

NEG コーティング電気伝導度の真空パイプインピーダンスへの影響

EFFECTS OF NEG-COATING ELECTRIC CONDUCTIVITY ON VACUUM-PIPE IMPEDANCE

中村典雄 #

Norio Nakamura #

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

NEG-coated vacuum pipes are being used worldwide to improve the vacuum performance of accelerators including synchrotron light sources, and their use is also being considered for the next-generation light source at KEK. Since there are many types of NEG coatings due to their composition and morphology, and their electric conductivity varies widely as the vacuum performance differs from each other, it is necessary to consider not only the vacuum performance but also the impedance of the vacuum pipe when selecting NEG coatings. In this paper, the impedances of NEG-coated vacuum pipes are calculated over a wide range of electric conductivity of NEG coating and the loss and kick factors related to heat generation and beam instability are evaluated using the impedances. In addition, the effect of the bunch length of the electron beam and the thickness of the NEG coating are also described.

1. はじめに

NEG コーティングされた真空パイプは放射光源を含む加速器の真空性能向上を目的として世界的に使用されつつあり、KEK の次期放射光源リング[1, 2]でもその利用が検討されている。NEG は真空パイプの金属よりも電気伝導度が一般的に悪いので、NEG コーティング真空パイプのインピーダンスによる発熱やビーム不安定性などへの影響について評価が行われてきた[3, 4]。しかし、NEG はその組成及び内部構造の違いから多くの種類があり、真空性能に違いがあると同時にその電気伝導度も大きく異なる[5, 6]。そのために、NEG コーティングの選定には真空性能とともに真空パイプとビームの結合インピーダンスを広い電気伝導度の範囲で評価する必要がある。本発表では、広範囲に及ぶ NEG の電気伝導度に対して NEG コーティング真空パイプのインピーダンスを計算し、発熱やビーム不安定性と関係するロスファクターやキックファクターを評価する。また、電子ビームのパンチ長や NEG コーティング厚の影響についても述べる。

2. インピーダンスの計算方法

インピーダンスの評価には簡単のために円形の真空パイプを考え、パイプ金属の内面に NEG コーティングを行ったパイプのインピーダンスを求めて電気伝導度の影響を調べる。NEG コーティングされた円形真空パイプの縦方向抵抗性インピーダンス Z_l は、次のように表せる[7]。

$$Z_l(\omega) = \frac{-iL}{2\pi\epsilon_0 bc \left\{ \left(\frac{\omega}{c\lambda_1} + \frac{c\lambda_1}{\omega} \right) \alpha_l - \frac{b\omega}{2c} \right\}} \quad (1)$$

$$\alpha_l = \frac{\left(\frac{\omega}{c\lambda_1} + \frac{c\lambda_1}{\omega} \right) c_0 H_0^{(1)}(\lambda_2(b+d)) + \left(\frac{\omega}{c\lambda_2} + \frac{c\lambda_2}{\omega} \right) c_1 H_1^{(1)}(\lambda_2(b+d))}{\left(\frac{\omega}{c\lambda_1} + \frac{c\lambda_1}{\omega} \right) d_0 H_0^{(1)}(\lambda_2(b+d)) + \left(\frac{\omega}{c\lambda_2} + \frac{c\lambda_2}{\omega} \right) d_1 H_1^{(1)}(\lambda_2(b+d))} \quad (2)$$

$$\lambda_{1,2} = \frac{i + \text{sgn}(\omega)}{\delta_{1,2}}, \quad \delta_{1,2} = \sqrt{\frac{2}{\sigma_{1,2}\mu_0|\omega|}} \quad (3)$$

$$C_0 = -J_1(\lambda_1 b)N_1(\lambda_1(b+d)) + N_1(\lambda_1 b)J_1(\lambda_1(b+d)) \quad (4)$$

$$C_1 = J_1(\lambda_1 b)N_0(\lambda_1(b+d)) - N_1(\lambda_1 b)J_0(\lambda_1(b+d)) \quad (5)$$

$$D_0 = -J_0(\lambda_1 b)N_1(\lambda_1(b+d)) + N_0(\lambda_1 b)J_1(\lambda_1(b+d)) \quad (6)$$

$$D_1 = J_0(\lambda_1 b)N_0(\lambda_1(b+d)) - N_0(\lambda_1 b)J_0(\lambda_1(b+d)) \quad (7)$$

