光学多層膜用
大形連続真空蒸着システムの開発
(クロスラインツインコータVRD2100L)

●Development of Large-Scale Continuous Coating Vacuum System for Optical Multi-Layer Coating (Cross-Line Twin Coater VRD2100L)

花木克任※

要旨

光学多層薄膜は、光やレーザを使う機器が多くの分野で使われるようになるにともない、より多くの種類が、より多量に生産されるようになった。従来、高品質の光学多層膜は、経験豊富な技術者の名人芸で蒸着されていたが、ここに開発した装置は汎用性と品質と生産性を同時に追求した全自動の生産システムである。規模の大きさと機能の豊富さは、蒸着装置としては業界で初めてのものと思われるが、そのため開発にあたっては高真空・高温という悪条件下で解決するべき技術課題が数多くあった。装置はフル生産に入って既に2年、その解答も出たと考える。

ABSTRACT

As optical and laser equipment have wider applications in various fields, production of optical multıa-layer coating shows a great increase in both amount and types. High-quality optical multi-layer coating has heretofore been a product of skilled, experienced craftsmen. The Cross-Line Twin Coater VRD2100L,we developed,is a fully autmatic multi-layer production system which meets the requirements for versatility, product quality and productivity. With regard to its large scale and multifunctionality, it is considered to be the first vapor deposition system to have reached this level. To develop this system, we had to resolve a number of technical problems caused by the necessary high vacuum and high temperature conditions. It has been two years since this system started operation at full capacity. This system has proven, through this time period, to be reliable and productive and we believe that all problems have been solved.

1. まえがき

光学薄膜の用途は広く、メガネ・カメラのレンズ、コンパクトディスクのピックアップやバーコードリーダの光学系、テレビ画面の反射防止スクリーンなどの反射防止膜、カラーテレビ用カメラの色分解フィルタや複写機の光学系のフィルタなど、多くの分野で使われている。これらの機器の普及の状況からも、大量に生産されていることがわかる。将来的にも、光通信の実用化とともに情報通信の分野に光学部品が多用されるようになり、太陽光の利用、照明の高級化、映像機器やディスプレイの高度技術化などに対応して需要が拡大すると思われる。

光学薄膜は、目的に応じていくつかの物質を数層から100層程度まで、各層が10分の1ミクロンというきわめて薄い膜厚で積層するものである。このような薄い膜を精度良く作るのには真空蒸着法が最も適しており、広く普及している。良い蒸着膜を得るためには、目的の光学性能に合う膜物質の種類、膜厚、層数など光学膜の特性の知識を必要とするほか、それぞれの物質について最適の圧力、温度、蒸着速度など多くの経験的ノウハウを必要とする。したがって、専門の蒸着加工業者が熟練技術者を使って製作するのが普通である。ところが、生産量の増大にともない昼夜連続運転が一般的になった現在、熟練技術者を多数確保することが難かしくなっている。また、目的の違ういろいろな光学膜を1台の装置で加工する場合は、その都度条件設定をやり直す必要があり、著しく生産性を阻害する。そこである程度専用化した装置を多数保有することになるが投資効率は悪くなる。

このような状況から、高品質で多品種の光学膜を、多量から少量まで生産でき、しかも生産性が高く、全自動

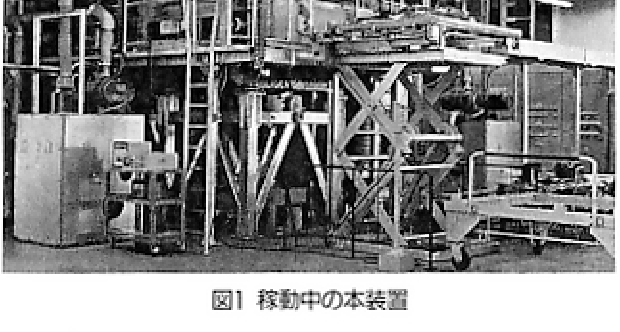


図1 稼動中の本装置

※産業機械事業部

で稼動する蒸着装置が待望されるようになった。しかし、蒸着に必要な高温・高真空という環境で重量物を高頻度で動かすことは技術的に難かしく、大形機で複雑な搬送を全自動で行う生産機はきわめて少なかった。このような状況を背景として、図1に示す装置を製作する際に、技術課題を一つずつ解決した結果について報告する。

2．真空蒸着装置の概要

真空中で物を加熱すると低い温度でも蒸発し、蒸発分子は空気という障害物がないので毎秒数百メートルの速度で一直線に飛んでいく。その先に清浄な基板を置いておくと、その表面で固体に戻り薄膜を形成する。蒸着に必要な真空度は、10^{-3}～10^{-4}Pa（10^{-5}～10^{-6}Torr）であるので、真空槽と高真空ポンプが必要である（図2参照）。物質を加熱蒸発する方法はいくつかあり、目的に応じて選ぶ。光学膜用には、制御性が良く、投入電力の大きい電子銃加熱蒸発源が多く使われる。蒸発源の直上にシャッタ板を設けこれを槽外のアクチュエータで開閉する。

膜をつけたい対象品を基板と呼ぶが、これは傘形の基板ドームに取付けられるのが普通である。基板ドームは膜厚分布を均一にするために、蒸着中に槽外のモータにより回転させる。また、半径方向の膜厚の均一性を得るために、膜厚分布補正機構を設ける。蒸着中の膜の厚さは、回転している基板を直接計れないので、ダミーとしてモニタガラスを基板の近くに固定し、ここに積層される膜に一定波長の光を当て、この反射または、透過光の干渉現象による変化から実時間で計測する。[1]

一般的に基板は、その材質と成膜物質の許容する限り温度を上げる方が膜の付着力が大きいので、基板加熱装置で加熱できるようにしておく。ガス導入装置はガス成分補充とイオンボンバードのために設ける。光学膜用によく使われる酸化物は、蒸発中に酸素を真空排気により失い、次第に膜質が変る。これを防ぐために不足酸素を補充する。イオンボンバードは、槽内に電極を設け電圧を加え導入したガスをイオン化し、これを電気的に吸引して基板表面を叩かせ清浄化・活性化し、膜の密着性を良くするものである。

