

SO_x規制強化後燃料トラブルの調査と情報発信

SOx規制強化に伴い多くなった2つのトラブル
について調査内容とトラブル影響軽減の対策を紹介。

どんなトラブル？

スラッジ異常発生



清浄機に蓄積した粘土状のスラッジ



ストレーナーに詰まったスラッジ

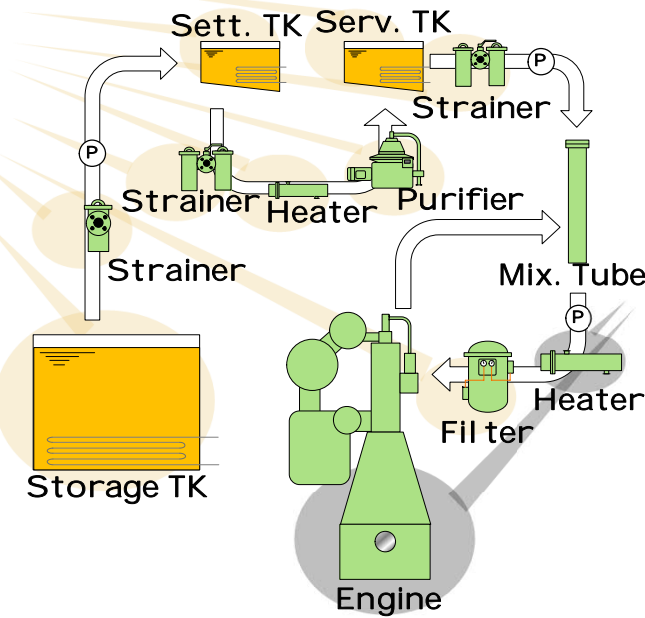


閉塞したスラッジ配管



廃棄されたライナー

一般的な燃料フロー



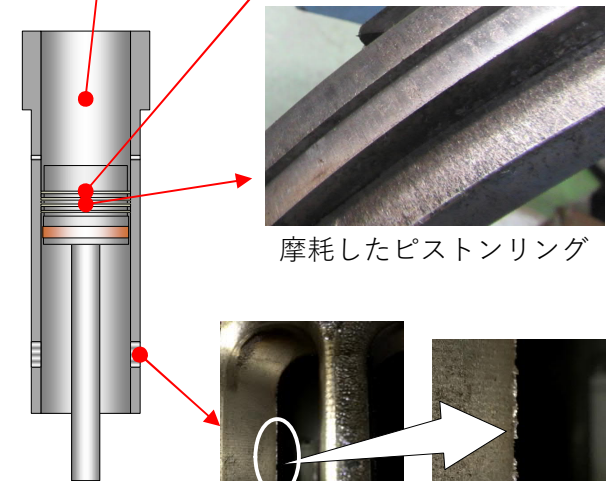
2サイクルエンジンの リング・ライナ異常摩耗



許容限まで摩耗した
シリンダライナ



リングランド部に蓄積
したデポジット



摩耗したピストンリング

シリンダライナ摩耗により発
生した 掃気ポートのバリ

- 約5,000件のVLSFO性状データから要因を推測
- トラブル影響を抑える対策を整理

〔なお、スラッジトラブルが報告された検査記録はほぼ無く、すべての情報は船社から寄せられたもの〕

VLSFO性状傾向

● VLSFOのプライベート分析結果を収集

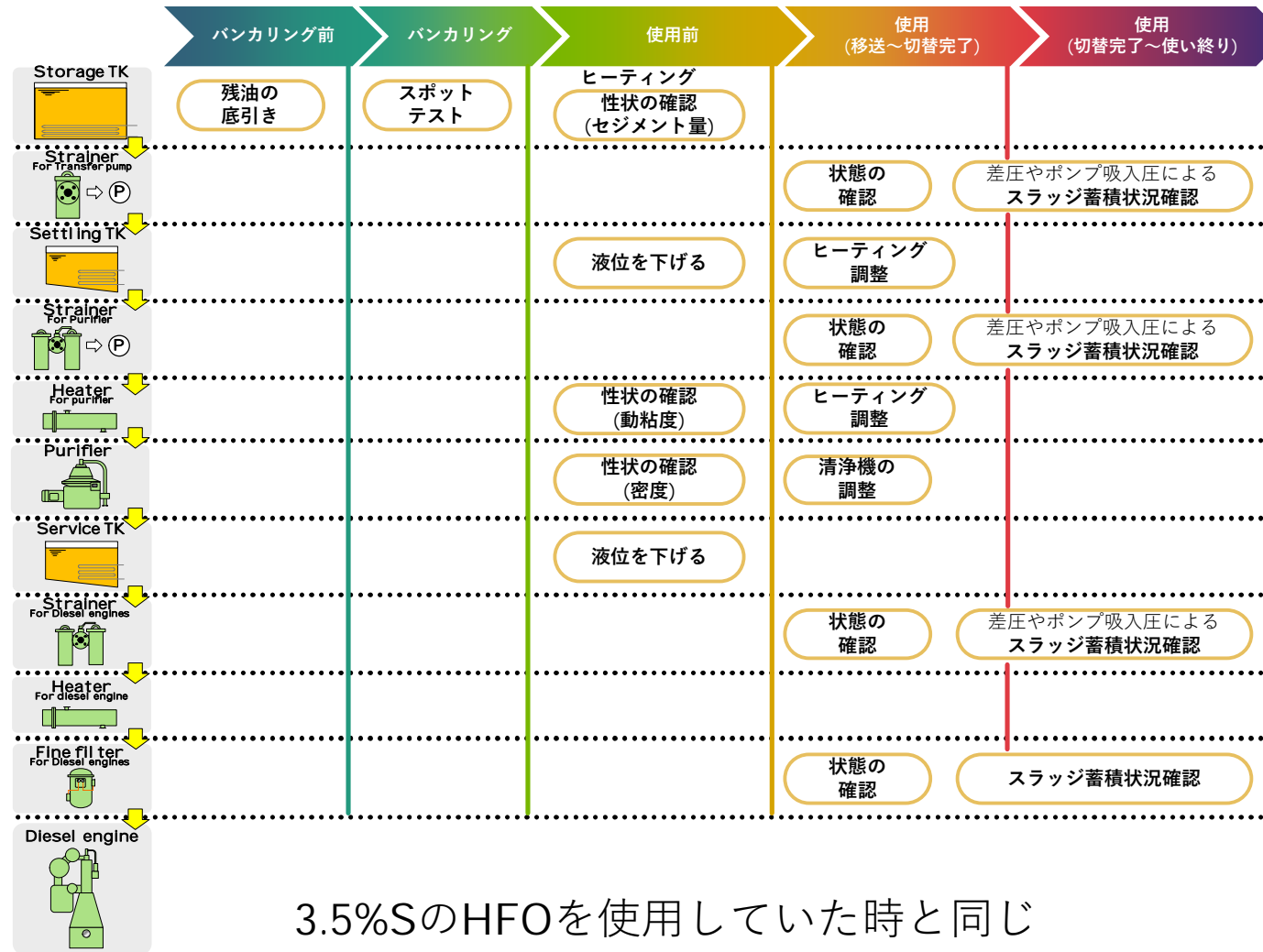
平均値		Average										
最小値	—	最大値	動粘度		流動点	Min. - Max.						
			Sulfur(mass%)	Density(kg/m ³)	Viscosity(cSt)	Pour Point(°C)	Al+Si(ppm)	MCR(mass%)	Ash(mass%)	TSP(mass%)	CCAI	
			Statutory requirements	991	380/700	30	60	18	0.1	0.1	870	
			ISO8217(2017) RMG380/700									
			Japan	930	38	5	9	2.8	0.01	0.01	821	
			(666 caces)	0.2 - 0.5	904 - 955	3 - 141	-35 - 24	1 - 50	0.4 - 16	0 - 0.1	0 - 0.1	800 - 860
			Korea	929	105	14	12	4.2	0.01	0.014	807	
			(335 caces)	0.2 - 0.5	895 - 982	6 - 383	-40 - 30	0 - 54	1 - 17	0 - 0.1	0 - 0.1	782 - 878
			China	944	133	16	25	6	0.03	0.017	819	
			(468 caces)	0.3 - 0.5	880 - 987	7 - 356	-6 - 30	1 - 69	0.1 - 12	0 - 0.1	0 - 0.2	793 - 865
			Singapore	944	110	14	27	5.6	0.03	0.021	821	
			(890 caces)	0.2 - 0.6	875 - 984	9 - 359	-30 - 36	1 - 122	0.1 - 14	0 - 0.3	0 - 0.3	783 - 865
			Others of East Asia	916	86	17	20	5.6	0.02	0.019	804	
			(678 caces)	0.3 - 0.5	868 - 979	3 - 493	0 - 30	1 - 58	0 - 15	0 - 0.1	0 - 0.2	774 - 866
			Middle East	929	173	22	19	6.5	0.03	0.014	801	
