

PF リングにおけるアンジュレータ#19 用 NEG コーティングダクトの設計と製作

DESIGN AND MANUFACTURE OF THE NEG-COATED CHAMBER FOR UNDULATOR #19 AT PF-RING

谷本 育律^{#, A) B)}, 金 秀光^{A) B)}, 山本 将博^{A) B)}, 野上 隆史^{A)}, 本田 融^{A) B)}

Yasunori Tanimoto^{#, A) B)}, Xiuguang Jin^{A) B)}, Masahiro Yamamoto^{A) B)}, Takashi Nogami^{A)}, Tohru Honda^{A) B)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{B)} The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI)

Abstract

A new elliptically polarizing undulator (U#19) with an APPLE-II-type magnetic arrangement is being constructed at the Photon Factory in KEK. The U#19 vacuum chamber is 4.1 m in length, and its beam channel with a 15x90 elliptical profile and two cooling-water channels alongside are formed by extrusion of A6060-T6 aluminum alloy. The inner wall of the beam channel is coated with a Ti-Zr-V Non-Evaporable Getter (NEG) thin film. Since the NEG coatings have a highly effective pumping speed and a low Photon Stimulated Desorption (PSD) yield, sufficiently low vacuum pressures can be achieved from the beginning of the beam operations. When a nominal beam current of 450 mA is stored, the inner wall of the beam channel will be exposed to Synchrotron Radiation (SR) from the upstream bending magnet and its power will reach 350 W over the entire length of the U#19 chamber. SUS-AI clad materials were machined and then TIG-welded to the extruded aluminum bar, so that the ICF203 flanges on both ends of the chamber have a stainless steel knife edge. After assembled, the U#19 chamber underwent the CERN-standard chemical polishing and the deposition of the NEG coating; a thin film with thicknesses ranging from 1.0 to 2.0 μm was deposited by means of DC magnetron sputtering.

1. はじめに

現在 KEK の PF-ring では、1987 年より利用されてきたリボルバ型マルチアンジュレータ (Rev#19) に代えて、APPLE-II 型可変偏光アンジュレータ (U#19) を設置する計画が進行中である[1]。設置時期は 2018 年の夏期停止期間中で、設置場所は偏向電磁石 B18-B19 間の約 5 m の直線部である。

U#19 は約 4 m の磁石列が最小ギャップ 24 mm ままで閉じる設計であるが、その真空ダクトは垂直方向 15 mm の物理開口を有する必要があり、長尺かつ薄肉という厳しい条件を満たすための機械的強度が要求される。

真空の観点からは、ビーム路を 10^{-8} Pa 台の超高真空に維持する必要があり、主要なガス放出源である SR 照射による PSD ガスを効率良く排気する性能が要求される。そこで、U#19 真空ダクトでは、高い実効排気速度と低い PSD 係数 η (molecules/photon) を兼ね備える非蒸発型ゲッター (NEG) コーティングを採用することとした。

真空ダクト材料は、長尺で薄肉な構造に耐える機械的強度、複雑な開口に対する展延性、SR 照射に耐える熱伝導性を兼ね備えるアルミ合金を採用した。

U#19 設置後のビーム運転で予測される NEG コーティングダクトの真空性能、いわゆる光焼出し効果による圧力減少の経過を Synrad+ と Molflow+ によるモンテカルロシミュレーションで予測した。

U#19 用真空ダクトの構造設計、製作、製膜は、海

外の加速器用 NEG コーティングダクトにおいて多くの実績を有する SAES Getters S.p.A. (伊) に委託した。

2. NEG コーティング

NEG コーティングは、2000 年頃に欧州原子核研究機構 (CERN) において LHC 用ビームダクトの高機能化を目指して開発された真空技術である[2, 3]。その開発直後から ESRF[4]や ELETTRA[5]で in-air 型アンジュレータ用真空ダクトに採用され、2005 年にはリングの半周のビームダクトに NEG コーティングを施した SOLEIL が建設された[6]。2015 年以降では、MAX IV[7]や SIRIUS[8]のように、リング全周に NEG コーティングを施した光源加速器も建設されるようになってきた。

