

発表No.B2-12

水素利用等先導研究開発事業/  
従来技術を凌駕する超高効率発電共通基盤研究開発/  
酸素水素燃焼タービン発電の共通基盤技術の研究開発

壹岐典彦

産総研、JAXA、東工大、阪大、  
電中研、JCOAL、川重、  
東芝エネルギーシステムズ

2023年7月14日

連絡先：壹岐典彦  
(国研)産業技術総合研究所  
n-iki@aist.go.jp

# 事業概要

## 1. 期間

開始 : 2020年8月

終了 : 2023年3月

## 2. 最終目標

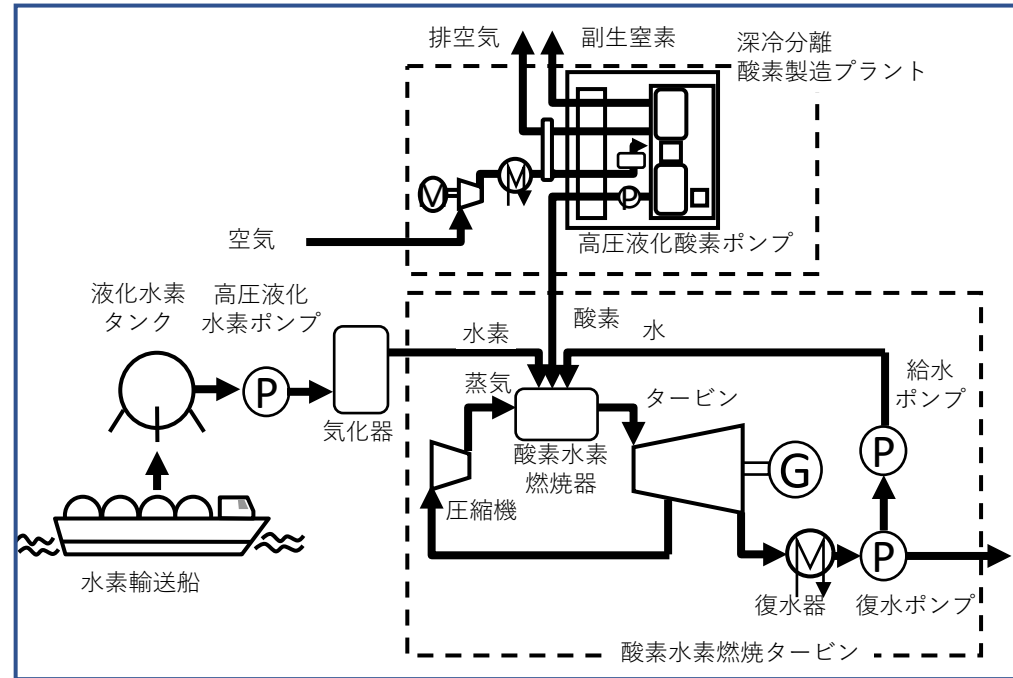
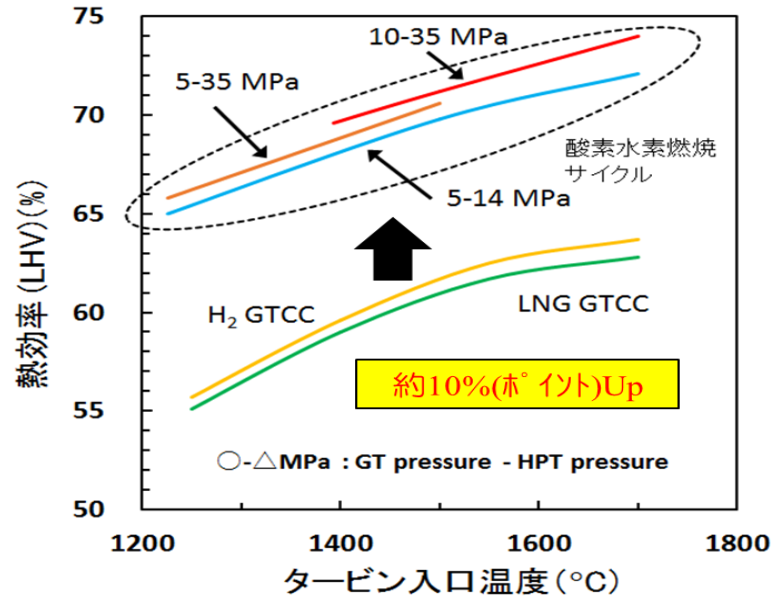
発電効率68%を達成可能なシステムに関する、高圧燃焼試験が実施可能なレベルの技術の確立と、1400°C級ガスタービンから1700°C効率訴求型へ移行するための計画を策定すること。

## 3. 成果・進捗概要

- ①クローズドサイクルの共通基盤技術の研究開発として、高温高圧条件における熱交換器概念設計、タービン翼冷却構造及びシール特性の検討、材料腐食に関わる劣化事象の調査、燃焼器及びタービンの複数候補材にて水蒸気酸化試験、高温水蒸気環境下におけるセラミック材減肉特性を評価するための暴露試験を実施した。
- ②システム検討として、動特性解析モデルのプロトタイプを構築し、計算条件項目を取り纏めた。タービンおよび蒸気圧縮機の概略設計で推定仕様を提示し、起動停止手順を検討した。本邦および各国市場のニーズに沿った負荷変化方法の要求項目を明確にし、さらに、コジェネレーション利用検討のモデルを構築した。
- ③安定した酸素水素燃焼を可能にする高温高圧燃焼機器の開発として、シングルバーナで0.8MPaで1kW以上の燃焼試験実施、マルチクラスターバーナの試作等を行った。高強度乱流酸素水素燃焼の直接数値計算技術、LES技術、レーザ計測技術等を確立した。燃焼器ライナー冷却検討用模擬燃焼器の構築、火炎構造可視化用計測系整備、燃焼器内流動・燃焼の数値解析手法に取り組んだ。高圧水素酸素供給設備の改造、冷却水供給設備の設計を行った。
- ④社会実装シナリオの構築として、内外の動向を踏まえ、社会実装時期の早期化検討、シナリオの見直し作業を進めた。各国の電力市場に受け入れられるシステム、次期アクションプランを検討した。

# 1. 事業の位置付け・必要性

## 究極のクリーン・高効率発電 酸素水素燃焼タービン



酸素水素燃焼タービン発電システムイメージ

### 1. 燃焼性生物が水（蒸気）のみ （エミッション・フリー）

純酸素と純水素の完全燃焼により、CO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub> の発生がない。

### 2. 従来技術を凌駕する効率10%UPの超 高効率発電

直接燃焼による水蒸気を作動媒体とすることでランキンサイクルとブレイトンサイクルを統合した全く新しいクローズドサイクルを実現し、高効率化を図る。

<効率検討のポイント>

- ✓ エクセルギー解析を活用したサイクル選定  
燃焼温度の上昇を抑えつつ、高い発電効率を実現できる最適サイクルの選定

# 1. 事業の位置付け・必要性: これまでの研究開発動向(FS)

## 超高効率発電システム基盤技術研究開発/酸素水素燃焼タービン発電システムの研究開発 (2018~2019年度) の成果概要

最終目標 2050年シナリオにおける水素発電の革新技術として、酸化剤に純酸素を用いる酸素水素燃焼タービン発電システムによるエミッションフリーと高効率化を実現する。

実施機関 産総研、東工大、川崎重工、エネ総工研 (赤字は本事業参加機関)

概要 発電効率75%を達成可能なシステムの技術成立性・経済性確保の見通しを検討するとともに、それらを競合技術と比較するフェジビリティスタディ (FS) を実施した。

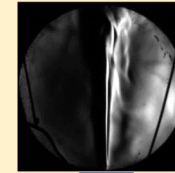
成果① 発電効率75%を達成可能なシステム (1700℃100MW級) を提示した。ただし、発電コスト削減には、高温高压熱交換器、酸素製造設備の設備費や所要動力などの低減化につながる技術開発が不可欠である。

成果② 発電コストが安く、発電効率68%の1400℃級100MWの合理化案を提示した。

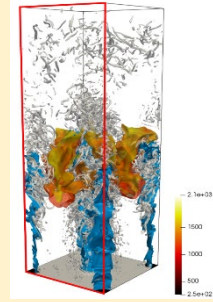
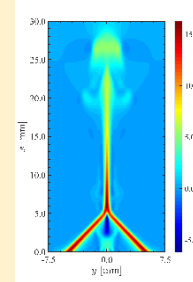
成果③ 将来的な競争力の可能性や既存火力の2倍以上の国内経済波及効果を示した。

成果④ 酸素水素高压燃焼の可能性を、実験及びシミュレーションで示し、非予混合火炎を用いたマルチクラスターバーナを提案、実験とシミュレーションを実施。

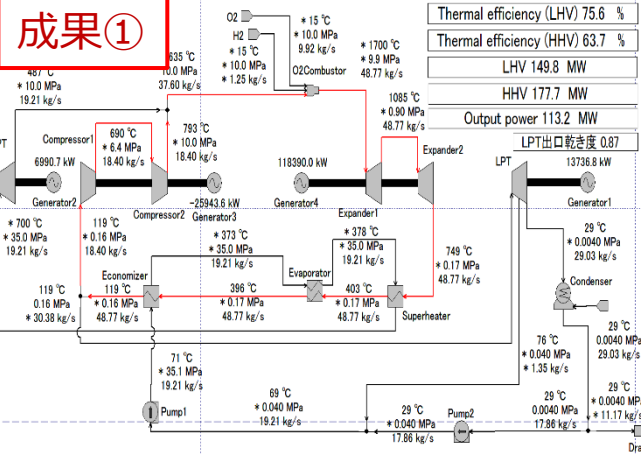
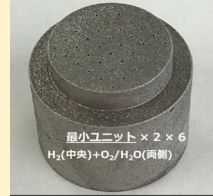
### 成果④



