

KU 34 形高出力・中速ディーゼル機関の開発

Development of KU 34 High-Power Medium Speed Diesel Engine

横浜製作所 塩田 潔*1 宮野 弥明*2
 長面川 昇司*3
 技術本部 中川 洋*4 出口 明雄*5

三菱 KU 30 形ディーゼル機関は、国内外の様々な分野の自家発電に 100 台以上を納入してきた。これらの稼働実績を反映し、KU 30 を超える 6~10 MW の出力範囲をカバーする KU 34 形機関を開発した。本機関は、KU 30 の基本構造を踏襲しながら、さらに高い経済性を追求した、同一出力クラスの機関の中では最も高い回転数 750 rpm で平均有効圧力 2.45 MPa の高出力機関である。種々の性能及び信頼性検証試験の結果、筒内最高圧力 18 MPa で燃費 184 g/(kW・h)、NOx 900 ppm を達成した。さらに、過負荷にて筒内最高圧力 19 MPa の過酷条件下での 500 h 耐久試験を実施して主要部品の最適化と信頼性を確認した。

The Mitsubishi KU 34 high-power diesel engine has been developed for the output range between 6 to 10 MW, based on the operating results of the KU 30 more than 100 sets of which have been delivered to domestic and foreign plants. The design of the KU 34 basically follows the features of the KU 30, but a BMEP of 2.45 MPa at an engine speed of 750 rpm has been achieved to realize good economy. According to various measurements, a specific fuel consumption of 184 g/(kW·h) and NOx emission of 900 ppm have been achieved. Furthermore, an overload endurance test for 500 hours has been carried out to optimize the major parts and prove high reliability.

1. ま え が き

三菱 KU 30 形ディーゼル機関⁽¹⁾⁽²⁾は、昭和 61 年発売開始以来、国内外の自家発電に 100 台以上を納入し、ユーザの高い評価を得ている。平成 5 年には、豊富な稼働実績を反映し、13%出力を増大しながら、さらに高い信頼性を確保した KU 30 A 形機関を開発した。現在までに KU 30 A の受注は 50 台を超え、既に 6 台が好調に稼働中である。

最近、工業の急速な発展により電力が不足気味の東南アジアでは自家発電も高出力化の傾向にあり、今後 KU 30 形の出力を超える 6~10 MW のレンジの需要が増えると見られる。そこで、この範囲をカバーする KU 34 形機関の開発に着手した。KU 34 は、KU 30 の基本構造を踏襲しながら、さらに高い経済性を追求するため、同一出力クラスの機関の中では最も高い回転数 750 rpm で、平均有効圧力 P_{me} 2.45 MPa、筒内最高圧力 P_{max} 18 MPa を定格出力としている。

これら出力仕様における機関性能と信頼性を検証するため、18 シリンダの KU 34 形機関を試作し各種試験を実施した。主要部の強度は、合計 400 点を超える温度・応力計測を実施し、また、機関性能は平均有効圧力 P_{me} 2.5 MPa において燃料消費率 b_e 184 g/(kW・h) (機関端)、NOx 900 ppm (O₂ 13%換算) を達成した。さらに、500 h の過負荷耐久試験を行い、十分な信頼性を確認した。本報では KU 34 形機関の開発経緯及び各種試験結果について述べる。

2. 開発コンセプトと主要諸元

表 1 に KU 34 形機関の主要諸元を示す。本機関の最大の特徴は、表 2 に示すとおり、同一出力クラス他社機関が 600 rpm を採用している中、より高回転の 750 rpm を採用して発電機を含めたコンパクト化を図り、プラント経済性の向上を狙ったとこ

表 1 三菱 KU シリーズ機関の主要諸元
Specifications of Mitsubishi KU series engine

機関名称	KU 34				KU 30 A					
	シリンダ数	12	14	16	18	12	14	16	18	
形式	4 サイクル、トランクピストン、水冷、V 型 空気冷却器付静圧過給ディーゼル機関									
発電端出力 (kW)	6 400	7 450	8 550	9 600	3 750	4 350	5 000	5 650		
平均有効圧力 (MPa)	2.45				1.95					
筒内最高圧力 (MPa)	18.0				14.7					
燃料消費率 (発電端)	192 g/(kW·h) +5%以内				192 g/(kW·h) +5%以内					
NOx (O ₂ 13%, ppm)	950 ppm 以下				950 ppm 以下					

