



第22回 海上技術安全研究所研究発表会



船用リーンバーンガスエンジンの 水素専焼に向けた技術開発

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所
海上技術安全研究所 (港湾空港技術研究所)
環境・動力系
市川 泰久

1. 研究目的、発表概要
2. メタン、水素の物性と混焼時に留意すべき点
3. 既存ガスエンジンに水素を供給するため開発した水素供給システム
4. 水素96%混焼実証運転結果
5. 水素混焼時のクランクケース内可燃性の評価

1. 研究目的、発表概要

船用燃料としてのメタンと水素



IMOではGHG削減戦略が採択され、日本では2050年カーボンニュートラル宣言がなされた中、カーボンフリー燃料（水素・アンモニア）やカーボンニュートラル燃料（バイオ、合成メタン）の船用燃料利用が注目されている。

水素

- 「水素社会」を目指して製造、輸送、供給、利用の各方面で研究開発が進められてきた。
- 水素社会が実現すれば、船用燃料として利用できる可能性がある。
- 水素はエネルギー密度が低く、液化温度が低いことから貯蔵・運搬が難しい。
 - 水素キャリア（アンモニア、有機ヒドライド、メタン）の利用
- 天然ガスと比較して、燃焼速度が極めて速く、容易に着火するなど燃焼制御が困難。

天然ガス・カーボンニュートラルメタン

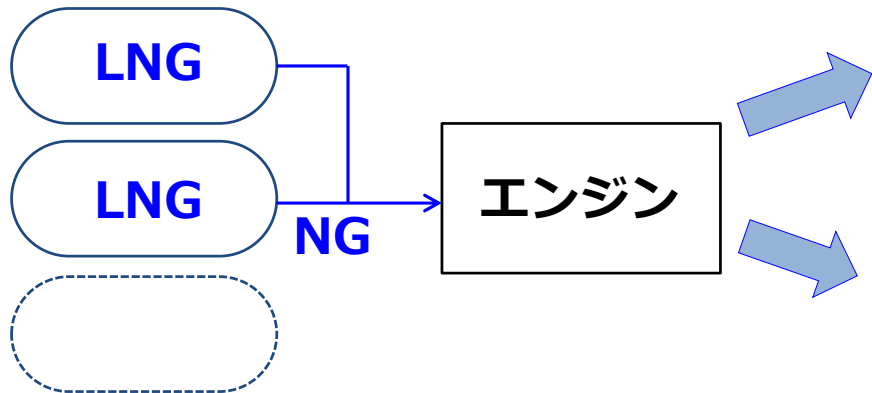
- 天然ガスはメタンが主成分で低炭素燃料であり、重油燃料よりCO₂排出が少ない。
- 天然ガスは地域的偏在が少ないため、供給安定性に優れる。
- 船用燃料としての利用技術が確立され、インフラ整備が進められている。
- 天然ガスからカーボンニュートラルに徐々に移行できれば、設備を継続的に使用しつつ低炭素化できる。
- CO₂の2.5倍の温室効果を持つメタンが排出される。

本研究では船用エンジンで水素・メタンを専焼・混焼する技術に着目

天然ガス/水素の専焼・混焼エンジンのシステムコンセプト

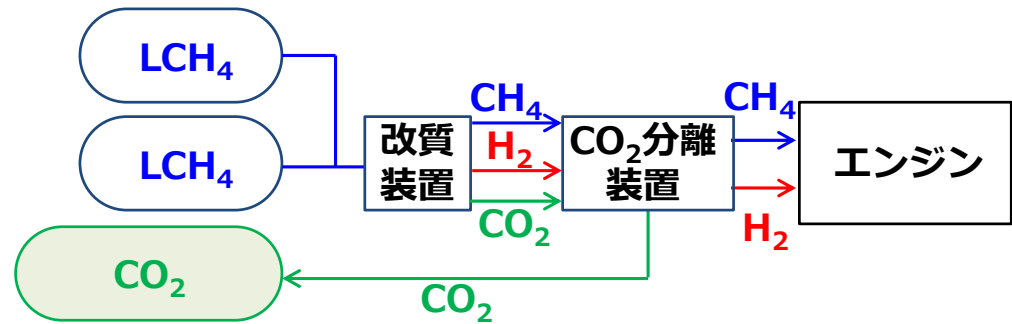


初期：LNG燃料船
(カーボンニュートラルレディ船)