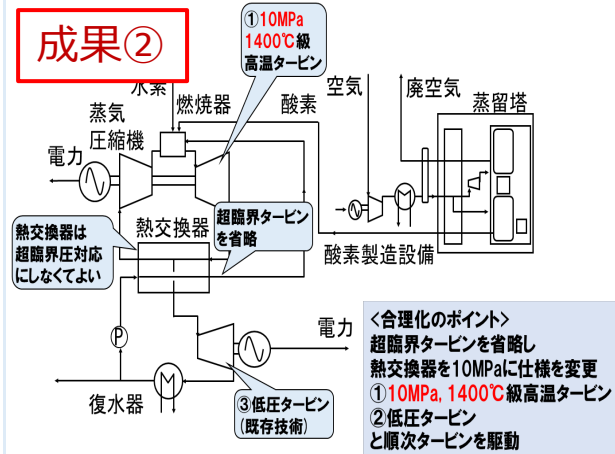
O<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>O H<sub>2</sub> O<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>O



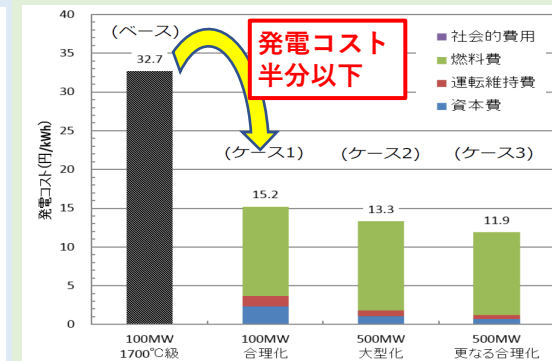
非予混合火炎を用いたマルチクラスターバーナ方式酸素水素燃焼バーナを提案。平行噴流と衝突噴流について実験とシミュレーションで可能性を確認。3D積層造形バーナ試作。



1700℃級100MWでの発電端効率75%達成



1400℃級合理化案の提案



合理化案による発電コスト削減

### 成果③

<合理化のポイント>  
 超臨界タービンを省略し  
 熱交換器を10MPaに仕様を変更  
 ①10MPa, 1400℃級高温タービン  
 ②低圧タービン  
 と順次タービンを駆動

# 1. 事業の位置付け・必要性

本研究開発では、水素社会の実現に向けて2040年以降という長期的視点から、従来の開放系サイクル技術とは一線を隔す超高効率の発電技術を現時点から検討しておく必要を踏まえ、従来技術を凌駕するポテンシャルを有する超高効率発電を対象として、燃焼器やタービン等の業界共通の要素研究を推進することにより、それらの基盤技術を確立することを目的とする。具体的には、以下の研究開発を実施する。

## ◆クローズドサイクルの有する共通基盤技術課題の抽出及び解決手段の提示

酸素水素燃焼を含むクローズドサイクルシステムに潜在する共通課題を取り上げ、クローズドサイクルに共通するコージェネ利用時の変動対策に対するシミュレーション、高温高压耐性シール技術、耐高温高压水蒸気材料、冷却技術等の技術を確立する。

このため、①クローズドサイクル共通基盤技術の研究開発、②システム検討を行う。

## ◆安定した酸素水素燃焼を可能にする高温高压燃焼機器の開発

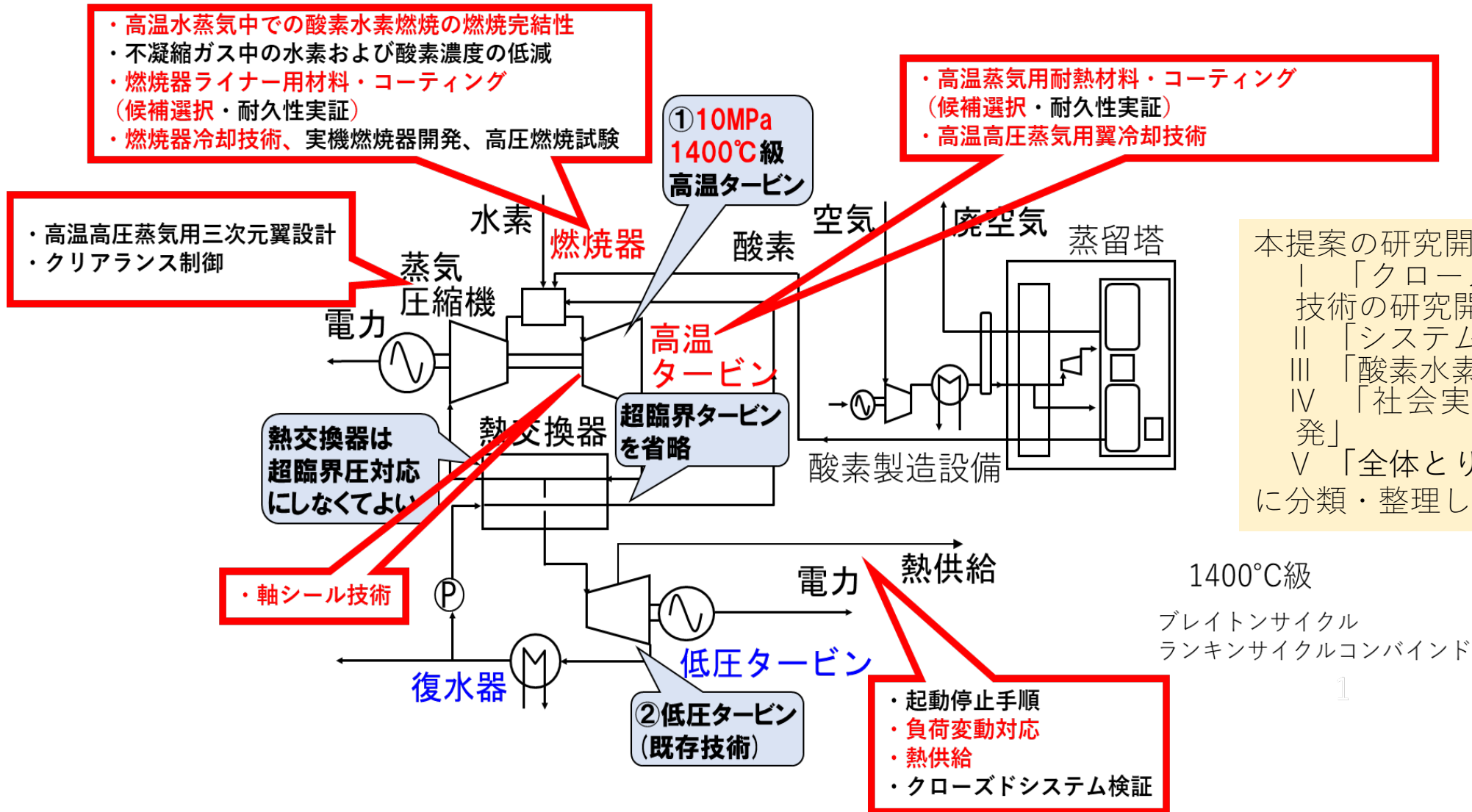
③安定した酸素水素燃焼を可能にする高温高压燃焼機器の開発として、バーナの形状・構造・材料と燃焼の安定化のための制御等により、酸素水素高温高压燃焼機器の実機試験を可能とする試験器製作のための基本設計を完成させる。

## ◆社会実装シナリオの構築

④社会実装シナリオの構築として、本事業で取り組む基盤技術開発によって、2040年に本技術をベースとする超高効率発電が社会実装されるための社会ニーズと製品スペックの最適化を検討し、その実現に向けたシナリオを提示する。

# 1. 事業の位置付け・必要性: 開発課題とその解決の方向性

1400°C級酸素水素燃焼タービン発電の実用化までの課題（すべて）と本事業で取り組む課題（赤字）



本提案の研究開発で進めるべき項目は、  
 I 「クローズドサイクル共通基盤技術の研究開発」  
 II 「システム検討」  
 III 「酸素水素燃焼の研究開発」  
 IV 「社会実装シナリオの研究開発」  
 V 「全体とりまとめ」  
 に分類・整理した。

## 2. 研究開発マネジメントについて:研究開発の目標

発電効率68%を達成可能なシステムに関する、高圧燃焼試験が実施可能なレベルの技術の確立と、1400°C級ガスタービンから1700°C効率訴求型へ移行するための計画を策定することを目標として、以下の技術開発をするとともに、社会実装シナリオについては脱炭素社会への取り組みの進行状況に応じた戦略を検討し提示する。

① **クローズドサイクル共通基盤技術の研究開発** (取りまとめ: 東芝エネルギーシステムズ)

- 1) クローズドサイクル要素技術
- 2) 燃焼器・翼材料技術、冷却技術の研究開発

② **システム検討** (取りまとめ: 電力中央研究所)

- 1) 負荷変化方法の検討
- 2) 熱利用技術の供給モデルと運転方法の構築
- 3) 起動・停止方法の研究開発

③ **安定した酸素水素燃焼を可能にする高温高圧燃焼機器の開発** (取りまとめ: 東京工業大学)

- 1) 酸素水素バーナの研究開発
- 2) 酸素水素バーナシミュレーションの研究開発
- 3) 酸素水素燃焼器の研究開発
- 4) 高圧燃焼器の研究開発

④ **社会実装シナリオの構築** (取りまとめ: 産業技術総合研究所、事業内容④)

⑤ **全体取りまとめ** (取りまとめ: 国立研究開発法人産業技術総合研究所、事業内容⑤)

## 2. 研究開発マネジメントについて:研究開発の目標①

発電効率68%を達成可能なシステムに関する、高圧燃焼試験が実施可能なレベルの技術の確立と、1400°C級ガスタービンから1700°C効率訴求型へ移行するための計画を策定することを目標として、以下の技術開発をするとともに、社会実装シナリオについては脱炭素社会への取り組みの進行状況に応じた戦略を検討し提示する。

最終目標（2022年度末）

① **クローズドサイクル共通基盤技術の研究開発**（取りまとめ：東芝エネルギーシステムズ）

### 1) クローズドサイクル要素技術

- ・ 高圧、高温耐性を有するシール技術の確立に関して、従来以上の高温、高圧状態に耐えるシール技術について、要素技術を確立。
- ・ 高温、高圧条件における高効率熱交換器技術の課題の抽出に関して、  
数値シミュレーション技術を用いた熱交換器の成立性評価を行い、基本構造を確立。  
実プラント計画に向けた課題についてまとめる。
- ・ 高温高圧水蒸気状態の熱交換器・配管材料技術に関して、これまでの調査結果を取り纏め、熱交換器や配管に対する材料選定のための基礎データとして、適切な材料や水処理方法の候補の提示。

