

# 航空機用複合サイクルエンジンの研究

## 目次

1. 航空機電動化将来ビジョンにおける燃費削減目標
2. 目標達成手段の候補と位置づけ
3. 複合サイクルエンジンの課題
4. JAXAにおける最近の研究と今後の計画
5. まとめ

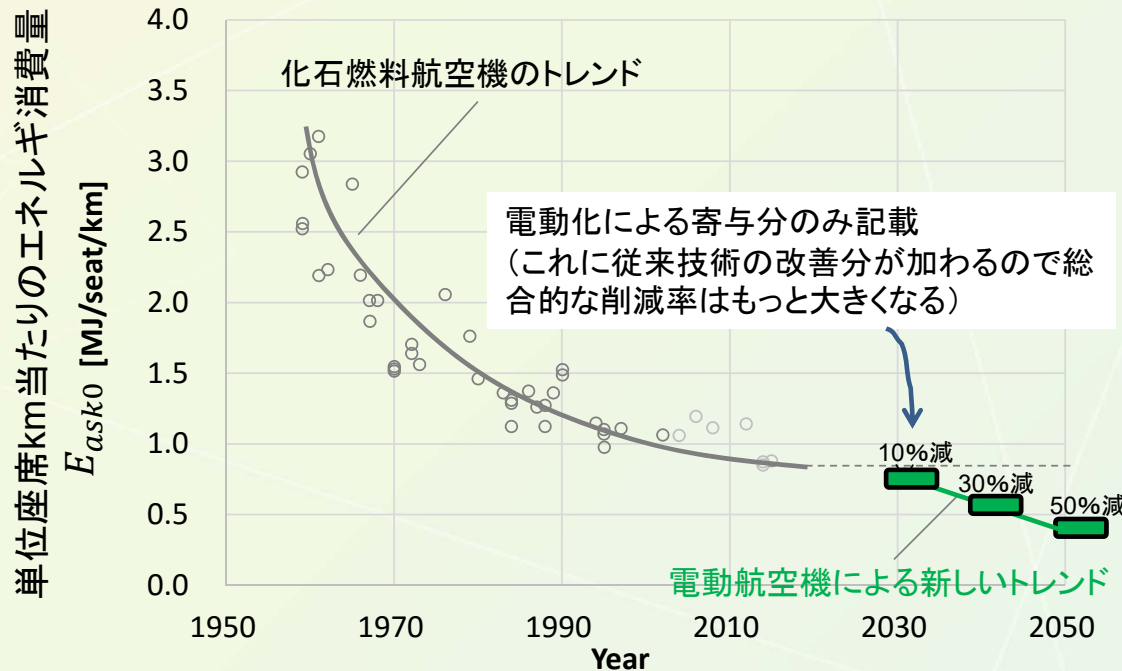
宇宙航空研究開発機構 航空技術部門

次世代航空イノベーションハブ エミッションフリー航空機技術チーム

○小島孝之、小林宙、田頭剛、飯嶋竜司、西山万里、岡井敬一、西沢啓



# 1. 航空機電動化将来ビジョンにおける燃費削減目標



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見込み

## 想定する開発機の燃費削減目標

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

EIS: Entry Into Service

- 技術リスクが比較的低い細胴機以下のサイズから電動化を開始
- 2040年代には全サイズに適用し電動化による新しいエネルギートレンドへ移行

出典: [http://www.aero.jaxa.jp/about/hub/eclair/pdf/eclair\\_vision.pdf](http://www.aero.jaxa.jp/about/hub/eclair/pdf/eclair_vision.pdf)

## 2. 目標達成手段の候補と位置づけ

単位座席km当たりのエネルギー消費量

$$\text{重量指標 } C_{str} = \frac{W_{ini}(1 - W_{fin}/W_{ini})}{N_{seat} \ln \frac{W_{ini}}{W_{fin}}}$$

← 離陸総重量  
← 着陸時総重量

$$E_{ask0} = \frac{\overset{\text{搭載エネルギー}}{E_{total}}}{\underset{\text{航続距離}}{R} \underset{\text{座席数}}{N_{seat}}} = \frac{\overset{\text{重量指標}}{C_{str}}}{\underset{\text{総合効率}}{\eta_{total}} L/D} = \frac{\overset{\text{重量指標}}{C_{str}}}{\underset{\text{熱効率}}{\eta_t} \underset{\text{推進効率}}{\eta_p} \underset{\text{揚抗比}}{L/D}} \text{ (MJ/seat/km)}$$

