

カンタル溶射空洞の RF コンディショニングと高電力特性

RF CONDITIONING AND HIGH-POWER PERFORMANCE OF KANTHAL SPRAYED CAVITY

宮原房史^{#,A)}, 荒木田是夫^{A)}, 松本修二^{A)}, 肥後寿泰^{A)}, 東保男^{B)}
 Fusashi Miyahara^{#,A)}, Yoshio Arakida^{A)}, Shuji Matsumoto^{A)}, Toshiyasu Higo^{A)}, Yasuo Higashi^{B)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK/SOKENDAI)

^{B)} Okinawa Institute of Science and Technology Graduate University (OIST)

Abstract

We have been developing a Kanthal (Al-Cr-Fe)-coated collinear load for L-band accelerating structure. To confirm feasibility of the collinear load under the designed accelerating field of 10 MV/m and understand the properties of the coated cell, a standing wave cavity for high power RF test has been made. The cavity consists of 3 cells, one of which is coated by Kanthal. The cavity reached the designed field level after a few days operation, and it showed stable performance after 300 hours conditioning. This report describes the RF conditioning of the cavity and the performance of the Kanthal coated load.

1. はじめに

KEK 電子陽電子入射器では SuperKEKB のためのアップグレードを進めており、陽電子ビームに関しては、KEKB の 4 倍の 4 nC のバンチ電荷を得るための陽電子収集の高効率化が要求されている。またダンピングリングの RF バケットから外れたサテライトバンチはダンピングリング中での放射線のバックグラウンドになるため、放射線管理上その抑制も要求される。陽電子捕獲部はタングステン標的と直後のパルスソレノイド (Flux Concentrator) ^[1]、これに続く DC ソレノイド内に設置された加速管で構成される。

陽電子発生用電子 (10nC、3.5GeV) から DR への電荷量 4 nC を確保するためには、加速管の大口径化、Flux Concentrator と DC ソレノイドによる磁場収束及び加速管の位相最適化で達成可能である。ダンピングリングのエネルギーアクセプタンス内により多くの陽電子を収めるために、電磁シャワーで生成された陽電子は第一加速管の減速位相に乗せられ、エネルギーが数十 MeV までの陽電子がバンチングされる。

サテライトバンチ抑制のため陽電子捕獲部の加速管は当初、陽電子捕獲部の加速管に主加速周波数の S-band と整数関係にない L-band (2856×5/11=1298 MHz) を用いる方法^[2]を検討したが陽電子捕獲部の大型化とコスト高の問題のため、大口径 S-band (Large Aperture S-band : LAS) を採用することにした。サテライトバンチの抑制は LAS の加速勾配を増やすことで対応できることがわかったためである。サテライトバンチは 1 本目の加速管終端付近でちょうどエネルギーが 0 付近まで減速した陽電子が 2 本目の加速管に入る時間がメインのバンチと速度差分だけ遅れることが原因で生成される。電磁シャワーによる陽電子のエネルギー分布はエネルギーに関し

て指数関数的に減少するため 1 本目の電場強度を大きくすることでもサテライトバンチの抑制が可能である。シミュレーションを用いた評価から大口径 S-band の加速管を用いた場合も 1 本目の加速管の電場勾配を 14 MV/m 以上にする事で L-band を用いた場合と同等にサテライトバンチ抑制できることが分かった^[4]。将来的には L バンドシステムを生かすことも考えられるが、その時には導波管部分で分断されるソレノイド磁石のつくるソレノイド磁場の落ち込みでの収集効率低下が問題である。これに加えて大口径のソレノイドのコスト高、電力と水冷の増加の問題があるため、出力カプラー部を通常のセル構造にカンタル (Fe-Al-Cr 合金) を溶射したコリニアロードセルに置き換えた加速管を設計した^[2,3]。

