

次世代超伝導加速空洞のための Nb₃Snを用いた積層薄膜構造成膜の研究

東北大学修士2年
素粒子実験（加速器）
佐々木大成

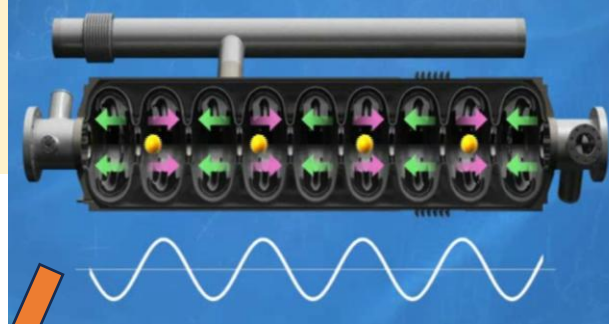
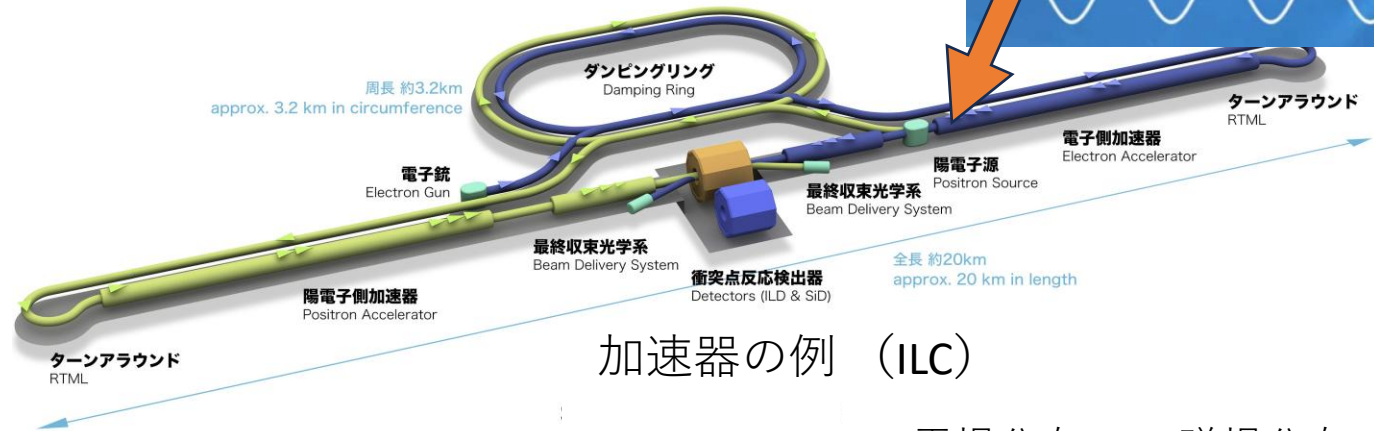
修士論文審査会
2026年2月3日

1. 研究背景
2. 成膜の再現シミュレーション
 - 平板成膜実験の再現
 - 空洞成膜実験の再現
3. Nb/Sn混合カソード開発
 - カソード設計
 - 成膜試験
4. シミュレーションを用いたNb/Sn混合カソードの最適化
5. 結論と今後の展望

加速器…国際リニアコライダー (ILC) 3

〈ILCの概要〉

- 電子・陽電子直線衝突型加速器
- $\sqrt{s} = 250 \text{ GeV}$ (91.2~1000)
- 全長約20km
- 低バックグラウンドでのヒッグスボソンの詳細な研究が目的

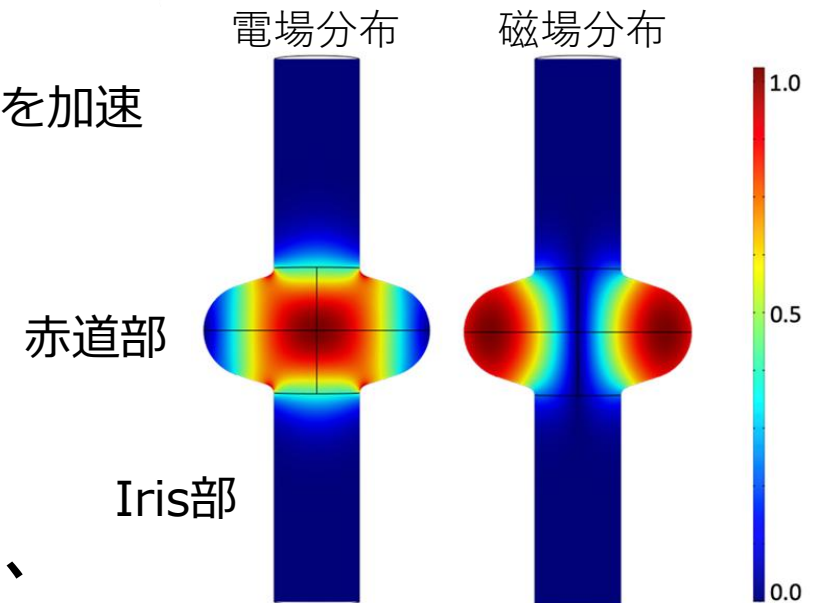


~加速器の基礎知識~

- マイクロ波を超伝導加速空洞内に励起し、電場成分を用いて荷電粒子を加速
超伝導により連続運転が可能
- 現在、超伝導加速空洞としてはNb製空洞が世界中で主流

〈Nb製空洞の性能〉

- 最大加速勾配 $E_{acc,max}$: $\sim 45 \text{ MV/m}$
- **積層薄膜構造(Nb₃Sn)**は理論値が $E_{acc,max} \approx 90 \text{ MV/m}$ であり、**最大加速勾配の向上が見込まれる。**



TESLA空洞内の電磁場分布¹

1. S. Posen, et al. "High-quality-factor superconducting cavities in tesla-scale magnetic fields for dark matter searches", Physical Review Applied, 20(3):034004, 2023.

積層薄膜構造

E_{acc} : 加速勾配 [MV/m]

H_0 : 表面磁場の振幅

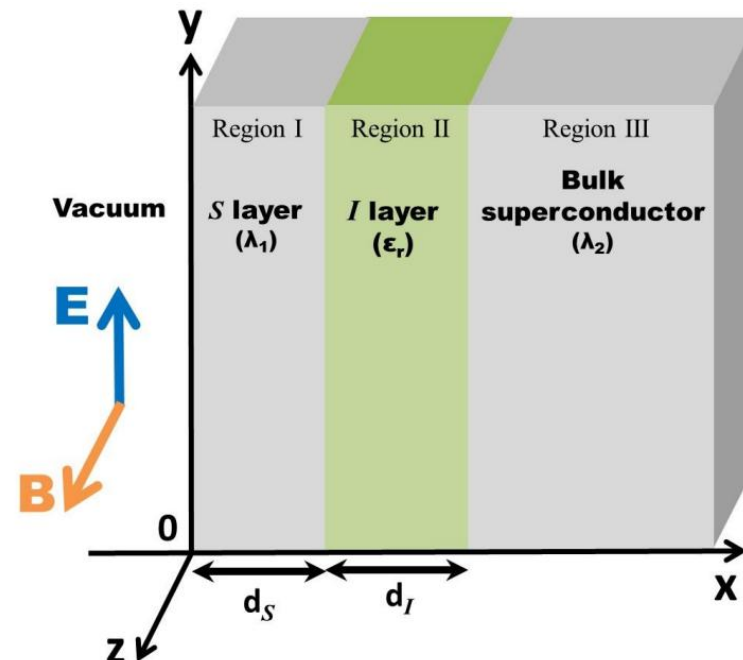
※ g : 空洞形状に由来する定数

$$\mu_0 H_0 = g E_{acc}$$

- 空洞表面における磁場の大きさが加速勾配に直結する



- 磁場を大きくしていくと超伝導体に渦糸(常伝導領域を伴う磁束)が侵入し始める。磁場が振動する時に渦糸も振動し、マイスナー状態の安定性が失われる。



積層薄膜構造の模式図²

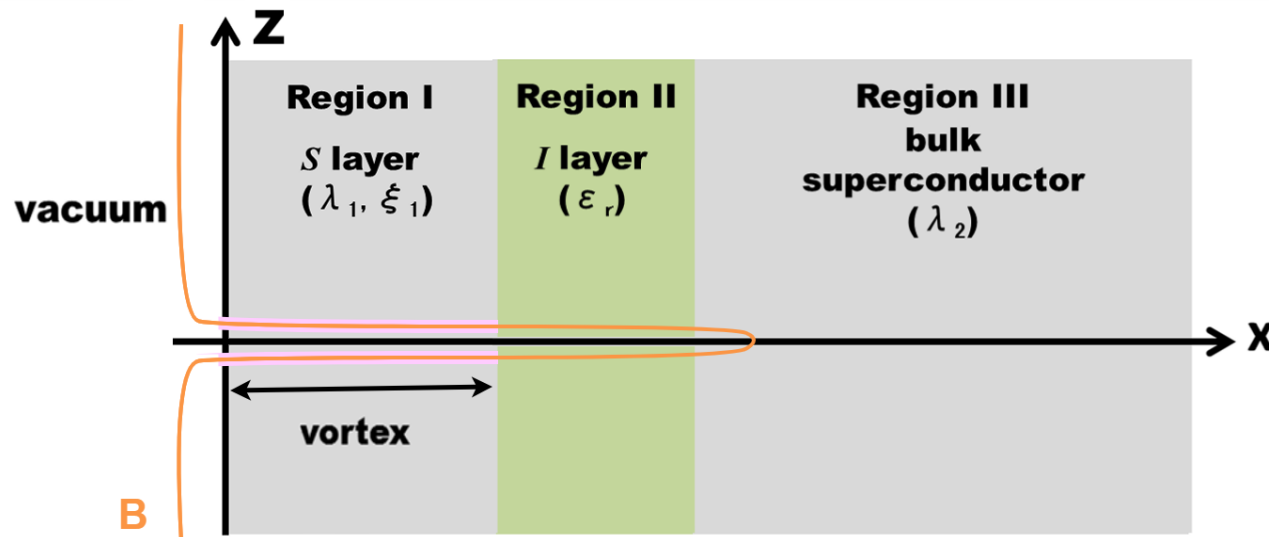
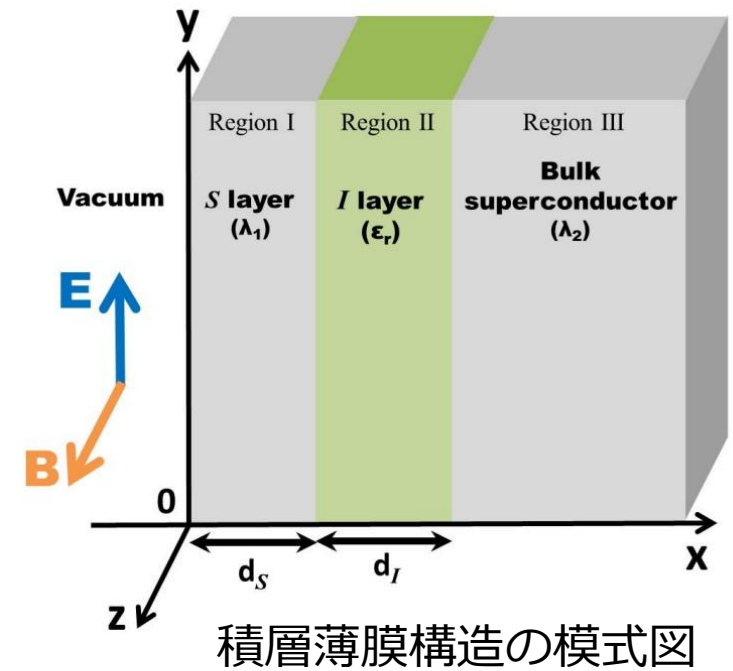
磁束侵入開始磁場…超伝導空洞の最大加速電場に対応する表面磁場の強さ

積層薄膜構造 : 積層することで磁束侵入開始磁場を向上させる構造

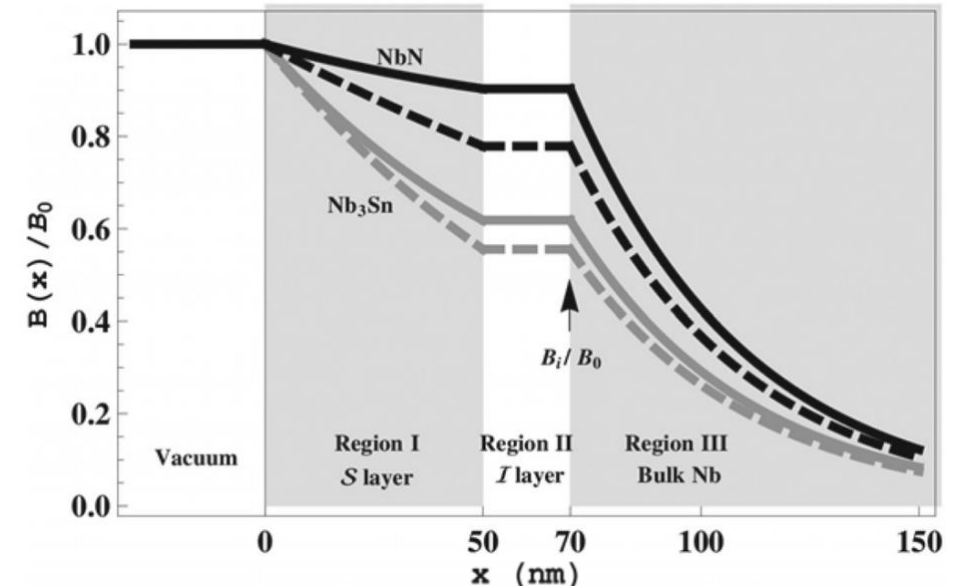
〈材料〉	
超伝導体層	: Nb ₃ Sn, NbN
絶縁体層	: Al ₂ O ₃ , SiO ₂
バルク	: Nb

積層薄膜構造

- 積層薄膜構造：積層することで磁束侵入開始磁場を向上させる構造
 - 表面のS層での遮蔽電流が抑制され、空洞表面での渦糸の生成を抑える。
 - 仮に渦糸が生成されても絶縁体層の存在によって、表層で発生した渦糸の全長が d_S 程度(～数百nm)に抑えられる。
 - 超伝導体バルク表面で改めて渦糸が生成されない限り、バルク内に渦糸は侵入しない。



積層薄膜構造における磁束侵入の様子



積層薄膜構造における磁場減衰の様子³

積層薄膜構造の成膜手法(KEK)

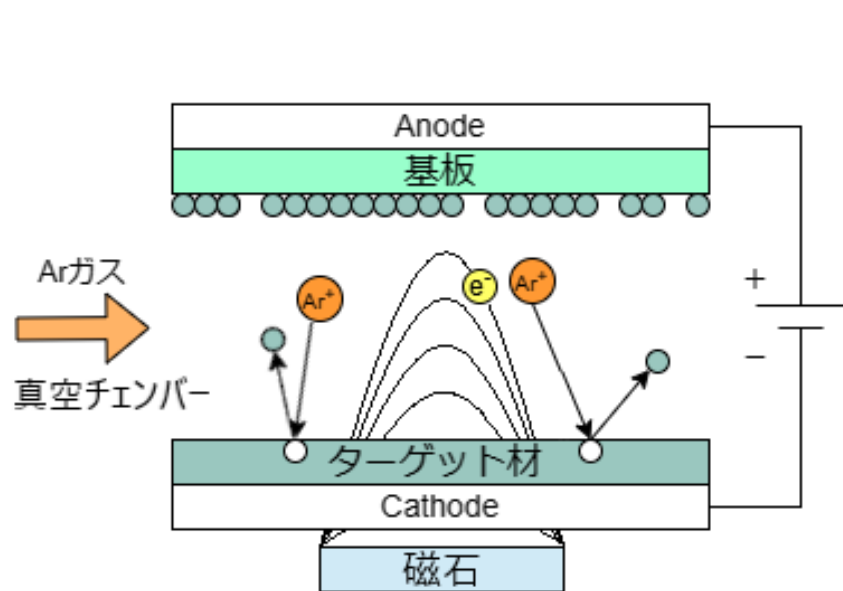
- マグネトロンDCスパッタリングを用いる。磁場を用いて効率的にスパッタリングを行う。

〈平板への成膜手法〉

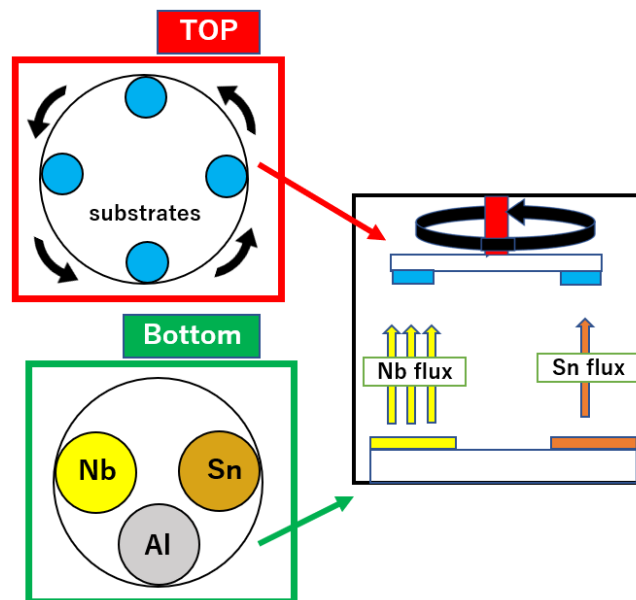
- 異なる種類の金属を同時にスパッタリング可能。

〈空洞への成膜手法〉

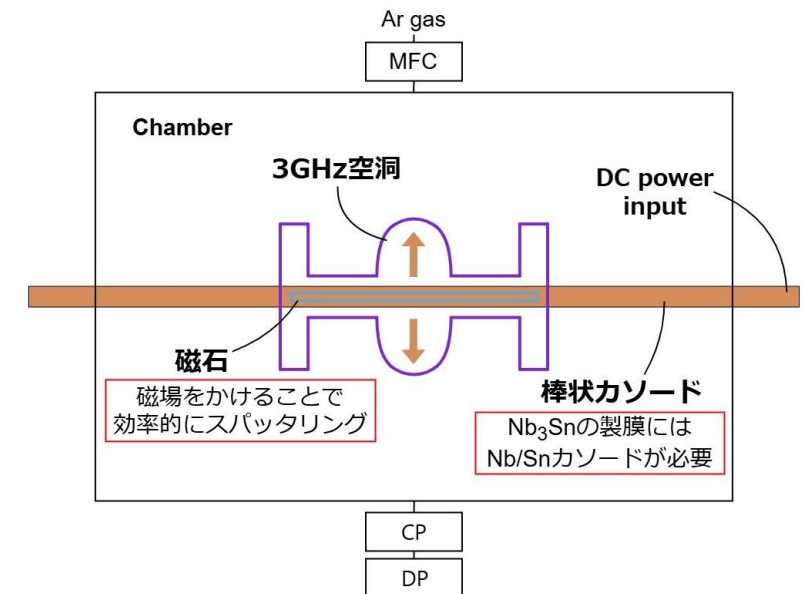
- 空洞は最速5rpmで回転する仕組みになっており、 Φ 方向で均一な膜分布が得られる。
- Nb_3Sn 成膜には単一素材のカソードのみでは不可能。NbとSnを同時成膜出来るようなカソードが必要。



マグネトロンDCスパッタリングの模式図



平板成膜装置の模式図



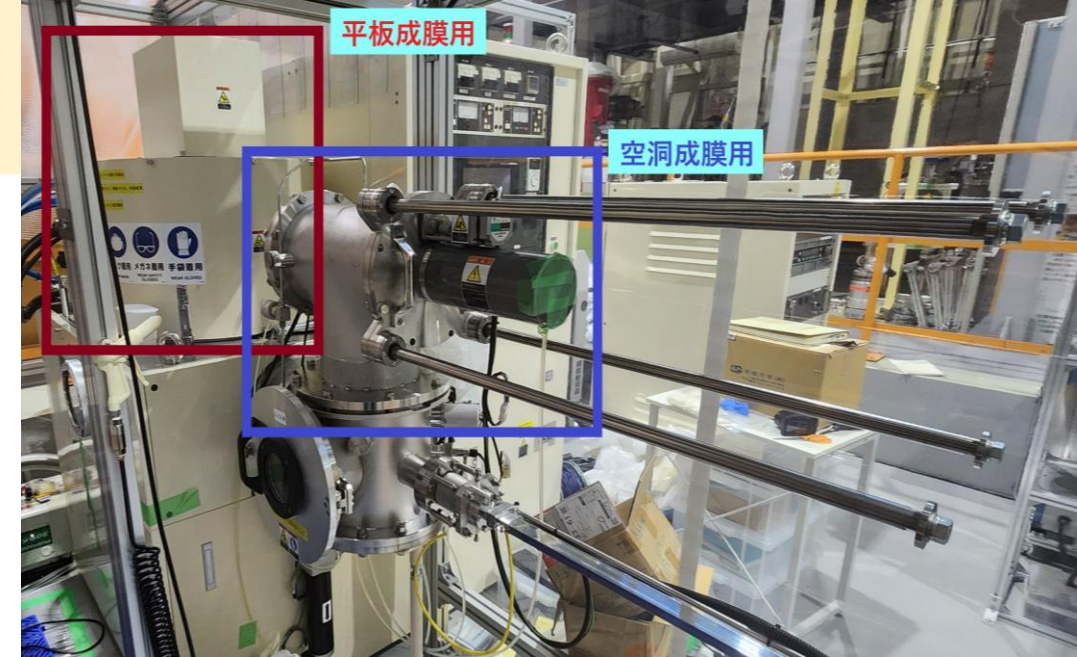
空洞成膜装置の模式図

先行研究と課題提起

7

〈先行研究〉

- NbN-SiO₂-Nbサンプル(平板)の磁束侵入開始磁場の評価
 - 積層薄膜構造によって**磁束侵入開始磁場が向上**
- 平板試料に対するNb₃Snスパッタリングと転移温度測定
 - T_c~16Kを超える**Nb₃Snが平板上で成膜可能**
- 空洞に対するNbスパッタリング
 - 単一素材のカソードにおいて、**空洞内面へのスパッタリングが可能**

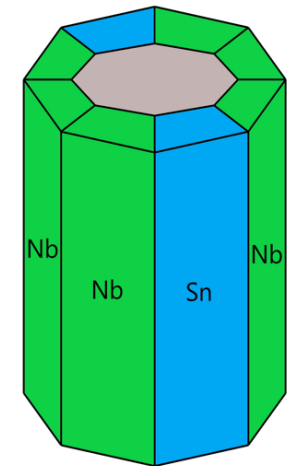


KEKの成膜装置



〈課題〉

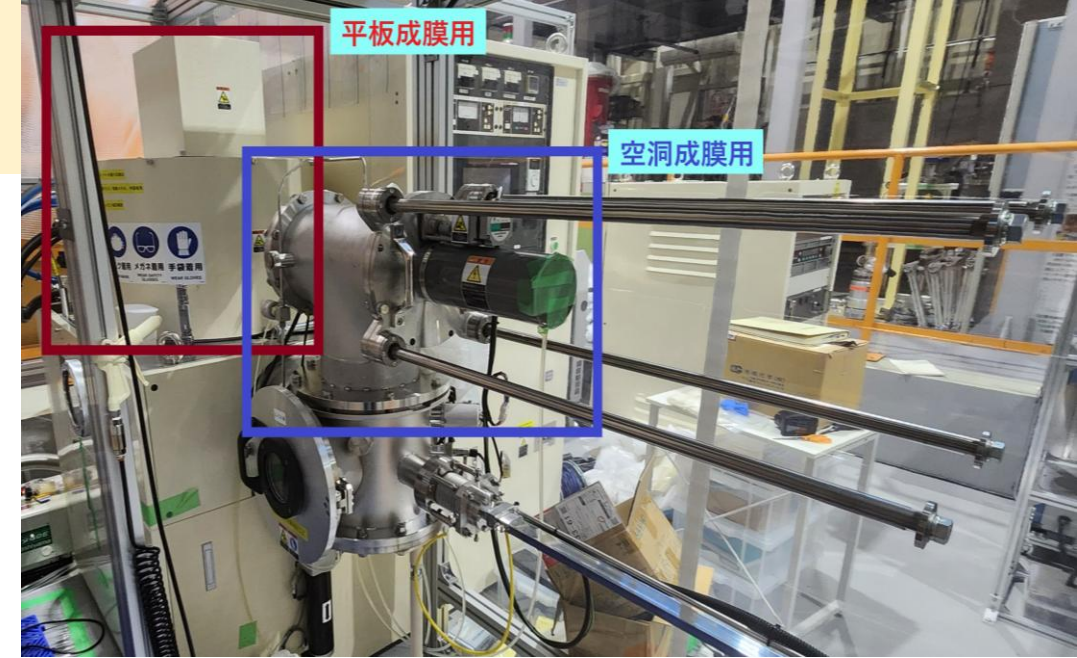
- 空洞内面へのNb₃Snの成膜手法の確立
 - スパッタリングの際に金属を混合させるための**Nb/Snカソード**が必要
 - 成膜する際には**均一な膜分布と適切な膜厚**を目指す必要があり、**シミュレーションを用いた分析**が重要



カソードの模式図

本研究の全体像

8



KEKの成膜装置

〈課題〉

- 空洞内面への Nb_3Sn の成膜手法の確立
 - スパッタリングの際に金属を混合させるための**Nb/Sn混合カソード**が必要
 - 成膜する際には**均一な膜分布と適切な膜厚**を目指す必要があり、**シミュレーションを用いた分析**が重要



〈本研究の目的〉

- 空洞内面に Nb_3Sn を成膜可能なカソードの開発

〈本研究の全体像〉

- DCマグネトロンスパッタリング時のプラズマ分布(Ar^+ , e^-)やフラックス分布の理解
 - 成膜実験を元にした再現シミュレーションを行う。
- Nb/Sn混合カソードの設計と成膜装置への導入・成膜試験
- Nb_3Sn 成膜に最適なターゲット比の分析
 - 作成したカソード形状を元に再度シミュレーションを行い、フィードバックをかける。

1. 研究背景
2. 成膜の再現シミュレーション
 - 平板成膜実験の再現
 - 空洞成膜実験の再現
3. Nb/Sn混合カソード開発
 - カソード設計
 - 成膜試験
4. シミュレーションを用いたNb/Sn混合カソードの最適化
5. 結論と今後の展望

シミュレーションの原理

10

- 解析にはPEGASUSソフトウェアを使用

1. 空間の静磁場を計算

- 静磁場解析モジュール(MSSM)

2. 静磁場内のプラズマの様子

ターゲットへのイオンフラックスを計算

- プラズマPIC/MCCモジュール(PIC-MCCM)

