

## 3年間の開発目標

- ・基礎技術の研究として水素の燃焼と噴射のメカニズムを把握し、シミュレーションモデルの作成と燃焼、噴射の最適化を行う。
- ・燃料供給装置に必要な仕様の決定、装置設計、製作、単体性能確認、エンジンとの連携確認を行う。
- ・単気筒試験を行い、水素専焼に最適な燃焼サイクル、燃料噴射方式、噴射弁構造を見出す。

## 事業スケジュール

| 実施項目          | R3   | R4      | R5       |
|---------------|------|---------|----------|
| 燃焼技術          | 試験準備 | 燃焼試験    | シミュレーション |
| 燃料噴射技術        | 試験準備 | 混合気形成試験 | シミュレーション |
| 燃料供給装置 (FGSS) | 設計   | 試作      | 試験       |
| 燃料噴射弁         | 設計   | 試作      | 試験       |
| 単気筒機試験 (主機関)  |      | 試験準備    | 試験       |
| 単気筒機試験 (発電機関) |      | 試験準備    | 燃焼試験     |

### 開発目標 (最終的な目標)

水素燃料推進プラントによる  
GHGゼロの推進プラントの実現

### 設定根拠

外航船用燃料としての重油に対し、LNGによるGHG削減は2割程度に留まる。ゼロエミッション燃料の水素を燃焼させることにより、GHGゼロの外航船を達成する。

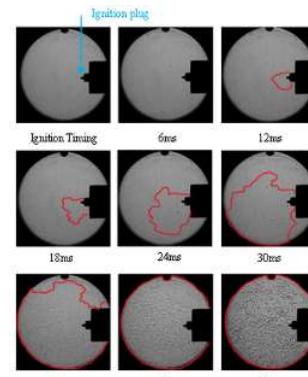
## ①基礎研究（燃焼技術、燃料噴射技術）

### 基礎研究：燃焼技術

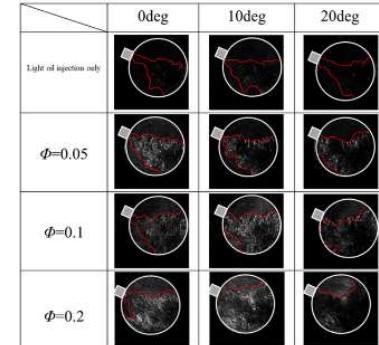
目的：燃焼メカニズムを把握する

- 1) 定容器を用いた混合気形成と燃焼過程の可視化  
⇒ 噴流乱れによる火炎の燃え広がりの影響や、点火の成否条件を把握できた

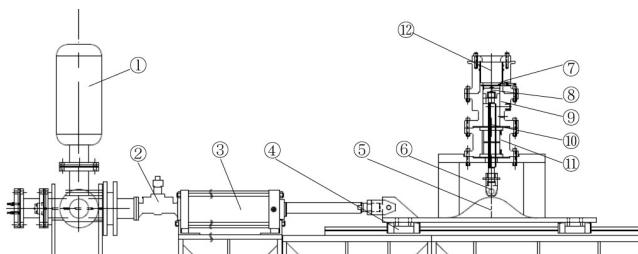
- 2) RCEM（急速圧縮膨張装置）を用いたMicro Pilot 点火方式による燃焼試験の実施  
⇒ 当量比0.2が希薄可燃限界と判明



1) 定容器での可視化



2) RCEMでの燃焼試験

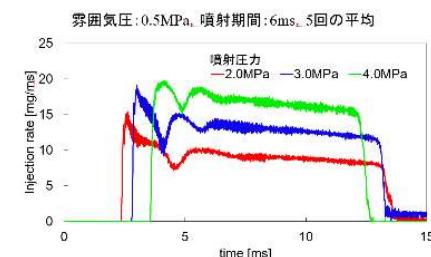


RCEM装置の外観

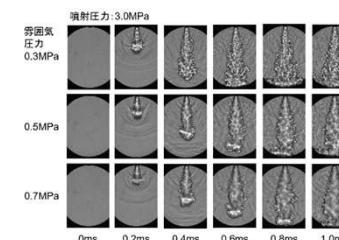
### 基礎研究：燃料噴射技術

目的：水素噴射の最適化

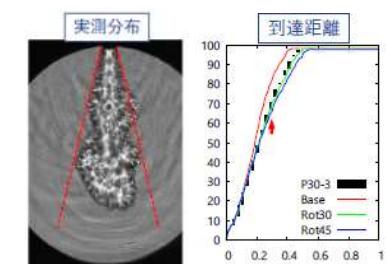
- 1) 水素燃料噴射弁の噴射特性把握  
⇒ モーメンタム法による噴射弁の噴射特性把握
- 2) 定容器内でガス噴射試験  
⇒ 水素噴流の発達過程、混合気形成過程を可視化により計測・評価
- 3) 燃料噴射モデルの作成  
⇒ モデルを作成し実測相当の噴射広がりとなること確認



