

低硫黄燃料を使用する機関側に必要とされる取り組み

ClassNK テクニカルアドバイザー 九州大学 高崎 講二

1. 低硫黄燃料に対する一般的対応について・・・
2. 2020年以降に予想される高芳香族燃料について・・・
3. メタノール・LPGなど代替燃料について・・・
4. 船用主機天然ガスエンジンの開発状況について・・・

1. 低硫黄燃料に対する一般的対応について・・・

参考資料：例えば・・・

「低硫黄燃料油に関する規制と問題点、その対策について」
2010 ClassNK 春季技術セミナー

http://www.classnk.or.jp/hp/pdf/reseach/seminar/2010_05.pdf

上記の内容は主にECA燃料（0.1%S）を対象としたもの。

当時、低硫黄燃料使用時（ディーゼル機関）の注意として・・・

- (1) 主機関におけるシリンダ油とのマッチング
- (2) 着火遅れ及び燃焼不良
- (3) 低粘度・低潤滑性

が上げられている。

- (1) に関しては、潤滑油メーカーの研究開発によるところが大きい・・・
- (2) については本日のテーマの一つ・・・
- (3) については、加熱したHFOからの切り替え時にECA用低粘度燃料の温度が上がり、粘度がさらに下がって潤滑性の問題を起こすことは知られている・・・（これは2020からの問題とは別・・・）

現在のところECA 燃料で大きな問題が少ないのは、量的に多くないため比較的良質のものが供給されているからか・・・？

2. 2020年以降に予想される高芳香族燃料について・・・

参考資料：

「IMOのSO_x規制強化による船舶用燃料への影響(1)」

JPEC レポート第17回（2015年度）

http://www.pecj.or.jp/japanese/minireport/pdf/H27_2015/2015-017.pdf

このレポートでは、船舶用低硫黄燃料の製造方法として

- (1) Marine Gas Oil (MGO/DMA)
- (2) Marine Diesel Oil (MDO/DMB)
- (3) IFO-380 (Intermediate Fuel Oil)
- (4) 低硫黄原油からの低硫黄船舶用残渣油

が上げられており、(1) (2) では基材として高芳香族の LCO*の使用、(3) ではさらに高芳香族の HCO*（CLO*）の使用について述べられている。(4) は量的確保が難しいとされている。

・現在ECA で一部使われているハイブリッド低硫黄燃料（ULSFO・・・脱硫重油と深度脱硫軽油のブレンド品？）は、潤滑性や動粘度が規制前燃料に近いと関心が集まっていると評価されている・・・次頁性状表を参照（これから量的にはどうなのか？）

*LCO・HCO（CLO）・・・FCC系の高芳香族成分（後で詳しくご説明します）

表4 船用として公表されている主な燃料（硫黄分0.1%）の性状

(出所:各石油会社のHPより)

JPEC レポート第17回 (2015) IMOのSOx規制強化による船舶用燃料への影響 (1)

項目	単位	限界	Premium HDME50	Fuel Oil	ULSFO	ULSFO	Eco Marine	参考
販売会社			ExxonMobil	Chemoil	Shell	SK Energy	Lukoil	
ISO8217 相当			RMD80		RMD80	RME180		RMG380
動粘度 (50℃)	mm ² /sec	上限	45	26.3	60	20~40	65	380.0
		下限	30		10			
密度(15℃)	kg/m ³	上限	900~915	896	790~910	928	910	991
CCAI	-	上限	795~810	795	800	790~800	860	870
硫黄分	mass%	上限	0.10	<0.1	<0.1	<0.1	0.095	
引火点	℃	下限	70	60	60	100	60	60
硫化水素	mg/kg	上限	1		<2		2.00	2.00
酸価	mgKOH/g	上限	0.1	2.35	<0.5		2.5	2.5
全沈殿物	mass%	上限	0.01	0.01	0.01~0.05	0.02	0.1	0.10
残留炭素分	mass%	上限	0.3	3.8	2.0	2.7	14.0	18.0
流動点 (冬用)	℃	上限	6~12	-6	18	20~25	20	30
流動点 (冬用)	℃	上限						
アルミナ+シリコン	mg/kg	上限	5	<10	12~20		17	60

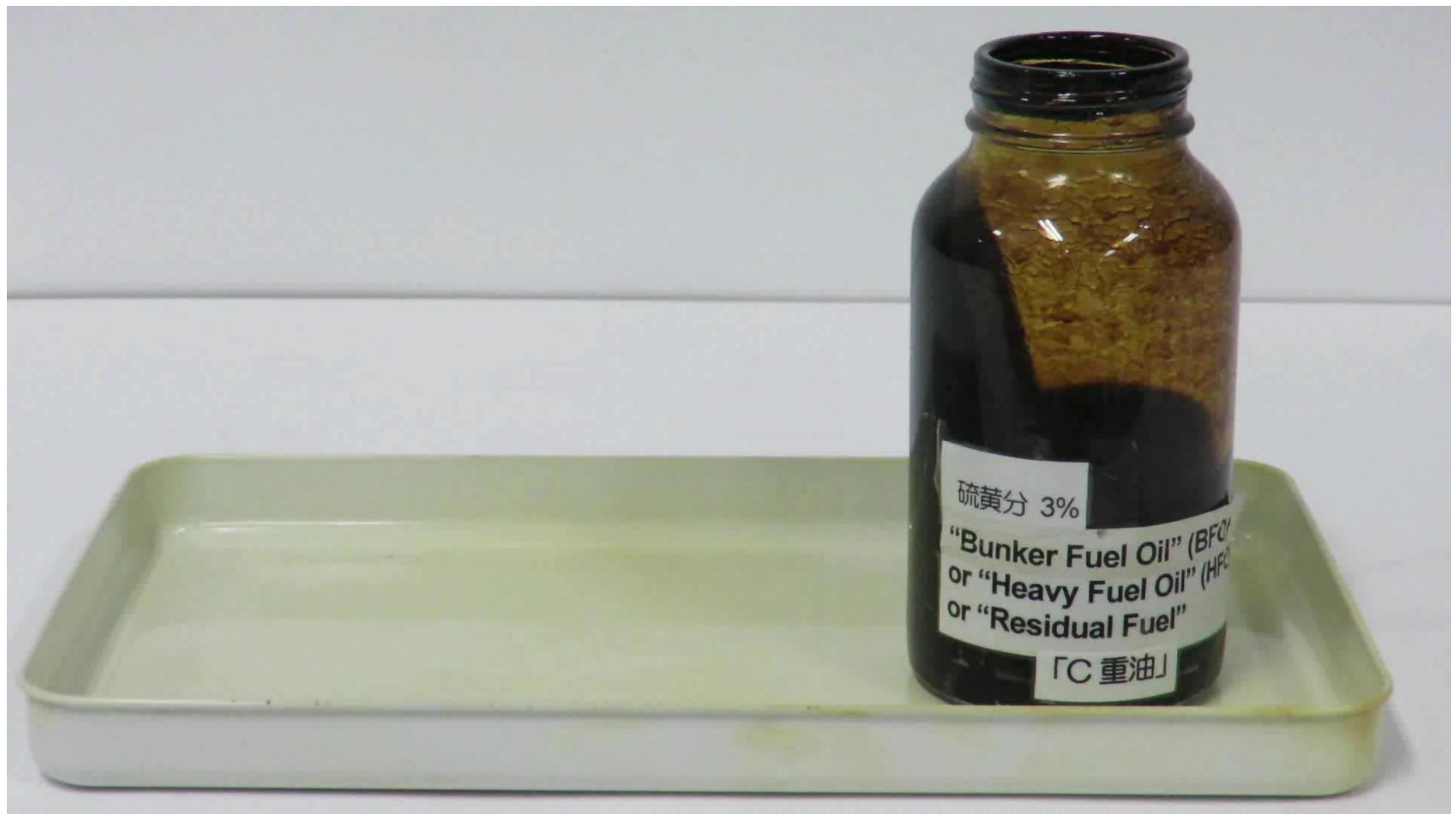
ご参考：上記はECA向けハイブリッド燃料と呼ばれているもの。これらはむしろ直留系らしく芳香族性は低い（EcoMarineを除いて・・・）。

- ・ IMO側レポートで言及されている脱硫残渣油は、もっと芳香族（CCAI）の高いもの（華山講演）

予備知識 従来の船用燃料・・・

C重油・残渣油・重質油 HFO・バンカー油 BFO・・・どれも同じ意味

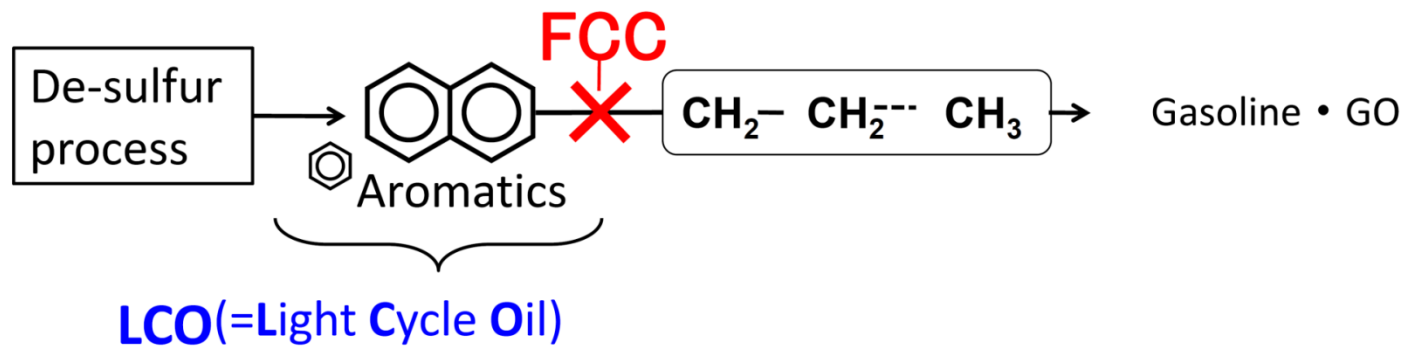
- 硫黄分3.5%まで許容されている。
- 固体のような残渣分（石油精製の残り物）を、粘度調整のためのカッター材（低粘度成分）で割ったもの。



代替燃料の候補: ライトサイクル油 **Light Cycle Oil (LCO)**

- 現在はC重油のカッター材・・・グローバルキャップ後にC重油が売れなくなれば、余ってしまつてMGO・MDOに多く混入される・・・?
- 低硫黄、低粘度、しかし高芳香族（着火性・燃焼性に劣る）

海事局（植村様）ご講演
p7・IPIECA報告の・・・
「A重油」に**FCC**から入る
「中間留分」が**LCO**です。



重いものも軽いものも、

残りものと言えは芳香族 = アロマ = ベンゼン環

(粘度が低いから良質とは限らない。)

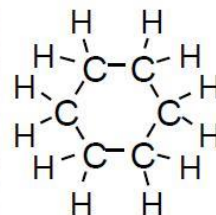


船用軽油からの**PM (Soot)**
(Marine Propulsion, April/May 2010)

Alicyclic hydrocarbons



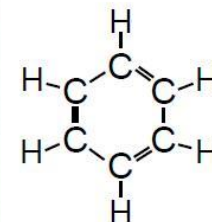
Cyclohexane
(C_6H_{12})



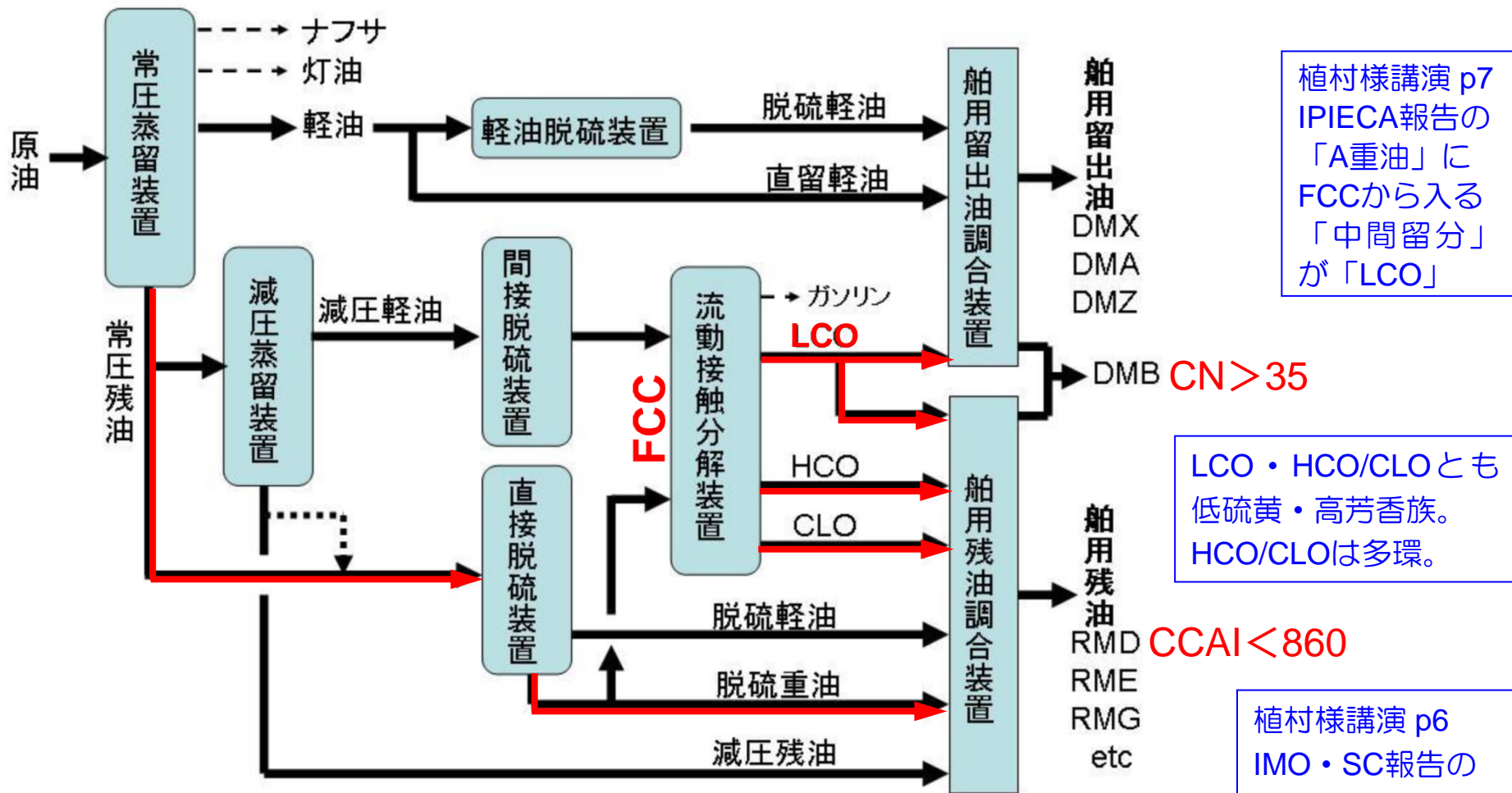
Aromatic hydrocarbons



Benzene
(C_6H_6)



芳香族も1-2環なら軽油なみの粘度であるが、
着火・燃焼性は悪い。右：芳香族（ベンゼン）



JPEC レポート第17回 (2015) IMOのSOx規制強化による船舶用燃料への影響 (1)

(以下は筆者の予想・・・)

