

NEG コーティング — 次世代放射光源に不可欠な超高真空技術 —

谷本育律^{1,2}, 金秀光^{1,2}, 山本将博^{1,2}, 本田融^{1,2}, 野上隆史¹, 内山隆司¹

¹ 高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 加速器第六研究系,

² 総合研究大学院大学 高エネルギー加速器科学研究科 加速器科学専攻

NEG Coating: An Ultra-high Vacuum Technology Essential for Next Generation Light Sources

Yasunori TANIMOTO^{1,2}, Xiuguang JIN^{1,2}, Masahiro YAMAMOTO^{1,2}, Tohru HONDA^{1,2},
Takashi NOGAMI¹, Takashi UCHIYAMA¹

¹ Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

² School of High Energy Accelerator Science, Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI)

Abstract

真空容器の内壁を真空ポンプとして機能させる非蒸発型ゲッター (NEG) コーティングが普及しつつある。特に最近の高輝度光源加速器ではビームダクトの小口径化が進んでおり、ダクトに沿った分布排気と低い光刺激脱離特性を兼ね備える NEG コーティングが広く採用されている。また、加速器以外の真空装置への応用も望まれており、さらなる性能向上や応用範囲の拡大に向けた研究が KEK を始め世界各国で進められている。本稿では、NEG コーティング技術の概要に加え、最近の研究や今後の展望の紹介を行う。

1. はじめに

真空装置を使用している方の中には「運転中の到達圧力を下げたいけど、真空ポンプを付けるスペースがない」という思いを抱いている方も多いのではないだろうか。NEG コーティングはこのような状況の改善に適した超高真空技術であり、とりわけ真空ポンプの設置が困難な装置において排気速度を向上させる最も効果的な手段となる。例えば、PF リングのような光源加速器の場合、運転中のビームダクト内の圧力は放射光照射による光刺激脱離 (Photon Stimulated Desorption; PSD) ガスによって上昇するが、電子ビームとの散乱を抑えるために 10^{-8} Pa の超高真空が求められている。しかも、近年の高輝度光源のようにビームダクトの口径が 20 mm 程度まで小さくなると、この PSD ガスを従来のようにビームダクトを通して真空ポンプに導く方法では超高真空を達成することができず、ビームダクトに沿って真空ポンプを配備させる分布排気方式が不可欠となる。このため、ビームダクトの内壁を真空ポンプとして利用できる NEG コーティングが最も有効な排気手段となっている。

さらに、NEG コーティングは運転初期の PSD ガス放出が一般的な金属表面よりも数桁小さい (光焼出しの枯れが速い) という特性を持っており、加速器の立上げ (コミッショニング) 期間の短縮化にも貢献する。この他にも装置がシンプル化できて、動作コストも低減できるという利点があり、加速器以外でも放射光ビームラインや電子顕微鏡、各種分析装置など、運転圧力の低減が装置性能の向上

に直結する真空システムにおいて有望な超高真空技術として徐々に普及が進みつつある。

ただし、このような NEG コーティングの性能をうまく発揮させ、それを長期間にわたって維持させるためには適切な準備操作や運転環境が必要であり、NEG コーティングの特性に関する知識が役に立つ場合が多い。本稿では、前半で NEG コーティングの基本的な特性を解説し、後半は KEK を始め世界中で進められている NEG コーティング開発の現状や今後の展開を紹介する。

2. NEG コーティングの概要

NEG コーティングは非蒸発型ゲッター (Non-Evaporable Getter) コーティングの略称で、気体分子に対して吸着作用をもつ NEG 材を真空装置内壁に 1 μm 程度製膜した真空ポンプである。「ゲッター」という用語は化学吸着による真空排気作用を指し、ゲッターポンプは貴ガスやメタンなどの不活性ガスを除く気体分子の排気を得意としている。「非蒸発型」と呼ばれるのは、PF リングや PF-AR の主要ポンプでもあるチタンサブリーメーションポンプが蒸発 (「フラッシング」や「ゲッターを焚く」ともいう) によって活性な化学吸着作用を得るポンプに対して、NEG ポンプは NEG 材を蒸発させずに昇温のみで排気作用を活性化させるためである。

NEG コーティングは、元々は 1990 年代後期に欧州原子核研究機構 (CERN) において大型ハドロンコライダ (LHC) の真空システムに向けて開発された技術である

[1,2]。開発直後の 2000 年代初期から ESRF [3], ELETTRA [4], LNLS [5], SOLEIL [6] などの第 3 世代光源に採用され始め、2015 年以降には MAX IV [7], SIRIUS [8], SLS 2.0 [9], PETRA IV [10] のように、ほとんど全周のビームダクトに NEG コーティングを施した加速器が建設や設計されている。

