

高い自由度で多様な皮膜のニーズに応える
 - 唯一の技術 プラティット回転円筒カソード搭載 PVD コーティング炉 -

1. はじめに

1970 年代にドイツ製の金色に輝くドリルの上陸が、日本における PVD 耐摩耗コーティングの幕開けとなった。金色の正体は PVD 電子ビームのホロカソード方式による TiN の皮膜で、当時主流のノンコート工具と比較し、工具の寿命は整数倍で向上した。海外競合他社の先行する技術に対し、国内の工具メーカーは、同仕様のコーティング炉を競って導入することで、コーティングの内製が活発となった。以降、C、Cr、Al、Si、V、Zr、B 等の元素が加わり、灰色、黒、赤紫と様々な色の皮膜が生まれてきた。膜の構造も単層から積層、複合と多彩化してきている(図1上)。これらの背景には、汎用膜に対し、専門的な用途の皮膜が、より優れた性能を発揮していることがある(図1下)。つまり、コーティング炉には、多様なニーズに一台の炉で応える柔軟性が求められている。

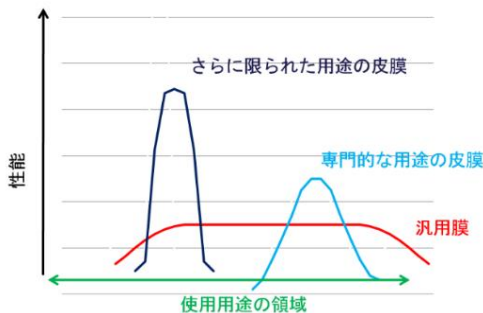
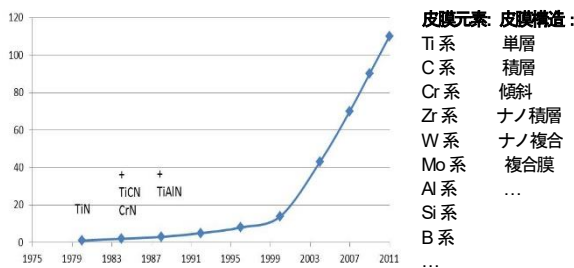


図1 汎用皮膜と専門皮膜のイメージ(上)
 専門用途化していく皮膜の動向(下) 1

2. 工具ユーザにおける皮膜のメリット
 コーティングは工具の長寿命化だけでなく、工具の切削性能も向上させた。皮膜の登場により、工具ユーザは加工コストを削減しながらも、高い生産効率を享受している。クロムモリブデン鋼加工の場合、ノンコートと比較し、TiN 処理した工具は6倍、TiCN は13倍と長寿命を実現する(図2上)。コストを下げ、生産効率を上げた事例として、加工機の時間当たりの費用を15,000円/時間で試算し、ノンコートとTiNを比較した(図2下)。切削速度75m/minの場合、ノンコートで9円/穴、TiNでは5円/穴と加工コストを約半分まで削減している。切削速度を1.6倍の120m/minに高めた場合、ノンコートで18円/穴、TiNは約1/4の4円/穴である。

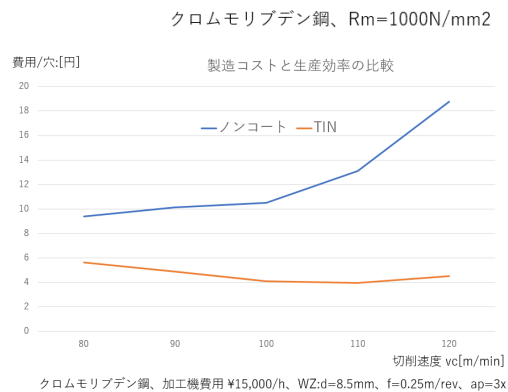
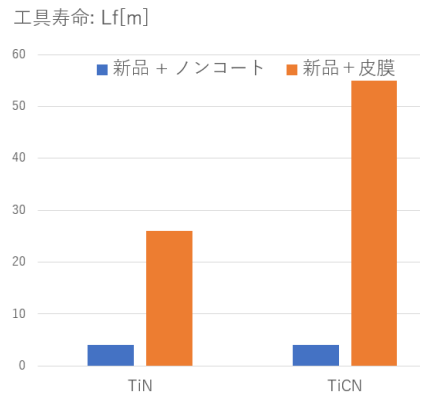


