

船舶用 Dual Fuel (二元燃料) エンジンの開発動向

2024年10月

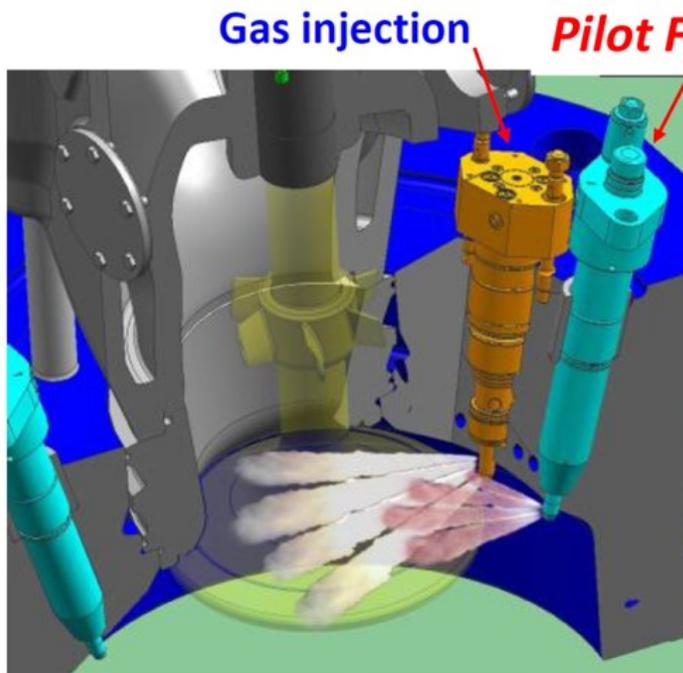
九州大学 名誉教授 高崎 講二

1. Dual Fuel (二元燃料) エンジンとは？
2. カーボンニュートラル燃料・ゼロカーボン燃料について・・・
3. メタノール(CH₃OH) エンジンの開発状況
 - 3.1 低速2ストローク・メタノールエンジン（ディーゼル型液体噴射）
 - 3.2 中速4ストローク・メタノールエンジン（オットー型とディーゼル型）
4. アンモニア (NH₃) エンジンの開発状況
 - 4.1 中速4ストローク・オットー型エンジンの開発
 - 4.2 低速2ストローク・ディーゼル型（液体噴射）エンジンの開発
5. 水素 (H₂) エンジンの開発状況
 - 5.1 中速4ストローク・オットー型水素エンジンの開発
 - 5.2 低速2ストローク・ディーゼルサイクル型（高圧気体水素噴射）の開発

1. Dual Fuel (二元燃料) エンジンとは？ 1種類の代替燃料と重油のどちらも使える・ClassNK

- 代替燃料のサプライ体制が整うまでは重油で運転することもあり得る。
(そのためには、船内の重油タンクは十分な容量を確保しておく必要がある。)
- 考えられる代替燃料はどれも重油より自己着火性に劣り、筒内での着火のため少量のパイロット重油が噴射される(右下動画)。
- 代替燃料が不足の場合は重油の噴射量を積極的に増やして「代替燃料と重油の混焼エンジン」に。

下図：天然ガスと重油の **DF** の例 (ME-GI)

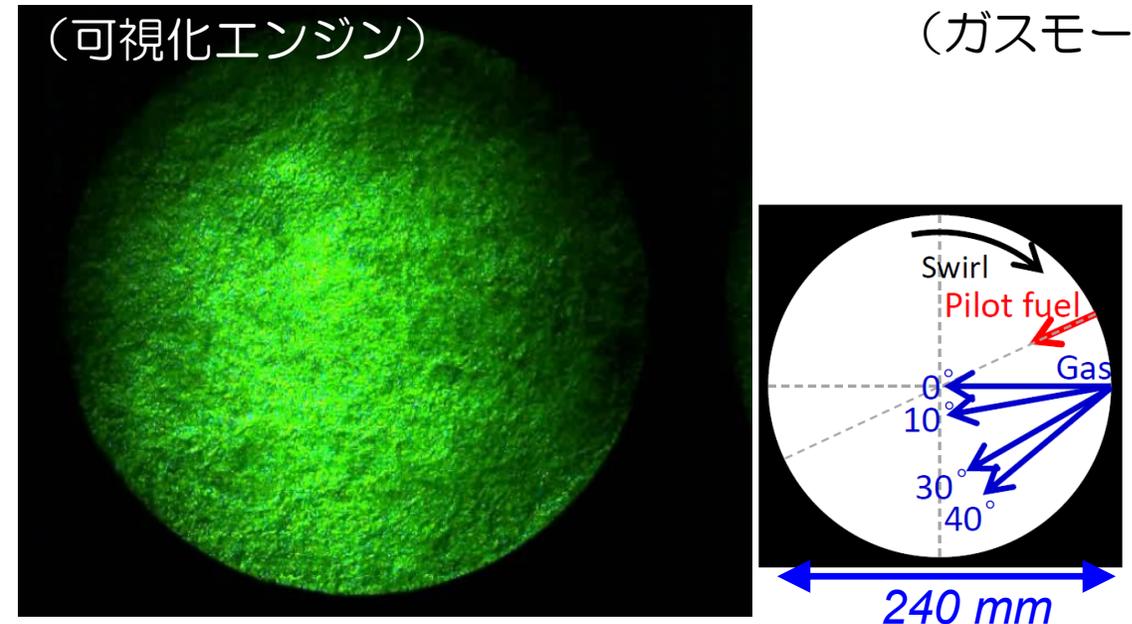


ガスモードではパイロット重油噴射弁であるが・・・

- ディーゼルモードでは全負荷分の重油を噴射。
- 天然ガス：重油の比率は選べる・・・

混焼モード

下図：少量の重油のパイロットで着火されるメタンの例 (可視化エンジン) (ガスモード)



2. カーボンニュートラル燃料・ゼロカーボン燃料について・・・

- 2050年に GHG（地球温暖化ガス）ネットゼロを狙える燃料

- ゼロカーボン燃料として・・・右図

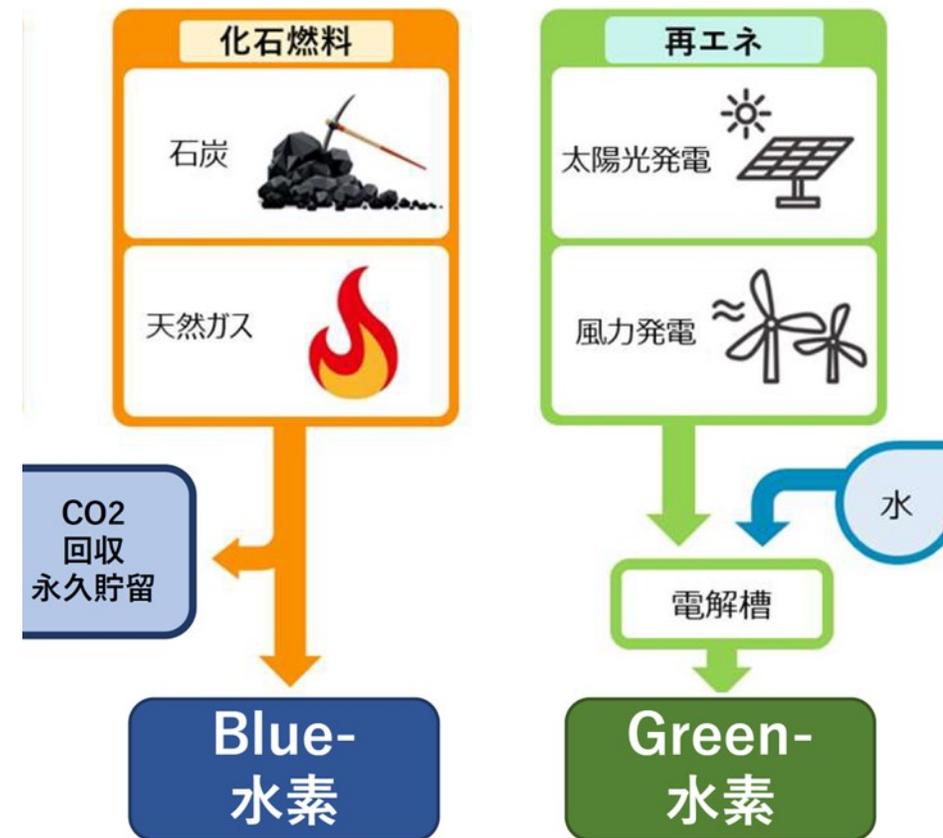
- グリーン水素（再生電力で水を電気分解して生成）
- ブルー水素（原料は化石燃料でもよいが、製造時に出る CO2 を回収貯蔵したもの）
- それらの水素と窒素を合成したアンモニア NH3

