

## 液体水素燃料を用いた航空機の概要

2020年12月15日  
小島孝之(JAXA航空技術部門)

## 2020年に発表された欧州における水素航空機開発計画

- 2020/5 Hydrogen-powered aviation発表、H2 Aviation Webinar (McKensey・エアバス、CleanSky2)
  - ・2028年までに短距離機の飛行実証および小型機の認証取得を行う計画を発表
  - ・関連してフランス政府が航空業界に1兆8千億円(3年間)の支援を決定し、CO2ゼロの航空機開発を促進することを発表
- 2020/7 欧州水素戦略(欧州委員会)
  - ・2024年までに100万トン/年の再生水素製造の目標(水電解の規模 100MW 6GW)
  - ・欧州におけるCO2削減目標に対する水素の重要性がより明確に
- 2020/9 エアバス社が2035年までに水素を利用したゼロエミッション航空機を事業化させる計画を発表

今後、欧州において航空機への水素適用研究開発が加速する

## 関連した水素利用航空機計画の動き

欧州においては、4人乗りの燃料電池航空機(HY4)を実施中。  
国内の航空宇宙メーカにおいても、水素を航空機に適用する計画を発表。

## 欧州における水素航空機に関する過去の検討例



### CRYOPLANE Project (2002 Airbus)

- 既存機体を液体水素燃料とした場合の航空機モデル検討
- 超電導、燃料電池は検討対象外

#### 対象

機体: ビジネスジェット~A380  
推進: V2500相当ターボファン~水素タービン冷却V2500 (TET150K上昇)

#### 結果

機体表面積拡大によりエネルギー消費→+9~+14%  
機体自重(Operating Weight Empty)→+23%  
離陸重量→-14.8%~+4.4%  
運用費→+4~+5%(燃料費の増加分)

電動化を行わなくても、技術的・経済的  
成立性あり

### E-Thrust (2012 EADS IW, R&R)

- FlightPath2050(CO2排出75%減)に対応した機体検討
- 電動推進を中心とした大型機航空機システムを検討

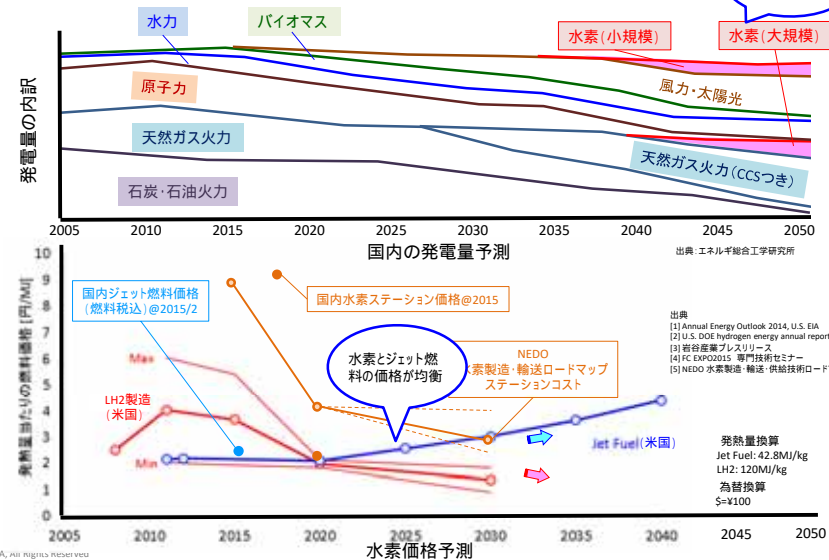
近年の電動化の技術動向を反映

## 水素利用航空機の将来予測



JAXAでは、2016年に将来の水素普及の見通しを予測し、水素航空機の技術検討を実施した。  
水素価格がジェット燃料と競争力をもつのは2020年代、また水素利用の本格普及は2040年代と予測。

