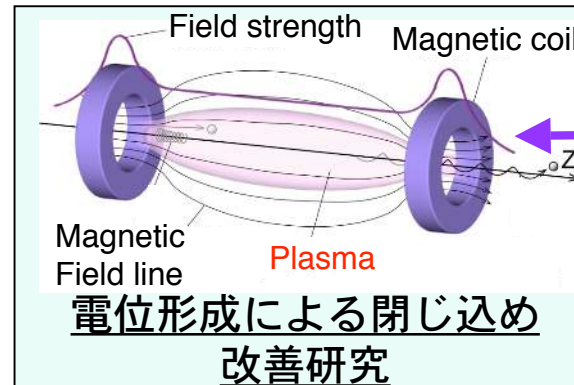
# 新研究計画の概要

既存装置タンデムミラー “GAMMA 10”



新ダイバータコイルを導入した  
新装置による新しい研究の発展

ミラー閉じ込めの原理



Open Magnetic Field

Potential & Electric field

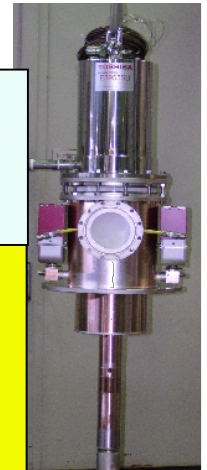
(1) 電位形成によるプラズマ閉じ込め改善研究のコアプラズマから境界プラズマへの拡張

(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。

Microwave source for ECH

High power heating systems (RF, NBI)

