磁化プラズマガンを用いた ELM様パルスプラズマ照射実験の進展

菊池 祐介，佐久間 一行，北川 賢伸，浅井 康博，
大西 晃司，福本 直之，永田 正義

兵庫県立大学 大学院 工学研究科 電気系工学専攻

発表概要

1. 背景：パルス熱負荷に関する研究

2. 磁化プラズマガン（兵庫県立大学）

3. プラズマパラメータ・熱流計測

4. タングステン（**W**)へのパルスプラズマ照射実験
   ・微結晶粒**W**サンプル（**W-TiC**, **W-TaC**）への照射

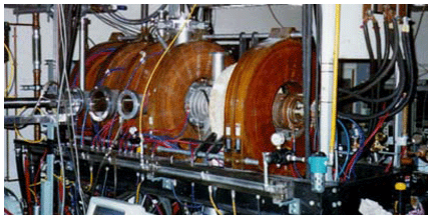
5. ダブルプラズマガンの初期結果

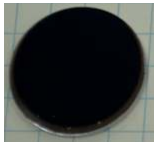
6. まとめと今後の研究計画

パルス熱負荷実験に関する共同研究

・定常予照射W　　日米協力2009～

PISCES-A @ UCSD (Dr. D. Nishijima, Dr. R. Doerner)





W-Fuzz

・Vapor shield現象の解明

LHD計画共同研究（～2013）
（阪大、電通大、名大、愛工大、金沢大、長岡技科大、核融合研）

・W合金材、W被覆材、W組織制御材

阪大、東北大との共同研究

磁化プラズマガン装置＠兵庫県大
パルス熱負荷照射実験

SPICA装置＠核融合研
LHDダイバータ材へのパルス熱負荷照射実験（2012～）

・表面損傷を持つWの熱負荷応答

阪大、原子力機構との共同研究

プラズマガンのパルス熱負荷照射によりWモノブロック材の表面損傷

↓

電子ビーム装置（JEBIS＠原子力機構）を用いてITER定常熱負荷を照射

・定常-パルスプラズマ複合照射

名大との共同研究

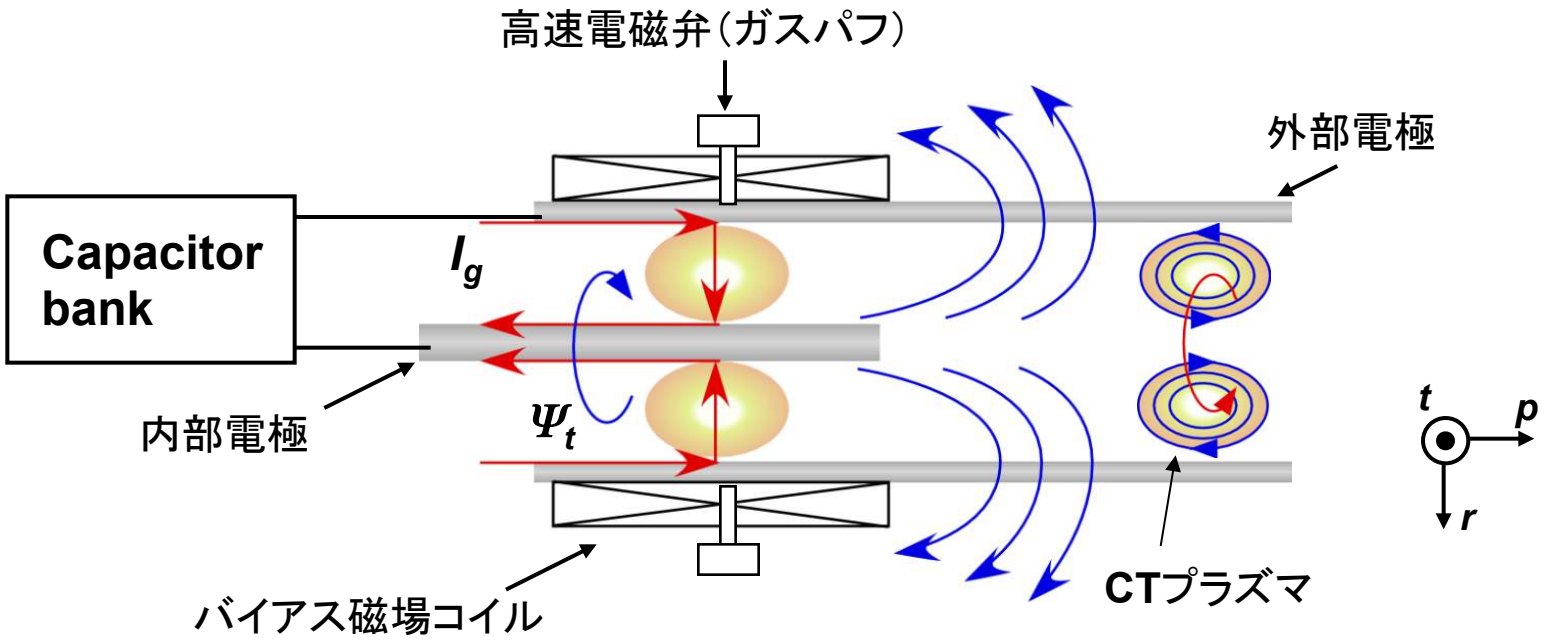
ダイバータプラズマ模擬実験装置NAGDIS-Iにプラズマガン装置を接続

↓

・複合照射実験を開始（2013年7月）

磁化プラズマガン@兵庫県立大学

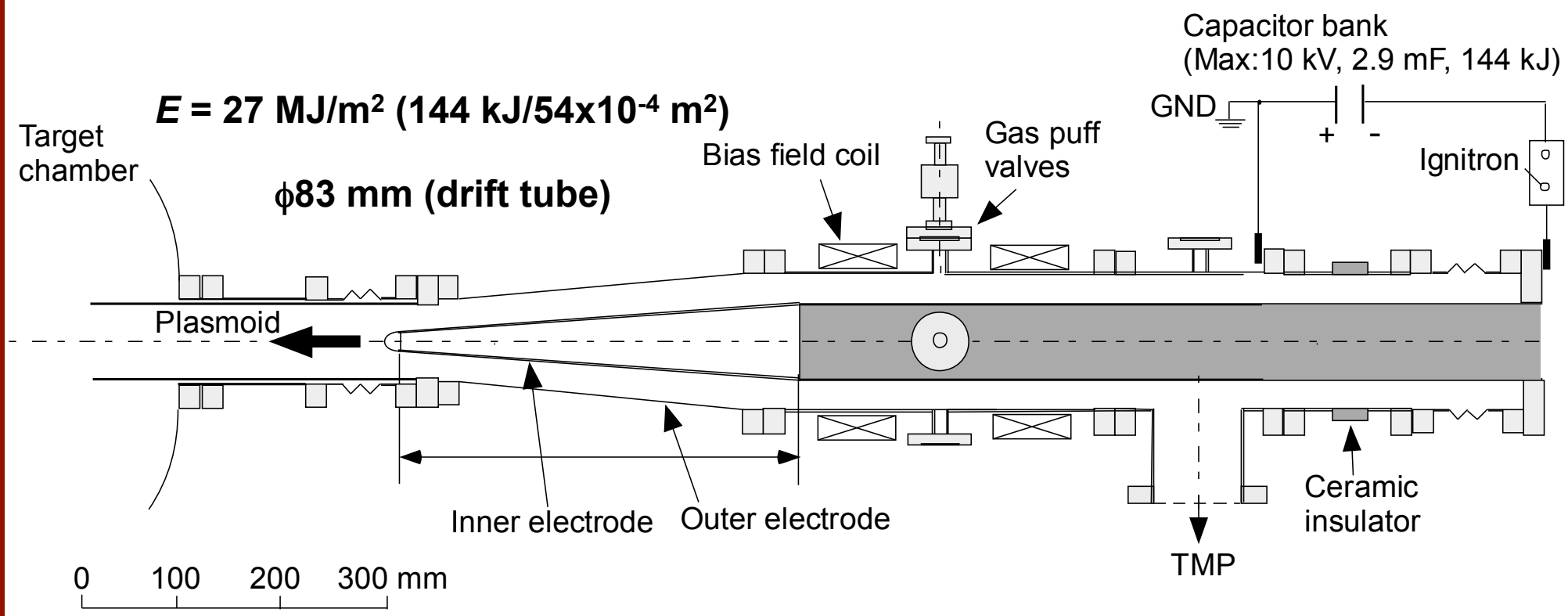
Magnetized Coaxial Plasma Gun (MCPG)



