

UEC52LSE 形高出力ディーゼル機関の開発

Development of UEC52LSE Marine Diesel Engine

横浜製作所 小野茂視^{*1} 中野良治^{*2}
 神戸造船所 山田知夫^{*3}
 技術本部 佐藤伸朗^{*4} 赤川裕和^{*5}
 児玉敏雄^{*6}

三菱 UEC-LS II 形機関は、1998 年にそのシリーズ化を完了し、国内外の主に船用主機として約 200 台が就航している。これらの良好な就航実績を反映し、将来の高出力化や環境対策等の社会的ニーズにこたえるため、UEC 52 LSE 形機関の開発に着手した。本機関は従来同クラス機種に比べて出力率が 15 % 上回る一方、燃料消費率は同一とした高出力・高経済性機関である。開発に際しては LS II 形機関の設計コンセプトを基本とし、性能・信頼性・環境対応等それぞれの課題に対して当社のディーゼル機関開発の歴史の中で蓄積した技術と最新の知見を駆使して設計検証を行い、従来機種並み以上の性能・信頼性を確認し、この度開発設計を完了した。

All Mitsubishi UEC-LSII series engine models were completed in 1998. Some 200 units have been in service mainly as marine propulsion engines. Based on satisfactory service results, we started developing the UEC52LSE engine to attain high power and meet environmental requirements. This high-power, high-cost-efficiency engine has a power ratio 15% higher than conventional models in the same class while consuming the same amount of fuel. We used the LS II engine design concept and verified design using know-how accumulated in our diesel engine development. We confirmed performance and reliability analytically.

1. ま え が き

三菱重工では、1955 年以來自社開発の UE 形ディーゼル機関を製作している。1998 年には UEC 37 LS II 形機関を開発し、最新機種である UEC-LS II 形機関のシリーズ化を完了した。UEC-LS II 形機関は既に約 200 台が就航しそれぞれ性能・信頼性共に良好のうちに順調に運航されている。

当社では今後の船舶の需要動向や環境対策等の社会的ニーズに対応できる高出力・高経済性機関として UEC 52 LSE 形機関の開発に着手した。開発に際しては、良好な就航実績を有する UEC-LS II 形機関の設計コンセプトを基本にし、更なる高出力・高経済性を実現するために、当社の最新技術を駆使して性能・信頼性の設計検証を実施した。

本報では UE 機関の概要と UEC 52 LSE 形機関の設計検証結果について述べる。

2. UE ディーゼル機関の概要

表 1 に UE ディーゼル機関の最新シリーズ機種である LS II 形機関と共に新開発の UEC 52 LSE 機関の主要目を示す。LS II 形機関は、33 LS II から 85 LS II までの 8 機種により構成され、1 200 ~ 46 000 kW、54 ~ 215 rpm の出力範囲をカバーし、小型内航船から VLCC まであらゆる船種の主機として搭載されている。

表 2 に UE 機関の生産実績を示す。UEC-LS II 形機関はその最長運転時間が既に 75 000 h 以上に達しており、それぞれ順調に運航されている。

特に燃焼室の信頼性やピストンリング・シリンダライナの摩耗実績については、各顧客から高い評価を得ている高信頼性機関である。

図 1 にピストンリング・シリンダライナの摩耗実績を示す。

表 1 UEC 形機関主要目
Principal particulars of UEC type diesel engine

機 関 型 式		33 LS II	37 LS II	43 LS II	50 LS II	60 LS II	75 LS II	85 LS II	85 LSC	52 LSE
シ リ ン ダ 数		4 ~ 8	5 ~ 8	4 ~ 8	4 ~ 9	4 ~ 8	4 ~ 12	5 ~ 12	5 ~ 12	4 ~ 8
シリンダ直径	mm	330	370	430	500	600	750	850	850	520
ピストン行程	mm	1 050	1 290	1 500	1 950	2 300	2 800	3 150	2 360	2 000
行程/シリンダ径	—	3.18	3.49	3.49	3.90	3.83	3.73	3.71	2.78	3.85
機関出力	kW/cyl. (PS/cyl.)	566 (770)	770 (1 050)	1 052 (1 430)	1 375 (1 870)	1 986 (2 700)	2 942 (4 000)	3 862 (5 250)	3 898 (5 300)	1 700 (2 320)
機関回転数	rpm	215	186	160	124	105	84	76	102	127
正味平均有効圧 P_{me}	MPa	1.77	1.79	1.81	1.74	1.75	1.70	1.71	1.72	1.90
平均ピストン速度 C_m	m/s	7.53	8.00	8.00	8.06	8.05	7.84	7.98	8.02	8.47
出力率 $P_{me} \times C_m$	MPa × m/s	13.3	14.3	14.5	14.0	14.1	13.3	13.6	13.8	16.1
燃料消費率	g/(kW·h) [g/(PS·h)]	177 (130)	175 (129)	173 (127)	167 (123)	166 (122)	165 (121)	163 (120)	165 (121)	167 (123)