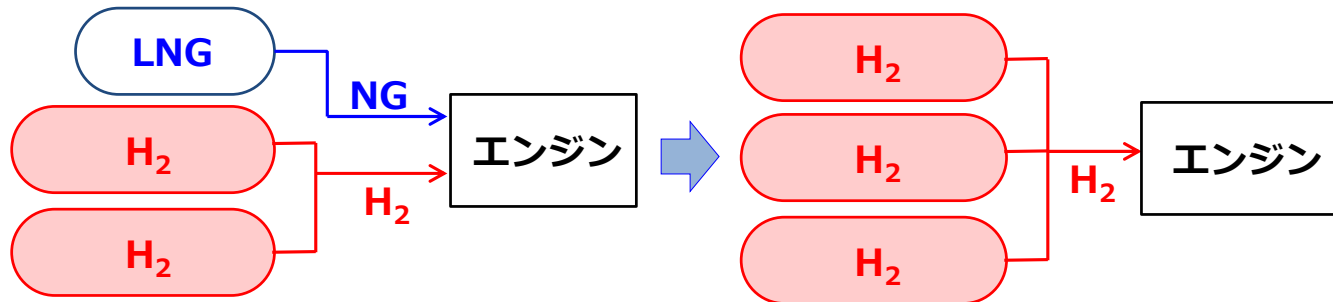


カーボンニュートラル化の方向性やインフラの整備状況、地域ごとの違いに応じて、柔軟に対応できる、カーボンニュートラルレディ船を想定

カーボンリサイクルメタンが普及した場合



水素が普及した場合



エンジンにおける水素利用の課題



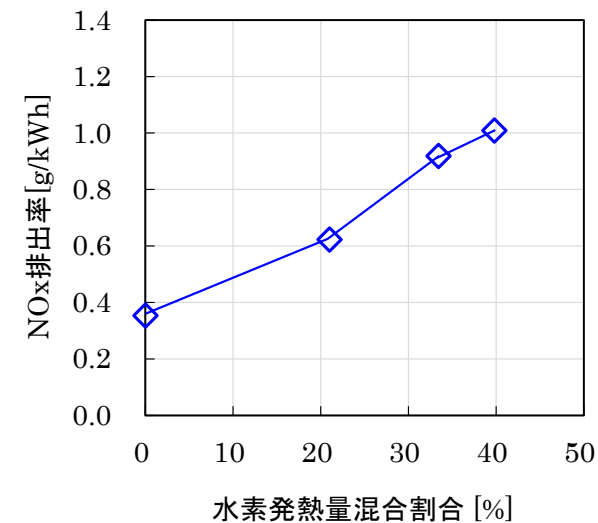
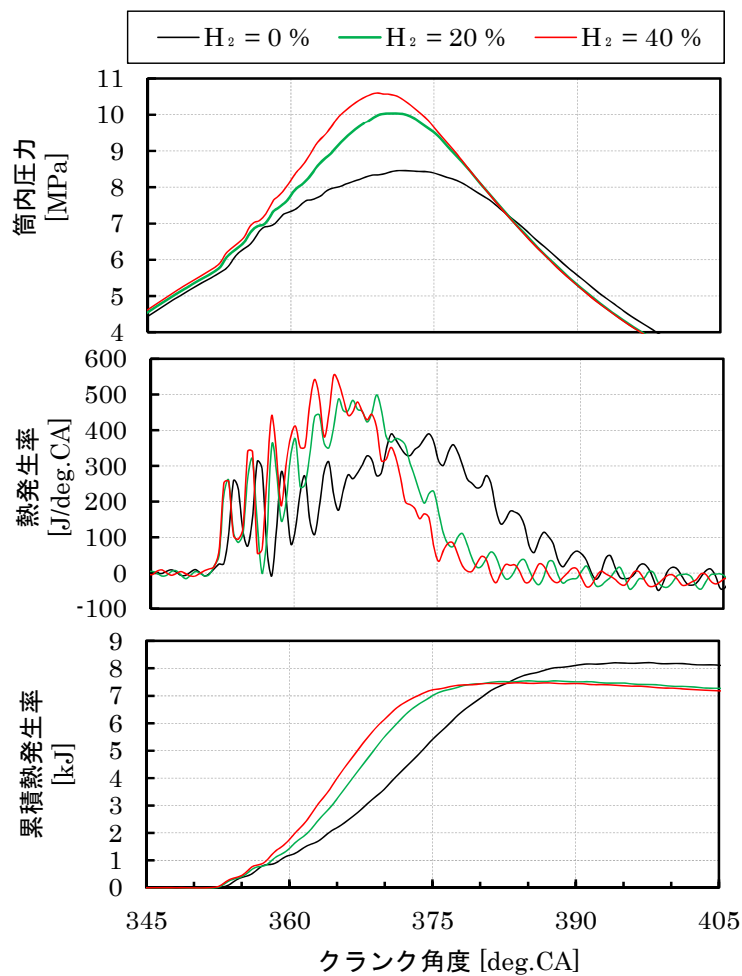
水素混合率の増加によって、燃焼速度が増大する。

燃焼期間が大幅に短縮することで、筒内圧力および温度が増大する。



- 熱損失の増大
- NO_x 排出率の増大
- ノッキングの発生

燃焼を抑制する
燃焼制御技術が不可欠



水素エンジンの開発動向



	出力(kW)	エンジンメーカー	開発目標年	備考
2スト	5000kW以上	J-ENG	2026年度※	GI基金
4スト	1000kW～ 2670kW	ABC、CMB	2020年	混燃(水素75%)
4スト	645kW	MAN	2021年	混燃(水素25%) 2020年代末に専焼エンジンを開発予定
4スト	776kW～ 2535kW	Rolls Roys, mtu	2023年	
4スト	不明	バルチラ	2025年	
4スト	2000kW～ 3000kW	川崎重工	2026年度※	GI基金
4スト	800kW	ヤンマー	2026年度※	GI基金(出力1400kWエンジンも順次開発)

※ 開発目標年は船舶搭載前の陸上試験完了を示す。

図 5.2.2-1 国内外における水素エンジンの開発動向

出展：国際海運の2050年カーボンニュートラル達成に向けて

研究目的と発表の概要



研究目的

水素専焼、天然ガス専焼，両燃料混焼の全てが可能な中・高速4ストロークガスエンジン技術を開発する。
特に燃焼速度が速く、着火し易い水素の燃焼制御技術、安全管理技術に着目する。

研究の手段

発電出力400kWの都市ガス用リーンバーンガスエンジンに対して、水素供給システムをレトロフィットし実験的に研究

開発したシステムでの実施研究課題

- 水素供給システムの検討と開発
- 水素安定燃焼技術の開発（希薄燃焼技術、EGR技術、給気水噴射技術）
- クランクケース内ガスの可燃性評価と対策技術の検討
- 水素によるメタンスリップ削減効果の検討
- 水素+EGRの制御による動特性の改善

本発表の概要

- メタン・水素およびその混合燃料の基本的特徴を解説し、水素供給システムを検討結果
- 既存エンジンへ水素を供給するために開発したレトロフィットシステム
- 負荷率50%において、ほぼ専焼に近い水素熱量混合率96%で実証運転に成功した結果
- 水素混焼時のクランクケース内ガスの可燃性評価結果



2. メタン、水素の物性と混焼時に留意すべき点

エンジン燃料としてのメタンと水素の特徴



	メタン CH ₄	水素 H ₂
分子量 [g/mol]	16	2
体積発熱量 [MJ/Nm ³]	35.8	10.8
ウォッベ指数 [MJ/Nm ³]	53.4	48.4
最大燃焼速度 (MPC) [-]	36	282
最小点火エネルギー [mJ]	0.29	0.015
着火温度 [K]	900~920	800~850
可燃範囲 [vol.%]	5-15	4-75
メタン価	100	0

