

【公開版】

令和2年度
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業
戦略的基盤技術高度化支援事業

「小規模ごみ焼却発電技術を普及させる蒸気ロータリー発電エンジンの
研究開発」

研究開発成果等報告書

令和3年5月

担当局 近畿経済産業局
補助事業者 公立大学法人大阪

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) 研究開発の背景	
	(2) 研究目的及び目標	
1-2	研究体制	5
1-3	成果概要	8
1-4	当該研究開発の連絡窓口	12

第2章 本論

2-1	蒸気ロータリーエンジンの高出力高性能化に係る技術	
【1-1】	180℃蒸気に対応する耐熱給気バルブ技術	13
【1-2】	軸受部潤滑封止シールの低摩擦化による出力向上	14
【1-3】	蒸気制御バルブ（CV）用軸受部分の長寿命化	15
2-2	水蒸気環境下の高耐久トライボロジー技術	
【2-1】	実機内の各部品状態を可視化する計測技術と 再現環境の摺動試験機の開発	18
【2-2】	新金属素材を用いた蒸気ロータリーエンジン用の アペックスシール素材の開発	19
【2-3】	蒸気ロータリー発電エンジンハウジングに適合したクロムめっき膜の開発	27
2-3	量産用共通設計エンジンと性能カスタム技術	
【3-1】	高強度必要部の 素材変更による低コスト軽量化技術	34
【3-2】	シングルローターエンジン用の低振動維持バルンサー技術の開発	35
【3-3】	バルブ開口部の形状・断面積・タイミング改良による 出力リミッターの開発	35

最終章 全体総括

1	研究成果	37
2	研究開発後の課題と事業化展開	39

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) 研究開発の背景

多くの中小事業者共通の経営課題として、産業廃棄物の処理費用は経営面に対しての課題であり、焼却処分に要するエネルギーと発生する CO₂ も今後環境負荷として対外的には評価されていくことになる。多くの製造業にとって、環境評価指数として製造過程だけでなく、廃棄物処理時においても消費した熱（燃料）・電力の削減・低コスト化・高効率化が求められている。特に食品工業や農業・畜産業など生物由来の廃棄物処理のため、自治体や業者に依頼する処理費も各業界にとっては手痛い出費となっている。

(2) 研究目的及び目標

廃棄物処理時に要する追加の化石燃料を低減させ、焼却熱から発電した電力を用いたファン、搬送経路用電力による地産地消化で、より環境負荷を低減した焼却システムとエネルギー効率の向上が小規模でも可能な蒸気発電ユニットの高効率化を目指した。

本事業では、小規模分散型のロータリー型蒸気機関の高性能化・低コスト化・普及に必要な技術対応として、下記の課題に取り組んだ。

- ・低温低圧水蒸気を対象としたエンジンの高性能・高出力化
- ・消耗部品（アパックスシール等）の長寿命化
- ・エンジン本体部の低コスト化と軽量化

【1. 蒸気ロータリーエンジンの高出力高性能化に係る技術】

【1-1】180℃蒸気に対応する耐熱給気バルブ技術

高出力化・高性能化を目指し急速給気を可能とする大口径バルブを開発する。

給気気温度 180℃、出力 15.0kW を目指す。

【1-2】軸受部潤滑封止シールの低摩擦化による出力向上

軸受部と給排油口に搭載している潤滑油封止部の摩擦抵抗低減化により、動摩擦によるロスを現状に比べ60%低減し、機械効率60%、発電効率 $\eta=8\%$ 2500RPM を目指す。

【1-3】 蒸気制御バルブ（CV）用軸受部分の長寿命化

液状態の潤滑油では圧力がかかるとすぐ漏洩してしまうため、ある程度の粘性をもったグリスタイプで定期補給する形を中心とした軸受部の耐摩耗長寿命化を検討する。

軸受寿命 4000h を目指す。

【2. 水蒸気環境下の高耐久トライボロジー技術】

【2-1】 実機内の各部品状態を可視化する計測技術と再現環境の摺動試験装置の開発

蒸気ロータリー発電エンジンの稼働中の内部条件を探るため、ローター内の温度・圧力・湿度などの信号を取れる計測用技術を開発する。特に最も高速かつ高圧で力のかかるアペックスシールの耐摩耗性に必要な温度領域と圧力を調査する。

【2-2】 新金属素材を用いた蒸気ロータリーエンジン用のアペックスシール素材の開発

アペックスシールは、ロータリーエンジンの作動室の気密を保持するガスシールで、三角形のローターの各頂点に設置されている。

（図 1-1）

アペックスシールはローターのシール溝の底部に設けたスプリングによって、シールは常に摺動面に押し付けられるため、耐摩耗性や摺動性が要求される。

自動車用のロータリーエンジンでは、先端部を電子ビームによるチル硬化処理された鋳鉄製

（アシキュラー鋳鉄）のアペックスシールが用いられているが、本事業で開発する水蒸気を用いたロータリーエンジンでは、腐食による損傷が激しく従来の鉄系素材のアペックスシールは使用できない。

そこで、本事業では、Ni 基金属間化合物合金を主体に Co 基金属間化合物合金をアペックスシール素材として適用することを試み、合金組成の選定・最適化を行う。

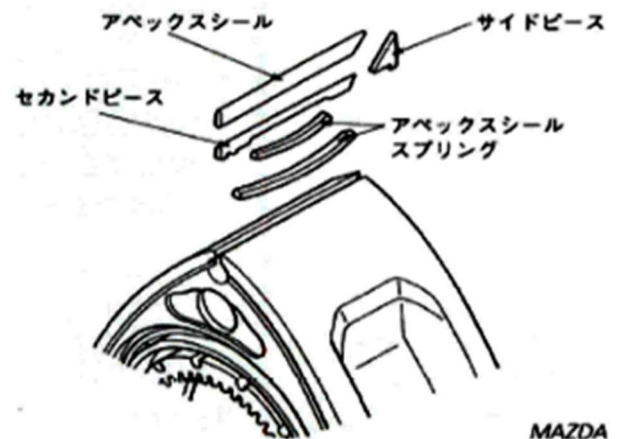


図 1-1 アペックスシール
（出典：<https://www.weblio.jp/>）

【公開版】

アペックスシール素材開発にあたって、すべての合金を蒸気ロータリー発電エンジン実機で検証するのは現実的に困難である。そこで、実機検証以外でもある程度の選定基準となるよう、サンプル評価試験方法を検討するとともに、実機試験評価を行う。

【2-3】 蒸気ロータリー発電エンジンハウジングに適合したクロムめっき膜の開発

蒸気ロータリー発電エンジンハウジングの表面は、高速で回転するアペックスシールと接触するため、低摩擦で、密着性と耐食性を有し、耐熱性がある表面処理が必要である。本テーマは、ロータリーエンジンのアルミニウム合金製ハウジングに適用できる表面処理を提供するため、クロムめっき皮膜の最適化およびハイブリッド型クロムめっきの開発として、以下について取り組む。

1) 複雑形状ハウジングへのクロムめっきの最適化

ハウジング製造では軽量化のためアルミニウム合金が検討された。アルミニウム合金は活性金属であり、表面が不動態化されるため、めっき皮膜の密着性を得ることは極めて難しい。そこで粗面化による前処理を用いた直接めっき法を検討しクロムめっきの密着性を確保する。

複雑形状の部材へのクロムめっきでは、電流分布の影響を大きく受け、めっき膜厚の均一性が極めて悪い。このため、一般には想定の1.5倍程度の厚めっきを施し、後加工で所定の膜厚へ仕上げる必要があり、生産性が悪くコスト高になっている。ロータリーエンジンハウジングでは、コスト面、皮膜の物性などの観点から、後加工を少なくすることが望まれている。そのためには、クロムめっき時に、品物上での膜厚の分布をできるだけ均一化する必要がある。本事業では、均一性を高めた有機スルホン酸浴の開発ならびに陽極・電極シグの改良の両面から、めっき皮膜の膜厚均一化を進め、後加工の低減に貢献を目指す。

2) ハイブリッド型クロムめっき膜の開発

高圧・高温の水蒸気雰囲気では、従来のエンジンに使われる潤滑油は浮いて洗い流されてしまうため、低摩擦を維持することは困難である。更に、高圧・高温の水蒸気と接触するため、ハウジング素材とクロムめっき間の異種金属腐食の抑制も必要である。本事業で、オテック社技術であるテフ・ロック技術を発展させ、有機フッ素系あるいは SiO_2 無機系のコーティング剤をクロムめっき皮膜内のクラックへ浸透させたハイブリッド型クロムめっき膜を開発し、耐食性・耐熱性・低摩擦を有する表面処理としてハウジングへの適用を検討する。

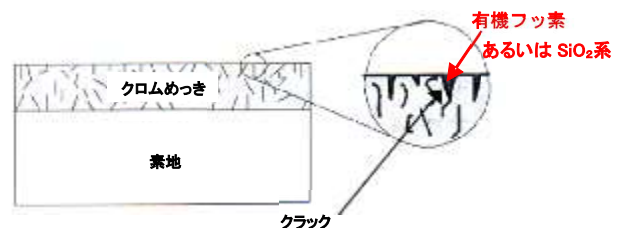


図 1-2 ハイブリッド型クロムめっき

【3. 量産用共通設計エンジンと性能カスタム技術】

【3-1】 シングルローターエンジン用の低振動維持バルンサー技術の開発

自動車用ロータリーエンジンはもともと1ローターしか無かったが、トルクの釣り合いを取れるため2ローターが主流となった。しかし、本エンジンは1ローターで2つのサイクルを構成するため、2ローターである必要はないものの、偏芯重量を打ち消さなければならない。そのため大きいバランスウェイトが必要である。

10kW 発電時の振動速度 0.7mm/s-rms 以下の実現を目指す。

【3-2】 熱歪みと防錆効果の高い 軽量蒸気エンジンの各部品の軽量化・低コスト素材化技術

現在の蒸気ロータリー発電エンジン本体重量において2/3はエンジンハウジング部分が占めている。表面硬度が必要とされるのは摺動面だけであり、組立精度が維持できるのであればより安価なアルミ系素材が使用できる可能性がある。アルミ自体は表面硬度が低く耐摩耗性がないため、【2-3】で行う硬質クロムめっきの剥離対策技術と蒸気稼働の繰り返しの熱変形に強い耐熱構造を開発し軽量化を進め水蒸気エンジンとして必要十分な成膜と構造を確立する。

エンジン本体部重量 39kg を目指す。

【3-3】 バルブ開口部の形状・断面積・タイミング改良による圧損解析と出力リミッターの開発

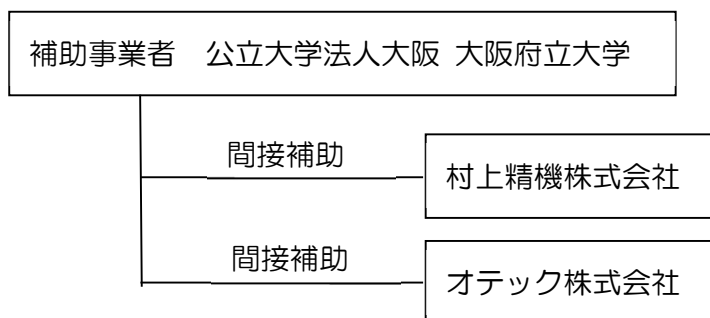
一般的な出力制限装置として蒸気流量計や電動蒸気弁を連動させた電子制御が必要であり、装置だけでもエンジン本体価格のうち1/4近くを占めるため割高である。

また、これらの外部機器のエラーが発生すると発電機側コイルの発火などの原因にもなってしまう。熱源側が大きく変動しても一定流量以上回転・出力できない給気制御バルブの出力リミッター機能をバルブ開口部で実現する。

処理量が小さい小規模焼却施設の熱を活用できる蒸気ロータリー発電エンジンは小ささ故に耐熱技術とトライボロジー技術の高度化が必要である。そのため、耐久性と高性能化、高出力化をねらい、イニシャルコストおよびメンテナンスコストを低減する技術開発を行う。

1-2 研究体制

研究組織



総括研究代表者（PL）
 所属：村上精機株式会社
 役職：製造部 技術開発課
 氏名：仲 崇志

副総括研究代表者（SL）
 所属：公立大学法人大阪 大阪府立大学
 役職：大学院工学研究科 教授
 氏名：金野 泰幸

管理体制

【補助事業者】公立大学法人大阪 大阪府立大学

管理員

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
中嶋 淳	研究推進本部 研究推進課 課長	事業管理
日高 伴紀	研究推進本部 研究推進課 課長代理	事業管理
笹谷 幸裕	研究推進本部 研究推進課 （平成30年8月～平成31年3月）	事業管理
大岡 明裕	研究推進本部 研究推進課	事業管理
荒木 輝男	研究推進本部 研究推進課 （平成31年4月～令和3年3月）	事業管理