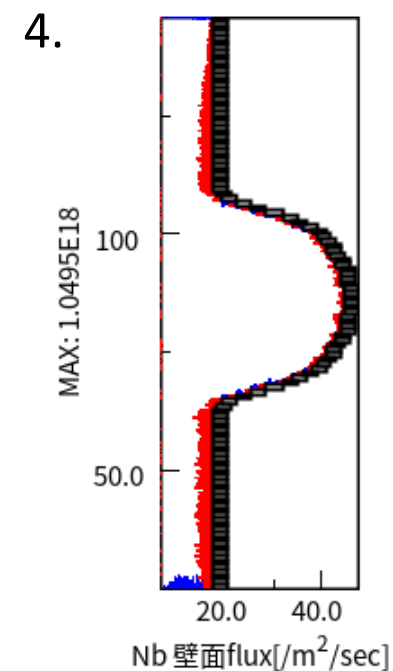
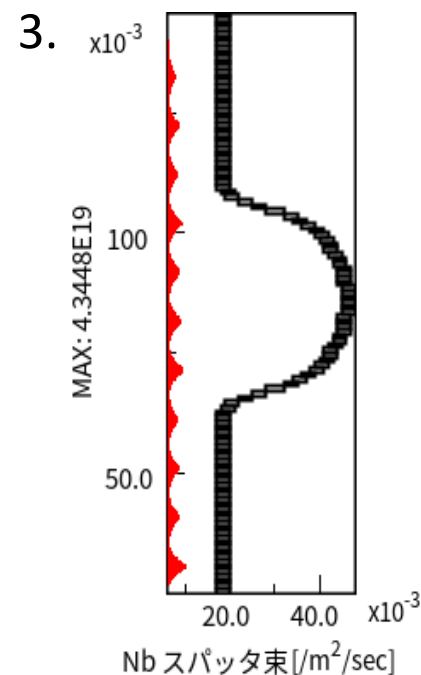
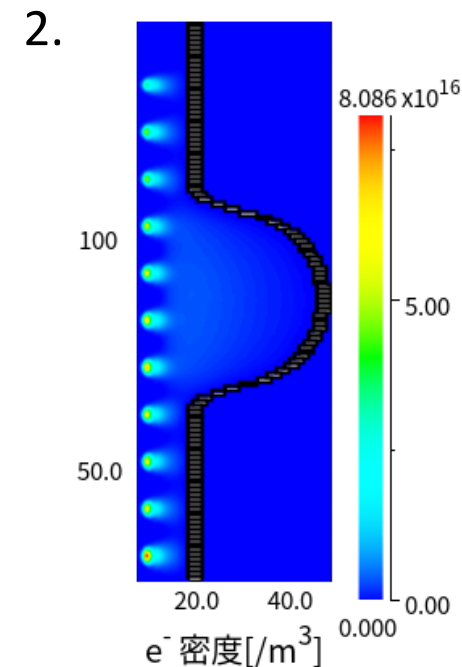
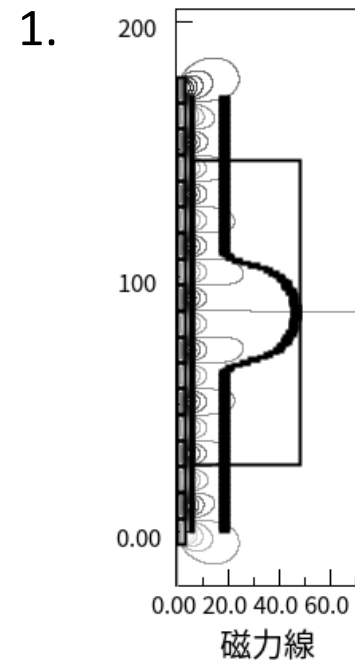
3. ターゲットから飛び出すスパッタ粒子を解析

- スパッタリングシミュレーションモジュール(SPUSM)

4. 装置内のスパッタ粒子の運動を追跡

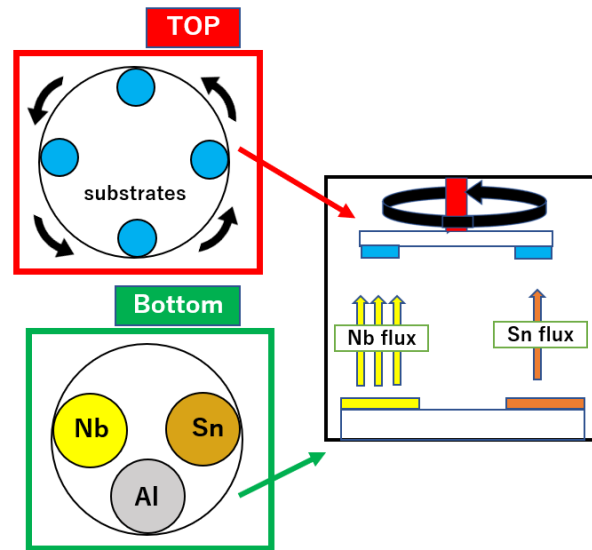
基板に到達するスパッタ粒子のフラックスを解析

- 中性粒子DSMCモジュール(DSMCM)



1. 平板成膜の再現シミュレーション

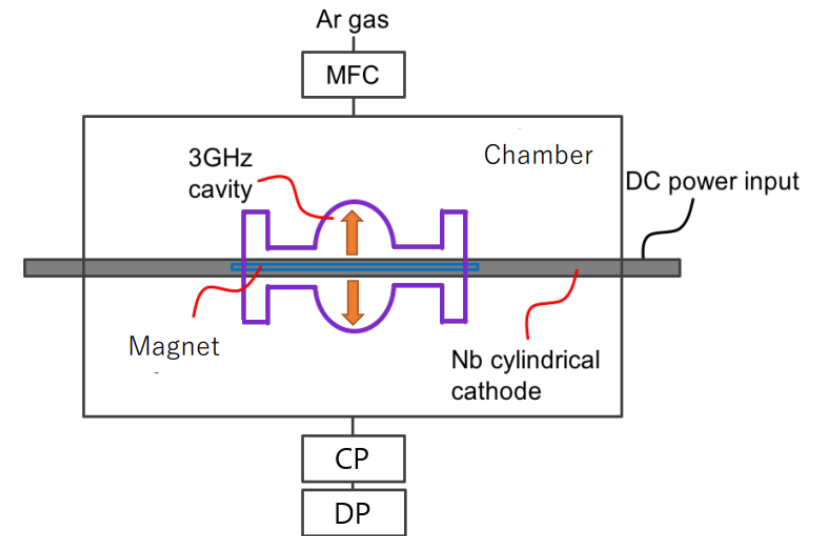
- Nb, SnターゲットにおけるSi基板上への成膜速度を計算する。
- 測定済みの成膜実験と成膜速度を比較し、シミュレーション結果の校正を行う。



平板成膜装置の模式図

2. 空洞成膜の再現シミュレーション

- Nb単体カソードにおける空洞内面への成膜速度を計算する。
- 空洞内部でのプラズマ分布やカソードへのAr⁺フラックス分布を分析する。

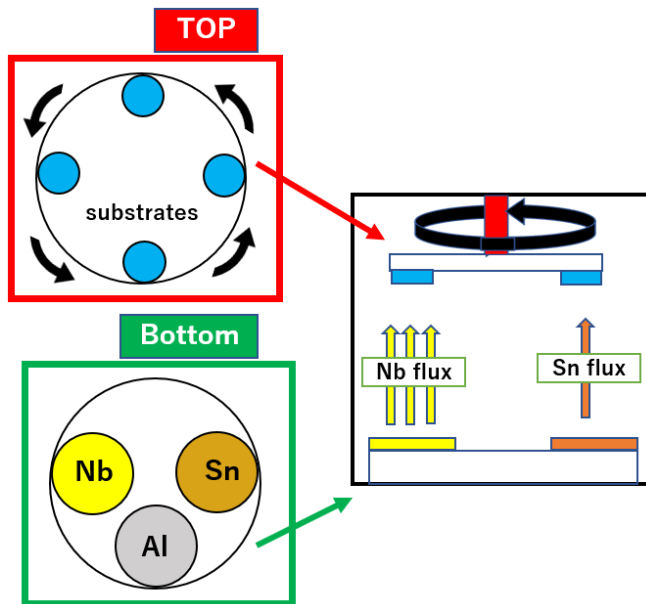


空洞成膜装置の模式図

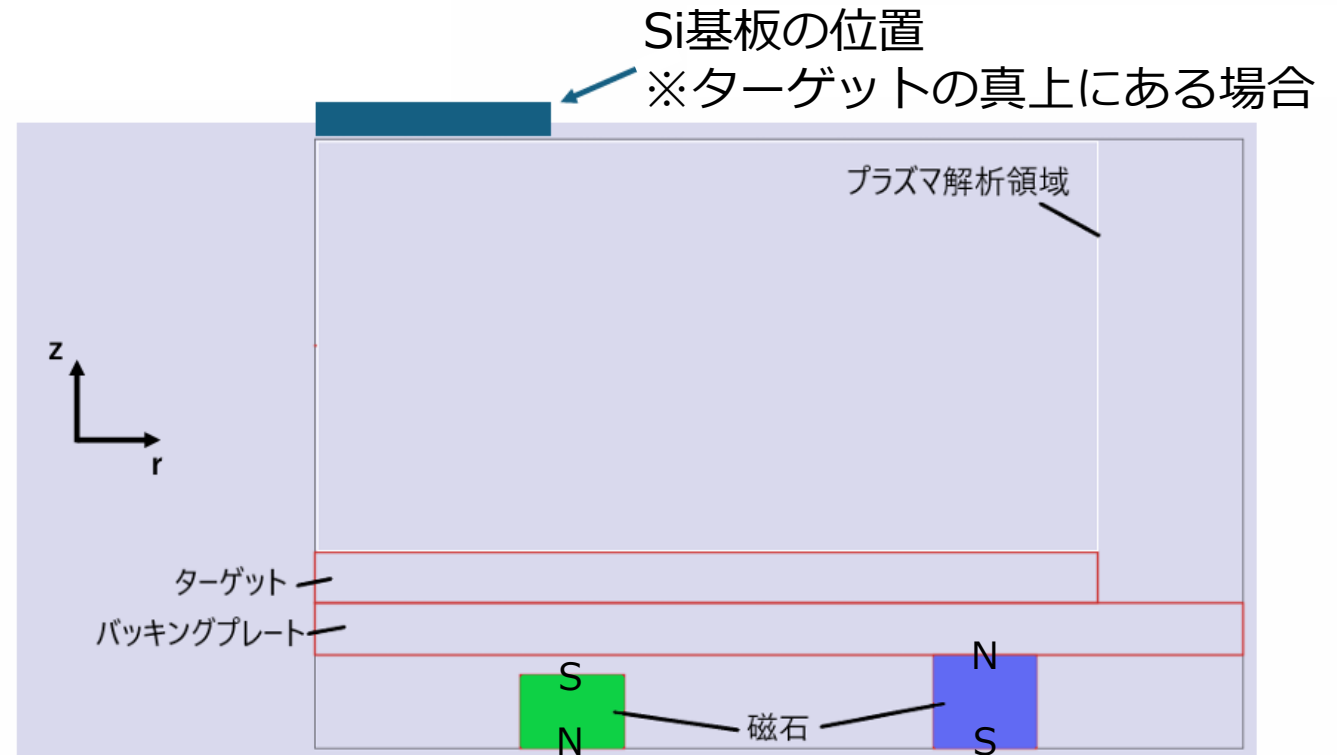
シミュレーション条件(平板成膜)

- 実際の平板成膜装置の形状に合わせた計算形状、解析領域を設定
各ターゲットの中心を $r=0\text{mm}$ とした
 - I. Nbターゲット, 電極間電圧 -350V
 - II. Snターゲット, 電極間電圧 -330V
- Ar流量を 50sccm として解析

磁石はN35のネオジム磁石を
仮定している

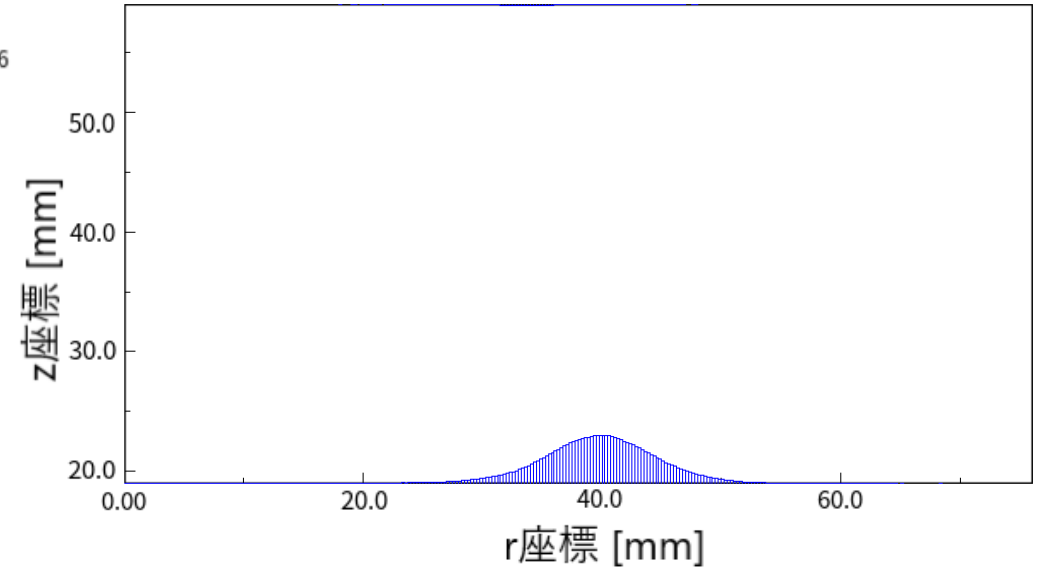
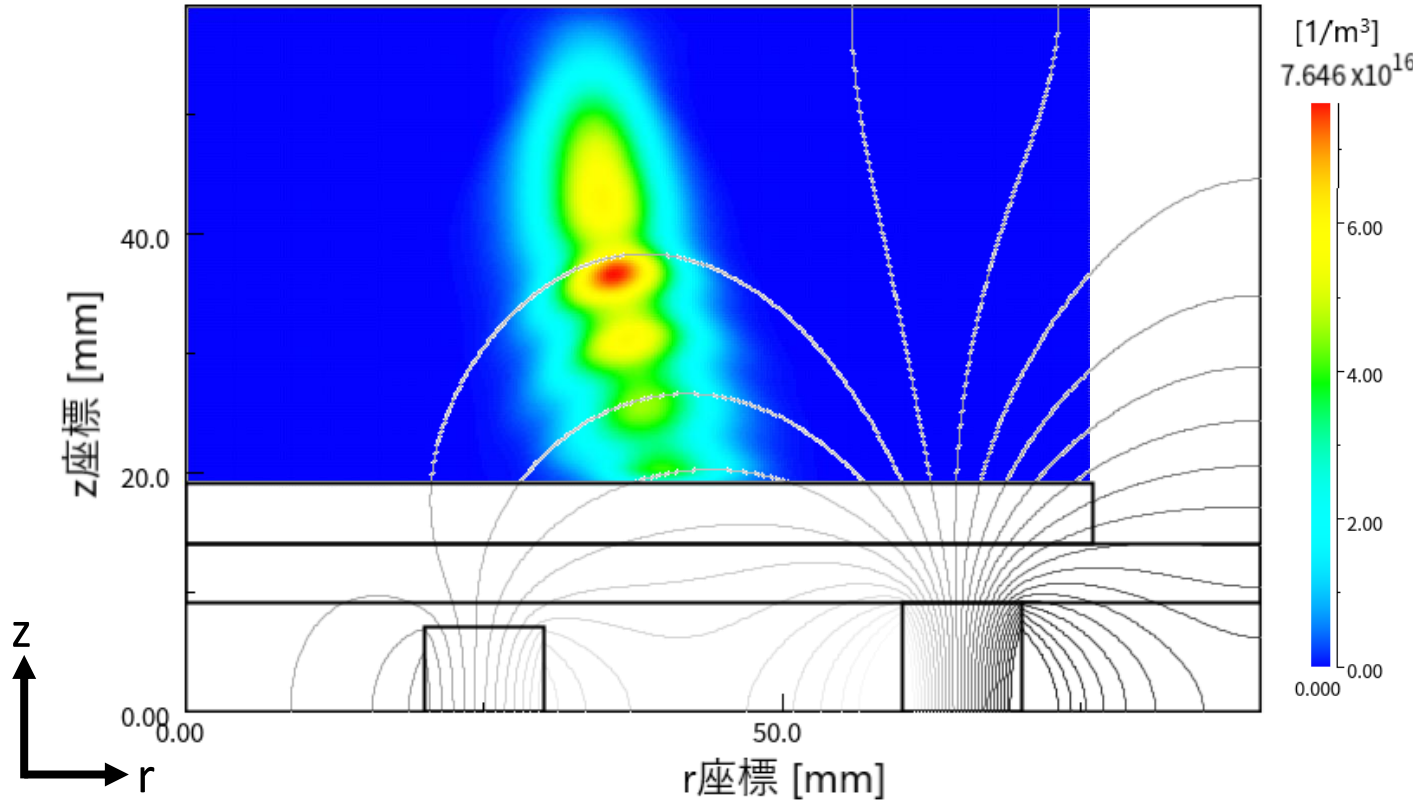


平板成膜装置の模式図



セットアップ

結果 - プラズマ解析



ターゲット表面へのAr⁺フラックス分布

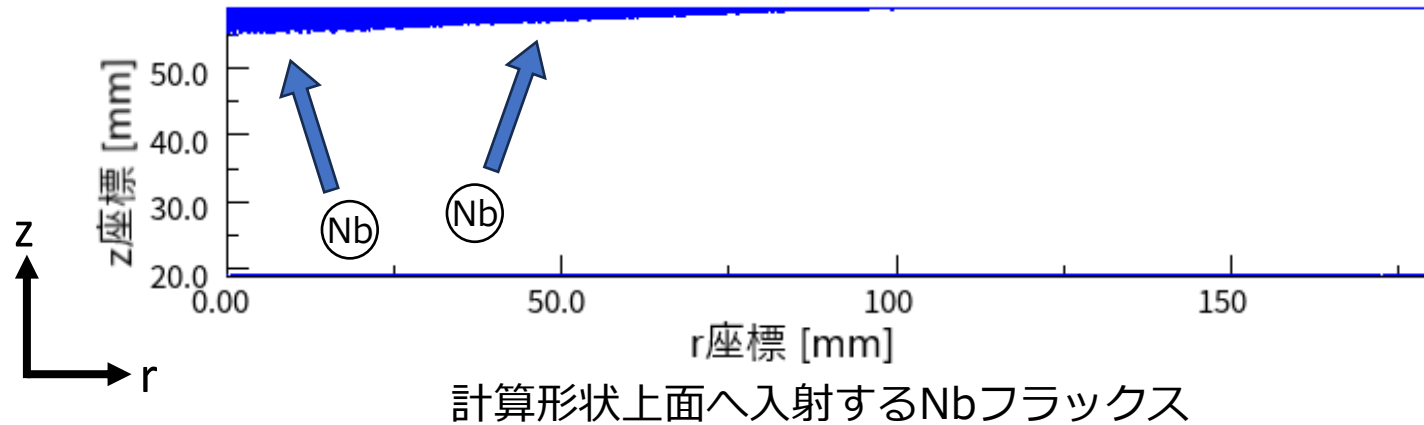
t=25 μ s (投入電力100W)

- **Nbターゲット**
- **-350V**

平板再現シミュレーションでの磁場分布とAr⁺プラズマ分布

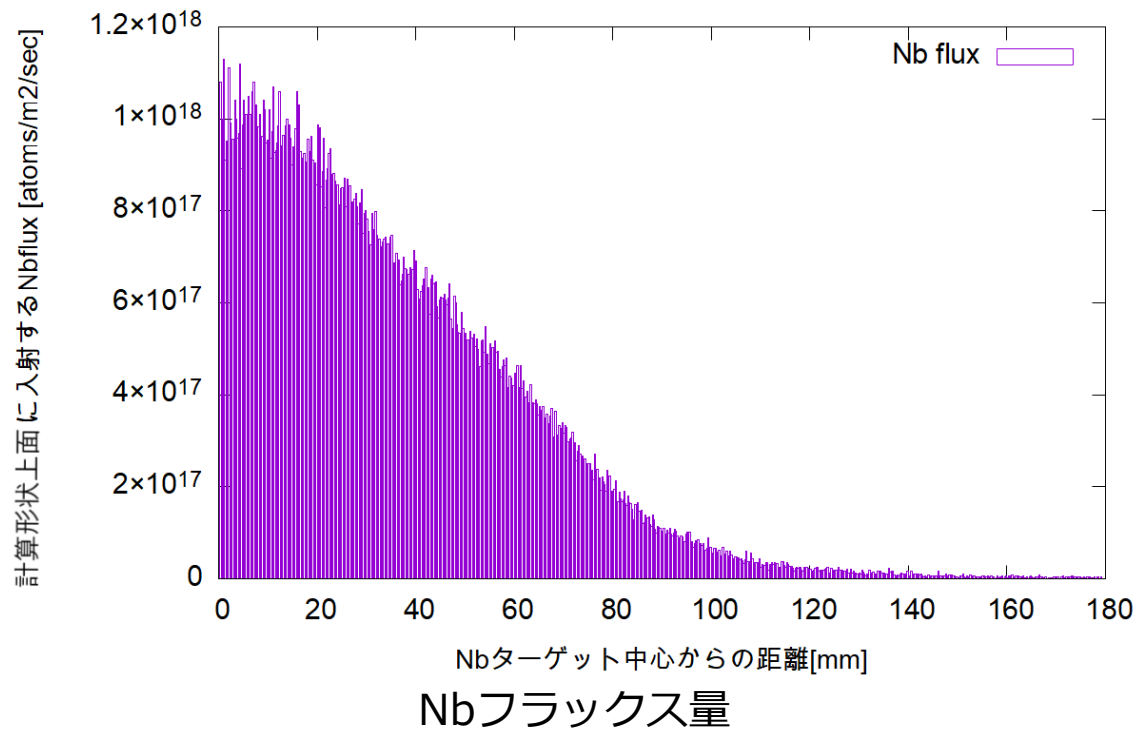
- 磁場に沿った位置にAr⁺プラズマが生成されている。
- 投入電力が100Wでのプラズマ密度分布、Ar⁺プラズマのflux分布が得られた。
- Snターゲットの条件においても同様のプラズマ分布が得られた。

結果 - フラックス解析

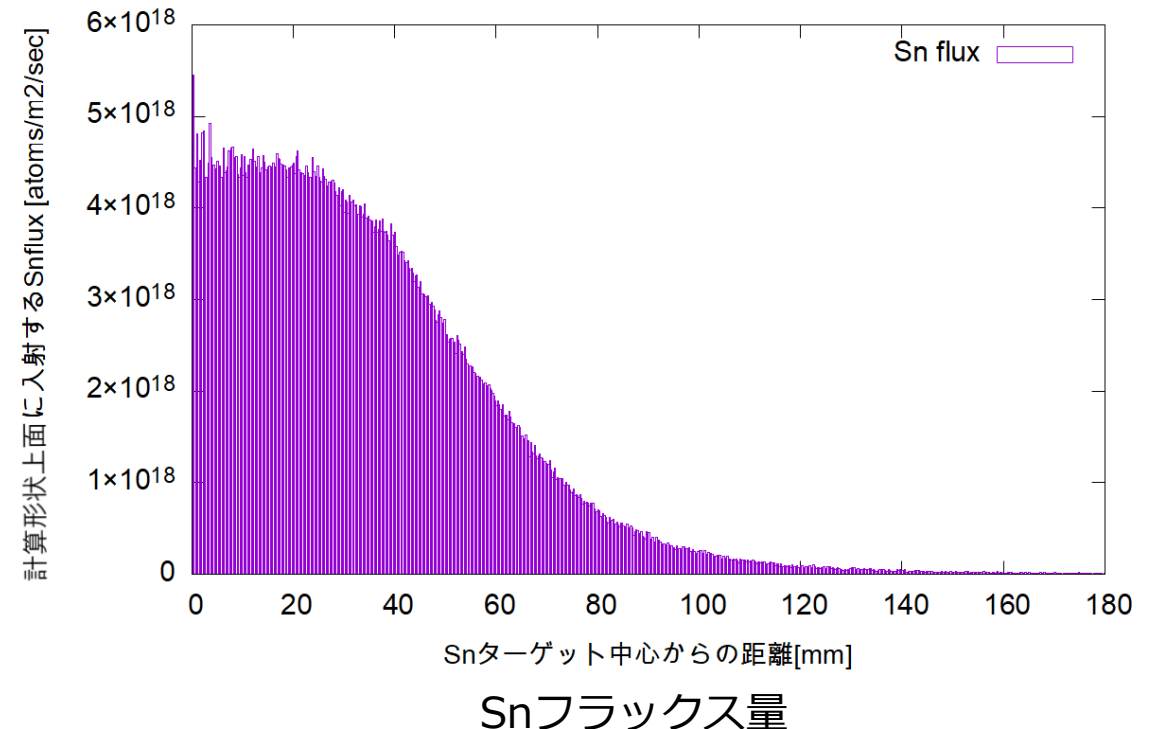


計算形状上面へ入射するNbフラックス

- 計算形状上面(Si基板の位置に対応)へのNbフラックスが得られた
- ターゲット中央付近($r=0$)で最もフラックスが得られた
- Snターゲットを用いた場合、Nbの4倍程度のフラックスが得られた



Nbフラックス量



Snフラックス量

結果 – フラックス解析

Si基板に到達するNb,Snフラックス（成膜速度）

表 3.3: 平板成膜における成膜速度の比較

項目	平板成膜 (Nb)	平板成膜 (Sn)
成膜実験で得られた成膜速度 [atoms/m ² /sec]	2.67×10^{18}	6.70×10^{18}
シミュレーションで得られた成膜速度 [atoms/m ² /sec]	1.88×10^{17}	8.97×10^{17}

- 7-14倍程度、成膜実験の方が成膜速度が早い
- Nb₃Sn成膜においてはNbとSnの成膜速度比が重要であるため、NbとSnの比に着目する
 - 成膜実験 → Nb : Sn = 1 : 2.5
 - シミュレーション → Nb : Sn = 1 : 4.8

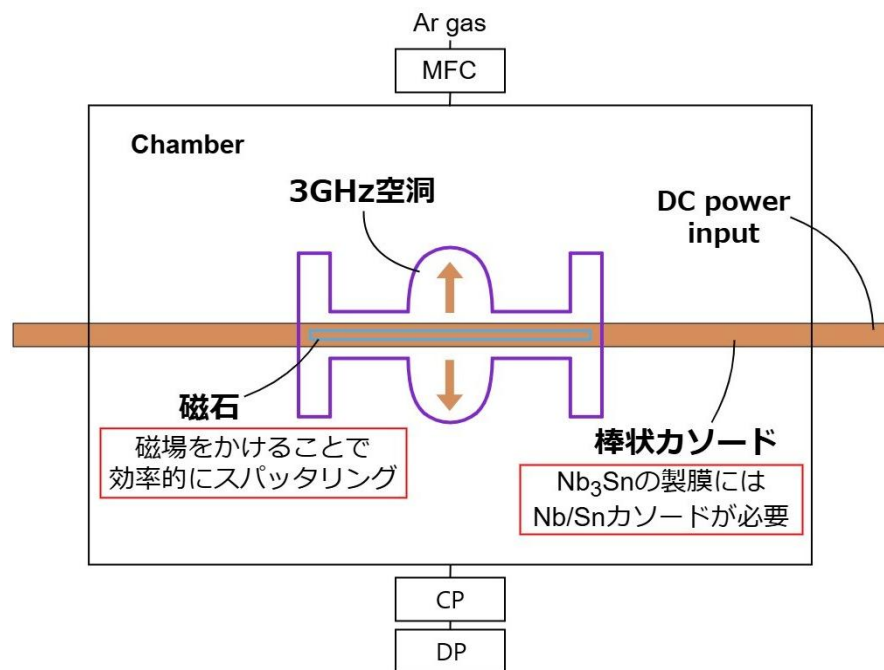


Nb/Sn混合カソードのシミュレーションで校正を行う

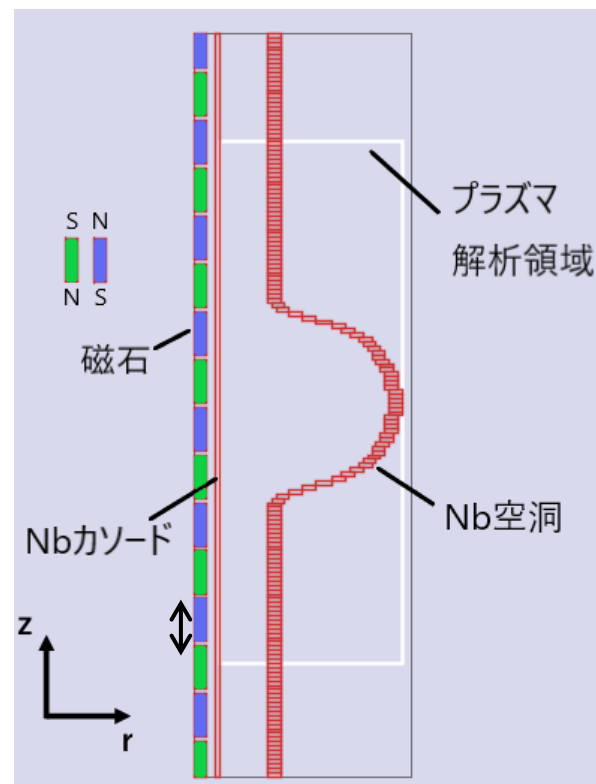
- 投入電力:100W, 電極間電圧:約-330V, 電極間距離:約40mmの条件においてシミュレーション上でSnが約1.9倍ほどNbに比べて過剰にスパッタされているといえる。

シミュレーション条件(空洞成膜)

