

蓄積リング高周波空洞用導波管真空封止セラミック窓の放電抑制

SUPPRESSION OF DISCHARGE FOR A WAVEGUIDE-TYPE VACUUM WINDOW IN RF CAVITIES OF A STORAGE RING

山口博史^{†, A)}, 大島隆^{A, B)}, 早賀紀久男^{C)}, 安積隆夫^{D)}, 恵郷博文^{E)}, 稲垣隆宏^{A, B)}

Hiroshi Yamaguchi^{†, A)}, Takashi Ohshima^{A, B)}, Kikuo Hayaga^{C)}, Takao Asaka^{D)}, Hiroyasu Ego^{E)}, Takahiro Inagaki^{A, B)}

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

^{B)} RIKEN SPring-8 Center (RSC)

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

^{D)} National Institute for Quantum Science and Technology (QST)

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

Abstract

We developed a waveguide-type ceramic window indispensable for a TM020 mode HOM-damped cavity with a coupler variable coupling. The new window is more compact than conventional coaxial-type couplers such as implemented in SPring-8; therefore, it is easy and quick to replace in case of damage in the ceramic. However, discharges frequently happened on the windows in spite of TiN-coating on the ceramic in high-power performance tests up to 250 kW. We took two countermeasures against the discharge: (1) applying a vertical magnetic field to the ceramic and (2) coating the ceramic with DLC whose SEY (Secondary Electron Yield) is smaller than that of TiN. In results, the discharges were effectively suppressed and the high-power performance was markedly improved by both countermeasures.

1. はじめに

SPring-8 では、次世代の蓄積リング高周波空洞として TM020 モード HOM 減衰型高周波空洞と、この空洞に備わる結合度可変カプラーを開発した[1, 2]。空洞の真空封止は、この結合度可変カプラーと接続する導波管のところにセラミック窓[3]を設置して行う。本空洞とセラミック窓の図を Fig. 1 に示す。この空洞とセラミック窓は、現在 SPring-8 で使用しているカプラー(東芝社製 E4263) [4] と異なり、空洞-導波管間の結合と真空封止の機能を

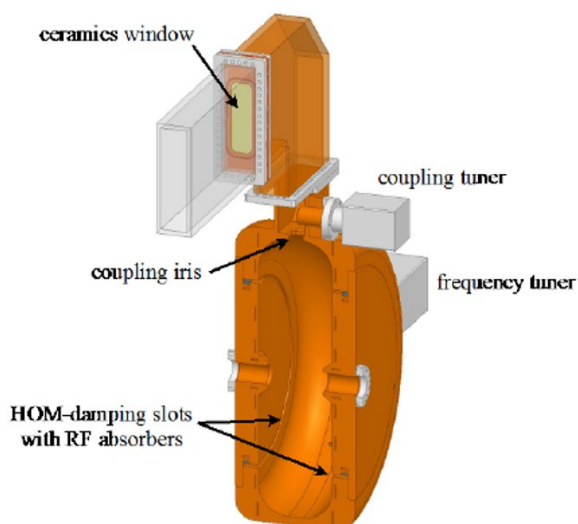


Figure 1: Schematic of the TM020 mode HOM-damping RF cavity and waveguide type ceramic window.

分離しているため、ビーム負荷に合わせてカプラーの結合度を調整することが可能になる。また、セラミック窓は小型で、導波管のフランジに埋め込まれた構造をしているため、破損時の交換が容易である。この空洞とセラミック窓は 3 GeV 高輝度放射光施設ナノテラスで蓄積リング高周波空洞として採用され、2023 年の運転開始から使用されている[5]。

このセラミック窓の開発に際して、実際の使用状況を模した状況下でセラミック窓に大電力 RF を通過させる動作試験を行った。この RF 大電力試験において、問題が 2 点発生した。1 点目は、試作した 4 台のセラミック窓のうち 2 台において、RF を照射するとセラミックが想定する温度以上に発熱し、最終的にセラミックが破損し真空状態が破れる事案が発生したことである。この異常発熱の問題は、セラミック製作メーカーがセラミック製作方法を改良して誘電損失($\tan\delta$)を小さくすることで解決した[6]。

2 点目はセラミック窓全数において、RF 照射中に真空側のセラミック表面で放電が多発したことである。この放電の対策として、(1) セラミック表面に対して垂直方向に磁場をかける、(2) 放電のしやすさを示す二次電子放出係数(Secondary Electron Yield : SEY)の小さい物質をセラミック表面にコーティングする、の 2 案を考案した。本論文では、この放電対策として考案した 2 つの方法の詳細と結果について報告する。