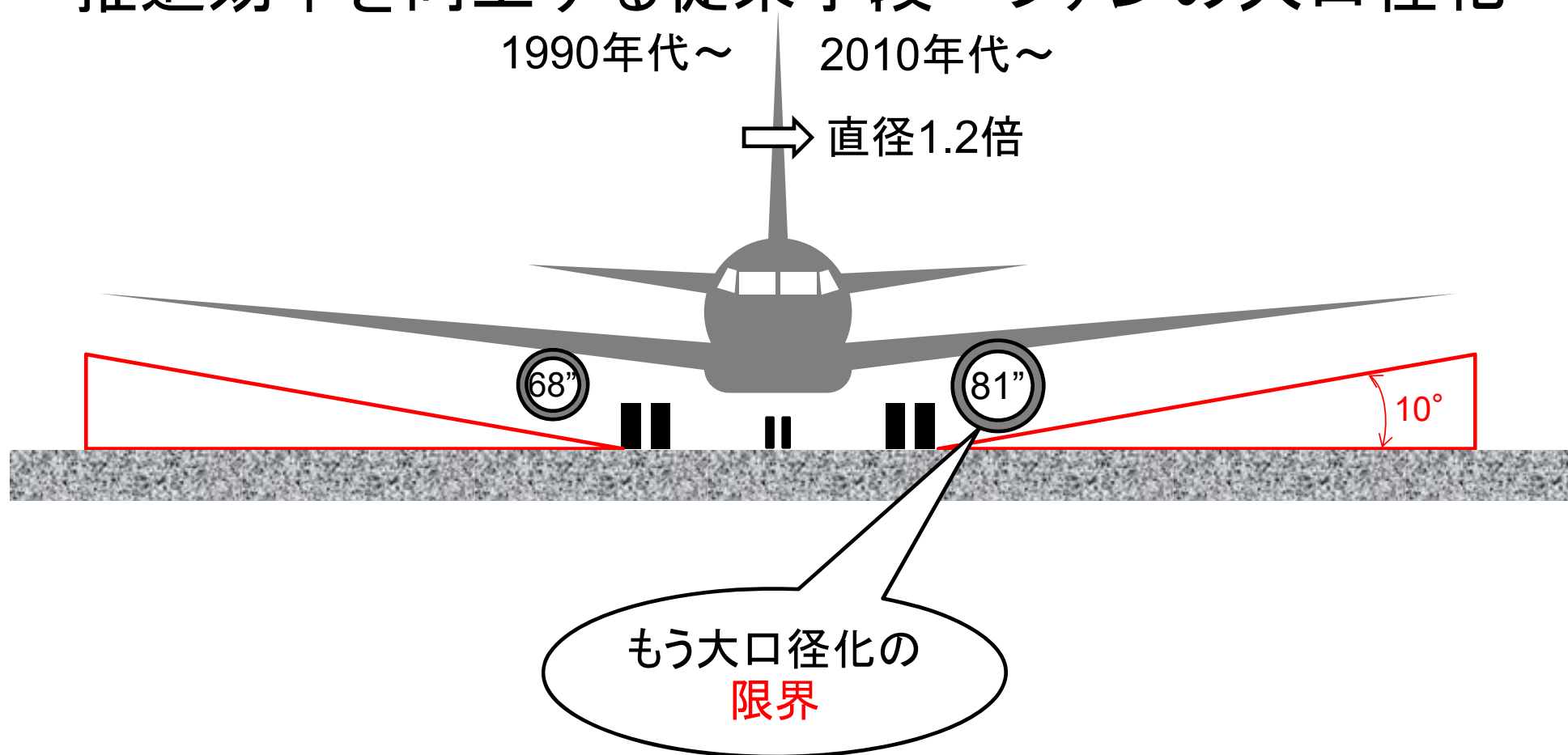
$$E_{ask1} = 0.7 E_{ask0} = \frac{C_{str}}{(1.43 \eta_{total}) L/D}$$

- 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少なくとも1.43倍※**にしなければならない

(※:実際には重量指標が大きくなる効果と揚抗比が小さくなる効果が加味されるので、さらに大きくしなければならない)

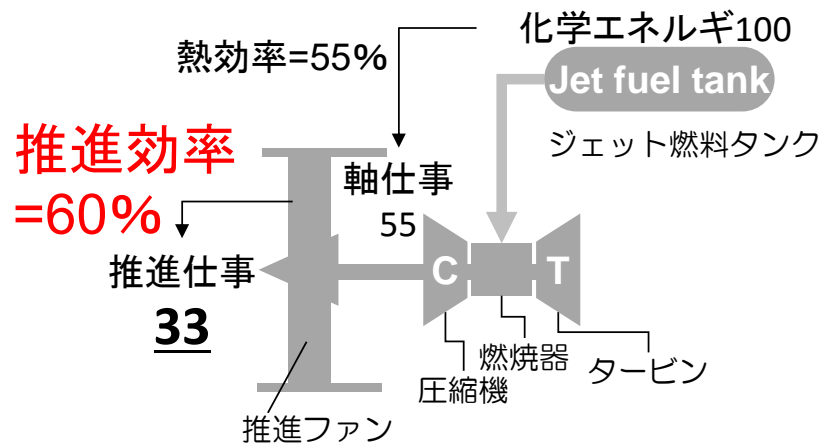
## 2. 目標達成手段の候補と位置づけ

### 推進効率を向上する従来手段＝ファンの大口径化

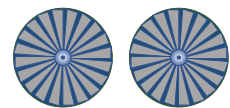


## 2. 目標達成手段の候補と位置づけ

### 電動化への期待＝「多発化」による推進効率の向上



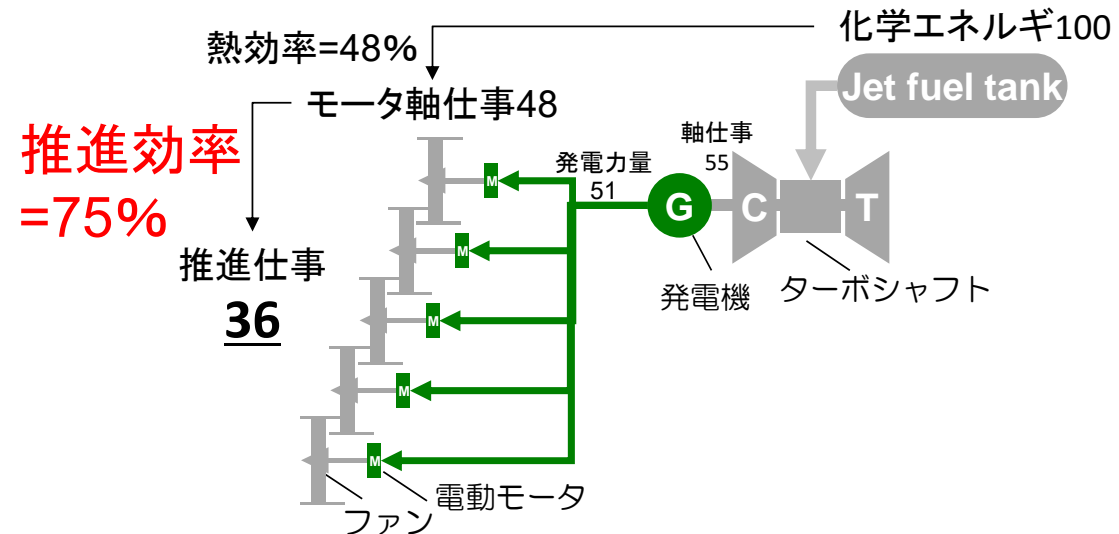
従来型ファンジェットエンジン



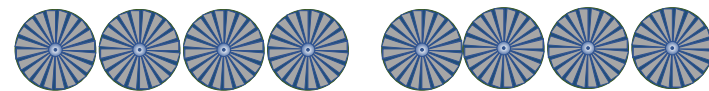
半径:  $r_0$   
 総面積:  $S_0 = n_0 \pi r_0^2$

