

終 了 報 告 書

S I P (戦略的イノベーション創造プログラム)

課題名「エネルギーキャリア」

「水素燃焼技術の開発」(H26年～H27年度)

「水素エンジン技術開発」(H28年～H29年度)

H26年度～H29年度

研究責任者：川崎重工業 技術研究所 熱システム研究部
部長 飴 雅英

目次

1. 本研究の目的	1
2. 研究実施体制	1
3. 研究成果	2
3-1. 水素ガスタービン燃焼技術	
3-2. 水素エンジン燃焼技術開発	
3-3. 高圧水素インジェクタ開発	
3-4. 高圧液水ポンプ開発	
3-5. まとめ	
3-6. 今後の課題	
4. 外部発表実績	5
5. 特許出願実績	5
6. 参考文献	5

別添：各研究機関終了報告書

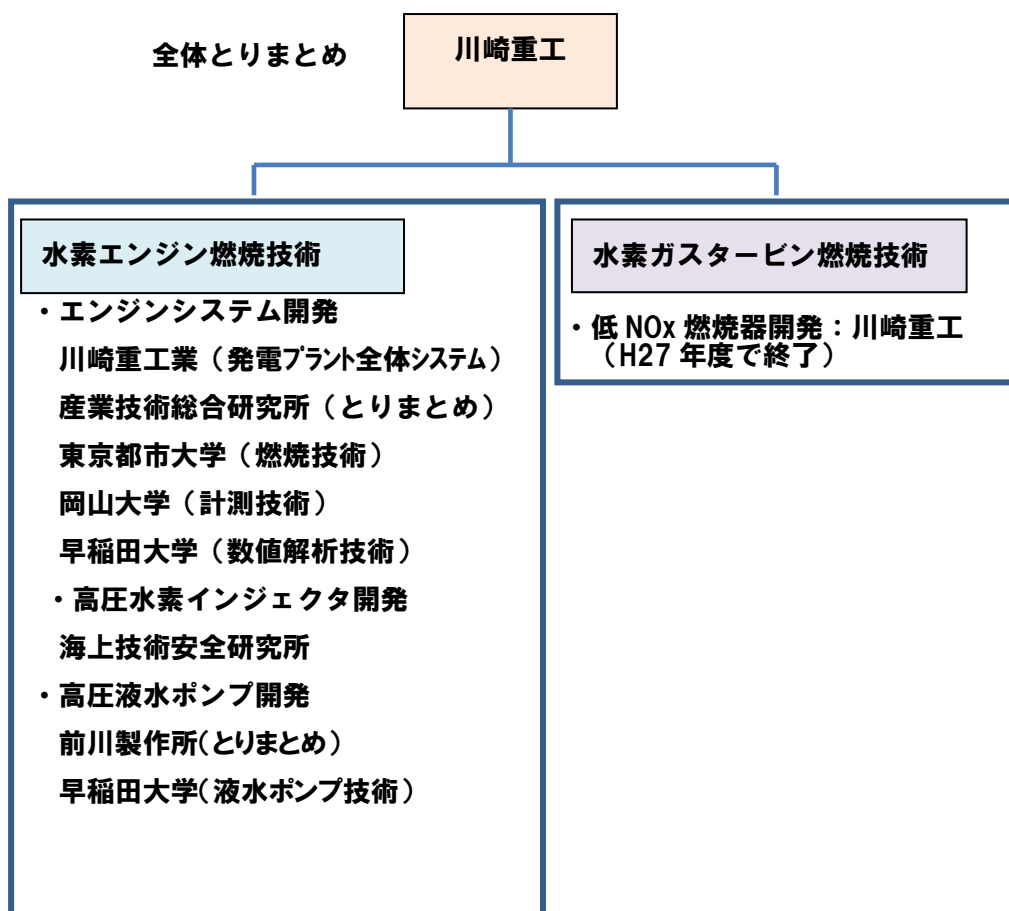
- ・川崎重工業
- ・産業技術総合研究所
- ・東京都市大学
- ・岡山大学
- ・早稲田大学（内藤研究室）
- ・海上技術安全研究所
- ・前川製作所
- ・早稲田大学（宮川研究室）

