

水素航空宇宙機の研究開発



2022年9月

宇宙航空研究開発機構 航空技術部門
航空環境適合イノベーションハブ 環境適合エンジン技術チーム
田口秀之

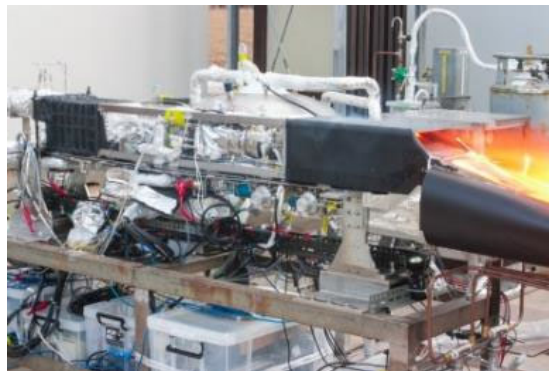
極超音速旅客機



手軽に宇宙に行ける
スペースプレーン
(マッハ4程度)



2時間で太平洋を横断できる
極超音速旅客機
(マッハ5程度)



離陸からマッハ5まで連続作動できる
極超音速予冷ターボジェットの実用化が鍵

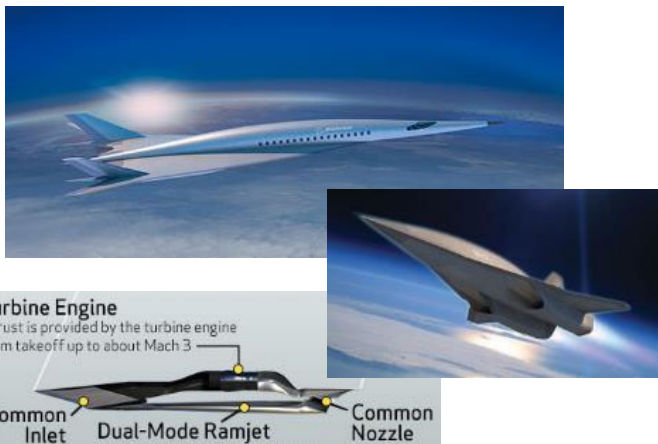
極超音速旅客機

- ・最高速度マッハ5程度の飛行により、大陸間輸送の超高速化を実現。
- ・既存の航空管制体系に従って離着陸し、東京からロサンゼルスに2時間以内、パリ、ニューヨークに3時間以内で到達。（ファーストクラス利用者の移行により、事業が成立。）
- ・超高速性を生かして、再使用型宇宙輸送機の母機に発展。



極超音速旅客機の研究開発

- 米国と欧州においてマッハ5クラスの極超音速旅客機を実現する計画が構想され、これに必要な極超音速で作動する空気吸込式エンジンの研究開発が進められている。
- JAXAでは、長期ビジョン2025に基づき、液体水素を燃料とする極超音速ターボジェットの小規模実証エンジン試作を完了し、平成19年度に世界初のエンジン総合地上燃焼実験に成功、平成22年度に超音速飛行実験(マッハ2)を実施した。
- 平成24年度から、マッハ4飛行模擬環境実験を実施し、エンジンシステム運転に成功している。



米国の極超音速旅客機構想



欧州の極超音速旅客機構想

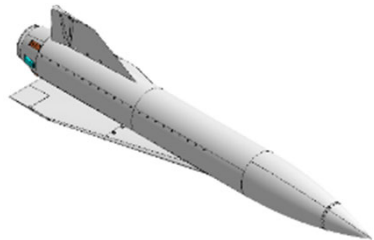


日本の極超音速旅客機構想

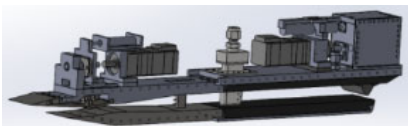
極超音速機の研究開発構想

マッハ5程度で飛行するスペースプレーン／極超音速旅客機について、機体／推進統合制御技術、巡航技術、加速技術を段階的に実証することで、実用化を目指している。

第1段階



極超音速統合制御実験機
(全長:1.5m)



超小型極超音速エンジン
(推力10kgf級)



第2段階



極超音速巡航実験機
(全長:8m程度)



小型極超音速エンジン
(推力100kgf級)



第3段階



極超音速無人機
(全長:20m程度)



中型極超音速エンジン
(推力1tonf級)



実用段階



極超音速ビジネスジェット
(乗客10人)

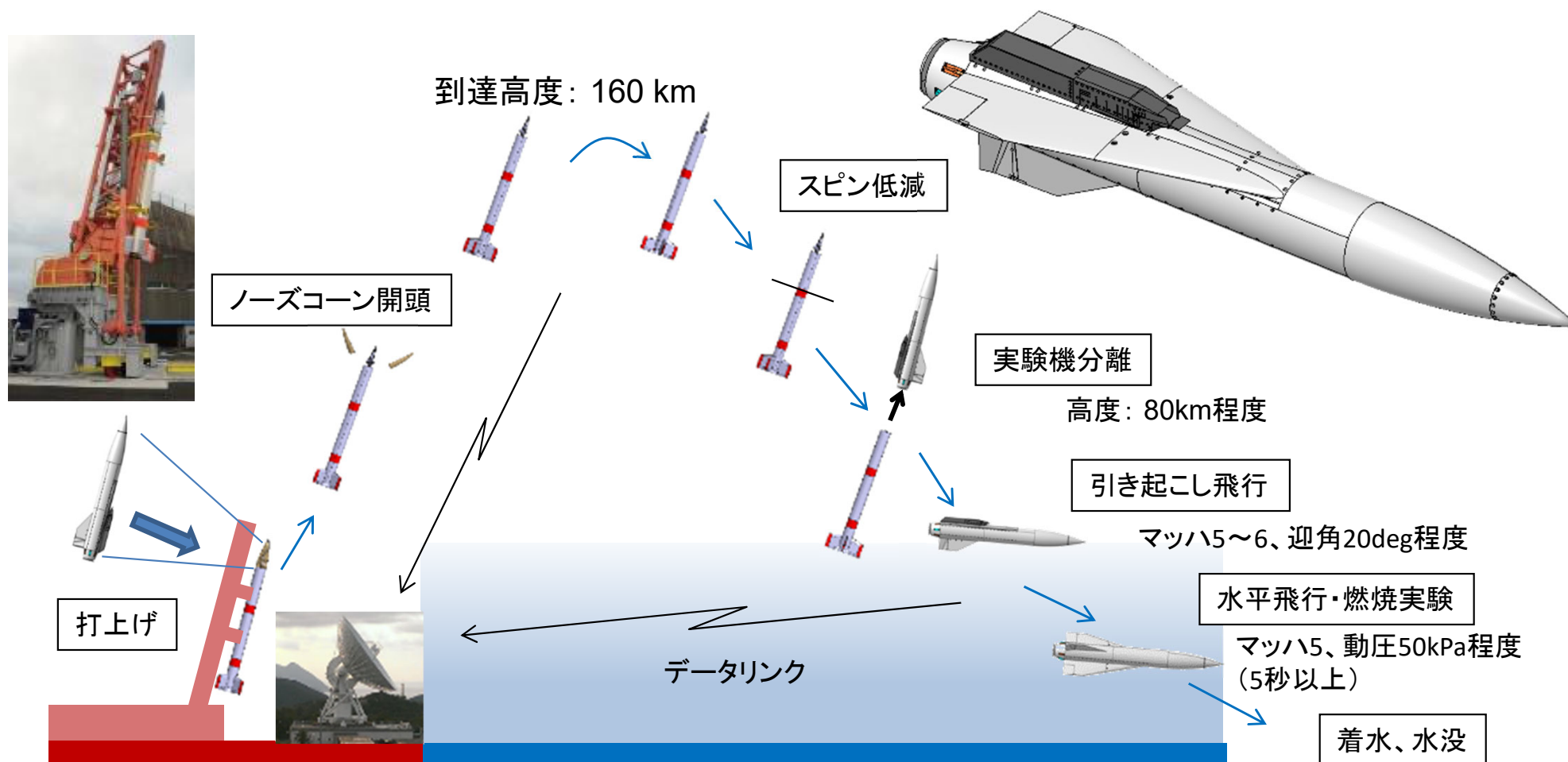


極超音速旅客機
(乗客100人)

