

発表No.D-1

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

発表者名 壹岐典彦

団体名 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

発表日 2022年7月29日

連絡先：n-iki@aist.go.jp
(国研)産業技術総合研究所

事業概要

1. 期間

開始 : 2020年8月
終了 (予定) : 2023年3月

2. 最終目標

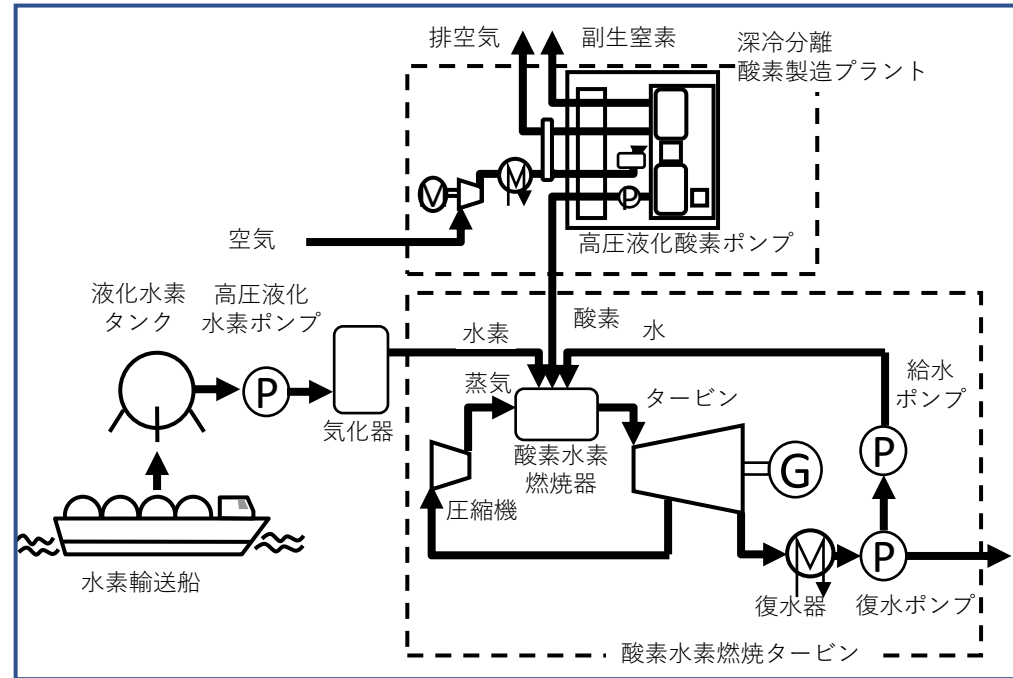
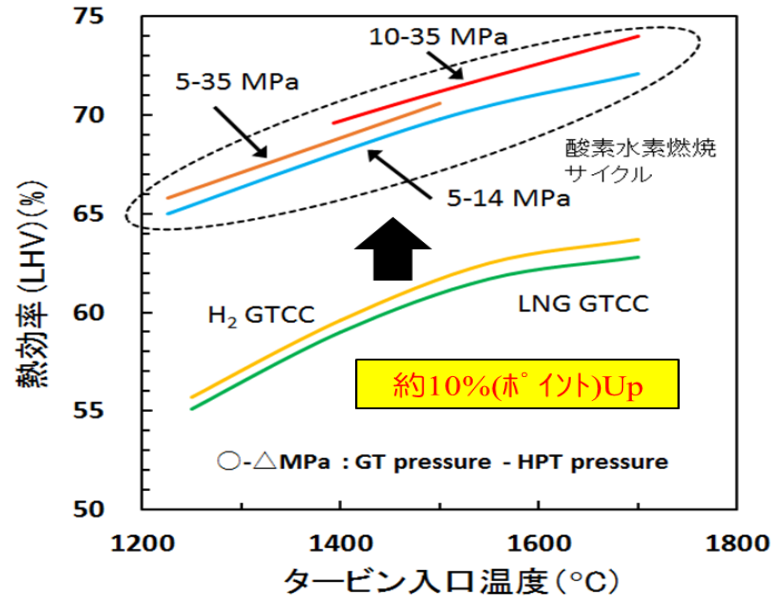
発電効率68%を達成可能なシステムに関する、高圧燃焼試験が実施可能なレベルの技術の確立と、1400°C級ガスタービンから1700°C効率訴求型へ移行するための計画を策定すること。

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結果を取り纏めた。
- 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、CO₂、NO_x、SO_x 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。

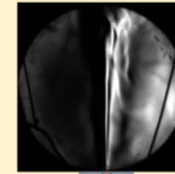
成果① 発電効率75%を達成可能なシステム (1700℃100MW級) を提示した。ただし、発電コスト削減には、高温高圧熱交換器、酸素製造設備の設備費や所要動力などの低減化につながる技術開発が不可欠である。

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。

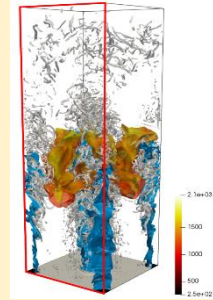
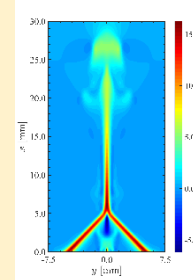
成果③ 将来的な競争力の可能性や既存火力の2倍以上の国内経済波及効果を示した。

成果④ 酸素水素高圧燃焼の可能性を、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。

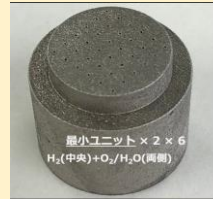
成果④



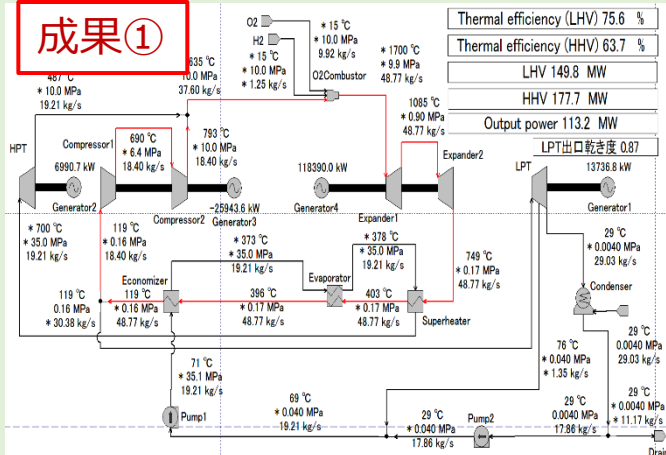
O₂+H₂O H₂ O₂+H₂O



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。

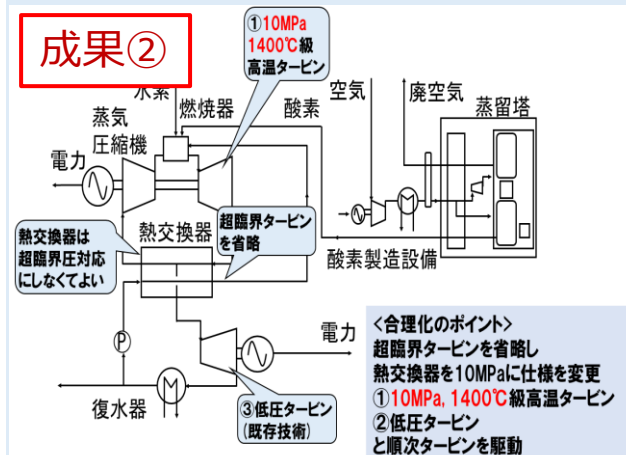


成果①

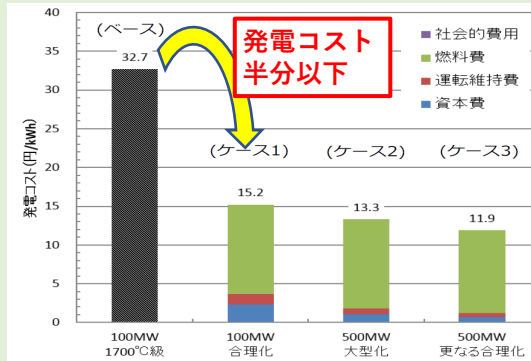


1700℃級100MWでの発電端効率75%達成

成果②



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

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、高温高圧耐性シール技術、耐高温高圧水蒸気材料、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圧燃焼機器の開発