$$0.8r_0 = r_1$$

$$2.5S_0 = S_1$$



シリーズハイブリッド

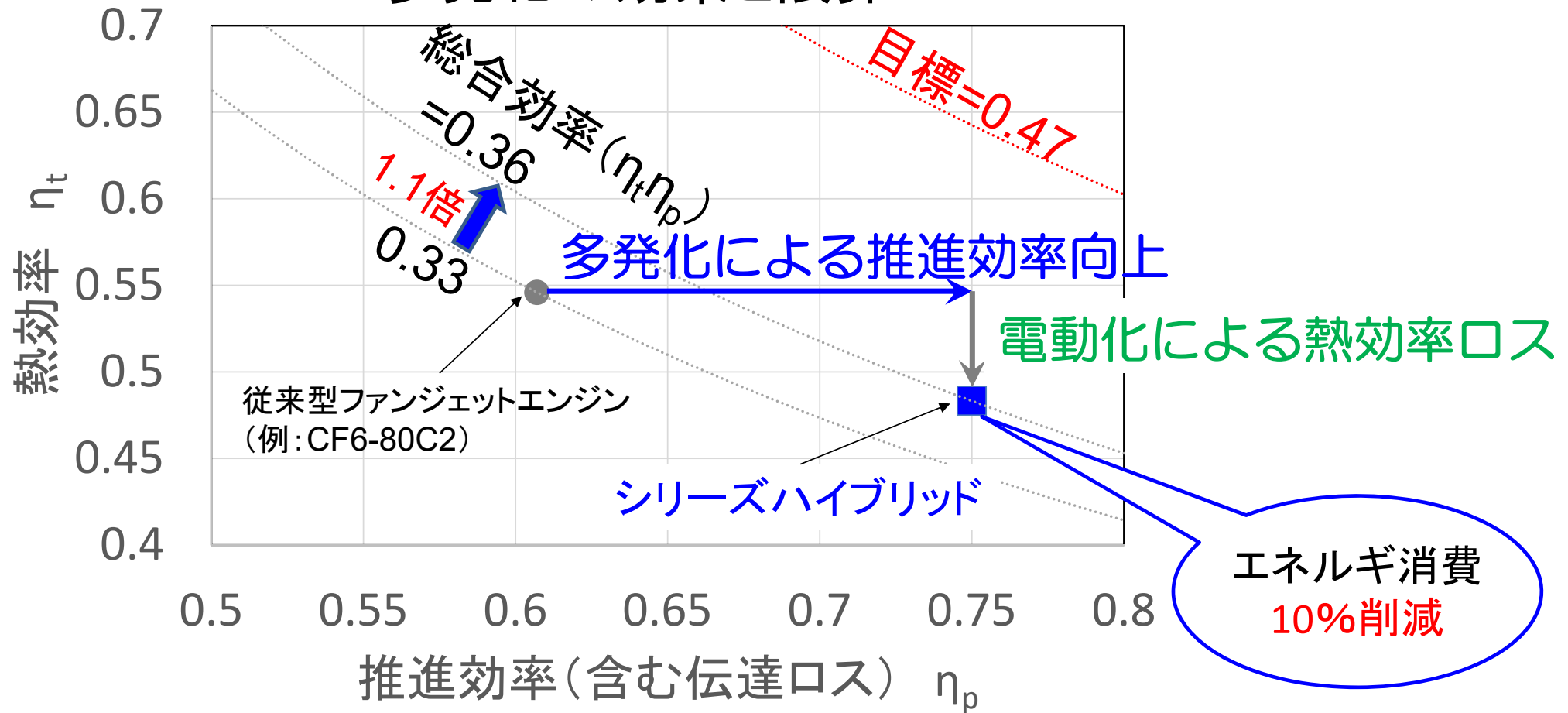


半径:  $r_1$   
 総面積:  $S_1 = n_1 \pi r_1^2$

- 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。また、ベースとなるファンの推進効率の値によって15pt増となる場合の面積比は異なる。

## 2. 目標達成手段の候補と位置づけ 多発化の効果と限界

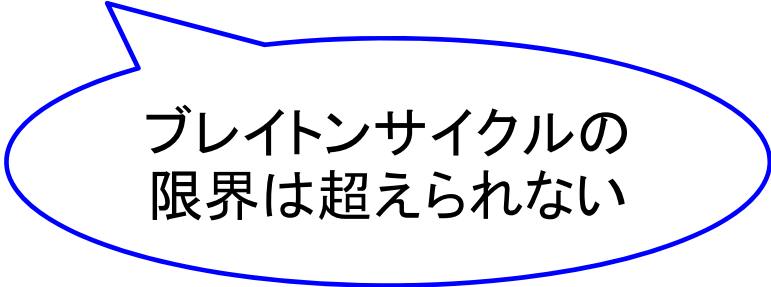


- 総合効率1.1倍向上し、10%程度のエネルギー消費削減効果(目標には届かず)
- 電動システムによる各ロスが追加されるため、熱効率は悪化(シリーズハイブリッドの弱点)

## 2. 目標達成手段の候補と位置づけ

**熱効率**を向上する従来手段＝

- 圧力比の向上（最適値に近づいている）
- タービン入口温度の向上
  - ・低NO<sub>x</sub>化とのトレードオフが必要
  - ・単結晶合金に替わる新素材必要