研究員

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
金野 泰幸	工学研究科・教授	【2-2】

【公開版】

補助員

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
辰巳 真紀	研究推進本部 研究推進課 （平成30年8月～平成31年3月）	事業管理
松本 環	研究推進本部 研究推進課 （平成30年8月～平成31年3月）	事業管理
藤川 千純	研究推進本部 研究推進課 （平成31年4月～令和3年3月）	事業管理
前島 加奈	工学研究科 （平成30年8月～令和2年3月）	【2-2】
西山 慶太郎	工学研究科 （令和2年4月～令和3年3月）	【2-2】

【間接補助事業者】 村上精機株式会社

研究員

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
仲 崇志	製造部 技術開発課	【1】【2-1】【2-2】【3】
村上 周三	代表取締役	【3】
池永 伸郎	統括部長	【3】

補助員

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
吉田 憲司	製造部 工場長 （平成30年8月～令和2年3月）	【3-2】
平川敏之	製造部 工場長 （令和2年4月～令和3年3月）	【1-1】【3-2】
グェンドックヒェン	製造部 旋盤課 （平成30年8月～令和2年3月）	【1-1】【3-2】
久長 剛史	製造部 フライス課 （平成30年8月～令和2年3月）	【1-1】【3-2】
グェンドックタン	製造部 電気加工課	【2-1】【2-2】【3-2】
指野 雅昭	製造部 研磨課	【1-1】【1-3】【3-2】
志津 国夫	製造部 品質保証課 （平成30年8月～令和2年3月）	【3】
永井 鉄平	製造部 品質保証課 （平成30年8月～令和2年3月）	【3-2】

【公開版】

【間接補助事業者】 オテック株式会社

研究員

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
森河 務	技術開発部 顧問	【2-3】
福島 俊行	製造部 課長	【2-3】
森本 泰行	技術開発部 係長代理	【2-3】
楠木 真一	技術開発部 主任 (令和2年4月～令和3年3月)	【2-3】
原野 知己	技術開発部 主任 (令和2年4月～令和3年3月)	【2-3】

【アドバイザー】

氏名	所属・役職
高杉 隆幸	公立大学法人大阪 大阪府立大学 名誉教授
千星 聡	国立大学法人東北大学 金属材料研究所 新素材共同研究開発センター 准教授
林 彰平	地方独立行政法人大阪産業技術研究所 金属表面処理研究部 研究員
佃 市三	公立大学法人大阪 大阪府立大学 客員研究員

1-3 成果概要

【1. 蒸気ロータリーエンジンの高出力高性能化に係る技術】

【1-1】 180℃蒸気に対応する耐熱給気バルブ技術

高出力化・高性能化を目指し急速給気を可能とする大口径バルブを開発したが、最高給気温度約 175℃以上ではバルブディスクの熱膨張で摩擦の増加が起き、最大出力は小口径型の 13.0kW までの確認に留まった。これらの実験の中で得た課題に対応し構造を大きく見直した 180℃給気対応型の新型耐熱バルブ部品の設計・試作が完了した。試運転の結果、蒸気シール低摩擦化の他、蒸気の偏流防止等の効果でバルブ・ローター安定性が向上し、静音化などの効果も確認できた。クリアランス調整と、流路形状とタイミング調整により高出力化の段階にあり、超小型での耐熱給気バルブ技術の完成の目途が付いた。

【1-2】 軸受部潤滑封止シールの低摩擦化による出力向上

低摩擦化運転のテストにより、機械効率 60%の瞬間値を確認した。また軸受潤滑にオイルとグリスを使い分けることで、排気へのオイル漏洩量≒0でも約 2500RPM の安定稼働に成功した。

発電効率 η は、実験値で 6.47%まで確認したが、現状構造の排気蒸気リーク（オーバーラップ）損失を定量的に評価したことで、給気開始直後から生じるオーバーラップを低減したハウジング改良も行ったことで、高性能化を実現した。

【1-3】 蒸気制御バルブ（CV）用軸受部分の長寿命化

バルブオイルシール搭載型 CV を開発し軸受を耐熱グリスで常時潤滑できるタイプを開発した。一方でオイルシール周径・摺速と封止圧力による摩擦損失要素の実験値を元に、一般機械と同様の軸受外部化タイプの設計が完了した。新型耐熱構造では 8000h 程度の軸受寿命を確保した構造を実現した。

【2. 水蒸気環境下の高耐久トライボロジー技術】

【2-1】 実機内の各部品状態を可視化する計測技術と再現環境の摺動試験装置の開発

「蒸気を不使用で、温度、圧力、電位、応力分布を再現するモーターテスト装置の構築」

【公開版】

を目指したが、モーター回転とスプリングによる押付圧力ではアペックスシールが蒸気稼働に比べ 1/100 以下しか摩耗せず、開発速度を上げられる開発にはならないことがわかった。

【2-2】新金属素材を用いた蒸気ロータリーエンジン用のアペックスシール素材の開発

Ni 基金属間化合物合金は高温での強度・硬さ特性に優れるとともに、Ni 合金並みの耐食性を兼備する大阪府立大学で開発された新金属素材で、大別すると Ni-Al-V 系の Ni 基二重複相金属間化合物合金（Ni 基超々合金）と、Ni-Si-Ti 系の $Ni_3(Si,Ti)$ 相をベースとする NST 合金の二種類が存在する。高温強度は Ni 基超々合金が秀逸であるが、NST 合金は室温延性を有し、強度-延性のバランスに優れるとともに、耐食・耐酸化性が良好な合金である。他方、Co 基金属間化合物合金として注目した Co-Ti 系合金 (Co_3Ti) も $Ni_3(Si,Ti)$ と同様、強度と延性のバランスに優れた金属間化合物で、加工硬化が大きく、耐食性にも優れた合金である。

アペックスシールの寿命試験は実機の水蒸気稼働ロータリーエンジン内に装着して行った。表 1-1 は自動車エンジン用のアシキュラー鋳鉄製と NST 合金製のアペックスシールの実機回転試験結果である。アシキュラー鋳鉄製に比べて NST-5Ta 合金製のアペックスシールは 2.6 倍の高寿命を示している。また、試験条件が異なるため（エンジン内に油が流入）、単純な比較は出来ないが、NST-5Ta の寿命を基準にすると、NST-2Nb 合金ではさらに高寿命の結果（アシキュラー鋳鉄の 500 h に対して NST-2Nb では 1800 h）が得られている。

表 1-1 実機アペックスシール試験結果

素材	アシキュラー 鋳鉄	NST-5Ta	NST-5Ta	NST-2Nb①	NST-2Nb②
試験日	18.5		19.6		
運転時間 hr			18.3489		
磨耗量 μm			28.28571	21.57143	21.14286
磨耗速度 $\mu\text{m/hr}$	6.08	3.08	1.54	1.18	1.15
磨耗速度換算値			3.08	2.34	
予想寿命 hr	500	1,300	1,300	1,800	
試験条件等備考			試験中油漏れ発生、ベンチマークNST-5Taで換算		

【公開版】

表 1-2 は同一条件で NAV-TCCN 合金、NST-2Nb 合金、NST-5Ta 合金を同一条件で同じ走行距離を摺動させたときの試験結果である。NST-5Ta に比べて、NAV-TCCN と NST-2Nb は摩耗速度がおおよそ 30%以上低くなっており、寿命特性が向上していることがわかる。

表 1-2 同一条件下での実機アパックスシール試験結果

試験時間：20.868 h	NAV-TCCN	NST-2Nb	NST-5Ta
摩耗量 (mm)	0.0865	0.0821	0.1250
摩耗速度 (mm/h)	4.149	3.936	5.990
NST-5Ta 比	-30.8%	-35%	—

さらに、NST-5Ta、NST-2Nb 合金と同一条件下で NST-4Mo 合金の実機試験を行った結果（表 1-3）、摩耗量から推定した寿命ではあるが、NST-4Mo 合金でアシキュラー鋳鉄の 500 h に対して 2500 h の 5 倍もの高寿命が達成させることがわかった。NST-4Mo の 2500 h はサポイン当初のベンチマークである NST-5Ta の 1300 h と比べてもおおよそ 2 倍の値であり、蒸気稼働下での実機ロータリーエンジンでも使用可能なレベルのアパックスシールの開発ができた。

表 1-3 アパックスシールの実機回転試験による摩耗量から判断した推定寿命

	NST-5Ta	NST-2Nb	NST-4Mo
一定時間の摩耗量 (μm)	12.714	10.142	6.714
NST-5Taとの相対摩耗比 (%)	100	79.7	52.8
推定寿命 (h)	1300	1800	2500

アシキュラー鋳鉄の5倍、NST-5Taと比べても2倍の高寿命化

【2-3】蒸気ロータリー発電エンジンハウジングに適合したクロムめっき膜の開発

蒸気ロータリー発電エンジンハウジングのアルミ化を実現するため、高速で回転するアパックスシールと接するハウジングに潤滑性がよく、耐摩耗性に優れ、耐食性に優れた表面処理が必要である。本事業では、ハイブリッド膜をロータリーエンジンのシリンダに適合できるクロムめっき膜の開発として、以下について取り組んだ。

【公開版】

1) 複雑形状ハウジングへのクロムめっきの最適化

アルミニウム素材へクロムめっき前処理法について検討し、曲げ試験<テスト用アルミニウム合金板>で剥がれが認められないこと、ハウジングでは常温と 180℃程度間での熱サイクルで剥離しないめっき皮膜の密着性があることを確認し、その前処理法を確立した。

有機スルホン酸浴としては、液組成、および浴温、めっき電流密度についての検討を進め、外観光沢、平滑性、めっき析出速度の高速化、および工業的に安定製造ができる条件を確立した。

ハウジングへの膜厚均一性については、めっき用治具を工夫することでハウジング有効面内での膜厚比 20%以内 (100 μ m めっき時) を目指し検討を進めた。膜厚比はハウジング内のフラット部では目標を達成できたが、穴まわり部は今後改善の余地を残した。

2) ハイブリッド型クロムめっき膜の開発

有機スルホン酸浴からのクロムめっき技術をベースとし、皮膜のクラックを拡大し、それにケイ素化合物を浸透・硬化させることで、めっき金属と無機物のハイブリッド化と必要とされる物性の確保に取り組んだ。ハイブリッド型クロムめっきの形成条件を最適化することで、アルミニウム合金素地への適用時において、キャス試験 32 時間以上の耐食性、アペックスシール材との摩擦係数 0.2 以下、220℃における耐熱性（はく離や変色などの異常がない）を達成した。

【3. 量産用共通設計エンジンと性能カスタム技術】

【3-1】シングルローターエンジン用の低振動維持バルンサー技術の開発

アンバランスモーメントを相殺するカウンターウェイトの微調整機構として、リアーのみにつけていたフライホイール型バルンサーをフロント側にも追加し、より微調整を可能な構造とした。その結果、現状値 1.02~1.72mm/s-rms (良) まで確認できた。

【3-2】熱歪みと防錆効果の高い 軽量蒸気エンジンの各部品の軽量化・低コスト素材化技術

エンジン本体部重量 39kg の軽量化は、全ハウジングをアルミ化したことで低振動化のためフライホイール型バルンサーに変更したため目標を 4kg 弱オーバーしている。目標達成には、強度を維持した肉抜き構造化などの必要があることが判明した。

【公開版】

【3-3】バルブ開口部の形状・断面積・タイミング改良による圧損解析と出力リミッターの開発
タービンと異なる原理のため熱源側が大きく変動しても一定流量以上回転・出力できない給気制御バルブの出力リミッター機能を確認した。（断面積形状・タイミング等によって異なる）高価な蒸気流量制御弁およびフィードバック制御等の安全装置不要化に成功した。
騒音値は、現状 74dB（@10kW カバーなし）である。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