ここで、 $b, d, L, \sigma_{1,2}, \delta_{1,2}$ は、それぞれパイプ半径(内径)、内層(NEG コーティング)の厚み、パイプの長さ、内層・外層(パイプ金属)の電気伝導度と表皮厚(skin depth)である。また、外層の厚みは無限に大きいとしている。 $\epsilon_0, \mu_0, c, \omega, i$ は、それぞれ真空の誘電率と透磁率、光速、角周波数、虚数単位で、 J_0, J_1, N_0, N_1 は 0 次と 1 次の第 1 種、第 2 種のベッセル関数で、 $H_0^{(1)}, H_1^{(1)}$ は 0 次と 1 次の第 1 種ハンケル関数である。

縦方向と同様に、横方向抵抗性インピーダンスも解析的な式を求めることができる。高周波領域での計算上の問題とその解決手法については参考文献[3, 4]に書かれている。いずれにしても、全周波数領域で縦・横方向のインピーダンスを求めることができる。

3. 電気伝導度のインピーダンスへの影響

前章で述べたように、真空パイプとしては円形を考える。また、パイプ金属はアルミニウム(電気伝導度: $\sigma_2 = \sigma_{Al} = 3.5 \times 10^7$ S/m)とし、パイプの内半径として典型的な挿入光源用チェンバーの狭い垂直アパーチャを考慮して 4 mm (直径 8 mm) を仮定した。NEG コーティングの電気伝導度として、 $\sigma_1 = \sigma_{NEG} = 10^4, 5 \times 10^4, 10^5, 5 \times 10^5, 10^6, 5 \times 10^6, 10^7$ S/m の 7 つの値に対してインピーダンスを計算した。厚み $d = d_{NEG}$ の依存性を見るために、 $0.5 \mu\text{m}$ と $1 \mu\text{m}$ の 2 つの場合を考えた。さらに、ロスファ

norio.nakamura@kek.jp

クターやキックファクターでは、ビームのバンチ長の影響を調べるために、 $\sigma_t = 5, 10, 15$ ps の 3 つの場合について計算した。

3.1 縦方向インピーダンスとロスファクター

前述した NEG コーティング円形パイプのインピーダンス計算方法から求めたコーティング厚 $0.5 \mu\text{m}$ と $1 \mu\text{m}$ の場合の縦方向インピーダンスを Fig. 1 及び Fig. 2 に示す。NEG コーティングの電気伝導度として $\sigma_{\text{NEG}} = 10^4, 5 \times 10^4, 10^5, 5 \times 10^5, 10^6, 5 \times 10^6, 10^7$ S/m の 7 つの値に対してインピーダンスの実部と虚部をそれぞれ同じ図に示している。

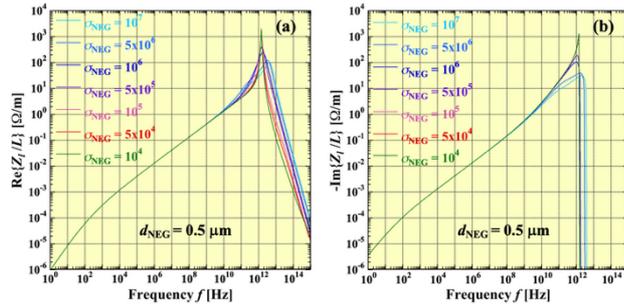


Figure 1: (a) Real and (b) imaginary parts of longitudinal resistive-wall impedances per unit length for NEG-coated Al pipes ($b = 4$ mm) with coating thickness of $0.5 \mu\text{m}$ for various electric conductivities. The unit of NEG electric conductivity σ_{NEG} in the legend is S/m.