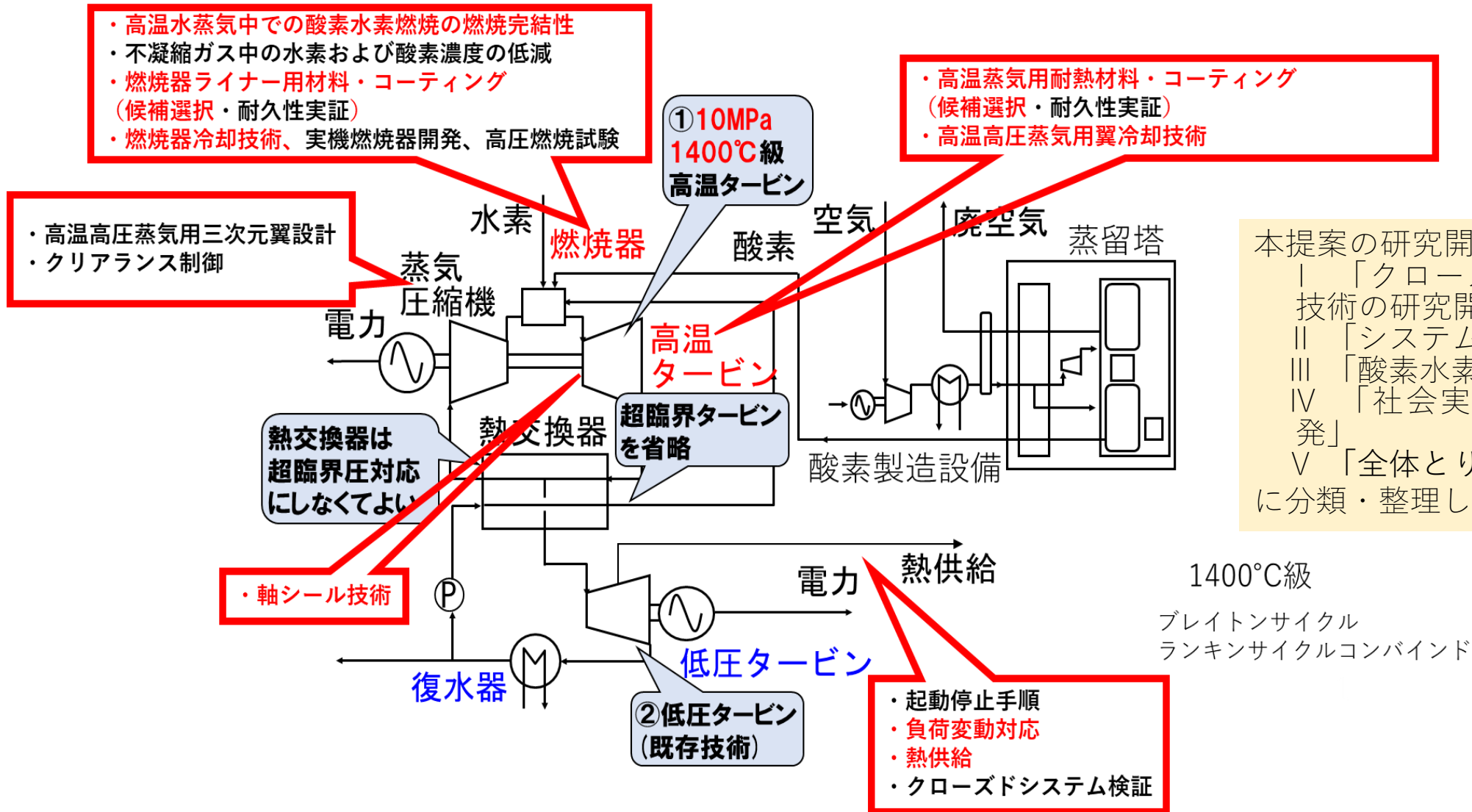
③安定した酸素水素燃焼を可能にする高温高圧燃焼機器の開発として、バーナの形状・構造・材料と燃焼の安定化のための制御等により、酸素水素高温高圧燃焼機器の実機試験を可能とする試験器製作のための基本設計を完成させる。

◆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。

1400°C級

ブレイトンサイクル
 ランキンサイクルコンバインド

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/cm²/1000h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。

