

第42回高エネルギー加速器セミナー OHO`25

放射光源加速器の真空システム

金 秀光

KEK、加6系、真空グループ

目次

- 真空の基礎
- 放射光源加速器の真空
- NEGコーティング
- 本グループの研究成果

真空とは

定義：通常の大気圧よりも低い圧力の気体で満たされた空間。

単位：1 Pa = 1 N/m² (単位面積に働く力)

1気圧 = 1.013×10^5 Pa, 1 Torr = 133 Pa, 1 mbar = 100 Pa,

真空の分類：	低真空	$10^5 \sim 10^2$ Pa (富士山頂、注射器)
	中真空	$10^2 \sim 10^{-1}$ Pa (掃除機、真空ケース)
	高真空	$10^{-1} \sim 10^{-5}$ Pa (蒸着装置)
	超高真空	$10^{-5} \sim 10^{-9}$ Pa (加速器、電子顕微鏡)
	極高真空	10^{-9} Pa以下 (電子銃)

理想気体の状態方程式

$$pV = \nu RT$$

p は圧力、 V は体積、 ν はモル数、 R は気体定数 ($8.314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$)、 T は絶対温度。

例えば： p は $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ 、 273.15 K の時、1モル気体分子の体積は 0.0224 m^3 である。

$$p = nkT$$

n は気体分子密度、 k はボルツマン定数 ($R/N_A = 1.381 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$)、 N_A は1モルの分子数。

- ・ 圧力は気体分子密度に比例する。

気体分子の速さ

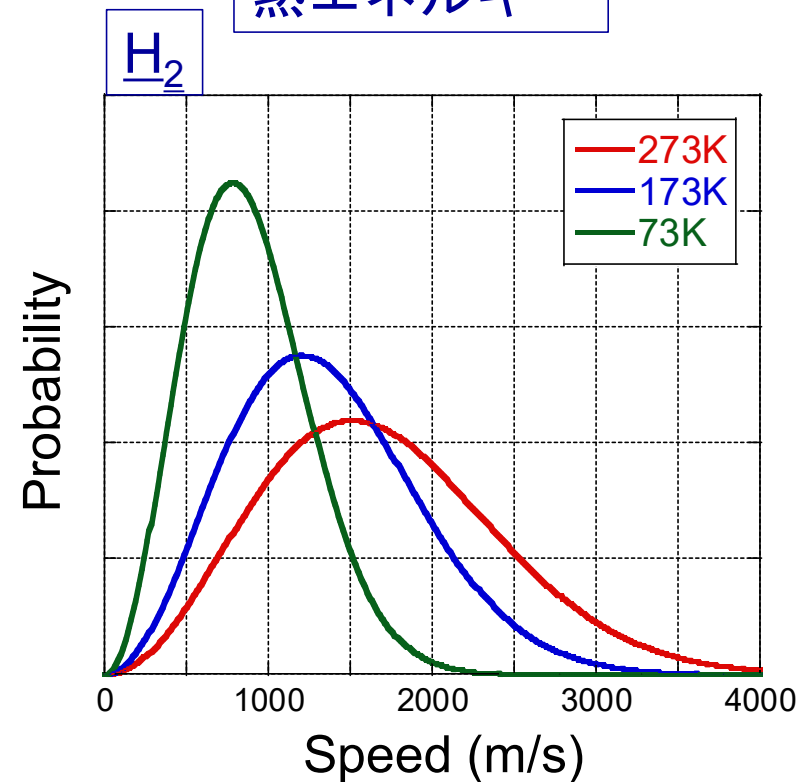
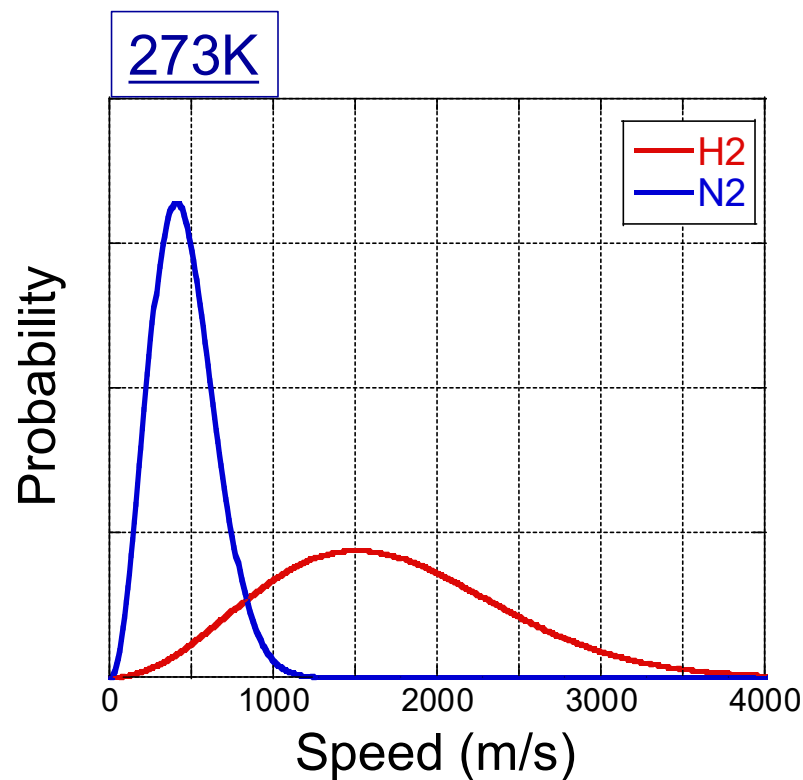
5

ボルツマン分布 $f(v)dv = 4\pi C v^2 \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right) dv$

v は速さ、 m は気体分子質量、 C は定数

分子の運動エネルギー

熱エネルギー



気体分子の速さ

最確速さ

$$v_m = \sqrt{\frac{2kT}{m}}$$

平均速さ

$$v = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}$$

2乗平均速さ

$$\sqrt{v^2} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$$

- 平均自由行程や分子のフラックスなどの輸送の場合は平均速さ。
- エネルギーや圧力の場合は2乗平均速さ。

入射頻度

単位面積に毎秒衝突する気体分子数。

$$\Gamma = \frac{1}{4} n v = \frac{p}{\sqrt{2\pi m k T}} \quad \text{単位 : molecules} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$$

応用例：固体表面原子密度が 10^{19} molecules/m² で、COガスの圧力が 1×10^{-4} Paの時、COが全表面を覆うにかかる時間？

Γ は 3×10^{18} molecules/s·m² で、3.3 sで全表面が覆われる。

体積の入射頻度 $\Gamma_V = \frac{1}{4} v$ 単位 : m³·s⁻¹·m⁻²

導入量 $Q_1 = A\Gamma_V^* p_1$
 $Q_2 = A\Gamma_V^* p_2$

応用例：
 導入量、コンダクタンス

開口面積A

オリフィス

開口面積A

コンダクタンス

$Q = A\Gamma_V (p_1 - p_2)$

平均自由行程

$$\lambda = \frac{\text{分子の移動距離}}{\text{分子の衝突回数}} = \frac{\overset{\text{移動した距離}}{vdt}}{\underset{\text{移動した体積中の分子数 (衝突回数)}}{n\pi\sigma^2 vdt}} = \frac{1}{n\pi\sigma^2}$$

σ は分子の直径

N₂の場合 :

10⁵ Pa, 70 nm;

10 Pa, 0.7 mm;

10⁻³ Pa, 7 m

クヌーセン数 $K_n = \frac{\lambda}{d}$ d は真空容器の寸法

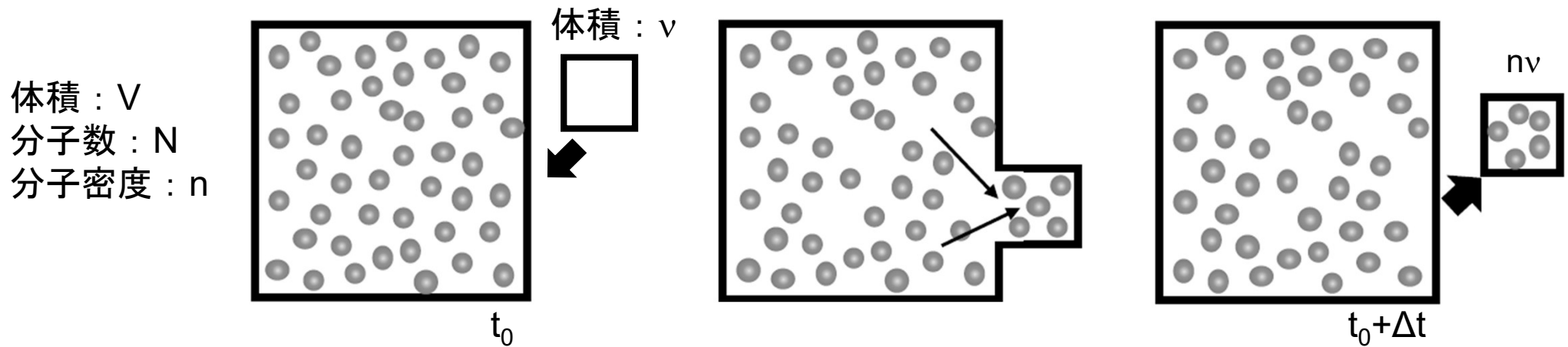
粘性流 : $K_n < 0.01$ 、気体分子同士の衝突が主となる。

中間流 : $0.01 < K_n < 1$ 、

分子流 : $1 < K_n$ 、気体分子と容器表面の衝突が主となる。

真空排気

9



$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = V \frac{\Delta n}{\Delta t} = -n \frac{v}{\Delta t}$$

$$S = \frac{v}{\Delta t} \quad \text{単位 : } \text{L/s} \text{ 或いは } \text{m}^3/\text{s}$$

排気コンダクタンス

- ・ 導管の中に流体が流れるとき、その流れ易さを表す。
- ・ 断面が一様な長い導管の場合（分子流）

$$C = \frac{4KA^2}{3BL} v$$

A は断面の面積、 B は断面の周長、
 L は長さ、 v は分子速さ、 K は補正定数

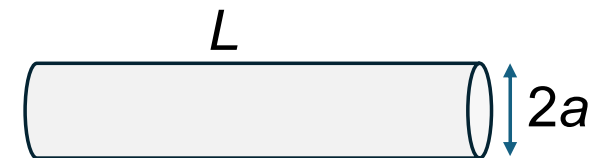
- ・ 円筒の場合

$$C = \frac{2\pi a^3}{3L} v$$

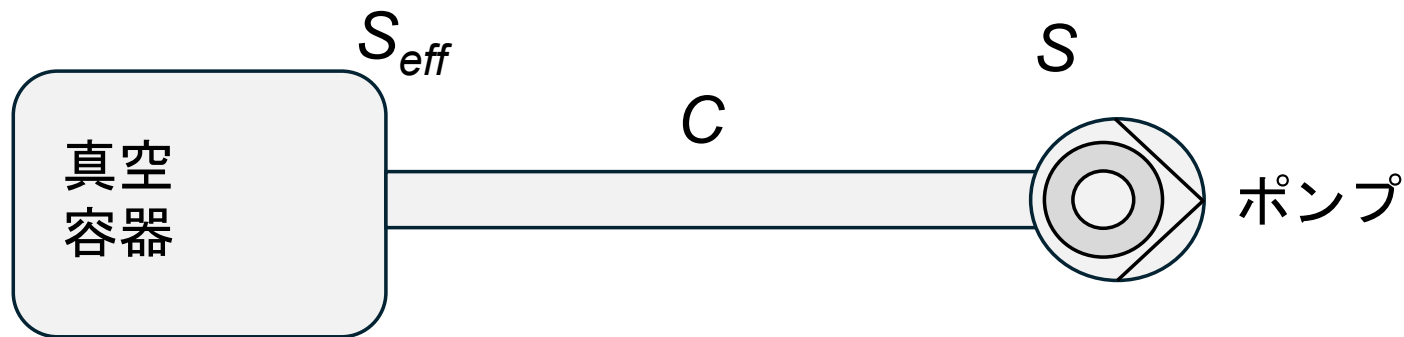
N_2 の時、

a は12.5 mm、 L は600 mm、

C は3.3 L/s



実効排気速度



$$\frac{1}{S_{eff}} = \frac{1}{C} + \frac{1}{S} \quad \longrightarrow \quad S_{eff} = \frac{CS}{C+S}$$

例えば：

S が60 L/sで、 C が3.3 L/sの時、実効排気速度(S_{eff})は3.1 L/s。

- ・ 排気コンダクタンスが小さい時、排気速度を左右する。

PFでのポンプ の設置

真空ポンプは、太い導管で
真空容器に近づける。



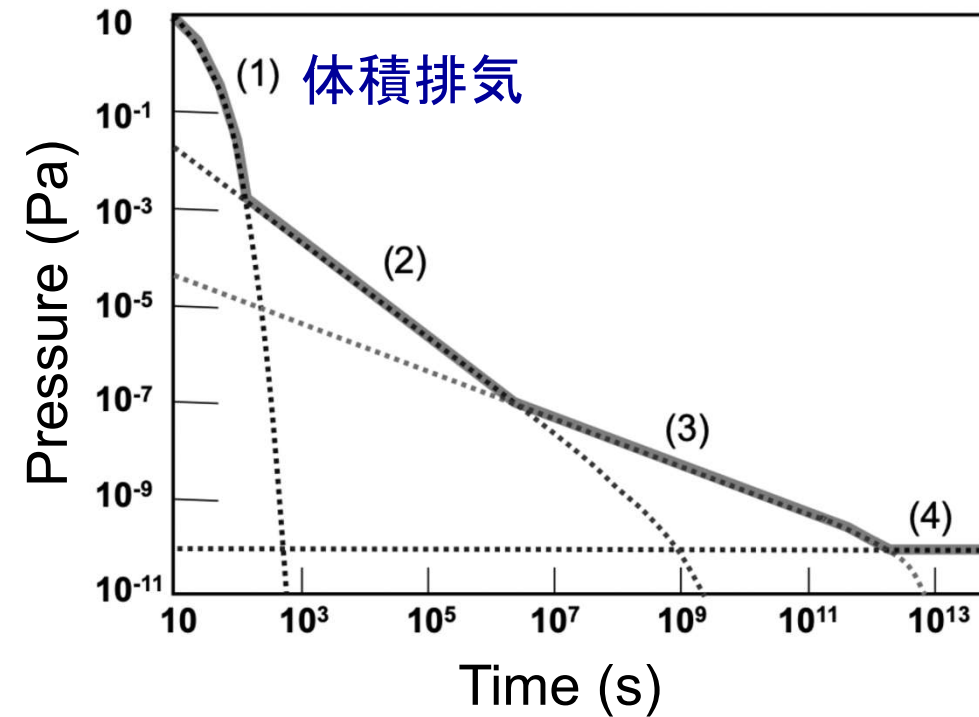
排気過程

(1) 体積排気

13

- 真空容器中の体積分の空気を排気。

$$p = p_0 \exp\left(-\frac{S}{V}t\right)$$



排気過程

(1) 体積排気

$$p = p_0 \exp\left(-\frac{S}{V}t\right)$$

14

(2) 表面脱離

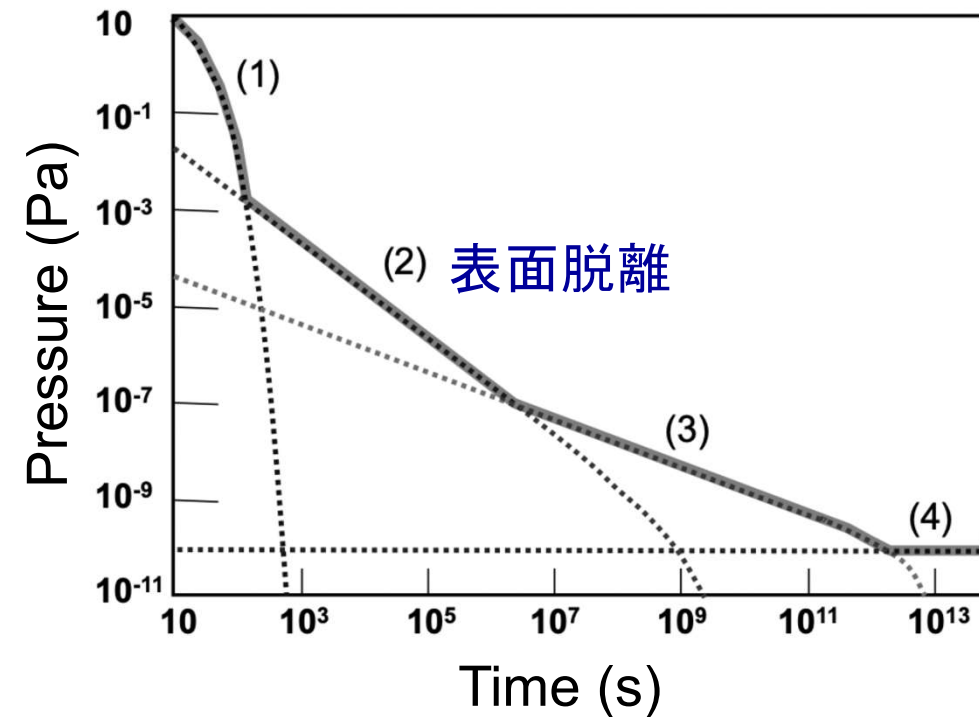
- 内壁に吸着していたガス（水分）の排気。

$$q_a = \frac{o}{\tau_0} \exp\left(-\frac{E_d}{RT}\right)$$

q_a は脱離率、 o は吸着密度、 τ は滞在時間、 E_d は脱離の活性化エネルギー

例えば：水の脱離の活性化エネルギー
81.32 kJ/molで、脱離率は100℃で常温の
1000倍、200℃で常温の 3×10^5 倍である。

- ベーキングが必要になる。



排気過程

(1) 体積排気

$$p = p_0 \exp\left(-\frac{S}{V}t\right)$$

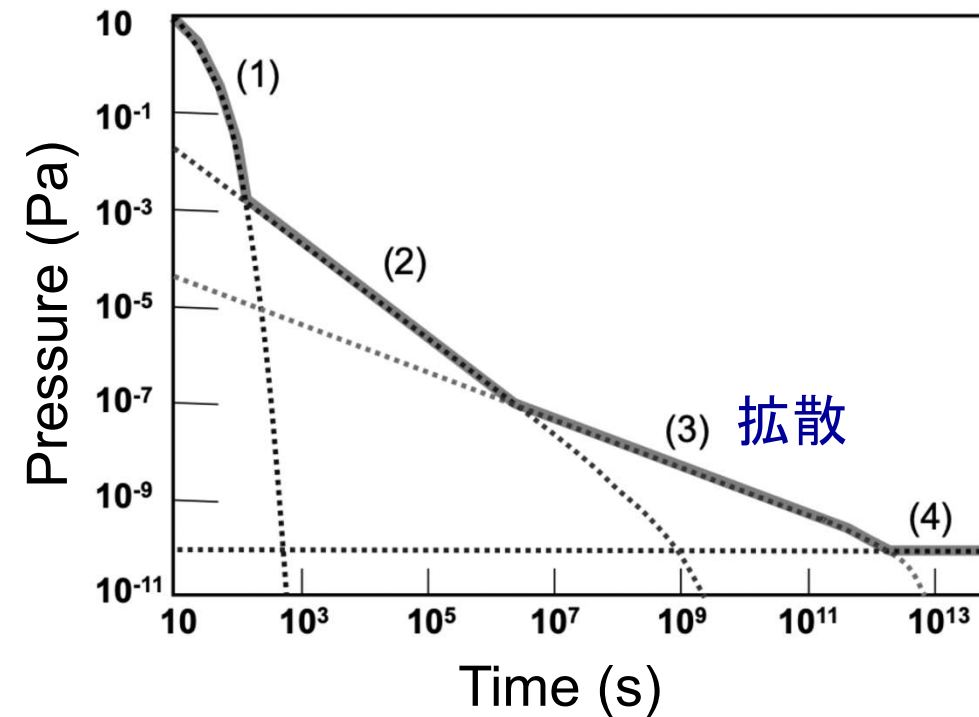
(2) 表面脱離

$$q_a = \frac{O}{\tau_0} \exp\left(-\frac{E_d}{RT}\right)$$

(3) 拡散

- ・ 金属中から拡散して放出するH₂の排気。
- ・ 超高真空領域での主なガス源。

到達圧力 $p_m = \frac{Q}{S}$ Q はガス放出量



排気過程

(1) 体積排気

$$p = p_0 \exp\left(-\frac{S}{V}t\right)$$

(2) 表面脱離

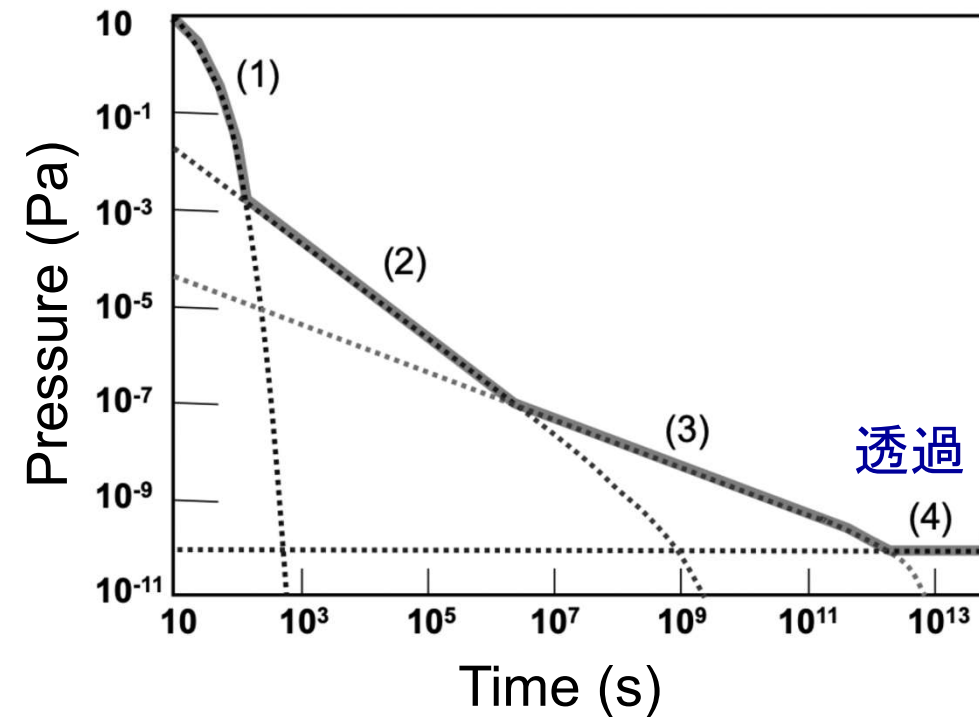
$$q_a = \frac{\sigma}{\tau_0} \exp\left(-\frac{E_d}{RT}\right)$$

(3) 拡散

$$p_m = \frac{Q}{V}$$

(4) 透過

- ・ 大気中の水素がダクトを透過してくること。
- ・ ガス量が少なく、超高真空への影響はほとんどない。



材料の表面処理

17

- 表面積の低減

SUSのバフ研磨・電解研磨、 Cuの化学研磨など。

- 安定した表面の創製

SUSの不働態処理。

- 表面の清浄化

脱脂処理。油成分の脱離活性化エネルギー60～100 kJ/mol。

- 材料内部のガス溶解量の低減

Vacuum firing、SUSの800～1000℃の熱処理。

- 拡散障壁層の作製

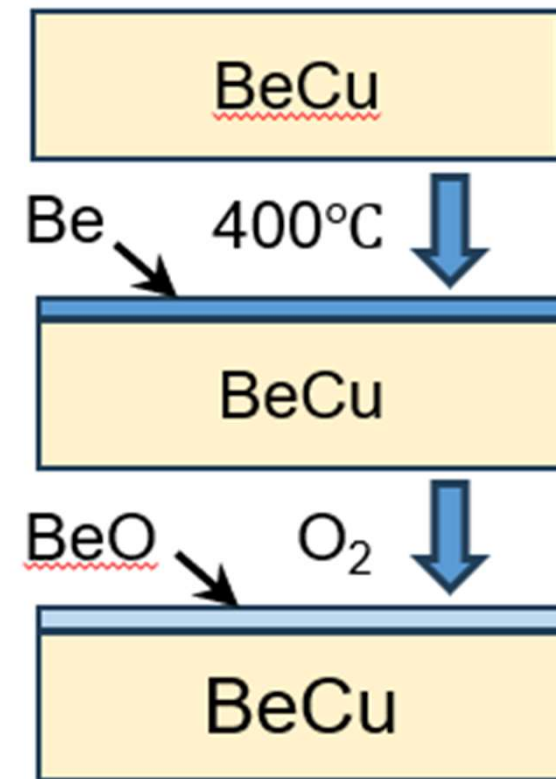
BeCu、最表面にBeOを生成。熱脱離がCuより1桁以上少ない。

BeCuの紹介

18

BeCuの処理過程

- 内部の H_2 を放出する。
- 表面にBeを析出する。
- 10nm程度のBeO層を生成し、障壁層の役割をする。
- 水分などが吸着しにくい。



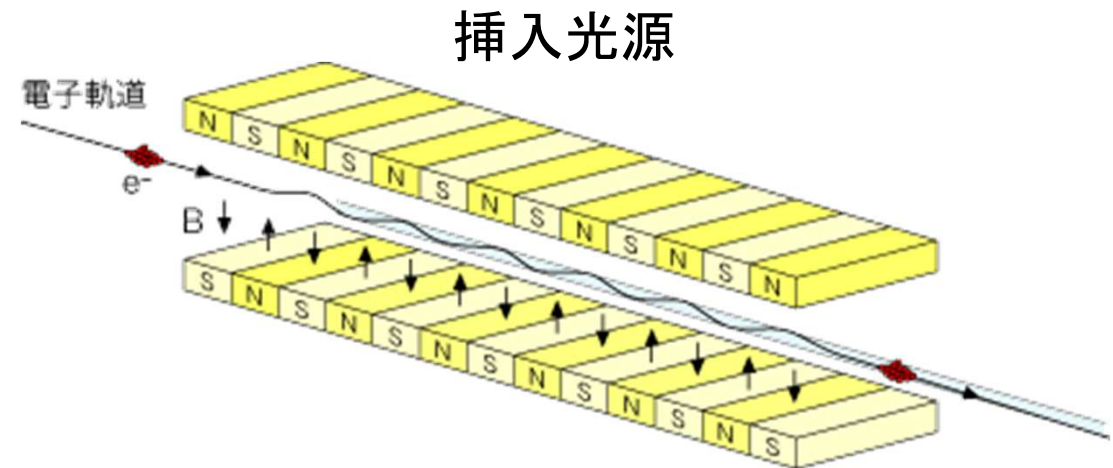
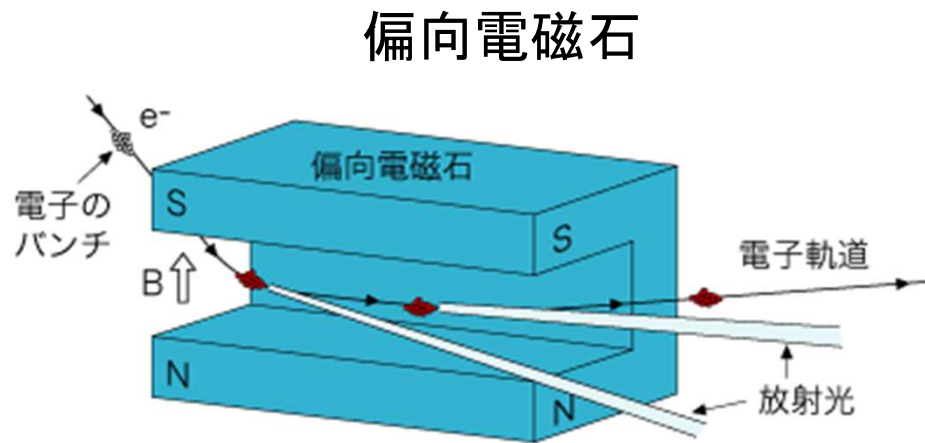
F. Watanabe, J. Vac. Sci. Technol. A22 (2004) 181-191.

