

# GAMMA10における金中性粒子ビーム プローブを用いた低周波揺動の観測

筑波大学プラズマ研究センター 谷口文彬

## ✚ 発表内容

1. 概要
2. GAMMA10
3. 金中性粒子ビームプローブについて
4. 実験結果
5. まとめ

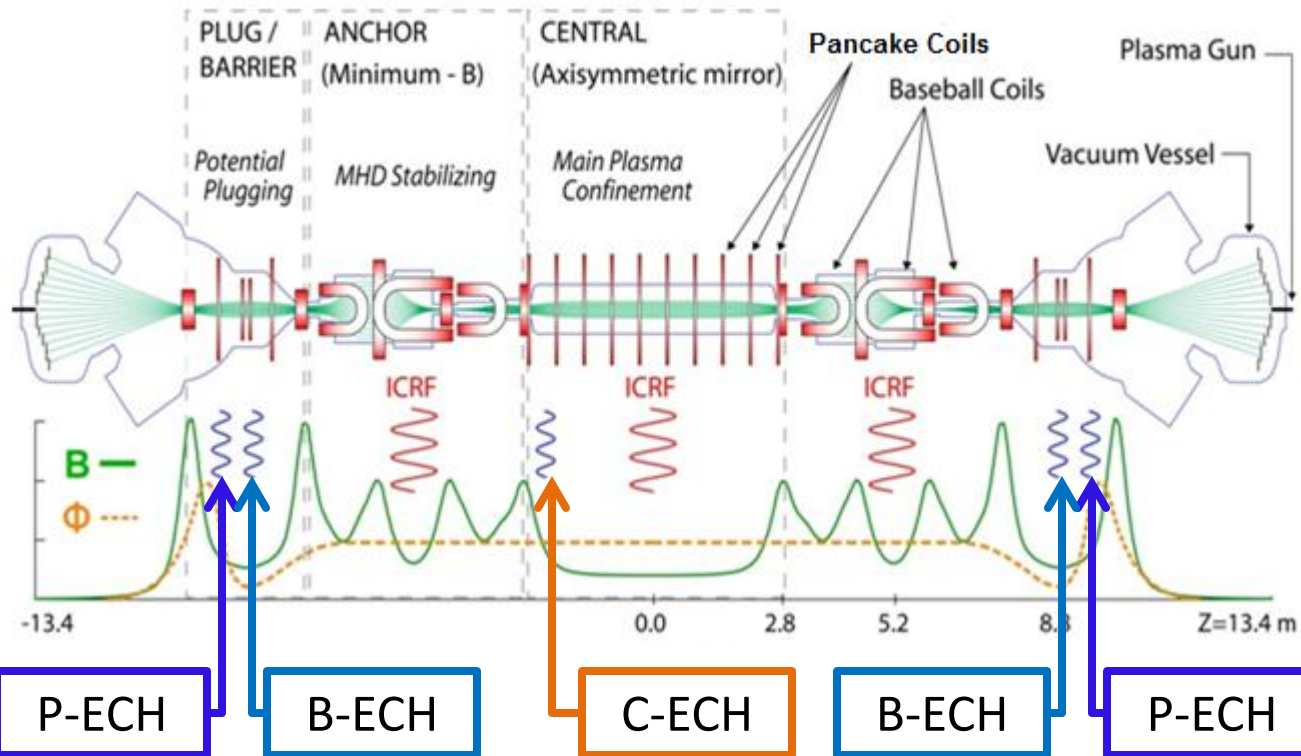
# 1. 概要

現在、磁場閉じ込め型の核融合が核融合研究の主流となっている。そのような核融合プラズマにおいては、粒子の輸送が密度や温度の減少を引き起こすので、大きな問題となっている。プラズマ粒子や熱エネルギーがプラズマの熱力学的な力や不安定性による乱流揺動が原因で磁場を横切って損失してしまう。このようなプラズマの拡散や対流現象を**プラズマ輸送**と呼ぶ。プラズマ輸送は、粒子の軌道を考える時にクーロン衝突しか考えないような新古典拡散理論では扱うことができないために**異常輸送**とも呼ばれる。

## 本研究の目的

本研究では、実験によってはプラグ部の電子サイクロトロン加熱(ECH)が入射されて径方向電場が形成されているにも関わらず、セントラル部の電子線密度と反磁性量が飽和し、減少に転じる現象が観測された。これは、**プラズマ内部の不安定性**により閉じ込めが悪化されたためと考えられる。本研究では、この現象についてGNBPを用いて**電位、電位揺動、密度揺動の観点から考察し、また他グループの計測機と比較・検討を行った。**

## 2. GAMMA10



### GAMMA10

軸対称サーマルバリア  
付きタンデムミラー型  
装置

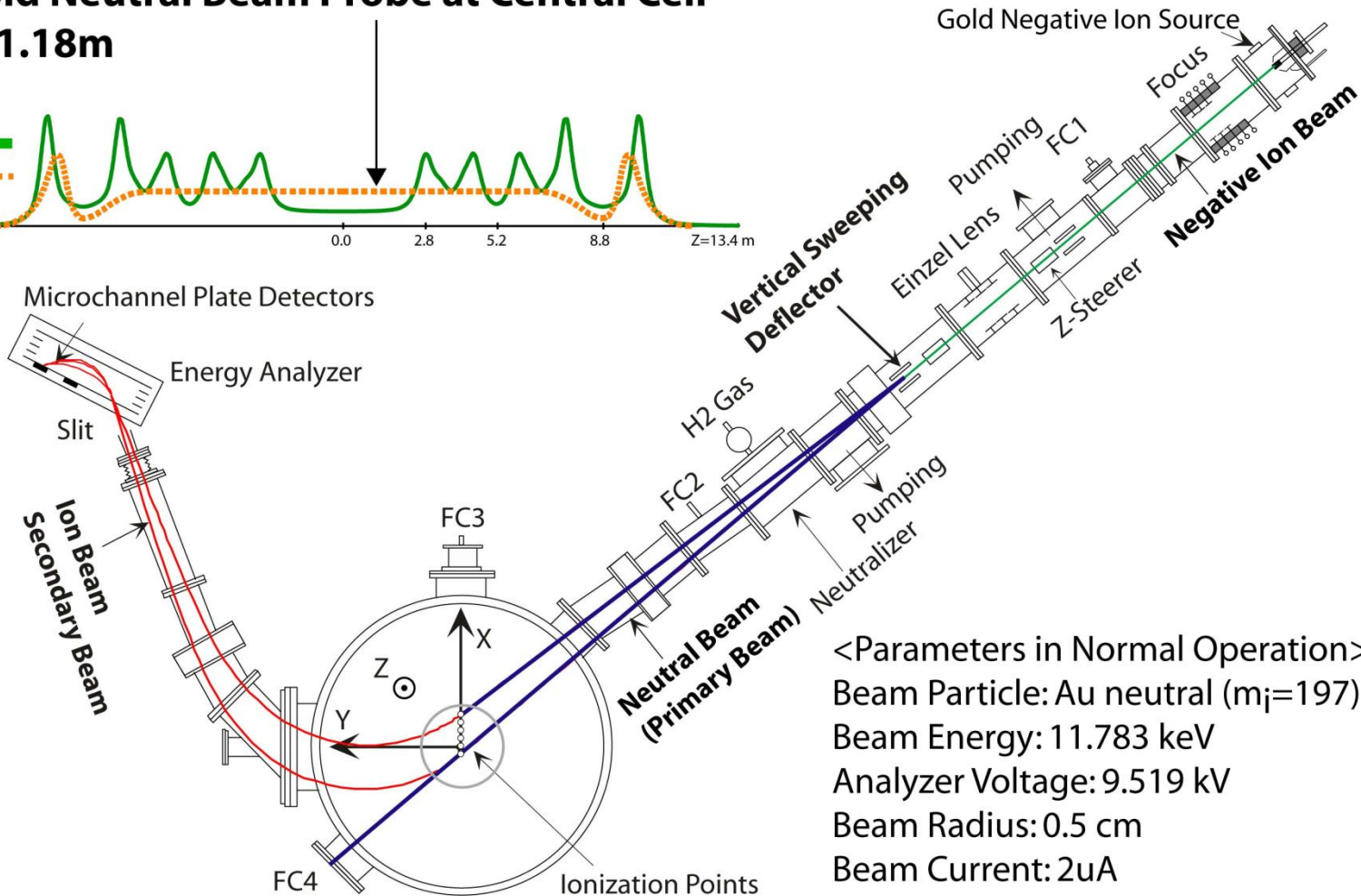
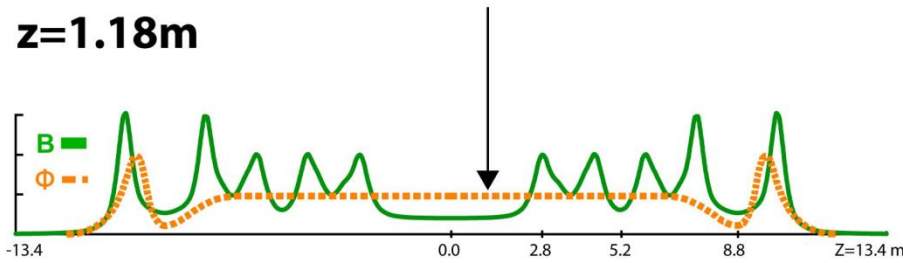
### GAMMA10の特徴

