

ディーゼル機関診断の適用について

Application of Diagnostic System for Diesel Engine

日本原子力発電（株）敦賀発電所	吉永 岳	Takeshi Yoshinaga
日本原子力発電（株）敦賀発電所	林 治次	Haruji Hayashi
日本原子力発電（株）敦賀発電所	笛吹 博巳	Hiroimi Usui
日本原子力発電（株）敦賀発電所	鶴園 篤哉	Atsuya Tsuruzono
日本原子力発電（株）敦賀発電所	松田 隆文	Takafumi Matsuda

The Japan Atomic Power Company (JAPC) began to implement Condition Based Maintenance (CBM) for rotating components (pumps, fans and electric motors) from 1999 and, also has begun to apply diesel engine diagnostic techniques at our three nuclear power plants since 2004.

This paper provides a description of the CBM methods used for diesel engines in nuclear standby service, a summary of the procedures to introduce these diagnostic techniques to our nuclear power plants, and experience with the application of these methods to JAPC nuclear power plants.

Keywords: Condition Based Maintenance, Diesel Engine, Diagnostic Techniques

1. はじめに

我が国の原子力発電所においては、機器の健全性/信頼性の維持とトラブルの未然防止のため、予防保全を基本とした広範囲な分解点検等が定期的実施されている。しかしながら、平成7年の電気事業法改正以降、「電力自由化」の動きが加速されており、原子力発電も機器の健全性/信頼性維持とともに、他電源に対する経済的な競争力を求められる状況になっている。

一方、米国においては、機器の運転中の状態を把握するための様々な技術が開発され、それらの適用により機器の状態を把握し、その結果に基づきその後の保全措置を決める、いわゆる状態基準保全 (Condition Based Maintenance、以下 CBM という。) を導入し、機器の健全性/信頼性を確保するとともに、保全コストの削減に成功している。

上記の状況に鑑み、当社(日本原子力発電株式会社)は、平成11年にそのための専任チームを発電所に設置するとともに、米国にて多くの実績がある振動診断、潤滑油分析を中心とした回転機器の診断を実施してきた。また、これと並行して電動弁、空気作動弁、ディーゼル機関等、特定機器用の診断システムについて調査や技術開発等を行い、順次、CBMの導入を進めている。

連絡先：吉永 岳、〒914-8555 福井県敦賀市明神町1番地、日本原子力発電(株)敦賀発電所技術センター、電話：0770-26-8043、e-mail：takeshi-yoshinaga@japc.co.jp

このうち、ディーゼル機関の診断システムは、エンジン特性分析、潤滑油・燃料油分析、冷却水分析等の組合せで総合的にディーゼル機関の経年劣化状態や異常兆候を診断するものであり、米国においては既に多くの原子力発電所において適用実績を有する技術である。当社は、本システムの実機への試適用においてその有効性を確認した後、当社社員直営でのデータ採取及び診断・評価を行っている。

本稿では、このディーゼル機関診断システムの原理、本システムの導入プロセス等について紹介するとともに、当社原子力発電所のディーゼル機関にて確認された事例について紹介する。

2. 原子力発電所ディーゼル機関の特徴

表1に当社発電所のディーゼル機関の概要を記す。当社のディーゼル機関は大きく分けて以下の3つに分類される。

- ・非常用ディーゼル発電機駆動用ディーゼル機関
- ・高圧注水系ポンプ駆動用ディーゼル機関
- ・高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機駆動用ディーゼル機関

いずれの設備も工学的安全設備に分類されており、このうち、非常用ディーゼル発電機は、落雷等による所内電源の喪失時に、非常用炉心冷却システム (Emergency Core Cooling System、以下 ECCS という。) 機器等への電源を供給する役割を担っており、手動、自動に関わらず、いつでも起動できるよう、常に待機

状態としておくことを保安規定において定めている。また、他の2つはECCS機器であり、いずれのディーゼル機関も非常に高い信頼性が要求されるため、その信頼性が確保されていることを確認すべく、月に1回、定期試験を行い、手動起動にて全負荷運転での運転性能の確認を行う他、発電所の定期検査時には、自動起動・性能確認検査や分解検査等、法令に基づく検査を実施している。

