

平成 2 6 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「高性能皮膜を高歩留まりで施工できるプラズマ溶射トーチの開発」

研究成果報告書

平成 2 7 年 3 月

委託者 関東経済産業局

委託先 シンワ工業株式会社

目次

第1章	研究開発の概要	… 3
1-1	研究開発の背景・研究目的及び目標	… 4
1-1-1	高度化目標	… 4
1-1-2	特定研究開発等の実施方法	… 5
1-1-3	従来、及び競合プラズマ溶射機の課題	… 5
1-1-4	特定研究開発品の内容	… 7
1-2	研究体制	… 8
1-3	成果概要	… 10
1-3-1	出力課題への対応	… 10
1-3-2	歩留まり向上課題への対応	… 14
1-3-3	耐プラズマ性向上課題への対応	… 15
1-3-4	高速化課題への対応	… 15
1-3-5	高電圧・低電流運転について	… 16
1-3-6	冷却水への熱ロスについて	… 16
1-3-7	特許取得について	… 16
1-3-8	開発品スペック	… 16
第2章	本論	… 17
2-1	実施内容	… 17
2-1-1	出力課題への対応	… 17
2-1-2	歩留り向上課題への対応	… 19
2-1-3	耐プラズマ性向上課題への対応	… 21
2-1-4	高速化課題への対応	… 22
最終章	全体総括	… 25

第1章 研究開発の概要

一つの電極から発生したプラズマを複数に分岐し、溶射材料をノズ先端の中心から軸方向に噴出し、複数のプラズマで包み込む技術を応用することで、溶射の電力、材料、時間コストを低減するとともに、高速化による緻密な皮膜や、外気との接触を抑制し酸化を抑えた皮膜を高歩留まりで施工できるプラズマ溶射トーチを開発する。また、従来使用できなかった液体材料を使用可能とし、半導体、航空宇宙、製紙機械・印刷機械分野からの高性能皮膜の要求に対応した研究開発を行う。

本開発品は、主トーチノズルの先端面には、その軸芯を中心点とする同心円線上に間隔をおいて3個以上のプラズマジェット噴出孔を設け、一つの陰電極から発生したプラズマジェット及びプラズマアークを分岐し、その中心に溶射材料噴出孔を設け、溶射材料を軸方向に供給する。また、その主トーチから出る複数のプラズマと、副トーチから出るプラズマを一つの電気回路で繋げる技術を実現した。副トーチの数は、1個～3個まで選択可能である。

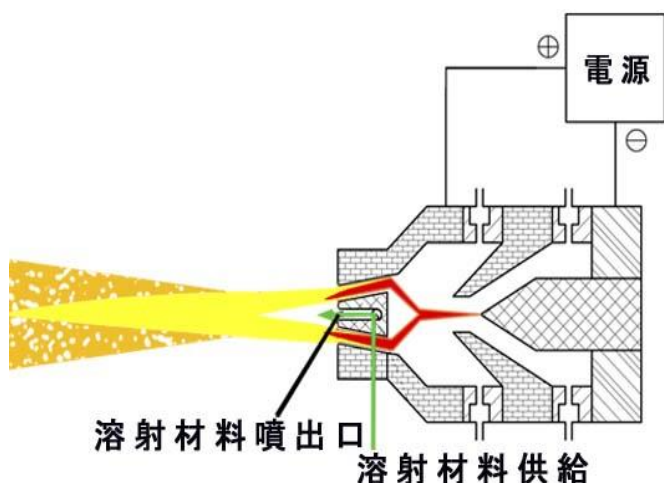


図1 プラズマの分岐

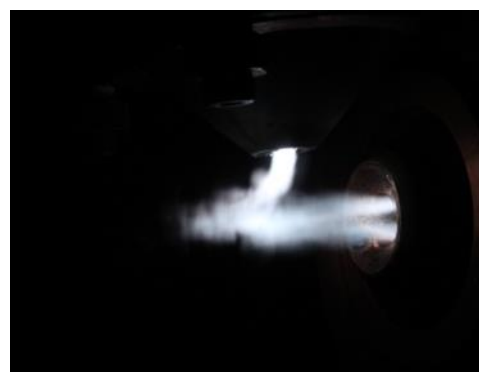
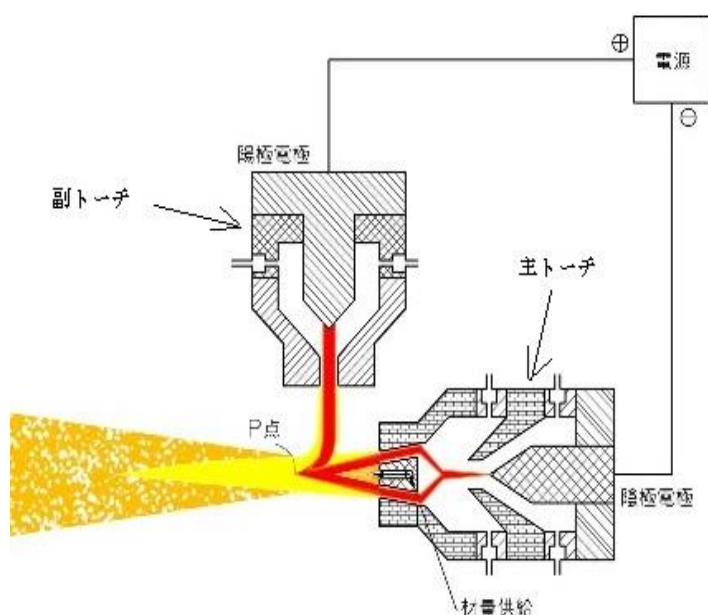


図2 プラズマアークの連結

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

プラズマ溶射は高温高速のプラズマフレームにセラミックや金属の粉末を供給し、溶融または半溶融の粒子を基材表面に吹き付けて皮膜を作る技術で、耐摩耗性、耐食性、耐熱性の向上、電気磁気特性の付与など表面改質処理技術として、産業用ガスタービンや自動車部品さらに半導体製造装置など、広く産業に利用されている。しかし、従来のプラズマ溶射装置は溶射材料をプラズマフレームの横から投入するため材料がフレームの中心に入りにくいという問題がある。また、エネルギーの有効利用、均一加熱の点から、フレームの軸方向後方から溶射材料を供給する方式（アキシアルフィード方式）は、非常に有効であり、近年、各社で開発が進められている。本開発は、従来型のプラズマ溶射装置のみならず、近年開発されている他のアキシアルフィード溶射装置の課題も解決する目的で行った。

1-1-1 高度化目標

(1) 半導体・液晶製造装置に関する事項

①川下製造業者等の抱える課題及びニーズ

エ. 長寿命化、維持管理の軽減。

半導体製造装置部品の長寿命化、維持管理の軽減を図る。

②上記を踏まえた高度化目標

ウ. 皮膜の電気絶縁特性の向上、 カ. 溶射の高速化、歩留まりの向上

半導体製造装置部品において、本研究で開発する新型アキシアルフィード型プラズマ溶射トーチを用いて、微粒な溶射材料の使用を可能とし、且つ、溶融粒子を高速化することで、皮膜が緻密化し、耐プラズマ性が向上し、寿命の長期化に繋がる。また密着力を高めたり、電気絶縁性を向上することを可能にする。

(2) 航空宇宙に関する事項

①川下製造業者等の抱える課題及びニーズ

イ. 長寿命化、維持管理の軽減。

航空機のタービンブレード、ケーシングの遮熱部において長寿命な遮熱皮膜を提供し、川下産業の維持管理の軽減を提供する。

②上記を踏まえた高度化目標

ク. 溶射の高速化、歩留まりの向上。

本研究で開発するアキシアルフィード型プラズマ溶射トーチを用いて溶射を高速化することで、緻密で密着力の高い皮膜の作成が可能となり、従来より高い蒸気温度での運転を可能にし、タービン効率の向上に繋がる。

(3) 製紙機械・印刷機械に関する事項

①川下製造業者等の抱える課題及びニーズ

ア. 生産性の向上、 イ. 環境配慮の推進、 ウ. 品質の向上

製紙・印刷業界の各種ロールの補修、製作において、従来のプラズマ溶射より緻密な皮膜を提供し、川下産業での生産性向上に貢献する。また、従来の六価クロムめっきの代替が可能で、環境に配慮した、且つ長寿命の皮膜を提供できる。

