

発表No.B2-17

競争的な水素サプライチェーン構築に向けた
技術開発事業／総合調査研究／
酸素水素燃焼用マルチクラスターナの研究開発

発表者：范 勇

国立研究開発法人 産業技術総合研究所

国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構

国立大学法人 東京工業大学、国立大学法人 大阪大学

三浦工業株式会社、大陽日酸株式会社

一般財団法人 カーボンフロンティア機構

2024年7月19日

連絡先：

范勇

(国研)産業技術総合研究所

yong.fan@aist.go.jp

1. 調査の背景（熱需要分野における水素燃焼技術開発の必要性）

熱需要はCO2排出量において、大きな割合（1/5）を占めている。

日本では化石燃料による熱供給が8割を占める。高温工業プロセスでのCO₂削減に水素燃焼が期待。

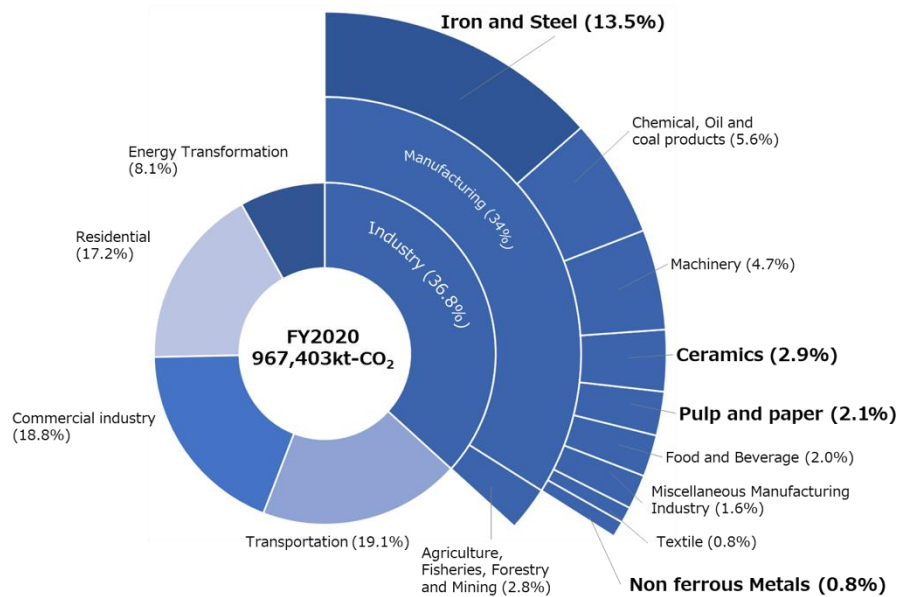
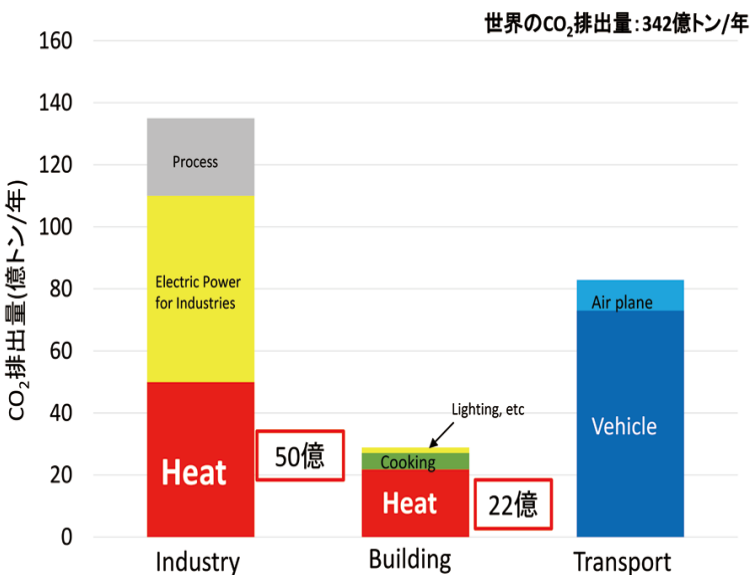


図 日本のCO₂排出量の内訳

2020年度の国内のCO₂排出量は1,044百万t
 エネルギー起源は967百万t
 工業プロセスから排出されるCO₂は186百万t(約19%)

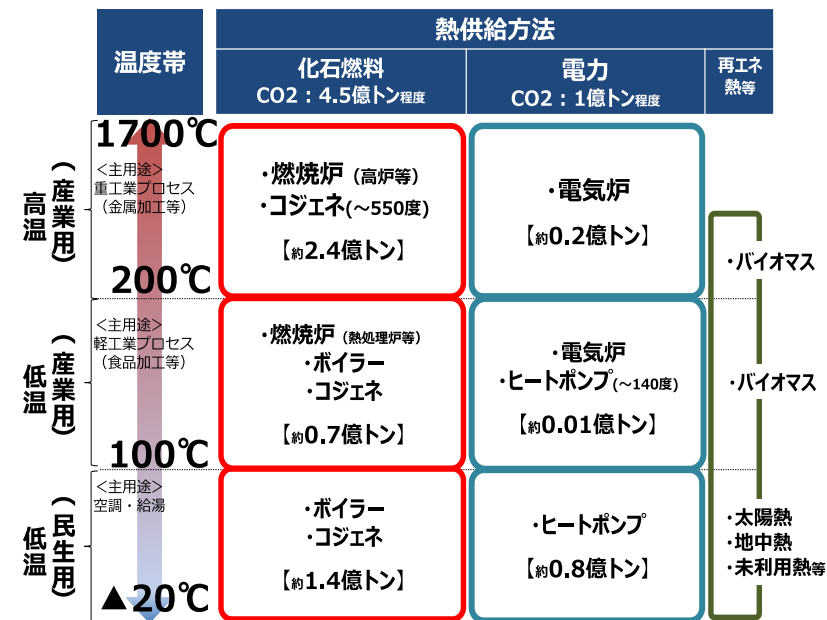
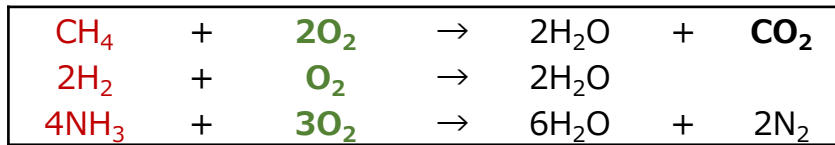


図 熱供給の温度とCO₂排出量の関係

出所：資源エネルギー庁 第23回基本政策分科会「資料1. 2030年エネルギーミックス実現のための対策～原子力・火力・化石燃料・熱～」(2017年) p.56を基にNEDO技術戦略センター作成