3．基本仕様の決定

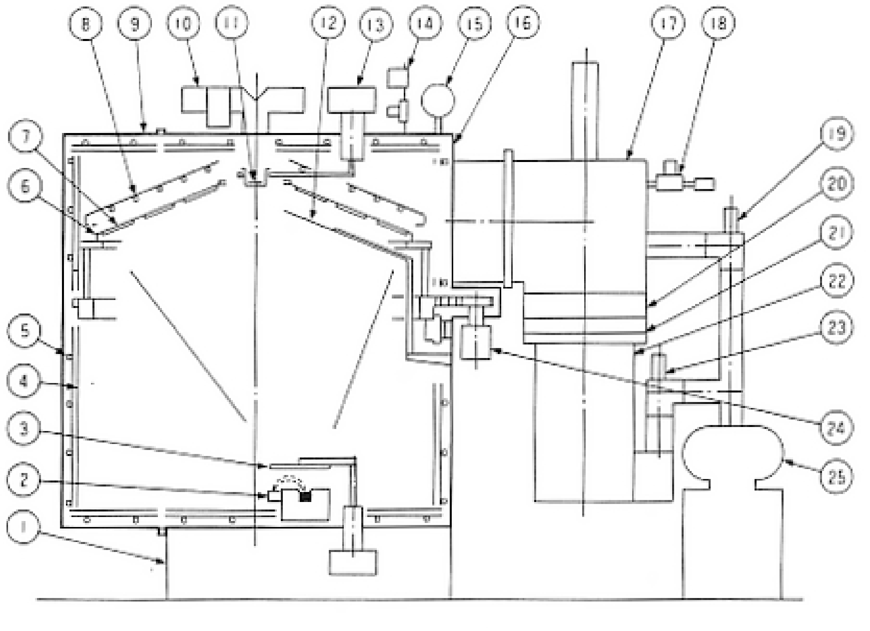
3－1．要求品質

真空蒸着装置の多槽連続機としては、蒸着槽が1槽だけで前後に圧力変換のための入口・出口槽を接続した3槽式が一般的である。蒸着槽が1槽だけでは成膜条件の設定も限定されるため、対応できる膜種も制限される。工程時間の配分から考えても、蒸着槽1槽に対し入口・出口槽が各1槽付属しているのは無駄が多くなる。このような観点から、蒸着槽を2槽持つ本機が開発されることとなった。

すでに述べた環境条件から本装置に課せられた要求品質は以下のようになり、これを基本仕様に展開した。

- 生産性が高い
  - 処理品収容量が大きい
  - タクトタイムが短い
  - 運転休止時間が短い
- 多様性に富む
  - 多様な膜構成に応じられる
- コストが安い
  - 設備コスト
  - 運転コスト

基本仕様を決めるために検討した内容を以下に述べる。



1	架台
2	電子銃蒸発源
3	シャッタ
4	防着板
5	ベーキングヒータ
6	基板ドーム
7	基板
8	基板加熱ヒータ
9	真空槽大扉
10	光学式膜厚モニタ
11	モニタガラス
12	膜厚分布補正機構
13	モニタガラス交換装置
14	ガス導入装置
15	真空計
16	真空槽本体
17	主バルブ
18	ベントバルブ
19	粗引きバルブ
20	コールドトラップ
21	水冷バッフル
22	高真空ポンプ
23	補助バルブ
24	基板ドーム回転装置
25	補助ポンプ

図2 単槽バッチ式真空蒸着装置の基本構成

3-2. 基板ドームの大きさ

基板ドームはステンレスなどの薄板製で、直径1000mm以下のものが一般的である。この寸法は、直接生産量を左右するとともに、大形の基板に使えるか否かで汎用性にも関わってくる。装置全体の規模や設備コストを決める最重要要素である。できるだけ大きくしたいので、不具合がおきた時に一人で持ち上げられる限界の直径1600mmを採用した。

3-3. 工程計画と槽構成

タクトタイムを短くするには、蒸着以外の時間を短くする必要がある。すなわち、一つのドームを蒸着している間に、他のドームは他の工程を同時に処理するようにしなければならない。蒸着作業に必要な全工程はつぎのとおりである。

時間の長い工程は真空排気、加熱、蒸着である。加熱は温度が低ければ短くてすむが、一般的に、蒸着による膜は基板温度が高い程密着力が大きいので、ガラス基板に対しては350℃～400℃に昇温する必要がある。その結果、昇温時間がタクトタイムを左右する要因として重要になる。

蒸着と他の工程をできるだけ分離し、これを搬送でつなぐと最少の槽構成はつぎのようになる。平均的な条件として加熱に30分、蒸着に40分必要として工程時間も割りあててみた。

入口槽	大気ベント・搬入・排気	25分
蒸着槽	加熱・イオンボンバード・蒸着	75分
出口槽	冷却・大気ベント・搬出・排気	25分

タクトタイムは蒸着槽で決まり75分であるが、他の槽では待ち時間が多くなり生産効率が悪い。入口槽で加熱時間の一部を受けもち蒸着槽との合計時間を平均化するとタクトタイムは50分となる。これでも出口槽の生産効率が悪いことは変らない。そこで、別に加熱槽を設けると工程時間の配分はつぎのようになる。

