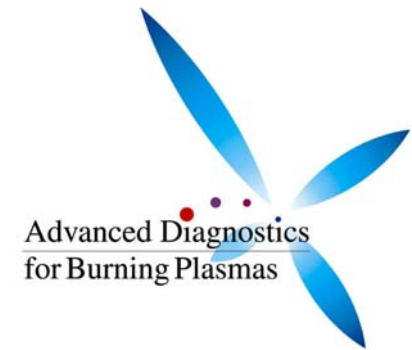


2008.318  
第11回若手科学者によるプラズマ研究会



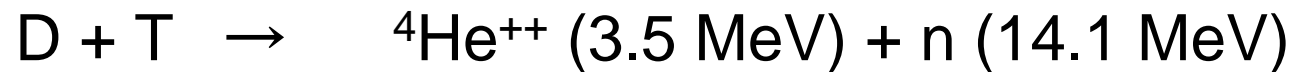
# ITERにおけるアルファ粒子計測用 He<sup>+</sup>イオン源の基礎特性の評価

木崎雅志, 小渕隆, 神藤勝啓<sup>A</sup>, 岡本敦, 北島純男,  
笹尾眞實子, 津守克嘉<sup>B</sup>, 西浦正樹<sup>B</sup>, 金子修<sup>B</sup>, 榊田創<sup>C</sup>,  
木山学<sup>C</sup>, 平野洋一<sup>C</sup>, 和田元<sup>D</sup>  
東北大院工, <sup>A</sup>原子力機構, <sup>B</sup>核融合研, <sup>C</sup>産総研, <sup>D</sup>同志社大院工

# 背景

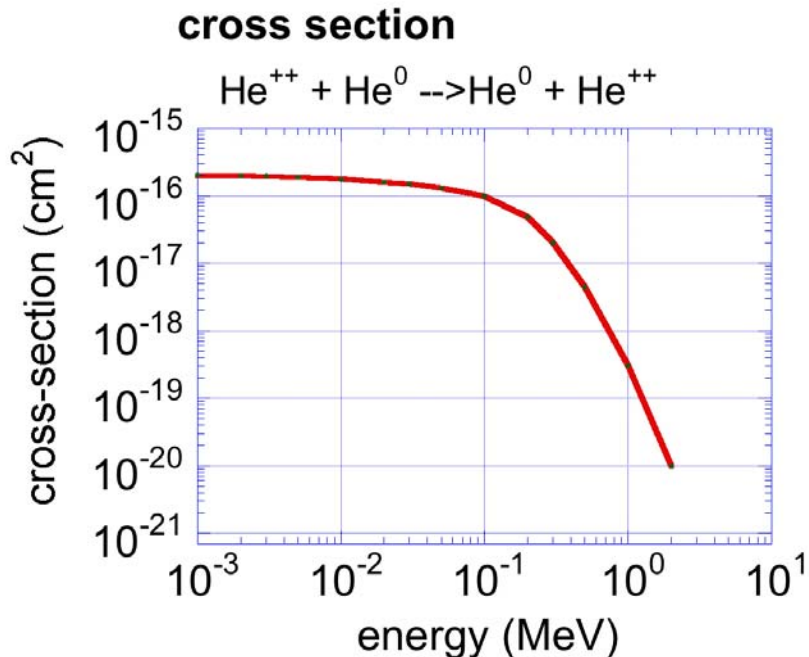
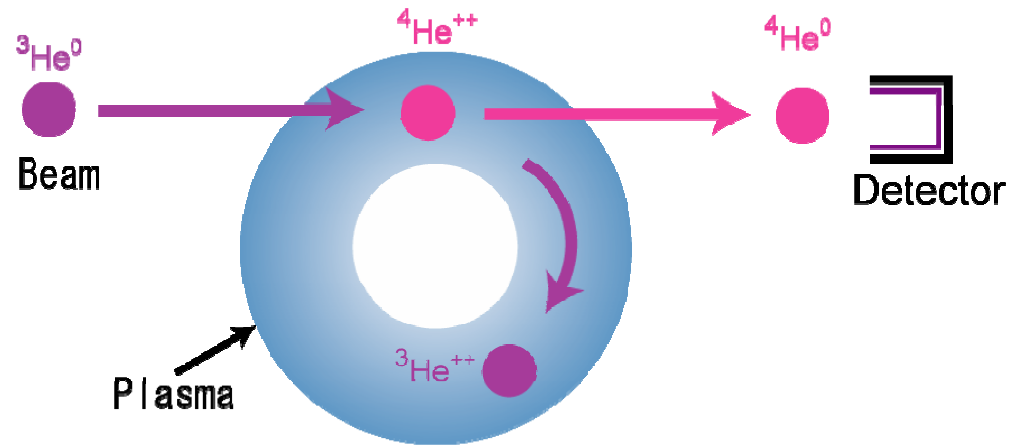
---

- 国際熱核融合実験炉 (ITER) では D - T 核融合反応による実験が計画されている。



- D - T 核融合反応により生成されたアルファ粒子はプラズマ粒子との衝突によりプラズマを加熱する。
- アルファ粒子の閉じ込めの良否は、プラズマが自己加熱を維持する鍵となる。
- 磁場によって閉じ込められたアルファ粒子の空間分布、速度分布を測定することは重要である。

# ビーム中性化法



荷電交換断面積は相対速度に対応するエネルギーが 200 keV を超えると急激に減少



アルファ粒子と同程度の速度を持った  $\text{He}^0$  ビームが必要

# He<sup>0</sup>ビームの生成

(a) 正イオン(He<sup>+</sup>)を加速し、ガスセルで中性化する方法

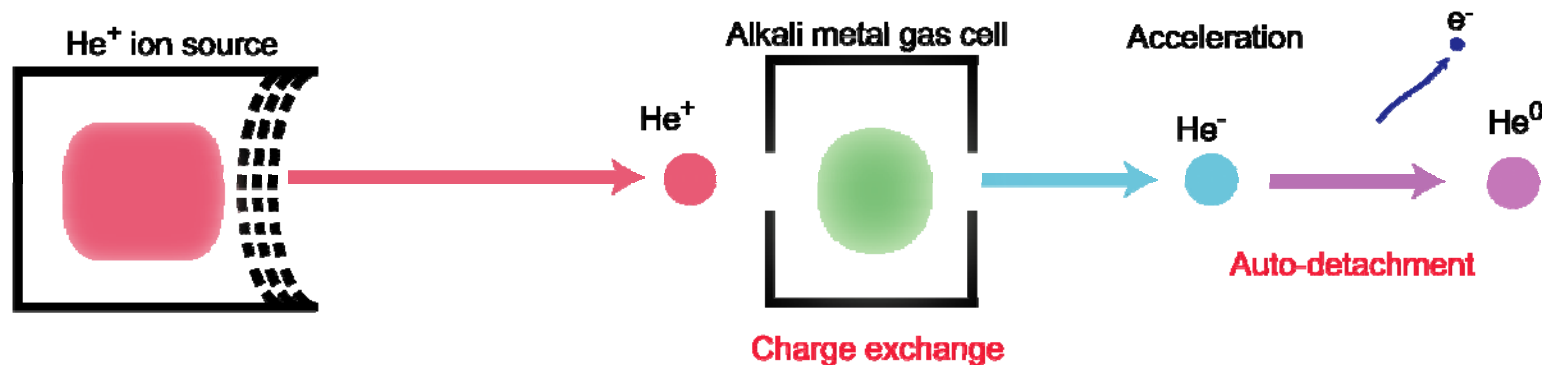
- ・ MeV 領域のビームエネルギーでは中性化効率が数 % 以下

(b) 負イオン(He<sup>-</sup>)を加速し、ガスセルで中性化する方法

- ・ 生成される He<sup>0</sup> の70 % がイオン化され易い準安定状態であり、プラズマ中心部までの透過が困難

(c) 負イオン(He<sup>-</sup>)を加速し、飛行中に自然崩壊させる方法

- ・ プラズマ中での減衰が小さい基底状態の He<sup>0</sup> を効率よく生成することが可能



**He<sup>-</sup> : 1 – 1.5 MeV, 0.1 mA/cm<sup>2</sup>, 100 cm<sup>2</sup> (5cm x 20cm)**

[M. Sasao et al., Rev. Sci. Instrum., 77, 10F130 ,2006]

