

(解説)

硬質膜用PVDコーティング装置

PVD Coating System for Hard Thin Film



藤井博文*
Hirofumi FUJII



河口 博*
Hiroshi KAWAGUCHI

Since 1986, Kobe Steel has been designing, manufacturing and supplying Physical Vapor Deposition (PVD) systems for coating products, such as cutting tools, molds, and mechanical / automotive parts. The company has the largest market share of the systems sold in Japan. Kobe Steel also developed a production coating system, particularly designed for piston rings, and started its delivery around 15 years ago. Kobe Steel now has the largest market share of the piston-ring coating system in the world. This paper presents Kobe Steel's PVD systems for coating hard thin films and describes the future developments of PVD equipment.

まえがき = PVD (Physical Vapor Deposition) 法は、真空中で行う成膜技術の代表的な方法であり、皮膜材料の一部またはすべてを固体材料から蒸発・昇華させて供給し、被処理物に堆積させるものである。1980年代から工具・機械部品などの表面処理方法として工業的に用いられているが、当社は、1986年にPVD法の一つであるAIP (Arc Ion Plating) 法の基本技術を米国から導入し、装置の国産化と国内販売を開始した。その後、1998年には同じPVD法の一つであるスパッタ法のUBMS (UnBalanced Magnetron Sputtering) 装置を上市し、UBMSの特徴を生かしてDLQ (Diamond Like Carbon) 用を中心に装置販売と受託加工を行ってきた。当社は、PVD装置市場への参入当初より、装置のみならず皮膜についても改良・開発を続け、切削工具・摺(しゅう)動部品・金型用向けなどのハードコーティング分野を中心に成膜市場の要請に対応してきた結果、PVD装置販売では国内トップ、さらにピストンリング用の成膜装置では世界No.1のシェアを誇っている。

本稿では、当社の特色ある硬質皮膜用PVDコーティング装置の概要と今後の開発方向について解説する。

1. AIP装置

1.1 AIP法の原理

AIP法とは、真空中チャンバ内でTi, Crなどの金属または合金などの固体金属材料(ターゲット)を陰極としたアーク放電を発生させ、ターゲット表面に形成されるアークスポット(直径数~10μm程度)に集中するアーク電流のエネルギーによりターゲットを瞬時に蒸発・イオン化させ、同時にチャンバ内に導入した窒素などのプロセスガスと反応させてワーク(被コーティング物)の表面に皮膜を形成する方法である。蒸発したターゲット材料のイオン化率が非常に高いのがAIP法の特徴であ

り、負のバイアス電位を印加したワークの表面に緻密で密着性に優れた皮膜が得られる。このため、AIP法により形成された硬質皮膜は(Ti, Al)Nコーティングに代表されるように、いまや切削工具用コーティングの代名詞となっている。

AIP装置の基本構成を図1に示す。標準的なAIP装置では、真空チャンバの側壁面に平板ターゲットを有する蒸発源を配置し、チャンバの底部にワーク積載用テーブルを搭載している。通常、蒸発源を高さ方向に複数個配列し、高さ方向の膜厚分布とコーティング処理空間を確保するとともに、回転可能なテーブルにより周方向にも均一なコーティングを可能としている。