第1段階 極超音速統合制御実験機 (HIMICO)



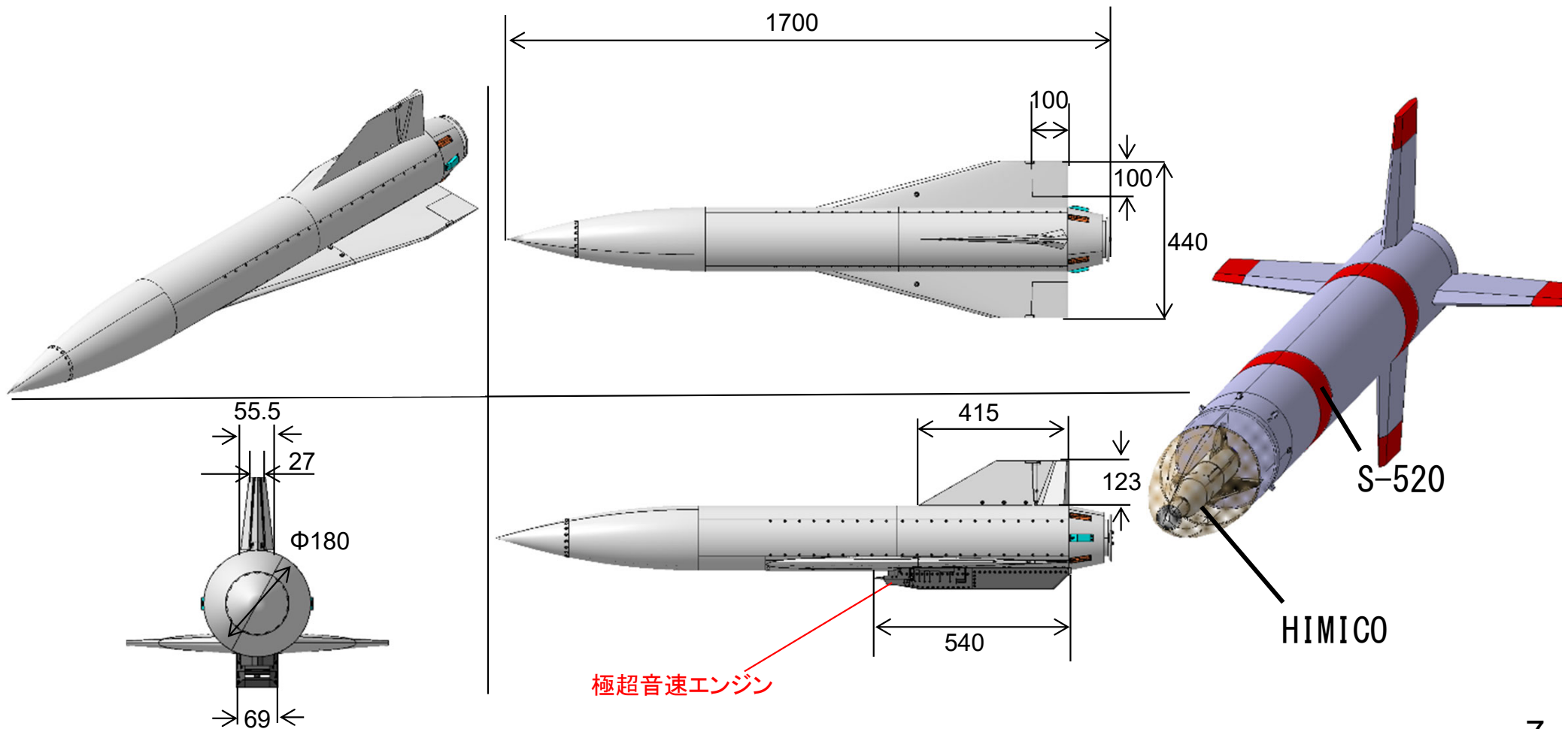
観測ロケットのノーズコーン内に実験機を搭載し、宇宙空間で射出した後、サブオービタル飛行によってマッハ5程度に加速する。極超音速飛行状態で機体／推進統合制御実験を行い、機体姿勢の変化に対応したエンジン内部可変機構の制御方法と、エンジン排気による空力特性の変化を考慮した操舵翼の制御方法を実証する。





極超音速統合制御実験機(HIMICO) 機体諸元

- S520観測ロケットのノーズコーンに入る大きさに機体形状を設計。
- ロケット射角要求(73deg以上)に対応した引起し飛行を実現するために、主翼面積とエレボン面積を設定。
- 方向安定性を得るために、垂直尾翼面積を設定。
- 胴体下部に水素燃料で作動する極超音速エンジンを搭載

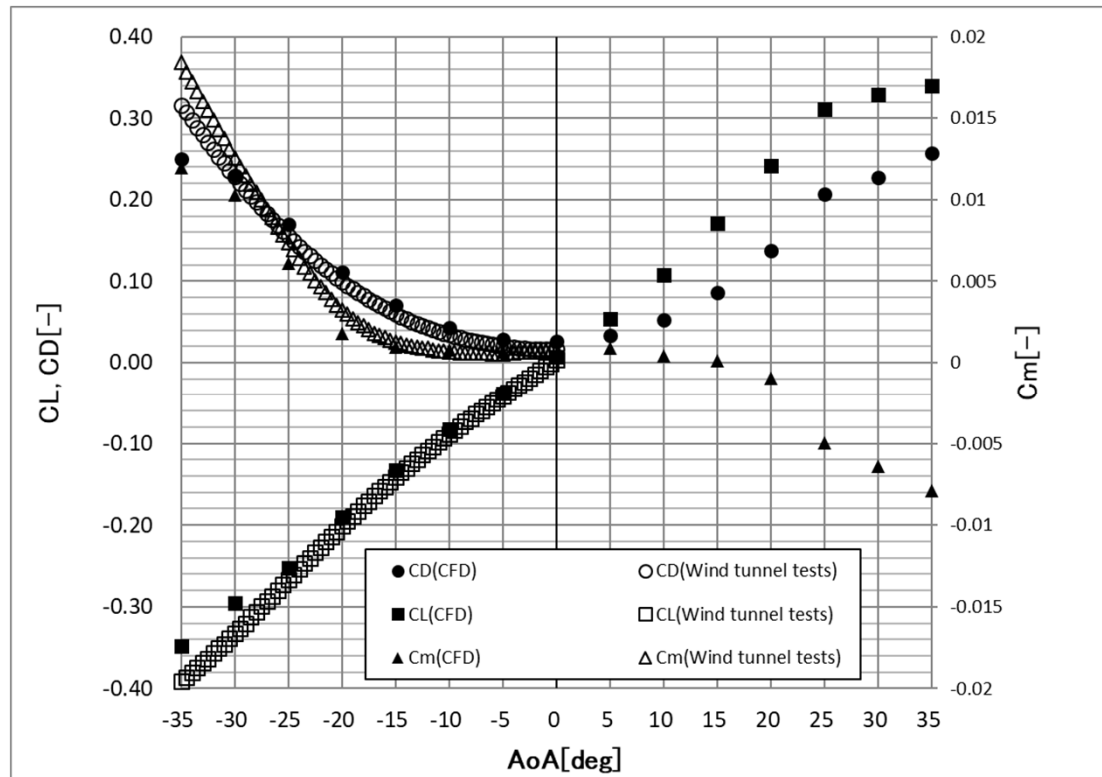
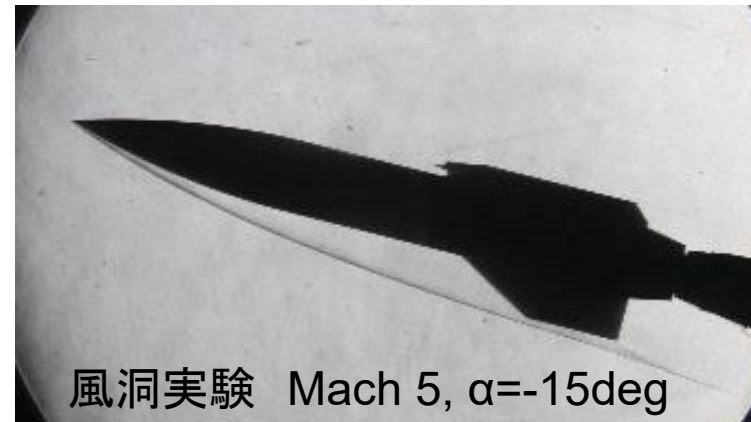