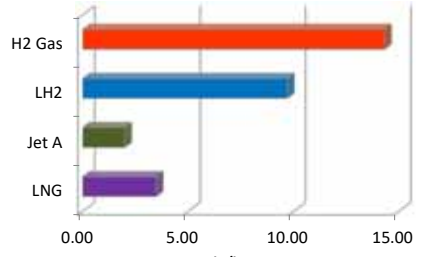
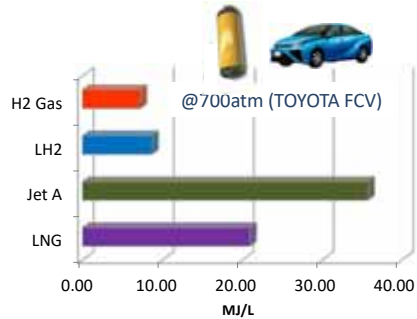
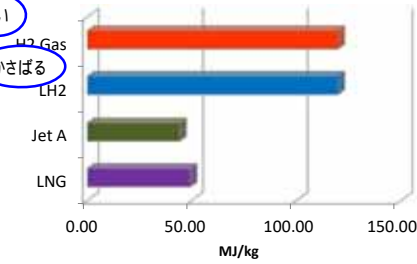
水素利用の本格普及



## 水素燃料のメリット・デメリット



- 水素の「発熱量 / 重量」 → ジェット燃料の 3 倍 軽い
  - 水素の「発熱量 / 体積」 → ジェット燃料の 1/4 倍 かさばる
  - 水素の「比熱」 → ジェット燃料の 4 倍
  - LNGの 3 倍
- 液体水素と高圧水素は燃料密度はほぼ同じ



©2020 JAXA, All Rights Reserved

発熱量 / 体積の比較

発熱量/重量の比較

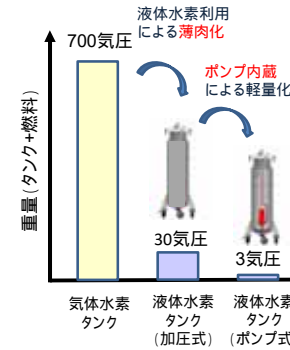
比熱の比較

5

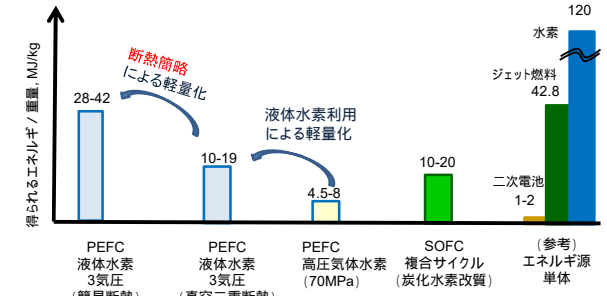
## 液体水素利用のメリット



- 液体水素を利用することによりタンク構造は軽量(薄肉化)になる。
- ポンプの内蔵、断熱の簡略化によりさらなる軽量化が可能。



水素燃料タンクの重量比較



電源質量の比較  
(水素質量5kg、出力20-40kW想定)