水素がメタンと同じ出力を出すためには約3.5倍の体積供給が必要。

メタンと水素では同じインジェクタを使用しても同程度の熱量噴射が可能。
※ただし材料、漏れについて水素対応が必要

メタンに比べて水素はエンジン内で急速に燃焼が完了する。

容易に着火・燃焼する。
 ✓ 異常燃焼 (過早着火)
 ✓ クランクケース、煙道燃焼、逆火

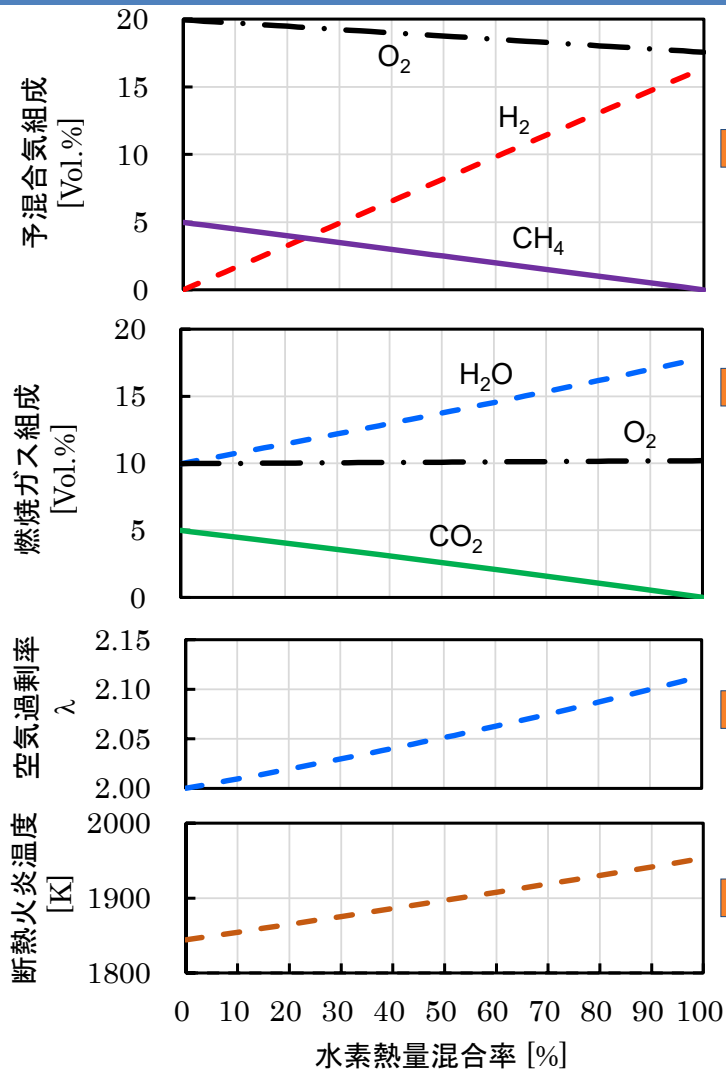
エンジンを壊す可能性があるノッキングが発生しやすい。

メタンに水素を混焼した場合の特徴



計算条件

- ✓ メタンにおいて、空気過剰率 $\lambda 2.0$ で運転している状態を基準とする。
- ✓ 水素混焼する場合、エンジンへの供給混合気量と燃料熱量を固定する。



水素混焼によって、シリンダ内燃料濃度が大幅に高まる。

※予混合気が出ているクランクケース内部も燃料濃度が増加する懸念がある

水素混焼によって、排気中の水分濃度が大幅に高まる。

※排気システムには、水分凝縮に対する配慮が必要

水素混焼によって、燃料濃度が高まっているが、燃焼に必要な酸素が不足するわけではない。

燃焼温度が高くなり、NOx生成を促進する可能性がある。

水素供給システムの検討



- エンジンの圧縮比やバルブタイミング、過給機などの基本諸元を変更せずに、水素の混焼、専焼を実現するレトロフィットシステムを開発
- 水素の急速な燃焼を抑制する技術として、希薄燃焼，排気再循環，水噴射技術を適用・試験できるシステムを開発
- 異常燃焼の対策として，シリンダ内燃焼状態の常時監視
- バックファイアの対策として，吸気ポート内の水素滞留を防止する噴射タイミングの吸気行程内制御を適用
- クランクケース内の燃料濃度計測・監視と空気を用いた強制換気システムを設置

3. 既存ガスエンジンに水素を供給するため 開発した水素供給システム

水素供給システムをレトロフィットしたエンジン



ガス機関の諸元

名称	AYG20L-SE (ヤンマー)
発電出力/回転速度	400 kWe / 1800 min ⁻¹
燃焼方式	ガス専焼/副室火花点火 /希薄燃焼
ボア/ストローク	155 mm / 180 mm
気筒数	6 気筒
総行程容積	20 L
負荷	発電機 + 抵抗器
使用燃料	都市ガス(13A)