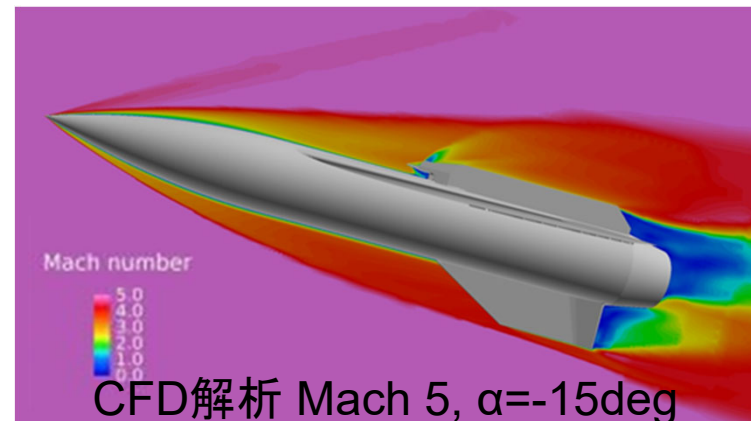
極超音速統合制御実験機(HIMICO) マッハ5風洞実験

風洞実験: JAXA 調布0.5m極超音速風洞
空力解析: CFD(FaSTAR)

- 大気圏再突入飛行で想定する迎角(20deg以下)について推算誤差を評価。
- 実験結果を反映した空力モデルを作成中。

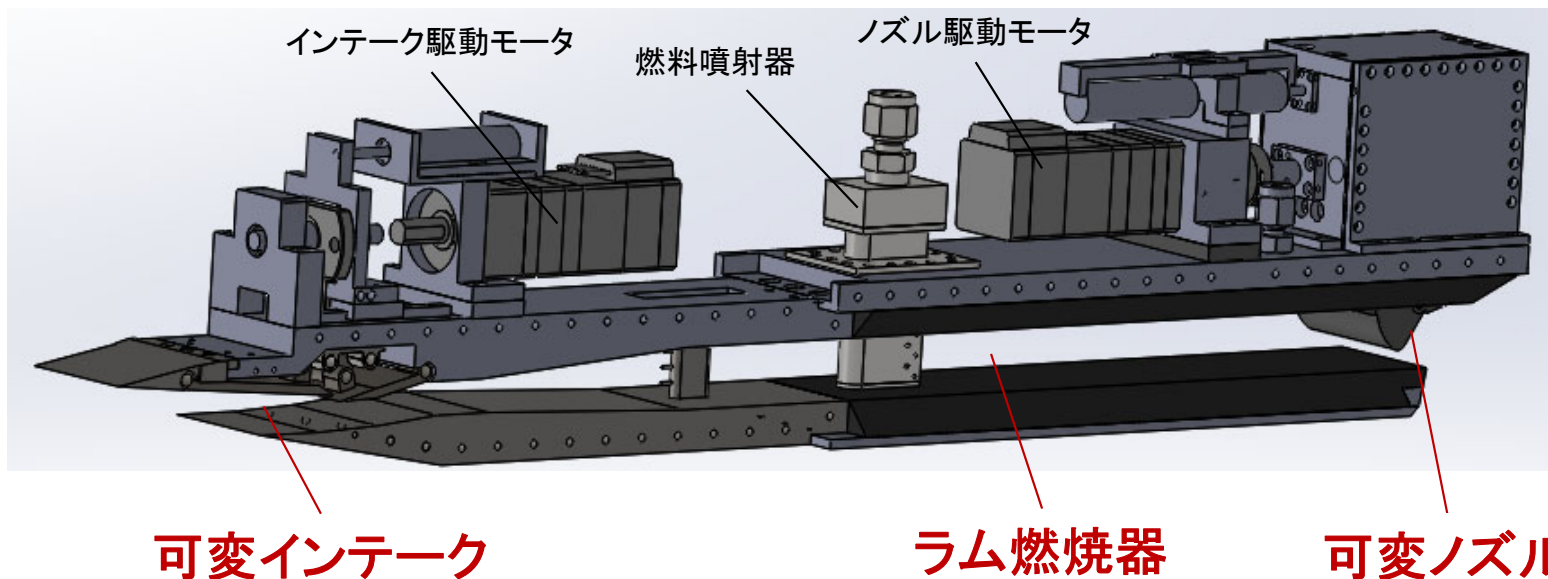


空力係数の比較(マッハ5、操舵無)

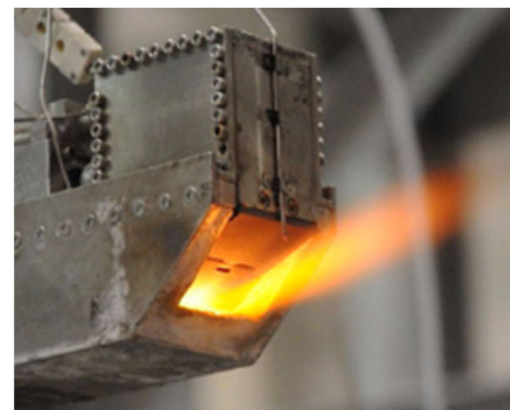


極超音速エンジン マッハ4要素実験

- 極超音速予冷ターボジェットを縮小して、極超音速エンジンを製作した。(全長54cm)
- マッハ4飛行条件で可変インテーク風洞実験、ラム燃烧器・可変ノズル実験を実施した。