図2 上：工具寿命の違い(ノンコートと皮膜)
 下：製造コストと生産効率の比較(ノンコートと皮膜(下))

3. 受託事業がないPVD コーティング炉専門メーカー プラティット社
 スイス・プラティット社は、2002年に初めて回転円筒カソードを搭載した炉をリリースした。コーティング炉メーカーの多くは、受託サービス事業を持ち、顧客へのノウハウの提供は、事業を脅かす可能性がある。他方、コーティング炉専門メーカーである同社は、コーティングの前後のプロセスを含め、ノウハウを顧客に提供できる体制になっている。



図3 回転円筒カソード PVD コーティング炉 π411(上)と特許回転円筒カソード(下)

4. 高自由度のプラティット社コーティング炉π411と超硬除膜装置STシリーズ
 一般的なPVD アークコーティング炉は、金属材料の形状がスポット、またはプレート型である。プラティット社のコーティング炉π411(図3上)は、業界で唯一、複数の回転円筒カソード(写真3下)を搭載することで、極めて高い自由度を実現している。プラズマ領域φ500×L460mmで、電源を内蔵しながらも、所要床面積は横 2.8m×奥行 1.8mのコンパクトサイズの炉になっている。また、超硬除膜STシリーズについても、以下の通り、事例を合わせて紹介する。

コーティング炉：

- モジュラ化による仕様の最適化
- ソフトウェアによる皮膜組成の制御
- AlCr 合金カソードの高出力高速処理
- DLC と酸化系皮膜の対応
- イオン分率増加機能で密着性の向上とスパッタ皮膜の緻密化
- アークとスパッタの同時蒸着

除膜炉：

- 超硬工具のAlCr 系皮膜の除膜

4.1 最適な仕様を可能にするモジュラ式カソードシステム

ニーズに合わせて、回転円筒カソードを下記の通りモジュラ式で搭載することができる(図4)。

- ECO：
 ドア側に3本の回転円筒アークカソードを搭載する高自由度仕様。炉内中央にカソードがないため、大型ワークにも対応可能。
- Turbo：
 ドア側3本、炉内中央に回転円筒アークカソード1本搭載。合計4本のアークカソードの高生産性仕様。
- SPUTTER：
 ドア側3本のアークカソード、炉内中央に回転円筒スパッタカソード1本を搭載。平滑性に特化した皮膜仕様。
- HYBRID：
 ドア側3本のアークカソードと炉内中央のスパッタカソードの同時蒸着が可能な仕様。ホウ素の組成比制御も実現。

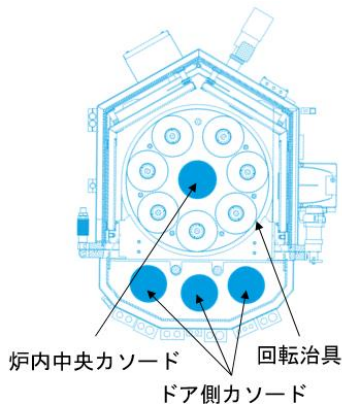


図4 π411 カソード配置図

4.2. 皮膜組成をソフトウェアで制御

一般的な PVD アーク炉は、金属材料通りの組成比率で、工具に皮膜を蒸着する。一方、本装置は純金属の回転円筒カソードを利用し、皮膜の組成比をソフトウェアで制御して、蒸着させる。TiAl 系皮膜の場合、ドア側に Ti、Al の純金属の回転円筒カソードを搭載し、TiAlN (50/50%)、AlTiN (67/33%)、AlTiN (75/25%) をソフトウェアで制御する (図 5)。合金材料が不要なので、既存の皮膜組成が加工条件に適さなければ、新しい組成で直ちにチューンナップし、迅速に対応することができる。新しい割合の合金を手配する場合、最低でも 3 カ月程度の納期を要することが多い。本装置であれば、金属材料の開発や納期の煩わしさから解放され、市場の動向に短期間で対応し、用途に適した独自の皮膜の確立が可能だ。