1. 調査の背景（酸素水素燃焼の特徴と課題）

本事業は、水素社会の実現に向けて2030年代以降という長期的視点から、従来の空気による水素燃焼技術とは一線を画した**酸素水素燃焼**技術の実用化を図る。



酸素水素燃焼により

CO₂フリー

NO_xフリー

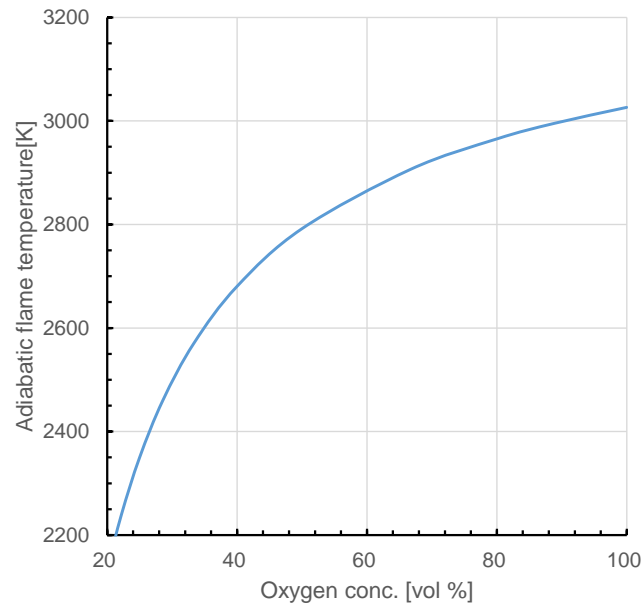


図 断熱火炎温度と酸素濃度の関係

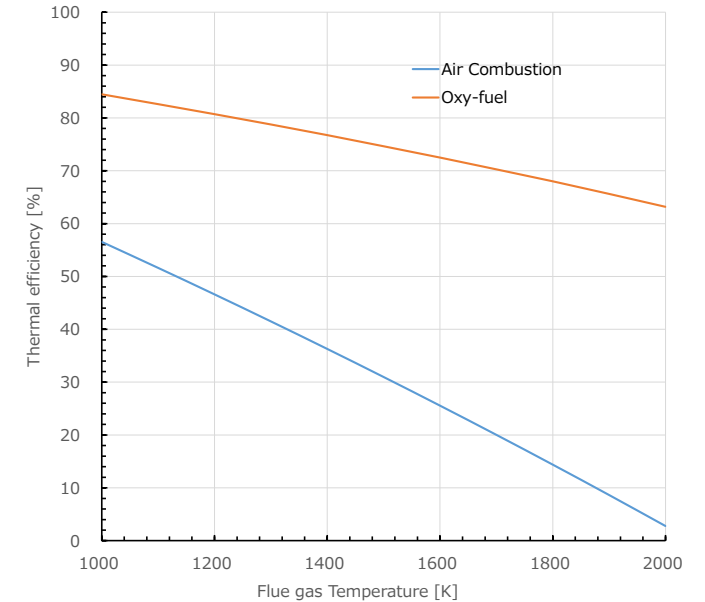


図 ガス温度と熱効率の関係

【酸素燃焼の特徴】

- 高温火炎の形成：輻射伝熱性能の向上
- 高速火炎の形成：火炎の安定性及び対流伝熱性能の向上
- 支燃性ガス中の窒素が無くなる事で、酸素燃焼では熱損失が75-80%削減(熱効率が向上)

1. 調査の目的（熱需要のための酸素水素燃焼技術）

酸素水素燃焼の特性を活かした熱需要ニーズとして鉄鋼用工業炉および直接加熱ボイラに着目し、技術の成立性と社会実装課題について調査を行うと共に、必要に応じて基盤的研究も併せて実施することで要素技術開発における課題整理の充実を図った。

水素の燃焼速度がメタンの8倍程度、炭化水素用ではなく専用バーナが必要。また、バーナに求められる仕様が、用途別に異なることが想定される。

工業炉



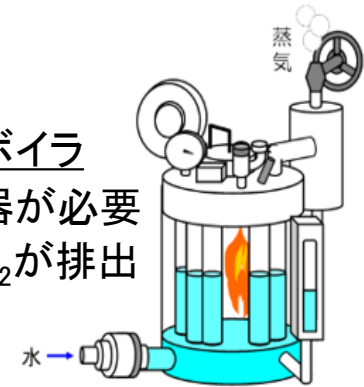
直接加熱ボイラ

NO_x・CO₂フリー
熱交換器不要

高圧で短火炎によりコンパクトな燃焼器

現状のボイラ

熱交換器が必要
NO_x・CO₂が排出される

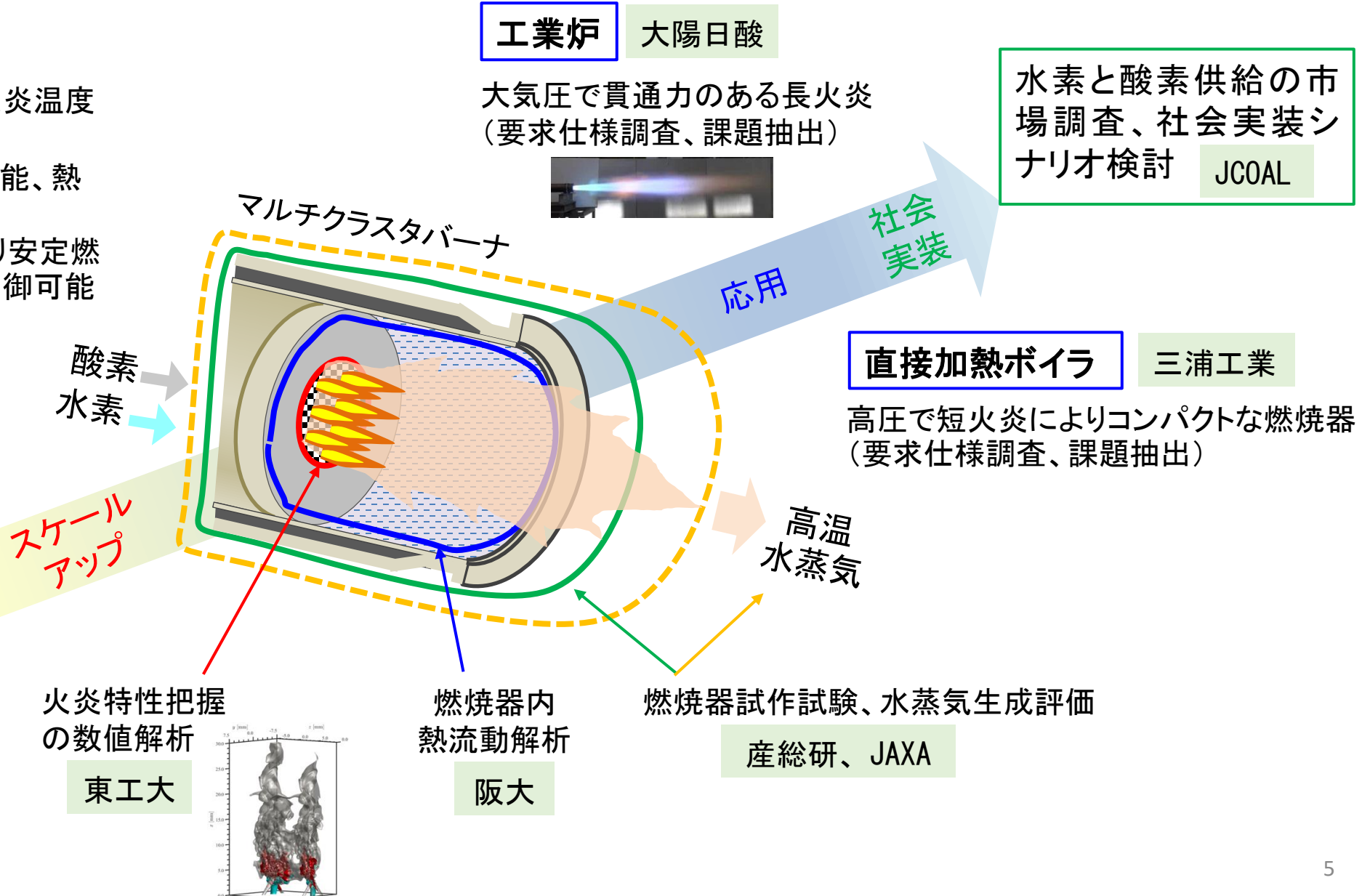
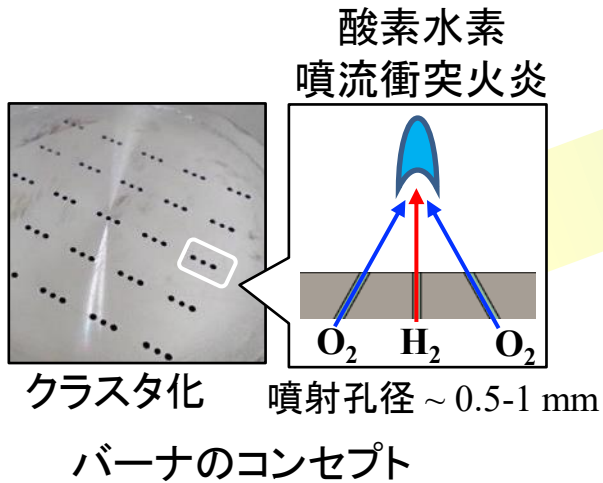