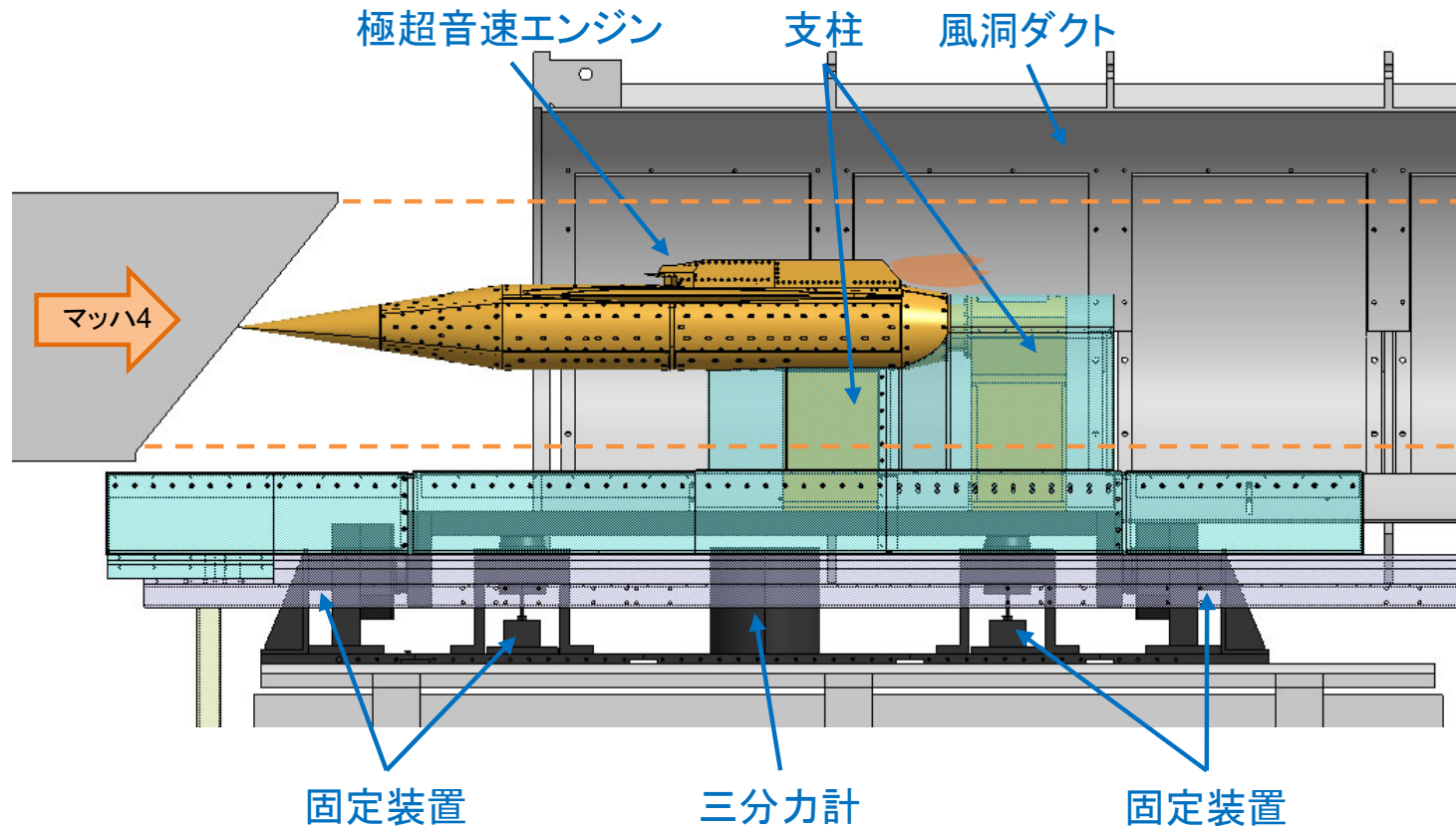


可変インテーク風洞実験
(ISAS超音速風洞)



ラム燃烧器・可変ノズル実験
(東京大学・柏・極超音速高エンタルピ風洞)

- JAXA角田宇宙センターのラムジェットエンジン試験設備において、マッハ4飛行模擬条件で、推進風洞実験を行い、HIMICO実験機の機能と性能を確認した。
- HIMICO実験機を、垂直尾翼を外した形態で固定し、風洞の気流中央に設置した。
- 支柱、三分力計、固定装置は、風洞床部に固定されたフェアリングで保護され、高温気流に晒されないようにした。



推進風洞実験セットアップ

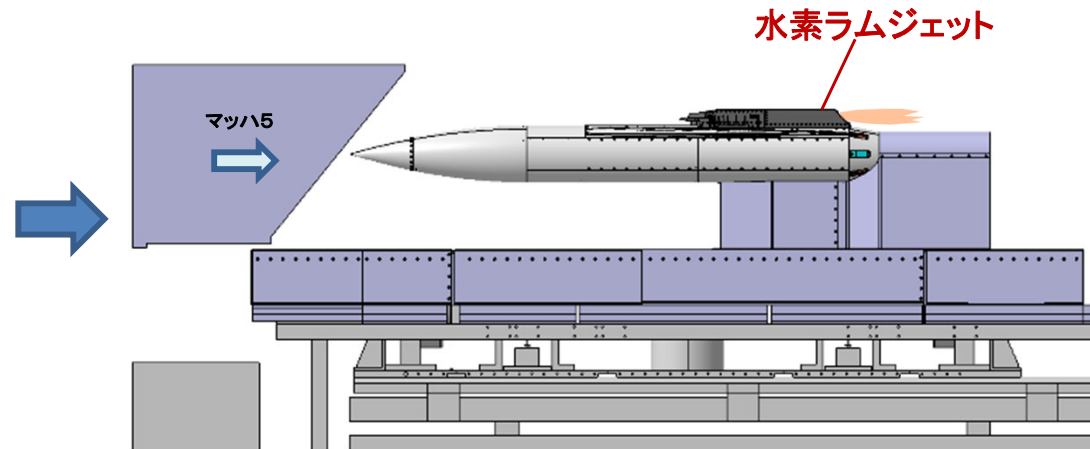


極超音速統合制御実験機(HIMICO)

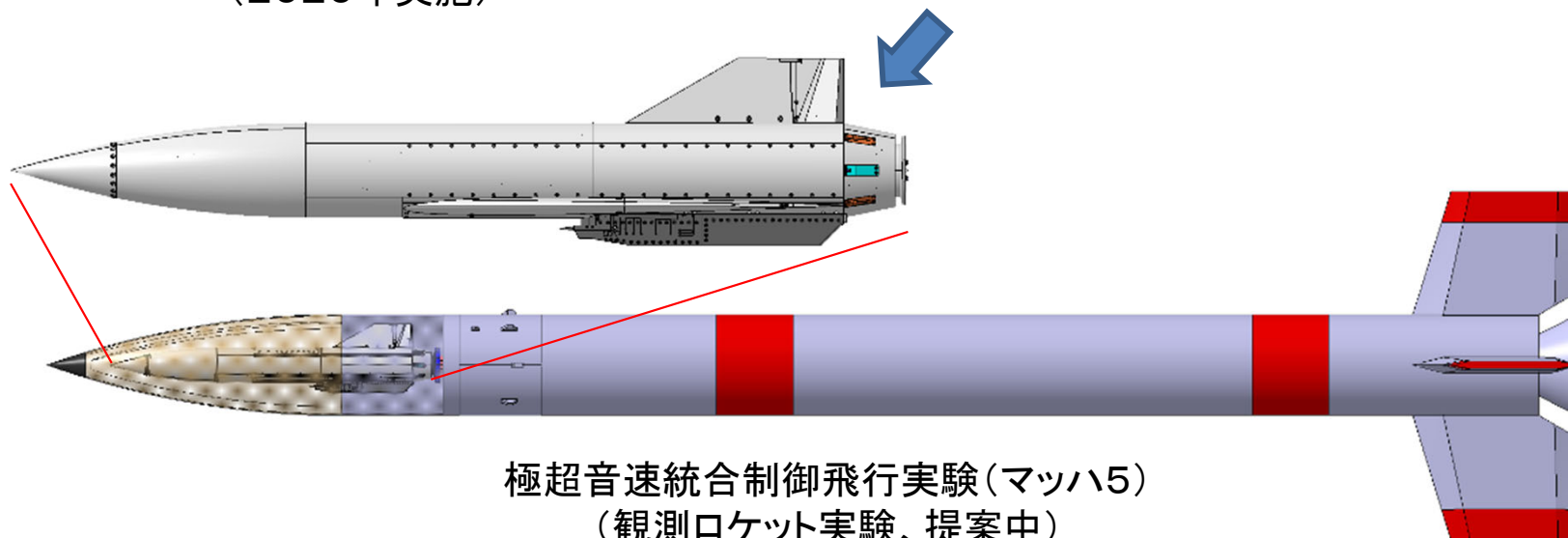
- 「極超音速機の姿勢変化」と「極超音速エンジンの推進力」が相互に与える影響を推進風洞実験と飛行実験で評価する。
- 推進風洞実験(マッハ5)を経て、観測ロケット実験を実施予定。



推進風洞実験(マッハ4)
(2020年実施)



推進風洞実験(マッハ5)



極超音速統合制御飛行実験(マッハ5)
(観測ロケット実験、提案中)