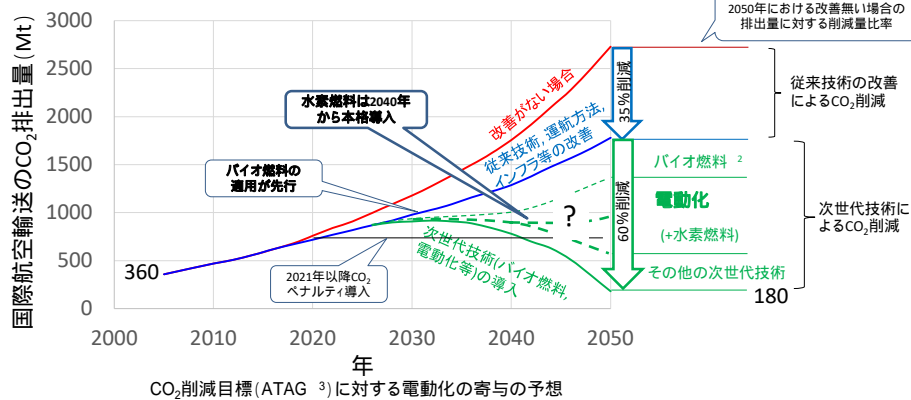
比熱の比較

6

## 航空機電動化コンソーシアム 将来ビジョン (2018年12月)



航空分野における2050年のCO<sub>2</sub>排出半減に向け、次世代技術の適用目標を定めた。次世代技術のうち、バイオ燃料(ライフサイクルCO<sub>2</sub>排出はジェット燃料の37%)の適用が先行するが、CO<sub>2</sub>排出削減目標には未達。2040年代より水素燃料(CO<sub>2</sub>フリー)の適用が必須。



CO<sub>2</sub>削減目標(ATAG<sup>3</sup>)に対する電動化の寄与の予想

- ジェット燃料消費量の3.16倍がライフサイクルCO<sub>2</sub>排出量(質量)。
- 本図は国際航空輸送の寄与のみを示す。国際航空輸送の燃料消費は全体の約65%(2010年)。2050年には70%まで増加するとされる<sup>1</sup>。
- 1 Source: ICAO Environmental Report 2016 P.16
- 2 ICAO Environmental Report 2016 P.17~19には、バイオ燃料の導入について複数のシナリオとバイオ燃料によるCO<sub>2</sub>削減のポテンシャル範囲が提示されている。ここで示すバイオ燃料導入量はそれらの範囲に含まれる一例。
- 3 ATAG(Air Transport Action Group, <https://www.atag.org/>)<sup>2050年時点</sup>で2005年時点の半減、をCO<sub>2</sub>排出量削減目標として設定

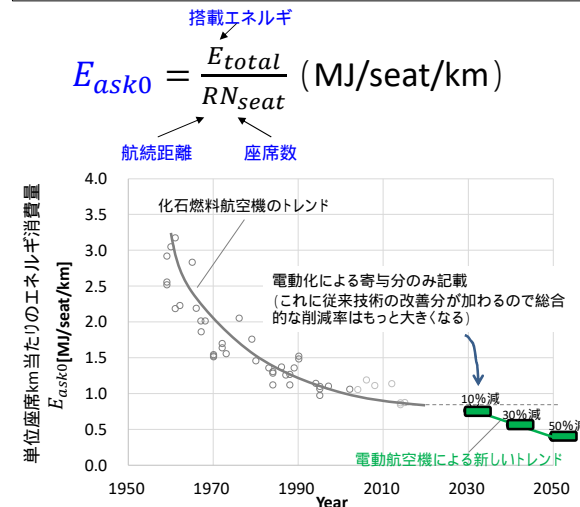
©2020 JAXA, All Rights Reserved

7

## 燃料削減に向けた電動推進系の性能目標



将来ビジョンにおける電動推進の燃費削減目標を機体サイズ、EIS時期で定めた。このうち、CO<sub>2</sub>削減量に対するインパクトの大きい2040年代における推進システムの詳細化を進めた。



旅客機における単位エネルギー消費量の推移と開発機の目標

©2020 JAXA, All Rights Reserved

想定する電動推進航空機の燃費削減目標

EIS時期	サイズ	燃費削減率
2030年代	細胴機以下	10%
2040年代	全サイズ	30%
2050年代	全サイズ	50%

EIS: Entry Into Service

8

## 燃料削減に向けた個別技術目標



単位座席km当たりのエネルギー消費量を30%削減するための技術目標を検討

$$E_{ask0} = \frac{E_{total}}{RN_{seat}} = \frac{C_{str}}{\eta_{total} L/D} = \frac{C_{str}}{\eta_t \eta_p L/D} \quad (\text{MJ/seat/km})$$

