

「LNG燃料船のキーテクノロジー

・天然ガスエンジンの分類と開発のポイント」

NK テクニカルアドバイザー

九州大学 高崎講二

(MLIT・NK・JSTRA, 2012年度 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 委員長)

タイトルにご注意 (LNGエンジンとは言わない・・・)

天然ガスはタンクの中では液 (LNG) ですが、エンジンに供給
されるときは気体 (気化器装備)。 (例外: LPG (プロパン))

本日の全講演を分かりやすく聴いて頂くための基礎知識として・・・

- ・天然ガスエンジンの種類 ・ 燃焼方式の分類
- ・ リーンバーンと **GI** ・ 両者の特長と問題点、開発のポイント
を解説します。

25分で皆さんをガスエンジン燃焼のプロに・・・

本日の講演で登場するガスエンジン

- **NYK** : LNG燃料タグボート・・・中速4ストDF 機関 (**リーンバーン**) 搭載
- **三菱重工** : 多くのモデルシップ紹介・・・各種類ガス機関搭載
- **三井造船** : 低速2スト (DF) 「ME-GI」 機関 **GI (Gas Injection)**
- **ディーゼルユナイテッド** :
低速2スト (DF) 「低圧ガス噴射式」 機関 (**リーンバーン**)
- **神戸船舶・ダイハツディーゼル・新潟原動機** :
「デュアルフューエル機関」・・・中速4ストDF機関 (**リーンバーン**)

実はもう1種類あります。

中・高速4スト ガス専焼機関 (**リーンバーン**)

***リーンバーン** : **Lean-burn**・・・薄めの (空気多めの) ガス予混合気の燃焼の意味。

- 本年1～9月に欧州で情報収集・エンジン開発会社・研究所を訪問のほか、
 - 天然ガス燃料フェリー Viking Grace（6万総トン・中速 DFエンジン+電気推進）
 - Bergen Fjord（2.5万総トン・中速 ガス専焼エンジン+CPP直結）に乗船。

• 天然ガス燃料船・ガスエンジンに関する最近の文献・資料

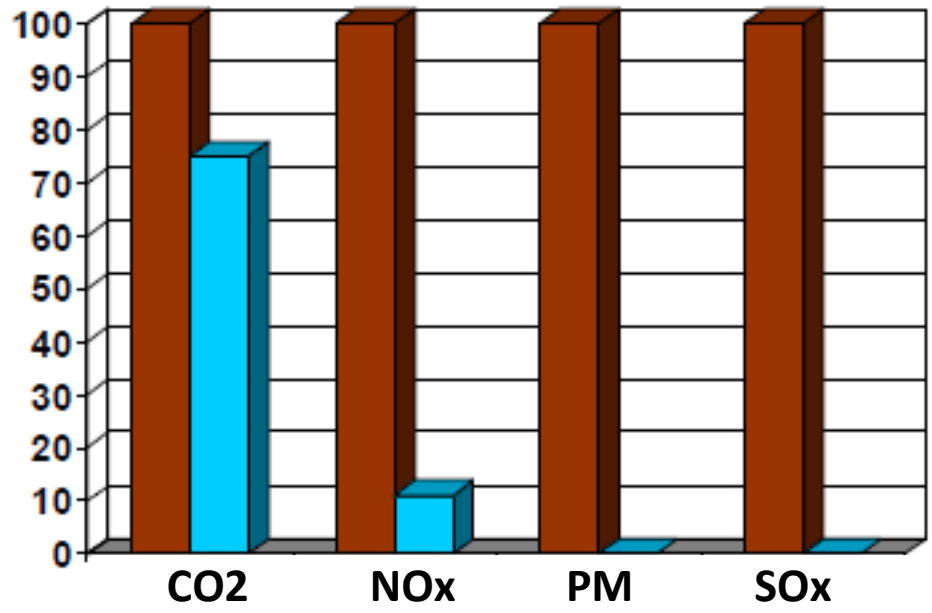
- 日本マリンエンジニアリング学会誌 2014年1月号（49-1）
ガス焚きエンジンとその周辺動向特集（以下は記事の主な内容）
 - Wartsilaタイプの低速2スト・リーンバーンエンジンの解説
(ディーゼルユナイテッド)
 - 低速2スト「ME-GI」機関の解説（三井造船）
 - ME-GI機関を搭載したLNG船の紹介（三井造船）
 - 舶用中速4ストDF機関の紹介（新潟原動機）
 - ガス燃料船とガス燃料供給船の実現への課題（川崎重工）
 - 船舶・洋上LNG設備（GEMS）の開発（三菱重工）
- ClassNK ガス燃料船ガイドラインver.2（2013年12月）
- 天然ガス燃料船の建造需要予測（2012-2024）調査（船技協など・2013年3月）
 - <http://www.jstra.jp/html/PDF/%E2%91%A0.pdf>

• • CO2と排気有害成分の同時削減へ • •

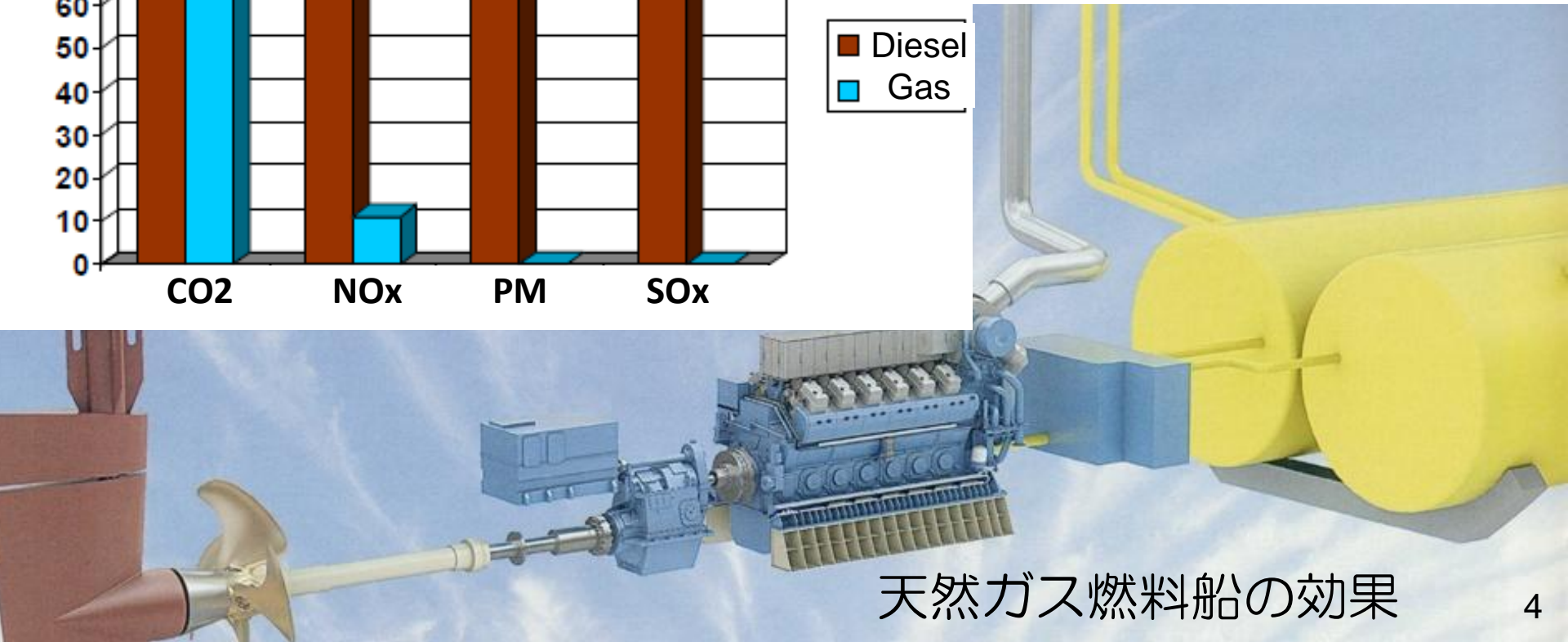
A重油 • • $C_{16}H_{34} \cdot \cdot 16CO_2 + 17H_2O + Q$

天然ガス • • $12CH_4 \cdot \cdot 12CO_2 + 24H_2O + Q$

(EEDI • CO2低減-20~25%)



- 課題
- LNGコスト
 - 供給インフラ
 - 安全要件 • クルー



天然ガス燃料船の効果

天然ガス燃料船の導入実績

- 主に北欧（ノルウェー）において、内航フェリー、オフショア支援船を中心に普及
- 最近では、オランダ等の北欧以外の欧州の国や韓国等においても導入開始。
現在、40隻以上が就航し、船種も広がってきているところ



Bergensfjord/ Fjord 1 (130m x 20m, DNV)

フェリー



Viking Energy/ Eidesvik (95m x 20m, DNV)

オフショア支援船



Bit Viking/ Tarbit Shipping (177m x 26m, GL)

ケミカルタンカー



Argonon/ Deen Shipping (110m x 16m, LR)

重油バンカー船 @オランダ・ロッテルダム港



Høydal/ Nordnorsk Shipping (70m x 16m, DNV)

貨物船（水産飼料運搬）



Viking Grace/ Viking Line (218m x 32m, LR)

Seagas/ Sirius Shipping (50m x 11m, DNV)

 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


EcoNuri/ Incheon Port Authority (36m x 8m, KR)

観光船 @韓国・仁川港



Barentshav/ Norwegian Coast Guard (93m x 17m, DNV)

