# 次世代接合システムに求められる高速原子ビーム源

名古屋大学大学院　マイクロ・ナノ機械理工学専攻
秦　誠一

内　容

1. はじめに
2. 磁場印可型高速原子ビーム源
3. 高速原子ビーム照射範囲均一化
4. パーティクルレス化／バッチ処理への挑戦
5. おわりに

# 1．はじめに



## 高速原子ビーム（Fast Atom Beam）源

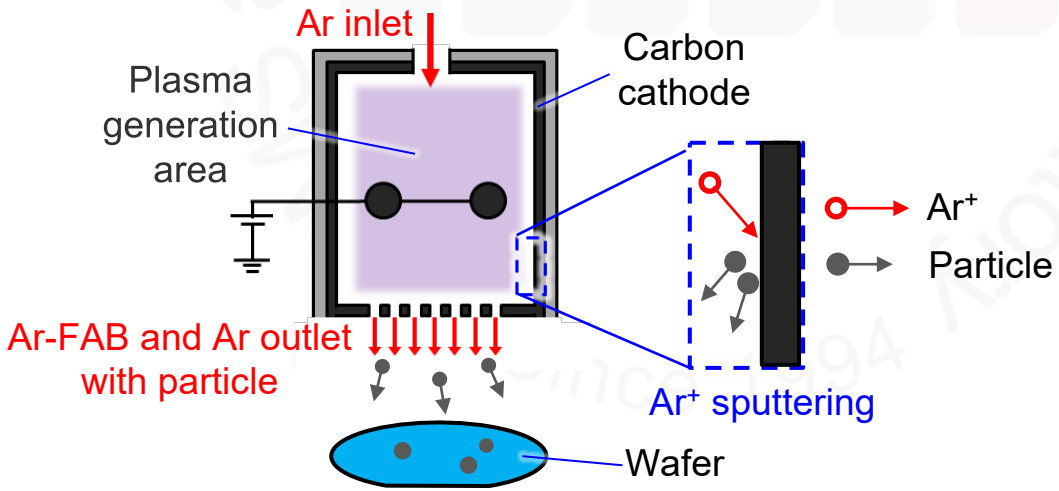
### 特　徴

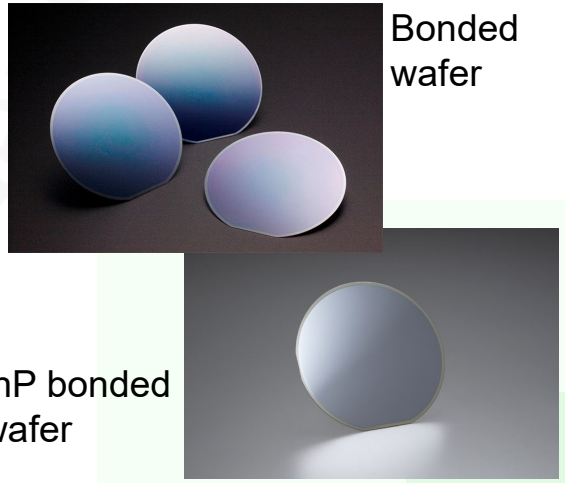
①真空下でArをFAB源内部に導入，直流高電圧によりプラズマを生成

②プラズマ中の$Ar^+$は，内部電場により加速，その後中性化され照射

### 課　題

- ビーム源内部の$Ar^+$スパッタリングにより炭素製の電極内壁から炭素微粒子（パーティクル）が発生→**接合面の欠陥生成**
- ウエハの大口径化に対応するための**大面積照射，均一照射**




https://www.ngk-insulators.com/en/news/20251020_1.html

# 1. はじめに



## 高速原子ビーム源の課題解決への取組み

### 炭素微粒子（パーティクル）の抑制

- 磁場または電場によるAr+，プラズマのFAB照射口付近への集中
- FAB内壁のスパッタリング抑制

### 大面積照射，均一照射，バッチ処理

- シミレーションによるFABの流束，粒子エネルギからのエッチング量推定
- 新構造，新発想FAB源の開発

## 研究目的

次世代接合システムに求められるパーティクル抑制，大口径基板接合，バッチ処理に向けた新型高速原子ビーム源の開発

# 2. 磁場印可型高速原子ビーム源

## 交互磁場印可型高速原子ビーム源

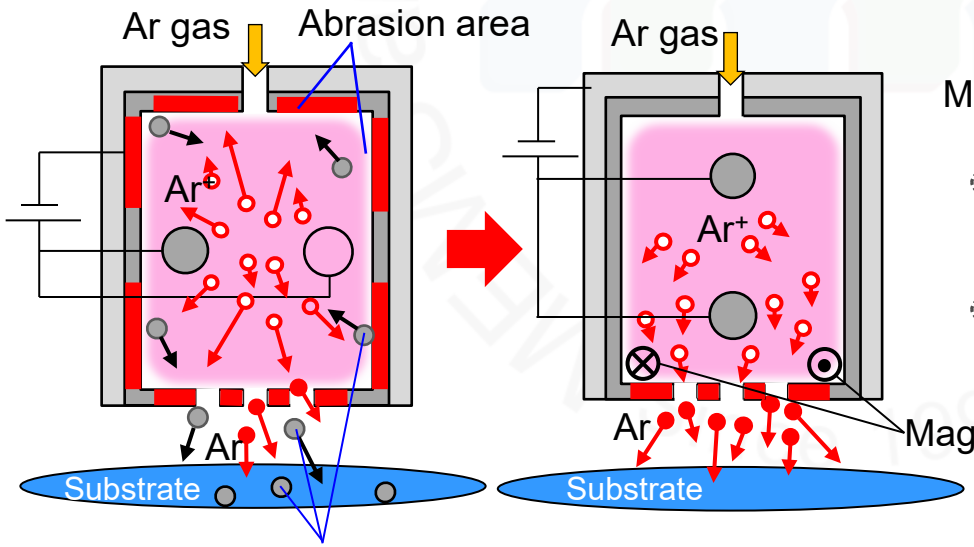
- FABガン内部の$Ar^+$の挙動を外部磁場により制御
- 電極方向の変更（照射口に対して平行方向から垂直方向へ）

⇨ FABガン内部のスパッタを低減

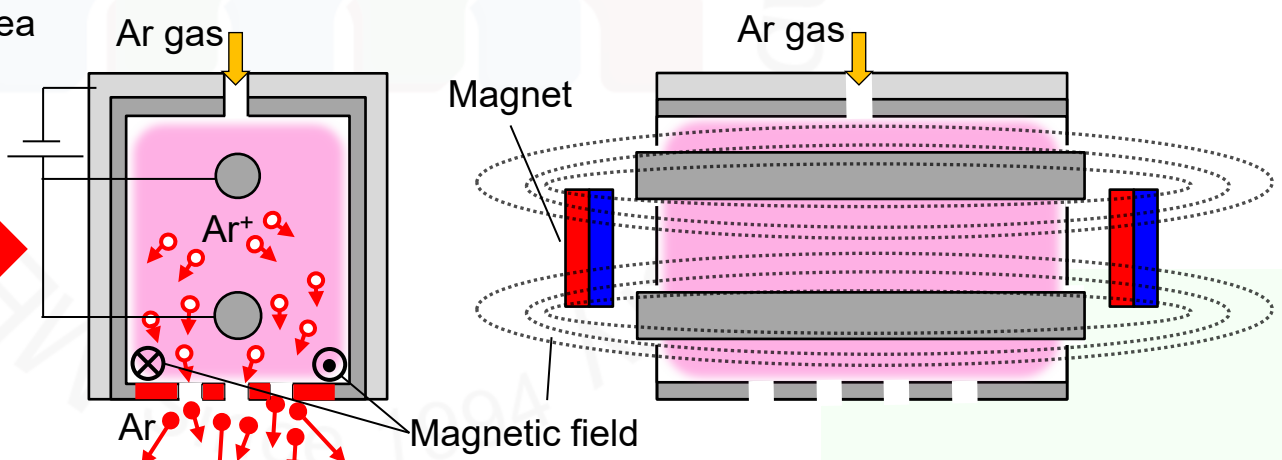
⇨ { 磨耗部面積・磨耗量の低減
  { Ar照射量・照射効率の向上

⇨ 照射可能時間・接合可能回数の向上

### Conventional FAB gun



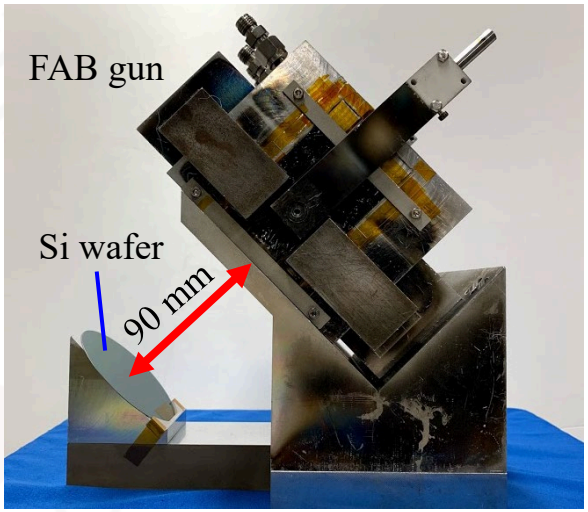

### Present FAB gun



## 交互磁場印可型高速原子ビーム源

### 酸化膜除去実験方法

- 真空チャンバ内にFABガンと酸化膜付きSi基板を正対するように設置
- FAB源によりAr-FABをSi基板酸化膜へ照射
- 照射前後の酸化膜厚さを白色干渉計により測定し，酸化膜除去量を算出
- 照射１時間当たりの酸化膜最大除去量（エッチングレート）を評価



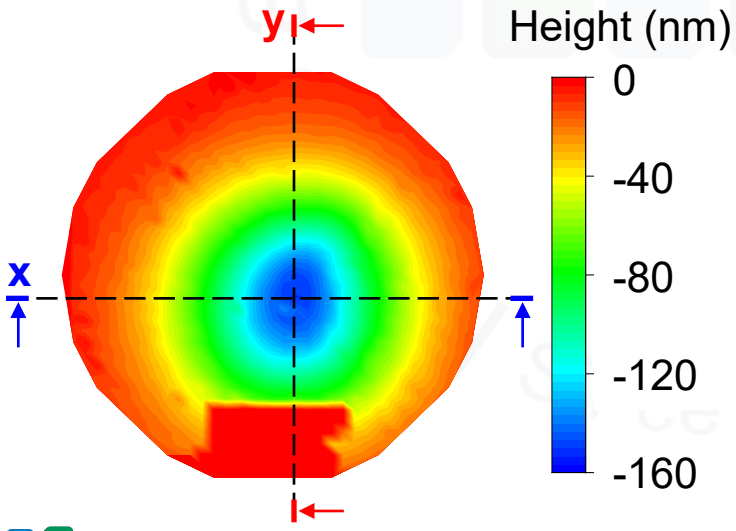

### 実験条件

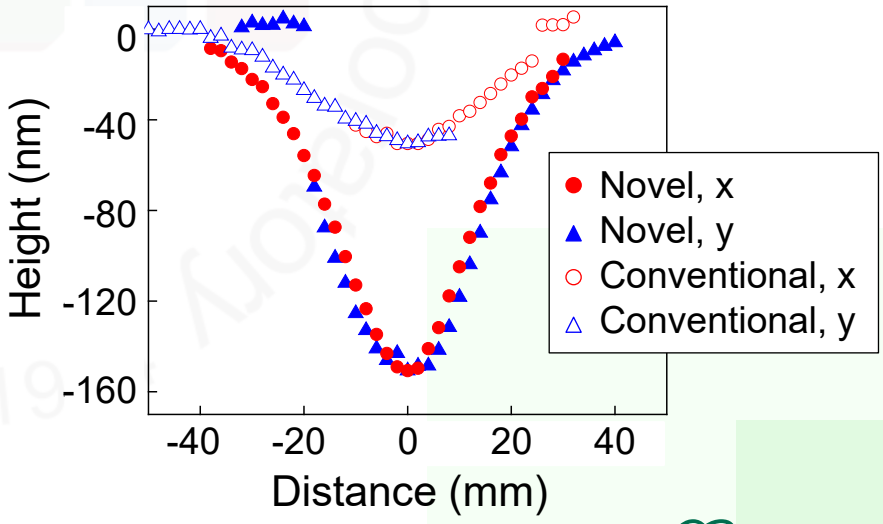
Arガス流量：67 sccm，入力電流：100 mA，照射時間：1 hour

## 交互磁場印可型高速原子ビーム源

### 実験結果

- 現行FAB源：50.0 nm/h，新形FAB源：150.7 nm/h（約3倍）
  - ⇒磁場印加と新形FAB源の構造によってAr+の誘導に成功
    - ⇒Ar-FAB照射効率が約3倍に向上
- 新形FAB源：除去分布が急峻
  - ⇒磁場印加によりAr-FABの収束率上昇