- 2020年から留出油が主体となる場合、これまで残渣油のカッター材となっていた LCOが余る・・・その分だけ留出油も LCOリッチに・・・？
- 製油所側としてはできるだけ残渣分を処理したい・・・残油脱硫ラインがある場合はそれを使う？
上記留出油にも一部残渣を混ぜて、例えば RMD の規格にしてしまえば着火性の基準は甘くなる
(セタン価でなく CCAI 値に・・・ or ISOの改訂も要?) IMOやIPIECA案でなく第3の話です。8

植村様講演 p7
IPIECA報告の
「A重油」に
FCCから入る
「中間留分」
が「LCO」

LCO・HCO/CLOとも
低硫黄・高芳香族。
HCO/CLOは多環。

植村様講演 p6
IMO・SC報告の
「低硫黄C重油」
にFCCから入る
「分解残油」が
「HCO/CLO」

ご参考：船用留出油の規格概要（ISO8217:2012）

項目	単位	限界	DMX	DMA	DMZ	DMB	試験方法
動粘度(40℃)	mm ² /sec	上限	5.50	6.00	6.00	11.00	ISO 3104
		下限	1.40	1.50	3.00	2.00	
密度(15℃)	kg/m ³	上限	—	890.0	890.0	900.0	ISO 3675 ISO 12185
セタン指数	—	下限	45	40	40	35	ISO 4264
硫黄分	mass %	上限	1.00	1.50	1.50	2.00	ISO 8754 ISO 14596
引火点	℃	下限	43.0	60.0	60.0	60.0	ISO 2719
硫化水素	mg/kg	上限	2.00	2.00	2.00	2.00	IP 570
酸価	mgKOH/g	上限	0.5	0.5	0.5	0.5	ASTM D664
熱ろ過沈殿物	mass%	上限	—	—	—	0.10	ISO 10307-1
酸化安定性	g/m ³	上限	25	25	25	25	ISO 12205
残留炭素分	mass %	上限	—	—	—	0.30	ISO 10370
残炭(10%残)	mass %	上限	0.30	0.30	0.30	—	ISO 10370
曇り点	℃	上限	−16	—	—	—	ISO 3015
流動点(冬用)	℃	上限	—	−6	−6	0	ISO 3016
流動点(夏用)	℃	上限	—	0	0	6	ISO 3016
水分	vol%	上限	—	—	—	0.30	ISO 3733
灰分	mass%	上限	0.010	0.010	0.010	0.010	ISO 6245
潤滑性(60℃)	μm	上限	520	520	520	520	ISO 12156-1

ご参考：船用残渣油の主要6グレードの規格（ISO8217:2012）

青枠は従来の高硫黄船用残渣油

項目	単位	限界	RMA 10	RMB 30	RMD 80	RME 180	RMG 380	RMK 500	試験方法
動粘度（50℃）	mm ² /sec	上限	10.0	30.0	80.0	180.0	380.0	500.0	ISO 3104
密度（15℃）	kg/m ³	上限	920	960	975	991	991	1,010	ISO 3675 ISO 12185
CCAI	—	上限	850	860	860	860	870	870	計算値
硫黄分	mass%	上限	法的要求値						ISO 8754他
引火点	℃	下限	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	ISO 2719
硫化水素	mg/kg	上限	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	IP 570
酸価	mgKOH/g	上限	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	ASTM D664
全沈殿物	mass %	上限	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	ISO 10307-2
残留炭素分	mass %	上限	2.50	10.0	14.0	15.0	18.0	20.0	ISO 10370
流動点（冬用）	℃	上限	0	0	30	30	30	30	ISO 3016
流動点（夏用）	℃	上限	6	6	30	30	30	30	ISO 3016
水分	vol%	上限	0.30	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	ISO 3733
灰分	mass%	上限	0.04	0.07	0.07	0.07	0.10	0.15	ISO 6245
バナジウム	mg/kg	上限	50	150	150	150	350	450	IP501,IP470
ナトリウム	mg/kg	上限	50	100	100	50	100	100	IP501,IP470
アルミナ + シリコン	mg/kg	上限	25	40	40	50	60	60	IP501,IP470

分析時の注意事項等の詳細は、ISO 8217：2012を参照のこと。

2020年・・・SOxに加えてCO2・EEDI規制・・・

EEDI 2020年以降の新造船からは基準より-20%削減へ・・・
(さらに2022から-30%?USA案)

EEDI・・・CO2 g/ton・mile

$$\frac{\text{機関出力(kW)} \times \text{燃料消費率(g/kWh)} \times \text{CO2換算係数}}{\text{DWT (ton)} \times \text{速力 (mile/h)}}$$

(対策：少ない馬力で走れる効率的な船形・推進効率・省燃費エンジン
・ガス燃料化(CO2換算係数)・最後はバイオ燃料?)

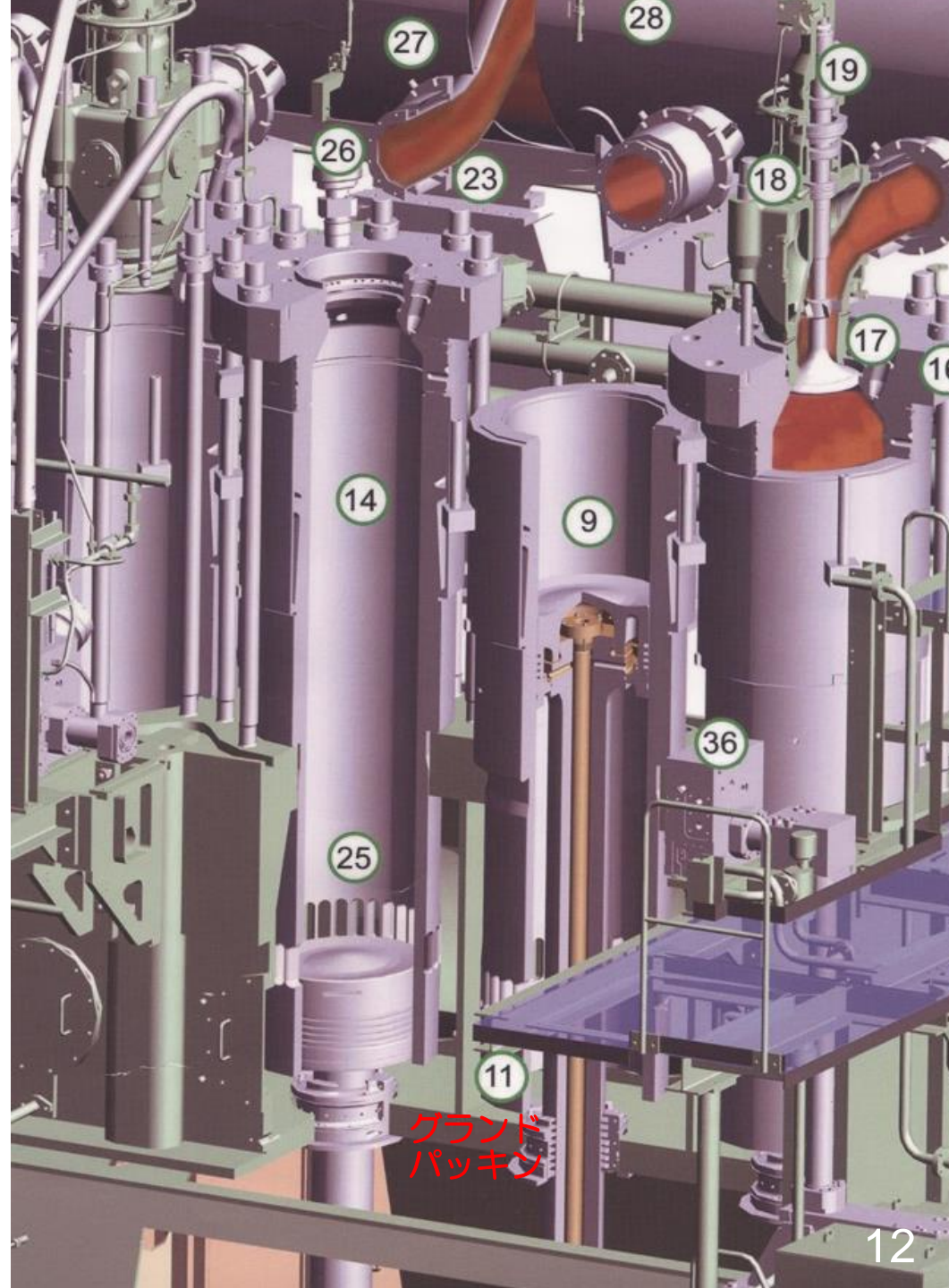
- 「燃料消費率」の改善は大きくは期待できない状況。
- 最低出力ガイドラインはできるものの、EEDIを下げるために定格出力の小さい機関を採用すると・・・高負荷常用(気象によっては過負荷)となり、(これまでの減速運転＝連続低負荷の問題と全く違って)本来の耐久性が問われることに・・・**燃焼研究は重要**・・・

- 2回転に1回の吸排気行程でLub.Oilを塗り直せる4スト機関に比べ・・・

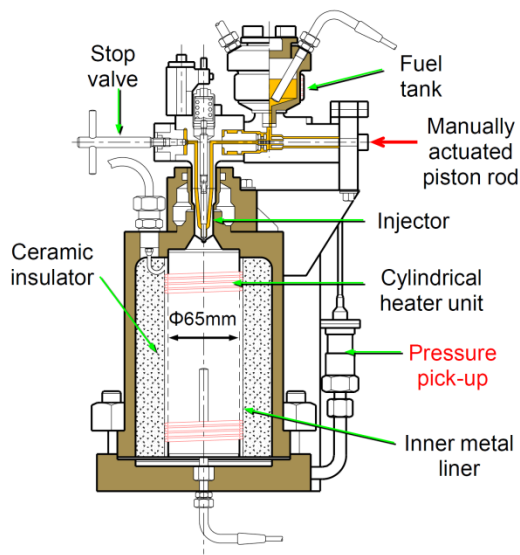
2スト機関のピストンリング・ライナ潤滑は条件が厳しい。

- ライナ上部は油膜が切れ掛け・・・
燃烧悪化やライナ温度上昇により潤滑障害を起こしやすい。

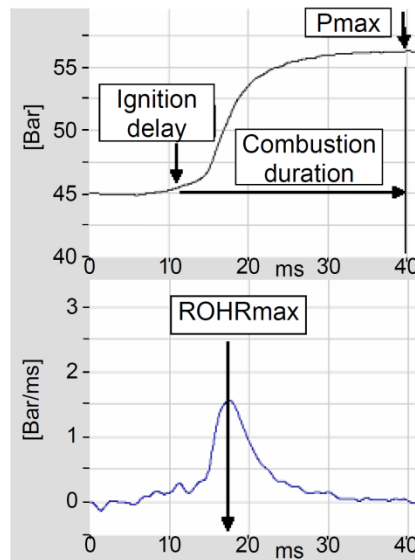
- 逆に、
減速運転では低温腐食も・・・
(この10年は、こちらの問題が多かったのではありますが・・・)



- 事前の燃料検査は一つの方法
NKでの着火・燃焼性チェックの例

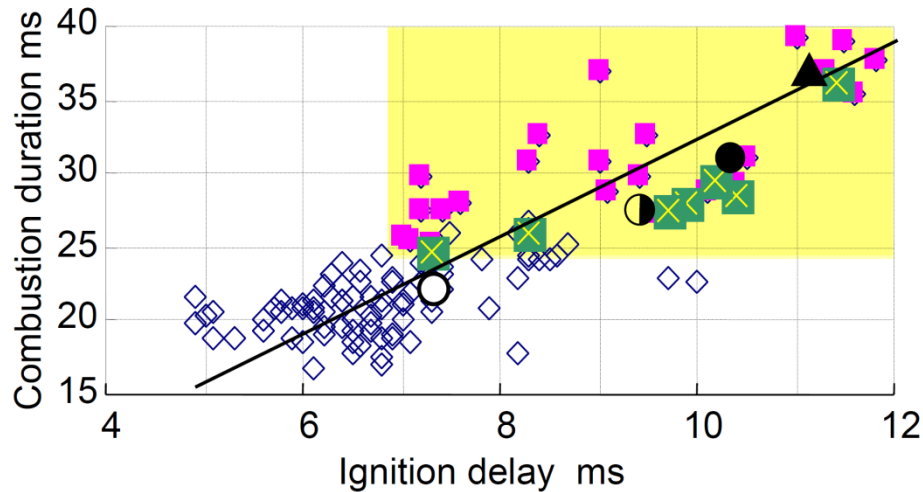


FIA (Fuel ignition analyzer)



Definitions of ignition and combustion factor

FIA (Fuel Ignition Analyzer)



◇ Non-trouble ■ Trouble ✕ Trouble for medium speed engines

GUIDANCE FOR MEASURES TO COPE WITH DEGRADED MARINE HEAVY FUELS

船用燃料重油の低質化対策指針 Version II

— 難燃性燃料油対策 —

Guidance for Measures to Cope with Degraded Marine Heavy Fuels Version II

Taking into Account the Poor Combustibility of Fuels

2008年6月

ClassNK
2008発行 財団法人 日本海事協会

CIMAC 2016 No.91: Visual study on combustion for development of alternative liquid and gas fuels (by 高崎)

低硫黄燃料の燃焼性を確かめた研究のご紹介・・・



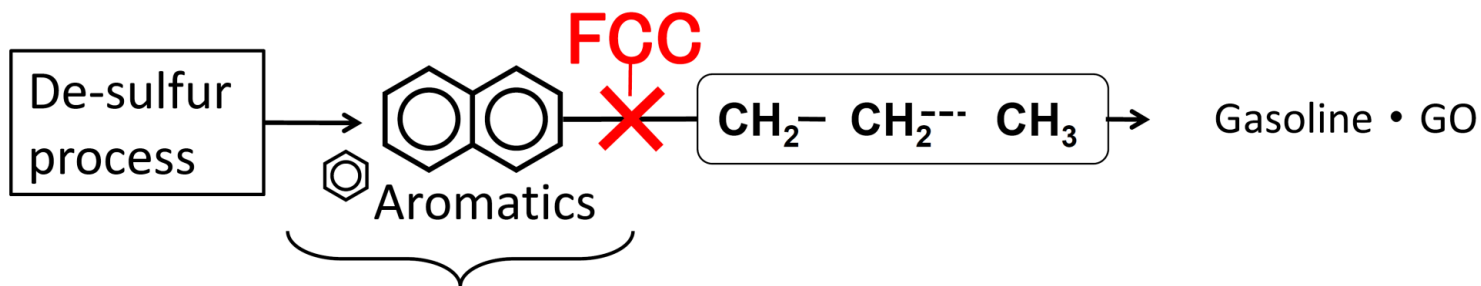
Methanol
(Zero sulfur)
(Zero aroma)

Gas Oil

Light Cycle Oil
(Low sulfur)
(High aroma)

