

# **GAMMA10の最近の研究と 今後の研究計画**

**Recent experiments on GAMMA 10  
and future plan**

**筑波大学プラズマ研究センター  
吉川正志**

# CONTENTS

## 1. INTRODUCTION

- ・ GAMMA10の研究方針

## 2. EXPERIMENTAL APPARATUS

- ・ GAMMA 10 tandem mirror について
- ・ 計測系について
- ・ 加熱系について

## 3. DENSITY AND POTENTIAL FLUCTUATION MEASUREMENTS

- ・ マイクロ波干渉計による密度揺動計測
- ・ 金中性粒子ビームプローブによる電位・密度揺動計測
- ・ 径方向粒子束の解析
- ・ 電位生成による揺動の抑制について

## 4. GAMMA 10 FUTURE PLAN

- ・ ダイバーターシミュレーターについて

## 5. SUMMARY

# INTRODUCTION

- 筑波大学プラズマ研究センターでは、「電位閉じ込めのメカニズムの解明に向けてのプラズマ物理研究・展開」として、日本の核融合研究のグラウンドデザインに沿って要素還元型研究を中心に進めている。
- ITER含む磁場閉じ込め装置に普遍的に重要なHモード・内部輸送障壁(ITB)などの閉じ込め改善の鍵の一つである「プラズマ中に生成されるシアーフローによるプラズマ輸送改善」に重点を置き研究を進めている。このシアーフロー生成の物理機構の解明はプラズマ輸送の能動制御につながり、ITER及び核融合炉の実用化に大きなインパクトをもつ研究である。

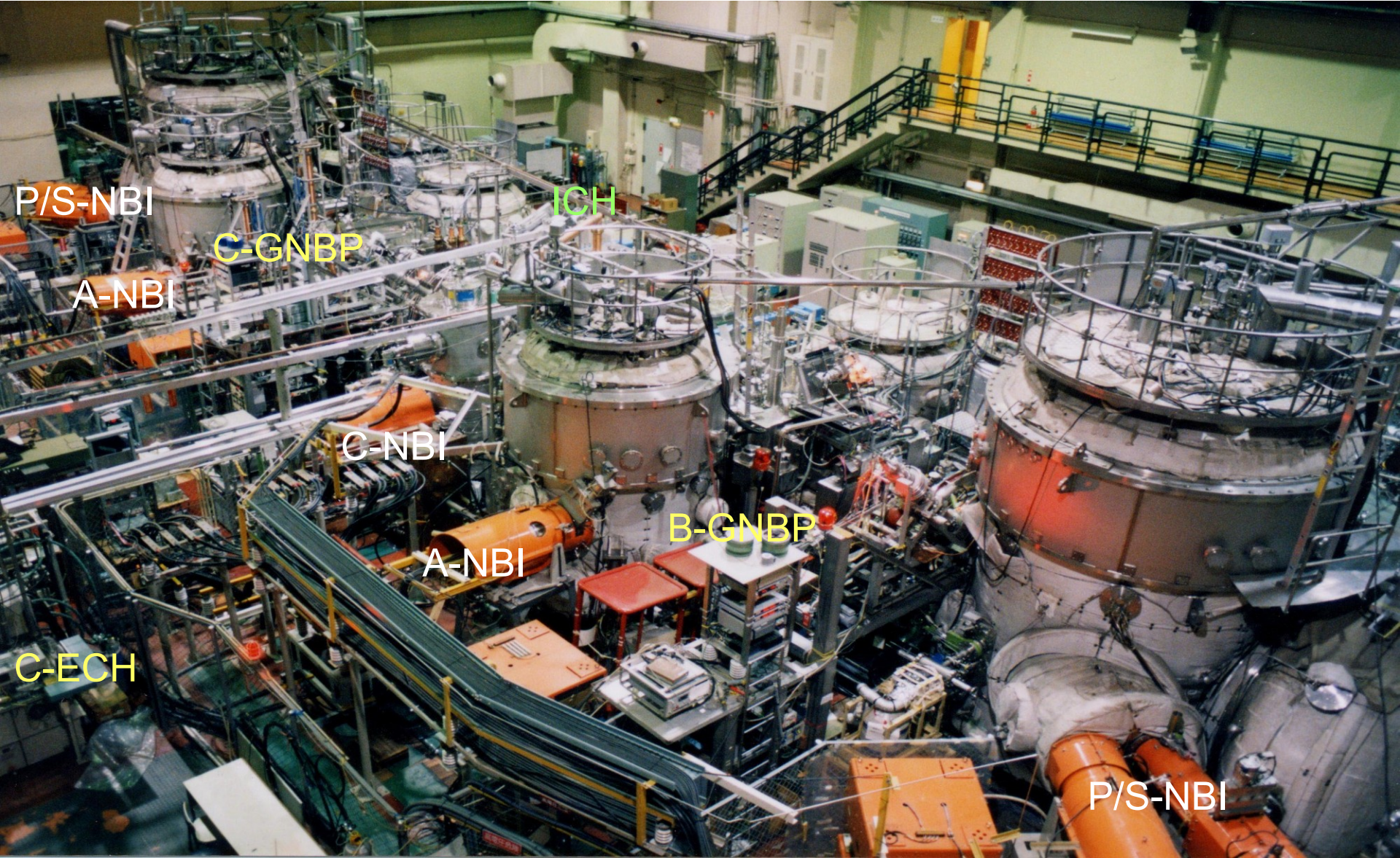
# INTRODUCTION2

## これまでの主要な研究成果

1. 異常輸送に関連した揺動抑制と径方向輸送の解析  
—金中性粒子ビームプローブ (GNBP)
2. ドリフト型揺動のECHによる抑制の直接測定  
—GNBP, マイクロ波干渉計
3. ECH及びエンドプレートによる電位・電場制御
4. 電位制御ツール ジャイロトロンの増強 と  
1MWジャイロトロンの開発研究

