極超音速飛行を可能とする スクラムジェットエンジンの研究

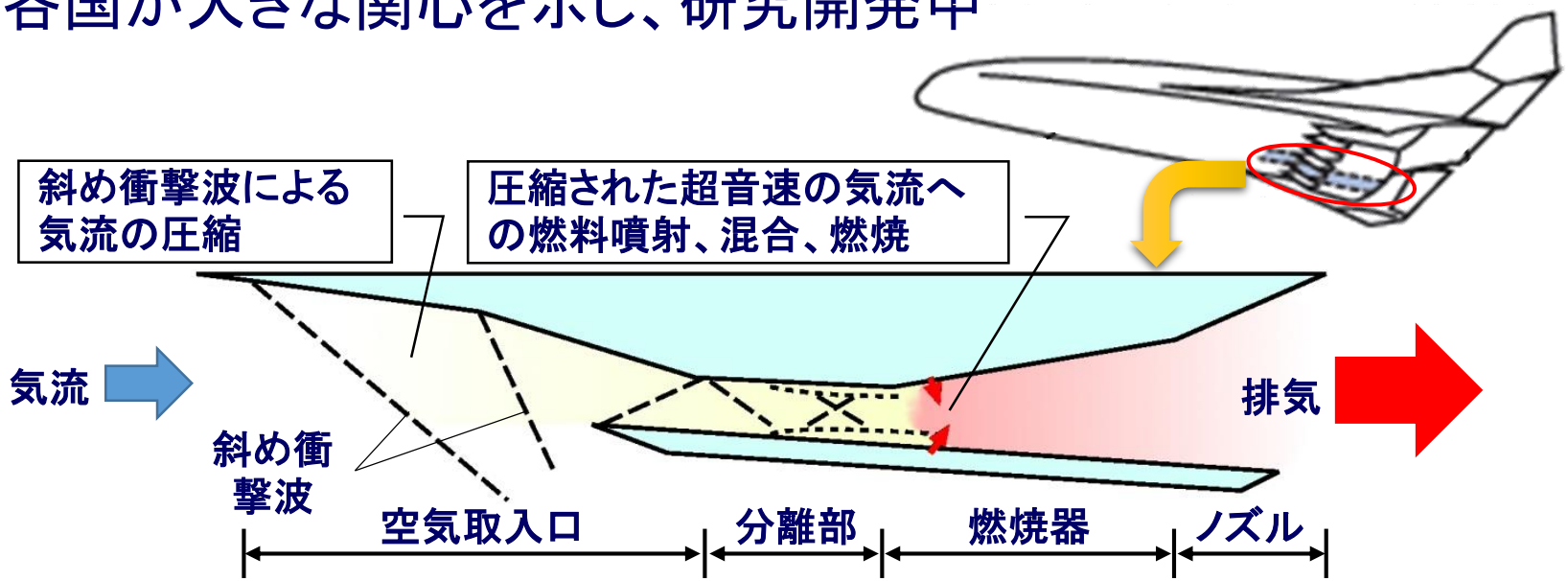
中山　久広

防衛装備庁　航空装備研究所
エンジン技術研究部　ロケットエンジン研究室

令和元年11月13日
防衛装備庁技術シンポジウム2019
於グランドヒル市ヶ谷

スクラムジェットエンジンとは

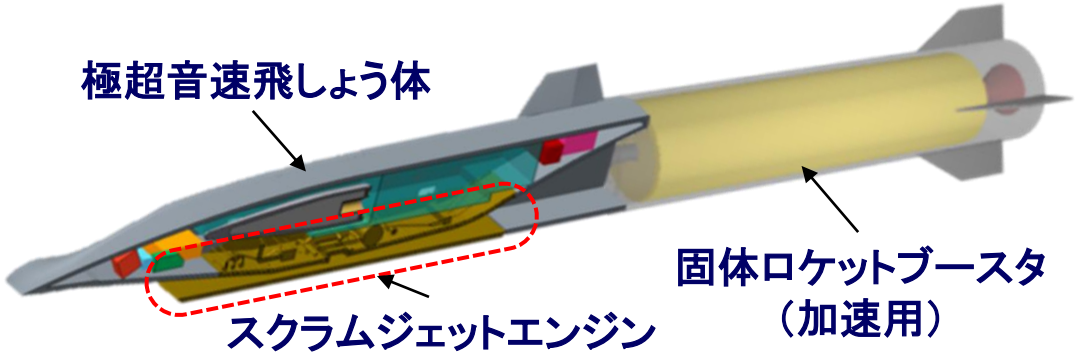
- 空気取入口に生じた衝撃波で空気を圧縮し、圧縮された超音速の空気に燃料を噴射、燃焼させて推力を得るエンジン
- スクラムジェットエンジンの利点:
  - シンプルな構造
  - 極超音速巡航（マッハ数5以上）が可能
  - 極超音速飛しょうにおいて最も高い比推力
- 各国が大きな関心を示し、研究開発中