用途	メリット	技術課題	適用先	市場規模
工業炉	<ul style="list-style-type: none"> • CO₂ & NO_xフリー • 省エネ • 高温が得やすい 	<ul style="list-style-type: none"> • 保炎性、バーナ耐久性 • 加熱能力（輻射強度） • 被加熱物の品質 	<ul style="list-style-type: none"> • 鉄鋼用溶解炉など（酸素供給設備が既設） 	<ul style="list-style-type: none"> • CO₂削減規模1億t（鉄鋼用） • 市場規模90億円（鉄鋼用ガス）
小型直接加熱ボイラ （新型蒸気発生器）	<ul style="list-style-type: none"> • CO₂ & NO_xフリー • 省エネ • 小型化 	<ul style="list-style-type: none"> • 水（噴霧）中燃焼 • 高い燃焼完結性 • 水蒸気発生（燃焼ガスと水噴霧との熱交換） • 湿り蒸気下の点火技術 	<ul style="list-style-type: none"> • 小型貫流ボイラ代替など 	<ul style="list-style-type: none"> • CO₂削減規模4,000万t • 市場規模1,000億円 ※三浦工業推計

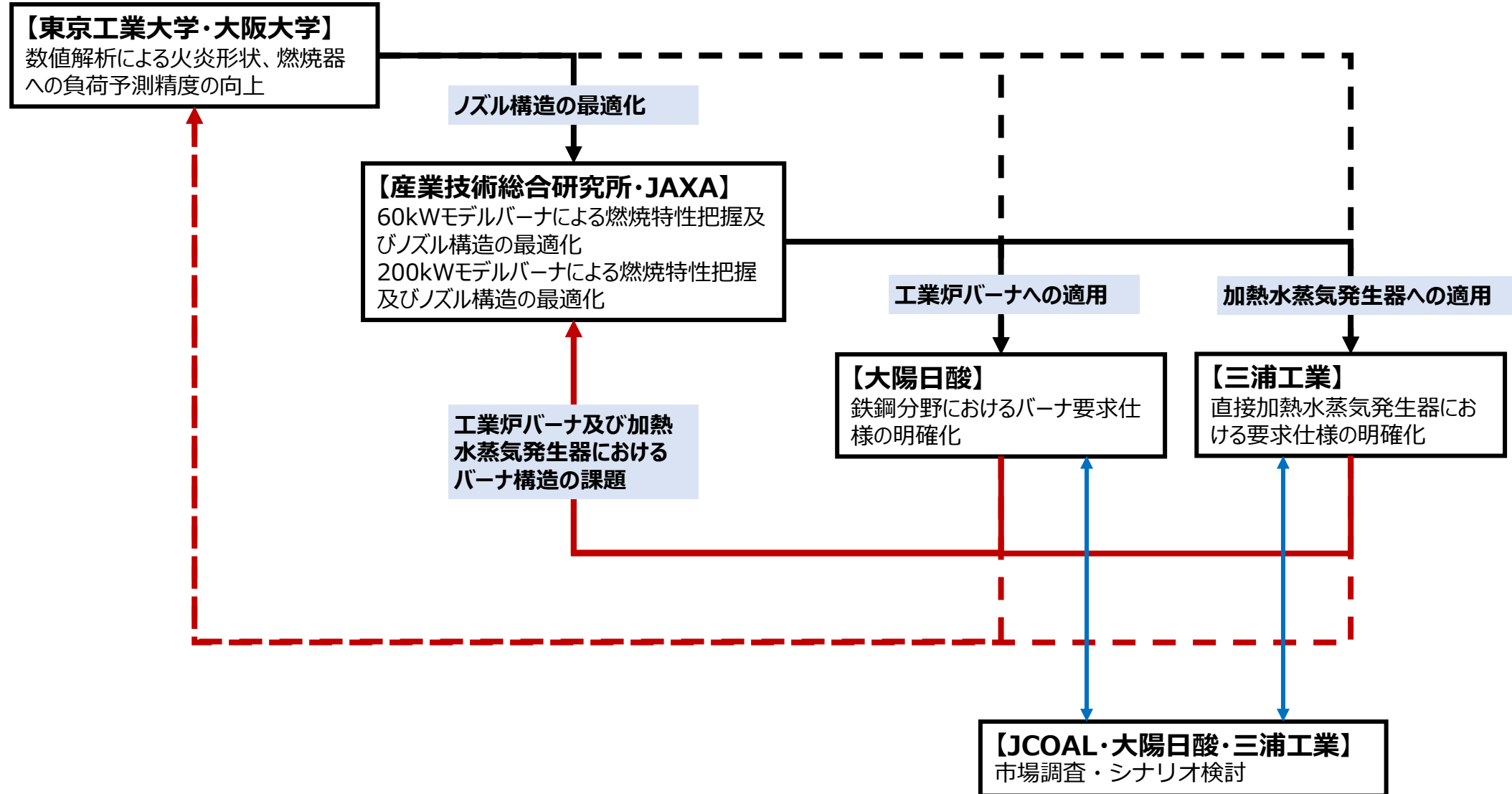
2. 調査の概要

基礎原理

- 水素燃焼によりCO₂排出ゼロ
- 酸素燃焼によりNO_x排出ゼロ、火炎温度上昇、加熱性能強化
- 酸素水素燃焼により直接加熱可能、熱効率向上
- 噴流衝突火炎のクラスタ化により安定燃焼範囲拡大、用途別火炎形状制御可能



2. 調査の概要(実施体制)



2. 調査の内容・成果（サプライチェーンを含めた市場調査、シナリオ検討）【JCOAL】

社会実装シナリオ検討

水素・酸素ポテンシャル

水素

- 海外水素の輸入

酸素

- 既設酸素製造設備の余剰利用
- 再エネ電力を利用した水電解装置の副生酸素の活用

水電解装置による水素、副生酸素供給能力見通し

単位：千m³

\FY	2020 (実績)	2021 (実績)	2022 (見込)	2025 (予測)	2030 (予測)	2035 (予測)	2040 (予測)
水素	2,500	2,600	3,200	8,800	53,000	810,000	3,710,000
副生酸素	1,250	1,300	1,600	4,400	26,500	405,000	1,855,000
装置稼働率	10%	10%	10%	10%	10%	15%	15%