表 2 KU 34 形機関の出力と回転数
Power range and engine speed of KU 34

機 種	ボア径 / ストローク (mm)	回 転 数 (rpm) (50Hz/60Hz)	発電機出力 (kW) (発電機効率=0.96)	
			5 000	10 000
三 菱	KU 34	340/400	750/720	6 400 / 9 600
	KU 30	300/380	750/720	3 750 / 5 650
A	320/360	750/720	4 100 / 6 200	
			4 720 / 7 080	
B	320/350	750/720	6 970 / 10 450	
			7 140 / 10 710	
C	400/450	600/600	6 970 / 10 450	
			7 140 / 10 710	
D	410/470	600/600	6 970 / 10 450	
			7 140 / 10 710	

ろである。KU 30 A に比べ P_{me} は約 25%高い 2.45 MPa と設定し、 P_{max} は 18 MPa として燃費低減を狙った。目標性能は、発電端熱効率 44.1%、 b_e 192 g/(kW・h) (発電端)、NOx 950 ppm とした。また、当社開発の燃料・水層状噴射システムも採用可能な燃料噴射系としており、この場合、NOx を 400 ppm まで低減可能としている。

*1 原動機技術部主管
 *2 原動機技術部主査
 *3 原動機技術部 (ディーゼル開発グループ)

*4 長崎研究所内燃機・油機研究推進室主査
 *5 横浜研究所構造・強度研究室長

さらに、KU 34 形機関は市場でのコスト競争力を考慮し、シンプルな構造で極力部品点数を削減するよう工夫がなされている。また、各部品の最適化によって軽量化と寿命の延長を図っており、容易な取扱性と相まってメンテナンス費用を低減している。

このほか、粗悪燃料（3500 s R.W.No.1）への対応や、亜熱帯などの厳しい周囲条件にも対応できる設計としており、定置用ディーゼル機関として高い信頼性と経済性を両立している。

3. 主要構造と設計検証

3.1 主要構造

図1にはKU 34の主要構造と主な特徴を示す。基本構造は、KU 30及びKU 30 A形機関を踏襲しながら、豊富な稼働実績に基づく改善を折込んでいる。工場における検証試験では評価が難しい新規構造の主要部品に関しては、KU 30の実プラントにてフィールドテストを実施し、信頼性を評価した上で採用の可否を決定している。

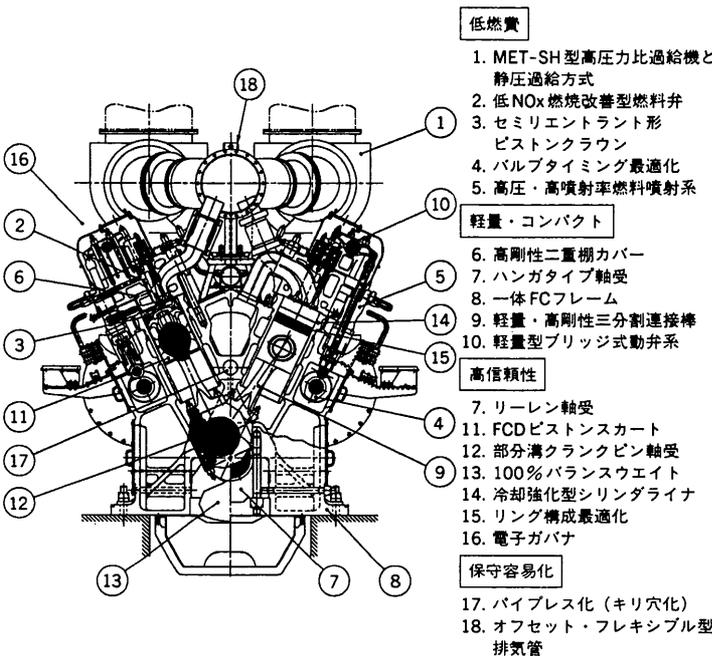


図1 KU 34 形機関の特徴と構造 KU 34 形機関の主な特徴と構造を示す。 Cross section and features of KU 34

一体構造のハンガタイプを採用した本体は、シリンダ間の隔壁に適切なリブを配することで高剛性を確保した。主軸受は、油膜圧力を低減し、油膜厚さを増大させて長寿命化を図るとともに、軸受メタルも従来の三層メタルに代えて耐摩耗性の優れたリーレン軸受としている。また、カウンタウェイトは100%バランスとして内部モーメントを低減し、機関振動を抑制している。