- カーボンニュートラル燃料として・・・

- バイオ燃料はすでに合格であるが生産量が少ない
- 合成メタン・合成メタノールは・・・

グリーン・ブルー水素に回収 CO2 を合成させる。

- それらの供給がない現時点では、グレーな作り方でもよいから運用を開始し、グリーン・ブルーな燃料が出て来た時点でそちらに換えて行くという考え方もある・・・

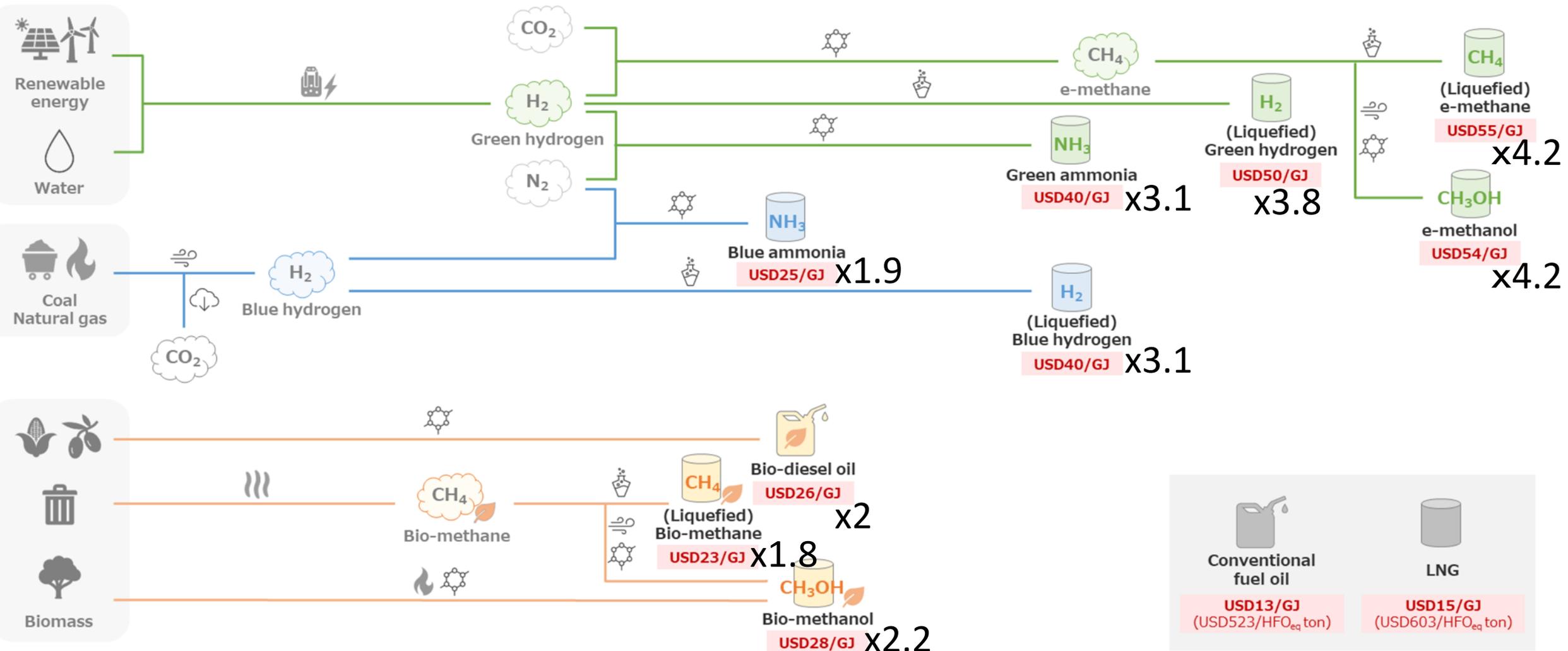


- 下図は 合成メタン CH₄ (=カーボンリサイクルメタン・グリーンメタン・・・) 製造法の例
- 同様に 合成メタノール CH₃OH (=グリーンメタノール・e-メタノール・・・) も製造可能・・・
- 陸側から CO₂ を回収して合成したメタン・メタノールは、カーボンニュートラル扱いとなること が期待される (IMO で協議)。



上図：メタネーションはグリーンメタン (=カーボンリサイクルメタン・合成メタン・・・) 製造法

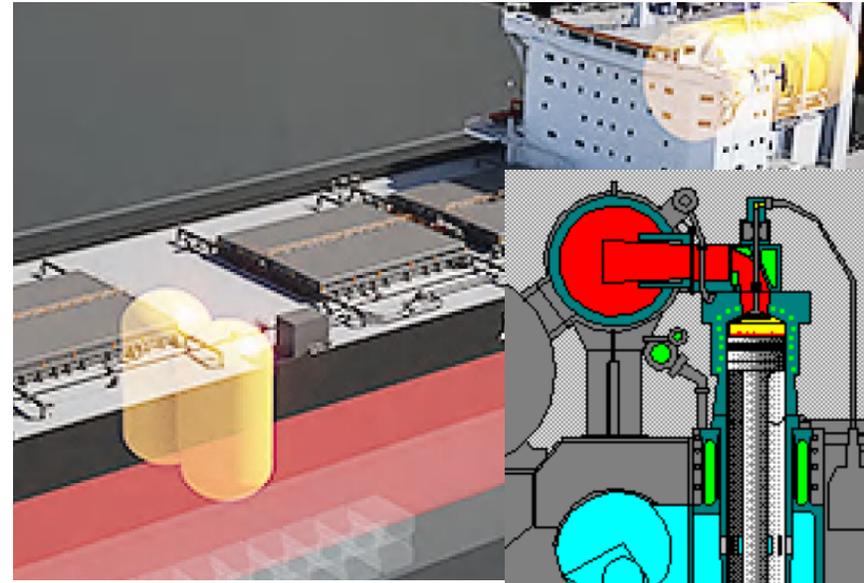
出典：MLIT HP 国際海運 GHG ゼロエミッションプロジェクト
国際海運の 2050年カーボンニュートラルに向けて (概要) 2022年 3月
<https://www.mlit.go.jp/maritime/content/001484433.pdf>



x 数字は対重油比

どの燃料も船内タンクでは液体

- ① バイオ 燃料 (FAME・HVO・SVO 等)・・・常温・常圧で液体
- ② (合成 or バイオ) メタノール・・・常温 (65°C以下)・常圧で液体
- ③ アンモニア・・・・・・・・・・-33°C以下で常圧で液体
- ④ (合成 or バイオ) メタン・・・・・・・・-162°C以下で液体=LNG
- ⑤ 水素・・・・・・・・・・-253°C以下で液体 (LH2)



エンジン側は・・・

・ バイオ燃料 (バイオディーゼルと呼ばれる FAME 等) は筒内に液体で噴射する=ディーゼル

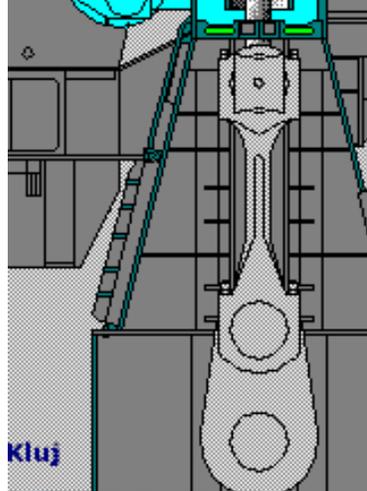
・ メタノール・アンモニアは、筒内への供給・燃焼パターンが2種類。

・ 液体ディーゼル噴射・噴霧燃焼 (低速2スト)

・ (4ストでは吸気管に供給) 気化した燃料と空気の予混合気によるオットー型燃焼も可

・ メタン・水素は FGSS から気体で供給 (燃焼はディーゼルサイクル or オットーサイクル)

注：FGSS (Fuel Gas Supply System) : メタン・水素を液体で昇圧後に気化させる



(低速2スト主機)

• 熱量当たり体積比＝同じ熱量を発生する船内燃料タンク容量の比 (重油を1とする)

• 実際の船上貯蔵方法

	水素 H ₂ (LH ₂)	アンモニア NH ₃	カーボンリサイクル CR 合成メタン CH ₄	CR 合成メタノール CH ₃ OH	バイオディーゼル (FAME)
低位発熱量 (GJ/t)	120.0	18.8	50.0	19.9	37.1
液体密度 (t/m ³)	0.0708	0.7	0.422	0.79	0.885
熱量当たり体積比 (VLSFO 比、@液化状態)	4.42	2.86	1.78	2.39	1.14
沸点 (°C) (大気圧下)	-253	-33	-161	65	345~354
船上での貯蔵方法 (液体状態)	真空防熱 タンク	Type C (低温 or 加圧) 独立方形タンク/ メンブレン	Type C (低温 or 加圧) 独立方形タンク/ メンブレン	常温常圧 船体付きタンク	常温常圧 船体付きタンク
船上貯蔵時の性状 (液体状態)	abt.-250 °C、 0.5 MPa	-30~-10 °C、 0.07~0.5 MPa	-160~-140 °C、 0.07~0.5 MPa	常温、常圧	常温、常圧

国土交通省ホームページ

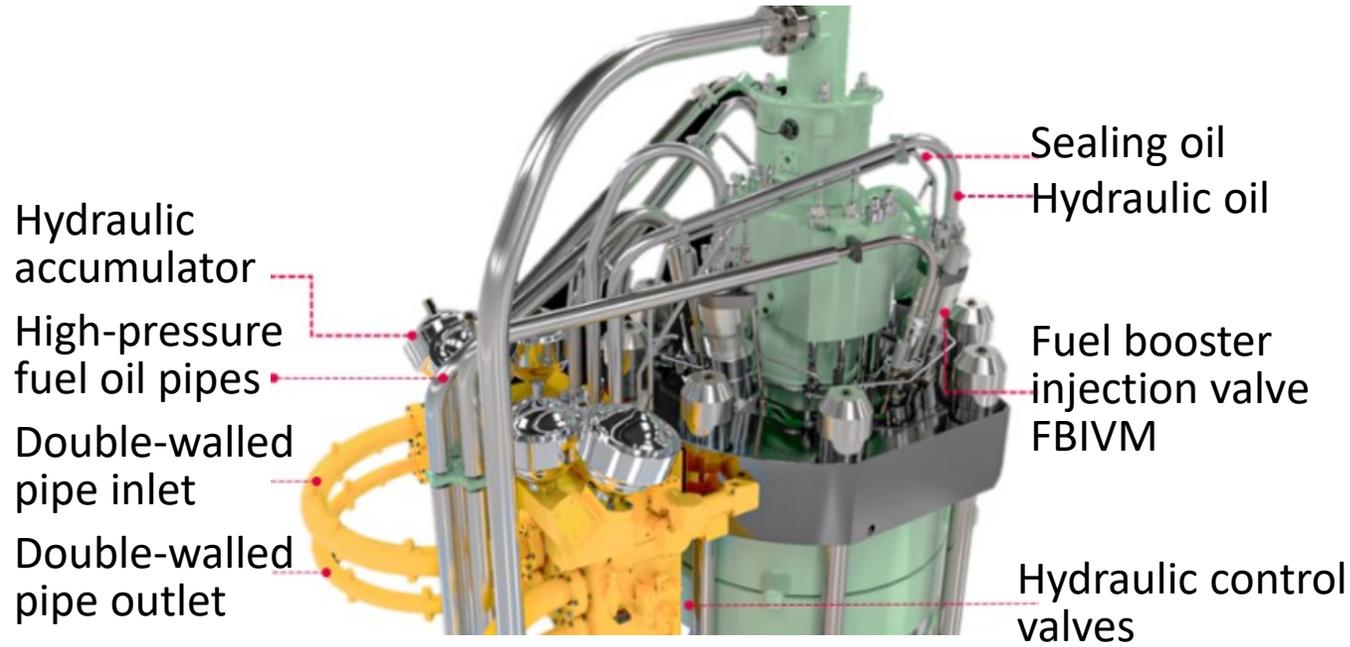
<https://www.mlit.go.jp/maritime/content/001484435.pdf>