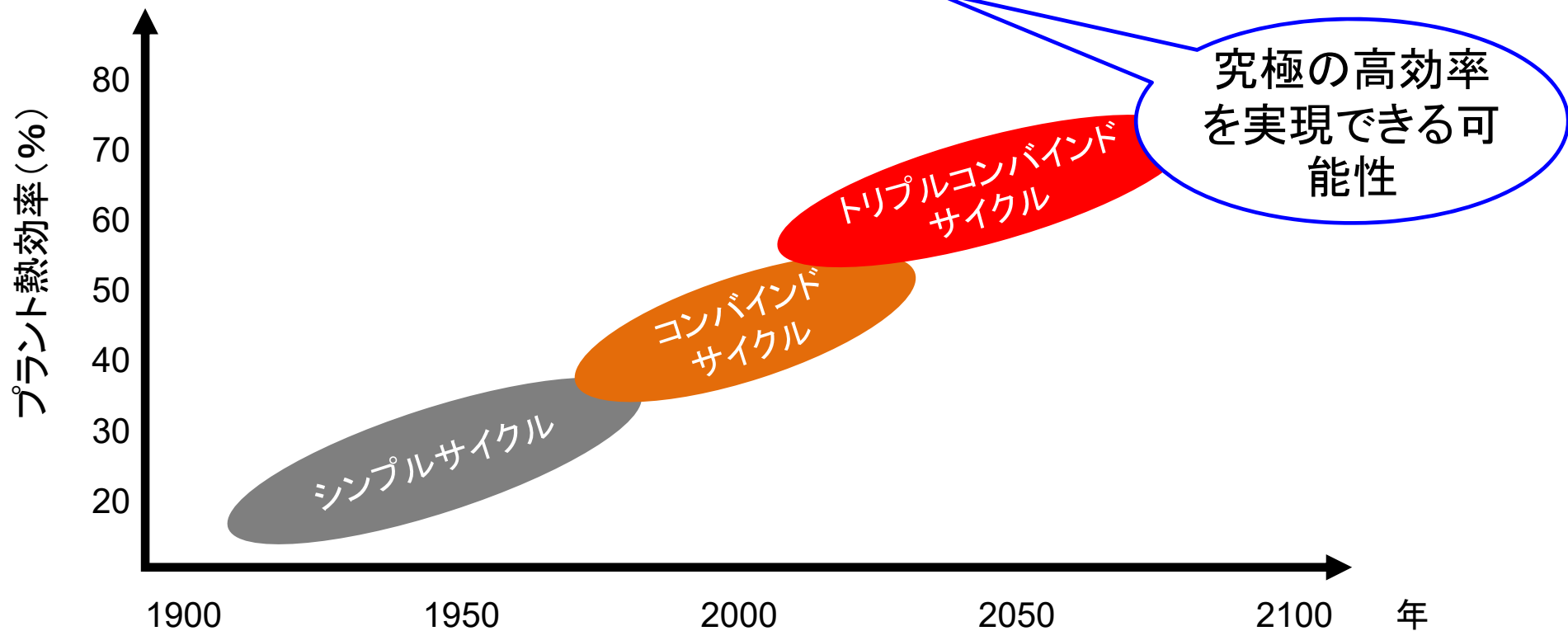


ブレイトンサイクルの  
限界は超えられない

## 2. 目標達成手段の候補と位置づけ

熱効率を抜本的に向上する方法＝

- 燃料電池による**複合サイクル化**

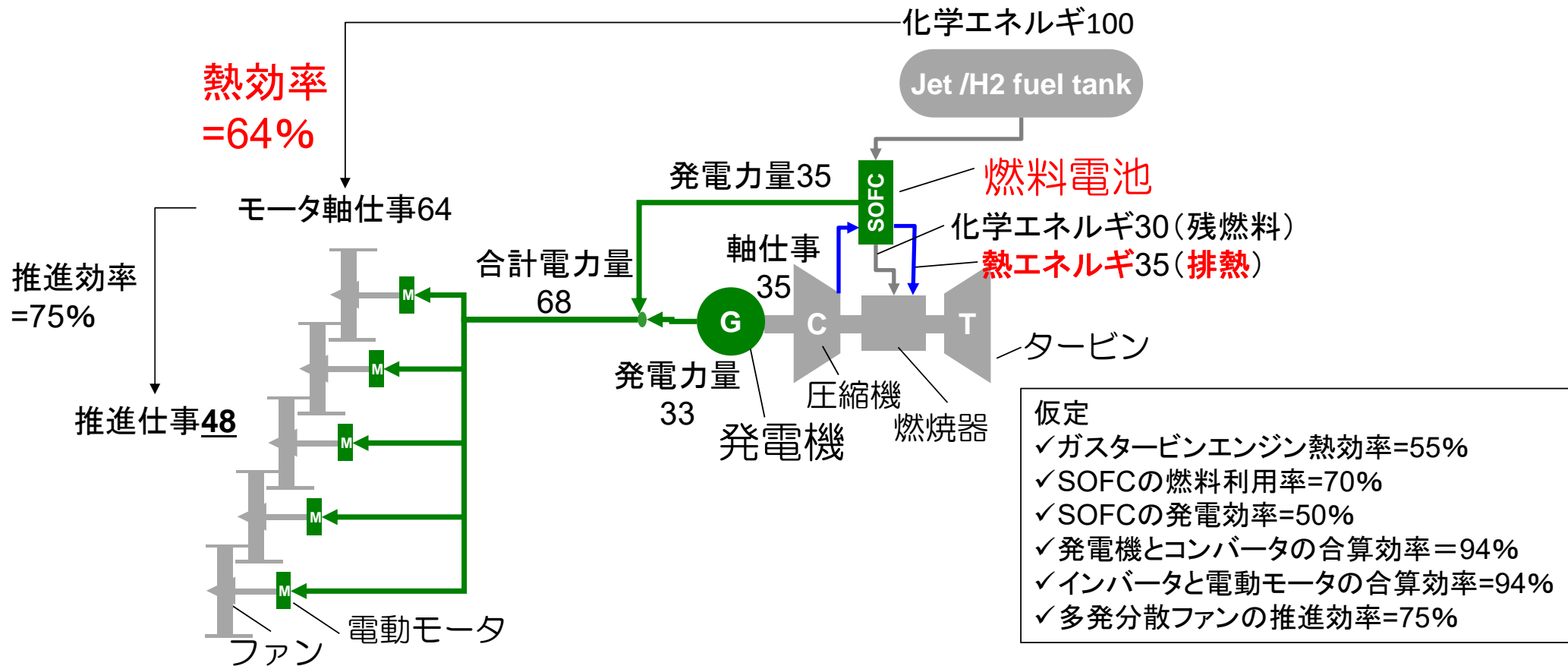


定置発電システムにおける発電効率の変遷と将来予測