搭載エネルギー (E<sub>total</sub>)  
 航続距離 (RN) / 座席数 (N<sub>seat</sub>)  
 重量指標 (構造) (C<sub>str</sub>)  
 総合効率 (η<sub>total</sub>)  
 熱効率 (η<sub>t</sub>) / 推進効率 (η<sub>p</sub>)  
 揚抗比 (空力) (L/D)

$$E_{ask1} = 0.7 E_{ask0} = \frac{C_{str}}{(1.43 \eta_{total}) L/D}$$

- 単位エネルギー消費量を推進系の寄与だけで30%削減するには
- 熱効率と推進効率の積を1.43倍にしなければならない

9

## ターボファンエンジンの効率

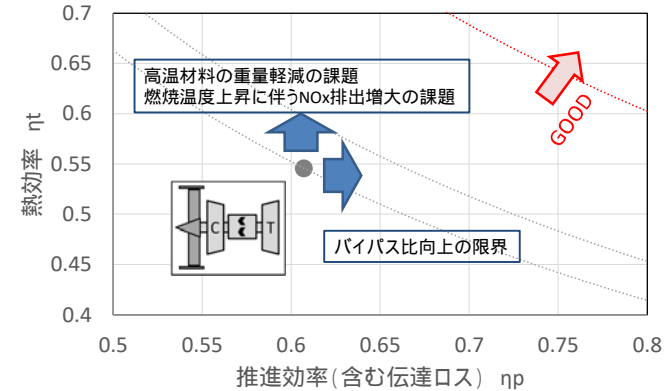


➤ ジェットエンジンの効率(燃料消費率)は、熱効率と推進効率の積で表され、いずれも上限に近づきつつある。

$$\eta_{th} = \frac{\text{発生運動エネルギー}}{\text{供給燃料のエネルギー}} = \frac{m_a \left[ (1+f) \frac{u_2^2 - u_1^2}{2} \right]}{m_f q_R} = \frac{(1+f) \frac{u_2^2 - u_1^2}{2}}{f q_R}$$

$$\eta_{prop} = \frac{\text{推進動力}}{\text{発生運動エネルギー}} = \frac{m_a [(1+f) u_2 - u_1]}{m_a \left[ (1+f) \frac{u_2^2 - u_1^2}{2} \right]}$$

全体圧力比、温度比が大きいほど良い  
 バイパス比が大きいほど良い



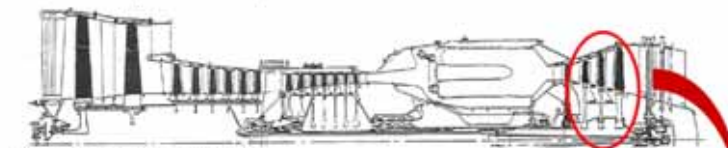
10

## バイパス比増大による課題(1) エンジン重量

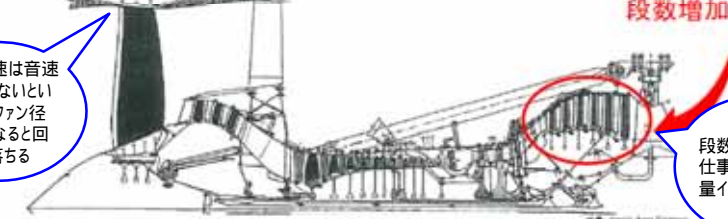


- 低圧軸回転数はファン周速により律速されるが、タービンは大型化ができない。
- 近年のジェットエンジンはタービン多段化により対応しているが、段数増加による重量増を招く

PW社 JT3D (バイパス比1)



GE社 GE90 (バイパス比8)



ファン周速は音速付近としないといけない。ファン径が大きくなると回転数も落ちる

段数を多くして、仕事をやる。重量インパクト大

11

## バイパス比増大による課題(2) 降着装置の大型化



- エンジン径増大により降着装置が長く重くなる
- エンジン位置が中心から離れ、垂直尾翼も大型化。

B707 (バイパス比1)

