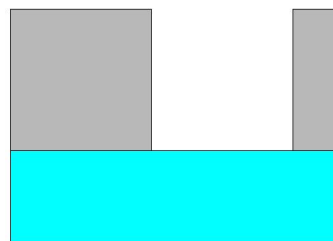
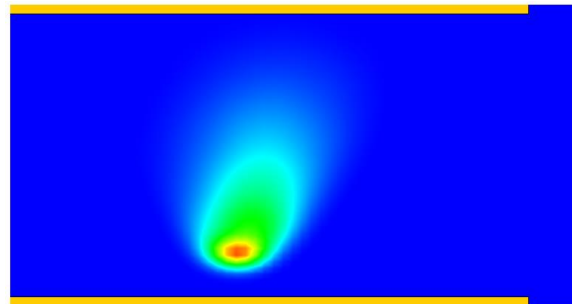
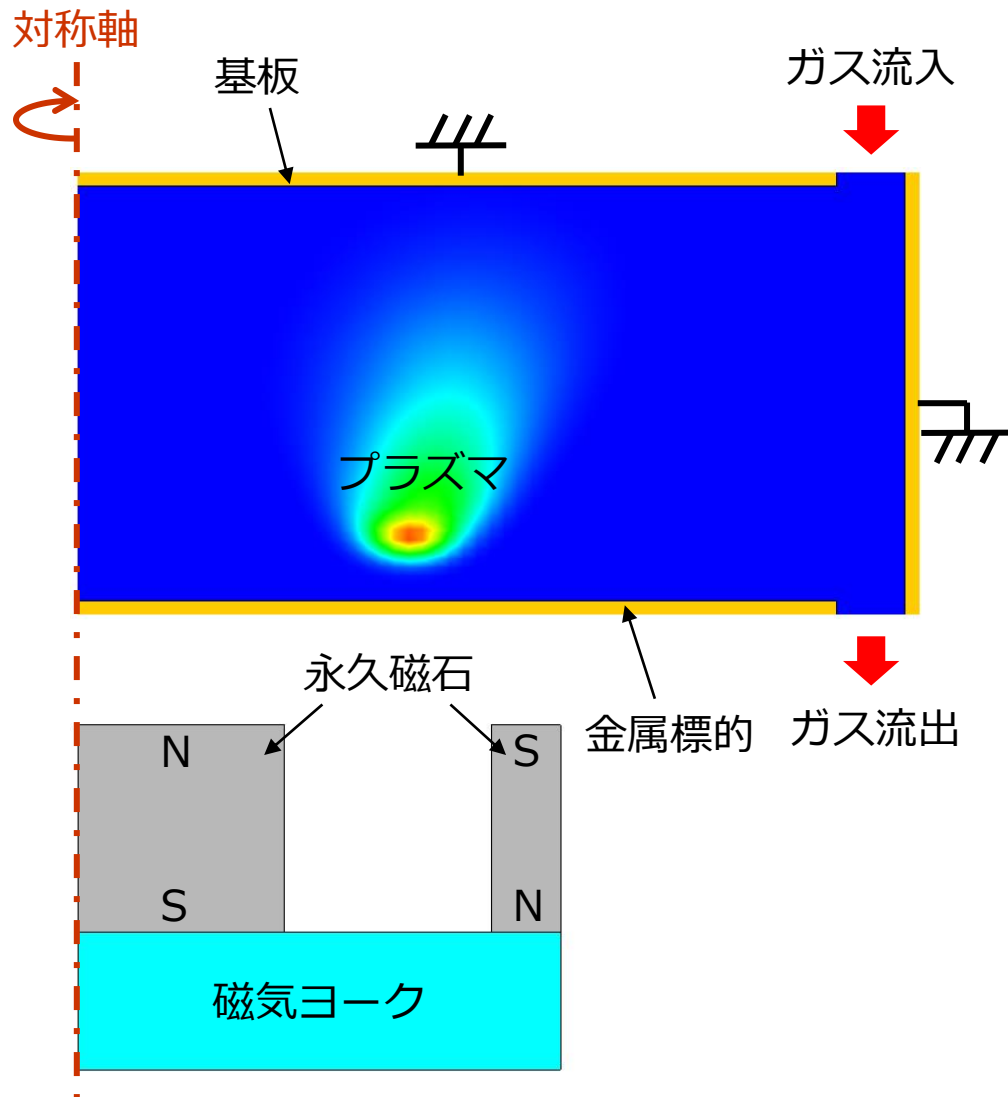


Particle-PLUS計算事例

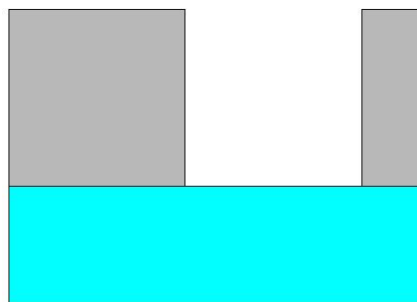
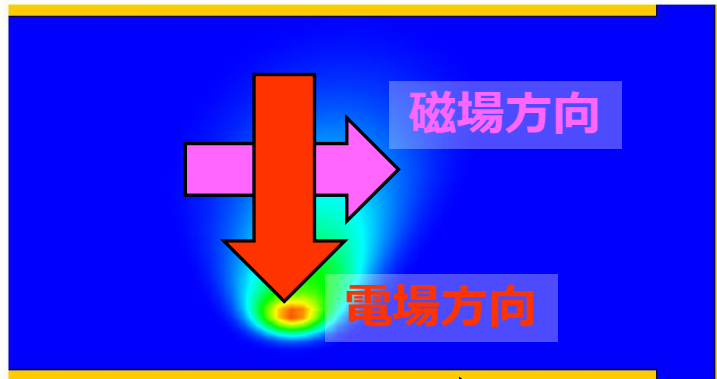
DCマグネトロンスパッタリング