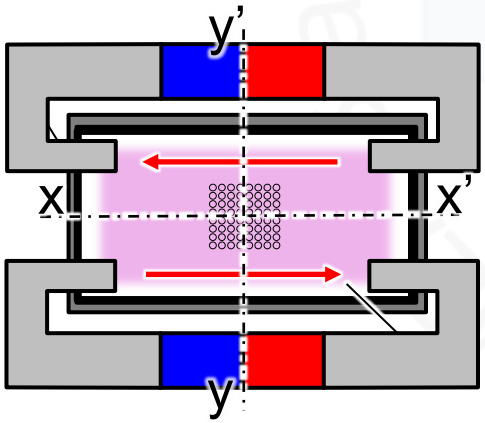
# 2. 磁場印可型高速原子ビーム源

## 交互磁場印可型高速原子ビーム源

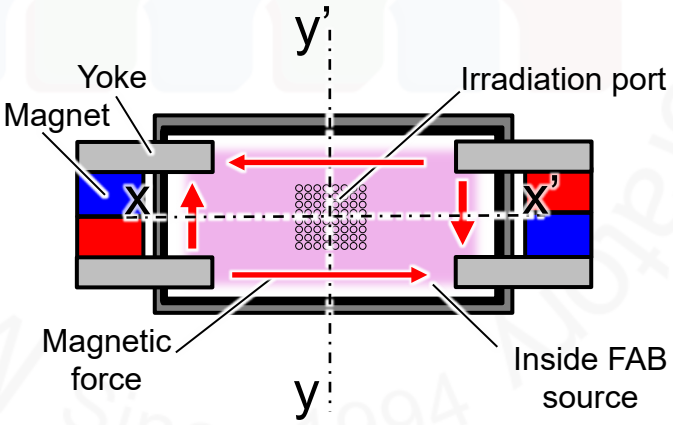
### 磁場印可方法の改良

- 初号機：ヨークが大型，ヨークがFAB源内部に侵入
- ２号機：ヨークを小型化，ヨークがFAB源内部に侵入
- ３号機：ヨークをFAB源外部に配置

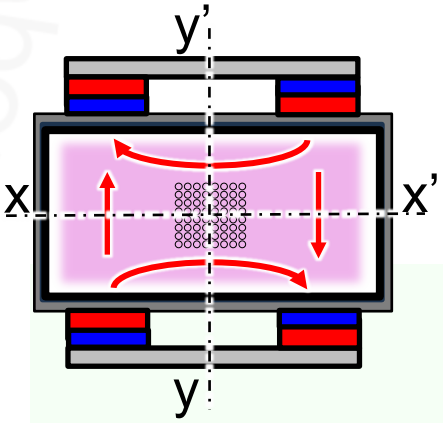
Unit No. 1




Unit No. 2




Unit No. 3

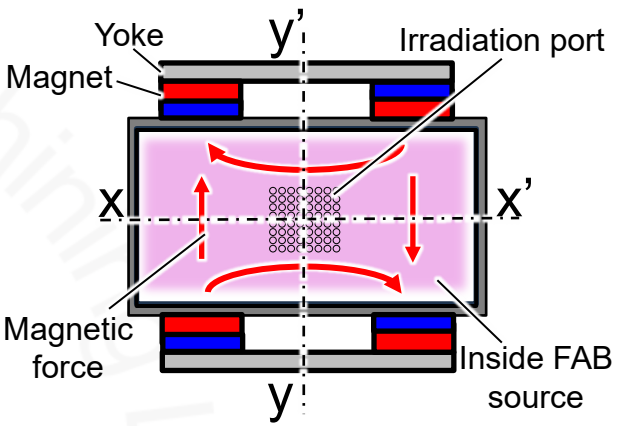


# 2. 磁場印可型高速原子ビーム源

## 交互磁場印可型高速原子ビーム源

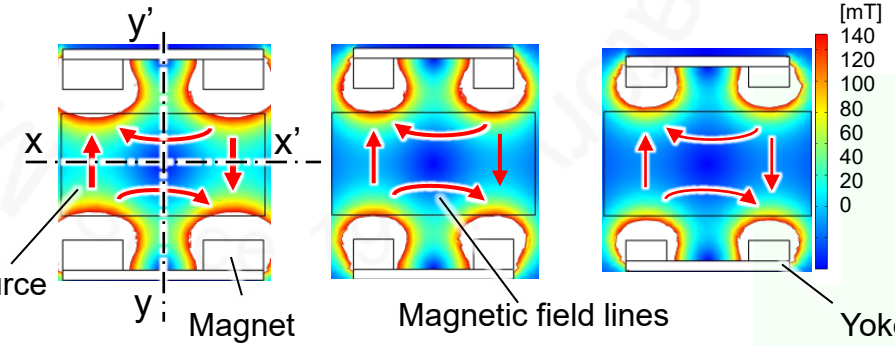
### 3号機の磁場検討

- 初号機，２号機での検討結果を元に３種類の磁場強度を検討
- 中心磁場強度(y=±10, x=0)：
  MF1 > MF2 > MF3




| | MF 1 | MF 2 | MF 3 |
|---|---|---|---|
| Material | N 35 | N 35 | YXG28 |
| Magnet Dimensions | 20×30×15 | 20×20×15 | 20×20×10 |
| Magnetic field y=10,20 mm (x=0) | 21 mT, 45 mT | 17 mT, 38 mT | 12 mT, 28 mT |

Application image



# 2. 磁場印可型高速原子ビーム源

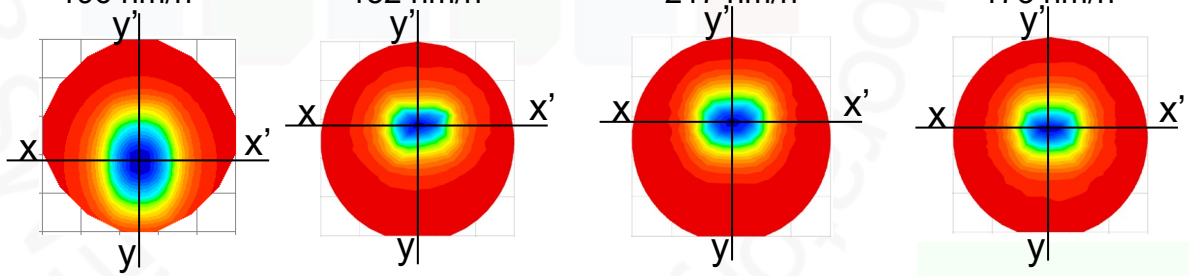
## 交互磁場印可型高速原子ビーム源

### 3号機の酸化膜除去試験

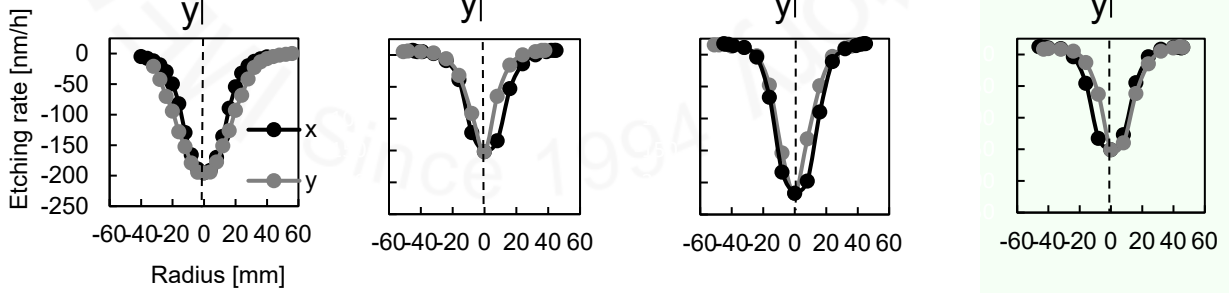
- エッチングレート： MF 2 > MF 3 > MF 1　MF 2 > Conventional
- Y軸方向照射範囲： MF 2 > MF 3 > MF 1　MF 2 < Conventional

| | Conventional | MF 1 (Strong) | MF 2 (middle) | MF 3 (weak) |
|---|---|---|---|---|
| Voltage | 1.0 kV | 0.75 kV | 0.75 kV | 0.75 kV |
| Ar flow | 55 sccm | 10 sccm | 15 sccm | 20 sccm |
| Etching rate | 196 nm/h | 152 nm/h | 217 nm/h | 173 nm/h |

Removal image




Section profile

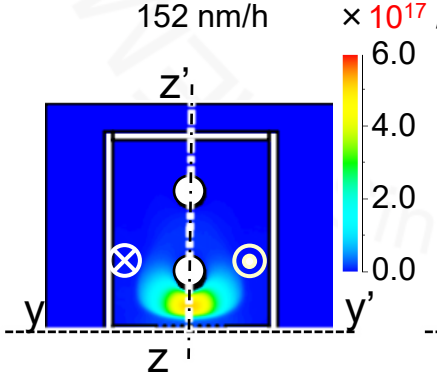
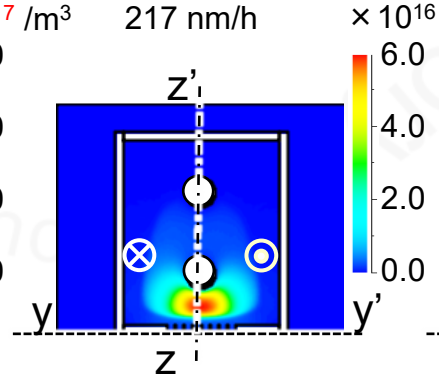
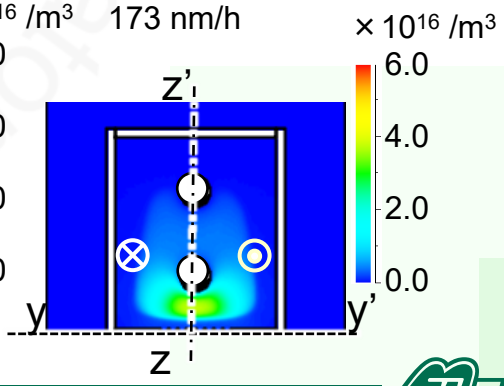


# 2. 磁場印可型高速原子ビーム源

## 交互磁場印可型高速原子ビーム源

### 3号機のプラズマ密度解析

- エッチングレートおよびY軸方向の照射範囲：MF 2 > MF 3 > MF 1
  - ⇒ MF 1：強すぎる、MF 3：弱すぎる
    - ⇒ 適切な磁場強度が存在？
- Y軸方向の照射範囲：従来方式 > MF 2
  - ⇒ 照射ポートのz軸付近へ$Ar^+$を誘導？
    - ⇒ 照射ポートを拡大することで照射範囲を拡大可能？

| | MF 1 (Strong) | MF 2 (middle) | MF 3 (weak) |
|---|---|---|---|
| Max Ar+ density | $5.1\times10^{17}$ /m$^3$ | $5.9\times10^{16}$ /m$^3$ | $3.8\times10^{16}$ /m$^3$ |
| Etching rate | 152 nm/h | 217 nm/h | 173 nm/h |
| $Ar^+$ density distribution |  |  |  |

