

令和4年度

成長型中小企業等研究開発支援事業

「液体水素温度における材料摩耗および力学物性試験機の製作」

研究開発成果等報告書

令和6年3月

担当局 中国経済産業局

補助事業者 公益財団法人しまね産業振興財団

目次

1. 研究開発の概要	3
1. 1 研究開発の背景・研究目的及び目標	3
1. 1. 1 研究開発の背景・研究目的	3
1. 1. 2 研究開発の目標	6
1. 2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者名、アドバイザー）	9
1. 2. 1 研究組織及び管理体制	9
1. 2. 2 研究全体の総括、プロジェクトの運営管理	9
2. 導入した技術、機器設備について	10
3. 補助事業の具体的内容	11
【1. 高温超伝導線材を用いた駆動機構の開発】	11
【2. 低温で動作する圧力センサーの開発】	15
【3. 摩耗試験機本体の設計・製作】	15
【4. 引張負荷を与える機構の開発】	15
【5. 熱サイクルを与える機構の開発】	16
【6. 従来機を超える雰囲気制御・温度可変範囲を備えた 汎用の試験機のプロトタイプ製作】	16
【7. 液体水素中試験装置の開発】	19
4. 補助事業の成果及びその効果	20
5. 補助事業の成果に係る事業化展開について	20
5. 1 補助事業の成果が寄与すると想定している具体的なユーザー、 マーケット及び市場規模等に対する効果について	20
5. 2 補助事業の成果・効果の価格的・性能的な優位性のほか、事業化 見込みについて、目標となる時期・売上規模等	21
5. 3 事業化に至るまでの遂行方法や今後のスケジュール	22
6. 補助事業の成果に係る知的財産権等について	23
6. 1 知的財産権の出願及び取得並びに論文掲載の有無について、 補助事業実施中の状況及び今後の可能性	23
7. アドバイザーによるコメント	23

1 研究開発の概要

本研究は、「中小企業の特定制り基盤技術の高度化に関する指針」のうち、「(九) 複合・新機能材料に係る技術に関する事項」に記載の「1 複合・新機能材料に係る技術において達成すべき高度化目標」の(4) 川下分野特有の事項の「2) 環境・エネルギー分野に関する事項」に挙げられた「①川下製造業者等の特有の課題及びニーズ」の「耐久性・耐熱性・耐食性・耐薬品性を兼ね備えた高強度な部素材の開発」に応えるものである。

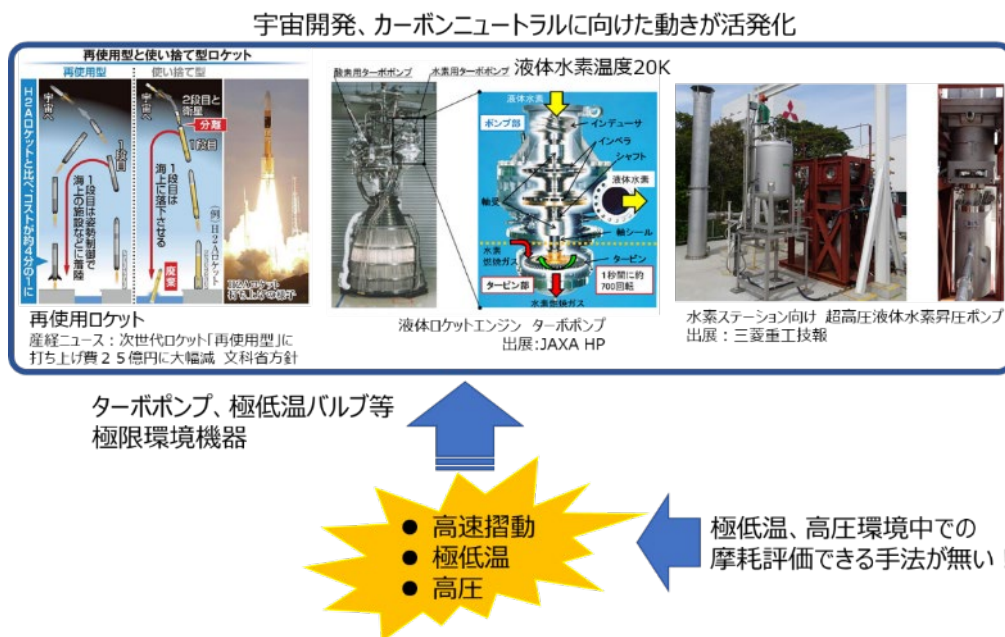
液体水素、液体酸素タンクのシールや、ポンプに使用される軸受けは極低温かつ、酸化、還元雰囲気中に晒されるため室温付近で現れる摩耗現象とは異なった様相を示すことが知られている。しかし、20K レベルでの極低温で雰囲気を制御できる摩耗試験、引張特性を評価できる試験装置は世界的にみても存在しないため、この分野における研究はあまり進んでいない。その結果、極低温で使用されるシールや軸受けは古くから用いられているテフロンなどの素材に限られている。テフロンは固体潤滑材として有名であるが、摩耗量が比較的大きいことや、酸化、還元雰囲気で使用すると摩耗が一気に進むケースがあるため、テフロンに変わるシール材、軸受け材の開発が求められている。

本研究開発では、これらの材料開発における生産プロセスの革新の一助となるものであり、装置の信頼性向上に寄与するほか、新たな部素材開発にも寄与するものである。

1.1 研究開発の背景・研究目的及び目標

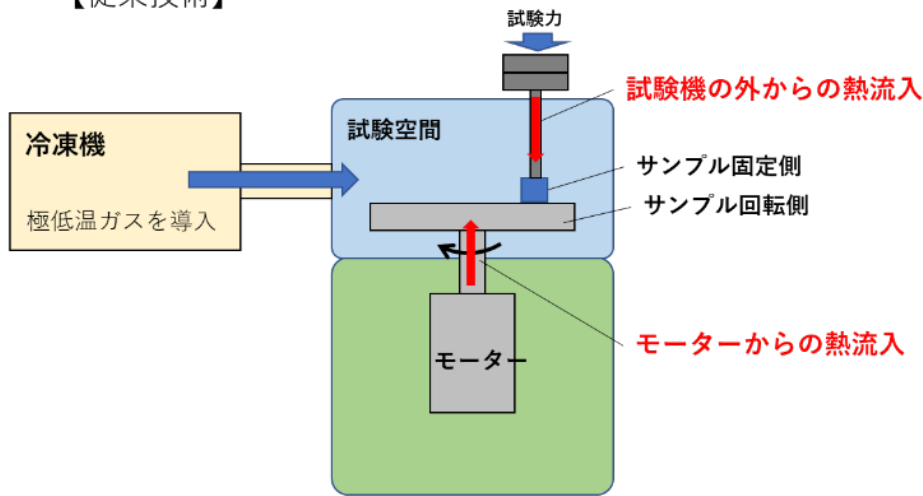
1.1.1 研究開発の背景・研究目的

水素は、クリーンエネルギー媒体の筆頭候補であり、我が国は水素社会の実現に向けて新産業の育成およびインフラ整備に取り組んでいる。水素を貯蔵運搬する際に最も体積効率が良いのは液体水素を用いる方法であり、絶対温度 20 ケルビン (K) (=摂氏マイナス 253 度) において動作する部品、特にバルブ・パッキン等の部材の開発が重要となる。また、宇宙産業においても液体水素を燃料として用いるが、バルブやパッキンの不良は事故(例:スペースシャトル・チャレンジャー号)に直結するため、信頼性のある材料および工法の開発は必須である。バルブやパッキンでは低温に耐える合成樹脂および複合材料が使用されているが、現在のところわが国では液体水素温度における摩耗試験を行う手段がなく、米国 NASA の報告書等を参考に部材や工法の選定が行われている。



