

DESIGN OF ACCELERATING STRUCTURE TERMINATED WITH KANTHAL-COATED COLLINEAR LOAD

Fusashi Miyahara ^{#A)}, Kazuyoshi Saito ^{B)}, Yoshio Arakida ^{A)}, Kazuhisa Kakihara ^{A)}, Takuya Kamitani ^{A)}, Hiroaki Sakurabata ^{C)}, Yasuo Higashi ^{A)}, Shuji Matsumoto ^{A)}, Toshiyasu Higo ^{A)}

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

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{B)} Hitachi, Ltd., Hitachi Research Laboratory

7-2-1 Omikacho, Hitachi, Ibaraki, 319-1221

^{C)} Hitachi, Ltd., Power Systems Company

3-1-1 Saiwaicho, Hitachi, Ibaraki, 317-8511

Abstract

We have been developing L-band accelerating structure with Kanthal-coated collinear load, consisting of 5 cells, for SuperKEKB. We have measured surface resistance of the Kanthal layers coated by various thermal spraying techniques. We also evaluated the reduction of the resistance under high magnetic fields. Numerical simulation and the experimental measurement show that the L-band accelerator structure can be designed with collinear load consisting of Kanthal-coated cells.

カンタルコリニアロード終端型 L-band 加速管の設計

1. はじめに

SuperKEKB ではルミノシティが KEKB の 40 倍の 8×10^{35} [1/cm²/s] を目標としている。このため入射器には低エミッタンス、大電流の電子、陽電子ビームが要求される。電子ビームに関しては新たに開発した フォトカソード RF 電子銃を用いる。陽電子ビームは 3.5 GeV、10 nC の電子ビームをタングステン標的に入射し、発生した陽電子を Flux concentrator (FC) ^[1] とソレノイドの巻かれた大口径の加速管で構成される陽電子捕獲セクションで捕らえ、ダンピングリングで低エミッタンス化して得る。陽電子捕獲セクションは 2014 年の SuperKEKB リングへの入射では 2 m の大口径 S-band 加速管 6 本の構成で始める。大電荷運転でのダンピングリングにおける放射線バックグラウンドと陽電子の収率に問題がある場合は、FC の後には 2 本の 2.4m-L バンド加速管と 4 本の大口径 2m-S バンド加速管を配置する事を検討している。L-band を用いた場合、縦方向と横方向の捕獲効率を高くする事と主加速周波数である S バンドの 5/11 倍の周波数 1298.1818 MHz の L バンドを選択し、両周波数の加速管群間で の位相スリップを利用する事で、ダンピングリングに入射されるべきバケット以外のサテライトのバンチを抑制する事が可能となる。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放射線バックグラウンドの原因となる。数値シミュレーションでは 2 本の L-band 加速管を用いずに全て S-band 加速管とした場合、バックグラウンドが 2 倍になる事が分かっている。現在、加速管本体と 40 MW L-band

クライストロンも同時に開発中であり、今年 7 月に高電力試験を終えた^[2]。しかし、両端にカプラーを有する L バンド加速管を導入すると導波管部分のソレノイド磁場の落ち込みによる収集効率低下とソレノイドの径が大きくなる事によるコスト、電力、水冷要求の増加という問題がある。そこで出力カプラー部を加速管と同一線上の RF ロード (コリニアロード) に置き換える事とした。加速管への入力電力は約 10 MW、パルス幅 1.5 μ s、繰り返し 50 Hz であり、ロード部での電力損失は 1 kW 以下である。

コリニアロードの候補として炭化珪素セラミックス (SiC) を用いたタイプと通常空洞にカンタル (Fe-Al-Cr 合金) 粉末を溶射したものを検討した。前者は SiC ディスクをセル内部に備えたタイプ^[3] や砲弾型のタイプ^[4] で導波管ロードとしては実績があり、十分な性能が期待できるが、大きな温度依存性をもつ問題がある。カンタルは大きな電気抵抗率 (直流抵抗で銅の約 86 倍) を持ち、温度依存性は小さく、SLAC や他の加速器施設のダミーロードにも用いられている。カンタルを用いたコリニアロードは 1965 年に J. Haimson によって開発された^[5]。S-band では DESY の LINAC II で実績もある^[6]。但し、今回陽電子キャプチャー部に用いるためには、カンタルの諸特性を調べ直す事が必要であると認識して、本稿に関する試験研究を進めてきた。カンタル部の表皮抵抗や強いソレノイド磁場 (~0.4 T) 中での振る舞いや空洞への溶射方法の技術的な問題もあった。本稿では、カンタルの電氣的な特性評価結果とそれを用いた加速管の電氣的設計を報告する。

