

平成 2 5 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「不等リード不等傾斜角スクリーブスターポンプの製品開発
と実用化に向けての技術開発」

研究開発成果等報告書

平成 2 6 年 3 月

委託者 関東経済産業局

委託先 公益財団法人にいがた産業創造機構

目 次

第 1 章 研究開発の概要

1-1	研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-2	研究体制	1
1-3	成果概要	5
1-4	当該研究開発の連絡窓口	6

第 2 章 本論

2-1	スクリーローターの高精度・高速加工技術の開発	7
2-1-1	専用工作機械の開発	7
2-1-2	加工精度向上及び加工時間の短縮	7
2-2	高精度高剛性軸受けの開発	8
2-2-1	スクリー軽量化	8
2-2-2	共振点の移動検討	8
2-3	ベアリング部オイル供給機構の開発	10
2-3-1	目的	10
2-3-2	実施内容及び結果	10
2-4	ポンプ内接ガス部の腐食対策コーティング開発	11
2-4-1	目的	11
2-4-2	実施内容及び結果	11
2-5	20,000L/min 型不等リード不等傾斜角スクリーブースターポンプの性能試験	17
2-5-1	開発装置概要	17
2-5-2	開発装置の性能評価試験方法	17
2-5-3	試験結果	18

第 3 章	全体総括	19
-------	------	----

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

本研究開発の目的は、太陽電池、大型平板ディスプレイ、LED、半導体等の製造に関する超高生産性化、省エネ化、省スペース化、低コスト化等の課題を排気プロセスの面で解決するもので、広い圧力領域で良好な排気特性を持った新型真空ポンプであり、分子流域から粘性流域まで、分子量の小さい水素ガスから大きな分子量のガスまで安定した排気速度を維持し、省エネ、小フットプリントを実現するものである。

この不等リード不等傾斜角スクリーブスターポンプについては、腐食ガス雰囲気の中、長時間に渡りトラブルなく運転を行うこと、また、排気系運転エネルギーの50%以上削減を可能としながら、製造コストを現行ポンプと同等以下にすることが課題である。これらの解決に向け研究開発を行う。

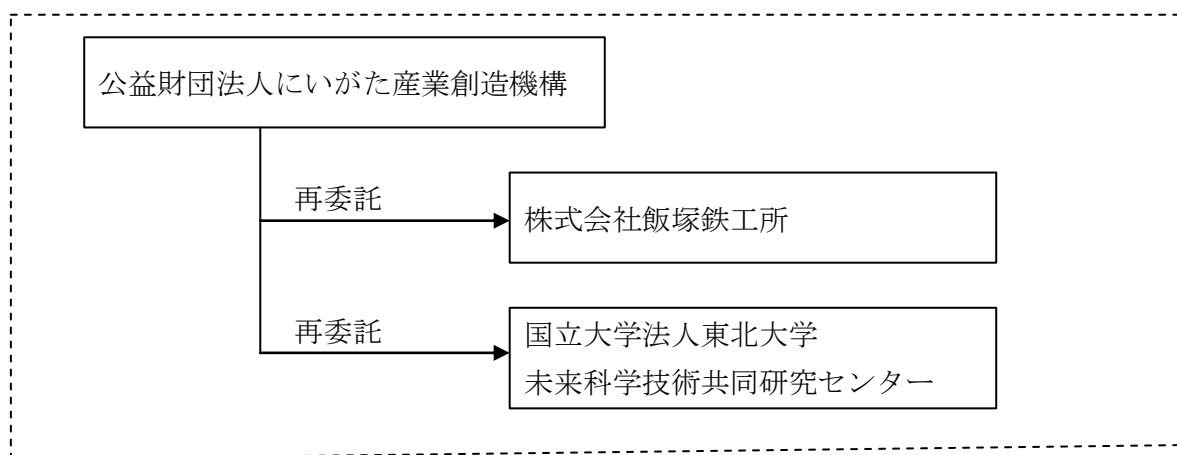
研究の目標は以下のとおり。

- ①スクリーローターの高精度高速加工を確立し、生産高2日/1セットを目標とする。
- ②ポンプの吸入側と吐出側のガスの圧縮比が30,000以上のスクリーローターを開発する。
- ③腐食ガス中において、50,000時間以上の耐腐食性を持つ表面保護膜を開発する。
- ④遠心力を利用する方法でオイルをベアリングに供給し、15cc/min以上の安定した供給を行える遠心ポンプの開発と、最適なオイルを選定する。
- ⑤ポンプとして完成させ、10,000時間以上の無事故・無故障の運転を実現する。