回転数750 rpmクラスでは最も大きいシリンダ径の本機関では運動部分の徹底した慣性質量低減を図っている。連接棒は三次元FEMにて形状を最適化し、従来より20%軽量で高い剛性を有する三分割形を採用している。

シリンダカバー・給排気弁は従来構造にて温度・強度的に十分な信頼性を有しているため、KU 30の構造を踏襲することとした。これに対し、シリンダライナはピストンリングしゅう動面の条件が厳しくなることを考慮して、シンプルで冷却効果の高い構造に変更した。しゅう動面にはレーザ焼入れを施して耐摩耗性を向上している。ピストンは組立形で、ピストンカートには疲労強度の優れたノジュラ鋳鉄を採用した。

そのほか、燃料噴射系には高圧・高噴射率の燃料噴射ポンプを採用し、噴射期間・受熱期間を短縮して燃費の改善を図った。ガバナはKU 30 Aにて高性能と信頼性が実証された自主開発電子ガバナを標準装備としている。

また、本機関の過給機には当社長崎造船所で新たに開発した圧力比4.5の高性能過給機MET-SHを採用している。

3.2 信頼性検証

高回転・低燃費化による出力と筒内最高圧力の増大は、燃焼室周りの熱負荷を増大させるばかりでなく、主要運動部の強度と重量に著しく影響を及ぼし、主要軸受の性能や機関振動を大きく左右する因子となる。したがって、これらの信頼性を確保しながら、いかに運動部重量を低減するかが大きな課題である。

図2には、三次元FEM解析により燃焼圧力下のピストンスカートの変形と強度を評価した例を実測結果と併せて示す。ノジュラ鋳鉄は強度・熱膨張などの面で従来の鍛造アルミより優れた特性を持つ一方で、比重量は約2.5倍であり、強度と重量のバランスや変形としゅう動面のプロファイルを適切に設定する必要がある。そこで、事前検証では強度・変形を実績のあるKU 30と相对比较する手法を採った。実機での応力計測により強度推定精度の高いことが確認され、所期の強度・信頼性を満足する結果を得た。

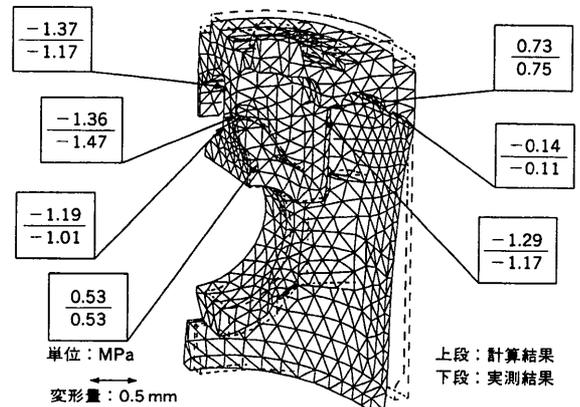


図2 燃焼圧力下のピストンスカートの変形と応力 燃料圧力下の変形と応力を解析と実測結果について比較した。 Stress distribution and deformation of piston skirt at the maximum cylinder pressure

機関振動の検討としては、固有振動と振動応答解析を行い、機関の据付剛性を含めた評価を行っている。図3にはX形振動の計算結果を示す。定格回転数（750 rpm）でX形及びH形振動の共振を回避するよう、機関本体の剛性を最適化した。また、内部モーメントによる1次の振動応答も計算した結果、応力レベルは従来の実績と同等以下である。

3.3 性能計画

P_{me} 2.45 MPa, b_e 192 g/(kW・h)（発電端）を実現するために、機関性能シミュレータにて圧縮比、バルプタイミング、給気圧などの適正化を行い、 P_{max} 18 MPaにて目標性能が達成できる目途を得た。また、燃料噴射系は粗悪燃料の使用や噴射ポンプ駆動系の信頼性を考慮しつつ噴射期間を短縮するため、種々のシミュレーションによって適正化を図り、二次噴射や高・低圧系のキャビテーションなしに目標の最高噴射圧力120 MPaを達成する結果を得た。