● 従来技術での課題

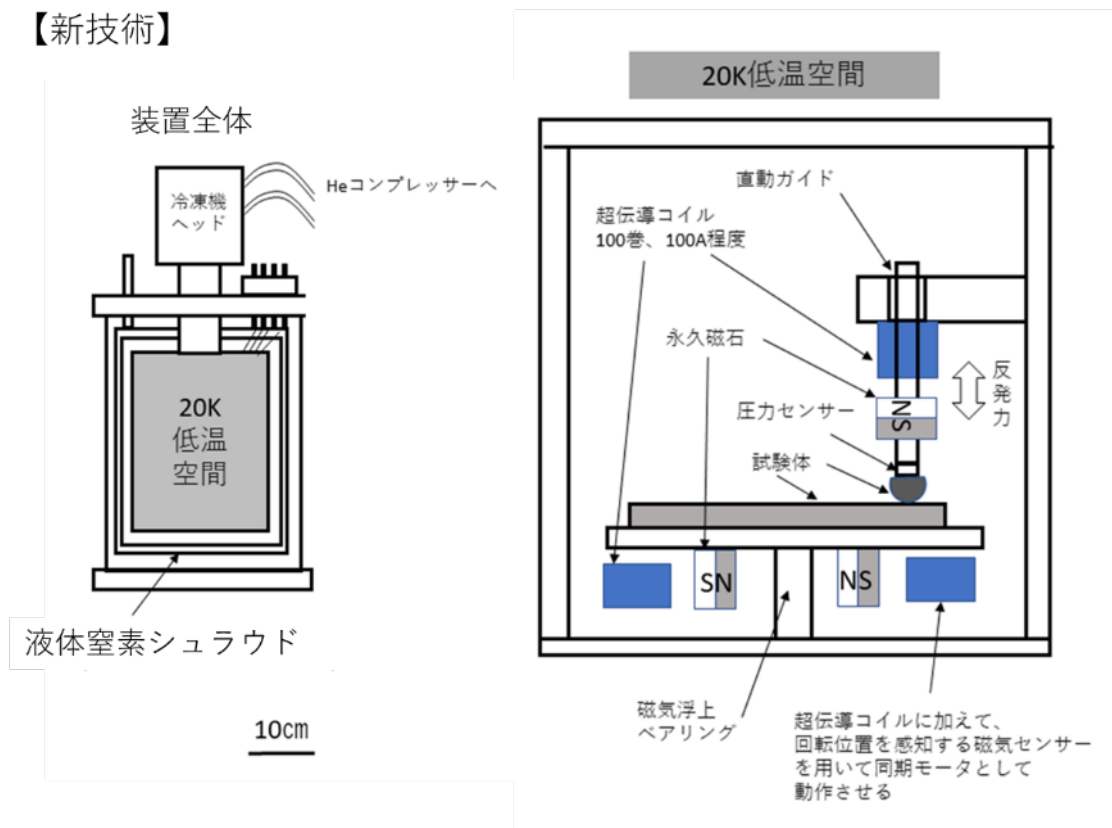
【従来技術】



外部からの熱流入が大きく、摂氏マイナス150度以下に冷やすことができない。

●新技術を実現するために解決すべき研究課題

【新技術】



サンプルの回転機構、サンプル固定側の押し当て機構すべてが、冷凍機によって冷却された空間に納まっているので外部からの熱流入を極小にできる。

⇒今までない、低温領域(-250℃レベル)の摩耗試験評価が可能になる！

ヘリウム循環型冷凍機は、20K 付近で数W～数十Wの冷却能力を持つものが市販されているため、測定のための低温環境を作ることは可能である。摩耗試験や力学物性試験には、この低温環境下で試験体に応力を掛けた状態で運動させることが必要である。例えば、摩耗試験機としては回転試験片の上に固定試験片を一定の加重（例 1000 ニュートン）で押し付けて設定回転数（例 6000 回転/分）で一定時間回転させ、取り出して摩擦痕を解析するなどの手法がとられる。（図 1 参照）しかし、低温環境下での駆動には困難を伴う。回転運動を駆動するためにモーターを中に入れると発熱を伴い、外に置いたモーターで駆動すると大きな熱流入が伴う。この熱をできるだけ抑制しないと低温環境の維持のため大きな冷凍機が必要になるとともに、温度の様な制御に困難が生じる。現在のヘリウム循環型冷凍機は冷却効率が 0.5%以下と悪いので、室温環境での試験機のモーターでは気にせずに使われる 10W 程度の発熱・熱流入でも kW 級の消費電力の増大が生じ、また装置も大型化してしまう。

この問題を克服するため、本提案では、まず高温超電導体を用いたモーターを試作し、液体水素温度で発熱のない駆動系を開発して用いることを目標とする。幸い、銅酸化物高温超電導体の線材化技術がようやく実用化し、住友電工（株）等から液体窒素温度（絶対温度 77K）以下で超伝導を示す線材が市販されるようになってきている。高温超電導線材について、これまで無冷媒磁石などへの応用は報告されているが（例：鉄道総研 超伝導リニアモーターカーの車両用電磁石）、実用的なモーターを製作した例はない。実現すれば、世界でも初めての技術となる。高周波同期モーターによる回転駆動系、押し付け・引張試験のための直線駆動系（プランジャー）等、これまでになかった要素技術の設計製作という、原理的には可能だがチャレンジングな課題の解決が必要である。また、低温での力や変位の測定も必要となるので、ピエゾ抵抗効果を用いた圧力センサーやレーザー干渉計の組み込み等も行い、試作機を完成させる。

さらに、超伝導モーター・アクチュエータの電源技術の開発が必要である。JR 東海/鉄道総研の超伝導リニアモーターカーの推進磁場は常伝導であり、磁場が短時間（秒単位）で変化する超伝導コイルは、核融合研究施設 JT-60, ITER のプラズマ閉じ込め用途などに用いられている（図 2）。超伝導電磁石は非常にインピーダンスが低く、また磁場の時間変化に応じて大きな逆起電力が生じるため、毎分 6000 回転のモーターでは、電源の設計にも技術的な工夫の余地が大きい。核融合用途では半導体スイッチによる電流方向切り替えと放電用の大電流耐熱抵抗が用いられており、磁場方向の切り替えのたびにエネルギーが失われる。今回開発する超伝導モーターでエネルギー回生型の小型電源を開発できれば、他用途にも大きな波及効果があると考えられる。

エネルギー回生は、超伝導コイルに蓄えられるエネルギーを半導体スイッチでコンデンサに移すことによって行う。今回考えている超伝導コイルの自己インダクタンスは $L=15\ \mu\text{H}$ 、 $I=100\text{A}$ 流すとするとエネルギーは $LI^2/2=0.075\text{J}$ 。電圧 1V でコンデンサに蓄えたとすると、 $CV^2/2=0.075$ から、 $C=150\text{mF}$ となる。電気二重層コンデンサでは速度が不足するが、最近の高周波対応大容量電解コンデンサ (10mF 程度) を並列に 15 個用いれば不可能な値ではない。スイッチ切り替え時に超伝導コイルからの起電力をモニターしながらコンデンサに適切に充電する必要がある、マイコン制御が必要など回路的にはチャレンジングである。

ポテンシャルとしては、SL の北海道大学・島田教授は電子回路技術に詳しく、半導体スイッチを用いた回路も多数製作している (<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/nl803284t> や <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsanm.1c04048> など)。

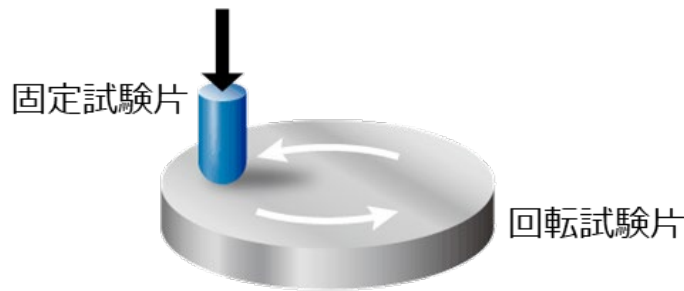


図1 磨耗試験機のイメージ図

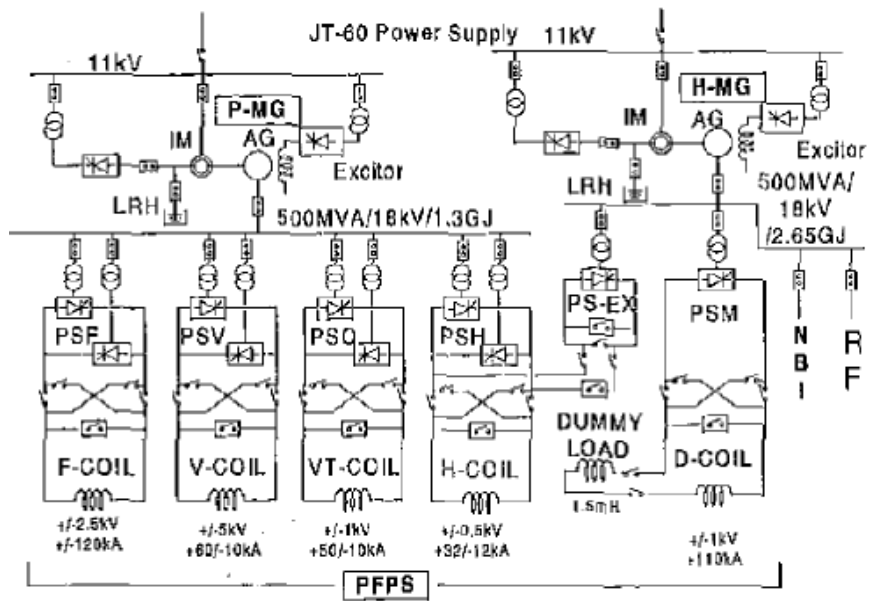


Fig. 1. Schematic of JT-60 power supplies

図2 核融合施設 JT-60 での超伝導コイル電源回路 (ITER でも方式は変わらない)

引用元: M. Matsukawa et al., IEEE Trans. Appl. Superconductivity 10, 1410 (2000).