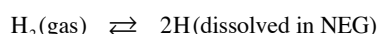
国内では KEK で 2013 年に建設された小型エネルギー回収型加速器 (cERL) において超伝導空洞周辺の圧力低減が不可欠なビームダクトから採用され始め [11], 2018 年に PF リングに設置された BL-19 用アンジュレータの扁平ビームダクトにも採用されている [12]。

2.1 NEG ポンプの動作原理

NEG コーティングを含め、一般に NEG ポンプは活性な金属表面が吸着分子で覆われるにしたがって排気速度が低下する。購入時など大気に触れていた場合は表面が酸化層で覆われている (当然, 排気作用がない)。ここでは NEG ポンプの動作原理として、活性化とよばれる排気作用を回復させるプロセスを中心に解説する。

NEG 材の表面において、活性ガスは高い吸着確率で捕獲され、多くの場合自発的に解離吸着して金属と強く共有結合する [13]。そして、ステンレスなどの一般金属とは対照的に、真空準位よりもバルク内に拡散するポテンシャルの方が低い [14], 吸着分子 (原子) は昇温によって脱離ではなく NEG 材内部へ拡散し、その結果、新鮮な金属表面が生成される。この拡散プロセスの度合いは、X 線光電子分光法 (XPS) やオージェ電子分光法 (AES) を用いて、昇温前後での酸素の結合状態や吸着量の変化を観察することで正確に判定できる [15,16]。

活性ガスのうち水素だけは常温でもバルク内に拡散し、表面からも脱離する。水素と NEG 材との反応は次式のように可逆的であり、活性化中に放出されるガスのほとんど (99% 以上) は水素が占めている。



活性化中、左辺の水素平衡圧は右辺の NEG 材内部の溶解度の 2 乗に比例するというジーベルツ則に従うため [17,18], 気相の水素分子をターボ分子ポンプでできるだけ効果的に系外に排出させて NEG 材内部の水素含有量を減らすことが活性化後の高い排気速度や排気容量を得るのに有効である。

以上をまとめると、NEG ポンプの性能をうまく引き出すには適切な活性化を行うことが重要であり、具体的には、1) NEG 材毎に規定されている温度と時間を守って表面の酸素を十分に内部拡散させること、2) 高い実効排気速度で粗排気を働かせて NEG 材の水素含有量を十分に低減させること、の 2 つの目的を達成させることである。

2.2 NEG コーティングの構造

一般的な NEG ポンプは真空中で 500°C 程度に 1 時間保持させて活性化させるものが多いのに対し、NEG コーテ

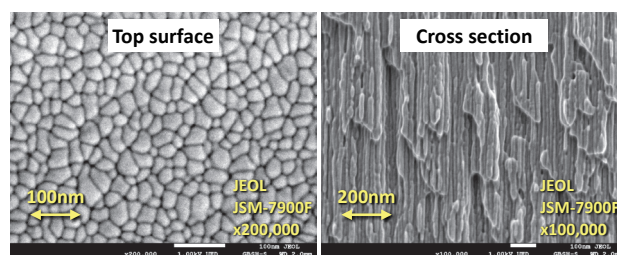


Figure 1 SEM images of a TiZrV film coated by SAES Getters for the PF-ring Undulator #19 [12].

ィングは比較的低温な 160 ~ 200°C で 24 時間保持させることで活性化される。これは、チェンバをベーキングするときの許容温度以下で NEG を活性化させる必要があるためであり、まさにこの点が NEG コーティングの開発における主要課題であった。CERN の開発チームは様々な材料を試験した結果、TiZrV の 3 元合金をマグネトロンスパッタ法で製膜することで、低温活性化条件を満たす NEG コーティングが得られることを見出した [19]。

活性化温度の低温化に対しては、酸素に対する溶解度が高いことが重要で、この点において第 4 族の Ti, Zr, Hf が優れており、NEG 材の主元素として広く利用されている。NEG コーティングの場合はこの Ti と Zr に第 5 族の V を追加して拡散性を向上させている [20]。これは、酸素の内部拡散のパスとして結晶の粒界が有効に働くため [21], 結晶構造や格子定数の異なる元素の添加により結晶を微細化させることが低温活性化に寄与すると考えられているためである。Fig. 1 は TiZrV 薄膜の SEM 画像の例であり、10 ~ 20 nm の細かい結晶粒が確認できる。スパッタ法の利点である柱状に製膜できることも深さ方向の拡散に有利であると考えてられている [22]。結晶粒内のより微細な構造の観察として、X 線回折 (XRD) を用いると結晶子サイズが 2 nm 以下であることが多く [23], また、PF での広域 X 線吸収微細構造 (EXAFS) 観察の結果からは結晶単位胞を有していないことが確認されている。