一方、目標燃費とNOx、スモーク低減を同時に達成するためには、燃焼室形状と燃料噴霧のマッチングが不可欠である。そこ

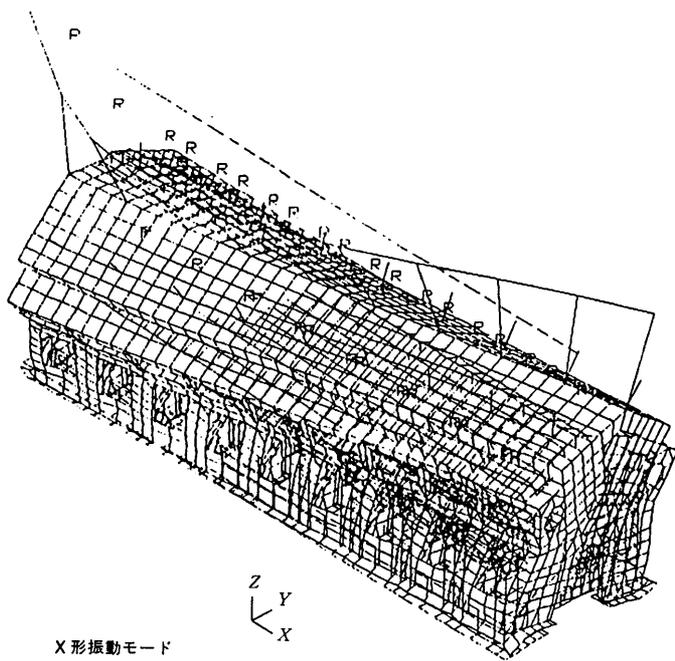


図3 X形振動モードの解析結果 X形振動モードを三次元FEMにて解析した結果を示す。
Prediction of large X mode vibration

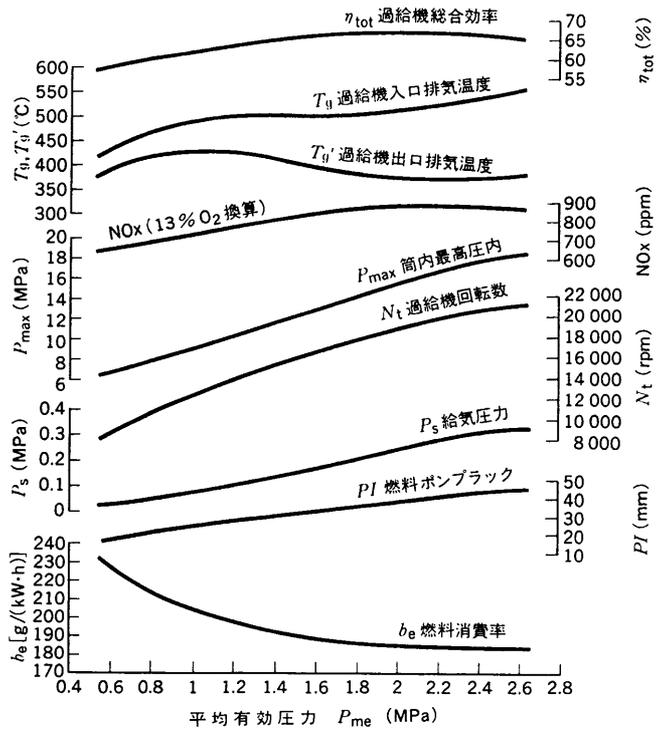


図5 機関性能 機関回転数 750 rpm の実測機関性能。
Engine performance curve at speed of 750 rpm

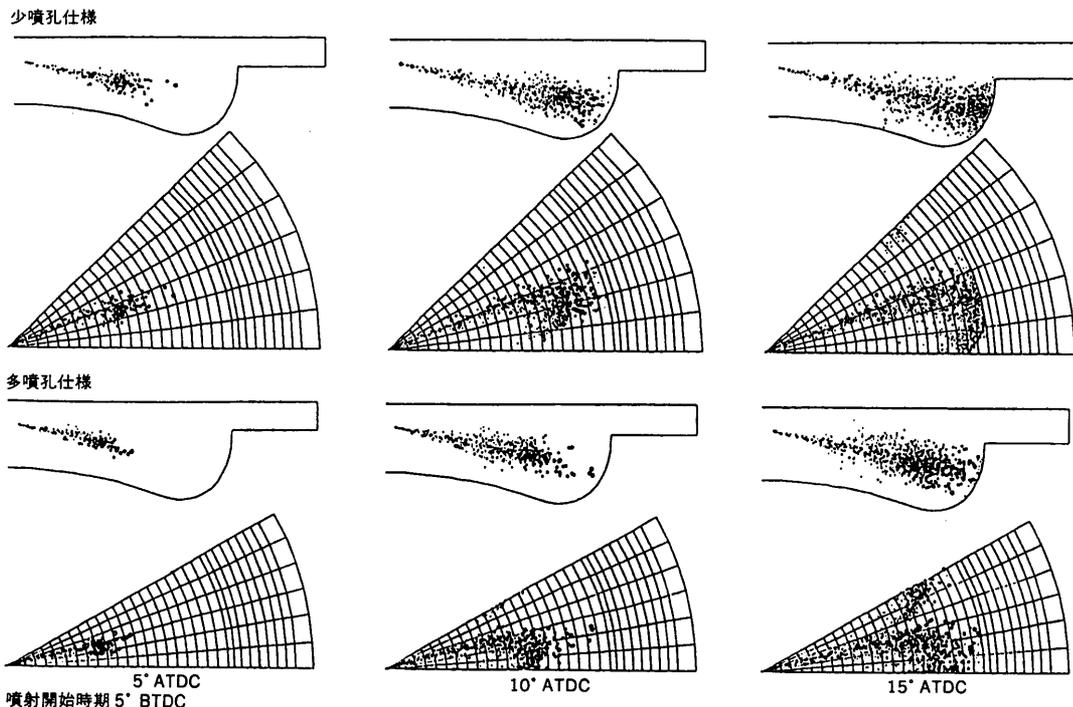


図4 燃料噴霧の分散状況 噴霧流動シミュレーションにて噴孔仕様と噴霧の分散状況を予測した。
Effects of nozzle geometry on fuel spray

で、噴霧流動シミュレーションにて種々の検討を行っている。図4は同一噴孔総面積にて噴霧の分散状況に対する噴孔数の影響を検討した例である。