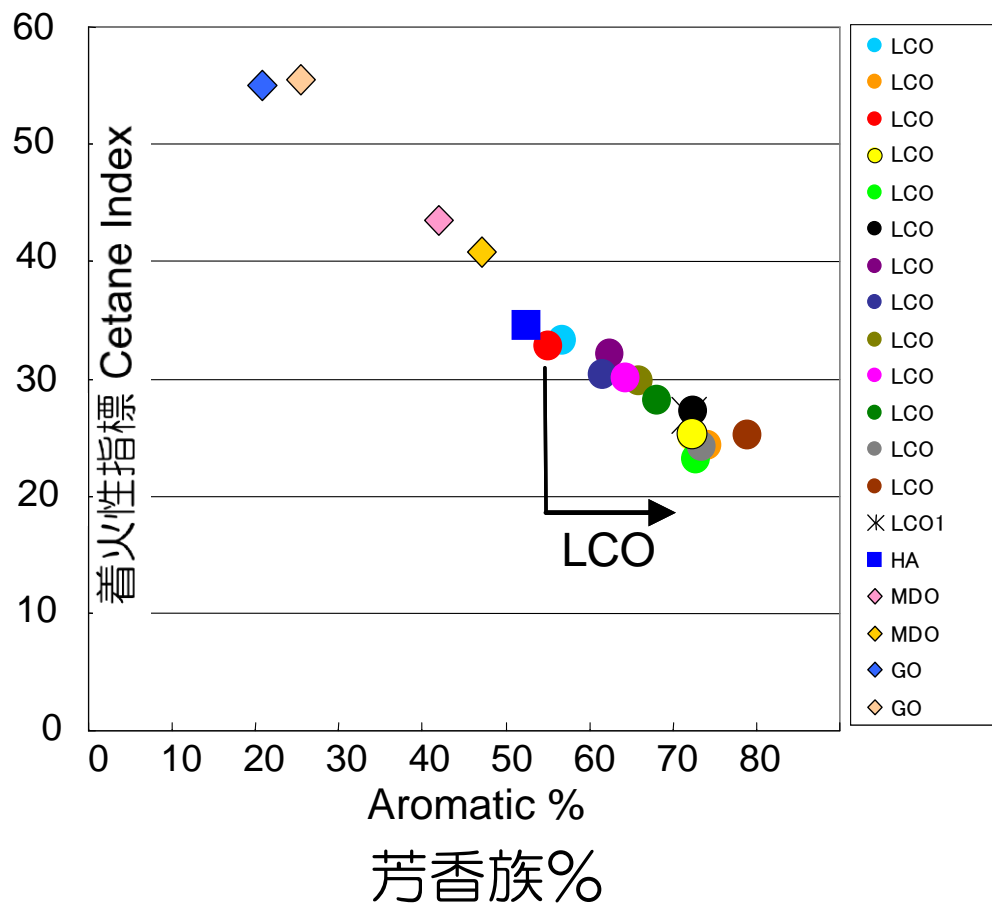
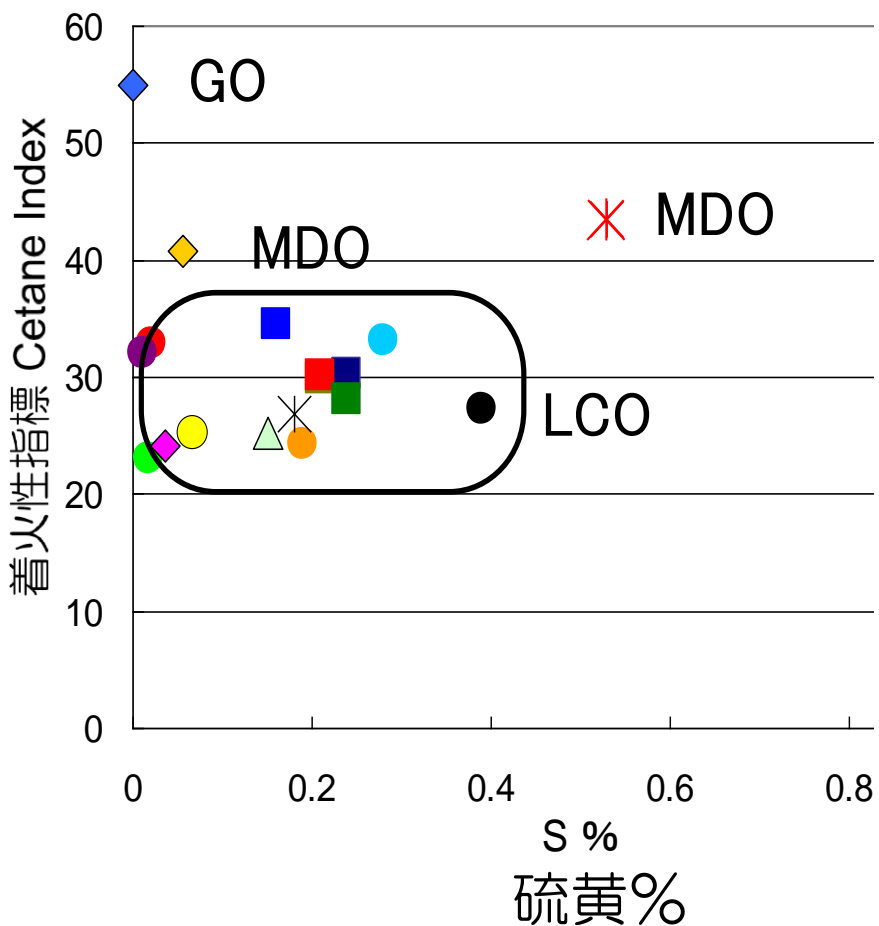
CLO

考えられる低価格？の低硫黄（0.5%以下）燃料・・・
LCO(ライトサイクル油) リッチの MGO・MDO



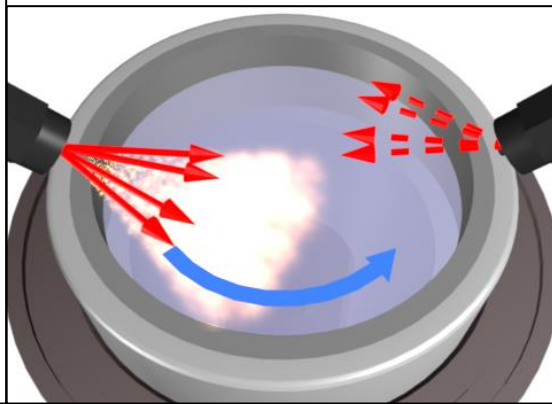
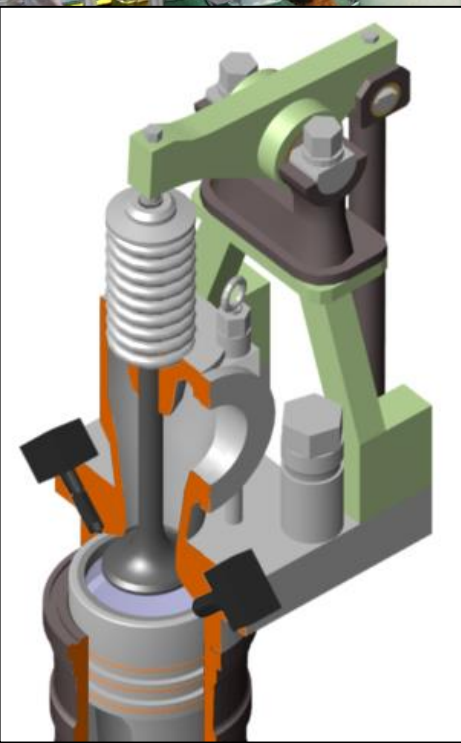
LCO(=Light Cycle Oil)

日本のLCOの硫黄%とセタン価 (Cetane Index)





高芳香族燃料の燃焼観察
by 2スト可視化ディーゼル



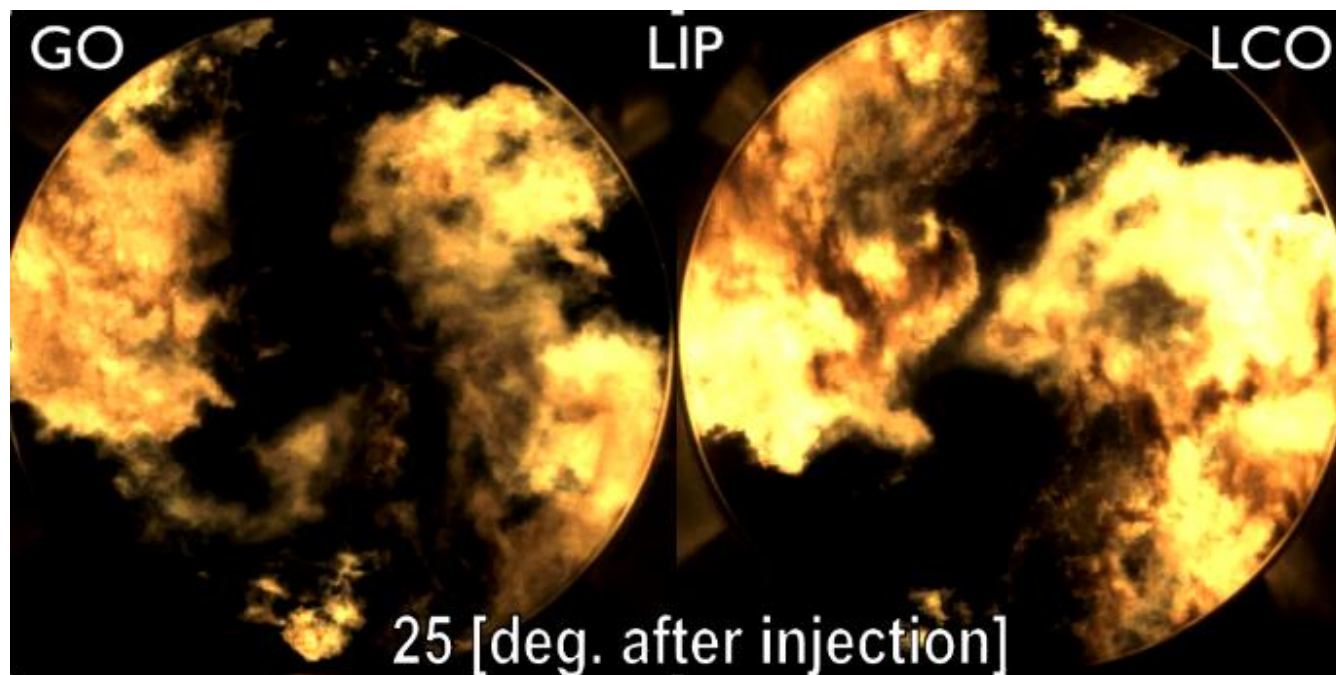
(低速2スト・中速4ストとも、
実機ベースのLCO燃焼運転は
ほとんど行われていない・・・)

Bore /Stroke : 190 mm /350 mm
2-stroke, Super-charged
Engine speed : 500 rpm

通常の軽油と LCO の燃焼比較 (着火遅れ・Soot・後燃え)

両燃料で噴射条件は同一・・・

・噴口径：0.23 mm x 4 噴口 x 2セット・噴射期間：-3 ~12° ATDC・噴射圧力：70 MPa



通常の軽油

LCO

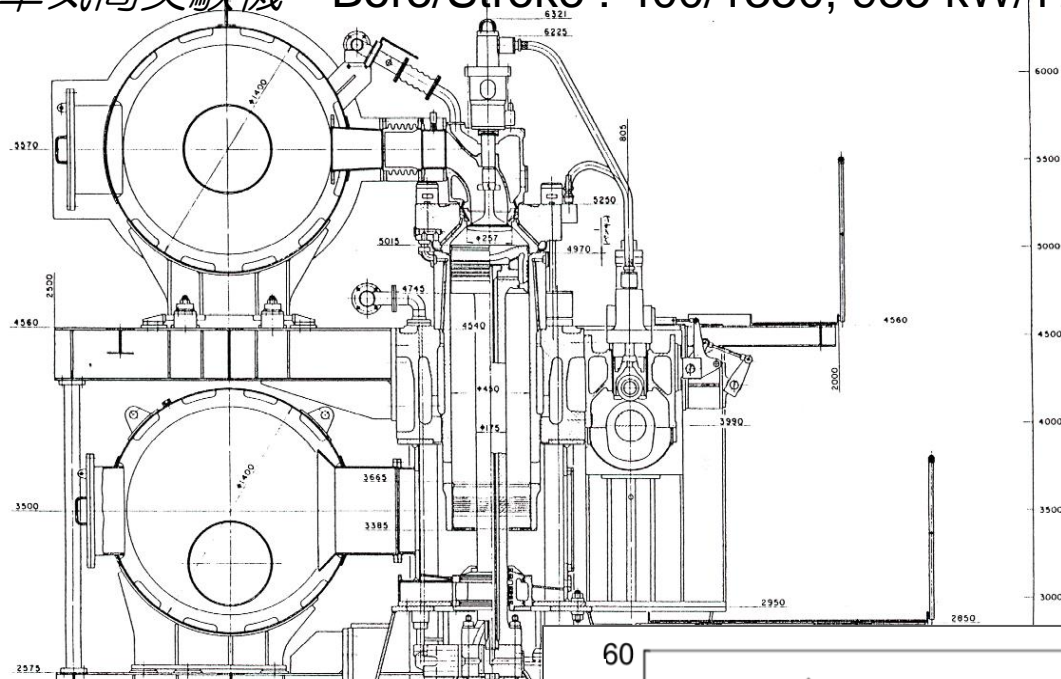
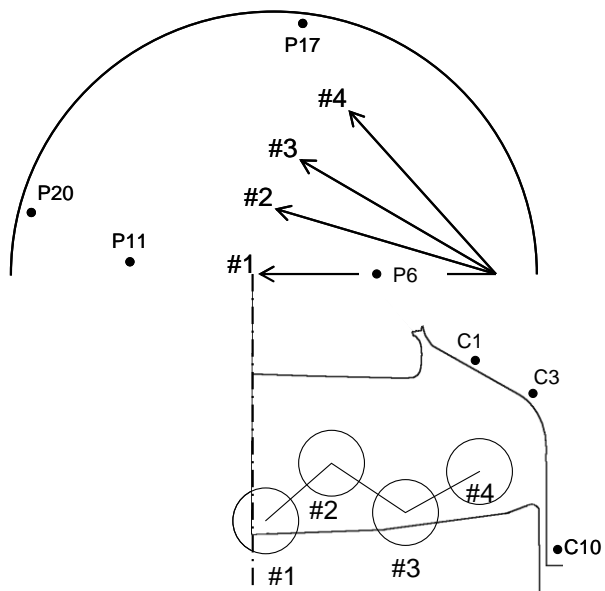
上記静止画は@燃料噴射終了後10°の後燃えの比較・・・

(左) 軽油噴霧はほぼ燃え切っているが、(右) LCOでは後燃えが続いている。
着火遅れの差については動画でご説明します。

注意：この可視化エンジンは実際の低速2スト機関より小型で回転数も速く、現象は実機より強調されていることにご注意ください。

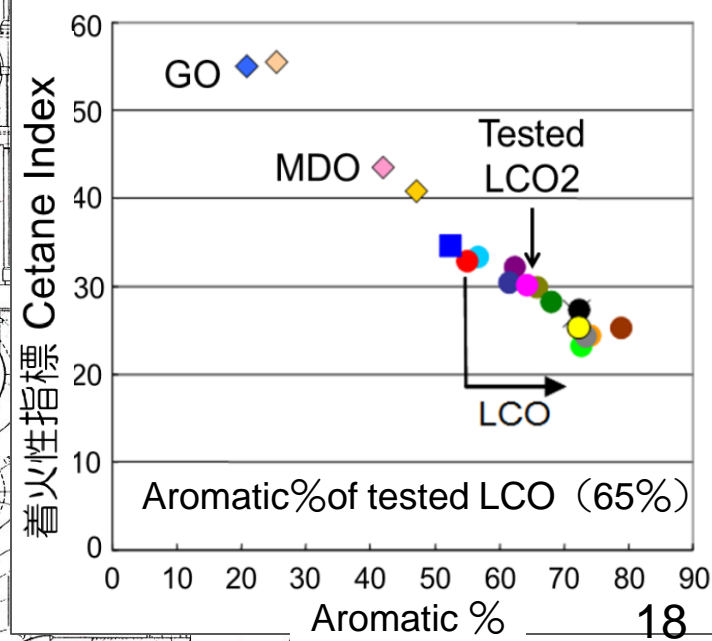
低速2スト機関によるLCO燃烧実験例

(日立造船 有明 単気筒実験機 • Bore/Stroke : 400/1350, 985 kW/178 rpm)