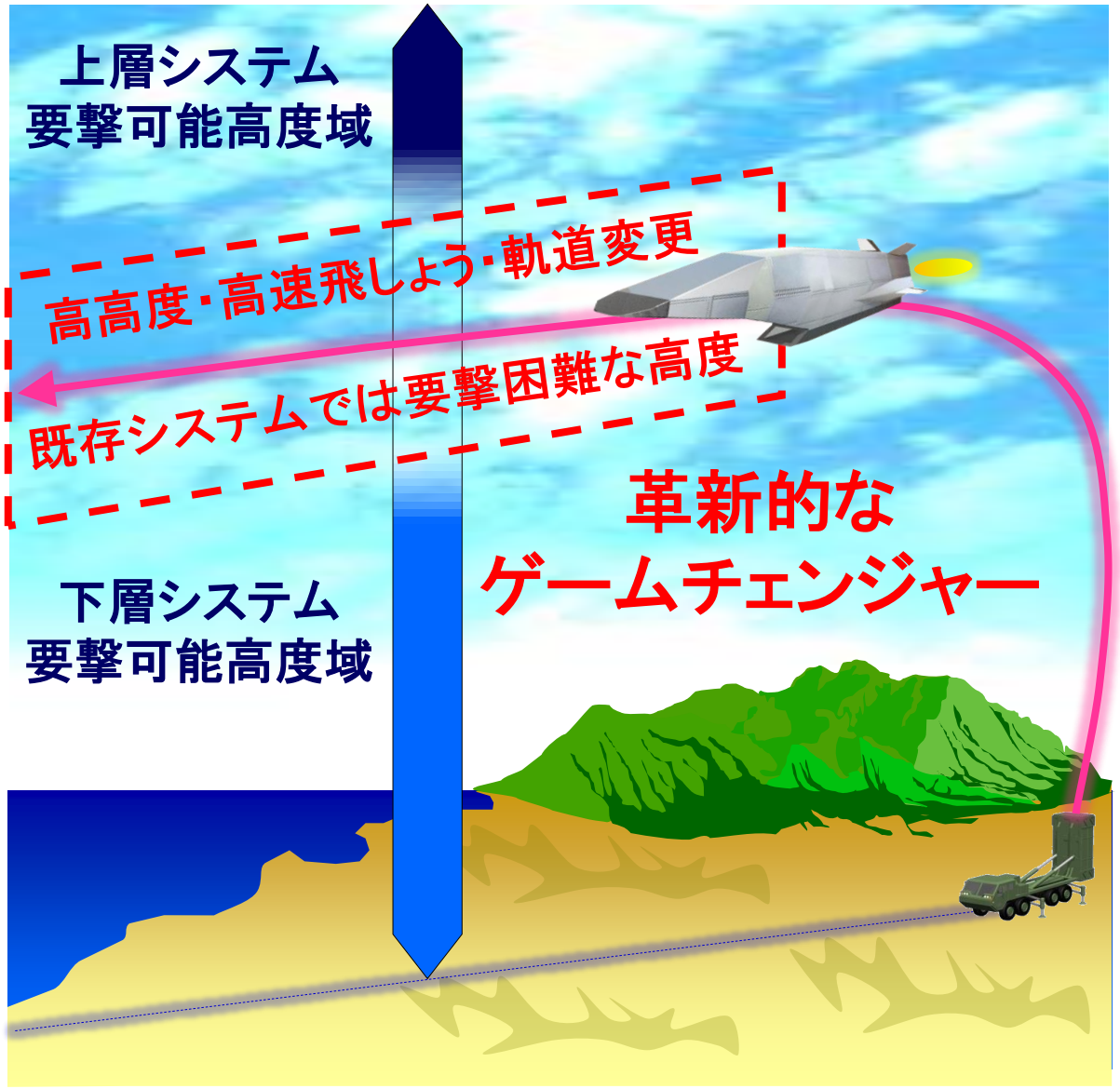


X-51Aプログラム（米国）

出典
※1: https://www.cnet.com/news/x-51a-races-to-hypersonic-record/
※2及び※3: http://www.boeing.com/features/2013/05/bds-x51-05-03-13.page