目次

- 真空の基礎
- 放射光源加速器の真空
- NEGコーティング
- 本グループの研究成果

放射光生成

20



PF紹介ページより

- 放射光は、ほぼ光速で直進する電子がその進行方向を磁石などによって変えられた際に発生する電磁波である。
- 放射光は円軌道の接線方向に放射される。

真空の必要性

- 気体分子との衝突を減らし、電子ビームの散乱を防ぐことで、電子ビームの寿命を十分に長くする。

- 散乱の影響

(1)角度変化

散乱によって、電子がある角度以上の散乱を受けると、ビームダクトにぶつかって失われる。

(2)エネルギーの損失

散乱によって、ある大きさ以上のエネルギー損失を受けると、RFバケットから外れて失われる。

ガスとの散乱

- Moller散乱

残留ガスの原子核外電子との散乱で、電子は大きく散乱され、エネルギーを損失する。

- ラザフォード散乱

原子核のクーロン場による散乱で、エネルギーは変化せずに進行方向が変わる。

- 制動放射

電場の中で進行方向が変えられた際に、電磁波の放射によるエネルギーロスである。

散乱断面積

- Moller散乱

$$\sigma_m = \frac{2r_0^2}{\gamma_c} \quad (q(\phi_c) > \gamma_c)$$

- ラザフォード散乱

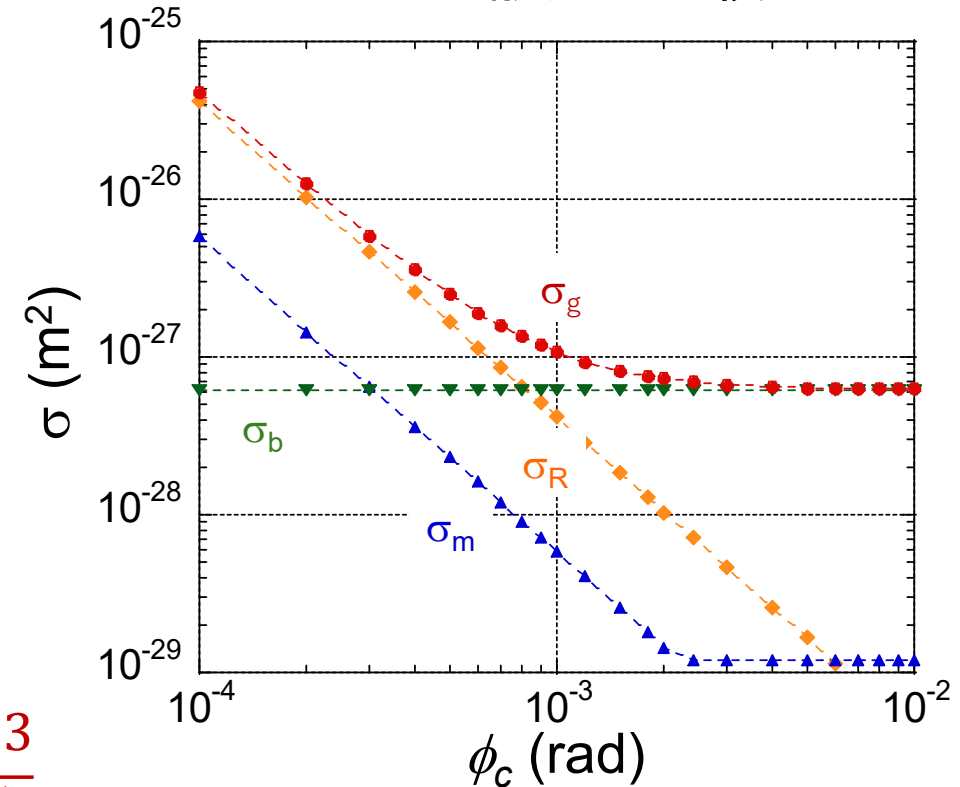
$$\sigma_R = 4\pi \left(\frac{r_0 Z}{\phi_c} \right)^2$$

- 制動放射

$$\sigma_b = \frac{4Z(Z+1)r_0^2}{137} \left(-\frac{4}{3} \ln\left(\frac{\Delta E}{E}\right) - \frac{5}{6} \right) \ln \frac{183}{Z^{\frac{1}{3}}}$$

r_0 は電子の古典半径、 γ_c はRFバケット、 ϕ は散乱角度、 Z は原子番号、 E は電子エネルギー

COの散乱断面積



散乱断面積

- Moller散乱

$$\sigma_m = \frac{2r_0^2}{\gamma_c} \quad (q(\phi_c) > \gamma_c)$$

- ラザフォード散乱

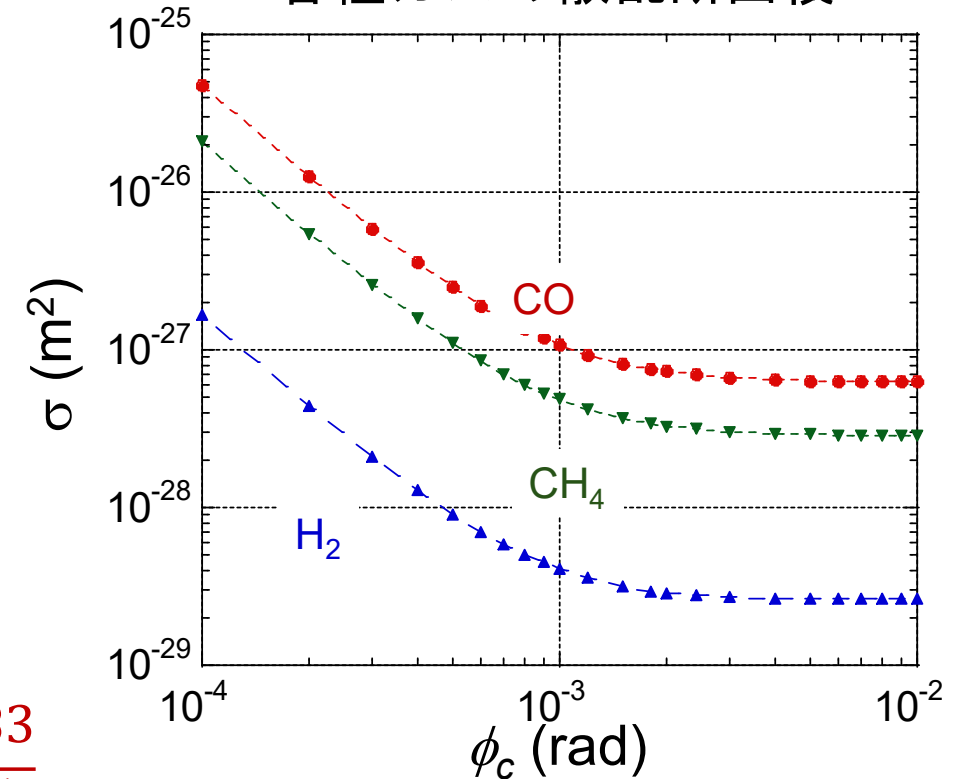
$$\sigma_R = 4\pi \left(\frac{r_0 Z}{\phi_c} \right)^2$$

- 制動放射

$$\sigma_b = \frac{4Z(Z+1)r_0^2}{137} \left(-\frac{4}{3} \ln\left(\frac{\Delta E}{E}\right) - \frac{5}{6} \right) \ln \frac{183}{Z^{\frac{1}{3}}}$$

r_0 は電子の古典半径、 γ_c はRFバケット、 ϕ は散乱角度、 Z は原子番号、 E は電子エネルギー

各種ガスの散乱断面積



電子ビーム寿命

$$I(t) = I_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

電子ビーム寿命(τ)は、 I の指数関数的な減衰における定数であり、 $1/e$ なる時間に相当する。

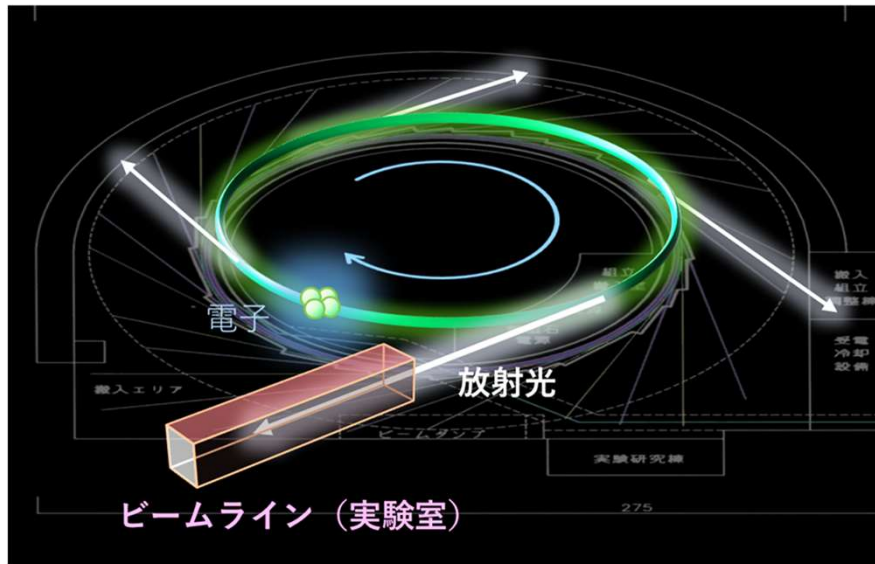
$$\frac{1}{\tau_g} = \frac{v\sigma p}{kT}$$

τ_g はガス散乱によるビーム寿命、 v は電子速度、
 p は圧力、 σ は散乱断面積

PFの例：ガス散乱の臨界角0.8 mrad、エネルギー損失の臨界値0.012、
 COの分圧は 3×10^{-8} Paで、

τ_m は1410h、 τ_R は197h、 τ_b は210hで、 τ_{touschek} は52.5hより長い。

蓄積リング



- 蓄積リングでは、生成する放射光のほんの少しがユーザーに送られる。
- 放射光の大部分はダクトで吸収される。

放射光のパワー

$$P \text{ (kW)} = 88.5 \frac{E \text{ (GeV)}^4 I \text{ (A)}}{\rho_{BM} \text{ (m)}}$$

E は電子ビームのエネルギー、 I は電流値、 ρ_{BM} は偏向電磁石の軌道半径。

PFリングの場合

E は2.5 GeV、 I は0.45 A、 ρ_{BM} は8.6 mで、放射光のパワーは180 kW。

ユーザーに利用されるのは10%弱で、約160 kWの放射光がビームダクトに照射される。

放射光照射でのビームダクト

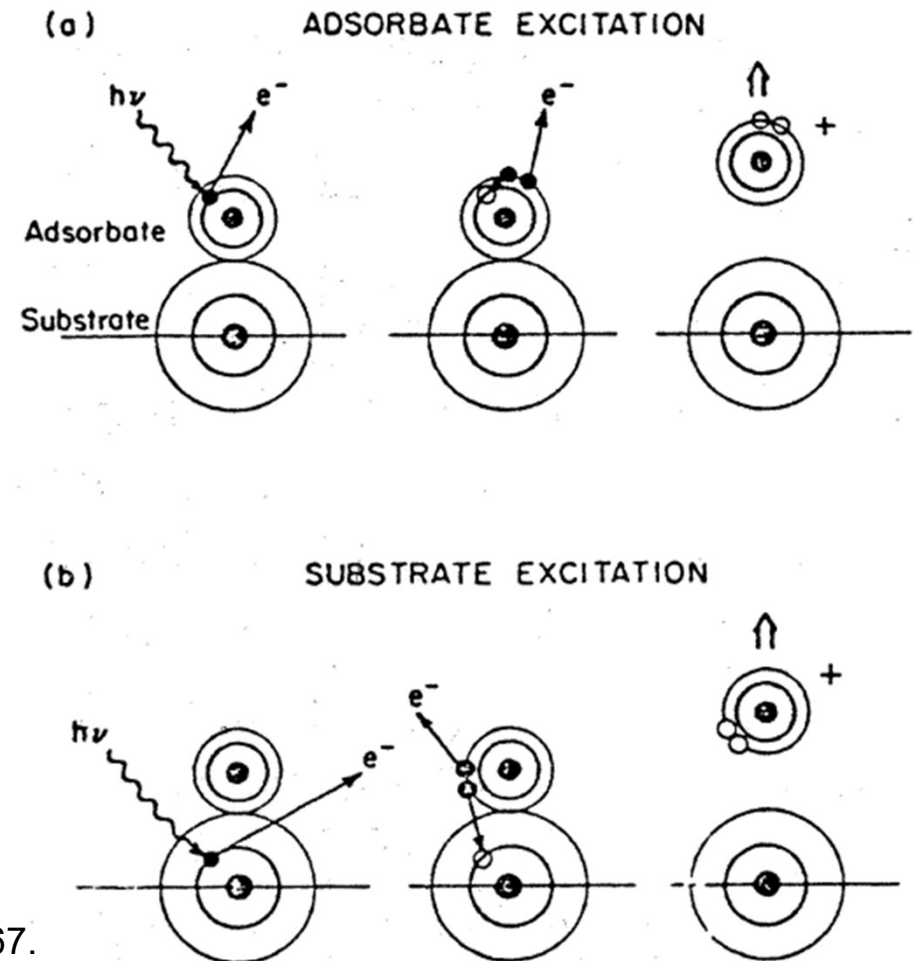
- 光刺激脱離（PSD : photon stimulated desorption）を誘起する。
熱脱離より遥かに多く、PSDは放射光源加速器の主なガス源。
- 高エネルギーの光電子を放出する。
電子刺激脱離（ESD : electron stimulated desorption）を誘起する。
- PSD係数 : 放出気体分子数/入射光子数
- 放射光源加速器でのPSD係数には、電子刺激によるガス放出を含む総合のイールドである。

特徴(1)

光（電子）刺激脱離のモデル

28

- KnotekとFeibelmanより提唱されたKFモデル。
- 光（電子）の照射で、表面原子の中に空孔が作られる。
- 吸着原子から空孔へAuger遷移が起こり、陰イオンの吸着原子が中性または陽イオンになり、表面より脱離する。



M.L. Knotek and P.J. Feibelman, Phys. Rev. Lett. 40 (1978) 964-967.

放射光照射でのビームダクト

- Radiation enhanced diffusion

固体内に侵入する放射光が固体原子や不純物原子の拡散を促進する。

- バルク中の不純物が拡散してくる。

3 keV放射光のAlの吸収長は8 μm である。

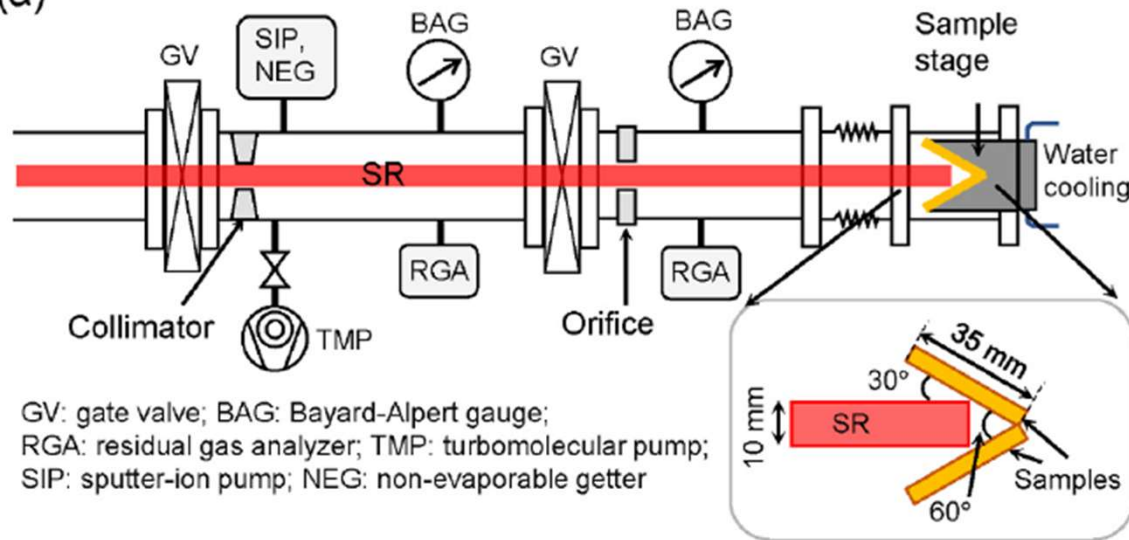
- 熱拡散ではHがメインですが、Radiation enhanced diffusionではC、Oの拡散も向上する。

- 表面吸着原子の減少により、Radiation enhanced diffusionがPSDの律速となる。

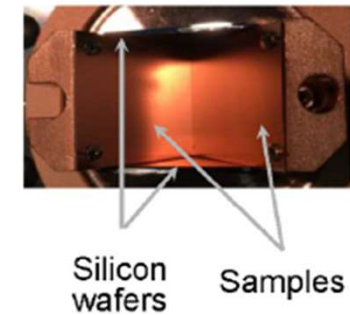
光刺激脱離の評価装置

PF BL21 (a)

偏向電磁石より



(b)



[X.G. Jin et al.](#), Vacuum 207 (2023) #111671.

光刺激脱離係数 $\eta = \frac{C(\Delta P_1 - \Delta P_2)}{kT} \frac{1}{F_{ph}}$

F_{ph} : 放射光のフラックス、
 C : コンダクタンス、
 ΔP_1 、 ΔP_2 : 真空チェンバー
 の圧力変化

フラックスの計算

偏向電磁石のフラックス

31

$$N_{photons/s} = \frac{5\pi r_e}{\sqrt{3}e\hbar c} EI$$



$$N_{photons/s} = 8.08 \times 10^{20} E(\text{GeV}) I(\text{A})$$

PF、2.5 GeV、0.45 Aで

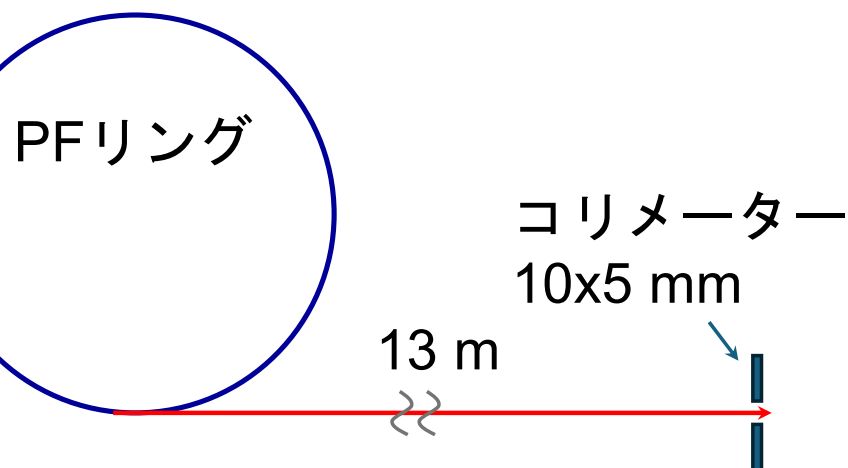
PF全体、 9.09×10^{20} photons/s;

水平切り出し角 : $10 \text{ mm} / 13 \text{ m} = 0.77 \text{ mrad}$;

$$9.09 \times 10^{20} \times \frac{0.00077}{6.28} = 1.11 \times 10^{17} \text{ photons/s ;}$$

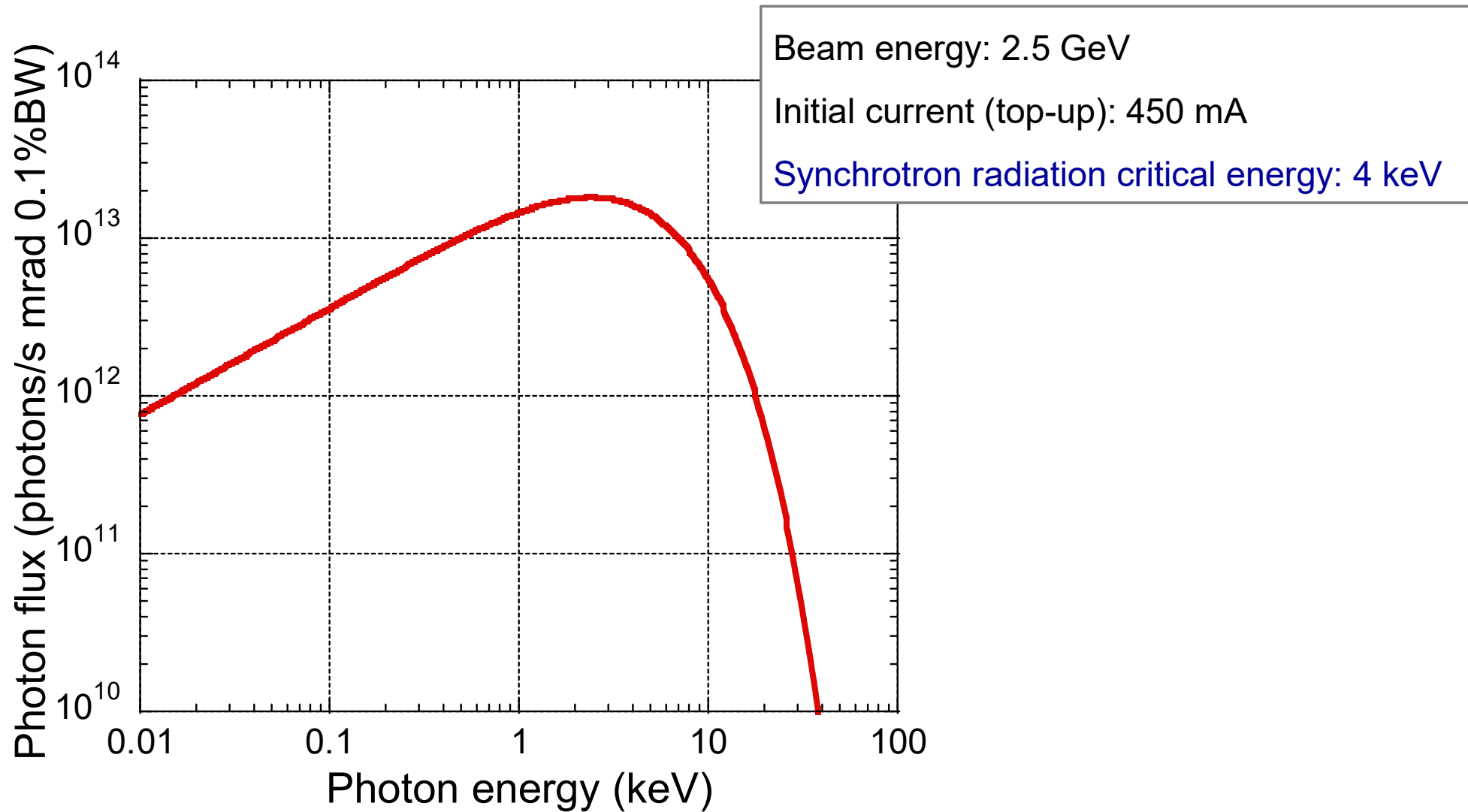
垂直開口(5 mm)を考慮すると

$$4.56 \times 10^{16} \text{ photons/s}$$



Spectrum of SR from bend

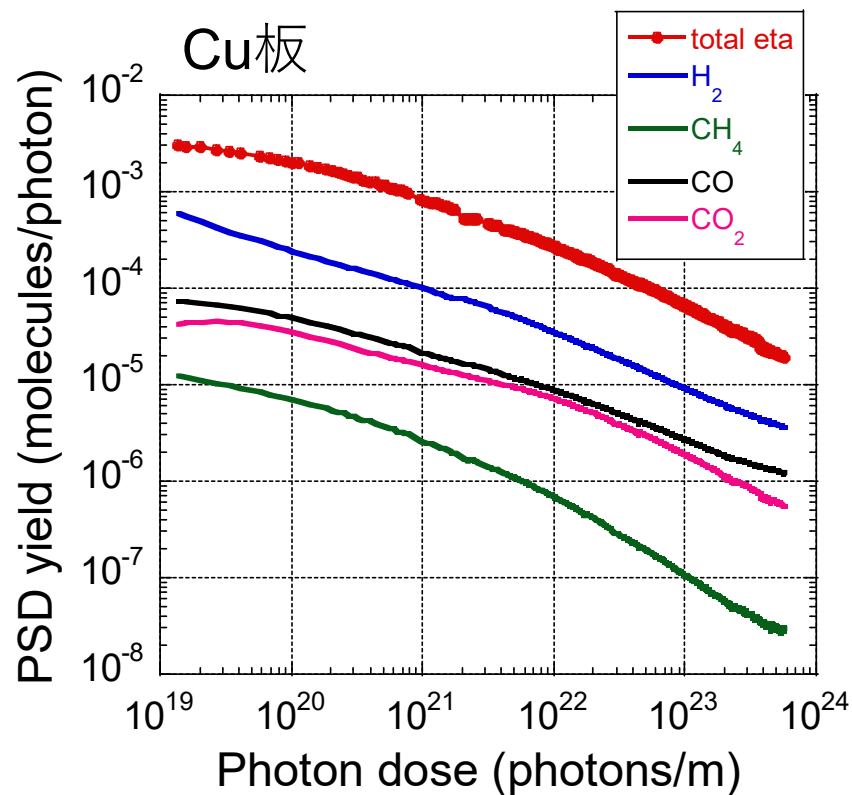
32



PSD結果_Cu

33

150°Cで24時間のベーキング

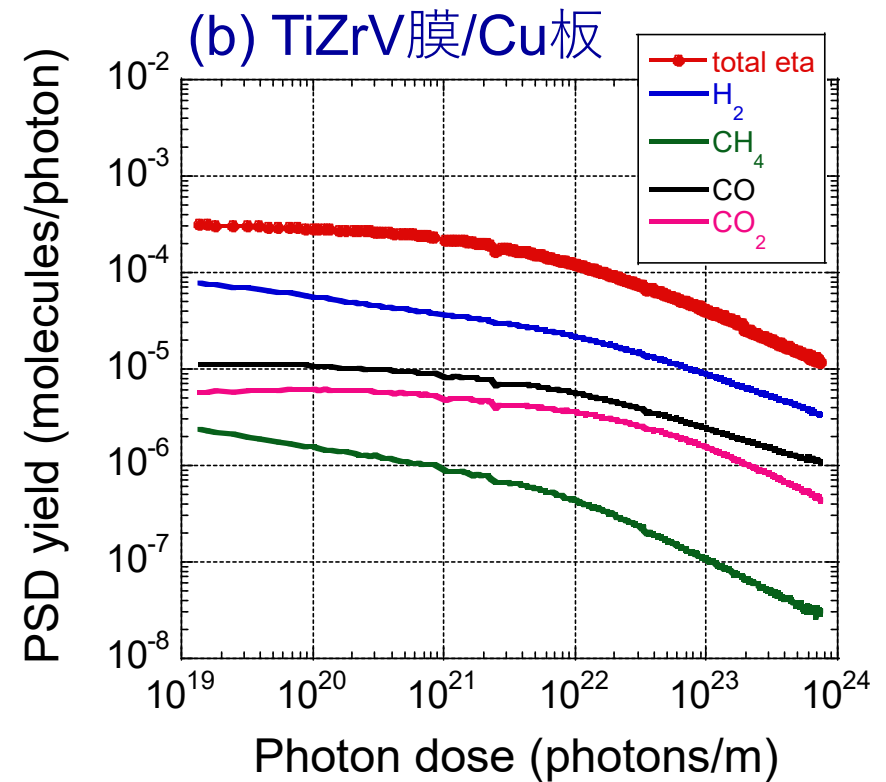
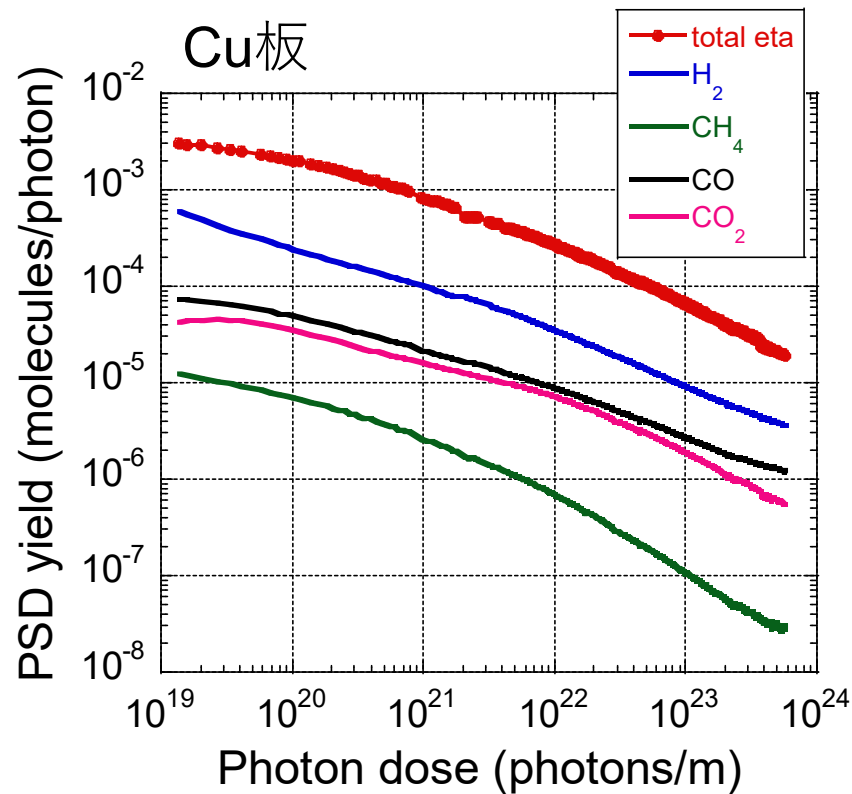


- 脱離ガスは、H₂、CO、CO₂、CH₄である。
- 照射に伴い、ガス脱離が減る。
(枯れる)

