

水素の性状と大型船舶用水素エンジンの開発

高崎 講二（九州大学名誉教授・海技研フェロー）

本日の内容

1. ゼロカーボン燃料としての水素（カーボンニュートラル燃料との区別）
2. 水素を含む新燃料の燃焼に関する性状
 - ・「自己着火性」と「燃焼性」の区別
3. 天然ガスや水素燃料エンジンの2種類の燃焼方式（どちらもエンジンには気体で投入）
 - ・ オットー（サイクル）型燃焼＝予混合燃焼＝低圧（供給）型
 - ・ ディーゼル（サイクル）型燃焼＝拡散燃焼＝高圧（筒内噴射）型
4. NEDO・**Green Innovation** 基金による船舶用水素燃料エンジンの開発

1. ゼロカーボン (ゼロエミ) 燃料としての水素 (カーボンニュートラル燃料との比較)

メタン CH_4 とメタノール CH_3OH は分子中に炭素 **C** を含む。
 燃焼で生成される CO_2 (Tank to Wake) は重油に比べて・・・
 LPG で約 15%減・メタンで約 25%減・メタノールで約 1 割減

それらの燃焼による CO_2 がゼロカウントとなる条件は・・・
水素+回収 CO_2 等の方法 (合成) or バイオで作られること。

- 右表：カーボンニュートラル燃料のカーボンリサイクル (CR) メタンは 以下の同義語でも呼ばれる。
 - e-メタン・グリーンメタン・合成メタン・再生メタン
- 右表：合成メタノールは以下の同義語でも呼ばれる。
 - e-メタノール・グリーンメタノール・再生メタノール

アンモニア NH_3 ・水素 H_2 は、分子中に **C** を含まない
ゼロエミッション (脱炭素) 燃料。

代替燃料の環境用語上の類型と消費時の性状分類

環境用語上の類型	代替燃料	消費時性状分類
ブリッジ燃料	LPG	LPG C_3H_8
	LNG	メタン CH_4
カーボンニュートラル燃料	(※) 合成燃料 カーボンリサイクルメタン	
	合成メタノール	メタノール CH_3OH
	バイオ燃料 バイオメタノール	
ゼロエミッション燃料	バイオディーゼル	石油系に類似
	アンモニア	アンモニア NH_3
	水素	水素 H_2

※) 合成燃料の用語は、回収された二酸化炭素と再生エネルギー由来の水素を利用するものを差し、かつカーボンニュートラルと認められることを前提として使用している。

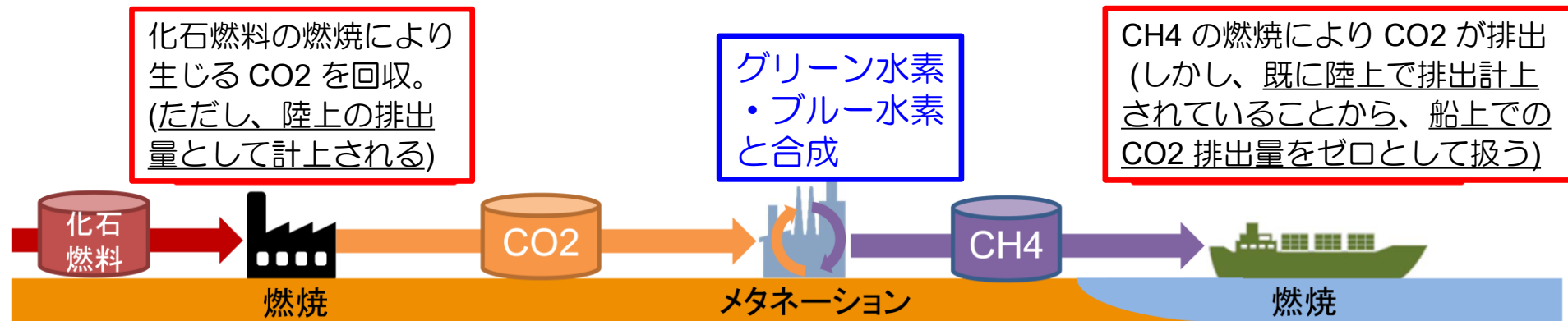
復習：炭素 C を含む合成燃料を「カーボンニュートラル」として作る方法の考え方

- 下図は 合成メタン (CH₄) (= e-メタン・グリーンメタン・カーボンリサイクルメタン...) の製造法の例
- 同様に 合成メタノール (CH₃OH) (= e-メタノール・グリーンメタノール...) も製造可能