# He<sup>+</sup>イオン源に要求される性能

## ✓大電流ビーム

He<sup>+</sup>からHe<sup>-</sup>への荷電交換効率はエネルギーに依存  
荷電交換効率は最大でも数% (ex. Na : 2%)



低引き出し電圧で大電流 (> 1 A) が必要  
ビーム電流は引き出し電圧の3/2乗に比例

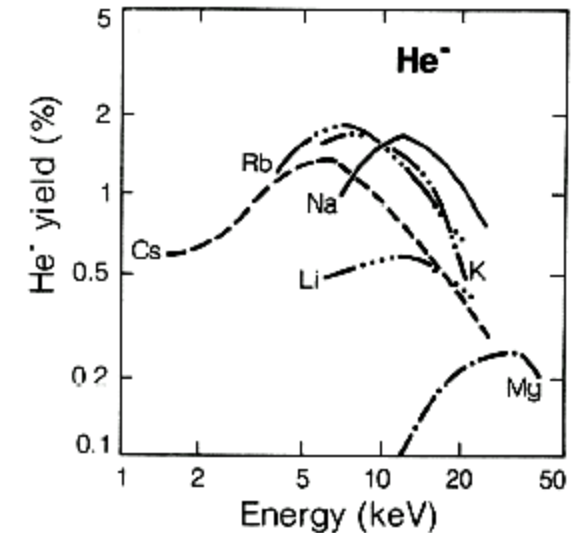
## ✓強集束性

ガスセルのアパチャを小さくしてアルカリ金属ガスの漏出を抑制



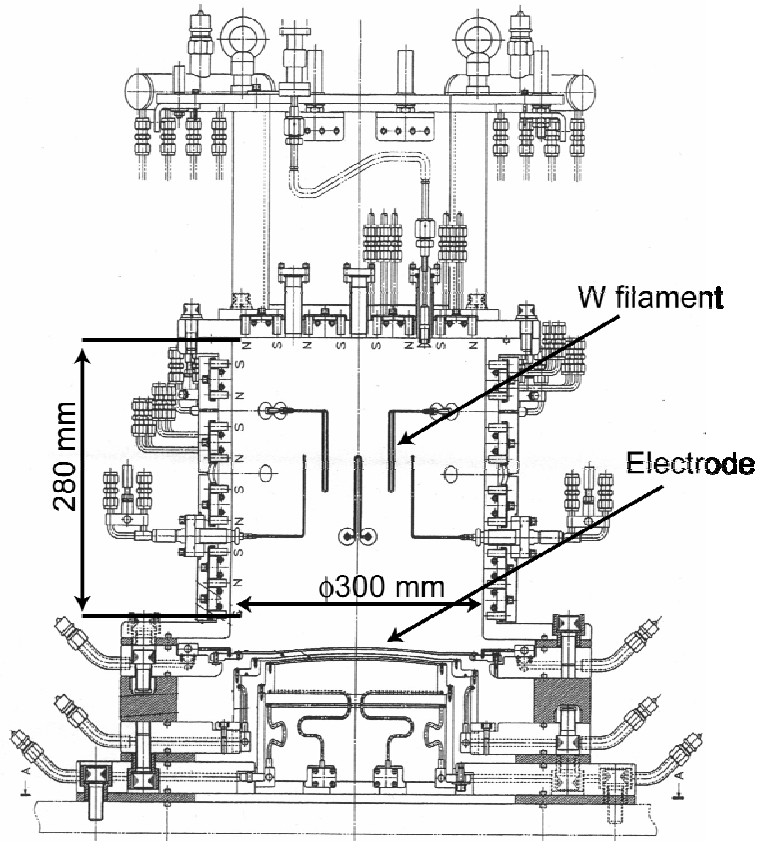
ガスセル近傍でビームを集束させることが必要

低速、大電流密度のビームは空間電荷効果が支配的



様々なアルカリ金属ガスに対するHe<sup>+</sup>からHe<sup>-</sup>への荷電交換効率  
[Schlacter, AIP conf. Proc.1984]

# 強集束He<sup>+</sup>イオン源



## ✓ 大電流ビームの引き出し

— 引き出し面  $\phi 100$  mm で  $\phi 4$  mm  $\times$  300 個  
のマルチアパチャ

— ビームエネルギー **30 keV** 以下でビーム電  
流量 **3 A**

## ✓ ビームの強集束

— **湾曲型電極**を採用することでプラズマ電極  
から 750 mm の位置にビームを集束  
— 焦点においてビームが  $\phi 20$  mm に集束

- $\phi 300$  mm  $\times$  280 mm のプラズマ容器
- W フィラメントを陰極としたアーク放電
- カस्प磁場によるプラズマ閉じ込め

# 目的

---

ITERにおけるアルファ粒子計測用の実機サイズの  $\text{He}^+$  イオン源のビーム引き出し性能と集束性を評価することを目的とする。

- ビーム電流、ビーム径を計測するための計測器を製作する。
- $\text{He}^+$  ビーム電流の計測及び $\text{He}^+$  ビームの集束性の検証を行なう。
- ビーム電流、ビームの集束性に関してプラズマ生成条件、引き出し条件に対する基礎特性を評価する。
  - ビーム電流のアークパワー依存性
  - ビーム電流の引き出し電圧依存性
  - $1/e$  半幅のパービアンズ依存性