- プラグ、バリアECHを印加することにより静電ポテンシャルを形成して、速度空間に存在する粒子の損失領域(ロスコーン)を狭めている
- 極小磁場配位を取るコイルを両端に配置し、MHD的に安定な磁場配位を形成している

# 3-1. 金中性粒子ビームプローブ (GNBP)

## Gold Neutral Beam Probe at Central Cell

z=1.18m



<Parameters in Normal Operation>

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

Beam Energy: 11.783 keV

Analyzer Voltage: 9.519 kV

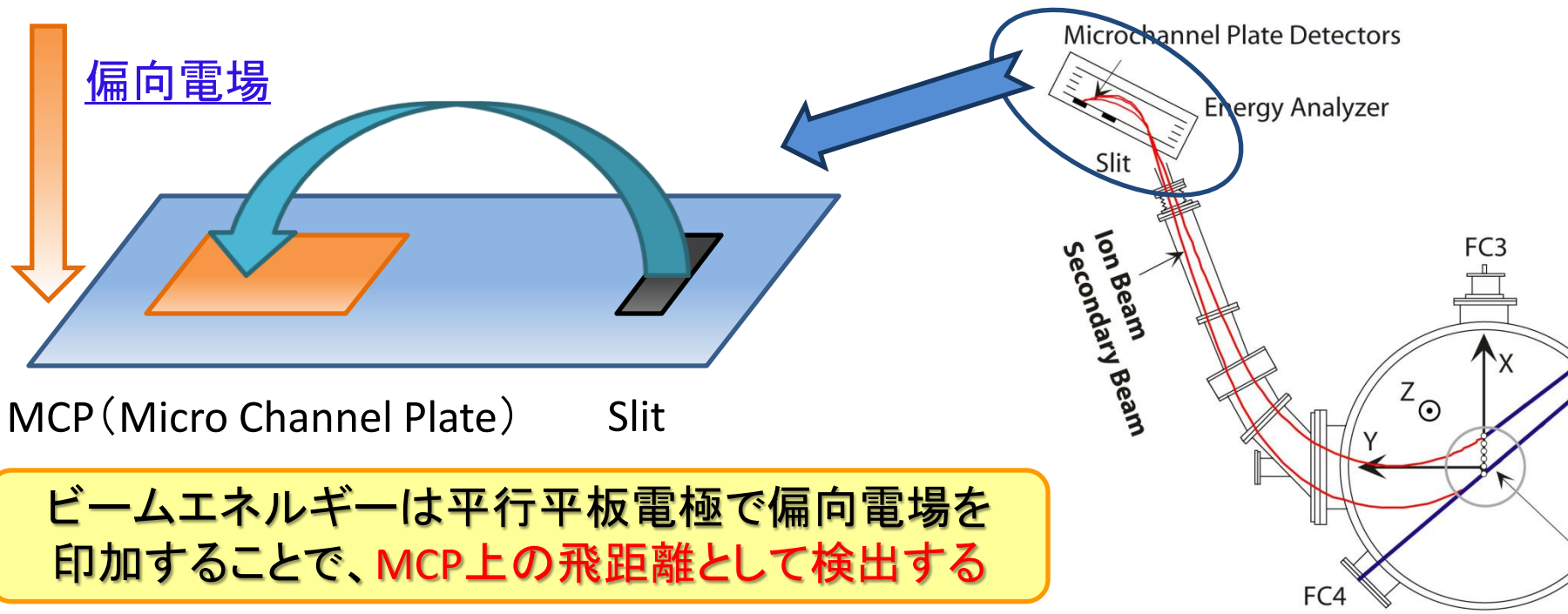
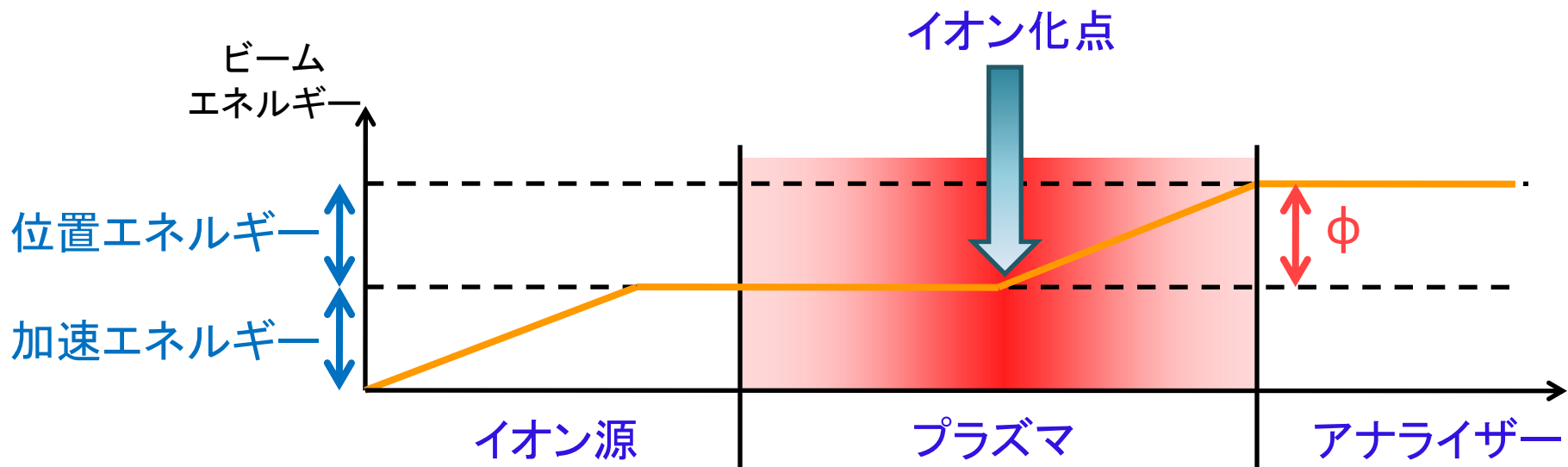
Beam Radius: 0.5 cm

Beam Current: 2uA

ビーム電流量  $\Rightarrow$  電子密度  $\Delta I / I \cong \Delta n_e / n_e$   
 ビームエネルギー  $\Rightarrow$  プラズマ電位  $\Delta E \cong \phi$

密度、電位の情報を同時に計測可能

## 3-2. GNBPの電位測定原理



ビームエネルギーは平行平板電極で偏向電場を印加することで、MCP上の飛距離として検出する

# 3-3. GNBPを用いた電位、密度揺動測定原理

## ✦電位揺動測定原理

GNBPにおいて校正実験より導出した以下の電位計算式を用い、電位の算出を行っている。

$$\phi = \frac{P_{ch} - (21.752 + 0.085766 \times R - 0.010647 \times R^2)}{0.015251 - 0.000022157 \times R - 0.000001538 \times R^2}$$

R: 径方向位置(cm)

$P_{ch}$ : アナライザー内での  
ビームの飛距離

2次ビームによってプラズマ内部の電位情報が分析器内での飛距離として現れるため、飛距離( $P_{ch}$ )の微小変動から電位揺動を得ることができる。

## ✦密度揺動測定原理

1次ビーム( $Au^0$ )は、プラズマ中で電子との電離反応により、金の正イオンビームとなり分析器内部に到達する。イオン化効率 $\alpha$ はLotzの経験則より、現在の電子温度領域ではイオン化係数はほぼ密度に依存しているため、密度揺動を得ることができる。

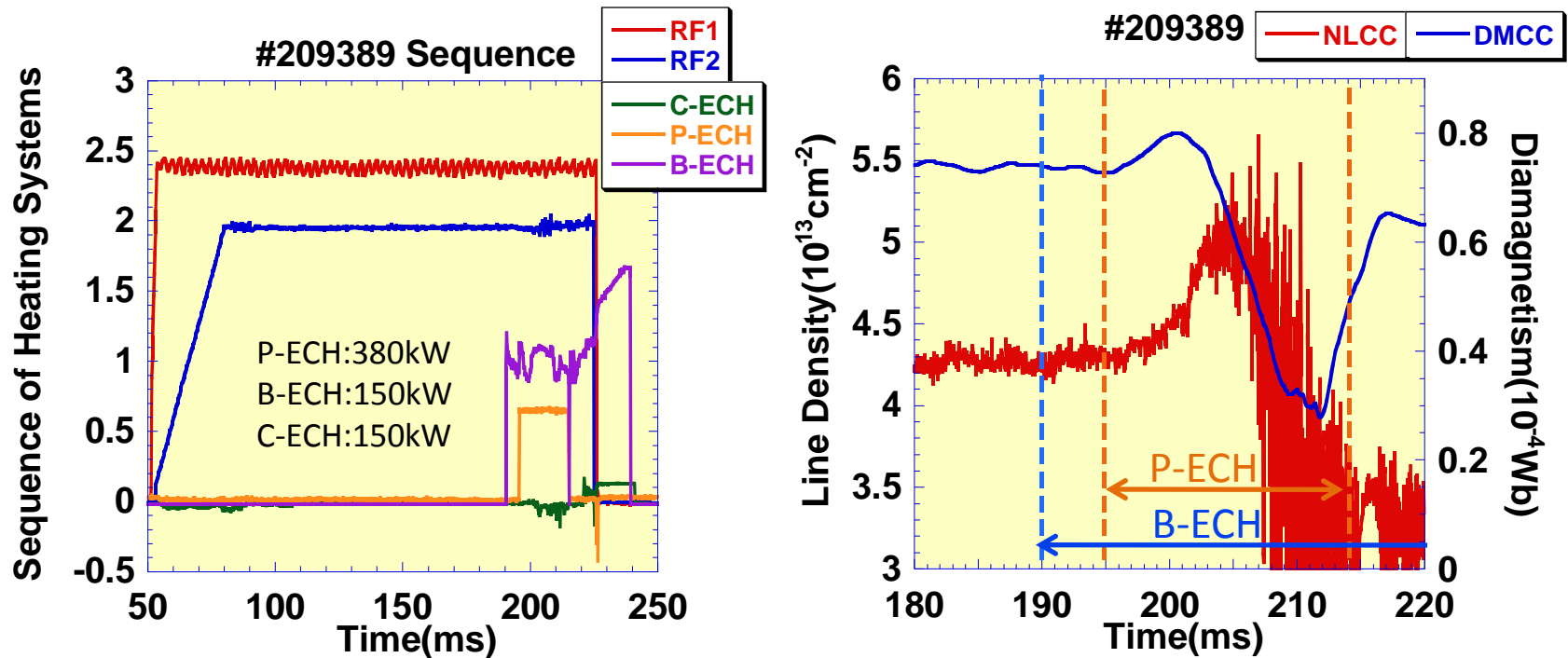
$$Q = 3.0 \times 10^{-12} \frac{n_e}{v_b} \sum_{i=1}^N \frac{Z_i}{(T_e \text{ eV})^{1/2} U_i} \int_{U_i/T_e}^{\infty} \frac{e^{-x}}{x} dx$$