# EXPERIMENTAL APPARATUS

## GAMMA 10 tandem mirror

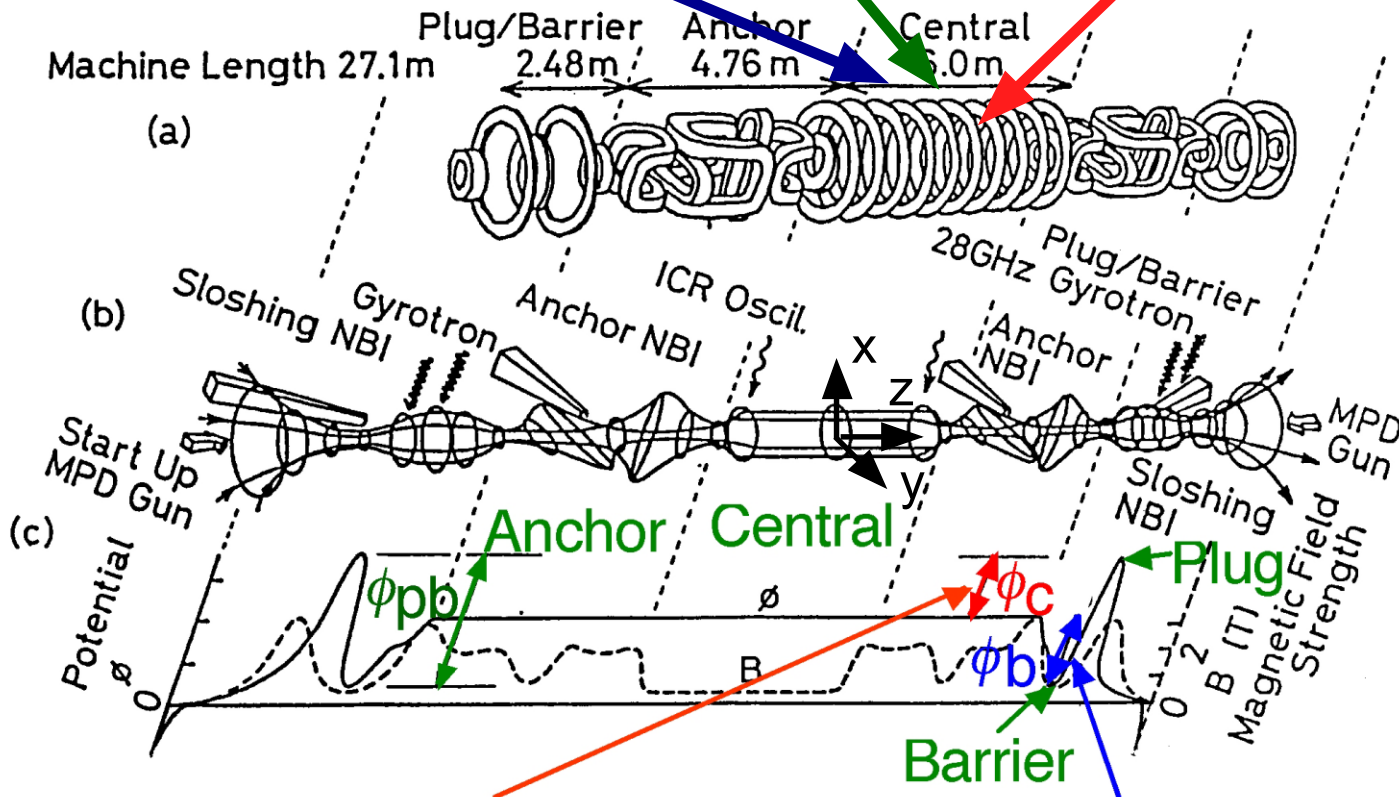


# GAMMA 10 tandem mirror

Multi-channel microwave interferometer

Movable microwave interferometer

Gold neutral beam probe



H<sub>2</sub> plasma

$n_e \sim 2 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$

$T_e \sim 0.1 \text{ keV}$

$T_i \sim 5 \text{ keV}$

$\phi_c \sim 2.0 \text{ kV}$

$\phi_b \sim 1.5 \text{ kV}$

ICH 6.36~10.2 MHz, 500 kW

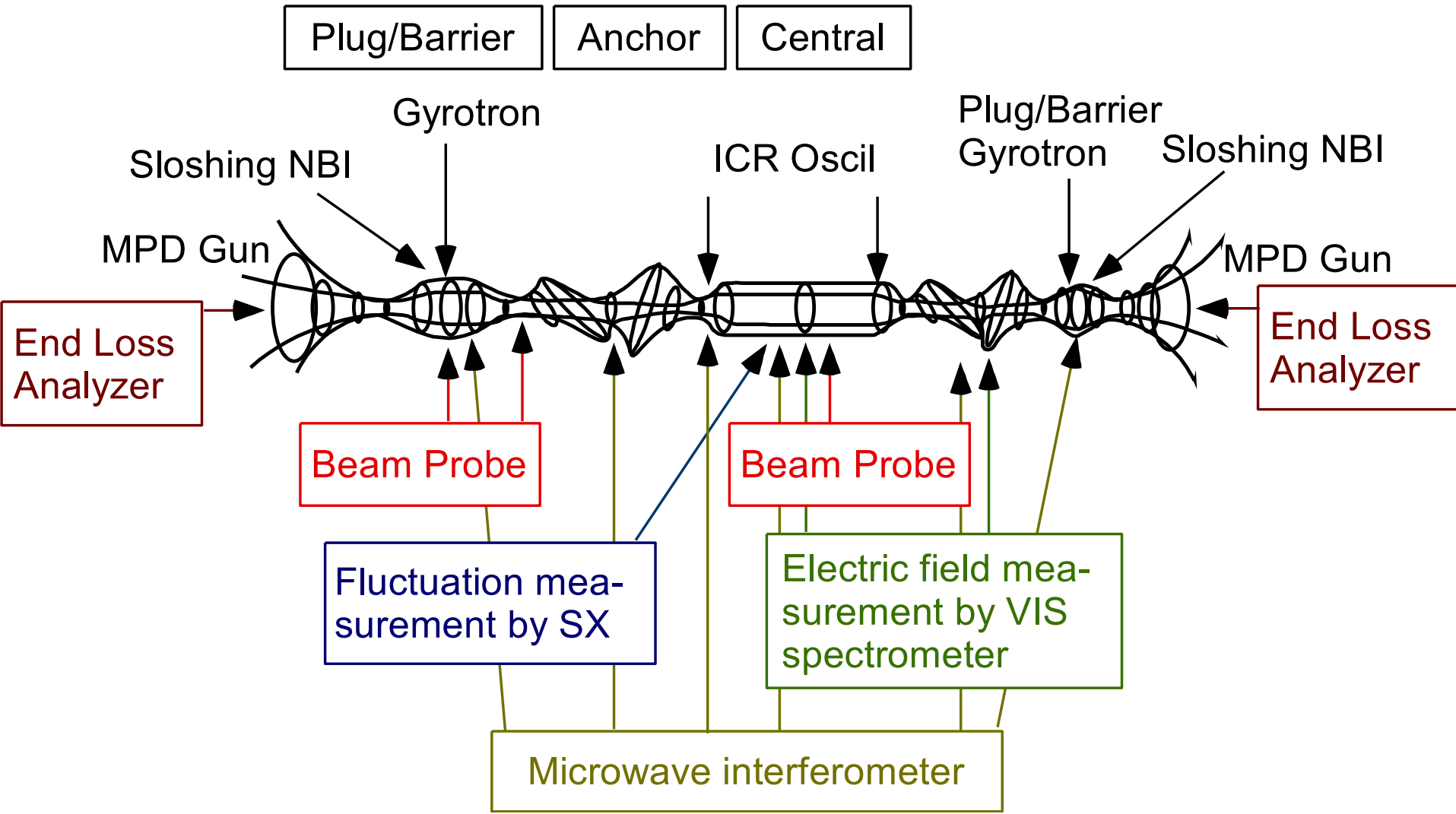
ECH 28 GHz, 500 kW

$\phi_c$ ; Ion Confining Potential

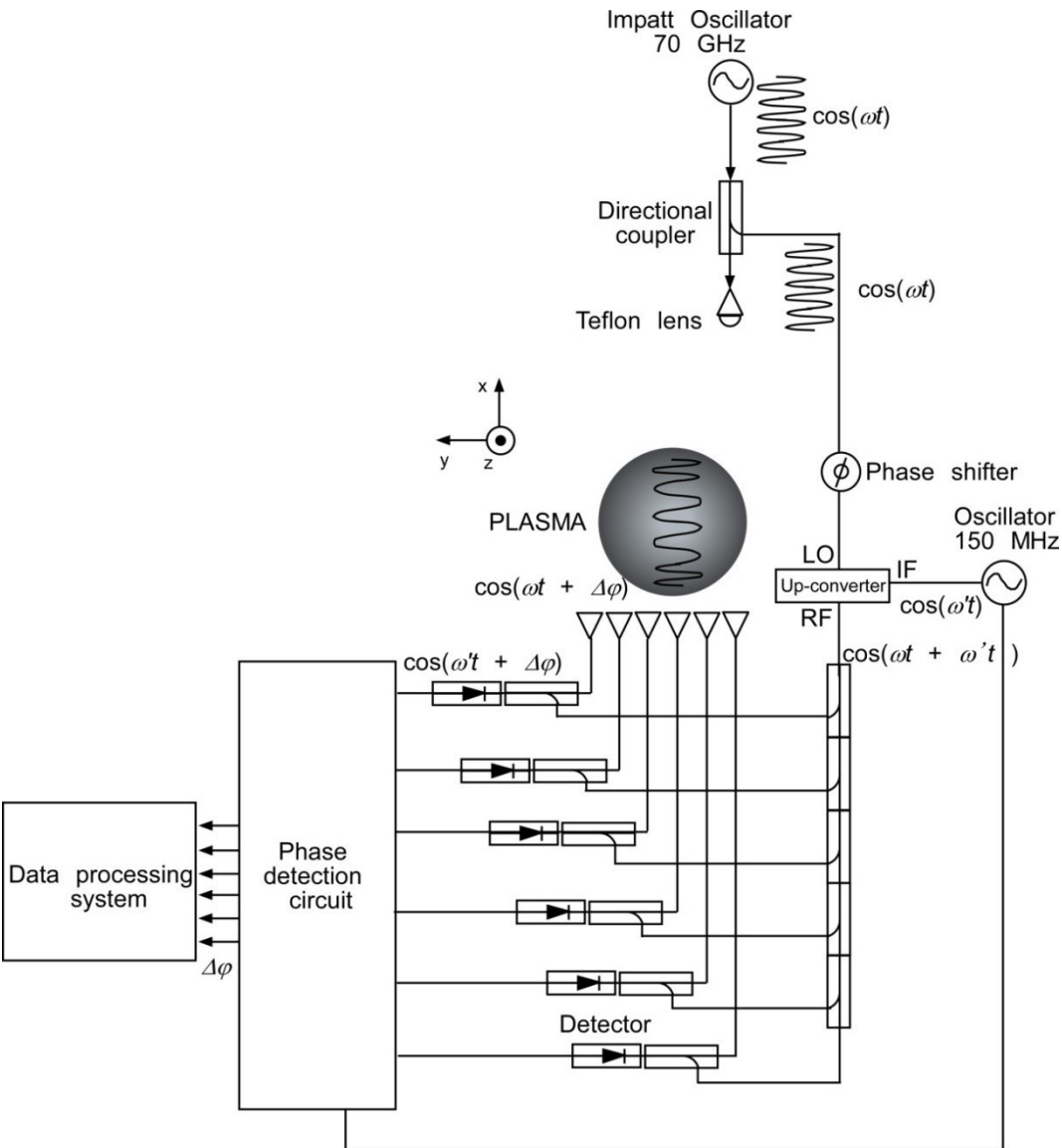
$\phi_b$ ; Thermal-Barrier Potential

# Diagnostic systems

GAMMA 10 tandem mirror



# Multi-channel microwave interferometer



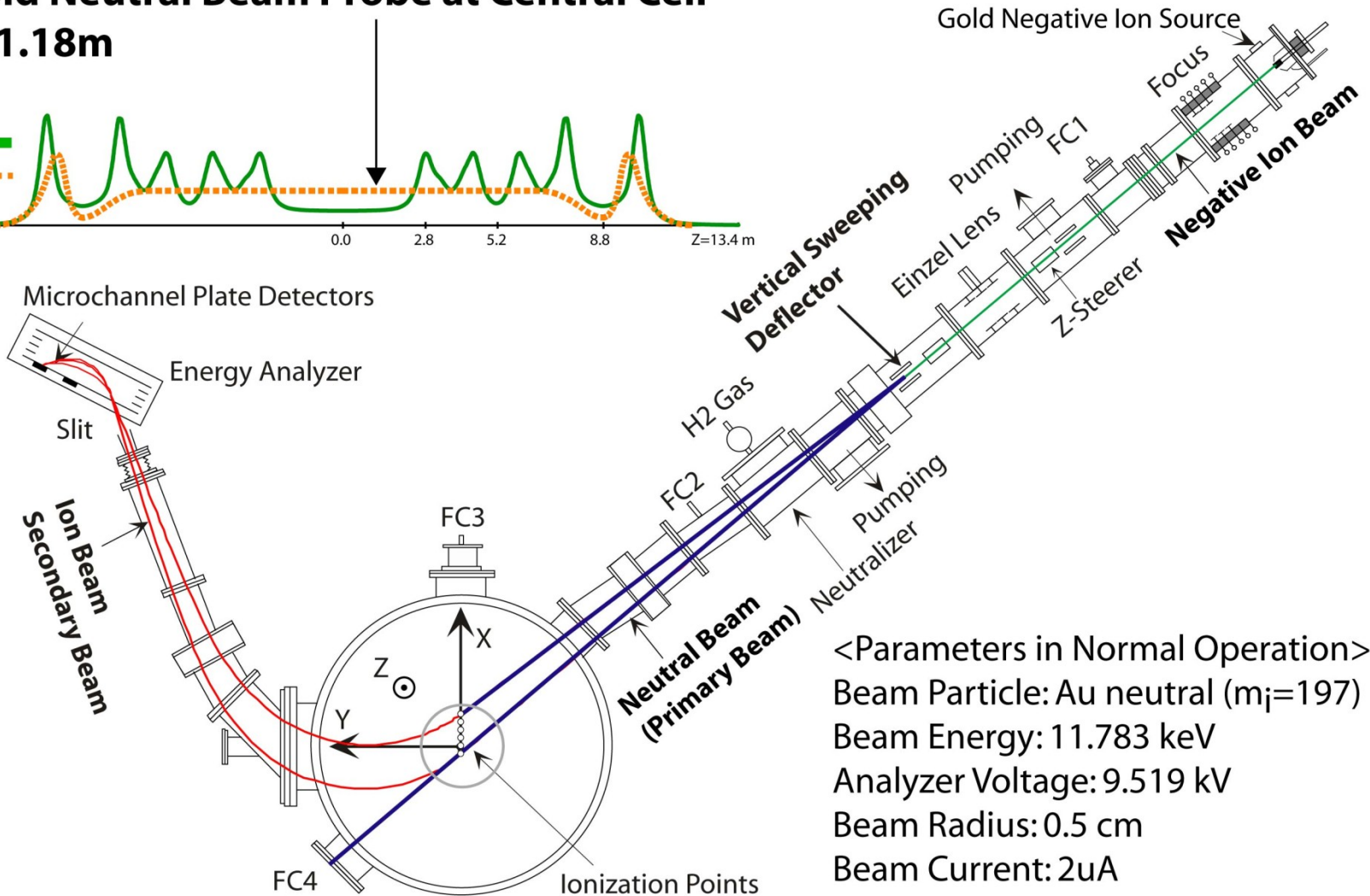
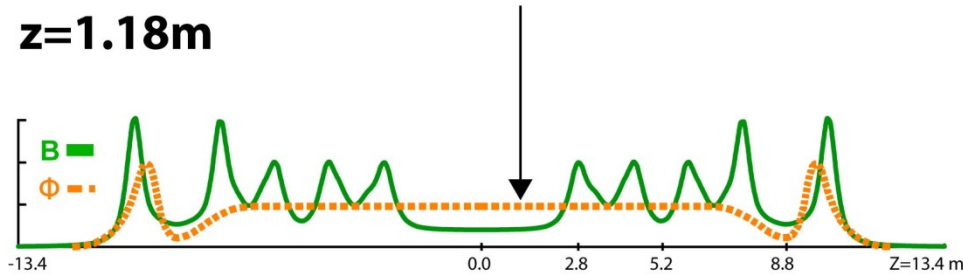
- The system is configured as a heterodyne interferometer consisting of a 70 GHz (1 W) Impatt oscillator (Quinstar Technol., QIO-7030CL) and a 150 MHz oscillator (Vega Technol., VCO-132).
- Out put of the Impatt oscillator is divided to two microwave beams. One is a probe beam that goes through the plasma, and another is a reference beam that is combined with the output of 150 MHz oscillator using an upconverter (Millitech, MUP-12-RSR).
- A probe microwave beam is injected into the plasma by the transmission horn which is set at the  $x = 1.15$  m and  $y = -0.10$  m though a Teflon lens system (the radius, the radius of curvature and the thickness are 0.0545 m, 0.0536 m, and 0.0236 m, respectively) from the upper port of the GAMMA 10.
- In the former system the transmission horn position was  $x = 0.65$  m and no lens system were used.
- The probe beam extends and is received by the 6 horns settled at the measuring position of  $y = 0.05$  m (ch. 1), 0.01 m (ch. 2), -0.02 m (ch. 3), -0.07 m (ch. 4), -0.10 m (ch. 5), and -0.12 m (ch. 6) at the bottom outside the port of GAMMA 10. The spatial resolution of the system is about 3 cm.