1. 本研究の目的

水素ガスタービンについては高効率で低公害に水素を燃焼できる世界にも例がないドライ型低 NOx 燃焼器を開発する。ただし、H27 年度までに実施した研究開発により、2MW 級ガスタービン用のドライ型低 NOx 水素燃焼器を実機ガスタービンと同等の条件（温度、圧力）で性能試験を実施し 40 ppm(残存酸素 16%換算値)を下回る性能を達成することが出来、ドライ型低 NOx 水素燃焼の基礎技術は確立した。よって、水素ガスタービン燃焼技術は SIP での開発を終了する。

水素エンジンに関しては水素燃焼の最適化によりクローズド型エンジンシステムにおいて大型エンジンシステムとしては例がない 7MW 級エンジン単体の正味熱効率 60%を達成可能な要素技術の開発を進めた。ただし、早期実用化の可能性を検討した結果、H28 年度よりオープン型エンジンシステムの開発を優先し、世界最高水準の天然ガスエンジンと同等の熱効率とクリーン性を水素燃料で達成することを目指すこととした。また、製品化に十分な耐久性を持った液体水素高圧供給技術を開発する。

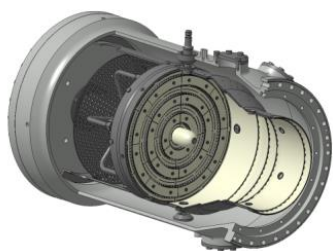
2. 研究実施体制



3. 研究成果

3-1. 水素ガスタービン燃焼技術

川崎重工業は分散火炎を用いた新規燃焼構造を採用した2MW級ガスタービン用のドライ型低NOx水素燃焼器を開発し、実機ガスタービンと同等の条件（温度、圧力）で性能試験を実施し40ppm（残存酸素16%換算値）を下回る性能を達成した。



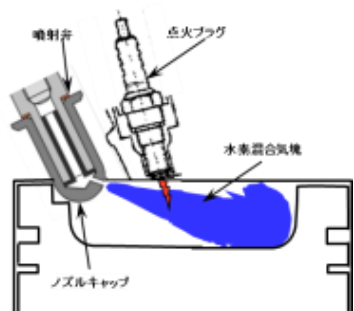
2MW級ガスタービン用 ドライ型低NOx水素燃焼器



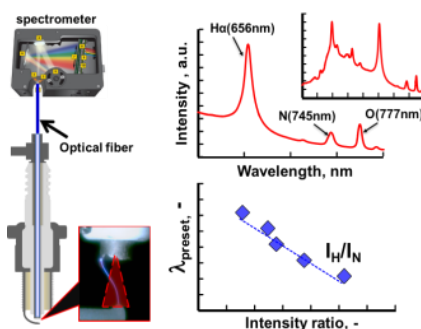
実機ガスタービン条件の水素燃焼試験

3-2. 水素エンジン燃焼技術開発

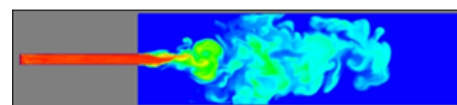
東京都市大学のオープンサイクル用水素エンジンにて、岡山大学で開発されたエンジン内部の水素濃度の分布を過濃混合気塊中でも正確に計測可能な計測技術、および早稲田大学 内藤研究室での研究成果である給気流れも加味した水素噴流の解析技術等を適用し、水素燃料噴流の分散を抑制し適切な状態で点火プラグ近傍に偏在させることや、燃焼火炎を燃焼室壁面に接触させず冷却損失を軽減することのできる噴射弁形状等を最適化し、かつ、過給を採用する事でベースエンジンの出力を低下させる事なく、本研究開発の最終目標である効率50%以上（LHV換算における7MW級エンジン単体の正味熱効率）、NOx:200ppm以下（残存酸素0%換算値）を大幅に上回る性能を達成した。