1.2 バッチ式AIP装置

当社では、工具・金型・機械部品など広範な用途に対応する汎用バッチ式AIP装置「AIP-Sシリーズ」をライ

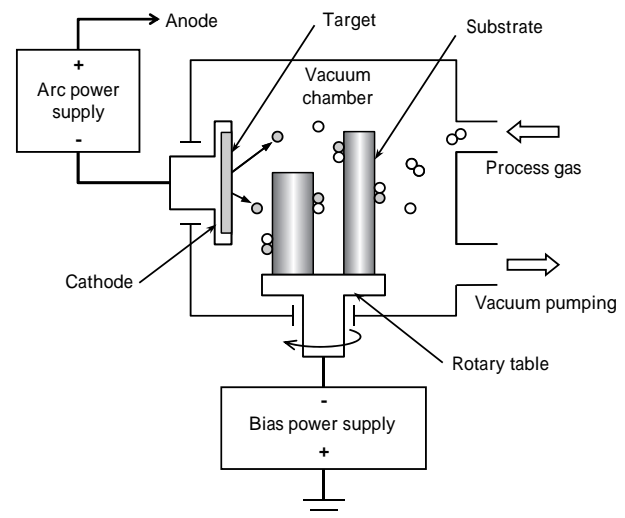


図1 AIP装置の基本構成
Fig. 1 Schematic drawing of AIP system

*機械エンジニアリングカンパニー 産業機械事業部 高機能商品部

ンアップしている（図2）。

AIP-Sシリーズの主な特徴を以下に示す。

- ・ターゲットに対して新開発の磁場形態を印加することによりメタルイオンのプラズマ密度をアップし、皮膜の性能や面粗度を大幅に向上させた新型アーク蒸発源ファインカソード¹⁾（図3）を搭載
- ・熱フィラメント型プラズマ源による強化型ガスイオンポンパード機構により、皮膜の高密着性を実現
- ・高温ヒータ+ゾーン温度制御とバイアス印加状態での精度良いワーク測温の実現により、ワーク昇温能力とワーク温度の均一制御性が格段に向上
- ・最新版マンマシンインタフェースによる簡単で快適な操作性と、レシピNo.を選択するだけの全自動システムによる高いプロセス再現性
- ・蒸発源を搭載した2面の大型ドア構造を採用し、メンテナンス時のチャンバ内アクセスが極めて容易
- ・蒸発源追加用予備ポートを標準装備し、成膜方式の拡張性が高い

1.3 厚膜（ピストンリング）用 AIP 装置

ピストンリングの表面処理として1990年代前半からAIP法によるCrNコーティングが適用され始めた。この皮膜は、当初ディーゼルエンジンの高級車や高出力エンジンだけに採用されていたが、近年、環境に配慮しながらエンジン性能の向上を図るため世界的に広まり、いまやガソリンエンジンのコンパクトカーやオートバイなど

大衆車のピストンリングにまで広く適用されるようになった。ピストンリングの表面処理として従来用いられてきた窒化・溶射・硬質Crメッキなどに対して、AIP法によるCrN皮膜は、耐摩耗性・耐食性・耐焼付き性などあらゆる特性に優れている²⁾。しかしピストンリング用の皮膜厚さは通常十数 μm から数十 μm と、工具や機械部品などに用いられる数 μm 程度の膜厚に対して非常に厚い膜厚が要求されるため、成膜に要する時間が非常に長く、操業安定性やメンテ性に優れた装置が求められる。

当社は、量産車エンジン用ピストンリング専用のコーティング装置としてロッド型のターゲットを搭載したAIP-R500を1993年に世界で初めて実用化し、優れた性能を持つCrN皮膜の適用拡大に寄与してきた。さらに2004年には、生産性とメンテナンス性を大幅に向上し、皮膜性能の改善を図ったAIP-R600（図4）を開発・上市し、当社のピストンリング用PVD量産装置の世界シェアは現在7割以上に達している。

AIP-R600の特徴を以下に示す。

- ・特殊磁場印加により大電流アークスポットの位置制御を世界で初めて可能とし、膜厚分布の厳密な制御と再現性の格段の向上、皮膜の粗度の改善、分割式両端大径ターゲットを採用するなどさらなるターゲットコストの低減を図った新開発ロッド蒸発源^{3),4)}を搭載。図5にその放電状態を示す。