※水素供給能力：設備規模 1M あたり 200N m³/h
副生酸素供給能力：水素供給能力[m³]×0.5

売り込み地

- コンビナート
- カーボンニュートラルポート

売り込み先設備

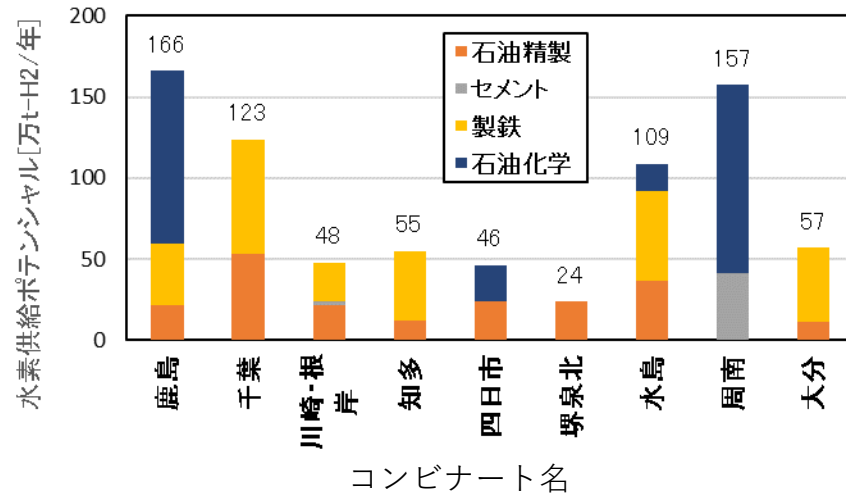
工業炉

- 製鉄産業加熱炉
- ガラス産業溶解炉
- セメント産業加熱炉

ボイラ

- 石油化学産業直接加熱ボイラ

水素供給ポテンシャル



合計785万ton-H₂/年、製鉄に大きなポテンシャル

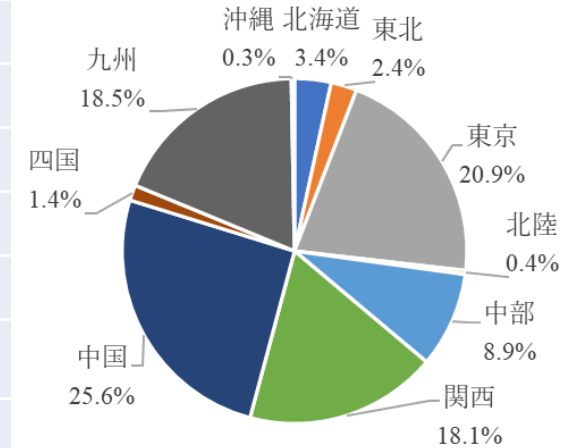
酸素供給ポテンシャル

酸素消費量

需要分野	消費量 千m ³
高炉	7,720,000
電炉（電気炉）	772,200
ガラス製造	250,000
医療	169,000
パルプ漂白	82,850
ステンレス	84,350
造船	76,500
非鉄金属	52,900
光ファイバー	8,000
合計	9,215,800

酸素供給設備能力Nm³/h

高炉	1,865,020
電炉	142,713
非鉄金属	136,100
ガラス製造	不明
パルプ漂白	31,557
工業ガスプラント	164,520
合計	2,339,910



酸素消費量92億m³に対して2.2倍の設備規模がある

2. 調査の内容・成果（工業炉の市場調査と課題抽出）【大陽日酸】

市場調査

JFEスチール、日本製鉄、神戸製鋼など大手製鉄メーカーは製鉄工程で熱エネルギーとして利用されている化石燃料の削減を積極的取組んでいる。将来的に製鉄所を中心とした水素供給網が構築され、下工程を含めた製鉄プロセス全体で水素-酸素燃焼導入の可能性がある。