PSD結果_TiZrV膜

150°Cで24時間のベーキング

34



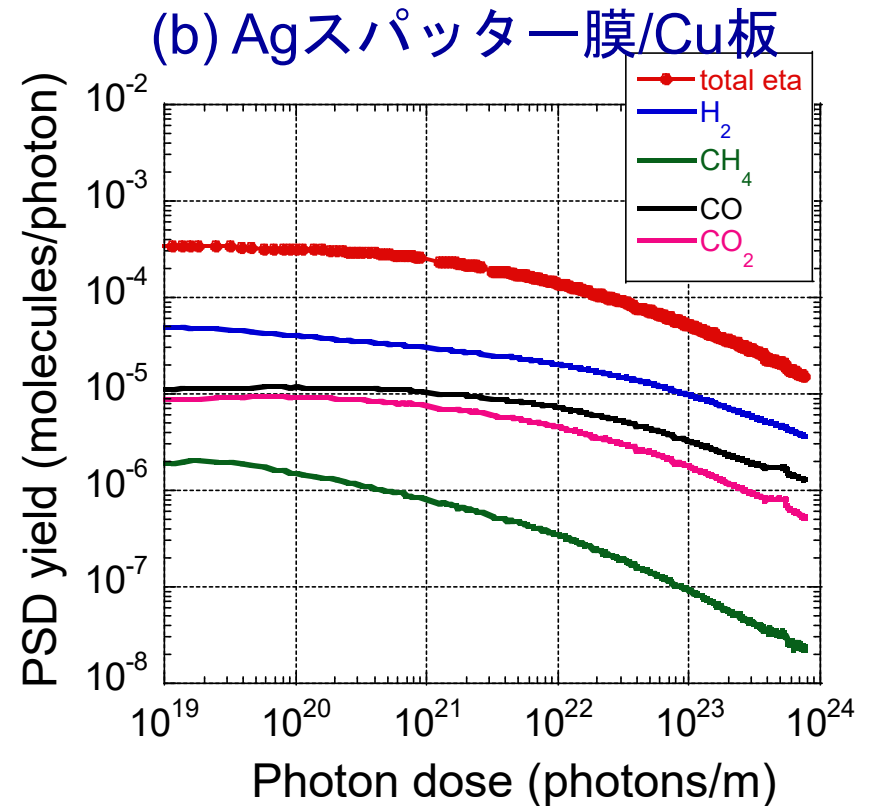
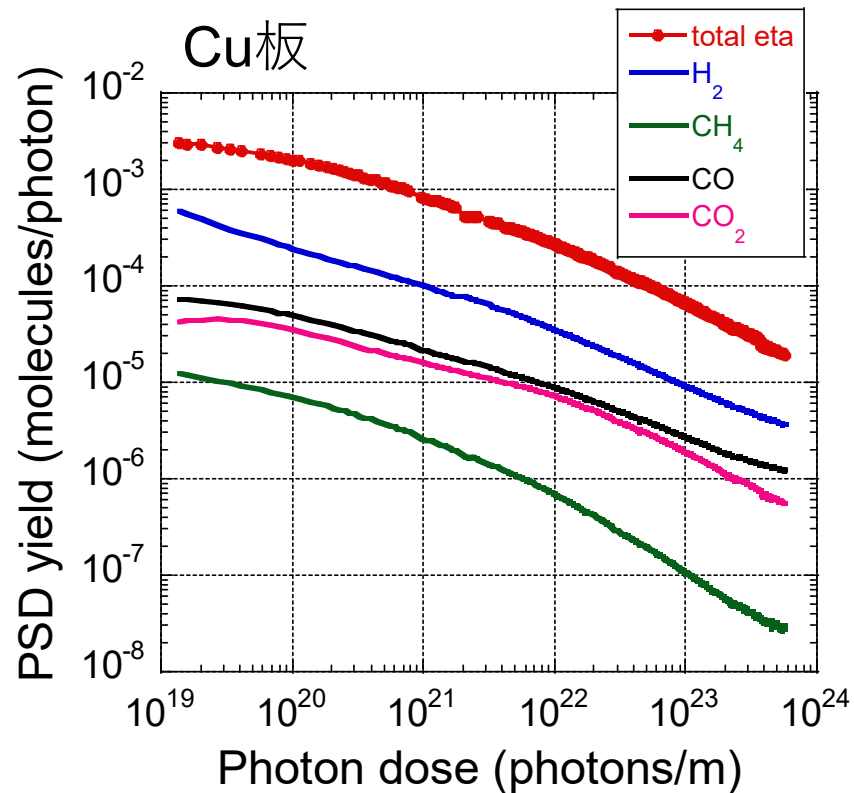
[X.G. Jin et al.](#), Vacuum 207 (2023) #111671.

加熱によりTiZrVは清潔な表面を作り、PSDを下げる。

PSD結果_Ag膜

150°Cで24時間のベーキング

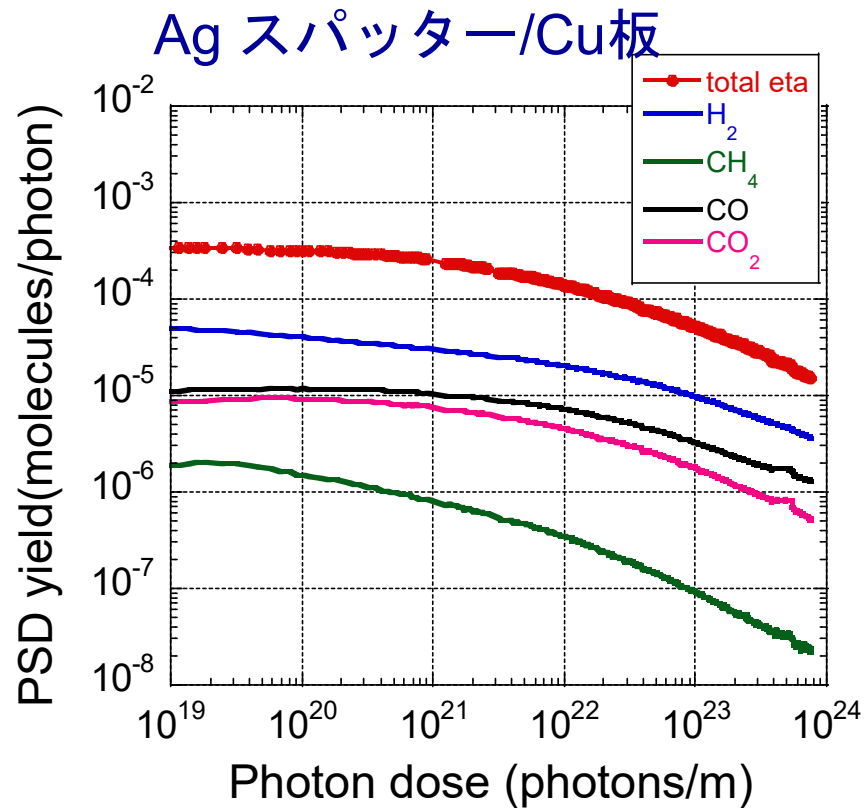
35



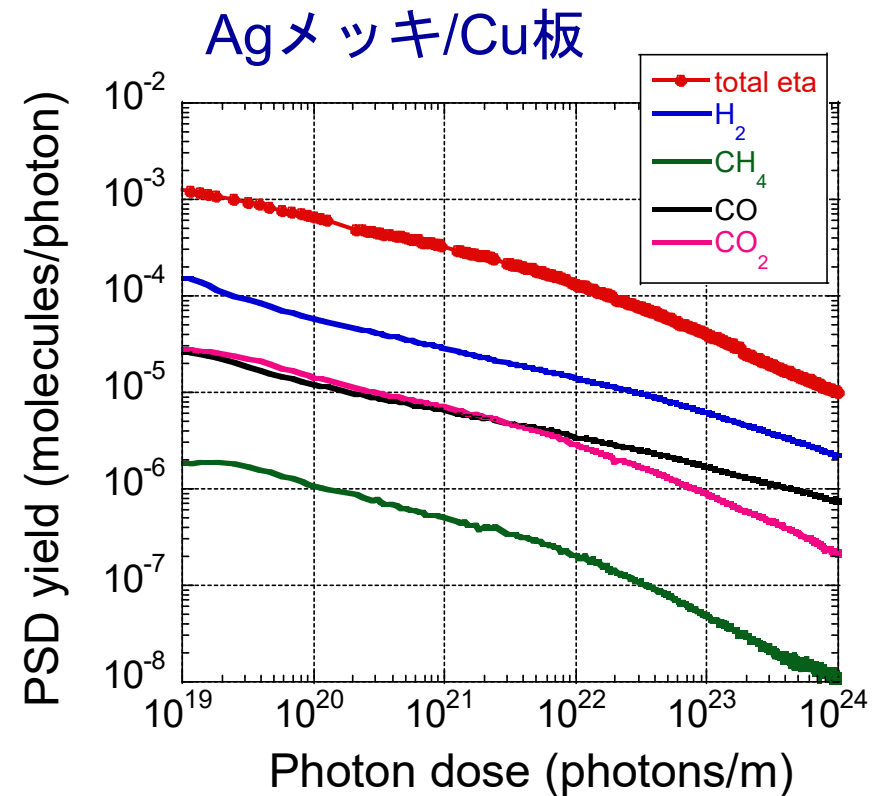
[X.G. Jin](#) *et al.*, Vacuum 207 (2023) #111671.

Agスパッター膜のPSD係数が低い。

PSD結果_Ag膜



150°Cで24時間のベーキング



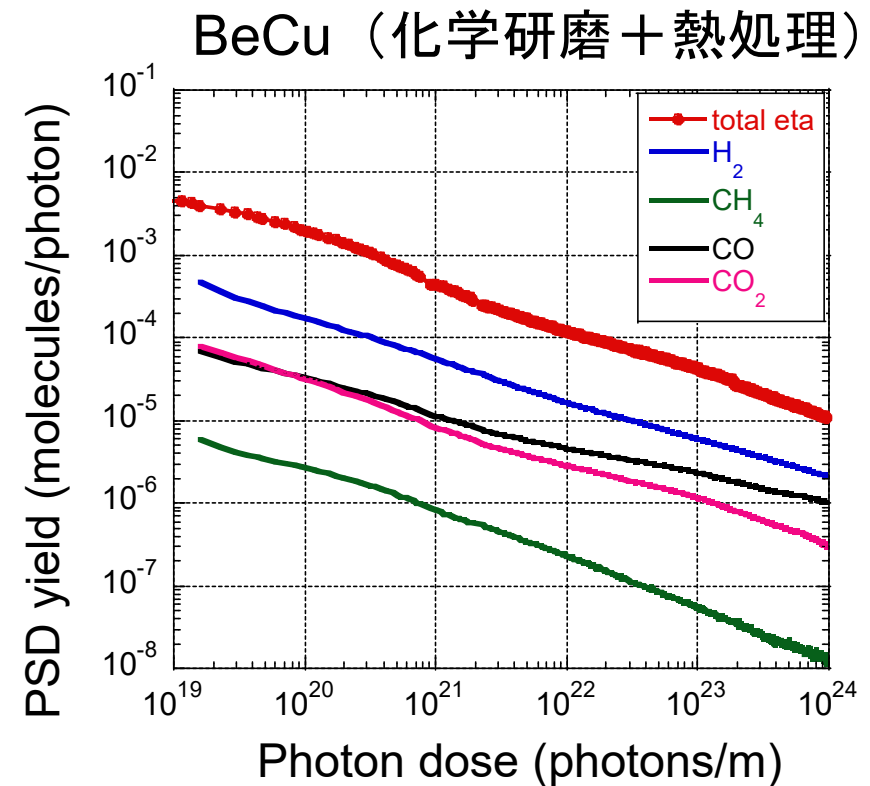
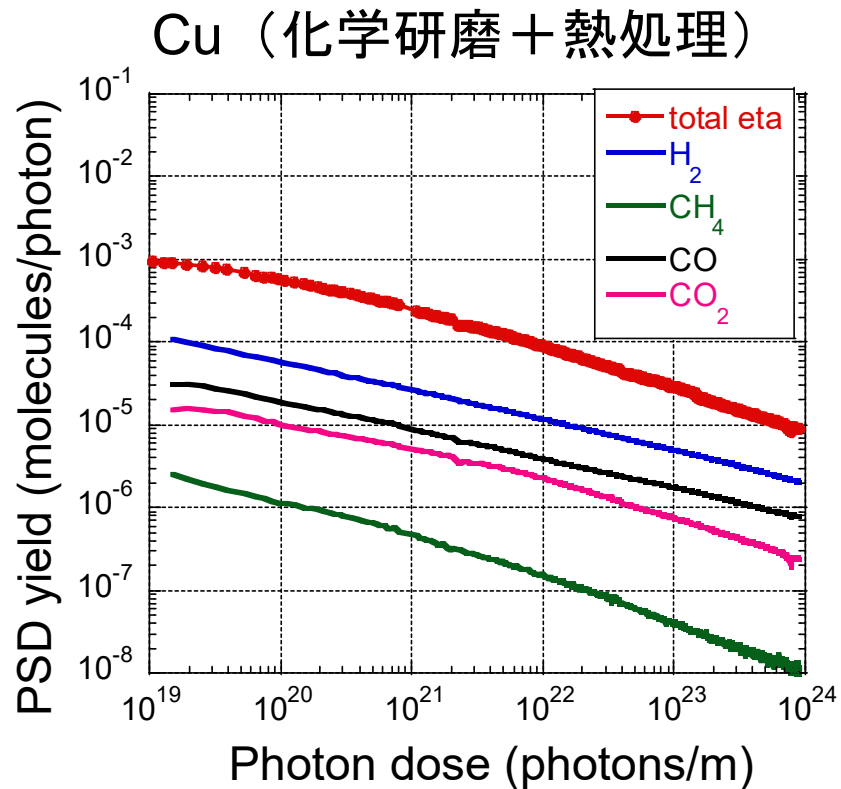
金 秀光ほか、第21回日本加速器学会年会の発表資料。

薄膜の作り方によって、PSDが異なる。

PSDの結果_BeCu

150°Cで24時間のベーキング

37



金 秀光ほか、第22回日本加速器学会年会の発表資料。

- BeO障壁層の効果が表れてない。
- 表面酸化物が増えることで、CO、 CO_2 のガスの脱離も増加。

蓄積リングの真空の特徴(2)

38

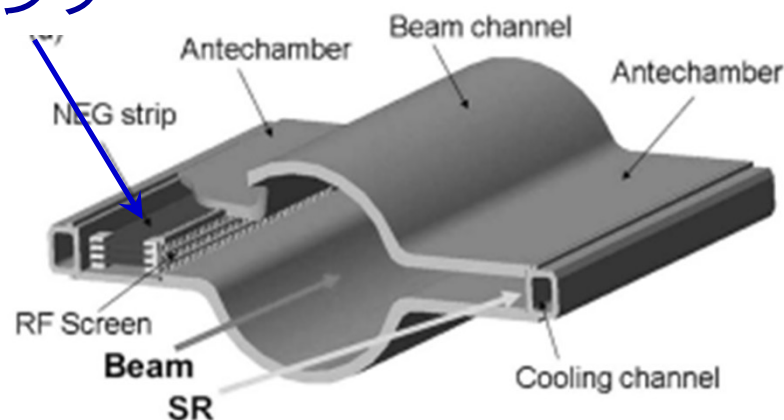
- 蓄積リングは細長いダクトで構成しており、コンダクタンスが悪く、実効排気速度が低い。

- 解決例

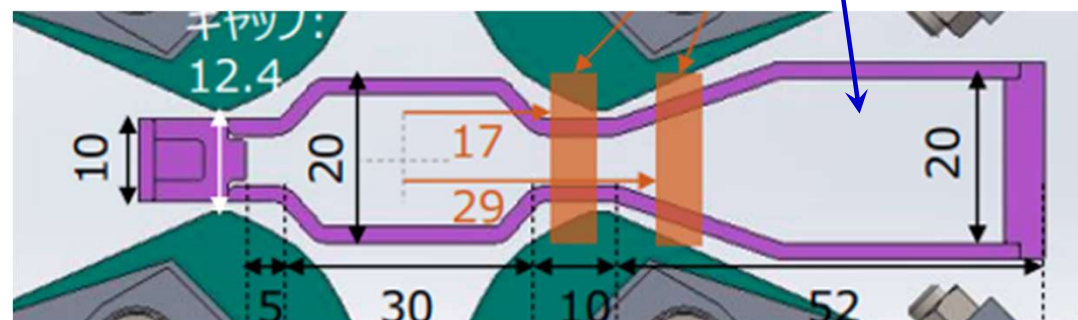
SuperKEKBのダクト

ナノテラスのダクト

NEGポンプ



アンテチェンバ



蓄積リングの真空の特徴

39

1) PSDが主なガス源である。

PSDが低い材質の探索、導入が必要。

2) 排気コンダクタンスが悪い。

分布的な排気、アンテチェンバが必要。

目次

40

- 真空の基礎
- 放射光源加速器の真空
- NEGコーティング
- 本グループの研究成果

NEGとは

41

- 非蒸発ゲッター(Non-evaporable getter)は、真空中で加熱することで蒸発を伴わずに反応性の高い清浄な表面を生成し、残留ガスを排気する材料。
- NEGポンプは、Tiサブリメーションポンプ、スパッタイオンポンプとは違う。
- よく使われているNEGポンプはSAESのSt707(Zr-V-Fe)、ZAO (Ti-Zr-V-Al) などがある。

NEGポンプ

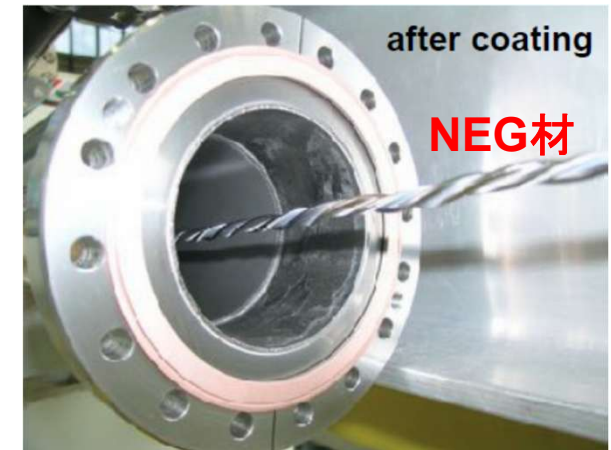


NEGコーティングとは

- NEG材をビームダクトの内面にコーティングすることで、本来ガス源である内壁を真空ポンプに変える技術である。

C. Benvenuti *et al.*, Vacuum 60 (2001) 57-65.

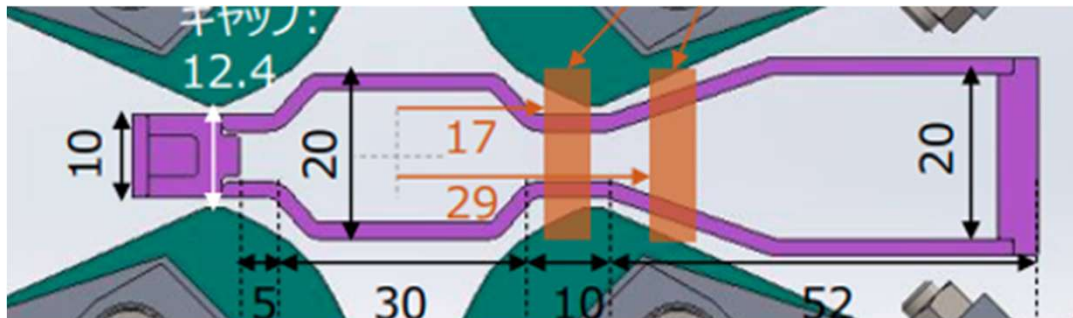
- TiZrV膜は比較的低温(180°C、24h)で再活性化できる。（市販のNEGポンプは550°Cで再活性化）
- マグネトロンスパッタリングで成膜し、膜厚は0.5~2 μm 。
- 排気コンダクタンスが悪い場所の真空改善に有効である。
- 低いPSD係数、低いESD係数、低い2次電子係数を有する。



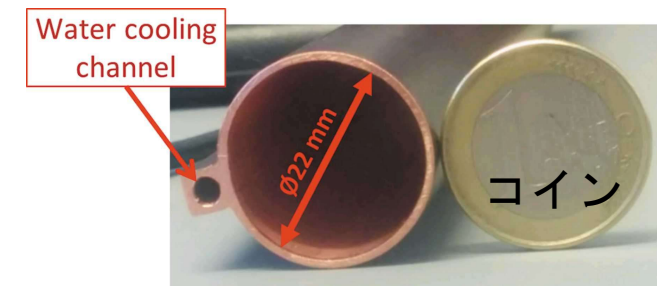
NEGコーティングのメリット

- ダクトの形状が簡単になる。

ナノテラスのダクト



MAX IVのダクト
(NEGコーティング採用)

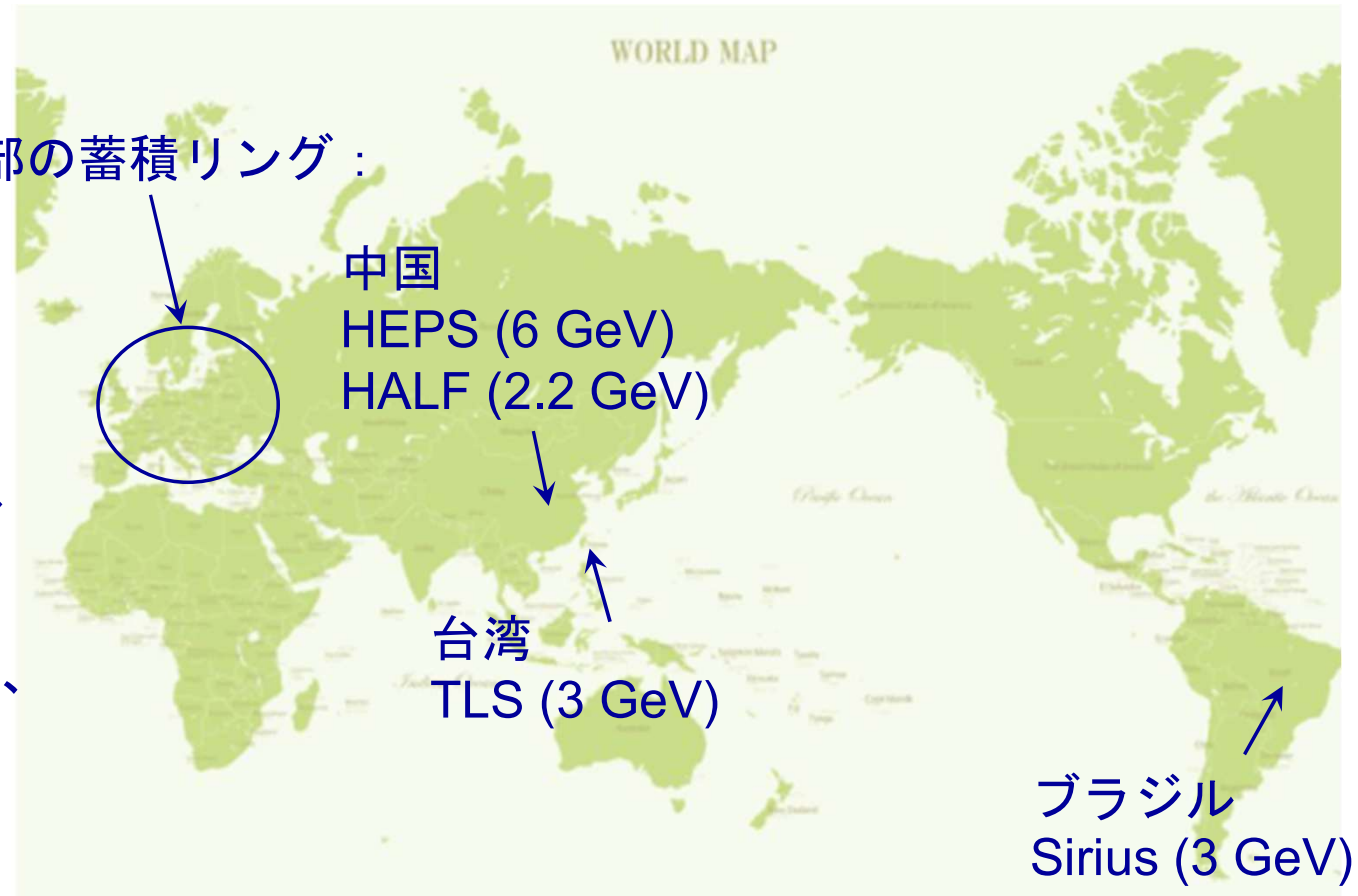


- PSDが低いことから、コミッショニング時間が短縮できる。

NEGコーティングの普遍的な利用

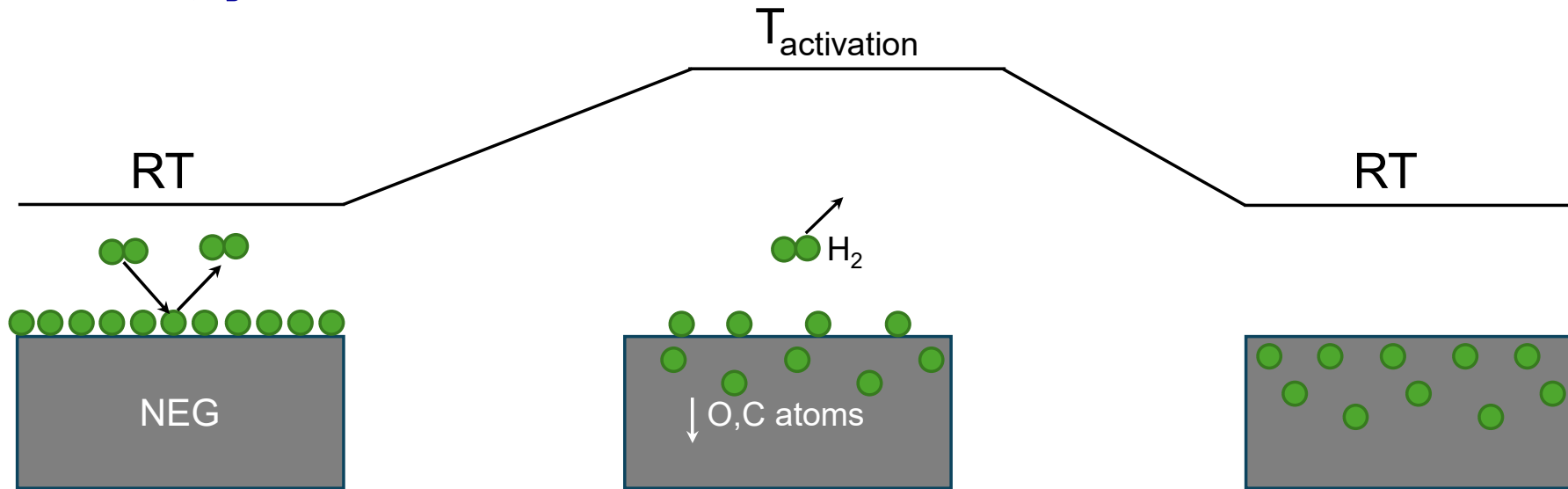
ヨーロッパのほぼ全部の蓄積リング：

MAX IV U (3 GeV)、
SLS2.0 (2.4 GeV)、
Elettra 2.0 (2.4 GeV)、
Diamond II (3 GeV)、
SOLEIL II (2.75 GeV)、
PETRA IV (6 GeV)、



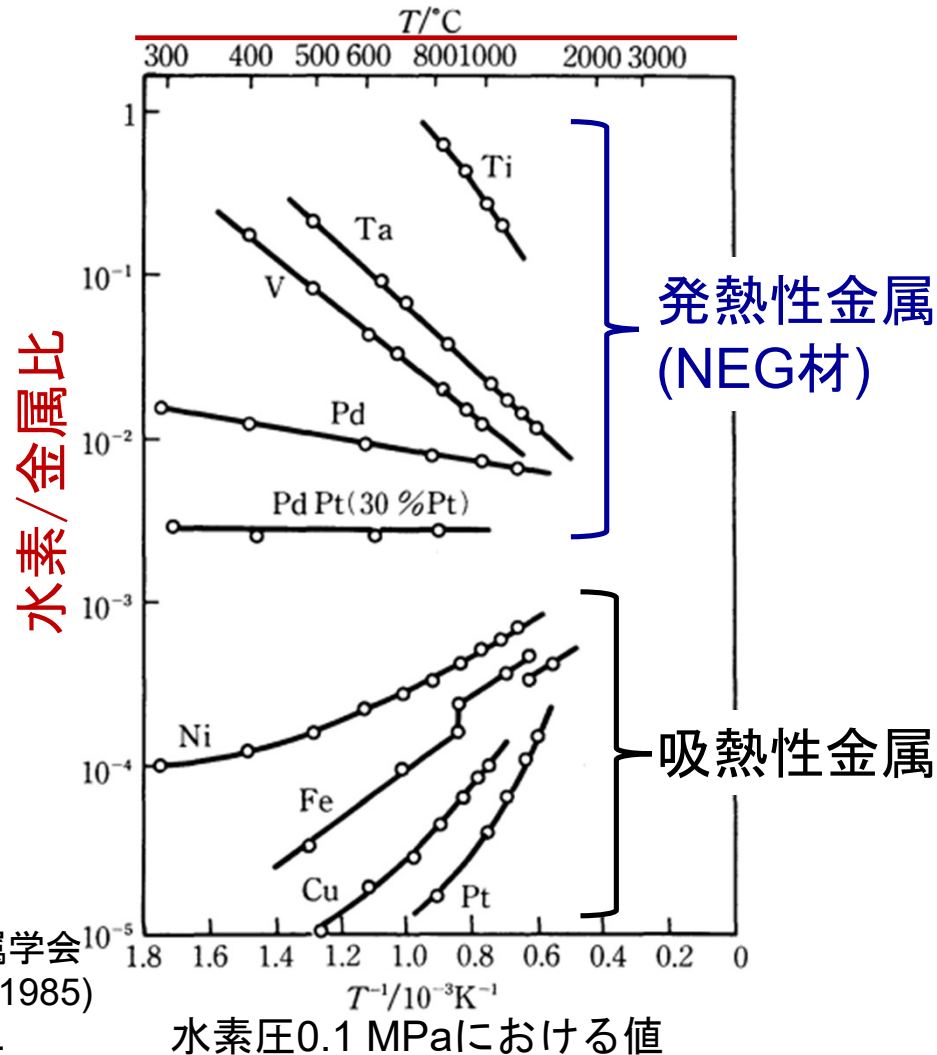
NEGの原理

45



- 化学吸着作用により排気する。
H₂、CO、CO₂、H₂O、N₂、O₂ 排気、希ガス、CH₄は排気できない。
- 表面飽和すると排気できない。
- 再活性化することで、排気性能が回復する。

