

プラズマガンを用いたELM様パルス プラズマのタングステン材への照射実験

菊池 祐介, 岩本 大希, 佐久間 一行, 北川 賢伸,
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

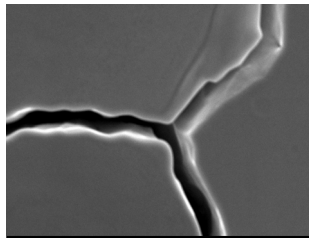
1. 研究の背景
2. 磁化プラズマガン(兵庫県立大学)
3. タングステンへ(W)のパルスプラズマ照射実験
 - ・定常予照射Wサンプルへの照射
 - ・W-Ta合金材、Wコーティング材への照射
4. 今後の研究計画

ITERダイバータにおける高熱流プラズマ模擬実験

Type I ELMs
0.2-2 MJ/m², 0.1-1 ms

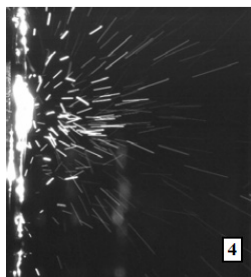
Transient heat loads

模擬装置: 電子ビーム, レーザ
プラズマガン



W表面におけるクラック

表面損傷:
溶融, クラック, ダスト
droplet splashing

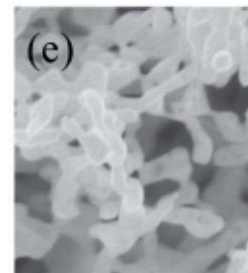


by QSPA Kh-50

高フラックス ~ 10²⁴ m⁻²s⁻¹
高フルーエンス ~ 10²⁶ m⁻²

Steady-state heat loads

模擬装置: 電子ビーム, イオンビーム,
直線型ダイバータプラズマ模擬装置



W fuzz

表面損傷:

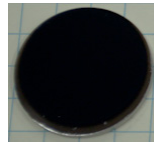
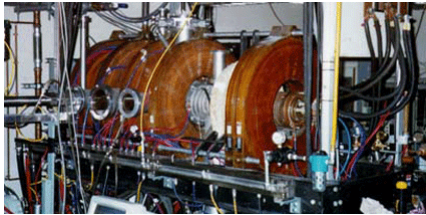
- 溶融, ダスト
- W表面構造
- Heバブル,
- Dブリストア,
- Fuzz

Ref.: S. Takamura, PFR 2006., M. Baldwin, NF2008.

プラズマガンと定常プラズマ源による複合照射研究

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
(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

- ・ 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

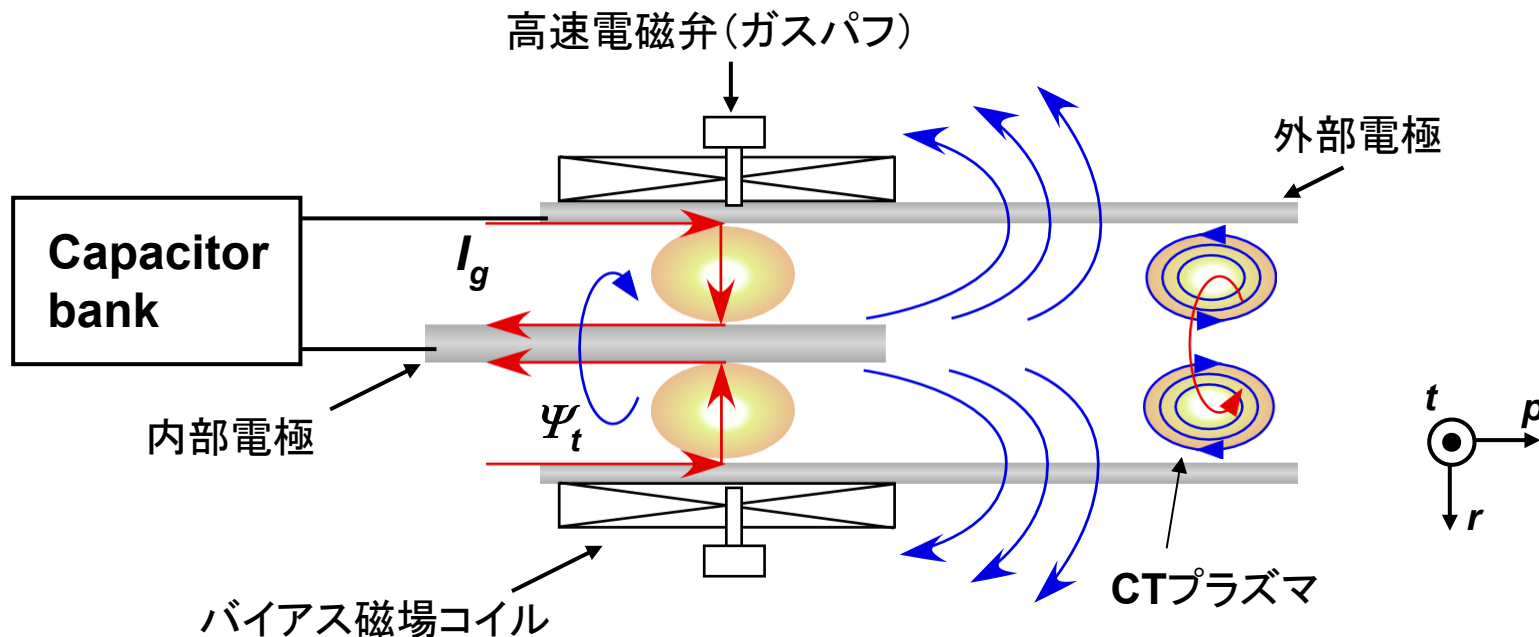
ダイバータプラズマ模擬実験装置
NAGDIS-IIにプラズマガン装置を接続



- ・ プラズマガン単体動作確認
- ・ 複合照射実験を2012年秋～

磁化同軸プラズマガン@兵庫県立大学

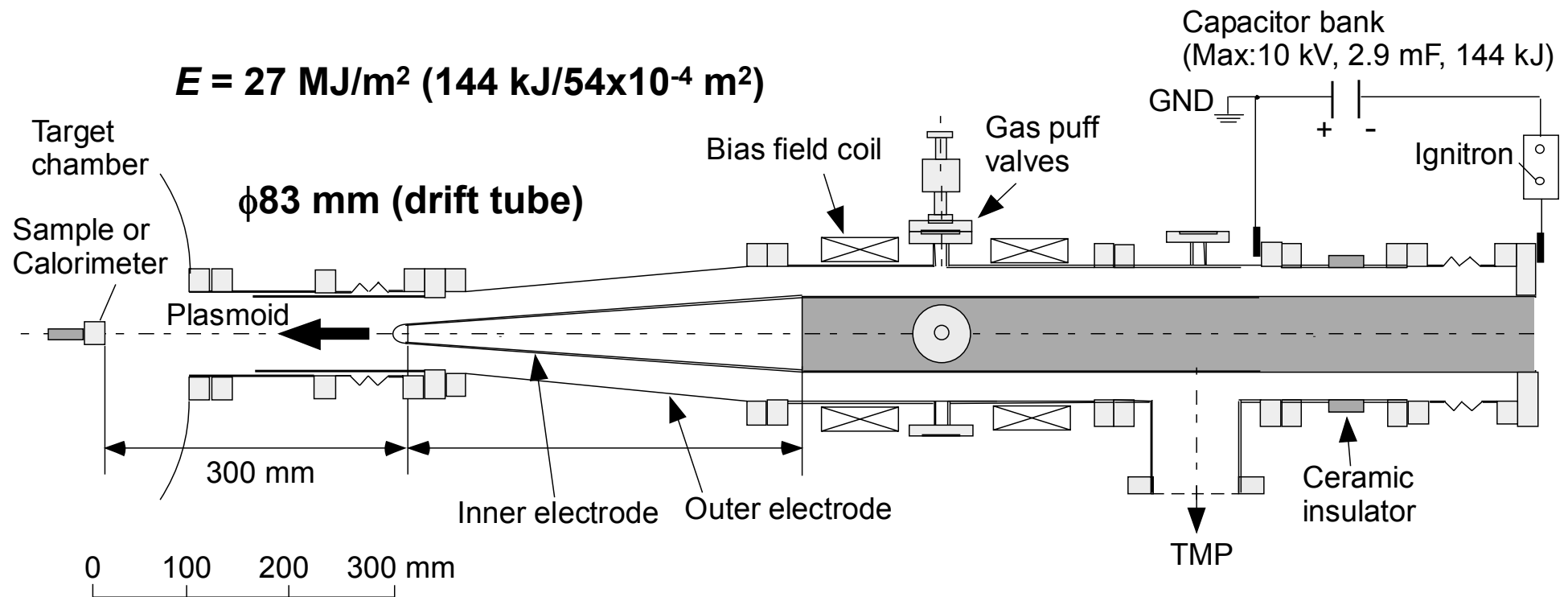
Magnetized Coaxial Plasma Gun (MCPG)



