

CHARACTERISTICS OF KANTHAL-SPRAYED LAYER USED FOR COLLINEAR LOAD

Yoshio Arakida, Yasuo Higashi, Toshiyasu Higo, Shuji Matsumoto, Fusashi Miyahara
KEK, High Energy Accelerator Research Organization
1-1 Oho, Tsukuba-shi, 305--0801

Abstract

The upstream-side of the positron capture section of SuperKEKB injector will be consisted of L-band accelerator structures surrounded by solenoid magnets as one of the option for larger bunch charge after T=0 with moderate bunch charge. The accelerator structure will be inserted into the solenoid. Therefore, the solenoids become huge to accept the waveguide port flanges if input and output waveguides exist. Then, we started developing the collinear load to omit the output coupler and waveguides. The Kanthal material was chosen as the lossy material for this purpose. Various characteristics of the Kanthal sprayed layer was measured aiming at using for the cells at collinear load of the accelerator structure.

コリニアロードに用いるカンタル溶射膜の特性

1. はじめに

SuperKEKB の陽電子発生直下流の高周波加速初段は L band も想定され、ソレノイド磁場内で使用される。要求されている磁場 0.4T は大きく、加速管とソレノイドコイルは別途製造してソレノイドコイル内孔に加速管を差し入れて組み立てることになる。コイルは内径が小さい方が望ましいが現状は高周波入出力ポート形状により $\phi 350$ 程度以上に制限される。これを小さくするためには、高周波の排出に出力ポートによらず加速管後部ビーム軸上で消費させるコリニアロードが必要になる^[1]。

コリニアロードはこの場合高抵抗分の大きい Low Q 空洞にすることに他ならない。加速部空洞との構造の共通性を保つ薄膜でしかも高抵抗物質として機能するよう、鉄合金“カンタル”が候補に挙げられる。これは磁性体であり、高磁場中に置くことになる。他方表皮効果により抵抗層は薄くてよいので空洞の内壁に溶射により形成できる。この方法は古くは Oak Ridge の L バンド加速器^[2]に用いられており、最近では DESY LINAC-II の S バンド加速器^[3]にも用いられている。しかし、SuperKEKB の計画に用いるべく検討始めると、日本では加速器に最近応用した例を筆者らは見つけることができず、カンタル溶射膜自身の物性で不明の点が多いので、これを確認して進めねばならない、との結論に達した。本稿は空洞に溶射膜を形成することを目標としたときに必要な諸特性を評価したのでその結果を報告する。

2. 溶射の材料と方法

2.1 溶射する物質

溶射とは、高温により熔融した材料を基体表面に高速で吹き付けることで、基体表面に積層させる表面改質法の一つである。空洞に溶射する高抵抗物質

としてカンタル^[4]を使用する。カンタルはクロム 20-30%、アルミニウム 4-7.5% の鉄合金で、抵抗率が鉄 $\sim 10^{-7} <\Omega\cdot m>$ 台に比較して $\sim 10^{-6} <\Omega\cdot m>$ 台と大きく、広く抵抗素子や発熱体として広く使われている。通称“ニクロム線”も現状多くの場合は後発で特性のよいカンタル系鉄合金とのことである。

2.2 溶射の方法と選択

溶射方法は幾種類もある^[5]が、利用できる設備等の事情により検討したのは以下 4 方法である。

- 1) AS : アーク溶射 (Arc Spraying) 2本の線状の溶射材料間のアーク放電を熱源とする。
- 2) APS : (大気) プラズマ溶射 (Atmospheric Plasma Spraying) アルゴンガス中放電のプラズマジェットによる。溶射材は粉末。
- 3) VPS : 真空 (低圧) プラズマ溶射 (Vacuum Plasma Spraying) プラズマ溶射を真空中か低圧環境で行う。
- 4) HVOF : 高速フレーム溶射 (High Velocity Oxy-Fuel)酸素と燃料の燃焼を熱源とする。溶射材は粉末。