金属中の水素



- 金属中の水素と水素の圧力は、Siever法則に従う。

$$\sqrt{p} = Kx$$

p は水素の圧力、 x は水素の濃度、 K はsiever定数

$$\ln k = -\Delta S_s + \Delta H_s/RT$$

ΔS_s は溶解エントロピー、 ΔH_s は溶解熱

ΔH_s が負の時、高い水素の溶解度。

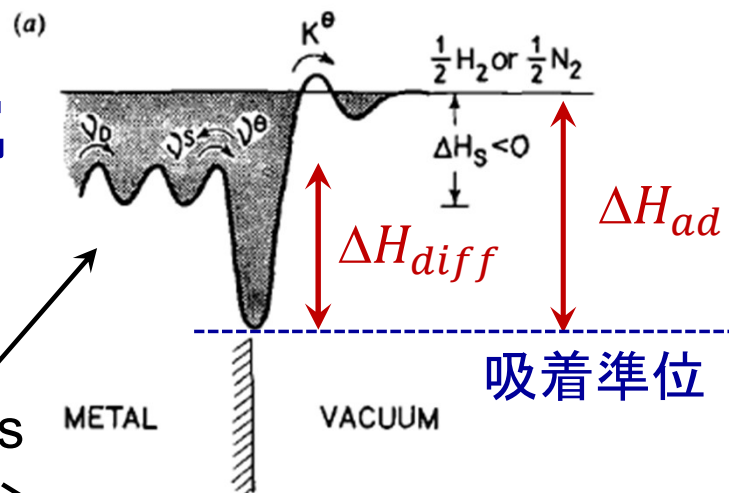
- 高温で水素を放出し、室温で水素を吸着する。

表面吸着原子の内部拡散

47

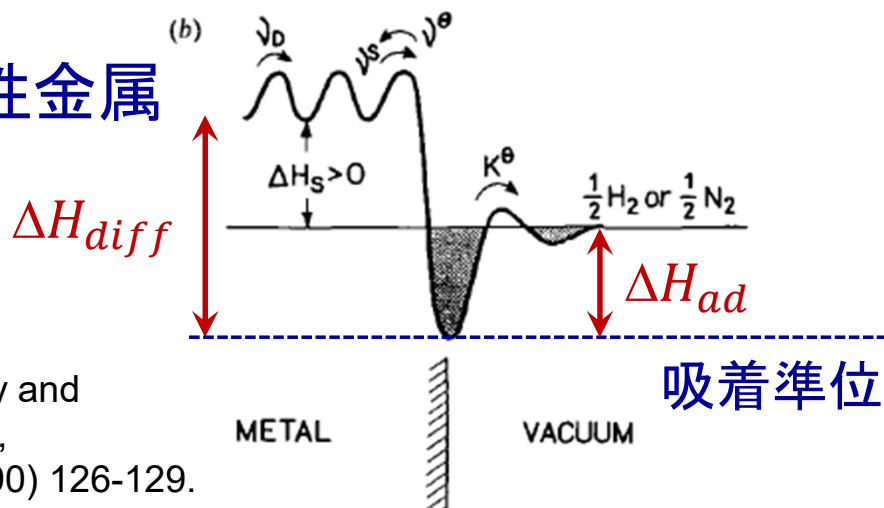
発熱性金属
(NEG材)

Potential diagrams



- 発熱性金属（NEG材）では、
 $\Delta H_{diff} < \Delta H_{ad}$ で、加熱により
吸着原子が内部に拡散する。

吸熱性金属



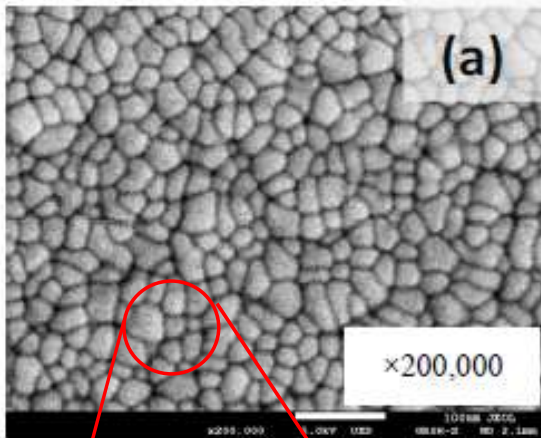
- 吸熱性金属では、
 $\Delta H_{diff} > \Delta H_{ad}$ で、吸着原子
の内部への拡散ができない。

B.M. Shipilevsky and
V. G. Glebovsky,
Vacuum 41 (1990) 126-129.

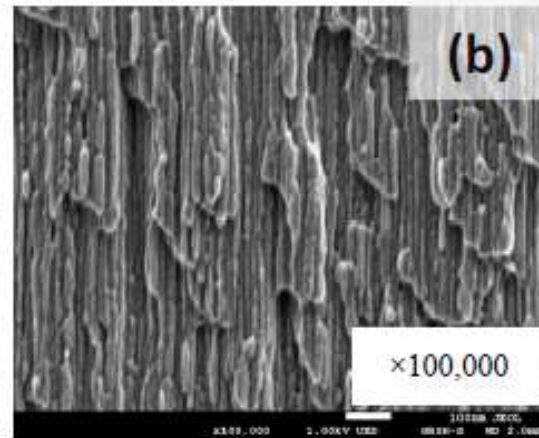
TiZrVの低温再活性化

48

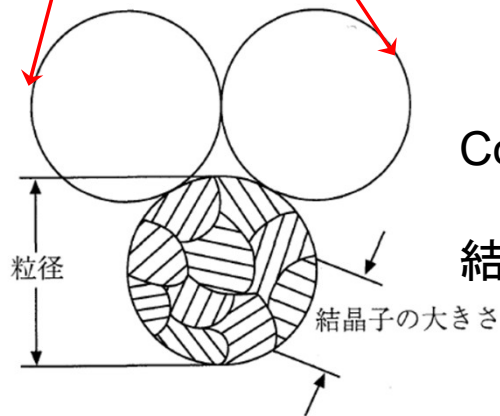
SEM表面像



SEM断面像



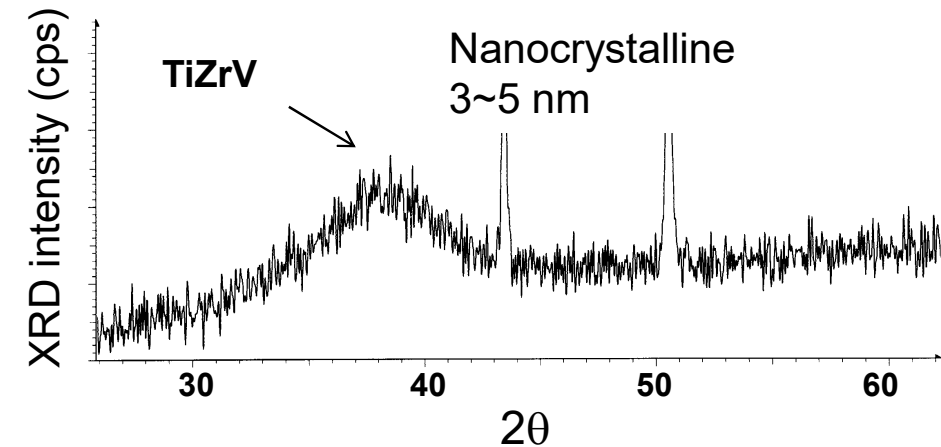
Y. Tanimoto *et al.*, IPAC2019 proceeding 1276-1279



Column径 : 20~100 nm

結晶子サイズ : 3~5 nm

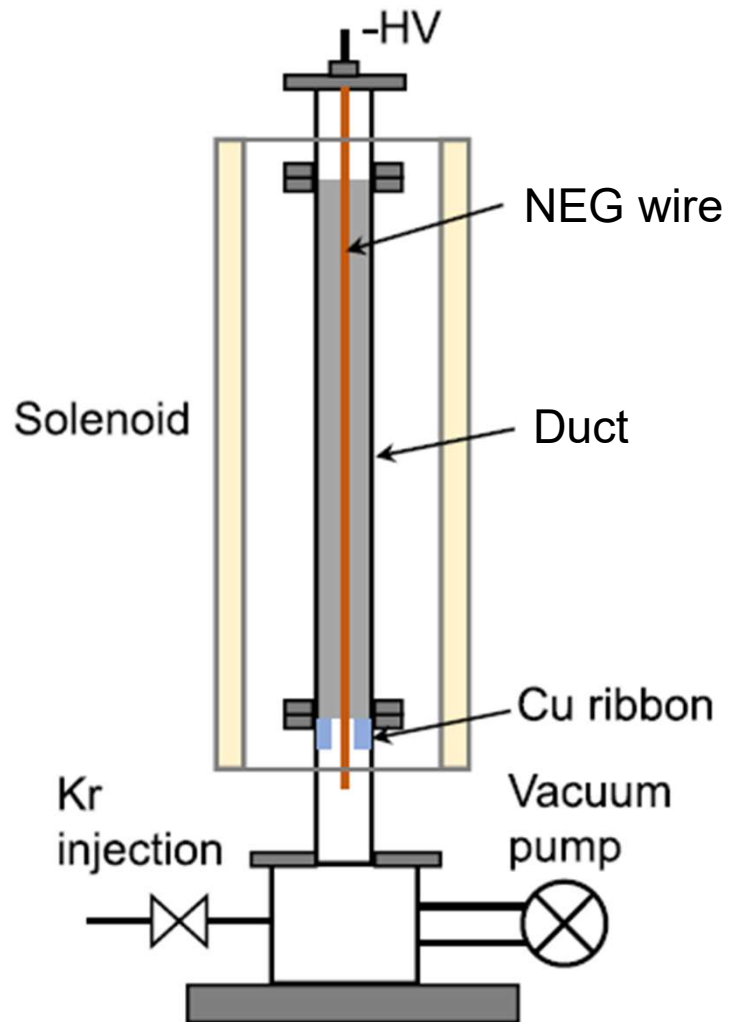
X線回折



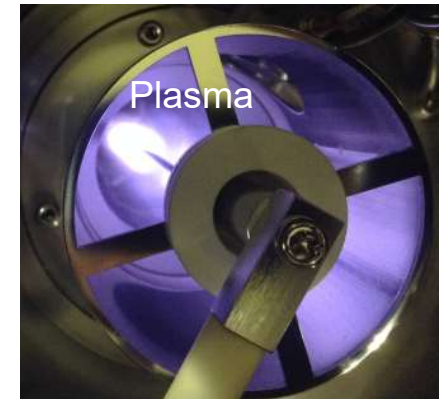
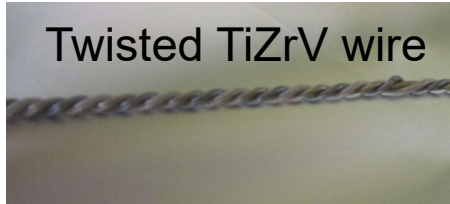
diffraction, the low activation temperature is correlated to the film structure [10] and presumably caused by a large density of grain boundaries, which should facilitate the transport of oxygen from the surface into the bulk of the film.

C. Benvenuti *et al.*, Vacuum 71 (2003) 307-315.

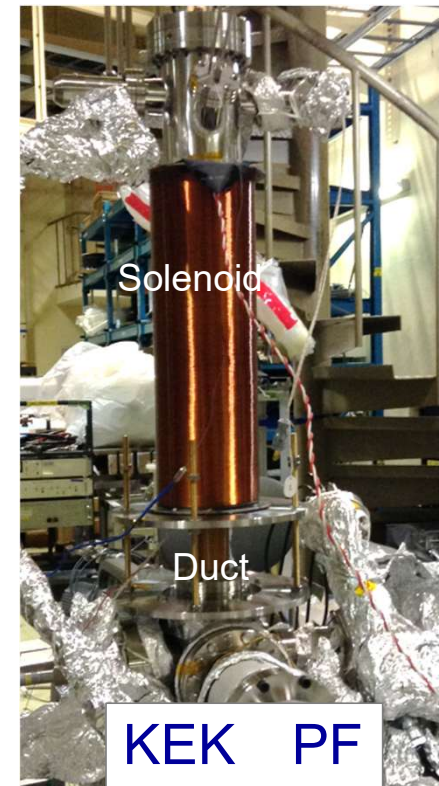
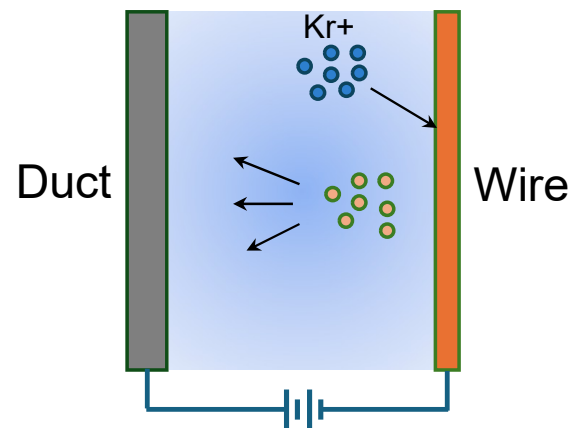
マグネトロンスパッタ



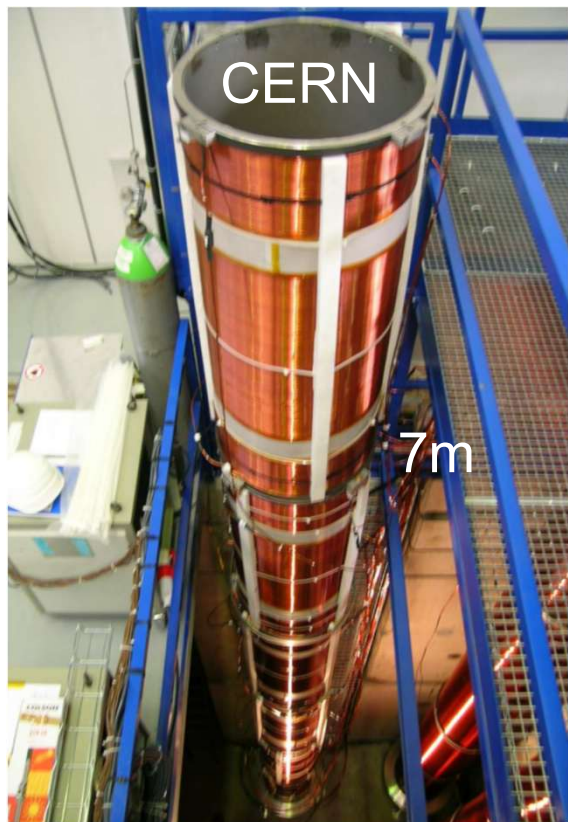
Twisted TiZrV wire



スパッタリング原理



世界中のNEGコーティング装置

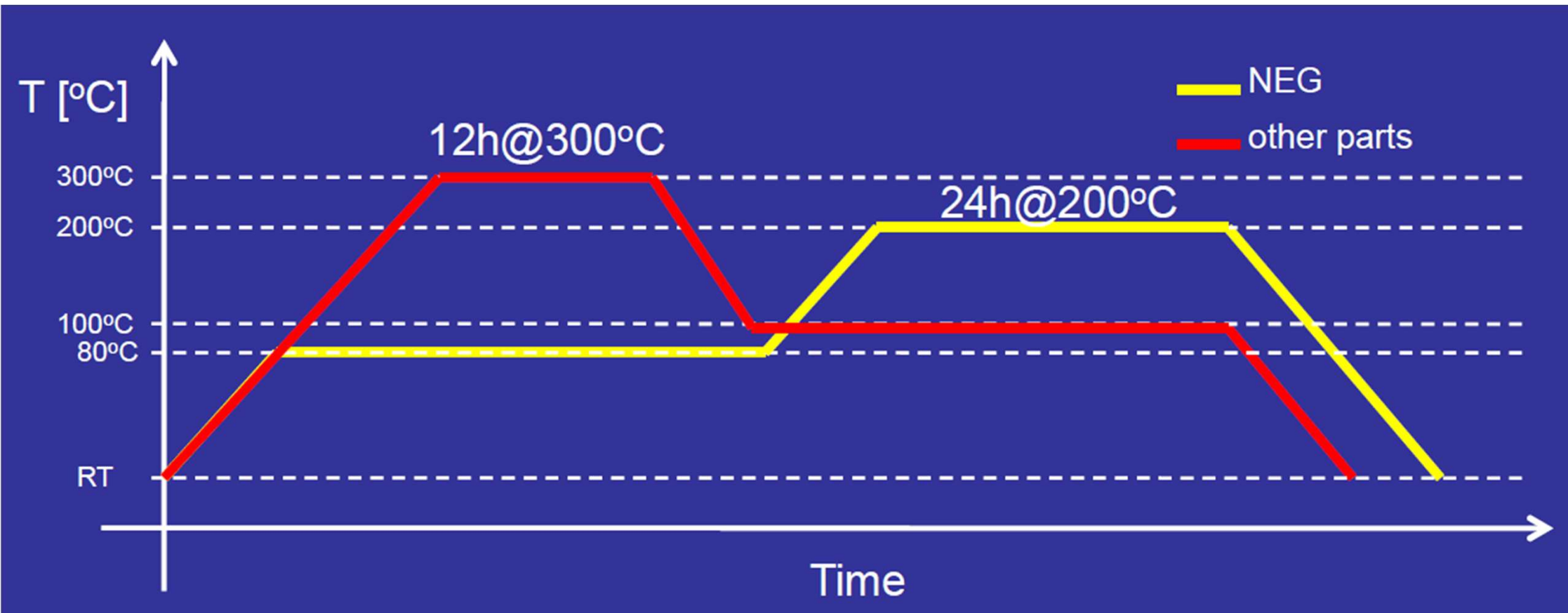


NEGコーティング手順

- 1) ダクトの洗浄、表面処理
- 2) 装置のベーキング、ダクトは200°Cで24h
- 3) 残留ガス分析 → ソレノイドON → Krガス導入 (1~5 Pa)
- 4) カソードに高電圧印加 (-300 ~ -600 V)
- 5) コーティング時間、24時間程度 (膜厚2 μm)
- 6) 高電圧OFF → Krガス遮断 → ソレノイドOFF
- 7) 残留ガス分析 → 窒素封入

