

平成24年度～26年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「半導体製造プロセスにおける高真空・高温条件下での
高度な耐熱特性を有する真空ロボットの開発」

研究開発成果等報告書

平成27年 3月

委託者 四国経済産業局

委託先 公益財団法人かがわ産業支援財団

目次

第1章 研究開発の概要	4
◆ 半導体技術の現状	4
◆ 研究開発の概要	4
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	5
【1】研究開発の背景	5
【2】研究の目的	7
【3】研究の目標	7
1-2 研究体制	8
【1】研究組織	8
【2】管理体制	8
【3】管理員及び研究員	9
【4】経理担当者及び業務管理者の所属、氏名	9
1-3 成果概要	10
【1】真空チャンバの研究・開発	10
【2】真空ロボットの研究・開発	11
1-4 当該研究開発の連絡窓口	13
第2章 本論	14
2-1 真空チャンバの研究・開発	14
【1】真空チャンバ全体仕様	14
【2】メインチャンバ	14
【3】LL チャンバ	15
【4】精度測定チャンバ	15
【5】昇温チャンバ	15
【6】温度測定チャンバ	15
【7】位置補正チャンバ	15
【8】ベアリング試験機	15
【9】真空環境の制御について	16
【10】真空チャンバの性能評価	16

2-2	真空ロボットの研究・開発	17
【1】	動力伝達部の耐熱性向上	17
【2】	ロボット内部の温度上昇防止	19
2-3	ベアリングの耐熱性向上	23
【1】	耐熱ベアリングの仕様検討	23
【2】	高温対応リテーナ付きベアリングの性能評価	24
2-4	メンテナンス時間の短縮	25
【1】	位置補正システム（大気用試験機）	25
【2】	位置補正システム（真空チャンバ用試験機）	26
【3】	位置補正システム（真空チャンバ用試験機）の評価	26
【4】	位置補正システム（真空チャンバ用試験機）の性能評価結果	26
第3章	全体総括	28
3-1	真空チャンバの研究・開発	28
3-2	真空ロボットの研究・開発	28

第1章 研究開発の概要

◆ 半導体技術の現状

現在主流の耐熱性能を有した真空ロボットは、仕様上は約150℃程度となっているが、高温プロセスに連続搬送することで、ロボット先端の温度は350℃程度になるとも言われており、実際の生産現場においては性能以上の高温領域で使われていることになる。

その結果、真空ロボットの寿命は非常に短く、頻繁にベアリングやタイミングベルトを交換するメンテナンスが必要となっており、真空ロボットのメンテナンス業務だけで生計を立てている企業が数多く存在しているほど、頻繁にメンテナンスが行われている。

また、メンテナンスの度に生産設備（プロセス装置）を停止させる必要があるため、生産性が著しく低下している現状がある。

◆ 研究開発の概要

これらの顧客ニーズに対応するために、耐熱性を備えた各機構の開発により、真空ロボットの耐熱温度を飛躍的に向上させる。また、ロボットが温度上昇した際に顕著に現れる搬送位置精度の低下問題についても、補正機能を開発することで、更に長期間の使用に耐える真空ロボットを開発する。

- ① 〈動力伝達部の耐熱性向上〉
- ② 〈ベアリングの耐熱性向上〉
- ③ 〈ロボット内部の温度上昇防止〉
- ④ 〈メンテナンス時間の短縮〉

これにより、飛躍的に真空ロボットのメンテナンス・サイクルを延長することができ、生産設備（プロセス装置）の稼働率を向上させることが可能となる。

真空チャンバの研究・開発

前述した内容を実施するため、超高真空のテスト環境（真空チャンバ）を製作し評価環境を確立した。

平成24年度

- ・真空ロボットを設置するためのチャンバ →(メインチャンバ)
- ・半導体ウエハを出し入れするためのチャンバ →(ロードロックチャンバ：
以下『LLチャンバ』と表記する)
- ・ロボットの停止位置精度測定用チャンバ →(精度測定チャンバ)

平成25年度

- ・半導体ウエハの高温プロセスを模した高温のチャンバ →(昇温チャンバ)
- ・ウエハの表面温度測定用チャンバ →(温度測定チャンバ)

平成26年度

- ・ロボットの温度による位置ズレ補正用チャンバ →(位置補正チャンバ)
- ・真空耐熱ベアリングの加速劣化試験機 →(ベアリング試験機)

真空ロボットの研究・開発

平成24年度は、耐熱性を備えた機構開発のため2種類の真空ロボットを製作した。

- ・ベースロボット（評価用のベースデータとなる真空ロボット）

- ・スチールベルトロボット（高真空かつ高温条件でも寿命が長く、アウトガス発生
の少ないスチールベルトを用いた動力伝達機構とベルト伸び吸収機構を搭載
した真空ロボット）

平成25年度は、〈動力伝達部の耐熱性向上〉と〈ロボット内部の温度上昇防止〉を
実現するため4種類のロボットを製作した。

- ・スチールベルトロボット改良1（平成24年製作ロボットのベルト滑り対策のため、一部改良）
- ・スチールベルトロボット改良2（ベルト滑り対策のため、アーム部全面改良）
- ・熱対策基礎テストロボット（ベースロボット+エンドエフェクタ熱対策構造：以下
『EE熱対策構造』と表記する）
- ・熱対策構造ロボット（ヒートパイプ付きベースロボット+ EE熱対策構造）

平成26年度は、〈動力伝達部の耐熱性向上〉と〈ロボット内部の温度上昇防止〉
を実現するため平成25年度に製作したロボットを改良した。

- ・スチールベルトロボット改良3+熱対策構造改良品

また、〈ベアリングの耐熱性向上〉を実現するための開発を行った。

- ・高温対応リテーナ付きベアリングの仕様検討・設計・製作・評価

さらに、〈メンテナンス時間の短縮〉を実現するための開発を行った。

- ・位置補正システムの仕様検討・設計・製作・評価

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

【1】 研究開発の背景

近年、半導体の需要は市場ニーズの高度化と多様化に起因して増加し続けている。更に、より一層の安定供給が望まれている。

その一方で、一般的な半導体工場では、トラブルやメンテナンスによって停止する製造装置のメンテナンス・サイクルを見込んで、工場における生産量を設定しているのが実状である。

開発対象のロボットは、半導体ウエハを掴んだり載せたりして、放射状に配置された各種チャンバに搬入出するための真空ロボット（図1）である。ロボットとチャンバ等の配置は（図2）の通りである。

ここで、ロボットが高温条件のチャンバへ侵入し、高温のウエハを把持することによってロボット自体の温度が上昇する（前者は輻射熱、後者は伝達熱）。そして、ウエハの搬送を繰り返すうちに更にロボットの温度が上昇する。最も温度が上昇する部位は350℃もの高温になる。

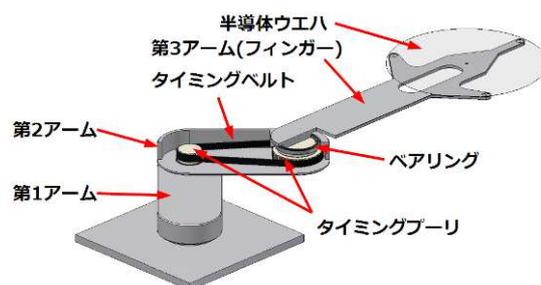


図1. 真空ロボット

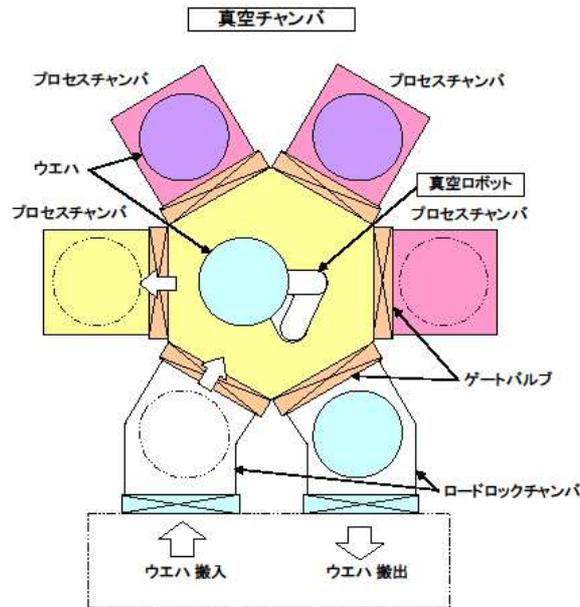


図2. ロボットとチャンバの配置例

現在市場に出ているロボットは150℃以上の条件での稼働を保証されているものがなく、処理を終えたウエハを搬送するに先立ち、温度を低下するための待ち時間が必要になる。しかし、この方法による温度の低下効果は小さく、ロボットに不具合が発生する原因となっている。その結果、装置のメンテナンス・サイクルよりもロボットのメンテナンス・サイクルの方が短くなるような事態となる。

更に、製造設備を効率的に稼働させるためには、当該ロボットの役割が非常に重要となっており、ウエハを搬送する役割を効率的に行うために、ロボットは半導体の製造設備中央に配置されている。そのため、ロボットが搬送位置精度の低下や故障等のトラブルによって停止した場合、製造設備全体として稼働できない状態となる。