CERN の開発した NEG コーティングでは、真空チェンバの内面に NEG 材として 1 μm 程度の Ti-Zr-V を製膜する。それにより、真空チェンバ自体をゲッターポンプとして機能させることが可能となる。排気の機構はバルク型の NEG ポンプと同様で、活性ガスを化学吸着により排気する。表面が吸着分子で飽和して排気速度が低下した場合でも、昇温によって吸着分子を NEG 材内部に拡散させて、金属表面を非蒸発的に再活性化させる。そして、NEG コーティングの場合は、活性化温度がバルク型の 450~550 $^{\circ}\text{C}$ に比べ、180~250 $^{\circ}\text{C}$ という比較的低温 (一般的なベーキング温度) で行うことができるという特長を持つ。

光源加速器において NEG コーティングを採用する利点は以下のとおりである。

[#] yasunori.tanimoto@kek.jp

- ビーム路に沿って高い実効排気速度を実現する。
- 特に長尺アンジュレータや超低エミッタンスリングなど、コンダクタンスの制限される真空ダクトに対して効果的である。
- 長尺アンジュレータ内の圧力低減は、ビームラインに向けて放出される制動放射 γ 線の低減に寄与する。
- 運転初期の PSD 係数 η が一般材料より約 2~3 桁低いため[9]、コミッション期間の短縮化に貢献する。
- 真空ポンプや排気ポートが削減でき、真空システムの設計・製作が簡素化される。

一方、NEG コーティングの不利な点についても十分に考慮し、対策をとる必要がある。

- 表面排気容量は単分子層 (1 ML) であり、できる限り超高真空を維持することが求められる。
- Ar などの不活性ガスは排気できないため、貴ガス対応型スパッタイオンポンプを併用する。
- 大気開放と活性化を繰り返すと吸着確率 (排気速度) が徐々に低下するため、活性化の回数に限りがある。リング真空作業時には NEG コーティング区間をゲートバルブで保護する、ベントガスに貴ガス (Ar や Ne) を用いて再活性化の回数を減らす、などの対策が有効である[10]。
- 高い排気速度や低い η 特性を得るには活性化が不可欠であり、周辺ダクトも含め、現場ベーキングのための装備が必要となる。

3. U#19 真空ダクトの設計

3.1 真空ダクト形状

まず長さに関して、U#19 は周期長 68 mm、周期数 55 の APPLE-II 型磁石列を有し、その進行方向可動範囲は 3921 mm である。真空ダクトは両端の ICF203 フランジや冷却水路の加工領域を含め、全長を 4100 mm とした。U#19 の上下流にはそれぞれ、RF シールド付きゲートバルブ、ベローズと排気ポート付き形状変換ダクトが設置される。このベローズは、180 °C での NEG 活性化時に真空ダクトの片側 7 mm ずつの熱膨張を吸収する。

高さに関しては、U#19 磁石列の最小ギャップは 24 mm であり、真空ダクトの上面と底面には 0.6 mm 厚の多極成分補正用フラットワイヤを備える予定である。以上を考慮して、真空ダクトの高さを 20 mm とし、約 1.4 mm のクリアランスを確保した。

また、ビームダイナミクスからの要請により、当該直線部の垂直開口を 15 mm とした。すなわち、ダクト最薄部の厚さは 2.5 mm となる。U#19 真空ダクトの断面形状を Fig. 1 に示す。

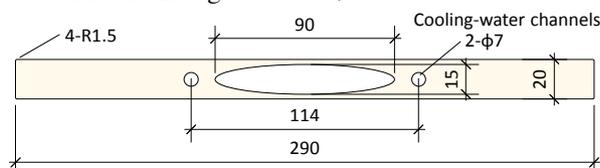


Figure 1: Cross section of the U#19 vacuum chamber.