			(191 caces)	0.4 - 0.5	889 - 961	14 - 374	0 - 30	1 - 119	2 - 10	0 - 0.1	0 - 0.1	786 - 914
			Europe	950	146	8	19	6.7	0.02	0.024	827	
			(301 caces)	0.4 - 0.6	876 - ##	7 - 501	-42 - 36	1 - 214	0.7 - 15	0 - 0.2	0 - 0.4	784 - 888
			Africa	939	90	8	13	6.9	0.02	0.018	823	
			(64 caces)	0.4 - 0.5	901 - 986	15 - 307	-18 - 30	0 - 57	2.7 - 11	0 - 0.1	0 - 0.1	789 - 871
			North America (East)	945	82	6	26	5.9	0.02	0.024	831	
			(72 caces)	0.3 - 0.6	887 - 987	6 - 325	-12 - 27	2 - 95	1 - 13	0 - 0.1	0 - 0.2	791 - 868
			US Gulf	939	89	11	19	4.8	0.02	0.03	824	
			(53 caces)	0.1 - 0.6	855 - 989	5 - 321	-9 - 30	0 - 51	0.2 - 9.9	0 - 0.1	0 - 0.2	766 - 865
			North America (West)	945	84	2	22	4.9	0.02	0.014	837	
			(119 caces)	0.4 - 0.5	874 - 990	3 - 382	-12 - 33	1 - 56	1.5 - 13	0 - 0.1	0 - 0.2	770 - 870
			South America*	932	91	8	19	4.8	0.02	0.031	816	
			(232 caces)	0.2 - 0.5	878 - 971	5 - 366	-12 - 33	1 - 65	0.2 - 13	0 - 0.1	0 - 0.4	795 - 854
			*including Panama									
			Sludge Trouble* (20 caces)	0.46	938	77	10	28	4.7	0.03	0.044	824
			*all areas	0.3 - 0.5	876 - 980	7 - 290	-6 - 30	1 - 56	0.7 - 13	0 - 0.1	0 - 0.1	788 - 861

(These data were based on results of private analysis supplied by ClassNK customers)

- 性状（特に動粘度）のバラつきが大きい ⇒ 燃料の混合に注意（アスファレンスラッジ 発生の可能性）
- 流動点高い ⇒ 燃料加熱に注意（ワックスラッジ 発生の可能性）

スラッジトラブルへの対策 ClassNK

スラッジの発生量を減らす対応は、**混合をできる限り避け、適切な温度に加熱すること**と、**こまめなチェック**によりスラッジ発生 of 早期察知。



3.5%SのHFOを使用していた時と同じ

- 約5,000件のVLSFO性状データから要因を推測
- 検査データに基づくトラブル傾向の調査
- 損傷品調査
- 運航記録調査
- トラブルシナリオの推定
- トラブル影響を抑える対策を整理