NEGコーティングの活性化

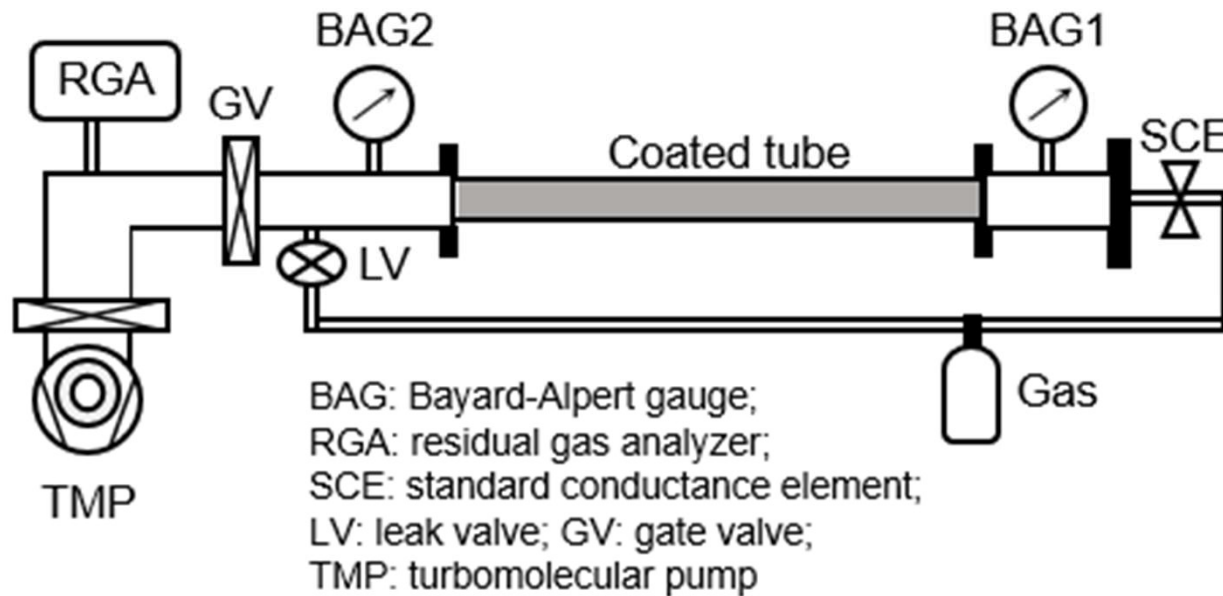
52



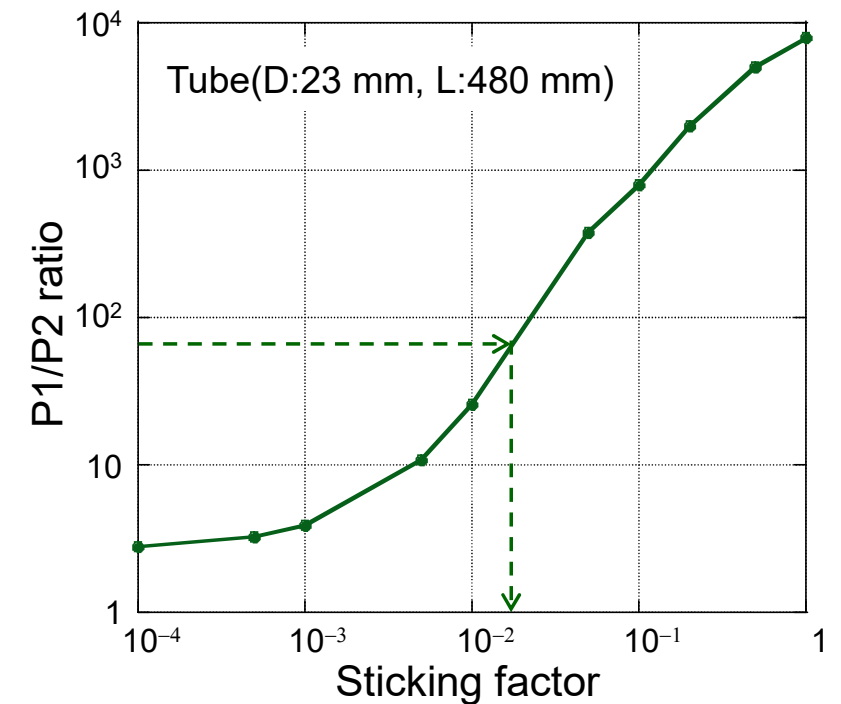
Courtesy Pedro Costa Pinto

排気速度の評価 — 平均吸着確率

通過法



MolFlow+による計算結果

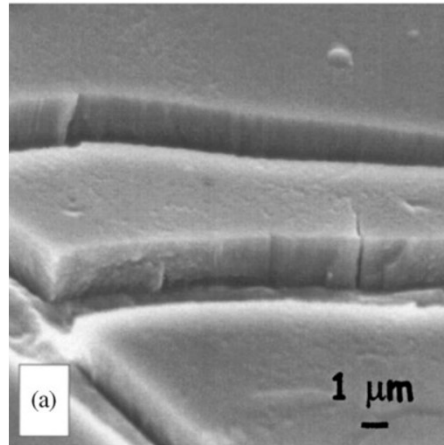


表面モフォロジー

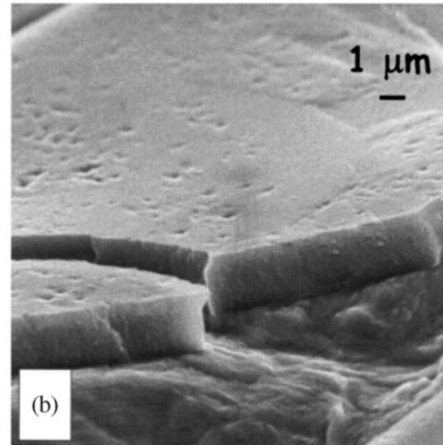
54

成膜中の
ダクト温度による
表面の変化

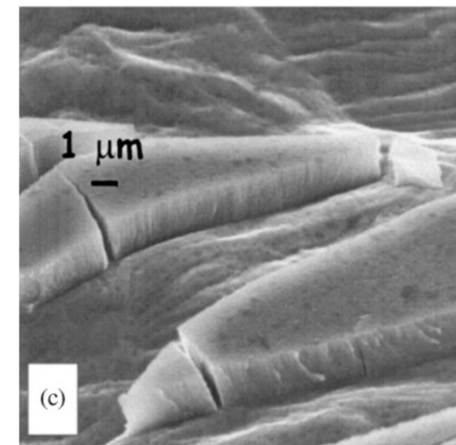
100°C



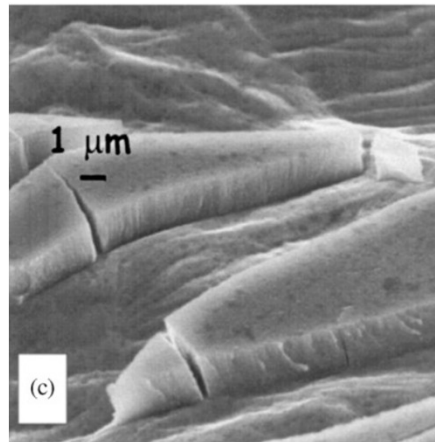
150°C



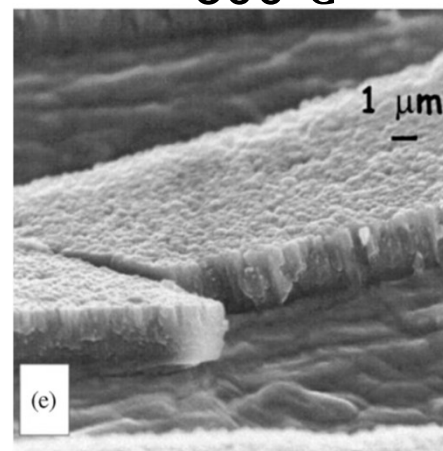
200°C



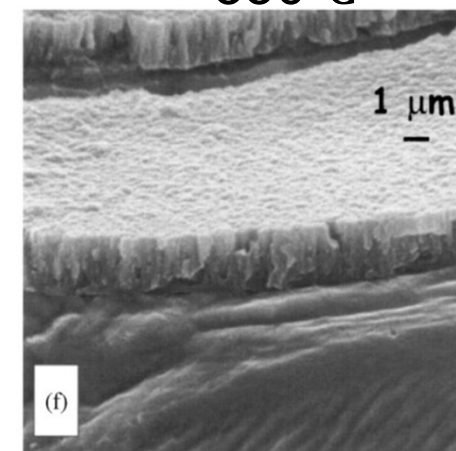
250°C



300°C



350°C

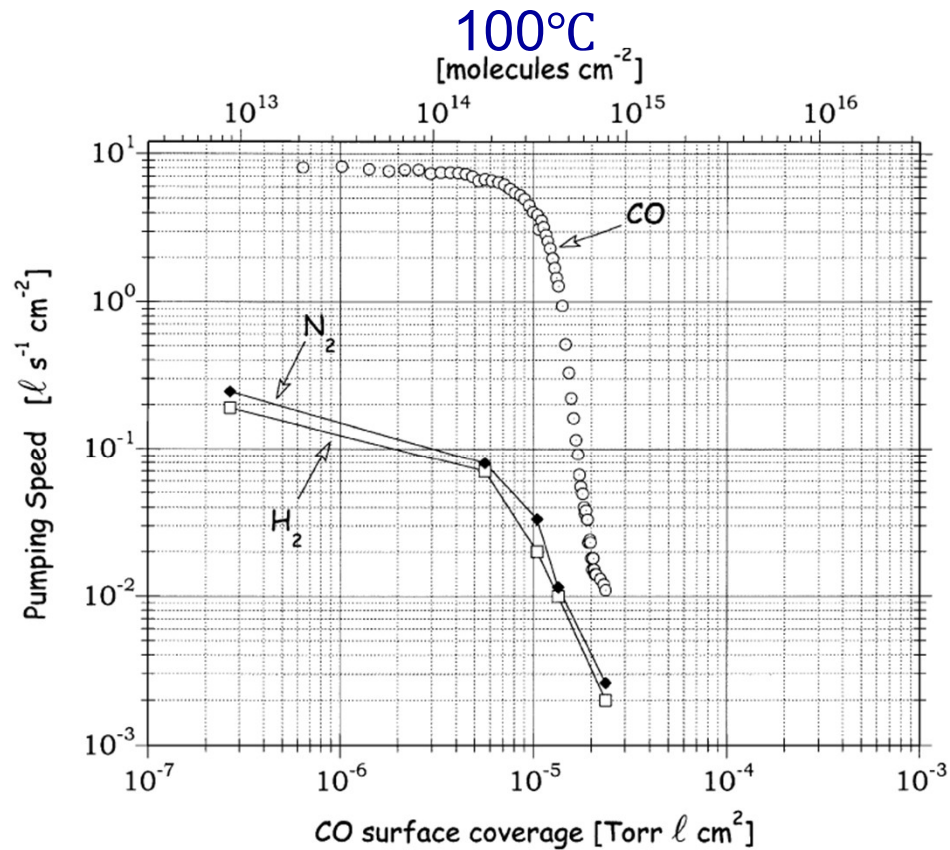


C. Benvenuti *et al.*, Vacuum 71 (2003) 307-315.

排気性能

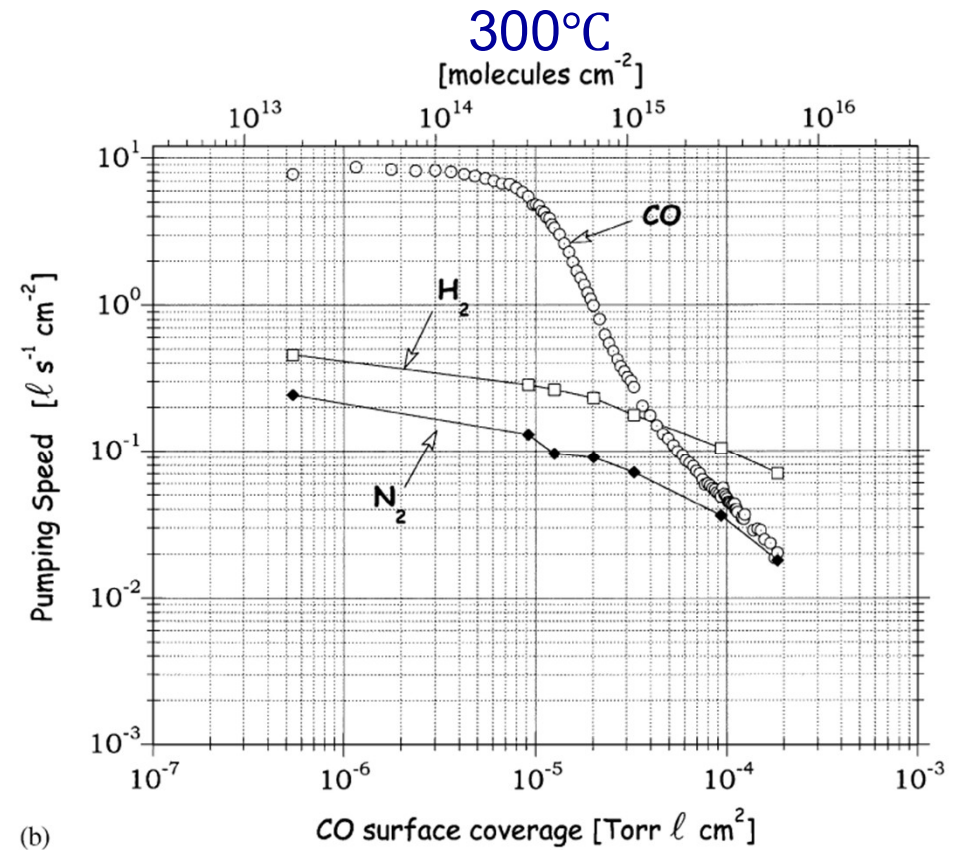
COガスの測定中に、H₂とN₂の排気速度を計測

55



1 ML =
1 × 10¹⁵ molecules/cm²

CO飽和量 : 8 × 10¹⁴ molecules/cm²



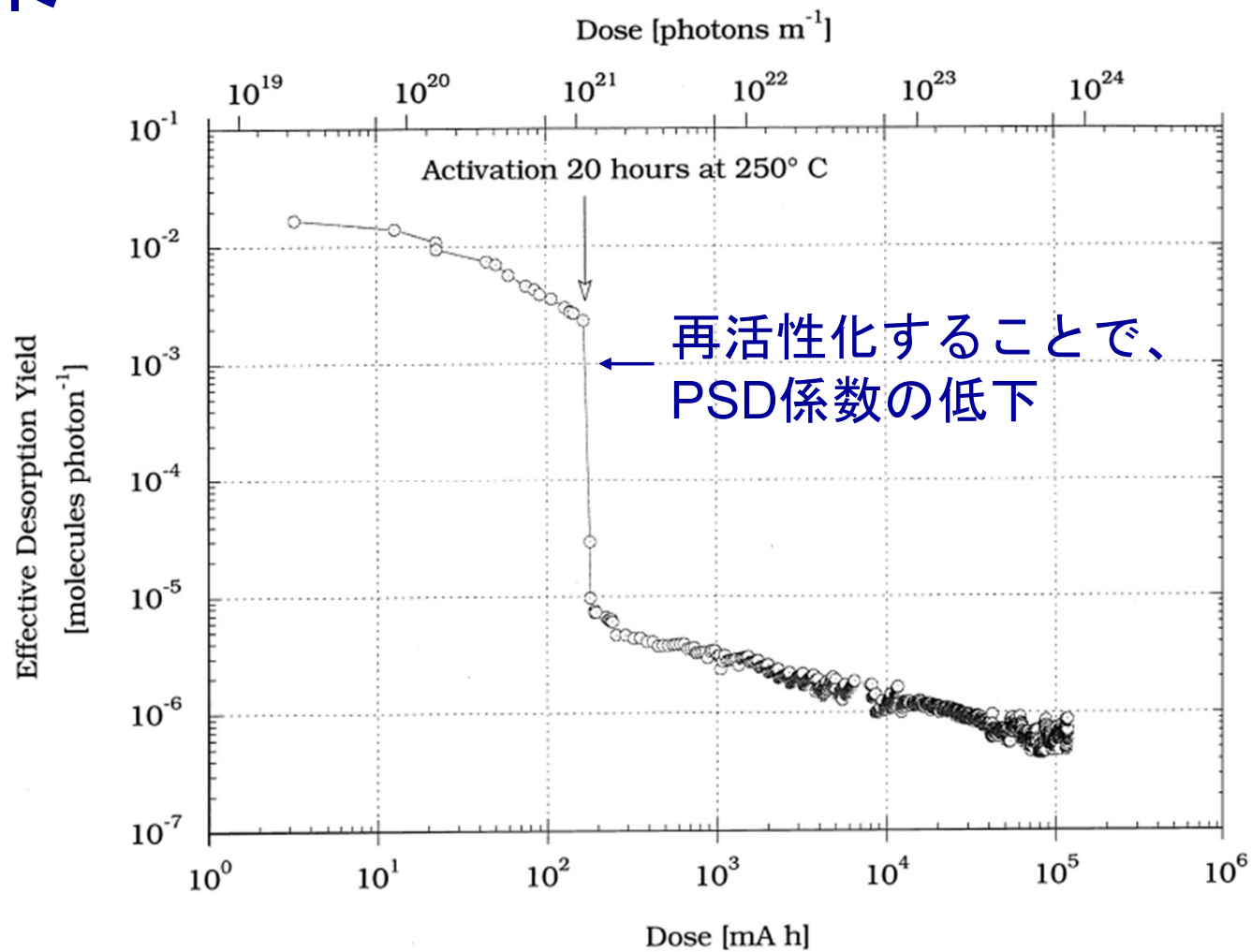
(b)

C. Benvenuti *et al.*, Vacuum 71 (2003) 307-315.

7 × 10¹⁵ molecules/cm²

PSD結果

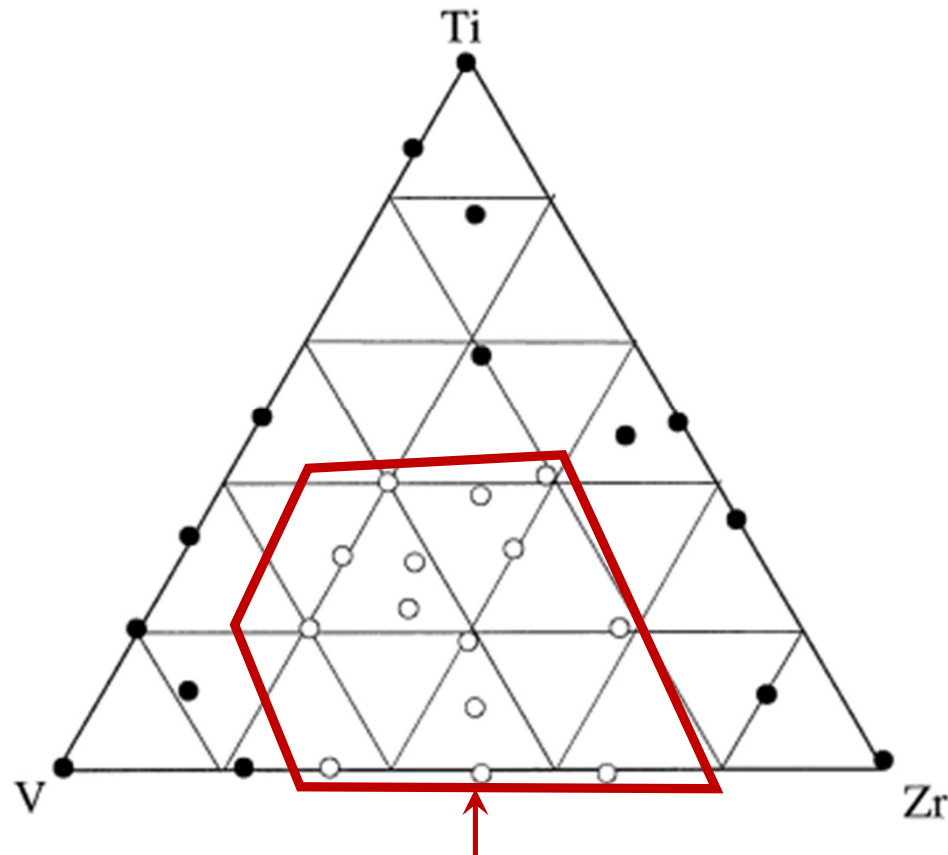
56



C. Benvenuti *et al.*, Vacuum 60 (2001) 57-65.

TiZrVの組成依存

57



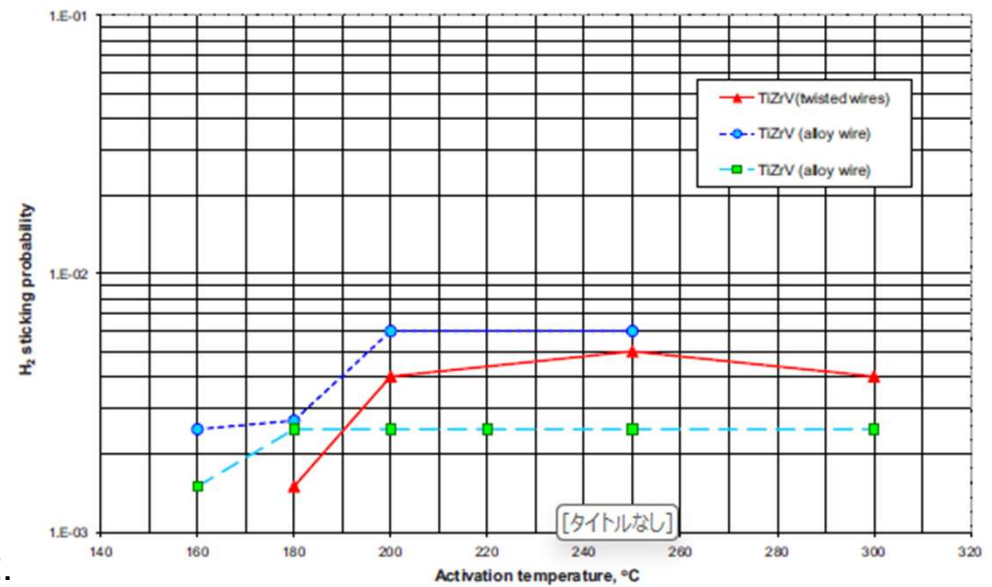
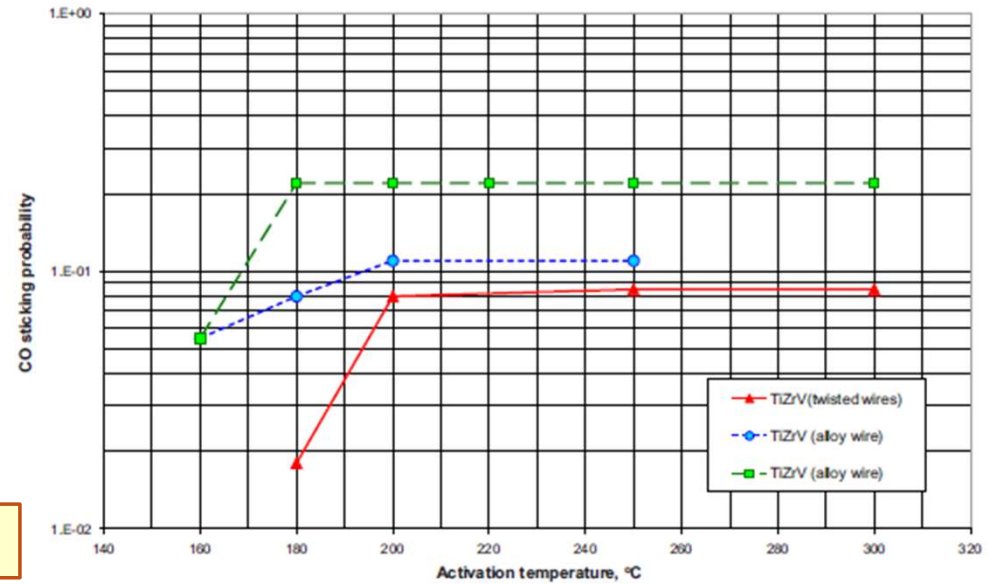
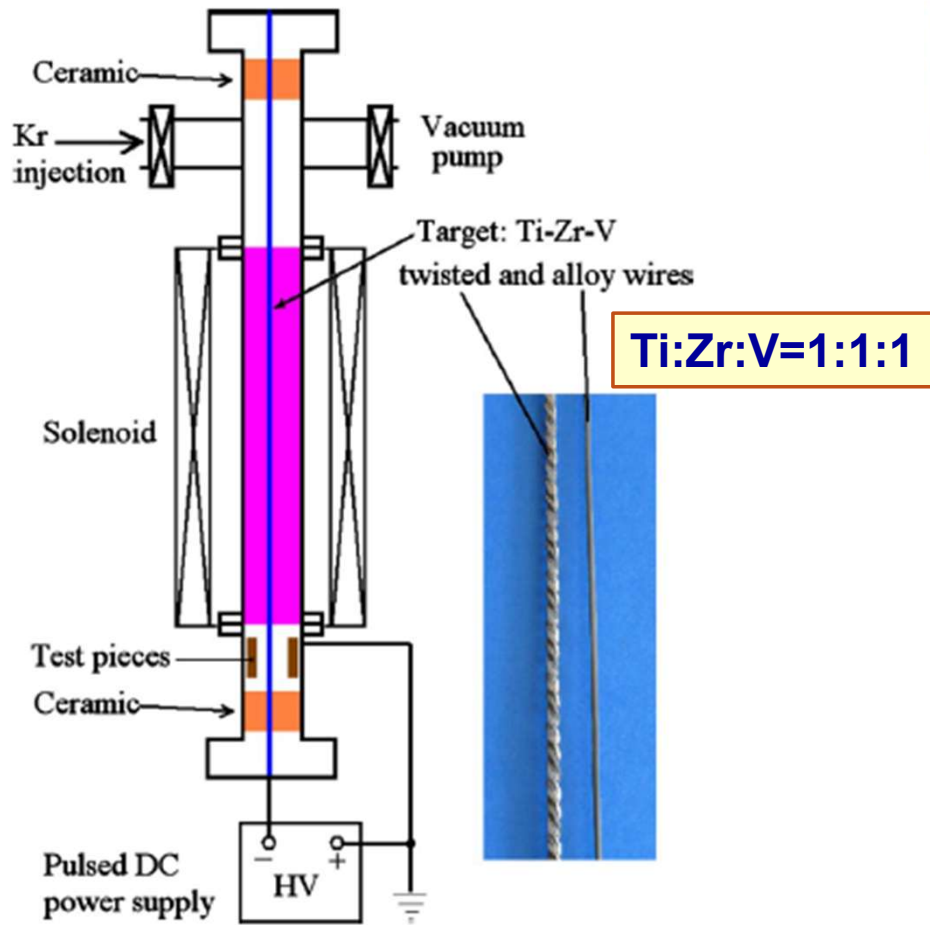
低温再活性化できる組成領域

- 200°Cで1時間の加熱処理を行う。
- 表面分析により、Zrの酸化物の変化を調べた。
- $Zr/ZrO > 0.5$ を基準にする。

$Ti_{(0\sim40)}Zr_{(20\sim60)}V_{(30\sim70)}$ の
広い組成範囲で低温活性化される。

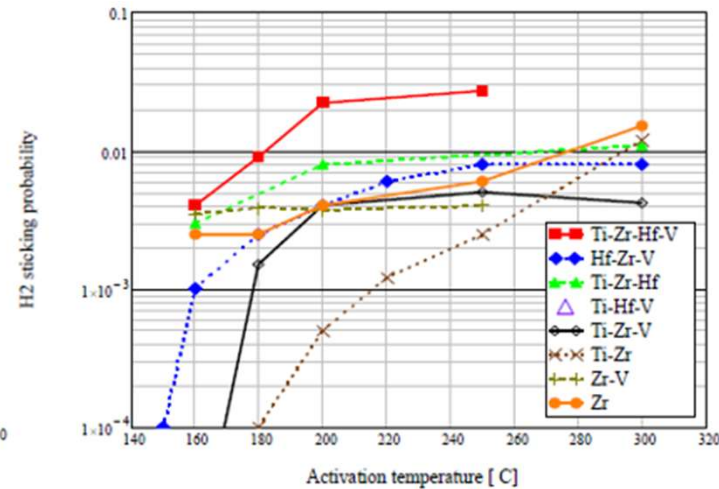
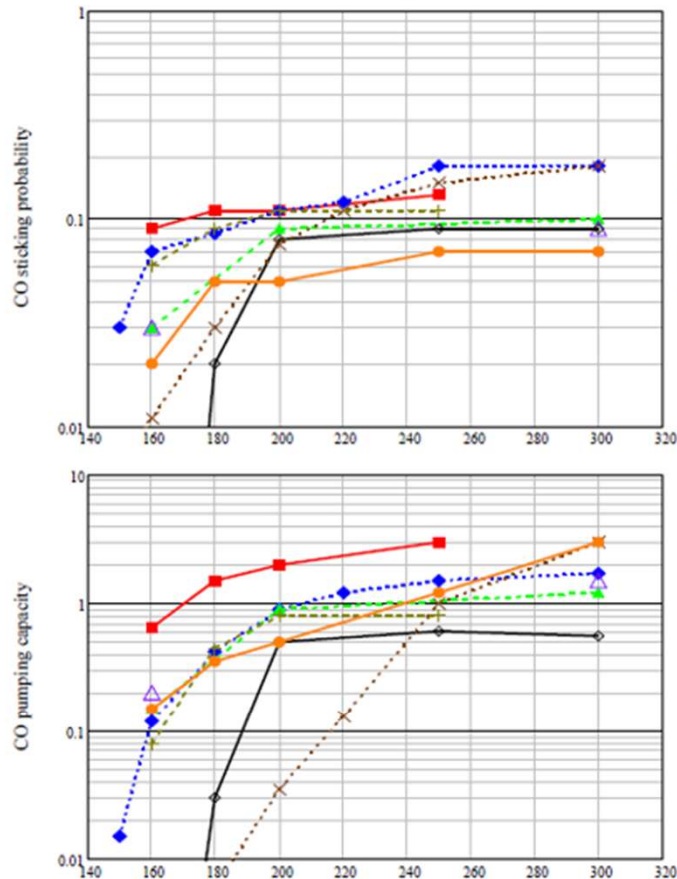
C. Benvenuti *et al.*, Vacuum 60 (2001) 57-65.

合金ターゲット



異なるNEG材の排気性能

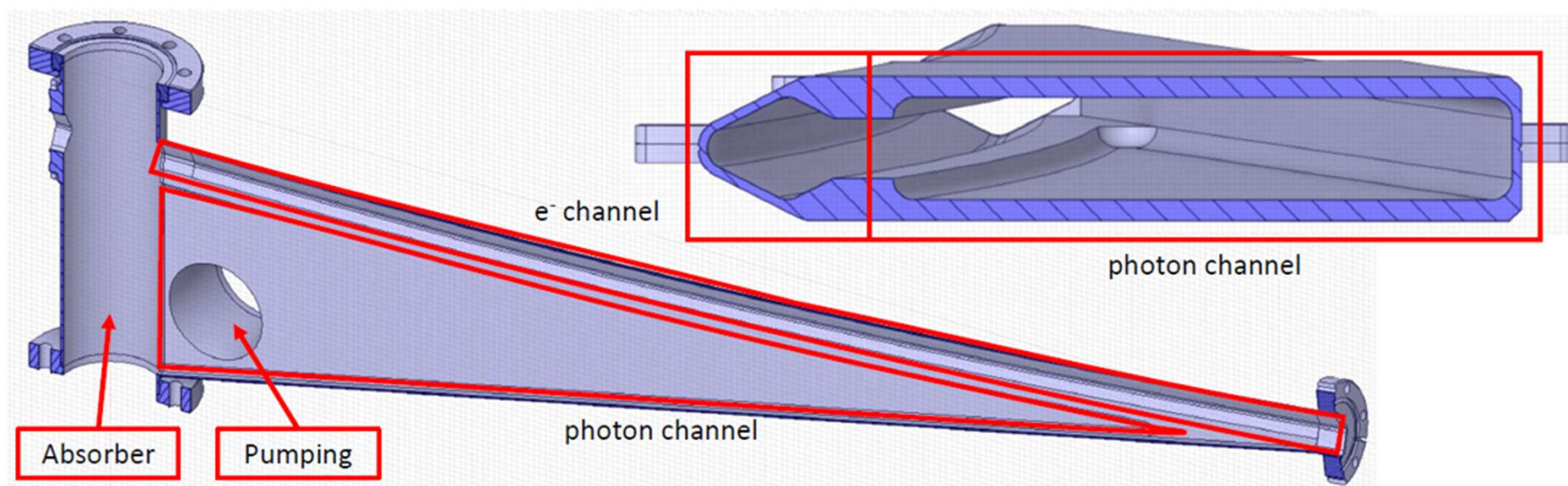
Courtesy Reza Valizadeh



- **Ti-Zr-Hf-V** performed the best
 - ✓ Activated at 150-160 °C for a columnar film
 - ✓ $\alpha_{CO} \leq 0.4$, $\alpha_{CO_2} \leq 0.6$, $\alpha_{H_2} \leq 0.03$
- **Hf-Zr-V**, **Ti-Zr-Hf**, **Ti-Hf-V** and **Zr** are comparable nevertheless they perform less than **Ti-Zr-V**.
- **Zr-V** is the best binary alloy (has the lowest activation temperature in binary range)

複雑形状のダクト

Courtesy Stefano Saroglia



➤ e⁻ channel

- $0.3 < \text{Thickness} < 0.5 \mu\text{m}$
- High coverage & uniformity

1st stage

➤ Photon channel

- $0.3 < \text{thickness} < 1.5 \mu\text{m}$
- High coverage

➤ Absorber & pumping ports

- $0.3 < \text{thickness} < 1.5 \mu\text{m}$
- High coverage

2nd stage

複雑形状のダクト

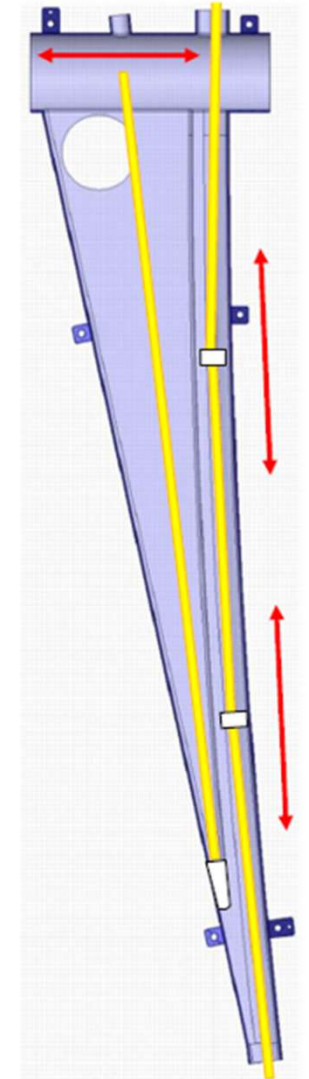
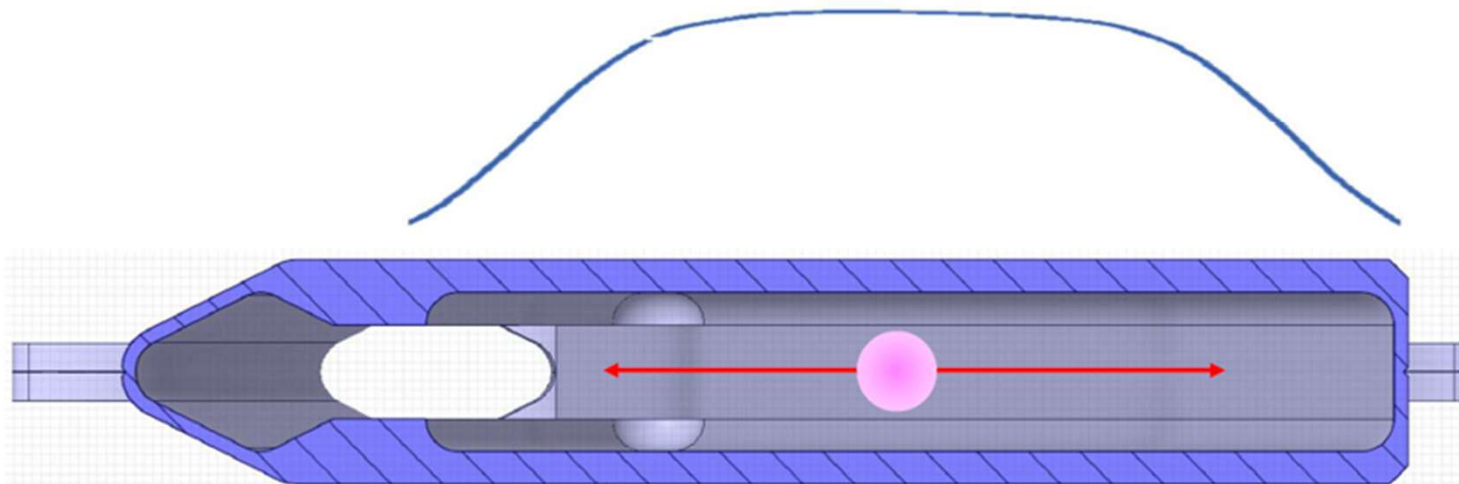
Courtesy Stefano Saroglia

➤ ELETTRA = bent e^- channel (6.5°)

- **Spacers** needed for target centering
 - Transversal **uniformity**
 - But **masking**
- Longitudinal target + spacers **translation**
 - Compensation for masking
 - Longitudinal **uniformity**

➤ ELETTRA = variable cross section in **photon channel**

- Big change in width = **10-124 mm**
- Blind pocket – closed volume
- Reduced transversal **coverage**
- **Multiple** positions needed
 - Multiple targets not possible
 - Target lateral **translation**