スクラムジェットエンジンを搭載した極超音速飛しょう体

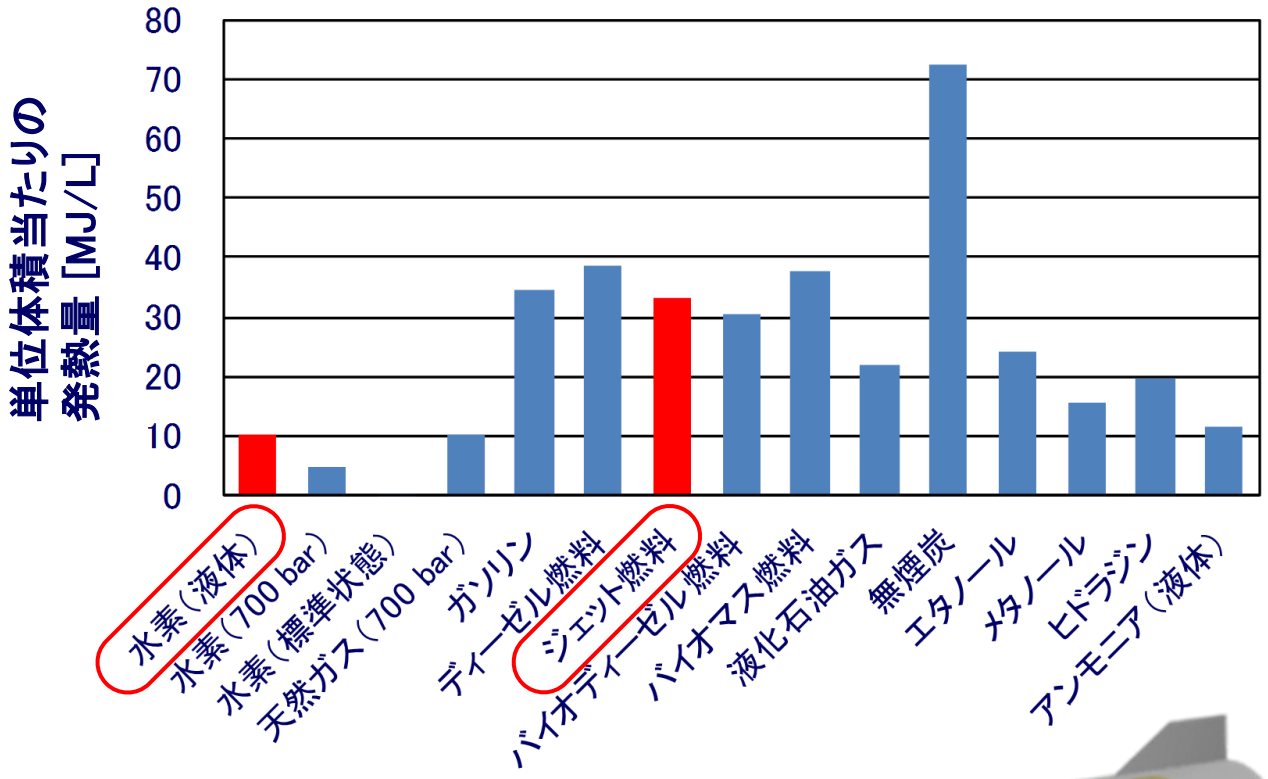


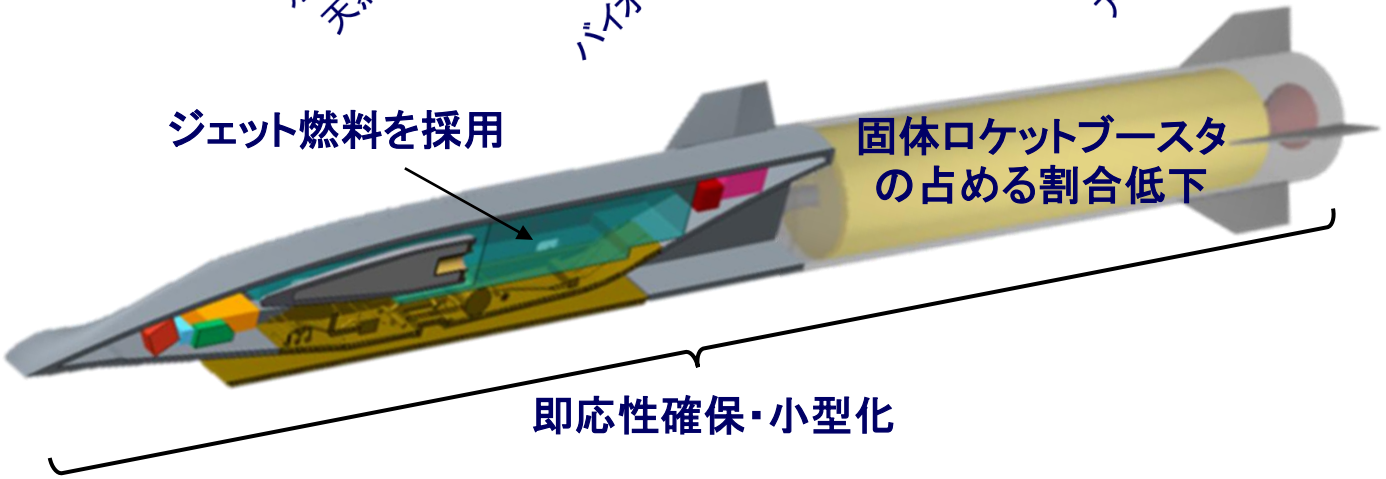


極超音速飛しょう体に適用するために

飛しょう体の即応性及び小型化

- ジェット燃料（液体炭化水素燃料）の採用
  - 常温保管が可能
  - 単位体積当たりの発熱量は水素（液体）の3倍以上
- 超音速加速・極超音速巡航の幅広い作動範囲を、単一形態のスクラムジェットエンジンでカバーし、低比推力の固体ロケットブースタによる加速を最低限に





本研究の目的

ジェット燃料を採用したデュアルモード・スクラムジェットエンジン（DMSJ）が必要

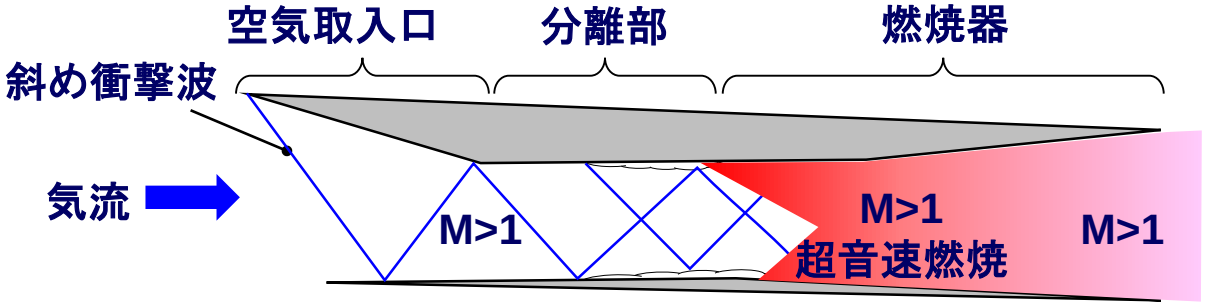
- 超音速燃焼（スクラムジェットモード（SJM））と亜音速燃焼（ラムジェットモード（RJM））の両方に適合可能

目的

ジェット燃料を採用したDMSJの技術実証

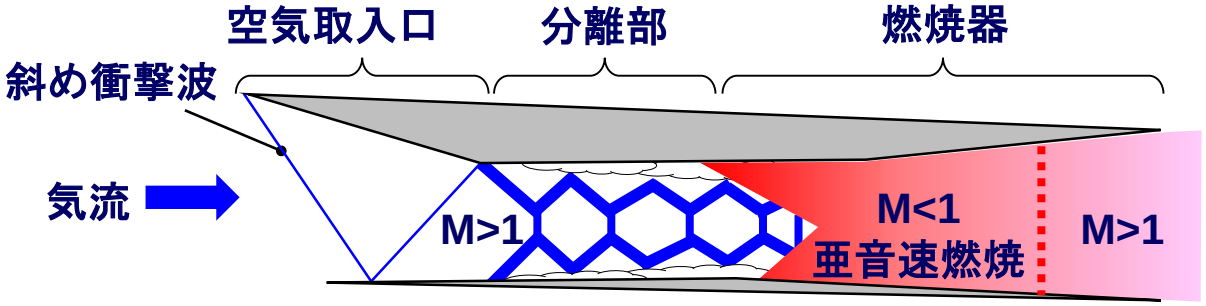
- 地上試験装置を用いた燃焼試験による実証（中期的）
- 極超音速飛しょう体による飛行実証（長期的）