1) 噴射特性把握



2) 水素噴流の可視化



3) 燃料噴射モデル作成

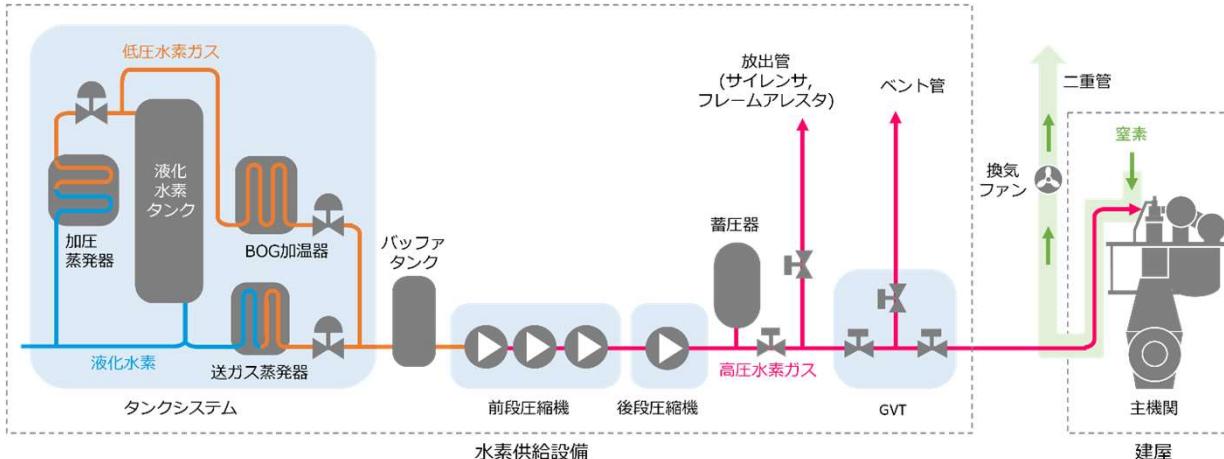
## ①基礎研究(燃焼技術、燃料噴射技術)