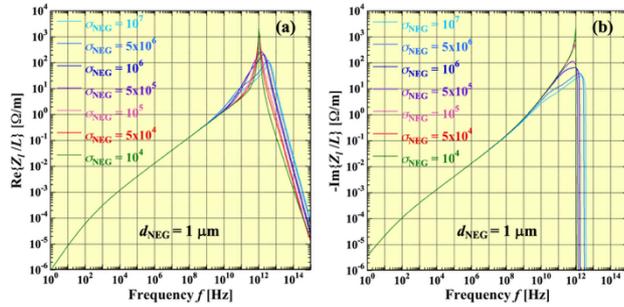


Figure 2: (a) Real and (b) imaginary parts of longitudinal resistive-wall impedances per unit length for NEG-coated Al pipes ($b = 4$ mm) with coating thickness of $1 \mu\text{m}$ for various electric conductivities. The unit of NEG electric conductivity σ_{NEG} in the legend is S/m.

上の 2 つの図 (Fig. 1 と Fig. 2) からわかるように、実部でも虚部でも低周波領域ではパイプ金属の材料であるアルミニウムと同じインピーダンスになってほぼ重なる。また、周波数が上がると、NEG 電気伝導度の高いものから順により低周波で盛り上がり始める。さらに周波数が上がると NEG 電気伝導度の低いパイプのインピーダンスが高いパイプのインピーダンスを追い越してより高いピークを持つ。これは、非常に低周波ではアルミニウムがインピーダンスでは支配的であるが、周波数が上がってくると NEG コーティングの寄与が相対的に大きくなるためである。まずは高い電気伝導度の NEG コーティングを持つパイプのインピーダンスが上がり、その後には低い電気伝導度を持つ NEG コーティングを持つパイプのインピー

ダンスが上がり、インピーダンスが逆転する。実部と虚部を比較すると、虚部の方が盛り上がる周波数がより低く、低い電気伝導度と高い電気伝導度の NEG コーティングを持つパイプのインピーダンスが逆転する周波数もより低くなることに注目しておく必要がある。また、Fig. 1 と Fig. 2 を比較すると、NEG コーティング厚が $0.5 \mu\text{m}$ から $1 \mu\text{m}$ に増えることで実部でも虚部でもインピーダンスの盛り上がり始める周波数がより低くなることもわかる。これは、NEG コーティング厚が厚いとコーティング厚と表皮の厚さ (skin depth) が同じになる周波数がより低くなることから理解できる。

ロスファクター k_{loss} はインピーダンスによる電子バンチのエネルギー損失のし易さを表す係数で、最終的にこれらのエネルギーはパイプでの発熱につながる。バンチ長 σ_t のガウス分布形状の場合、ロスファクターは次のような周波数 f の積分で定義される。

$$k_{\text{loss}} = 2 \int_0^{\infty} \text{Re}[Z_l] e^{-(2\pi f \sigma_t)^2} df \quad (8)$$

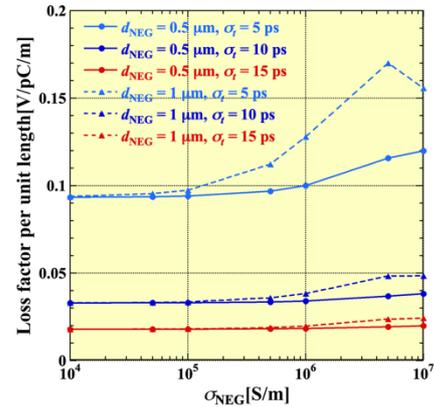


Figure 3: Loss factor per unit length of the vacuum pipe as a function of the electric conductivity for the coating thicknesses of 0.5 and $1 \mu\text{m}$ and the bunch lengths of 5 , 10 and 15 ps.