# Gold Neutral Beam Probe System

## Gold Neutral Beam Probe at Central Cell

$z=1.18\text{m}$



<Parameters in Normal Operation>

Beam Particle: Au neutral ( $m_i=197$ )

Beam Energy: 11.783 keV

Analyzer Voltage: 9.519 kV

Beam Radius: 0.5 cm

Beam Current: 2uA

Beam current  $\Rightarrow$  Electron density    Beam energy  $\Rightarrow$  Plasma potential

$$\Delta I / I \cong \Delta n_e / n_e$$

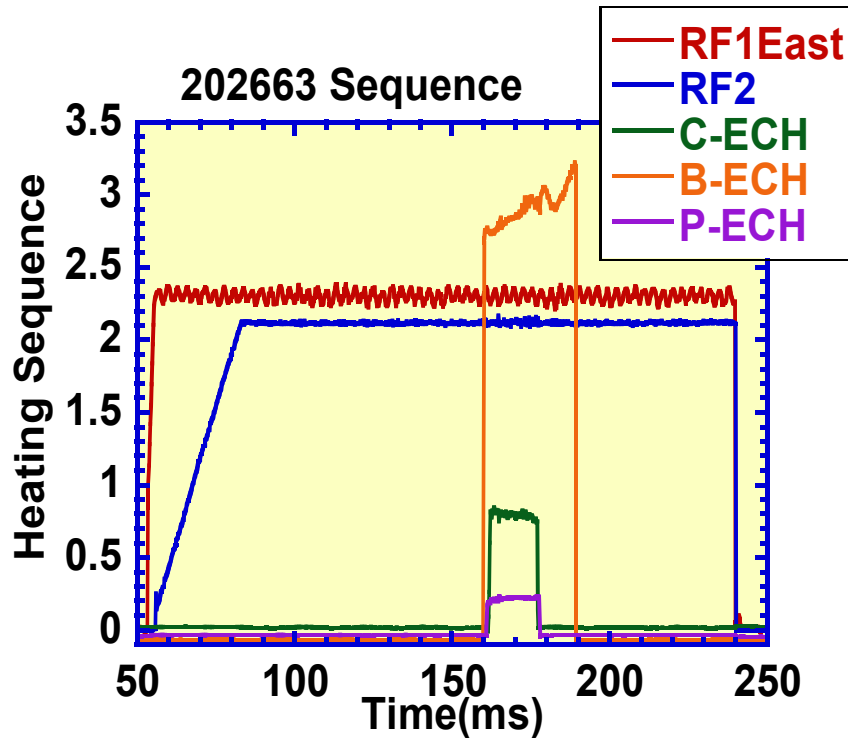
$$\Delta E \cong \phi$$

# EXPERIMENTS

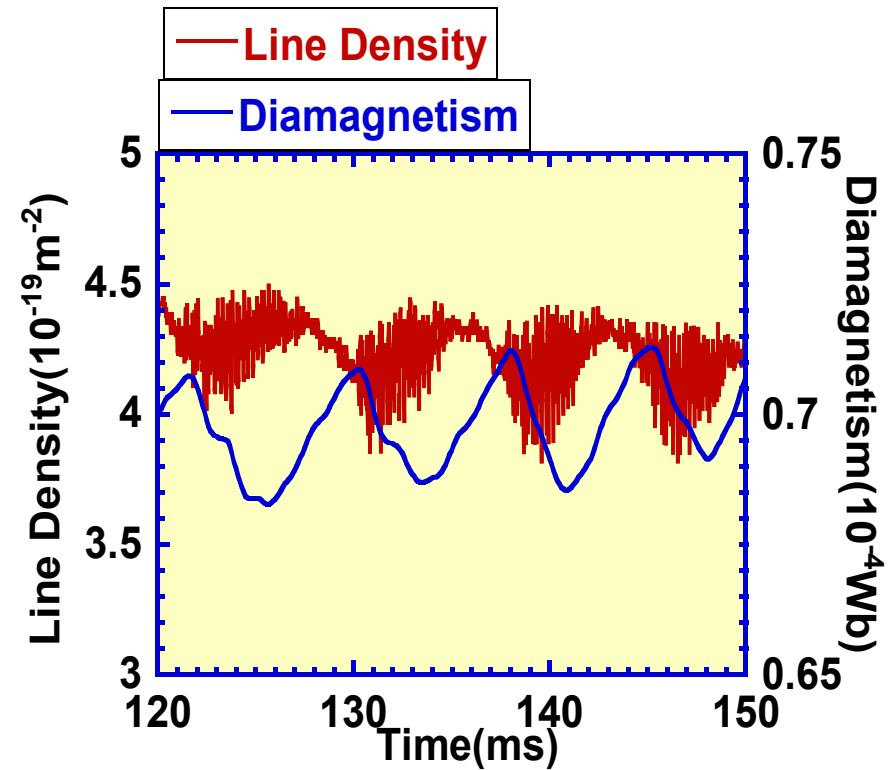
1. 異常輸送に関連した揺動抑制と径方向輸送の解析  
— 金中性粒子ビームプローブ (GNBP)
2. ドリフト型揺動のECHによる抑制の直接測定  
— GNBP, マイクロ波干渉計
3. ECH及びエンドプレートによる電位・電場制御

# Particle flux analysis

Heating sequence

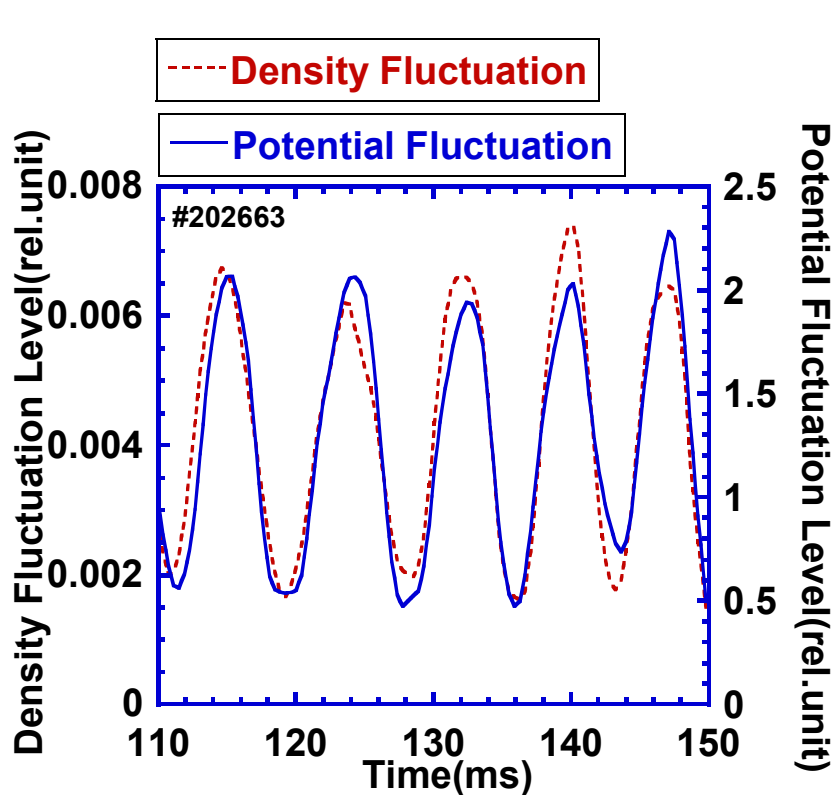


Line density and diamagnetism

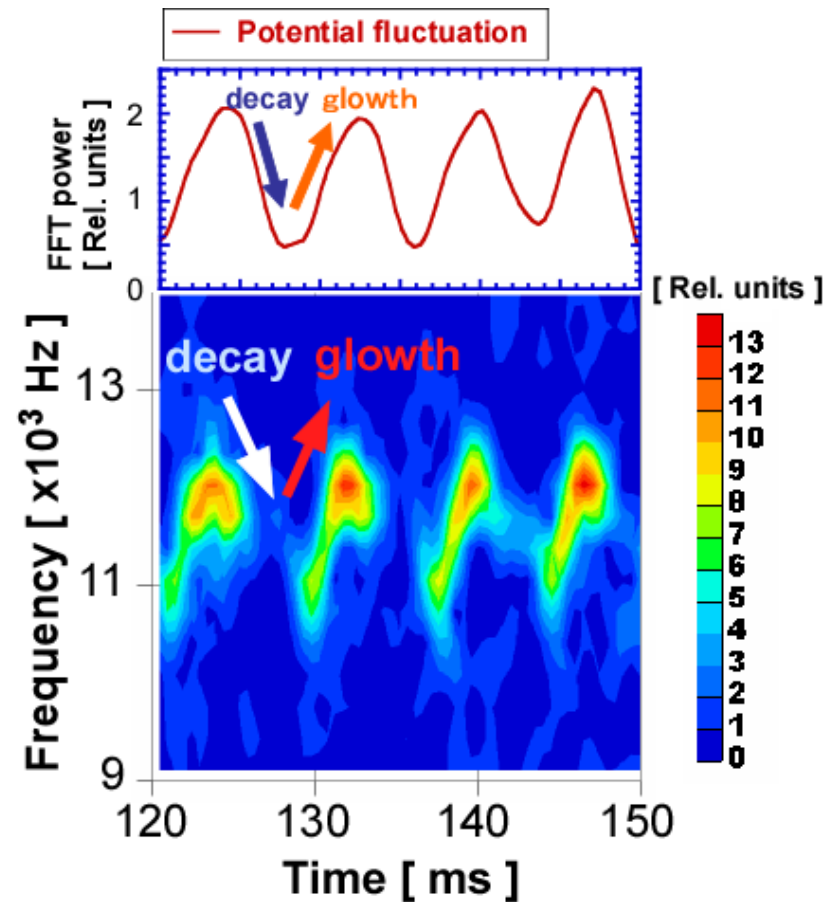


During ion cyclotron heating (ICH) period, the diamagnetism and line density are fluctuating with time.

