

2019年度 JPECフォーラム

船舶・燃料研究
—2018年度 試験結果報告—

2019年5月8日

船舶・燃料研究WG

1. はじめに

VG-2

低硫黄燃料油の品質確保にかかる燃焼試験について

- 船用燃料油のアベイラビリティの拡大を図るべく、低硫黄化に伴う性状変化が現行C重油を使用している船用エンジンに影響しないかを確認するため、実機による実際の使用を想定した燃焼試験を実施。
- 石油連盟及び日本船用工業会間で調整の結果、以下の試験燃料について燃焼試験を行う。
- また試験燃料毎に、特性の異なる複数の船用エンジンで燃焼試験を行う。

現行の船用燃料油と低硫黄化に伴う変化

現行	低硫黄化 (3.5%以下→0.5%以下) による性状変化	試験の要否
軽油	変化なし	不要
A重油 ・着火性: セタン指数40程度 ・動粘度: 2~20mm ² /s	硫黄分以外変化なし	不要
C重油 ・着火性: CCAI860程度 ・動粘度: 50~180mm ² /s	着火性や動粘度に 変化あり ・着火性: CCAI 860 / セタン指数35程度 ・動粘度: 2~180mm ² /s	性状変化の影響を評価する 試験が必要

試験燃料の性状

試験燃料	動粘度 (mm ² /s)	着火性	備考
試験燃料① (A重油に 近いもの)	2~20	セタン指数 35程度	・着火性、動粘度 を最も大きく変 化させた燃料
試験燃料② (①と③の 中間)	20~50	CCAI 860 ／セタン指 数35	・動粘度によって ヒーティングレ ベルが変わるた め動粘度を①と ③の中間にした 燃料
試験燃料③ (現行の C重油)	50~180	CCAI 860 程度	・基準燃料とする

(注) セタン指数(CI: Cetane Index)・・・軽油やA重油の着火性を示す指標。 CCAI・・・C重油の着火性を示す指標。

(※) 着火性及び動粘度レベルに変化がないC重油については、試験燃料③で評価する(低硫黄化燃料であっても、燃焼性は同等と判断)。

試験燃料性状のねらい

想定シナリオ

現行、高硫黄C重油を使用している船舶が、C重油の代わりとして低硫黄燃料油を使用する状況を想定する。このため、現状のC重油を使用する場合の運転方法と同様に、A重油で起動した後に試験燃料に切替える。

試験燃料①：A重油に近い燃料油（CI 35程度、動粘度2～20 mm²/s）

Point: 着火性と動粘度を最も大きく変えた燃料

➡ 起動時に従来のA重油を使用すれば、現在のC重油と同じように使用可能であることを確認。

試験燃料②：中間動粘度燃料油（CCAI 860／CI 35程度、動粘度20～50 mm²/s）

Point: 動粘度に着目した燃料

➡ ①と③の中間レベルの燃料。低動粘度で、従来のC重油とは加熱条件が変わるが、適切に加熱すれば、問題なく使用できることを確認。

試験燃料③：現行C重油相当燃料油（CCAI 860程度、動粘度50～180 mm²/s）

Point: 基準燃料

➡ 着火性及び動粘度レベルに変化のない低硫黄C重油については、試験燃料③で評価する。

2. 燃焼試験に用いる試験燃料

VG-4

試験燃料の性状

名 称		試験燃料①	試験燃料②	試験燃料③
密度@15°C (g/cm ³)		0.8835	0.9408	0.9855
動粘度 (mm ² /s)	@40°C	2.43	---	---
	@50°C	2.03	35.2	153
	@75°C	---	15.1	45.0
流動点 (°C)		-42.5	-22.5	-5.0
引火点 (°C)		73.0	87.5	126.5
水分 (容量%)		0.03>	0.03>	0.27
残留炭素分 (質量%)		0.02	7.54	11.5
灰分 (質量%)		0.001>	0.001>	0.006
硫黄分 (質量%)※1		0.16	1.06	2.42
セタン指数(新)		35.4	---	---
CCAI		---	833	857
ECN※2		16.7	24.0	17.9

※1 燃料性状としては動粘度、着火性に着目し、燃焼性に影響しない硫黄分は規制値適合を条件としない。

※2 推定セタン価。FCAIによる試験結果。

3. 燃焼試験に用いるエンジン

VG-5

○今年度は、2つの4サイクルエンジンについて、燃焼試験を実施。

No.		1	2
タイプ		4サイクル中速エンジン	
型式		新潟原動機 6L19HX	マツイ鉄工所 MU323DGSC
定格出力／回転数		750 kW / 1000 rpm	257 kW / 420 rpm
シリンダ数		6気筒	3気筒
シリンダ径 × ストローク		190 × 260 mm	230 × 380 mm
燃料噴射系	開弁圧力	35.0 MPa	25.5 MPa
	噴射ノズル	φ 0.32 × 9穴-噴射角140°	φ 0.32 × 7穴-噴射角120°
搭載船例		499GT	199GT
外観			
特徴		中速エンジンの中で、機関回転速度が速く、ボア径の小さい機関のサンプル。機関回転速度が速いため、燃焼期間に余裕がなく、燃料性状の変化に敏感である。	中速エンジンの中で、機関回転速度が遅い機関のサンプル。機関回転速度が遅いため、燃焼期間に余裕があり、No.1エンジンに比して燃料性状の変化に鈍感である。

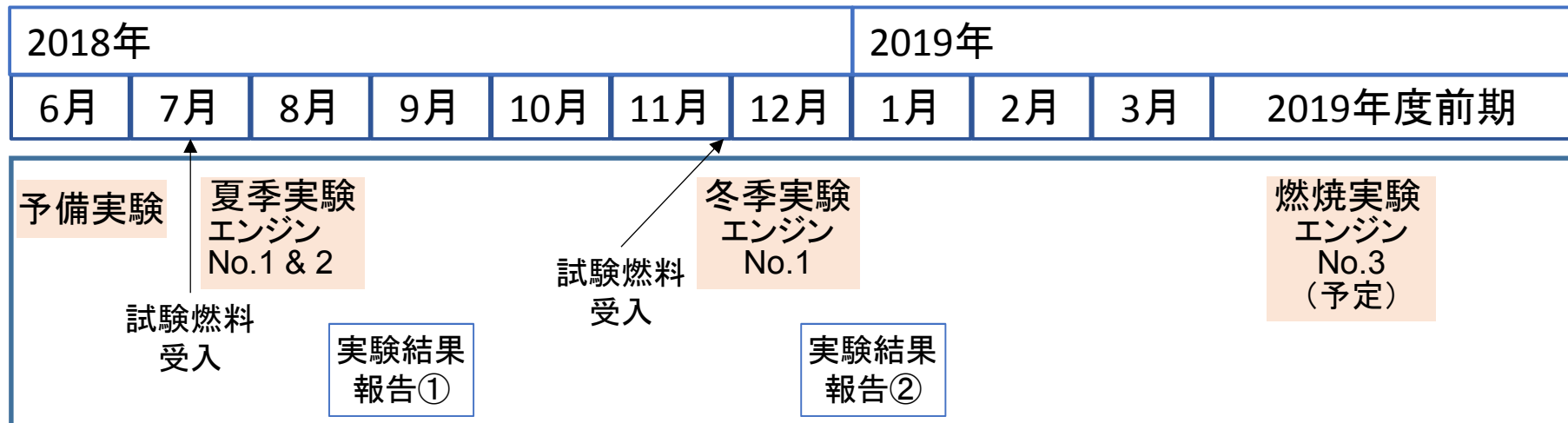
4. エンジン燃焼試験 実施計画

VG-6

第1回船舶・自動車及び燃料研究委員会資料より

エンジンNo.		No.1		No.2	No.3
項目					
試験エンジン		6L19HX		MU323DGSC	2サイクル低速
試験時期		夏季	冬季	夏季のみ	来年度実施の 予定
試験燃料	燃料①	n=1	n=1	n=1	
	燃料②	n=1	n=1		
	燃料③	n=1	n=1	n=1	

スケジュール



5. 今年度燃焼試験 条件・計測マトリックス

VG-7

燃料	試験燃料性状		試験条件*		計測項目	
	動粘度 mm ² /s (50°C)	着火性	エンジン 運転条件	燃料噴射前 加熱条件	エンジン	エミッション
①	2 - 20	CI 35	船用特性 25% 50% 75% 100%	加熱なし	燃料噴射圧 筒内圧 熱発生率 着火遅れ 燃料温度 排ガス温度 冷却水温度 燃料消費量 ・ ・ ・	NOx CO ₂ CO O ₂ THC スート PM [EC,OC]** スモーク
②	20 - 50	CCAI 860 ／CI 35		燃料加熱温度を適切に設定して実験を実施。 →メーカー推奨の動粘度範囲内に設定***		
③	50 - 180	CCAI 860		メーカー推奨の動粘度範囲内に設定		

* エンジン及び付帯設備の性能要件により、一部実験条件が変更となる可能性があります。

** PM計測は、エンジン1の夏季実験時のみ。

*** 各エンジンメーカーの仕様による。C重油の場合、通常は10～20mm²/sの範囲内でエンジンごとに指定されている。

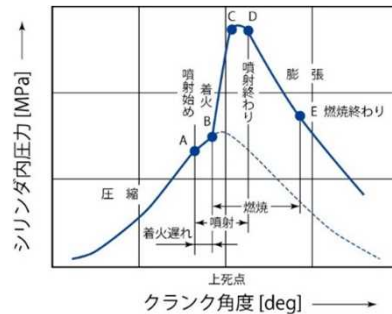
6. 燃焼試験

VG-8

○ 負荷率25%(従来のC重油で注意が必要な負荷率), 50%, 75%, 100%(50%以上が航海中の主な負荷率)の負荷率において, 十分に安定させた状態で圧力波形や排ガス温度, 排ガス性状などを計測する。

(a) 着火遅れ・最高シリンダ内圧力

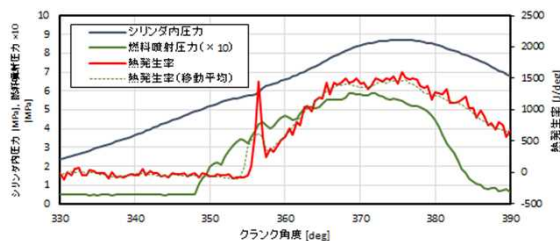
燃料の着火性を評価する指標の一つに着火遅れ(燃料を噴射してから着火するまでの期間)や最高シリンダ内圧力Pmaxがある。



(b) 圧力波形・熱発生率

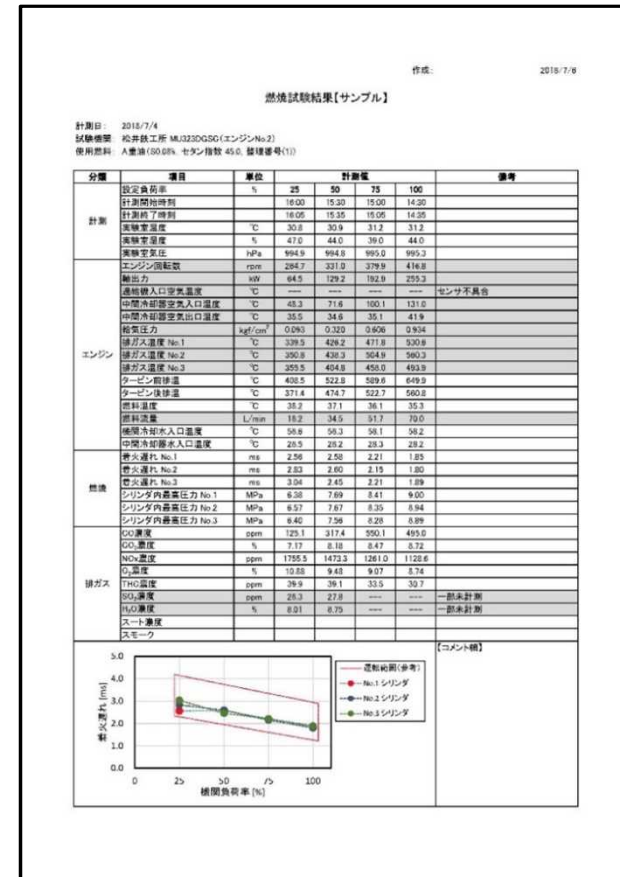
シリンダ内圧力波形や熱発生率 $dQ/d\theta$ [J/deg]を詳細に分析することで, 燃料の燃焼状態を調べることができる。

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{V}{\kappa - 1} \frac{dP}{d\theta} + \frac{\kappa P}{\kappa - 1} \frac{dV}{d\theta}$$



(c) その他

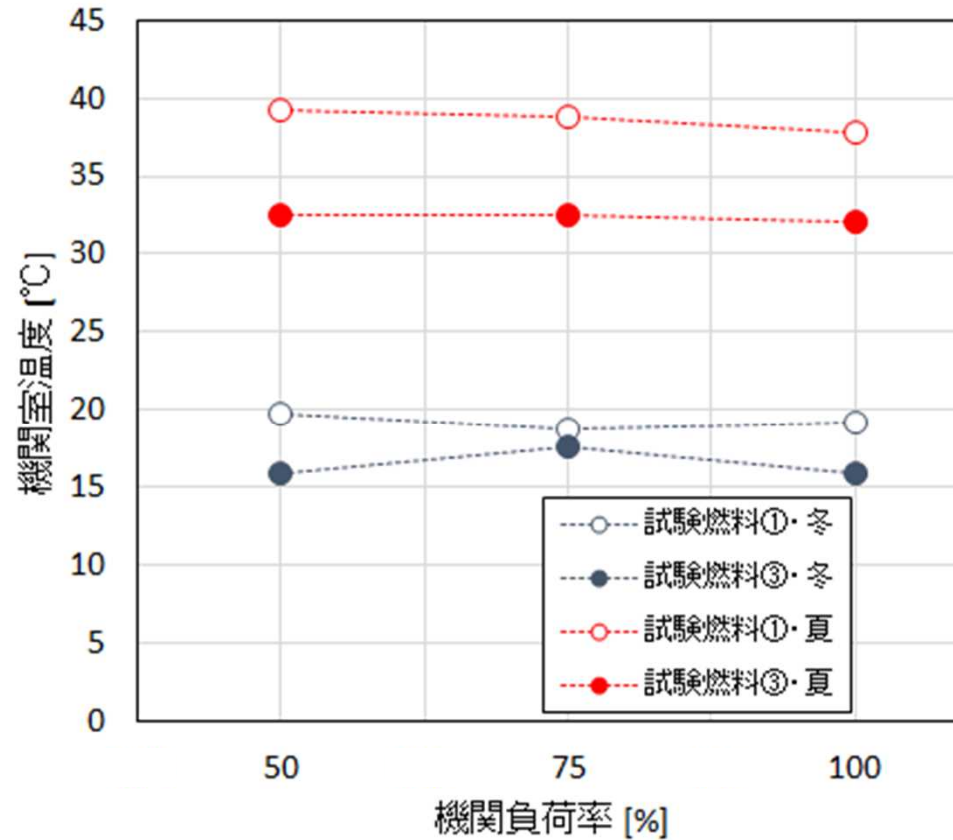
その他の評価指標として, 排ガス温度や過給機特性, 排ガス性状などがある。



6.1 新潟原動機6L19HXの試験結果(試験燃料①, ③)

