



ダブルプラズマガン装置における
核融合炉壁材料への
ELM 様パルスプラズマ照射実験

佐久間 一行, 北川賢伸
兵庫県立大学院工 博士後期課程

もくじ

- 背景：PWI 実験に向けた磁化プラズマガン装置
- プラズマパラメータ・熱流束計測
- ダブルプラズマガン装置における初期実験
- まとめ

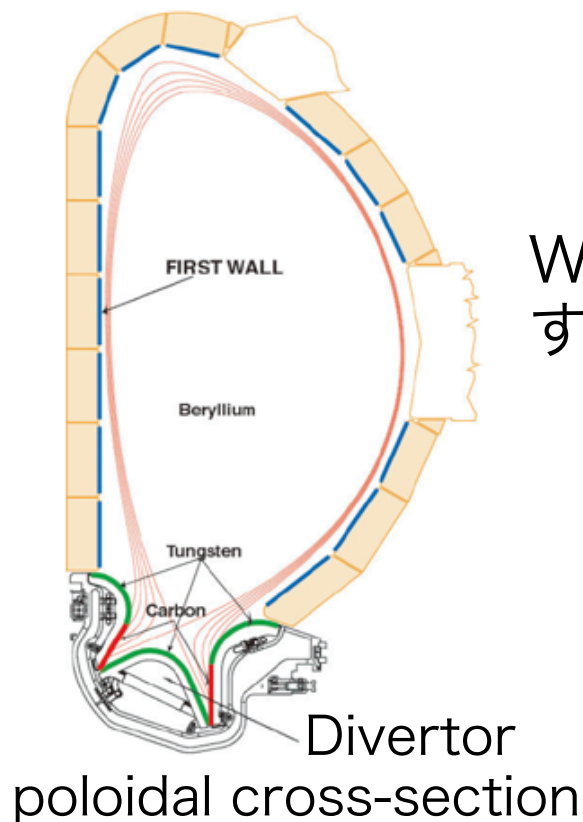
研究背景

ITER における PFC へのパルス熱負荷

Type I ELM: $0.2\text{-}3\text{MJ/m}^2$, $0.1\text{-}1\text{ms}$, $1\text{-}10\text{Hz}$

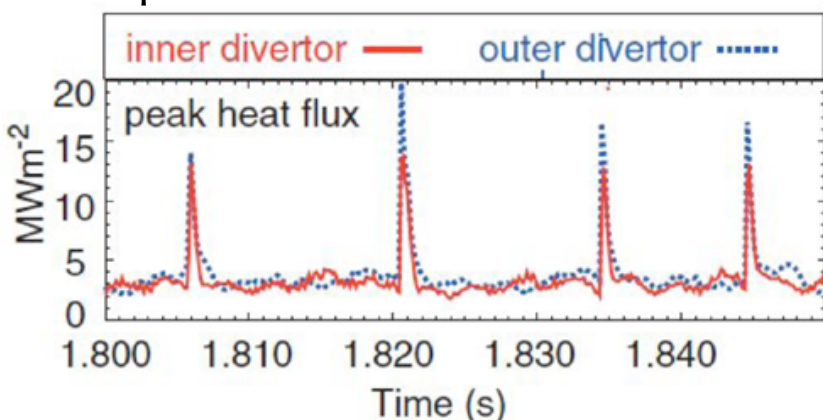
Disruption: $10\text{-}100\text{MJ/m}^2$, $1\text{-}10\text{ms}$

W などのダイバータ材料が過渡熱負荷にさらされ損傷する



ダストがコアに入りプラズマが冷やされる

コアプラズマ消滅の危険性



Type I ELM in ASDEX upgrade
T. Eich et. al., PPCF 2005

損傷過程の解明は
重要な研究テーマである

PWI 研究におけるプラズマガン装置の特徴

◆ ITER における Type I ELM の模擬実験

- 現存するトカマク装置 & プラズマ模擬装置

→ ITER で予想されるパラメータを達成するのは現状では困難である。

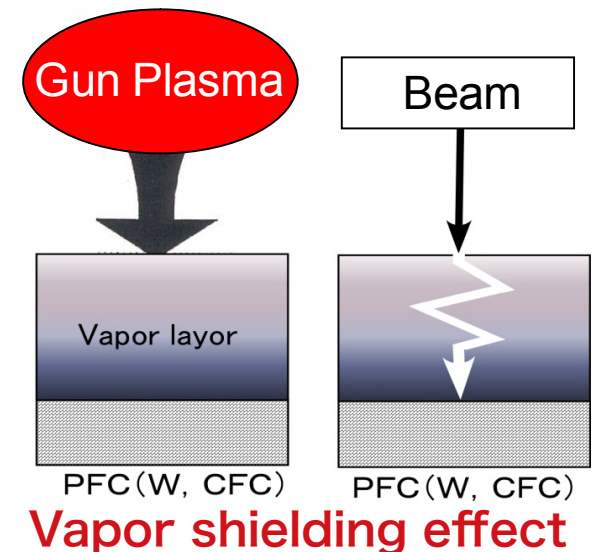
- 電子ビームやレーザー装置

高エネルギー負荷によって蒸気層が形成される

→ 蒸気遮蔽効果によって熱負荷が緩和されると考えられる。

しかしながら、電子ビームとは材料表面に生じた熱緩衝バリアとなる蒸気層を貫通して熱負荷が材料表面へと到達する

プラズマガン装置は ELM による損傷模擬実験において、蒸気遮蔽効果も評価することができる装置である



Damage reduction : 1/10 ~ 1/100

ダブルプラズマガン装置を用いた実験アプローチ

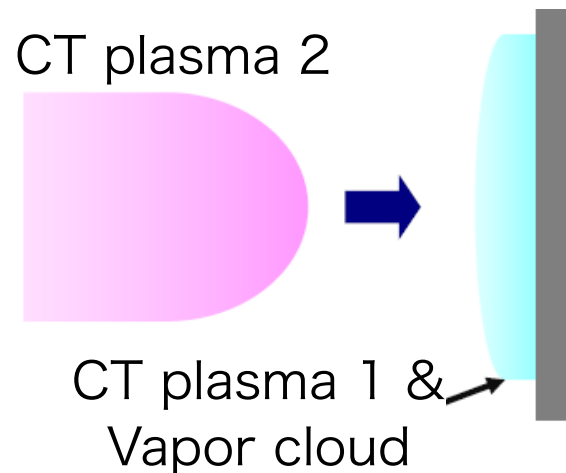
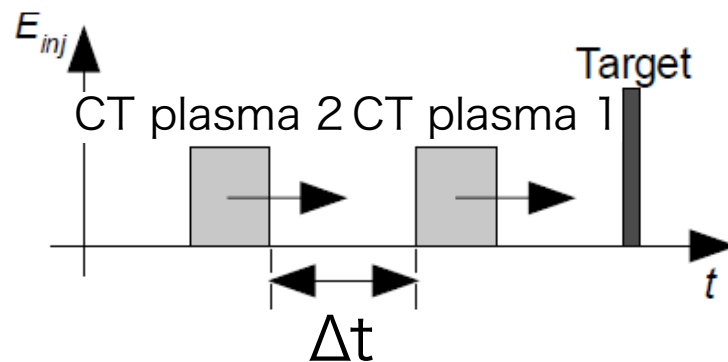
◆ 蒸気遮蔽効果の検証実験