# 2. 磁場印可型高速原子ビーム源

## 交互磁場印可型高速原子ビーム源

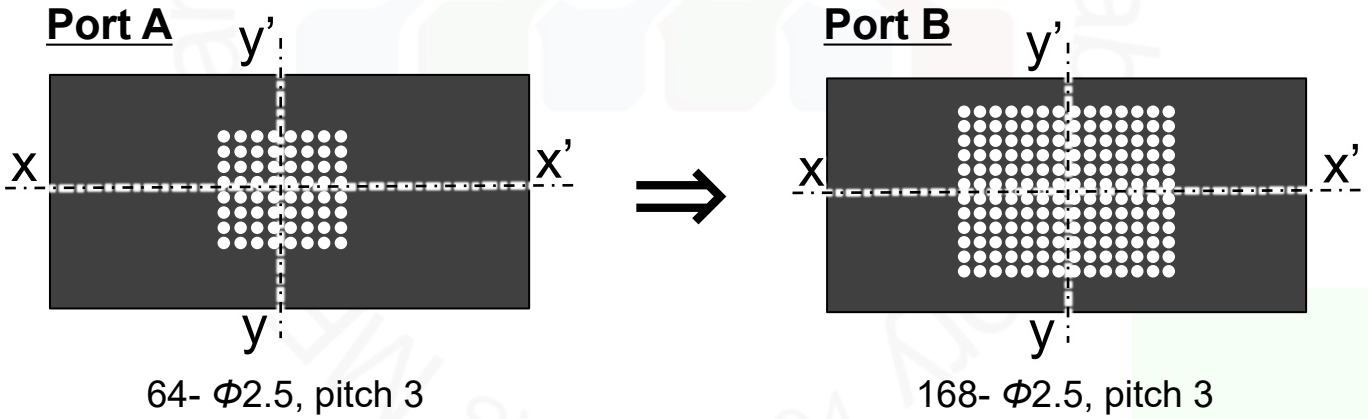
### 3号機の照射範囲の拡大，成形

照射口数を増大

⇒照射範囲の拡大を期待

⇒プラズマ維持のためのArガス流量増大

⇒Arガス流量が少なく，照射範囲の狭いMF1に適用し効果を確認



# 2. 磁場印可型高速原子ビーム源

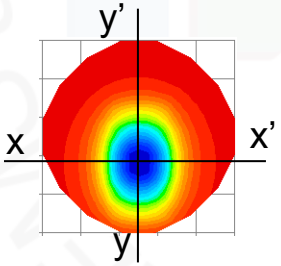
## 交互磁場印可型高速原子ビーム源

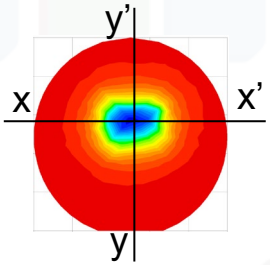
### 3号機の照射範囲の拡大，成形

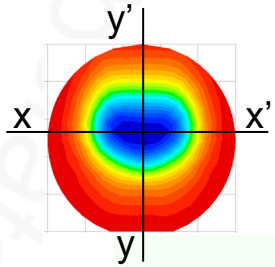
- 照射範囲の拡大に成功
- 従来のFAB源との比較：
  印加電圧25%減，Ar流量50%減，エッチングレート20%増

| | Conventional | MF 1, Port A | MF 1, Port B |
|---|---|---|---|
| Voltage | 1.0 kV | 0.75 kV | 0.75 kV |
| Ar flow | 55 sccm | 10 sccm | 25 sccm |
| Etching rate | 196 nm/h | 152 nm/h | 232 nm/h |

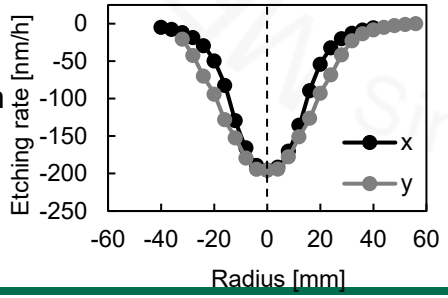
Removal image

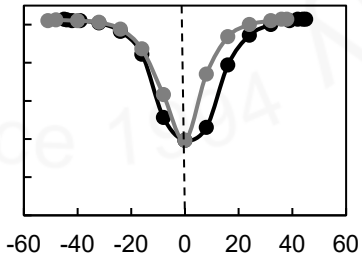


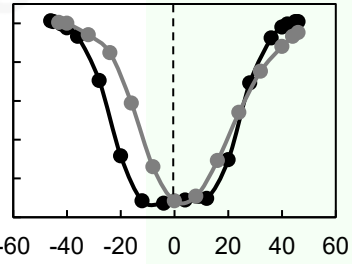




Section profile



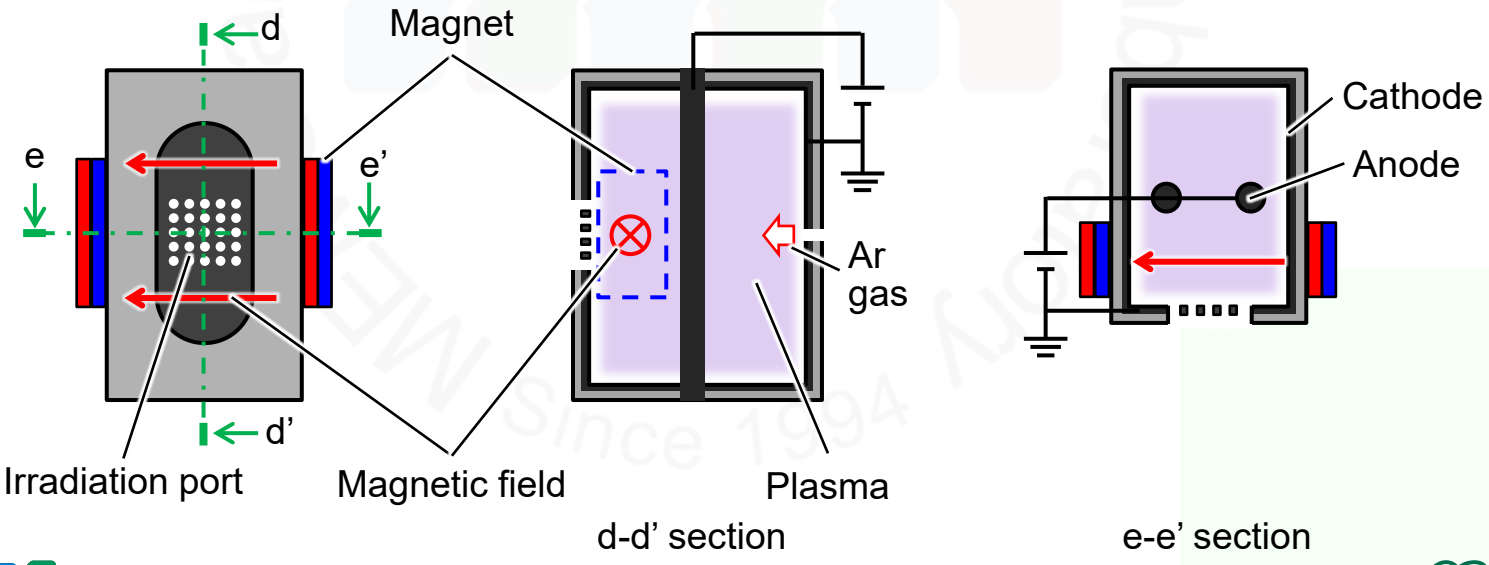
## 一方向磁場印可型高速原子ビーム源

### 研究背景

交互磁場印可型：陽極の長手方向へ交互磁場を印可するため，FAB源の大型化，長大化に課題

### 基本構造

- Saddle Field(SF)型FAB源の側面に磁石を取付
- 陽極の軸線に垂直な一方向磁場を印加し荷電粒子を誘導



# 2. 磁場印可型高速原子ビーム源

## 一方向磁場印可型高速原子ビーム源

### プラズマシミュレーションによる設計

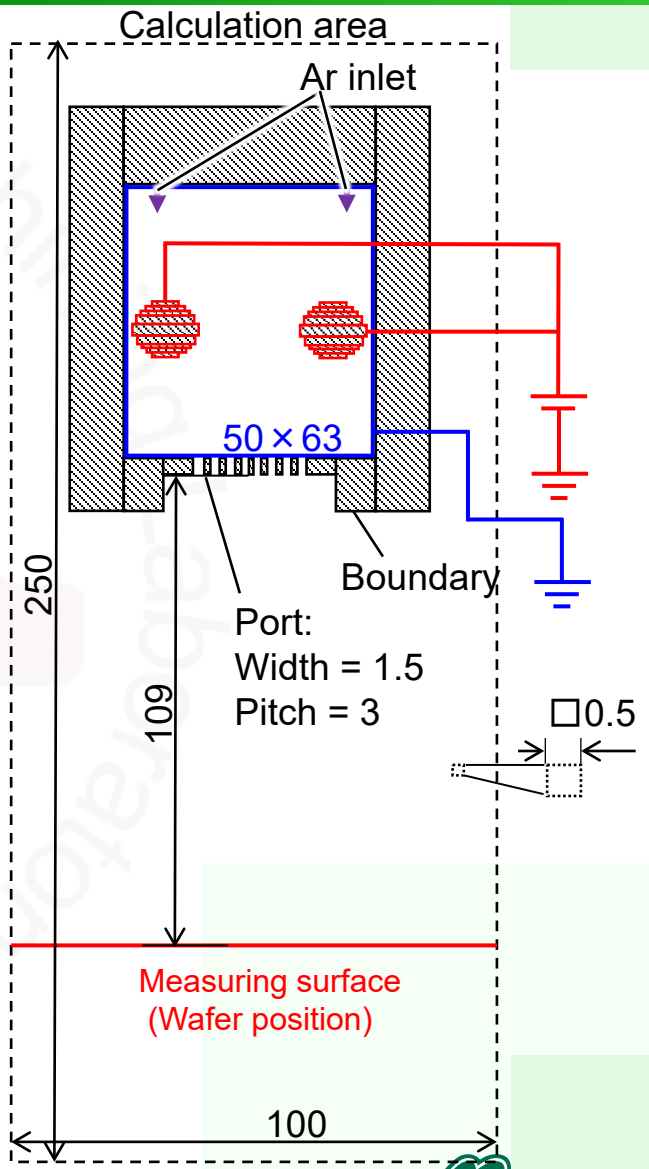
① x-y座標系の計算領域・FAB源断面を模した形状を設定し，□0.5 mmでメッシュ分割

② FAB源内部の圧力が数Paになるように初期条件，Ar流量を設定

③ 初めにPIC-MCC*法で荷電粒子の挙動を追跡し，その後DSMC**法でAr粒子数が安定するまで計算

④ ウエハ位置でのArの入射エネルギー，フラックス分布を取得

*Particle In Cell – Monte Carlo Collision
**Direct Simulation Monte Carlo



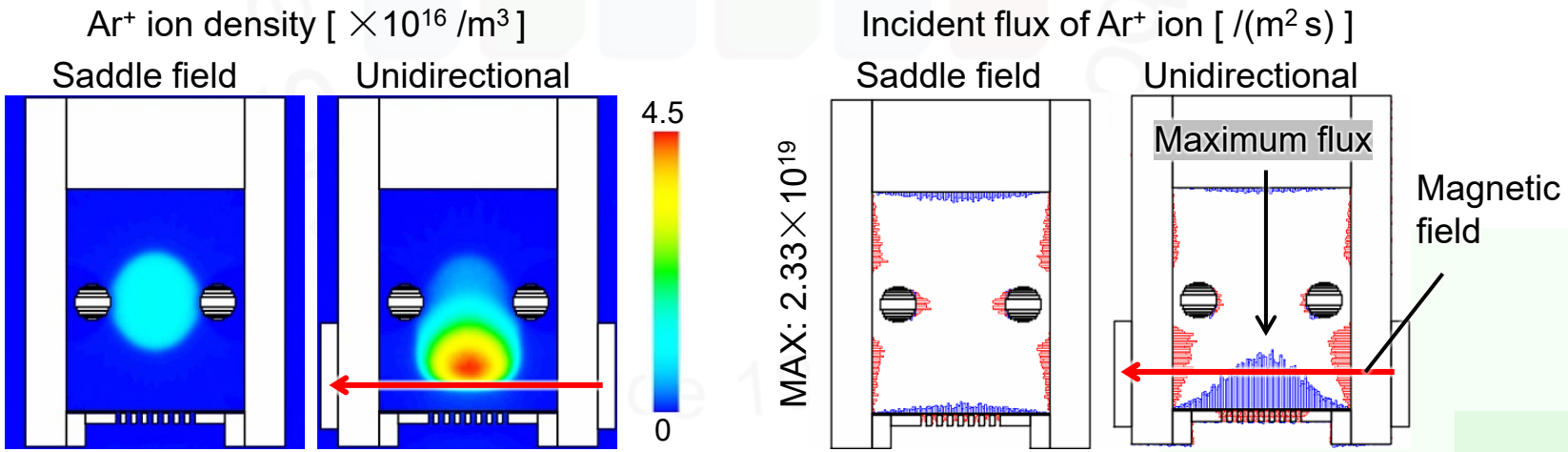
# 2. 磁場印可型高速原子ビーム源

## 一方向磁場印可型高速原子ビーム源

### プラズマシミュレーションによる設計

- Ar+イオン密度：増加，照射口側への誘導を確認
- $Ar^+$イオンの照射口への入射フラックス増加
  ⇒FAB照射効率向上が期待
- 照射口反対側の壁面の$Ar^+$イオンスパッタ抑制
  ⇒長寿命化が期待