極超音速推進技術 研究開発動向

- 米国はスクラムジェット、英国と日本は予冷サイクルエンジンに注力。
- **極超音速エンジン**については、各国で**戦略的に重要な技術**として位置付けられている。
- 日本は、**極超音速予冷ターボジェットの運転試験に成功**しており、国際的優位性を確保している。(予冷エンジン方式、可変機構等の特許を保有)

米国 GDE Engine



英国 SABRE Engine



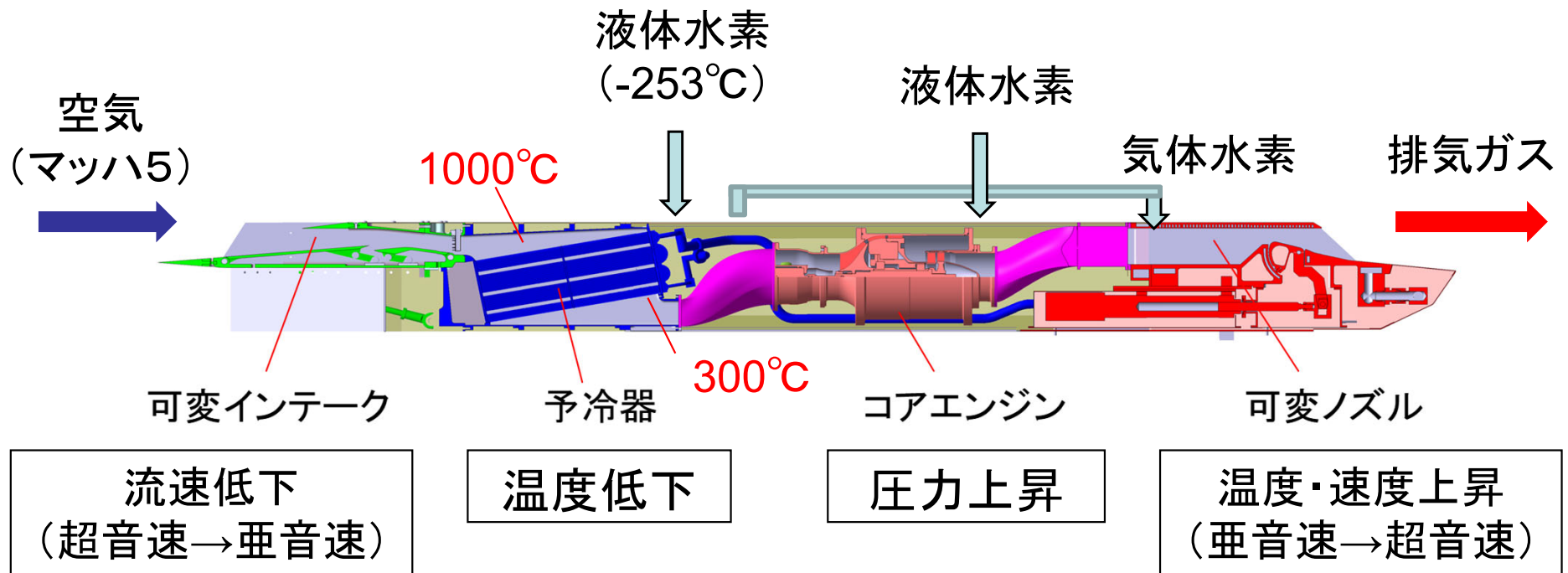
JAXA Pre-Cooled Turbojet



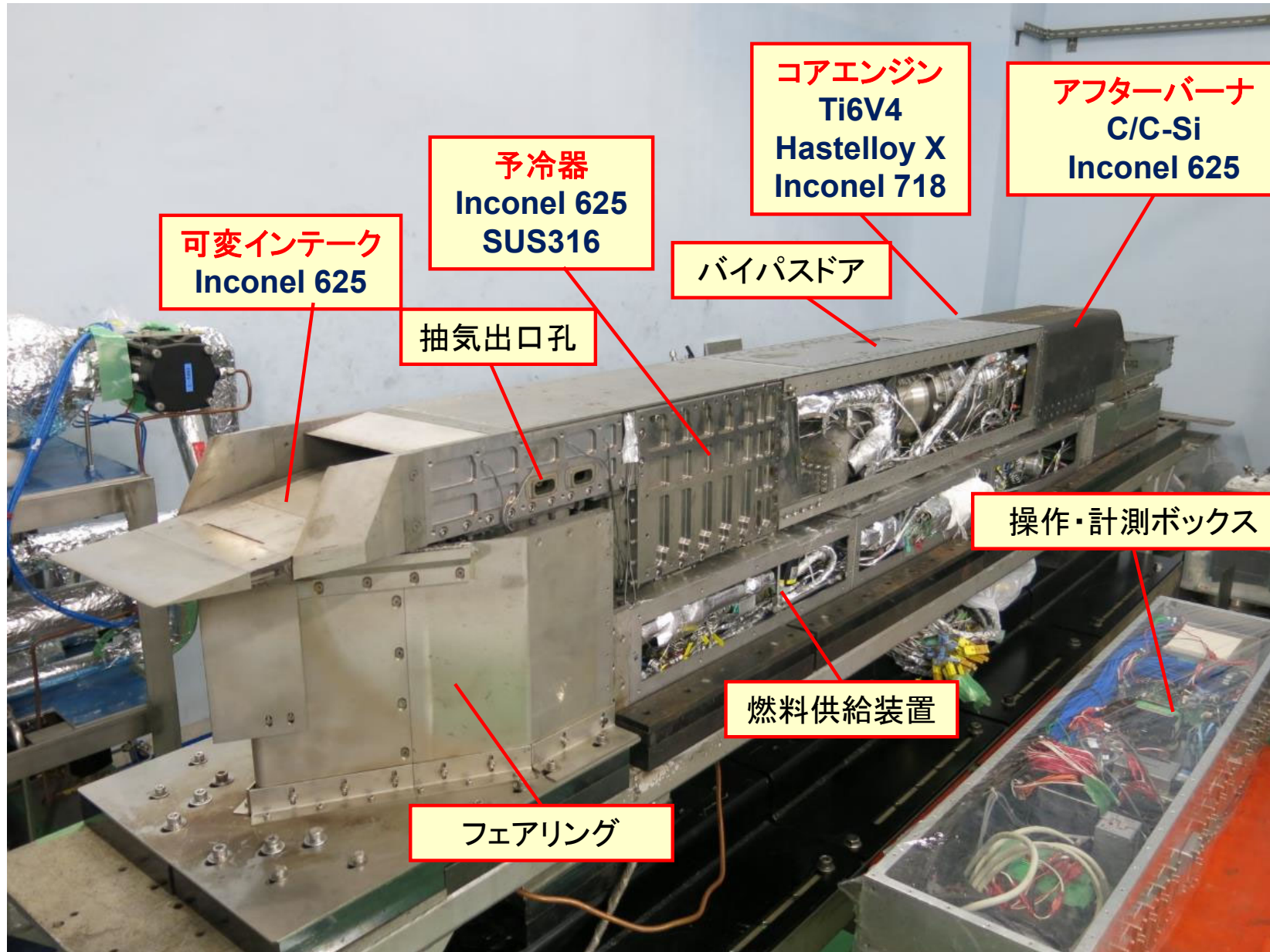
研究開発主体	DARPA (Pratt & Whitney)	英国 Reaction Engines社	JAXA 航空技術部門
燃料	ジェット燃料	液体水素＋ヘリウム冷媒	液体水素
エンジン方式	ターボジェット／スクラム ジェット切替方式	予冷ターボジェット・ヘリ ウム複合サイクル方式	予冷ターボジェット方式
特徴	マッハ4でターボジェットと スクラムジェットを切替える。	ヘリウム予冷器の採用に よる安全性の向上と高い サイクル効率	水素予冷器の採用による軽 量化と、水素系統の簡易化 による高い信頼性
作動速度	マッハ0～5	マッハ0～5	マッハ0～5
開発フェーズ	スクラムジェットの風洞試 験、飛行実験を実施済。	概念検討＋部分試作レベ ル	小型実証エンジンによる地 上燃焼実験を実施。飛行実 証を計画中。

