



海運におけるエタノール利用の評価

ロバート・L・マコーミック、ニマル・ナセル

ロッキー山脈国立研究所

本レポートはGrowth Energyの指導の下、NLRが「Work for Others」契約番号TSA-25-33719に基づき作成したものである。

ロッキー山脈国立研究所は、米国エネルギー省傘下の国立研究所であり、重要鉱物・エネルギー革新局が管轄する。契約番号 DE-AC36-08GO28308 に基づき運営されている。

戦略的パートナーシップ・プロジェクト報告書
NLR/TP-2A00-101938
2026年9月

本レポートはロッキー山脈国立研究所（NLR）のウェブサイト
（www.nlr.gov/publications）から無料で入手できる。

海上輸送におけるエタノール利用の評価

ロバート・L・マコーミック、ニマル・ネイサー

ロッキー山脈国立研究所

推奨引用形式

McCormick, Robert L, and Nimal Naser. 2026. 『海運におけるエタノール利用の評価』. コロラド州ゴールデン: ロッキー山脈国立研究所. NLR/TP -2A00-101938. <https://www.nlr.gov/docs/fy26osti/101938.pdf>.

ロッキー山脈国立研究所は、米国エネルギー省傘下の国立研究所であり、重要鉱物・エネルギー革新局が管轄する。契約番号 DE-AC36-08GO28308 に基づき運営されている。

本レポートはロッキー山脈国立研究所（NLR）のウェブサイト（www.nlr.gov/publications）から無料で入手できる。

戦略的パートナーシップ・プロジェクト報告書
NLR/TP-2A00-101938
2026年9月

ロッキー山脈国立研究所 15013 Denver West
Parkway Golden, CO 80401
303-275-3000 • www.nlr.gov

注記

本稿は、契約番号 **DE-AC36-08GO28308** に基づき運営される、米国エネルギー省（DOE）管轄のロッキーマウンテン国立研究所が執筆した。また、本稿は、契約 **TSA-25-33719** に基づき、**Growth Energy** から支援を受けた。本稿で表明された見解は、必ずしも米国エネルギー省（DOE）または米国政府の見解を代表するものではない。米国政府は、本著作物の出版形態を米国政府の目的のために出版または複製する、あるいは他者にその行為を許可する非独占的、使用料完済済み、取消不能、全世界的なライセンスを留保しており、出版者は本記事の掲載を承諾することにより、米国政府が当該ライセンスを留保していることを認めるものとする。

本レポートは、ロッキーマウンテン国立研究所（NLR）のウェブサイト（www.nlr.gov/publications）から無料で入手できる。

1991年以降に作成された米国エネルギー省（DOE）の報告書および、1991年以前の文書もwww.osti.gov から無料で入手できる。

表紙写真：ジョシュ・パウアー、ロッキーマウンテン国立研究所 061725。

ロッキーマウンテン国立研究所では、印刷に再生紙を使用している。

謝辞

本レポートの作成は、技術サービス契約番号 TSA-25-33719 に基づき、Growth Energy から支援を受けた。著者らはまた、アメリカ穀物バイオプロダクツ協会（U.S. Grains and Bioproducts Council）からの支援にも感謝する。

略語一覧

ANP	ブラジル石油・天然ガス・バイオ燃料庁（燃料規制機関）
ASTM	ASTM International（規格策定機関）
CEN	欧州標準化委員会
CO ₂	二酸化炭素
CO ₂ eq	二酸化炭素換算量
ECA	排出規制区域
GFI	温室効果ガス燃料強度
GHG	温室効果ガス
HFO	重油（残留燃料油とも呼ばれる）
IMPCA	国際メタノール生産者・消費者協会IMO国際海事機関
ISO	国際標準化機構
LHV	低発熱量
LNG	液化天然ガス
MARPOL	船舶による汚染の防止に関する国際条約 MGO 船舶用軽油（ディーゼル燃料に類似した燃料）
MMA	A級船舶用メタノール
MMB	B級船舶用メタノール
MMC	C級船舶用メタノール
mt	メトリックトン
NO _x	窒素酸化物
NZF	ネット・ゼロ・フレイムワーク
PM	粒子状物質
SO _x	硫黄酸化物
TEU	20フィートコンテナ換算単位
ULSD	超低硫黄ディーゼル燃料
VLSFO	超低硫黄燃料油（硫黄分が0.5重量%未満のHFO）