VLSFO性状傾向

平均値

● VLSFOのプライベート分析結果を収集

最小値	-	最大値	動粘度				Average		着火性指標			
			Sulfur(mass%)	Density(kg/m ³)	Viscosity(cSt)	Pour Point(°C)	Min.	Max.	Al+Si(ppm)	MCR(mass%)	Ash(mass%)	TSP(mass%)
			Statutory requirements	991	380/700	30		60	18	0.1	0.1	870
Japan			0.36	930	38	5	9	2.8	0.01	0.01	821	
(666 caces)	0.2 - 0.5	904 - 955	3 - 141	-35 - 24	1 - 50	0.4 - 16	0 - 0.1	0 - 0.1	800 - 860			
Korea			0.44	929	105	14	12	4.2	0.01	0.014	807	
(335 caces)	0.2 - 0.5	895 - 982	6 - 383	-40 - 30	0 - 54	1 - 17	0 - 0.1	0 - 0.1	782 - 878			
China			0.44	944	133	16	25	6	0.03	0.017	819	
(468 caces)	0.3 - 0.5	880 - 987	7 - 356	-6 - 30	1 - 69	0.1 - 12	0 - 0.1	0 - 0.2	793 - 865			
Singapore			0.47	944	110	14	27	5.6	0.03	0.021	821	
(890 caces)	0.2 - 0.6	875 - 984	9 - 359	-30 - 36	1 - 122	0.1 - 14	0 - 0.3	0 - 0.3	783 - 865			
Others of East Asia			0.43	916	86	17	20	5.6	0.02	0.019	804	
(678 caces)	0.3 - 0.5	868 - 979	3 - 493	0 - 30	1 - 58	0 - 15	0 - 0.1	0 - 0.2	774 - 866			
Middle East			0.46	929	173	22	19	6.5	0.03	0.014	801	
(191 caces)	0.4 - 0.5	889 - 961	14 - 374	0 - 30	1 - 119	2 - 10	0 - 0.1	0 - 0.1	786 - 914			
Europe			0.48	950	146	8	19	6.7	0.02	0.024	827	
(301 caces)	0.4 - 0.6	876 - ##	7 - 501	-42 - 36	1 - 214	0.7 - 15	0 - 0.2	0 - 0.4	784 - 888			
Africa			0.46	939	90	8	13	6.9	0.02	0.018	823	
(64 caces)	0.4 - 0.5	901 - 986	15 - 307	-18 - 30	0 - 57	2.7 - 11	0 - 0.1	0 - 0.1	789 - 871			
North America (East)			0.49	945	82	6	26	5.9	0.02	0.024	831	
(72 caces)	0.3 - 0.6	887 - 987	6 - 325	-12 - 27	2 - 95	1 - 13	0 - 0.1	0 - 0.2	791 - 868			
US Gulf			0.45	939	89	11	19	4.8	0.02	0.03	824	
(53 caces)	0.1 - 0.6	855 - 989	5 - 321	-9 - 30	0 - 51	0.2 - 9.9	0 - 0.1	0 - 0.2	766 - 865			
North America (West)			0.46	945	84	2	22	4.9	0.02	0.014	837	
(119 caces)	0.4 - 0.5	874 - 990	3 - 382	-12 - 33	1 - 56	1.5 - 13	0 - 0.1	0 - 0.2	770 - 870			
South America*			0.46	932	91	8	19	4.8	0.02	0.031	816	
(232 caces)	0.2 - 0.5	878 - 971	5 - 366	-12 - 33	1 - 65	0.2 - 13	0 - 0.1	0 - 0.4	795 - 854			
*including Panama												
Sludge Trouble* (7 caces)			0.45	936	51	6	18	4.3	0.02	0.024	826	
*all areas	0.4 - 0.5	912 - 974	22 - 121	-3 - 24	2 - 48	2 - 7.8	0 - 0	0 - 0.1	802 - 861			

(These data were based on results of private analysis supplied by ClassNK customers)

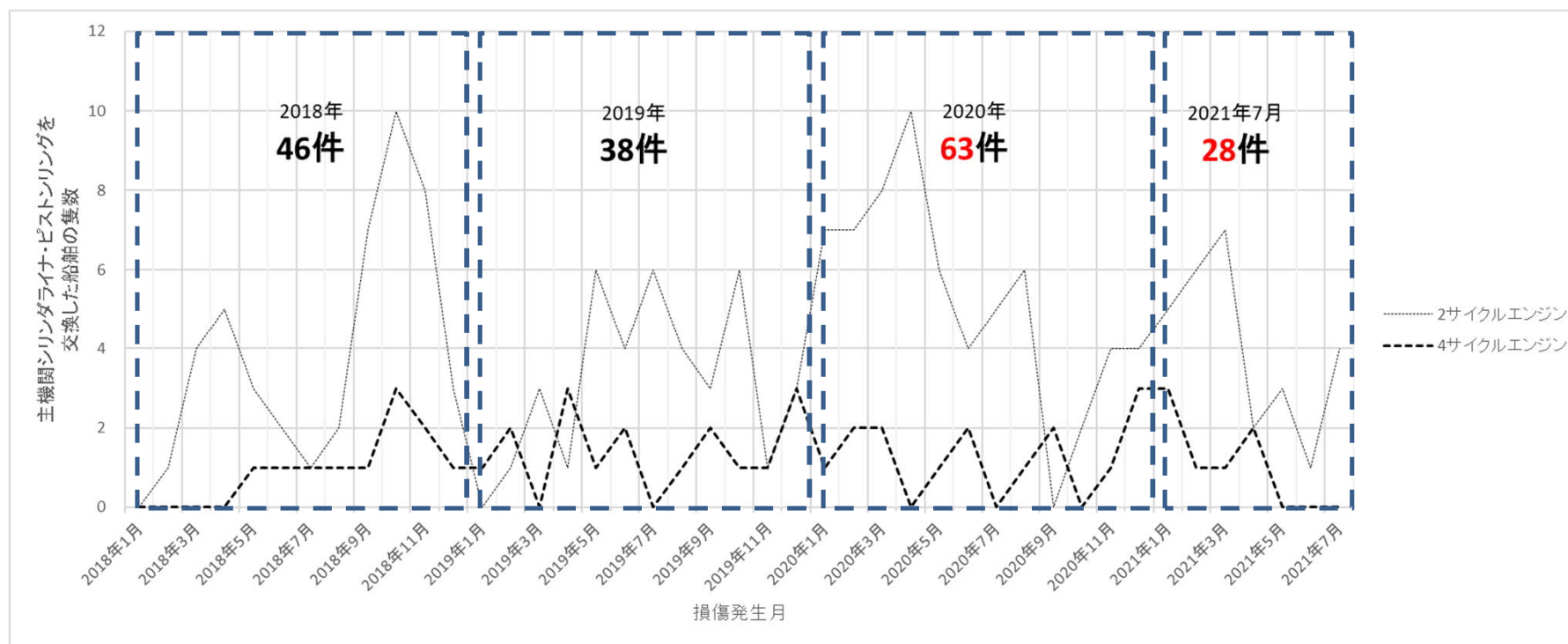
- 動粘度は低くバラつきが大きい ⇒ 燃料加熱に注意 (エンジンでの燃料噴霧不良の可能性)
- Al + Siは低く、着火性指標を示すCCAIは良好