Z: 等価電子数

U: イオン化ポテンシャル(eV)

N: 原子殻数

# 4-1. 実験シーケンス



195ms: P-ECH入射によって電子線密度、反磁性量ともに上昇し始める

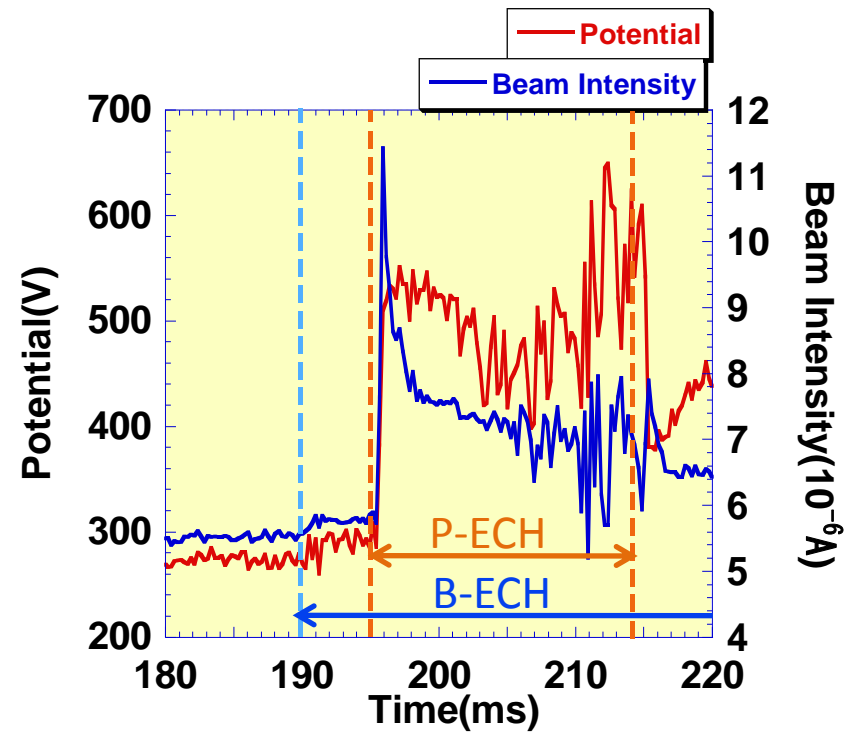
203ms: 電子線密度の微小変動が大きくなり、それに伴い反磁性量も減少



P-ECHは入射され続けていることから、電子線密度、反磁性量が上昇する過程で揺動が成長したと考えられる

## 4-2. GNBPを用いた電位計測

- 195ms: P-ECH入射によってプラグ電位が形成され、磁力線でつながったセントラル部の電位も上昇
- 203ms: 電位および、ビーム電流量に微小変動が発生し始めている



セントラル部 $R=0$ [cm]付近の電位、ビーム電流量の時間変化

高速フーリエ変換(FFT)を用いて電位揺動、密度揺動について周波数解析を行う  
ことで、この揺動の特性について検討した



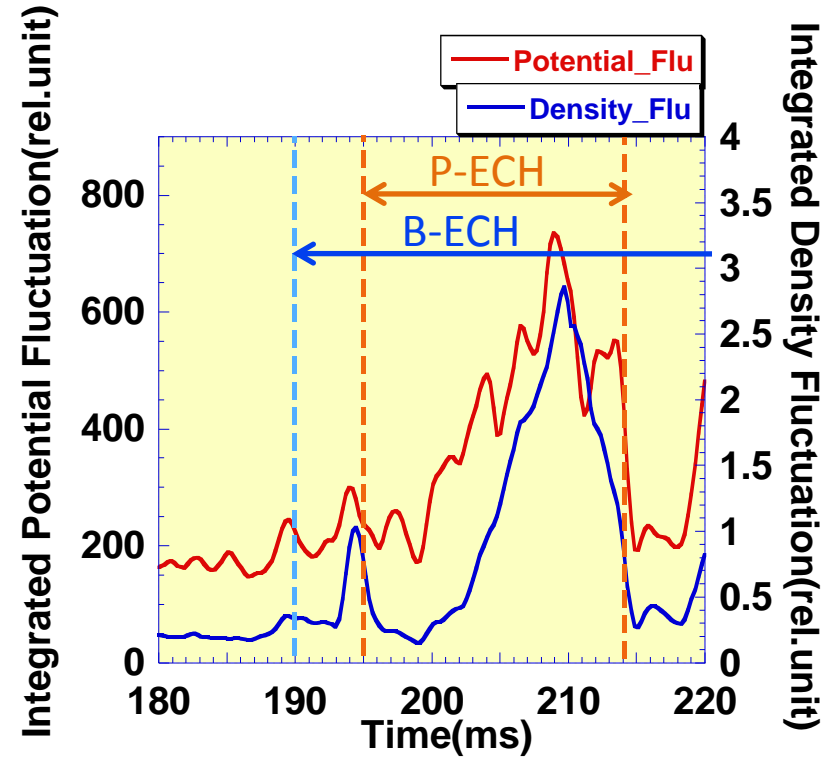
## 4-3. GNBPを用いた揺動計測

### 低周波揺動解析

P/B-ECH時間帯において、低周波に強い揺動が観測されたので、1~20kHzの周波数帯で解析を行った



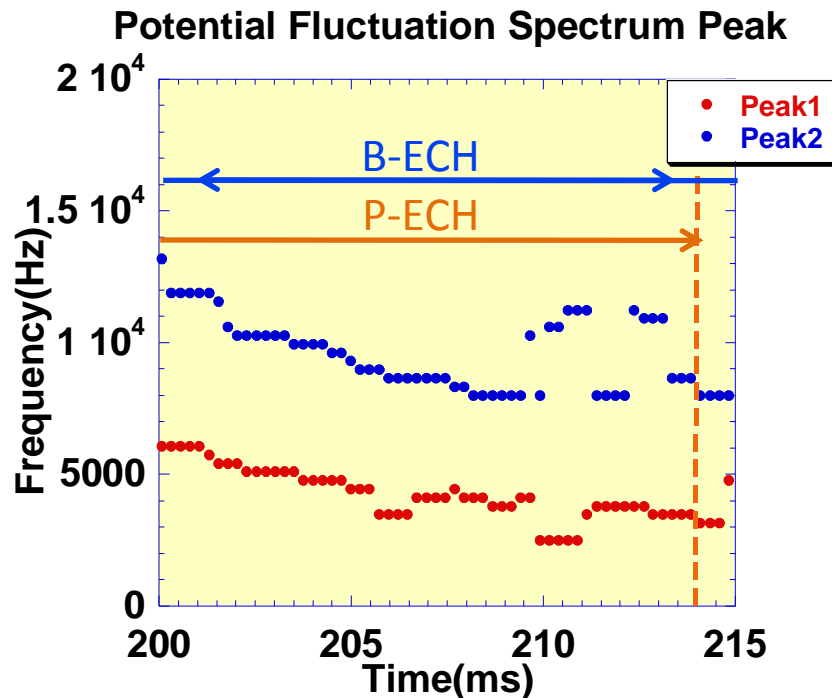
先の考察通り、電子線密度、反磁性量が減少し始める時間帯(203ms~)において、電位揺動、密度揺動の両方が急激に増加した