Figure 3 は、Fig. 1a と Fig. 2a で示したインピーダンスの実部と Eq. (8) を使って計算した単位長さあたりのロスファクターを NEG の電気伝導度の関数としてプロットしたものである。コーティング厚 $d_{\text{NEG}} = 0.5 \mu\text{m}$ の場合、バンチ長 10 ps と 15 ps では電気伝導度が 10^4 から 10^7 S/m までほとんど変化はない。また、バンチ長 5 ps でも 10^4 から 10^6 S/m の電気伝導度でほとんど差はなく、 10^7 S/m まで大きくても 20% 程度の増加にとどまった。これは、NEG によるインピーダンスの高周波での増加をバンチ長とバンチ形状によるローパスフィルターによって抑えられることによる。高い電気伝導度の NEG を持つパイプでロスファクターが上がって発熱しやすくなるのは、より低周波数からインピーダンスが盛り上がるためにローパスフィルターの影響を受けにくい成分が相対的に大きくなるためである。現状で想定される NEG の電気伝導度は 10^4 から 10^6 S/m の範囲なので、NEG の厚みが $0.5 \mu\text{m}$ 程度であれば、ロスファクターに関して電気伝導度による差はほとんどないと言える。NEG の厚みが $1 \mu\text{m}$ の場合、ロス

ファクターは低い電気伝導度の NEG ではロスファクターが $0.5 \mu\text{m}$ の場合と変わらないが、NEG の電気伝導度が高くなると $0.5 \mu\text{m}$ の場合よりも増加が大きくなる。これはインピーダンスが $0.5 \mu\text{m}$ と比べて相対的により低周波から盛り上がるためである。それでも電気伝導度を 10^4 から 10^6 S/m の範囲に限定すると、バンチ長 10 ps と 15 ps ではかなり小さな増加にとどまり、バンチ長 5 ps でも最大で 30% 程度であることがわかる。

3.2 横方向インピーダンスとキックファクター

NEG コーティング厚 $0.5 \mu\text{m}$ と $1 \mu\text{m}$ の場合の横方向インピーダンスを Fig. 4 及び Fig. 5 に示す。NEG コーティングの電気伝導度として $\sigma_{\text{NEG}} = 10^4, 5 \times 10^4, 10^5, 5 \times 10^5, 10^6, 5 \times 10^6, 10^7 \text{ S/m}$ の 7 つの値に対してインピーダンスの実部と虚部をそれぞれ同じ図に示している。

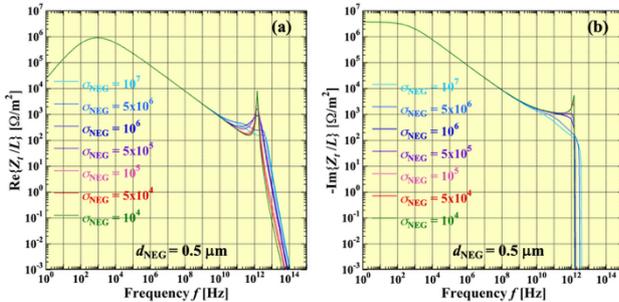


Figure 4: (a) Real and (b) imaginary parts of transverse resistive-wall impedances per unit length for NEG-coated Al pipes ($b = 4 \text{ mm}$) with coating thickness of $0.5 \mu\text{m}$ for various electric conductivities. The unit of NEG electric conductivity σ_{NEG} in the legend is S/m .

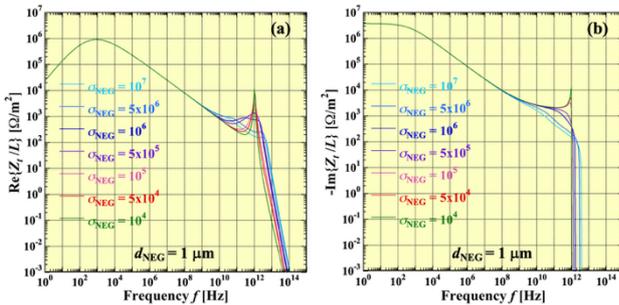


Figure 5: (a) Real and (b) imaginary parts of transverse resistive-wall impedances per unit length for NEG-coated Al pipes ($b = 4 \text{ mm}$) with coating thickness of $1 \mu\text{m}$ for various electric conductivities. The unit of NEG electric conductivity σ_{NEG} in the legend is S/m .