### 2) 燃焼器・翼材料技術、冷却技術の研究開発

- ・ 高圧高温水蒸気状態での燃焼器およびタービン材料の選定に関して、高温水蒸気環境で使用可能な燃焼器およびタービン翼向けのNi基およびCo基合金材料を選定し、適切な構造を提案。
- ・ 高温高圧水蒸気状態の翼冷却技術に関して、  
高温高圧水蒸気状態の冷却技術の確立。  
流体・伝熱解析や強度評価を実施することで高温高圧水蒸気状態の冷却技術の確立。
- ・ 高温水蒸気環境でのコーティング技術に関して、1400°C級酸素水素燃焼タービンにおいて想定される下記環境をクリア可能なコーティング構造を提案。

熱サイクル試験（1200°C,大気中）：250サイクル以上

高速水蒸気減肉試験（1200°C,100m/s）：1 μm/100 h (=5mg/cm<sup>2</sup>/1000h相当) 以下

水蒸気雰囲気熱暴露試験（1200°C）：組織構造変化の指標として気孔率変化25%以下(100h)



## 2. 研究開発マネジメントについて:研究開発の目標②

発電効率68%を達成可能なシステムに関する、高圧燃焼試験が実施可能なレベルの技術の確立と、1400°C級ガスタービンから1700°C効率訴求型へ移行するための計画を策定することを目標として、以下の技術開発をするとともに、社会実装シナリオについては脱炭素社会への取り組みの進行状況に応じた戦略を検討し提示する。

最終目標（2022年度末）

②システム検討（取りまとめ：電力中央研究所）

### 1) 負荷変化方法の検討

- ・当該システムにおいて各種条件での動特性解析が可能なダイナミックシミュレーション技術の確立。
- ・負荷追従性や周波数応答性などの運転特性、負荷変化時の温度・圧力の急変現象などの課題、対応策の提示。
- ・前記課題に対応し機器の仕様を変更する（もしくはその影響を検討する）場合、仕様の見直しを行うとともに、機器の特性データの再計算を行い、合わせて提示。
- ・本邦および各国市場のニーズに沿った負荷変化方法への効果を明確化。

### 2) 熱利用技術の供給モデルと運転方法の構築

- ・コジェネ利用時の熱・蒸気利用ニーズに応じたコジェネ運転方法の提示。

### 3) 起動・停止方法の研究開発

- ・酸素水素燃焼タービン（セミクローズドサイクル）の起動・停止方法を明確化。

## 2. 研究開発マネジメントについて:研究開発の目標③

発電効率68%を達成可能なシステムに関する、高圧燃焼試験が実施可能なレベルの技術の確立と、1400°C級ガスタービンから1700°C効率訴求型へ移行するための計画を策定することを目標として、以下の技術開発をするとともに、社会実装シナリオについては脱炭素社会への取り組みの進行状況に応じた戦略を検討し提示する。

最終目標（2022年度末）

**③安定した酸素水素燃焼を可能にする高温高圧燃焼機器の開発**（取りまとめ：東京工業大学）

### 1) 酸素水素バーナの研究開発

- ・シングルバーナ（0.8MPa発熱量1kW以上の酸素水素燃焼を実現）をもとにマルチクラスター化による燃焼安定化制御を達成し、その知見を活かしてマルチクラスターバーナを設計し、設計手法を確立。
- ・酸素水素燃焼火炎がバーナ壁面に及ぼす材料劣化の抑制について研究し、バーナ壁面材料劣化抑制方法（材質・伝熱等）を提示。
- ・高圧燃焼器用バーナの試作試験を行い、2MPaでの保炎技術及び昇圧技術（昇圧過程での失火防止）とバーナ冷却技術（バーナの焼損防止）を確立。

### 2) 酸素水素バーナシミュレーションの研究開発

- ・実機用燃焼器の開発試験用マルチクラスターバーナを試作するためのシミュレーション技術の確立。

### 3) 酸素水素燃焼器の研究開発

- ・模擬燃焼器における酸素水素燃焼場に対してレーザードップラー流速計もしくは粒子画像流速測定法などを適用して流れ場を可視化し、燃焼器ライナー冷却のための水蒸気制御法を確立。
- ・実機を対象とした数値シミュレーションを実施し、燃焼実験により得られた熱発生率の分布、流れ場の可視化実験結果と比較することにより、提案した数値シミュレーション手法の精度を検証し、燃焼器内の流動・燃焼状態の数値シミュレーション手法を確立。

### 4) 高圧燃焼器の研究開発

- ・2MPa以上の高圧燃焼試験手法及び試験設備運用法の確立

## 2. 研究開発マネジメントについて:研究開発の目標④

発電効率68%を達成可能なシステムに関する、高圧燃焼試験が実施可能なレベルの技術の確立と、1400°C級ガスタービンから1700°C効率訴求型へ移行するための計画を策定することを目標として、以下の技術開発をするとともに、社会実装シナリオについては脱炭素社会への取り組みの進行状況に応じた戦略を検討し提示する。

最終目標（2022年度末）

④ **社会実装シナリオの構築**（取りまとめ：産業技術総合研究所）

- ・ 2050年カーボンニュートラルを想定した社会実装に向けた実用化シナリオの策定。

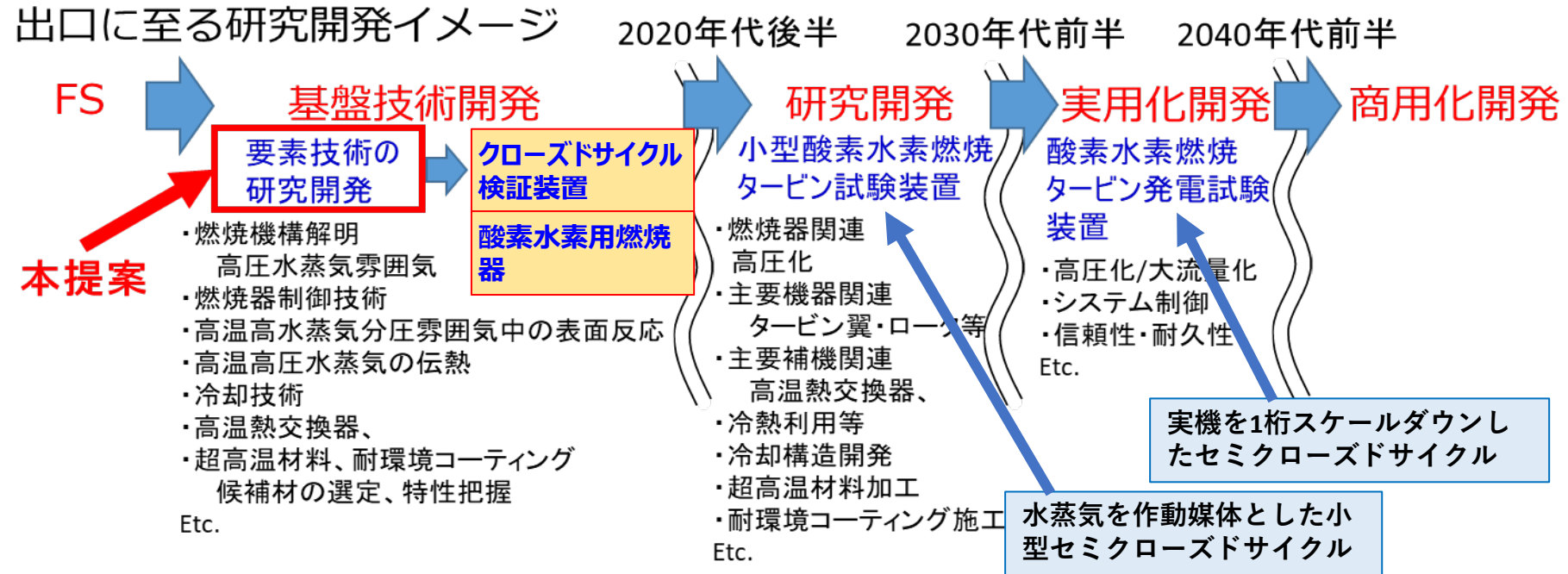
⑤ **全体取りまとめ**（取りまとめ：産業技術総合研究所）

- ・ 高圧燃焼試験計画の策定。
- ・ 1400°C級酸素水素燃焼タービン発電の開発計画の策定。
- ・ 1700°C級効率追求型酸素水素燃焼タービン発電の開発計画の策定。

## 2. 研究開発マネジメントについて:長期開発計画

基盤技術開発の次のフェーズで、「クローズドサイクル検証装置」と「酸素水素用燃焼器」を試作して研究開発を行うことを想定し、そのために必要な要素技術を本提案では研究開発する。

理由 小型のタービン試験装置であっても既存技術と大きく異なるため、安定な燃焼条件材料の耐久性、起動手順、制御方法などの情報がないと、「小型酸素水素燃焼タービン試験装置」の設計は出来ない。