②上記を踏まえた高度化目標

ア. 皮膜の耐摩耗性、グリップ性、耐衝撃密着性等の向上、 オ. 溶射の高速化、歩留まりの向上

本研究で開発するアキシアルフィード型プラズマ溶射トーチを使って溶射を高速化する

ことで、緻密で密着力の高い皮膜の作成が可能となる。

1-1-2 特定研究開発等の実施方法

(1) 高機能化に対応した技術開発の方向性

①部材表面の機能付加（耐熱性、耐食性、耐摩耗性等）に資する溶射技術の研究開発

ウ．溶射皮膜形成時の粒子の低温化、高速化等による材料変性の抑制

②基材の保護（外部環境からの遮断、密着性確保）に資する溶射技術の研究開発

半導体製造装置で使われる材料には、電気絶縁特性と熱伝導性が要求されるものがあるが、これに利用される特殊な材料の皮膜作成技術はまだ確立されていない状況である。こうした状況下、これらの課題を解決し、半導体製造装置分野において付加価値の高い皮膜作成技術の確立を目指す。

(2) 溶射品質の信頼性の向上に対応した技術開発の方向性

①溶射加工の自動化、高速化に資する技術開発

溶射加工において、高速化したプラズマガスフレーム中に材料を投入することにより、皮膜が緻密になり性能が向上することが期待されている。しかしながら高速のプラズマフレーム中に外部から材料を投入しようとする材料が弾き飛ばされてしまう。本研究で開発したアキシアルフィード型プラズマ溶射装置を応用してこの課題を解決し、緻密で高性能な皮膜作成技術の確立を目指す。

(3) 環境配慮に対応した技術開発の方向性

②溶射技術の効率の向上（材料、エネルギーの利用効率等）に資する技術開発

③資源リスクの低減に資する溶射技術の開発

製紙機械・印刷機械分野におけるフィルムロール、アニロックスロールの補修では歩留まりの高い緻密な皮膜が要求されている。従来技術である六価クロムめっきは毒性が強いことからより安全な材料を用いた方法への代替が検討されている。プラズマ溶射での補修で環境配慮の生産プロセスに貢献する。

1-1-3 従来、および競合プラズマ溶射機の課題

従来のプラズマ溶射機は、溶射材料をプラズマフレームの横から投入するため、プラズマフレームに入った材料のみ溶融、または半溶融し皮膜を形成する。プラズマフレームに入らなかった材料は飛散する。

一方、プラズマフレームは中心部分の温度が高く、中心から離れるに従い温度が低くなる。このため、中心に入った材料は良く加熱され、中心から少し外れた材料は加熱の少ない状態となる。しかし、これらは、共に皮膜を形成するため、熱履歴にバラツキのある粒子が皮膜中に混在する事となる。

また、投入した材料の内、成膜に寄与する割合（歩留り）が、非常に悪い。通常、歩留りを良くするために、材料は事前に分級され、粒度分布のシャープな溶射材料が使用されるが、それでも、歩留りは30%～60%である。且つ、この溶射材料を送りこむガス量の調整は慎重に行う必要がある。

このため、サブミクロンやナノレベルといった微粒の材料や液体材料はプラズマフレームに弾き飛ばされるため、従来の溶射機では使用出来ない。

このようなプラズマフレームに溶射材料が入り難い状況は、プラズマフレームの速度を増すに従い顕著となるため、高速化による緻密な皮膜を形成しようとする場合の障害となる。

また、プラズマ溶射トーチの場合、内部が高温になるので水冷しているが、トーチ内部に

プラズマアークの繋がる点が存在するので、冷却水への熱ロスが60%～70%と高い。

構造上、プラズマアークが短いので、低電圧／高電流の運転となり、電極の消耗が早い。
従来プラズマ溶射機の課題を以下にまとめる。

従来プラズマ溶射機の課題

- ・溶射材料の塗着効率が低い。（30%～60%）
- ・微粒（20 μ mアンダー、サブミクロン、ナノレベル）や液体材料を使用することが出来ない。
- ・溶射粉末材料の製造工程で造粒や分級が必要があり、材料コストが高くなる。
- ・溶射材料を均一加熱しにくい。
- ・熔融粒子の高速化が難しい。（約300m/s以下）
- ・冷却水への熱ロスが大きい。
- ・低電圧／高電流であり、電極の消耗が早い。

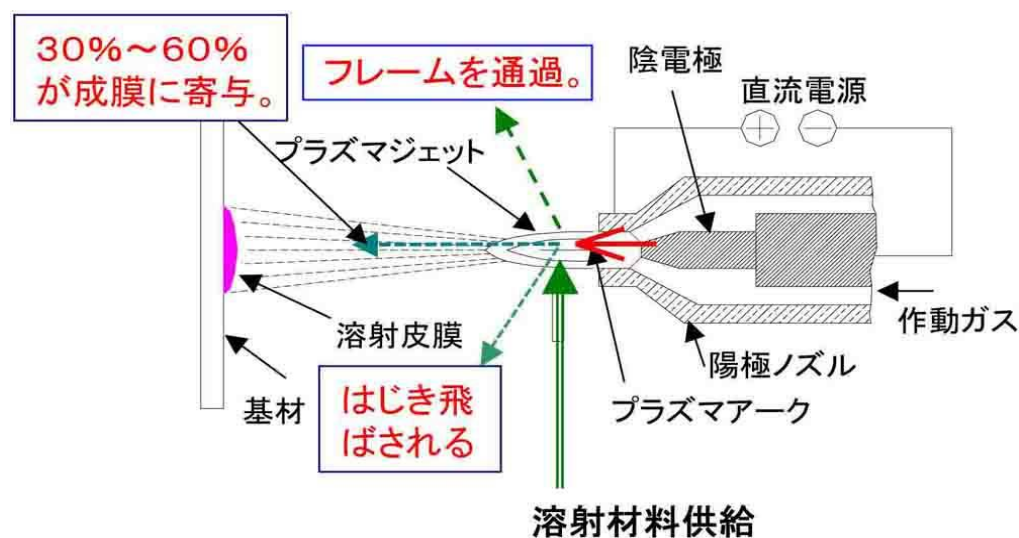


図3 従来の外部供給型プラズマ溶射トーチの課題

競合アキシアルフィード型溶射装置の課題

- 溶射材料をプラズマ発生室内、またはプラズマジェット噴出孔内に供給するため（内部供給方式）、熔融した溶射材料がプラズマ発生室内や電極、及びプラズマジェット噴出孔内に付着しやすい。このため、連続運転の阻害要因となったり、製品（皮膜）にスピットが付着する。
- 溶射材料供給機側に背圧が作用し、耐圧設計が必要となる場合がある。
- 3組の陰極－陽極部を持ち、3つのプラズマジェットを一つに収束させ、その中心に軸方向に溶射材料を供給する溶射装置（3電極型）は、構造上、プラズマジェットが収束するまでの距離が長いため、大きな出力を必要とする。このため、処理能力は大きくなるものの、経済的な出力での溶射が困難であり、基本電力料金のアップや初期設備投資が大きくなる。
- 溶射材料は、1万℃以上のプラズマアークではなく、格段に温度の低いプラズマジェットに供給されるため、熱効率が従来型同様に良くない。

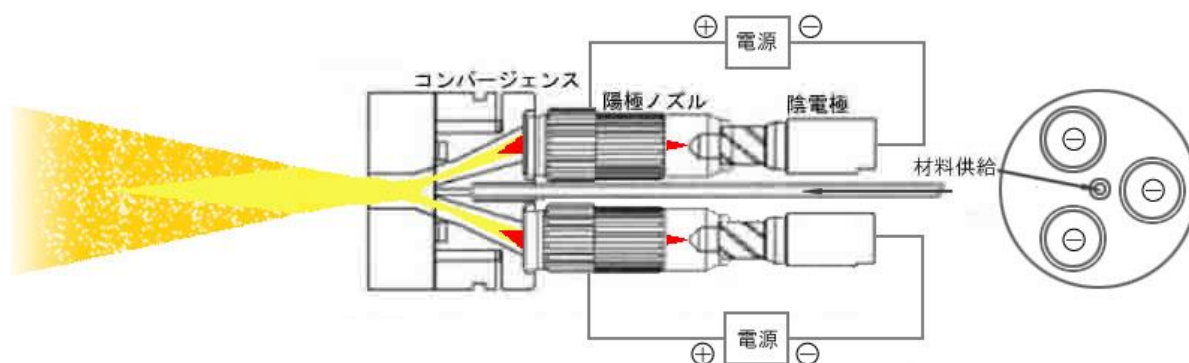


図4 競合アキシャルフィード型溶射装置

1-1-4 特定研究開発品の内容

【従来の考え方】

従来のプラズマ溶射機は、ノズル先端の中心に穴が一つ有り、そこからプラズマが1本出るのが常識であった。この時、プラズマは細く集中し中心温度は1万℃以上の高温になるため、プラズマを分岐する多穴構造にすると分岐部が溶失してしまうと考えられていた。