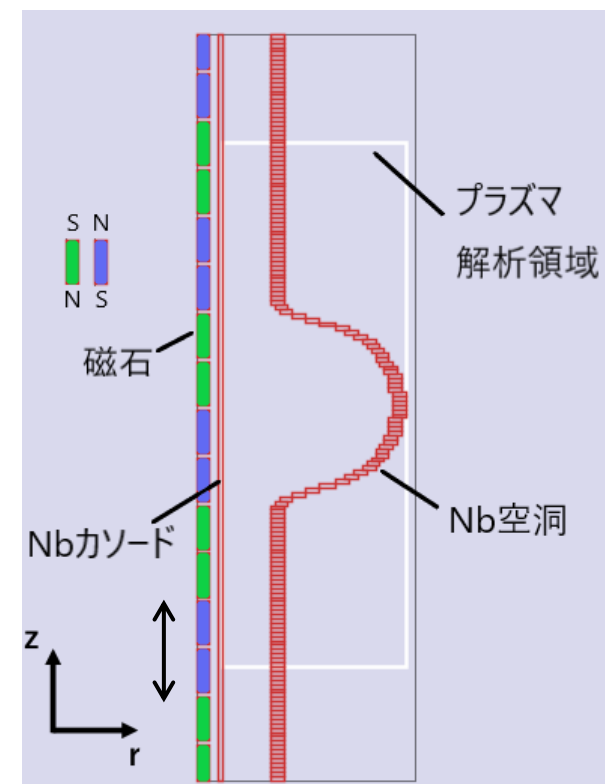
- 実際の成膜装置の形状に合わせた計算形状を設定
 - ◆ 磁石長10mm, Ar 100sccm ※初期にArを過剰に流入
 - ◆ 磁石長20mm, Ar 80sccm
- 電極間電圧を-330Vとして解析



空洞成膜装置の模式図



磁石長10mmの場合のセットアップ

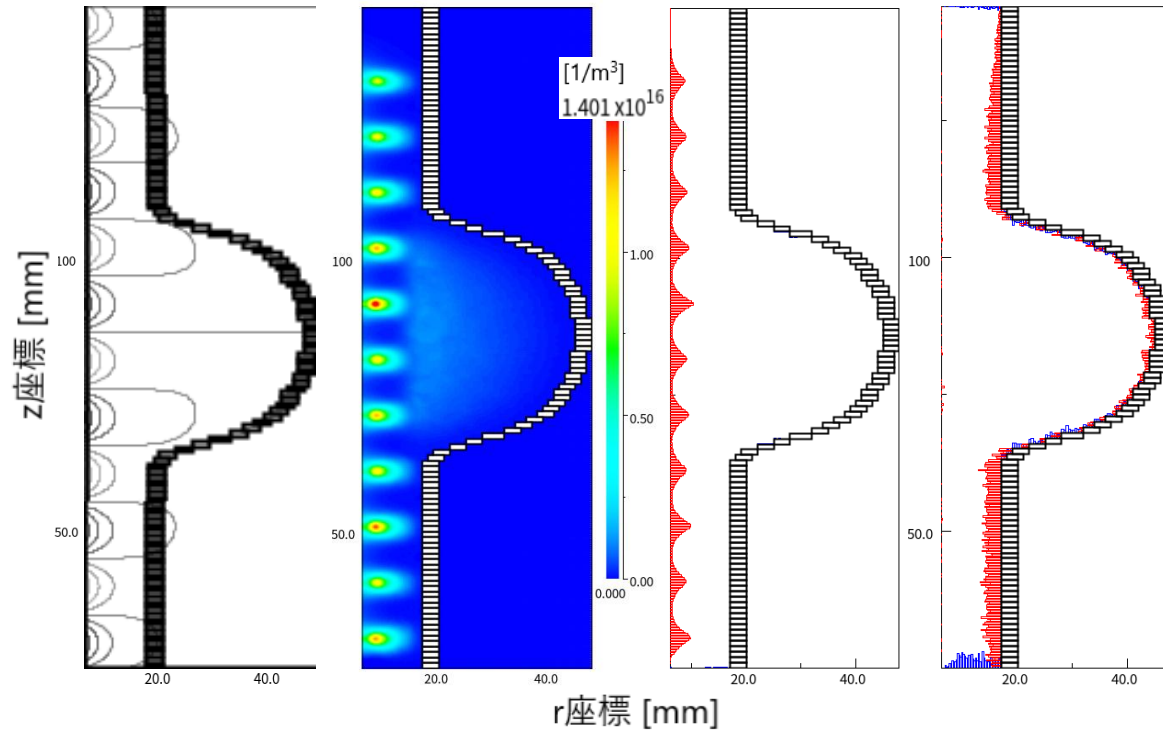


磁石長20mmの場合のセットアップ

結果 - プラズマ解析

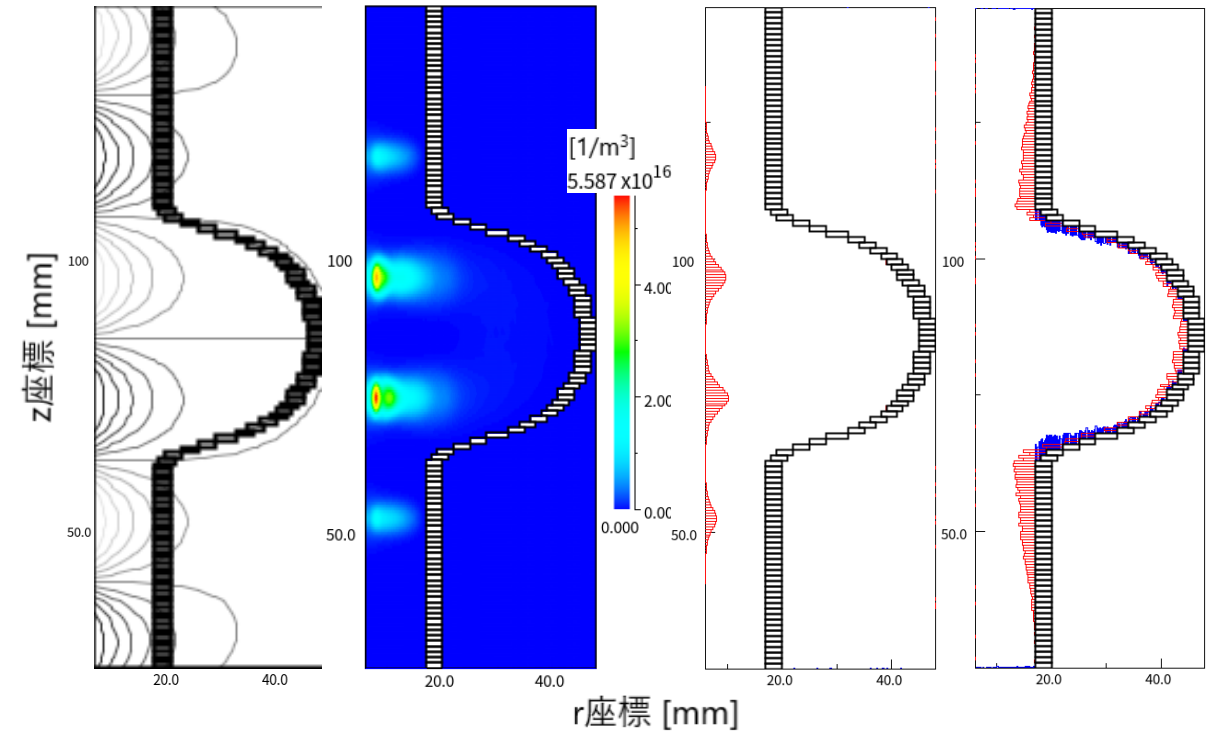
赤色のflux : r方向に垂直
青色のflux : z方向に垂直

～磁石長10mm, Ar 100sccm～



磁束線の様子 Ar⁺プラズマ分布 Ar⁺ flux分布 Nb flux分布

～磁石長20mm, Ar 80sccm～



磁束線の様子 Ar⁺プラズマ分布 Ar⁺ flux分布 Nb flux分布

- 以降のカソード設計で用いるAr⁺のカソードへのフラックス分布が得られた。
- 赤道部とアイリス部間で成膜速度の差が見られるが、アイリス部は表面磁場がほとんどかからないため、膜厚が多少ずれても問題がないといえる。

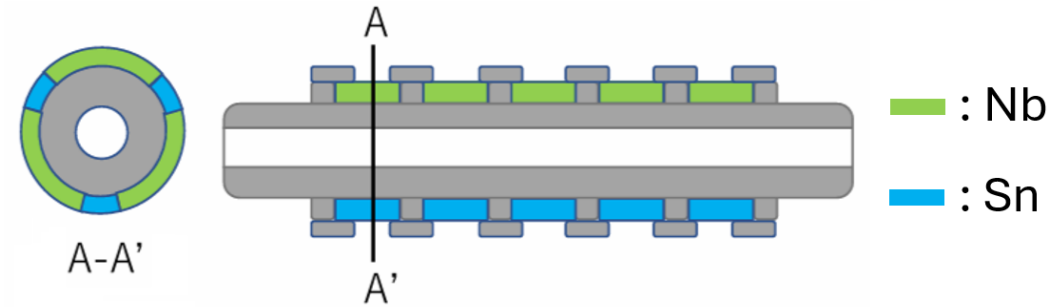
目次

1. 研究背景
2. 成膜の再現シミュレーション
 - 平板成膜実験の再現
 - 空洞成膜実験の再現
3. Nb/Sn混合カソード開発
 - カソード設計
 - 成膜試験
4. シミュレーションを用いたNb/Sn混合カソードの最適化
5. 結論と今後の展望

Nb/Sn混合カソード製作

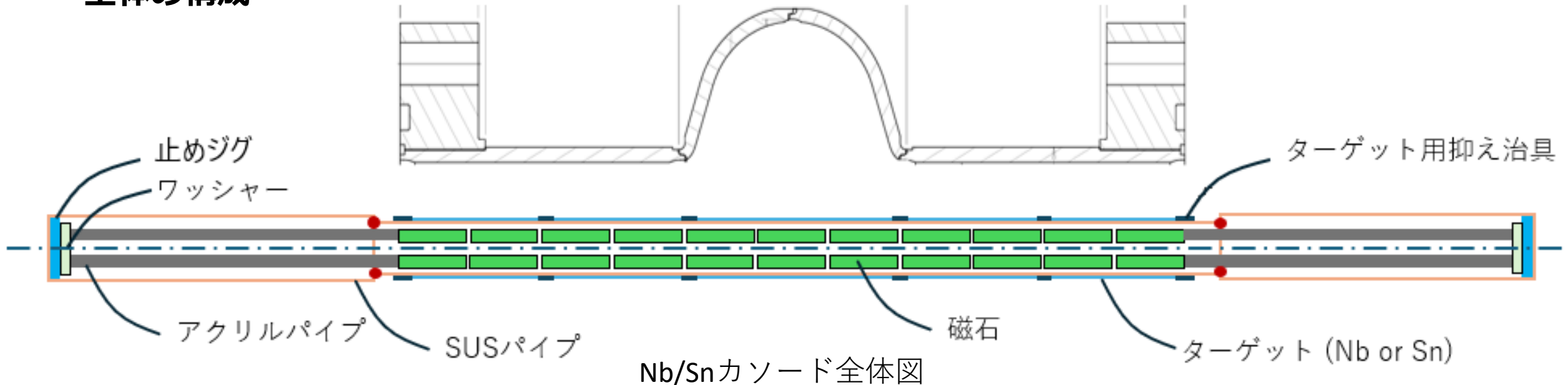
〈必要要件〉

- Nb₃Snがスパッタ可能である事
- スパッタ分布ができる限り均一である事
- カソード内部に冷却水を通すことが可能な構造である事
- 耐熱性や耐食性に優れた構造である事



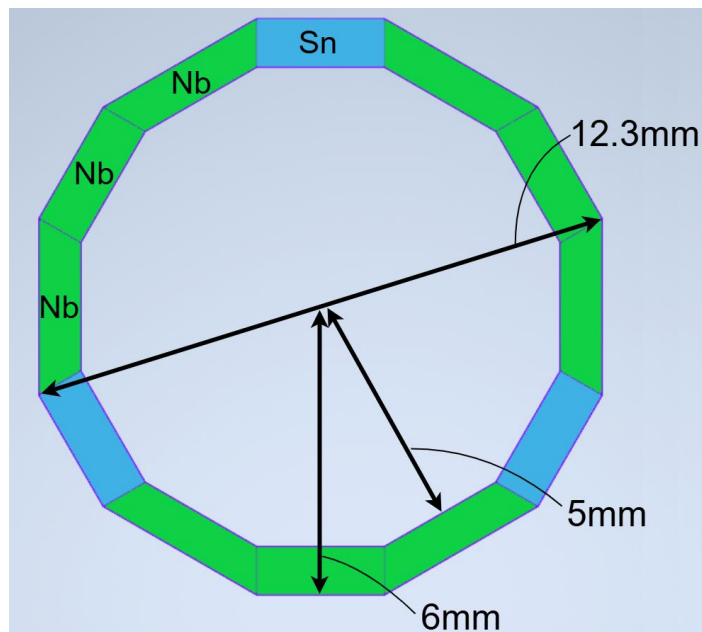
異なる金属種の
ターゲット面を持つカソード構造

～全体の構成～



～金属ターゲット～

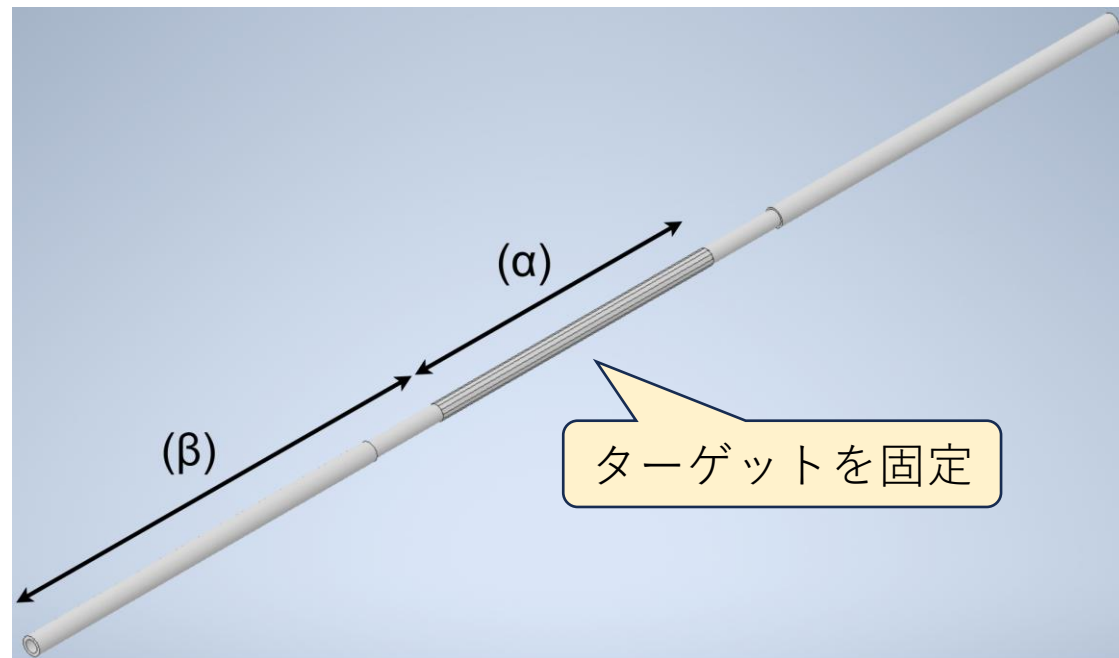
- 内側の12角柱のベースカソードに沿うようにターゲットを配置。
 - Snの加工難度の点から、ターゲットは長方形と台形状で作成
 - 下図の状態ですら面積比がNb:Sn=3.75:1である。



ターゲット配置図

～ベースカソード～

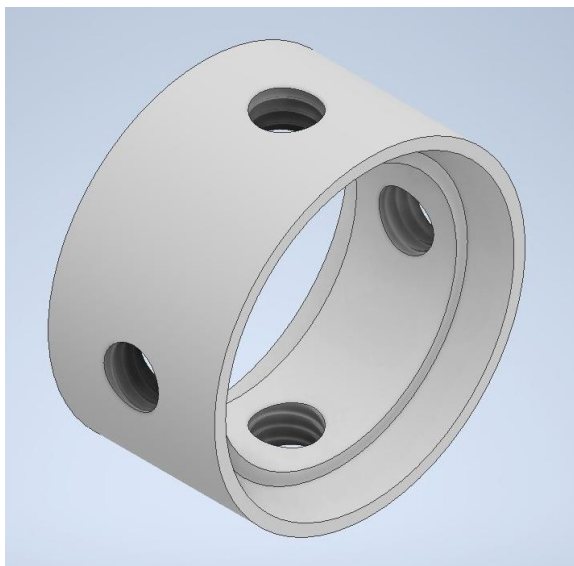
- カソード(a)とカソード(β)を組み合わせて製作する。
 - カソード(a)：長さ200mm
中空の正12角柱
 - カソード(β)：長さ300mmの円筒



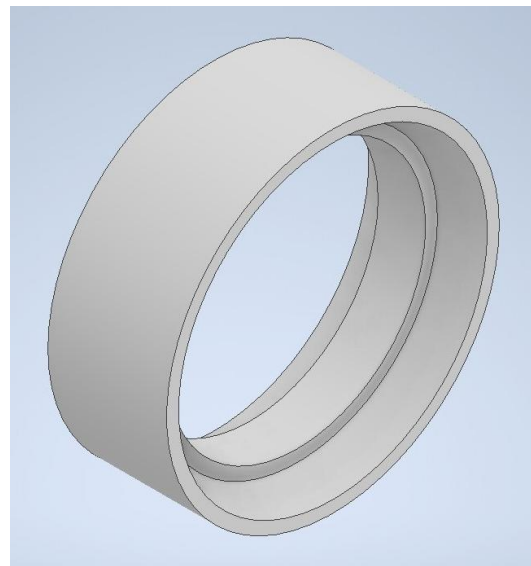
ベースカソードの全体像

～ターゲット用抑え治具～

- リング状の抑え治具(SUS)
治具の内径部のテーパで
ターゲットを両側から押さえ、固定する。
 - 7.5mm長押さえ治具は両端に配置する。
 - 5mm長押さえ治具は中間に配置する。



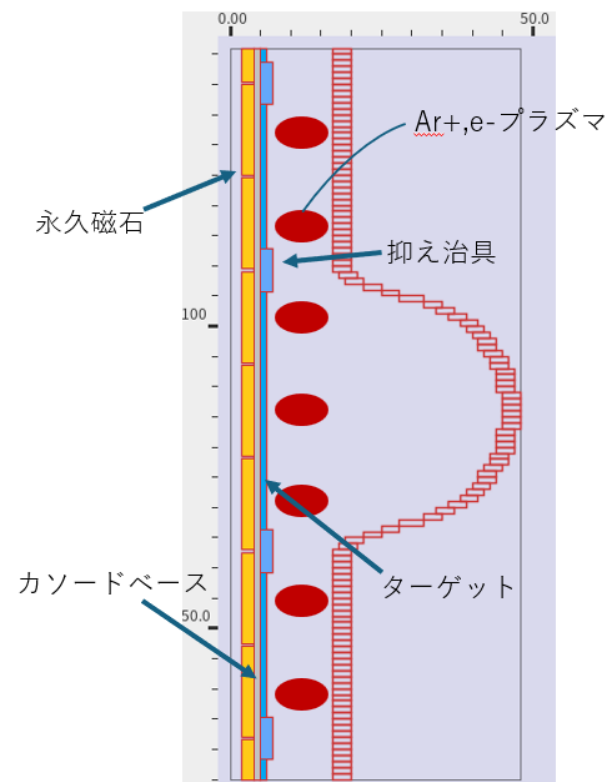
7.5mm長抑え治具



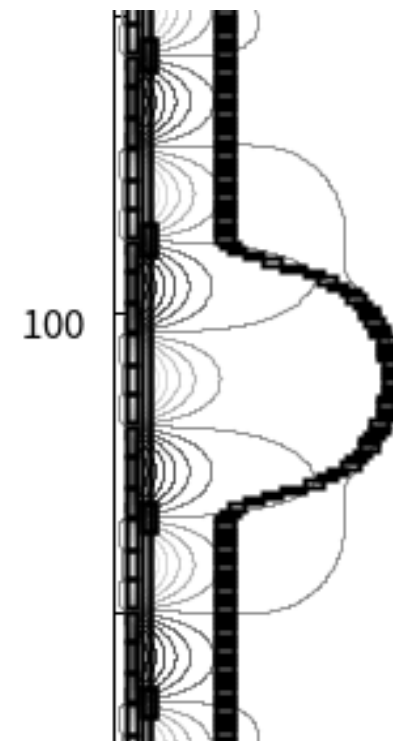
5mm長抑え治具

～磁石と治具の配置～

- 磁石長15mmの**サマコバ磁石**を用いる。
※空洞成膜の再現シミュレーションで得た
Ar+フラックスを用いて最適化を行った。



治具や磁石の配置図

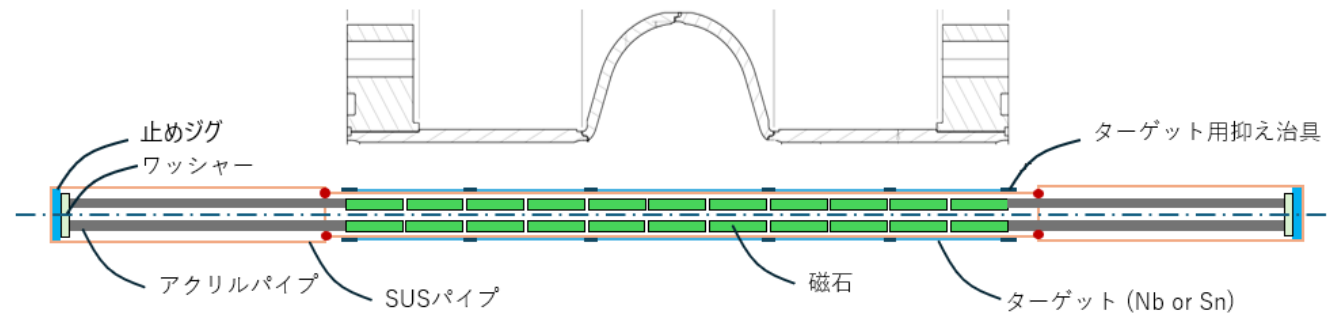


磁力線の参考図

Nb/Sn混合カソード試作品製作

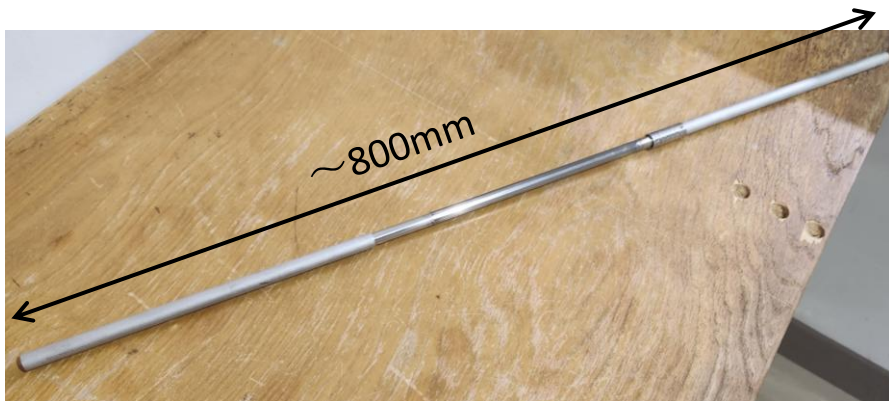
〈試作品の詳細〉

- Nb, Snターゲットの代わりにSUS, Alターゲットを用いた。
- 磁石へのコーティングは行っていない。
- 磁石用の抑え治具として、アクリルパイプを用いた。

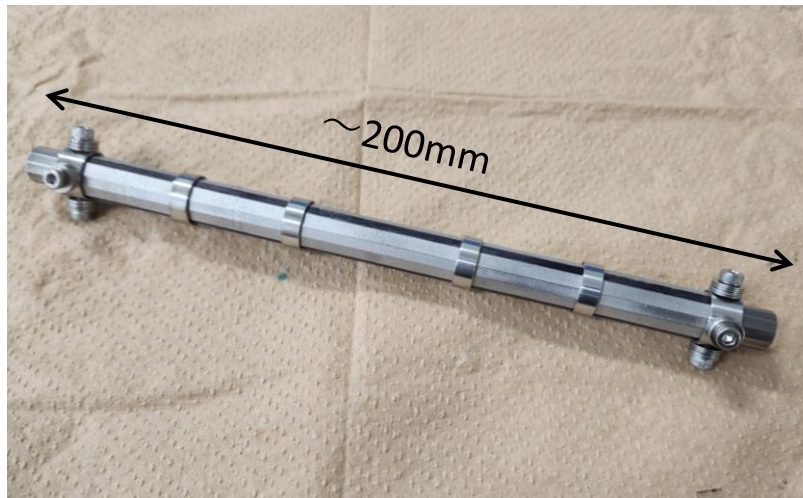


Nb/Sn混合カソードの模式図

〈試作品組み立て〉



試作品のベースカソード



試作品カソードの中央部

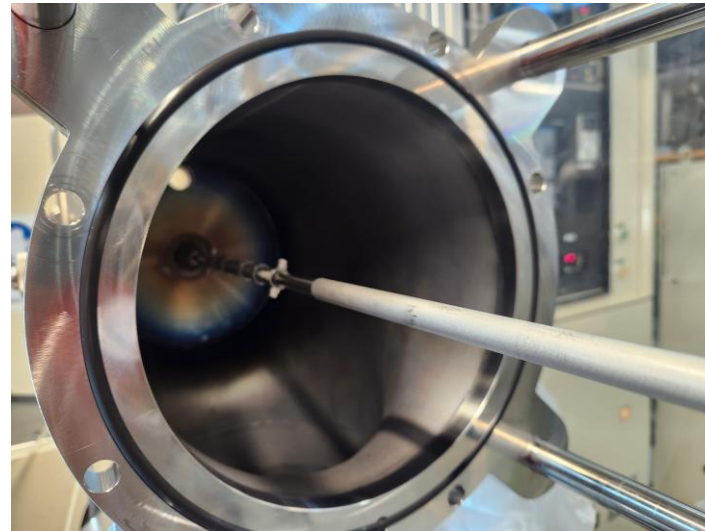


試作品カソードの溶接部

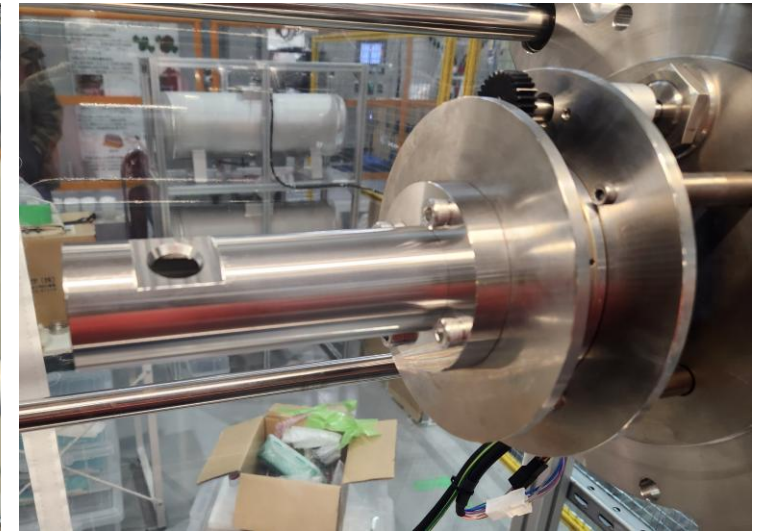
試作品Nb/Sn混合カソードの成膜試験

～試作品用空洞～

- 3.0GHz空洞のアイリス部と等しい径の試作品用空洞を作成した。
- Si基板を試験用空洞に取り付け、Si基板表面への成膜を確認する。



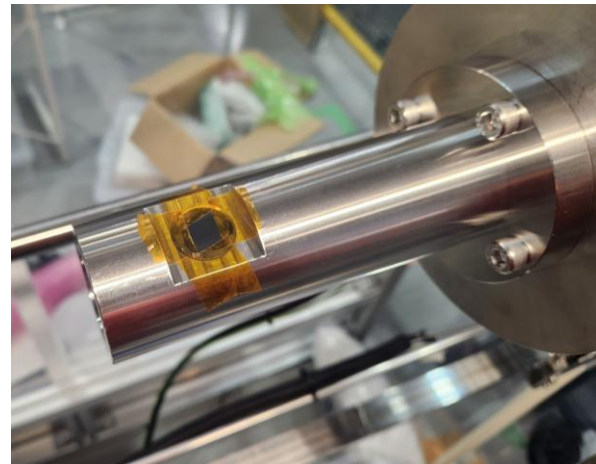
成膜装置へ試作品の導入



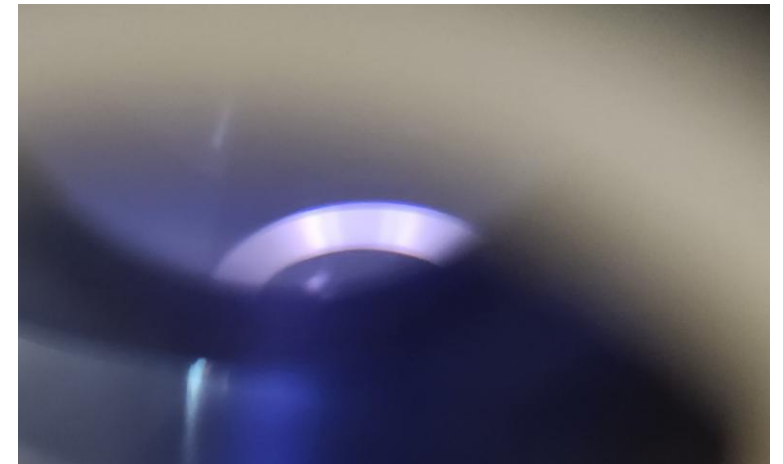
試作品用空洞

〈成膜試験の詳細〉

- 成膜装置内部をゲージ圧力で 10^{-5} Paまで真空引きを行った。
- 投入電力とAr流量の条件を変え、9回試験を行った。
- 成膜試験時には装置内部で青白い光が見られた。



