

蓄積リング高周波空洞用導波管真空封止窓の開発 DEVELOPMENTS OF A WAVEGUIDE-TYPE VACUUM WINDOW FOR RF CAVITIES OF A STORAGE RING

山口博史^{A)}, 稲垣隆宏^{B)}, 安積隆夫^{A)}, 早賀紀久男^{C)}, 森本理^{C)}

Hiroshi Yamaguchi^{A)}, Takahiro Inagaki^{B)}, Takao Asaka^{A)}, Kikuo Hayaga^{C)}, Osamu Morimoto^{C)}

^{A)}Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

^{B)}RIKEN SPring-8 Center

^{C)}SPring-8 Service Co., Ltd. (SES)

Abstract

We develop a HOM-damping cavity in accelerator facilities with a next-generation synchrotron light source. A waveguide-type ceramic vacuum window is also developed. During the cavity operation, RF injection to the cavity is frequently down due to overheating or arc discharge on the ceramic. The overheating is caused by a large loss tangent ($\tan \delta$) of the ceramic. Therefore, such ceramic is removed after measuring the $\tan \delta$ using a network analyzer and temperature rising by RF irradiation. On the other hand, permanent magnets are implemented around the ceramic window to suppress the arc discharge. Electrons generated by a multipactor effect are suppressed by the magnetic flux.

1. はじめに

現在、次世代放射光施設 [1] の建設が進行している。この加速器は、電子ビームエネルギー 2.998 GeV, ビーム電流 400 mA で設計され、放射光による蓄積ビームのエネルギー減衰は、偏向磁石によるものが 0.62 MeV, 挿入光源のギャップを閉じた場合にはさらに 0.48 MeV の減衰が見積もられている。このエネルギー損失を補うために、蓄積リングに 900 kV の加速空洞 4 台を設置し、この 4 台の加速空洞に対して 1 台の 1.2 MW クライストロンから RF を供給する。加速空洞の RF 周波数は 508.76 MHz である。

次世代放射光施設では、1.14 nm · rad の低エミッタンスを達成するために磁石等の装置が大量に設置されるため、空洞を設置できる区域が限られている。また、高次共振モード (Higher-order mode : HOM) の結合インピーダンスに起因するバンチ間不安定性が問題となる。この 2 つの問題を同時に解決するために、SPring-8 アップグレード用に開発した HOM 減衰空洞 [2] を蓄積リング用加速空洞に採用する。この加速空洞は、ビーム加速共振モードに TM₀₂₀ を使用し、このモードの磁場の節に当たる位置に高周波吸収体を設置することにより、空洞自身が HOM を吸収する。従って、HOM を取り出すカップラーや導波管が必要なくなり、コンパクトな構造になる。この HOM 減衰空洞の設計と並行して、空洞を真空封止するためのセラミック窓 [3] も設計・製作した。SPring-8 のセラミック窓は、円筒型セラミックがカップラー同軸部に接合されており、セラミック窓の交換にはカップラーごと取り外す必要がある。これではセラミックが破損した場合に交換に時間がかかりビーム停止時間が長くなってしまふことから、本セラミック窓は簡易に交換できるように設計している。本報告では、本セラミック窓の性能評価時や HOM 減衰空洞で使用した際に明らか

かになった問題について報告し、その解決方法を示す。

2. セラミック窓

HOM 減衰空洞の真空封止用セラミック窓の写真を Fig. 1 に示す。セラミック窓の形状は、板状にして導波管のフランジ間に挟んで設置するようになっており、フランジを締結しているボルトを外すだけで交換が行えるため、破損時には短時間で交換可能である。加えて、小型化かつ透過周波数帯域の拡大のためにセラミック等のサイズの最適化を図っている。最適化の結果、 $W470 \text{ mm} \times H190 \text{ mm} \times t16 \text{ mm}$ のクロム銅板の中央部にアイリスを設け、このアイリス部分に $W258.6 \text{ mm} \times H80 \text{ mm} \times t5 \text{ mm}$ のセラミックをロウ付け等によって取り付けている。この構造によって、真空封止も可能となっている。以降、「セラミック」と表記した場合はセラミック単体を指し、「セラミック窓」と表記した場合はセラミックをクロム銅のフレームにロウ付けし真空封止可能な状態にしたものを指す。真空側のセラミック表面には、放電を抑えるために厚み 5 - 10 nm