【新技術】

プラズマが集中する前に、プラズマを分岐する事で、分岐部が溶融せず、プラズマを多穴から出す事を可能にした。また、分岐後のプラズマは、一つに収束する。この結果、ノズル先端部に材料噴出用の孔を設け、溶射材料をプラズマフレームの後方から軸芯に向かって投入する事が出来るようになった。

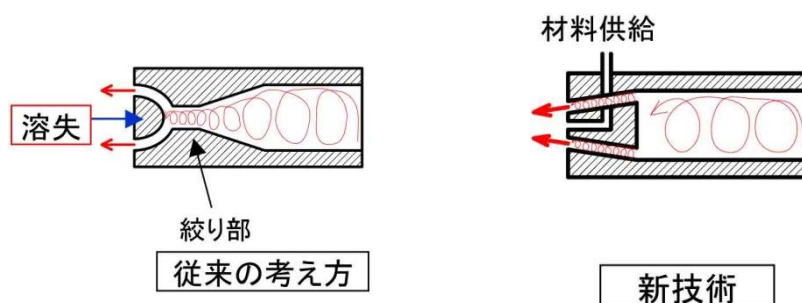
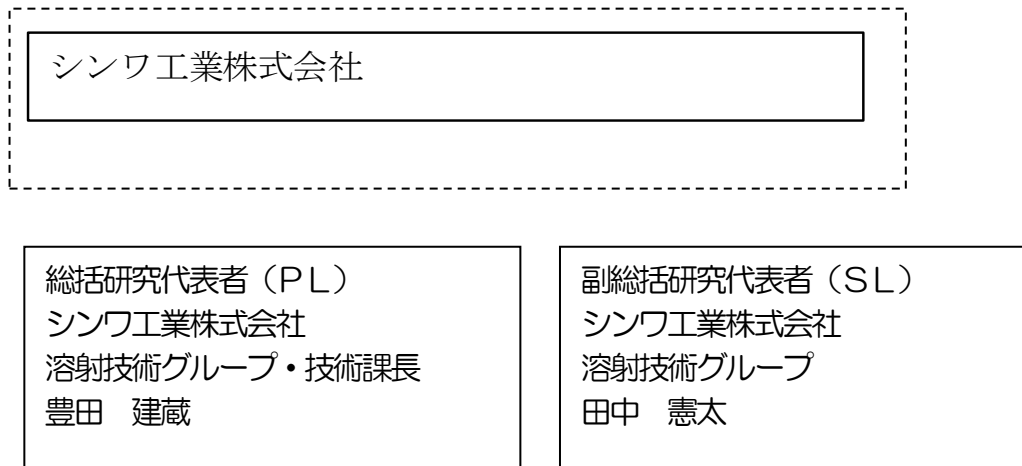


図5 プラズマを分岐する考え方

1-2. 研究体制

(1) 研究組織及び管理体制

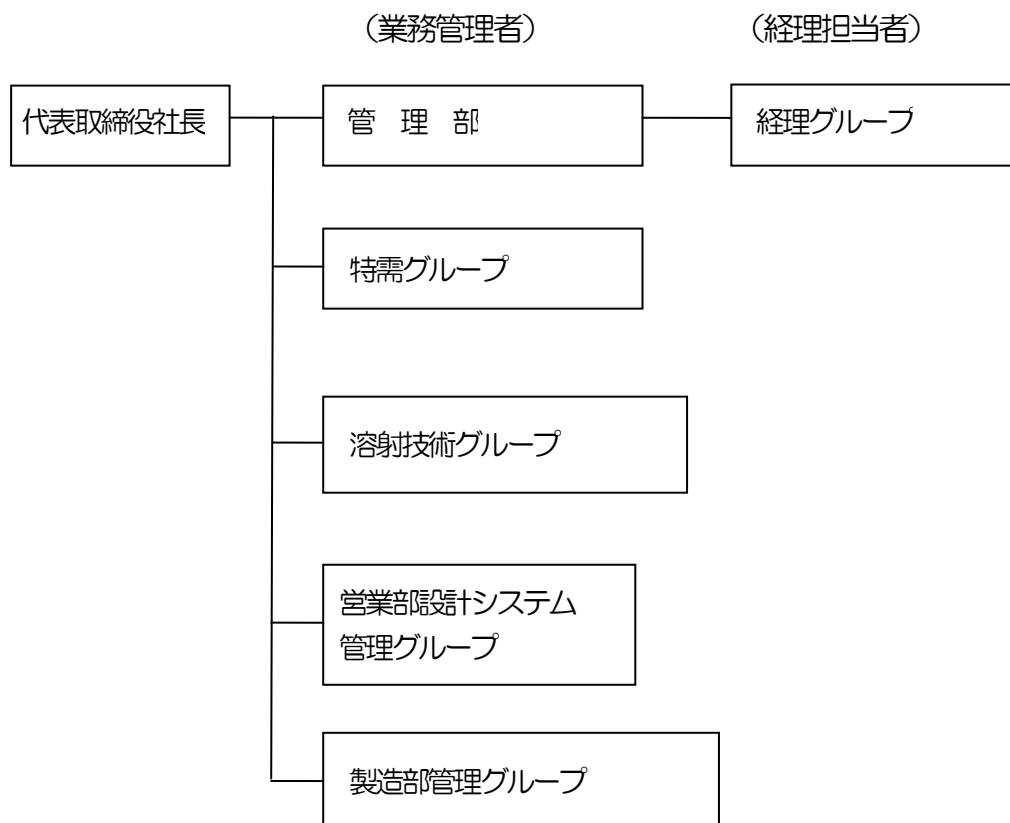
1) 研究組織（全体）



2) 管理体制

①事業管理機関

[シンワ工業株式会社]



(2) 管理員及び研究員

【事業管理機関】シンワ工業株式会社

① 管理員

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
塩田 教司	溶射技術グループ	⑤
草島 浩	特需グループ	⑤
豊田 建蔵	溶射技術グループ・技術課長	⑤
田中 憲太	溶射技術グループ	⑤

② 研究員

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
豊田 建蔵	溶射技術グループ・技術課長	①②③④
田中 憲太	溶射技術グループ	①②③④
塩田 教司 (再)	溶射技術グループ	①②
五十嵐 悠	溶射技術グループ	④
森田 啓	製造部管理グループ・課長	④
小野 義尚	営業部設計システム管理グループ	①

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理機関)

シンワ工業株式会社

(経理担当者) 管理部経理グループ・課長 山口 功

(業務管理者) 管理部・部長 川上 欽司

(4) 他からの指導・協力者

氏名	所属・役職	備考
安藤 康高	学校法人足利工業大学 創生工学科 教授	アドバイザー
野田 佳雅	学校法人足利工業大学 総合研究センター 助手	アドバイザー
岩尾 徹	学校法人五島育英会東京都市大学 工学部電気電子工学科 教授	アドバイザー
佐藤 克夫	村田ボーリング技研株式会社 営業技術課長	アドバイザー
広瀬 幸司	株式会社名東技研 営業部リーダー	アドバイザー
田中 卓巳	有限会社サクタ 代表取締役	アドバイザー
宮下 康孝	株式会社大東製作所 プラズマ溶射部	アドバイザー

1-3 成果概要

1-3-1 サブテーマ① 出力課題への対応

川下産業の要求する皮膜品質や施工能力を満足するために必要な出力を達成する。26年度に設定した出力の目標（目安）と成果は表1のとおりであった。

表1 出力課題への対応

トーチ種類	平成26年度目標（目安）	平成26年度成果
単トーチタイプ	100kW	80kW（達成率80%）
副トーチタイプ	30kW	40kW（達成率133%）