# ビーム電流、ビームウェストモニター

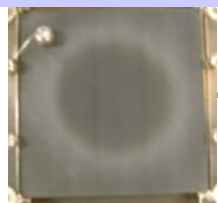
ロゴスキーコイル

巻数 811 回  
内径 176 mm  
断面図 184 mm<sup>2</sup>

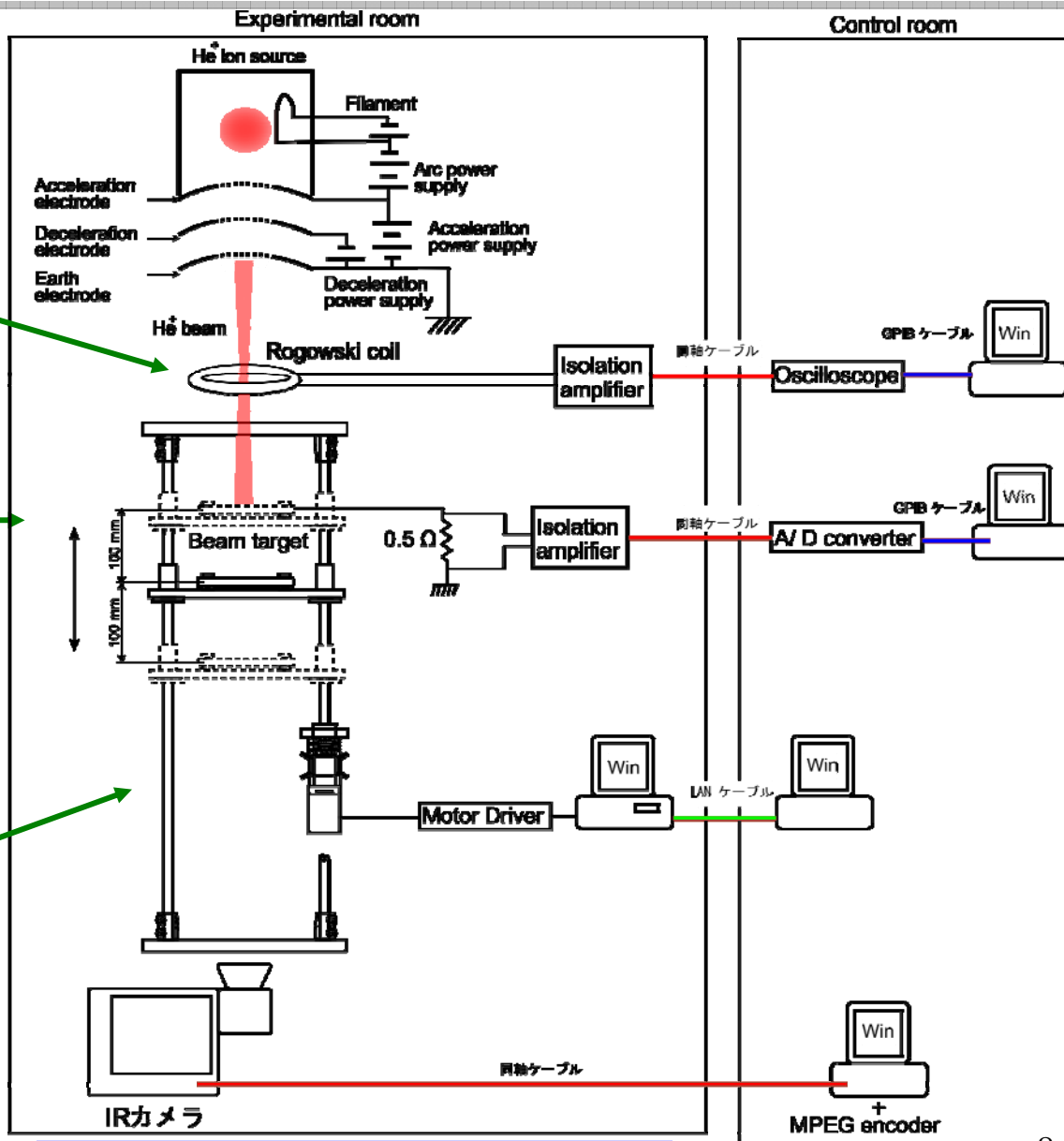


カーボン板

寸法 2×100×100 mm  
駆動範囲: 215 mm



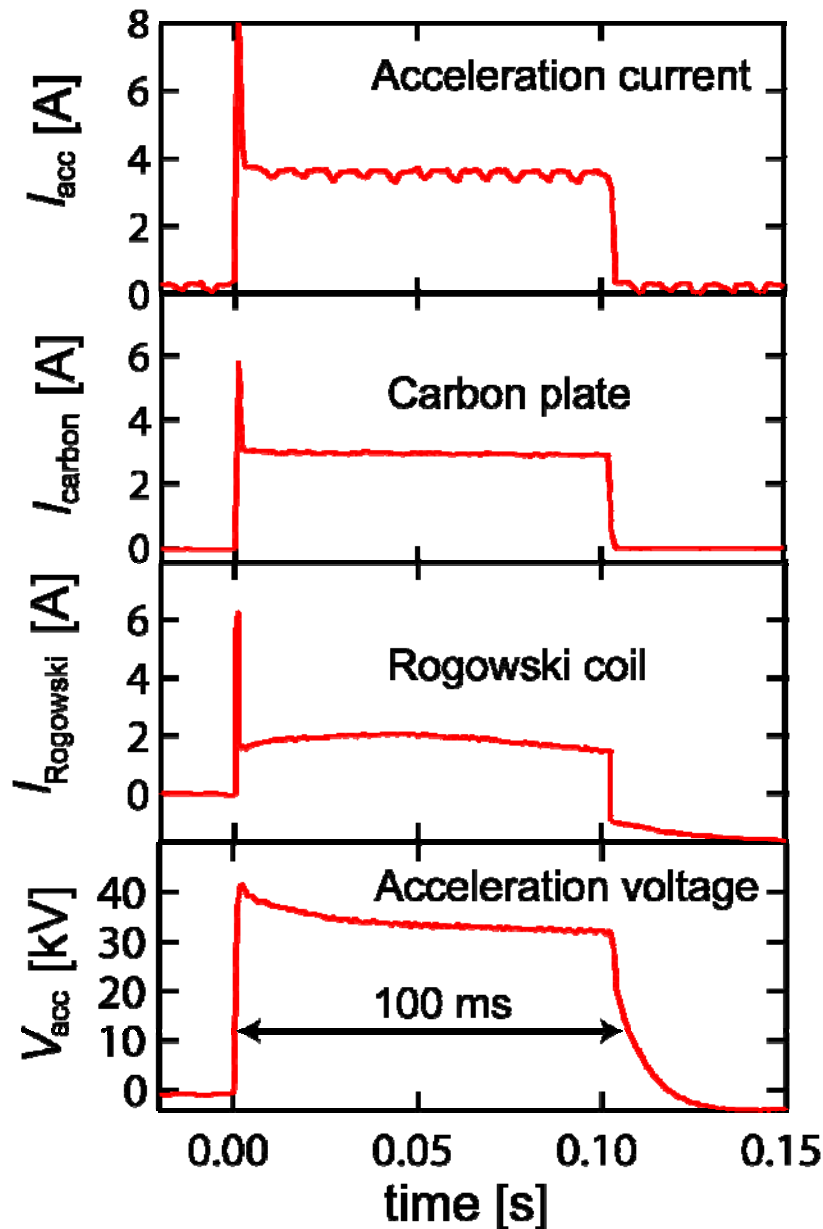
IRカメラの仕様  
温度範囲: 0 ~ 620 °C  
フレームレート: 30 fps  
波長帯: 8 ~ 14 μm  
画素: 320 × 240