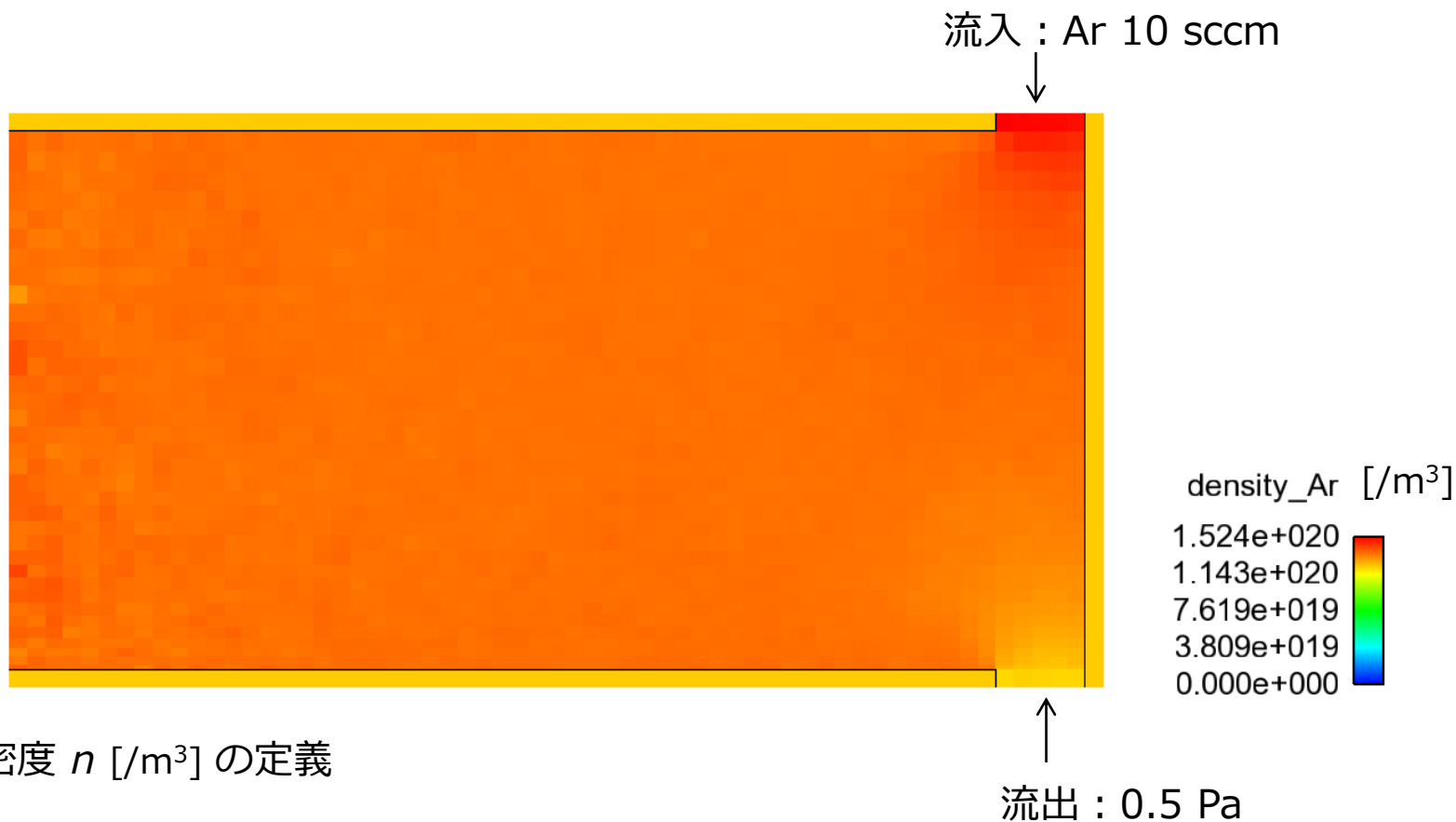
軸対称モデル

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	



標的

- ✓ 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**)



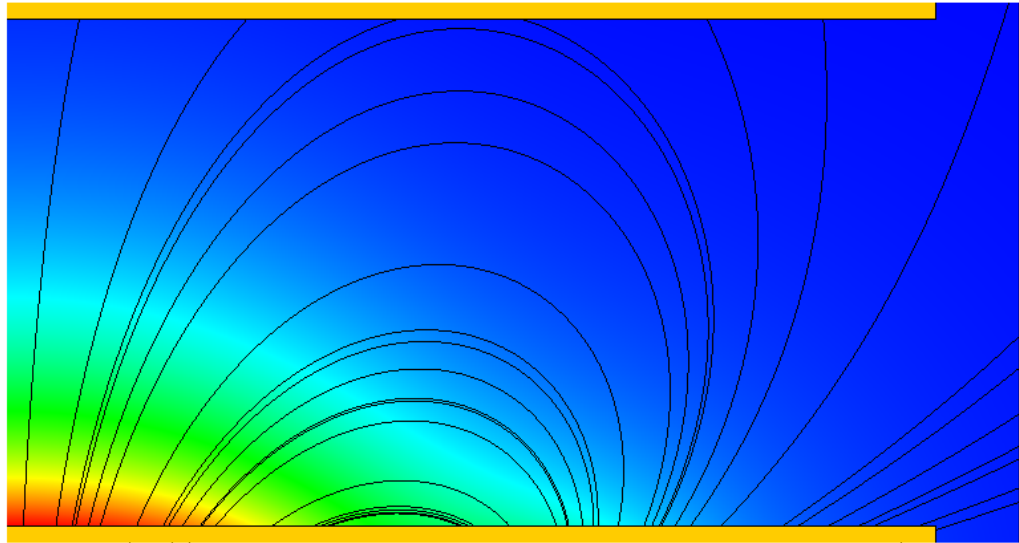
数密度 n [/m³] の定義

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

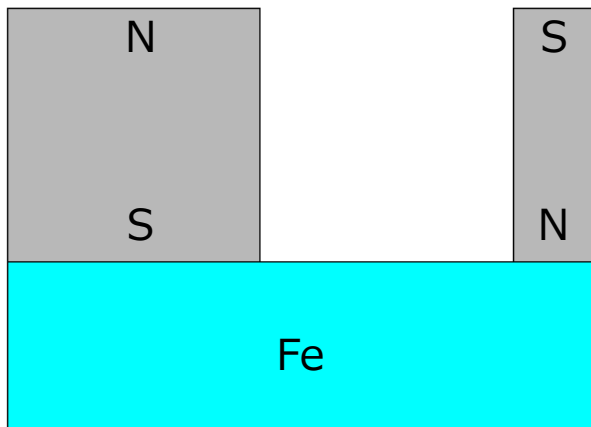
N : ある空間領域 (ここではセル1つ)
内に含まれる数

V : その領域の体積 [m³]

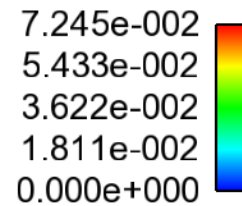
0.5 [Pa] \div 数密度1.2E20 [/m³] (300K)



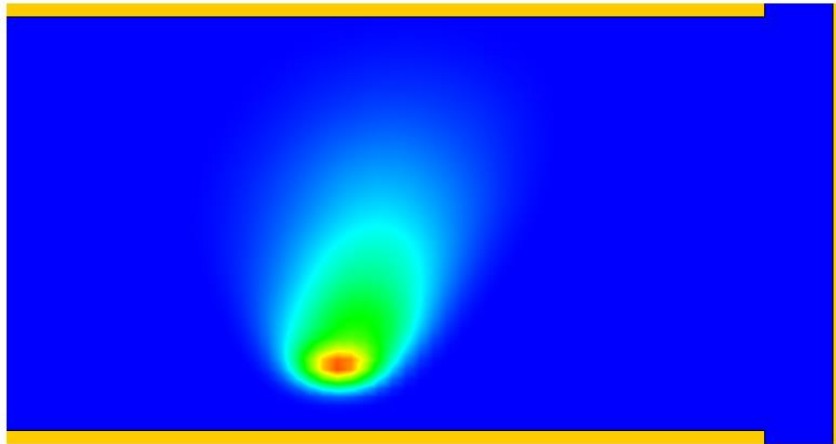
色 : 磁束密度ベクトルの大きさ
黒線 : 磁束密度ベクトルの流線



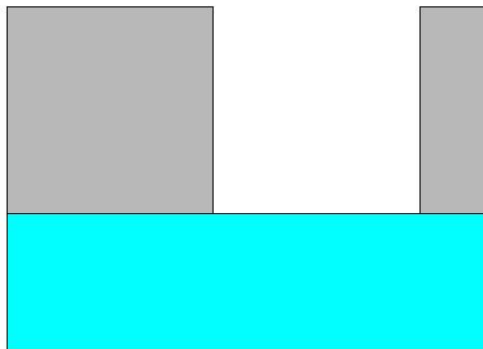
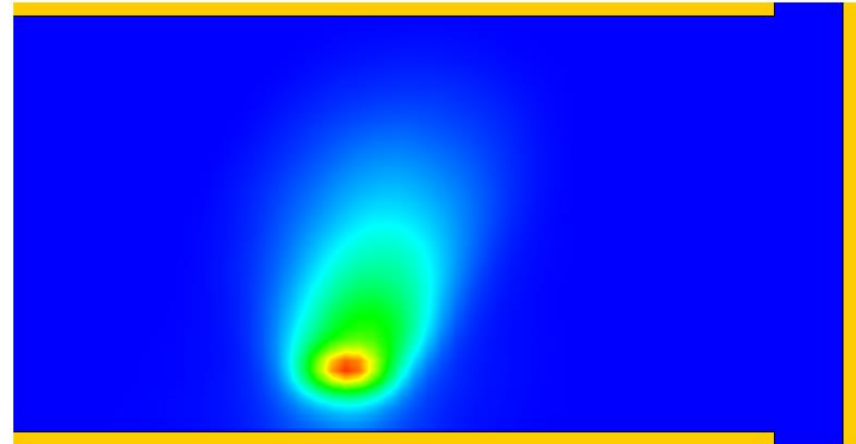
magnetic_field [T] ($=[\text{Wb}/\text{m}^2]$)