空洞へのSi基板の装着

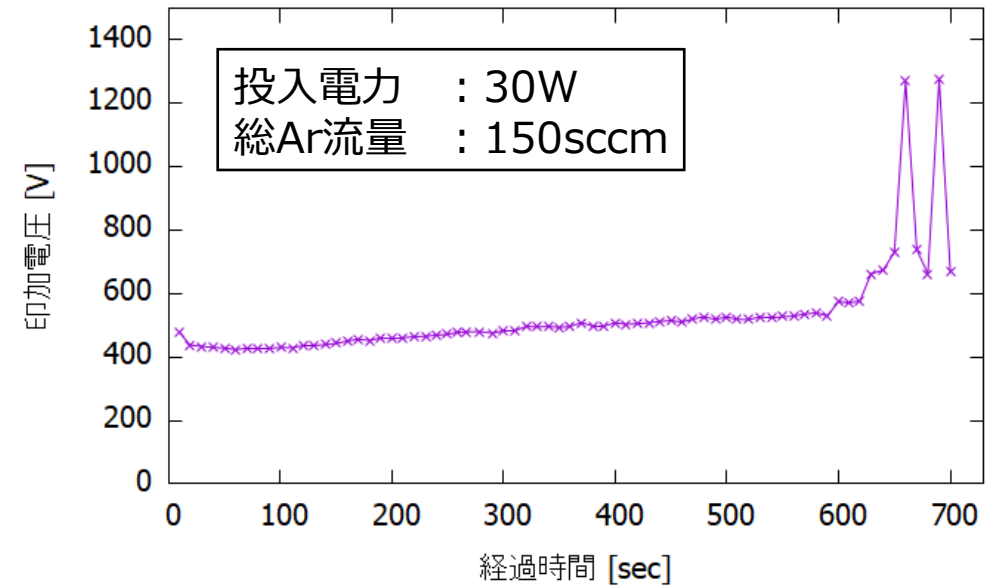


成膜試験中の装置内部の様子

試作品Nb/Sn混合カソードの成膜試験

〈成膜試験の結果〉

- 9回行ったいずれの試験においても、異常放電(急激な電圧上昇)が確認された。
- 電力投入後しばらく時間が経つと徐々に印加電圧が上昇し、約650V程度で異常放電が発生した。
→ カソード形状における突起物を減らす。
- 成膜試験後のSi基板を見ると、層構造が見られる。
→ AlやSUSによるスパッタリングが行われていた事を示す。
- 成膜試験後、Alターゲットが溶融していた。
内部のアクリルパイプが溶け、冷却水が十分に流れなかった事が原因。
→ アクリルパイプの代わりにSUSパイプを用いる。



時間経過による印加電圧の変動

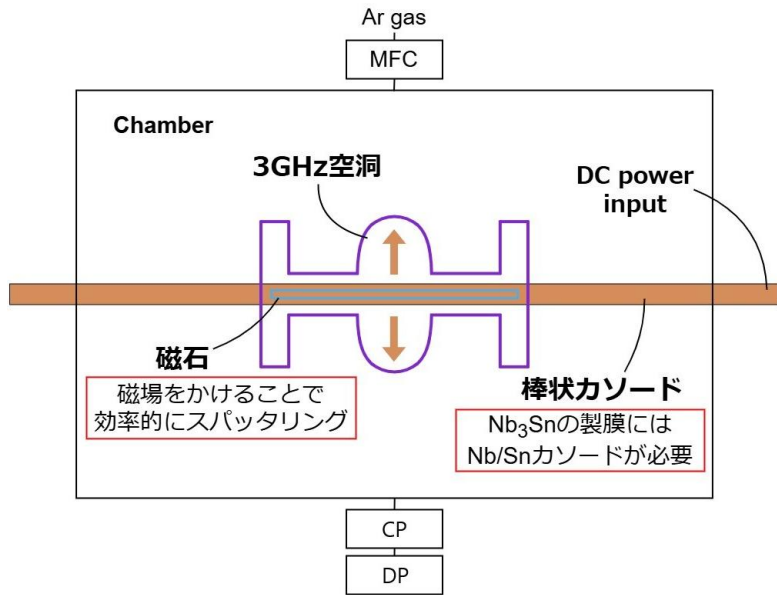


成膜試験後のSi基板の様子

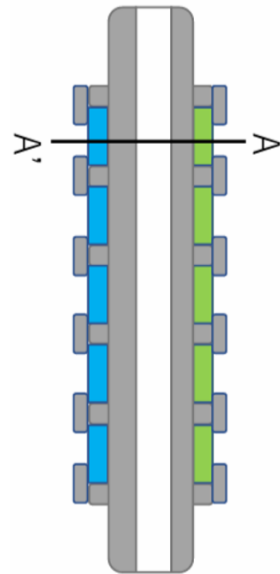
1. 研究背景
2. 成膜の再現シミュレーション
 - 平板成膜実験の再現
 - 空洞成膜実験の再現
3. Nb/Sn混合カソード開発
 - カソード設計
 - 成膜試験
4. シミュレーションを用いたNb/Sn混合カソードの最適化
5. 結論と今後の展望

シミュレーション条件

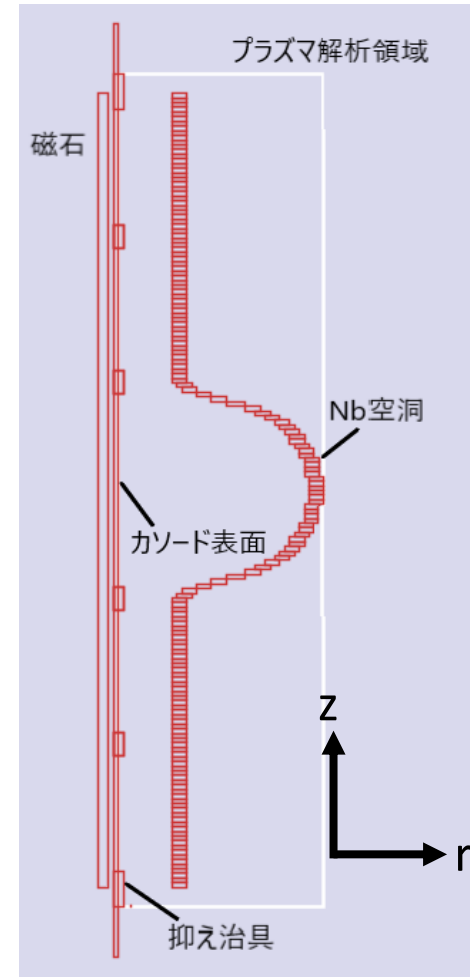
- 実際の成膜装置の形状に合わせた計算形状、解析領域 + カソードの形状をセットアップに反映
- Ar圧力を約0.8Pa、印加電圧を-330Vとして解析
 - ステップ1 Ar+, e-のプラズマ解析
 - ステップ2 NbやSnのスパッタリングの解析
※空洞表面へのfluxを元に成膜速度を計算



空洞成膜装置の模式図

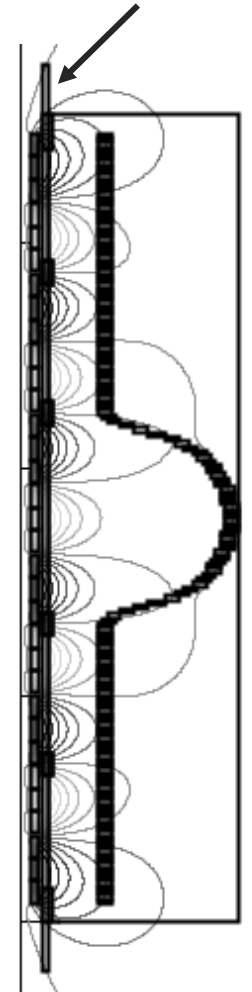


Nb/Sn混合カソード



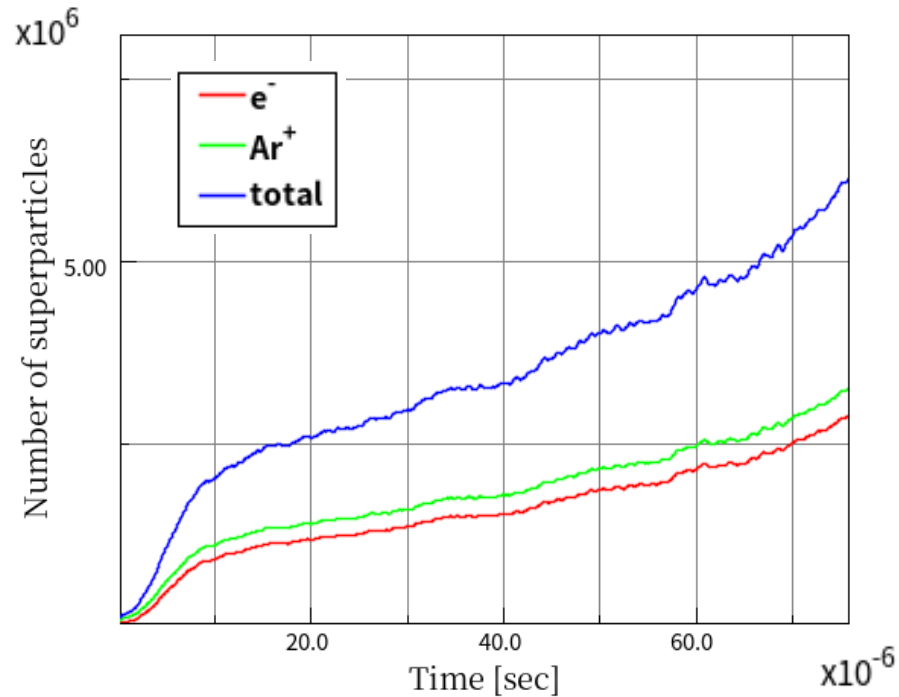
セットアップ

※磁石が並んでいる

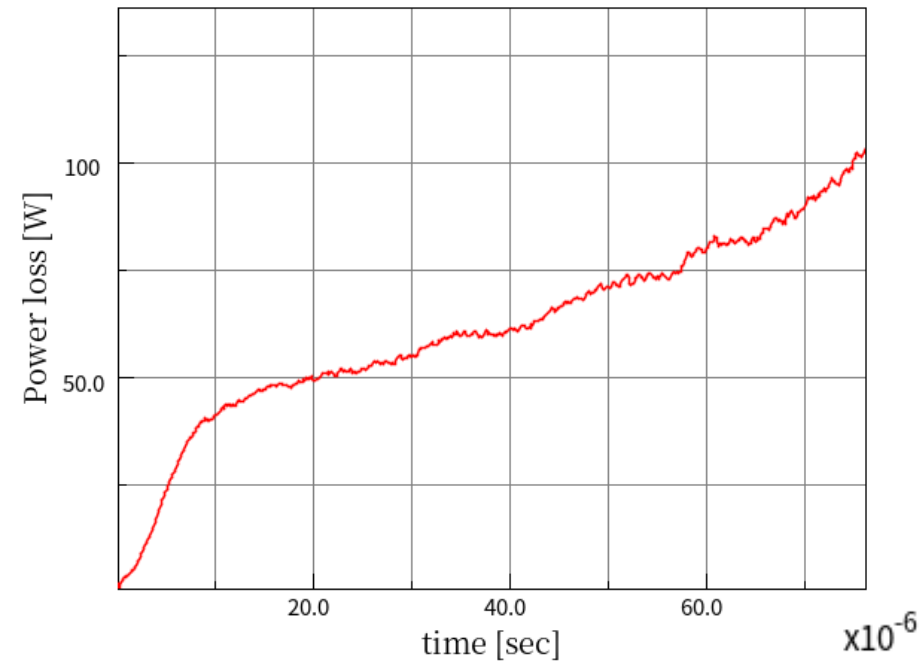


磁場の解析

結果 - プラズマ解析

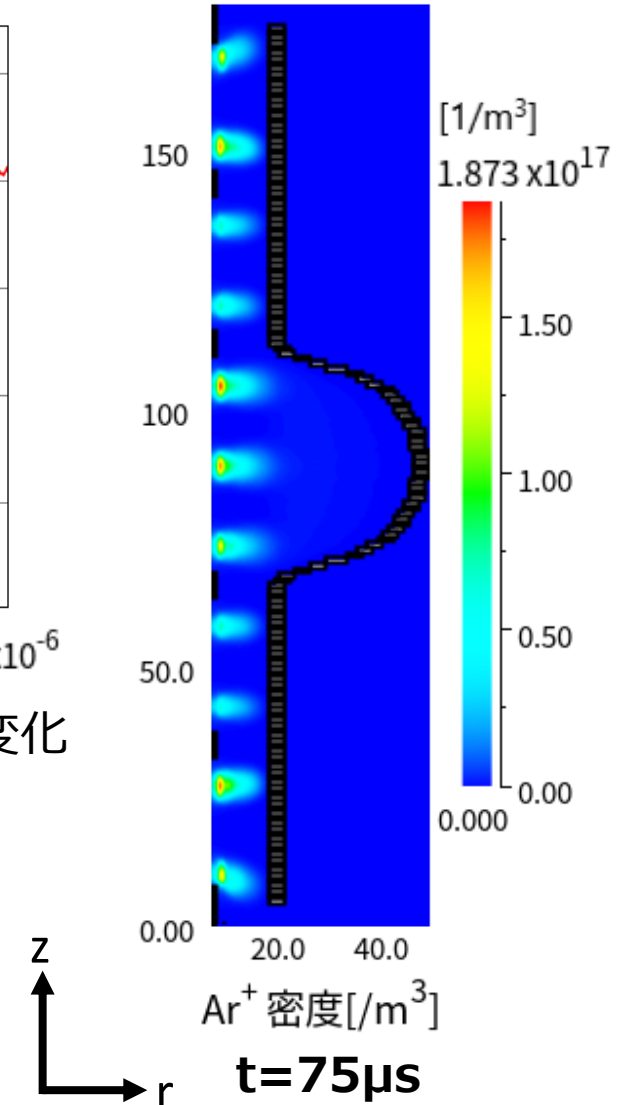


超粒子数の時間変化



荷電粒子が失った総エネルギーの時間変化

- 投入パワーを100Wまで上げ、プラズマ密度分布とflux分布を得た
- 押さえ治具を避けた位置に Ar^+ プラズマが生成されている
 Ar^+ プラズマの密度に不均一性が見られる ※ e^- に関しても同様
- $t=75\mu s$ 時点でのプラズマ分布を用いて、成膜速度を計算

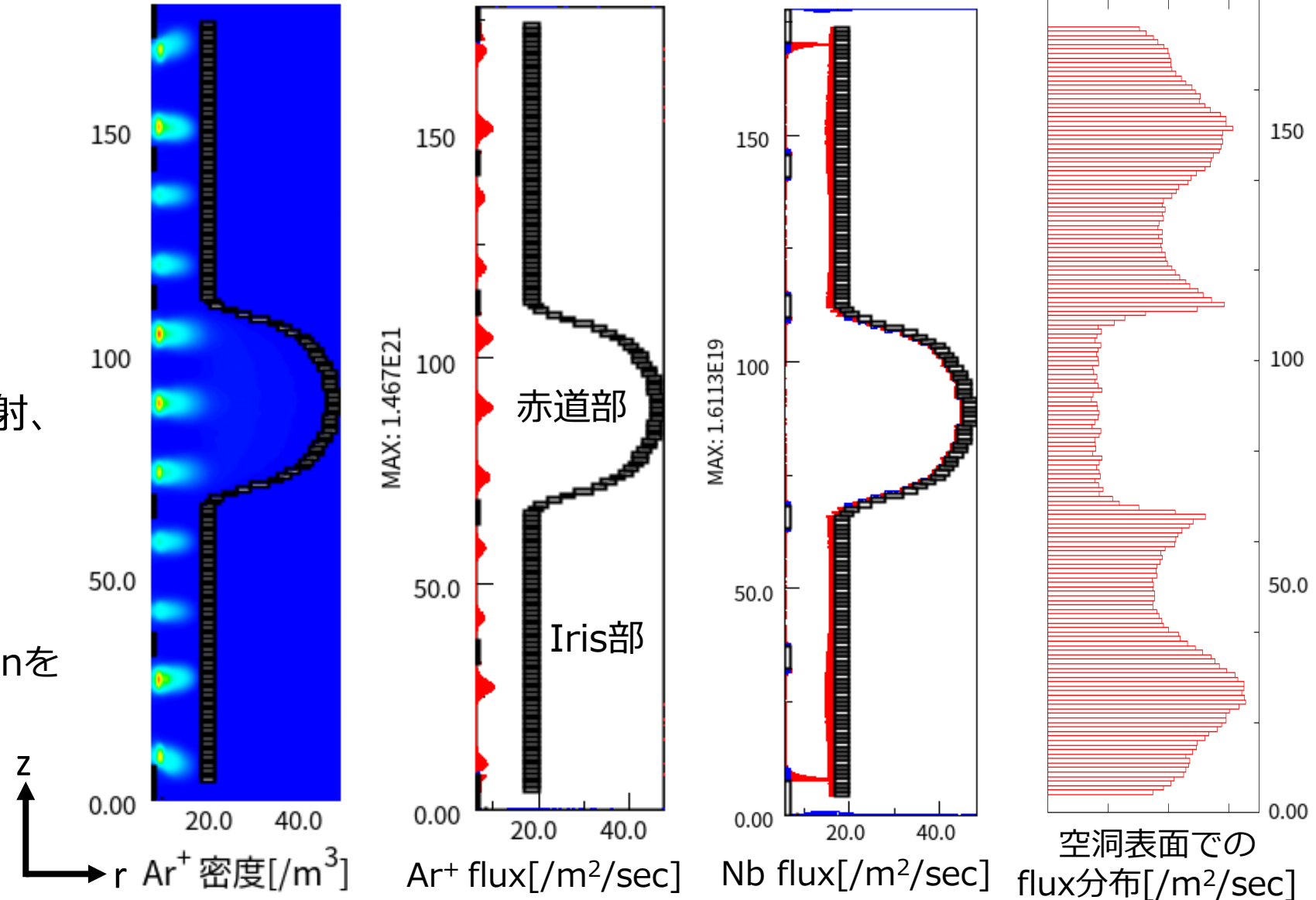


結果 - スパッタリング解析

赤：r方向に垂直
青：z方向に垂直

28

- ✓ Nb 100%のカソードを仮定
- 空洞内面へのNb fluxを確認
 - Iris部と赤道部でfluxの大きさが異なる
 - z方向にfluxのばらつき
- 外側の押さえ治具にAr⁺が入射、fluxの損失が見られる
- 押さえ治具に入射したAr⁺ fluxは全体の約4.53%
 - 効率良く、純度の高いNb₃Snを成膜するために重要



✓ Nb 100%, Sn 100%のカソードを仮定し
それぞれで成膜速度を計算



Cathode	Equatorial Region [atoms/m ² /sec]	Iris Region [atoms/m ² /sec]
Nb 100%	8.30×10^{17}	2.36×10^{18}
Sn 100%	2.58×10^{18}	6.87×10^{18}

シミュレーションで得られたflux



〈成膜速度比〉

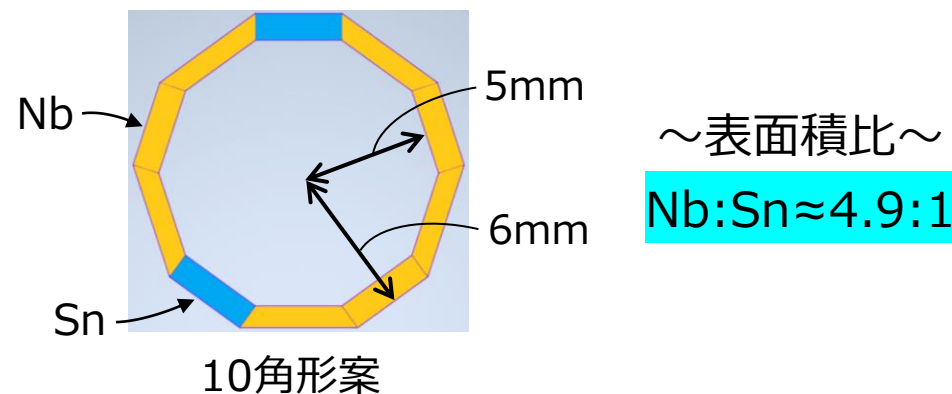
- 赤道部 Nb : Sn \approx 1 : 3.11
- Iris部 Nb : Sn \approx 1 : 2.91

- 平板成膜の再現シミュレーションから結果を校正すると

赤道部 Nb : Sn \approx 1 : 1.67

- Nb₃Snの成膜には Nb:Sn \approx 3:1 が必要

➤ ターゲットの表面積比を Nb:Sn \approx 5:1 にすれば良い



- 赤道部とIris部で成膜速度が2~3倍ほど異なる

- アイリス部は表面磁場がほとんどかからないため、問題はない
- 赤道部付近での均一化は必要

1. 研究背景
2. 成膜の再現シミュレーション
 - 平板成膜実験の再現
 - 空洞成膜実験の再現
3. Nb/Sn混合カソード開発
 - カソード設計
 - 成膜試験
4. シミュレーションを用いたNb/Sn混合カソードの最適化
5. 結論と今後の展望

結論と今後の展望

結論

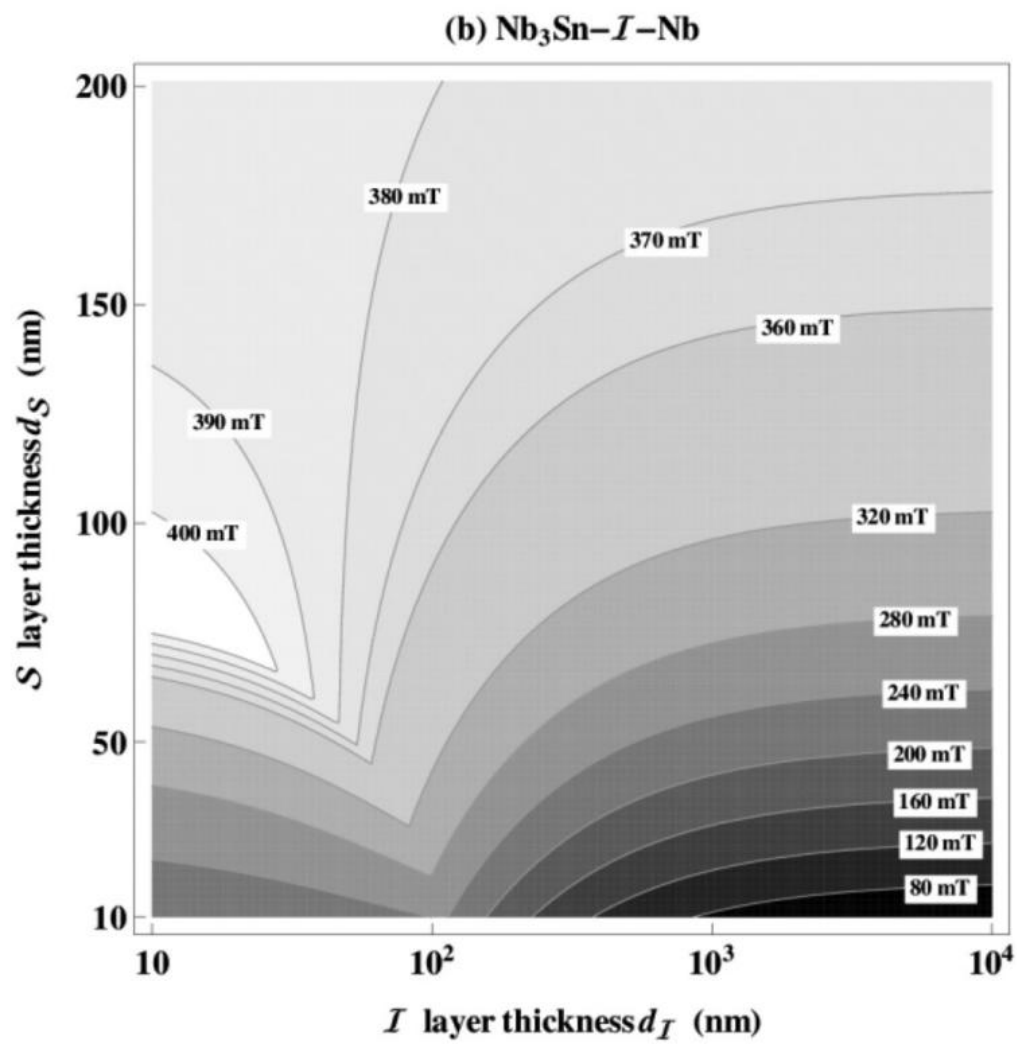
- 平板成膜、空洞成膜の再現シミュレーションを用いて、Nb:Sn成膜比の校正とAr+フラックスの解析を行った。
- NbとSnの同時成膜を可能とするNb/Sn混合カソードの開発・試作を行った。Nb/Sn混合カソードを用いた成膜試験において、Si基板上への成膜が確認した。
- Nb/Sn混合カソードを用いたシミュレーションの結果、Nb₃Sn成膜に必要なターゲット比がNb:Sn ≈ 5:1である事が分かった。

今後の展望

- Nb/Sn混合カソードの修正
 - 放電対策
 - 冷却水周りの改善
 - 押さえ治具形状や磁石配置の改善
 - ターゲット形状の最適化
 - シミュレーションによる磁場分布の最適化
 - 赤道部付近における成膜速度の均一化
-
- 空洞内面へのNb₃Snの成膜