1-2 研究体制

(1) 研究組織及び管理体制

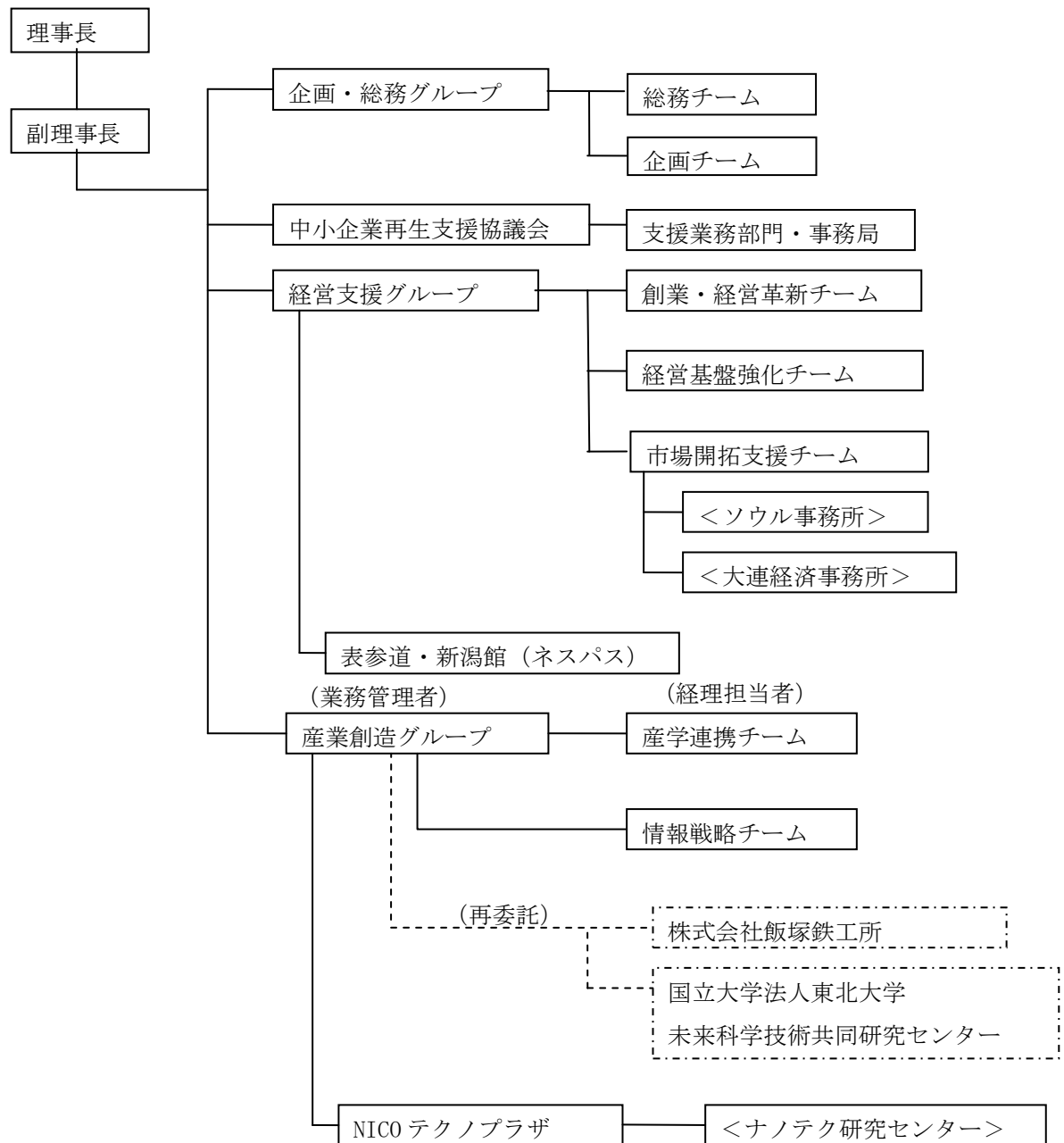
1) 研究組織（全体）



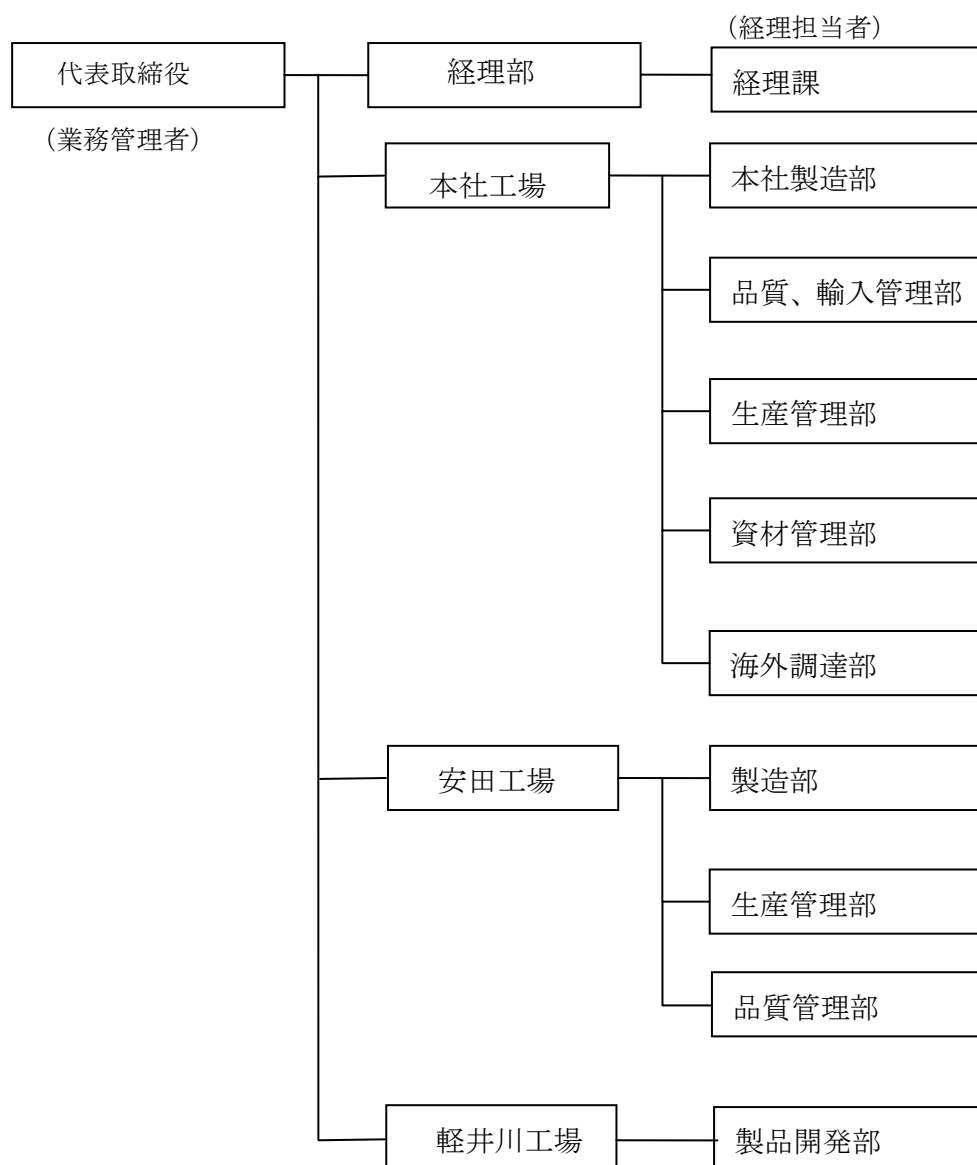
2) 管理体制

①事業管理者

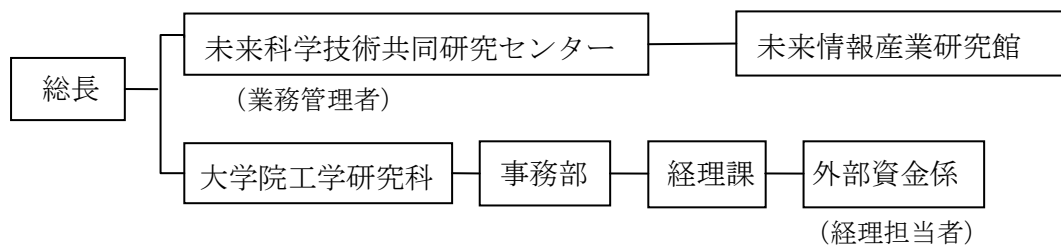
公益財団法人にいがた産業創造機構



②再委託先
株式会社飯塚鉄工所



国立大学法人東北大学未来科学技術共同研究センター



(2) 管理員及び研究員

【事業管理機関】 公益財団法人にいがた産業創造機構

① 管理員

氏名	所属・役職
杉井 伸吾	産業創造グループ 産学連携チーム シニアエキスパート
内藤 薫	産業創造グループ 産学連携チーム シニアチーフ

【再委託先】

(研究員)

株式会社飯塚鉄工所

氏名	所属・役職
飯塚 肇	専務取締役
山崎 英明	軽井川工場 製品開発部
品川 海人	安田工場 品質管理部
中村 重光	軽井川工場 製品開発部
神保 義裕	軽井川工場 製品開発部
川村 吉孝	軽井川工場 製品開発部
桑原 貴大	軽井川工場 製品開発部
中川 誠一	軽井川工場 製品開発部

国立大学法人東北大学未来科学技術共同研究センター

氏名	所属・役職
後藤 哲也	准教授
大山 健二	研究員

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理機関)

公益財団法人にいがた産業創造機構

(経理担当者) 産業創造グループ 産学連携チーム マネージャー 斎藤 茂樹
(業務管理者) 産業創造グループ 総括マネージャー 畔上 正美

(再委託先)

株式会社飯塚鉄工所

(経理担当者) 経理部経理課長 小玉 喜子
(業務管理者) 代表取締役 飯塚 靖一

国立大学法人東北大学未来科学技術共同研究センター

(経理担当者) 大学院工学研究科事務部経理課外部資金係 八島 涼子
(業務管理者) 未来科学技術共同研究センター准教授 白井 泰雪

(4) 他からの指導・協力者

研究開発推進委員会 委員

氏名	所属・役職	備考
飯塚 肇	株式会社飯塚鉄工所 専務取締役	PL
後藤 哲也	国立大学法人東北大学 未来科学技術共同研究センター 准教授	SL
大山 健二	国立大学法人東北大学 未来科学技術共同研究センター 研究員	
白倉 哲男	公益財団法人にいがた産業創造機構 産業創造グループ ディレクター	
畔上 正美	公益財団法人にいがた産業創造機構 産業創造グループ 総括マネージャー	
大見 忠弘	国立大学法人東北大学 シニアリサーチフェロー	アドバイザー
川端 洋成	国立大学法人東北大学 未来科学技術共同研究センター 客員教授	アドバイザー
齋藤 幸正	東京エレクトロン株式会社 PVE事業本部 PVE新製品企画室 FPSプロジェクト 副主事技師	アドバイザー
坂井 朋之	新潟県工業技術総合研究所 企画管理室 室長	アドバイザー
渡辺 琢也	新潟県産業労働観光部産業振興課 課長	アドバイザー

1-3 成果概要

(1) スクリューローターの高精度・高速加工技術の開発

スクリューローター切削加工の高精度・高速加工技術の開発において、重要な要素となる専用工作機械を開発した。また、専用加工工具やNCプログラムの開発に取り組み、加工時間は開発当初の7日/1セット(20時間/メススクリュー)から4日/1セット(14時間/メススクリュー)まで短縮した。また形状精度は開発当初の $\pm 0.05\text{mm}$ から $\pm 0.015\text{mm}$ まで向上した。

(2) 高精度、高剛性軸受の開発

本開発対象ポンプの性能向上において、高速回転するスクリュー同士、およびスクリューとステータのクリアランスを一定の値に保持することは極めて重要である。これを実現するために、軸受け部の構造を変更して共振周波数を高周波側に移動させて動的剛性を高め、スクリューを軽量化して回転時の偏芯荷重を低下させる対策を施した。その結果、運転速度における回転振れを極めて小さくすることができ、高いポンプ性能を実現した。

(3) ベアリング部オイル供給機構の開発

軸受け部の潤滑及びモーターの冷却に用いるオイルを選定するとともに、遠心力を利用してオイルを移送する遠心オイルポンプを開発し、800cc/min以上の安定したオイル供給を実現した。また、本体冷却構造の検討・開発を行い、安定した温度での運転が可能になった。