入口槽	大気ベント・搬入・排気	25分
加熱槽	予備加熱	25分
蒸着槽	本加熱・イオンボンバード・蒸着	50分
出口槽	冷却・大気ベント・搬出・排気	25分

この時間配分をみると、蒸着槽を2槽設けると、各工程のタクトタイムが25分に揃い最も効率が良くなることがわかる。

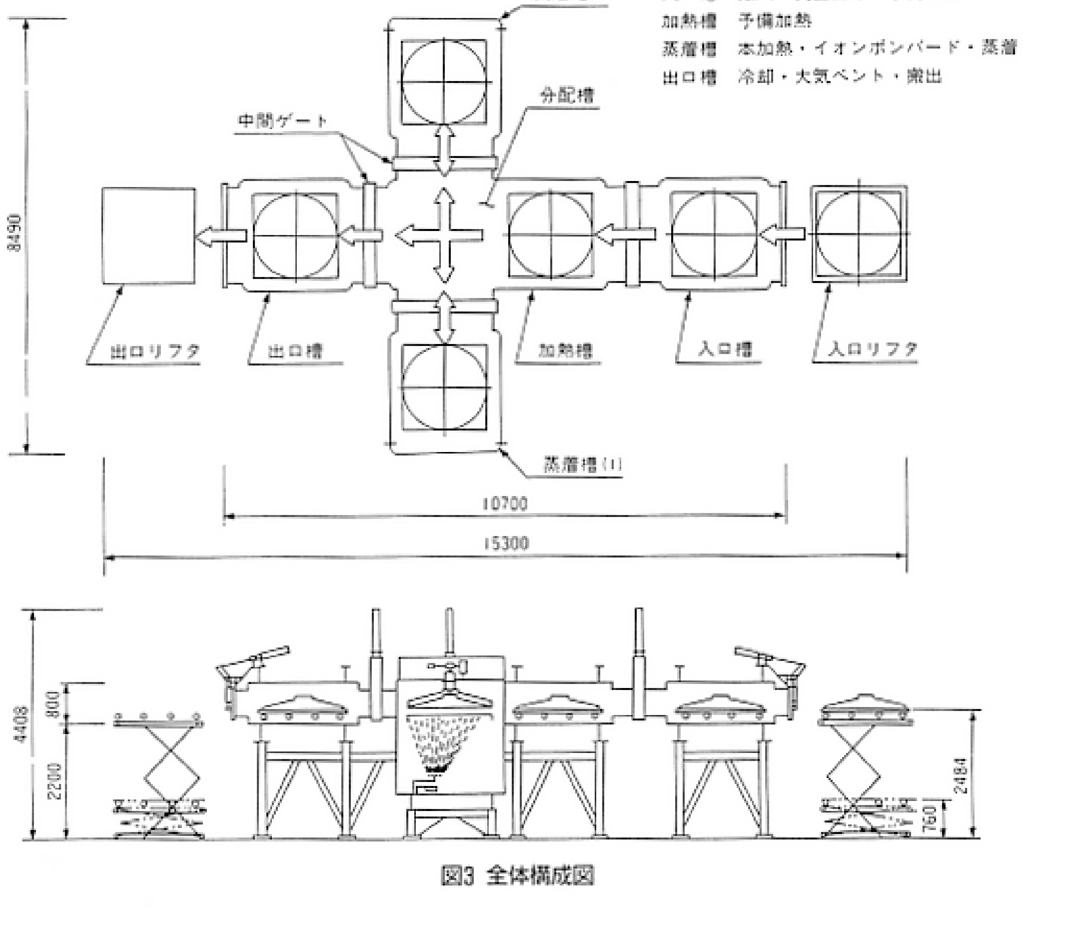


図3 全体構成図

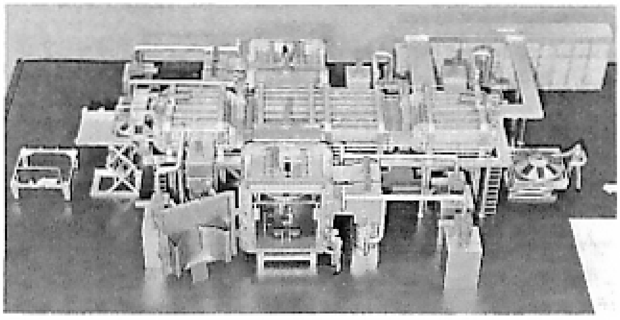


図4 全景(模型)

以上の検討に基いて決めた装置の全体構成と寸法を図3に、全景を図4に示す。実際には入口槽でも排気の時間を利用して予備加熱が行えるようにした。また、各蒸着槽への出入りの方向転換部として分配槽を設けたが、ここはキャリアが通過するのみとして待機はさせない。これにより、異常の生じた基板ドームを直ちに出口槽から搬出できる。また、蒸着槽の間の往復もできるので、変化に富んだ膜構成ができ汎用性が向上している。

各蒸着槽と分配槽の間にも中間ゲートがあるが、これを閉じておけば、一方の蒸着槽で保守または清掃のために大扉を開けても、他方の蒸着槽の運転は継続できる。また、双方が蒸着中でも、これを閉じておけば、入口槽・出口槽側の中間ゲートの開閉にともなう圧力変動の影響を受けることがなく、膜の品質が安定する。

以降の説明の便宜のために本装置の細部についての標準仕様を表1に示す。

3-4．膜種の多様性への対応

膜種は主に、成膜物質と各層の膜厚と層数で決まる。それぞれに対して考慮しなければならない装置側の要素をつぎに示す。

- 成膜物質の種類
  - 蒸発源の種類と台数が多い
  - ガス成分不足分の補充が可能
  - 基板加熱温度の設定自由度が高い
  - 冷却速度の設定自由度が高い
- 膜層数
  - モニタガラスの交換枚数が多い
  - 蒸発物質の保有量が多い
  - 蒸着条件が長時間安定している
  - 多層膜の全自動蒸着制御ができる
- 膜　厚
  - 任意の膜厚設定が可能
  - 計測精度が高く安定している

蒸発源の種類と台数についてはとくに検討を要する。蒸発物質の種類により蒸発源の種類が違う。また、同種類の蒸発源でも多種類の蒸発物質をセットできる方が良い。本装置の蒸着槽は大形なので、槽内の床面積が大きく十分な数の蒸発源を配置することができる。また、蒸着槽が2槽あるので、全く別の膜種を同時に施工でき、

表1 標準仕様

形式	汎用光学膜生産用2蒸着槽形連続真空蒸着装置	
基板ドーム	外　径　1600笠形	
基板加熱温度	最高 400℃　常用 350℃　分布均一度 ±10℃	
真空度	到達圧力　10^{-5}Pa台（10^{-7}Torr台）	
	作業圧力　10^{-3}Pa台（10^{-5}Torr台）	
	起動から20分（入口・出口槽）	
タクトタイム	25分（加熱30分、蒸着40分の場合）	
真空槽	蒸着槽　2.1×2.3×高2.2M	2槽
	入口・出口槽　2.1×2.1×高0.8M	2槽
	加熱槽　2.1×2.1×高0.8M	
	分配槽　2.1×2.1×高0.8M	
	電子銃引出し槽　φ0.32×0.4M	2槽
	材質　SUS304L、SUS304ステンレス	
蒸発装置	電子銃加熱蒸発源	4台
	2台は電子銃引出装置付	
	抵抗加熱蒸発源	12点
膜厚制御装置	光学式膜厚モニタ（透過・反射両用）	2台
	水晶式膜厚モニタも取付可能	
	モニタガラス交換システム	2式
	膜厚分布補正機構	2台
蒸着補助装置	イオンボンバード装置	2式
	ボンバードガス導入管含む	
	O_2補充用自動ガス導入装置（オプション）	
搬送装置	送りローラによるキャリヤ搬送方式	1式
	搬入・搬出用送りローラ付昇降リフタ	2台
	ドーム回転装置　ドーム吊り下げ式	2式
真空ゲート	中間ゲート　開口 1,800×　400	4台
	出入口ゲート　開口 1,800×　400	2台
	蒸着槽大扉　開口 2,100×2,200	2台
真空排気装置	油拡散ポンプ36インチ　LN_2トラップ付	2台
	油拡散ポンプ28インチ　LN_2トラップ付	3台
	油拡散ポンプ4インチ　LN_2トラップ付	2台
	メカニカルブースタ　1,500m^3/H	5台
	油回転ポンプ　4,500ℓ/m	5台
	油回転ポンプ　700ℓ/m	2台
	監視用　広帯域電離真空計	3台
	質量分析計	2台
	制御用	5式
	ペニング真空計	
	ピラニ真空計	
	真空スイッチ	
加熱装置	シーズヒータ　基板加熱用	5式
	ベーキング用	2式
	ハロゲンランプヒータ　基板加熱用	2式
	CA熱電対温度計	1式
	PID制御SCR温度調節器	1式
制御装置	ホストCPU　全体制御、蒸着データベース	
	自動蒸着データ処理と制御	
	マイコン　真空排気系ブロック、通信ブロック制御	
	シーケンサ　搬送ブロック制御	
電源装置	電子銃電源4、抵抗加熱電源2、ボンバード電源2	
	加熱装置電源1、搬送・排気電源1	

