

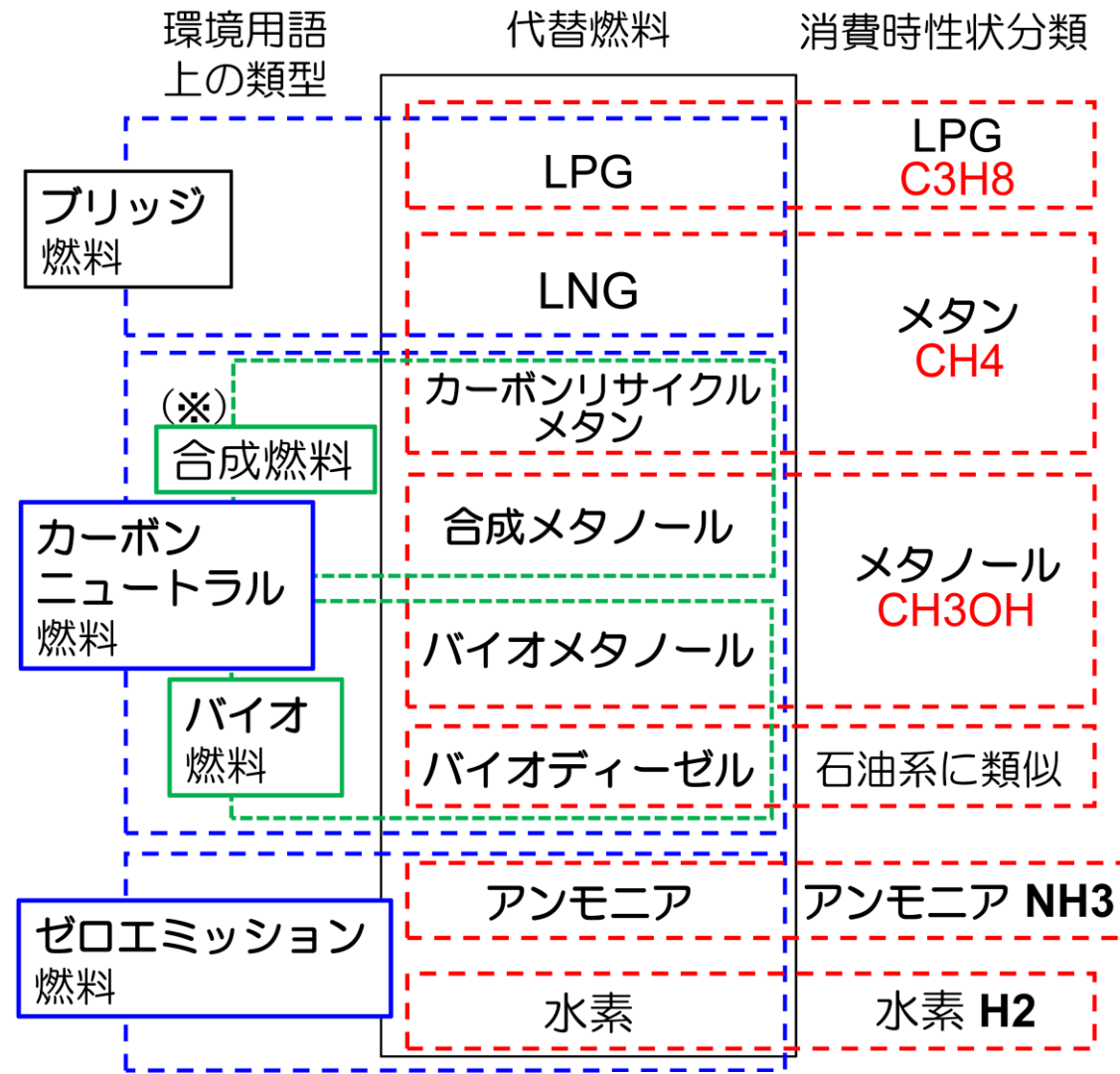
GHG 削減のための新燃料対応機関の技術動向と 技術課題

九州大学 名誉教授 高崎 講二

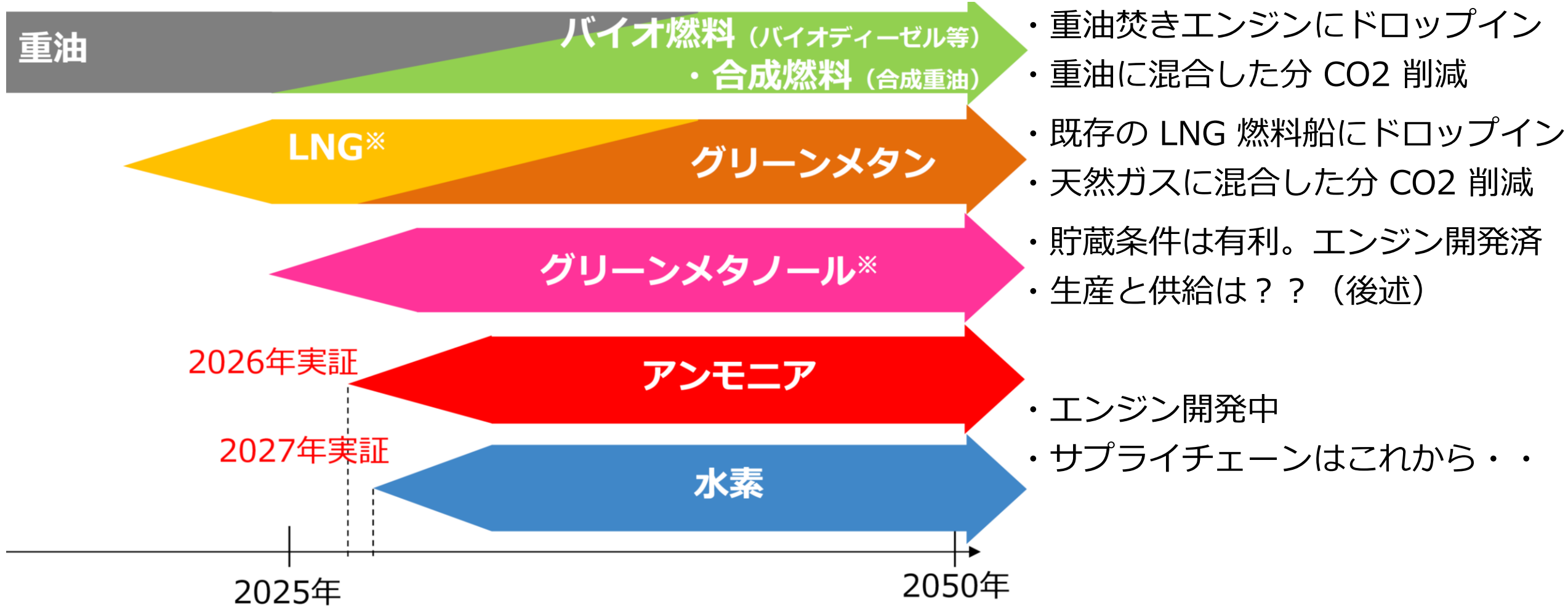
本日の内容・・代替燃料のためのエンジン開発

- 右表右端の (今回は LPG を除く) . . .
 - メタン **CH4** とメタノール **CH3OH** の分子中には炭素 **C** が入っている。それらの CO2 削減%は重油に比べて以下の程度
 天然ガス (メタン) -25%・メタノール -1割
 - それらが CO2 ゼロカウントとなるには、グリーン水素+回収 CO2 等の新方法で作られる必要がある
 - その**カーボンニュートラル**な**メタン**の同義語 . . .
 - カーボンリサイクルメタン・合成メタン
 - 再生メタン・e-メタン・グリーンメタン . . .
 - カーボンニュートラル**な**メタノール**としては
 - 合成 (グリーン) メタノール・バイオメタノール
 - アンモニア NH3**・**水素 H2** は、炭素 C が含まれない**ゼロエミ燃料**であるが、エンジンは開発途上 (後述)