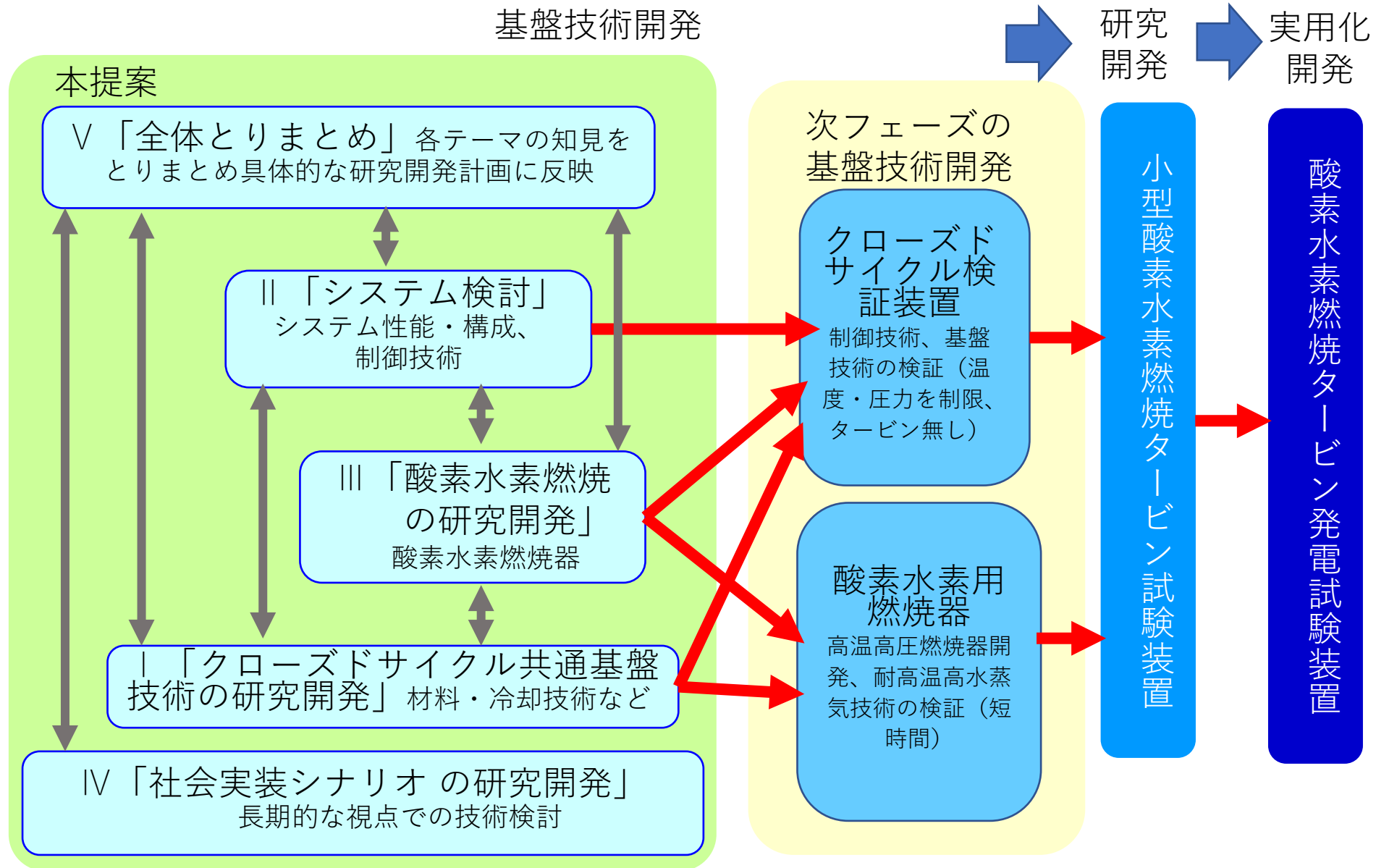
### クローズドサイクル検証装置

1MPaクラスの酸素水素燃焼器を用いてシステムの起動停止、付加変動制御などのクローズドサイクルの制御技術を開発・検証する装置。当該装置を用いて、材料の耐水蒸気性能なども検討する。これにより「小型酸素水素燃焼タービン試験装置」の設計データ、制御技術を取得する。

### 酸素水素用燃焼器

10MPaクラスの酸素水素燃焼器を目指して開発する。本提案で得られた2MPaでの燃焼器開発を踏まえ、5MPa以上での試験を行い、材料の耐久性、冷却技術を検証して「小型酸素水素燃焼タービン試験装置」で使用する燃焼器の設計データと技術を取得する。

## 2. 研究開発マネジメントについて:全体像と研究項目間の関係



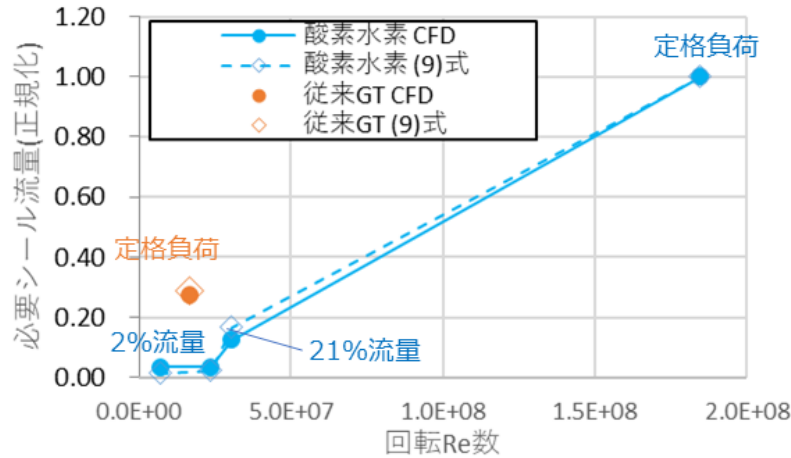
# 3. 研究開発成果について ①クローズドサイクル共通基盤技術の研究開発

## 1) クローズドサイクル要素技術

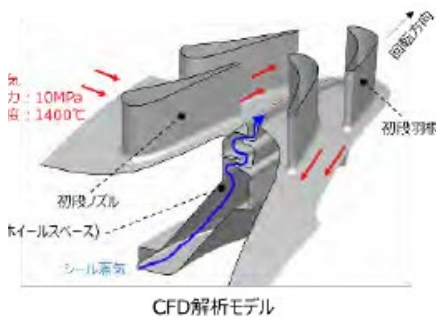
### A: 高圧、高温耐性を有するシール技術の確立

ラビリンス、ハニカム、ブラシ等の軸シール技術について文献調査を実施し、酸素水素タービンで想定される軸シール技術の課題抽出を実施した。

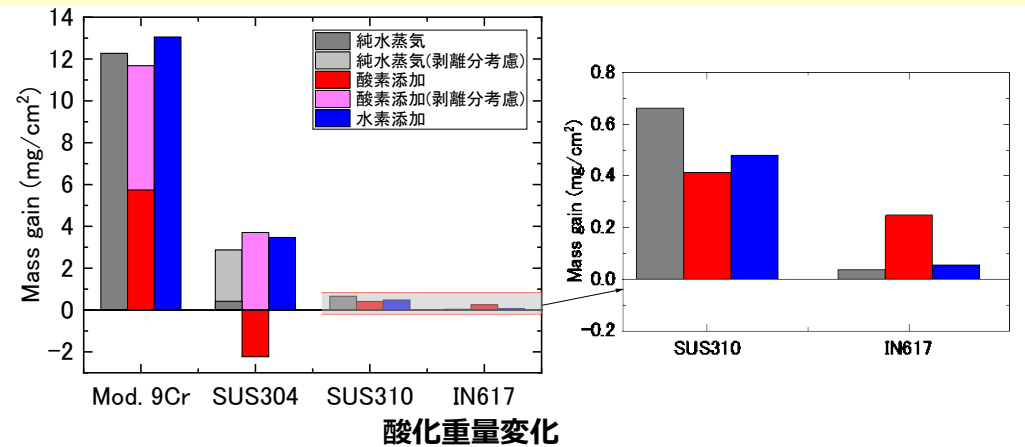
$$\dot{m}_{min} = \rho u_{min} A = \rho \frac{2}{3} C_{d,e} \Delta C_p^{0.5} \Omega b 2\pi S_c b = \frac{2}{3} C_{d,e} \Delta C_p^{0.5} Re_\phi 2\pi S_c b \frac{\mu}{b} \dots (9)$$



CFD結果と(9)式の必要シール流量比較

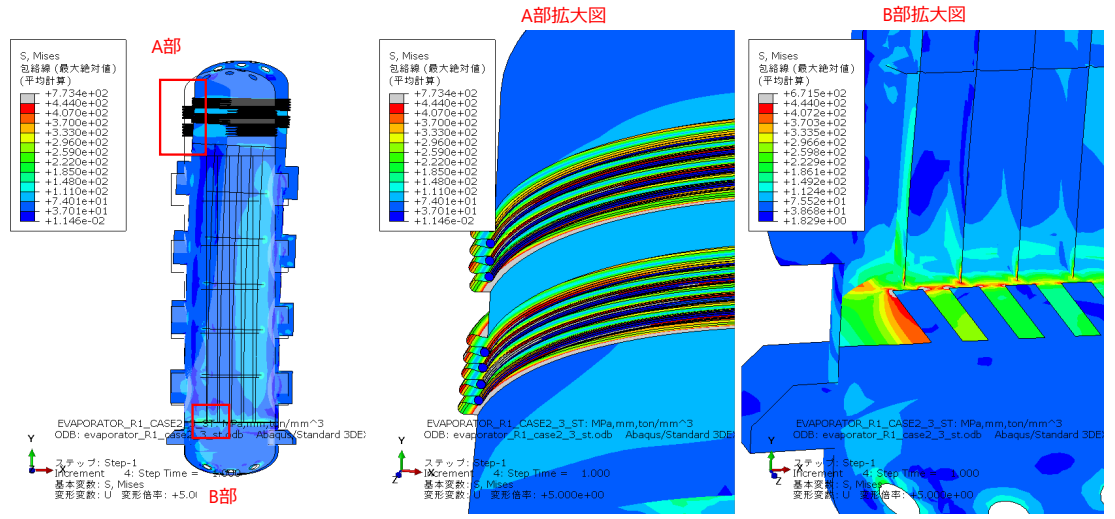


**C: 高温高圧水蒸気状態の熱交換器・配管材料技術**  
水蒸気中への酸素・水素・NOxの混入による劣化事象について調査・検討を行い、影響が大きい劣化機構や環境と劣化度合いの関係などについて整理した。



### B: 高温、高圧条件における高効率熱交換器技術の課題の抽出

熱交換器の中で最も高温高圧になる過熱器を対象とし、数値シミュレーション技術を用いた評価を実施した。流れ解析にて過熱器内部の高温タービン排気蒸気の流れを評価し、概念設計時に想定していた流れ場になることを確認した。通過するタービン排気の圧力損失の分析を行い、システムの熱交換器全体で生じる圧力損失について検討した。強度解析では伝熱管の管寄せ部になる管板ヘッダ構造について定常状態を想定した評価を実施し、各部材の変位量と応力値を確認した。これらの解析評価から主要な課題を抽出し、解決に向けたロードマップを検討した。