また、熱の影響によってロボットを構成する部品の経年劣化が促進され、ロボットの搬送位置精度の低下が生じる。それを事前に防ぐためには、搬送位置精度の補正が頻繁に必要となる。現在は、プロセスを停止させてロボットを高真空から大気圧の条件下に戻してメンテナンスを行っている。そして、再び真空条件に戻すなど、メンテナンスに要する時間は12hと大幅な時間を要することや、その様な温度変化のために半導体の品質の維持が難しくなるなどの課題が生じている。

すなわち、ロボットの耐熱性向上がウエハの搬送位置精度を長期間に亘って維持し、更にメンテナンス・サイクルの延長化によって工場全体の半導体の生産性向上に寄与することとなる。そして、これらによって、生産量の安定化、生産設備の簡略化、製品のコストダウン、製品の品質向上等、様々な効果がもたらされることとなる。

以上の内容から、現状の課題を列挙すると次のようになる。

課題1：プロセスの高効率化

内容：高真空、高温などの過酷条件下において稼働するプロセスの実現

担当：プロセス装置メーカー

課題2：プロセス稼働状況の安定化

内 容：装置の安定した稼働、メンテナンス・サイクルの延長

担 当：プロセス装置及びロボットメーカー

課題3：スループット性の向上

内 容：装置の高速化、ウエハ処理数の増加、処理時間の短縮

担 当：プロセス装置及びロボットメーカー

課題1のプロセスの高効率化と、課題2のプロセス稼働状況の安定化は、現在ではトレード・オフの関係にある。更に、課題3のスループット性の向上のために処理時間を短縮（プロセス条件を更に高温化）すると、装置およびロボットが故障し易くなり、頻繁に（年に1回以上）プロセスを停止してのメンテナンスが必要になる。しかし、半導体製造現場においては、これら全ての課題を同時に克服することが望まれており、各担当の装置及びロボットメーカーには、技術的なブレークスルー、技術イノベーションが必要となっている。

【2】 研究の目的

半導体プロセスは高真空かつ高温という非常に過酷な条件下で行われるのが特徴で、複数のプロセス装置を効率的に稼働させる為には、半導体ウエハを搬入出する役割を担う真空ロボットの性能が非常に重要となり、ロボットの耐熱性を向上させることで得られるプロセスの安定した稼働は、生産性向上に大きく貢献する。

今般、プロセスをより効率的に稼働させることで生産性の向上を図る為に、ロボットの耐熱性向上の技術を確立する。

【3】 研究の目標

【極限環境対応部品を実現するための高真空技術の確立】

半導体の生産性向上には、プロセスが安定して、かつ高度な処理を実現させるためにプロセスのメンテナンス・サイクルを延長することが必要であるとともに、ロボットの安定した稼働を実現しなくてはならない。

真空圧が1E-6Pa以下という条件のみの作業においては、ロボットには重大な問題が生じないが、これに高温の条件が付加されると、ロボットの稼働が安定しなくなる。現行のロボットには耐熱性が150℃以上のものは存在せず、高温条件下での稼働に対応できていない。その結果、ロボットの動作精度の低下や故障などが発生し、プロセスが頻繁に停止しているのが現状である。

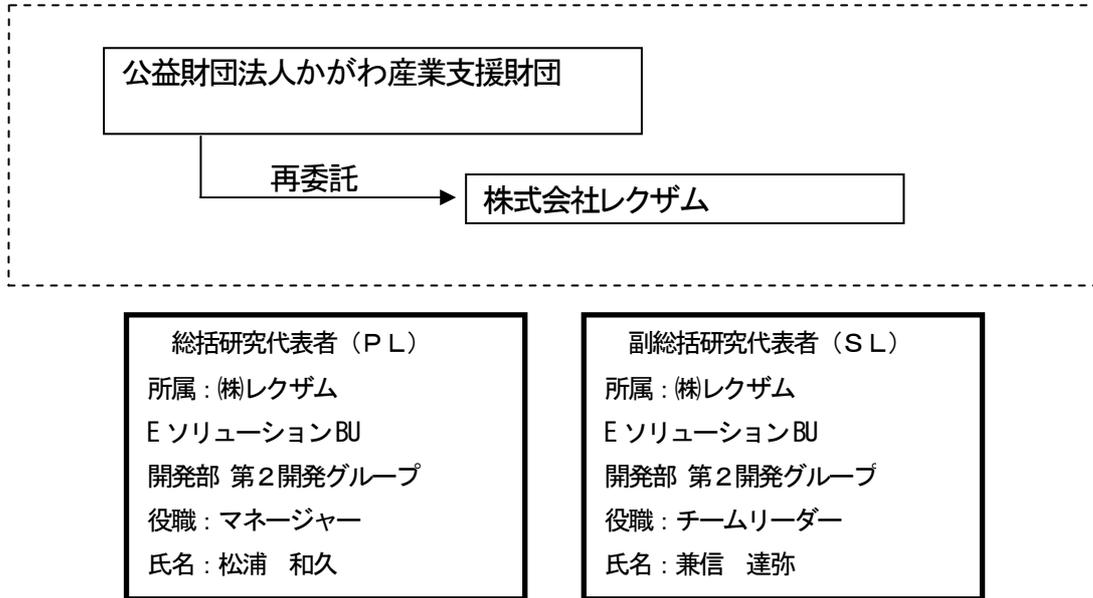
このようなロボットの不具合を低減するために、やむを得ずプロセスの温度を下げて稼働している場合もある。しかし、プロセスに要する時間は増加し、その結果、生産性の低下は免れない。

以上のことから、プロセスの更なる生産性の向上のためには、高真空でかつ高温の条件下で安定稼働する耐熱性の高いロボットを実現することが必須となる。

1-2 研究体制

【1】 研究組織

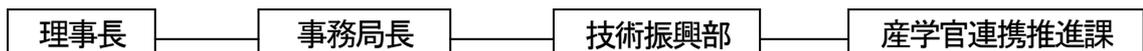
研究組織（全体）



【2】 管理体制

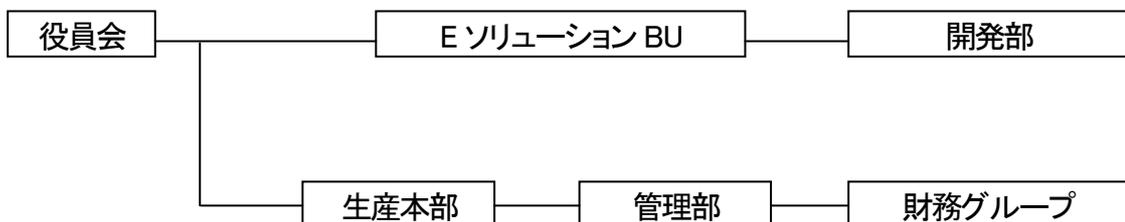
①事業管理者

[公益財団法人かがわ産業支援財団]



②再委託先

[株式会社レクザム]



【3】 管理員及び研究員

【事業管理者】 公益財団法人かがわ産業支援財団

① 管理員

氏名	所属・役職
森 敏樹	技術振興部長
芳重 博光	技術振興部産学官連携推進課 課長代理

【再委託先】 株式会社レクザム

② 研究員

氏名	所属・役職
佐藤 雅昭	開発部 部長
松浦 和久	第2開発グループ マネージャー
兼信 達弥	第2開発グループ リーダー
武智 美幸	開発部 主幹技師
太田 隆浩	第2開発グループ
吉原 享平	第2開発グループ
伊藤 修	第3開発グループ マネージャー
池田 徹	第3開発グループ リーダー
宮本 大輔	第3開発グループ

【4】 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理者)

公益財団法人かがわ産業支援財団

(経理担当者) 技術振興部産学官連携推進課 課長代理 芳重 博光

(業務管理者) 技術振興部長 森 敏樹

(再委託先)

株式会社レクザム

(経理担当者) 管理部財務グループ マネージャー 中西 一輝

(業務管理者) 開発部 部長 佐藤 雅昭

1-3 成果概要

【1】真空チャンバの研究・開発

真空チャンバの研究・開発成果概要を下記に示す。(図3, 表1, 表2, 表3)

