



ダブルプラズマガン装置における 蒸気遮蔽効果の検証実験

佐久間 一行, 菊池 祐介, 浅井 康博, 大西 晃司,
磯野 航, 中園 拓実, 福本 直之, 永田 正義
兵庫県立大学院工

もくじ

- 背景 : PWI 実験に向けた磁化プラズマガン (MCPG) 装置
- プラズマパラメータ・熱流束計測 (シングルプラズマガン)
- 蒸気遮蔽効果の検証 (ダブルプラズマガン装置)
- 今後の予定

研究背景

ITER における PFC へのパルス熱負荷

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

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

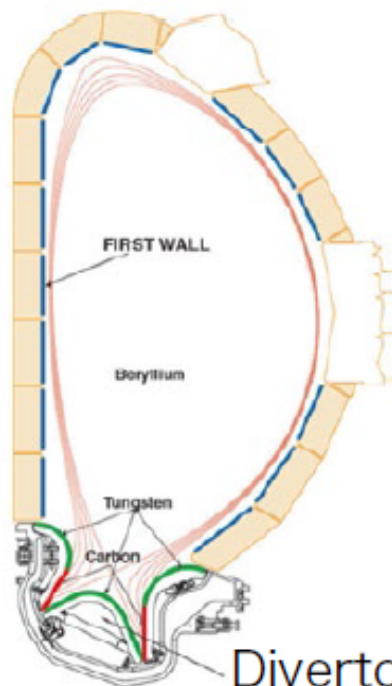


ダストがコアに入りプラズマが冷やされる

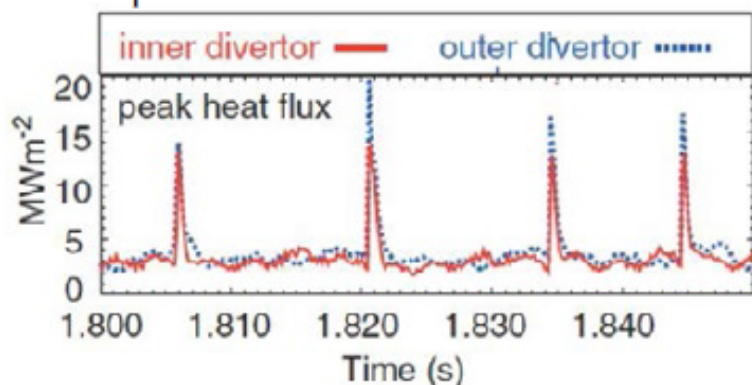


コアプラズマ消滅の危険性

損傷過程の解明は
重要な研究テーマである



poloidal cross-section



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

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.

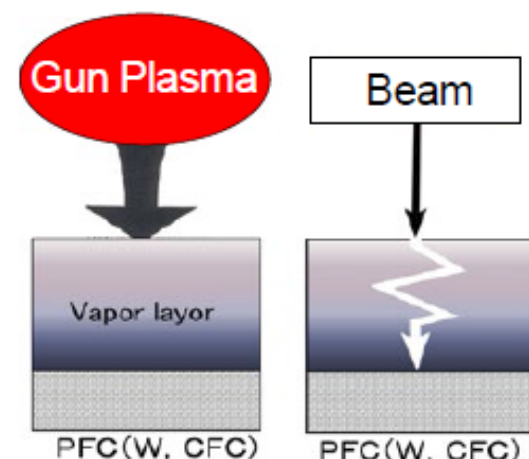
- 電子ビームやレーザ装置

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

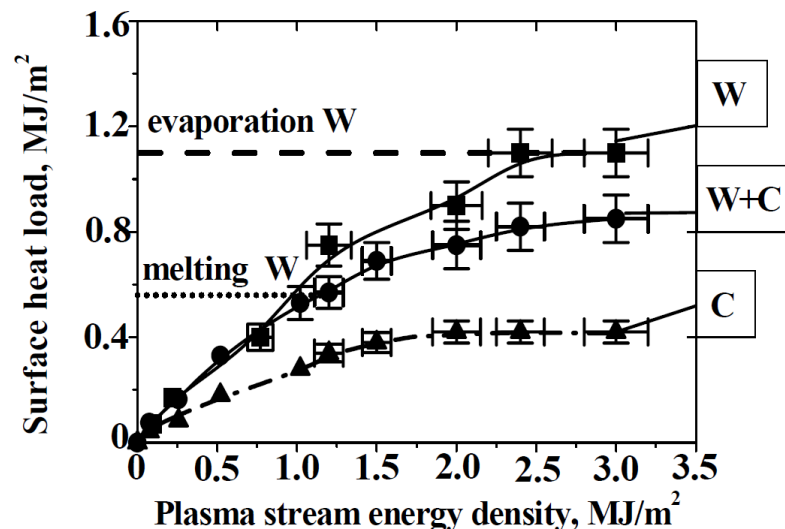


Vapor shielding effect

Damage reduction : 1/10 ~ 1/100

蒸気遮蔽効果の検証方法

◆ 先行研究では



QSPA Kh-50 における照射実験結果より

横軸：照射するプラズマの全エネルギー密度

縦軸：ターゲット材料表面でのエネルギー密度

- 低エネルギー密度では比例
- エネルギー密度の増加に伴い、飽和する

➡ 蒸気遮蔽効果が発現している

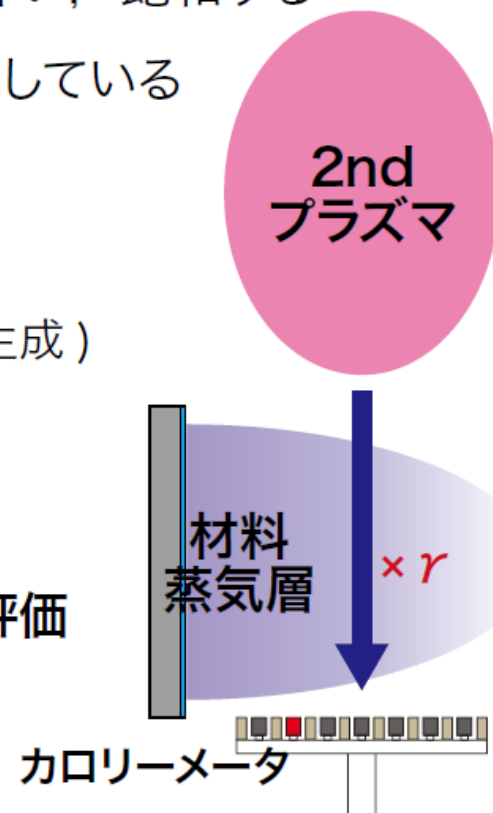
V. I. Tereshin et. al., 22nd IAEA Fusion energy Conference, IT/P6-12, 2008

◆ 本研究では

- ・ 蒸気層を Al フォイルを用いて別途生成 (独立した 2 つのプラズマの生成)
- ・ 蒸気層を通過したプラズマのエネルギー密度を計測
- ・ Al フォイルの有無によるエネルギー密度の比較

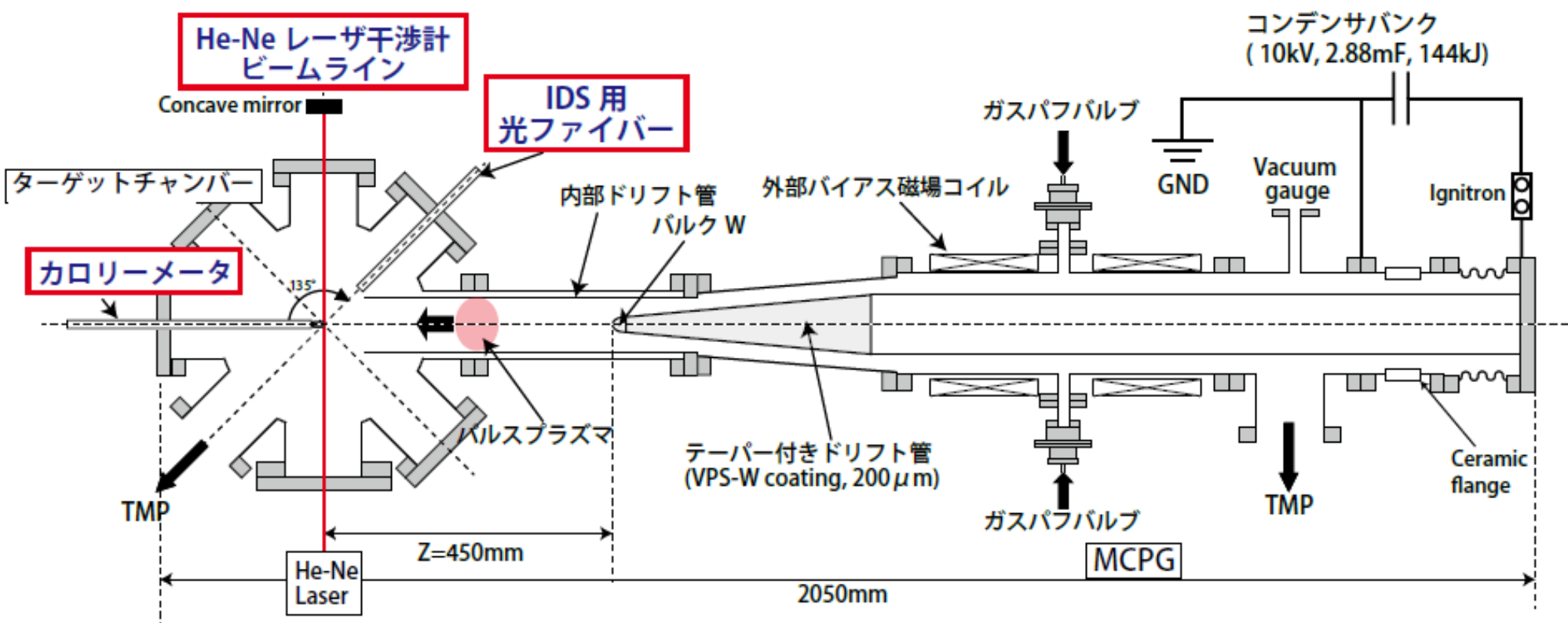
➡ 蒸気層を通過したプラズマのエネルギー密度の緩和係数の評価

プラズマのエネルギー密度はどの程度緩和されるのか



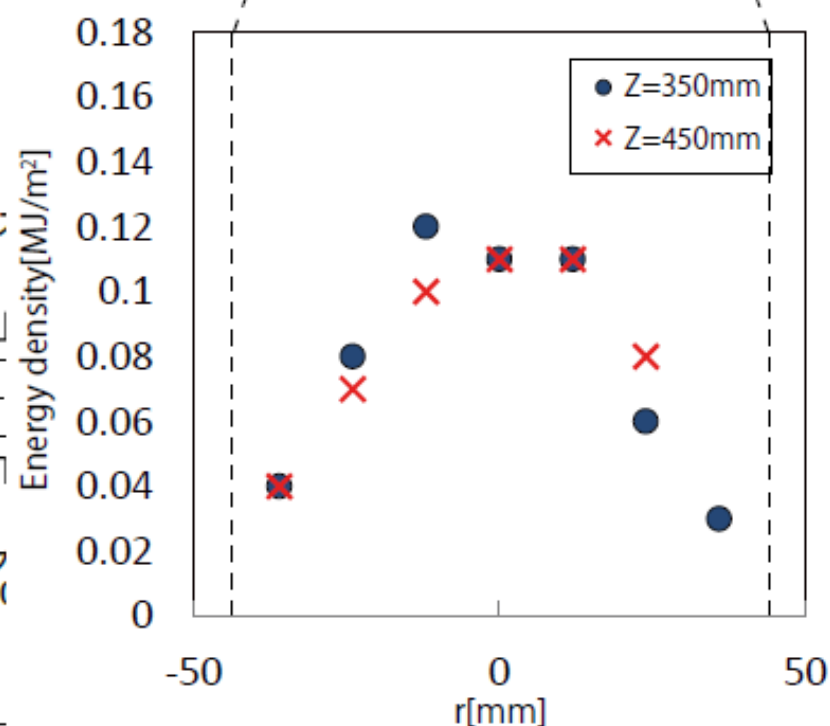
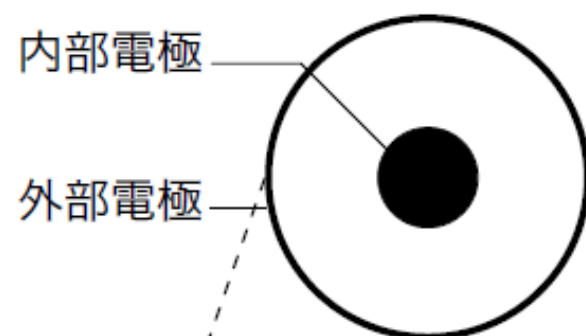
シングル MCPG 装置外観図

- ・ プラズマ生成電源に高密度コンデンサを使用：10kVMax, 2.88mF, 144kJ
- ・ テーパー付きドリフト管によるプラズマの高密度化
- ・ プラズマ直径：約 90mm(ドリフト管径より)