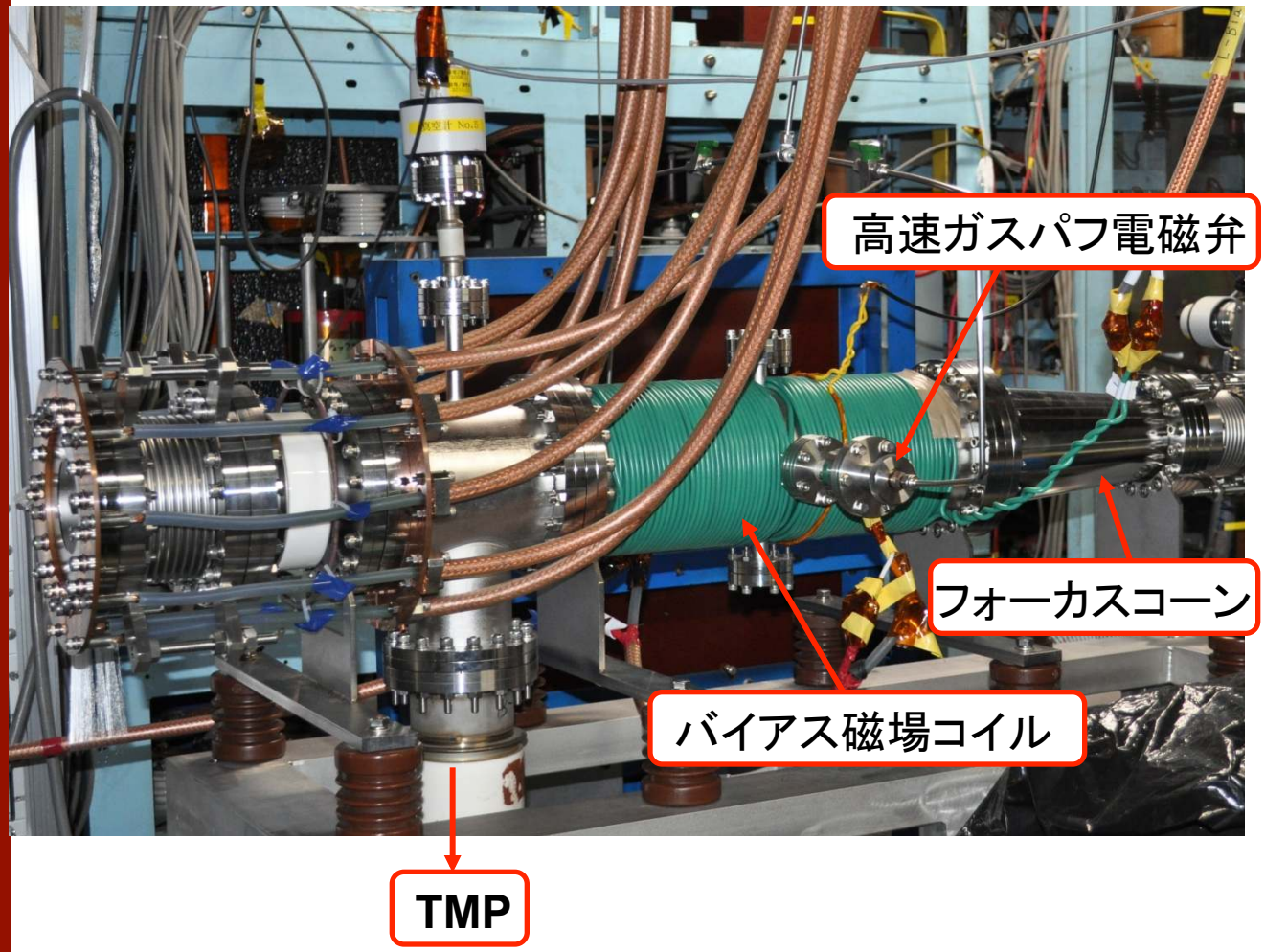
- ポロイダル電流とトロイダル電流を有するコンパクトトーラス（**Compact Torus: CT**）プラズマが形成される。
- 高速（**~ 300 km/s**）で移送可能

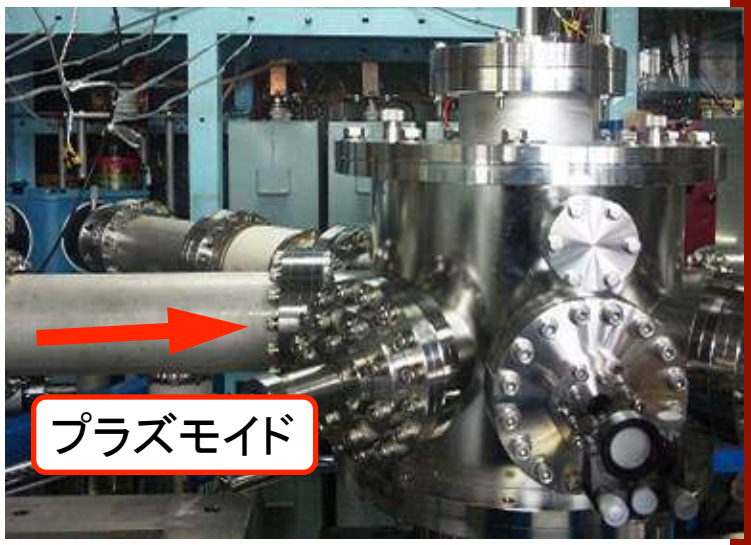
磁化同軸プラズマガン@兵庫県立大学

（1）高密度コンデンサの使用（最大電源エネルギー：**10 kV, 2.9 mF, 144 kJ**）
（2）テーパー付きドリフト管によるプラズマの高密度化
（3）内部電極（**SUS304**）への**VPS-W**コーティング（**0.2 mm**）による不純物低減