# Potential and density fluctuations



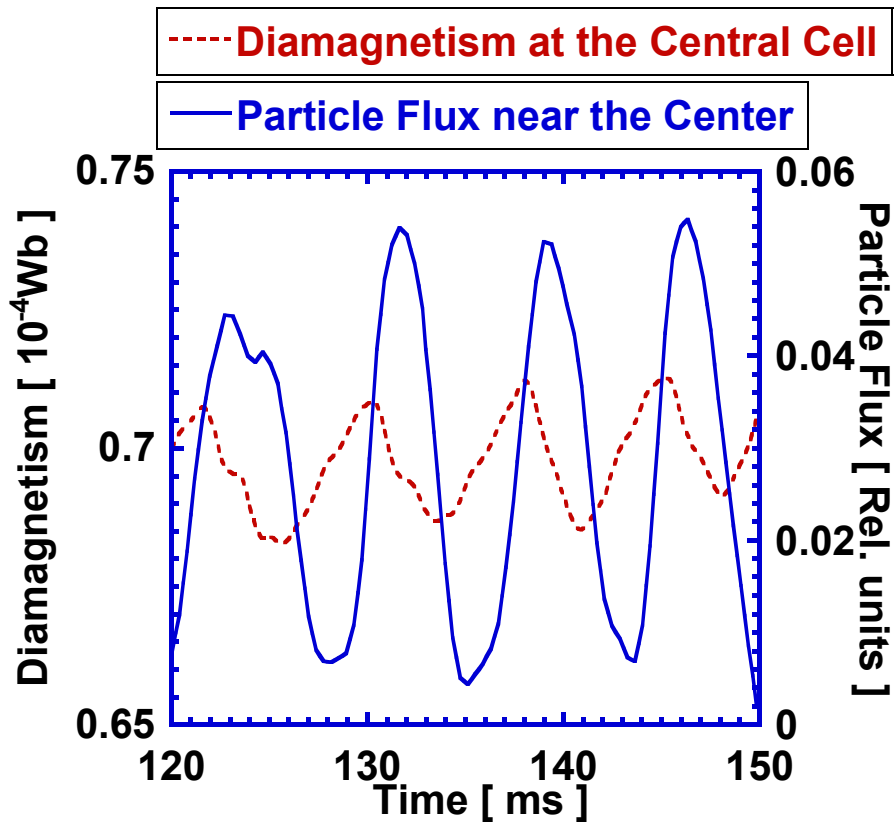
Temporal evolution of the low-frequency potential and the density oscillations near the center of GAMMA 10.



The time evolution of the potential fluctuation and its fluctuation frequency obtained by using GNPB.

- We observed the potential and the relative density fluctuation frequencies of about 10 to 12 kHz which correspond to the drift type fluctuation.
- A good correlation between both oscillations is recognized.

# Particle flux obtained by GNBP



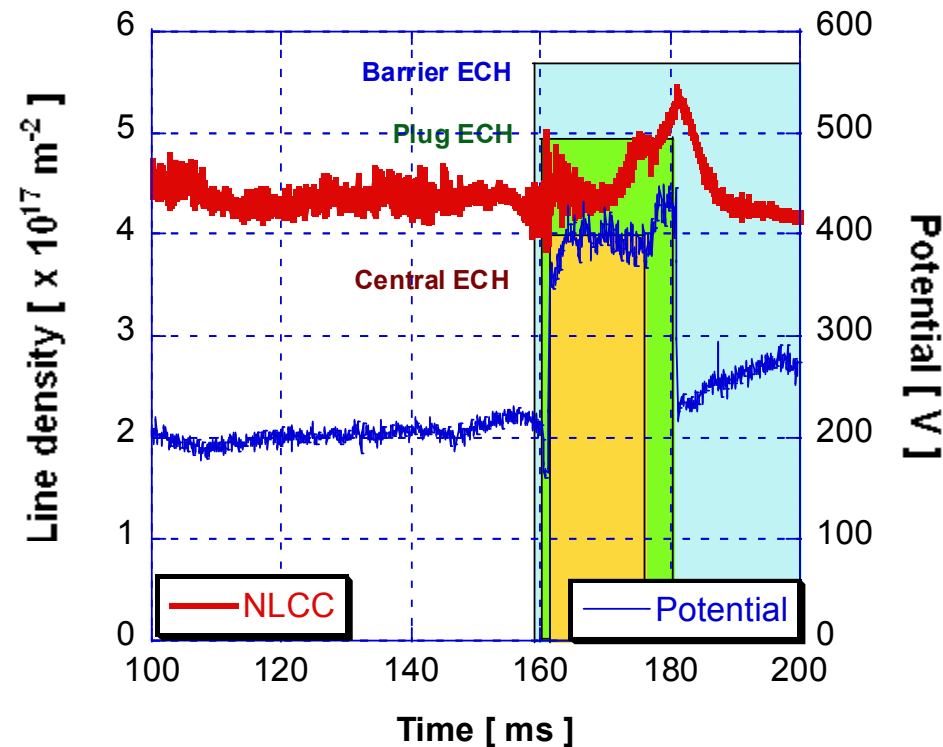
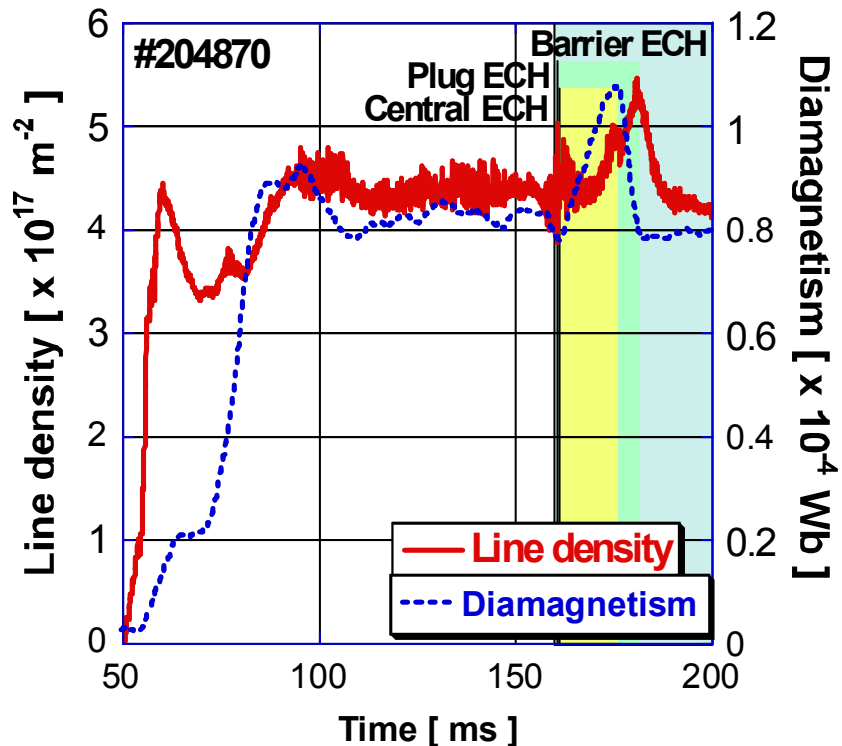
- The diamagnetism began to decrease at 120 ms and particle flux was on the increasing phase. When the particle flux was on the decreasing phase at 125 ms, the diamagnetism goes into an increasing phase. The particle flux of about 0.035 is the threshold of increasing and decreasing phase of diamagnetism.
- The edge particle flux must be considered in detailed particle flux analysis.
- The frequency of the diamagnetism and the particle flux oscillation is about 100 Hz. This correlation tells us that one of the source of the anomalous radial transport is the potential and density fluctuations and the fluctuations decrease the plasma stored energy.

$$\Gamma_r = \langle \tilde{N} \tilde{V}_r \rangle = \langle \tilde{N} \tilde{E}_\theta \rangle / B_z,$$

# EXPERIMENTS

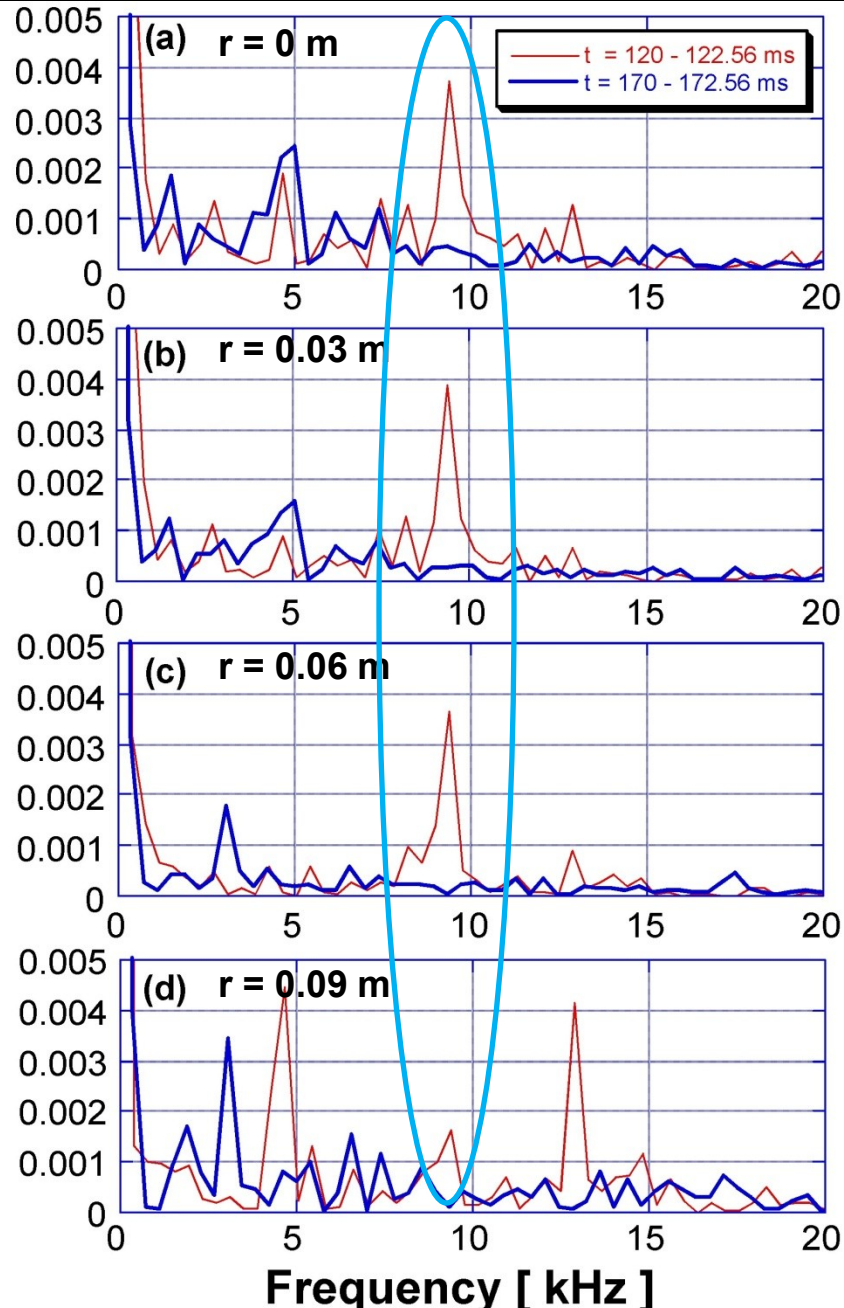
1. 異常輸送に関連した揺動抑制と径方向輸送の解析  
—金中性粒子ビームプローブ (GNBP)
2. ドリフト型揺動のECHによる抑制の直接測定  
—GNBP, マイクロ波干渉計
3. ECH及びエンドプレートによる電位・電場制御

# DENSITY AND POTENTIAL FLUCTUATION MEASUREMENTS



- The plasma is produced at 50.5 ms and sustained by ICH. Then barrier-ECH is applied between 159.5 and 204.5 ms to create thermal barrier potential and plug-ECH is applied between 160.5 to 180.5 ms to create confining potentials. Central-ECH is applied between 161.0 to 176.0 ms to increase the electron temperature.
- Figure shows a time variation of line-integrated density (solid line) measured by the movable interferometer and diamagnetism (dotted line) with the heating sequence.
- The diamagnetism and electron line density increase with applying ECH.