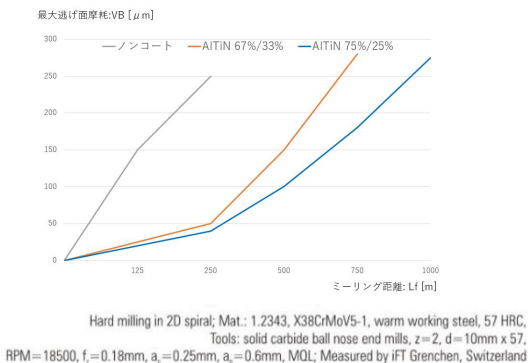
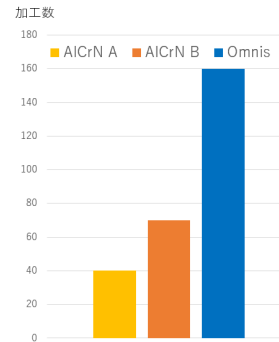


図5 組成比制御による皮膜のチューンナップ

4.3 AlCr 合金カソードの高出力高速処理

AlCr 合金をドア側 3 本、炉内中央カソードに 1 本搭載し、高速処理をする皮膜 Omnis (オムニス) がリリースされた。同じ組成の合金を搭載することで、最大出力の電流をカソードに流すことが可能になり、 $2\mu\text{m/h}$ の蒸着レートを実現する。Omnis は窒素圧力、バイアスを最適化し、膜を緻密化しており、ホブやスカイビング、エンドミル向けに適した膜となっている (図 6)。



Tool: Shaper cutter, Coating thickness: $3.5\mu\text{m}$
Workpiece material: 1.7131; 33 HRC
Wet machining
Source: Customer in Germany

図6 一般的な AlCr 系皮膜と Omnis の比較

4.4 DLC と酸化系皮膜の対応

連続旋削のインサートでは、高温加工の耐久性に優れる CVD による酸化系皮膜が多く利用されている。装置電源等の進化もあり、PVD 炉においても DLC (PECVD)、酸化系皮膜、厚膜が可能となっている。π411 では、アークによる窒化膜を処理した後に、DLC、酸化系皮膜を展開することが可能である。耐熱性が求められるニッケル合金系の加工においては、CVD 膜との置き換えに成功している (図 7)。膜厚を $3\mu\text{m}$ から、 $6\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ へと厚膜にすることで、CVD のアルミナ皮膜 Al₂O₃ に対し、勝る結果を残している。プラティットの酸化系皮膜 nAlCoX の場合、回転治具の交換は必要なものの、炉への汚染も限定的であり、連続処理が可能となっている。

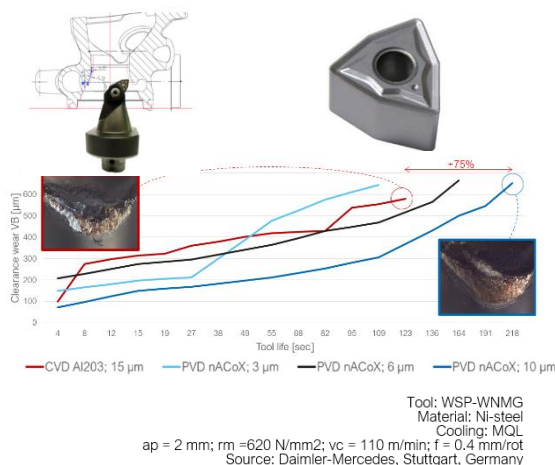


図7 CVD Al₂O₃ と PVD 酸化系皮膜の比較

4.5 イオン分率増加機能で密着性の向上とスパッタ皮膜の緻密化

本装置はドア側の回転円筒カソードを利用し、イオン分率を増加する特許技術がある。同機能により、プラズマボンバードや、スパッタ処理中のプラズマアシストが可能となる。3番のカソードのシャッタを閉じ、磁場を工具とは反対側の外側に向け、2番のカソードをアノードに切り替え、3番カソードをアーク放電する。これにより、電子の流れが3番カソードから2番カソードに発生し、炉内のガスイオン分率を増加することが可能だ(図8)。