検査データに基づくトラブル傾向 **ClassNK**

- 主機関のリング・ライナの交換隻数（注を年毎に比較）

（注：メンテナンスで交換したのものも含む）

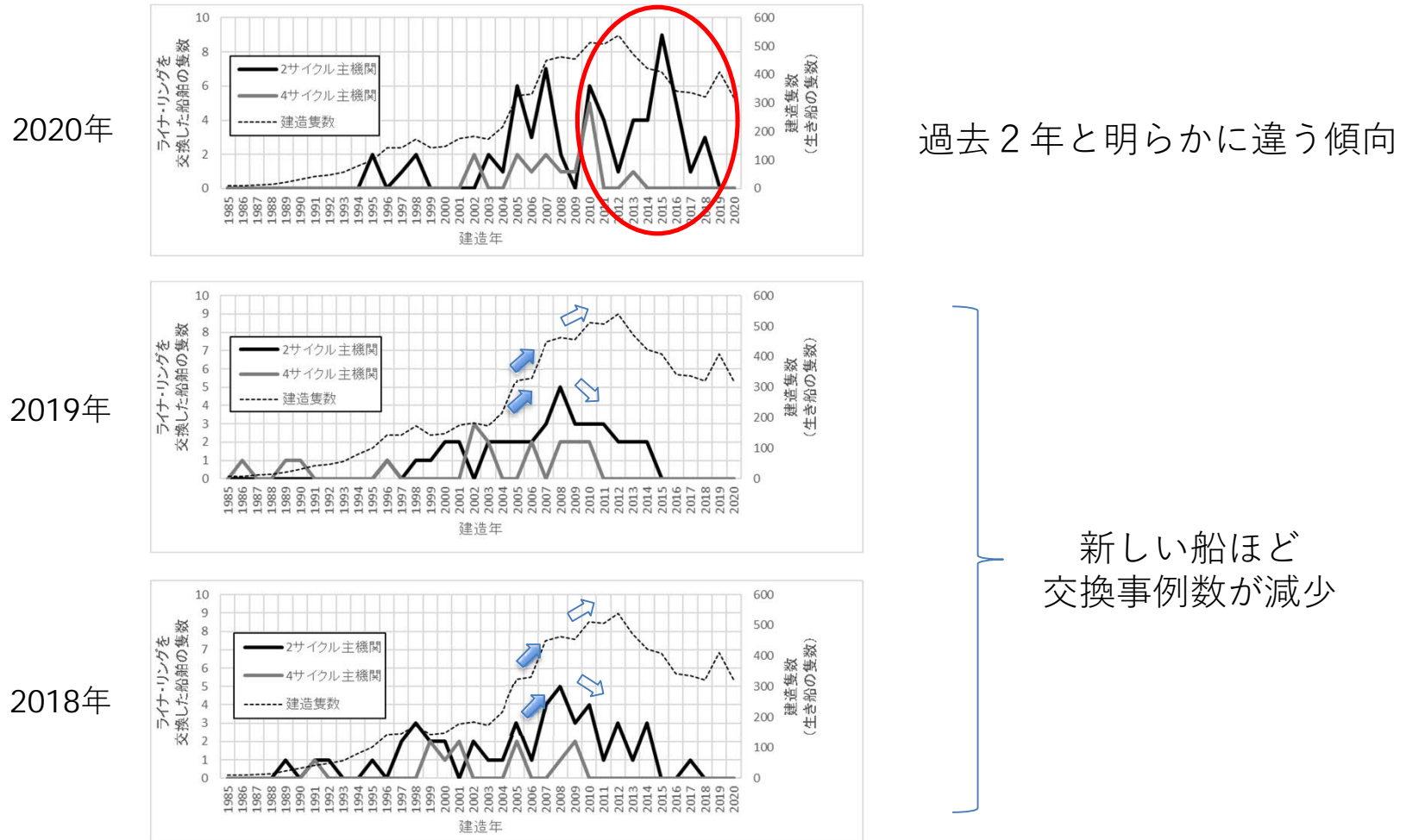
2018以降の交換件数（月毎）



2020年は2サイクルエンジンの損傷件数が多く、一方の4サイクルエンジンは傾向は変わらない

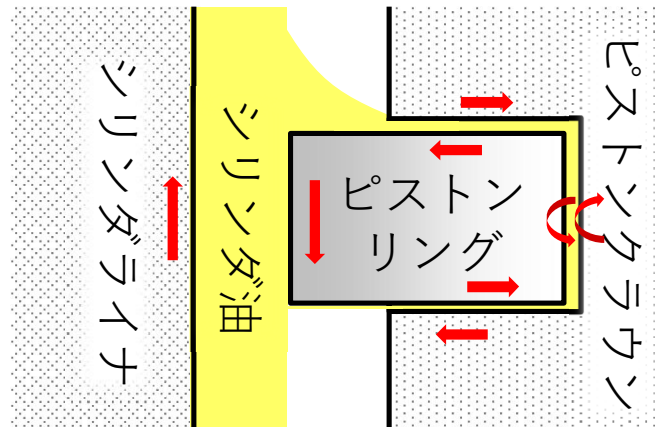
検査データに基づくトラブル傾向 ClassNK

● 交換隻数を交換時期で比較



2020年は2サイクルエンジンで新旧関係なく損傷が発生する傾向が見られ、一方の4サイクルエンジンは傾向は変わらない

リング・ライナの異常摩耗なぜ起こるのか？



金属部品の摩擦力を減らす潤滑油が上手く作用できていないことが直接原因。



2020年になって変わったもの。
「燃料油」と「シリンダ油」
オペレーションは今まで通り。

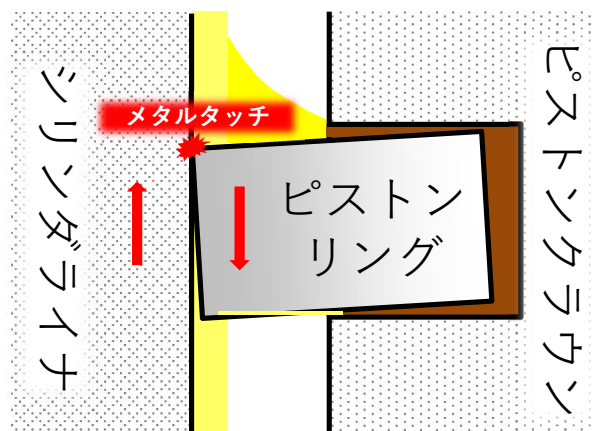
燃料油の変化 (HFO⇒VLSFO)

- 着火燃焼性が要因なら4サイクル機関にも影響が出るはずだが傾向無く、トラブル燃料のCCAIも良好
- Al+Siが要因なら燃料噴射ポンプに影響が出るはずだが報告なし
- 燃料油の低動粘度化と加熱しすぎによる噴霧不良などの可能性

着火性やAl+Siより燃料油の低動粘度化が要因である可能性があると推測

リング・ライナの異常摩耗なぜ起こるのか？

シリンダ油のアルカリ価変化 (BN100⇒BN40)