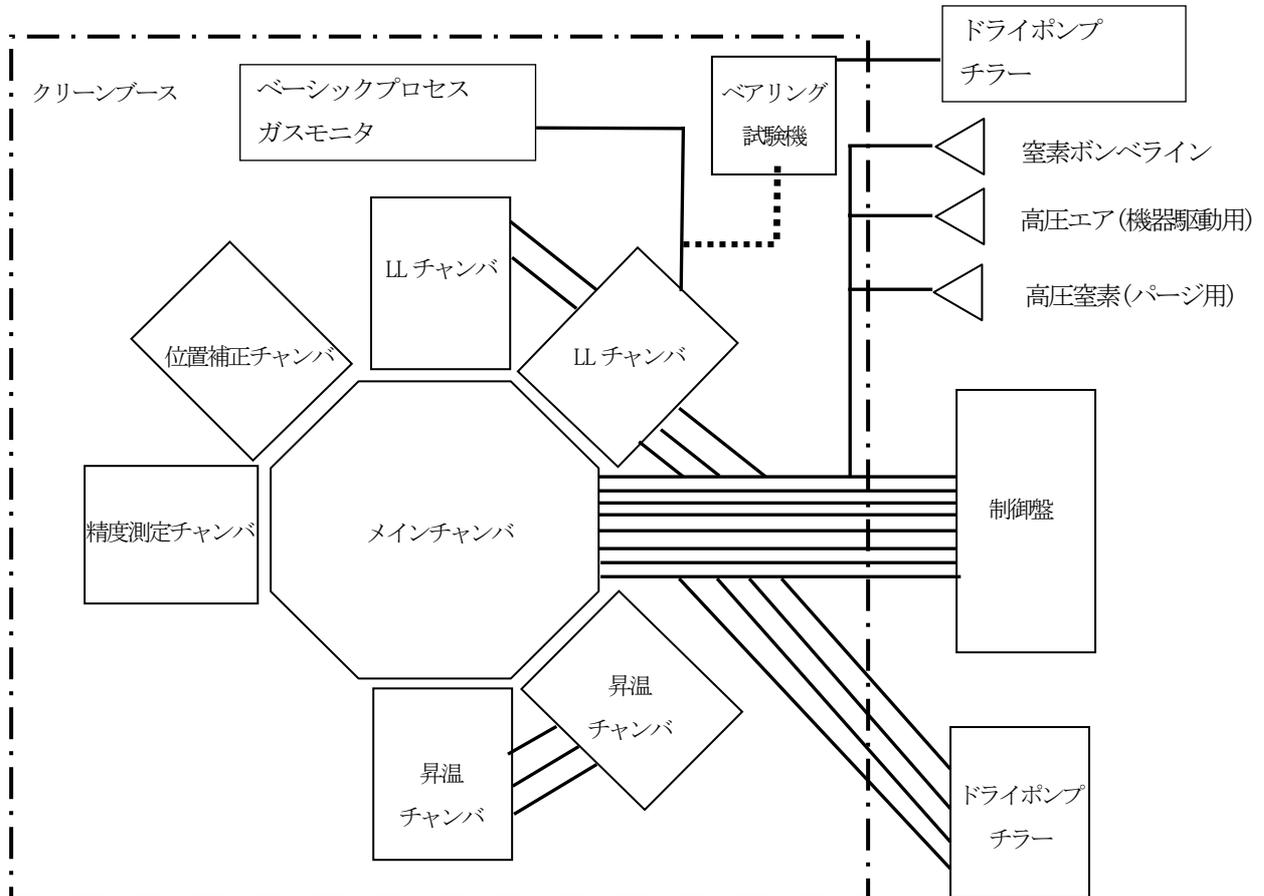


図3. 真空チャンバ概略図

表1. 真空チャンバ一覧表

チャンバ名称	概要	開発時期
メインチャンバ	真空ロボット搭載するチャンバ 各サブチャンバを接続し、ウエハを搬送する	H24 年度
LL チャンバ	ウエハを大気環境-真空環境間出し入れするためのサブチャンバ	H24 年度
精度測定チャンバ	ロボットの動作位置・精度を測定するためのサブチャンバ	H24 年度
昇温チャンバ	ウエハを350℃まで加熱するためのサブチャンバ	H25 年度
温度測定チャンバ	ロボットの関節部(ベアリング近辺)やウエハ表面の温度を測定するためのサブチャンバ	H25 年度
位置補正チャンバ	位置補正システム(位置補正機構)を搭載し、繰り返し搬送による位置ズレを補正する測定部を設けたサブチャンバ	H26 年度
ベアリング試験機	真空耐熱ベアリングの評価を行うための試験用チャンバ	H26 年度

表2. 真空チャンバ 成果概要

	仕様検討	設計・製作・組立		性能評価	
メインチャンバ	H25 制御仕様 検討済み	H24 済み	H25 全体組立 動作制御 確認済み	H24 済み	H25 全体性能 評価済み
LLチャンバ		H24 済み		H24 済み	
昇温チャンバ		H25 済み		H25 済み	
精度測定チャンバ		H24 済み			
温度測定チャンバ	H25 仕様検討・設計・製作済み				
位置補正チャンバ	H26 仕様検討・設計・製作済み			H26 性能評価済み	
ベアリング試験機	H26 仕様検討・設計・製作済み			H26 性能評価済み	

表3. ロボット脱着機 成果概要

	仕様検討・設計・製作	
ロボット脱着機	H25 仕様検討・設計・製作済み	

【2】真空ロボットの研究・開発

真空ロボットの研究・開発成果概要を下記に示す。(表4, 表5)

表4. 真空ロボット 成果概要 (1/2)

	ロボット名称		アーム外観	EE 外観
H24	ベースロボット (タイミングベルト)			
	スチール ベルトロボット	(初期)		
H25	スチール ベルト ロボット	改良1		(同上)
		改良2		

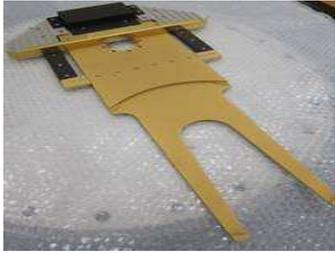
	熱対策基礎テストロボット (ベースロボット +EE 熱対策構造)		 EE 熱対策構造
	熱対策構造ロボット (ヒートパイプ付きベース ロボット+EE 熱対策構造)		
H26	スチールベルトロボット (改良3) + EE 熱対策構造 (改良1)	 スチールベルトロボット (改良3)	 EE 熱対策構造 (改良1)
	高温対応リテーナ付き ベアリング		

表4. 真空ロボット 成果概要 (2/2)

ロボット名称		仕様検討	設計製作	性能評価 (大気圧)	性能評価 (高真空/高温)
ベースロボット (タイミングベルト)		H24 済み	H24 済み	H24 済み	H25 済み
スチール ベルトロボット	(初期)	H24 済み	H24 済み	H25 済み	
スチール ベルト ロボット	改良1	H25 済み	H25 済み	H25 済み	
	改良2	H25 済み	H25 済み	H25 済み	
熱対策基礎テストロボット (ベースロボット +EE 熱対策構造)		H25 済み	H25 済み		H26 性能評価済み
熱対策構造ロボット (ヒートパイプ付きベース ロボット+EE 熱対策構造)		H25 済み	H25 済み		H26 性能評価済み
スチールベルトロボット (改 良3) + EE 熱対策構造 (改良1)		H26 済み	H26 済み		H26 性能評価済み
高温対応リテーナ付き ベアリング		H26 済み	H26 済み		性能評価中

表5. 位置補正機構 成果概要

ロボット名称	仕様検討	設計製作	性能評価
位置補正システム (位置補正機構)	仕様検討済み (大気評価用)	設計製作済み (大気評価用) 	性能評価済み (大気評価用)
	仕様検討済み (真空チャンバ用)	設計製作済み (真空チャンバ用) 	性能評価中 (真空チャンバ用)

1-4 当該研究開発の連絡窓口

総括研究代表者 (PL)

所属：(株)レクザム
 EソリューションBU
 開発部 第2開発グループ
 役職：マネージャー
 氏名：松浦 和久
 電話：087-879-3131
 FAX：087-879-8877
 E-mail：matsuura-kazuhisa@rexxam.co.jp

副総括研究代表者 (SL)