- 2つの独立した CT プラズマ

1st : 蒸気層の形成

2nd : 熱緩衝バリアの検証

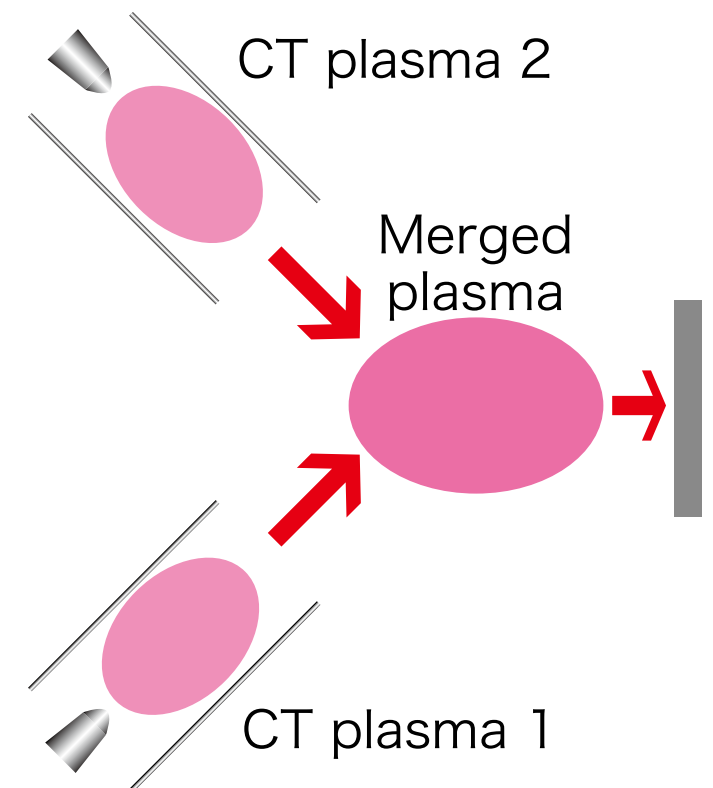
2つのプラズマは Δt の時間差を持つ。



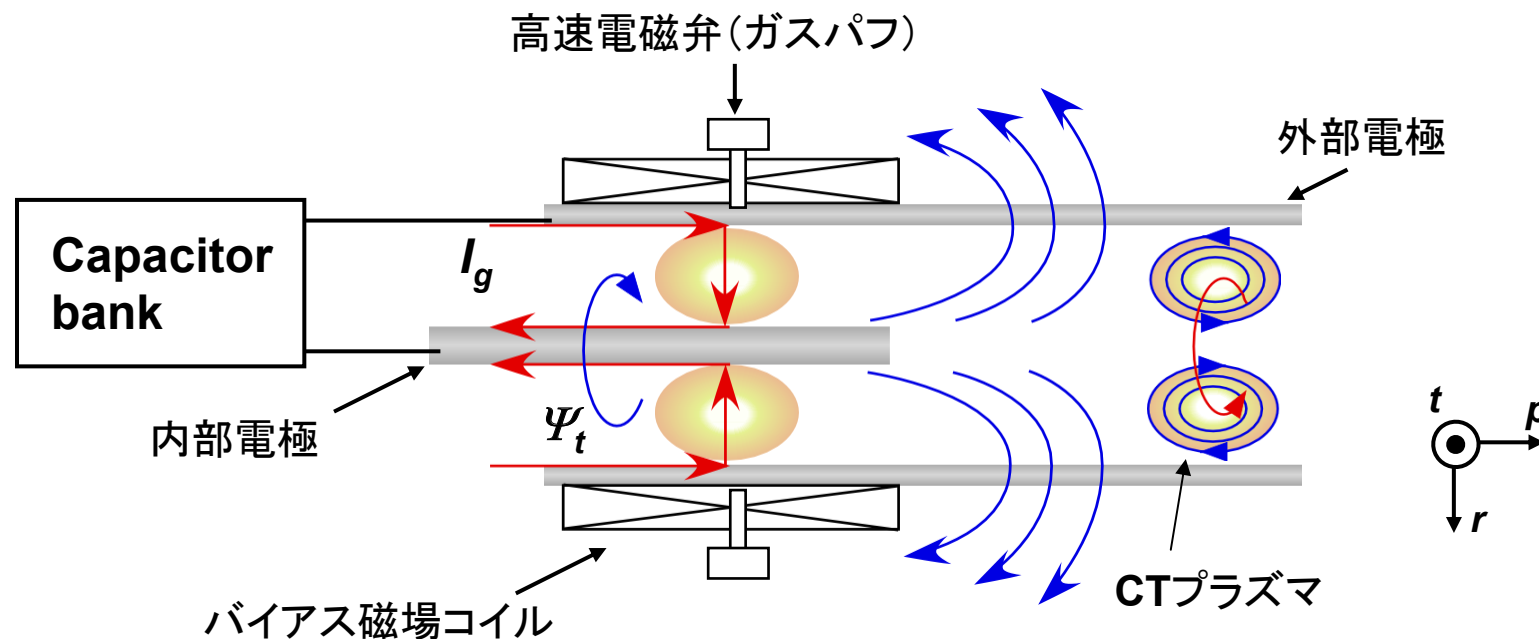
◆ 高エネルギープラズマ実験

- プラズマ合体実験

プラズマ合体によって
より高密度のパルスプラズマ
が得られる



磁化同軸プラズマガン (MCPG) 動作原理

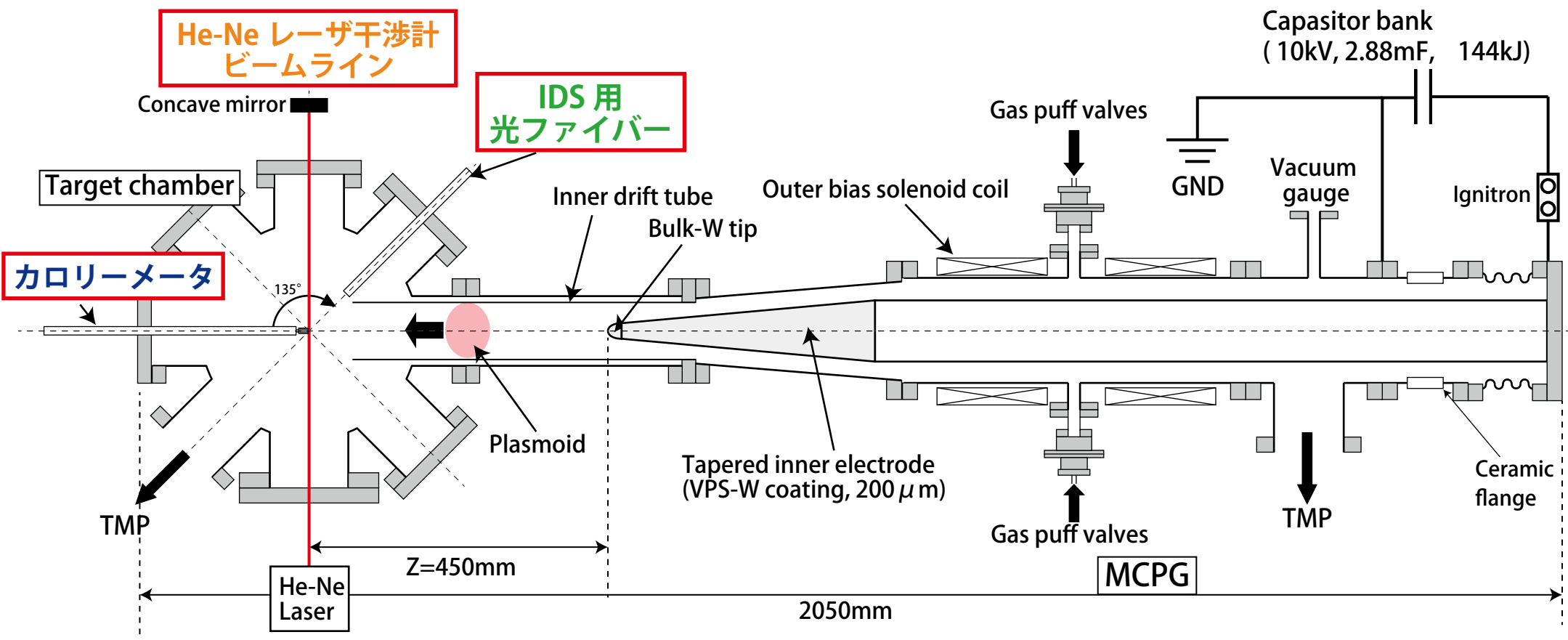


- トロイダル磁場とポロイダル磁場を有するコンパクトトーラス (CT) プラズマが生成される
- 高速 ($\sim 300\text{km/m}$) で移送可能

シングルプラズマガン装置図

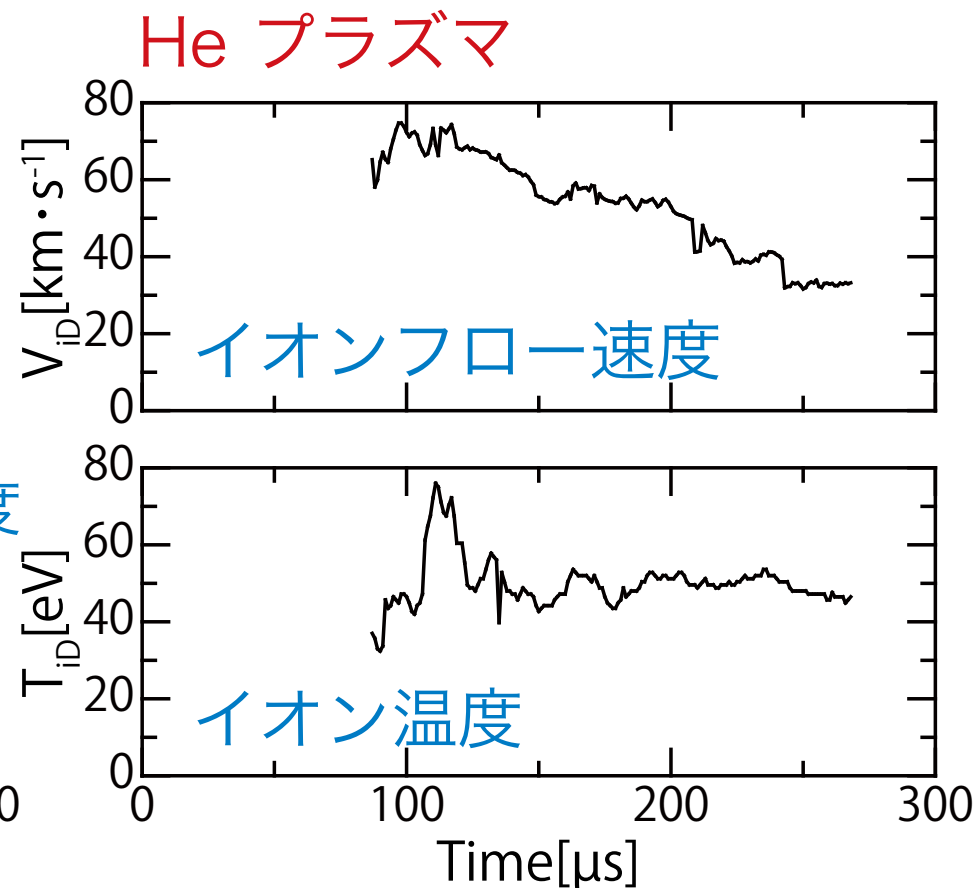
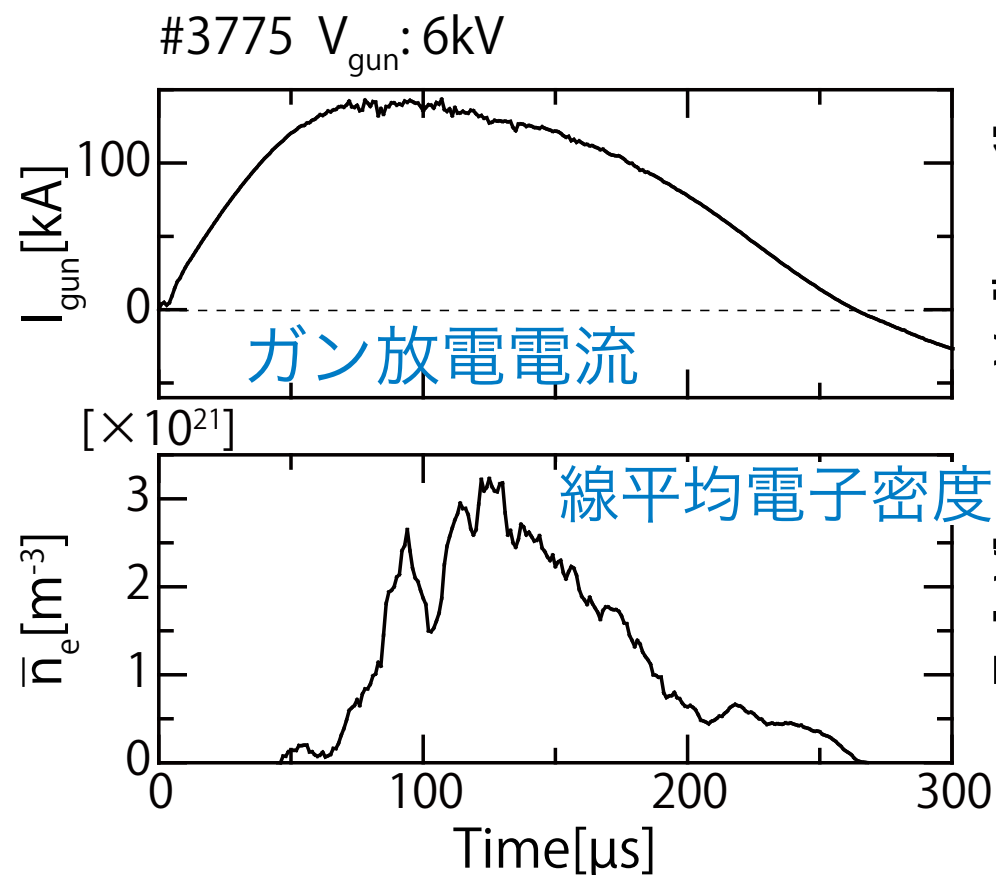
プラズマガンの生成するプラズマパラメータの計測を行った