出典：MLIT HP 国際海運 GHG ゼロエミッションプロジェクト

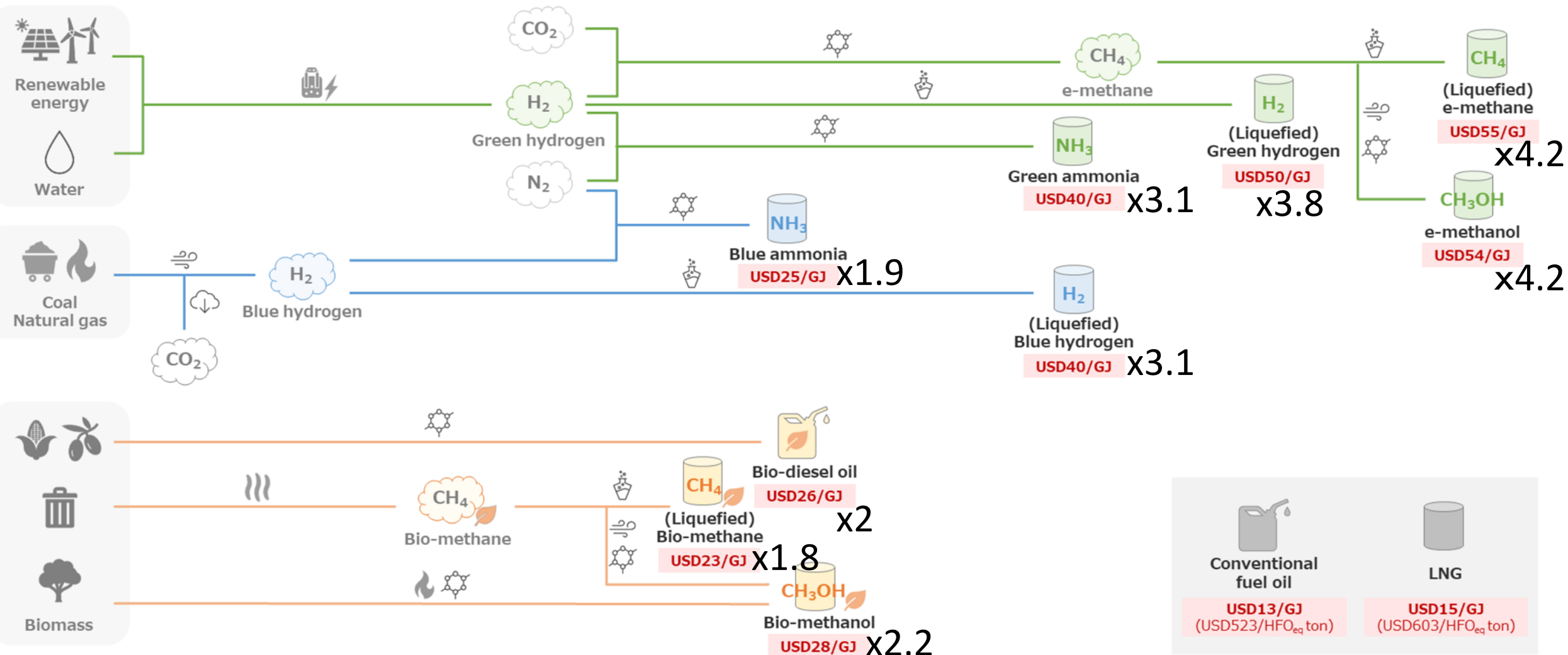
国際海運の 2050年カーボンニュートラルに向けて（概要）2022年 3月

<https://www.mlit.go.jp/maritime/content/001484433.pdf>



図：メタネーション：合成メタン製造法の例

ご参考：代替燃料の製造経路 コスト（2030 年時点での見込み） 出典：ClassNK 代替燃料インサイト (2024)



