

【公開版】

平成30年度
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業
戦略的基盤技術高度化支援事業

「水素混合燃料燃き小型高性能ボイラの開発」

研究開発成果等報告書

平成31年3月

担当局 近畿経済産業局
補助事業者 公益財団法人滋賀県産業支援プラザ

目 次

第 1 章 研究開発の概要	1
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-1-1 研究開発の背景	1
1-1-2 研究目的及び目標	2
1-1-3 当初の目的及び目標に対しての実施結果	6
1-2 研究体制	8
(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)	
1-3 成果概要	11
1-4 当該研究開発の連絡窓口	12
第 2 章 本論	13
1. 天然ガスと水素混合バーナ開発	13
【1-1】バーナの基本形態、機構の研究	13
【1-2】300kW 試験バーナの基礎研究	14
【1-3】1200kW (2t/h)用バーナの開発	15
2. 小型高性能化技術の開発	17
【2-1】300kW 試験ボイラ本体の基礎研究	17
【2-2】1200kW (蒸発量 2t/h) 用ボイラ本体の開発	18
3. 潜熱回収技術の開発	20
【3-1】潜熱回収技術確立の研究	20
【3-2】1200kW (2t/h)用排熱回収器の開発	20
4. 最適制御技術の開発	21
【4-1】300kW 試験ボイラでの制御基礎研究	21
【4-2】1200kW (2t/h)ボイラ制御の確立	21
最終章 全体統括	23
3-1 研究開発成果	23
3-2 研究開発後の課題・事業化展開	26

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1-1-1 研究開発の背景

(1) これまでの取り組み

ボイラ業界においては、以前より省エネルギー、低環境負荷対応、小型、省スペース化がすすめられており、株式会社ヒラカワもボイラのスペシャリストカンパニーとして、エネルギー効率の向上と、環境負荷低減に寄与する商品の提供を心掛けてきた。

古くは、硫黄酸化物、窒素酸化物排出量低減のため、国産初の重油だき炉筒煙管ボイラ、さらに高性能ガス焚き低 NO_x ボイラ等を開発し、ボイラ業界をけん引してきた。

近年においては、小型、省スペース化達成のため、ボイラ内部の燃焼空間容積を限りなくゼロに近づけることが出来る、株式会社ヒラカワ独自の燃焼技術、「管巢（JAFI）燃焼方式」を開発、小型ボイラを中心にこの燃焼方式を採用し、ボイラ効率 98%を超える省エネルギー製品を提供している。

その提供先は、大、中規模事業所、工場、地域冷暖房設備等と多岐にわたり、現在、それら顧客においては、地球温暖化問題の深刻化に伴う、CO₂ 排出量低減対応がすすめられている。

各顧客においては、CO₂ 排出量低減、低環境負荷対応は企業イメージ向上の必須条件であり、設備機器の高効率化はもとより、CO₂ 排出量取引等、様々な取り組みがなされている。

その中でも熱源機器としてのボイラへの高効率化、低環境負荷対応の要望が強い。

さらに、近年、小型ボイラの需要が急増しており、大、中型ボイラの顧客においても、小型ボイラを複数台設置して使用する方法が取られ、毎年の小型ボイラの出荷台数は10000 基を超えている。

このような状況下において、CO₂ 排出量低減、低環境負荷、省スペース対応促進のため、これまで供給面、価格面等で小型ボイラでの燃焼が困難であった水素を燃料とする、小型高性能ボイラを開発するに至った。

なお、今回の共同研究者である学校法人関西大学は、株式会社ヒラカワとの共同研究のもと、これまでに、管巢（JAFI）燃焼方式の基礎研究ならびに技術開発のサポート、石油代替燃料として DME（ジメチルエーテル）を燃料とする小型ボイラの共同研究開発等

を行ってきた実績を有する。

同じく、今回の共同研究者である、滋賀県工業技術総合センター、滋賀県東北部工業技術センターは、長年にわたり株式会社ヒラカワ製品の耐久性評価、信頼性向上のための、材料分析、試験等の実施協力を得てきた実績を有する。

(2) 当該分野における研究開発動向

水素燃焼技術については、内閣府の戦略イノベーション創造プログラムにおいても開発がすすめられているが、その対象は発電、輸送船への大型水素エンジンやガスタービンである。

また、ボイラ業界においても、水素燃焼ボイラは存在するものの、大型ボイラが主であり、また水素のみの専焼である。

(3) 今回の技術の新規性

本研究開発は、天然ガスと水素混合バーナを汎用性、普及率が高く、免許不要で取扱性にも優れた小型蒸気ボイラに搭載するものであり、そこに管巢（JAFI）燃焼方式を組み込む全く新しいボイラである。

加えて、従来に無い潜熱回収能力を備えた排熱交換器との組み合わせと、最適制御運転により、「CO₂削減」、「水素社会への適応」、「小型化」、「高性能化」を達成し、川下ニーズに応えるものである。

1-1-2 研究目的および目標

川下企業からは、低 CO₂ 排出量、高効率、省エネルギー、小型省スペース設置の蒸気ボイラが要求されている。

さらなる低 CO₂ 化を達成するため、また、水素社会推進のため、ボイラ業界においては水素ガスの適用は喫緊の課題であり、顧客からの要望も強い。

そこで、株式会社ヒラカワの独自の技術である管巢（JAFI）燃焼方式をさらに進化させ、「天然ガスと水素」を混合した燃料を使用する小型高性能ボイラを開発し、既存ボイラと比較して CO₂ 排出量 26%ダウン、及びボイラ業界トップクラスとなるボイラ効率 104%を達成する。

この目標を達成するため、本研究開発では、以下の4つの技術開発を実施した。

【1】天然ガスと水素混合バーナ開発

天然ガスと水素を適正に混合する技術、及びその燃料による燃焼が、燃焼室を無くすことが可能で、排出 NO_x 値も大幅に低減できる株式会社ヒラカワ独自の技術、管巢（JAFI）燃焼方式に適用できる新規バーナを研究開発する。

具体的には、水素の天然ガスへの混合比率を50%とし、天然ガス使用量減に伴うCO₂ 排出量削減率 20%を達成のため、天然ガスと水素の混合器、最適な燃焼が可能なバーナを開発する。

最適な燃焼とは、振動、発音等が無く安定燃焼が維持できる燃焼量の変化幅、および空燃比の上下限幅、すなわち燃焼範囲が十分に確保できること。

＜技術的目標値＞

水素の天然ガスへの混合比率：50%（CO₂ 排出量削減率 20%）

安定燃焼確保空燃比の上下限幅：O₂の値で3%以上

最大最低燃焼量差：10対1の比率（ターンダウン比）

燃焼後の排出 NO_x：30ppm 以下（O₂=0%換算）

【2】小型高性能化技術の開発

燃焼室を無くすことが可能で、排出 NO_x 値も大幅に低減できる株式会社ヒラカワ独自の技術、管巢（JAFI）燃焼方式の技術を活用し、高負荷燃焼、伝熱に耐えるボイラ本体を研究開発する。

ボイラの設置面積を既存、同容量ボイラの30%以上減を達成するため、要求される製品寸法の、規格「小型ボイラ」で取扱性が良い、1200kW（蒸発量 2t/h）の蒸気ボイラを開発する。

