

# TiZrV および緻密 Pd コーティングにおける抵抗壁インピーダンス評価と単バンチ不安定性シミュレーション

## RESISTIVE WALL IMPEDANCE EVALUATION AND SINGLE BUNCH INSTABILITY SIMULATION FOR TiZrV AND DENSE Pd COATINGS

石橋拓弥<sup>#, A, B)</sup>, 金 秀光<sup>A, B)</sup>  
Takuya Ishibashi<sup>#, A, B)</sup>, Xiuguang Jin<sup>A, B)</sup>  
A) KEK Accelerator Laboratory  
B) SOKENDAI

### Abstract

In beam pipes used in accelerators, especially electron or positron circular accelerators, the surface is sometimes coated with a low photon-stimulated desorption (PSD) material to suppress gas desorption. TiZrV alloy is well known as a non-evaporable getter (NEG) coating material, and the PSD can be reduced by applying the coating to the beam pipe surface. It is also known that a dense Pd coating on the surface can reduce PSD. The direct current (DC) resistivity of this coating is about an order of magnitude lower than that of TiZrV coating, which can also contribute to beam impedance reduction in the accelerators. Therefore, we evaluated the resistive wall impedance of TiZrV and dense Pd coatings using ImpedanceWake2D (IW2D) and the effect of the coatings on single bunch instability using PyHEADTAIL for a future light source Hybrid Ring and a lepton collider FCC-ee.

### 1. はじめに

高エネルギーの電子・陽電子円形加速器で使用されるビームパイプでは、放射光によるガス脱離を抑制するために内表面に光刺激脱離 (photon-stimulated desorption, PSD) 係数の低い材料をコーティングすることがある。

TiZrV 合金は非蒸発型ゲッター (non-evaporable getter, NEG) 材としてよく知られているが、ビームパイプ表面にこのコーティングを施すことで、例えば Cu と比べて PSD によるガス放出量 (intrinsic PSD yield: 排気性能の効果を差し引いた PSD yield) を 1 桁程度低減することができる [1]。

表面に緻密な Pd コーティングを施すことで従来の TiZrV コーティングと比べて PSD によるガス放出量をさらに 1 桁程度低減できることが報告されている [2]。また、このコーティングは大気導入による性能劣化もほとんどなく低 PSD 表面を維持することから、耐久性も有している。このコーティングの直流 (direct current, DC) 電気抵抗率は TiZrV コーティングよりも約 1 桁低く、加速器におけるビームインピーダンスの低減にも貢献する可能性があり、将来の電子・陽電子円形加速器への利用が期待される。

そこでシミュレーションにより TiZrV と緻密 Pd コーティングの抵抗性壁 (resistive-wall, RW) インピーダンスを評価し、将来の放射光源計画である Hybrid Ring の storage (SR) モード [3] と衝突型加速器計画 FCC-ee [4] の単バンチ不安定性に対するコーティングの効果を評価した。

### 2. RW インピーダンスの評価

#### 2.1 Wake potential

RW インピーダンスの評価には ImpedanceWake2D

<sup>#</sup> takuya.ishibashi@kek.jp

Table 1: Input Parameters in IW2D for Hybrid Ring

	アルミ合金 +TiZrV コート	アルミ合金 コート	アルミ合金 +緻密 Pd コート
レイヤー1			
DC 抵抗率 [ $\Omega\text{m}$ ]	$3.25 \times 10^{-8}$	$1.75 \times 10^{-6}$	$1.8 \times 10^{-7}$
内径 [mm]	7.5	7.5	7.5
厚み	2.5 mm	1.0 $\mu\text{m}$	1.0 $\mu\text{m}$
レイヤー2			
DC 抵抗率 [ $\Omega\text{m}$ ]	$1.0 \times 10^{-15}$	$3.25 \times 10^{-8}$	$3.25 \times 10^{-8}$
厚み [mm]	$\infty$	2.5	2.5
レイヤー3			
DC 抵抗率 [ $\Omega\text{m}$ ]		$1.0 \times 10^{-15}$	$1.0 \times 10^{-15}$
厚み [mm]		$\infty$	$\infty$

(IW2D) を使用した [5]。IW2D は円形断面またはフラット断面形状の多層ビームパイプにおける resistive-wall インピーダンスおよび wake (Green) function を計算するコードである。

ここでは Hybrid Ring を例として、ビームパイプ内直径 15 mm、厚み 2.5 mm のビームパイプの使用を想定し、Table 1 の条件で RW インピーダンスを計算した。ここではアルミ合金の DC 電気抵抗率に A6063 T6 の値を使用し、最外層は空気に設定している。ビームエネルギー 3 GeV ( $\gamma \sim 5871$ )、長さ 1 m、内直径 15 mm の円形または全高 15 mm のフラットビームパイプにおける縦方向の wake function を Fig. 1 に示す。

