

(技術資料)

# ピストンリング用新型AIP装置

## Arc Ion Plating System for Coating Piston Rings



藤井博文\*  
Hirofumi FUJII

Kobe Steel has been selling the Arc Ion Plating (AIP) system with rod cathode for coating piston rings since the early 1990s, and has been contributing to the improvement of engine performance and fuel consumption rate. Recently, as AIP thin film has become widely used, more productivity and reduction of coating cost are required. This paper describes the new AIP system which is featured by newly developed rod type evaporation source, water-cooled rotary table and twin door system with slanted opening.

まえがき = ピストンリングは自動車や二輪車などのエンジンのピストン外周に装着され、シリンダ内を摺動する過酷な環境で使用される部品で、エンジン燃焼室の爆発力を効率的にクランクシャフトに伝えるための気密性の確保、シリンダ内壁の潤滑油膜量の適切なコントロール、ピストンが受けた熱をシリンダ壁に逃がす伝熱機能、シリンダ内を激しく往復動するピストンの姿勢制御など、エンジン性能を左右する重要な役割を担っている<sup>1)</sup>(図1)。

ピストンリングの表面処理として従来、窒化処理や溶射、硬質Crめっきなどが施されてきたが、1990年代前半になると、エンジンの高出力化・低燃費化、ディーゼルエンジンのEGR(排ガス再循環システム)の採用などに対応するため、耐摩耗性・耐食性・耐焼付き性・低相手攻撃性などに非常に優れたAIP(Arc Ion Plating)法によるCrN(窒化クロム)系皮膜のコーティングがディーゼルエンジン用に適用され始めた。

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AIP-R500を世界で初めて実用化し、優れた

性能をもつCrN皮膜の適用拡大に寄与してきた。

近年、環境汚染・地球温暖化がクローズアップされる中、燃費向上や厳しい排ガス規制への対応から、CrNコーティングを施したピストンリングが乗用車のガソリンエンジンにまで広く採用されるようになってきた。このため、皮膜性能の向上とコーティング処理コストの低減がますます強く求められている。

本稿では、その要請にこたえるため新たに開発したピストンリング用新型AIP装置AIP-R600を紹介する。

### 1. AIP法の概要

AIP法とは、真空チャンバ内でTi, Cr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。工具や機械部品などの表面処理法として1980年代から工業的に広く用いられており、当社は1986年から、AIP法を用いた成膜装置を各種用途向けに製造・販売している<sup>2)</sup>。

### 2. ピストンリング用AIP装置

#### 2.1 AIP-R500の特徴

一般的な工具などに施されるAIP法による皮膜は2~5μm程度の厚さであるが、ピストンリング用の皮膜は数十μm~50μm以上と非常に厚く、成膜に数時間から十数時間を要する。このため、ピストンリング用成膜装置に対しては長時間の放電安定性、ターゲットの長寿命化、長時間運転により汚染されるチャンバ内のメンテナンスの向上がとくに強く求められる。これに対応して当社