この結果、多噴孔仕様では噴霧の微粒化が促進されて燃焼の改善が、少噴孔仕様では多噴孔に比べ、噴霧の貫徹力が増して効率良い空気導入が期待できる。この仕様については、実機試験にて筒内圧・燃焼室温度を実測して最終決定することにした。また、燃焼室形状も同様な検討の結果、従来のKU 30 Aを踏襲した燃焼室形状が最も良いとの結論を得た。

4. 実機試験結果

4.1 機関性能

図5にKU 34形機関の機関性能の計測結果を示す。 P_{me} 2.5 MPaにおける b_e は184 g/(kW·h)(機関端)、NOxは900 ppm (O₂ 13%換算)を記録し、目標性能を満足する結果を得た。また、燃料弁マッチング試験では少噴孔仕様が燃費やスモークの面で有利であることが分かった。過給機マッチング試験においては、MET 42 SH形過給機の総合効率は最高67%に達し、圧力比4.2

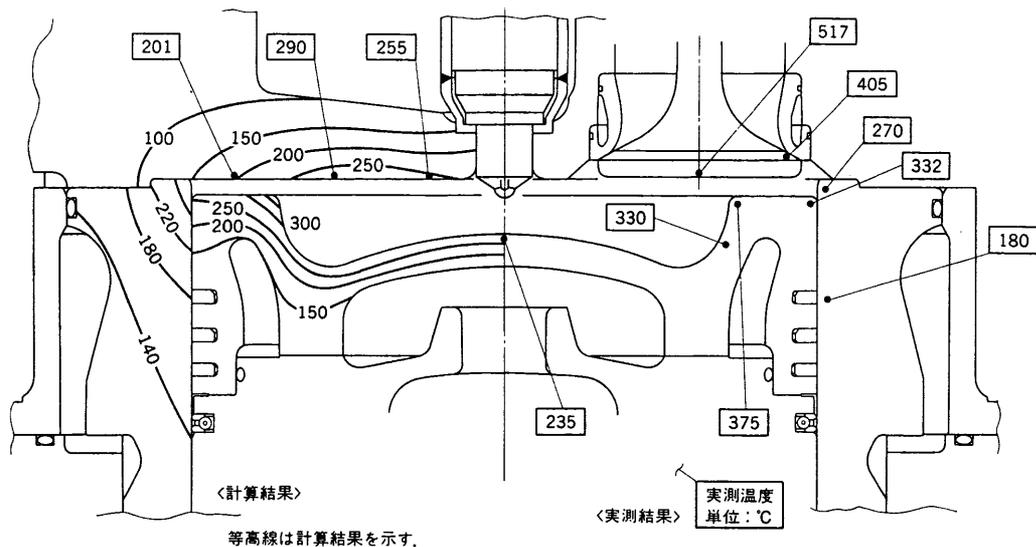


図6 燃焼室周りの温度分布 全負荷における燃焼室周りの温度を計算・実測につき比較した。等高線は計算値。
Temperature distribution around combustion chamber