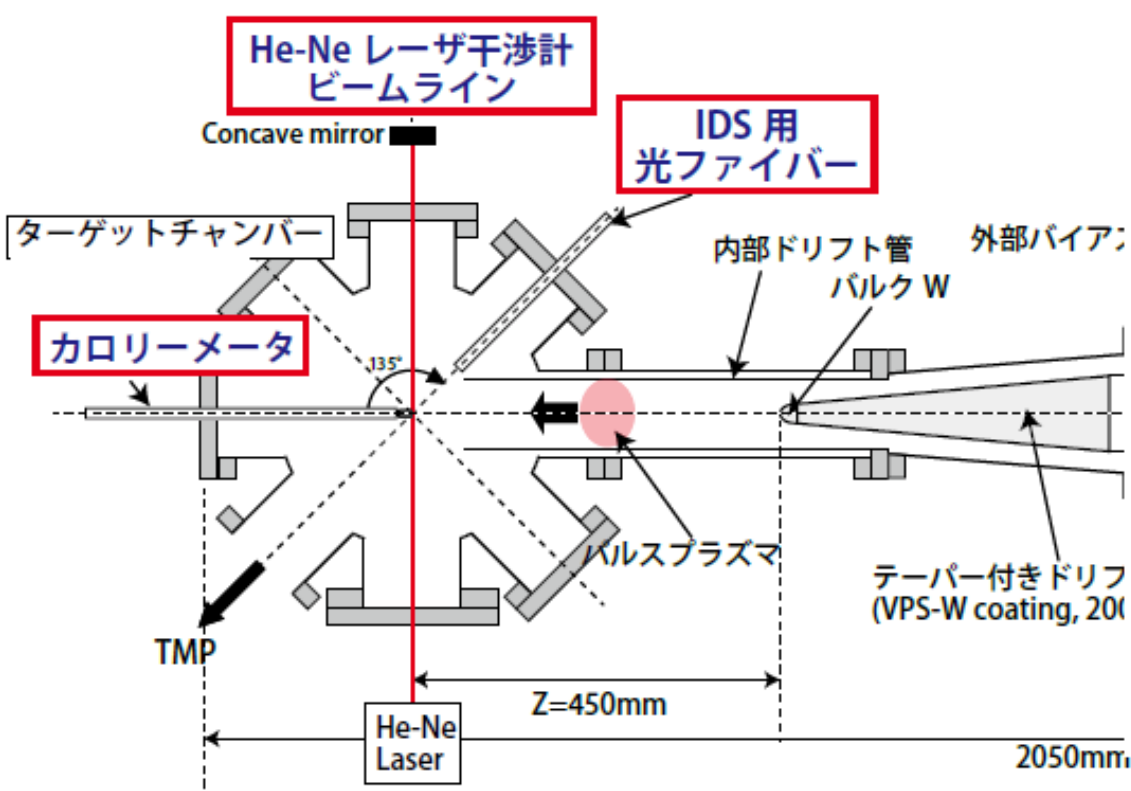


シングル MCPG 装置外観図

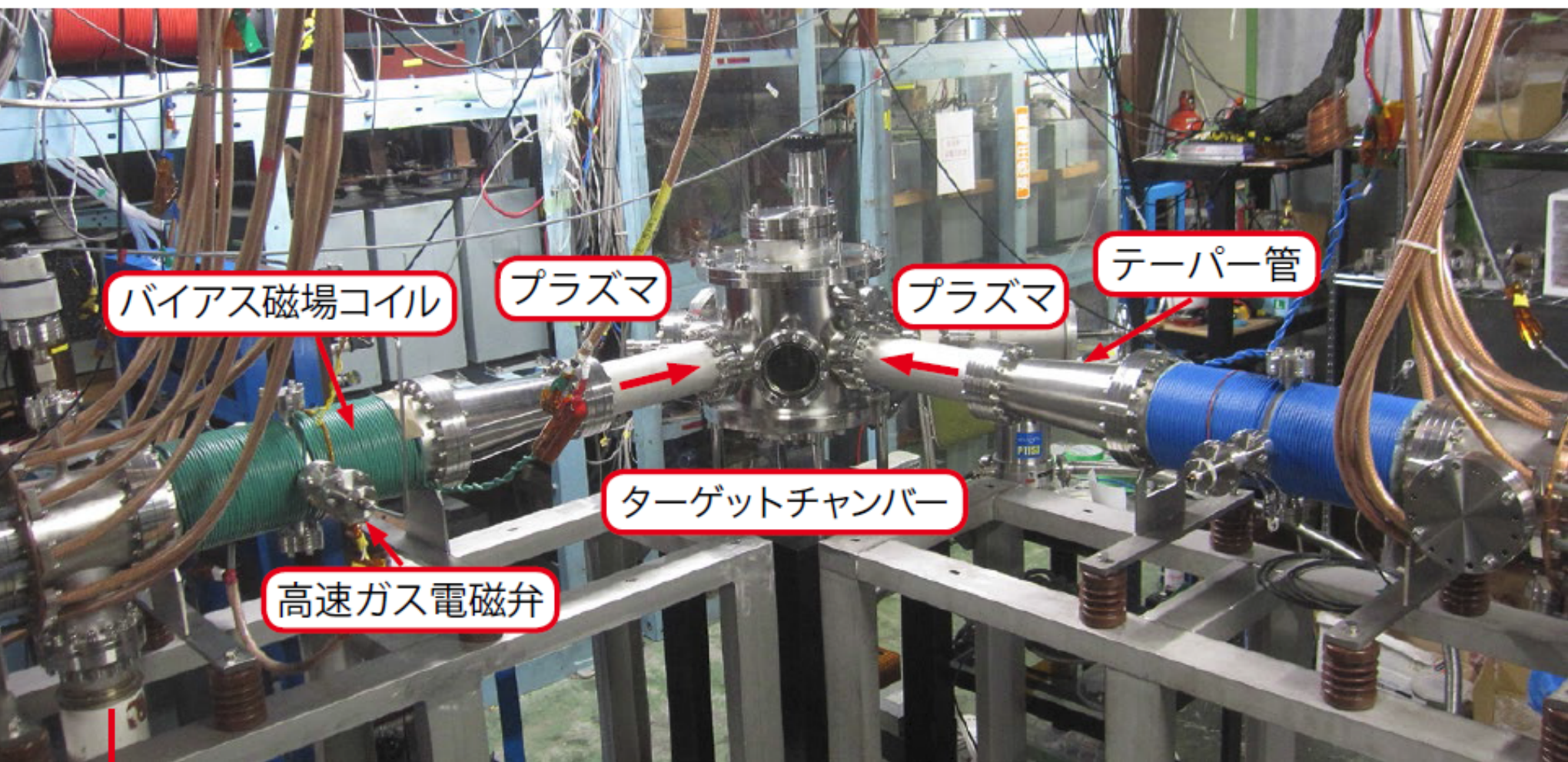
- ・ プラズマ生成電源に高密度コンデンサをイ
- ・ テーパー付きドリフト管によるプラズマ
- ・ プラズマ直径：約 90mm(ドリフト管径)



パルスプラズマエネルギー密度分布



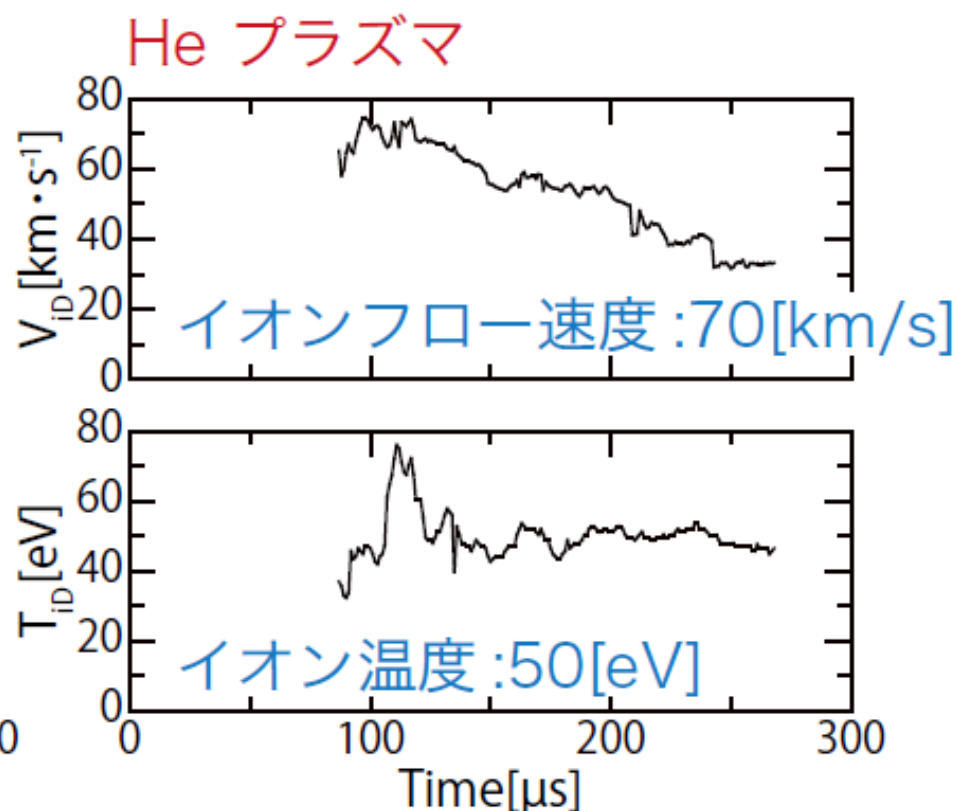
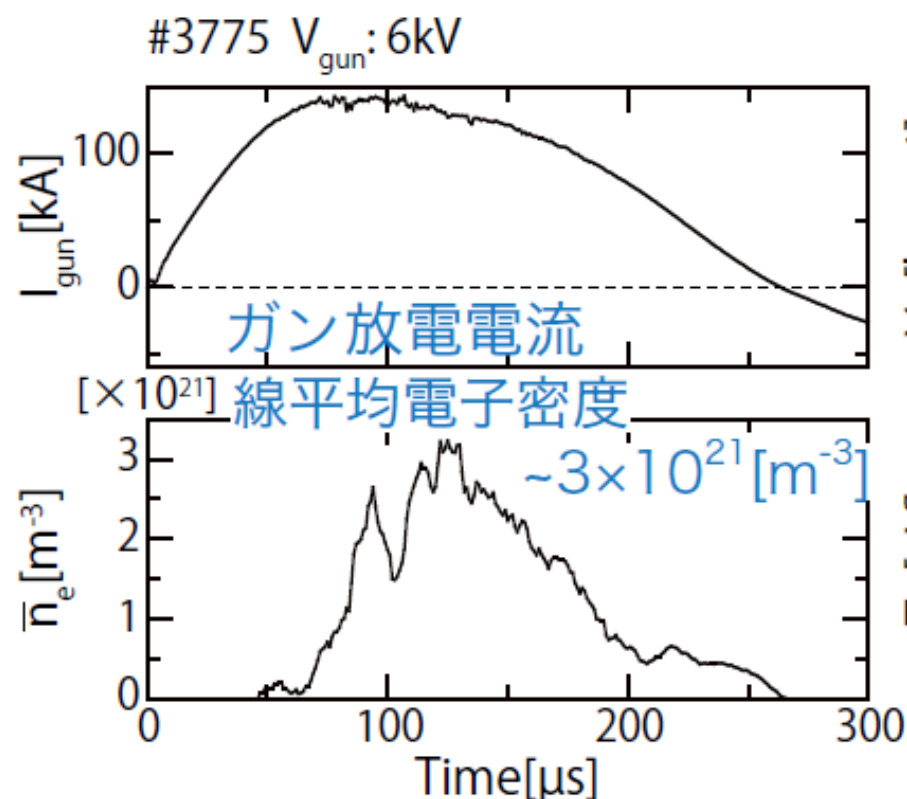
ダブルプラズマガン装置@兵庫県立大



TMP

シングルプラズマガン典型放電波形

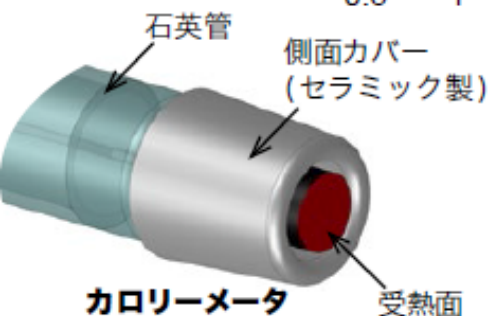
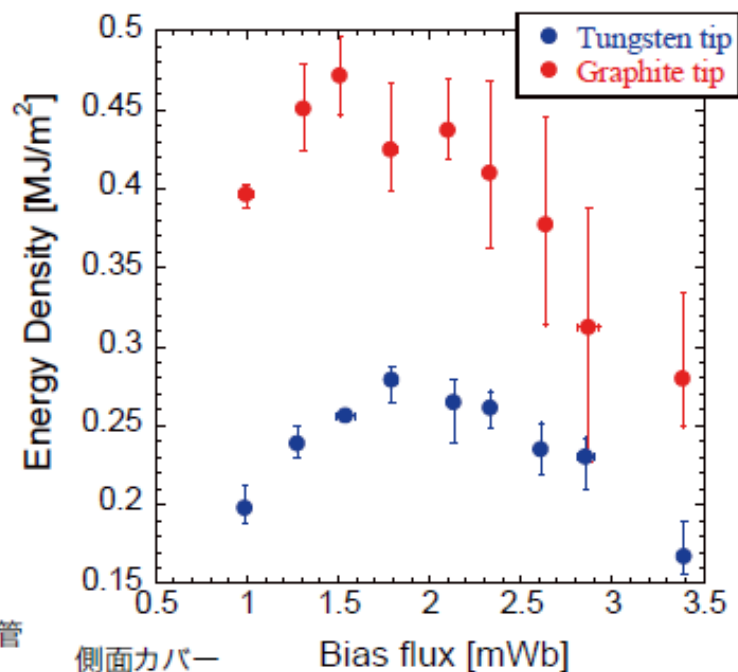
- ガン放電電流 : $\sim 150\text{kA}$
- ガス種 : H, D, He
- パルス幅 : 0.15ms
- 運転間隔 : 10 分



照射実験結果 (シングル MCPG)

• 吸収エネルギー密度

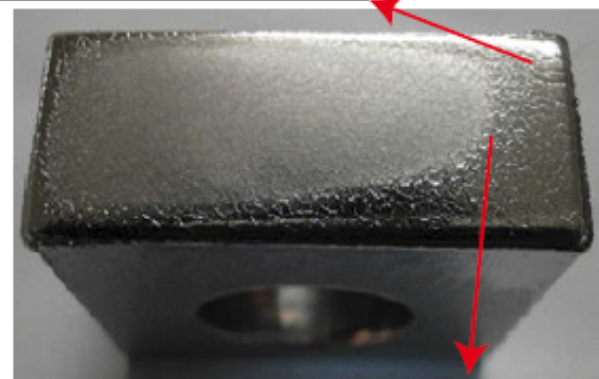
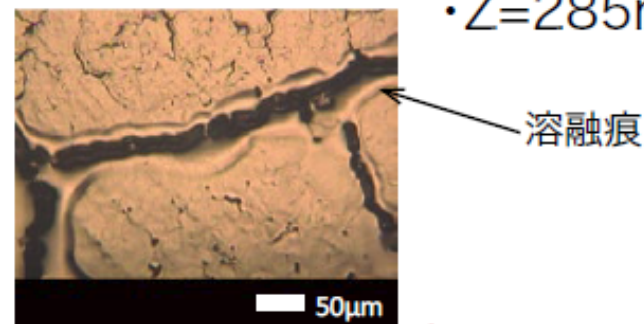
- ・ カロリーメータにより計測
- ・ ガン電圧：6kV
- ・ 計測位置：Z=450mm