代替燃料の環境用語上の類型と消費時の性状分類



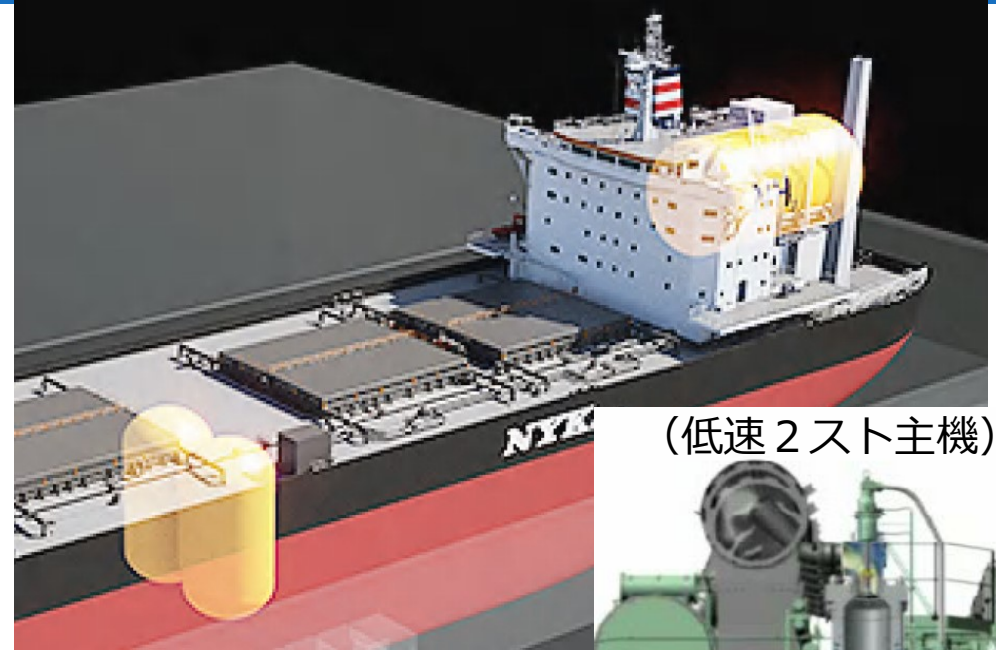
出典：日本海難防止協会資料



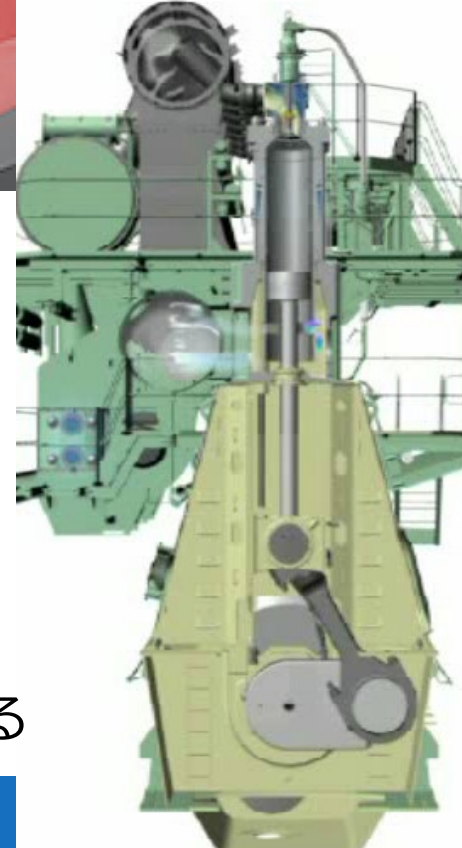
各種代替燃料の貯蔵性とエンジン側への供給

どの燃料も船内タンクでは液体

- ・ **バイオ燃料** 常温・常圧で液体
- ・ **メタノール** 常温 (65°C以下) 常圧で液体
- ・ **アンモニア** -33°C以下で常圧で液体
- ・ **天然ガス (メタン)** . . . -162°C以下で液体 = **LNG**
- ・ **水素** -253°C以下で液体 = **LH2**



(低速2スト主機)



エンジン側は . .

- ・ バイオ燃料やメタノールは筒内に液体で噴射する = ディーゼル
- ・ アンモニアはエンジンへの供給・燃焼パターンが2種類。
 - ・ 液体ディーゼル噴射 (低速2スト)
 - ・ 気体で供給する予混合燃焼タイプ (4スト)
- ・ メタン・水素は FGSS で気体にして供給 or 噴射 (燃焼パターンは2種類 : 後述)

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

	水素 H2 (LH2)	アンモニア NH3	カーボンリサイクル CR 合成メタン CH4	CR 合成メタノール CH3OH	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)	Type C (低温 or 加圧)	常温常圧 船体付きタンク	常温常圧 船体付きタンク
		独立方形タンク/ メンブレン	独立方形タンク/ メンブレン		
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>

① バイオ燃料について (本日は取り扱いの問題だけ・・・)

船用燃料に有望なのは **FAME** (バイオディーゼルとも呼ばれる)

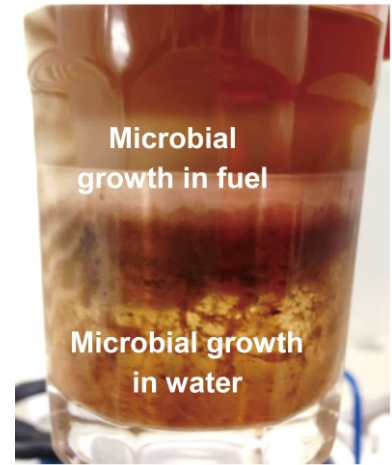
(**Fatty Acid Methyl Ester** : 脂肪酸メチルエステル・・・触媒反応で低粘度化したもの) A 重油・C 重油と混合可。混合安定性は一応注意。

- ・粗バイオ燃料 (SVO) ・ **FAME** にはバイオの名残 (右例：微生物の発生)
- ・MEPC 78 (昨年 6月) において以下決定
 - バイオ燃料使用による NOx 増加は規制の対象にしない
 - ・ いよいよ真のドロップイン燃料に ・ エンジン調整も不要に ・
 - ・ 燃焼性は ・ 含酸素燃料であって重油よりむしろ良好。

課題・ バイオ燃料の最大の課題はその「生産量」と思われる。

原材料の食用廃油も少なく・・・

航空業界 (SAF (HVO : 水素化分解油) へ) とも競合・・・



取り扱いについて・・・

- ・NK 機関部から解説
https://www.classnk.or.jp/hp/ja/info_service/bio/
- ・海事局から・・・
「船舶におけるバイオ燃料取り扱いガイドライン」
<https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001597437.pdf>

液体で筒内噴射・ディーゼル燃焼・・・右表参照

- ・ 沸点 65℃：常温・常圧で液体
(配管内での気化防止のため予圧 1 MPa 程度)