Tools for Plasma Control



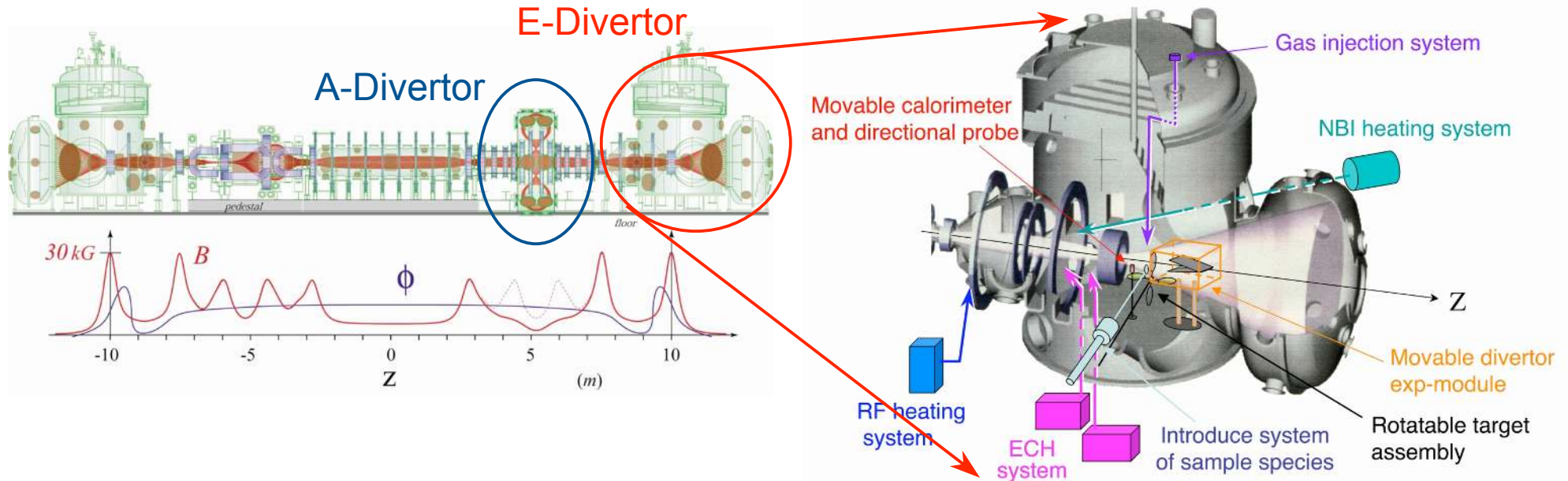
これまでの研究の展開を図る為に以下の2つのプロジェクトを開始

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

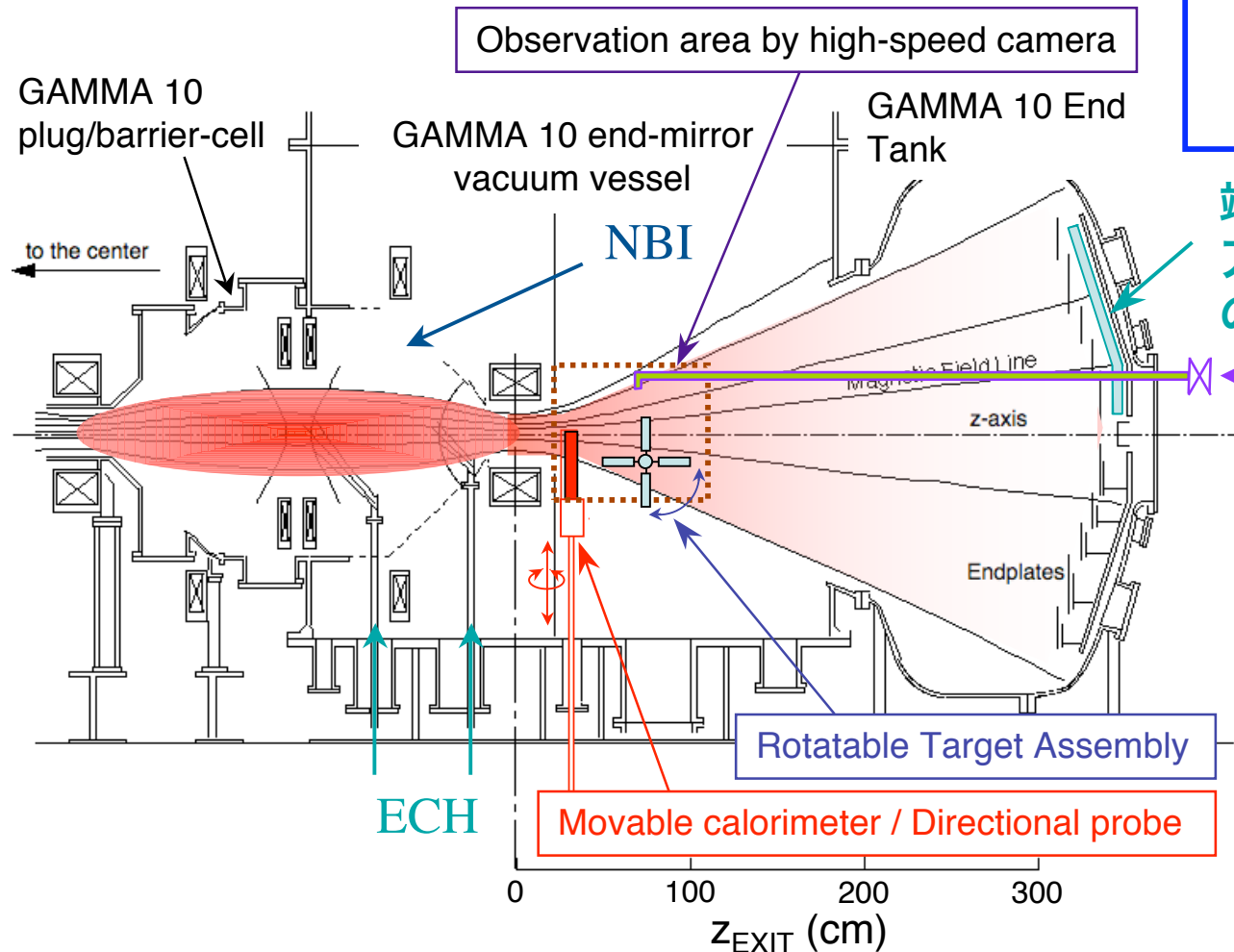


- ・ 既設の大出力ジャイロトロンによる強力な電子加熱，及び大電力イオン加熱装置（ICRF，NBI）を用いた高エネルギーのプラズマ生成が可能で，他の小型ダイバータ模擬実験装置に比べて**大口径・高熱流束が期待**できる。
- ・ 大容量クライオ排気装置を用いたダイバータ排気実験が可能。
- ・ パルス運転を利用した**ELMを模擬した研究など実機プラズマのダイバータに近い環境**(強磁場，高イオン・電子温度，端部放電電極等の影響の無い条件下)での，**ダイバータプラズマ制御実験**を世界で初めて実施する。

# *E-Div.*の基礎実験結果 (双方向型共同研究)

(CM/Prb, 回転ターゲット, 端損失イオンエネルギー分析器, 及びガス導入系)

## 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

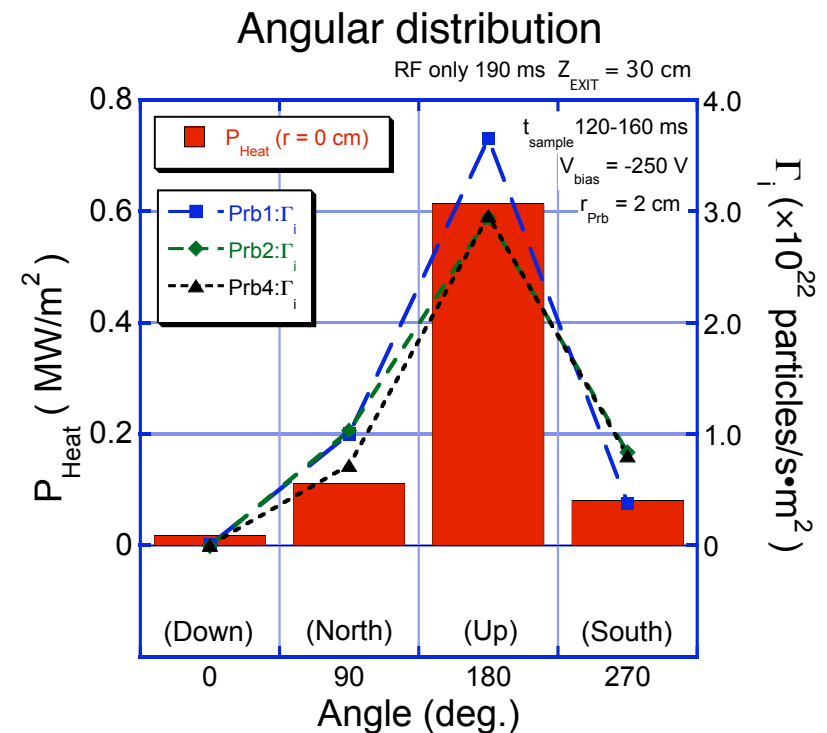
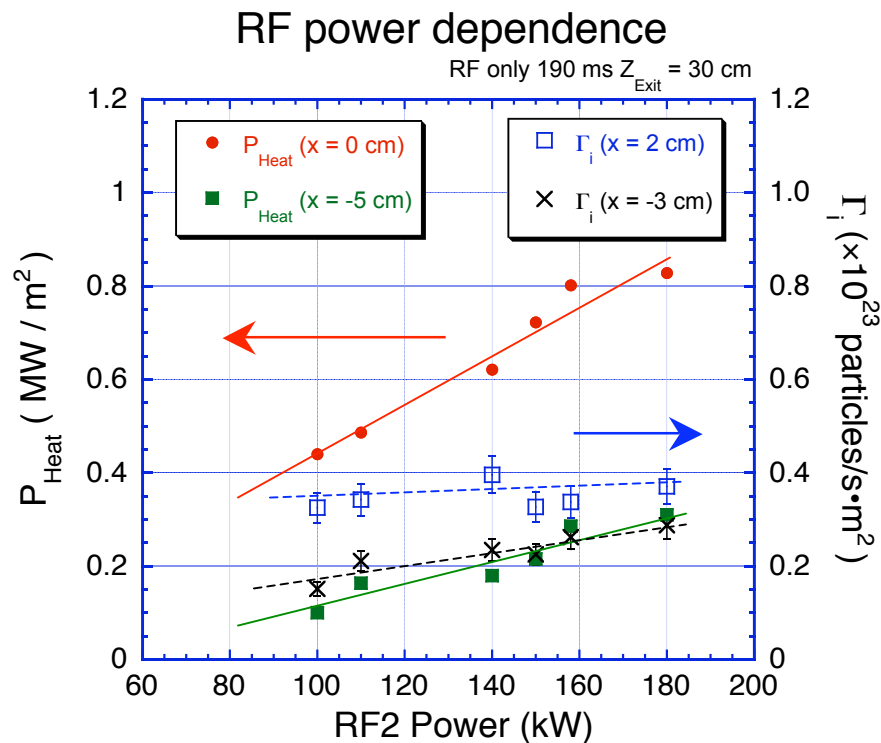
高速カメラによるプラズマ  
とターゲット材料との相互  
作用の計測

