

# GAMMA10における 固体水素ペレット入射時の ペレット溶発

筑波大学プラズマ研究センター  
米田 良隆

## Outline

1. 研究の背景と目的
2. 実験装置の概要
3. ペレット入射結果
4. 考察および今後の課題

# 1. 研究の背景と目的

## 研究の背景

(定常的な熱核融合の実現)  
高温高密度プラズマ維持  
のため粒子補給が必要

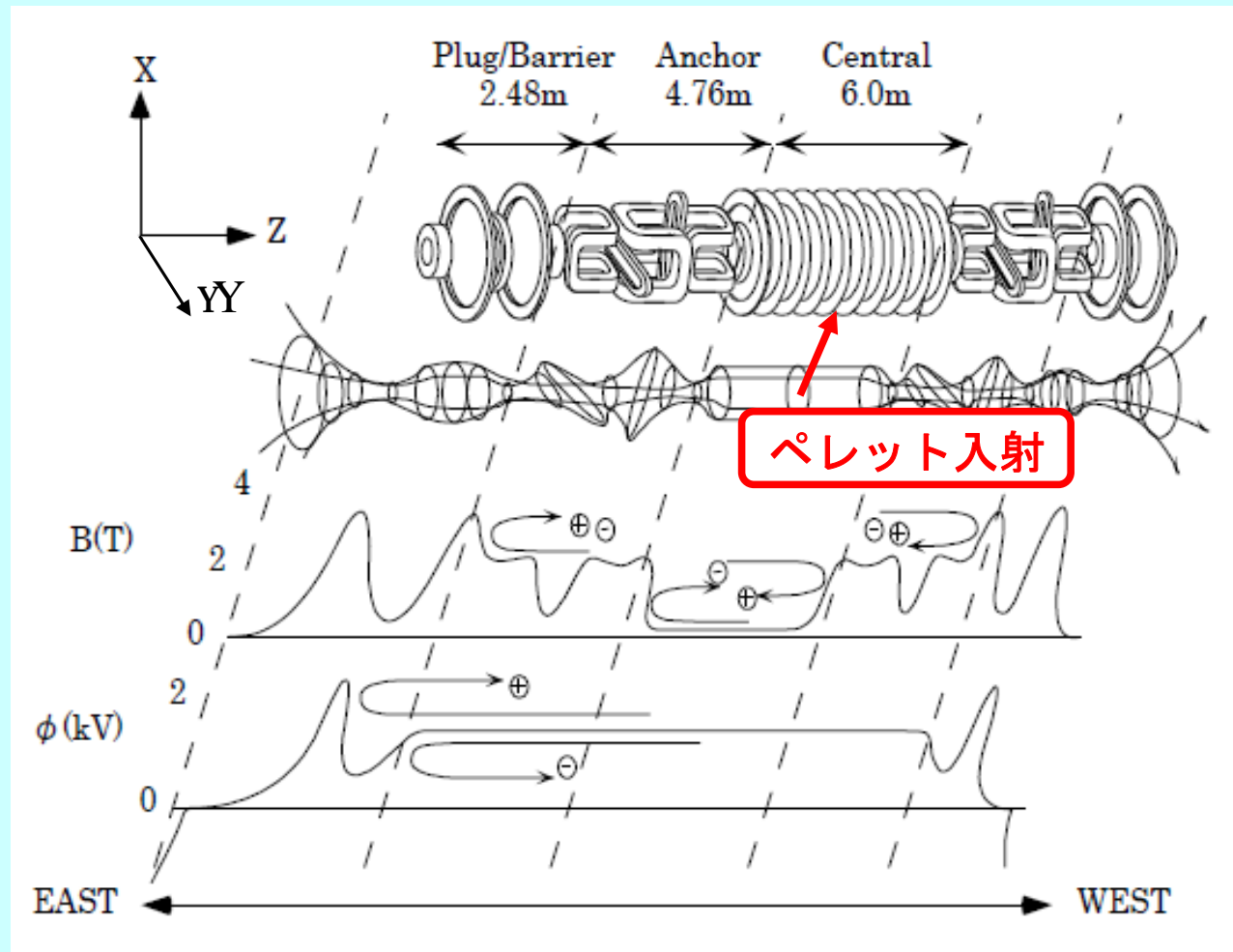


ペレットでの粒子補給に伴う  
プラズマへの影響は？

## 本研究の目的

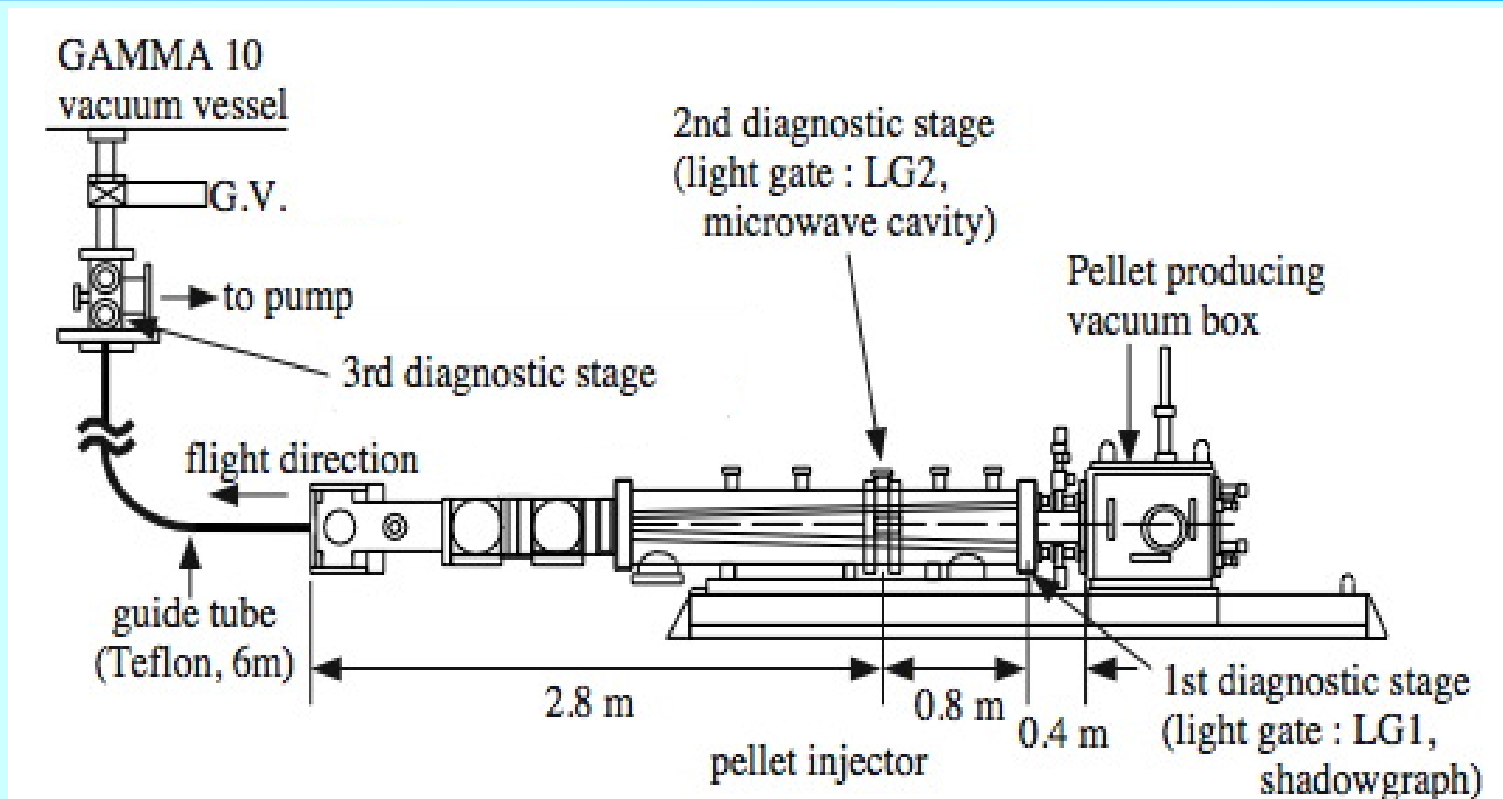
- ・ ペレット入射に伴う、**高密度領域の電位閉じ込め解析**
- ・ **開放端系でのペレット入射に伴う、ペレット溶発過程**  
**および粒子、エネルギーの伝搬解析**
- ・ **安定した粒子補給のための、ペレット入射装置の制御**