水素エンジン（東京都市大学）



SIBS計測システム（岡山大学）



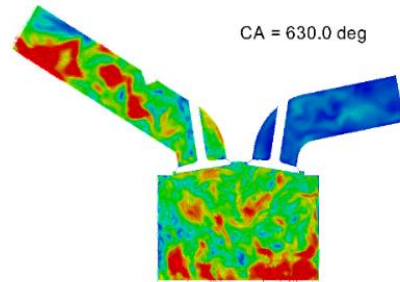
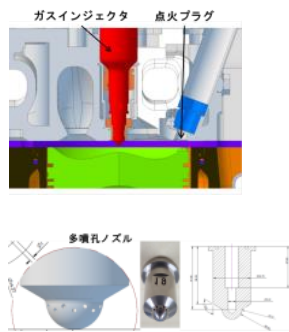
水素噴流の高空間解像型数値解析
結果の可視化（早稲田大学）

産総研では、水素噴流の発達特性について、多次元数値解析結果と実験結果の検証を行い、数値解析により定量的に実験結果を再現できること確認した。また、水素の詳細化学反応機構を新たに作成し、これを用いて、水素エンジン燃焼の最適制御に関して、水素濃度の希薄化及びEGRの適用が熱効率向上とNOx低減に有効であることがわかった。また、直接噴射式水素エンジンのモデル実験では、水素の噴射時期、点火時期、過給圧力、EGR

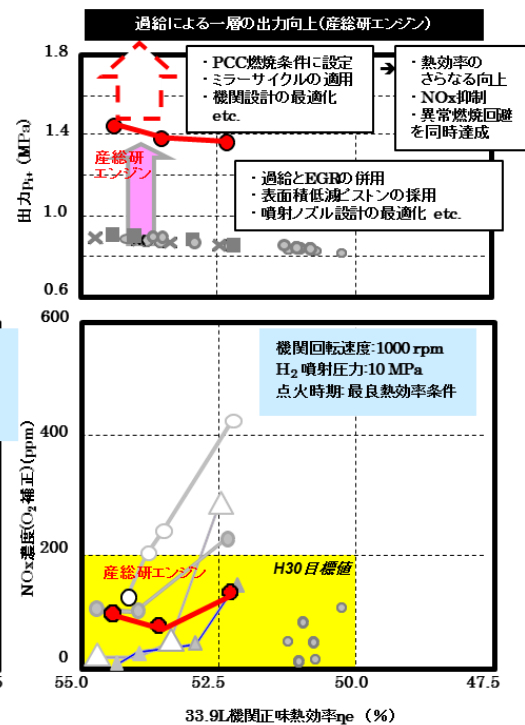
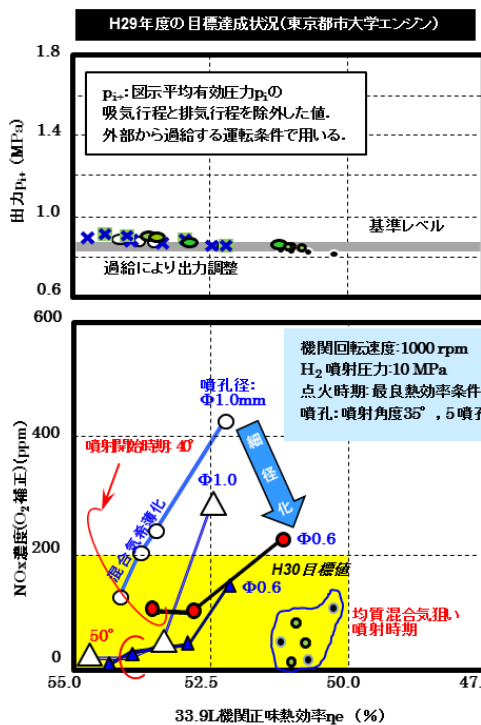
率など変数とする多数の実験を行い、最終的に研究目標である 7MW 級エンジンにおける熱効率 $>50\%$ 、 $\text{NO}_x < 200 \text{ ppm}$ ($\text{O}_2 @ 0\%$ 換算) を達成するだけでなく、水素エンジンとして世界最高レベルの図示平均有効圧力も同時に達成することができた。



水素エンジン (産総研)

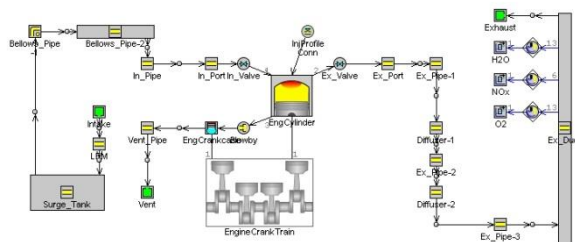


水素エンジンシミュレーション結果 (産総研)