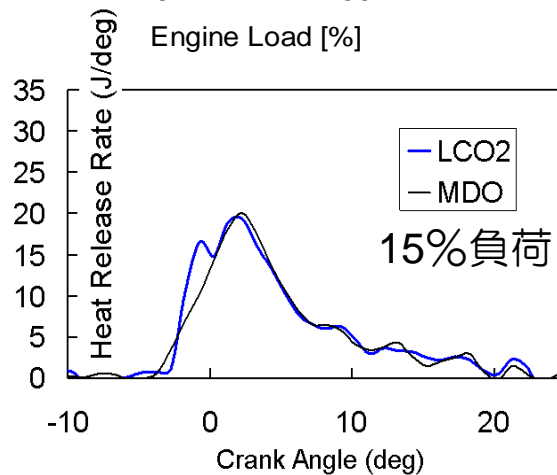
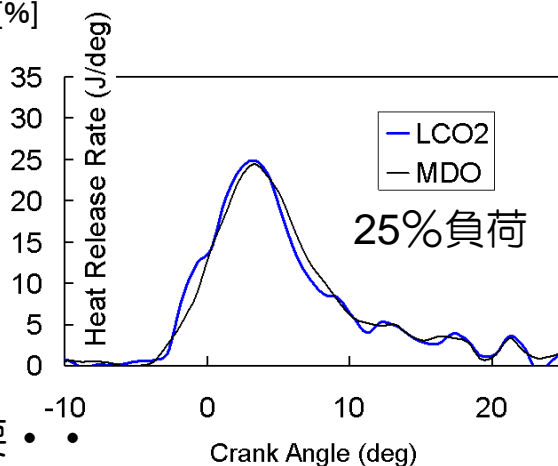
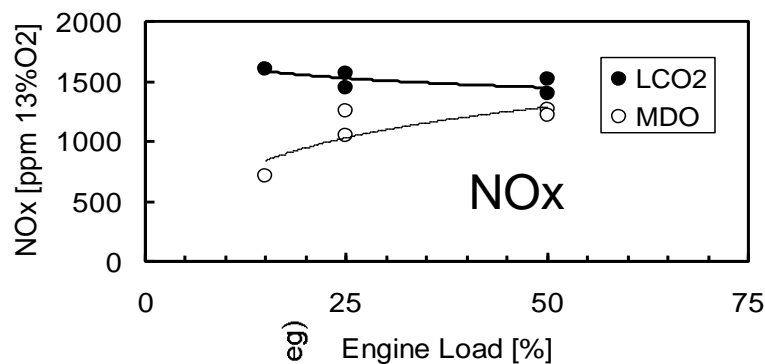
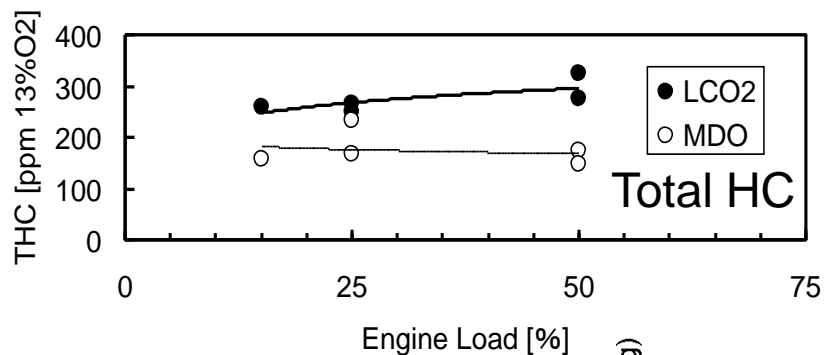
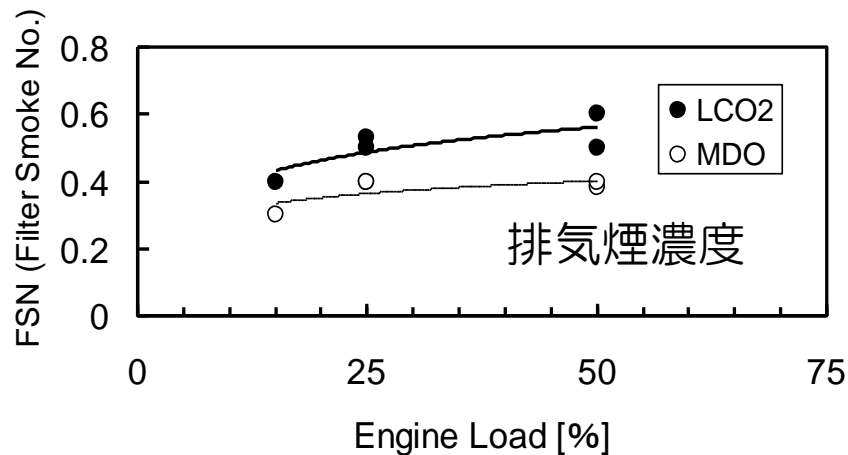
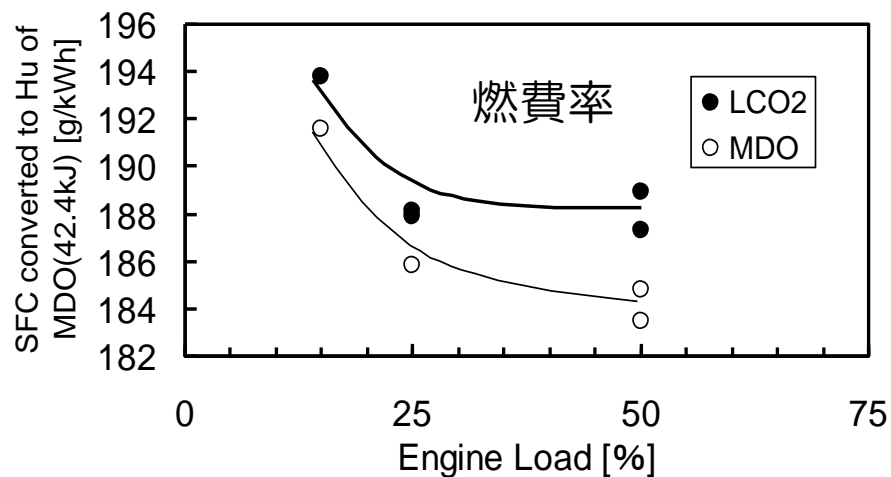


Point	MDO	LCO
P6	351	365 (+14)
P11	334	351 (+17)
P17	230	249 (+19)
P20	171	184 (+13)
C1	219	230 (+11)
C3	209	220 (+11)
C10	225	239 (+14)

LCOによる燃烧室壁温の上昇(°C) (at 50% load)



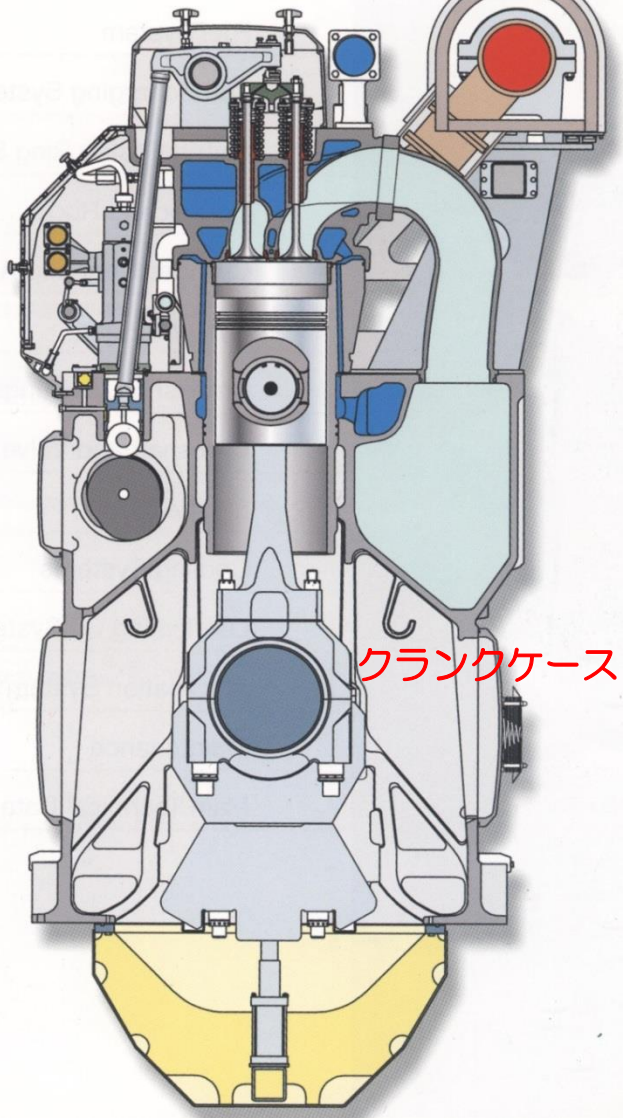
低速2スト実験機関によるLCO燃焼試験 (MDO: A重油との比較)



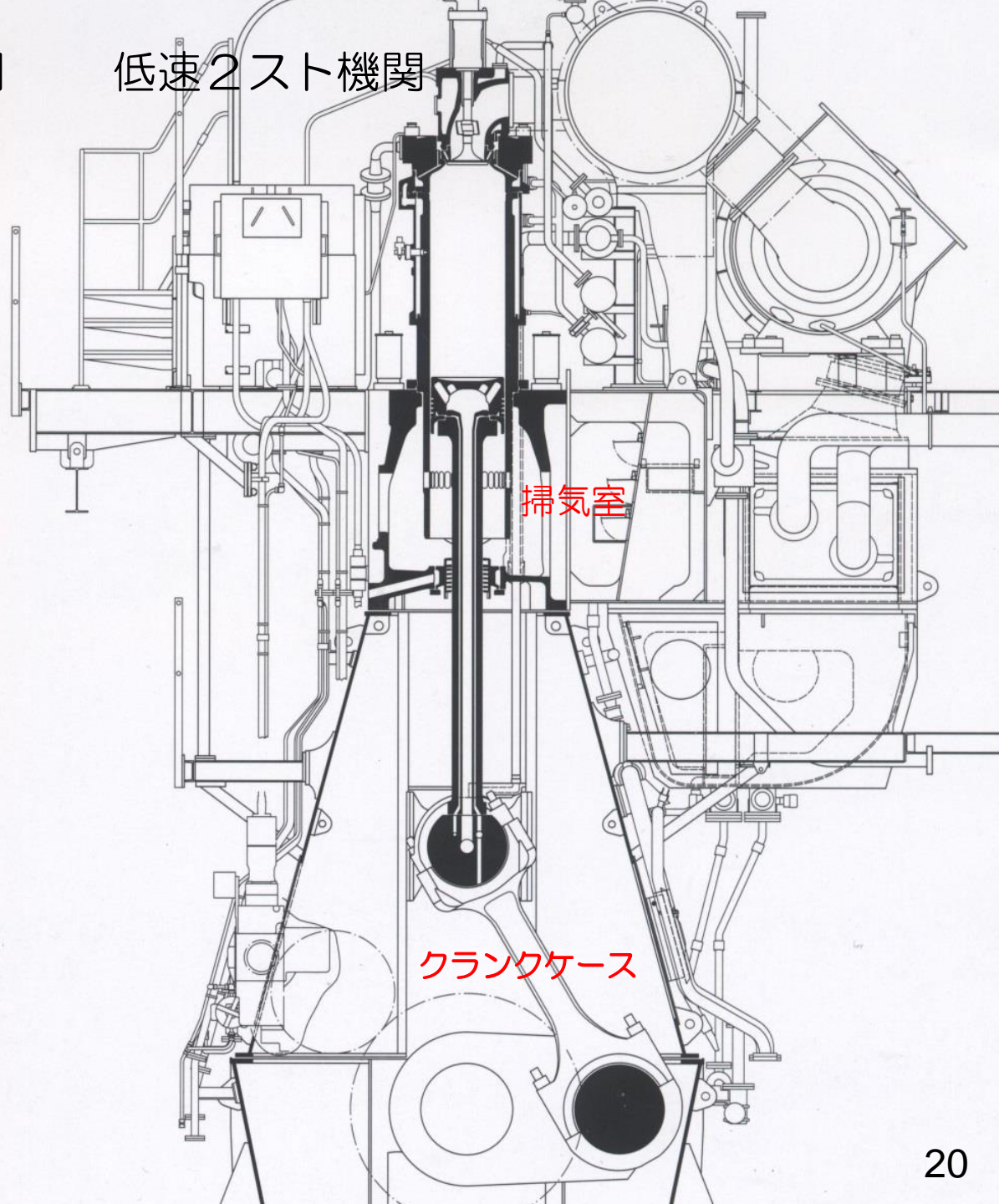
LCO

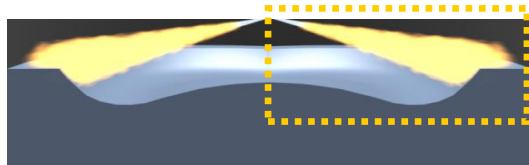
- 低速機関では難着火性の影響は小。
- さらに長時間の運転実験が必要

予備知識：中速4スト機関



低速2スト機関

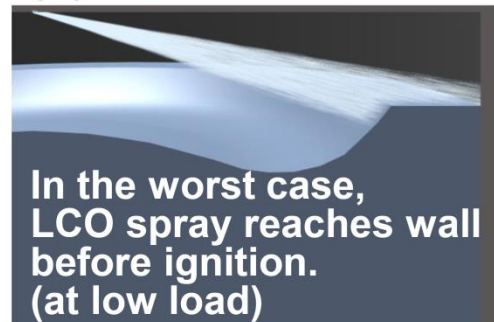




(a) Std: MDO (A重油)