(4) ポンプ内接ガス部の腐食対策コーティング開発

ポンプ内部は用途により Cl_2 , F_2 , HBr 等の腐食ガスに晒されることから、それによる腐食を防ぐ Al_2O_3 コーティングを開発し、良好な効果が得られることを確認した。また、実機部品への塗布を行い、良好な耐食性が得られることを確認した。

(5) 20,000L/min 型不等リード不等傾斜角スクリーブスターポンプの性能試験

3 年間の開発要素を採り入れた 20,000L/min 型不等リード不等傾斜角スクリーブスターポンプ及び 500L/min 小型スクリーバックポンプを製作し、ポンプの排気性能を評価した結果、排気速度 19,000L/min 以上、圧縮比 30,000 以上、消費電力 1.5kW、到達圧力 $5 \times 10^{-4} \text{Pa}$ の結果を達成した。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

公益財団法人にいがた産業創造機構

〒950-0078 新潟県新潟市万代島 5 番 1 号「万代島ビル」10F

産業創造グループ 産学連携チーム

シニアエキスパート 杉井 伸吾

シニアチーフ 内藤 薫

TEL 025-246-0068 FAX 025-246-0033

E-mail info@nico.or.jp

第2章 本論

2-1 スクリューローターの高精度・高速加工技術の開発

本事業の課題であるスクリューローターの切削加工の高精度・高速加工技術の開発において、重要な要素となる専用工作機械の開発を行った。また、専用加工工具やNCプログラムの開発に取り組んだ。

2-1-1 専用工作機械の開発

(1) 装置概要

従来装置に以下の改良を加えた。

- ・ 高速演算を可能とし、減速しないNC装置の開発
- ・ 工具の位置決めを検出する検出器を回転式から直線式へ
- ・ 高速加工において発熱を抑えるボールネジの軸中心冷却装置
- ・ バイト本体の角度を制御出来る軸（A軸）を追加
- ・ 計測用高精度タッチセンサによる自動計測装置を追加

専用工作機械を図2-1に、自動計測の様子を図2-2に示す。



図2-1 開発した専用工作機械

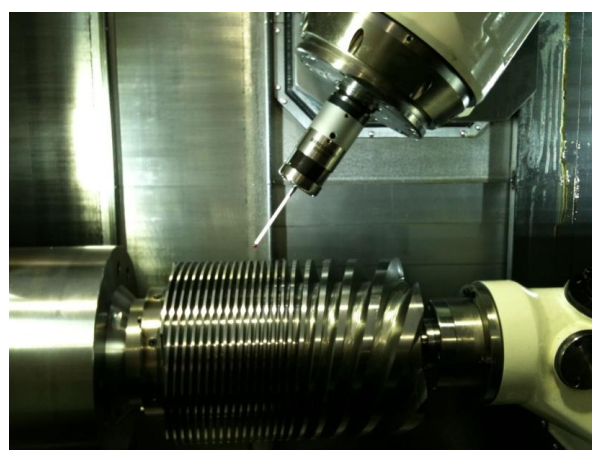


図2-2 自動計測装置

2-1-2 加工精度向上及び加工時間の短縮

スクリューローター形状精度はポンプの大排気量化、高圧縮率、高真空化に直結することから、この加工精度向上は重要な開発課題である。また、スクリューローターの溝加工は材料の4割以上を切削加工によって除去するもので、その形状から非常に時間のかかる工程となっている。このため、スクリューローターの高精度高速加工技術を確立し、加工時間を1個/12時間に短縮し、溝形状の加工誤差を $\pm 0.01\text{mm}$ 以内に抑えることで、ポンプの性能向上とコスト削減を目指した。

(1) 実施内容及び結果

切削加工工具の開発及び加工工程、加工のNCプログラムの開発を行い、開発当初の加工時間7日/1セット（20時間/メススクリュー）から4日/1セット（14時間/メススクリュー）まで短縮した。またこれらの取り組みから現在のスクリューの加工形状精度は $\pm 0.015\text{mm}$ まで向上した。

スクリュー各部の形状測定結果について、図2-3に示す測定ポイント（計7点）における精度測定結果（目標値からの偏差）を図2-4に示す。

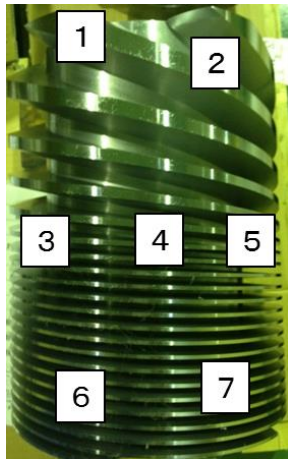


図 2-3
オススクリュー
測定ポイント

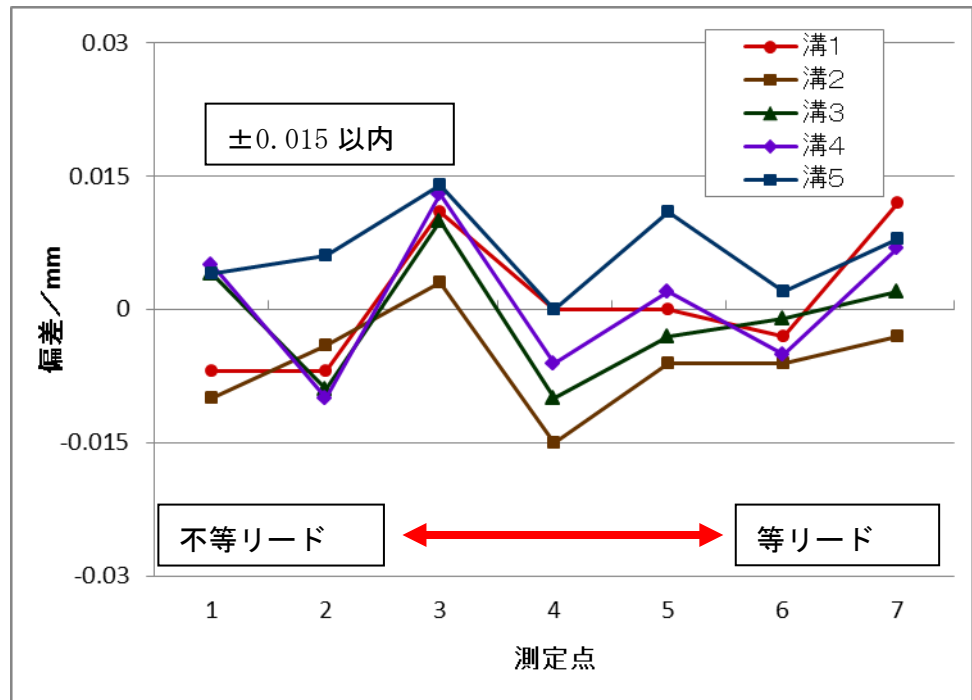


図 2-4 オススクリュー測定結果

2-2 高精度高剛性軸受けの開発

本開発対象ポンプにおいては、スクリュー同士のクリアランスおよび、スクリューとステータのクリアランスを小さくすることでポンプの性能向上を図ることができる。しかし、オススクリューローターはφ250で40kgを超え、6,000回転を超える常用回転数になることから、スクリューの軸受剛性が十分に高くないとスクリューの振れが大きくなり、スクリュー同士やスクリューとステータが接触して故障に至る。このため、本開発対象ポンプに必要な十分な精度と剛性を持った軸受が必要であり、本事業ではこの解決のために重要となる振動の低減に重点を置いて対策を行った。

2-2-1 スクリューの軽量化

(1) 実施内容及び結果

スクリューの内径部肉厚を薄くして軽量化を図った。変更前後の形状を図 2-5 に、スクリュー外周の振れ測定結果を図 2-6 に示す。スクリューを 9.5%軽量化することで、回転時に生じる軸の曲げモーメントが減少し、振れ量が軽量化前の 1/3 近くに減少した。

2-2-2 共振点の移動検討

(1) 概要及び解析結果

ポンプの運転領域内にある 110Hz (6600rpm) から始まる共振を運転領域外の高い回転数に移動させるため、スクリューの取付位置を下げ、固定ベアリングとの距離を短くした。これにより軸受けの剛性を増大させて、共振周波数を高周波側に移動させることを目指す。変更前後のスクリュー取付位置の様子と実際のスクリュー外観を図 2-7 に、コンピューターシミュレーションによるモーダル解析の結果を図 2-8 に示す。計算の結果、共振周波数は 133.9Hz (8394rpm) に移動し、外周の振れは 0.05mm 以下になると予測される。

