

本調査は、独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構
が、ヤンマー株式会社に委託して実施したものである。

代替燃料を活用した常時混焼原動機システム に関する調査 (概要版)

独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構

2020 年 2 月

1. はじめに

船舶の環境負荷軽減に向け、そのエネルギー源において二酸化炭素(CO₂)を削減するためには、現在主流である重油から、より炭素分が少ない燃料に移行するべきである。しかし代替燃料を単独の燃料源として利用するには、すでに実用化された液化天然ガス(LNG)を除くと技術的に不明確な部分が多く、信頼性の観点からも難しいとの見方が占めている。従って原動機(エンジン)中でメイン(ベース)燃料となる重油や LNG にそれらを補完的に混ぜ込み、両者を共に燃やす混焼方式がソリューションの一つとして選択される。但し、二元燃料を切替えて運転するデュアルフューエルエンジンは市場実績があるものの、混焼エンジンに関する具体的な情報がほとんど無いというのが実状である。

そこで本調査では、現在考えられる混焼方式において CO₂削減効果を探ると共に、二元燃料を使用した各エンジンでの技術課題を抽出した。加えて具体的な船舶へのレイアウト試験設計を行うことにより、システム全体(燃料供給システムを含む)での課題点や法的问题の有無等を整理した。さらには、本常時混焼原動機システムを搭載した内航船普及に向けた 2050 年を見据えたロードマップを検討した。

2. 代替燃料を活用した混焼方式の検討と課題整理

表 1 に、調査した混焼方式(燃料)を示す。(産業用)小型ディーゼルエンジン(以降、小型 D/E)と(中型コージェネレーション用)希薄予混合燃焼(リーンバーン)方式のガスエンジン(以降、リーンバーン G/E)による CO₂削減効果の実機調査と技術課題の整理を行った。

表 1 (常時)混焼方式の一覧

ベース燃料	混焼燃料			検証手段	
	水素	液化石油ガス(LPG)	LNG	エンジン種別	定格出力/回転速度 (kW/min ⁻¹)
軽油	①	②	③	小型 D/E	44/3000
LNG	④	⑤	—	リーンバーン G/E	400/1800

まず小型 D/E での実験について、ベース燃料としては軽油を供試し、各混焼燃料を吸気マニホールド上流で混合できる装置を使用した。エンジンの運転条件としては、機関回転速度を 1000min⁻¹で一定とし、3 段階の負荷変更を実施している。①～③に対する混焼試験の結果、図 1・左図より、最も高い CO₂削減率が得られる混焼燃料としては水素になることを確認した。但し水素混焼時の高負荷においては、異常燃焼(プレイグニッション)の発生により混焼率を上げることが出来ず、低中負荷域と比較して CO₂削減率の低下が見られた。

「プレイグニッション」は、圧縮行程後期に筒内ガス温度・圧力が上昇し、通常着火前に未燃予混合気自着火する現象であり、図 1 の右図にその燃焼波形を示す。“通常(従来)のディーゼル燃焼”と“これを点火源とした代替燃料による火炎伝播”の組合せとなる本燃焼形態により、従来は無かった異常燃焼を実機確認したわけであるが、エンジンの許容筒内圧力超過やノッキングに発展する可能性があり、また混焼率を高めるためにもこれを回避する必要がある。その方策のコンセプトとしては圧縮端温度の低減が有効であると考えられる。

一方、(同一噴射時期における) NO_x(窒素酸化物)排出量について、水素混焼率が高いほど、低負荷では低下したが、高負荷では増大傾向を示した。吸入混合気の希薄化レベルによ

る燃焼速度の高低が、各々影響しているものと推察される。本混焼エンジンは従来のディーゼル燃焼と予混合燃焼が合わさった複雑な燃焼形態をとることは前述しているとおりであり、各負荷に応じた最適な燃料、空気量の供給制御が必要になる。