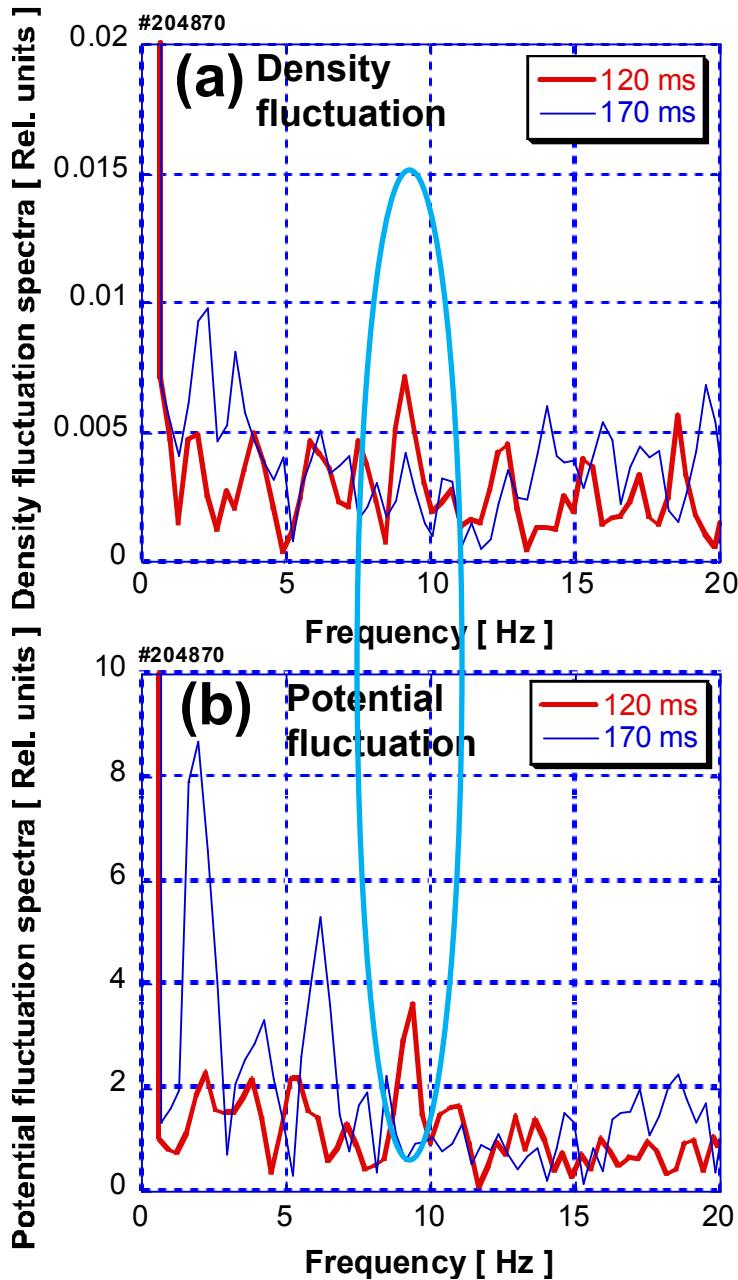
# FFT spectra of the plasma density



- FFT frequency spectra are displayed in these figure for each position measured by the multi-channel interferometer.
- FFT spectra of each channel before ECH (red line,  $t = 120-122.56$  ms) and during ECH (blue line,  $t = 170-172.56$  ms) are shown in figure (a) at vertical position of 0 m, (b) at 0.03 m, (c) at 0.06 m, and (d) at 0.09 m, respectively.
- It is observed that the FFT power on each position of plasma densities is suppressed during the application of ECH.
- The frequency peaks of about 9 kHz before the application of ECH and during application of ECH those frequency peaks are suppressed. The frequency peaks of about 9 kHz are observed at the region from  $r = 0$  to  $r = 0.09$  m.



# Potential and density fluctuation

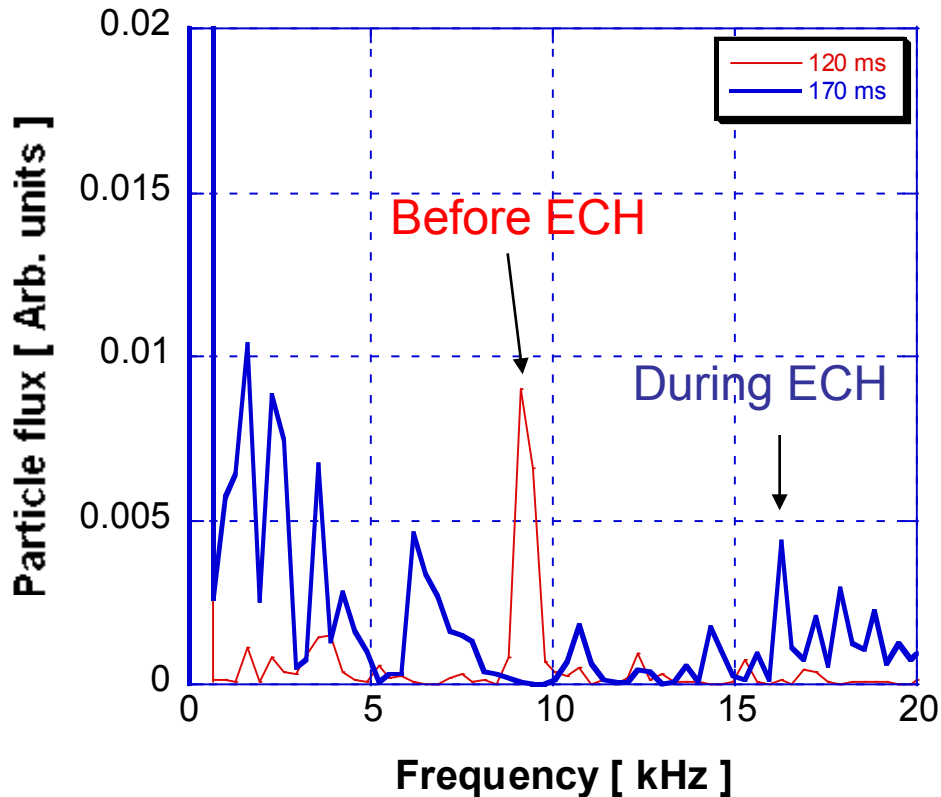


We show the FFT spectra of the density (a) and potential (b) fluctuations measured by using the GNPB system. On both of the figures, the peak at the frequency of 9 kHz is observed.

When the plug ECH applied, the decrease of 9 kHz peak is observed.

The ion confining potential formation with plug ECH made potential and density fluctuations suppression of the coherent modes.

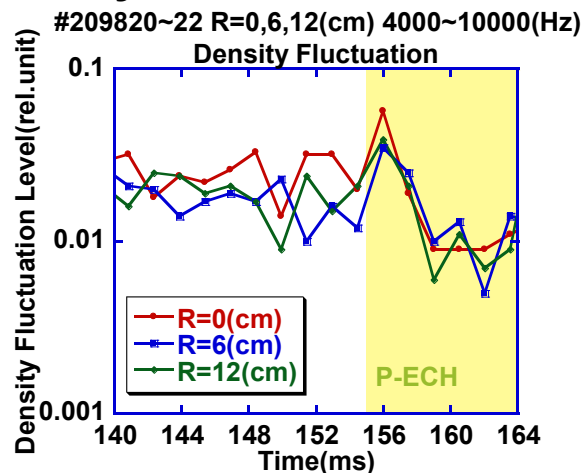
# Particle flux analysis



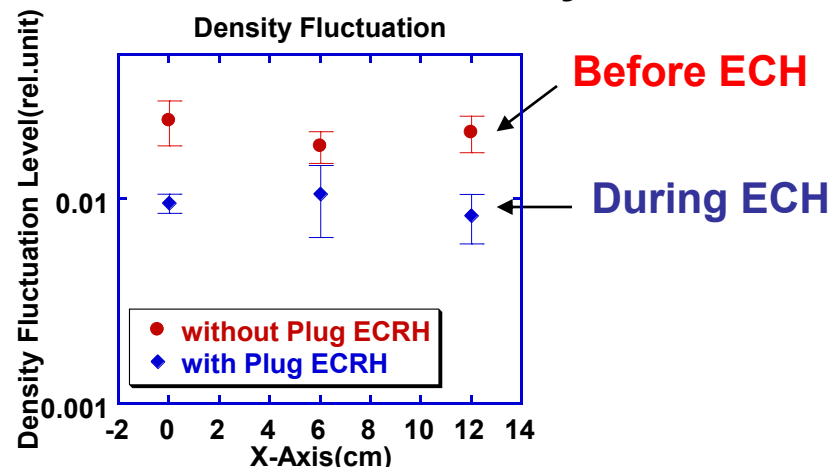
- We observed the potential and the relative density fluctuation frequencies of about 9 kHz which correspond to the drift type fluctuation.
- This figure shows the particle flux measured at  $r \sim 2$  cm.
- The hair line and bold line show the particle flux before application of ECH and that during ECH, respectively.
- The frequency peak about 9 kHz before application of ECH is observed. It decrease during the ECH.

# GGBP measurements

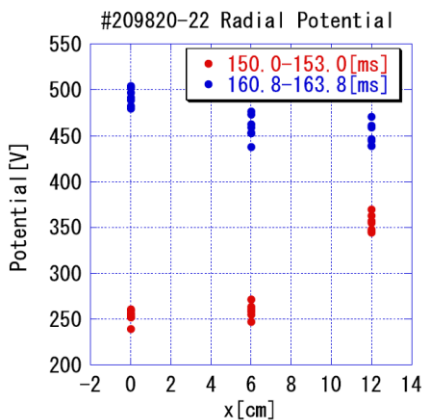
## Density fluctuation



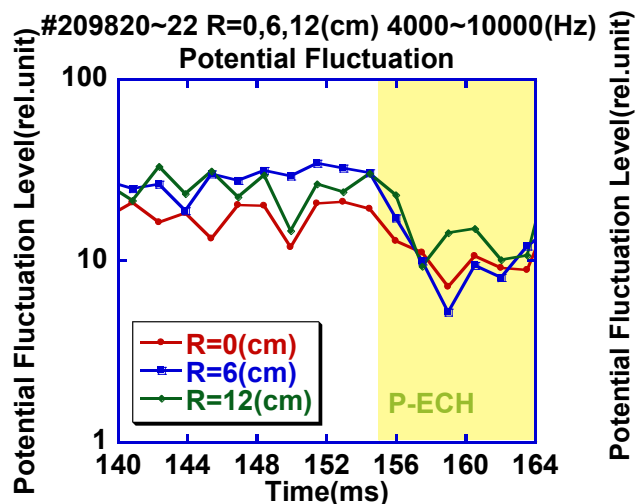
## Radial distribution of density fluctuation



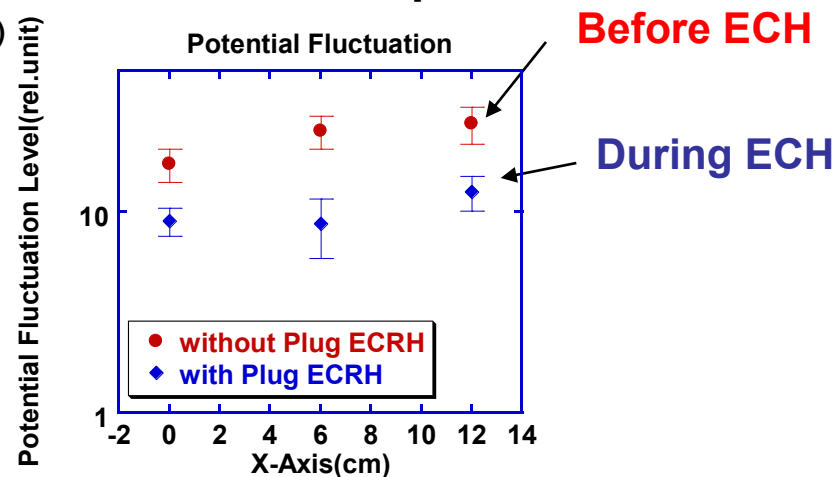
## Potential profile



## Potential fluctuation



## Radial distribution of potential fluctuation



Density and potential fluctuations of the frequency range from 4 kHz to 10 kHz are suppressed with application of ECH.