＜技術的目標値＞

製品据付面積：従来製品の30%以上低減

伝熱面積：10m²以下

【3】潜熱回収技術の開発

排ガスの潜熱回収能力が大きく、かつ小型化を達成した高性能排熱回収器を研究開発する。

【公開版】

ボイラ効率を、既存高性能ボイラ製品の98%から、ボイラ業界ではトップクラスとなる104%（ボイラの効率表示は低位発熱量基準による）に高め、燃料消費量を6%削減、すなわちCO₂排出量削減率6%を達成するため、水素混焼時の凝縮水量増加に対応した、小型、省スペースの排熱回収器を開発する。

<技術的目標値>

ボイラ効率：104%（CO₂排出量削減率6%）

ボイラの効率表示は低位発熱量基準による

外形寸法形状：現存排熱回収器相当

【4】最適制御技術の開発

適正運転状態維持のため、各種センサーで燃焼、伝熱状況を監視し、最高効率、最低環境負荷で運転する最適化制御技術を開発する。

全ての開発技術を適用した製品について、超低環境負荷、省エネルギー運転が可能な制御技術を開発する。

結果として、CO₂排出量削減率26%（天然ガスと水素混合バーナで20%、高性能排熱回収器で6%）、ボイラ効率104%での安定、継続的な運用を可能とする。

図1に、開発製品の模式図を示す。

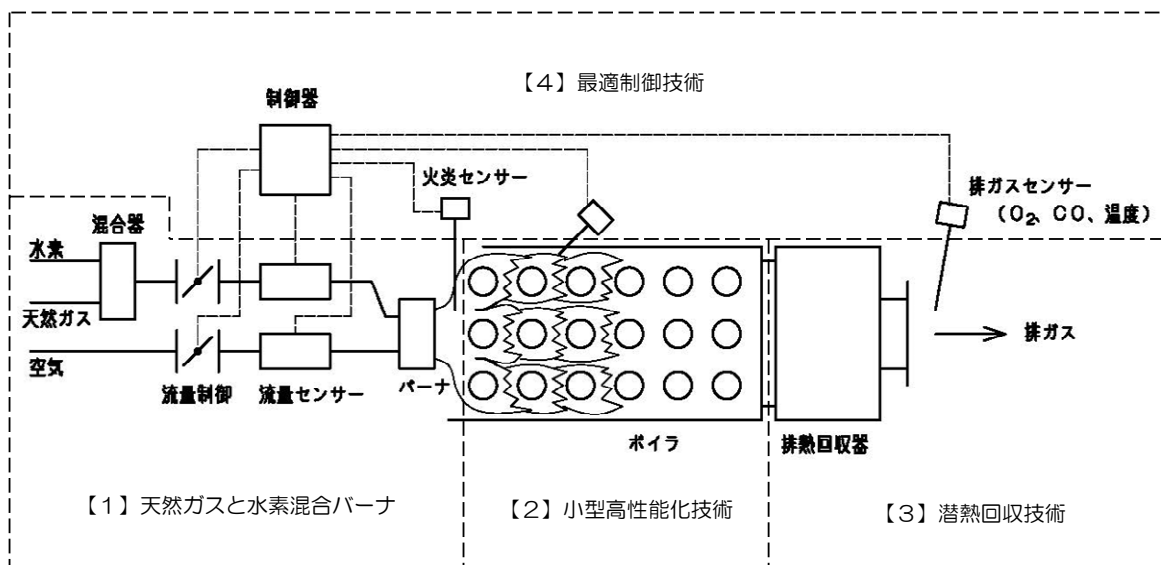


図1. 水素混合燃料燃焼小型高性能ボイラの模式図

また、これら目標値を達成した、最終開発製品仕様を以下に示す。

最高使用圧力: 0.98MPa

適用規格: 「小型ボイラー」

取扱者資格: 特別講習受講者 (ボイラー技士免許不要)

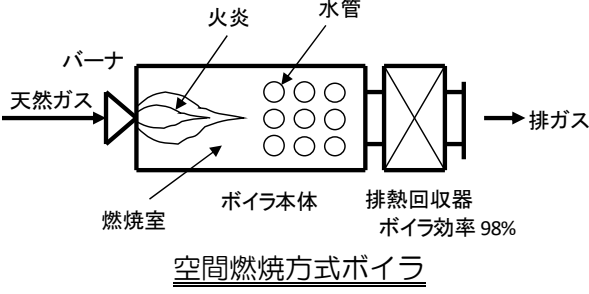
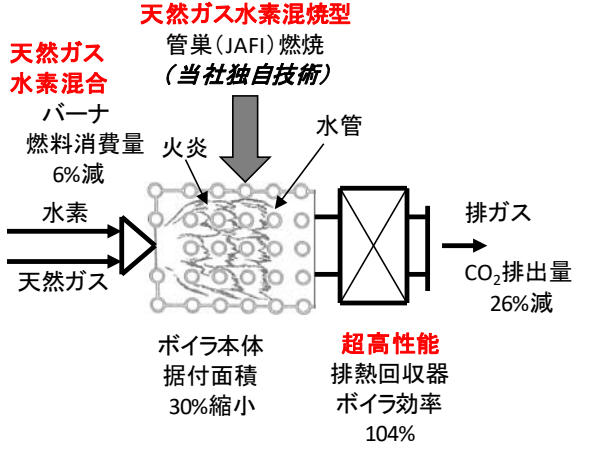
ボイラー種別: 「貫流ボイラー」

換算蒸発量: 2t/h



図2. 最終開発製品イメージ

以下に、従来技術と、今回研究開発する新技術の対比表を示す。

従来技術	新技術
<p>1. 天然ガス専焼バーナ 省エネルギー、低環境負荷対応が困難 水素専焼バーナ 小型ボイラへの適用が困難</p> <p>2. 燃焼空間（燃焼室）を有するボイラ 大型、設置面積大</p> <p>3. 従来型排熱回収装置 顕熱回収のみ</p> <p>4. 従来型方式燃焼制御 O₂ 検知による空燃比制御のみ</p>  <p style="text-align: center;"><u>空間燃焼方式ボイラ</u></p>	<p>1. 天然ガス水素混合燃焼バーナ 省エネルギー、超低環境負荷に対応 [水素専焼でなく混合燃料焚きとする理由] ・水素燃料供給量変動の影響回避 ・天然ガス用、汎用低価格制御機器の使用</p> <p>2. 燃焼空間（燃焼室）を持たない JAFI ボイラ 小型、省スペースを実現 株式会社ヒラカワ独自の管巢（JAFI）燃焼方式（⑦専門用語等の解説参照）を水素混合燃焼に適用</p> <p>3. 超高性能排熱回収器 顕熱＋潜熱回収技術 水素燃焼による発生水蒸気量増加を活用</p> <p>4. 最適燃焼制御 新規各種センサーによる運転制御</p>  <p style="text-align: center;"><u>水素混合燃料焚き小型高性能ボイラ</u></p>
<p>◆課題</p> <ul style="list-style-type: none"> ・CO₂ 排出量削減、低環境負荷、未対応 ・ボイラ効率 98%（燃料低位発熱量基準） 省エネルギー化必要 ・小型省スペース化必要 	<p>◆特徴</p> <ul style="list-style-type: none"> ・CO₂ 排出量 26%削減 ・ボイラ効率 104%（燃料低位発熱量基準） （燃料真発熱量基準→94%程度） ・燃料消費量を 6%削減。 ・設置面積 30%縮小。