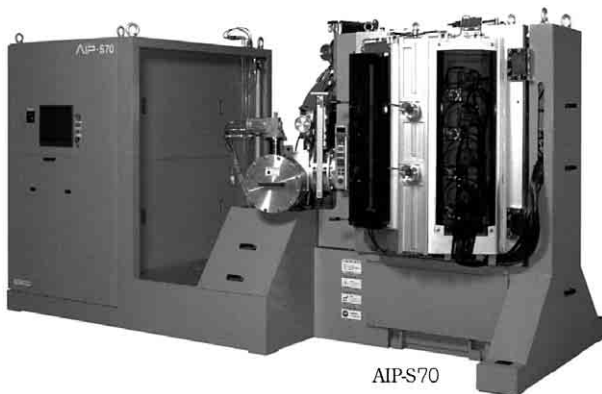


図2 大型生産装置 / AIP-S70

Fig. 2 AIP large scale production model / AIP-S70

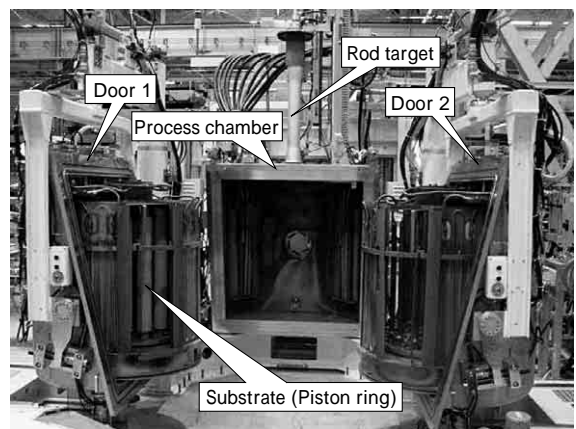


図4 ピストンリング用成膜装置 / AIP-R600

Fig. 4 Piston ring coating system / AIP-R600

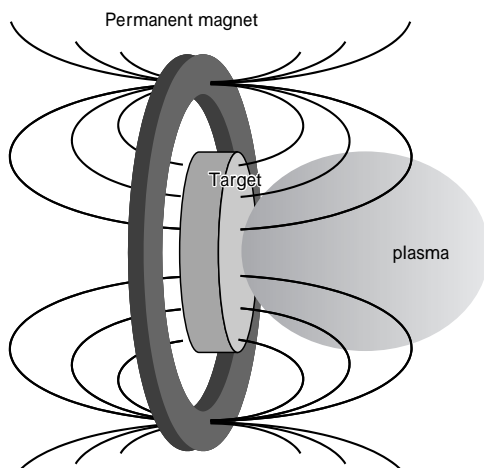


図3 AIP ファインカソードの概念図

Fig. 3 Model of AIP "Fine Cathode"

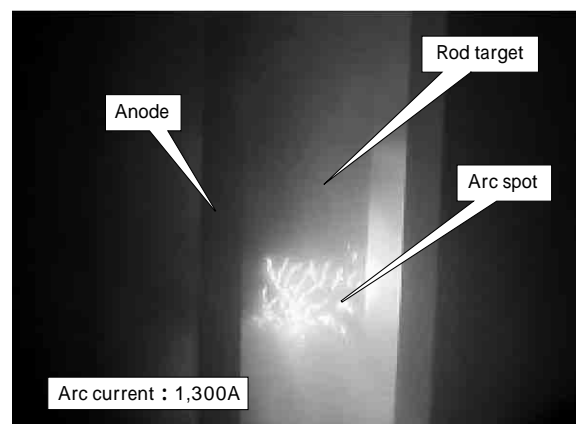


図5 新型ロッド蒸発源のアーク放電

Fig. 5 Arc discharge of newly developed rod evaporation source

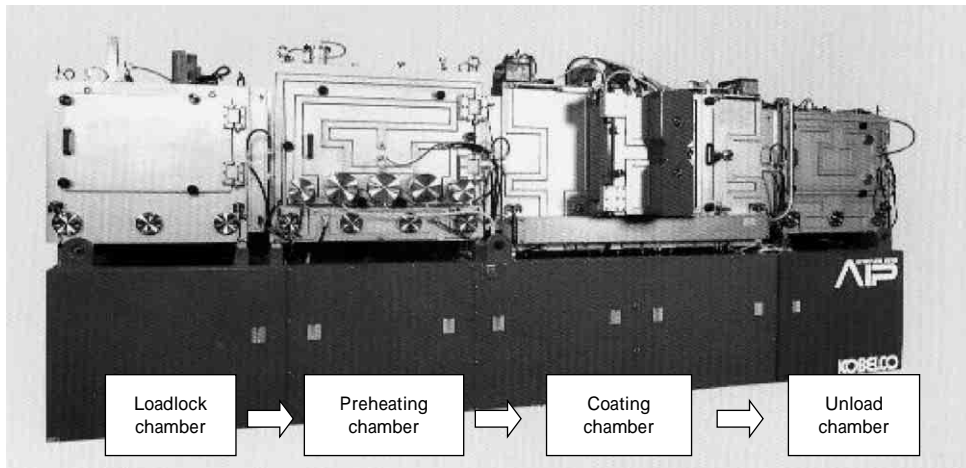


図6 インライン式 AIP 装置 / AIP-IV65
Fig. 6 AIP in-line system / AIP-IV65

- ・ピストンリングの内側に水冷パイプを通すことにより、従来約 500 °C であった処理温度を 380 °C まで低減し、処理温度の制約から従来 PVD 処理できなかった材料の適用が可能⁵⁾
- ・斜め切断チャンバ⁶⁾と、テーブルを搭載したツインドアシステムの採用により連続バッチ処理を実現し、生産性の向上とともにメンテナンス作業性も大幅に改善