2.3. NEG コーティングの排気性能

NEG ポンプの排気性能は排気速度と排気容量の 2 種類で規定される。さらに、排気容量の方は、活性化のたびに再生される表面排気容量と、ポンプ自体の寿命に関係するバルク排気容量の 2 種類がある。ここでは排気速度の方について解説する。

NEG コーティングの場合、排気速度は表面積や温度、ガス種によって異なるので、分子の立場でみた吸着確率、すなわち個々の気体分子が表面に入射したときに吸着される確率の平均で表す方が普遍的で便利である。吸着確率の例としては、超高真空領域での主要な残留ガス成分である水素に対して 0.001 ~ 0.01 程度、一酸化炭素に対して 0.2 ~ 0.5 程度である。これを常温での排気速度に換算すれば、それぞれ 1 cm² 当たり 0.04 ~ 0.4 L/s と 2.4 ~ 5.9 L/s に相当し、広範囲に製膜することでかなり大きな実効排気速度

が得られることになる。

ビームダクトのような長尺の NEG コーティングに対する排気速度は、一般的なポンプ開口面の排気速度を測定する手法は適用できず、ダクト内部の状態を評価する必要があるため、通過法とよばれる特殊な方法で測定する。ダクトの一端から測定したいガスを低流量で導入し、ダクトの両端に設置した真空計での圧力増加 Δp を測定して、その比を取ることでダクト内面の吸着確率を得ることができる。その際、吸着確率と両端の圧力比との相関関係を、予め Molflow+ などのモンテカルロシミュレーション [24] で取得しておいて実測値と比較する。Fig. 2 に長さ 480 mm、内径 23 mm の円筒型 NEG コーティングダクトに対して CO の吸着確率を測定した例を示す。ガス導入初期の圧力比は $\Delta p_1/\Delta p_2 = 2650$ であり、この場合の CO に対する吸着確率は 0.33 と測定される。流量 $3 \times 10^{-7} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ の CO 導入によって手前側の圧力 p_1 は 10^{-5} Pa 台まで上昇したのに対し、反対側の p_2 は NEG コーティングの排気性能により 10^{-8} Pa 台に留まり、ほとんど変化していないことがわかる。

もう一つ、NEG コーティングの排気に関する事例を紹介しよう。NEG コーティングダクトを設置した真空システムを残留ガス分析計 (RGA) で監視していたところ、実験で使用していない Ar が突如上昇し始めて驚いたことがある。調査の結果、RGA に対して NEG コーティングをはさんだ反対側で大気リークが起っており、大気に含まれる Ar だけが NEG コーティングを通過して、このような特異な現象として観測されたことが判明した(ある意味、

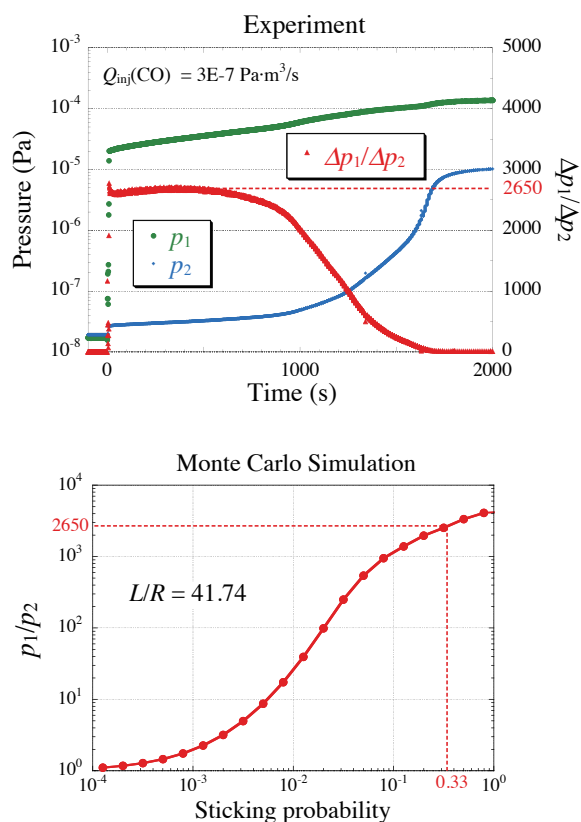


Figure 2 Sticking probability measurement by transmission method.