2. セラミック窓の構造

本セラミック窓の写真を Fig. 2 に示す。セラミックのサイズは $^W258.6 \text{ mm} \times ^H80 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ である。セラミックの端をメタライズし、銅製のフランジにロウ付け接合している。銅フランジのサイズは $^W470 \text{ mm} \times ^H190 \text{ mm} \times 18.4 \text{ mm}$ で、導波管のフランジに取り付ける形で空洞を真空封止する。

[†]hiroshi.yamaguchi@spring8.or.jp

従来のカプラーのセラミック封止部は円筒の形をしており、熱膨張や衝撃による応力が集中しにくい構造になっているが、本セラミック窓は直方体の形状をしており、セラミックの角の部分に応力が集中しやすい形状になっている。シミュレーションコード ANSYS による計算では、RF 250 kW 通過時の熱膨張によるセラミック-銅フランジの接合部分に掛かる応力は 30 MPa 程度に抑えられており、実際の使用では問題ないと判断している。セラミックの $\tan\delta$ は 1×10^{-4} 以下であり、冷却水温度 28°C、流量 5 l/min で冷却しながら RF 250 kW で運転した時のセラミックの温度上昇は 20°C 程度になる。セラミックの真空側表面には、放電防止のために、厚さ 5-10 nm の TiN をコーティングしている。

3. セラミックへの磁場印加による放電抑制

セラミック窓表面での放電は、マルチパクターによって引き起こされていると考えている。マルチパクターでは、何らかの形でセラミックの表面から飛び出した電子が RF によって加速されて再度セラミック表面に衝突し、これによって大量の二次電子が発生する。この二次電子が RF

によってまた加速されてセラミックに衝突することを繰り返すことで、雪崩のように電子数が増えていき放電に至る。このマルチパクターを阻害するために、セラミックに対して垂直に磁場を印加することを考えた。磁場により電子は螺旋状に運動しながらセラミックに近づくので、セラミックの衝突時には角度をもって衝突する。これによってセラミックに垂直に衝突するよりも衝突エネルギーが落ち、二次電子が発生しにくくなることが期待される。

この磁場による放電抑制を確認するため、本セラミック窓を 2 枚用意し、真空用導波管の両側にセラミック窓を設置した。この真空用導波管とセラミック窓 2 枚をクライストロンとダミーロードを接続した導波管の途中に設置し、クライストロンで生成した大電力 RF をセラミック窓に通過させた。試験のセットアップを Fig. 3 に示す。磁場はフェライト磁石で発生させた。磁場強度は、フェライト磁石表面で ~70 mT である。フェライト磁石をセラミック窓の両側及び導波管の上下に設置することで、セラミックに垂直に磁場がかかるようにした。試験中、セラミックの温度を放射温度計で測定した。またアークセンサーを用いてセラミック表面での発光を監視し、発光を検知した場合は放電と判断してインターロックを発報させた。その他、真空計・方向性結合器の出力も監視して、真空度の悪化・RF の反射が起きた場合も運転を停止させた。

試験の結果を Fig. 4 に示す。5 月 15 日から 5 月 19 日の間は他の実験にクライストロンを使用したため運転を中断している。磁石を置いた場合、RF 電力を上げていく



Figure 2: Photograph of the waveguide type ceramic window.

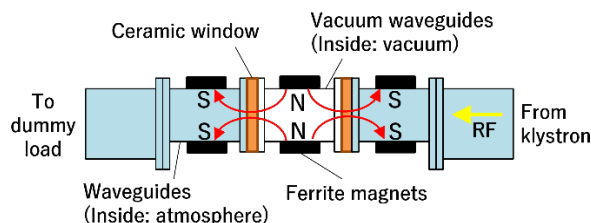


Figure 3: Setup of the high-power RF test for ceramic window.