シリンダ油に添加されるアルカリ性の金属石鹼にはピストンリング周りにデポジットが溜まらないようする清浄性をもっている。

添加量が減り機能が弱まるカーボンがリングの動きを阻害し、最悪の場合、リングとライナがメタルタッチする。

- 一般的に2サイクル機関は4サイクル機関に比べ潤滑条件が厳しい
- BN40の清浄性が従来品より低下した可能性
- トラブルが発生していない船もいる

シリンダ油の清浄性低下が損傷までの閾値を下げたことと、船舶ごとの条件（エンジンの状態、運航負荷、海象条件など）が複合して発生したと推測

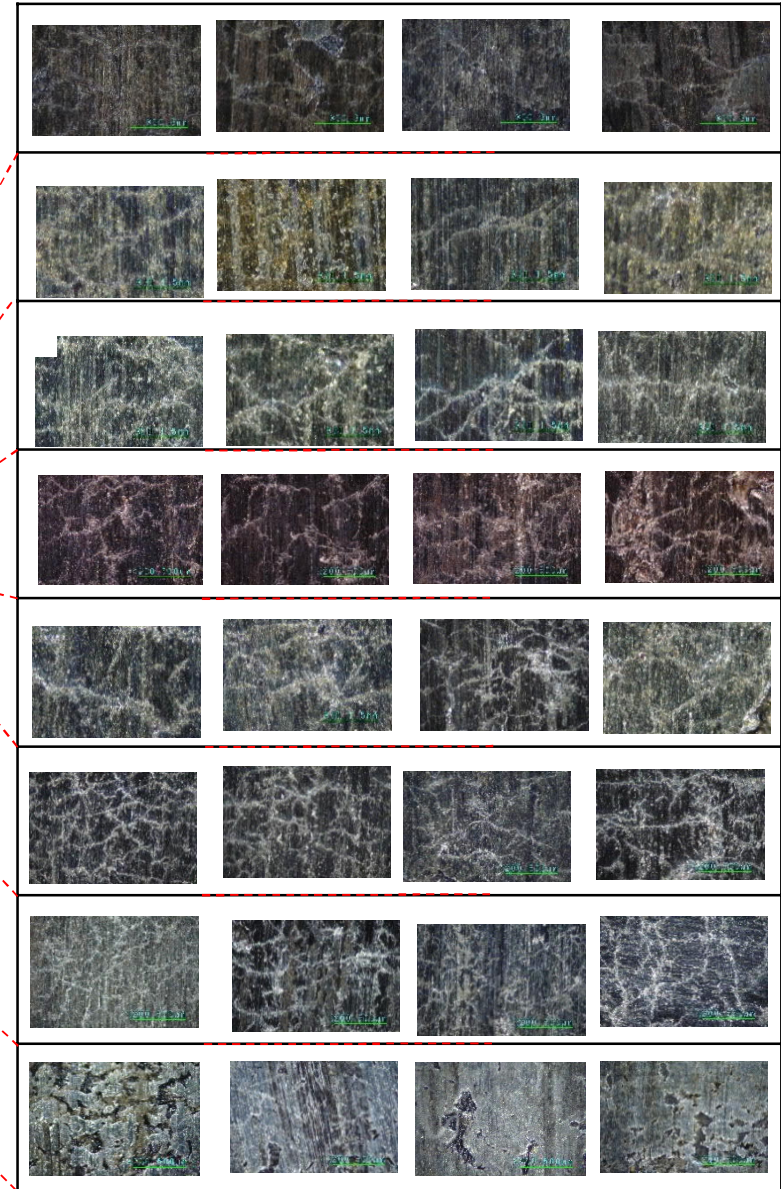
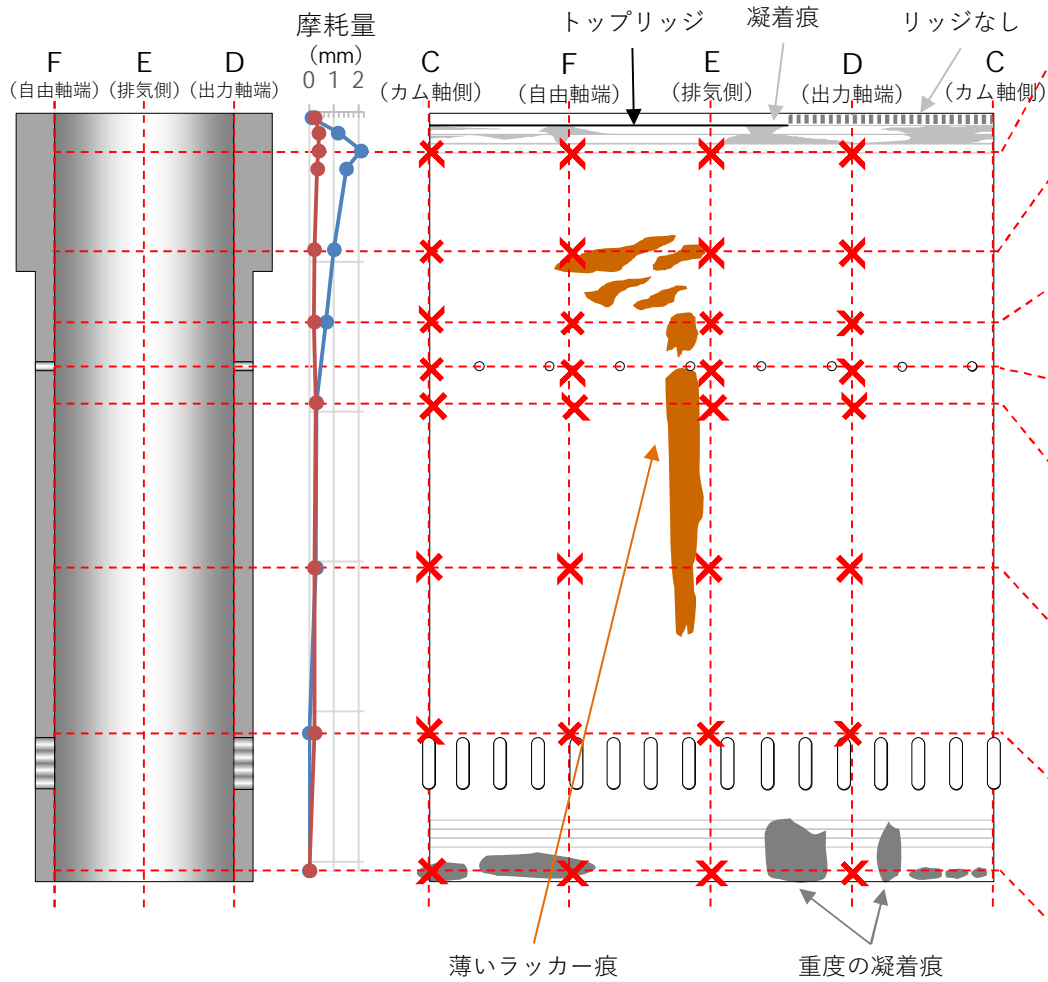
トラブル原因として考えられうるもの

