

# 宇宙航空研究開発機構研究開発資料

## JAXA Research and Development Memorandum

---

### 30kN級液体ロケットエンジン用 90kW級試作LOX電動ポンプシステムの要素検証

Element verification of 90kW class prototype LOX electric pump system  
for 30kN class liquid rocket engine

島垣 満, 眞武 幸三, 川崎 聡, 高田 仁志, 池田 隼人, 渡邊 啓悦, 高橋 正晴  
SHIMAGAKI Mitsuru, MATAKE Kozo, KAWASAKI Satoshi, TAKADA Satoshi  
IKEDA Hayato, WATANABE Hiroyoshi and TAKAHASHI Masaharu

2022年2月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

# 目 次

概要 .....	1
1. はじめに .....	2
2. 研究課題 .....	2
3. LOX 電動ポンプ各要素の検証 .....	4
3.1. モータ要素の検証 .....	4
3.1.1. 磁石磁力 .....	4
3.1.2. 逆起電圧 .....	5
3.1.3. モータトルク .....	6
3.2. 磁石飛散防止材 .....	6
3.3. 低温運用による要素温度 .....	7
4. まとめ .....	9
謝辞 .....	10
参考文献 .....	10

# 30kN 級液体ロケットエンジン用 90kW 級試作 LOX 電動ポンプシステムの要素検証

島垣 満<sup>\*1</sup>, 眞武 幸三<sup>\*2</sup>  
川崎 聡<sup>\*1</sup>, 高田 仁志<sup>\*1</sup>, 池田 隼人<sup>\*2</sup>, 渡邊 啓悦<sup>\*2</sup>  
高橋 正晴<sup>\*3</sup>

## Element verification of 90kW class prototype LOX electric pump system for 30kN class liquid rocket engine

SHIMAGAKI Mitsuru<sup>\*1</sup>, MATAKE Kozo<sup>\*2</sup>  
KAWASAKI Satoshi<sup>\*1</sup>, TAKADA Satoshi<sup>\*1</sup>, IKEDA Hayato<sup>\*2</sup>, WATANABE Hiroyoshi<sup>\*2</sup>  
TAKAHASHI Masaharu<sup>\*3</sup>

### ABSTRACT

In joint research between JAXA and Ebara Corporation, preparations are underway for the demonstration of a 90kW class LOX propellant supply electric pump assuming a 30kN class thrust LOX-LCH4 rocket engine. So far, as part of the preparation, we have verified the electromagnetic design and electromagnetic elements of the motor, which are important for establishing the system. Furthermore, the relationship between the torque and current of the prototype motor was in good agreement with the electromagnetic design of the motor. We pre-cooled the electric pump system, proceeded with the analysis from the temperature distribution of each component, and examined the policy such as the operation method.

**Keywords:** Element verification, High Output Density Motor, High-Speed SPM Motor, LOX Electric Pump

### 概 要

JAXA と荏原製作所の共同研究では、30kN 級推力の LOX-LCH4 ロケットエンジンを想定した 90kW 級 LOX 推進剤供給電動ポンプの実証に向け準備を進めている。これまで準備の一環として、システムを確立するために重要なモータの電磁設計や電磁気要素を検証した。更に試作モータのトルクと電流の関係は、モータの電磁設計とよく一致した。電動ポンプシステムの予冷を実施して、各コンポーネントの温度分布から分析を進め、運用方法などの方針を検討した。

\* 2021 年 11 月 30 日受付 (Received November 30, 2021)

\*<sup>1</sup> 研究開発部門第4研究ユニット (Research Unit IV, Research and Development Directorate)

\*<sup>2</sup> 株式会社荏原製作所 (EBARA Corporation)

\*<sup>3</sup> 株式会社日立ソリューションズ東日本 (Hitachi Solutions East Japan, Ltd.)