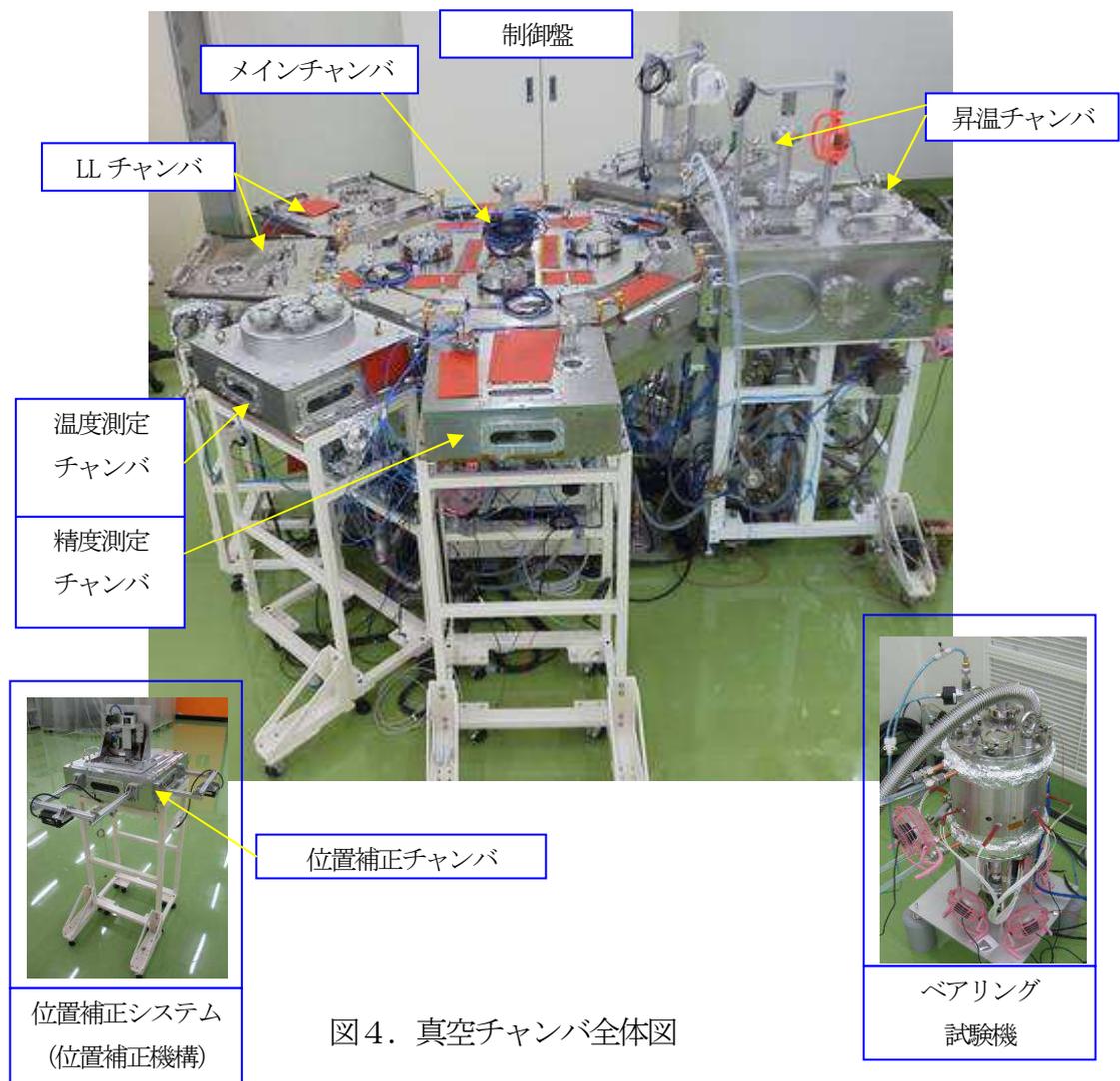
所属：(株)レクザム
 EソリューションBU
 開発部 第2開発グループ
 役職：チームリーダー
 氏名：兼信 達弥
 電話：087-879-3131
 FAX：087-879-8877
 E-mail：kanenobu-tatsuya@rexxam.co.jp

第2章 本論

2-1 真空チャンバの研究・開発

【1】真空チャンバ全体仕様

高耐熱性を有する真空ロボットの性能評価には、「 $1E-6Pa$ 」の真空到達圧力性能が必要なため、チャンバのリークレートを「 $1E-9Pa \cdot m^3/sec$ 以下」にした。真空チャンバはSUS溶接構造とし、内面処理をバフ研磨+電解研磨とすることで、真空内の表面積を少なくすることによる放出ガス量の減少と、クリーニング作業の容易さに考慮した真空内表面処理仕様とした。



【2】メインチャンバ

真空ロボットを搭載するメインチャンバを装置中央に配置し、その周りに最大8台のサブチャンバを接続可能なマルチ・チャンバ構成とした。これにより、中央に配置されたメインチャンバに搭載された真空ロボットが全てのサブチャンバにウエハを搬送することが可能になる。

【3】 LL チャンバ

LL チャンバはロードロックチャンバであり、メインチャンバ内を真空に保持したまま、ウエハの出し入れを行うために設置した真空チャンバである。

【4】 精度測定チャンバ

真空ロボットの動作位置精度測定を行うためのサブチャンバで、熱負荷により精度測定環境に影響があることを想定して、2台をメインチャンバに接続する仕様とした。また、双方のチャンバ間で、測定値の校正をとる。

【5】 昇温チャンバ

ウエハを 350℃まで加熱するための真空チャンバである。試験パターン及びウエハ搬送タクトタイム短縮のため、2台の昇温チャンバを製作した。

ヒータはチャンバ内部に設置し、放射温度計によりウエハの表面温度を測定する。また、ウエハを 350℃まで加熱することから熱に対する安全対策が必要になる。そこで、熱電対による温度監視・インターロック、チラーによるチャンバ冷却などを行っている。

昇温チャンバ内部には他のチャンバとは異なり、熱源（ウエハ加熱用ヒータ）が存在する。このため、安全対策及び熱対策として以下の対応を実施した。

- チャンバ内部温度の測定
 - ・・・熱電対による内部温度の監視
- チャンバ外部温度の測定
 - ・・・熱電対による外部主要部品の表面温度の監視
- 放射熱によるチャンバ壁面、内部の温度上昇対策
 - ・・・遮光板設置による輻射熱の抑制
- チャンバ及び設置機器の熱対策
 - ・・・冷却配管、冷却用ファン設置による熱対策

昇温チャンバは、メインチャンバ側のゲートバルブを閉じることにより、メインチャンバより取り外す事ができるように独立した排気システムを設けた。

【6】 温度測定チャンバ

ロボット エンドエフェクタを直接加熱した場合のアーム温度確認、ウエハ表面温度及びロボットアーム関節部の温度測定を行うことが出来る温度測定用のチャンバを製作した。

チャンバ本体は新規製作とせず、2台製作した精度測定用チャンバのうち、1台を改造することで対応する。

【7】 位置補正チャンバ

位置補正チャンバには、上部にロボットフィンガを撮影、画像処理する「位置補正システム」を配置する為のビューポートを設置した。また、「位置補正システム」で画像処理されたロボット位置情報が適切か判断する為に、X、Y方向にそれぞれレーザー変位計を設置した。レーザー変位計の設置には、調整や取り扱い等を考慮し、精度測定用チャンバと同様のアルミフレームを取り付けた。

【8】 ベアリング試験機

真空高温環境下で使用されるベアリングの性能評価を行ための試験機を製作した。

- ・試験機内部温度 1 2 0℃ (ベアリング周辺温度)
- ・試験環境圧力 1 0¹~1 0⁻¹ Pa (低真空時)

- ・ベアリング回転数 6 6 6rpm (実使用回転数：5 0rpm
／最大回転数：1 5 0rpm)
 - ・ベアリング負荷荷重 7 5 2N (最大負荷／実負荷：3 0N程度)
- 実負荷と同じ条件で使用した場合、5 8 4 0時間の評価時間が必要になるため、回転数、ベアリングの負荷荷重を変更可能な試験機を製作し、加速試験を実施した。

【9】真空環境の制御について

真空環境を作るには、超高真空圧と大気圧の各圧力状態間を移行することが必要となる。また、各サブチャンバ (LL チャンバ、昇温チャンバ、測定 (精度・温度) チャンバ) は各2台用意されるが、実験内容により使用台数が変更されることも考慮する必要がある。この条件を満たす為に、真空環境を生成するプロセスを下記のように分けて制御する。なお、これらのプロセスを機器単位に制御することは、インターロックや制御移行の条件把握が必要であり難解となるため、各プロセスを自動制御できるようなシステム構築を行った。

- 真空環境の制御 . . . チャンバ内部の圧力を超高真空圧や大気圧に移行する制御
- 昇温チャンバの昇温制御 . . . ウエハを3 5 0℃に昇温する制御
- ベーキング処理 . . . 超高真空圧の環境を生成するためのチャンバ本体の加熱処理

昇温チャンバの制御は、チャンバ外部に設置された放射温度計より取得されたウエハ温度を入力した温調計によって、ヒータの制御を行う。また、チャンバ制御を行う PLC は、温調計との通信により温度等の必要な情報を受信するとともに、ヒータ制御にかかわる目標温度の設定や制御パラメータを温調計に送信する。

【10】真空チャンバの性能評価

各真空チャンバは納品後、He リークディテクタによりリークチェックを実施した。各チャンバ接続後は、真空到達力の目標値を満足するか、評価を行った。

<真空到達圧力の目標値 : 10⁻⁶Paオーダー>

(1)メインチャンバ／温度測定チャンバ／ 精度測定用チャンバ : 9. 8×10⁻⁶ Pa . . .OK

(2)LL-Aチャンバ : 2. 8×10⁻⁵ Pa
(LL-Aはウエハ入れ替え用チャンバのためロボット試験には影響ない)

(3)LL-Bチャンバ : 9. 0×10⁻⁶ Pa . . .OK

(4)昇温チャンバA : 8. 9×10⁻⁶ Pa . . .OK

(5)昇温チャンバB : 3. 6×10⁻⁶ Pa . . .OK

2-2 真空ロボットの研究・開発

【1】動力伝達部の耐熱性向上

① ベースロボット

性能評価を行うにあたり、ベースとなるデータが必要となるため、ベースとなる真空ロボットを設計・製作した。

表 6. ベースロボット仕様

耐圧	1E-6 Pa	
耐熱温度	120°C	
クリーン度	ISO クラス 1	
アーム駆動方式 (材質)	タイミングベルト (ゴム)	
繰返し 停止精度	X 軸	(目標値) ±0.1mm
	θ 軸 (Y 軸)	(目標値) ±0.006deg (Y 軸換算値: ±0.1mm)
	Z 軸	±0.05mm
ウエハサイズ	300mm	
真空シール方法	磁性流体シール、溶接ベローズ	
制御機器	AC サーボモータ、AC サーボモータ用アンプ、他	
その他	真空用のロボット構造とする	