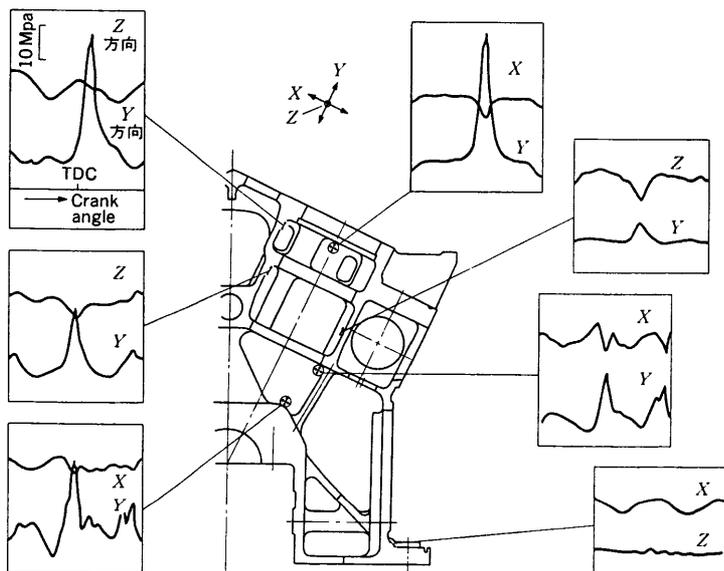


図7 機関本体の動的応力計測結果 本体各部の1サイクルの変動応力を示す。
Results of dynamic stress measurement on engine frame

においても65%と良好な性能を示した。

4.2 信頼性検証

4.2.1 燃焼室温度

燃焼室主要部の温度計測結果を図6に示す。シリンダカバー・排気弁・ピストンクラウンとも事前検証とほぼ同じレベルであり、所期の目標としたKU30と同レベルであることを確認した。また、シリンダライナのトップリング位置の温度は硫酸腐食の心配もなく、潤滑性能上好ましい適正温度の範囲である。

4.2.2 機関振動

実機において機関振動の計測を実施した結果、X形・H形振動は定格回転数で4.5次及び4次・5次の起振力との共振を回避していることを確認した。図7には全負荷における機関本体の動的応力計測結果を示す。各部の作用応力レベルは十分小さく、高い信頼性を有することを確認した。

4.2.3 主要部品の最適化

事前検証にて評価の難しい主要部品については、形状・材質などの異なる部品を組み込み、比較評価して最適化する手法を採った。たとえば、潤滑油消費やライナ摩耗と密接な関係を持つピストンリングについて、現在の技術ではしゅう動面のプロファイルや材質を事前に十分な精度で最適化することが難しい。そこで、基礎試験にて有望と判断された数種類の組合せを実機に組み込み、運転経緯を調査して最適なリング構成を選定した。このほか、ピストントップランドのクリアランス、燃料噴射ポンプのデフレクタ形状なども同様の手法で最適化した。

4.2.4 耐久試験

本機関では、実際の連続運転下で発生するかもしれない初期故障の顕在化とその対策を確立して市場に投入するため、50サイクルの急速発停試験と500h(燃焼最高圧力の繰返し数で 1.1×10^7 回)の過負荷耐久試験を実施した。本試験は、定格出力よりさらに高い P_{me} 2.6 MPa、 P_{max} 19 MPaの過酷な条件にて実施しており、高い信頼性を有していることが確認できた。なお、本耐久試験の実施と合わせて、旅客船用主機としてのJG新形内燃機関の承認申請を行った。

5. あとがき

KU34形機関の主な特徴と、18KU34試験機関での各種試験結果について述べた。計画どおりユーザに満足いただける性能と信頼性を有する機関を開発できたと考えている。当面の商談には、 P_{me} 2.2 MPa、 P_{max} 18 MPaと余裕を持った出力仕様にて対応していき、稼働実績を考慮して出力アップを図る予定である。今後とも使用実績を十分フォローし、ユーザの期待にこたえていく所存である。

参考文献

- (1) 恒屋ほか、三菱KU30形中速ディーゼル機関の開発、三菱重工技報 Vol.23 No.5 (1986) p.44
- (2) 塩田ほか、三菱KU30ディーゼルコージェネレーションプラントの運転実績、三菱重工技報 Vol.31 No.3 (1994) p.205