NEG コーティングがあたかも貴ガス精製器のように振る舞い、うまく活性化ガスを排気していたことが確認できたといえる)。

2.4 NEG コーティングの PSD 特性

上述のように、光源加速器では電子ビーム蓄積によりビームダクト内の圧力が上昇し、そのほとんどが放射光照射による PSD ガス放出によるものである。規模の大きな改造直後の運転では 3~4 桁上昇することもあり、改造前の状態に回復するまでに 1 週間~1 か月の光焼出し期間が必要になる。この枯れの度合いを表す指標として PSD 係数 (molecules/photon) が用いられ、照射光子 1 個当たりに放出される気体分子数で定義される。そして、Fig. 3 に示したように、活性化された NEG コーティングは PSD 係数の初期値が一般的な清浄金属表面よりも 2~3 桁低いという特性を持つ。

近年、加速器の真空システムの設計では Synrad+ と Molflow+ という放射光と圧力の 3 次元分布シミュレータ [24] を利用するのが一般的であり、この PSD 係数の変化をビームダクトの各微小面素ごとに適用することでコミッショニング中の枯れの進行や到達圧力が精度良く模擬できるようになっている。我々光源真空グループでは、PF の BL-21 を用いて、加速器の様々な条件に応じて NEG コーティングの PSD 係数を測定し [25, 26], PF や KEK-LS などの加速器の真空システム設計に役立てている [10, 12, 27]。

また、NEG コーティングは PSD だけでなく電子照射による脱離 (Electron Stimulated Desorption; ESD) によるガス放出特性も低いことが確かめられており [28], 例えば電子顕微鏡のように ESD による圧力上昇が性能に影響する装置への応用も期待されている。さらに、光や電子の飛び交う環境下ではガス放出だけでなく、電子放出 (光電子や 2 次電子) も低い [29]。このことは、素粒子実験用の陽子加速器や陽電子加速器においてビーム性能を劣化させる電子雲形成の抑制に役立つ。

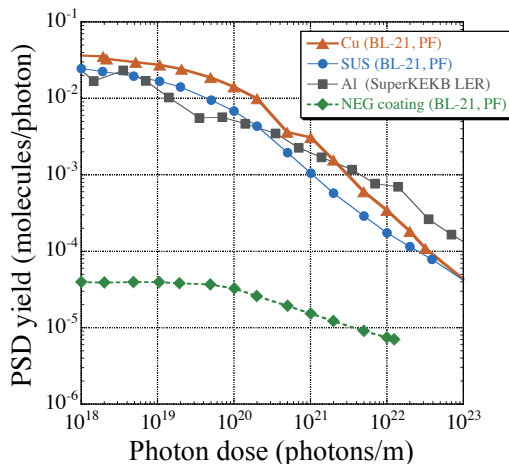


Figure 3 PSD yields of various materials [12].

3. 最近の研究紹介

最近の NEG コーティングの研究開発項目を大きく 3 つの方向性に分けて示すと Fig. 4 のようになる。ここでは、それぞれの方向性について最近の研究を簡潔に解説する。

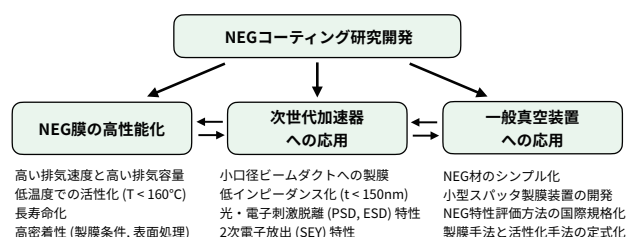


Figure 4 NEG-coating R&Ds: Present directions and their outlook.

3.1 NEG 膜の高性能化

3.1.1 高い排気速度と高い排気容量

高い表面排気容量をもつ NEG 膜は表面が飽和しにくく、高い排気速度を長期に維持できるという利点がある一方、大気開放を繰り返すと表面排気容量が高い分、バルク排気容量の飽和 (寿命) に達しやすくなる。また、高いバルク排気容量をもつ NEG 膜を得るには、内部拡散性に優れた柱状構造をもたせることが有効とされている。膜厚を厚くすることも有効であるが、 $3\text{ }\mu\text{m}$ 辺りを超えると剥がれやすくなるためあまり好ましくない。したがって、NEG コーティングは使用環境に応じて最適な膜質や膜厚のものを採用することになる。