磁化プラズマガン@兵庫県立大学

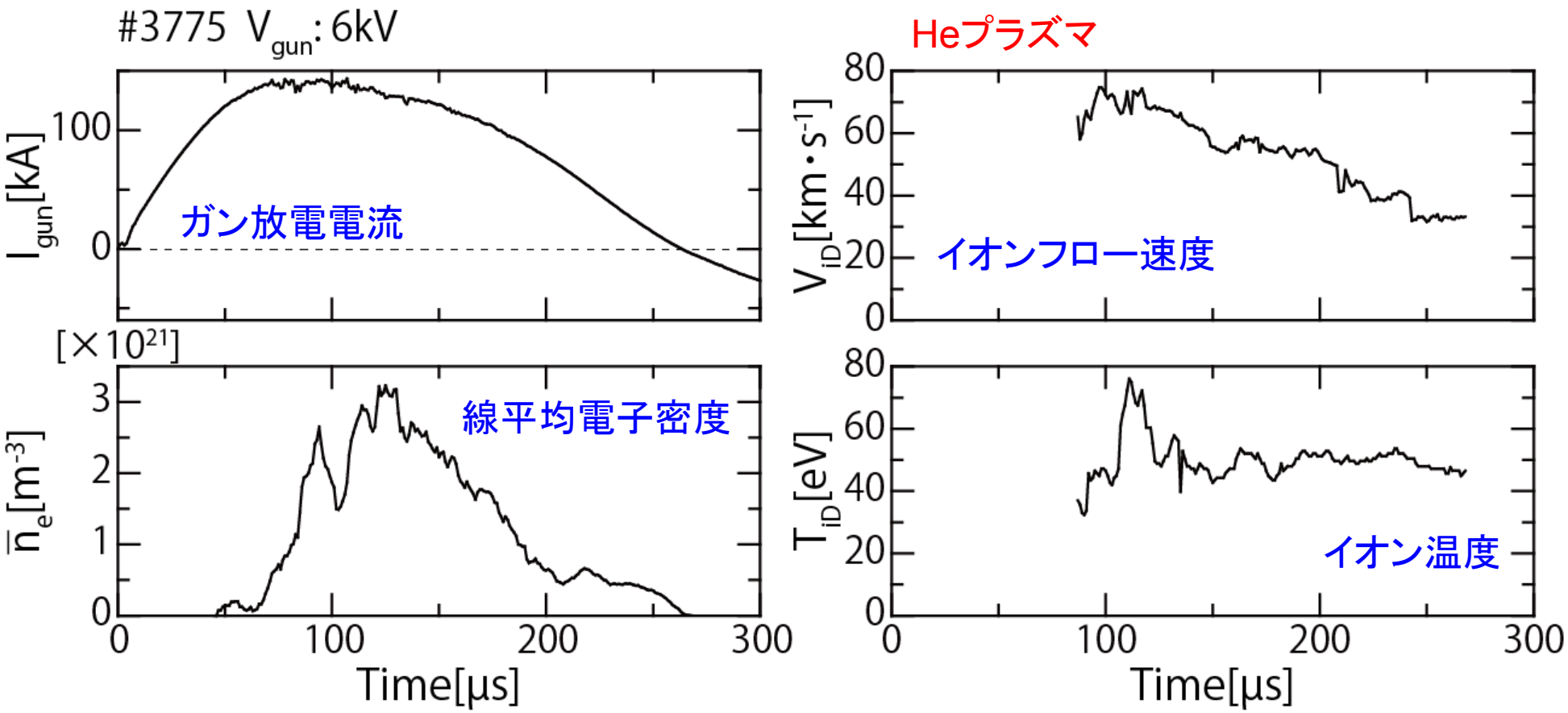




ターゲットチャンバー

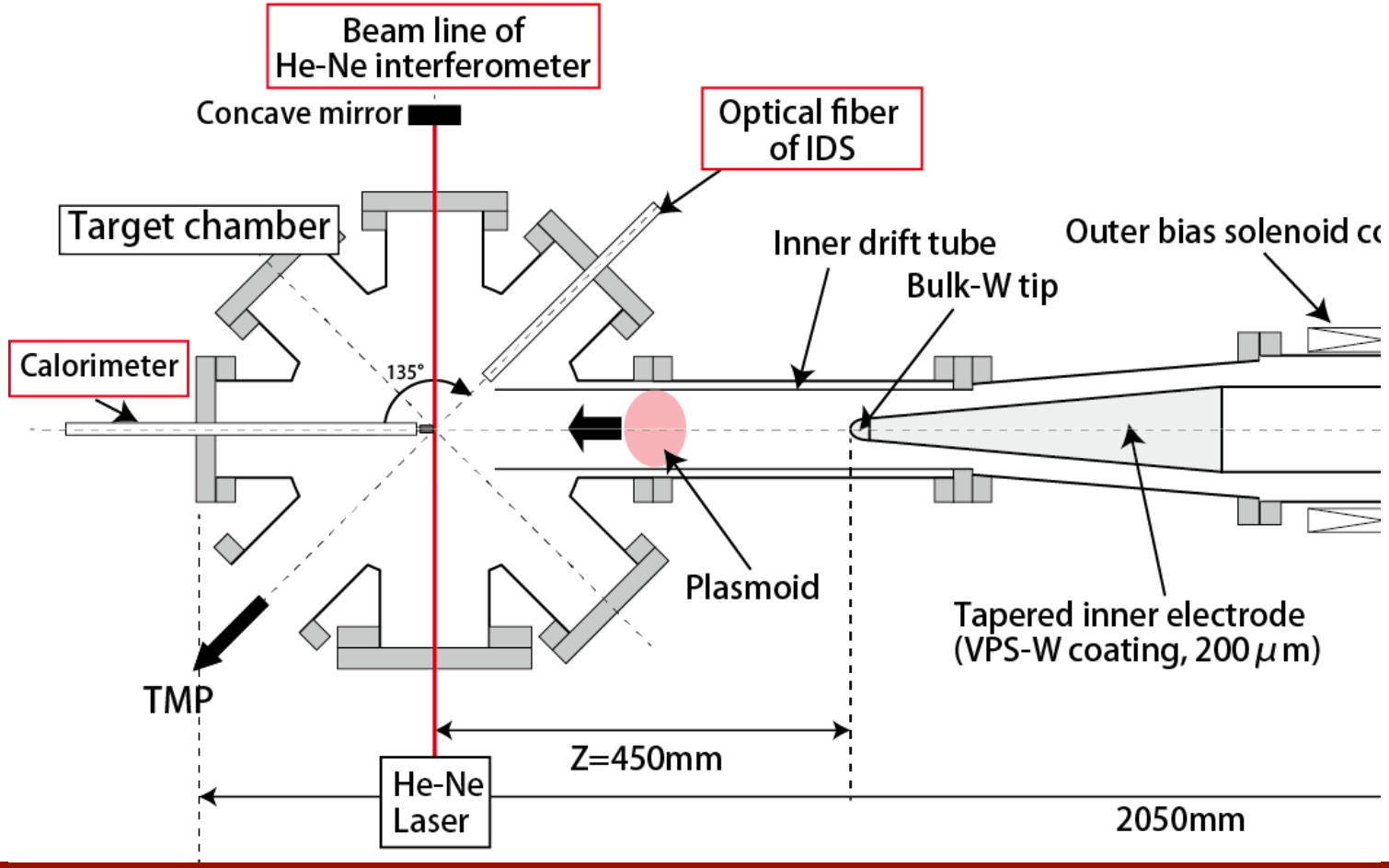
典型的な放電波形

- ガン電流: ~ **150 kA**
- パルス幅: **0.2 ~ 0.3 ms**
- 放電ガス: 水素、重水素、ヘリウム
- 運転周期: **10**分



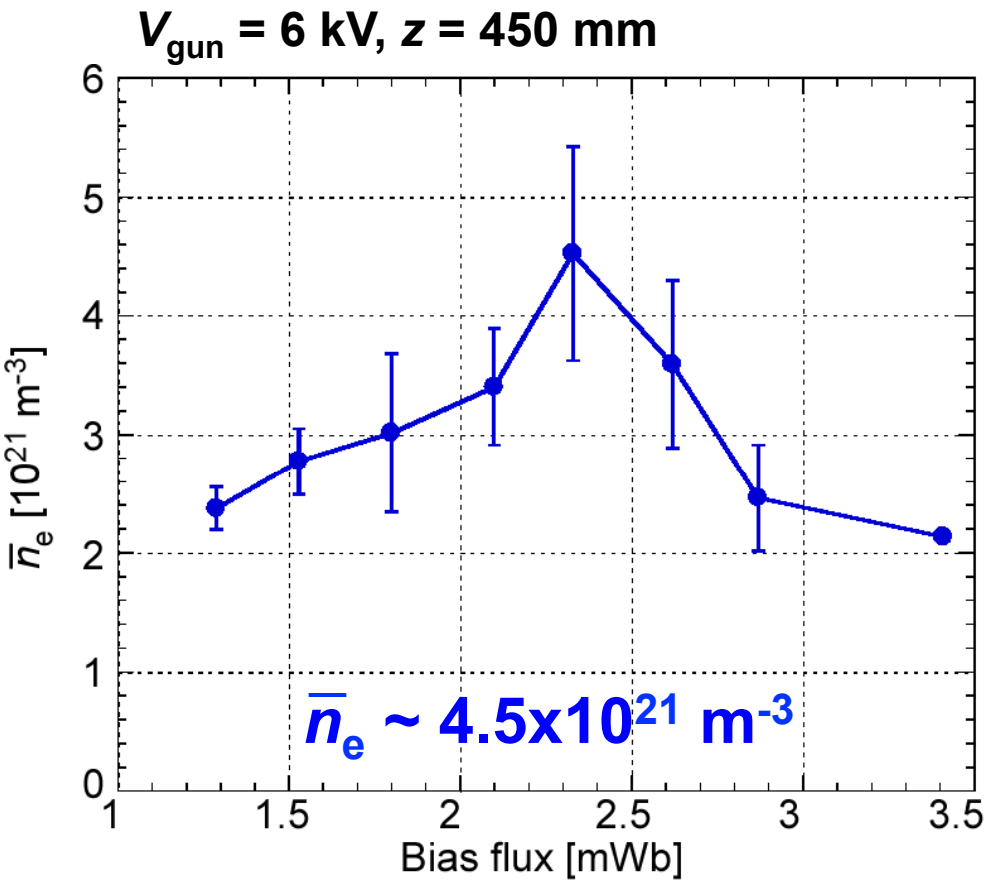
プラズマパラメータ計測

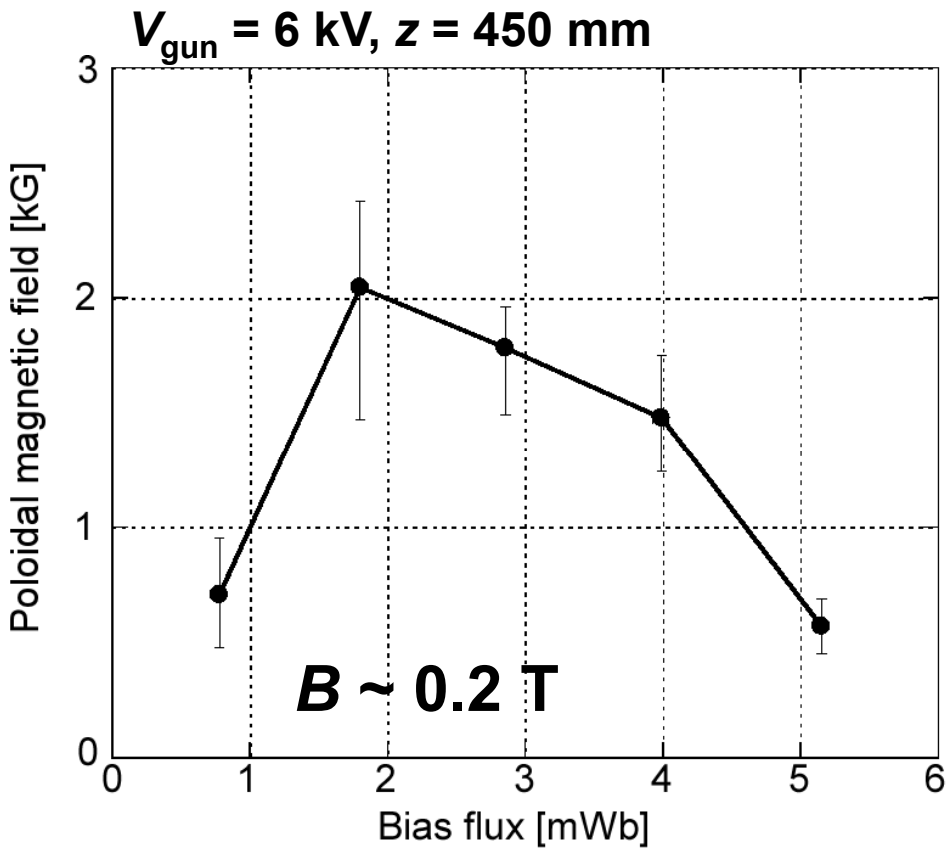
- 線平均電子密度計測： He-Neレーザ干渉計
- イオン温度、イオンフロー速度：イオンドップラー分光システム（IDS）
- 熱流計測：カロリーメータ（C, Wチップ）、・磁気プローブ