主に巡航　飛しょうマッハ数：高い　燃料噴射量：少ない



（a）スクラムジェットモード（SJM）

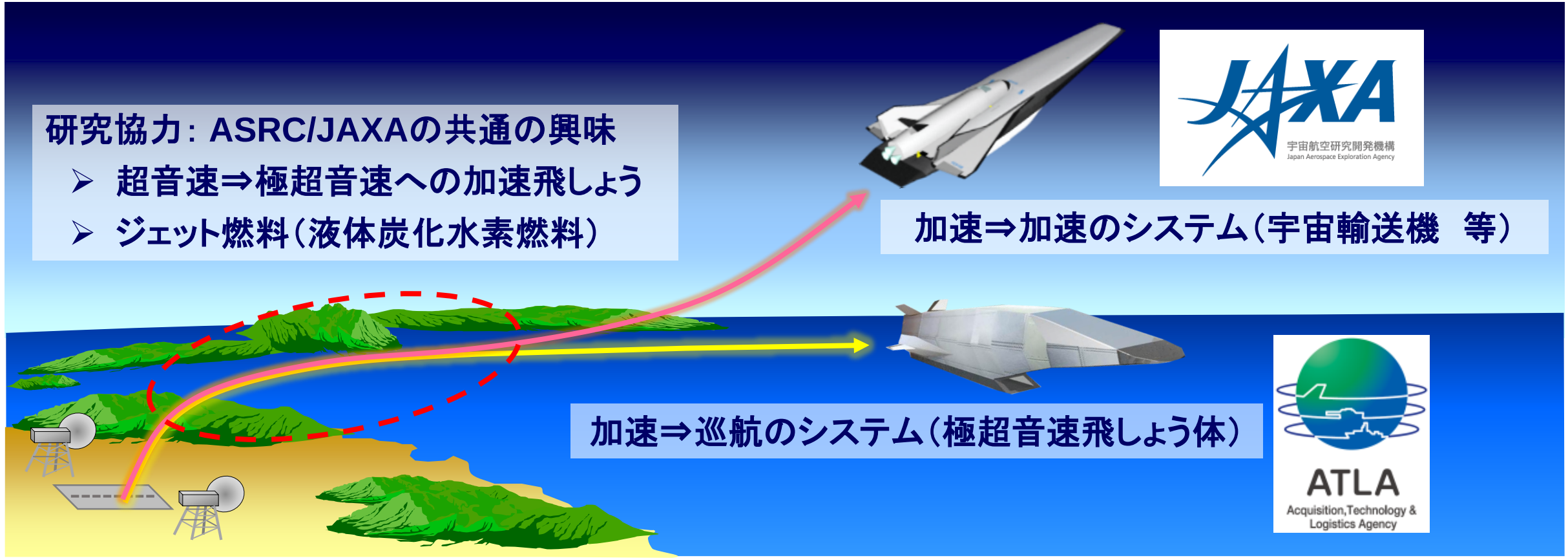
主に加速　飛しょうマッハ数：比較的低い　燃料噴射量：多い



（b）ラムジェットモード（RJM）

JAXAとの研究協力

- 防衛装備庁航空装備研究所（ASRC）と宇宙航空研究開発機構（JAXA）は、2016年より「極超音速飛行技術の実証に係る関連技術分野の研究協力」を実施中
- 目標はジェット燃料を採用したDMSJを搭載した極超音速飛しょう体の飛行実証

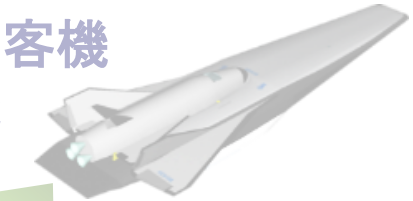


研究協力における技術研究ロードマップ（概要）

本発表の内容
②の成果（燃焼器）と③を紹介

極超音速
飛しょう体

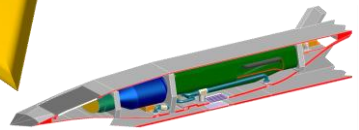
極超音速旅客機
宇宙往還機



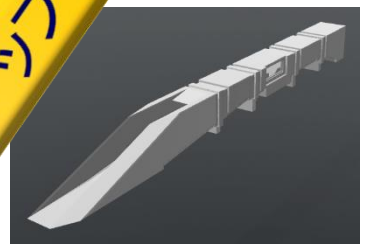
ATLAの開発

JAXAの開発

技術的ステップアップ



④飛しょう実証機の飛行実証（調整中）
- 飛しょう実証機を設計、製作し、地上試験を経て飛行実証



③DMSJシステムの実証、機体形状・材料の検証・評価（令和元～7年度）
- 地上試験によりエンジン燃焼性能を確認
- 地上試験によりエンジン再生冷却性能を確認
- 機体形状、耐熱材料・構造の検証・評価（風洞試験、加熱試験）

②DMSJ主要構成要素の実現性検討（平成29～30年度）
- エンジン主要構成要素（燃焼器、再生冷却パネルの一部）を設計、製作し、地上試験により基本性能を確認

①DMSJを搭載した極超音速飛しょう体の概案の検討（～平成28年度）
- 飛しょう体概案設計（CFD、飛しょう解析等）を実施
- エンジン燃焼、再生冷却特性等の解析手法、初期モデル検討