蒸発源の種類や台数が単に増えたよりもはるかに多様性が大きい。

3-5. 冷却工程の多様化

出口槽では、膜質に応じて直ちに大気ベントする急冷、しばらくしてから大気ベントする徐冷、ヒータをある時間働かせてから大気ベントする保温の3パターンの冷却方法を用意し、膜の残留応力の改善など膜質に応じた対応を行った。

3-6. 蒸着槽の真空維持

真空槽を蒸着に必要な圧力迄真空排気するには15～20分かかる。それを節約するために、大気と真空の圧力変換は他の槽で行い、蒸着槽は常に真空に保っておくのがよい。また、そうすることによって、圧力や温度などの条件が安定するため、膜質も安定し再現性が良くなるという大きい利点がある。蒸着槽の真空維持で問題となるのは、表2のように物と人の出入りであり、主要事項につき検討した結果を以下に述べる。

表2 蒸着槽の物と人の出入り

物の出し入れ	頻度	人の出入り	頻度
1.基板(基板ドーム)	高	1.蒸発物質の交換補充作業	中
2.膜厚計測用モニタガラス	高	2.槽内清掃作業	中
3.蒸発物質	中	3.フィラメント,防着板交換作業	低
4.フィラメント	低	4.保守点検作業	低
5.防着板	低	5.異常事態処理	低

（1）基板の出し入れ

基板は基板ドームに搭載し、後述するキャリア式搬送装置により入口リフタから入口槽を通って蒸着槽まで搬入、蒸着後出口槽を通って出口リフタまで搬出する。

（2）モニタガラスの出し入れとモニタガラス交換装置

光学多層膜の蒸着では、計測精度の点から1枚のモニタガラスを数層の膜にしか使わないので、多数のモニタガラスを持っておき、これを切替えて使う。また、使用済みのものは排出する必要がある。本装置では、基板ドームと一緒にモニタガラス8枚入りのカートリッジをキャリアに載せて搬入出することにした。蒸着時はモニタガラスは傾きが変ると計測用の光の光路が変るため膜厚の計測ができなくなる。キャリアは温度変化によってひずむので、モニタガラスをキャリアからとりあげ、1枚ずつ正しい位置と姿勢にセットする必要がある。ここに開発したモニタガラス交換装置では、蒸着槽の頂部の槽外のアクチュエータでカートリッジの着脱とガラスの入れ替えを行う。その構造体は中空で、計測用の光を通しウィンドガラスで真空封じしている。基板と同条件にするために、モニタガラスを同じ温度に加熱しなければならないが、この装置自体に熱ひずみが発生すると計測不能になるので機構の設計に細心の注意を要した。

（3）蒸発物質の補充と電子銃引出装置

電子銃加熱蒸発源のるつぼのハース（蒸発物質を入れる穴）は4点と8点、抵抗加熱蒸発源のボート（蒸発物質を載せる抵抗発熱体）は6点であるので、合計で18点の物質を装填できるが、大形るつぼはさらにハースの数を増やすこともできる。

4点ハースの電子銃加熱蒸発源は引出式にしてあり、電子銃・るつぼのみならずシャッタ板も含めて、蒸着槽を真空に維持したまま外部に引き出すことができる。蒸発物質の補充だけでなく、フィラメントの交換や周辺付着物の清掃を随時行えるので、生産性の向上に大変寄与している。この電子銃引出し装置は水平方向に引出されるので床にピットを掘ることもなく、分配槽の下で作業できるため余分なスペースを必要とすることもない。

4. 装置製作上の技術課題とその解決

設計・製作上の基本的な技術課題は、環境としては、「高真空」「高温」「発塵」であり、装置の性格としては「大形」「高頻度搬送」「運用コストの低減」である。とくに「高頻度搬送」「運用コストの低減」は産業用の生産機である本機の性格決定上重要な項目である。「大形」ということは漠然としているが、「真空」と結びつくと大気圧による外力が著しく大きいことになり、「高温」と結びつくと熱変形が大きいことになる。また、「真空」「高頻度搬送」と結びつくと外周を多くの機器・配管類でとりまかれるため、分解が著しく困難になるというどれも構造設計上厄介な問題が生じることになる。

以下に主要な項目について説明する。

4-1. 真空槽の構造と材質

真空槽は全体を接続すると、全長約11m、奥行8.5m、高さは最大2.2mという大きなものとなる。この連続体が受ける大きな力にはつぎの3種類がある。

1）槽内外の圧力差による力（1槽の天井で44トン）

2）温度分布の不均一による熱応力

3）全体の熱膨張・収縮を押さえる力

熱膨張・収縮による力は、次項に示すような方法で緩和する工夫をしたが、他の二つの力は装置の運転により減圧－昇圧、加熱－冷却がくり返され、永続的な変動力となる。

一方、槽の材質は真空性能に直接関係する。蒸着時の圧力は、7×10^{-3}Pa(5×10^{-5}Torr)かそれ以下であるが、これを維持するために材料表面からの気体放出の少ないステンレス鋼を使う。ステンレスは鉄と比べると熱膨張率が大きく熱伝導度が小さいので、溶接によるひずみや残留応力が大きく、大形溶接構造物を作るには細かいノウハウを必要とする。大きい残留応力を持ったまま変動