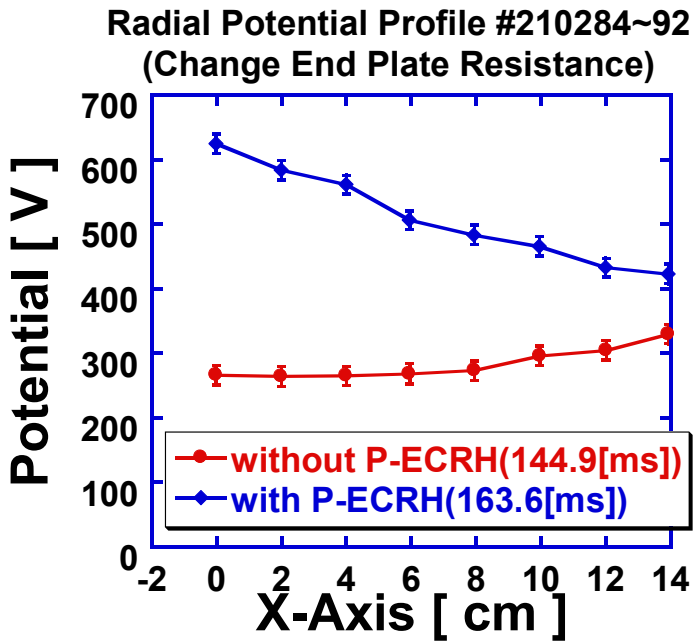
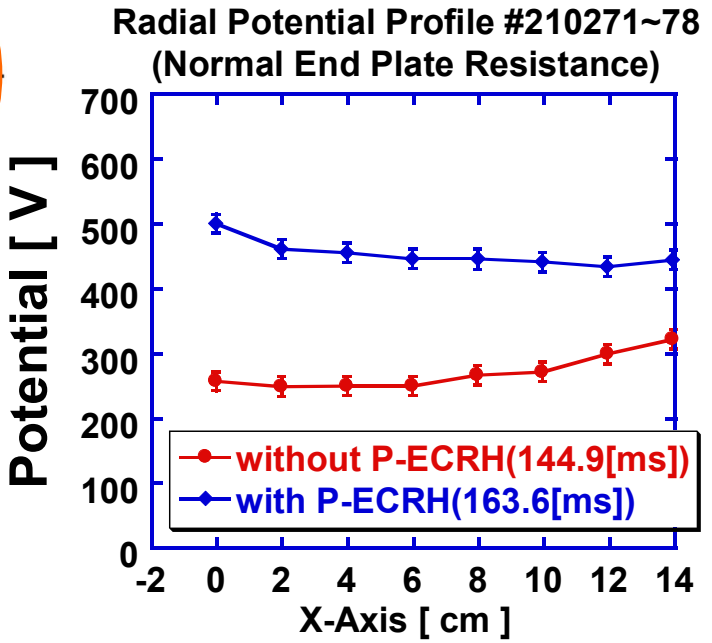
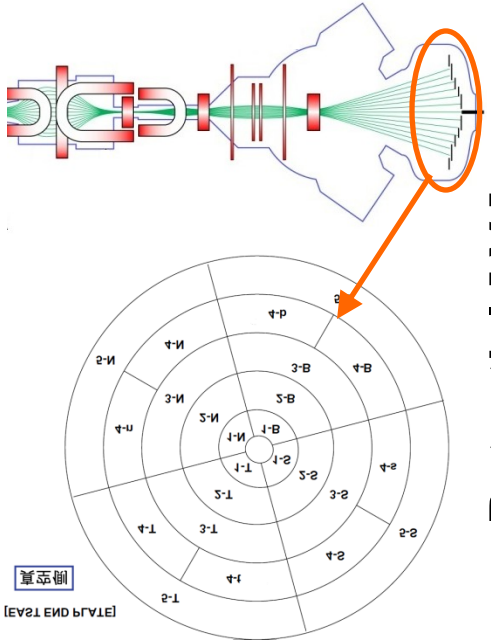
Density and potential fluctuations are suppressed in every radial positions during ECH.

# EXPERIMENTS

1. 異常輸送に関連した揺動抑制と径方向輸送の解析  
—金中性粒子ビームプローブ (GNBP)
2. ドリフト型揺動のECHによる抑制の直接測定  
—GNBP, マイクロ波干渉計
3. ECH及びエンドプレートによる電位・電場制御

# POTENTIAL AND ELECTRIC FIELD CONTROL

Shot number (エンドプレート抵抗)	抵抗 0-2(中心部)	抵抗3-5 (外側)
#210271-78 (通常抵抗)	1 MΩ	1 MΩ
#210284-92 (中心近傍抵抗小)	11kΩ	1 MΩ



Potential and electric field can be successfully controlled by changing the end plate registers.

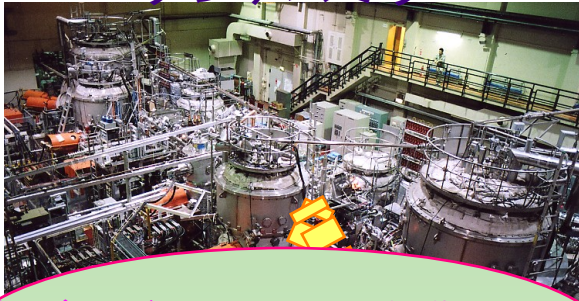
# GAMMA10 FUTURE PLAN

## 開放端磁場配位を活かした 境界プラズマ輸送制御研究計画

1. 概 要
2. 方針と展開
3. 要素還元型研究
4. 新しい研究の紹介
5. ITER-核融合研究へのインパクト

# 概要

## タンデムミラー



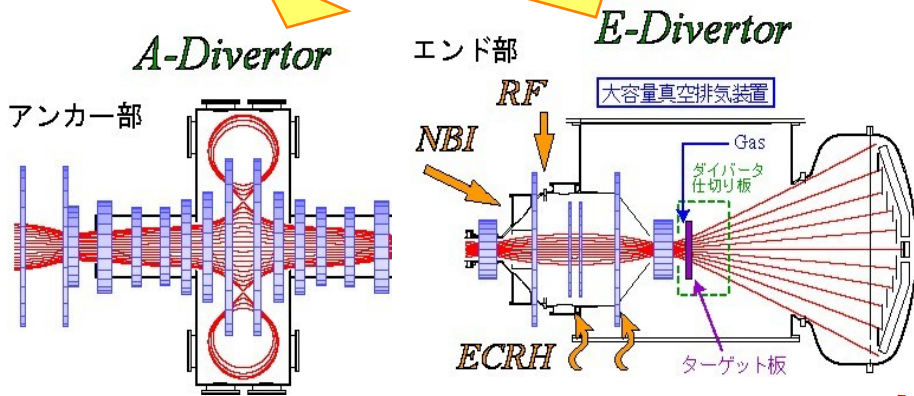
新ダイバータコイルを導入した  
新装置による新しい研究の展開

今後は、以下のような2本の研究課題を柱に、研究計画を立てている。

- (1) 電位／電場による閉じ込め・輸送の改善の物理をコア領域から境界部まで拡張した研究を進める。

この研究を更に強化するため、

- (2) 新ダイバータ装置を導入し、ダイバータプラズマ様の境界プラズマの研究を新たに展開し、急務の課題であるダイバータ開発において、開放端磁場の特長を活かした研究によりITER等トラスプラズマ研究に貢献する。



電位・電場によるプラズマ閉じ込め改善・輸送研究とダイバータ模擬による境界プラズマ輸送研究を融合した新しい展開

ここでは、主として(2)に関する研究テーマについて、現状までに検討されている計画の詳細、並び課題等について報告する。

# 要素還元型研究の深化

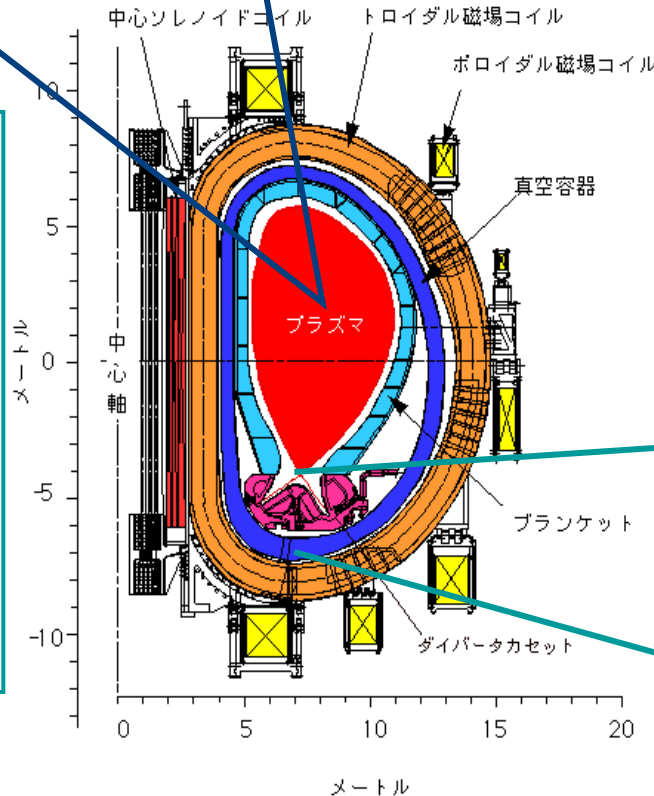
## 電位/電場によるプラズマ閉じ込め輸送研究の境界プラズマへの拡張

これまでの電場による閉じ込め改善研究の成果を，発展的に新装置に取り込み，コアプラズマに加えて，境界領域にまで拡張した「高プラズマ閉じ込めと低壁負荷の両立」を目指したプラズマ輸送制御の研究に展開してゆく。

### 電位の重要性

電場によるプラズマ閉じ込め研究は，開放端磁場配位における端損失粒子の電位閉じ込め改善ばかりでなく，ITER等のトカマク，或いはヘリカル型の環状系プラズマ閉じ込め装置における閉じ込め改善モード（Hモード）をも含む広く普遍的で，顕著なプラズマ性能改善・向上の鍵を握る物理機構として，近年極めてその重要性が注目されている。

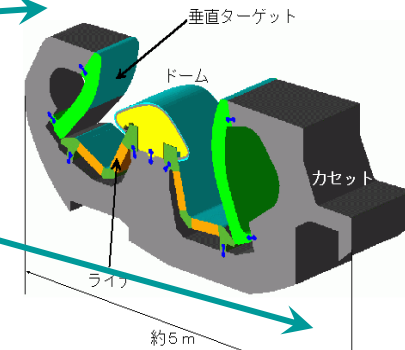
ITER断面図



### ダイバータ装置

ダイバータとは，核融合炉において高温高密度プラズマを長時間維持するために，核融合反応で生成された灰や不純物进行处理する装置で，核融合炉において基幹的な構成要素である。国際熱核融合炉実験装置ITERでは，通常運転時のダイバータ熱負荷は，5~20 MW/m<sup>2</sup>と見積もられており，熱・粒子制御やダイバータ部周辺プラズマ物理の解明が，急務の課題となっている。