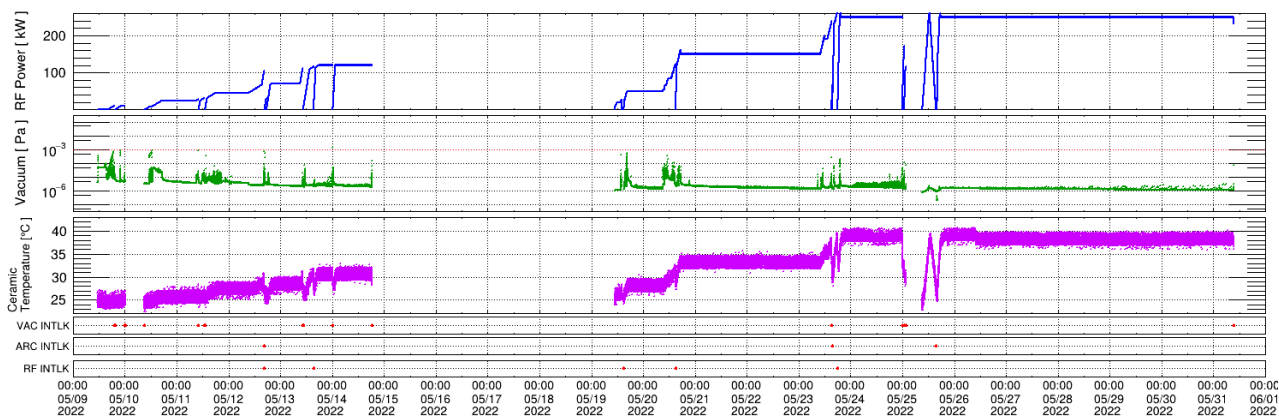


Figure 4: Trend graph of the RF power, the vacuum pressure, the temperature of the ceramic window and alarm (interlock) history due to the vacuum pressure, arc, and RF reflection during the high-power conditioning test for ceramic windows with magnetic field. Once the alarm (described by red circle) is halted, RF operation is stopped. When the alarm is reset, operation is then resumed from a lower power. The operation was paused between May 14th and 19th.

と1 kWを超えたあたりからガス放出が増え、真空度がゆっくり悪化する状況が続く。この期間は真空度が 5×10^{-6} Pa 以下になるように RF 電力を調整しながら徐々に電力を増やし、最終的には目標の250 kWまでRF電力を上げることができた。250 kWまで上昇させた後も真空度が悪化することがあったので、フェライト磁石を裏返して磁力線の向きを反転させてから、再度にRF電力を上昇させると、真空度の悪化を抑えることができた。最終的には250 kWで5日間の連続運転を行い、健全性を確認できた。

4. DLC コーティング

SEYが小さい物質をセラミックの表面にコーティングすることで、放電を抑えることができる。これまで、本セラミック窓の真空側表面にはTiNをコーティングしていたが、放電を十分抑えきれていないため、TiNよりもSEYが小さいDLC(Diamond Like Carbon)を新たなコーティング材として検討した[7]。DLCは炭素を主成分とした物質で、ダイヤモンド構造とグラファイト構造が混じりあった構造をしている。このため、化学的にはダイヤモンドとグラファイトの両方の特徴をもった物質であり、工業的には高硬度、低摩擦係数といった特徴をもつ。また、DLCはコーティングの方法等によってダイヤモンド構造とグラファイト構造の比率や水素含有量が変わり、DLCの性質もこれらの比率によって変わる。DLCの構造比率や水素含有量はコーティング業者によってほぼ決まっており、これらの値を指定するのは難しいため、今回はDLCをコーティングする業者を2社選び(日本コーティングセンター社(JCC)[8]及びナノテック社(Nanotec)[9])、DLCの特徴が異なった場合にSEYが異なるのかを確認した。SEY測定用にセラミック片($^{w}19 \text{ mm} \times ^{h}19 \text{ mm} \times ^{t}5 \text{ mm}$)を準備し、このセラミック片の片面にDLCコーティングしてテストピースを製作した。DLCの膜厚は、日本コーティングセンター社が0.5-3.0 μm 、ナノテック社は0.1-0.3 μm である。

4.1 高温時のDLC

DLCは熱に弱く、温度が300°C以上になると炭素の構

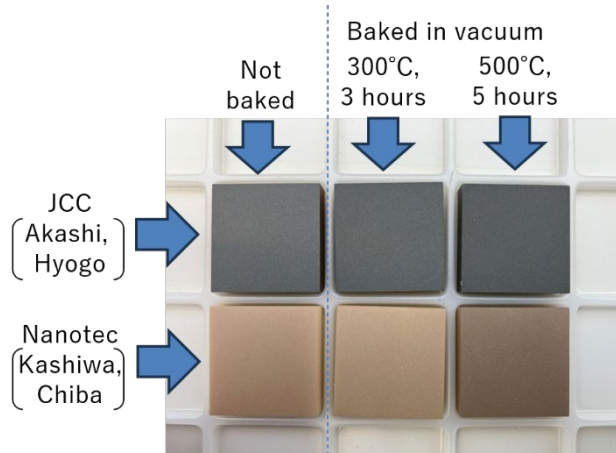


Figure 5: Test pieces of the DLC-coated ceramic samples. The pieces in the center columns and right columns were baked at 300°C for 3 hours and 500°C for 5 hours in vacuum, respectively.