プラズマパラメータ計測（$\bar{n}_e$, B）

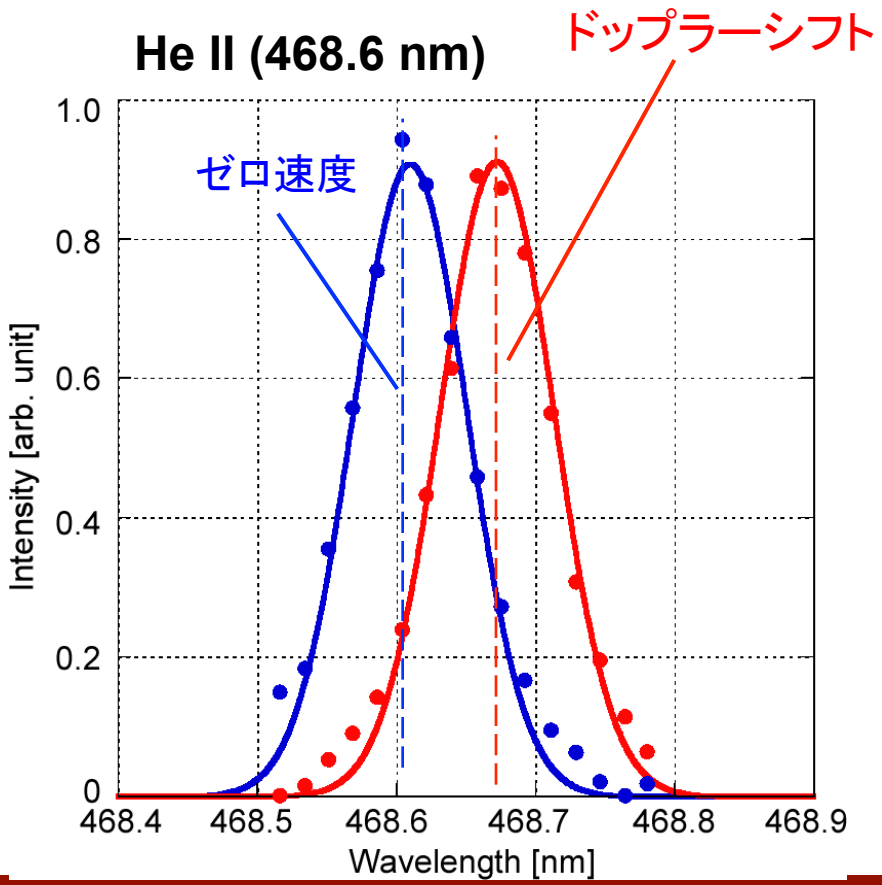
・He-Neレーザ干渉計を用いた線平均電子密度計測
・バイアス磁場に対して、線平均電子密度および磁場は最大値をとる。

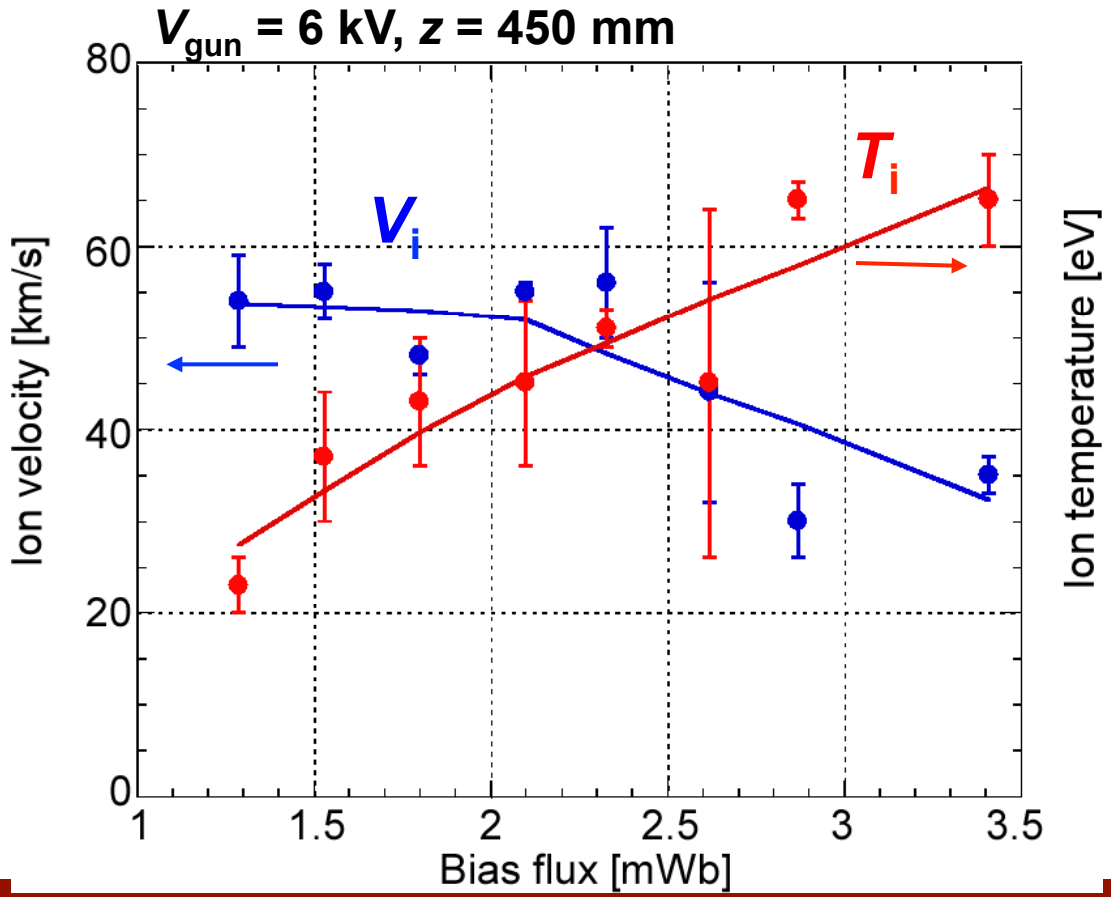




プラズマパラメータ計測（V_i, T_i）

- イオンドップラー分光器（1 m分光器、16ch PMT出力）
- He II (468.6 nm)のドップラー拡がり（イオン温度）、ドップラーシフト（フロー速度）
- バイアス磁場の増加で、イオンフロー速度は低下、イオン温度は上昇