真空容器外に設置したIRカメラで  
カーボン板表面の温度分布、形状を観測



# 典型的な電圧・電流波形



## 実験条件

加速電圧  $V_{acc} = 17.7 \text{ kV} \sim 34.5 \text{ kV}$

減速電圧  $V_{dec} = -0.87 \text{ kV}$

アークパワー  $P_{arc} = 5.8 \text{ kW} \sim 12 \text{ kW}$

パルス幅  $t = 100 \text{ ms}$

ショット間隔 300 s

電極を通過したビーム電流  $I_{ext}$

$$I_{ext} = I_{acc} - I_{dec}$$

$I_{acc}$ : 加速電源に流れた電流

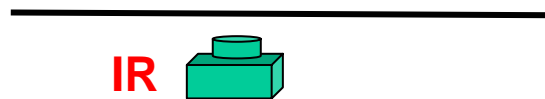
$I_{dec}$ : 減速電源に流れた電流

# ビームウェスト位置とビーム径の測定

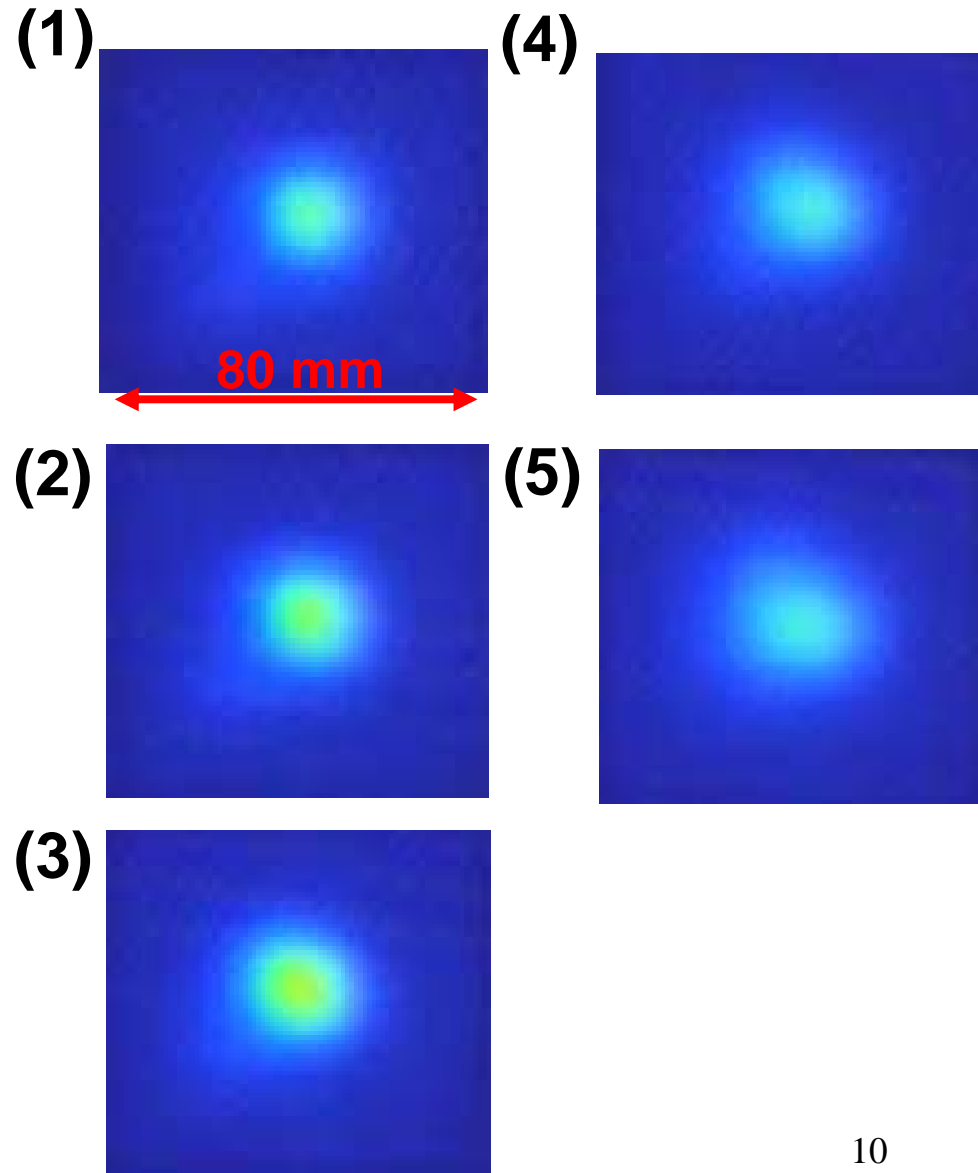
電極



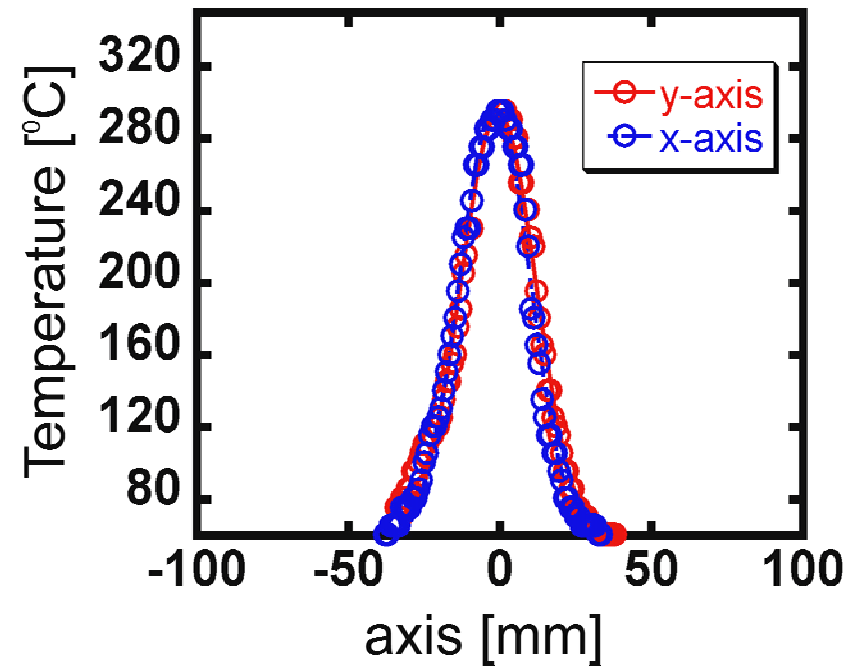
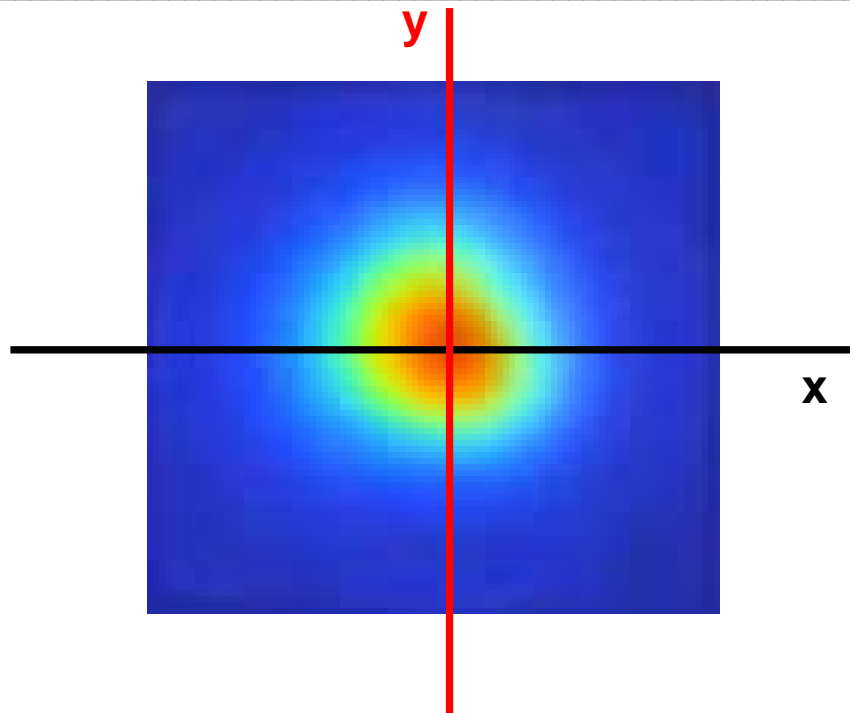
- (1) 441 mm
- (2) 495 mm
- (3) 548 mm
- (4) 603 mm
- (5) 656 mm