公立大学法人大阪 大阪府立大学

研究推進本部 研究推進課 課長代理 日高 伴紀

TEL：072-252-6189

FAX：072-254-6529

E-mail：thidaka@ao.osakafu-u.ac.jp

村上精機株式会社

製造部 技術開発課 仲 崇志

TEL：072-232-5693

FAX：072-233-3168

E-mail：naka@murakamiseiki.co.jp

第2章 本論

2-1. 蒸気ロータリーエンジンの高出力高性能化に係る技術

【1-1】180℃蒸気に対応する耐熱給気バルブ技術 : 村上精機

- ・大型化水蒸気給気制御バルブ（CV）部の大型化に伴う諸問題と根本的原因の解消

これまでのCV部は円筒型バルブが回転する蒸気配管的役割で、低コストながらも効果

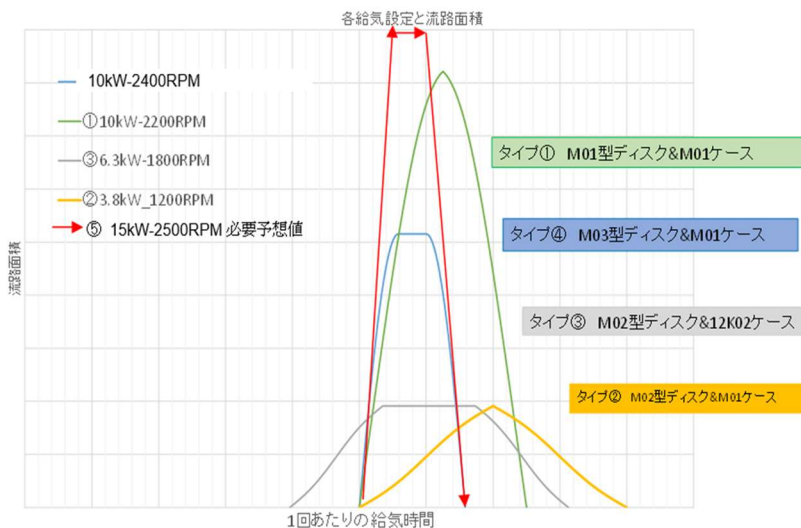


図 2-1-1 急速給気に要する流路面積と各バルブモデル


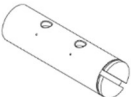
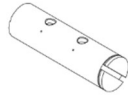
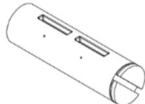
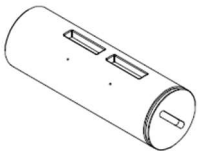
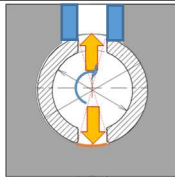
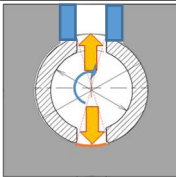
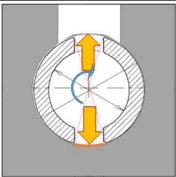
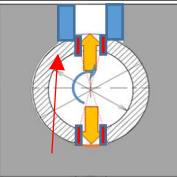
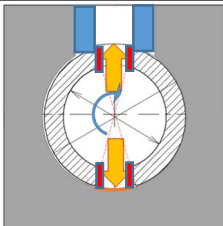
的に蒸気の給気量・タイミングを制御できる方式を採っていた。M01型の最大出力は13.0kWまで取れるものの、熱源ボイラー側の蒸気圧力を高めても、給気バルブ内の圧力が高温蒸気を維持できていないことがネックとなっていた。その中で流路断面積の不足による急速給気量の限界と高膨張比の両立、軸受部の潤滑

機構のスペース的な問題があったため、令和元年度、オイルシールでCV軸受を封止し、高速回転高出力化のための大型化を目指したM20型バルブの試作開発を行った。その結果、最高回転数は約2500RPMまで上昇させることができた。

しかしながら流路面積を維持・拡大させるために大型化した M20 型 CV ではオイルシール部の摩擦損失が想定以上に増加し、出力トルクの低下を招いた。

特にオイルシール部の段数増設と口径増大によるマイナス面が大きく、オイルシール自体の寿命にもよくないという二律背反的な課題を残していた。膨張比の大きい設定バルブでは、オイルシールの摩擦トルク以上にメリットが得られず、M01～M03 バルブと同等かそれ以下の出力性能となってしまった。

表2-1-1 各バルブの実験条件

タイプ	① M01	② M02	③ M02A	④ M03	M20
	標準 現行モデル	少流量	少流量ディスク 給気区間確保型	M03 型	M20 型
パラメータ	Lv3&3	Lv3mini&3	Lv3mini&6	Lv1.5&3	Lv1.5&3
バルブ ディスク 外観					
流路面積	標準：100%	25%	25%	66%	88%&133%
内部構造					
改良点	青枠部 ケース窓幅を狭く	ディスク開口 面積を狭めた	開口面積と給気時 間の改善	赤枠部 ディスク幅を狭く	M01,M03 型の構造 のまま約 30%拡大

そこで、オイルシール部の周速を減らすため「オイルシール部のみ小口径化」「軸受の低コスト化（市販量産品対応化）と潤滑保持」としながらも「高速回転・急速給気を可能とする流路断面積モデル」を兼ね備えることをコンセプトとした M30 型 CV のモデルを新設計した。

【1-2】軸受部潤滑封止シールの低摩擦化による出力向上 : 村上精機

給気温度を上昇させていくことで高出力化を狙っていたが、分解すると軸受（ニードルベアリング）の外輪が滑り供回りを起こしていた痕跡見られるようになった。これは軸受部潤滑用オイルが十分機能し、軸受温度が 75℃程度、一方ローターは水蒸気が当たり 150℃付近まで上がると、運転中に 85μm 程度のクリアランス増大を招いてしまうためと推測された。

そこで、圧入してあるベアリング外輪が緩くなり、ローターの不安定な状況を生むと考えられた。また、ローターが傾斜するとオイルシールは楕円軌道で接触することになり、摩擦も増大する。それを抑止するためローター内に 3 箇所からスプリングピンを活用した温度変化にも追従できるチャック機構を新たに設け、ニードルベアリングロックガイドを付けた。

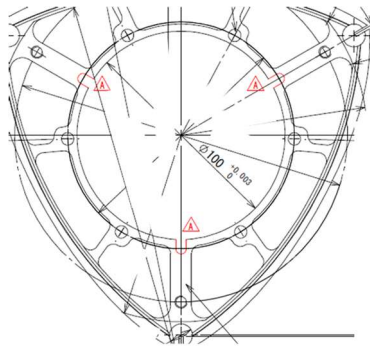


図2-1-2 ニードルベアリング固定のためのローター追加工部



図2-1-3 ニードルベアリングロックガイドと固定用スプリングピン

この改良により、ローターとアベックスシールの姿勢維持がされやすくなり、摩耗パターンの均一化による長寿命化効果を期待できるようになった。またシール潤滑用ポートの他にも低コストかつシンプルな潤滑油供給装置を搭載し、最大負荷のかかる軸受部でオイルシール部の蒸気と潤滑油の完全隔離に成功した。これらの要素技術の集合体として、低振動かつ長寿命な蒸気ロータリー発電エンジン技術の高度化に成功した。

【1-3】蒸気制御バルブ（CV）用軸受部分の長寿命化：村上精機

M20型バルブでは以降では、オイルシールを用いたCV用軸受は潤滑されるため、設計通りの荷重である限りは十分目標達成できる見込みであった。しかし、実際にテストを開始してみると離れたところにある軸受と中央のバルブケースとの同芯度・同軸度の精度と熱膨張の処理より図面指示の詳細化等が重要であると判断し、幾何公差を十分に指示しなおした高精度版図面にて新たにバルブケースの再製作を行った。

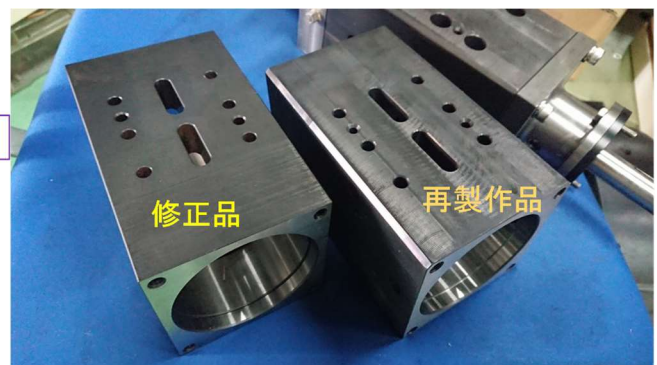
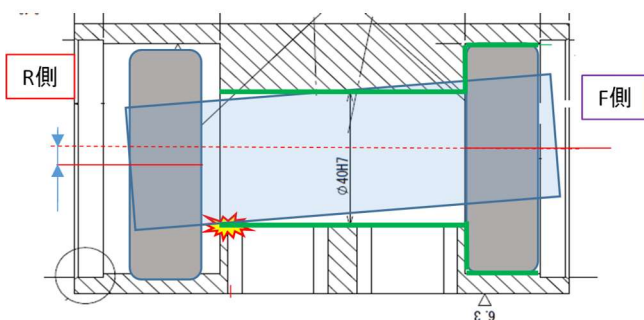


図2-1-4 大口径バルブの熱膨張時のクリアランス課題

【公開版】

軸受同士に傾きのないバルブケースでオイルシール3段仕様を組み立てたが、オイルシールの摩擦が大きく、リア側の軸受ほど寸法維持が難しいといった課題があることを確認した。

表 2-1-2 現行機タイプ M01 型バルブ性能テスト結果

タイプ	給気温度 [°C]	給気圧 [kPaG]	出力トルク [N・m]	回転数 [RPM]	発電出力 [kW]	機械効率 [%]	発電効率 η [%]
M01	161.0	500.4	47.741	1816.5	9.070	47.3	5.920
M01	163.8	543.8	50.145	2007.9	10.544	57.2	6.382
M01	166.8	594.3	53.382	2251.1	12.584	55.0	6.467
M03	170.5	654.3	40.466	2407.0	10.210	44.7	6.137
M20 x2.5	171.2	660.0	40.351	2656.7	11.270	42.0	5.615
最終目標	180.0	800.0	57~60	2500	15.000	58~60	8.0 以上

それらの摩擦要因は性能比較にも表れており、給気圧、回転数などは増加しているが出力トルクおよび機械効率などは M01 タイプの各数値より低下していることがわかった。

- ・軸受保護のオイルシール増加（摩擦損失の増加）
- ・加工精度
- ・想定温度分布のクリアランス
- ・蒸気リーク量

現時点では大型化による恩恵がほとんど見られていない。摩擦損失低減で軸受寿命は向上できるが、高精度化したモデルでも小口径版に比べ効率は約 15%程度ダウンしていることがわかった。

特に発電効率 η も低下しているため、機械的な摩擦損失増加だけでなく、バルブの大型化により蒸気の漏れが増えていることも判明した。

機械効率と発電効率を同時に上昇させるためには、現行の給排気方式では給気圧が予想通りには上げられず、期待通りの高温高圧化に限界があることが分かった。

これらの現象を解消するべく、完成形の CV モデルを新たに設計を行った。

- ・耐熱性を高めた構造の側面給気型バルブ

M01 型から M20 型までの回転円筒型バルブの課題としては

- ①. 軸受が蒸気雰囲気下に存在するため素材の選定が厳しい（特殊素材では製造コストも増）
- ②. 高速回転と急速給気を可能とするには現行の断面積の確保が重要
- ③. 軸受保護のためのオイルシールは直径と摺速により摩擦抵抗が大きく上昇する。

これらの諸条件を踏まえ新たな側面給気型の構造を設計・試作を行った。

1. 蒸気はバルブ弁体の側面から給気する
2. 軸受は水蒸気と隔離する
3. 2本の弁体で流路断面積を確保する
4. ギアを用いて同期回転させる
5. 回転動力はこれまでと同様にドライブシャフトからタイミングベルトを用いる

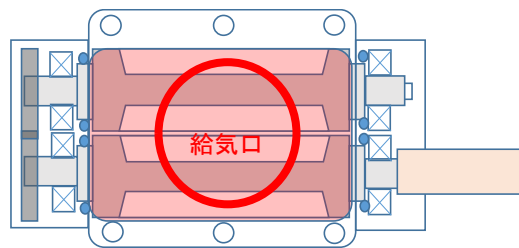


図 2-1-5 側面給気型バルブの構造

これらのコンセプトに基づき試作し試運転を行った後の部品状態を図2-1-5に示す。

蒸気投入後は静穏性がこれまでのどのバルブに比べてよかったが、途中でかじりつきが生じた。

ケースと弁体の一部に温度差 80℃の設計で製作したクリアランスでも弁体の縁に焼け付いた後が見られた。部位としてはリアー側の一部であった。



図 2-1-6 試運転時接触部位

熱膨張差による影響の場合は全面に接触痕が生じるため、これは部品点数が多くなったことで組

立によるガタの大きさが熱膨張によるクリアランスより大きかったためとみられる。この対策として固定ピンの増設と、クリアランスの拡大と弁体の水冷機構を搭載することで改修予定である。オイルシールの摩擦は想定通り小口径化で低減できていたため、これまでのバルブシリーズの断面積・給気タイミングを反映したバルブディスクであれば、CV軸受の耐久性と高性能化を両立できるものと見ている。