VG-9

(1) 機関室温度(夏期・冬期)



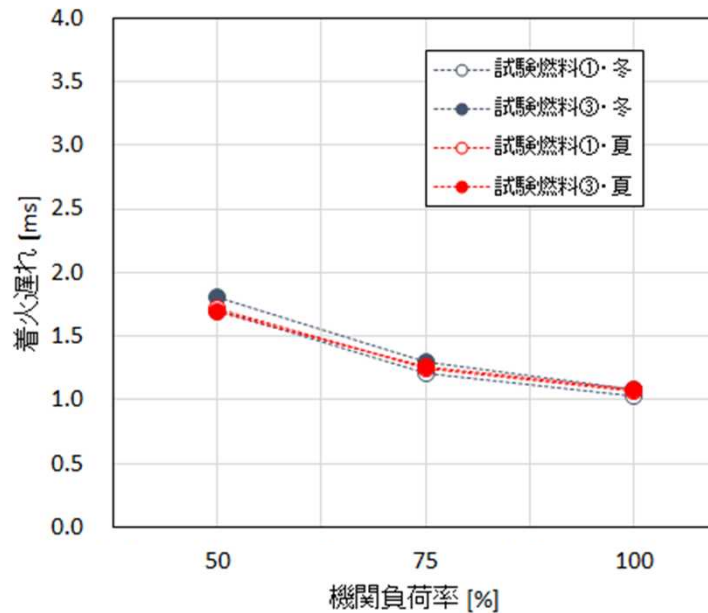
- 機関室温度(試験エンジンが設置された防音壁内の温度)は冬季の方が15~20°C程度低い。

機関室温度

6.1 新潟原動機6L19HXの試験結果(試験燃料①, ③)

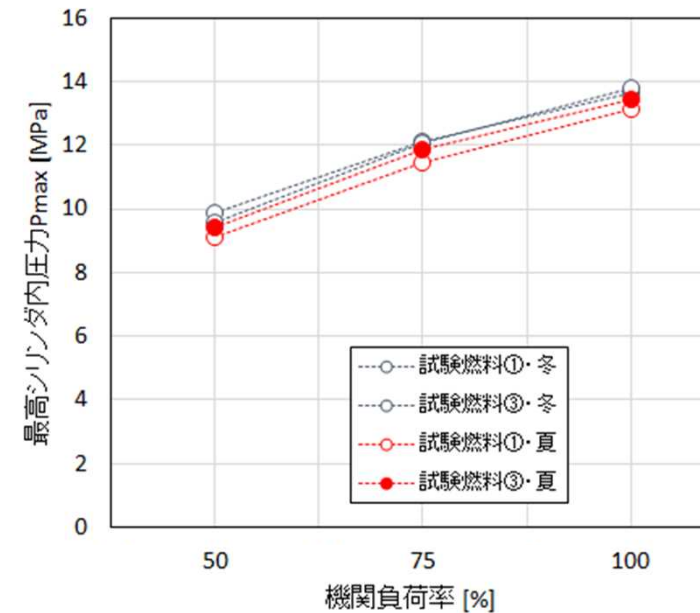
VG-10

(2) 着火遅れ・最高シリンダ内圧力



(a) 着火遅れ

- 負荷率50%以上の範囲において、試験燃料①の着火遅れは試験燃料③とほぼ同じである。
- 夏季・冬季ともに同様の傾向がみられる。



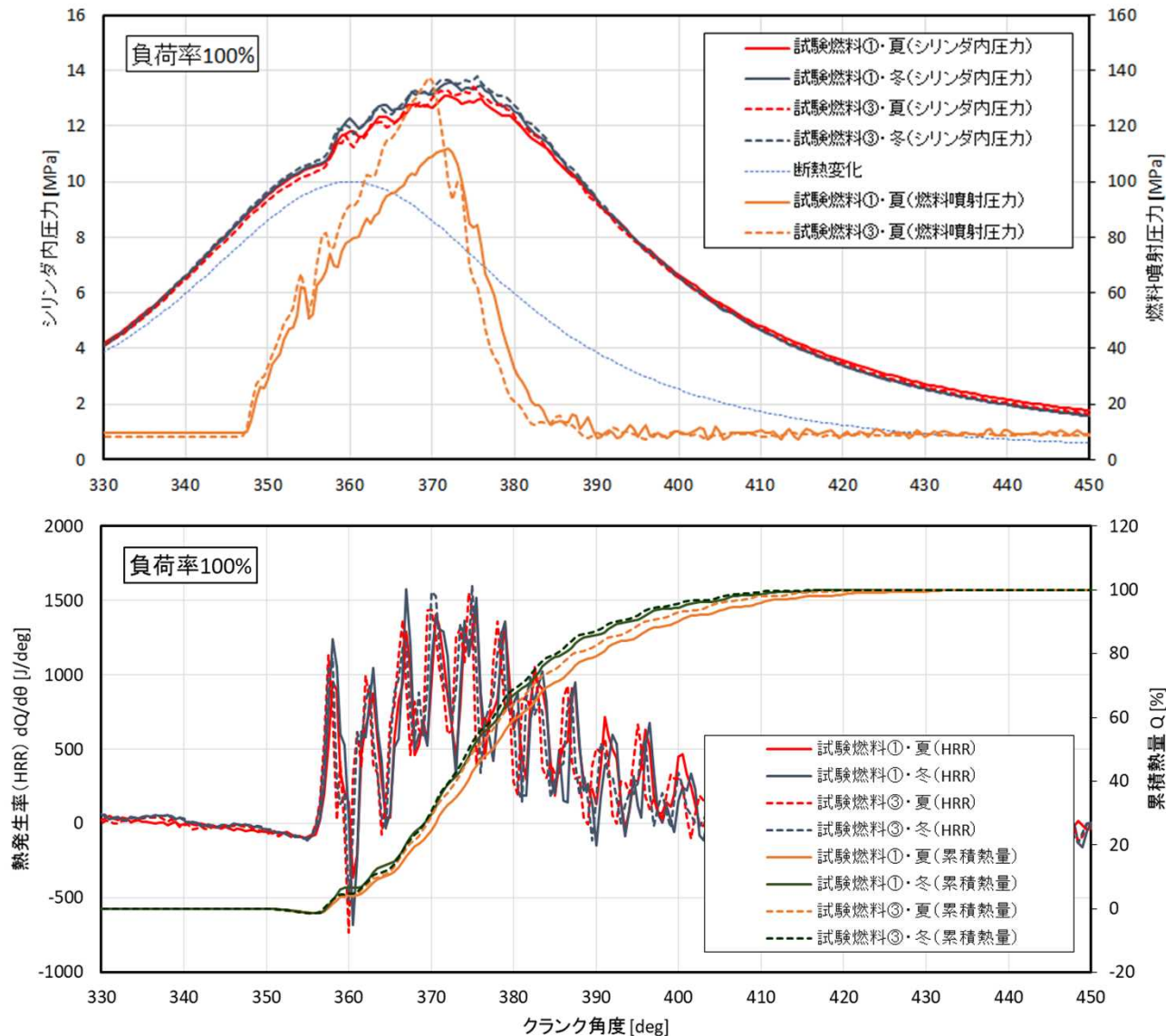
(b) 最高シリンダ内圧力Pmax

- 負荷率50%以上の範囲において、試験燃料①の最高シリンダ内圧力は試験燃料③よりもわずかに低い。
- 夏季・冬季ともに同様の傾向がみられる。

6.1 新潟原動機6L19HXの試験結果(試験燃料①, ③)

VG-11

(3) 圧力波形および熱発生率(負荷率100%)



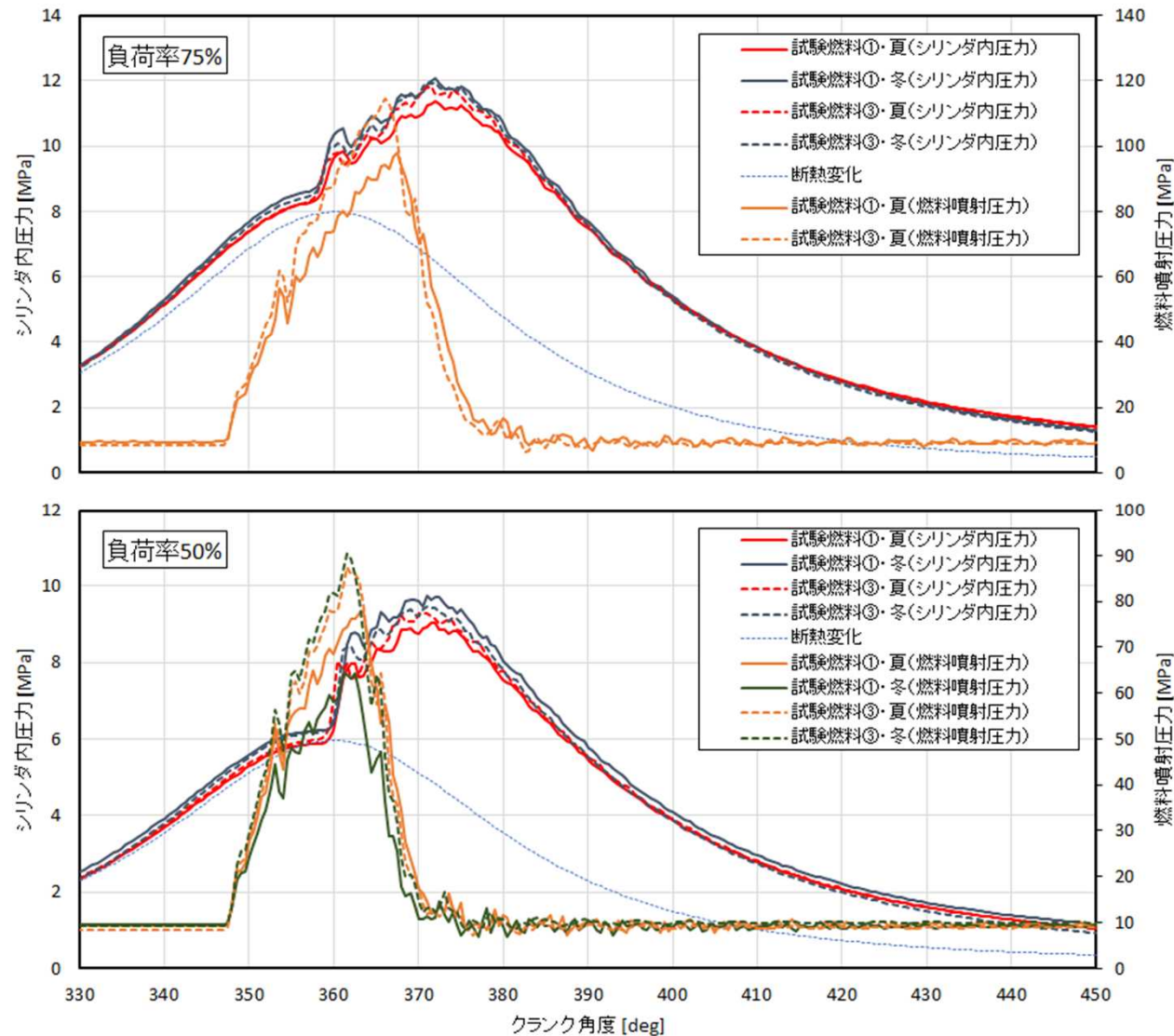
➤ 夏季・冬季ともに、負荷率100%における試験燃料①と試験燃料③の圧力波形はほぼ重なっている。

➤ 負荷率100%における熱発生率および累積熱量(燃烧期間に相当)は、燃料の種類による影響をほとんど受けていない。

6.1 新潟原動機6L19HXの試験結果(試験燃料①, ③)

VG-12

(4) 圧力波形および熱発生率(負荷率75%, 50%)