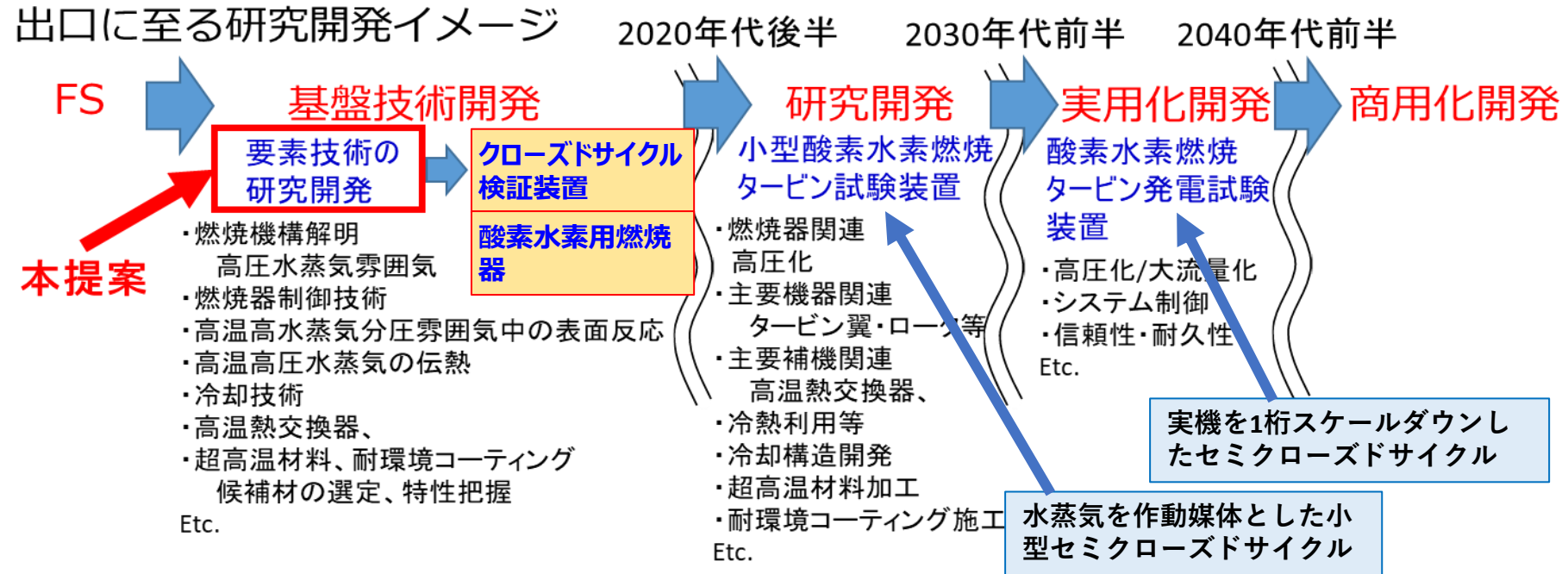
⑤**全体取りまとめ**（取りまとめ：産業技術総合研究所）

- ・ 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。



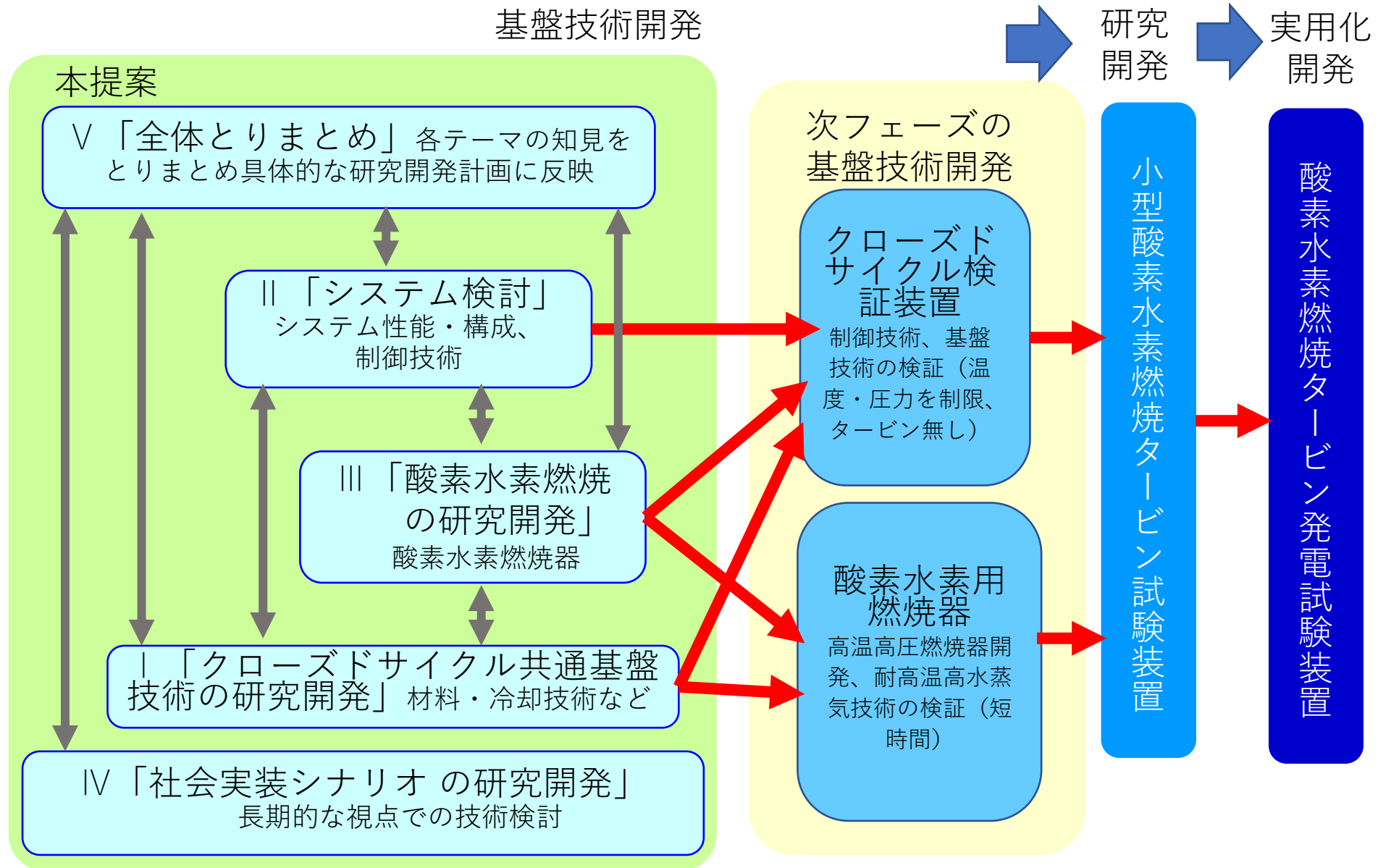
クローズドサイクル検証装置

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

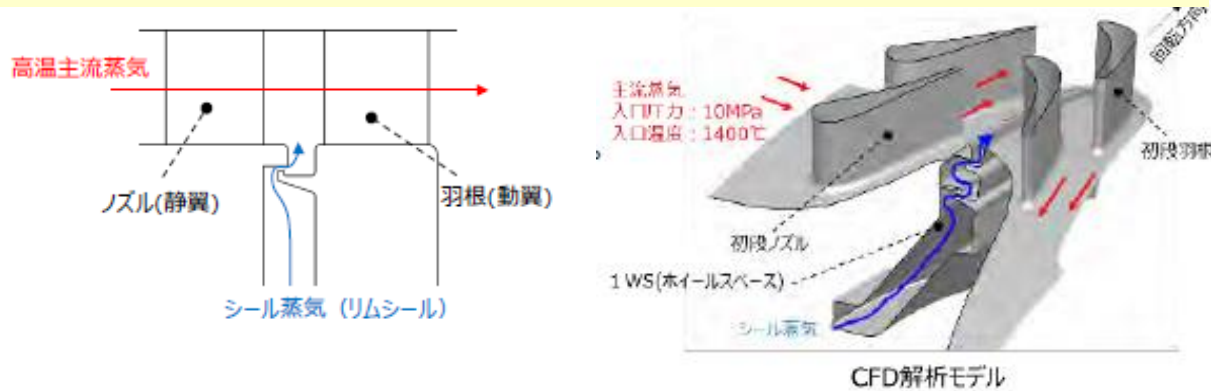


3. 研究開発成果について ①クローズドサイクル共通基盤技術の研究開発

1) クローズドサイクル要素技術

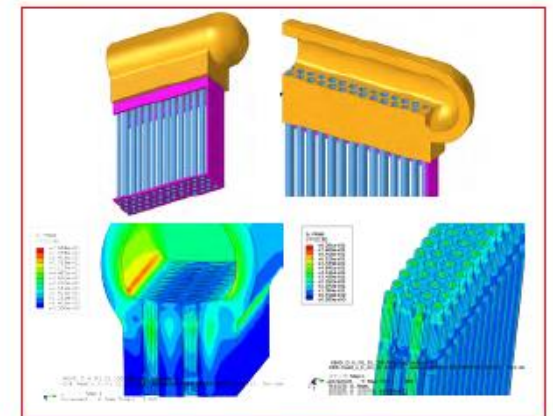
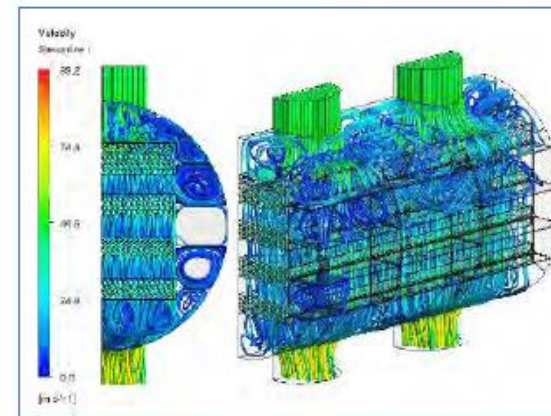
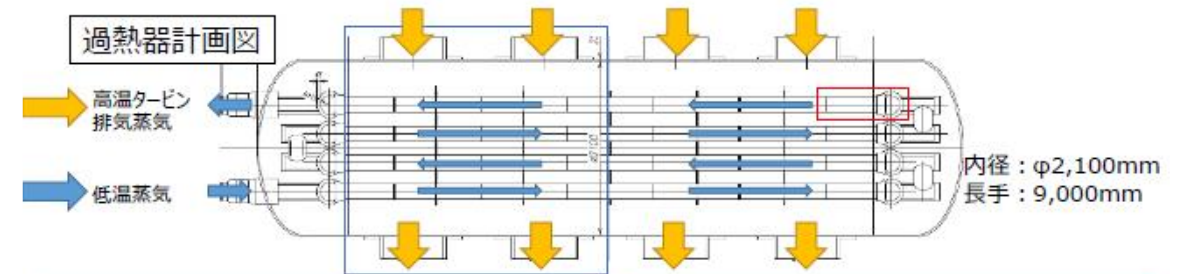
A: 高圧、高温耐性を有するシール技術の確立