x 数字は対重油比

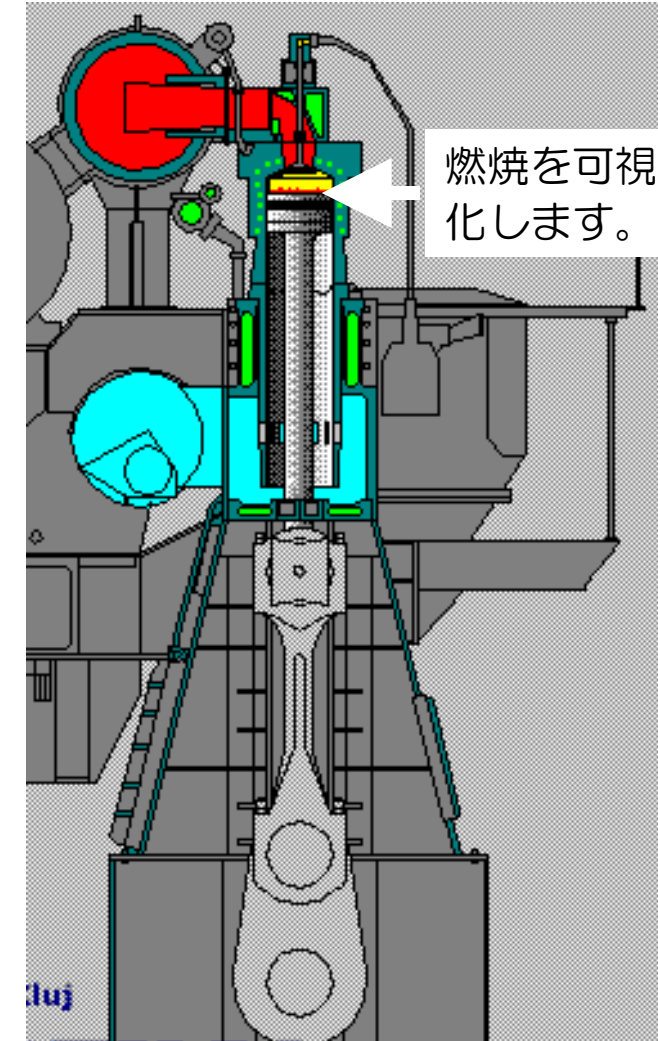
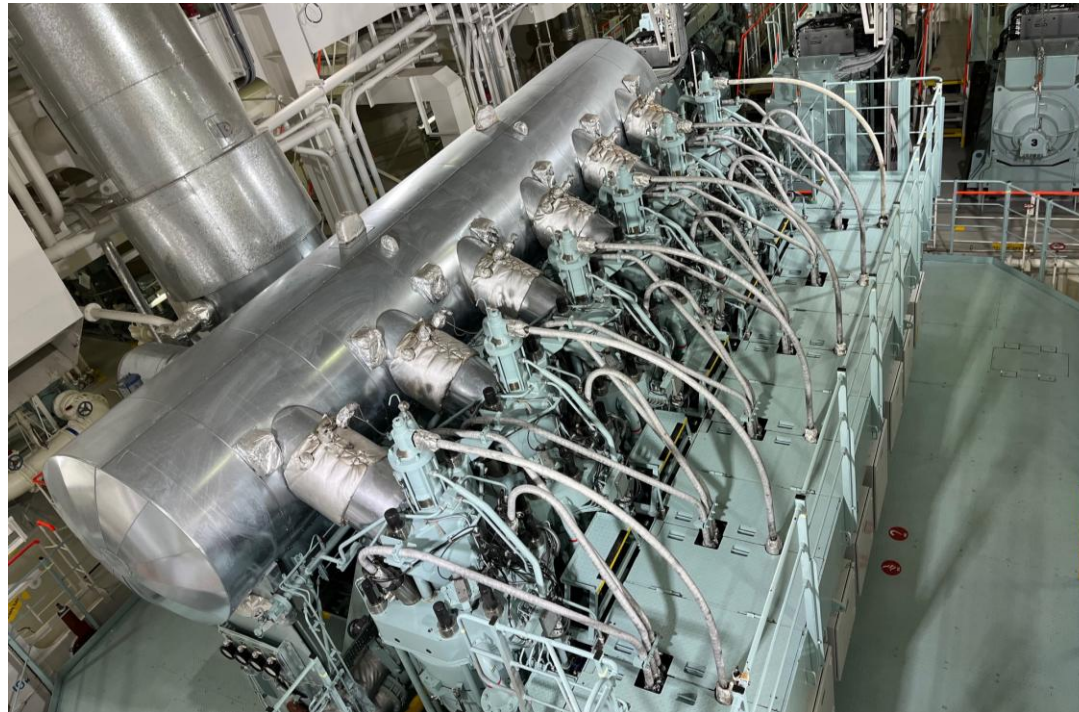
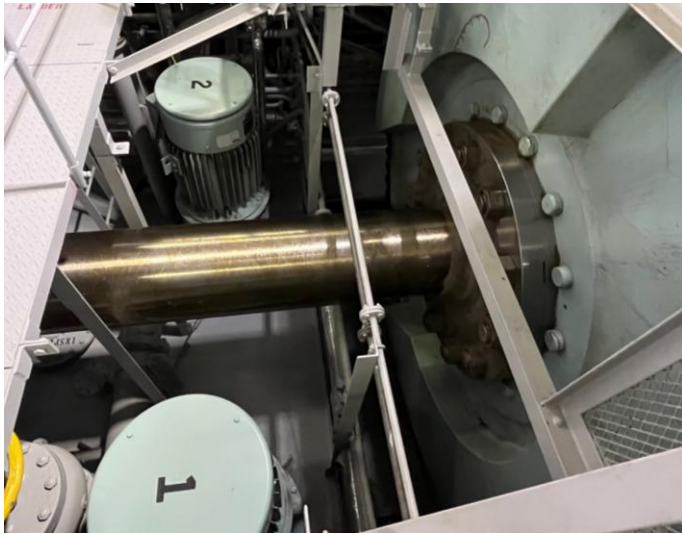
- ここからエンジンの話に・・・