[#] fusashi.miyahara@kek.jp

2. カンタルの電気特性

カンタル被膜は溶射によって銅表面に形成する。溶射とは材料を加熱し、熔融または半熔融状態になると同時に運動エネルギーを付与して高速で飛行する液滴状態にし、これを基材表面に衝突させて被膜を形成する方法である。これまで実用にされているカンタル溶射方法では、銅の下地に適当なアンダーコートを行っているが、我々の試験では銅面に直接カンタルを溶射しても十分密着強度があることを考慮して、アンダーコートは用いないことにした。

空洞への溶射範囲やロードに必要な空洞の数を決めるには L-band の RF 中でのカンタルの表皮抵抗を知る必要がある。溶射によって形成されるカンタル層は小さな空孔を持ち、表面は小さな凹凸構造（数 μm ～数十 μm ）となっている¹⁷⁾。RF はカンタル層の内部まで侵入するためこの空孔構造が表皮抵抗に大きく寄与すると考えられる。被膜の構造は溶射方法や条件によって異なる。表皮抵抗が高いほど、設計の自由度が増すためロードに最適な溶射方法を調べる必要がある。また S-band で測定された RF の表皮深さは約 60 μm であり¹⁸⁾、L-band でも同程度の深さが必要であると予想されるため、被膜の厚さに対する実効的な表皮抵抗の変化を調べる必要がある。

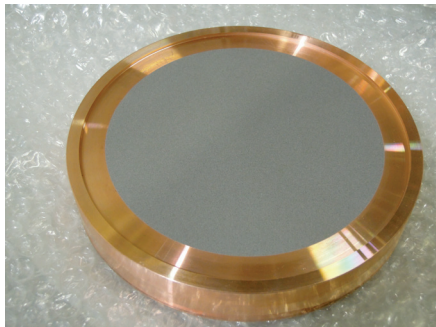


図 1: 銅のプレートにカンタルを溶射した様子

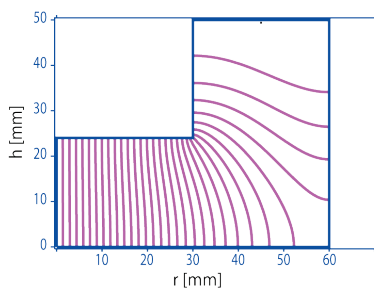


図 2 : 表皮抵抗測定用の空洞

そこで直径 120 mm の銅のプレートの内側 110 mm の範囲にカンタルを溶射し（図 1）、このプレートとカップ型の空洞を合わせ、図 2 に示した空洞として 1.3 GHz での Q 値からカンタルの表皮抵抗を評価した。TM01 モードの共振周波数は 1.3086GHz で、L-band 加速管の周波数とほぼ同じである。カンタル溶射部が銅の α 倍の表皮抵抗を持つ

と仮定すると空洞の Q 値は

$$Q_{Cu+Kantath} = \frac{2\omega_0 U}{R_{s,Cu} \left(\int_{S_{Cu}} |H|^2 ds + \alpha \int_{S_{Kantath}} |H|^2 ds \right)} \quad (2)$$

で与えられる。ここで ω_0 は RF の角周波数、U は空洞に蓄えられるエネルギー、 $R_{s,Cu}$ は銅部分の表皮抵抗で積分の項はそれぞれ溶射なし、溶射ありの空洞表面の磁場の積分を表す。溶射したプレートと溶射無しのプレートを使った空洞の Q 値の比と SUPERFISH を用いて計算した空洞表面の磁場からカンタル部の表皮抵抗を求めた。