(備考: 黄色部が目標値)



図 5. ベースデータロボット (H24)

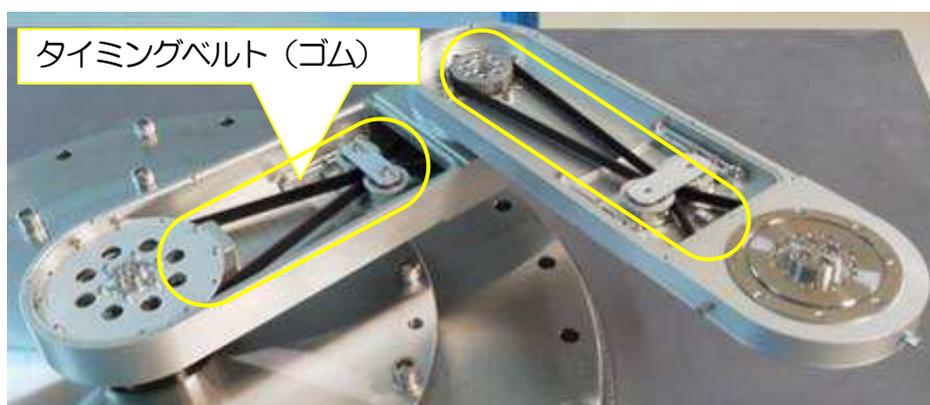


図 6. ベースロボットアーム (内部)

②スチールベルトロボット

高真空かつ高温条件でも寿命が長く、アウトガス発生の少ないスチールベルトを用いた動力伝達機構を開発した。高温条件下でスチールベルトを使用すると、輻射熱によってベルトが伸びる。その結果、ベルトのテンションが変化して搬送位置の精度が低下する。それを防止するため、伸び吸収機構を開発した。

表7. スチールベルトロボットの仕様

耐圧	1E-6 Pa	
耐熱温度	(目標値) 350°C	
クリーン度	ISO クラス 1	
アーム駆動方式 (材質) (伸び補正機構)	スチールベルト (ステンレス) (温度上昇によるベルト伸び吸収機構付き)	
繰返し 停止精度	X 軸	(目標値) $\pm 0.1\text{mm}$
	θ 軸 (Y 軸)	(目標値) $\pm 0.006\text{deg}$ (Y 軸換算値: $\pm 0.1\text{mm}$)
	Z 軸	$\pm 0.05\text{mm}$
ウエハサイズ	300mm	
真空シール方法	磁性流体シール、溶接ベローズ	
制御機器	AC サーボモータ、AC サーボモータ用アンプ、他	
その他	真空用のロボット構造とする	

(備考：黄色部が目標値及びベースデータロボットとの相違点)



図7. スチールベルト最終改良品(H26)

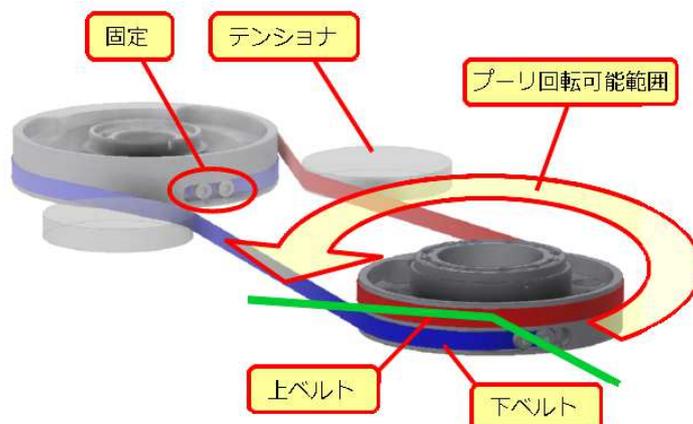


図8. 伸び吸収機構

③ スチールベルトロボットの性能評価

ベースロボットとスチールベルトロボット最終改良品の停止位置精度(温度負荷無し)比較を下記に示す。いずれも、目標値：±0.1mm を満足している。但し、ベースロボットと比較しスチールベルトロボット改良品の停止位置精度は非常に良いことが分かる。(図9)

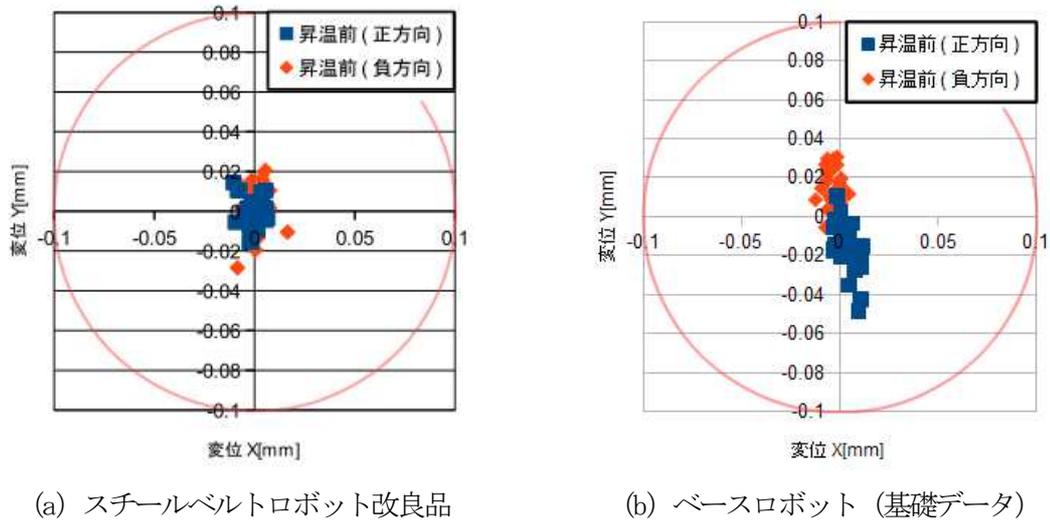


図9. 搬送精度プロット図

【2】ロボット内部の温度上昇防止

ロボットの内部温度上昇防止のための熱対策構造品は、下記の観点より設計を行った。

1. 高温状態のウエハ(350°C)及び昇温チャンバ内壁(400°C)からの受熱低減
2. エンドエフェクタ(以下EE)部の高温領域から、関節部までの熱伝導低減
3. EE部の放熱性能向上

用いられる部材は特殊な物が多く、材料単価・納期の負荷が非常に大きい。そのため、数値解析ソフトを用いた材質・構造の比較検討を行い、試作回数の低減を計った。

表8. 想定動作パターン

	時間[s]												
	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33		
Arm	Turn	Get_wafer			Move_Home			Set_wafer			Move_Home		
Chamber				8							8		
Wafer				15.5									

表9. 熱サイクル表

時刻[s]	ウエハ 表面温度[°C]	チャンバ 内壁温度[°C]
0	24	24
20	24	24
20	350	400
40	350	400
40	24	24
60	24	24
60	350	400
80	350	400
80	24	24
100	24	24
100	350	400
120	350	400

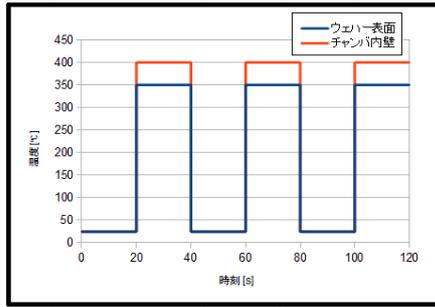


図10. 熱サイクル図

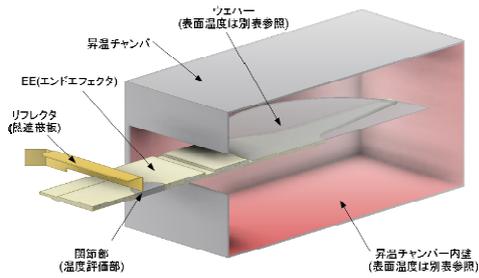


図11. 解析モデル

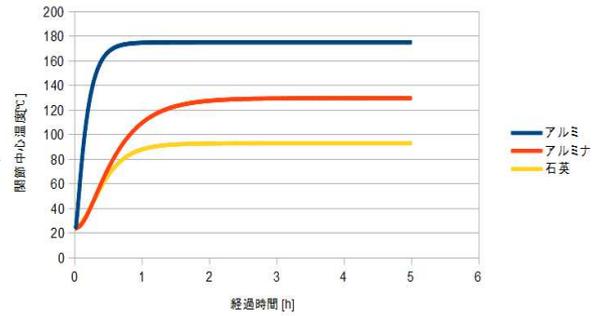
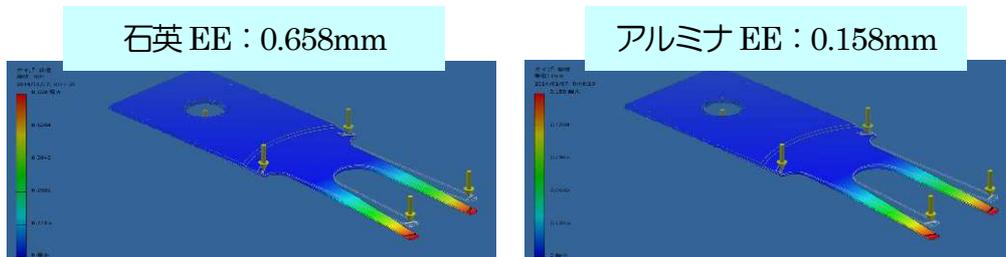