複雑形状のダクト

Courtesy Stefano Saroglia

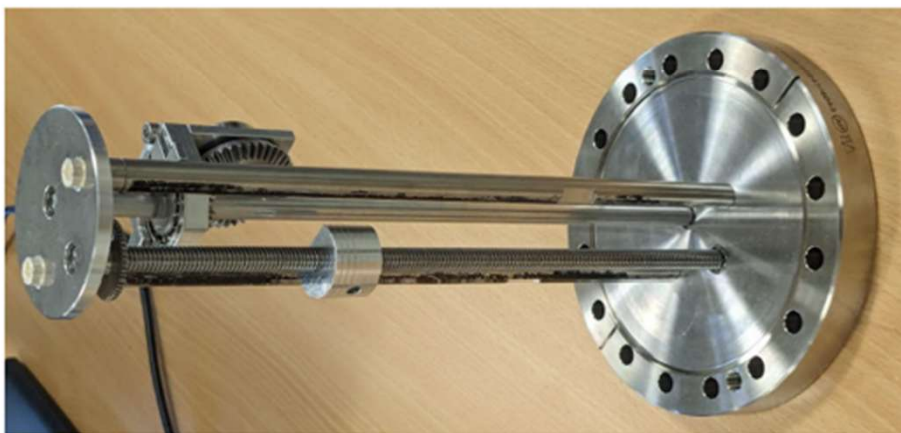
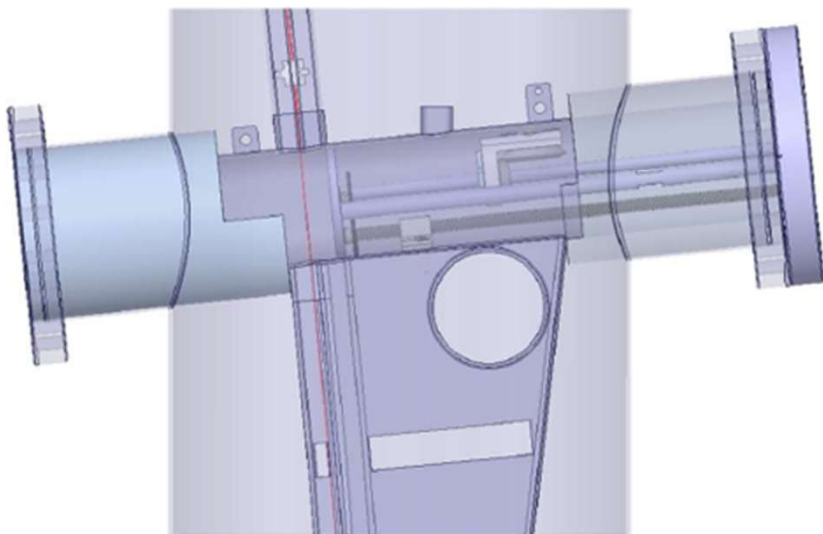
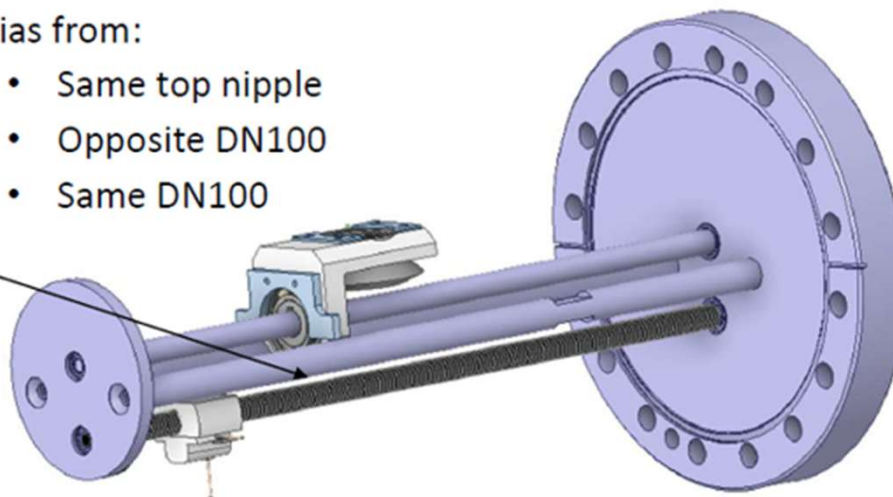
➤ Principle:

- Rotation actuation from top nipple
- 90° axis change rotation
- Synchronous with e⁻ channel

- Bias from:
 - Same top nipple
 - Opposite DN100
 - Same DN100

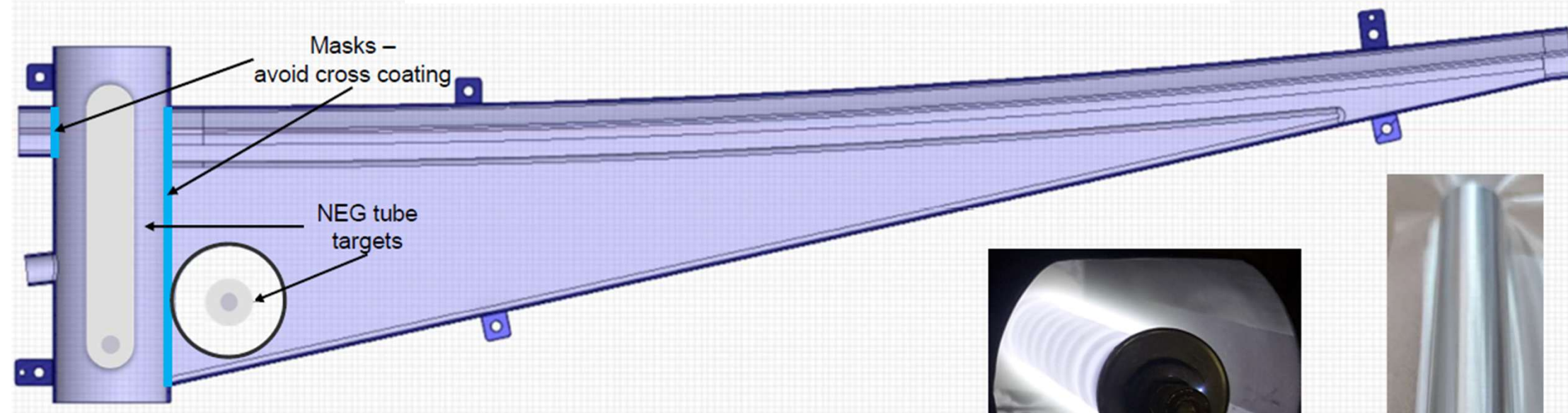


Drive screws –
DLC Coating



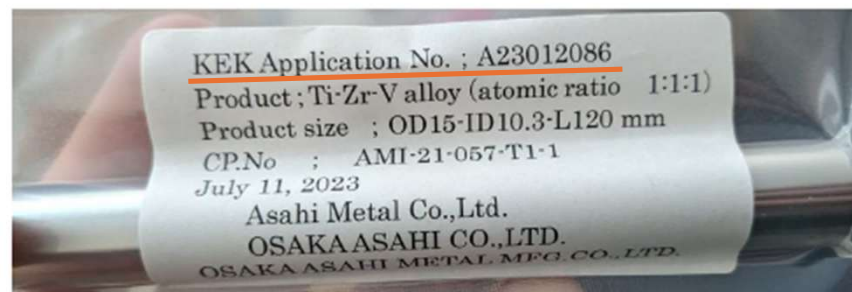
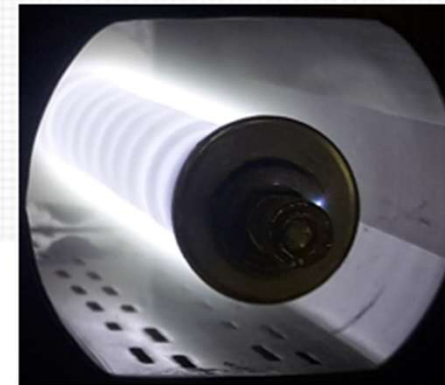
複雑形状のダクト

Courtesy Stefano Saroglia



➤ Permanent magnets cylindrical sputtering:

- No need of external magnetic fields
- Established technology – in-situ LHC aC coating
 - NEG tube targets
 - KEK (Y. Tanimoto) – Asahi Metals collaboration



Fully NEG coated 3 GeV electron storage ring at MAX IV



Marek Grabski
on behalf of the MAX IV vacuum team

The 103rd IUVSTA Workshop on New Horizons of NEG Thin Film Applications,
24-27 June 2024, York, UK

NEG coating of vacuum chamber

65

All the vacuum chambers were NEG (Non-Evaporable Getter) coated with:

- Thin film (0.5-2 μm) of Ti-Zr-V (30%, 30%, 40% respectively) alloy deposited by magnetron sputtering.

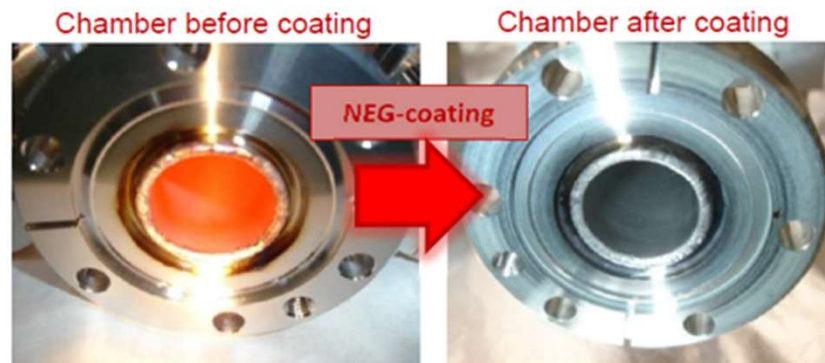
NEG film, after activation (heating up to 180°C under vacuum), activates and pumps active gasses (do not pump noble gasses nor methane CH_4), and has lower PSD (Photon Stimulated Desorption).

The prototyping and validation of the NEG coating on standard and most complicated geometrically chambers was done in collaboration with CERN.

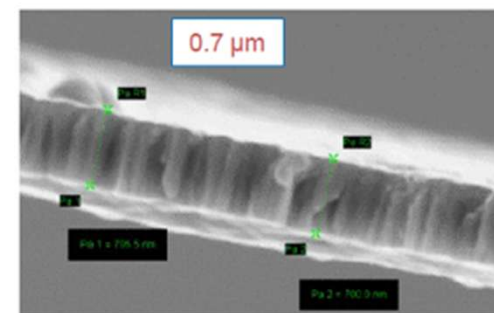
The extruded copper tubes prior to the coating were cleaned and surface treated (etched, passivated), then NEG coated.



'NEG thin film coatings: from the origin to the next-generation synchrotron-light sources', Paolo Chiggiato, CERN (presented at OLAV'14)



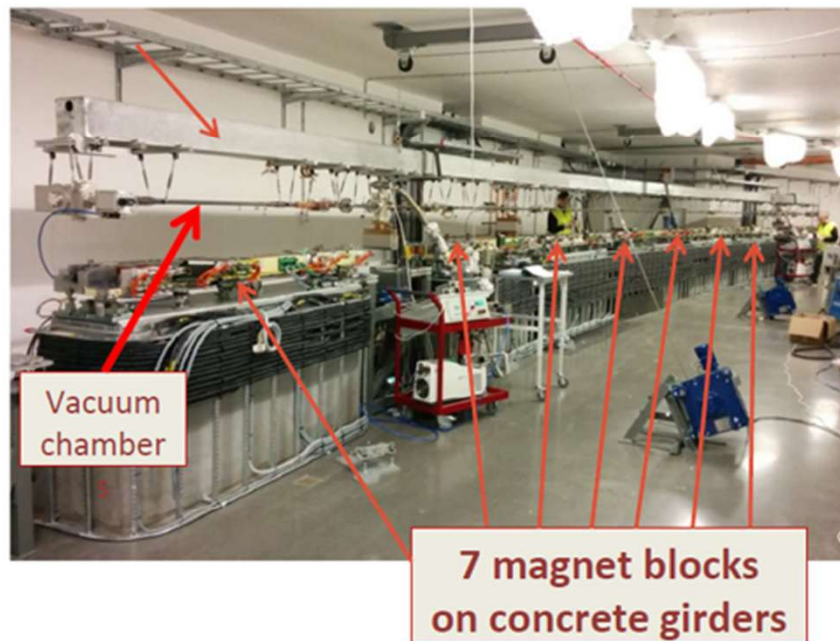
SEM coating thickness measurements:



Courtesy
Marek Grabski

Installation procedure

Ring installation was tested and rehearsed by installing and activating 1 mockup achromat inside a separate hall.



Actual vacuum installation lasted 7 months (November 2014 – June 2015).

Main steps included:

- vacuum chambers were assembled above lower magnet halves,
- Lifted up with a strongback,
- baked and activated at 180 deg C with oven,
- lowered to the lower magnet halves,
- Magnets were closed,
- Straight sections between achromats were installed and baked in-situ,

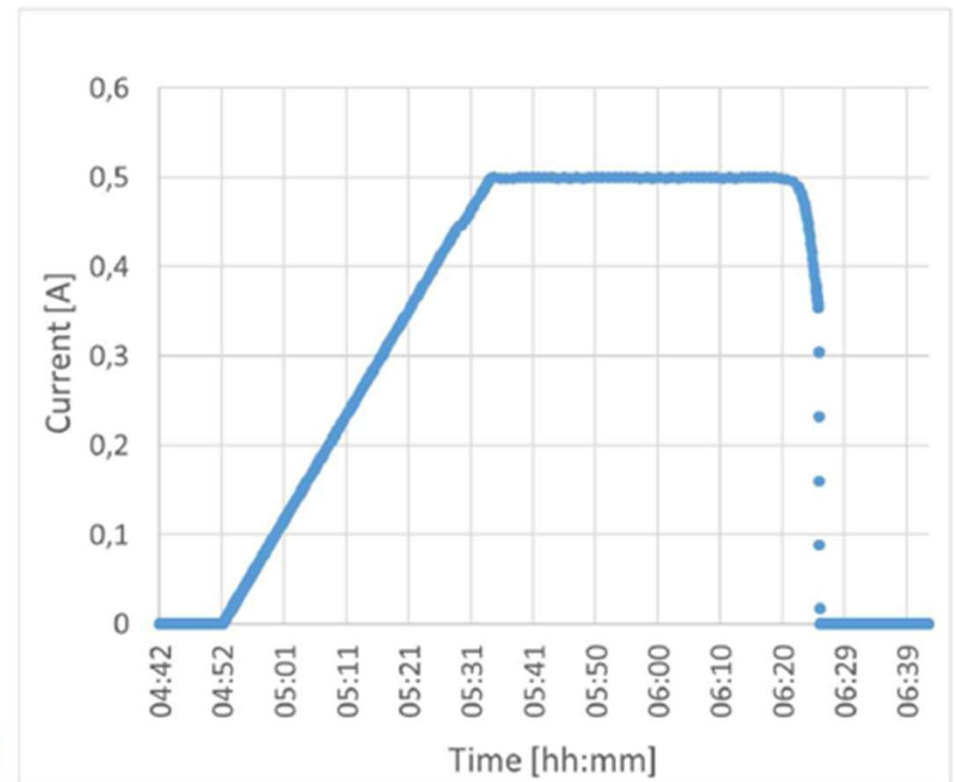


Courtesy Marek Grabski

Vacuum performance

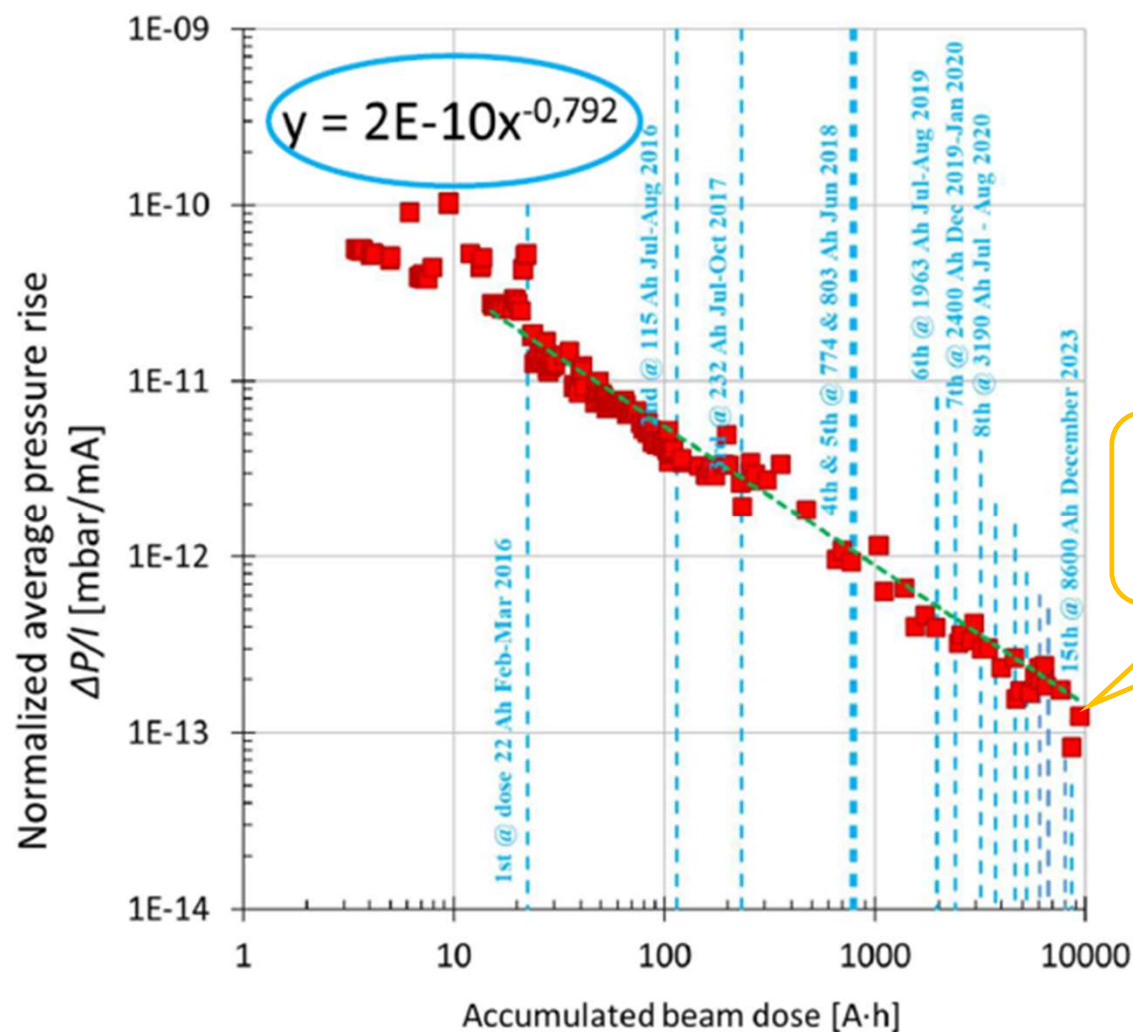
Courtesy Marek Grabski

- Average base pressure (June 2024):
 $\sim 1.5 \times 10^{-10}$ mbar (extractor gauges)
- Accumulated beam dose:
9971 Ah (June 2024)
- Max. stored current:
500 mA (November 2018)
total lifetime was 14 h,
- Beam current for delivery to beamlines:
400 mA, (total beam lifetime ~ 15 h)



Vacuum performance: pressure

Courtesy Marek Grabski



500 mAの時、
 ΔP は 5×10^{-9} Pa

NEGコーティングの改善すべき点

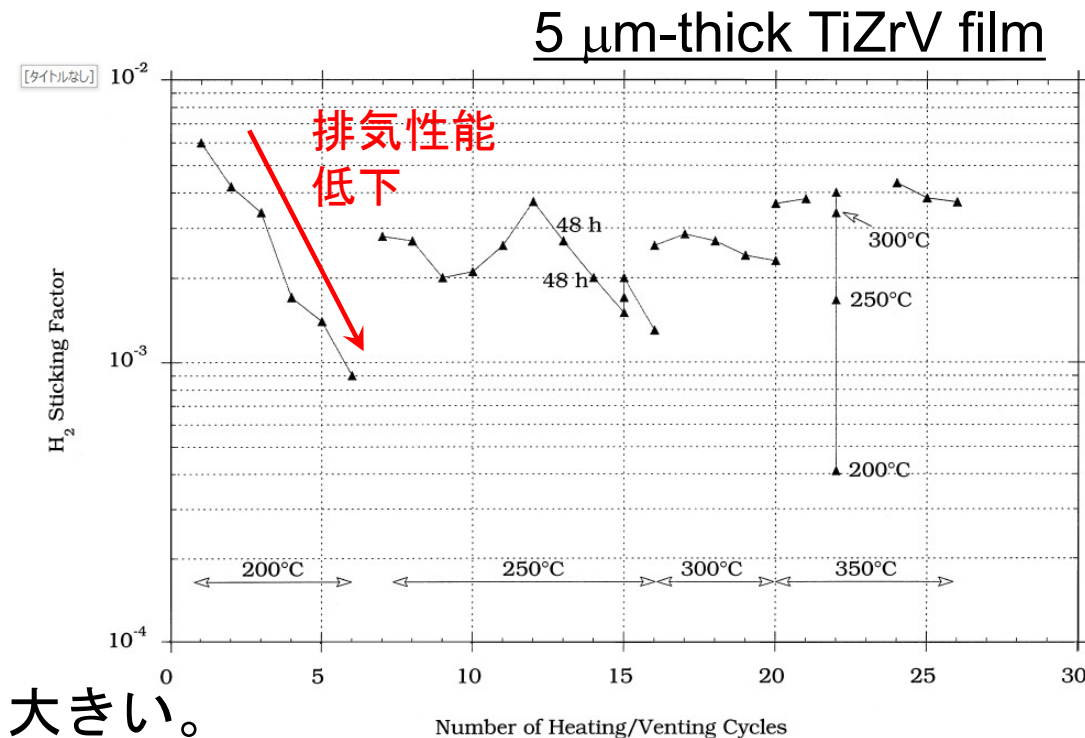
寿命問題

- ・ 大気開放中に大量の酸素、水分を吸着する。
- ・ 表面が酸素リッチになり、排気性能が低下する。

抵抗率

- ・ TiZrV膜の抵抗率が $175 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ 以上と大きい。
(Cuの抵抗率が $1.6 \mu\Omega\cdot\text{cm}$)

- ・ Resistive wall impedanceにより、発熱やビームが不安定になる。

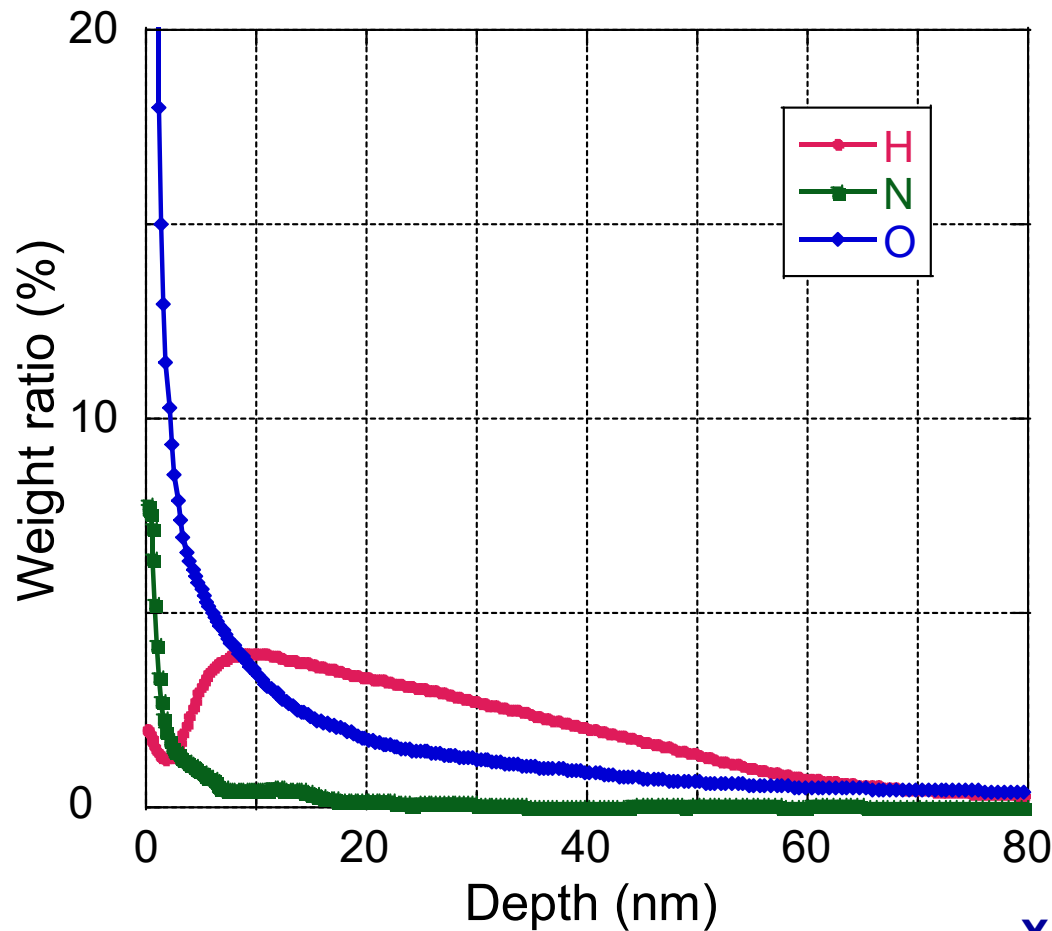


C. Benvenuti *et al.*, Vacuum 60 (2001) 57-65.

目次

- 真空の基礎
- 放射光源加速器の真空
- NEGコーティング
- 本グループの研究成果
 - 1) 超低PSD・長寿命NEG膜の開発
 - 2) 超低PSD・低抵抗率の密なPd膜の開発
 - 3) 低PSDのアブソーバーの開発

NEG膜の表面付近の元素分布



- 大気中に保存したTiZrV膜。
- GDS (glow discharge optical emission spectrometry) による元素の深さ方向の分布。
- O_2 、 H_2O は数十nmまで侵入する。

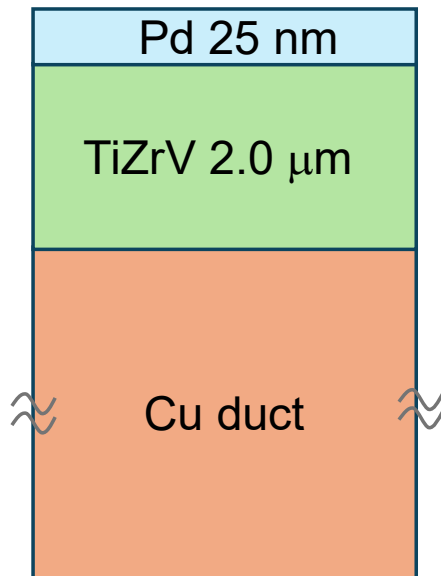
Pd 表面層の導入

72

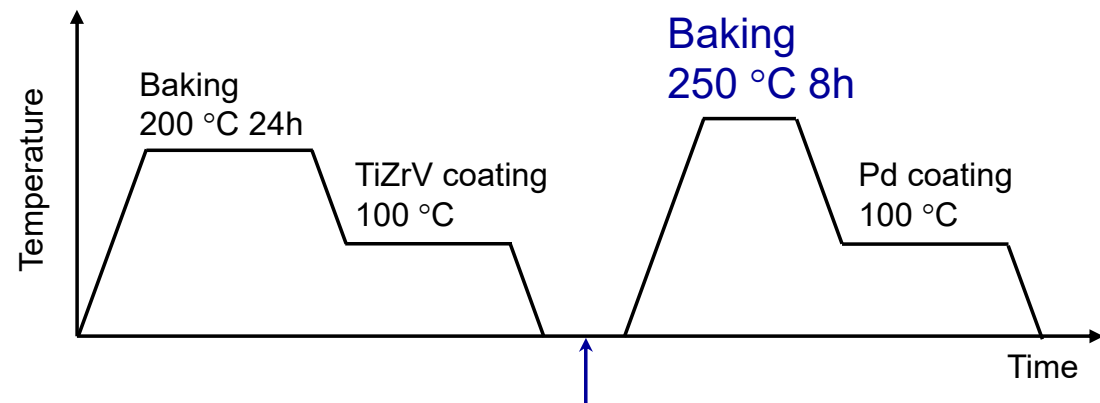
- Pd膜は O_2 と H_2O とは反応しないが、 H_2 とCOは吸着する。
- Pd膜でNEG膜を覆うと、寿命を長くする。

C. Benvenuti *et al.*, Vacuum 73 (2004) 139-144.

Sample structure



Coating process



Exchanging TiZrV wire to Pd wire
(TiZrV film exposed to air)