	重油	メタノール CH₃OH	アンモニア NH₃	メタン CH₄	水素 H₂
液比重 kg/m ³ @ 沸点	989@15°C	749	682	423	71
沸点 °C @ 大気圧	---	65	-33	-161	-253
自己着火温度 °C	250	440	630	537	585
引火点 °C	>60	12	---	-175	---
最小着火エネルギー mJ		0.174	45	0.274	0.017
燃焼速度 cm/s		48	7	37	270
低位発熱量 MJ/kg	40.5	19.9	18.6	50	120

- 重油比較の代替燃料の性状として、低引火点（アンモニアを除く）しかし高自己着火温度
- メタノール・アンモニアでは質量当たり発熱量が低い・・

3. メタノール (CH3OH) エンジンの開発状況

3.1 低速2ストローク・メタノールエンジン（ディーゼル型液体噴射）



MAN 社の低速2ストローク・メタノールエンジン
8G95ME-C10.5-LGIM-EGRTC (シリンダ径: 950 mm)
シリンダカバー部 (MAN ES 社提供)

低引火点・毒性・安全対策・2重管部 (黄色部)
高い自己着火温度・メタノール噴射弁とパイロット噴射弁 (3対)



WinGD 社の低速2ストローク・メタノール
エンジン開発のための単気筒テストエンジン
(シリンダ径: 920 mm) (WinGD 社提供)

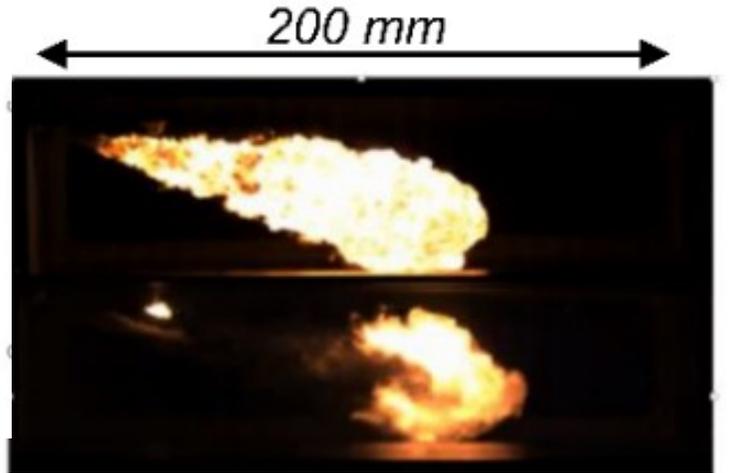
低速2ストローク・メタノールエンジン（ディーゼル型液体噴射）の燃焼

右：メタノール噴霧燃焼
可視化研究のご紹介

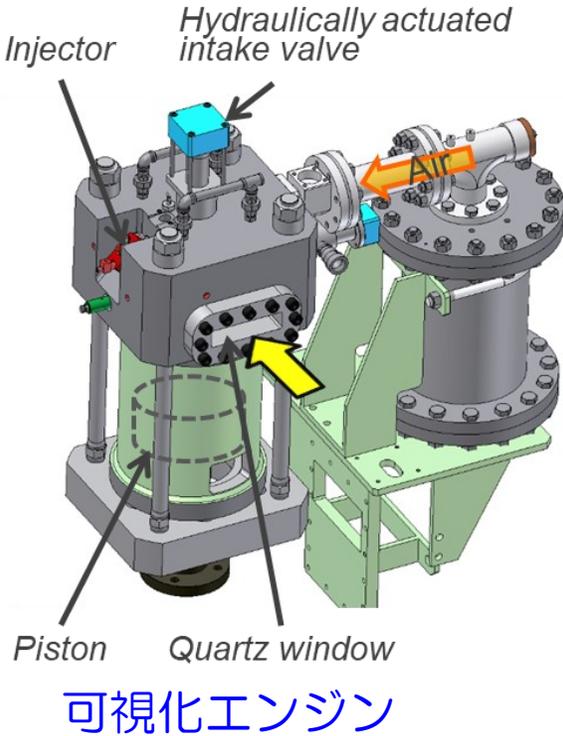
同じ熱量を発生するため、大噴口から軽油の2.5倍のメタノール体積を噴射。
メタノールは不輝炎。
右下：シャドウグラフの灰色がメタノール火炎

Gas Oil
Inj. hole dia
0.5 mm

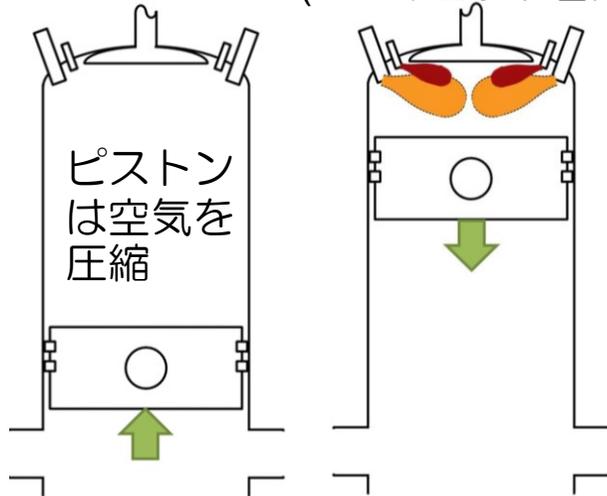
Methanol
Inj. hole dia
0.8 mm



(上写真) 軽油とメタノール火炎の直接撮影
筒内圧力・温度 (10 MPa, 500°C)



液体メタノール噴射
(+パイロット着火)



Gas Oil
Inj. Hole Dia. **0.5** [mm]
Inj. Press. **89** [MPa]

Methanol + Pilot
Inj. Hole Dia. 0.8 [mm]
Inj. Press. **57** [MPa]

Reference
Methane CH4 + Pilot
Inj. Hole Dia. **1.0** [mm]
Inj. Press. **30** [MPa]



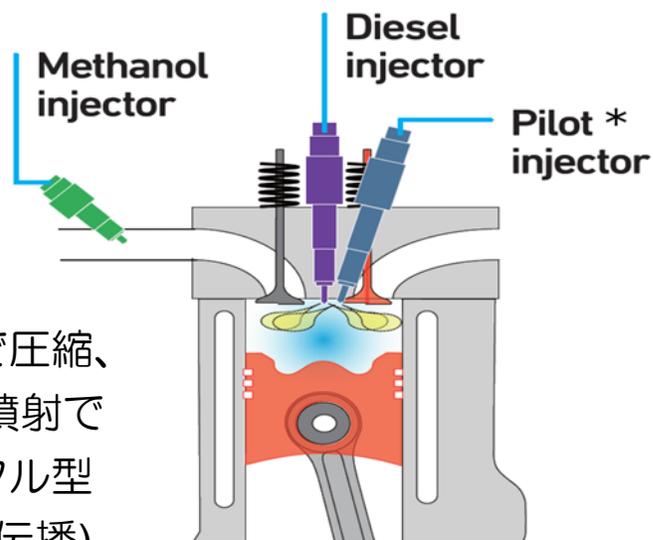
MOVIE | 5.0 [deg. ATDC]

オットー型 LP(Low Pressure)-PFI

Port Fuel Injection

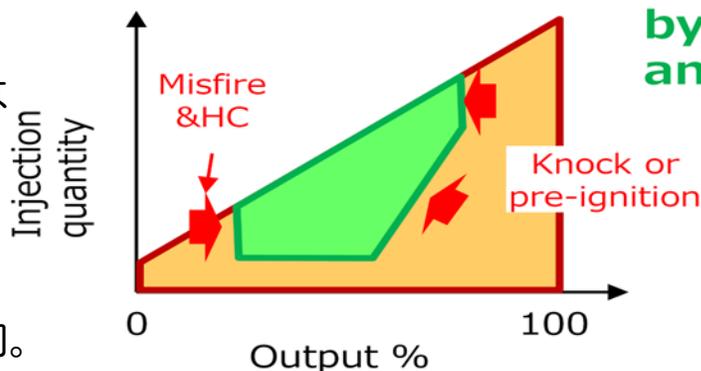
低圧・吸気管噴射

予混合気をピストンで圧縮、重/軽油のパイロット噴射で着火、オットーサイクル型燃焼（混合気中の火炎伝播）



*:Pilot injector may not be required.

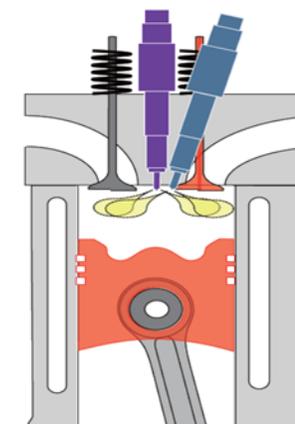
- メタノール低圧噴射系はシンプル
- オットー型燃焼ではノッキング等異常燃焼の可能性あり、メタノール使用の出力範囲が限定傾向。



Restricted by knocking and misfire

HP(High Pressure)-DI ディーゼル型

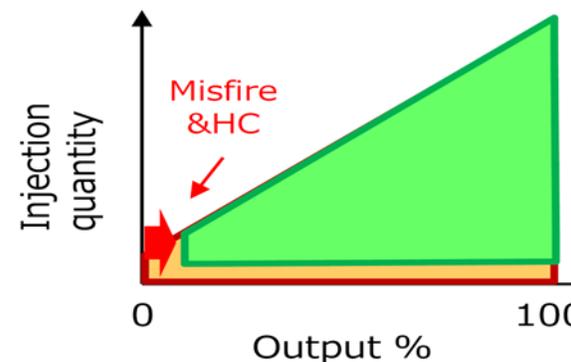
Methanol / Diesel injector



Direct Injection

高圧・(筒内) 直接噴射
ディーゼル噴霧燃焼
(前述の低速2ストと同)