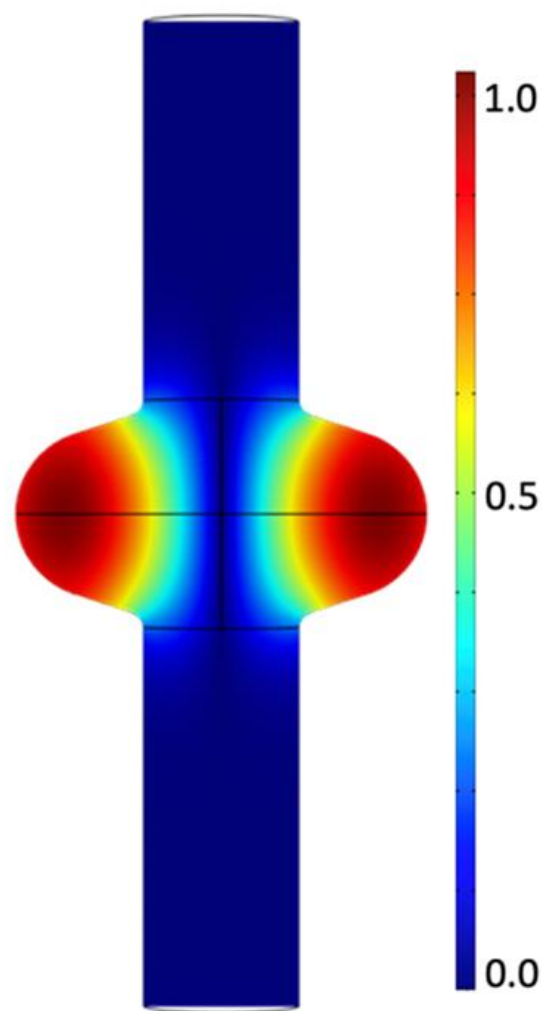
Back-up

空洞膜厚に関して

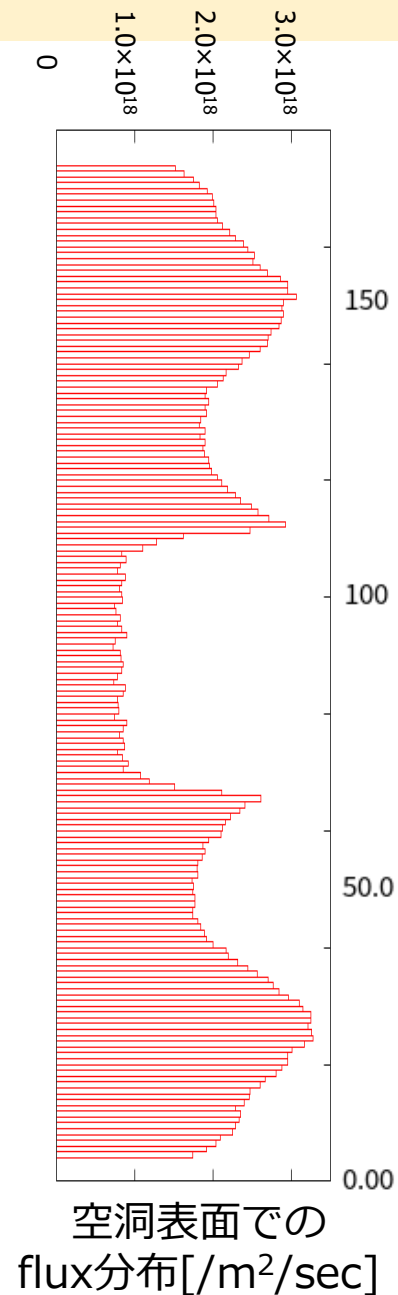
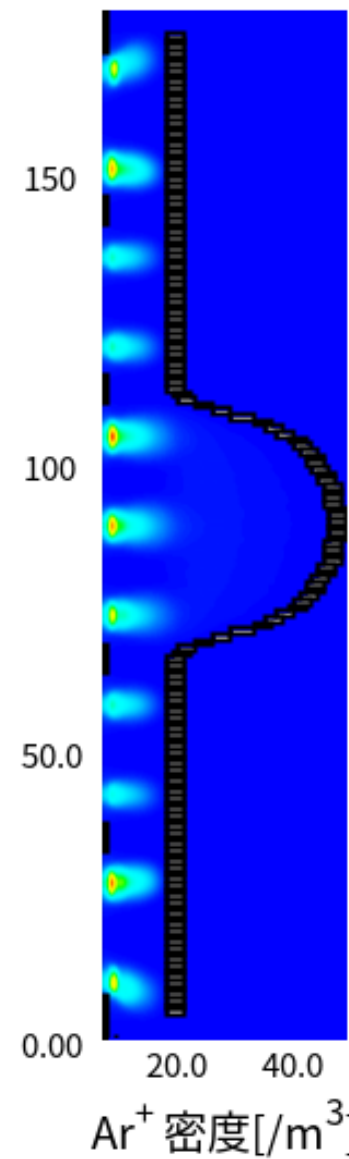


S'IS構造における B_V

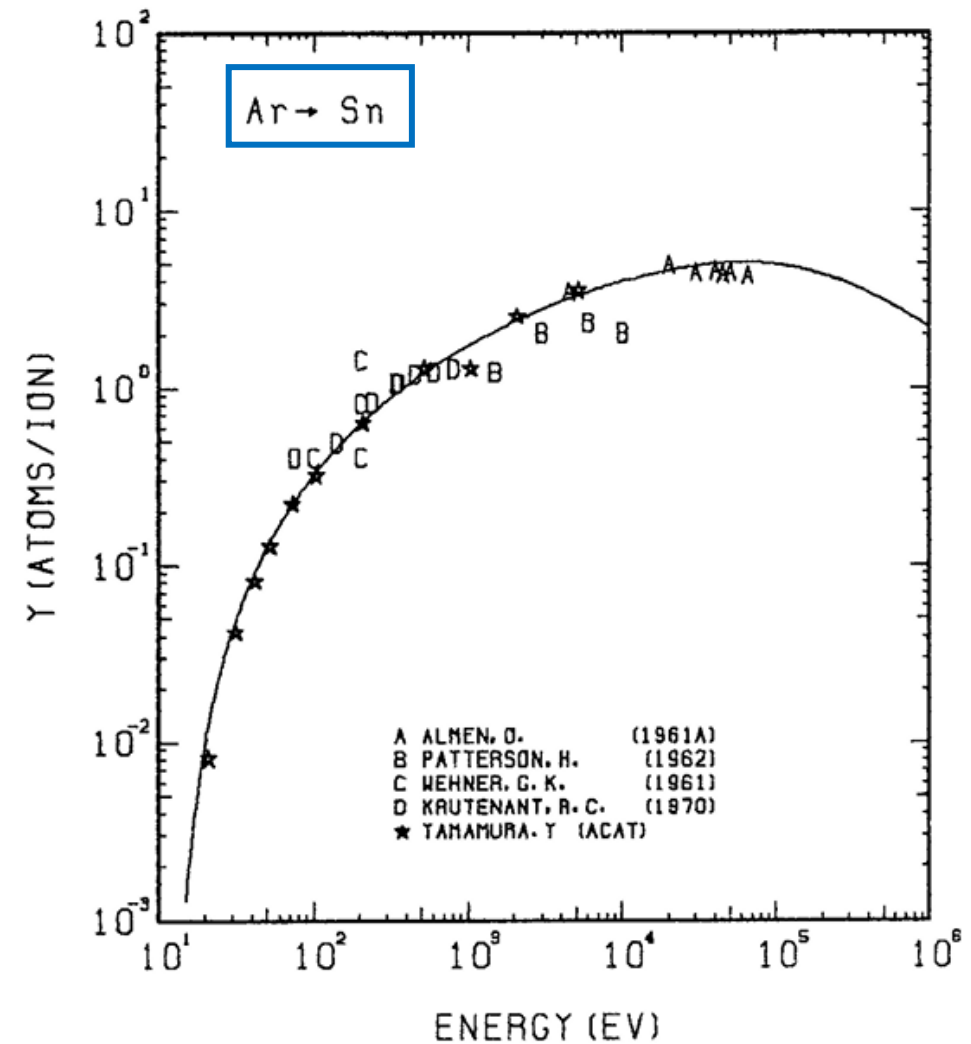
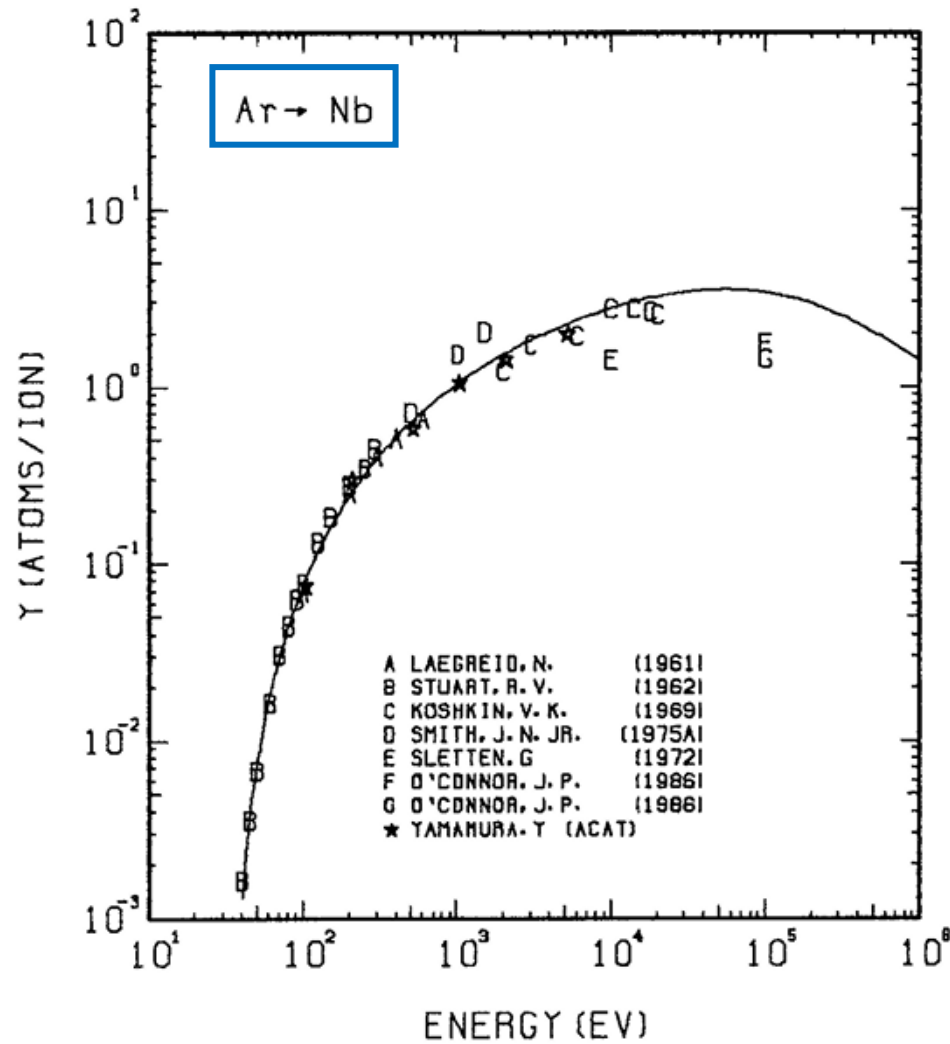
T. Kubo, Y. Iwashita, and T. Saeki, Appl. Phys. Lett. 104, 032603 (2014). doi:10.1063/1.4862892.



TESLA型空洞における
磁場強度分布



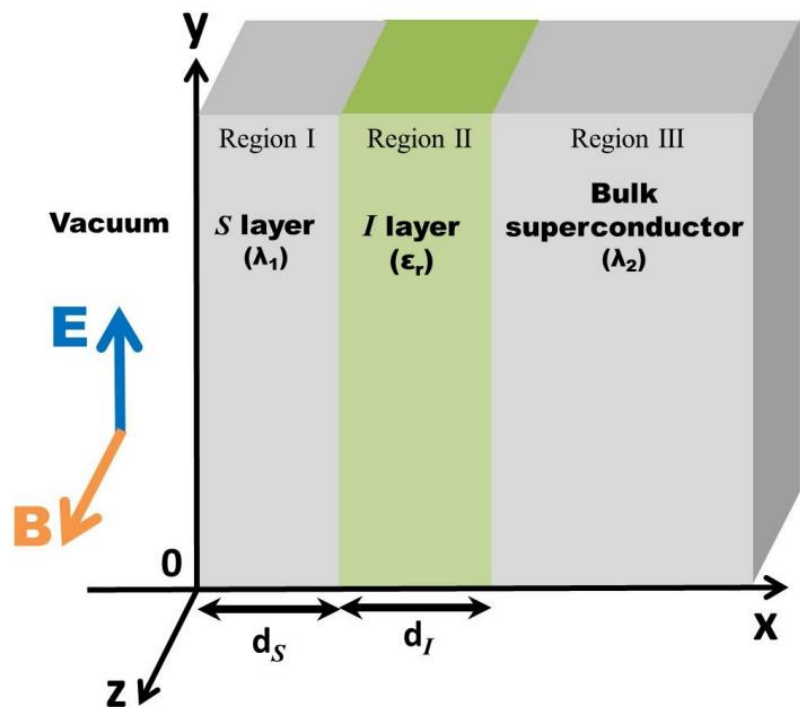
スパッタリング率に関して



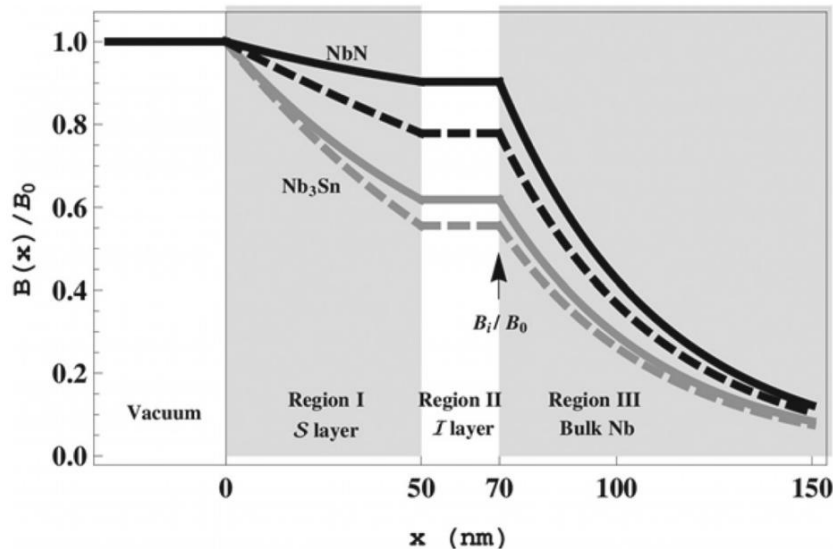
入射粒子がAr⁺の場合のスパッタリング率のAr⁺イオンエネルギー依存性

Yasunori Yamamura and Hiro Tawara, "Energy dependence of ion-induced sputtering yields from monatomic solids at normal incidence", Atomic Data and Nuclear Data Tables, 62(2):149–253, 1996.

積層薄膜構造

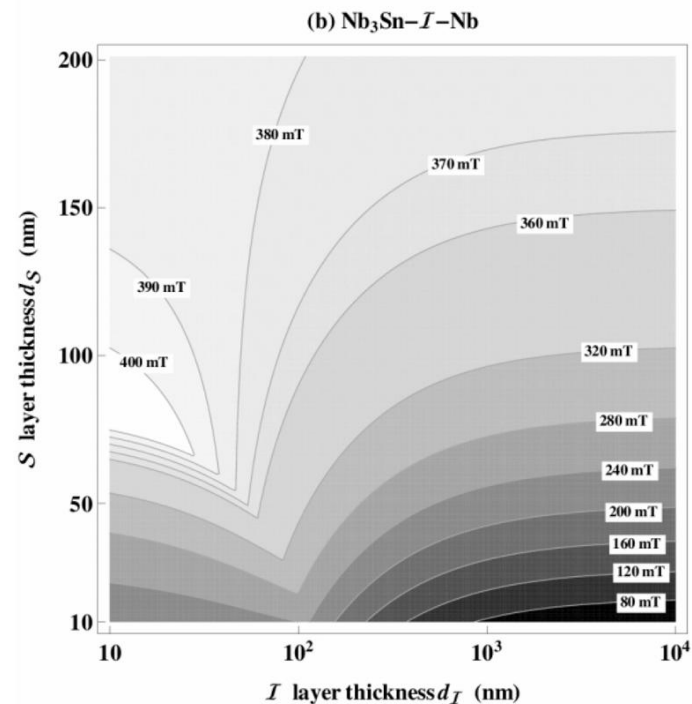
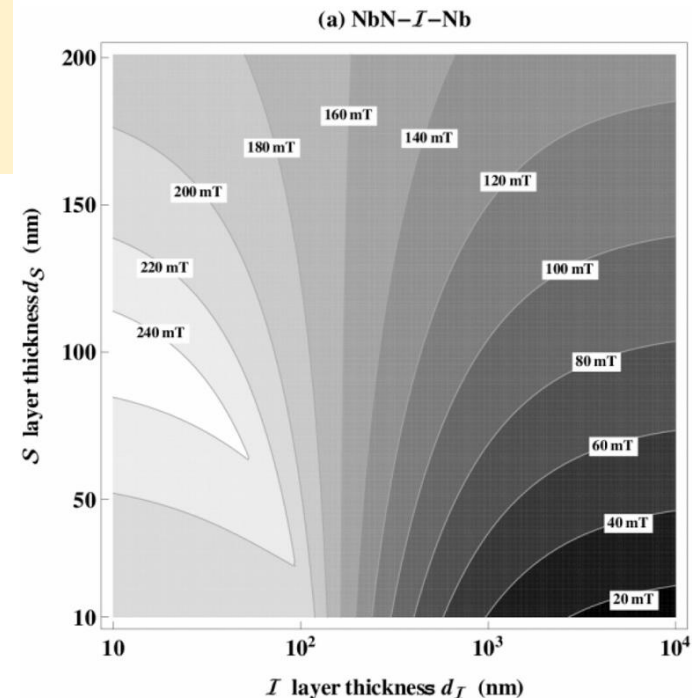


～磁束侵入開始磁場～



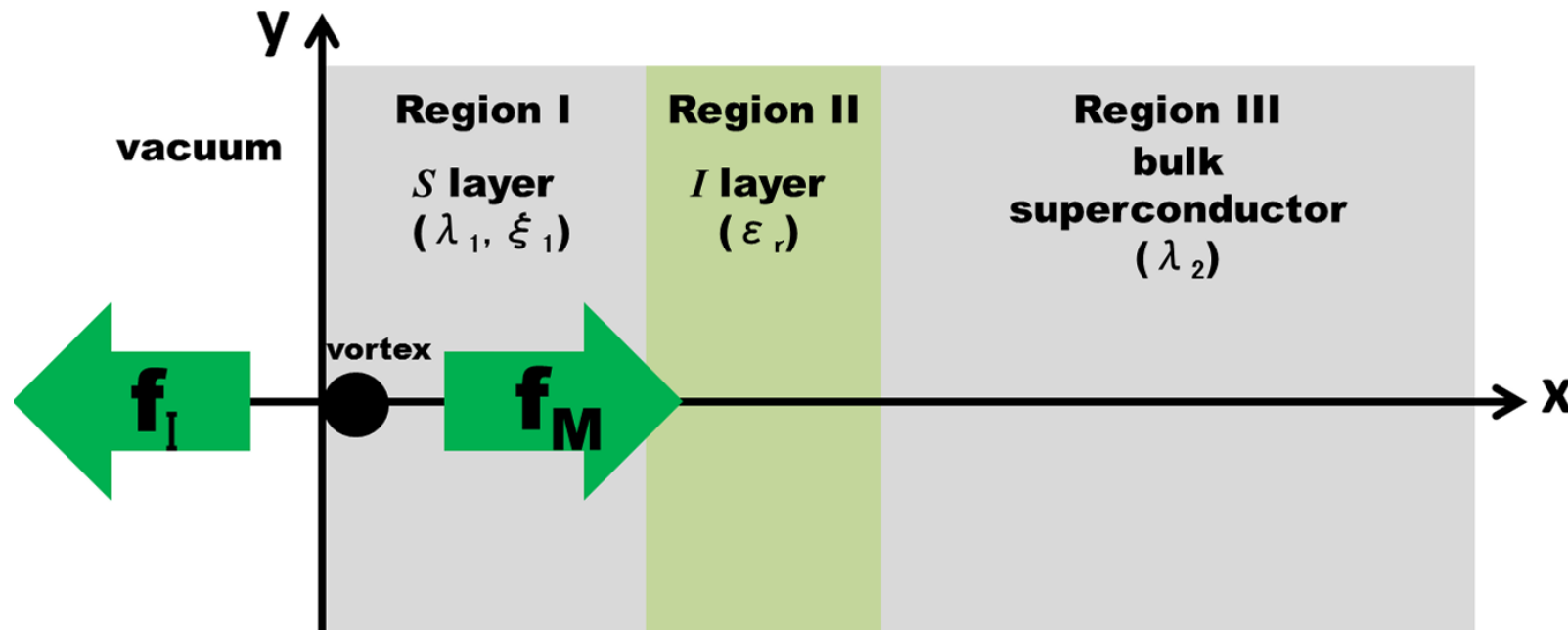
積層薄膜構造における磁場減衰の様子

$$B_v^{(S)} = \frac{\phi_0}{4\pi\lambda_1\xi_1} \frac{\cosh \frac{d_S}{\lambda_1} + \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} + \frac{d_I}{\lambda_1} \right) \sinh \frac{d_S}{\lambda_1}}{\sinh \frac{d_S}{\lambda_1} + \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} + \frac{d_I}{\lambda_1} \right) \cosh \frac{d_S}{\lambda_1}}$$



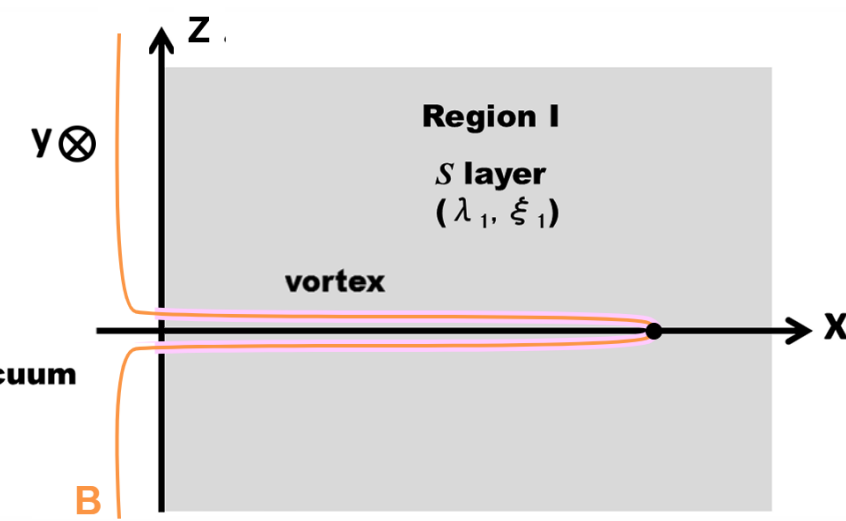
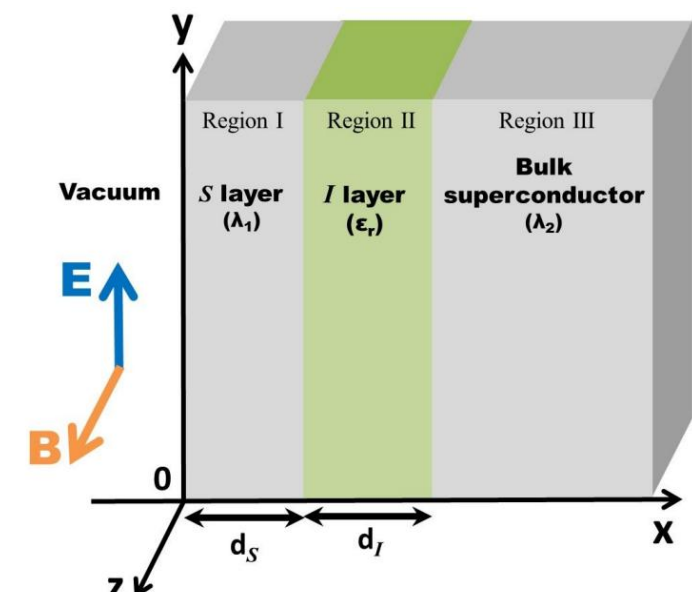
積層薄膜構造

～超伝導体内部の渦糸に作用する力～



$$f_I = \mathbf{j}_I \times \phi_0 \hat{\mathbf{z}} = -\frac{\phi_0^2}{4\pi\mu_0\lambda^2\xi} \hat{\mathbf{x}},$$

$$f_M = \frac{B_0\phi_0}{\mu_0\lambda_1} \frac{\lambda_1 \sinh \frac{d_S - x}{\lambda_1} + (\lambda_2 + d_I) \cosh \frac{d_S - x}{\lambda_1}}{\lambda_1 \cosh \frac{d_S}{\lambda_1} + (\lambda_2 + d_I) \sinh \frac{d_S}{\lambda_1}} \hat{\mathbf{x}}.$$



渦糸の模式図

※積層薄膜構造の理論文献

T. Kubo, Y. Iwashita, T.Saeki, Applied Physics Letters 104, 032603, 2014

- 薄膜(数百nm)の積層部分がバルクニオブを磁場や渦糸の侵入から守る構造
- 渦糸が表層で発生した場合でも、**絶縁体層で渦糸が消失するため、バルクニオブを渦糸から保護**
- 積層部分で磁場が減衰するため、より大きな電磁場を励起することが可能、Nb空洞に比べてNb₃Snを用いると**加速勾配が約2倍向上する**。



積層薄膜構造の模式図

〈vs Nb空洞〉

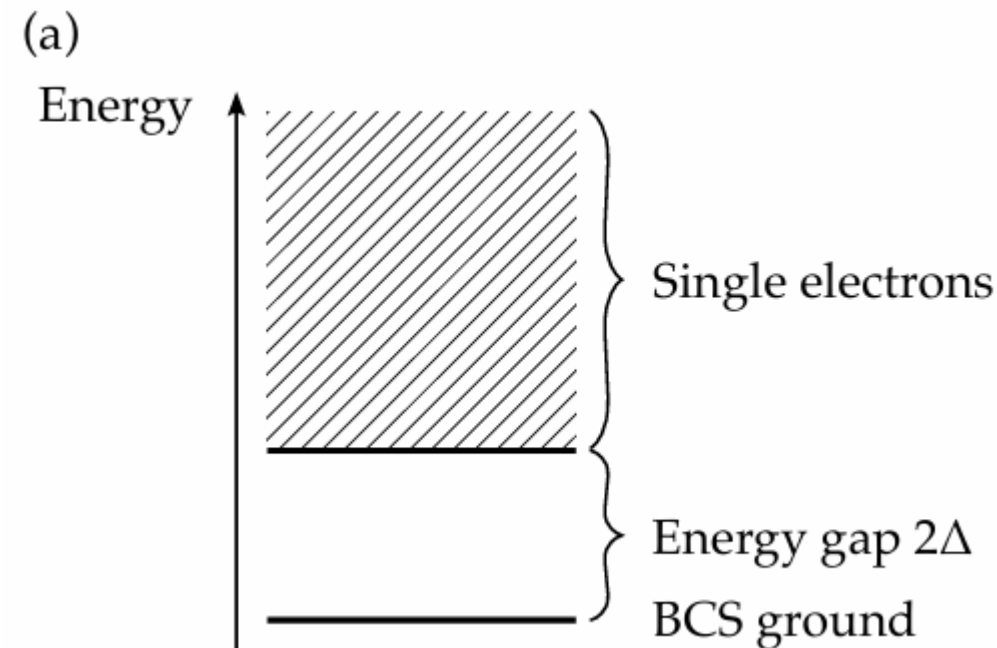
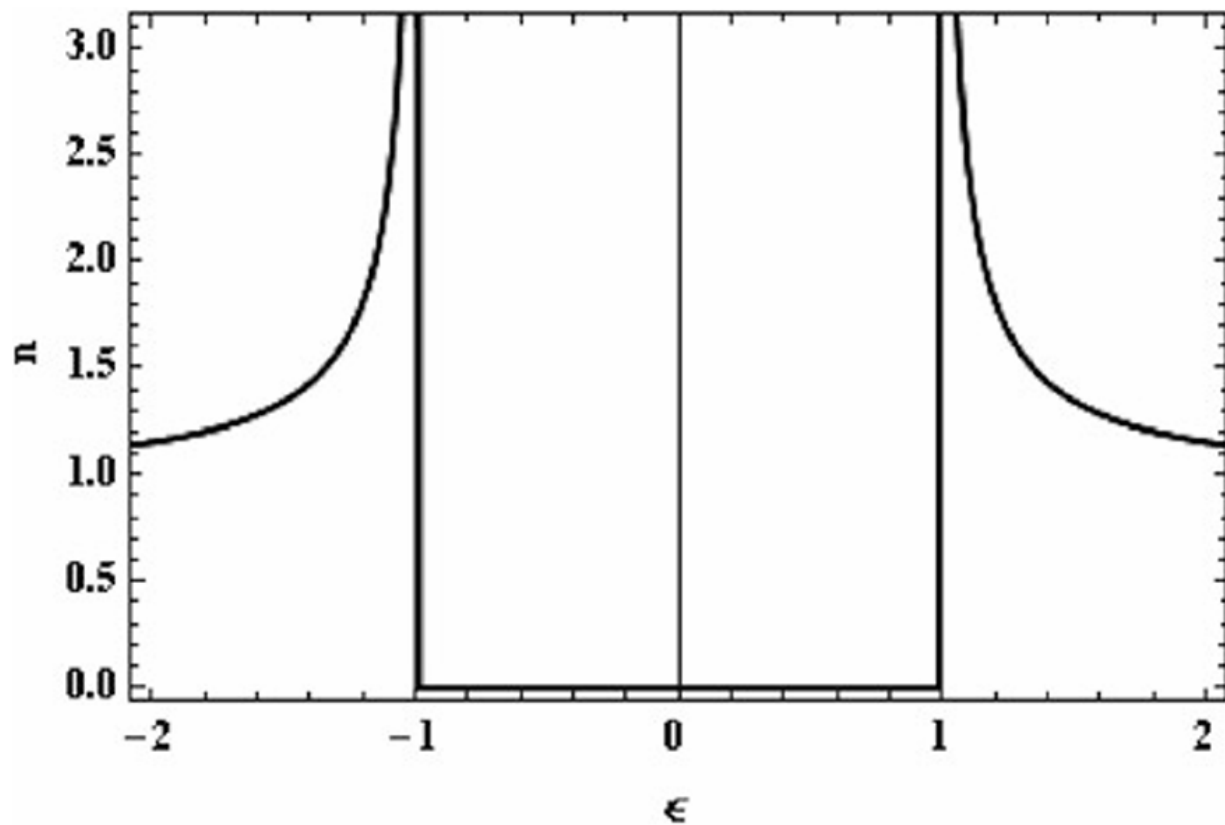
- 積層部分で磁場を減衰する分だけ、表面磁場をより大きく印加することが可能
- バルクニオブのみの場合、渦糸を止める仕組みが存在しない