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。また、ロータを高温蒸気から保護するためのリムシールは冷却流量全体に対する割合も大きく酸素水素タービンの成立性を確保するため重要なシール技術の一つとなる。酸素水素タービン上流段で想定される高温高圧蒸気下では重要な無次元数であるレイノルズ数が従来ガスタービンや文献で示されている試験の実績範囲外であり、高温蒸気の巻き込みを防止するために必要な流量の特性を把握することを課題として確認し、数値解析を用いた検討を開始した。



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

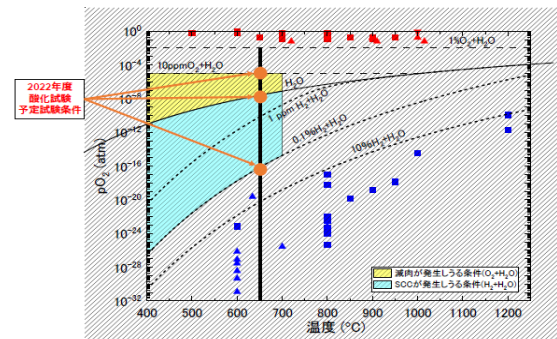
熱交換器の中で最も高温高圧になる過熱器を対象とし、数値シミュレーション技術を用いた評価を実施した。流れ解析にて過熱器内部の高温タービン排気蒸気の流れを評価し、概念設計時に想定していた流れ場になることを確認した。通過するタービン排気の圧力損失の分析を行い、システムの熱交換器全体で生じる圧力損失について検討した。強度解析では伝熱管の管寄せ部になる管板ヘッダ構造について定常状態を想定した評価を実施し、各部材の変位量と応力値を確認した。これらの解析評価から主要な課題を抽出し、解決に向けたロードマップを検討した。



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。

【抽出文献の酸化試験条件と実機想定条件の比較(304, 316鋼を例)】



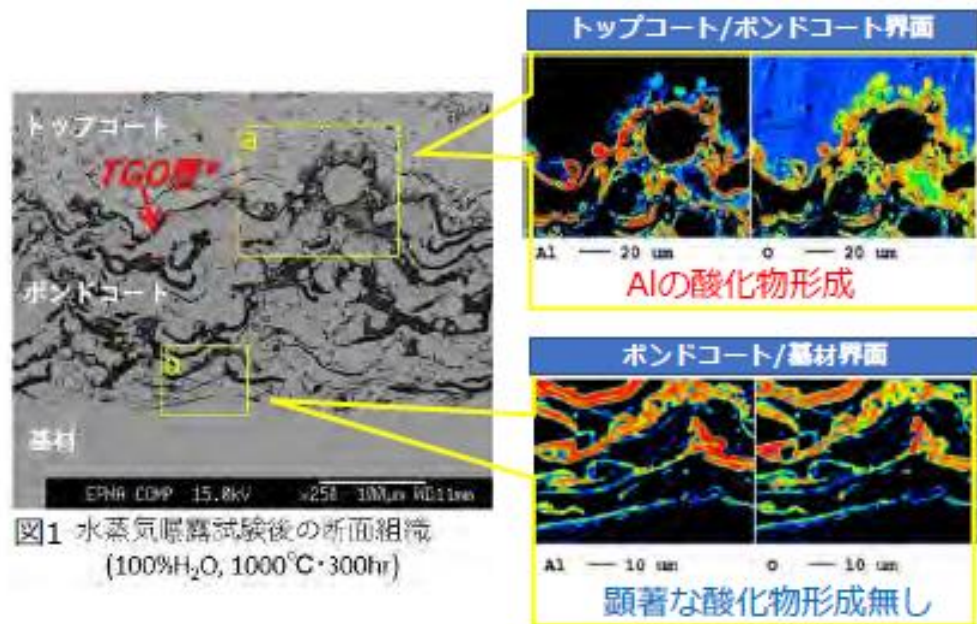
3. 研究開発成果について ①クローズドサイクル共通基盤技術の研究開発

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

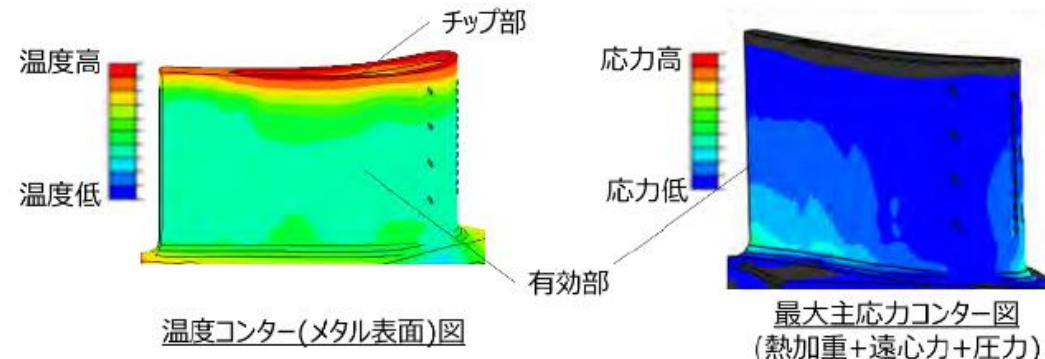
2021年度はTBCを施工した燃焼器及びタービン翼材料の実機高温高圧水蒸気環境を念頭に置き、水蒸気分圧の影響を検証することを目的として、水蒸気分圧を3水準設定し、温度1000℃、最長1000時間の水蒸気酸化試験により候補材料の水蒸気酸化特性を評価した。対象とした候補材料は、燃焼器用鍛造Ni基合金Haynes®282、Nimonic®263、Hastelloy®Xの3種類と、タービン翼用鋳造Ni基合金CMSX®4、Mar-M-247®、Inconel®738LCの3種類の計6種類とした。

水蒸気酸化環境における水蒸気分圧の影響、及び、TBCの影響について、20年度に実施した基材のみの水蒸気酸化試験結果とも比較を実施しまとめを行った。併せて、トップ層とボンド層の界面に形成されるTGO層 (Thermally Grown Oxide層)の成長に着目し検討を実施した。



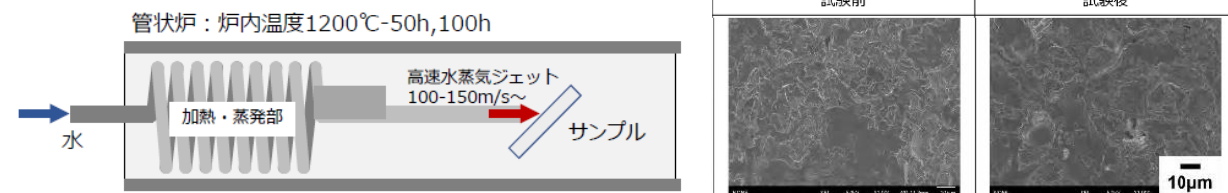
B: 高温高圧水蒸気状態の翼冷却技術

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と、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。



C: 高温水蒸気環境でのコーティング技術

高温水蒸気環境におけるセラミックコーティングの減肉特性を評価するため、水蒸気環境熱暴露試験及び高速水蒸気減肉試験を実施した。1200℃における両試験において、比較検討材のうち、プラズマ溶射8YSZコーティングについて、想定仕様内に収まる結果を得ることができた。一方、範囲内ではあったが、焼結は進んでおり、複層化などの対応が必要と考察した。