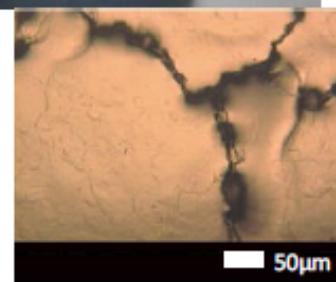
- ・ ~0.3 MJ/m² (W tip)
- ・ ~0.5 MJ/m² (C tip)

• W サンプル

- ・ パルスプラズマ 25 発照射
- ・ クラックおよび溶融痕の形成
- ・ Z=285mm



- ・ 0.75 MJ/m² (推定)
- ・ 0.15 ms
- ・ 61 MJm⁻²s^{-0.5}



ダブルプラズマガン装置を用いた実験アプローチ

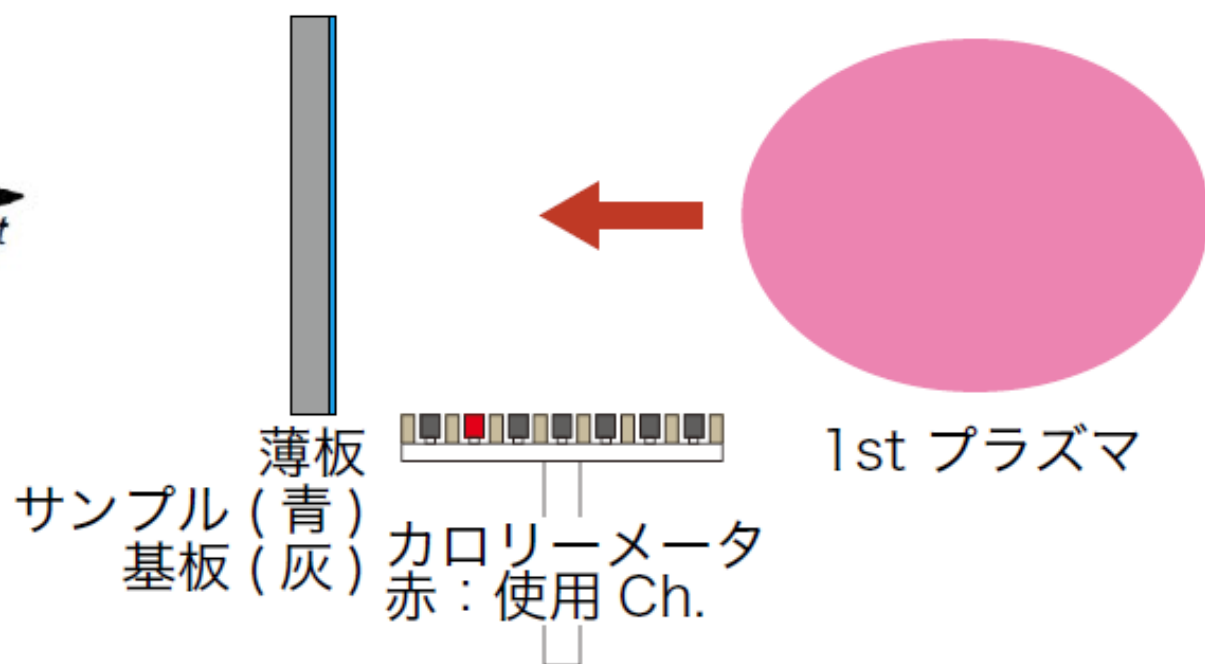
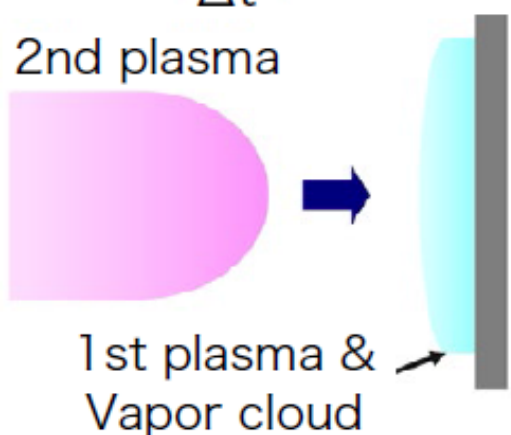
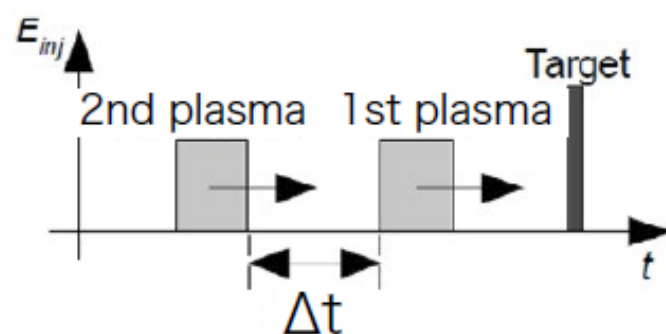
◆ 蒸気遮蔽効果の検証実験

- 2つの独立したパルスプラズマ

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。



ダブルプラズマガン装置を用いた実験アプローチ

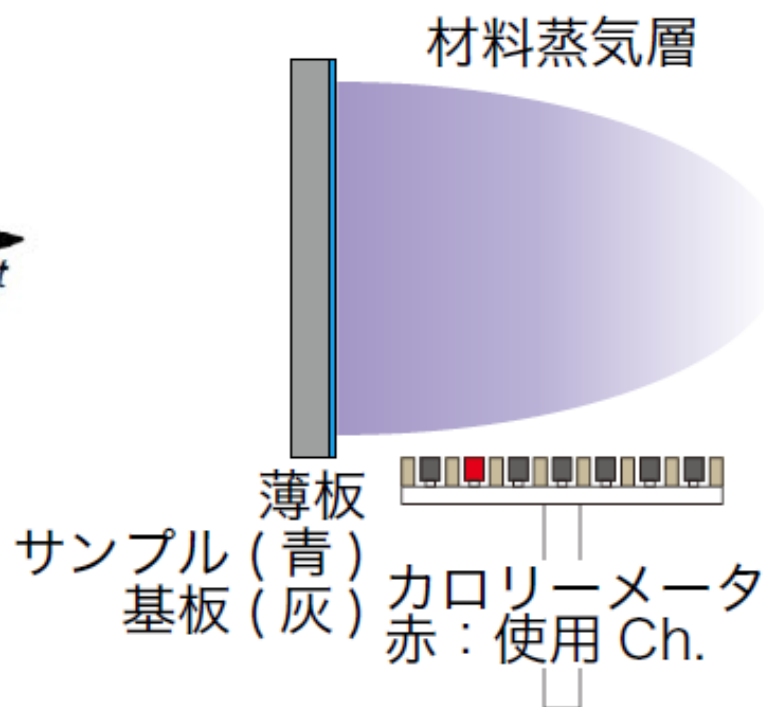
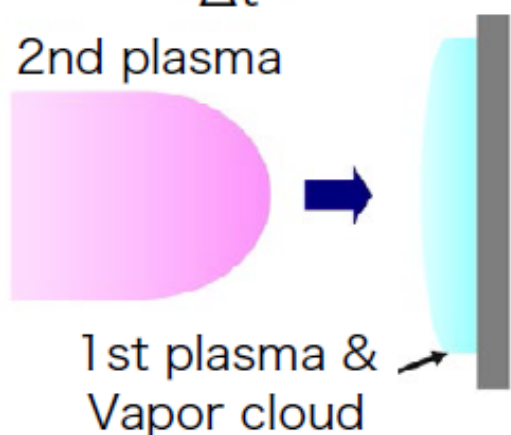
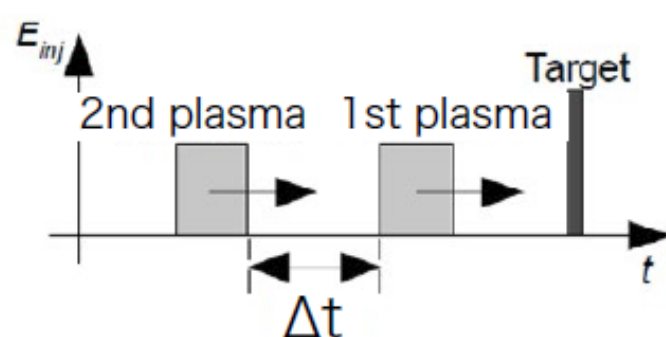
◆ 蒸気遮蔽効果の検証実験

- 2つの独立したパルスプラズマ

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.



ダブルプラズマガン装置を用いた実験アプローチ

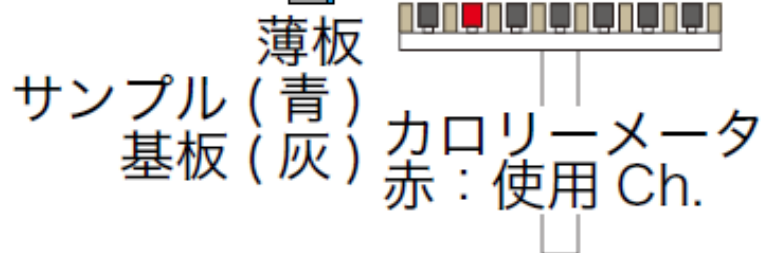
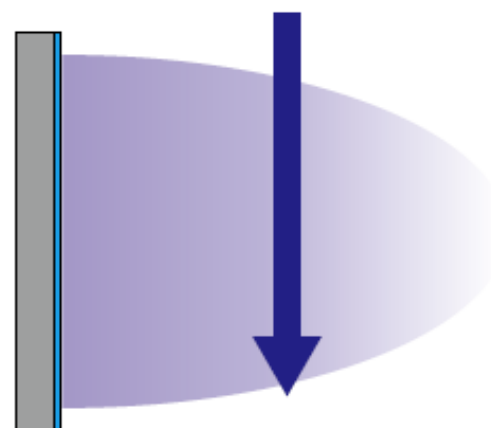
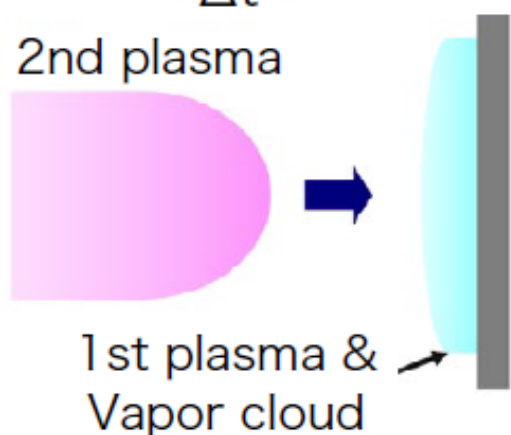
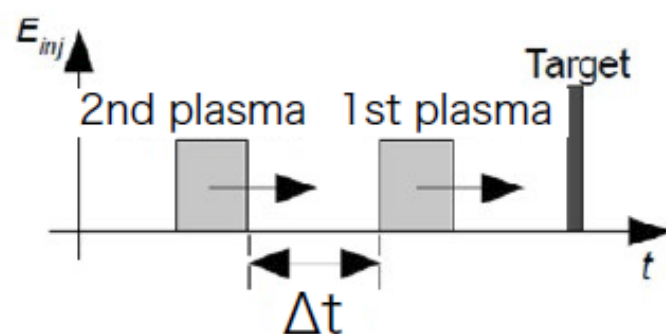
◆ 蒸気遮蔽効果の検証実験

- 2つの独立したパルスプラズマ

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.



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

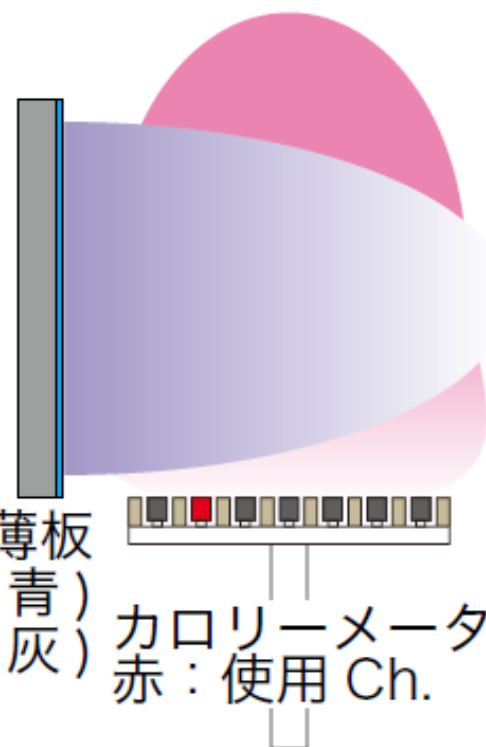
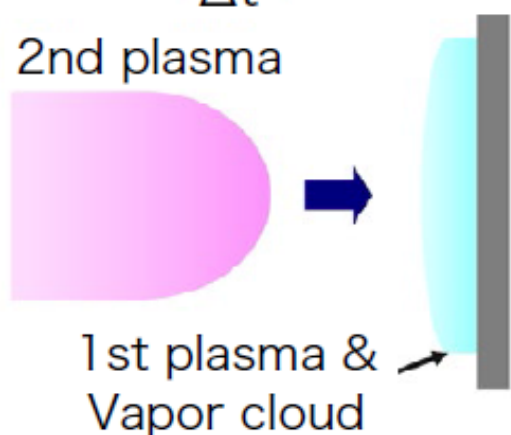
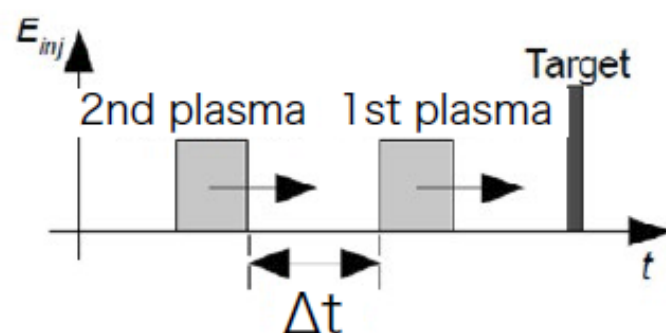
- 2つの独立したパルスプラズマ