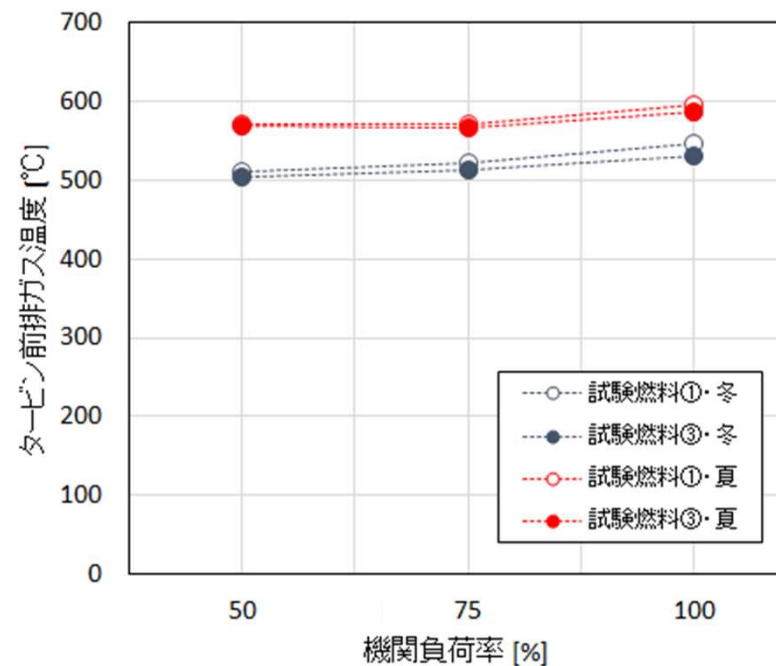


➤ 負荷率50%, 75%もほぼ同様の結果が得られており, 圧力波形や熱発生率は燃料種の影響をほとんど受けていない。

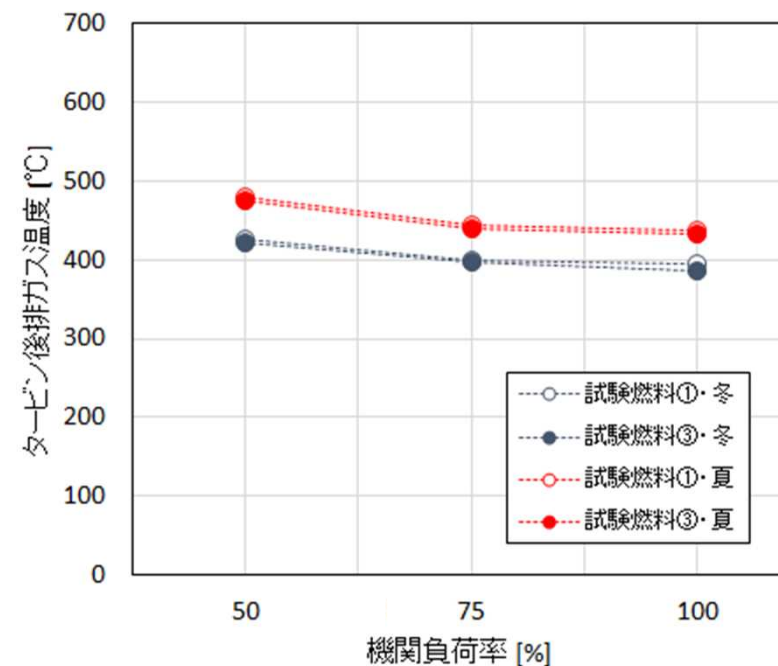
6.1 新潟原動機6L19HXの試験結果(試験燃料①, ③)

VG-13

(6) 排ガス温度



(a) タービン前排ガス温度



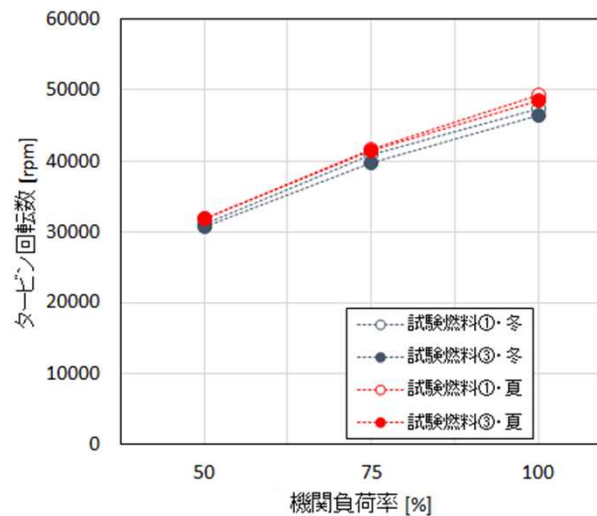
(b) タービン後排ガス温度

- 夏季・冬季ともに、タービン前後排ガス温度は、燃料種の影響をほとんど受けていない。
- タービン前後排ガス温度は冬期の方が50～60℃程度低い。

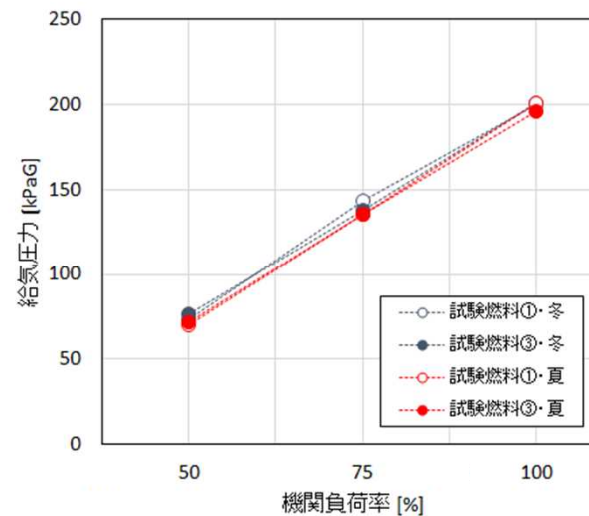
6.1 新潟原動機6L19HXの試験結果(試験燃料①, ③)

VG-14

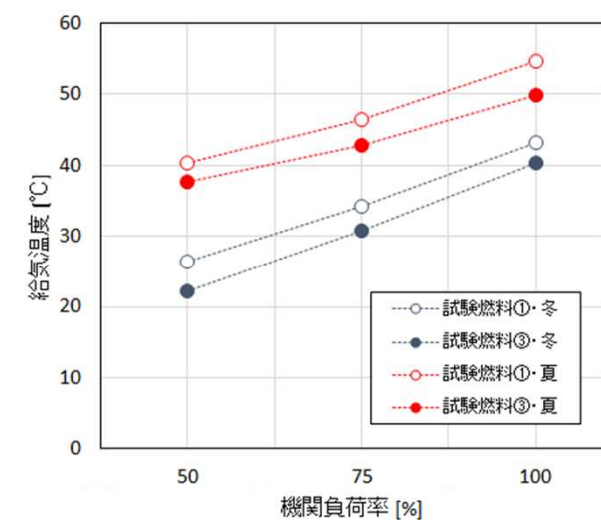
(7) 過給機特性



(a) タービン回転数



(b) 給気圧力



(c) 給気温度

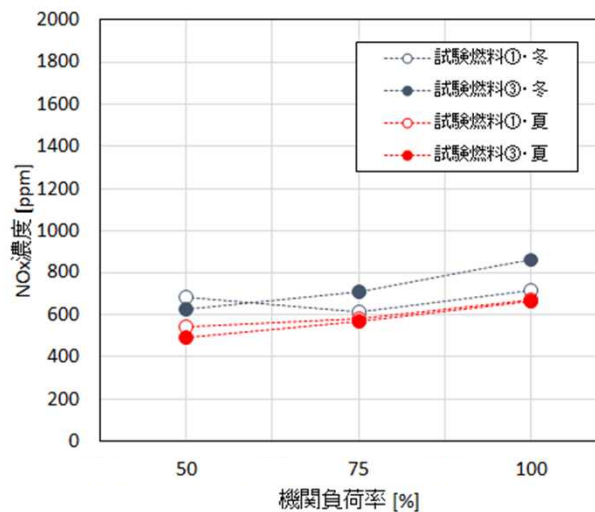
- 夏季・冬季ともに、タービン回転数や給気圧力は、燃料種の影響をほとんど受けていない。
- 冬期のタービン回転数がわずかに低い。

- 給気温度は冬季の方が10～15℃程度低い。

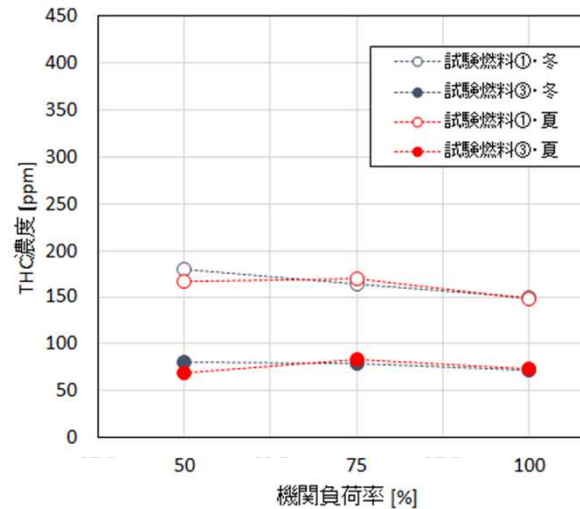
6.1 新潟原動機6L19HXの試験結果(試験燃料①, ③)

VG-15

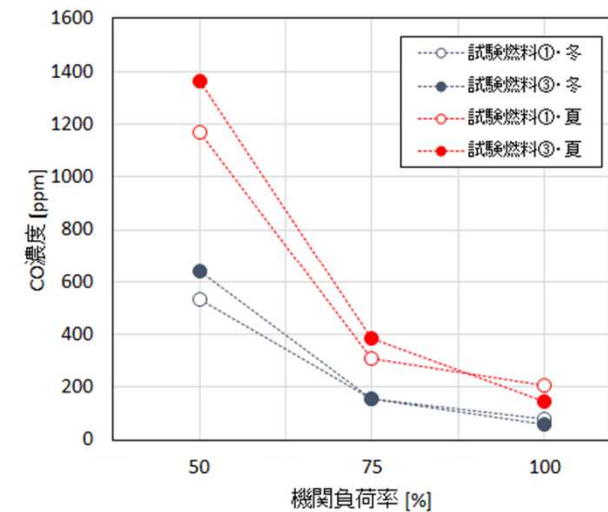
(7) 排ガス性状



(a) NOx濃度



(b) THC濃度



(c) CO濃度

- 負荷率50%以上の範囲において、試験燃料①のNOx濃度は試験燃料③とほぼ同じレベルである。

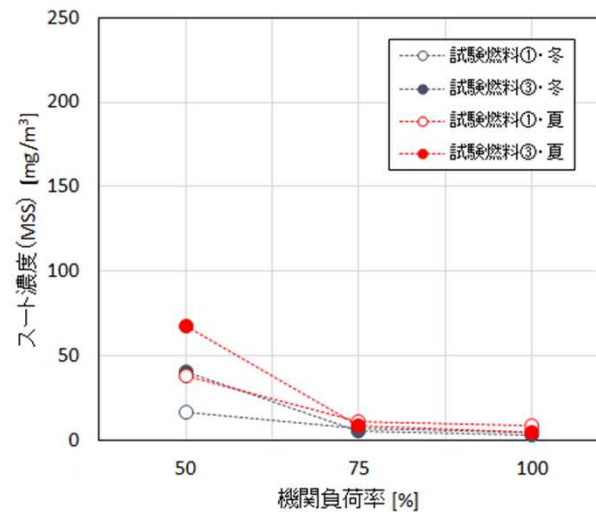
- 夏季・冬季ともに、負荷率50%以上の範囲において、試験燃料①のTHC濃度は試験燃料③と比べて高い。

- 試験燃料①のCO濃度は試験燃料③とほぼ同じレベルである。
- 冬季のCO濃度は夏季よりも低い。

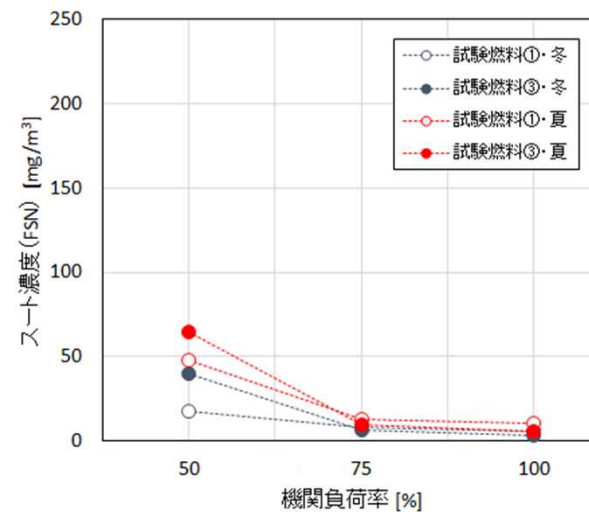
6.1 新潟原動機6L19HXの試験結果(試験燃料①, ③)

VG-16

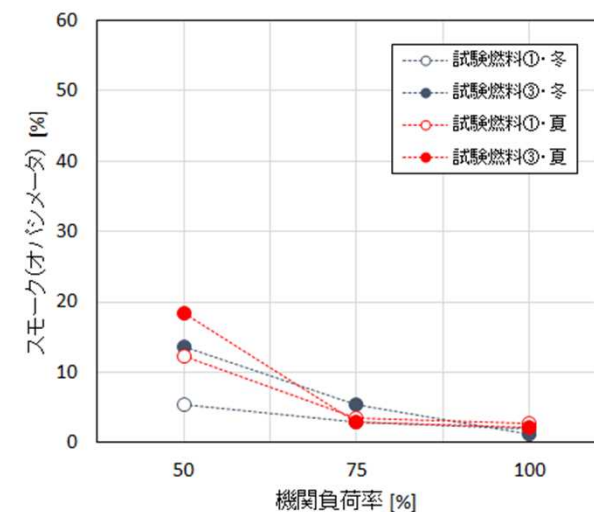
(8) 排ガス性状



(a) スート濃度 (MSS)



(b) スート濃度 (FSN)



(c) スモーク濃度

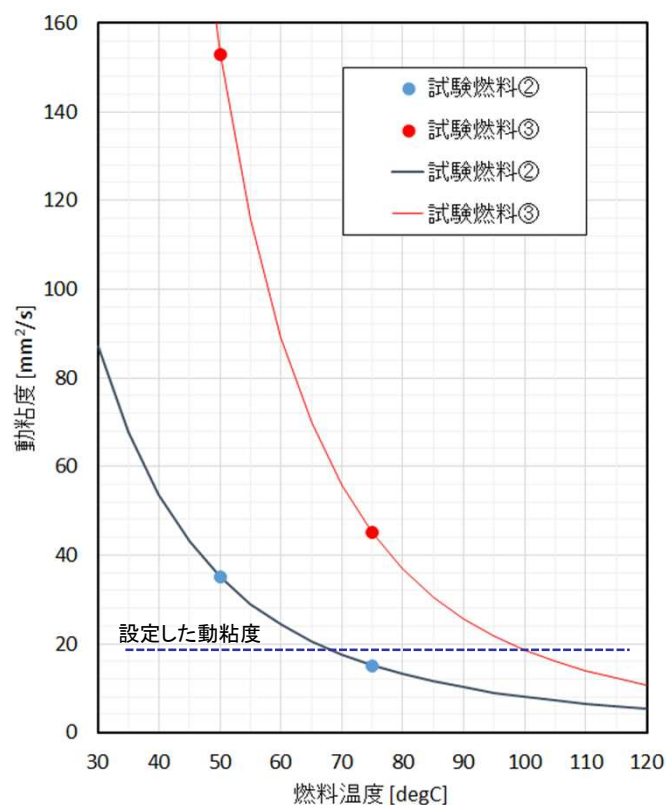
- 負荷率50%以上の範囲において、試験燃料①のスート濃度およびスモーク濃度は試験燃料③とほぼ同じ／問題ないレベルである。
- スート濃度およびスモーク濃度は、冬季の方が低い。