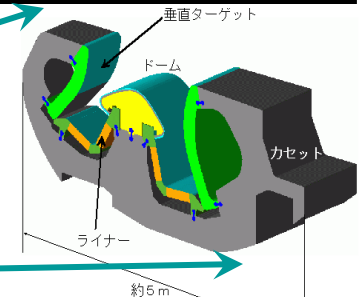
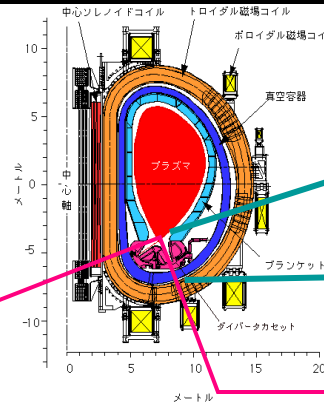
### ダイバータカセット





# 要素還元型研究の深化（続き）

ITER断面図



ダイバータカセット

## 境界プラズマへの拡張 — 新ダイバータ装置の導入

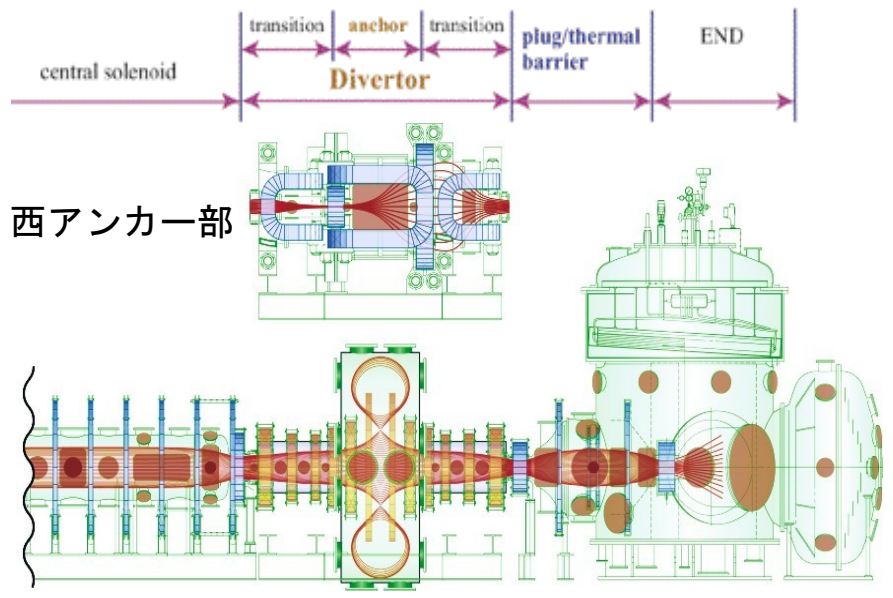
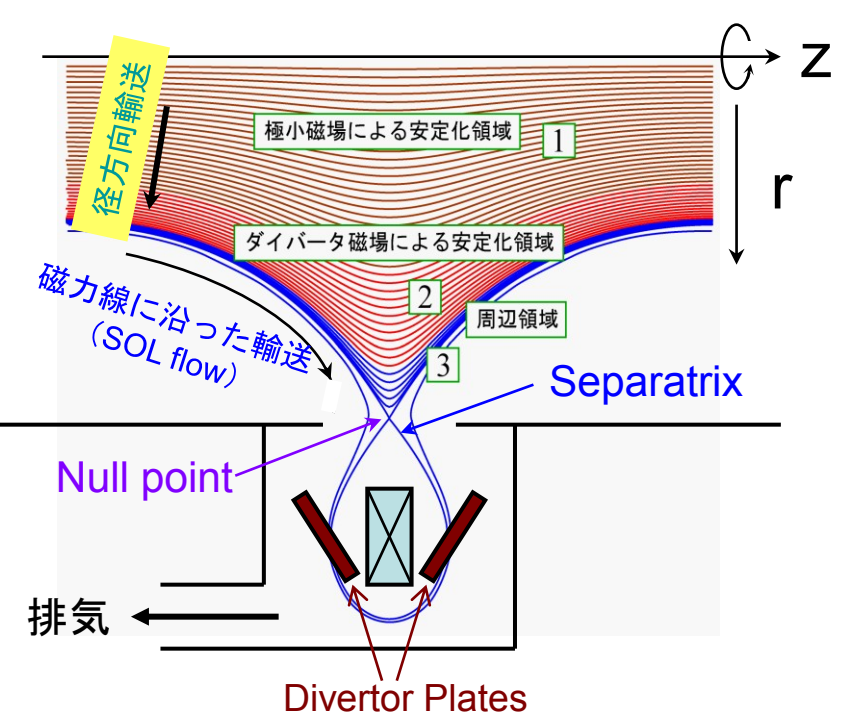
• 斬新なアイデア（片方の極小磁場配位に換えてダイバータ磁場配位を導入）を盛り込むことによる、新しいダイバータシミュレータの開発（*A-Div.*）と開放端磁場を活かした、これまでにない高熱粒子束シミュレータの開発（*E-Div.*）を進める。

• これらを導入した新装置により、電位／電場の物理の境界プラズマへの拡張を可能にし、ITER 及び核融合炉の重要かつ緊急の課題である以下の実験を可能にする。

- ① ダイバータプラズマにおける不純物輸送制御（コアプラズマへの逆流等）
- ② 定常及び ELM様パルス高熱粒子束の制御／放射冷却プラズマの解明と定常制御
- ③ セパトトリックス周辺のダイバータ領域における熱・粒子制御

# 開放端磁場を活かした新研究(A-Div.)

新しいダイバータの概念図 新しいダイバータプラズマに向けた装置案

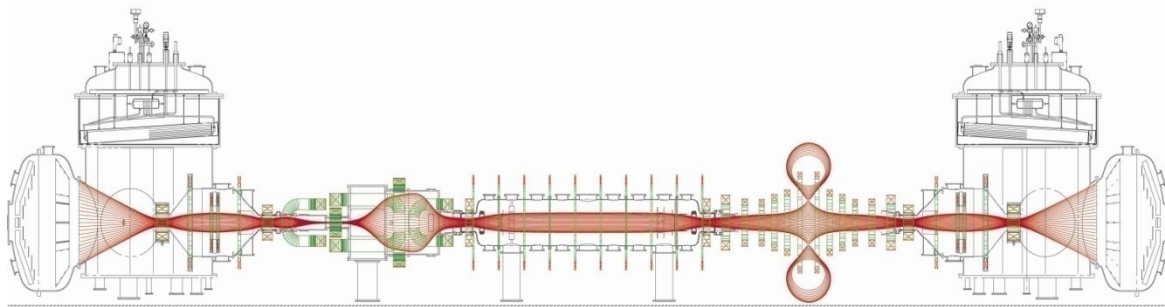
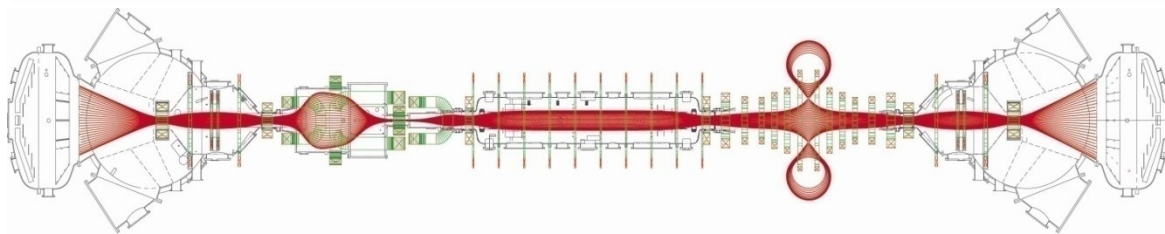
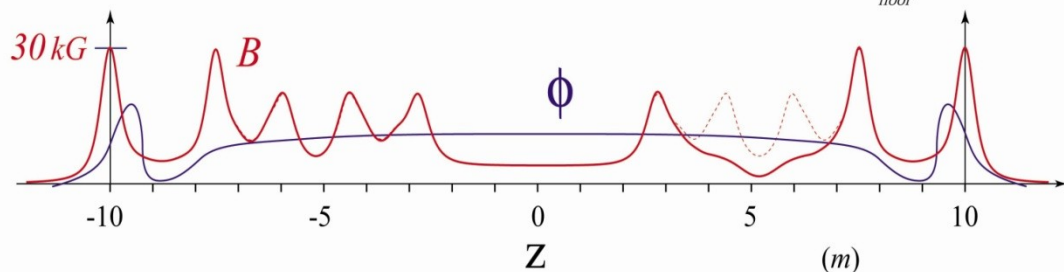
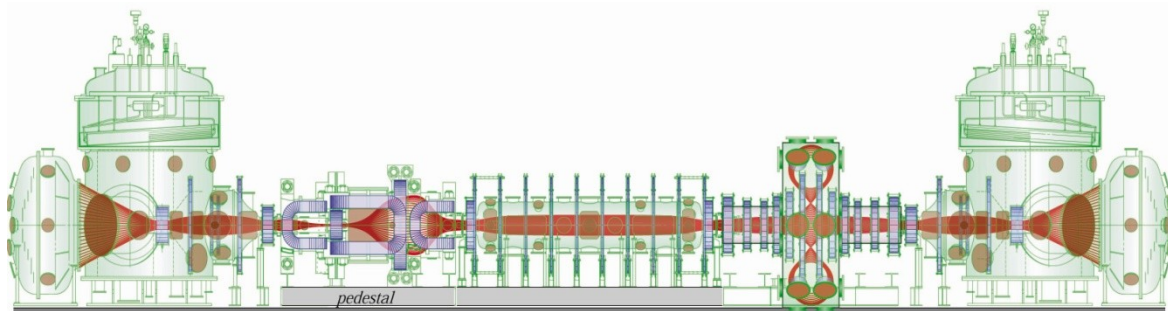


セパトトリックスを有する磁場配位を用いた周辺プラズマ物理の新しい展開

- 新ダイバータ磁場での実験では、片側極小磁場による安定化を保持し、新ダイバータ領域でのこれまでの電位の物理を拡張して、SOLプラズマ物理や開放端磁場配位中の揺動・輸送現象の解明 (①と③) を中心に、世界初の電位／電場の物理を応用した**プラズマ閉じ込め改善と不純物輸送の解明と制御**研究を実施。