- 重/軽油の噴射系に加えて、メタノール噴射系として重油比2倍以上の噴射量を賄う高圧システムが必要。



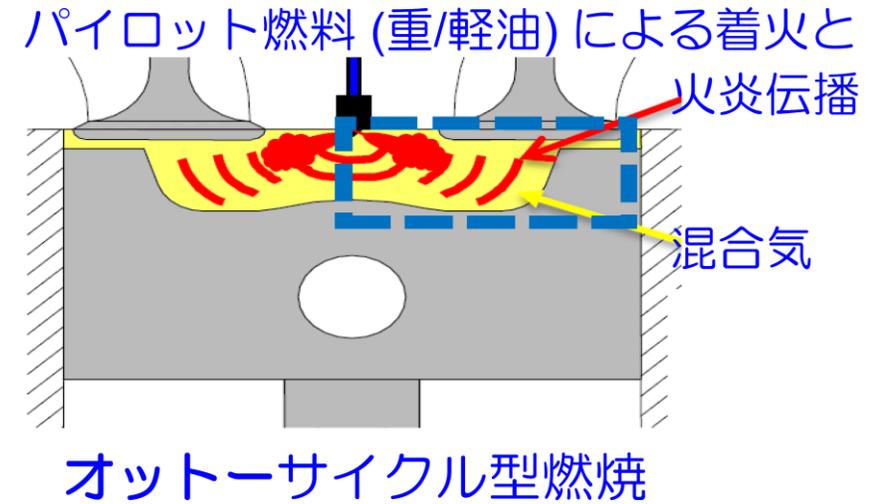
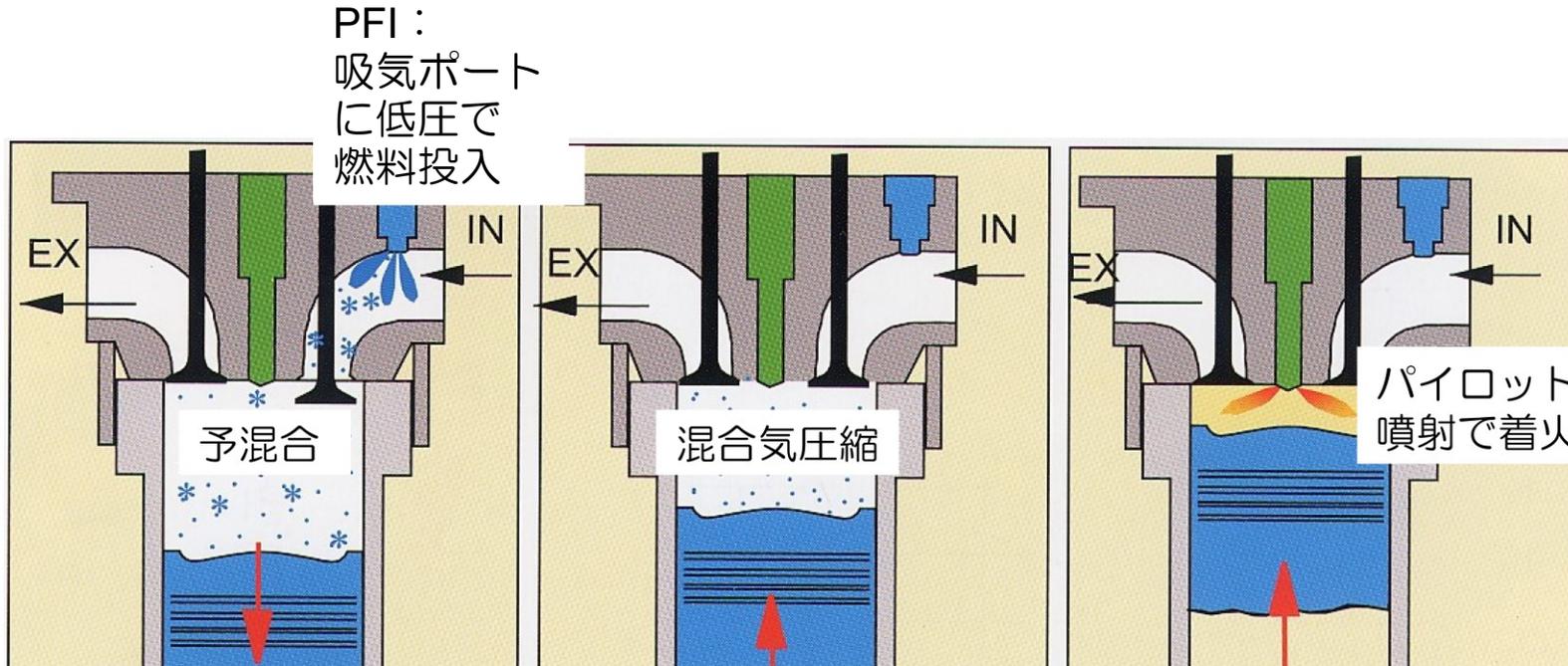
Close to Current diesel

- ノッキング等の異常燃焼なし。高出力をカバー

出典：YANMAR Power Technology CO., LTD.

参考：オットーサイクルの燃焼パターン

ディーゼル燃焼のイメージは、すでにメタノール・ディーゼル火炎の動画でご理解頂きました。
 一方・・・（天然ガスエンジンだけでなく）・メタノール・アンモニア・水素燃焼の4ストエンジンでは
 下図のオットーサイクル型燃焼が出て来ます。



4ストローク・メタノール DF エンジンの開発状況

欧州

- MAN 社の 4ストローク・メタノールエンジン
Genset（発電機）用の L21/31DF-M を開発済み・・・PFI のオットー型。2025年 1Q からデリバリー
（Genset 用の L27/38DF-M まで PFI のオットー型）
- Wartsila 社・・・ディーゼル型・・・発電機用 Wartsila 32 メタノール 2023年 2Q からデリバリー

国内

- ヤンマーPT・ダイハツディーゼルで開発中。オットー型とディーゼル型との性能概要比較を発表。
- 阪神内燃機・低速4スト主機・・・ディーゼル型
LA28M を搭載した内航初のメタノール燃料船「第一めた丸」命名・進水・2024年 7月 4日同社HPニュース
- 赤阪鐵工所・低速4スト主機・・・ディーゼル型
コモンレール式の電子制御システムを組み込んだ DF エンジンを 2026年に開発完了予定
・・・2024年 6月24日同社ニュースリリース

4. アンモニア (NH3) エンジン開発状況 (下図は GI 基金テーマ)

アンモニア燃料国産エンジン搭載船舶の開発 事業期間：2021～2027 年度 (7 年間)



出典：日本郵船 (株)、(株) ジャパンエンジンコーポレーション、(株) IHI 原動機、日本シッパヤード (株)

2021年

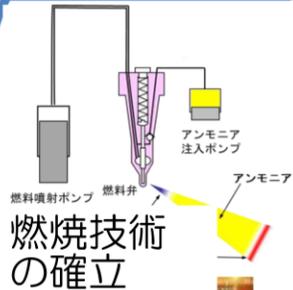
2024年

2026年

NEDO HPより

エンジン開発

- アンモニア燃焼技術の確立/エンジン設計



内航船(アンモニア燃料タグボート)の開発・運航



国産4ストローク主機の社会実装
世界に先駆けてアンモニア燃料船を実現

竣工

(4ストローク機関は、気体 NH3+ 空気の混合気を燃焼させる 予混合燃焼型 = オットー型)



外航船(アンモニア燃料アンモニア輸送船)の開発・運航



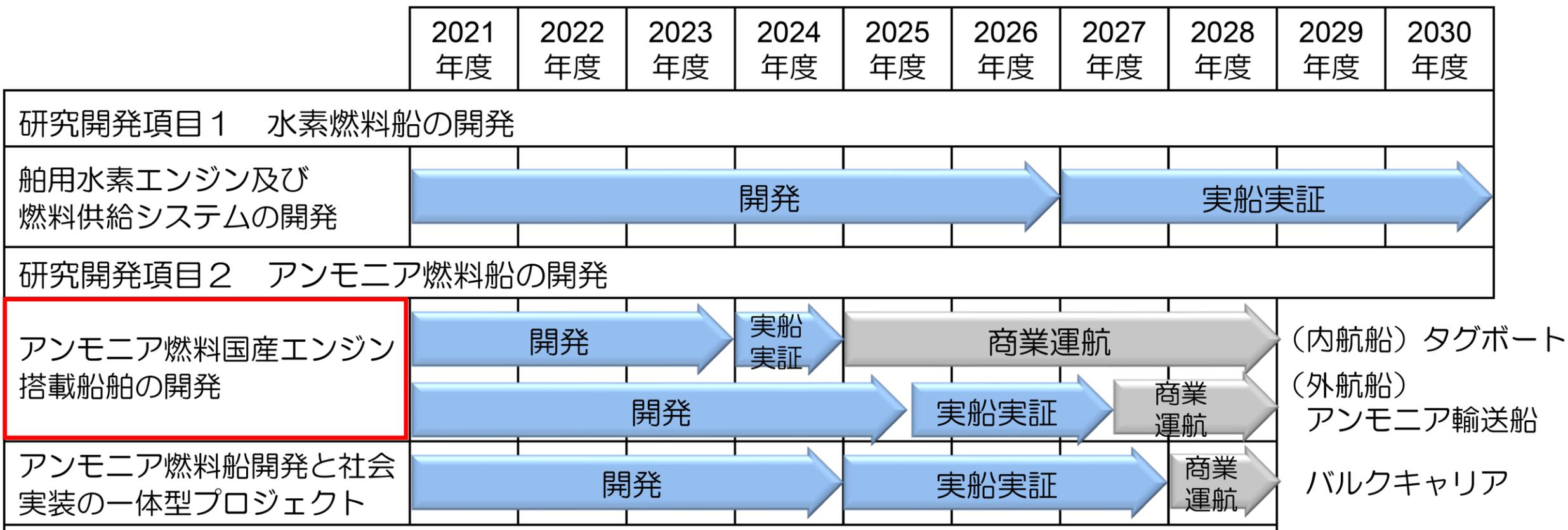
国産2ストローク主機/国産4ストローク補機の社会実装
アンモニア燃料外航船の社会実装
アンモニア海上輸送の低炭素化

竣工

(低速2ストローク機関は、液体 NH3 を筒内噴射・噴霧燃焼させる ディーゼル)

実機設計・製造





(2024年 1月時点) NEDO HP : GI 基金 次世代船舶の開発

4.1 中速4ストローク・アンモニア（オットー型）エンジンの開発（GI 基金）ClassNK

NK が世界で初めてとなるアンモニア燃料船用エンジンの船級型式承認を発行。NK Press Release 2024年4月

アンモニア燃料タグボート(内航船)

用途	種類	ボア径 (mm)	出力 (kW)
主機	4ストローク	280	約1,600

用途	2021年度	2022年度	2023年度	2024年度	2025年度	2026年度	2027年度
主機	4ストロークエンジン開発・製造・試験運転			竣工			
船体開発	船体設計・試験運転・建造						
運航	法令対応・運航マニュアル策定				実証運航・実装運航		



A-Tug用中速4ストローク28ADF型エンジン（出力：1618kW/台
 ・D/S：280/390mm・6気筒・回転数：750rpm・Pme：1.8MPa）



A-Tug さきがけ（主機出力1618kW x 2台）

「日本の技術で海と未来を変える」～2026年竣工へ加速～



アンモニア燃料アンモニア輸送船(外航船)

用途	種類	ボア径 (mm)	出力 (kW)	用途	2021年度	2022年度	2023年度	2024年度	2025年度	2026年度	2027年度	
主機	2ストローク	500	約8,000	主機	2ストロークエンジン開発・製造・試験運転					竣工		
補機	4ストローク	200 250	約1,300	補機	4ストロークエンジン開発・製造・試験運転							
				船体開発	船体設計・試験運転・建造							
				運航	法令対応・運航マニュアル策定・事業性検討							実証運航・実装運航



AFMGC イメージ図

NEDO HP [「次世代船舶の開発」](#)
[NEDO グリーンイノベーション基金](#) より・・・

J-ENG (ジャパンエンジン社) アンモニアエンジンの開発状況



In May 2023, The world's first low-speed 2-stroke engine Ammonia fuel operation has started.