これらの図から、縦方向インピーダンスと同様に実部でも虚部でも低周波領域ではアルミニウムパイプと同じインピーダンスになって重なっているが、周波数が上がると、NEG 電気伝導度の高いパイプからインピーダンスが盛り上がり始め、さらに周波数が上がると NEG 電気伝導度の低いパイプのインピーダンスが追い越してより高いピークあるいは盛り上がりを持つ。また、虚部の方が盛り上がる周波数がより低く、高い電気伝導度と低い電気伝導度の NEG コーティングを持つパイプのインピーダンスが逆転する周波数もより低くなる。さらに、Fig. 4 と Fig. 5 を比較

することで、NEG コーティング厚が $0.5 \mu\text{m}$ から $1 \mu\text{m}$ に増えることで、盛り上がり始める周波数がより低周波数になることもわかる。

キックファクター k_{kick} は横方向のコヒーレントチューンシフトを生み、横方向モードカップリングビーム不安定性 (TMCI: Transverse Mode-Coupling Instability) のバンチ電流閾値と関係するパラメータで、バンチ長 σ_t のガウス分布のバンチ形状の場合には、次のように横方向インピーダンスの虚部をバンチ長とバンチ形状を考慮した結合インピーダンスの周波数 f の積分で定義される。

$$k_{\text{kick}} = -2 \int_0^{\infty} \text{Im}[Z_t] e^{-(2\pi f \sigma_t)^2} df \quad (9)$$

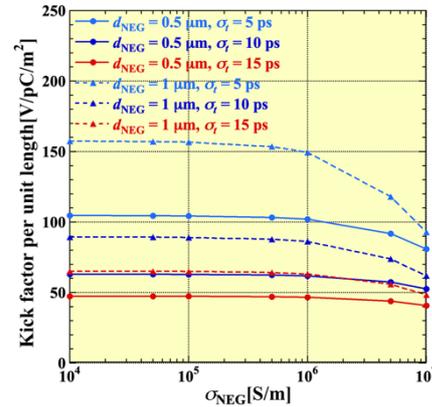


Figure 6: Kick factor per unit length of the vacuum pipe as a function of the electric conductivity for the coating thicknesses of 0.5 and $1 \mu\text{m}$ and the bunch lengths of 5 , 10 and 15 ps .

Figure 6 は、Fig. 4b と Fig. 5b で示したインピーダンスの虚部と Eq. (9) を使って計算した単位長さあたりのキックファクターを NEG の電気伝導度の関数としてプロットしたものである。コーティング厚 $d_{\text{NEG}} = 0.5 \mu\text{m}$ の場合、バンチ長 10 ps と 15 ps では電気伝導度が 10^4 から 10^6 S/m までほとんど変化はなく、バンチ長 5 ps でも大きな差はないことがわかる。これは、高周波領域でのインピーダンスの増加がバンチ長とバンチ形状によるローパスフィルターによって抑えられてしまうためである。ただし、 10^6 S/m 以上の高い NEG 電気伝導度ではやや下がり始める。キックファクターを決めるインピーダンスの虚部では前述したように高い電気伝導度と低い電気伝導度の NEG コーティングを持つパイプのインピーダンスが逆転する周波数が実部よりも低くなる。そのためにその逆転する周波数とローパスフィルターの遮断周波数との関係が変わってキックファクターはロスファクターの場合とは逆に電気伝導度が上がると下がる。現状で考えられる NEG の電気伝導度 ($10^4 \sim 10^6 \text{ S/m}$) では、NEG の厚みが $0.5 \mu\text{m}$ であれば、キックファクターに関して電気伝導度による差はほとんどない。NEG の厚みが $1 \mu\text{m}$ になると、電気伝導度に関わらずキックファクターは相対的に大きくなり、高い電気伝導度でのキックファクターの減少度も大きくなる。これは虚部の盛り上がり方が NEG 厚 $1 \mu\text{m}$ の場合により低周波で起こるためである。