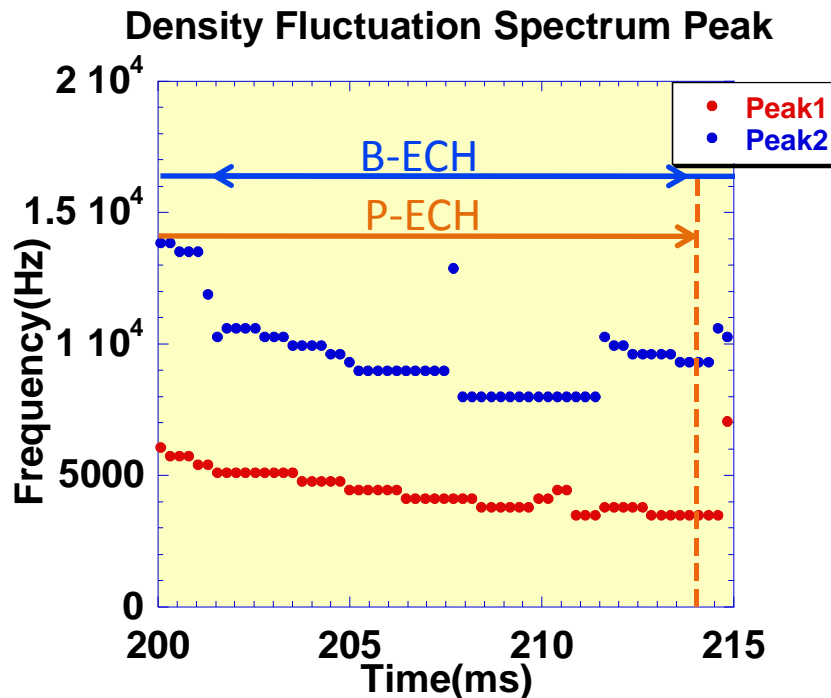
1~20kHzにおける揺動強度の積分値の時間変化

# 4-4. GNBPを用いた揺動計測(2)

## 周波数Peak値の時間変化



電位揺動のPeak値の時間変化



密度揺動のPeak値の時間変化

- 電位・密度揺動に同様な時間変化をする揺動
- Peak周波数は時間とともに減少
- Peak2の周波数はPeak1の周波数の約2倍

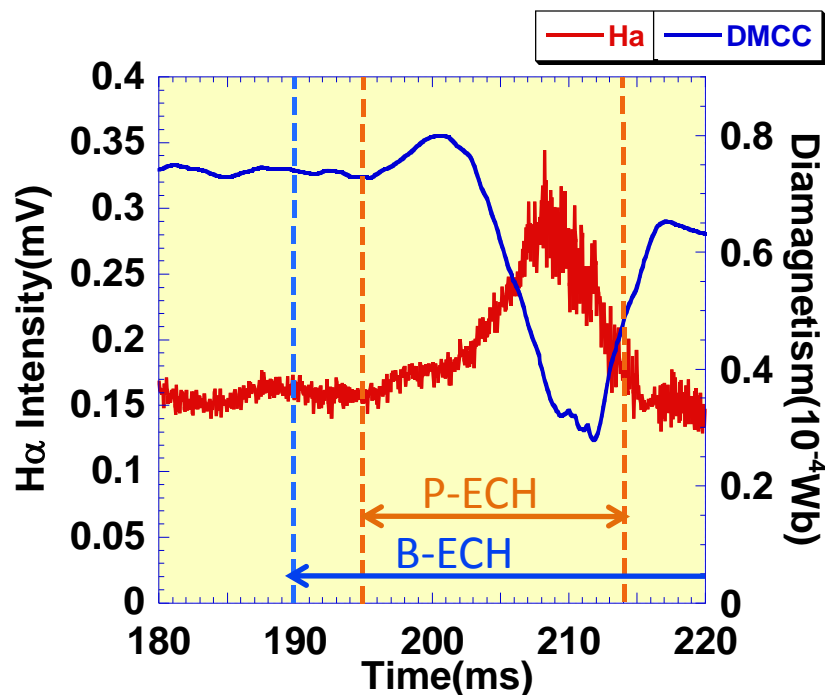
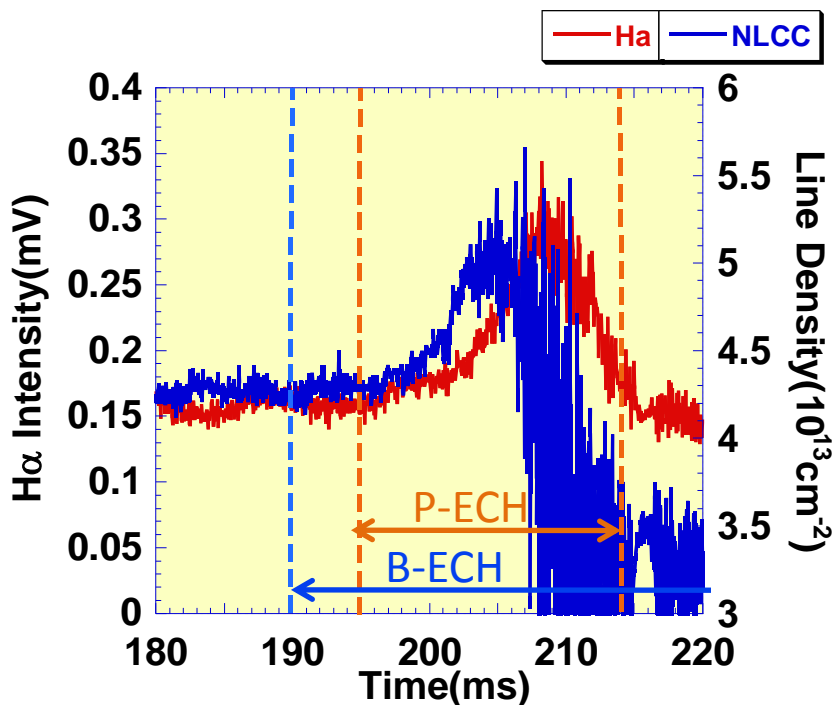


この2つの揺動は同じ揺動で、Peak2はPeak1の高調波と考えられる

# 4-5. H $\alpha$ 検出器を用いた計測

## H $\alpha$ 検出器

H $\alpha$ 線の発光強度は電子密度、電子温度、中性粒子密度に起因している。



電子線密度、反磁性量が減少し始める時間帯(203ms~)において、H $\alpha$ 線発光強度が増加している



反磁性量が減少していることから、この時間帯においては中性粒子密度が増加していると考えられる

# 5-1. まとめ

P/B-ECH時間帯において、電子線密度、反磁性量がある程度上昇したのちに、減少するシーケンスについて考察を行った。

## GNBPを用いた計測

➤GNBPで測定した電位および、ビーム電流量に微小変動が観測された



FFTを用いた周波数解析

電子線密度、反磁性量が減少し始める時間帯から揺動強度が増加しており、このとき、5kHzと10kHz付近にコヒーレントな揺動が表れていた。この2つのPeakは、時間とともに減少していた。また、周波数が2倍で、時間変化が同じなので、この2つは同じ揺動であると考えられる。

## H $\alpha$ 検出器を用いた計測

電子線密度、反磁性量が減少し始める時間帯で、H $\alpha$ 線の発光強度が増加しているため、中性粒子密度が増加したと考えられる

## 5-2. まとめ

### 静電プローブを用いた計測

同様な実験シーケンスにおいて

- ▶ 磁力線方向に波数を持たない
- ▶ 方位角方向において、 $\pi/4$ ラジアンで位相差が約1.7ラジアン生じているので  $m=-2$ であることが分かった



以上の特徴から今回ECH時間帯に観測された低周波の揺動は フルート不安定性(交換不安定性)に起因することが分かった

# 6. 今後の課題

## ✚ 今後の課題

➤この揺動の発生原因の特定、および抑制に向けて



高速カメラや静電プローブなどとも比較することで、揺動の発生原因および、成長過程を特定し、最終的には揺動を抑制し電子線密度、反磁性量が上昇し続けるようなショットを目指していきたいと考えている。

# 7-1. GNBПの特徴

## GNBPの特徴

- ▶ セシウム (Cs) スパッタリング型の金負イオン源
  - ⇒ スパッタリングイールドが大きい
- ▶ 1次ビーム ( $Au^0$ ) から2次ビーム ( $Au^+$ ) へのイオン化断面積が大きい
- ▶ 負イオン ( $Au^+$ ) から中性粒子 ( $Au^0$ ) に変わる中性化効率が高い
- ▶ 安定同位体が存在しない ( $^{197}Au$ : ~100%)
- ▶ 中性粒子ビームを用いるので1次ビームへの漏えい磁場の影響が少ない



電位測定においては同位体の存在や漏えい磁場の影響が誤差の原因となるので、GNBPを使うと高いS/N比を得られる

## 7-2. おまけ (GNBPの測定点補正)

### イオン化点補正

GNBPではGAMMA10内の磁場と分析器スリットの位置から計測点であるイオン化点が求まるが、プラズマ電位の上昇とともに、ビームライン上手前側でイオン化点がずれることが原理的に分かっている。