カンタルを溶射した空洞の高周波特性の委細は別稿^[1]によるが、高周波特性の理由で、我々はまず AS を除外した。

また、VPS の溶射作業は、①チェンバー内で行われる、②溶射前後、チェンバーの減加圧に時間を要する、③真空中にあるために溶射体が冷却されにくくワークの温度上昇が大きい、④真空チェンバー内の作業は大気中と比較して制約が多い、等の特徴があり、加速器パーツ製作には向かないと判断した。

HVOF は上記 4 方法中最も温度上昇が大きく溶射終了直後は摂氏数百度以上と推定される。我々の溶射試験でも、試料の銅表面が変色し、耐熱テープは焼きつき、融点の低い金属はマスクに使えない等問題点が明らかになった。また、当初溶射する面はカップの内面と考えていたため、照射ビームと溶射面の角度が直角でなく、溶射が難しいことが判明し、

yoshio.arakida@kek.jp

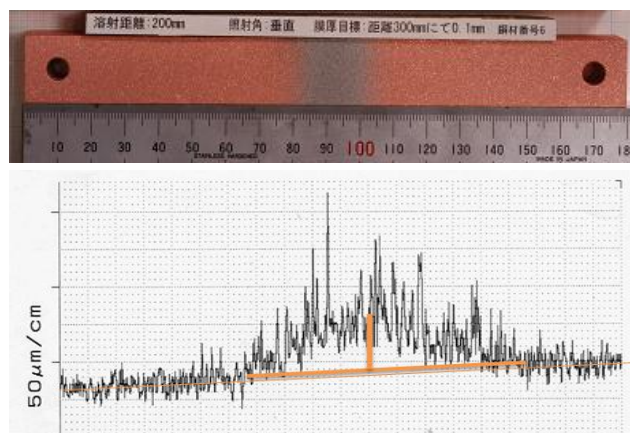
採用しないこととした。

以上の溶射方法に関する判断より、その後の全ての試験をAPSに集中して進めているので、これについて報告する。

2. 溶射層の表面形状とマスクング

2.1 表面形状

溶射層は針状起伏が多いが一応全幅 25mm の正規分布と見なせるだろう。実際の溶射面はこのような分布を 8mm ピッチ程度で移動しながら重畳させるので、厚さ一様な面を得ることができる。図2に直径φ110 にわたって溶射したときの膜厚分布を示した。これは先端φ5μm、開き角度 60 度のスタイラスで計測した。図2上より、100μm の平均膜厚に対して、山谷はほぼ 100%に及ぶことがわかる。一部拡大したのが図2下だが、鋭い立ち上がりはほぼスタイラスの角度によっていて、実際は更に切り立った構造である可能性がある。重ねて溶射しても突起起伏は大きい。ほとんどの場合、厚さのマイクロメータ計測値は溶射前後の重さの差から換算した厚さのおよそ2倍強である。



25mm w. 54μm h

図1 分布測定片の溶射

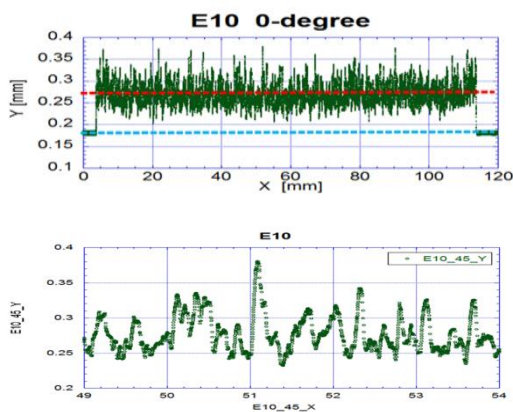


図2 平面へのAPS溶射の膜厚分布

2.2 マスキング

空洞への溶射に関しては、高電界部や接合部等に溶射しないことが要求されるので、適当なマスクングが必要である。溶射とマスク境界部はスムーズに溶射厚さが変化して角のある段差とならない必要がある。被溶射基板面にマスクエッジが密着、0.5~2mm 隙間の場合等の駒をつくり試した。図3に今回試験したマスクの例を示すが、右上から斜め45度に溶射する場合を想定したマスクである。