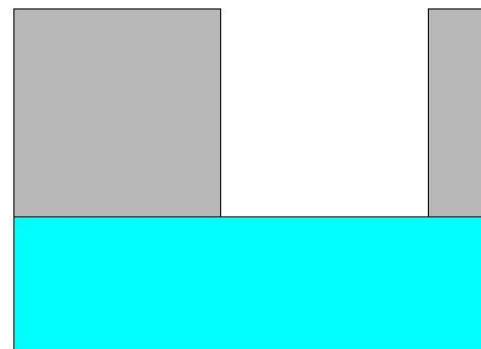
電子数密度



Ar⁺イオン数密度



ave_density_ele [/m³]
1.887e+016
1.415e+016
9.435e+015
4.718e+015
0.000e+000

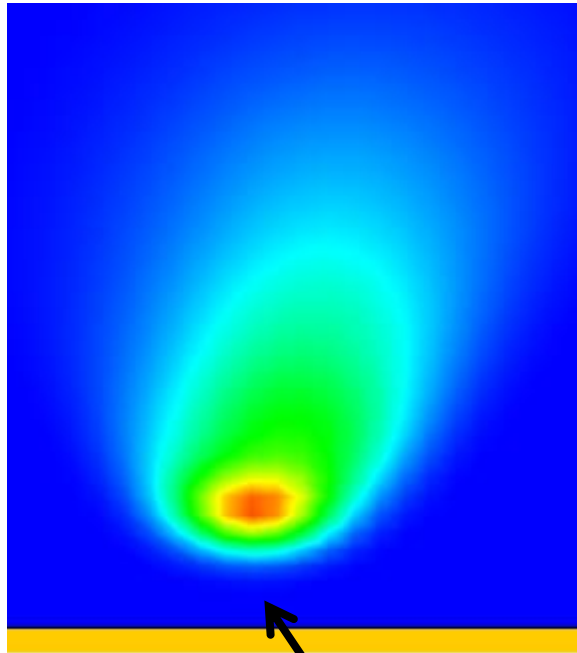


ave_density_Ar_p [/m³]
1.866e+016
1.400e+016
9.331e+015
4.665e+015
0.000e+000

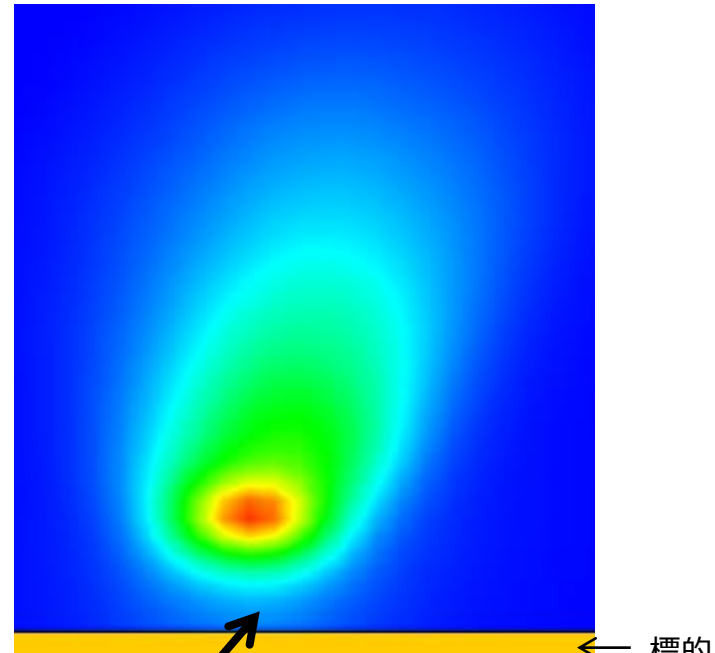


- ✓ 電子が磁場に補足されている様子が伺える
- ✓ Ar⁺イオンは電子に似た分布をとる

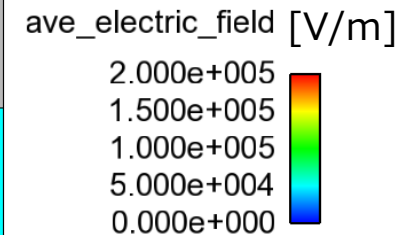
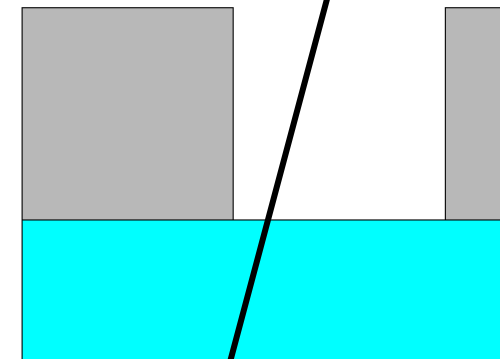
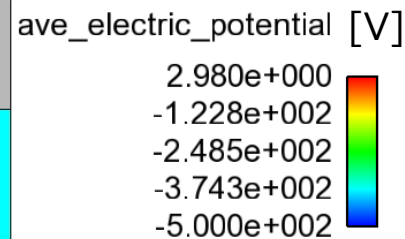
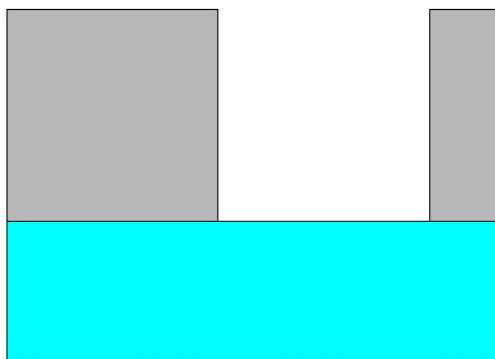
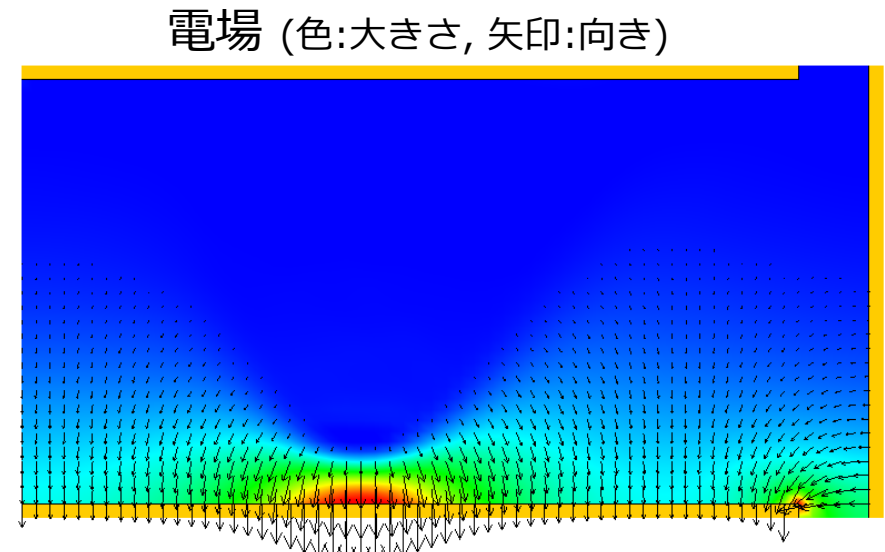
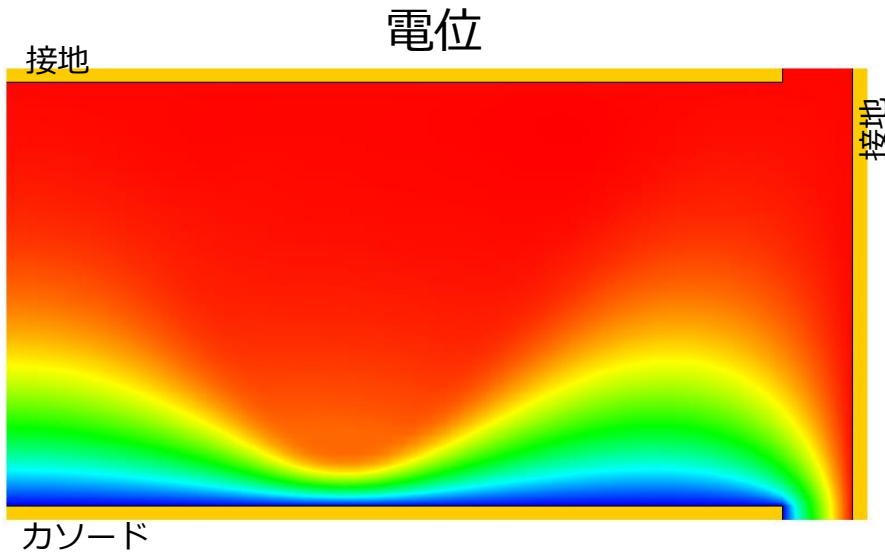
[拡大図] 電子数密度