陽電子捕獲部の加速管は LAS を採用することとしたが LAS は通常の加速管に比べビームホール周辺の表面電場強度が大きいため安定運転に関しては多少の危惧がある。本稿の L バンドコリニアロードの研究成果は LAS にも転用可能であり陽電子捕獲部の最初の 2 本の加速管間距離の短縮が可能になって高収量化とサテライトバンチ抑制が期待できるため研究を継続している。カンタル溶射セルの高電力特性を調べるため、3 空洞のうち中央の空洞が設計値と同じ Q 値をもつ様にカンタルを溶射した定在波空洞を製作し、進行波管として使用する設計と同等の加速電場となる入力電力で試験を行った。コンディショニング過程と真空挙動、暗電流の変化等を印加するソレノイド磁場との関係も含め報告する。

2. 高電力試験用空洞

陽電子捕獲セクションではコリニアロードは進行波型の空洞として通常の加速管の後段に接続されるが、進行波型の空洞を製作するにはコストと時間を要する。そこで設計したコリニアロードとほぼ同様の電界を持つ定在波型の空洞を設計・製作した。

[#] fusashi.miyahara@kek.jp

2.1 空洞設計

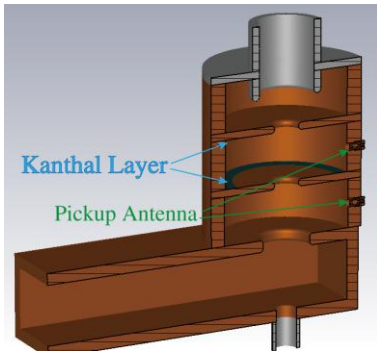


Figure 1: Three-cell SW cavity..

定在波型の空洞は 3 セルとし、導波管に結合する 1 段目の空洞（マッチングセル）内部は通常のレギュラーセル、2 段目の空洞はカンタルを溶射し Q 値を通常のセルの 1/16 程度まで下げたロードセル、3 段目は電磁場をブロックするためのセル（デチューンセル）とした。Figure 1 に空洞の断面図を示す。Q 値を下げるためにはカンタルを磁場成分の大きなシリンダー面に溶射する方が効率的ではあるが、空洞壁面を流れる電流の向きと磁場（ソレノイド）の向きが平行な場合、磁場印加によって表皮抵抗が小さくなってしまいう事が分かっているため^[2]、ロードセルの両側のディスク面に溶射した。溶射の範囲は CST^[5]を用いて空洞の Q 値が 1300 になるように決定した。この際、表皮抵抗は比透磁率 μ と電気伝導率 σ の積で決まるが、比透磁率の値は S-band で測定された $2.58^{[6]}$ を用い、電気伝導率は表皮抵抗の測定実験^[2]を再現する 22000 S/m を用いた。空洞設計としては、反射を定常状態で -20 dB 以下に抑え、マッチングセルとロードセルの電場バランスを進行波コリニアロード設計とほぼ同じになる様にマッチングセルのシリンダー径や、導波管とマッチングセルの結合部の径を決定した。また、マッチングセル

Table 1: Accelerating field and Maximum surface field for $P_f^{cav}=2 \text{ MW}$ [MV/m].

	E_z^{acc}	E_{surf}^{max}
TW last regular cell	10	20
TW 1st load cell	8	16
Matching cell	12	21
Load cell	10	19

とロードセルのフィールドバランスを調べるために、両セルにピックアップアンテナを設置した。

CST の計算で得た空洞の反射特性と軸上の電場の大きさをそれぞれ Figure 2 上段（赤色の実線）、下段に示す。周波数 1.3GHz での反射は十分低く抑えられおり、 π モードでのロードセルの電場の大きさはマッチングセルの約 80%で、これは実際のコリニアロードの設計とほぼ同じである。コリニアロー

ドを用いた場合の加速管とロード 1 セル目、今回設計した定在波型の空洞の表面の最大電場強度と加速電場の大きさを Table 1 にまとめた。2 つのセル間のバランスはほぼ同じであり、定在波型空洞に 2 MW の RF を供給すれば実際のロードとほぼ同様の条件を満たしており、この条件の下で安定に運転可能ならばカンタルを用いたコリニアロードは十分実用的であることが分かる。