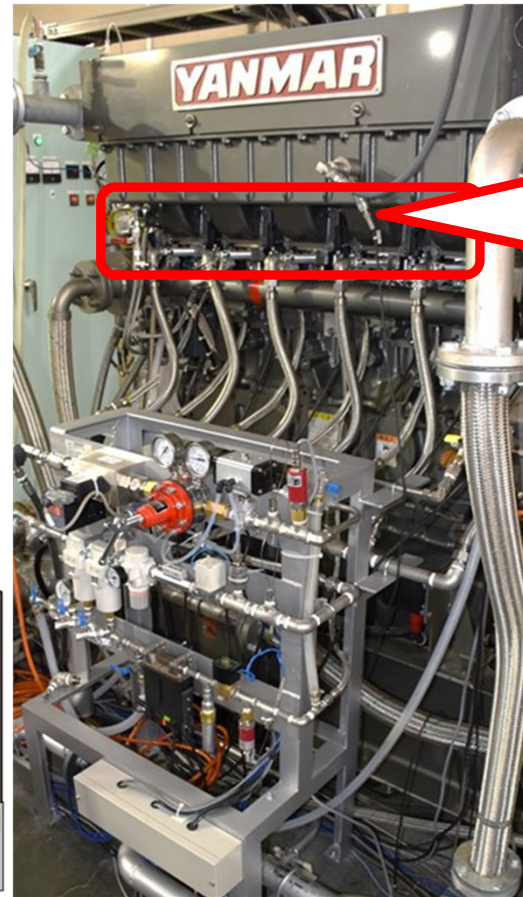
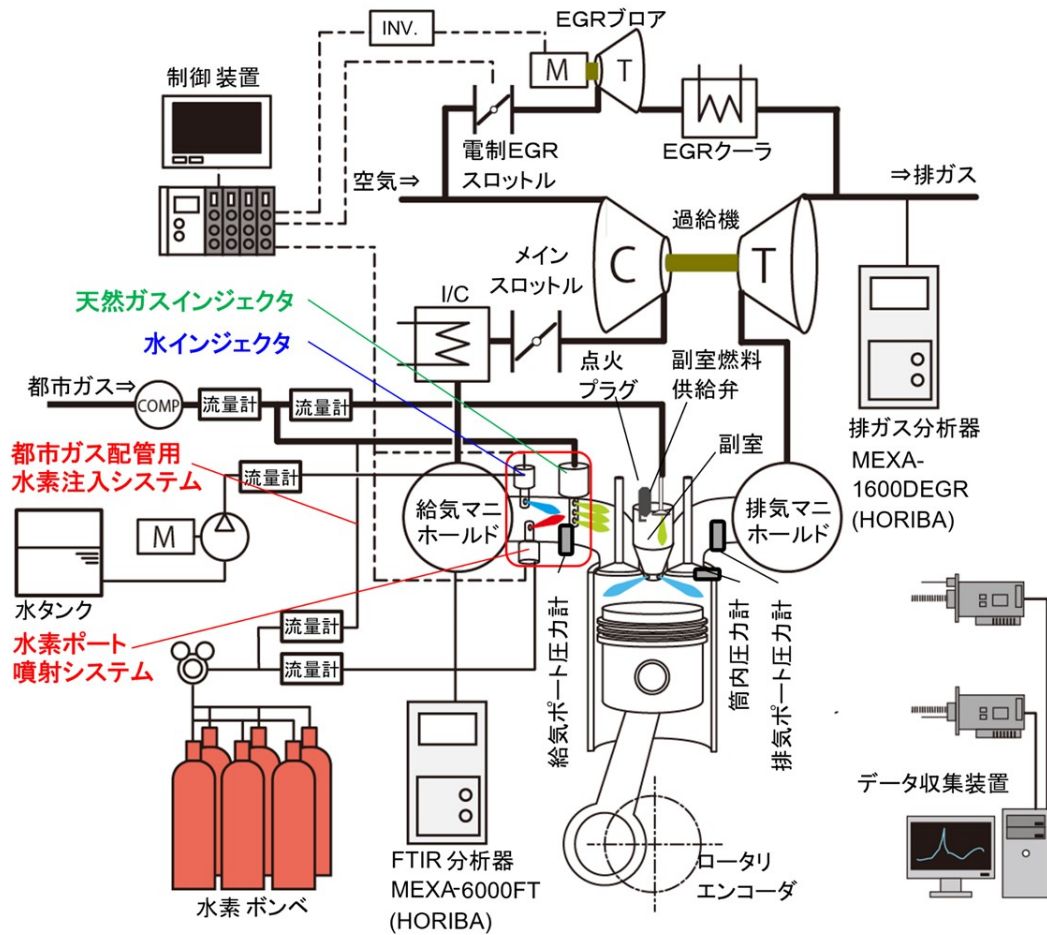
ガス機関の外観

天然ガスと都市ガスの組成

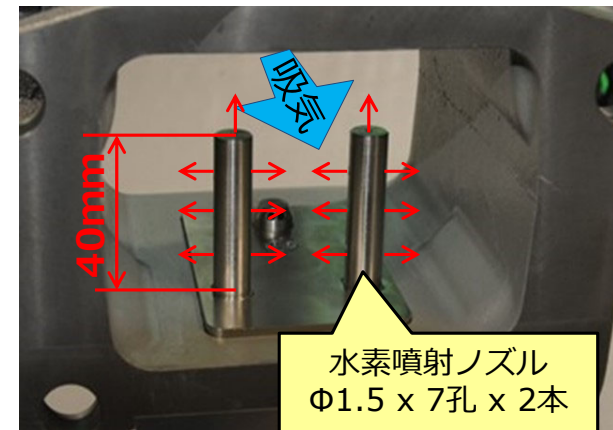
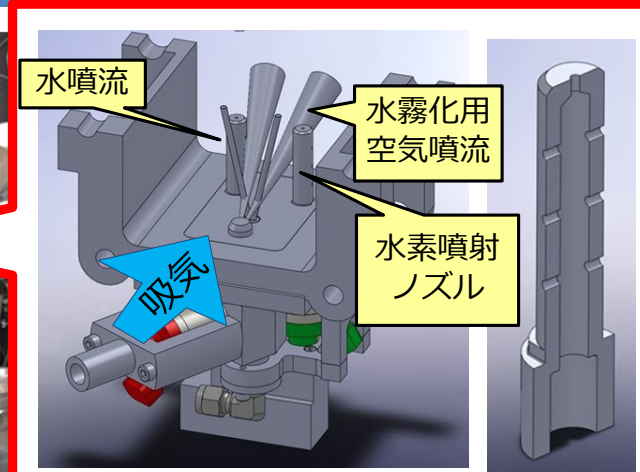


燃料代表性状[vol %]			
	都市ガス 13A	LNG オースト ラリア	LNG 組成範囲
CH ₄	87.3	87.3	81-99.7
C ₂ H ₆	6.8	8.3	0.1-12.4
C ₃ H ₈	4.6	3.3	0.03-3.5
C ₄ H ₁₀	1.2	1.0	0.01-1.4
N ₂	-	0.04	0.01-2.0

独自に開発した水素供給システム



水素供給システム設置の様子



水素噴射ノズル設置の様子

4. 水素96%混焼実証運転結果

水素96%混焼実験の運転条件



機関回転速度	1800 min ⁻¹	
発電出力(負荷率)	200 kWe (50%)	
図示平均有効圧力	0.77 MPa	
点火時期	-12.0 deg.ATDC	
水素熱量混合率	0 %	96 %
空気過剰率, λ	1.73	2.65
給気マニホールド圧力	146 kPa_abs	183 kPa_abs
給気温度.	30 °C	18 °C
副室燃料流量割合	2.5 vol.%	0 vol.%