表 1 に今回試験した溶射ごとに銅に対する表皮抵抗をまとめる。アーク溶射は 2 本の溶射用線材に電圧を印可し、アーク放電を発生させ、その熱で材料を熔融し、ガス噴出により基材へ成膜する。プラズマ溶射は高温の熱プラズマジェットに粉末材料を供給して成膜する方法で、大気中で行う方法と減圧容器中で行う方法がある。HVOF（High Velocity Oxy-Fuel 法）は高速フレイム（1300 ～ 2400 m/s）に試料を投入し、高い運動エネルギーで基材に衝突させ、被膜を形成する方法である。断面写真を比べたところ均一で密に詰まった構造よりも空孔が多数ある構造の方が表皮抵抗が大きくなる傾向にあった。粒径 53-104 μm の粉末を用いた HVOF で最も大きな表皮抵抗が得られたが、この方法は溶射の角度を 45° にすると被膜を形成することが出来ず、空洞内部に溶射するには適さないことが分かったため、空洞への溶射方法は大気プラズマを採用した。

表 1: 溶射方法ごとの銅に対するカンタルの表皮抵抗。 θ_{spray} は基材平面に対する溶射の方向、 α は銅に対するカンタルの表皮抵抗を表す。被膜の厚みは約 100 μm である。

溶射方法	粒径 [μm]	θ_{spray} [deg.]	α
アーク	-	90	60
大気プラズマ	53-104	90	77
大気プラズマ	53-104	45	87
減圧プラズマ	53-104	90	66
HVOF	53-104	90	116
HVOF	20-52	90	61

図 3 に大気プラズマ溶射での溶射量に対する表皮抵抗を示す。被膜表面は凹凸があり、厚さを再現性良く測るのは困難なため単位面積あたりのカンタルの質量としてある。溶射角度 90°、45° とともに 25 g/cm^2 以上溶射すれば表皮抵抗はほぼ一定になることが分かった。表皮抵抗が実効的な表皮深さと溶射量 d で決まると仮定すると溶射量に対する表皮抵抗は $1-\exp(-2d/\lambda)$ に比例する形で近似できる。図 3 の実線はこの関数をデータにフィットした様子で、

溶射角度 90、45° のデータに関してそれぞれ $\lambda=15 \pm 8$, $\lambda=18 \pm 9$ を得た。各実線はデータの振る舞いを再現している。溶射量 25 g/cm² の試料の厚みをマイクロメータで測定すると約 100 μm であるため、実効的な表皮深さは λ から換算して 60 μm 程度となる。

コリニアロードは加速管を覆うソレノイド内部に設置されるため、磁場中での表皮抵抗の変化を調べた。磁場の強さ 0 ~ 0.5 T の範囲で表皮抵抗の変化を測定したところ、溶射面が磁場の方向に対して垂直な場合はほとんど変化がないのに対し、平行な場合は大きく変化する事が分かった。この原因は磁気インピーダンス効果と考えられる^[9]。磁場に平行な面での減衰量を評価するため、図 2 に示した空胴の側面 (r=60, h=6—13) にカンタルを溶射し、磁場に対する表皮抵抗の減衰を測定した。図 4 に磁場中で表皮抵抗が減少する様子を示す。ソレノイド磁場は約 0.4 T であるため、空胴のシリンダー部分へ溶射した場合、この部分の表皮抵抗は磁場無しの場合に比べて 40%まで減少する。