- 燃料油に含まれるAI + SI
- 燃料油の着火燃焼性
- 燃料油の過加熱による噴霧不良など
- シリンダ油の清浄性低下
- 船ごとの条件 (エンジンの状態、運航負荷、海象条件など)

損傷シリンダの調査

マイクروسコープによる表面観察
結果：AL+Si痕跡無し・ヒートクラック確認

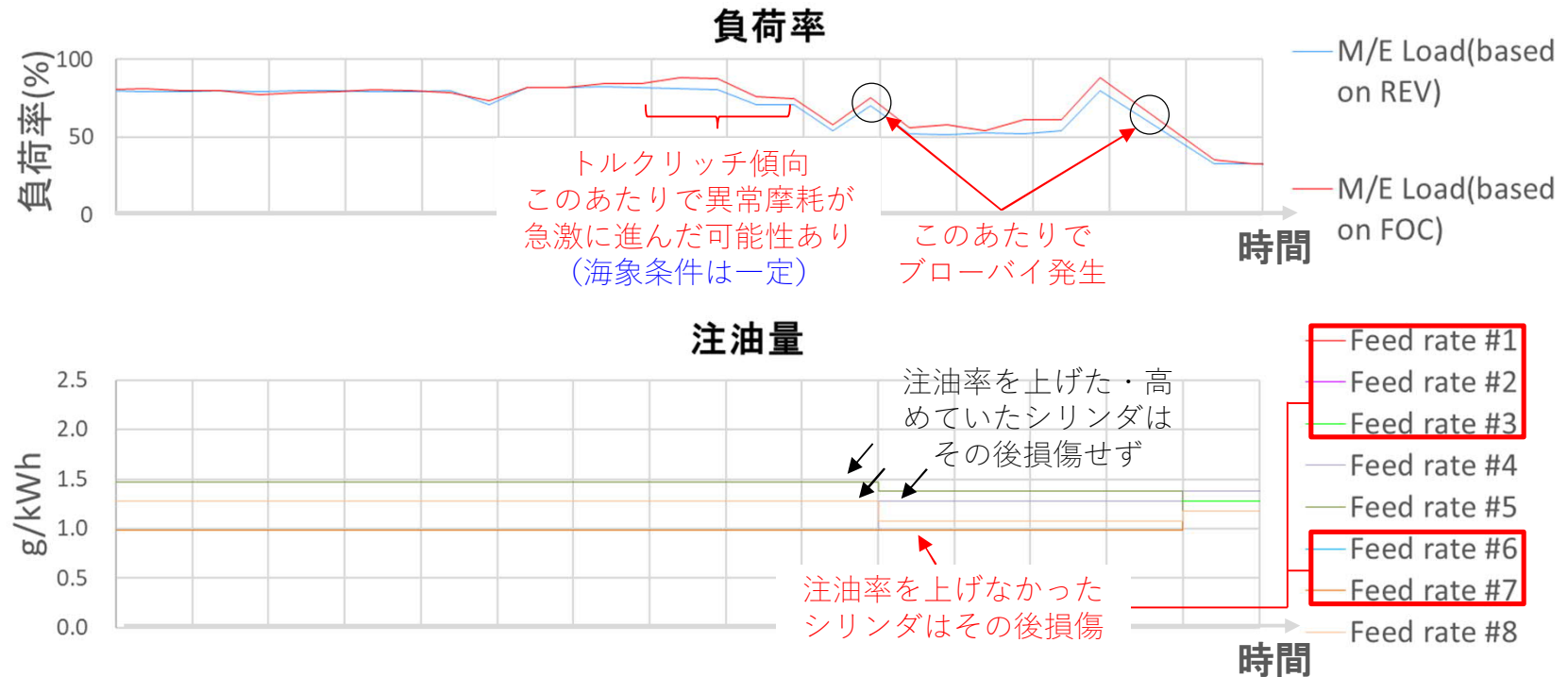
0.5mm
←



トラブル原因として考えられうるもの

- ~~燃料油に含まれるAl+Si~~
- 燃料油の着火燃焼性
- 燃料油の過加熱による噴霧不良など
- シリンダ油の清浄性低下
- 船ごとの条件 (エンジンの状態、運航負荷、海象条件など)

● トラブル前の兆候

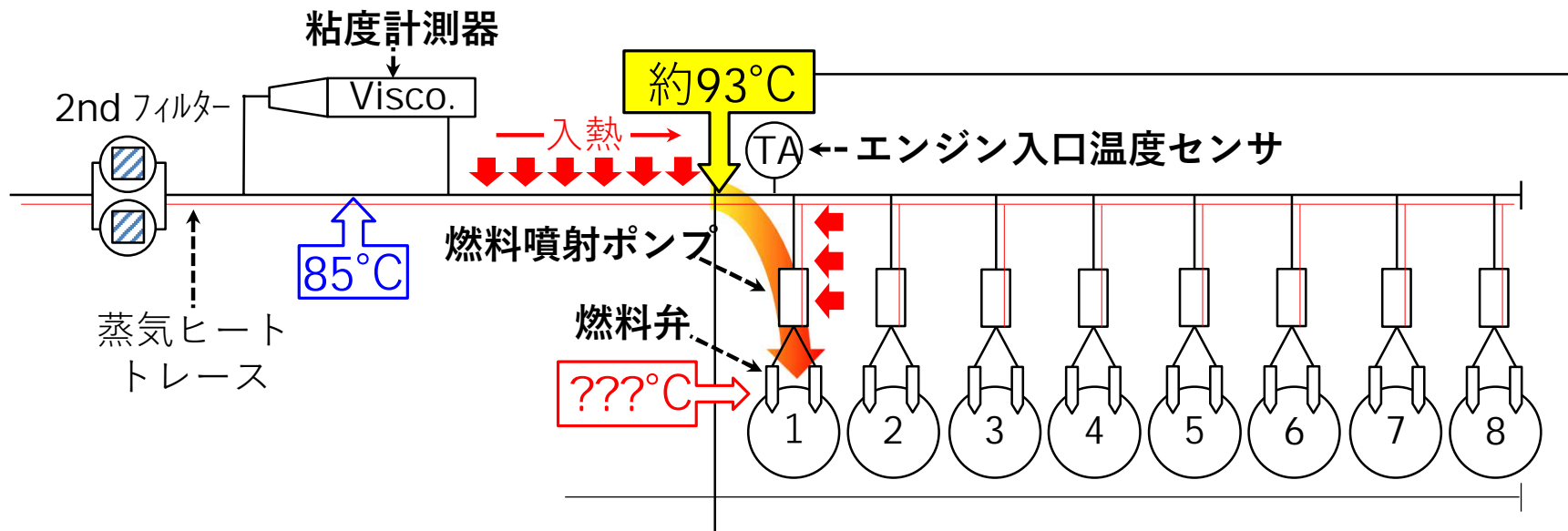


一見、負荷に対しシリンダ油の注油量が足りなかった可能性が疑われるも、オペレーションを変えておらず、清浄性分散低下による損傷までの閾値低下が影響したと推測。

トラブル原因として考えられうるもの

- 燃料油の着火燃焼性
- 燃料油の過加熱による噴霧不良など
- シリンダ油の清浄性低下
- 船ごとの条件 (エンジンの状態、運航負荷、海象条件など)