Ar⁺イオン数密度

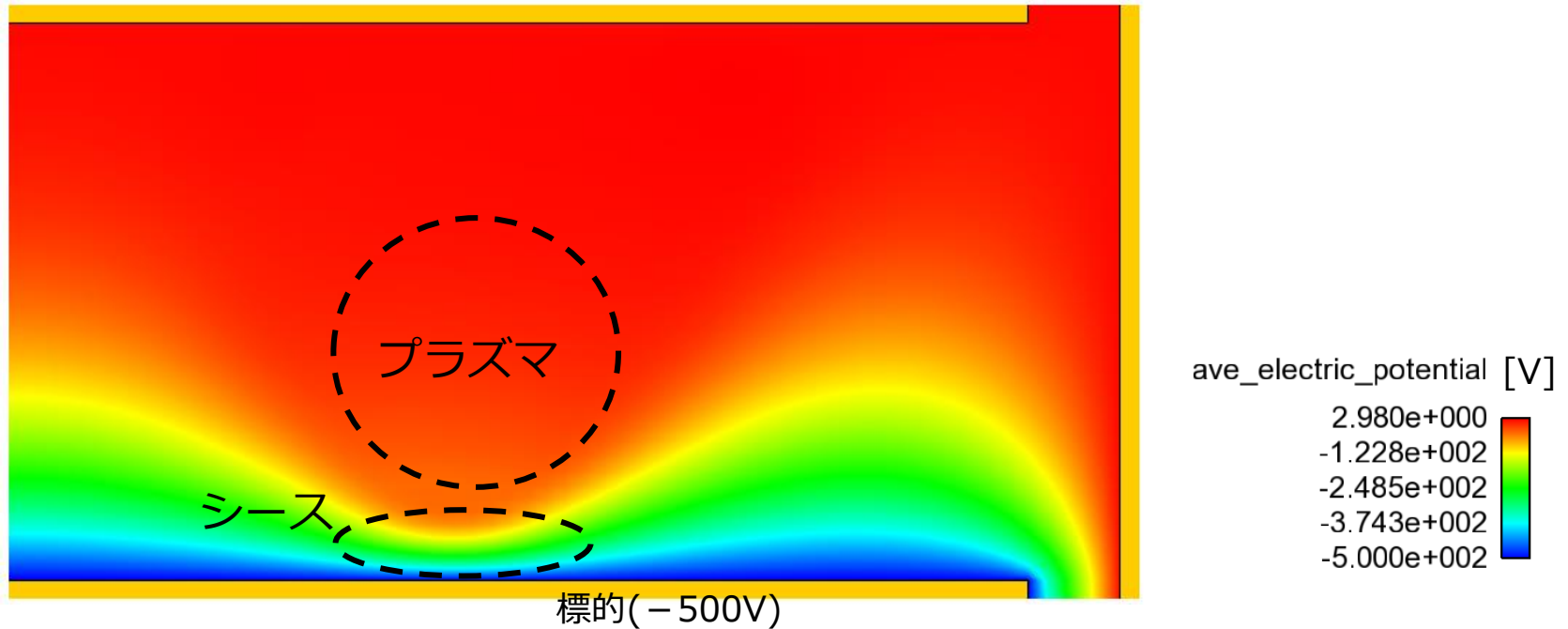


- ✓ 表面付近では電子よりもAr⁺イオンが多い (イオンシース)