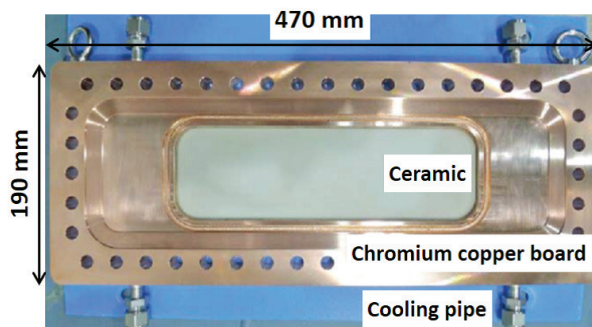


Figure 1: Photograph of ceramic window for HOM-damping cavity in next-generation synchrotron light source.

のTiNがコーティングされている。セラミック窓には冷却水配管が取り付けられ、RF 100 kW 出力時及び流量 3 l/min で通水という条件下で、セラミックの温度上昇が 7 K に抑えられるよう設計している。

このセラミック窓を 4 台製作し、動作試験を行ったところ、異常発熱するセラミック窓が複数発生し、最悪のケースではセラミックが破損して真空封止ができなくなるセラミック窓も生じた。この原因を調査したところ、セラミックの誘電正接 $\tan \delta$ が、仕様値である $< 1 \times 10^{-4}$ よりも約 10 倍大きい 10×10^{-4} であったことが判明した。この異常に高い $\tan \delta$ によって、RF がセラミックを透過する際にエネルギーを損失して発熱し、高温になったセラミックが破損して真空封止が破られたと考えられる。一方で、4 台のセラミック窓の中には適正な温度上昇で抑えられたものもあったが、このセラミック窓を HOM 減衰空洞の真空封止に使用すると、セラミック表面で放電が発生してインターロックが作動し、空洞への RF 入射が停止する事象が多発している。

以上のように、今回開発したセラミック窓は、RF 透過時に異常発熱や放電多発といった問題が発生し、加速器運転時に求められる長期安定性が実証されていない。本研究では、セラミック窓を長期間安定的に運用するために、(1) セラミックの $\tan \delta$ の評価方法を確立し、RF 透過時に異常発熱しないセラミックのみでセラミック窓を製作する、(2) セラミック表面で発生している放電を抑制する手法を確立する、の 2 点の項目について開発を進めた。

3. 異常発熱対策

セラミック窓使用時に生じたセラミックの異常発熱は、セラミックの誘電正接 $\tan \delta$ が仕様値よりも 1 桁以上大きいことが原因である。この異常に大きい $\tan \delta$ のセラミックを調査することによって、成型時の条件が従来より精度の高い領域で成型を行わなければならないことが分かった。また、成型時の条件の幅によってセラミックに個体差が生じている。以上のように、異常に高い $\tan \delta$ のセラミックが製作される原因が判明したことから、製作手法を見直して成型の最適化を行い、 $\tan \delta$ が均一になったアルミナを使用するようにした。

一方で、セラミックの段階で $\tan \delta$ 等の性能を評価し、規格を外れて異常発熱するセラミックを銅フレームへの接合前に不良品として除外することで、様々なコストを削減することを目指した。これまでの $\tan \delta$ の測定は、セラミックの形状を測定機器に合わせる必要があるため、同工程で製作した小型の試料で $\tan \delta$ を測定していた。しかし、この方法では、サンプルの $\tan \delta$ が良好でも、実際にセラミック窓に使用するセラミック自体が不良である場合もあるため、セラミック窓に使用するセラミックそのものの $\tan \delta$ を非破壊で測定する必要がある。また、セラミックの $\tan \delta$ は 10^{-4} 台と微小であるため、市販の測定器やセラミック窓透過時の損失を測定する方法では測定が困難である。今回、非破壊でセラミックの $\tan \delta$ を測定するために、導波管を用いた空洞法と呼ぶ手法で $\tan \delta$ 値を測定することを考案した。最終的にはセラミックに RF を照射して温度上昇を測定し、異常発熱しないことを確認する。