3. 研究開発成果について ②システム検討

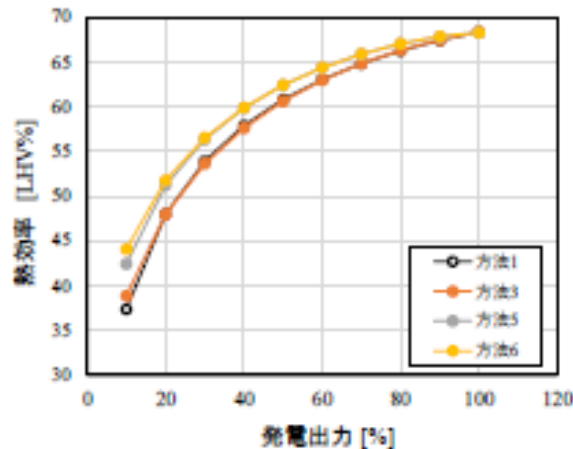
1) 負荷変化方法の検討

A:負荷変化方法の検討

昨年度までに開発した本システムの各構成要素機器の動特性解析モデルおよびそれらによるシステム全体の動特性解析モデルのプロトタイプを用いて試算を行い、各種負荷変化方法や制御方法、負荷変化時に制約となりうる項目を検討・整理し、取り纏めた。本システムでは作動流体が水蒸気であり、また、圧力比が高い特徴から、圧縮機入口で温度低下した際にはドレン発生、温度上昇した際には圧縮機出口で大きな温度上昇が発生し得る。そのため、従来のガスタービン（GT）システムにおけるGT出口温度などの制約項目に加え、圧縮機入口温度も重要な制約項目であることなどが分かった。

10～100%負荷間での10%毎の部分負荷に対して、各種負荷変化方法によるヒートマスバランスを明らかにした。また、動特性解析の基準となる計算条件として、上記の各種制約項目に加え、構成各機器の仕様や性能を検討・整理し、取り纏めた。

	制御変数	操作変数
方法1	発電出力 HTT出口圧力一定(0.4MPa)	燃料流量 蒸気弁
方法2	発電出力 HTT出口圧力一定(0.4MPa) 燃焼温度一定(1393℃)	燃料流量 蒸気弁 圧縮機IGV
方法3	発電出力 HTT出口圧力一定(0.4MPa) HTT出口温度一定(700℃)	燃料流量 蒸気弁 圧縮機IGV
方法4	発電出力 HTT出口圧力一定(0.4MPa) 圧縮機入口温度一定(150℃)	燃料流量 蒸気弁 圧縮機IGV



部分負荷効率方式5・方式6ともに高い結果が得られた

方法5 (← 方法1)
 ・出力指令値に追従するように燃料流量を制御
 ・LPT蒸気弁は開度一定(HTT出口圧力変動)

方法6 (← 方法3)
 ・出力指令値に追従するように燃料流量を制御
 ・HTT出口温度を一定に保持するようにIGV開度制御
 ・LPT蒸気弁は開度一定(HTT出口圧力変動)

B:負荷変化検討用データ抽出

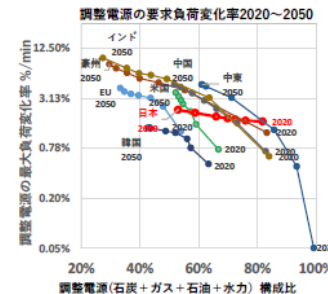
昨年度検討の1400℃級に引き続き、1700℃級サイクルの主要回転機械である高温タービン、高圧タービン、低圧タービン、および蒸気圧縮機の概略設計検討を行い、推定仕様（寸法、段数、回転数、膨張線図など）をまとめ、提示した。さらに、同じく1700℃級プロセスで使用される熱交換器（過熱器、蒸発器、エコマイザ）について概略設計検討を行い、推定仕様（伝熱管長さ、本数、重量など）をまとめ、提示した。以上の結果をもとに、1400℃級および1700℃級サイクルのシステムダイナミックシミュレーションの実施に必要な機器の特性データ（回転軸の質量・慣性モーメント・熱容量、ケーシング質量・熱容量、熱交換器の伝熱部寸法・材料比熱など）を算出・提示した。

C:負荷変化ニーズ国内・海外調査

我が国及び海外各国のEIAによる2050年までの再生可能エネルギーの電源構成計画をもとに、太陽光発電の電源系統への不安定分析から酸素水素燃焼タービンに要求される電力調整ニーズを国別に明確にした。また、各国のカーボンニュートラルへの取り組みを調査して、コジェネレーションを含む酸素水素燃焼タービンの市場参入の可能性を研究した。競合技術（水素専焼ガスタービン、超臨界CO2タービン、燃料電池等）との技術比較を行い、酸素水素燃焼タービンの優位性とすみわけについて考察した。

- EIA2019からEIA2021において各国の再エネ電源比率は見直された。
 - ✓ 太陽光増加大：中国、インド、米国、豪州、中東、アフリカ
 - ✓ 風力増加大：韓国、米国、EU、豪州、カナダ、ブラジル
 - ✓ 大きな変化なし：日本（若干風力増加）、ロシア、
- 調整電源（石油、石炭、ガス、水力）の負荷変化率要求値（%/min）

国・地域	負荷変化率要求値（%/min）		
	現在	2030年	2050年
日本	1.6	1.8	2.3
韓国	0.5	1.2	1.4
中国	0.7	2.9	4.6
米国	0.8	2.7	3.7
EU	1.3	3.4	4.2
中東	0.0	3.2	4.6
インド	0.6	6.0	9.6



- 酸素水素燃焼タービンの負荷変化率は5%/min以上であれば社会受容可能性がある。（インド、豪州は蓄電池などの追加対策が必要）

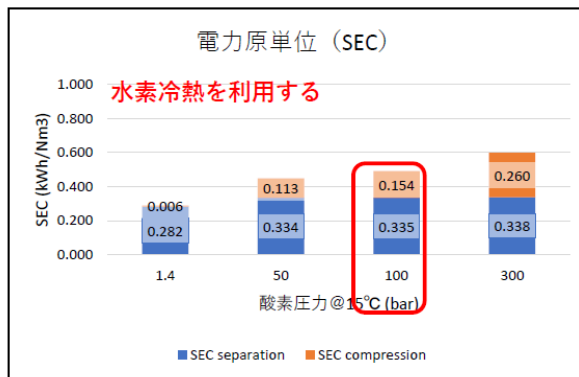
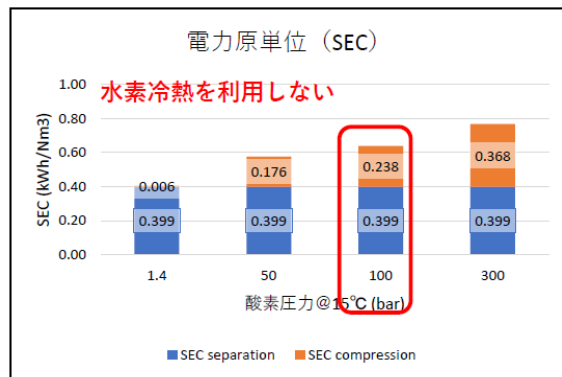
3. 研究開発成果について ②システム検討

2) 熱利用技術の供給モデルと運転方法の構築

液体水素の冷熱を利用することで深冷分離法による酸素製造動力を低減するためのモデルを構築した。酸素の液相圧縮を前提として高圧酸素を製造するプロセスを構築し、酸素製造原単位に及ぼす酸素純度、酸素圧力の影響を明らかにした。水素燃焼量を変えずに熱電比を制御するコジェネレーション・プロセスを構築した。これにより、冷熱利用、高圧酸素製造の両方において定常運転が可能となり、負荷変動に伴う送電効率の低下を回避する案を示した。