## 1. はじめに

角田宇宙センターでは、小型液体推進剤ロケットへの適用を見越し、打上げ用ロケットエンジンに加え惑星離着陸船ロケットエンジンまたは軌道間輸送船ロケットエンジン、更にはモジュラー型ロケットエンジンへの適用を想定して二軸電動ポンプ式ロケットエンジンの実現を目指すべく、推進剤供給電動ポンプの実現に向け取り組んでいる<sup>(1-5)</sup>。諸外国では、既に商用として電動ポンプによる液体推進剤供給方式のロケット<sup>(6)</sup>が運用されており、または電動ポンプシステム実証へ進んでいると想定される<sup>(7)</sup>。

本稿では、前述を背景に当構が実施継続している「ターボポンプの電動化の研究」において90kW級試作液体酸素供給用電動ポンプシステム（以降、LOX電動ポンプと称する。）の特に技術的重要箇所の要素検証を中心に報告する。

## 2. 研究課題

LOX電動ポンプの実現に向け2018年度から株式会社荏原製作所と共同研究を推進している。研究当初、全体システムのキー技術として筆頭となるモータの実現は、定格50,000rpmで出力密度15kW/kgを目標として電磁気要素部を小型軽量の体格を狙うため国内外の一般汎用品では存在せず困難を極めた（図1参照）。モータについては電磁気概念設計検討、詳細設計を終え、LOX電動ポンプ概念設計検討まで終えた。2018年度末と2019年度にかけてモータ要素品の試作へ移行し2020年度にモータシステム（図2(a)参照）およびLOX電動ポンプ（図2(b)参照）の試作を完了した。一方、試作モータを制御する専用インバータは、概念設計段階において当時高いスイッチング周波数を有する高耐圧SiCデバイスが市販され始めているため想定よりコストを抑えた設計解が見つかり試作完了できた。試作した専用インバータの実力は、100kW級同期2極対モータで80,000rpmまで制御可能とする。なお試作モータは、一般的なラジアルギャップ形式永久磁石同期モータの電磁気設計に比較して電磁気部位（ステータ、銅コイル、シャフト含む磁石と積層鋼板）に対して出力密度13.6kW/kgと推算される。

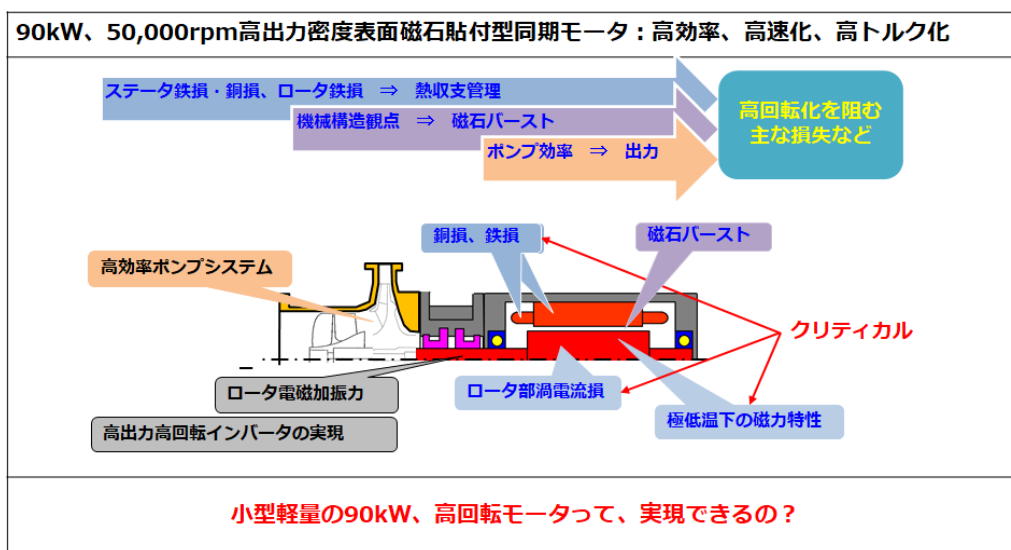
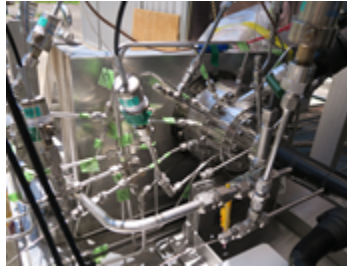


図1 高出力密度高回転モータの課題



(a)試作 90kW モータ



(b)LOX 電動ポンプシステム (試験前)

図2 試作 90kW モータ(a)および LOX 電動ポンプシステム(b)

高出力密度かつ高電流密度である観点から当初より試作モータの熱収支検討は、一次元解析モデルにより成立する条件を探索しながら、かつ精度を上げるためのモデル構築を進めた<sup>(8)</sup>。またモデル構築は、電磁気設計で得た設計解を解析モデルへ連携させることでより実際に近いモデル構築に努めた<sup>(9, 10)</sup>。一方、非常に高回転で運用するためロータダイナミックの面から電磁加振力による振動への影響の可能性も拭い去れないため解析的に調査した<sup>(9, 11)</sup>。その他、宇宙環境を想定して真空放電、汎用品を用いた場合の放射線に対する遮断など検討も進めた<sup>(5)</sup>。