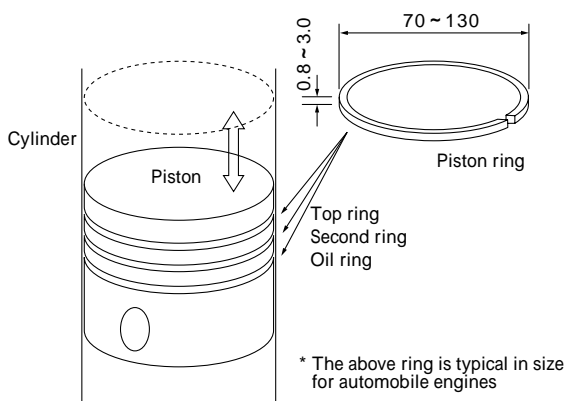


図1 ピストンリング  
Fig. 1 Piston ring

\* 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

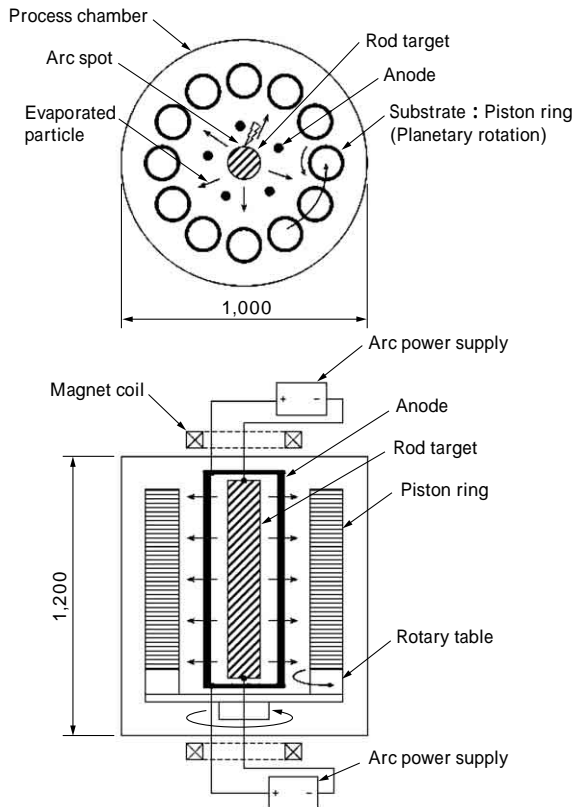


図2 AIP-R500 概略チャンバ内構成  
Fig. 2 Structure of AIP-R500 inside chamber

は、以下の特徴を持つ AIP-R500 を 1993 年に実用化した。

AIP-R500 の概略チャンバ内構成を図 2 に示す。

- ・ターゲットを円筒状（ロッド形）とした AIP 蒸発源を採用し、1,000A の放電電流にて極めて安定した長時間放電が可能。
- ・従来の平板タイプに比べ重量あたりのターゲット製造コストが安価で、30 μm 成膜で 30 パッチ以上のターゲット寿命。
- ・ターゲットをチャンバ中央に配置し、その周囲をワークが自公転しながら成膜されるため、蒸発粒子の捕捉率が高くチャンバ内壁の汚染が少ない。

## 2.2 AIP-R500 の課題

さらなる生産性向上・皮膜性能向上のため、以下に示したようなクリアすべき課題があった。

### (1) 膜厚分布の制御性・再現性

アークスポットはターゲット表面をランダムに動く（図 3）。AIP-R500 のアークスポットの位置制御は、図 4 に示すように、アノード電流の上下バランスと電磁コイルの磁場により、アークスポットをおおよそ上・中・下の位置に寄せるレベルにとどまっていた。しかしながら、成膜中のガス圧力によって制御位置の変動が大きく、また膜厚のばらつきは、成膜時間や成膜後の仕上げ加工の工数に大きく影響するため、膜厚分布の制御性・再現性の向上が求められるようになった。

### (2) 処理温度の低減

一定の生産性、すなわち成膜速度を得るため通常 1,000A のアーク電流を投入するが、そのため成膜中のワーク温度が 450 から、条件によっては 500 を超える。CrN コーティングリングの材料として主に用いられてい