### 3D熱流動解析のモデルと結果

| No   | 計画内容                           | 研究成果概要  |      |    |    |   |       |       |   |      |       |      |      |      |   |       |       |   |       |       |      |    |    |   |     |     |   |     |     |   |     |     |   |    |     |   |     |     |
|------|--------------------------------|---|------|----|----|---|-------|-------|---|------|-------|------|------|------|---|-------|-------|---|-------|-------|------|----|----|---|-----|-----|---|-----|-----|---|-----|-----|---|----|-----|---|-----|-----|
| 1    | 単気筒試験機にて吸気管噴射(低圧)方式の3次元熱流動解析実施 | <p>流動計算時のメッシュ</p> <p>複数運転条件での筒内排ガス成分(実測、計算)</p> <table border="1"> <caption>モル分率O2</caption> <thead> <tr> <th>ケース名</th> <th>計算</th> <th>実機</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>14.2</td><td>15.7</td></tr> <tr><td>2</td><td>14.2</td><td>15.7</td></tr> <tr><td>3</td><td>14.6</td><td>15.7</td></tr> <tr><td>4</td><td>16.1</td><td>16.4</td></tr> <tr><td>5</td><td>14.3</td><td>15.7</td></tr> </tbody> </table> <table border="1"> <caption>モル分率NOx</caption> <thead> <tr> <th>ケース名</th> <th>計算</th> <th>実機</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>182</td><td>228</td></tr> <tr><td>2</td><td>184</td><td>225</td></tr> <tr><td>3</td><td>152</td><td>211</td></tr> <tr><td>4</td><td>96</td><td>165</td></tr> <tr><td>5</td><td>117</td><td>166</td></tr> </tbody> </table> <p>基礎研究で作成した燃焼Simulationモデルの成果を生かし、複数燃焼条件で高精度な計算結果が得られる燃焼Simulationモデルが得られた</p> | ケース名 | 計算 | 実機 | 1 | 14.2  | 15.7  | 2 | 14.2 | 15.7  | 3    | 14.6 | 15.7 | 4 | 16.1  | 16.4  | 5 | 14.3  | 15.7  | ケース名 | 計算 | 実機 | 1 | 182 | 228 | 2 | 184 | 225 | 3 | 152 | 211 | 4 | 96 | 165 | 5 | 117 | 166 |
| ケース名 | 計算                             | 実機  |      |    |    |   |       |       |   |      |       |      |      |      |   |       |       |   |       |       |      |    |    |   |     |     |   |     |     |   |     |     |   |    |     |   |     |     |
| 1    | 14.2                           | 15.7  |      |    |    |   |       |       |   |      |       |      |      |      |   |       |       |   |       |       |      |    |    |   |     |     |   |     |     |   |     |     |   |    |     |   |     |     |
| 2    | 14.2                           | 15.7  |      |    |    |   |       |       |   |      |       |      |      |      |   |       |       |   |       |       |      |    |    |   |     |     |   |     |     |   |     |     |   |    |     |   |     |     |
| 3    | 14.6                           | 15.7  |      |    |    |   |       |       |   |      |       |      |      |      |   |       |       |   |       |       |      |    |    |   |     |     |   |     |     |   |     |     |   |    |     |   |     |     |
| 4    | 16.1                           | 16.4  |      |    |    |   |       |       |   |      |       |      |      |      |   |       |       |   |       |       |      |    |    |   |     |     |   |     |     |   |     |     |   |    |     |   |     |     |
| 5    | 14.3                           | 15.7  |      |    |    |   |       |       |   |      |       |      |      |      |   |       |       |   |       |       |      |    |    |   |     |     |   |     |     |   |     |     |   |    |     |   |     |     |
| ケース名 | 計算                             | 実機  |      |    |    |   |       |       |   |      |       |      |      |      |   |       |       |   |       |       |      |    |    |   |     |     |   |     |     |   |     |     |   |    |     |   |     |     |
| 1    | 182                            | 228   |      |    |    |   |       |       |   |      |       |      |      |      |   |       |       |   |       |       |      |    |    |   |     |     |   |     |     |   |     |     |   |    |     |   |     |     |
| 2    | 184                            | 225   |      |    |    |   |       |       |   |      |       |      |      |      |   |       |       |   |       |       |      |    |    |   |     |     |   |     |     |   |     |     |   |    |     |   |     |     |
| 3    | 152                            | 211   |      |    |    |   |       |       |   |      |       |      |      |      |   |       |       |   |       |       |      |    |    |   |     |     |   |     |     |   |     |     |   |    |     |   |     |     |
| 4    | 96                             | 165   |      |    |    |   |       |       |   |      |       |      |      |      |   |       |       |   |       |       |      |    |    |   |     |     |   |     |     |   |     |     |   |    |     |   |     |     |
| 5    | 117                            | 166   |      |    |    |   |       |       |   |      |       |      |      |      |   |       |       |   |       |       |      |    |    |   |     |     |   |     |     |   |     |     |   |    |     |   |     |     |
| 2    | 単気筒試験機にて筒内噴射(中圧)方式の3次元熱流動解析実施  | <p>流動計算時のメッシュ</p> <p>2運転条件での筒内排ガス成分(実測、計算)</p> <table border="1"> <caption>モル分率NOx</caption> <thead> <tr> <th>ケース名</th> <th>計算</th> <th>実機</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>1,648</td><td>1,273</td></tr> <tr><td>2</td><td>625</td><td>1,872</td></tr> </tbody> </table> <table border="1"> <caption>モル分率NO+NO2</caption> <thead> <tr> <th>ケース名</th> <th>計算</th> <th>実機</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>2,402</td><td>1,273</td></tr> <tr><td>2</td><td>1,058</td><td>1,872</td></tr> </tbody> </table> <p>筒内噴射(中圧)での燃焼モデルを作成するも、高精度な計算結果を得ることが出来なかつたが、筒内の水素分布状態に改善点があることがわかつた</p>  | ケース名 | 計算 | 実機 | 1 | 1,648 | 1,273 | 2 | 625  | 1,872 | ケース名 | 計算   | 実機   | 1 | 2,402 | 1,273 | 2 | 1,058 | 1,872 |      |    |    |   |     |     |   |     |     |   |     |     |   |    |     |   |     |     |
| ケース名 | 計算                             | 実機  |      |    |    |   |       |       |   |      |       |      |      |      |   |       |       |   |       |       |      |    |    |   |     |     |   |     |     |   |     |     |   |    |     |   |     |     |
| 1    | 1,648                          | 1,273   |      |    |    |   |       |       |   |      |       |      |      |      |   |       |       |   |       |       |      |    |    |   |     |     |   |     |     |   |     |     |   |    |     |   |     |     |
| 2    | 625                            | 1,872   |      |    |    |   |       |       |   |      |       |      |      |      |   |       |       |   |       |       |      |    |    |   |     |     |   |     |     |   |     |     |   |    |     |   |     |     |
| ケース名 | 計算                             | 実機  |      |    |    |   |       |       |   |      |       |      |      |      |   |       |       |   |       |       |      |    |    |   |     |     |   |     |     |   |     |     |   |    |     |   |     |     |
| 1    | 2,402                          | 1,273   |      |    |    |   |       |       |   |      |       |      |      |      |   |       |       |   |       |       |      |    |    |   |     |     |   |     |     |   |     |     |   |    |     |   |     |     |
| 2    | 1,058                          | 1,872   |      |    |    |   |       |       |   |      |       |      |      |      |   |       |       |   |       |       |      |    |    |   |     |     |   |     |     |   |     |     |   |    |     |   |     |     |