エグゼクティブ・サマリー

- エタノールは、船舶用燃料として実用性がある。10年以上前に導入されたメタノールデュアルフューエルエンジンの技術と実績が、その実用性を裏付けている。
 - エタノールの特性はメタノールとよく似ており、既存のメタノール用インフラと運用経験を活用することで、導入を加速できる。
 - エタノールはメタノールに比べ、エネルギー含有量が35%高く、毒性と腐食性が低い。また、海洋に流出した場合の生分解が速い。さらに、バイオエタノールは現在、バイオメタノールよりも大幅に低い価格で、大量に調達できる。
 - 大型メタノールデュアルフューエルエンジンは、改造せずにエタノールで運転できる。現在就航している約112～120隻のメタノールデュアルフューエル船が常時エタノールを使用して運航した場合、年間消費量は600万メトリックトン（mt）、すなわち20億ガロンに達する可能性がある。
 - 2025年後半から2026年にかけて、エタノールを用いた数回の試験航海が実施された。2026年の夏には、エタノールの商業的な船対船バンカリングが開始された。
- 世界の船舶用燃料市場は大きく、2023年の消費量は推定2億5,900万mtに上る。重油1 mtを330ガロンとして換算すると、860億ガロンに相当する。
- エタノールを含む海運における代替燃料の利用を後押しする重要な要因の一つは、国際海事機関（IMO）の「ネットゼロ・フレームワーク」である。このフレームワークでは、3つのエタノール経路を含む170の異なる燃料経路が認められている。「FuelEU Maritime」のような地域規制も重要な推進力となっている。
- 船舶用エタノールに関する国際標準化機構（ISO）の規格が必要であり、ISOはすでに策定作業を開始している。規格にトウモロコシ由来エタノールに関する最新の科学的知見を反映させるには、米国エタノール産業の参画が不可欠である。
- 未解決の課題として、供給網に必要なインフラの整備、供給網の変動性、コストの評価が挙げられる。特に、以下の点を明らかにする必要がある。
 - 米国および世界の主要港湾でエタノールを供給するために必要なインフラ
 - 米国でエタノールの燃料補給拠点となる主要港湾

目次

要約	v
はじめに	1
IMOのネットゼロ・フレームワーク	2
エタノールの概要	3
船舶用燃料の使用状況と規制の現状	5
従来型および代替船舶用燃料	5
バンカリング	7
大気汚染物質の排出	8
規制	8
燃料の流出	9
船舶用エンジン	11
大型2ストロークエンジン	11
小型4ストロークエンジン	11
デュアルフューエルエンジン	12
海運におけるメタノール	14
エタノールとメタ比較	20
物理的性質と可燃性	20
仕様	21
材料との適合性	23
環境へのメタノールおよびエタノールの流出	24
船舶業界におけるエタノールの導入	26
規制	26
エンジンの現状と試運転航海	26
エンジンの性能	26
試験航海	27
港湾における燃料補給と供給状況	27
エタノール価格と代替燃料との比較	28
エタノール導入の概要	29
概要と残された課題	31
参考文献	33