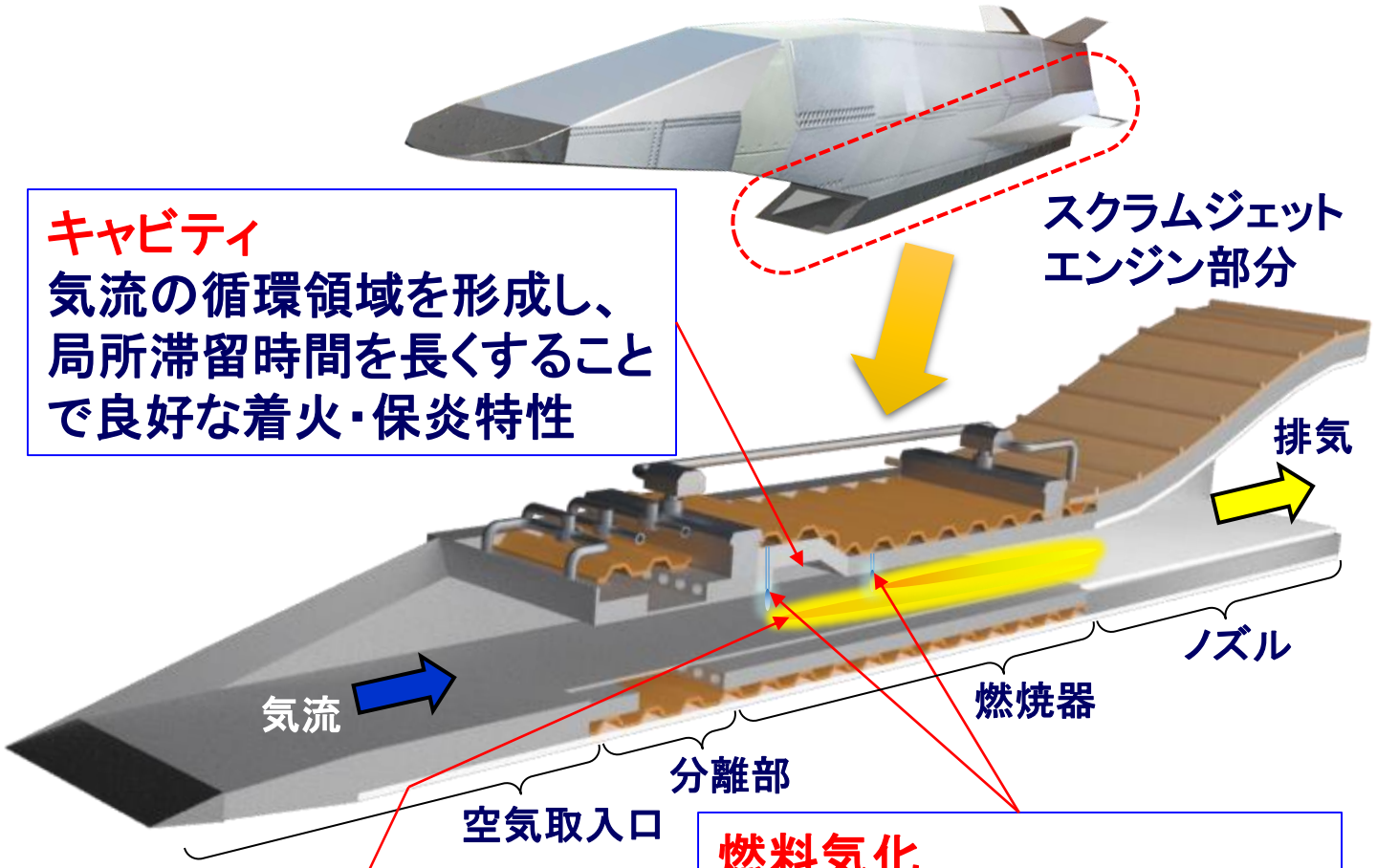
DMSJの課題と克服方法

DMSJの燃焼器の特徴

- 燃焼器内で超音速流であり、滞留時間が短い
- ジェット燃料は従来燃料の水素に比べ燃え難い
- 単一形態の燃焼器でSJM／RJMの両モードを達成

技術的課題

- 良好な燃焼
  - 燃料／空気の速やかな混合
  - 安定燃焼
  - 高燃焼効率
- 十分な推力ポテンシャル



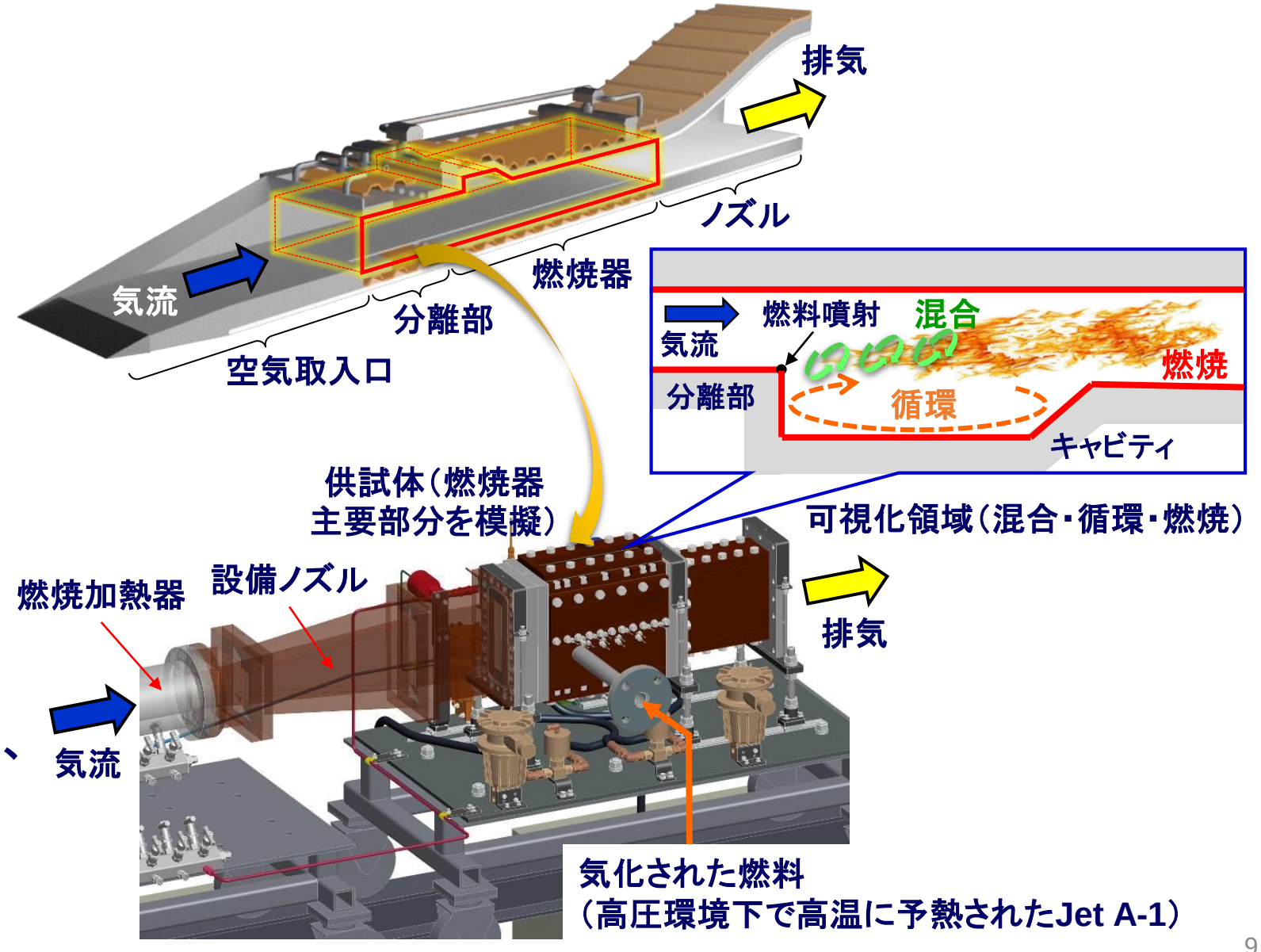
キャビティ
気流の循環領域を形成し、局所滞留時間を長くすることで良好な着火・保炎特性