Table 1 Summary of Diesel Engines in JAPC Plants

Plant	Diesel Engines	Basic Spec.		Beginning of Plant Operation	Total Operating Time		
		Number	Vendor				
Tsuruga P/S Unit 1	Diesel Engine for HPCI Pump	Number	1	1970.3.14	About 1,140 Hours		
		Vendor	General Motors				
		Power	3,050 BHP				
	Diesel Engine for Emergency Generator	Electric Capacity	-				
		Number	2				
Diesel Engine for Emergency Generator	Vendor	Niigata	1987.2.17	About 630 Hours			
	Power	2,900 HP					
	Electric Capacity	2,500 kVA					
Tokai Daini P/S	Diesel Engine for Emergency Generator of HPCS System	Number	2	1978.11.28	About 900 Hours		
		Vendor	Mitsubishi				
		Power	9,780 PS				
		Electric Capacity	8,625 kVA				
	Diesel Engine for Emergency Generator	Number	1			1978.11.28	About 900 Hours
		Vendor	Niigata				
		Power	4,150 PS				
Diesel Engine for Emergency Generator	Diesel Engine for Emergency Generator	Number	2	1978.11.28	About 900 Hours		
		Vendor	Niigata				
		Power	7,480 PS				
		Electric Capacity	6,500 kVA				

一方、図1に示すように、ディーゼル機関は複雑な系統構成をしている上、多くの部品から構成されているため、その保全においては非常に多くの労力を要するとともに、高いレベルの品質保証体制が要求される。そのため、保全コストが高くなるとともに、分解・組立時のヒューマンエラーに伴うトラブルの懸念がある。

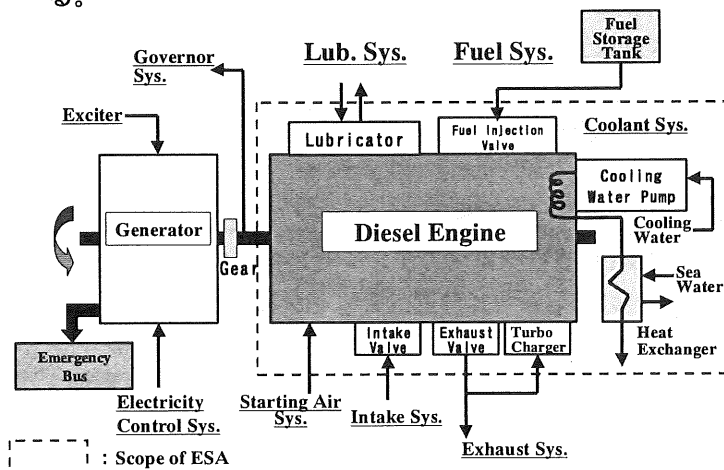


Fig. 1 Structure of Diesel Engine System

しかしながら、上述のように、ディーゼル機関が運転されるのは月に1回の定期試験、13ヶ月に1回の発電所定期検査時の試運転及び性能検査、所内電源喪失

時等、時間的に限定されており、年間を通じての運転時間は高々、30時間程度である。このため、摩耗のように運転時間により支配される劣化事象の進行は非常に緩やかであると考えられる。また、これまでの運転保守経験から、ディーゼル機関の起動失敗に至るような重大なトラブルは少ない。また、修理や取替の必要な部品も少なく、その部位も限られていることから、劣化状況を的確に把握し、その状態を評価することができれば、信頼性を維持しつつ、ディーゼル機関保全の合理化を進めることは十分可能であると考えられる。

3. ディーゼル機関診断システムの概要

3.1 診断技術

ディーゼル機関診断システムは、いくつかの診断技術の組合せで総合的にディーゼル機関の状態を診断するものである(図2)。以下に、本システムで適用する診断技術の概要を記す。

★ Total Analysis by 3 Techniques

① Engine Signature Analysis: ESA

- Combustion Analysis
- Vibration & UT Signature

② Chemical Sampling

- Lub Oil and Coolant

③ Temperature Measurement

- Measured by Thermocouple
- Infrared Thermography

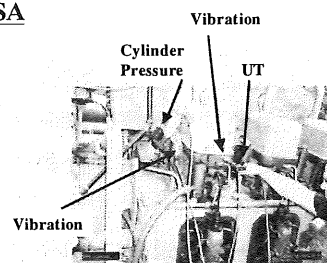


Fig. 2 Techniques Applied on Diesel Diagnosis

①エンジン特性分析(Engine Signature Analysis、以下ESAと言う。)

ESAでは、シリンダや燃料供給システムの各種パラメータ(圧力、振動、超音波等)とエンジンのクランク角との相関を記録し、ベースラインデータや他シリンダデータ、あるいは同型の他号機のデータとの比較を行う。採取されたデータについては、以下の2通りの分析が行われる。