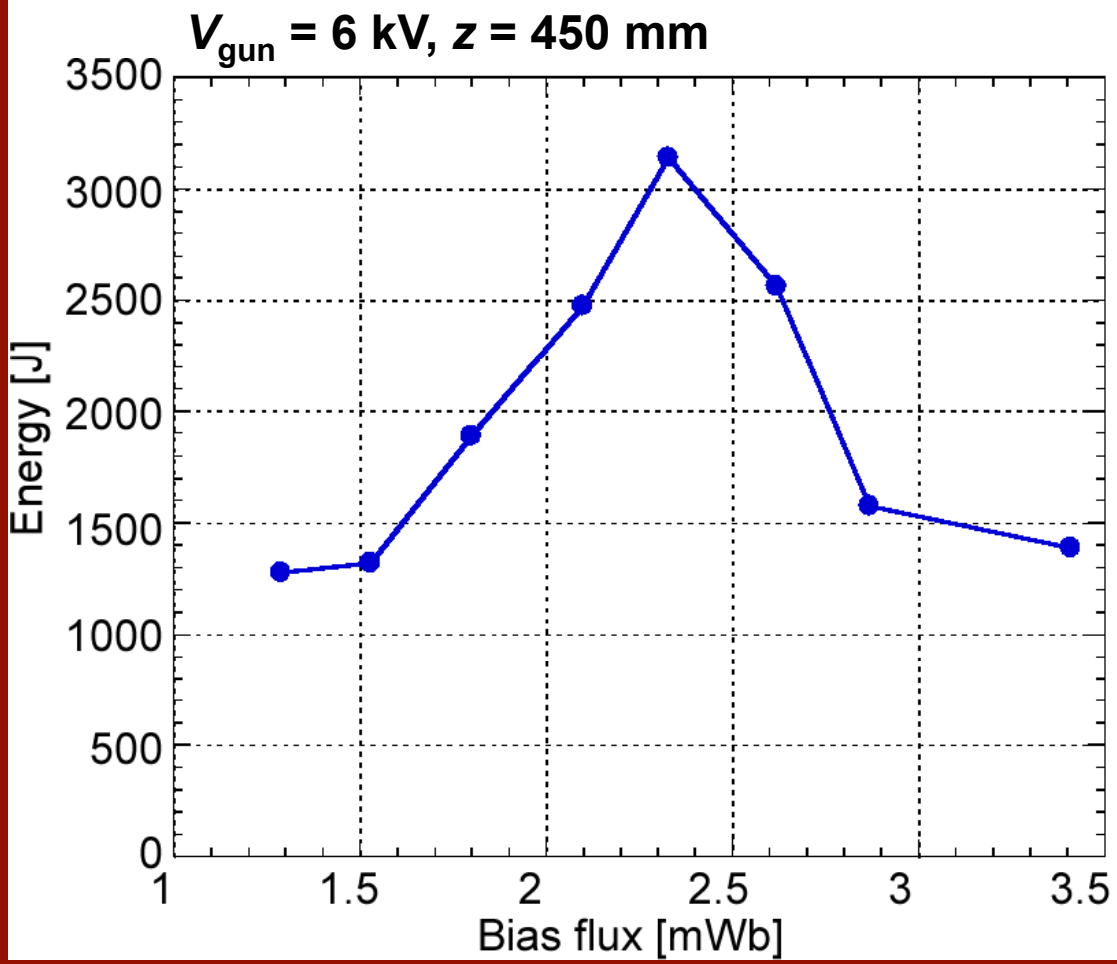


プラズマエネルギー評価

・計測したパラメータから
プラズマエネルギーの評価

$$E = \frac{1}{2} m_{i,e} v_{i,e}^2 + \frac{3}{2} k T_{i,e}$$

運動エネルギー　　熱エネルギー



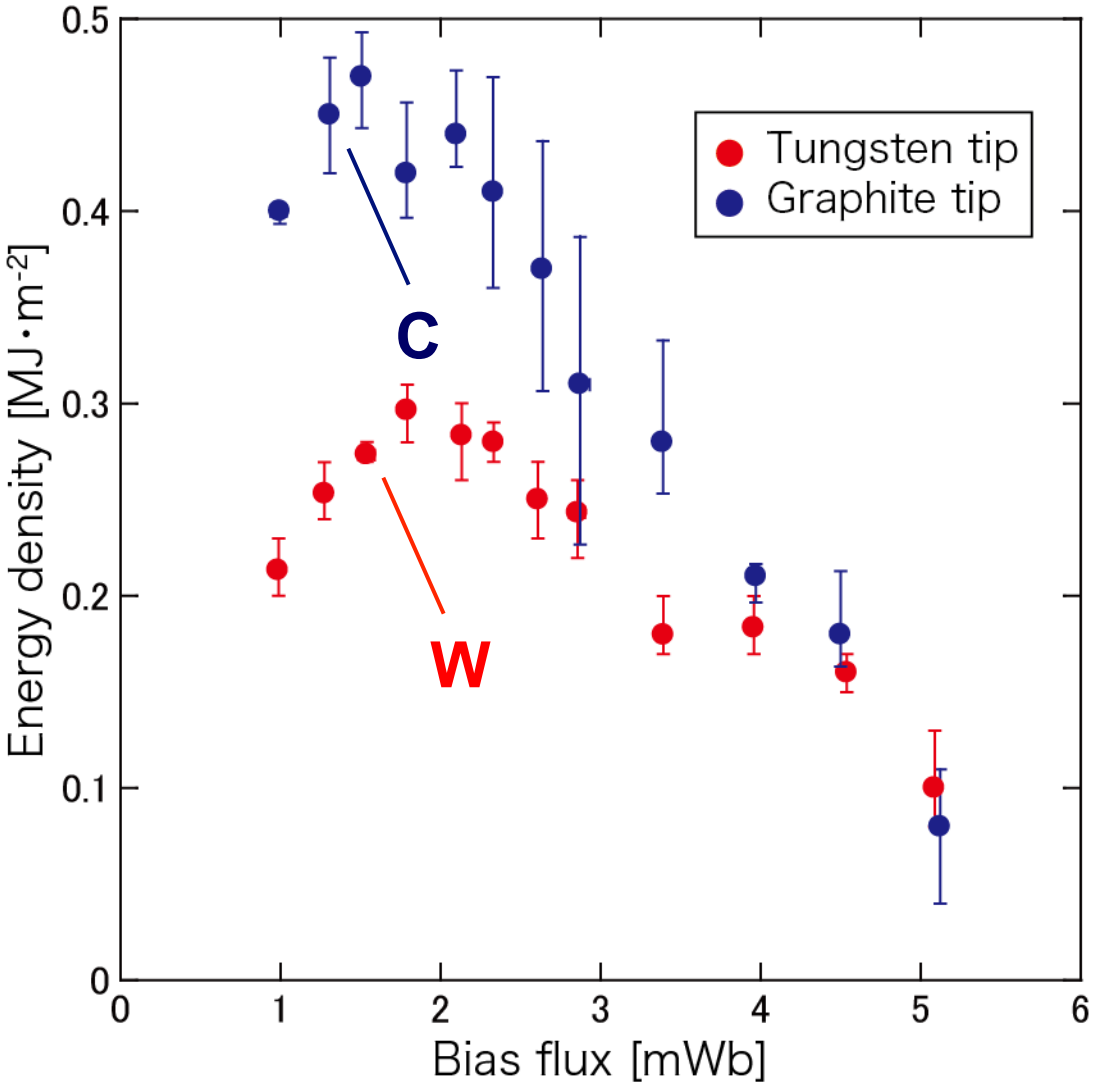
電源エネルギー（V_{gun} = 6 kV）:
E_{PS} = 54 kJ

プラズマが持つエネルギー
E_{plasma} ~ 3 kJ

⬇

電源エネルギーの6%程度

エネルギー密度計測



- カロリーメータによるエネルギー密度計測
- バイアス磁場に対して、エネルギー密度はピーク値をとる。
- 同じエネルギーのプラズマを照射した場合、グラファイトのほうがタングステンよりも吸収エネルギーが大きい。

$$E_W \sim 0.6 E_C$$

- プラズマエネルギーの**30%**（**C**）、**18%**（**W**）が材料に吸収される。

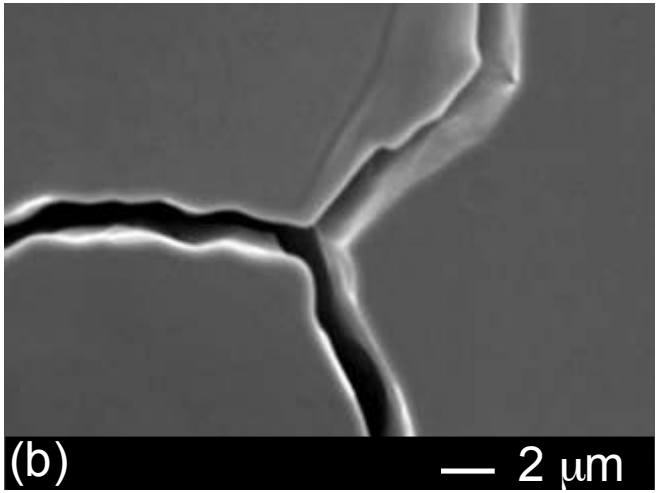
⬇

材料の種類や表面状態（**W-Fuzz**等）で吸収エネルギーが変化する。

微結晶粒W（TFGR-W)に対するプラズマ照射

（1）これまでのW試料への照射実験
（PSI2010, PSI2012にて報告）

・ITER-grade Wへの照射：
クラック形成、表面溶融の発生
・W-Ta合金材：
クラック形成の抑制
・VPS-Wフェライト鋼
表面溶融の発生、接合面の健全性確認



ITER-grade W

（2）微結晶粒W（TFGR-W）の照射実験
栗下先生（東北大）、上田先生（阪大）との共同研究

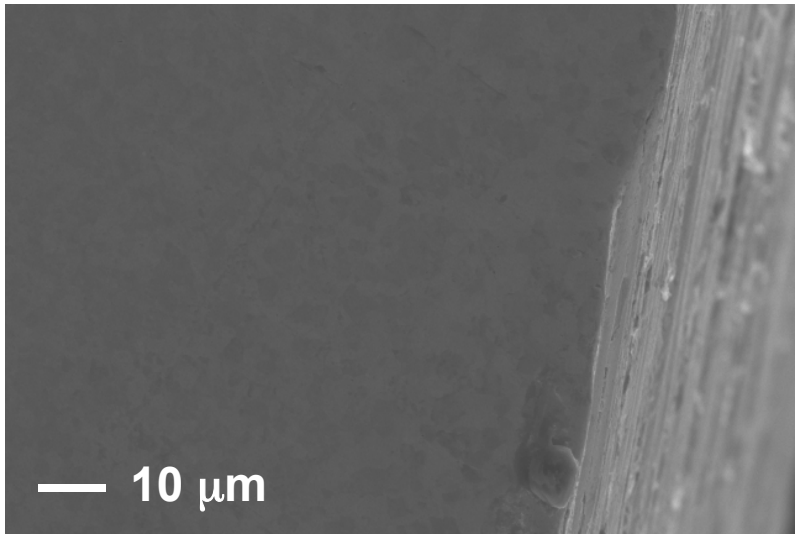
・添加物（TiC, TaC）を加えることで、結晶粒界の強度を高めている。
パルス熱負荷時のクラックが形成されにくいと考えられる。
・プラズマガンを用いたパルスプラズマ照射実験は従来報告されていない。