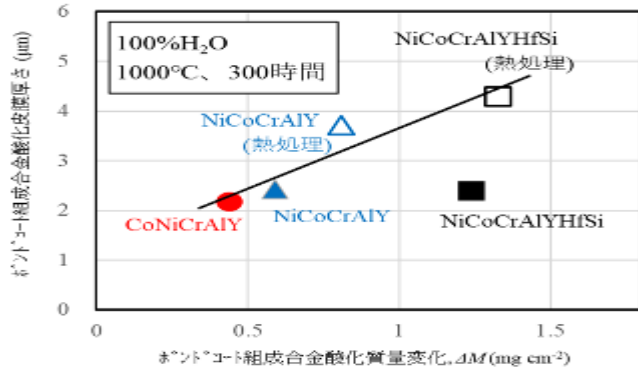
Mises応力コンタ図 (変形倍率5倍、管束非表示)  
蒸発器解析CASE3 熱伝導・熱応力解析結果

# 3. 研究開発成果について ①クローズドサイクル共通基盤技術の研究開発

## 2) 燃焼器・翼材料技術、冷却技術の研究開発

### A: 高圧高温水蒸気状態での燃焼器およびタービン材料の選定

遮熱コーティング(TBC)の剥離寿命予測について、高温高圧水蒸気環境においても、TBCの剥離寿命の予測方法を、TBCのボンドコート組成合金の振る舞いに着目して実験的に検討し、従来技術の一例である天然ガス焼きガスタービンと比較した。天然ガス焼きガスタービンで使用してきた燃焼器、動翼材ならびに遮熱コーティングを基本的には使用可能である。



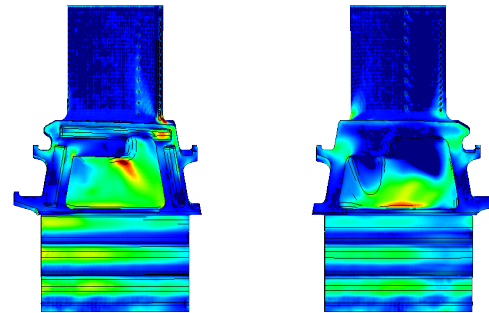
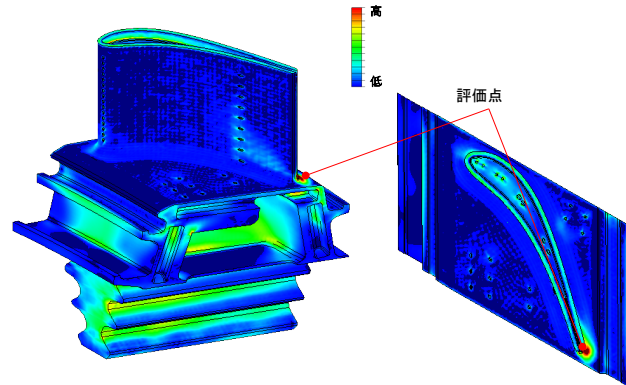
ボンドコート組成合金の水蒸気酸化皮膜厚さと質量変化の関係(100% $H_2O$ 、1000°C、300時間)

### 従来技術LNG焼きガスタービンと酸素水素燃焼タービンの実機条件におけるTBC剥離寿命予測 (hr)

TBC剥離閾値	10 $\mu$ m		15 $\mu$ m	
	800°C・10MPa			
メタル温度・ガス圧力	800°C・10MPa			
環境	LNG焼き	酸素水素燃焼	LNG焼き	酸素水素燃焼
CoNiCrAlY		105hr<		
NiCoCrAlY		9.7E+04		10 <sup>5</sup> hr<
NiCoCrAlY+熱処理	10 <sup>5</sup> hr<	10 <sup>5</sup> hr<	10 <sup>5</sup> hr<	
NiCoCrAlYHfSi		2.3E+04		5.2E+04
NiCoCrAlYHfSi+熱処理		4.2E+04		9.5E+04

### B: 高温高圧水蒸気状態の翼冷却技術

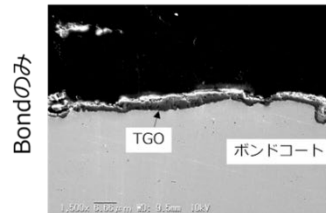
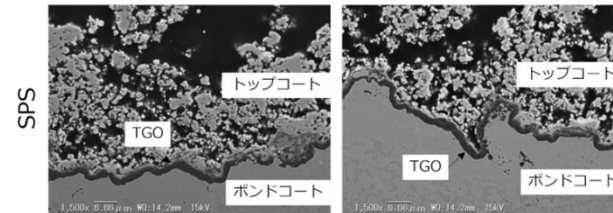
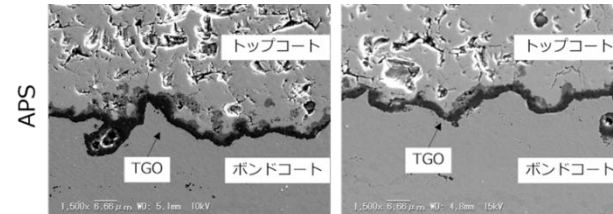
システムWGで検討のタービン通路部計画に対応する冷却翼形状を検討した。翼形状に合わせた冷却流路とフローバランスの検討、伝熱特性と強度を評価した。翼有効部において温度及び応力は概ね目標以下の結果が得られたが、従来ガスタービンよりも圧力差が大きいため、冷却流路とフローバランスでの調整が課題として認められた。2021年度の評価結果より、翼冷却構造を3次元翼モデルでの流体解析、伝熱解析、構造解析を実施し、最適化検討を開始した。



腹側 背側  
最大主応力分布図

### C: 高温水蒸気環境でのコーティング技術

多層膜サンプルを試作し、耐剥離性、耐水蒸気減肉特性、耐久性の評価を行い、高温水蒸気環境のためのセラミックコーティングとして適切な構造として、APS、SPSともに目標をクリアし、SPSはブラスト無しの機材においても熱サイクル特性は良好であることが確認された。



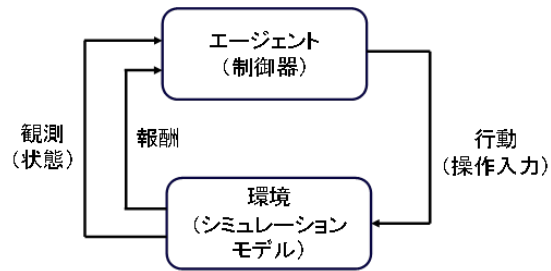
SPS-8YSZコーティングの熱サイクル試験前後の断面組織写真(SEM)

# 3. 研究開発成果について ②システム検討

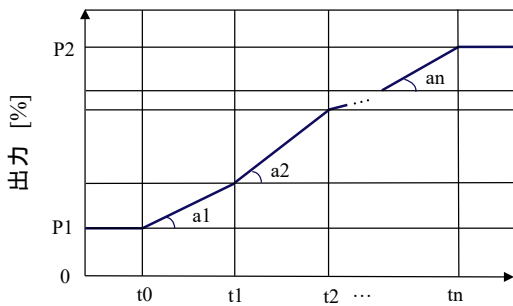
## 1) 負荷変化方法の検討

### A: 負荷変化方法の検討

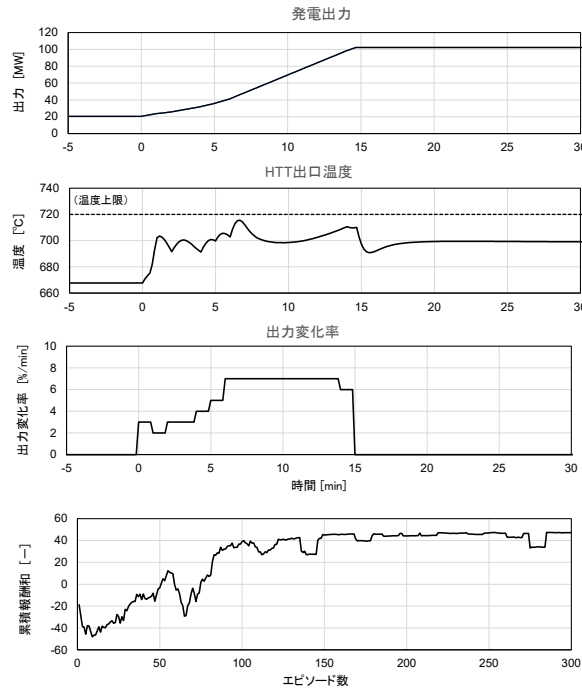
酸素水素燃焼タービンシステムについて、機器仕様や機器性能、システム系統や制御方法、出力指令などを柔軟に設定、変更ができるシミュレーション技術を構築した。これを用いて負荷変化手順や制御方法を検討し、並列から定格負荷までの負荷変化や周波数変動に対する動特性解析を可能とした。また、強化学習法のDeep Q-Learning Networks (DQN) による運転パラメータ探索技術を構築し、各種制約条件を回避しつつ速やかに負荷変化させる方法を示すことができた。さらに、国内外の関連特許を調査し、負荷変化時や、起動時・シャットダウン時の流体の変動、特に圧力の不安定を回避する方法などが提案されていることが分かった。



強化学習システムの概要



解析シナリオの例 (ケース1)



解析結果の例 (ケース1)

### B: 負荷変化検討用データ抽出

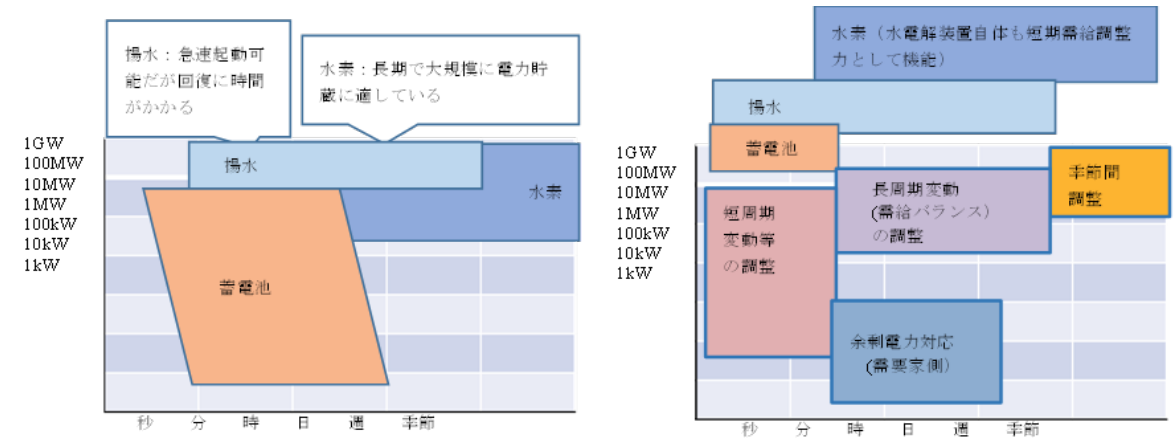
システムダイナミックシミュレーションを実施するために、1,400℃級、1,700℃級のそれぞれについてサイクルを構成する主要機器（タービン、圧縮機、熱交換器）の概略設計を行い、回転数や段数、寸法・重量などの諸元を推定するとともにシミュレーションに必要なデータを算出した。