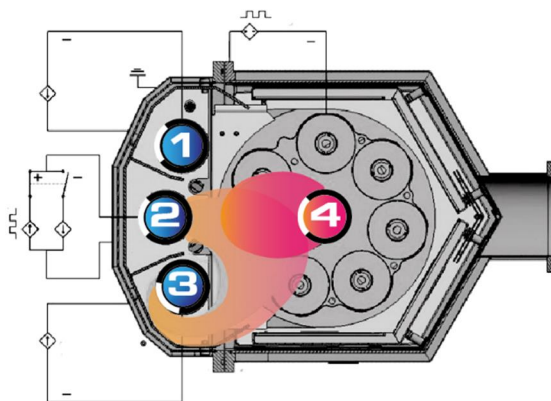


図8 特許回転円筒カソードのイオン分率増加機構

4.5.1 複雑形状でも皮膜の密着性を向上
炉内プロセスであるプラズマ洗浄が、皮膜の密着性を左右する。プラズマ分率増加機能を利用することで、アンテナ効果を抑えた低バイアスのボンバードが可能となる。ホブの刃溝やドリル溝、金型等の複雑形状に効果を発揮する。酸化膜を施した工具に、ボンバードをした事例では、グロー放電と比較し、溝から刃先までより均一に酸化膜が除去されている(図9)。

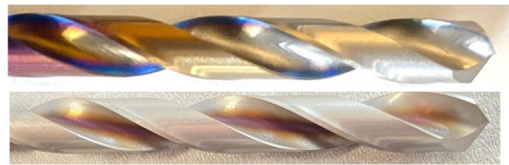


図9 酸化膜をエッチングで除去
グロー放電(上)、プラズマアシスト(下)

4.5.2 イオン分率に優れたスパッタ皮膜

本装置は、炉内中央のカソードをアーク源、またはスパッタ源から選択できる。スパッタ皮膜は、TiN、CrTiN、TiB₂、WC/C、DLC、の処理が可能である。アークと比べ平滑性に優れ(図10)、主にタップ等の塑性加工用の工具で、ホロカソードの置き換えで利用されている。又、TiB₂は耐刃先凝固に優れ、アルミ合金やスマートフォン向けTiAl合金のフライス加工用皮膜として、活躍している。本装置の場合、円筒カソードを採用したことで、工具とカソードの距離が近く、スパッタの課題である低蒸着レート、低イオン分率を補うことが可能である。高出力のHiPMSスパッタも、基板バイアスの出力は3-4kWに過ぎないことが多い。一方、本装置であれば11-12kWの出力を実現する。また、イオン分率増加機能を利用し、スパッタTiB₂の場合、ナノ硬度32を38GPaへ向上することも可能だ(図11)。

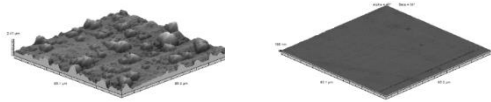


図 10 AFM(原子間力顕微鏡)による比較
アーク ZrN(左)、スパッタ TiB2(右)