カーボン板を54 mm間隔  
で駆動



# IR画像の解析手順



温度のピークを原点に設定

(仮定)

- ビームの密度分布がガウス分布
- カーボン板の厚さがビーム径に比べて小さいためカーボン板裏面の温度分布もガウス分布
- バックグラウンドをビーム照射前のカーボン板の温度

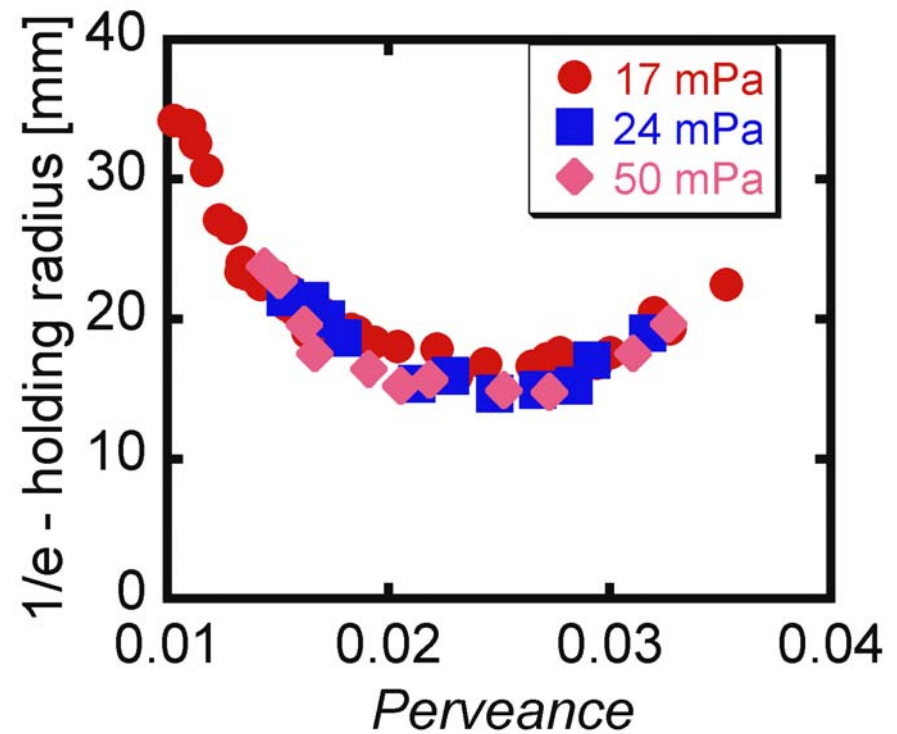
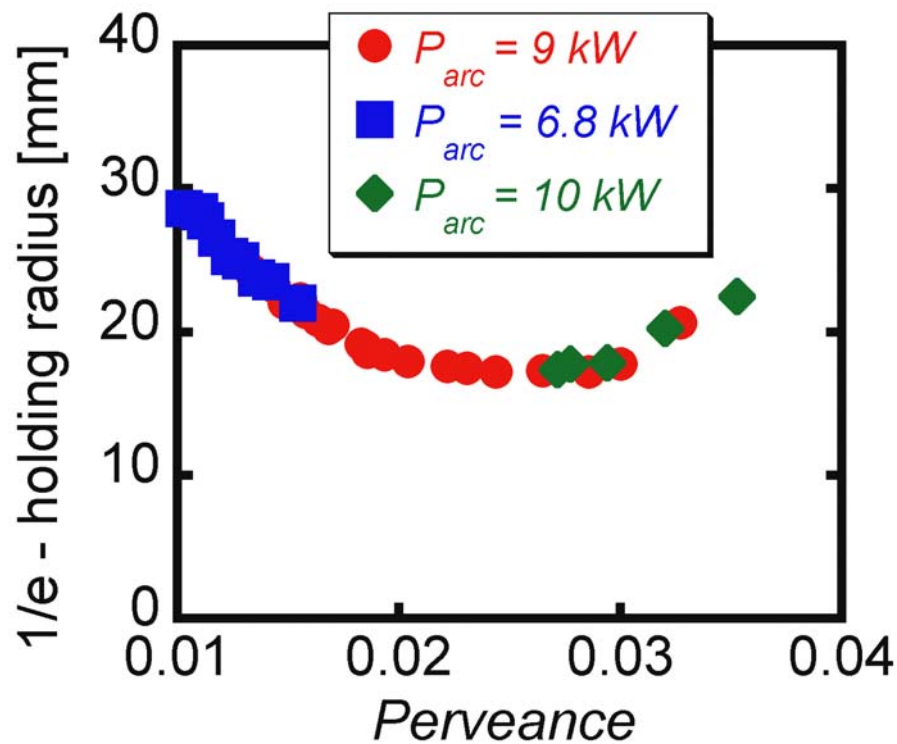
ビーム径を温度分布の  $1/e$  半幅から評価

# 1/e半幅のパービアンズ依存性

ビームの発散角がパービアンズ (*Perveance*) に依存するため、パービアンズに対する1/e半幅  $r_{1/e}$  の依存性を調べた。

カーボン板の位置を 646mm に固定

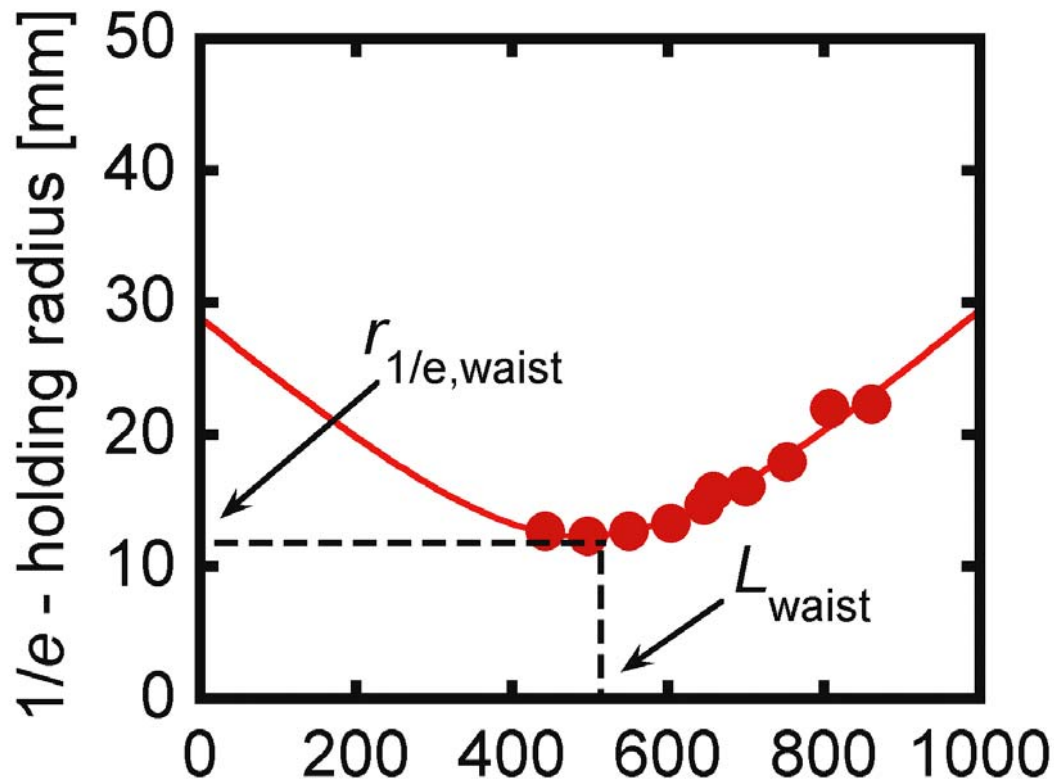
$$Perveance = \frac{I_{acc} - I_{dec}}{V_{acc}^{3/2}}$$