2-2. 水蒸気環境下の高耐久トライボロジー技術

【2-1】 実機内の各部品状態を可視化する計測技術と再現環境の摺動試験機の開発：村上精機

エンジン実機内でのアペックスシールの挙動を知るで、回転数からは幾何学的に最大摺速度等は求められる。しかし実機内での摩擦熱によるアペックスシールの温度を計測する方式を検討した。

初年度、アペックスシール温度の計測方法について過去の文献を調査した結果、アペックスシール内に埋め込み固定するセンサは市販のサーミスタ（温度により電気抵抗が変化する素子）を予定していた。しかし、市販のサーミスタでは予想される NST 合金の優位性が発生する 500~1000℃まで使えるものがないため、-200℃~1000℃まで対応する K 型熱電対の利用が適切であると判断した。課題としては偏心回転するローターからどのようにして電位差の情報を安定的にチャンバーの外へ取り出すか、であった。

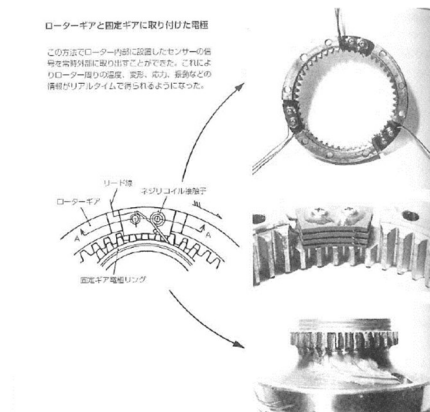


図 2-2-1 内燃エンジンアペックスシールの温度計測法

「マツダ・ロータリーエンジンの歴史（グランプリ出版）」によると センサの電極とギアの電極を常に接触させるピン構造をギアの端に構築していたことが伺える。しかし蒸気ロータリー発電エンジンは、内部が油と CO₂ ガスがほとんどの自動車用エンジンとは環境が異なる。むき出しの電極から水蒸気やドレン水などの影響を除外して 0.1mV 以下の電位差信号を取るのには難しいため別の方式を検討した。

極限環境に向けて小型収録機器を耐熱電池で駆動する IoT 機器案

ローター内の肉抜きスペースに小さな電池で駆動するマイコンで収録することをめざして、100℃以上で使える電池を調査した。結果、Maxell 社は人工衛星向けの電池があるという情報を掴んで入手を依頼したが、本開発の環境下ではメーカー保証の観点から出荷することができないということで、調達さえできず開発を断念した。

最終年度ではモーター回転とスプリングによる押付圧力でアペックスシールの摩耗ペースを計測した。その結果、蒸気稼働試験に比べ摩耗ペースが時間当たり 1/100 程度にしかならないため、実機稼働データの方が時間を短縮して、より実機に近い環境で判断できること

【公開版】

がわかった。通常の水蒸気給気圧による押し付け圧力はスプリングと比べて十分大きく、他社の摺動試験機のカタログ値を見ても同等の試験はできる装置が見つけれなかった。

結果として、期間内では実機稼働時のアパックスシールの温度データを得ることはできなかったが、RaspberryPi や Arduino シリーズの小型基板と microSD カード一式を耐圧ケーシングなどで保護したうえで、水蒸気稼働を数分程度の間ならば、記録媒体が破損せずに温度変化値を持ち帰れる可能性は残されている。

【2-2】新金属素材を用いた蒸気ロータリーエンジン用のアパックスシール素材の開発：
大阪府立大学

アパックスシールは、前記の通りロータリーエンジンの作動室の気密を保持するガスシールのうち、最も寿命が短い部品である。本事業では、Ni 基金属間化合物合金を主体に Co 基金属間化合物合金をアパックスシール素材として適用することを試み、合金組成の選定・最適化のため、下記の実験・測定を通して最適なサンプル組成の合金種の特定制を行った。

(1) 摩擦係数測定結果

表 2-2-1 に掲載の合金について、エンジンハウジング内面と同じ硬質クロムめっき層に対する摩擦係数を測定した。Ni-Si-Ti 系の NST 合金からは添加元素の異なる NST-5Ta と NST-2Nb の二種類を用いた。また、Ni-Al-V 系の Ni 基超々合金からは、同じく添加元素が異なる NAV-TCCN と NAV-5Ta の二種類とした。また、比較材として炭素鋼 S45C も試験に供した。

表 2-2-1 摩擦係数測定サンプル一覧

	合金	鑄造法	室温硬さ
①	NST+5Ta	高周波大気溶解 (Y 鑄型)	約 460 HV
②	NST+2Nb (熱処理材)	真空高周波溶解	約 400 HV
③	NAV-TCCN	遠心力鑄造	約 460 HV
④	NAV-5Ta	遠心力鑄造	約 600 HV
⑤ 比較材	S45C	市販固定ピン素材	200~270 HV
相手材	Cr メッキ Al 合金	オテック/村上精機	

使用した試験装置と試験条件は以下の通りである。動摩擦係数測定方式：バウデン型 一方向接触、使用機器：新東科学 HEIDON 14FW 型、試験温度：25℃、荷重：100g、摺動長さ：20mm、摺動速度：2 mm/s (120 mm/min)。試験片仕様と装置外観を図 2-2-2 に示す。

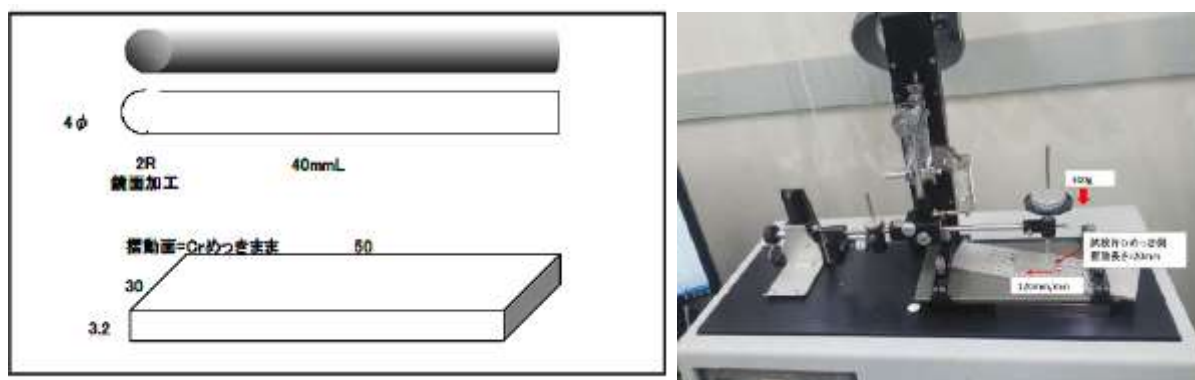


図 2-2-2 摩擦係数測定用試験片（左図）と装置外観（右図）

（動摩擦係数測定試験片上部：Ni 合金接触子、下部：摺動側 Cr めっきアルミシート）

試験結果を表 2-2-2 に掲載する。摩擦係数試験の結果では、Ni 基超々合金の摩擦係数は鋼材の S45C と大差は無いが、動摩擦係数と摩耗量は Ni 基超々合金（特に、NAV-TCCN）が良好な耐摩耗性を有していることが判明した。

表 2-2-2 摩擦係数測定結果

No.	合金	Hv硬さ	摩擦係数(n5の平均)		摩耗量*1 NAV(円相当径μm)
			静摩擦係数	動摩擦係数	
①	NST+5Ta	460	0.39	0.31	190
②	NST+2Nb (熱処理材)	400	0.41	0.32	170
③	NAV-TCCN	460	0.30	0.21	152
④	NAV-5Ta	600	0.34	0.28	155
⑤	S45C		0.30	0.27	163

（試験温度：25℃、荷重：100g、摺動長さ：20mm、摺動速度：2mm/s）

(2) 水蒸気酸化試験結果

水蒸気酸化試験は、水蒸気を主体とするガス雰囲気条件下で、各種材料の耐食性を評価する試験法である。供試材は表 2-2-3 に記載の Ni 基合金 4 種類と比較材と Cr メッキ Al 合金の接合材を用い、図 2-2-3 のように装置内に試料をセッティングした。試験装置は東京衡機製バッチ式高温高圧水中試験装置（オートクレーブ）で、水質は水道水を軟水器に通した蒸気ボイラー用とし、溶存酸素については脱気無し、温度：170℃（オートクレーブ）、圧力：0.8 MPa、試験時間：100hとした。

表 2-2-3 水蒸気酸化試験供試材

	合金	鑄造・制作	硬さ	在庫寸法
①	NST+5Ta	Y鑄型	460HV	15×33×70 1個
②	NST+2Nb (熱処理材)	真空鑄造	400HV	49×54×19 1個 48×52×85 1個
③	NAV-TCCN	遠心力鑄造	460HV	外径100×内径70 ×70
④	NAV-5Ta	遠心力鑄造	600HV	6×23×52 Φ10×50
⑤ 比較材	アシキュラー鑄鉄 電子ビームチル	市販品 2×6×80mm	800HV	2×6×80mm
相手材	CrメッキAl合金	オテック/村上精機		3×50×100

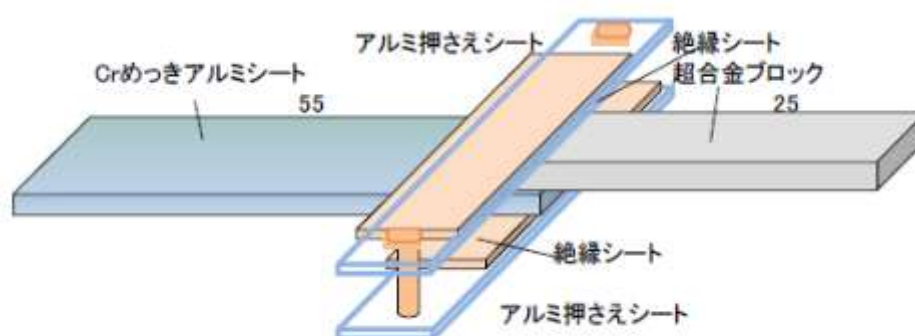


図2-2-3 水蒸気酸化試験の試料セッティング

試験結果を表 2-2-4 に示す。NAV 合金（Ni 基超々合金）については、NAV-TCCN も NAV-5Ta も腐食量に差異は見られなかった。NST 合金については、NST-2Nb は相対的

【公開版】

に腐食量が大きかった。これらの Ni 基金属間化合物合金（NST 合金、NAV 合金）に比べてアシキュラー鋳鉄の腐食量は格段に大きく、従来の自動車用ロータリーエンジンのアパックスシール（アシキュラー鋳鉄）は水蒸気可動において使用不可であることを如実に示している。アシキュラー鋳鉄に比べて、Ni 基金属間化合物合金の腐食量は少なく、特に、NST+5Ta は 1/50 以下の腐食量である。これらの結果から、Ni 基金属間化合物合金（NST 合金および Ni 基超々合金）は水蒸気可動の摺動材として信頼性が高いことが確認された。

表 2-2-4 各種アパックスシール素材の水蒸気酸化試験結果

No.	合金	表面積 (cm ²)	腐食減量測定			腐食量 (g/m ² ・h)	試験後の外観観察 (左側:Crめっき接触面)
			試験前 (g)	試験後 (g)	減量 (g)		
①	NST+5Ta	22.15	36.1931	36.1932	-0.0001	-0.000452	
②	NST+2Nb (熱処理材)	22.15	32.9397	32.9400	-0.0003	-0.001355	
③	NAV-TCCN	22.14	32.5960	32.5962	-0.0002	-0.000903	
④	NAV-5Ta	22.18	36.4409	36.4411	-0.0002	-0.000902	
⑤	アシキュラー鋳鉄	7.94	4.3058	4.3056	0.0002	0.0025175	

(温度：170°C (オートクレーブ)、圧力：0.8 MPa、試験時間：100 h)

(3) 高温硬さ試験結果

図 2-2-4 に各種アパックスシール素材の高温ビッカース試験の結果を示す。図には Ni 基超々合金の NAV-5Ta、-HTN01、-TCCN と、NST 合金では後述の実機回転寿命試験結果が良好であった NST-4Mo に加えて、Co 基金属間化合物である Co-23Ti と Co-Ti-Ta の結果と、市販 Ni 合金の代表例として Inconel 718 合金の硬さも併せて掲載している。同じ合金系であっても添加元素によって硬さは異なるが、総じて NST 合金に比べて NAV 合