極超音速予冷ターボジェットの作動原理

- ・マッハ5で飛行する際には、空気の温度が1000℃程度になる
 - 極低温の液体水素で空気を予冷却することでジェットエンジンを作動
- ・燃料として水素を使用
 - 二酸化炭素を排出しない、地球環境に優しいジェットエンジン
- ・空気と水素の燃焼により燃料消費率がロケットエンジンの1/5以下
 - 長時間・遠距離の飛行が可能



極超音速予冷ターボジェット 供試体概要



極超音速予冷ターボジェットの研究開発

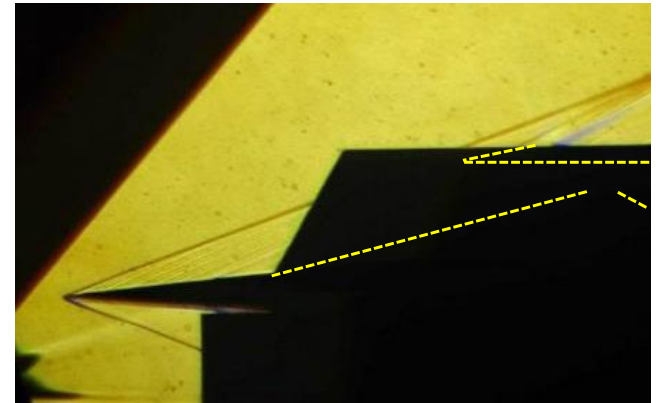
- 離陸からマッハ5(入口空気温度: 1000°C)まで連続作動できるエンジンを開発している。
- 液体水素燃料を用いた予冷却方式で各速度域のエンジン性能を取得してきた。
- 液体水素を用いたマッハ4推進風洞実験を実施し、エンジンの推進力を取得した。



地上燃焼実験



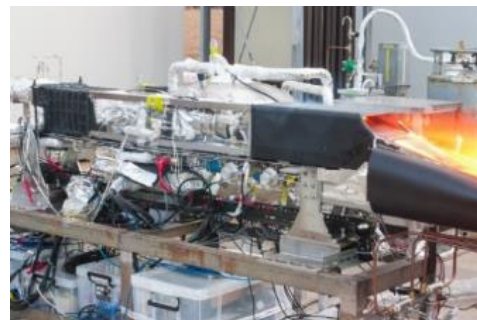
極超音速予冷ターボジェット



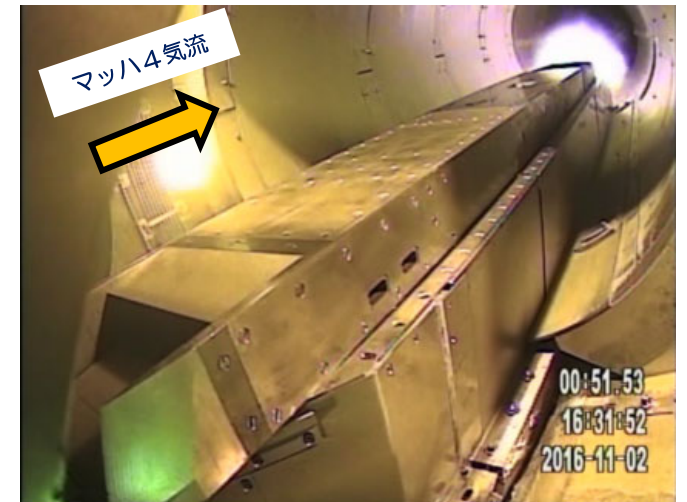
マッハ4作動時のインテーク周辺



マッハ2飛行実験



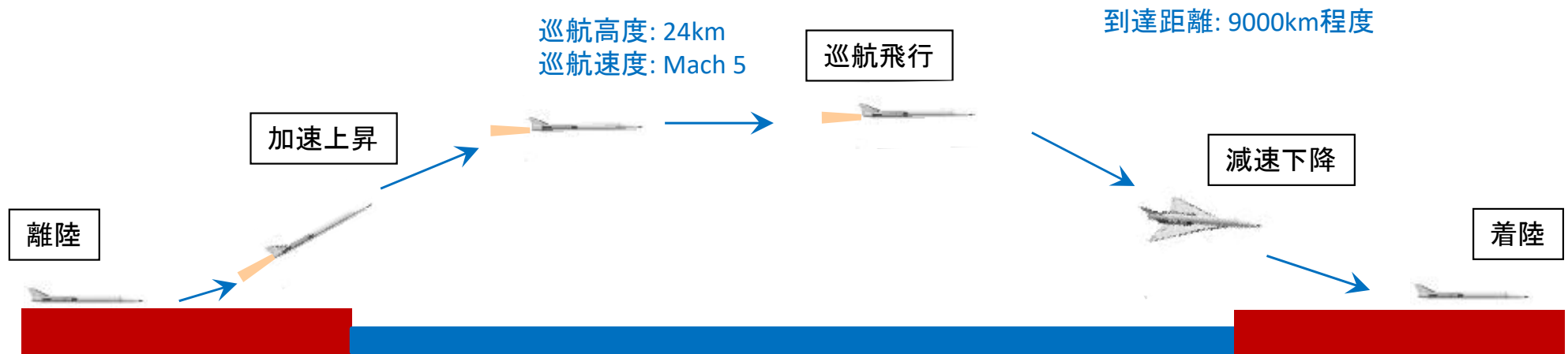
マッハ4模擬環境実験



マッハ4推進風洞実験

実用段階 極超音速旅客機

- 極超音速エンジンの自力加速によって、滑走路から離陸し、マッハ5に到達する。
- 乗客100人の極超音速旅客機について、機体成立性を検討。
- 極超音速旅客機をベースにした再利用型宇宙輸送機の実現も目指している。



<政策的位置付け>

2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略での言及

航空機産業は、グリーン成長戦略での対象分野とされており、以下の目標が設定されている。

国際航空において急速に低炭素要求が強まりつつある中、ICAO(国際民間航空機関)は2019年比でCO₂排出量を増加させないことを制度化。グリーンによる技術の変わり目を、我が国航空機産業の競争力を飛躍的に強化するチャンスと捉え、複合材、電動化、水素や代替燃料などの複数の要素における技術的優位性の確立を目指す。



Airbus 水素航空機

<周辺状況>

Airbus社が、2020年にゼロエミッション民間航空機のコセプトを提示。

数種類のコンセプトは、いずれも水素を燃料とし、ターボファンエンジンの水素化のほか、燃料電池の併用(ハイブリッド化)なども候補として挙げられている。

Airbusと協力関係にある国内企業から、ターボファンエンジンの水素化に的を絞った水素化の提案がなされているところ。

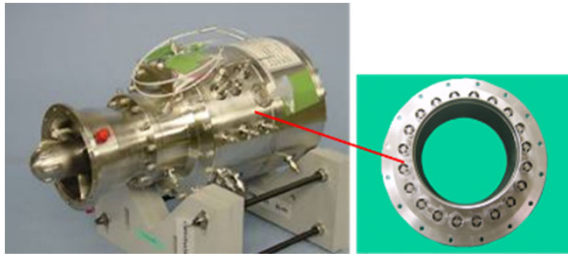


ゼロエミッション
水素製造イメージ

<https://www.airbus.com/>

水素航空機の技術課題

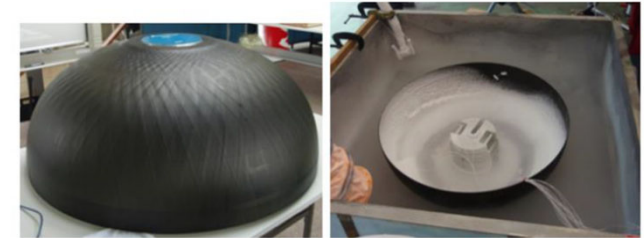
- 水素航空機を早期に実現するためには、既存エンジンを基にした水素ジェットエンジンの実用化が現実的である。
- 水素ジェットエンジンの実現のためには、水素燃焼技術、液体水素電動ポンプ技術、液体水素複合材タンク技術を実用化する必要がある。
- 他に、水素燃料を搭載する場合の安全管理技術、環境影響評価、電力管理技術を構築する必要がある。