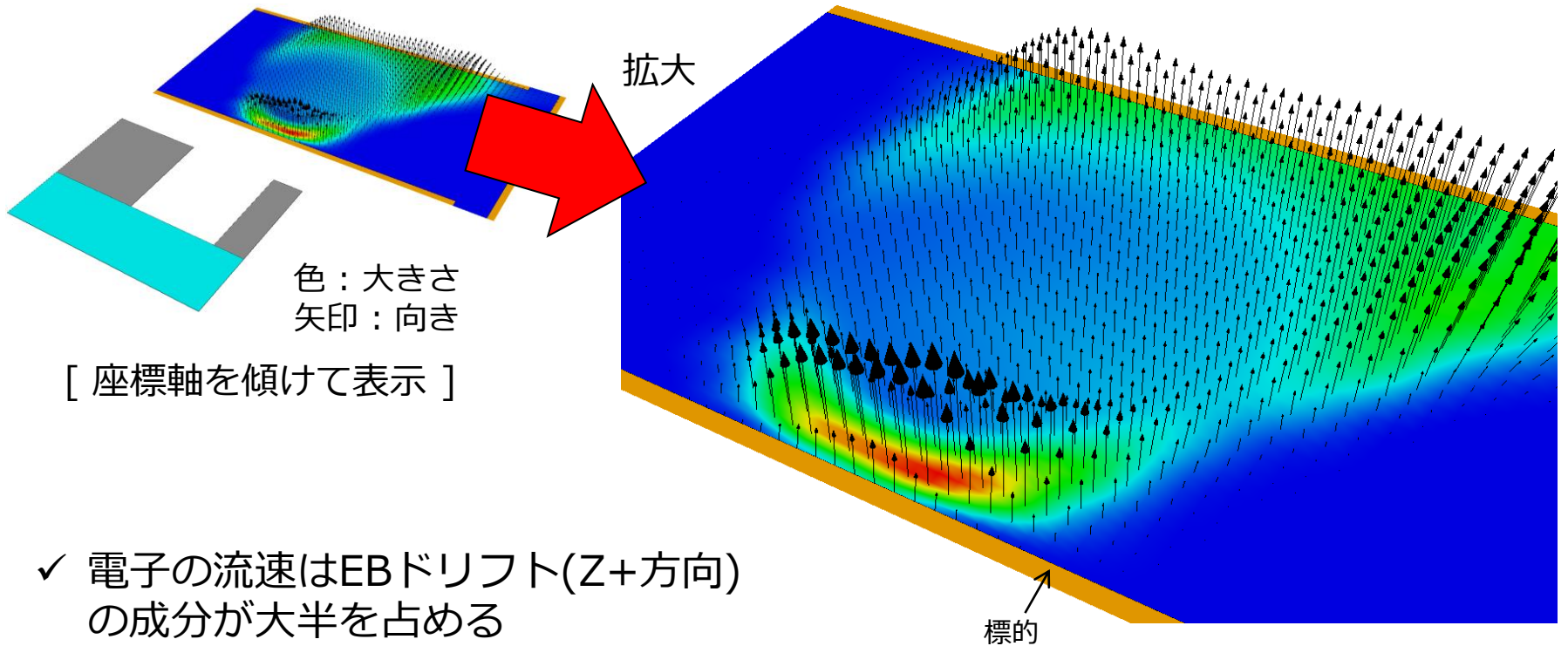


強いシース電場

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⁺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

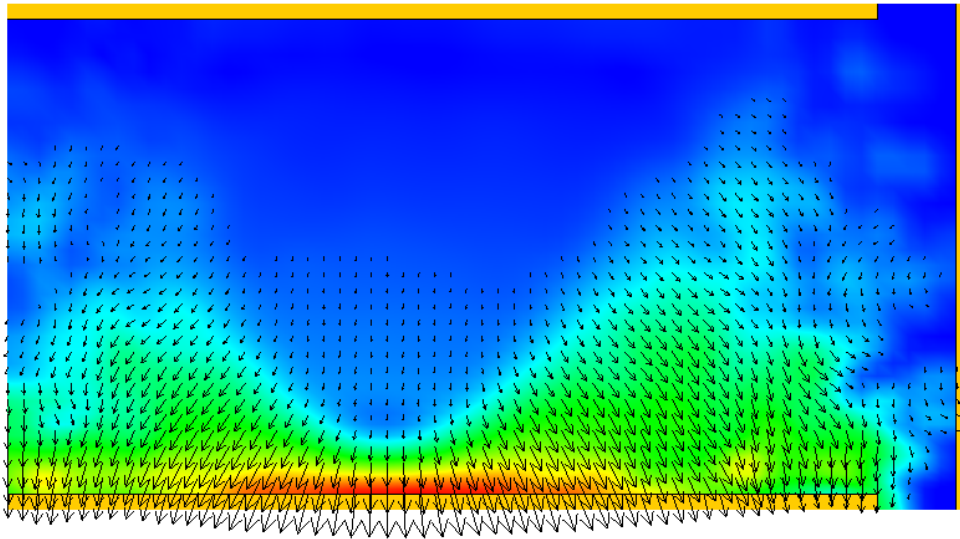


ave_velocity_ele [m/s]

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
 $E/B \doteq (2.0 \times 10^5 [\text{V/m}]) / (0.07 [\text{T}]) = 2.8 \times 10^6 [\text{m/s}]$

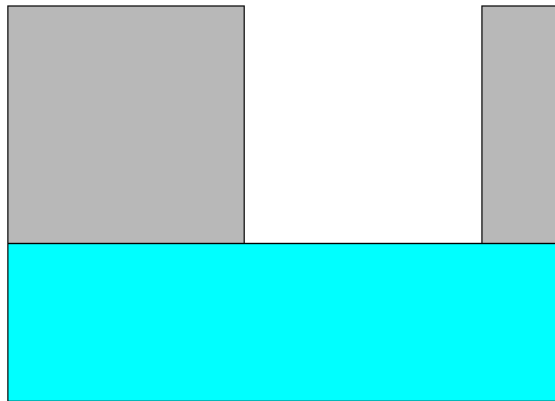


- ✓ Ar⁺イオンは重いため速度が小さく、ほぼ電場の向きに沿って移動する

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]

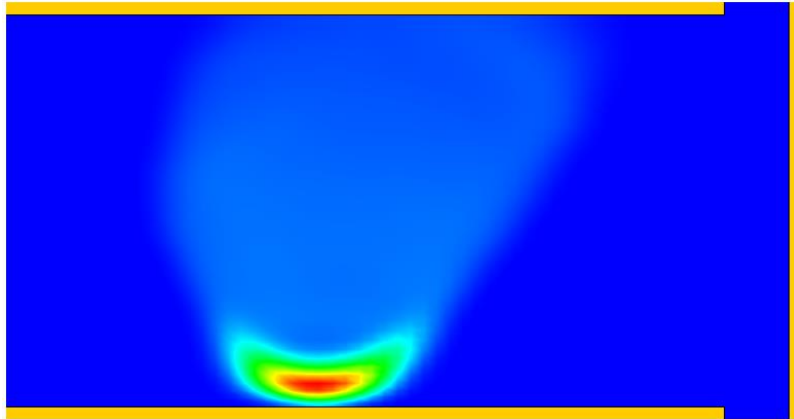
3.489e+004
2.617e+004
1.744e+004
8.722e+003
0.000e+000



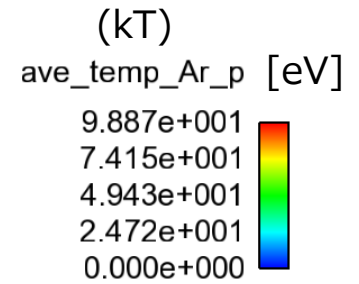
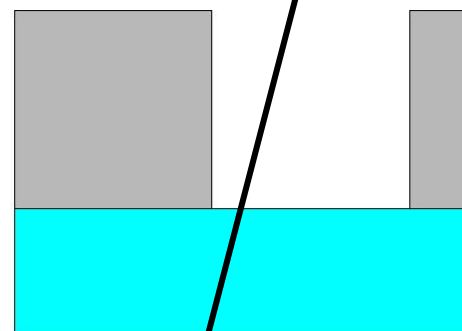
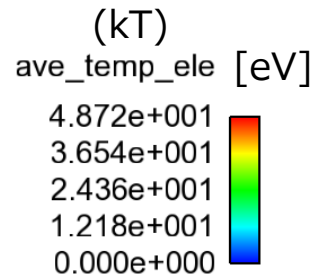
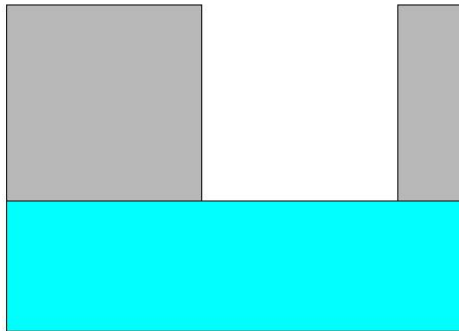
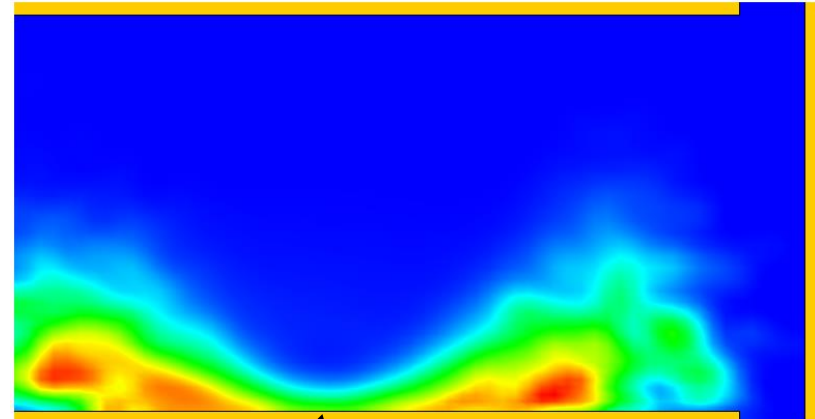
プラズマの温度*