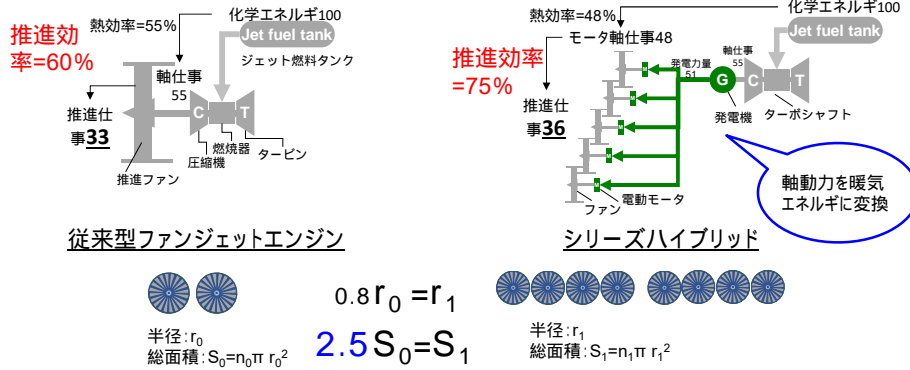


B787 (バイパス比11)



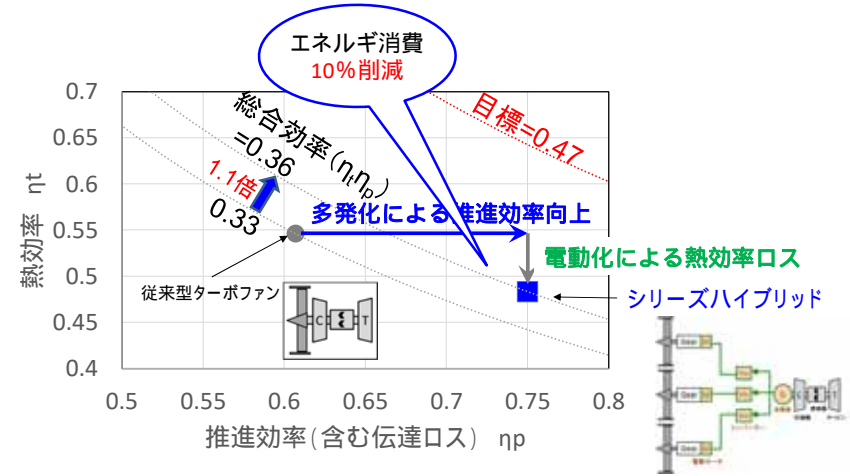
12

# 電動化への期待 = 「多発化」による推進効率の向上



- 多発化によるファン面積増加により推進効率を向上
  - ファン面積2.5倍で推進効率15pt増
- ファン中心部等実際の形状の影響は考慮していない

# 多発化の限界

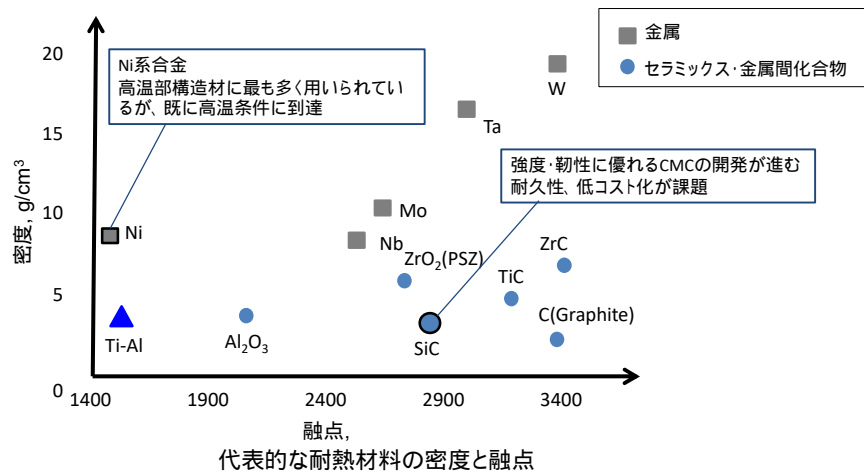


- 総合効率1.1倍向上し、10%程度のエネルギー消費削減効果 (目標には届かず)
- 電動システムによる各ロスが追加されるため、熱効率は悪化 (シリーズハイブリッドの弱点)