- 下写真は低速2ストローク・天然ガスエンジン（重油との **Dual Fuel : DF** ）の1例

（**DF** = 2元燃料の意義について解説します。後述の NEDO 基金開発の
舶用水素エンジンも重油との **DF**）

- 6気筒
- シリンダ直径：62 cm
- 出力：1万 kW クラス
- エンジン回転数：100 rpm のオーダー

- プロペラ直結



2. 水素を含む新燃料の燃焼に関する性状

・ 引火点は低い（アンモニア NH3 を除く）一方、 自己着火温度は高い（水素を含めパイロット着火の必要性）

各代替燃料の 燃焼に関係した燃料性状	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/m3 @ 沸点	989@15℃	791@25℃	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	(132)	-175	極低温
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

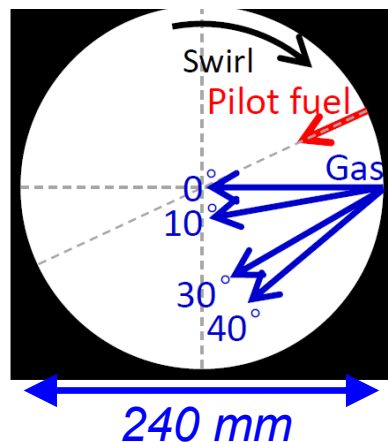
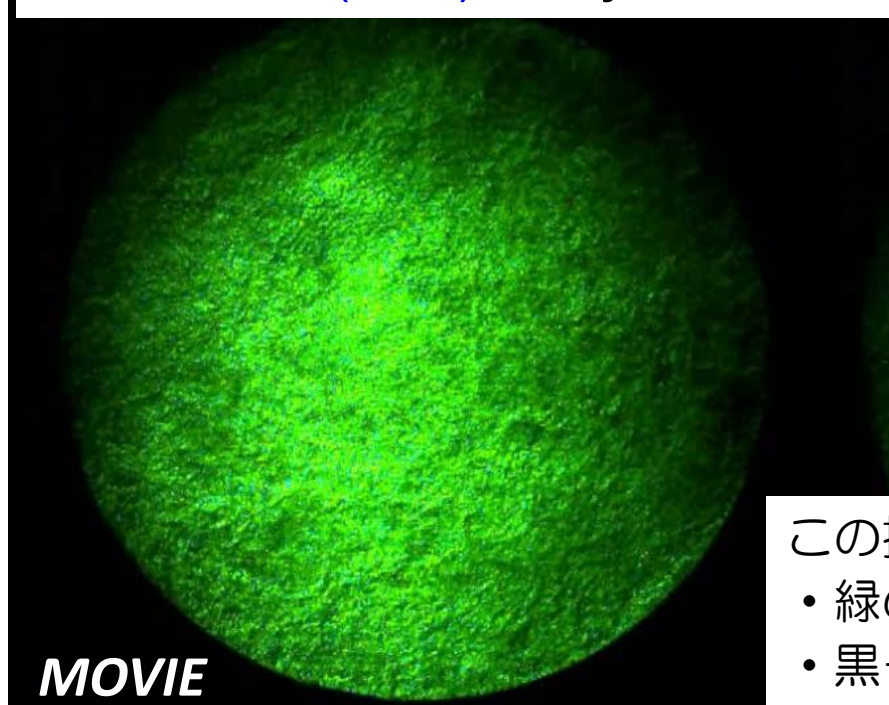
（*メタノールの自己着火温度は 385℃、メタンの自己着火温度は 635℃と言うデータも・・・）

参考: プロパンデータ・液比重 508 kg/m3・沸点 - 42℃・自己着火温度 432℃・引火点 -104℃・低位発熱量 46.4 MJ/kg

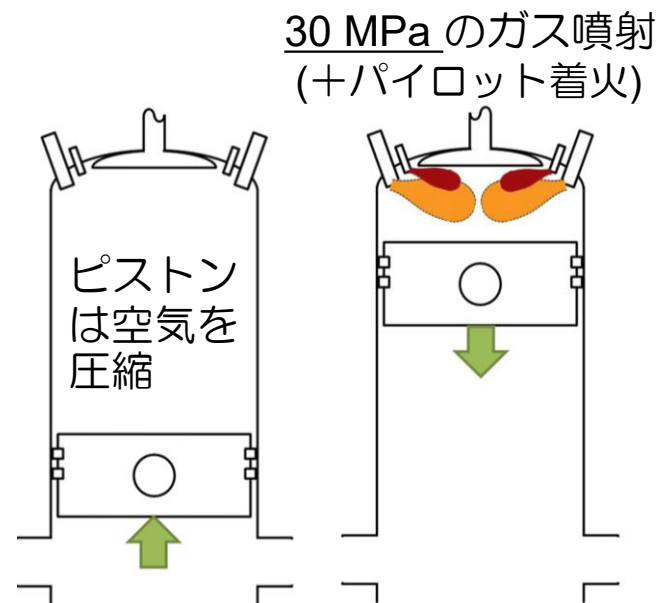
- (動画) メタンのパイロット着火「ディーゼル型燃焼」の可視化例
(水素の可視化例については、本日後半の研究講演で環境・動力系より紹介)