* 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



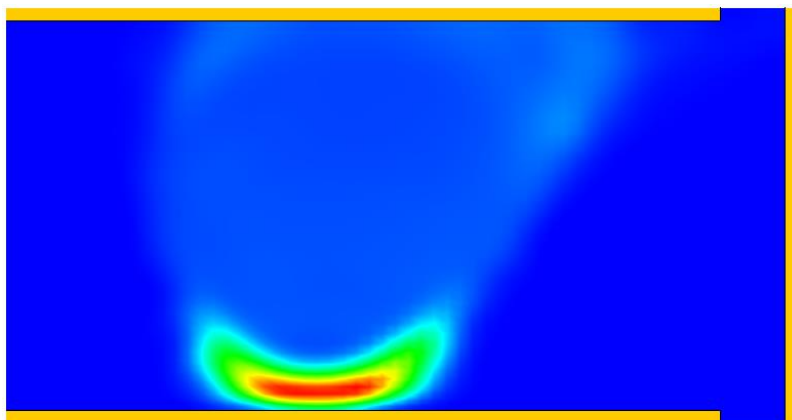
Ar⁺イオン温度



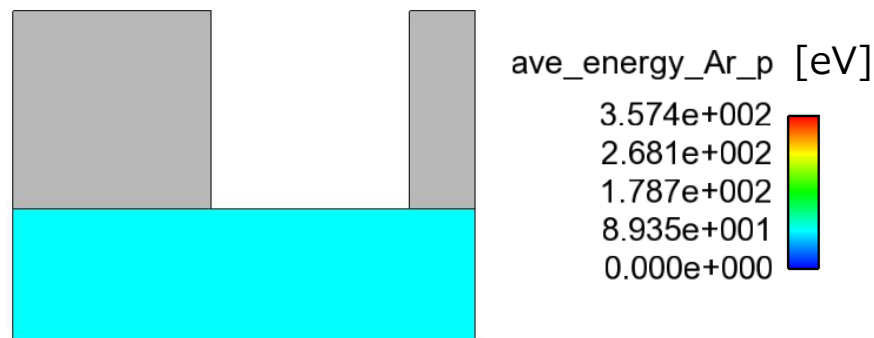
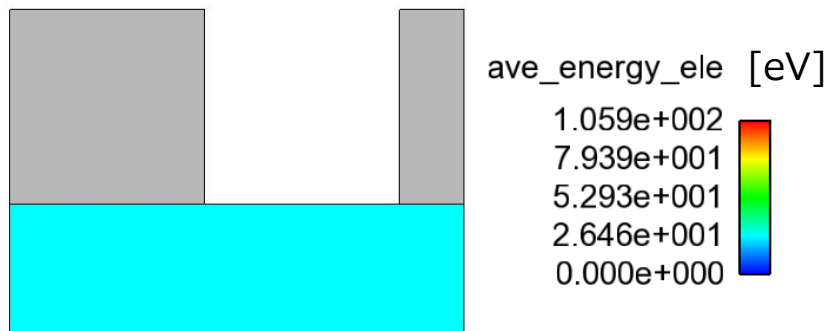
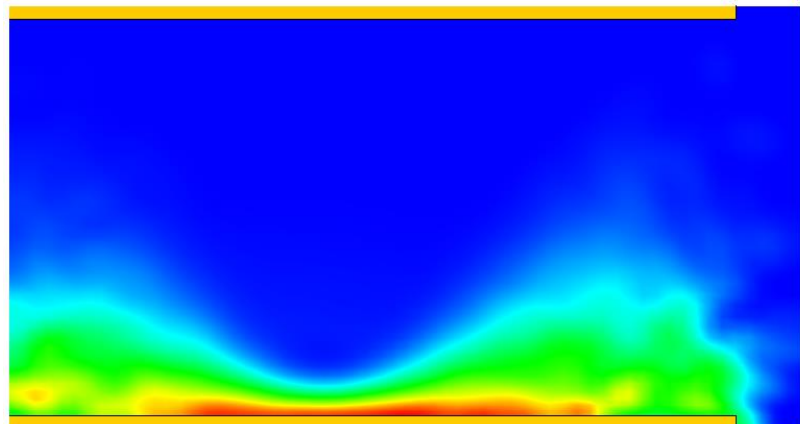
標的に入射するAr⁺イオンの温度は低い
(速度が揃っている)

1 [eV] ≒ 11600 [K]

電子エネルギー(1個あたり)



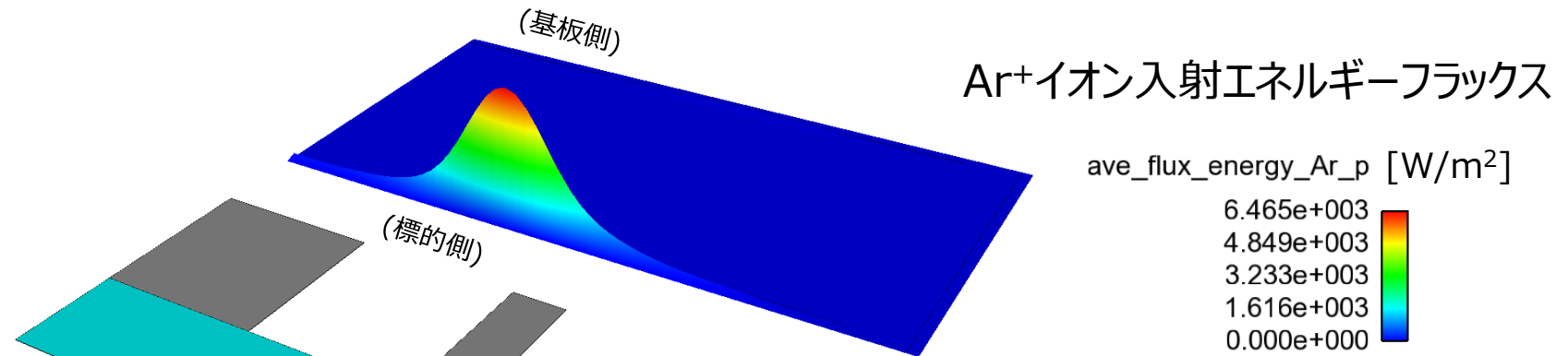
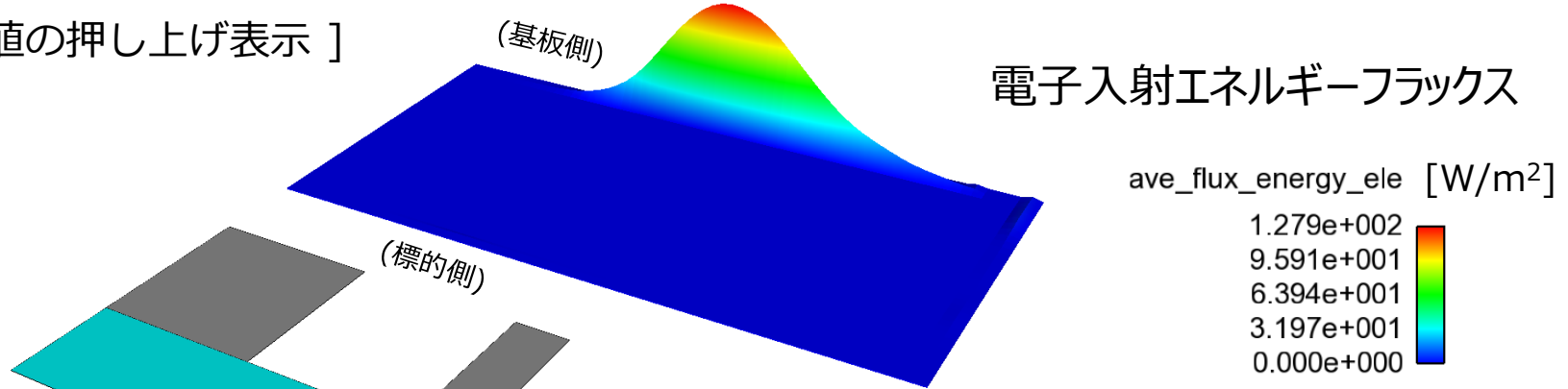
Ar⁺イオンエネルギー(1個あたり)



