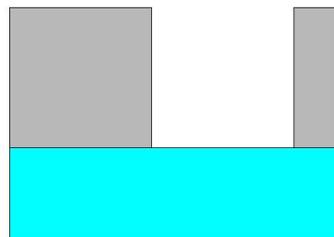
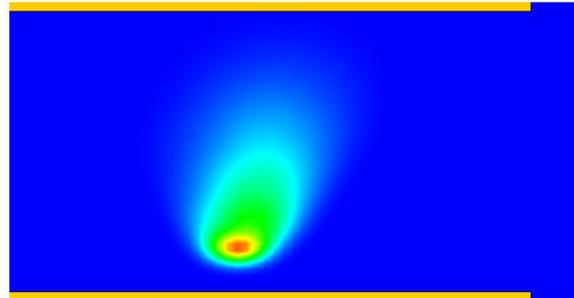
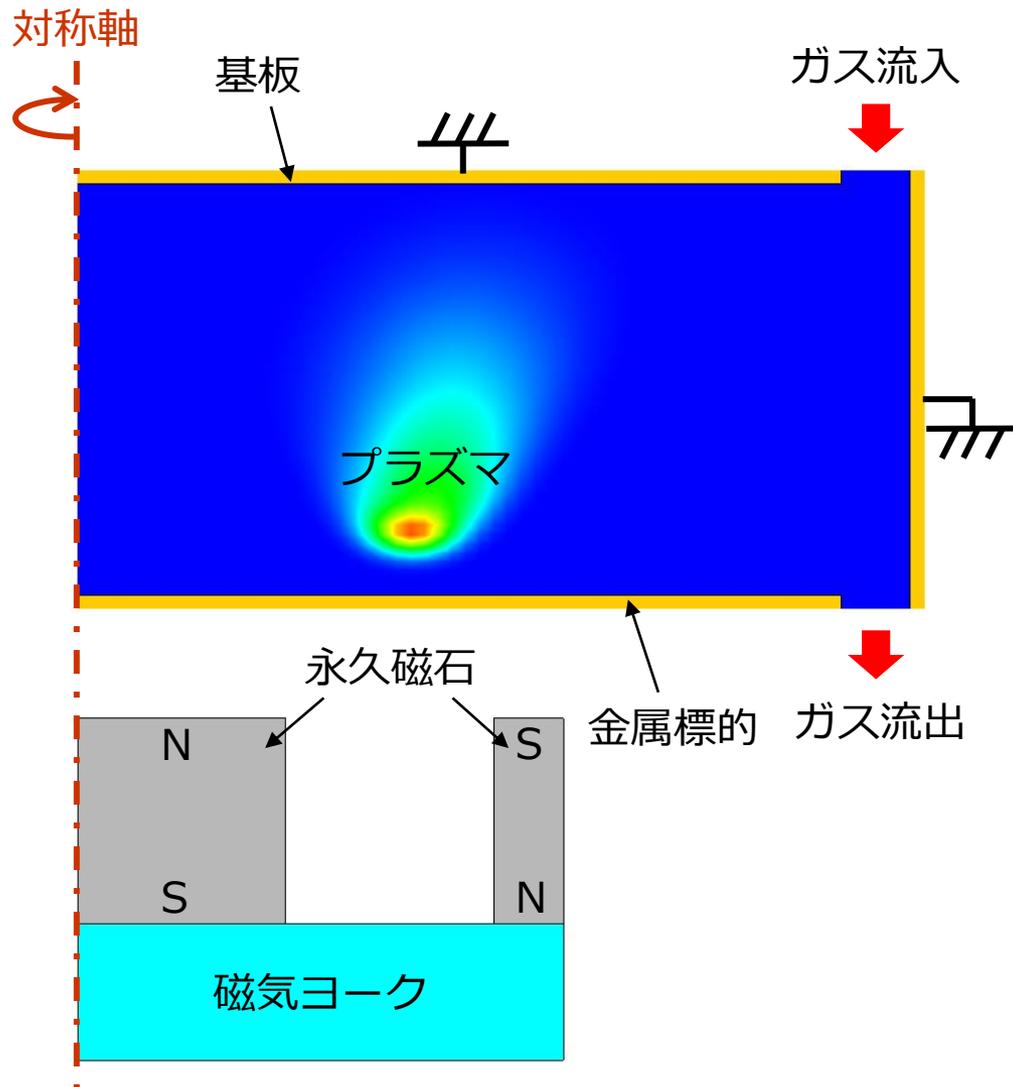


# Particle-PLUS計算事例

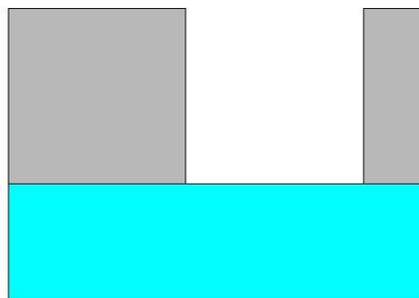
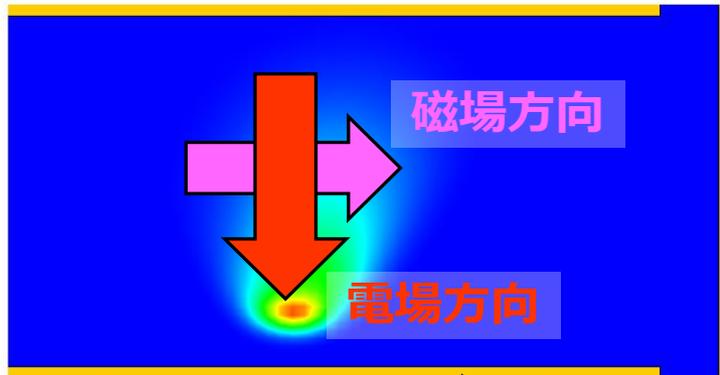
## DCマグネトロンスパッタリング