各熱交換器の主要諸元 (1,700℃級サイクル、概数)

		過熱器		蒸発器		エコノマイザ		
		TEMA	BEM	TEMA	BEM	TEMA	BEM	
シェル1基あたりの値	シェル数	-	3	1		4		
	伝熱管重量	t	84	9.8		86		
	形式	-	TEMA	BEM	TEMA	BEM	TEMA	BEM
	伝熱管長さ	m	12	1.5		10		
	伝熱管外径	mm	16	25		16		
	伝熱管厚み	mm	4	6		4		
	伝熱管本数	本	5, 800	2, 300		7, 300		

### C: 負荷変化ニーズ国内・海外調査

系統電源への負荷変動要因を太陽光発電の日没時の電力低下として、調整電源の負荷変動ニーズを2020～2050年の電源構成比から試算した。カーボンニュートラル社会において酸素水素燃焼タービンは再生エネルギーを貯蔵した水素を活用し、長期間の調整電源としての優位性がある。



再エネ電力調整技術のすみわけ

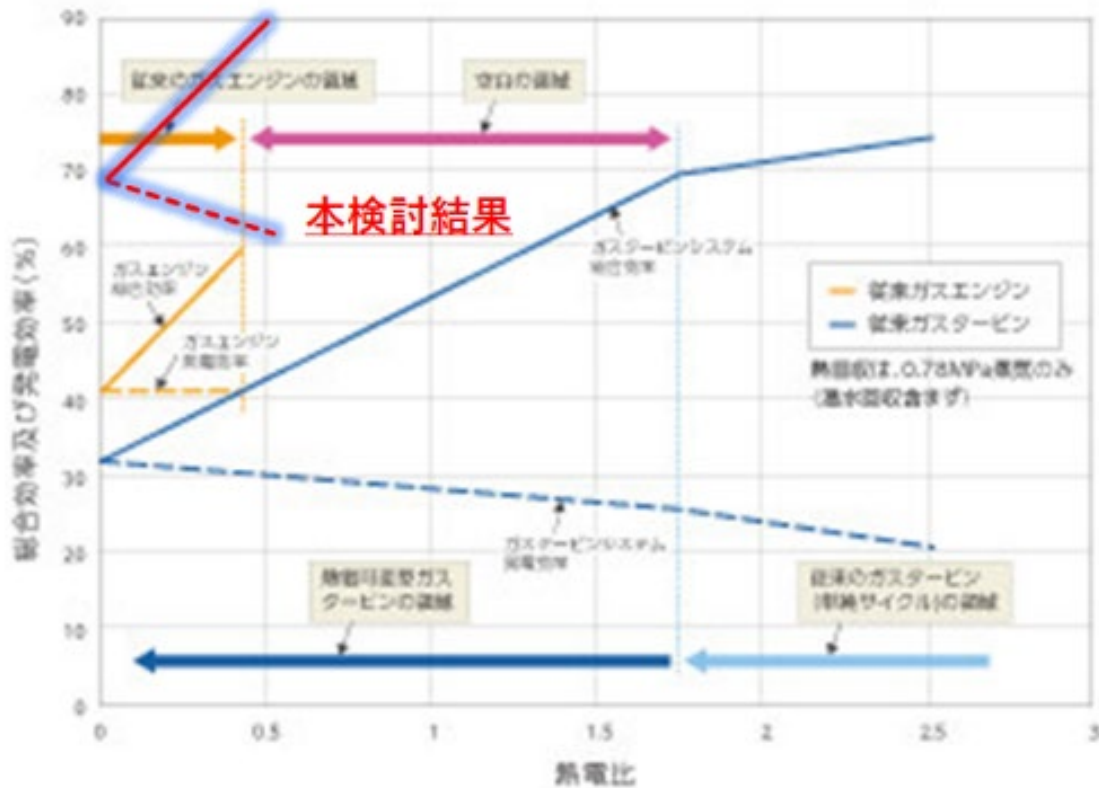
出典：IEA Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cellsより作成



# 3. 研究開発成果について ②システム検討

## 2) 熱利用技術の供給モデルと運転方法の構築

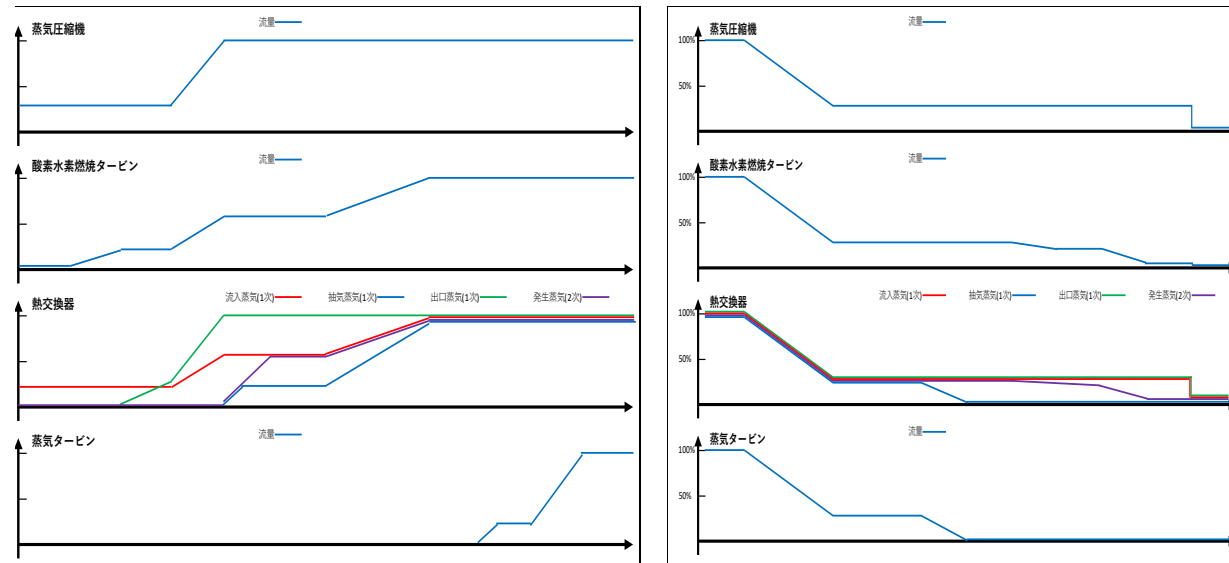
送電端効率を高めるため、水素冷熱を利用した酸素製造プロセスの酸素製造源単位を見積ったところ、0.396から0.265kWh/Nm<sup>3</sup>\_O<sub>2</sub>へ低減できた。また、コージェネレーションを考慮したサイクルの熱電比は他の技術と比較して低くガスエンジンと同程度であったが、発電効率と総合効率はかなり大きくなっており、本技術の優位性を示せた。



熱電比 vs 総合効率および発電効率。原図は下記HPより引用。  
<https://www.nedo.go.jp/hyoukabu/articles/201314mes/index.html>

## 3) 起動・停止方法の研究開発

酸素水素燃焼タービンサイクルの起動・停止方法および手順について提案した。酸素水素燃焼器においては、着火から定格運転状態までの幅広い圧力帯で運用可能な耐久性が求められ、開発設計条件への反映が必要である。起動過程で、クローズド部の蒸気循環が成立するまで外部からの蒸気供給の継続が必要となり、今後、起動時間の最適化が求められる際には、熱交換器ウォーミング方法等、クローズド部の蒸気条件が早期に成立するような対策が必要となる。今後、開発機器となる酸素水素燃焼タービン、蒸気圧縮機、熱交換器等の詳細計画、詳細設計によって明らかになる制約条件や要求仕様に応じて、起動・停止方法への反映による精度向上が求められる。



起動チャート

停止チャート

# 3. 研究開発成果について ③安定した酸素水素燃焼を可能にする高温高圧燃焼機器

## 1) 酸素水素バーナの研究開発

### A: マルチクラスターバーナの研究開発

最小単位となるシングルバーナを対象として、0.8MPaで発熱量1kW以上の酸素水素燃焼試験を実現し、低圧条件（1MPa以下）燃焼の安定化技術を確認した。シングルバーナを3つ以上集合したマルチクラスターバーナの試作を行い、その燃焼特性を明らかにすることでマルチクラスターバーナの設計手法を確立した。

### B: 酸素水素燃焼火炎がバーナ壁面に及ぼす材料劣化の抑制

OHラジカルのレーザ誘起蛍光法（LIF）計測装置を構築し、酸素水素火炎の火炎構造（OH分布）を検討可能な計測手法を確立するとともに、材料劣化の抑制方法を確立した。

### C: 高圧燃焼器用バーナの試作試験

1MPa以上の試験用マルチクラスターバーナを試作した。また、宇宙航空研究開発機構と連携して2MPa程度の高圧条件での燃焼試験を実現し、保炎するためのバーナ構造、水素/酸素/水蒸気の供給バランス等を明らかにした。