〈vs 数 μm の厚さのNb₃Sn空洞〉

- 積層の方が表面の層が薄く、侵入する渦糸の全長は短いため、渦糸の口スが抑制される
- 渦糸の口数が多いと超伝導状態が壊れやすい。積層の方が高い表面磁場に晒される上では有効





Y. Arimoto, "超伝導の基礎II", OHO'22, 2022

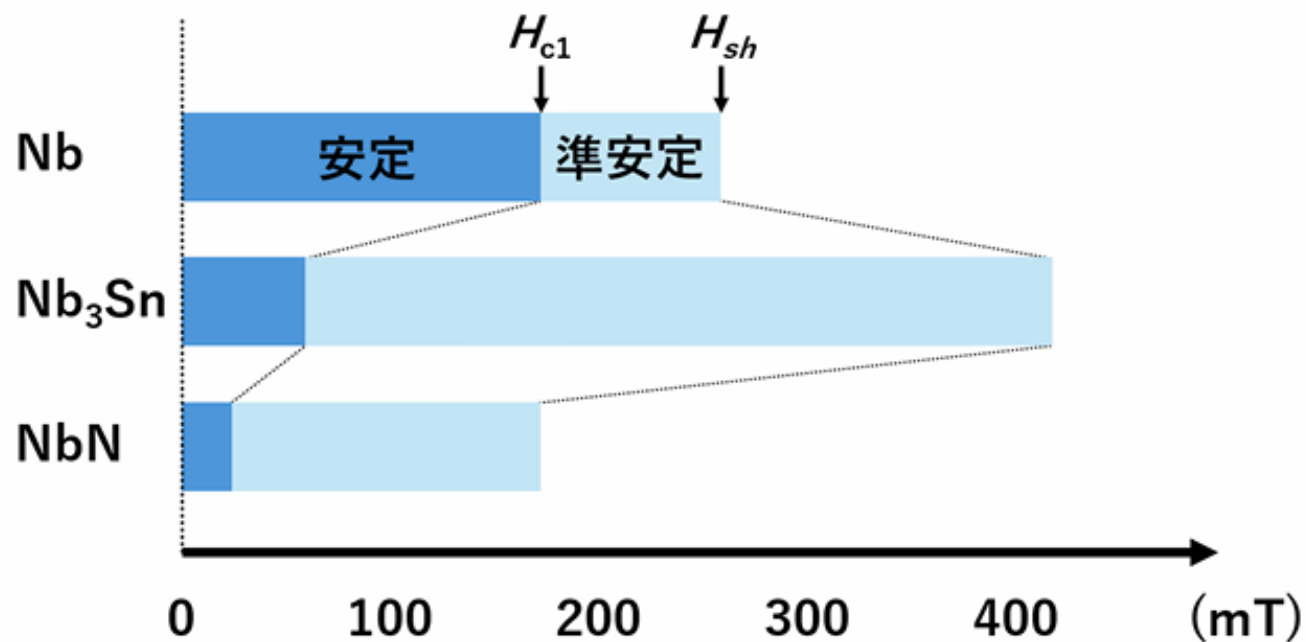
図4 準粒子状態密度. 横軸 (エネルギー) はペア・ポテンシャル Δ で規格化, 縦軸 (状態密度) はフェルミ・エネルギーでの状態密度で規格化してある.

$$R_{\text{BCS}} = A \frac{\omega^2}{T} \exp \left(-\frac{\Delta(0)}{k_B T_c} \cdot \frac{T_c}{T} \right)$$

金属種ごとの超伝導特性

金属種	臨界温度 T_c [K]	下部臨界磁場 $\mu_0 H_{c1}$ [mT]	熱力学的臨界磁場 $\mu_0 H_c$ [mT]	ロンドン長 λ_L [nm]
Nb	9.2	170	200	40
Nb ₃ Sn	18	50	540	85
NbN	16.2	20	230	200

荻津 透, 古屋 貴章, "超伝導入門", 加速器, 16(4):240-250, 2019.



成膜手法(DCマグネトロンスパッタリング)

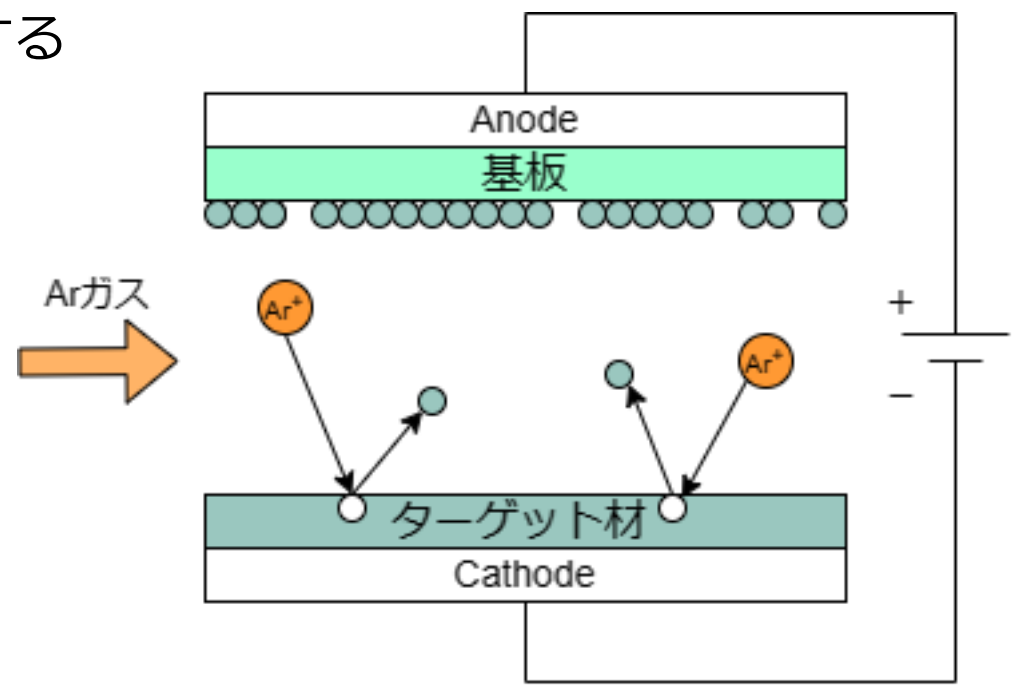
- DCマグネトロンスパッタリング …… 磁場を用いて電子の閉じ込め機構を作り、プラズマ密度を上げ、効率よくスパッタリングを行う

〈成膜ステップ〉

1. チェンバー内にArを充填し、カソードに電圧を印加する
2. 電子がグロー放電し、Arと反応してAr+を生成する
3. Ar+がカソード表面に引き寄せられ、ターゲット材の粒子をはじき出す

〈特長〉

- 3.0GHz空洞などの複雑な空洞形状の内面に対して均一な成膜が可能
- チェンバー内部のAr圧力や印加電圧などを調節する事で膜厚の詳細なコントロールが可能
- ターゲット材を複数用意する事で異なる金属の同時成膜が可能



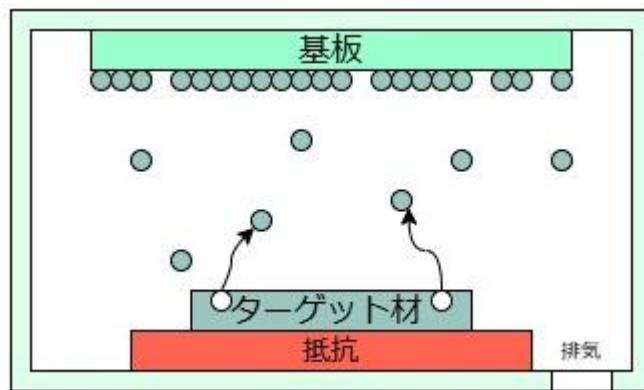
スパッタリングの模式図

成膜手法(DCマグネトロンスパッタリング)

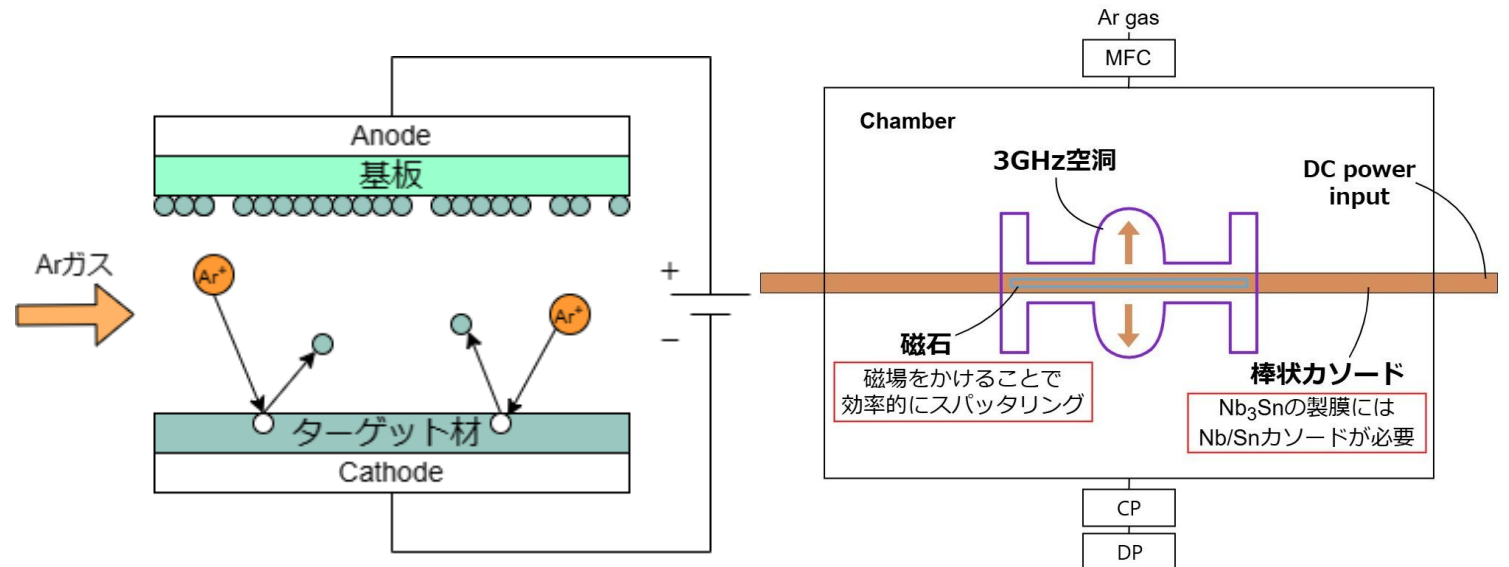
- DCマグネトロンスパッタリング …… 磁場を用いて電子の閉じ込め機構を作り、効率よくスパッタリングを行う

〈蒸着との比較〉

- 仕組みや装置 → 蒸着の方がシンプル
- 構造体に対する成膜、NbとSnの同時成膜 → スパッタリングが優れる
- 成膜速度、量産性 → スパッタリングが優れる



蒸着の模式図



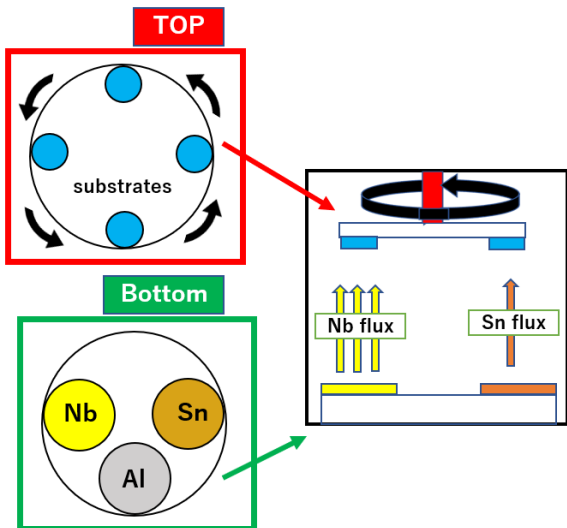
スパッタリングの模式図

平板成膜装置に関して

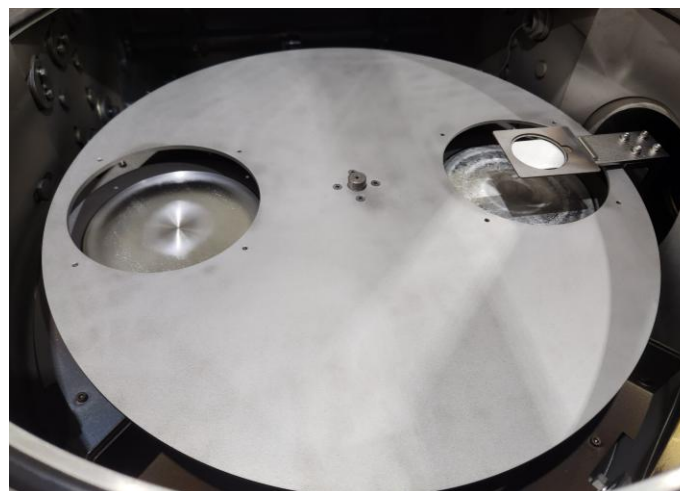


平板成膜装置の上面

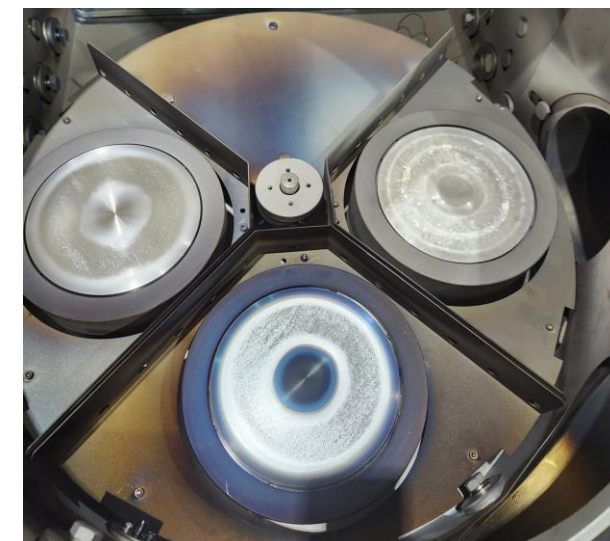
- 成膜時にはシャッターを用いて必要なターゲットのみを露出させる。
- ターゲットの下側にリング状の磁石(N35)が配置されている。



平板成膜装置の模式図



平板成膜装置の下面
※シャッターあり



平板成膜装置の下面
※シャッターなし

〔モジュールの原理〕

1. 静磁場解析モジュール(MSSM)

- 有限要素法を用いて**電磁界**を解析

2. プラズマPIC/MCCモジュール(PIC-MCCM)

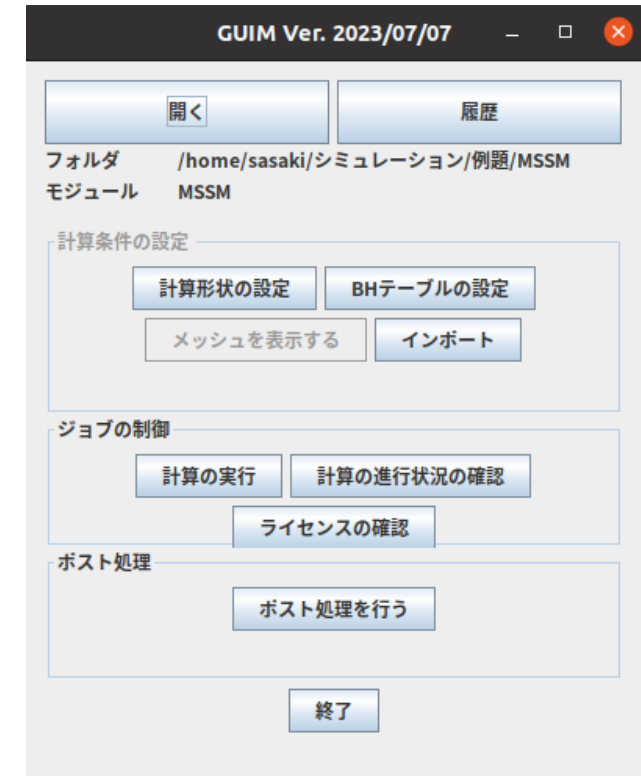
- Particle-in-Cell法とMCCモデルを用いて**プラズマの挙動**を解析

3. スパッタリングシミュレーションモジュール(SPUSM)

- 2体衝突近似に基づくモンテカルロ法を用いたシミュレーションによって、**スパッタ粒子の境界条件**を解析

4. 中性粒子DSMCモジュール(DSMCM)

- DSMC法とテスト粒子モンテカルロ法を用いて**中性粒子の挙動**を解析



PEGASUSシミュレーション

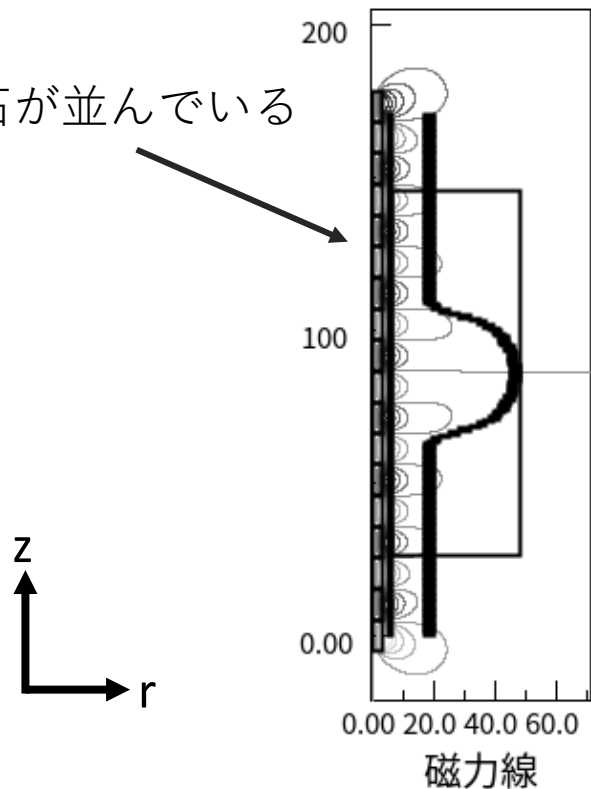
〔シミュレーションの流れ〕

① 静磁場解析モジュール(MSSM)



空間の静磁場を計算

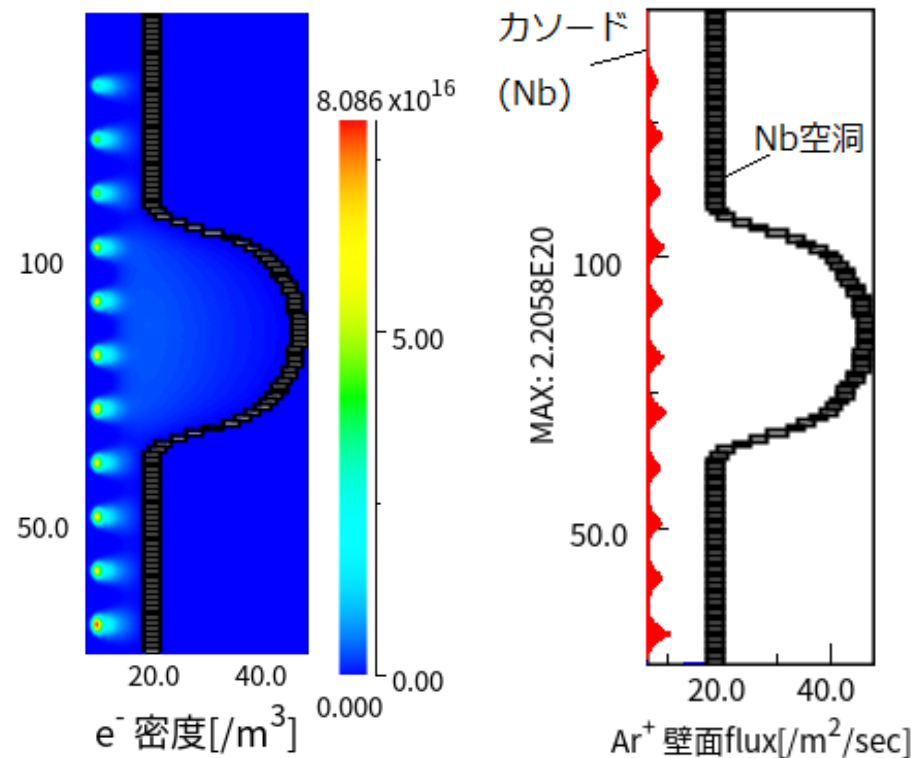
※棒磁石が並んでいる



② プラズマPIC/MCCモジュール(PIC-MCCM)



静磁場内のプラズマの様子
ターゲットへのイオンフラックスを計算



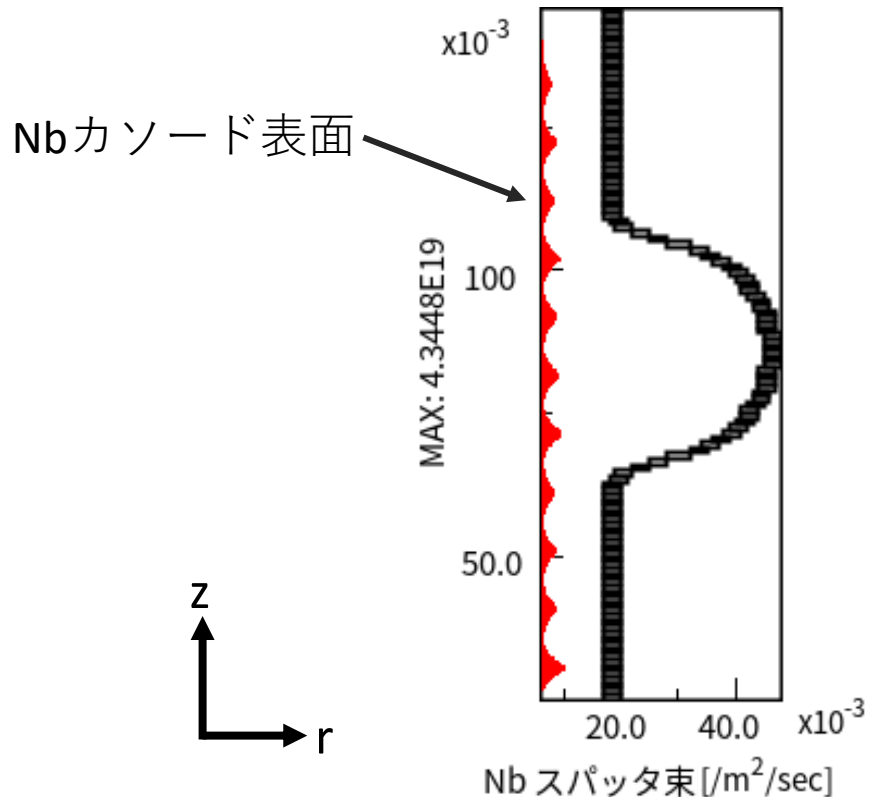
PEGASUSシミュレーション

〔シミュレーションの流れ〕

③ スパッタリングシミュレーションモジュール (SPUTSM)



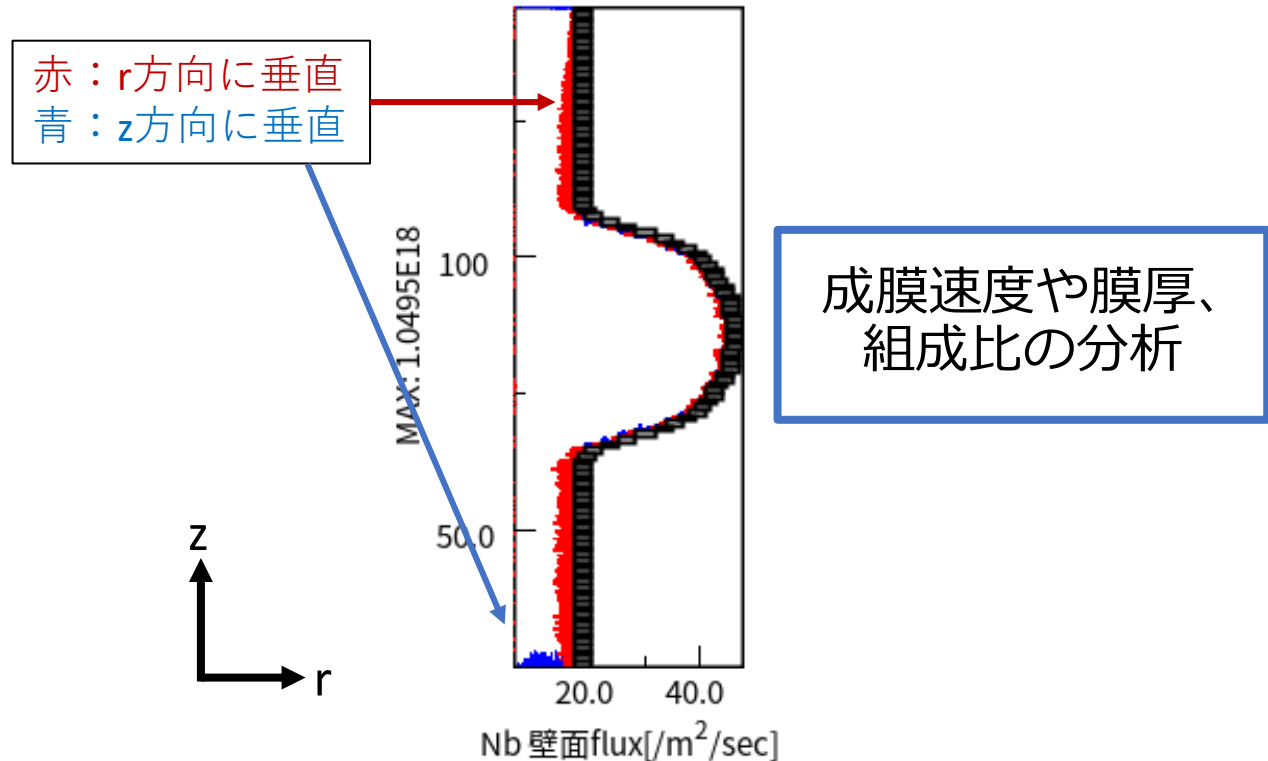
ターゲットから飛び出すスパッタ粒子を解析



④ 中性粒子DSMCモジュール (DSMCM)



装置内のスパッタ粒子の運動を追跡
基板に到達するスパッタ粒子のフラックスを解析



シミュレーション条件の詳細(平板成膜)