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。

# ***E-Div.*の基礎実験結果** (双方向型共同研究)

典型的なホットイオンモードプラズマ ( $n_e(0) \sim 2 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ ,  $T_i(0) \sim 5 \text{ keV}$ ), において端部ミラー出口で熱流束・粒子束密度の計測が行われた。

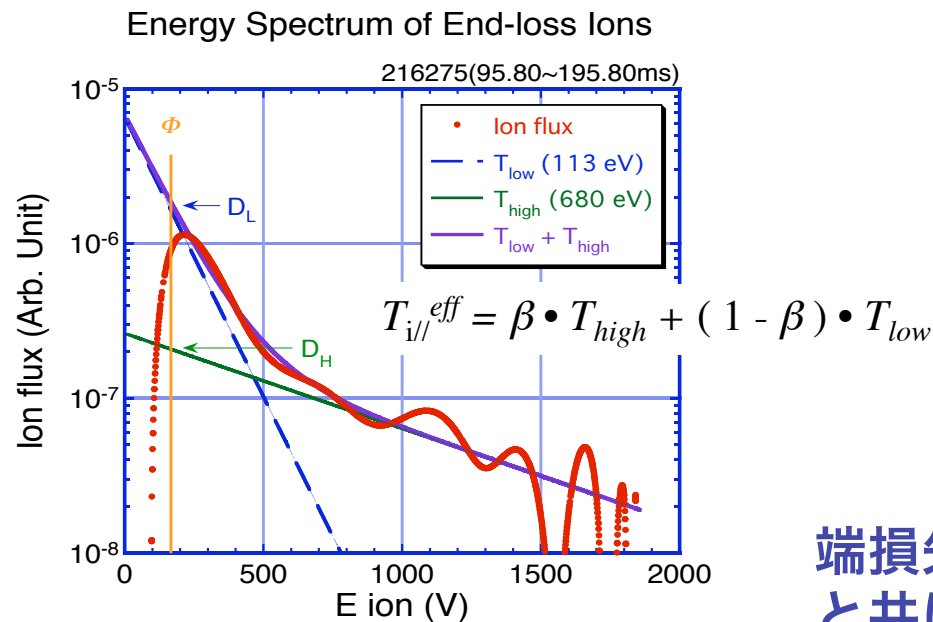


- ICRF加熱時，熱流束密度  $0.8 \text{ MW/m}^2$  粒子束密度  $4 \times 10^{22} \text{ H/s} \cdot \text{m}^2$  が中心軸上で得られ，熱流束はRFパワーの増加と共に増加することが分かった。
- 熱流束と粒子束のピッチ角分布は，両者共に良い一致を示し熱流源は主としてイオン流によるものであることを示している。

# E-Div.の基礎実験結果 (双方向型共同研究)

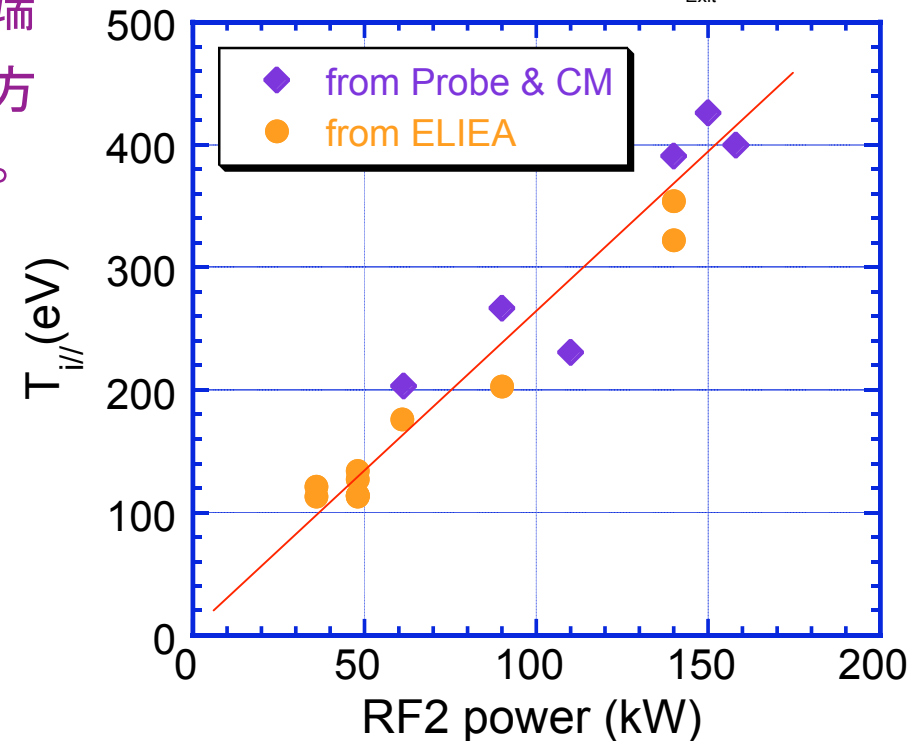
西エンド部真空容器内に設置した端損失イオンエネルギー分析器(ELIEA)を用いて、端損失イオンのエネルギー分析を行い、軸方向イオン温度 $T_{i//}$ とイオン電流値を評価した。