図12. 伝熱解析(部材比較)

表10. 物性値

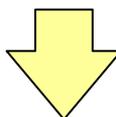
材質	密度[g/cm ³]	曲げ強さ[MPa]	縦弾性係数[GPa]	ポアソン比
石英	2.2	67	72	0.17
アルミナ(Al ₂ O ₃)	3.94	370	390	0.24

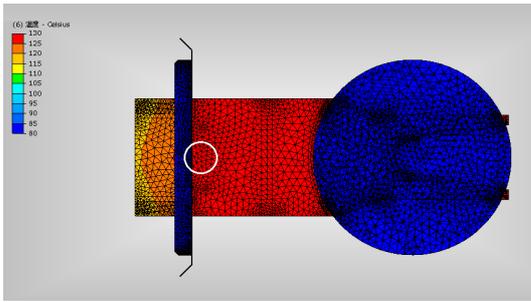


(a) 石英EE

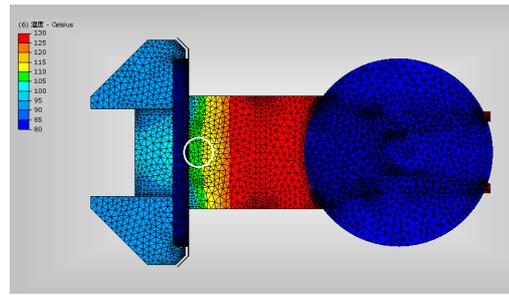
(b) アルミナEE

図13. EEたわみ解析

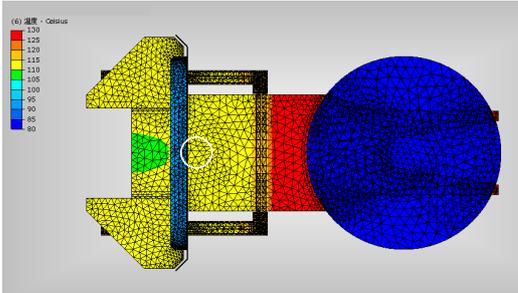




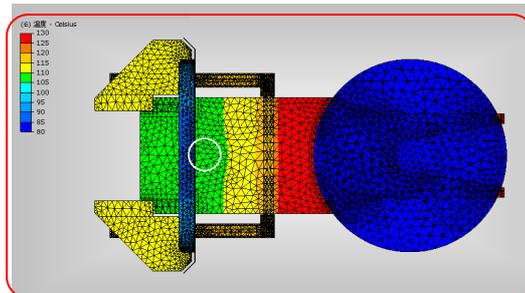
(a) 熱遮蔽板



(b) 熱遮蔽板+放熱板



(c) 熱遮蔽板+放熱板+ヒートパイプ



(d) 熱遮蔽板+放熱板+ヒートパイプ+断熱板

図14. 定常状態での温度分布(白円:関節部境界)

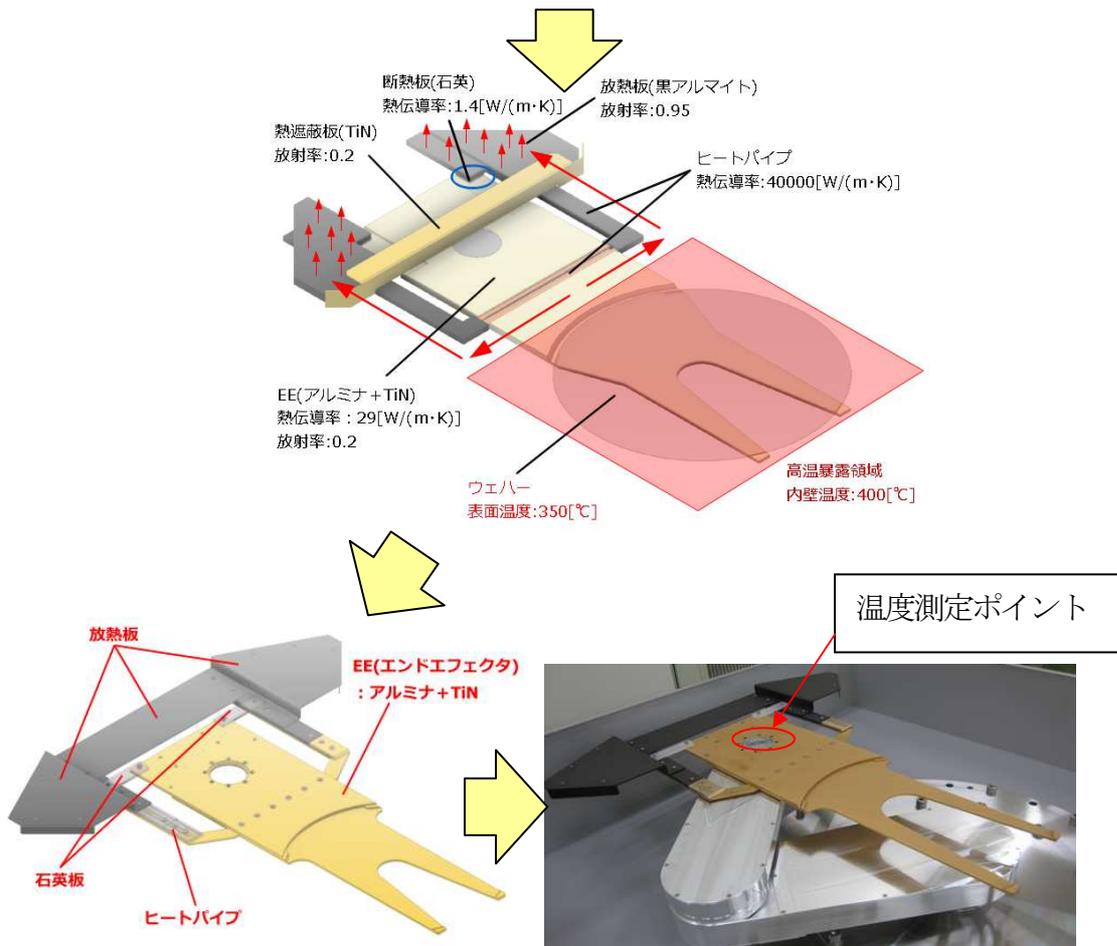


図15. 熱対策構造の改良(H26)

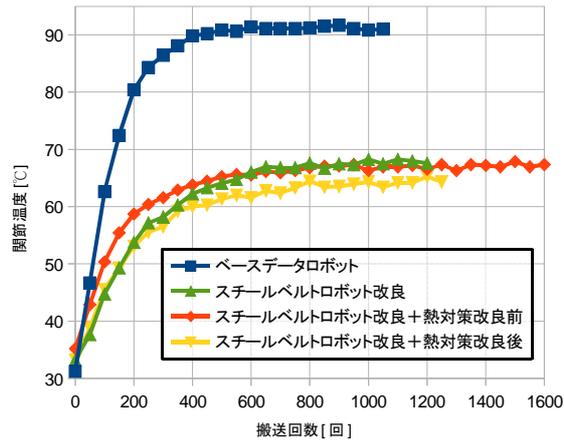
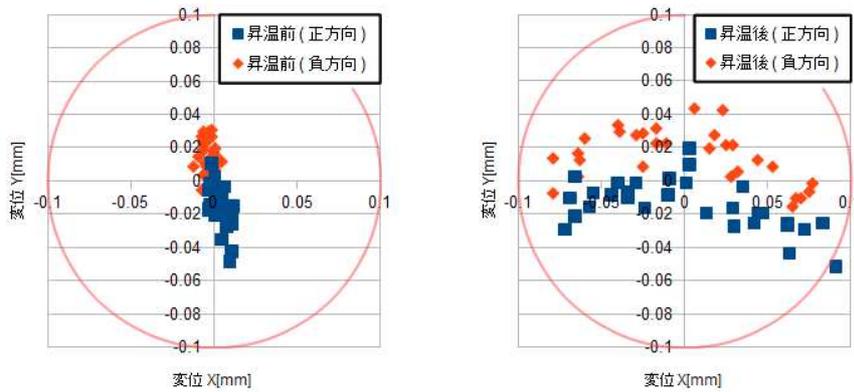