図3の6番マスクを使用した左45度上方からの溶射での溶射面断面形状を図4に示す。右側上段部分が溶射層、左側が銅ブラスト面である。

マスク1, 2のように切り立っている場合は、光の影のように溶射の当たらない部分ができる。マスク11, 12のように溶射角より浅くなると、図3に濃くみえる、先端先により多く積もった部分ができる。従ってマスクのエッジは溶射角よりも急にしなければならぬと判断した。

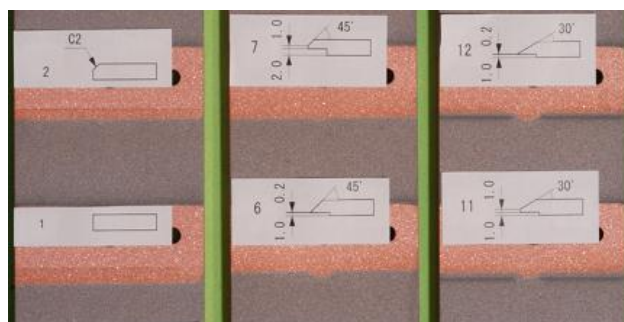


図3 マスク試験の例

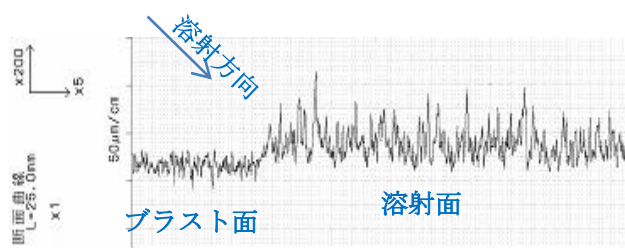


図4 マスク6番での溶射面形状

3. 空洞部品への溶射

3.1 溶射の条件

高周波空洞は製造上”Cup”と”Disk”に分けて部品製造し組み立てられる。Cup は円筒内側面と底面に溶射が必要のために斜め45度方向からの溶射となる。溶射厚さが均一になるようにCupは回転させる。回転とガンの上下動で平面溶射とピッチ移動速度が同等になるようにする。今回は半径方向による違いは補正しなかった。ガンとCupが衝突しないように吹き出し口から被溶射体位置まで200mmとした。