造が崩れて母材から剥がれてしまうことが分かっている。放電が生じた場合、局所的には300°Cを超えることが考えられるので、真空状態で高温にさらしたDLCのSEYも測定した。テストピースを真空槽に入れて、300°Cで3時間焼鈍したものと、500°Cで5時間焼鈍したものの2種類のテストピースを用意し、このテストピースのSEYも測定した。テストピースの写真をFig. 5に示す。DLCを真空焼鈍すると、外観は焦げて少し黒く変色しているが、手で触ってもコーティングが剥がれることはなかった。DLCが大気中で高温になった場合は、DLC内の炭素が大気中の酸素と分子結合をしてDLCの構造が壊れてしまうが、真空中では酸素が無いので、大気中と比較してDLCの構造は高温でも維持されると考えられる。

4.2 SEY 測定

真空焼鈍したテストピースのSEYを測定した。測定は、KEKで開発された走査型電子顕微鏡をSEY測定用に改造した装置[10]をお借りした。電極の上にテストピースを置き、コーティング剤に電子を打ち込むと二次電子が発生する。打ち込んだ一次電子は二次電子分の電荷量が減った状態でテストピース下の電極に入る。この電極に入った一次電子は電流として測定できるので、テストピースがない場合とテストピースを置いた場合の電極の電流値の差分を取ると二次電子の電荷量が分かる。コーティング剤へ打ち込んだ一次電子のエネルギーに対するセラミック、TiN [10]、DLCのSEYの分布をFig. 6に示す。TiNのSEYが ~ 2 に対して、DLCは ~ 1.5 であり、より放電を抑えることができると期待できる。また、2社のDLCコーティングにおいてSEYの差異は大きくなかった。

真空焼鈍したDLCのSEYの測定結果もFig. 7に示す。真空焼鈍したDLCのSEYは、真空焼鈍していないDLCの値と大きな差はなかった。このことから、DLCコーティングのセラミック窓は放電などにより局所的な温度上昇があっても、組成が変わることなくSEYは低い状態を保ち、RF運転が継続可能だと考えられる。

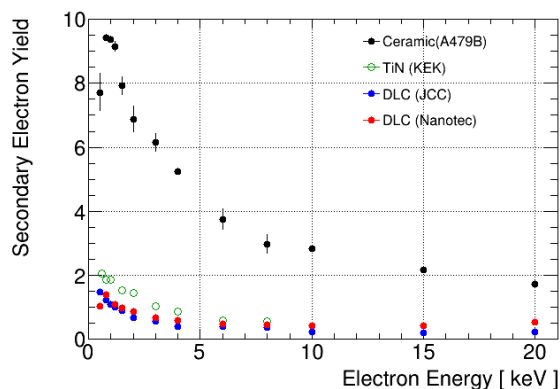


Figure 6: SEY (Secondary Electron Yield) distribution as a function of the incident electron energy for ceramic samples without coating, with TiN coating [10] and with DLC coating.

4.3 大電力 RF 通過試験

日本コーティングセンター社で DLC コーティングしたセラミック窓を 2 枚用意し、TiN コーティング時と同様に 3 章で示した大電力 RF 通過試験を実施して、セラミック表面での放電を抑制できるか確認した。また、フェライト磁石による磁場を印加しない場合と印加した場合の試験も

行い、DLC コーティングにおいても磁場によって放電が抑制できるか確認した。試験結果を Fig. 8 に示す。

まずは、磁場を印加していない状態で、大電力 RF によるコンディショニングを開始した。この時、RF 電力を 40-120 kW の間で上昇もしくは下降させたときに急激な真空悪化が多発した。このため、RF 電力を 250 kW まで上げる時には何度も真空悪化および RF の反射によるインターロックで運転が停止した。ただし、インターロックが発報する時の RF 電力は徐々に上がっていったため、何回も繰り返し RF 運転を再開して RF 電力を上げることで、最終的には目標の 250 kW に到達し、8 日間安定して運転することができた。一方で、RF 電力を下げた時には、真空が悪化して停止する状況は残っており、コンディショニングを進めても RF 立ち上げに時間がかかる状況は改善されなかった。