【定性分析 (図3)】

吸排気弁及び燃料噴射弁の開閉タイミング、燃料噴射、排気ガス放出等のタイミング、及び振動、超音波並びに圧力波形等の大きさの比較

【定量分析 (図4)】

燃焼分析による各シリンダの出力、シリンダ間の出力バランス及び熱効率等の算出

ESAにおいて計測されるパラメータの概要を表2に示す。

る摩耗粉や化学組成の状態を確認することによりエンジンの健全性を評価するとともに、それらの酸化度や水分含有量を確認することで、流体自体の健全性の確認も併せて行う。

③温度測定

熱電対、サーモグラフィ等により、電気的な結線の緩みや外れ、排気ガスの漏れの有無等を確認する。サーモグラフィは熱源の検知を行うものであり、機械的接触の大きい場所、高温流体・ガスの漏れ、高い電気的抵抗源等を検出できる。

Table 2 Parameters measured at ESA

Engine Performance Parameter	Engine Signature	Engine Condition Monitored
Peak Firing Pressure	P-θ	Engine balance, combustion performance
Peak Firing Pressure Angle	P-θ	Engine balance, combustion performance, fuel injection performance
Expansion Reference Pressure	P-θ	Combustion performance, fuel injection performance
Terminal Pressure	P-θ	Exhaust flow pathway is open, proper function of exhaust valve opening
Compression Reference Pressure	P-θ	Cylinder pressure compression performance, ring sealing, valve sealing
Indicated Horse Power	P-V	Engine balance
Indicated Mean Effective Pressure	Log P - Log V	Engine balance
Compression Coefficient	Log P - Log V	Ring sealing, valve sealing, compression ratio
Start of Combustion	dP-dθ	Combustion performance, fuel injection timing
Maximum Pressure Rise Rate	dP-dθ	Detonation, fuel injection timing
Maximum Heat Release Rate	Heat Release Rate	Combustion performance, fuel injection performance

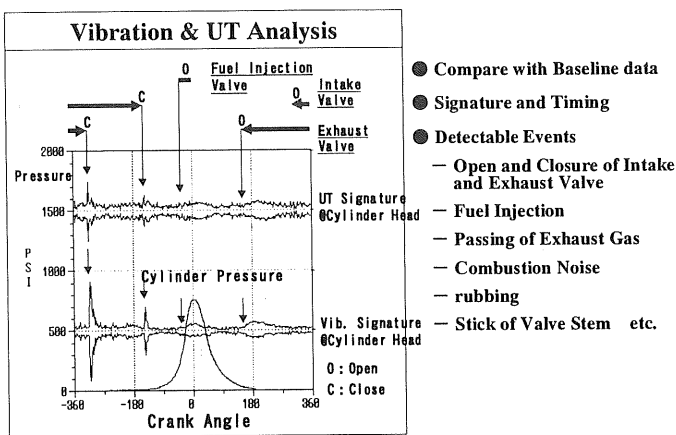


Fig. 3 Qualitative Analysis (Normal Signature)

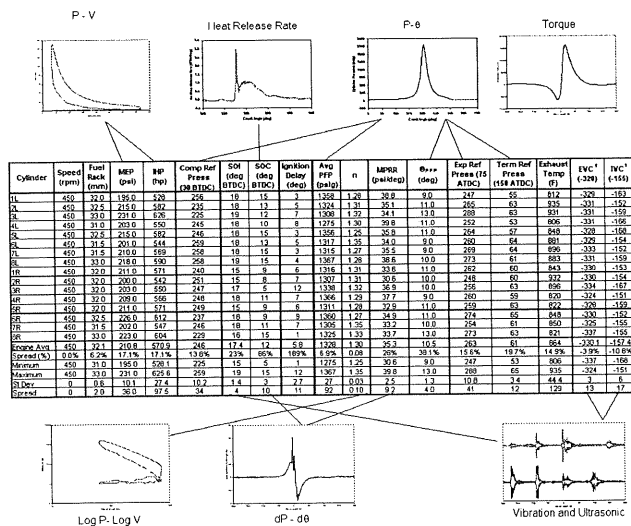


Fig. 4 Quantitative Analysis

②化学サンプリング

化学サンプリングでは、エンジンに作用する流体（潤滑油、燃料油及び冷却水等）を定期的にサンプリングし、それらの分析を行う。分析は、流体に含まれ

3.2 ディーゼル機関の劣化モード

表3に、ディーゼル機関の主な劣化モードと、本診断システムによる検出方法を記す。表3からわかるように、多くの部品に対する劣化モードが本システムにより検知可能であることがわかる。図5にピストンリングでのブローバイ（燃焼後の排気ガスがピストンリングの隙間から漏れる事象）が発生している場合のESAによる検知の例を示す。この場合、図3の通常時の波形と比べA部に大きな振幅信号が認められる。このデータと他のデータやパラメータを確認し、総合的に評価することにより、起きている事象がピストンリングのブローバイであることが推測される。