図16. 改良品の温度プロット

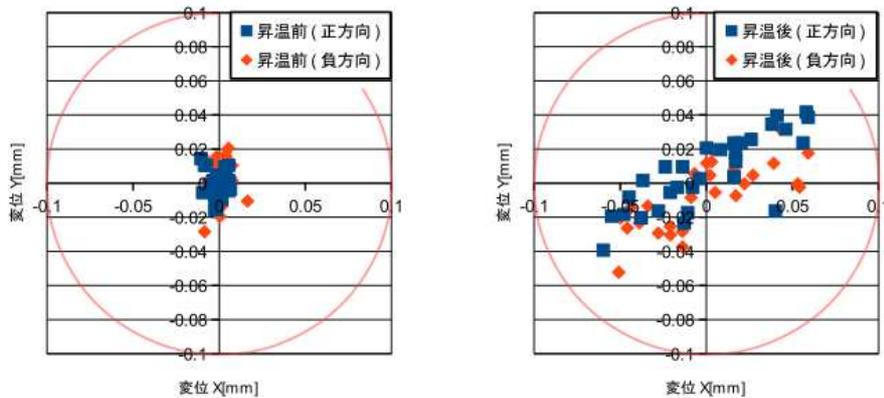
ベアリング温度の目標値：120°Cに対し、最終改良品（スチールベルトロボット改良+熱対策改良）は、64.11°Cとなった。ベースデータロボットとスチールベルトロボットのデータを比較すると、スチールベルトロボットの温度が大きく到達温度が下がっていることが分かる。この理由は、アーム部の表面処理を白色アルマイトから無処理に変更したことでありと考えられる。

ベースデータロボットと、最終改良品（スチールベルトロボット改良+熱対策改良）を用いた常温と、350°Cウエハ搬送でのロボット停止位置精度の比較は下記のようになった。



(a) 昇温前測定データ（ベースロボット）

(b) 昇温後測定データ（ベースロボット）



(a) 昇温前測定データ（スチールベルトロボット）

(b) 昇温後測定データ（スチールベルトロボット）

図17. 精度プロット比較

停止位置精度の比較より、昇温前後どちらも最終改良品（スチールベルトロボット改良+熱対策改良）の方が精度が良いことが分かる。昇温後のプロットは目標値である±0.1mm以内に収まっており、ロボットアームの基礎的な精度向上に加えて、到達温度を低下させたことが精度向上の要因であると考えられる。

2-3 ベアリングの耐熱性向上

【1】耐熱ベアリングの仕様検討

高真空かつ高温の条件下で起こる真空ベアリングの焼き付き・固着は、ベアリング内部に封入しているグリスの蒸発等によって発生している。一般的に真空条件下で使用されているグリスは飽和蒸気圧の低いグリスが使用されているものの、高温になるとグリスの蒸発、焼き付きが生じ易くなる傾向は変わらない。よって、グリスの蒸発による固着発生し難いベアリングが必要とされる。

ロボットの関節部に使用されるベアリングは、内外輪の肉厚が薄くコンパクト設計されたものが必要となる。そこで、開発に使用するベアリングとして下記を選定した。また、耐熱性向上に有効な下記4項目について、検討・対策を実施した。



詳細項目	内容
型番	RA5008CS-S
ローラ・内外輪	鉄系
リテーナ	ナイロン
グリス	AFB-LF グリス
耐熱温度	80℃

図18. ベアリング（THKのHPより引用）

(1) リテーナ材質変更による耐熱性向上

一般的に使用されているナイロンの耐熱温度は、80～140℃となっており今回必要としている高温条件を踏まえると不十分である。そのため、耐熱性が高く機械的強度に優れる耐熱樹脂（耐熱温度：240℃）を使用して耐熱性能の向上を行う。

(2) 高真空、高温条件で使用できる真空グリスの選定

既存のベアリングに使用されているグリスは、リチウム石鹸基系グリスであり耐摩耗性、極圧性、機械安定性に優れているが使用温度範囲（-15～100℃）を外れているため高温領域での使用が出来ない。そのため、同様の機械的特性、高温特性、低アウトガス特性を持つ真空グリスの調査から「F系」と「S系」のグリスを選定した。

(3) ローラ表面の耐摩耗コーティング

ベアリング内部のローラは、常時リテーナや内外輪に接しているため駆動するとローラ表面がうろこ状に剥がれるフレーキング現象や油膜切れで生ずる微小焼き付きの発生によって表面が損傷されるスミアリング等が発生する可能性がある。そのため、ローラ表面に耐摩耗用に行われるコーティングを行い寿命の延長を図る。

(4) 摩擦抵抗の軽減

ベアリング内のローラは、内外輪と円筒面で線接触、端面で点接触しているため、ローラ端面での摩擦抵抗が高くなる。そのため、ローラ端面に耐熱樹脂のパットを装着させ接触部の摩擦抵抗の軽減を図る。

表 1 1. 真空ベアリング試作品の構成

型式	ローラ	リテーナ	グリス
Aタイプ	耐摩耗コーティング	耐熱樹脂	S系
Bタイプ	耐摩耗コーティング	耐熱樹脂	F系
Cタイプ	標準	ナイロン	S系
Dタイプ	標準	ナイロン	F系
Eタイプ	側面摺動パット付きローラ	耐熱樹脂	S系

【2】高温対応リテーナ付きベアリングの性能評価

真空かつ高温環境においてベアリングの耐久性を比較するために、ベアリング試験機を使用してベアリングの性能評価を行った。

表 1 2. 耐久試験目標値 (加速試験時)

	ロボット実績	加速試験	(倍率)
回転数[rpm]	150	666	4.4
負荷荷重[N]	30	752.1	25
真空圧力[Pa]	$10^{-6} \sim 10^{-5}$	低真空: $10^{-1} \sim 10^1$ 高真空: $10^{-6} \sim 10^{-5}$	-
温度[°C]	120	120	-
目標時間[H]	5840	53.1	-

表 1 3. 試作ベアリングの試験結果まとめ

型式	正常継続	波形異常	終了判定	ベアリング状態		性能順位
				リテーナ	ローラ	
Eタイプ	87.0h	18.0h	波形異常	リテーナ	継続使用可能	1
				ローラ	割れ発生 (多数)	
				内外輪	傷少ない	
				グリス	残存	
Aタイプ	127.0h	2.0h	モータ過負荷	リテーナ	激しく摩耗	2
				ローラ	傷有り	
				内外輪	傷有り	
				グリス	無し	
Cタイプ	81.0h	3.0h	波形異常	リテーナ	ナイロン融解し固着	3
				ローラ	傷少ない	
				内外輪	傷少ない	
				グリス	無し	

Bタイプ	0.5h	0.75h	モータ過負荷	リテーナ	激しく摩耗	4
				ローラ	大きな傷有り	
				内外輪	大きな傷有り	
				グリス	無し	
Dタイプ	8.0h	9.0h	波形異常	リテーナ	融解、炭化	5
				ローラ	大きな傷有り	
				内外輪	大きな傷有り	
				グリス	無し	

加速試験による耐久性の目標時間 53.1 時間に対し、「Eタイプ」、「Aタイプ」、「Cタイプ」は目標時間を達成する結果となった。

2-4 メンテナンス時間の短縮

【1】位置補正システム（大気用試験機）

本研究では、カメラでエンドエフェクタを撮影し画像処理によって熱影響による位置ズレを算出、補正する機構の研究・開発を行なった。

使用するレンズの選定、カメラ位置ズレ確認用マーカの形状や材質検討、カメラ基板作成用データ収集等を効率良く行う為、大気用試験機を設計・製作した。

(図19, 図20)



図19. 大気用試験機(H26) 外観

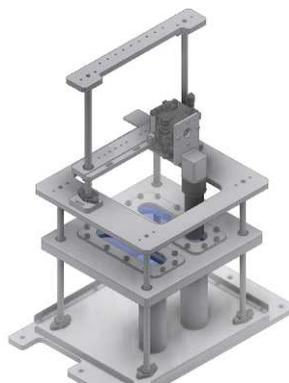


図20. 大気用試験機(H26) 測定部

【2】位置補正システム（真空チャンバ用試験機）

大気用試験機の評価結果をもとに位置補正チャンバ上に設置する真空チャンバ用試験機を製作した。この試験機は自動で調整が行えるオートフォーカス構造とした。また、製品化する場合も考慮し、装置内にカメラやレンズ照明、モータの電源用基板を設置したコンパクトな構造とした。設置場所が変わっても同様の補正が行えるようにカメラ取付部と装置下部にレベル調整用ボルトを設置した。

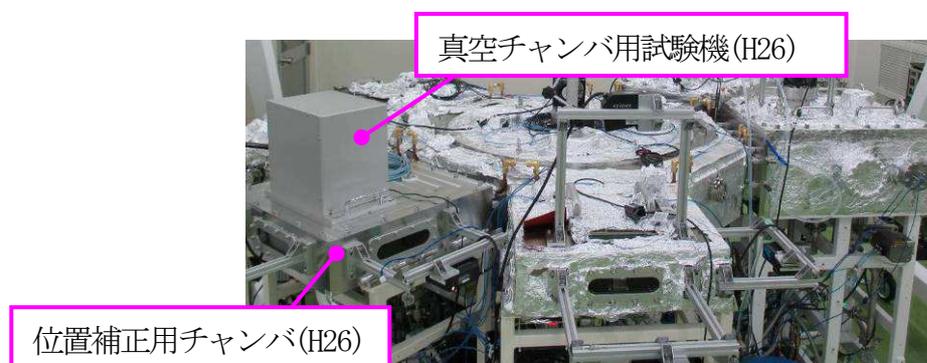


図 2 1. 真空チャンバ用試験機(H26)を組み付けた真空チャンバ全体図

【3】位置補正システム（真空チャンバ用試験機）の評価

大気用試験機はエンドエフェクタ先端のエッジ位置を検出することによりロボットの位置情報を取得する機構である。(図 2 2) まず、ティーチングを行い基準となるデータを記録しておき、次にロボットの温度が変化にともない再度エッジ位置の検出を行う。ティーチング位置と温度変化後のズレ量からアーム各部の熱膨張量を算出し、そのズレを補正するような制御を行う。

