「加速器」Vol. 6, No. 4, 2009（355–358）

会議報告

AEC ’09（anti e-cloud coating workshop）報告

Mauro PIVI*1・柴田　恭*2

Report on AEC ’09

Mauro PIVI and Kyo SHIBATA

1. はじめに

近年及び将来の陽子や陽電子加速器では，真空ダクト内に発生する電子雲が引き起こすビーム不安定性，いわゆる電子雲不安定性（Electron Cloud Instability, ECI）を抑制することが，ますます重要な課題になっている．この電子雲の発生を抑えるためには，ビームダクト内表面に二次電子放出率（Secondary Electron Yield, SEY）を下げる特殊なコーティングを施すことが有効であり，現在様々な研究所でコーティングに関する研究が行われている．

2009 年 10 月 12–13 日の 2 日間，Anti e-cloud coating workshop（AEC ’09）と銘打ったワークショップがスイスの CERN で開催され，各所で行われているコーティング研究に関する報告及び意見交換が行われた．以下，まず M. Pivi がワークショップの概要を紹介し，引き続いて柴田が特に多くの時間をかけて議論された炭素コーティングと TiN コーティングについてより詳細に報告する．本ワークショップの詳細については WEB サイトを参照されたい[1)]．

2. ワークショップの概要

The workshop topic was on anti electron-cloud coatings that do not require activation. Workshop focus included: motivation and requirements on coatings (secondary emission yields etc), future plans, production and characterization of coatings, vacuum and impedance properties, beam measurements with & w/o coatings.

In particular, the workshop concentrates on possible remedies for the electron cloud in the CERN SPS injector of LHC. An electron cloud in the SPS may seriously limit the luminosity performances of the LHC. A tremendous progress has been achieved lately in the field of electron cloud mitigations.

Fig. 1　A session in the workshop.

Reports from various laboratories on TiN coating showed mixed results. Experiences at PEP–II SLAC and KEKB show that TiN coating is a viable choice to mitigate electron cloud in positron machines, while reports from proton machines, as the spallation neutron sources SNS at OakRidge and PSR at Los Alamos, show that TiN not always reduces the electron cloud as expected.

Amorphous carbon is a promising novel coating that has a stable secondary emission yield below unity as

*1 SLAC National Accelerator Laboratory
（E-mail: mpivi@slac.stanford.edu）
*2 高エネルギー加速器研究機構　KEK
（E-mail: kyo.shibata@kek.jp）

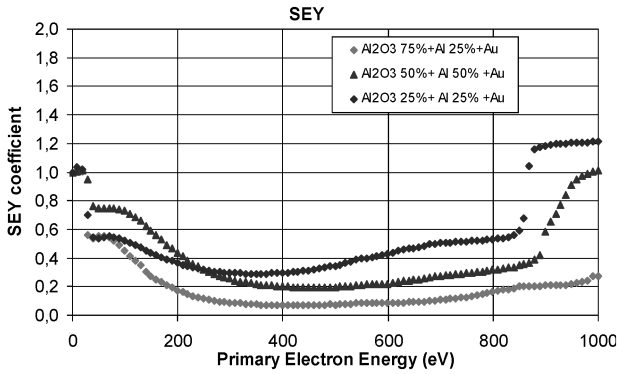

Fig. 2 Extreme reduction of secondary electron yield by metallic and dielectric micro-particle Al and Al_2O_3 coatings. Courtesy of I. Montero ICMM Madrid, Spain.

measured at CERN. For this reason, coating of a large fraction of the CERN SPS with amorphous carbon is under consideration for the next machine upgrade phase. In CesrTA at Cornell University, amorphous carbon has been tested with very promising results and monitoring is underway to estimate its impact on dynamic vacuum.

Metallic and dielectric Al/Al_2O_3 micro-particles coatings showed an extreme reduction of the SEY well below unity at studies performed at ICMM Madrid (**Fig. 2**). Besides coating, other techniques as grooves and clearing electrodes have shown a reduction of order of magnitude in the electron cloud effect in experimental tests in particle accelerators and are now a consolidated choice for future machines as the Damping Rings of future Linear Colliders ILC and CLIC or the SuperB factories.