要求仕様の抽出

用途別に異なる要求性能に適用可能なバーナ開発

<高炉>

- 羽口の微粉炭燃焼を水素燃焼に代替
 - 羽口内で燃焼を完結出来る性能

<電炉>

- 補助加熱用に用いられるバーナの燃料を水素で代替
 - 鉄スクラップを貫通・加熱の為に、カッティング性能の高いバーナが必要

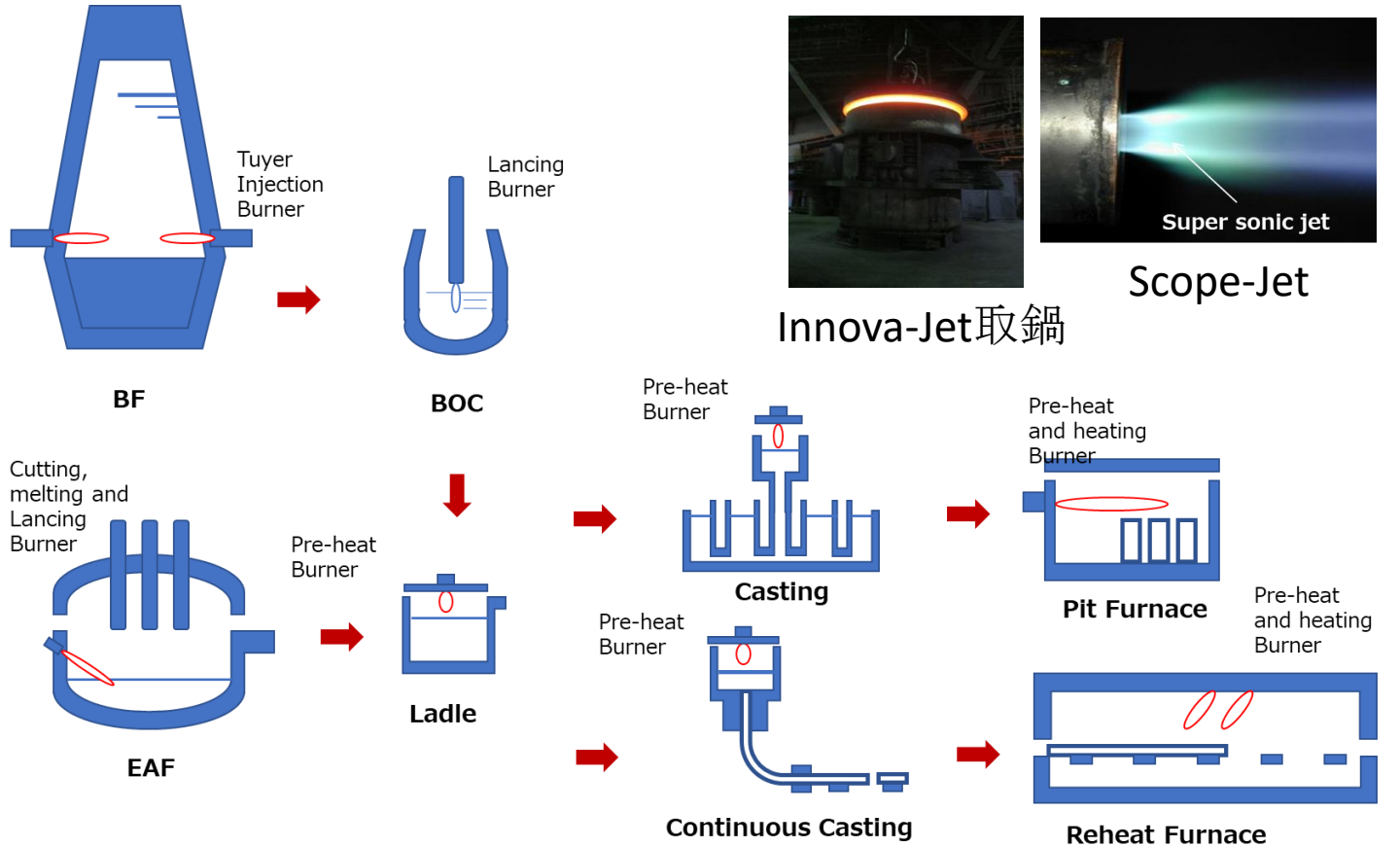
<加熱炉・取鍋等>

- 耐火物予熱・鋼材加熱用バーナの燃料を水素で代替
 - 耐火物・鋼材の品質を一定に保つため、炉内を均一に加熱できるバーナが必要

- ノズル過熱に対する冷却技術の確立

- 水素燃焼代替に伴う水蒸気分圧が製品に与える影響の評価

製鉄・製鋼プロセスにおける熱利用



対流伝熱型酸素バーナ

<特徴> 高速の燃焼火炎を形成し、被加熱物に対して酸素バーナ火炎からの対流伝熱で、直接加熱・伝熱する。

<対象製品> SCOPE-Jet

<対象用途> EAF、電気誘導炉等の補助加熱用途 等

輻射伝熱型酸素バーナ

<特徴> 酸素バーナ火炎からの輻射伝熱により、被加熱物に対して間接的に加熱・伝熱する。

<対象製品> Innova-Jet、Innova-Jet Swing

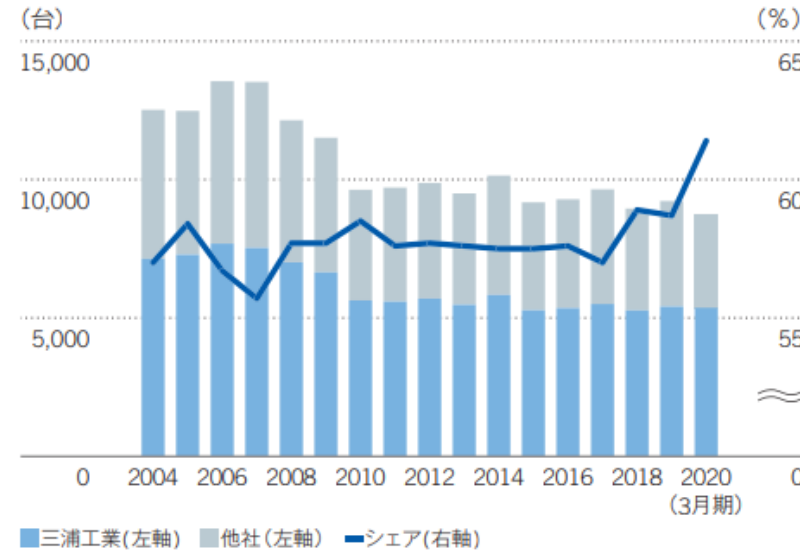
<対象用途> 取鍋予熱、鉄鋼加熱炉 等

2. 調査の内容・成果（直接加熱ボイラ（蒸気発生器）の市場調査と課題抽出）【三浦工業】

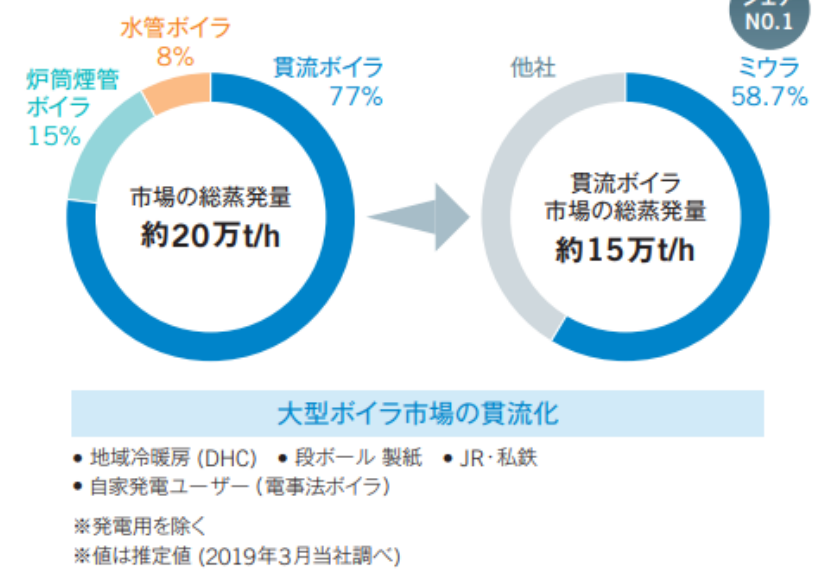
市場調査

ボイラの国内販売台数はおおよそ年間10,000台である。
 本蒸気発生器の市場は水素と酸素のユーティリティの普及にも関連するから、蒸気の質が同じでコストが同等の場合、蒸気発生装置の市場規模は同等規模になると考えられる。