図表一覧

図1. 2019年から2023年までの燃料種別ごとの年間総量。[10]より転載。 6	
図2. 2022年の報告期間における総トン数5,000トン以上の船舶の燃料油消費量（船種別）。 2022年報告期間における船種別年間消費量。図は[10]より転載。 6	
図3. 2021年から2023年までの船舶による液化石油ガス、エタン、エタノール、メタノール、およびバイオ燃料の年間消費量の合計。[10]より転載した図表 7	
図4. 米国の製油所およびブレンダーによる残留燃料油の年間純生産量 [37]..... 8	
図5. 各種エンジン回転数におけるMARPOL附属書VIのNO _x 排出制限値 [38]..... 9	
図6. デュアルフューエルエンジンのパイロットインジェクターおよびプライマリインジェクターの配置（図：N. Naser, NLR） 13	
図7. 船舶用燃料としてのメタノール開発における重要な出来事 19	
図8. エネルギー密度に基づく相対燃料体積 [60]..... 21	
図9. 海洋におけるエタノール流出のシナリオ [61] 24	
図10. 船舶用燃料としてのエタノールの開発における重要な出来事 30	

表一覧

表1. 純エタノールの物理的性質 4	
表2. MARPOL附属書VIにおけるNO _x 排出制限値 (38) 9	
表3. メタノールおよびMGOの物性 15	
表4. IMPCAおよびISO 6583:2024のメタノール規格要件..... 17	
表5. メタノールデュアルフューエル船舶における重要な出来事 18	
表6. メタノールとエタノールの物性の比較 20	
表7. エタノールとISO6583 MMCグレードメタノールの国際規格の比較 22	
表8. メタノールおよびエタノールのエラストマーおよびプラスチックとの相容性に関連するパラメータ 23	
表9. グレー・メタノール、グリーン・メタノール、およびエタノールと比較したVLSFOの価格 29	
表10. 海運におけるエタノール導入の主な経緯..... 29	

はじめに

世界貿易の約80%は海上輸送によって行われており、主に重油（HFO）または超低硫黄燃料油（VLSFO）が利用されている[1]。海上輸送は、貨物を輸送する上で群を抜いて最も効率的で低コストな手段である。この効率性は、現代の海運が巨大な規模で運営されていることにも一部起因しており、最大のコンテナ船は20,000 TEU（20フィート相当単位；長さ20フィートのコンテナ1個）以上を輸送することができる[2]。これらの船舶は、推進用として最大500万ガロン（16,000メートルトン [mt]¹）のHFOを積載することができる[3]。

海上輸送は、国際海事機関（IMO）によって規制されている。IMOは国連の専門機関であり、海上の安全と保安、船舶による海洋汚染の防止を担当する。硫黄酸化物（SOx）、窒素酸化物（NOx）、粒子状物質（PM、いわゆるすす）などの大気汚染物質の排出削減[4]、燃料流出による環境影響の低減、さらに将来的な温室効果ガス（GHG）排出量の削減も担う[5]。

これらの目標を低コストで達成する方法として、従来の重油（HFO）から、よりクリーンなバイオ燃料への転換が考えられる。例えば、多くの船舶ではバイオディーゼルをB100（バイオディーゼル100%）として使用することが承認されている[6]。船舶用ディーゼル燃料と残渣燃料に関するISO 8217:2024でも、その使用が認められている。また、メタノールとエタノールは、それぞれの取り扱い、貯蔵、燃焼に対応するよう改造または建造された船舶での使用が認められている[7, 8, 9]。本レポートでは、米国のエタノール生産と利用の概要を示し、海運分野での利用に関する情報を整理するとともに、残された課題と導入上の障壁をまとめる。

IMOの推計によると、2023年の海運業界全体の燃料消費量は、1日あたり420万バレル、年間で640億ガロン（2億1,100万mt）であった[10]。ただし、この数値は国際海運、およびIMOへの燃料使用量の報告が義務付けられている総トン数5,000 mtを超える船舶を対象としたものである。2023年には35,143隻のうち28,620隻（81.4%）しかIMOにデータを提供しなかったため、この数値は実態よりも過小報告されている。報告が完全に行われたと仮定して外挿すると、総量は2億5,900万mt（860億ガロン）となる。IMOの推計には小型船や国内航路が含まれていないため、他の推計では年間総量が3億mtを超えるとされている[11]。