沿岸警備船



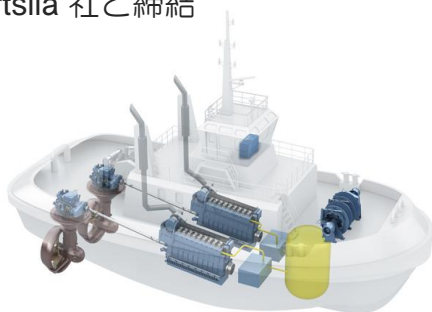
Francisco/ Buquebus (99m x 26m, DNV)

 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)

- 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
- 併せて、北米においてオフショア支援船や、世界初の低速エンジンを用いた天然ガス燃料船（コンテナ船）の計画が存在。また、タグのような船種についても、天然ガス燃料船の導入が計画



- ドイツのEMS社がワッデン海のフェリー“Ostfriesland”をDFエンジンに換装する契約をWärtsilä社と締結



- 負荷変動の激しいタグボートをLNG燃料化する計画も浮上



- 米国内航船社TOTE社がMANの低速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）



- 米国のHarvey Gulf社が6隻のオフショア支援船を発注
- LNG燃料供給設備の建造も計画（ルイジアナ州ポート・フォーチョン）



- 米国内航船社Horizon Line社が蒸気タービン船2隻のDFエンジンへの換装を計画

主機ガスエンジンの分類（LNGCの蒸気タービンは除外・・・）

	プロペラ直結	電気推進
中速 4スト機関	・・・あり	・・・あり
低速 2スト機関	・・・全て直結	・・・なし

	ガス専焼	DF（Dual Fuel）
中速 4スト機関	・・・あり	・・・あり
低速 2スト機関	・・・なし	・・・全てDF

DFの意義は、ガスモードの危急時に、瞬時に重油モードに切り替えが可能。
 （また、ガスモードの際もパイロット燃料として1～5%分は重油を噴射している。）

	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

（*注意：4ストで、ガス専焼機関を「リーンバーン」、他を「DF」と呼んだりもするが、4ストDF機関のガスモード運転も「リーンバーン」である。）

本来、エンジン燃焼には2種類・・・

自動車だったら・・・**ガソリンエンジンとディーゼル**

ガソリンエンジン・・・青い火炎（不輝炎・・・輝かない炎）

- **予混合火炎**「燃料と空気は**予め**（あらかじめ）**混合**している」
- ガソリンエンジンの燃焼は、混合気の中を火炎が「**伝播**して行く」
- 大問題・・・**ノッキング**（動画で）・・・**圧縮比**を上げられない。
（ハイオク（高オクタン価）とはノッキングしにくいガソリンのこと・・・）

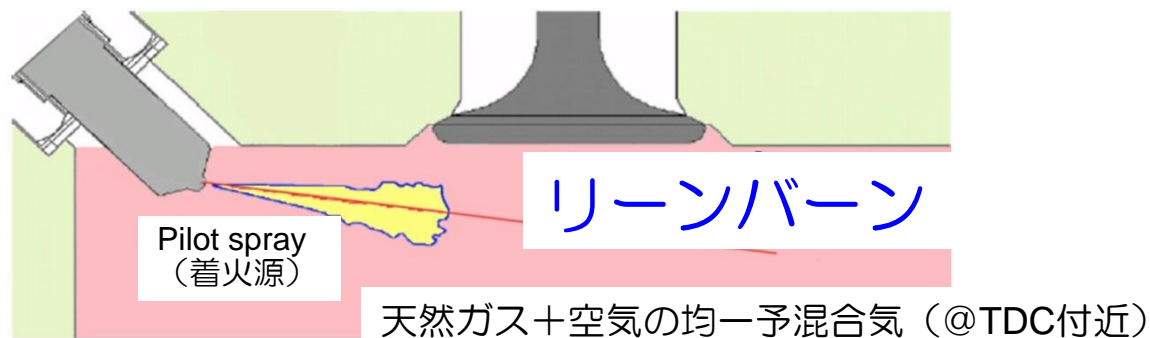
ディーゼル・・・黄色い火炎（輝炎）

- 燃料と空気を**予め**混ぜてない。
- シリンダ内の**圧縮**された空気いきなり**燃料を噴射**・・・動画で・・・
- ディーゼル燃焼は**不均一**で局所高温部があり、そこから**NOx**が発生。