スパッタ法はこれらの膜構造の制御 [30] に加え、膜の密着性にも適した製膜手法であり、光源真空グループは Fig. 5 にあるように PF 光源棟地下機械室に 2 台のマグネトロンスパッタ装置 (ソレノイド寸法: 内径 31 cm –長さ 100 cm と内径 15 cm –長さ 50 cm) および通過法による排気性能測定装置を用いて、NEG 膜の真空特性と膜構造との相関を探索している。具体的には、グロー放電発光表面分析 (GDS) やエネルギー分散型 X 線分析 (EDS) による膜内元素の深さ分布、活性化過程の分子の挙動が排気性能に与える影響についての研究 [31] などである。近年の他施設での研究例としては、製膜中のガス圧力や印加電圧を変えて柱状や緻密な膜構造を制御する研究 [22] が行われている。

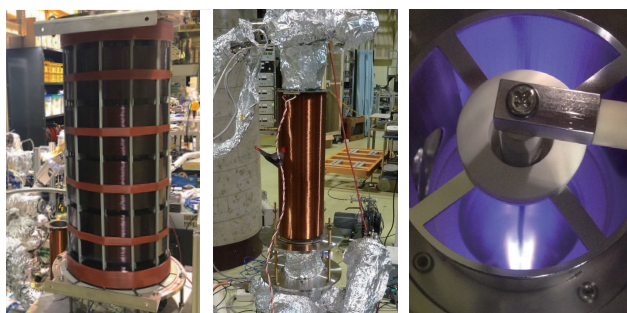


Figure 5 NEG coating devices being operated at KEK-PF, and plasma emission during NEG film deposition.

3.1.2 低温度での活性化 ($T < 160^{\circ}\text{C}$)

TiZrV 膜が活性化し始める 160°C よりも低い温度で活性化できる膜は、真空装置のベーキングを簡素化できるという利点がある。その開発例として、スパッタターゲットとして一般的な 3 種の純金属ツイストワイヤではなく TiZrV 合金を用いる方法 [32] や、TiZrV に Hf を加えた 4 元合金の NEG 材を製膜する方法 [33, 34] で、それぞれ 160°C と 150°C での活性化が実証されている。

3.1.3 長寿命化

運用面での長寿命化対策はやはり、できるだけ圧力の低い状態で運転し、かつ大気開放の回数を減らすことである。短時間の大気開放ならパージガスに貴ガスを用いると真空引き後に再活性化しなくても排気性能が回復するため、CERN などでは高純度の Ne を用いて真空作業を行っている [35]。Ar でも同様な効果が得られるが、高価な Ne を用いる理由は上述のように Ar が真空装置内に存在するとリークを疑う必要があるためである。

NEG コーティングの低いバルク排気容量の弱点を根本から克服する手段として、Pd 膜を利用する方法が注目されている。一般に貴金属は酸化膜を形成せず、また比較的低温での加熱により吸着ガスを放出する。中でも Pd は超高真空における主要な残留ガス成分である水素や一酸化炭素を吸着し、またバルク内に水素を取り込みにやすいという性質をもっている。NEG 膜の上に数 10 nm 程度の薄い Pd を付加的に製膜することで、原理的に無限に活性化できる NEG コーティングが得られるが、従来の NEG 膜よりも不利な点として、水素の再放出により到達圧力が高くなることや、二酸化炭素を排気できないこと、また、Pd 表面から Ti などの NEG 母材側への水素拡散に障壁があることなどが挙げられる。拡散性の改善に向けて、Pd に Ag を添加する手法 [36] や、Ti 界面での酸化膜の形成を抑制した無酸素 Pd/Ti 膜 [37] が開発されている。光源真空グループも Pd/TiZrV 膜の排気特性や PSD 特性を調べており、良好な結果が得られつつある [38]。

3.2 次世代加速器への応用

3.2.1 小口径ビームダクトへの製膜

次世代加速器では内径 10 mm クラスの小口径ビームダクトに適用させる必要があり、これまでに内径 6 mm のビームダクトへの製膜が、NEG ポンプに関して多くの開発と供給の実績を有するサエスゲッター社により実証されている [39]。また、従来の発想を転換して、まずアルミパイプの外周に NEG コーティングを施し、その外側に銅パイプを電鍍法で形成し、その後芯のアルミを化学エッチングで取り除く手法が CERN により開発されている [40]。この手法により、スパッタ製膜が困難な細い銅ダクトの内面にも NEG コーティングが施せるようになる。

3.2.2 低インピーダンス化

ビームダクトの内面には周回ビームの誘起電磁場に対す

る良好な導電性が求められており、小口径化が進むとその影響がより顕著になる。この点においては無酸素銅製ビームダクトが最適であるが、比較的電気抵抗の高い TiZrV を製膜すると、膜厚が 1 μm であってもビーム不安定性の原因になりうる。