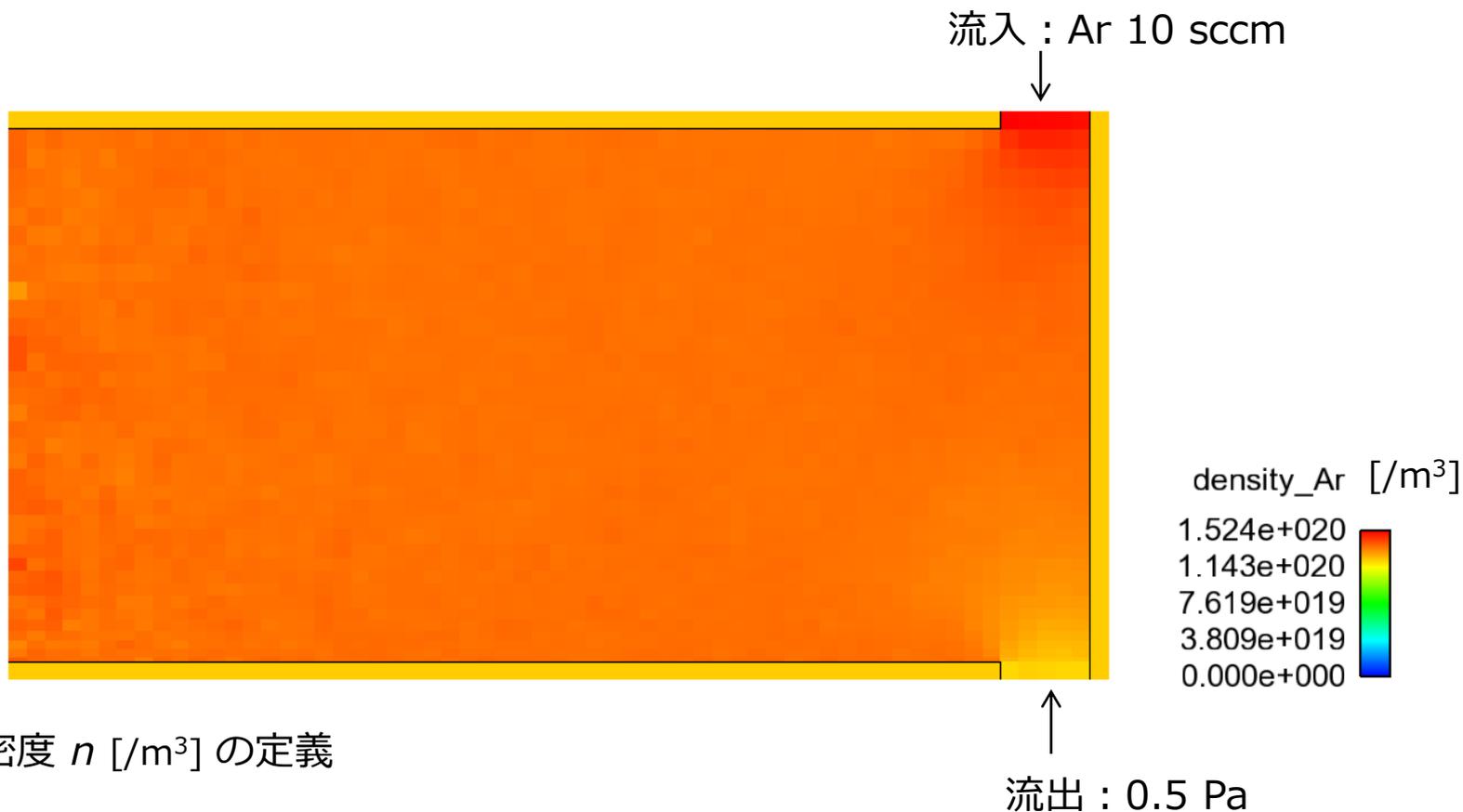


## 軸対称モデル

ガス流入	Ar 10 sccm	
ガス流出	0.5 Pa	
永久磁石	AlNiCo	
磁気ヨーク	Fe	
標的	材質 電圧 2次電子放出	Ti DC -500 V 係数 0.1
標的-基板間距離	30 mm	



- ✓ 正イオンは電場により加速されて標的に衝突し、材料原子や二次電子を放出させる (**スパッタリング**)
- ✓ 電子は磁場により回転運動 (**サイクロトロン**) し、その回転中心は画面手前方向へ移動する (**EBドリフト**)
- ✓ 高エネルギーの電子が原料ガスに衝突し、電子とイオンを発生させる (**電離**)
- ✓ 以上のようにプラズマを定常的に発生させながら、削られた材料原子を基板に堆積させる (**デポジション**)



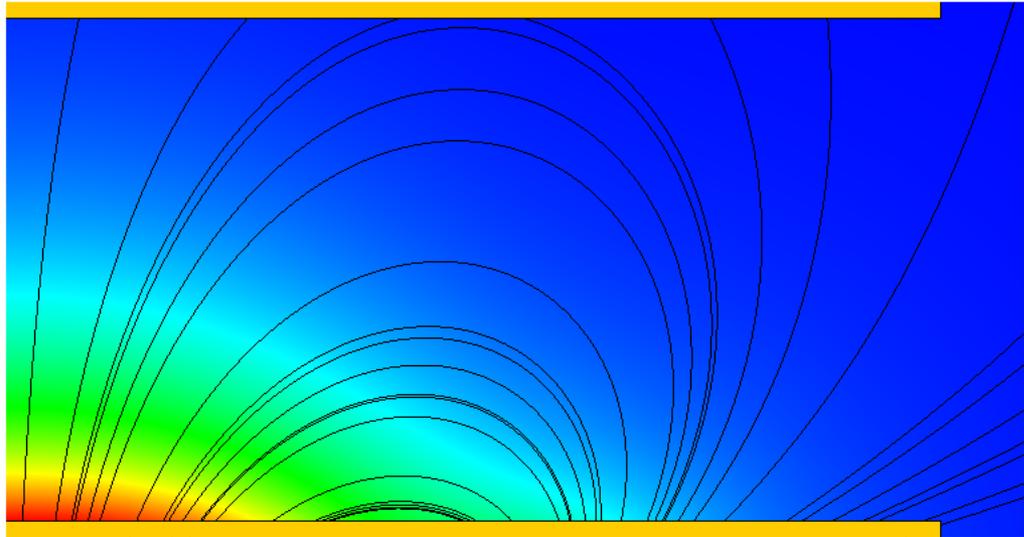
数密度  $n$  [ /m<sup>3</sup> ] の定義

$$n = \frac{N}{V}$$

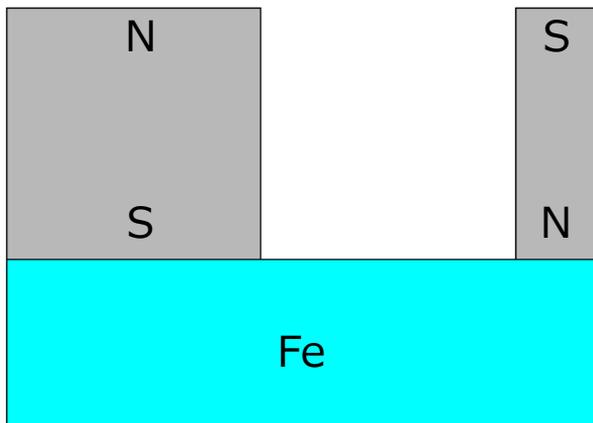
$N$  : ある空間領域 (ここではセル1つ)  
内に含まれる数

$V$  : その領域の体積 [m<sup>3</sup>]

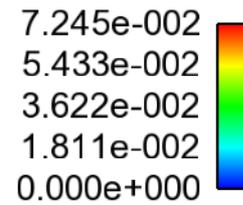
0.5 [Pa]  $\div$  数密度1.2E20 [ /m<sup>3</sup> ] (300K)