*1 原動機技術部主管

*2 原動機技術部ディーゼル設計課主務

*3 原動機技術部次長

*4 横浜研究所機械研究室

*5 長崎研究所内燃機・油機研究推進室

*6 高砂研究所構造研究室長

表2 UEC形機関の生産実績

Production record of UEC type diesel engine

機 種	受 注	出荷済み	就航中	最長運転時間h
UEC 37 H/H-II	166	166	166	116 000
UEC 45 H/HA	111	111	111	124 500
UEC 52 H/HA	108	108	108	136 500
UEC 60 H/HA	78	78	78	135 000
UEC 37 L	16	16	16	94 000
UEC 45 L	14	14	14	96 500
UEC 52 L	48	48	48	104 000
UEC 60 L	5	5	5	100 000
UEC 37 LA	264	256	252	91 000
UEC 45 LA	256	245	244	92 000
UEC 52 LA	129	124	121	93 000
UEC 60 LA	44	42	40	93 000
UEC 52 LS	92	85	83	76 000
UEC 60 LS	145	132	128	83 000
UEC 33 LS II	40	40	40	37 100
UEC 50 LS II	103	97	95	35 300
UEC 60 LS II	23	20	17	25 000
UEC 75 LS II	20	19	19	75 000
UEC 85 LS II	25	19	18	46 300
UEC 85 LSC	7	7	7	36 200
総 計	1 694	1 632	1 610	

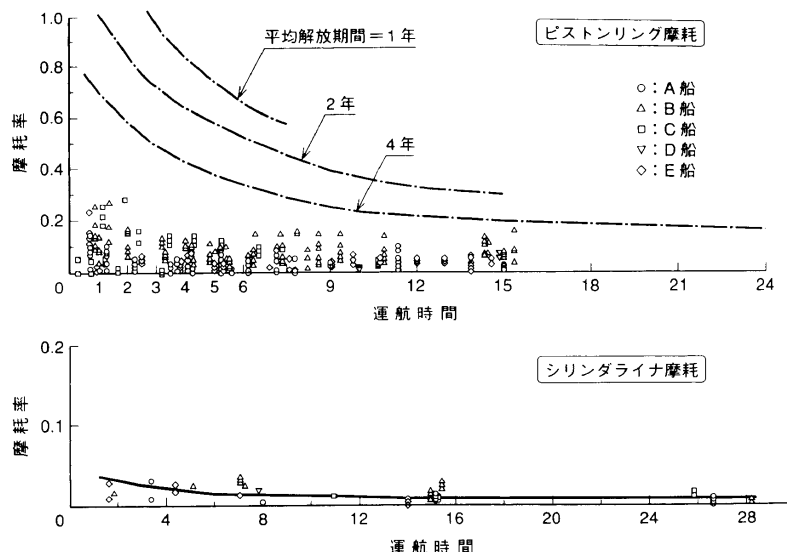


図1 UEC-LS II形機関のピストンリング・シリンダライナ摩耗実績 UEC-LS II形機関の就航後のピストンリングとシリンダライナの摩耗状況を示す。
Service result of piston ring and cylinder liner wear of UEC-LS II type engine

3. 開発コンセプトと主要構造

UEC 52 LSE 形機関は同クラスの従来機種である UEC 50 LS II 形機関に比べて平均有効圧力 P_{me} を 10 %、ピストン平均速度 C_m を 5 % 増大させた高出力機関である。また筒内最高圧力 P_{max} を 10 % 増加させることにより、UEC-LS II 形機関から高出力化したにもかかわらず、燃料消費率は UEC 50 LS II 形機関と同一とした高経済性機関でもある。