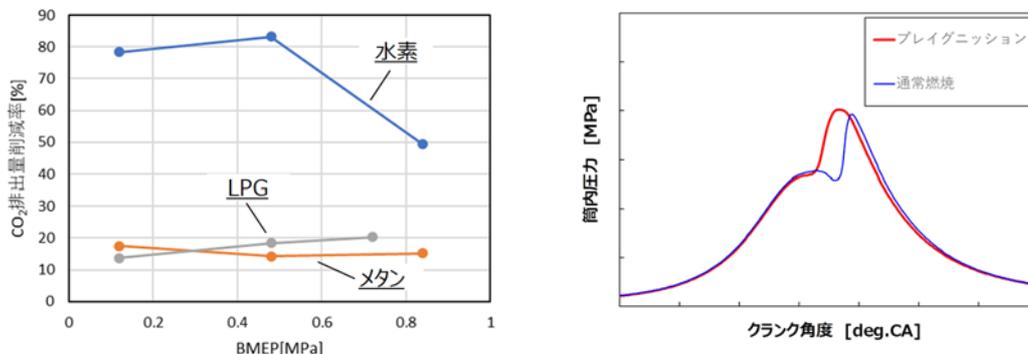


図1 ディーゼル燃料ベースでの混焼試験結果
(左図:CO₂削減率、右図:高負荷時の燃焼波形)

次に都市ガス 13A(LNG)を燃料とするリーンバーン G/E による混焼試験結果¹⁾について、ここでは④を抜粋して報告する。その水素混焼実験には、給気ポート噴射システムを使用した。機関回転速度を 1800min⁻¹で一定とし、負荷率 50、75% [正味平均有効圧力(BMEP : Break Mean Effective Pressure)では 0.69、1.02 MPa] の 2 段階で出力変更している。図 2 の左図中、一点鎖線および破線は、13A および LFO(軽質燃料油)に対する水素熱量混合率と CO₂削減率の計算結果を示す。本実験では、50~60%の CO₂削減率(図中プロット)を得る結果となった。なお水素熱量混合率(混焼率)とは、エンジンへの全燃料投入熱量に対する水素投入熱量の割合である。

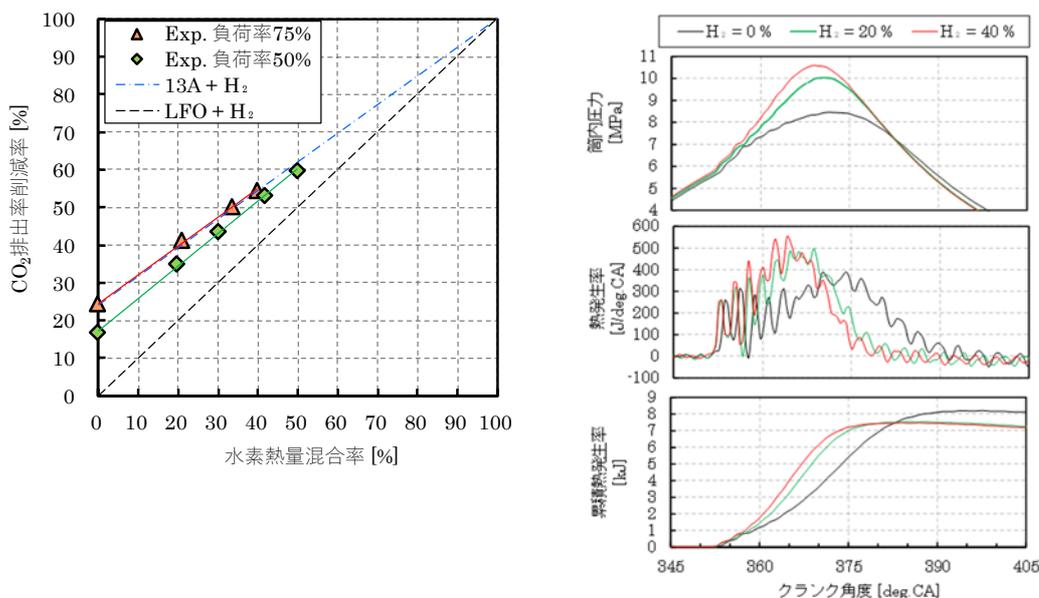


図2 LNG ベースでの混焼試験結果 (左図:CO₂削減率、右図:燃焼波形)

図2の右図には、負荷率75%において水素熱量混合率を0、20、40%と変化させた場合のクランク角度に対する筒内圧力および熱発生率の実験結果を示す。水素熱量混合率の増加に伴い、(最高)筒内圧力は増大しており、熱発生率からは主燃焼期間が短縮していることが分かる。水素混焼により燃焼速度が速くなったことが起因しているものと考えられるが、対策として燃焼緩慢化作用を有する排気再循環(EGR: Exhaust Gas Recirculation)技術を適用し、この筒内圧力の増大および同時に発生したNO_x排出量の増加抑制が可能になることを確認した。高負荷、高混焼率になると、さらに高いEGR率が要求されることから、EGR装置の大型化や耐久性、負荷応答時の制御方法などが今後の検討課題として挙げられる。