比較項目	最低試験温度	真空度	駆動方式
【従来技術】	123K (-150℃)	1×10^7 torr	汎用モーター
【新技術】	20K (-253℃)	5×10^7 torr	超電導モーター

1. 1. 2 研究開発の目標

本研究では、20K(-253℃)での磨耗試験、引張試験が可能な試験装置を開発する。

以下に、本開発の研究テーマと、各テーマの技術的目標を記載する。

【1. 高温超伝導線材を用いた駆動機構の開発】【令和4年度～令和5年度実施】

液体水素温度(20K)付近で動作する高温超電導線材を用いた駆動系を試作する。ヘリウム循環型冷凍機と液体窒素シールドを用いた低温槽の中で、高温超電導線材コイルと永久磁石を用いて回転駆動と直線駆動を設計・製作する。非常にインピーダンスが低く大電流を流す電磁石となるため、駆動電源のエレクトロニクスにも新設計が必要である。

役割としてはPL(株)キグチテクニクス 戦略企画部 宮本 伸樹部長)が実機製作を担い、SL(北海道大学 島田 敏宏教授)が基本設計と試作を行う。

技術的目標値：回転駆動の目標値は1年目は600回転/分、直線駆動力の目標値は10ニュートンとする。2年目の目標値は回転速度を3000回転/分、直線駆動力を100ニュートンとする。

【2. 低温で動作する圧力センサーの開発】【令和4年度～令和5年度実施】

シリコン等のピエゾ抵抗効果を用いて、液体水素温度付近で動作する圧力センサーを製作する。これには、現在市販されているセンサーを液体水素温度で校正することになるが、圧力印加と変位測定のための専用の機構が必要である。変位測定には外部に設けた光学窓を通したレーザー干渉計を用いる。

役割としてはPLが校正の実施を担い、SLが手法・装置を確立する。

技術的目標値：20K環境中での変位・圧力測定の実現

【3. 摩耗試験機本体の設計・製作】【令和4年度～令和5年度実施】

摩耗試験を行う装置の設計・製作を実施する。1.で開発した回転駆動機構と2.で開発した圧力センサーを直線駆動に組み合わせ、回転ディスク式の摩耗試験機として完成させる。

その後、20Kに冷却できるように液体窒素シュラウドおよび真空ジャケットを取り付け試験機として完成となる。役割としてはPLが設計・製作を行う。

技術的目標値：摩耗試験機の完成(回転速度：3000回転/分、試験力100ニュートン)

【4. 引張負荷を与える機構の開発】【令和4年度～令和5年度実施】

引張試験を行う装置を開発する。初めは断面がmmサイズの小型の試料のみに対応するが、直線駆動力を増大させて、断面をできるだけ大きくできるようにする。

役割としてはPLが設計・製作を行う。

技術的目標値：引張負荷機構の完成

【5. 熱サイクルを与える機構の開発】【令和4年度～令和5年度実施】

力学的負荷をかけながら熱サイクル試験を行う装置を開発する。3.で製作した摩耗試験機本体の基本構造は変更せず、外部からサンプルに熱流入させる構造を付与する。

こうすることで、20Kまで冷却された試料を室温付近まで温めることができ、冷凍機の制御と熱流入を制御することで適切な温度サイクルを与えることができる。

役割としてはPLが設計・製作を行う。

技術的目標値：20K⇔270K(-250°C⇔室温)の温度サイクルの実現

【6. 従来機を超える雰囲気制御・温度可変範囲を備えた汎用の試験機のプロトタイプ製作】

【令和4年度～令和5年度実施】

販路を拡大するため、5で開発した温度サイクル機構に加え、試験の雰囲気制御できる汎用機を製作する。極低温中で摩擦現象が発生する部品の中にはフッ素環境、酸素環境など非常に厳しい環境で使用されるものが少なくなく、試験パラメーターとして試験温度だけでなく、試験の雰囲気制御ができることは、ユーザーにとって大きな魅力になると考えている。こちらを全面に押し出し、現在10万台程度が稼働していると推測される摩耗試験機・引張試験機の世界シェアの一部をとりに行く。

役割としてはPLがプロトタイプ機の製作を担い、SLが今までにない環境パラメーター（温度、雰囲気）での物性データの取得を行う。

技術的目標値：雰囲気制御・温度可変範囲を備えた汎用の試験機の完成

【7. 液体水素中試験装置の開発】【令和5年度実施】

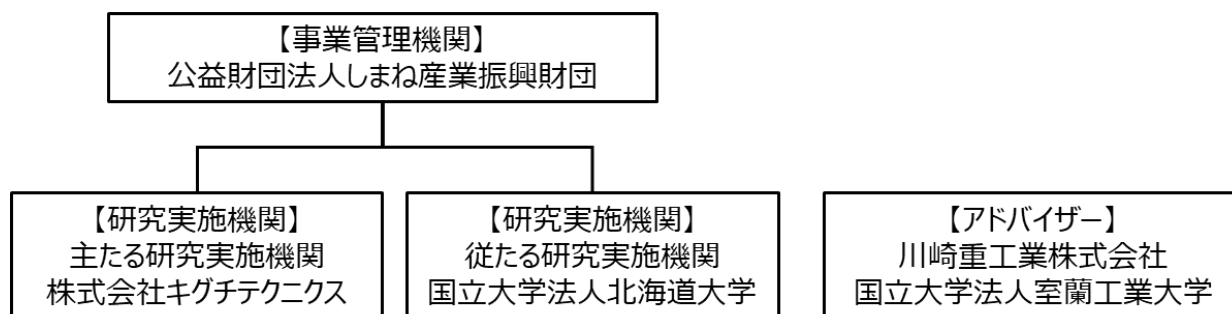
液体水素を扱う川下企業からのニーズを受けて、液体水素中で、摩耗試験と引張試験が行える試作機を製作する。極低温中で、しかも液体中での試験片の摩耗試験と引張試験が行える機構を検討し、1で開発した回転駆動機構と2で開発した圧力センサーを応用した機構とし、防爆施設での実験を行い、摩耗試験と引張試験が行える機構の最適化を検討し、詳細設計を行い、試作機を完成させる。

役割としてはPLが設計・製作を行う。

技術的目標値：液体水素中で摩耗試験及び引張試験が行える試作機の完成

1. 2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者名、アドバイザー）

1. 2. 1 研究組織及び管理体制



統括研究者代表者（PL） 株式会社キグチテクニクス 戦略企画部長 宮本 伸樹
副統括研究者代表者（SL） 国立大学法人北海道大学 教授 島田 敏宏

1. 2. 2 研究全体の総括、プロジェクトの運営管理

【補助事業者】公益財団法人しまね産業振興財団

管理員

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
安田 征司	企業振興部 新事業支援課・課長	事業管理責任者
杉原 暁	企業振興部 新事業支援課・主幹	プロジェクト管理・運営
福田 裕介	企業振興部 新事業支援課・主事	プロジェクト管理・運営

補助員

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
小村 彩加	企業振興部 新事業支援課・専門員	プロジェクト管理・運営

【間接補助事業者】株式会社キグチテクニクス

研究員

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
宮本 伸樹	戦略企画部・部長	(1) - 2 (2) (3)
石川 直元		(4) (5) (6) (7)
大倉 淳子		

管理員

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
安井 誠司	総務部・部長	プロジェクト管理・運営
畑 洋子	総務部総務課・課長	プロジェクト管理・運営

【間接補助事業者】 国立大学法人北海道大学

研究員

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
島田 敏宏	大学院工学研究院・教授	(1) -1 (2) (6)

管理員

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
尾野 美波	工学系事務部経理課・外部資金担当	プロジェクト管理・運営

【アドバイザー】

氏名	所属・役職
濱本 貴也	川崎重工業株式会社 航空宇宙システムカンパニー 航空宇宙技術本部 材料技術開発部 部長
清水 一道	国立大学法人室蘭工業大学 副学長 もの創造系領域機械航空創造系学科機械システム工学コース 教授

2. 導入した技術、機器設備

表 2.1 に導入した設備と用途を示す。

表 2.1 導入した設備と活用方法(キグチテクニクス)

品名	仕様	用途 (サブテーマ)
摩擦摩耗試験機	EFM-3-G	1, 6
4K冷凍機	SRDK415D2+F50L	3, 5
ターボ分子ポンプ	nEXT400D ICF152	3
ターボ分子ポンプ用TAGコントローラ	エドワーズ ターボ分子ポンプコントローラー	3
ドライルーツポンプ	nXR60i	3
真空計	PKR251 DN 40CF-F	3
335温度コントローラ	335型	2, 3, 5
シリコンダイオード温度センサ	DT-670A-CU	2, 3
セルノックス抵抗温度センサ	1.4-325 K	2, 3
超電導線	Type Hti-NX 170A級	1
チラー	PCU-SL10000	1
油圧加振機	MTS モデル244.21 50kN油圧加振機	7
磁気シール	SSB006NN	1
ギャップセンサー	PU-05	7
低温真空チャンバー	—	1