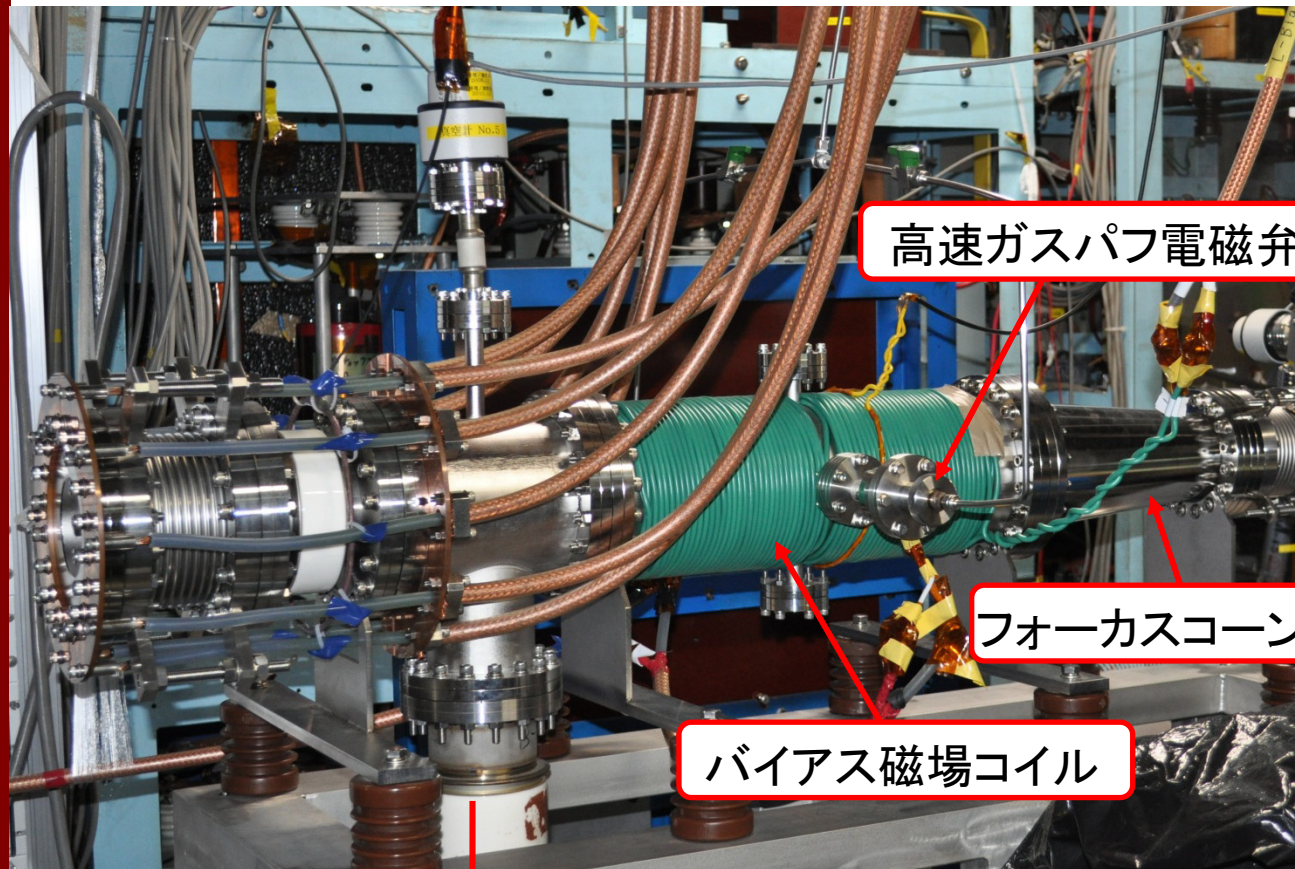
- ポロイダル電流とトロイダル電流を有するコンパクトーラス (**Compact Torus: CT**) プラズマが形成される。
- 高速 ($\sim 300 \text{ km/s}$) で移送可能