【公開版】

金（Ni 基超々合金）の硬さは室温から高温に至る全温度域で高い値を示す。特に、Ta を添加した NVA-5Ta と NAV-HTN01 は室温で 600 HV を越える Ni 合金としては非常に高い硬さを示している。NST 合金も合金元素によって硬さレベルが異なるが、高温延性を重視した NST-4Mo の硬さは Inconel 718 合金とほぼ同等の硬さ特性となっている。Co-23Ti 合金の室温硬さは NST-4Mo、Inconel 718 合金と同等であるが、高温域での硬さはやや低目である。しかし、Co 基金属間化合物の場合も Ta を添加した Co-Ti-Ta 合金では全温度域で 100 HV 程度の硬さの上昇が見られる。実際のアペックスシール特性（寿命）は硬さのみで決まるものではないが、硬さが重要な特性の一つであることには変わりはない。合金系や添加元素を変えることで種々の硬さレベルを有する合金素材が利用可能であることが明らかとなった。

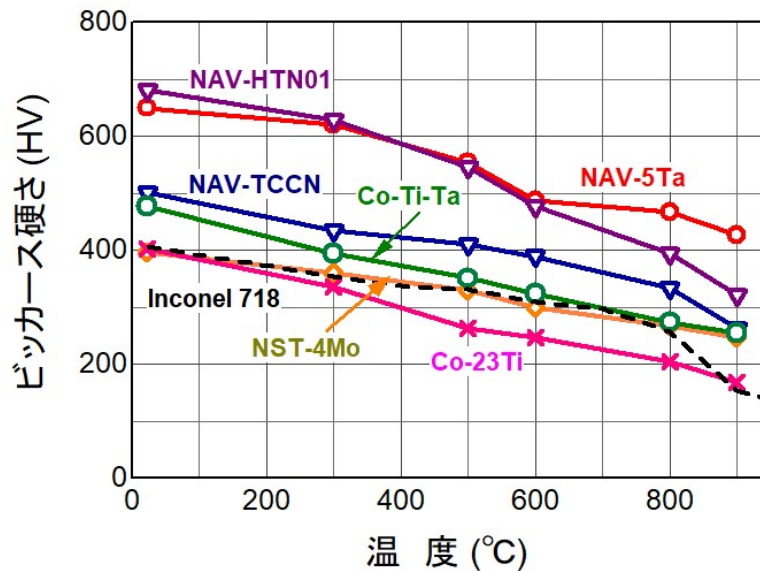


図 2-2-4 各種アペックスシール材料の高温ビッカース硬さ

(4) 実機回転試験後のアペックスシール表面状態観察結果

ロータリーエンジンのバランスが崩れるとアペックスシールに偏摩耗が生じることが判明した。そこで偏摩耗したアペックスシールの詳細な表面観察を行った。表2-2-5に回転試験後のアペックスシールの摩耗状況の一覧を示す。

表 2-2-5 実機回転試験後のアペックスシールの表面状態

材質	記号	摩耗状況	最終使用ハウジング
アシキュラー鋳鉄 (側面のみ無電解ニッケルめっき処理)	Nidox A	傾斜全面均等	HPM77/サージェント浴
NST-2Nb	Nv15E	傾斜全面均等	A5052/有機スルホン酸
NST-4Mo	4MoA	ハウジング攻撃後	A5052/有機スルホン酸
NST-4Mo	4MoB	R側偏摩耗	HPM77/サージェント浴
インコネル718	M14A	傾斜全面均等	HPM77/サージェント浴
CTT-B	Co-Ti-Ta	R側偏摩耗	HPM77/サージェント浴
NST-5Ta	NST-5Ta C	R側偏摩耗	HPM77/サージェント浴
NST-5Ta	JN07 D	ハウジング攻撃後	A5052/有機スルホン酸
Co-Ti	Co-Ti A	R側偏摩耗	HPM77/サージェント浴

図2-2-5に示す光学顕微鏡観察より、通常のマイルドな摩耗面はアブレシブ摩耗の様相を呈していた。一方、偏摩耗したアペックスシールの表面をFE-SEMで観察すると、図2-2-6のように凝着摩耗の様相を呈していた。そこでさらに詳細に分析するためにFE-EMPAを用いて摩耗面の元素分析を行った。分析結果の一例として、図2-2-7にNST-4Moの偏摩耗面の元素マッピング結果を示す。同図より、アペックスシール素材（NST-4Mo）の構成元素であるNiとSiの分布は一致しており、またハウジング表面のめっき層成分であるCrとアペックスシール素材の構成元素であるTiの分布は一致していた。この結果より、偏摩耗はハウジングめっき層のCrがアペックスシールの構成元素のうち、主にTiと反応してシール表面に付着することが明らかとなった。

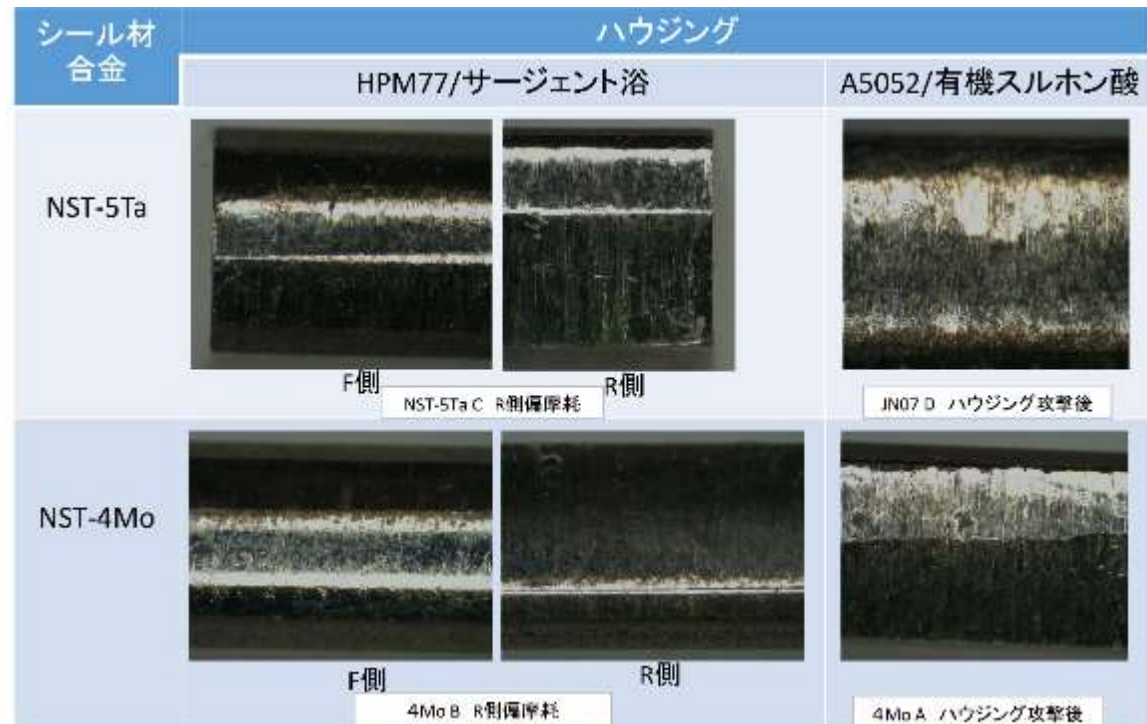


図2-2-5 実機回転試験後のNST合金系アペックスシールの摩耗面観察結果



図2-2-6 NST-4Mo (B) R側 (HPM77/サージエント浴) の偏摩耗面のFE-SEM写真

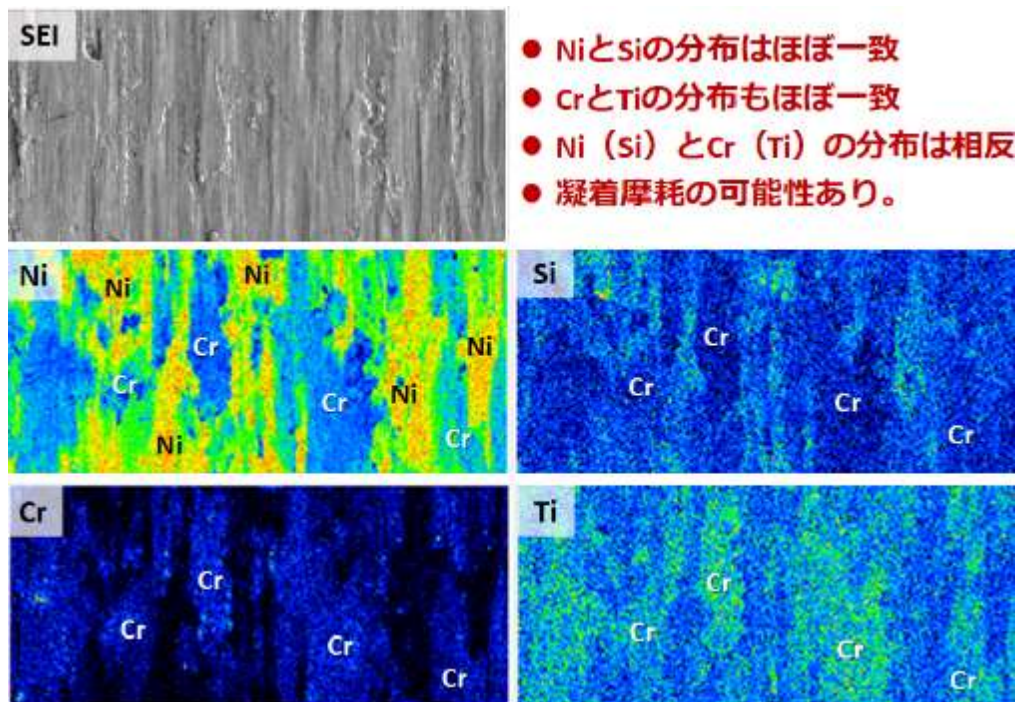


図2-2-7 NST-4Mo (B) R側 (HPM77/サージエント浴) の
偏摩耗面のFE-EPMA元素マッピング

【公開版】

【2-3】 蒸気ロータリー発電エンジンハウジングに適合したクロムめっき膜の開発：オテック

2-3-1 複雑形状ハウジングへのクロムめっきの最適化

2-3-1-1 アルミニウム素材へのクロムめっき前処理の開発

蒸気ロータリー発電エンジンハウジングの使用条件は、高温・高圧で多湿な環境である。クロムめっき皮膜で耐久性のある耐摩耗性を発揮させるには、それらの環境に耐える密着性、低摩擦性、耐熱性を有するクロムめっき皮膜を提供する必要がある。本事業では、エンジンを軽量化するために、鉄鋼材だけでなくアルミニウム合金の採用が予定された。アルミニウム合金は、活性な金属であり、単純な前処理だけでは、めっきの密着性を確保することは極めて難しい。そこで、まずアルミニウム合金へ密着性に優れた直接クロムめっきを施す前処理法の開発に取り組んだ。

前処理としては、粗面化等の前処理で密着性の確保を目指した。粗面化することで、表面の酸化膜や加工時の汚れ等を除去できる。一方、粗面化で用いた砥粒がアルミニウム合金材に食い込み、めっき欠陥が生じる欠点がある。そこで、表面に残留する砥粒等の除去を検討した。その結果、最適な条件で超音波洗浄を行うことで、表面に付着した研磨残渣だけでなく、素材に食い込んだ砥粒も除去でき、後加工で問題となるようなめっき欠陥（ピット、ぶつ）を大幅に減らすことに成功した（図 2-2-8）。

開発した前処理を活用し、アルミニウム合金（A5052、A7075）に対してクロムめっきを $100\mu\text{m}$ 施し、折り曲げ試験（ 180° 曲げを 6 回）および熱サイクル試験（ 200°C と室温間 5 回）による密着性を調べた。最適条件でめっきしたものでは、クロムめっき皮膜の剥離や欠陥は認められず、良好な密着性を確保できる前処理条件を確立できた。これをアルミニウム合金製ハウジングへ適用（ $100\mu\text{m}$ 以上クロムめっき）し、常温と 180°C 程度間での熱サイクル試験を行ったところ、めっき皮膜の密着性には問題が発生しないことを確認した。