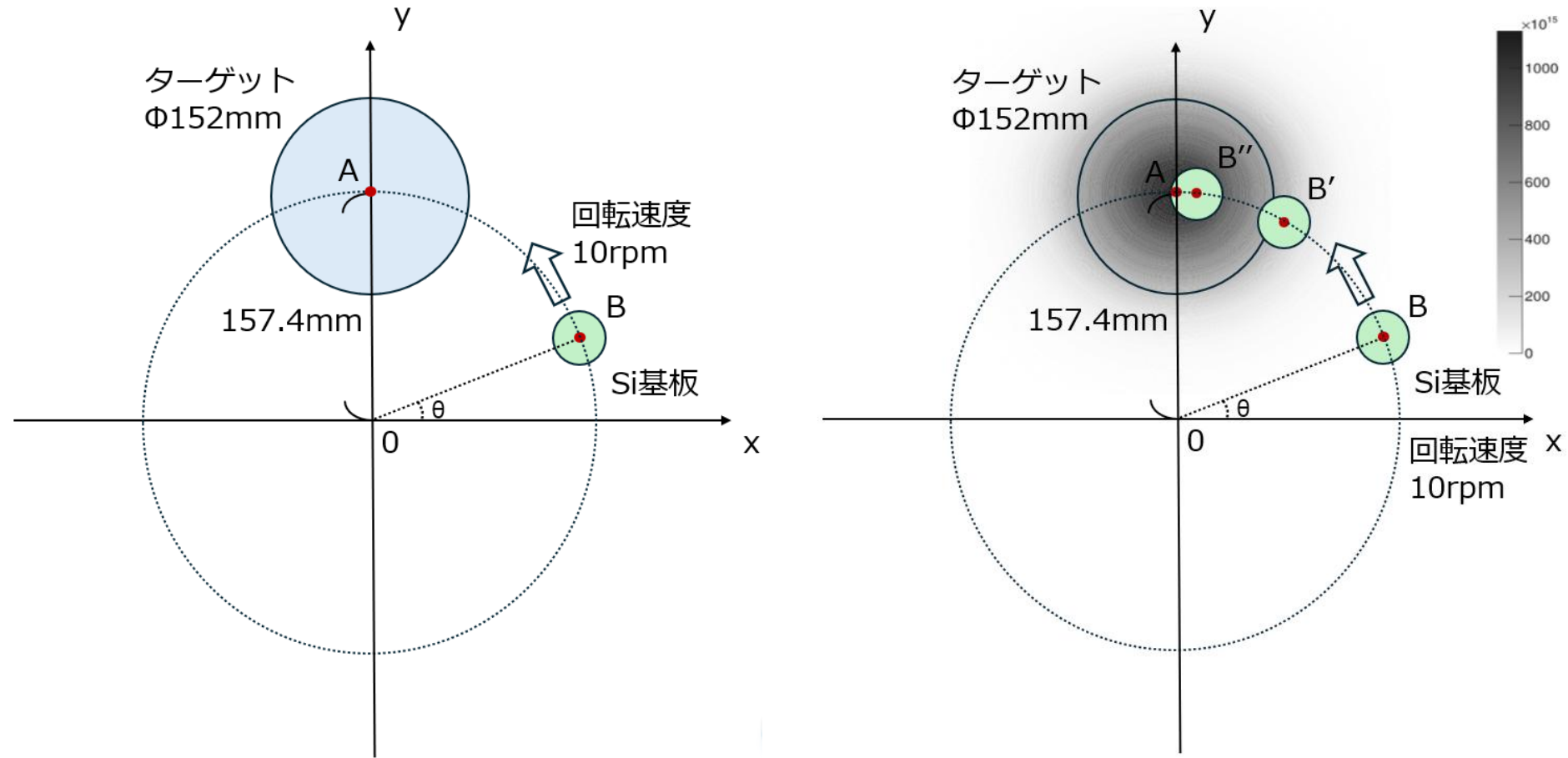
- 実際の平板成膜装置の形状に合わせた計算形状、解析領域を設定
ターゲットの中心を $r=0\text{mm}$ として計算領域を設計
- Ar流量を 50sccm として解析
- 初期 Ar^+ , e^- 密度は一様分布として与えている

表 3.2: 平板成膜再現シミュレーションにおける制御パラメータ

項目	(a)	(b)
粒子種	Nb	Sn
カソードへの印加電圧 [V]	-350	-330
e^- 初期密度 [$1/\text{m}^3$]	1.0×10^{14}	1.0×10^{14}
e^- 初期超粒子数	70,000	70,000
Ar^+ 初期密度 [$1/\text{m}^3$]	1.0×10^{14}	1.0×10^{14}
Ar^+ 初期超粒子数	70,000	70,000
Ar 初期密度 [$1/\text{m}^3$]	1.14×10^{20}	1.14×10^{20}
時間間隔 [sec]	1.0×10^{-10}	1.0×10^{-10}

← 修士論文からの訂正

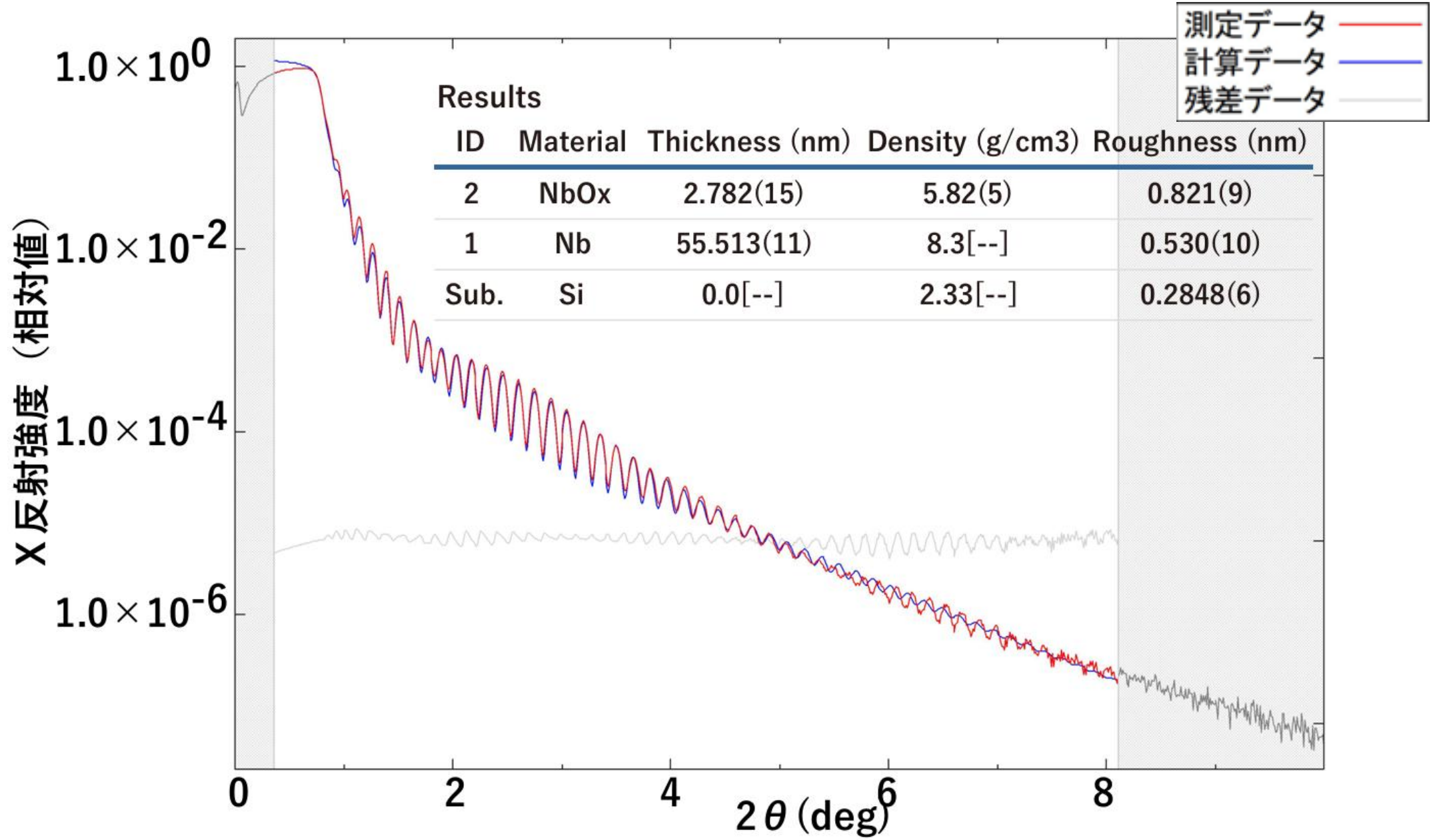
結果 - フラックス解析



- 計算形状上面(Si基板の位置に対応)へのNbフラックスが得られた
- ターゲット中央付近($r=0$)で最もフラックスが得られた
- Snターゲットを用いた場合、Nbの4倍程度のフラックスが得られた

XRR測定例 (X線反射率測定)

Measured by 佐貫

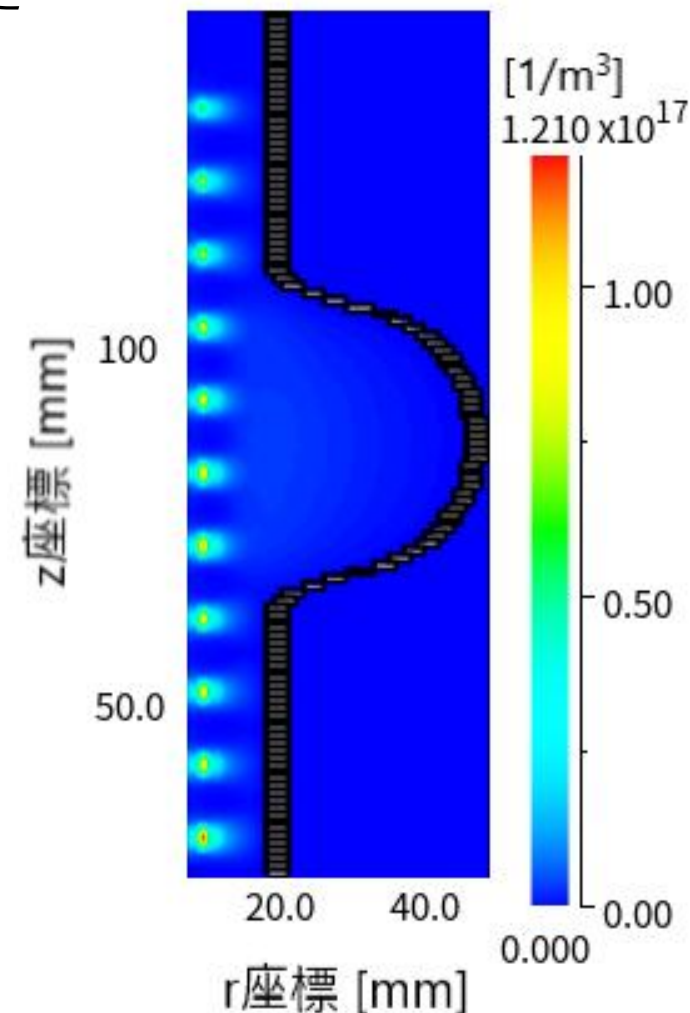


シミュレーション条件の詳細(空洞成膜)

- 実際の成膜装置の形状に合わせた計算形状、プラズマ解析領域を設定
 - i. 磁石長10mm, Ar 80sccm ※最初期にArを過剰に流入
 - ii. 磁石長10mm, Ar 100sccm ※最初期にArを過剰に流入
 - iii. 磁石長20mm, Ar 80sccm

表 3.7: 空洞成膜再現シミュレーションにおける制御パラメータ

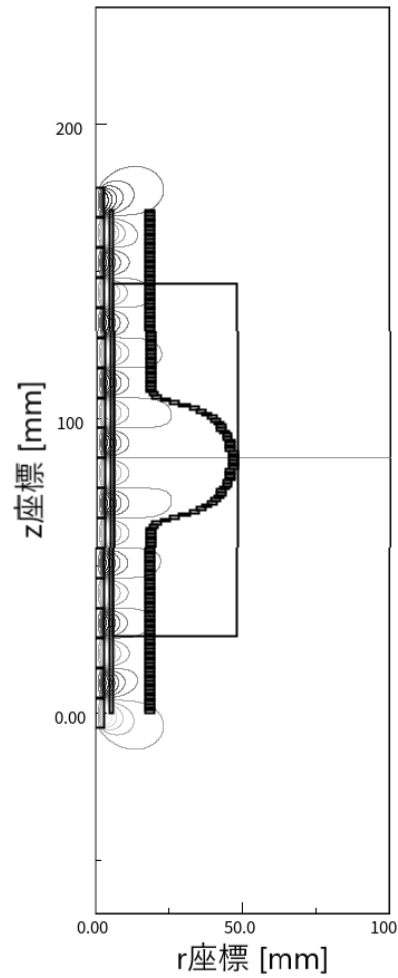
項目	(i)	(ii)	(iii)
e^- 初期密度 [$1/m^3$]	図 3.21	図 3.21	1.0×10^{14}
e^- 初期超粒子数	2,000,000	2,000,000	100,000
Ar^+ 初期密度 [$1/m^3$]	図 3.21	図 3.21	1.0×10^{14}
Ar^+ 初期超粒子数	2,000,000	2,000,000	100,000
Ar 初期密度 [$1/m^3$]	1.33×10^{20}	1.98×10^{20}	1.33×10^{20}
時間間隔 [sec]	1.0×10^{-10}	1.0×10^{-10}	1.0×10^{-10}
磁石長 [mm] ※ネオジム	10	10	20



初期 Ar^+ 密度分布

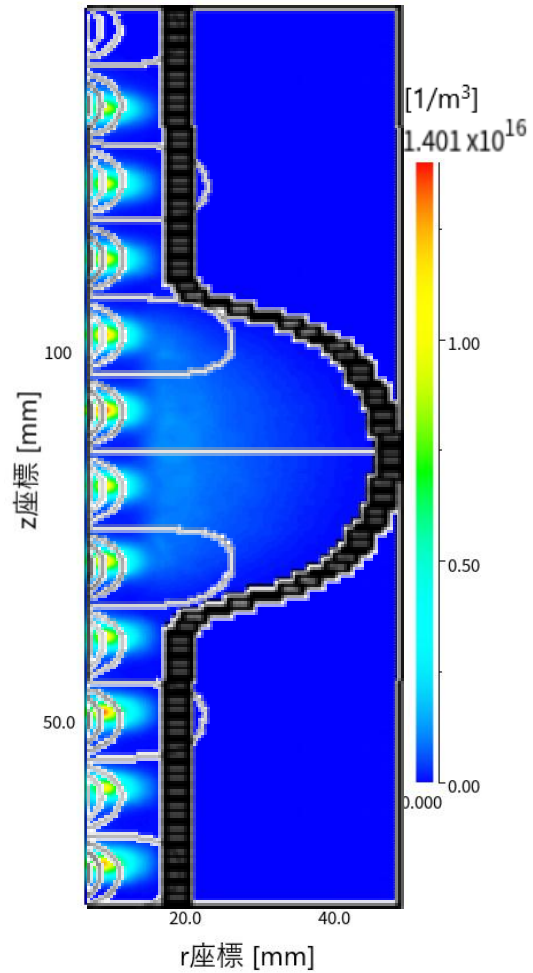
結果 - プラズマ解析

～磁石長10mm～



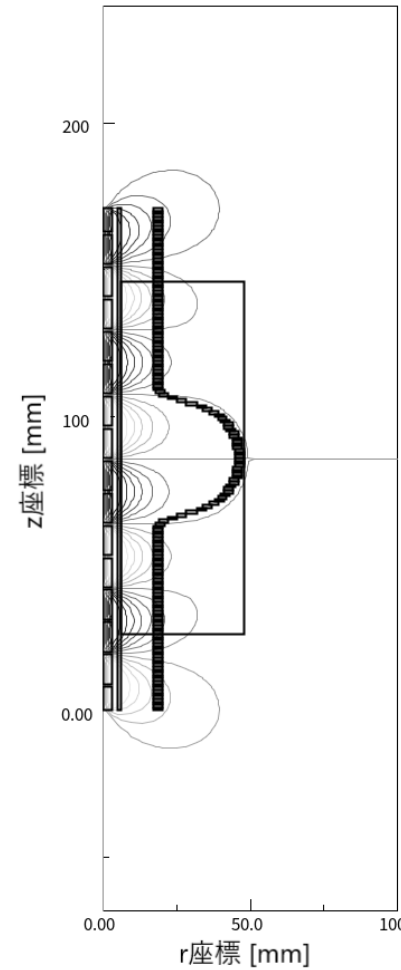
磁場分布

Ar 100sccm



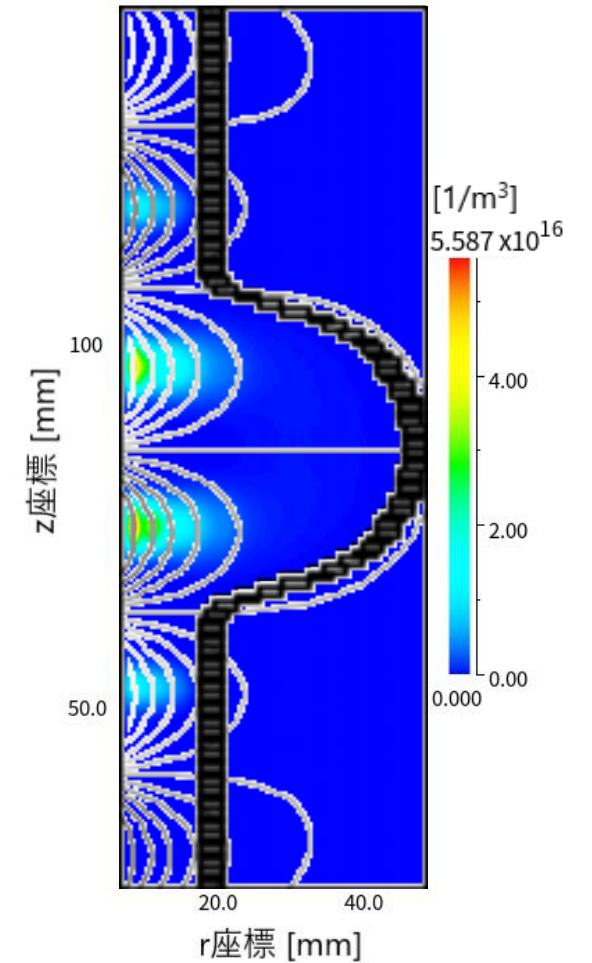
Ar+プラズマ分布

～磁石長20mm～



磁場分布

Ar 80sccm



Ar+プラズマ分布

結果 - フラックス解析

条件	赤道部 [nm/sec]	アイリス部 [nm/sec]
磁石長10mm, Ar100sccm	3.31×10^{-3}	1.13×10^{-2}
磁石長20mm, Ar80sccm	5.59×10^{-3}	7.43×10^{-3}
(磁石長10mm) 実験結果	3.5×10^{-1}	-

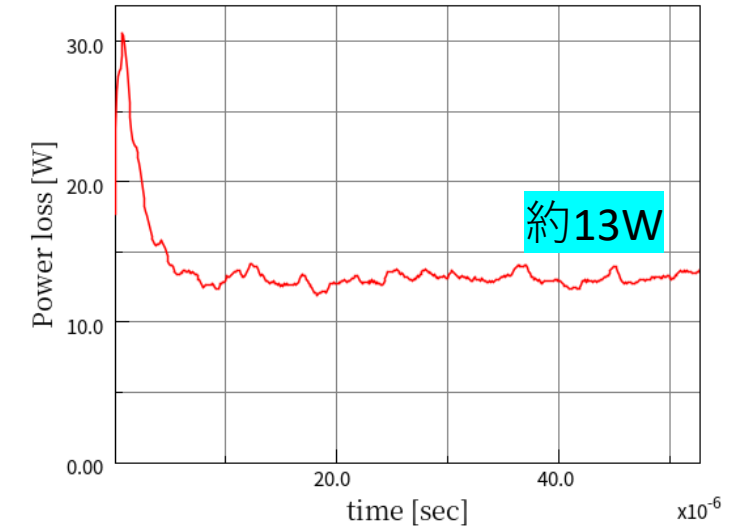
シミュレーションで得られたflux

- シミュレーションと実験で成膜速度の差が見られる。
- 赤道部とアイリス部間で成膜速度の差が見られる。

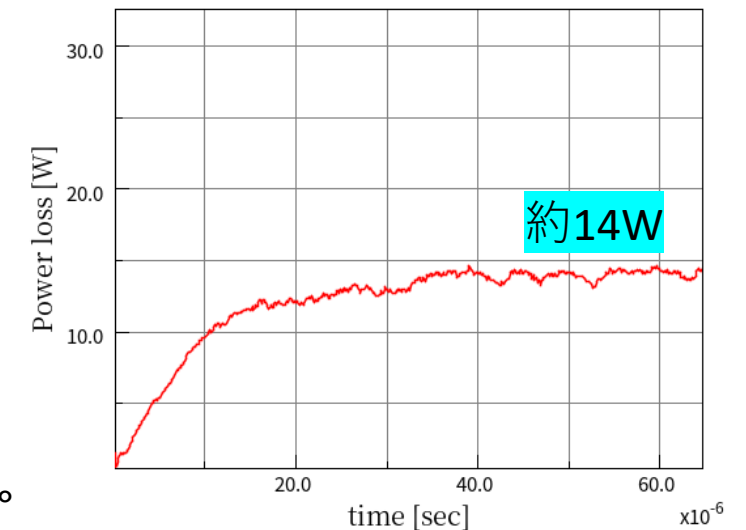


- 成膜装置の投入パワー(約100W)との乖離やシミュレーション由来の誤差が成膜速度の違いを生んだ一要因。
- 赤道部とアイリス部間で成膜速度の差はアイリス部で表面磁場がほとんどかからないため問題がないといえる。

磁石長10mm, Ar100sccm



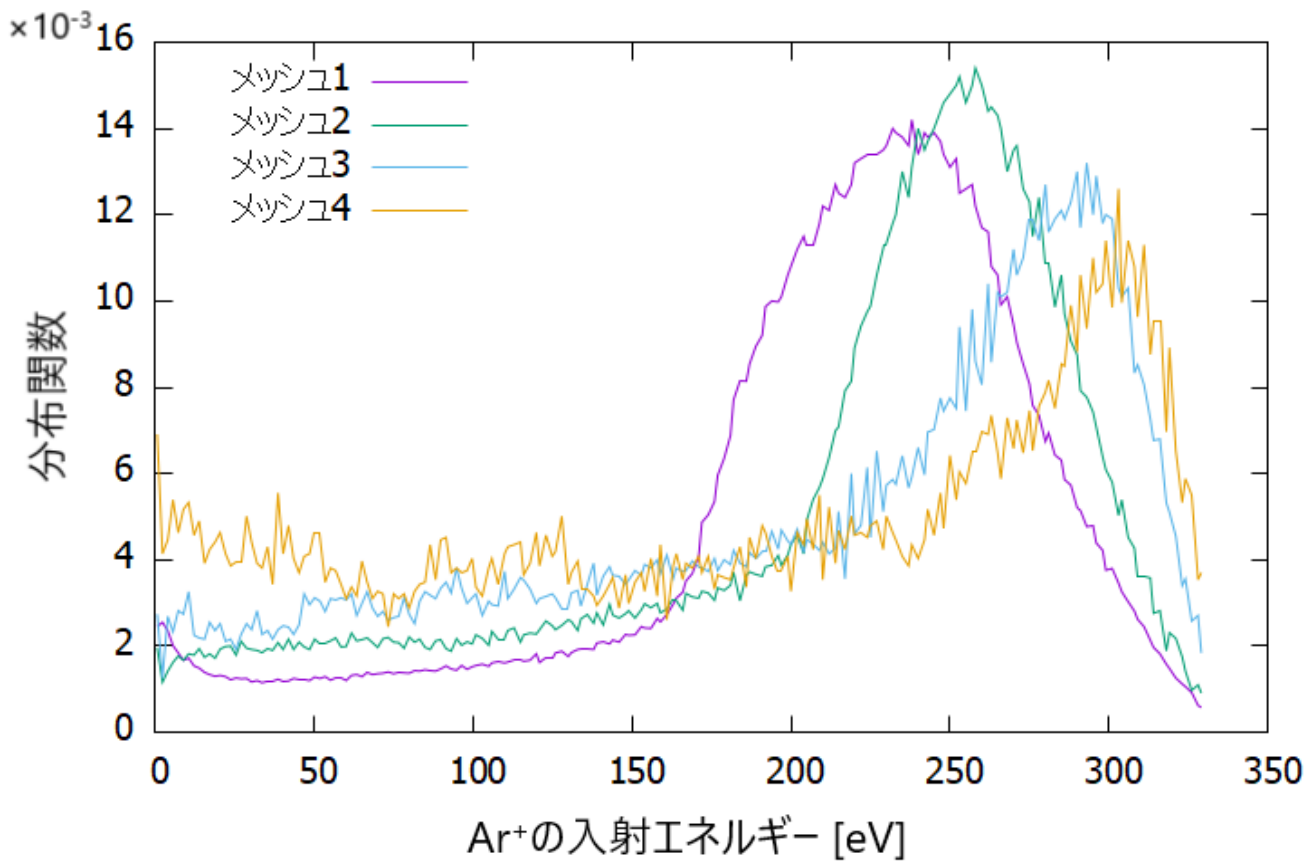
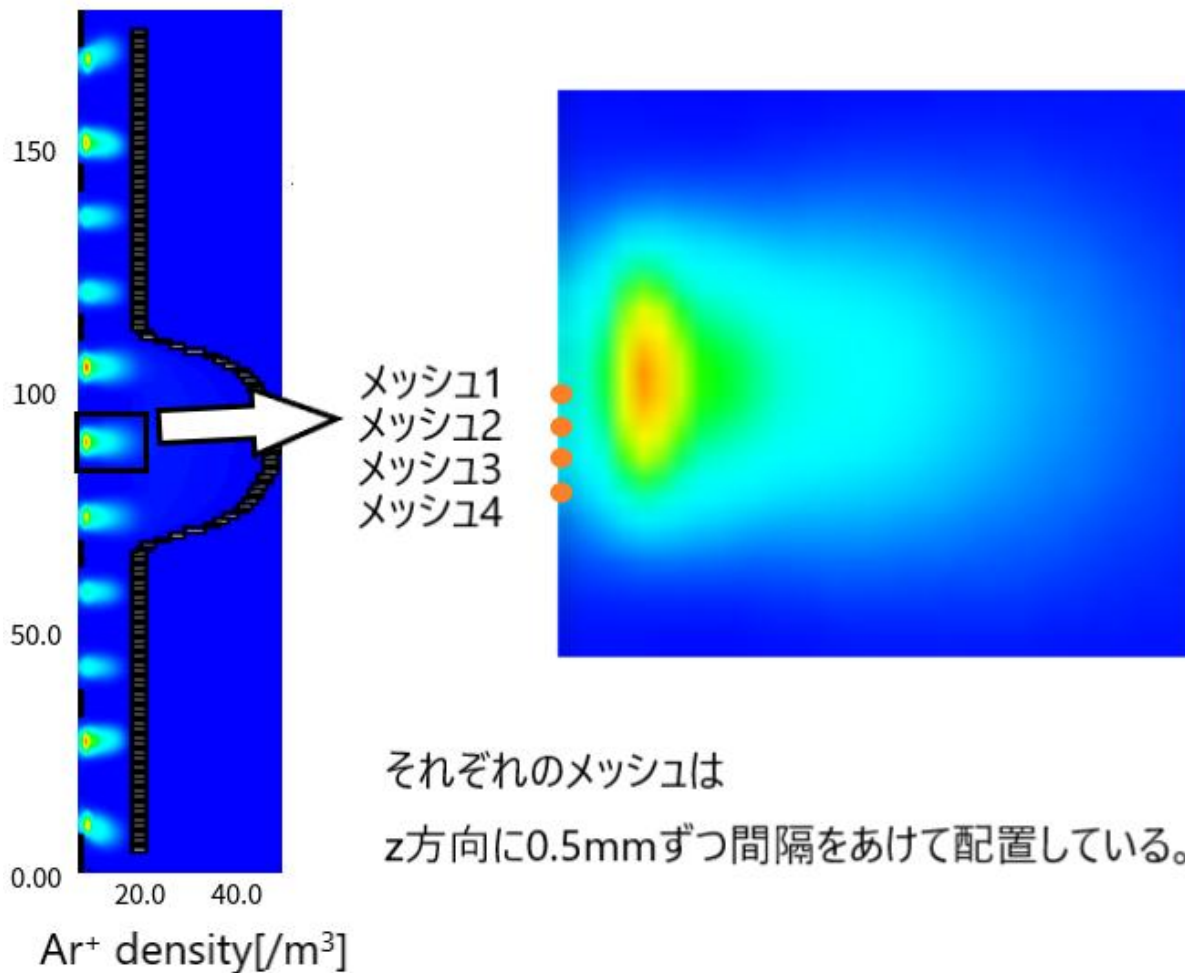
磁石長20mm, Ar80sccm