1-1-3 当初の目的及び目標に対しての実施結果

本研究開発では、基礎研究から商品化まで、下記の三段階の形態で検証を進めた。

第1段階：入熱 10kW 試験装置（バーナの基本形態、機構の研究）

第2段階：入熱 300kW 試験装置（バーナ、ボイラ本体の基礎研究等）

第3段階：入熱 1200kW（2t/h）試験装置（最終製品設計、性能確認等）

【公開版】

まず、入熱 10kW 試験装置においては、使用するバーナの基本形態、機構をバーナ単体で確定した。

次に、入熱 300kW 試験装置においては、バーナ、本体、排熱回収器を組み合わせ、ボイラ製品と同構成の機器で総合的な性能評価を行った。

入熱 300kW は蒸発量 500kg/h に相当し、最終製品の 4 分の 1 の容量であるが、最終製品に至るまでに、ボイラ本体部での水管配列変更、排熱回収器の形状変更試験等、大掛かりな構造変更が予測され、小規模試験装置で実製品相当容量の前に検証を実施した。

入熱 1200kW 試験装置は、最終製品である蒸発量 2t/h に相当し、最終製品設計、製作に適用すべく、各種試験、性能確認を行った。

バーナ、小型高性能化、潜熱回収技術、制御技術のそれぞれの開発課題に対し、図3の研究開発の全体像に示す手順により各開発（研究項目）の目標を達成した。

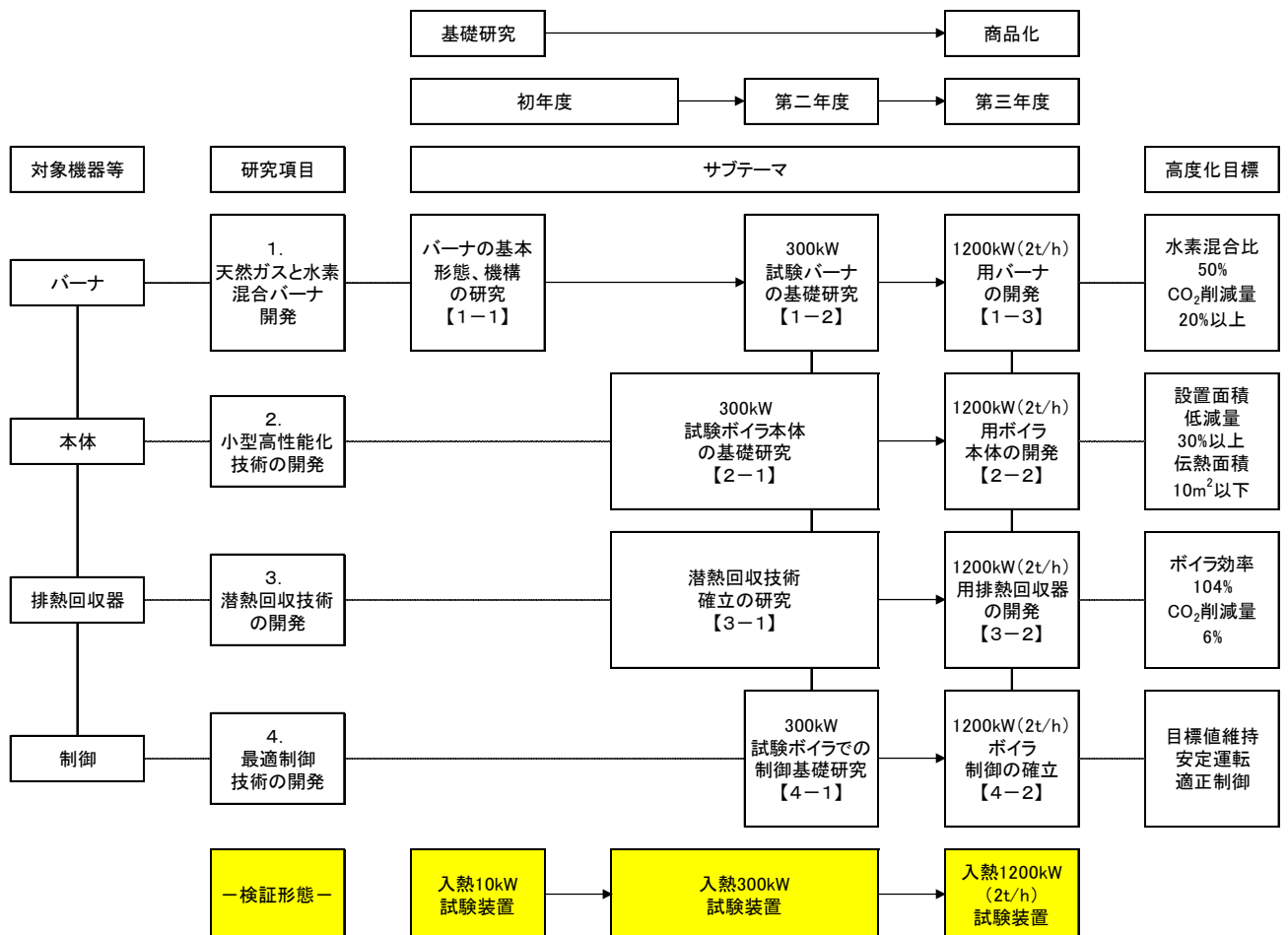
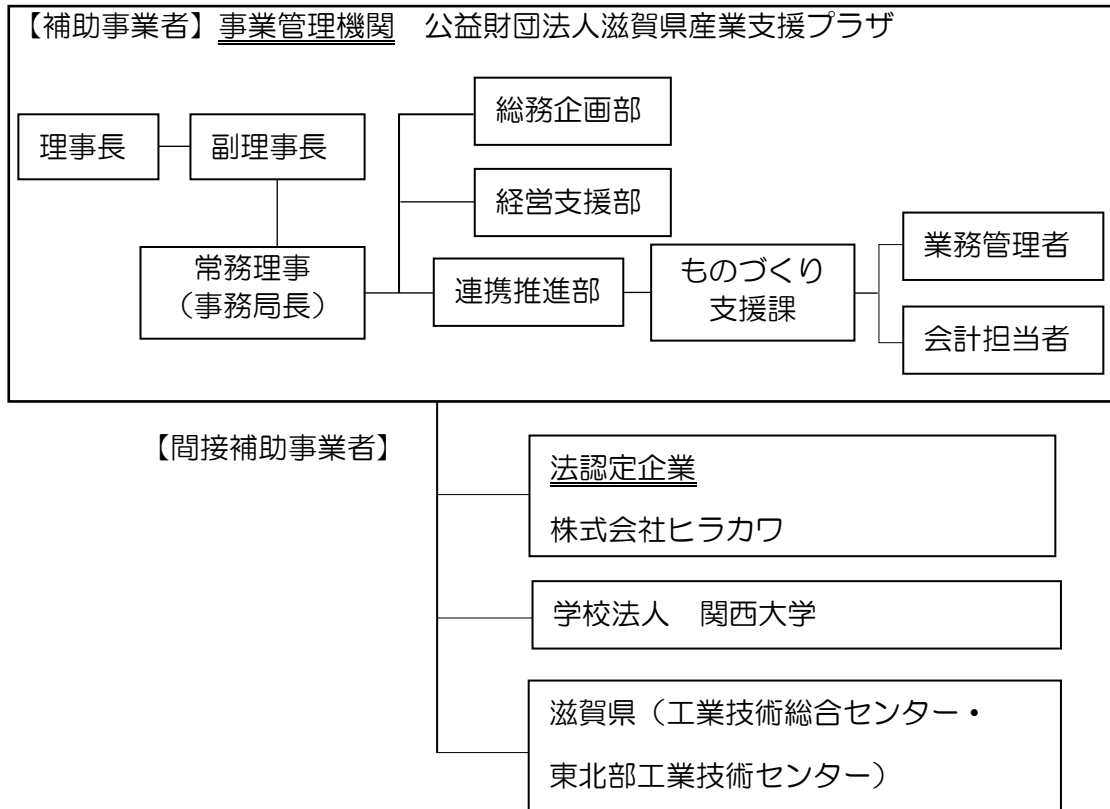