HFOとエタノールのエネルギー含有量に大きな差があることを考慮すると、すべての船舶がエタノールで稼働するという極端なケース（液化天然ガス [LNG] 船については5%減、エタノールの点火用として使用されるディーゼル／燃料油については5%減）では、2億5,900万mtの市場は最大で3億5,500万mtのエタノール（1,180億ガロン）に相当することになる。この極端なケースが実現する可能性は低いものの、海運市場がエタノールにとって巨大な機会であることは明らかである。

¹ 海運における燃料量は通常、メートルトンで表される。335ガロンのエタノールの重量は1メートルトンである。

IMO ネットゼロ・フレームワーク

IMO ネットゼロ・フレームワーク（NZF）は、海洋環境保護委員会が決議MEPC.377(80)によって採択した、IMOの2023年GHG戦略に基づく[12]。同戦略は、2008年を基準に、2030年までに炭素強度を少なくとも40%、年間GHG総排出量を少なくとも20%、2040年までに年間GHG総排出量を少なくとも70%削減し、2050年頃までに総排出量をネットゼロにすることを目標とする。また、2030年までに海運で使用するエネルギーの少なくとも5%を、GHG排出量がゼロまたはほぼゼロの技術や燃料で賄うことを求めている。

この枠組みには、ライフサイクル全体で見た単位エネルギー当たりのGHG排出量を段階的に削減する世界共通の燃料基準と、排出削減の達成状況に応じた価格メカニズムが含まれる。船主は、排出削減要件を上回る成果を上げた場合にクレジットを獲得し、要件を満たせない場合にはクレジットを購入できる[5]。IMO NZFへの適合に用いる燃料のライフサイクル排出量は、IMOの海洋環境保護委員会が認定した手順で検証する必要がある[13, 14]。

船舶のGHG排出量は、温室効果ガス燃料強度（GFI）を用いて定量化する。GFIは単位エネルギー当たりのGHG排出量を示し、他の分野で用いられる「炭素強度」に近い指標である。単位はgCO₂eq/MJで、CO₂eqは、メタンと一酸化二窒素を含むGHG排出量を二酸化炭素量に換算した値である。排出ゼロまたはほぼゼロの燃料は、GFIが19.0 gCO₂eq/MJ以下と定義され、現在の平均値93.3 gCO₂eq/MJより80%低い。NZFは、FuelEU Maritimeなどの地域規制とともに、エタノールを含む低GFI燃料の利用拡大を促す主要な要因である。また、SO_x、NO_x、PMの排出を減らすため、港湾内で運航する船舶や内航船でも代替燃料の導入が進む可能性がある。

これらの規制は、総トン数5,000を超える国際航海の船舶を対象とする。対象船舶は、海運分野のGHG排出量の85%を占めるとされる。他のIMO規制と同様に、NZFは176のIMO加盟国によって施行されることになる。

燃料がIMOのNZFの対象となるためには、IMO承認の方法論[14]を用いた「井戸から船尾」までのライフサイクル分析に基づき算出されたGFI（温室効果ガス排出係数）を有していなければならない。現在、IMOがGFIのデフォルト値として検討している経路は170あり、そのうち3つがエタノール経路である。

エタノールの概要

エタノール（エチルアルコールとも呼ばれる）は、バイオマスから生産され、運輸、化学、製薬産業などで様々な用途に利用されている。エタノールは、デンプンやセルロースに由来する糖の発酵によって生産される。米国では、エタノールの大部分がトウモロコシのデンプンから生産されている。エタノールは燃料成分として長い歴史を持つ。

例えば、1908年に生産された初代フォード・モデルTは、エタノール、ガソリン、あるいはその混合燃料を使用できるようキャブレターを調整できるフレキシブル燃料車であった[15]。より最近では、1970年代のエネルギー危機を契機に、体積比10%のエタノールを混合したガソリンが導入され、エタノール混合燃料は連邦高速道路税の一部が免除される法律が制定された。