図5に空洞形状とスプレアの配置を示した。図6は実際のターンテーブル上での溶射の様子である。

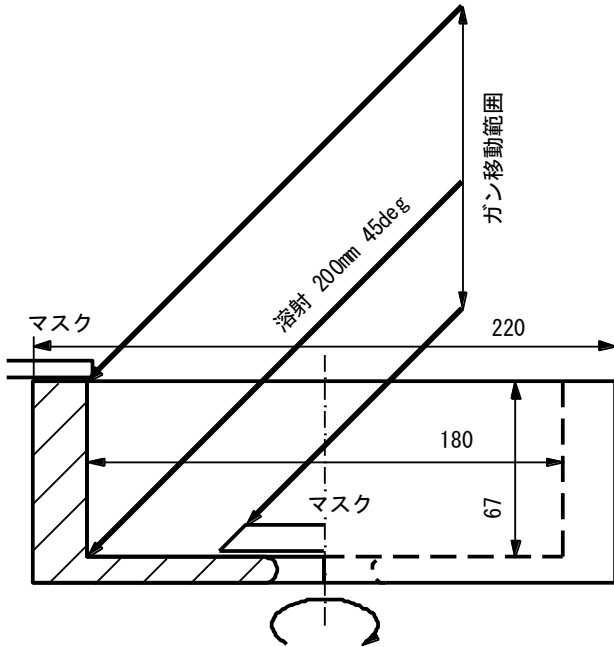


図5 空洞“Cup”と溶射方向と動き

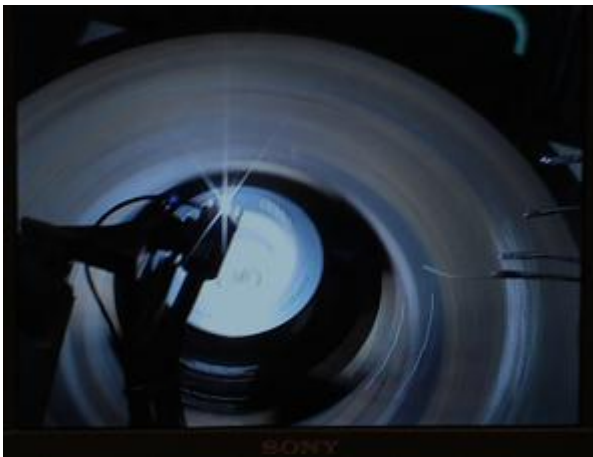


図6 ターンテーブル上“Cup”への溶射の様子

3.2 温度測定

金属のマスクと精密加工部が直接接触しないようにするためと隙間から塵が吹き込まないようにするために、弾力のあるシールを介してセットすることが望ましいと考えた。弾力あるシールは高温での変質等の問題があるので、溶射中の Cup の温度測定を行った。

Cup の底面、側面の数箇所溶射裏面より表面近くまで穴を開け熱電対を差し込んで計測した。結果を図7に示す。底面も側面も温度に近いのは基材が銅で熱伝導が良いためであろう。2回の溶射とそ

の後自然冷却を示している。APS ならば1回 100 μm 程度の溶射あたり 10 $^{\circ}\text{C}$ 程度温度上昇が観測された。

溶射の金属粒子は付着時点でも千 $^{\circ}\text{C}$ 以上と思われるが、溶射粒子が直接当たらない工夫をすればゴムやプラスチック等のシールが使えると判断した。

Cup に付着する粒子が持ち込む熱量を相当過大に見積もっても、Cup の温度上昇 (20 $^{\circ}\text{C}$ 程度) に対応する熱量の方が何倍も大きい。従って Cup に持ち込まれる熱の相当部分はプラズマジェットからと考えられる。

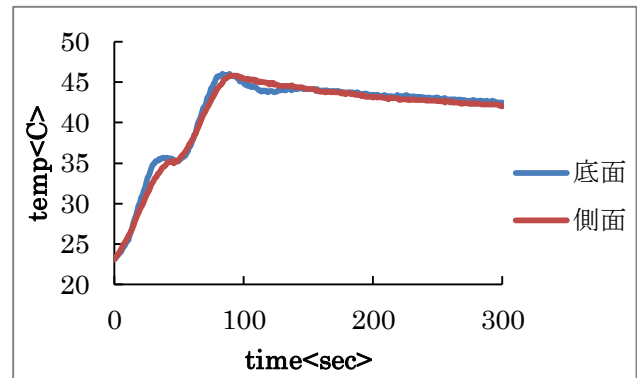


図7 溶射による“Cup”の温度

4. 直流抵抗の測定

電気計測の基本として溶射帯を作り直流抵抗を調べた。

4.1 線材の抵抗

カンタル自体の抵抗測定のために購入した素材 ϕ 1.6 線を使い、低抵抗値が予想されるので4端子測定を行った。長さ 10m 強に電流を流し電極間隔の内側で電圧を測定した。測定結果は 0.700 $\langle\Omega/\text{m}\rangle$ 、製造会社の表示は 0.7011 $\langle\Omega/\text{m}\rangle$ であり、同等であった。抵抗率に換算すると $1.407 \times 10^{-6} \langle\Omega\cdot\text{m}\rangle$ となる。

4.2 溶射帯の抵抗測定

溶射された状態は固体と異なると思われる。SUS 基板上に先ずセラミックを溶射して絶縁層をつくりその上に長さ 1050mm、幅 10mm の溶射帯を作る。形状は耐熱テープのマスキングにより形成した。厚さはマイクロメーター測定で $\sim 50\mu\text{m}$ となった。形状測定により数十 μm の起伏が大きいことはわかっているので電流導入部はインジウムを挟んで電極片を固定した。