Table 1: Loss tangent ($\tan \delta$) as well as measured Q_0 for A479B, A479U and A473

Ceramic	Datasheet $\tan \delta$	Measurement	
		Q_0	$\tan \delta$
A479B (1)	$< 1 \times 10^{-4}$	13200	1.2×10^{-4}
A479B (2)		13100	1.3×10^{-4}
A479B (3)		13200	1.2×10^{-4}
A479B (4)		13200	1.2×10^{-4}
A479B (5)		13200	1.2×10^{-4}
A479B (6)		13200	1.2×10^{-4}
A479B (7)		13300	1.2×10^{-4}
A473	6×10^{-4}	6100	5.0×10^{-4}
A479U	1×10^{-4}	12300	1.5×10^{-4}

3.1 $\tan \delta$ 測定

空洞法のセットアップの断面の概略図を Fig. 2 に示す。この空洞法では、セラミックを仮固定する銅板を別途用意し、セラミックを銅板に固定する。次に、1/4 波長導波管を 2 個用意して銅板を挟むように接続し、開いている導波管の両側を閉止フランジで短絡する。結果的に、1/2 波長の空洞を導波管で作成し、その空洞の中心に

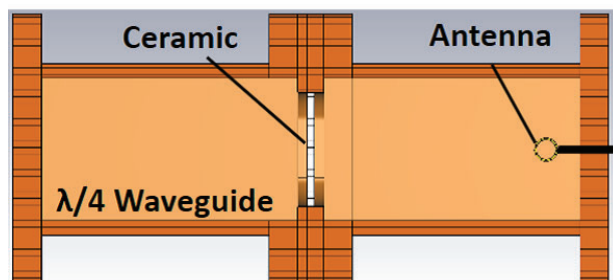


Figure 2: Schematic of cross section view of wave guides and ceramic in cavity method to measure Q_0 .

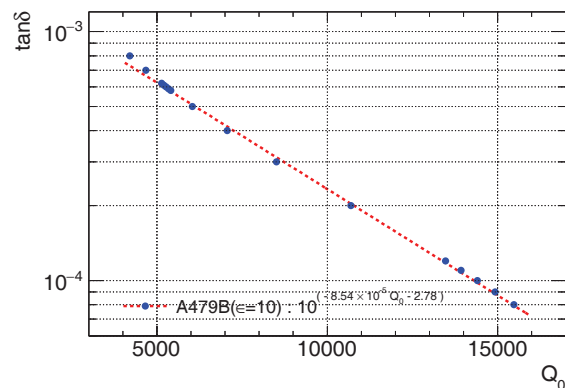


Figure 3: Correlation between $\tan \delta$ of ceramic A479B in waveguides and Q_0 value of the waveguide on simulation.

銅板で固定されたセラミックが設置される形になる。最後に、閉止フランジから導波管空洞内にアンテナを挿入し、アンテナとネットワークアナライザーを接続して、導波管空洞の Q_0 値を測定する。

セラミックの $\tan \delta$ が大きくなると、導波管空洞としての損失が大きくなるため、 Q_0 値は減少する。あらかじめ、セラミックの $\tan \delta$ と導波管の Q_0 値の相関をシミュレーションコード CST Studio Suits で計算し、測定した導波管空洞の Q_0 を相関式に入力することでセラミックの $\tan \delta$ を評価する。CST によって求めた導波管空洞の Q_0 値とセラミック窓の $\tan \delta$ との相関を Fig. 3 に示す。 Q_0 から $\tan \delta$ への変換は、