(b) LCO



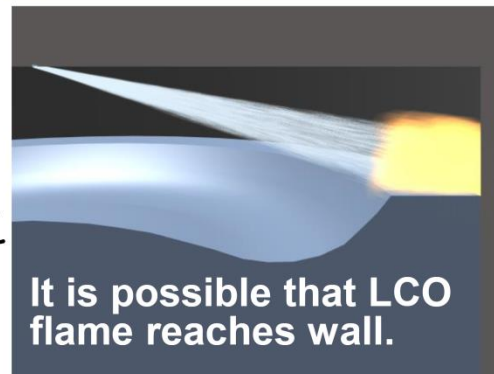
(c) LCO + Pilot injection



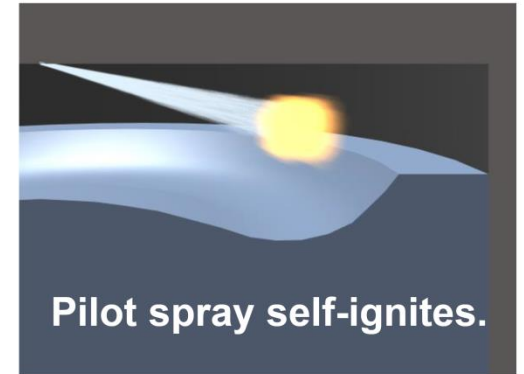
中速4スト機関で考えられる問題点

LCOの難着火性と後燃え
回転数の高い中速機関では
両方の悪影響が・・・

4ストの潤滑油膜は2ストより強い・・・はずではあるが・・・



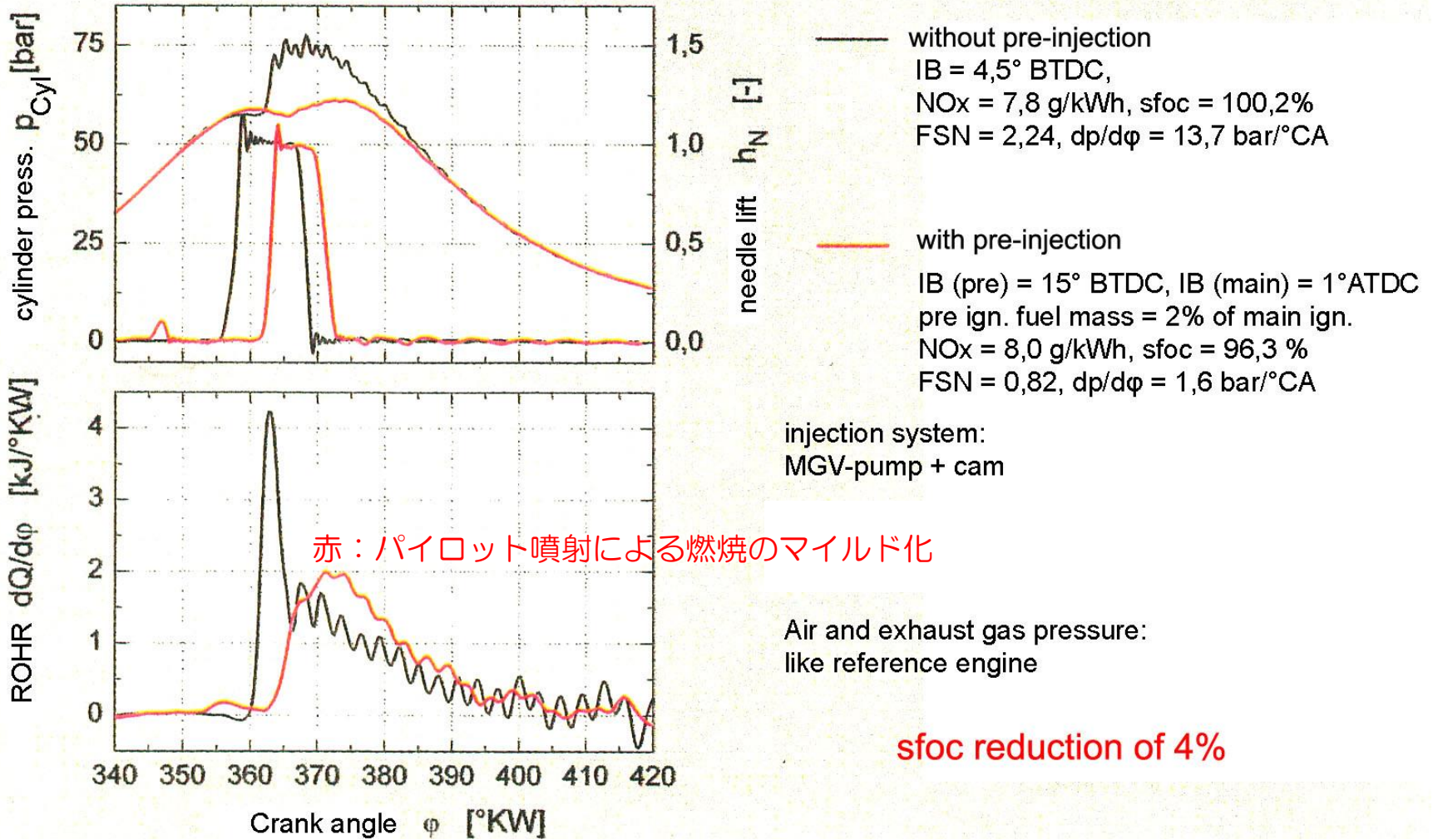
火炎がシリンダ油膜に接近



難着火性燃料対策としてのパイロット噴射、PM対策としての燃料噴射圧力増大は、コモンレールなど新燃料噴射システムに期待・・・

An example of pilot injection for HFO at low load running (red)

パイロット噴射(図中でpre-injection)適用研究の1例(ハンブルク工科大学)



3. メタノール・LPGなどの代替燃料について・・・

燃焼性を確かめた低硫黄燃料



Methanol (Zero sulfur) (Zero aroma)
Gas Oil
LCO (Low sulfur) (High aroma)
CLO

下図：メタノール (CH₃OH) の噴霧燃焼

メタノール・LPG・天然ガスとも、着火性は低いが燃焼は良好（LCOと違って着火性は燃焼性を代表しない）。パイロット燃料による着火後は不輝炎燃焼して黒煙の発生もなく、軽油以上に速やかな燃焼となる。（含酸素の分だけ低発熱量であり、大きな噴口から軽油より多量に噴射している。）

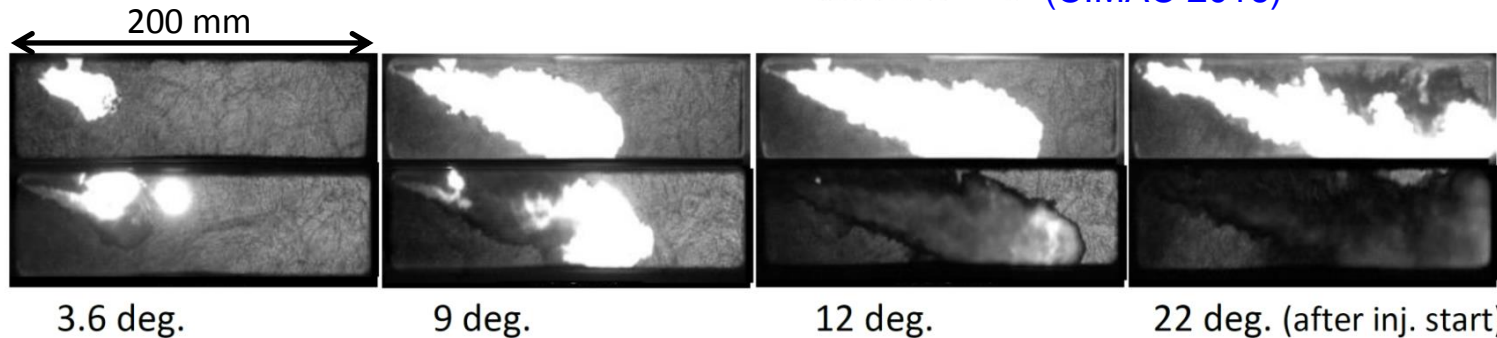
メタノールエンジン（三井造船）



Figure 7 – Picture of the 7S50ME-B9.3-LGI engine on test bed at MES. (CIMAC 2016)

Gas Oil
Inj. hole dia. 0.5 [mm]
Inj. press. 90 [MPa]

Methanol
Inj. hole dia. 0.8 [mm]
Inj. press. 57 [MPa]



ご参考・・・

(いつも天然ガスやメタノールの燃焼動画を見て頂いているので、) 本日は**LPG**の燃焼動画

GO (No.19)

Inj. Hole Dia. 0.5 [mm]

Inj. Press. 110 [MPa]

Total Q 19.9 [kJ]

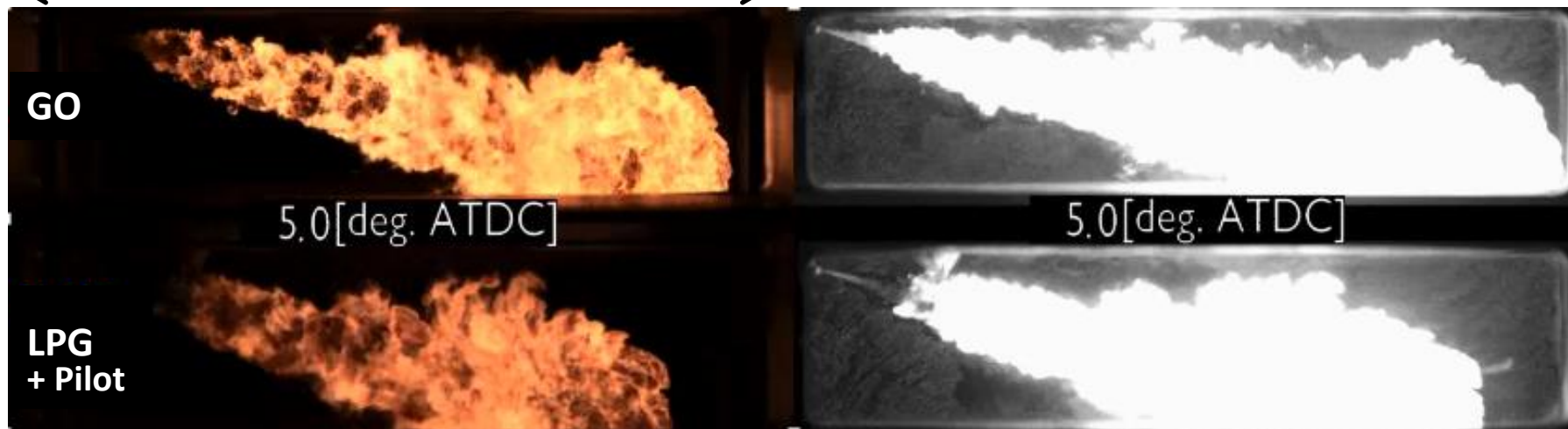
LPG + Pilot (No.56)

Inj. Hole Dia. 0.6 [mm]

Inj. Press. 100 [MPa]

Total Q 19.9 [kJ]

200 mm



直接撮影

シャドウグラフ撮影

- プロパンは（天然ガスと違って）液体で噴射できる・・・

この実験では、燃料噴射ポンプ前で 3 MPaの与圧を掛けて常温で液相をキープ。通常のディーゼル噴射システムを使って噴射している。噴射後の気化が速く、軽油噴霧と比べても遜色ない良好な燃焼。

将来燃料検討には以下の3要素が必要・・・

- 燃焼面からの実用性（高崎発表論文）
- コスト面からの実用性（これから要検討）
- 市場への流通性（石油業界からの情報）

参考：低硫黄燃料・ガス燃料の運航コスト面からの実用性検討（CIMAC 2016 No.132）

Payback年数・・・諸燃料の値段設定でどう言う答も・・・

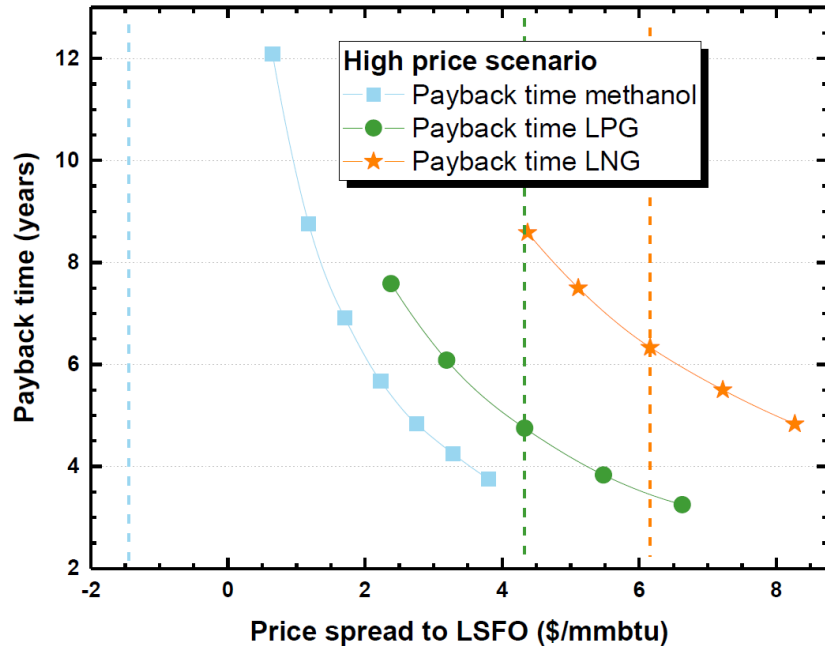


Figure 12: Payback time as a function of price difference between LSFO (at 19.55 \$/mmbtu) and the alternative fuel. Dashed lines represent the values used in the high price scenario for each fuel.

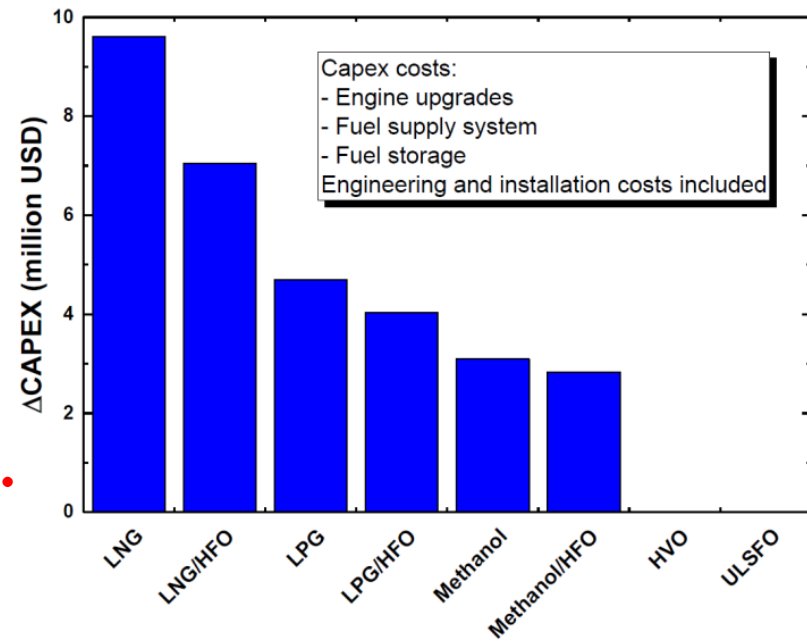
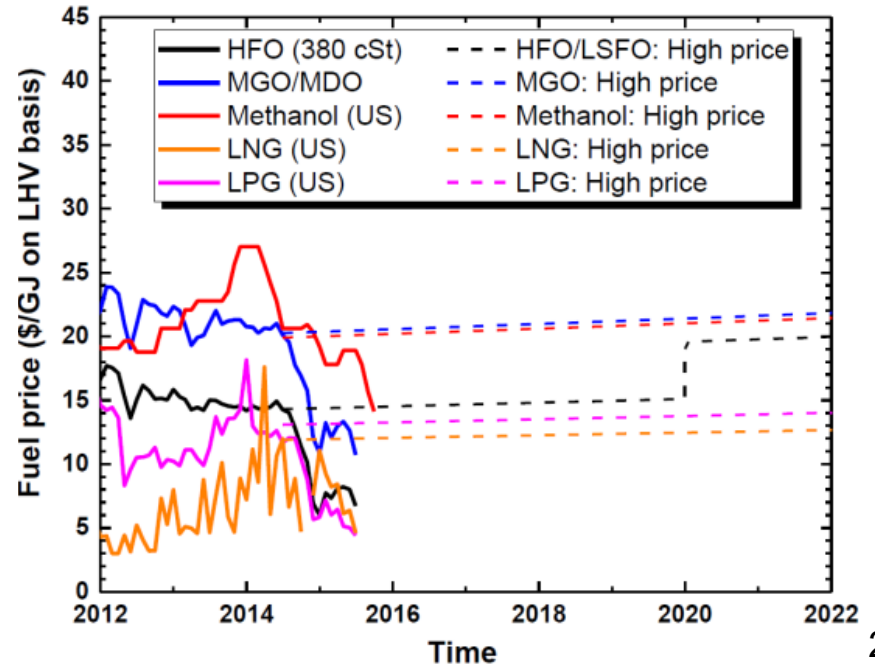