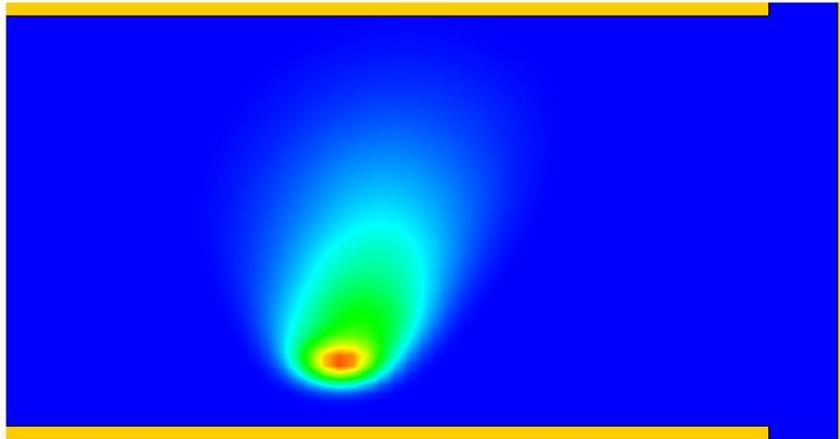
色 : 磁束密度ベクトルの大きさ  
黒線 : 磁束密度ベクトルの流線



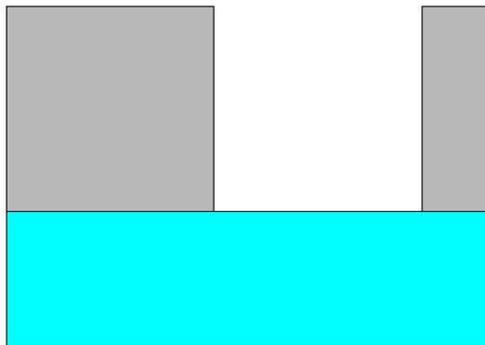
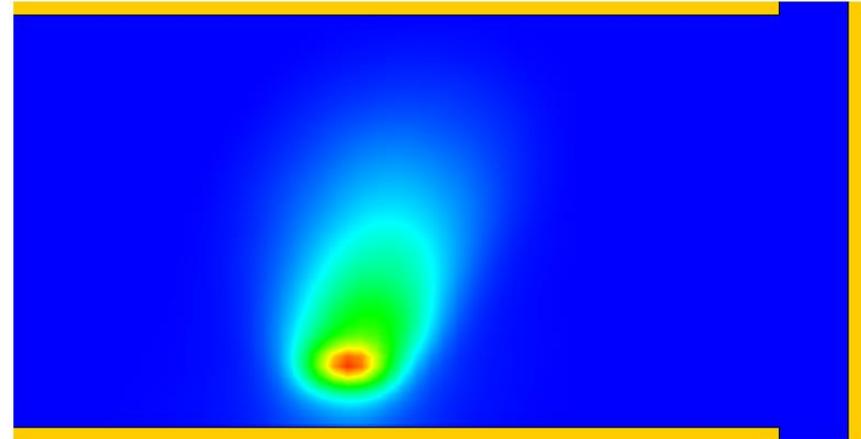
magnetic\_field [T] ( $=[\text{Wb}/\text{m}^2]$ )



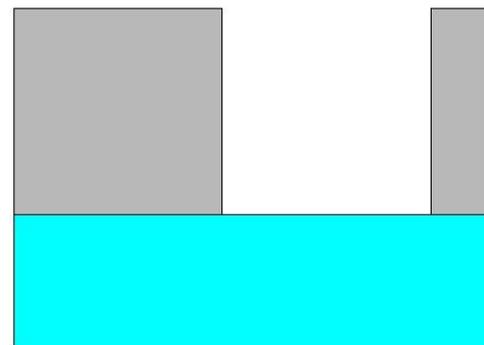
電子数密度



Ar<sup>+</sup>イオン数密度



ave\_density\_ele [/m<sup>3</sup>]  
1.887e+016  
1.415e+016  
9.435e+015  
4.718e+015  
0.000e+000

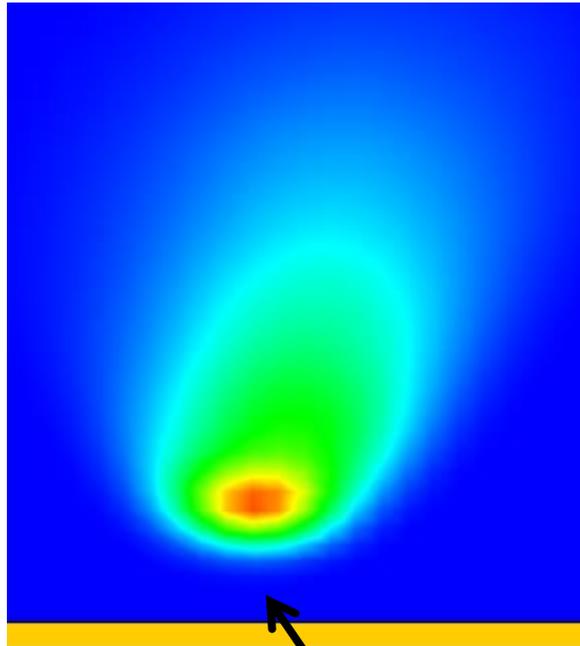


ave\_density\_Ar\_p [/m<sup>3</sup>]  
1.866e+016  
1.400e+016  
9.331e+015  
4.665e+015  
0.000e+000