1980年代のガソリン中のテトラエチル鉛の段階的廃止に伴い、高オクタン価のブレンド原料としてのエタノールの利用に関心が集まった。1990年代には、一酸化炭素や揮発性有機化合物の排出を削減するため、エタノールを含む酸素化剤のガソリンへの添加が義務付けられた。しかし、2000年3月から段階的に廃止されるまで、メチル・ターシャリー・ブチル・エーテル（MTBE）が酸素化剤市場を支配していた[16]。

それ以来、エタノールの混合は拡大を続け、現在では米国で消費されるガソリンの95%以上が10%のエタノールを含有するに至っている[17]。2011年1月、米国環境保護庁（EPA）は2001年モデル以降の自動車におけるE15の使用を承認し[18]、E15の使用はますます一般的になりつつある[19, 20]。

世界の燃料用エタノール生産量は、2024年に310億ガロン（1,170億リットル、9,300万mt）を超え[21]、2034年までに1億4,000万mtを超えると予測されている[22]。

米国が160億ガロンで最大の生産国となり、ブラジルが90億ガロンで2位となった。インド、欧州連合（EU）、中国はそれぞれ10億ガロン以上を生産した。

米国には、年間約20億ガロン（約600万mt）の休止中の生産能力がある。エタノールは主に中西部で製造され、鉄道で全米に輸送される。一般的には、容量30,000ガロンのタンク車100両から成る専用列車（ユニットトレイン、積載量約9,000 mt）が用いられる。2023年9月から2024年8月までの販売年度には約18億ガロン、2025年には21億ガロンを超えるエタノールが輸出された。主な輸出先はカナダ、EU、インド、英国である[23]。船舶による輸出は主にヒューストン地域から行われた。米国の輸入量は少なく、2024年には主にブラジルから400万ガロンを輸入した[24]。ブラジルは年間約7億ガロン（26億リットル）を輸出しており、韓国とオランダが主な輸出先である[25]。

同総説では、エタノールの炭素強度の最良推定値を51.4 gCO₂eq/MJとし、石油系燃料より46%低いと結論付けた。最大の寄与要因はエタノール製造時に発生するCO₂であり、原料糖に含まれる炭素の約3分の1がCO₂に変換される。エタノール生産者の間では、このCO₂を回収・貯留する取り組みが広がっており、最近導入された税額控除の対象となっている。

CO₂の貯留によって、炭素強度を最大30 gCO₂eq/MJ削減できる可能性がある[27]。

表1はエタノールの物理的特性を示している。船舶用燃料として特に重要なのは、低位発熱量（LHV）が26.9 MJ/kgであり、40 MJ/kgを超える船舶用軽油（MGO）やHFOより大幅に低い点である。また、引火点は14°Cであり、燃料タンクへの窒素封入が必要となる[9]。15°Cにおけるエタノール335ガロンは、重量1 mtに相当する。

表1. 純エタノールの物理的性質

物性	エタノール
沸点、°C ^a	78.4
凝固点、°C ^a	-114
15°Cにおける密度、kg/m ³ ^b	793.5
20°Cにおける動粘度、mm ² /s	1.36 ^c
低発熱量、MJ/kg（比エネルギー）	26.9 ^d
低発熱量（LHV）、MJ/L（エネルギー密度）	21.4
25°Cにおける気化熱、kJ/kg ^a	918
引火点、°C（密閉カップ法）	14 ^e

^a NIST Webbook [28]; ^b Measurement Canada [29]; ^c Engineering Toolbox; ^d Christensen et al. [30]; ^e Sigma-Aldrich、エチルアルコール（純）の安全データシート。製品番号：E7023。

船舶用燃料の使用状況と規制の現状

従来の船舶用燃料および代替船舶用燃料

IMOの推計によると、2023年の国際海運における全燃料の総消費量は2億1,100万～2億5,900万mt、すなわち約650億～800億ガロンであった（総重量5,000 mt以上の船舶）[10]。他の情報源では、海運全体で3億mtを超えるなど、この数値ははるかに高いと示唆されているが、これらの追加の船舶はIMOの規制の対象外である[11]。