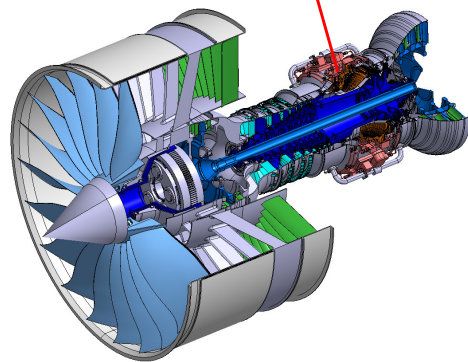
水素燃焼技術
(低NOx、振動燃焼抑制)



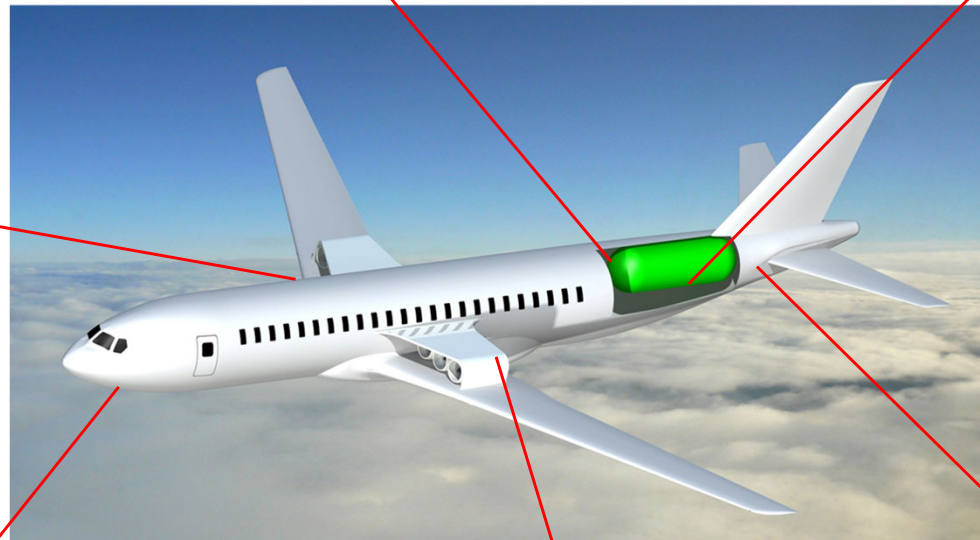
液体水素電動ポンプ技術
(少流量、高吐出圧、精密制御)



液体水素複合材タンク技術
(口金接合部、漏洩対策、疲労対策)



水素ジェットエンジン



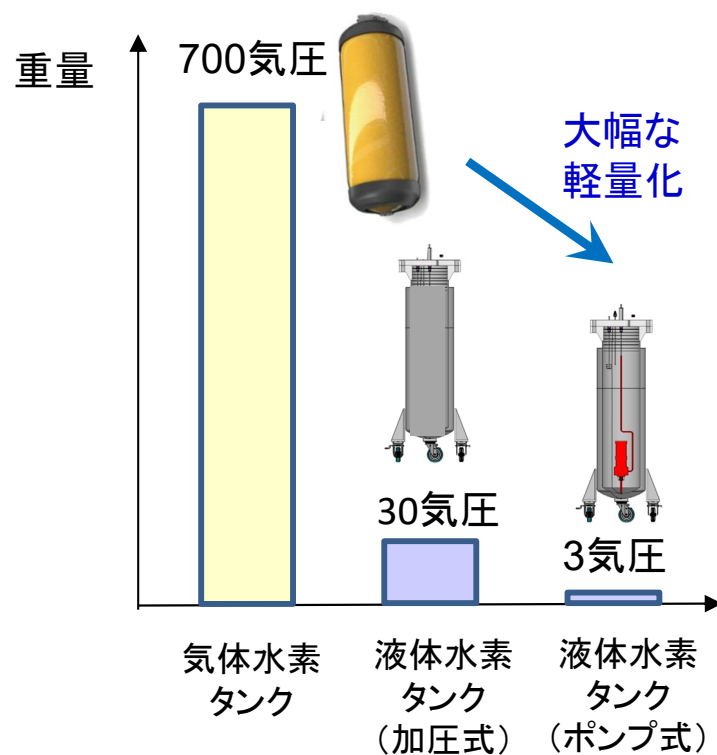
安全管理技術
(防爆対策、漏洩検知)

環境影響評価
(燃料製造方法、水蒸気排出)

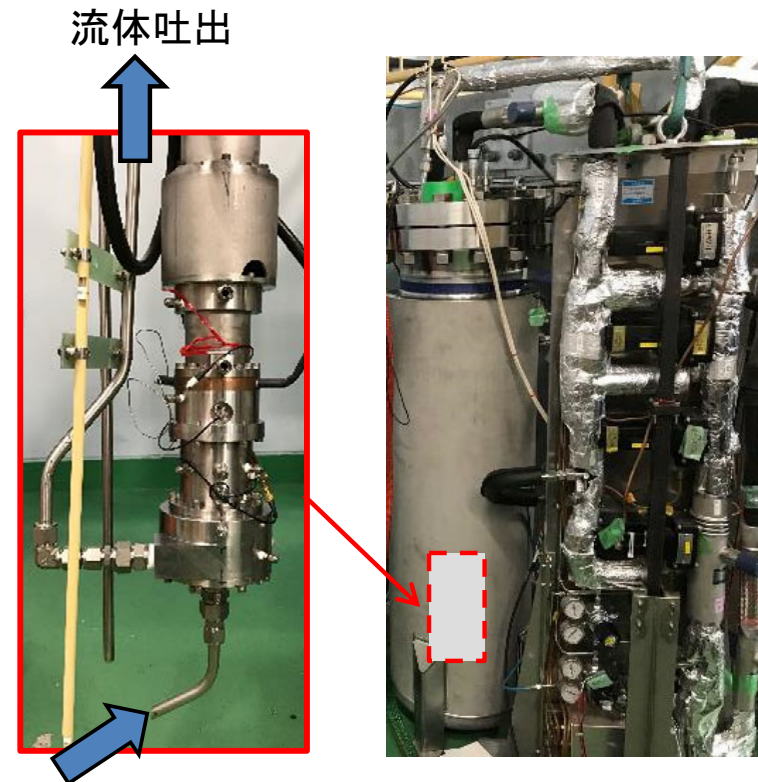
電力管理技術
(燃料電池、APU)

液体水素電動ポンプの研究

- 気体水素タンクの場合、700気圧に加圧することでタンク体積を抑える必要があるが、圧力が高いために重くなる傾向がある。
- 液体水素タンク(加圧式)の場合、液体状態にすることで、タンクを小型化できるが、蒸発しやすい燃料を安定に供給するために30気圧程度に加圧する必要がある。
- 液体水素電動ポンプを実用化して、液体水素タンク(ポンプ式)にすることで、タンク圧力を3気圧程度にして、大幅な軽量化を実現できる。