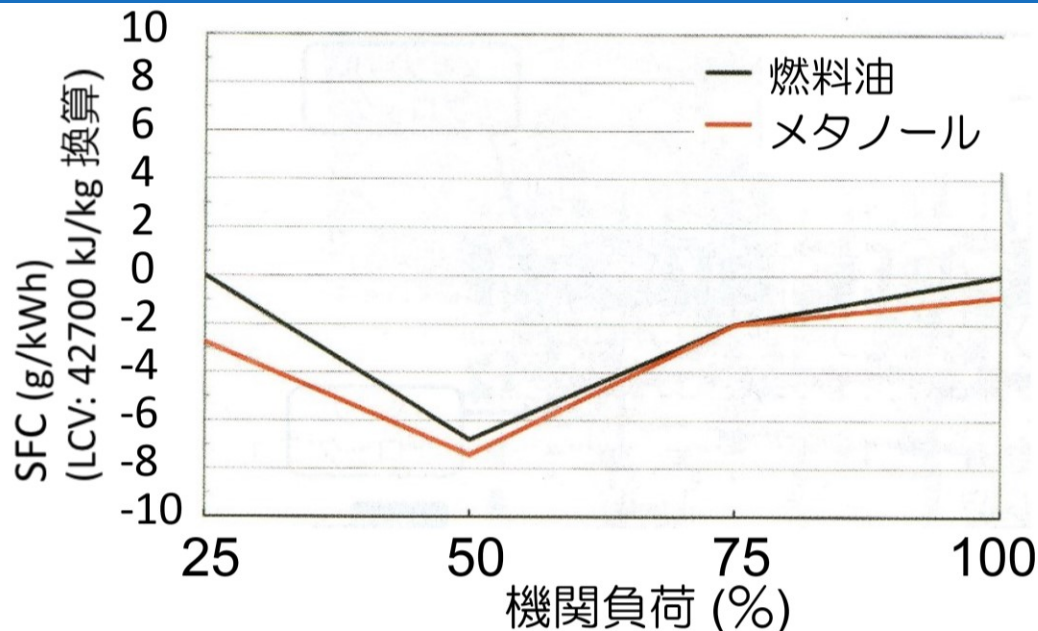
筒内へディーゼル噴射

(ただし、4ストでは気体で供給する予混合燃焼型も可能)

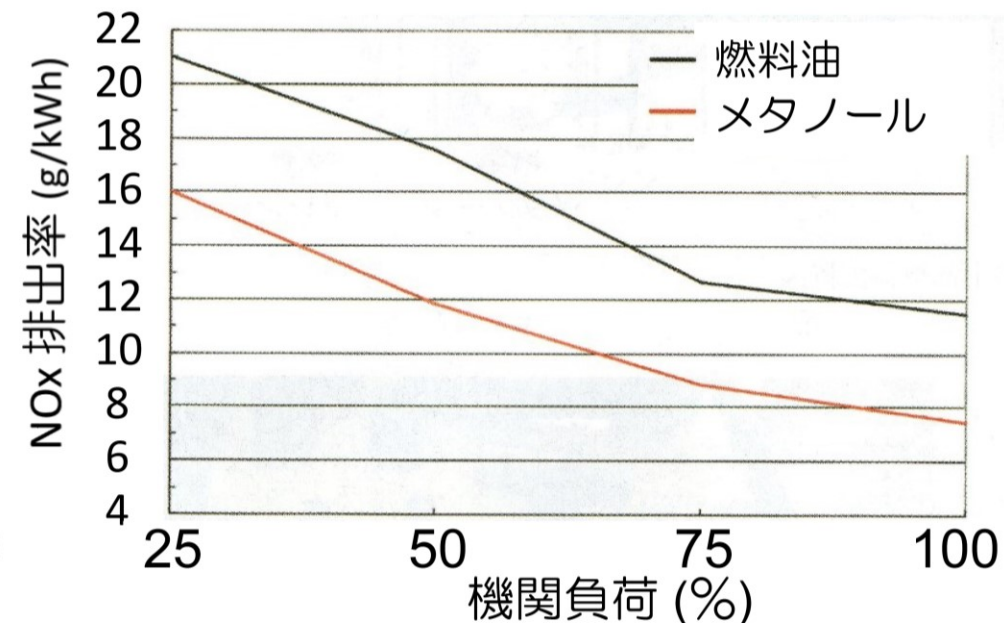
- ・ 発熱量：質量当たりで（重油の）半分以下
同出力での噴射体積は 2.4 倍に
- ・ (低引火点である一方) 自己着火温度が高い
- ・ パイロット重/軽油でメタノールに着火。
(パイロット噴射とはどういうものか？動画で・・・)
- ・ メタノールは着火性は悪いが燃焼性は良好
この傾向はメタン・水素も・・・
- 一方、アンモニアは着火性も燃焼性も悪い (後述)

	アンモニア	HFO	メタノール
ガス比重 kg/m ³ @ 沸点	0.876		1.206
ガス比重 kg/m ³ @ 20℃	0.707		---
液比重 kg/m ³ @ 4℃	633.1	989 @15℃	805.9
液比重 kg/m ³ @ 沸点	682.3		748.7
沸点 °C @ 大気圧	-33	---	65
飽和蒸気圧 barA @ 45℃	17.8	---	---
自己着火温度 °C	630	250	385
引火点 °C	---	>60	12
可燃下限界 (燃料 vol.%)	15	1	6
可燃上限界 (燃料 vol.%)	30	7	36.5
最小着火エネルギー mJ	45	0.24 (ガソリン)	0.174
燃焼速度 cm/s	7	30 (ガソリン)	48
低位発熱量 MJ/kg	18.8	40.2	19.9

← 440℃のデータも



7S50ME-B9.3-LGI 機関での燃料消費率 (SFC) 計測結果



7S50ME-B9.3-LGI 機関での NOx 計測結果 (三井造船技報 218 号 (2017年 1月))

7S50ME-B9.3-LGI by MES, 2015

Cylinders	7
Bore	0.5 m
Connection rod	2.214 m
Stroke	2.214 m
Compression volume	16 l/cyl
Power	8,470 kW
MEP	16.9 bar
Speed	99 rpm
Max. pressure	185 bar

エンジン技術が完成しているのも利点の一つ

- ・少量のパイロット重油は必要
- ・A 重油と同等の性能
- ・4 スト機関も開発済

LNG 燃料船より安い船価

課題はカーボンニュートラルメタノールの生産量・サプライチェーン?

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、日本シップヤード（株）

2021年

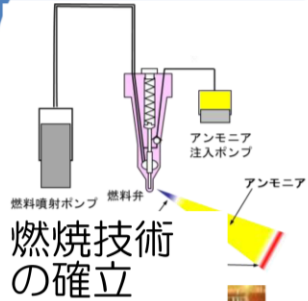
2024年

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スト機関は、気体アンモニア + 空気の混合気を燃焼させる予混合燃焼型 = オットー型)

単筒試験



外航船(アンモニア燃料アンモニア輸送船)の開発・運航

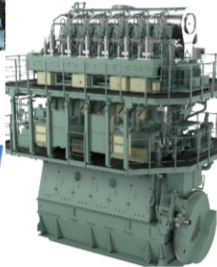


国産2ストローク主機/国産4ストローク補機の社会実装
アンモニア燃料外航船の社会実装
アンモニア海上輸送の低炭素化

竣工

(低速2スト機関は、液体アンモニアを筒内噴射・噴霧燃焼させるディーゼル)