3. 炭素コーティング

本ワークショップを主催したCERNでは，炭素コーティングの研究が盛んに行われており，発表件数も炭素コーティングに関するものが一番多かった．

CERNではLarge Hadron Collider (LHC) のアップグレードに向けてインジェクター群の改造計画が進められているが，その中の一つであるSuper Proton Synchrotron (SPS) では電子雲対策が必要不可欠であると考えられている．と言うのも，SPSでは現在でも

- 圧力上昇
- ビームロス
- エミッタンスの増大

といった電子雲の影響とみられる現象が観測されており，電子雲がその性能を制限している一因と考えられているからである．SPSの電子雲対策が満たすべき条件としては，

- 偏向電磁石内にある既存のステンレス製ビームダクト（約6 m）に，磁石を外すことなく施工可能なこと
- ダクトのアパーチャーを減少させないこと
- 120度以上のベーキングが必要ないこと
- 活性化が不必要なこと
- 大気に曝しても性能が劣化しないこと
- インピーダンスが低いこと
- 長期間にわたって安定であること
- 真空特性が良いこと(ガス放出率が十分小さいこと)

等が挙げられる．これらの条件を満たす電子雲対策の候補として，CERNでは非晶質炭素（amorphous carbon, a–C）コーティングを有力視しており，これまでに様々な研究が行われてきた．SEYを下げるコーティングとしては，他にもNEG (non-evaporable getter) コーティングやTiNコーティングが有名だが，CERNが中でもa–Cコーティングに着目した理由の一つに「大気に曝しても性能が劣化しないこと」があるようだ．各コーティング面ともSEYの最大値（δ_{max}）は真空中で電子を照射され続けると減少し（エージング効果），いずれδ_{max}は1.0以下となることが知られている．しかし，その後コーティング面を大気に曝すと，エージング効果は失われてしまい，δ_{max}は1.0以上に戻ってしまう．SPSでは$\delta_{max}<1.3$で電子雲の影響が観測されなくなるのだが，実験では大気暴露直後に$\delta_{max}<1.3$を満たすのはa–Cコーティングだけであった．

SPSには既にa–Cコーティングされた試験ダクトがインストールされており，ビーム運転中のダクト内の電子雲測定も行われている．コーティング無しの無垢のステンレスダクトと比較すると，a–Cコーティングの効果は明らかで，a–Cコーティングが電子雲低減に非常に有効であることが示された．

次にコーティングの方法であるが，a–CコーティングはDCマグネトロンスパッタリング法で行われている．これはNEGやTiNのコーティングでも用いられている一般的な方法で，十分なNEGコーティングの経験があるCERNにとっては，一見それほど難しいことではないように感じられる．しかし，今回のダクトは長い偏向電磁石に入ったままコーティングする必要があり，このため従来のコーティング装置を流用することは不可能であった．そこで，a–Cコーティン

グのための新たな装置が開発された．新しいコーティング装置の特徴は，

- 偏向電磁石の磁場を利用する（NEG コーティングではソレノイドコイルを使用）
- ダクトは横置きにする（NEG コーティングでは縦置き）
- ダクト（断面形状が横長の長方形）内の両脇に炭素ターゲットを設置する（NEG コーティングではターゲットをダクト中心軸上に設置）

等であろう．この装置の問題点は，炭素膜の厚さが不均一になってしまうという点である．最初はダクトの中心軸上に炭素ターゲットを設置したのだがそれではうまくいかず，現在のようにダクトの左右の壁面近くに炭素ターゲットを置く形になった（**Fig. 3**）．しかしこの場合，ターゲットからダクト内面までの距離によって炭素膜の厚さに大きな違いが生じてしまう．現在のところ，ターゲットから離れたダクト中心部に 200 nm のコーティングをした場合，ターゲットに近い所のコーティングの厚さは 1500 nm 程度になるとのことである．コーティング時間の短縮とともに，この点は今後改善するべき点であろう．

その他に，コーティングダクトのインストール方法に関する報告もあった．周長 6.9 km の SPS のビームダクトに a–C コーティングを施す方法として

- トンネル内の現場でコーティング
- 数か所ある地下ワークショップでコーティング
- 地上のワークショップでコーティング

の 3 つの方法が提案されている．もちろん作業は地上でやるのが一番やり易いのだが，ダクトの運搬のことを考えると地下でのコーティングという選択肢も検討する必要があるとのことである．

SPS では早ければ 2013 年から a–C コーティングダクトのインストールを予定しており，今後も a–C コーティングの研究が精力的に進められていくと思われる．

4. TiN コーティング

TiN コーティングは，すでにいくつかの加速器で採用されており，またいくつかの加速器には R&D として試験ダクトがインストールされている．今回のワークショップでは

- KEK : KEKB，陽電子
- SLAC National Accelerator Laboratory（SLAC）: PEP–II，陽電子
- Cornell 大学 : Cesr Test Accelerator（CesrTA），陽電子

Fig. 3 Tour of a-C coating facility at CER. A carbon electrode can be seen in the fore hand.