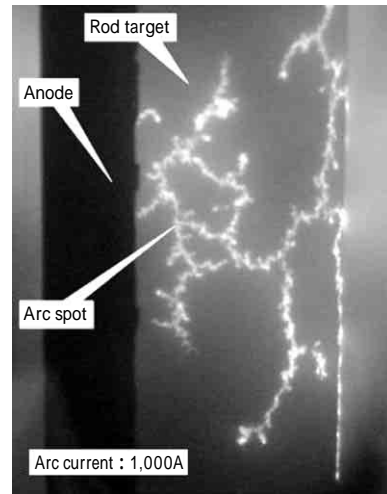
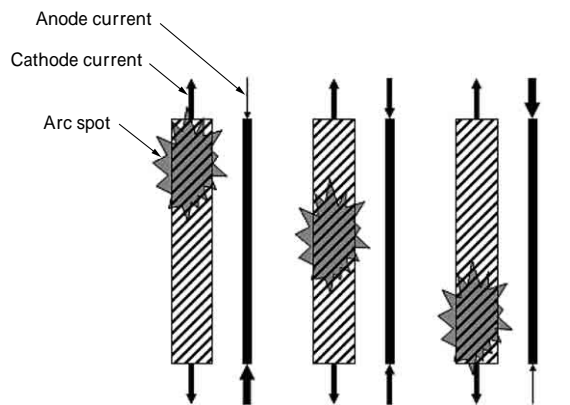


図3 ターゲット表面をランダム移動するアークスポット(AIP-R500)  
Fig. 3 Random motion of arc spots on target of AIP-R500



Cathode current	Equal	Equal	Equal
Anode current	Upper < Lower	Upper = Lower	Upper > Lower
Arc spot position	Upper	Middle	Lower

図4 アノード電流バランスによるアークスポット位置制御(AIP-R500)  
Fig. 4 Arc spot position control of AIP-R500 by anode current balance

る窒化処理されたステンレス鋼は、この処理温度に耐えるが比較的高価である。しかし自動車部品のコスト低減要請はピストンリングも例外ではなく、前記処理温度では硬度低下を来すような安価な低級鋼へのコーティング適用を図るため、処理温度を 400 以下とする要求が強まった。

### (3) ドロップレットの低減

AIP 法に特有なターゲットから発生するドロップレット（溶融粒子）や、チャンバ内に付着した皮膜の飛散粒子が膜に取込まれると、それが核となって皮膜が局部的に異常成長し、後加工中にそれが脱落することによって、皮膜表面に微小な穴が形成される。これをピットと呼ぶが、直径 100 μm 程度のピットが 1 個でも存在するとピストンリングとして使用できない。製品歩留りの改善にはドロップレットのサイズと数の低減が必須である。

### (4) 合金ターゲットの適用

皮膜性能向上のため、Cr に他の元素を添加したいという要求があったが、それはほとんどの場合純 Cr に比べて非常に脆い材料となり、従来のロッドターゲットでは長尺ゆえに応力解放などによる割れが発生し、実用化できていなかった。

### 3. ピストンリング用新型 AIP-R600

上記の要請に対し、当社ではアークスポットの厳密な位置制御を可能とした新型ロッド蒸発源や水冷テーブル、ツインドアを採用した新型ピストンリング用成膜装置 AIP-R600 を開発した。

#### 3.1 新型ロッド蒸発源

##### 3.1.1 大電流アークスポットを捕捉可能な磁場形態<sup>3)</sup>

ターゲットの表面に発生するアークスポットは通常ランダムに動こうとするが、ターゲット付近の磁場やアノードの位置関係などにも影響を受ける。アークスポットの軌道を制御する方法として、一般的に使用される平板ターゲットでアーク電流80～150A程度の場合、図5に示すような磁場を発生させてアークスポットの位置を一定の範囲に捕捉する方法が用いられる。

アークスポットは通常、アーク電流70～80Aごとに分裂することが分かっており、80～150A程度では1～2個のアークスポットが視認できる。しかしながら、アーク電流が増大しアークスポットが3個以上になると、互いの反発力とアーク電圧が上昇することから図5の軌道にとどまることが困難となり、逸脱してしまう性質がある。1,000Aのアーク放電では常時十数個のアークスポットが発生しているとみられ、これだけの電流量のアークスポットを任意の位置にとどめておく技術は従来はなかった。