開発に際しては、船主・造船所・機関製造所すべてにとっての高経済性を追求した。すなわち低燃費機関はもとより高信頼性に基づくアフターサービス費用の低減、機関ぎ装性・メンテナンス性・操縦性の容易化、機関部品点数の削減等に重点を置いた。さらに近い将来にクローズアップされる環境問題への対応を考慮して NOx 排出レベルを標準条件より 50 % 程度低減できる水添加装置の採用が可能とした環境に優しい機関である。

4. 構造の特長

UEC 52 LSE 形機関の断面を図2に示す。UEC 52 LSE 形機関は良好な就航実績を持つ UEC-LS II 形機関の設計思想を基本とし、またパイプレス等のコンパクト化を推進している自社開発機関である4サイクル KU ディーゼル機関の設計思想を反映し⁽¹⁾、前述した開発コンセプトを実現するために、種々の改善を織込んだ。

以下に UEC 52 LSE 形機関の主要構造について述べる。

4.1 過給機配置

多様な船型の機関室に対して、最適な機関の配置に加えてフレキシブルな機関室の計画が可能となるように、過給機配置は従来からの排気側配置と船尾側配置の2種類の構造を選択できるように準備した(図2参照)。例えば、船尾形状がスリムな機関室には幅寸法を小さくした過給機船尾側配置が適していると考えられる。また本機関の過給機には自社開発の高性能過給機 MET-SE 形を採用し、機関の高効率化を確保している。

4.2 本 体

台板、架構、ジャケットは鋳物の一体構造とし、これらをタイボルトにより強固に締結する高剛性構造としている。カム軸箱は

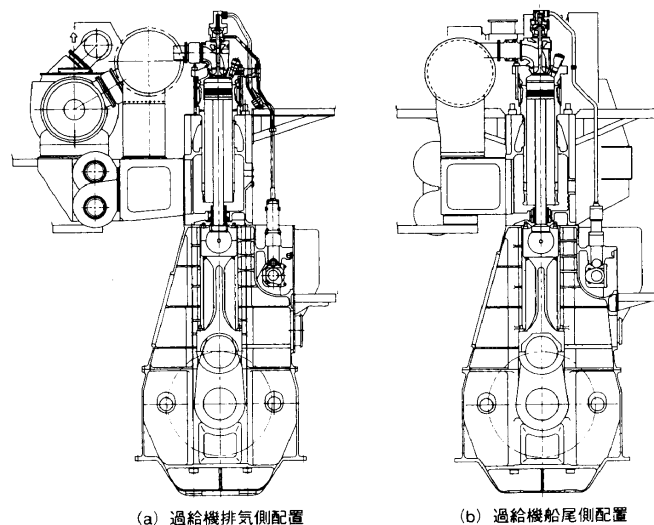


図2 UEC 52 LSE 機関の機関断面 UEC 52 LSE 形機関の断面構造を示す。(a)は過給機の排気側配置を、(b)は過給機の船尾側配置を示す。
Cross section of UEC 52 LSE type engine

架構と一体化し、排気弁作動油供給管及びカム軸系潤滑油管を架構本体に内蔵化しパイプレス化を実現することにより、部品点数の削減と接近性・メンテナンス性の向上を図った。ジャケットはシリンダライナを直接支持する、背の高い高剛性構造とした。これによりカバーボルト長さを短縮高剛性化し、併せて上段支腕等、上段の各種機器・構造物の支持部剛性を確保することにより機関上層部の更なる低振動化を図った。

4.3 シリンダライナ

高い筒内最高圧力に耐えるようにライナ上部は肉厚の特殊鋳鉄製とした。FEM 解析によるライナ温度・応力、流動解析による冷却水流れの最適化により従来のボアクール方式に換えてジャケット冷却方式の採用を可能とし構造の単純化を図った。ライナ下部にて新気を流入する掃気口には掃気口の高さに応じてスワール強さを最適化した当社独自開発の最新 CSS (Controlled Swirl Scavenging) ポートを採用し、その高い掃気効率により燃焼条件

の向上を図っている。

4.4 ピストン

ピストンは、特殊合金製で高い筒内最高圧力と、高い平均有効圧力による高熱負荷に耐えられる中支え方式を採用した。ピストン冠内部は最適に流速を調整したシステム油により、効率的に冷却される。

4.5 主軸受

軸受周りの剛性を考慮した油膜特性解析手法（EHL）を用いて軸受の油膜特性が精度良く評価できるようになり⁽²⁾、埋没性、信頼性に優れたホワイトメタルを従来機種と同様に採用している。軸受は従来どおり薄肉メタルとしており、取扱い性を重視している。