図1に示すように、2020年以降、使用される燃料の半分以上がHFOであり、2020年から許容硫黄含有量が3.5 wt %から0.5 wt %に引き下げられたことに伴い、軽油の割合が増加している（ただし、SOxスクラバーを装備している船舶では3.5%硫黄燃料の使用が可能であり、大型コンテナ船ではこれが非常に一般的である）。HFOは、原油の蒸留過程で揮発しない物質であるため、残留燃料油としても知られている。その物性限界はISO 8217:2024に規定されている。粘度は非常に高く、最も重質なグレードでは50°Cで最大500 mm²/sに達することもある。室温での粘度は10,000 mm²/sにも達することがあり、この物質は半固体のタールと表現されることもある。この非常にタール状の物質は、エンジンに注入する前にポンプで送れるよう粘度を下げるため、船上で加熱しなければならない。軽油も残留燃料の一種であるが、粘度は低く、硫黄含有量も低い場合がある。MGOは、ディーゼル燃料に類似した留出燃料である。

図2に示すように、ばら積み貨物船、コンテナ船、タンカーが船舶用燃料の大部分を消費している。使用された代替燃料の中で最大だったのはLNGであり、LNGを使用する主な船舶はLNG運搬船である。多くの場合、これらの船舶は積荷のLNGから発生するボイルオフガスを一部燃料として利用している。図3に示すように、2021年から2023年の期間には、その他の代替燃料のごく少量が使用された。この図におけるバイオ燃料は、主にバイオディーゼルおよび再生可能ディーゼルで構成されていると考えられる。2023年、IMOの報告によると、大型ばら積み貨物船の燃料として4,000 mtのエタノールが使用されたが、これに関する追加情報はほとんど得られていないようだ[10]。図3に示された燃料は、この期間における海運で消費された燃料の0.5%未満を占めるに過ぎなかったが、2023年以降、LNGおよびメタノールの使用量は大幅に増加している可能性が高い。2025年末時点で、LNGは依然として海運において最も広く採用されている代替燃料であり、載貨重量トン数ベースで世界の船隊（就航中および受注済み）の約10%を占めていた[31]。メタノール対応船はLNGに次いで2番目に大きなカテゴリーであり、2026年の新規引き渡し38隻を含め、計112～120隻が運航中である[32]。これらの船舶の約3分の1はメタノール運搬船であり、半数はコンテナ船である。さらに700隻がメタノール対応（将来的なメタノールデュアルフューエルへの転換を目的として建造されたもの）であり、300～350隻が発注中である。