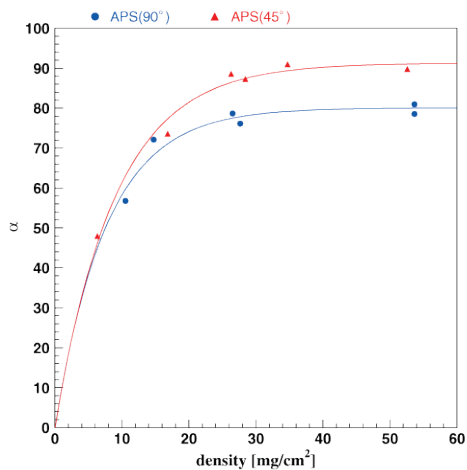


図 3 : 溶射量に対する表皮抵抗の変化

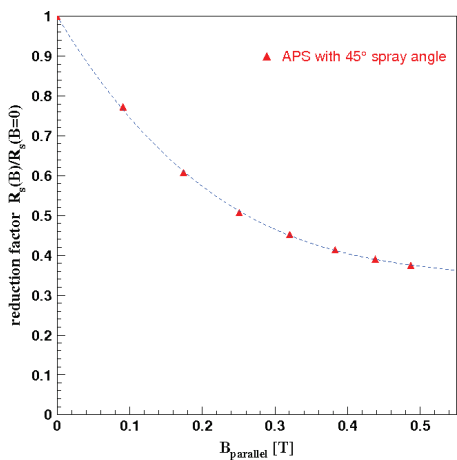


図 4:磁場中で表皮抵抗が減少する様子。横軸は溶射面に平行な磁場の強さ、縦軸は表皮抵抗の減少率を表す。

3. ロード部設計

加速管内の陽電子輸送の観点から電力の反射係数 Γ は 0.1 以下 (VSR<1.22) にする必要があると仮定した。空洞あたりの電力損失は空洞の Q 値と規格化群速度 v_g を用いて

$$P/P_{in} = \exp\left(-\frac{2\pi c}{3v_g Q}\right) \quad (2)$$

で与えられる。ここで P は空洞を透過する電力、 P_{in} は入力電力、 c は光速を表す。現在試験中の L-band 加速管^[10] の最後の空洞では $Q=20650$ 、 $v_g=0.00388$ である。ロード部では空洞での電力損失を大きくするため Q 値を小さくする必要がある。コリニアロード部の空洞の数が 5 個と仮定し、式(2)を用いて減衰量を評価すると Q 値が通常のセルの 1/40 ~ 1/15 程度のセルの組み合わせで十分な減衰量が得られることが分かった^[11]。Q 値を下げるには磁場の大きなシリンダー部に溶射すると効率が良いが、シリンダー部はソレノイド磁場と平行であるため磁場の強さに応じて Q 値が変化する問題がある。また、シリンダー部へ溶射すると空洞のマッチング調整用のディンプルチューニング部分に溶射する事となり、カンタルが剥離する可能性がある事と、溶射の際のマスクングが複雑になるという技術的な問題がある。そこで溶射はディスク面に限定する事とした。図 5 にディスク面の溶射範囲と得られる Q 値の関係を示す。カンタルの表皮抵抗は大気プラズマ溶射の試験で得た銅の 77 倍とした。シリンダー部へ溶射しなくても Q 値を 1/45 まで下げる事が可能である。

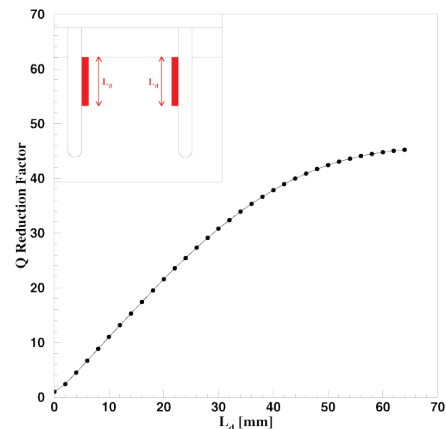


図 5 : 空洞のディスク面にシリンダーから長さ L_d の範囲でカンタルを溶射した際に期待される Q 値の減少率。横軸は銅に対するカンタルの表皮抵抗を表す。

次に具体的な設計を検討した。コリニアロード部の先頭の空洞はアイリス付近の電場が強いためアイリス付近まで溶射すると放電の可能性が増す事と、

Q 値を大きく下げると上流の空洞とのマッチングが難しくなることが懸念される。そこで5セルのうち、先頭の2空洞のQ値を大きくし、後半の3空洞のQ値を小さくする事とした。前半と後半でロードに入るRFの電力を約半分ずつ消費する様に要求すると、前半のQ値は1300 ($Q_{\text{regular}}/16$)、後半は650 ($Q_{\text{regular}}/32$)とすれば良い。

この設計での上流から進行してくる波に対するカンタルセクションでの反射特性を調べるためHFSS^[12]を用いたシミュレーションを行った。カンタル溶射部を厚み0.1mmとして、銅に対する表皮抵抗が87となる様に比透磁率2.5、電気伝導率 1.92×10^4 [S/m]の物質を空洞表面に配置した。図6に軸上の電場の強さと位相を示す。ロード部のシリンダー内径は $2\pi/3$ モードの周波数が運転周波数になる様に調整しており、この組み合わせでほぼマッチングがとれている事が確認できた。電場の強さは先頭の2空洞は通常のセルの8~9割程度、後半の空洞では4割以下である。上流側のセル部にリップルが現れ、反射波の存在を示しているが、VSWRは1.15程度で設計要求を満たしており、このままでも5空洞にカンタルを溶射すれば陽電子生成セクションのL-band コリニアロードとして十分な性能を持つことが分かった。実際には、主に上流の2セル、最下流のロス無しセルなどでの周波数チューニングで、カンタルロードセル部への継ぎ目での反射波を更に打ち消すことを検討している。