## 2. タンデムミラー装置 GAMMA10



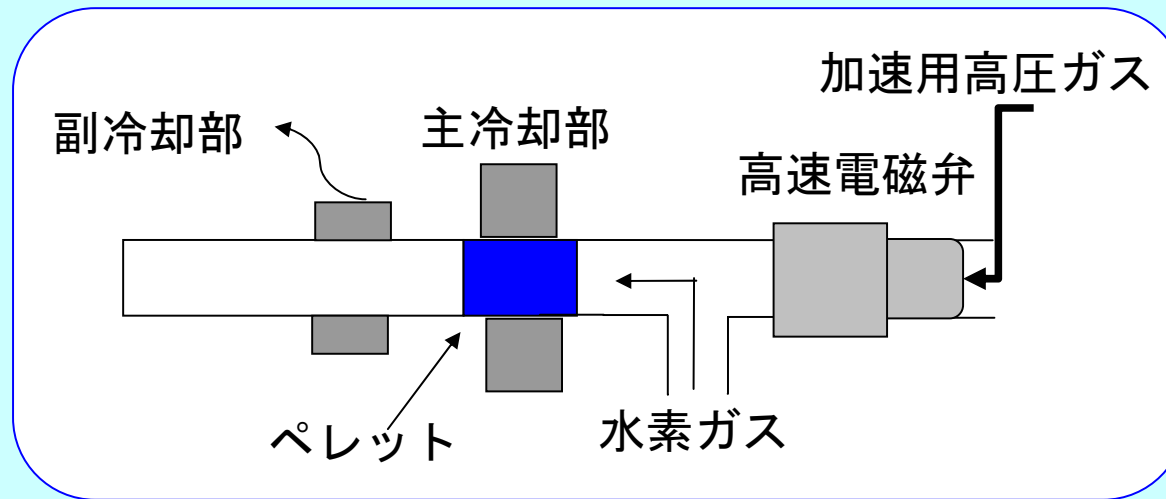
GAMMA10下方から垂直方向へペレット入射

## 2.ペレット入射実験装置



- ・パイプガンタイプ
- ・8本のサイズの異なるバレルを持つ  
(本実験で使用したバレルは内径0.79mm)
- ・射出直後に第一、第二計測部を通過
- ・本体まで6.5mのガイドチューブで繋がる
- ・第三計測部を通過後、プラズマへ入射

## 2.ペレット入射実験装置



- ・ 液体ヘリウムを用い、主冷却部を6~8Kに冷却  
主冷却部の熱伝導により、水素ガスを固化させる
- ・ 副冷却部の温度を調節してペレットの長さを制御可能
- ・ ペレットの加速は常温の高圧ガス(水素)を用いる
- ・ 高圧ガスの射出は高速電磁弁で行う

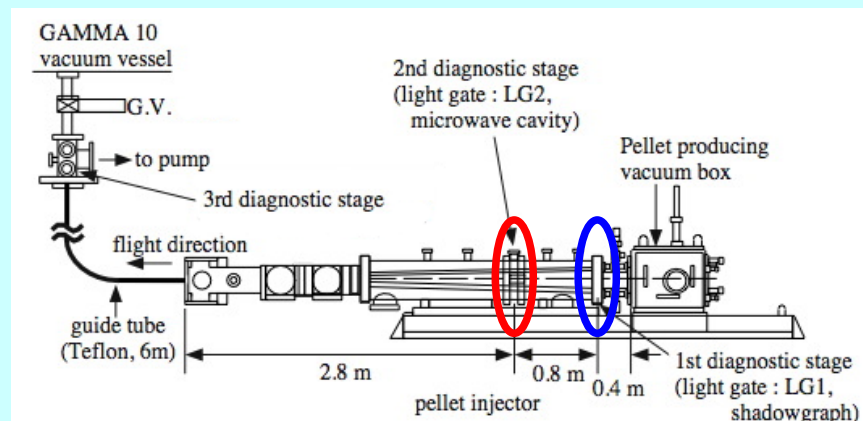
## 2.ペレット入射実験装置

### ライトゲートシステム(以下、LGと略す)

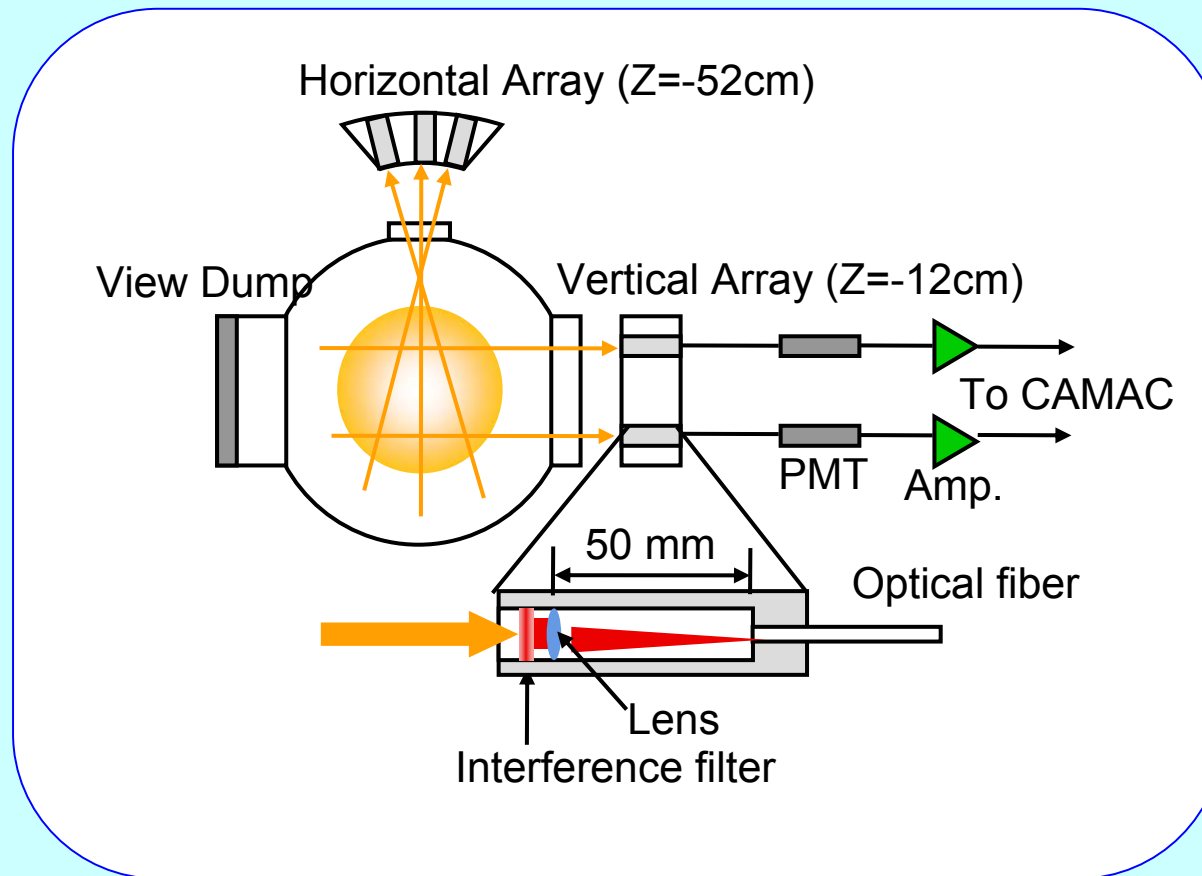
- ・ 2本の対向して設置された光ファイバー(片方から光を当てる)
- ・ ペレットが通過し、光が遮られることを検出
- ・ 2つのLG間の距離と通過時間から、速度を算出できる
- ・ ペレット形状撮影(シャドウグラフ)のトリガとしても用いる
- ・ 第一計測部にLG1、第二計測部にLG2、第三計測部にLG3, LG4を設置している