大部分の劣化モードが検出可能ではあるが、接続棒軸受でのフレットングや燃料噴射弁での冷却水による腐食等、本システムでは検知できない故障モードも存在するため、これらに対してはポアスコープ等による内部確認を行うこと等を検討する。

Table 3 Failure Modes detected by Diagnostic Techniques

Diesel Engine Element Monitored	Failure Mode or Degradation Mechanism	Diagnostic Detection Method
Pistons and Cylinder Liners	Scuffing of liner by piston	Vibration analysis, lube oil analysis
Pistons and Cylinder Liners	Cracked pistons	Vibration analysis
Piston Rings	Excessive blowby	Ultrasound analysis, crankcase manometer
Intake/Exhaust Valves	Burned or eroded seats	Ultrasound analysis
Intake/Exhaust Valves	Excessive seating noise	Vibration analysis
Intake/Exhaust Valves	Incorrect closing/opening time	Vibration analysis
Piston Wrist Pin and Bushing	Excessive bushing/bearing wear	Vibration analysis
Connecting Rod Bearing	Excessive bearing wear	Vibration analysis
Crankshaft Main Bearing	Excessive bearing wear	Vibration analysis
Fuel Injection Pump Metering Rod	Off-design pump settings	Trending of fuel metering rod position

■
■
■

Ex.) "Brow-by" at Piston Wring

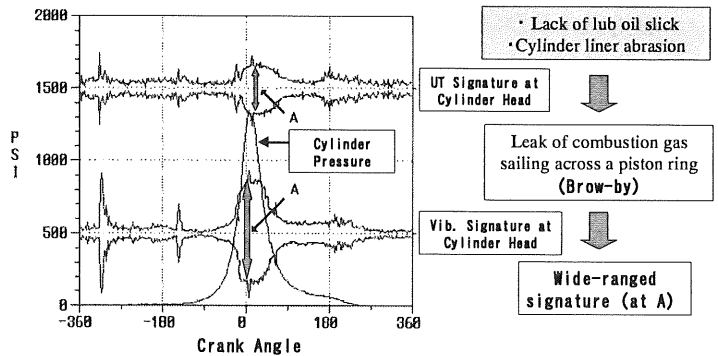


Fig. 5 Typical Signature of "Brow-by" at Piston Ring

4. 当社発電所ディーゼル機関への試適用

本診断システムを用いたデータ採取及び診断・評価を当社直営で行うことができるようにすることを目的とし、平成13年11月に敦賀発電所において約2週間に渡り、ESAに関するトレーニングを実施した。本トレーニングは、米国において本診断システムによるディーゼル機関診断に多くの実績を持つ米国コンサルタント会社（MPR Associates社）の指導のもとに行われた。以下に、そのトレーニングの概要を示す。

①机上トレーニング

●エンジン理論

ディーゼル機関の運転及び燃焼についての十分な理解を習得するための講義

- ・ エンジンの熱力学的なサイクル
- ・ 燃料噴射と燃料噴射システムの機器
- ・ エンジンの機械的なサイクル
- ・ 燃焼と燃焼パラメータ
- ・ 振動及び超音波信号の理論

●データ採取

データ採取に用いる各種装置の理論を習得するための講義

- ・ エンジン分析装置
- ・ 圧力変換器
- ・ 振動加速度計
- ・ 超音波変換器
- ・ クランク軸位置検出器 等

●判定基準とその技術的根拠

定量的に得られるデータについては、その判定基準とその技術的根拠、定性的に評価するものについては、その解釈の方法についての講義

●分析・診断方法

得られたデータの分析・診断のポイント

- ・判定基準を満足しているか？
- ・問題の兆候は見られないか？
- ・シリンダ間の出力バランスにバラツキはないか？
- ・問題を解決するには、どのような措置を取るのが最善か？