1-3-1-a 単トーチタイプの出力について

出力目標100kWを達成すべく、ノズル内温度測定やノズルの冷却改善、及び材質変更を行ったが、先端ノズルの分岐部溶融を防ぐ事が出来ず、出力を80kW以上に上げる事が出来なかった。

単トーチタイプでは、比較的融点の低い金属材料において、ガス供給圧アップによる高速化によって、低酸化の皮膜を高歩留まりで成膜する事が可能となった。しかし、サーメット材料やセラミック材料については、実用的な皮膜を成膜するには至らなかった。

単トーチタイプは出力80kW以内で、低融点の材料を対象に、高速化と低温プラズマによる低酸化を目的とした溶射に有効である。

1-3-1-b 副トーチタイプの出力について

(1) 副トーチタイプ代替案（N3ノズルタイプ）

副トーチタイプの出力は、25年度終了時のMAXは15kWであったが、26年度は、代替案（N3ノズルタイプ）（内部供給方式）によって40kWでの安定運転を達成した。（図6、図7）

これによって、川下ユーザー支給のサーメット材において、出力30kWにおいて、要求事項（出力30kW以下、歩留まり80%以上、材料供給量10g/min）を達成する事が出来た（図7）（写真2）。

アルミナなどのセラミック溶射においては、従来トーチでは使用出来なかった20μmアンダーの微粉を使用して、出力40kW時において、従来トーチの60kW時と同等の皮膜品質と歩留まりを得る事が出来た（写真1）。しかし、更に歩留まりアップと皮膜品質向上のためには出力を上げる必要がある。しかしながら、出力を40kW以上に上げると、内部溶着が発生し、連続運転の障害と皮膜へのスピット付着が発生した。この内部溶着対策として種々の方策を試みたが解決出来ず、結果として材料噴出口がノズル内部にある内部供給方式では、材料の溶融具合や粒子径や比重などの条件によっては、内部溶着は防げない事態が発生するという結論に至った。

また、液体材料使用時には、液体の噴霧と蒸発膨張により更に内部溶着が顕著になると予想されるので、液体材料を使用するには、本開発品の副トーチタイプ（N3ノズルを使用しない）のように材料噴出口が外部にある外部供給方式が不可欠であると再認識した（図8）。

そこで、26年度後半になって、副トーチタイプ（N3ノズルなし）（外部供給方

式)の開発を再開した(写真3)。

その結果、出力は40kWまで上げられるようになったが、セラミック溶射における歩留まりや皮膜品質向上のためには、更に出力を上げる必要があると考えている(目標60kW)。現在、出力アップの障害となっているのは、主トーチから出る複数プラズマと副トーチから出るプラズマが連結して形成するプラズマアークが、出力を上げるとプラズマ噴出穴以外から繋がってしまう事である。所謂、ダブルアークと呼ばれる現象である(写真6)。このダブルアークを抑制するために、プラズマ噴出穴の長さ、穴径、同芯円径、及び収束角度を最適化し、プラズマガスの旋回力を強くする事が有効である事が分かってきたので、補完開発になるが、これら対策を実施中である。

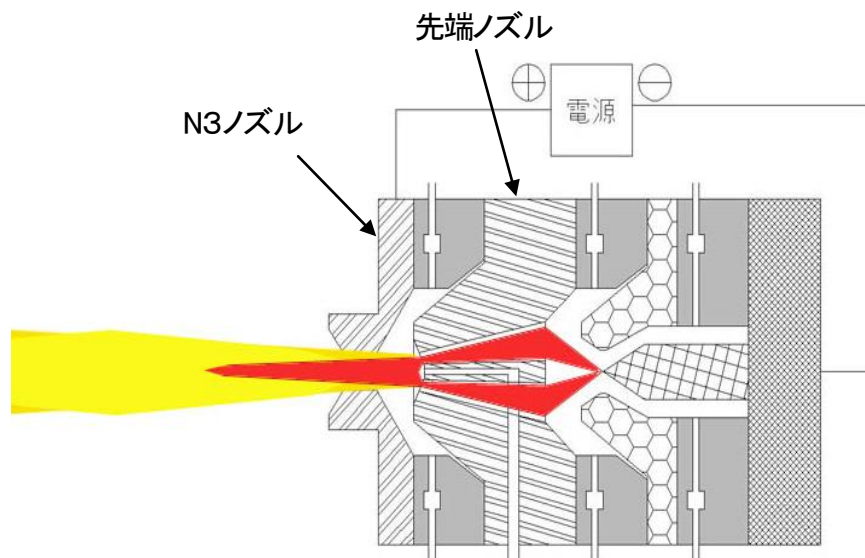


図6 副トーチタイプの代替案(N3ノズルタイプ)(内部供給方式)

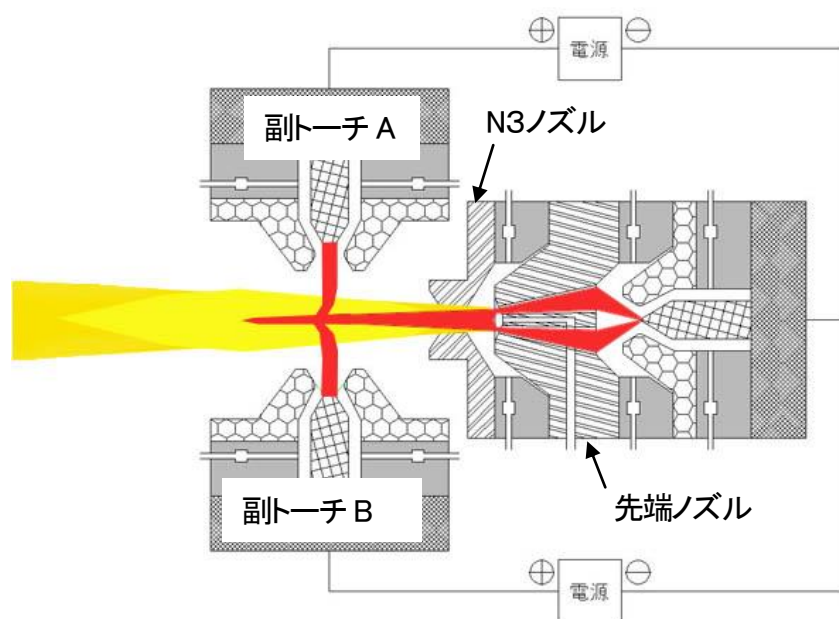


図7 副トーチタイプ (N3 ノズル有り) (内部供給方式)

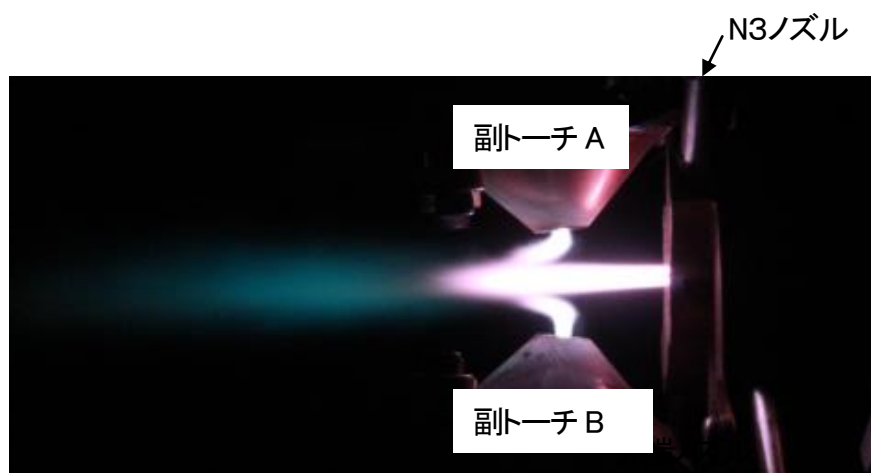


写真1 副トーチタイプ (N3 ノズル有り) (内部供給方式)
(アルミナ20 μ mアンダー投入時)



写真2 副トーチタイプ (N3 ノズル有り) (内部供給方式)
(川下ユーザー支給サーメット材料投入時)