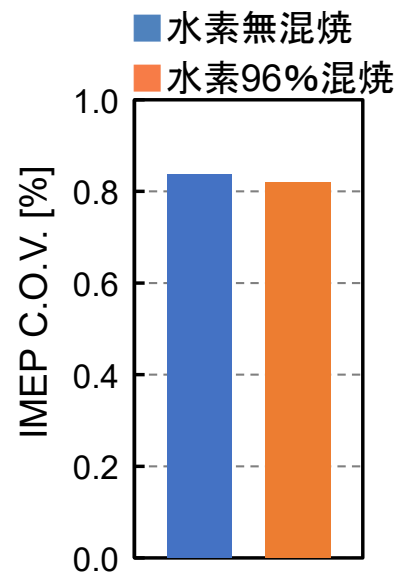
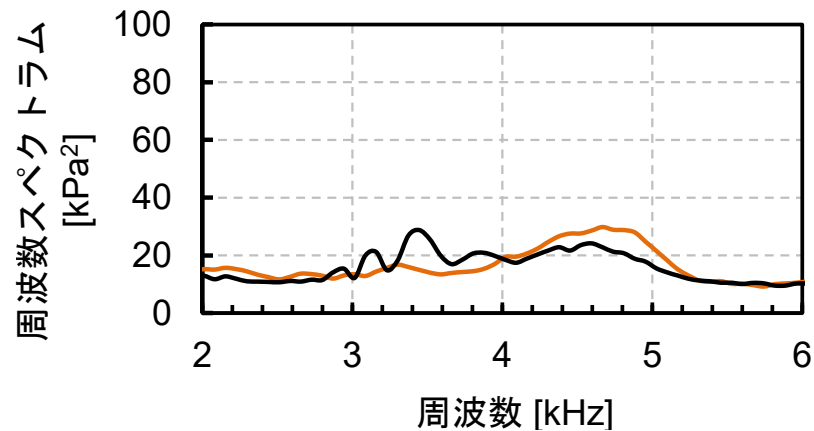
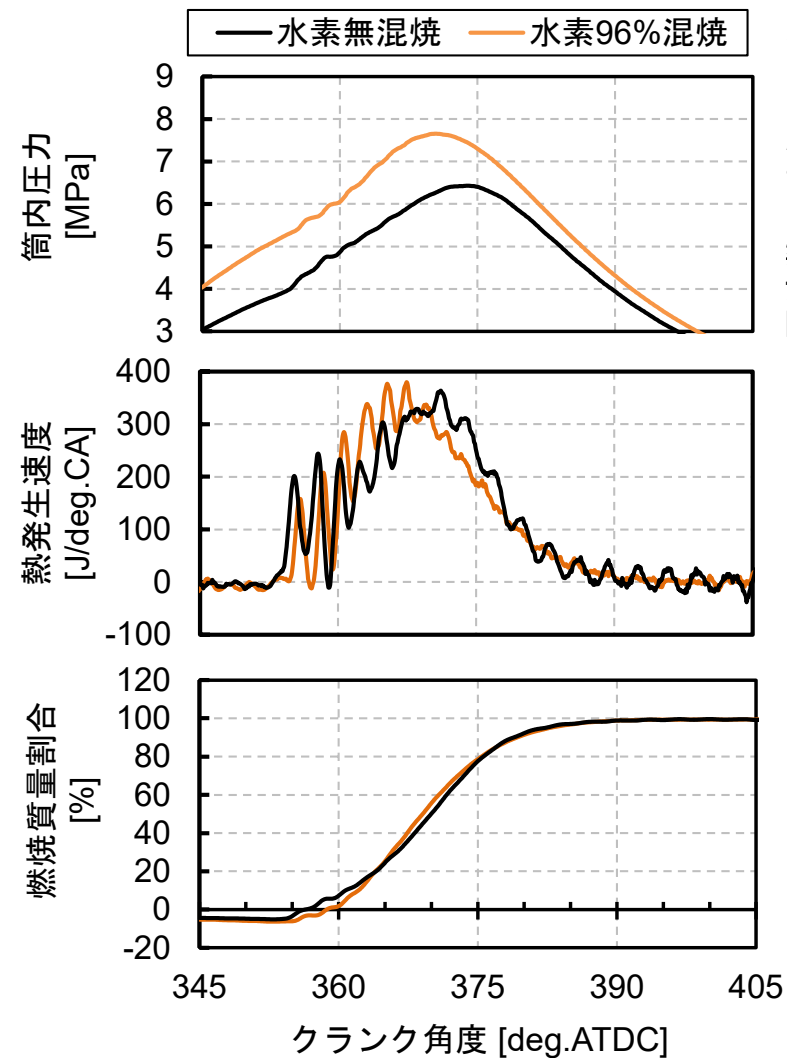
現状は、水素供給システムの制約から水素専焼運転ができない。
※96%混焼と専焼の差異は小さい。