酸素純度97% (Ar 3%, N₂ trace), 環境温度 15°C
タービン入り口温度 1550°C
熱効率 LHV 70%, 発電量 105 MW

酸素 10.3 kg/s
水素 1.25 kg/s



青色：空気から酸素を分離するために要するエネルギー
オレンジ：酸素を圧縮するために必要なエネルギー

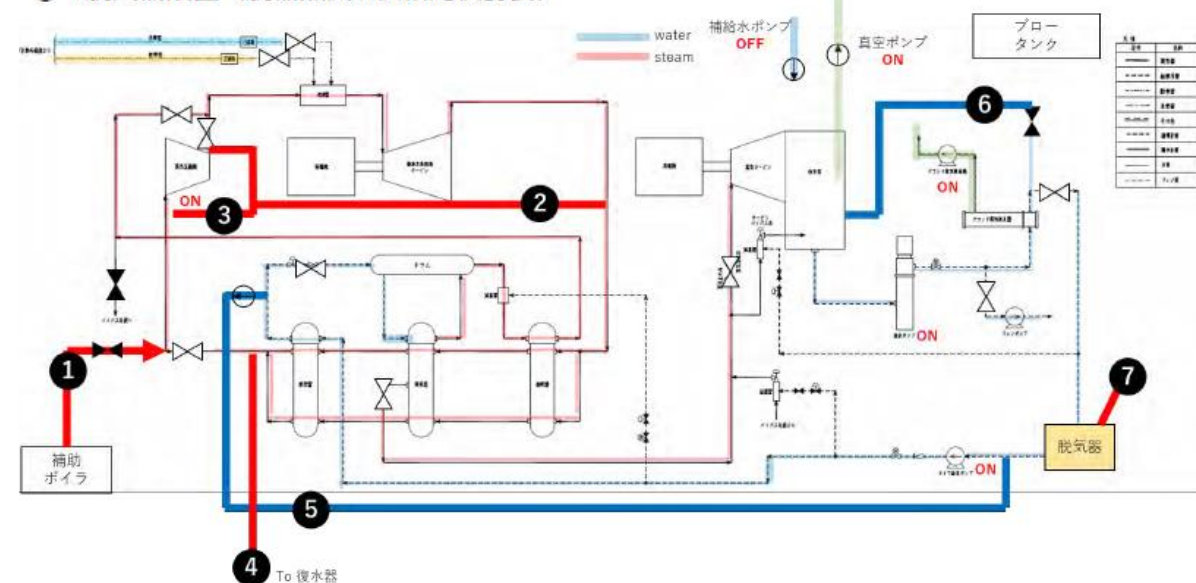
100 barの場合、水素冷熱を利用すれば酸素製造に要する電力原単位は「0.637 → 0.489 kWh/Nm³-O₂」に低減（23%削減）。酸素製造動力を発電出力から引くと、正味効率は59.0%または61.5%になる。

3) 起動・停止方法の研究開発

酸素水素燃焼タービンシステムの基本的な機器構成は一般的な火力発電設備に類似することから、火力発電設備の起動停止手順に基づいて、セミクロード状態までの起動・停止手順の計画コンセプトの検討を実施した。作動流体が水および蒸気のセミクロードサイクルに必要な系統および機器機能について抽出し手順に反映した。

起動・停止検討より抽出された必要系統

- ①：補助ボイラ接続先を圧縮機入口
- ②：圧縮機吐出バイパス系統（熱交換器入口に接続 → タービン排気弁について検討要）
- ③：圧縮機再循環系統
- ④：熱交換器出口バイパス系統（復水器接続）
- ⑤：再循環系統（節炭器出口→給水ポンプ入口 必要に応じて再循環ポンプを採用）
- ⑥：再循環系統（復水ポンプ吐出→復水器）
- ⑦：脱気器設置（脱気蒸気の供給元検討要）



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

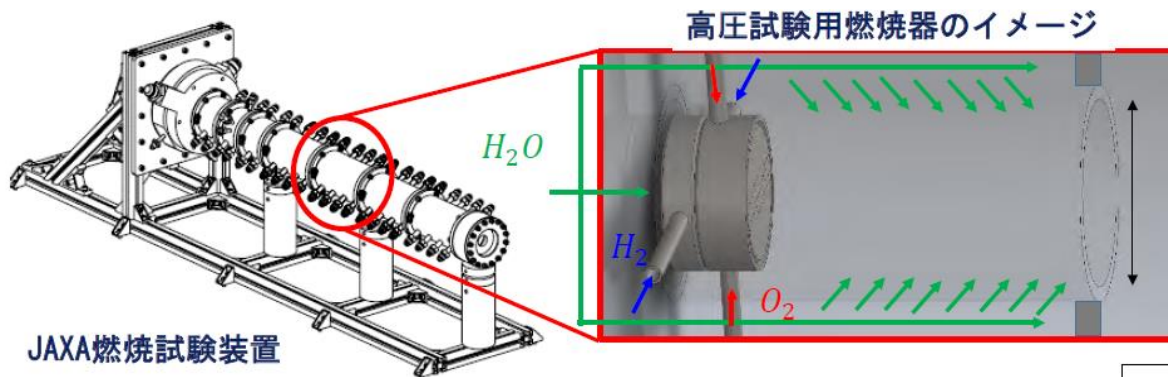
最小単位となるシングルバーナによる酸素・水素・水蒸気の低圧（1MPa以下）を対象として、燃焼の安定化技術を確認するために0.8MPaで発熱量1kW以上の酸素水素燃焼試験を実施した。水素噴流に水蒸気希釈酸素を両側から衝突させることで、広い流量範囲で保炎が可能であることを確認し、雰囲気圧力をはじめパラメータを変えた試験を行い、バーナノズルの過熱防止を考慮したバーナ設計を検討した。また、試作バーナを東京工業大学と大阪大学に提供し、その試験結果を情報共有した。

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

O原子とH原子の2光子吸収レーザー誘起蛍光法（TALIF）計測装置を構築し、酸素水素火炎の火炎構造（HとO原子分布）を取得できるように計測系準備を進めた。また、酸素水素燃焼場での材料劣化試験に用いる多層セラミックコーティングの壁面試料の準備を終えた。

C: 高圧燃焼器用バーナの試作試験

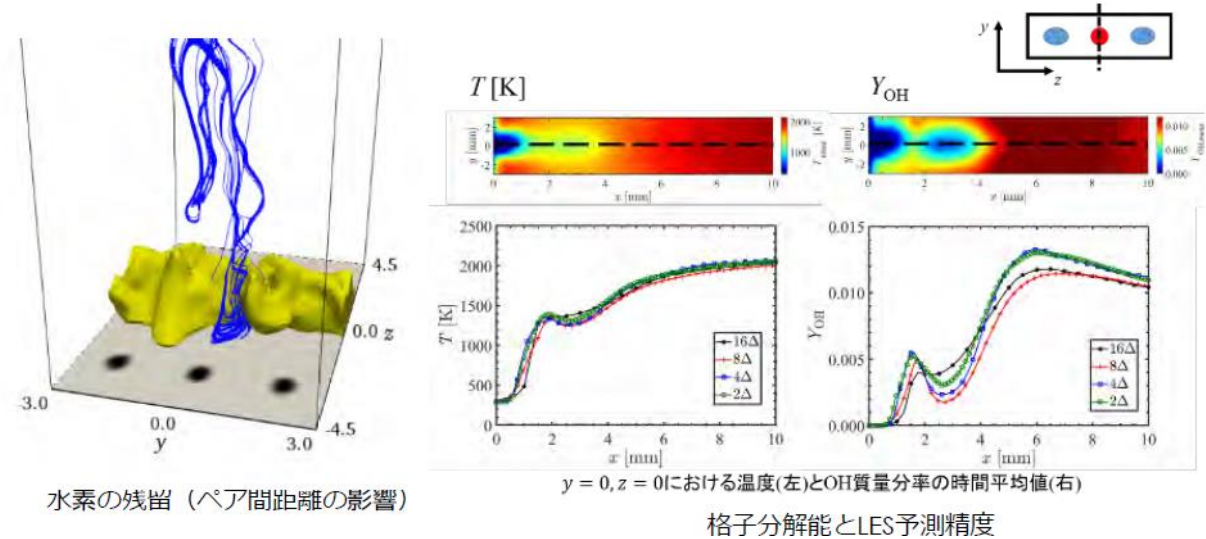
東京工業大学と大阪大学の数値解析と燃焼試験の結果も踏まえて、2022年度に試験を行う高圧燃焼器用のバーナノズルの仕様案を決定し、マルチクラスターバーナを試作した。