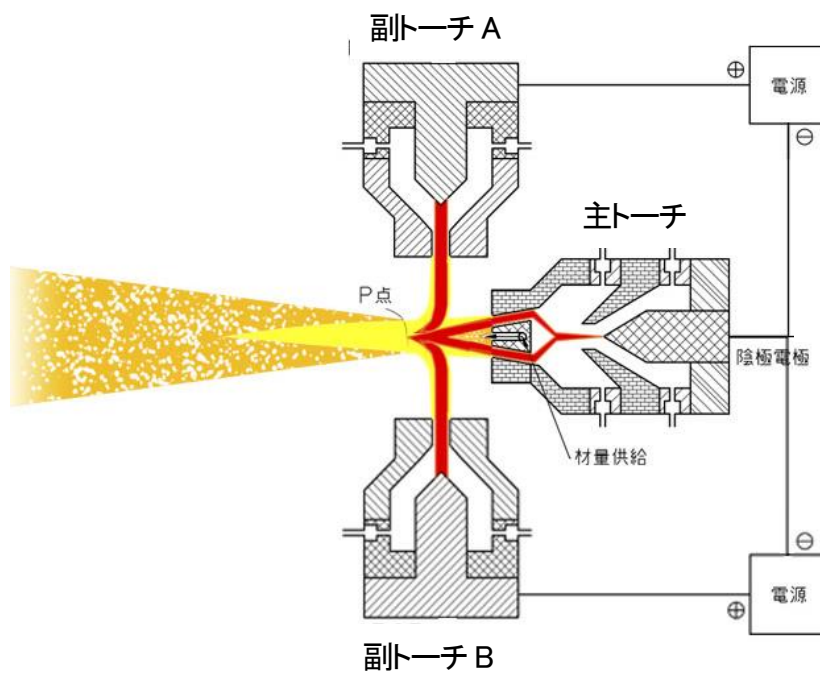


図8 副トーチタイプ (N3 ノズル無し) (外部供給方式)



写真3 副トーチタイプ (N3 ノズルなし) (外部供給方式)

1-3-2 サブテーマ② 歩留り向上課題への対応

金属材料、サーメット材料、セラミック材料において、70%～90%の 高歩留まりを実現するという目標に対し、成果は表2の通りである。

表2 歩留り向上課題の目標と成果

	26年度目標	26年度成果
金属材料（アルミニウム）の場合	90%	90%（達成）
サーメット材料（川下ユーザー支給）の場合	80%	84%（達成）
セラミック材料（アルミナ）の場合	80%	62%（未達）

1-3-2-a 単トーチタイプの歩留まりについて

単トーチタイプにおいて、25年度はアルミニウム材料を使って、歩留まりは82%であったが、26年度はガス供給圧アップによる高速化により、90%を達成した。ちなみに、この時の皮膜の密着力は実用に充分な34N/mm²であった。

1-3-2-b 副トーチタイプの歩留まりについて

N3ノズルと副トーチを組合せたタイプを使って、サーメット材料（川下ユーザー支給）における歩留まり84%を達成し、目標の80%をクリアした。

セラミック材料であるアルミナの溶射では、サーメット材料と同様にN3ノズルと副トーチを組合せたタイプで、粒径20μmアンダーの粉末を使い、歩留まりは、62%であった。目標80%に対して未達であった。今回の歩留まりテスト時の出力は40kWであるが、出力を上げるとアルミナの歩留まりは上がる傾向があり、もっと熔融させると歩留まりが上がると思われる。しかし、N3ノズルを使った内部供給方式では、熔融を強化すると内部付着が発生し、連続運転が出来なくなるため、今後は外部供給方式である副トーチタイプ（N3ノズルなし）を使って、出力を上げて歩留まり向上を図る。

表3 歩留まり比較

溶射材料	従来型	本開発品
アルミニウム	—	90%
サーメットA	70%	84%
アルミナ	50%	62%

※1 アルミニウム溶射は、主トーチのみ使用し、ガス供給圧を1.5MPaとした。

※2 アルミナ溶射の比較は、従来型が出力60kW、本開発品が出力40kWの数値である。

1-3-3 サブテーマ③ 耐プラズマ性向上（液体材料使用可）への対応

【26年度目標】

イットリア材料のスラリーや従来の溶射では使えなかった細かな粒径の粉末材料を使って、耐プラズマ性の高い皮膜を成膜する。

【26年度成果】

従来の溶射では使用出来なかった $20\mu\text{m}$ アンダーの微粉を使って、アルミナの溶射は可能となった。イットリアの溶射は、 $20\mu\text{m}$ アンダーの材料が入手できなかったため、 $40\mu\text{m}$ 前後の粉末で成膜トライをしたが、成膜出来なかった。

スラリー材料については、24年度に液体材料供給機と特性噴霧ノズルを開発し、25年度に、この特性噴霧ノズルを単トーチタイプに内蔵して供給する技術を確立したが、単トーチタイプではフレーム温度が足りず、スラリー状のセラミック材料（アルミナ、およびイットリア）を使って成膜することは出来なかった。

26年度は、副トーチタイプでスラリー材料を使って成膜を行い、皮膜を川下ユーザーで評価して頂く計画であったが、副トーチタイプにおけるアルミナ微粉末の溶射技術の確立が遅れたため、スラリー材料の成膜トライは出来なかった。補完開発となるが、外部供給方式の副トーチタイプの先端ノズルに噴霧機能を持たせて、アルミナとイットリアのスラリーの成膜テストを計画している。

1-3-4 サブテーマ④ 高速化課題への対応

【26年度目標】

粒子速度 1200m/s

【26年度成果】

粒子速度 500m/s （目標未達）

26年度は、単トーチタイプにおいて、プラズマガスの供給圧を上げ、プラズマガスの噴出速度、及び粒子速度を上げて、高速度カメラによる粒子速度の測定と高速化による皮膜品質と歩留まりへの影響把握を行った。

25年度までは、プラズマガスの供給圧のMAXは 1MPa であったが、26年度は、 3MPa まで上げられる様に圧力調整弁、接続ホース、継ぎ手、流量計を耐圧の高いものに取り替えた。

成膜テストと粒子速度測定は、単トーチタイプで行い、アルミニウム粉末を使用した。ちなみに皮膜サンプル作成時は粒径 $20\mu\text{m}$ アンダーを使用し、粒子速度測定では、カメラで捉えられないとの理由で、 $75\mu\text{m}\sim 145\mu\text{m}$ を使用した。

ガス供給圧アップによる歩留まりと密着力への影響は表4の通り。

表4 高速化による歩留まりと密着力への影響

項目	25年度	26年度
ガス供給圧 (MPa)	1MPa 以下	1.5MPa
歩留まり (%)	82%	90%
密着力 (N/mm ²)	1.4N/mm^2	3.4N/mm^2

ガス供給圧アップによる高速化で、歩留まり、密着力共に上昇した。

断面観察から、皮膜中に酸化が見られず、アルミニウムが酸化していない事が認められた。

1-3-5 高電圧・低電流運転について

副トーチを使用するタイプでは、プラズマアークの長さが長くなり、高電圧・低電流の運転が可能となった。これにより、電極の長寿命、および連続運転可能時間が期待できる。

表5 高電圧・低電流の運転 (30 kW 時)

	従来型	本開発品
電圧／電流	50 V／600 A	150 V／200 A

1-3-6 冷却水への熱ロスについて

副トーチを使用するタイプでは、トーチ冷却水への熱ロスが大幅に低減できた。

表6 冷却水への熱ロス

	従来型	本開発品
熱ロス	60%～70%	35%

(熱ロス (%) = 冷却水の増加エンタルピ／溶射出力)

1-3-7 特許取得について

名称「アキシアルフィード型プラズマ溶射装置」

特許第 5396565号 平成25年10月25日登録

特許第 5690891号 平成27年 2月 6日登録

1-3-8 開発品のスペック

本開発品のスペックを表7にまとめる。

表7 本開発品のスペック

対象溶射材料	金属、サーメット、セラミック
溶射材料形態	粉末 (20 μ mアンダーも使用可能)、及び液体材料
溶射材料供給量	30g/min (粉末) 50ml/min (液体)
溶射出力	80 kW (低温タイプ) 主トーチのみ使用 40 kW (高温タイプ) 副トーチ使用
ガス量・ガス供給圧	20～400ℓ /min (高温タイプ) 供給圧 2.0MPa (低温タイプ) (流量計上限 400ℓ /min をオーバー)