図3. 本研究開発の全体像

1-2 研究体制

(研究目標・管理体制、研究者氏名、協力者)

1-2-1 研究組織・管理体制



総括研究代表者 (PL)
氏名：上梨 厚見
所属組織：株式会社ヒラカワ
所属役職：開発室 開発室長

副総括研究代表者 (SL)
氏名：松本 亮介
所属組織：学校法人 関西大学
所属役職：システム理工学部 教授

1-2-2 研究者・協力者

① 研究者氏名

【間接補助事業者】株式会社ヒラカワ

氏名	所属部署・役職	実施内容（担当テーマ）
上梨 厚見	開発室 開発室長	【1】 【2】 【3】 【4】
島倉 聖	開発室 開発グループ長	【1】 【2】 【3】 【4】
鈴木 卓哉	開発室 開発グループ 主任	【1】 【2】 【3】 【4】
加藤 宏	開発室 開発グループ マイコン担当 専任技師	【4】
吉井 一夫	製造グループ 専任課長	【1】 【2】 【3】
上西 宏和	製造グループ 係員	【1】 【2】 【3】

【間接補助事業者】学校法人 関西大学

氏名	所属部署・役職	実施内容（担当テーマ）
松本 亮介	システム理工学部 教授	【1】 【2】
小田 豊	システム理工学部 准教授	【1】 【2】
小澤 守	社会安全学部 教授	【1】 【2】

【間接補助事業者】滋賀県（工業技術総合センター・東北部工業技術センター）

氏名	所属部署・役職	実施内容（担当テーマ）
所 敏夫	工業技術総合センター 参事 兼 無機材料係長	【1】 【2】 【3】
安田 吉伸	東北部工業技術センター 金属材料係 主査	【1】 【2】 【3】
佐々木 宗生	工業技術総合センター 無機材料係 専門員	【1】 【2】 【3】

【公開版】

② 事業管理機関

【間接補助事業者】公益財団法人滋賀県産業支援プラザ

氏名	所属部署・役職	実施内容
田中 勝晴	連携推進部 部長	プロジェクトの進捗把握・管理、指導業務
篠原 弘美	連携推進部 副部長	プロジェクトの進捗把握・管理、指導業務
福井 浩成	連携推進部 ものづくり支援課 課長	プロジェクトの進捗把握・管理、指導業務
山本 博之	連携推進部 ものづくり支援課 参与	プロジェクトの進捗把握・管理、指導業務
西村 泰典	連携推進部 ものづくり支援課 サポイン事業推進 コーディネートスタッフ	プロジェクトの進捗把握・管理、指導業務、間接補助事業先との連絡調整業務

③ 協力者

氏名	所属部署・役職	実施内容
石田 富雄		自動車メーカー、ダイハツ工業株式会社での職務経歴を生かし、【4.最適制御技術の開発】で必要となるセンサー技術に関するアドバイス

1-3 成果概要

今回、小型ボイラにおいて燃焼が困難であった水素を燃料とすることで、既存ボイラよりも省エネルギーで CO₂ 排出量が少なく、環境負荷低減につながる小型高性能ボイラを開発し、既存ボイラと比較して、CO₂ 排出量を、水素使用による天然ガス使用量減に伴い 20%削減、ボイラ効率上昇による燃料消費量減に伴い 6%削減、合計 26%低減、及びボイラ業界トップクラスとなるボイラ効率 104%を達成した。

また、最終段階の入熱 1200kW（蒸発量 2t/h 相当）試験装置では、以下の開発目標を達成した。

- 水素の天然ガスへの混合比率：50%（最大）
水素使用による天然ガス使用量減に伴う CO₂ 排出量削減率 20%
- 安定燃焼確保空燃比の上下限幅：O₂ の値で 3%以上
- 最大最低燃焼量差：10 対 1 の比率（ターンダウン比）
- 燃焼後の排出 NO_x：30ppm 以下（O₂=0%換算）
- 製品据付面積：従来製品の 30%以上低減
- 伝熱面積：10m²以下（小型ボイラー適用）
- ボイラ効率：104%（ボイラの効率表示は低位発熱量基準による）
ボイラ効率 98%の既存高性能ボイラ製品の燃料消費量を 6%削減
よって、CO₂ 排出量削減率 6%
- 総合 CO₂ 排出量削減率：26%
水素の天然ガスへの混合で 20%、ボイラ効率上昇で 6%、合計 26%
- 上記性能を維持しながら、安定、継続的な運用を可能とする制御の確立

1-4 当該研究開発の連絡窓口

【事業管理機関】

公益財団法人滋賀県産業支援プラザ

連携推進部 ものづくり支援課 参与 山本 博之

〒 520-0806 滋賀県大津市打出浜2番1号 コラボしが21 2階

電話 077-511-1414 FAX 077-511-1418

E-mail : h-yamamoto@shigaplaza.or.jp

【法認定管理機関】

株式会社ヒラカワ

開発室 開発室長 上梨 厚見

〒 520-2323 滋賀県野洲市三上 2308 番地

電話 077-588-2455 FAX 077-588-2531

E-mail : a_kaminasi@hirakawa.co.jp

第2章 本論

1. 天然ガスと水素混合バーナ開発

【1-1】バーナの基本形態、機構の研究

入熱 10kW 試験装置において、バーナ上流側での天然ガスと水素の混合器を設計するための技術を開発した。

実際にはバーナ単体での燃焼試験を実施して、燃料混合器、最適バーナ等の最適形態、機構を決定した。

天然ガスと水素の密度は大きく異なり、均一に混合することが難しく、燃焼性にも大きく影響するため、数種の混合方法を検証し、最適なものを求めた。

バーナ本体については、水素が天然ガス等の一般燃料ガスと大きく異なった燃焼性を持っているため、安定燃焼させるための燃焼器構造、火炎監視も含めた燃焼制御等の技術開発を行い、その基本的な燃焼形態を研究し、最適な燃焼が可能なバーナを開発した。

具体的には、火炎形成部である多孔噴出口、ガスノズル、空気穴等の寸法形状について、開口比、噴出流速、穴、ノズル形状等を変更因子とした部品を複数準備し、燃焼試験を繰り返した。

バーナ開発の課題である、低 NO_x 燃焼と水素の安定燃焼、管巢（JAF I）燃焼を水素に活用した低 NO_x 燃焼技術の2点の克服を目指して研究開発を行った結果、低 NO_x のための排気ガス再循環量、安定燃焼のための水素投入場所とその量に関する知見、ボイラの水管群による NO_x 抑制効果を確認することができ、バーナの基本形態、機構を確立し、次の研究開発ステップである、入熱 300kW 試験装置のバーナ設計のための基礎データとなった。

開発されたバーナは、火炎の定着性が良く、火炎形状とボイラ本体構造が適合しており、安定燃焼が確保できる空燃比の上下限が広く、火炎監視が確実に出来き、最大と最低燃焼量の差が大きく、燃焼後の排出 NO_x 値が低いものである。

開発試験では、燃焼ガスの酸素濃度場と温度を精密に制御することができるバーナである「管状火炎バーナ」を用いて、水素混合燃焼の NO_x 排出特性の調査、水素の安定燃焼制御の可能性についての検討を行った。