パービアンズが0.025近傍で1/e半幅が**最小**

# ビーム進行方向のビーム径の変化

パービアンスを固定して、カーボン板を駆動し各位置で1/e半幅  $r_{1/e}$  を求め、ビーム進行方向の1/e半幅  $r_{1/e}$  の変化を求める。



Curve approximation

$$r_{1/e}^2 = \theta_{div}^2 L^2 + \left( \frac{r_{1/e}}{f} \right)^2 (f - L)^2$$

$r_{1/e,0}$ : プラズマ電極における1/e半幅

$\theta_{div}$ : ビーム発散角

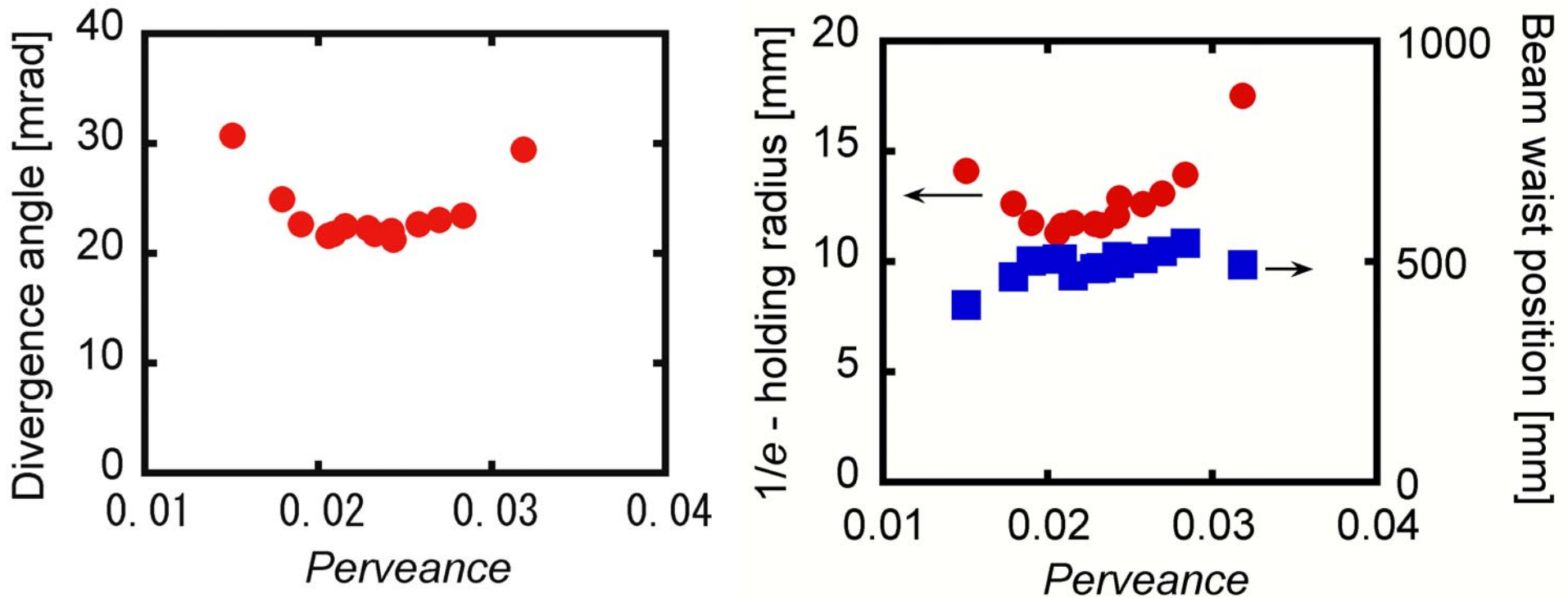
$L$ : プラズマ電極からの距離

$f$ : プラズマ電極の形状で決まる焦点距離

Path length from the plasma electrode [mm]

近似曲線から発散角  $\theta_{div}$ 、ビームウェスト位置  $L_{waist}$ 、  
ビームウェストにおける 1/e 半幅  $r_{1/e,waist}$  を求める。

# $\theta_{\text{div}}$ 、 $r_{1/e,\text{waist}}$ 、 $L_{\text{waist}}$ のパービアンズ依存性



- ◆ 発散角  $\theta_{\text{div}}$ 、ビームウェストにおける1/e半幅  $r_{1/e,\text{waist}}$  はパービアンズが 0.025 近傍で最小
- ◆ パービアンズが 0.025 のとき、ビームウェストが 500 mm に存在し、 $r_{1/e,\text{waist}} = 12\text{mm}$

# まとめ

---

## ➤ビームの集束性の検証

ビームウェストの位置およびビームウェストにおけるビーム径の計測を行った。

→  $Perveance = 0.025$  近傍のときビームウェストが500 mmに存在し、ビームウェストにおいて  $1/e$  幅  $\phi_{1/e} = 24$  mm に集束してると見積もられる。

現状の技術でガスセルの製作が可能な範囲である。

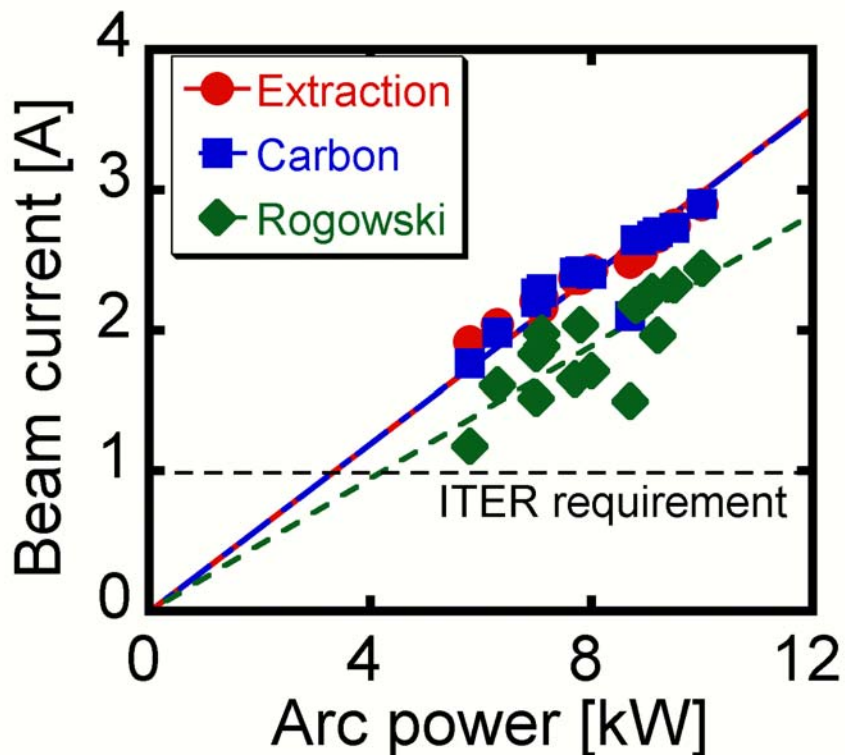
## ➤ビームの集束性の基礎特性

- ・  $1/e$  半幅のパービアンس特性はアークパワー、ガス圧に依存しない。
- ・  $1/e$  半幅はパービアンスが  $0.025$  近傍で最小となった。