$$\tan \delta = 10^{-8.52 \times 10^{-5} Q_0 - 2.78} \quad (1)$$

と求まった。実際に測定した導波管空洞の Q_0 をこの式に入力して、セラミックの $\tan \delta$ を評価する。

セラミックの製作工程を改良した後に、セラミック窓に使用するセラミック A479B を 7 枚製作し、このセラミックの $\tan \delta$ を空洞法で評価する。また、 $\tan \delta$ と Q_0 の相関が正しいか確認するために、 $\tan \delta$ が 6×10^{-4} のセラミック A473 と、 1×10^{-4} のセラミック A479U を各 1 枚ずつ製作し、A479B と同様に空洞法で $\tan \delta$ を測定した。各セラミックの Q_0 値と、その Q_0 値から求めた $\tan \delta$ を Table 1 に示す。A479B は、どのセラミックも Q_0 が 13200 になり、 $\tan \delta$ は 1.2×10^{-4} であると評価した。A473 及び A479U の $\tan \delta$ は、測定した Q_0 値からそれぞれ $\tan \delta = 5.0 \times 10^{-4}$ 、 $\tan \delta = 1.5 \times 10^{-4}$ と評価した。

今回の本空洞法では、 $\tan \delta$ が小さい A479B や A479U の $\tan \delta$ が、仕様値よりも大きい値を示している。これは、導波管内側表面や導波管接合部のインピーダンスをシミュレーションで再現できていないことが原因であると考えている。従って、この空洞法で得られた $\tan \delta$ 値は参考にとどめ、 $\tan \delta$ が 1.5×10^{-4} 以下であるならば、セラミックに RF を照射して異常発熱するか確認し、発熱状況で不良品かどうか最終的に判断することにした。

3.2 RF 照射試験

空洞法で異常がないと判断したセラミックに対して、実際に 100 kW の RF を照射して発熱しないことを確認する。ただし、A473 は温度上昇が大きくなるため、RF 強度を 20 kW に留めている。

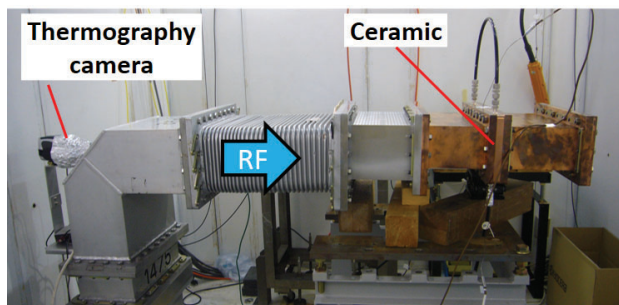


Figure 4: Photographs of RF high power test.

Table 2: Temperature rising ΔT of ceramic samples in measurement and calculation during RF irradiation.

Ceramic	RF Power	ΔT	ΔT
		Measurement	Simulation
A479B (1)	100 kW	13 K	
A479B (2)		12 K	
A479B (3)		13 K	
A479B (4)		12 K	< 25 K
A479B (5)		13 K	
A479B (6)		12 K	
A479B (7)		11 K	
A473	20 kW	32 K	30 K
A479U	100 kW	20 K	25 K

この RF 照射試験のセットアップを Fig. 4 に示す。空洞法のセットアップから、片側の閉止フランジを取り外し、その開放面をクライストロンに接続する。このセットアップでは、入射した RF はセラミックから 1/4 波長下流にある閉止フランジによって全反射される。この全反射によって、導波管内には定在波が生じる。セラミックの位置はちょうど定在波の腹の位置になるため、セラミックに照射される電場は 2 倍相当になる。従って、クライストロンから入力した RF が 100 kW の場合、4 倍にあたる 400 kW 相当の電力がセラミックを照射することになる。セラミックを仮固定している銅板には冷却水配管を実装する。冷却水は 30 ± 1 °C で一定になるように調整されており、RF 照射試験前に冷却水を配管内に循環させて、セラミック及び銅板の温度が平衡になるようにしている。セラミックの温度は放射温度計で測定し、その他にも銅板や冷却水の温度を熱電対で測定する。RF は、入力強度が 100 kW になってからセラミックの温度が平衡になる約 6 時間後まで継続して照射する。