次に、この窓に磁場を印加して運転を行った。この場合は RF 電力上昇および下降時に、5 kW 以下の RF 電力領域で真空インターロックが発報しない程度の真空悪化が発生した。しかし、その他では真空悪化等は発生せず、安定して 250 kW までの運転を実施できた。また、磁場を印加した状態で 7 日間連続運転をし、250 kW までの電力で本セラミック窓が使用できることを確認した。

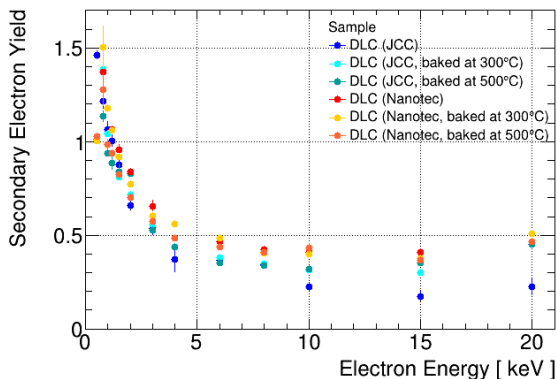


Figure 7: SEY (Secondary Electron Yield) distribution for DLC coated ceramic samples, before and after vacuum baking.

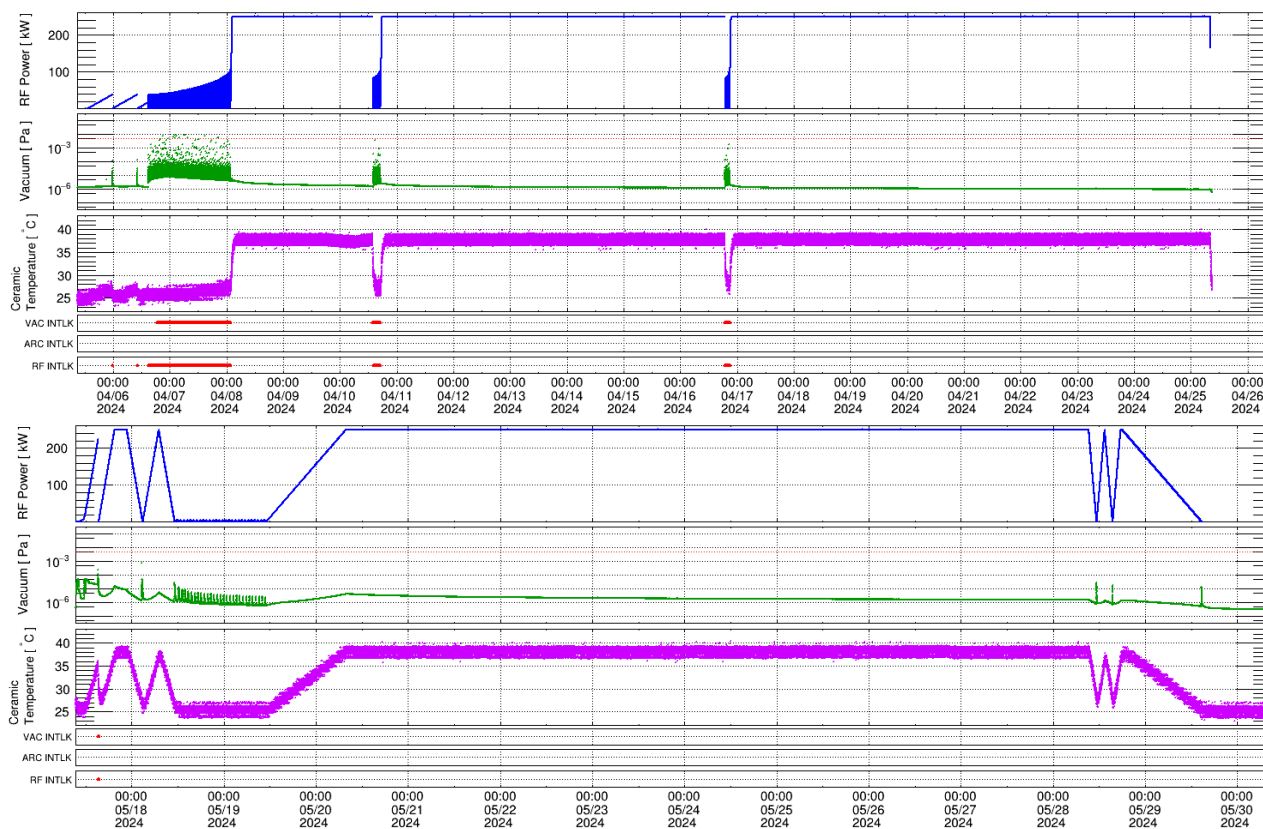


Figure 8: Trend graphs of the RF power, the vacuum pressure, the temperature of the ceramic window and alarm (interlock) due to the vacuum pressure, arc, and RF reflection during the high-power conditioning test for ceramic windows coated with the DLC without magnetic field (top) and with magnetic field (bottom). The operation halted on April 10th and 16th due to the circulator alarm and the instantaneous power down caused by a lighting strike, respectively.

5. まとめ

新規に開発した蓄積リング RF 加速空洞の真空封止用セラミック窓において、大電力運転時にセラミック表面で放電が多発したため、2 種類の対策を行った。まずは磁場をセラミック表面に垂直に印加する方法を実施し、250 kW までの RF 電力で使用できることを確認した。この方法は、ナノテラスで使用する空洞の RF コンディショニング時にも採用され、これによりセラミック窓での放電をほぼ無くすことができている。

もうひとつの方法は、従来の TiN コーティングの代わりに二次電子放出係数(SEY)の低い DLC をコーティングする方法である。DLC は耐熱性に不安があったので、DLC コーティングしたテストピースを真空炉で焼鈍し SEY を測定した。500°Cまでの温度では SEY の特性に大きな変化は無く、問題無いことが確認できた。また、実際のセラミック窓に DLC コーティングをしたものを製作し、大電力試験にて 250 kW までの電力で使用できることを確認した。

謝辞

本研究に使用したセラミック窓および SEY 測定用セラミックは京セラ株式会社及びコスモ・テック株式会社に製作していただきました。セラミックへの DLC コーティングは、日本コーティングセンター株式会社およびナノテック株式会社・株式会社ウエキコーポレーションに実施していただきました。DLC コーティングしたテストピースの真空焼鈍は東洋冶金工業株式会社にしていただきました。SEY 測定は、高エネルギー加速器研究機構 山本康史様に SEY 測定装置をお借りし、測定しました。御協力いただいた皆様に御礼申し上げます。

参考文献