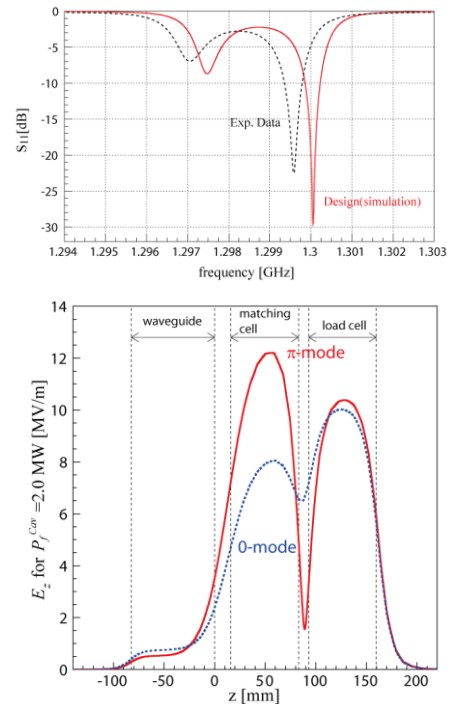


Figure 2: Reflection as a function of frequency (upper) and the electric field strength on axis (lower).

2.1 制作・低電力試験

空洞は各セルのシリンダー、ディスクを別々に加工し、ロードセルのディスク面にカンタルを溶射した後、ロウ付けを行って製作した。カンタルは中心から半径 $71\sim 87.5 \text{ mm}$ の範囲に大気プラズマ溶射溶射し、実効的な表皮深さよりも十分厚くするために $1 \text{ 平方センチメートルあたり } 30 \text{ mg}$ （厚さ約 $100 \mu\text{m}$ ）となるように調整した。Figure 3 にカンタルを溶射したディスクを示す。溶射の際は銅のディスク面やロウ溝を傷つけないようにバイトンシートを介した SUS のマスキング治具を用いた。

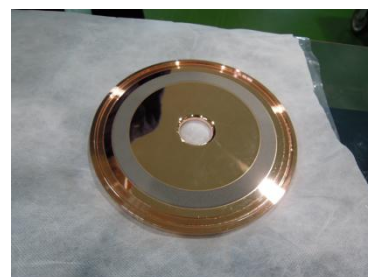


Figure 3: The Kanthal-coated disk.

ロウ付け後に測定した反射特性を Figure 2 上段 (点線) に示す。πモードの共振周波数は計算値より約 0.5 MHz 低かったが、このうち 0.2 MHz は空気の影響であり、これを除いた 0.3 MHz のずれは機械加工の誤差等が原因と思われる。またビード法を用いてマッチングセルとロードセルのフィールドバランスを測定し、ロードセルの電場はマッチングセルの 74%であることを確認した。このように空洞は、低電力試験ではほぼ設計通りであることが分かった。

3. 高電力試験

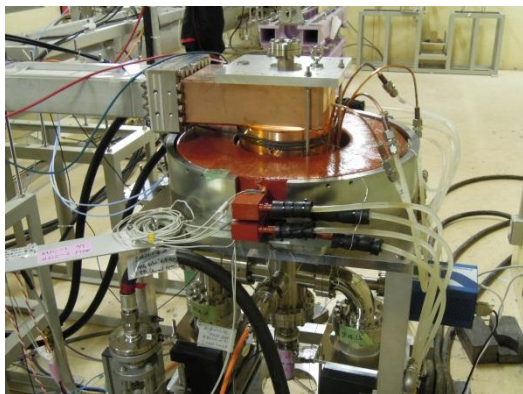
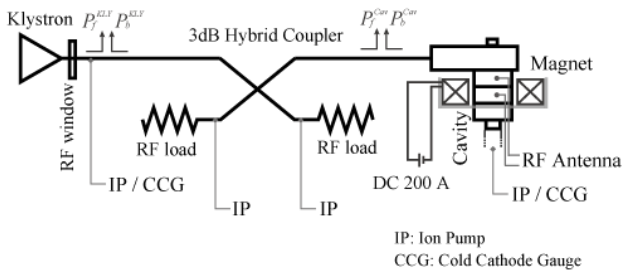


Figure 4: Experimental Configuration.