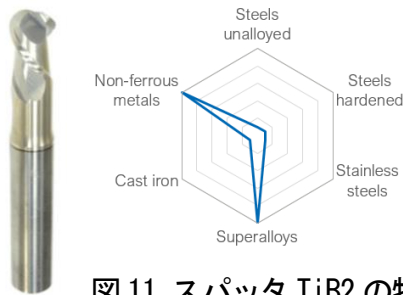


図 11 スパッタ TiB2 の特性

4.6 アークとスパッタの同時蒸着

PVD 炉の中には、アーク炉にスパッタ機能を内蔵しているものがあるが、同時蒸着は困難である。本装置であれば、炉内中央カソードのスパッタコーティング中に、ドア側のアークカソードで同時に蒸着が可能である(図 12)。スパッタ TiB₂ とアーク Ti カソードを同時蒸着させ、ホウ素の組成比制御により、ナノ硬度 45GPa の TiB₂ も可能である。また、本装置能を利用したホウ素の組成制御により、内部応力の操作が可能となり(図 13 上)、鋭角な刃先への蒸着や厚膜を実現する。小径工具や仕上げ工具、リーマの鋭角な刃先への確実な皮膜の蒸着、ホブやドリルの厚膜にも対応する。また、ドロップレットが発生するものの、アークだけで蒸着した皮膜より、平滑性に優れ、スパッタ皮膜より、イオン分率も高めることも可能だ(図 13 下)。

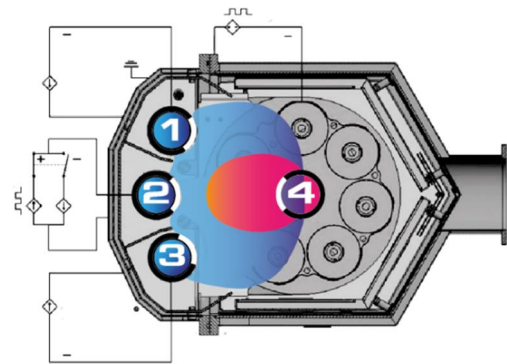


図 12 スパッタとアークの同時処理のイメージ

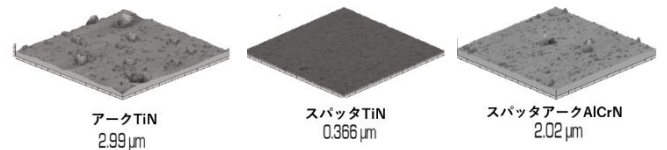
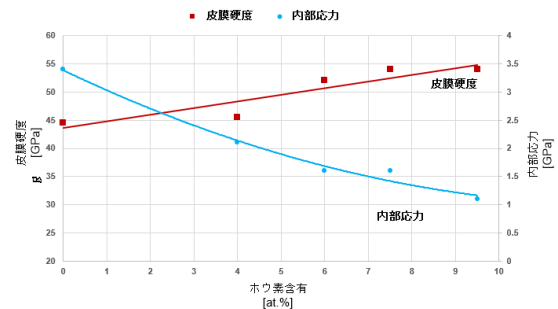


図 13 ホウ素含有による皮膜硬度と内部応力の変化(上)
膜厚2 μmの平滑性の比較(下)

4.7 超硬工具のAlCr系皮膜の除膜

ターンキーの一環で、除膜用に独自の商品 ST シリーズをラインナップしている(図 14 上)。コバルト、タングステンのレアメタルを含む超硬工具の有効活用の需要は高いにも関わらず、超硬工具を除膜している例は限られている。本装置であれば、TiAl系だけでなく、AlCr系皮膜も超硬から除膜が可能である。ノンコートの状態でも超硬を除膜液に浸けた場合、時間に応じてコバルト浸出が避けられない。しかし、膜厚に応じて、適切なタイミングで除膜槽から、工具を取り出すことで、コバルトの浸出も抑制

することができる(図14下)。

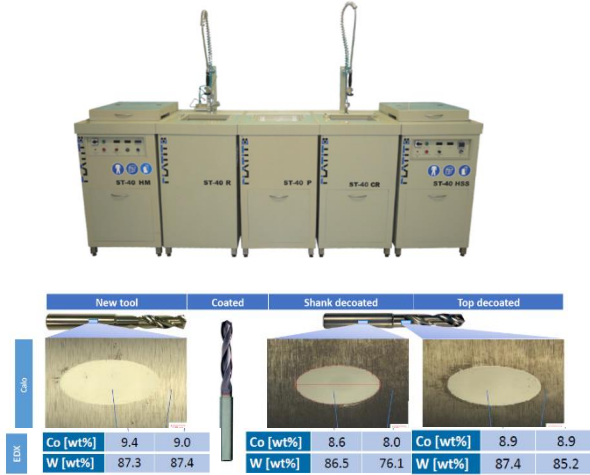


図14 除膜システムSTシリーズ(上)
TiAl系皮膜の超硬からの除膜(下)