### 3. LOX 電動ポンプ各要素の検証

本共同研究では、LOX 電動ポンプ単体実証に移行する前に、技術的にキーとなる要素に対して性能未達や損傷等について妥当性を評価する目的で要素検証を行った。以降の節に事例を示す。

#### 3.1. モータ要素の検証

特にモータシステムの観点で電磁気設計と構造設計、および電動ポンプシステム観点について解析および試験にて表 1 に示す項目について検証を進めた。

表 1 検証項目

観点	検証項目	目的
① 電磁気	磁力	<b>着磁による磁力の妥当性</b> ・トルクに寄与するため想定した磁力に着磁されていたか ・低温検証後、パーミアンス係数を想定してトルク値推定
	逆起電圧	<b>銅線巻線設計の妥当性</b> ・定格回転数に対する必要電圧の検証 ・インバータ設定に必要なインダクタンスの実測
	トルク	<b>電磁気システム設計の妥当性</b> ・必要なトルクが必要電流で得られるのか
② 構造	飛散防止材の破断	<b>飛散防止材の妥当性</b> ・磁石を保持する繊維が破断しない確認
③ 低温運用	要素温度	<b>予冷時間などの運用に関する妥当性</b> ・モータ各要素に対して安全に運用するため

#### 3.1.1. 磁石磁力

磁力は、一般的に同期モータに対して主にトルクに依存する設計変数である。本項は、磁石に磁力を与えるための着磁操作後の磁力実測について述べる。選定した磁石 4 極分の着磁結果は、図 3 に示すように約 400mT まで着磁を完了できた。本結果は、モータ諸特性の精度を考慮した磁界解析による次項で述べる逆起電圧の把握に必要な情報になる。

また使用温度環境が液体推進剤温度まで至る可能性があるため磁石は、そのような低温環境下において磁力が衰える減磁の可能性の有無、残留磁束密度 (Br) —保磁力 (Hcj) 特性について把握する必要性がある。詳細は控えるが極低温環境下における Br[T]は、常温に比較して異常または顕著な低下が認められず、むしろ増加する傾向を示した。また Hcj[A/m]についても同様な傾向を示した。故に、運用される温度環境下による使用磁石は、Br-Hcj 特性を十分に発揮できる状態であり、常温よりもパーミアンス係数がやや高めで運用できる可能性を示唆することから定格トルクよりもやや高いトルクで運用できると試算される。

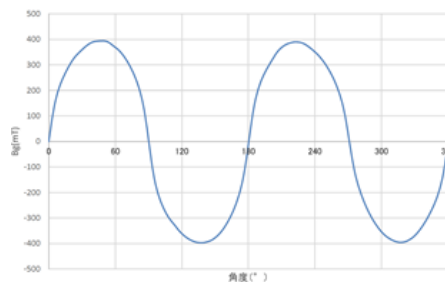
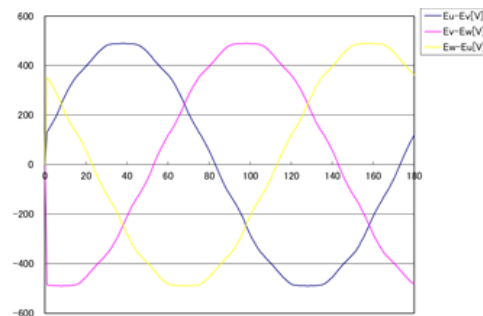


図 3 モータ磁石 4 極着磁後の磁力実測値

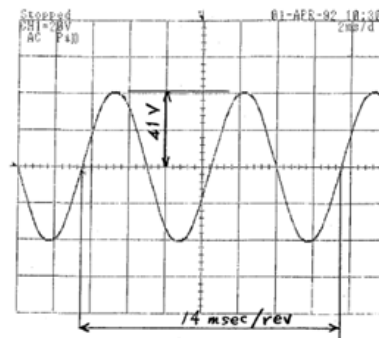
### 3.1.2. 逆起電圧

試作モータとインバータ間で見られる電圧波形を元に電磁気設計で得られたステータコア巻線設計（銅線の巻き数、重ね数およびスロット数など）の妥当性を評価する目的で市販磁界設計解析ツール JMAG を用いて設計と磁界解析を繰り返し実施した。図 4(a)は、解析により得られた逆起電圧 347Vrms を示しており高調波や他異常が確認されない。