水平方向に関しては、ダクトサポート (Fig. 2 の赤い部分) と磁石列駆動機構との干渉を避けるには 400 mm 程度のダクト幅が好ましいが、アルミ合金製押出管の加工しやすさを考慮して 290 mm に決定した。その場合、約 4 m の押出管をリング外側のみで保持することになるが、ANSYS での構造解析の結果、ダクトサポートもアルミ合金製にすることでビーム軸方向の応力が緩和され、180 °C での活性化時でも垂直方向の最大たわみが 0.1 mm 以内に収まる事が確認された。

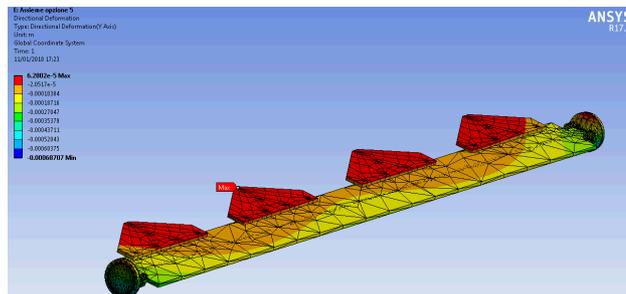


Figure 2: Structural analysis of the U#19 chamber carried out by Marco Urbano (SAES Getters).

ビーム路の水平開口は、上下流の PF リング直線部用四極電磁石ダクト (Q ダクト) の開口と同じ 90 mm とした。ビーム路の断面形状は、均一な NEG コーティングの製膜を考慮して、形状変化が極力滑らかになるように楕円とした。

U#19 真空ダクトのビーム路内面には、上流の偏向電磁石 B18 からの SR が照射される。そのパワーは、450 mA のビーム蓄積時に U#19 真空ダクト 4.1 m 全体で約 350 W になると計算される。この入熱を除去するために、ビーム路に沿って $\phi 7$ mm の冷却水路を設けた。ビーム路のリング内側にも冷却水路を設けてあるのは、多くの反射光が当たるためである。Synrad+ で入熱パワーを計算すると、リング外側が約 300W、リング内側が約 40W であった (Fig. 3)。

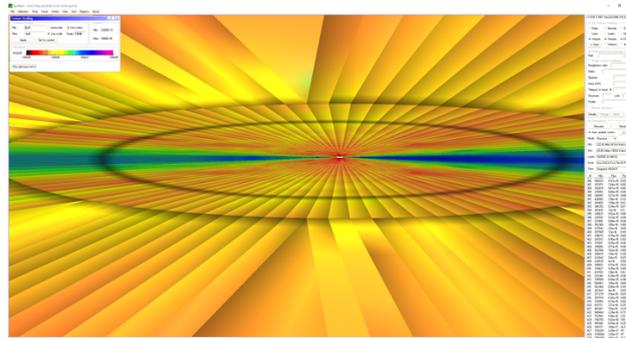


Figure 3: Synrad+ simulation for the U#19 chamber. In this figure, SR from B18 directly irradiates the right-hand side wall of the beam channel, and a significant amount of the SR reflects and irradiates the opposite side.

3.2 真空ダクト材料

上述のとおり、U#19 真空ダクトは長尺な上に複数の開口を有し、さらに、それらを精度良く加工する必要がある。また、SR が直接照射するため、高い熱

伝導性も要求される。無酸素銅は展延性、熱伝導性ともに優れるが、複数の開口での展伸成形に不向きである。このため、U#19 真空ダクトにはアルミ合金押出管を採用した。アルミ合金押出管は海外のアンジュレータ用 NEG コーティングダクト材として多くの実績がある。

アルミ合金押出管の種類に関しては、アジアや北米の加速器では A6063-T5 が多く採用されているが、U#19 真空ダクトには欧州で広く流通している A6060-T6 を採用した。A6063-T5 に比べて Mg の含有率は低いが、T6 調質により同等以上の強度を有する。また、真空の観点からも、蒸気圧の高い Mg の含有率が低いことは特に昇温する用途に好ましく、さらに、Mg は熱間押出加工で表面に析出しやすいため、多孔質な MgO を多く含む酸化層の低減も期待される[11]。

U#19 真空ダクト両端のフランジにはステンレスのナイフエッジが必要となるため、SUS-AI の材料変換材として、PF-ring 用ビームダクトで実績のある爆着クラッド材 BACLAD (旭化成製) を使用した。

フランジの SUS 部分には SR が直接照射しないようにする必要がある。上流側フランジは形状変換ダクトに設置した SR アブソーバの影に入れることができるが、下流側はできない。そのため、下流側フランジのみ楕円開口の端に R4 の SR 逃げ加工を施した (Fig. 4)。