6.2 新潟原動機6L19HXの試験結果(試験燃料②, ③)

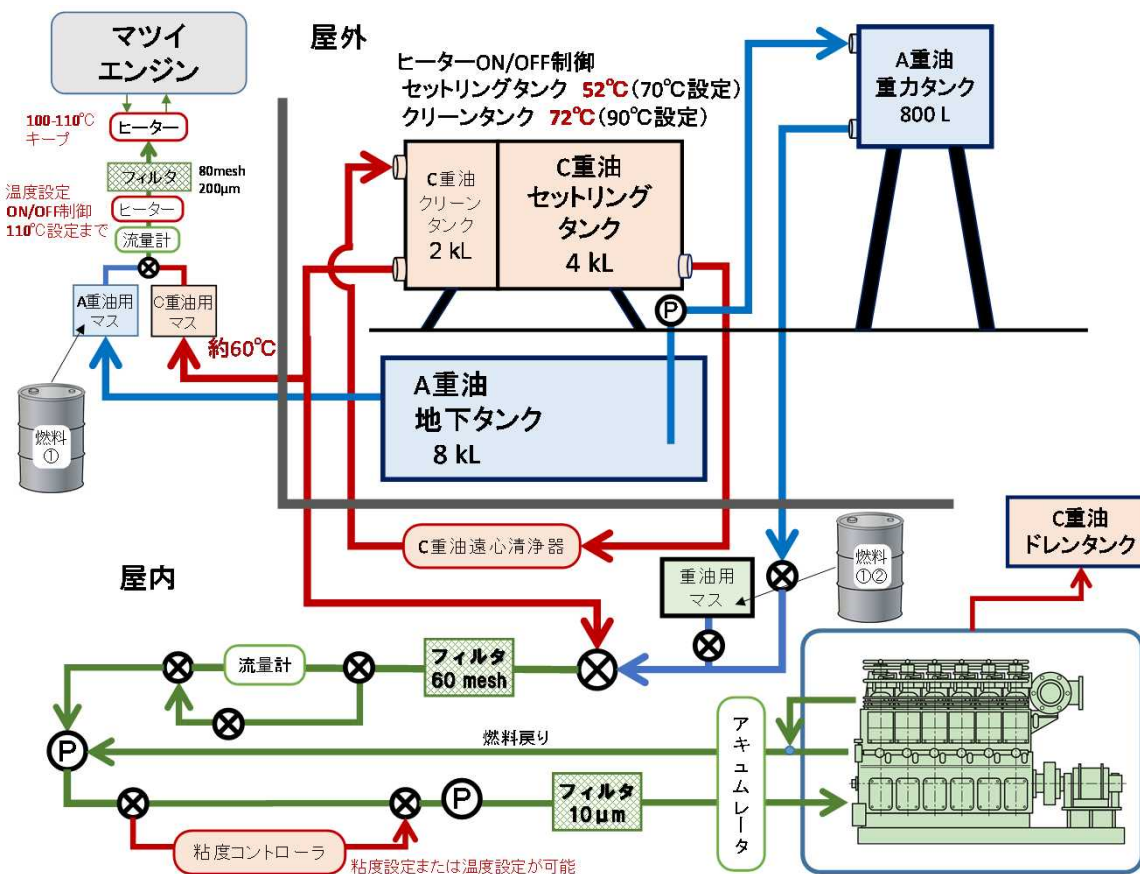
VG-17

(1) 試験方法の概要

- 燃料温度と動粘度の関係から、使用可能な動粘度レベルになるように粘度コントロールを行った。
- 本燃焼試験では、動粘度を約18mm²/sにコントロールした。



燃料温度に対する動粘度

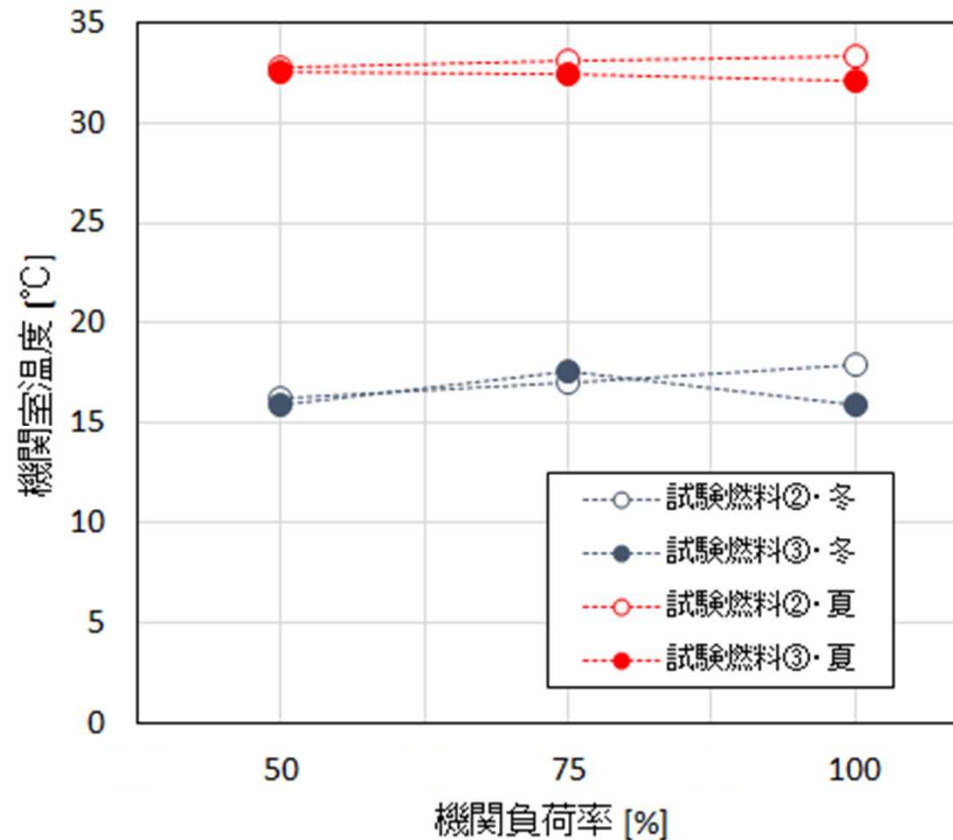


試験設備の概要

6.2 新潟原動機6L19HXの試験結果(試験燃料②, ③)

VG-18

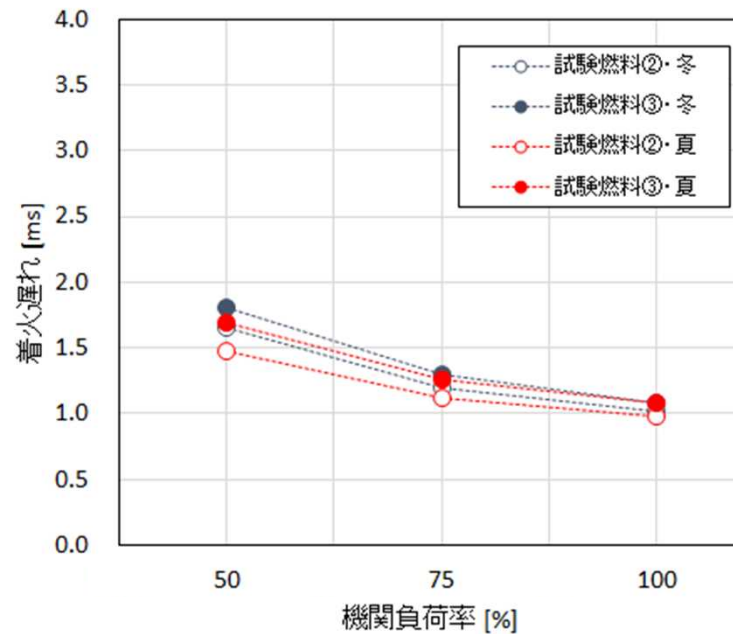
(2) 機関室温度(夏期・冬期)



- 機関室温度(試験エンジンが設置された防音壁内の温度)は冬季の方が15~20°C程度低い。

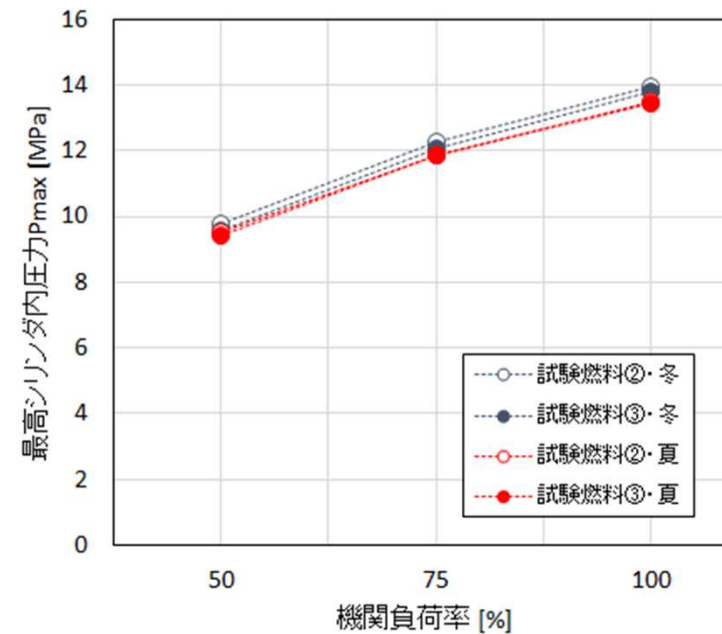
機関室温度

(3) 着火遅れ・最高シリンダ内圧力



(a) 着火遅れ

- 夏季・冬季ともに, 試験燃料②の着火遅れは試験燃料③とほぼ同じである。



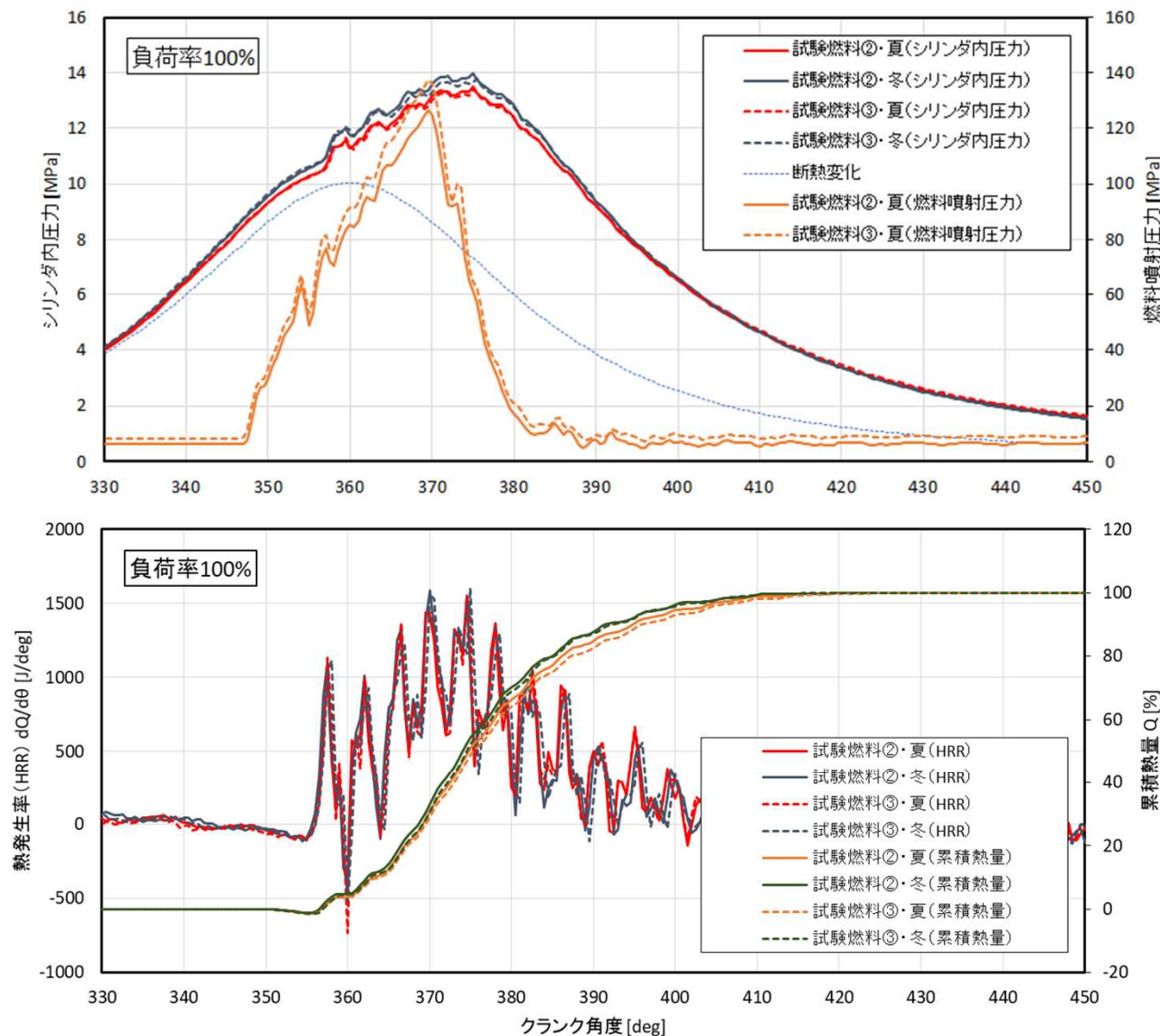
(b) 最高シリンダ内圧力Pmax

- 夏季・冬季ともに, 試験燃料②の最高シリンダ内圧力は試験燃料③とほぼ同じである。

6.2 新潟原動機6L19HXの試験結果(試験燃料②, ③)