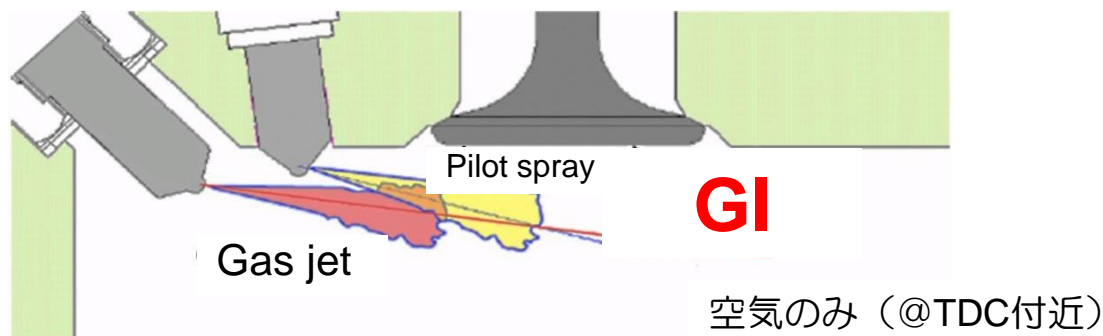
（講義で使っているキーワード）

「**ノック****が**問題、**NOx****で**大変」（が：ガソリンエンジン、で：ディーゼル）

ガスエンジン燃焼も2種類



ガソリンエンジン風の燃焼



ディーゼル風の燃焼

ガス燃焼にも2種類：

リーンバーン（予混合）と **GI**（高圧ガス噴射）

始めに・・・

- リーンバーン燃焼の紹介

- ガスは低圧供給、中速4スト（5-6気圧）では吸気管で空気と予混合

- **ガソリンエンジン風**の燃焼（不輝炎（輝かない炎））

- 着火源として（点火プラグもあるが）重・軽油のパイロット噴射・・・

- NOxの発生は極小（ディーゼルに比べて一桁落ち）。

- ノッキングなど**異常燃焼**の問題が残る・・・動画紹介

- （ここで**DF**の意義・・・異常燃焼を検知し重油モードに瞬時切り替え）

- （「ハイオク」に相当するノッキングしにくいガスを高メタン価と言う）

- メタンスリップ

後で・・・

- （• **GI**燃焼・・・ガスを高圧にして（例：30 MPa = 300 気圧）筒内に噴射。

- ディーゼル風の燃焼（拡散燃焼と言う）・・・動画紹介・・・）

(この後の講演に出て来ない) 番外編から解説します・・・

ガス専焼エンジン (中・高速4スト)・・・ノルウェーのフェリーの例・・・



ノルウェーの短距離フェリー

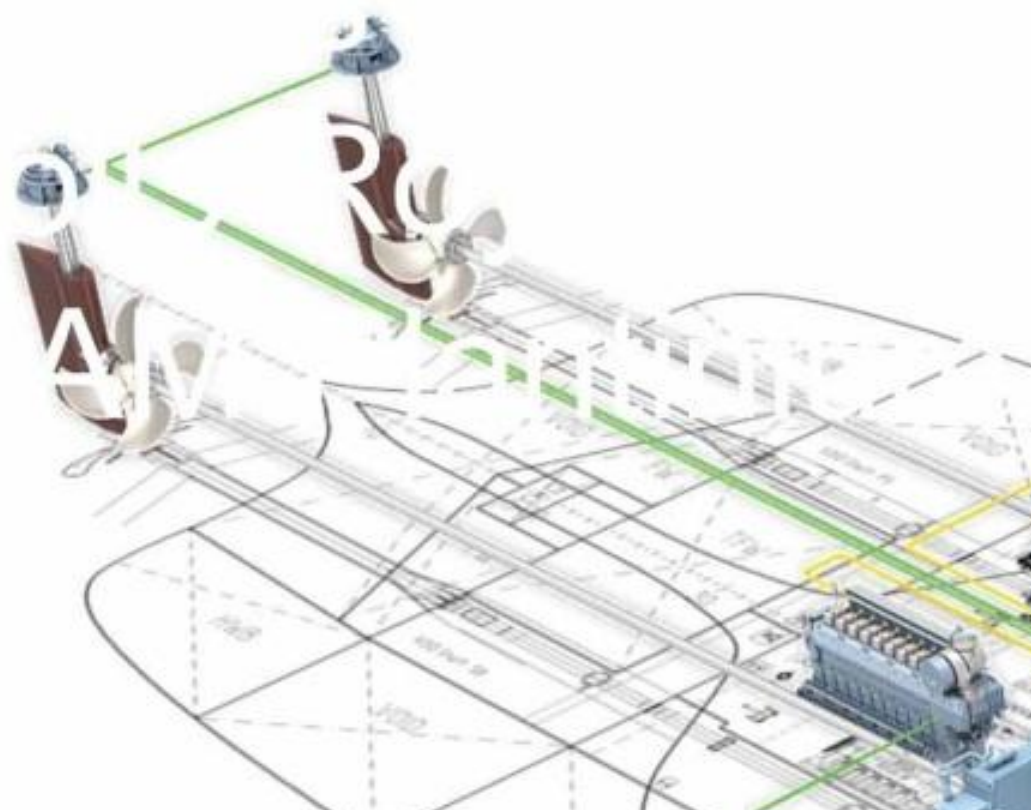
中速4スト・天然ガス専焼エンジン + 電気推進



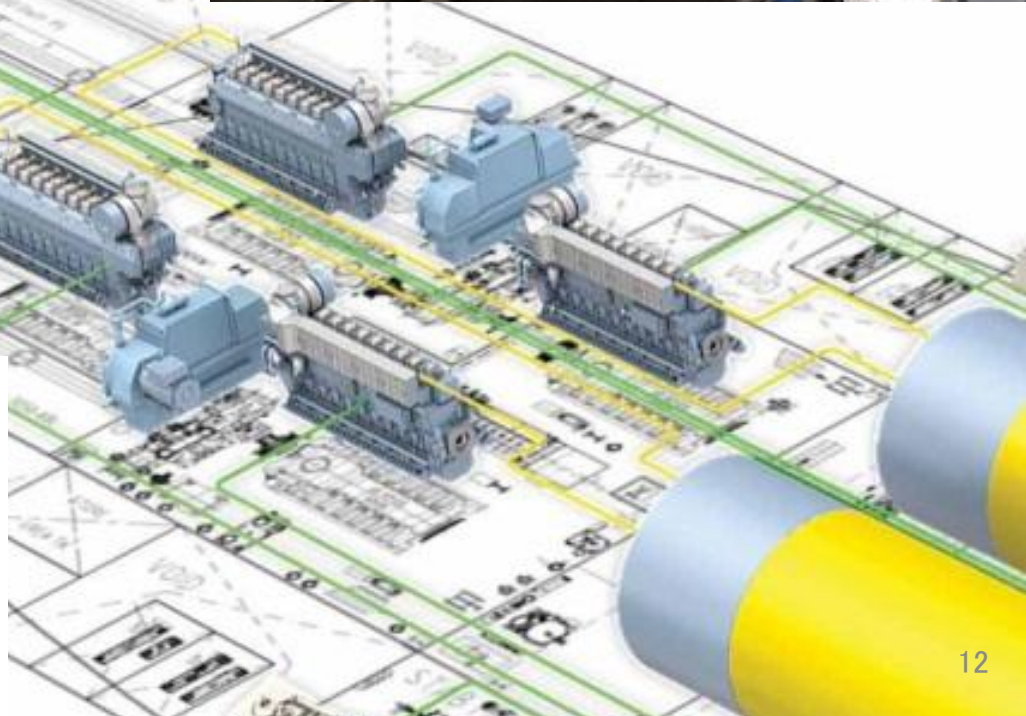
ノルウェー～デンマークの長距離フェリー

中速4スト・天然ガス専焼エンジン + CPP直結

ノルウェー～デンマークの長距離フェリー 中速4スト・天然ガス専焼エンジン + CPP 直結

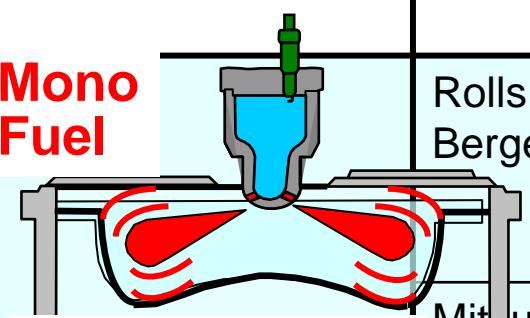
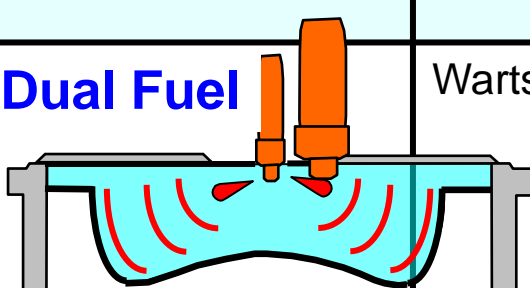


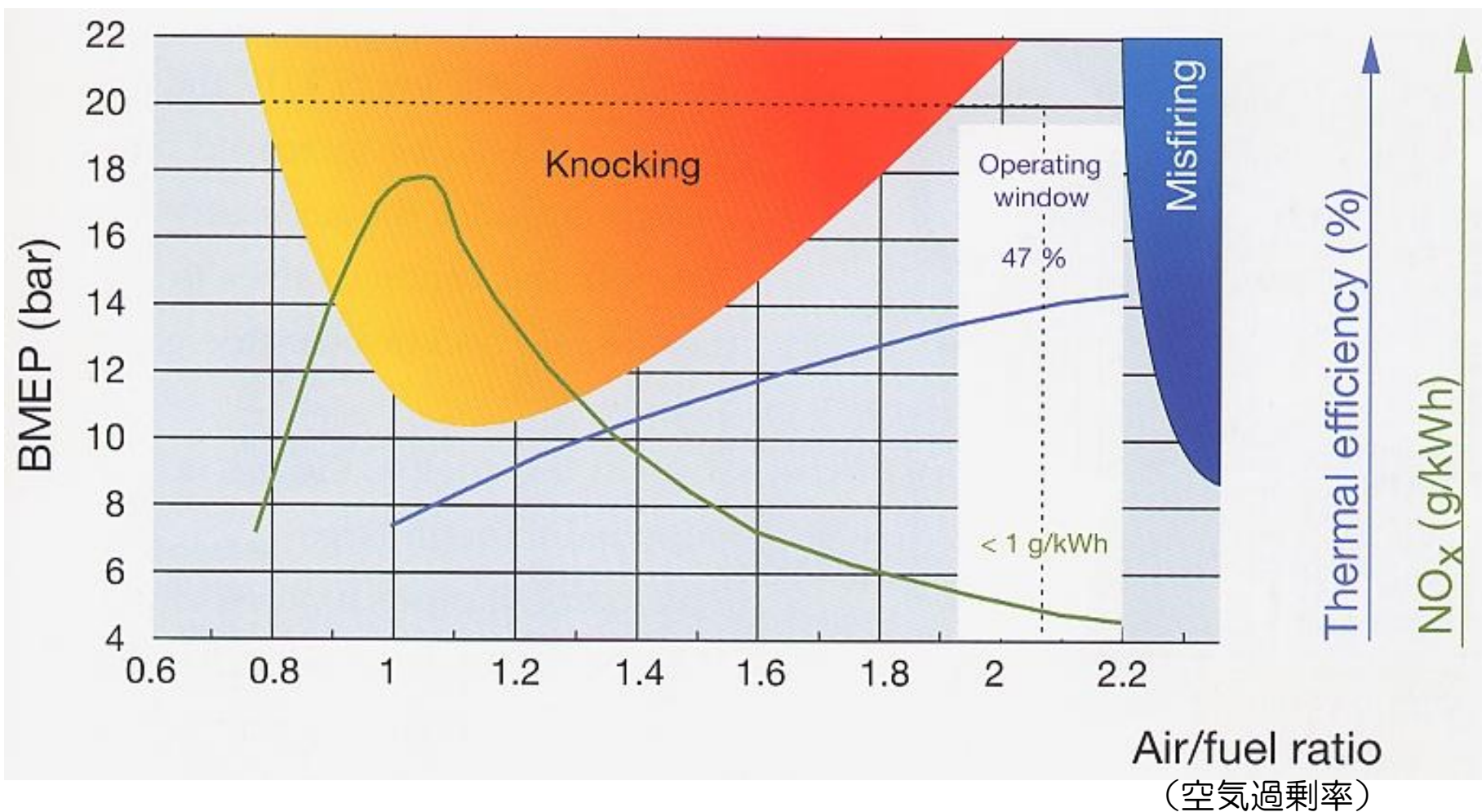
RR社 B35・40型 ガス専焼エンジン
(右図は直列 8気筒ですが実際は V12気筒)
5400 kW (Pme: 18.7 bar, 750 rpm)
X 4機 2軸
+ディーゼル発電機 2700 kW



「ガス専焼 (Mono Fuel) エンジン」と「DF (Dual Fuel) エンジン」

- 燃焼室形状と着火方式が異なるが、リーンバーン (予混合) である点は共通。
- 「ガス専焼」の典型的燃焼パターンは・・・副室内に濃い目の混合気、主室内にリーン混合気を供給、副室内の点火プラグで点火、下図のように副室から主室へ半燃焼ガス (トーチと言う) が噴き出し、主室のリーン混合気に安定した火炎伝播を実現する。

中(高)速4スト	OEM	Engine model	Output (MW)	Example of applied ships
 <p>Mono Fuel</p> <p>副室+火花点火</p>	Rolls Royce Bergen	KVG, B35:40 C26:33	2 - 9 1.5 - 2.5	Ferry, RoRo, Small LNG carrier Coastal bulk carrier
	Mitsubishi	GSR	0.5 - 1.0	Car ferry Coast guard vessel
 <p>Dual Fuel</p> <p>オープンチャンバー +パイロット噴射</p>	Wartsila	50DF 34DF	6 - 17 2 - 6	LNG carrier PSV, FPSO RoRo, RoPax Cruise, Ferry
		20DF	1 - 1.5	Small cargo, Ferry
出典:GDEC資料	MAN	51/60DF	6 - 18	LNG carrier, Container



リーンバーン・ガスエンジンのノッキング領域

Wartsila社資料

ガス専焼エンジンの場合、ノッキングを感知したら点火タイミングの変更、
 また先ほどのRR社 B35・40型 エンジン は VGターボ搭載となっており、
 それらでノッキングを回避する?? ノッキングがひどくなれば CPPで負荷下げ??