【サブテーマ】

- 【1】 高温超伝導線材を用いた駆動機構の開発
- 【2】 低温で動作する圧力センサーの開発
- 【3】 摩耗試験機本体の設計・製作
- 【4】 引張負荷を与える機構の開発
- 【5】 熱サイクルを与える機構の開発
- 【6】 従来機を超える雰囲気制御・温度可変範囲を備えた汎用の試験機のプロトタイプの製作
- 【7】 液体水素中試験装置の開発

表 2.2 導入した設備と活用方法（北海道大学）

品名	仕様	用途（サブテーマ）
ベーシックプロセスガスモニター	BGM2-101	3
ターボ分子ポンプ	HIPace300 DN100 CF-F	3
ANSYS MAXWELL	Academic Research CFD /EM	1

【サブテーマ】

- 【1】 高温超伝導線材を用いた駆動機構の開発
- 【2】 低温で動作する圧力センサーの開発
- 【3】 摩耗試験機本体の設計・製作
- 【4】 引張負荷を与える機構の開発
- 【5】 熱サイクルを与える機構の開発
- 【6】 従来機を超える雰囲気制御・温度可変範囲を備えた汎用の試験機のプロトタイプ製作
- 【7】 液体水素中試験装置の開発

3. 補助事業の具体的内容

【1. 高温超伝導線材を用いた駆動機構の開発】



写真 3-1-1 コイル試作

熱を発生しない駆動機構として、高温超伝導線材コイルと永久磁石を用いたモーターを設計・試作した。

超伝導転移温度が液体窒素温度以上であるリボン状の高温超伝導体でコイルを作製し、液体窒素に漬けた状態で超伝導状態になることを確認し、電源も製作して磁場の発生と駆動機構としての動作を確認した。

モーターとしての安定した動作を行わせるために、超伝導磁石と磁気回路について、ANSYS 社製のシミュレータを用い、永久磁石の大きさや超伝導コイル・鉄芯などの構造を最適化し、摩耗試験機の試料駆動機構として十分な回転数とトルクで回転できるような設計を行った。

この設計で扇風機の 5 倍程度のトルクを発生させられるため、小型の摩耗試験機として機能することが期待される。

また、直線駆動についてもシミュレーションを用いて実用に耐える設計を行った。今回の研究開発により、手のひらサイズにまで小型化した、超伝導モーターの開発に成功した。また、当小型超伝導モーターを用いて、極低温度 20 K (−253℃) で、一般的な摩耗試験の手法である、Ring on disk 摩耗試験の実施に成功することができた。



写真 3-1-2 液体窒素に漬けた状態での実験状況

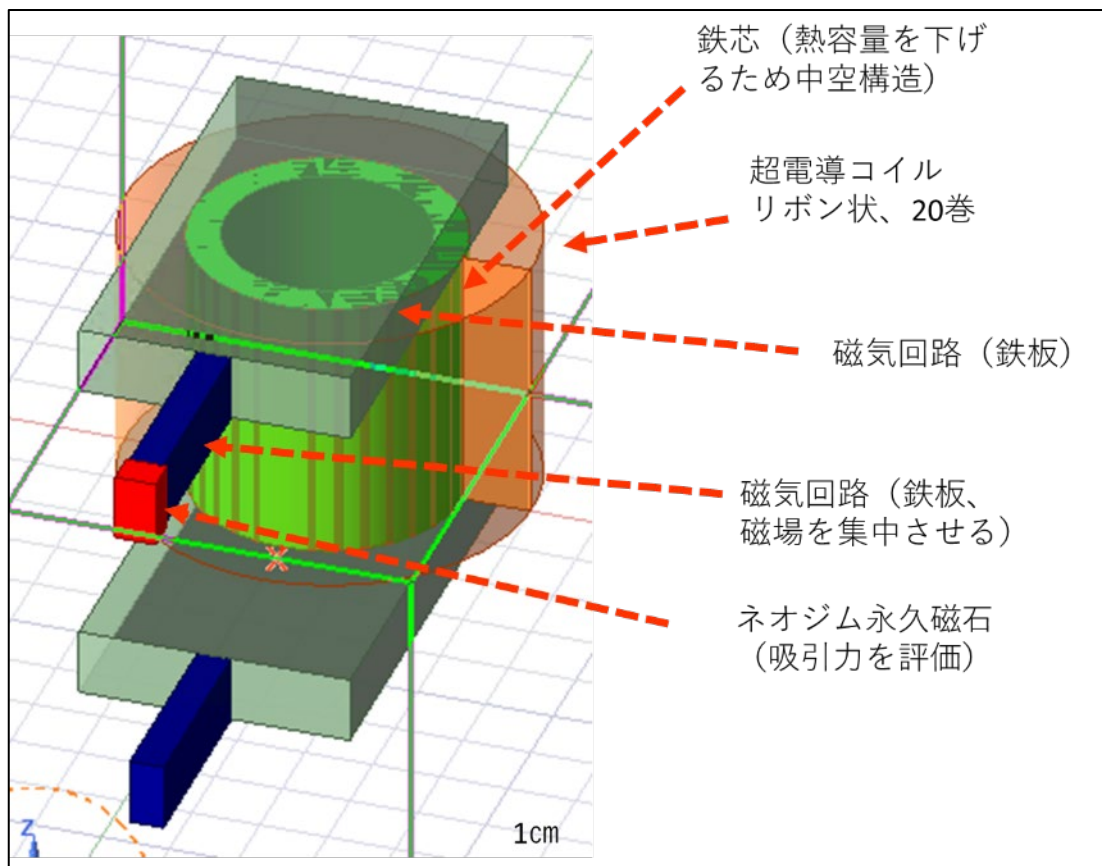


図 3-1-1 磁気回路設計シミュレーション (Ansys Maxwell)

鉄芯のくりぬき径（熱容量を下げる）

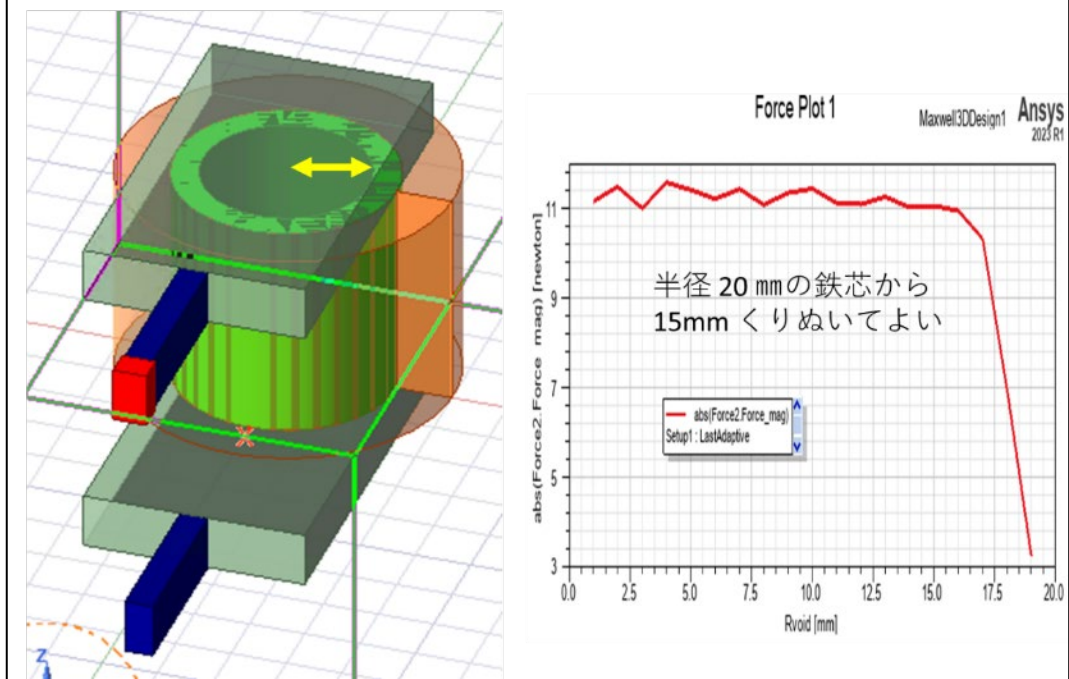


図 3-1-2 磁気回路設計シミュレーション (Ansys Maxwell)