1st: 蒸気層の形成

2nd: 熱緩衝バリアの検証

- ◆ カロリーメータによって
緩和された 2nd プラズマの
エネルギー密度を評価

2つのプラズマは Δt の時間差を持つ。



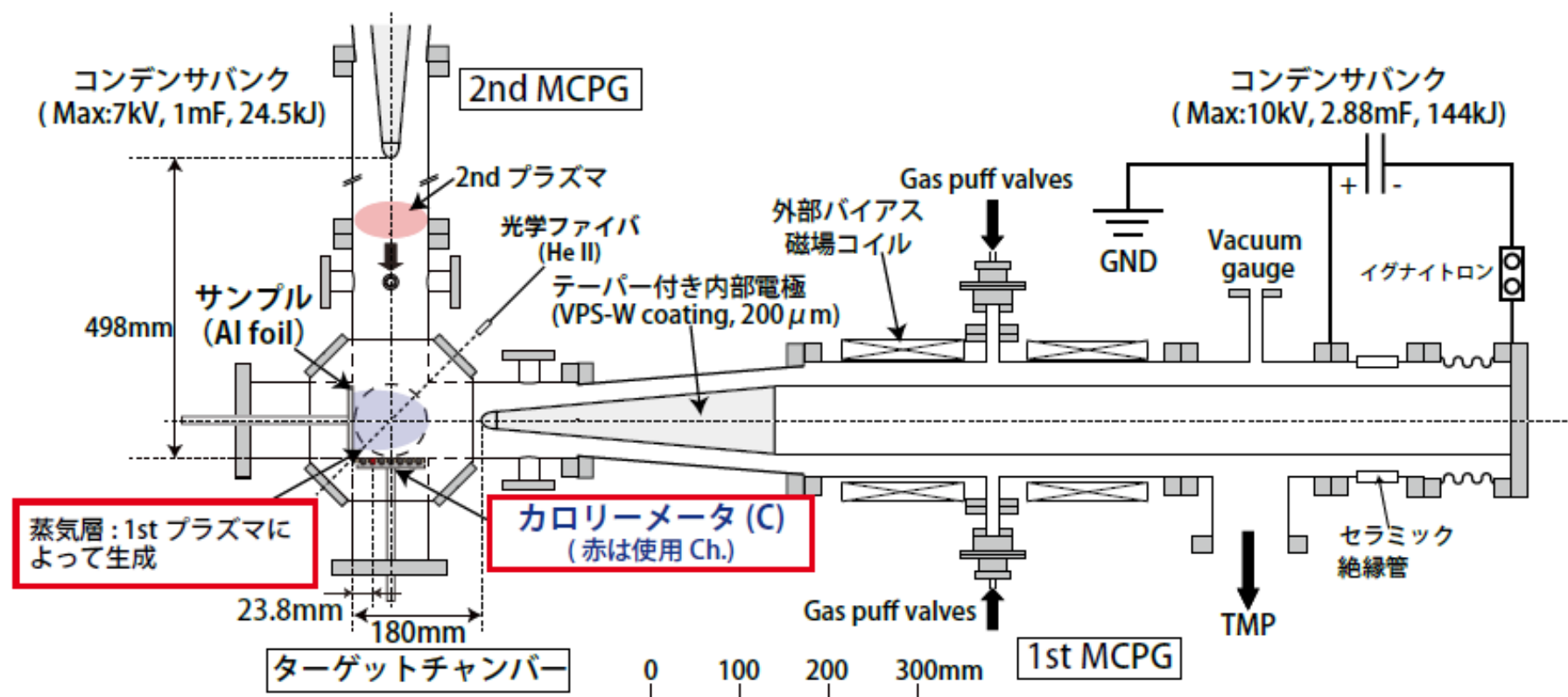
蒸気遮蔽効果
の発生

サンプル (青)
基板 (灰)

カロリメータ
赤: 使用 Ch.

実験設定：ダブルプラズマガン装置

- ・ 2 台の MCPG にて独立した 2 つのプラズマを生成
- ・ 2 台の MCPG の放電タイミングの間隔 Δt を制御
- ・ 電源エネルギー
 - ・ 1st MCPG : 10kVMax, 2.88mF, 144kJ
 - ・ 2nd MCPG : 7kVMax, 1mF, 24.5kJ



ダブルプラズマガン装置概略図

実験設定：放電条件

・放電条件

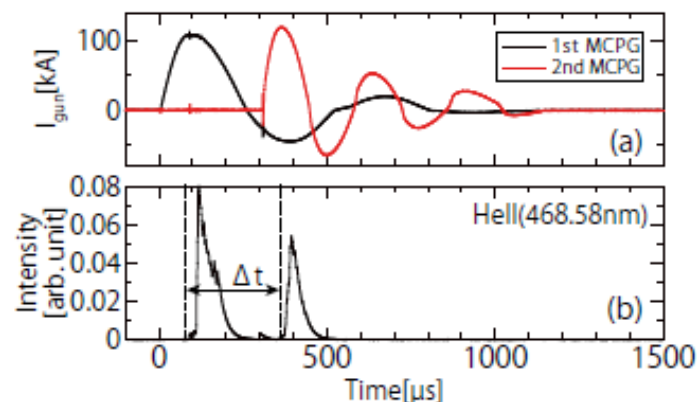
- ・放電ガス：He
- ・ Δt : 70 μ s

	ガン電圧 [kV]	ガン電流 [kA]	パルス幅 [ms]
1st MCPG	4.0-4.6	~110	~0.2
2nd MCPG	6.0(固定)	~120	~0.15

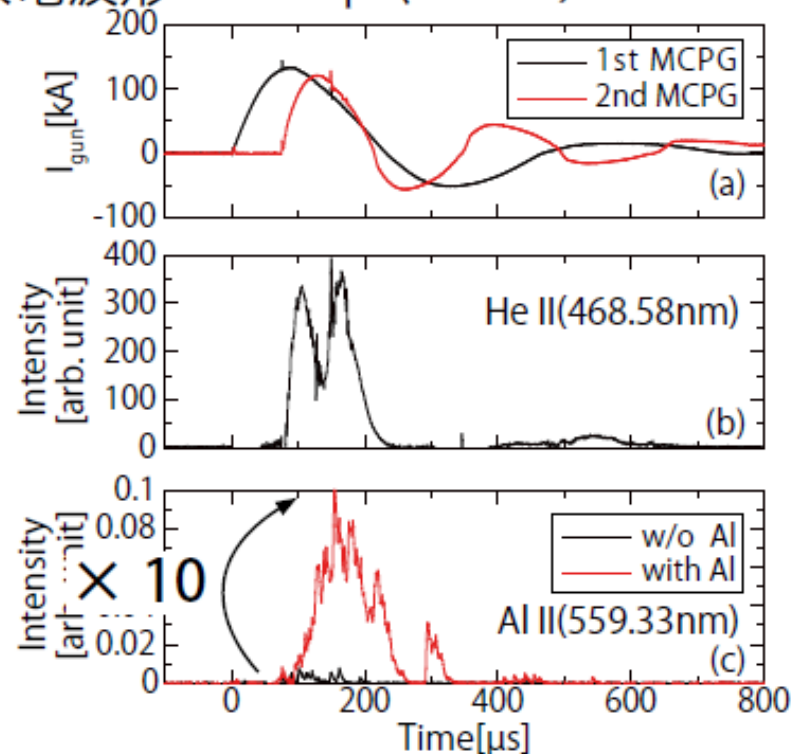
・サンプル (蒸気生成用)

- ・材質：アルミニウム
- ・厚み：11 μ m
- ・直径： ϕ 60 mm
- ・製造：三菱アルミニウム社

放電波形 Δt : 300 μ s(#4799)



放電波形 Δt : 70 μ s(#6784)

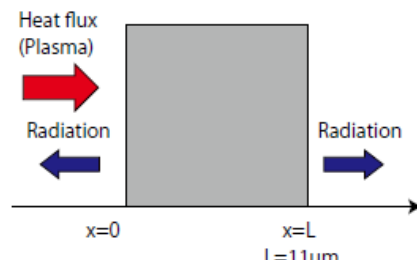
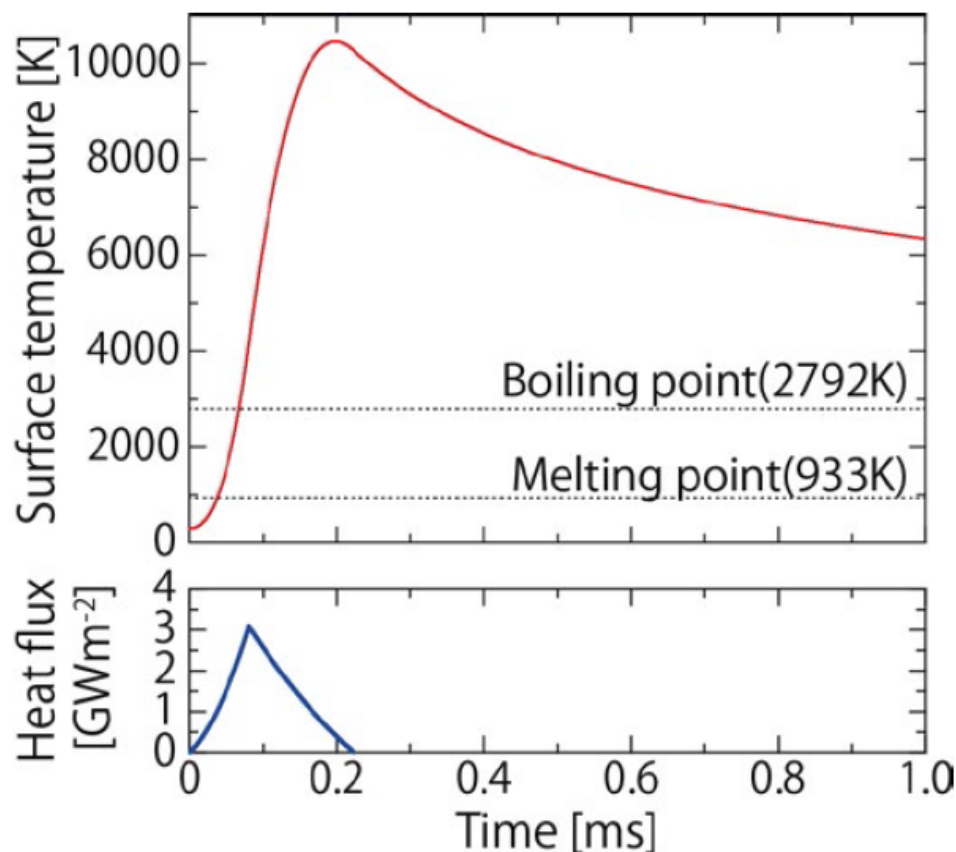


Al 材料の蒸気層 (プラズマ) 形成を確認

表面温度計算：1次元熱伝導方程式

◆ 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密度を仮定
- 相変化については考慮していない



◆ 初期条件および境界条件

- 初期条件
 - $T = 300\text{K}$
- 境界条件
 - 熱流束および熱輻射を想定

◆ Al 物性値 (一定)

$$\rho : 2.70 \times 10^3 [\text{kg/m}^3]$$

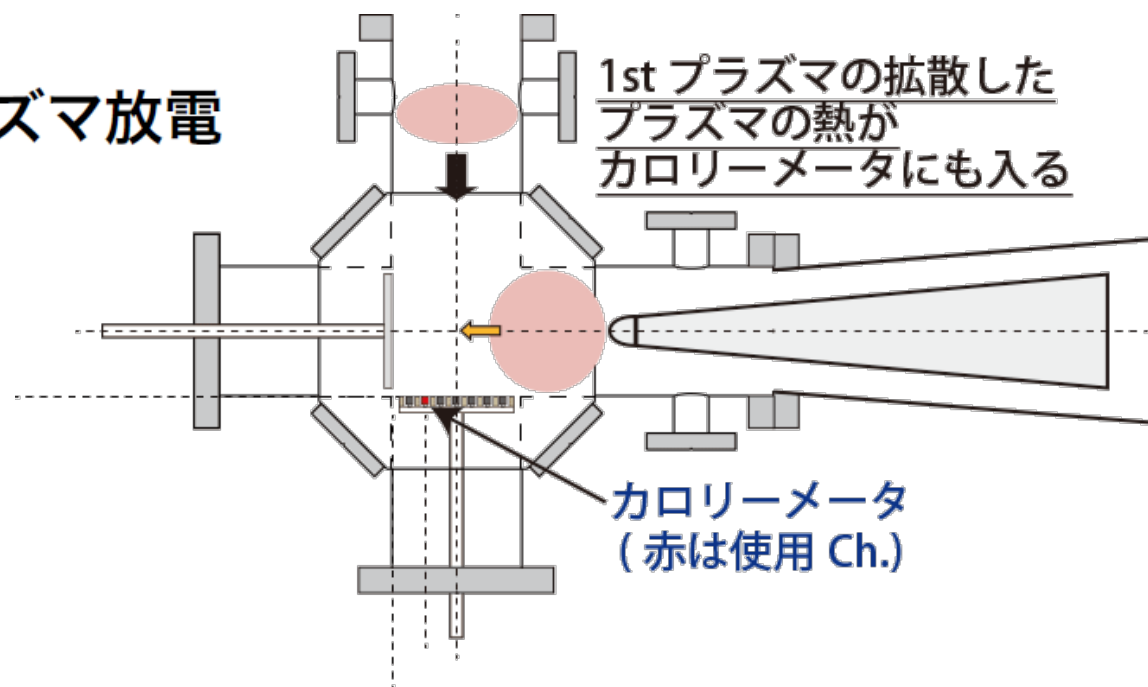
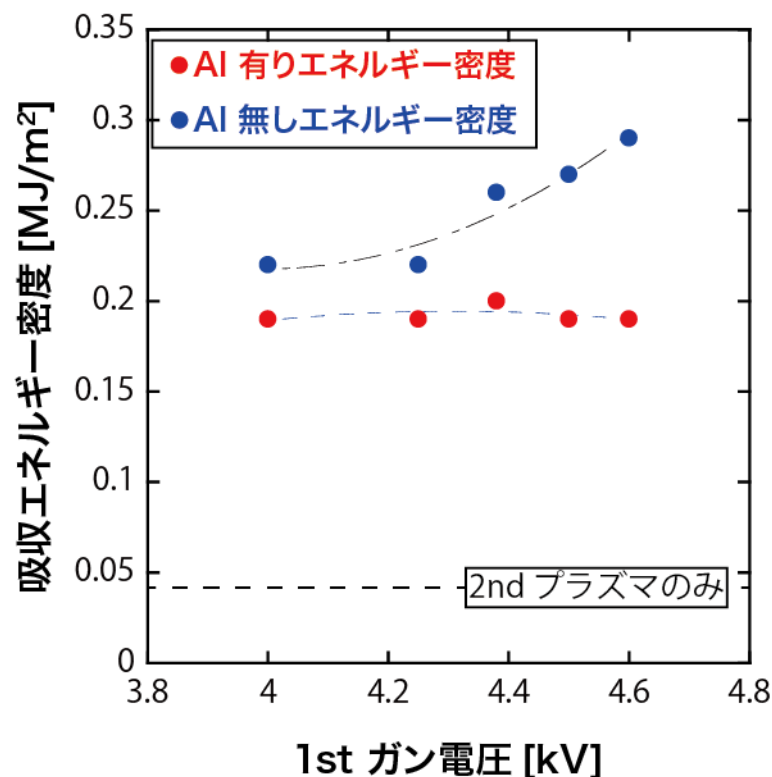
$$C_p : 896.91 [\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}]$$