Viking Energy

(Platform supply vessel @北海)

・・Wartsila 32DF + 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では自動的に重油モードへ切替え。(再度ガスへ戻すときはマニュアル)





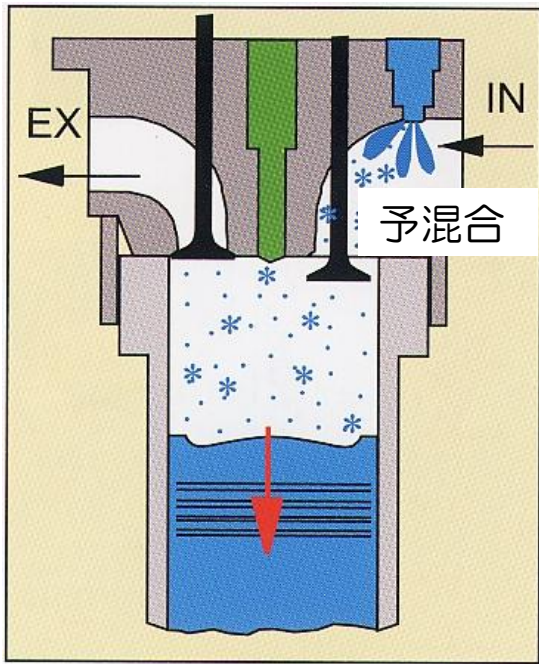
DFのやり方

Wartsila 50DF用 重油噴射ノズル

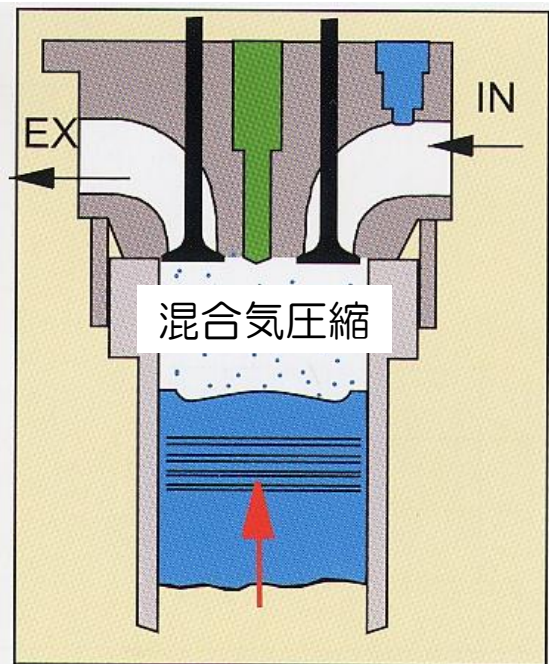
(シリンダ内への噴射ノズル・・・Wartsila社資料)

ディーゼルモード用噴口（大）とガスモード・パイロット用噴口（小）

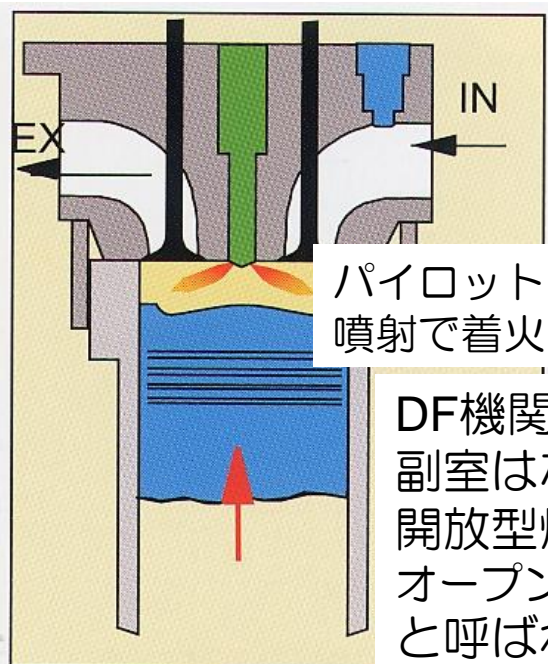
DF機関の例（現在、中速4スト・ガスエンジンは全てリーンバーンタイプ）



AIR & GAS INTAKE



COMPRESSION OF AIR & GAS



IGNITION BY PILOT FUEL

DF機関の場合、副室はなくて開放型燃焼室：オープンチャンバーと呼ばれる。



Wartsila 50DF
(950 kW/cyl.)
(Wartsila社資料)

バルト海の天然ガス燃料フェリー・・・

中速4スト・DFエンジン+電気推進・・・で安定したガスモード運転

・バルト海は静か・・・

ノッキングを誘発するようなプロペラ側からの負荷変動は少ない・・・

・フェリーでは負荷%が高くない（発電機定格出力に余裕）

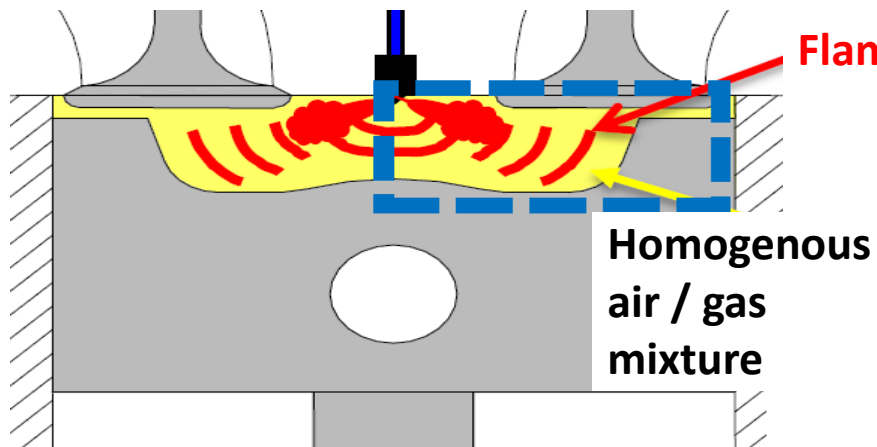
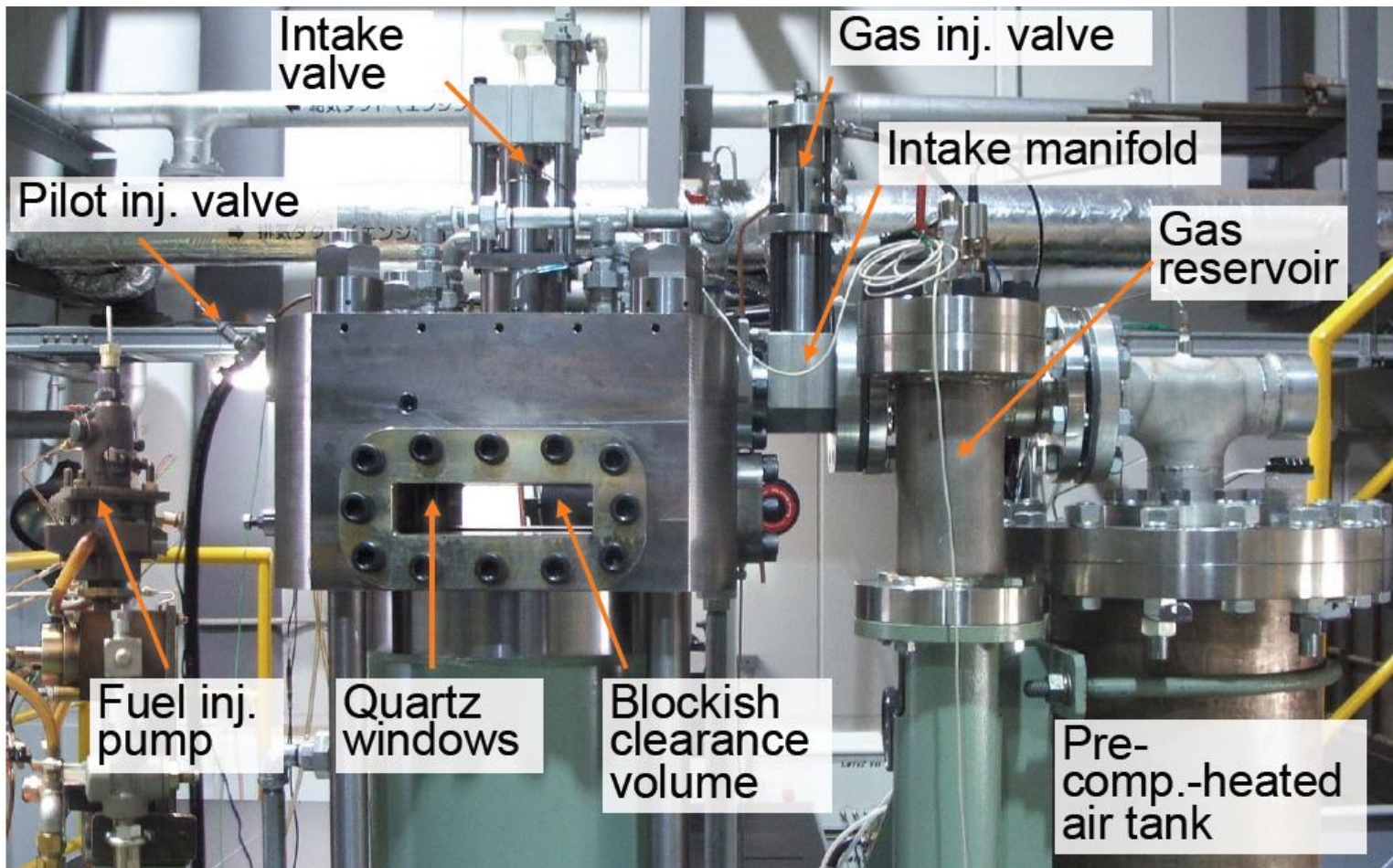
・欧州のガスはメタン価が高くノッキングしにくい・・・

How it should be!:

- Clean sea.
- Clean air.

Viking Grace:

- Low Exhaust Emissions.
- No visible exhaust.
- No discharge into the sea, gray water, black water, bilge water
- Very small waves.
- Low noise levels, positiv feedback from people who live in the archipelago, they can not hear Viking Grace is coming!