# 開放端磁場を活かした新研究(A-Div.)

## 磁場配位の最適化設計



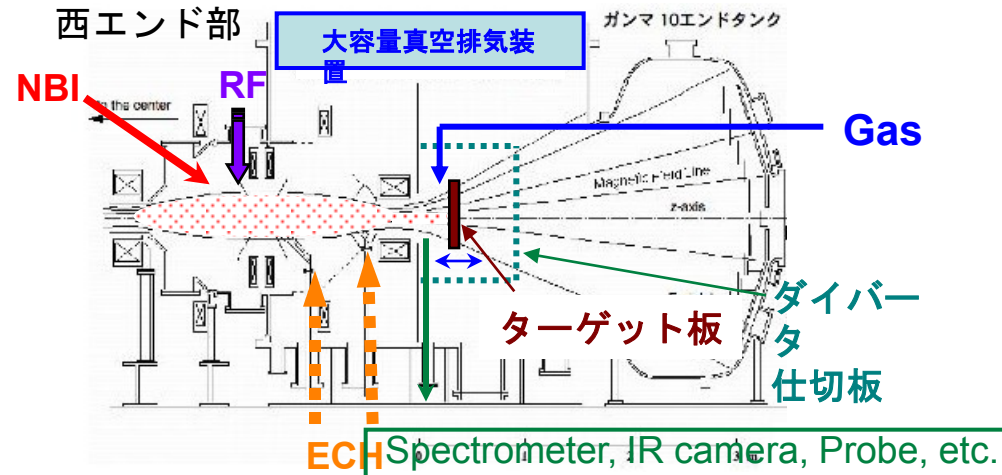
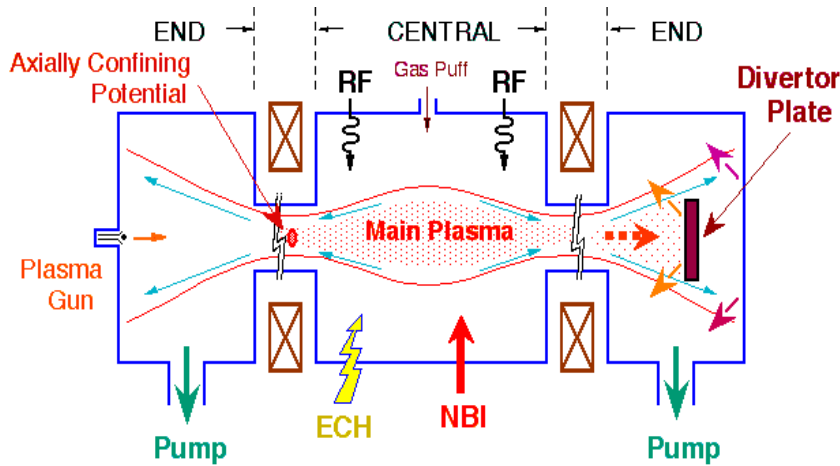
既存の電源設備が利用できる条件下において、最適な磁場配位の設計が進行中である。

### 磁場最適化条件

- ・ セパトリックスの磁力線が壁に接しない
- ・ ヌル点直下軸上磁場強度が1kG以上
- ・ 極小磁場部のプラズマ断面楕円度40以上
- ・ 極小磁場部とエンドミラー一部で再円形化

# 開放端磁場を活かした新研究(E-Div.)

## 開放端磁場配位とダイバータ模擬装置の概念



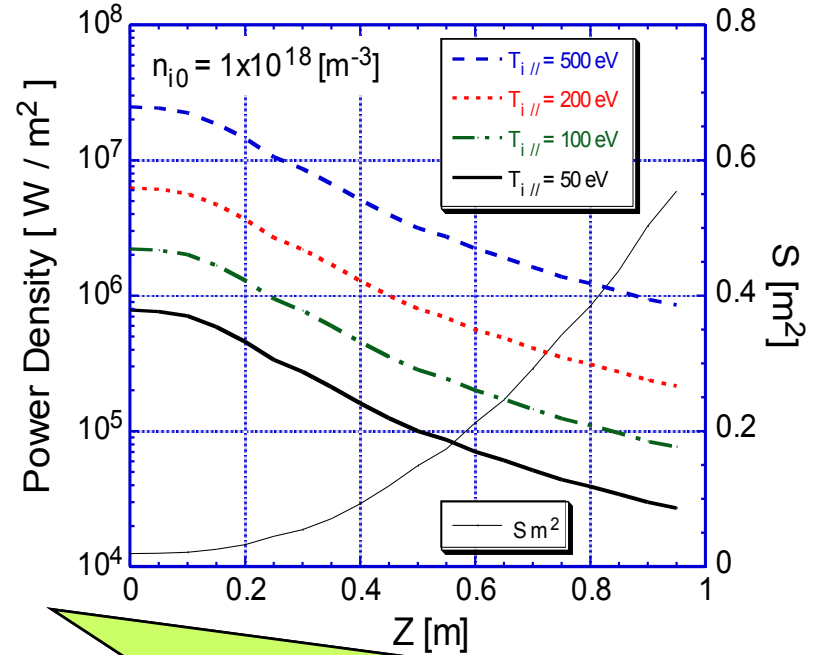
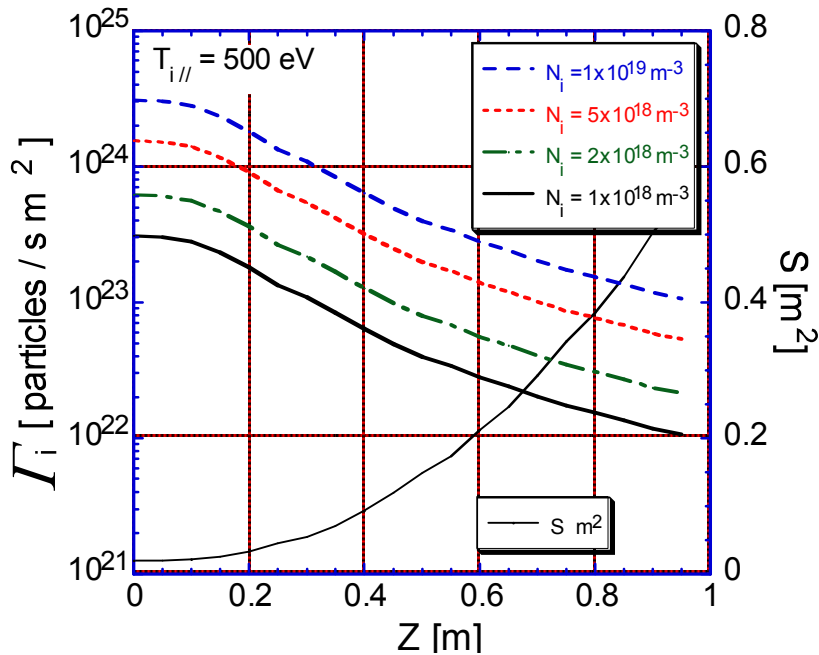
開放端磁場配位は元々ダイバータと類似した構造を有しており、セントラル部で生成された粒子は磁力線に沿って輸送され、エンドプレートでガス化し排気される。

- 核融合科学研究所との共同開発のジャイロトロンによる強力な電子加熱、及び大電カイオン加熱装置を用いて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、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での、電位／電場によるダイバータプラズマ制御（①と②）実験を世界で初めて実施する。

装置端部において、既設加熱系を用いて高温・高密度プラズマを生成し、高熱流プラズマ束を発生、ターゲット板に照射する。

# 開放端磁場を活かした新研究(*E-Div.*)

## エンド部熱流束・粒子束密度の見積



エンドミラー部に各種加熱系を併用し，ミラースロート部において，密度： $10^{18} \text{ m}^{-3}$  台，温度：数100 eVのプラズマを生成すれば，エンドミラー部下流0.5m付近で、

- ・フラックス： $10^{22-24} \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ ,
- ・熱流密度： $0.1-10 \text{ MW m}^{-2}$

を得ることが期待できる。

# 新装置において目標とする性能

## <E-Divertor>

- プラズマ口径:  $0.1 \sim 1.0 \text{ m}\phi$
- プラズマ密度:  $\leq 10^{19} \text{ m}^{-3}$
- 粒子束密度:  $10^{22} \sim 10^{24} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- 熱流束密度:  $0.1 \sim 10 \text{ MW/m}^2$
- プラズマ持続時間:  $0.4 \text{ 秒} \sim 4 \text{ 秒} (10 \text{ 秒})$
- フルエンス:  $10^{24} \sim 10^{25} \text{ m}^{-2} / \text{shot}, \sim 10^{27} \text{ m}^{-2} / \text{week}$

## <A-Divertor>

- プラズマ口径:  $1.0 \sim 1.5 \text{ m}\phi \times 0.05 \text{ m}^w$  (円環状)
- プラズマ密度:  $\leq 10^{18} \text{ m}^{-3}$
- 粒子束密度:  $10^{20} \sim 10^{21} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (定常放電時),  $\sim 10^{22} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (消滅時)
- 熱流束密度:  $0.01 \sim 0.1 \text{ MW/m}^2$  (消滅時)
- プラズマ持続時間:  $0.4 \text{ 秒} \sim 4 \text{ 秒} (10 \text{ 秒})$
- フルエンス:  $10^{21} \sim 10^{22} \text{ m}^{-2} / \text{shot}, \sim 10^{24} \text{ m}^{-2} / \text{week}$

# 新研究計画のITER-核融合研究へのインパクト

## 1. ダイバータの物理を解明

- 高熱流束下の表面物理現象（損耗，堆積，不純物生成と輸送） **課題①, ②**
  - 従来のダイバータ模擬装置に比べ、既存の大電力プラズマ加熱装置を利用することにより、高温プラズマからの大口径、高熱流束のプラズマ流を発生、特に従来の小型ダイバータ模擬装置では不可能であった、**高イオン温度ダイバータプラズマ**が実現可能 **<E-Div.>**
  - 表面温度制御可能なターゲット板を設置し、実機に近い環境を含む広範囲の温度領域での照射を実現でき、現在急務の課題である**高Z材料への照射による不純物生成と輸送**についての実機レベル研究が可能 **<E-Div.>**
- デタッチトプラズマにおける諸現象（原子分子過程） **課題②**
  - ダイバータ近傍における原子分子過程とダイバータ機能に関連する物理現象（分子活性化再結合、ダイバータ板からの金属不純物の逆流等）やデタッチトプラズマの定常維持に関連する研究が**実機に近い環境(高イオン温度、電子温度)**で検証可能 **<E-Div.>**
  - 高度なプラズマ計測機器の活用 **<E-Div.>**
- 粒子排気の物理 **課題②**
  - 大容量クライオポンプによる**ダイバータ排気実験** **<E-Div.>**
- ダストプラズマの物理（ディスラプション時の表面挙動） **課題②**
  - ターゲット面上の高速カメラ計測 **<E-Div.>**

# 新研究計画のITER-核融合研究へのインパクト

## 2. コアプラズマ閉込め性能改善の為の輸送障壁の物理に貢献

- $\text{e}^+$  ラトリックスを有する磁場配位を用いた境界プラズマ物理の新しい展開 **課題③**
  - 周辺プラズマ計測機器を駆使した構造の解析 <A-Div.>
  - 電位形成と境界プラズマ輸送・構造形成の解析 <A-Div.>
- 電位制御によるELM発生時の高熱・粒子束のシミュレーション **課題②, ③**
  - 既存加熱系を用いた軸方向径方向電位制御によるパルス状プラズマ束生成とそのターゲット材料への照射効果の検証 <A-Div.>, <E-Div.>

## 3. 周辺ペデスタル構造と原子分子過程の関連を解明 【共同研究主導型】

- ペデスタルスケーリング, 構造予測能力の向上に寄与 **課題③**
  - 周辺プラズマ計測、シミュレーションによるモデリング <A-Div.>

## 4. 磁力線に沿った或いは横切る輸送現象を解明 【共同研究主導型】

- コンベクティブな粒子異常輸送現象(blob)や揺動の機構 **課題③**
  - セントラル部, ダイバータ部における高速カメラ計測や, プローブ, マイクロ波計測を用いた周辺部詳細計測 <E-Div.>, <A-Div.>
  - 同部におけるシミュレーション解析 <E-Div.>, <A-Div.>



# SUMMARY

1. GAMMA10における最近の研究について示した。特に、GNBPとマイクロ波干渉計を用いてECH印加による電位生成によるドリフト型揺動抑制について示した。
2. GAMMA10の今後の研究計画である、ダイバーターシミュレーター(A-Div, E-Div)の実験計画について示した。現在、研究実現に向けて検討を続けている。