交互磁場印加型と同様の効果を確認



## 一方向磁場印可型高速原子ビーム源

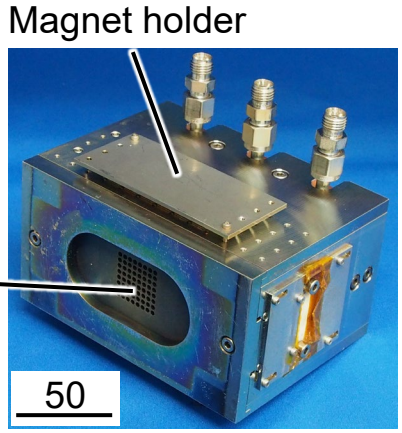
### 動作試験

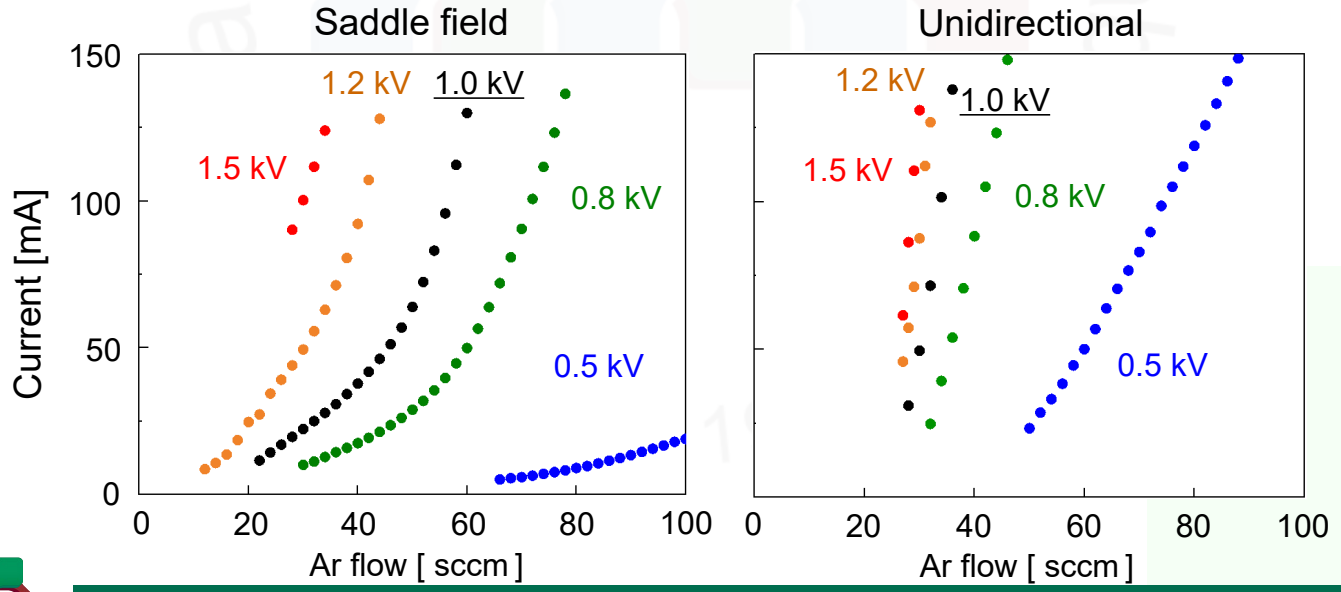
プラズマ発生時の電流，電圧，Ar流量を調査

- 少ないAr流量で高電流

  ⇒FAB照射効率向上

- 標準実験条件である印加電圧1.0 kV，放電電流100 mA付近で安定動作



# 2. 磁場印可型高速原子ビーム源

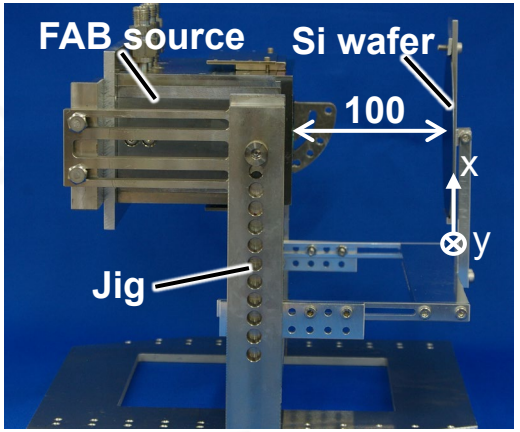
## 一方向磁場印可型高速原子ビーム源

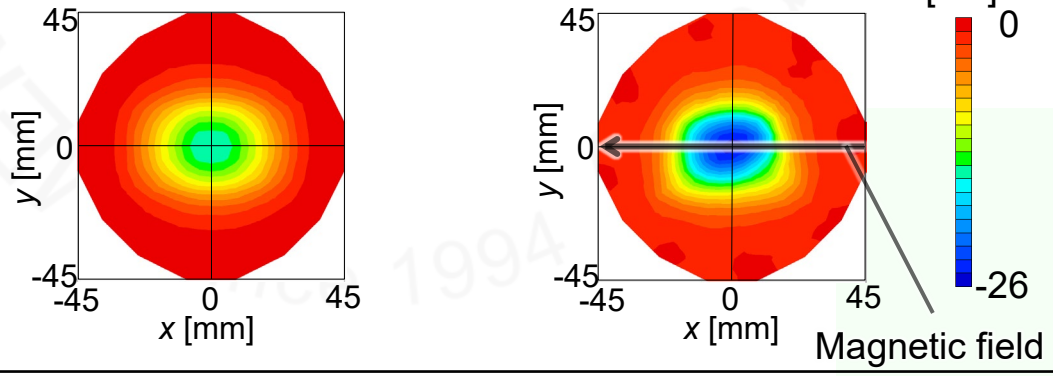
### 酸化膜除去実験

真空チャンバ内で，酸化膜付きSiウエハとFAB源を正対させて照射

実験条件：1.0 kV，100 mA，300 sec

実験結果：エッチングレート向上




| | Saddle field | Unidirectional |
|---|---|---|
| Etching rate | 183.9 nm/h | 307.8 nm/h |
| Volume etching rate | 0.284 mm³/h | 0.444 mm³/h |
| Etching distribution |  | |