力を受けると年月を経て変形や溶接部のクラックが生じる。これが真空リークにつながると直ちに生産を停止せざるを得なくなるので重要な問題である。使用開始後2～3年の大形装置の真空漏れはよく起こることである。

設計段階からとくに注意を払った事項をつぎに示す。

1）温度上昇を防ぎ温度分布を均一化する。
　材料を薄くし、放熱の良い骨組構造とする。

2）温度分布の不均一による応力集中を避ける。
　板厚の大きい変化を避ける。
　各部の曲げ半径を大きくする。
　溶接線の集中を避ける。

3）残留応力を除去する。
　構造・用途上重要な槽は応力除去熱処理を実施する。

角形槽は圧力に弱い平面部分が多いうえに受圧面積が増えるため厚い材料を使いたくなるが、厚い材料は熱膨張・収縮により大きな力を発生する。また、膨張・収縮の逃げ場のない角部が多く構造的に応力集中を生じやすいので、主に8mmの薄い板を使い放熱が良く、変形の少ない構造にした。また、ステンレスの応力除去熱処理は、材質品位の低下をともなうので、実施の必要性・方法・時期・後処理などをよく検討し見極めることが大切である。そこで、蒸着槽や真空ゲートなど、加工量の多い重要構造物を選んで実施した。真空槽の写真を図5に示す。

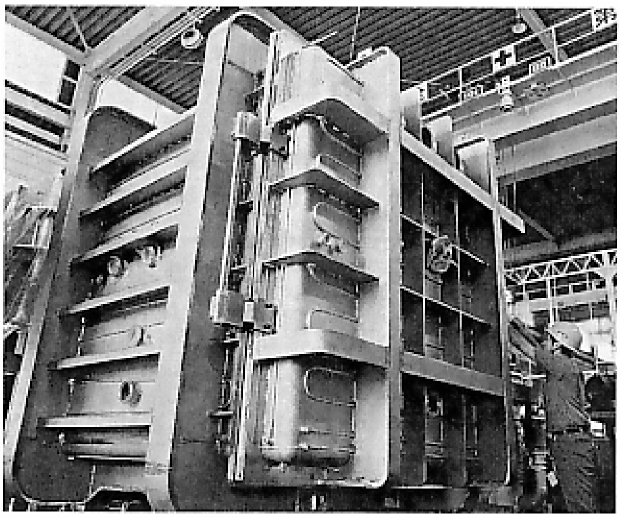


図5 ステンレス製真空槽（蒸着槽）

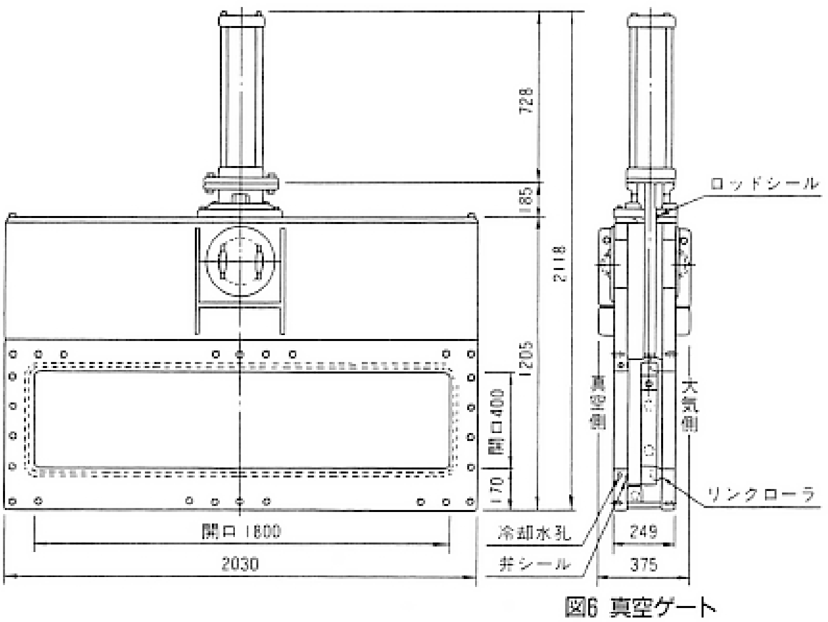
4-2．真空槽の支持方法

真空槽は水冷しているが、部材断面の平均温度と床の温度の差を、基板加熱温度400℃から計算して150℃と見込むと、長さ11mの真空槽は約29mm伸びる。伸縮が生じないように床に固定すると、ステンレスの槽を破壊するだけの応力が発生する。床面に対し滑るようにしても、自重が大きい（蒸着槽で約6トン）ので摩擦力が動きを妨げ応力が発生する。破壊に至らなくても全体的に曲がると内部の搬送装置の動きに直接影響する。そこで全体の中央にある分配槽の脚1カ所のみ架台に固定し、他の槽の脚は全て搬送ライン方向に摺動できるように、ガイド付きのスライドプレートの上に載せた。スライドプレートの材質は、大荷重で高温でもクリープが生ずることもなく、摩擦係数も小さい含油プラスチック積層材とし、地震時に架台から脚が外れないような構造にしてある。

この対応により真空槽のスライドプレート部でのすべり量は最大の所で5mm程度と予測したが、実際には2mm以下で納まった。これは真空槽の平均温度が予想を下回ったためで、構造的な放熱効果の良さによるものと考えられる。

4-3．真空ゲート

図3に示すように真空槽の間に4台の中間ゲートがある。基板ドームを通す大きな開口を持つ高真空大形ゲー



基本構造	ステンレス厚板溶接構造
真空シール	バイトンシール
主要材料	SUS304L
熱処理	応力除去焼鈍
弁板押付機構	多連ローラリンク方式
駆動源	無給油エアシリンダ 開閉LS付、作動圧力5±1.5kg/cm²G
ローラ摺動部	真空高温用固体潤滑剤コーティング
弁シール	特殊仕様バイトンシール
弁シール冷却	弁シール座に冷却水孔
ロッド軸シール	バイトンシール 給油および中間排気可能 エアシリンダを外さずに交換可能
取付方向	エアシリンダが上になる垂直方向
安全装置	弁体落下防止バー付属
自重	約2,500kgf
耐久試験	弁体10,000回、弁シール20,000回