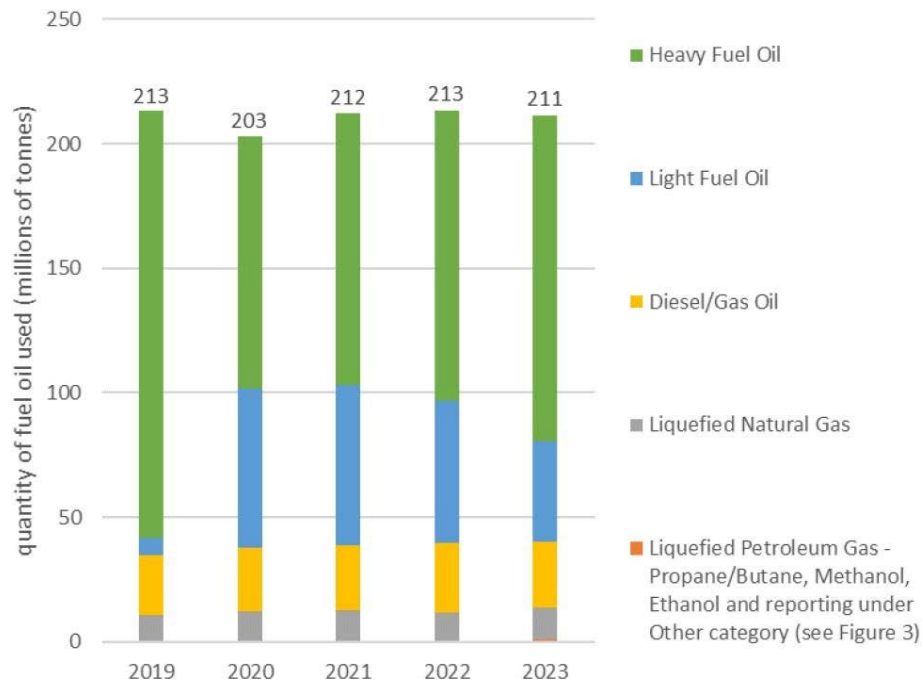


図1. 2019年から2023年にかけてIMOに報告された各燃料種の年間総量。図は[10]より転載。

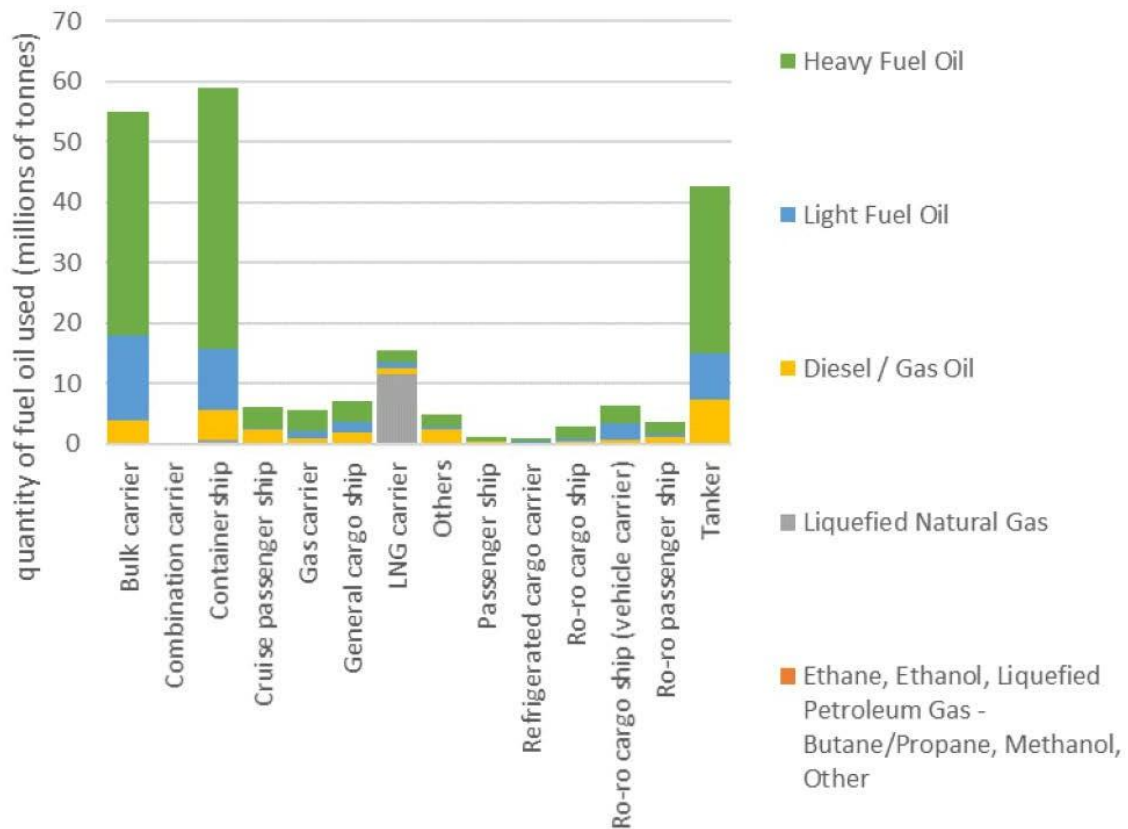


図2. 2022年の報告期間における、総トン数5,000トン以上の船舶について、船種別に消費されIMOに報告された各燃料油の年間消費量。[10]より転載。

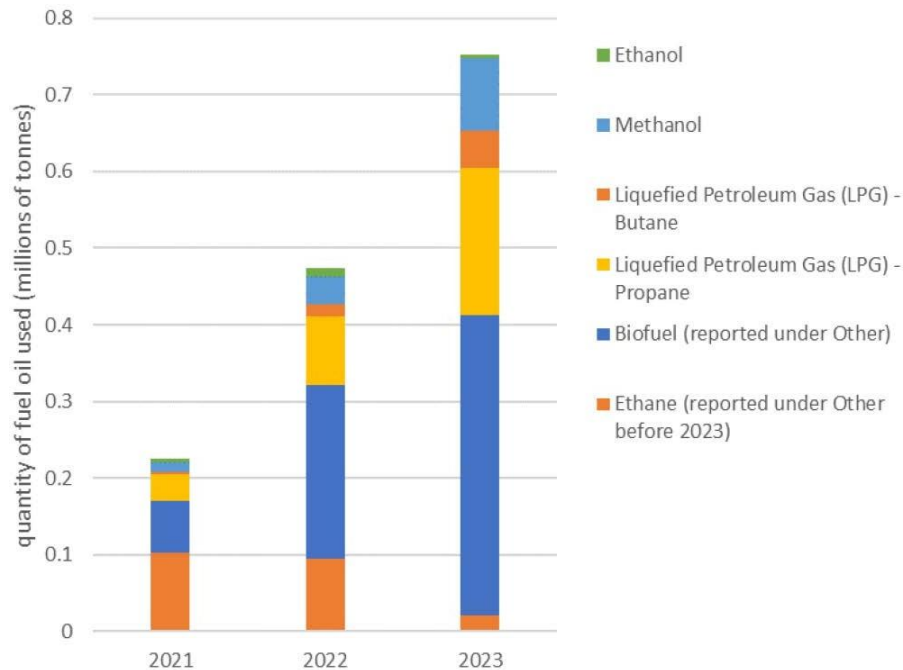


図3. 2021年から2023年にかけて消費され、IMOに報告された液化石油ガス、エタン、エタノール、メタノール、およびバイオ燃料の年間総量。[10]より転載。

燃料補給

船員は、自動タンク測深計、圧力センサー、流量計を組み合わせ、船内の燃料量を注意深く監視している。現代の船舶では、船員は各タンク内の燃料重量をリアルタイムで追跡することができる。これは、追加の燃料を積み込む（バンカリング）前に、燃料のこぼれや溢れがないことを確認するために特に重要である。