## ②燃料供給装置の開発

### 水素供給システム (FGSS-H2)



エンジンまでの水素供給システム概略図



水素供給システム全景

動特性解析等から必要な機器容量を求め、HAZOPを通して安全上必要な計測機器を把握し、所定の性能(流量・圧力)を発揮できる供給装置を完成させた。



後段圧縮機



蓄圧器



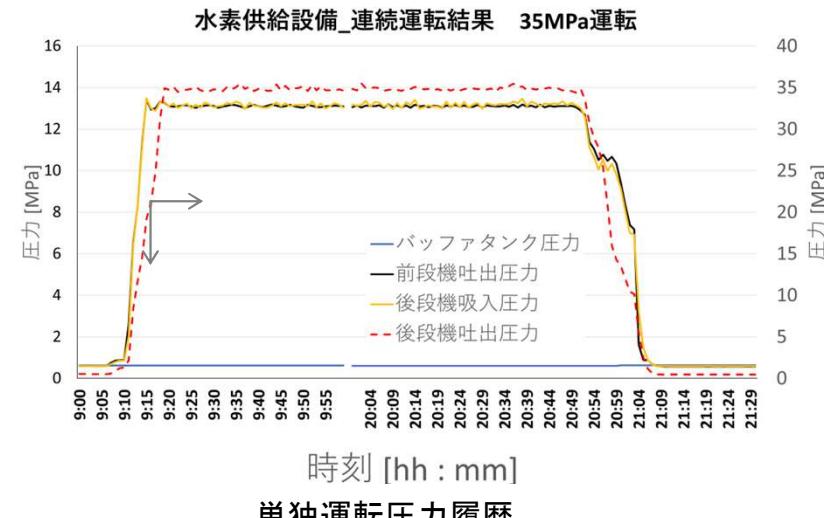
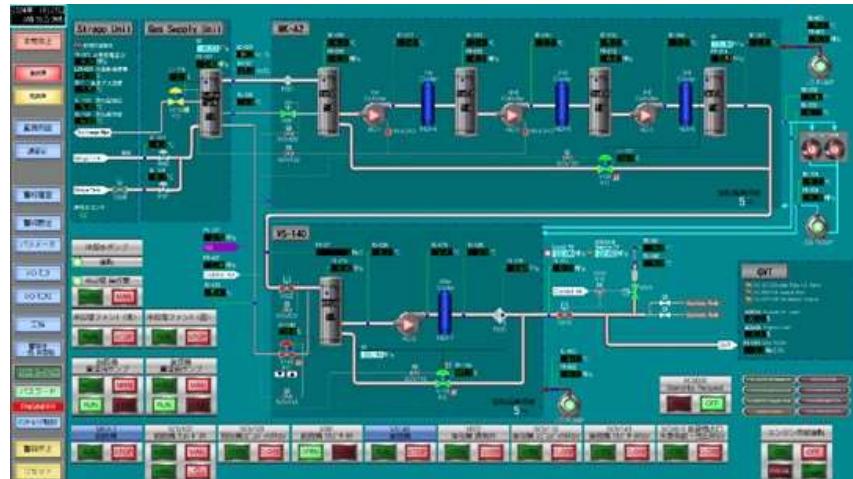
放出管