- ✓ 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⁺イオンは高いエネルギーで標的に衝突している

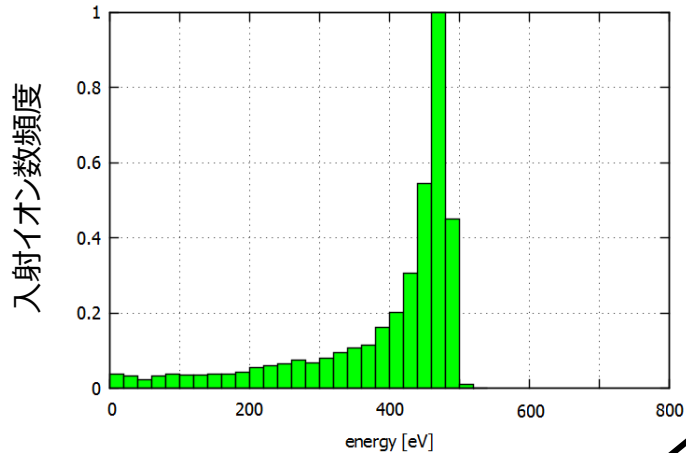
$$1 \text{ [eV]} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ [J]}$$

[値の押し上げ表示]



✓ Ar⁺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

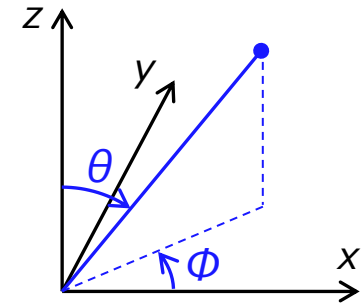
入射エネルギー頻度分布



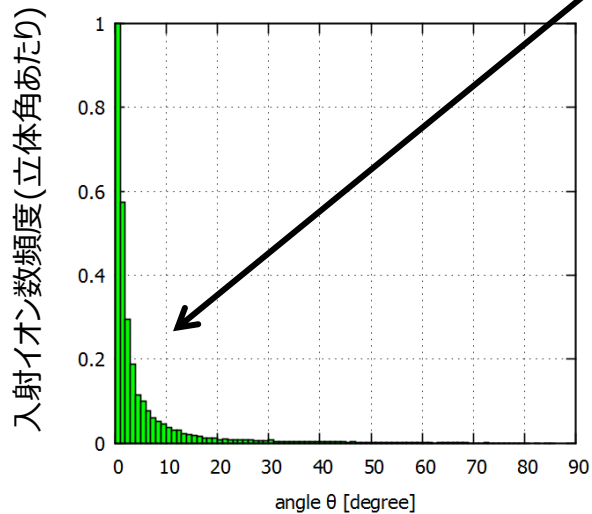
✓ **Ar⁺イオンの多くは垂直に入射**

入射角 θ と方位角 ϕ の定義

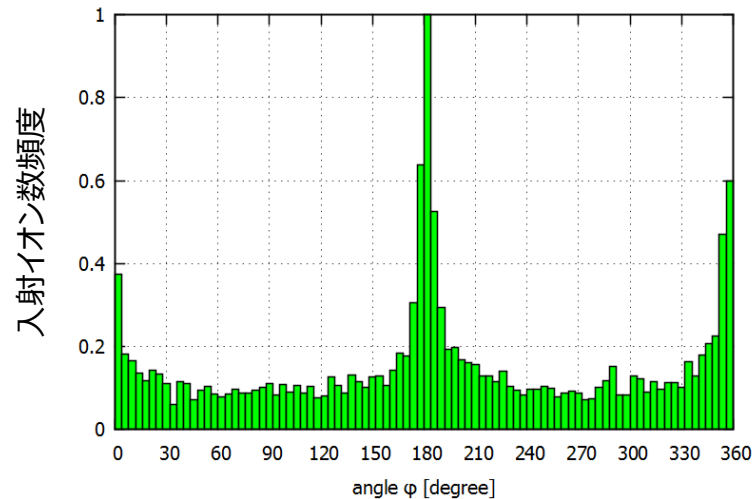
(表面法線)