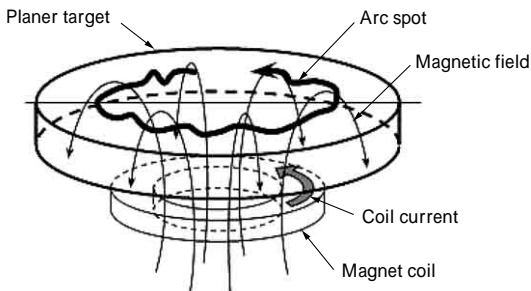


図5 平板ターゲットにおける従来のアークスポット位置制御  
Fig. 5 Conventional arc spot position control for planer target

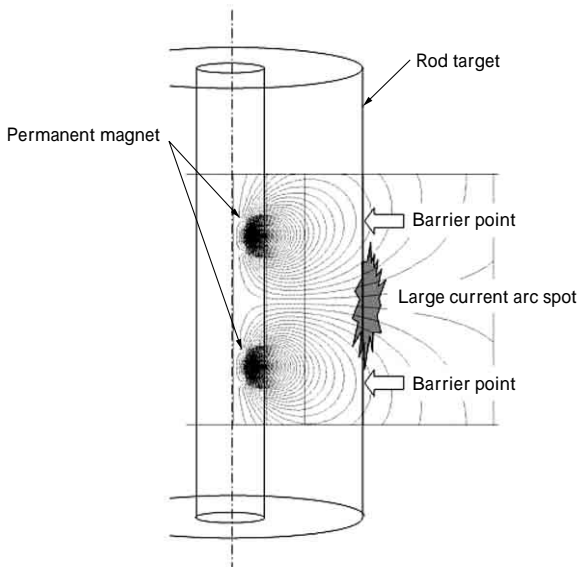


図6 大電流アークスポット捕捉用磁場シミュレーション  
Fig. 6 Magnetic field simulation for trapping large current arc spot

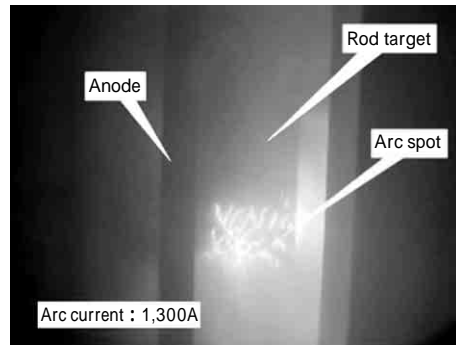
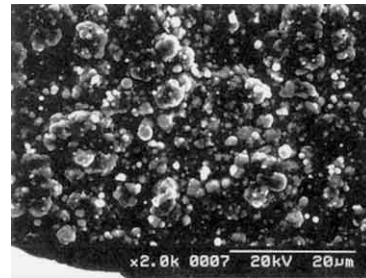
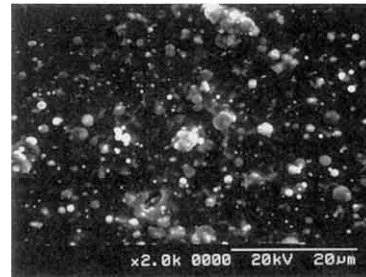


図7 磁場により捕捉された大電流アークスポット(AIP-R600)  
Fig. 7 Arc spots on rod target completely trapped by magnetic field



(a) Conventional CrN film surface (AIP-R500)



(b) CrN film surface coated by newly developed rod cathode (AIP-R600)

図8 CrN 皮膜面粗度の改善状況  
Fig. 8 Improvement of surface roughness of CrN film

当社は、大電流のアークスポットが図5の軌道から逸脱する性質を逆に利用し、この磁場をバリアとして用いることにより所定の領域に捕捉する技術を開発した。AIP-R600では、ターゲット中に永久磁石を設け、ターゲット周方向にターゲット表面に平行な成分のみを持つ磁場を上下に2列発生させ、その間にアークスポットを挟むように閉込めている(図6)。このため、磁石をターゲット内で軸方向に昇降させることにより、アークスポットをターゲットの周方向に環状に分布させた状態でターゲット上を往復動させることができる(図7)。