### シャドウグラフ

- ・ CCDカメラによるペレット形状撮影
- ・ 照明に色素レーザーを用いる
- ・ 第一計測部および第三計測部に設置している

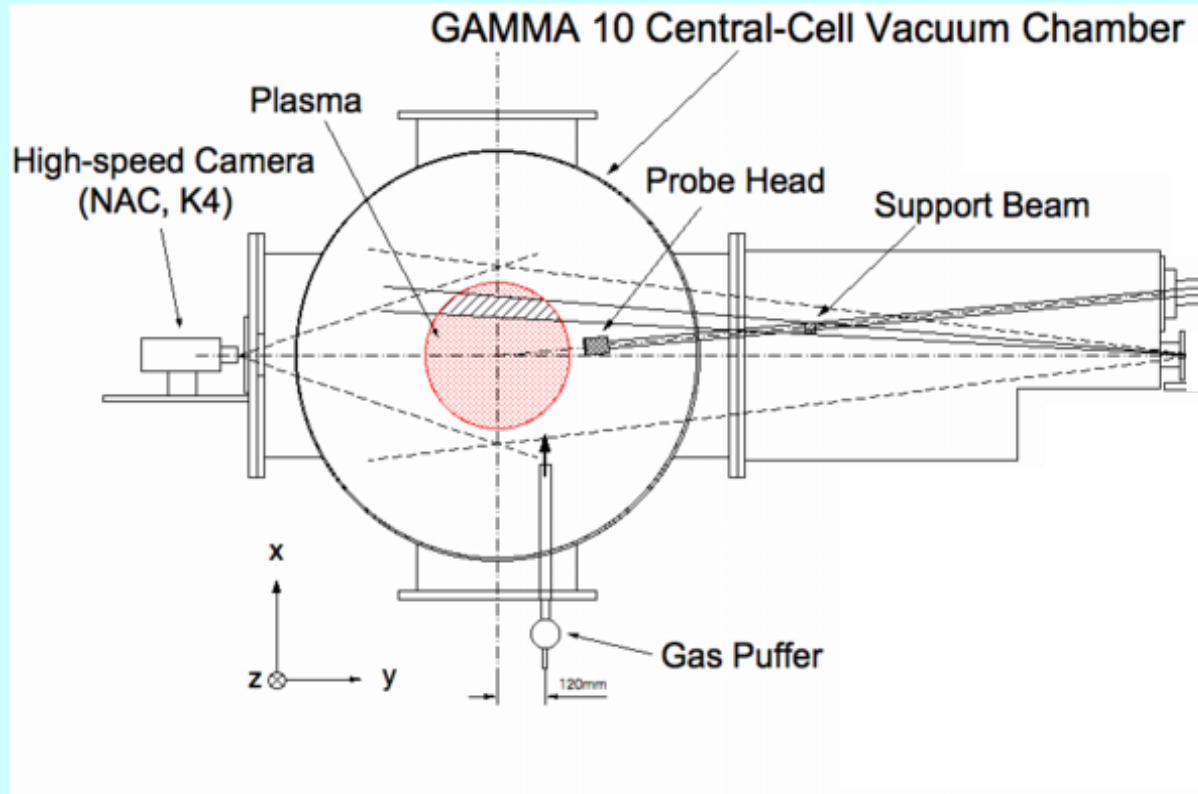


## 2.H $\alpha$ 線検出器(縦横各12ch)



- ・ GAMMA10のXY平面について縦横各12chの検出器を設置
- ・ 干渉フィルタによりH $\alpha$ 線を透過し、レンズで集光する
- ・ 光ファイバーを通し、PMT(光電子増倍管)で電流信号にする
- ・ ピックアップ抵抗で電圧信号へ変換後、アンプで増倍

## 2. 高速カメラ



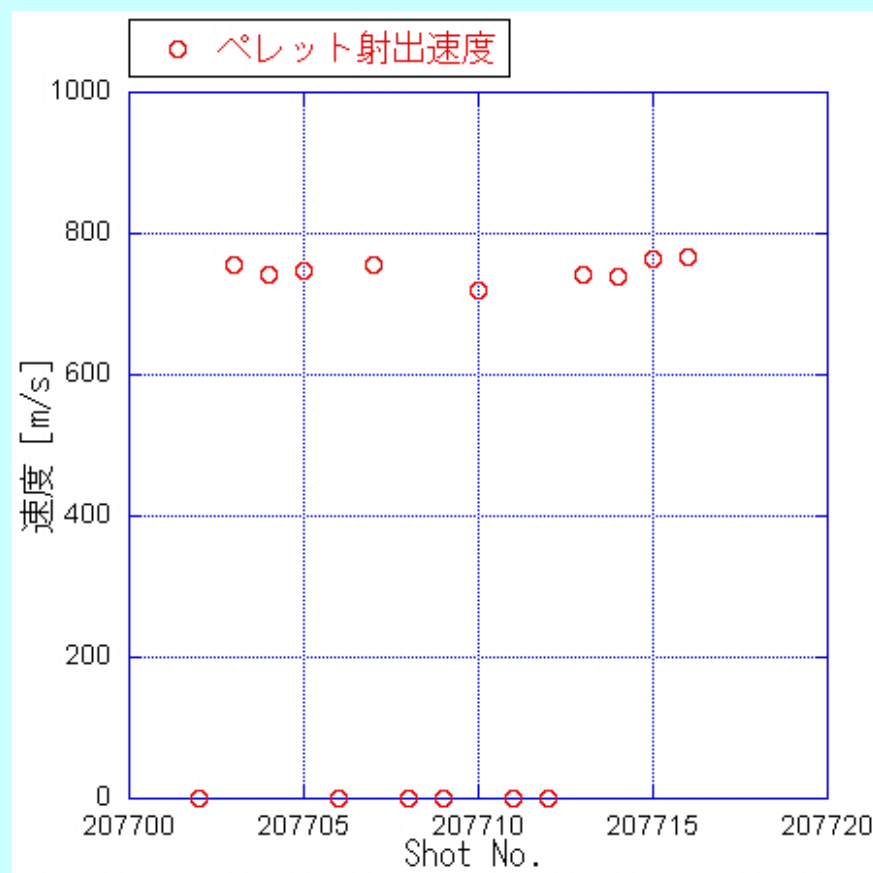
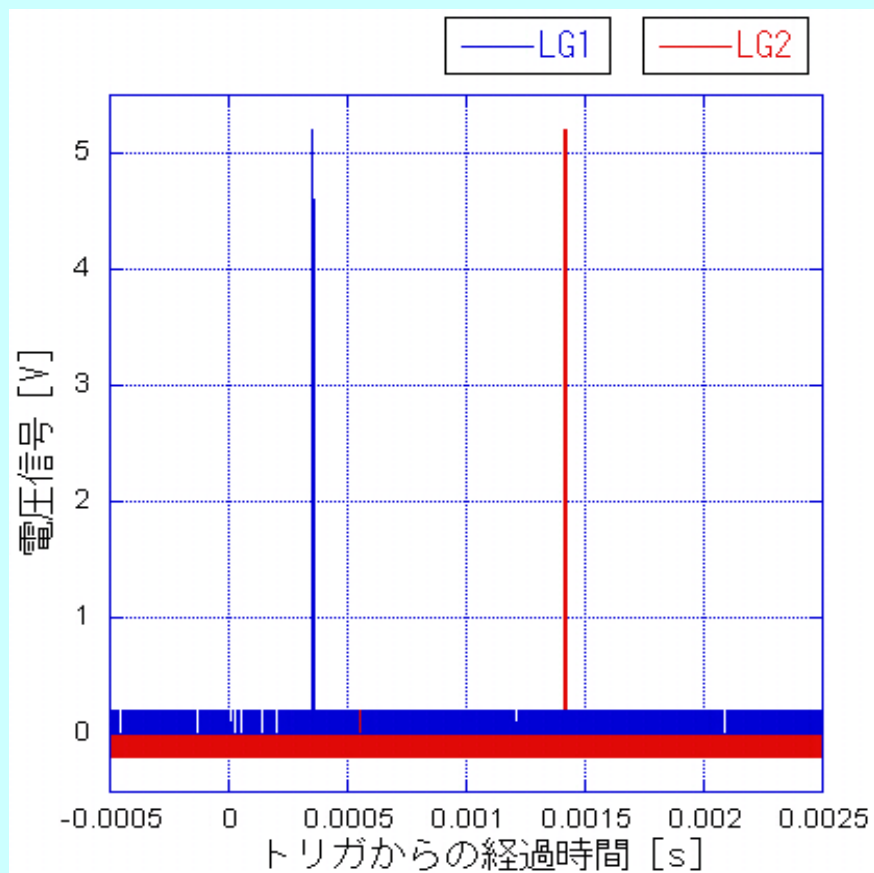
- ・ 最高168,000コマ/秒(48×32 pixel)で撮影可能
- ・ 今回は、40,000fps(192×144 pixel)、60,000fps(160×80 pixel)で撮影
- ・ Z軸方向の位置は、Z=0cm
- ・ 今回の実験では、干渉フィルタ(Center Wavelength 653.21 nm)を使用した