GVT

## ②燃料供給装置の開発

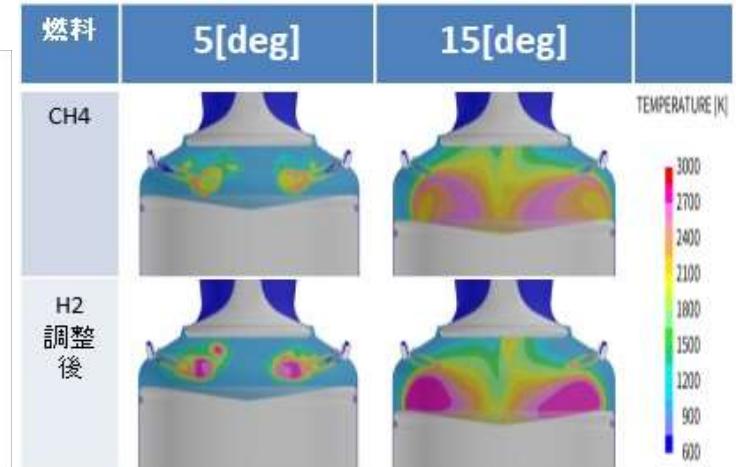
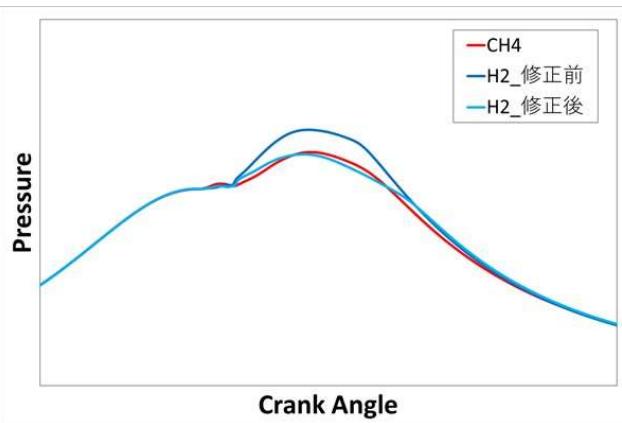
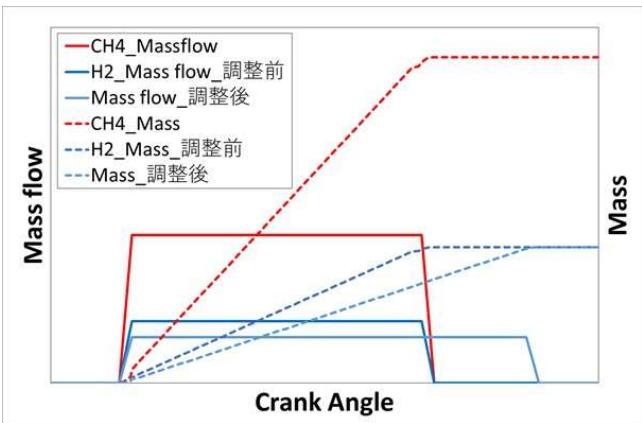
### 水素供給システム (FGSS-H2) 単独運転とエンジンとの連携運転



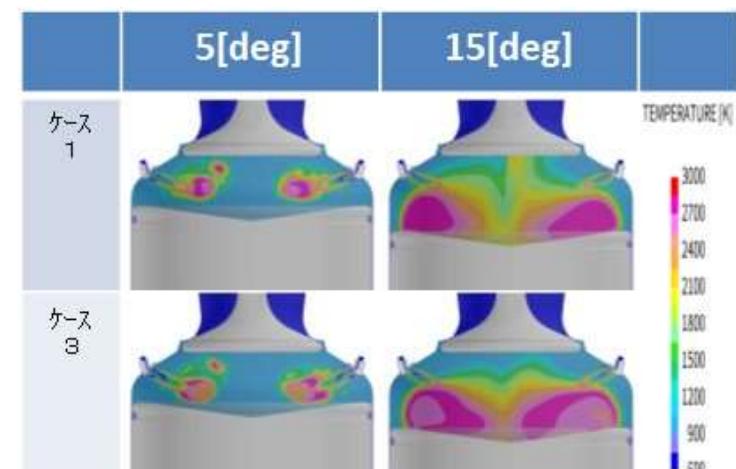
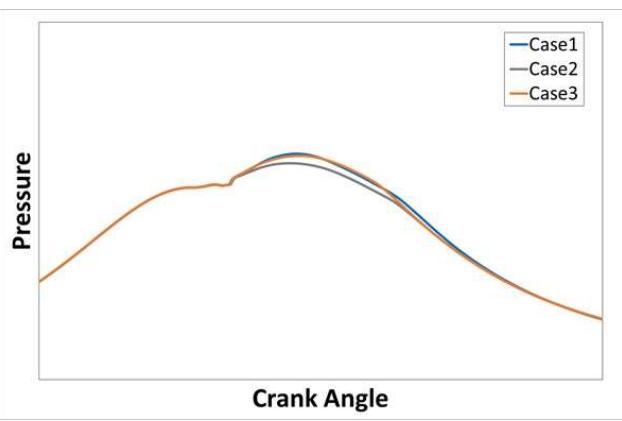
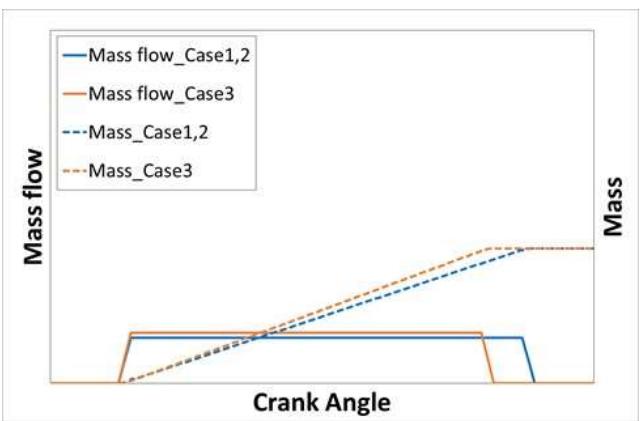
単独運転、およびエンジンとの連携運転が所定の性能を維持できることを確認した。