1-4 当該研究開発の連絡窓口

所属 シンワ工業株式会社
溶射技術グループ・技術課長

氏名 豊田 建蔵

電話 03-3947-0203

E-mail toyota@shinwa-ism.jp

第2章 本論

2-1 実施内容

2-1-1 サブテーマ① 「出力課題」の実施内容

川下産業の要求する皮膜品質や施工能力を満足するために必要な出力を達成するための実施内容は以下のとおり。

2-1-1-a 単トーチタイプの実出力アップ対策

出力目標100kwを達成すべく、問題となっているのが先端ノズルのプラズマ分岐部の溶融である。25年度は先端ノズルの冷却を強化するため、チラーのポンプの能力を0.5MPaから1.0MPaに上げ、また、ノズル形状の最適化を図った。

26年度に実施した内容は以下の通りである。

(1) 先端ノズル内温度測定

先端ノズルの中心からの距離の異なる位置7箇所に熱伝対を挿入し、出力や水素混合量を変化させて、温度測定を行い、プラズマ温度分布を予測し、溶融現象の解析を行った。

(2) 先端ノズル中心部の冷却強化と材質変更

先端ノズル中心部に冷却水が回るようにし、且つ、熱伝導性も良く、耐熱温度の高いタングステン部材に変更したが、中心部の溶融を防ぐ事は出来なかった。

(3) 先端ノズルプラズマ分岐部への巡回ガス増加

狙い：プラズマ噴出穴の入口付近で、穴それぞれに巡回ガスを導入し
プラズマの集中を緩和し、分岐部溶損を防ぐ。

結果：プラズマ分岐部の溶損発生。効果なし。

2-1-1-b 副トーチタイプにおける出力アップ対策

25年度に副トーチタイプのテストを行ったが、プラズマアークが安定せず、その対策がとれないとの判断をし、25年度終盤から、その代替案としてN3ノズルタイプの開発を進めた。しかし、N3ノズルタイプでは内部溶着が発生するという問題があり、これが、出力アップの障害となった。そこで、出力アップの対策として、以下のとおり、ノズル内容着対策に取り組んだ。



溶射後の材料噴出部



溶射後の N3 ノズル内面
(プラズマ噴出穴4個の場合)

写真 4 内部溶着状況

(1) 材料の直進性改善

N3 ノズルと副トーチを組合せたタイプにおいて、材料噴出部の直進性が悪い事が判明し、改善を行った。

中心軸にある材料噴出穴に斜めに材料を供給すると、材料が真っ直ぐに噴出されないが、直角に供給するか、或いは溜まり部を設けると、軸心と同方向に材料が噴出できるようになった。

(2) 材料噴出部（先端ノズル）形状の最適化

先端ノズルのプラズマ噴出穴の径、長さ、収束角度、同芯円径の最適化を行い、内部溶着対策を行った。

(3) N3 ノズルテーパ角度と出口径の最適化

N3 ノズルのテーパ角度や出口径の最適化を行い、内部溶着対策を行った。

(4) N3 ノズルと副トーチの組合せ

N3 ノズル内にプラズマアークの繋がる点が存在するため、その付近が高温になり、溶射材料が溶着しやすい事が分かった。そこで、副トーチを追加して、N3 ノズル内でプラズマアークが繋がらないようにしたところ、ノズル内容着が軽減できた。

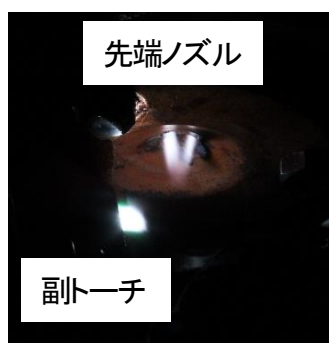
(5) 副トーチタイプ（N3 ノズルなし）（外部供給方式）の開発

N3 ノズルタイプにしる、N3 ノズルと副トーチの組合せにしる、ノズル内に溶射材料を供給する内部供給方式では、内部溶着を解決することは困難との結論に至った。

26年度に再開した副トーチタイプのテストによって、25年度に安定したプラズマアークが形成されなかった現象は、主トーチから出る複数のプラズマアークと副トーチから出るプラズマアークを連結する際、プラズマ噴出穴以外の主トーチ前面からプラズマアークが繋がる現象である事が分かった。所謂、ダブルアークと呼ばれる現象である。

そして、ダブルアークを起こさない対策としては、プラズマ噴出穴の長さを短、直径を大、収束角度を大、同心円の直径を小の方向で最適化し、且つ、ガス旋回力の強化が重要である事が分かった。出力40kW までであれば、安定した連結プラズマアークが形成できるまでになった。今後、補完研究を計画している。

写真5～写真7は、26年度の副トーチタイプ（N3 ノズルなし）（外部供給方式）のテスト時の写真である。



プラズマアークを連結する前の状態

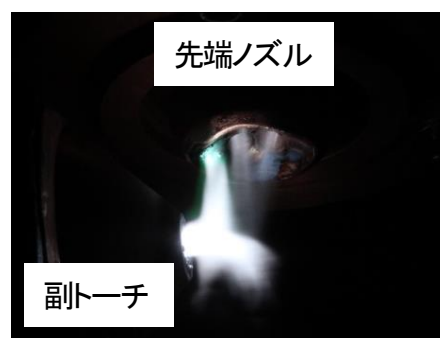


主トーチの複数プラズマと副トーチプラズマが連結した状態
（出力26kW）

写真5 副トーチタイプの連結プラズマアーク



ダブルアーク発生状況(例)
(出力28kW)



ダブルアーク発生状況(例)
(出力30kW)

写真6 副トーチタイプのダブルアーク状況

主トーチから出る複数プラズマの収束角度等を最適化して、出力40kWで安定した連結アークが形成できるようになった。更に、最適化とガス旋回力を強化する対策を計画しており、目標60kWまで出力を上げても、ダブルアークが発生せず、安定した連結アークが形成出来るようにしていく。



安定した連結プラズマ
アーク形成。
(出力 40kW)

写真7 主トーチの複数プラズマ と副トーチプラズマとの連結プラズマアーク
(主トーチ；4穴タイプ、 副トーチ：2個)

2-1-2 サブテーマ②「歩留り向上課題」の実施内容

金属材料、サーメット材料、セラミック材料において、70%～90%の高歩留まりを実現するための実施内容は以下のとおり。歩留り向上課題の目標と成果は表8のとおり。

表8 歩留り向上課題の目標と成果

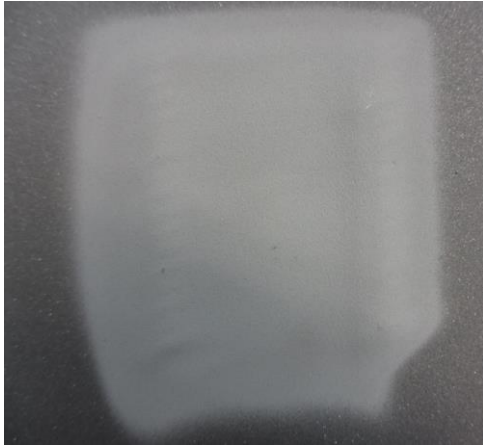
	26年度目標	26年度成果
金属材料（アルミニウム）の場合	90%	90%（達成）
サーメット材料（川下ユーザー支給）	80%	84%（達成）
セラミック材料（アルミナ）の場合	80%	62%（未達）

2-1-2-a 単トーチタイプの歩留まりについて

単トーチタイプにおいて、25年度はアルミニウム材料を使って、歩留まりは82%であったが、26年度はガス供給圧アップによる高速化により、90%を達成した。ちなみに、この時の皮膜の密着力は実用に十分な34N/mm²であった。

更に、歩留まりアップを狙って、プラズマ噴出部の形状を3つ穴から、リング型スリット形状としたが、冷却機能が低下し、材料噴出部が溶融した。

単トーチタイプ用先端ノズルのプラズマ噴出部の最終形状は3つ穴形状とする。



塗着効率 90%

単トーチタイプ 64kW

写真8 アルミニウムの塗着効率測定時の皮膜サンプル

2-1-2-b 副トーチタイプの歩留まりについて

N3ノズルと副トーチを組合せたタイプを使って、サーメット材料（自動車メーカー支給）における歩留まり84%を達成し、目標の80%をクリアした。

セラミック材料であるアルミナの溶射では、サーメット材料と同様にN3ノズルと副トーチを組合せたタイプで、粒径20μmアンダーの粉末を使い、歩留まりは、62%であった。目標80%に対して未達であった。今回の歩留まりテスト時の出力は40kWであるが、出力を上げるとアルミナの歩留まりは上がる傾向があり、もっと溶融させると歩留まりが上がると思われる。しかし、N3ノズルを使った内部供給方式では、溶融を強化すると内部付着が発生し、連続運転が出来なくなるため、今後は外部供給方式である副トーチタイプ（N3ノズルなし）を使って、出力を上げて歩留まり向上を図る。