1.4 インライン式 AIP 装置

バッチ式の装置に対して、初期真空排気、ワークの予熱、ポンパード、コーティング、冷却など PVD 処理の各工程をそれぞれ専用処理（または一部共用処理）するチャンバを仕切り弁を介して連結し、ワークを順に搬送しながら大量連続処理する方式を採用したのがインライン式 AIP 装置 AIP-IV シリーズである。図 6 に AIP-IV65 の外観を示す。この装置構成では、両端の処理室以外は常時真空状態に保持されるため放出ガスの影響がほとんどなく、高品質の成膜を安定して処理することが可能である。さらに、各室の処理時間を極力平準化することにより高い生産性を得ることができる。当社はこのような優れた特徴を持つ AIP 法によるインライン式生産装置を 1988 年に世界で初めて実用化した。この装置は運転条件を PC にプリセットしておき、処理ロットごとにワークに添付されたタグの内容を自動的に読み取り、対応する運転条件を PC から読み出して全自動処理される。装置の前後にワークのストックを設けたものや前後の処理工程と連動させたものなど、ワークや処理形態に応じた装置を提供している。自動車・家電部品や切削工具などの小ロット・無人連続処理に用いられ、処理コストの削減に寄与している。

2. UBMS 装置

2.1 UBMS 法の原理

スパッタリング法は AIP 法と並ぶ PVD 法の代表的なプロセスであり、半導体・電子機能部品から装飾用のコーティングまで広範囲の産業分野で利用されている。Ar などの不活性ガスを導入した真空雰囲気において、固体ターゲットを陰極として高電圧を印加するとグロー放電が発生し、Ar⁺ イオンが生成される。“スパッタ”と

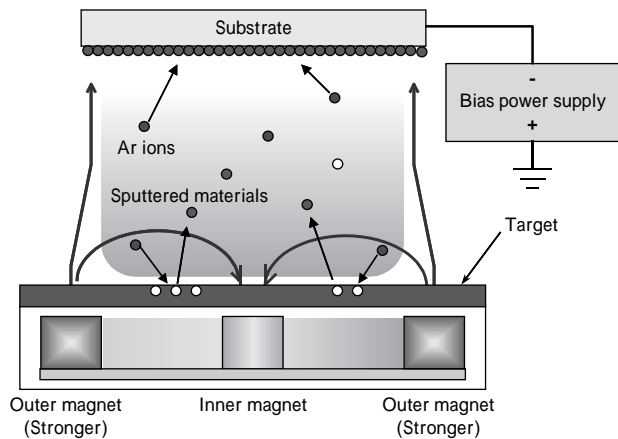


図7 UBM スパッタ源の概念図
Fig. 7 Model of UBM sputtering source

は、この Ar⁺ イオンがターゲットに衝突してターゲットの原子 / 分子を弾き飛ばす現象をいい、この現象を利用してターゲット材料をワーク表面に堆積させて成膜するのがスパッタリング法である。ターゲット材料は導電性から絶縁性まで適用範囲が広く、また非常に平滑な皮膜が得られるという特徴がある。しかし、スパッタされた粒子のほとんどは電気的に中性であり、イオンによって皮膜形成を行う AIP 法に比べると皮膜形成粒子のエネルギーが低い。このためこれまで、強固な密着性や耐摩耗性が要求されるハードコーティング分野でのスパッタリング法の適用は限られていた。

UBMS 法は、スパッタ粒子のエネルギーを増すために、通常マグネトロンスパッタ源とは異なり、外側磁極の磁力を内側より強くして磁力のバランスを意図的に崩した非平衡磁場が特徴である(図7)。外側磁極の磁力線の一部がワーク付近まで達し、ターゲット近傍に集束していたプラズマの一部が磁力線に沿ってワーク近傍に到達しやすくなる。その結果、皮膜形成中にワークに照射される Ar イオン量が増大し、そのイオンアシスト効果によってスパッタ粒子のイオン化が促進され、ワークに印加されるバイアス電圧による皮膜特性の制御が可能となる⁷⁾。

2.2 UBMS 装置

1998 年に当社は、国内メーカーとしては初めて UBMS



図 8 UBMS 中型生産装置 / UBMS504
Fig. 8 UBMS middle scale production model / UBMS504

法を用いたスパッタリング装置を上市した。DLC 皮膜や窒化物・酸化物皮膜などを中心に、潤滑・耐摩耗性皮膜形成用として、AIP 装置と同様に研究開発用から大型生産用の汎用パッチ式スパッタ装置をラインナップしている(図 8)。本装置の PVD 装置としての基本的な特徴は、1 章で述べた当社 AIP-S シリーズの特徴を継承している。また、機械部品などのさらなる処理コスト低減のためのインライン式のスパッタ装置も提供している。