### ③単気筒試験（主機関）

#### 拡散燃焼試験（シミュレーション解析）



#### 燃料噴射期間の影響調査



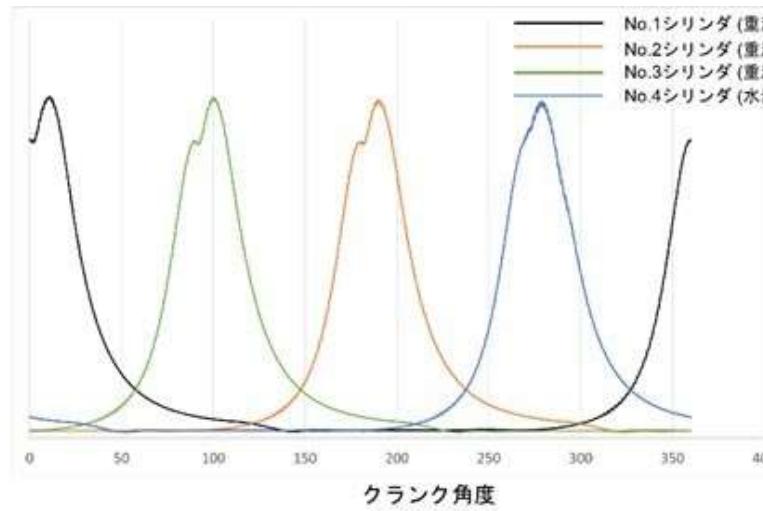
#### 燃料噴孔径の影響調査

温度分布

燃焼試験のための各種条件を3次元CFD解析でパラメータサーベイを行い、その結果に基づいて燃焼試験を行った。

### ③単気筒試験（主機関）

#### 拡散燃焼試験（燃焼試験）



Pmax COV

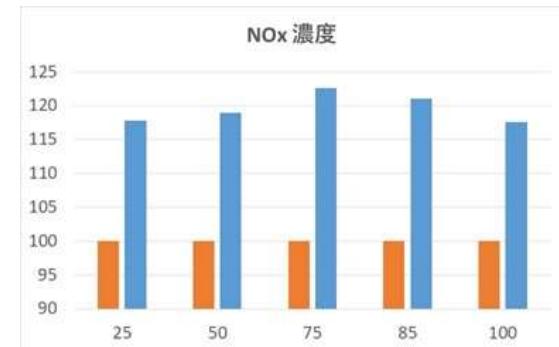
| シリンダ         | 25%  | 50%  | 75%  | 85%  | 100% |
|--------------|------|------|------|------|------|
| No.1         | 0.77 | 1.05 | 0.69 | 0.73 | 0.73 |
| No.2         | 1.11 | 0.68 | 0.72 | 0.70 | 0.66 |
| No.3         | 0.61 | 0.91 | 0.29 | 0.90 | 0.65 |
| No.4<br>(水素) | 0.63 | 0.37 | 0.48 | 1.05 | 0.56 |



シリンダカバー周辺



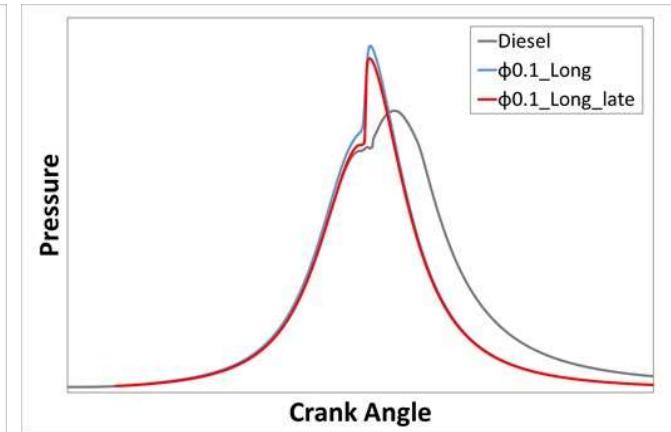
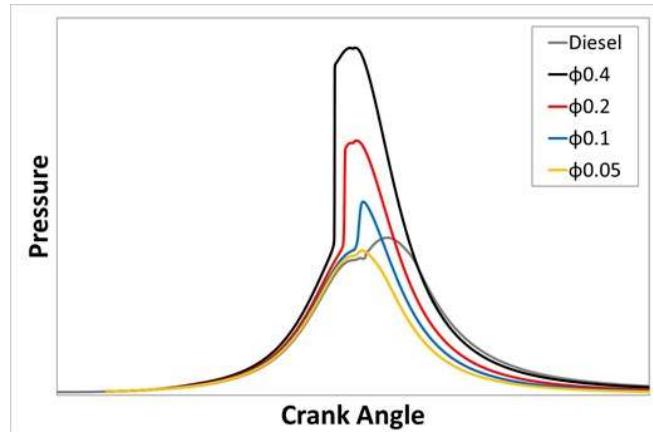
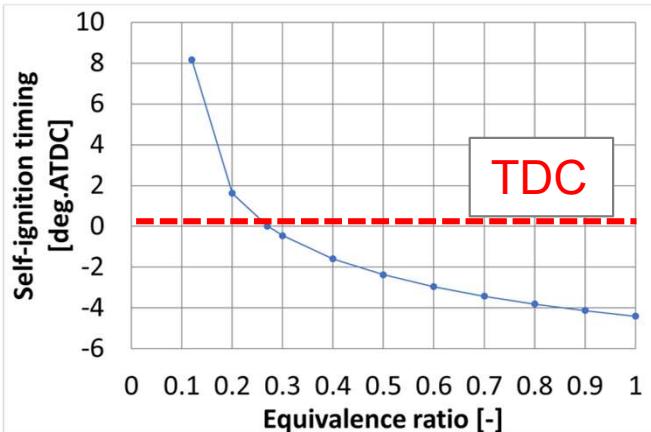
NOx濃度