# ビーム電流計測



# ビーム電流のアークパワー依存性



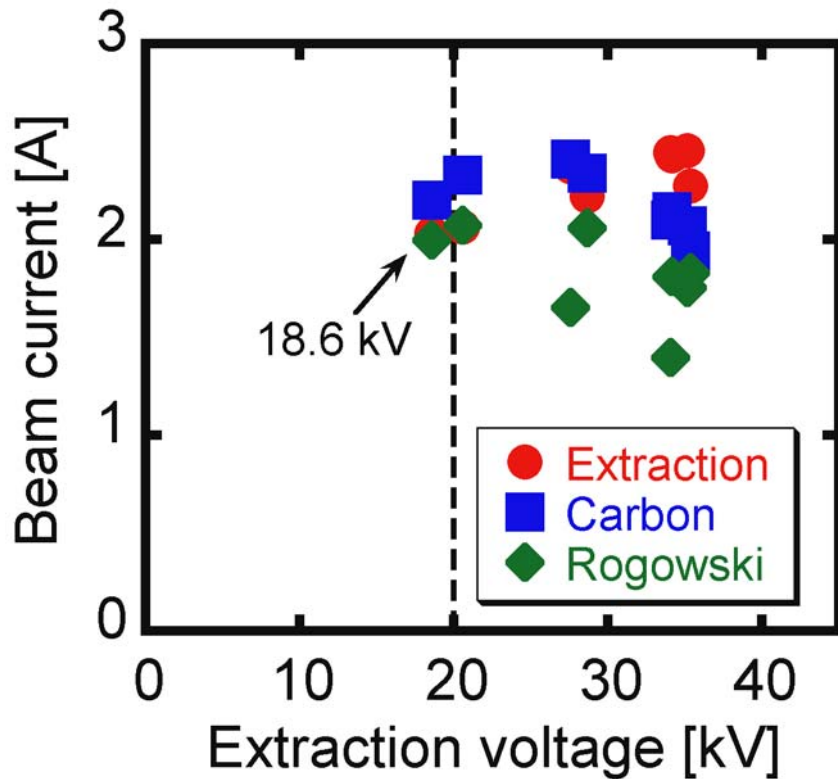
- ◆ビーム電流がアークパワー  $P_{arc}$  に比例  
→アークパワーを増加させるとプラズマ密度が増加するため引き出されるビーム電流量が増加
- ◆カーボン板で計測したビーム電流がログスキークoilで計測したビーム電流より大きい  
→二次電子による誤差
- ◆アークパワー  $P_{arc} = 10 \text{ kW}$  のとき **2.5 A** 程度のビーム電流の引き出しに成功  
→イオン源の定格 40 kW の1/4 のアークパワーで十分な電流を引き出せる。

## 実験条件

$P_{arc}$ (kW)	$V_{acc}$ (kV)	$V_{dec}$ (kV)	$P$ (mPa)
5.8 ~ 10	26.7	0.87	17

ITER でのアルファ粒子計測用の  $\text{He}^+$  イオン源に要求される性能を満足

# ビーム電流の引き出し電圧依存性



アルカリ金属ガスとして Na を使用した場合、1% の荷電交換効率を得るにはビームエネルギーが 20 keV 以下であることが必要

引き出し電圧が 18.6 kV で 2 A 以上のビームの引き出しに成功



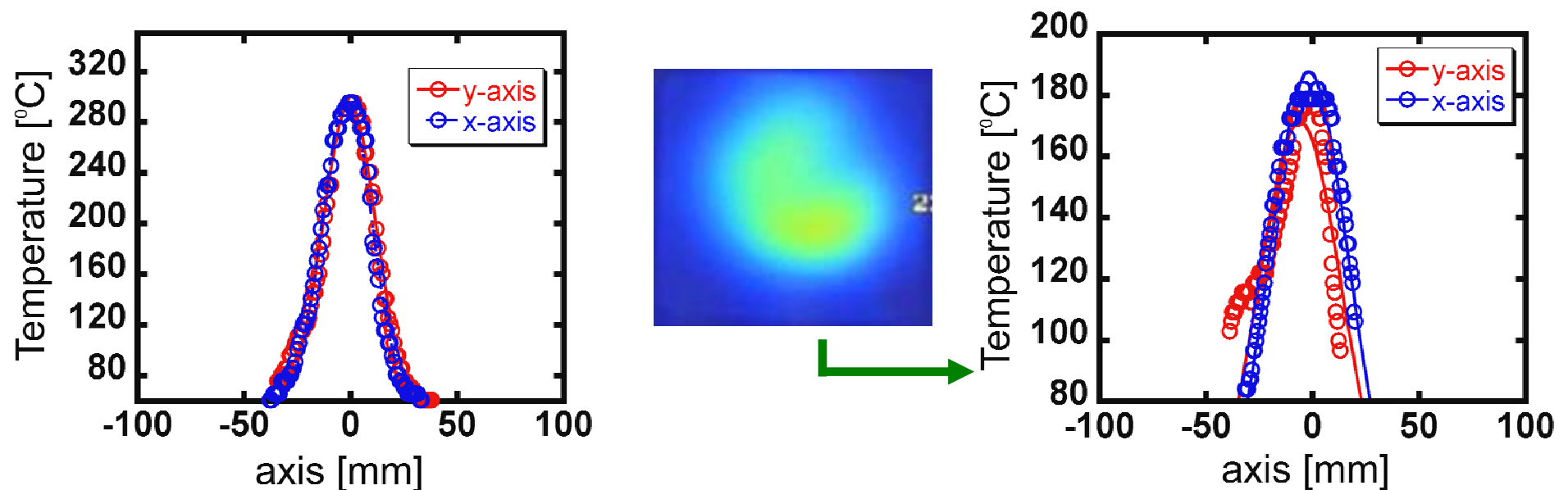
10 mA 以上の He<sup>-</sup> を生成することが可能

## 実験条件

$V_{\text{acc}}$ (kV)	$V_{\text{dec}}$ (kV)	$P_{\text{arc}}$ (kW)	$P$ (mPa)
17.7 ~ 34.5	0.87	7.1	17