- 気体で高圧噴射しパイロット着火させるメタン噴流・水素噴流の燃焼も、原理的に重油・軽油のディーゼル燃焼と同じ。「拡散燃焼」とも言う。

メタン CH_4 (気体) : P_{inj} 32 MPa (パイロット軽油は熱量で5%)



- この撮影法では
- 緑の部分は純空気
 - 黒+輝炎部分が燃焼域



メタン燃焼
ディーゼル型



天然ガス (メタン) 噴流はパイロット火炎によって着火されなければならないが、一旦着火すればほぼ完全燃焼・・

未燃メタン (メタンスリップ) は全ガスの 0.2 % 程度と極小。ほぼ無視できるオーダー

- ディーゼル型燃焼：ノッキング等異常燃焼の問題がなく、高圧縮比可・高効率・高出力

3. 天然ガスや水素燃料エンジンの2種類の燃焼方式（どちらもエンジンには気体で投入）

新燃料については「[ディーゼルサイクル型](#)・[オットーサイクル型](#)」とも呼ばれる。

	低速2スト (主機)	中速4スト (主機・発電機)
天然ガス/メタン CH ₄	ディーゼル (気) or オットー	オットー
メタノール CH ₃ OH	ディーゼル (液)	オットー or ディーゼル
アンモニア NH ₃	ディーゼル (液)	オットー (or ディーゼル)
水素 H ₂	ディーゼル (気)	オットー

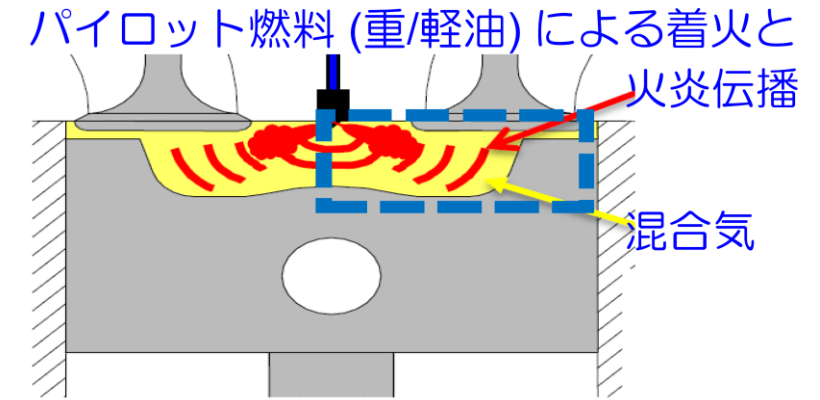
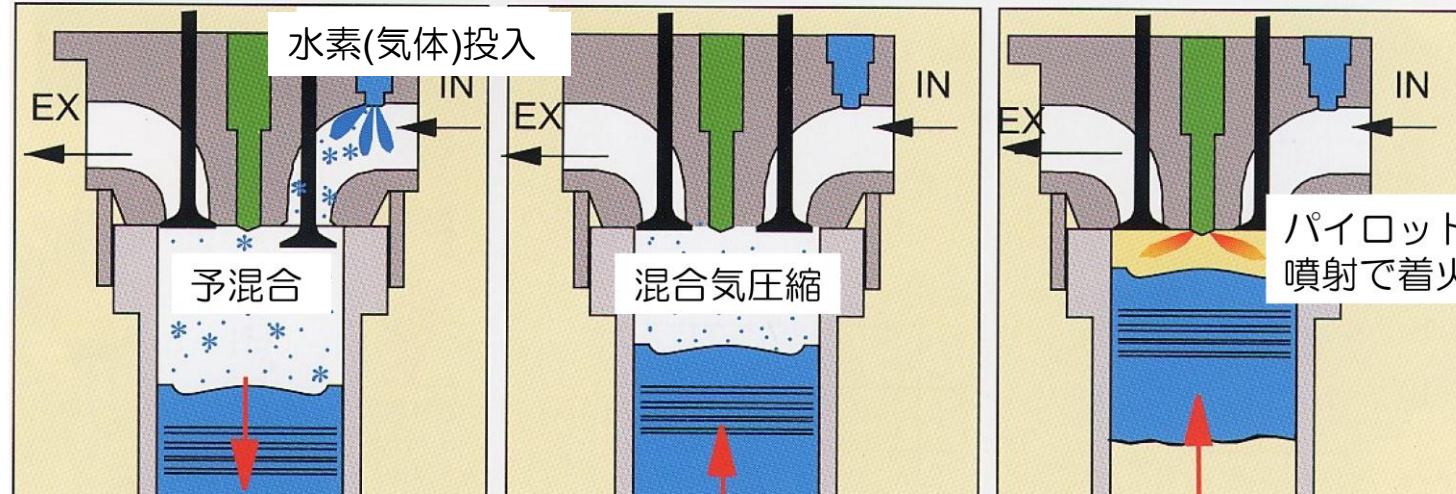
- ・ディーゼル型燃焼は「[拡散燃焼](#)」、オットー型燃焼は「[予混合燃焼](#)」とも言う。
- ・燃料の供給圧力から、ディーゼル型を「高圧型」、オットー型を「低圧型」とも言う。
- ・また中速4ストエンジンでは、**High Press. Direct Injection** : [HPDI](#) と言えばディーゼル型
Port Fuel Injection : [PFI](#) と言えばオットー型を意味。