VG-20

(4) 圧力波形および熱発生率(負荷率100%)



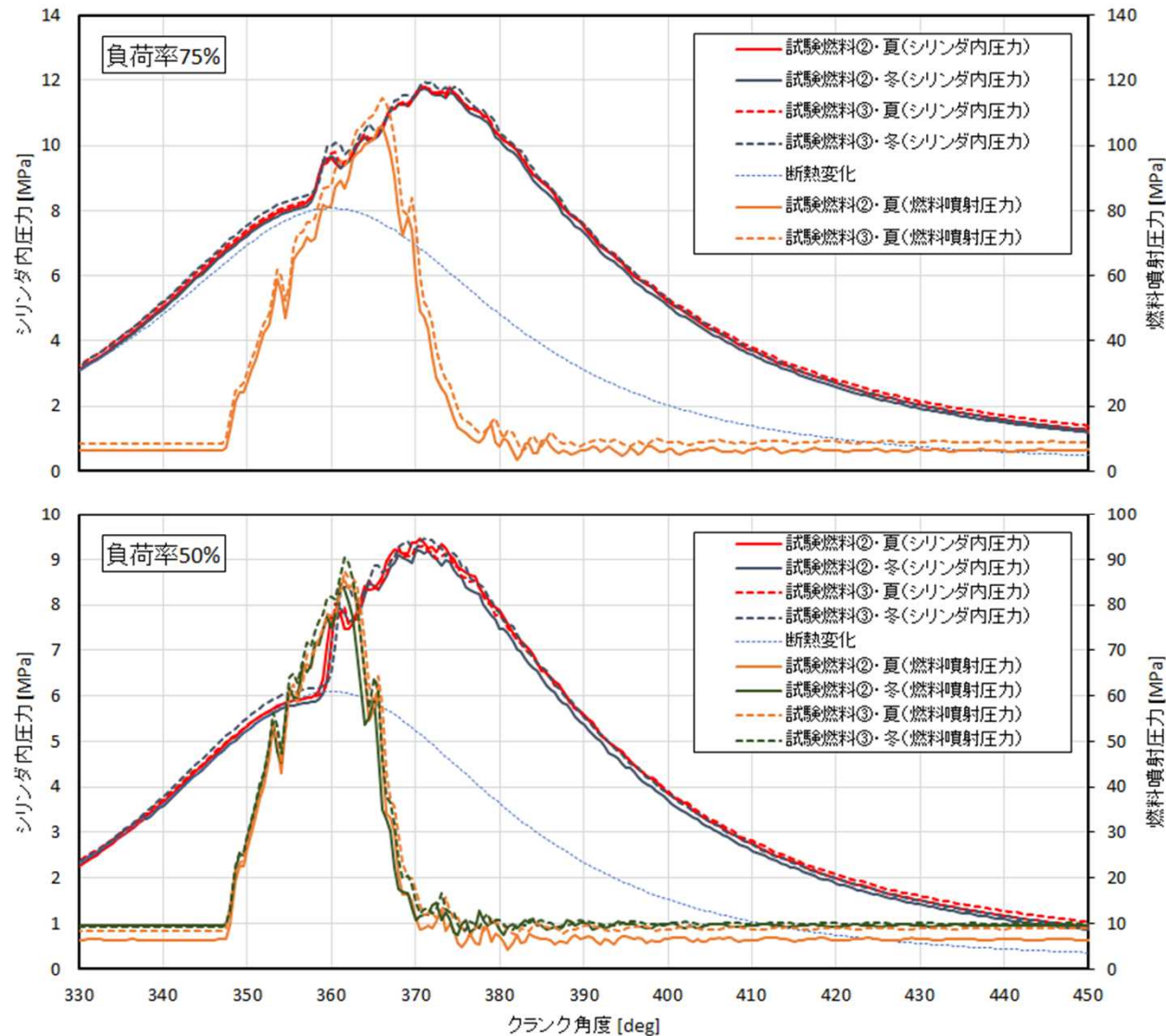
➤ 夏季・冬季ともに、負荷率100%における試験燃料②と試験燃料③の圧力波形はほぼ重なっている。

➤ 負荷率100%における熱発生率および累積熱量(燃焼期間に相当)は、燃料種の影響をほとんど受けていない。

6.2 新潟原動機6L19HXの試験結果(試験燃料②, ③)

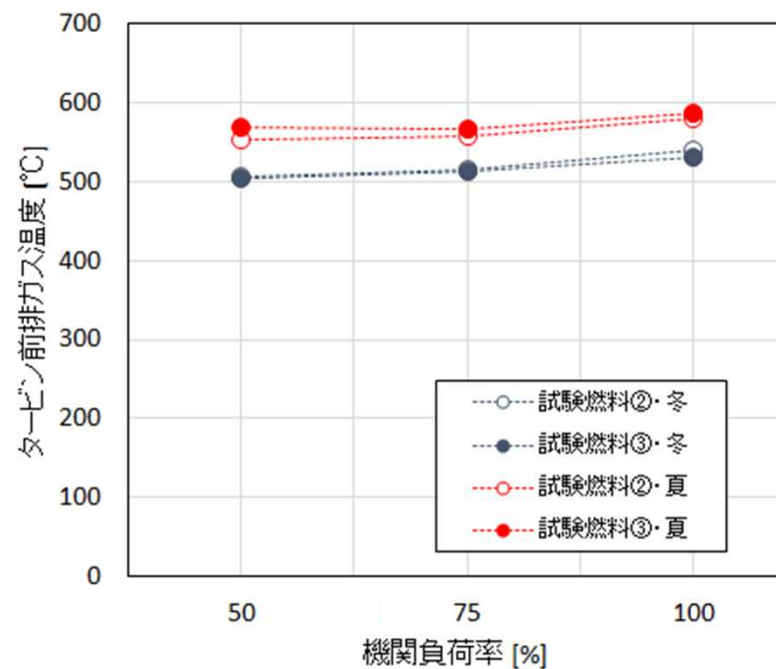
VG-21

(5) 圧力波形および熱発生率(負荷率75%, 50%)

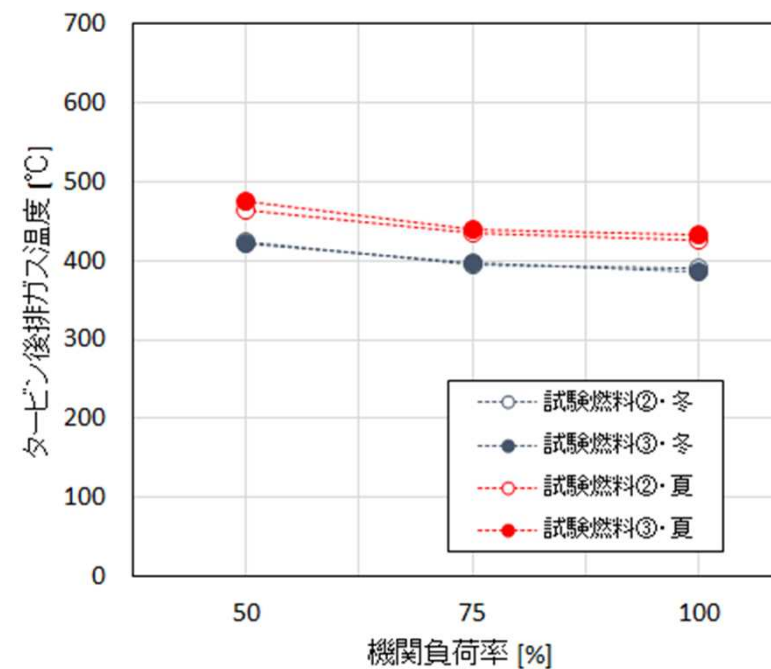


- 負荷率50%, 75%もほぼ同様の結果が得られており, 圧力波形や熱発生率は燃料種の影響をほとんど受けていない。

(7) 排ガス温度



(a) タービン前排ガス温度



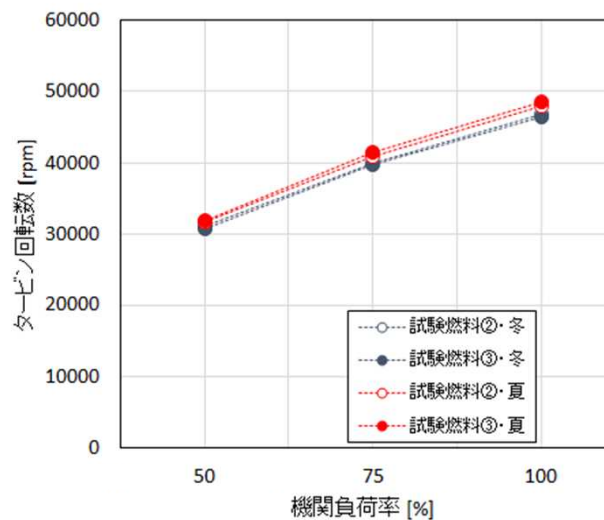
(b) タービン後排ガス温度

- 夏季・冬季ともに、タービン前後排ガス温度は、燃料の影響をほとんど受けていない。
- タービン前後排ガス温度は冬季の方が50～60℃程度低い。

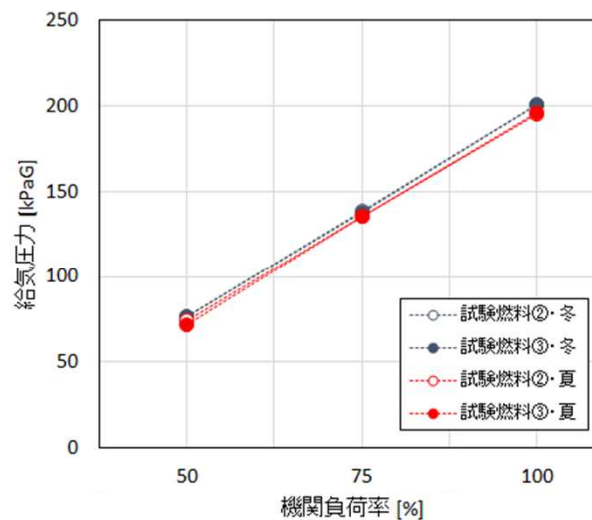
6.2 新潟原動機6L19HXの試験結果(試験燃料②, ③)

VG-23

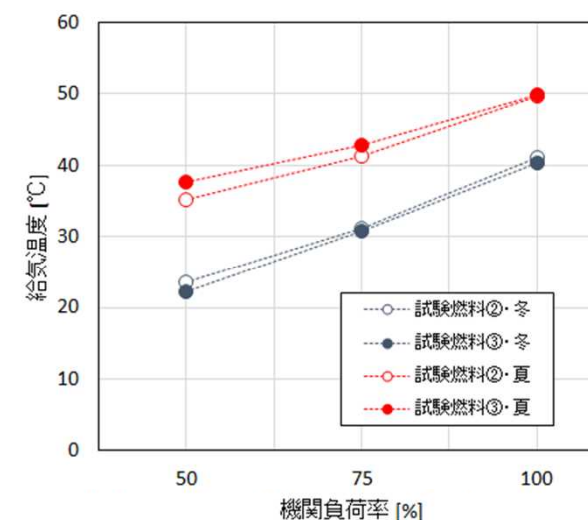
(8) 過給機特性



(a) タービン回転数



(b) 給気圧力



(c) 給気温度

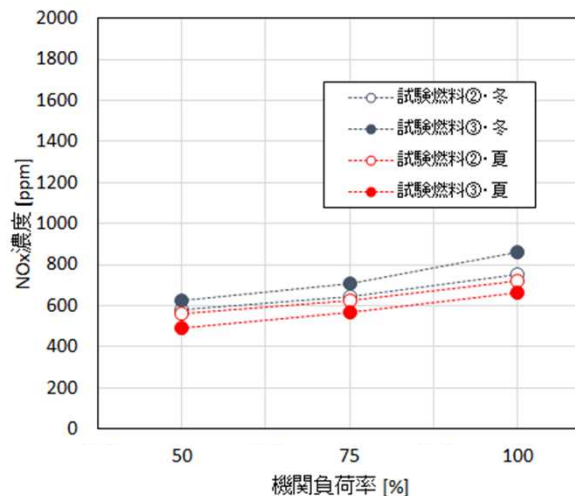
- 夏季・冬季ともに、タービン回転数や給気圧力は、燃料種の影響をほとんど受けていない。
- 冬季のタービン回転数がわずかに低い。

- 給気温度は冬季の方が10～15℃程度低い。

6.2 新潟原動機6L19HXの試験結果(試験燃料②, ③)