この wake function から wake potential (pseudo-Green function) を得るためには、次式の畳み込みを計算した。

$$W(s, \sigma_z) = \int_{-\infty}^{\infty} ds' V(s', \sigma_{z0}) \lambda(s - s') \quad (1)$$

$$\lambda(s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \exp\left(-\frac{s^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (2)$$

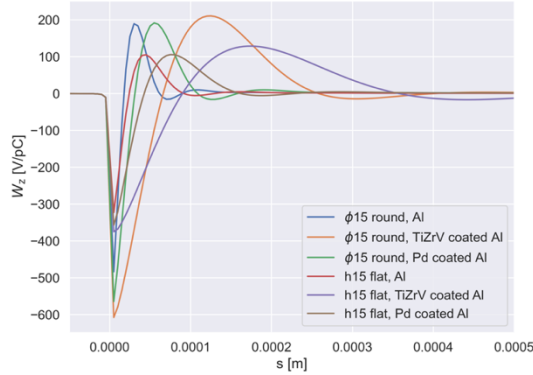


Figure 1: Longitudinal wake function in the circular and flat beam pipe.  $\phi$  and  $h$  refer to the inner diameter in the circular and the full height in the flat cross-section.

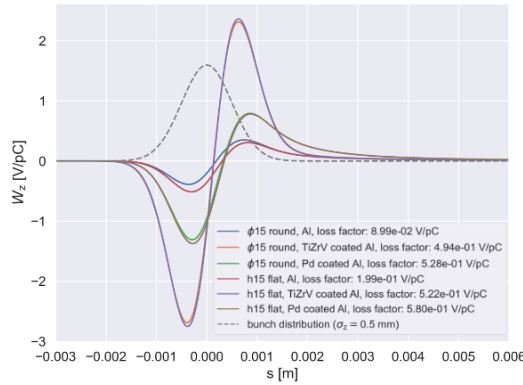


Figure 2: Longitudinal wake potential with the bunch length of 0.5 mm in the circular and flat beam pipe.

ここで  $W, V, \sigma_z$  はそれぞれ wake potential, wake function, バンチ長である。また  $s$  はウェイク場を駆動する誘導ビームと試験粒子の相対距離である。 $\sigma_z = 0.5$  mm について畳み込みを実行した結果を Fig. 2 に示す。TiZrV コーティング、緻密 Pd コーティング、コーティングなしの順に wake potential の振幅が小さくなっていくのがわかる。また、縦方向については断面形状の違いによる差異が小さいこともわかる。

## 2.2 縦方向インピーダンス

文献[6]に倣い、得られた  $\sigma_z = 0.5$  mm の wake potential について次式の回帰分析を行い、resistance と inductance を概算した。

$$W_{\text{reg}}(s) = -Rc\lambda(s) - Lc^2\lambda'(s) \quad (3)$$

ここで  $R, L, c$  はそれぞれ resistance, inductance, 光速である。

### 2.2.1 Hybrid Ring

各条件における loss factor ( $k_z$ ), resistance ( $R$ ), inductance ( $L$ ) を Table 2 に示す。ここでは得られた wake potential を Hybrid Ring の周長 350 m で重み付けしている。TiZrV は緻密 Pd コーティングに比べて loss factor お

Table 2: Longitudinal RW Impedance in Hybrid Ring

	$k_z$ [V/pC]	$R$ [ $\Omega$ ]	$L$ [nH]
アルミ合金	70	410.8	1.4
アルミ合金 +TiZrV コート	183	1080.0	9.9
アルミ合金 +緻密 Pd コート	203	1199.3	3.5

Table 3: Longitudinal RW Impedance in FCC-ee

	$k_z$ [V/pC]	$R$ [ $\Omega$ ]	$L$ [nH]
アルミ合金 +TiZrV コート	10500	62060.6	620
アルミ合金 +緻密 Pd コート	12900	76062.5	210

よび resistance は約 10% 小さいが、inductance が約 2.8 倍大きいことがわかる。

### 2.2.2 FCC-ee

同様に FCC-ee で想定されている内直径 70 mm のビームパイプについても IW2D と畳み込みにより RW インピーダンスを評価した。ビームエネルギー 45.6 GeV ( $\gamma \sim 89237$ )、各コーティングの膜厚は 1  $\mu\text{m}$ 、ビームパイプの厚さは 2 mm とした[7]。ここでは文献[7]との比較のため、ビームパイプの外側には厚さ 6 mm の空気層に加え、さらにその外側には電磁石のヨークを想定した厚さ無限大の Fe の層 (DC 電気抵抗率:  $6.9 \times 10^{-7}$   $\Omega\text{m}$ ) を設定して計算した。