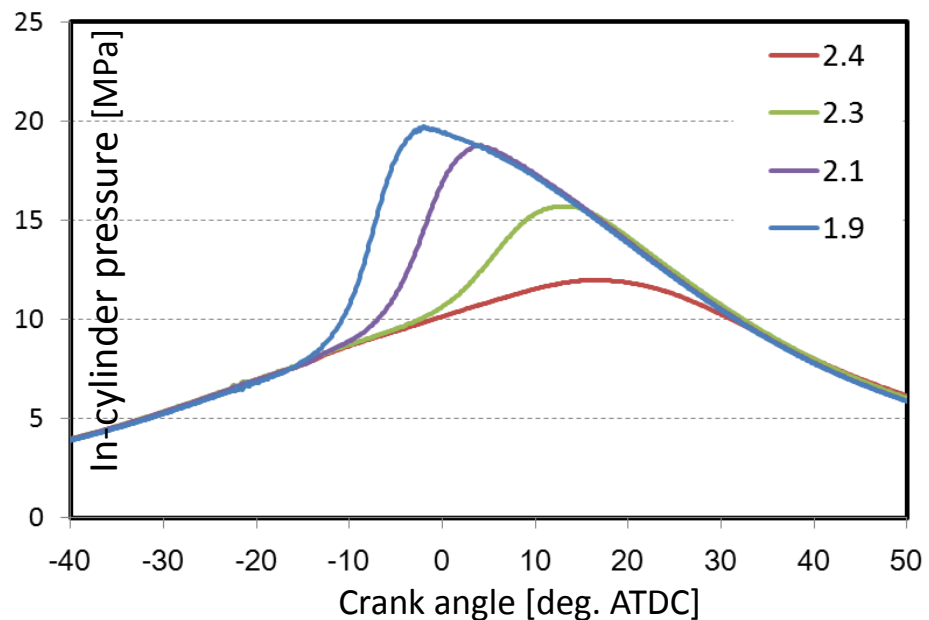
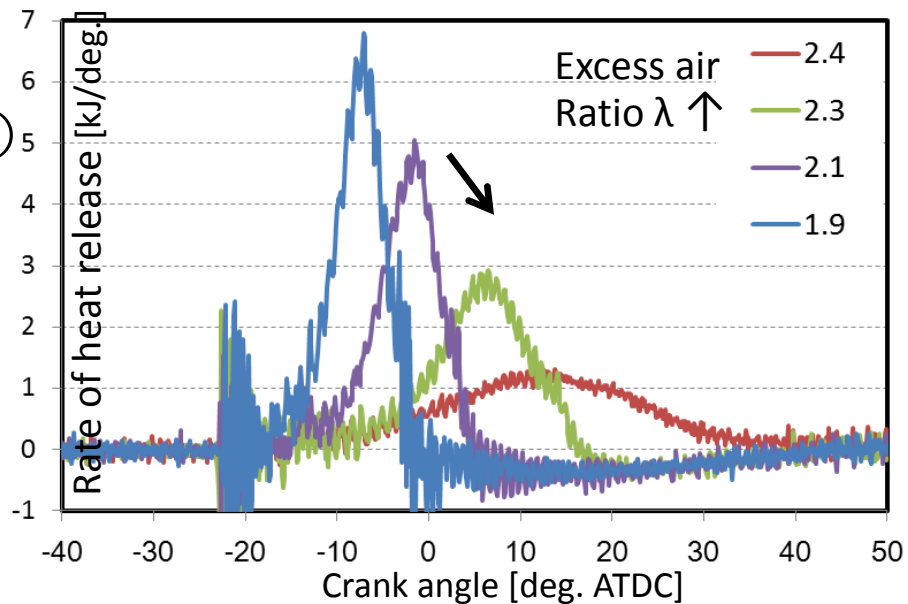
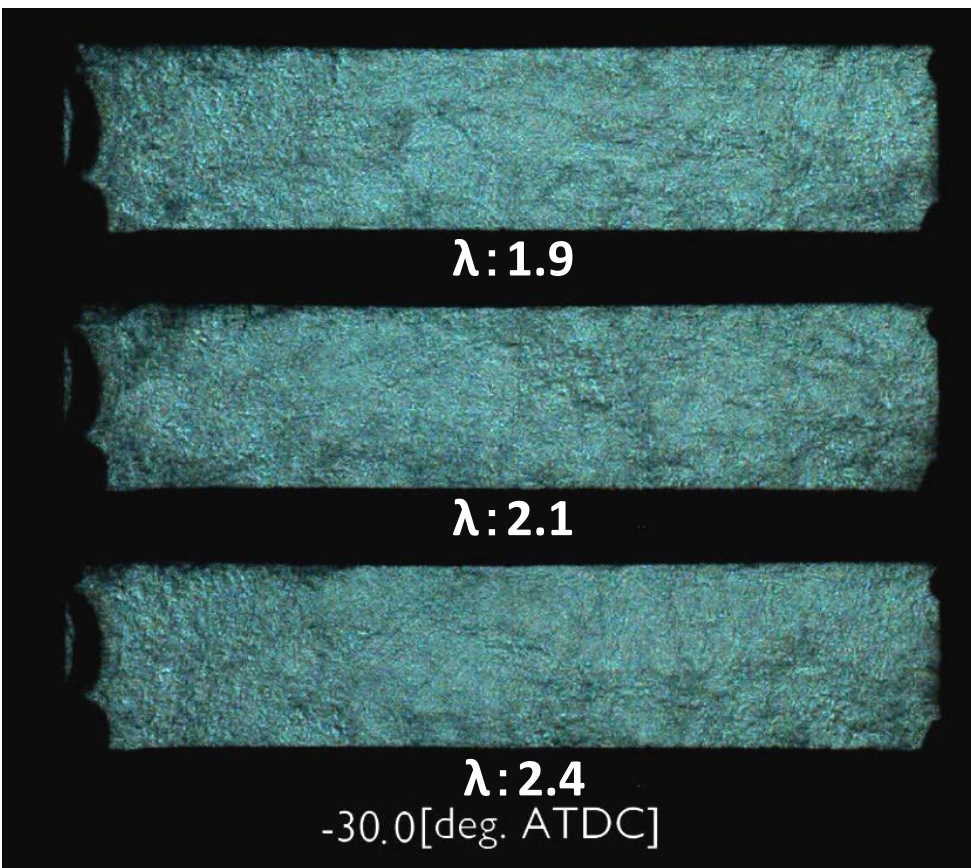
ガスエンジン燃焼可視化装置 RCCEM

九州大学

天然ガス・リーンバーン燃焼のシャドウグラフ撮影

予混合火炎は不輝炎燃焼
(シャドウグラフでは燃焼域が黒く映る)