Optimizing various operation parameters, determining fuel efficiency and exhaust gas performance, and verifying safety

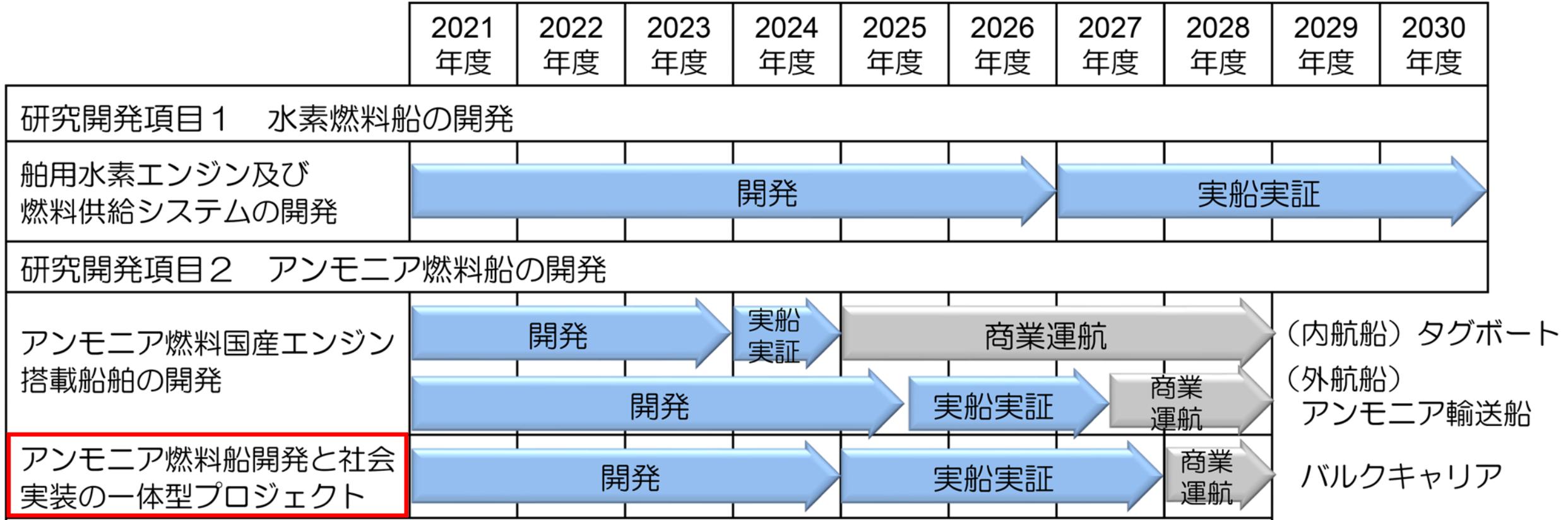


低速2ストローク・単気筒テストエンジン

アンモニア供給設備



もう一つのアンモニア燃料船計画



前頁・石炭運搬船（バルカー）の主機として三井 E&S 社が 7S60-LGIA 型アンモニアエンジンを製造。

その開発のため、MAN 社コペンハーゲン・リサーチセンターのテスト機での試験（2023年7月開始）

単気筒試験 途中結果

パイロット油消費量：他のLGI機関と同等

N₂O：非常に低い（エンジンチューニングで対応）

NO_x：燃料油運転より約40%低い（更なる検証を継続中）

NH₃：NO_x排出量とバランスさせSCR技術によって両方を除去する予定

2024/4 現在 単気筒試験は継続中

- ・ 排ガスエミッションの最適化
- ・ アンモニアスリップの低減
- ・ 掃気管等へのアンモニア混入の有無確認
- ・ アンモニア特有の材質/構造変更の必要性を確認



テストエンジン 4T50ME-X (シリンダ径 500 mm)

Ammonia engine design

The LGI injection system on S60 for ammonia fuel

Hydraulic oil

High pressure hydraulic oil pipes

Hydraulic control valves

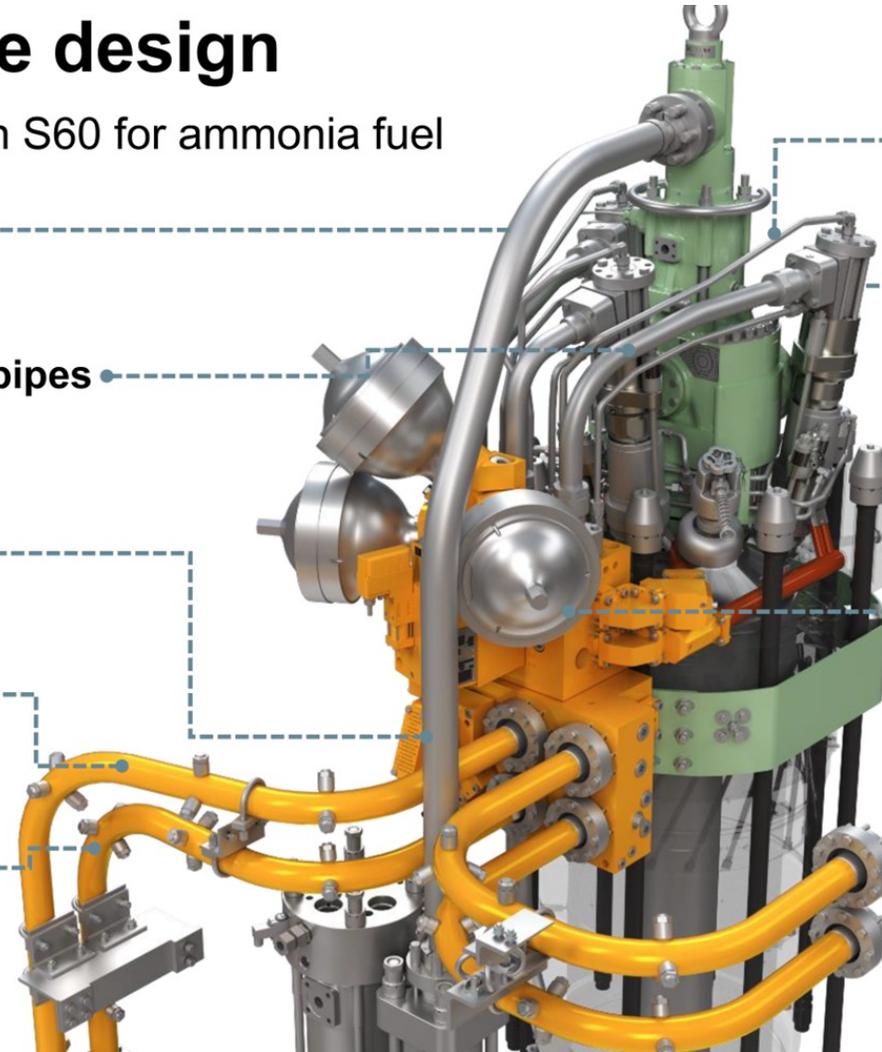
Ammonia double-walled pipe inlet

Ammonia double-walled pipe outlet

De-aeration point

Fuel Booster Injection Valve

Hydraulic accumulator



LPG /アンモニア輸送船主機として、シリンダ径 520 mm の 6X52 DF-A エンジンの出荷を 2025年2Q に予定している。

それにも関連して、三菱造船がアンモニア燃料供給装置 およびアンモニア処理装置を開発しており、2024年4月に NK から基本設計承認 (AiP) が発行された。



WinGD 社の低速2ストローク・アンモニアエンジン開発のための単気筒テストエンジン
(シリンダ径: 520 mm)
(WinGD 社提供)

- GI 基金のほか、ヤンマーPT とダイハツディーゼルが単気筒エンジンでアンモニア燃焼の試験を行っている。また、水素を混焼してアンモニアの燃焼を改善する基礎研究も行われている。ただし、これは船上でアンモニアの一部を水素に改質できる装置との組み合わせが必須となる。
- また欧州においても、Wartsila 社は W25 型（シリンダ径：250 mm）アンモニアエンジン（オットーサイクル）を開発してリリースを開始した。一例として、Platform Supply Vessel 改造のために、W25 エンジンのほかアンモニア燃料ガス供給から排ガス処理システムまでのパッケージの提供について発表がされている。

出典：Wärtsilä ホームページ：[Wärtsilä 25 Ammonia \(wartsila.com\)](https://www.wartsila.com) & [Press release 26. Aug. 2024.](#)

アンモニアバンカリングガイドラインの策定に向けた検討について  国土交通省
参考資料1

概要

- アンモニアは燃焼時にCO₂を排出しないため、海運のカーボンニュートラル実現に向けた代替燃料の一つとして期待されている
- グリーンイノベーション（GI）基金によるアンモニア燃料船および関連機器の研究開発が進められるとともに、国際海事機関（IMO）において、アンモニア燃料船の安全基準の検討が進んでいる※
- アンモニア燃料船の普及に向けて必要となる、船舶へのアンモニア燃料の補給の安全かつ円滑な実施については、各国に委ねられている
- 「アンモニア燃料船への安全かつ円滑なバンカリングの実施に向けた検討委員会」を立ち上げ、設備の要件、離接舷時の気象・海象要件、事故防止対策等を検討し、令和6年度にガイドラインとしてとりまとめる予定