2010.9.25  
K. Ichimura, Y. Nakashima



$T_{i//}$  のICRF パワー依存性

$Z_{Exit} = 300$  cm



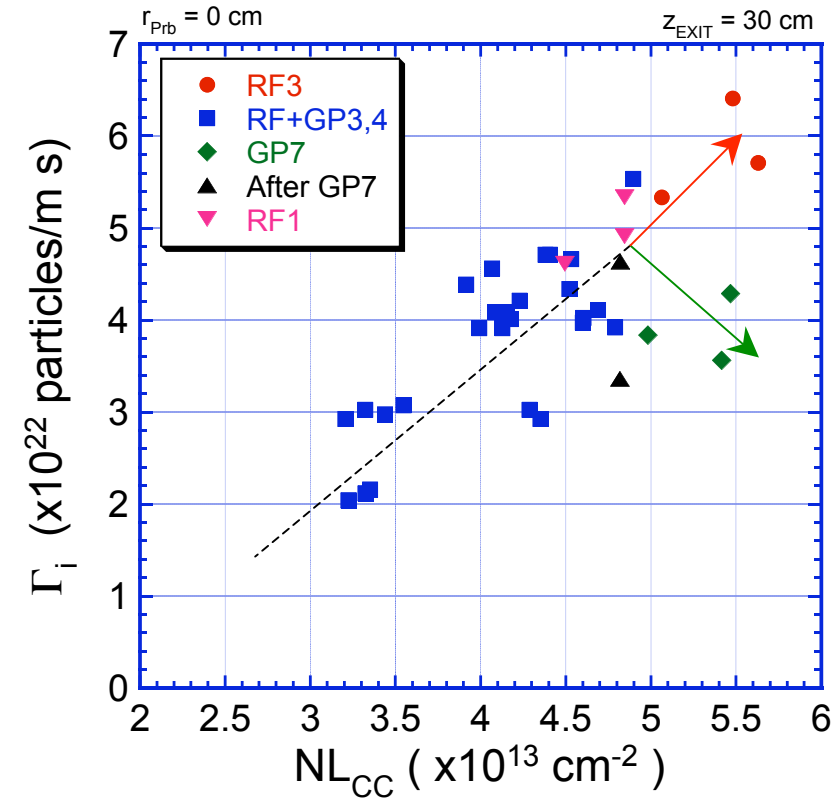
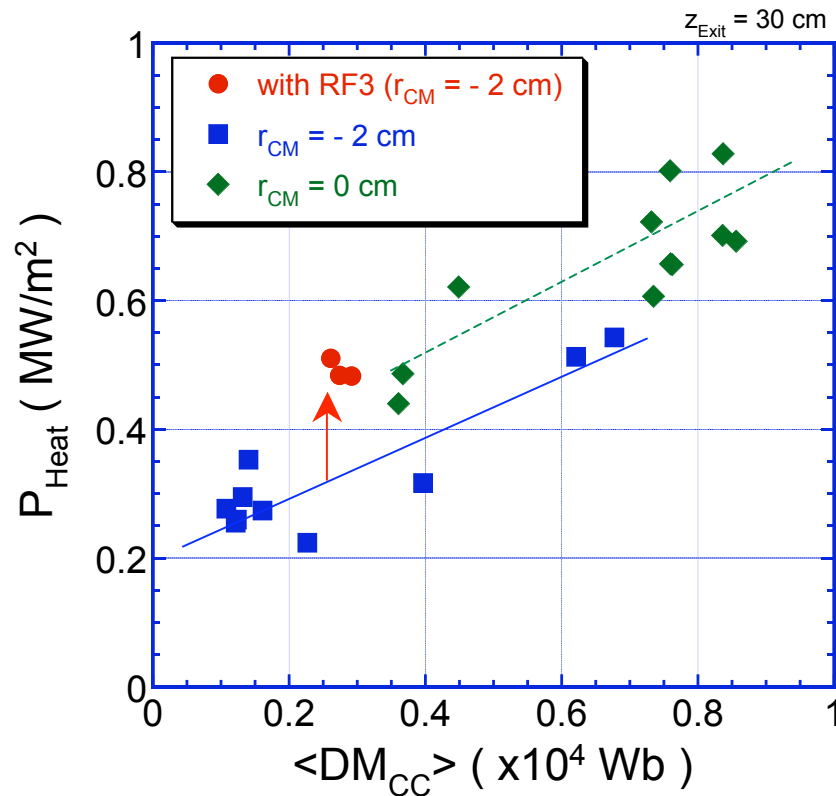
端損失イオンの実効温度  $T_{i//}^{eff}$  は、DMccの増加と共に上昇し、100 ~ 400eVの範囲で制御可能

- 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  $T_{i//}$  はと主にICRFパワーと共に増加し、お互いに良い一定を示した。

# *E-Div.*の基礎実験結果 (双方向型共同研究)

熱流束・粒子束密度の制御性を調べるために、それらのメインプラズマパラメータや各種プラズマ生成・加熱系に対する依存性が調べられた。

*by H. Takeda*



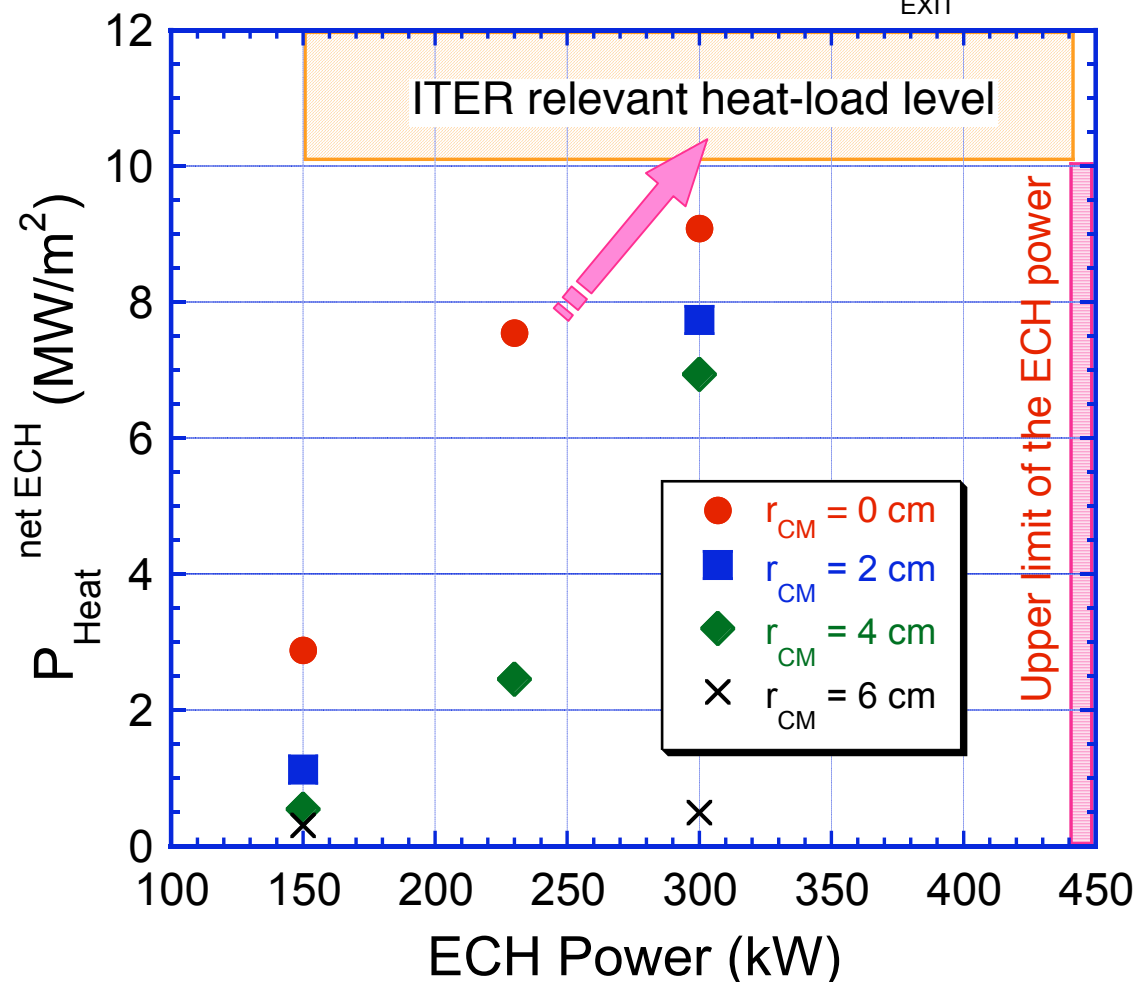
- 熱流束密度は、セントラル部の蓄積エネルギー(反磁性量)の増加と共に上昇し、粒子束密度は、同部電子の線密度と共に増加することが分かった。
- 両者のデータは、極小磁場アンカー部のICRF追加熱により有意に上昇し、その効果が確認された。