磁石の位置、すなわちアークスポットの位置はステップモータにより厳密に制御可能となり、膜厚分布の制御性および再現性が確保されている。

またこの磁場形態は、アークスポット近傍に強い垂直磁場が印加することにより、ドロップレットの発生を抑制する効果がある。図8に皮膜の表面粗度の改善状況を示す。

さらに、消耗などによってターゲット径が変化してもアークスポットの存在領域の磁力変化が非常に小さく、ターゲット寿命まで均質な皮膜が得られることを確認している。

### 3.1.2 両端太径ターゲット<sup>4)</sup>

上記の技術により、膜厚分布の制御性は確保されるが、ターゲット全長にわたって均一に消耗(蒸発)させたのでは、ワークの膜厚分布は必ず両端が薄くなってしまふ。ワーク全長にわたって均一な膜厚分布を得るためには、ターゲット両端からの蒸発量を増やしてやる必要がある。

ターゲットからの蒸発量はアーク電流に比例するため、蒸発量を増やすにはアーク電流を増やすか磁石の速度を下げればよい。AIP-R600では均質な皮膜を得るためアーク電流を一定とし、ターゲット両端付近で磁石を減速させて均一な膜厚分布を得ている。種々の検証から、磁石の速度を往復動の両端50~80mmの範囲で1/2とし、通常要求される膜厚ばらつき $\pm 10\%$ 以内に対し、標準的な運転条件で $\pm 5\%$ 前後の実力を持っている。

一方で、ターゲット端部からの蒸発量を多くすると、その部分だけ早期に寿命に達し、ターゲットの利用効率が悪い。そのためAIP-R600では上下端部のみターゲット径を太くし、その他の部分の2倍消費させることができる形態としている。

### 3.1.3 ターゲットの分割

両端を太くした長尺の円筒ターゲットは、成形自体の困難さや中央部の削り代が多いなど、コストが非常に高くつく。そこで、ターゲットを分割して両端部とそれ以外を個別に成形し、それらを連結して使用することでコスト削減を図った。

AIP法では通常、ターゲット表面につなぎ目があるとアークスポットがつなぎ目に落ちて放電が停止したり、逆に動かなくなってターゲットの溶損に至る場合もある。AIP-R600は前記磁場形態によるアークスポットの捕捉力が非常に強いいため、磁石が移動してターゲットのつなぎ目を通過しても、アークスポットは問題なく磁

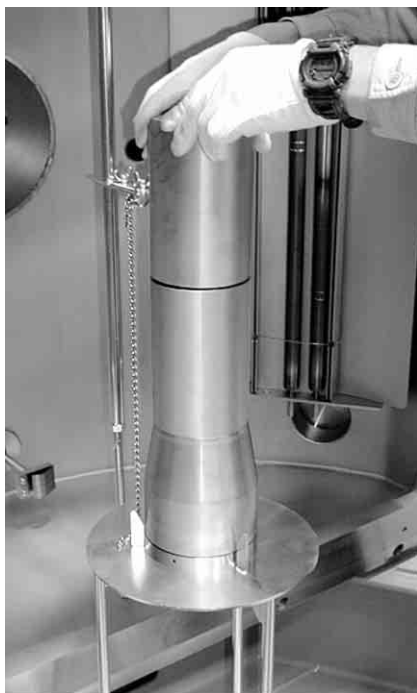


図9 分割ターゲットの交換作業  
Fig. 9 Exchange work of divided target

石に追従し、安定放電を継続できる。

また分割ターゲットの1個の長さを150~200mmとして重量を10kg程度に抑え、また冷却水のシールを兼ねたリング1個でターゲットどうしを連結可能とするなどして、従来1本30kgを超えていたロッドターゲットの交換作業が格段に容易になった(図9)。さらに、ロッドターゲットへの給電もスポット制御のための両側給電が不要となり、片側給電により蒸発源構造が簡素化できた。また、従来長尺の一体型ターゲットでは成形が極めて困難であった合金ターゲットが分割ターゲット採用で一部の材料で使用可能となる点も新型ロッド蒸発源の特徴として挙げられる。