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



磁化同軸プラズマガン@兵庫県立大学

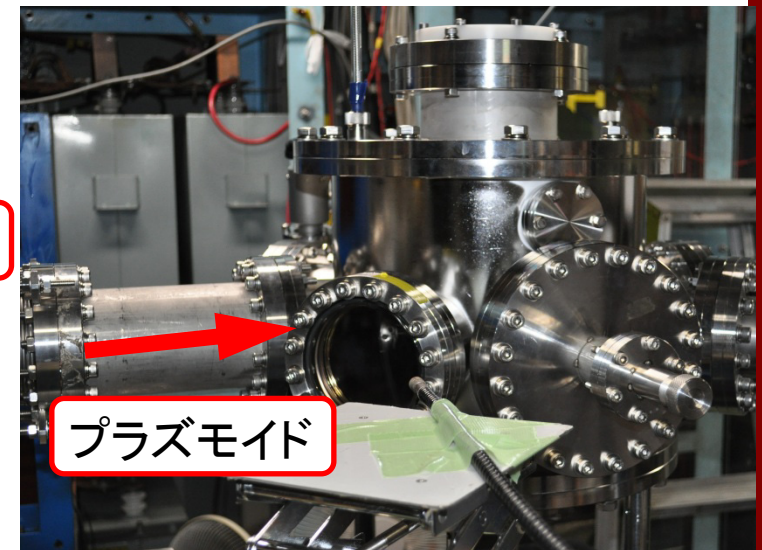


高速ガスパフ電磁弁

フォーカスコーン

バイアス磁場コイル

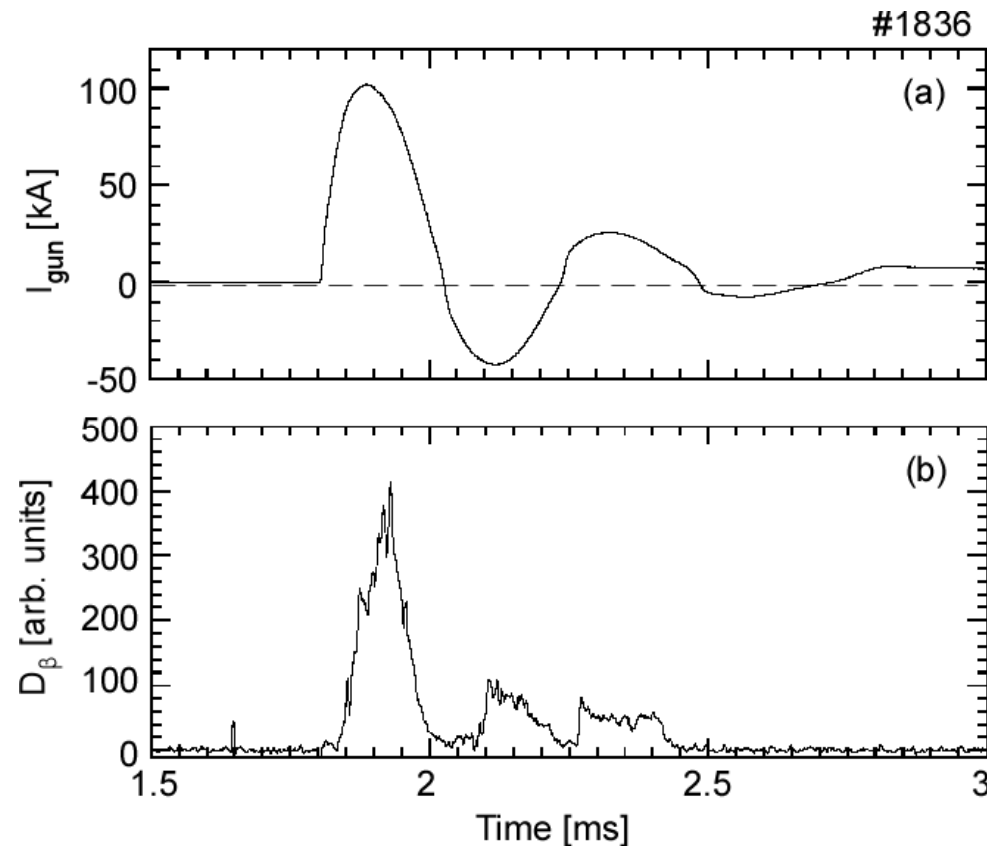
TMP



プラズモイド

ターゲットチャンバー

典型的な放電波形

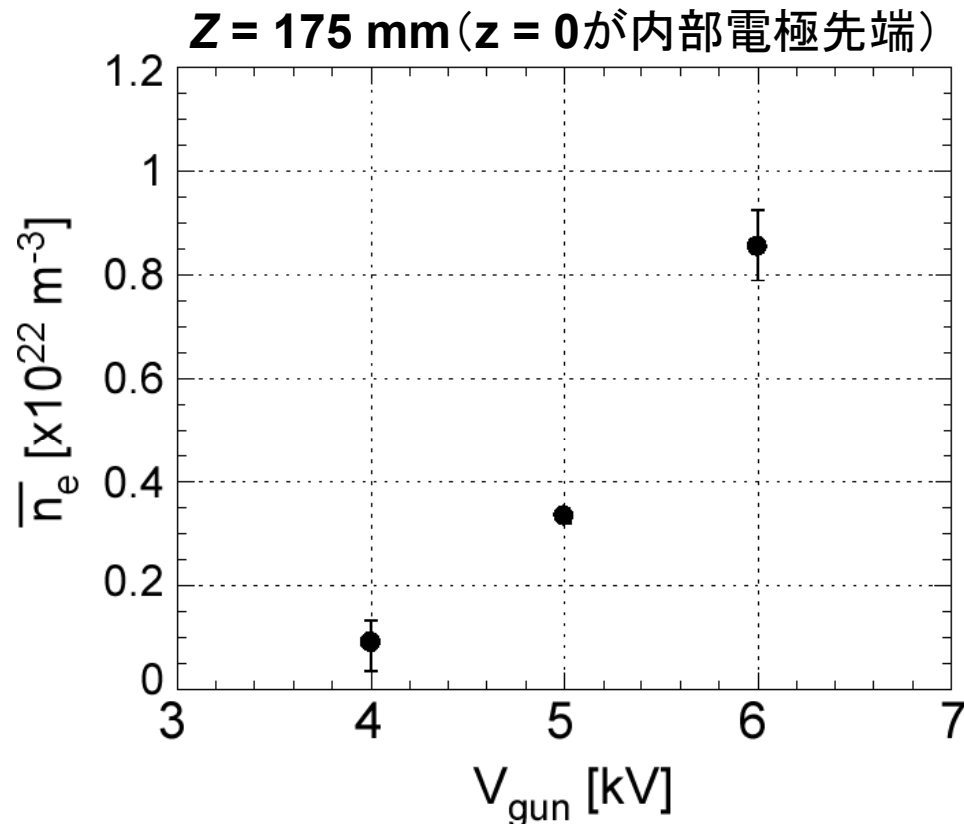


- ガン電流: ~ 100 kA
- パルス幅: ~ 0.2 - 0.6 ms
- 放電ガス: 水素、重水素、ヘリウム
- 運転周期: 10分

プラズマパラメータ計測

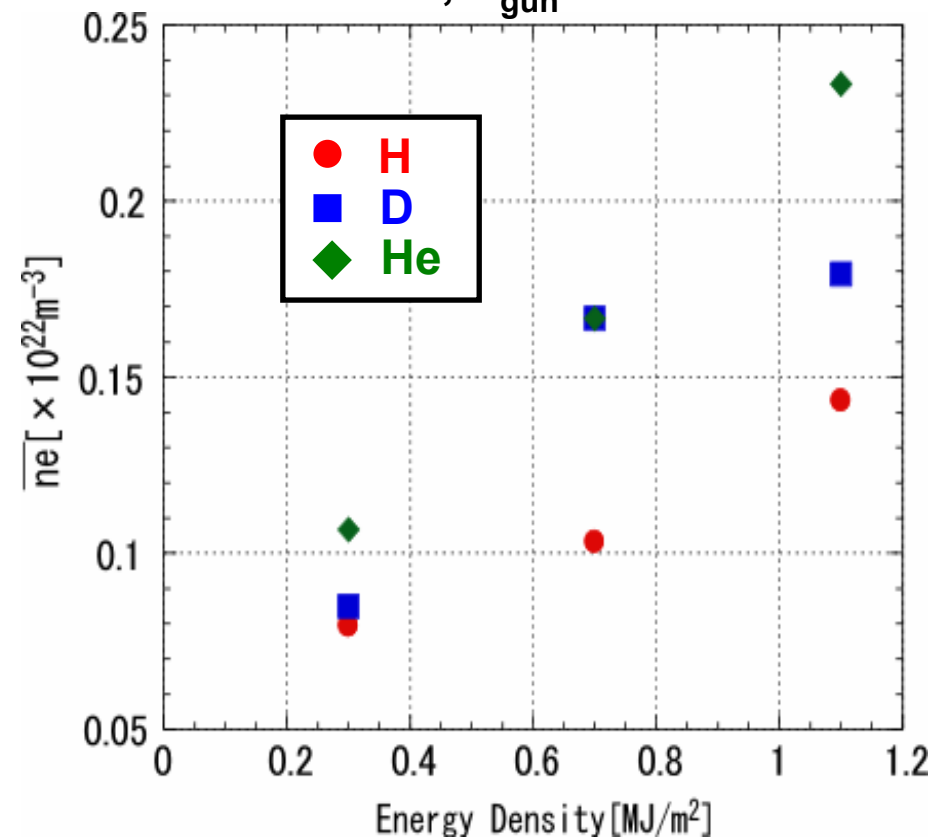
- ・He-Neレーザ干渉計による線平均電子密度計測
- ・材料照射位置 ($z = 340 \text{ mm}$) にて、線平均電子密度 $\sim 2 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$