※GI基金は2028年までの早期の商業運航を目標。IMOでは2024年内にガイドライン承認を予定

※国際的な基準・標準化等の課題が出た場合は対応していく

アンモニアバンカリング
ガイドラインの検討委員会

<委員>

高崎 講二 九州大学名誉教授
海上保安大学校
日本海事協会
日本船舶技術研究協会
海上技術安全研究所
日本船主協会
日本造船工業会
日本中小型造船工業会
日本船用工業会
日本内航海運組合総連合会
日本海難防止協会
海上災害防止センター

<関係省庁>

経済産業省産業保安グループ
国土交通省海事局
国土交通省港湾局
海上保安庁警備救難部
海上保安庁交通部

主な検討項目

- 緊急遮断システムなどのアンモニア燃料船およびアンモニアバンカー船に求める設備要件
- 安全な離接舷操船を行うための気象・海象要件
- アンモニアによる事故を防止するための対策

想定される設備要件の例



緊急遮断システム



離接舷操船の要件の検討例

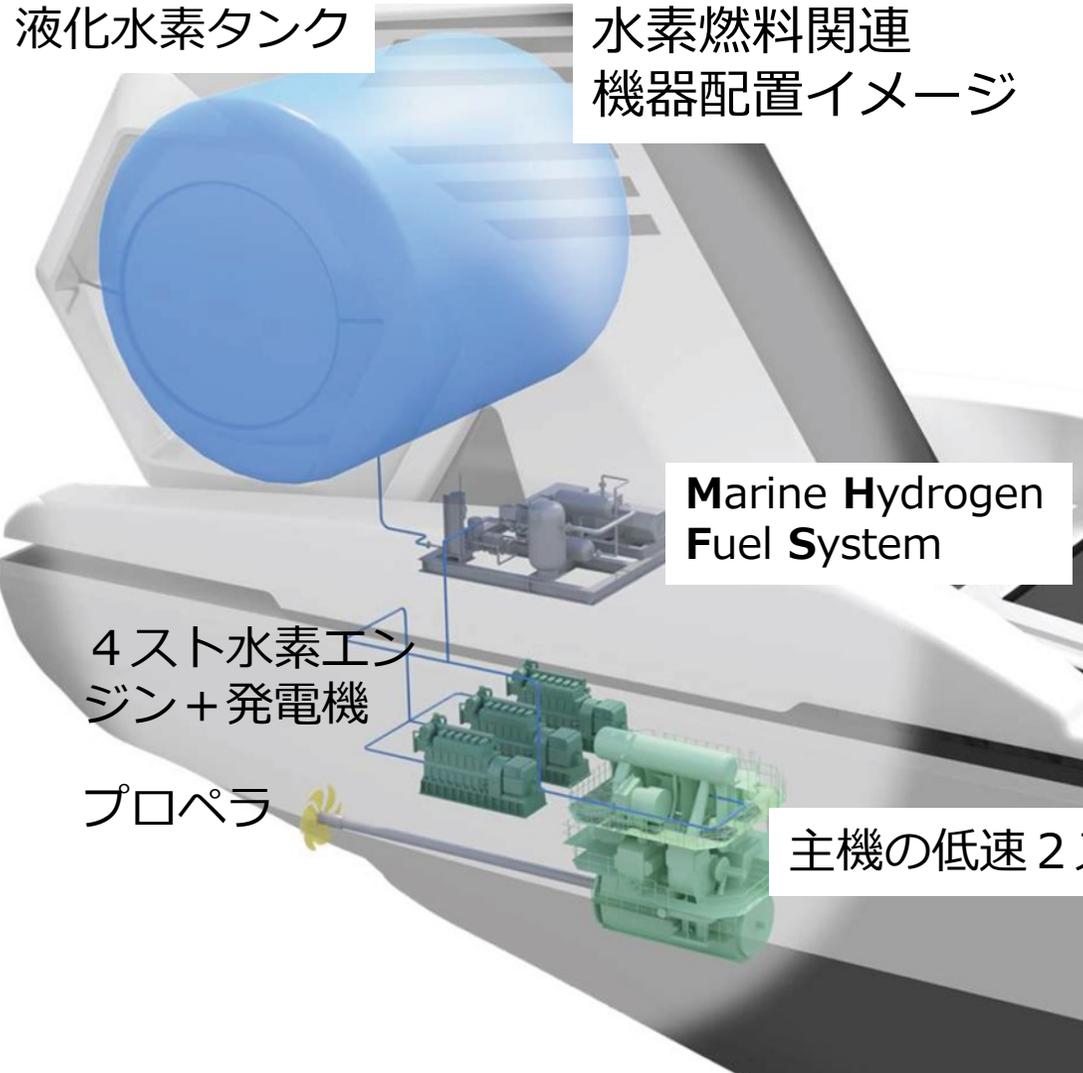


気象・海象に応じたシミュレーションイメージ

5. 水素 (H2) エンジンの開発状況

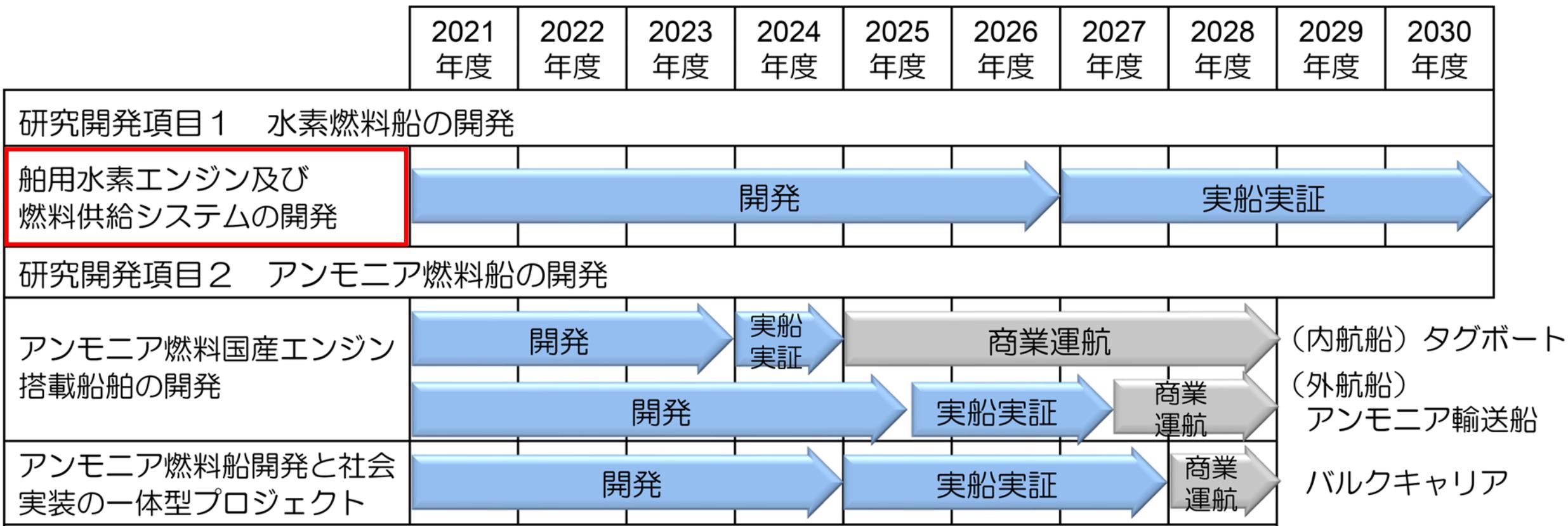
Hydrogen-Fueled Concept Ship: **C-ZERO Japan H2** 80,000 DWT バルクキャリアのイメージ

海事局 HP「国際海運のゼロエミッション
に向けた ロードマップ」 2020年3月 より

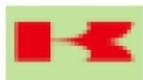




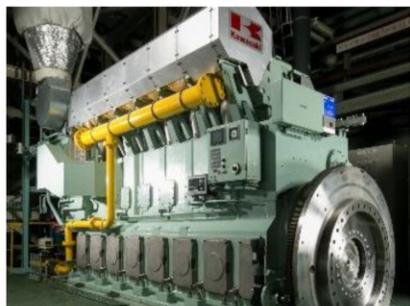
水素燃料船の開発



① 水素燃料エンジンの開発 出典：川崎重工業(株)，ヤンマーパワーテクノロジー(株)，(株)ジャパンエンジンコーポレーション



推進用 中速4ストローク
水素エンジンの開発
(2,000-3,000 kW)



補機用 中高速4ストローク
水素エンジンの開発
(800 kW, 1,400 kW)



推進用 低速2ストローク
水素エンジンの開発
(5,000 kW 超)



② 水素燃料タンク・
燃料供給システムの
開発

2021年度～2030年度(10年間)



水素を液相で昇圧後に気化
させることで圧縮動力の低減



陸上試験

低速2スト機関は 30MPa
の高圧水素を筒内噴射し
燃焼させる・・・
ディーゼルサイクル型。

実証運航

適用

適用



4スト機関は、吸気管に低圧水素供給・予混合
燃焼させるオットーサイクル型。

5.1 中速4ストローク・オットー型水素エンジンの開発

GI 基金：川崎重工業の中速4ストローク・オットー型水素エンジンの開発例

Combustion test using single cylinder engine

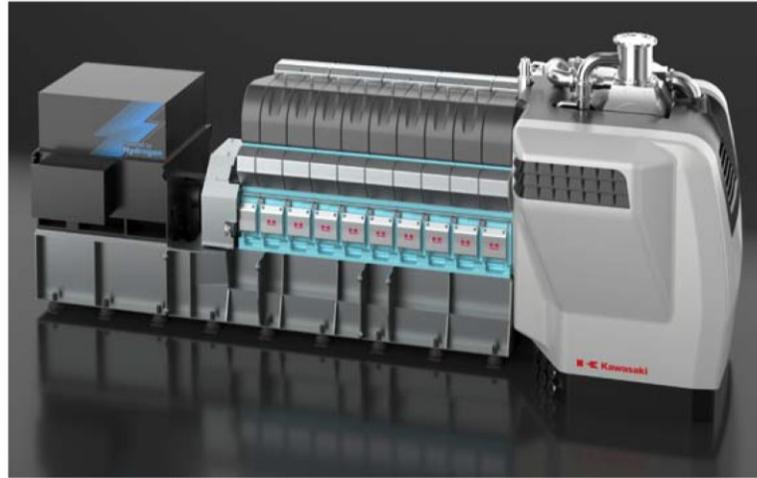


SSRT* Investigation of the effect of hydrogen on materials



SSRT(Slow Strain Rate Technique)

Hydrogen Dual Fuel engine



Engine type : 8L30KG-HDF
 MCR @Hydrogen mode : 2.4 MWe
 MCR @Diesel mode : 3.0 MWe

Operating mode : Hydrogen mode(*) and Diesel mode
 *Liquid pilot fuel is necessary for Hydrogen mode. Pilot fuel quantity is 5% or less in calorific value.