径方向位置、電位の2つを変数としたイオン化点補正式は以下のようなになる

$$x[m] = \frac{25.062 \times R[m] + 0.00081499 \times \phi[V]}{25.062}$$

$$y[m] = \frac{25.062 \times R[m] - 0.55 - 0.01696 \times \phi[V]}{474.06}$$

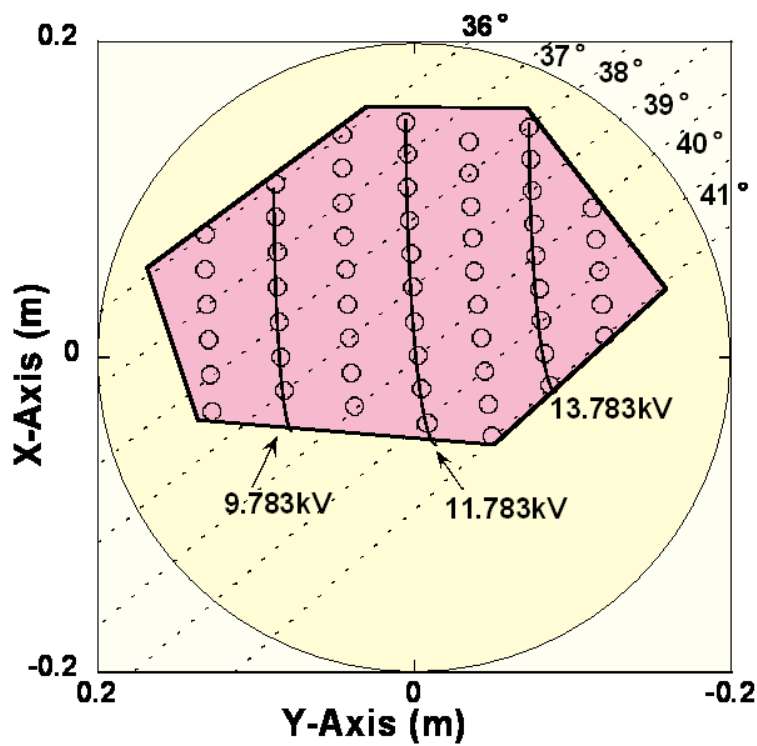
プラズマ電位200Vに対して約1cm手前にずれることになる



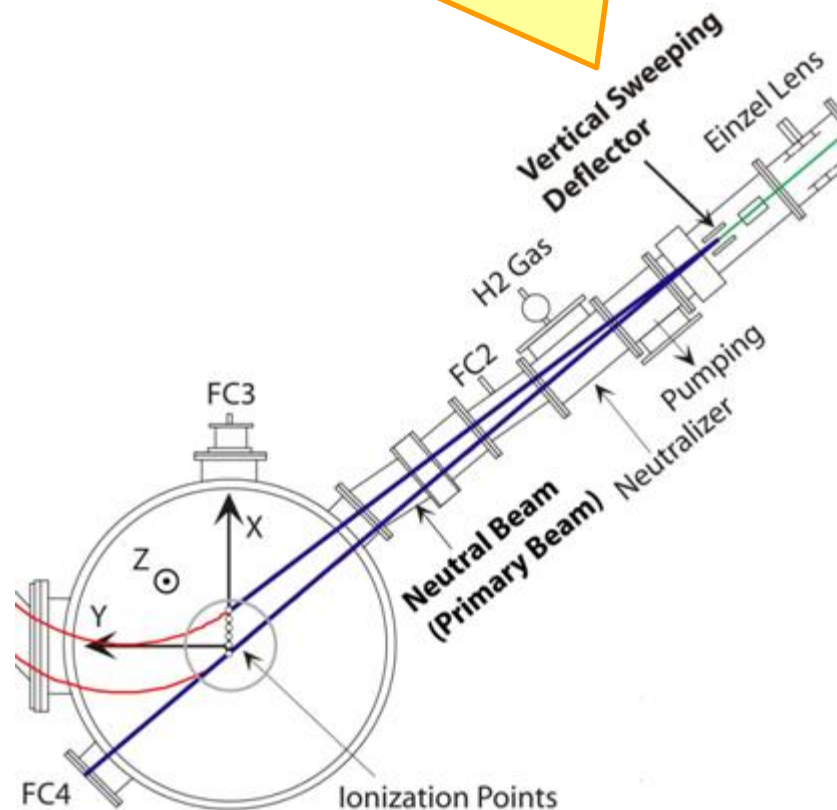
# 7-3. おまけ (GNBPの測定範囲)

## GNBPの測定範囲

空間分解能: (5mm, 5mm, 10mm)



平行平板電極に電圧を印加することでビームの軌道を調整できる



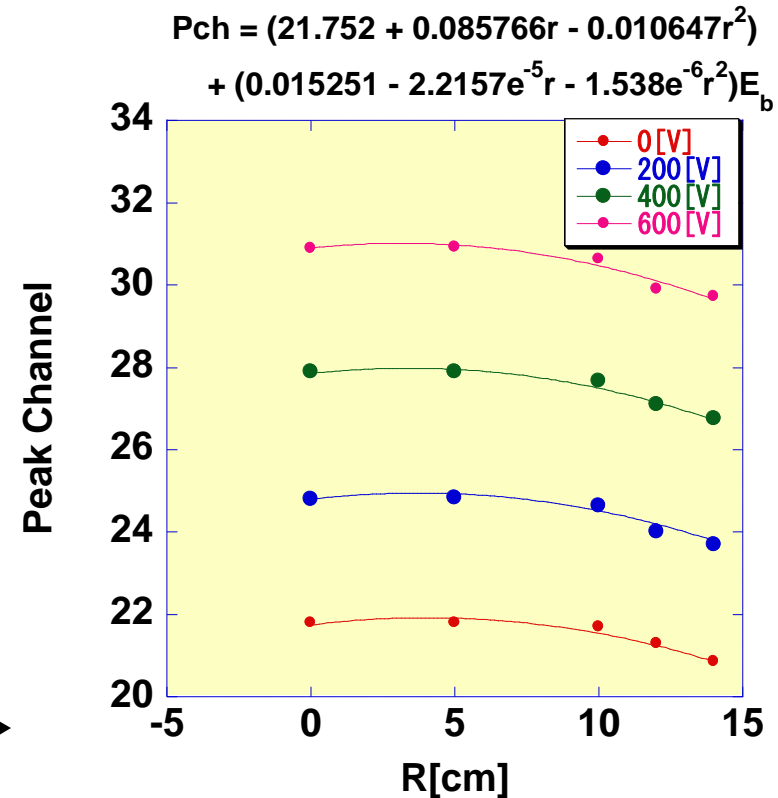
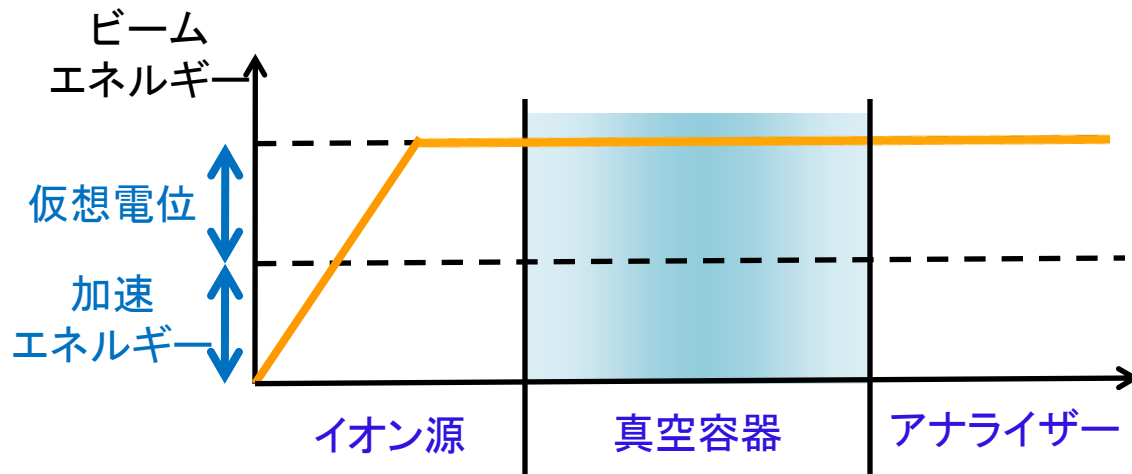
# 7-3. おまけ (GNBPの校正実験)

## 校正実験

校正実験は、セントラル部の排気を停止し、真空度を劣化 ( $10^{-6} \rightarrow 10^{-4}$  Pa) させ、真空容器内に残留ガスを充満させる



磁場コイルを通电した状態で、ビームを通常の加速電位に加え、プラズマ中で加速されるべき仮想電位を印加したビームを入射する。ビームは中性粒子と衝突し、イオン化され、そのビームはエネルギーを変化せずに検出器に入る



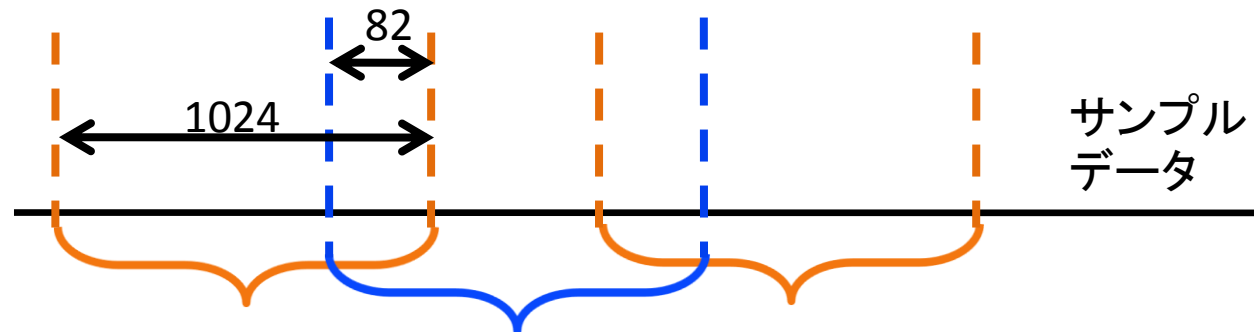
## 7-3. おまけ(解析の各種設定)