- ガン電圧依存性



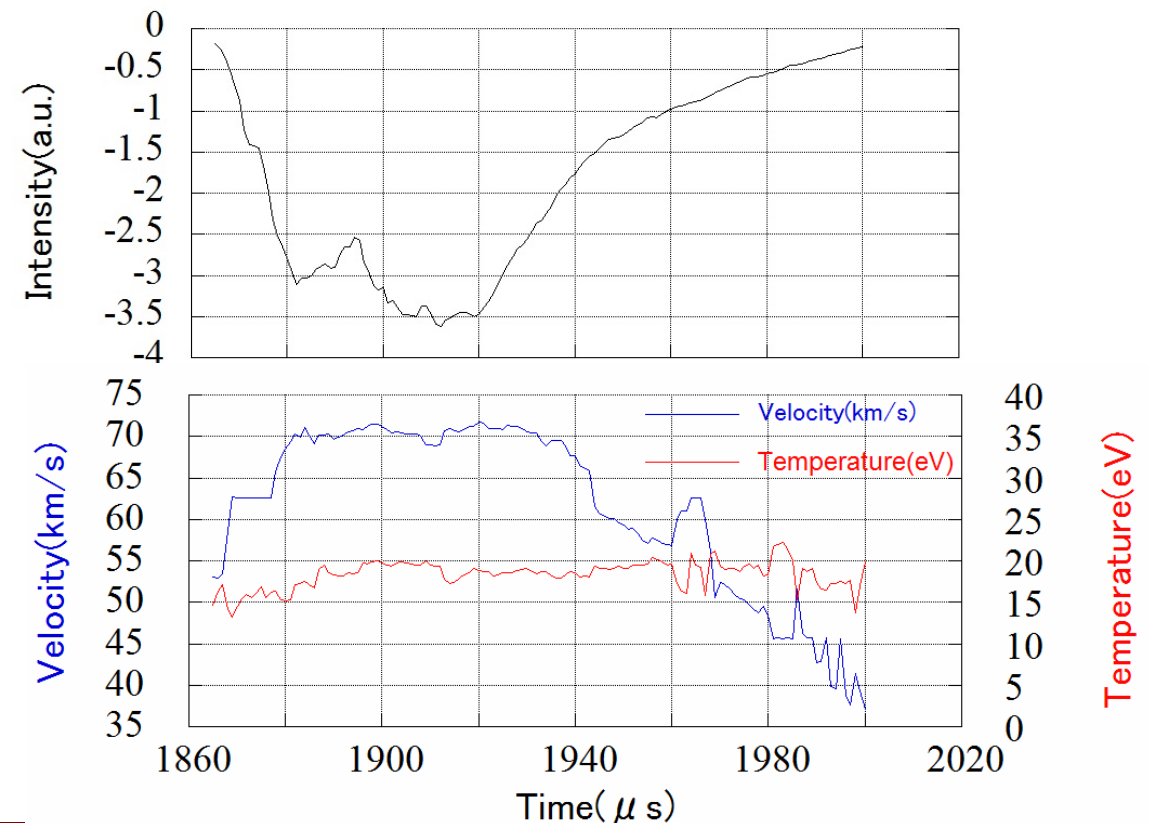
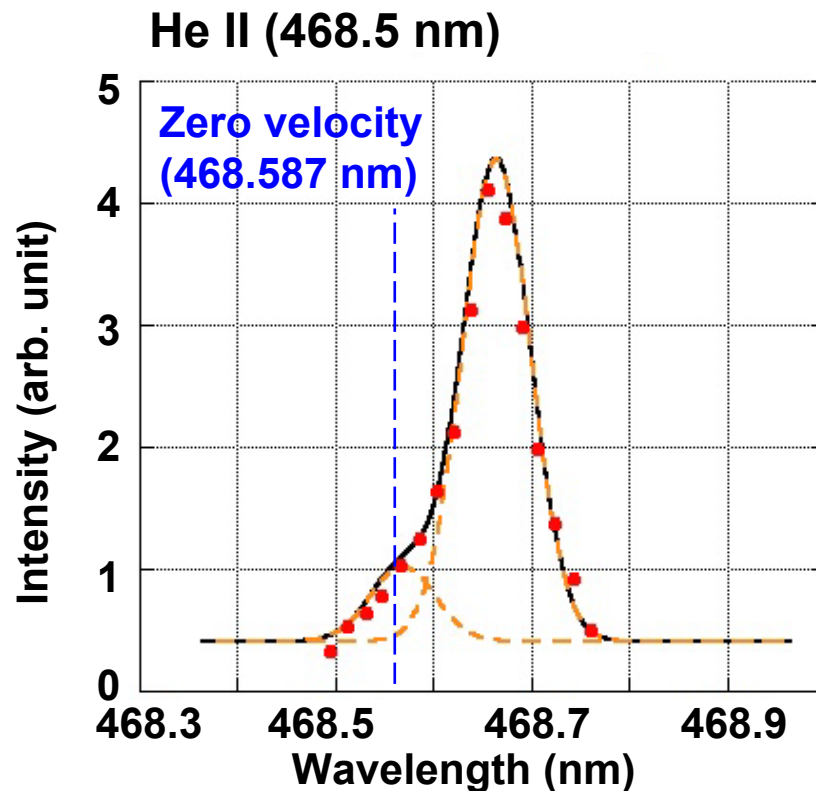
- ガス種依存性

$Z = 340 \text{ mm}, V_{\text{gun}} = 6 \text{ kV}$



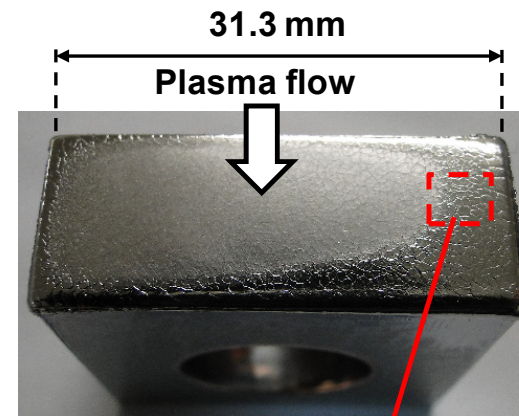
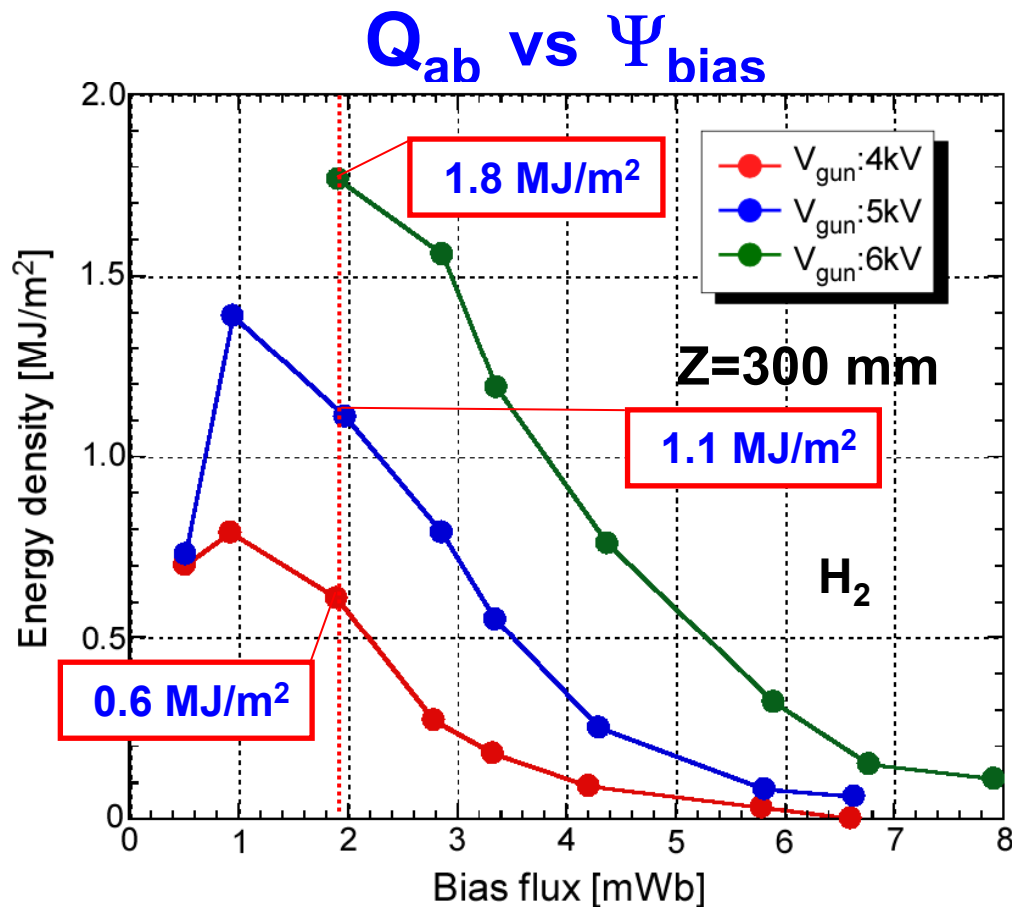
プラズマパラメータ計測

- ・イオンドップラー分光器(1 m分光器、16ch PMT出力)
- ・He II (468.5 nm)のドップラー広がり(イオン温度)、ドップラーシフト(フロー速度)
- ・イオン温度: 20 eV、イオンフロー速度: 70 km/s ($E_i \sim 100$ eV)