200 mm

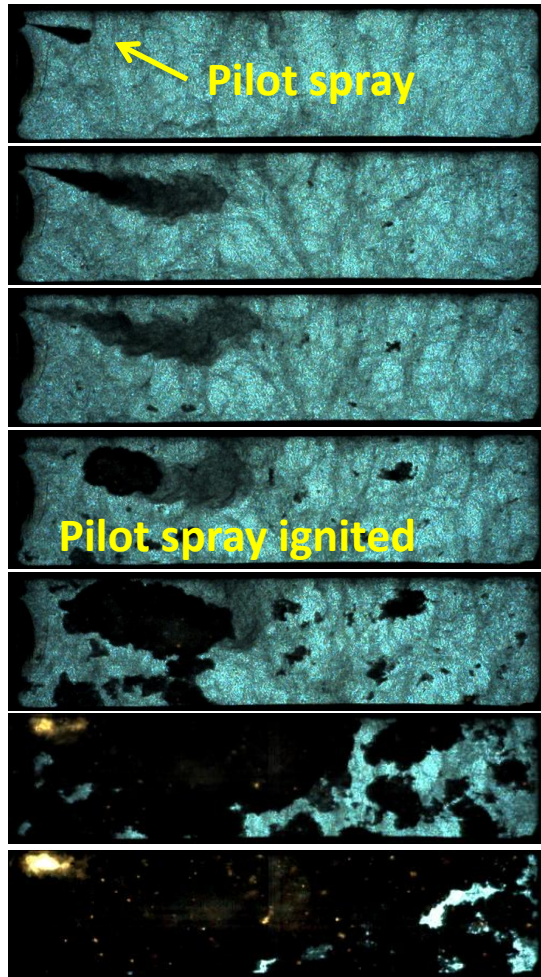


濃混合気 (低 λ) では過早着火の可能性・・・

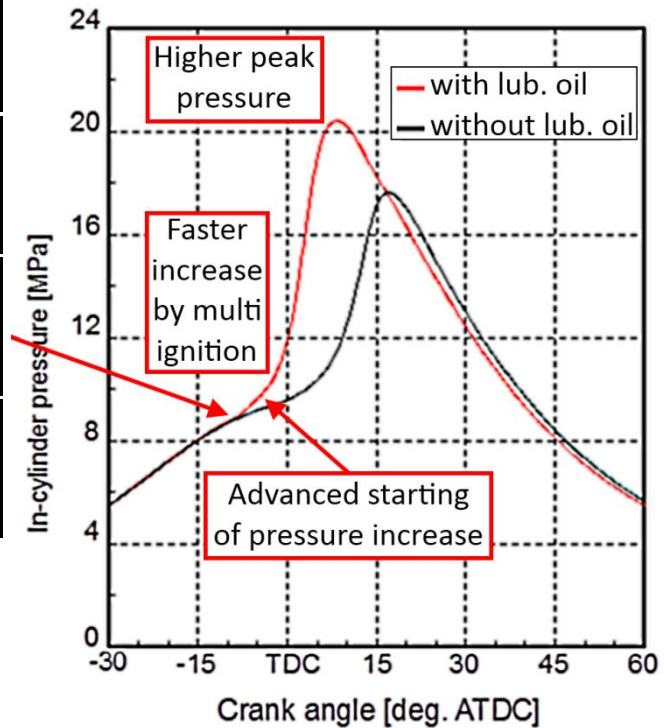
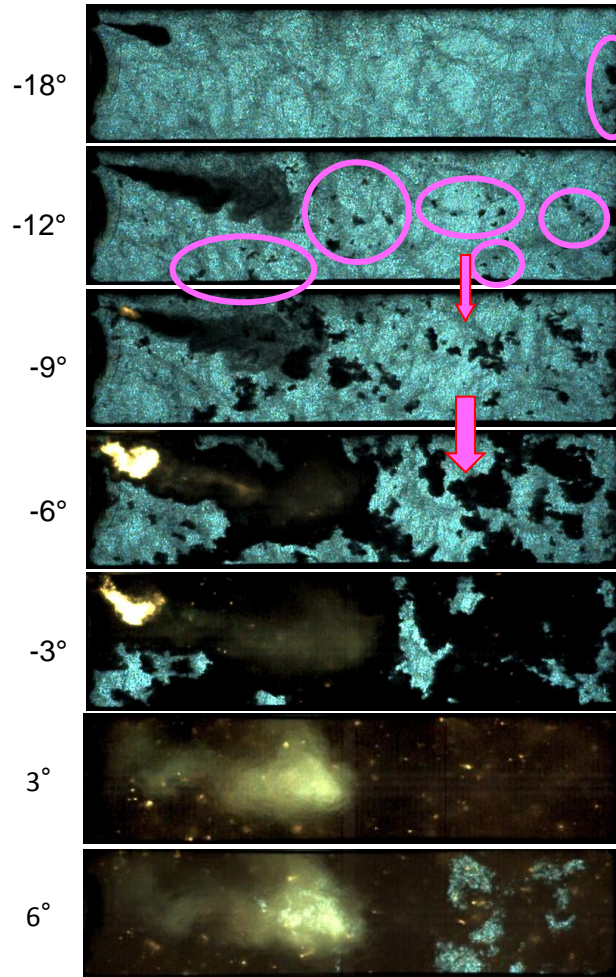
リーンバーンエンジン・・

シリンダ内の潤滑油粒に起因する混合気の過早着火の問題（研究中）

Without Lubricating Oil



Lub. Oil \approx 0.5 g/kWh

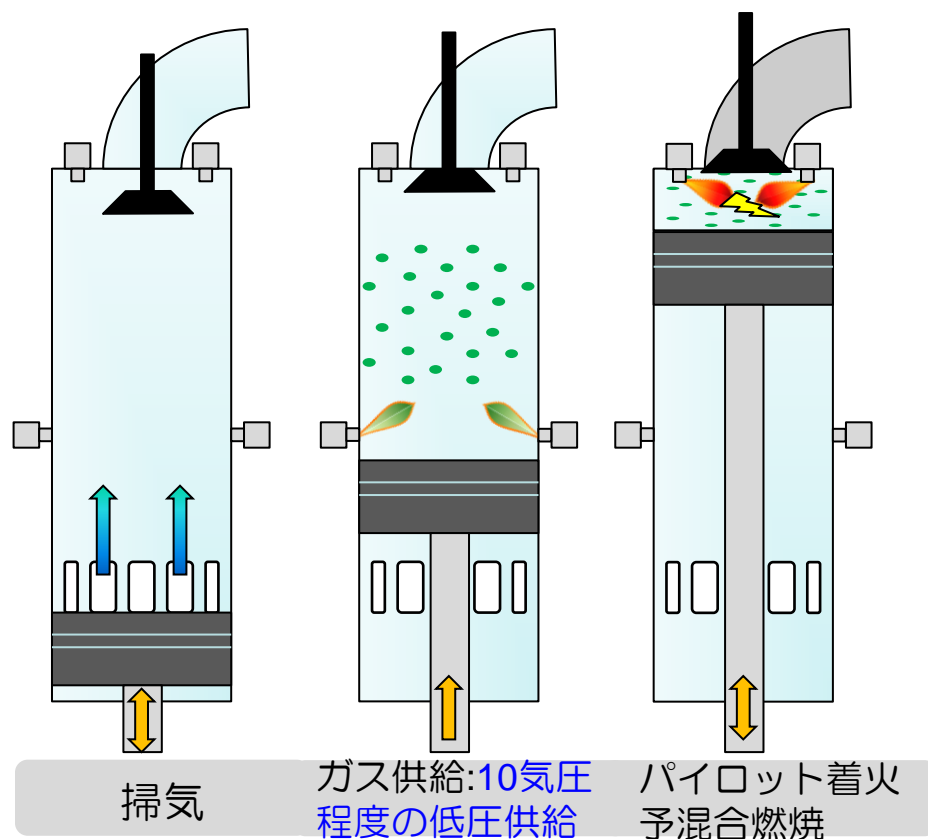


今日の主機分類の話・・・もう1種・・・

ここで再びリーンバーンに戻りますが、今度はWartsila の低速2スト **DF** エンジン

- ・ **リーンバーン** (予混合) (低圧ガス噴射とも呼ばれる) 低速2スト・エンジン

燃焼上の特長と問題点は4スト・リーンバーンと同様

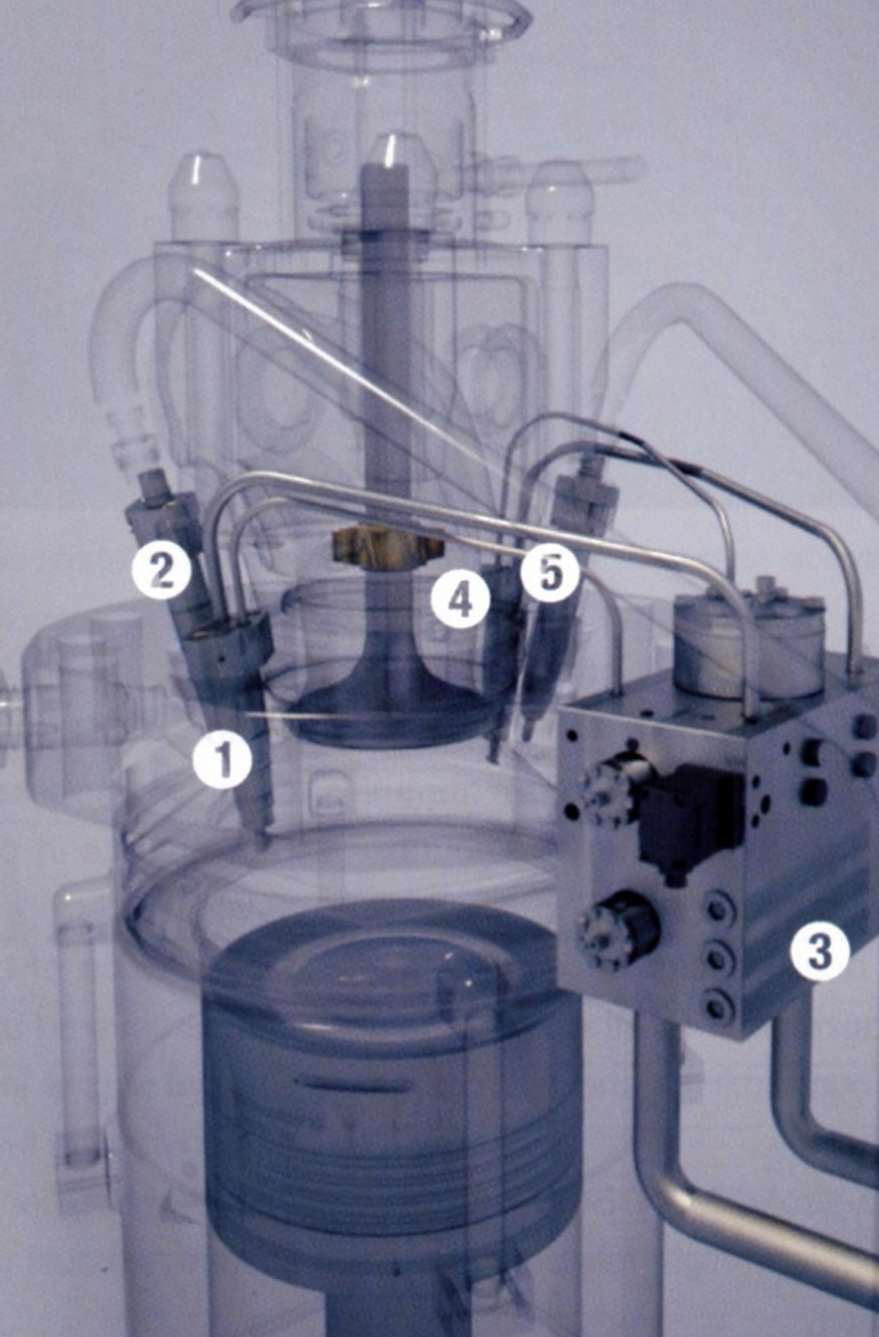


(Koji Takasaki, ClassNK TECHNICAL BULLETIN Vol. 30, 2012, p8)