# 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

H. Takeda, Y. Nakashima

$Z_{\text{EXIT}} = 30 \text{ cm}$



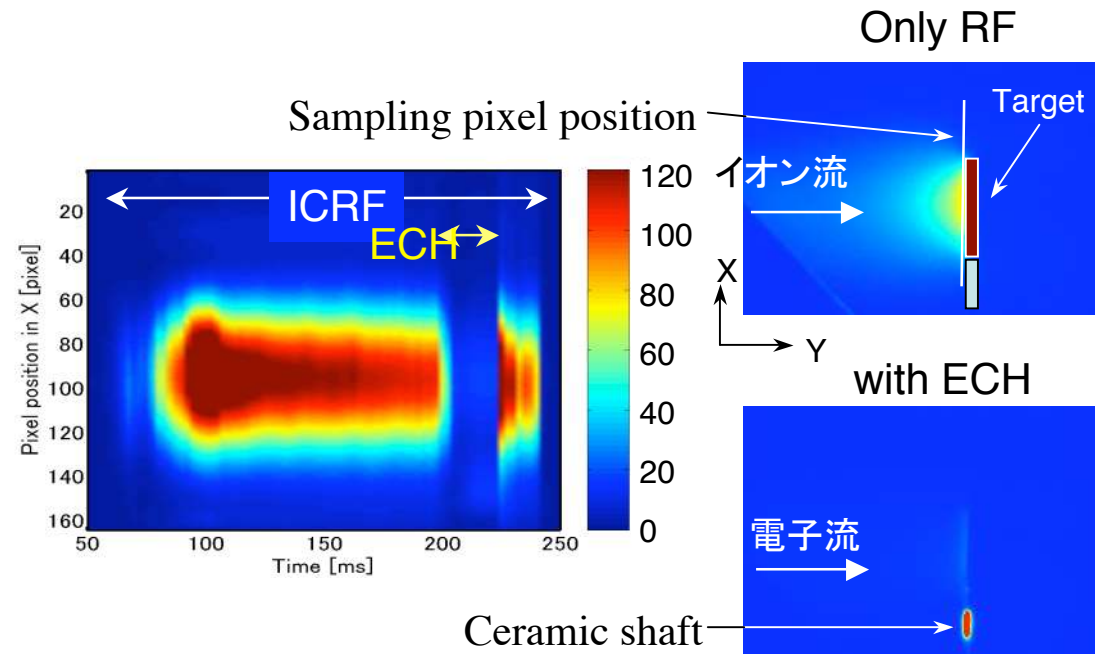
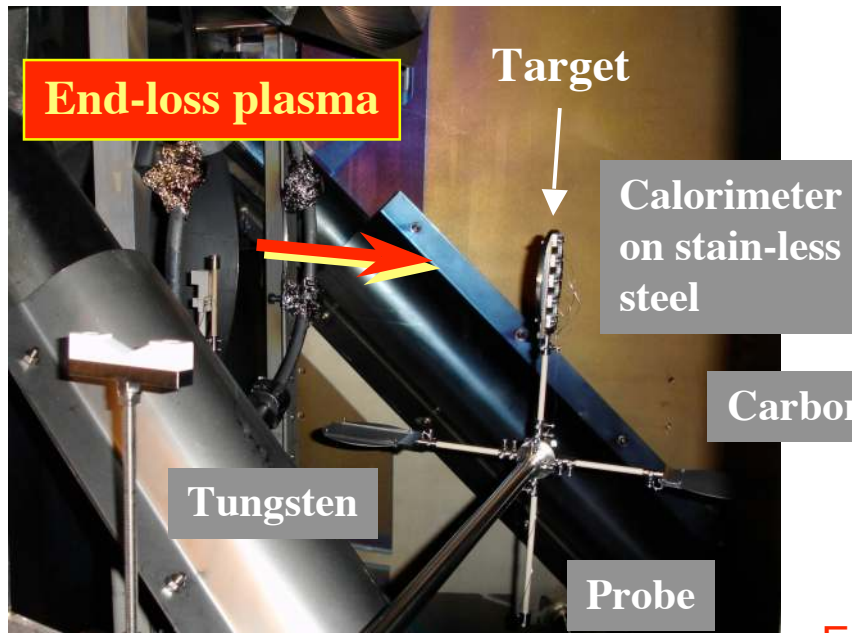
- 典型的なホットイオンモードプラズマ（セントラル部プラズマ密度  $2 \sim 3 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ ，イオン温度  $\sim 5 \text{ keV}$ ）において，端部ミラー出口近傍で，端損失プラズマ流の粒子束，熱流束密度の計測を行った。