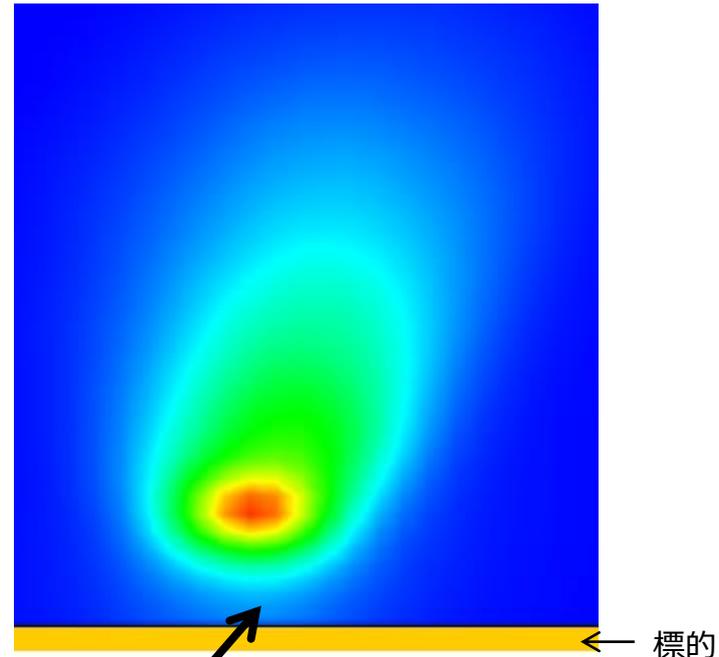


- ✓ 電子が磁場に補足されている様子が伺える
- ✓ Ar<sup>+</sup>イオンは電子に似た分布をとる

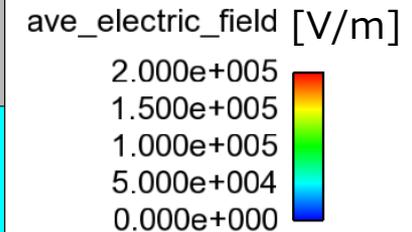
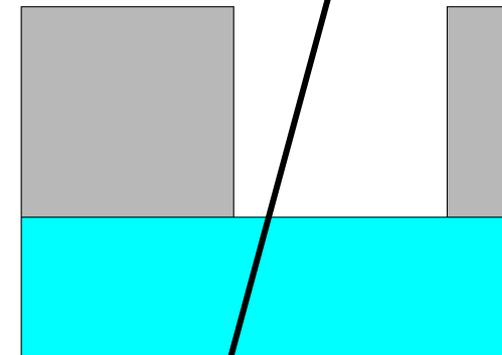
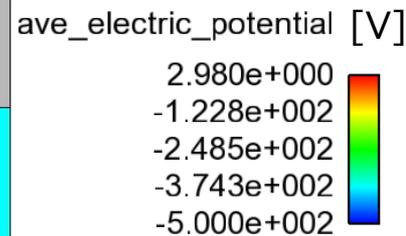
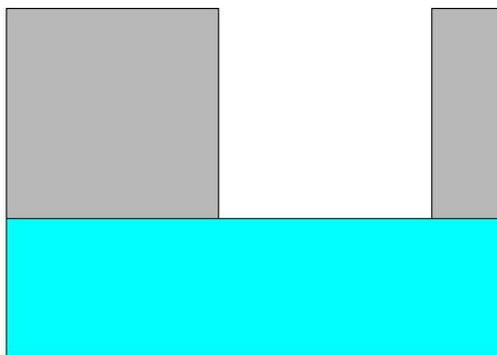
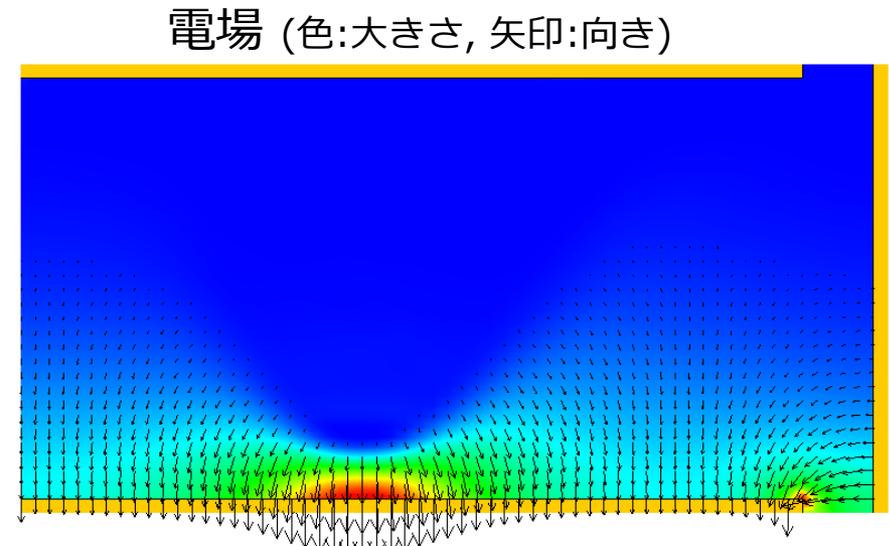
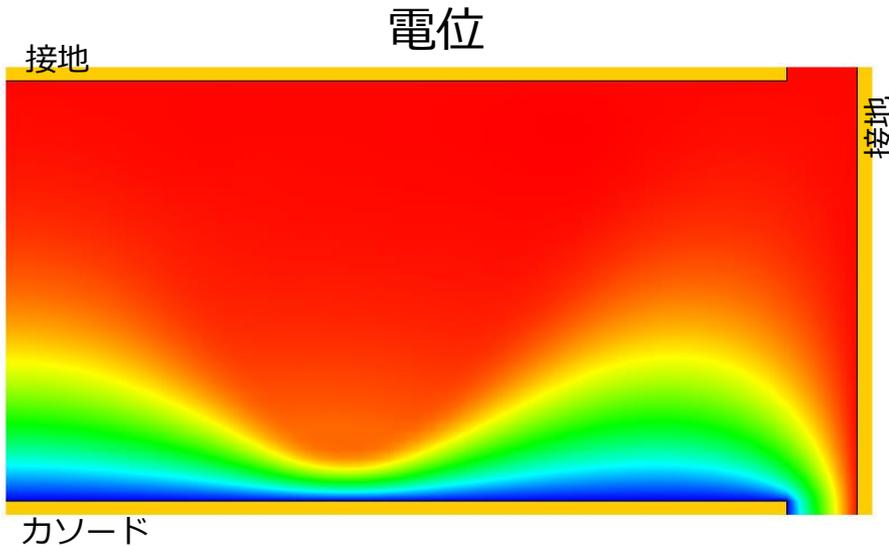
[ 拡大図 ] 電子数密度



Ar<sup>+</sup>イオン数密度

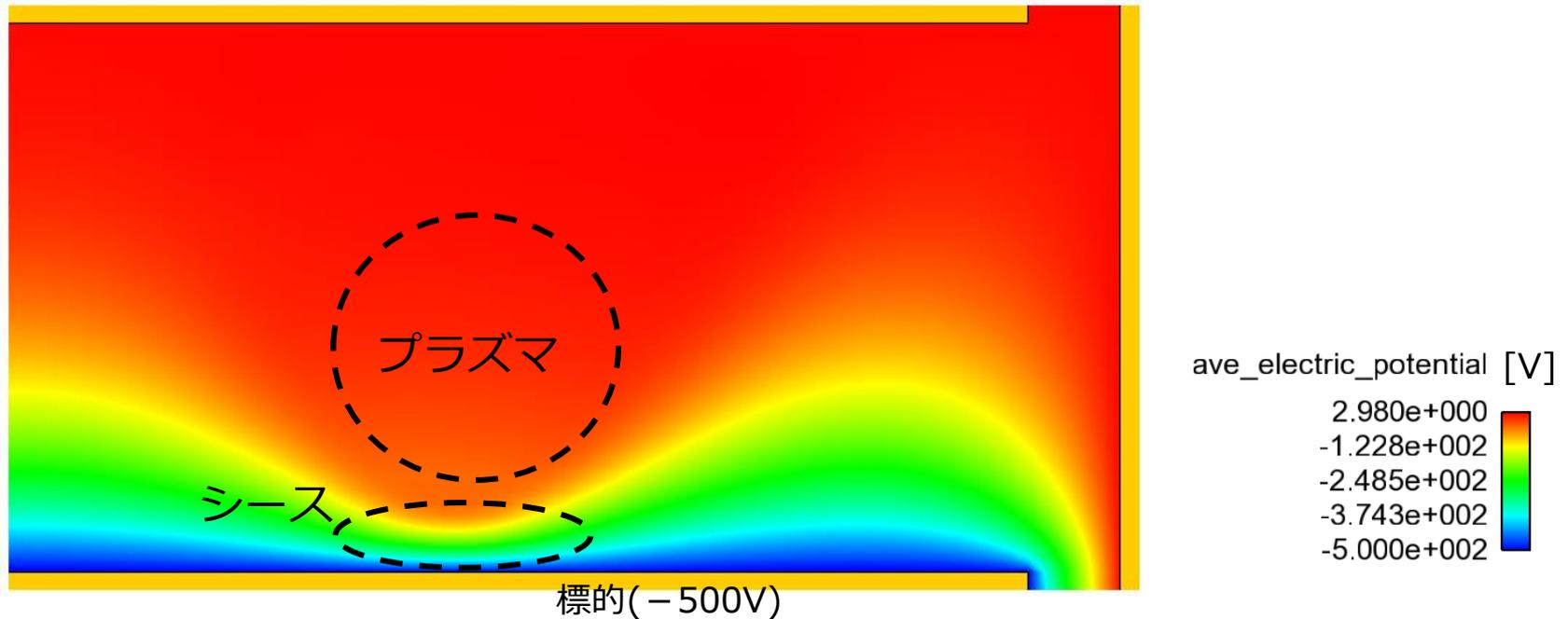


- ✓ 表面付近では電子よりもAr<sup>+</sup>イオンが多い (イオンシース)