4.6 カム軸駆動系

カム軸は、従来同様信頼性及びタイミング精度の高い歯車列によりクランク軸から駆動される構造としている。カム軸箱の架構との一体化と併せて、駆動歯車の枚数を従来の4枚から3枚に減少させ更なる信頼性の向上と部品点数の削減を図った。

4.7 空気冷却器

空気冷却器はケーシングとの一体構造としている。また空気冷却器の上方はオープンスペースを確保した構造としており、一体吊りによる開放・搬出が容易となり、メンテナンス作業性の容易化を実現した。

以上の信頼性と保守性の向上をねらった構造のシンプル化等の改善により UEC 52 LSE 形機関の部品点数は UEC 50 LS II 形機関に比較して約 25 % 低減することができた。

5. 性能・信頼性の設計検証

機関の高出力化による平均有効圧力とピストン平均速度の増大さらに低燃費化のため実施した筒内最高圧力の増大は、燃焼室周りの熱負荷を厳しくするばかりでなく機関本体及び主要運動部の強度にも大きな影響を与えることになる。そこで開発に際しては当社の長年にわたるディーゼル機関の開発の中で蓄積した技術と

最新の知見を駆使して、あらゆる角度から信頼性の設計検証を実施した。ここではその設計検証の一部を紹介する。

5.1 本体強度

UEC 52 LSE 形機関の本体強度の解析結果を図 3 に示す。

台板・架構・ジャケットは 1.5 シリンダの三次元ソリッドモデルを用いて FEM 解析を実施した。

タイボルト締付け、上死点時、下死点時、最高筒内圧力作用時、最大サイドスラスト作用時等の主要な荷重条件において本体各部の応力、変形を計算評価し、従来実績機関と同等以上の信頼性を確保した。

5.2 燃焼室温度・強度

燃焼室周りの温度解析結果を図 4 に示す。燃焼室周りの温度評価は、これまでの開発機関の温度実測とその逆解析結果の蓄積から各部の計算条件を設定して実施した。しかし UEC 52 LSE 形機関は、その平均有効圧力が従来機種に比しておよそ 10 % と大幅に増大することから、従来機関において UEC 52 LSE の平均有効圧力に近い状態にした運転により温度計測を実施した（図 5 参照）。その計測結果から UEC 52 LSE の計算条件の妥当性をクロスチェックしている。

上記予備温度計測データを基に燃焼室各部の形状の最適化を行った結果、各部の温度解析結果は、従来機種の実績値と同等のレベルにあることを確認した。またこの温度解析結果と筒内最高圧力を用いて各部の疲労強度を検討した結果を図 4 に示す。燃焼室周りの疲労強度も形状の最適化の結果、従来実績機関のそれとはほぼ同等のレベルにあり、十分な疲労安全率を有していることを確認した。

5.3 主軸受

図 6 に主軸受の油膜圧力計算結果を示す。UE 機関では、過去の主軸受改善評価技術として、クランク軸と主軸受周りのハウジングの剛性を考慮した高精度軸受荷重の計算手法と、弾性を考慮した軸受油膜特性評価手法（EHL：Elasto-Hydrodynamic Lubrication）を開発した。これらの解析手法により、主軸受特性の解析はその精度が飛躍的に向上した。UEC 52 LSE 形機関ではこれらの最新技術を駆使し、クランク軸及び主軸受周りの剛性の最適化を実施し、油膜圧力分布を、従来実績機関の圧力レベル以下に調整することができた。

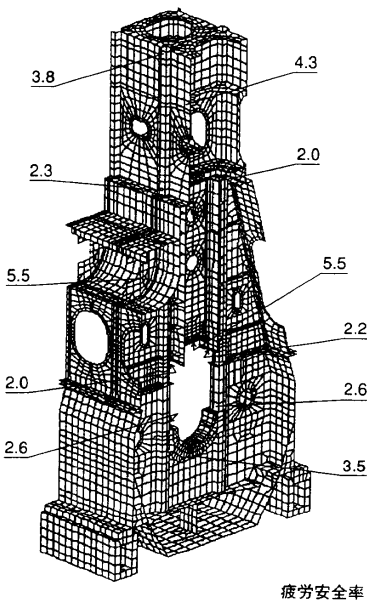


図 3 UEC 52 LSE 形機関の本体強度解析結果 UEC 52 LSE 機関の本体構造の三次元 FEM 解析による疲労強度検討結果を示す。
Result of strength analysis of UEC 52 LSE type engine body