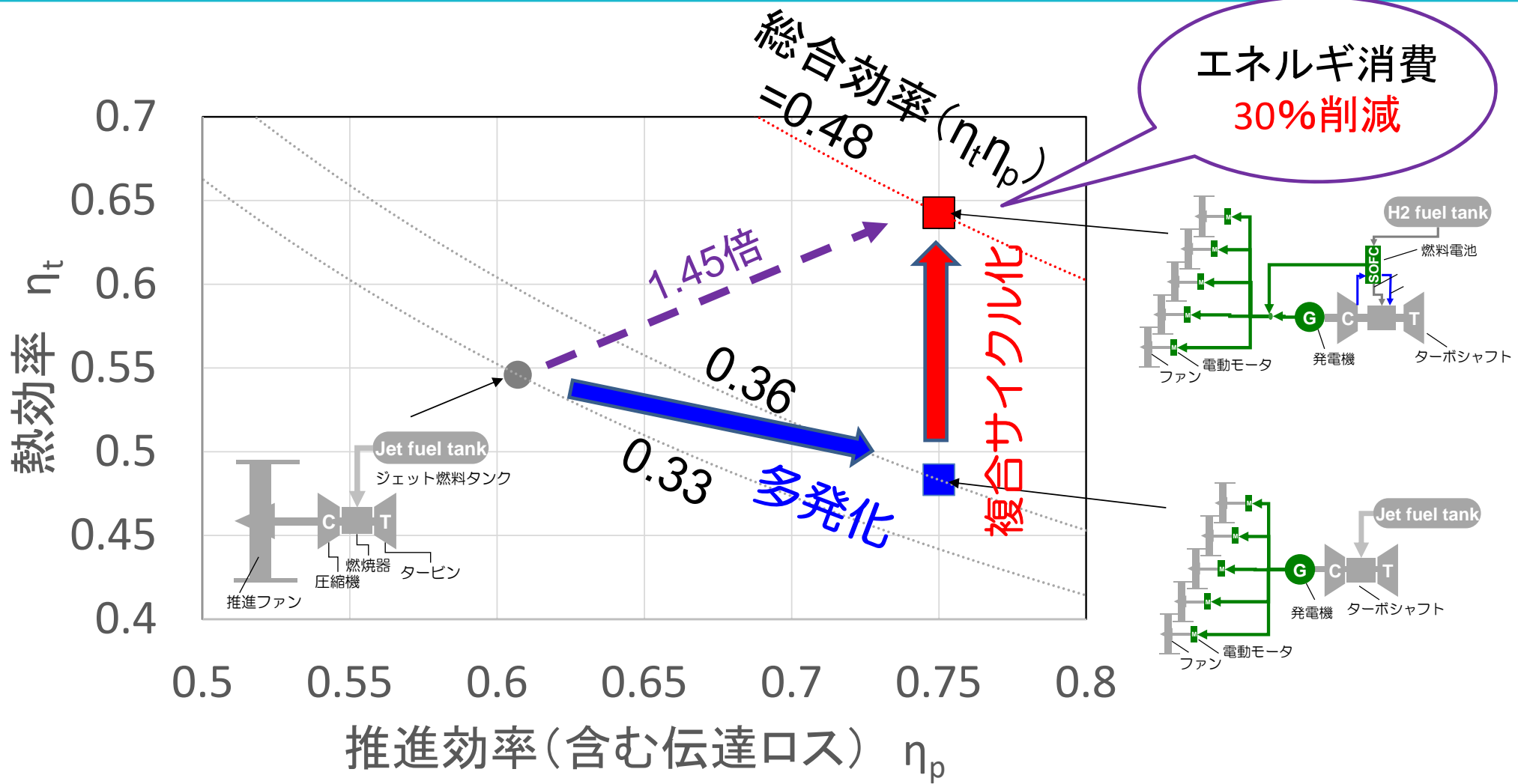
## 2. 目標達成手段の候補と位置づけ

### 航空機用複合サイクルエンジンの構想



- SOFCが排出した高温空気の熱エネルギー(排熱)を燃焼器で回収→複合サイクル化
- ガスタービンエンジン単体、SOFC単体よりも熱効率が向上

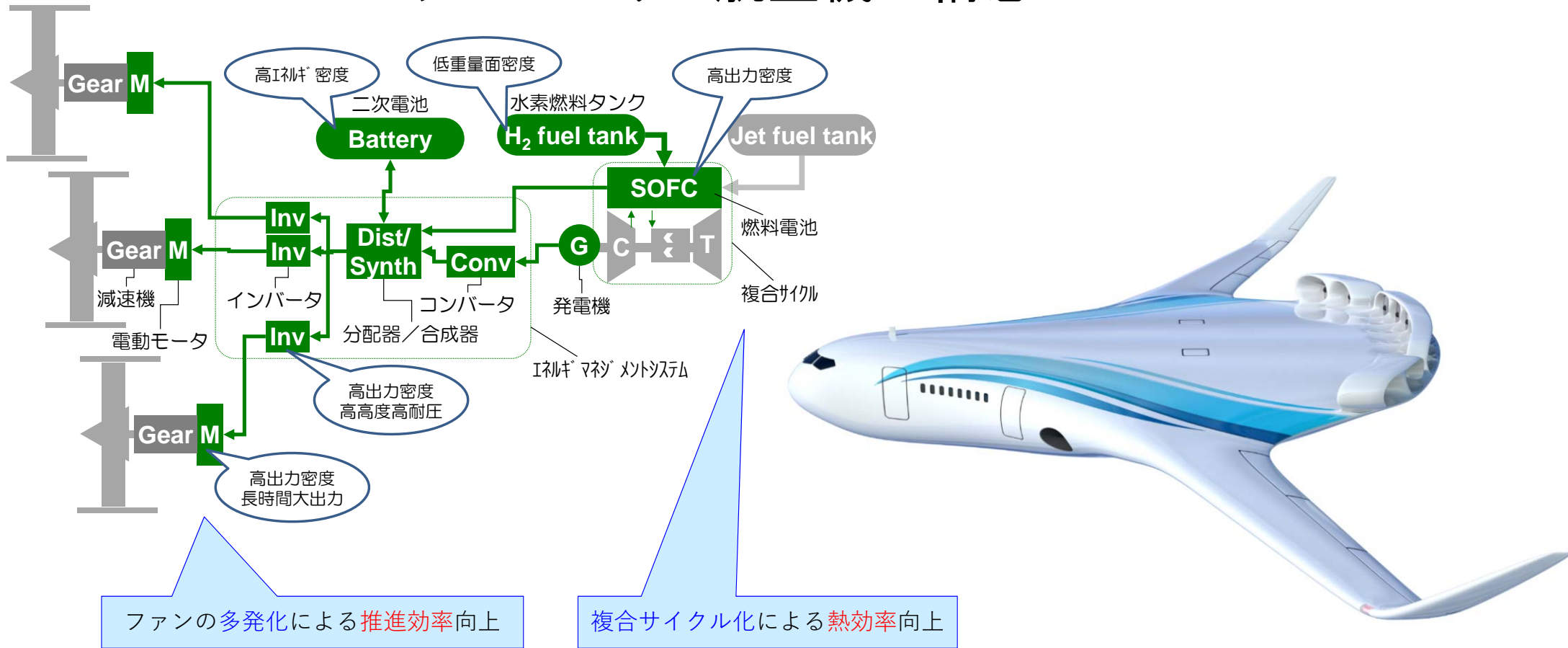