- その結果，短パルスECH印加中に，ITERにおけるダイバータ板上の熱流密度に匹敵する値（ $\sim 9 \text{ MW/m}^2$ ）を示した。

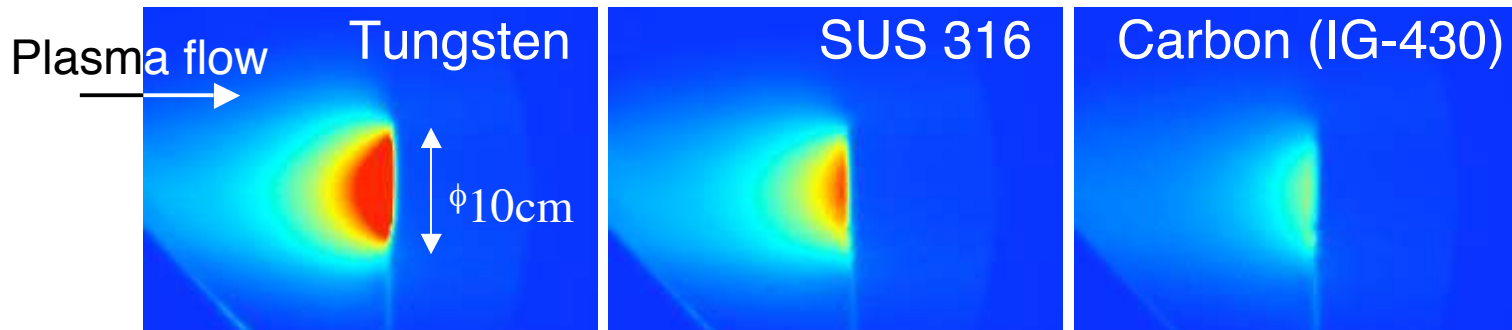
- 現有の出力でITERリリバントな熱流密度レベルに達したことから，今後の端部プラズマ加熱系の増強により，更に高熱流束を発生できる見通しが得られた。

# 高速カメラによるプラズマ材料相互作用 の2次元イメージ計測

ミラー出口に設置した回転ターゲット



ECH入射時、端損失プラギングによる発光強度の減少を観測



端損失プラズマ流と材料表面との相互作用による強い発光を観測

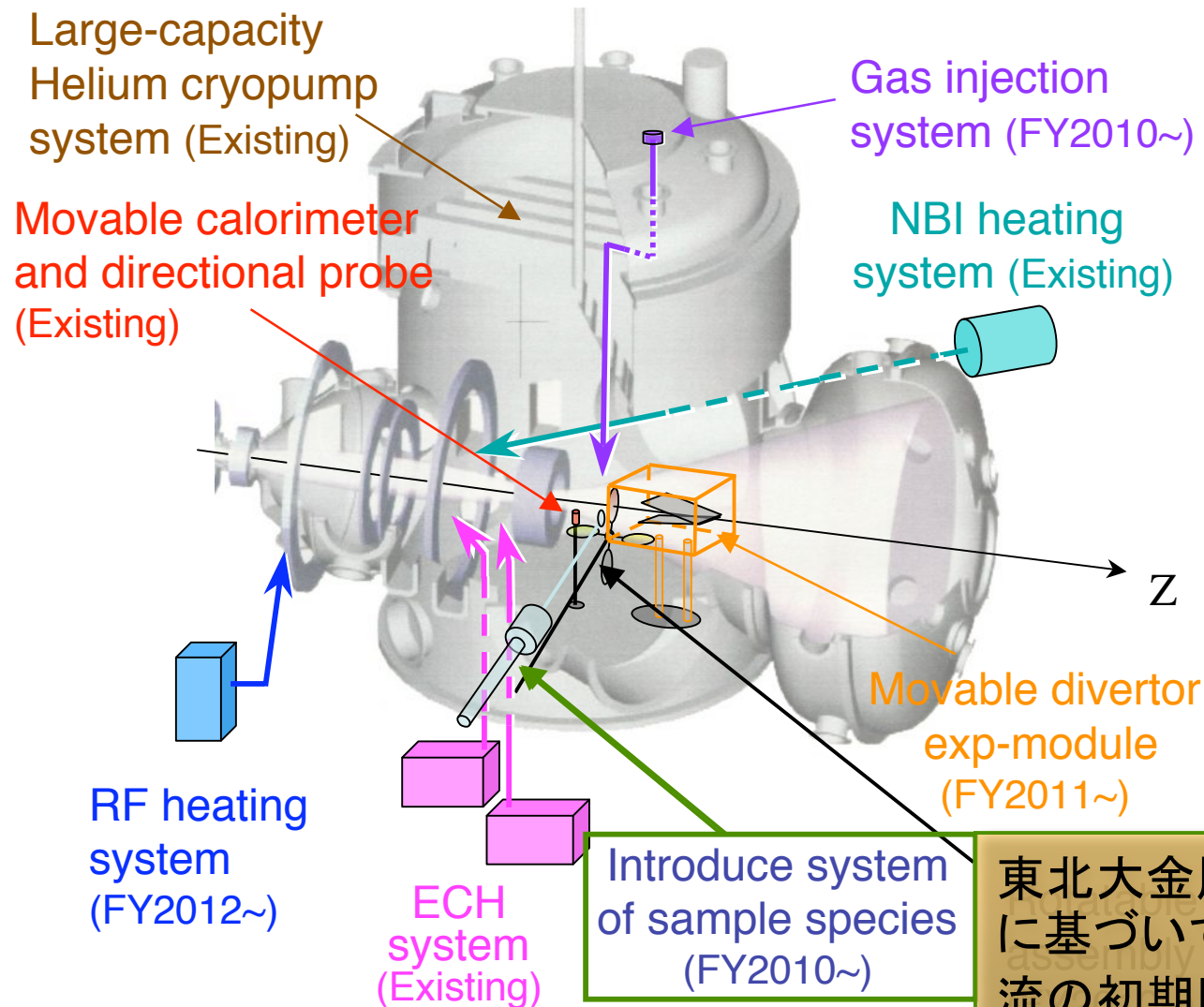
Camera: HAS 220  
Frame rate: 400 fps  
Shutter: Open  
Filter: Without

R. Yonenaga, Y. Nakashima

PRC Sympo 2011, Y. Nakashima

# ダイバータ研究の今後のスケジュール

GAMMA10 end-mirror vacuum vessel

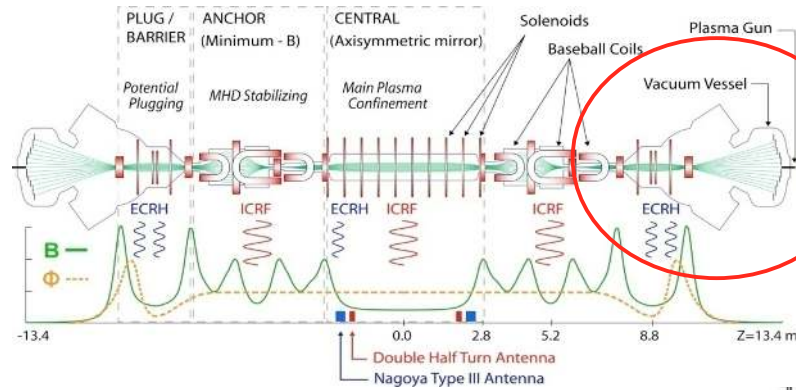


## 研究項目

- ダイバータ実験モジュール (D-module) の設置と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
- 高周波発振器の増強による高熱流束の強化