光源真空グループでは、CERN と共同で 150 nm の薄い NEG コーティングの PSD 特性を BL-21 で調査しており、大気開放と活性化を 10 回繰り返しても PSD 係数に劣化は見られないという結果が得られている。また、CERN のグループは、90 nm の薄い NEG コーティングに対して同様な活性化サイクルを繰り返して、内部拡散した酸素の分布を深さ方向の XPS 観察し、4 回の活性化ですでにバルク排気容量に達していることを確認している [41]。すなわち、90 nm の膜厚では 5 回目以降は活性化による排気性能の回復は見込めないことを意味する。その状況でも低い PSD 特性を有しているのは、低 PSD 特性の特徴である清浄な薄い酸化膜が NEG 表面で形成されているためと考えられる。

今後、次世代加速器でダクト内面の低インピーダンス化が必須条件となる場合は、膜厚を薄くして排気性能を犠牲にしても低い PSD 特性を重要視するという設計方針が採用されていく可能性がある。その一例として、SLS 2.0 ではビームダクトの一部に膜厚 200 nm の薄い NEG コーティングを施すとのことである [9]。

3.3 一般真空装置への応用

3.3.1 NEG 材のシンプル化

最近の研究で、Zr だけをマグネトロンスパッタで製膜することで、十分な低温活性化や低 ESD 特性が得られることが確かめられている [42]。この方法は、必ずしも TiZrV のような高性能が必要でなく、シンプルに NEG コーティングを適用したい場合に有効な手段になると期待される。

3.3.2 小型スパッタ製膜装置の開発

CERN 方式の NEG コーティングは長尺なビームダクトの形状に最適化された製膜手法であり、このためリング全周の多様なチェンバに NEG コーティングを隈なく施すには限界がある。また、真空は気体分子数がログスケールで変化する世界なので、コーティングなしで PSD 係数が 2 桁高い表面が 1% でもあれば、残りの 99% と同程度のガスを放出することになり、せっかくの努力の成果が半減してしまうことになる（真空装置のベーキングで全体を温めることが大事な理屈と同じ）。

そこで、光源真空グループでは複雑な形状をもつ真空チェンバやコンポーネントにも NEG コーティングを施すことができるように、真空フランジ上に NEG 材と磁石を組み込んだ小型の DC マグネトロンスパッタ装置の開発を進めている。これまでに国内の金属メーカー（大阪アサヒメタル）の尽力により TiZrV 合金の製造方法を確立し、2020 年に ICF114 型プロトタイプを用いて DC マグネトロンスパッタでの製膜に成功している（Fig. 6）。本装置は 2021

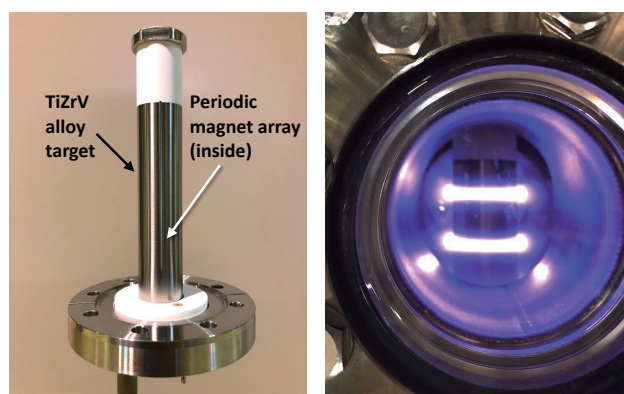


Figure 6 Compact NEG-coating device and plasma emission during NEG film deposition.

年 4 月現在、特許申請中である。

この小型製膜装置は加速器以外の一般真空装置にも応用が可能であり、今後は普及に向けた開発を進めていく予定である。スパッタ方式の製膜というと敷居が高いと思われるかもしれないが、この装置はユーザーが真空装置に必要な数を組み込み、1 Pa 程度の Kr（または Ar）を導入して -500V 程度の電圧を印加するだけで TiZrV を製膜できるようにするものである。

3.3.3 NEG 特性評価方法の国際規格化

2018 年頃までは KEK も含めて、NEG コーティングの応用や供給を目的とした製膜装置の設置には CERN からのライセンス供与と技術移転が必要であったが、開発後 20 年以上が経過した現在は特許が失効しているとのことである。今後、多様な NEG コーティングが普及してきたとき、ユーザーが安心して利用できるようにするためには、特性評価方法がしっかり規定されていることが重要となる。現在、産業技術総合研究所計量標準総合センターが中心となって、日本からの提案で NEG ポンプの性能評価方法を ISO 規格化する取り組みがなされている [43]。