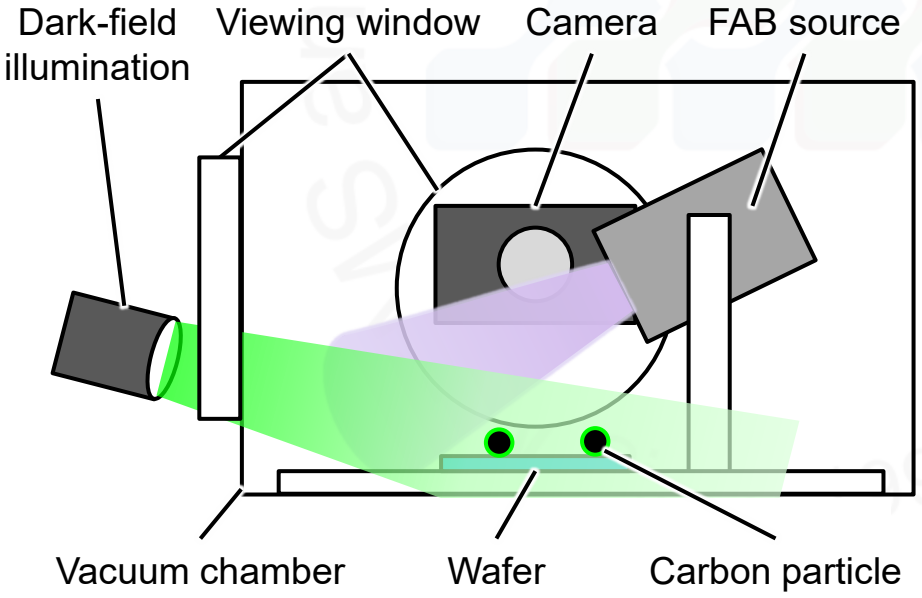
## 一方向磁場印可型高速原子ビーム源

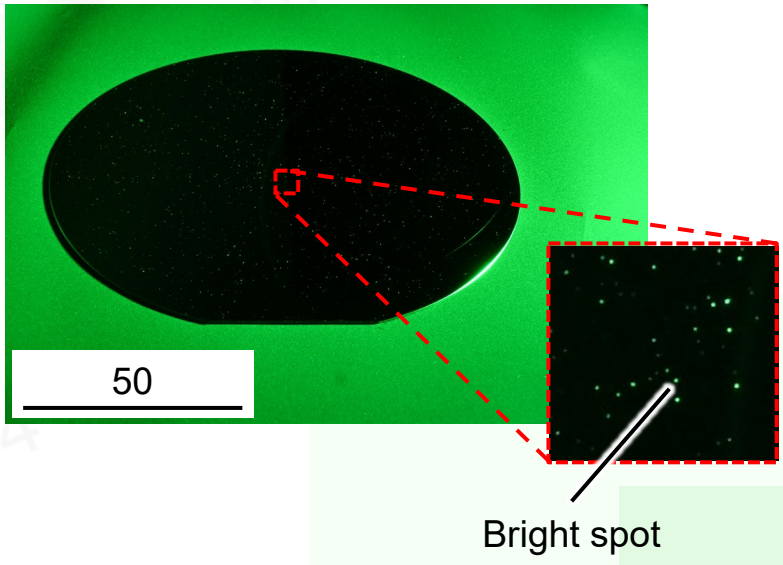
### 炭素微粒子排出量の測定

実験条件：Saddle Field型　1.0 kV，100 mA
　　一方向磁場印加型　0.7 kV，100 mA
} 酸化膜除去量をそろえて実施

30 sのFAB照射と300 sのインターバルを繰り返し実施

ウエハ表面へ付着する炭素微粒子を暗視野照明により可視化



## 一方向磁場印可型高速原子ビーム源

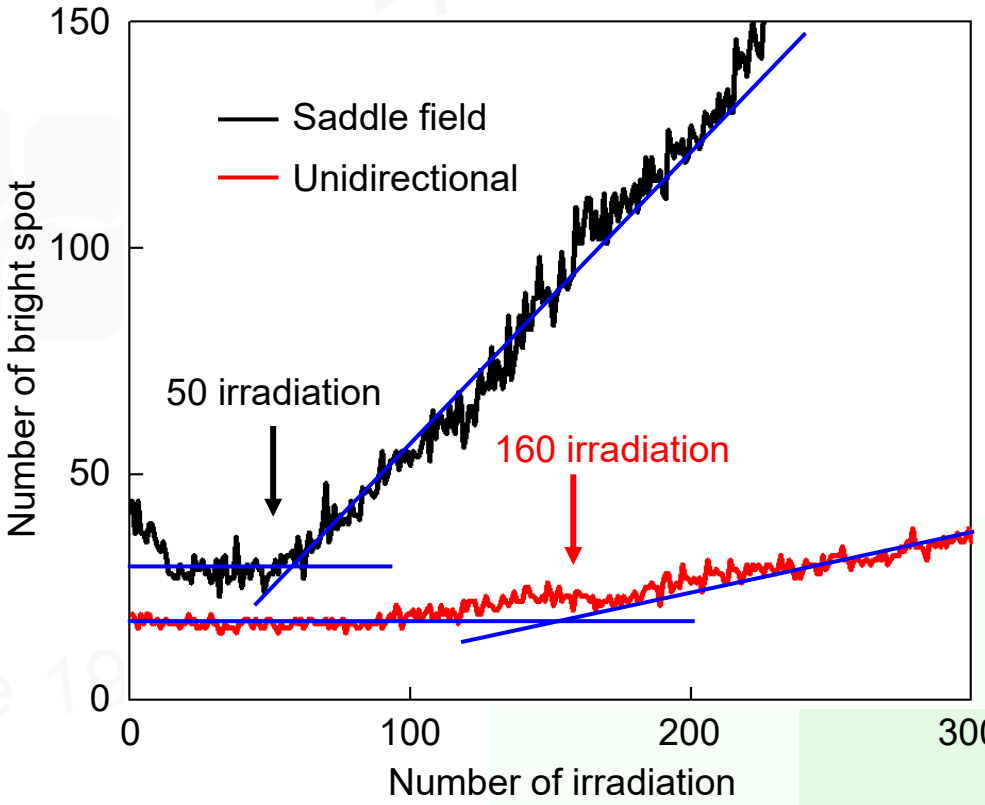
### 炭素微粒子排出量の測定

- 磁場印加により，炭素微粒子排出量は減少
- 排出開始後，炭素パーティクル数は概ね線形に増加
- 試験初期のベースラインと
  排出開始後の直線の交点
  ⇒排出開始点（FAB源の寿命）

Saddle Field型　　約 50回

一方向磁場印加型　約160回

⇒**3.2倍の炭素微粒子排出抑制効果**



## シミュレーションによる酸化膜除去量推定

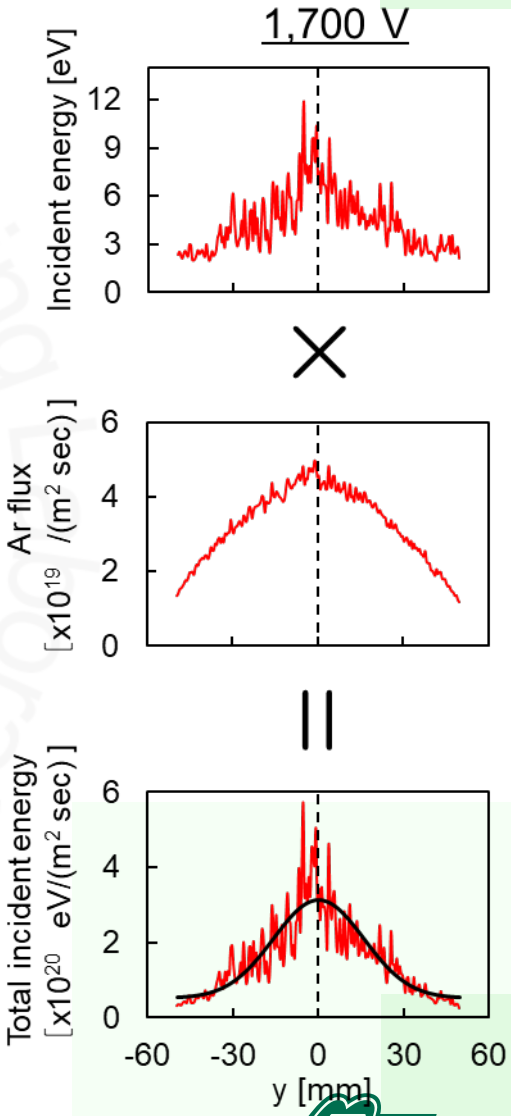
**入射エネルギー［eV］の定義**

計測面のある位置に到達したAr粒子1つが持つ運動エネルギーの大きさの平均

**総入射エネルギー［eV/(m² sec)］**

＝入射エネルギー［eV］×Arフラックス［/(m²sec)］

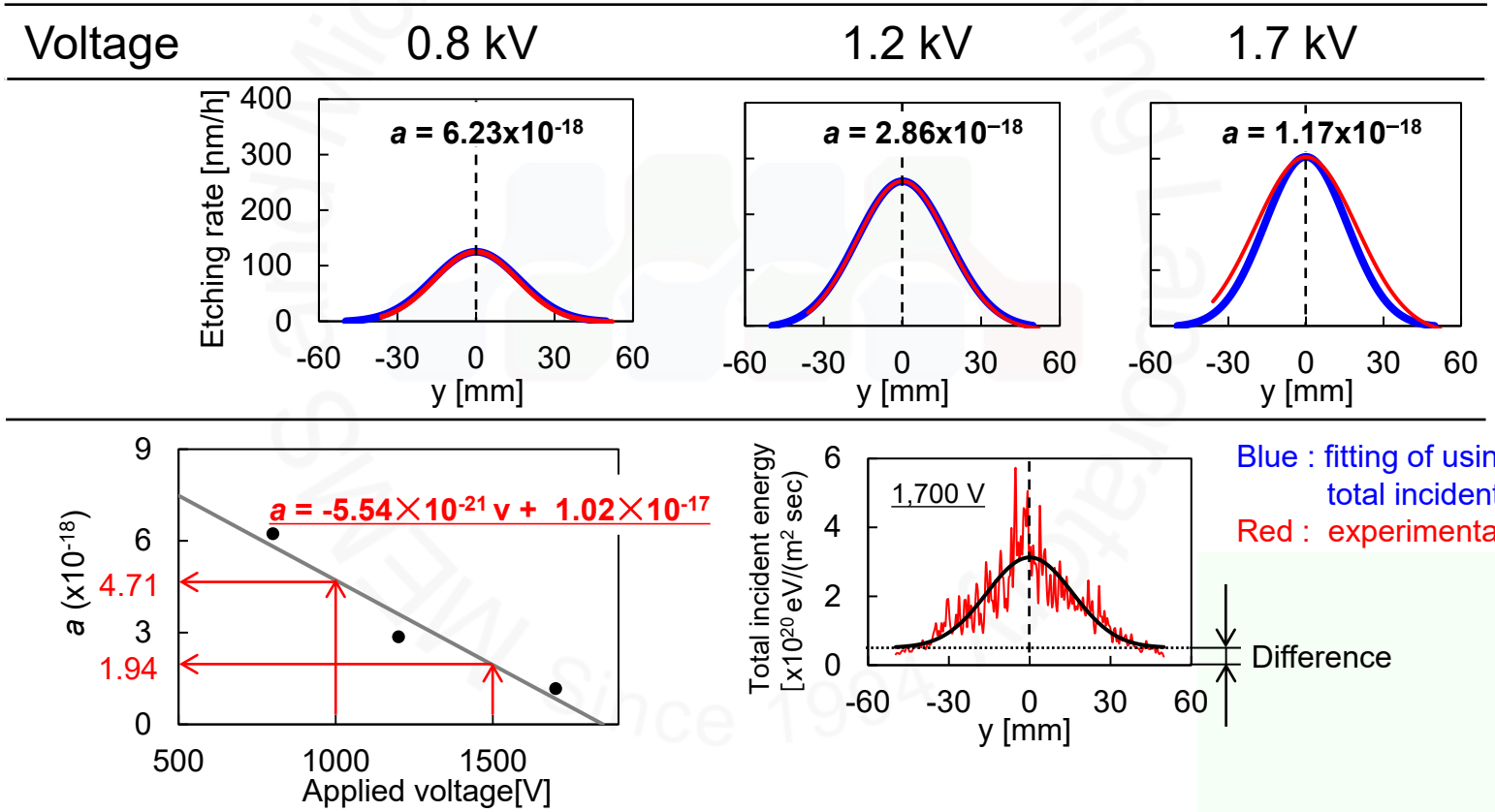
計測面のある位置で単位時間あたりに入射するエネルギーの総量を求め，各位置における総入射エネルギーと定義しガウス近似