4. まとめ

NEG コーティングの電気伝導度を大きく変えて、NEG コーティング真空パイプ(アルミニウム製)のインピーダンスの計算を行い、電気伝導度依存性やコーティング厚依存性を調べた。また、電気伝導度やコーティング厚以外にバンチ長も変えてロスファクターやキックファクターへの影響を調べた。下記にその結果をまとめる。

- 縦・横方向インピーダンスは共に周波数が上がると、NEG 電気伝導度の高いパイプから順により低周波でインピーダンスが上がり始め、さらに周波数が上がると NEG 電気伝導度の低いパイプのインピーダンスが追いついてより高いピークあるいは盛り上がりが高周波領域を持つ。
- インピーダンスの虚部が実部よりも盛り上がる周波数が低く、高い電気伝導度と低い電気伝導度の NEG コーティングを持つパイプのインピーダンスが逆転する周波数が相対的により低くなる。
- そのために、縦方向結合インピーダンスの実部と関係するロスファクターでは高い電気伝導度でバンチ長やコーティング厚に依存して増加するが、横方向結合インピーダンスの虚部と関係するキックファクターでは逆に減少する。
- ただし、現状で考えられる NEG の電気伝導度の範囲($10^4 \sim 10^6$ S/m)で、NEG の厚みが $0.5 \mu\text{m}$ であれば、ロスファクターに関して電気伝導度による差はほとんどない。NEG 厚が $1 \mu\text{m}$ でも低い電気伝導度では $0.5 \mu\text{m}$ とほとんど差がなく、高い電気伝導度でも 10-15 ps では大きな差はなかった。
- また、 $10^4 \sim 10^6$ S/m の NEG の電気伝導度では、NEG の厚みが $0.5 \mu\text{m}$ であれば、キックファクターに関して電気伝導度による差はほとんどない。NEG

の厚みが $1 \mu\text{m}$ ではキックファクターは増加し、高い電気伝導度で減少の勾配も大きくなる。

謝辞

PF 光源のビームダイナミクスグループ及び真空グループのメンバーとは打ち合わせ等で有益な議論やコメントをいただきました。この場を借りて感謝します。

参考文献

- [1] K. Harada *et al.*, "Conceptual design of the Hybrid Ring with superconducting linac", J. Synchrotron Rad. **29**, 118-124 (2022).
- [2] Photon Factory Hybrid Light Source (PF-HLS) Conceptual Design Report (CDR) ver. 1 (2024).
<https://www.euvlitho.com/2019/S1.pdf>
- [3] N. Nakamura, "Impedance analysis of NEG-coated vacuum pipes and its application to the PF-HLS ring", Proc. PASJ2024, Yamagata, Japan, Jul. 31-Aug. 3, 2025, pp. 804-808.
- [4] N. Nakamura, "Resistive-wall impedance calculations and effects of NEG coated insertion device vacuum pipes for the PF-HLS ring", Proc. ipac2025, Taipei, Taiwan, Jun. 1-6, 2025, pp. 2149-2152.
- [5] O. B. Malyshev *et al.*, "RF surface resistance study of non-evaporable getter coatings", Nucl. Instrum. Methods A **844**, 99-107 (2017).
- [6] O. B. Malyshev, "A progress in development of non-evaporable getter coating in UK", KEK Accelerator Seminar, Tsukuba, Japan, Mar. 6, 2025.
- [7] N. Nakamura, "Resistive-wall impedance effects for the new KEK light source", J. Phys.: Conf. Ser. **874**, 012069 (2017).