4.7.1 除膜によるリコートの性能差

エンドミルは除膜の必要性が低いと認識されていることが多いが、再研磨3回に1度の頻度で除膜が推奨される。すくいと逃げ面を再研磨し、リコートをして、刃裏には皮膜が残る。リコートでは古い皮膜の上に、新しい皮膜が形成されていくが、剥離し易くなり、刃先の新しい皮膜も一緒に剥がれることになる。新品の工具と、3回再研磨+リコート、除膜してから3回目再研磨+リコートしたものを比較した。新品と比較し、3回再研磨+リコートでは65%の性能に止まっているが、除膜をすることで、新品と同等近い性能を発揮する(図15上)。

4.7.2 コーティング・除膜の内製によるメリット

コーティング・除膜を外部に依頼すると、最短2-3日の追加納期、ハンドリングによる工具の損傷、不安定な皮膜品質、輸送梱包の手間、受入検査の工程確保の課題がある(図15下)。一方、コーティング・除膜を内製することで下記のメリットが上げられる。

内製化によるメリット：

- 輸送梱包、輸送がなくなり納期を短縮
- 委託コート先の利益分のコスト削減
- 混載を避けられるため、膜厚、色味等の皮膜の品質が安定
- 工具品質の向上
- 梱包、受入検査の工程削減

特に品質の面では、内製することで、混載状態のコーティングを避けることができ、安定した皮膜品質を獲得できる。さらに、内製により、除膜による工具表面の化学的損傷面を再研磨時に除去し、リコートできるので、新品に近い性能を実現できる。委託コートの場合、工具研削後に除膜するため、工具の表面が損傷したり、最終形状が劣化するリスクがある。

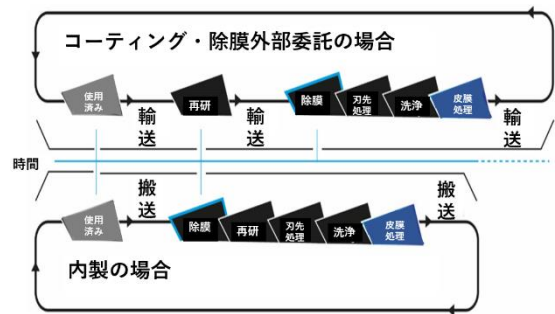
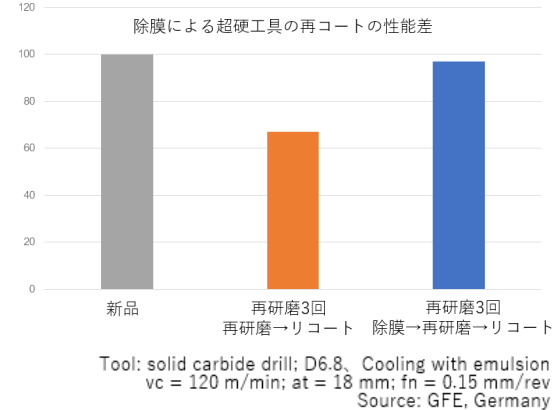


図15 除膜によるリコート工具の寿命差(上)
委託と内製による工程の違い(下)

5. おわりに

プラティットは受託コーティング事業を持たないPVDコーティング炉の専門メーカー

である。コーティングに加え、洗浄、刃先処理、除膜のノウハウを惜しみなくターンキーで提案できる事業体制である。また、業界で唯一、複数の回転円筒カソードを搭載するπ411は、最高の自由度を兼ね備え、市場のニーズに一台の炉で迅速に対応する。皮膜の改善や前後プロセスの提案により、皮膜の発展、及びコーティングの内製化に貢献したい。

以上