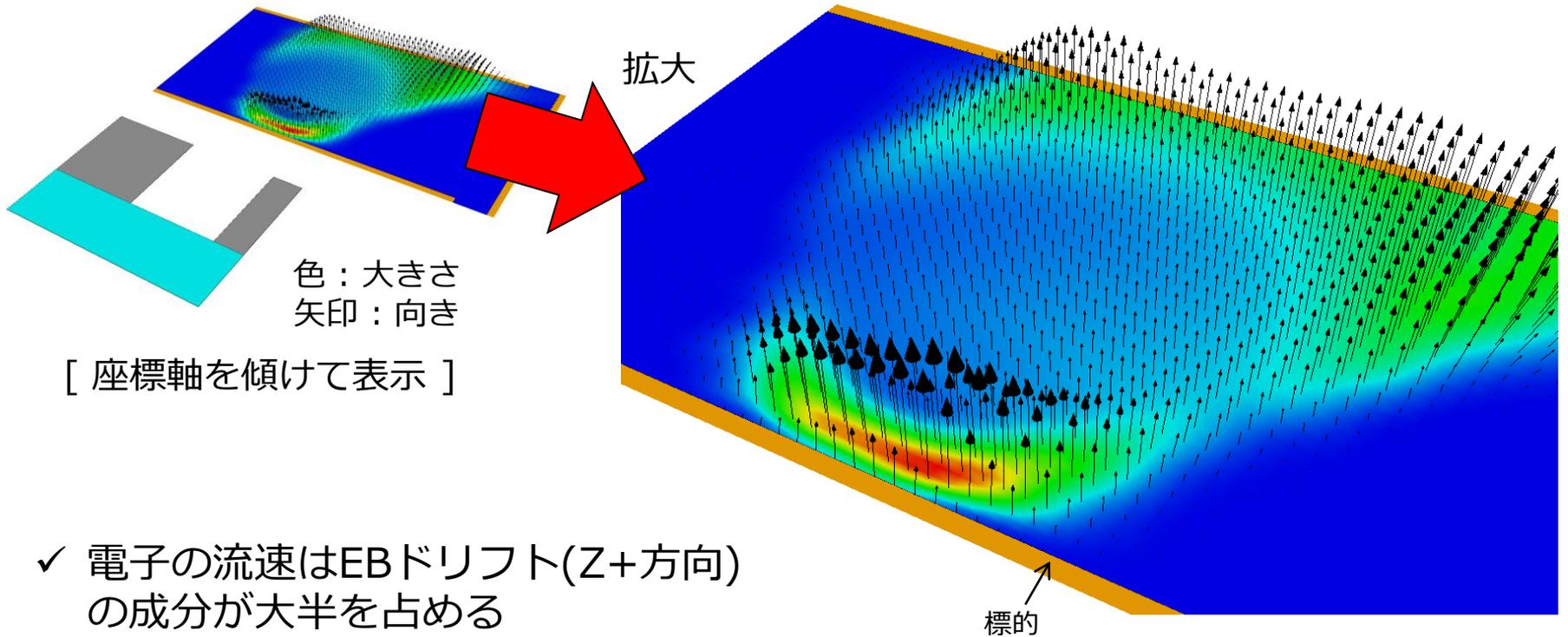


強いシース電場

## 電位



- ✓ プラズマの電位はほぼゼロ（若干正）
- ✓ もしプラズマ中のAr<sup>+</sup>イオンがシースで加速されて標的に衝突する場合、最大で 500 eV のエネルギーを持つことが期待される



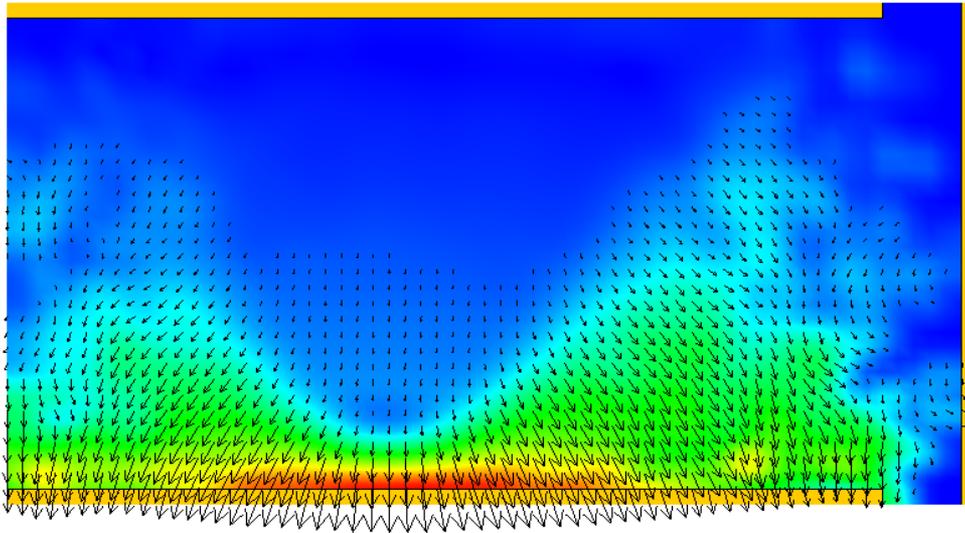
- ✓ 電子の流速はEBドリフト(Z+方向)の成分が大半を占める

ave\_velocity\_ele [m/s]

2.497e+006  
1.873e+006  
1.249e+006  
6.244e+005  
0.000e+000



【参考】 近似式から大雑把に見積もられるドリフトの大きさ  
 $E/B \doteq (2.0 \times 10^5 [\text{V/m}]) / (0.07 [\text{T}]) = 2.8 \times 10^6 [\text{m/s}]$

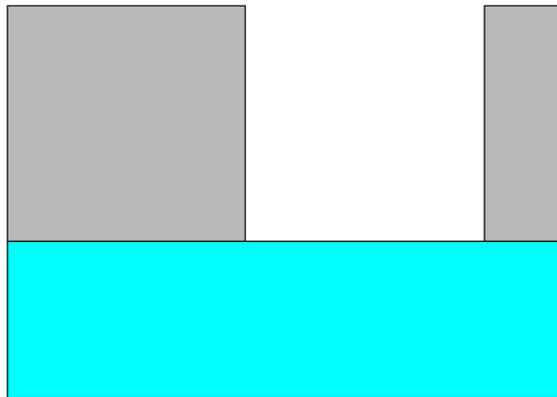


- ✓ Ar<sup>+</sup>イオンは重いため速度が小さく、ほぼ電場の向きに沿って移動する

粒子の運動方程式

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = q \left( \vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} \right)$$

色：大きさ  
矢印：向き



ave\_velocity\_Ar\_p [m/s]

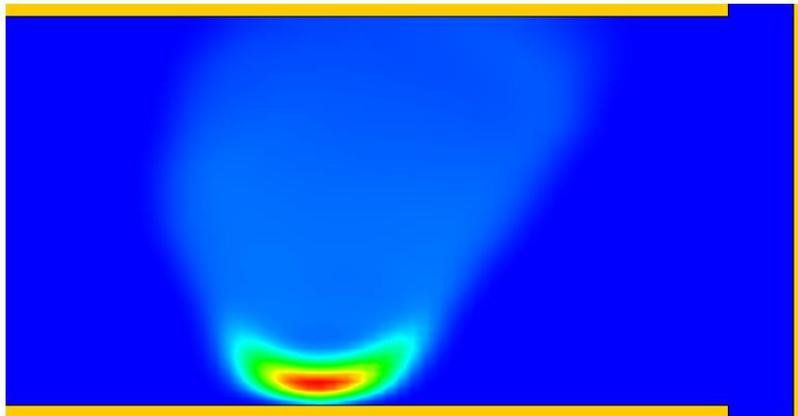
3.489e+004  
2.617e+004  
1.744e+004  
8.722e+003  
0.000e+000



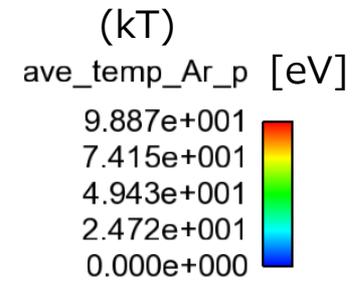
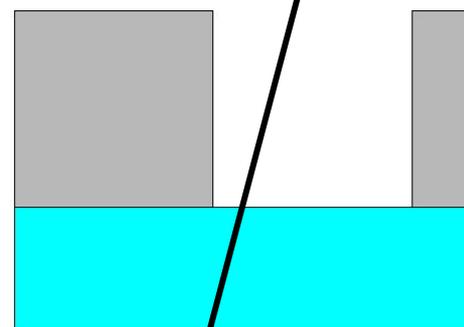
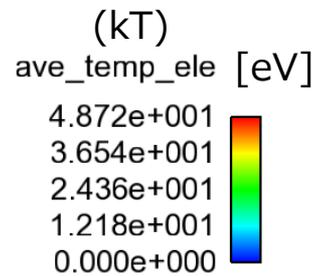
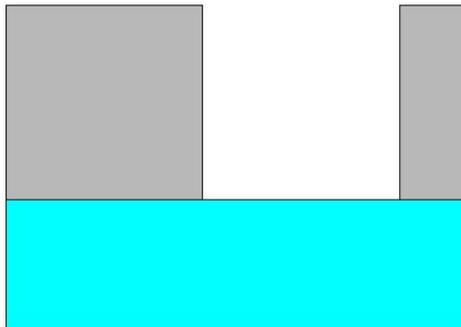
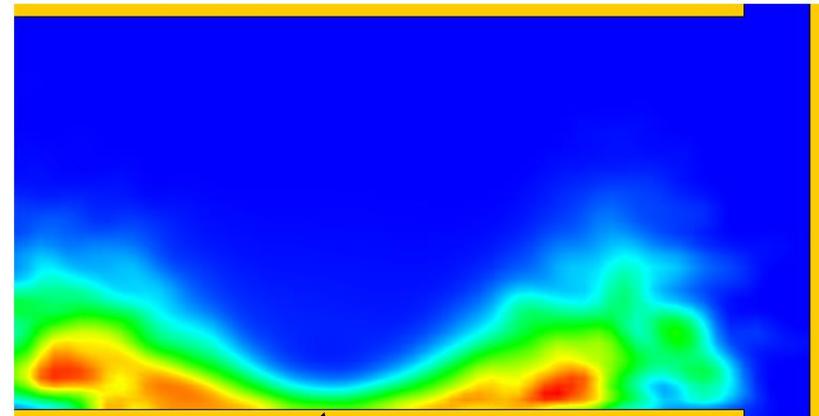
# プラズマの温度\*