## 2. 目標達成手段の候補と位置づけ



- 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

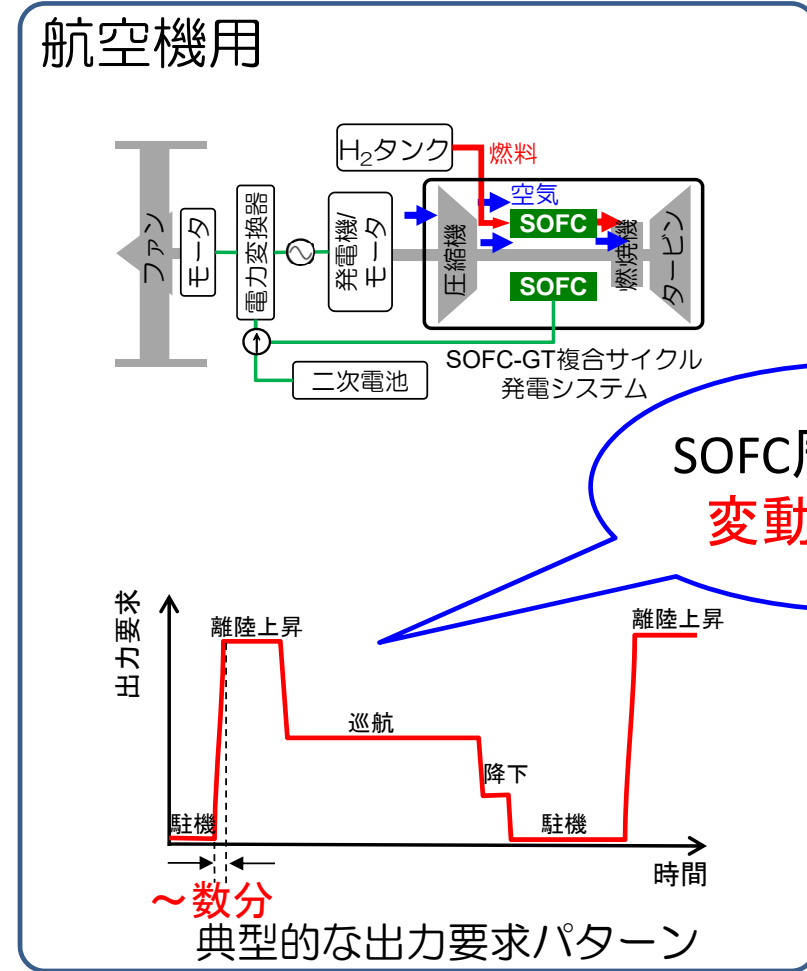
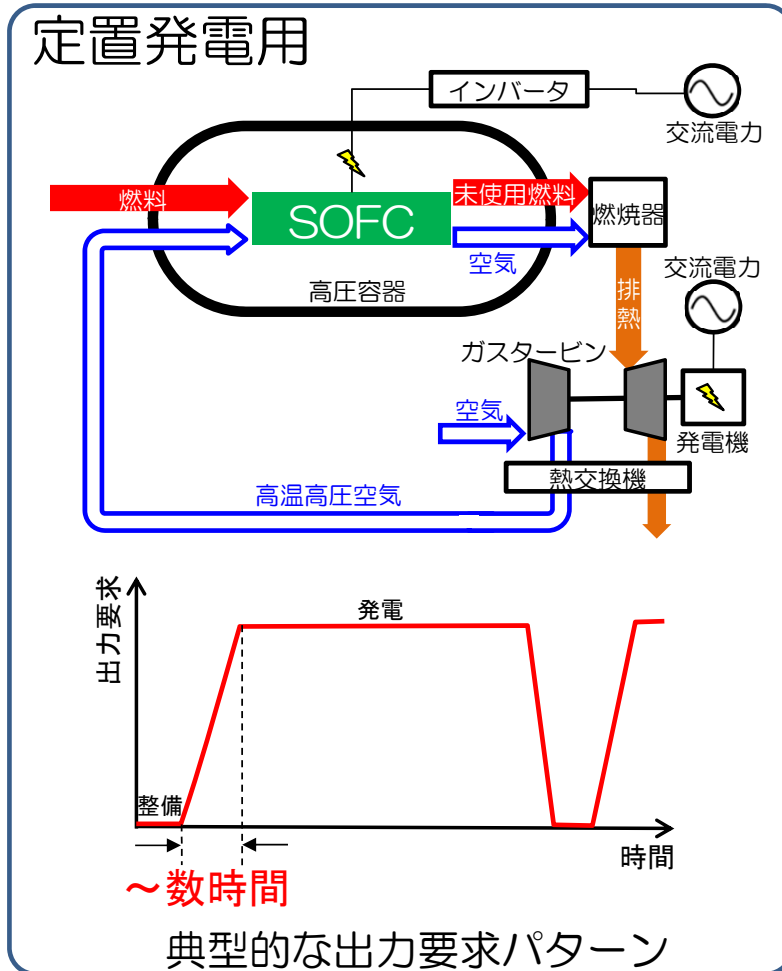
## 2. 目標達成手段の候補と位置づけ