高速カメラを用いた計測は  
広島大学 西野信博 准教授 との双方向共同研究



# 3.ペレット射出結果(速度)

ライトゲートシステム(以下LGと略す)による計測結果



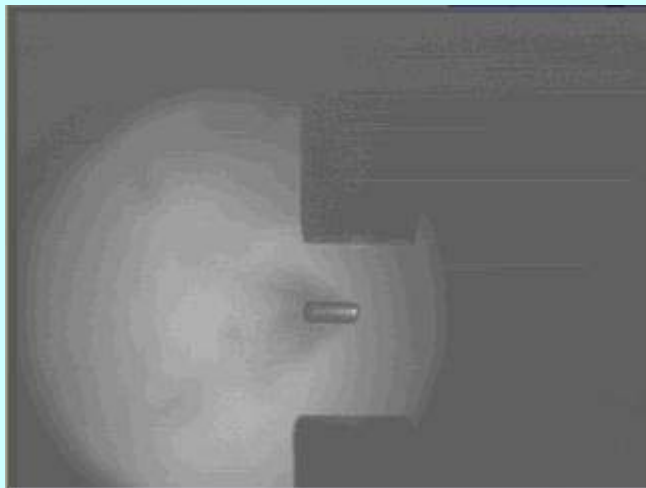
- ・ LG間の距離(0.8[m])と信号検出時間より速度を計測
- ・ 上記(Shot No. 207703)の速度は、755[m/s]となった。

- ・ 他のShotも同一条件で射出したところ射出速度は750[m/s]前後で安定(速度が0[m/s]のところは、一方のLGで検出できなかったもの)

# 3.ペレット射出結果(形状、粒子量)

シャドウグラフのペレット画像から予想される粒子数を算出する

ペレット画像(シャドウグラフ)  
#207703



$\Phi=0.50[\text{mm}]$ 、 $L=1.3[\text{mm}]$

$$n = \rho V = 2.6 \times 10^{28} [\text{m}^{-3}] \times \left[ \frac{0.50}{2} \right]^2 \pi \times 1.3 \times 10^{-9} [\text{m}^3] \\ = 0.66 \times 10^{19} [\text{particles}]$$

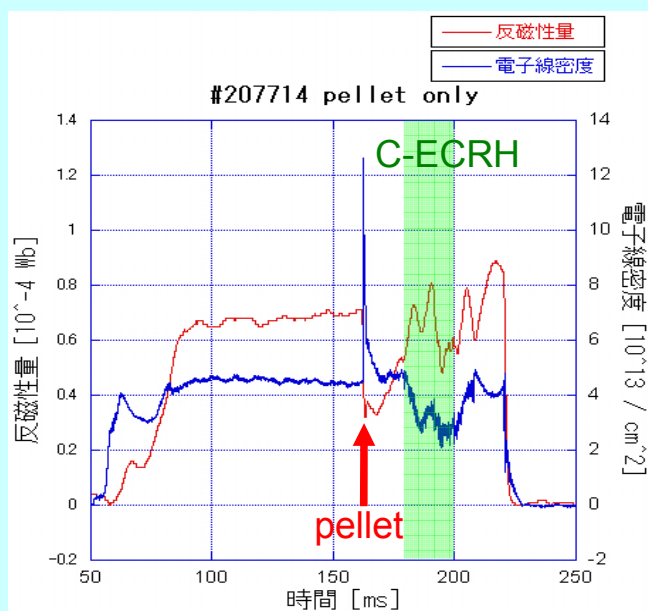
ここから予測される電子線密度上昇値は  
 **$36.67 [10^{13} / \text{cm}^2]$**

他ショットのペレットの大きさは、 $\Phi = 0.50 \sim 0.60 [\text{mm}]$ 、 $L = 1.2 \sim 1.4 [\text{mm}]$

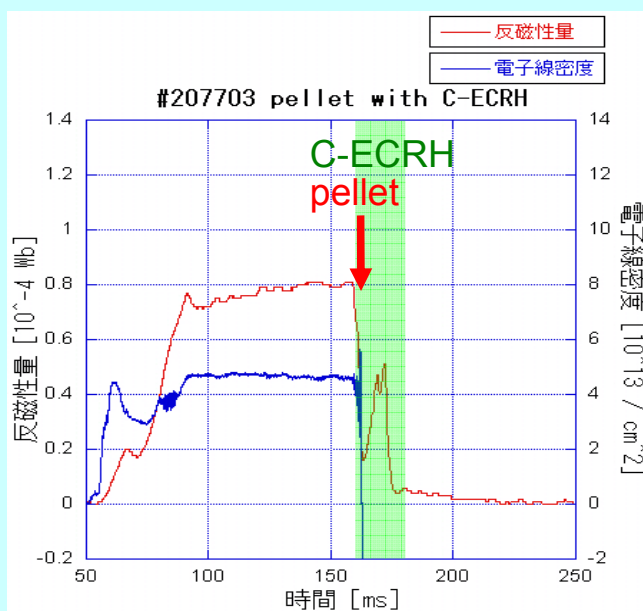
# 3. 電子線密度および反磁性量を比較

電子線密度および反磁性量を比較 ※ ECRH、NBIの前につく「C-」はセントラル部の意

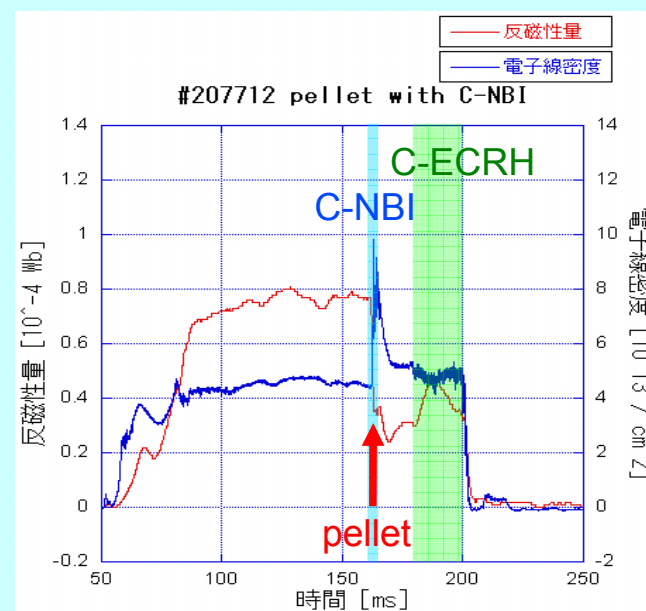
#207714  
(pellet only)



#207703  
(pellet with C-ECRH)



#207712  
(pellet with C-NBI)

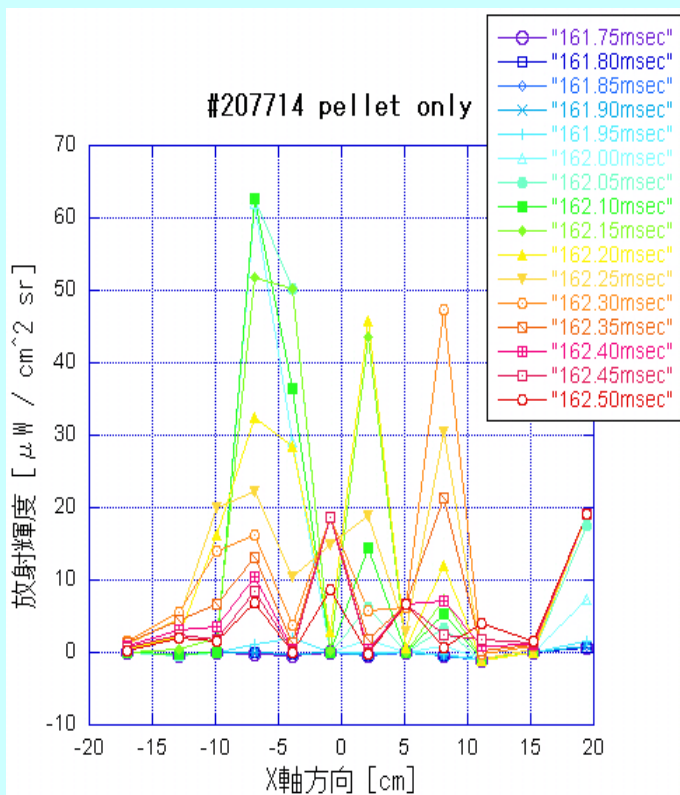


- ・ペレット入射に伴い電子線密度が急上昇
- ・#207703ではC-ECRH印加により反磁性量低下(プラズマが潰れた?)  
そのため、ペレット入射での電子線密度上昇が少ない