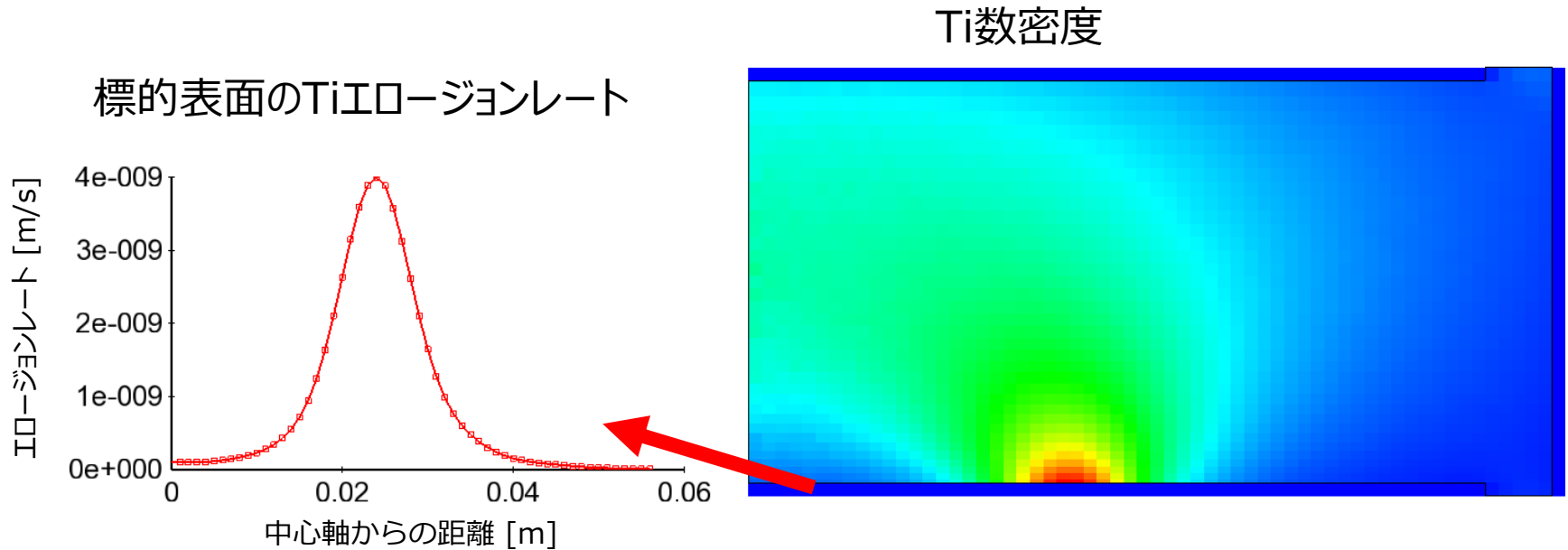


入射角(θ)頻度分布



方位角(ϕ)頻度分布



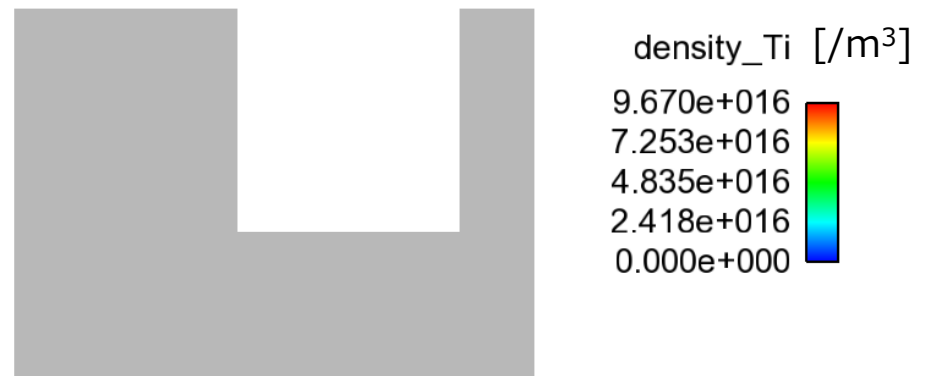


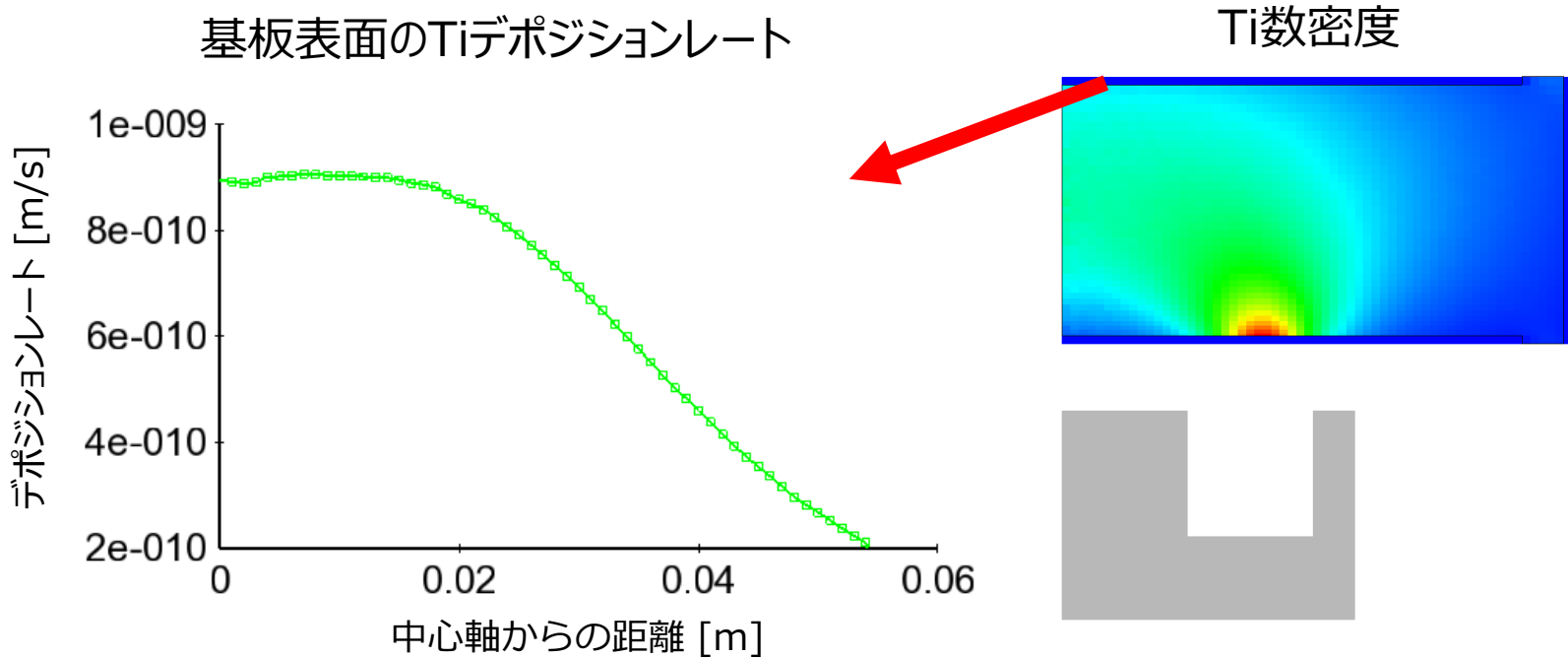
エロージョンやデポジションのレート R [m/s] の定義

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

Γ : 表面での原子フラックス [/(m²s)]

n_s : 固体中の原子濃度 [/m³]

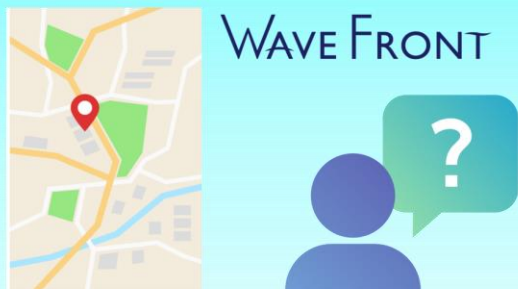




- ✓ 標的から飛び出したTi原子は、原料ガスのArと衝突して拡散する
- ✓ 基板に到達したTi原子が堆積することで膜を形成する

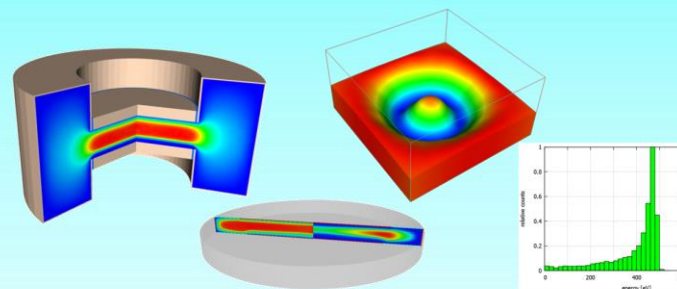
関連項目 (Webリンク)

➤ 連絡先・お問い合わせ



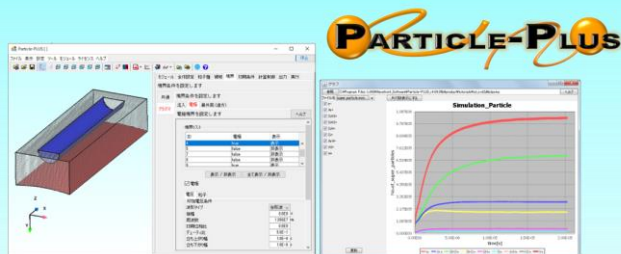
<https://www.wavefront.co.jp/inquiry.html>

➤ 他の計算事例



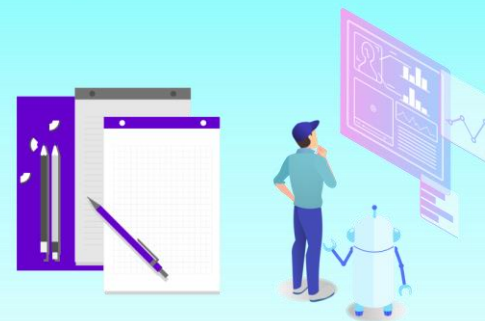
<https://www.wavefront.co.jp/CAE/particle-plus/example.html>

➤ 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>