- ・ 線平均電子密度 : **He-Ne レーザ干渉計**
- ・ イオン温度, イオンフロー速度 : イオン Doppler 分光器 (**IDS**)
- ・ 吸収エネルギー密度 : **カロリメータ** (炭素 or タングステンチップ)



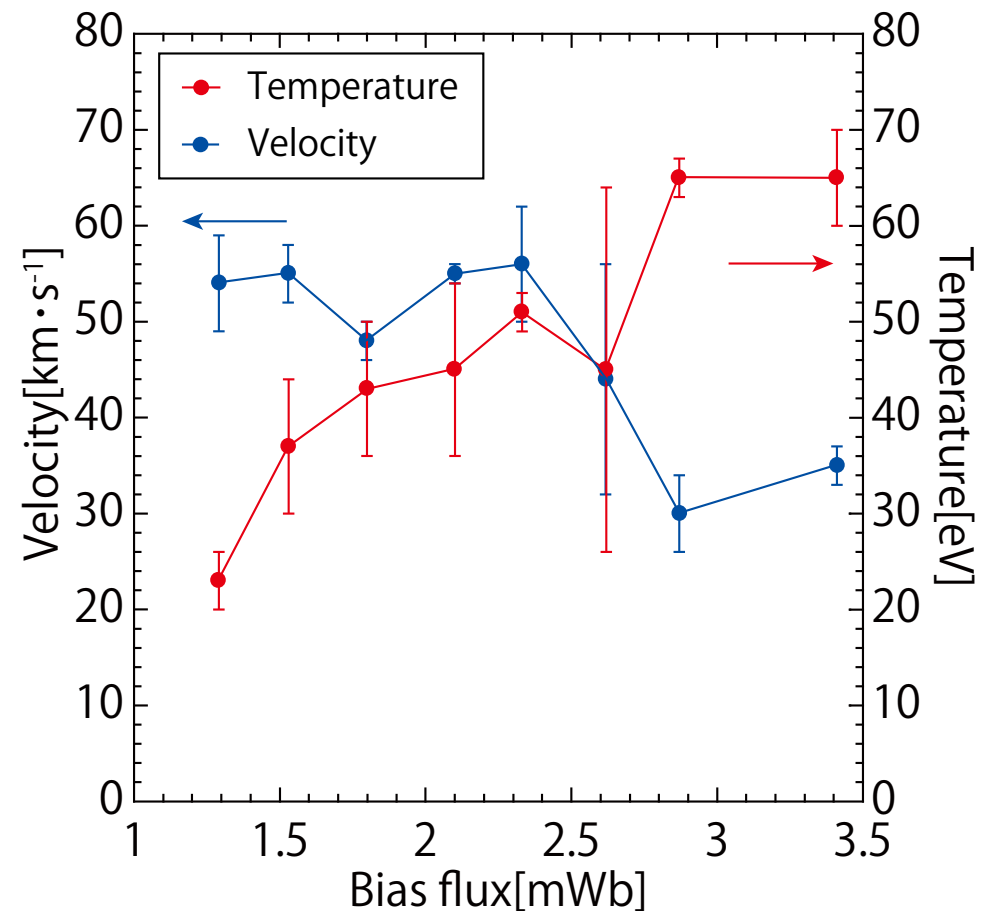
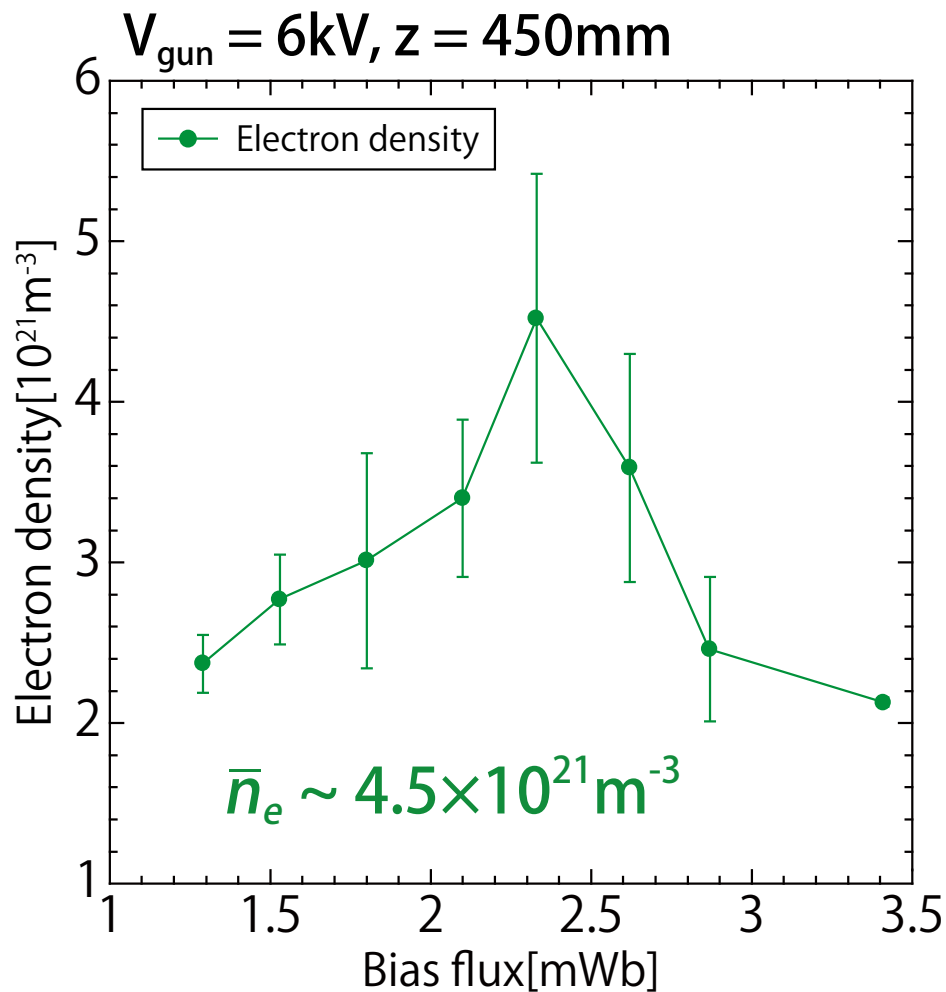
シングルプラズマガン典型放電波形

- ガン放電電流 : $\sim 150\text{kA}$
- ガス種 : He
- パルス幅 : $0.2\text{-}0.3\text{ms}$
- 運転間隔 : 10 分



プラズマパラメータ計測

- 線平均電子密度：Bias flux に対して最大値をとる
- イオンフロー速度：Bias flux の増加に伴い減少
イオン温度：Bias flux の増加に伴い上昇