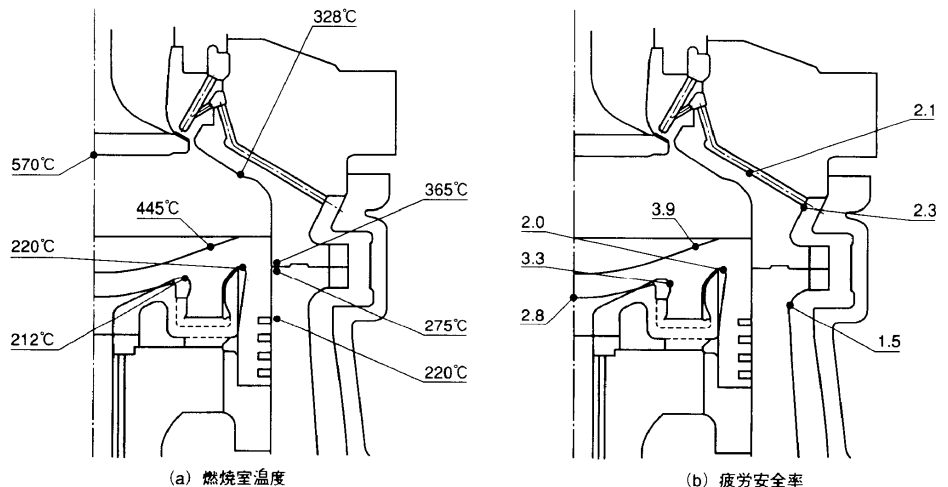


図 4 UEC 52 LSE 形機関の燃焼室温度・強度解析結果 FEM 解析による UEC 52 LSE 形機関の燃焼室の (a) 温度推定結果、(b) 疲労強度解析結果を示す。
Result of temperature and strength analysis for combustion chamber of UEC 52 LSE type engine

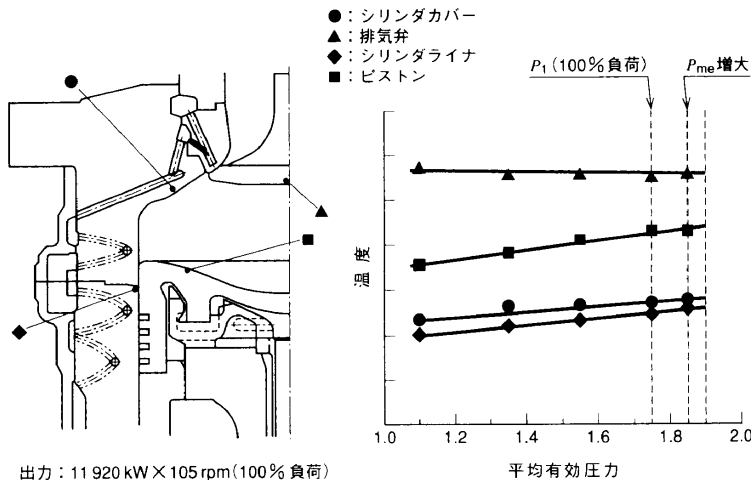


図 5 高負荷運転による温度計測結果 従来機種にて実施した高負荷運転時の燃焼室温度計測結果を示す。
Measuring result of temperature of combustion chamber at high P_{me} operation test on conventional engine

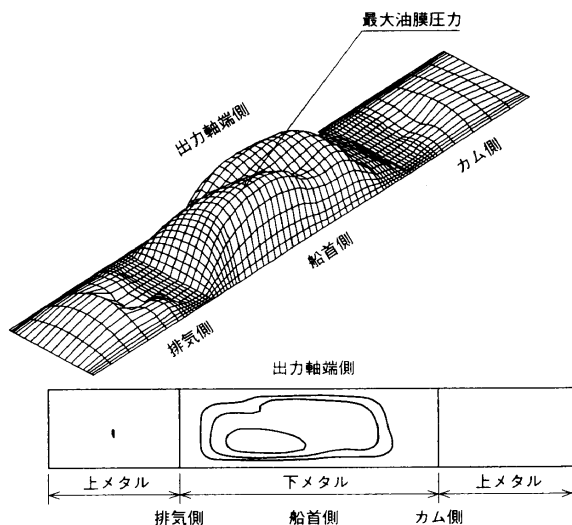


図 6 UEC 52 LSE 形機関の主軸受油膜圧力解析結果 軸受の剛性を考慮した EHL 解析により計算した主軸受の油膜圧力分布を示す。
Calculation result of oil film pressure in journal metal by EHL analysis