➡ **W-1.1%TiC, W-3.3%TaCへの照射実験を実施。**

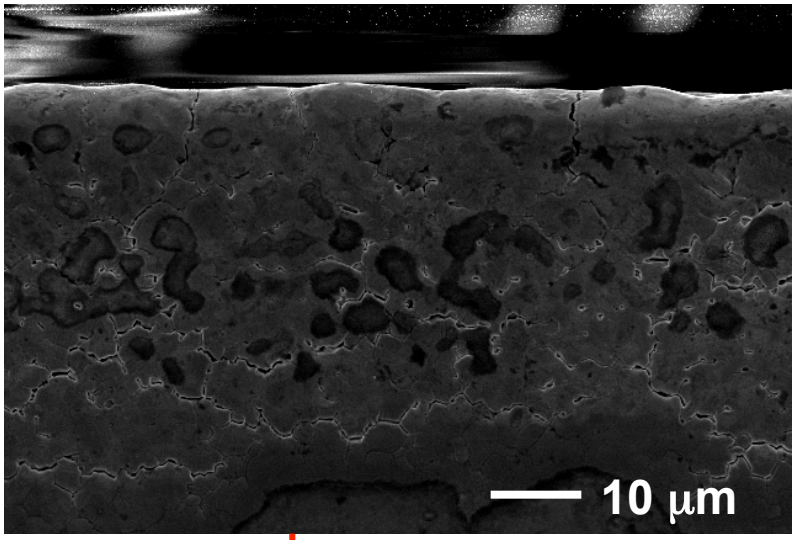
微結晶粒W（TFGR-W)に対するプラズマ照射

・W-1.1%TiCにHeパルスプラズマ（~0.5 MJ/m^2）を20ショット照射

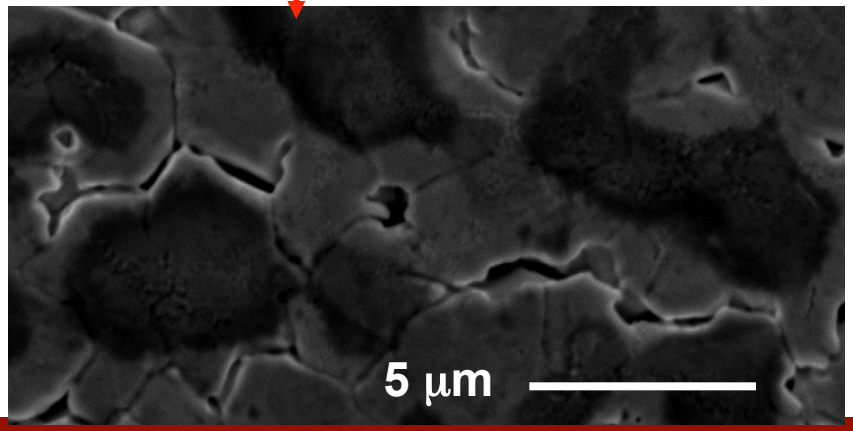
照射前



照射後



拡大

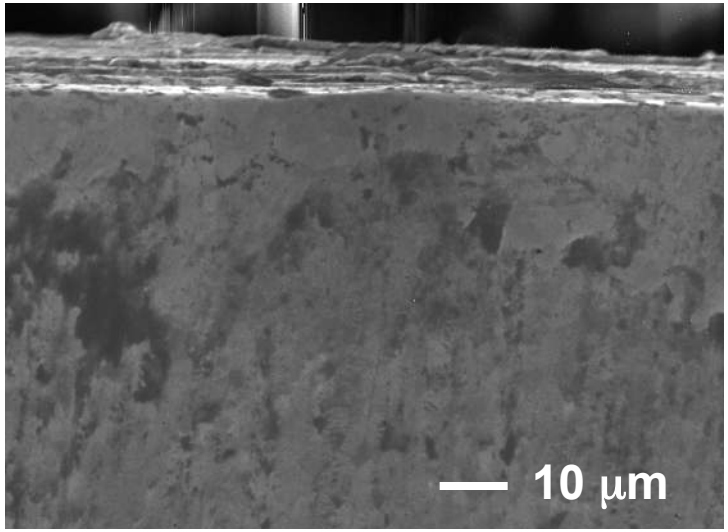


・サンプルの周辺部のSEM写真
・周辺部に細かいクラックが発生
・中央部のクラックは抑制
・小さい穴を確認：添加物が抜けた後に発生したと考えられる。

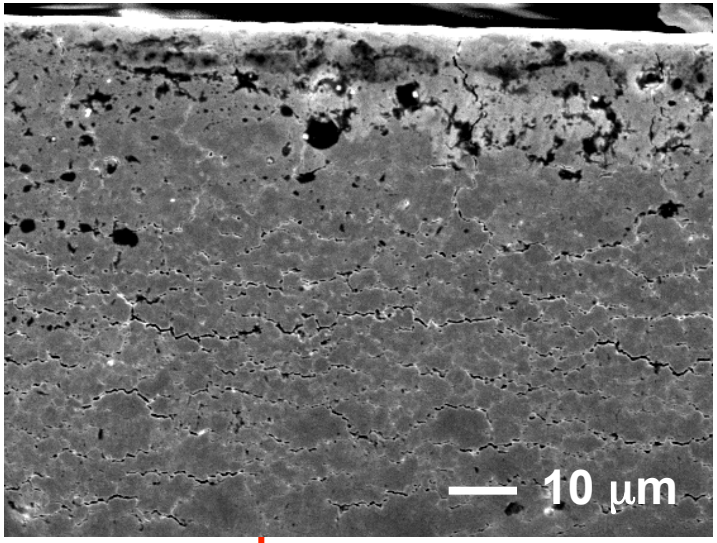
微結晶粒W（TFGR-W)に対するプラズマ照射

・W-3.3%TaCにHeパルスプラズマ（~0.5 MJ/m^2）を20ショット照射

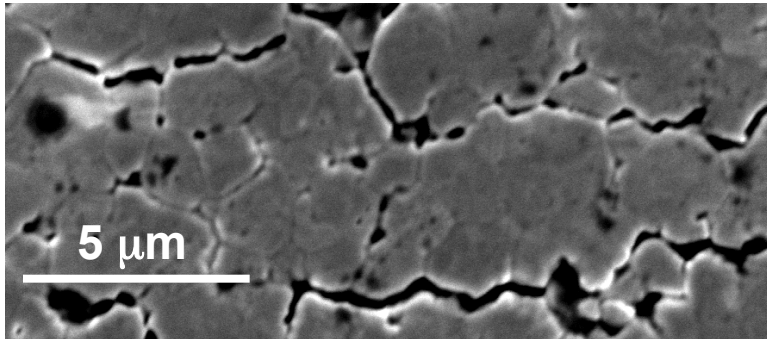
照射前



照射後