### GNBPの取り込み、平均化パラメータ

- ▶ A/Dコンバータのサンプリング周波数: 333kHz
- ▶ 電位、ビーム電流量平均化パラメータ: 0.246ms間

### FFTを行った際の各パラメータ

- ▶ 解析可能周波数: ~約166[kHz]
- ▶ 窓関数: ハニング窓

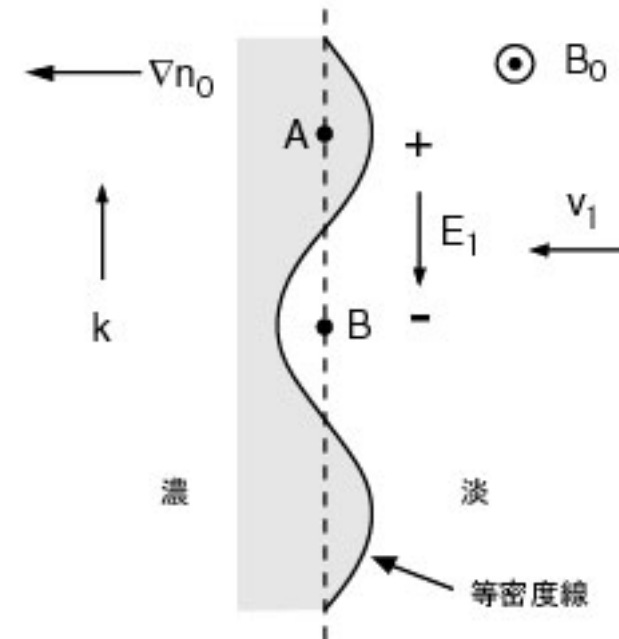


## 7-4. おまけ(ドリフト波不安定性1)

### ドリフト波不安定性発生メカニズム

ドリフト波不安定性は密度勾配、温度勾配(圧力勾配)によって誘起される不安定性のことを指す。これは、イオンの慣性のために、電子とイオンの間に荷電分離が起こることに起因している。

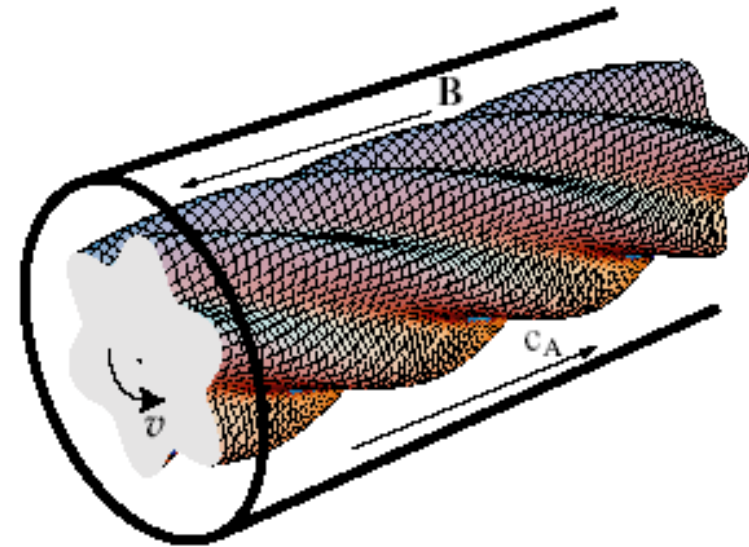
荷電分離が生じると、電子が電荷の中性を保つために磁力線に沿って移動し、Boltzmann分布を形成しようとするが、粒子同士の衝突、つまり抵抗によってその運動が妨げられると荷電分離が起こり、それによって生じる電場でドリフトが駆動され、擾乱を成長させることになる。



# 7-5. おまけ(ドリフト波不安定性2)

## ドリフト波不安定性の特徴

- ▶ ドリフト型揺動は圧力勾配(温度勾配、密度勾配)により駆動される
- ▶ ドリフト型揺動は装置全体にわたって観測され、電子の反磁性ドリフトの方向に等しいモード数で回転する
- ▶ ドリフト型揺動は、磁力線方向に有限の波数を持って伝搬する
- ▶ ドリフト型揺動の強度はセントラル部において強く観測される
- ▶ 磁力線方向に対して右回りに回転する



ドリフト波不安定性の概念図

## 7-6. おまけ(フルート不安定性)

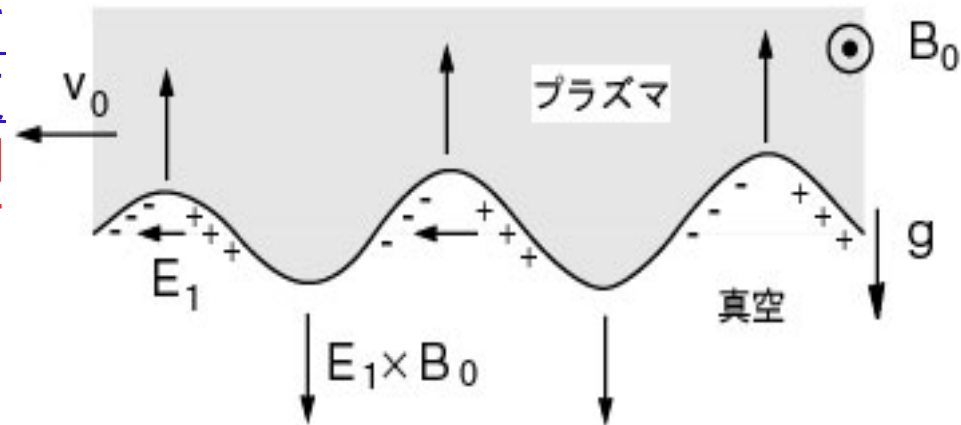
### フルート不安定性発生のメカニズム

無秩序な熱的揺動があって、プラズマ-真空境界面に揺らぎがあったとする。プラズマ中の荷電粒子は流体方程式より

$$v = - \left( \frac{mg}{eB} + \frac{k_B T}{neB} \frac{dn}{dx} \right)$$

のドリフト速度で運動する。このドリフトにより、揺らぎの両側に電荷の誘起し、波の頂から谷に向かうに従って符号を変える電場を発生する。この電場によりEXBドリフトが駆動される。

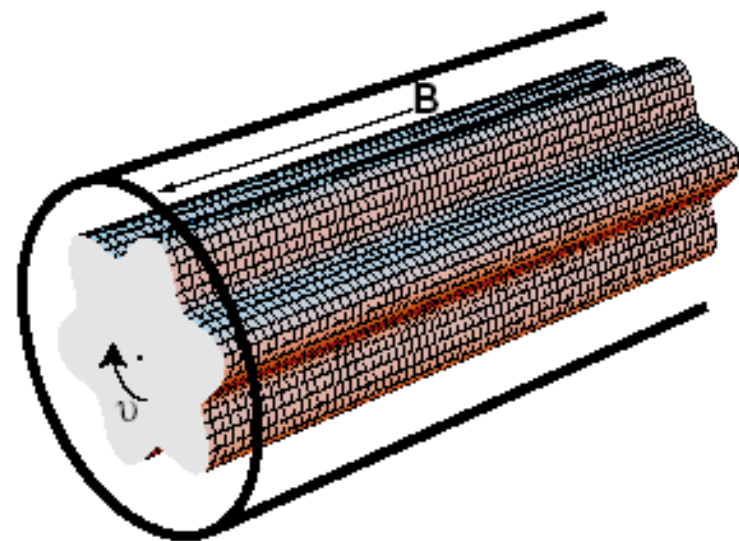
EXBドリフトは常に、面が上に向かって動いた領域では上に、下に動いた領域では下に向いている。よって、**初期の揺らぎはEXBドリフトによって成長する**