実機設計・製造



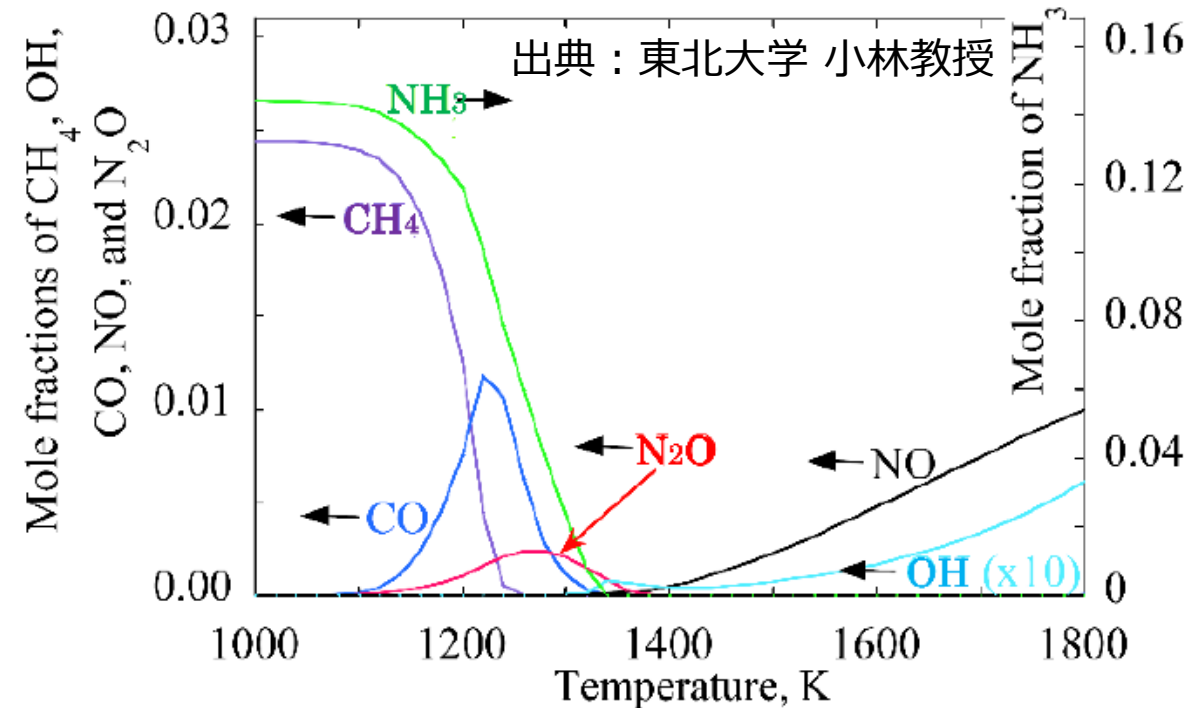
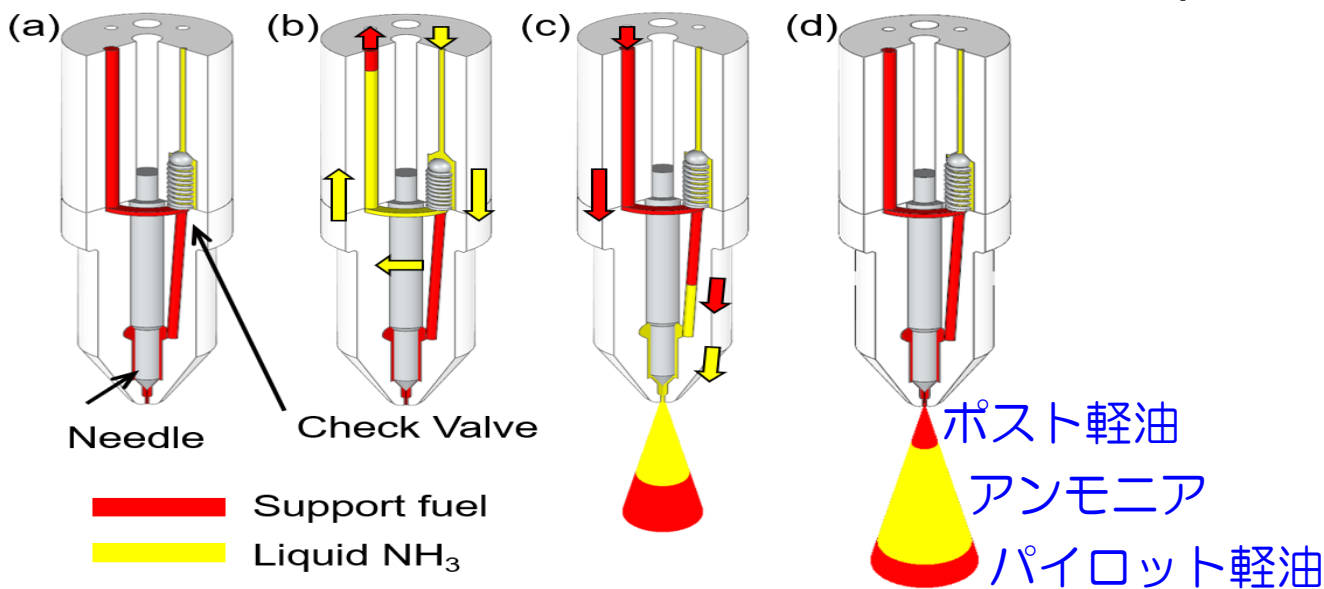
③ アンモニア NH₃ の性状

- 沸点 -33℃ (@大気圧)
 - 機関に気体で供給する予混合燃焼型と・・・
 - 気化防止のため予圧 (MAN 社データでは 8 MPa) を掛け、筒内へ液体で噴射する **ディーゼル**の2種類の燃焼法
- 発熱量：HFO の半分以下 (N の入った分子式から・・・)
 - 液比重も低いことから、体積では重油の約3倍も噴射する必要・・・
- 自己着火温度：極めて高くパイロット重/軽油で着火。
さらに着火後の燃焼性も悪い。
(表の燃焼速度の低さからも分かる・・・)
- 後述：超温暖化ガス N₂O 発生の可能性

	アンモニア	HFO	メタノール
ガス比重 kg/m ³ @ 沸点	0.876		1.206
ガス比重 kg/m ³ @ 20℃	0.707		---
液比重 kg/m ³ @ 4℃	633.1	989 @15℃	805.9
液比重 kg/m ³ @ 沸点	682.3		748.7
沸点 °C @ 大気圧	-33	---	65
飽和蒸気圧 barA @ 45℃	17.8	---	---
自己着火温度 °C	630	250	385
引火点 °C	---	>60	12
可燃下限界 (燃料 vol.%)	15	1	6
可燃上限界 (燃料 vol.%)	30	7	36.5
最小着火エネルギー mJ	45	0.24 (ガソリン)	0.174
燃焼速度 cm/s	7	30 (ガソリン)	48
低位発熱量 MJ/kg	18.8	40.2	19.9

- **N₂O** : GHG としては CO₂ x 約 300に相当。
- 燃焼が不活発となり火炎温度が (右図で1300 K 付近まで) 下がると、**N₂O** 発生 の心配が出て来る。
- 対策 : 予混合燃焼型ではパイロット噴射の改善。
 低速 2 ストのディーゼルでは、**層状噴射系**による **ポスト燃料噴射**などで対策。

下図 : 軽油・アンモニア・軽油 層状噴射システム (ジャパンエンジン社開発)



上図 : アンモニア燃焼温度と排気有害成分生成

- パイロット燃料やポスト燃料でアンモニア燃焼を活発化し、上図横軸の火炎温度を高くする (右側に寄せる) ことで、N₂O と未燃 NH₃ の同時抑制が可能。

④ メタン CH4 ・ ⑤ 水素 H2 の2種類の燃焼パターンについて

エンジン内に気体で供給 ・ ・ 2種類の燃焼パターン

- ・ 筒内への高圧気体噴射 = ディーゼルサイクル型と ・ ・
- ・ 空気との予混合気を作る = オットーサイクル型がある。
- ・ どちらもパイロット重/軽油で着火。