# 熱効率向上に関する課題 (1) 高温材料



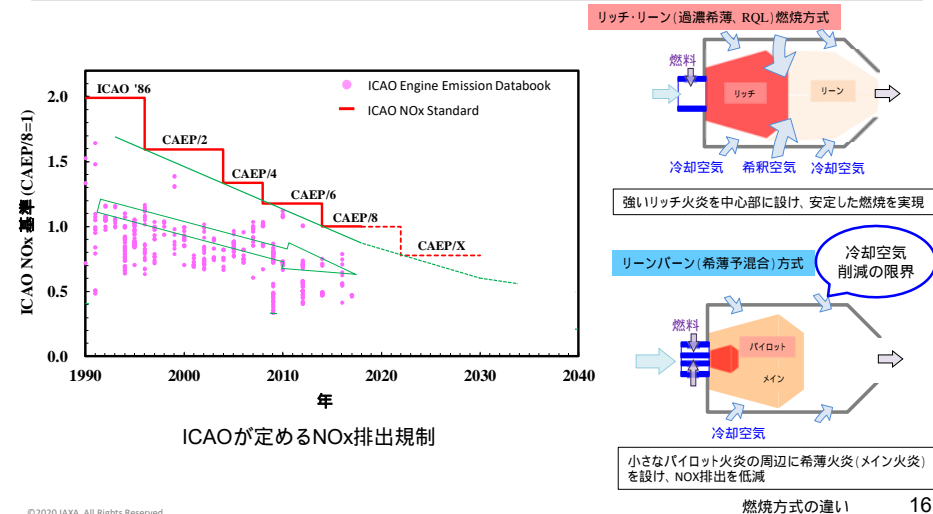
- 高温部に用いているNi系合金は既に上限に到達し、SiC系材料(CMC)の開発が進められている。CMCは耐久性向上、低コスト化が課題。



# 熱効率向上に関する課題 (2) NOx排出低減

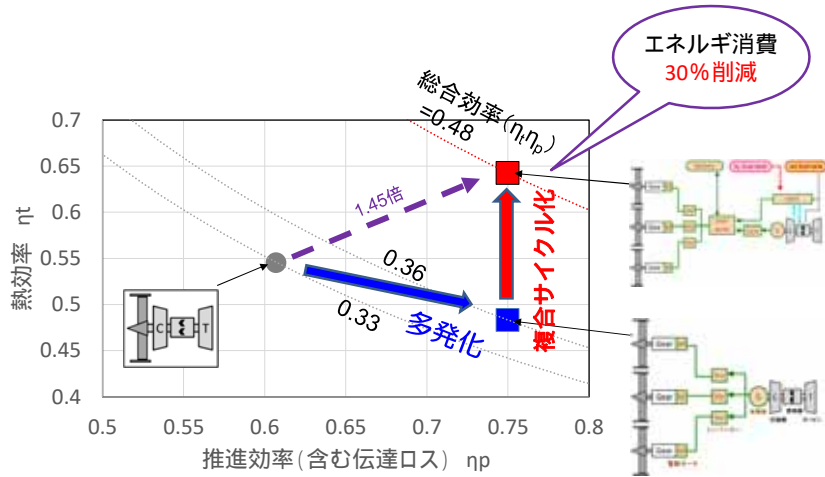


- 現在はICAO CAEP/8基準が利用されており、今後も規制は厳しくなる傾向
- 燃焼器は燃焼安定性に優れたリッチ・リーン方式から低NOx性に優れたリーンバーン (希薄予混合燃焼) 方式へ変わりつつあるが、希薄燃焼の限界に近付きつつある。