Shop test start in 3Q of Y2024.



To be installed on a liquified hydrogen carrier for demonstration operation

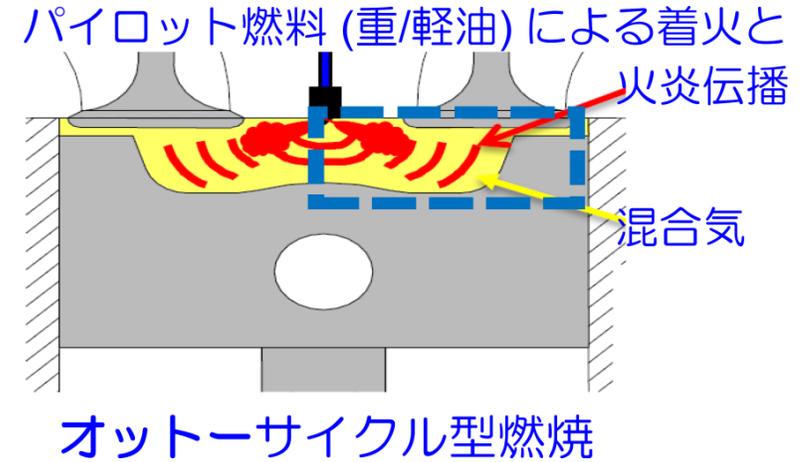
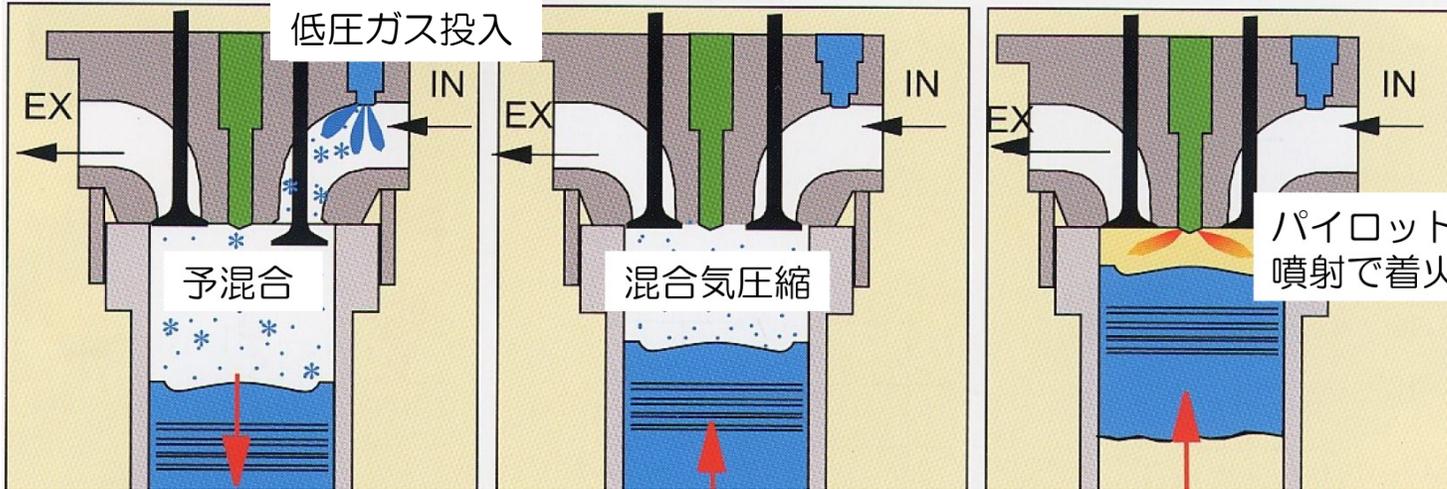


Operating hours of engine will be accumulated till Y2030.

Source: Kawasaki Heavy Industries, Ltd.

・水素 H₂ の2種類の燃焼パターン (天然ガス (メタン CH₄) と同様)

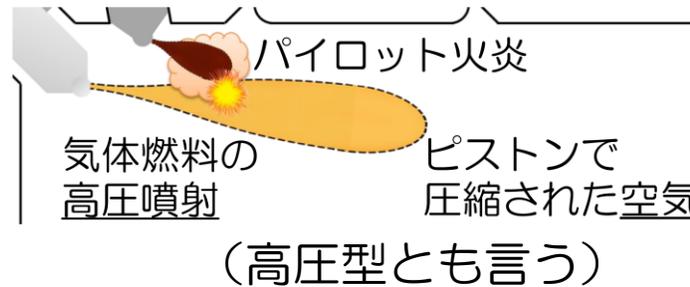
・天然ガス・水素の4ストロークエンジンは下図のオットーサイクル型 (低圧型とも・・・投入ガス圧力 <1 MPa)



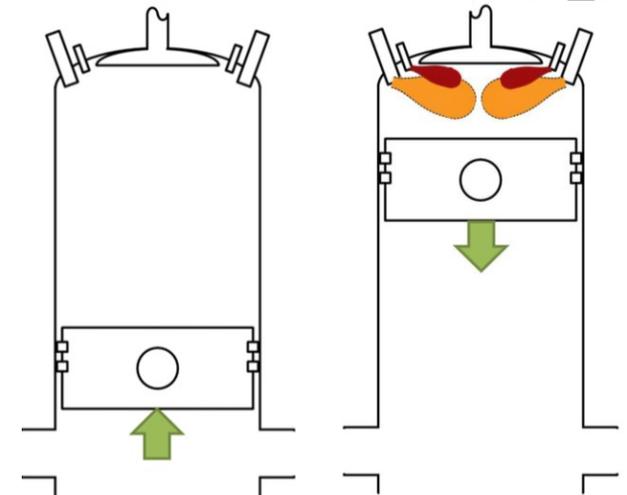
PFI : Port Fuel Injection
吸気ポートに燃料投入

・低速2ストローク水素エンジンは下図のディーゼルサイクル型

ディーゼルサイクル型 (拡散燃焼)