水素エンジン試験結果 (東京都市大、産総研)

川崎重工業では大型水素ガスエンジンの製品化に必要な性能予測、性能向上方法を検討するために 1次元シミュレーション技術を構築し、高圧ポンプで昇圧した液体水素の冷熱を利用してエンジン給気を冷却し、熱効率向上、 NO_x 低減を行うことを検討し、水素タンクや補機類も含めた発電プラント全体のシステムの熱効率向上効果を確認した。



1次元シミュレーションモデル

3-3. 高圧水素インジェクタ開発

海上技術安全研究所ではオープンサイクル用エンジン試験機に搭載する水素対応インジェクタシステムを開発するため、インジェクタを評価するための試験設備を構築し、数種類の実験用ガスインジェクタを設計・試作するとともに、摺動部の材質や加工精度、表面処理、シート面の形状が異なるいくつかの部品を用い、高圧条件下における性能評価試験、ガスリーク特性試験を実施しガスリーク防止と耐久性向上のための要素技術を確立した。



水素高圧インジェクタ



ガスリーク特性試験設備



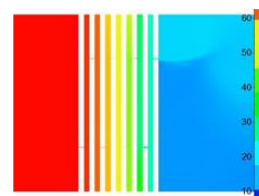
評価試験設備

3-4. 高圧液水ポンプ開発

前川製作所で実施した超低温液体水素高圧ポンプの開発では試作した液体窒素ポンプを使用して、早稲田大学 宮川研究室が実施した液体水素ポンプを模擬した CFD 解析結果やシール機構等の検討を反映した様々なシール材料・構成による性能確認試験を行い、吐出圧力 25～30 MPa において目標を満足する体積効率 80～90%、断熱効率 60～70% を達成し低温・高圧ポンプ開発技術を確立した。



レシプロ型高圧ポンプ要素試験装置 (前川製作所)



シール部 解析結果

(早稲田大学)

3-5. まとめ

本研究開発で実施した「水素ガスタービン燃焼技術」では分散火炎を用いた新規燃焼構造を採用したドライ型低 NOx 燃焼器を開発し、開発目標である 40 ppm(残存酸素 16%換算値)を下回る性能を達成し、将来の製品化に向けた基盤技術が確立した。

「水素エンジン燃焼技術」の開発成果としては、オープンサイクルエンジンで開発目標である効率 50%以上 (LHV 換算における 7MW 級エンジン単体の正味熱効率)、NOx : 200ppm 以下 (残存酸素 0%換算値) を大幅に上回る世界トップクラスの性能を得ることが出来た。

更に水素エンジンの製品化に必要なエンジンに水素を供給するための「高圧液水ポンプ」、「高圧水素インジェクタ」に関する開発技術も同時に開発することで、今後の水素エンジンの市場投入に向け大きく貢献できると考えられる。

3-6. 今後の課題

本研究では小型実験用エンジン実験により水素エンジン燃焼技術の基礎技術の開発を実施し、その成果を大型エンジンに適用した際の性能予測を三次元数値計算によるシミュレーションにより実施した。

今後は、単気筒の大型実験用エンジンによりその性能を検証したのち、その技術を多気筒の大型エンジンに適用し水素エンジンの製品化を図る。

なお、製品化の際には本研究で開発した液化水素を圧縮して高圧水素にする高圧液化水素ポンプと高圧水素をエンジンに噴射する高圧水素インジェクタを組み合わせることで、エンジンシステム全体としてより高効率化を図る。

4. 外部発表実績

(単位：件数)

学会発表	講演	査読付論文	査読なし論文	取材	合計
41	4	6	18	1	70

5. 特許出願実績

	出願番号	発明の名称	出願年月日	出願人
1	特願2016-224776	水素エンジンシステム	2016/11/18	川崎重工業株式会社/ 国立研究開発法人 産業技術総合研究所
2	特願2017-096984	ガスタービン燃焼器の燃料制御	2017/5/16	川崎重工業株式会社

6. 参考文献

なし