ボイラ国内販売台数とシェアの推移



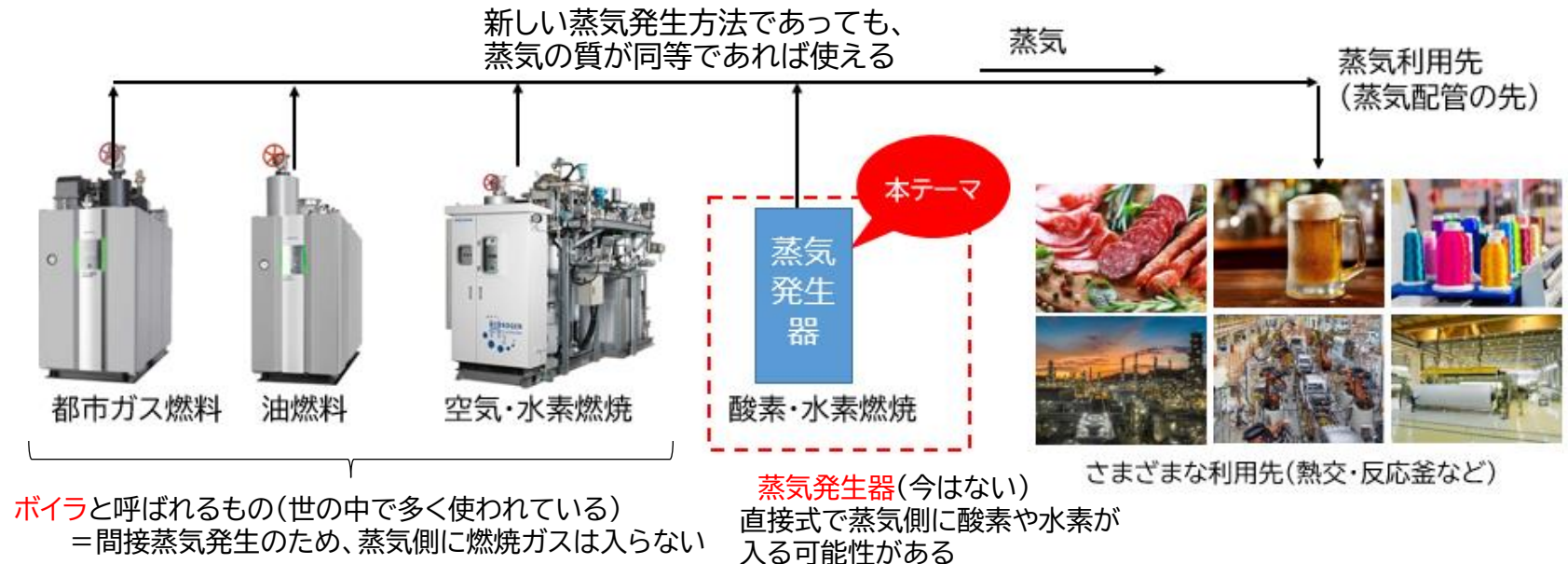
国内の業界シェア



一次検討仕様の抽出

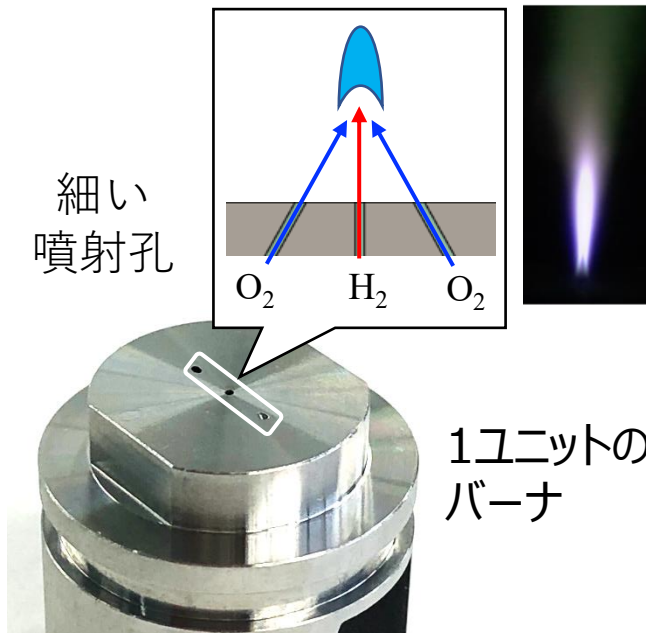
蒸気圧力 (法規制), 蒸気の質, ターンダウン, コンパクト

項目	仕様
圧力	0.98MPa以下
酸素濃度	21ppm
水素濃度	0ppm
ターンダウン	1:5以上



ボイラと呼ばれるもの(世の中で多く使われている)
 = 間接蒸気発生のため、蒸気側に燃焼ガスは入らない

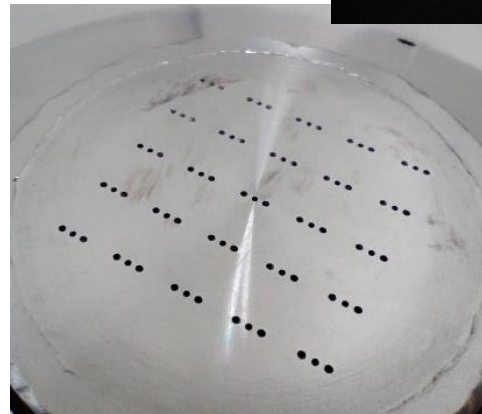
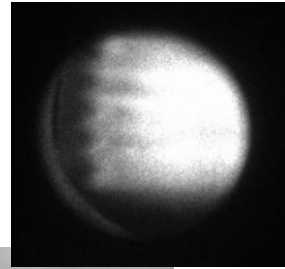
酸素水素燃焼用に試作したマルチクラスタバーナの特徴