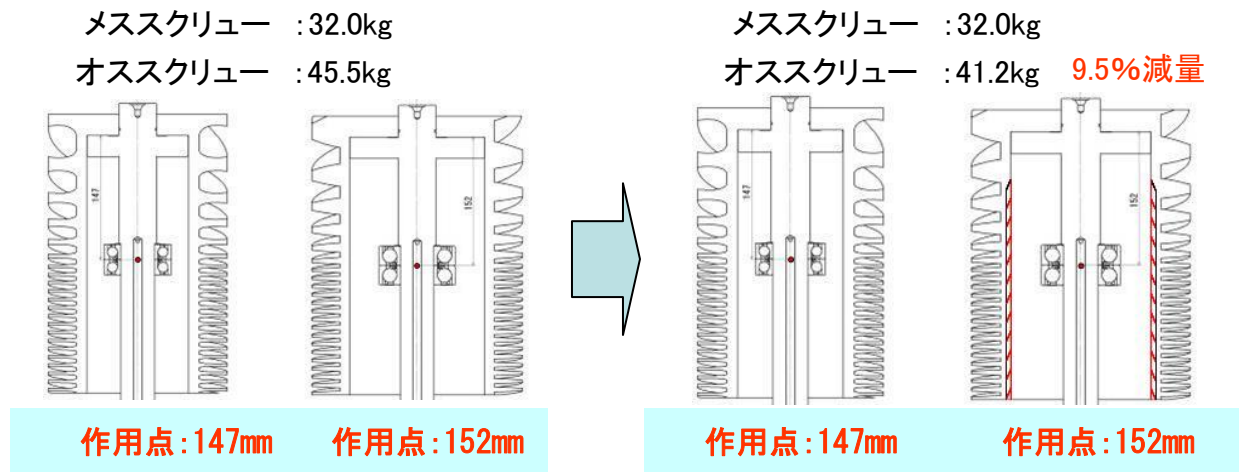
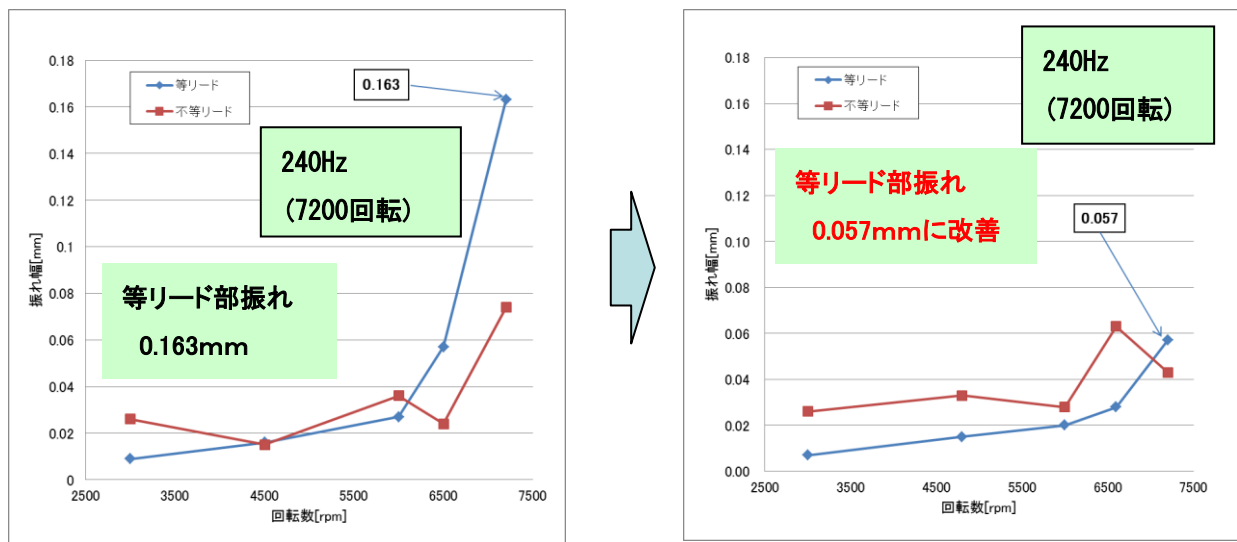