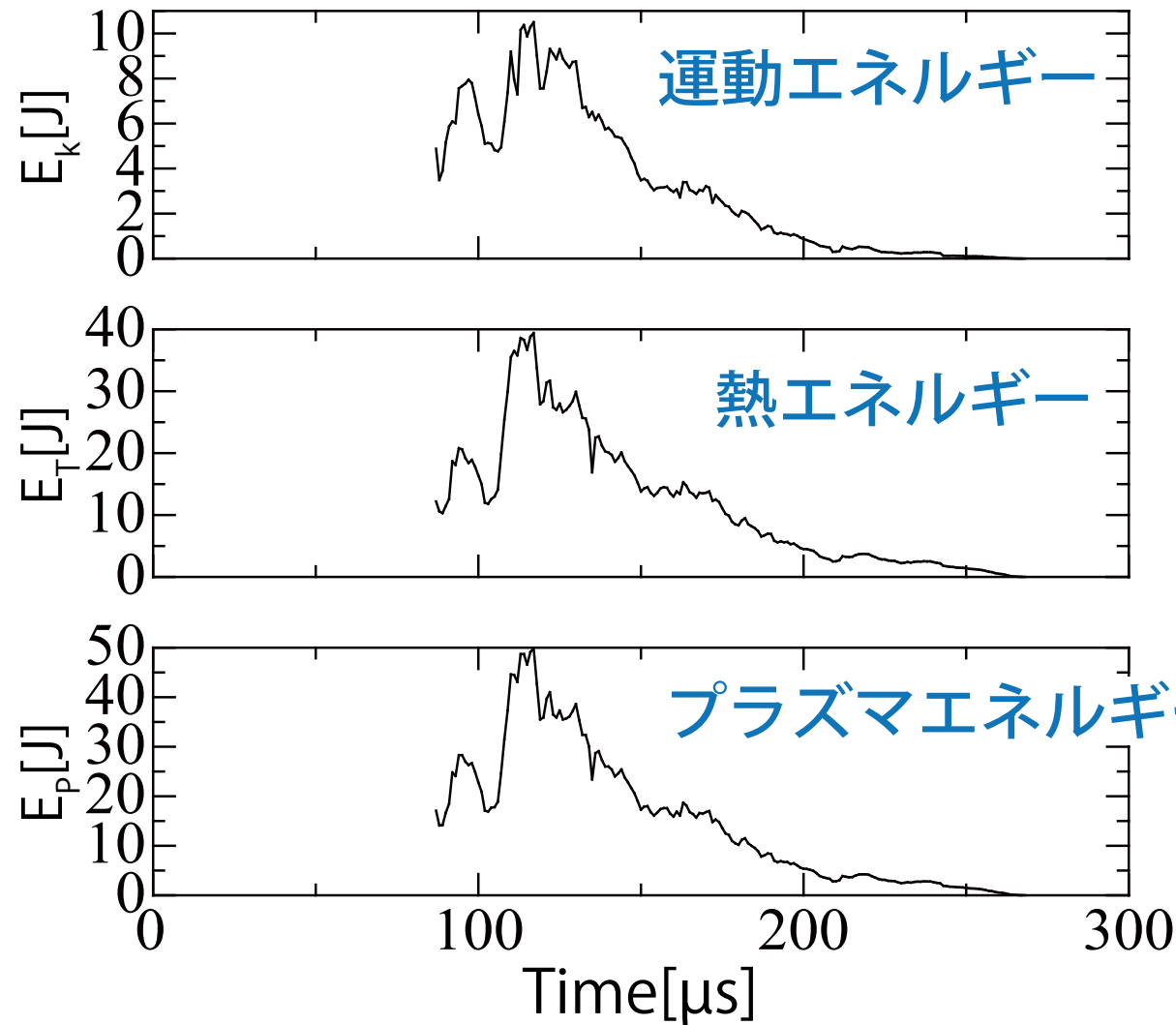


プラズマエネルギー時間発展

◆ パラメータからプラズマのエネルギーを計算

→ **熱エネルギー**が支配的であり、先頭部にエネルギーが集中

#3775 $V_{gun}:6kV$ He プラズマ



● 運動エネルギー

$$E_k = \frac{1}{2} m_{i,e} v_{i,e}(t)^2 S n_e(t) v_i(t) \Delta t$$

● 熱エネルギー

$$E_T = \frac{3}{2} k T_{i,e}(t) S n_e(t) v_i(t) \Delta t$$

● プラズマエネルギー

$$E_{Plasma} = E_k + E_T$$

$$T_e \simeq T_i$$

S: 断面積, Δt : サンプルング時間

プラズマエネルギー—Bias flux 依存性

プラズマエネルギー E_p

コンデンサバンク
 E_c

Plasma

$$E_p = \gamma_{cp} E_c$$

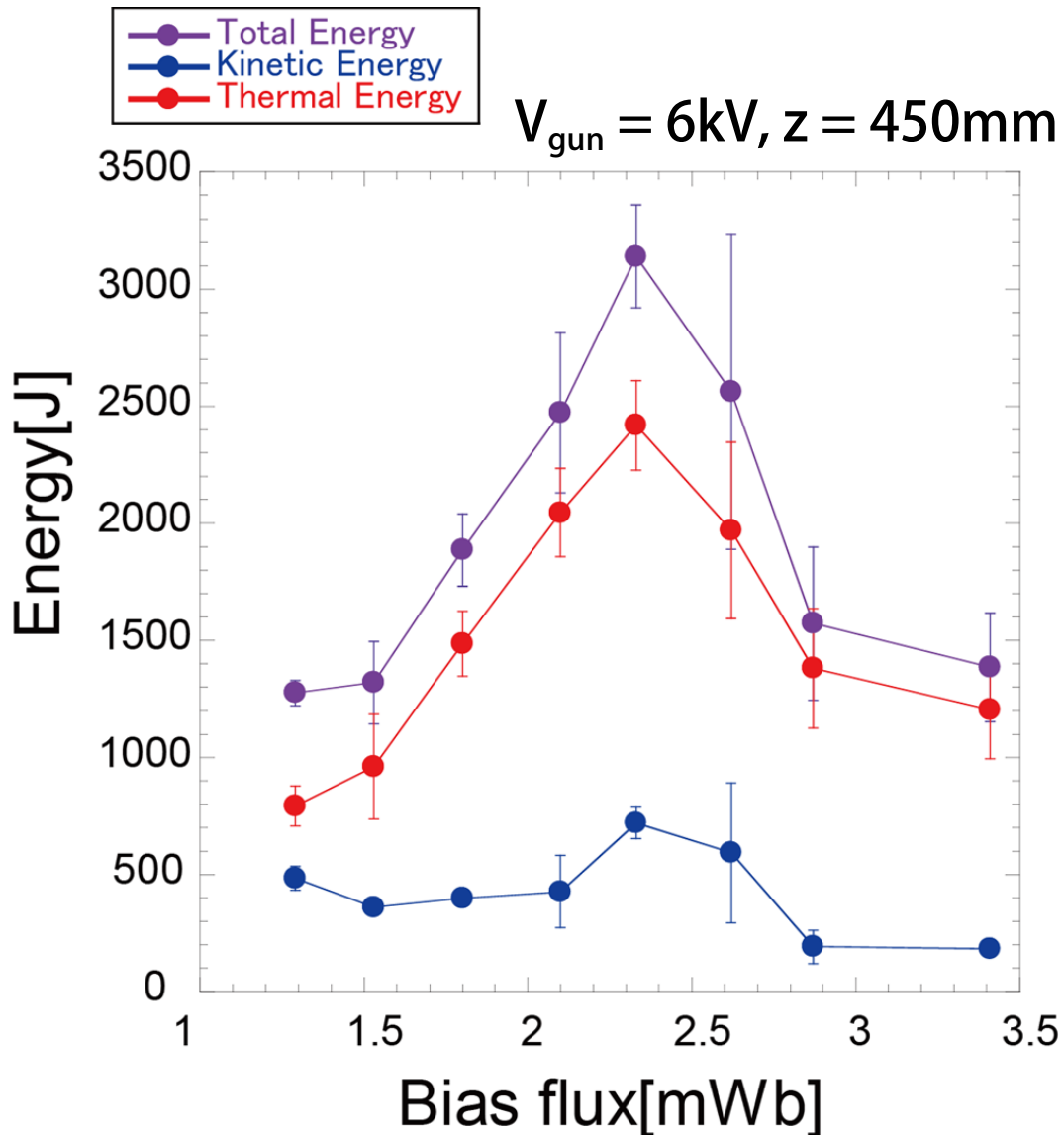
コンデンサバンクエネルギー

E_c : 54 kJ (6kV)