# 航空機用複合サイクルエンジンを搭載した エミッションフリー航空機の構想



### 3. 複合サイクルエンジンの課題

## SOFC-GT複合サイクルにおける定置発電用途と航空機用途の違い



- 環境変動からSOFCを保護することが**重要な課題**

### 3. 複合サイクルエンジンの課題

## 航空機用複合サイクルエンジンの重要技術課題位置づけ

単位エネルギー消費量

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

熱効率向上

推進効率向上

揚抗比向上

重量軽減

#### ● 電動ハイブリッド化

#### ● 複合サイクル化

- ✓ 航空用GT環境変動からのSOFC保護
- ✓ SOFCからの排熱回収の最大化
- ✓ 航空用GTとのエネルギーバランス最適化

#### ● 多発化

- ✓ ファンレイアウト最適化

重量・体積増える

重量増える

抵抗増える

✓ 空力抵抗低減

✓ 電動要素の軽量化

✓ ファンの軽量化

✓ SOFCの小型軽量化

● 複合サイクルを成立させるだけでなく、重量軽減も特に重要な課題

### 3. 複合サイクルエンジンの課題



航空機用複合サイクルエンジンに適用するSOFCの目標

#### SOFCセルの電流密度

現状： 1A/cm<sup>2</sup>

目標： 2A/cm<sup>2</sup>

#### SOFCシステム(スタック+周辺機器)の出力密度

現状： 0.1kW/kg

目標： 0.5kW/kg

- 個別要素の目標値と現状技術のギャップは非常に大きい
- ハイリスクハイリターンの研究と位置づけ

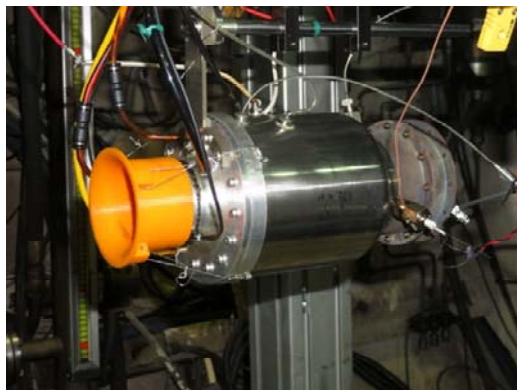
## 4. JAXAにおける最近の研究と今後の計画

これまでの研究

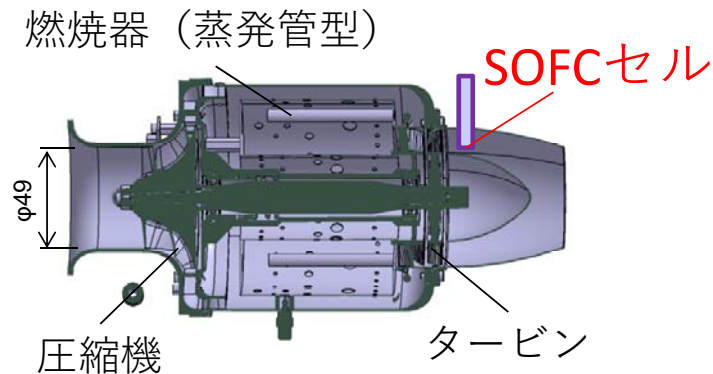
- シミュレーション(机上検討)中心 → 複合サイクルエンジンの効果を推定
- 航空機GT環境変動を想定したSOFC単セル試験(JAXA-日大共研)
- SOFCの小型軽量化に関する研究(JAXA-中部大-東北大-産総研共研)