## 7-7. おまけ(フルート不安定性)

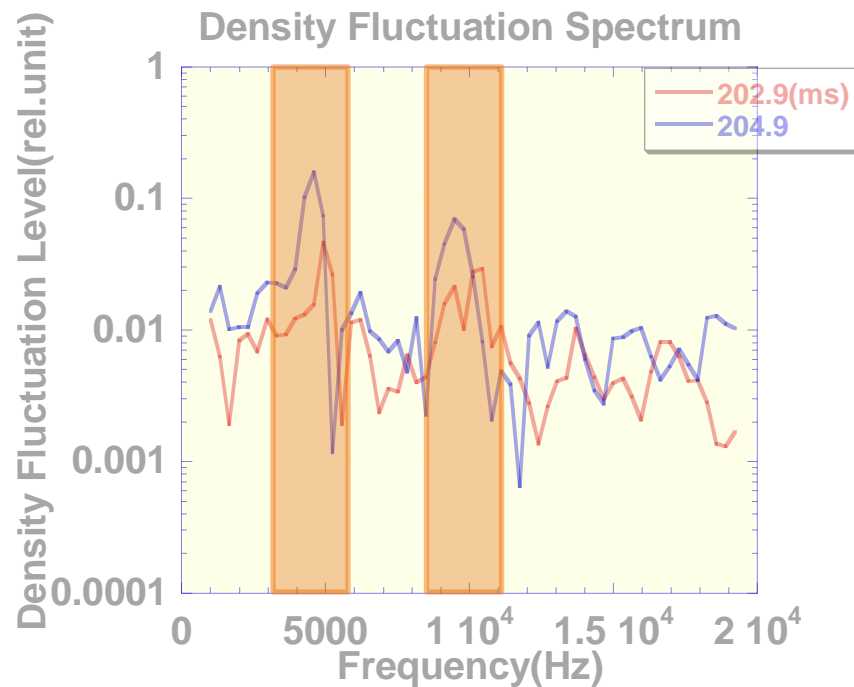
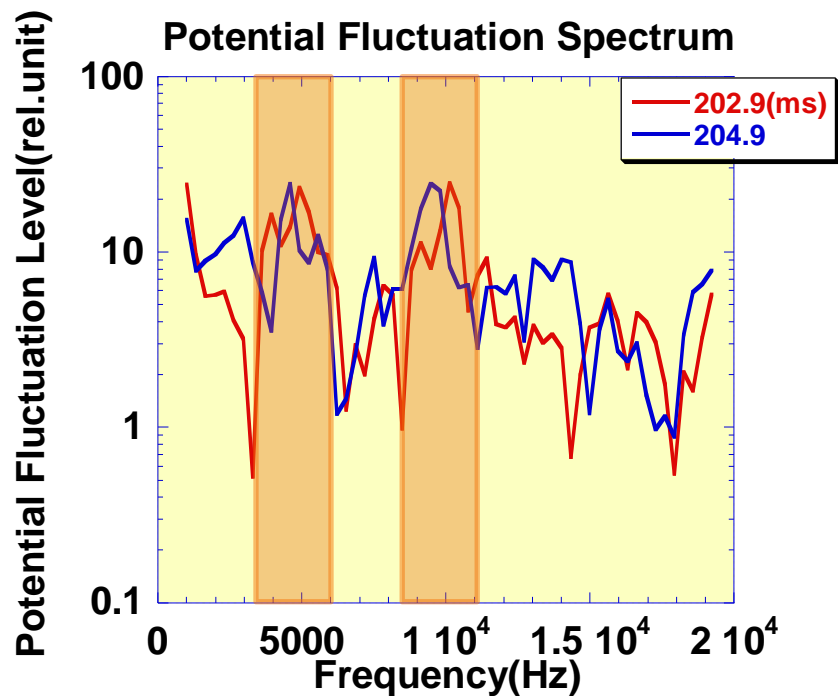
### フルート不安定性の特徴

- ▶ フルード型揺動は、装置全体にわたってEXBドリフトの方向に等しいモード数で回転する
- ▶ フルード型揺動は、磁力線方向に波数を持たない
- ▶ プラズマがMHD的に安定であるときには観測されない



# 7-8. おまけ(スペクトル1)

## 電位・密度揺動スペクトル



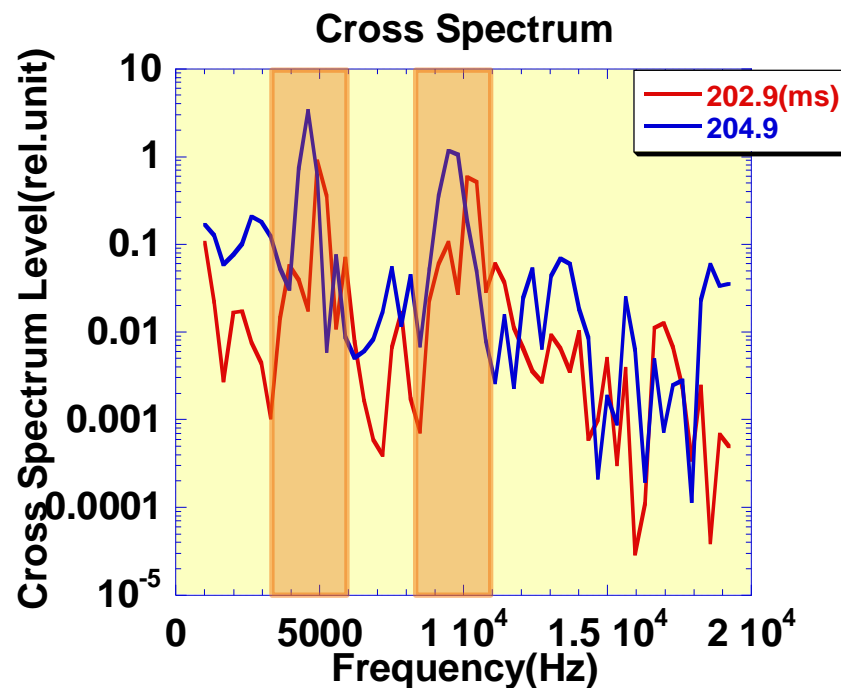
電位揺動の強度はPeak1と2でほとんど同じ大きさなのに対して、密度揺動は約2倍の強度を示していた



# 7-9. おまけ(スペクトル2)

## クロススペクトル

クロススペクトルを見ると、Peak1の揺動強度はPeak2の揺動強度の約2倍ある



# 7-10. おまけ(ドリフト速度との比較)

## ドリフト速度

EXBドリフトと反磁性ドリフトは以下の式で与えられる

$$v_{E \times B} = \frac{E}{B} \quad v_d = -\frac{k_B T_e}{eB} \frac{n'}{n}$$

プラズマのパラメータを以下のように設定して計算すると

$$\begin{aligned} r &= 2.49[\text{cm}] & T_e &= 100[\text{eV}] \\ E &= 4[\text{V/cm}] & n'/n &= 10[\text{cm}] \\ B &= 0.4[\text{T}] \end{aligned}$$



$$v_{E \times B} = 1.0 \times 10^3 [\text{m/s}] \quad v_d = 2.5 \times 10^3 [\text{m/s}]$$

# 7-11. おまけ(各種揺動との比較)

## ドリフト型揺動の場合

ドリフト型揺動の場合には、**ドップラー効果**を考慮しなくてはならないので、この場合の速度は、EXBドリフトと反磁性ドリフトの速度の差となる

$$f = \frac{v}{2\pi r}$$

を用いると、今回観測された揺動は5～6kHzなので、**揺動の発生点は4.8cm**付近と求めることができる

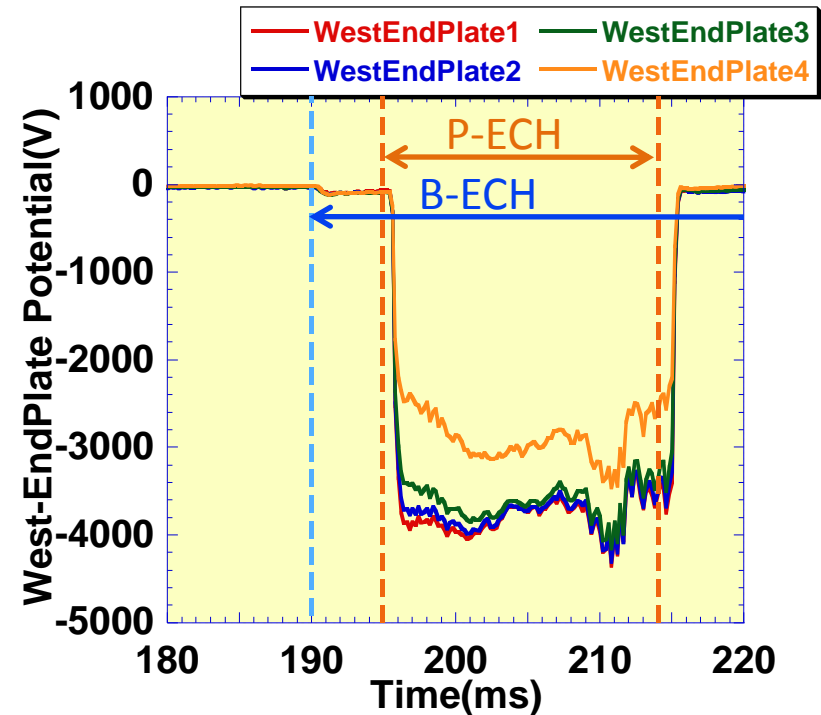
## フルート型揺動の場合

フルート型揺動の場合には、EXBドリフトの速度のみが周波数に影響を与えるので測定点におけるフルート型揺動の**周波数は6.4kHz**と求められた

# 7-12. おまけ(エンドプレート電位との比較1)

## ■ エンドプレート電位

GAMMA10の両端にはステンレス版が軸方向に垂直に設置されていて、各プレートはそれぞれ抵抗を介して接地されている。よって、その抵抗にかかる電圧を測定することで、軸方向に流出して生じた荷電粒子を見積もることができる。