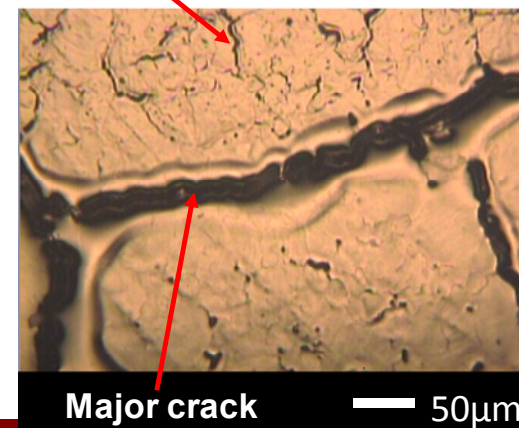


エネルギー密度計測

- ・カロリメータによるエネルギー密度計測
- ・ $V_{\text{gun}} = 6 \text{ kV}$ にて $\sim 2 \text{ MJ/m}^2$ を達成
- ・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。



Micro-sized crack



Major crack

50 μm

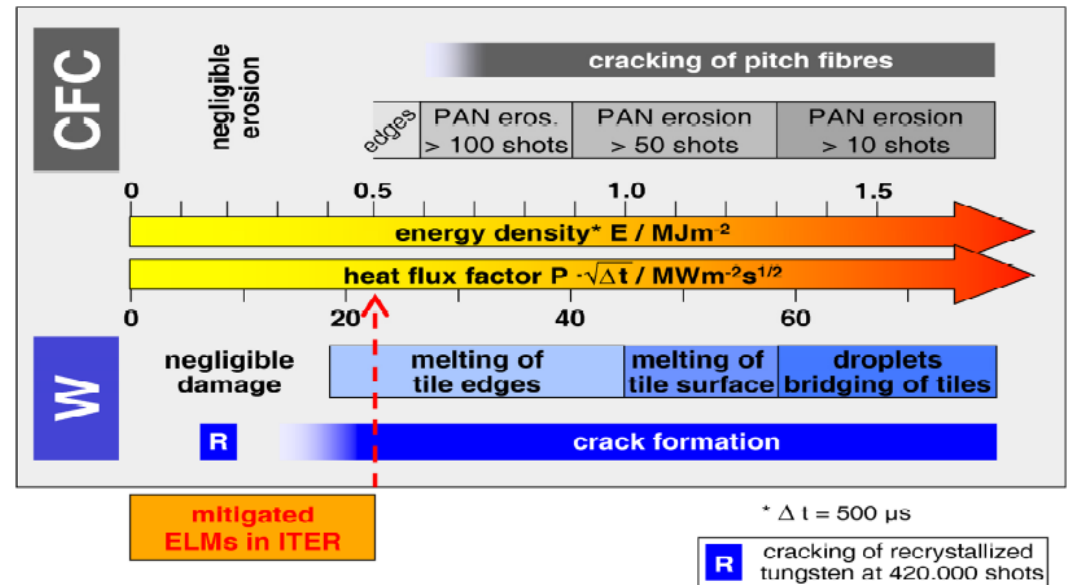
Wモノブロック
への照射
(阪大、原子力
機構との共同
研究)

- ・W表面溶融
- ・クラック形成

プラズマパラメータ(まとめ)

エネルギー密度	~2 MJ/m ²
パルス幅	0.2-0.6 ms
コンデンサバンク エネルギー(最大)	144 kJ (10 kV, 2.9 mF)
フロー速度	70 km/s
イオン温度	20 eV
入射イオンエネルギー	100 eV
線平均電子密度	2x10 ²¹ m ⁻³
フラックス	1.4x10 ²⁶ m ⁻² s ⁻¹
フルーエンス	~3x10 ²² m ⁻²

※Heプラズマの場合



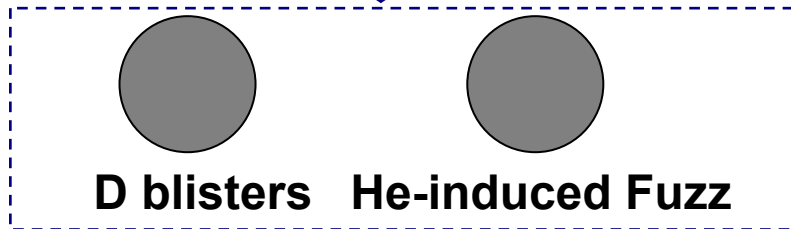
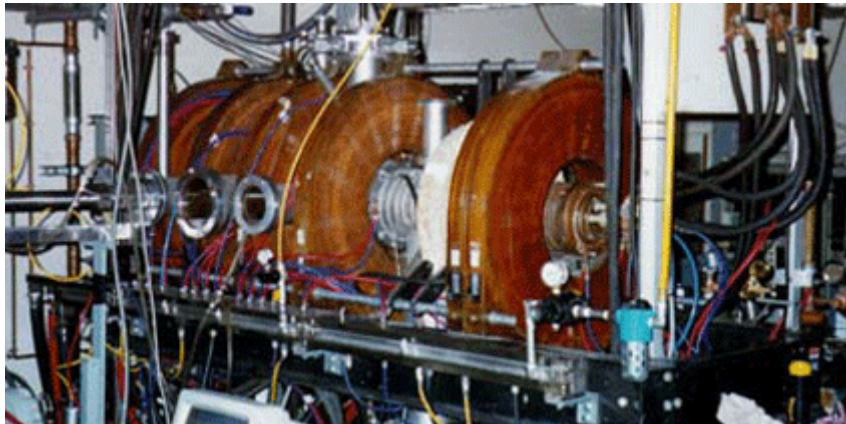
- ・ITERのtype I ELMで想定されているエネルギー密度のパルスプラズマの生成
- ・W表面溶融

W-Fuzzに対するパルスプラズマ照射

UCSD (Dr. D. Nishijima, Dr. R. Doerner) との共同研究

PISCES-A (UCSD) により定常D, Heプラズマ照射をしたITER-grade Wを兵庫県立大学に持ち込み、プラズマガン装置によりELM様パルスプラズマを照射した。

PISCES-A @ UCSD



ITER-grade W, 直径: 25.4 mm、厚さ: 1.5 mm

プラズマガン装置@兵庫県立大学



W-Fuzzに対するパルスプラズマ照射

- ・定常Heプラズマ照射によりFuzzが形成されたWサンプル
- ・Heパルスプラズマ($0.3, 0.7, 1.1 \text{ MJ/m}^2$)を1ショット照射
- ・ 0.3 MJ/m^2 ではサンプル表面にほぼ変化なし
- ・ 0.7 MJ/m^2 では表面が灰色になり、アーク痕を確認
(Dブリスターサンプルではアーク痕は確認されない)