また経験のない設計範囲だったため実測による検証を行った。検証は、試作した磁石部ロータと銅線巻かれたステータのモータ要素を角田宇宙センターで組立てた試作モータを用いた（図 2(a)参照）。図 4(b)の試験結果は、適当な回転数からモータロータをフリーランさせたタイミングで計測した逆起電圧を示す。本結果で示される両振幅値は、50,000rpm 時の換算で 338Vrms となる。試験結果は、解析結果との差が 0.3%程度と非常に小さいため試作ステータコア巻線設計が妥当であると考えられる。実際のステータコア巻線設計では、電磁気設計と磁界解析を幾度か繰り返すことで設計手戻りが無きよう進めている。



(a) 磁界解析



(b) 試験

図 4 (a)磁界解析および(b)試験による逆起電圧の確認

### 3.1.3. モータトルク

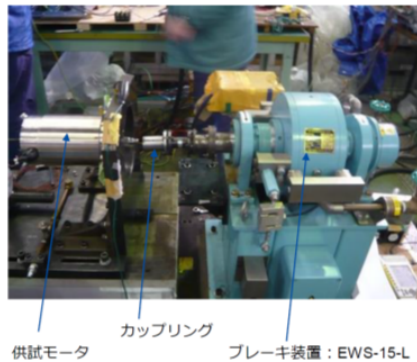


図5 試作 90kW 級高回転モータ負荷特性試験（荏原製作所藤沢事業所）

試作モータの電磁気設計の妥当性を評価する目的で荏原製作所藤沢事業所既設のモータ負荷特性試験装置を用いて試験を実施した（図5参照）。高回転による負荷運転は、装置の仕様から外れるため低回転による負荷特性を調べた。図6はJMAGによる磁界解析結果（青線）と試験結果（黒線）を併せて示す。なお黒破線は黒線以降の推定値を示す。試験結果は、直進性を示す解析結果に比較してややずれる。この一因は、専用インバータを用いず汎用インバータのため精査された設定で運転できていないことがあげられる。試作モータは、高回転（定格付近）による負荷特性が把握できていないが、低回転によるトルクー電流特性からは大きな異常は認められないため、概ねの電磁気設計の妥当性が見込められる。また試作モータは、インバータによる進角、ベクトル制御等の修正などにより効率的な運用が可能になると考えている。

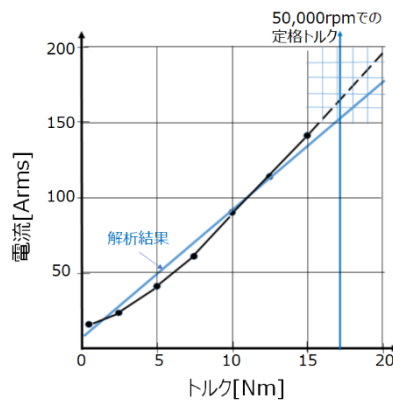


図6 試作モータトルク電流特性

### 3.2. 磁石飛散防止材

図7に示す試作された表面磁石同期モータロータは、定格 50,000rpm でも磁石の飛散回避・防止の目的に合う構造設計が施されている。本設計は、幾つかの手法があるうち一般的に磁石外周を繊維材で巻く構成とする。本実験は、図8に示す試験装置を用いて低回転から 50,000rpm まで実施した後、ロータ周囲の状況を目視確認することで検証を進めた。試験後の磁石周囲の繊維材の面は、凹凸、亀裂やせん断された様子について生じなかった。耐久性については、今後も継続運用（試験を通し）して繊維材の本数、巻き方、巻き厚みの妥当性について検証を深めていく。