3. 代替燃料を活用した常時混焼原動機システムの概略設計と課題の明確化

3.1 試設計条件と対象船におけるCO₂削減量の推定

本システムで用いる混焼方式としては、小型D/E、リーンバーンG/E共にCO₂削減効果が最も高かった「水素」を代替燃料とし、ベース燃料は各検証実験の結果から抽出された課題と対応策の現状に基き、「重油」を選択することとした。

次に、本システム搭載の概略設計を行うタイプシップとして、「749トン型石灰石運搬船」を選定した。”試設計”においては具体的な問題点を把握することが肝要になるが、船種に対して代替燃料タンク配置上の難易度を勘案し、大きさ(総トン数)については内航船数の80%以上が”749GT以下”であり、かつ大型化の傾向にあることを考慮した。

図3には、対象船搭載エンジンでのCO₂排出量削減効果の算出(推定)方法を示す。1次元性能シミュレーションによる本試算では、”小型D/Eにおけるプレイグニッション発生時の筒内ガスの圧縮端温度”を制約条件として、混焼率の限界を決定した。

続いて、重油専焼から水素混焼に移行する際に必要なタンク内容積を求めた結果を図4に示す。後述のとおり燃料を液体水素としているが、その単位容積当たりのエネルギー密度は、重油に比べて約5分の1程度である。そのため、重油専焼の場合よりも、燃料タンク全体の所要容積は大きくなる。本検討条件において、水素混焼での燃料タンク総容積(重油および水素タンク容積の和)は、重油専焼時を基準とすると、約2.5倍の大きさとなっている。

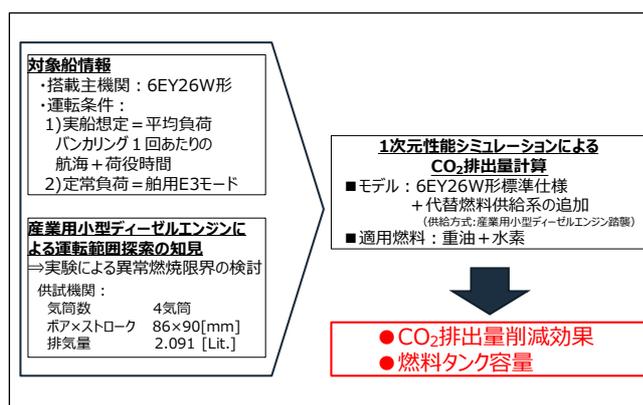


図3 CO₂排出量削減効果の算出方法

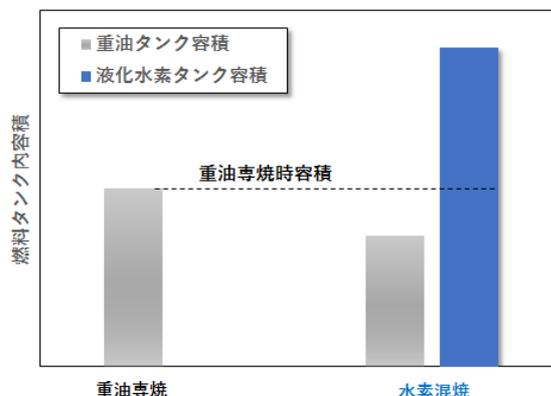


図4 船内に搭載する燃料タンク容積の比較
(シミュレーション計算結果)

3.2 水素混焼原動機システムの概略配置図作成

液体水素は、LNGと同様に低温状態で貯蔵し、気化させてエンジンに供給することとなる。従って本試設計においては、LNGを燃料とする既存事例をベースにして、基本装置を構成した。また規則要件として、現在のところLNGに関してのみ具体的な規定があるIGFコード(国際ガス燃料船安全コード)を参考にし、燃料タンク個数・配置、タンクコネクションスペース、ガス燃料配管やバンカリングステーションを検討項目として挙げた。燃料タンク仕様については、種々の資料等²⁾³⁾を調査の上、決定している。荷役関係設備や甲板室(居住区)等の甲板上構造物を変更することなく積載可能な場所としては、物理的要件にも従い、以下、2パターンの概略一般配置図を作成した。