1ユニットのバーナ

衝突噴流型により
逆火無し、失火しにくい

酸素水素
衝突噴流
火炎



マルチクラスタ化

25ユニットのバーナ

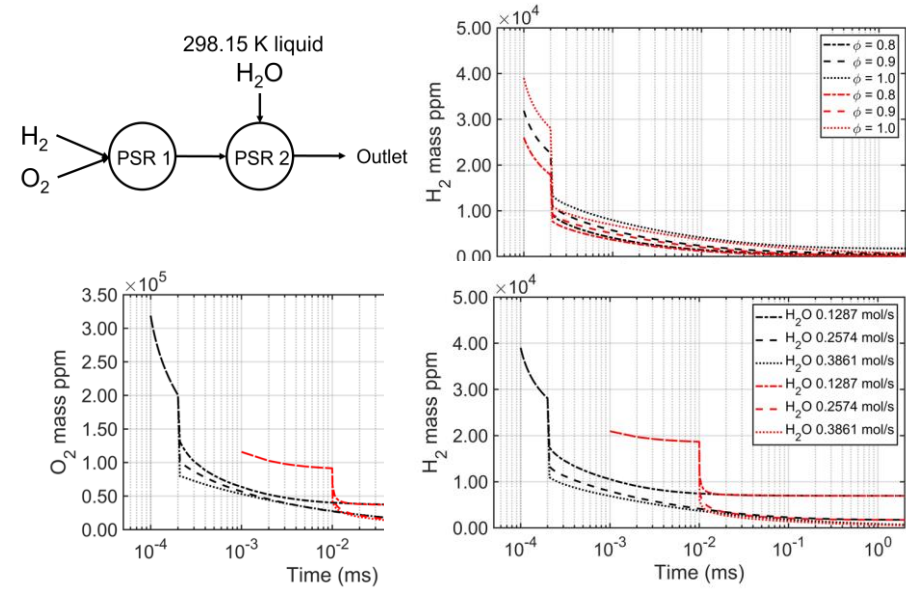
ユニットの行列化により
スケールアップできる



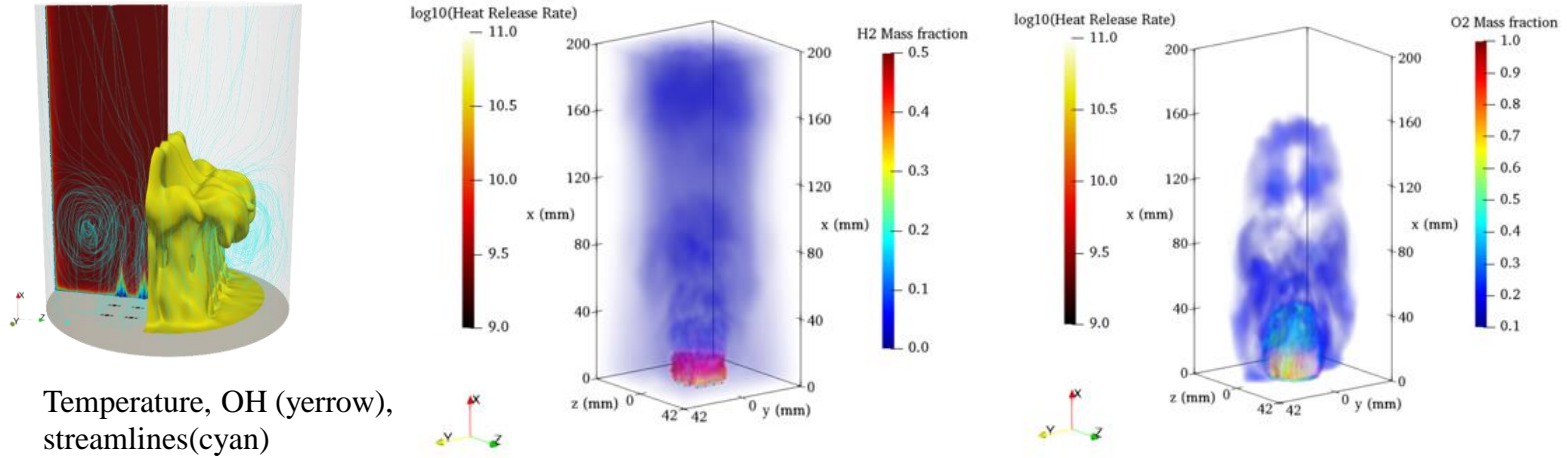
AMによる
3次元流路設計に対応
可、製造コスト減

2. 調査の内容・成果 (火炎特性と燃焼器内熱流動の数値解析) 【東京工業大学・大阪大学】

残存ガスのPSR解析

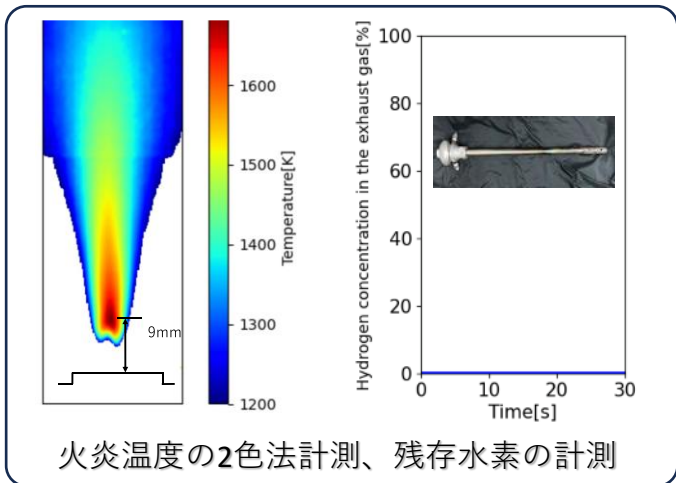
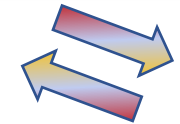


火炎特性の数値解析



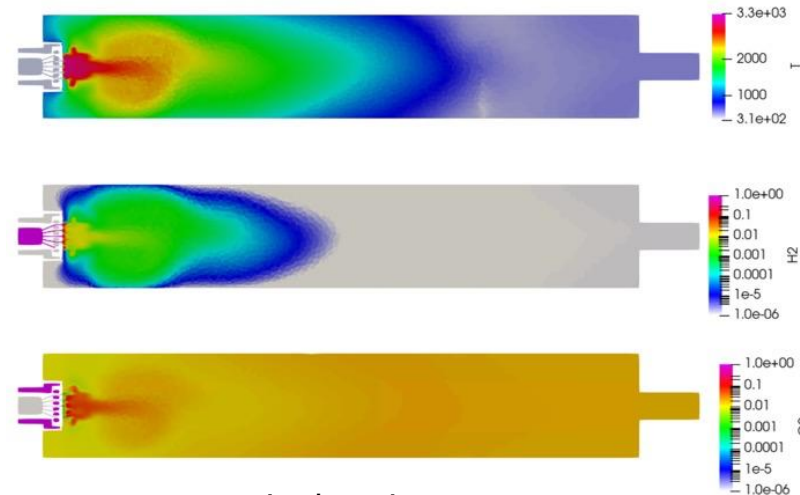
Temperature, OH (yellow), streamlines(cyan)

水噴霧を含む燃焼器内熱流動の数値解析



火炎温度の2色法計測、残存水素の計測

数値解析の検証データとして



水噴霧あり

バーナ設計の最適化

2. 調査の内容・成果 (工業炉用マルチクラスタバーナの試作試験) 【産業技術総合研究所・JAXA】

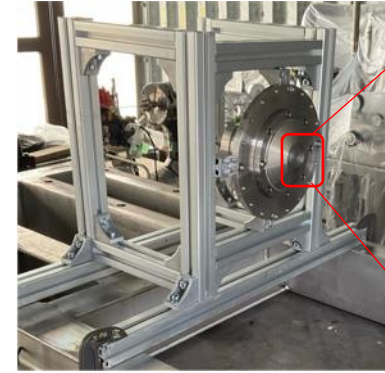
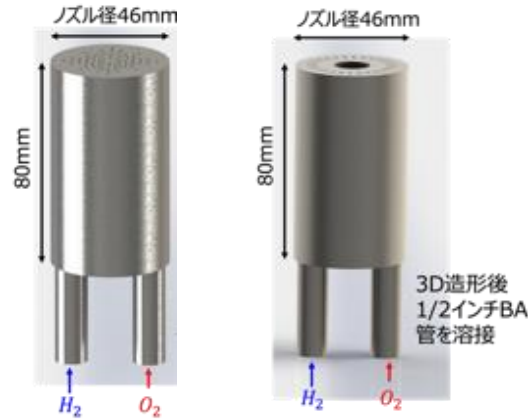
要求仕様

工業炉向けバーナ
(太陽日酸)

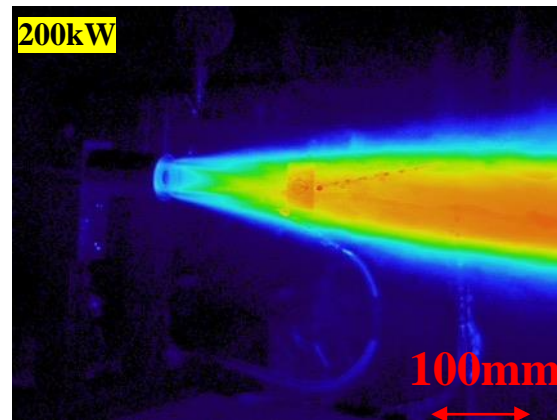
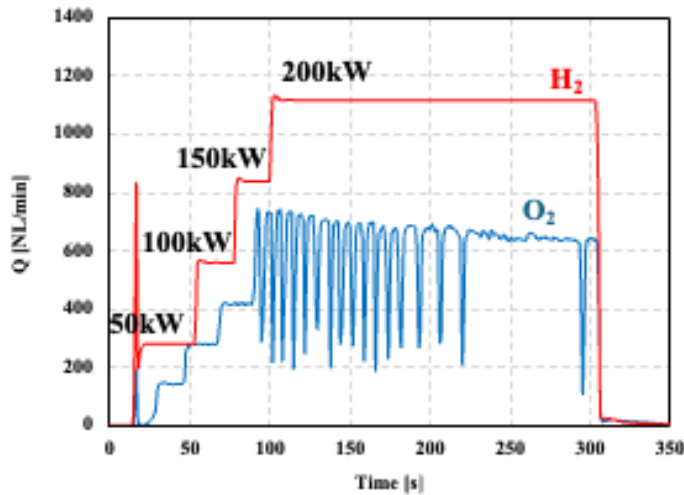


(出力200kW, ノズル径50mm程度)
大気圧で貫通力のある長火炎

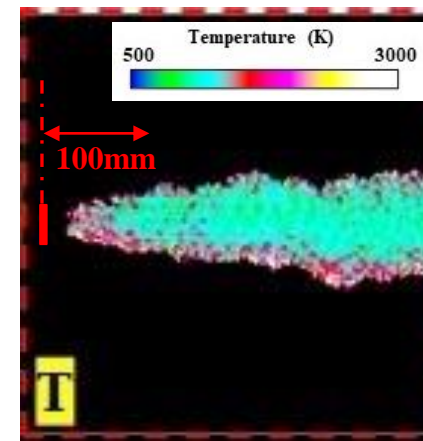
バーナ試作 (産総研)