モータのロータ磁石とステータ間の隙間は、磁石飛散防止に有効な繊維材の厚みを考慮した必要があ



ることと、電磁氣的に要求トルクを未達させない厚みを選択した。

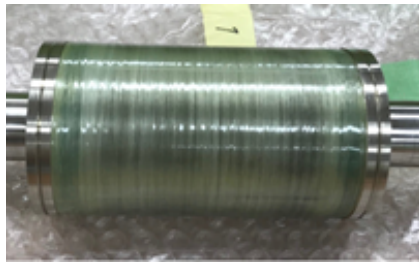


図7 磁石飛散防止材



図8 モーターロータ回転試験（角田宇宙センター）

### 3.3. 低温運用による要素温度

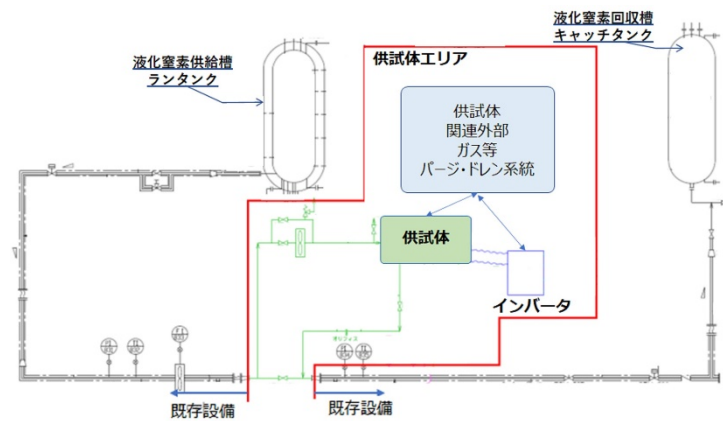


図9 LN<sub>2</sub>による電動ポンプ単体試験設備 概略図  
（角田宇宙センター極低温ターボポンプ試験棟）



図 10 LN2 予冷による LOX 電動ポンプ

試作 LOX 電動ポンプが低温環境となる場合、各要素の温度を把握する目的で LN2 予冷／液流し設備機能確認試験を角田宇宙センター極低温ターボポンプ試験棟極低温キャビテーションタンネル試験設備に設置した電動ポンプ単体試験設備を用いて実施した（図 9 参照）。図 10 は、予冷時の電動ポンプシステムの様子と図 11 は、各要素の温度時系列を示す。LOX 電動ポンプの軸受は、低コスト化の一環として通常ロケット用ターボポンプで使用する低温用軸受ではなく汎用潤滑剤を積極的に用いる形式を選択している。予冷終了後、モータ端部軸受外輪温度は、ほぼ常温であり潤滑剤が固化する懸念はない。課題となる点は、ポンプ側軸受外輪が予冷後、想定より低温を示した。この理由は、ポンプ入口からシール機構ケーシングの内部にて内部リークを生じさせている可能性を含んでいる。この可能性を確認するため Abaqus を用いた FEM 解析を実施した。結果は、図 11 下の温度等値分布図として示す。ポンプ側の軸受外輪温度は、概ね 260K 付近を示しており試験による温度から 40K 程の乖離を示した。解析では、条件となる熱伝達率を推定値として入力している点もあり誤差が生じるものの微量の内部漏洩の可能性は否定できない。ケーシング構成は、LOX 使用を想定するため次設計では本事象を考慮した構造に反映する。

次にロータ磁石近傍では、ロータ鉄損による発熱量を抑えかつ高いパーミアンス係数で運用する目的で予冷により低温環境に至ることを期待した。解析結果は、飛散防止繊維材で覆われるためステータ冷却による低温化を受け難い状況であることを示した。故に低温度環境による高いパーミアンス係数は期待する程得られないためトルク増も見込めないことが推定されるが、3.1.3 項で述べたように設計通りのトルクは得られると思われる。今後、量産化を想定した場合、冷却特性も見込み飛散防止繊維材の選定ではなくスリーブ形式構造とのトレードオフも視野に入れたい。