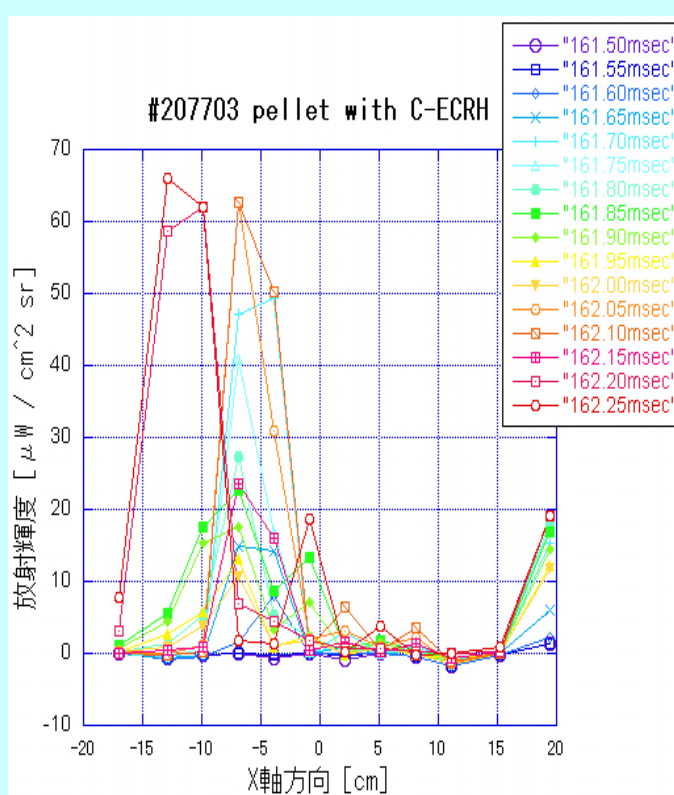
# 3.ペレット進入長(H $\alpha$ 線検出器)

H $\alpha$ 線放射輝度を比較 (NDフィルタ使用、輝度1/100)

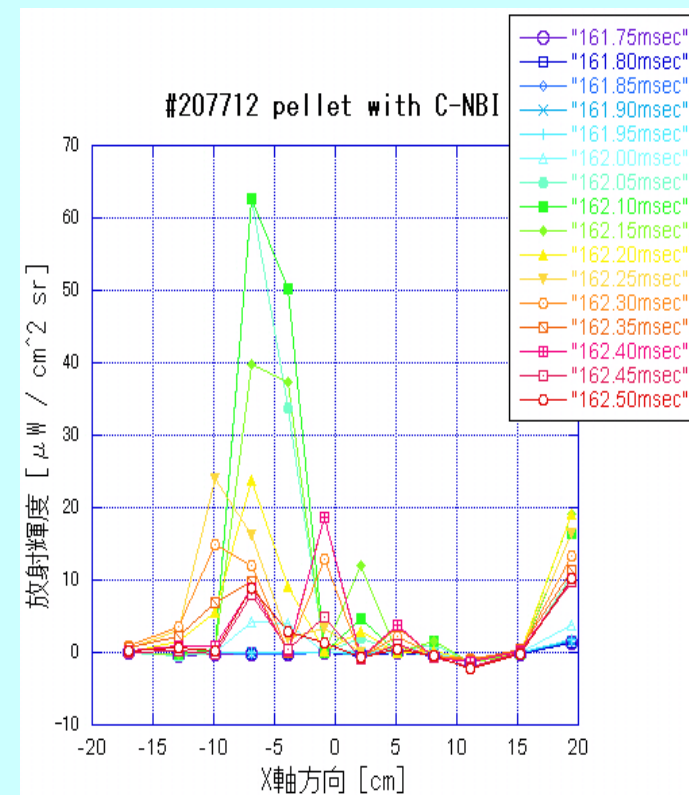
#207714  
(pellet only)



#207703  
(pellet with C-ECRH)



#207712  
(pellet with C-NBI)

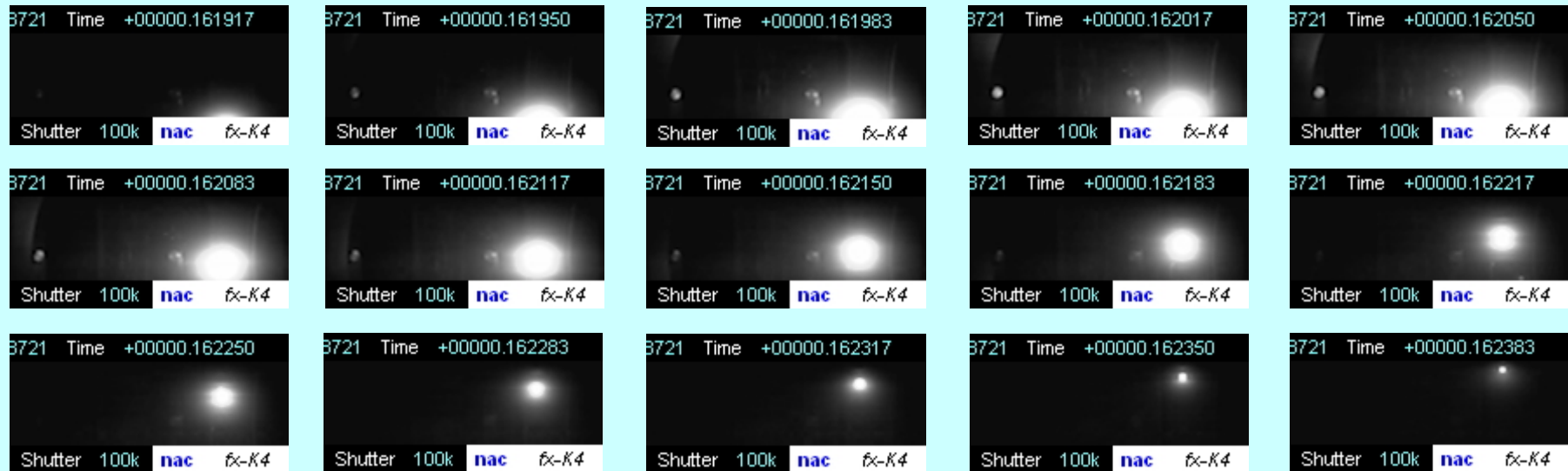


ペレットのみの場合では、プラズマより上方でH $\alpha$ 線を検出  
C-ECRH印加時またはC-NBI時には中心より下方で溶発  
C-ECRH印加時のほうが、C-NBI時より下方での溶発が多い

# 3.ペレット進入長(高速カメラ) 1/3

高速カメラを用い、ペレット溶発を計測

#207714  
(pellet only)