## シミュレーションによる酸化膜除去量推定

### 総入射エネルギーから酸化膜除去量の予測

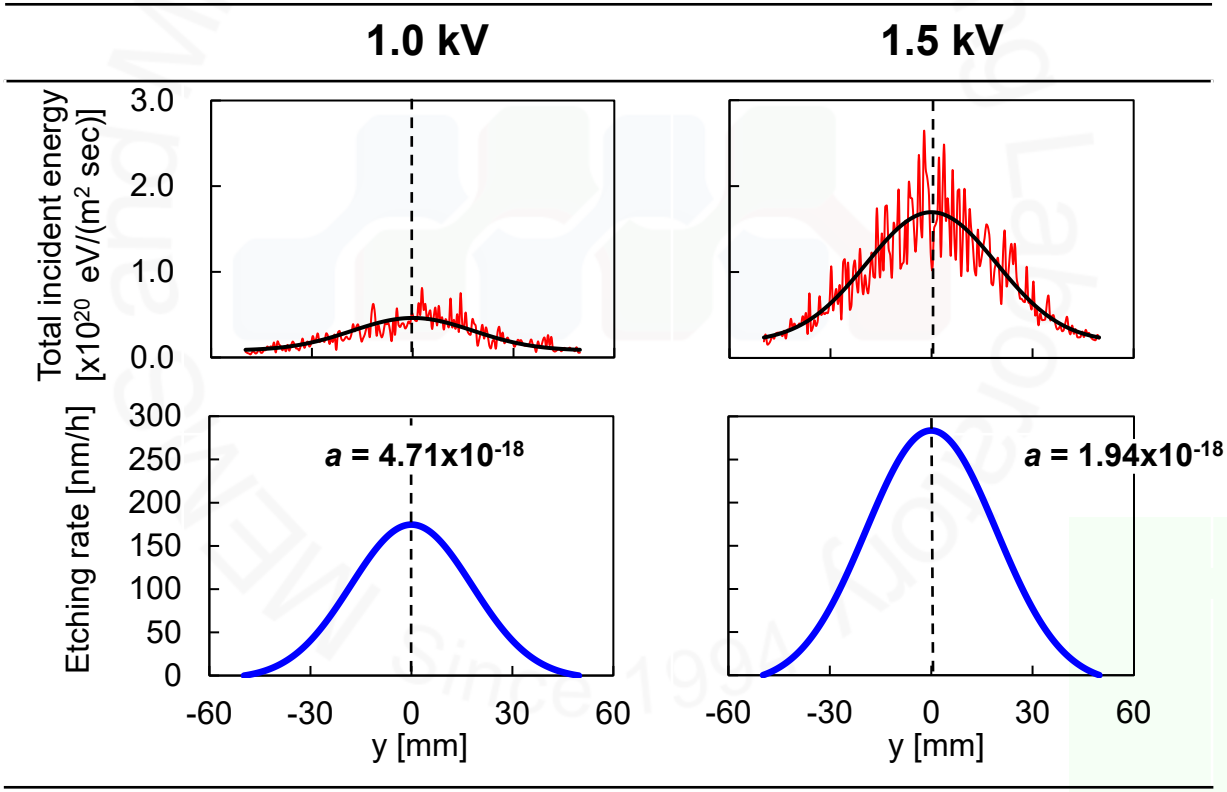
ベースラインが0となる差を求めy=0での値が一致するよう係数aを探索



## シミュレーションによる酸化膜除去量推定

### 予測モデルの妥当性の検討

1.0 kV，1.5 kVで予測モデルを使用し酸化膜除去量分布を予測し実験結果と比較することで妥当性の検討



## シミュレーションによる酸化膜除去量推定

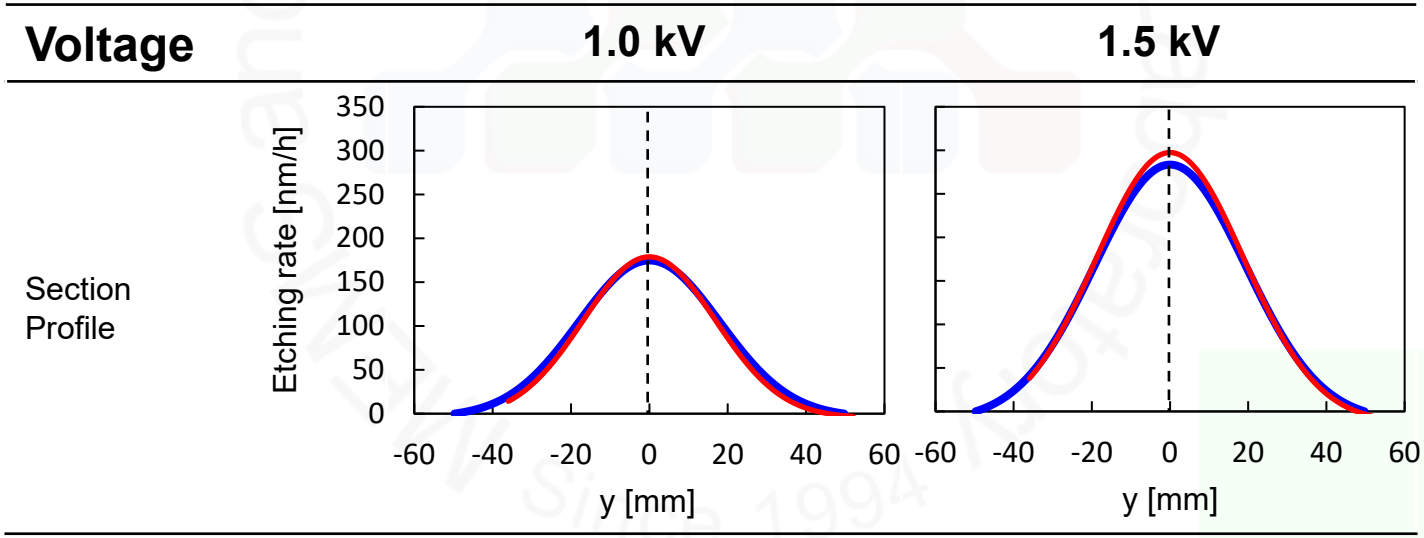
### 予測モデルの妥当性の検討

1.0 kV，1.5 kVでともに予測モデルを用いた予測分布を作成

⇒実験から得られた除去量分布にほぼ一致

⇒総入射エネルギを用いた予測モデルの妥当性を確認

⇒実験によらない照射範囲の設計が可能



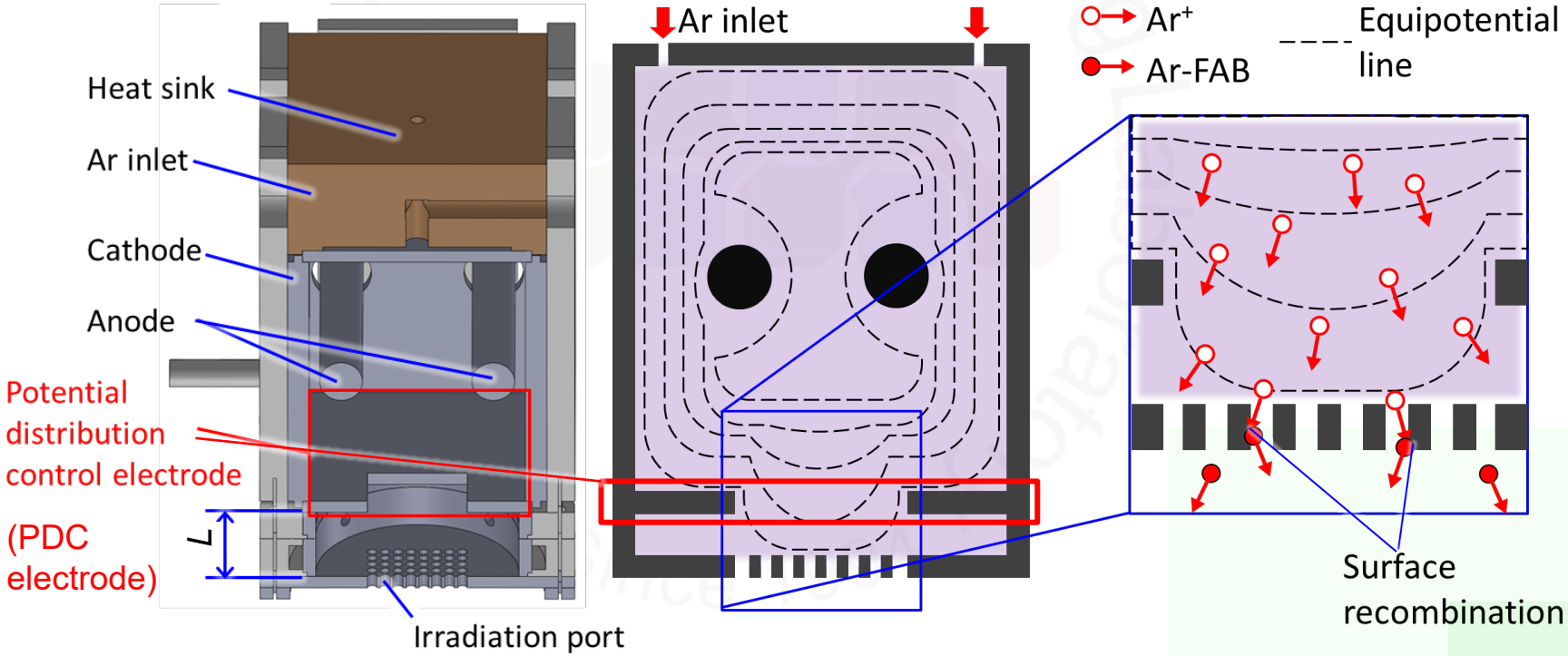

Blue：fitting of using total incident energy
Red：experimental

# 3. 高速原子ビーム照射範囲均一化

## 電位分布制御電極による照射範囲制御

### 電位分布制御電極内蔵FAB源

- FAB源内部に形成される電位分布を変化させAr+の加速方向を制御
- 電位分布が変化する部分の長さ（*L*）を可変（ *L* =10，17，24）

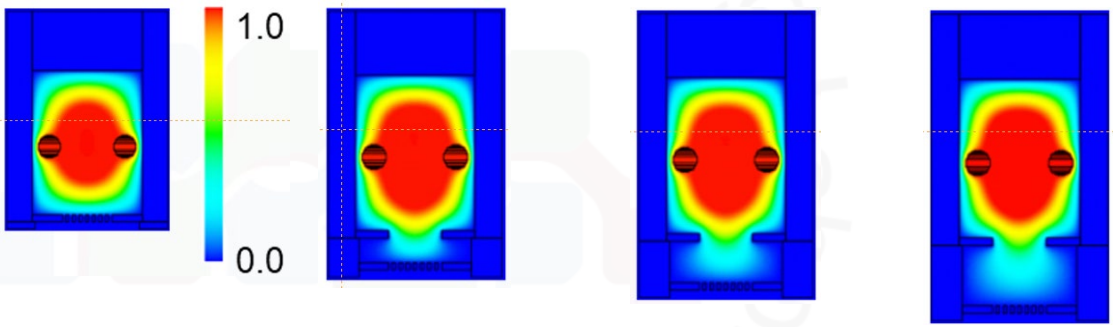


# 3. 高速原子ビーム照射範囲均一化

## 電位分布制御電極による照射範囲制御

### シミュレーション

電位分布制御電極によりFAB源内部の電位分布の変化を確認

| FAB source | Conventional (SF) | SF + PDC electrode | | |
|---|---|---|---|---|
| Irradiation port length | - | *L*=10 | *L*=17 | *L*=24 |
| Electric potential distribution [kV] |  | | | |



### 照射特性評価方法

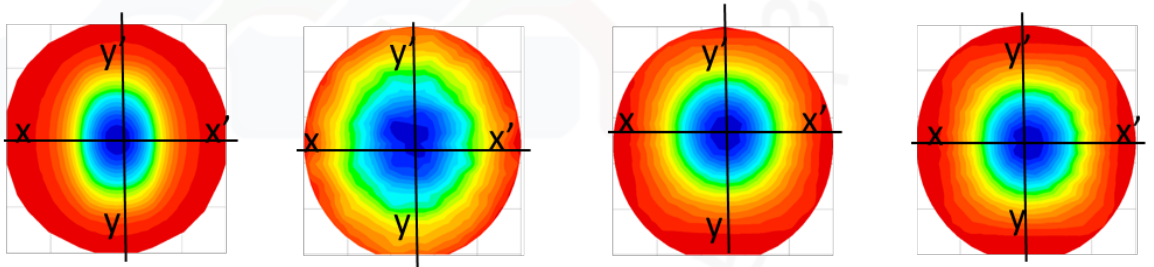
- 評価方法：酸化膜除去量
- 照射対象：酸化膜付き4inchシリコンウエハ（照射口から100 mm）
- 照射条件：放電電圧1.0 kV，放電電流 100 mA，照射時間 30 min

## 電位分布制御電極による照射範囲制御

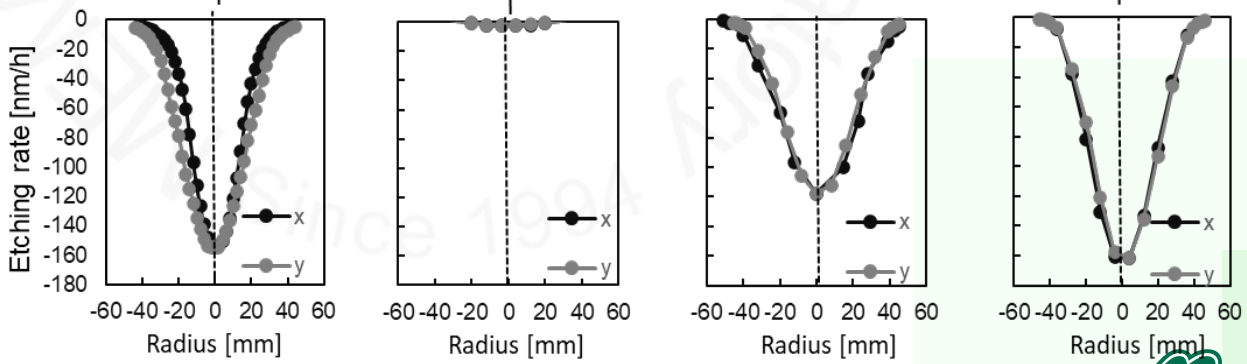
### 照射特性評価結果

| FAB source | Conventional (SF) | SF + PDC electrode | | |
|---|---|---|---|---|
| Irradiation port length | - | $L$=10 | $L$=17 | $L$=24 |
| Voltage | 1.0 kV | 1.0 kV | 1.0 kV | 1.0 kV |
| Current | 100 mA | 100 mA | 100 mA | 100 mA |
| Ar flow | 50 sccm | 53 sccm | 35 sccm | 29 sccm |
| Etching volume rate | $2.1\times10^{-1}$ mm$^3$/h | - | $1.6\times10^{-1}$ mm$^3$/h | $2.0\times10^{-1}$ mm$^3$/h |