水素 : オットー型として混合気を作ってピストンで圧縮する場合は、表中の最小着火エネルギーの低さは後述の 過早着火 (プレイグニション) 発生の可能性に ・ ・ 対策が必要 ・ ・

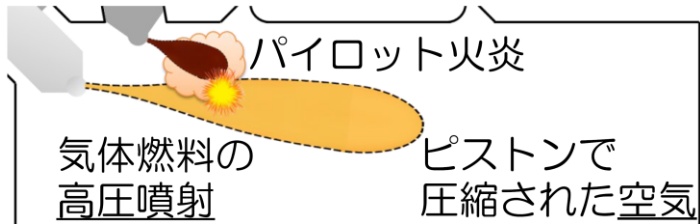
注 : 水素の取り扱いから言うと、漏洩しやすさと表の可燃上下限界 (可燃範囲の燃料濃度 Vol.%) の広さも要注意。

	メタン	水素
ガス比重 kg/m3 @ 沸点	1.820	1.340
ガス比重 kg/m3 @ 20°C	0.659	0.083
液比重 kg/m3 @ 4°C	---	---
液比重 kg/m3 @ 沸点	422.5	70.8
沸点 °C @ 大気圧	-161	-253
飽和蒸気圧 barA @ 45°C	---	---
自己着火温度 °C	537	585
引火点 °C	-175	---
可燃下限界 (燃料 vol.%)	5.3	4
可燃上限界 (燃料 vol.%)	17	75
最小着火エネルギー mJ	0.274	0.017
燃焼速度 cm/s	37	270
低位発熱量 MJ/kg	48.0	119.9

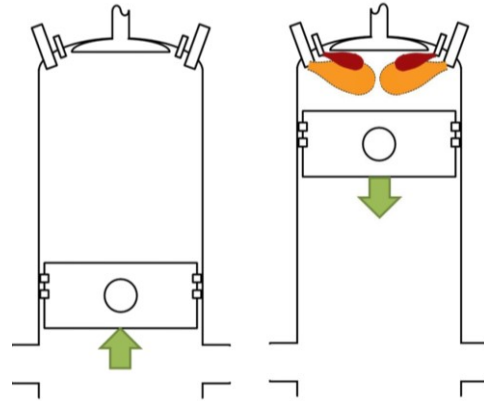
④ メタン CH₄ : 2 種類の燃焼パターン実例 (⑤ 水素も同様の 2 種類)

天然ガス・低速 2 ストローク主機の例

ディーゼルサイクル型 (拡散燃焼)



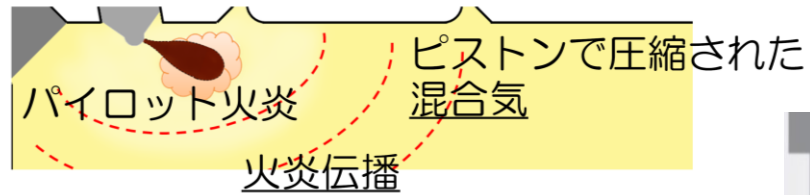
30 MPa の
ガス噴射
(パイロット着火)



- K-Line の PCC 第1船
主機：ME-GI (MAN)
(高圧型とも言う)

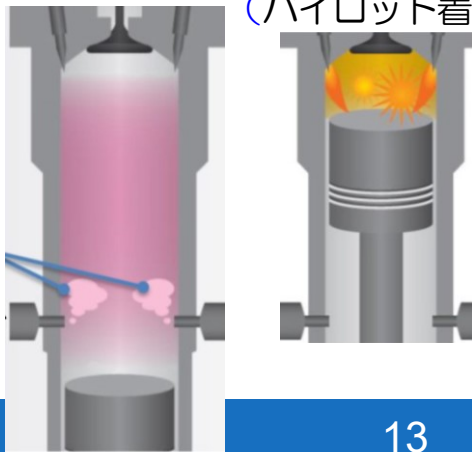


オットーサイクル型 (予混合燃焼)

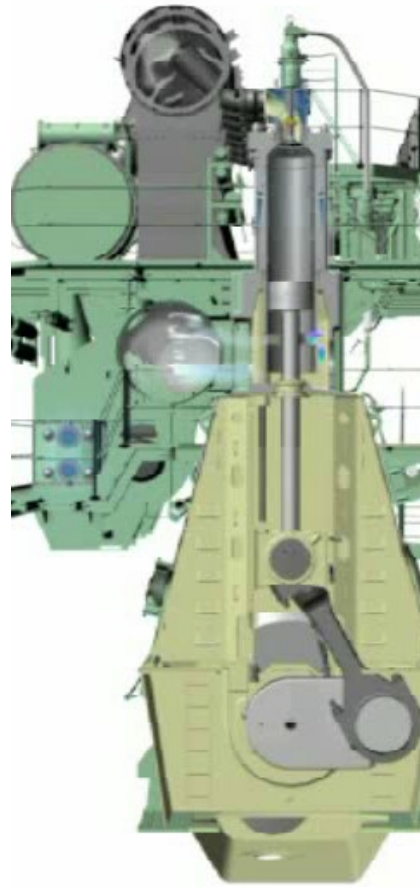


圧縮前の空気に 1 MPa 程度の天然ガスを供給

(パイロット着火)



- NYK の PCC 第1船
主機：X-DF (WinGD)
(低圧型とも言う)



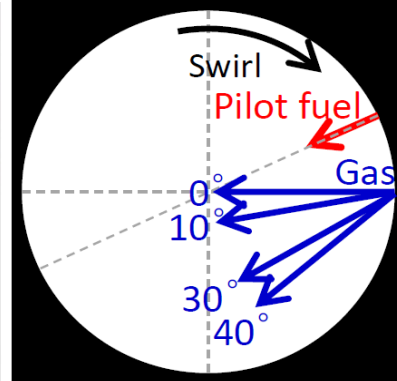
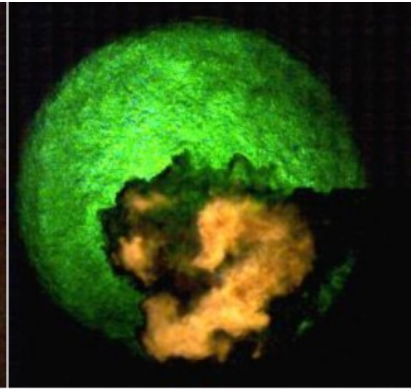
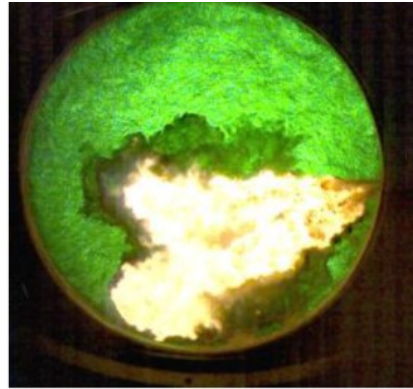
- ・長所：燃焼上の問題がなく・・高出力・高効率・メタンスリップ極小

ディーゼル燃料
噴射圧力: 135 MPa

メタン + パイロット軽油 5%
噴射ガス圧: 32 MPa

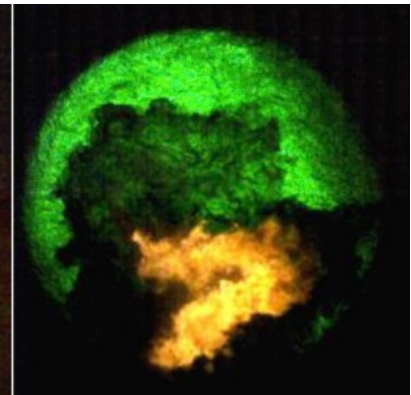
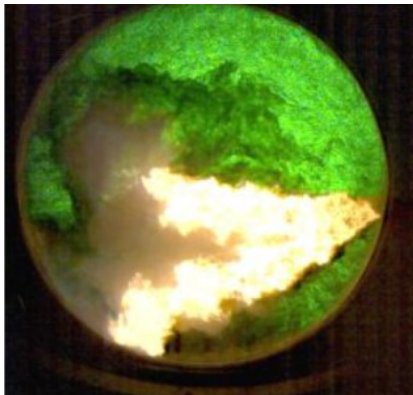
Crank angle deg. ATDC