*注：[Dual Fuel](#) の解説で「ディーゼルモード」と呼ばれることがあるのは「全ディーゼル油モード＝全重油モード」のこと。上表の「ディーゼル型」とは新燃料の燃焼モード

• 水素のオットー型燃焼パターン (天然ガス (メタン) オットー型と同様・・・

水素・オットー型

＝低圧型：投入水素圧力は 1 MPa のオーダー)



吸気ポートに燃料投入

PFI：Port Fuel Injection

4ストエンジンで PFI 言えばオットー型。

バックファイヤ（吸気管で水素が燃焼）は解決済。

水素混合気は最小着火

エネルギーが極小のため、
プレイグ* 発生の懸念も
あったが、

エンジン側の対策は十分進んで、
開発は成功裏に完了している。

*プレイグ：シリンダの潤滑油等が火種
となって、混合気の無制御着火が起こる
異常燃焼 (Pre-ignition)

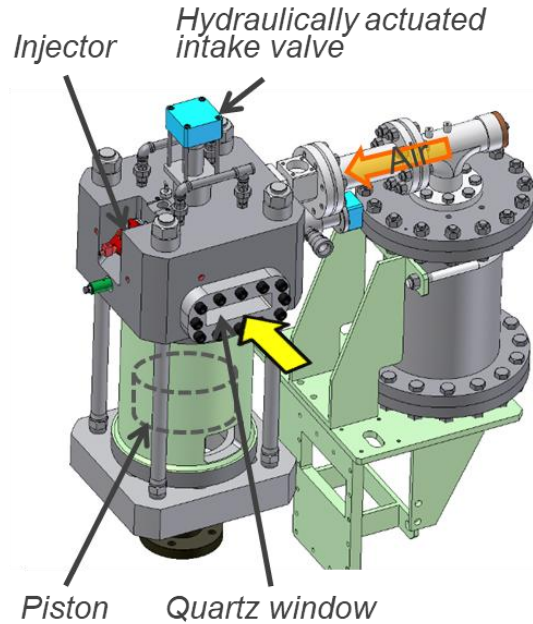
*余談：今回は説明を省略しますが、トヨタの車用水素エンジンは「中圧・筒内噴射」のオットー型・・・

・ピストン圧縮前の筒内低圧空気に水素を 3 MPa？程度の圧力 (中圧) で噴射。圧縮行程中に混合気を作り
点火プラグで着火して「予混合燃焼」させる。

(オットー型ではあるが、吸気管でなく筒内に燃料を投入することでバックファイヤとは無縁になっている)

参考：水素のディーゼル型燃焼の基礎研究

- ・空気だけを圧縮するディーゼル型燃焼はノッキング・ブレイグとは無縁



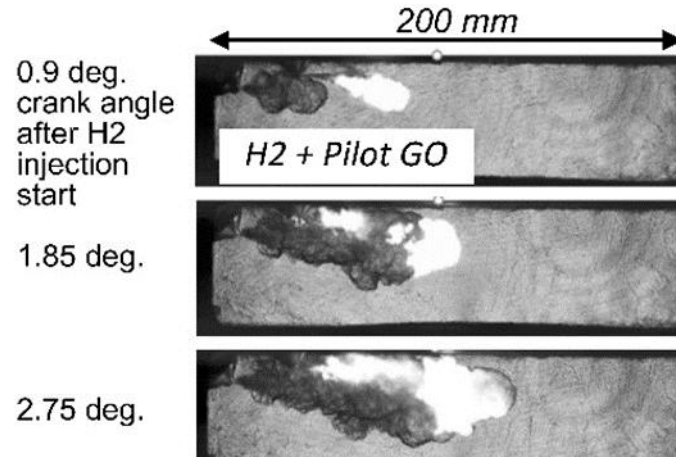
(上) 燃焼可視化装置 (旧タイプ：九州大学)

水素噴射圧力: 300 bar = **30 MPa**

空気圧力: 80 bar = 8 MPa

(右) 本日後半の研究講演で
環境・動力系より紹介)