混合促進
燃料噴射部下流で、燃料／空気の混合を促進

燃料気化
加熱されて気化したジェット燃料の噴射により燃焼促進（再生冷却で回収された熱を利用して気化）

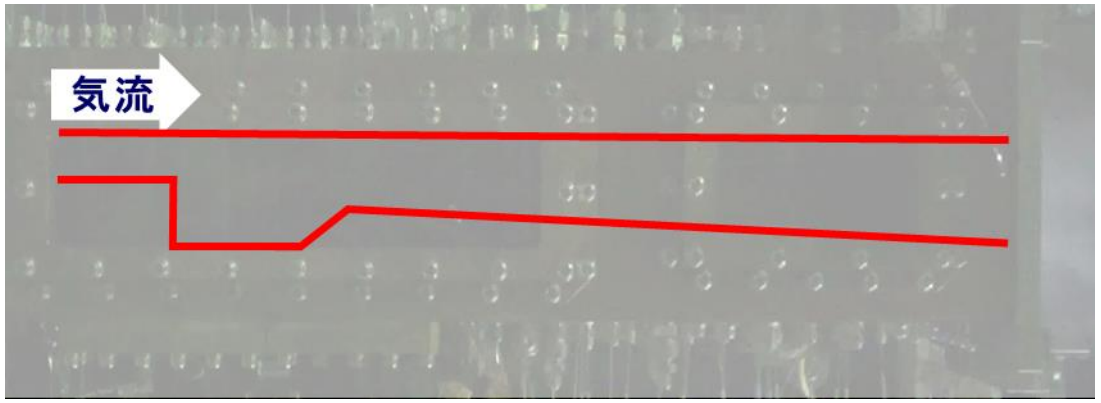
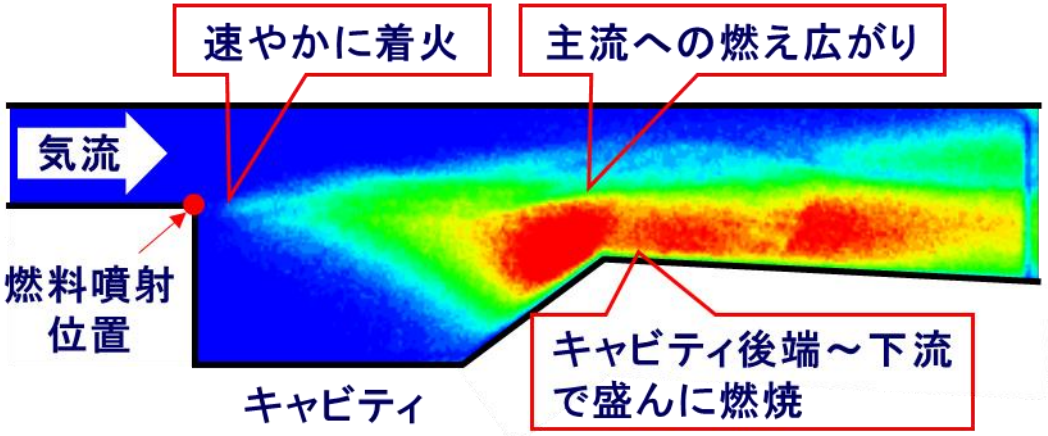
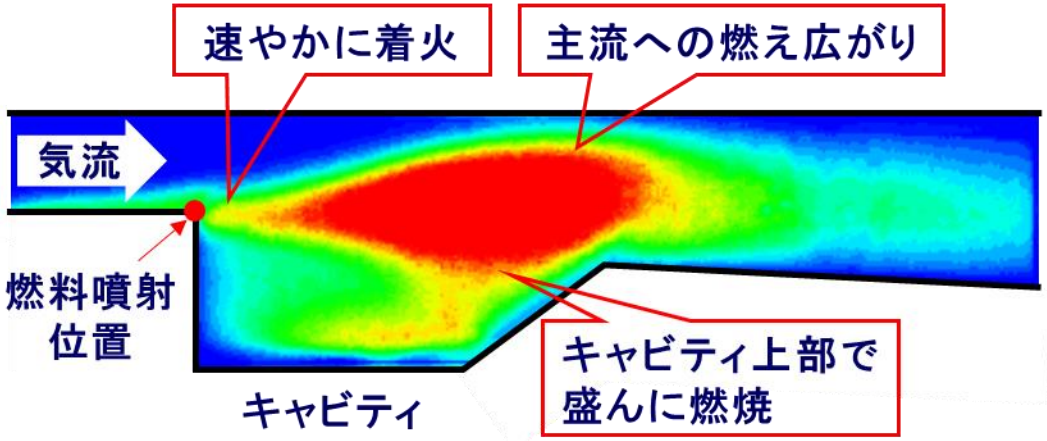
試験用燃焼器

- ■ 燃焼器
  - ➢ DMSJ燃焼器主要部
- ■ 燃料
  - ➢ Jet A-1を使用
  - ➢ 再生冷却による温度上昇を模擬し、加圧環境下で高温に予熱し、噴射
- ■ 試験方法
  - ➢ JAXA（角田）の基礎燃焼風洞を用い、直結方式により所定の気流を供給し、燃焼性能を確認