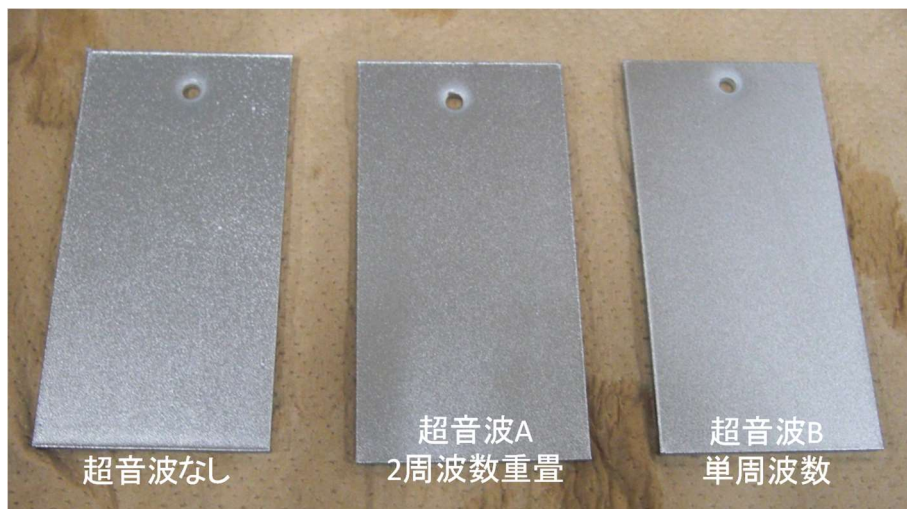


図 2-2-8 A7075 アルミニウム合金素地へのクロムめっき試料の外観（熱サイクル試験後）

2-3-1-2 有機スルホン酸浴の最適化

クロムめっきは、つき回りが悪く、複雑形状部材へのめっき皮膜の膜厚を均一にあげることが難しい。ロータリーエンジンハウジングでは、めっきした後の後加工は極力少なくすることが望まれた。ここでは、有機スルホン酸浴の開発、ならびに陽極・電極ジグ等の改良を行い、めっき膜厚の均一化を改善し、後加工低減への寄与に取り組んだ。

一般に使われるクロム酸-硫酸浴からのクロムめっきは、めっきのつき回りが悪く、電流効率が約13~16%と低い、電流密度が高くなると外観不良（焼け）が生じる、膜厚が厚くなると凸部（ブツ）が発生する、皮膜に内在するクラックはマクロクラックで素地まで到達し耐食性が悪いなどの欠点を抱えていた。本事業では、従来クロムめっきが抱える欠点の改善を目指して、有機スルホン酸浴の開発とハウジングへの適用を進めた。

現行品と開発品の厚めっきの外観を、図2-2-10に示す。開発した有機スルホン酸からのめっき皮膜は、厚めっきを施しても、光沢性と平滑性を保ち、ブツ・焼けなどの欠陥が生じにくく、めっき速度は現行より約5~20%高く、クラックも微細化することができた。

更に、ハウジングへの適用するために、有機スルホン酸浴の最適化を進め、触媒濃度（×2A以上）、浴温（40~60℃）、電流密度（10~40A/dm²）に制御することにより、平滑性が改善できる条件を見出した。

厚めっき品の外観とめっき速度

現行品

めっき時間：63.5h

膜厚：約761μm

速度：12μm/h



開発品

めっき時間：25h

膜厚：約526μm

速度 21μm/h

外観良好

欠陥が小

耐食性改善



図2-2-9 めっき表面の状態（クラック状態はエッチング後に観察）

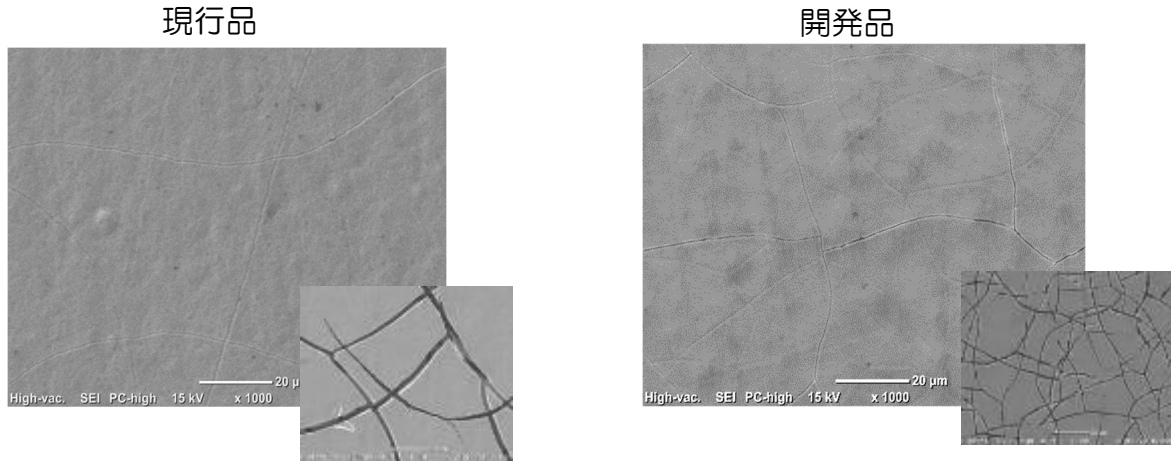


図 2-2-10 現行の工業用クロムめっき と 開発品（有機スルホン酸浴）の比較

2-3-1-3 陽極・電極ジグの改良による膜厚の均一化

複雑形状の部材へのクロムめっきにおいては、めっき皮膜の均一性が極めて悪い。ロータリーエンジンハウジングでは、めっき皮膜の後加工を軽減するため、品物全体にできるだけ均一なめっき膜厚を形成させる必要がある。そこで、陽極・電極ジグの改良による膜厚の均一化を検討した。めっき膜の均一性の評価には、品物上の膜厚比を用いた。計算には、設定したポイントで膜厚データを採取し、平均値と測定データとの膜厚比を求めた。その後、ハウジングの最大膜厚比と最小膜厚比との差を求め、めっき膜の膜厚比を算出した。

図 2-2-11 にクロムめっきの膜厚測定箇所を示す。表 2-2-6 にハウジングのフラット部における膜厚測定結果と膜厚比を、表 2-2-7 にハウジングの穴回り部を含めた測定結果をそれぞれ示す。表の変換値とは、ハウジングの膜厚平均値が $100\mu\text{m}$ であったと仮定したとき、それぞれの箇所の膜厚値である。ハウジングのフラット部における膜厚比は、改善前の膜厚比 97%から 19%へと大幅に改善でき、目標値とした膜厚比 20%以下を達成することができた。一方、穴回りを含めた膜厚比は、改善前の 112%から 36%へと大幅に改善できたが、20%以下を達成することができず、今後改善の余地を残した。

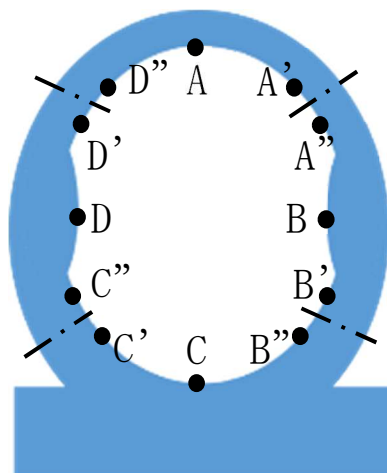


図2-2-11 ハウジングのめっき膜厚測定箇所

表 2-2-6 フラット部のクロムめっきの膜厚と膜厚比

1回目	A	B	C	D	平均	膜厚比(%)
測定値	32	94	51	77	64	97
変換値	51	121	81	148	100	
2回目	A	B	C	D	平均	膜厚比(%)
測定値	112	159	159	158	147	33
変換値	76	107	108	109	100	
3回目	A	B	C	D	平均	膜厚比(%)
測定値	220	174	167	200	190	28
変換値	116	91	88	105	100	
4回目	A	B	C	D	平均	膜厚比(%)
測定値	44	52	38	42	44	30
変換値	98	115	85	93	100	
5回目	A	B	C	D	平均	膜厚比(%)
測定値	90	91	88	91	87	19
変換値	111	104	97	92	100	
6回目	A	B	C	D	平均	膜厚比(%)
測定値	183	162	209	174	182	22
変換値	105	89	129	83	102	
7回目	A	B	C	D	平均	膜厚比(%)
測定値	191	169	152	164	169	23
変換値	113	100	90	97	100	

表2-2-7 穴回りを含めたクロムめっきの膜厚と膜厚比

1回目	A	A'	A''	B	B'	B''	C	C'	C''	D	D'	D''	平均	膜厚比(%)
測定値	32	39		94	55		51	51		77	38		55	112
変換値	59	72		171	101		94	93		140	69		100	
2回目	A	A'	A''	B	B'	B''	C	C'	C''	D	D'	D''	平均	膜厚比(%)
測定値	112	101		159	170		159	162		158	119		143	48
変換値	79	71		112	119		111	114		111	83		100	
3回目	A	A'	A''	B	B'	B''	C	C'	C''	D	D'	D''	平均	膜厚比(%)
測定値	220	130	136	174	176	181	167	202	208	200	239	259	191	68
変換値	115	68	71	91	92	95	87	106	109	105	125	136	100	
4回目	A	A'	A''	B	B'	B''	C	C'	C''	D	D'	D''	平均	膜厚比(%)
測定値	44	57	58	42	38	38	38	41	43	52	45	45	45	44
変換値	98	126	128	93	94	84	85	91	96	115	101	99	101	
5回目	A	A'	A''	B	B'	B''	C	C'	C''	D	D'	D''	平均	膜厚比(%)
測定値	90	90	82	81	73	72	88	103	99	91	83	81	86	36
変換値	105	105	95	94	85	84	102	120	115	106	96	94	100	
6回目	A	A'	A''	B	B'	B''	C	C'	C''	D	D'	D''	平均	膜厚比(%)
測定値	183	183	168	162	171	174	209	233	199	174	183	189	186	39
変換値	99	99	90	87	92	94	113	126	107	94	99	102	100	
7回目	A	A'	A''	B	B'	B''	C	C'	C''	D	D'	D''	平均	膜厚比(%)
測定値	191	243	195	169	141	143	152	159	151	164	159	181	171	59
変換値	112	142	114	99	83	84	89	93	88	96	93	106	100	

2-3-2 ハイブリッド型クロムめっき膜の開発

本事業では、高圧高温の水蒸気雰囲気で使用されるロータリーエンジンに適用でき、耐久性を有する表面処理が必要である。そこで、有機スルホン酸浴をベースとし、拡張したマイクロクラック内にSiO₂無機系コーティング剤を浸透させることによるクロムめっき皮膜のハイブリッド化に取り組んだ。

ハイブリッド型クロムめっきの形成条件を最適化し、要求物性としてはキャス試験 32 時間以上の耐食性（アルミニウム合金素地）、低摩擦係数 0.2 以下（アペックシール材）、220℃での耐熱性（密着不良などの欠陥が発生しない）を目標に検討をすすめた。

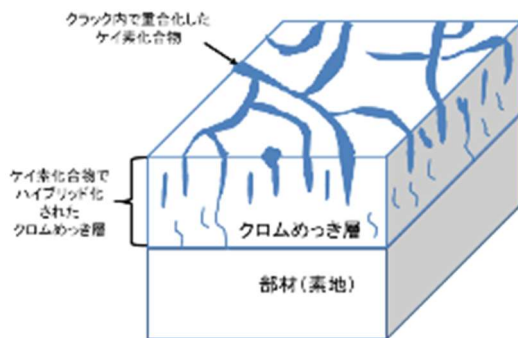


図 2-2-12 ハイブリッド型のクロムめっき皮膜の断面模式図

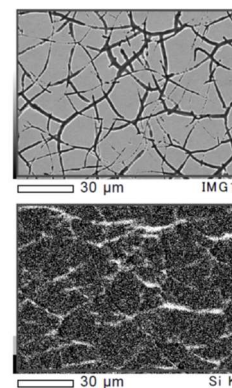


図 2-2-13 ハイブリッド型のクロムめっき皮膜の表面におけるケイ素 (Si) の元素分布図

ハイブリッド化剤の選定にあたっては、フッ素系ならびにケイ素化合物について予備試験を行い、クラックへの浸透量ならびに腐食に対する素地保護性の観点を踏まえ、ケイ素化

【公開版】

物のアルコキシシラン剤を最終的に選定した。クロムめっきのハイブリッド膜化プロセスとしては、有機スルホン酸浴からのクロムめっき→めっき皮膜のクラック拡張処理→ハイブリッド化剤の含浸処理→めっき表面の過剰液剤の除去→ケイ素化合物の硬化処理とし、各工程の処理条件を最適化した。

試作したハイブリッド型クロムめっき膜表面について、エネルギー分散型X線分析装置付き走査型電子顕微鏡（EDX-SEM）による分析結果を図 2-2-13 に示す。下図の白い部分はケイ素元素の存在領域である。ケイ素はクロムめっきで拡張したクラックに存在し、ケイ素化合物でクラックが埋め込まれていることを確認した。ハイブリッド型クロムめっきの断面写真およびグロー放電発光分光分析（GDS）による深さ方向の元素分布解析結果を図 2-2-14 に示す。深さ方向でのケイ素は表面から約 25 μm までの分布し、ケイ素化合物がクラックに含浸し、クロムめっきのハイブリッド化の達成を確認した。