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の複数干渉を対象として、計算領域設定及び格子解像度設定方法を明らかにすることで、高強度乱流酸素水素燃焼の直接数値計算（DNS）を確立した。また、DNS結果の解析から、複数火炎の干渉機構、火炎安定性、バーナ表面での熱流束特性等を明らかにするとともに、高精度なLarge Eddy Simulation(LES)実現に向けた基礎的知見を取得した。併せて、DNSとLESを検証する実験データとして、火炎構造及び火炎基部構造の動的特性等を取得した。さらにDNSデータの解析から、Flamelet型モデルの導入を検討するとともに、現状の簡易燃焼モデル(反応速度の第0近似)でも高精度な解析を可能とする格子配置条件等を明らかにした。これにより、複数火炎の干渉機構を予測可能なLES技術をオープンソースソフトウェア（OSS）上で確立した。



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

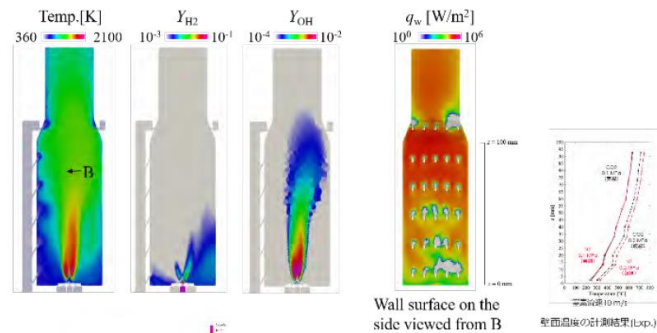
A: 燃焼器ライナー冷却のための水蒸気制御

マルチクラスターバーナ（産業技術総合研究所より提供）を設置し、ライナー冷却を検討可能な模擬燃焼器を構築した。また、その内部で二酸化炭素および窒素による代替希釈試験を実施し、製作した模擬燃焼器において保炎可能な流量範囲や昇圧下における燃焼挙動の変化、壁面冷却効果の傾向を確認した。また、高温水蒸気供給系に加え、水蒸気希釈条件下において排気ガスが水蒸気100%になることへの対策として、排気系に新設する水蒸気処理装置を設計し、供給系、排気系ともに構築を完了した。また、火炎構造を可視化するためのOH-PLIFを実施し、データ取得を完了した。

B: 燃焼器内の流動・燃焼状態の数値シミュレーション

詳細化学反応機構を考慮した酸素水素燃焼のRANS解析技術を確立した。また、ポリヘドラル格子を導入することで、実機の複雑形状の計算に成功した。さらに、本手法を用いて、阪大が設計開発した模擬燃焼器を対象とした計算結果を得た。

壁面熱流束の評価



バーナ表面での高熱流束
 ・東工大のDNSで指摘
 ・産総研の基礎実験で可能性を確認
 ・阪大のRANS解析でも確認
 ⇒バーナ設計に応用

4) 高压燃焼器の研究開発

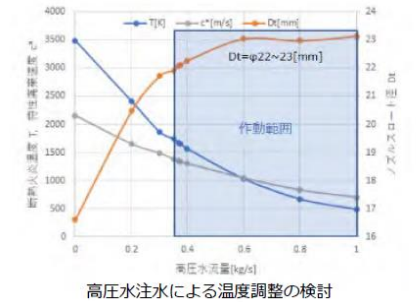
A: 2MPa 以上の高压燃焼試験手法及び試験設備運用法の確立

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として、高温高压水蒸気供給設備の設置と試運転を完了した。高温高压水蒸気供給設備は、①高压水素酸素供給設備、②冷却水供給設備、③高温高压水蒸気発生用燃焼器から構成され、2020年度より段階的に設計製作と性能確認試験を進捗させてきた。2022年3月に設備全体が完成し、1MPa以上の条件で高温高压水蒸気を発生させる設備試運転を実施した。試運転の結果、高压酸素・水素ガス燃焼と高压水添加によって温調された水蒸気を安定的に供給する試験手法を確立し、2021年度までの目標を達成した。以上により、2022年度に予定するバーナ試験に向けた試験設備側の準備を整えた。

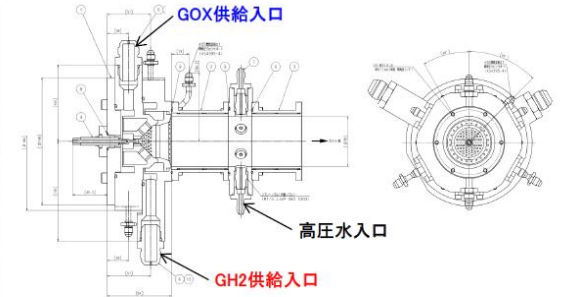
◆ 高压燃焼器の研究開発 (JAXA)

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

- 冷却水供給設備の整備 (100%)
 - 設計圧力 2 MPa
 - 燃焼によって生成する水蒸気流量 : 330 g/s
 - 燃焼温度 : 最大1400°C
 - 温度調整方法 : 水ポンプによる高压水添加
 - 高压水流量 : 1 kg/s以上、吐出圧3MPa以上



2020年度に設置した高压水素酸素供給設備



2021年度に設置する高温高压水蒸気発生装置の燃焼器設計

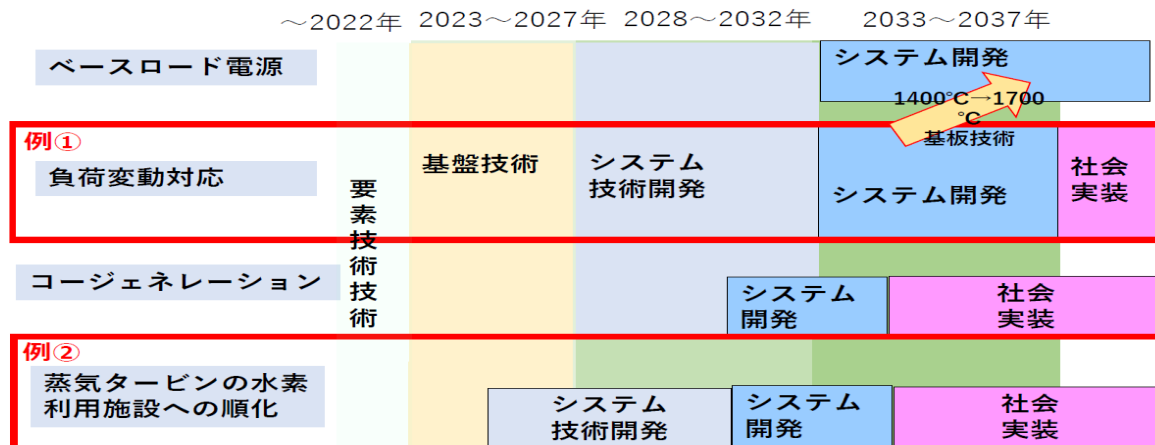
3. 研究開発成果について ④社会実装シナリオの構築

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する。

1) シナリオ策定

2021年10月に英国グラスゴーで開催された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が各国の電力市場に受け入れられるシステムを検討した。また、本技術に必要な水素および酸素のサプライチェーンについて検討しグリーンまたはブルー水素の製造、輸送、貯蔵を含めた供給能力を調査検討した。さらに、社会実装を2040年に実現するための次期アクションプランについても検討し、競合技術とのコスト評価を含む対比を行った。