RF 照射前後のセラミックの温度上昇値を Table 2 に示す。併せて、各セラミックの $\tan \delta$ 値を ANSYS に入力し、セラミックの温度上昇をシミュレーションした結果も Table 2 に示す。A473 はシミュレーションとほぼ同じ温度上昇を示している。一方で、A479U はシミュレーションよりも 5 K 低く、A479B は半分程度の温度上昇で抑えられている。これは、A479U、A479B の $\tan \delta$ が 1×10^{-4} よりも小さく、特に A479B は、 $(4-6) \times 10^{-5}$ であることを示している。また、製作工程改良後の 7 枚の A479B は、全て温度上昇が ~ 12 K となっており、セラミックの製作が最適化されていること及び $\tan \delta$ の大きいセラミックが生じていないことを示している。本結果から、今回製作したセラミックは全て真空封止窓に使用することを決定した。今後も、新規にセラミック窓を製作する際には、この製作工程と空洞法及び RF 大強度照射試験による $\tan \delta$ の評価を行い、異常発熱が発生しない良好なセラミック窓を準備する。

4. 放電対策

HOM 減衰空洞の大電力試験では、RF 電力を上げて運転するとセラミック窓表面で放電が多発している。この放電によって、RF がセラミック表面で反射されてクライストロン側に戻ってくるために、インターロックが作

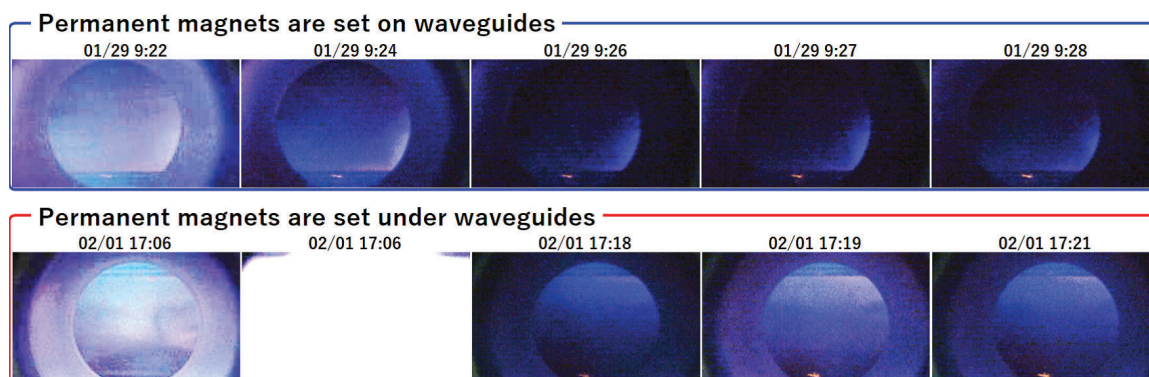


Figure 5: Photographs of the ceramic window at arc discharge.

動して空洞への RF 入射が停止する。2020 年 7 月の試験時には約 7 時間に 1 回の頻度で放電による RF 停止が発生した。加速器の運転に使用するには停止頻度を年間に数回程度に抑える必要がある。コンディショニングを長時間行うことによって停止頻度は徐々に低下していく傾向があるが、この停止頻度に抑えるためには放電を抑制する機構が必要である。

セラミック窓表面での放電は、一面性マルチパクタ放電が原因であると推測している。マルチパクタは、セラミック表面から飛び出した電子が RF の電場によって再び加速された状態でセラミックに戻る現象で、加速された電子はセラミック表面に衝突した際にさらに複数の電子を放出する。これが繰り返されて雪崩のように電子が増加し放電に至る。従って、放電を抑えるために、放出した電子が再びセラミックに戻らないようにする、電子がセラミック表面に衝突しても電子が放出しないようにする、といった対処方法を考えた。この対処方法として、(1) セラミック窓付近に永久磁石を設置し、磁力線によって電子がセラミックに戻らないようにする、(2) セラミック表面に処理しているコーティングを、TiN よりも電子が放出しにくいコーティングに変更する、の 2 通りを試験する。