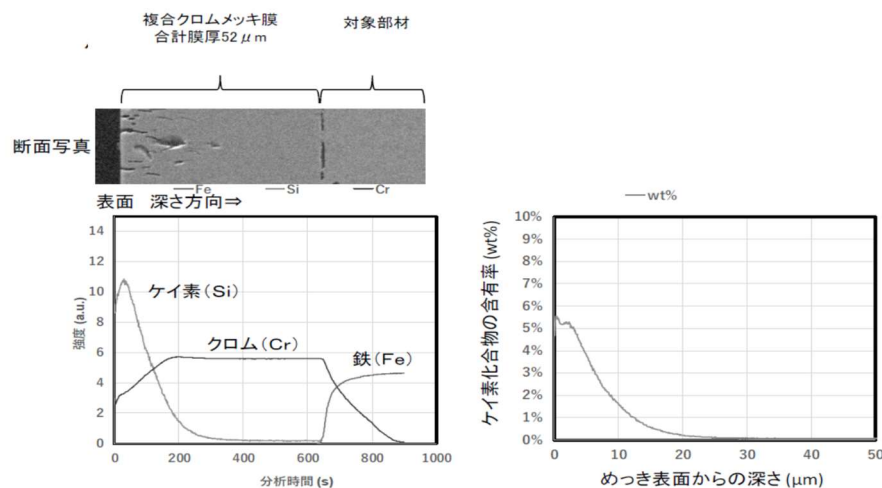


図 2-2-14 ハイブリッド型クロムめっき皮膜の断面写真および表面から深さ方向の各元素の分布状況

ハウジングへのハイブリッド型クロムめっきの適用を目指して、要求される耐食性、摩擦抵抗、耐熱性について検討を進めた。

鉄素材上のハイブリッド型クロムめっき試料では、ハイブリッド化条件を最適化することで、キャス試験336時間後も外観の変化や赤さび発生は認められず、優れた耐食性を発揮させることに成功した。次に、本事業で予定されるアルミニウム合金5052材への適用の検討を進めた。

アルミニウム合金では、めっき皮膜の密着性向上のために粗面化を利用するため、めっき皮膜には素地まで貫通するピンホールが存在し、鉄素地と同等のハイブリッド化条件のみでは、目標とするキャス試験24時間の耐食性のクリアは困難であった。

そこで、有機スルホン酸浴からのクロムめっき条件およびハイブリッド処理の硬化条件

【公開版】

等を大幅に見直した。図2-2-15に、アルミニウム素材へのハイブリッド膜のキャス試験結果を示す。ハイブリッド化の処理工程等を見直すことによって、目標としたキャス耐食性24時間を超える耐食性をアルミニウム合金上で得ることに成功した。

		日数→	目標												
		時間→	0	1	2	4	8	1	2	3	4	5			
ケイ素化合物の硬化条件	HB5	膜厚56μm エッチング コート 酸化A コート		○	○	○	○	○	○						
	H6	膜厚56μm エッチング コート 酸化B コート		○	○	○	○	○	○						
	HB6	膜厚56μm エッチング コート 酸化C コート		○	○	○	○	○							
	HB7	膜厚56μm エッチング コート 酸化D コート		○	○										
	HB8	カクマウ 56μm E 25A 2min コート 酸化E コート		○	○										

図 2-2-15 A5052 材へのハイブリッド型クロムめっきのキャス試験結果

本事業で開発されたアペックスシール材と各クロムめっき皮膜との摩擦係数を図2-2-16に示す。摩擦係数は、アペックスシール材の種類により変わる。概ね、有機スルホン酸浴>サージェント浴>ハイブリッド膜の順となり、ピンの摩耗量の低減効果も求められた。特に、新規に開発されたCo-Ti合金とハイブリッド型クロムめっきを組み合わせると、摩擦係数が約0.19を示し、目標の0.2を下回ることができた。

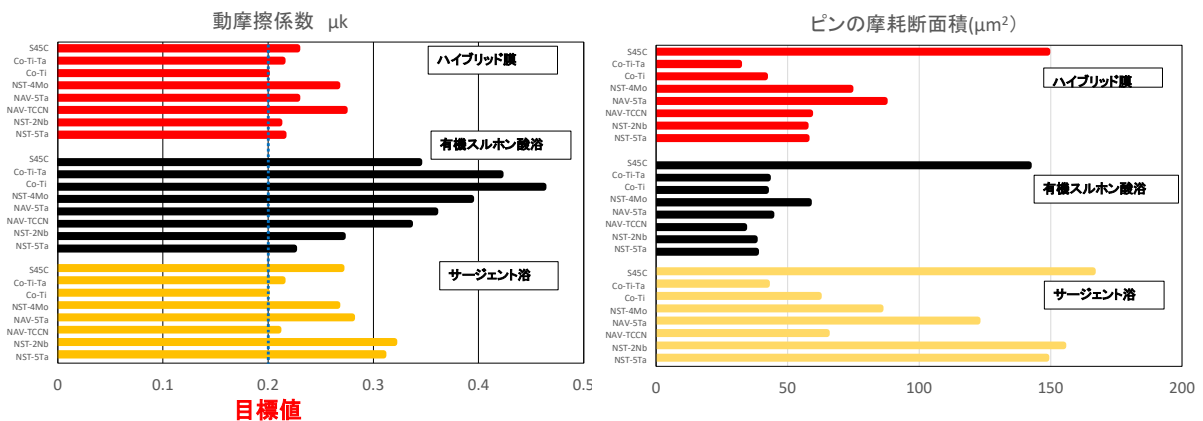


図 2-2-16 A5052 材へのハイブリッド型クロムめっきのキャス試験結果

【公開版】

本事業では、ハウジング使用温度は上限180℃が予定されている。発電時にめっき剥離などの異常が起こらないことを確認するため、耐熱性は安全性を踏まえ220℃を目指した。

本事業で確立した前処理方法を用い、A5052材上へめっきした試料の耐熱試験結果を図2-2-17に示す。ハイブリッド型クロムめっきを含めて全てのクロムめっきが、300℃まで変色や膨れは認められず、220℃以上の耐熱性を有していることを確認した。

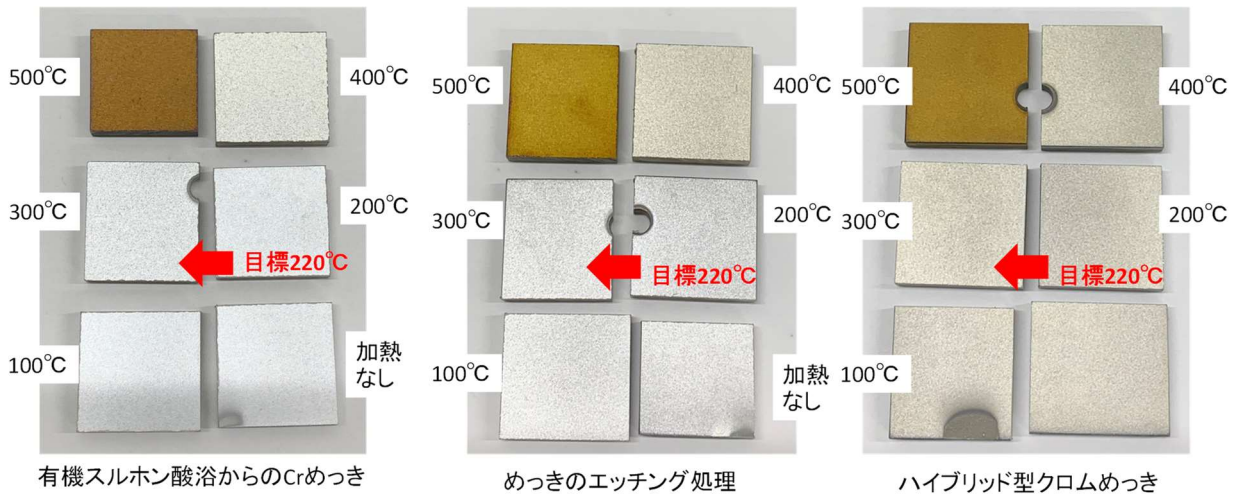


図 2-2-17 A5052 材の各クロムめっきの耐熱試験結果

蒸気ロータリー発電エンジンハウジングへのハイブリッド型クロムめっきの実証を行うため、ケイ素化合物の硬化処理に用いる加熱装置（図 2-2-18）を導入し、ハウジングへの適用を行った。



図 2-2-18 加熱装置



図 2-2-19 ハイブリッド型クロムめっきを施したハウジング

2-3 量産用共通設計エンジンと性能カスタム技術

【3-1】 シングルローターエンジン用の低振動維持バルンサー技術の開発：村上精機

令和元年度に製作したフライホイール型バランスウェイトはリアー側にしか装着されておらず、その他の部品変更等による内部ローター重量・重心の変化を相殺しきれない課題があった。そこでアンバランスモーメントを相殺するためのフライホイール型バルンサーをリアーだけでなくフロント側にも搭載することで、バランスウェイトの加減を両方から調整できるように変更した。

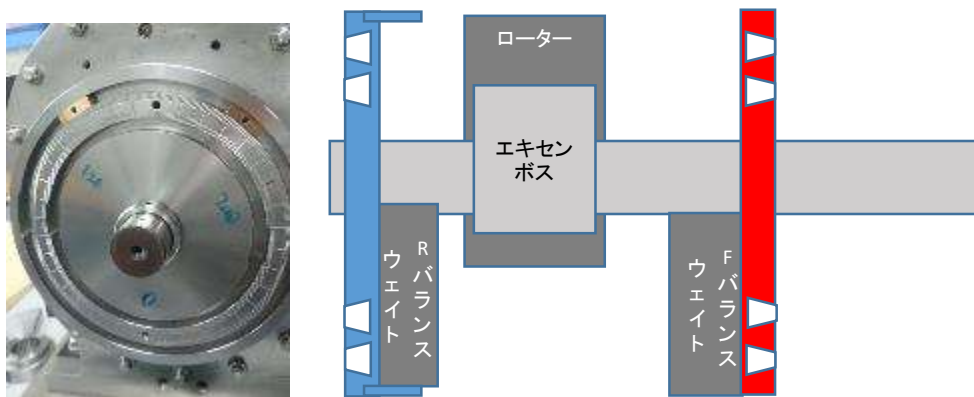


図 2-3-1 フライホイール型バルンサーの増設 (R 側+F 側)

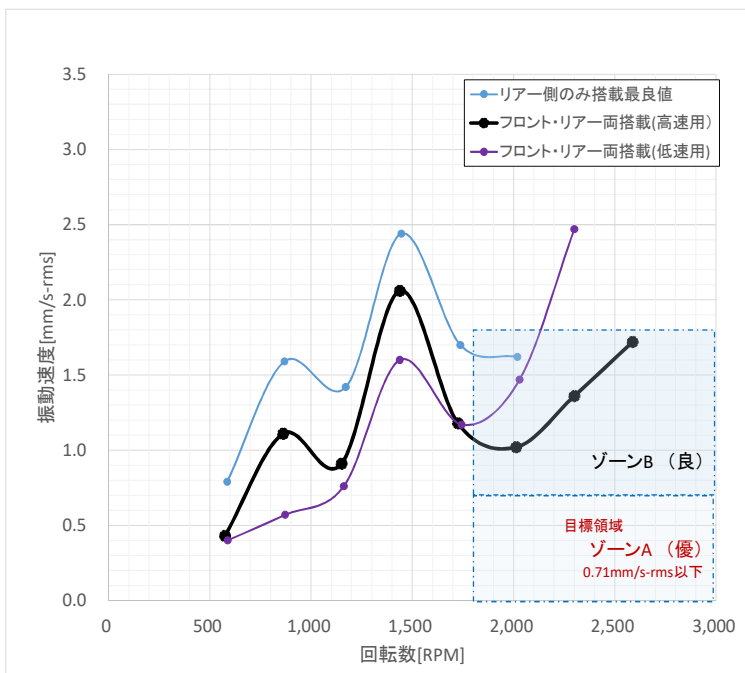


図 2-3-2 フライホイール型バルンサーの搭載による回転数と振動速度の変化

表 2-3-1 振動シビアリティクラス分類

振動シビアリティ JIS B 0906(ISO 10816-1)

振動速度の rms 値 (mm/s)	Class 1	Class 2	Class 3	Class 4
0.71mm/s	A	A	A	A
1.12mm/s	B	1.12mm/s	A	A
1.8mm/s	1.8mm/s	B	1.8mm/s	A
2.8mm/s	C	2.8mm/s	B	2.8mm/s
4.5mm/s	4.5mm/s	C	4.5mm/s	B
7.1mm/s	D	7.1mm/s	C	7.1mm/s
11.2mm/s	D	D	11.2mm/s	C
18mm/s	D	D	D	18mm/s