燃焼期間が水素無混焼を同一になるように調整。

安定燃焼のためには副室燃料供給を停止が必要。

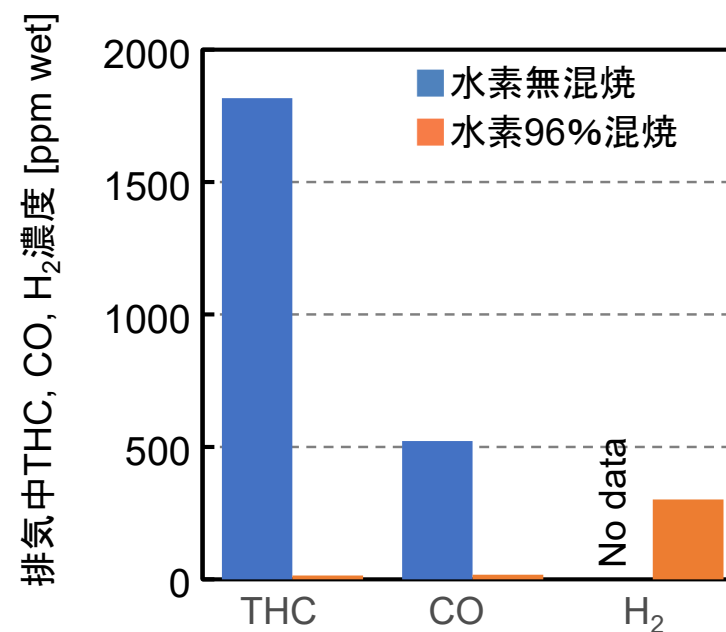
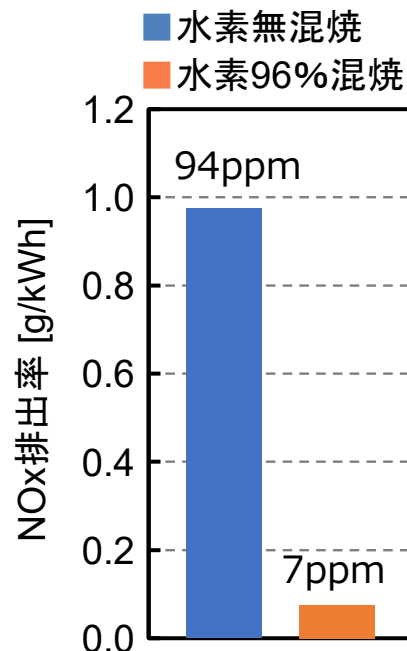
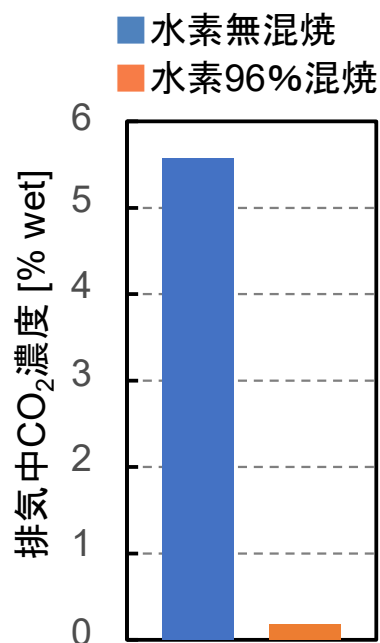
水素混焼時はクランクケース内水素濃度は常時監視し、水素濃度が可燃下限界よりも十分に低くなるように、空気による強制換気を実施。

水素96%混焼時の燃焼特性



- ✓ 空気過剰率を適切に調整すれば、水素96 %混焼時でも燃焼速度を抑制可能。
- ✓ 水素96 %混焼時でもノッキングやバックファイアなどの異常燃焼は発生していない。
- ✓ 水素96 %混焼時でも安定燃焼を実現。

水素96%混焼時の排気特性



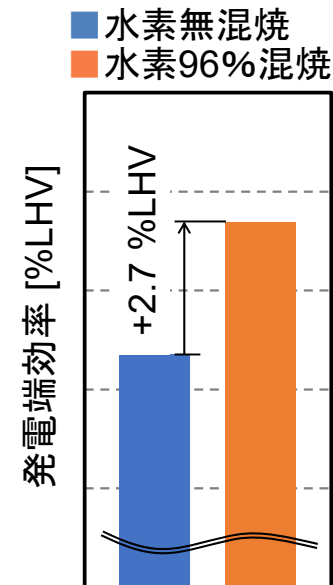
✓ 水素無混焼と比較して、NOx排出率が90 %以上低下。

✓ 水素96%混焼時の排気中H₂濃度は、水素無混焼時の排気中のTHC濃度（≒未燃燃料濃度）と比較すると大幅に低いことを確認。⇒排気中の未燃燃料濃度が大幅に低減可能。

水素96%混焼時の発電端効率



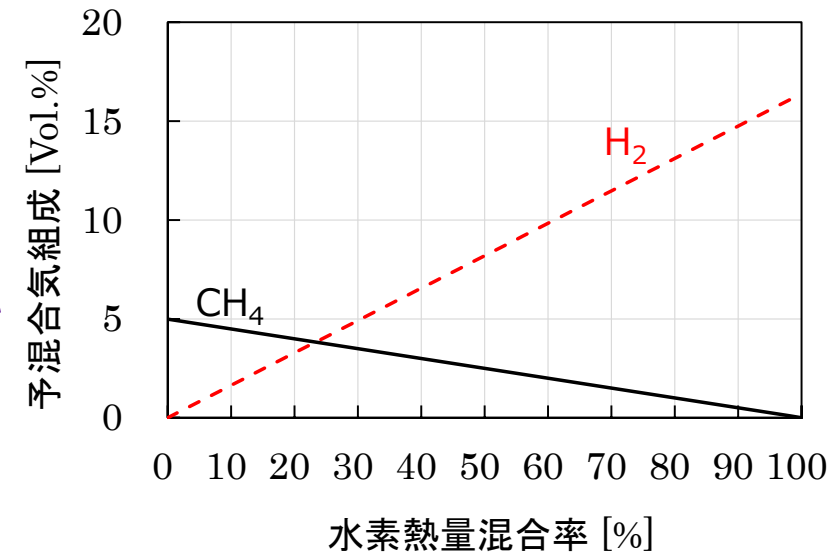
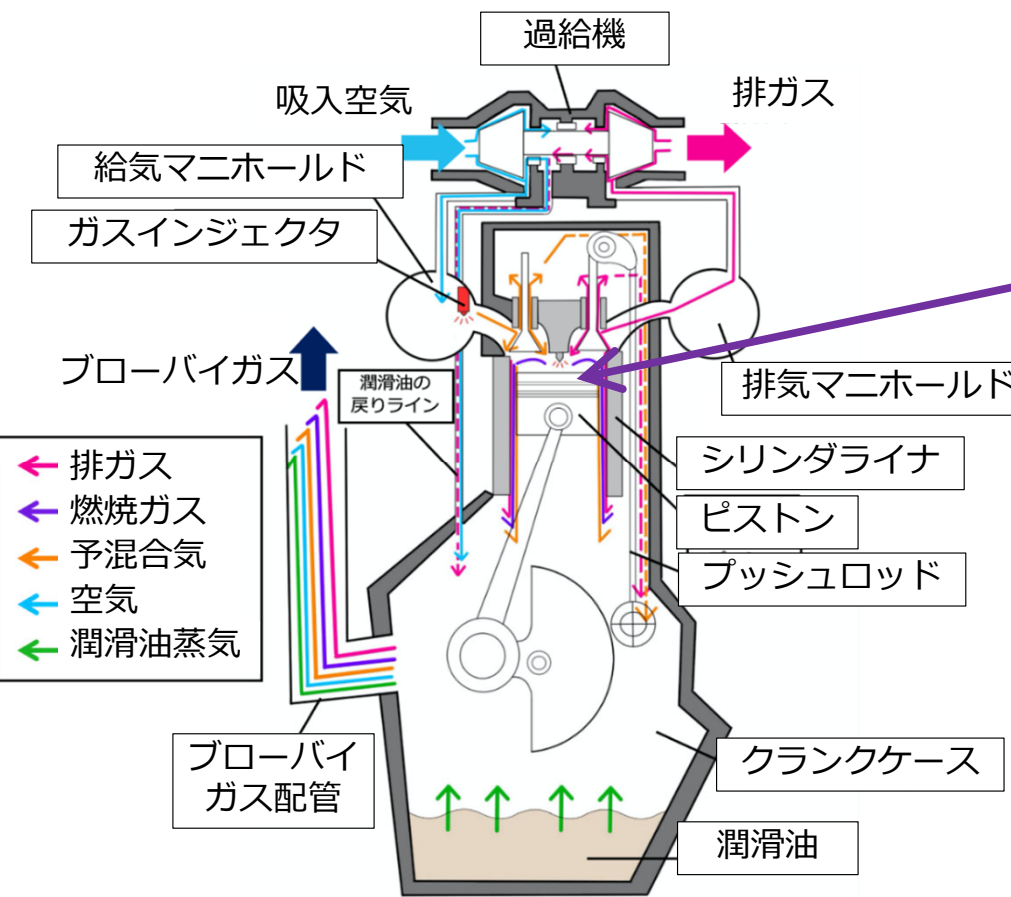
$$\text{発電端効率} = \frac{\text{発電出力 [kWe]}}{\text{燃料(都市ガス+H}_2\text{)供給熱量 [kJ/s]}}$$