出力は、60kWまで上げられる様に対策を講じ、40kW、50kW、60kWでの歩留まりと皮膜品質を比較していきたい。

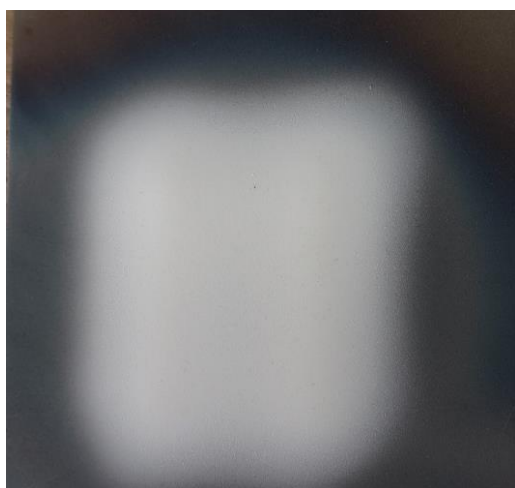


塗着効率; 84%

出力: 30kW

N3ノズル+副トーチタイプ

写真9 サーメット（メーカー支給材）の塗着効率測定時の皮膜サンプル



塗着効率; 62%
出力:40kW
N3ノズル+副トーチタイプ

(参考)
表面粗さ Ra 2.36
(従来トーチのアルミナ皮膜の
表面粗さ Ra は、5.60)

写真10 セラミック（アルミナ）の塗着効率測定時の皮膜サンプル

表9 歩留まり比較

溶射材料	従来型	本開発品
アルミニウム	—	90%
サーメットA	70%	84%
アルミナ	50%	62%

※1 アルミニウム溶射は、主トーチのみ使用し、
ガス供給圧を1.5MPaとした。

※2 アルミナ溶射の比較は、従来型が出力60kW、
本開発品が出力40kWの数値である。

2-1-3 サブテーマ③ 「耐プラズマ性向上（液体材料使用可）」の実施内容

【26年度目標】

イットリア材料のスラリーや従来の溶射では使えなかった細かな粒径の粉末材料を使って、耐プラズマ性の高い皮膜を成膜する。

【26年度成果】

従来の溶射では使用出来なかった20μmアンダーの微粉を使って、アルミナの溶射は可能となった。イットリアの溶射は、20μmアンダーの材料が入手できなかったため、40μm前後の粉末で成膜トライをしたが、成膜出来なかった。

スラリー材料については、24年度に液体材料供給機と特性噴霧ノズルを開発し、25年度に、この特性噴霧ノズルを単トーチタイプに内蔵して供給する技術を確立したが、単トーチタイプではフレーム温度が足りず、スラリー状のセラミック材料（アルミナ、およびイットリア）を使って成膜することは出来なかった。

26年度は、副トーチタイプでスラリー材料を使って成膜を行い、皮膜を川下ユーザーで評価して頂く計画であったが、副トーチタイプにおけるアルミナ微粉末の溶射技術の確立が遅れたため、スラリー材料の成膜トライは出来なかった。補完開発となるが、外部供給方式の副トーチタイプの先端ノズルに噴霧機能を持たせて、アルミナとイットリアのスラリーの成膜テストを計画している。

従来トーチ（旧エアロプラズマ社製）で平均粒径25μmのアルミナ材料を使用した溶射皮膜と、本開発品で20μmアンダーのアルミナ材料を使用した溶射皮膜

の破壊電圧とスガ摩耗量を比較した（表10）。

破壊電圧とスガ摩耗量は、プラズマ耐食性の代表特性として考えた。

今回の比較では、従来トーチで出力60kWで溶射した皮膜に対して、本開発品で出力40kW～45kWで溶射した皮膜は、同等以上に良い結果となった。これは、アルミナ粉末の微粒化の影響とアキシアルフィードによる均一加熱の影響と考えられる。

表10 破壊電圧とスガ摩耗量における従来トーチとの比較

	サンプル名称	ノズル種類、溶射条件	破壊電圧(実測値) kV	皮膜厚さ μm	破壊電圧(換算値) kV/mm	スガ摩耗量(400DS) mg
従来トーチ使用	サンプル① 60kW	アルミナ材料 (粒径平均25 μm)	1.7	197	8.8	24.9
	サンプル② 60kW	アルミナ材料 (粒径平均25 μm) 60kW	4.3	402	10.8	—
本開発品使用	テスト① 35kW	アルミナ材料 (粒径20 μm アンダー) 副トーチ0個 タングステン イ°	1.6	101	15.6	9.9
	テスト② 40kW	アルミナ材料 (粒径20 μm アンダー) 副トーチ2個 Dタイプ N3 ϕ 6	2.3	206	11.2	24.0
	テスト③ 45kW	アルミナ材料 (粒径20 μm アンダー) 副トーチ1個 Dタイプ N3 ϕ 6	2.3	244	9.6	12.2

2-1-4 サブテーマ④ 「高速化課題」の実施内容

【26年度目標】

粒子速度 1200m/s

【26年度成果】

粒子速度 500m/s (目標未達)

26年度は、単トーチタイプにおいて、プラズマガスの供給圧を上げ、プラズマガスの噴出速度、及び粒子速度を上げて、高速度カメラによる粒子速度の測定

と高速化による皮膜品質と歩留まりへの影響把握を行った。

25年度までは、プラズマガスの供給圧のMAXは1MPaであったが、26年度は、3MPaまで上げられる様に圧力調整弁、接続ホース、継ぎ手、流量計を耐圧の高いものに取り替えた。

成膜テストと粒子速度測定は、単トーチタイプで行い、アルミニウム粉末を使用した。ちなみに皮膜サンプル作成時は粒径 $20\mu\text{m}$ アンダーを使用し、粒子速度測定では、カメラで捉えられないとの理由で、 $75\mu\text{m}\sim 145\mu\text{m}$ を使用した。

高速度カメラ測定結果とプラズマジェット温度測定値から計算した音速値、およびコールドスプレイ溶射の臨界速度計算値を参考にして、粒子速度を 500m/s とした。ガス供給圧アップによる歩留まりと密着力への効果は表11の通り。

表11 高速化による歩留まりと密着力への影響

項目	25年度	26年度
ガス供給圧 (MPa)	1MPa 以下	1.5MPa
歩留まり (%)	82%	90%
密着力 (N/mm ²)	14N/mm ²	34N/mm ²

ガス供給圧アップによる高速化で、歩留まりが向上し、実用に十分な密着力が得られた。

断面観察から、皮膜中に酸化が見られず、アルミニウムが酸化していない事が認められた(写真12)。

密着強度試験結果

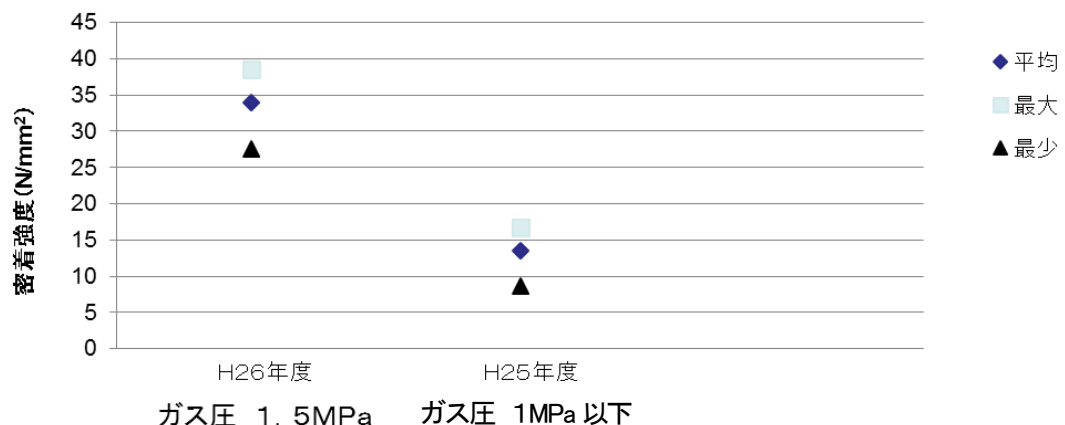


図9 アルミニウム皮膜の密着強度



写真11 アルミニウム皮膜の引っ張り試験サンプル

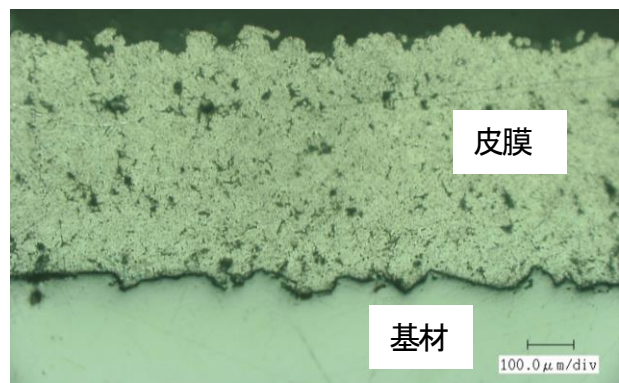


写真12 アルミニウム皮膜の断面 (ガス供給圧1.5MPa時)