Figure 4: Additional investment costs for the alternative fuel variants

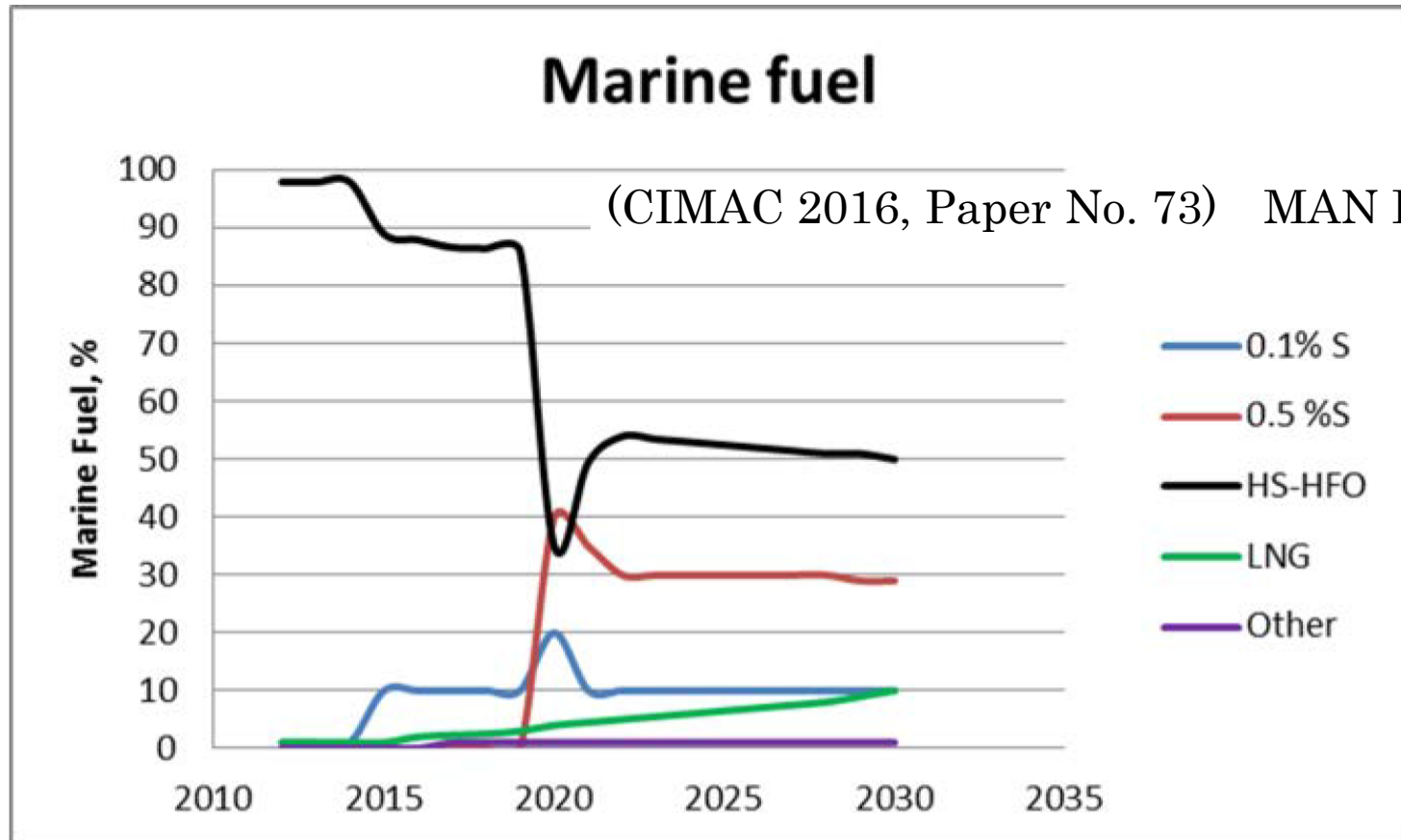


4. 船用主機天然ガスエンジンの開発状況について・・・

グローバルキャップ以降の船用燃料の変化予測については様々あります。

(下図は「スクラバに期待」型の予想か？ 2020年に世界の船舶の1/3にスクラバが装備されると言う予想？ 実際のスクラバ搭載船の数は??)

+ 2030年にLNGが10% の予想・・・



天然ガス燃料船の導入実績

2020年以降、バルト海内航ではLNG燃料船が急速に普及するであろう・・・

- 最近は、オランダ等の北欧以外の欧州の国や韓国・中国においても導入開始。
 現在約50隻が就航し、船種も広がってきているところ（2012）・・・今は70隻・・・



フェリー



オフショア支援船



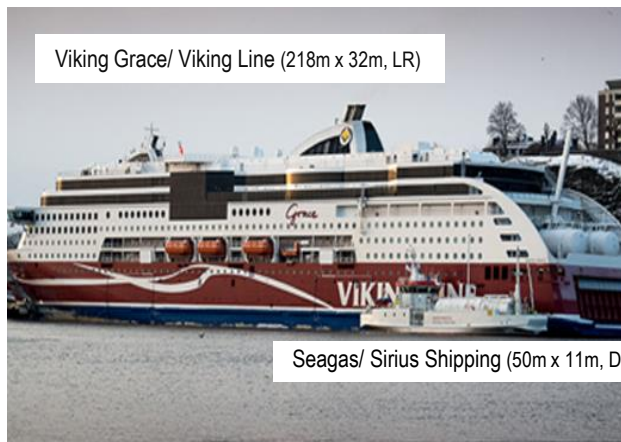
ケミカルタンカー



重油バンカー船 @オランダ・ロッテルダム港



貨物船（水産飼料運搬）



クルーズフェリー及び世界唯一のLNGバンカー船
 @スウェーデン・ストックホルム港



観光船 @韓国・仁川港



沿岸警備船



高速フェリー @豪州にて海上公試
 （アルゼンチン⇄ウルグアイ航路に投入予定）

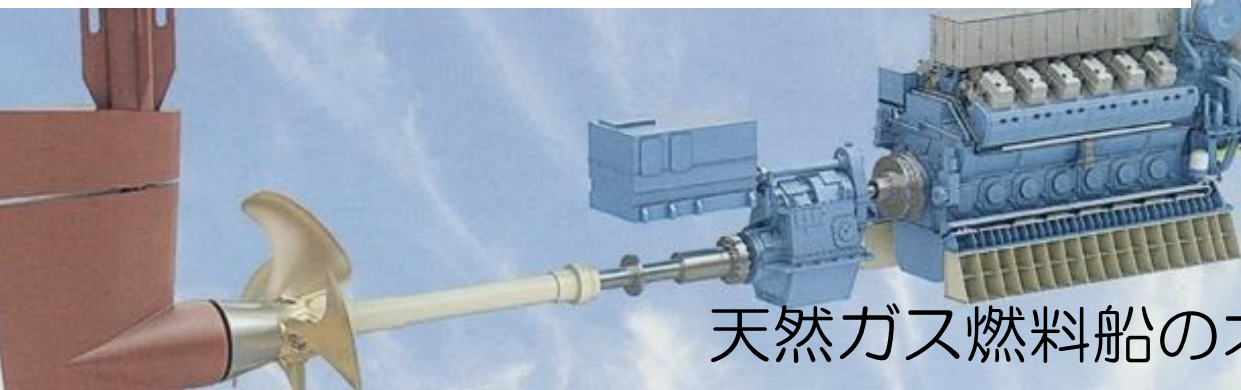
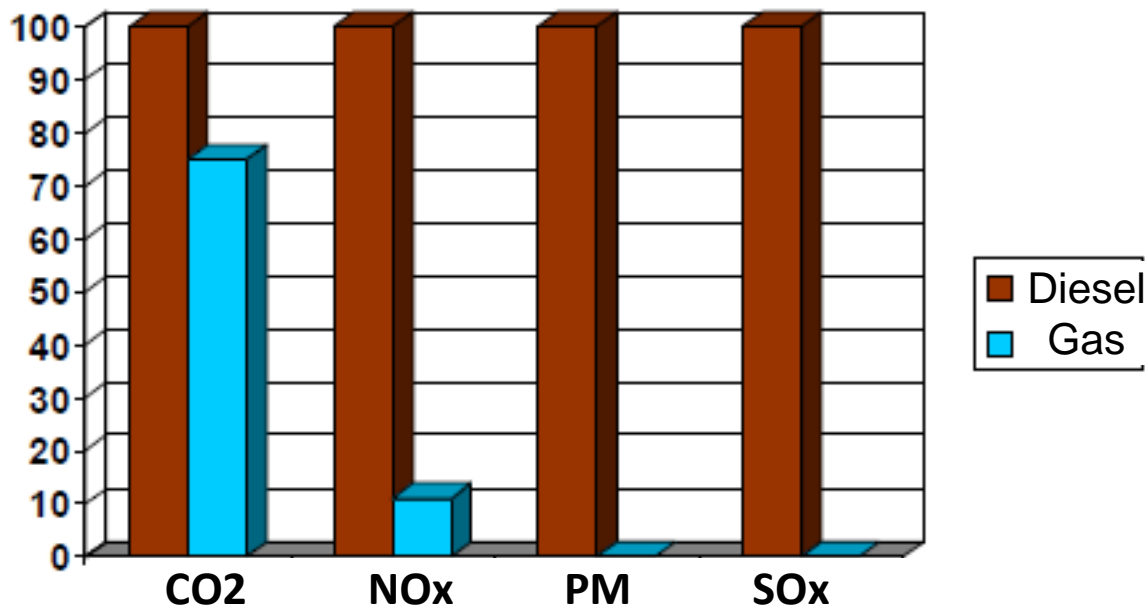
ガスエンジン紹介でいつも使う例・・・

- ・ 中速4スト・リーンバーンエンジン

A重油・・・ $C_{16}H_{34}$ ・・・ $16CO_2 + 17H_2O + Q$

天然ガス・・・ $12CH_4$ ・・・ $12CO_2 + 24H_2O + Q$

(EEDI・CO₂低減-20～25%)



LNG燃料船普及のためのサポート(2012)



国土交通省

天然ガス燃料船の普及促進に向けた総合対策検討委員会

事務局: 日本船舶技術研究協会

【座長】 九州大学 高崎 講二 教授

【委員】

東京海洋大学 今津 名誉教授 東京大学 藤野 名誉教授

海上技術安全研究所 田村 研究統括主幹

日本海事協会

日本船主協会

日本中小型造船工業会

日本ガス協会

日本造船工業会

日本船用工業会

技術協力

ClassNK
NIPPON KAJI KYOKAI

- 船級としての豊富な知見
(船級規則検討、検査等)

燃料移送等検討委員会

事務局:
日本船舶技術研究協会

座長:
海上技術安全研究所
田村 兼吉 研究統括主幹

航行安全検討委員会

事務局:
日本海難防止協会

座長:
東京海洋大学
今津 隼馬 名誉教授

海上防災検討委員会

事務局:
海上災害防止センター

座長:
東京大学
藤野 正隆 名誉教授

各分野の有識者、関連業界団体、経済産業省、海上保安庁等の関係省庁の協力を得て、調査方針の指示、調査結果の審議、取りまとめ等

調査・検討コンソーシアムによる調査・検討事業の実施

(調査実施主体: 株式会社日本海洋科学、三菱重工株式会社)

連携



日本船舶技術
研究協会

- IMO対応、ISO対応に関連するプロジェクトを取りまとめ

① 高圧ガスサプライシステムの安全要件

- 高圧ガスサプライシステムの設計における安全要件
- 高圧配管（二重管）の設計における安全要件

② 燃料供給を受けない天然ガス燃料船の航行・入出港時の安全要件

- 留意すべき事項の洗い出し
- 主機の負荷特性の調査・検討

③ LNG燃料移送ガイドライン・オペレーションマニュアル

- LNG燃料移送作業手順・安全対策
- LNG燃料移送に用いる機器等
- ガス危険区域の設定
- 夜間におけるLNG燃料移送に係る留意事項
- 荷役中・旅客乗降中の留意事項
- 異種LNG混合時の燃料タンクの圧力管理に係る留意事項

■ Ship to Ship (StS) 方式

- 安全管理体制（海上防災組織との連携等）
- 運用条件（限界気象・海象条件等）
- 離接舷操船・係留に係る留意事項

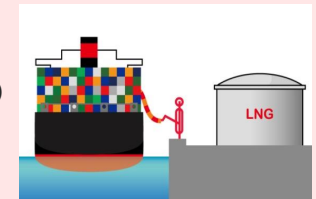


④ StS方式LNG燃料移送に係る航行安全対策

⑤ StS方式LNG燃料移送に係る海上防災対策

■ Shore to Ship方式

- 安全管理体制（船陸間責任体制）
- 緊急離脱装置の要件



■ Truck to Ship方式

- 安全管理体制（船陸間責任体制）
- 緊急離脱装置の要件



⑥ 天然ガス燃料船の入渠に係る要件

- ガスフリー等の入渠時に必要となる措置の整理
- 真空防熱型Type Cタンクの取り扱い

LNG移送に用いる機器等 (③LNG燃料移送ガイドライン・オペレーションマニュアル)



LNG移送アーム

TTS



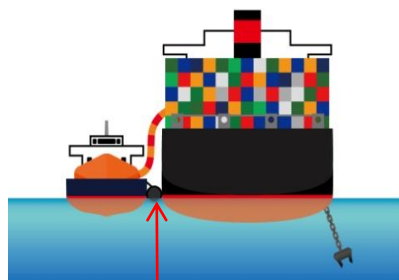
LNG移送ホース

Gutting BV

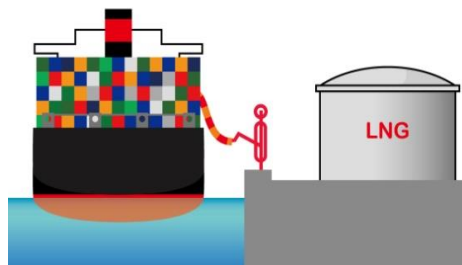


ホースサドル
ドリフトレイ

ウォーター
カーテン



フェンダー (空気式防舷材)



横浜ゴム(株)

緊急遮断システム (ESDS), 緊急離脱装置等 (ERS, DBC)

ERSを構成する装置である
緊急切離しカップリング(ERC)

漏洩対策機能をもつカップリング
(DBC) ※小径のホースに利用



Klaw Product Ltd.