3.1 実験セットアップ

試験空洞は KEK 電子陽電子入射器に設置し、入射器の復旧やアップグレードのため運転は主に夜間のみに行った。実験のセットアップ図を Figure 4 に示す。クライストロンギャラリーから入射器トンネルに設置した空洞へ RF を供給し、クライストロン出力の約 40%が空洞へ入力される。空洞内の電場を目的の大きさ(10 MV/m 以上)にするためには 2 MW 必要なため、クライストロンの出力が 6 MW で十分な入力電力となる。クライストロン出口と空洞直前に方向性結合器を設置し、空洞から大きな反射があった場合に備えて 3dB ハイブリッドカップラーと RF ロードを用意した。

磁場中での応答を調べるため、空洞をソレノイド磁石の中心に設置した。ソレノイドはヨークが片側にしか備わっていないが、カンタル溶射面に対して磁場の方向が鉛直に一樣に近い位置に空洞の位置を合わせた。本来のコリアロードは 0.4 T のソレノイド磁場中で使用されるが、今回の実験では電源の制約から最大磁束密度 0.09 T までの測定を行った。

空洞内部及びクライストロン窓での放電現象をとらえるために空洞上部とクライストロン出口窓下流の E ベンド導波管のビューポートに光電子増倍管 (PMT) を設置した。光電子増倍管の出力はインターロックにも利用した。また、PMT とは反対側のポートにファラデーカップを設置し、暗電流の測定を行った。各装置内の圧力の測定とインターロックのためにクライスト側と空洞側には真空ゲージ (CCG) を設置し、空洞側には質量分析器を設置した。真空度によるインターロックの閾値は通常の運転では 2×10^{-4} Pa とした。

3.2 コンディショニング

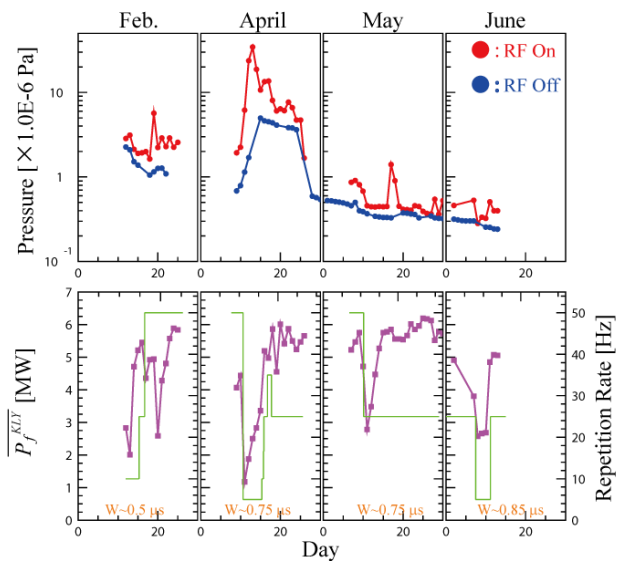


Figure 5: Upper: History of the pressure in the cavity with/without RF power. Bottom figures show average output power and repetition rate of the klystron.