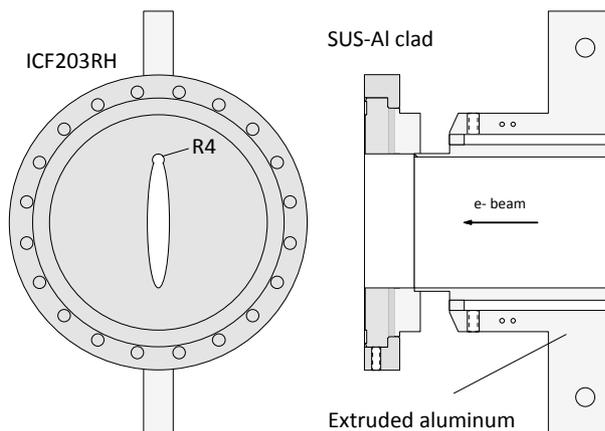


Figure 4: Downstream end of the U#19 chamber.

本フランジは締結後にできるギャップを狭めた PF 仕様フランジであり、相手側の形状変換ダクトの楕円開口に沿って取り付けられた BeCu 製コンタクトチップがギャップを埋めて RF シールドの役割を果たす。

3.3 SR と圧力の分布シミュレーション

U#19 設置後の B18-B19 間直線部における SR と圧力の分布について、Synrad+ と Molflow+ [12] によるモンテカルロシミュレーションで予測を行った。

まず始めに Synrad+ において、450 mA 蓄積時での SR 分布を計算した (Fig. 3)。その際、照射表面での吸収や反射をうまく再現させるため、真空材料はできるだけ実際に即して、ビームダクトを Al、クロッチアブソーバを Cu、SUS 製形状変換ダクトを Fe とした。

次に、計算された SR 分布を表面材料ごとの η (molecules/photon) を用いてガス放出分布に変換した。ここで、SR 照射量に対する η の減少 (ガス放出の枯れ) は、Fig. 5 に示したデータを用いた。

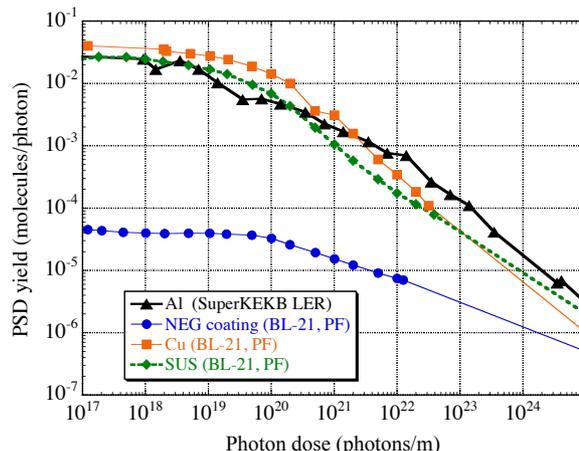


Figure 5: PSD yield data used for Molflow+ simulation.

Al は SuperKEKB LER phase 1 (SR 臨界エネルギー 1.9 keV) での観測結果[13]、NEG コーティングと Cu と SUS は PF-ring のビームライン BL-21 (同 4.0 keV) での測定結果である。

これらのガス放出分布を Molflow+ に読み込ませ、運転時間経過ごとの圧力分布を計算した (Fig. 6)。

NEG コーティングの排気速度については、一般に活性化直後の CO に対する吸着確率は 0.5 程度であるが、ここでは表面の飽和が進んだ状態を仮定して 0.01 とした。常温での CO に対する排気速度に換算すると $220 \text{ L s}^{-1} \text{ m}^{-1}$ である。

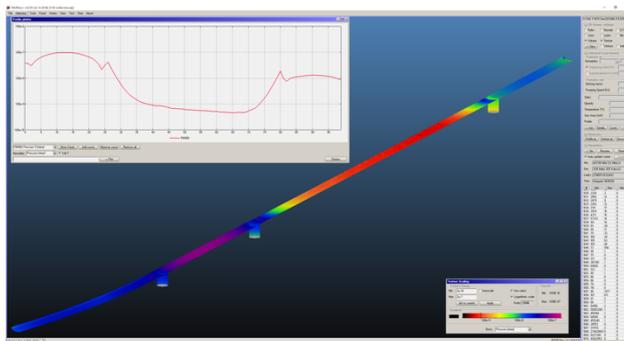


Figure 6: Molflow+ simulation for the B18-B19 straight section.