結果を表1に示す。質量から換算する一体の金属膜と比較して7倍ほど抵抗値が大きい。また図8に示す電圧分布からは、溶射平均厚さは一樣であることがわかる。

表 1

抵抗試験片の溶射厚さと直流抵抗計測値

ID	質量換算 <μm>	マイクロメータ <μm>	実測 <Ω>	抵抗率換算 <Ω・m>
1	21.5	56.3	48.9	1.051E-05
2	17.4	58.3	63.4	1.103E-05

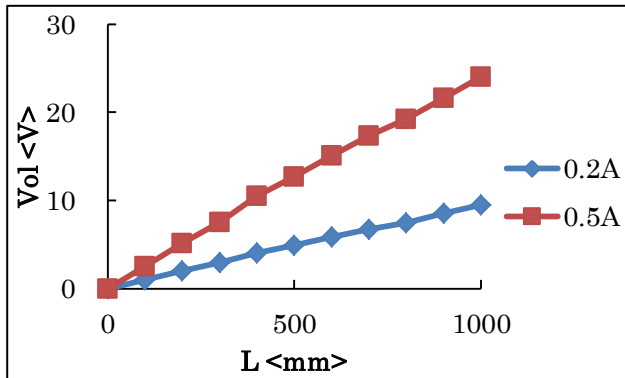


図 8 抵抗体の電圧分布

5. ガス放出レートの測定

APS で溶射した試験片を作りガス放出レートの測定をした。

5.1 測定方法と装置

溶射面は前出のようにキメが粗いものになる。つまり、溶射表面からの脱ガス量は、清浄な金属表面と比較すると多くなることが予想される。

加速管内は 10^{-6} Pa 以下の高真空に保たなければならない。このため、加速管と一体になるコリニアロードもこれと同等の真空度に保たなければならない。カンタル表面からの脱ガス量を定量的に知っておくことは重要である。

この目的のため、専用の真空装置と試料を用意しガス放出量測定を行った。試験装置を図 9 に示す。

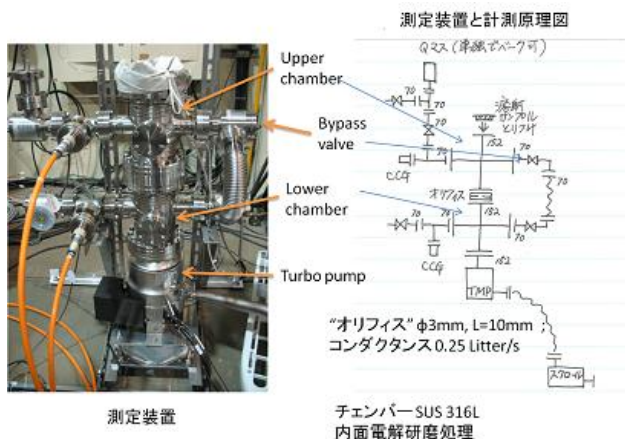


図 9 ガス放出特性測定装置

試料は以下である。ガス放出試験片の写真を図 10 に載せる。

- ① APS SS Plates
カンタルを溶射した SUS 板 (10 枚で 1 セット)
- ② APS baked SS Plates
APS 後真空炉で 800 度まで加温してベーキング処理したもの 1 セット
- ③ Plain SS Plates
表面を電解研磨処理した、APS 試料と同一形状の SUS316L 板 (1 セット)
- ④ Empty chamber
真空槽に何もいれず、空の状態での測定を行った。

5.2 測定手順

- ① 試料 (55mm×150mm 厚さ 1mm ; 10 枚 1 セット) を Upper chamber に入れる。
- ② Lower chamber をターボポンプで排気する。粗排気を行う間は上記バイパスラインバルブを開き Upper chamber を速やかに排気する。
- ③ Upper chamber の圧力が十分下がった時点でバイパスバルブを閉じる。オリフィスのみを通じた排気を定常な状態に達するまでおこなう。