鉄芯のくりぬき長さ

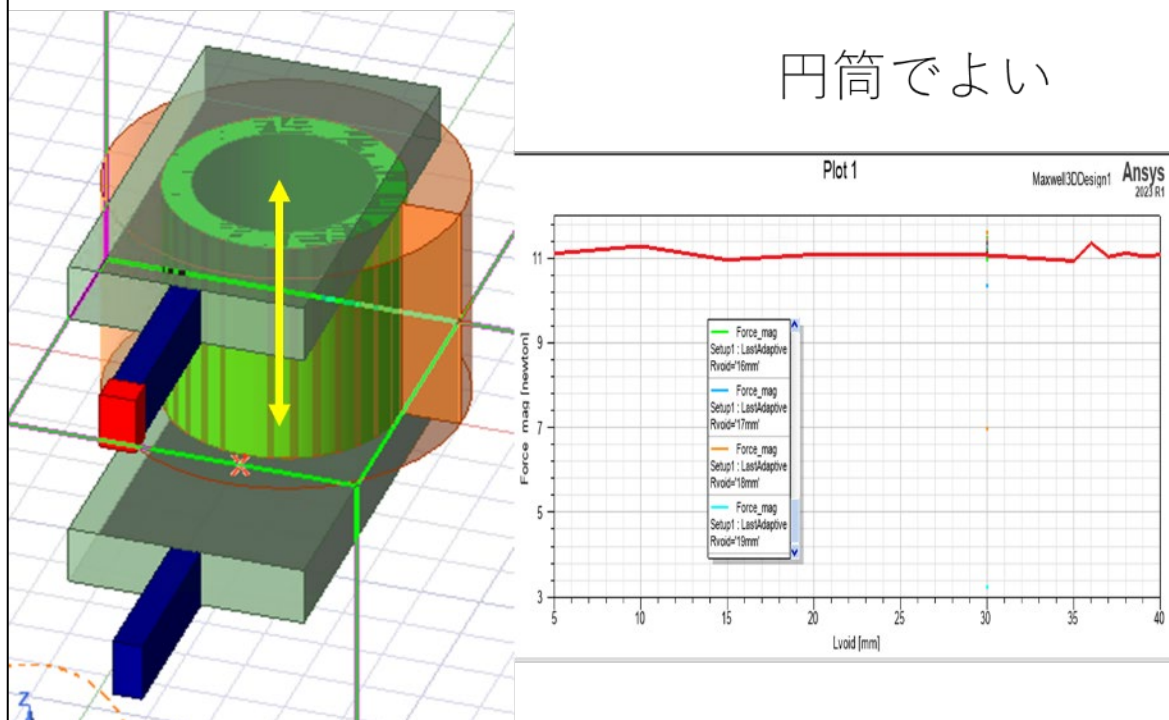


図 3-1-3 磁気回路設計シミュレーション (Ansys Maxwell)

永久磁石の大きさ

力は大きさにほぼ比例
だが、少し上に凸
(お得な大きさがある)

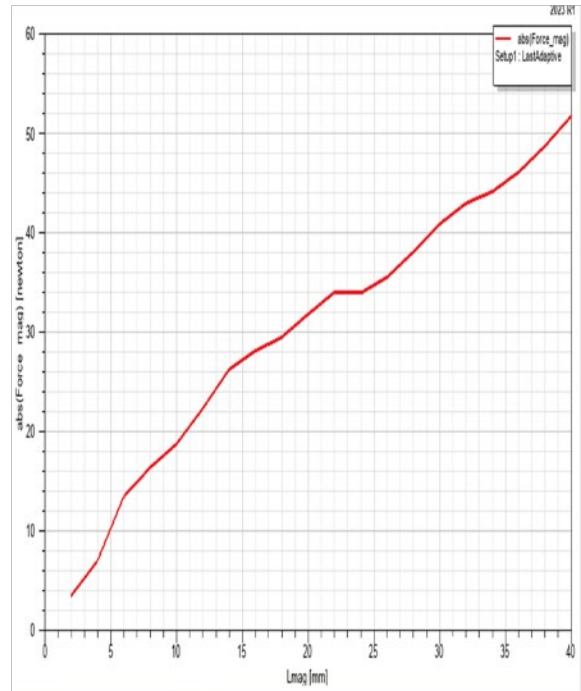
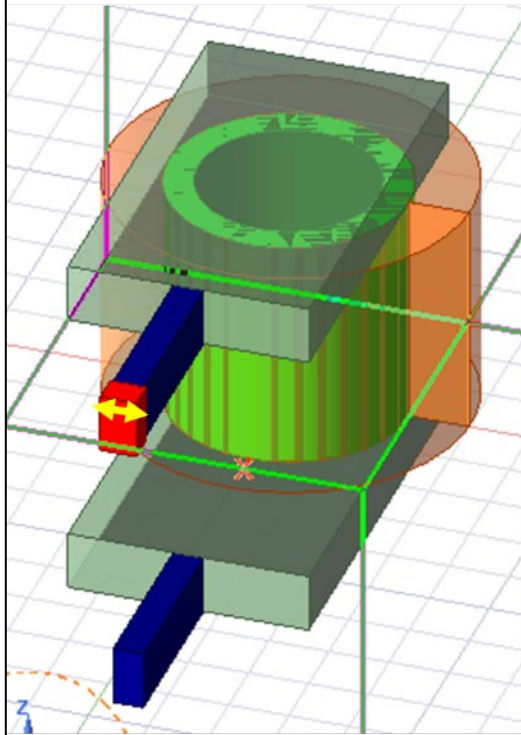


図 3-1-4 磁気回路設計シミュレーション (Ansys Maxwell)

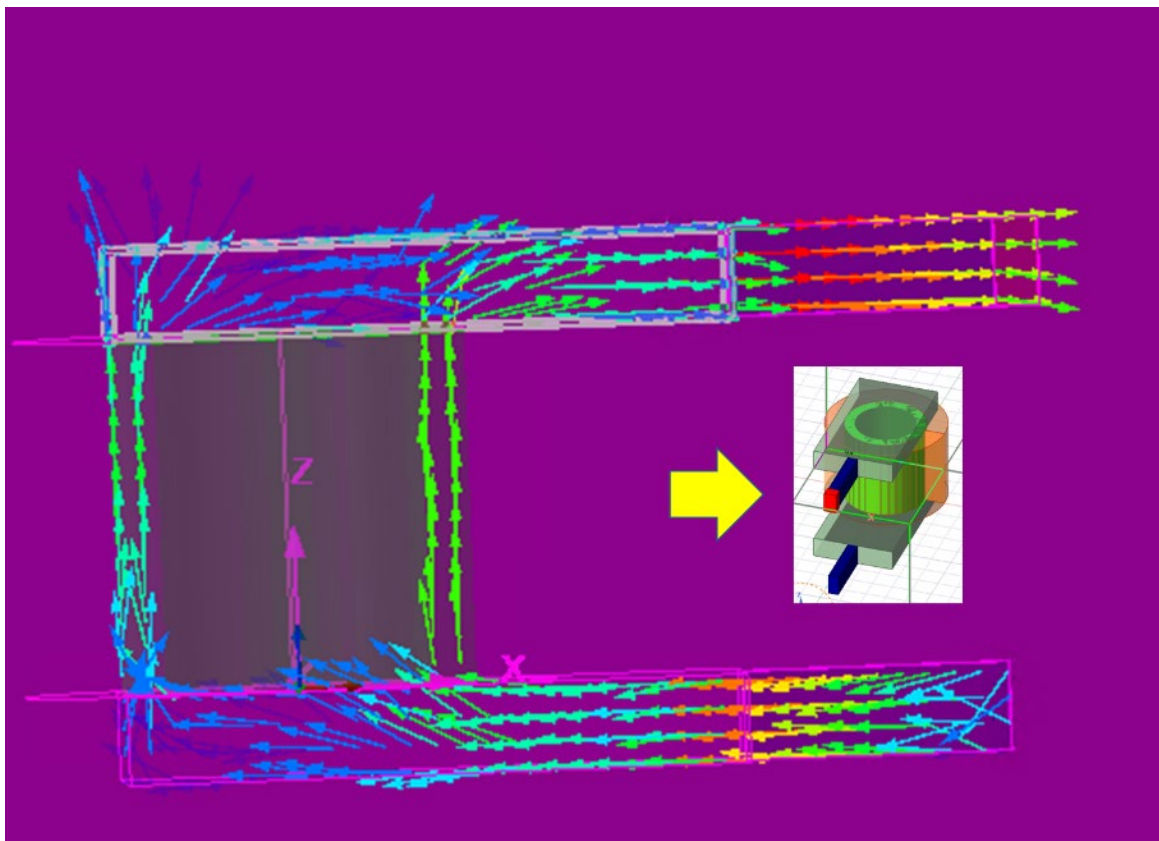


図 3-1-5 磁気回路設計シミュレーションによる磁場強度結果 (Ansys Maxwell)

【2. 低温で動作する圧力センサーの開発】

昨年度実施した、圧力印加と変位測定のための専用の機構を設計するために、最適なセンサー類の探索と、液体水素温度における校正方法や変位測定の機構について検討の結果、上述の試作機において、20 K環境中での変位・圧力測定の実験を行い、正常に動作することを確認できた。