ビーム運転開始時からの積分電流値 (A·h) ごとの圧力分布計算結果を Fig. 7 にまとめた。U#19 内の NEG コーティングダクトで速い枯れが期待できることが判る。

U#19 上下流の Q ダクトで高い圧力を示しているが、これらの Q ダクトは 12 年以上の運転で十分に枯れているものである。このメモリ効果により、実際の運転再開後の η は、本計算に用いた PSD データよりも低い値を示すことが期待される。これまでの PF-ring の立上げ実績と本計算結果を比較すると、その違いは 1 桁程度である。

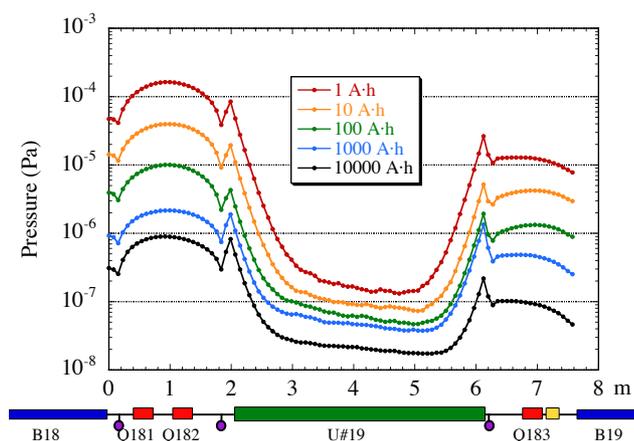


Figure 7: Evolution of the pressure profiles in the straight section B18-B19 during the beam operations.

4. U#19 真空ダクトの製作と製膜

4.1 U#19 真空ダクトの製作

まず始めに、Fig. 1 に示した断面形状の押出加工試験を、約 30 cm のテストピースを用いて、寸法公差を満たす金型が得られるまで行った。とりわけ最薄部である垂直開口 15 mm の部位を目標公差 0.15 mm に収めることに試験回数を要した。最終的に公差制御に成功した金型を用いて、U#19 用の約 4 m 押出管を製作した。その結果、断面形状の公差は保証値 0.5 mm 以内に収まった。

次に、SUS -Al クラッド材を ICF203 フランジに加工し、押出管の両端にアルミ合金どうしの TIG 溶接を行った。溶接箇所は薄肉であり、フランジの重量を支えられないため、溶接部周辺を覆うようにアルミブロックを溶接して補強した。さらに、ダクト輸送時はその周りを着脱可能な治具により補強した (Fig. 8)。



Figure 8: U#19 vacuum chamber assembly (a photo taken at SAES Getters before the NEG-film deposition).

4.2 NEG コーティングの製膜

製膜に先立ち、すべての組立が完了したダクトに脱脂と化学研磨を施した。化学研磨は製膜後の NEG コーティングの剥がれを防ぐための重要な工程であり、アルミ合金の場合は多孔質で厚い酸化物を除去し、緻密で薄い酸化皮膜を形成しておく必要が

ある。

その後、DC マグネトロンスパッタ装置 (Fig. 9) に組み込み、NEG コーティングを施した。楕円開口の円周に沿ってなるべく均一な膜厚分布を得るため、楕円開口内部に 3 本の Ti-Zr-V ツイストカソードを設置して製膜した。



Figure 9: NEG-coating device at SAES Getters.

製膜後、残留ガス分析計で製膜環境の健全性 (リークがないことなど) を確認し、さらに大気雰囲気中で 1 日保持してコーティングの剥がれがないことを確認した。

NEG 膜の評価として、ダクトと同時に製膜した試験片 (クーポン) に対して、NEG 膜の組成と膜厚検査をそれぞれエネルギー分散型 X 線分析 (EDX) と触針式プロファイラ (KLA-Tencor P-15) を用いて行った。組成は (Ti, Zr, V) = (30.4, 39.3, 30.3) [at%]、膜厚は $1.5 \pm 0.5 \mu\text{m}$ であり、ともに許容範囲にあることを確認した。