\* ここではMaxwell速度の分散と同義 DCマグネトロンスパッタリング

電子温度



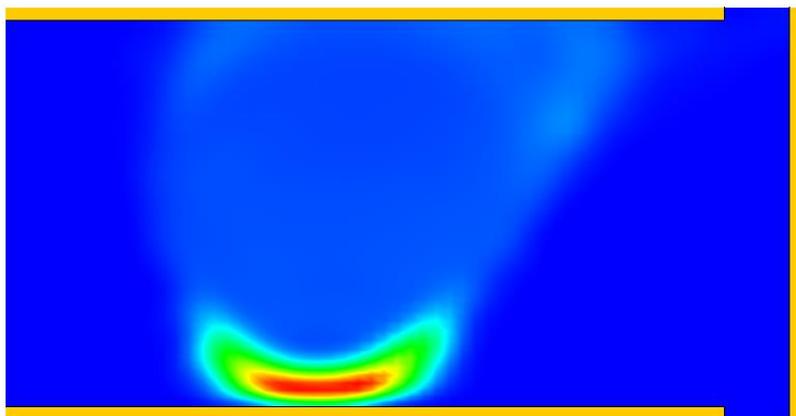
Ar<sup>+</sup>イオン温度



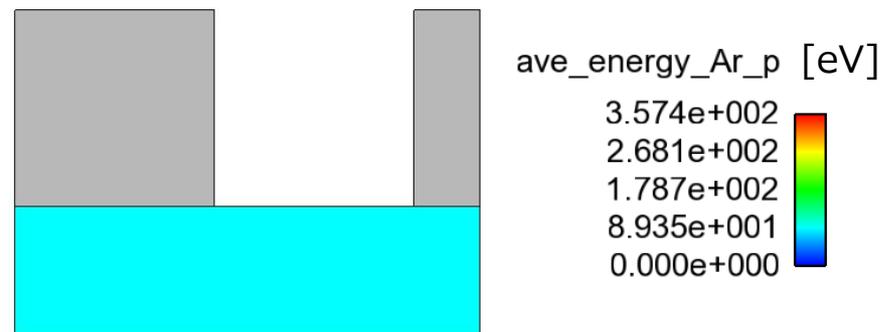
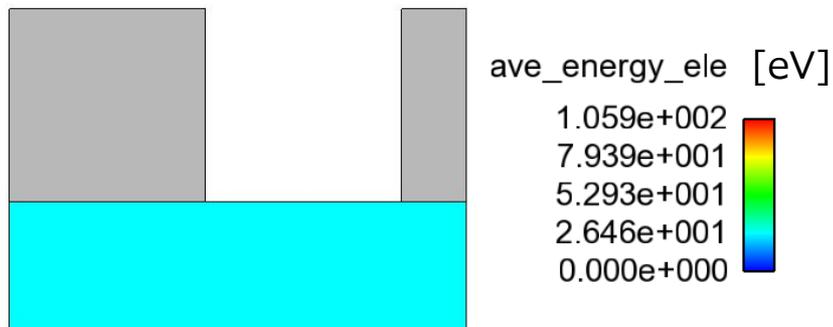
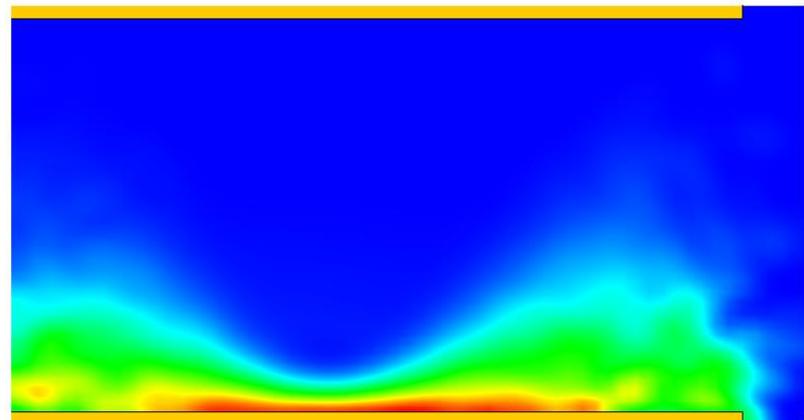
標的に入射するAr<sup>+</sup>イオンの温度は低い  
(速度が揃っている)

1 [eV] ≒ 11600 [K]

電子エネルギー(1個あたり)



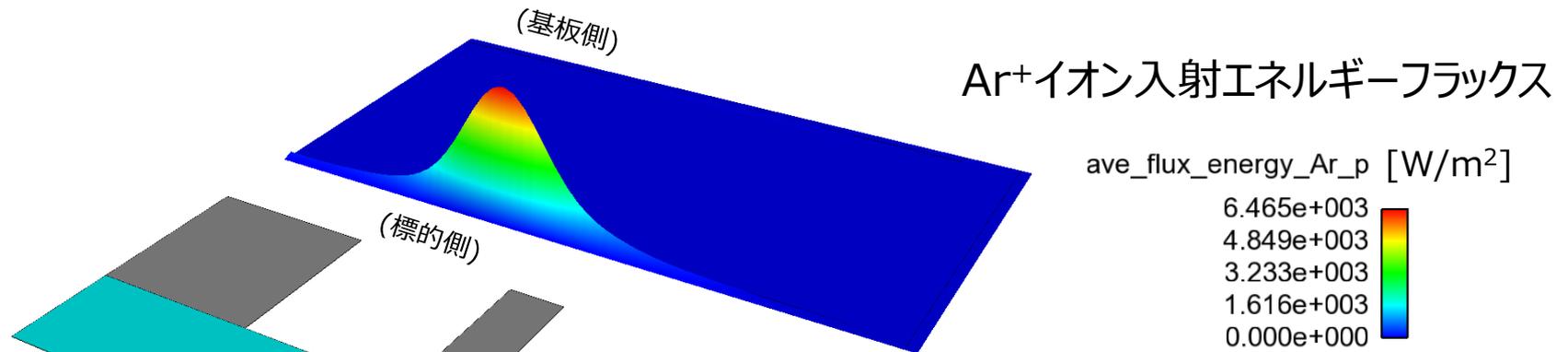
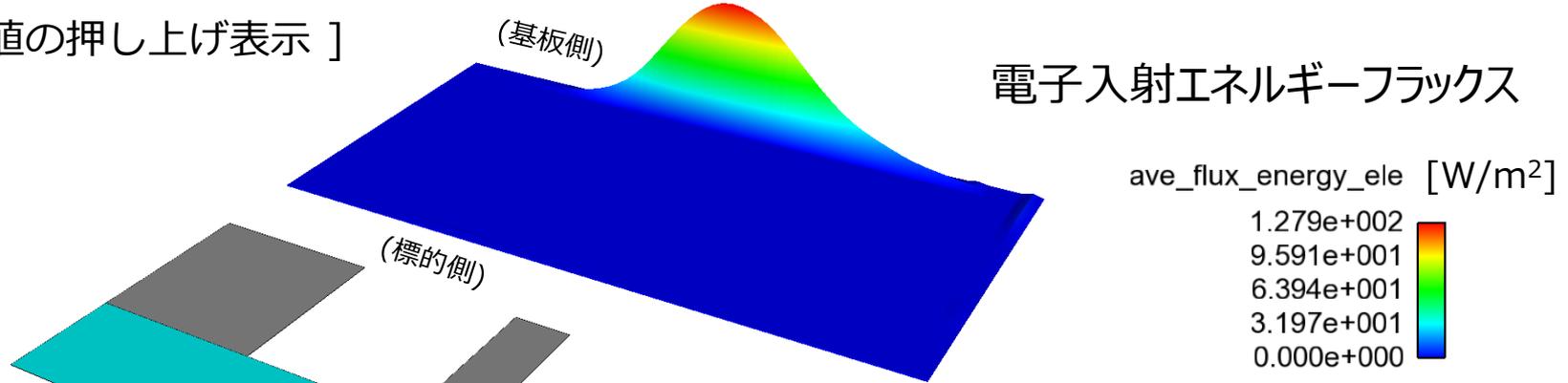
Ar<sup>+</sup>イオンエネルギー(1個あたり)