- Fermi National Accelerator Laboratory（FNAL）: Tevatron の Main Injector（MI），陽子
- Oak Rigde National Laboratory（ORNL）: Spallation Neutron Source（SNS），陽子

で行われたビームを使った試験結果についての報告があった．それぞれの結果を以下にまとめて報告する．

非常に興味深いことに TiN の効果は各所で異なっており，まとめると，

- 効果あり : KEKB, PEP–II, MI
- 少し効果あり : CesrTA
- ほとんど効果なし : SNS

となっている．

まず，効果のあった KEKB の場合を見てみよう．KEKB は周長約 3 km の電子と陽電子のダブルリングコライダーで，電子雲関連の R&D は 3.5 GeV の陽電子リングで行われている．陽電子リング内の同じ場所に，TiN コーティングを施した銅ダクト（以下 TiN コーティングダクト）とコーティング無しの銅ダクト（以下 Cu ダクト）を入れて，ダクト内の電子雲をそれぞれ測定したところ，TiN コーティングダクト内の電子雲密度は，Cu ダクト内よりも減少することが確認された．また，実験室での SEY 測定では，電子（250 eV）を 0.01 C/mm^2 照射した場合の TiN コーティングした銅の δ_{max} は，0.84 まで減少していることが分かった．同条件下でのコーティング無しの銅の δ_{max} は 1.3 程度であり，この結果からも TiN コーティングが電子雲対策として効果的であることが分かる．KEKB の同じ場所では他にも NEG や DLC コーティングされたダクトが試験されているが，今のところ TiN が最も効果的であるという結果が得られている．

KEKBと同様の加速器であるPEP-IIでは，アルミダクトにTiNコーティングしたものが長年使用されており，こちらでもTiNコーティングの効果が確認されている．

CesrTA（周長：768 m，エネルギー：2.5–5 GeV）は，International Linear Collider（ILC）のDamping Ring（DR）のテストファシリティとして利用されており，ここでも電子雲関連の様々なR&Dが行われている．ここにはa–Cコーティングダクトや TiNコーティングダクトがインストールされており，今回のワークショップで試験結果の報告があった．まだ暫定的な結果ではあるが，このリングではTiNコーティングの効果はそれほど顕著ではなく，a–Cコーティングダクト内の方が電子雲は少なくなっていることが示された．ただ，2つの試験ダクトはリングの違う場所に設置されており，放射光等の実験条件は異なっている．今後はダクトを入れ替えて更に同様の測定を続けるとのことである．

一方，SNSからはTiNの電子雲低減効果がほとんど得られていないという（筆者にとっては）ショッキングな報告がなされた．SNSは周長248 m，エネルギー1 GeVの陽子蓄積リングであるが，電子雲対策としてほぼ全て（95.4%）のステンレス製真空ダクトにTiNがコーティングされている．（コーティングはBrookhaven National Laboratory（BNL）で実施された．）シミュレーションでは目標ビーム強度（1.5×10^{14} ppp）の130%までは電子雲不安定性は発生しないと予想されていたが，実際には20%のビーム強度で電子雲による不安定性が確認されたとのことである．しかも，これまで約3年間運転しているが，ビームによるエージング効果もほとんど確認されていない．ORNLでは約34万ドルをかけて新しいTiNコーティング装置を購入することを検討していたが，このままTiNの効果が確認できなければ今後見直しされる可能性もあるとのことであった．

この様に，TiNの効果はリングによって様々であり，何故この様な違いが生じるかについての議論が行われたが，結論には至らなかった．今後TiNコーティングの採用を予定している加速器では，その有効性に対する慎重な検討が必要となるだろう．

参考文献

1） AEC ’09 workshop website: http://indico.cern.ch/conferenceDisplay.py?confId=62873