燃焼試験結果例

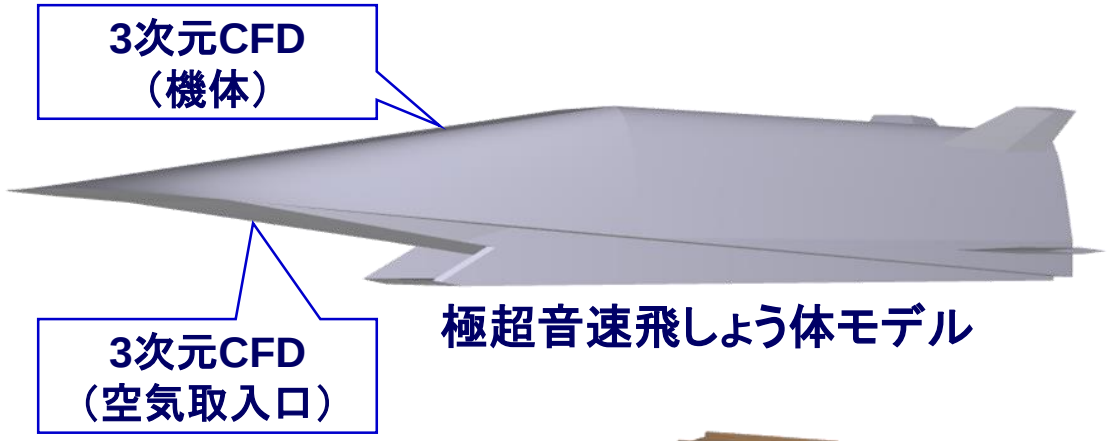
SJM／RJMともに本研究の燃焼器が安定作動することを実証

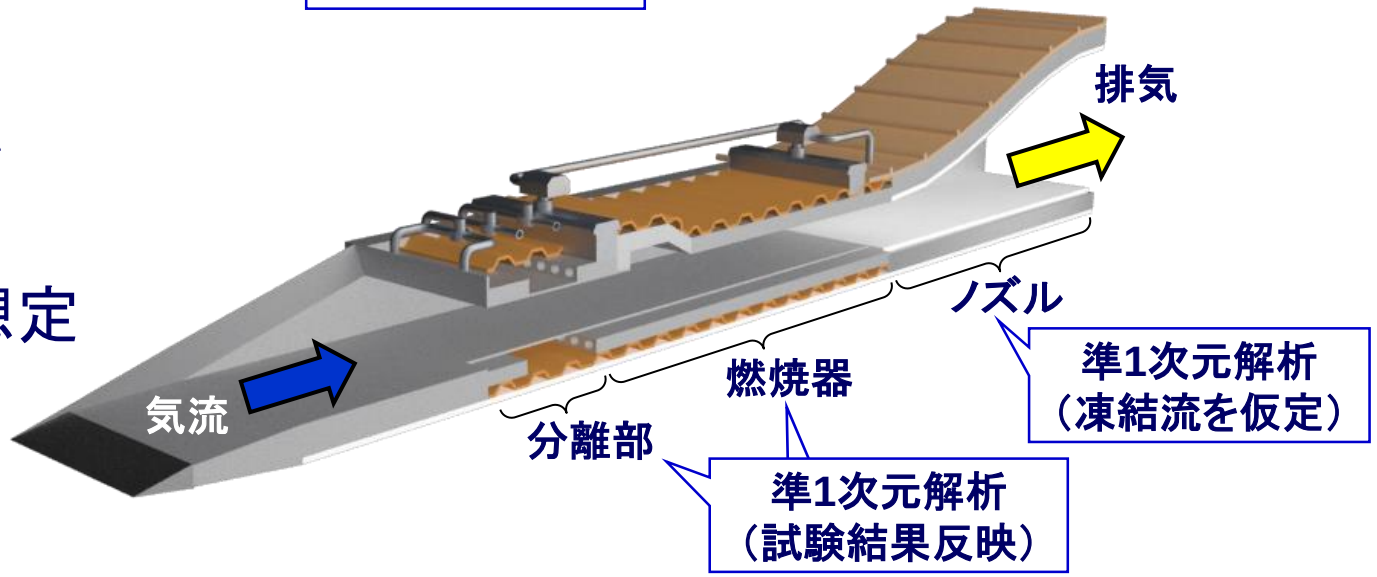
	スクラムジェットモード（SJM）	ラムジェットモード（RJM）
可視光		
OH ラジカル 自発光		

極超音速飛しょう体の実現性検討

DMSJを搭載した極超音速飛しょう体の飛しょう性能を、基礎的モデルを用いた解析により確認

- 機体の空力係数、空気取入口の性能
  - 3次元CFDで推定
- 分離部、燃焼器、ノズルの性能
  - 準1次元解析で推定（試験結果反映）
- 飛しょう性能
  - 3自由度飛しょう解析で確認
  - 地上発射を想定
  - 動圧が概ね一定の軌道を想定