- ✓ エネルギーの高い電子は原料ガスを電離させることができる
- ✓ Ar<sup>+</sup>イオンは高いエネルギーで標的に衝突している

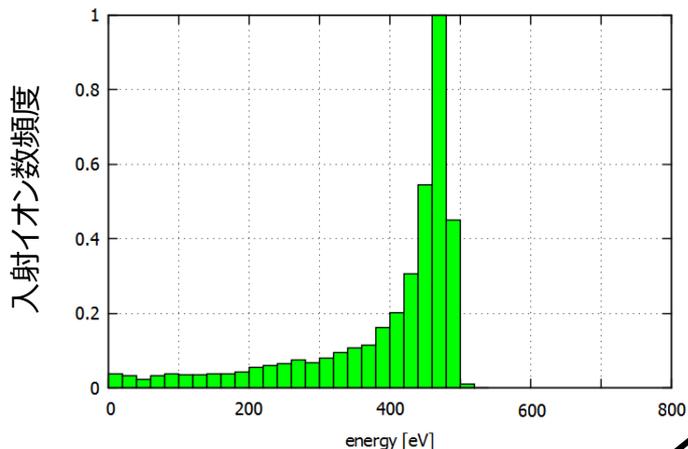
$$1 \text{ [eV]} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ [J]}$$

[ 値の押し上げ表示 ]



✓ Ar<sup>+</sup>イオンの入射エネルギーにより  
標的が激しくスパッタされる

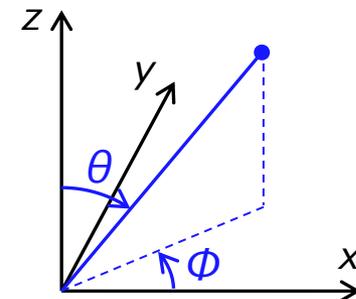
### 入射エネルギー頻度分布



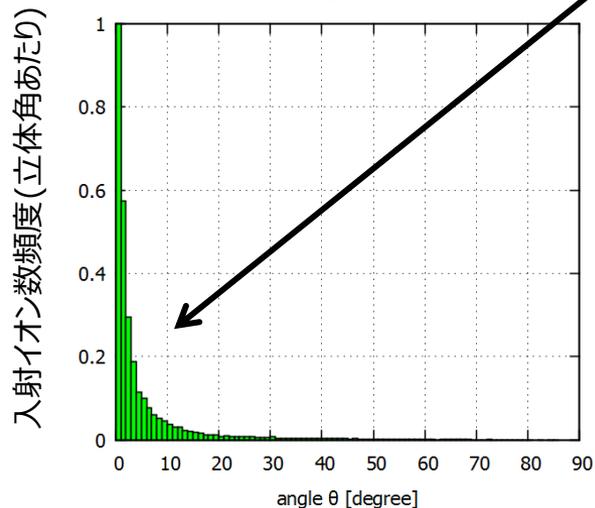
✓ **Ar<sup>+</sup>イオンの多くは垂直に入射**

### 入射角 $\theta$ と方位角 $\phi$ の定義

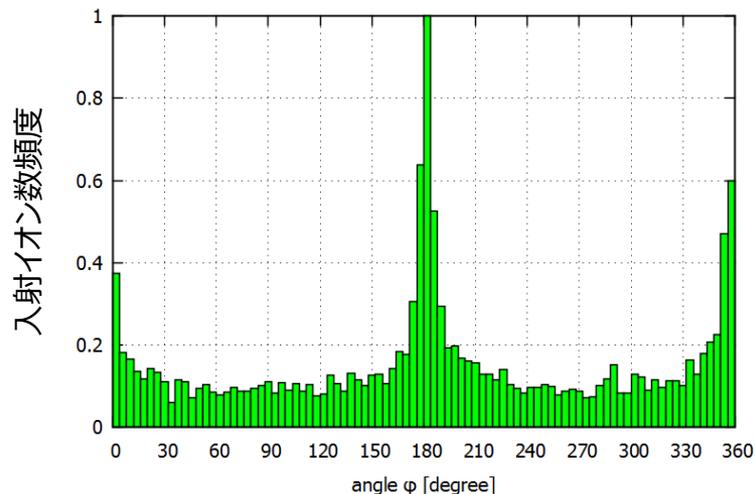
(表面法線)