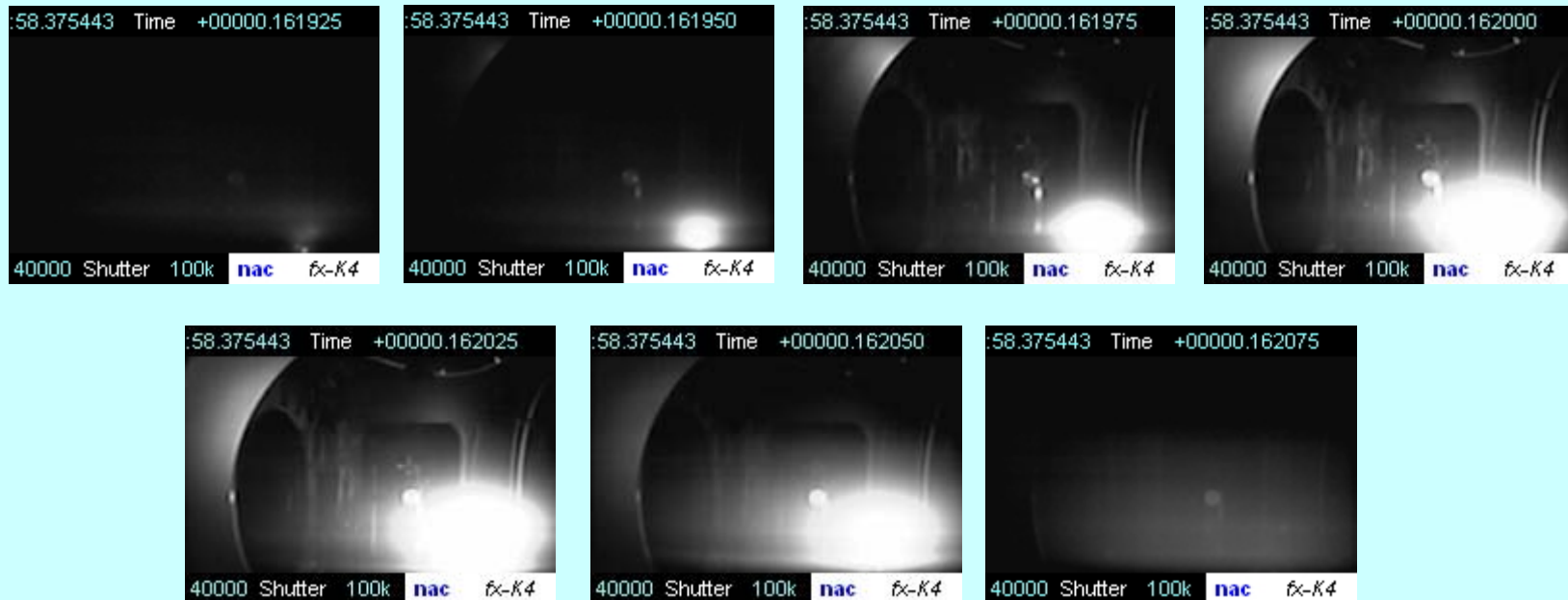


高速カメラを用いてペレットのみのショットを計測  
ペレットのみの場合では、プラズマの中心を突き抜け、  
真空容器上部まで到達していることが分かる

# 3.ペレット進入長(高速カメラ) 2/3

高速カメラを用い、ペレット溶発を計測

#207703  
(pellet with C-ECRH)

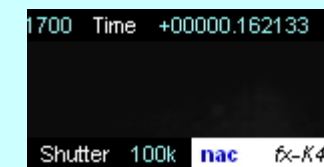
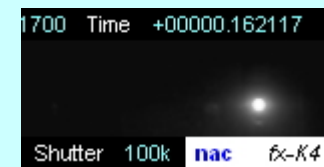
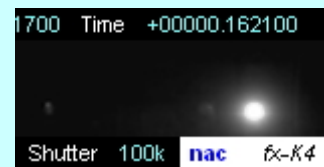
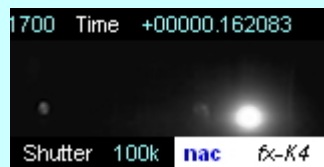
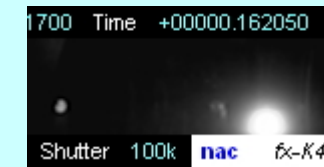
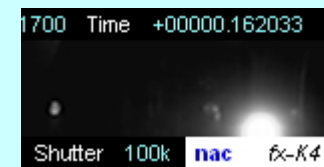


高速カメラを用いてC-ECRH印加時のペレット入射を計測  
C-ECRH印加時では高温電子により、中心より下方で溶発

# 3.ペレット進入長(高速カメラ) 3/3

高速カメラを用い、ペレット溶発を計測

#207712  
(pellet with C-NBI)

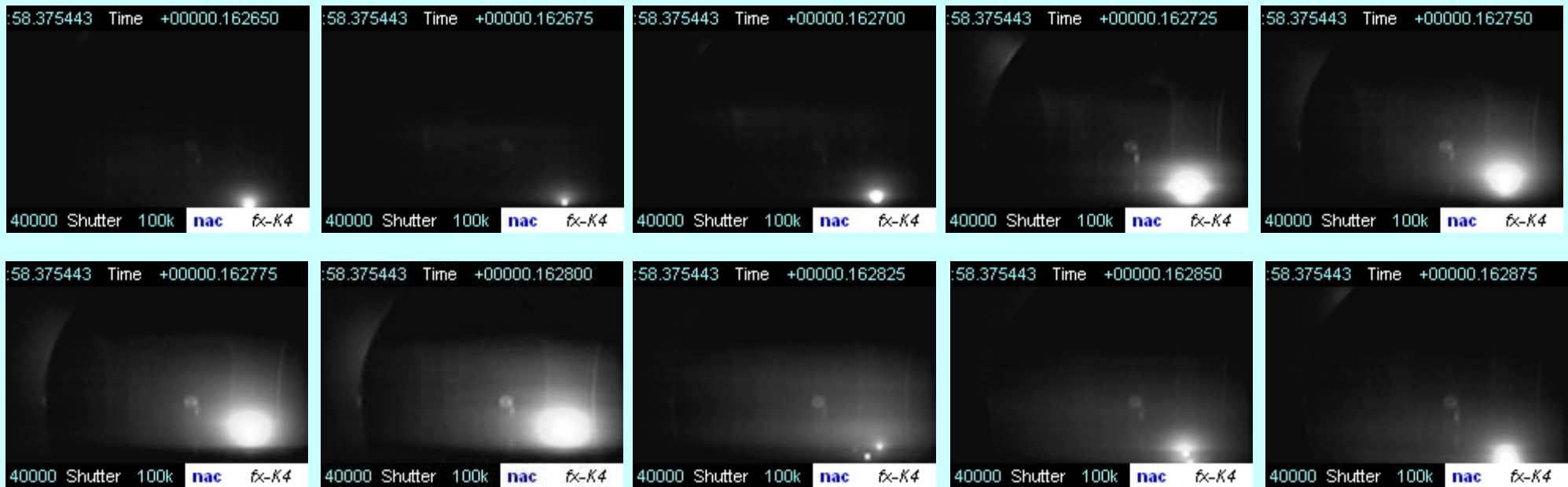


高速カメラを用いてC-NBI時のペレット入射を計測  
C-NBIにより密度、温度が上昇し、中心近傍で溶発  
C-ECRH印加時より、若干上方で溶発

# 3.ペレットのガイドチューブ内破損

高速カメラを用いた計測により、ペレットの破損、分裂を確認

#207703  
(pellet with C-ECRH)



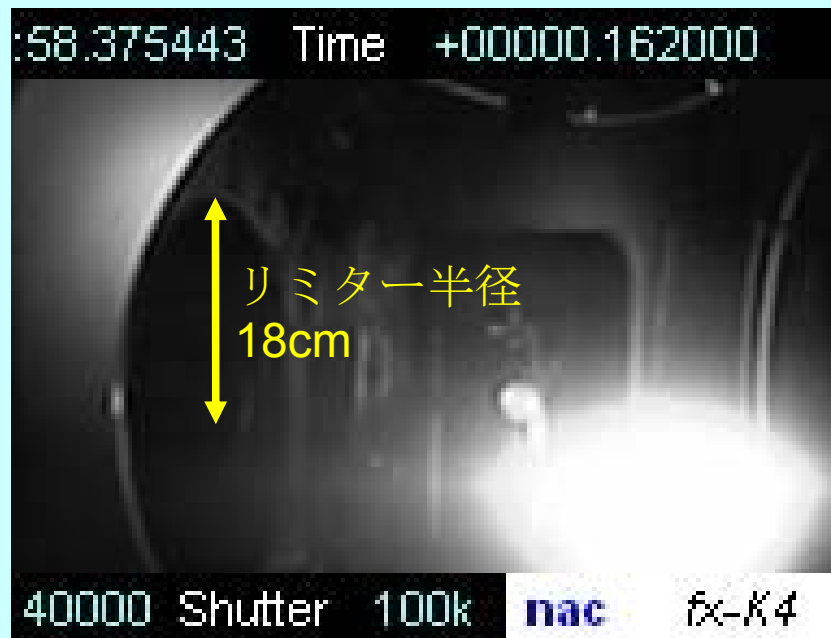
高速カメラの画像より、ペレットが数個の小片になって入射していることを改めて確認  
(以前にもH $\alpha$ 線放射輝度などから破損を確認していた)



# 3.ペレット進入速度(高速カメラ)

高速カメラを用い、ペレット進入速度を計測

#207703  
(pellet with C-ECRH)