図6 真空ゲート

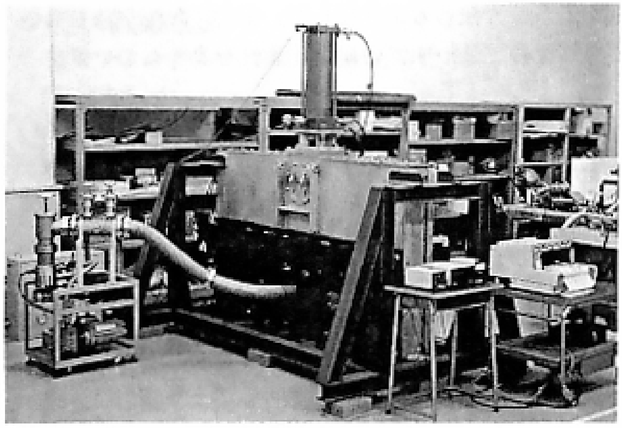


図7 耐久試験中の真空ゲート

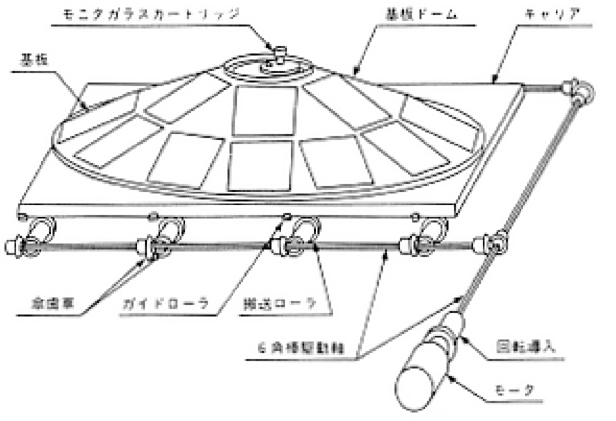


図8 搬送装置

ト弁である。これの使用頻度は高く、15分に1度の開閉として、24時間運転で1カ月2500回、1年で30,000回の運転となる。弁板は7トン余の圧力差と照射熱を受ける。しかも、槽にはさみ込まれているため将来保守のために抜き出すことを予定するのは現実的でない。本装置にとっては最も信頼性が必要な部品である。市販品には目的に適うものが無く、当社で開発した（図6）。

シールは運用コスト上各部とも入手しやすいOリングを使用した。材質は耐熱性を考慮してフッ素ゴム製とし、とくに弁シールはゴミのかみ込みや経年変形に対する余裕をとるために太く軟らかいものを使った。Oリング試験機を作り、20,000回のくり返し圧縮試験を行い適切な寸法・硬度を選んだ。弁シールは、開いた状態で交換ができるように弁箱側に設けた。そして、このシールのすぐ内側に長尺のドリル孔を加工し冷却水を通した。エアシリンダのロッドのシールはベローズを使わず敢えて2段のOリングシールとした。これはベローズの場合背が高くなるのと、損耗した場合一気に真空リークを生じ装置全体が使えなくなるからである。2段Oリングの場合は、圧力上昇などで損耗の兆候が見えた時に、真空グリースを封入するか、中間排気を行うなどして、つぎの休転日までの延命を図ることができる。このOリングもエアシリンダをつけたまま交換できるよう生産機としての配慮がなされている。

大きい荷重の加わるリンクローラには、ローラおよび軸に固体潤滑剤の耐熱コーティングを行った。当初設計のリンクローラは耐久試験2000回でコーティングが剥離して焼付いた。軸とボスの片当たりが原因であった。新設計により、10,000回の耐久試験を行い性能を確認した。（図7）。

4-4. 搬送装置

基板ドームは下方から加熱や蒸発物質を受けるので、下面に構造物を設けにくく、しかも、平面が円形であるため搬送しにくい。そこで、これを平面が四角形のキャリアに載せローラコンベア式の搬送を行うこととした。キャリアを設けたことにより入口・出口リフタから前後のコンベアラインへの自動搬送が容易になり、将来前後装置を含めて無人化システムにすることが可能となった（図8）。

基板ドームを搭載したキャリアを、入口・出口のリフタ上面と真空槽内に配置した搬送ローラ上を搬送する。分配槽での分岐と蒸着槽でのドーム回転装置への受け渡しには昇降装置を使う。搬送重量は1キャリアにつき150kgfとなるが、高真空下では摩擦が著しく大きくなるのに潤滑油が使えないうえ、使用材料も限られしかも高温にさらされるということで条件は苛酷である。検討した技術課題の主要なものはつぎのとおりである。

1）ベアリングの潤滑（真空槽内使用数 約 480個）
2）回転導入シール（搬送駆動軸真空槽貫通部12カ所）
3）槽内駆動軸　　　（総延長45m）
4）リミットスイッチ（真空槽内使用数 20個）

（1）ベアリング

高真空用ベアリングが市販されているが高価である。ベアリングの交換に数百万円の費用が発生するのは運用コスト上問題である。また、このベアリングは大気中での寿命が著しく短く、リミットスイッチの位置決めなど調整運転の必要な装置には不適当である。さらに、これだけの量になるとメーカの安定供給もおぼつかない。そこで、通常のボールベアリングに固体潤滑剤を耐熱コートしたものを使うこととし、ベアリング試験機を作って耐久試験を実施した上で、適切なコート方法を採用した。これによりコストは半分以下になった。

（2）回転導入シール

回転導入部を完全にシールし抵抗トルクも小さくするには、磁性流体継手が実用化されている。しかし、本装置のように大量生産用に使うには若干問題がある。すなわち、真空ゲートのロッドのシールでも述べたように、損耗した時に一気に使用不能に至ることである。しかも修理するにはメーカに持ち込む必要があり、製品コストも修理コストも高くなる。蒸着装置は真空・高温とダストの発生がともなう磁性流体に対しては基本的に悪条件

になっているのでこのことは無視できない。また、ウィルソンシールは安くて適切に作ればシール性能も良いが、市販品がないため品質と供給の安定にユーザが安心できない。

調査・検討の結果、フッ素ゴム製オイルシールを多段で使うことにし、これも試験装置を作って耐久試験を行った。その結果、あるメーカの1形式に限定して使用している。温度の上がる部分についてはシールの外周を水冷している。これにより一気に真空が破れることもなくなり、シール性能が低下したものは真空グリース封入により、しばらく生産を継続できる。また、交換部品も安価で、ユーザの手でも交換作業が可能である。