- [1] H. Ego *et al.*, “Design of a HOM-damping RF cavity for the SPring-8-II storage ring”, Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Japan, August 9-11, 2014, pp. 237-241.
- [2] H. Ego *et al.*, “Compact HOM-damping structure of a beam-accelerating TM020 mode rf cavity”, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 1064, 169418 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.nima.2024.169418>
- [3] H. Ego *et al.*, “Rectangular-waveguide window for a high-power CW UHF coupler”, Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Toyonaka, Japan, August 8-11, 2012, pp. 154-157.
- [4] M. Akemoto, "High-power input coupler with a cylindrical alumina window," Conference Record of the 1991 IEEE Particle Accelerator Conference, San Francisco, CA, USA, 1991, pp. 1037-1039 vol.2. doi:10.1109/PAC.1991.164529
- [5] N. Nishimori, “Recent development and future direction of ring-type synchrotron light sources in Japan”, in Proc. IPAC'24, Nashville, TN, May 2024, pp. 3939-3943. doi:10.18429/JACoW-IPAC2024-FRYD2
- [6] H. Yamaguchi *et al.*, “Developments of a waveguide-type vacuum window for RF cavities of a storage ring”, Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, QST-Takasaki (Online), Japan, August 9-12, 2021, pp. 733-737.
- [7] S. Mori *et al.*, “Multipactor suppression in dielectric assist accelerating structures via diamondlike carbon coating”, Phys. Rev. Accel. Beams, 24. 022001 (2021).
- [8] <https://www.jcc-coating.co.jp/>
- [9] <https://www.nanotec-jp.com/>
- [10] Y. Yamamoto *et al.*, “Research on ceramic for RF window”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, July 31-August 3, 2019, pp. 1015-1019.