$$K : 273 [\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}]$$

➡ 蒸気層が形成されると想定

実験結果

◆ エネルギー密度：ダブルプラズマ放電



- Al 蒸気層の量について

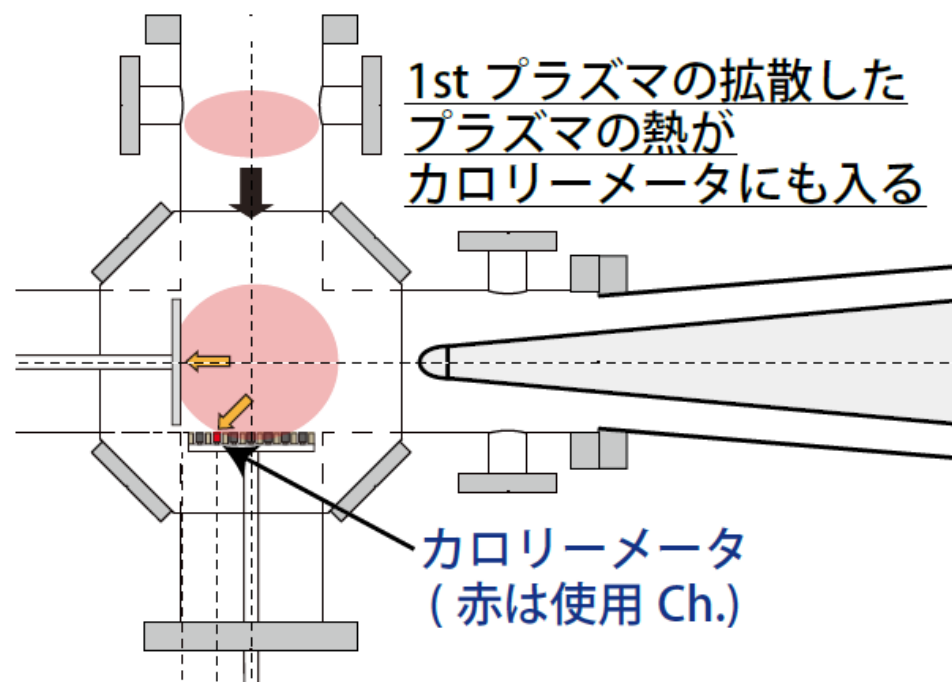
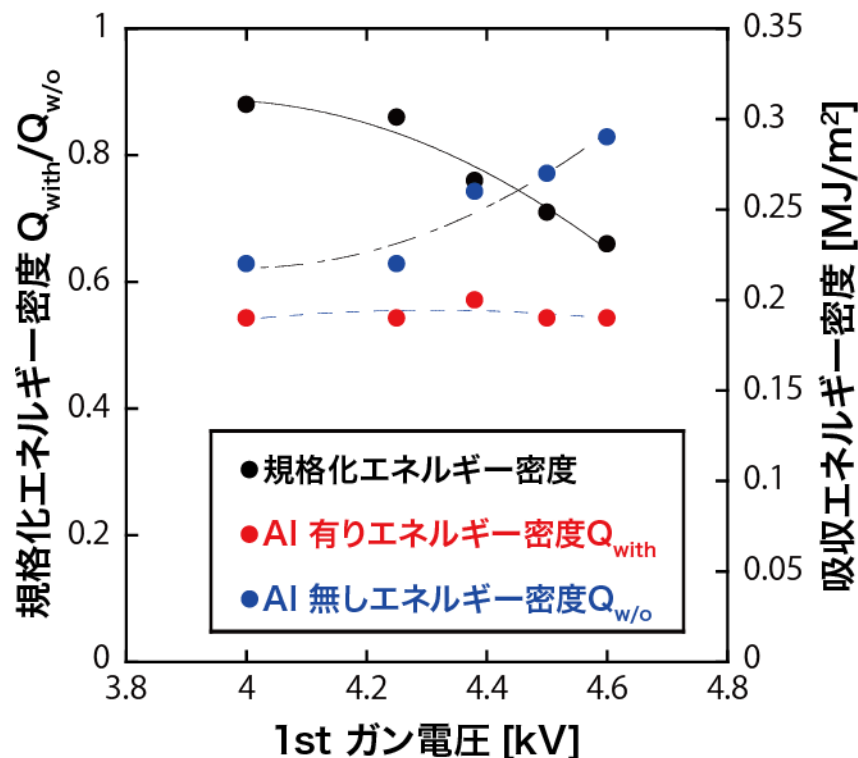
検出されたエネルギー密度：

$$Q_{detected} = Q'_1 + Q_2$$

- 1st プラズマからのエネルギーが一部カロリメータに入る (Q'_1)
- 1st ガン電圧の増加 **→** 1st プラズマへの投入エネルギーの増加
- 1st ガン電圧を増加することで、1st プラズマ自身の自己遮蔽が生じている可能性がある

実験結果

◆ エネルギー密度の低減



- 規格化エネルギー密度の算出

$$\gamma = Q_{with} / Q_{w/o}$$

規格化エネルギー密度は、1st ガン電圧を上昇させると緩和されて減少する

$$\gamma_{max} = 0.66 \quad (V_{1st\ gun} : 4.6\text{kV での緩和率})$$

今後の予定

◆ W 材料における蒸気遮蔽効果の検証

- W の溶融・蒸発の発生が課題

→ { ・電源増設によるプラズマのロングバ
・W 溶射材料の活用

◆ 蒸気層の材料依存性の調査

- { ・低 Z 材料：Al, C
- ・高 Z 材料：W

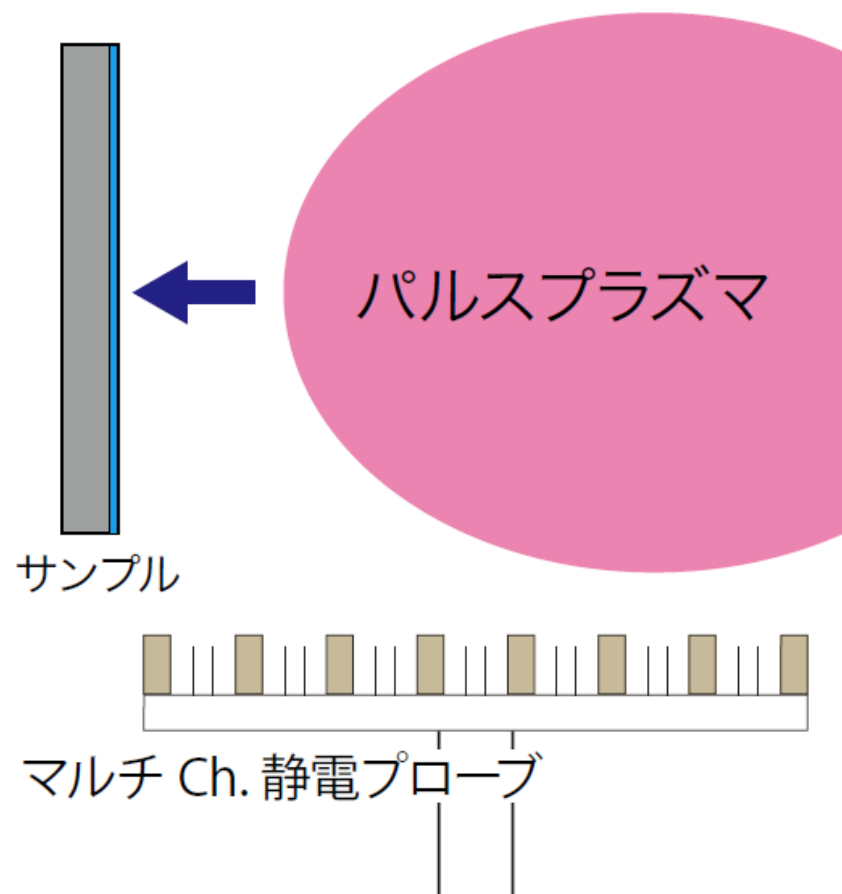
◆ 各種計測の実施

- 分光トモグラフィ計測により挙動を調査
- IDS(Ion-Doppler Spectrometer) 計 測 に
よって表面近傍でのパルスプラズマパラ
メータの変化を調査
- パイロメータによる材料（背面）温度計測
- 静電プローブによるイオン粒子束の計測

- 静電プローブを用いたイオン粒子束の計測

高時間分解能をもつ計測 (1 μ s 程度)

→ 1st, 2nd プラズマそれぞれの
信号が検出可能となる



ロングパルス化による利点

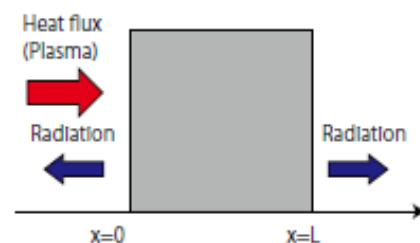
◆ 表面温度 - サンプル厚さ依存性

- 1次元熱伝導方程式の数値解析

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

- Wの熱伝導率, 比熱, 質量密度は一定値を使用
- 入射熱流束:
 - 従来のパルスプラズマ
 - エネルギー密度: 0.3 MJ/m^2
(Wチップカロリメータ計測より)
 - パルス幅: $150 \mu\text{s}$
 - ロングパルスプラズマ
 - エネルギー密度: 1.2 MJ/m^2
(Cチップ計測値からの換算による)
 - パルス幅: 3 ms