8



240 mm

16

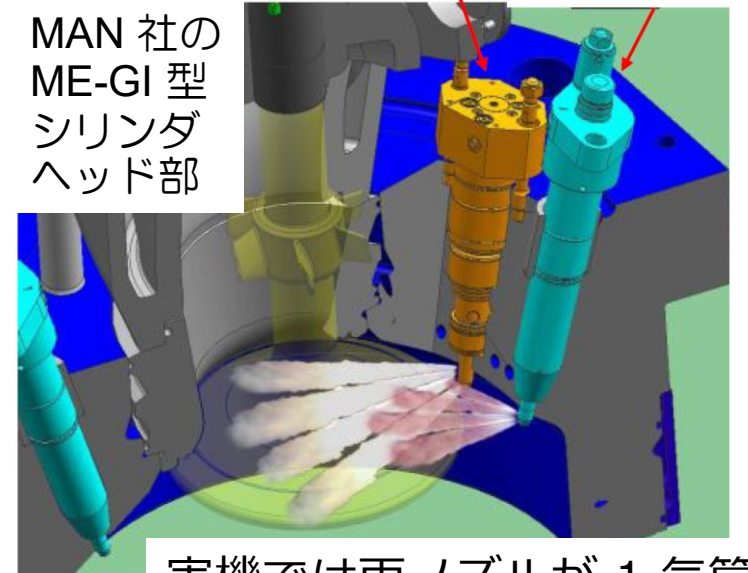


この撮影法では

- ・ 緑の部分は圧縮純空気
- ・ 黒 + 輝炎部分が燃焼域

Gas injection Pilot Fuel

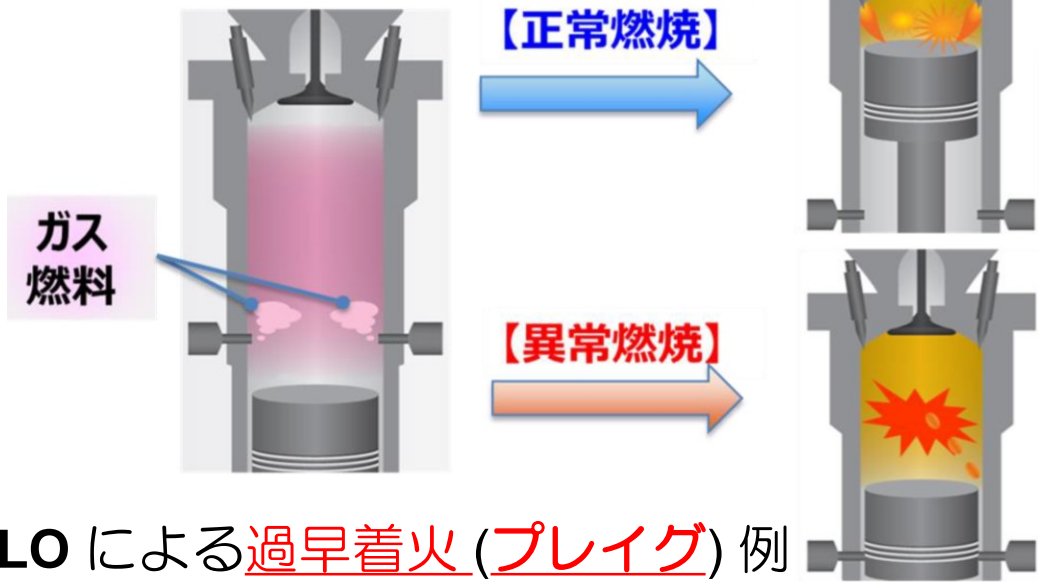
MAN 社の
ME-GI 型
シリンダ
ヘッド部



実機では両ノズルが 1 気筒に
2~3 対装備されるが、左の
燃焼可視化では 1 対のみ模擬

ほぼ完全燃焼・・ディーゼルサイクル型天然ガスエンジンの未燃メタン (メタンスリップ) は
全ガスの 0.2 %程度。オットーサイクル型より一桁少なくて無視できるオーダー

オットーサイクル型

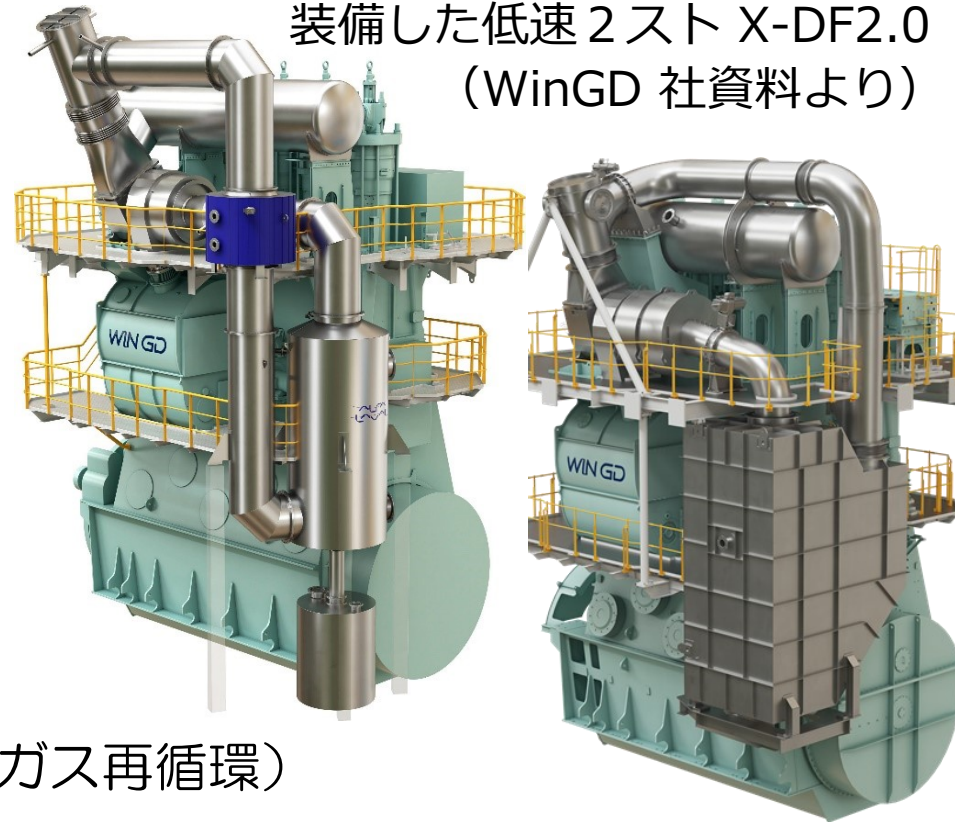


ピストン上死点で
パイロット燃料を
噴射し着火

上死点到達前に
潤滑油自己着火
による異常燃焼
が発生

= 過早着火

iCER と呼ばれる EGR 装置を
装備した低速 2 スト X-DF2.0
(WinGD 社資料より)



LO による 過早着火 (プレイグ) 例

低速 2 スト天然ガスエンジンへの対策 (下記の対策で解決中)