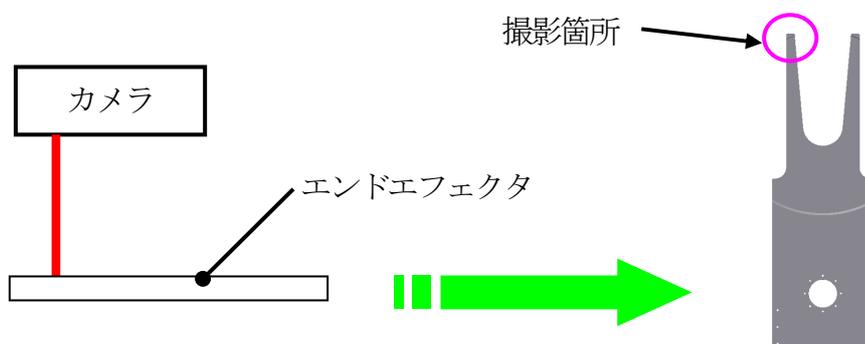


図 2 2. 撮影箇所

【4】位置補正システム（真空チャンバ用試験機）の性能評価結果

基準データ、熱影響データ（位置補正無し／位置補正有り）を比較したグラフを示す。(図 2 3)

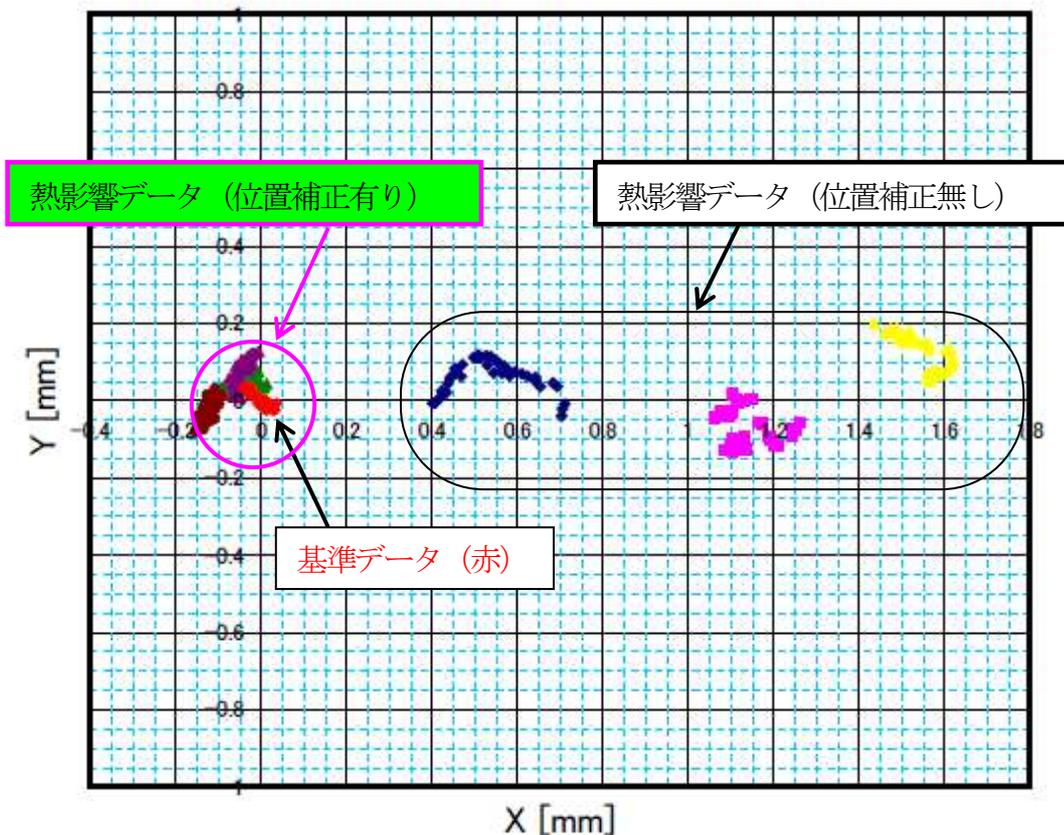


図23. 基準データ，熱影響データ（位置補正無し／位置補正有り）

基準データは、0mm 付近でかつ $\pm 0.1\text{mm}$ の範囲に収まっているが、熱影響データ（位置補正無し）の場合は、関節温度が上がるにつれて基準データ位置から X 方向にズレが発生し、ばらつきの幅が広がっている。

熱影響データ（位置補正有り）の場合は、熱影響を受けたロボットを位置補正することにより、ズレ位置を基準位置に近づけることができた。しかし、目標値の $\pm 0.1\text{mm}$ 以内より若干大きく $\pm 0.15\text{mm}$ 程度である。

「評価はNG」であるが、ほぼ目標値に近い値となった。

第3章 全体総括

3-1 真空チャンバの研究・開発

高温条件下で高度な耐熱特性を有するロボットを開発するためには、超高真空のテスト環境が必要になる。このため、真空ロボットのテスト評価用として7種類（製作したチャンバは「測定チャンバ」、「LLチャンバ」、「メインチャンバ」「昇温チャンバ」「温度測定チャンバ」「位置補正用チャンバ」及び「ベアリング試験機」）の真空チャンバを製作した。各チャンバのリークレートは「 1×10^{-9} Pa・m³/sec 以下」を満足した。

また、真空到達圧力の目標値「 10^{-6} Pa オーダー」に対し「LL-A チャンバ」以外は目標値を満足した。（「LL-A チャンバ」は 1.1×10^{-5} Pa であり若干不足しているものの、ウエハの入れ替えのみに使用するため、ロボットの試験には影響しないので問題なしと判断した。）

昇温チャンバは、ウエハの温度を 350°Cにするためのチャンバであるが、問題なく昇温できることを確認した。

各真空チャンバの真空制御や温度制御などは、制御装置により安全で適切に制御できるシステムとなっていることを確認した。

ベアリング試験機は、耐熱ベアリングの耐久試験機としての性能を満足している。

3-2 真空ロボットの研究・開発

《動力伝達部の耐熱性向上》

- ・高真空かつ高温条件でも寿命が長く、アウトガス発生の少ないスチールベルトを用いた動力伝達機構の開発は完成した。

<繰り返し停止位置精度の目標値：±0.1mm> 目標達成率 100%

- ・高温条件下でスチールベルトを使用すると輻射熱によりベルトが伸び、テンションが変化して送位置の精度が低下する。これを防止するための伸び吸収機構の開発は完成した。
目標達成率 100%

《ベアリングの耐熱性向上》

- ・高温条件下での使用によりベアリングの転動面の接触摩擦が増加することで発生する金属同士の固着（焼き付き）を防止するための、高温条件対応リテーナ付きベアリングの開発はまだ試験は継続しているものの、加速試験での目標の耐久時間は3種のベアリングで達成した。

<350°Cの条件下での暴露時間 : 10sec>

<インターバルタイム : 50sec>

<寿命サイクル : 350,400回(寿命時間5,840h)> 目標達成率: 100%

《ロボット内部の温度上昇防止》

- ・ロボットアームの内部の温度を上昇させないヒートパイプを組み込んだ熱伝導効率の良いロボット構造の開発は完成した。熱対策構造の温度は64.11℃である。

<ベアリング周辺温度 : 120℃以下> 目標達成率:100%

- ・輻射熱を防ぐ熱輻射率の高い金属化合物（特にTiN）による最適な表面処理方法の確立は、アルミナの表面処理としてTiN処理品は完成した。TiN処理品からのパーティクル発生は無い。

<パーティクル発生 : 0.1μm以下ゼロ> 目標達成率:100%

《メンテナンス時間の短縮》

- ・経年劣化に起因する搬送位置精度の低下を補正する搬送位置補正システム及びその制御システムの開発は完成した。温度補正後の停止位置精度は、±0.15mmであり100%では無いもののほぼ実用レベルに達している。また、1回の補正時間は1分以内である。

<位置補正後の繰り返し停止位置精度 : ±0.1mm> 判定:合格

<搬送位置補正時間 : 1h> 目標達成率:100%

本研究により、今後の真空中での耐熱が要求されるさまざまな次世代の半導体処理装置において、非常に有効な技術が蓄積できた。また、高温条件下で高度な耐熱特性を有するロボットにおいては掲げた目標をほぼ達成することができたことを報告して全体総括とする。