- ・水素燃料で稼働するシリンダNo.4も他のシリンダと同等の筒内圧力を実現。
- ・20サイクル分のPmax COV(変動係数)は他のシリンダと同等で安定燃焼できている。
- ・出力に相当する平均有効圧力も同等だが、NOx発生量は、油焚きより増加した。

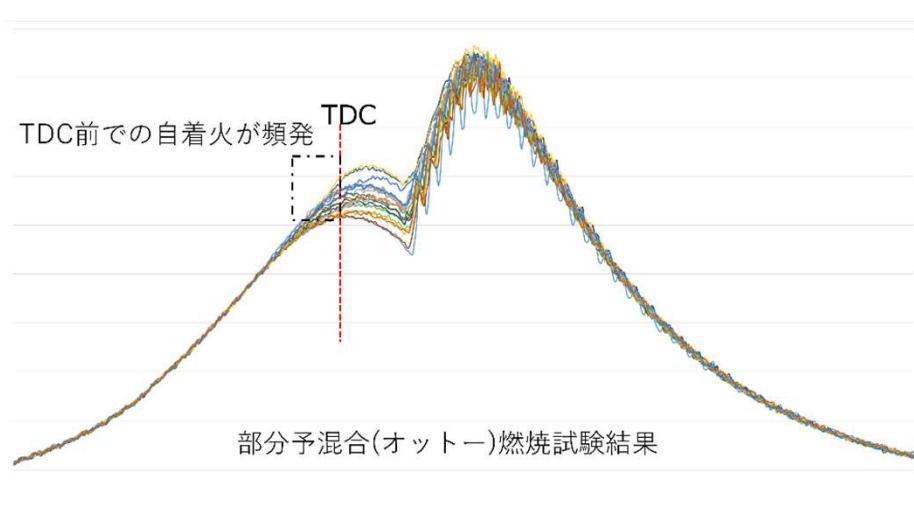
### ③単気筒試験（主機関）

#### 部分予混合燃焼試験（シミュレーション解析と試験結果）



均一混合ガスは、当量比0.27以上ではTDCより手前で自己着火する結果となった。  
当量比0.1でも噴射期間やタイミングの調整だけでは、最高筒内圧力を許容値内に抑えられない。

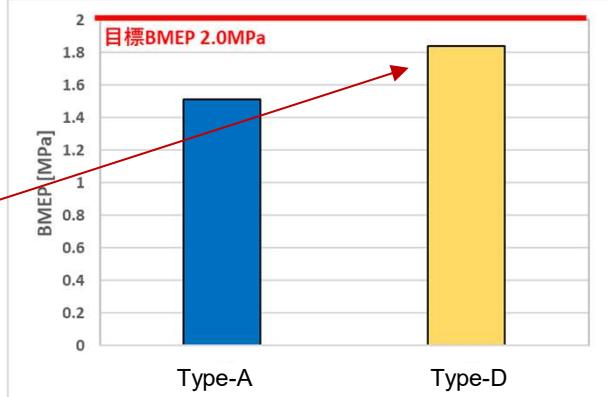
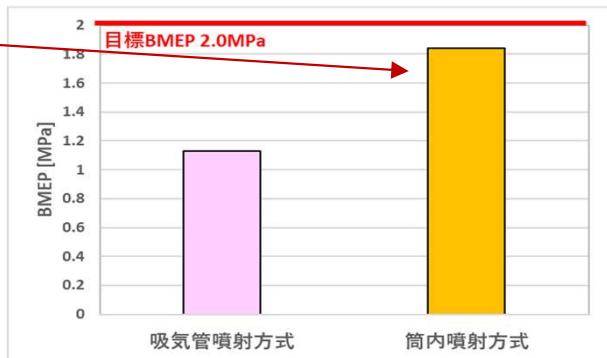
- ・拡散燃焼試験と同じ装置を使用し、TDCよりも手前で水素を噴射。
- ・当量比0.05の低負荷で試験を開始。
- ・ピストンによる昇圧行程で水素の早期着火が起きて圧力が上昇。
- ・早期着火の発生が不安定で、燃焼制御を維持できないと判断して試験継続を断念。