5. 4 排気動弁・燃料噴射系

従来はシリンダジャケット下部位置にあったカム軸箱を架構に一体化させた関係で、排気動弁系及び燃料噴射系の作動油高压管長さは、従来機種に比べて相対的に長くしている。これまでの開発機関での実測結果を織込んだシミュレータを利用して、カムプロファイルや作動油管周りの諸元の最適化を図った。その結果、燃料噴射系においては 2 次噴射やキャビテーションのないことを確認している。また水添加採用時（水添加率 50 %）の燃料噴射特性も併せて計算した。水添加に際してはカムリフトを増加し吐出量の増量分を確保するとともにカム速度を調整して燃油圧力の過昇を抑える工夫をした。さらに、水添加時を想定してカム軸駆動装置周りの強度についても評価し従来機種並みの安全率を有していることを確認している。排気弁の作動については、そのシミュレーション解析結果から排気弁の開弁期間中はその駆動油圧の変

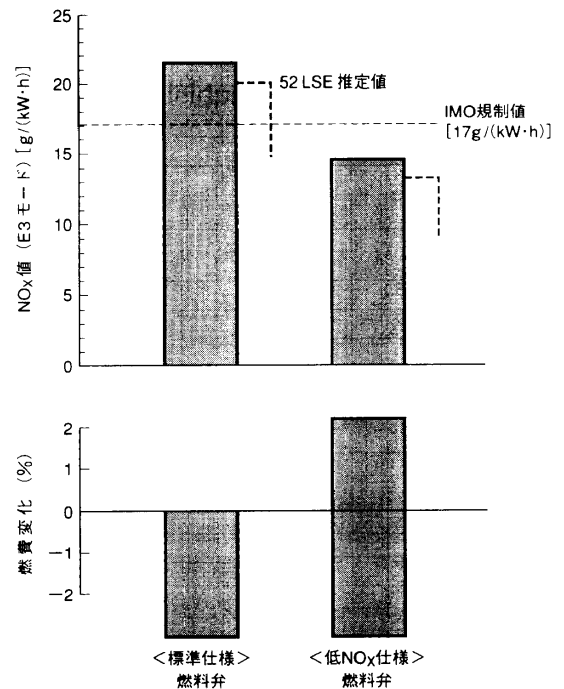


図 7 IMO 対応低 NO_x 燃料弁比較試験結果 UEC 60 LS 形機関にて実施した低 NO_x 仕様燃料弁使用時の NO_x 排出量と燃料消費率の変化を示す。
Measurement result of low NO_x type fuel injection valve

動が従来機種のそれに比べて若干高くなるものの、カムプロファイルの調整等により所期の開弁期間を確保し、排気弁着座時の圧力降下や着座速度等を従来実績機種並みとすることができた。

5. 5 NO_x 規制対応

UE 機関では、2000 年の IMO による NO_x 規制 (MARPOL ANNEX VI) に対しては、基本的に低 NO_x 仕様の燃料弁を採用することにより対応することができる (図 7 参照)。

UEC 52 LSE 機関開発に際しては、将来予想される更なる NO_x 規制にも対応できるように水添加装置（水噴射装置もしくは水エマルジョン燃料装置）を採用できるようにあらかじめ構造・強度を含めて検討している。これにより、NO_x 排出レベルは標準仕様に対して約 50 % 減 [約 10 g/(kW·h) : E 3 モード] に低減させることができる。

6. あ と が き

UEC 52 LSE 形機関の開発コンセプト及び信頼性の設計検証結果について述べた。今後実機検証試験により、所期の性能と信頼性を確認の上市場投入し、将来の環境対応形・高出力機関として、顧客の期待にこたえていく所存である。

参 考 文 献

- (1) 宮野弥明ほか、三菱 KU シリーズディーゼル機関の開発、三菱重工技報 Vol.34 No.4 (1997-7) p.260
- (2) 古野啓二ほか、大型船用 UEC ディーゼル機関の信頼性向上、三菱重工技報 Vol.34 No.4 (1997-7) p.256