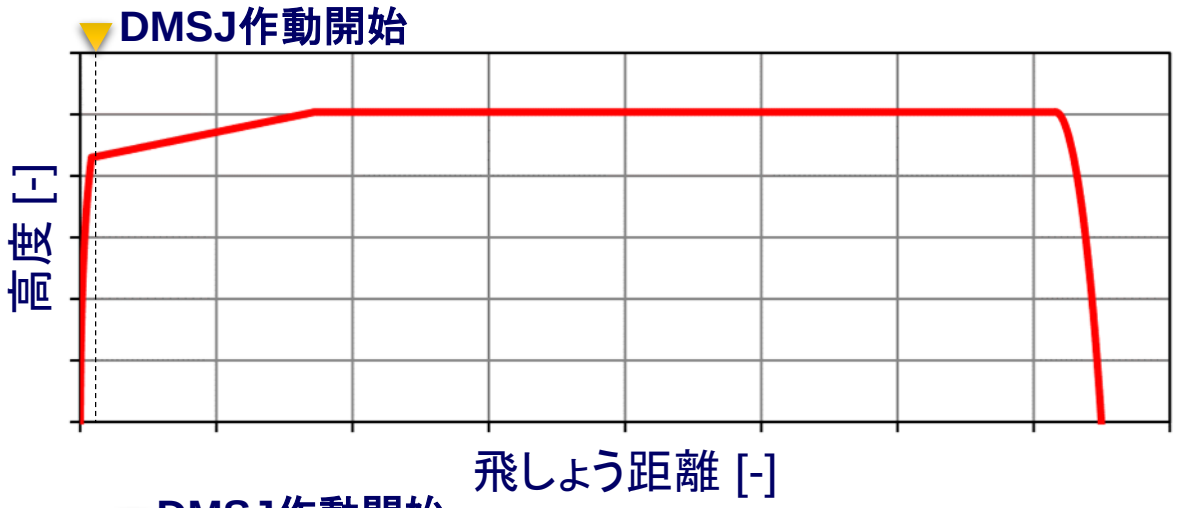


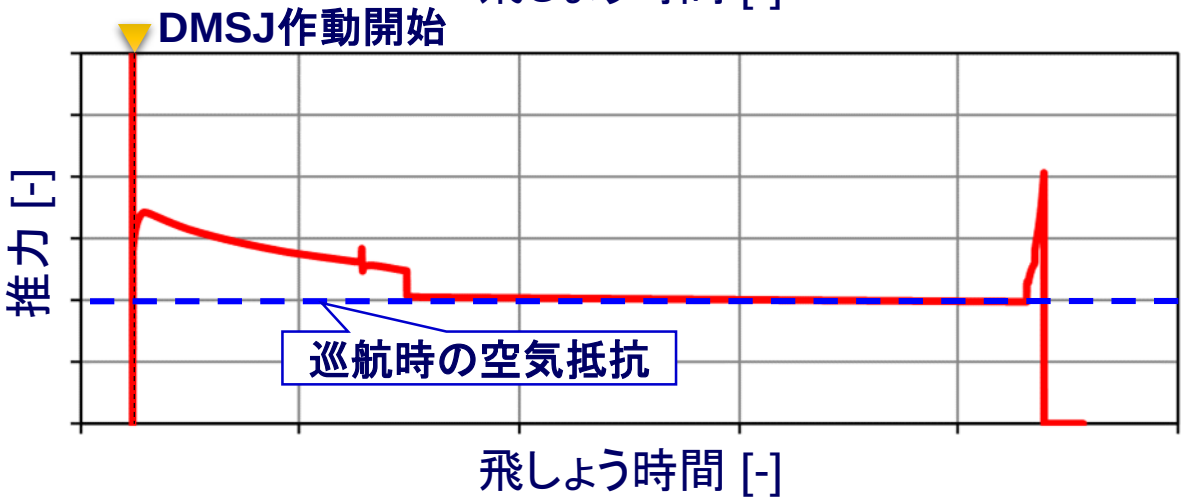


解析結果

■ DMSJを搭載した極超音速飛しょう体が所望の飛しょう性能を発揮することを確認

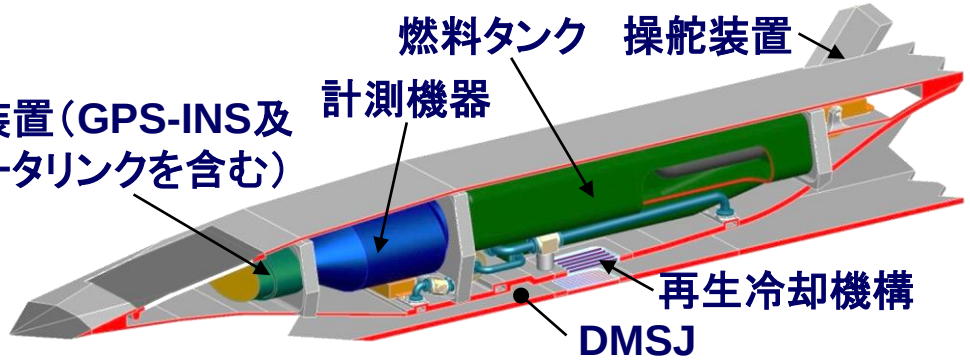
➢ 飛しょうのためのDMSJの推力ポテンシャルは十分



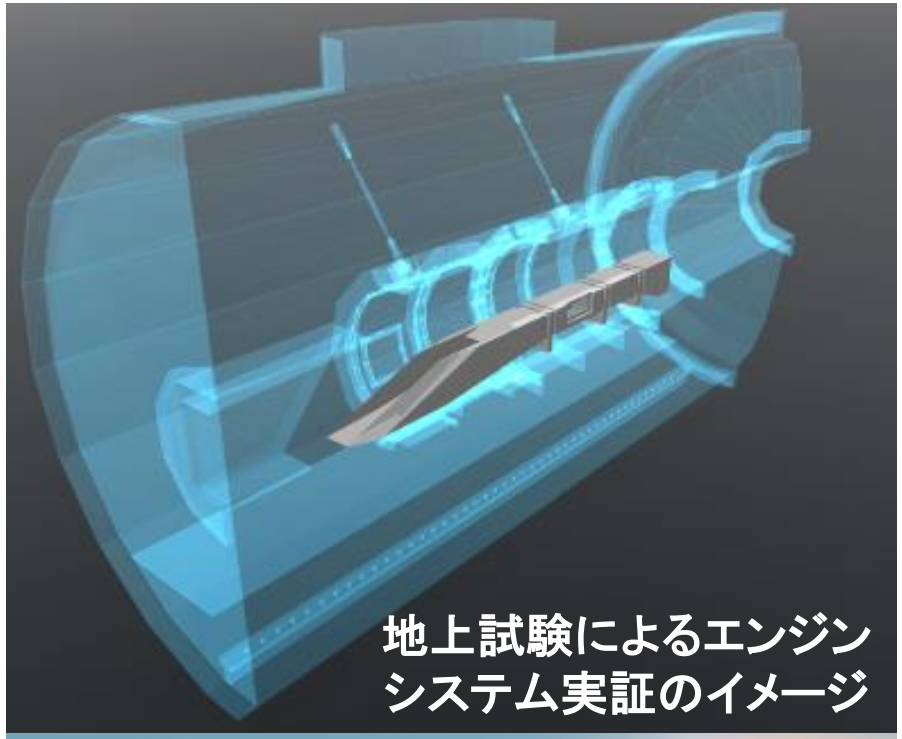


今後の展望

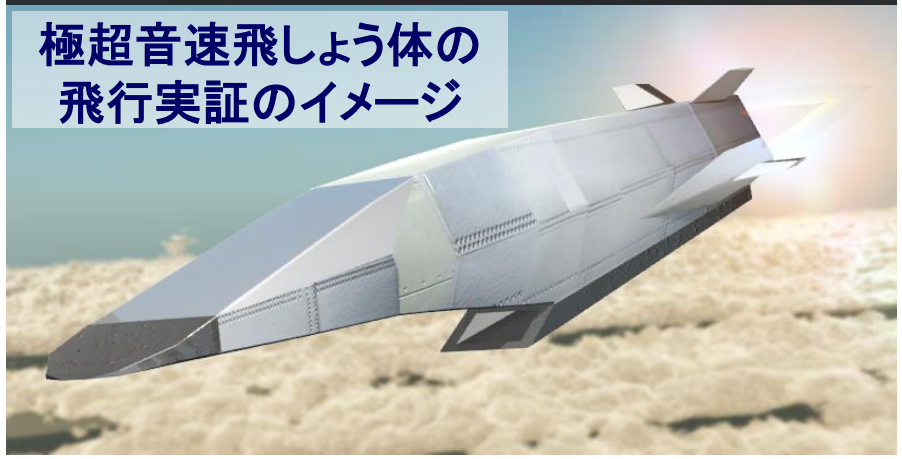
- 平成30年度までに、DMSJ主要構成要素（燃焼器、再生冷却パネル）の基本性能を確認
  - 良好な燃焼・推力ポテンシャル
  - 燃料による冷却特性確認
- 以上の成果を反映し、今年度よりDMSJの研究試作に着手し、地上試験でシステムレベルの実証を計画
  - 燃焼性能
  - 再生冷却性能
- 極超音速飛しょう体の飛行実証を早期に目指す。



飛行実証機のイメージ



地上試験によるエンジンシステム実証のイメージ



極超音速飛しょう体の飛行実証のイメージ