その結果、天然ガスの燃焼場に水素を噴出させることで、安定燃焼を実現した。

また、「管巢（JAF I）燃焼」は、水管群中にて燃焼ガスを適切に冷却することによ

【公開版】

り NO_x 生成を抑制するものであるが、天然ガスと水素混合の燃焼では、水素の高い燃焼性を利用することにより、水管群中においても燃焼反応を維持することが可能であり、さらなる NO_x 抑制力があることが確認された。

さらに、水素混入燃焼によるバーナ部品の高温腐食等の材料的影響を分析し、その防御技術も確立した。

水素混合に用いたバーナ材質の耐熱性評価のため、燃焼試験後のバーナ表面の酸化度合、酸化膜の膜厚および生成物分析を実施、さらに、バーナ材質の劣化評価のため、金属組織分析を実施し、電気化学的再活性化率測定による評価を行った。

その結果、表面状態および劣化状況について評価が可能であり、表面状態の評価としては酸化被膜の膜厚測定および表面生成物の同定、また材料の劣化状況の評価としてしゅう酸エッチングによる組織観察、電気化学的再活性化率測定は有効な手段であることがわかった。そして、これらの分析、評価方法が、今後の研究開発試験にも有効に適用できることを確認した。

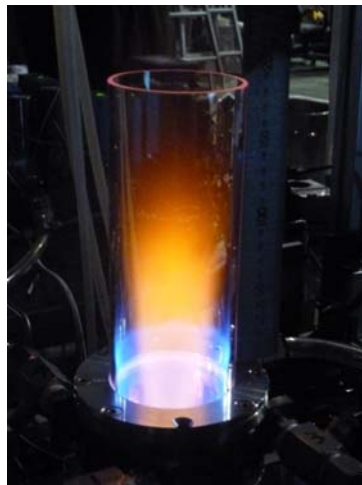


図4. 入熱 10kW 試験バーナ

【1-2】300kW 試験バーナの基礎研究

入熱 10 kW 試験装置で決定されたバーナ形態、機構を基準に、入熱 300kW のバーナを設計し、まずは、バーナ単体での燃焼試験を行い、その燃焼特性を把握した。

大気開放状態でバーナを燃焼させ、天然ガス、水素それぞれの燃焼状態、火炎分布等を確認、バーナの基本形態を策定した。

10 kW バーナでの試験結果との比較によるスケールアップ概念が適正であったことも確認できた。

【公開版】

引き続き、別途設計、製作した 300kW 試験ボイラ本体にバーナを装備し、燃焼試験を継続した。

バーナについては、基本構造は決められているものの、管巢（JAFI）燃焼方式を採用したボイラ本体との燃焼適合が難しく、数度の試作、試験を繰り返した。

具体的には、バーナの開口比、噴出流速、穴、ノズル形状等を変更因子とし、燃焼試験を繰り返した。

ボイラ水管群中での管巢（JAFI）燃焼により NO_x 排出低減を目指す水素燃焼技術の確立のため、ボイラ水管群とバーナとのマッチングを重要視して、水素の混合および燃焼反応領域を評価する燃焼試験を重点的に行った。

具体的には、燃焼ガスの温度分布とガス濃度分布を詳細に計測し、NO_x 低減の方策、安定燃焼酸素幅およびターンダウン拡大のための課題を明確にした。

その結果、天然ガスと水素は単独に噴出するのが適切と判明、バーナと本体、排熱回収器、及び制御も含めての適合性試験を実施、目標値を達成するバーナを開発した。

そして実製品の蒸発量 2t/h ボイラに適用すべく、1200kW バーナを設計するに当たり、天然ガス、水素の噴出速度、形態等の基準を見定めるための情報を得た。

バーナについては、既存製品の材質を評価するため、比較的熱影響を受けやすい部材について、表面状態および劣化状況について評価方法の検討を行った。

その結果、策定された評価方法が有効であることを確認した。

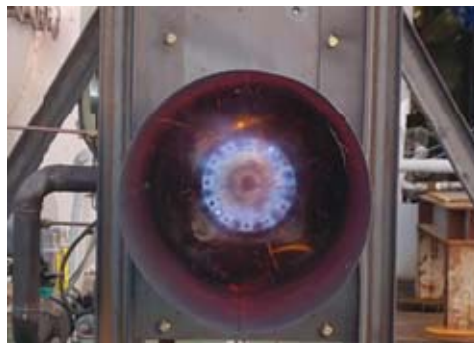


図5. 入熱 300kW 試験バーナ

【1-3】 1200kW (2t/h)用バーナの開発

入熱 10kW、および 300kW バーナでの試験結果に基づき、実製品である蒸発量 2t/h ボイラに適用すべく、入熱 1200kW（蒸発量 2t/h 相当）にスケールアップ設計、

【公開版】

製作し、別途準備する 1200kW 用ボイラ本体に装備して燃焼試験を実施、目標値を達成するバーナを開発した。

試験バーナについては、ボイラ本体との燃焼適合試験から、3 度の設計、試作を行った。

ここでは入熱 300kW でのバーナ開発試験が完了しているので、主にバーナと本体、排熱回収器、及び制御も含めての適合性試験が主となった。

入熱 300kW のバーナ単体の燃焼試験では、バーナ出口中央部から水素を投入した場合、バーナ近傍では水素の燃焼反応が確認されず、水素の燃焼反応領域が下流に広がり巨大火炎を形成したため、NO_x および CO 生成量を下げる弊害となっていることが確認された。

そのため、天然ガスの燃焼後の低酸素濃度場に水素を投入する 2 段燃焼をコンセプトとする、燃焼ガスと水素との良好な混合を行う、水素を分散投入する構造とした。

その結果、CO 濃度 100ppm 以下、排出 NO_x30ppm 以下を達成する先混合バーナの開発に成功した。

すなわち、水素の投入方法の検討を重点的に実施した結果、水管群内の低酸素濃度場において緩やかに燃焼が進むことで低 NO_x 燃焼が実現できる『水素での管巢（JAFI）燃焼技術』の基本技術の確立に至った。

また、バーナ部材の材料適正判定も、300kW での判定に引き続き、水素と都市ガスとの混焼による材料の高温劣化を評価し、300kW で選定した材料が適切であるかどうかの検証を、精度を上げて実施した。

その結果、燃焼ガスに水素が入ることで材料に発生する酸化皮膜の厚さが薄くなること、金属組織的には水素の有無によってほとんど変化しないことを明らかにした。

水素が燃料として使われることで酸化皮膜が薄くなったということは、還元的な環境で燃焼が起こっており、材料の酸化速度が遅くなっていると考えられる。

したがって、水素混焼ボイラの方が高温腐食速度は遅いと推察されるため、従来の都市ガス専焼ボイラで使用できた材料は水素混焼でも使用できると判断した。

2. 小型高性能化技術開発

【2-1】300kW 試験ボイラ本体の基礎研究

最終製品である入熱 1200kW (2t/h) ボイラ本体の設計基準を確立するため、300kW 試験ボイラ本体を設計、製作し、燃焼、伝熱試験を実施した。

ボイラ本体は小型化、低 NO_x 化に適している管巢 (JAFI) 燃焼方式を採用した。

この燃焼技術は、設計が適当であれば火炎が管群部に形成されても、燃焼および伝熱に問題がないのみならず、保炎と燃焼を同時に促進することで火炎温度を下げることで、生成 NO_x を抑制できるというもので、管巢燃焼 (Tube-Nested Combustion—略して TNC、生成火炎の形状から Jaggy Fire Ball—略して JAFI、ともに株式会社ヒラカワ登録商標) と呼称しており、株式会社ヒラカワ独自の技術である。今回、燃焼速度が速い水素を混入することで、管群部での、より安定した燃焼で、低 NO_x が達成できた。