### 航空機用複合サイクルエンジンの試験例(10kW GT)

- 2018年度～ **GTとSOFCを組み合わせた実験的研究に着手**

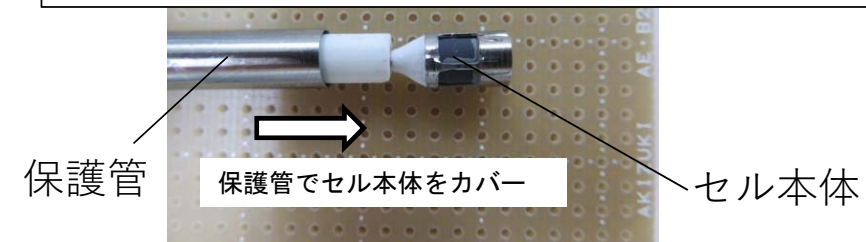


10kW級小型GTエンジン



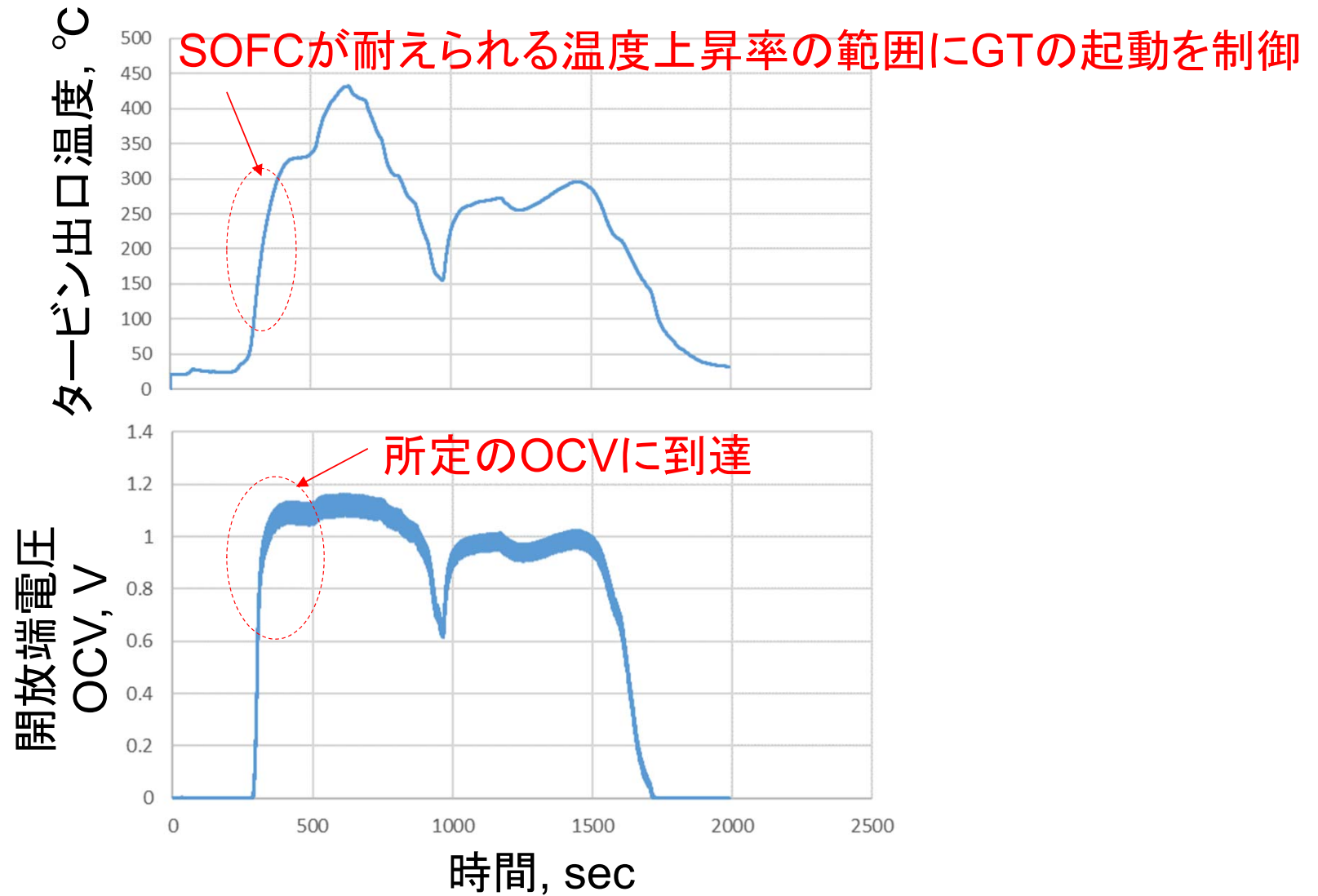
SOFCセル設置位置

**燃料電池**  
型式: 固体酸化物形燃料電池(SOFC) 筒型 1本  
形状: 直径4mm  
作動温度: ~800°C



セル単体構成

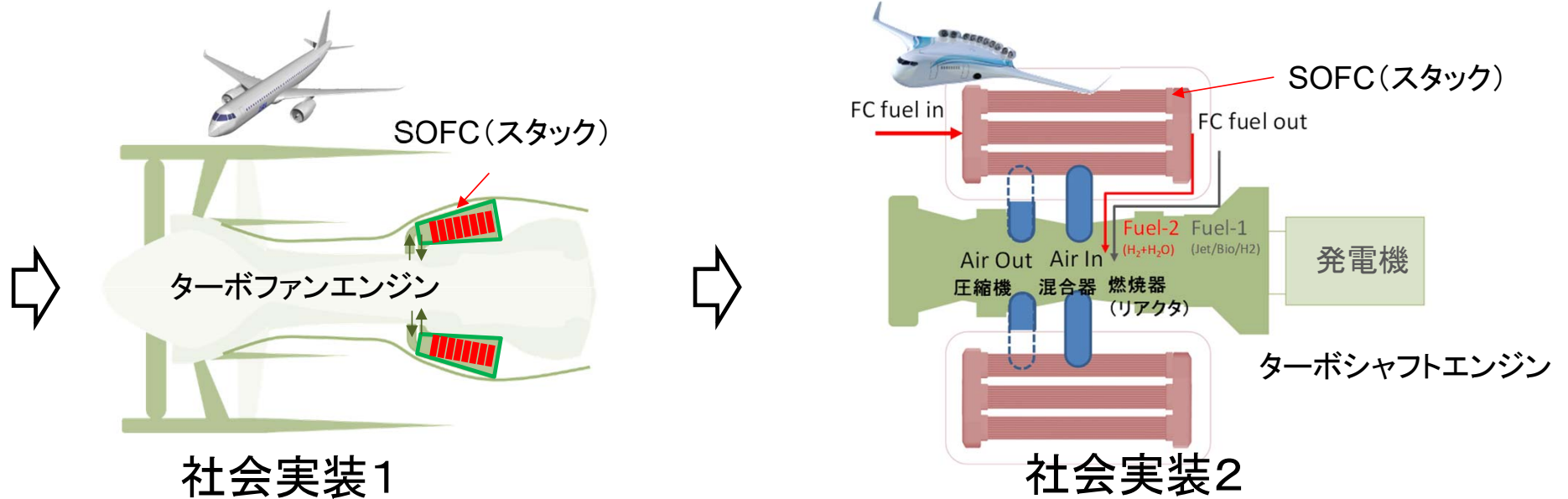
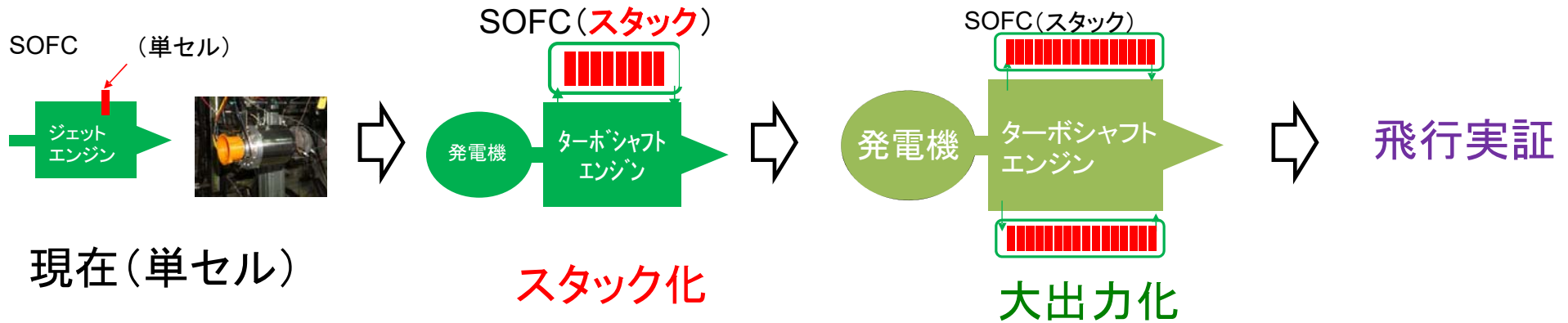
## 4. JAXAにおける最近の研究と今後の計画





# 4. JAXAにおける最近の研究と今後の計画

## 今後の計画



## 5. まとめ

1. 複合サイクル化は熱効率を大幅に向上できる可能性を有する
2. ただし、ハイリスクハイリターンの研究であり、長期的取組が必要
3. 本コンソーシアムの枠組みを活用し、産学官連携で取り組む