# フィラメントの最適化

# 電極の歪み



プラズマ電極からの距離 646 mm

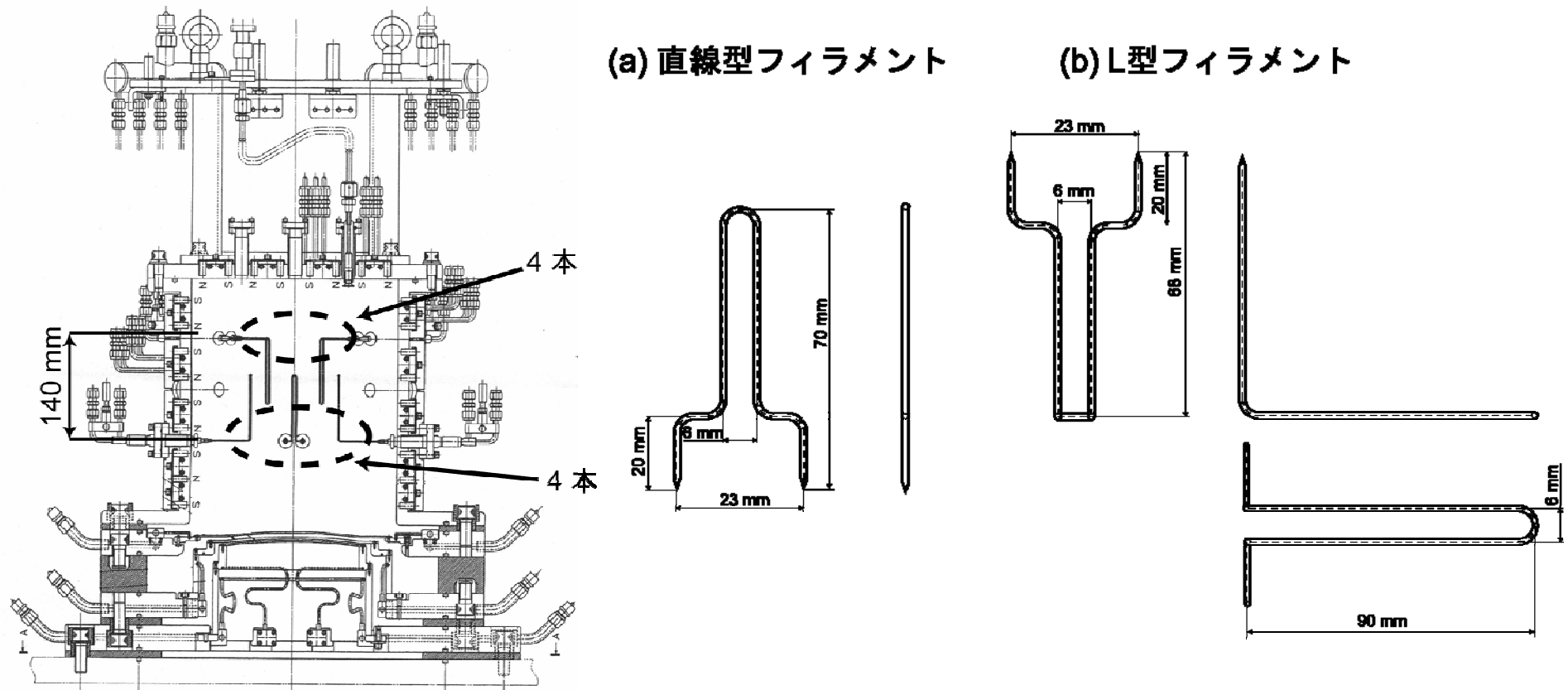
プラズマ電極からの距離 861 mm

プラズマ電極から離れるとビームのプロファイルが非対称  
Y軸方向の温度分布はガウス分布でフィッティングできない。

プラズマとフィラメントからの熱負荷によるプラズマ電極の歪みが原因

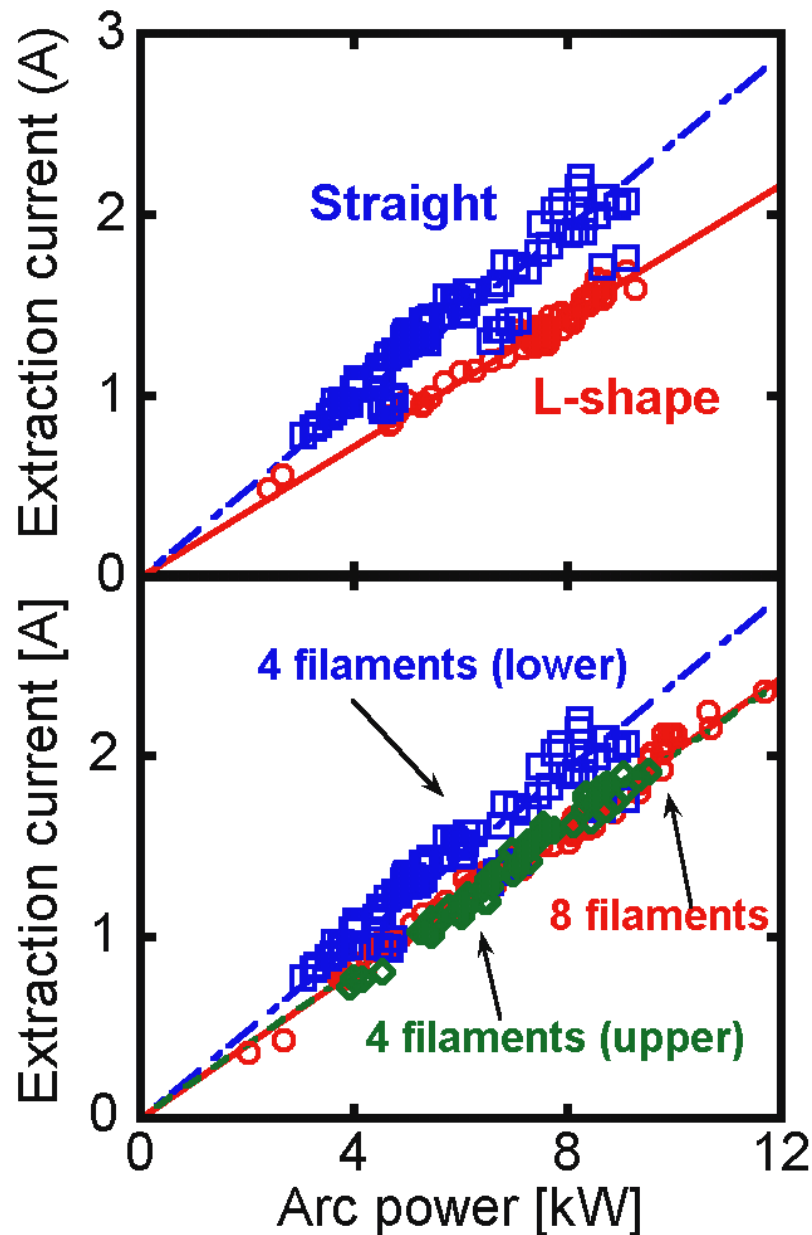
ITER におけるアルファ粒子計測では、イオン源を定常運転する計画  
→熱負荷を低減するため入力パワーを小さく抑え、要求される性能を引き出す  
ことが必要

# フィラメントの最適化 (1)



- 直線型とL型のフィラメントでプラズマ生成
- 上下に各 4 本、計 8 本のフィラメントを設置
- 8 本、上 4 本、下 4 本のフィラメントでプラズマ生成

# フィラメントの最適化 (2)



フィラメントの形状、本数、取付位置に対してアーク効率を比較した。アーク効率とは、単位アークパワーあたりに引き出せるビーム電流である。

- ◆ 直線型フィラメントのアーク効率が高い
- ◆ フィラメントの本数が 4 本、設置位置が下側のとき、アーク効率が高い  
→ プラズマ電極に近い領域でプラズマの生成を行なっているため、効率の良いイオン引き出しが可能



フィラメントの形状が直線型、本数・取付位置が下側 4 本が最適