【3. 摩耗試験機本体の設計・製作】

摩耗試験を行う装置の設計・製作のために必要な部品類の調達を行い、試作機の設計・製作に向けた動作・組付け等の検討及びシミュレーション等を行った。

また冷凍機の冷却能力を維持できる冷却機構を設計し、さらに真空チャンバーの最適化のためのシミュレーションを行った。

液体窒素シラウドを構成する各部品について、3D 設計図面を検討するとともに、真空度を高めるための 3D 設計図面のパラメーターの検証と最適化を図った。



図 3-3-1 装置外観

【4. 引張負荷を与える機構の開発】

昨年度の引張試験機のための機構の設計構想検討のほか、水素蒸発量が大きくなり、液体水素温度でも維持できるよう、島根県産業技術センターの技術指導を受けて、シミュレーションを実施し、クライオスタットのサイズを決定した。

当該サイズを決定したことを受けて、試験片が試験中にずれないようにするため、試験片を固定するための掴み具と治具を、弊社の従来技術を応用して開発した。



図 3-4-1 引張負荷を与える機構

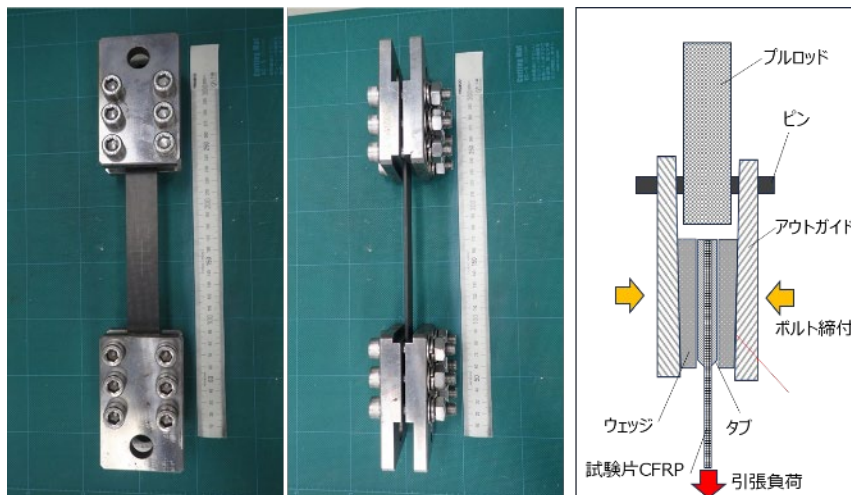


図 3-4-2 試験片クランプ治具

【5. 熱サイクルを与える機構の開発】

摩耗試験の試作機中で、20 Kまで冷却できる冷凍機の制御と、20 Kまで冷却された試験片サンプルを270 K（室温付近）まで温めることのできる熱流入を制御できる機構について、昨年度実施したシミュレーション結果を踏まえた設計構想を受けて、構成する部品等を調達し、機構として組上げ、摩耗試験試作機に組み込むことができた。

【6. 従来機を超える雰囲気制御・温度可変範囲を備えた汎用の試験機のプロトタイプ製作】

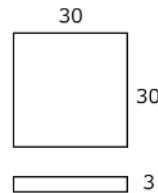
昨年度実施した、汎用試験機としての基本機能を実現するために、冷却機能を維持できる試験機としての構造のシミュレーションと設計構想を受けて、摩耗試験機及び引張試験装置としてプロトタイプを試作した。試作したプロトタイプをもとに、20 K及び50 KでのRing on diskの摩耗試験

4 サンプルの実験を行い、試験片の摩耗状況と摩耗の深さの計測を行い、摩耗試験機として基本的機能が行えることを確認できた。また、引張試験装置においては、2 サンプルの実験を行い、試験片チャッキングの滑りは発生せず、良好な破断であることを確認できた。

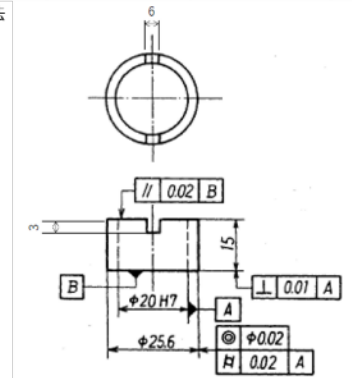
表3-6-1 摩耗試験予備試験条件

材質	試験方法	試験温度	加圧力	回転数	試験時間
回転側：PA9T 固定側：SUS304	Ring on disk	・20K (-253℃)	10N	600rpm	600sec
回転側：PA9T+GF50% 固定側：SUS304		・50K (-223℃)			

PA9T (ポリアミド) 工業用プラスチックとして、低吸水性、高耐熱性、高耐薬品性、寸法精度に優れており、電子部品や車載部品への用途として使用されている。



回転側 (PA9T/PT9A+GF50%)



固定側 (SUS304)