- 最大 50% もの大量 **EGR : Exhaust Gas Re-circulation** (排気ガス再循環)
- EGR ガス混入によって ・ ・ 混合気の過度の活性が抑制され 過早着火は抑えられる。

(同時にオットー型特有のメタンスリップの低減策にも ・ ・ EGR ガス中の未燃メタンが再燃焼 ・ ・)

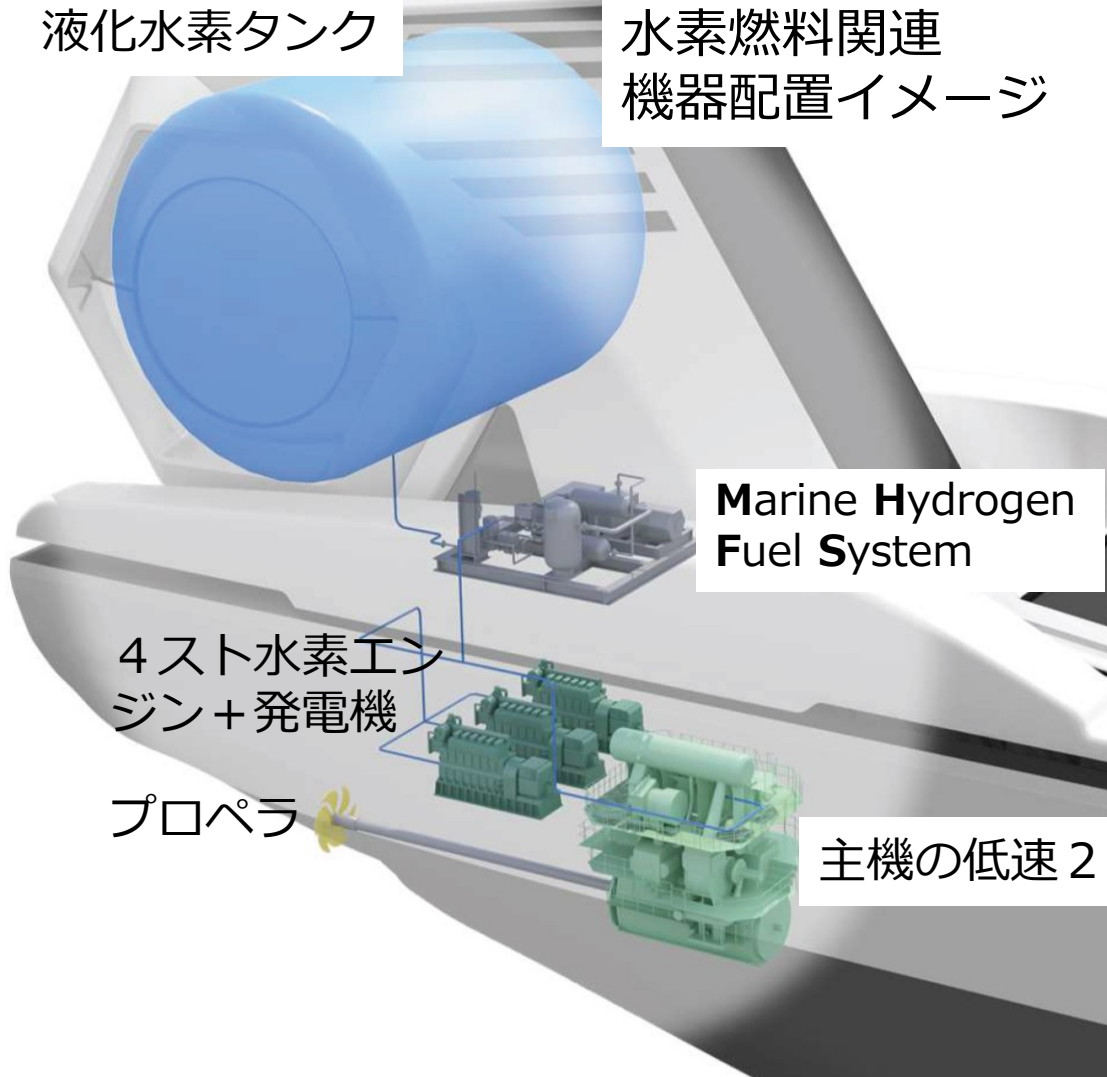
⑤ 水素 H2 : 水素燃料コンセプト船の一例

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

液化水素タンク

水素燃料関連
機器配置イメージ



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

2021年度～2030年度(10年間)



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

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

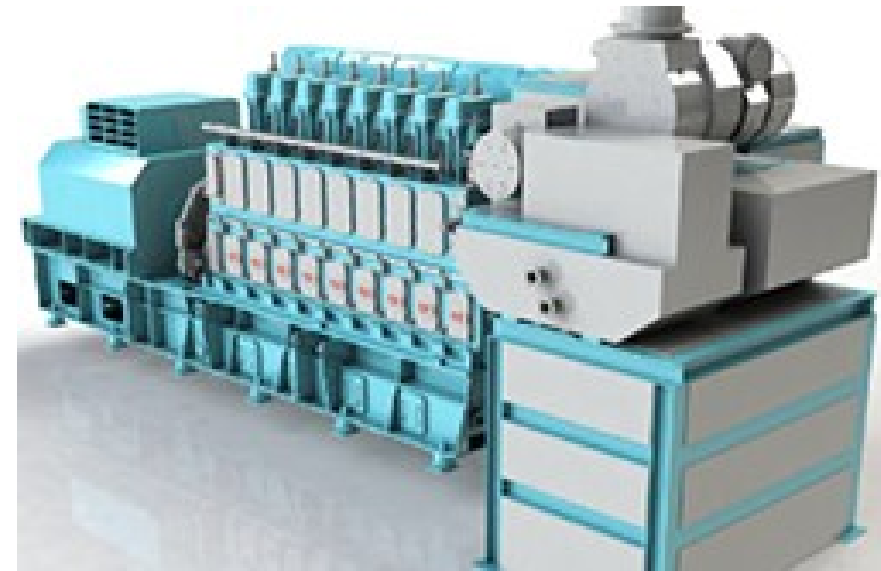
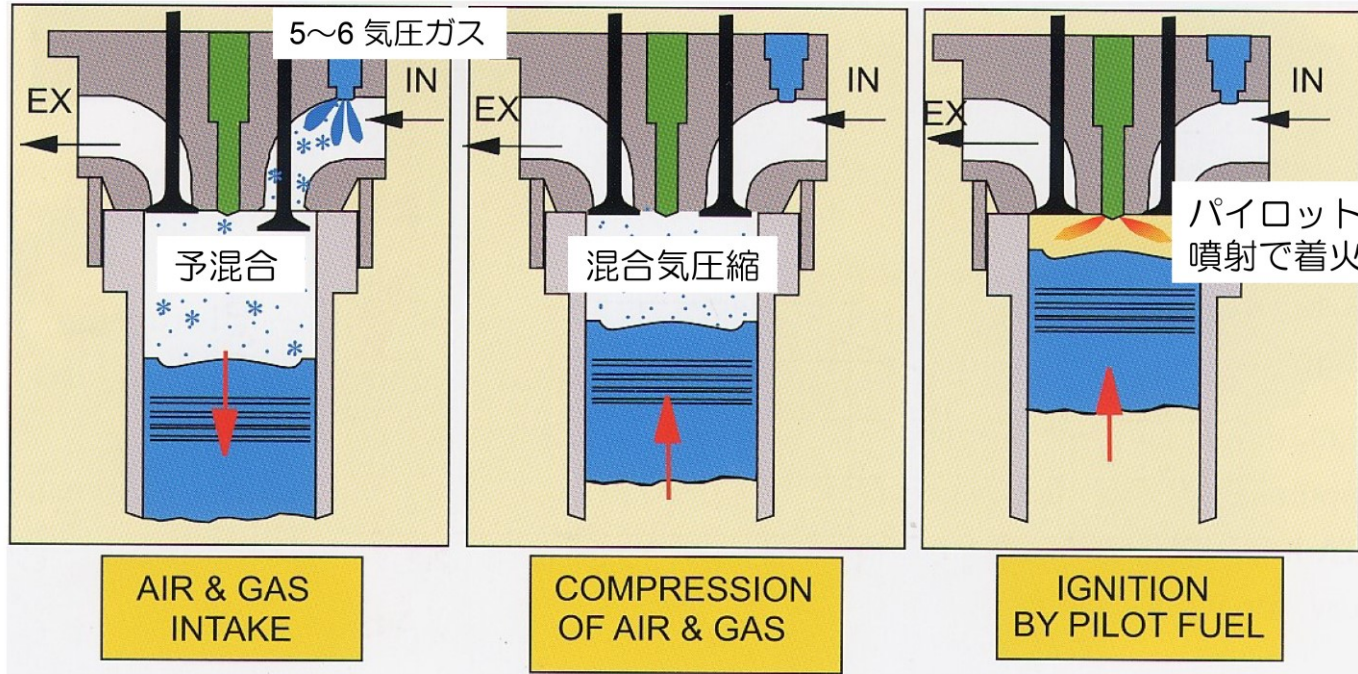
適用