γ_{cp} : 6%

プラズマエネルギー

E_p : ~3.2 kJ



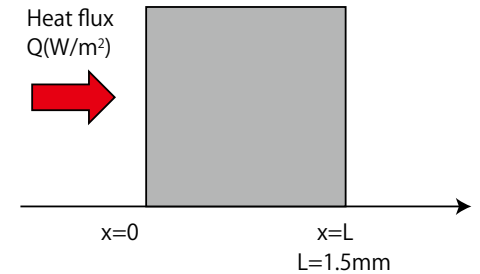
1次元熱伝導方程式による表面温度計算

◆ 入力 Heat flux の仮定について

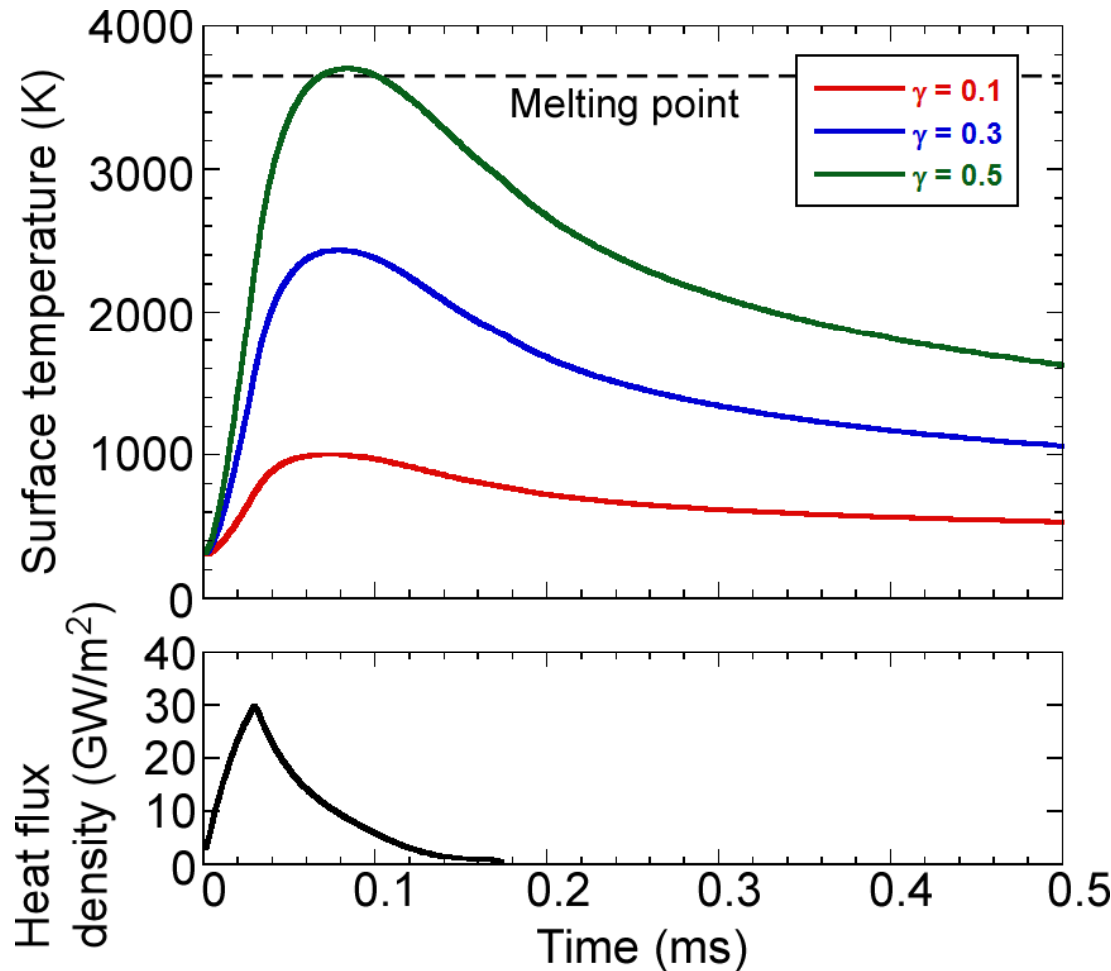
- 計測したプラズマエネルギーから波形およびトータルのエネルギー量を仮定

◆ W 物性値

$\rho : 1.925 \times 10^4 \text{kg/m}^3$ $C_p(T), k(T)$



$$\rho c_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right)$$



◆ 初期条件および境界条件

• 初期条件

- $T = 300\text{K}$

• 境界条件

- $-k \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) = Q$

- $\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) = 0$

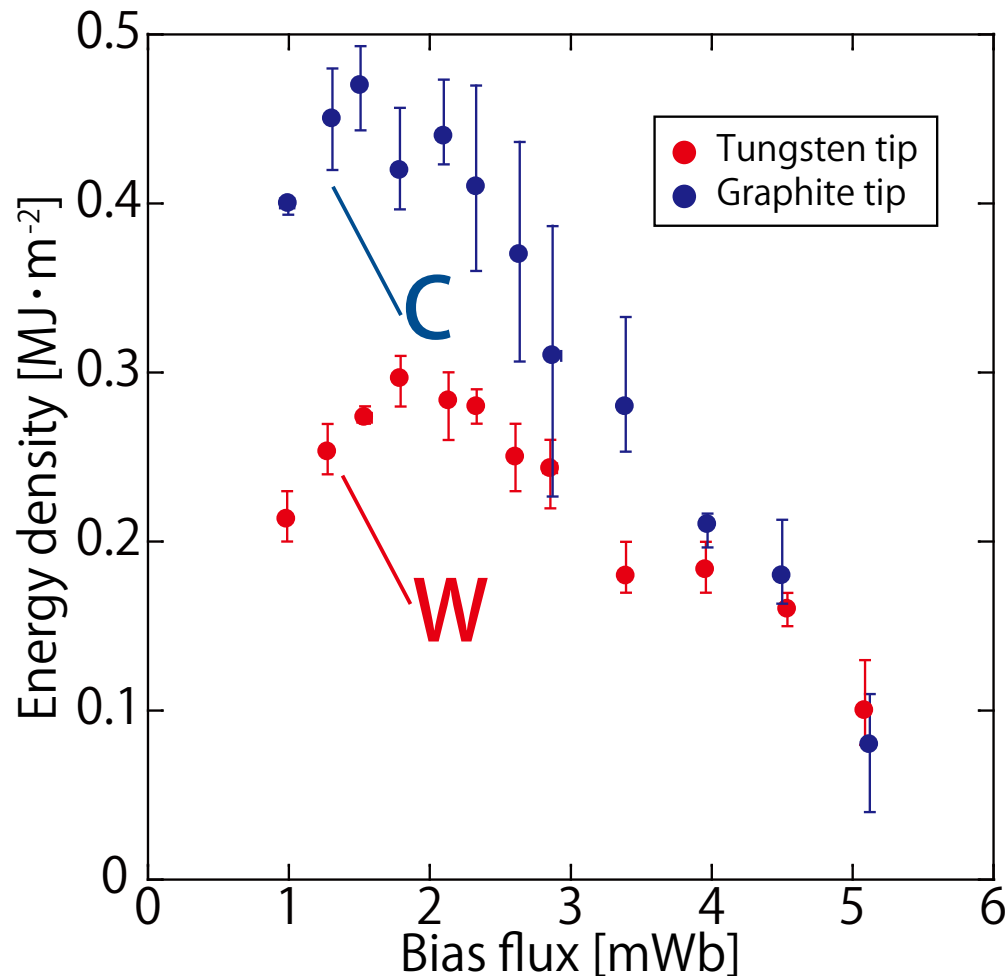
◆ 伝達係数 γ

プラズマ - 材料間の
エネルギーの伝達係数

→ カロリメータによる計測
によって評価可能

吸収エネルギー密度計測

- ◆ カロリメータを用いて、チップ材料ごとのエネルギー密度を計測
- ◆ Bias flux に対する依存性がある
 - Bias flux を変化させてエネルギー密度の制御を行える。



プラズマ負荷を同じにした場合、
グラファイトチップにおける吸収エネルギー密度は
タングステンチップにおける値に比べ約 1.7 倍大きい。

$$E_c \sim 1.7E_w$$

- 伝達係数 γ

$$\gamma_w \sim 0.18$$

$$\gamma_c \sim 0.3$$



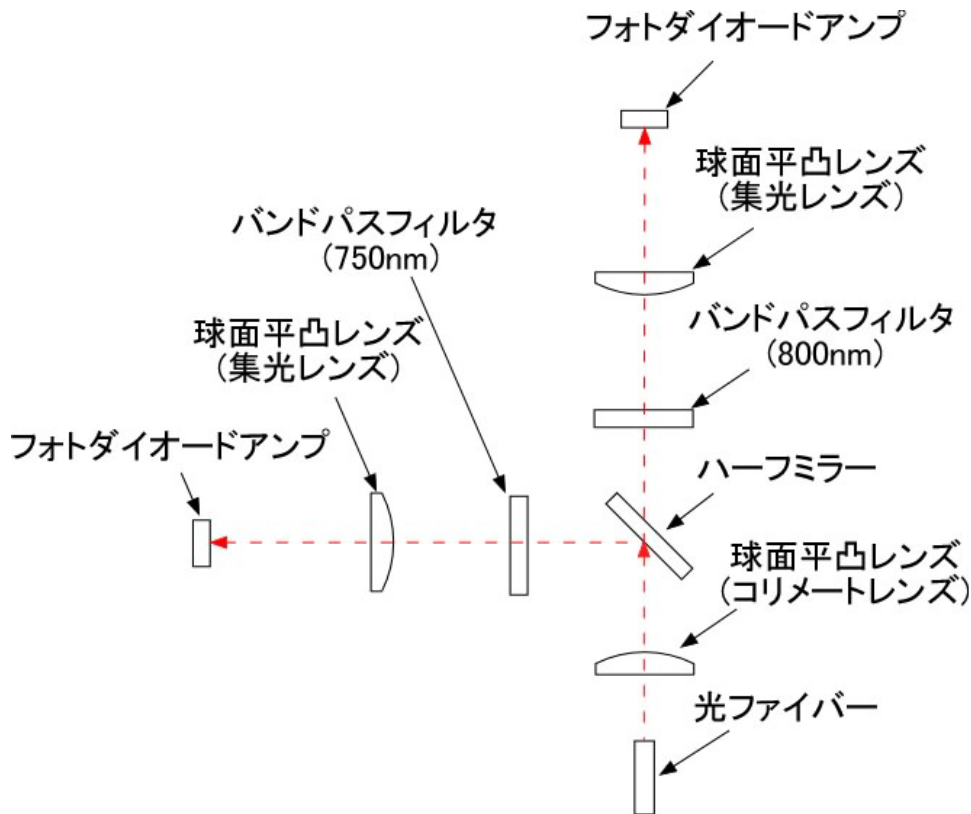
吸収エネルギー密度は材料の種類やその表面状態に依存する。

表面温度の計測

◆ パイロメータによる計測

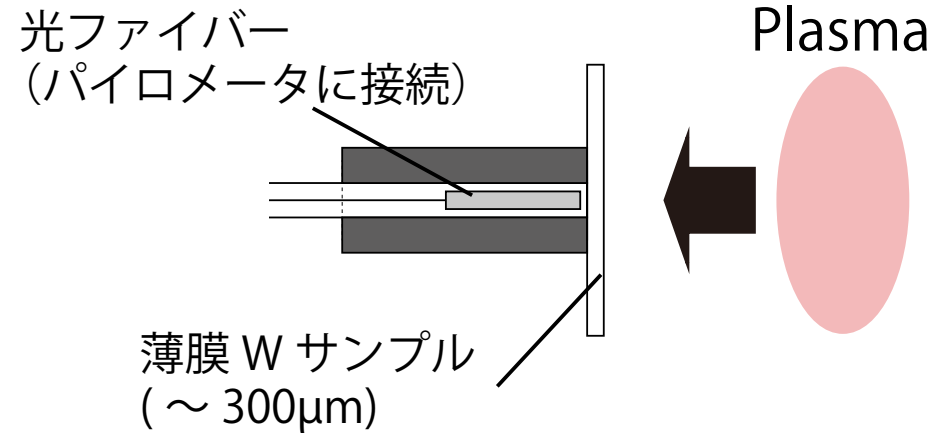
2 波長の強度比から温度を算出

バンドパスフィルタを用いて 2 波長の光を取得.