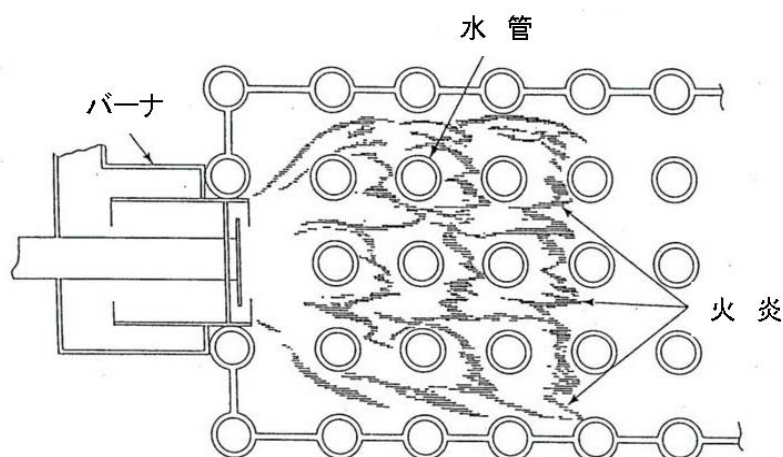


図6. 管巢 (JAFI) 燃焼方式

ただ、この管巢 (JAFI) 燃焼方式は天然ガス等の専焼が主で、水素混合燃焼での実績は無いため、水素燃焼では燃焼温度の上昇や、水管の熱負荷上昇の懸念があり、燃焼性に大きく影響する水管の配列規則 (水管の直径と配列ピッチ、配列パターン等) も天然ガスだけの燃焼とは異なる。

また、管巢 (JAFI) 燃焼の特性として振動燃焼が発生しやすいという事実もあり、燃焼特性が異なる水素との混合燃焼での問題解決に、繰り返しの試験、検証が必要となった。

その結果、バーナ・水管群間距離の調整、そして水素ノズル形状の修正により、水素混合が促進され、安定燃焼酸素幅の拡大、ターンダウンの拡大、NO_x 低減を実現できるこ

とが判明した。

製作した試験ボイラ本体には、全ての水管には熱電対を埋め込み、その熱負荷を計測した。

そして、水素混入燃焼による水管等の伝熱面への、高温腐食等の材料的影響も分析し、その防御技術も確立した。

試験バーナ周辺部材について、連続燃焼後に、表面の酸化皮膜膜厚および生成物深さ方向の分析を行うことにより、遮熱板の酸化、劣化状況を評価した。

このことにより、これらの分析、評価方法が、バーナ各部材検証にも有効に適用できることを確認した。

また、今後研究開発する潜熱回収装置の材料の腐食性評価のため、既存ボイラ製品の排熱回収器において、潜熱回収時に発生する凝縮水の分析（電気伝導度、ICP 分析、イオンクロマト分析）や、既存ボイラ製品で使用している材料の浸漬腐食試験を実施した。

結果として、耐食性評価試験手順、及び基準を策定出来た。

そして、これらの試験、検証により、1200kW ボイラ本体の設計基準の知見を得た。



図7. 300kW 試験ボイラ本体

【2-2】1200kW（蒸発量 2t/h）用ボイラ本体の開発

300kW 試験ボイラ本体での試験結果より、1200kW（2t/h）用ボイラ本体を設計、製作し、別途準備するバーナと組み合わせ、製品化すべく燃焼、伝熱試験を実施した。

【公開版】

天然ガスと水素は、分散投入する方策に切り替えた。

水素投入量の調整を行い、蒸発量の調整、排気ガス温度の調整を行い、製品据付面積：従来製品の30%以上低減を達成、伝熱面積：10m²以下を達成した。

水管群内で水素火炎が保炎されることから、燃焼温度上昇に伴うボイラ水管に過剰な熱負荷がかかる恐れがあったが、水管群の過剰な熱負荷は観察されなかった。

また、別途準備した潜熱回収式排熱回収器を装備し、ボイラ製品としての性能確認を行った。

小型ボイラでは、ボイラ水位の制御と発生蒸気品質の関係が密接である。

水位が低すぎると水管過熱に至り、水位が高すぎると発生蒸気品質が低下する（ボイラ水に含まれる不純物が蒸気に含まれる割合が増える）というもので、その関係を把握する試験を行い、水位制御に反映した。

燃料ガス中に水素が加わることでボイラ部材の高温酸化が促進されると従来のボイラ材料を用いることが困難となる。

そのため、300 kW 試験ボイラ本体と同様、材料の候補となる鋼材について、高温腐食試験を行い、水素混焼での影響を調査した。

その結果、300kW 試験ボイラと同様に、燃焼ガスに水素が入ることで材料に発生する酸化皮膜の厚さが薄くなること、金属組織的には水素の有無によってほとんど変化しないことを明らかにした。

したがって、従来の都市ガス専焼ボイラで使用できた材料は水素混焼でも使用できると判断された。



図8. 1200kW（蒸発量 2t/h）用ボイラ本体

3. 潜熱回収技術の開発

【3-1】潜熱回収技術確立の研究

まずは、既存ボイラの潜熱回収装置からの凝縮水を用い、凝縮水中の腐食成分および浸漬腐食試験により潜熱回収装置用部材の耐食性の評価方法を検討した。

その結果、これらの手法で腐食性を評価でき有効であることがわかった。

ただ、既存製品に採用されている排熱回収器は、給水温度等の使用条件により若干の潜熱回収能力を有するが、水素混合燃焼による燃焼排ガスの凝縮水量増加に適合し、十分な熱回収を得るものとはなっていない。

潜熱回収能力向上のためには、伝熱面形状の適正化と凝縮水の効率よく排出する構造、形状を決定することが重要となる。

そこで、既存製品の構造を一新し、潜熱回収能力が高く、かつ小型、軽量の排熱回収器の構造検討、策定を行なった。

【3-2】1200kW（2t/h）用排熱回収器の開発

策定された潜熱回収技術より、1200kW（2t/h）ボイラ用の排熱回収器を設計、製作し、燃焼、性能試験を実施、製品化した。

【公開版】

構造は、既存製品の見直し試験により、既存品から大きく構造変更された。

そして、別途準備した、1200kW (2t/h)用ボイラ本体、バーナと組み合わせ、燃焼、性能試験を繰り返した。

また、水素混焼により潜熱回収装置内の腐食性が悪化すると、従来の潜熱回収装置用材料が使えなくなるため、1200 kW ボイラ用の排熱回収器で発生した凝縮水の詳細な分析を行い、評価した。

その結果、水素混焼した方が腐食性物質である NO_3^- および SO_4^{2-} が低下する傾向が確認できた。

これは燃料ガス中に水素が入ることで、窒素の酸化が抑制されたこと、また 13A の使用量が減ることで 13A 中に含まれる臭気成分である硫黄化合物の酸化が減ったためであると推定される。

このことから、潜熱回収装置内の腐食性は水素混焼する方が低下するといえる。

以上より、従来型の潜熱回収装置で使用されていた材料は水素混焼の場合においても使用できると判断された。

4. 最適制御技術の開発

【4-1】300kW 試験ボイラでの制御基礎研究

入熱 300kW 試験ボイラ本体での燃焼特性を把握し、制御方法を策定した。

流量、火炎、圧力、 O_2 、 CO 、温度等のセンサーを準備し、計測値と燃焼性能との関係を把握して、正常外燃焼の事前察知、修正機能を確立した。

具体的には、燃焼安定性、安全性を確保できる各計測値の範囲、燃焼状態の変化と各計測値の応答性等を見極め、最適な監視項目と制御を確定した。

さらに、得られた結果からの最適燃焼制御を目指し、マイコン制御装置を開発した。

【4-2】1200kW (2t/h)ボイラ制御の確立

検証された 1200kW (2t/h)用ボイラ本体、バーナ、排熱回収器より構成されるボイラ製品の制御機能を確立した。

300kW 試験ボイラで確定された最適監視項目と制御について、実ボイラ製品への適用のため、燃焼制御以外の伝熱面過熱防止、水位制御等も含めた総合的な制御方法を策定し、最適化した。