空洞の設置は 2013 年 2 月に行い、コンディショニングは基本的には真空度の変化に注意しながら RF のパルス幅、入力電力を増やす方針で行った。また、運転初期にソレノイド磁場を印可すると大きなガス放出が起こることが判明した。そこでコンディショニングを進めてガス放出が少なくなった後 (約 2×10^{-6} Pa 以下) にガス放出が最も多くなる電流値を探し、コンディショニングを進めた。

Figure 5 に実験開始から終了までの RF ON/OFF 時の空洞内の平均圧力の変化とクライストロン出力、繰り返しを示す。コンディショニングが進むに従ってベースの圧力が下がり、RF を投入したときの圧力上昇も小さくなっていることが分かる。4 月 10 日付近から RF 投入時の真空度の悪化が大きくなっているのはソレノイドコイルへの通電を開始したためである。磁場無しの環境では数日の運転で規定の電力に達している。

高電力試験の初期とコンディショニングが進んだ後の RF 投入時の圧力の変化を Figure 6 に示す。左側の図はコンディショニング初期の段階でベース圧力が 2×10^{-6} Pa であるのに対して、約 340 時間の運転（繰り返し 50Hz で規格化）の後は 5×10^{-7} Pa まで下がっており、真空バーストの頻度、大きさも減少している。なお、コンディショニング後の条件は比較のため初期と同じにした。

5月の終わり以降は空胴内の真空悪化もほとんど無くなり、クライストロン出口側の窓のガス放出、発光による問題を除けば、規定の電力で安定運転を行うことが出来た。クライストロン窓側のガス放出はパルス幅を $1 \mu\text{s}$ 程度まで伸ばすと頻度が上がったため、 $0.85 \mu\text{s}$ を超すロングパルスでの長期運転は行わなかった。定在波型空胴で充填時間は長い、ピックアップアンテナの出力は $0.85 \mu\text{s}$ で飽和出力に対して 9 割ほどであったが入力電力は規定よりも 2 割大きく、空胴自身の評価に影響は無いと考えられる。本試験後にクライストロンを RF ロードに直結して評価試験し窓発光の問題が無かったことから、RF 窓の問題は、空胴からの反射が影響していると思われる。

3.3 暗電流、空胴内の発光

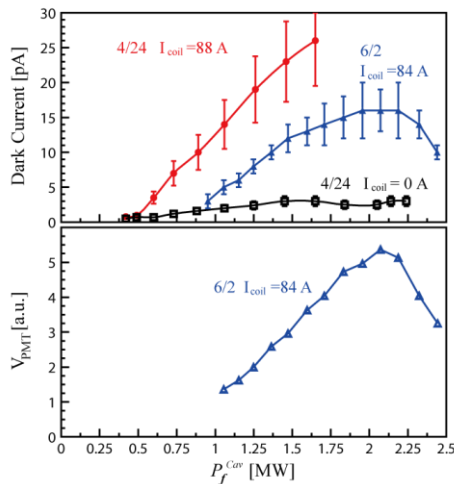


Figure 7: Dark current and PMT output at three solenoid field levels.

RF 投入時およびソレノイド磁場印可時の空胴の応答を調べるため、空胴からの光の放出と暗電流の測定を行った。Figure 7 にコンディショニング中盤の暗電流と後半の暗電流、PMT 出力を示す。ソレノイドに通電すると電流値 $I_{\text{coil}}=88 \pm 10$ A の範囲で暗電流が増加する事が分かった。この値から外れると暗電流は 1/10 以下であった。空胴からの発光も暗電流と同じ傾向を示した。測定した入力電力に対する暗電流の大きさは入力電力に対して 2 MW 付近までは線形に増加し、2 MW 以上では線形に減少しており、Fowler-Nordheim 理論^[7]では説明できない。今のところ理由は不明で、ある狭い磁場条件で暗電流が増加することから特定の箇所から放出された電子がカナル面や特定の場所に衝突、増殖する事象、マルチ

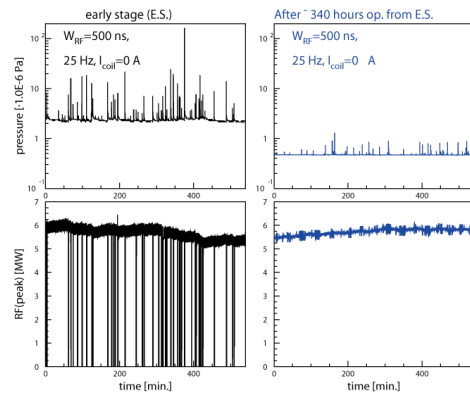


Figure 6: Comparison of pressure trend between early stage (left) and after 340 hours additional conditioning (right). Bottoms show the klystron output.