Removal image



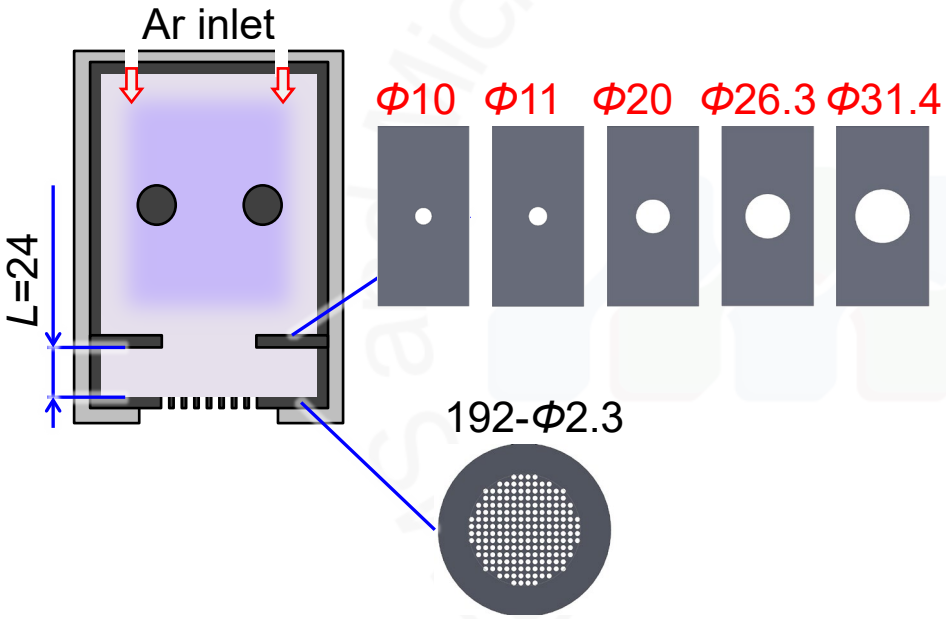

Section profile

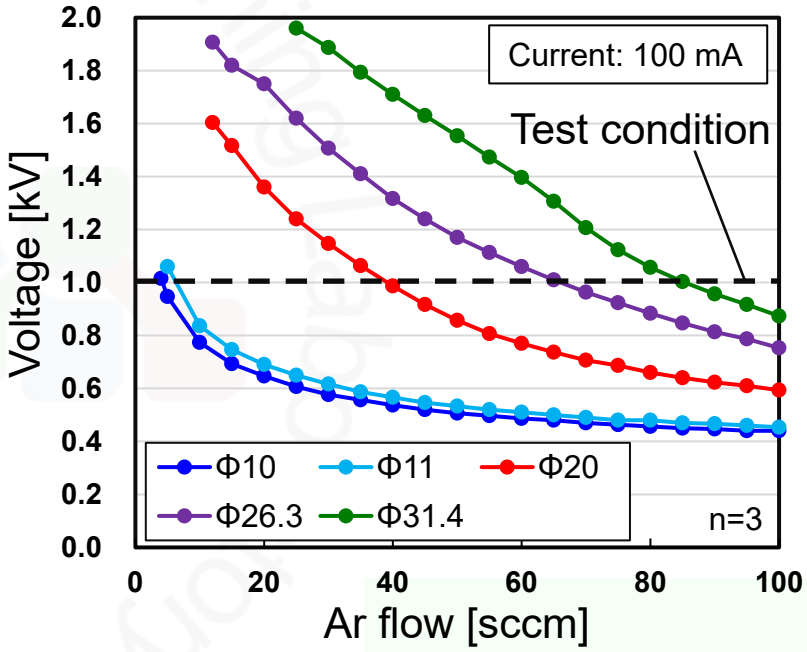


# 3. 高速原子ビーム照射範囲均一化

## 電位分布制御電極による照射範囲制御

### 電極開口部面積と照射特性の検討



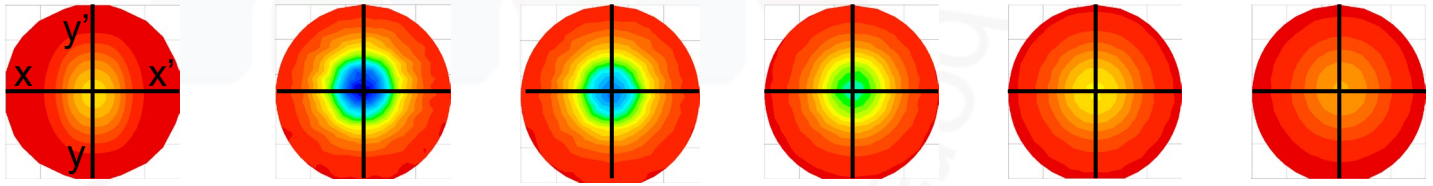
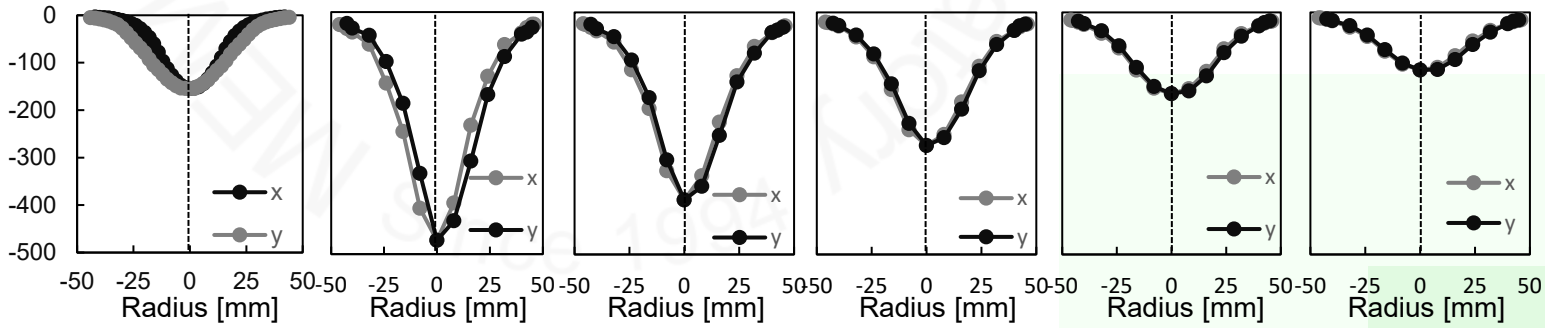



# 3. 高速原子ビーム照射範囲均一化

## 電位分布制御電極による照射範囲制御

### 照射特性評価結果

- Φ10のとき，従来比で3倍以上のエッチングレートを確認
- エッチングレート低下に伴い照射範囲増加

| FAB source | Conventional | Without rear exhaust *L*=24 192-Φ2.3 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Φ | - | 10 | 11 | 20 | 26.3 | 31.4 |
| Ar flow | 50 sccm | 9.7 sccm | 10.7 sccm | 47.5 sccm | 72.0 sccm | 87.5 sccm |
| Etching rate | 154.4 nm/h | 471.6 nm/h | 387.2 nm/h | 274.8 nm/h | 168.0 nm/h | 118.8 nm/h |
| Removal image |  | | | | | |
| Section profile and etching rate [nm/h] |  | | | | | |