【公開版】

さらに、実ボイラにおいては、燃焼温度の上昇による伝熱面過熱や、水位制御不良による伝熱面加熱、あるいは発生蒸気の品質低下等は燃焼制御と密接な関係があり、これら項目も含めた総合的な検証を行なった。

最終章 全体統括

3-1 研究開発成果

【1】天然ガスと水素混合バーナ開発

平成 28 年度には、入熱 10kW 試験装置で、バーナの基本形態、機構を確定した。

平成 29 年度には、入熱 300kW（蒸発量 500 kg/h 相当）試験装置において、バーナをボイラ本体、排熱回収器を組み合わせ、ボイラ製品と同構成の機器で総合的な評価試験を行った。

平成 30 年度には、入熱 1200kW（蒸発量 2t/h 相当）試験装置において、実販売製品と同等の容量で、バーナを設計、製作し、燃焼試験、耐久試験、性能試験を行なった。

結果として、最終段階の蒸発量 2t/h ボイラに適用できる目標を達成したバーナを開発した。

【2】小型高性能化技術の開発

平成 29 年度には、入熱 300kW（蒸発量 500 kg/h 相当）試験装置において、ボイラ本体をバーナ、排熱回収器を組み合わせ、ボイラ製品と同構成の機器で総合的な評価試験を行った。

平成 30 年度には、入熱 1200kW（蒸発量 2t/h 相当）試験装置において、実販売製品と同等の容量で、ボイラ本体を設計、製作し、燃焼試験、耐久試験、性能試験を行なった。

結果として、最終段階の蒸発量 2t/h ボイラに適用できる目標を達成したボイラ本体を開発した。

【3】潜熱回収技術の開発

天然ガスと水素との混合燃焼で、通常の天然ガスのみの場合に比較して、増加する排ガスの水蒸気凝縮熱を効率良く回収するための研究を行い、潜熱回収技術を確立した。

潜熱回収式排熱回収器については、現在、株式会社ヒラカワの現行製品にも存在するが、水素混焼時の凝縮水量増加に対する熱回収性能に改善の余地があり、また、寸法形状が大きく、重量過多で、小型化、省スペース化に適していなかった。