●不具合事例のケーススタディ

正常な状態と異常のある状態を比較することで、どのような「異常状態」が発生しているかを判断する方法について習得するための講義

②当社発電所の実機ディーゼル機関での、当社社員直営によるデータ採取

この実機でのデータ採取及びその後の分析の結果、当社プラントのディーゼル機関に対する ESA の有効性が確認された。その一例を以下に記す。

【事例：燃料噴射ノズルの閉塞兆候】

敦賀発電所 2 号機のディーゼル機関の 1 台において、2 つのシリンダの排気温度が他のシリンダと比較して低いという事象が認められた。これは、深刻な問題ではないものの、ESA により燃料噴射ノズルが閉塞気味であることが推測された。この推測結果は、その後の定期検査時における当該ディーゼル機関の分解点検時に正しかったことが確認された。

また、平成 14 年 10 月には、東海第二発電所においても同様の実機データ採取を行い、本システムの適用性を確認するとともに、同年 12 月には ESA 以外の主要技術である化学サンプリングに関して、以下を習得することを目的とし、トレーニングを実施した。

- ・潤滑油、燃料油、冷却水の各システムの構成とその機能
- ・潤滑油、燃料油、冷却水の化学的組成
- ・サンプル採取手順と技術
- ・採取したサンプルの試験方法
- ・分析すべき主要パラメータと、その判定基準
- ・ESA にて得られたデータとの相関

以上の ESA 及び化学サンプリングに関するトレーニングの結果、受講者は今後、直営でのデータ採取、診断・評価が可能であるとの確信を得るとともに、米国コンサルタント会社からも、当社社員が十分な知識

と技量を有しているとの評価を得た。

5. ディーゼル機関診断結果 (例)

これまで当社直営によってデータ採取・分析・評価を行ってきた中で、ディーゼル機関の性能自体には大きな影響はないものの、傾向監視または適切な時期に保全を行うことが望ましいと考えられる徴候が認められたものが数件ある。以下に、その例を挙げる。

5.1 排気弁のバウンシング (跳ね) 現象

図 6 の A 部は、排気工程終了後に排気弁が閉止する際の振動波形であるが、排気弁が閉止する際に一度では着座せず、弁が跳ねているために A 部と同様の波形が B 部に認められている。ただし、B 部以降の波形から排気弁は漏れを起こしている徴候は認められないとともに、吸気弁閉止後の圧縮工程も設計どおりに行われており、定量分析からも所定の燃焼圧力を確保できていることが確認できたことから、本事象については継続的に監視していくこととした。

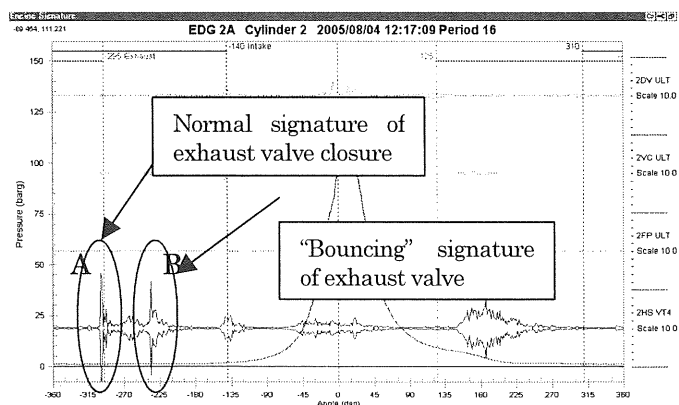


Fig. 6 Signature of "Bouncing" at Exhaust Valve

5.2 インジェクタ弁バックシート漏れ

シリンダ内圧力を検出するために、インジェクタラインに圧力変換器を取付け、インジェクタ弁を全開にするが、その際に当該弁がバックシート漏れを起こしているためと考えられる超音波波形が燃料噴射ポンプ近傍で認められた (図 7)。当該弁については、次の点検時に取替を行い、試運転時に診断を行って再現のないことを確認した。