Westエンドプレート時間変化

190ms: B-ECH入射によってエンド部に電子が流出してきた

203ms: P-ECH入射によってプラグ電位が形成され電子がエンド部に流出してきた

#1~4の全てが同じ時間変化をしていた

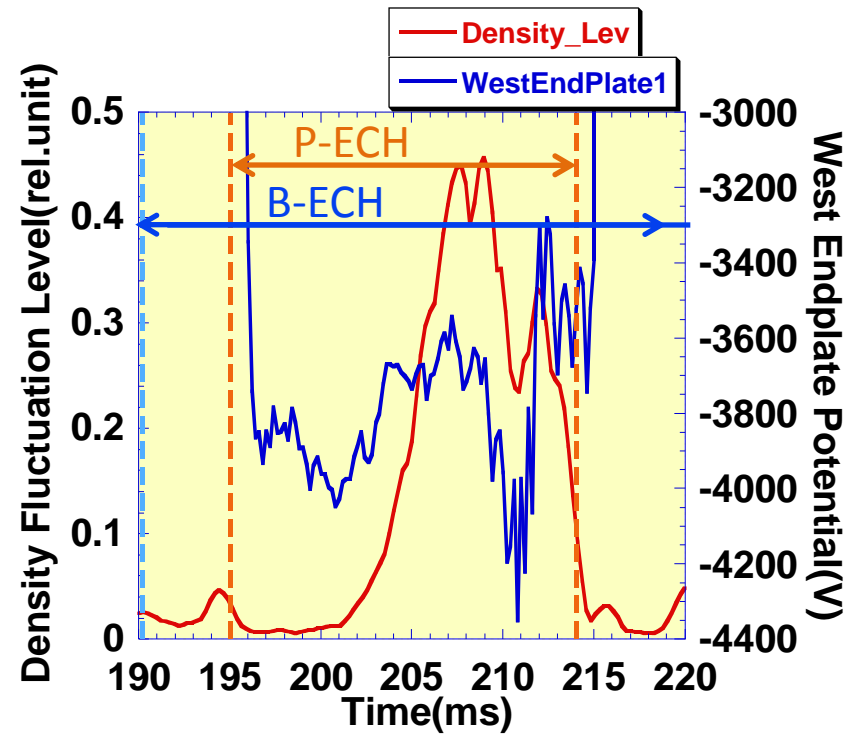
# 7-13. おまけ(エンドプレート電位との比較2)

## ✚ エンドプレート電位と密度揺動強度の比較

203ms: 密度揺動強度が増加  
エンドプレート電位は減少している  
ので、流れ込む電子の量が増えている



P-ECHは一定のパワーで印加しているので、それ以外の要因で軸方向に電子が損失して、電子密度プロファイルが緩和されていると考えられた。



エンドプレート電位と密度揺動強度の時間変化

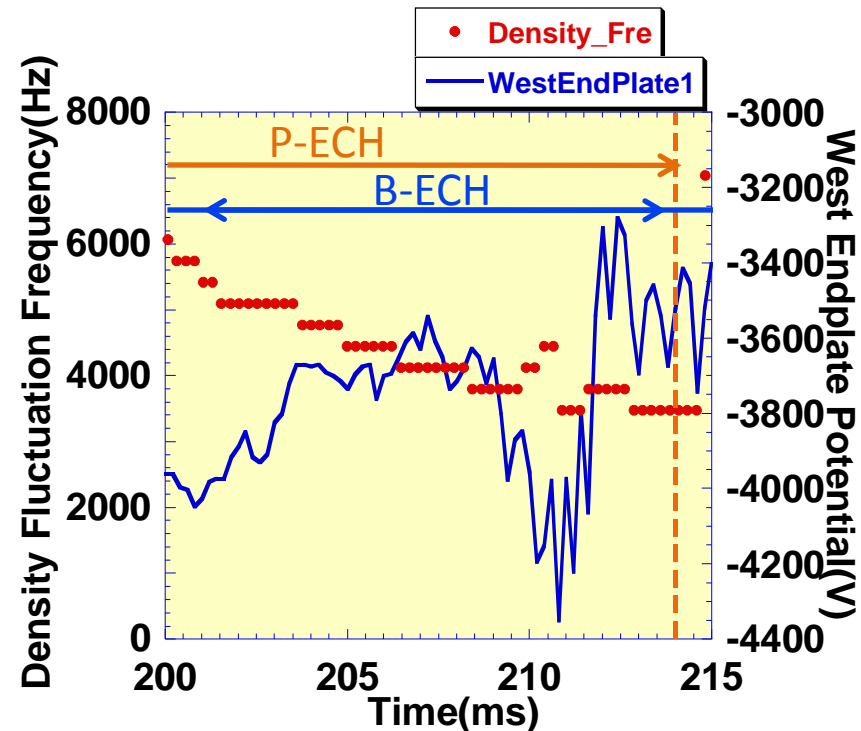
# 7-14. おまけ(エンドプレート電位との比較3)

## ✚ エンドプレート電位と密度揺動のPeak周波数の比較

203ms: 密度揺動のPeakが減少  
エンドプレート電位も減少

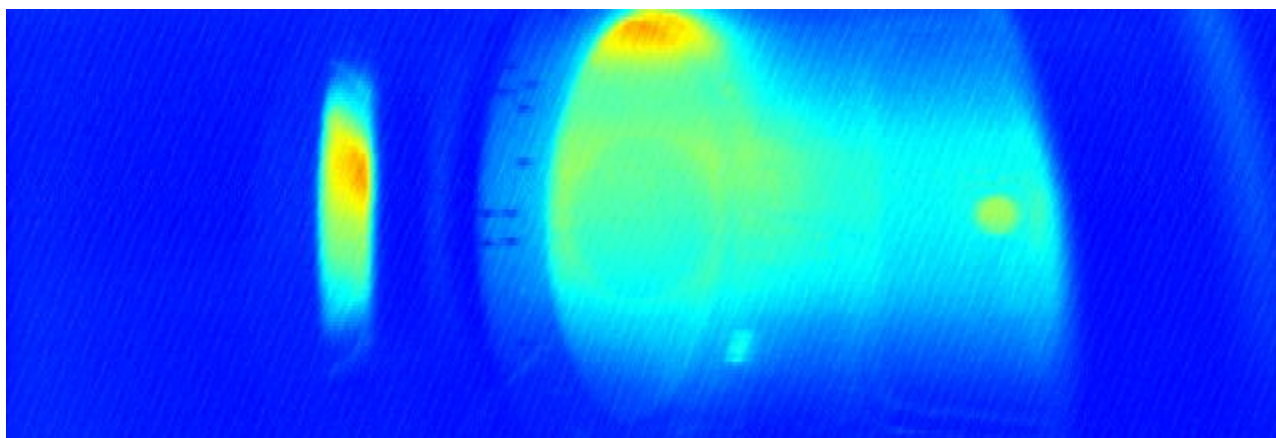


この揺動は電子密度プロファイルに  
起因した揺動である

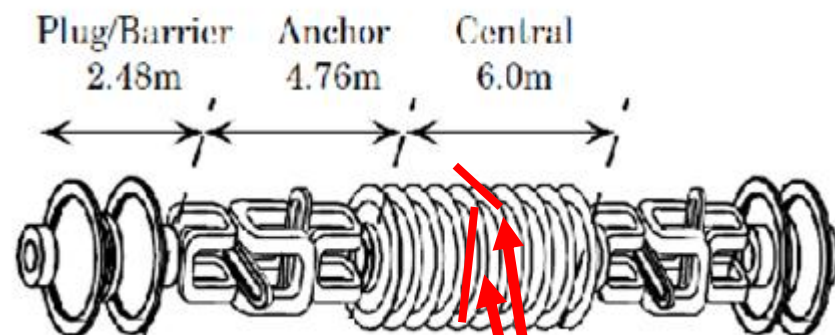
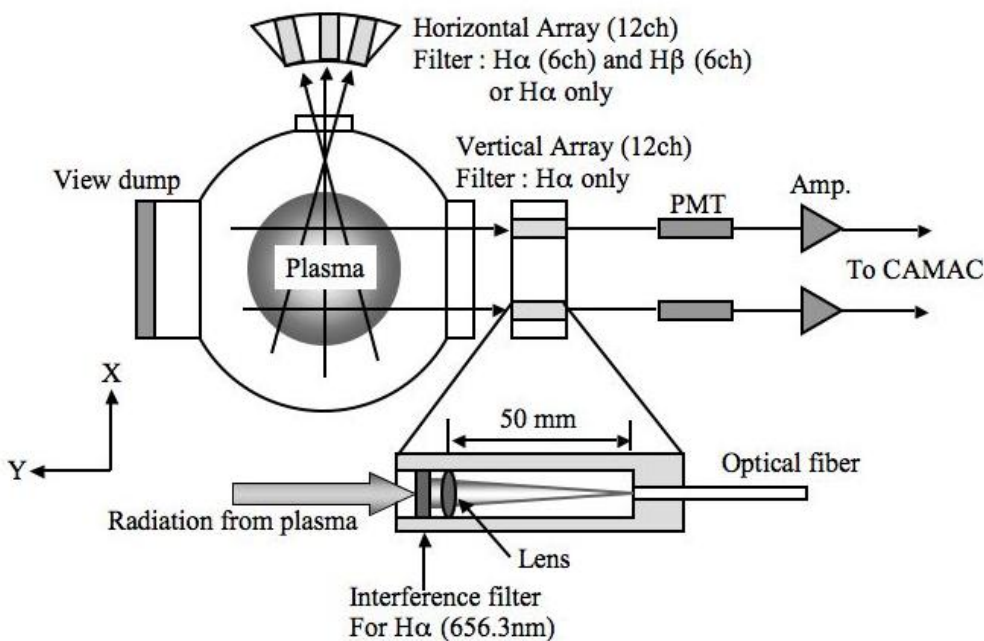


密度揺動のPeak周波数と  
エンドプレート電位の時間変化

## 7-15. おまけ(中速カメラとの比較3)



# 7-15. おまけ(H $\alpha$ 検出器)



多チャンネル検出器

- GAMMA10のプラズマに対し2次元的にH $\alpha$ 線の放射輝度を測定
- プラズマに影響を及ぼすことなく、発光強度のみから測定可能
- 干渉フィルターでH $\alpha$ 線(波長656.3nm)のみ集光