蒸着槽の基板ドーム回転装置は槽項部に設けてあり、アームで基板ドームを吊り下げて回転させる。したがって、槽内に通常の蒸着装置（図２）に見られる回転機構がないため、清掃などの作業性が良く、ベアリングを槽外に出せたので信頼性が高い。しかし、この回転導入部は中空にして中を前述のモニタガラス交換装置を通しているので径が大きくなり、オイルシールの内径も145㎜と大きいものを使っている。

（３）槽内駆動軸

一つの真空槽の中には、一つの搬送方向につき10個の搬送ローラがある。槽外にあるモータから回転導入部を通って槽内に入ってくる駆動軸は１カ所であるが、駆動力は10個のローラすべてに伝える必要がある。必然的に槽の中を長い駆動軸があちこちに通ることになるが、問題は熱膨張である。片側のローラ列の脇に１本の駆動軸を通し、これからかさ歯車で各ローラに回転を伝えるが、駆動軸を精密６角棒を使いかさ歯車の軸穴も６角にして相互に滑るようにし、駆動軸が熱膨張により伸縮しても回転が滑らかに伝わるようにした。また、キーを使わないことによって狭い中での組立作業性を良くしている。

（４）リミットスイッチ

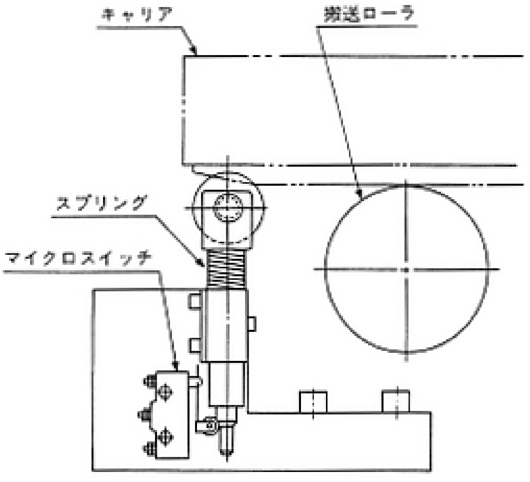
キャリアの位置を検知するためのセンサが多数必要である。高真空・高温はセンサにとって悪条件なので、槽外から無接触で使える光電式センサが考えられる。しかし、光軸を上下に通すとダストにより窓が曇るばかりでなく、左右に通すと槽をはさんで2.5ｍも離れるため、光軸合わせが難かしく熱ひずみによるずれも考えられる。いずれの場合も蒸着槽では蒸発物質により窓が曇ってくることは防げない。

そこで、市販の400℃耐熱形マイクロスイッチを使うことにしたが、作動上のガタが大きく精度が悪い。しかも、１形式しかないため選択の余地がない。精度良く作動をさせるためにこのマイクロスイッチを組み込んだリミットスイッチを作って間接的にマイクロスイッチを叩くようにした。アクチュエータの戻り用スプリングはＳＵＳ631を使用したが、使用温度が350℃以上になる所では、カウンターウエイト方式にした。マイクロスイッチのメーカの真空中使用の保証は全くないが、使用実績では問題なかった(図９)。

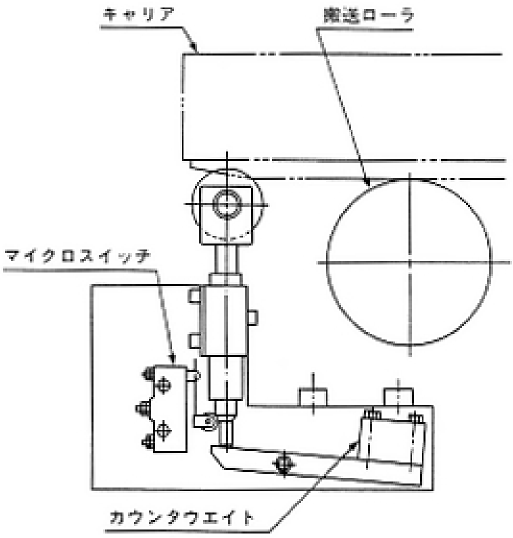
リミットスイッチについては、関連各構造部材の熱変形による誤作動があり、真空槽内のことで現象確認と調整がやりにくく大いに悩まされた。熱変形対策と精力的な調整作業により安定した運転ができるようになった。

スプリングは約1.5年の使用でへたりを生じ、線径を太くした。

リード線はガラス繊維被覆のものを使い真空・高温に対応した。



（ａ）低温形



（ｂ）高温形

図9 リミットスイッチ

4-5. 制御装置

装置全体の制御ブロック図を図10に示す。

(1) このシステムの制御上の特徴

（a）　入出力点数が多い　2000点余

真空ポンプ	25台	真空計	47台
モータ	22台	エアシリンダ	99本
ヒータ	192本	温度センサ	19個

（b）　自動蒸着中に手動調整を必要とする場合がある。自動運転中に人の操作が割り込むため誤操作対応・安全対策など複雑になる。

（c）　異常発生要因が多い
膨大な数のアクチュエータ、センサの異常のほかに真空計やのぞき窓のガラス破損や人の槽内閉じ込めなどに対応しなければならないので人・製品・装置の保護対策が多い。

（d）　強力なノイズの発生源をかかえている。
電子銃は強力な電子ビームを発生しており、落雷と同じ程度のノイズ源となる。

(2) 制御ソフトウエア

6つの真空槽の搬送系・排気系がすべて互いに関連するので非常に複雑かつ膨大なソフトウエアの量となる。そこで、シーケンサ、マイコン、パソコンをそれぞれの特質を生かして制御内容を分担させるようにしたが、それでも処理量が多すぎて処理時間が問題になるため、ラウンドロビンスケジュール管理によるマルチタスク制御を実施している。さらに、装置の異常メッセージをプリントアウトするとともにメモリし、必要に応じ電話回線を利用してメーカへ転送、異常原因がメーカの技術者で直接分析し得る手段もとれるようにした。
異常処理についてのプログラム量は全体の4分の1近くを占める。