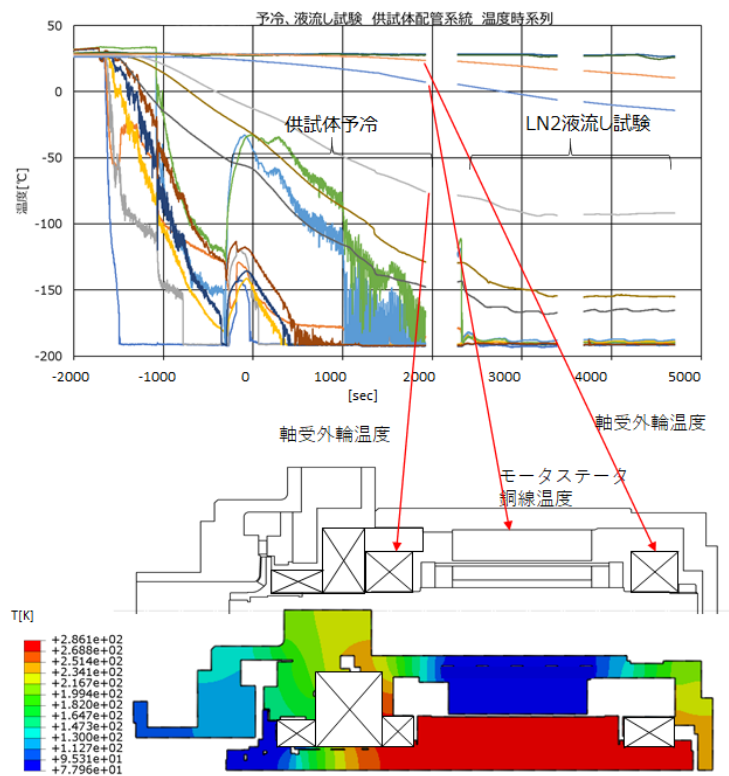


図 11 予冷時の温度時系列（上）と FEM による温度分布（下）

#### 4. まとめ

本稿は、30 kN 推力クラスロケットエンジンへの適用を想定した 90kW 級試作 LOX 電動ポンプの個々の要素検証について述べ以下のことを示した。

- LOX 電動ポンプを実現する上でキー技術となる国内でも類を見ない同期モータを試作した。
- 試作モータの電磁気設計は、概ね妥当性を得た。
- 試作 LOX 電動ポンプは、ケーシング設計及び予冷運用手順の見直しにより要素の過冷却を抑え運用ができる可能性を得た。

今後は、90kW 級 LOX 電動ポンプシステムの LN2 単体試験へ進める。目的は、LN2 を作動流体とした LOX 電動ポンプシステムの成立性（モータ発熱と冷却による熱収支、機構系、供給電力／出力（モータ電磁気設計）、内部循環流）の評価に資するデータの取得である。一方で試作モータは、定格回転数 50,000rpm に対するモータ特性検証に至れていない。今後電動ポンプ試験とは別にモータ対向試験による特性把握することも重要と考えている。また我々は、二軸式電動ポンプエンジンの更に先の将来を見据え、異なるモータ形式による一軸式電動ポンプの構築を推進してエンジンシステムの簡素化、低コスト化を狙うシステムも併せて平行に追及していく（図 12 参照）。