0.3 MJ/m^2



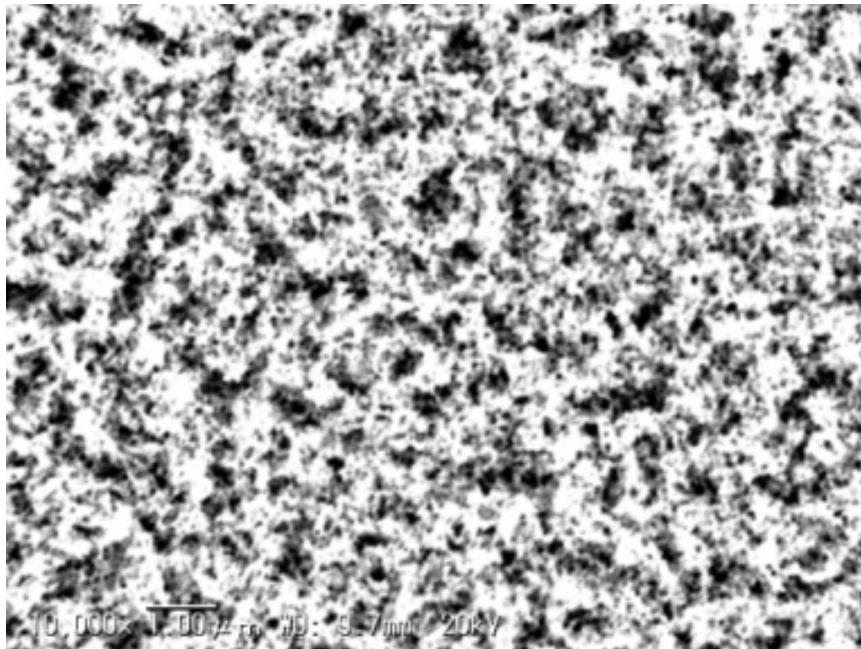
0.7 MJ/m^2



1.1 MJ/m^2

W-Fuzzに対するパルスプラズマ照射

パルスプラズマ照射前

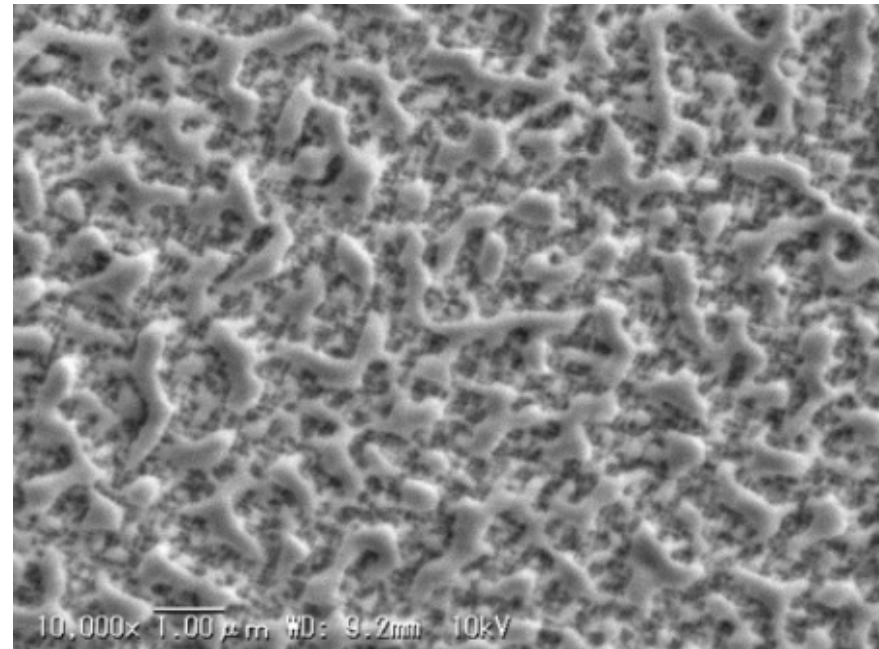


— 1 μm



W-Fuzz: 黒色

パルスプラズマ照射後



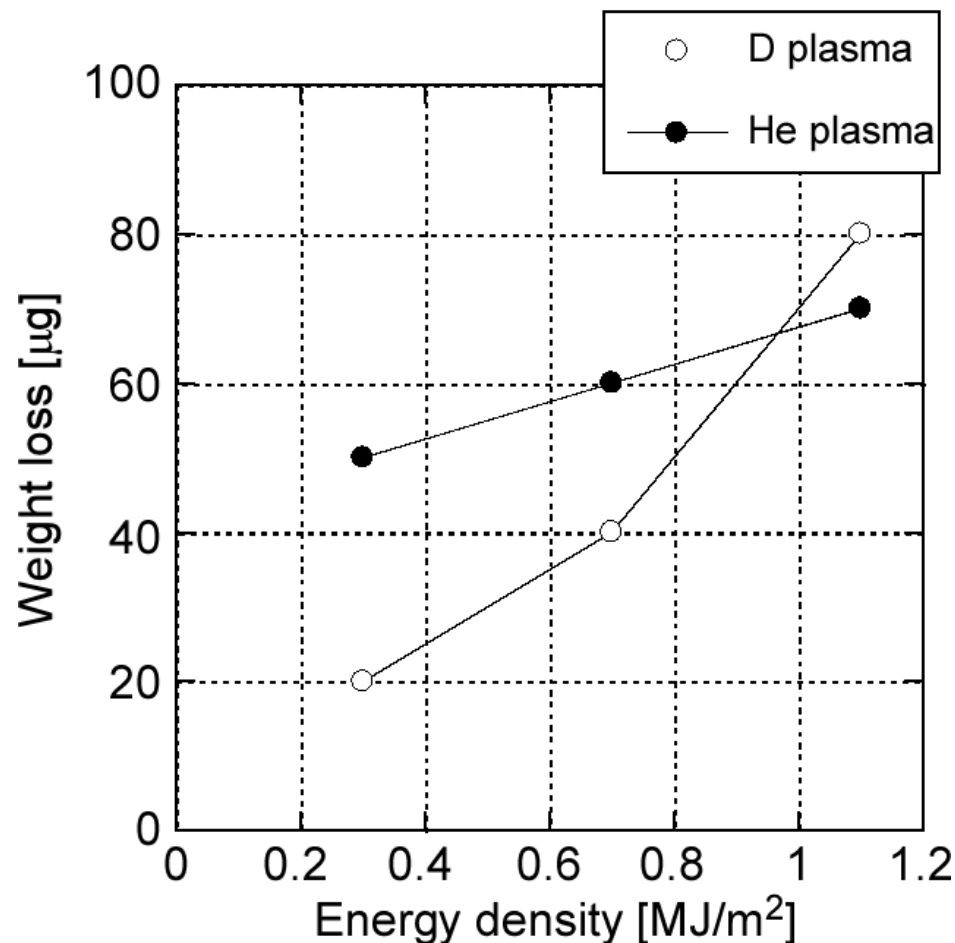
— 1 μm



W-Fuzz: 黒色→灰色、白色
(Fuzzが溶融し、表面が
スムーズになるため)