次に・・・**GI**燃焼の紹介

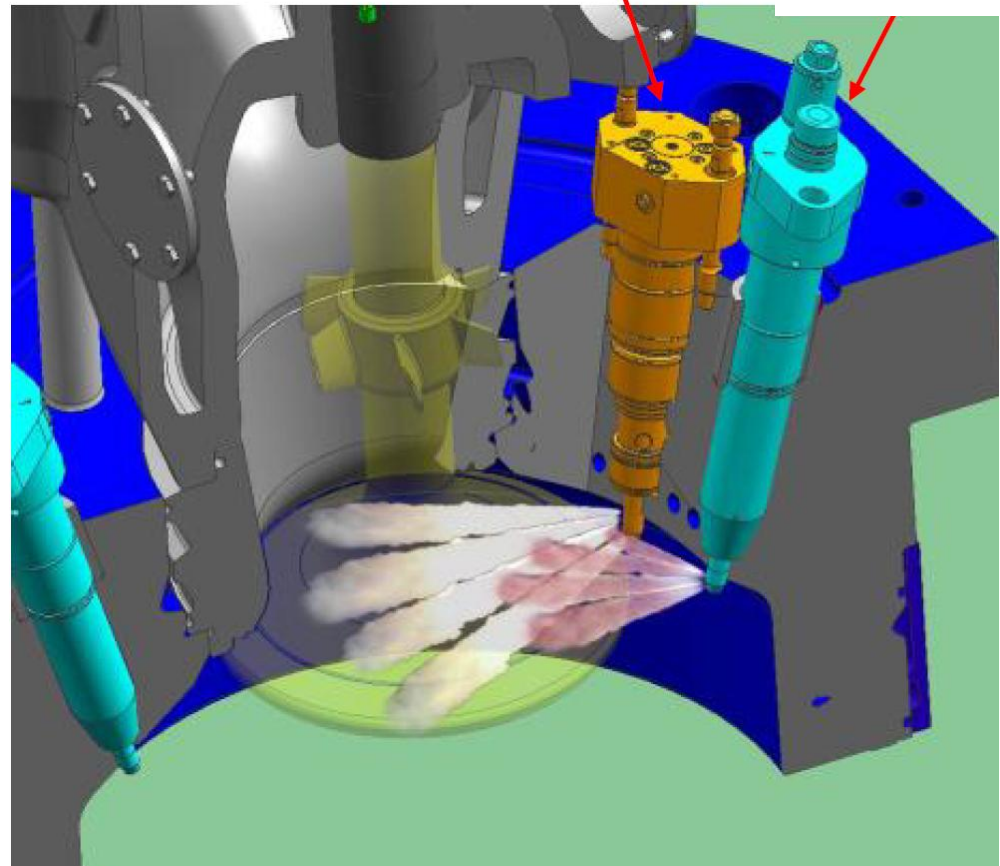
- • ガスを高圧にして（例：30 MPa = 300 気圧）筒内に噴射。
 - **ディーゼル風の燃焼**（拡散燃焼と言う）・・・動画紹介
ただしガスでは自己着火はできないのでパイロット噴射が必要。
異常燃焼の問題はない（高圧縮比が可。メタン価は無関係）。
燃焼は不均一で局所高温部があり、そこから**NOx**が発生。
（GIのNOx はディーゼルに比べてせいぜい3割減・・・）
- **FGSS** (Fuel Gas Supply System) ・・・
 - **GI** エンジンに供給する 300気圧のガスを用意する際に、
液体（LNG）で300気圧までポンピング後、300気圧下で
気化させる装置のこと・・・目的：ガス圧縮仕事の低減

GI 燃烧



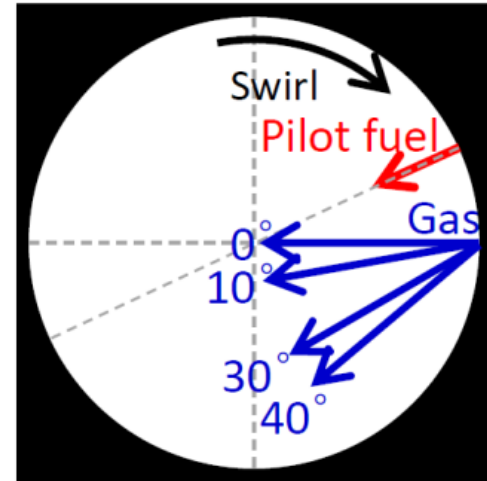
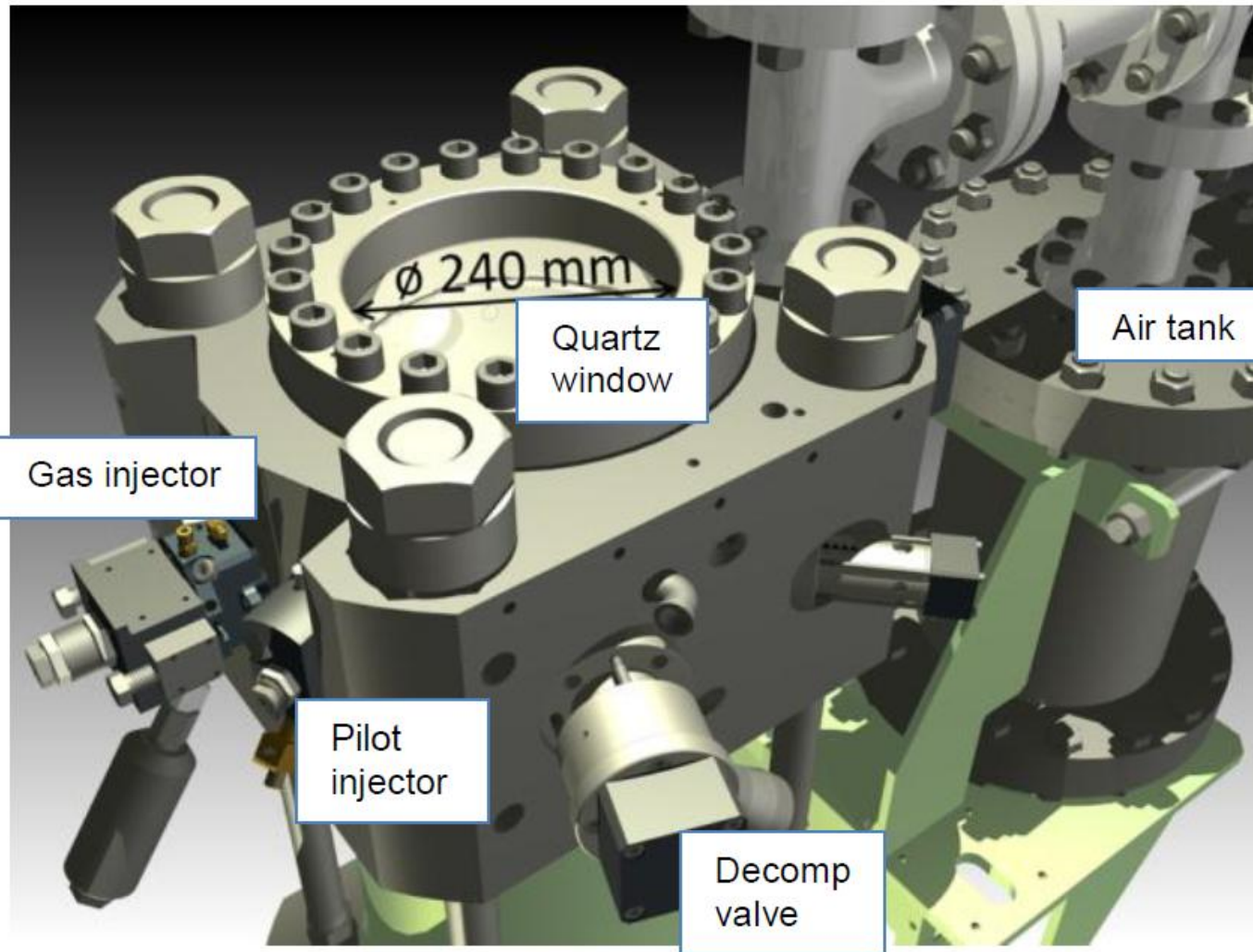
Gas injection

Pilot Fuel



GI燃烧は低速2ストロに • • ME-GI燃烧室 MAN D&T 社資料

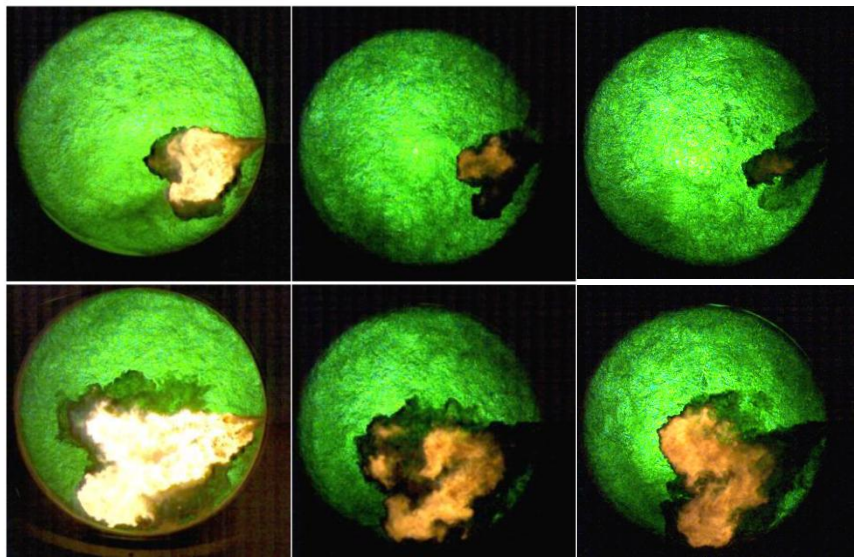
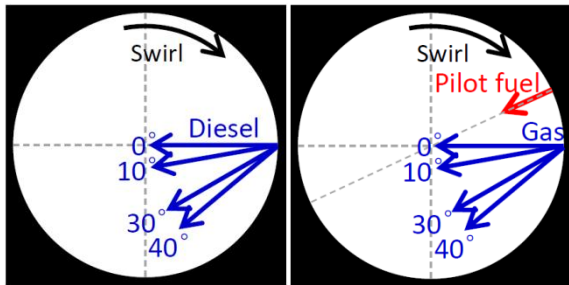
燃烧可視化装置 (九州大学)