- 燃料油の温度管理



粘度コントローラーで15cSt（約85°C程度）に設定されていたが、エンジン入口の燃料油温度は運航記録より約93°Cであったため、噴霧時は更に高い温度になっていたと推測。

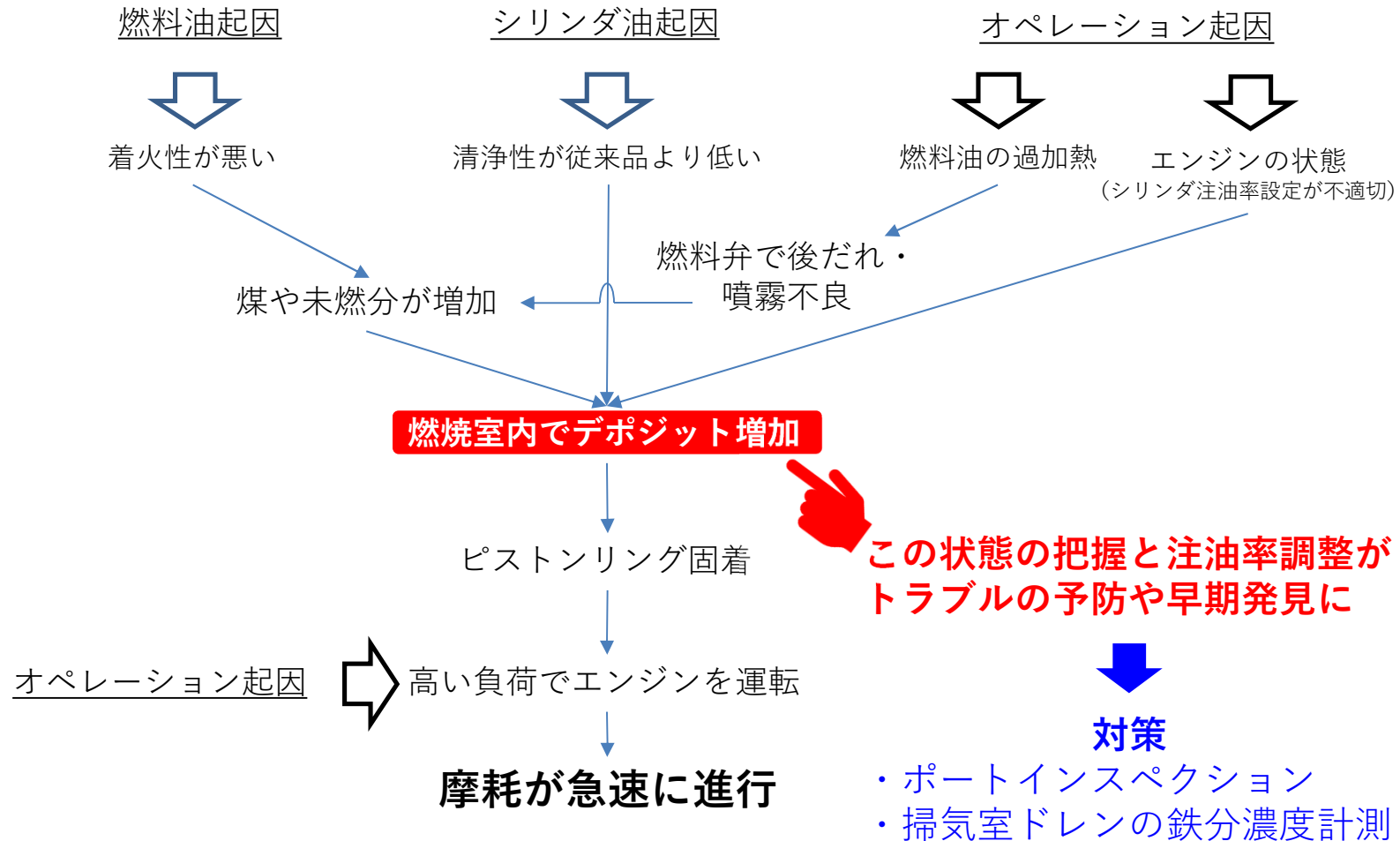
燃料油がヒートトレースによる加熱により設定動粘度より低い動粘度になっていた

トラブル原因として考えられうるもの

- 燃料油の着火燃焼性
- **燃料油の過加熱**による噴霧不良など
- **シリンダ油の清浄性低下**
- **船ごとの条件**（エンジンの状態、運航負荷、海象条件など）