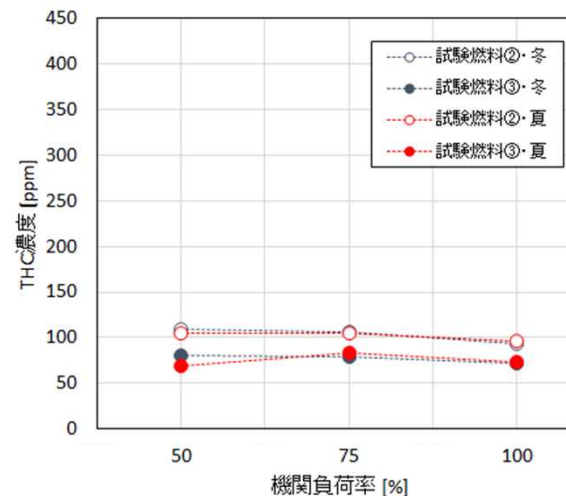
VG-24

(9) 排ガス性状



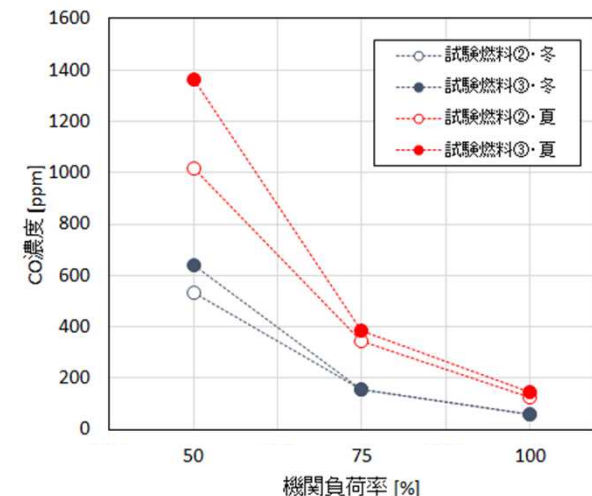
(a) NOx濃度

- 夏季・冬季ともに、試験燃料②のNOx濃度は試験燃料③とほぼ同じレベルである。



(b) THC濃度

- 夏季・冬季ともに、試験燃料②のTHC濃度は試験燃料③とほぼ同じレベルである。



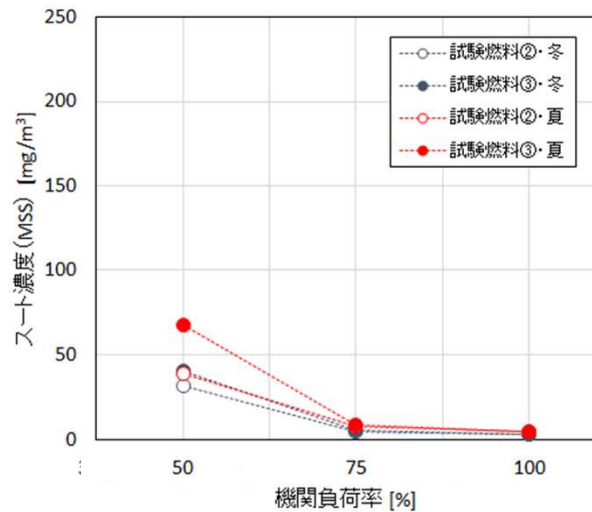
(c) CO濃度

- 冬季のCO濃度は夏期よりも低い。

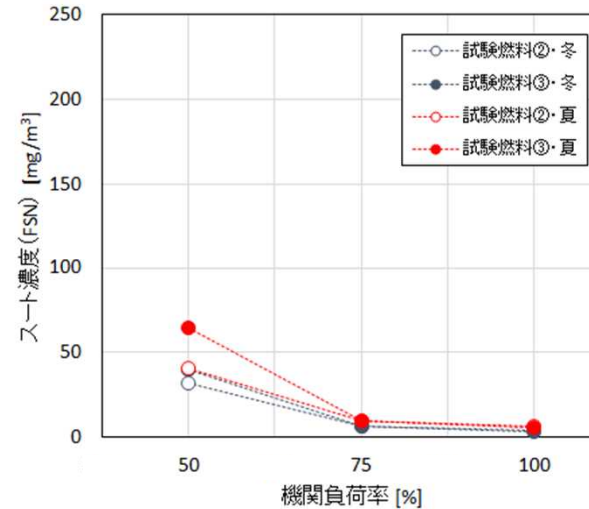
6.2 新潟原動機6L19HXの試験結果(試験燃料②, ③)

VG-25

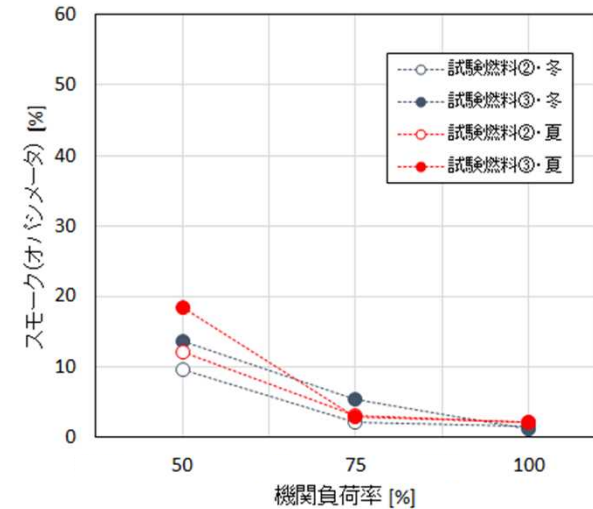
(10) 排ガス性状



(a) スート濃度 (MSS)



(b) スート濃度 (FSN)



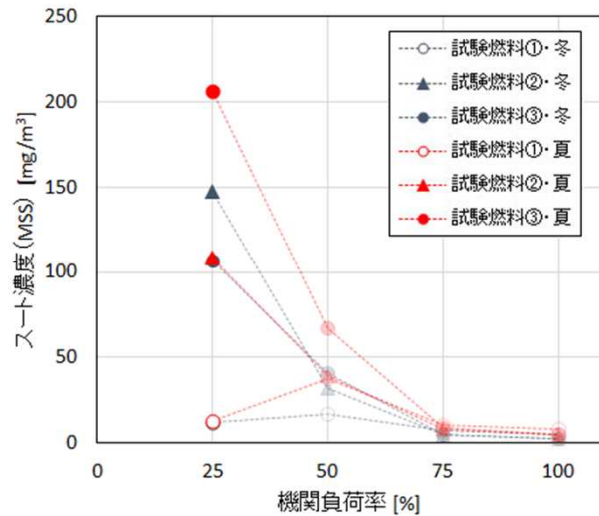
(c) スモーク濃度

- 負荷率50%以上の範囲において、試験燃料②のスート濃度およびスモーク濃度は試験燃料③とほぼ同じ／問題ないレベルである。

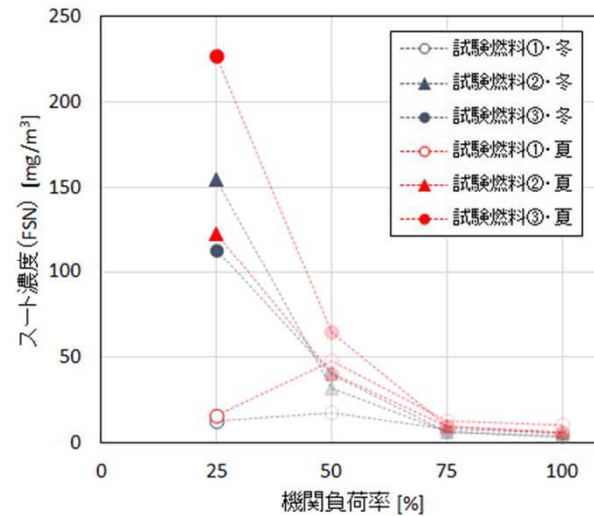
6.3 各種燃料使用時の注意点

VG-26

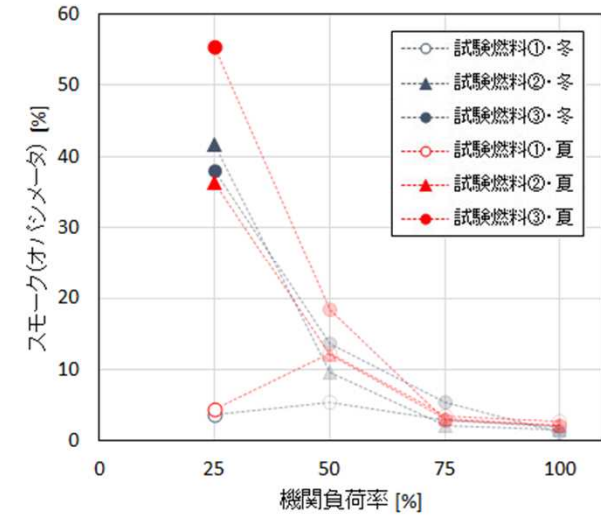
(1) スートおよびスモーク(新潟原動機6L19HX, 試験燃料①, ②, ③)



(a) スート濃度(MSS)



(b) スート濃度(FSN)



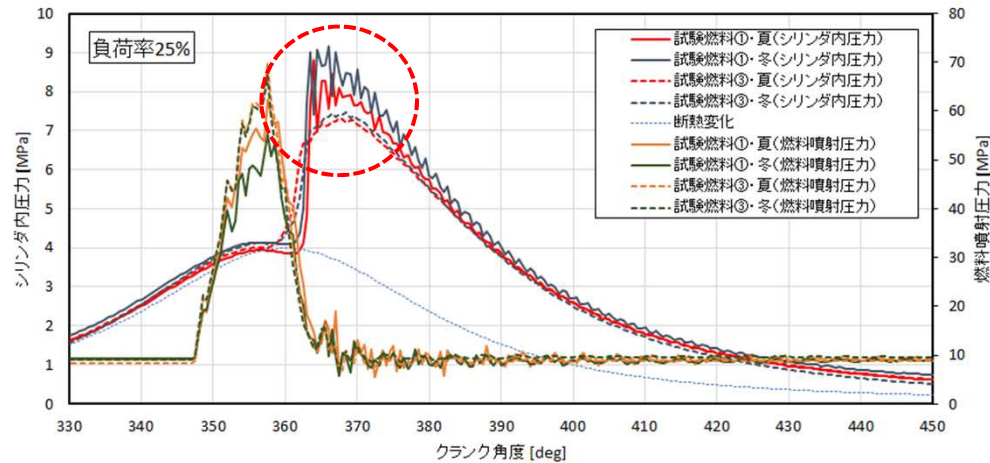
(c) スモーク濃度

- 試験燃料①の負荷率25%におけるスート濃度およびスモーク濃度は試験燃料③と比べて低い。
- 負荷率25%におけるスート濃度は試験燃料②・試験燃料③ともに高まる傾向があり, 注意が必要である。

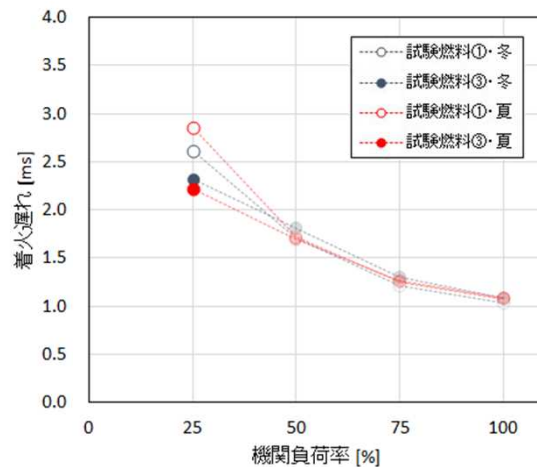
6.3 各種燃料使用時の注意点

VG-27

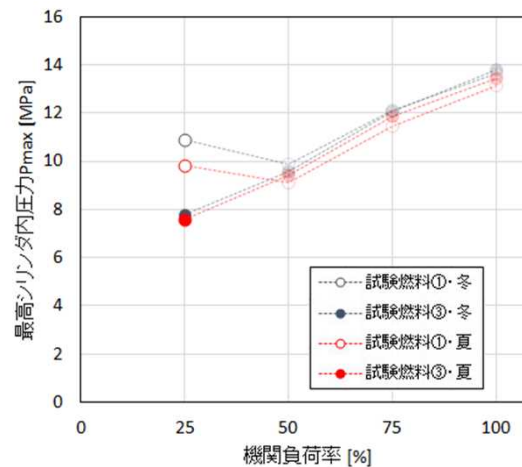
(2) 着火遅れ・最高シリンダ内圧力(新潟原動機6L19HX, 試験燃料①, ③)



(a) 圧力波形



(b) 着火遅れ



(c) 最高シリンダ内圧力Pmax

- 負荷率25%における試験燃料①と試験燃料③の圧力波形は大きく異なる。
- 負荷率25%における試験燃料①の最高シリンダ内圧力は高く、変化率が大い。(ディーゼルノックの現象が現れている。)
- 夏季・冬季ともに同様の傾向がみられる。

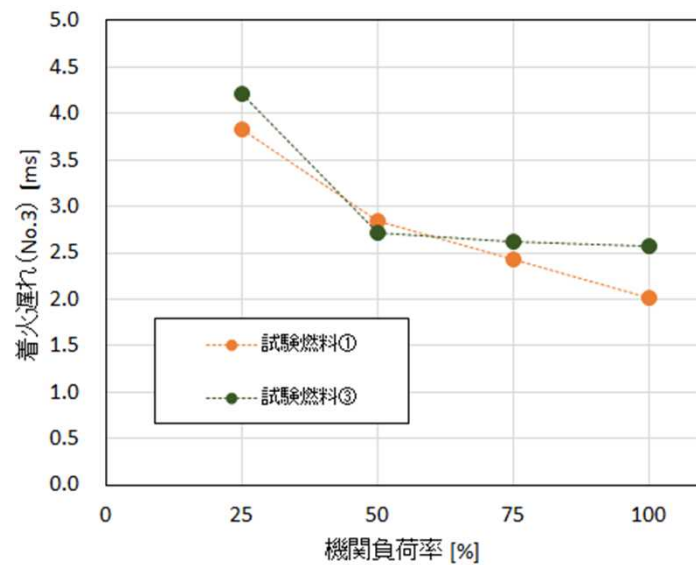
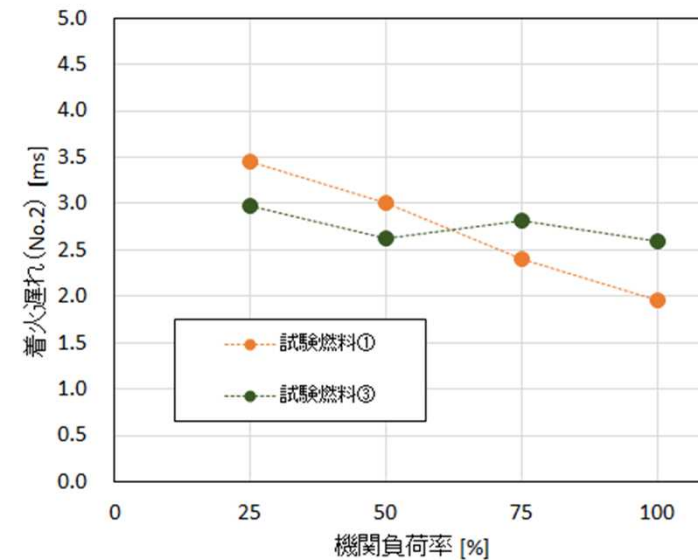
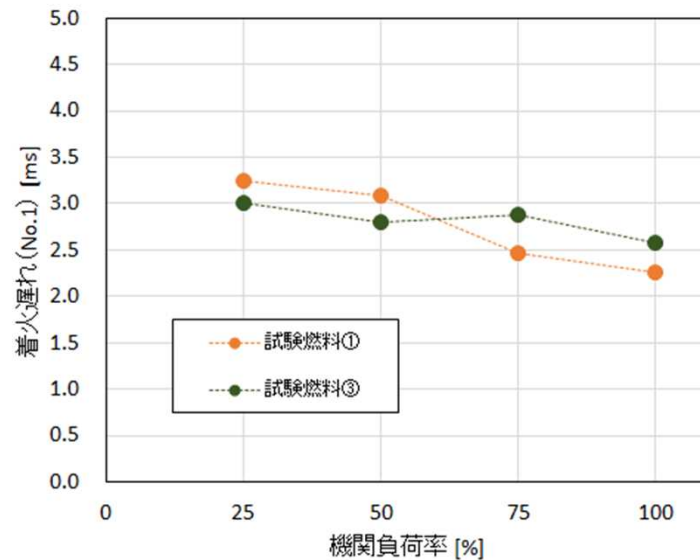
- 夏季・冬季ともに、負荷率25%における試験燃料①の着火遅れは試験燃料③よりもやや大きい。
- 夏季・冬季ともに、負荷率25%における試験燃料①の最高シリンダ内圧力はやや高い(圧力波形参照)。