4. おわりに

NEG コーティングは真空チェンバの壁自体を真空ポンプとして機能させることができ、光や電子照射下でのガス放出や電子放出も少ないことから、多様な真空システムの性能向上を可能にする有望な真空技術として注目されている。一方、これらの性能を十分に発揮させるには NEG 材の特性を理解しておくことが大切である。ご自身の装置への導入や運転操作でお困りの方は、著者までご連絡をいただければ少しはお役に立てることがあるかもしれない。PF では放射光実験施設の間瀬一彦准教授のグループでも NEG コーティングの研究開発が精力的に進められている。NEG コーティングについてさらに詳しくお知りになりたい方は、日本表面真空学会主催で毎年、真空夏季大学応用技術講座として NEG コーティングの講習を開催しており、ぜひそちらの受講をお勧めしたい（ただし、コロナ禍での開催は未定）。

5. 謝辞

これまでの光源真空グループでの研究開発では、費用を含めた研究環境を加速器 6 系的小林幸則主幹と放射光実験施設の船守展正施設長に整備していただいています。また、加速器 3 系の宮島司准教授にはソレノイド電磁石の設計と製作をしていただきました。さらに、NEG 膜の表面や構造の分析では、仁谷浩明助教、武市泰男助教、堀場弘司准教授（現：量子科学技術研究開発機構）、間瀬一彦准教授らの支援をいただいています。この場を借りてお礼申し上げます。

引用文献

- [1] C. Benvenuti, P. Chiggiato, F. Cicoira, and Y. L'Aminot, J. Vac. Sci. Technol. A **16**, 148 (1998).
- [2] C. Benvenuti *et al.*, Vacuum **60**, 57 (2001).
- [3] R. Kersevan, Proc. 8th European Particle Accelerator Conf. (EPAC2002) 2565.
- [4] F. Mazzolini *et al.*, Proc. 8th European Particle Accelerator Conf. (EPAC2002) 2577.
- [5] M.J. Ferreira O.R. Ferraz, H.G. Filho, and M.B. Silva, Proc. 21st Particle Accelerator Conf. (PAC2005) 2807.
- [6] C. Herbeaux *et al.*, Proc. 11th European Particle Accelerator Conf. (EPAC2008) 3711.
- [7] M. Grabski *et al.*, Proc. 4th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC2013) 3385.
- [8] L. Liu *et al.*, Proc. 11th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC2020) 11.
- [9] M. Dehler *et al.*, Proc. 10th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC2019) 1662.
- [10] N. Plambeck, DESY-M-19-01.
- [11] Y. Tanimoto *et al.*, Proc. 4th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC2013) 3315.
- [12] Y. Tanimoto *et al.*, Proc. 10th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC2019) 1276.
- [13] 福谷克之, 小倉正平, 大野哲, 真空 **59**, 145 (2016).
- [14] B.M. Shipilevsky and V.G. Glebovsky, Vacuum **41**, 126 (1990).
- [15] M.P. Lozano and J. Fraxedas, Surf. Interface Anal. **30**, 623 (2000).
- [16] C. Benvenuti *et al.*, J. Vac. Sci. Technol. A **19**, 2925 (2001).
- [17] R. J. Knize, J. L. Cecchi, and H. F. Dylla, J. Vac. Sci. Technol. **20**, 1135 (1982).
- [18] A. Rossi, Proc. 10th European Particle Accelerator Conf. (EPAC2006) 1444.
- [19] A. E. Prodromides, C. Scheuerlein, and M. Taborelli, Vacuum **60**, 35 (2001).
- [20] P. Chiggiato and P. Costa Pinto, Thin Solid Films **515**, 382 (2006).
- [21] O. B. Malyshev *et al.*, J. Vac. Sci. Technol. A **27**, 521 (2009).
- [22] O. B. Malyshev, R. Valizadeh, and A. N. Hannah, J. Vac. Sci. Technol. A **34**, 061602 (2016).
- [23] 金秀光 他, 第 16 回加速器学会年会プロシーディングス 619 (2019).
- [24] Synrad+ and Molflow+ are Monte Carlo codes developed at CERN by R. Kersevan and M. Ady. website: cern.ch/molflow
- [25] M. Ady *et al.*, Proc. 6th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC2015) 3123.
- [26] M. Ady, PhD dissertation, <https://cds.cern.ch/record/2157666/files/CERN-THESIS-2016-047.pdf>
- [27] KEK 放射光 Conceptual Design Report (Accelerator).
- [28] O. B. Malyshev, A.P. Smith, R. Valizadeh, and A. Hannah, J. Vac. Sci. Technol. A **28**, 1215 (2010).
- [29] B. Henrist, N. Hilleret, C. Scheuerlein, and M. Taborelli, Appl. Surf. Sci. **172**, 95 (2001).
- [30] Benvenuti *et al.*, Vacuum **71**, 307 (2003).
- [31] 金秀光, 谷本育律, 内山隆司, 本田融, 表面と真空, in press.
- [32] R. Valizadeh *et al.*, J. Vac. Sci. Technol. A **28**, 1404 (2010).
- [33] O. B. Malyshev, R. Valizadeh, and A. N. Hannah, Vacuum **100**, 26 (2014).
- [34] Xiaojin Ge *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **967**, 163864 (2020).
- [35] G. Lanza *et al.*, Proc. 2nd Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC2011) 1557.
- [36] C. Benvenuti *et al.*, Vacuum **73**, 144 (2004).
- [37] T. Miyazawa *et al.*, J. Vac. Sci. Technol. A **37**, 021601 (2019).
- [38] X.G. Jin, Y. Tanimoto, T. Uchiyama, and M. Okano, Vacuum, submitted.
- [39] T. Porcelli *et al.*, Vacuum **138**, 157 (2017).
- [40] L. L. Amador *et al.*, J. Vac. Sci. Technol. A **36**, 021601 (2018).
- [41] E. Belli *et al.*, Proc. 62nd ICFA ABDW on High Lumi. Circular e+e- Colliders (eeFACT2018) 234.
- [42] R. Širvinskaitė *et al.*, Vacuum **179**, 109510 (2020).
- [43] 吉田肇, VACUUM2020 真空展 ONLINE 規格標準報告会, 2020 年 10 月 14 日 - 11 月 13 日.
(原稿受付日: 2021 年 4 月 6 日)