図 2-5 スクリュー軽量化実施内容



スクリュー軽量化前

スクリュー軽量化後

図 2-6 スクリュー振れ幅測定結果

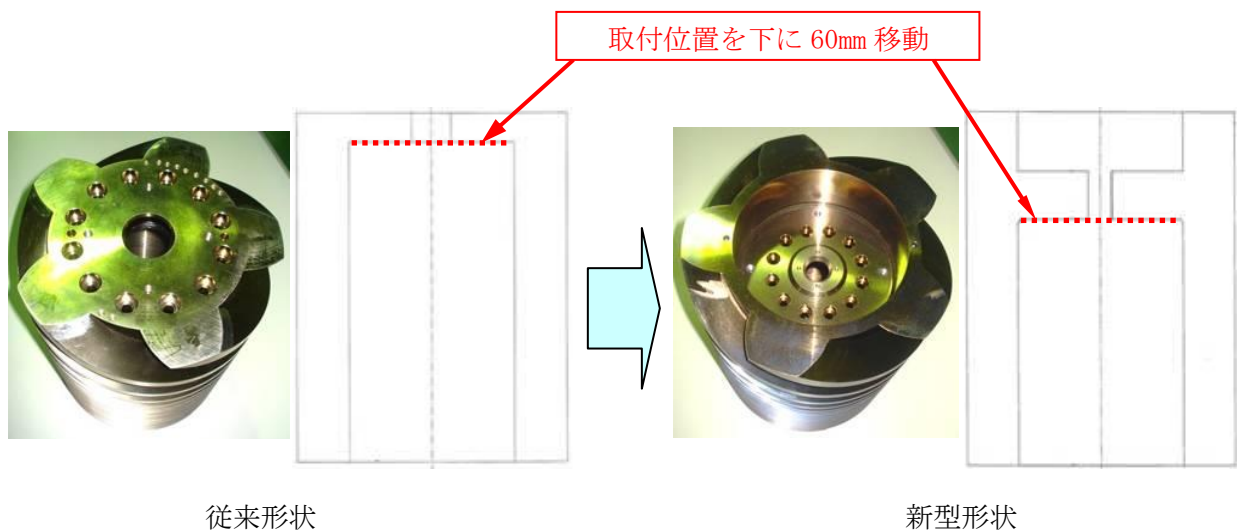


図 2-7 スクリュー取付位置変更概要図

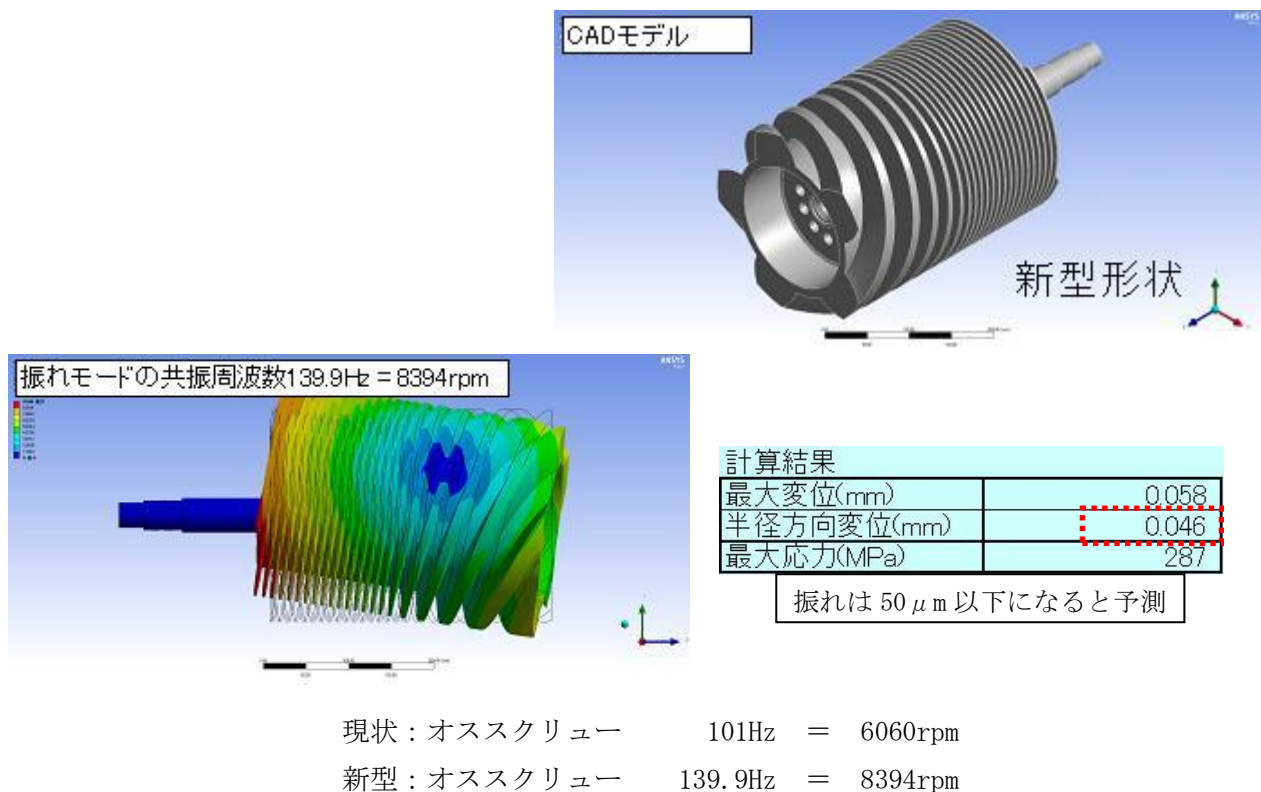


図 2-8 共振点解析結果

2-3 ベアリング部オイル供給機構の開発

2-3-1 目的

本開発対象ポンプの長時間安定稼働には、軸受け部の耐久性が重要な要素となる。ベアリングは高速で回転するスクリューやシャフトなどの荷重を受け、回転時の摩擦を軽減し、高精度な回転を維持することからその役割は極めて大きい。が、温度、はめあい、偏心、潤滑、与圧などにより寿命が大きく変化してしまう。また、スクリューを高速で回転させるモーターの発熱が軸受けの寿命に影響を与える懸念があり、これらの解決のために装置内潤滑・冷却を行うオイルを選定するとともに、遠心力を利用してオイルを吸い上げ、ベアリングやモーターへ供給する遠心オイルポンプを開発した。

2-3-2 実施内容及び結果

本開発ではベアリング及びモーターの発熱量を計算し、その冷却に必要なオイル供給量を試算し、それに必要な油量を移送できる遠心力を利用したオイルポンプの開発に取り組んだ。また、用いるオイルについても比較検討を仕様及び実験を経て決定した。

次に、ポンプ性能に直結するポンプの遠心ノズル部分と供給流路、さらに潤滑、冷却経路の検討を経てポンプ本体の安定潤滑、冷却を確認した。

開発初期と検討後のポンプ本体の温度変化の計測結果を、図 2-9、図 2-10 に示す。

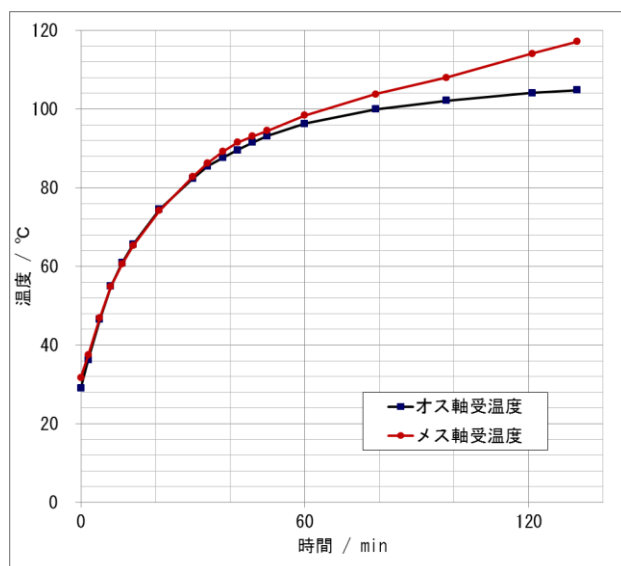


図 2-9 開発初期のポンプ温度変化

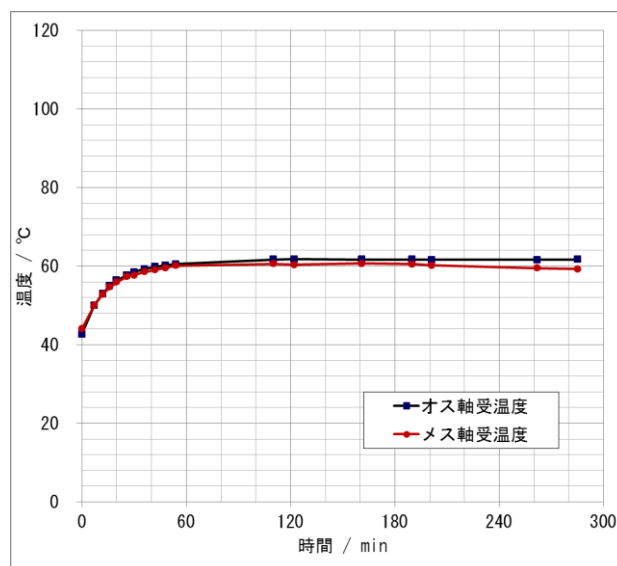


図 2-10 検討後のポンプ温度変化

2-4 ポンプ内接ガス部の腐食対策コーティング開発

2-4-1 目的

本開発ポンプの特徴としては、0.1MPa～0.1Pa まで一定の排気速度を有すること、水素のような軽いガスに対しても排気速度の劣化がなく希釈ガスを極力少なくできるためガス回収が有効ということが挙げられる。しかし、希釈ガスが少なくなることによって Cl_2 、 F_2 、 HBr 等の腐食性ガスが高濃度状態でスクリーに接触し、スクリー腐食や、それに伴うクリアランスの増加により排気速度が低下する可能性がある。また、スクリーへのデポ防止のために 100°C 以上の温度で加熱しているが、この温度も腐食を促進させる重要な要因となっている。このような腐食性を改善するためにはスクリー材質である Fe 系材料表面を耐食性膜でコーティングすることが有効であり、Ni メッキなどの表面処理がされている。しかし、長寿命化には更なる耐食性向上が必要であり Al_2O_3 コーティング技術を開発し、腐食試験によりその性能を確認する。