- ・案1：H₂タンクを暴露甲板上に配置する（貨物艙容積の変更を生じない）場合
- ・案2：H₂タンクを船体内に配置する（総トン数の変更を生じない）場合

本調査では、総トン数増加をはじめとした不利な部分もあるが、案1の方が、船体重量、貨物積載量、建造費用(推察)の点で有利との結論としている。

4. 常時混焼原動機システムを搭載する内航船の普及に向けたロードマップ

本調査で得られた各技術課題や、国土交通省および(一財)日本船舶技術研究協会らの主導による外航船舶のGHG(温室効果ガス：Greenhouse Gas)削減ロードマップ策定事業、さらには2018年度より環境省と国土交通省が共同事業として実施している水素燃料電池船の普及のためのロードマップ策定事業などを参照し、常時混焼原動機システムを搭載する内航船の普及に関する2050年を見据えたロードマップを検討した。

その結果、本ロードマップにおいては、水素混焼エンジンを搭載した小型船舶の就航から徐々に始まり、小型貨物船や定期航路の旅客船、さらには大型貨物船へと適用範囲が拡大するとしている。

5. まとめ

船舶からの排ガスの内、SO_x(硫黄酸化物)については2020年1月より規制が強化され、CO₂については国際海事機関(IMO)において2050年までに総排出量を50%以上削減し、今世紀中なるべく早期に排出ゼロを目指すといった野心的な目標が掲げられている。国内では、2016年5月に閣議決定された「地球温暖化対策計画」により、内航海運における目標として「2030年度に2013年度比で157万トンのCO₂削減」が設定されている。年々強化されていく環境規制やCO₂削減目標に対し、本調査においては以下の取り組みを行った。

小型D/EとリーンバーンG/Eを供試した燃焼実験や机上検討、先行研究により得られた知見を通じ、既存エンジンとの機器の違いや運転可能条件、各燃焼特性、CO₂削減効果、技術課題をまずは明確にした。

実船適用の観点からは、LNGを混焼のベース燃料とする場合、そのLNGと水素双方とも貯蔵に低温液化が必要であり、液化燃料の発熱量も重油と比較して少ないことから貯蔵設備が大型化すること、供給系統の配管が煩雑になることが課題として考えられた。これらを基に、船舶への搭載が最も現実的と判断された「重油+水素」の常時混焼原動機システムについて、試設計対象船の主機関でCO₂削減率を推定した。ディーゼルベースでの水素混焼限界の要因となるブレイグニッション対策の一つとしては、高出力エンジンでも既に実用化されている「(給気弁の早閉じ度合をIMO-NO_x2次規制仕様より高めた)ストロングミ

ラーサイクルを組合せた二段過給システム⁴⁾」を利用する等、さらなる CO₂ 低減が効果的に見込まれる。上記以外での技術課題としては、燃料供給方式の選別、制御面（調速・空燃比・混焼率）、安全性の確保、水素脆化対策が列挙される。

本システムを搭載する船舶の概略設計を通し、建造するに際しての技術面や法的課題についても明らかにした。類似設備となるであろう LNG を参考にして装置構成や関連規則要件を仮定することにより、タンクコネクションスペースその他必要と思われる区画の試設計を行ったところであるが、実際の建造においてはさらなる詳細な設計・仕様検討が求められる。燃料供給システム以外では、防火構造、消防設備、各種ガス検知装置、通風設備等の項目についても関連規則を調査しなければならない。

現時点では船舶向けの水素供給設備は整備されておらず、大型船舶や不定期航路の船舶に水素を供給することは難しい。GHG 削減船舶の船種拡大に向けた普及準備段階となる技術的なポイントの一つとしては、船内に多量の水素を搭載するための液体水素タンクの開発と実用化が挙げられる。同開発と陸上水素バンカリング設備の整備が進められることによって、総トン数 749 トン程度までの小型貨物船や定期航路の旅客船などへの導入が開始されると考えられる。

6. 参考文献

- 1) 市川泰久，関口秀紀，平田宏一，船用リーンバーンガス機関の水素混焼技術に関する研究，第 88 回マリンエンジニアリング学会学術講演会講演論文集（シンポジウム），p. 131-132，2018 年.
- 2) 日本海事協会，液体水素運搬船ガイドライン，2017 年
- 3) 中川雄太，LNG 燃料船の初期計画，日本マリンエンジニアリング学会誌，第 51 巻第 1 号，2016
- 4) 濱岡俊次，4 ストローク中速ディーゼル機関における過給技術-二段過給システムとその応用，日本マリンエンジニアリング学会誌，第 51 巻第 2 号，p.57，2016