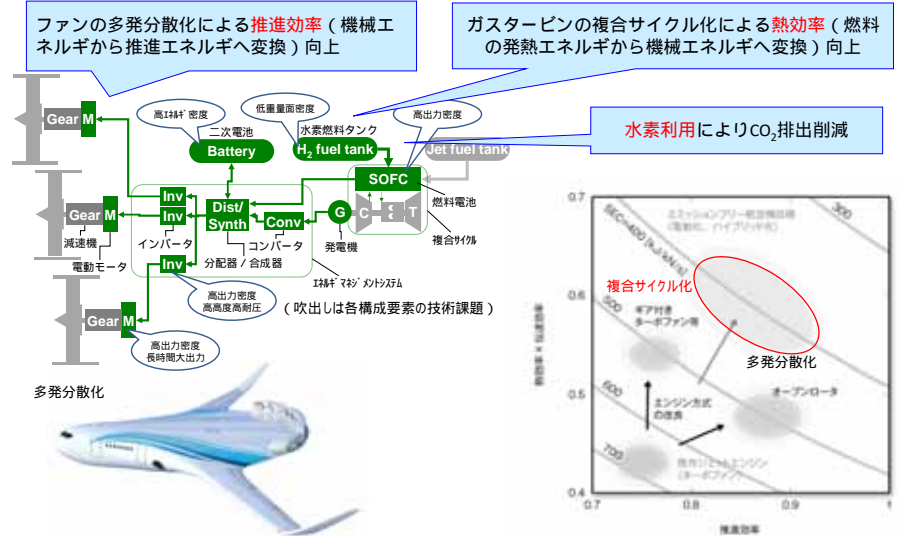
# 熱効率を抜本的に向上する方法



● 総合効率が1.45倍向上し、エネルギー消費削減目標の30%達成の可能性あり

# 推進系の改善 エミッションフリー航空機の構想

小島, "航空機用複合サイクルエンジンの研究", 航空機電動化 (ECLAIR) コンソーシアム第2回オープンフォーラム, 2019/11, [http://www.aero.jaxa.jp/news/event/event191128\\_rep.html](http://www.aero.jaxa.jp/news/event/event191128_rep.html)



JAXAが提案する電動複合サイクルエンジンの構想(上)と「エミッションフリー航空機」のイメージ図(下)

推進効率と熱効率の目標  
小島・岡井・西沢, 超電導応用・最新線「航空8」機用モータ, OHM2017年12月号

# 水素・電動エネルギーを主推進機関に用いる検討例



	短期構想 (現行する航空機からの移行が容易)	長期構想 (CO <sub>2</sub> 排出削減に対する寄与大)
	パラレルハイブリッド電動推進	ターボ電動推進 (シリーズハイブリッド電動推進)
構成		
燃料	ジェット燃料	ジェット燃料 / 水素
検討例	Boeing SUGAR-Volt hFan	JAXA Emission-Free Aircraft

# 水素航空機の課題



航空機性能向上

$$E_{ask} = \frac{1}{\eta_t} \frac{1}{\eta_p} \frac{1}{L/D} \frac{C_{str}}{1} \text{ (MJ/seat/km)}$$

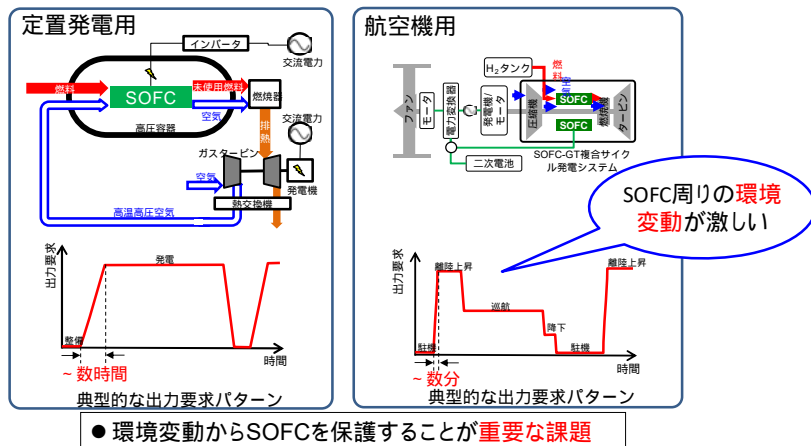
- 熱効率向上**
  - 複合サイクル化
  - 燃料電池高速起動
  - 飛行環境変動に対する燃料電池の保護
- 推進効率向上**
  - 高バイパス比化
  - 多発化
  - BLI(境界層吸い込み)
- 揚抗比向上**
  - 水素タンク複雑形状化
- 重量軽減**
  - 燃料電池出力密度向上
  - 水素タンク軽量化