各条件における loss factor, resistance, inductance を Table 3 に示す。ここでも得られた wake potential を FCC-ee の周長 97.75 km で重み付けしている。TiZrV は緻密 Pd コーティングに比べて loss factor および resistance は約 20% 小さいが、inductance が約 3 倍大きいことがわかる。

## 3. 単バンチ不安定性シミュレーション

### 3.1 Hybrid Ring

横方向の dipolar および quadrupolar wake function についても上記と同様のことを行い、得られた RW による縦・横方向の wake potential ( $\sigma_z = 0.5$  mm) を PyHEADTAIL[8, 9] に入力して単バンチ不安定性のシミュレーションを行った。なお、ここでのシミュレーションは全て横方向の bunch-by-bunch feedback を無効にしている。

シミュレーションに使用した主要なパラメータを Table 4 に示す。これらパラメータは文献[3]を参照しているが、そこに掲載されていないものについては次の仮定をしている。1) 垂直方向エミッタンスについては 2% coupling を仮定、2) ベータ関数の平均値  $\bar{\beta}$  は  $\bar{\beta}_{x/y} = C/2\pi\nu_{x/y}$  から計算、3) クロマティシティは水平・垂直方向ともに 0。

Bunch population に対する root mean square (RMS) バンチ長と RMS エネルギースプレッドを Fig. 3 に示す。

Table 4: Main Parameters of Hybrid Ring for the PyHEADTAIL Simulation

Energy [GeV]	3
Circumference [m]	350
RF frequency [MHz]	500.0
Momentum compaction	$1.59 \times 10^{-4}$
Energy spread	$1.26 \times 10^{-3}$
Energy loss [MeV/turn]	0.75
Normalized emittance, $\varepsilon_x/\varepsilon_y$ [ $\mu\text{m}/\text{nm}$ ]	3.88/77.6
Betatron tune, $\nu_x/\nu_y$	28.17/9.23
Averaged beta function, $\bar{\beta}_x/\bar{\beta}_y$ [m]	1.98/6.04
Damping time, $\tau_x/\tau_y/\tau_z$ [ms]	4.17/9.3/12.1
Number of turns	50000
Number of macroparticles	$1 \times 10^6$

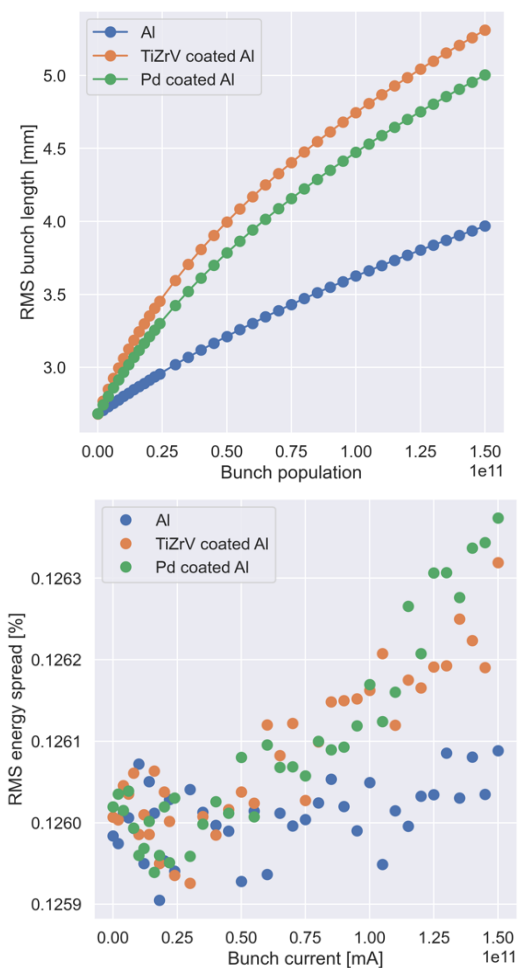


Figure 3: RMS bunch length (top side) and RMS energy spread (bottom side) as a function of the bunch population obtained by the PyHEADTAIL with only the RW impedance in Hybrid Ring.