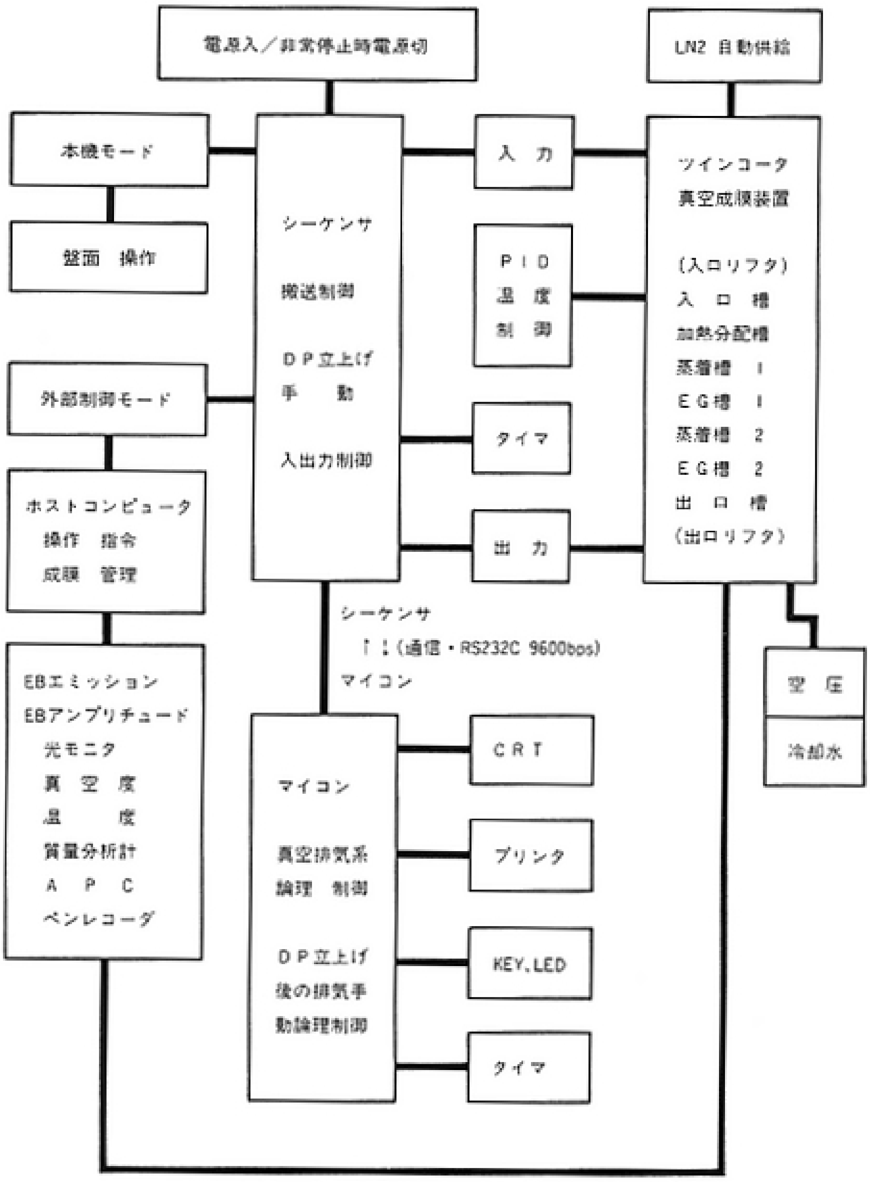


図10 制御ブロック図

（3）ノイズ対策

リミットスイッチのリード線、真空計の電極などがアンテナとなり強力なノイズを制御系に送り込む。電子銃電源・アース線の他からの分離、制御用と動力用の配線の分離、槽内配線のシールド、ノイズフィルタ、ノイズキラーを各所に挿入など徹底した対応を行う必要があった。

5．本システムの効果

本システムの効果としてつぎの3項目があげられる。

（1）蒸着槽の真空維持期間が長い

全自動24時間フル運転を行っているが、電子銃引出装置によって蒸着物質の補充ができるほか、付着物で汚れるシャッタ板やるつぼのまわりも清掃できるので、装置の運転を停止して蒸着槽の大扉を開けるのは1週間に一度で良い。これはちょうど要員の交替周期と合うので好都合である。

（2）蒸着膜の再現性が良い

蒸着槽が常に真空に保たれているので、蒸着の環境条件が安定し、日時を経て同じ膜を蒸着しても再現性が良く自動蒸着できる。

（3）生産性が高い

全体的な生産性は、膜物質・膜層数などの条件が不規則に変るために正確な数値比較はできないが、おおよそ単槽バッチ生産機の5－6台分の能力と言える。

6．まとめ

蒸着槽を2槽持つという極めて汎用性・生産性の高い光学薄膜用の汎用大形真空蒸着装置を開発し、約2ケ年に及ぶ生産運転を経過した。生産性と汎用性の両立を企図して決定した全体構成は、現在、多品種の光学膜を24時間連続運転で成膜し単槽バッチ機5－6台分の生産量をあげていることから、十分にその機能を発揮していると考えられる。これにとくに貢献している機器としては、基板ドームを出し入れするための搬送システムと真空ゲート、蒸発物質の出し入れ用の電子銃引出装置、それにモニタガラス交換装置で、いずれも今回開発したものである。

要素技術の開発結果は以下のとおりである。

(1) 真空槽

全体として非常に大きな真空槽となったが、熱による伸縮量は2㎜以内に納まり、搬送に影響を及ぼす変形は全くない。

(2) 真空ゲート

試作時のローラ焼付き以後は全く問題なく運転を継続している。

(3) 搬送装置

キャリアを導入したことにより、前後装置も含めた無人システム化に対応することを可能にした。ただし、真空槽内における搬送の位置決め用リミットスイッチはまだ精度と作動安定性に問題も多く、今後良いセンサが現れることを期待する。

(4) 制御装置

ソフトウエア量が膨大になることとノイズ対策が重要な問題である。ソフトウエアについては、膨大になると仕様の変化に対応することが難かしくなるため、その機種ごとに専用ソフトが必要になり、メーカとして対応しきれなくなる。今後、ソフトウエアのユニット化などで仕様の変化に対応できるように考えたい。

ノイズについては、徹底的にノイズの発生源および経路にそれぞれの対策を講じるしかないことがわかった。最も注意するべきことは設計段階で安易に考えてしまうことである。

最後に、このシステムを完成するについては、当社の技術を信頼していただき初号機の御発注と御指導をいただいた佐野機工株式会社殿に深く感謝の意を表したい。

参考文献

1) 砂川他：「光学式膜厚モニタ、終点検出機の開発」、新明和技報、vol. 2, 1989, P. 9