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

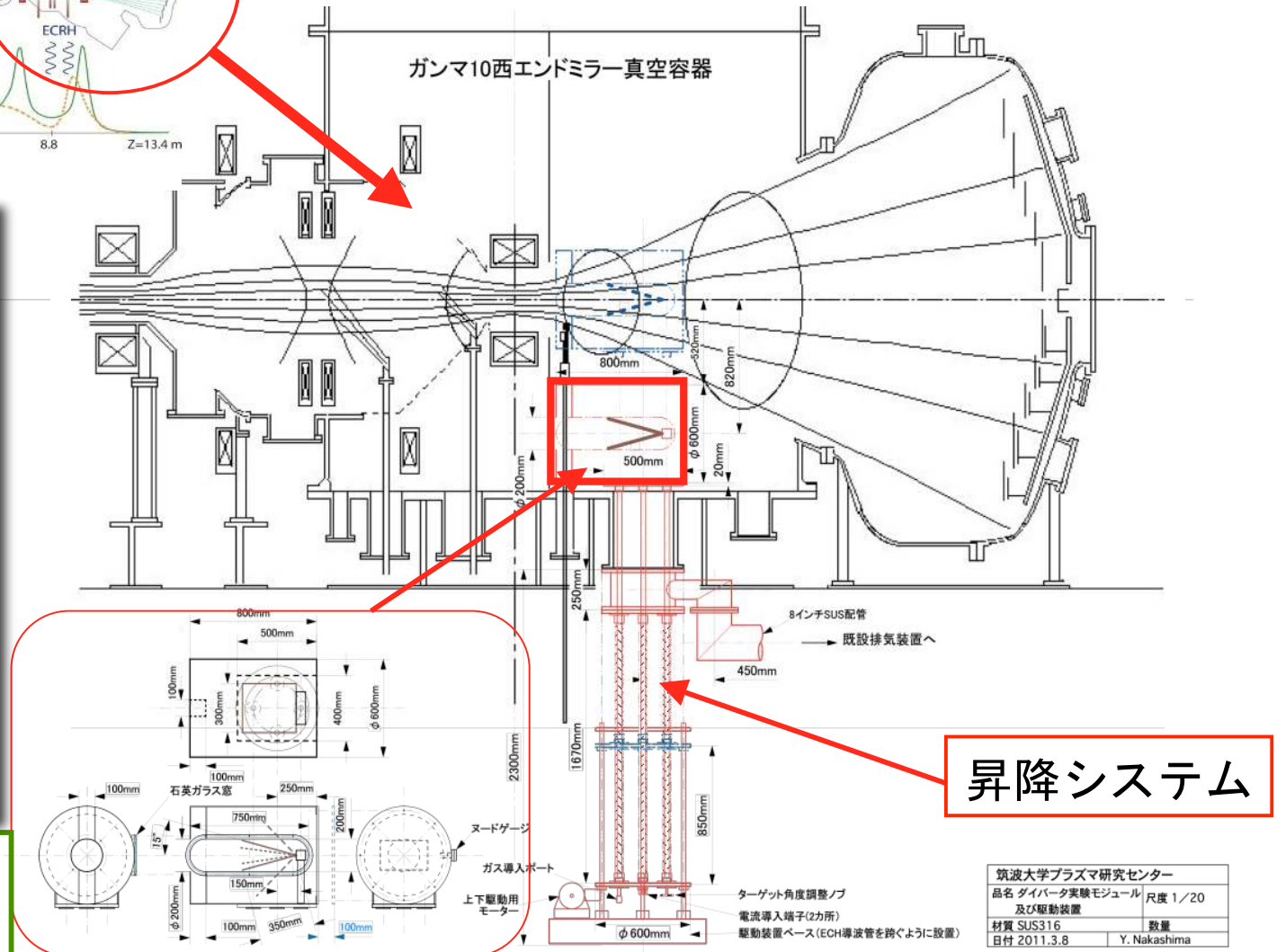
# 今年度計画中的の実験装置 (ダイバータ実験モジュール)