評価ゾーン

ゾーン A	新設された機械の振動値が含まれるゾーン (→ 優)
ゾーン B	何の制限もなく長期運転が可能なゾーン (→ 良)
ゾーン C	長期の連続運転は期待できないゾーン (→ 可)
ゾーン D	損傷を起こすのに十分なほど厳しいゾーン (→ 不可)

【公開版】

その結果、エンジン回転数2000RPM付近で1.02mm/s-rmsまで抑えることができた。これは15kW以下の装置区分で言えばゾーンB：何の制限もなく長期運転が可能なゾーン（良）である。今後もフロント・リアーのバランスウェイト重量の変更や微調整は可能であり、付加バランサーピースの位置・個数を変化させることで、低振動となる領域も調整・変更可能であることも確認できた。また、フライホイールの格納スペースには余裕があるため、最終的にはゾーンA（優）範囲にまで低減できる技術を開発できた。

【3-2】 高強度必要部の 素材変更による低コスト軽量化技術：村上精機

エンジン重量のうち大半の重量を絞めているハウジングをSUS系からアルミ素材化することで軽量化を目指し、同じ寸法でA5052と従来型HPM77の2種類のハウジングを試作した。最も重量のあるセンターハウジング重量は20.8kgから7.2kgになり、チャンバ容積等に変更なしで、本体部は目標重量35kgに到達した。しかし低振動化のため【3-1】で開発したフロント側のフライホイール型バランスウェイトの増量分が生じており、実機としては3.8kgオーバーしている。この増量分はハウジングの肉抜き等で強度に問題なく削減可能とみている。

【3-3】 ハルブ開口部の形状・断面積・タイミング改良による出力リミッターの開発：村上精機

M20型CV以降発生していたアペックスシールの不安定な摩耗パターンの解消のため、均一な流入をもたらすセンターハウジングの給気ポート形状の見直し、さらにアペックスシール用潤滑ポートを増設した新型センターハウジングの新設計・試作も行った。

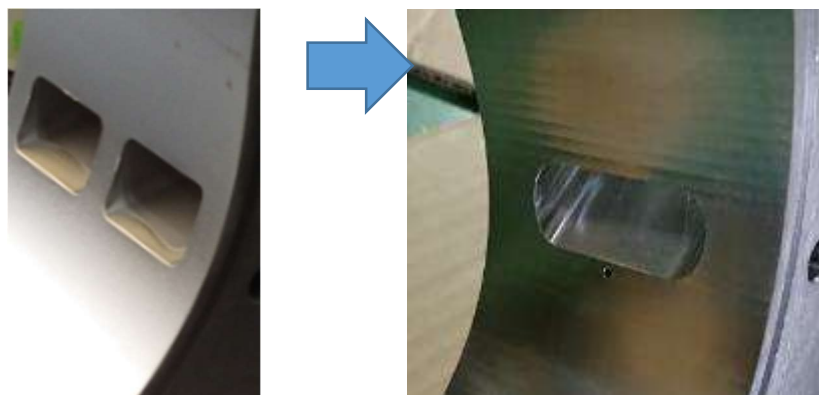


図 2-3-3 軽量化ハウジングの従来型ポート（左）と新型ポート（右）

【公開版】

この形状変更は、新型ハウジング、チャンバー内圧力の均一化を目的としたもので、センターハウジング給気ポートを2つから1つへ統合し、フロント側とリアー側で水蒸気の圧力差と流量差が無いようにするものである。また断面積と位置はほぼそのままであり、過去のエンジン部品に互換性が残るようにも配慮している。特に、ポートの出口直後にアパックスシール用潤滑供給ポートも増設した。

これに加え、各種蒸気制御バルブでは、ボイラー側の主蒸気弁を全開にしても一定以上流れ込まない流量と圧力があり、最大性能はバルブの設計と設定膨張比（給気区間）と流路面積、負荷トルクによって定まることを確認できた。

最終章 全体総括

1. 研究開発成果

本蒸気ロータリー発電エンジンの技術開発は、非常に多くの要素技術の集合体であり、開発項目は多岐に渡る計画となった。その中でも市場ニーズに纏わる安定性・性能・長寿命・信頼性・安全面に関わるテーマから優先して行っていったため、中には成果の乏しいテーマもあった。しかし、本エンジン技術は 簡易ボイラー区分の水蒸気ボイラーの最大温度 180℃の水蒸気に適応した耐熱給気バルブ構造に必要な条件を洗い出し、本エンジンに最適な給気制御バルブに必要な設計条件を特定することができた。

その他にも水蒸気環境下では潤滑なしには困難とされていた中で、アパックスシール素材の長寿命化では、計画スタート時よりも約 2 倍程度の寿命を持つ素材の特定でき、耐摩耗性に優れる耐食性のあるシール摺動材の組成を発見できたことは、低コスト化・普及においても大きな成果があった。

また、硬質クロムめっき摺動面における摩擦係数の評価と、新規に行ったワイヤー放電加工仕上げによる加工時間の大幅な短縮などにおいて製造コストおよび、ハウジング再生技術も生み出すことができた。

シール潤滑用ポートの他にも低コストかつシンプルな潤滑油供給装置を搭載し、最大負荷のかかる軸受部でオイルシール部の蒸気と潤滑油の完全隔離にも成功した。

また、オートバランスの複数搭載化を行い、ロータリー型の特徴である低振動性を高めることができたため、実機視察者などにも「静かでパワフル」という意見も多くもらうようになった。

【1-1】 180℃蒸気に対応する耐熱給気バルブ技術

開発目標：給気気温度 180℃ 現状確認値 175℃ （達成度 90%）

開発目標：出力 15.0kW 現状確認値 13.0kW （達成度 90%）

M20 型のデータを反映させた新型耐熱バルブで更に改善の見込みである。

【1-2】 軸受部潤滑封止シールの低摩擦化による出力向上

開発目標：機械効率 60% 現状確認値 60%※瞬間値 （達成度 100%）

MAX η = 8.0% 現状確認値 η = 6.5% （達成度 85%）

2500RPM 現状確認値 2600RPM （達成度 100%）

【1-3】 蒸気制御バルブ（CV）用軸受部分の長寿命化

開発目標：軸受寿命 4000h, (達成度 99%)

M20 型までの円筒導通型バルブではオイルシールを搭載しても摩擦損失の増大が生じることが避けられないと結論付けられる。これらの状況を反映した設計刷新を行った最終型モデルのバルブでは、軸受とオイルシールを小口径化し、またバルブディスク内に蒸気を通さない配置に見直したことで、軸受寿命は 4000h を十分達成すると見込んでいる。

【2-1】 実機内の各部品状態を可視化する計測技術と再現環境の摺動試験機の開発

端子露出型での水蒸気ドレンなどの影響が熱電対電位差への影響が大きかったため、内部搭載型を検討したが、電源用電池メーカー側が想定外の水蒸気環境下では耐熱用電池は販売できないとされ、調達できずに断念した。摺動試験機は、実機部品を流用した方が確実とみられるためバランスング用モーターを摺動テストとして流用することを予定していたが、モーターテストによる摩耗スピードは実機に比べ 1/100 以下であり、蒸気稼働テストの方が早く候補材の絞り込みが可能となるため実機を活用した。(達成度 40%)

【2-2】 新金属素材を用いた蒸気ロータリーエンジン用のアペックスシール素材の開発

蒸気ロータリーエンジン用のアペックスシール材料として、Ni 系合金（NST 合金系、NAV 合金系）と Co 系合金（Co-Ti 系合金）をそれぞれ数種開発した。摺動部材として耐摩耗性と、高温水蒸気環境中で使用されることを考慮して、合金成分と組成が異なる材料を用意することで、種々の環境・状態で使用可能なアペックスシールの作製が可能である。

今後は実機環境下での試験を繰り返し、より最適な素材合金としていくことで、ロータリーエンジン全体の高性能化へ繋がる。(達成度 62.5%)

【2-3】 蒸気ロータリー発電エンジンハウジングに適合したクロムめっき膜の開発

めっきの均一性を高めた陽極・電極シグの改良を行うことで、目標値である膜厚比 20% 以下に対して、フラット部のクロムめっきの膜厚比は 19%まで改善でき、穴まわりを含めたクロムめっきの膜厚比は 36%まで改善することができた。(達成率 80%)

【公開版】

SiO₂ 無機系コーティング剤を浸透させ、加熱硬化させるための加熱装置を導入し、有機スルホン酸浴のクロムめっきヘケイ素化合物を含浸させたハイブリッド化処理の改善方法に取り組み、目標値であるキャス 32 時間以上の耐食性、摩擦係数 0.2 以下、耐熱性 220°C 以上を達成した。(達成率 100%)

【3-1】 高強度必要部の 素材変更による低コスト軽量化技術

開発目標：エンジン本体部重量 35kg 以下 (達成度 90%)

低振動化用部品のために重量が 3.8kg 程度増量してしまったが、増加分はハウジング等の肉抜き等で削減可能である。

【3-2】 シングルローターエンジン用の低振動維持バランス技術の開発

開発目標：振動速度 0.7mm/s-rms (優),

現状値 1.02mm/s-rms(2015RPM) (良) (達成度 80%)

最終目標に対しては高速タービンと同等の規模でバランスをとる必要があり、時間がかかることがわかった。構造設計的には十分達成したと見ている。

【3-3】 バルブ開口部の形状・断面積・タイミング改良による出カリミッターの開発

開発目標：騒音値 72dB 以下 (エンジン端、カバーなし、1m 位置にて)

現状確認値 74 dB (10kW 出力時) (達成度 90%)

ボイラーや配管からの音などの影響を無くすことで、ほぼ達成の見込みである。

2. 研究開発後の課題と事業化展開

本プロジェクトにおいてメインベアリングの油潤滑ルートの水蒸気との隔離技術は完成したが、エンジン性能を維持するアペックスシール寿命においてはまだ潤滑が必要である。一方で製造環境に係る技術である以上、排気蒸気を待機開放せずに水の消費量をおさえることが今後の展開では重要である。

得られる電力以外にも水道代もランニングコストに係るため、下記のような焼却熱の排熱を用いたランキンサイクルを構築する例が考えられる。

【公開版】

しかしながら、現段階では中小鉄工所等は蒸気ボイラー業界への新規参入が難しく、低コスト化の進んでいる海外製のボイラー部（缶）を国内に輸入して利用するなどできないとされている。今後の CO₂ 排出削減目標達成のためには環境技術の普及のために利用目的を限定してでも、用途ごとの大きな規制緩和等が必要と考えられる。

通常のボイラーでは対象とする燃料は重油や石炭であり、高熱量の燃料に合わせて蒸気ボイラーの区分は制定されている。しかし、重油や石炭と比べて熱量の低いごみ由来の燃料などは燃焼温度が低く、排気ガスから熱回収を行う廃熱ボイラーでも、伝熱面積を多く取らなければ蒸発量を確保できないため、重油・石炭等よりも技術上は安全性が高い運用条件が多い。にもかかわらず蒸気ボイラーの規格区分は 1MPa 対応では 5m²が燃料の種類によらず一律に区分けされている。これらの通常の燃料のみを想定した規格区分は、安全管理基準・届け出手続き等においてユーザーの負担が多くかかり、小規模の廃熱利用・ごみ焼却発電の普及を妨げる一因となっている。更に、自家消費電力であったとしても電気事業法の扱いを受ける規模に判定されるおそれがあり、その面でも規制緩和等が必要と考えられる。

また、FIT の固定買取制度などでも太陽光、地熱、風力などは多くあげられているが、廃熱の発電率はまだない。結果として大規模な焼却施設にしかごみ焼却発電が普及していないのはこれらのインセンティブが大規模な施設でしか元が取れない点も挙げられる。地域内のごみ処理を地域内で行い、近距離では有効活用できる発電＋熱利用のCHPなどではインシヤルコストに対応した助成制度や技術実証・コンペティション等の推進が求められる。

本エンジンによる発電技術は、多少の出力変動が発生しても発電機部としては「20kW 未満」の小型風力発電システムと電気回路的には同じ構造であり、規模的には小出力発電設備に該当すると見られ、「発電設備のうち、出力が小さく安全性が高い発電設備」である小出力発電設備に該当するはずである。しかしながら、小出力発電設備が受ける規制は、「技術基準適合命令」のみで、その中で外燃機関は蒸気タービンなどの構造に関する基準はなく、「④ 内燃力を原動力とする火力発電設備であって出力 10kW 未満のもの。」として規制を受ける。本蒸気エンジンは蒸気タービンとは動作原理も異なるものであり、10kW 未満であると本技術の特性を活かしきれないため普及の妨げになりうる。そのため同様の扱いをせず、低振動・小型の蒸気エンジンとして 15kW なし 20kW 未満までで新規の区分を制定し、小型風力発電システムと同等の扱いを期待する。