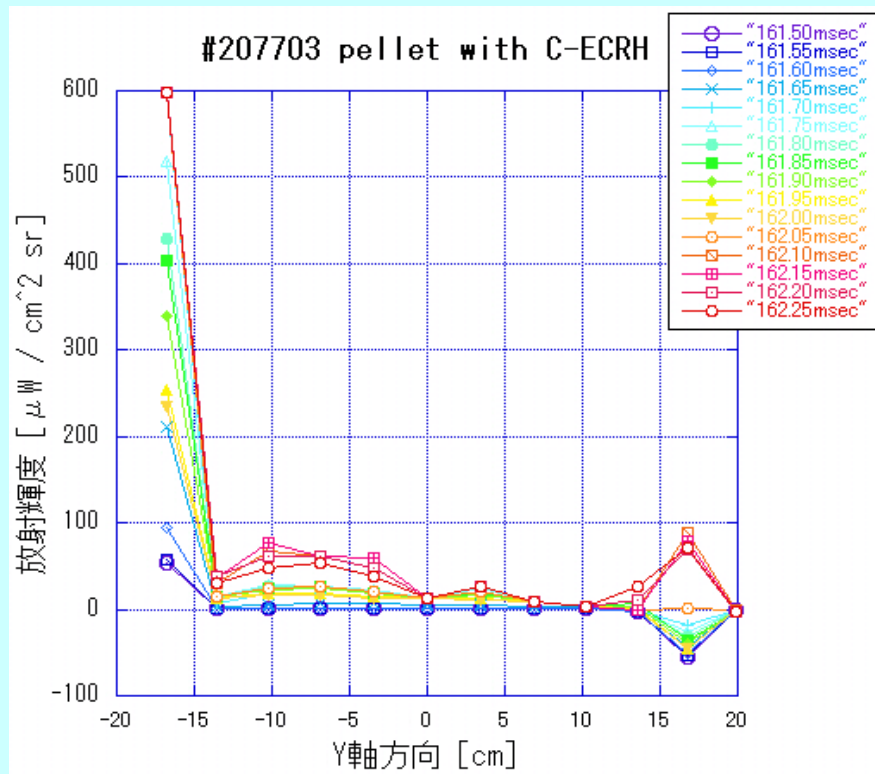
リミター半径(18cm)と  
画像の溶発ペレット中心位置から  
ペレットの速度を算出

速度を算出すると、**640[m/s]**となった  
射出直後の速度に比べ15%ほど減速している  
(射出直後の速度は755[m/s])

# 3.粒子伝播 (H $\alpha$ 線検出器、高速カメラ)

粒子のY軸方向(径方向)、Z軸方向伝播について計測

径方向(Y軸方向)  
H $\alpha$ 線検出器



Z軸方向  
高速カメラ



H $\alpha$ 線および高速カメラ画像から、Y軸、Z軸方向には突出した偏りはない

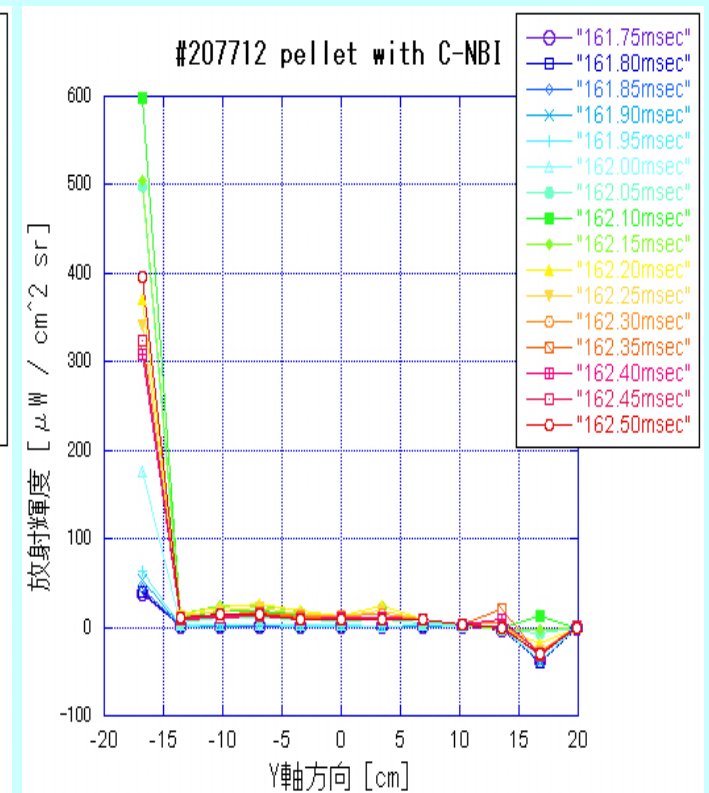
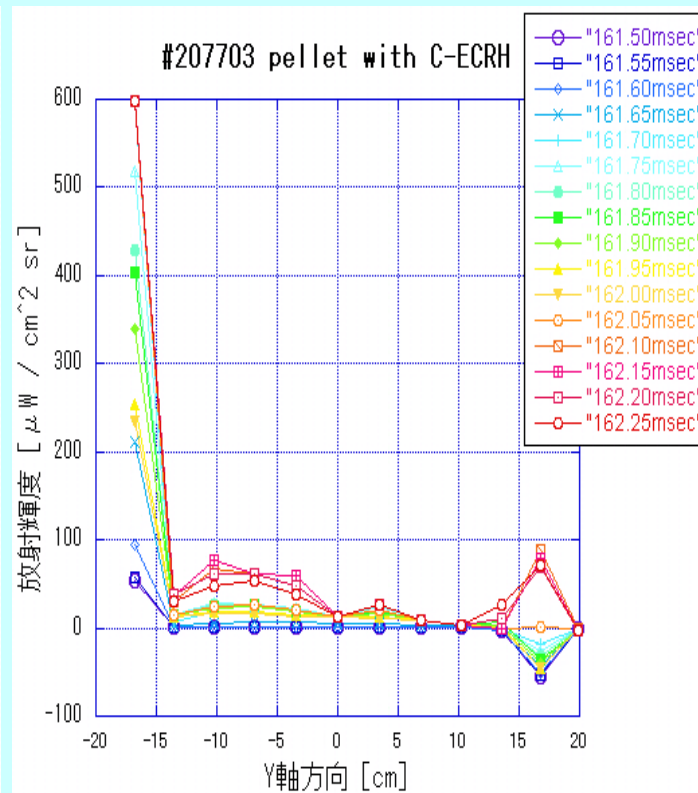
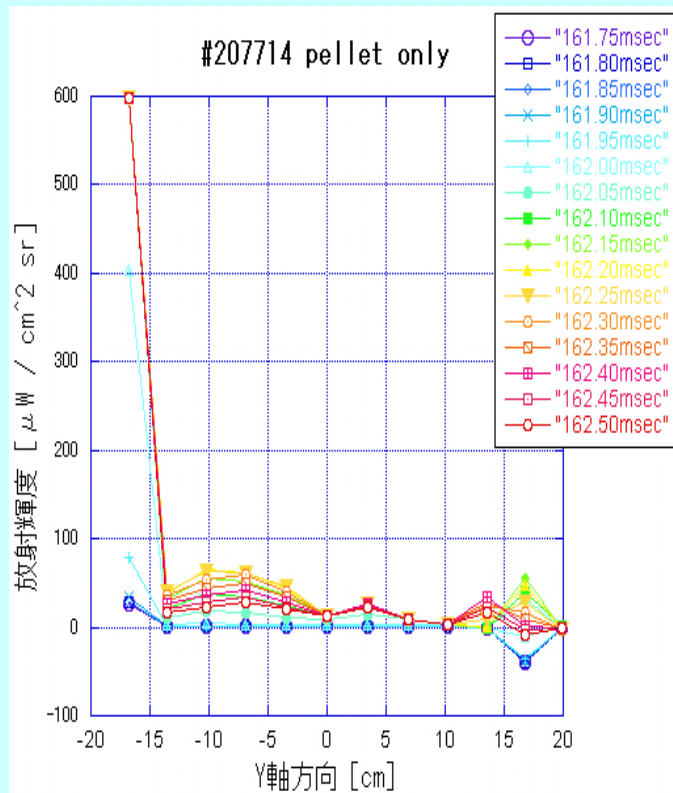
# 3.Y軸方向への拡散(H $\alpha$ 線検出器)

粒子のY軸方向(径方向)への拡散について計測

#207714  
(pellet only)

#207703  
(pellet with C-ECRH)

#207712  
(pellet with C-NBI)