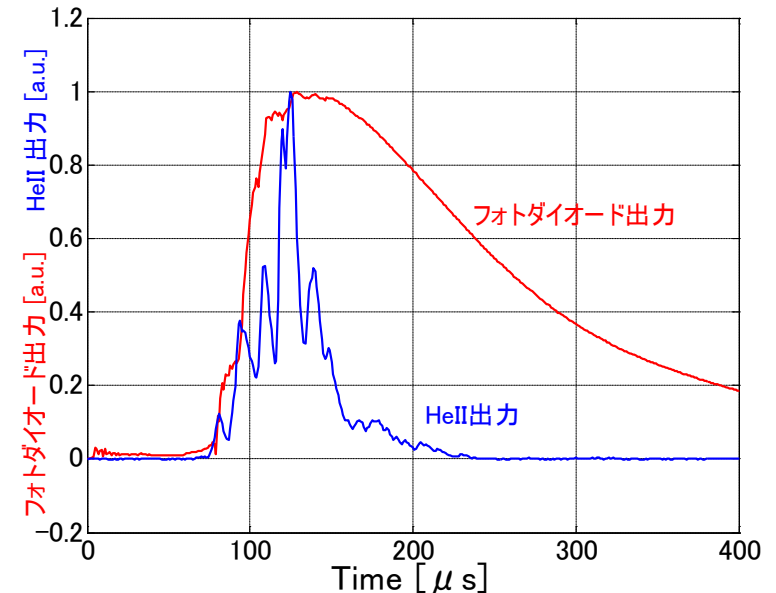


光学素子配置図

● 背面からの温度計測



背面からの輻射を確認



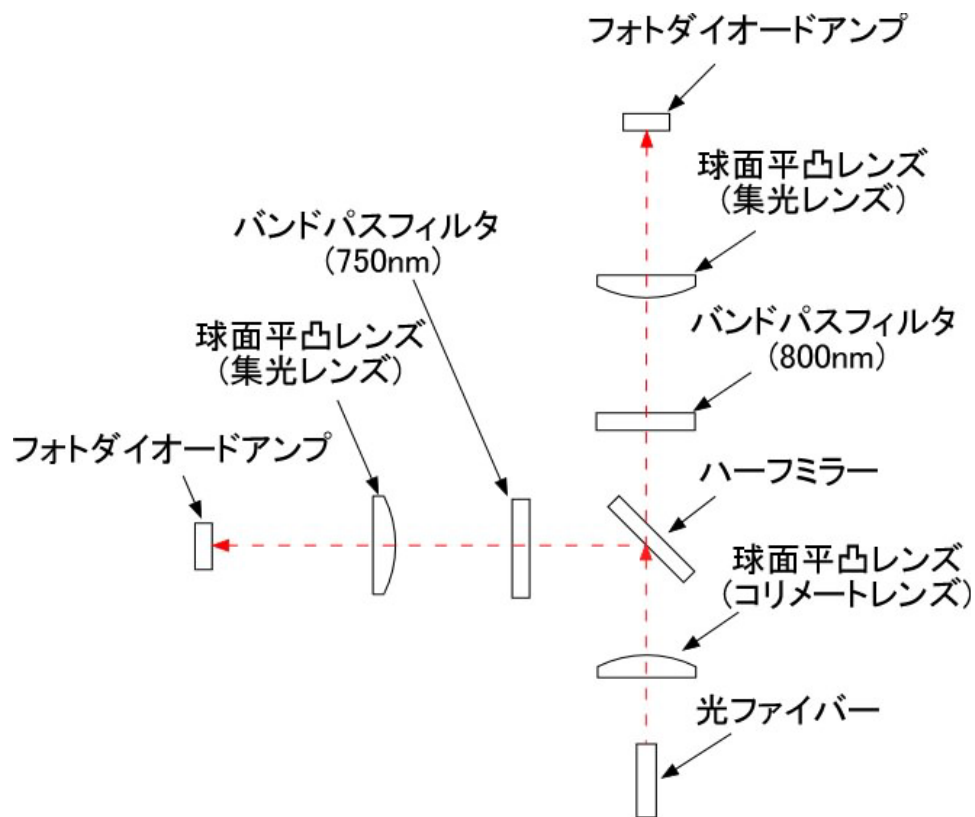
#5627 $V_{\text{gun}}: 4\text{kV}$

表面温度の計測

◆ パイロメータによる計測

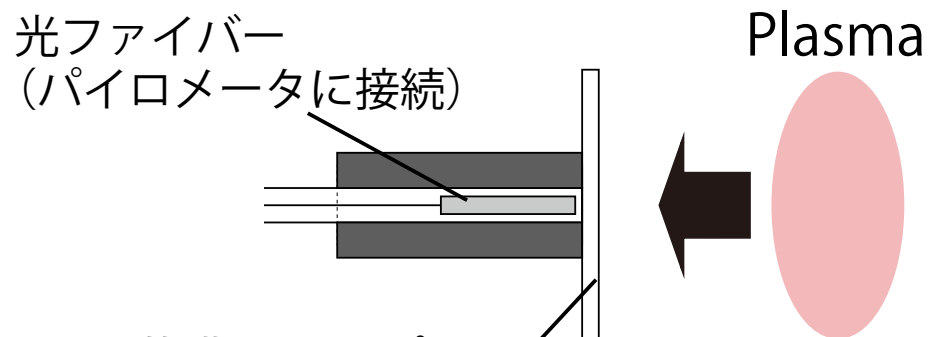
2 波長の強度比から温度を算出

バンドパスフィルタを用いて 2 波長の光を取得.