4.1 磁場印加試験

マルチパクタを抑制するために、セラミック窓周辺に永久磁石を設置して磁場を発生させる。セラミック表面近くの電子は、この磁場に巻きつくためにセラミックに戻れなくなり、電子の増加が抑えられるため放電が起らなくなる。

実際に永久磁石を設置することで放電を抑制できるか、セラミック窓付近に永久磁石を設置して確認した。セットアップは、RF 大強度試験時の Fig. 4 と大まかには同じであるが、セラミック窓と閉止フランジ間の 1/4 波長導波管を真空用のものに交換し、導波管内を 10^{-5} Pa 以下まで真空を引いている。また、閉止フランジもビューポート付きのものに交換し、RF 照射中はビューポートからビデオカメラでセラミック窓を常時撮影した。永久磁石はセラミック窓を挟んで導波管の上流側・下流側に 1 個ずつ設置する。発生する磁束密度は、セラミック窓中心付近で約 20 mT である。このセットアップで、導波管に RF を入射し、試験後に動画を確認して放電時の静止画を編集した。永久磁石は、導波管の上側に設置した場合と下側に設置した場合の 2 通りの設置方法を実施した。

Figure 5 は、放電時のセラミック窓の静止画をまとめ

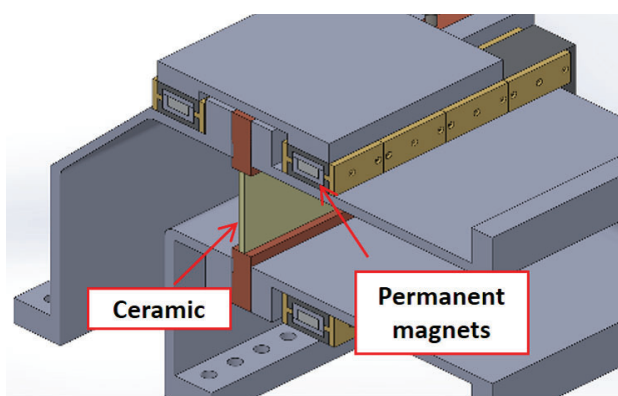


Figure 6: Cross section view of permanent magnets and support structure.

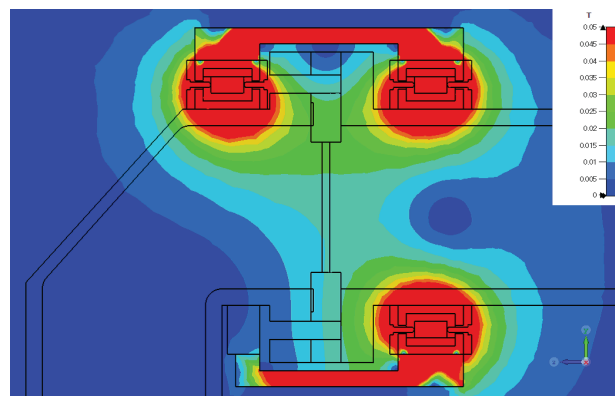


Figure 7: Magnetic flux distribution around ceramic window of HOM-damping cavity.

たものである。全ての放電で、永久磁石の設置位置と反対側が放電によって明るくなっており、磁石が設置してある側は磁場によって放電が抑えられたと考えられる。

この試験では導波管の片側のみ磁石を設置したが、セラミック窓の周囲に隙間なく永久磁石を設置すると、放電自体が抑えられると考えられる。従って、永久磁石を導波管周りに設置するフレームを製作し、実際に永久磁石を配置して放電が抑えられるか試験を行う予定である。Figure 6 に、この永久磁石とフレームの CAD 図を示す。永久磁石には、熱や放射線の耐性を考慮してサマリウムコバルト磁石を選択した。サマリウムコバルト磁石の残留磁化 B_r を 1.3 T、比透磁率 μ を 1.031 に設定し、このフレームを設置した場合のセラミック窓付近の磁場分布を Fig. 7 に示す。セラミックでは 15 - 20 mT の磁場が印加されており、放電抑制の効果が期待できる。現在、このフレームを製作中であり、完成したならば放電抑制の効果について検証する。