全体的にY軸マイナス方向(GAMMA10南側)の放射輝度が高い  
ガイドチューブからの射出方向が傾いている可能性あり

# 4.まとめ

## 1. ペレット入射装置の制御

同一条件で生成・射出した場合、安定したペレット射出を行えた

## 2. ペレット溶発位置

- ・ペレットのみではプラズマを突き抜けたことを再確認
- ・C-ECRH印加時には中心より下方で溶発したことを再確認
- ・今回新たにC-NBI時にペレットを入射し、中心より下方で溶発することを確認

## 3. ペレット破損確認

高速カメラにより、GAMMA10本体までの間にペレットが破損していることを確認

## 4. Y軸方向への拡散

Y軸マイナス方向の $H\alpha$ 線放射輝度が高いことを確認

# 4.結果

## 1. ペレット溶発

- ・ **ペレットのみ**では十分に溶発しきれず、**プラズマ**を突き抜ける
- ・ **C-ECRH印加時**には電子温度が上がり、**溶発が促進**される(下方で溶発)
- ・ **C-NBI時**にはイオン等の効果による**溶発が促進**される

## 2. ペレット破損

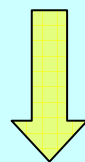
- ・ 速度700[m/s]でのペレット射出では、**輸送経路**で**ペレットが破損**する(破損率 93.2%、2~11個の破片に分裂する)
- ・ **輸送経路**で**減速**があり、プラズマ中での速度は700[m/s]弱となる

## 3. Y軸方向への拡散

- ・  $H\alpha$ 線放射輝度より、Y軸マイナス側への傾いた射出を行っている可能性あり

# 4. 今後の課題(理論モデル)

研究目的である、ペレット溶発過程および粒子・エネルギーの伝搬解析のため、ペレット溶発モデルを理解する必要がある



## NGS(中性粒子遮蔽)モデル

ペレットから溶発(アブレーション)した水素分子がペレット周囲に低温・高密度の溶発雲を形成する。

プラズマからのエネルギー流束は、この雲の中性粒子との弾性、非弾性散乱により減衰する。

入射するエネルギー流束において、

$T_e = T_i$  の場合、 $(m_e/m_i)^{1/2}$  で

イオンの影響は無視できる。

→溶発は電子温度に大きく影響される

→GAMMA10では $T_e < T_i$  よりイオンの影響も考慮



# 4. 今後の課題

## 1. NGSモデルの理解と応用

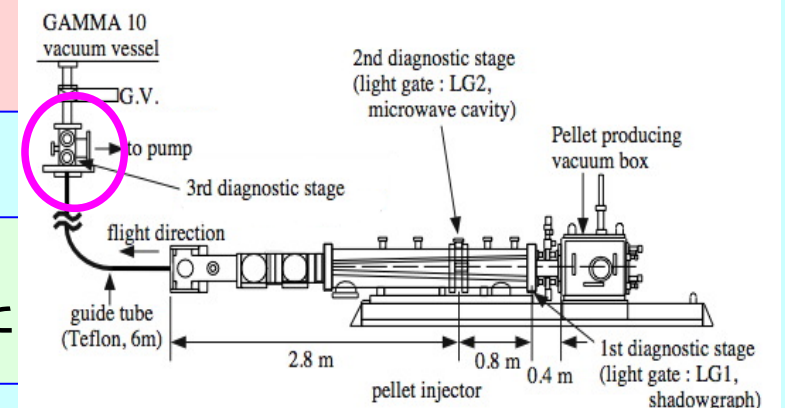
- ・ NGSモデルを理解し、電子温度の変化とペレット溶発についてシミュレーションなどを行う。
- ・ GAMMA10では、 $T_i > T_e$ であるため、イオンの影響を考慮
- ・ **パラメータ(密度、温度など)を変化させてシミュレーションを行い、実験結果と比較**

## 2. ペレット射出環境の確認

- ・ ペレット破損なしでプラズマへ入射できる条件を検討
- ・ **ペレット入射装置の第三計測部の再調整**
- ・ Y軸方向の傾きがあるか再確認し、調整

## 3. 粒子閉じ込め向上への検討

- ・ ペレット入射後の、粒子閉じ込め向上のため



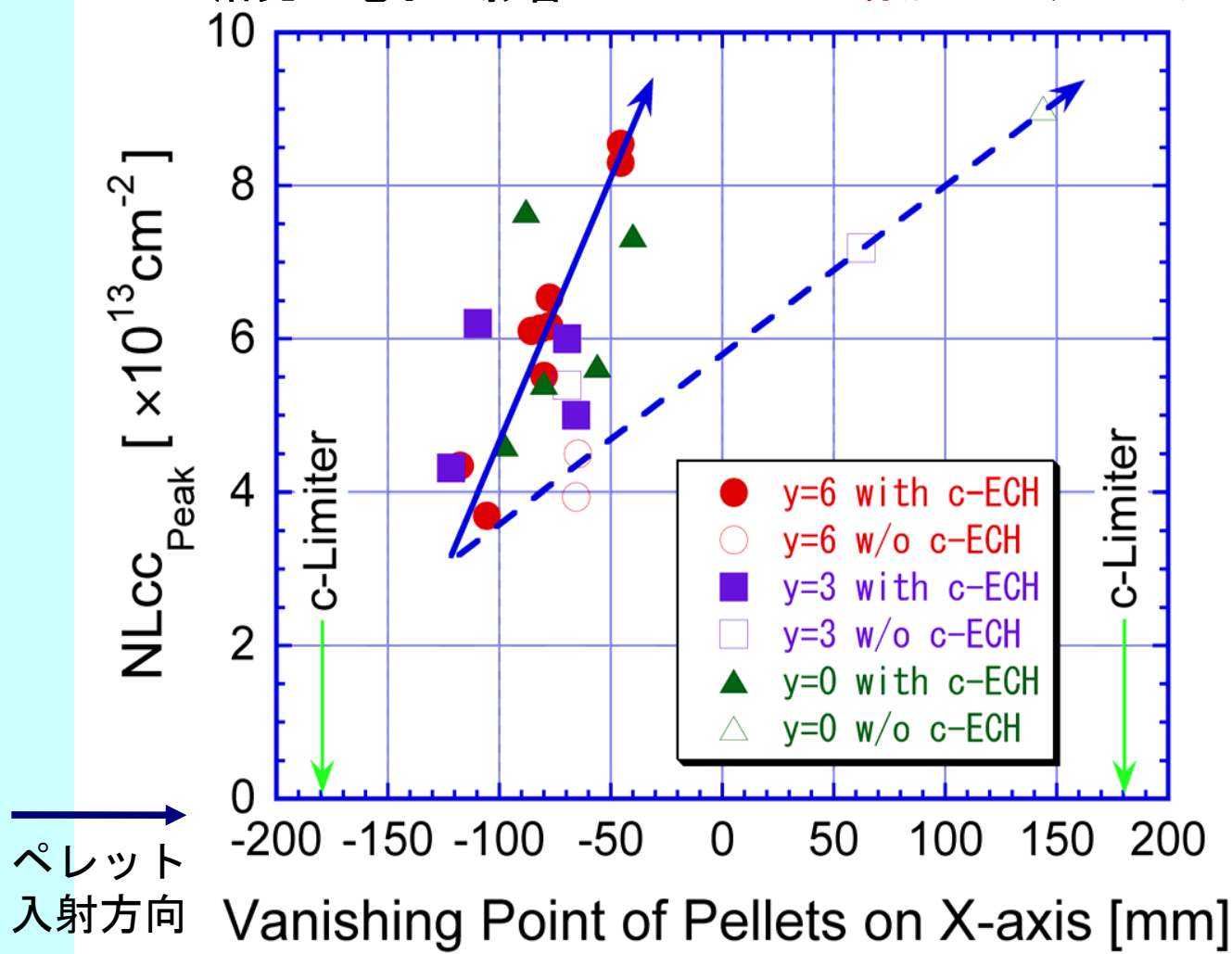
以上





# 付録1 (過去実験データ)

溶発に電子が影響 → C-ECRHの有無によりペレット進入長を比較



ペレットの侵入に伴い、NLccが上昇  
→ペレット溶発

C-ECRH印加無しでは中心を越えた位置でNL上昇  
→ペレットが溶発しきれずプラズマを突き抜ける

C-ECRH印加により短い侵入長で溶発  
→高温電子による溶発大

※データ提供：NBIグループ  
双方向共同研究 広島大学 西野信博 准教授  
高速カメラを用いた計測データ より