図 10 ガス放出試験片

5.3 脱ガス量測定：

定常法による評価を行なう。オリフィスのみを通じた排気では Upper chamber の圧力は通常、おおむね 100 時間程度でほぼ定常な状態に達する。このときの Upper chamber 内の圧力 P は、オリフィスのコンダクタンスを C として

$$P = C Q$$

と書ける。ここで Q はチェンバー空間への固体表面からの時間当たりの脱ガス量 (単位 Pa m³/s) で、ガス源は、チェンバー表面からと試料表面からである。前者は、試料を入れず空の状態での測定からその量を知ることができる。

5.4. ガス放出レートの測定結果

表 2：単位面積当たりのガス放出レート測定値

試料	$\times 10^{-8} \text{ Pa m}^3/\text{s/m}^2$
Empty Chamber	2.1
Plain Plates	1.7
APS Baked Plates	3.3
APS Plates	11

清浄な表面と比較すると、溶射のみの場合は約 10 倍、溶射後熱処理を行うと数倍まで減少することが確認された。想定されているコリニアロードを実装した Lバンド加速管では、RF 吸収体を塗付したセル数 5 に対し、加速セル数は 24 なので、コリニアロードが付加によるガス放出総量は多目に見積もっても加速管のみの場合の数倍程度と期待される。

5セル分のカンタル溶射面の面積は約 0.16m^2 でそこからのガス放出レートは表 1 Baked APS の測定値から $5.3 \times 10^{-9} \text{ Pa m}^3/\text{s}$ 。たとえば長さ 30cm の $\phi 35$ ビームパイプから排気したとして（パイプコンダクタンスは 15L/s）となり、コリニアロード内の平均圧力は $3.5 \times 10^{-7} \text{ Pa}$ 程度となる。真空圧力としては十分な値になり、排気系設計も厳しくない。

6. 作業工程について

加速空洞の内面は超精密加工がされている。溶射の工場は超精密加工とは全くの別世界である。溶射する表面は表面活性化のために“ブラスト処理”により表面を改質される。表面具合調整は現状では熟練者の経験に拠っている。重量 kg に対して μg の分解能の計量では質量の減少は見られなかった。

溶射条件にもよるが、溶射材料のうちで皮膜となって付着するのは 1/4 程度であり、他は溶射ブース内の塵となる。工場は各作業の場にエアガンが用意しており、工程前後にはエアブローにより前工程の塵を落とすのであるが、作業が進むにつれて作業場、作業台に塵が付くのが感触でわかる。また当初溶射マスクの金属枠は溶射現場で着脱していたが、いくら注意してもブラストの砂粒が入り込んで空洞部品に傷が絶えなかった。この状況を鑑みて、加速器パーツの製作工程としては、クリーンな環境で溶射セットアップを行い、工場に搬入してブラスト処理と溶射を連続で行い、再度クリーンな環境に戻して塵などに気をつけながら治具の分解を行うことが必須であると考えている。裏面に生じやすい隙間は、耐熱テープ等で密封し工場では外さないことが重要である。

7. まとめ

1 年程の間の各種溶射試験により空洞への溶射は APS で可能との見通しを得た。溶射時のマスクングに用いるシールについては十分信頼できる材料が得

られておらず検討が必要である。更に精密加工面の防塵は溶射関係すべての工程で常に注意しなければならないので、前章に述べたケアを考慮しつつ全工程を設計する必要がある。

参考文献

- [1] 宮原房史 他, カンタルコリニアロード終端型 L-band 加速管の設計, THLR04, 第 9 回日本加速器学会年会
- [2] J. Haimson, Nucl. Instr. and Meth. 33 (1965), 93.
- [3] L. Lilje, DESY, private communication.
- [4] Kanthal, 商標 カンタル®: サンドビック (株)
- [5] 馬込正勝 編 “溶射技術マニュアル”, 日本規格協会