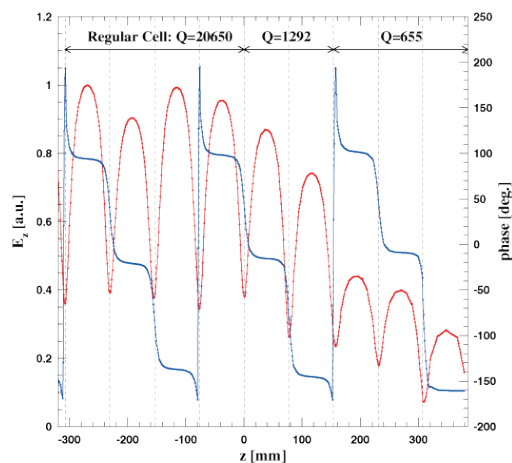


図6：HFSSを用いたシミュレーションで得た軸上の電場（赤色）と位相（青色）。 $z < 0$ は通常のセル、 $z > 0$ はロードセル部分に対応し、破線はセルの境目を表す。

4. まとめ

SuperKEKB 陽電子生成セクションに設置が予定されているL-band 加速管用のカンタルコリニアロードの研究、開発を行った。異なる溶射方法ごとに1.3 GHzの高周波でのカンタル溶射面の表皮抵抗を測定し銅の60~116倍の表皮抵抗を持つ事が分

かった。シミュレーションを用いた評価では、カンタルを溶射した5つの空洞で構成されるコリニアロードセクションはSuperKEKBのL-band 加速管に対して十分な性能を持つことが分かった。

今後、低電力セットアップで、設計の確認を行う。また、カンタル溶射部の高電界性能を確認することが必須と考えており、試験用の空洞を製作し、高電力試験を行う予定である。

参考文献

- [1] L. Zang, et al., "Prototyping of the Flux Concentrator for SuperKEKB Positron Capture", Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Osaka, Aug. 8-10, 2012.
- [2] S. Matsumoto, et al., "High Power Test of L-Band Accelerator Structure of SuperKEKB Injector Linac", Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Osaka, Aug. 8-10, 2012.
- [3] S. S. Win, et al., "DEVELOPMENT OF THE NEW C-BAND 50-MW CIASS SiC RF LOAD", APAC2004, THP16001.
- [4] J. Watanabe, et al., "DUCT-SHAPED SIC DUMMY LOAD OF LBAND POWER DISTRIBUTION SYSTEM FOR XFEL/SPRING-8", IPAC10, 2010, THPEA024.
- [5] J. Haimson, Nucl. Instr. and Meth. 33 (1965), 93.
- [6] Y. Arakida, et al., "Characteristics of Kanthal-Sprayed layer used for Collinear Load", Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Osaka, Aug. 8-10, 2012.
- [7] L. Lutz, private communication.
- [8] Y. Sun, et al., "KANTHAL ALLOY BASED S-BAND COLINEAR LOAD R&D FOR LINEAR ACCELERATORS", IPAC10, TUPEA074.
- [9] L. V. Pania, K. Mohri, "Magneto-impedance effect in amorphous wires", Appl. Phys. Lett. 65 1189(1994).
- [10] K. Saito, et al., "LOW-POWER TEST AND TUNING OF L-BAND POSITRON CAPTURE ACCELERATING STRUCTURE", TUPS1254, Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsukuba, Aug. 1-3, 2011.
- [11] F. Miyahara, et al., "DEVELOPMENT OF L-BAND POSITRON CAPTURE ACCELERATING STRUCTURE WITH KANTHAL-COATED COLLINEAR LOAD FOR SUPERKEKB", IPAC12, 2012, TUPPR051.
- [12] HFSS, <http://www.ansys.com/>