### 3.1.4 1300Aの安定放電

上記磁場形態によるアーク放電形態および分割ターゲット構造の新型ロッド蒸発源は、アノード構造の最適化などを重ねた結果、要求されるプロセスガス圧力の全領域で常用1,300Aの運転電流で生産に使用されている。

### 3.2 AIP-R600の装置構成

自動車部品であるピストンリングはその製造コスト低減が常に求められる。AIP-R600では安価な低級鋼リングに成膜するための水冷テーブル、生産性向上のためのツインドア方式の採用、さらにこれらを実現するために斜め切断チャンバを実用化した。

#### 3.2.1 水冷回転ワークテーブル<sup>5)</sup>

生産性すなわち成膜速度を犠牲にすることなく処理温度を下げるにはワークを冷却するしかない。そこで、積上げたピストンリングの内側に水冷パイプを挿入した回転テーブルを採用した(図10)。流熱計算から求めたパイプ径や水量を実機に適用し、実際にピストンリングをAIP-R600で処理した結果、ユーザからも処理温度が計算どおりの380℃弱に低減できているとの評価をいただいている。

#### 3.2.2 ツインドア方式<sup>6)</sup>

ピストンリング用皮膜の膜厚は、切削工具用をはじめとする他用途の皮膜に比べて一桁厚く、サイクルタイムが非常に長い。生産性向上のためには、ワークの載せ換えやチャンバ内に厚く付着した皮膜の除去などのバッチ間作業時間の短縮が強く求められる。また回転テーブル

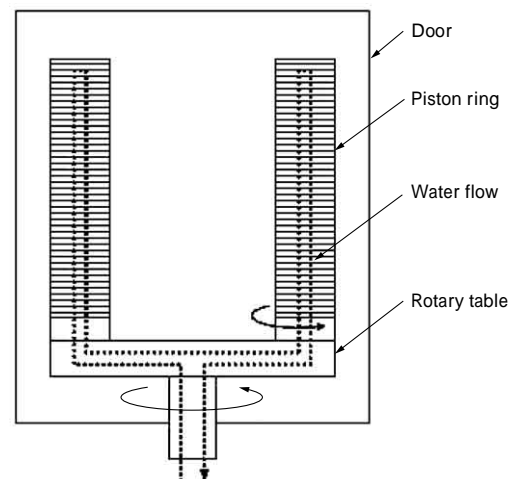


図10 水冷式回転テーブル  
Fig.10 Water-cooled rotary table

へ冷却水を供給しなければならないため、テーブルを着脱式にすることが困難である。

そこでAIP-R600では、水冷テーブルを取付けたチャンバドアを左右2式設け、一方のドア（テーブル）で成膜処理している間に他方のドア（テーブル）ではバッチ間作業を行い、交互に成膜処理することにより待機時間ゼロを可能とする装置構成とした（図11）。

このチャンバ構成により、ドアごとに運転条件を使い分けて皮膜の品質の安定化を図るといったことも可能となった。

さらにドアの自動入替え機能にも対応し、作業者を介在させずに連続バッチ処理を行うことも可能としている。

### 3.2.3 斜め開口チャンバ<sup>6)</sup>

ドアに固定した回転テーブルに冷却水を供給するためには、冷却水をテーブルの駆動軸に流す必要があり、必然的にドアの底面にテーブルの駆動軸を設けなければならない。一方、ロッド蒸発源がチャンバ中央に配置されているため、テーブルを搭載したドアを開閉する際には蒸発源を上方に退避しなければならず、蒸発源の支持部がチャンバ天井の中心になければならない。