Mann Tek AB

本委員会でハード面の開発も支援した一例をご紹介します・・

高圧ガスサプライシステム*の安全要件

(*FGSS (Fuel Gas Supply System)) ・・ LNGを液体のまま300気圧までポンピング後、
高圧下で気化させ、300気圧のガス(気体)にしてエンジンに供給する装置。各船に装備。
LNG燃料船にこのシステムがなぜ必要か?後でご説明します・・)

- GI (Gas Injection) 方式の(低速2スト)主機には、高圧(300気圧)でのガス供給が必要。
⇒ 空間の限られた船内において、極低温のLNGと高圧の天然ガスを扱うための安全対策が必要

[目的] 高圧ガスサプライシステムの安全要件(設計上の留意点)を策定



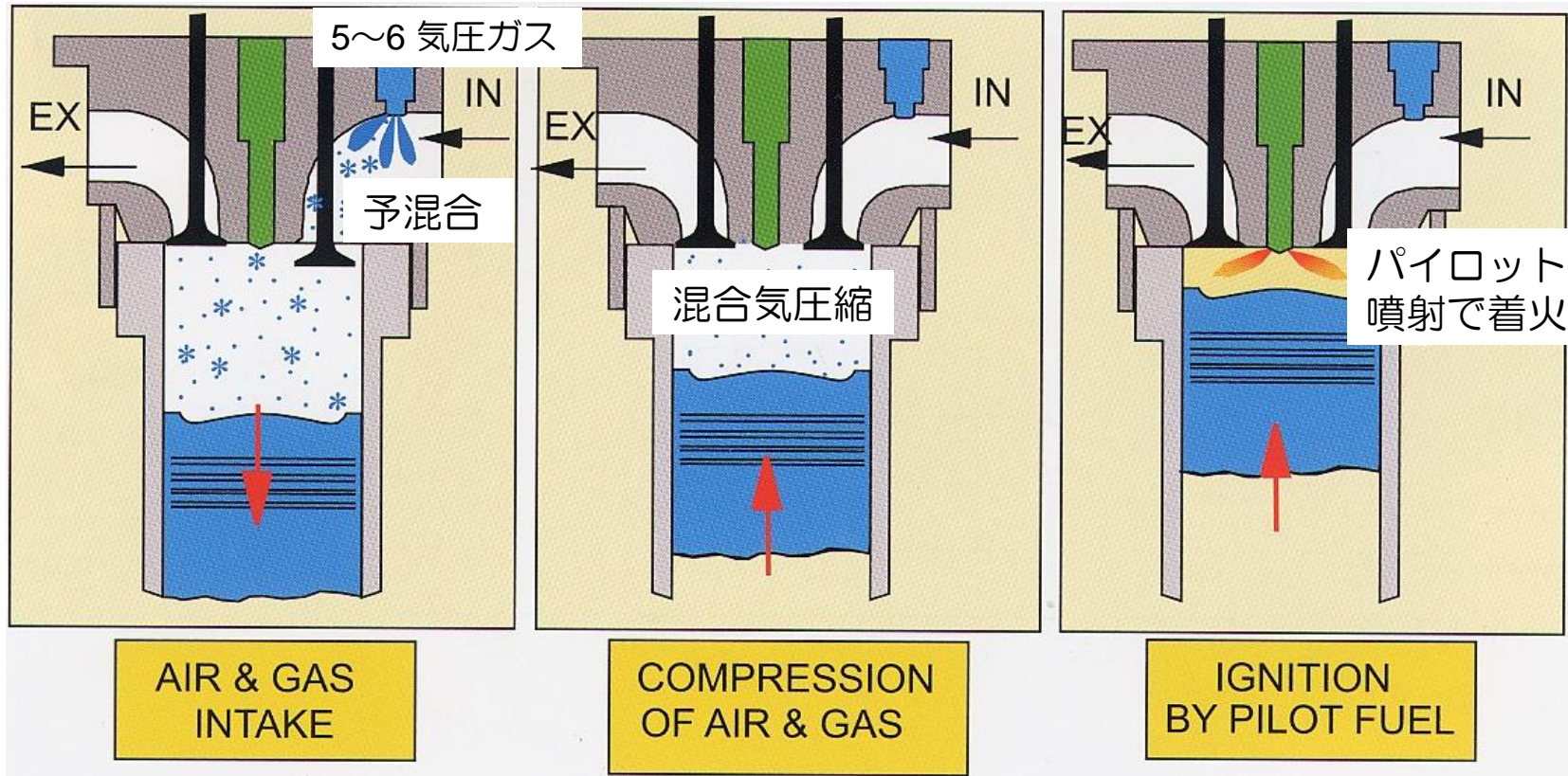
実証実験に用いた模擬プラント

- 日本内航初のLNG燃料船としてタグ（NYKグループによる・・・）が完成（2015）。



- Development of LNG-fuelled tug-boat by NYK Group・・・2013～
（MLIT and ClassNK is supporting development of not only vessel itself but also medium-speed DF engine）
- 負荷変動の激しいタグボートをLNG燃料化（NYKグループ）（政府と日本海事協会の支援）

現在、中速4スト・ガスエンジンは全てリーンバーン方式



- ガスエンジンの（ガソリンエンジンと同じ）予混合燃焼タイプ・・・
- それはリーンバーン方式（NO_xはディーゼルより1桁少ない）
- **ノッキング**が起こり得る（例えば荒天でプロペラ側からの負荷変動で・・・）
- ノッキングは天然ガスのメタン価（MN）に影響される。



(普段はガスエンジンとして使用するが・・・)

Dual Fuel (DF) 機関のメリット

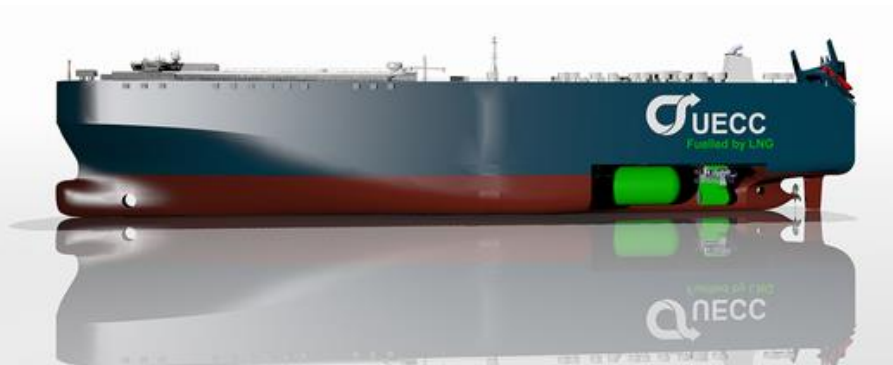
(Platform supply vessel @ 北海)

- ・中速4スト・ガス (DF) 機関+電気推進
- ・電気推進でも、荒天では、プロペラ側からの負荷変動でノッキング誘発の可能性。ノッキングを感知したら、DF機関では自動的に重油モードへ切替えられる。(再度ガスへ戻すときはマニュアル)



低速2スト主機に天然ガスエンジン・・・の時代に・・・

- 今後も欧州等において天然ガス燃料船の導入が拡大する見込み
- 低速エンジンを用いた天然ガス燃料船（コンテナ船、PCC・・・）が就航予定。



• United European Car Carriers (UECC) jointly owned by NYK and Wallenius Lines has ordered KHI two PCCs propelled by MAN low-speed ME-GI gas (DF) engine. (for voyage in European ECA)

• NYKとWallenius共同出資のUECC社が、MANの低速2ストGI（DF）エンジンを搭載した自動車運搬船を川崎重工に発注（欧州内ECAに投入予定）。



• TOTE Line has ordered 3,100TEU container ships propelled by MAN low-speed ME-GI gas (DF) engine. (Route: Florida⇔ Puerto Rico)

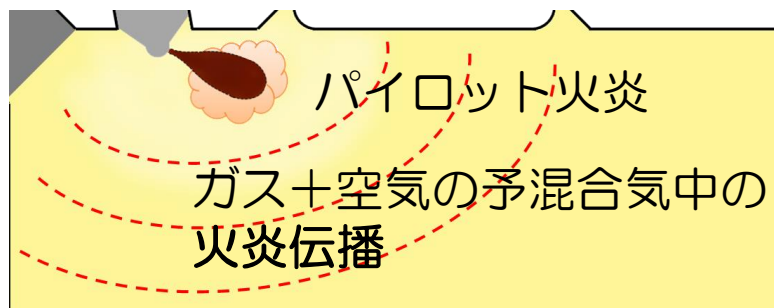
• 米国内航船社TOTE社が、MANの低速2ストGI（DF）エンジンを搭載した3,100TEUのコンテナ船を発注（フロリダ⇔プエトリコ航路に投入予定）

低速2ストガスエンジンのオーダー状況（2016）・・・ME-GI・LGI：165台
X-DF：43台

ガスエンジンの燃焼上の分類

	リーンバーン (低圧ガス供給・予混合)	GI (Gas Injection) (高圧ガス噴射)
中速 4スト機関	・ ・ 今のところ全て*	・ ・ 今はないが可能 (陸用であり)
低速 2スト機関	・ ・ あり	・ ・ あり

オートサイクル型 X-DF



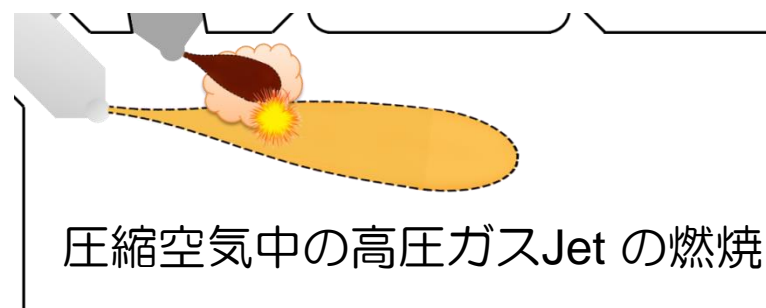
低圧ガス供給 (16気圧) で予混合気を作り、ピストンで圧縮・パイロットA重油で着火
ガソリンエンジンと基本的に同じ燃焼なので、オートサイクル型とも呼ばれる。

・ Lean burnとは、理論より空気が多めの予混合気の燃焼の意味。

長所 ・ 均一燃焼で燃焼温度低く 低NOx

短所 ・ ノッキングや過早着火で出力制限
(高メタン価の天然ガスが望ましい。)

ディーゼルサイクル型 ME-GI



空気のみをピストンで圧縮後、高圧 (300気圧) ガス噴射 ・ ・
ディーゼルエンジンに近い燃焼なので、ディーゼルサイクル型とも呼ばれる。

長所 ・ ノッキングや過早着火は起こらず、ガスのメタン価も無関係。

高出力・高効率

・ メタンスリップ極小

短所 ・ リーンバーンより 高NOx

・ 300気圧のシステムが必要

X-DF :
低速2ストの予混合リーンバーン型
燃焼としては中速4ストガスエンジンと同。

ディーゼルユナイテッド社の
テストエンジン (DF)
6 cylinders
Bore x Stroke: 720 x 3086 mm
MCR: 19350 kW@89 rpm
BMEP: 17.3 bar

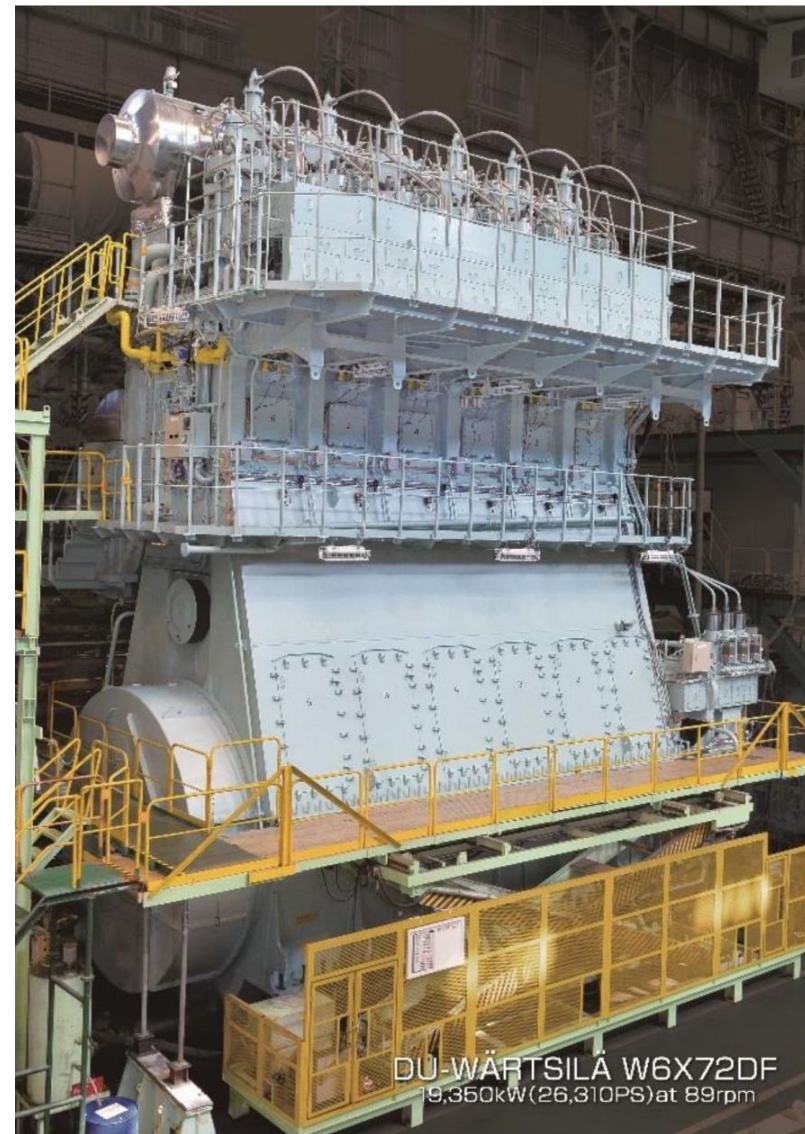


Figure1 Test engine (W6X72DF)

X-DFにおけるガス混合について・・・

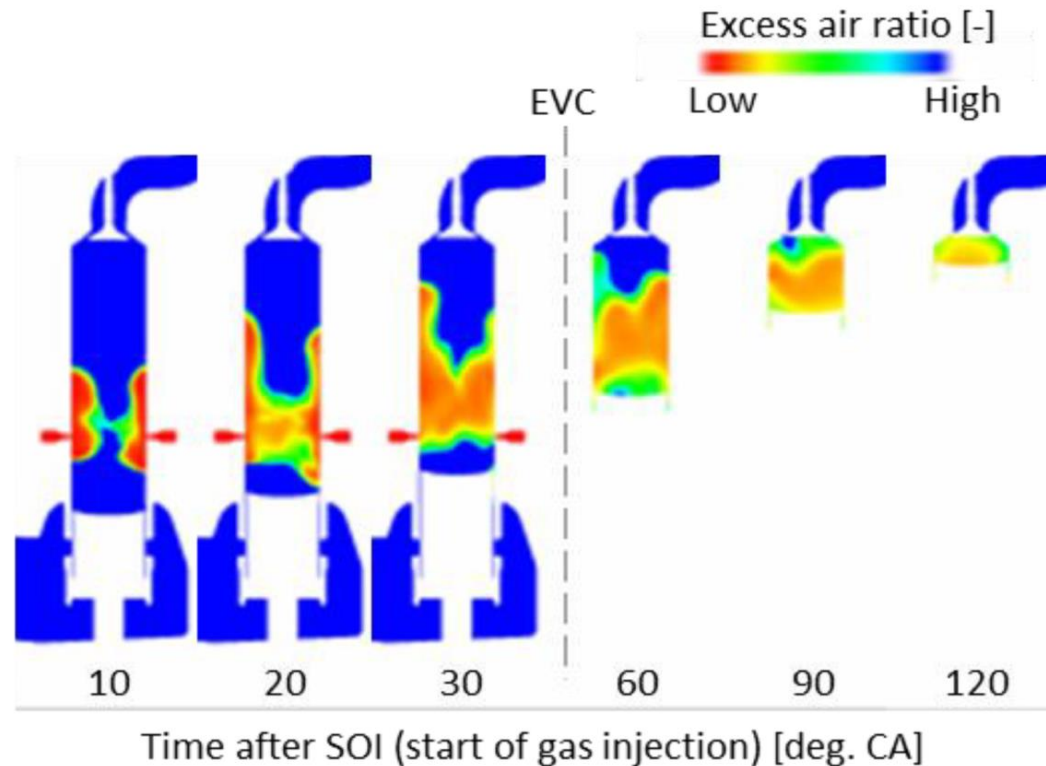
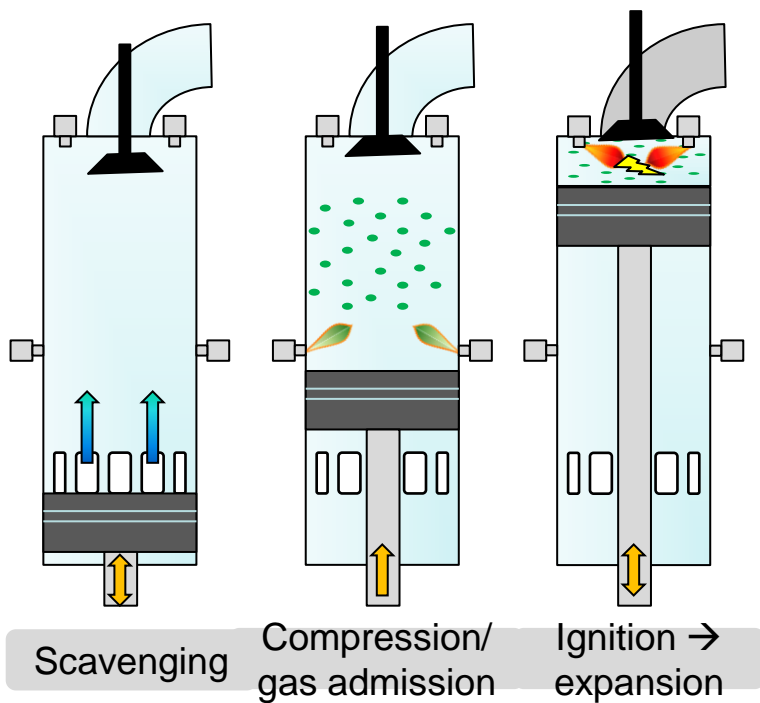