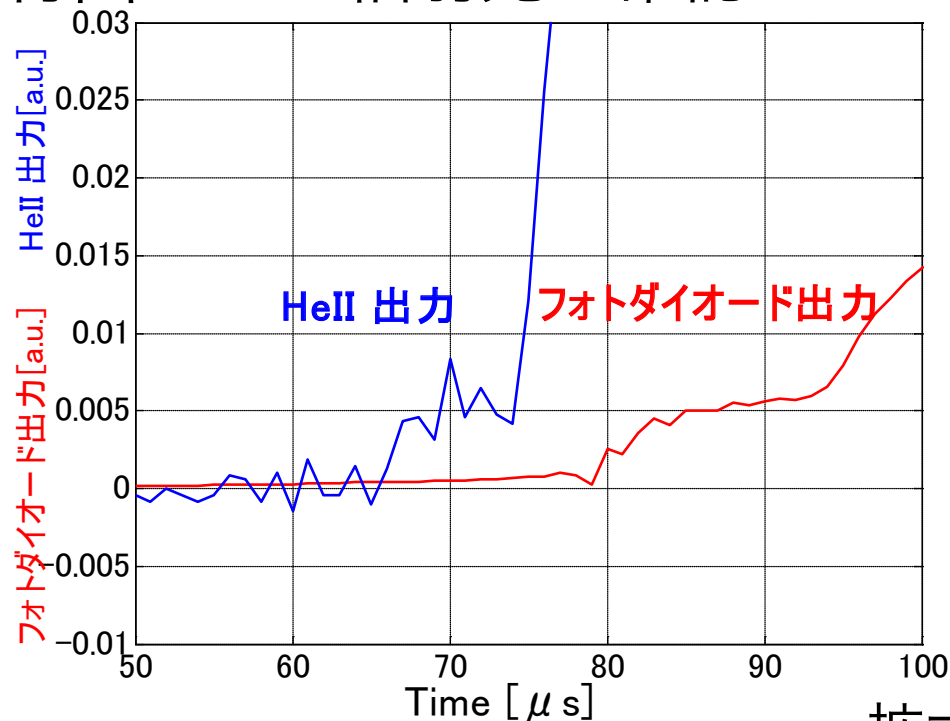
光学素子配置図

● 背面からの温度計測



立ち上がり時間に $17\mu\text{s}$ の差

背面からの輻射光を確認



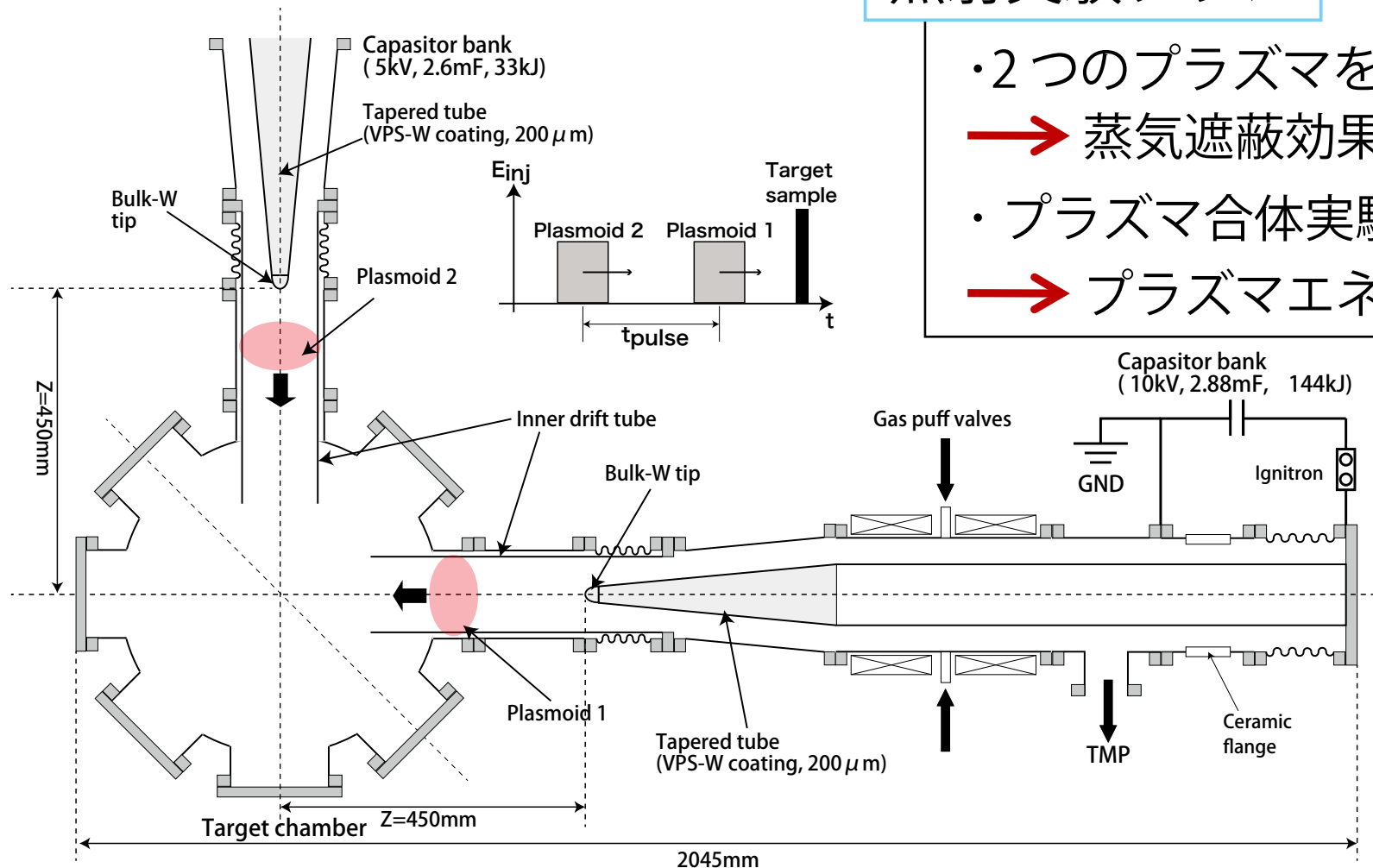
拡大図

ダブルプラズマガン装置

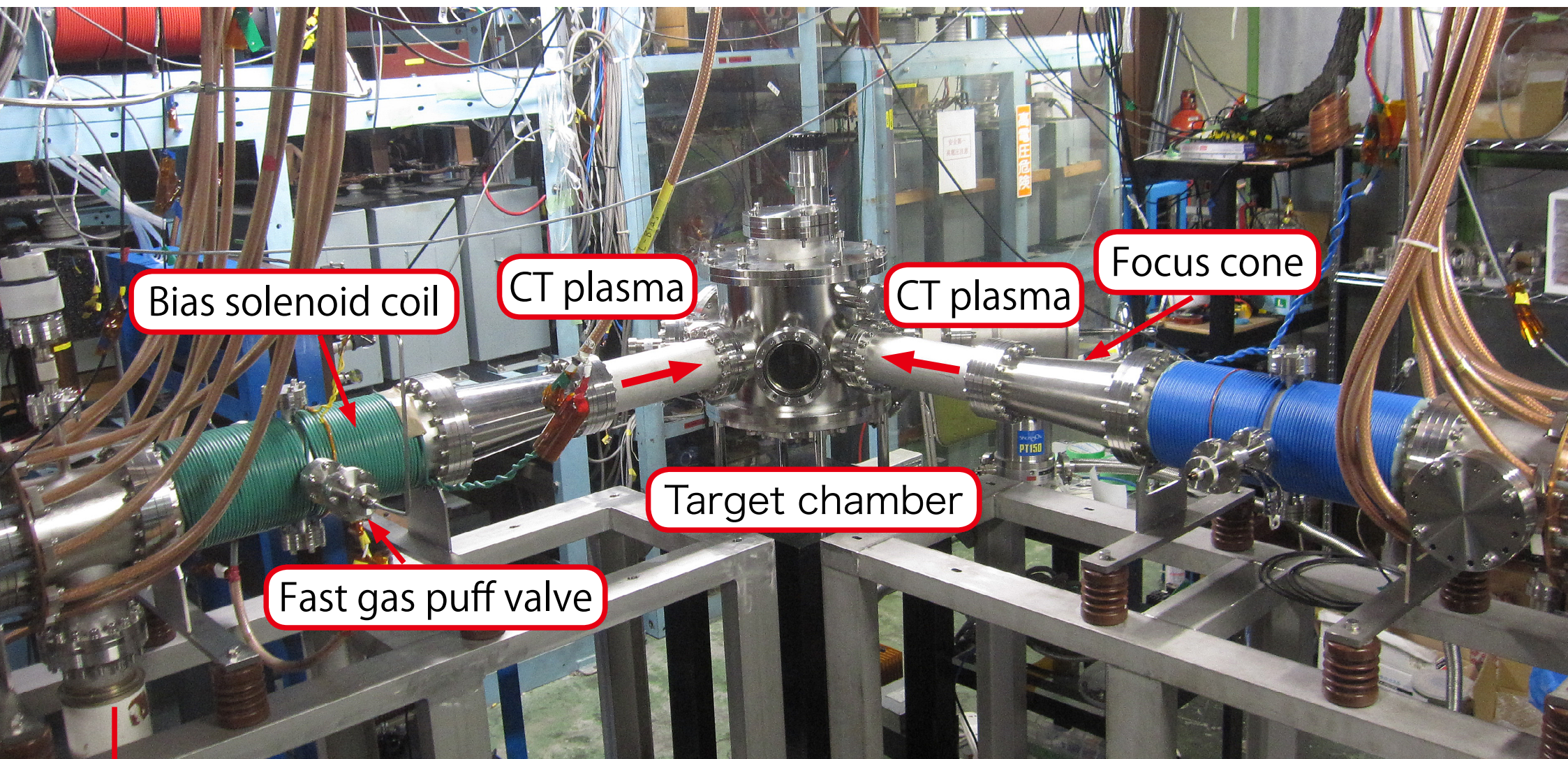
- 2つのCT入射装置は各々独立したCTプラズマを生成する。
- この装置は2つのCTプラズマ間の遅れ時間 t_{pulse} 制御できる。

照射実験プラン

- 2つのプラズマを用いて
→ 蒸気遮蔽効果の検証を行う
- プラズマ合体実験 ($t_{\text{pulse}} = 0\text{sec}$)
→ プラズマエネルギーの増加



ダブルプラズマガン装置の写真@兵庫県立大

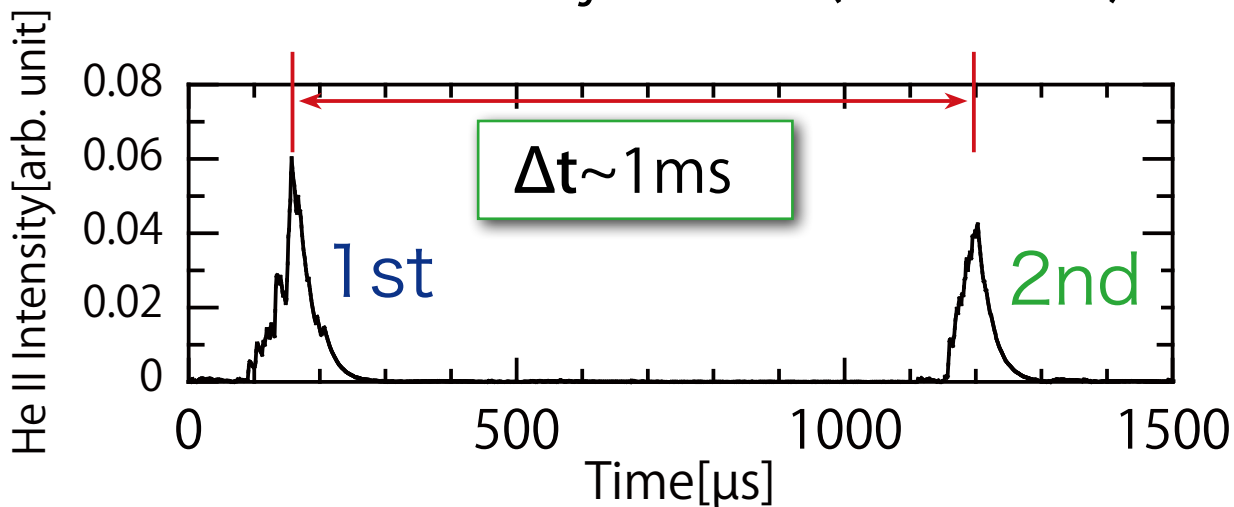


TMP

ダブルプラズママンガン装置における初期実験結果

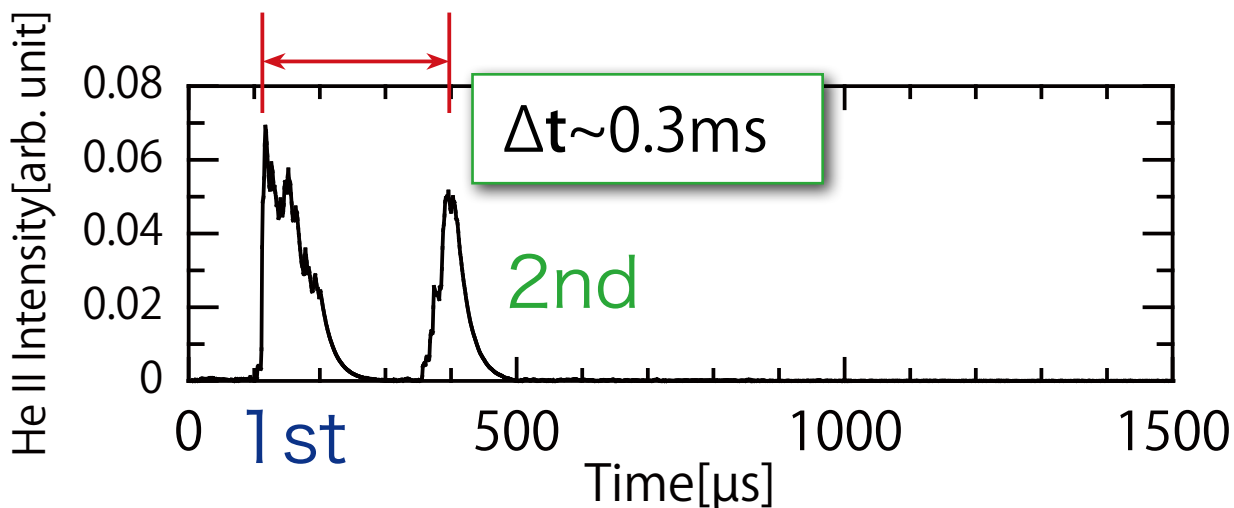
- ◆ 任意の時間間隔を持たせて放電を行うことに成功した.

Emission intensity of He II(468.6nm)



- 電源用コンデンサバンクの定格により, この実験では, コンデンサーの電源エネルギーを下げた.