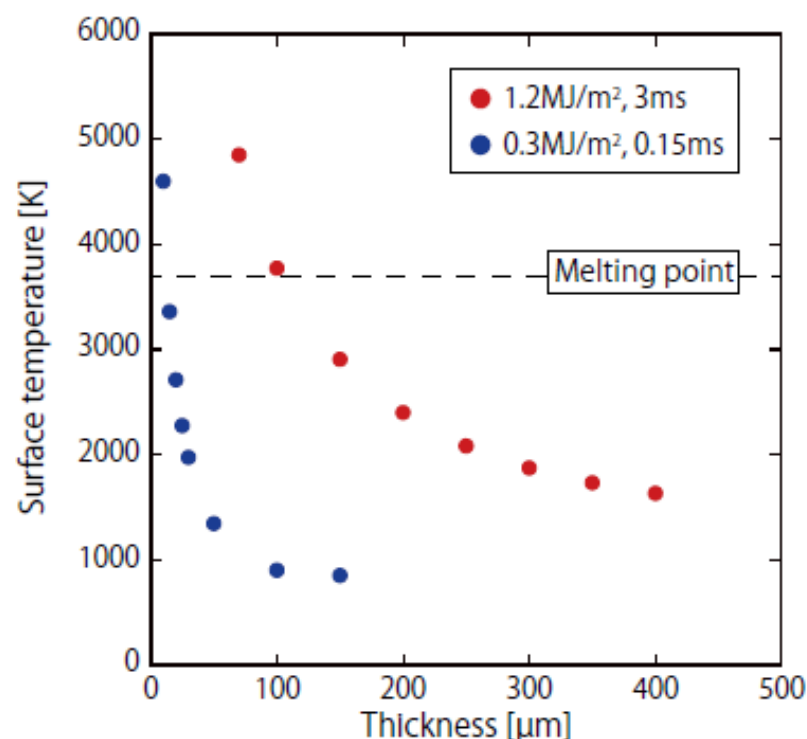
→ 厚みのあるサンプルで破損を防げる



- 刻み幅

$$\Delta x = 1 \times 10^{-6} [\text{m}]$$

$$\Delta t = 1 \times 10^{-8} [\text{s}]$$



表面温度 - サンプル厚さ依存性

ロングパルス化について

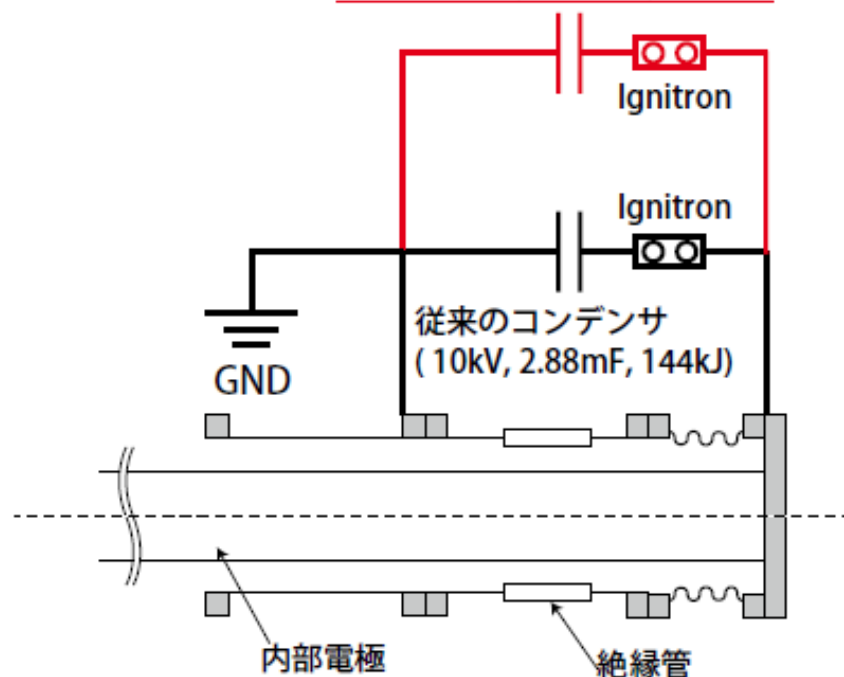
◆コンデンサの増設

- 二段放電によりロングパルス化を図る

・電源エネルギー

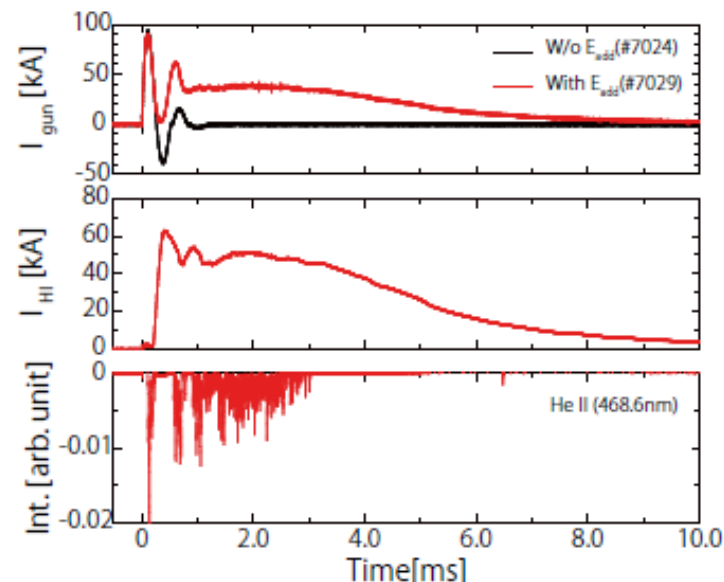
51.8kJ (従来 6kV) ➡ 51.8kJ+82.3kJ=134.1kJ (従来 6kV+ 追加 0.7kV)

ロングパルス用追加コンデンサ
(0.9kVmax, 336mF, 138kJ)



MCPG 後方部概略図

- 放電波形およびエネルギー密度



➡ オペレーションの最適化が必要

- エネルギー密度の変化

炭素チップによって計測	パルスプラズマ (従来 6kV)	ロングパルスプラズマ
エネルギー密度 [MJ/m ²]	0.45	2
パルス幅 [ms]	0.15	3
Heat flux factor [MJ m ⁻² s ^{-0.5}]	36.7	36.5

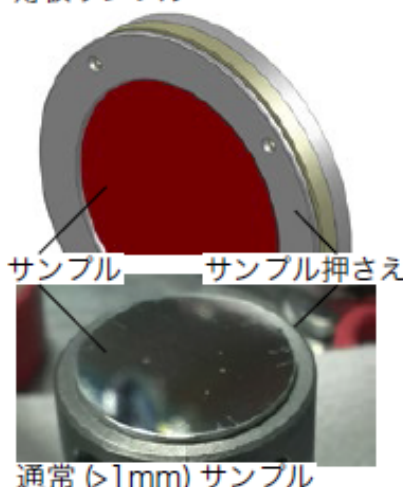
(参考) 48MJ/m²/s^{0.5} : タングステン溶融限界

蒸気遮蔽効果検証実験について

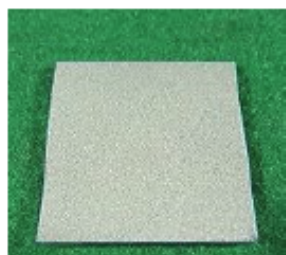
◆ タングステン溶射材料

- 薄板 W の取り扱いが困難
サンプルホルダが
先に照射されてしまう
ホルダレスの場合、
プラズマの圧力によっ
て変形する
- テストピースへの溶射結果（トーカロ社依頼）
膜厚：30 μ m 程度（溶射回数：1 回）

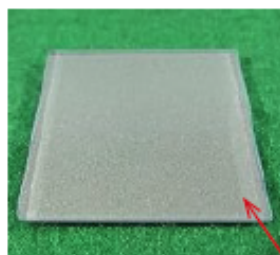
薄板サンプル



基材： アルミナ
 $\phi 25 \times 5t$



石英（表面）
 $20 \times 20 \times 1t$

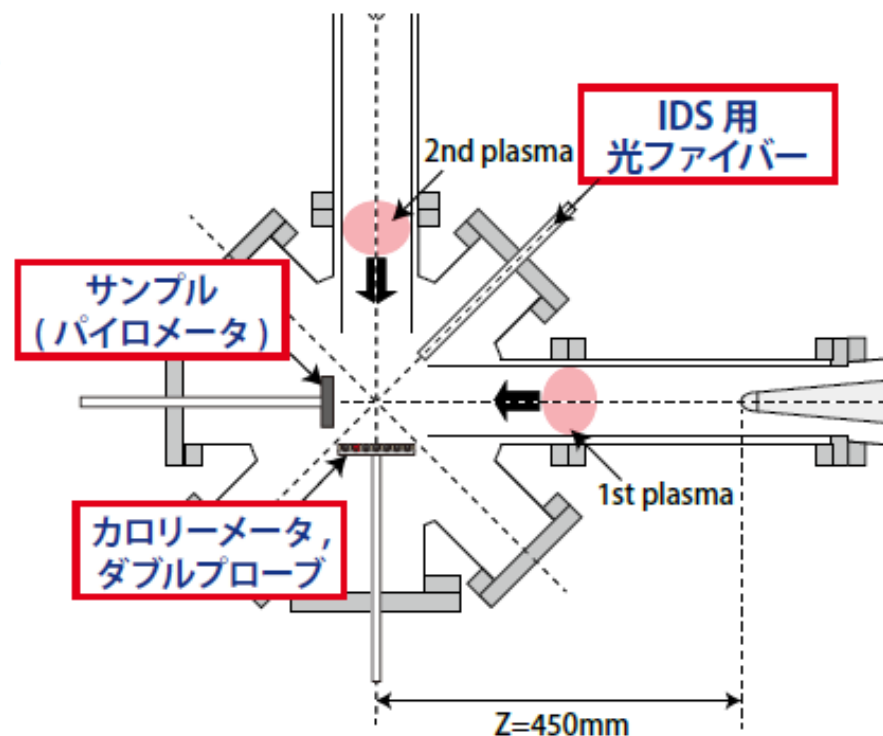


石英（裏面）

- 実験向けにサンプル作成予定
- テストピースへのプラズマ照射も予定

◆ 実験配置と計測系

- 上部ポートよりトモグラフィ計測可
- プローブ計測による高時間分解



石英への溶射材料を用いて，背面温度計測を行う予定

まとめ

◆ 蒸気遮蔽効果の検証実験

- ダブルプラズマガン装置において Al 薄板サンプル (11 μ m) を使用
 - ・1st プラズマ：Al 蒸気層の形成
 - ・2nd プラズマ：蒸気層を通過し，カロリメータで検出
- 蒸気遮蔽効果が発現し，エネルギー密度の緩和が生じた

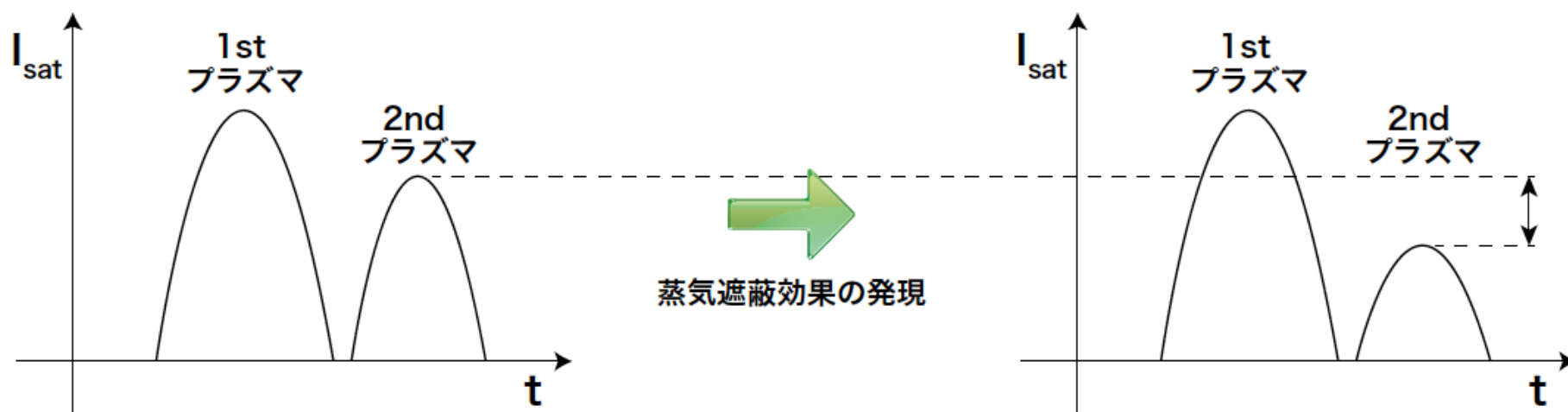
◆ W 蒸気層を用いた実験にむけて

- プラズマガン装置の電源増設
 - ・コンデンサバンクの追加によりエネルギー量が増加 51.8kJ $\rightarrow$ 134.1kJ
 - ・長周期化を経て，エネルギー密度： 2MJ/m^2 達成
 - ・100 μ m 程度のサンプルでも溶融層を形成できる
- W 溶射試料の検討
 - ・石英に溶射することで，背面光の取得が可能. $\rightarrow$ 背面温度計測に利用
- 静電プローブによる計測
 - ・1st, 2nd プラズマを時間分解して評価することが可能