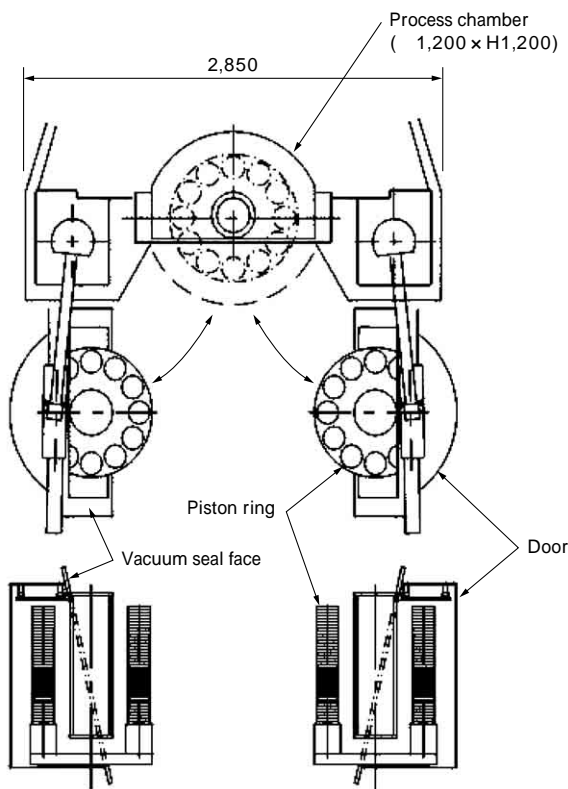


図11 ツインドアシステム (AIP-R600)  
Fig.11 Twin door system of AIP-R600

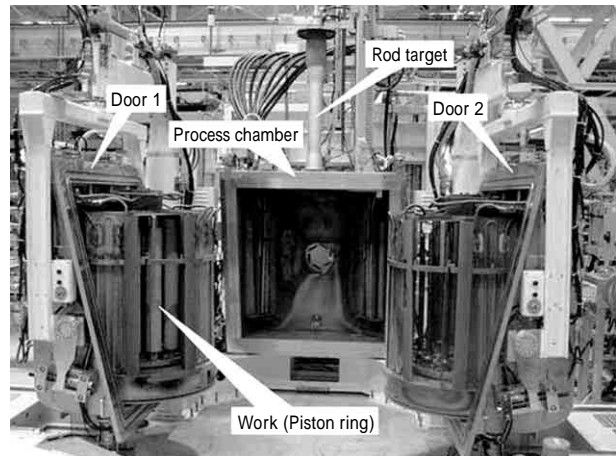


図12 斜め開口ドアを備えた AIP-R600 外観  
Fig.12 Whole view of AIP-R600 with slanted opening door

この制約下でドアの水平方向の開閉を実現するため、チャンバとドアとの当たり面を斜めにするという斬新なチャンバ形態を考案した。図12にチャンバとドアの斜め開口を採用したAIP-R600の外観を示す。ドア開閉動作のため、ロッド蒸発源が上方に退避している。このチャンバ形態の採用により、新型ロッド蒸発源や水冷テーブルによるワーク冷却機構などが量産装置に搭載可能となった。

むすび = 新開発のロッド蒸発源と独特のチャンバ形態を採用した成膜装置AIP-R600は、既に国内外でピストンリングへの高性能皮膜の量産に寄与している。

しかし、世界的な自動車生産台数の増加傾向が続く一方で、燃費改善・環境改善の要請は従来にも増して強まっており、AIPコーティングピストンリングのさらなる処理コストの低減と皮膜の高性能化が求められている。さらに、ピストンリング以外の自動車部品についても、燃費・環境改善のため高機能コーティングの必要性が高まってきており、当社は、ピストンリング以外の部品についても要求にマッチした各種用途向け装置を今後とも開発・提供していく所存である。

#### 参考文献

- 1) 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）pp.7-44, pp.131-156, 山海堂。
- 2) 高原一樹ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.55, No.2（2005）pp.100-104.
- 3) 公開特許：2003-193219.
- 4) 公開特許：2004-107750.
- 5) 公開特許：2004-156139.
- 6) 公開特許：2005-29848.