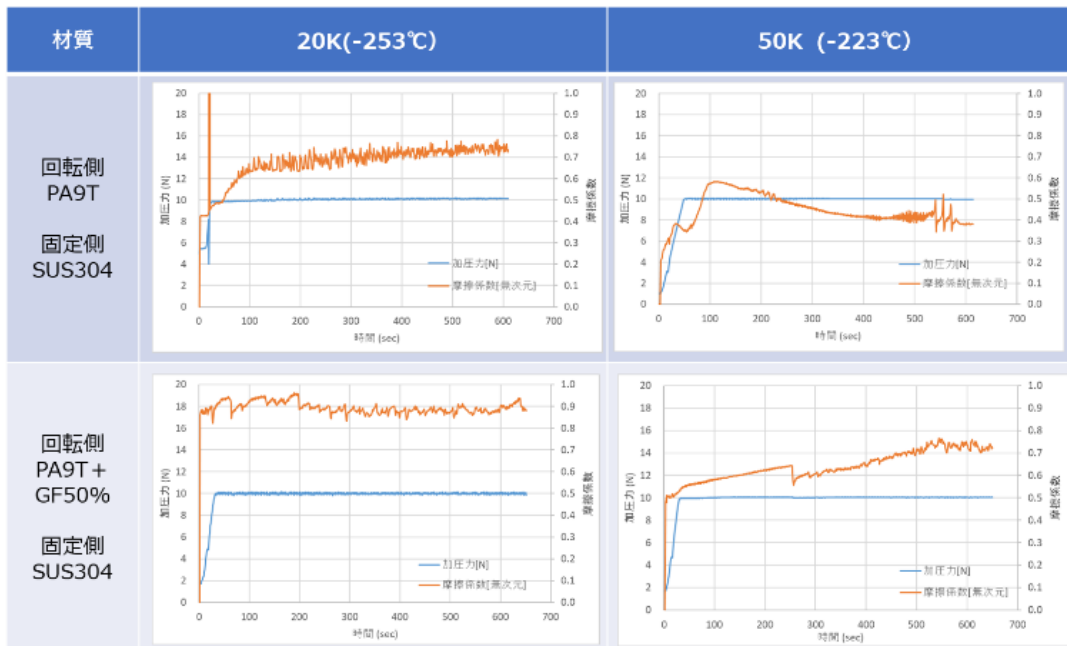


図3-6-1 予備試験結果

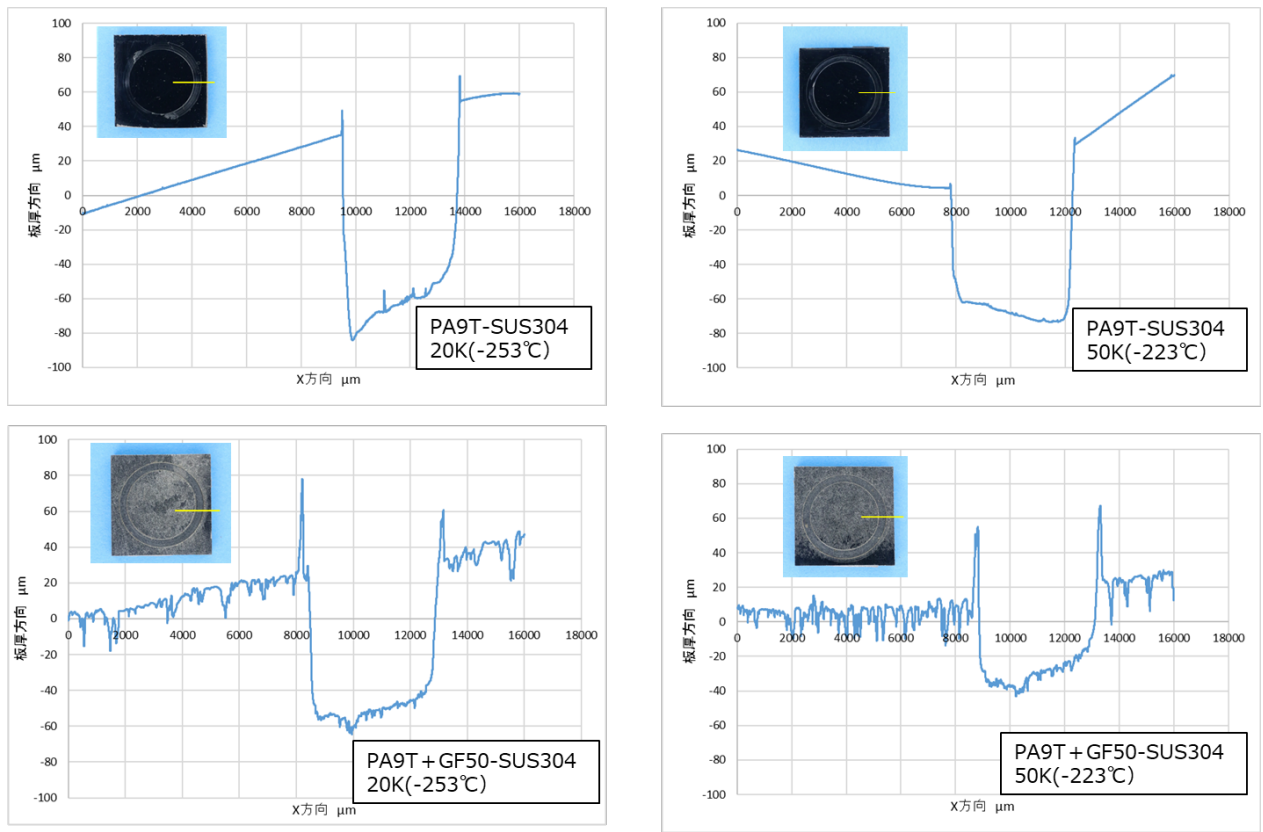


図3-6-2 予備試験結果 (試験片 摩耗痕計測結果)

試験片情報			試験条件		試験結果				
識別	幅 b mm	厚さ h mm	試験温度 ℃	試験速度 mm/min	弾性率			最大荷重 kN	引張強度 MPa
					弾性率範囲		結果 GPa		
					Lower με	Higher με			
1	25.401	1.025	-196	1.27	1000	3000	62.4	11.52	443
2	25.403	1.047	-196	1.27	1000	3000	58.9	11.35	427

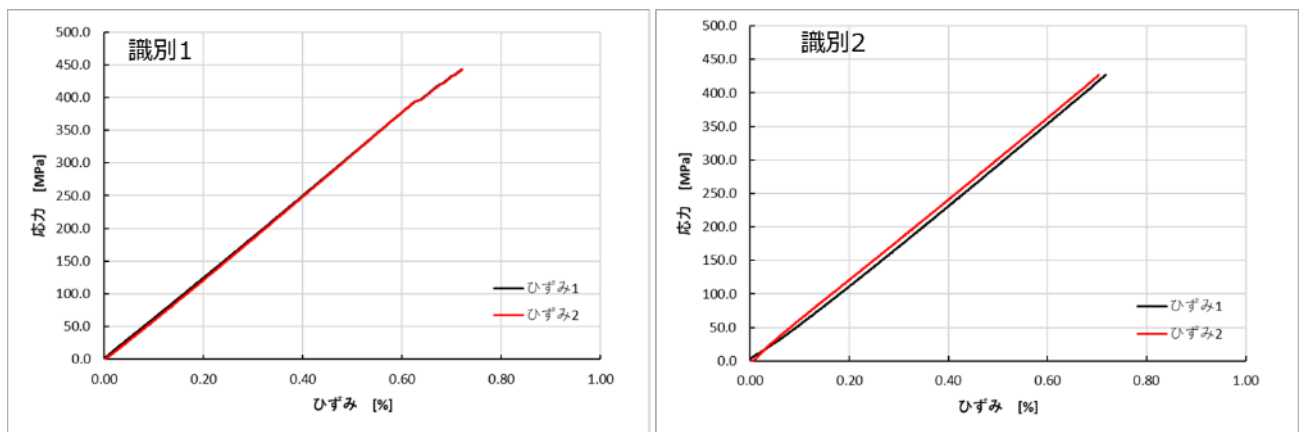


図3-6-3 液体窒素中でのCFRP引張試験結果

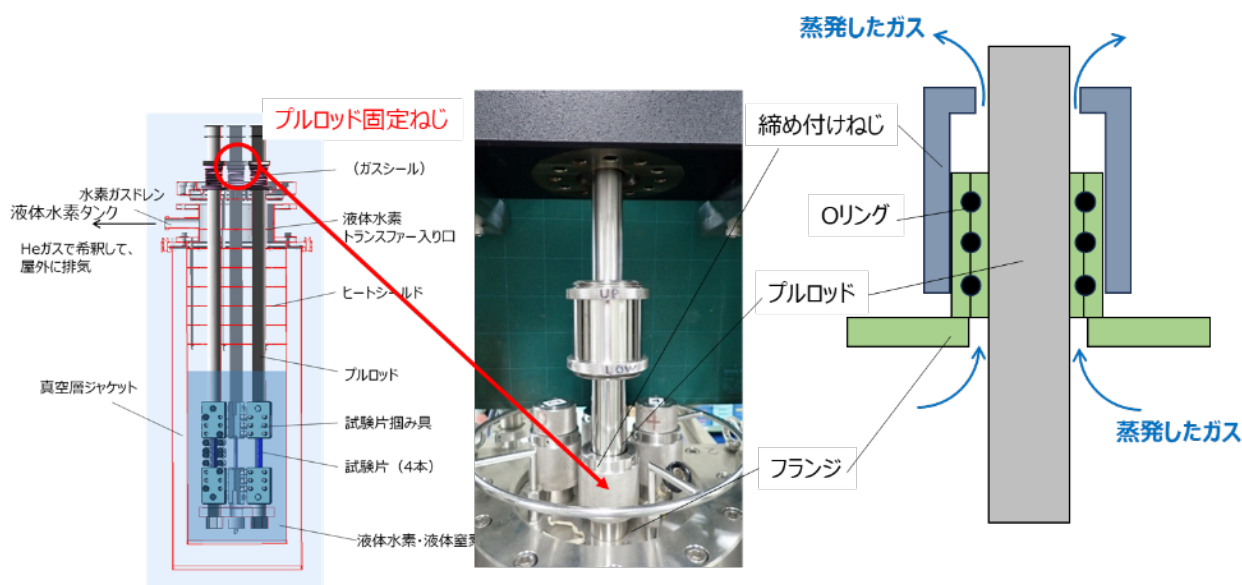
【7. 液体水素中試験装置の開発】

当該補助事業実施を川下企業数社にPRを行ったところ、極低温中でも液体水素中での摩耗試験と引張試験のニーズが判明した。

そのため、液体水素雰囲気での研究開発と同時に、液体水素中で摩耗試験と引張試験が行えるよう、昨年度実施した試作機のプロトタイプ的设计等機構を検討し、詳細設計を行った。

詳細設計図を作製し、唯一液体水素中で実験ができる、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）での実験に向けて、JAXAと協議を行ったが、実験中に液体水素が蒸発し、そのガスが室内に漏れ出し、空気中で爆発の危険があることが判明したため、機構及び詳細設計を見直し、水素ガスを爆発限界以下の濃度に希釈する機構を設けることとなり、当該機構の設計構想を行い、JAXAに提案を行った。

現在JAXA内において検討されており、近日中に回答が得られる見込みであり、承認が得られ次第、部品の詳細設計、加工を行うこととしている。



- 試験準備をする際には、ブルロッドが落下しないように、締め付けねじを締める。
- 試験実施時は、Oリングがブルロッドに触れていると、試験力に誤差が生じるので締め付けねじを緩めてフリーな状態とする。
→フランジとブルロッドの間から、蒸発したガスが漏れる。(液体水素の場合は、爆発の危険)
→水素ガスを爆発限界以下の濃度に希釈する機構を設けるようにJAXAから指導

図 3-7-1 液体水素中引張試験機の技術的課題

4. 補助事業の成果及びその効果

汎用試験機として必要な熱を発生しない駆動機構として、超電導モーターをこれまでの大きなサイズから手のひらサイズへの小型化に成功した。

また小型化した超電導モーターによる、極低温度20K (-253℃)で、一般的な摩耗試験の手法である、Ring on disk摩耗試験の実施に成功することができ、雰囲気制御・温度可変範囲を備えた汎用の試験機のプロトタイプとして試作機を完成させることができた。

また、当該研究成果を応用し、液体水素中での摩耗試験及び引張試験ができる機構を研究開発し、液体窒素中で引張試験を実施し、問題なく試験できることを確認できた。

しかし、当該試作機の機構では、液体水素中での試験中に、液体水素が蒸発し、水素ガスが漏れだすことがJAXAにおいて指摘されたことから、今後蒸発した水素ガスを希釈する機構を組み込んで、液体水素中で試験のできるプロトタイプの完成を目指す。