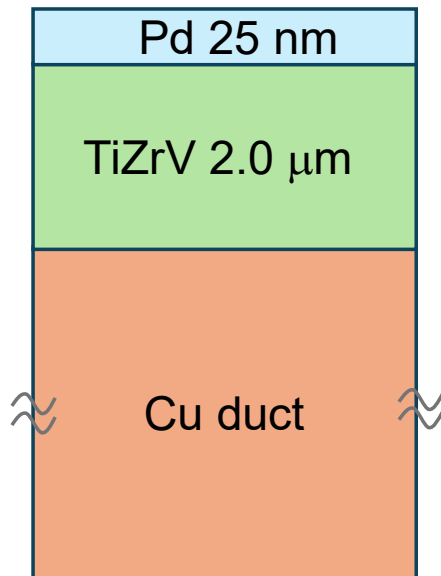
Pd covered NEG films

73

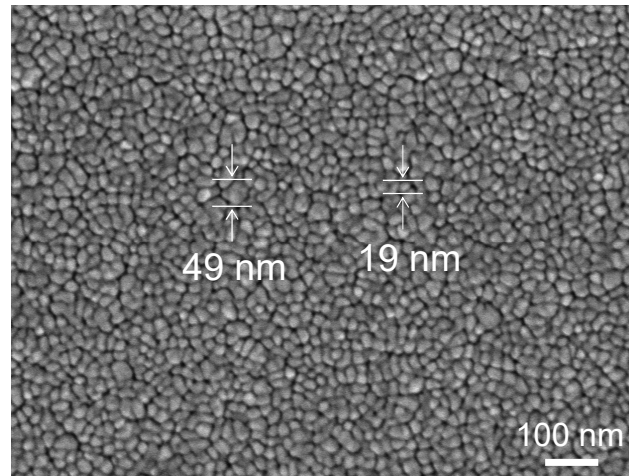
- Pd膜は O_2 と H_2O とは反応しないが、 H_2 とCOは吸着する。
- Pd膜でNEG膜を覆うと、寿命を長くする。

C. Benvenuti *et al.*, Vacuum 73 (2004) 139-144.

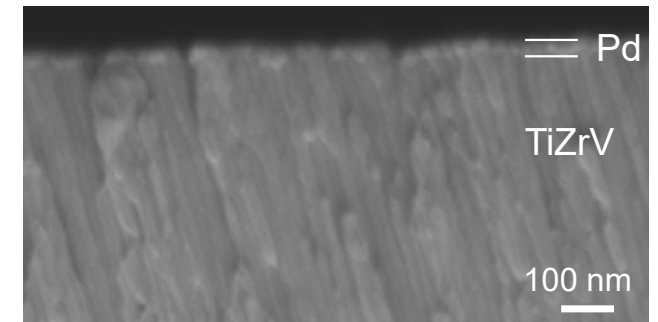
Sample structure



Surface SEM image



Cross-sectional SEM image

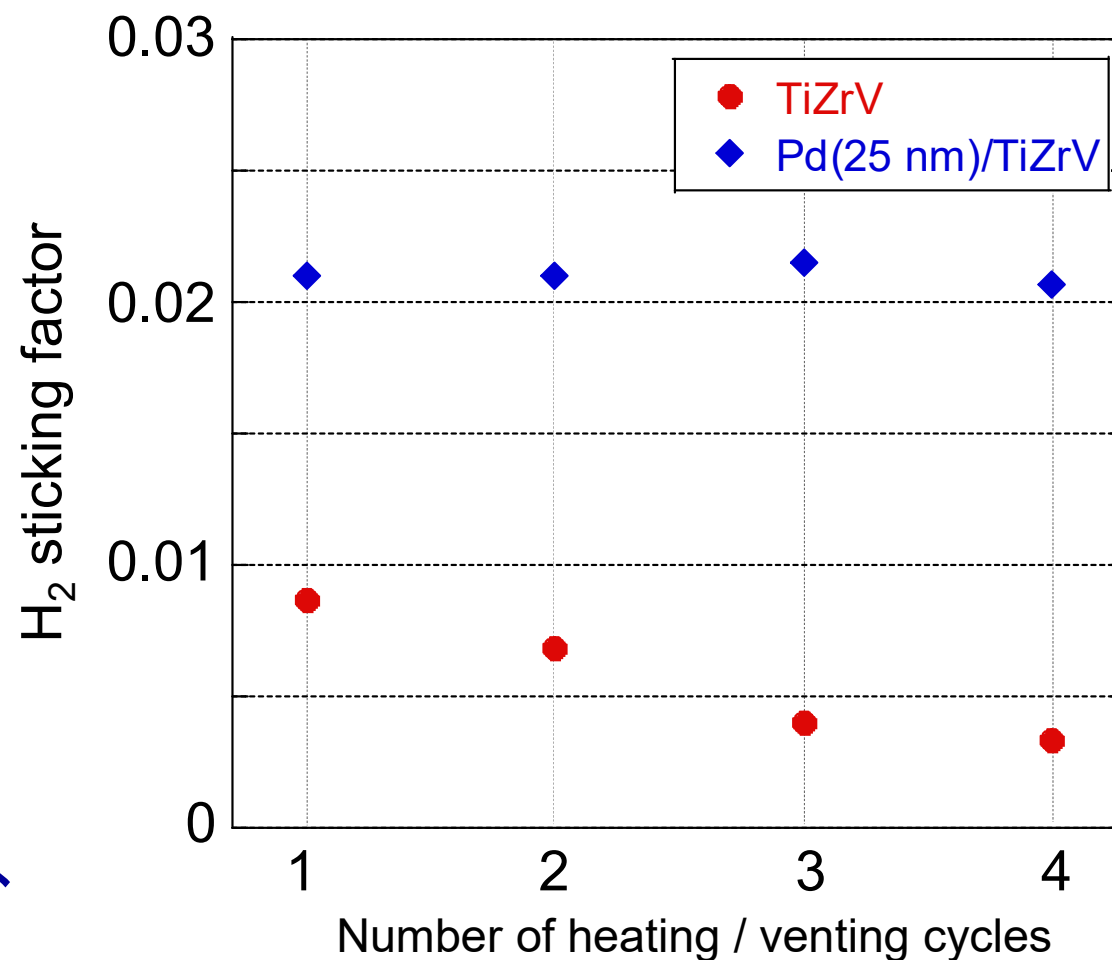


使用寿命の評価

74

- 乾燥空気開放と再活性化を繰り返す。
- 再活性化条件：
TiZrVは250°C、4 h
Pd/TiZrVは200°C、4 h
- Pd/TiZrVは一定の吸着確率を保つ。

Pd層の保護作用が有効であり、
水素の吸着確率が3倍向上する。



[X.G. Jin](#) et al., J. Vac. Sci. Technol. B39 (2021) #064202.

PSDの評価

75

照射前の試料の熱処理：

Cuダクト：150°C、20h

TiZrVコーティングしたダクト：250°C、4h

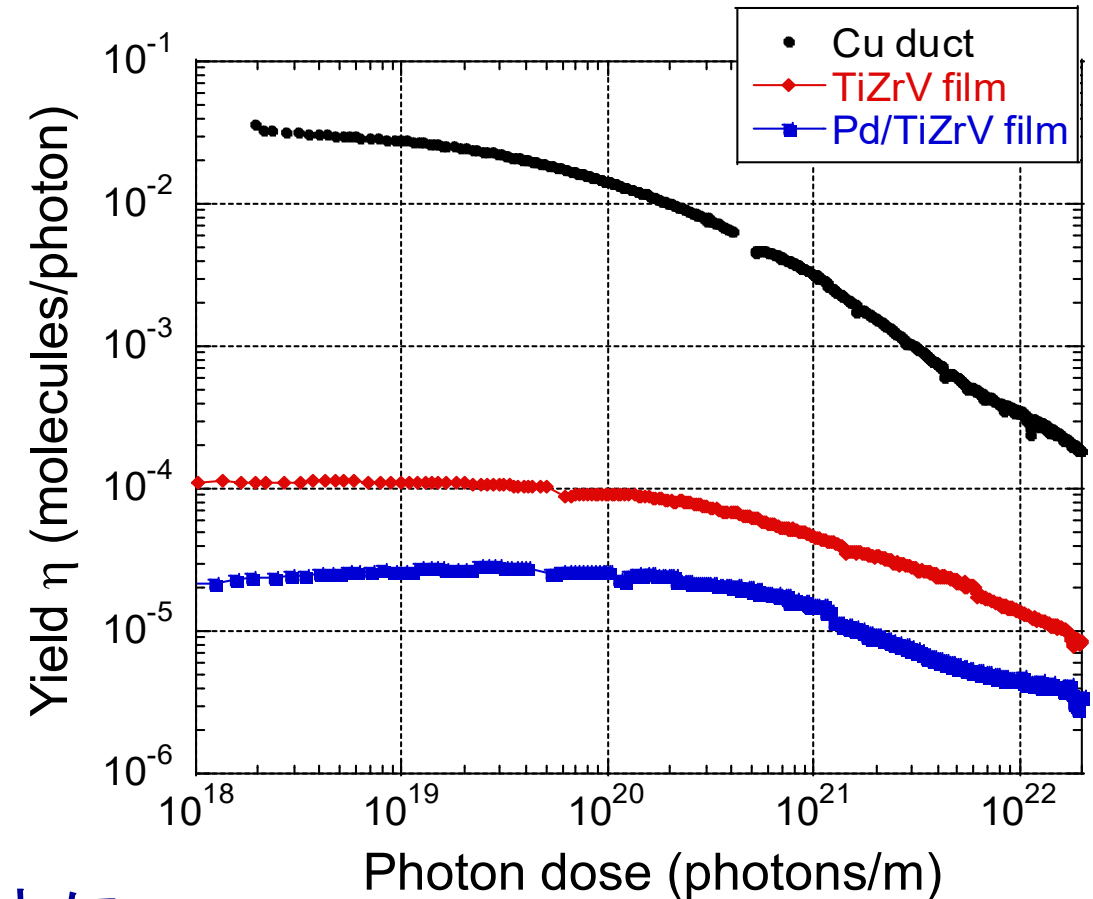
Pd/TiZrVコーティングしたダクト：
250°C、4h

刺激脱離係数 (η)：

脱離分子数/照射光子数

世界初で、Pd膜がPSDを下げることに
有効であることを発見。

PSD結果@PF BL21



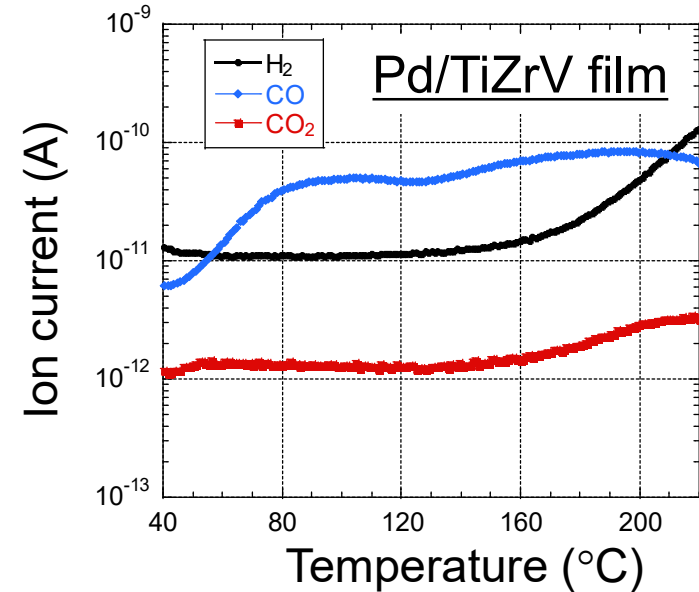
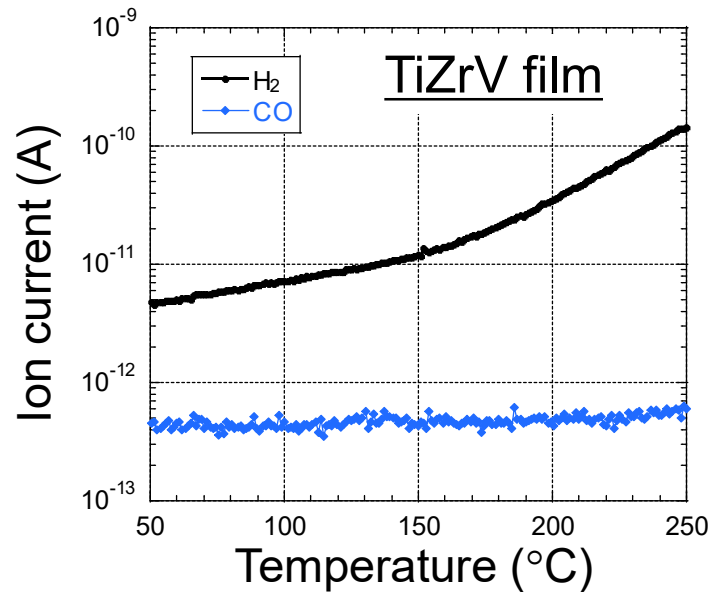
[X.G. Jin](#) et al., Vacuum 192 (2021) #110445.

TiZrVとPd表面の違い

76

- Pd表面の水素排気速度がTiZrVより高い。
- 室温でPdは酸化しないため、表面付近の酸素濃度が低い。
- 加熱後、Pd表面付近のカーボン濃度が低い。

COガス吸着後、
加熱による
ガス放出の結果



[X.G. Jin](#) et al., J. Vac. Sci. Technol. B39 (2021) #064202.

CO、CO₂の排気性能

77

吸着確率は通過法で計測した。

加熱条件:

TiZrV膜, 250°C for 4 h;

Pd/TiZrV膜, 200 °C for 4 h

	TiZrV film	Pd/TiZrV film
CO sticking factor	0.06	0.05
CO ₂ sticking factor	0.05	—

目次

- 真空の基礎
- 放射光源加速器の真空
- NEGコーティング
- 本グループの研究成果
 - 1) 超低PSD・長寿命NEG膜の開発
 - 2) 超低PSD・低抵抗率の密なPd膜の開発
 - 3) 低PSDのアブソーバーの開発

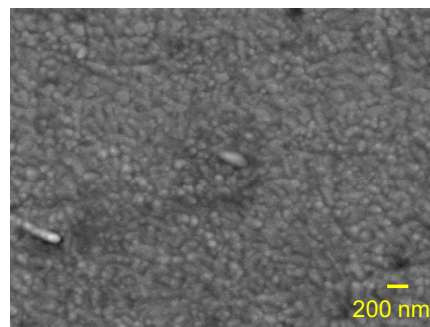
密なPd膜の低抵抗率

79

金属の抵抗率表

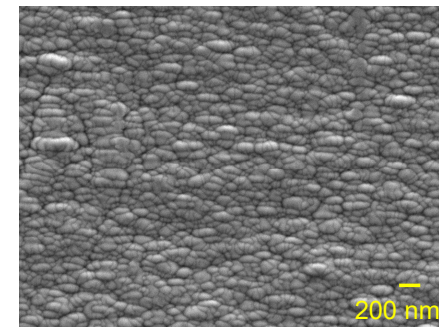
金属名	抵抗率 ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)
Ag	1.59
Cu	1.6
Pd	10.87
Zr	40
V	40
Ti	43 ~ 170
TiZrV合金	>175

Dense Pd film

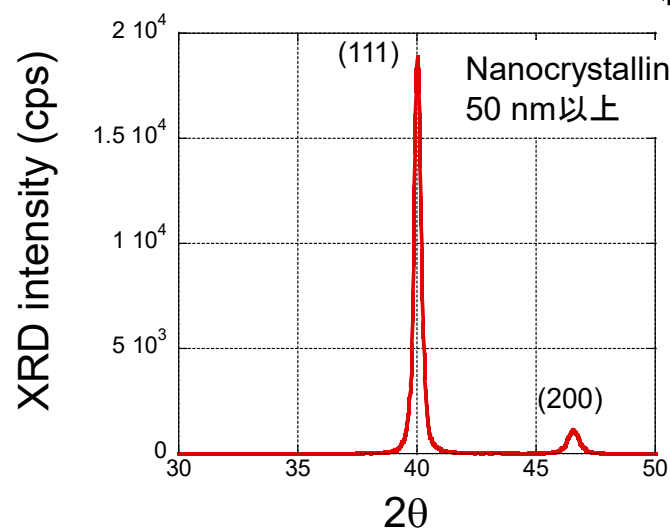


表面SEM像

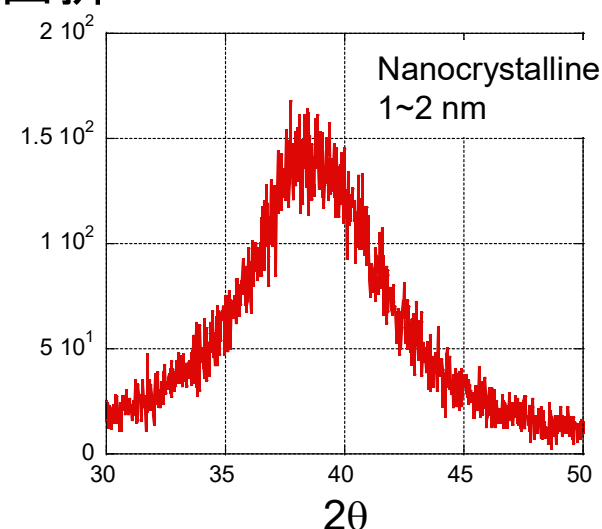
Columnar TiZrV film



X線回折



多結晶構造

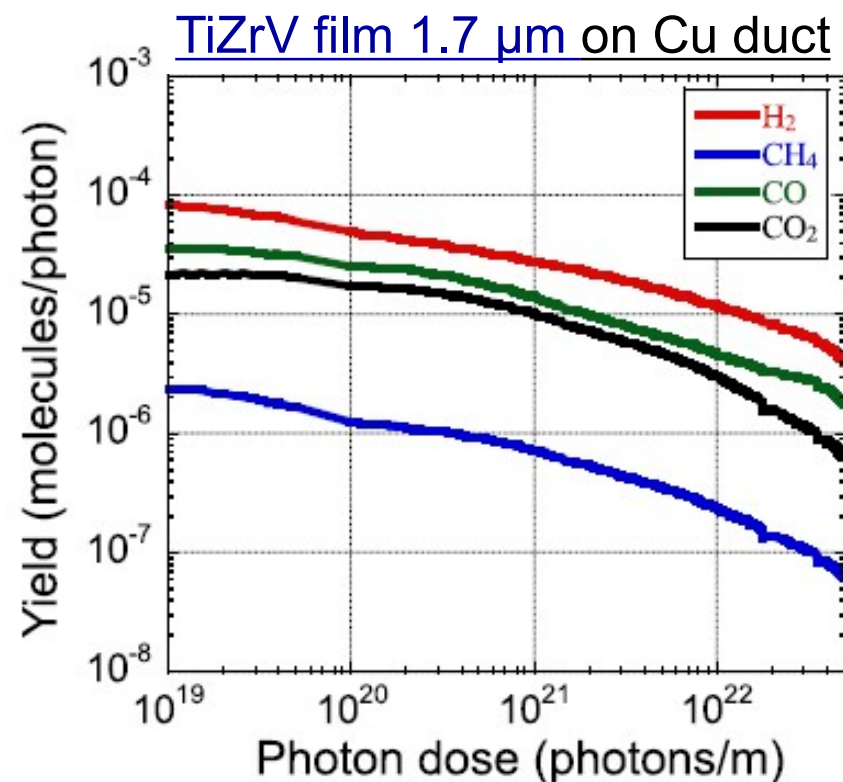
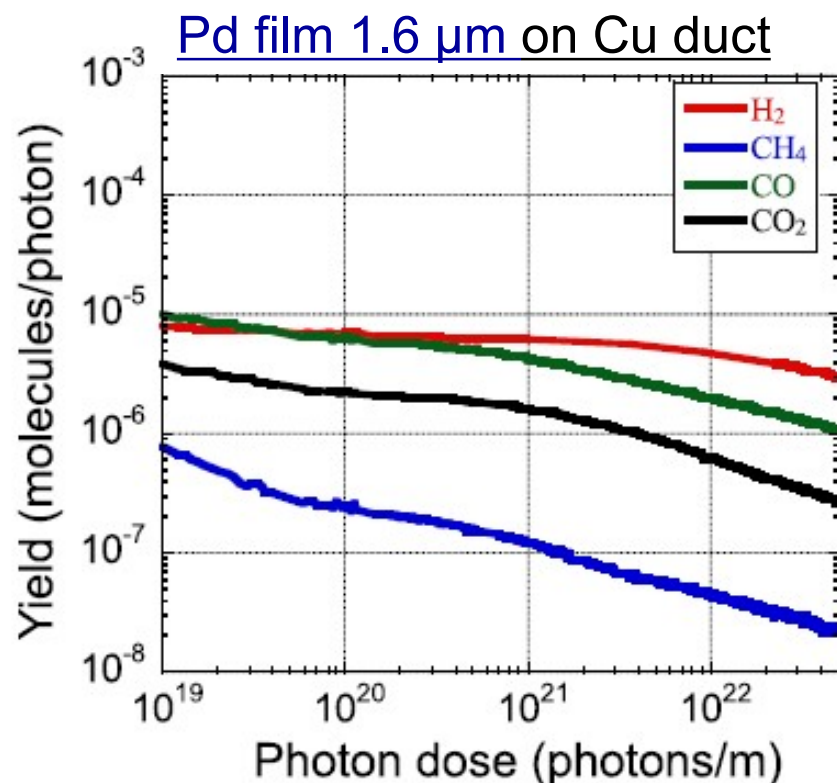


アモルファス構造

密なPd膜のPSDの結果

80

試料の熱処理：250℃、4h



[X.G. Jin et al.](#), Vacuum 215 (2023) #112370.

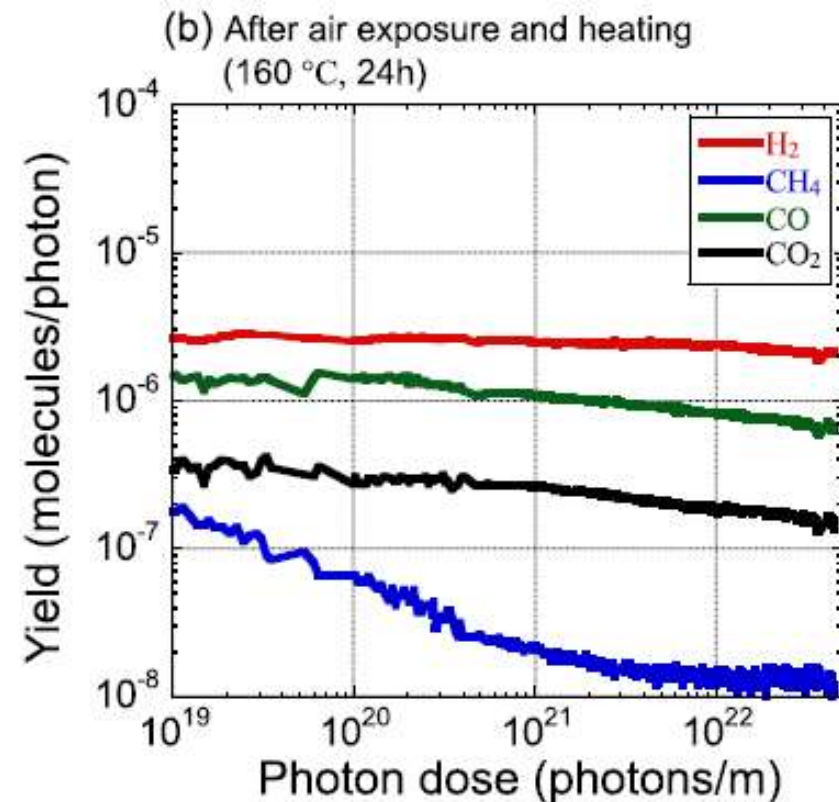
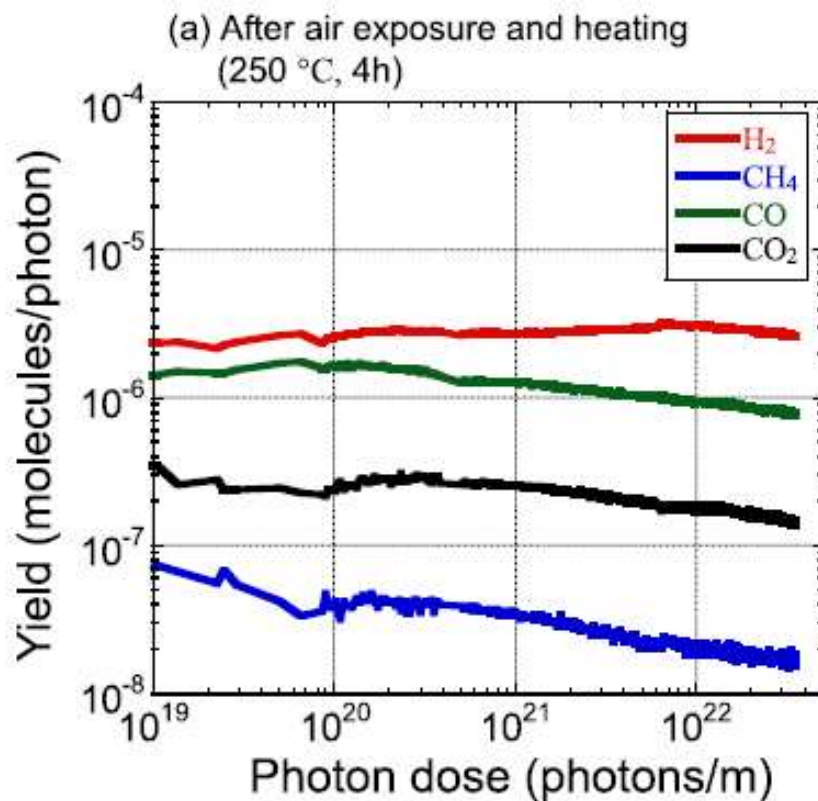
特願 [2023-034073](#) “真空配管及び真空配管の製造方法”

Pd膜（単層）でTiZrV膜より低いPSDが得られた。

密なPd膜の耐久性の評価

81

耐久性の評価：Pd膜を大気開放、加熱、PSD計測



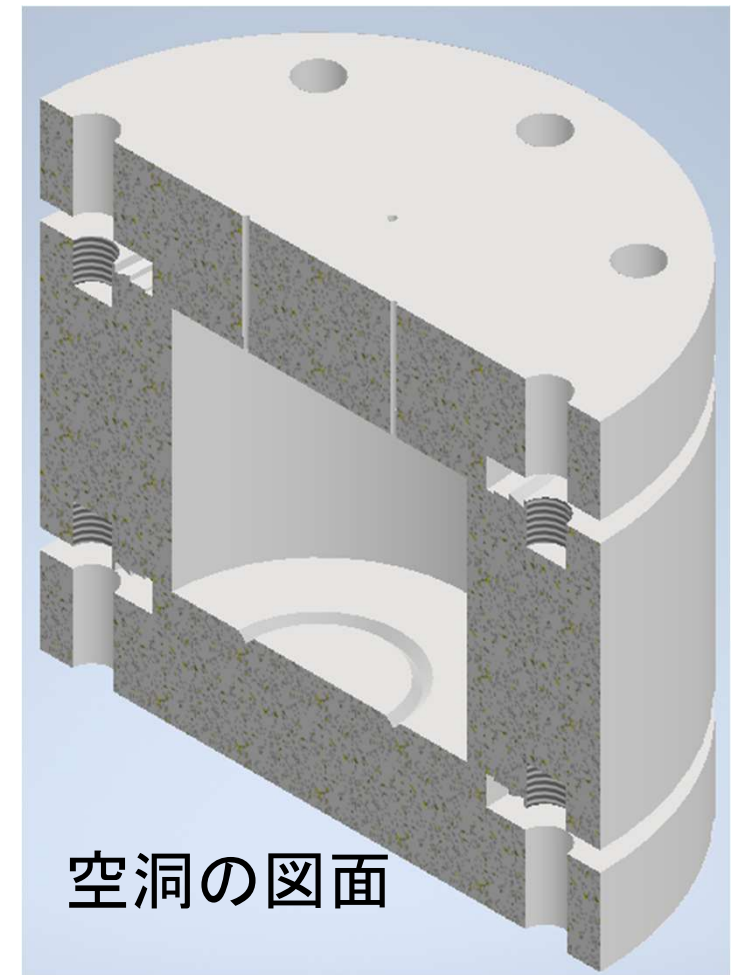
[X.G. Jin](#) et al., Vacuum 215 (2023) #112370.