## 2) 酸素水素バーナシミュレーションの研究開発

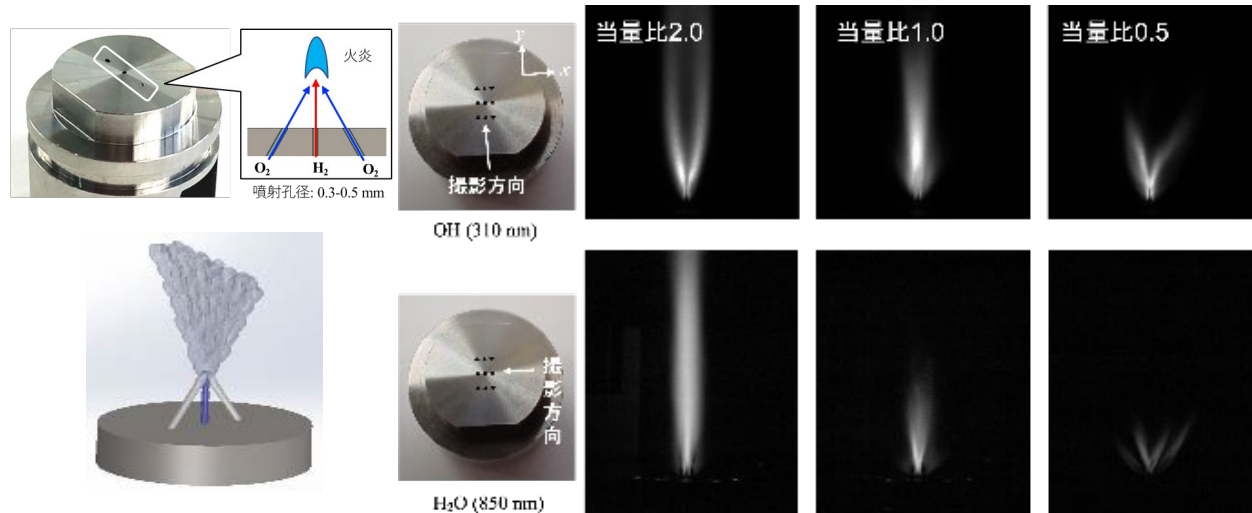
### A: マルチクラスターバーナの燃焼状態のシミュレーション手法確立

マルチクラスターバーナ単体（火炎干渉を一部含む）及び複数干渉を対象として、詳細化学反応機構を考慮に入れた高強度乱流場における酸素水素燃焼の直接数値計算（DNS）技術（数値解析法の選択、格子解像度設定、化学反応解析手法等）を確立した。

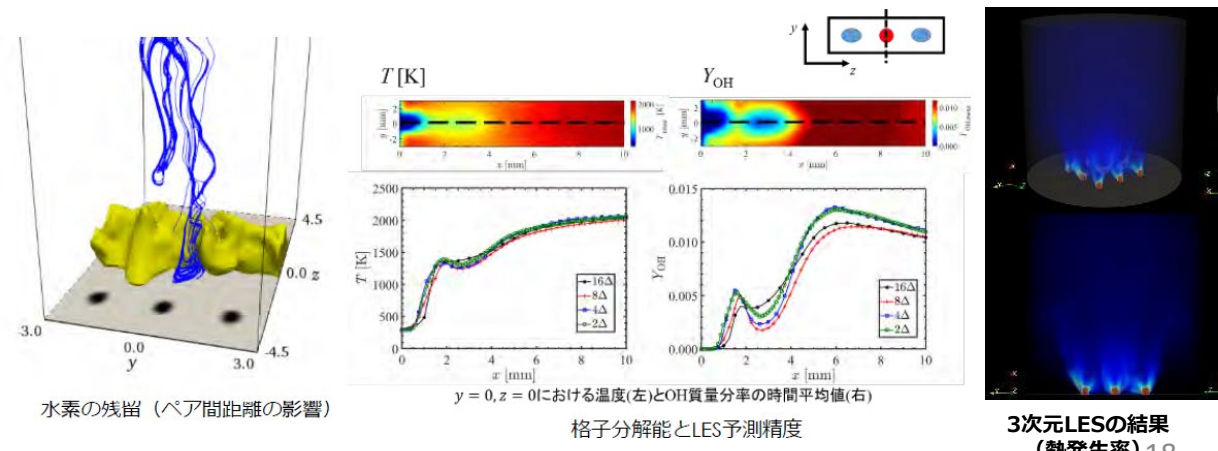
また、DNS結果から高強度乱流中での水素、酸素及び水蒸気の混合特性、火炎基部構造等を明らかにし、高精度なLarge Eddy Simulation (LES) 実現に向けた基礎的知見を得た。

さらに、OHラジカルの高速平面レーザ誘起蛍光法（PLIF）等のレーザ計測技術を確認し、火炎基部の動的特性、三次元火炎構造等の数値解析結果を検証するため基礎実験データを整備した。

オープンソースソフトウェア（OSS）上で、簡易燃焼モデル(反応速度の第0近似)を採用した酸素水素火炎のLES技術を実現した。このLES技術を、高温水蒸気雰囲気下での酸素水素火炎に適用することで、マルチクラスターバーナの開発に利用可能なLES予測技術を確認した。



マルチクラスタを構成要素であるシングルバーナと火炎形状の例



シミュレーション結果の例

# 3. 研究開発成果について ③安定した酸素水素燃焼を可能にする高温高压燃焼機器

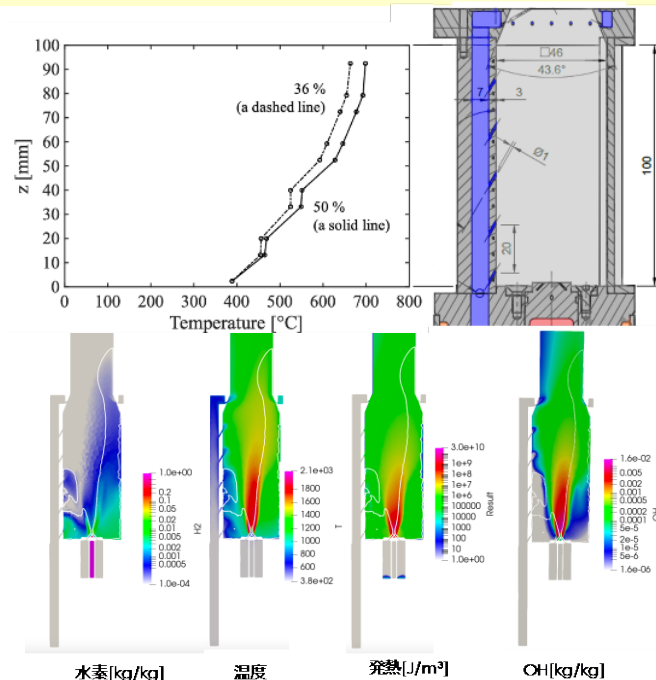
## 3) 酸素水素燃焼器の研究開発

### A: 燃焼器ライナー冷却のための水蒸気制御

マルチクラスターバーナを設置し、ライナー冷却を検討可能な模擬燃焼器を構築するとともに、高度な水蒸気供給系を付加することで、水蒸気希釈酸素と水素の高温燃焼試験及びライナー冷却試験を実現した。また、2波長OH-PLIF法による温度分布計測技術を確立し、ライナー部の温度計測と併せて流動特性とライナー冷却特性との関係を明らかにした。

### B: 燃焼器内の流動・燃焼状態の数値シミュレーション

燃焼器ライナー用冷却蒸気と燃焼ガスの混合状態等を予測できるふく射解析を含む流体固体連成解析技術を確立した。このシミュレーション技術を上述のライナー冷却を検討可能な模擬燃焼器に適用することで、開発シミュレーション技術はライナー冷却法の開発に十分適用できることを明らかにした。



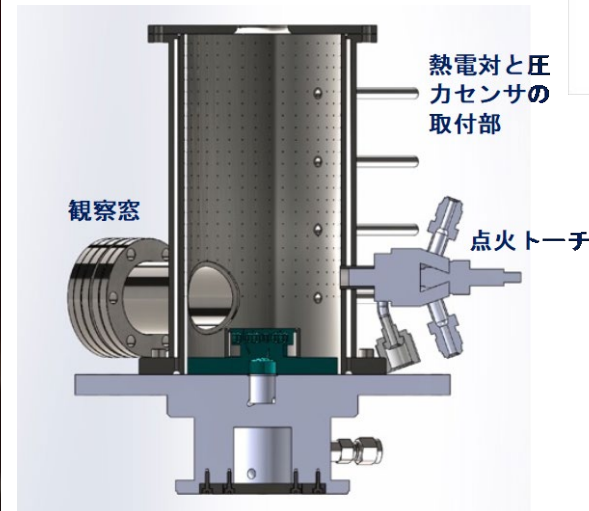
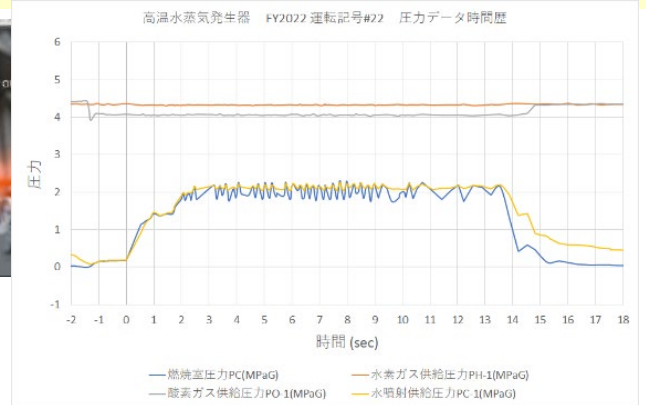
モデル燃焼器でのライナー冷却の様子と流動・燃焼状態のシミュレーション結果の例

## 4) 高压燃焼器の研究開発

### A: 2MPa 以上の高压燃焼試験手法及び試験設備運用法の確立

1MPa以上の圧力条件で高压水蒸気中のバーナ試験を実施可能な設備を整備するために、高压水素酸素供給設備の改造、酸素水素燃焼および水噴霧による高温高压水蒸気供給設備の設置を行った。