これら以外の負荷率25%における計測結果は燃料の違いの影響をほとんど受けていない。

6.4 マツイMU323DGSCの試験結果(試験燃料①, ③)

VG-28

(1) 着火遅れ

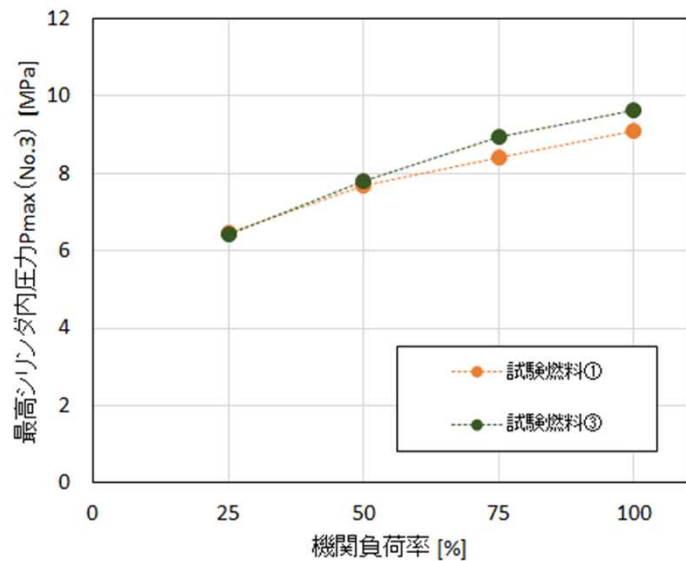
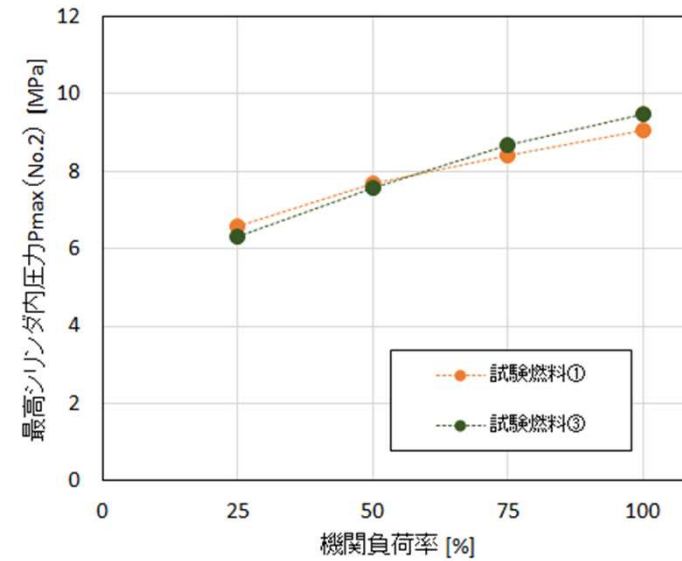
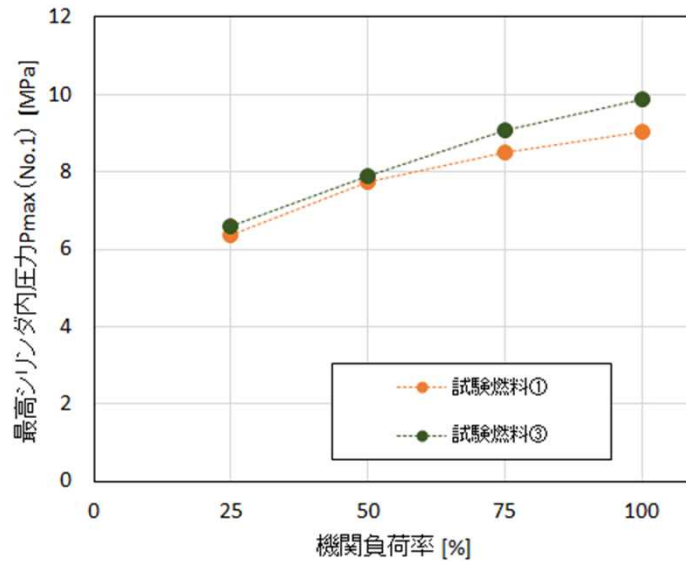


- すべての負荷域において、試験燃料①の着火遅れは試験燃料③と同程度である。

6.4 マツイMU323DGSCの試験結果(試験燃料①, ③)

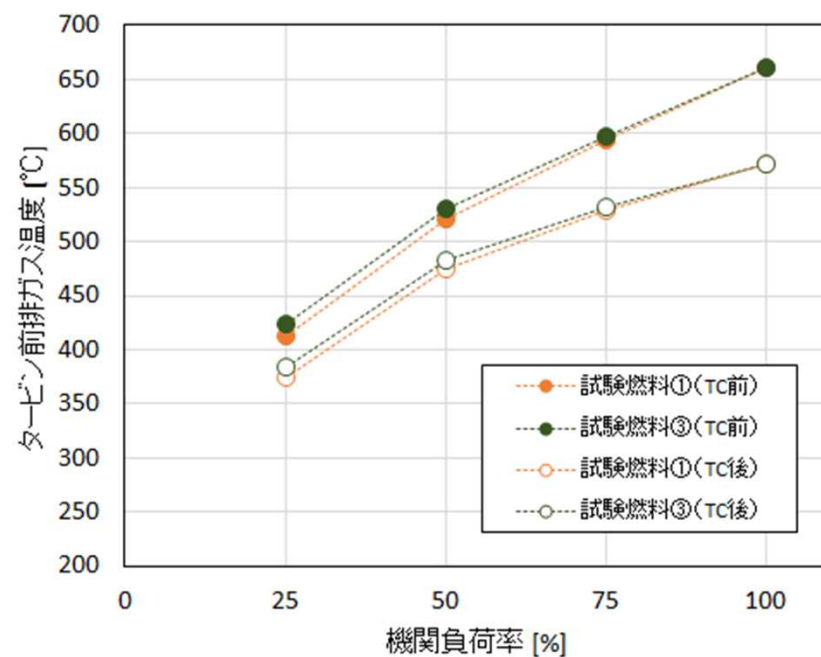
VG-29

(2) 最高シリンダ内圧力

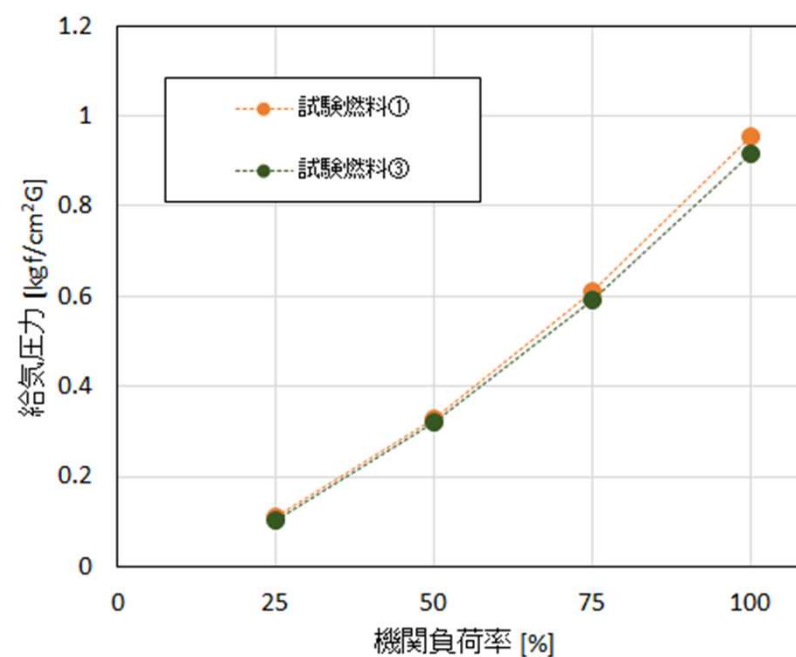


- 試験燃料①の最高シリンダ内圧力は試験燃料③と同程度である。

(3) 排ガス温度・過給機特性



(a) タービン前後排ガス温度



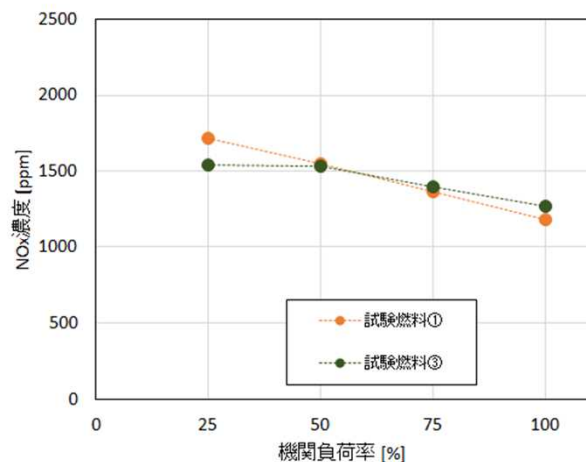
(b) 給気圧力

- タービン前後排ガス温度および給気圧力は、燃料の影響をほとんど受けないことを確認した。

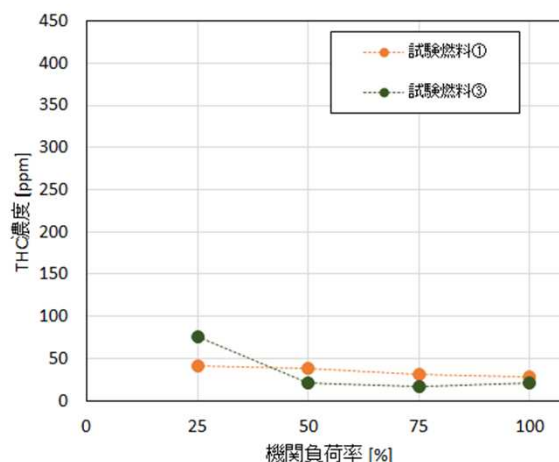
6.4 マツイMU323DGSCの試験結果(試験燃料①, ③)

VG-31

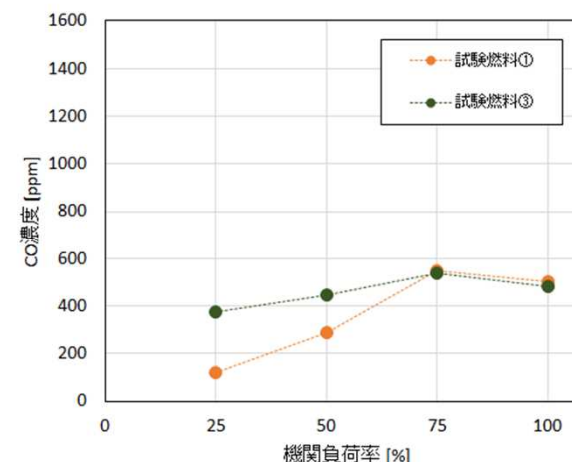
(4) 排ガス性状



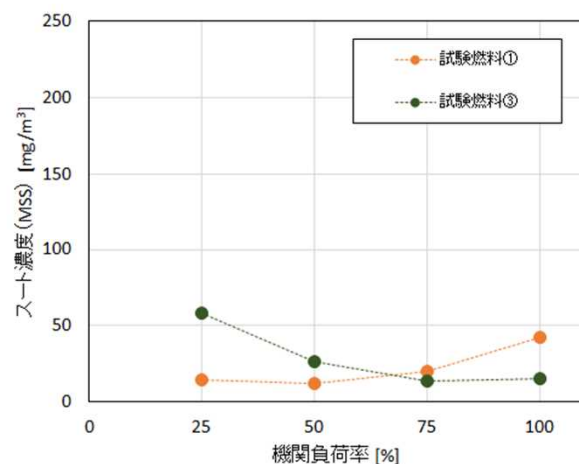
(a) NOx濃度



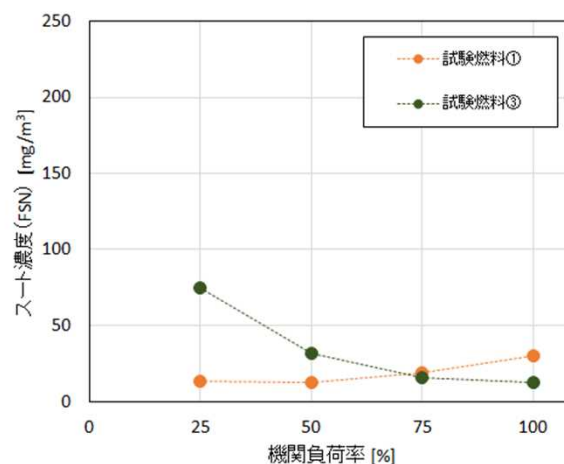
(b) THC濃度



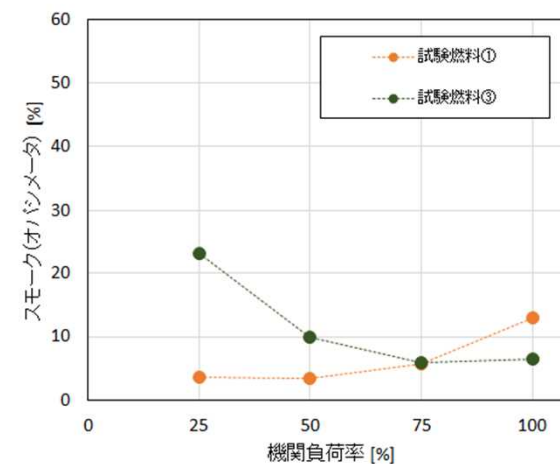
(c) CO濃度



(d) ストート濃度 (MSS)