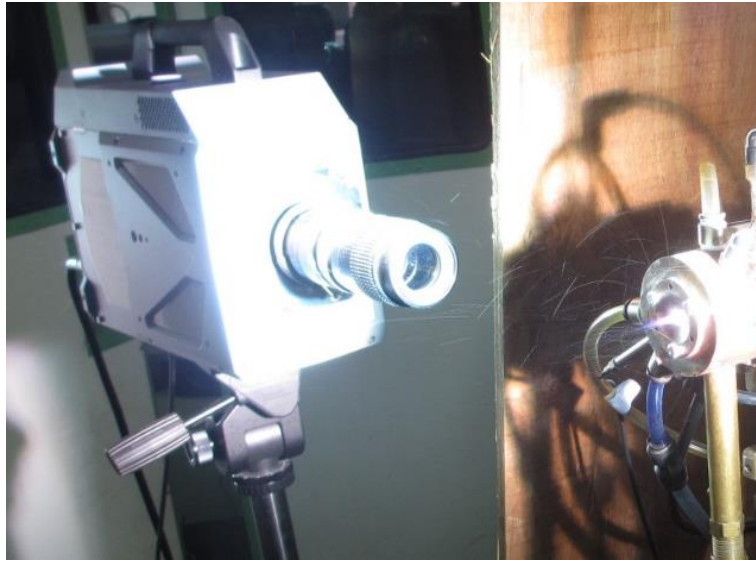


写真13 高速度カメラによる粒子速度測定風景

高速度カメラ: Photron FASTCAM SA-Z (560000fps 128×64pixel)
を使用。

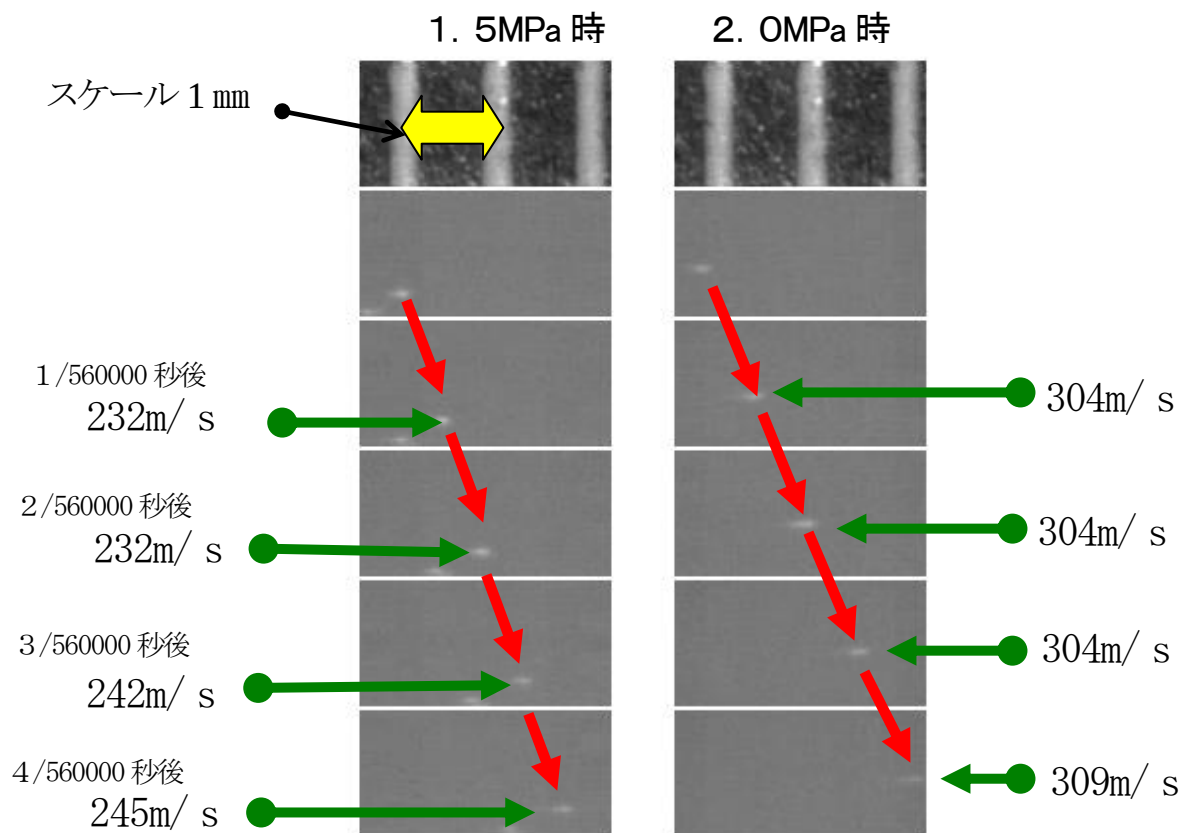


図10 高速度カメラによる粒子速度測定結果

最終章 全体総括

24年度は、溶射用周辺機器の設置、溶射用制御盤の設計・製作、および溶射トーチの設計・製作を行い、単トーチタイプの開発を行った。また、液体材料用供給装置を設計・製作し、酸化チタンのスラリー材料で成膜テストを行い、皮膜の評価を行った。結果は、光触媒効果は大きいが密着力に課題が残った。

25年度は、単トーチタイプの出力アップ対策としてガスシミュレーション解析の結果を参考にしてノズル形状の最適化を行い、併せてチラーのポンプ能力をアップして冷却強化を行った。また、副トーチタイプ（外部供給方式）のテストを行い、その結果から副トーチタイプの代替案としてN3 ノズルタイプ（内部供給方式）のテストも開始した。液体材料に関しては、噴霧技術の確立を進め、単トーチタイプの先端ノズルに特製の2重管構造の噴霧ノズルを内蔵し、イットリアスラリーの成膜テストを行った。結果は溶融不足であった。

26年度は、単トーチタイプでは出力アップ対策とガス供給圧アップによる高速化を行い、低融点材料（例：アルミニウム粉末）において、高歩留まり（90%以上）で実用的密着力を持つ、酸化のほとんど無い皮膜を実現した。また、副トーチタイプ（内部供給方式）で川下ユーザー支給のサーメット材料において、要求事項（歩留まり80%、出力30kW、材料供給量10g/min）を達成できた。今後、試作機販売に向けて詳細検討を進めていく。

しかし、セラミック溶射において更に出力を上げると内部溶着が発生し、連続運転が出来なかった。このように内部供給方式では、溶射材料の融点や比重および粒径などの条件の違いによっては、内部溶着が防げない状態が起こる。そこで、外部供給方式の副トーチタイプの開発を再開した。その結果、出力40kW以内であれば安定した連結プラズマアークが形成できるようになった。また、40kW以上に出力を上げるための方策も見えてきている。

今後早急に、これら対策を施した溶射トーチを使って、アルミナやイットリアのスラリー材料や、粒径20μmアンダーの材料を使って皮膜を作製し、そもそも計画していた川下ユーザーによる耐プラズマ性の評価を進めていきたい。

また、このトーチに期待されるところの、TBC 皮膜や蒸着の代替技術として燃料電池電解質や光発電素子など、今後重要性が増す機能性皮膜の高効率な製造技術として、広い分野で貢献していきたい。

リサイクル適性 

この印刷物は、印刷用の紙へ
リサイクルできます。