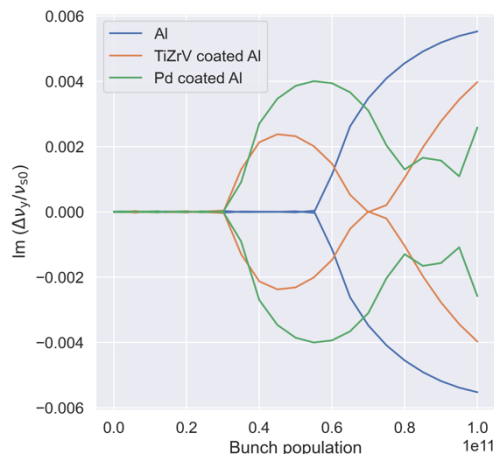


Figure 4: Imaginary part of the vertical tune shift as a function of the bunch population obtained by the PyHEADTAIL with only the RW impedance in Hybrid Ring.

バンチ長に関してはコーティングなし、緻密 Pd コーティング、TiZrV コーティングの順に長くなるのがわかる。また、エネルギー Spredd に関しては、各表面間での違いは

ほとんど見られず、bunch population が  $1.5 \times 10^{11}$  (バンチ電流で約 20.6 mA/bunch) までは microwave instability (MWI) も見られない。

Bunch population に対する垂直方向チューンシフトの虚部を Fig. 4 に示す。0 モード ( $\nu_y$ ) と -1 モード ( $\nu_y - \nu_s$ ) が結合し、transverse mode coupling instability (TMCI) が起きる閾値はコーティングなしの場合で約  $6.0 \times 10^{10}$  (約 8.2 mA/bunch)、緻密 Pd コーティングおよび TiZrV コーティングの場合で約  $3.5 \times 10^{10}$  (約 4.8 mA/bunch) であった。

### 3.2 FCC-ee

膜厚  $1 \mu\text{m}$  のコーティングありの場合について、RW による縦方向 wake potential ( $\sigma_z = 0.5 \text{ mm}$ ) を PyHEADTAIL に入力し、FCC-ee における単バンチ不安定性のシミュレーションを行った。シミュレーションに使用した主要なパラメータを Table 5 に示す。これらパラメータは文献[3, 7]を参照した。

Bunch population に対する RMS バンチ長と RMS エネルギー Spredd を Fig. 5 に示す。ここでの TiZrV コーティングにおけるバンチ長およびエネルギー Spredd を文献[7]と比べると、これらの計算結果はよく一致していることがわかる。MWI の閾値は TiZrV および緻密 Pd コーティングにおいてそれぞれ約  $6.0 \times 10^{10}$ 、 $1.4 \times 10^{11}$  であり、同じ膜厚であれば緻密 Pd コーティングを施すことによりその閾値を約 2.3 倍上げることができ、不安定性を緩和できる可能性がある。

## 4. まとめ

低 PSD 表面を得るための表面処理技術として加速器の将来計画への適用が期待される緻密 Pd コーティングと、従来型の TiZrV コーティングの RW インピーダンスを IW2D による計算により比較評価した。緻密 Pd コーティ

Table 5: Main Parameters of FCC-ee for the PyHEADTAIL Simulation

Energy [GeV]	45.6
Circumference [km]	97.75
RF frequency [MHz]	400.0
Momentum compaction	$1.48 \times 10^{-5}$
Energy spread	$3.8 \times 10^{-2}$
Energy loss [GeV/turn]	0.036
Normalized emittance, $\epsilon_x/\epsilon_y$ [ $\mu\text{m}/\text{nm}$ ]	24.1/89.2
Betatron tune, $\nu_x/\nu_y$	269.138/269.22
Damping time, $\tau_z$ [turns]	1281
Number of turns	25000
Number of macroparticles	$1 \times 10^6$