4.2 コーティング

放電を抑えるもう一つの手段として、セラミックのコーティングを検討する。現在セラミックの真空側表面には、二次電子放出係数 (Secondary Electron Yield : SEY) の小さい TiN コーティングを施し、放電を抑制している。しかし、TiN は導電性があるため、RF が透過するセラミックには厚くコーティングすることができない。この TiN コーティングに代わるコーティングとして DLC (Diamond Like Carbon) を検討している [4, 5]。この DLC は絶縁体であるため (0.5 - 3) μm 程度の厚みでコーティングでき、かつ TiN と比べて SEY が小さい。TiN と DLC の SEY の測定結果を Fig. 8 に示す [6]。また、この DLC コーティングした A479B セラミックを用意し、空洞法による $\tan\delta$ の測定及び RF 照射試験を実施した。この測定で、DLC コーティングした A479B の温度上昇はコーティングしていない A479B と同等であり、異常発熱が発生しないことを確認している。今後、DLC コーティングをしたセラミック窓を製作し、実際に

放電抑制と真空封止が可能か実証する。

謝辞

本セラミック窓の開発・製作は高エネルギー加速器研究機構 恵郷博文氏によって行われました。本研究に関しても恵郷氏から多大な助言を頂きました。セラミック窓の製作にあたって、京セラ株式会社 結城真一氏、横山篤志氏、吉住浩之氏、コスモ・テック株式会社 杉嶋健司氏にご協力いただきました。DLC コーティングに関して、高エネルギー加速器研究機構 森紳悟氏に有益な助言を頂きました。日本コーティングセンター株式会社 為房昇吾氏、堂前達雄氏にはセラミックに DLC をコーティングして頂きました。SEY 測定では、高エネルギー加速器研究機構 山本康史氏に測定装置を使用させていただき、解析手法についても助言を頂きました。皆様に感謝を申し上げます。

参考文献

- [1] National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology, "Accelerator design report for 3-GeV Next-Generation Synchrotron Radiation Facility", <https://www.qst.go.jp/uploaded/attachment/18596.pdf> (2020).
- [2] H. Ego *et al.*, Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Aug. 9-11, 2014, P.237-241, MOOL14, (2014).
- [3] H. Ego *et al.*, Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Toyonaka, Aug. 8-11, 2012, P.154-157, THLR05, (2012).
- [4] H. Xu, M. A. Shapino, R. J. Temkin, Measurement of internal dark current in a 17 GHz, high gradient accelerator structure, Phys. Rev. Accel. Beams, 22, 021002 (2019).
- [5] S. Mori, M. Yoshida, Multipactor suppression in dielectric-assist accelerating structures via diamondlike carbon coating, Phys. Rev. Accel. Beams, 24, 022001 (2021).
- [6] Y. Yamamoto, M. Michizono, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Society of Japan, Kyoto, Jul. 31-Aug. 3, 2019, P.1015, FRPI002 (2019).

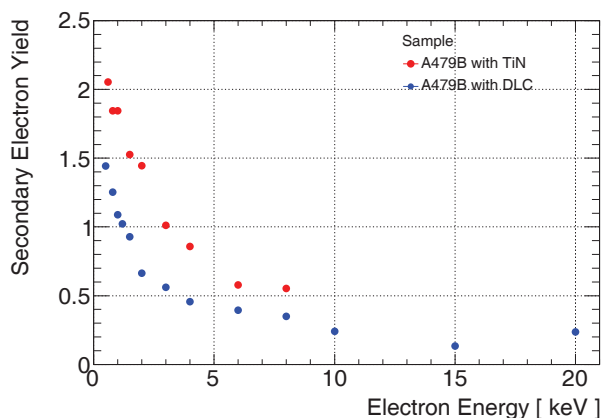


Figure 8: Secondary Electron Yield (SEY) distributions of TiN [6] and DLC as a function of incident electron energy.