安定性

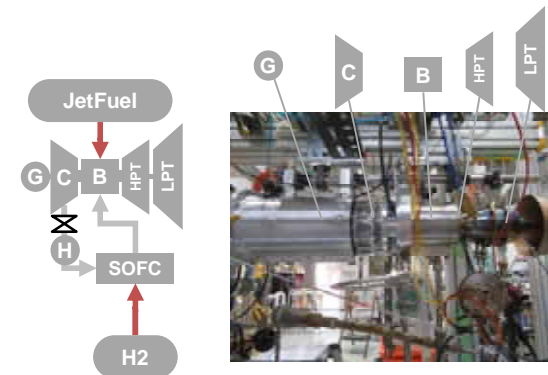
- 燃料電池・燃焼器への安定した水素供給
  - 空港インフラの安全性
- 安全なボイルオフガス処理  
水素タンク内の燃料揺動抑制

経済性、空港への水素大量供給

H2 Aviation Webinar. 欧州水素戦略において、いずれも電力価格に対する水素価格の優位性を補助する仕組みの必要性を強調

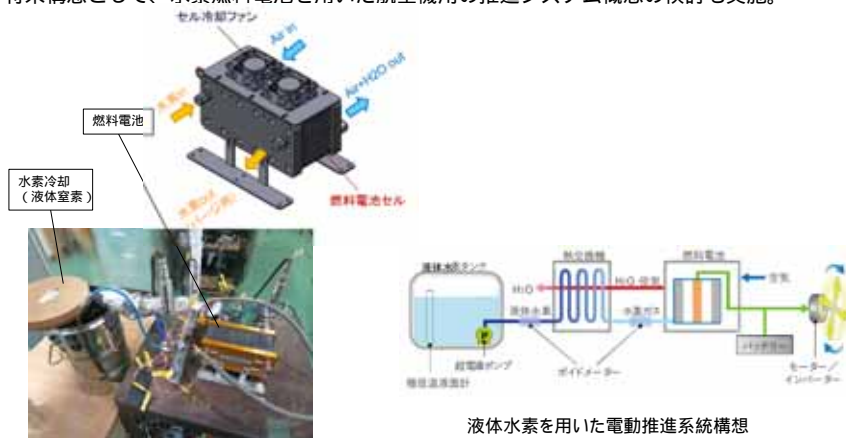


➤ 2019年度より小型ガスタービンとSOFCを統合した複合サイクルエンジンによる発電実験を実施中。複合サイクル化による熱効率改善効果の実証や高速起動実験を行う予定。



2軸小型複合サイクルガスタービン

- 液体水素タンクから供給された低温水素で発電する水素燃料電池の特性取得試験を実施中。
- 燃料電池の内部における発熱と低温水素供給のバランスによる温度分布を可視化して評価。
- 将来構想として、水素燃料電池を用いた航空機用の推進システム概念の検討も実施。



水素燃料電池の発電実験

## まとめ

- 国内外の動向
- 欧州を中心として、航空機への水素適用技術開発が進む
  - 大型機については、液体水素を利用した推進システムとなる
- JAXAにおける活動
- 航空機電動化コンソーシアムにおいて将来ビジョンを定め、航空機への水素適用はCO2排出削減目標達成に必要不可欠であり、導入時期は2040年代と予測した。
  - この目標を達成するため、エミッションフリー航空機を提案し、個別技術課題について研究開発を進めている。

ご清聴ありがとうございました。

小島孝之 / JAXA航空技術部門  
kojima.takayuki@jaxa.jp