これらの課題解決のため、新規伝熱面形状、構成による熱回収性能の向上、排ガス凝縮水の確実な排水で、凝縮水の再蒸発による回収熱量低下回避等の対応を確立した。

さらに、天然ガスのみとは成分が異なる排ガス凝縮水による腐食現象の解明と、防食技

術も確立した。

【4】最適制御技術の開発

天然ガスと水素との混合燃焼、伝熱、潜熱回収について、常に最適条件で運転、燃焼、熱回収が可能な監視、制御技術を研究し、その手法を確立、製品に適用した。

燃焼挙動検知や、最適制御への動作検証試験により、マイコン制御装置を開発することが出来た。

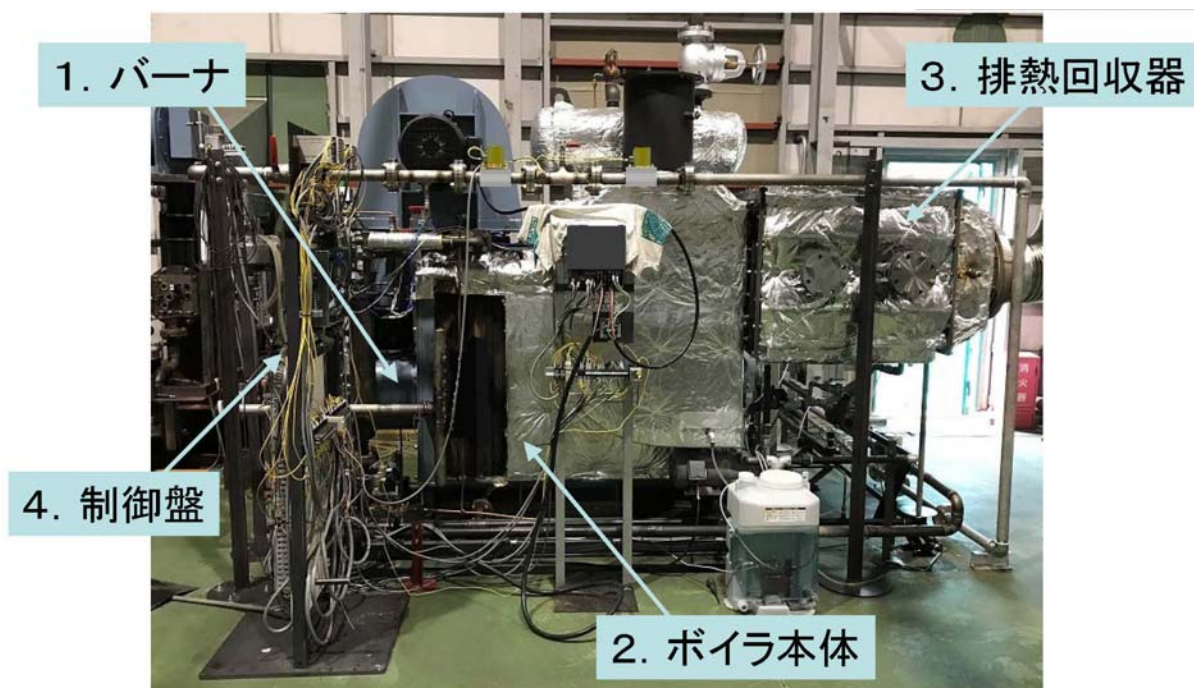


図9. 4つの開発項目の目標を達成した最終開発品

各研究開発テーマでの技術開発目標とその結果を表1にまとめる。

表1 技術開発目標達成状況

【1】天然ガスと水素混合バーナ開発 【1-1】バーナの基本形態、機構の研究 【1-2】300kW 試験バーナの基礎研究 【1-3】1200kW (2t/h)用バーナの開発	
実施内容：天然ガスと水素の混合器、最適燃焼が可能な水素混合JAFIバーナを開発。 数値目標： ・水素の天然ガスへの混合比率：50% ・安定燃焼確保空燃比の上下限幅： O ₂ の値で3%以上 ・最大最低燃焼量差： 10対1の比率（ターンダウン比） ・燃焼後の排出NO _x ： 30ppm以下（O ₂ =0%換算）	成果：蒸発量 2t/h ボイラに適用できる目標を達成したバーナを開発 数値結果： → 50%：○ → O ₂ の値で3%以上：○ → 10対1の比率（ターンダウン比）：○ → 30ppm以下：○
【2】小型高性能化技術の開発 【2-1】300kW 試験ボイラ本体の基礎研究 【2-2】1200kW (2t/h)用ボイラ本体の開発	
実施内容：JAFI 燃焼方式を用い、後負荷燃焼、伝熱に耐えるボイラ本体を開発。 数値目標： ・製品据付面積： 従来製品の30%以上低減。 ・伝熱面積：10m ² 以下。	成果：蒸発量 2t/h ボイラに適用できる目標を達成したボイラ本体を開発 数値結果： → 30%以上低減：○ → 10m ² 以下：○
【3】潜熱回収技術の開発 【3-1】潜熱回収技術確立の研究 【3-2】1200kW (2t/h)用排熱回収器の開発	
実施内容：排ガスの潜熱回収能力大きく、かつ小型化を達成した高性能排熱回収器を開発。 数値目標： ・ボイラ効率：104%（ボイラの効率表示は低位発熱量基準による） ・外形寸法形状：現存排熱回収器相当	成果：新規伝熱面形状で熱回収性能を向上凝縮水対する防食技術の確立 数値結果： → 104%：○ → 現存相当：○
【4】最適制御技術の開発 【4-1】300kW 試験ボイラでの制御基礎研究 【4-2】1200kW (2t/h)ボイラ制御の確立	
実施内容：各種センサーで燃焼、伝熱状況を監視し、再考効率、最低環境負荷で運転する最適化制御技術を開発。 数値目標： ・CO ₂ 排出量削減量：26% ・ボイラ効率 104%での安定、継続的な運用が可能	成果：最適条件で運転、燃焼、熱回収が可能な監視、制御を確立し、マイコン制御装置を開発 数値結果： → 26%継続運用：○ → 104%継続運用：○

3-2 研究開発後の課題・事業化展開

1. 想定している具体的なユーザー、マーケット及び市場規模等に対する効果

水素専焼ではなく天然ガスと水素の混合燃焼バーナを開発することで、例えば災害発生時等、水素燃料の供給が一時的に出来なくなる、あるいは供給量が低下した場合、天然ガスの混合比率を増やす、さらには天然ガスのみでバーナの燃焼が出来るといった、不測の事態への柔軟な対応が可能となった。

また、水素専焼や水素燃料の混合比率が高い場合、その対応のため燃料ガス制御機器の価格が大きく上昇してしまい普及が難しい。

現在、水素専焼は大型ボイラでは存在するが、その燃焼の特殊性から小型ボイラへの現実的な価格での適用が困難な状況である。

このような実情に対し、天然ガスと水素の混合燃焼バーナ搭載ボイラは、現行天然ガス専焼ボイラと同等価格での提供を可能にした。

また、環境負荷低減に寄与する小型高性能ボイラ開発にあたり、無尽蔵とも言える水素を活用することは、枯渇が危惧される化石燃料の代替燃料として、リサイクル性、クリーン性、エネルギーの脱炭素化へ向け、社会に大きく貢献する。

国内外における最重要課題である地球温暖化対策への取り組みとしては、燃料電池、水素自動車と言った方面の展開が主流である。

しかし、これだけの取り組みでは、水素社会構築、すなわち地球温暖化防止対策が達成されるとは言えない。

今回の研究開発で、天然ガスと水素の混合燃焼という新しい発想により、容易に水素を燃焼に活用できることになり、その活用可能市場規模からも地球温暖化防止対策への効果は大きい。

さらに、小型蒸気ボイラだけでなく、温水器や工業炉に搭載するバーナとしても利用することができ、環境負荷低減装置としての裾野が広がる。

特に温水器を使用するユーザーの一つであるスーパー銭湯等への普及は確実であり、温水器への応用展開は日本市場において大いに期待出来る。

また、今後、小型貫流ボイラ用として開発された天然ガスと水素の混合燃焼バーナを、株式会社ヒラカワが得意とする大、中型ボイラへ搭載するべく研究開発を進めることで、大、中型ボイラでの環境負荷低減、低炭素化といったニーズにも対応出来る。

2. 事業化に至るまでの遂行方法や今後のスケジュール

想定するサンプル出荷先として、まずはガス製造会社、ガス供給会社等へのモニター機
の設置を計画中である。

その後、ガス供給会社等の協力の下、CO₂の総量削減先企業をターゲットに提案営業
を推進する。

水素産業の大きな成長が見込める中で、ボイラを動力源として使用している多数の企業
で使用される水素燃料が増えることにより、水素燃料コストを下げることも可能になるこ
とから、ガス製造会社より、CO₂も大きく削減できる水素混合焚き小型蒸気ボイラの開
発要望を受けていた。

水素燃料供給においても、自動車関連企業、ガス供給会社をはじめとする水素供給事業
社による水素ステーション等が近年中に大きく増設される計画もあり、水素自動車の普及
とともにさらに増加していくことが見込まれる。

一部企業からは、製品完成時に、この水素混合焚き貫流ボイラを販売する旨の協力も打
ち出してくれており、株式会社ヒラカワの支店 5 カ所、営業所 7 カ所、出張所 4 カ所、
株式会社ヒラカワの販売店 53 カ所と協業して拡販していく方針である。

このように、今回の開発製品のような先進性の高い製品を望む「ヒラカワファン」を増
やすことは、株式会社ヒラカワの売上増に直結している。

現在、国内には法的な定期検査を必要とする大、中型蒸気ボイラが約 25,000 基設置
されており、さらに定期検査を必要としない小型蒸気ボイラにおいては、その総設置基数
は把握されていないものの、毎年 10,000 基以上の新規出荷がある。

また、現在、大、中規模事業所、工場、地域冷暖房設備等へ設置されている約 25,000
基の大、中型ボイラについても、従来、小規模事業所、ホテル、病院等への設置が主で
あった小型貫流ボイラを複数基設置し、大、中型ボイラと同等の能力を得るという手法
が、経済性、取扱性、設置性の良さから、主流になりつつある。

株式会社ヒラカワも既に小型貫流ボイラ（水素混合焚きではない）を販売しており、そ
の販売台数は毎年確実に増加している。

今後、小型貫流ボイラでの「CO₂削減」、「水素社会への適応」、「小型化」、「高性能
化」の要望は急速に増加すると考えられ、小型貫流ボイラを主力商品として今後の事業化
計画を立てている。

【公開版】

株式会社ヒラカワでは、これら水素インフラ整備をにらみ、標準型小型貫流ボイラの販売総数に占める「水素混合焚きボイラ」の販売台数の割合を増加させてゆく計画である。

ボイラ発達のポイントは、①燃料、②容量、③効率、④法規制と共に、社会環境の影響を受けてきた。

そうしたことから、株式会社ヒラカワは、以前より社会情勢を見ながらボイラ開発に関する事業展開を進めてきた。

現状は、先にも述べた燃料電池、水素自動車への水素燃料の展開が主であり、採算性が取れないというのが実態である。

ただ、水素社会の実現には、水素の「製造」「貯蔵・輸送」「利用」までの一気通貫したサプライチェーン構築が重要ではあるが、自動車業界が先行する中、「利用」用途として今回のボイラが商品化される意味は大きい。

事業所、工場、ホテル、病院、地域冷暖房設備へ設置される蒸気ボイラのみならず、この混合器・バーナによる燃焼技術を温水器や工業炉用に利用することで、様々な分野での活用が期待出来る。

また水素利用が増えることで、水素自体の単価が下がり、同時に水素対応制御機器技術の向上も促進され、水素社会実現が、よりいっそう加速されると考える。

そうなれば、現在、機器類のコスト面に難のある大型機器における水素専焼バーナの普及も後押し出来る。

水素という燃料を当たり前のように使用する時代を作り上げるためには、大手企業だけでなく、中小企業も見据えた小型機器の汎用化が必須である。

一家に一台水素自動車があると同時に、今回研究開発された技術を各種熱源機器に適用し、スーパー銭湯やビジネスホテル等で多数活用されることで、水素社会構築の一端を担って行く。