ガンマ10西エンド部改造模式図

- 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

ダイバータ実験モジュール



# 高速カメラによるプラズマ材料相互作用の2次元イメージ計測

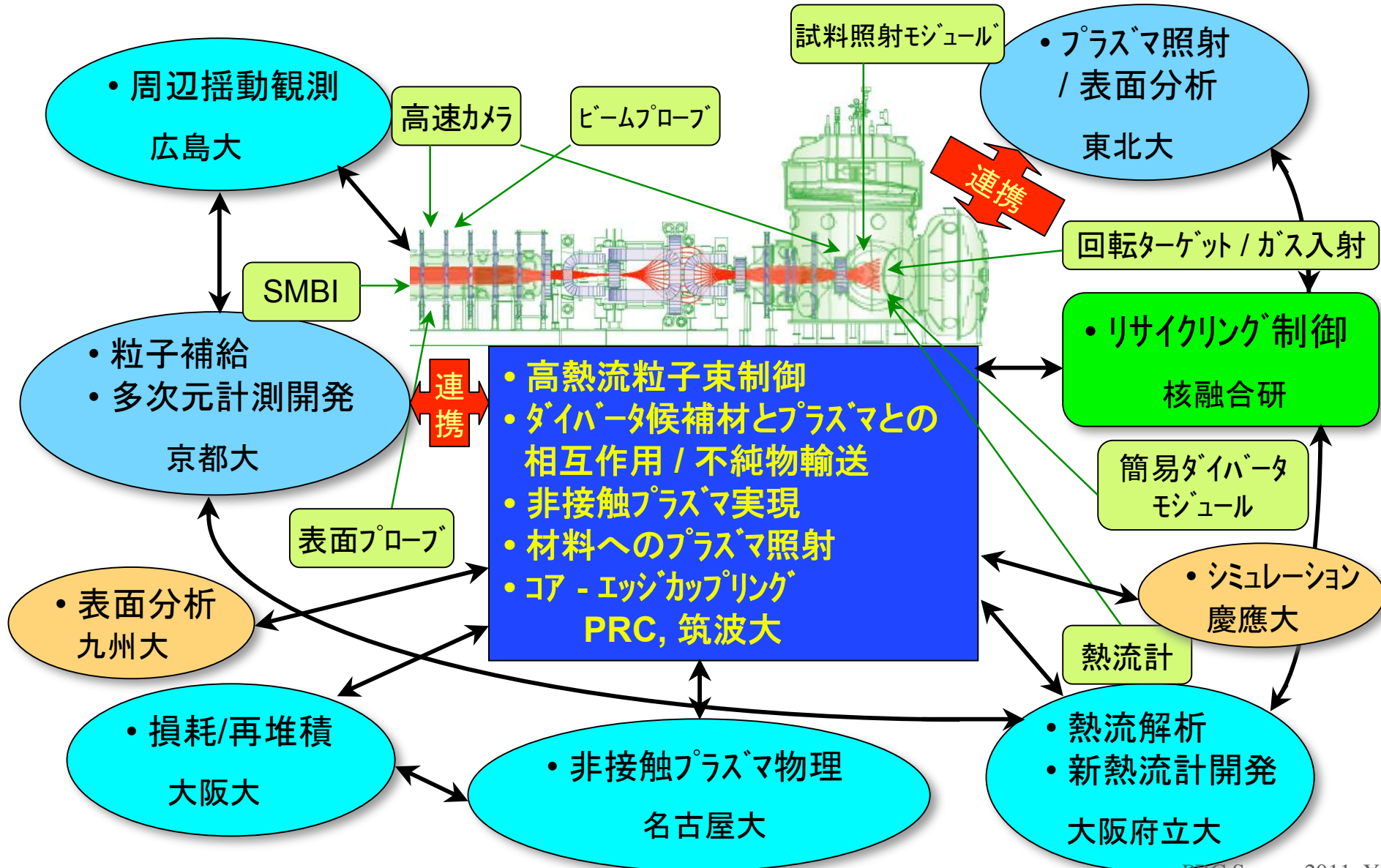
端部ミラー出口に設置したV字ターゲット

Frame rate: 400 fps, 228 × 164 pixels



- 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。
- ターゲット材とプラズマとの強い相互作用光が初めて撮影され、アンカー極小磁場部のICRF追加熱により、その発光強度が著しく増加していることが認められた。

# 今年度ダイバータ模擬研究計画



# まとめ

次期研究計画として、新ダイバータ装置を導入した境界プラズマにおける粒子輸送制御研究を課題に掲げている。本研究では、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研究（E-Divertor）において、その実現可能性をガンマ10西エンドミラー部にて実験的検証を行っている。

- 典型的なプラズマ（セントラル部プラズマ密度  $2\sim 3\times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ ，イオン温度  $\sim 5 \text{ keV}$ ）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  $4\times 10^{22} \text{ H/s}\cdot\text{m}^2$  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（ $\sim 9 \text{ MW/m}^2$ ）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。
- 端部容器内にターゲット板を設置し、プラズマとの相互作用発光を高速カメラにより観測した。ターゲット材（W, C, SUS）の違いによる発光の有意な差が認められ、ECH入射による電位形成に起因する特徴的な発光挙動が観測された。
- 端部に設置したイオンエネルギー分析器を用いて、端損失イオンのエネルギーを直接測定し、 $100\sim 400 \text{ eV}$ の範囲で制御可能であることを示した。
- 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  $8\times 10^{22} \text{ H/s}\cdot\text{m}^2$  まで増加し、端部熱流・粒子束の増強に、この追加熱が効果的であることを示した。
- 東北大金属材料研究所との連携協力によって、ダイバータ候補材への端部プラズマ流の初期照射実験を開始した。

# 成果発表一覧

## □ 国際会議 / ワークショップ報告

1. Y. Nakashima, et al., 2<sup>nd</sup> Int. Symposium on Plasma Surface Interactions, Jan. 18-20, 2010, NIFS, Toki p. 26. (論文掲載済: Fusion Engineering and Design **85** (2010) 956-962.)
2. Y. Nakashima, et al., 19<sup>th</sup> Int. Conf. Plasma Surface Interactions, May 24-28, 2010, San Diego P1-87. (論文掲載予定: Journal of Nuclear Materials)
3. Y. Nakashima, et al., 8<sup>th</sup> Int. Conf. Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, July 5-9, 2010, Novosibirsk p. 27. (論文掲載済: Trans. Fusion Sci. Technol. **59** No.1T (2011) 61-66.)
4. Y. Nakashima, et al., Int. Workshop on Requirements for Next Generation PMI Test Stands in Fusion Research, August 31 - September 2, 2010, Oak Ridge USA.
5. Y. Nakashima, et al., 23<sup>rd</sup> IAEA Fusion Energy Conference, October 11-16, 2010, Daejeon, Korea FTP/P1-33.

## □ 国内会議 / 研究会報告

1. 中嶋, 他 第1回プラズマ研究センターシンポジウム, 2009年7月, 筑波大学
2. 中嶋, 他 平成21年度第1回PWI合同研究会, 2009年8月, 核融合科学研究所
3. 中嶋, 他 プラズマ・核融合学会第26回年会, 2009年12月, 京都4pE21P
4. 中嶋, 他 プラズマ・核融合学会第26回年会インフォーマルミーティング, 2009年12月, 京都
5. 中嶋, 他 平成21年度第2回PWI合同研究会, 2009年12月, 核融合科学研究所
6. 中嶋, 他 第2回プラズマ研究センターシンポジウム, 2010年7月, 筑波大学
7. 中嶋, 他 平成22年度第1回PWI合同研究会, 2010年11月, 核融合科学研究所
8. 中嶋, 他 プラズマ・核融合学会第27回年会, 2010年11/12月, 札幌30pA10
9. 市村, 他 プラズマ・核融合学会第27回年会, 2010年11/12月, 札幌01P28
10. 武田, 他 プラズマ・核融合学会第27回年会, 2010年11/12月, 札幌01P29
11. 東山, 他 プラズマ・核融合学会第27回年会, 2010年11/12月, 札幌03P56
12. 中嶋, 他 平成22年度境界層プラズマ等合同研究会, 2011年1月, 核融合科学研究所
13. 市村, 他 平成22年度境界層プラズマ等合同研究会, 2011年1月, 核融合科学研究所
14. 武田, 他 平成22年度境界層プラズマ等合同研究会, 2011年1月, 核融合科学研究所