# 3. 高速原子ビーム照射範囲均一化



## 電位分布制御電極による照射範囲制御

### エッチングレート

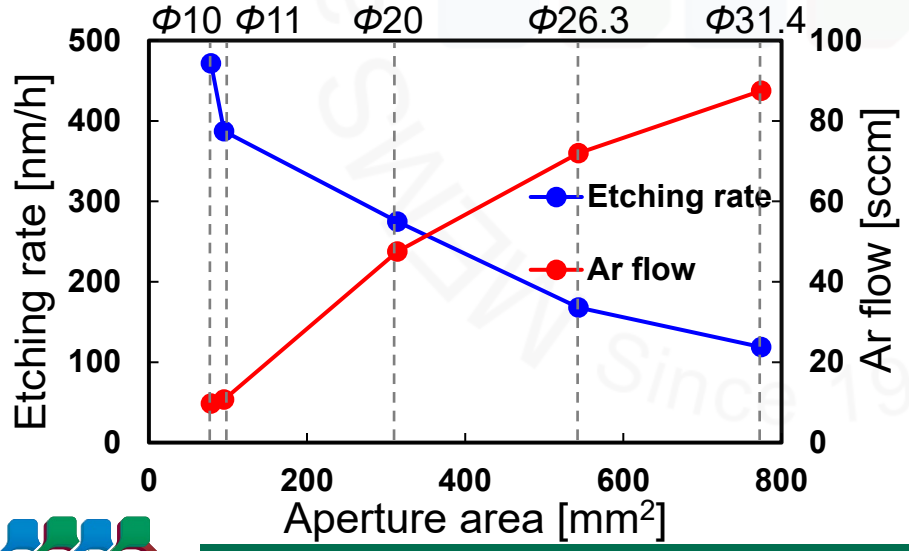
開口径の増加

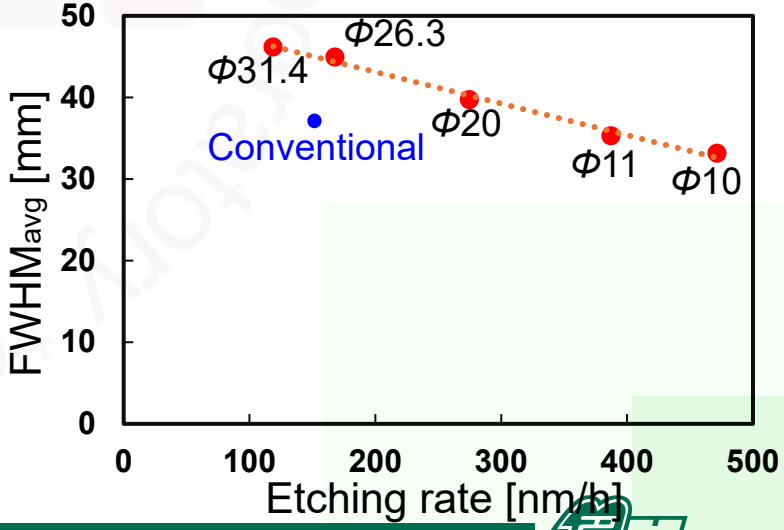
⇒ エッチングレート低下：Ar流量増加で平均自由行程増加による低エネルギ化

### 照射範囲

エッチングレート増加⇒ 照射範囲（半値幅）減少

Ar流量減少で平均自由行程増加⇒ 衝突回数が減少し，直進性向上？



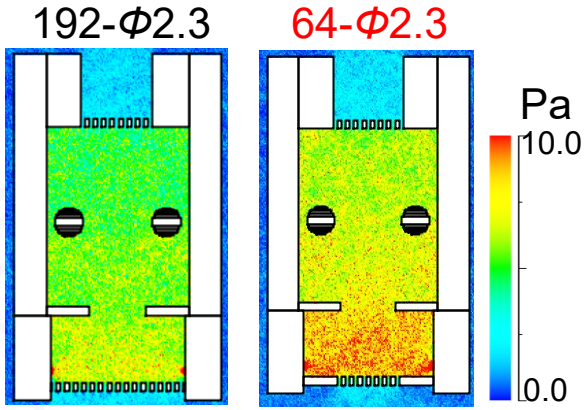
# 4. パーティクルレス化／バッチ処理への挑戦

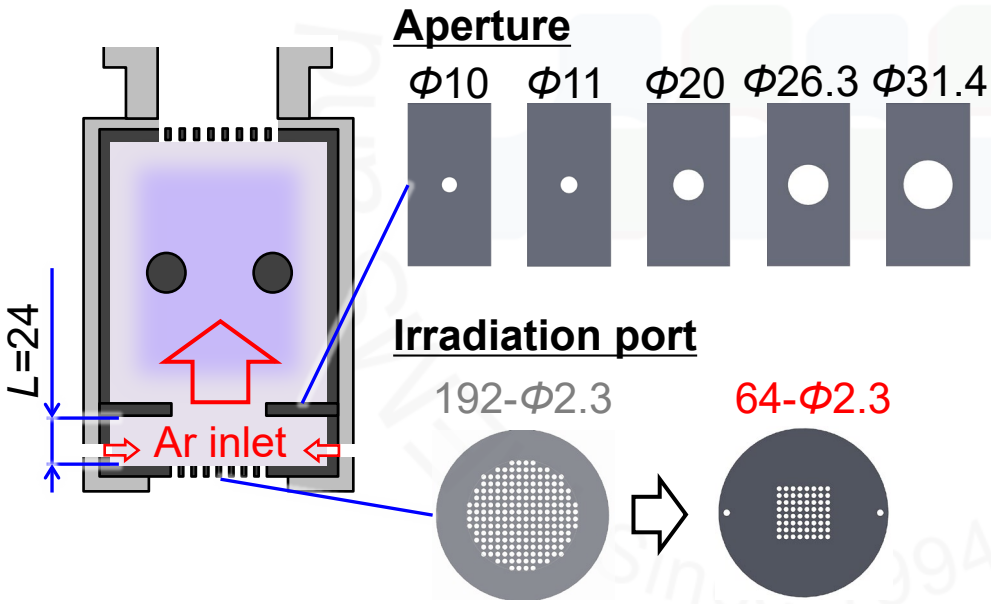
## 前方給気後方排気によるパーティクルレス化

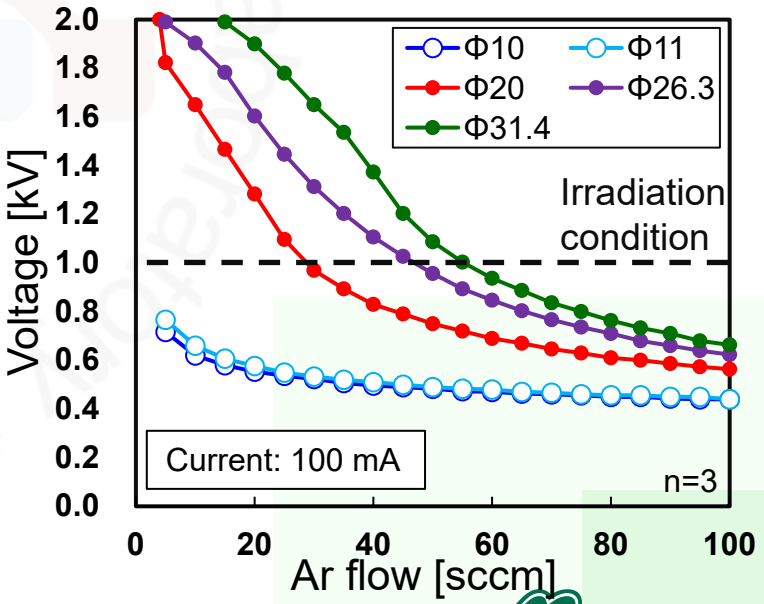
### パーティクルレスFAB源

Arの流れを従来とは逆向き
⇒照射口からのパーティクル排出を抑制

照射口孔数：64で安定動作を実現



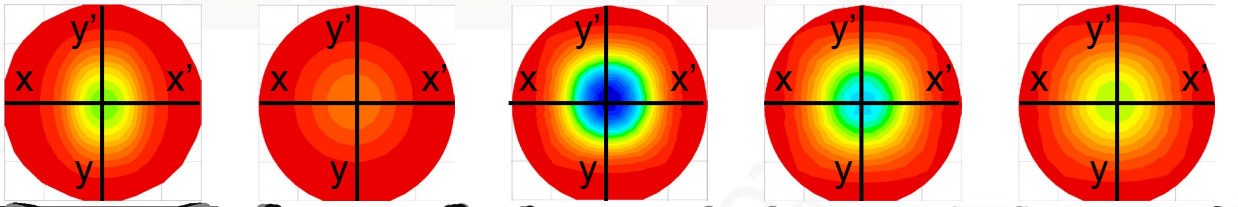
## 前方給気後方排気によるパーティクルレス化

### 照射特性評価結果

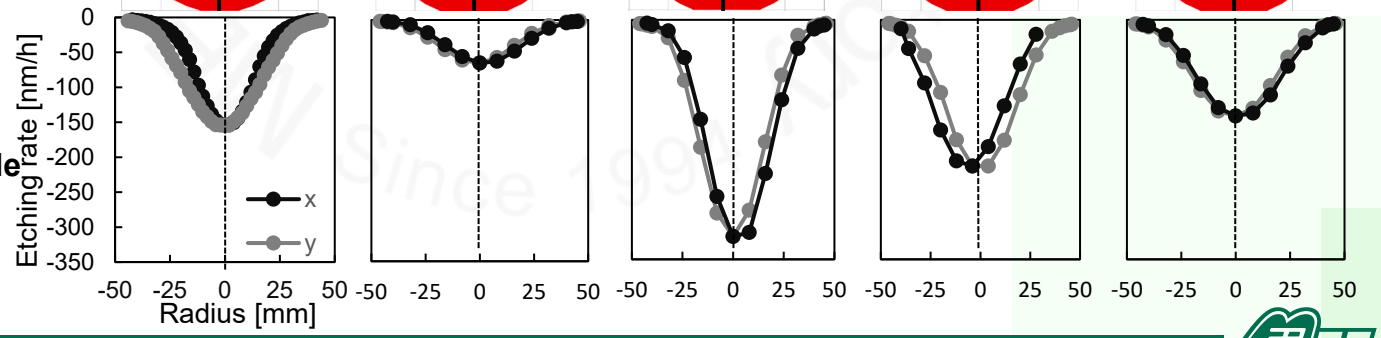
- Φ20のとき，従来比で2倍以上のエッチングレートを確認
- エッチングレート低下に伴い照射範囲増加

| FAB source | Conventional | Rear exhaust *L*=24 64-Φ2.3 | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| *Φ* | - | 10 | 20 | 26.3 | 31.4 |
| Voltage | 1.0 kV | 0.5 kV | 1.0 kV | 1.0 kV | 1.0 kV |
| Ar flow | 50 sccm | 53 sccm | 34 sccm | 54 sccm | 62 sccm |
| Etching rate | 154.4 nm/h | 62.5 nm/h | 316.4 nm/h | 206.2 nm/h | 140.6 nm/h |

Removal image




Section profile



# 4. パーティクルレス化／バッチ処理への挑戦

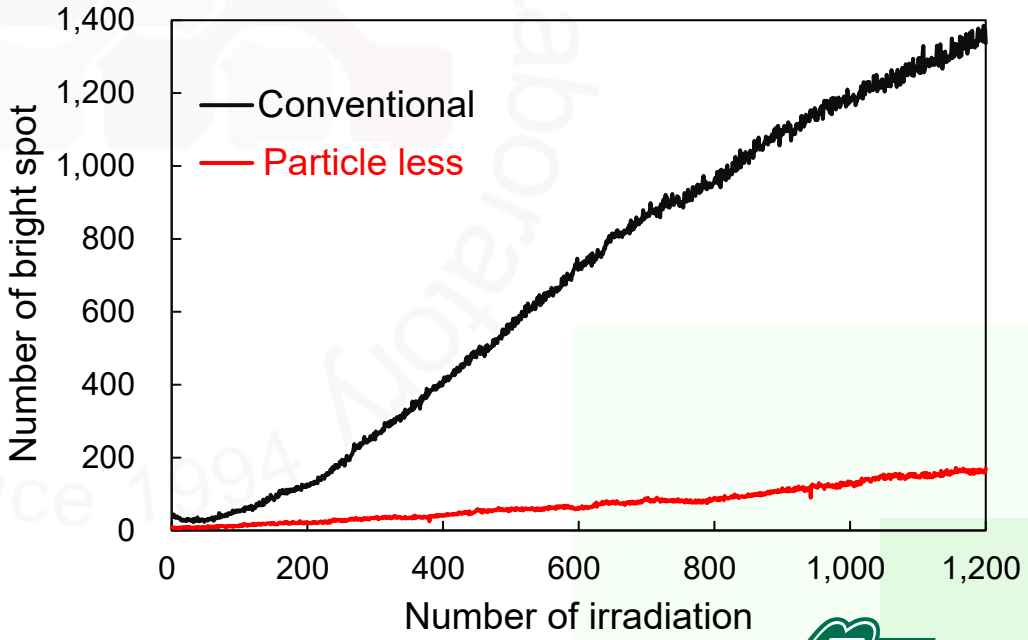
## 前方給気後方排気によるパーティクルレス化

### 炭素微粒子排出量の測定

- 排気口形状：64 – Φ2.3
- 動作条件：1 kV，100 mA，34 sccm
- 照射条件：30 s照射→300 sインターバル
- 電極：中古電極（エメリー紙および超音波洗浄で再生処理）

### 測定結果

FAB源後方からの排気で
パーティクル排出量減少

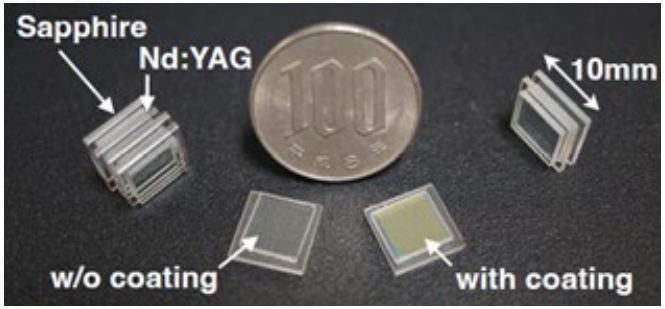


## バッチ処理への挑戦

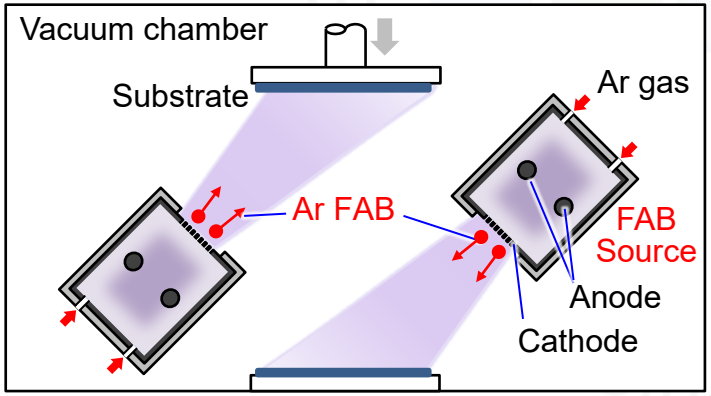
### バッチ処理のニーズ

分布面冷却構造集積レーザー

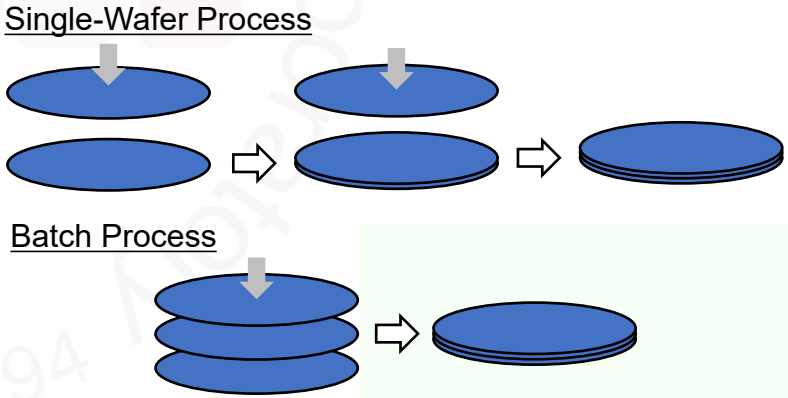
⇒大面積，多数枚の基板を一度または連続的に接合する必要性




### 従来のFAB表面活性化接合




### 枚葉式とバッチ式



# 4. パーティクルレス化／バッチ処理への挑戦



## バッチ処理可能な高速原子ビーム源

特許出願中につき講演での説明のみ

# 5. おわりに



## まとめ

- パーティクル抑制，大口径基板接合に向けた新構造，新発想高速原子ビーム源の開発について報告した．
  - 交互磁場印可型高速原子ビーム源
  - 一方向磁場印可型高速原子ビーム源
- 高速原子ビーム照射範囲均一化に資する研究を紹介した．
  - シミュレーションによる酸化膜除去量推定
  - 電位分布制御電極による照射範囲制御
- 前方給気後方排気によるパーティクルレス化への試みやバッチ処理への挑戦について述べた．

## 謝　辞

実験は，本研究室学生諸氏の不断の努力により行われている．
また，プラズマ発生メカニズム，測定，解析には名古屋大学　大野哲靖教授のご助言を受けている．ここに記して感謝致します．