4スト機関は、吸気管に低圧水素供給・予混合
燃焼させる**オートサイクル型。**

⑤ 水素 H₂ : 4スト水素エンジンはオートサイクル型

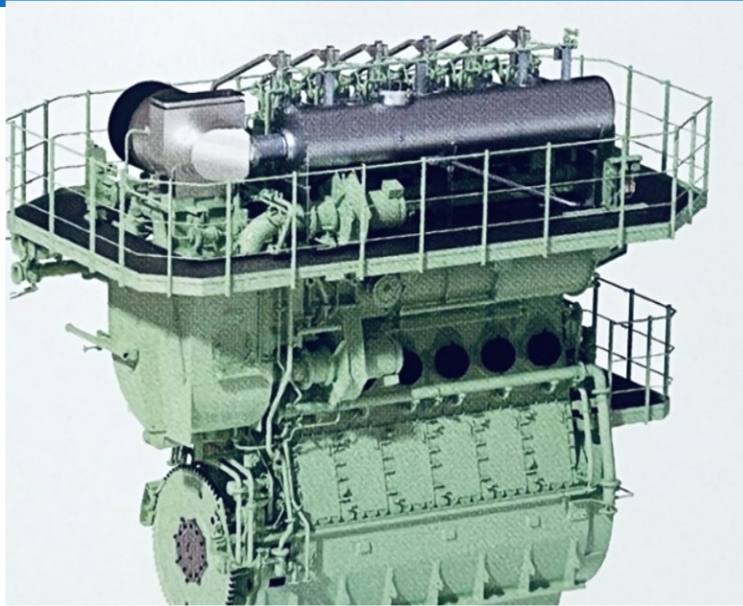
4ストエンジンのガス・空気の予混合気の作り方



4スト水素エンジンの例

(川崎重工・資料)

- 4スト水素エンジンも吸気管から水素を供給。
開発の仕方は・・・天然ガスに水素を混ぜて供給・・・水素%を増やして**過早着火 (プレイグ)** 等起これば対策する・・・
- 水素混合気の方がメタン混合気より活性・・・過早着火の可能性が高くなる。
対策として **EGR** や混合気の希薄化があるが、出力 (Pme) を高くキープしつつ対策することが技術。



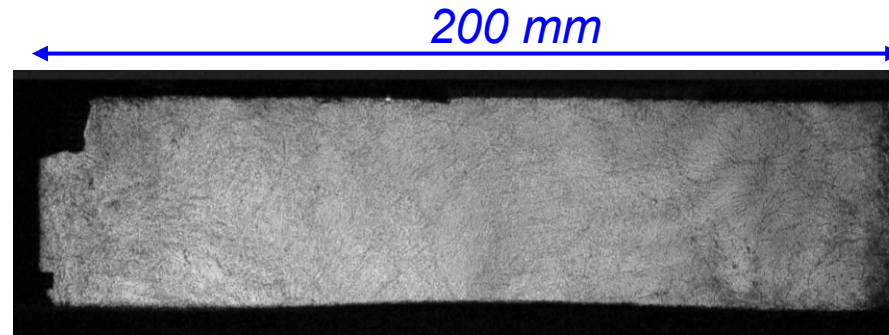
(上) 低速2スト・ディーゼル
サイクル型水素エンジン予想図

(ジャパンエンジン社・資料)

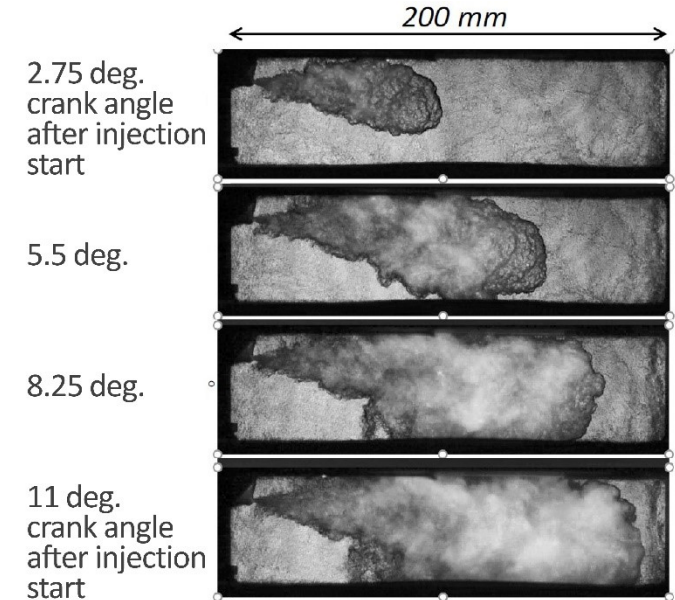
ディーゼルサイクル型に過早着火はない

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。

- IMO の GHG 削減目標達成のため、脱炭素に向けた燃料に対応できる新船用エンジン技術の開発が不可欠
- バイオ燃料・合成メタン・合成メタノールに関しては技術がほぼ確立されている一方、アンモニアと水素を燃料とするエンジンはまだ開発段階にある。詳しくは
 - ① バイオ燃料 (本日は取り扱いの問題だけ) ・ ・ 燃焼上の問題はなくドロップイン・生産量は？
 - ② (合成) メタノール ・ ・ 燃焼上の問題はない・エンジン開発済み・生産供給量は？
 - ③ アンモニア ・ ・ エンジン開発中・N2O 発生はどれほど？ ・ 必要なパイロット燃料量は？
 - ④ メタン (天然ガスから合成メタンへ) ・ ・ 合成メタンは LNG 燃料船にドロップイン
 - ⑤ 水素 ・ ・ オットーサイクル型・ディーゼルサイクル型ともエンジン開発中

- 安全要件の詳細が決まっていない新技術の適用には、従前の技術と同等の安全性を実証し旗国の承認を得ることが必要
- NK は業界との連携及び各プロジェクトへの参画を通じ、安全性評価、設計承認 (AiP)、旗国承認取得支援等により業界に貢献する
- NK で得られた知見を活用し、IMO における新技術適用船の安全に関する条約/ガイドラインの策定に貢献することを目指す

ご清聴ありがとうございました。