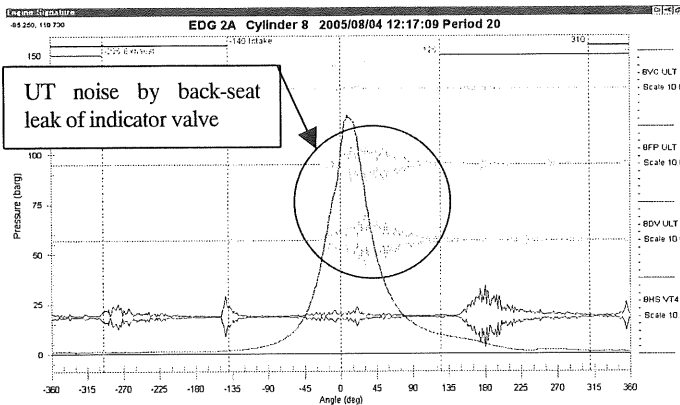


Fig. 7 Signature of Back-seat leak at Indicator Valve

5.3 排気弁の「閉止遅れ」現象

排気弁は、当該シリンダの上死点前-295度において閉止するよう設計されているが、図8に示すシリンダではこの位置で閉止せず、約45度遅れて閉止していることがわかる。

本事象も、その他部位の定性分析や定量分析においては機関の性能上問題ないと判断し、現在も継続監視中である。

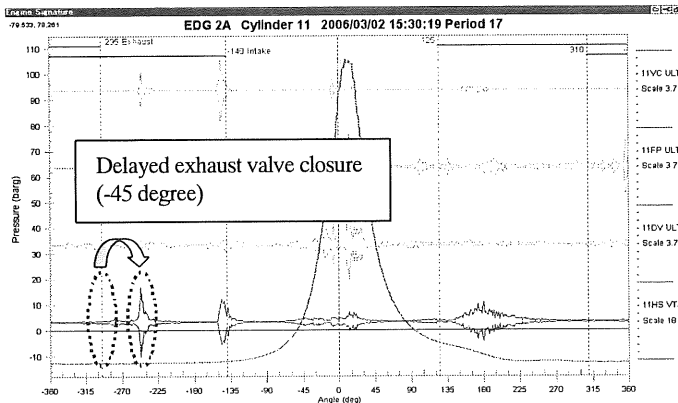


Fig. 8 Signature of Delayed Valve Closure

5.4 潤滑油分析

ディーゼル機関本体、あるいは熱交換器等の補機類における過度の摩耗や損傷の有無を確認するため、潤滑油・冷却水の分析を平成15年度より開始した。サンプリングは直営にて行い、分析については専門会社に委託を行っている。

平成15年度及び16年度の潤滑油分析結果において、敦賀1号機非常用ディーゼル機関B号機の鉛濃度が高いことが判明した（平成15年度：89ppm、平成16年度：73ppm、A号機は4~7ppm）。当該機関において鉛が使用されているのは主軸受とクランクピン軸受であり、これらの摩耗が懸念されたことから詳細検討

を行った。

- ①至近の潤滑油全量交換（約2,000リットル）は10定検前で、それ以降は定検時に不足分の補充（約200~300リットル）のみを実施している。
- ②平成15年度から16年度にかけての補充量は約300リットルであり、これは全保有量の約15%である。
- ③平成15年度と16年度の分析結果では、鉛濃度が18%低下している。

前記①~③を考慮すると、

- ・主軸受あるいはクランクピンの摩耗が発生（進行）していれば、鉛濃度の低下は15%以下となるはず
- ・従って、現状で主軸受あるいはクランクピンの摩耗は発生（進行）しておらず、高い鉛濃度の原因は過去の蓄積によるものである可能性がある

と推測した。

この推測を検証するために、次の定検時に当該機の潤滑油を全量交換した上で、試運転後及び2ヶ月間隔で2回（計3回）のサンプリング・分析を実施した。

その結果、鉛濃度が低下するとともに、上昇傾向も認められなかったことから、推測は概ね、正しかったことが検証された。

6. ディーゼル機関保全合理化への取組

当社では本装置の導入以前は各シリンダに対して一定の期間（10定検）毎に定期的な分解点検を行ってきたが、診断システムの導入によりディーゼル機関の運転状態を確認し、必要な時期に必要な箇所のみ保全を行うCBMへの移行が可能であるとの確信を得た。しかしながら、当社における本装置によるディーゼル機関診断データはまだ少ないことから、当面は診断データの蓄積を図りつつ、分解点検の周期を段階的（10定検毎→11定検毎→12定検毎…）に延長し、診断データと分解点検結果を合わせて評価することで将来的に完全なCBMへの移行を目指すこととした。

今後は、診断システムによるデータ採取、診断・評価と、分解点検の周期を延長したことによる影響の有無を確認しながら、最終的にはディーゼル機関の完全なCBM化を目標として進めていく所存である。

参考文献 なし