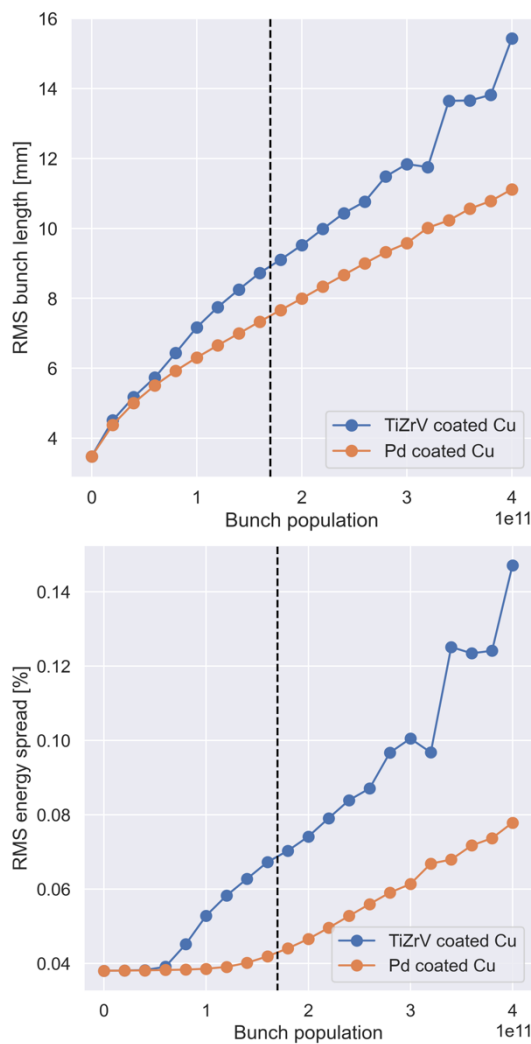


Figure 5: RMS bunch length (top side) and RMS energy spread (bottom side) as a function of the bunch population obtained by the PyHEADTAIL with only the RW impedance in FCC-ee.

ングは TiZrV コーティングと比べて inductance の小さい表面が得られることがわかった。また、緻密 Pd コーティングの採用が期待される将来加速器計画として Hybrid Ring と FCC-ee を着目し、上記で得られた wake potential を用いて PyHEADTAIL により各計画における単バンチ不安定性のシミュレーションを行った。

Hybrid Ring について、今回シミュレーションした bunch population の範囲内では緻密 Pd コーティングの採用による優位性を見つけることはできなかった。なお、Hybrid Ring の設計は現在進行形であるため、加速器の各種パラメータやビームパイプの形状および寸法などは今後も変更を受ける可能性はある。

FCC-ee についてはその周長故にコーティングがビーム不安定性へ及ぼす影響が大きく、同じ膜圧  $1 \mu\text{m}$  で比較すると、TiZrV コーティングと比べて緻密 Pd コーティングは MWI のバンチ電流閾値を大幅に緩和することができ、緻密 Pd コーティングに優位性があることがわかった。しかし、この閾値でも nominal な bunch population を下回っているため、さらに閾値を上げるためには膜圧を薄くする必要があるだろう。FCC-ee についてもその設計は現在進行形であるため、各種パラメータなどは今後も変更を受ける可能性がある。

また、今回の単バンチ不安定性シミュレーションでは、そこで使用されるであろう標準的なビームパイプに関する RW インピーダンスのみを使用した。より詳細には円形加速器内に設置されるすべての機器について RW および geometrical インピーダンスを計算し、これを使って不安定性のシミュレーションを行う必要がある。

## 参考文献

- [1] X. Jin *et al.*, “Stimulated gas desorption from TiZrV, Ag and Pd coating films in response to synchrotron radiation”, *Vacuum*, vol. 207, 2023, 111671. doi:10.1016/j.vacuum.2022.111671
- [2] X. Jin *et al.*, “Development of highly durable Pd coatings with ultra-low photon-stimulated desorption and low resistivity values”, *Vacuum*, vol. 215, 2023, 112370. doi:10.1016/j.vacuum.2023.112370
- [3] K. Harada *et al.*, “Conceptual design of the Hybrid Ring with superconducting linac”, *J. Synchrotron Rad.*, vol. 29, 2022, pp. 118-124. doi:10.1107/S1600577521012753
- [4] A. Abada *et al.*, “FCC-ee: The Lepton Collider”, *Eur. Phys. J. Special Topics*, vol. 228, 2019, pp. 261-623. doi:10.1140/epjst/e2019-900045-4
- [5] IW2D, <https://gitlab.cern.ch/IRIS/IW2D>
- [6] K. Bane *et al.*, “A design report of the baseline for PEP-X: an ultra-low emittance storage ring”, SLAC-PUB-13999. <https://www.slac.stanford.edu/pubs/slacpubs/13750/slac-pub-13999.pdf>
- [7] E. Belli *et al.*, “Electron cloud buildup and impedance effects on beam dynamics in the Future Circular e+e- Collider and experimental characterization of thin TiZrV vacuum chamber coatings”, *Phys. Rev. Accel. Beams*, vol. 21, 2018, 111002. doi:10.1103/PhysRevAccelBeams.21.111002
- [8] A. Oeftiger, “An Overview of PyHEADTAIL”, CERN-ACC-NOTE-2019-0013.

<https://cds.cern.ch/record/2672381/files/CERN-ACC-NOTE-2019-0013.pdf?subformat=pdfa&version=1>

[9] PyHEADTAIL,  
<https://github.com/PyCOMPLETE/PyHEADTAIL>