パクティング現象などの可能性が考えられるため、今後シミュレーションを用いた評価を行いたい。

3.4 残留ガス

質量分析器による残留ガスの質量スペクトルを Figure 8 に示す。残留ガスは一般的に観測される H_2 , H_2O , CO , N_2 , CO_2 が主であった。RF を投入した際には、 CO_2 が増加しており、 O_2 や C の増加は空胴内で RF により CO_2 が分解されたことが一因と考えられる。これらのガスはコンディショニングとともに全体的に低下した。

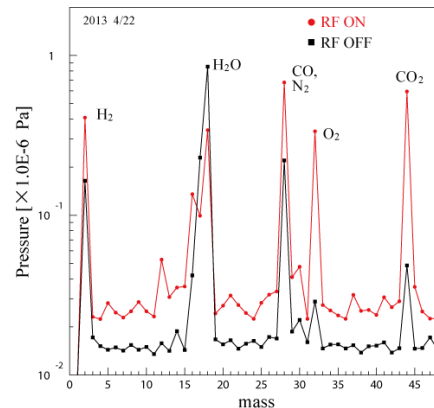


Figure 8: Residual gas with RF ON/OFF.

4.まとめ

L-band 加速管用のカナルコリニアロードの高電力運転評価のために、これとほぼ同様の電場分布をもつ 3 セルで構成された定在波型空胴を設計、製作し高電力試験を行った。これまで測定した L-band (1.3 GHz)でのカナルの表皮抵抗をもとに CST を用いて設計した空胴はほぼ設計通りの性能であった。高電力試験ではコンディショニングに時間を要するが、規定の加速電場 10 MV/m を満たす条件で安定に運転可能な事が分かった。

謝辞

本研究の端緒では、Haimson Co. の J. Haimson 氏に、1960 年代のカンタル適用加速器の情報を頂き感謝致します。更に、DESY の L. Lilie 教授始め多くの方々に LINAC-II での 1990 年代の経験をお聞きし、大変参考にさせて頂きました。溶射カンタルの物理的な性質に関しては詳細な情報を 中国科学技術大学の L. Shen 教授から頂きました。また日立製作所の齋藤一義氏にはコリニアロード、高電力試験用空洞の設計に関して多大な助言を頂きました。本研究はこれらの方々の協力により迅速に進めることができ、深く感謝致します。

参考文献

- [1] L. Zang, et al., “Design Optimization of Flux Concentrator for SuperKEKB”, Proceedings of the IPAC2012, New Orleans, USA, May. 20-25, 2012
- [2] F. Miyahara, et al., “Development of L-Band Positron Capture Accelerating Structure with Kanthal-coated Collinear Load for SuperKEKB”, Proceedings of the IPAC2012, New Orleans, USA, May 20-25, 2012
- [3] F. Miyahara, et al., “Design of Accelerating Structure terminated with Kanthal-coated Collinear Load”, Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Osaka, Japan, Aug. 8-11, 2012
- [4] T. Kamitani, “Positron Source”, 18th KEKB Accelerator Review Committee, Tsukuba, Japan, March 4-6, 2013. <http://www-kekb.kek.jp/MAC/2013/>
- [5] CST STUDIO SUITE, <http://www.cst.com/>
- [6] X. D. He, “X-band Hybrid Dielectric-iris-loaded Accelerator Investigation”, Ph.D Dissertation, 2009 (Chinese)
- [7] R. H. Fowler and L. Nordheim, Proc. Roy. Soc. A119, 137, 1928.