2-4-2 実施内容及び結果

(1) 実機へのコーティング

実機へのコーティングは、図 2-11 の工程で実施した。
コーティング後のスクリーを図 2-12 示す。

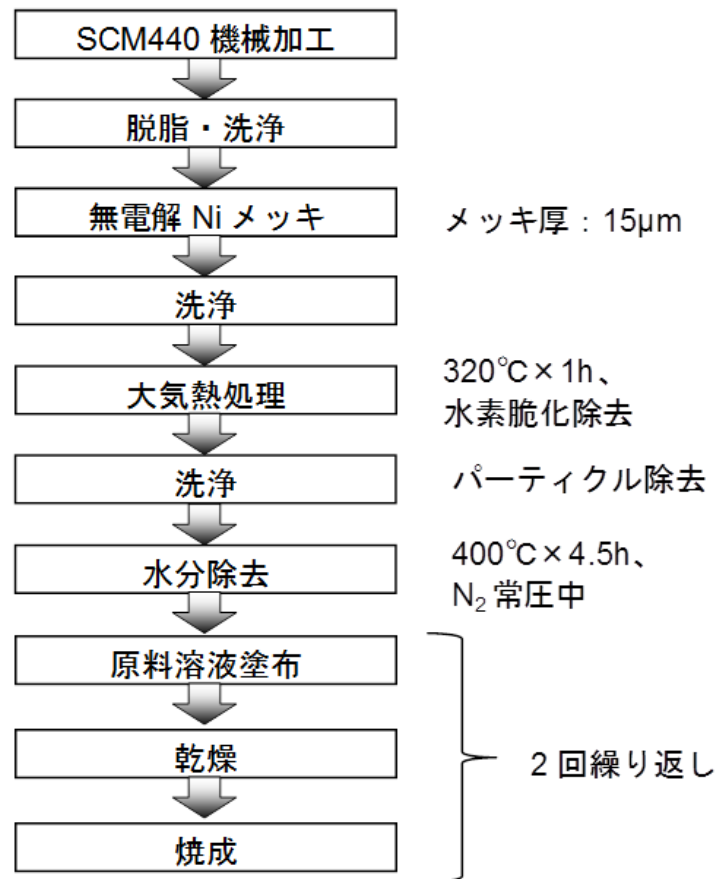


図 2-11 スクリューへのコーティング工程

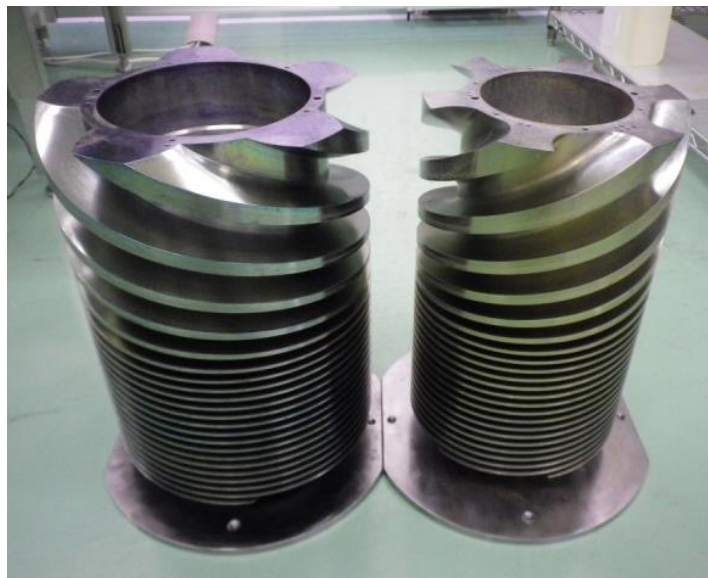


図 2-12 コーティング後のスクリュー

(2) 膜の評価

① 評価サンプルの作製

評価は耐食性と膜厚について行い、そのサンプルは以下の2種類とした。

(a) 膜厚測定 : Si ウエハ上に Al_2O_3 をコーティング

(b) 耐食性試験 : Ni コートを施した SCM440 上に Al_2O_3 をコーティング

サンプル作製にあたり、実機形状での膜の評価に近づけるため、基材を両面テープでスクリューに固定して原料溶液を塗布し、乾燥後に取り外してスクリューと同時焼成して評価することとした。

サンプルの貼付け位置を図 2-13 に示す。

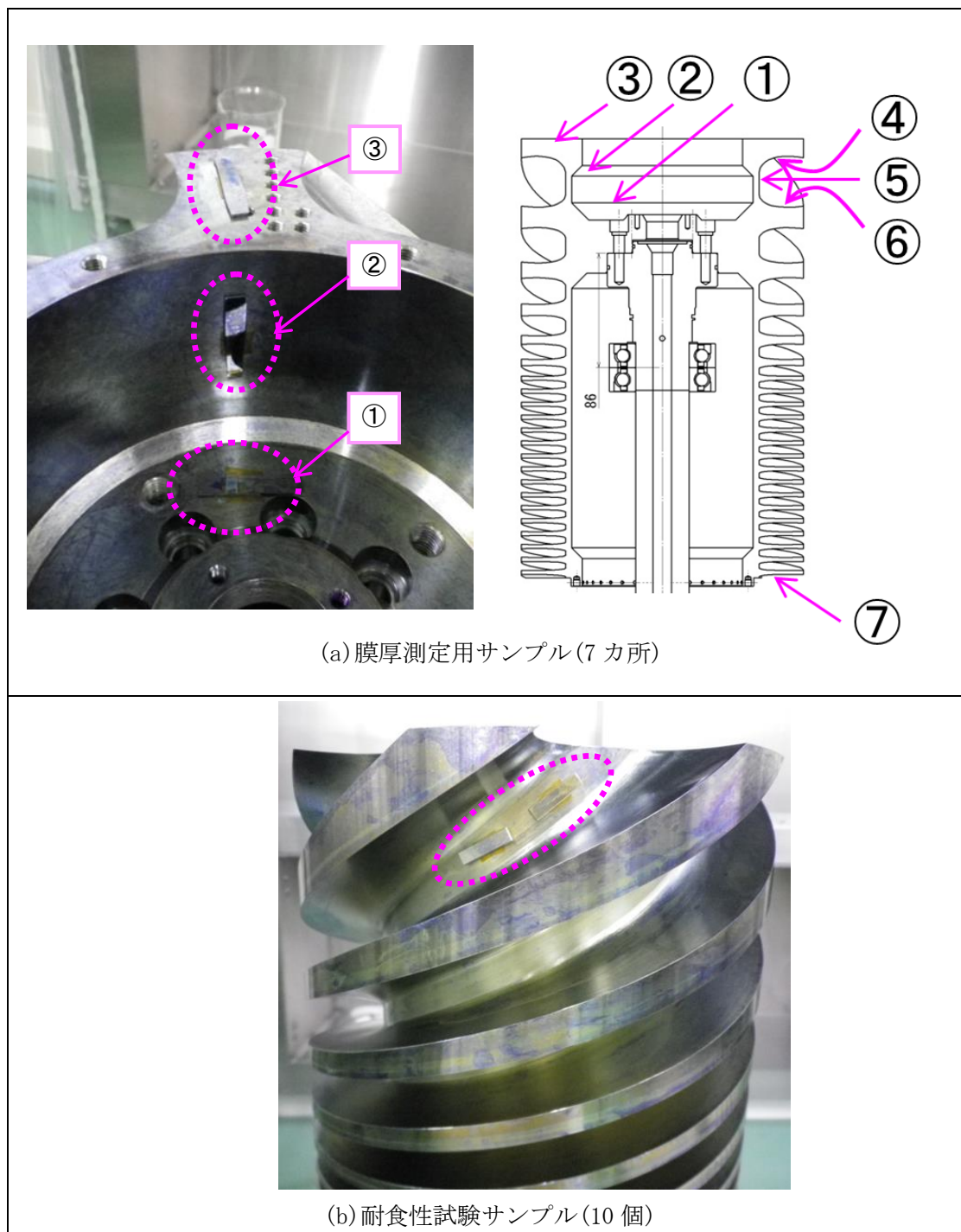
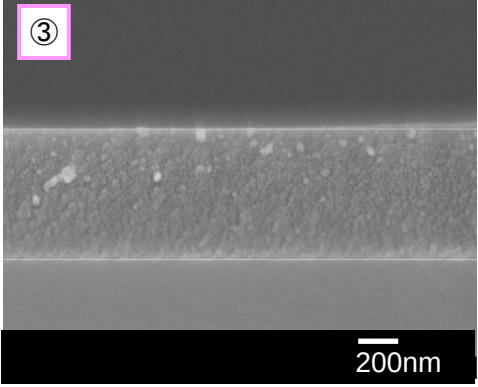
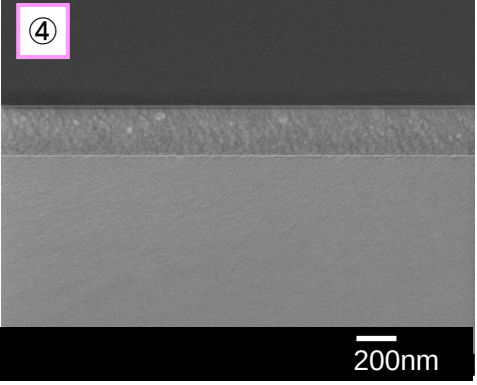
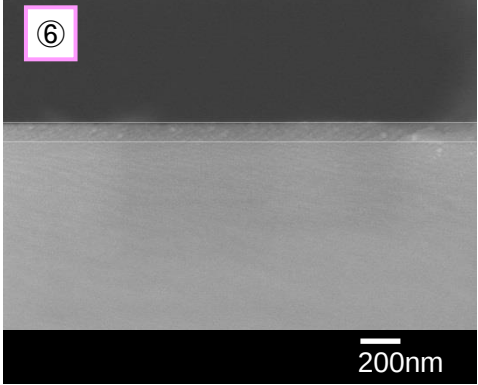


図 2-13 測定用サンプル貼付け位置

②膜厚測定

Si ウェハの断面を SEM 観察して膜厚を測定した。測定結果と代表的な膜断面観察結果を表 2-1 に示す。位置によるバラツキが大きく、今後ロボットの導入等の均一な原料溶液の塗布方法の検討が必要である。

表 2-1 膜厚測定結果

測定位置	膜厚／nm	
①	422	
②	330	
③	660	
④	249	
⑤	465	
⑥	98	
⑦	321	
		

③耐食性試験

耐食性の評価を行うため、表 2-2 に示した加速試験を行い、SEM による微細構造観察と ESCA による深さ方向分析を行った。それぞれの評価結果を図 2-14、図 2-15 に示す。

SEM による微細構造観察結果より、巨視的(1000 倍)な微細構造は封止前後で大きな差異はなく、微視的(50000 倍)な微細構造は腐食性ガスにより僅かに変化していることが分かった。