(e) ストート濃度 (FSN)



(f) スモーク濃度

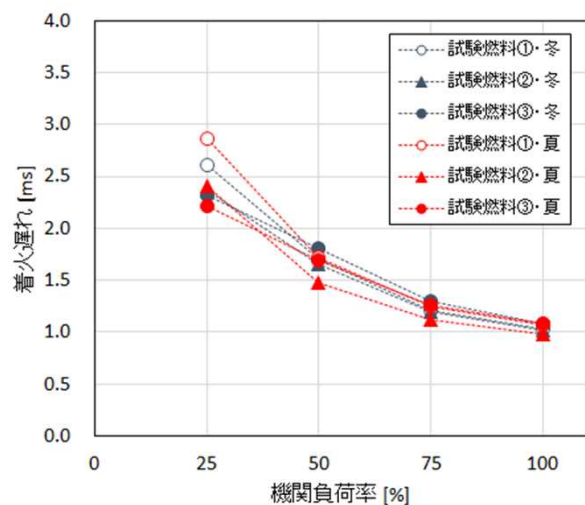
- 負荷率50%以上の範囲において、試験燃料①の排ガスは試験燃料③とほぼ同じ／問題ないレベルである。
- 試験燃料①の負荷率25%におけるストート濃度およびTHC濃度は試験燃料③と比べて低い。

- 試験燃料①から③について、2つの4ストロークディーゼルエンジンによる夏季・冬季の燃焼試験を実施した結果は以下の通りである。
 - a. 試験燃料①による燃焼試験において、負荷率が50%以上の範囲（航海中の主な負荷率）では概ね試験燃料③（基準燃料）と同等な結果が得られており、燃料による燃焼状態の違いは小さかった。
 - b. 試験燃料②による燃焼試験において、燃料を適切に加熱することで、概ね試験燃料③（基準燃料）と同等な結果が得られており、燃料による燃焼状態の違いは小さかった。
- 以上のことから、試験燃料①及び②は従来のC重油と同様に使用できると考えられる。ただし、従来のC重油と同様、起動時や低負荷時の運転には注意が必要である。

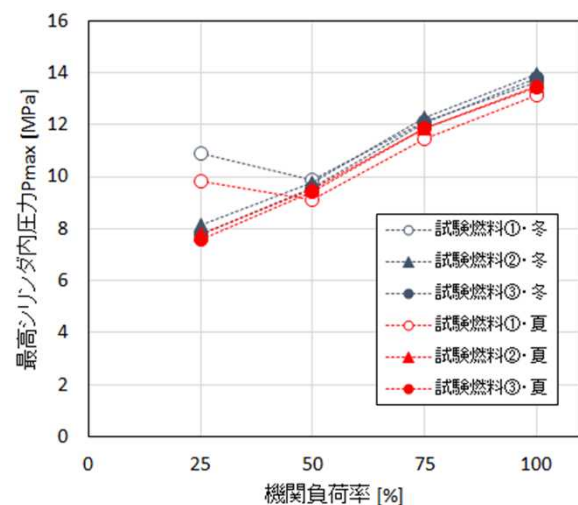
注) 従来のC重油で注意が必要な負荷率が50%未満の範囲では、エンジンによっては、試験燃料①、試験燃料②、試験燃料③ともに注意すべき事象が見られた（燃焼開始時のシリンダ圧力変化及びスートやTHC（未燃燃料分）などの排ガス性状）。

【参考資料】新潟原動機6L19HXの試験結果

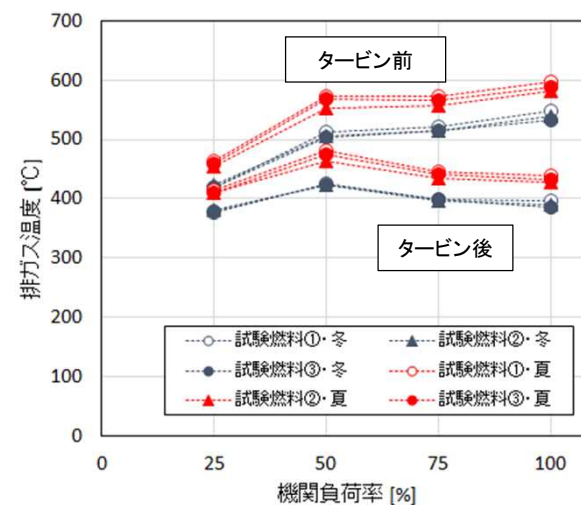
VG-33



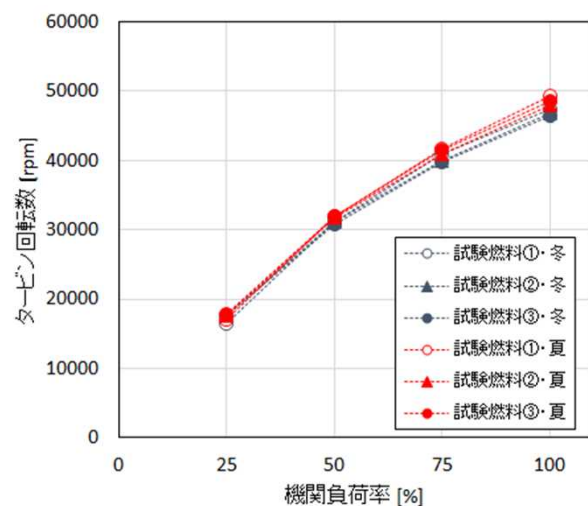
(a) 着火遅れ



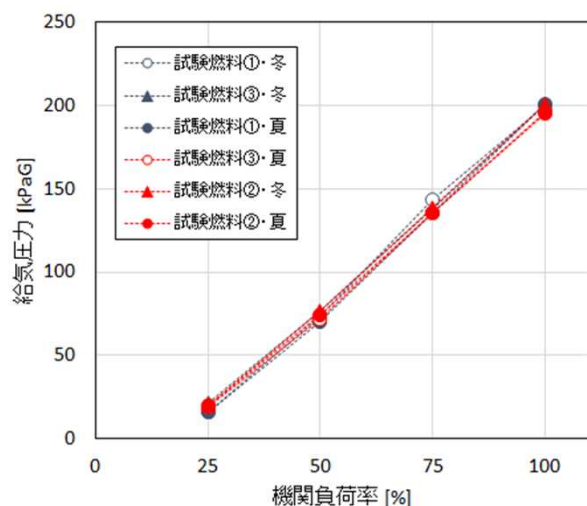
(b) 最高シリンダ内圧Pmax



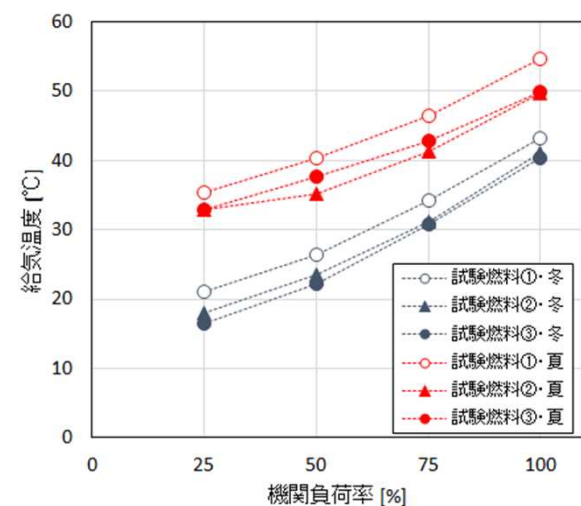
(c) 排ガス温度



(d) タービン回転数



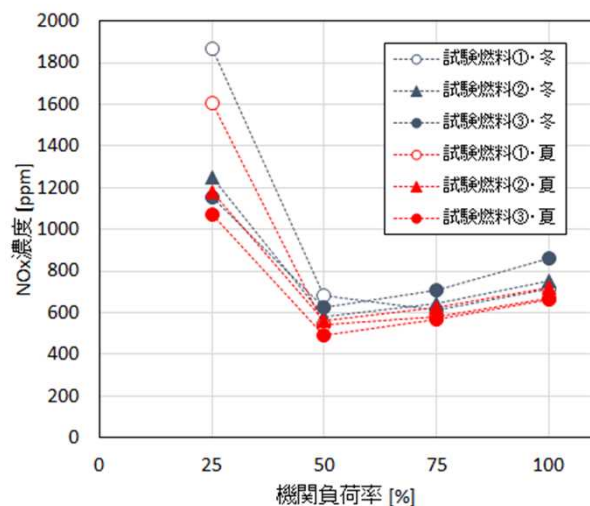
(e) 給気圧力



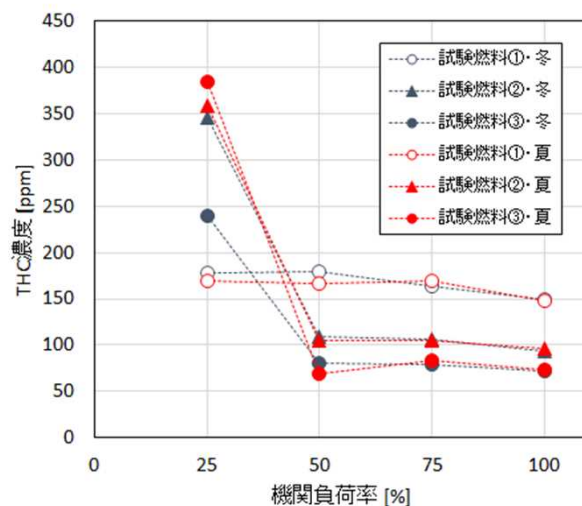
(f) 給気温度

【参考資料】新潟原動機6L19HXの試験結果

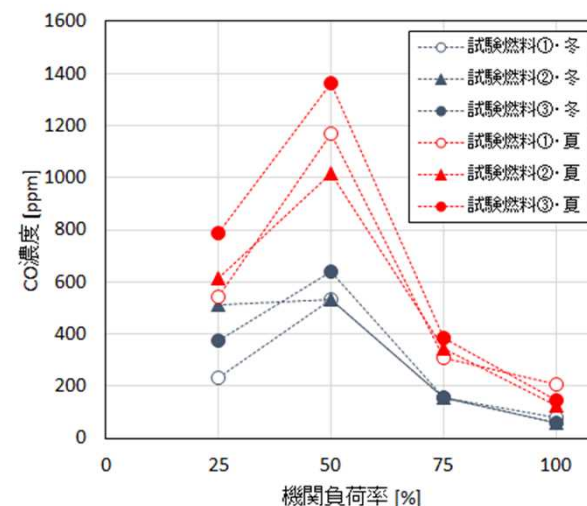
VG-34



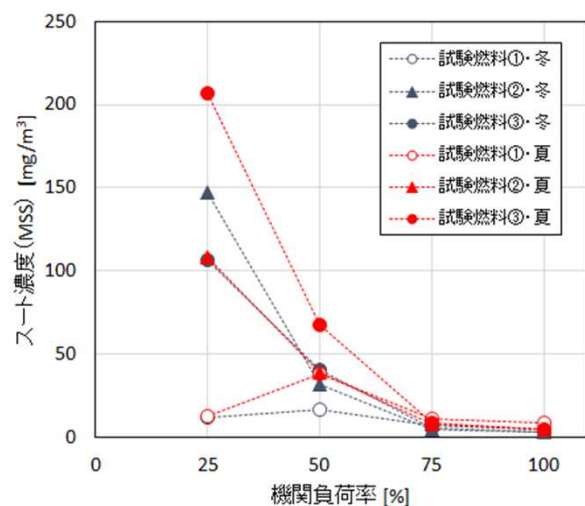
(a) NOx濃度



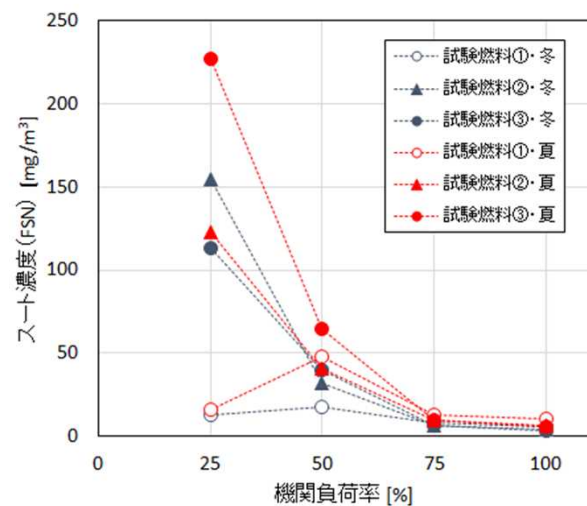
(b) THC濃度



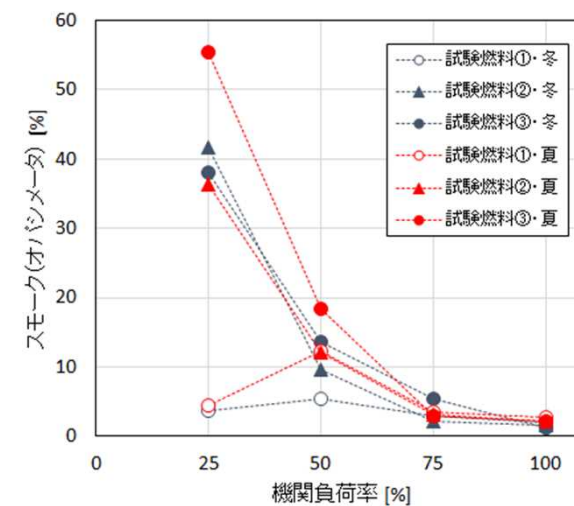
(c) CO濃度



(d) スート濃度 (MSS)



(e) スート濃度 (FSN)



(f) スモーク濃度