トラブルのシナリオ推定

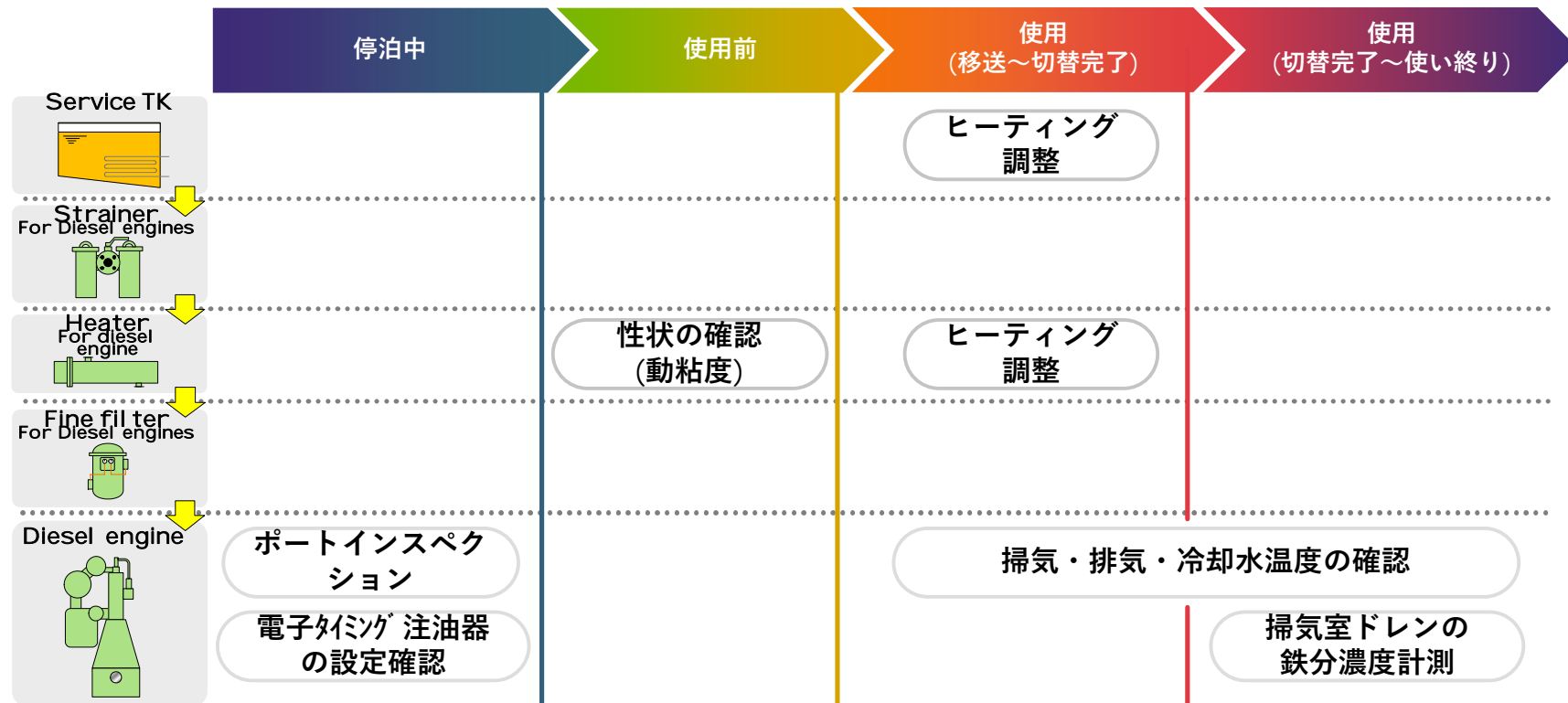
- シリンダライナー・ピストンリング損傷の推測シナリオ



シリンダトラブルへの対策

VLSFOと損傷との因果関係は明確になってないが、基本的に異常摩耗は潤滑不良によるもの。

対策は、**シリンダーの状態に応じた適切な注油率に調整**すること。



3.5%SのHFOを使用していた時と同じ

VLSFO注意喚起ポスターの公表 ClassNK

トラブルは収まりつつあるものの未だ発生している。
特にトラブルを未経験の船員に向け注意喚起ポスターを今年7月に公表。

VLSFO使用開始後のトラブル

ClassNK
www.classnk.com

スラッジトラブルとエンジンのシリンダトラブル

① **スラッジ異常発生**
 燃料油中のスラッジは、エンジン内部の燃料系に付着し、燃料噴射の精度を低下させる。また、スラッジが燃料系を詰まらせ、燃料供給が停止する可能性がある。スラッジが燃料系を詰まらせた場合、燃料供給が停止し、エンジンが停止する可能性がある。スラッジが燃料系を詰まらせた場合、燃料供給が停止し、エンジンが停止する可能性がある。

② **リング・ライナ異常摩耗**
 スラッジがシリンダ内部に付着し、ピストンリングとライナーとの隙間を狭め、異常摩耗を引き起こす可能性がある。また、スラッジがシリンダ内部に付着し、ピストンリングとライナーとの隙間を狭め、異常摩耗を引き起こす可能性がある。

③ **スラッジへの早期発見と適切な対応**
 燃料油の混合を最小限とする
 燃料油の過加熱と加熱不足に注意
 トリブルへの早期発見と適切な対応

トラブルを緩和する

いすゞ・マツダ・三菱重工のエンジンでは、トラブルを未然に防ぐことが重要です。燃料油の品質を確保し、燃料油の過加熱と加熱不足を防止することが重要です。また、燃料油の過加熱と加熱不足を防止することが重要です。

エンジン	エンジン	エンジン	エンジン	エンジン	エンジン
①-1 燃料油の品質	①-2 スラッジ発生	①-3 燃料油の過加熱	①-4 燃料油の加熱不足	①-5 燃料油の過加熱	①-6 燃料油の加熱不足
②-1 燃料油の品質	②-2 スラッジ発生	②-3 燃料油の過加熱	②-4 燃料油の加熱不足	②-5 燃料油の過加熱	②-6 燃料油の加熱不足
③-1 燃料油の品質	③-2 スラッジ発生	③-3 燃料油の過加熱	③-4 燃料油の加熱不足	③-5 燃料油の過加熱	③-6 燃料油の加熱不足
④-1 燃料油の品質	④-2 スラッジ発生	④-3 燃料油の過加熱	④-4 燃料油の加熱不足	④-5 燃料油の過加熱	④-6 燃料油の加熱不足
⑤-1 燃料油の品質	⑤-2 スラッジ発生	⑤-3 燃料油の過加熱	⑤-4 燃料油の加熱不足	⑤-5 燃料油の過加熱	⑤-6 燃料油の加熱不足
⑥-1 燃料油の品質	⑥-2 スラッジ発生	⑥-3 燃料油の過加熱	⑥-4 燃料油の加熱不足	⑥-5 燃料油の過加熱	⑥-6 燃料油の加熱不足

© 2022 ClassNK

1 スラッジトラブルへの対応

①-1 燃料油の品質 (スラッジ発生)
 ①-2 スラッジ発生
 ①-3 燃料油の過加熱 (スラッジ発生)
 ①-4 燃料油の加熱不足 (スラッジ発生)
 ①-5 燃料油の過加熱 (スラッジ発生)
 ①-6 燃料油の加熱不足 (スラッジ発生)

2 シリンダトラブルへの対応

②-1 ボルト・ナットの緩み (シリンダトラブル)
 ②-2 燃料油の過加熱 (シリンダトラブル)
 ②-3 燃料油の加熱不足 (シリンダトラブル)
 ②-4 各シリンダの排気・吸気・冷却水の温度の確認 (シリンダトラブル)
 ②-5 燃料油の過加熱 (シリンダトラブル)
 ②-6 燃料油の加熱不足 (シリンダトラブル)

© 2022 ClassNK

お問い合わせ窓口

財) 日本海事協会 技術研究所

担当：松本、十倉

TEL：03-5226-2737

E-mail：ri@classnk.or.jp