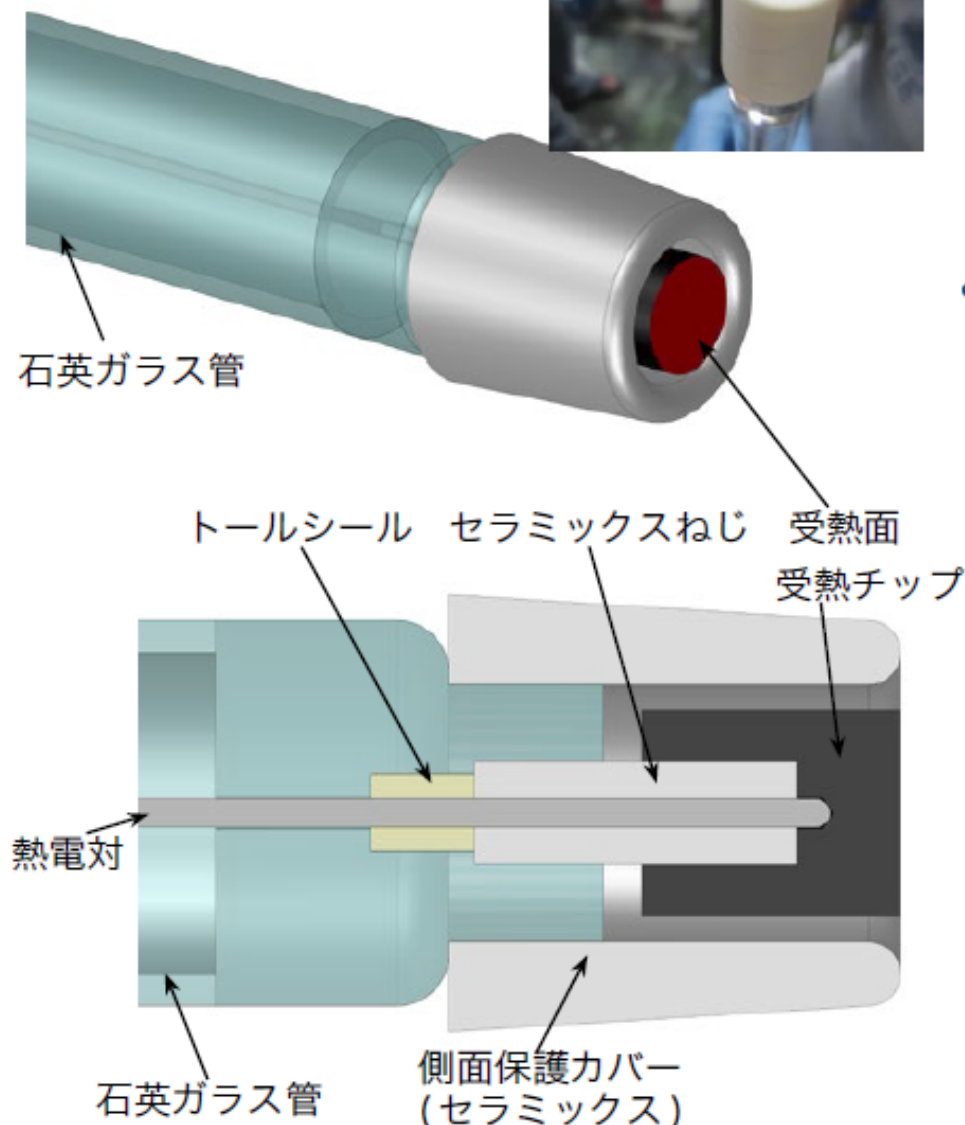
静電プローブ波形

◆ 蒸気遮蔽効果が発現したときのイメージ



カロリメータの構造

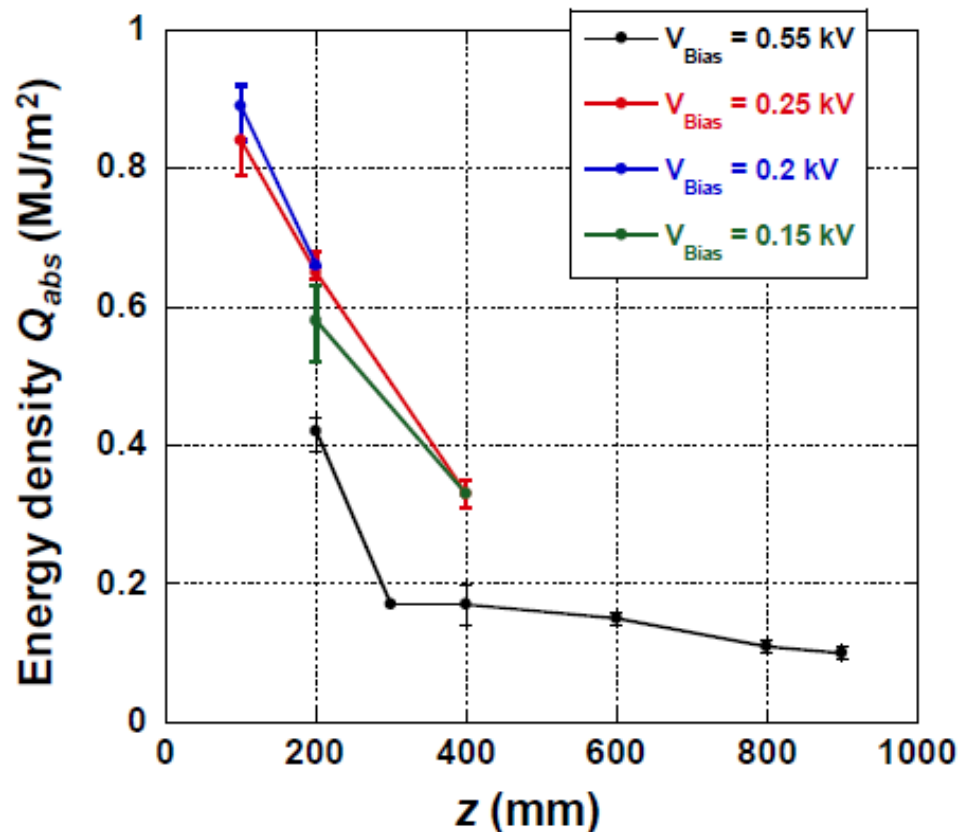
◆先端部構成



- トールシールで真空を封じてる。
プラズマが直接当たらないように、
ガラス等の内側で封じた
トルシール：使用温度～120℃
- 側面からの受熱を制限するために
側面保護カバーを取り付けている。
受熱面は赤色で示した面。
→ カバーが無い場合：ピーク
で2.4倍の過大評価となる
- 熱絶縁のためにセラミックスねじ
で母材のガラスから浮かせている。
- 受熱チップは、炭素かタングステ
ンに交換可能

Dependence of Q_{abs} on z

- The peak absorbed energy density $Q_{abs.max}$ reaches 0.9 MJ/m² at $z = 100$ mm.
- The Q_{abs} linearly decreases by increasing z , and the decrease rate is changed to be small at $z > 400$ mm.



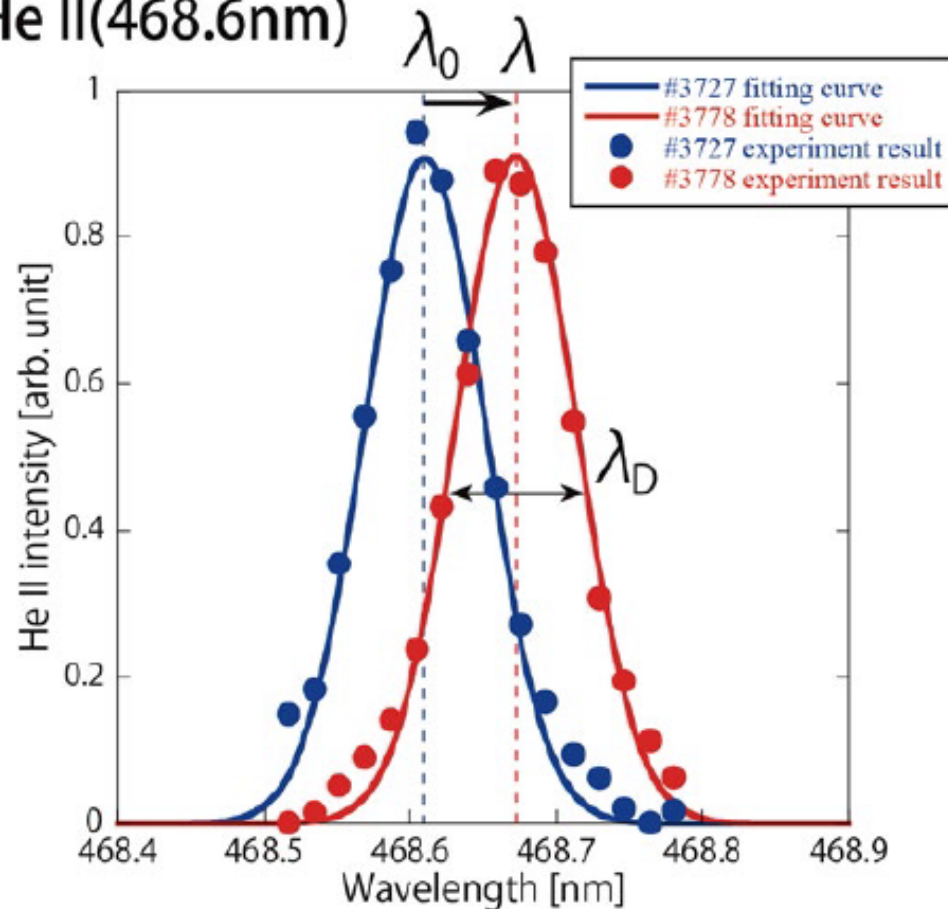
ドップラー分光法



測定波長 : He II (468.58 nm)

使用プラズマ : He

He II (468.6 nm)



温度・速度算出式

$$\lambda = \lambda_0 \frac{1 - (V/c) \cos \theta}{\sqrt{1 - (V/c)^2}}$$

$$T = \frac{A \cdot \Delta\lambda_D^2}{5.96 \times 10^{-9} \cdot \lambda_0^2}$$

λ, λ_0 : 波長, c : 光速

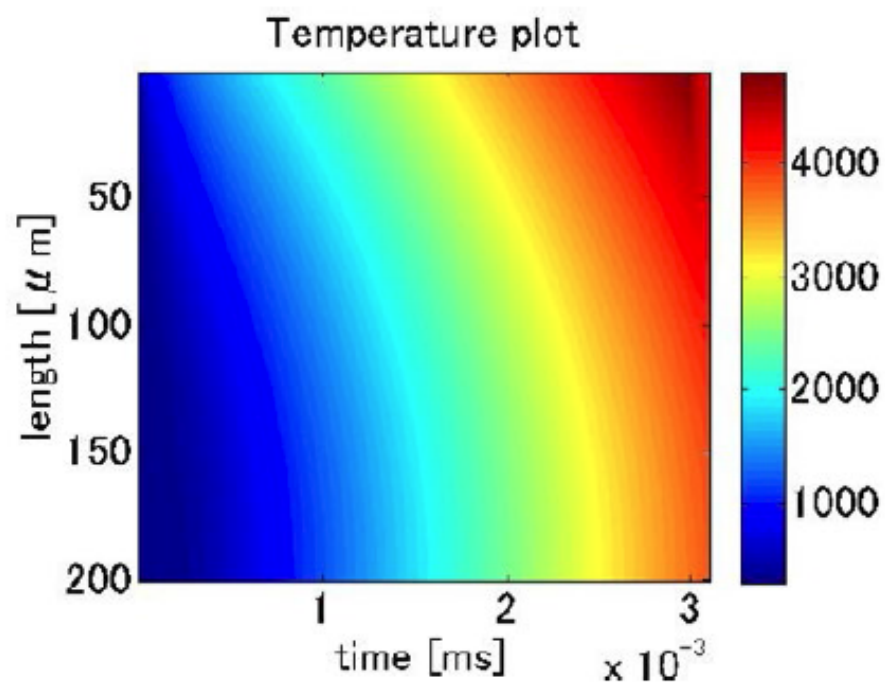
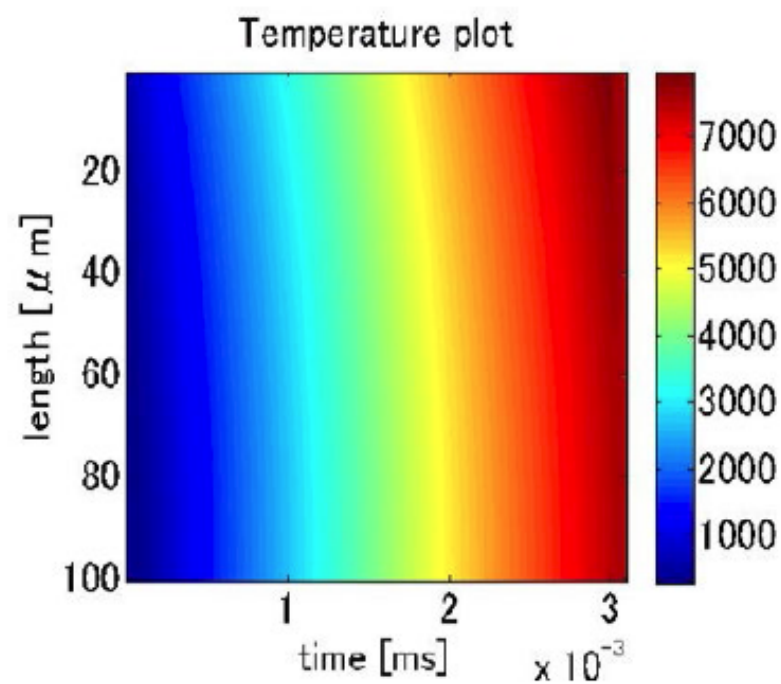
V : プラズマの速度

θ : 観測者から見た光源の動く方向

A : 質量数, $\Delta\lambda_D^2$: 全半値幅

照射材料の温度計算

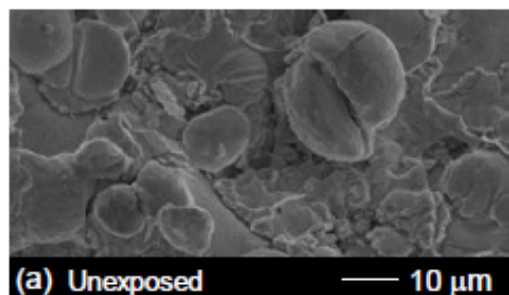
◆ 深さ方向の温度



蒸着材料の使用について

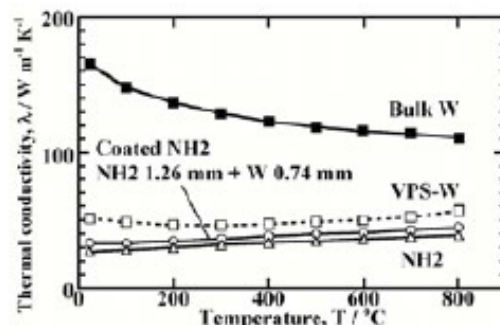
◆ 照射実験より

• VPS-W コーティング材料

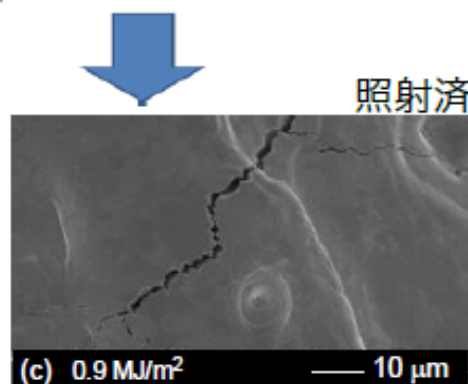


W particle: > 10 μm

Ref.: T. Nagasaka et al., Fus. Sci. Tech. (2009)