1st: 4kV, 3mF, 2nd: 6kV, 1mF



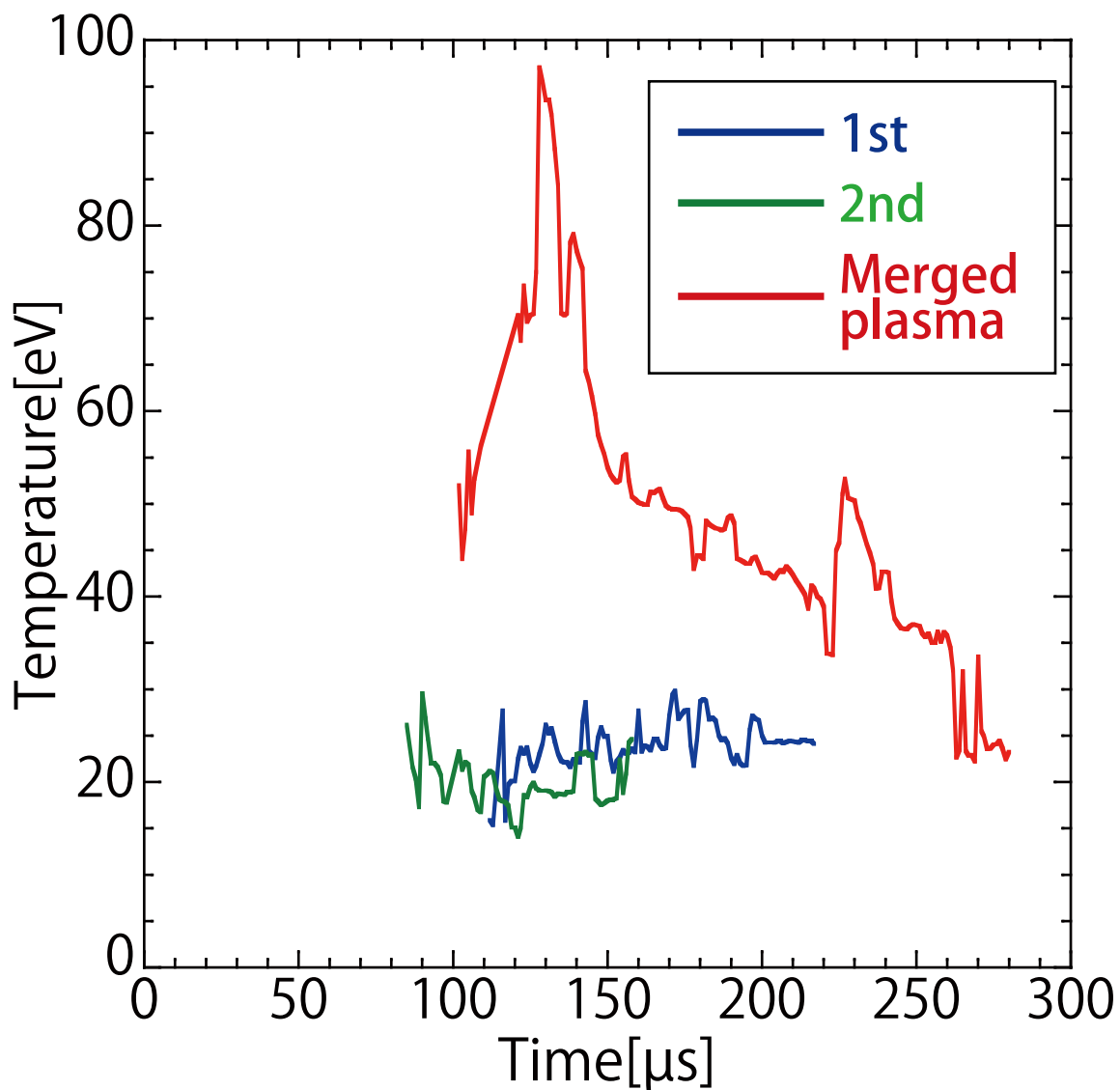
- 遅れ時間は Δt 任意に変更できる.



プラズマ合体実験!

合体プラズマのイオン温度計測

- 急激な温度上昇が計測された。



- シングル CT プラズマのイオン温度 1st および 2nd それぞれ：

$$T_i \sim 25 \text{ eV}$$

- 合体プラズマ：

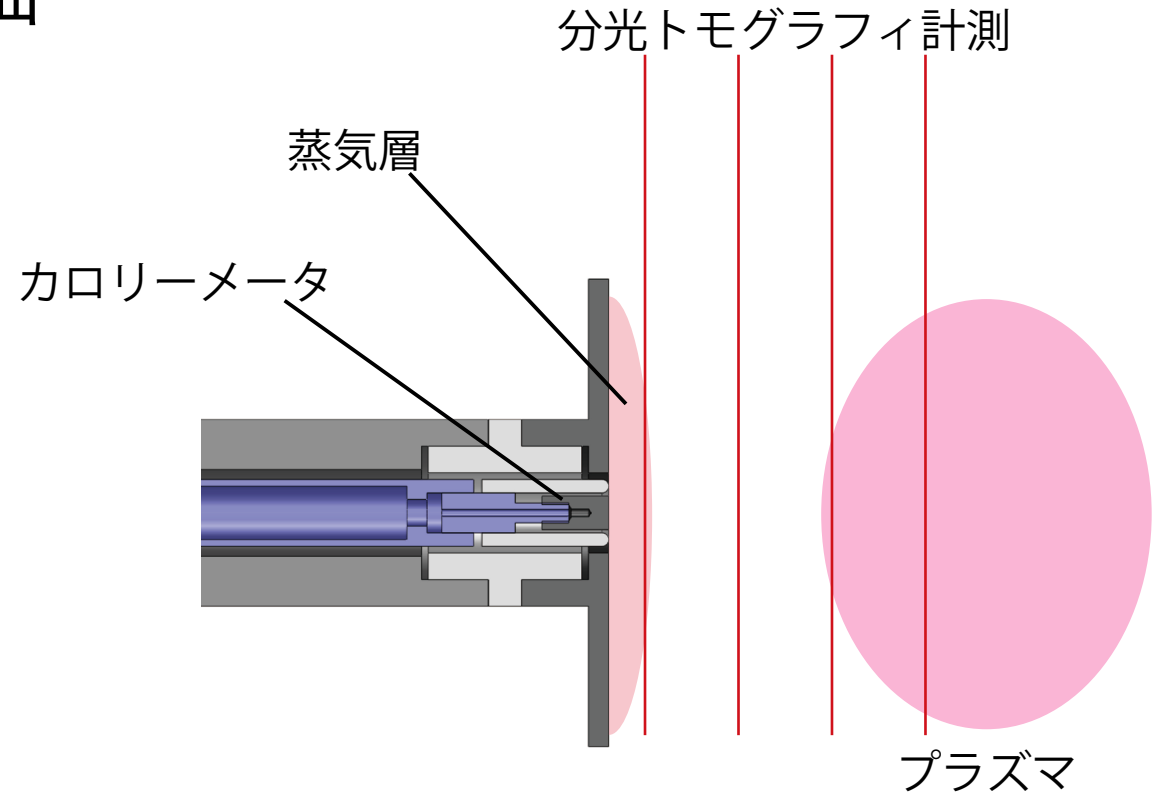
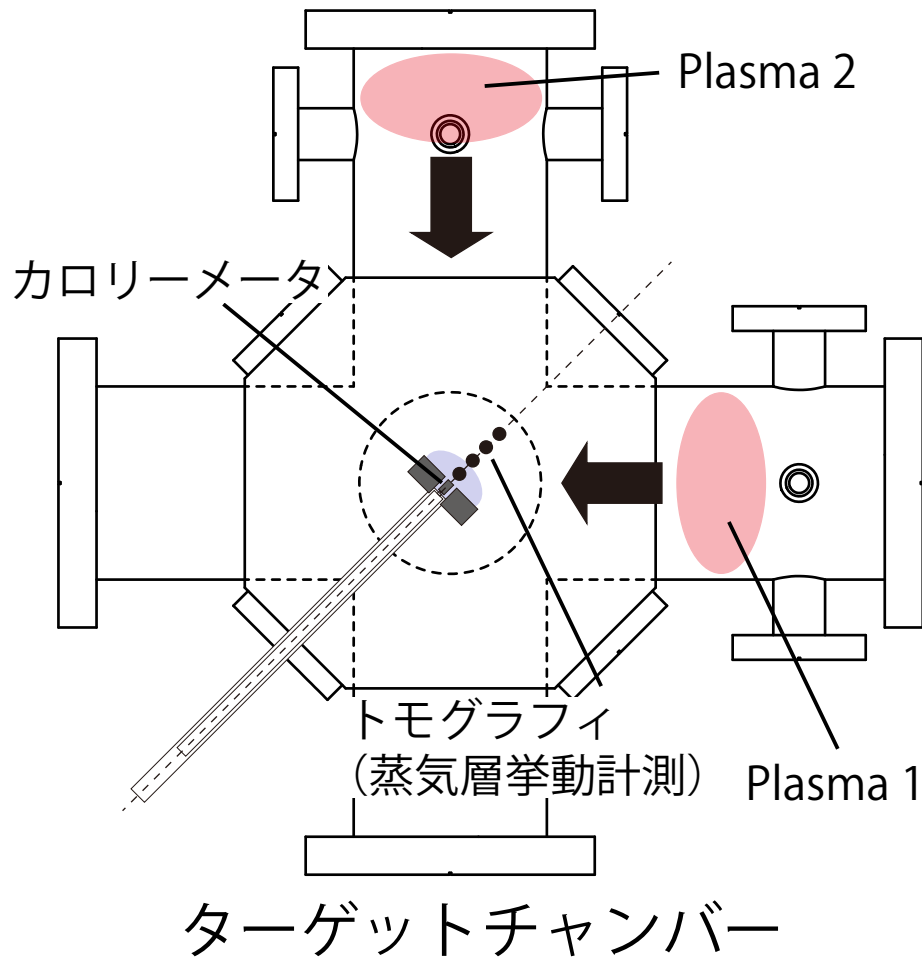
$$T_i \sim 100 \text{ eV}$$



イオン加熱は CT プラズマの運動エネルギーもしくは磁気エネルギーが熱エネルギーへと変換したことに起因していると考えられる。

蒸気遮蔽効果の定量評価

◆ 蒸気遮蔽効果の検証



- カロリメータによる吸収エネルギー密度を計測
- 分光トモグラフィによる蒸気層の挙動計測

→ パイロメータ計測も併せて現在実験中

まとめ

プラズマパラメータおよびエネルギー密度の計測実験

- ・ 電子密度, イオン温度, イオンフロー速度およびポロイダル磁場がそれぞれ計測された.

$$\bar{n}_e \sim 4.5 \times 10^{21} \text{ m}^{-3} \quad T_i \sim 65 \text{ eV} \quad V_i \sim 55 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$$

- ・ 吸収エネルギー密度についてもそれぞれのカロリメータで計測された.

→ カロリメータのチップの材質によるエネルギー密度の違いが生じた

$$Q_c \sim 0.5 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \text{ (graphite)} \quad Q_w \sim 0.3 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \text{ (tungsten)}$$

- ・ パラメータ計測を元にプラズマのエネルギーの評価を行った

→ 熱エネルギーが支配的であり, パルスの先頭部に多くのエネルギーが集中

- ・ W 材料表面温度をモデリングによって見積もると, およそ 1500K に達する

ダブルプラズマガン装置における初期実験

- ・ ダブルプラズマガン装置は任意の遅れ時間を持つ 2 つの CT プラズマを生成できる
- ・ 2 つの CT プラズマを合体させたとき, 合体プラズマのイオン温度および Hell 線の発光強度は上昇する.

発光強度

約 6 倍の増加

イオン温度

Single : 25 eV → 合体プラズマ : 100 eV