W-Fuzzに対するパルスプラズマ照射

パルスプラズマ照射(1shot)による
W-Fuzzの質量損失



1shotで最大80 μg の質量損失が発生



W-Fuzz(厚さ:2 μm)の14%に対応

※Dブリスターサンプルでは
質量損失無し



溶融層の放出やアーキングによる
質量損失

W合金材、W被覆材に対する照射

(1) ITER-grade W

大阪大学(上田教授)との共同研究

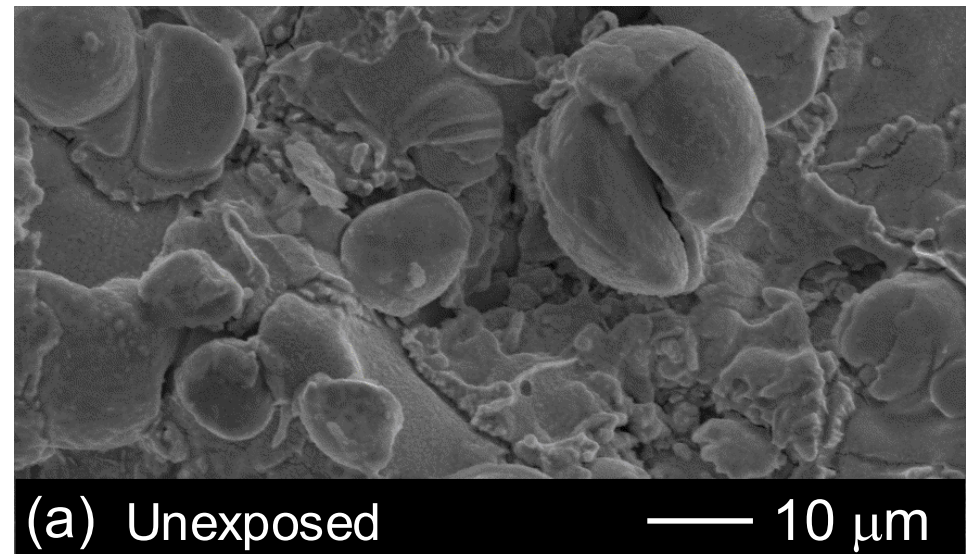
(2) W-Ta(2wt%)合金

- クラック形成の抑制が期待される。

(3) VPS W被覆低放射化フェライト鋼

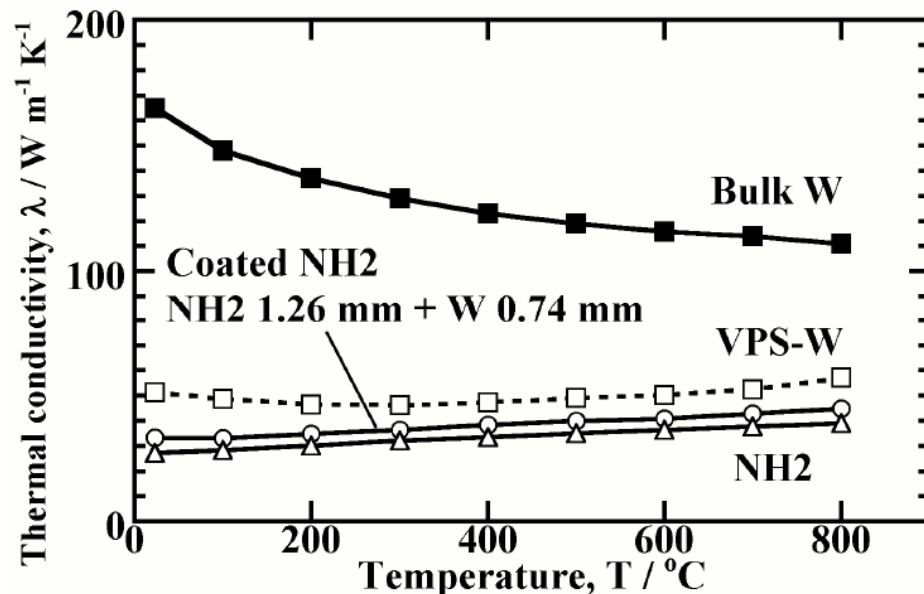
- F82H: Fe-8Cr-2W-0.1C
- 熱伝導率がバルクWの30 %程度

VPS-W被覆F82H



W被覆厚: 0.6 mm

W粒子: $>10 \mu\text{m}$

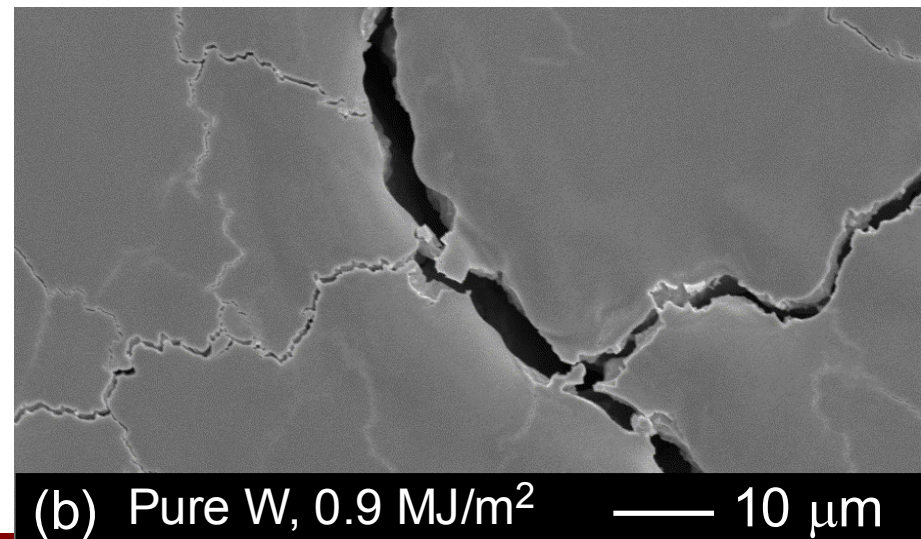
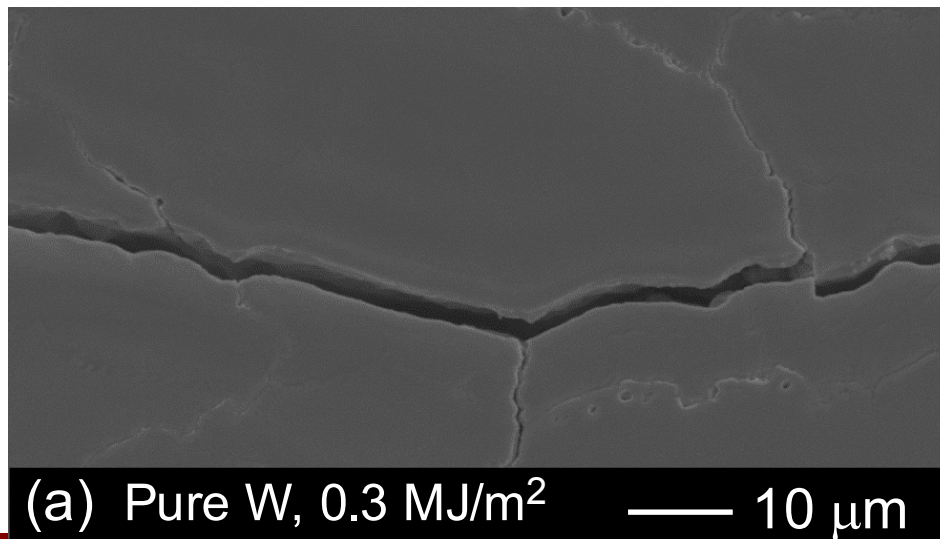
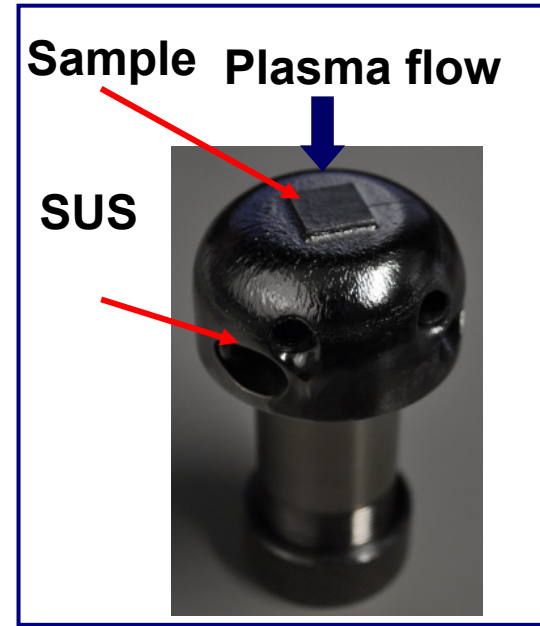


Ref.: T. Nagasaka et al., Fus. Sci. Tech. (2009)

W合金材、W被覆材に対する照射

(1) ITER-grade W (pure W) 10 plasma pulses of ~0.3 and 0.9 MJ/m²

- サイズ: 10 mm x 10 mm x 1 mm
- 鏡面研磨
- サンプルベース温度: 室温
- 表面クラックの形成 (~0.3 MJ/m²)
- クラック幅: ~ 5 μ m