大気開放の影響をほとんど受けず、低いPSDを保つ。

空洞共振器による表面抵抗の計測

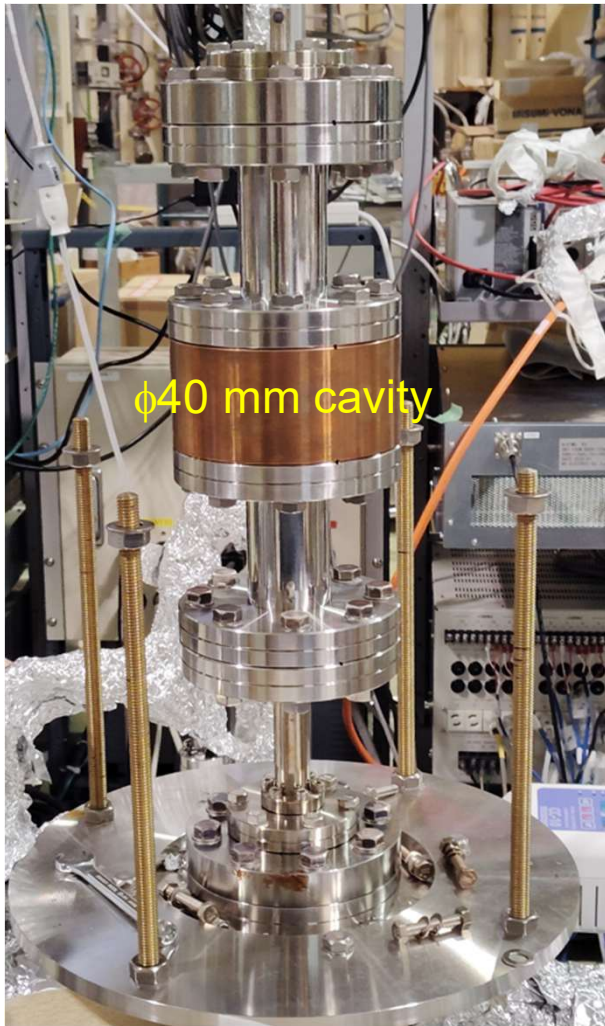
Courtesy M.L. Yao

- 高周波で誘起される電流は空洞壁の表面を流れ、その浸透深さはskin depthによって決定される。
- ダクト、2つのエンドギャップで円筒形の空洞を作製。
- CrCuで空洞を作製、ダクトの内径は40 mm (9.6437 GHz)、60 mm (6.7846 GHz)である。
- ダクトの内面でコーティングし、コーティング材の表面抵抗を計測。



空洞共振器による表面抵抗の計測

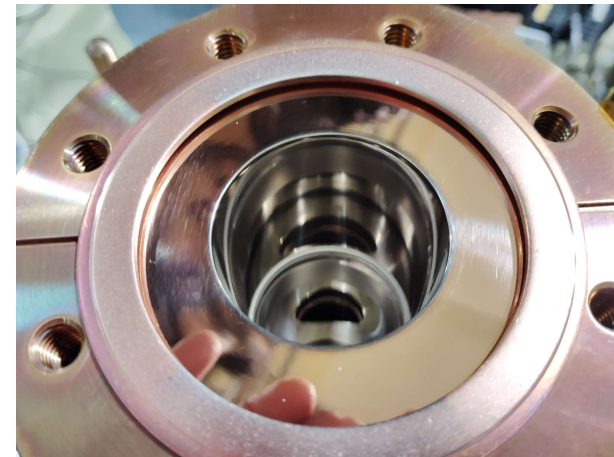
83



成膜前



Pd成膜後

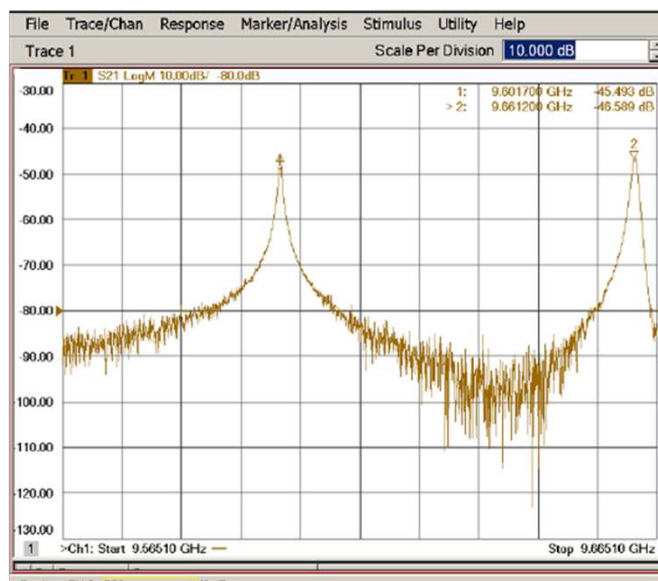


空洞共振器による表面抵抗の計測

Courtesy T. Abe



Q値の測定例



共振周波数と3 dB落ちの
バンド幅の比。

$$Q_0 = (1 + \beta_1 + \beta_2)Q_L$$

β_1 と β_2 は入出力カプラーの
結合定数、 Q_0 は無負荷のQ値。

$$Q_0 = \frac{\Gamma}{R_s}$$

R_s は表面抵抗、

Γ は空洞の形状による係数。

密なPd膜の表面抵抗の結果

TiZrV $> 175 \mu\Omega\cdot\text{cm}$

Sample	Thickness [μm]	Q_0	f [GHz]	σ [S/m]	R [$\mu\Omega\cdot\text{cm}$]
CuCr $\phi 40$		25737	9.5995	4.84E+7	2.07
CuCr $\phi 60$		31942	6.7832	4.76E+7	2.10
Pd on $\phi 40$	8	11175	9.5995	7.91E+6	12.6
Pd on $\phi 60$	6	15487	6.7832	8.47E+6	11.8
Cu理論値				5.96E+7	1.68
Pd理論値				9.26E+6	10.8

M.L. Yao, [X.G Jin](#), et al., Proceeding of IPAC 2025, 3105-3107.

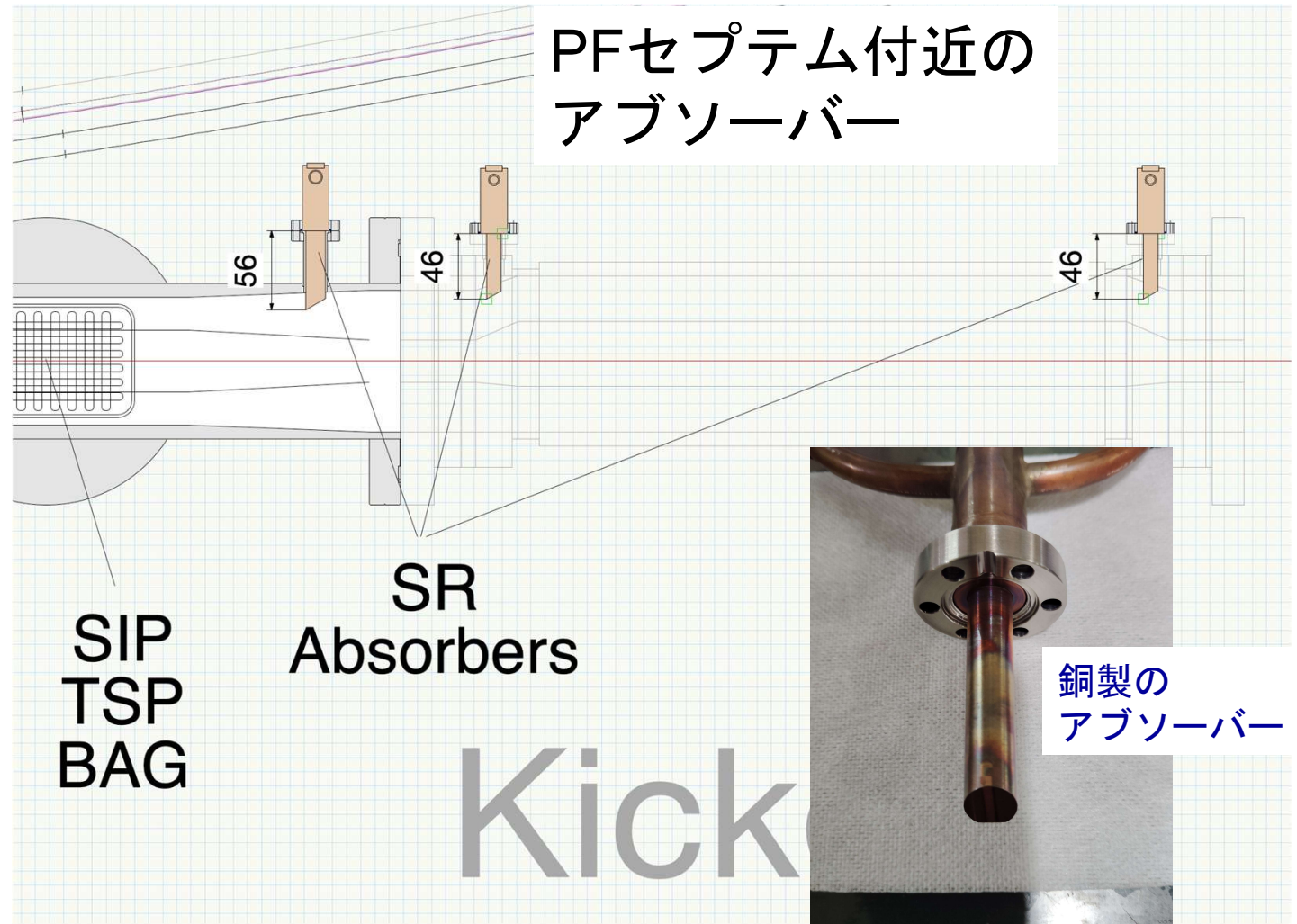
- Pd膜の抵抗率はTiZrV膜より1桁以上低下。
- Pd膜の伝導率は、Pd理論値の85%を超える。

目次

- 真空の基礎
- 放射光源加速器の真空
- NEGコーティング
- 本グループの研究成果
 - 1) 超低PSD・長寿命NEG膜の開発
 - 2) 超低PSD・低抵抗率の密なPd膜の開発
 - 3) 低PSDのアブソーバーの開発

アブソーバーとは

- 下流にある真空部品を保護するために、放射光を受け止める。
- 高強度の放射光が照射され、大量のガスを放出する。
- NEGコーティングの場合、これらの部品からのガス放出を低減することがNEG膜の飽和を防げる。



低いPSD候補材料 – Ag膜

88

Au sample:

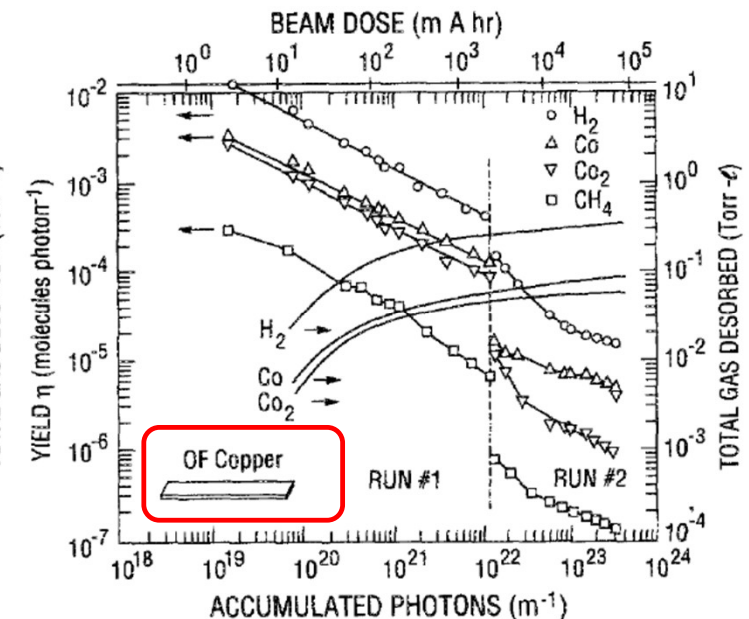
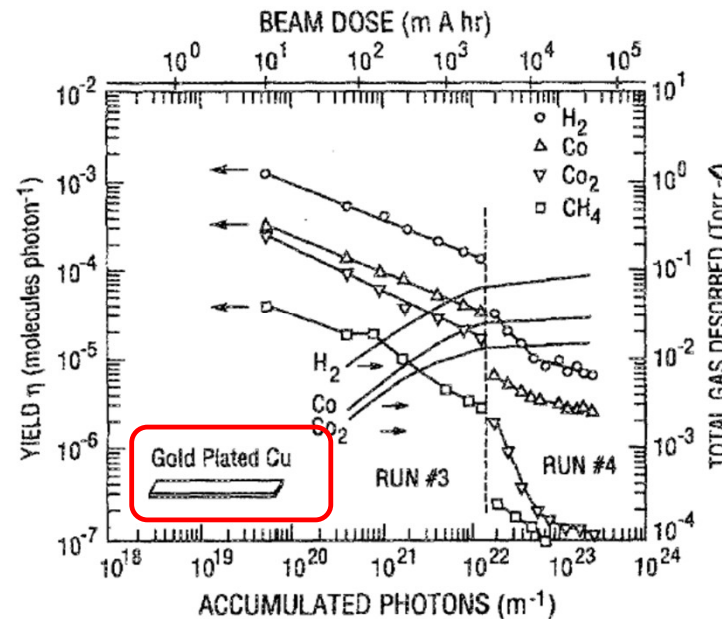
Thickness: 1.3 μm ;

Film formation: plating;

Sample shape: plane;

Heating procedure:

200 °C for several days



C.L. Foerster *et. al.* J. Vac. Sci. Technol. A 10 (1992) 2077-2081.

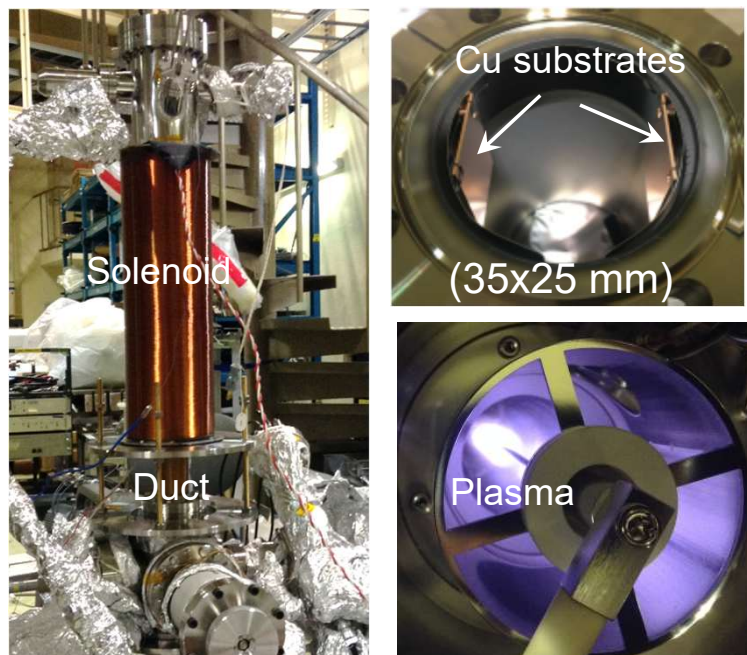
Au surface with lower gas adsorption are more easily conditioned and contribute to lower PSD.

Ag has characteristics similar to Au and is expected to reduce PSD.

試料作製とPSD評価装置

89

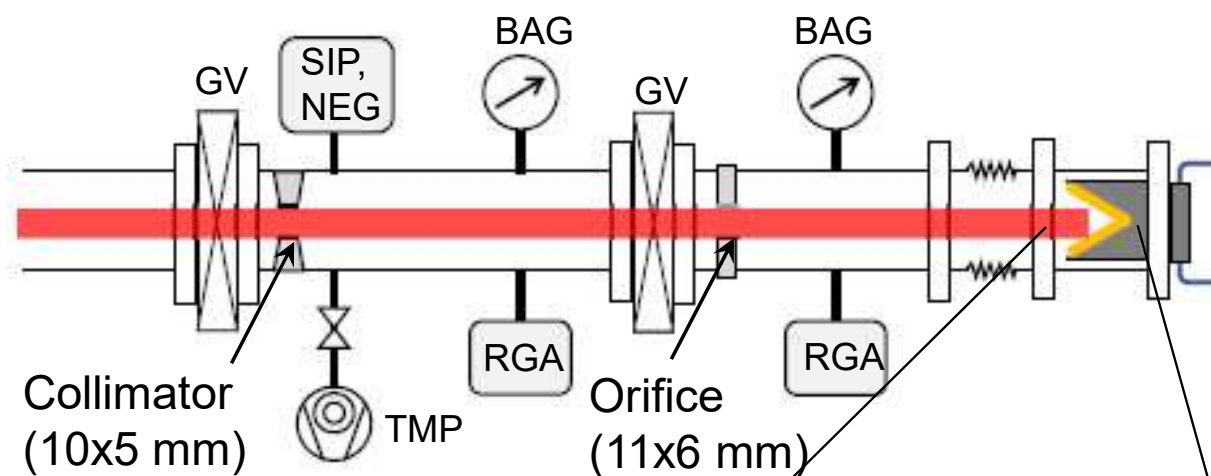
Magnetron sputtering



作製した試料:

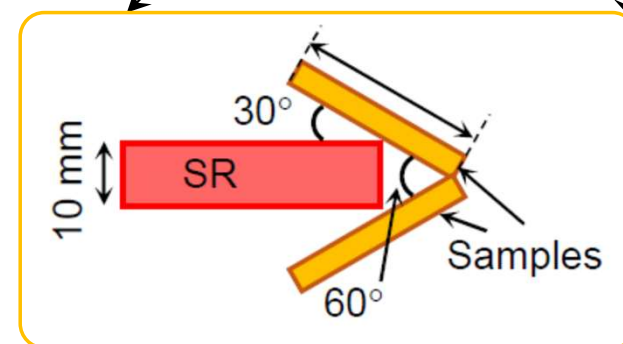
- $\text{Ti}_{0.29}\text{Zr}_{0.16}\text{V}_{0.55}$ film, 5 μm ;
- Ag film, 3.5 μm

PF BL21



PSD yield (η):

脱離分子数/照射光子数

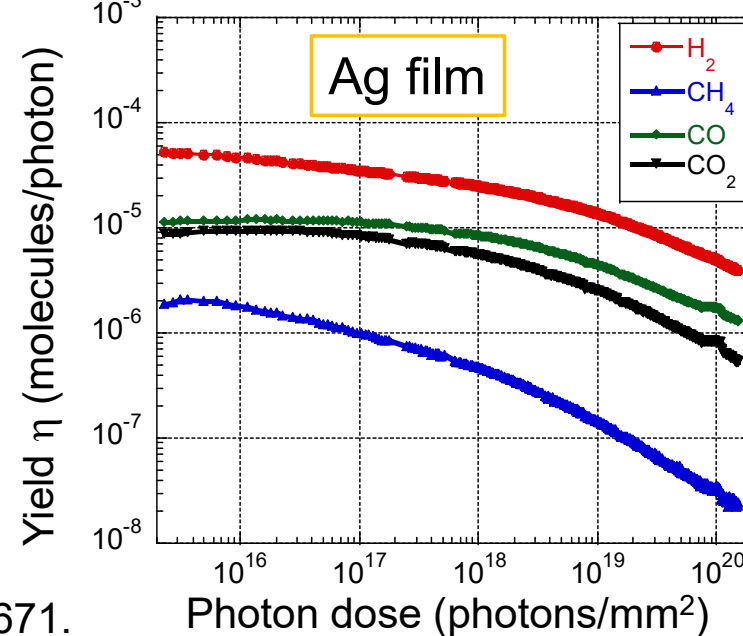
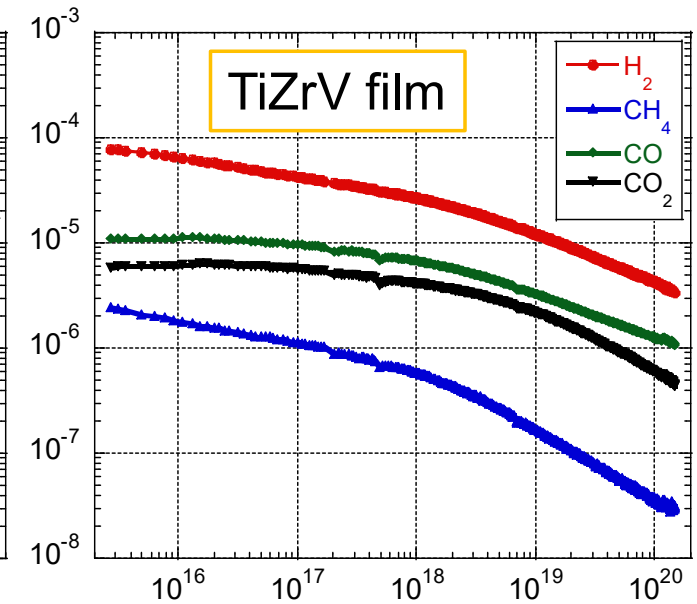
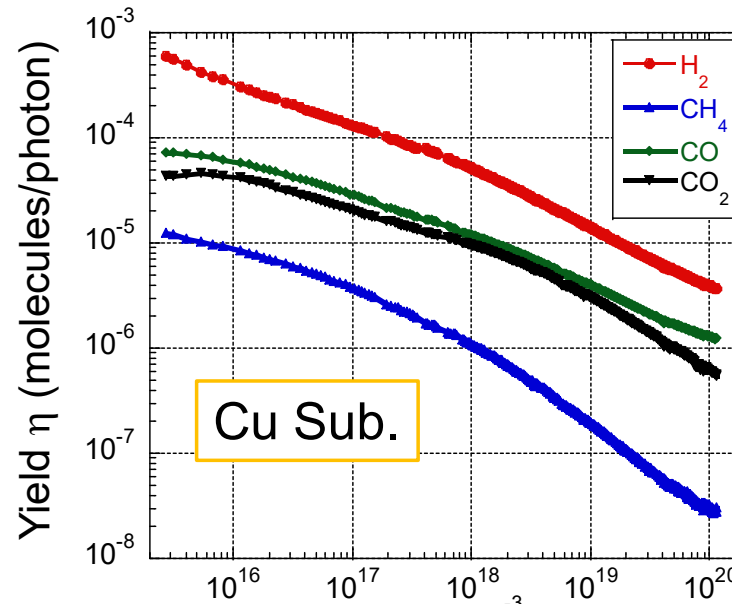


Ag膜のPSD結果

加熱処理：150℃、24h

- ・ TiZrV膜は、Cu基板に比べ、初期PSD係数が著しく小さい。
- ・ Ag膜のPSD係数はTiZrV膜と同程度に低い。
- ・ Agが酸化しないことや、水素を吸蔵しないことによりPSDが低下する。

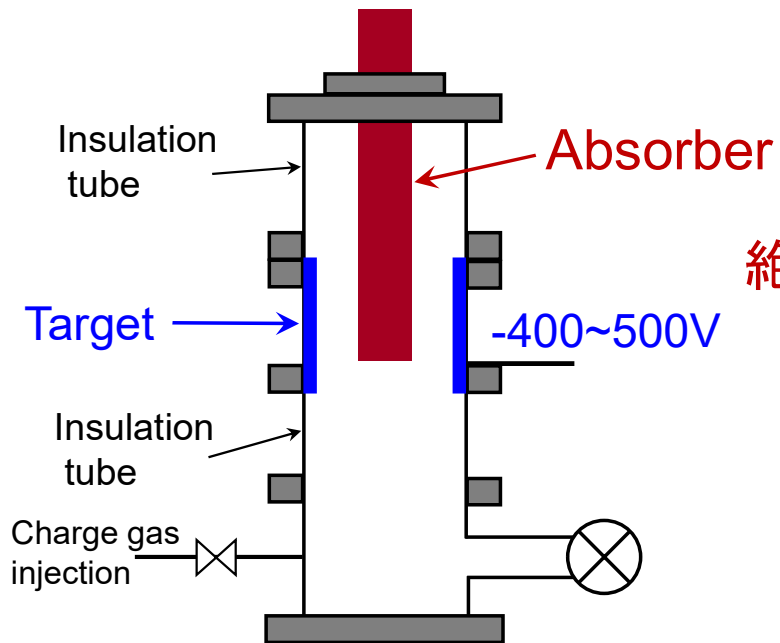
[X.G. Jin](#) et al., Vacuum 207 (2022) #111671.



低PSDのアブソーバーの開発

91

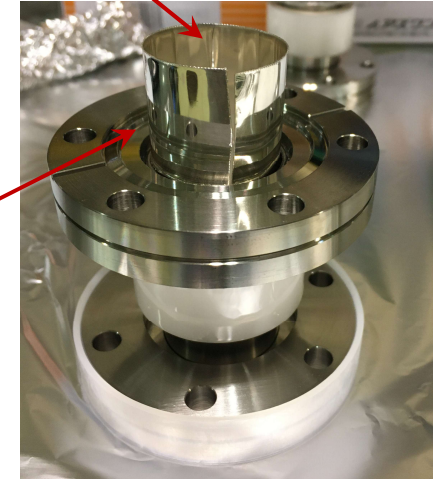
円柱型部品への
スパッタリング



絶縁ダクト

アブソーバー

ターゲット : Ag



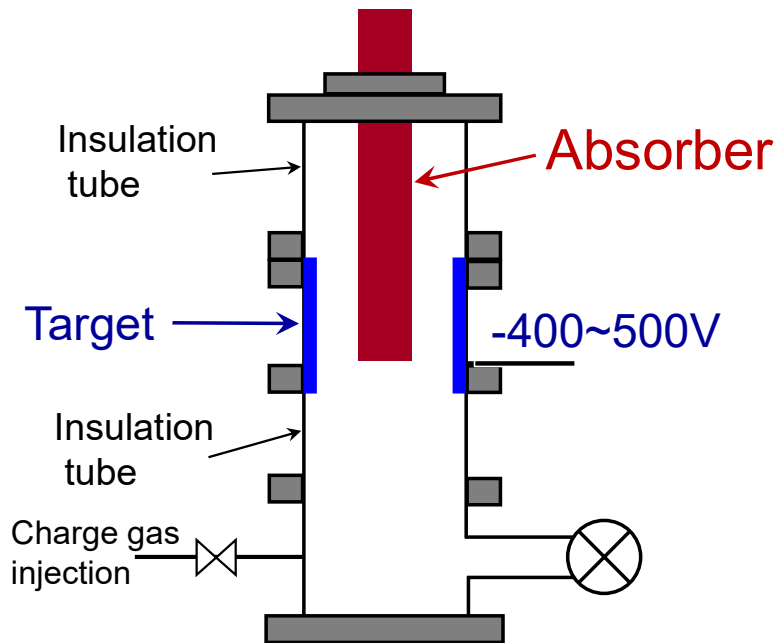
プラズマ



低PSDのアブソーバーの開発

92

円柱型部品への
スパッタリング



コーティング前



Agコーティング後

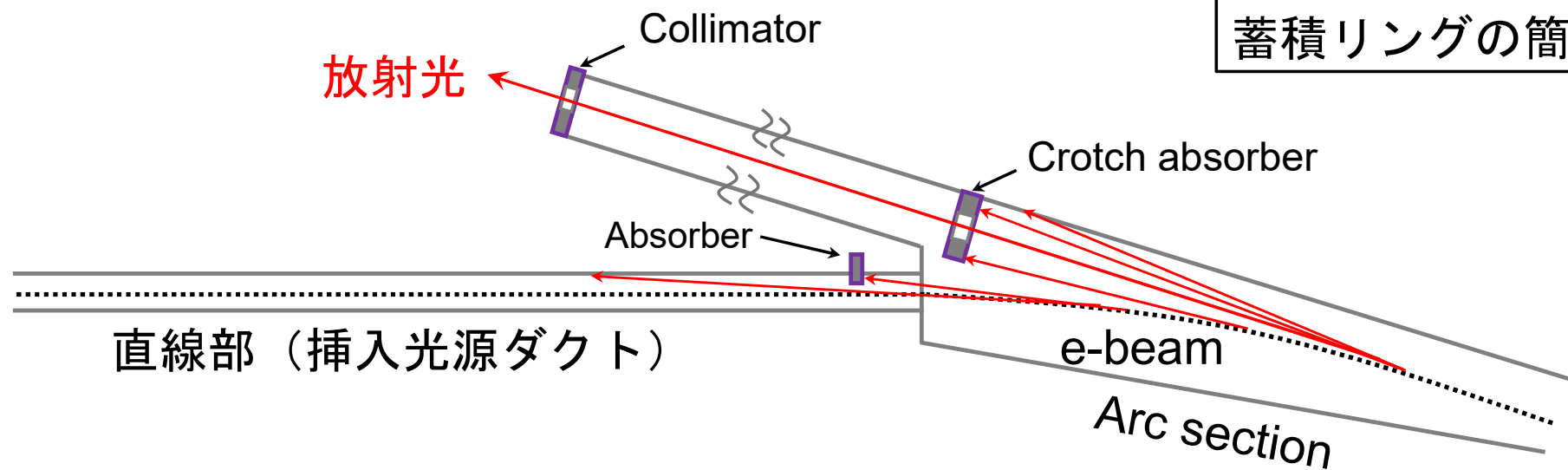


- ・ アブソーバーの表面に均一なAg膜が成膜されている。

[X.G. Jin](#), KEK Annual Report, 2023 74-75.

放射光源加速器への応用

93



- ・ 真空ダクト — 超低PSD・長寿命Pd表面層を持ったNEG膜 (Pd/TiZrV、Pd/Ti)
- ・ アブソーバーなど — 低PSDのAg膜
- ・ 挿入光源のダクト (Resistive wall impedanceの効果が大きい) —
超低PSD・低抵抗率・長耐久性の密なPd膜

本グループの研究成果のまとめ

- ・ Pd表面層を導入したNEG膜を開発し、**超低PSD・長寿命**を実現した。
- ・ 密なPd膜を開発し、**超低PSD・低抵抗率・長耐久性**を実現した。
- ・ Ag膜を導入して**低いPSDのアブソーバー**を開発した。

今後の課題

- ・ Pd表面層を導入したNEG膜のCO₂の排気。
- ・ 簡易的な方法でPd表面層を作製。