燃焼試験の筒内圧力トレンド

### ③単気筒試験(発電機関)

#### 単気筒試験装置による燃焼試験

| No | 計画内容                        | 研究成果概要   |
|----|-----------------------------|--|
| 1  | 水素噴射弁4種類の性能比較結果<br>(筒内噴射方式) | <p>目標:出力BMEP 2.0 MPa(ガスエンジン相当)<br/> <b>&lt;性能比較結果&gt;</b><br/>         Type-A: BMEP 1.51 MPa到達(到達率75.5%)<br/>         Type-B: 燃焼不安定<br/>         Type-C: 燃焼不安定<br/> <b>Type-D: BMEP 1.84 MPa到達(達成率91.5%)</b></p>  <p>Type- A / Dの到達出力比較</p> |
| 2  | 筒内噴射方式と吸気管噴射方式の性能比較         | <p><b>&lt;BMEP比較結果&gt;</b><br/> <b>・筒内噴射式 : 1.84 MPa</b><br/> <b>・吸気管噴射式 : 1.13 MPa</b></p> <p>→筒内噴射方式の方が水素専焼および高出力化に適している。<br/>         吸気管噴射方式で必要な出力を得るためにエンジンサイズ大型化。</p>  <p>吸気管噴射、筒内噴射方式の到達出力比較</p>                                   |

## 技術開発成果(1／2)

### ・基礎技術(燃焼技術)

⇒ 水素燃焼のメカニズムを把握するため、RCEMにて予混合燃焼と水素噴射弁を用いた試験を実施。当量比の増加に伴い、予混合では着火が遅れ、水素噴射弁では着火が早期化することが分かった。

実機用の燃焼Simulationモデルを作成するための、RCEMでの高精度な燃焼Simulationモデルが作成出来たことを確認した。

### ・基礎研究(燃料噴射技術)

⇒ 水素噴射の最適化による燃焼最適化を検討するため、RCEMの燃焼試験結果と水素噴射モデルの基礎検証データを元に吸気管/筒内噴射方式について3次元熱流動解析を実施。筒内圧ピークの大/小に実機と同様の傾向が得られた。基礎研究で作成した燃焼Simulationモデルから高精度な結果が得られる燃焼Simulationモデルが得られた。

### ・燃料供給装置(FGSS)

⇒ 大量(1000Nm<sup>3</sup>/h)高圧(35MPa)の水素を、漏洩による危険性を排除しながら安定に供給できることを単独運転において確認し、かつエンジンとの連携運転においてもエンジン側からの出力変動要請にも応えられる供給システムを確立した。

## 技術開発成果(2/2)

### ・燃料噴射弁(補機用)

⇒ 単体での噴射性能評価、単気筒試験での評価にて安定燃焼に必要な構造要件を把握できた。

### ・単気筒試験(主機用)

⇒ 水素燃焼機関用にシリンダカバー周りの機器設計を行い、CFDで得た燃焼条件に基づき、ディーゼル燃焼サイクルと部分予混合燃焼サイクルの両方での燃焼試験を行い、その結果から大型船用2st機関の水素燃焼方式においては、ディーゼル燃焼サイクルが好ましいと判断した。

水素95% & パイロット油5% … GHG低減95%

### ・単気筒試験(補機用)

⇒ 複数の水素噴射弁と噴射方式の比較試験結果から、筒内噴射方式が水素専焼および高出力化に適していることが分かった。

基礎研究で作成した燃焼Simulationモデルの成果を生かし、複数燃焼条件で高精度な計算結果が得られる燃焼Simulationモデルが得られた。

水素96% & パイロット4% … GHG低減96%

## 今後の予定

### 水素燃料船の社会実装に向けた社会環境整備が進行中

- 燃料供給； 国際的にはCOP28(2023年12月開催)において、2030年までに再生エネルギーの生産量を3倍とすることを合意。  
国内でも水素サプライチェーン構築に向けたプロジェクトが進む
- 規制面； IMOでは2023年7月に新たな「GHG戦略」を取り纏め、2050年頃のカーボンニュートラル実現を合意。具体的な規制内容について2025年秋の採択を目指して審議中。  
安全面でも、海上安全委員会(MSC)第111回会合で水素燃料船の暫定安全ガイドラインが承認される予定。

こうした状況を踏まえつつ、水素燃料機関等の製品開発・実証等に向けて開発を継続することとしている。

以上