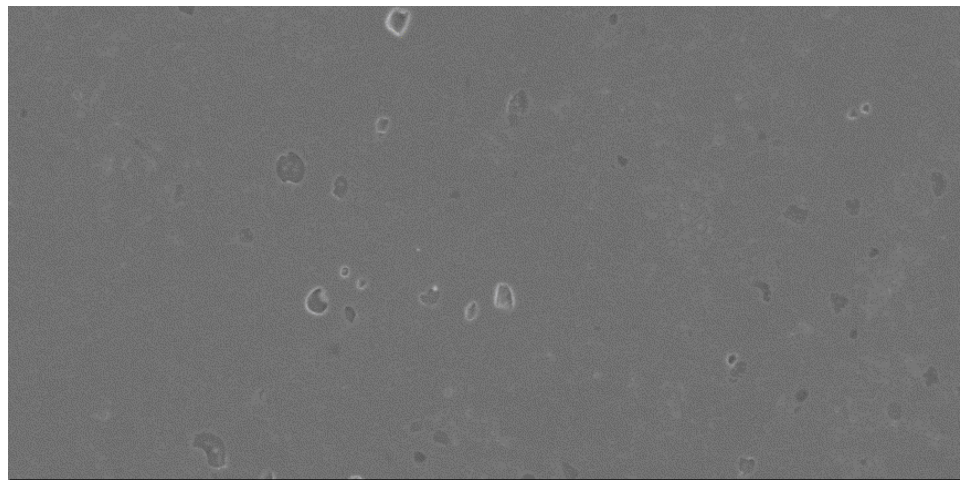
W合金材、W被覆材に対する照射

(2) W-Ta(2wt%)合金材

10 plasma pulses of ~0.3 and 0.9 MJ/m²

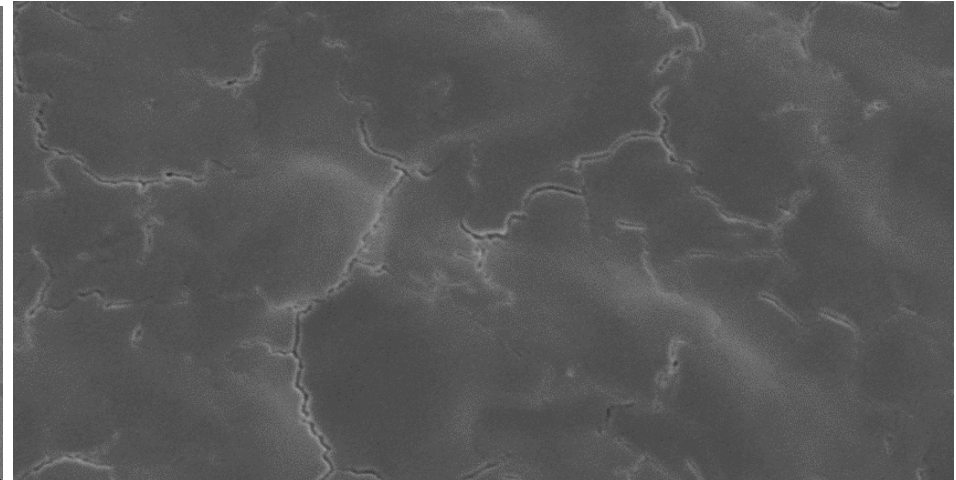
- サイズ: 10 mm x 10 mm x 1 mm
- 鏡面研磨
- サンプルベース温度: 室温
- 表面クラック: 形成されない (~0.3 MJ/m²)
- 表面クラック幅 (~0.9 MJ/m²) < 1 μm

➡ 表面クラック形成の抑制 (エネルギー密度閾値の上昇)



(a) W-Ta, 0.3 MJ/m²

—— 10 μm



(b) W-Ta, 0.9 MJ/m²

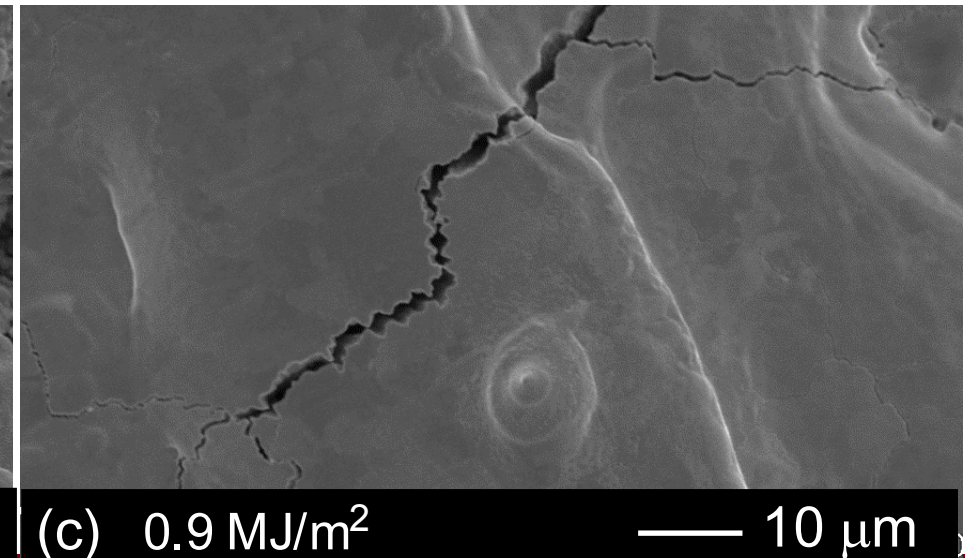
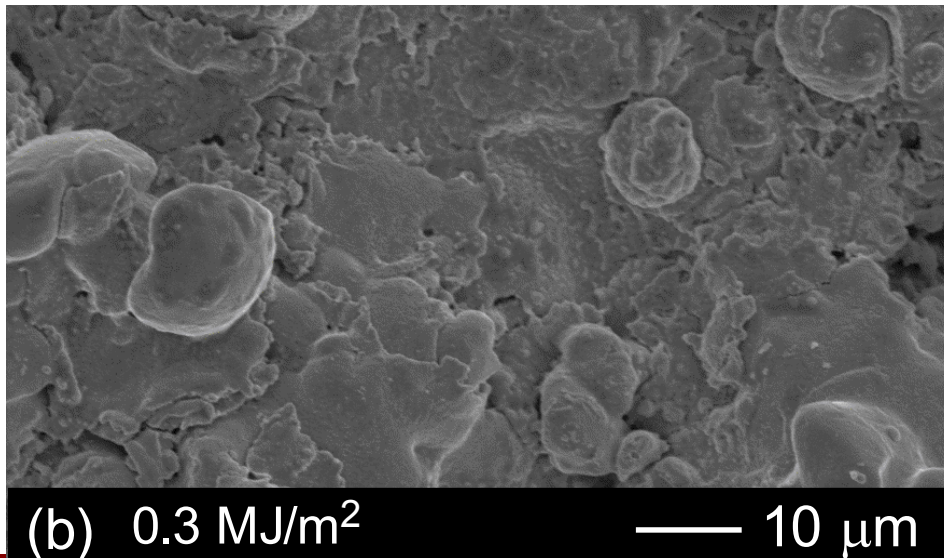
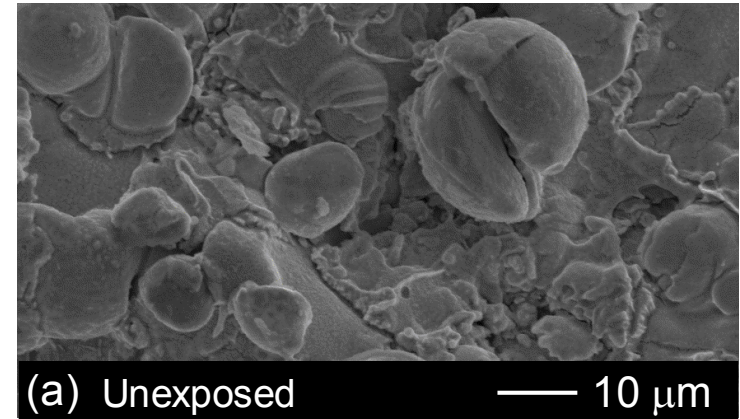
—— 10 μm

W合金材、W被覆材に対する照射

(3) VPS-W(低放射化材料F82H基板)

10 plasma pulses of ~ 0.3 and 0.9 MJ/m²

- サイズ: 10 mm x 10 mm x 1 mm
 - 鏡面研磨なし
 - サンプルベース温度: 室温
 - 表面形状の変化なし (~ 0.3 MJ/m²)
 - 表面溶融と再凝固層でのクラック形成 (~ 0.9 MJ/m²)
- ➡ 熱伝導率がバルクWに対して低いため、表面温度上昇が大きいと考えられる。



まとめ

磁化プラズマガン装置を開発し、エネルギー密度 $\sim 2 \text{ MJ/m}^2$
(パルス幅 $0.2 \sim 0.6 \text{ ms}$)のパルスプラズマを生成、材料照射した。

(1) 定常プラズマ予照射Wに対する照射

	Fuzz W	DブリストアW
質量損失	$\sim 14\% \text{ lost}$	無し
クラック	無し	有り
アーク発生	有り	無し

(2) W合金、W被覆材に対する照射

	ITER-grade W	W-Ta(2wt%)
クラック形成 閾値(10ショット)	$< 0.3 \text{ MJ/m}^2$	$\sim 0.7 \text{ MJ/m}^2$

VPS-W
$\sim 0.9 \text{ MJ/m}^2$ にて表面溶融、 再凝固時にクラック形成 W被覆の基板からの剥離 は確認されない。

今後の研究計画

ダブルプラズマガン装置@兵庫県立大学

Vapor shield効果を検証する実験