荷電粒子が失った総エネルギーの時間変化

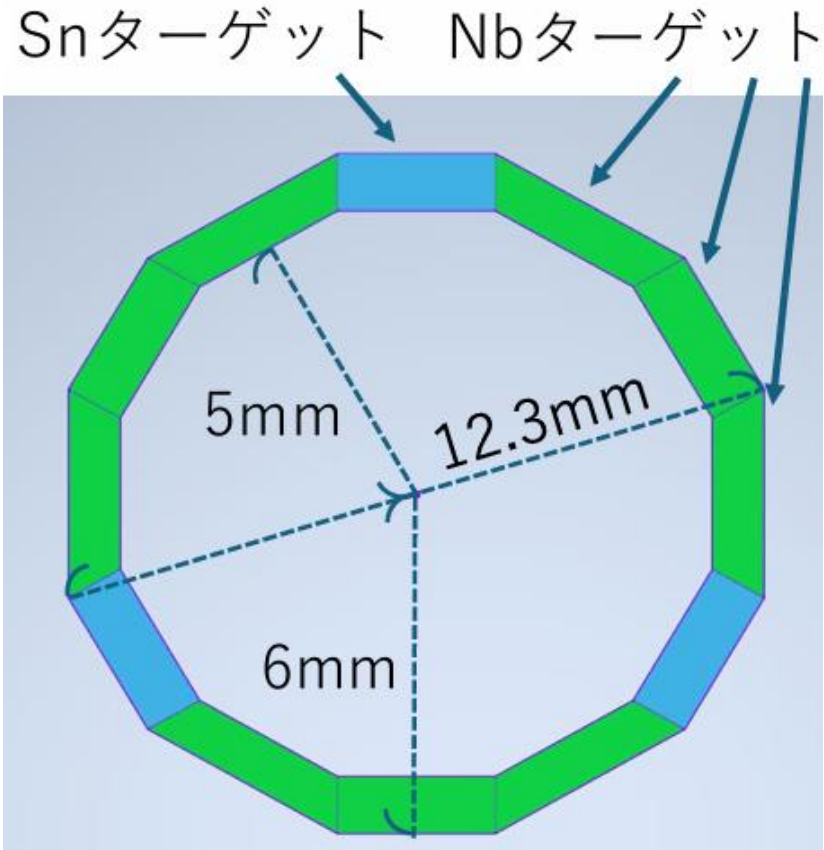
シミュレーションにおけるAr⁺入射エネルギー

- Nb/Sn混合カソードを用いたシミュレーションにおけるAr⁺の入射エネルギーを示す。



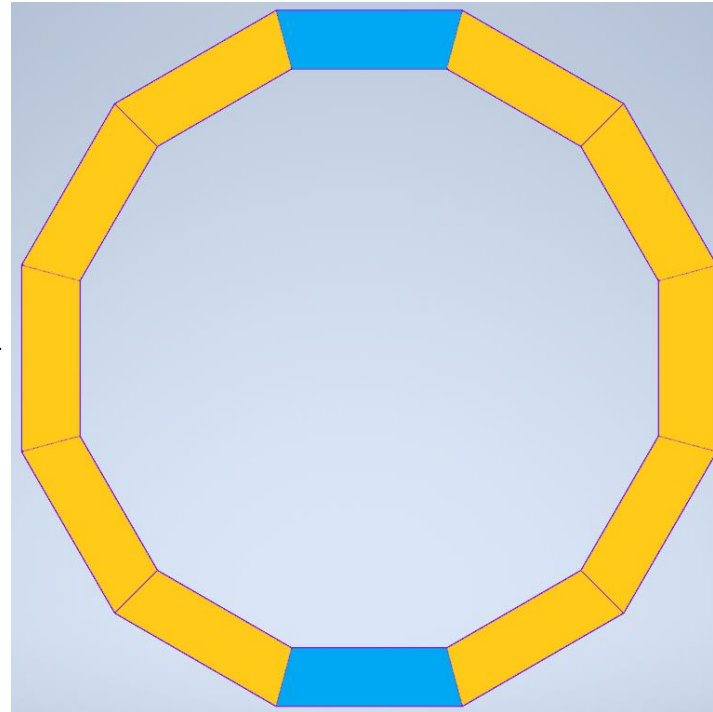
ターゲットに関して

➤ Nb_3Sn の成膜に向け、ターゲットの表面積比を $\text{Nb}:\text{Sn}\approx 5:1$ にする必要がある。



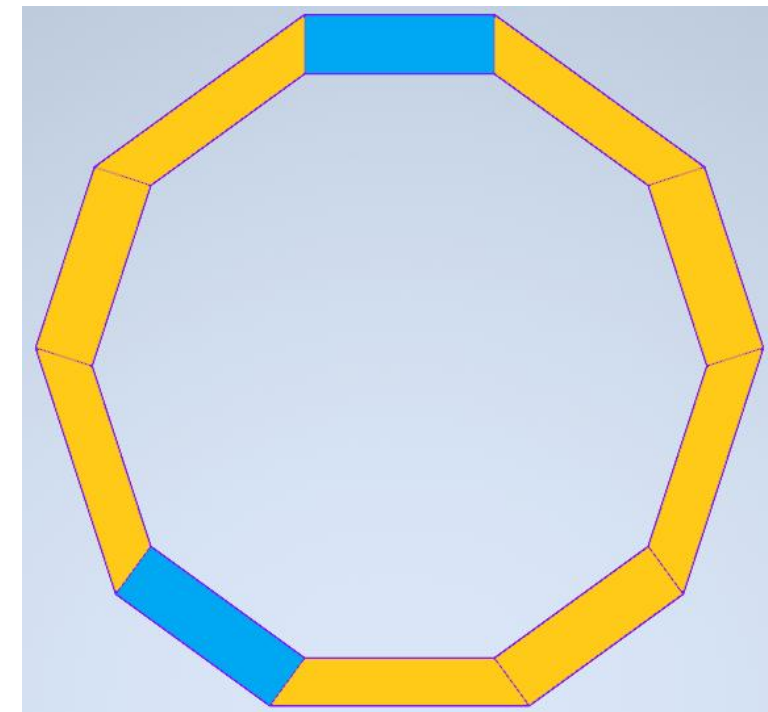
12角柱案
 $\text{Nb}:\text{Sn}=3.75:1$

全て台形ターゲット



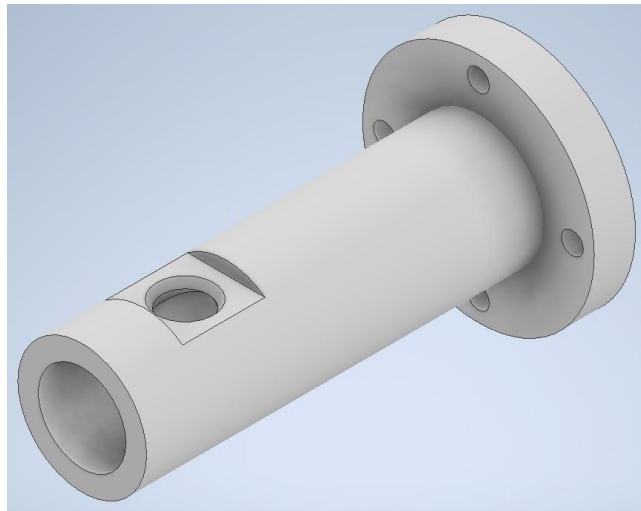
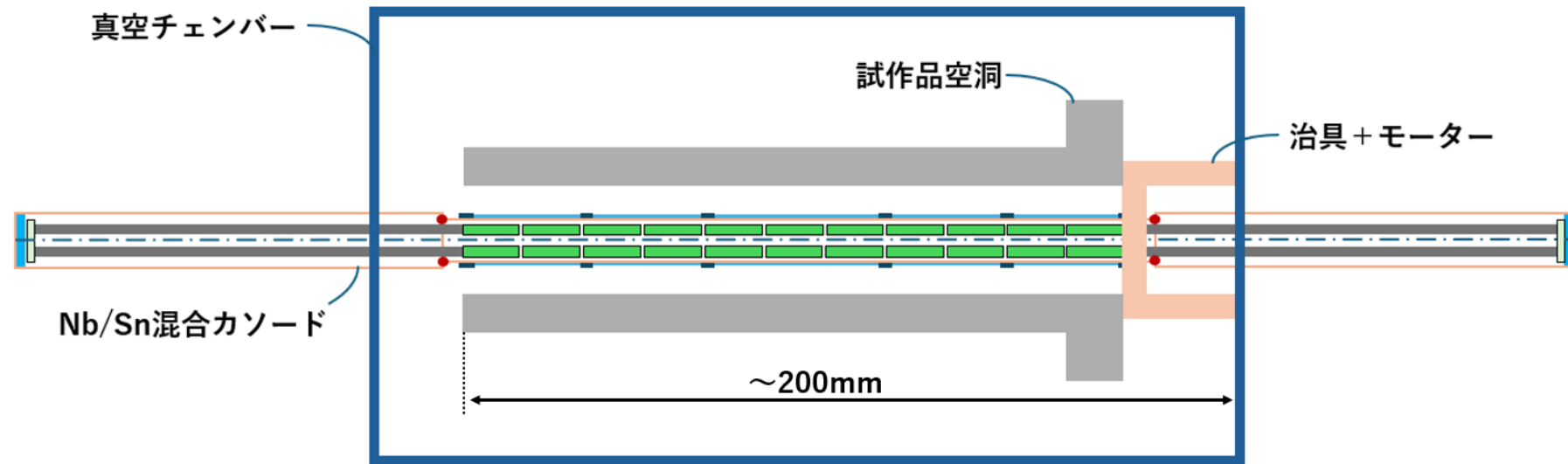
正12角柱案
 $\text{Nb}:\text{Sn}=5:1$

台形+長方形ターゲット



10角柱案
 $\text{Nb}:\text{Sn}=4.90:1$

試作品空洞に関して



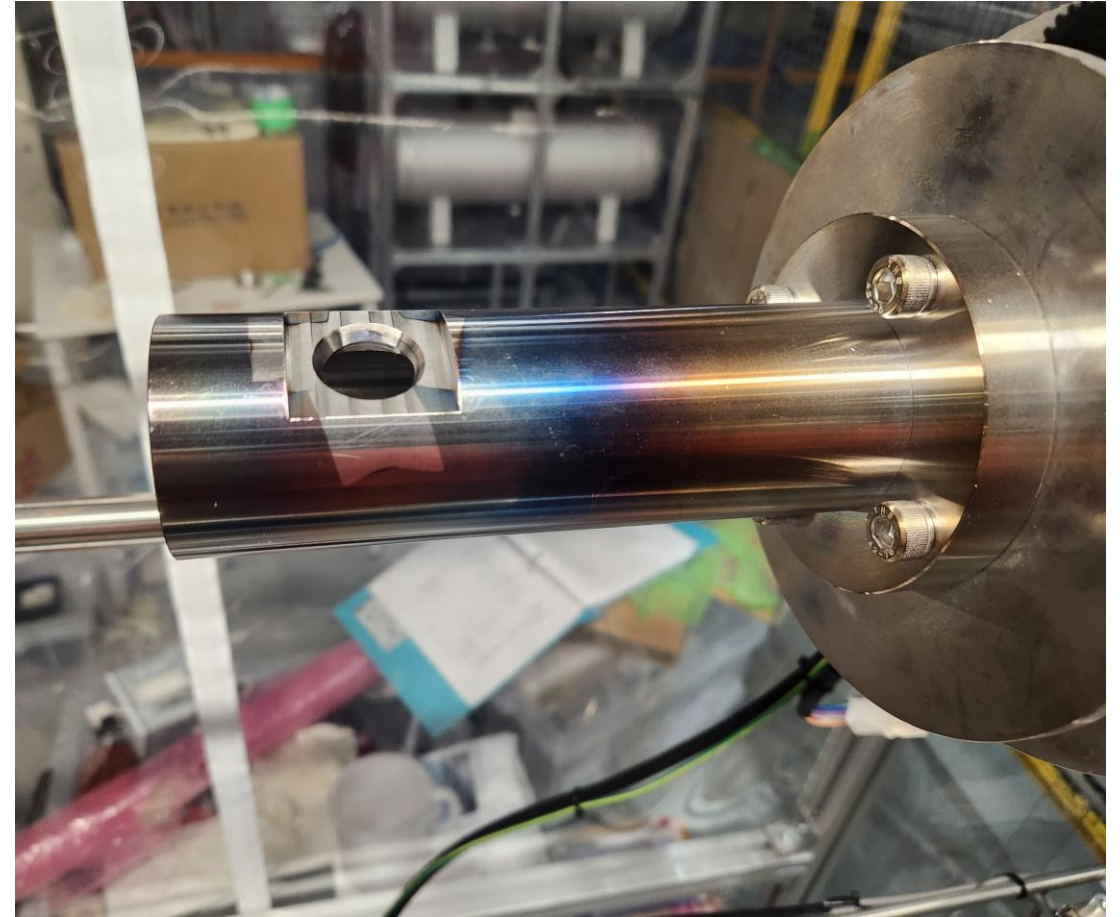
試作品空洞

- 試作品段階ではSUS, Alターゲットを用いている。空洞を汚染しないように試作品空洞(SUS)を作成した。
- 3.0GHz空洞のアイリス部の内径($\Phi 8\text{mm}$)と等しい内径を持つ円筒状の形状。
- $\Phi 20\text{mm}$ のSi基板を取り付けられるテーパ部分を設けている。
※成膜時にはSi基板をカプトンテープで固定する。

成膜試験後のカソードと試作品空洞



SUS,Alターゲットで作成されたカソードの
成膜試験後の様子



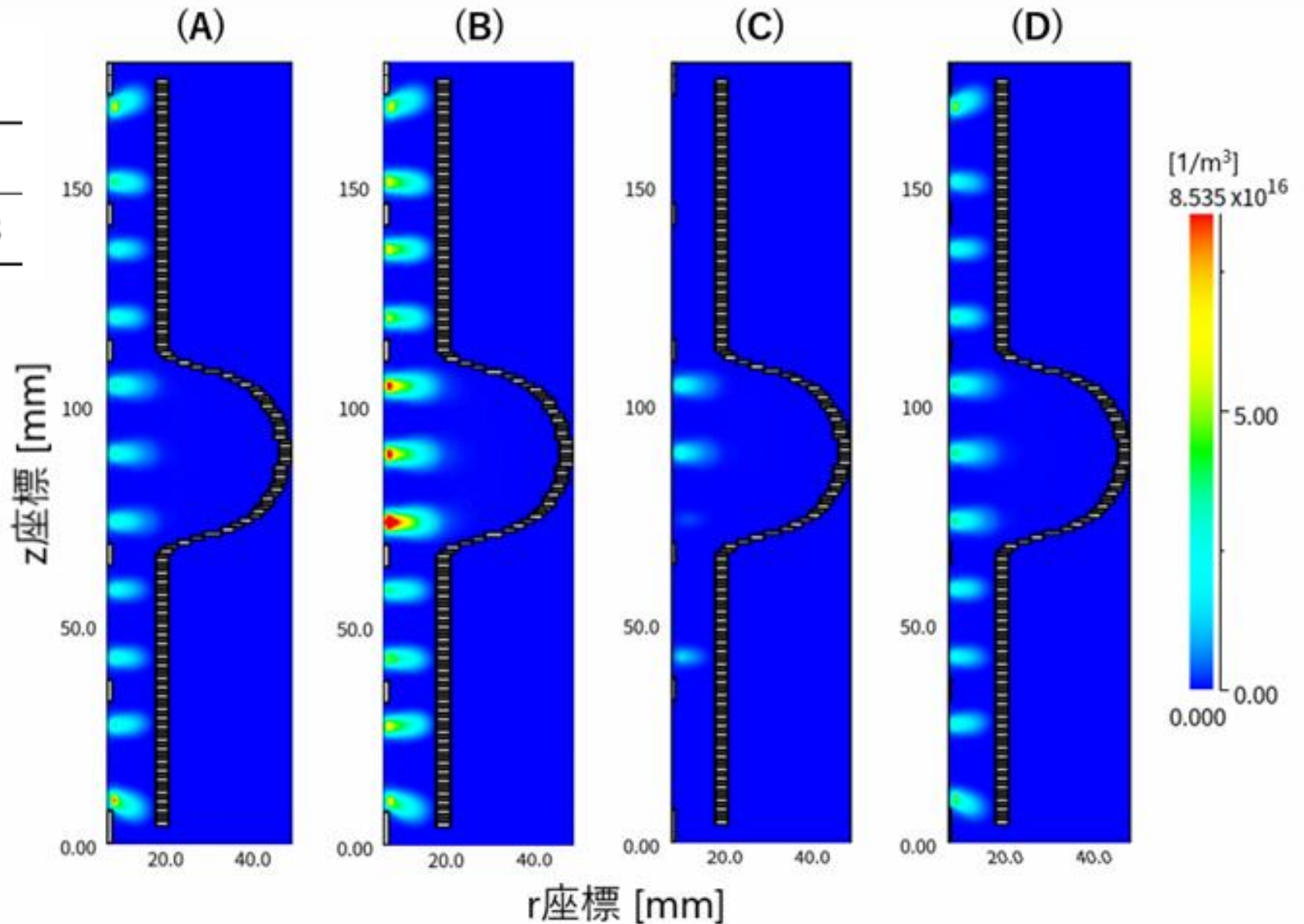
試作品空洞の成膜試験後の様子

カソード径を変化させたシミュレーション

表 5.3: シミュレーション毎のカソード径

シミュレーション	(A)	(B)	(C)	(D)
カソード径 ϕ [mm]	12	10	14	12.3

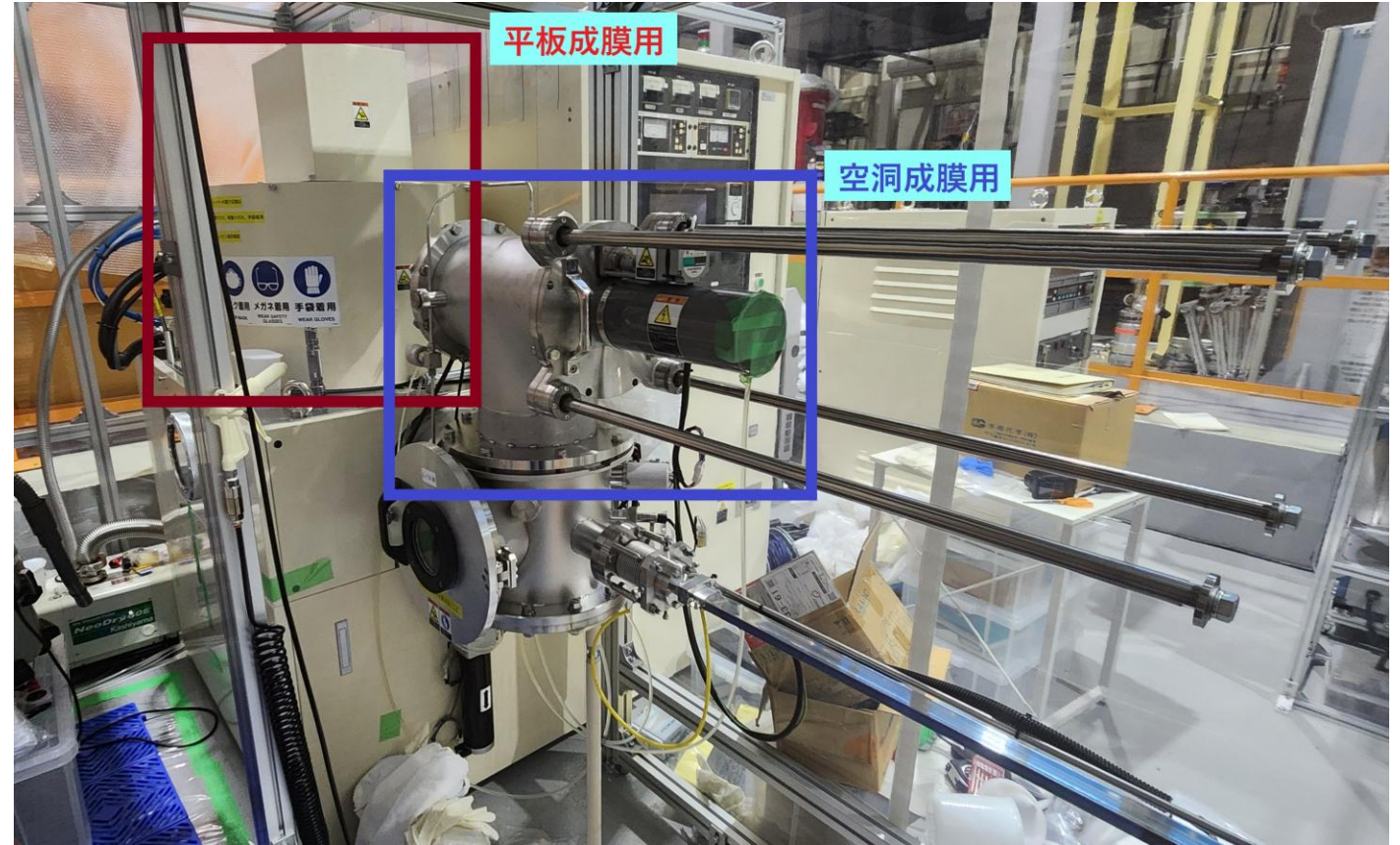
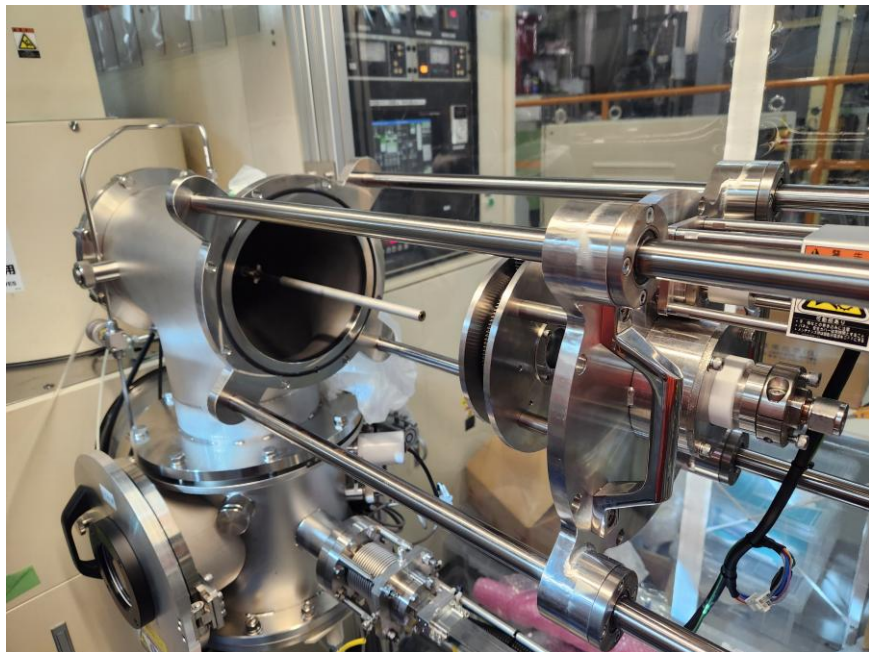
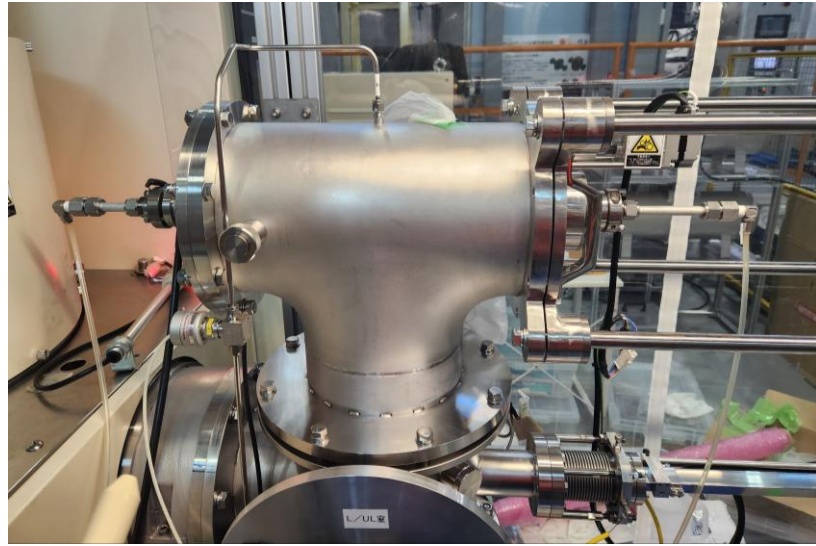
- Nb/Sn混合カソードにおいてカソード径を変化させ、プラズマ分布の様子を確認した
- 12角柱カソードの最外半径(D)においても、十分にプラズマが生成されることが示された。



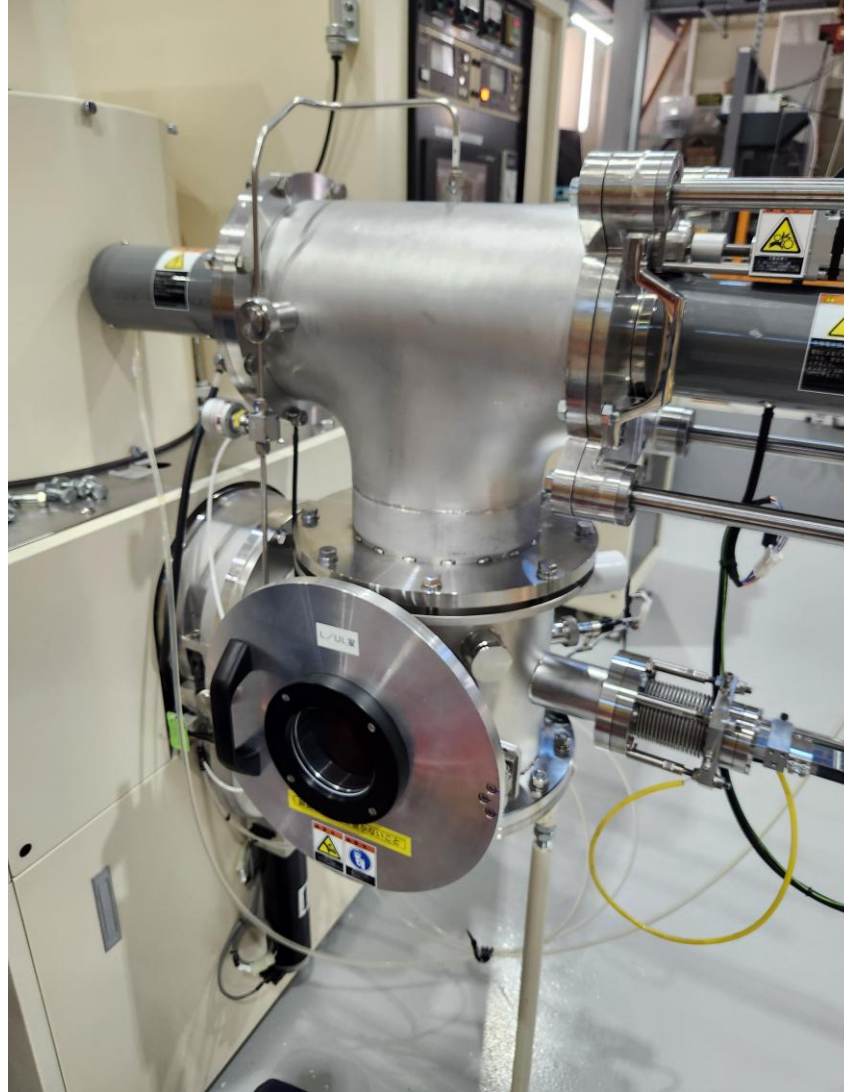
成膜装置周りの写真



成膜装置周りの写真



成膜装置周りの写真



成膜装置モ二夕一