Figure 11 λ distribution of fuel gas injected from the liner wall

2-stroke gas concepts – Low pressure DF (16 bar at this moment)

左の図は概念図。実際は右図のように（ガス弁は左右2弁）燃料ガスは空気（この時点で排気弁はまだ閉じてなくて、筒内は掃気圧力程度）中に10気圧以上で入るため、対向するライナ壁に到達した後は自らの運動量で上昇・拡散し、シリンダ軸方向の十分な混合が得られる・・・と。

CIMAC 2016 • Paper No.207

“Study on Mixture Formation Process in Two Stroke Low Speed Premixed Gas Fueled Engine”

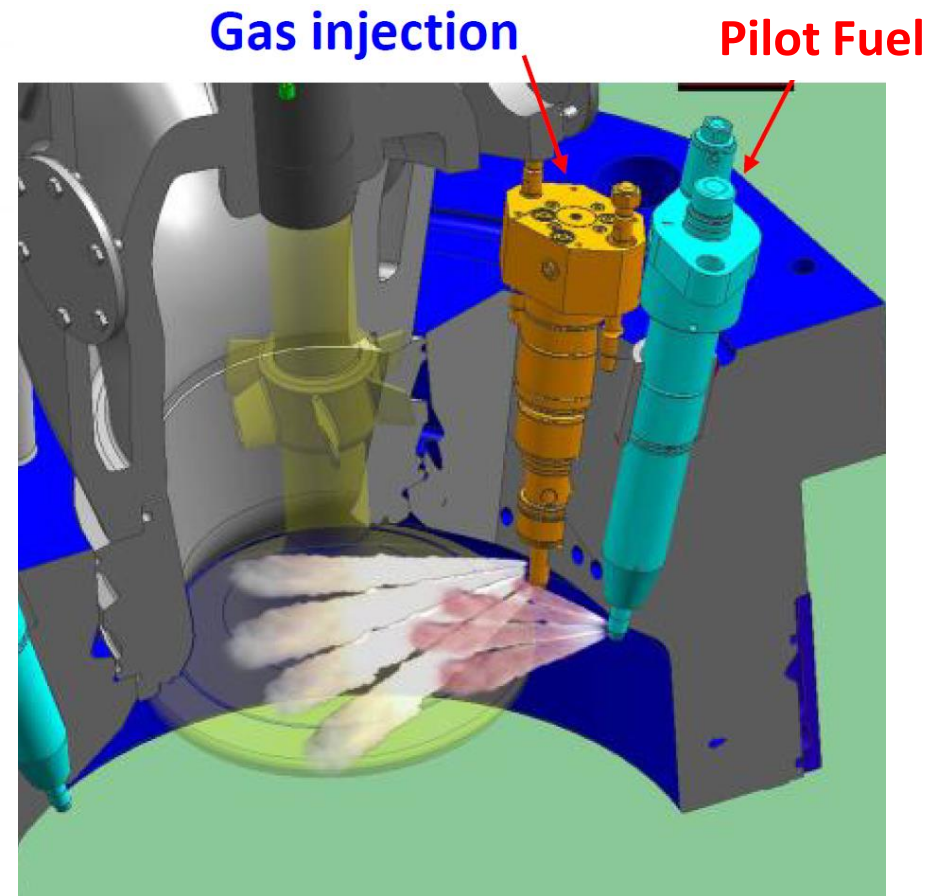
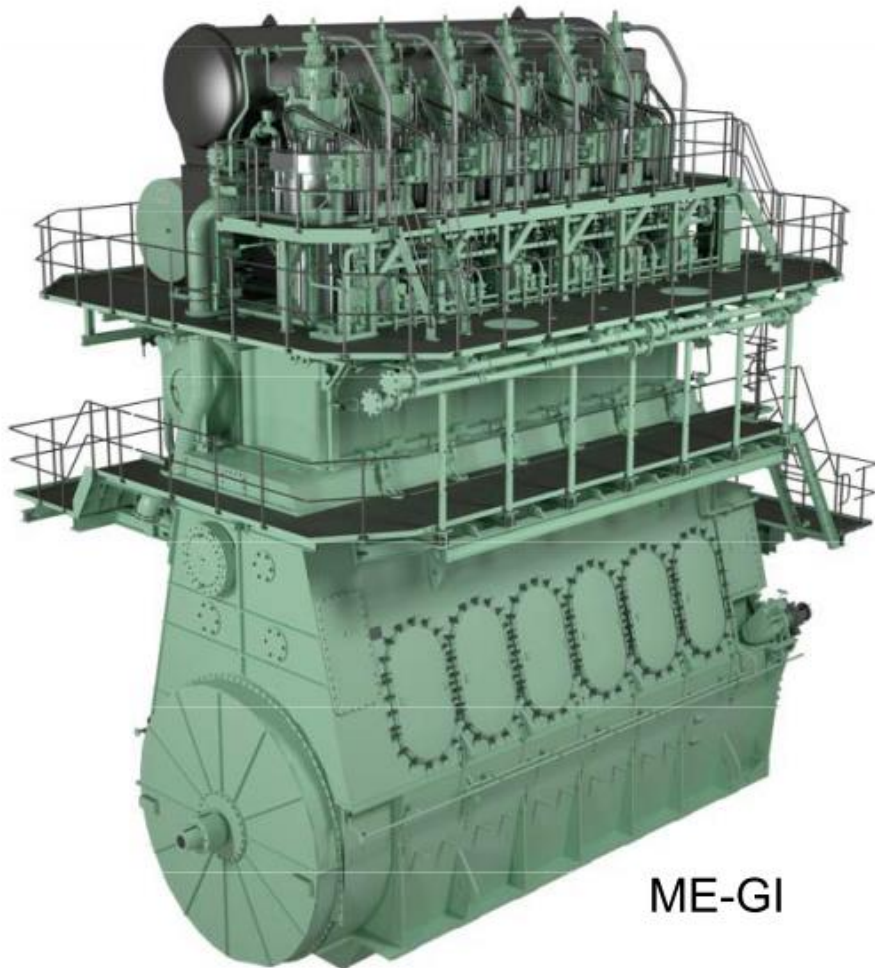
Takahiro Kuge (IHI Corporation, Japan) より抜粋

GI燃焼について（基礎研究：ガスエンジンの燃焼可視化研究のご紹介）

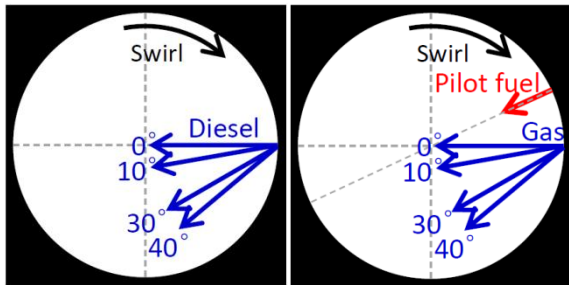
- ノッキングや Pre-ignition とは無縁（メタン価も無関係）

GI (Gas Injection) タイプ • • ディーゼルサイクル • ガスエンジン

ピストンで圧縮後の筒内空気（100気圧以上）にガス噴射するため、300気圧のガス圧が必要。基本的にディーゼルと同じ燃焼。重油混焼も自在に • •

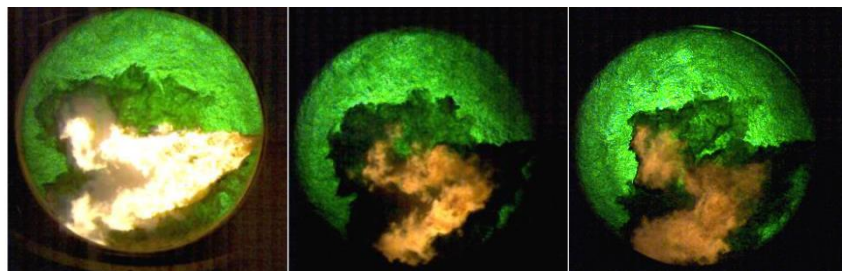


O Crank angle deg. ATDC

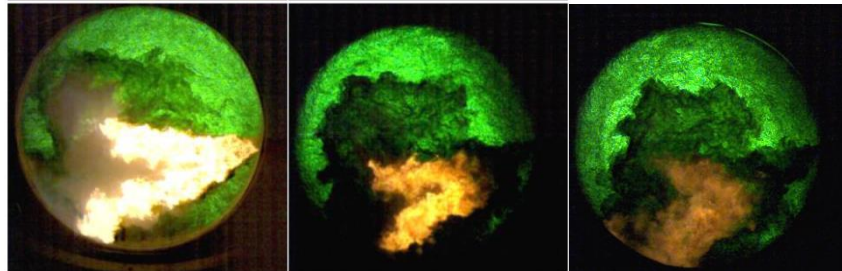


天然ガスの
GI 燃焼基礎
研究 (九大)

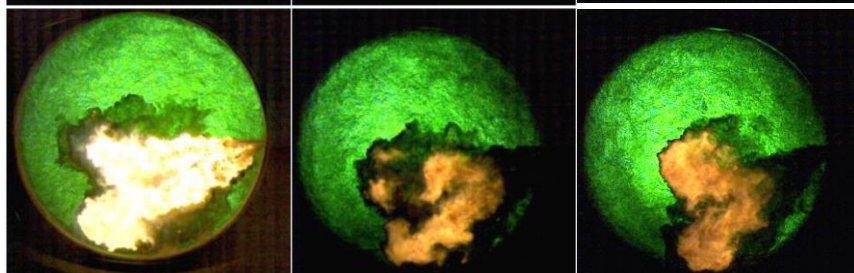
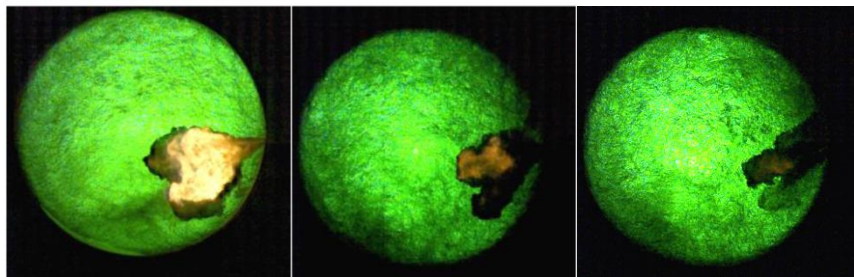
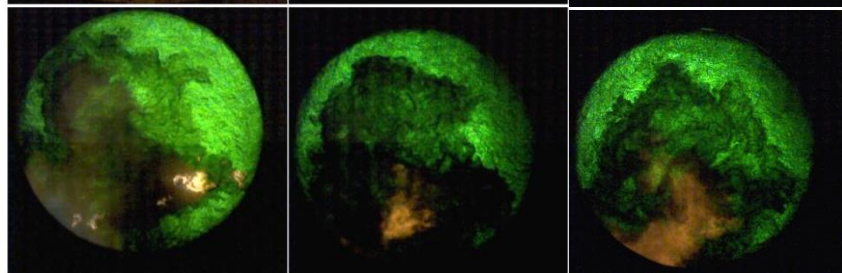
12



16



20



Diesel

Std. GI

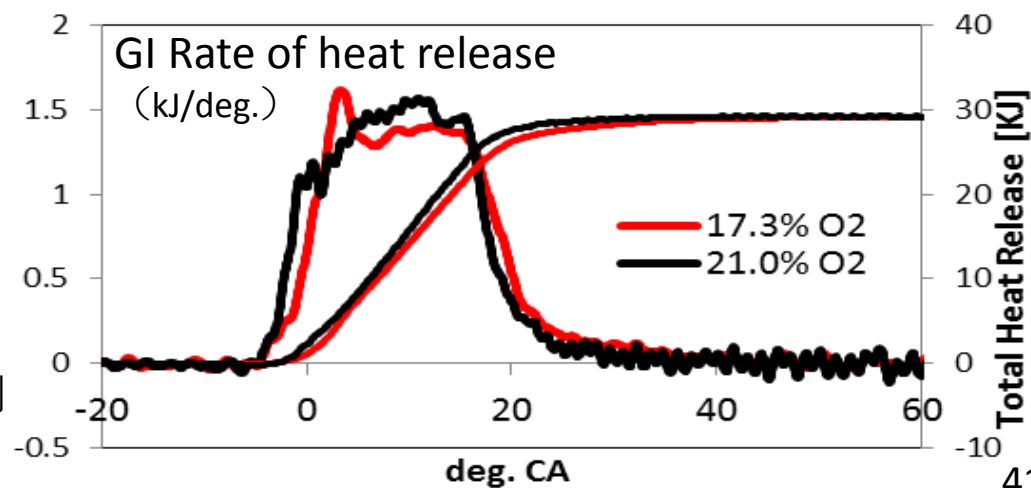
EGR GI 17%O2

Diesel

Std. GI

EGR GI 17%O2

Emissions	Diesel	Std. GI	EGR GI
CO[ppm]	17	30	45
NOx[ppm]	499	300	44



天然ガスのGI燃焼にSCRあるいはEGRを
組み合わせて、US・ECAのNOx Tier III規制
(Tier II から-75%) も達成できる。

1. 低硫黄燃料に対する一般的対応について・・・
2. 2020年以降に予想される高芳香族燃料について・・・
3. メタノール・LPGなど代替燃料について・・・
4. 舶用主機天然ガスエンジンの開発状況について・・・

ご紹介させて頂きました。



ご静聴ありがとうございました。ClassNK 42