水素燃料タンクの重量比較



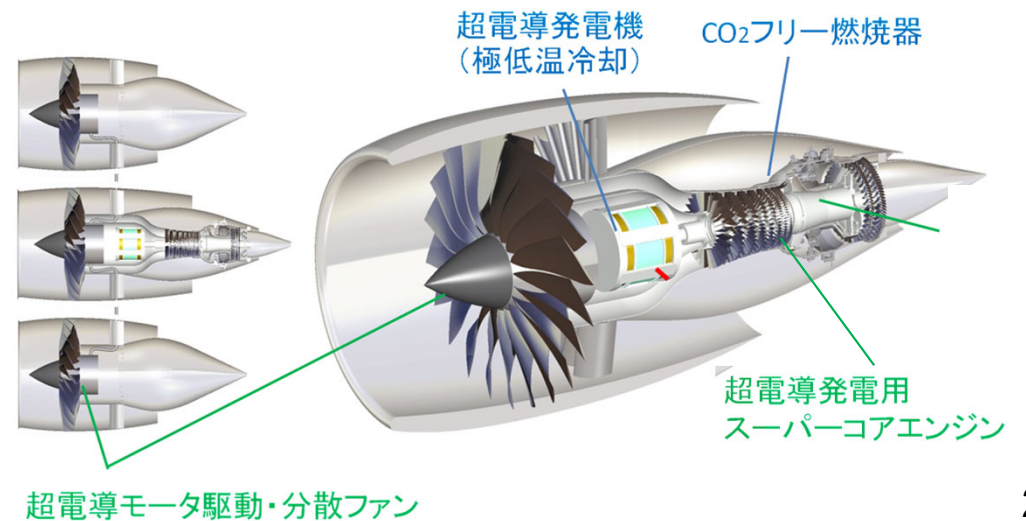
液体水素電動ポンプ試験装置

水素航空機の概念検討

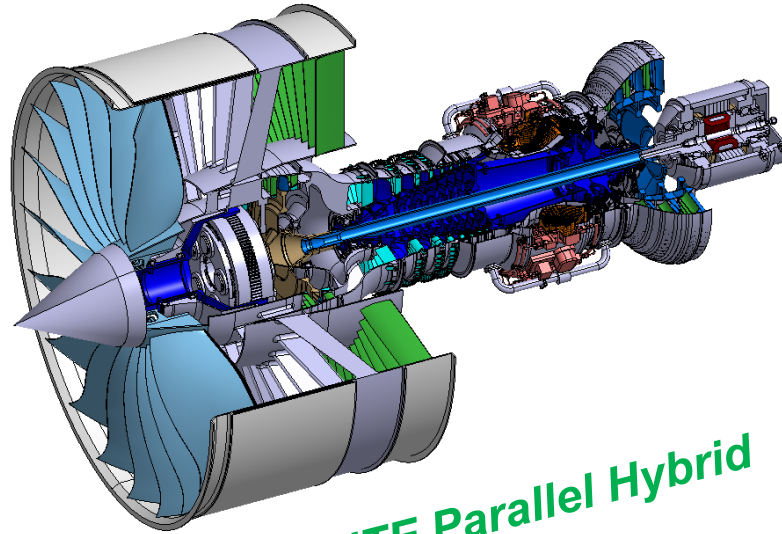


JAXAの研究で進めてきた液体水素貯蔵・供給技術を活用して、飛躍的な低排出／低燃費を実現する水素航空機の実用化を目指している。

液体水素(-253°C)の冷却能力を生かし、極低温で作動する超電導発電機と超電導モータ駆動・分散ファンを搭載した高効率エンジンを検討中。



水素電動エンジンの検討状況

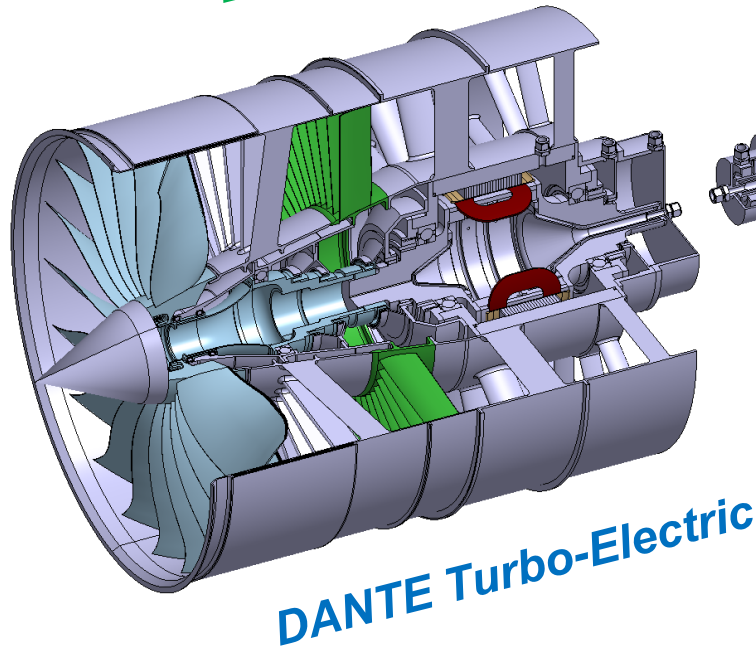


DANTE Parallel Hybrid

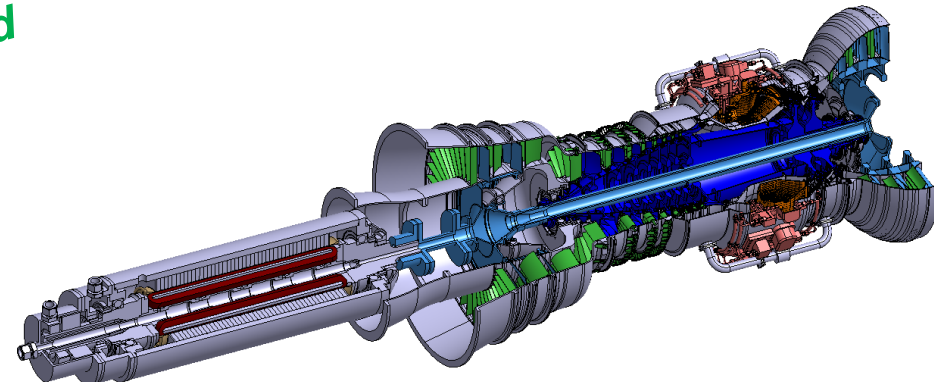
液体水素で冷却する超電導モータ・発電機によるジェットエンジンの性能改善を目標にして設計検討を実施中。

DANTE Parallel Hybrid:

エンジン後端に超電導モータを接続し、ファン駆動力の約1割を電気でアシストする方式。



DANTE Turbo-Electric



DANTE Turbo-Electric:

コアエンジンに直結された超電導発電機で発電し、ファンを超電導モータだけで駆動する方式。

水素航空宇宙機の研究開発状況について紹介した。

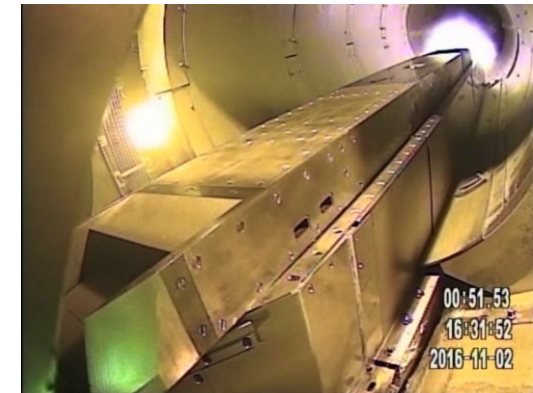
- 水素航空宇宙機である極超音速旅客機・極超音速エンジンの研究状況として、以下を紹介した。
 - ・ 極超音速旅客機 の概念検討
 - ・ 極超音速統合制御実験機 (HIMICO) の飛行実験計画
 - ・ 極超音速予冷ターボジェット燃焼実験

- 水素航空機技術の研究状況として以下を紹介した。
 - ・ 航空機用燃料として液体水素を安全に取り扱うための燃料タンクの軽量化、液体水素電動ポンプ等の研究
 - ・ 極低温 (-253°C) の液体水素の冷却能力を活用した超電導ジェットエンジンの研究

カーボンニュートラル社会の実現に向けて、今後も大学・産業界と連携しつつ水素航空宇宙機の研究開発を進めたい。



極超音速旅客機



極超音速予冷ターボジェット



水素航空機