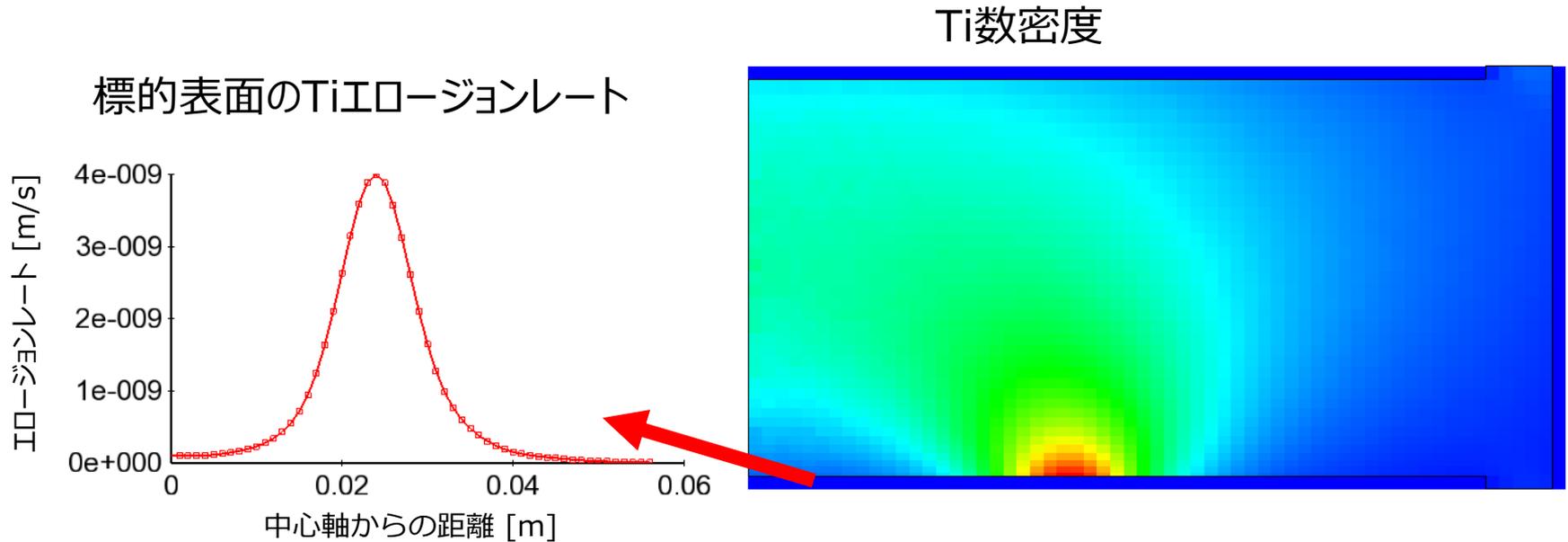


### 入射角( $\theta$ )頻度分布



### 方位角( $\phi$ )頻度分布



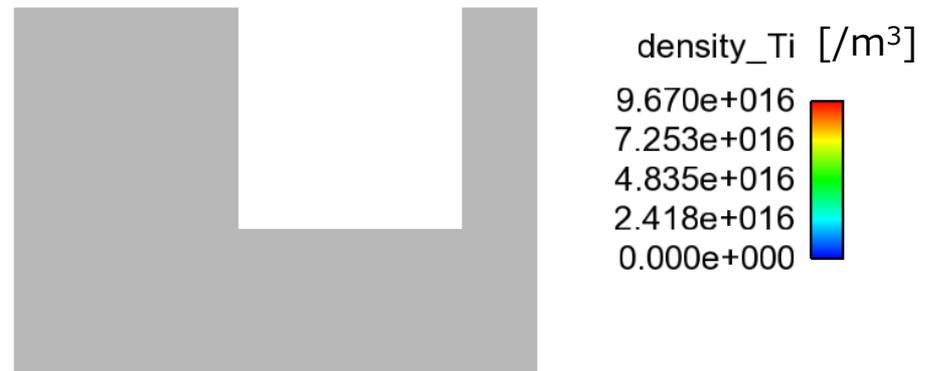


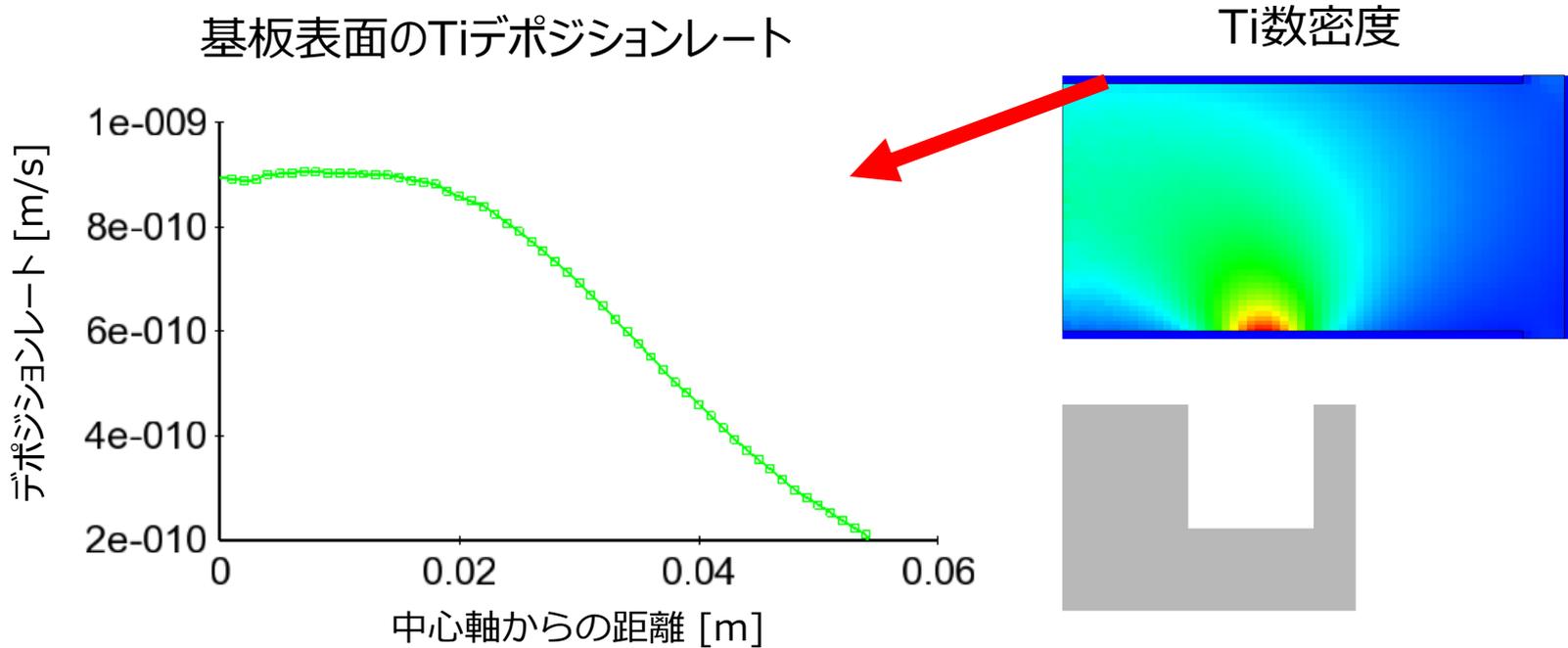
エロージョンやデポジションのレート  $R$  [m/s] の定義

$$R = \frac{\Gamma}{n_s}$$

$\Gamma$  : 表面での原子フラックス [/(m<sup>2</sup>s)]

$n_s$  : 固体中の原子濃度 [/m<sup>3</sup>]





- ✓ 標的から飛び出したTi原子は、原料ガスのArと衝突して拡散する
- ✓ 基板に到達したTi原子が堆積することで膜を形成する

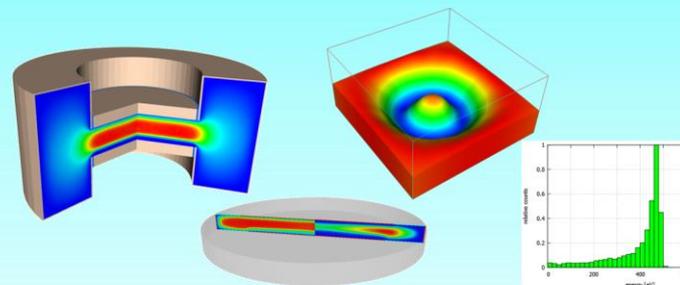
# 関連項目 (Webリンク)

## ➤ 連絡先・お問い合わせ



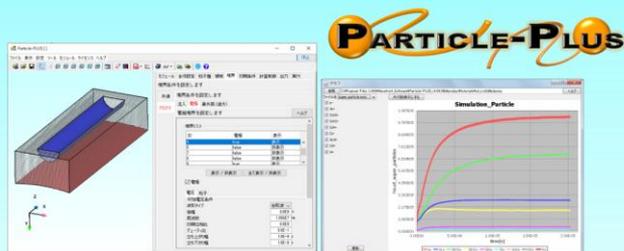
<https://www.wavefront.co.jp/inquiry.html>

## ➤ 他の計算事例



<https://www.wavefront.co.jp/CAE/particle-plus/example.html>

## ➤ プラズマシミュレーション ソフトウェア機能紹介



<https://www.wavefront.co.jp/CAE/particle-plus/detail.html>

## ➤ 技術コラム



<https://www.wavefront.co.jp/CAE/particle-plus/column.html>