2.3 PVD 複合装置

さらに当社は、AIP 装置に UBMS 蒸発源を付加した PVD 複合装置⁸⁾を 2003 年に上市し、工具・金型分野を中心に使用されている。当社の PVD 複合装置は、AIP 法と UBMS 法による成膜処理を同一チャンバ内で同時に行うことができ、両者の特徴を合せ持つ、あるいは両者にはない別の特徴を持つ複合皮膜や多層構造の皮膜の形成が可能である。

3. PVD 皮膜の適用例

当社では、上述のような種々の特徴を持つ当社の PVD 装置を用いることにより、工具・金型や機械・自動車部品分野へ適用可能な多くのユニークな皮膜開発も行ってきており、次に簡単に紹介する。

・ナノ積層硬質皮膜

PVD 複合装置を用い、AIP 蒸発源による成膜を行うと同時に、AIP 法では蒸発が困難な元素を UBMS 蒸発源から添加することにより、AIP および UBMS 双方の特徴を生かしたナノ積層構造を有する皮膜を形成することができる。一例として図 9 に CrN/BCN 複合皮膜の SEM 像を示す。

・アルミナ皮膜

切削工具や摺動部品などに用いられるアルミナ皮膜は高温でも極めて安定な構造を維持するため、耐熱性の付与に非常に効果的である。通常、この皮膜の形成には皮膜材料をガスにより供給する CVD (Chemical Vapor Deposition) 法が用いられるが、処理温度が 1,000 以上と非常に高く、使用できる基材が限られる。当社では、PVD 複合装置を用いて反応性スパッタリング法の遷移領域での最適運転制御を行うことによ

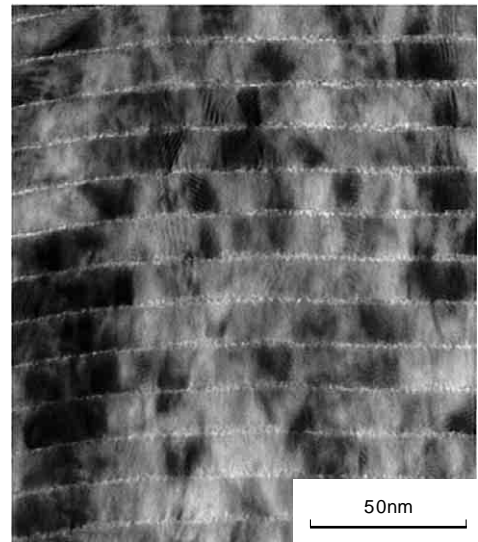


図 9 CrN/BCN 複合皮膜の TEM 像
Fig. 9 TEM image of CrN/BCN multi layer film



図10 PVD アルミナ皮膜表面の SEM 像
Fig.10 SEM image of PVD Al₂O₃ film



図11 レース用エンジン部品への DLC 皮膜の適用例
Fig.11 Sample of DLC film coated engine parts for auto race

り、アルミナを 750 の処理温度で形成できる技術を開発した。図10 にその SEM 観察像を示す。

・F1 レース部品向け DLC 皮膜

当社が UBMS 装置により開発した DLC 皮膜が F1 レース用エンジンの動弁系部品に適用された。極限的な使用環境下で非常に高い信頼性が要求される中で、当社の DLC 皮膜が優れた耐摩耗性と摺動性を安定して発揮することが実証された(図 11)。

むすび=当社は、AIP法によるPVD装置を二十年前に上市して以来、ハードコーティング市場のニーズにこたえるべく装置と皮膜の開発を続けてきた。その間に当社はPVD装置の国内トップメーカーとしての地位を築くことができ、国内外で300台以上の装置をご使用いただいている。

今後も硬質膜用PVDコーティング装置の国内トップメーカーとして、特徴ある皮膜を提供するための蒸発源・プロセスのさらなる開発・改良、生産性の向上と処理コストの低減のための装置の提案、前後処理や周辺技術の開発などにより硬質膜成膜のトータルソリューションを

提供し、さらには各種機能膜など硬質膜以外の成膜分野向け装置についても開発・提供してゆく所存である。

参 考 文 献

- 1) 高原一樹ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.50, No.2(2000)，p.53.
- 2) 自動車用ピストンリング編集委員会：自動車用ピストンリング(1997) p.149，山海堂．
- 3) 特許：4034563.
- 4) 公開特許：2004-107750.
- 5) 公開特許：2004-156139.
- 6) 公開特許：2005-29848.
- 7) 赤理孝一郎ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.50, No.2(2000) p.58.
- 8) 河口 博：R&D 神戸製鋼技報，Vol.52, No.2(2002) p.108.