著者紹介

谷本育律 Yasunori TANIMOTO



KEK 加速器研究施設

加速器第六研究系 准教授

〒 305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

e-mail: yasunori.tanimoto@kek.jp

略歴：1995 年名古屋大学理学研究科物理学専攻修士課程修了，動力炉・核燃料開発事業団 研究員，1997 年 10 月 KEK

物質構造科学研究所 助手，2010 年 11 月～2011 年 8 月 CERN Unpaid Associate（総研大若手教員海外派遣事業），2012 年 4 月 KEK 加速器研究施設 准教授，博士（理学）。最近の研究：NEG コーティング。PF-ring と PF-AR と cERL の真空システムの高性能化。趣味：テニス，バドミントン。

金秀光 Xiuguang JIN



KEK 加速器研究施設

加速器第六研究系 助教

〒 305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

e-mail: jinxg@post.kek.jp

略歴：2010 年名古屋大学工学研究科博士課程修了，博士（工学），2010 年名古屋大学高等研究院特任助教，2014 年高

エネルギー加速器研究機構特別助教，2018 年高エネルギー加速器研究機構助教。

最近の研究：NEG コーティング，スピン偏極電子源

趣味：サッカー

山本将博 Masahiro YAMAMOTO

KEK 加速器研究施設 加速器第六研究系 准教授

〒 305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

e-mail: masahiro.yamamoto@kek.jp

略歴：2004 年名古屋大学大学院理理学研究科助教，2009 年

高エネルギー加速器研究機構加速器研究施設特別助教，2010 年同施設助教，2019 年同施設准教授。理学博士。2019 年度より筑波大学数理物質系准教授を兼任。専門は超高真空，電子銃に関する研究。KEK では極低エミッタンス光陰極高電圧電子源の開発，PF 及び PF-AR の輸送路改造のための真空設計，cERL のビーム運転，RI 製造などの真空設計および照射実験なども行っている。

本田融 Tohru HONDA



KEK 加速器研究施設

加速器第六研究系 教授

〒 305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

e-mail: tohru.honda@kek.jp

略歴：1984 年東京大学工学部物理工学科卒業，1985 年東京大学生産技術研究所助手，1992 年高エネルギー物理学研

究所助手，博士（工学），2005 年高エネルギー加速器研究機構准教授，2013 年より現職。2016 年総研大高エネルギー加速器科学研究科加速器科学専攻長，2020 年より同研究科副研究科長を兼任。

最近の研究：放射光源加速器の真空機器の設計開発

趣味：ボウリング，四十の手習いから経歴 20 年。

野上隆史 Takashi NOGAMI

KEK 加速器研究施設 加速器第六研究系 技師

内山隆司 Takashi UCHIYAMA

KEK 加速器研究施設 加速器第六研究系 技師

〒 305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

e-mail: takashi.uchiyama@kek.jp

最近の研究：真空計の較正，ガasket性能試験，真空到達試験，真空装置組立

趣味：サッカー，バドミントン，家庭菜園