- ✓ 水素無混焼時と比較して、熱発生速度と燃焼質量割合がほぼ同等であるにもかかわらず、発電端効率が +2.7 %LHV向上。（※未燃燃料低減や熱サイクル効率の向上が寄与）

5. 水素混焼時のクランクケース内可燃性評価

クランクケース内ガスと可燃性



- ✓ クランクケース内ガスの流入源は主としてシリンダ内の予混合気
- ✓ 水素熱量混合率の増加によってシリンダ内の燃料濃度は増加
- ✓ 水素は可燃範囲が広く容易に着火しやすい



クランクケース内が着火・燃焼する危険性が高まる。

ガス組成分析装置と試験条件



ガスクロマトグラフ

Agilent 490マイクロGC

検出器：熱伝導度検出器(μ TCD)

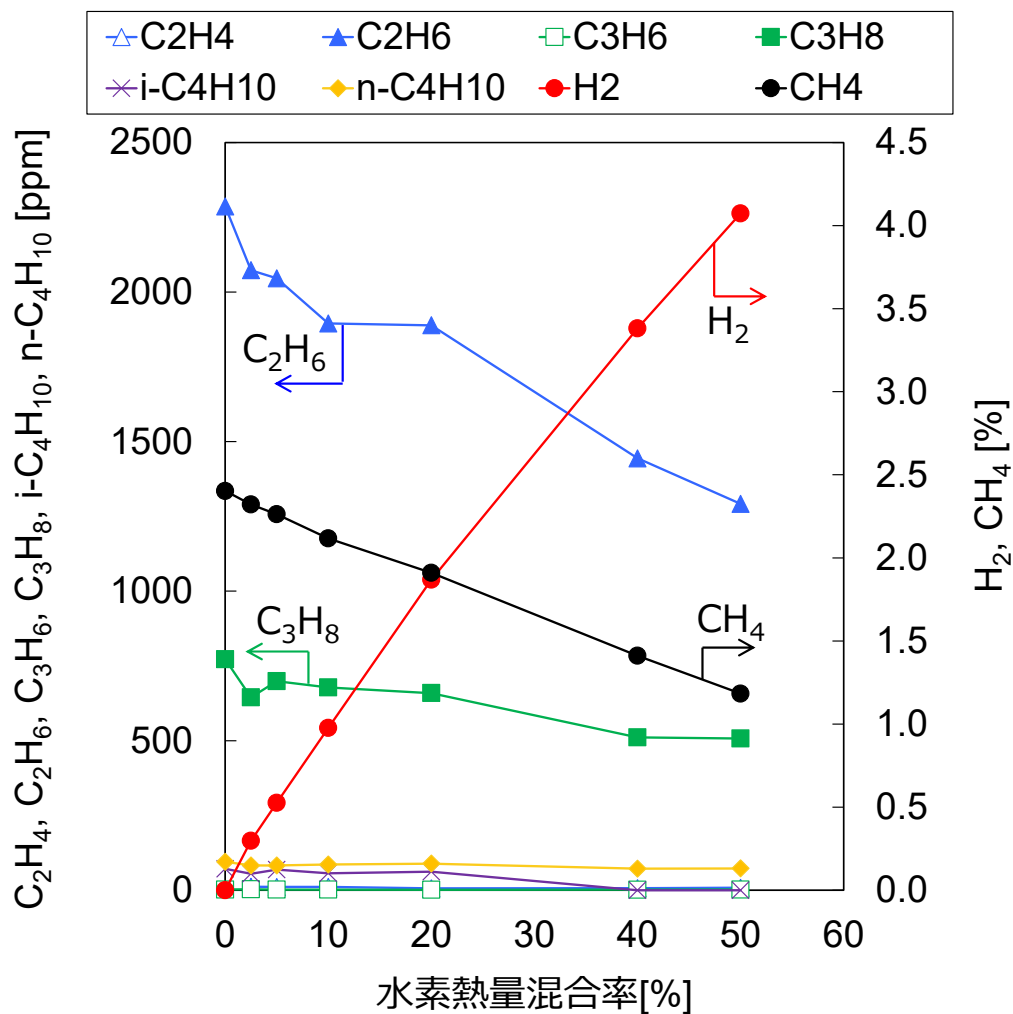
Ch.1 (キャリアガス：Ar)
 H_2 , O_2 , N_2 , CH_4 , CO

Ch.2 (キャリアガス：He)
 CO_2 , CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6 , C_3H_6 , C_3H_8 , $i-C_4H_{10}$, $n-C_4H_{10}$