5. おわりに

今後、U#19 に真空ダクトを組み込み、B18-B19 間直線部に設置する。周辺真空ダクトとの接続が完了した後、NEG コーティングの活性化を行い、残留ガス分析計などを用いて真空特性の評価を行う。そして、11 月の運転再開後の圧力変化から、実環境での NEG コーティングの排気性能や PSD 特性の評価を行う。

また、チェンバと同時に製膜したクーポンに対して、SEM-EDX、XPS、XRD などの表面分析を行い、膜構造の健全性の評価も行う予定である。

NEG コーティングはその多くの優れた特性から、加速器に限らず様々な真空装置への応用が期待され

ている真空技術である。しかしながら、国内では、KEKの小型エネルギー回収型線形加速器 cERLの一部に設置した実績はあるが[14]、放射光ユーザーマシンへの設置は、筆者の知る限り U#19 が初めてとなる。本稿が今後国内でNEGコーティングダクトを採用される際の参考になり、普及の一助となれば幸いである。

謝辞

U#19用NEGコーティングダクトの高品質な設計、製作、製膜は、SAES Getters S.p.A.、SAES RIAL Vacuum S.r.l.、Pandolfo Alluminio S.p.A.、Rodofil S.r.l.のご尽力により得られました。特にSAES社のEnrico Maccallini氏、Carlo Belliero氏、Marco Urbano氏、Tomaso Porcelli氏、Michele Mura氏、Paolo Manini氏、桜井英樹氏、アールデック社の飯村和広氏には、詳細な設計からNEG製膜、工程管理に至るまで全面的にご協力をいただきました。また、KEKの末次祐介教授には、SuperKEKBでのアルミ合金ビームダクトのPSD係数測定データをご提供いただきました。この場をお借りして感謝申し上げます。

参考文献

- [1] K. Tsuchiya *et al.*, "PFリングにおける可変偏光アンジュレータ：U#19の建設", in these proceedings, THP024.
- [2] C. Benvenuti *et al.*, "Vacuum properties of TiZrV non-evaporable getter films", *Vacuum* 60 (2001) 57.
- [3] P. Chiggiato and P. Costa Pinto, "Ti-Zr-V non-evaporable getter films: From development to large scale production for the Large Hadron Collider", *Thin Solid Films* 515 (2006) 382.
- [4] R. Kersevan, "NEG-Coated Vacuum Chambers at the ESRF: Present Status and Future Plans", in proceedings of EPAC2002, 2565.
- [5] F. Mazzolini *et al.*, "Performance of Insertion Device Vacuum Chambers at ELETTRA", in proceedings of EPAC2002, 2577.
- [6] C. Herbeaux *et al.*, "Vacuum Conditioning of the SOLEIL Storage Ring with Extensive Use of NEG Coating", in proceedings of EPAC2008, 3711.
- [7] E. Al-Dmour and M. Grabski, "The Vacuum System of MAX IV Storage Rings: Installation and Conditioning", in proceedings of IPAC2017, 3468.
- [8] R.M. Seraphim *et al.*, "Vacuum System Design for the Sirius Storage Ring", in proceedings of IPAC2015, 2744.
- [9] M. Ady *et al.*, "Photodesorption and Electron Yield Measurements of Thin Film Coatings for Future Accelerators", in proceedings of IPAC2015, 3123.
- [10] G. Lanza *et al.*, "The LHC Experimental Beam Pipe Neon Venting, Pumping and Conditioning", in proceedings of IPAC2011, 1557.
- [11] 石川雄一, "真空容器材料としてのステンレス鋼とアルミニウム合金", *圧力技術* 36 (1998) 442.
- [12] Synrad+ and Molflow+ are Monte Carlo codes developed at CERN by R. Kersevan and M. Ady;
<http://cern.ch/molflow>
- [13] Y. Suetsugu, "Experiences in Vacuum System of KEKB and SuperKEKB", 80th IUVESTA Workshop: Ultra low emittance light source vacuum systems, October 24–28, 2016, NSRRC, Hsinchu, Taiwan.
- [14] Y. Tanimoto *et al.*, "Design of the cERL Vacuum System", in proceedings of IPAC2013, 3315.