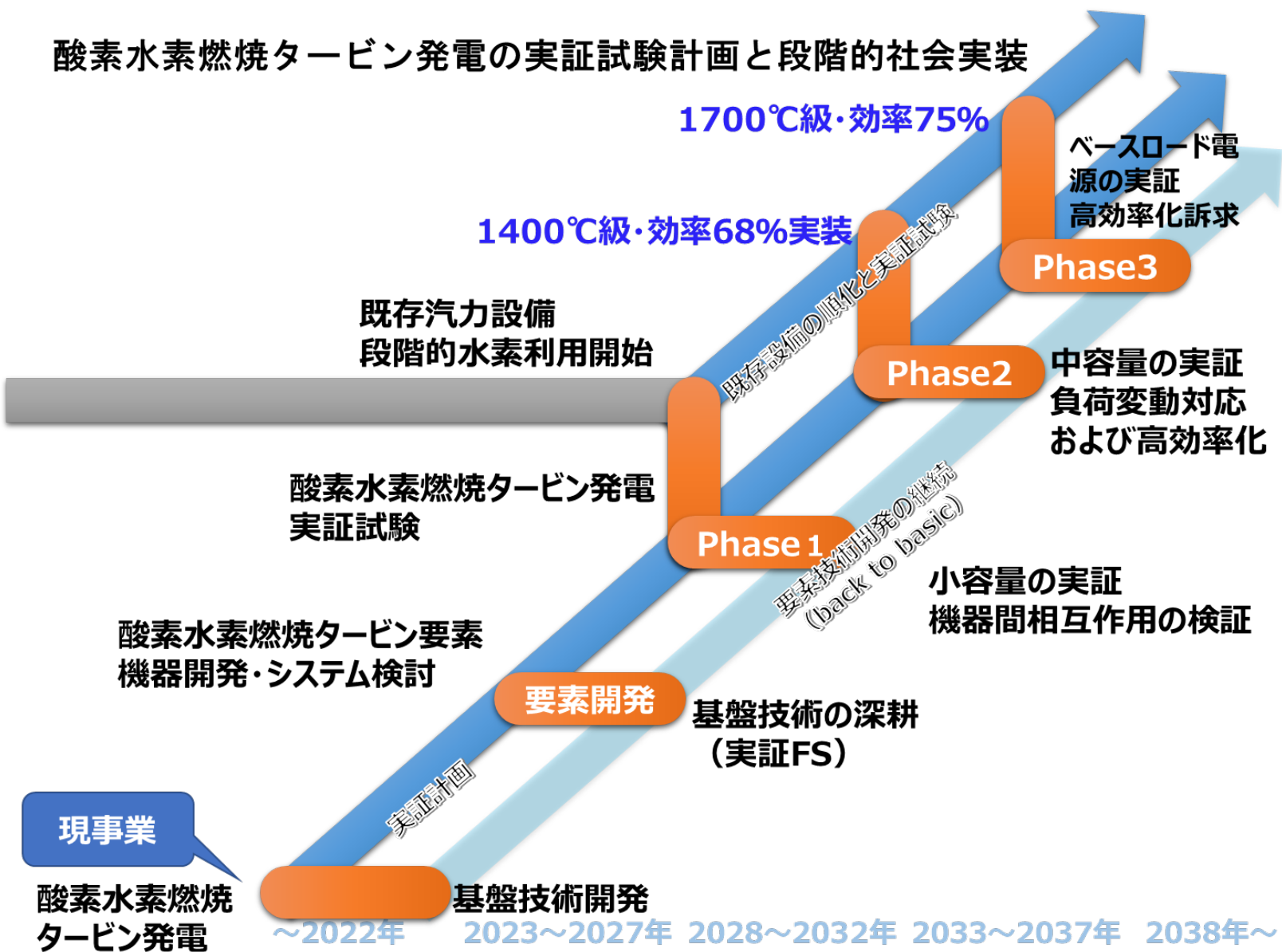
この設備に、産業技術総合研究所で開発した試験用マルチクラスターバーナを設置し、高压燃焼試験を実現した。なお、高压試験実施に際しては試験手法を提示するとともに、バーナ開発に伴う試験設備運用の課題を明確化した。



高压水蒸気発生器の高温高压水蒸気と高压燃焼器概要とバーナ火炎画像 (大気圧)

### 3. 研究開発成果について ④社会実装シナリオの構築

主なユーザーである電力企業から集約した意見を踏まえて、本技術の位置付け・優位性、環境特性、負荷調整力、経済合理性等に関するニーズ、および電力企業の本研究開発への参画意欲等を検討・評価し、実用化シナリオへ反映した。次期フェーズの開発としては、基盤技術開発を要素技術からシステムの要素として深耕して要素機器の開発に移行するとの整理を行った。その上で、超高効率ベースロード電源として社会実装されるまでの長期間において、他の利用用途としての波及効果なども検討した。その上で、負荷変動対応、コージェネレーション、蒸気タービンの水素利用施設への順化を想定して、開発フェーズを検討した。さらに、開発コストを抑える上では、既設の蒸気タービン発電設備を利用したロードマップも作成した。



### 3. 研究開発成果について ④社会実装シナリオの構築

各国で電力市場の状況が異なるため、COP26の合意事項及び各国のカーボンニュートラル宣言をもとに、先行する欧州、米国、豪州およびアジア各国地域の水素関連エネルギー動向や、再生可能エネルギーの導入による電力系統への影響を明確化し、酸素水素燃焼タービンの導入可能性を検討し、以下のことがわかった。

各国とも再生可能エネルギー、特に太陽光、風力に力を入れており、このような自然エネルギー由来電力投入に対して電力系統の安定性を支える設備が必要となる。世界的な動きの中では、このような系統不安定化に対応するため、電力系統の強化、揚水電源及び蓄電設備の導入・強化が加速されている。また、ロシアのウクライナ侵攻後の天然ガスの供給削減により、原子力発電を復活させる国が増加している。一般的に、化石燃料資源国は燃料費より設備費に重点を置く傾向がある。

欧州は各国の電力系統がかなり連携されており、小さい国ほど、太陽光或いは風力による自然エネルギー利用による電力変動を全体で比較的吸収し易い状況になっている。

米国は、州によってかなり異なるが、大きく資源州とそうではない州に分けることができる。化石燃料資源州は、先に述べたように、プラント効率より設備費を重視すると思われる。

日本を除くアジア諸国においては、先進国の脱炭素化技術の開発、それによるコストダウン状況、及び先進国からの技術・経済支援を睨みながら、早くても10年遅れにて、自国への適用を考慮することになると思われる。

国別に「酸素水素燃焼タービン」の社会実装シナリオが異なるが、まず日本にて、早期に実証し技術の優位性と経済性を具体的に見極めながら、他国へ本技術の普及展開することが重要となる。

表 主要国の電源動向と酸素水素燃焼タービンの導入可能性

国名	酸素水素燃焼タービン社会実装の可能性 高:○ 中:△ 低:×	
<b>【アジア】</b>		
日本	○	
中国	×	
台湾	○	
インド	△	
インドネシア	△	
<b>【オセアニア】</b>		
豪州	△	
ニュージーランド	×	
<b>【欧州】</b>		
英国	○	
ドイツ	○	
フランス	△	
ポーランド	×	
デンマーク	×	
ベルギー	×	
フィンランド	×	
オランダ	△	
スペイン	△	
ポルトガル	○	
<b>【北米】</b>		
米国	(カルフォルニア州)	○
	(テキサス州、ワイオミング州)	△
カナダ	×	
<b>【南米】</b>		
チリ	△	
ブラジル	×	

### 3. 研究開発成果について

#### (1) 研究発表・講演（口頭発表も含む）

発表者	所属	タイトル	学会名・イベント名等	発表年月
高橋徹	一般財団法人電力中央研究所	入門講座「コンバインドサイクル発電」XI章：コンバインドサイクルの将来展望	火力原子力発電技術協会協会誌 火力原子力発電	2022/3月号
店橋護	国立大学法人東京工業大学	Investigation of Steam-Diluted Hydrogen/Oxygen Lifted Flame Formed with Cross Jets in a Multi-Cluster Burner	15th World Congress on Computational Mechanics (WCCM-XV) & 8th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM-VIII)	2022/7/31- 2022/8/5
◎Yong Fan、 Norihiko Iki、 Osamu Kurata	国立研究開発法人産業技術総合研究所	Recent AIST topics of gas turbine for hydrogen energy technology	TCP on Clean and Efficient Combustion、 44th Task Leaders Meeting	2022/8/1- 2022/8/4
◎Mohammed Shahien、 Kentaro Shinoda、 Masato Suzuki、 Yong Fan、 Norihiko Iki	国立研究開発法人産業技術総合研究所	Ceramic coatings as an outstanding prospective towards environmental barrier layers in Hydrogen-Oxygen Combustion Gas Turbine	第116回 溶射学会全国講演大会0	2022/11/17-18
◎Hazim Shehab、 Yong Fan、 Norihiko Iki、 Osamu Kurata、 Hirohide Furutani、 Taku Tsujimura	国立研究開発法人産業技術総合研究所	Impinging angle effects of the combustion efficiency of non-premixed hydrogen-oxygen impinged jet flame	第60回 燃焼シンポジウム	2022/11/21-24
◎渡邊泰、 高橋徹、 鈴木晃純	一般財団法人電力中央研究所	Dynamic Simulation of an Oxygen-Hydrogen Combustion Turbine System Using Modelica	Asian Modelica Conference 20220	2022/11/24-25
◎青木里紗、 今井潔、 鹿目浩正、 窪谷悟	東芝エネルギーシステムズ株式会社	酸素水素燃焼タービン用Ni基合金の水蒸気酸化挙動に及ぼす水蒸気分圧の影響	2023年春期講演大会	2023/03/7-03/10
◎Hazim Shehab、 Yong Fan、 Norihiko Iki、 Osamu Kurata、 Hirohide Furutani、 Taku Tsujimura	国立研究開発法人産業技術総合研究所	Impact of the impingement position on the structure of non-premixed hydrogen-oxygen jet flames	14th Asia-Pacific Conference on Combustion (ASPACC 2023)	2023/5/14-18
◎渡邊泰、 高橋徹、 鈴木晃純	一般財団法人電力中央研究所	Effect of load change operation on an oxygen-hydrogen combustion turbine system	International Conference on Power Engineering - 2023 (ICOPE-2023)	2023/5/21
◎野崎智洋	国立大学法人東京工業大学	酸素水素燃焼と低炭素発電技術	自動車技術会	2023/7
青木 里紗	東芝エネルギーシステムズ株式会社	酸素水素燃焼タービン関連材料技術	日本鉄鋼協会自主フォーラム第4回研究会	2022/7/22

# 4. 今後の見通しについて

カーボンフリー水素が大量に流通する2040年代での事業化に向けて研究開発を進めていく。一方、要素技術については水素燃料の大規模発電以外の用途での早期実用化が期待できる。

- クローズドサイクルの共通基盤技術としての開発・実用化・事業化
- 産業用熱需要への対応技術の開発・実用化・事業化