ESCA による深さ方向分析結果より、F については Al_2O_3 膜と Ni 膜の境界付近で侵入が防止され、Br と Cl については Al_2O_3 膜表面近傍にて侵入が防止されている。

以上の結果より、 Al_2O_3 膜は腐食性ガスに対して十分な耐食性を備えていることが確認できた。

表 2-2 加速試験条件

No.	ガス種×封止時間	共通条件
1	5% F ₂ /N ₂ ×24h	温度：200℃ 圧力：0.3MPa
2	HBr×24h	
3	Cl ₂ ×24h	
4	(5% F ₂ /N ₂ ×24h⇨HBr×24h⇨Cl ₂ ×24h)を2回繰り返し	
備考	想定使用環境：150℃－1.3～130Pa	

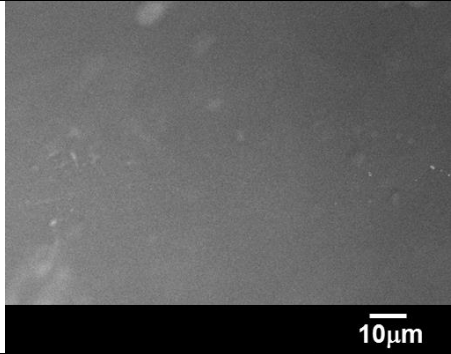
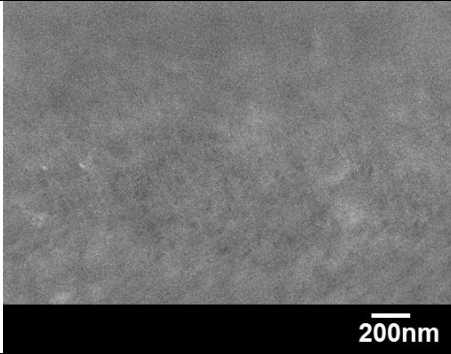
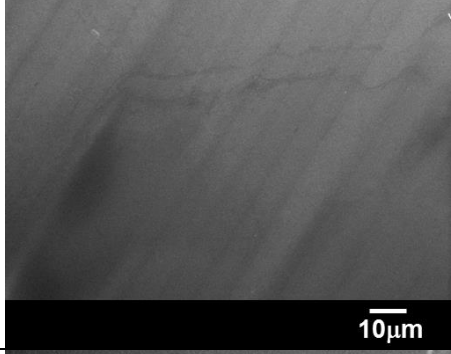
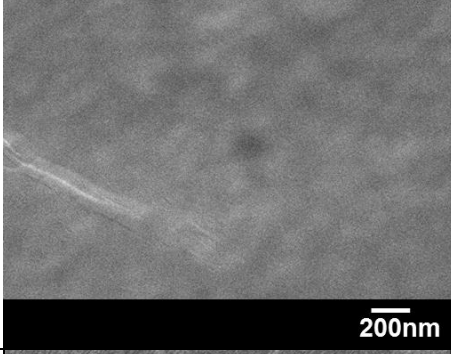
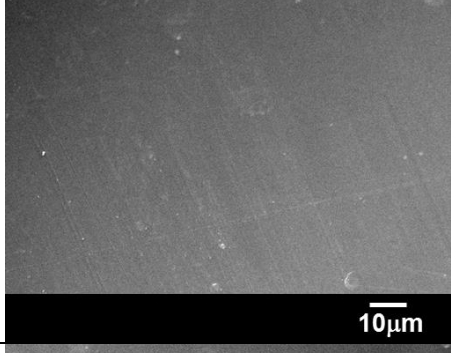
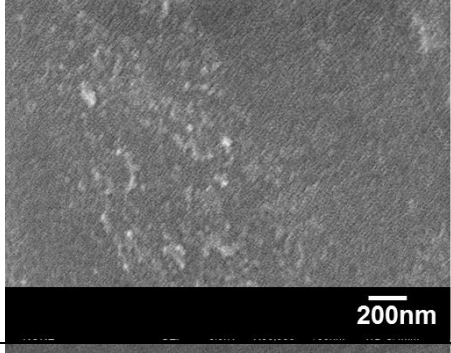
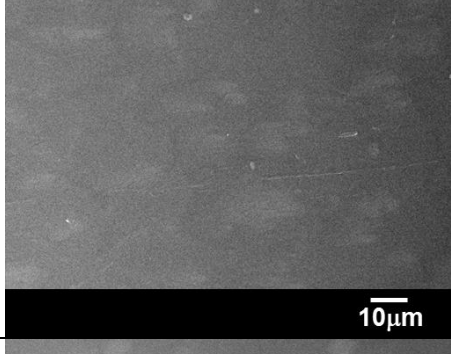
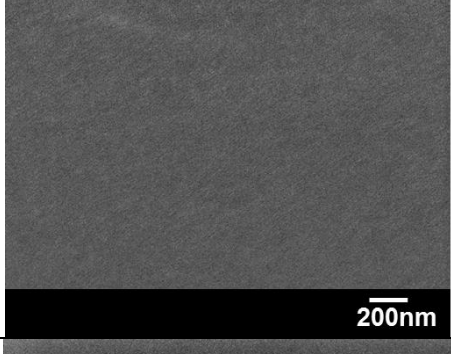
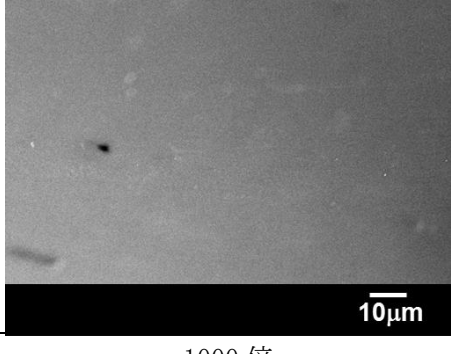
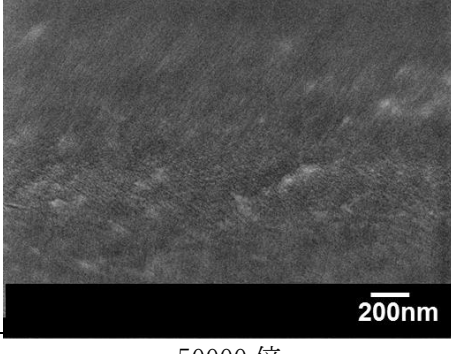
封止前		
5% F ₂ /Ar		
HBr		
Cl ₂		
5% F₂/Ar ↓ HBr ↓ Cl₂ × 2回		
	1000 倍	50000 倍

図 2-14 封止前後の Al₂O₃ 膜微細組織観察結果

封止前		
5% F ₂ /Ar		F : 中間層で侵入停止
HBr		Br : 最表面のみ
Cl ₂		Cl : 最表面のみ
5% F ₂ /Ar ↓ HBr ↓ Cl ₂ × 2回		F : 中間層で侵入停止 Br、Cl : 最表面のみ

図 2-15 封止前後の Al₂O₃ 膜 ESCA 深さ方向分析結果

2-5 20,000L/min 型不等リード不等傾斜角スクリーブスターポンプの性能試験

2-5-1 開発装置概要

これまでの検討、開発結果を盛り込み、改良型の 20,000L/min 型不等リード不等傾斜角スクリーブスターポンプ及びその小型化を図った、500L/min 小型スクリーブバックポンプ開発した。開発装置の概要は以下のとおり。

- ・不等リード不等傾斜角スクリーブにより広い圧力領域で良好な排気特性を持つ
- ・ビルトインモータを使用して小型化、省電力化
(外寸 H737×D940×W634 モーター定格出力 4.5kW)
- ・内部潤滑に遠心オイルポンプを利用

2-5-2 開発装置の性能評価試験方法

本開発で試作した 20,000L/min 型不等リード不等傾斜角スクリーブスターポンプと 500L/min 小型スクリーブバックポンプを接続し、ポンプシステムの排気実験を実施した。試験条件を表 2-3 に、試験の様子を図 2-16 に示す。

表 2-3 試験条件

テストドーム	IS021360-1 規格に適合 ※
ドーム内圧力	真空計によりドーム内の圧力を測定
ガス供給装置	0.005～50L/min までガスのフローコントロール
ポンプ回転数	7200rpm
ポンプ運転時間	7 時間以上経過後測定を開始
N ₂ シールガス流量	2.0L/min
冷却水流量	2.5L/min 以上
冷却水温度	20℃以下