5. 補助事業の成果に係る事業化展開について

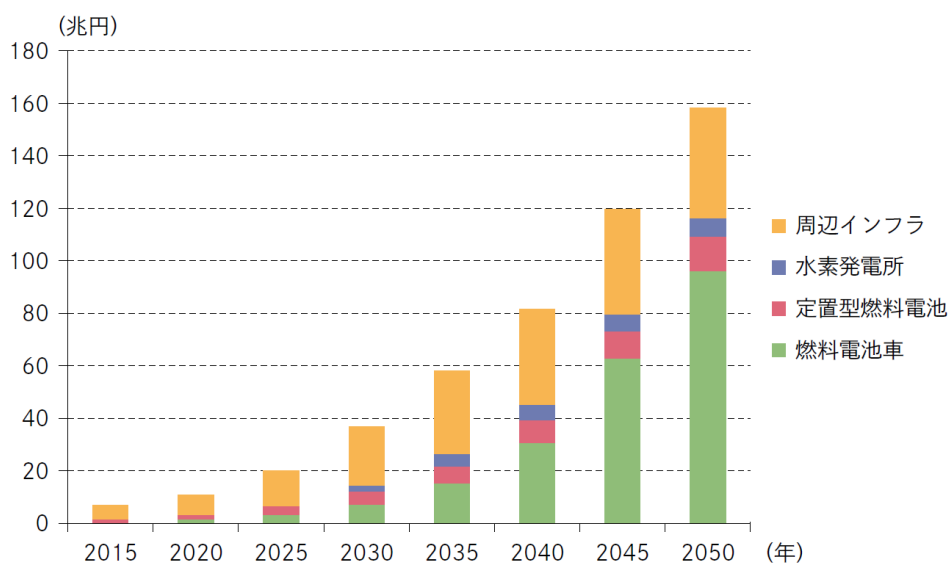
5.1 補助事業の成果が寄与すると想定している具体的なユーザー、マーケット及び市場規模等に対する効果について

本研究成果の成果が寄与すると想定しているユーザーは、以下の通りである。

想定する分野で使用される個体潤滑剤、シール材、構造用部材の評価と、装置販売を計画している。

- ①インフラ（水素ステーション、水素発電、定置型燃料電池）
- ②自動車（燃料電池車）

水素エネルギーの市場は、現状は家庭用燃料電池システムなどの定置用燃料電池が中心であるが、燃料電池自動車の導入と水素ステーションの整備により初期市場が形成され、その後、これらの本格的な普及や、水素を利用した発電の導入により、大きく拡大することが期待される。その規模は、国内では2030年に1兆円程度、2050年に8兆円程度である。また、世界の水素インフラの市場規模は、2030年には40兆円弱、2040年には80兆円、2050年には160兆円になると予測している。



③航空宇宙（航空機、ロケット）

液体水素を燃料として飛ぶ水素航空機の開発も川崎重工業、JAXA を中心に進んできている。

長年、国際共同開発の一員として期待の開発・製造にかかわってきた川崎重工業は、水素に関しても「つくる・はこぶ・ためる、つかう」の流れを長年蓄積してきており、水素航空機では、水素タンクや水素燃料供給システムなどの高度なシステムを開発・製造していく予定である。

航空機において、水素の漏れは絶対にあってはならないことであり、本研究で開発した液体水素中の摩耗試験機、引張試験機によって開発の後押しができると考えている。

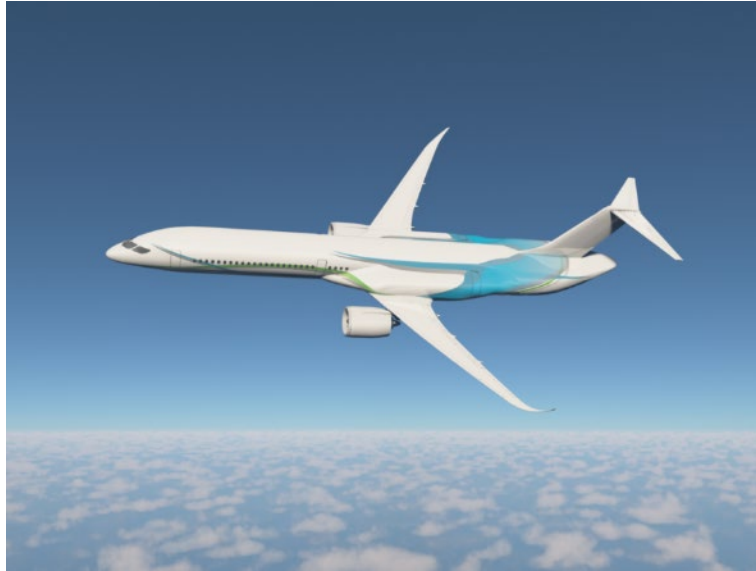


図 5.1-2 水素航空機のイメージ（川崎重工業）

5. 2 補助事業の成果・効果の価格的・性能的な優位性のほか、事業化見込みについて、 目標となる時期・売上規模等

本研究で開発する試験システムは、液体水素温度並びに液体水素中での摩耗試験を実現するものであり、国際的にみても類を見ない試験機である。還元性が強い液体水素の中で摩耗現象を評価することは今まで見えなかった表面劣化の状況が明らかになることが予想され、日本国内のみならず海外からも受託評価の引き合い、試験機販売の引き合いが見込まれる。

事業化は十分に実現できると考えている。事業化によって売り上げを立てられる時期は、補助事業終了後の令和6年度からを予定しており、評価のボリュームや内容に依存するが、5,000千円～10,000千円/件を予定しており、年間5件程度受託評価を行い、25,000千円～50,000千円の売り上げを計画している。

また、装置の販売に関しては、令和9年度からの販売を計画している。

令和6～令和7年度の受託評価の中で、装置の操作性に関する追加研究を行い、令和9年度1台、令和10年度2台の販売を予定している。

販売価格は1台20,000千円程度を検討している。

5.3 事業化に至るまでの遂行方法や今後のスケジュール

5.3.1 超電導モーター式 摩耗試験機

超電導モーターを応用した摩耗試験機は完成することができたので、販売に向けて、以下の改良を実施していく予定である。

- ・感電等のリスク排除⇒超電導モーターを駆動の 200A 近い大電流を使用するため
- ・ユーザーインターフェースの充実⇒使いやすい試験機にするため

5.3.2 液体水素式 摩耗試験機

未完成の部品の製作を実現するために、部品加工メーカーとの協議をすすめ、早期に完成させる。R6 年度下期には、液体水素でのデモ試験を実施できる予定で進める。

5.3.3 液体水素式 摩耗試験機

水素ドレンを改良し、JAXA にてデモテストを R6 年度上期に実施する予定である。

表 5.3-1 今後のスケジュール

フェーズ	タスク		年度				
			R6	R7	R8	R9	R10
開発	摩耗試験機	超電導モーター式	→	・感電等のリスク排除 ・ソフトウェアの開発			
		液体水素式	→	・部品の追加加工、組み上げ ・JAXA でのデモテスト			
	引張試験機	液体水素式	→	・水素ガス希釈機構の追加 ・JAXA でのデモテスト			
知財	特許			→ 出願		→ 出願公開 特許権設定	
事業化	受託評価の開始		→ 5 件/年			→ 10 件/年	→ 15 件/年
	追加研究		→ 操作性向上に関する追加研究				
	設備投資		→ 1 号機			→ 2 号機	→ 3 号機
	装置の生産				→ 受注		
	装置の販売					→ 販売	

6. 補助事業の成果に係る知的財産権等について

6. 1 知的財産権の出願及び取得並びに論文掲載の有無について、補助事業実施中の状況及び今後の可能性

超電導モーターに関わる、構造、電源に関しては知的財産権の出願と取得を計画している。専門家である弁理士とも協議を行い、引き続き協議を進める予定である。

7. アドバイザーによるコメント

7. 1 川崎重工業株式会社 航空宇宙システムカンパニー 航空宇宙技術本部 材料技術開発部 部長 濱本 貴也 氏

水素の輸送、貯蔵、利用に関しての開発を加速させている中で非常に良い研究にアドバイザーとして参加させていただき事ができ光栄に感じている。液体水素中の強度、摩耗の評価を実施できる評価機関は未だないため今後の装置の作りこみに大きく期待し、可能な限り早い事業化に大きく期待する。

7. 2 国立大学法人室蘭工業大学 副学長 もの創造系領域機械航空創造系学科機械システム工学コース 教授 清水 一道 氏

極低温でのトライボロジーのデータはほとんどなく、摩耗メカニズムもまだまだ説明できる状態ではない。本研究を通じて、極低温トライボロジーのデータが充実し、水素社会をはじめ、宇宙開発が加速されていくことを大いに期待している。開発の残件もあるので、開発の速度を緩めることなく進めていただきたい。