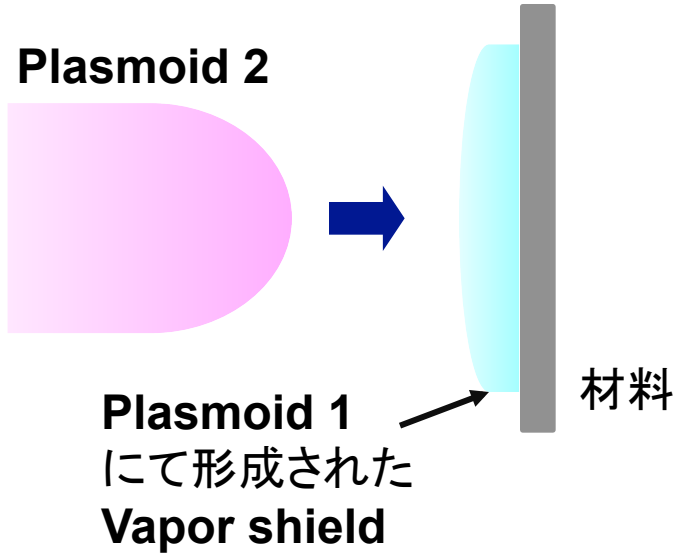
拡大

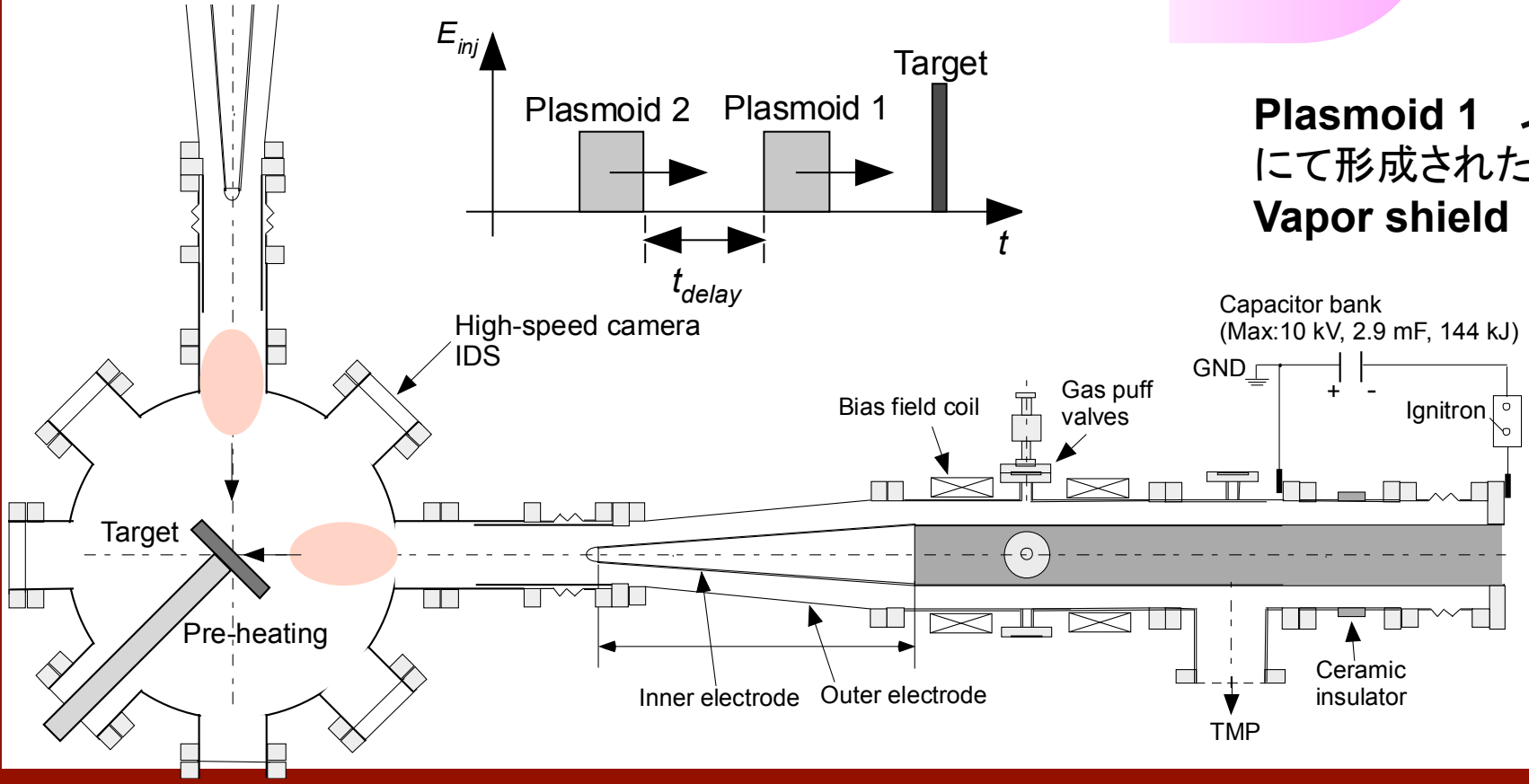


・サンプルの周辺部のSEM写真
・細かいクラックが発生
・W-TiCと同様に小さい穴が確認される。
・サンプル中央部ではクラック発生せず。

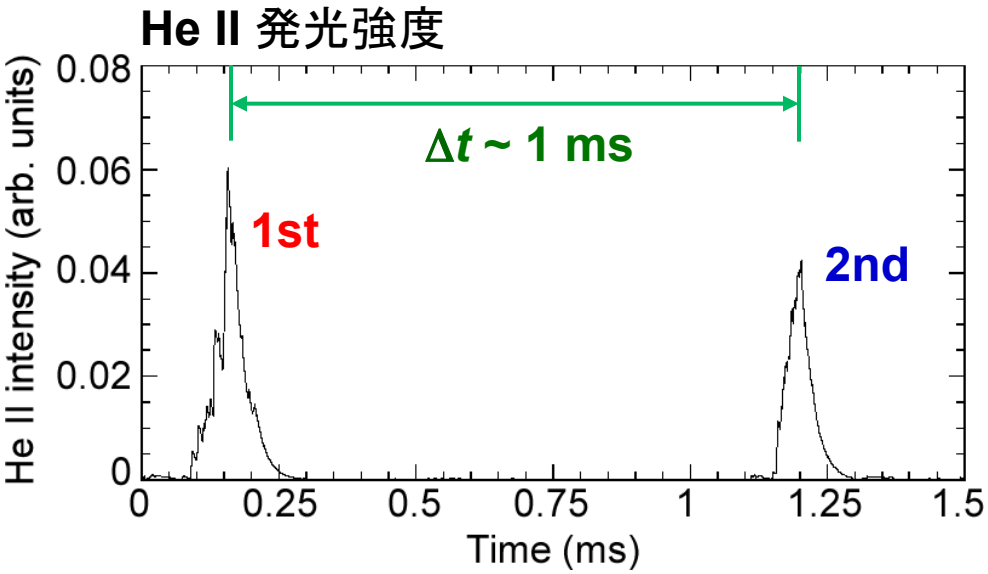
ダブルプラズマガン装置

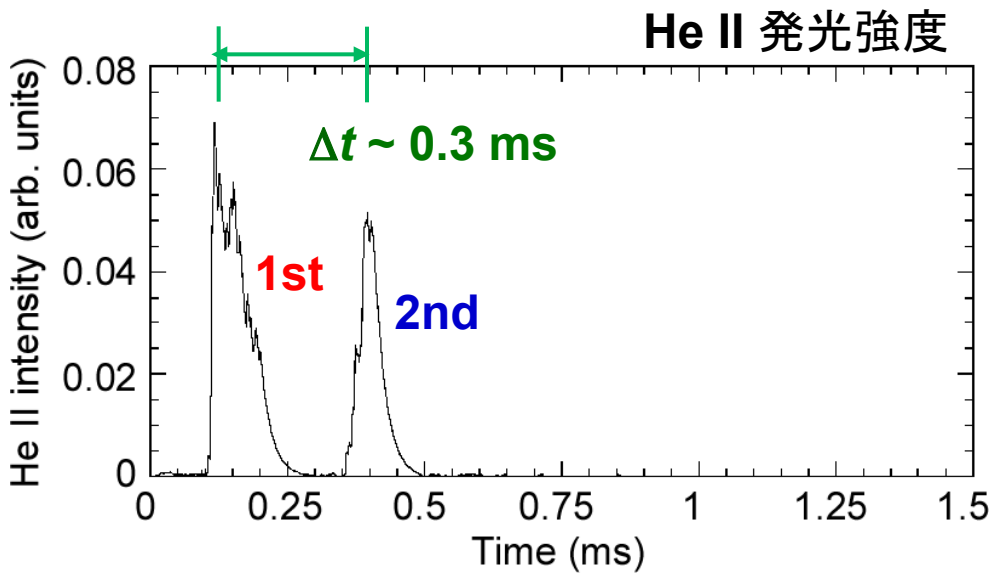
- 2台のプラズマガン装置を時間差をつけて動作。
- ターゲットに2つのプラズマを照射。





ダブルプラズマガン装置（初期結果）





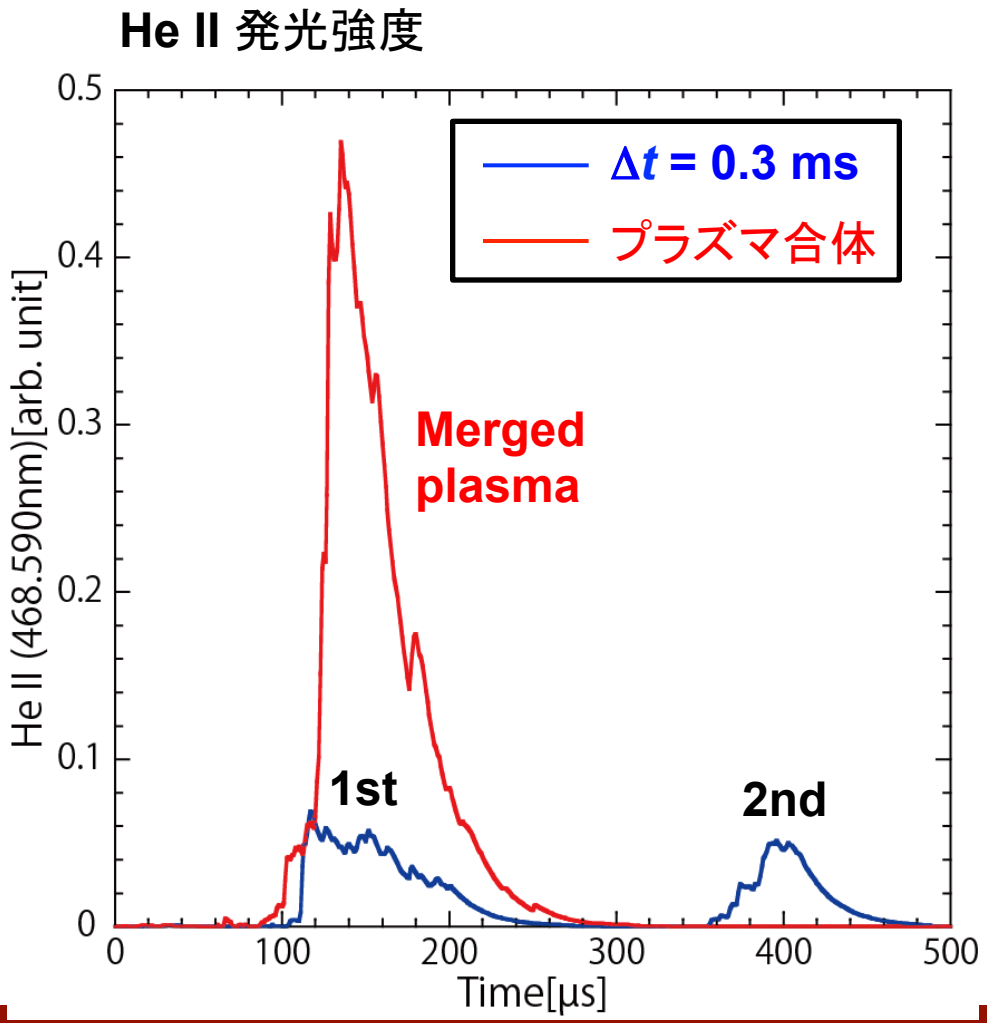
- 2台のプラズマガン装置を時間差をつけて動作させることに成功。
- 電源のコンデンサバンクの関係で単独運転と比較して電源パワーを下げて実験。
  1st: 4 kV, 3 mF, 2nd: 6 kV, 1 mF
- 時間差Δ*t*、プラズマエネルギー等を変えて照射可能。