機関回転速度	1800 min ⁻¹
発電出力(負荷率)	200 kWe (50%)
図示平均有効圧力	0.77 MPa
点火時期	-13.3 deg.ATDC
水素熱量混合率	0 ~50%
初期空気過剰率, λ	2.00
給気マニホールド圧力	146 kPa_abs
給気温度.	30 °C
副室燃料流量割合	2.5 vol.%

クランクケース内ガスの燃料組成



- ✓ 水素熱量混合率の増加によって、クランクケース内ガスの水素濃度が増大。
- ✓ 水素熱量混合率50%で、水素の可燃下限界4%に到達。

クランクケース内燃料濃度と可燃範囲



混合気の可燃下限界はルシャテリエの式を用いて推定した
(引用：新岡他，燃焼現象の基礎，(2001))

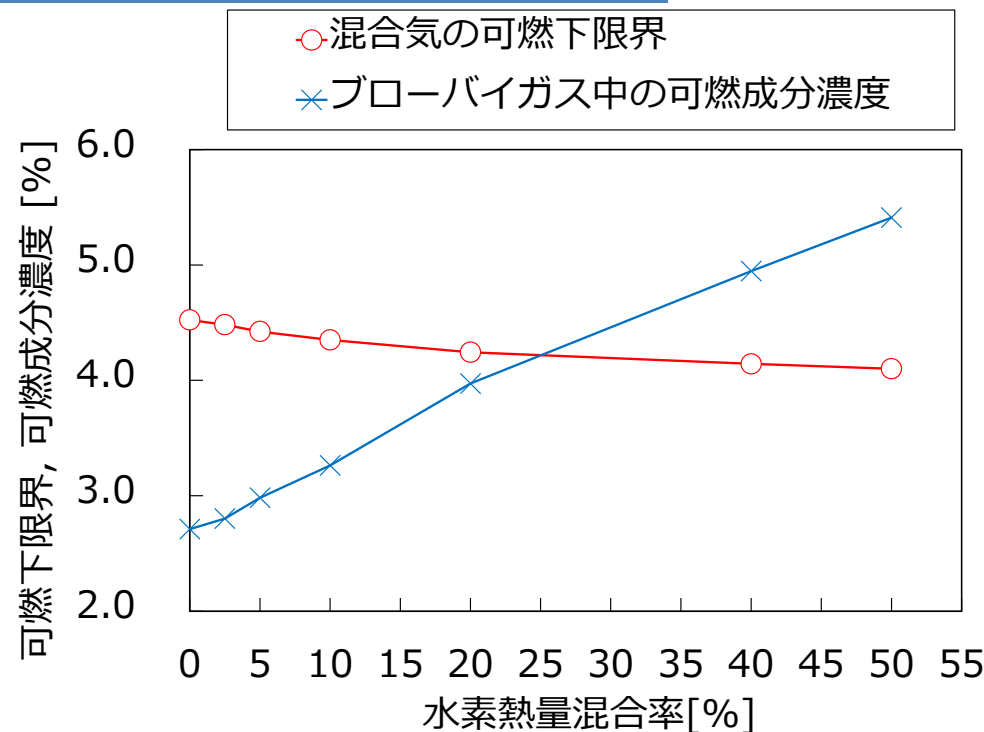
$$L = 100 / (n_1/L_1 + n_2/L_2 + n_3/L_3 + \dots)$$

L_i : i 成分の可燃下限界[vol.%]

N_i : i 成分の体積分率[vol.%]

	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀
可燃下限界 [%]	4	5	3	2.12	1.86

可燃成分は水素と都市ガス成分であるメタン，エタン，プロパン，ブタンを対象とした



- ✓ 水素熱量混合率25%でクランクケース内ガスは可燃範囲に到達。
- ✓ 水素混焼時は、クランクケース内ガスの燃料濃度を検知し空気などで強制換気することで可燃範囲に入らないように管理することが必要。

水素96%混焼運転時には、コンプレッサ空気によって強制換気して5倍程度に希釈しているため、水素濃度を2%以下に抑制できており、安全な状態で実験を行っている。

まとめ



- ✓ リーンバーンガスエンジンに対して水素供給システムをレトロフィットし、限定的な機種・運転条件ではあるが、負荷率50 %において水素96 %混焼時の運転に成功した。
- ✓ 副室燃料供給を停止し、希薄化することにより、燃焼期間を水素無混焼時と同等に調整することが可能であり、安定燃焼が実現できることを実証した。
- ✓ 水素96 %混焼時は、水素無混焼時と比較して、NO_x排出率および未燃燃料の排出が低く、発電端効率が向上できる利点もあることが明らかになった。
- ✓ 水素熱量混合率25%でクランクケース内ガスは可燃範囲に達した。水素混焼時は、クランクケース内ガスの燃料濃度を監視し、強制換気することで可燃範囲に入らないように管理する必要がある。

本研究における課題と今後の予定



- ✓ 設備上の制約から水素96%混焼が限界で水素専焼ができない。
⇒安定して水素専焼運転ができるように設備を改造。
- ✓ 高い負荷率では、異常燃焼（ノッキング、過早着火）が発生しやすいが、その発生条件や抑制技術が明らかになっていない。
⇒幅広い負荷条件で異常燃焼の発生条件を明らかにし、水噴射技術、EGR技術を適用して燃焼を抑制する実験を実施。
- ✓ 負荷の操作や変動に対応する水素混焼率や点火時期、空気過剰率などの制御アルゴリズムが未検討。
⇒強化学習を用いた水素混焼時のエンジン動的特性を含んだ制御アルゴリズムを開発中。
- ✓ 水素のバックファイアや煙道燃焼の発生条件や危険性が未検討。
- ✓ エンジン材料に対する水素脆化が未検討。
- ✓ 高速・補機特性といった特定機種の見解でしかない。 ⇒ より大型の中速エンジンへの技術適用の検討には、ノウハウが必要であり、メーカーの協力が必要。

現状設備での評価は難しいが、調査・検討が必要。

低負荷から高負荷までの幅広い条件において、水素専焼、天然ガス専焼、両燃料混焼を自在にかつ安全に実現できるエンジン技術の確立に向けて研究を推進する。



国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所
海上技術安全研究所
National Maritime Research Institute