※IS021360-1：2012 真空ポンプの性能測定方法—一般規則—による“流量計を用いる排気速度の測定法”に基づき試験を行った。

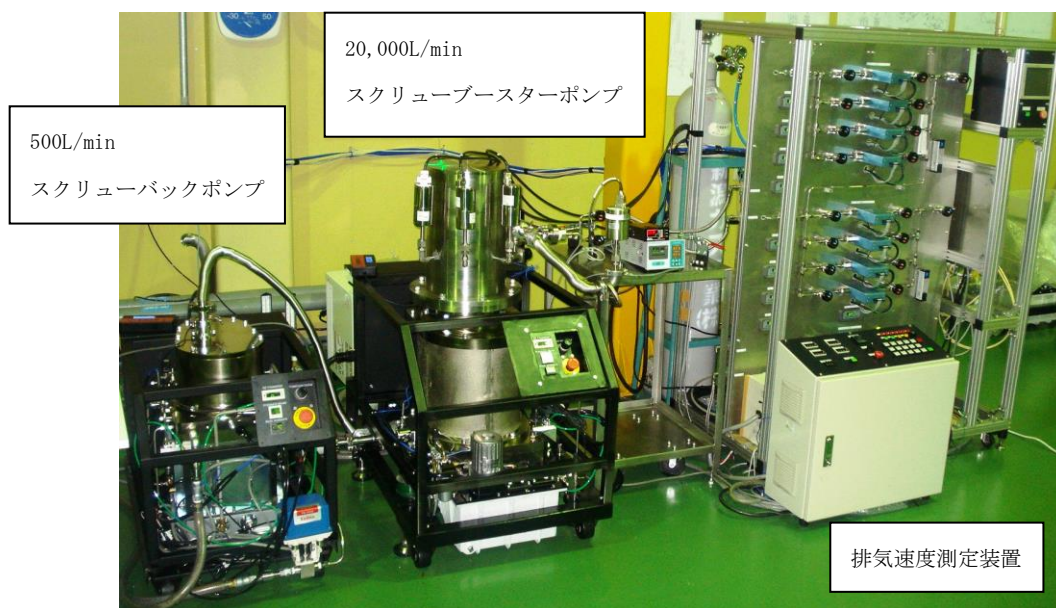


図 2-16 開発装置の性能評価試験の様子

2-5-3 試験結果

開発装置の性能測定を行い、従来機と特性を比較した。圧縮比、消費電力、軸シール部ガス流量等を測定、比較した結果を表 2-4 に示す。また、図 2-17 に従来機と開発機の排気特性測定結果を示す。

開発当初と比較し、N₂ ガス 20L/min 時の排気速度が当初は最高毎分 17,400L に対し改良型装置では毎分 19,081L となった。また、到達圧力は 10⁻⁶Torr と優れた能力を示した。しかし、分子流領域で排気速度の低下が見られ、この点はスクリーンの歯面の最適化で向上が見込めると考える。

表 2-4 従来機と開発機の比較

	到達圧力	排気速度	圧縮比	消費電力	N ₂ シールガス量
	Torr	L/min	P ₂ /P ₁	kW	L/min
従来機	4.50037E-05	17,400	6,333	2.6~2.2	-
開発機	2.25019E-06	19,081	128,571	2.65~1.59	2

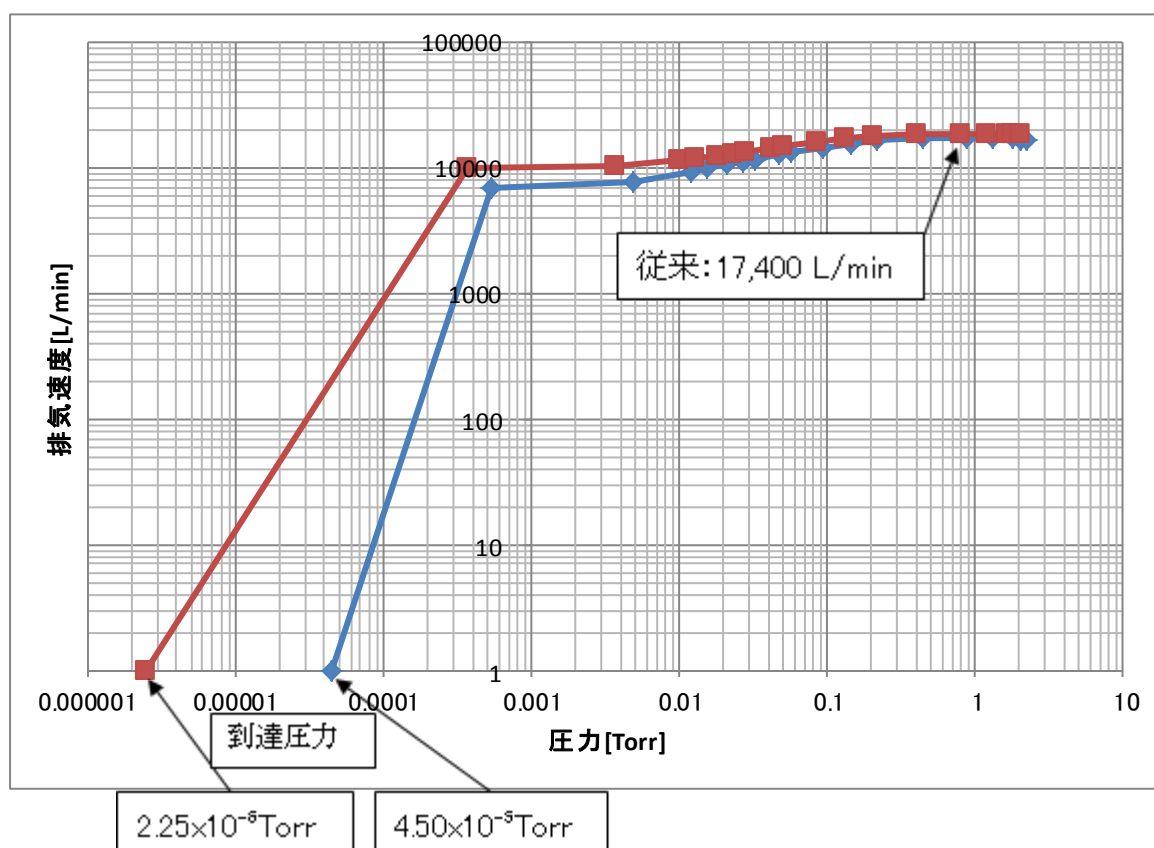


図 2-17 従来品と改良装置の排気特性比較

第3章 全体総括

- ・スクリーウの高速・高精度切削加工を実現する6軸加工機の開発を行った。この開発装置を用いてプログラムや工具の開発を進めることで、事業開始当初の加工時間 20 時間／1 個を 14 時間／1 個に短縮することができた。また、スクリーウ形状の加工精度は、事業開始当初の $\pm 0.05\text{mm}$ から $\pm 0.015\text{mm}$ まで向上した。
- ・ポンプの性能と寿命に大きな影響を与える軸受けの回転精度を向上させるため、スクリーウの軽量化や軸受け部の剛性向上等の対策を施した。これにより、極めて高精度なスクリーウ回転が可能となり、高いポンプ性能を実現した。
- ・ポンプの排気ガスには Cl_2 , F_2 , HBr 等の腐食ガスが想定され、この腐食防止に有効な Al_2O_3 コーティングを開発した。このコーティングを実際のスクリーウに施すと共に、耐食性能を確認した。
- ・スクリーウの軸受け部の潤滑及びモーターの冷却を行うオイルを選定するとともに、遠心力を利用してオイルを移送する遠心オイルポンプを開発した。また、軸受け部の潤滑とモーターの冷却を安定して行うオイル供給システムを開発した。
- ・3年間の開発要素を採り入れた 20,000L/min 型不等リード不等傾斜角スクリーウブースターポンプ及び 500L/min 小型スクリーウバックポンプを製作し、性能試験、ランニング試験を開始した。ポンプ性能は目標に対して以下の性能であることを確認した。
 - ・圧縮比 : 30,000 以上 (目標値 30,000 以上)
 - ・排気速度 : 1,9000L/min 以上 (目標値 20,000L/min 以上)
 - ・消費電力 : 1.5kW (目標値 2.0kW 以下)
 - ・到達圧力 : $5 \times 10^{-4}\text{Pa}$

〈今後の事業化展開について〉

本開発で取り組んだ不等リード不等傾斜角スクリーウブースターポンプの事業化に向けて、今後、展示会等を通じて積極的な PR に取り組み、既存真空ポンプの製造、さらに本事業成果であるスクリーウブースターポンプの製造を目指す。

また、本事業で得られた切削加工技術を活用できるスクリーウ形状や5軸加工品の受注が拡大していることから、今後さらにこの技術の高度化を進めて関連部品の受注獲得を目指す。