⬇

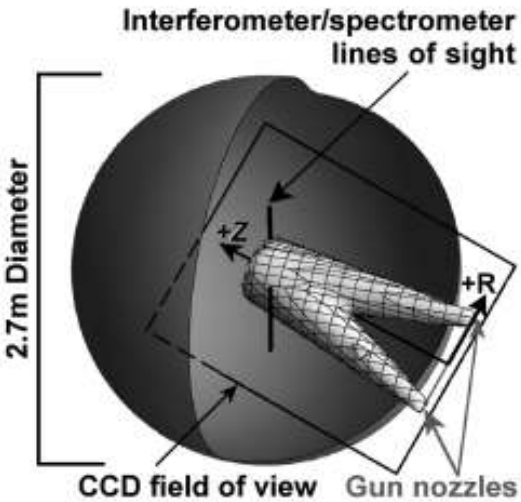
時間差Δ*t* = 0：プラズマ合体？

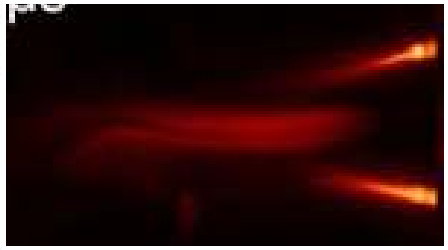
ダブルプラズマガン装置（初期結果）

・プラズマ合体 ➡ **He II発光強度の上昇**

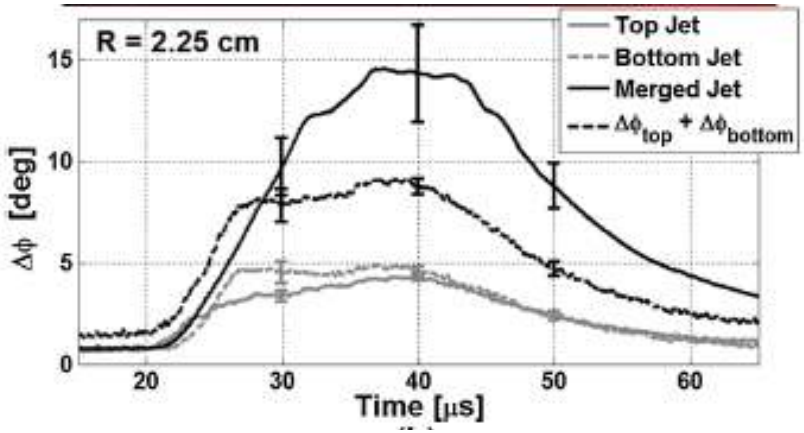


高エネルギー密度科学





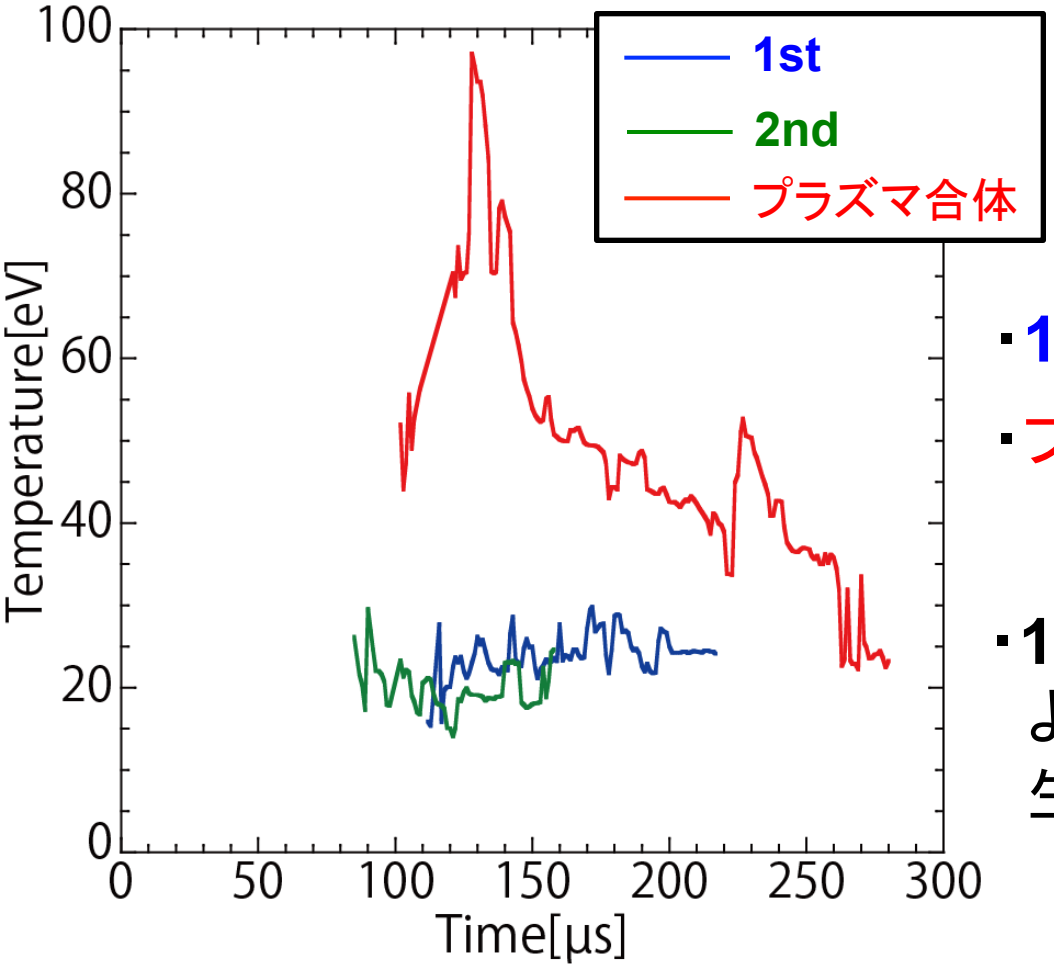
プラズマジェットの合体（**Plasma Liner Ex., Los Alamos National Lab.**）



E.C. Merritt, PRL2013

ダブルプラズマガン装置（初期結果）

・イオン温度の上昇 ➡ 高エネルギープラズマの照射



・1st, 2ndの単独放電：T_i ~25 eV

・プラズマ合体後：T_i ~100 eV

⬇

・1台のプラズマガンを高出力化するよりも高効率に高エネルギープラズマ生成可能。

まとめ

（1）プラズマパラメータ、熱流計測
- 線平均電子密度、イオン温度、イオンフロー速度、磁場計測
- タングステン、グラファイトにおける熱流計測

（2）**TFGR-W**へのプラズマ照射実験
- **W-1.1%TiC, W-3.3%TaC**への照射
- 純**W**表面にて生じたメジャークラックの抑制
- サンプル周辺部に微小なクラック形成と小さな窪みを観察
  添加物（**TiC**, **TaC**）の放出と考えられる。

（3）ダブルプラズマガン初期実験
- 2台のプラズマガンの動作を確認した。
- プラズマ合体時の**HeII**発光強度およびイオン温度の上昇を確認した。

今後の研究計画

（1）**TFGR-W**へのプラズマ照射実験
- **XRD**等を用いた表面構造の確認。
- プラズマエネルギー密度に対する表面損傷の依存性

（2）ダブルプラズマガン実験
- コンデンサバンクの増強
- 干渉計を用いた線平均電子密度計測
- カロリーメータを用いたエネルギー密度計測
  （時間差Δtに対する依存性の評価）
- 照射前後の質量損失計測（時間差Δtに対する依存性の評価）
- プラズマ合体を用いた高エネルギープラズマ生成と材料照射実験