Bulk 材料に比べ熱伝導率が低い

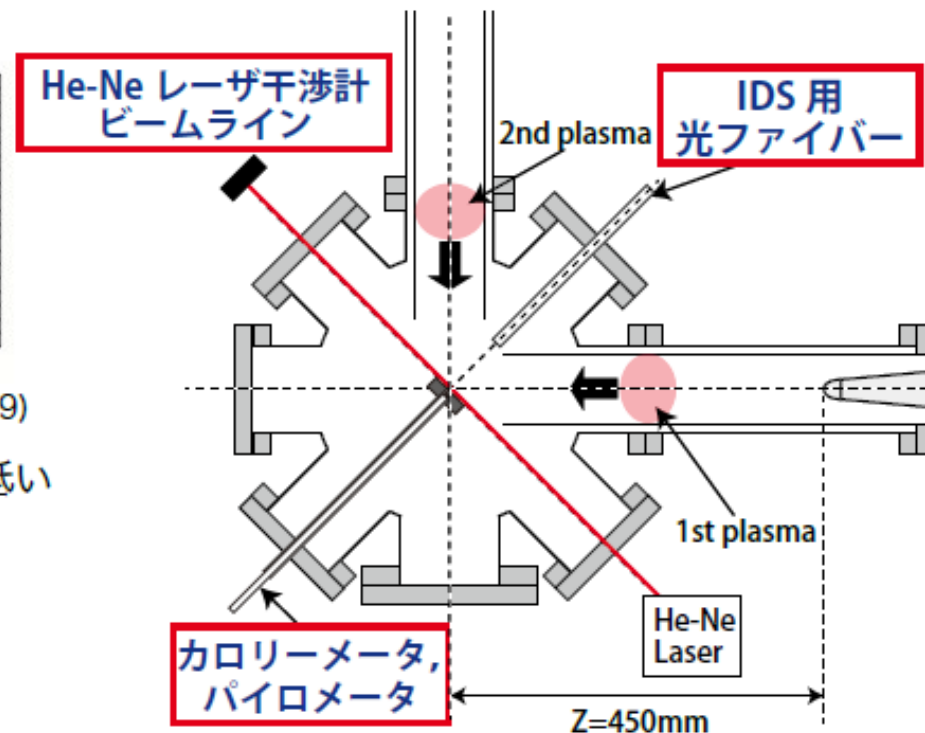


照射済

全体的に溶融する

◆ 実験配置と計測系

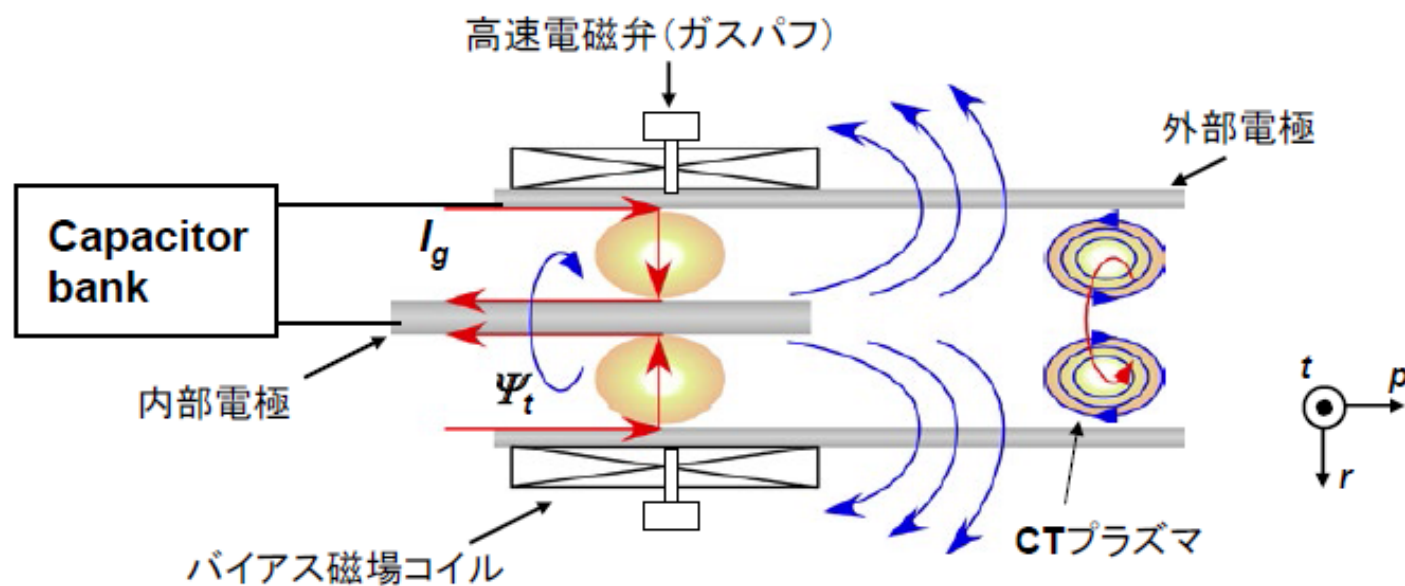
- 上部ポートよりトモグラフィ計測可



- 溶融層の形成に溶射材料を利用

- 溶射材料は母材に固定されているので、取り扱いが容易
- 石英に溶射し、背面温度計測を行う

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

パイロメータ

パイロメータとは

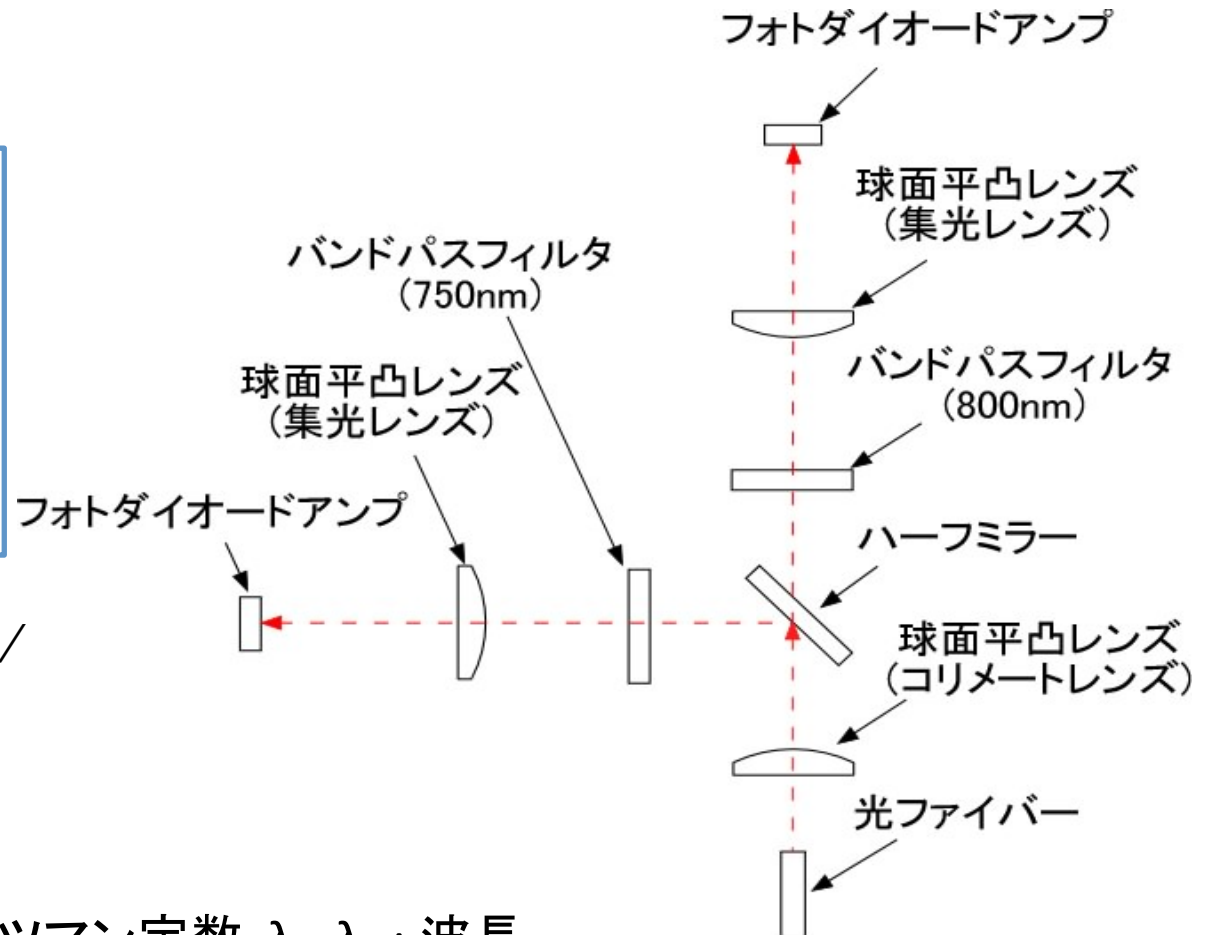
物体の熱放射により温度を測定する非接触式の温度計測器。

パイロメータの構造

サンプル背面光を光ファイバーで採光し、光学素子を用いて750, 800 nmの2線強度比 R から背面温度 T を算出する。

$$T = \frac{hc}{k} \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) / \ln((R)(\lambda_1 / \lambda_2)^5) \quad [\text{K}]$$

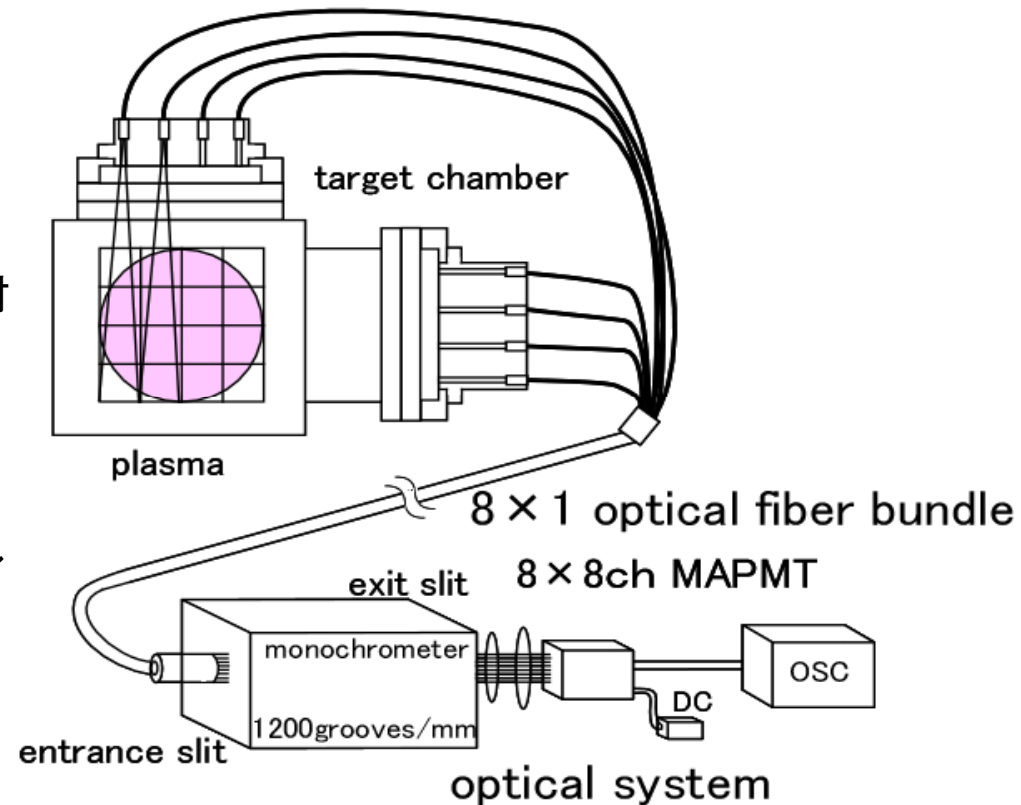
h : プランク定数, c : 光速, k : ボルツマン定数, λ_1, λ_2 : 波長



プラズマ発光トモグラフィ計測システム

プラズマを同時に多方向より計測し、プラズマの二次元空間分布を明らかにするための計測機器。
4 × 4 optical fiber array

1. プラズマ発光を光ファイバーを用いて採光する。
2. 光ファイバーより採光した光を、分光器の入射スリットに入射する。
3. 分光器出射スリットより波長分解された光が出射される。
4. 出射された光は、球面平凸レンズ二枚を通り、MAPMTの各光電面に入射される。
5. MAPMTより出力された電流信号は抵抗器を介して電圧信号に変換しOSCで計測。
6. 出力結果より、プラズマの二次元分布を算出する。



システムの構成

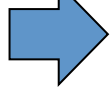
吸収エネルギー密度の算出

◆ 温度変化による算出

受熱チップを温度 T_1 から T_2 まで加熱するために必要な熱量を Q_{12} とする。比熱 c は物体の温度に依存するため、 $c=f(T)$ とすると

$$Q_{12} = \int_{T_1}^{T_2} c m dT = m \int_{T_1}^{T_2} f(T) dT \cong c m (T_2 - T_1) = c m \Delta T$$

$$E = Q_{12} / S \quad [\text{J/m}^2]$$



$\bar{c}$: チップの平均比熱 [J/kg・K]

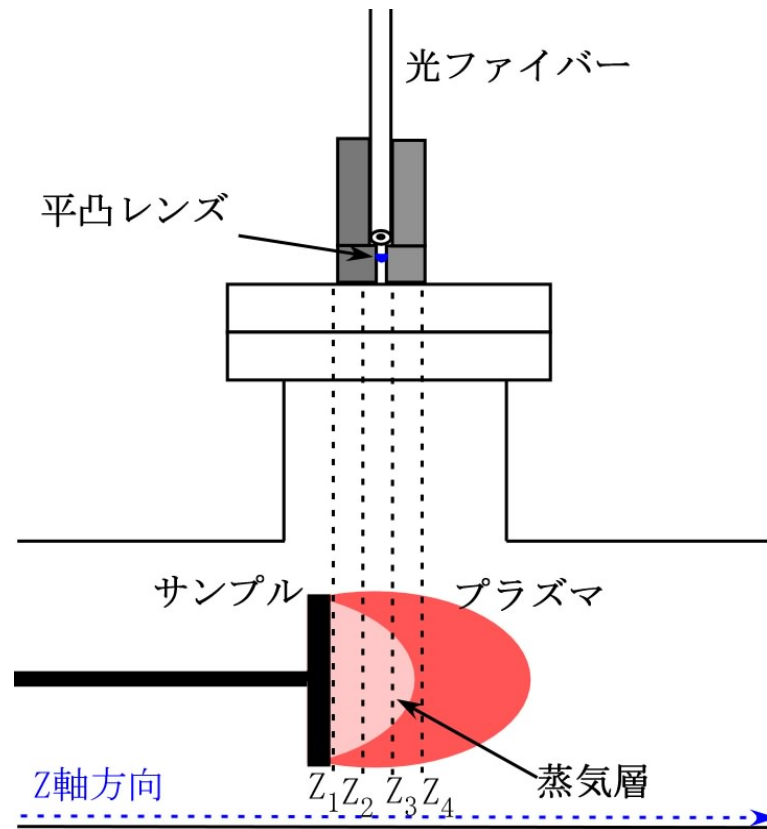
m : チップの質量 [kg]

ΔT : 温度変化 [K]

S : 受熱面の表面積 [m²]

受熱チップの熱容量の変化量を受熱面積で割って、エネルギー密度とする

プラズマ及び材料表面の蒸気層のパラメータ測定



プラズマパラメータ計測

プラズマフロー方向に対して90度、135度から計測を行いプラズマの温度、速度を算出する。

蒸気層のパラメータ計測

プラズマの入射に対して90度の方向に光ファイバーを設置し蒸気層の温度及び厚みを計測する。
また材料による蒸気層の変化を計測する。

CTプラズマのパラメータ計測

ガス種: He, H

計測波長: 486.13nm(HI)

468.58nm(HeII)

蒸気層のパラメータ計測

材料: C, W

計測波長: 462.15nm(CI)

426.72nm(CII)

406.79nm(CIII)

400.87nm(WI)

測定結果

入射プラズマのパラメータに対する蒸気層のパラメータの関係性を評価する。