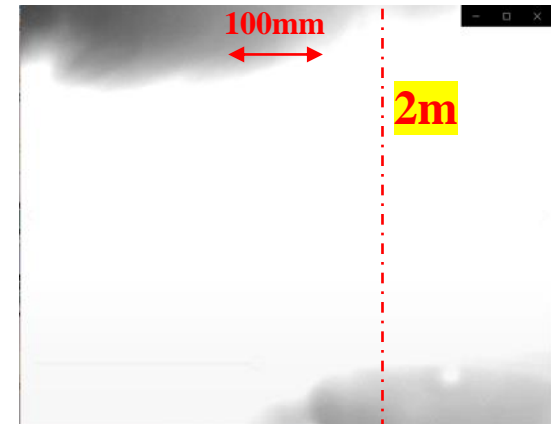
燃焼試験



赤外線カメラ撮影



2色法温度分布測定



高温水蒸気の可視化

✓ 燃焼量200kWで火炎の高温水蒸気到達距離~2mに成功

2. 調査の内容・成果 (直接加熱ボイラの試作試験) 【産業技術総合研究所・JAXA】

要求仕様

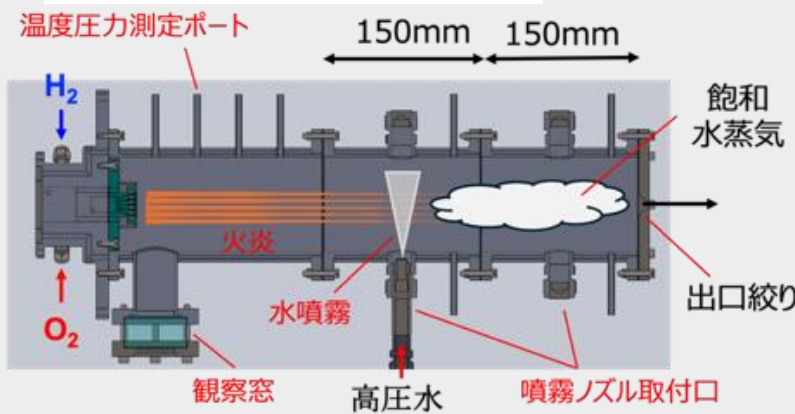
直接加熱ボイラ
(三浦工業)

(出力60kW, ノズル径50mm程度)

高圧で短火炎により
コンパクトな燃焼器

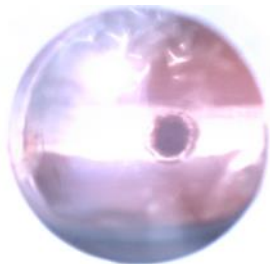


ボイラ試作 (産総研)

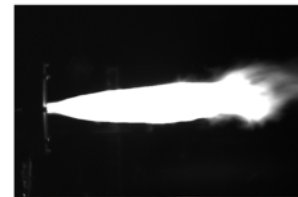
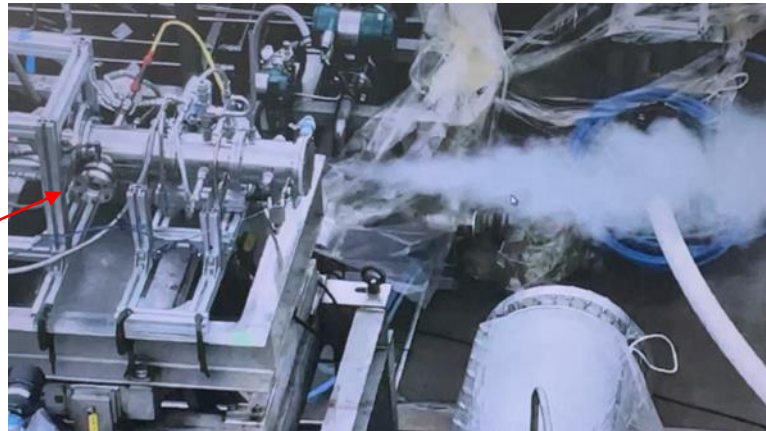


マルチクラスタバーナに水噴霧ランナーを組み合わせ
コンパクトなボイラ (φ110×500mm) を試作

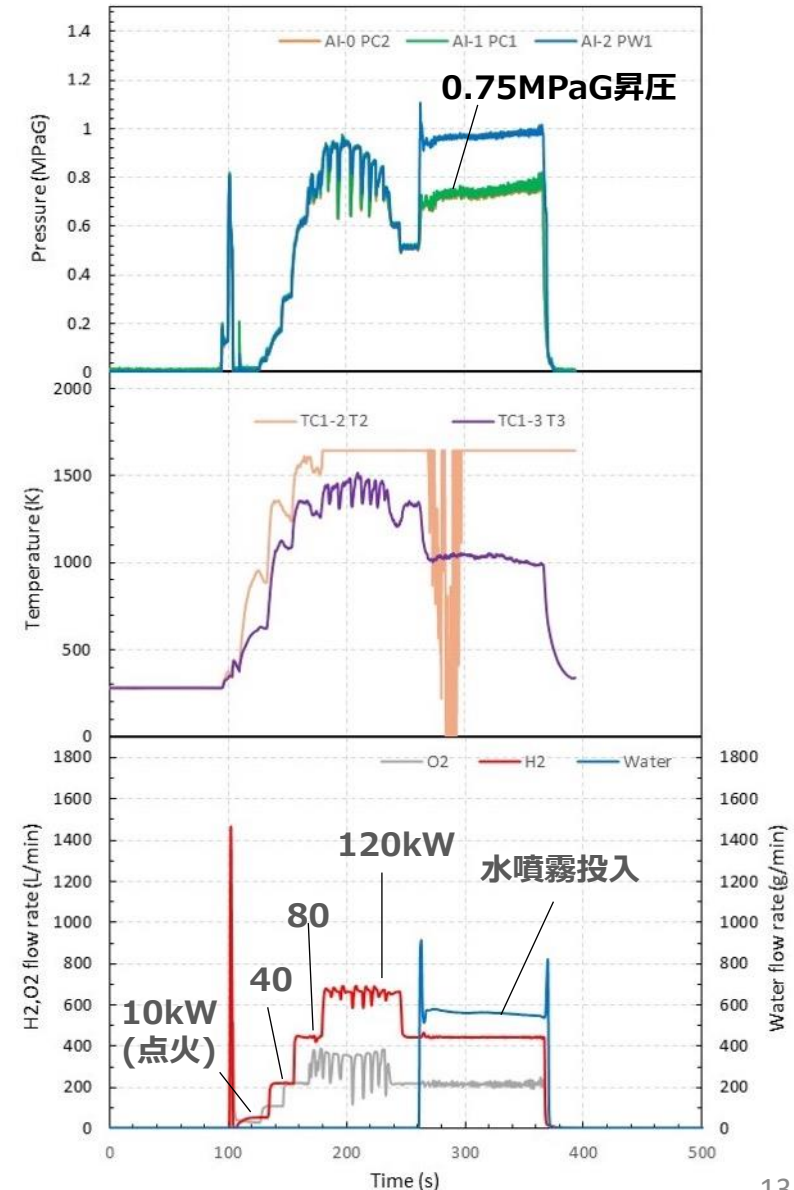
燃焼試験



窓越し撮影



水蒸気の可視化



✓ 燃焼量80kWで0.75MPaGの昇圧を達成し、水蒸気の生成を確認

3. 今後の見通しについて（酸素水素燃焼技術の社会実装）

◆ 酸素水素燃焼技術の社会実装の前倒しを狙い、2030年代で小規模でも社会実装可能な産業分野の熱需要に対応

- 直接加熱水蒸気発生器を小規模から実用化し、スケールアップ。
- 鉄鋼業界向けの工業炉バーナまで大型化、信頼性確立。

◆ カーボンフリー水素が大量に流通する2040年代で発電分野での社会実装を図る

- マルチクラスターバーナに設計の柔軟性があり、バーナを高圧化・スケールアップすることで、発電用途に対応。
- 経験を踏まえ、スケールアップした発電実証。