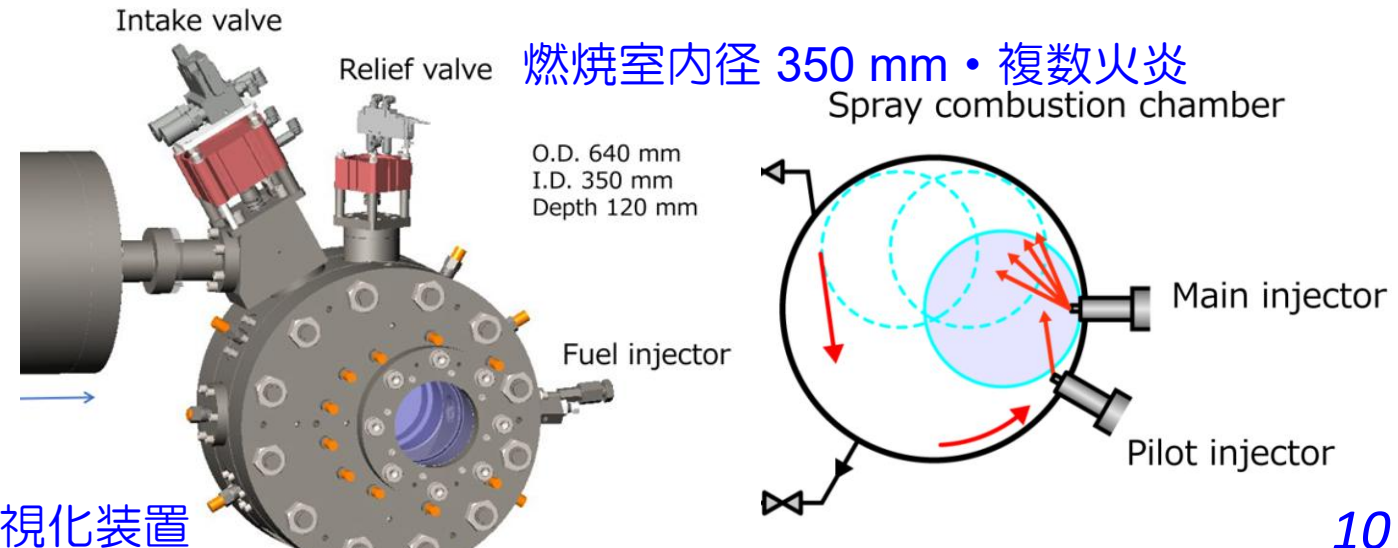
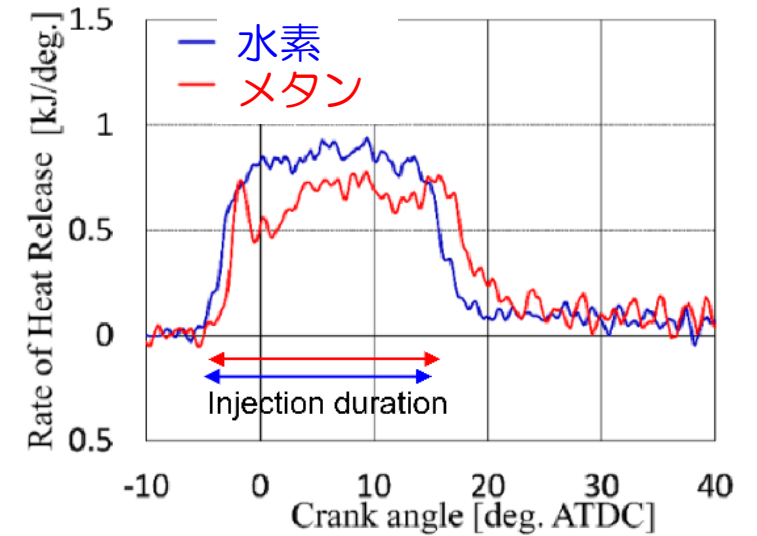
構造・大きさ・燃焼条件とも実
エンジンを模擬した新しい燃焼可視化装置



(上) パイロット軽油による水素
噴流の着火 (空気温度: 約 550°C)
(炭素を含まない水素は**不輝炎**)