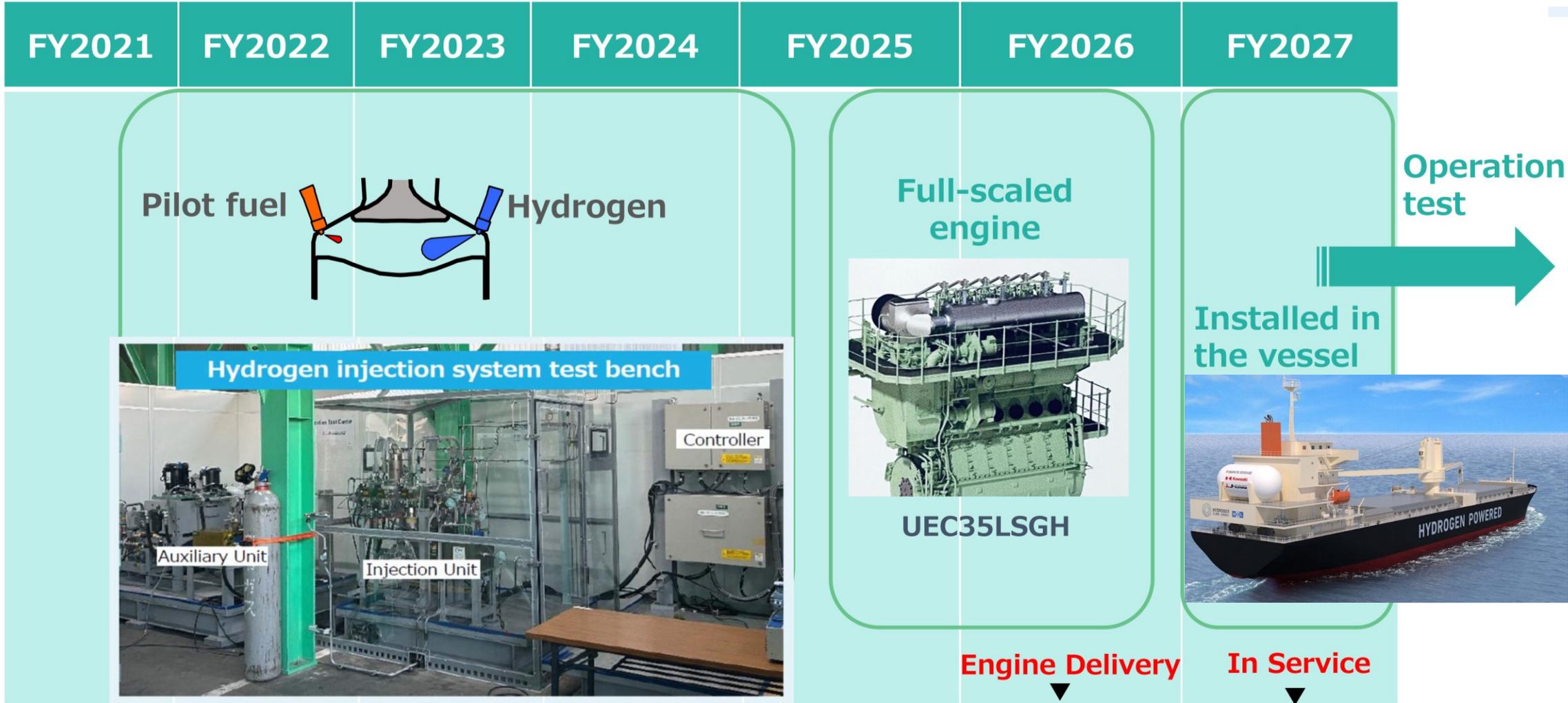


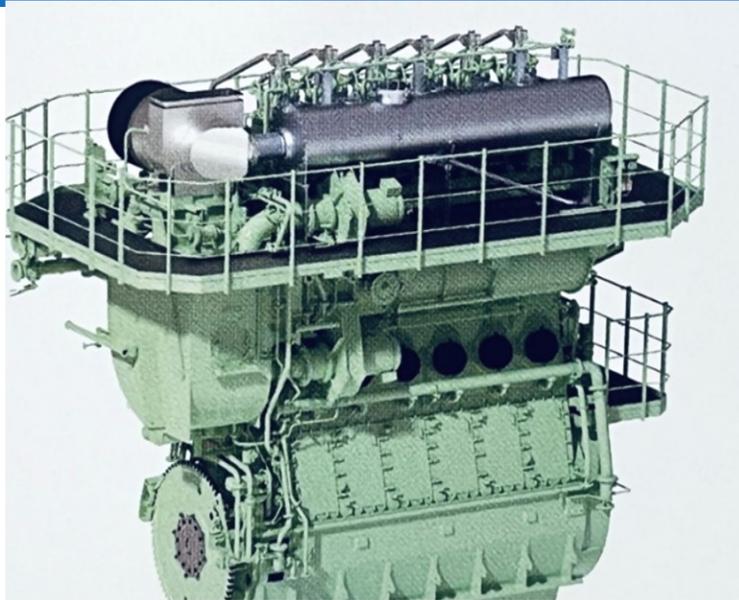
30 MPa のガス噴射
+パイロット着火



5.2 低速2ストローク・ディーゼルサイクル型（高圧気体水素噴射）の開発

GI 基金：J-ENG: ジャパンエンジンの低速2ストローク水素エンジンの開発スケジュール





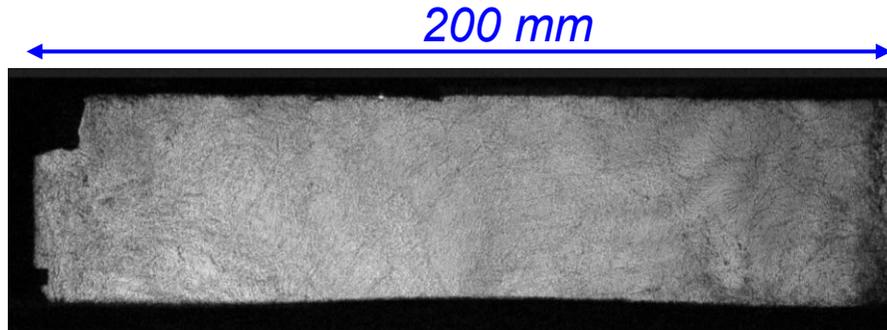
(上) 低速2スト・ディーゼルサイクル型水素エンジン予想図

(ジャパンエンジン社・資料)

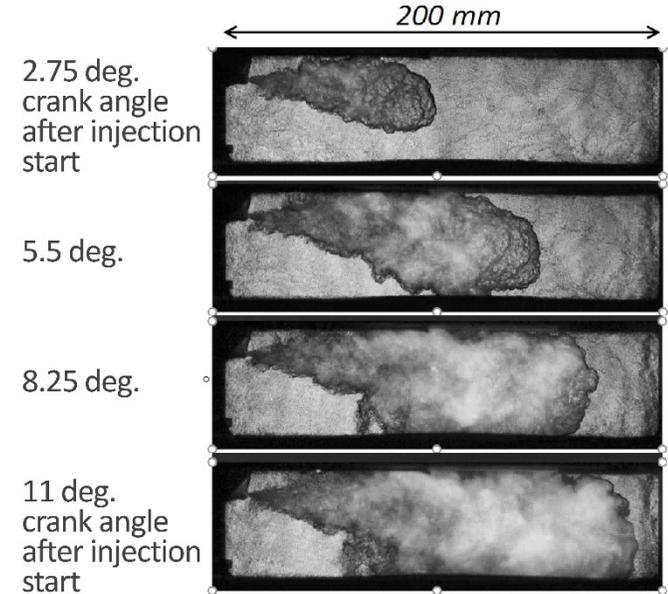
ディーゼルサイクル型に過早着火はない

ピストンは空気だけを圧縮・・・過早着火等の異常燃焼とは無縁。水素は噴射期間中は燃焼し、噴射終了とほぼ同時に燃え切る・・・水素噴射率で燃焼期間を制御可

下の動画は特例：空気温度を上げてパイロット燃料なしの自己着火
= GHG 完全フリーの水素燃焼



動画：
水素噴射圧力：30 MPa
空気圧力：8 MPa
空気温度：700℃以上

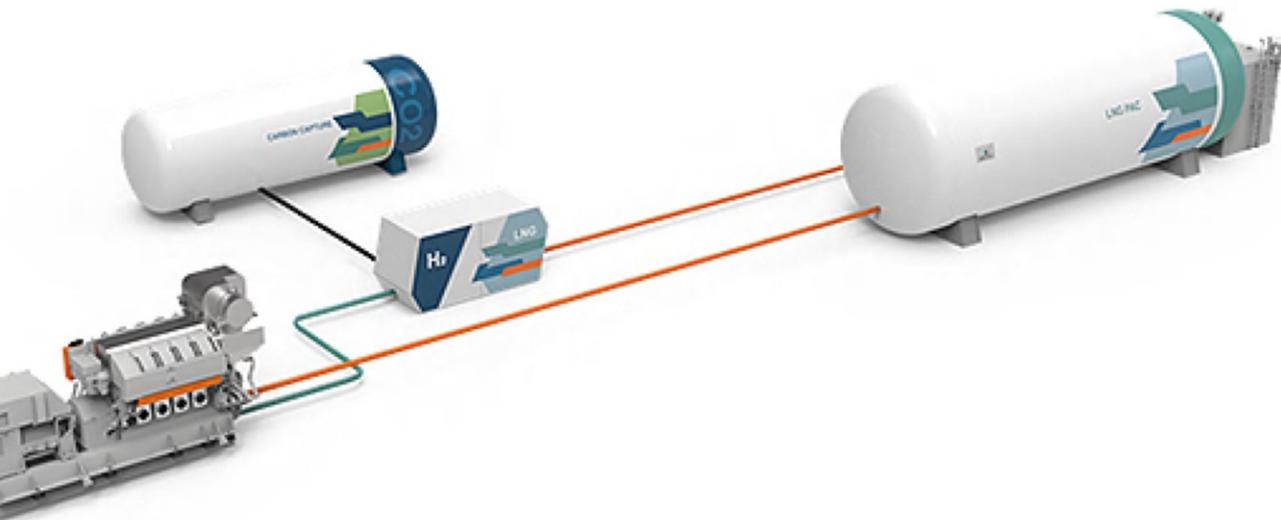


高密度の空気中に低密度の水素が噴射されるイメージであるが、噴射時の適度な運動量によって、噴流火炎の到達は確保される。

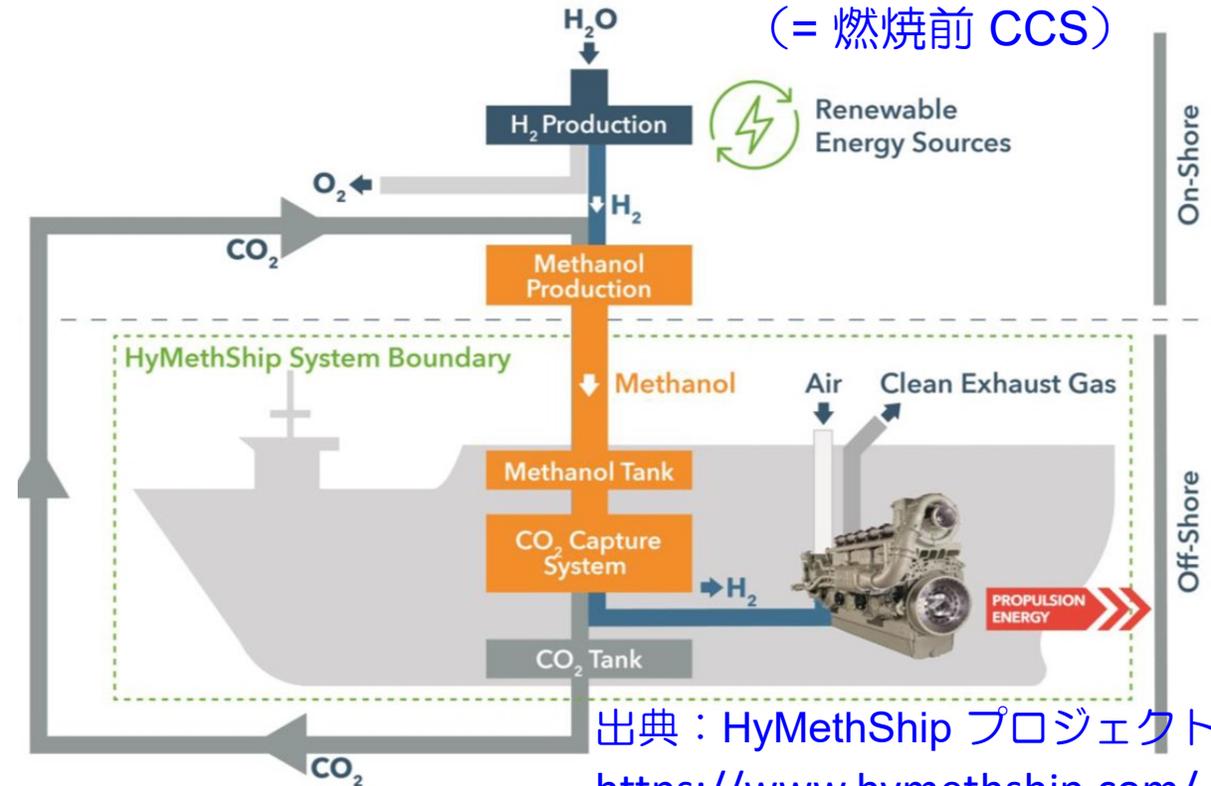
参考：船上改質の例

- LNG から水素を取り出す

船上で LNG から水素燃料生成
Wartsila 社らが新システム開発へ
(出典：Wartsila 社提供資料)



- メタノールから水素を取り出す
 - 船内でメタノールを水素に改質する (装置を開発)
 - エンジンには水素専焼
 - メタノール CH_3OH の C は CO_2 として回収し、液化して持ち帰り、陸でのメタノール生産に再利用 (= 燃焼前 CCS)



出典：HyMethShip プロジェクト
<https://www.hymethship.com/>

ご清聴ありがとうございました。

1. Dual Fuel（二元燃料）エンジンとは？
2. カーボンニュートラル燃料・ゼロカーボン燃料について・・・
3. メタノール (CH₃OH) エンジンの開発状況
4. アンモニア (NH₃) エンジンの開発状況
5. 水素 (H₂) エンジンの開発状況

について解説させて頂きました。

詳細については NK 技報 No.10 に掲載予定です。