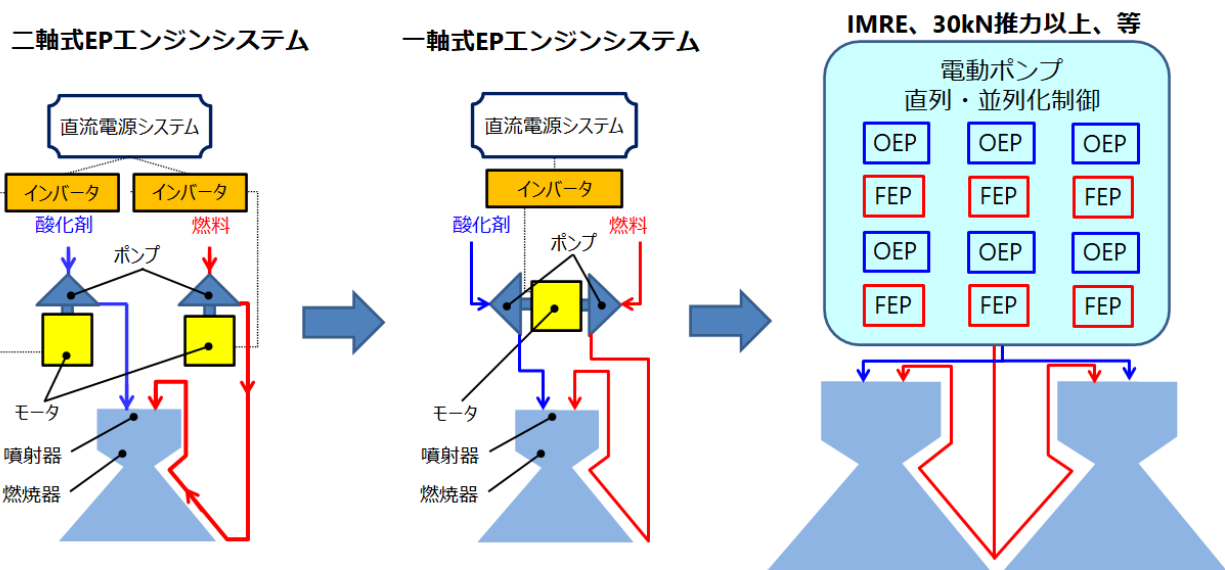


図 12 電動ポンプ式エンジンシステムの将来

## 謝 辞

試作モータ負荷特性試験を実施頂いた荏原製作所藤沢事業所、黒沼隆行様、Park. Hyunwoo 様にお礼申し上げます。前述試験に寄与頂きました、共同研究メンバーの荏原製作所藤沢事業所、本田修一郎様、佐藤忠様、茨田敏光様、モータロータ回転試験、電動ポンプ予冷・液流し試験についてご支援頂いた航空宇宙技術振興財団鈴木拓明様、吉岡理紗様、元 JAXA 田村努様（現宇宙航空技術振興財団）、コスモテック森下茂様、小貫徳貴様、小原伊織様にお礼申し上げます。

## 参考文献

- (1) 島垣満：ロケットエンジンターボポンプの電動化，日本機械学会，Vol.123 / No.1224，pp26-29，2020.
- (2) Toshiya Kimura, Mitsuru Shimagaki, Masaki Sato, Naoki Nagao, Tomoyuki Hashimoto and Hitoshi Naito: Feasibility Study on Electric Pump-fed Cycle Rocket Engines, Space Propulsion 2018 (Spain), SP2018\_00057, 2018-5.
- (3) Toshiya Kimura, Mitsuru Shimagaki, Hitoshi Naito, Tomoyuki Hashimoto, Masaki Sato and Naoki Nagao, Numerical Study on Performances of an Electric Pump-fed Cycle Rocket Engine, International Aeronautical congress2019, 2019-11.
- (4) 島垣満，本田修一郎，渡邊啓悦，長尾直樹，木村俊哉，橋本知之:宇宙機用推進剤供給電動ポンプの損失影響，第 61 回宇宙科学連合講演会講演文（久留米），2018-10.
- (5) 島垣満，長尾直樹，池田隼人：モジュール用ロケットエンジンに要求される推進剤供給電動ポンプ技術，第 59 回航空原動機宇宙推進講演会（岐阜），2019-1B03，2019-3.
- (6) <https://www.rocketlabusa.com/>
- (7) Giuseppe Fiore, Sébastien Le Martelot1, Romain Loëb, Gaël Levêque, Gabriel Henry and Luc Champion : Development of an LNG Electro-Pump for a cryogenic launcher stage : 8TH EUROPEAN CONFERENCE FOR AERONAUTICS AND SPACE SCIENCES, 2019.

- (8) Mitsuru Shimagaki, Toshiya Kimura, Tomoyuki Hashimoto, Satoshi Takada, Hayato Ikeda, Kozo Matake and Shuichiro Honda : Feasibility Study on Electric Pumps Feeding Propellants to a Rocket Engine, International Aeronautical congress2019, 2019-11.
- (9) 島垣満: ロケットエンジン推進剤供給用 90kW 級 50,000rpmSPM モータの熱収支-JMAG-RT と AMESIM ソフトウェアとの連携によるモデル化-, JMAG2020 ユーザー会, 2020-12.
- (10) 島垣満 : ロケットエンジン用極低温推進剤供給電動ポンプ用 90kW 級 SPM モータの冷却検討, 2021 SIMENS Realize Live, 2021-7.
- (11) 島垣満 : ロケットエンジン推進剤供給電動ポンプの高出力密度高回転 SPM モータロータに生じる電磁励振力, JMAG2019 ユーザー会, 2019-12.

宇宙航空研究開発機構研究開発資料 JAXA-RM-21-013  
JAXA Research and Development Memorandum

30kN級液体ロケットエンジン用90kW級試作LOX電動ポンプシステムの要素検証  
Element verification of 90kW class prototype LOX electric pump system for 30kN class  
liquid rocket engine

---

発行 国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)  
〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1  
URL: <http://www.jaxa.jp/>  
発行日 2022年2月4日  
電子出版制作 松枝印刷株式会社

※本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等に加工することを禁じます。  
Unauthorized copying, replication and storage digital media of the contents of this publication, text and images are strictly  
prohibited. All Rights Reserved.

---