(上・右上) 旧燃焼可視化装置 (左図) による単一水素火炎のデータ

(下図) 熱発生率
どちらも軽油パイロットによる着火



4. NEDO・Green Innovation 基金による船舶用水素燃料エンジンの開発

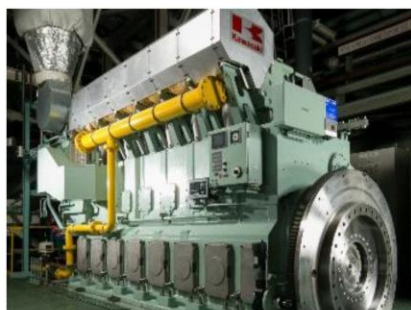
水素

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

適用

適用

液化水素運搬船



油槽船



ばら積み船



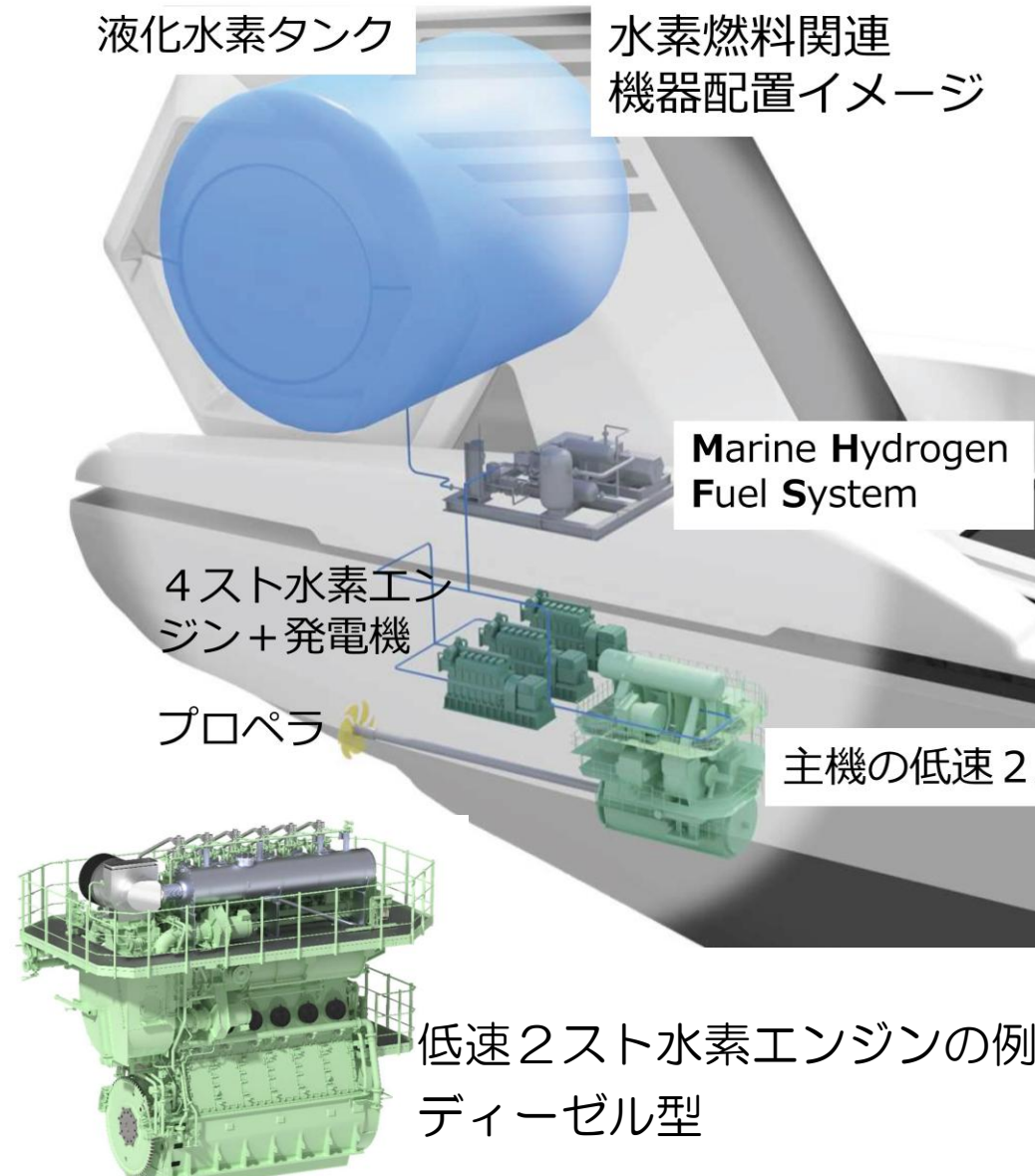
低速2スト機関は 30MPa
の高圧水素を筒内噴射し
燃焼させる・・・
ディーゼル型。

実証運航

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**型。

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



注＊この後の講演のように、NEDO 以外の補助金また
自社による水素エンジンの開発も国内で進行中です。

ご清聴ありがとうございました。

下記の内容についてお話しました。

本日この後の水素エンジン・水素燃焼の解説についてのご理解が深まれば幸いです。

1. ゼロカーボン燃料としての水素（カーボンニュートラル燃料との区別）
2. 水素を含む新燃料の燃焼に関する性状
 - ・「自己着火性」と「燃焼性」の区別
3. 天然ガスや水素燃料エンジンの2種類の燃焼方式（どちらもエンジンには気体で投入）
 - ・ オットー（サイクル）型燃焼＝予混合燃焼＝低圧（供給）型
 - ・ ディーゼル（サイクル）型燃焼＝拡散燃焼＝高圧（筒内噴射）型
4. NEDO・**Green Innovation** 基金による船舶用水素燃料エンジンの開発