Mirror on top of piston for Schlieren technique

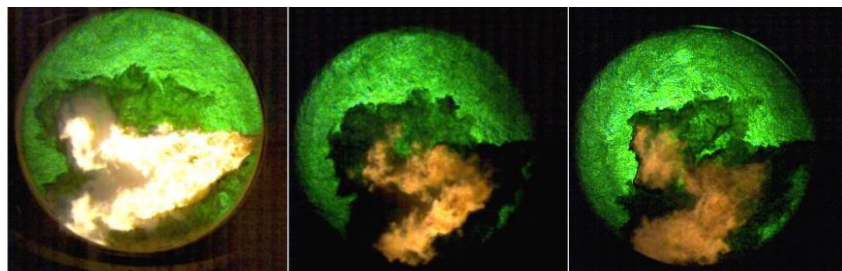


O Crank angle deg. ATDC

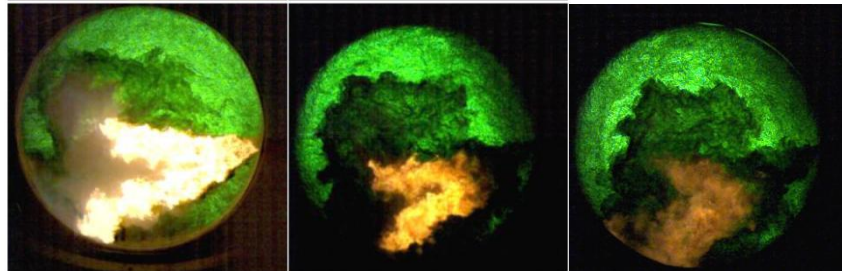


Diesel Std. GI EGR GI 17%O2

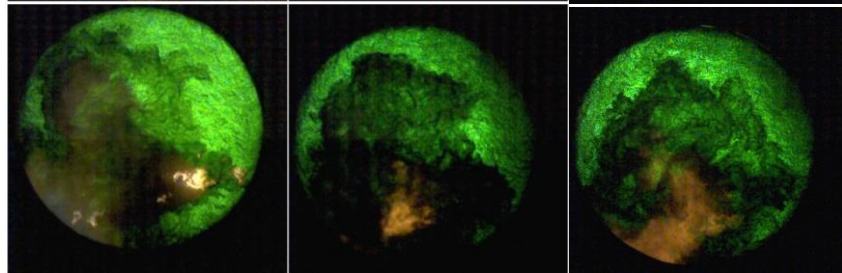
12



16



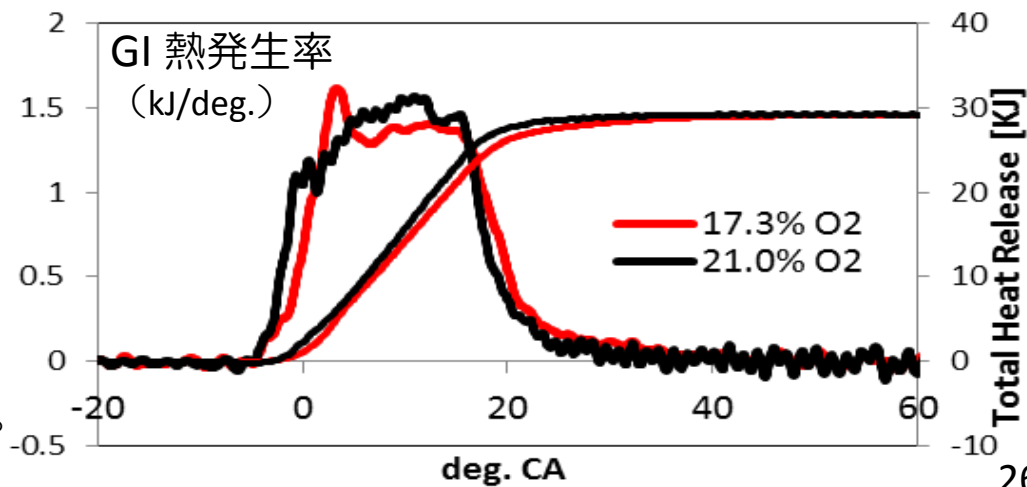
20



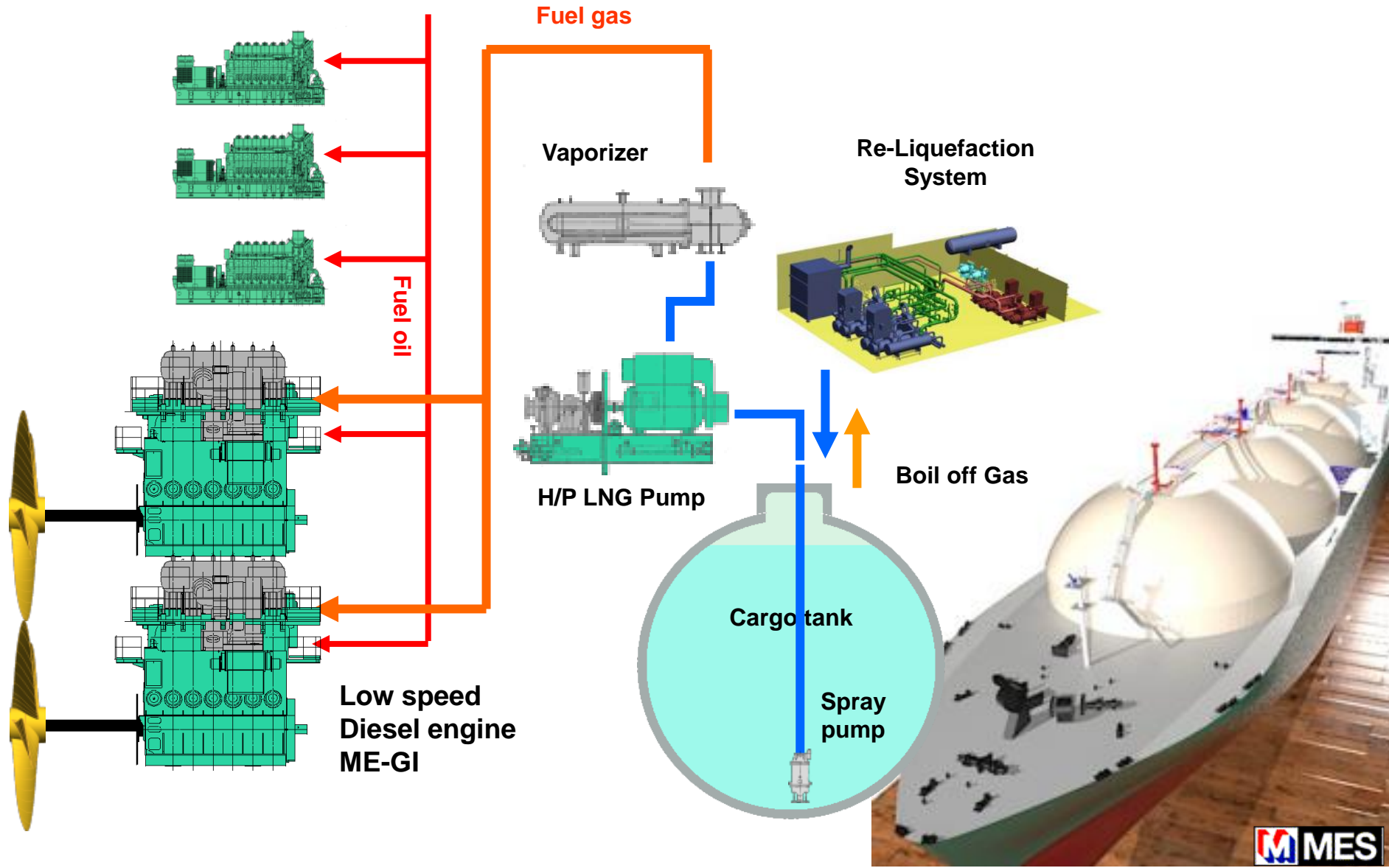
Diesel Std. GI EGR GI 17%O2

Emissions	Diesel	Std. GI	EGR GI
CO[ppm]	16.6	30.2	45
NOx[ppm]	499	300	44

GIでNOx・TierⅢ (-80%) をクリアするには EGR (or SCR) が必要。本実験では EGR 模擬の 17% O2 で NOx はディーゼルに比べて -90%。しかも燃焼は意外と悪くはない。



FGSS (液相圧縮・高圧で気化) 適用モデルの例



再度まとめ リーンバーン（予混合）

- ガスは低圧供給（中速4ストでは5-6気圧）
 - ガソリンエンジン風の燃焼（不輝炎（輝かない炎））
 - NOxの発生は極小（ディーゼルに比べて一桁落ち）。
 - ノッキングなど異常燃焼の問題（メタン価に敏感）
（DFの意義・異常燃焼を検知し重油モードに）
 - メタンスリップでCO2削減を一部キャンセル（現在はメタン規制なし）

GI（高圧ガス噴射）燃焼

- ガスを高圧にして（例：30 MPa = 300 気圧）筒内に噴射。
 - ディーゼル風の燃焼（拡散燃焼と言う）
ただしガスでは自己着火はできないのでパイロット噴射が必要。
 - 異常燃焼の問題はない（高圧縮比が可。メタン価は無関係）。
 - メタンスリップは極少
 - 燃焼は不均一で局所高温部があり、そこからNOxが発生。
（GIのNOx はディーゼルからせいぜい2~3割減・
ただしTier III向けEGR・SCRはやりやすい・極低S排ガスゆえ・・・）