社会実装事例を想定した開発スケジュール



2) シナリオ検討・管理

各開発課題から得られた知見を踏まえ、高効率と経済性を両立する酸素水素燃焼タービン発電の開発計画を策定する。また社会実装に向けた実用化シナリオを策定する。本年度は前年度に引き続き、酸素水素燃焼タービンに関連する知財調査を進めた。またエネルギー基本計画の改定により、2030年の水素の導入目標が明確化されるなど、COP26や関連する内外の動向を踏まえ、社会実装の時期を早めることを検討し、シナリオの見直し作業を進めた。次期フェーズ用の研究開発内容について検討を進めた。

負荷変動への対応能力はLNG GTCC並

→変動する再エネの電源とバッテリーの組み合わせに対して、カバーしきれない需給ギャップを輸入水素で補うことに使用できる。買い取り価格の高い電力にできる。

効率up60%→70%

燃料消費が約14%削減
→水素輸入量に比して、再エネへの転換を増加できると共に設備コストの削減に寄与する。

酸素製造動力や酸素製造設備のコスト削減により発電コスト削減が期待できる

→酸素製造技術開発により大きく改善される方向
・酸素分離膜、酸素吸着材などが開発中
・窒素製造の副産物としての安価な酸素供給が想定できる



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
◎篠田健太郎, 鈴木雅人, シヤヒン・モハメド, 明渡純, 高木英行, 壹岐典彦	国立研究開発法人産業技術総合研究所	次世代耐環境コーティングに向けた微粒子スプレーコーティング技術	日本ガスタービン学会誌	2021年7月
◎Kensuke SATO, Masayasu SHIMURA, Yuki MINAMOTO, Mamoru TANAHASHI	国立大学法人東京工業大学	Large Eddy Simulation of Steam-Diluted O ₂ /H ₂ Turbulent Non-Premixed Flame in a Multi-Cluster Burner	The Second Asian Conference on Thermal Sciences, 2nd ACTS	2021年10月
◎Hazim Shehab, Yong Fan, Norihiko Iki, Osamu Kurata, Hirohide Furutani	国立研究開発法人産業技術総合研究所	Investigation on Steam Dilution Effects on Non-Premixed Hydrogen-Oxygen Impinged Jet Flame	第49回日本ガスタービン学会定期講演会	2021年10月
◎宮下 竜太、志村 祐康、店橋 護	国立大学法人東京工業大学	酸素水素交差噴流非予混合火炎の安定燃焼特性	第59回燃焼シンポジウム	2021年11月
◎富澤 陽亮、店橋 護、源 勇気、志村 祐康	国立大学法人東京工業大学	衝突流に形成される水蒸気希釈酸素水素浮き上がり火炎の燃焼特性	第59回燃焼シンポジウム	2021年11月
◎Yousuke TOMISAWA, Yuki MINAMOTO, Masayasu SHIMURA, Mamoru TANAHASHI	国立大学法人東京工業大学	DNS of steam-diluted hydrogen/oxygen multi-cluster burner	The 13th Asia-Pacific Conference on Combustion (ASPACC 2021)	2021年12月
◎Hazim Shehab, Yong Fan, Norihiko Iki, Osamu Kurata, Taku Tsujimura, Hirohide Furutani	国立研究開発法人産業技術総合研究所	Structure of Non-Premixed Hydrogen-Oxygen Impinged Jet Flame under Elevated Pressure and Flow Rates	The 13th Asia-Pacific Conference on Combustion (ASPACC 2021)	2021年12月
◎渡邊泰, 高橋徹, 鈴木晃純	一般財団法人電力中央研究所	Modelicaによる酸素水素燃焼タービン発電システムの1Dシミュレーション	1DCAE・MBDシンポジウム 2021	2021年12月
◎壹岐典彦	国立研究開発法人産業技術総合研究所	カーボンニュートラルに向かう社会におけるガスタービン	燃焼学会誌	2022年2月

(2) 成果普及の努力（プレス発表等）

発表者	所属	タイトル	雑誌名・学会名・イベント名等	発表年月
壹岐典彦	国立研究開発法人産業技術総合研究所	酸素・水素で効率発電 川重・産総研など実証	日刊工業新聞オンラインの取材対応	2021年5月

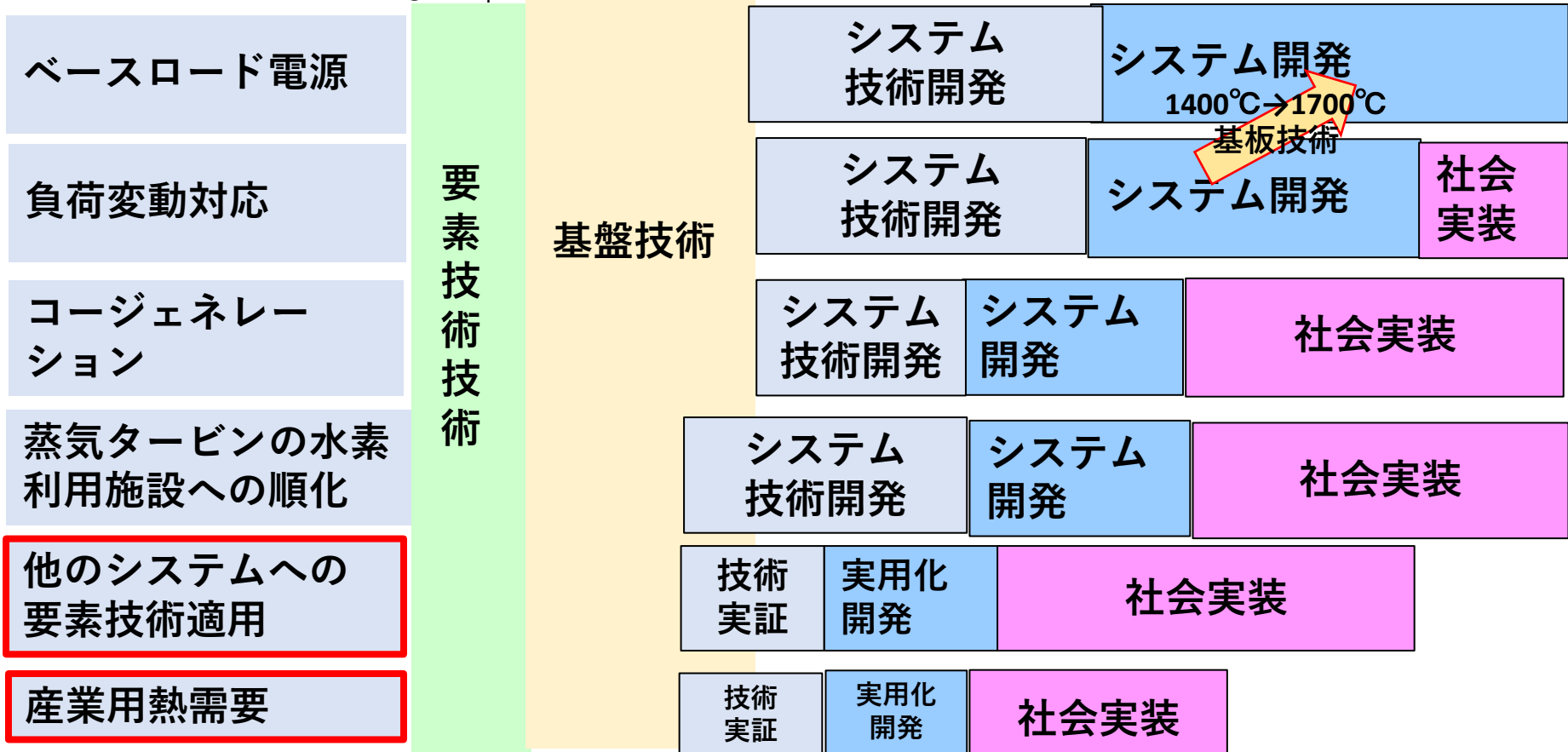
4. 今後の見通しについて

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

社会実装事例を想定した開発スケジュール

～2022年 2023～2027年 2028～2032年 2033～2037年



要素技術の
社会実装の
前倒し