バンカリングとは、船舶への燃料供給作業である。通常は燃料補給バージから船舶へ移送するが、陸上ターミナルやタンクローリーから配管・ホースを通じて供給する場合もある。取扱量が大きく、安全、環境、経済面でのリスクを伴うため、綿密な計画と規制の下で実施される。メタノール、エタノール、LNGは従来の燃料と物性が大きく異なり、補給手順も異なる。これらの燃料の取り扱いに対応した専用の燃料補給バージが必要となる。

2025年のバンカー燃料取扱量で最大の港はシンガポールであり、その取扱量は5,620万mtに達し、これは世界全体のバンカー燃料使用量の25%に相当する[33, 34]。その他の港の取扱量はこれよりはるかに少なく、2位のロッテルダムは980万mtである。米国内の全港湾におけるバンカー燃料の年間取扱量は、1,800万mtと推定されている[35]。これは、図4に示すように、米国の残留燃料油の年間生産量が約1,800万mtであることと一致している。バンカーリングが行われる可能性が高い米国の港を特定するには、貨物取扱量のランキングを参照すればよい。

それによると、ヒューストンが米国全体で最大の港であり、その後に米国メキシコ湾岸の他のいくつかの港が続く。メタノール運搬船を除けば、短期的にはコンテナ船がメタノール（またはエタノール）を使用する可能性が最も高く、ニューヨーク・ニュージャージー港が最大のコンテナ港であり、次いでロサンゼルス、ロングビーチ、サバンナ、ヒューストンが続く[36]。

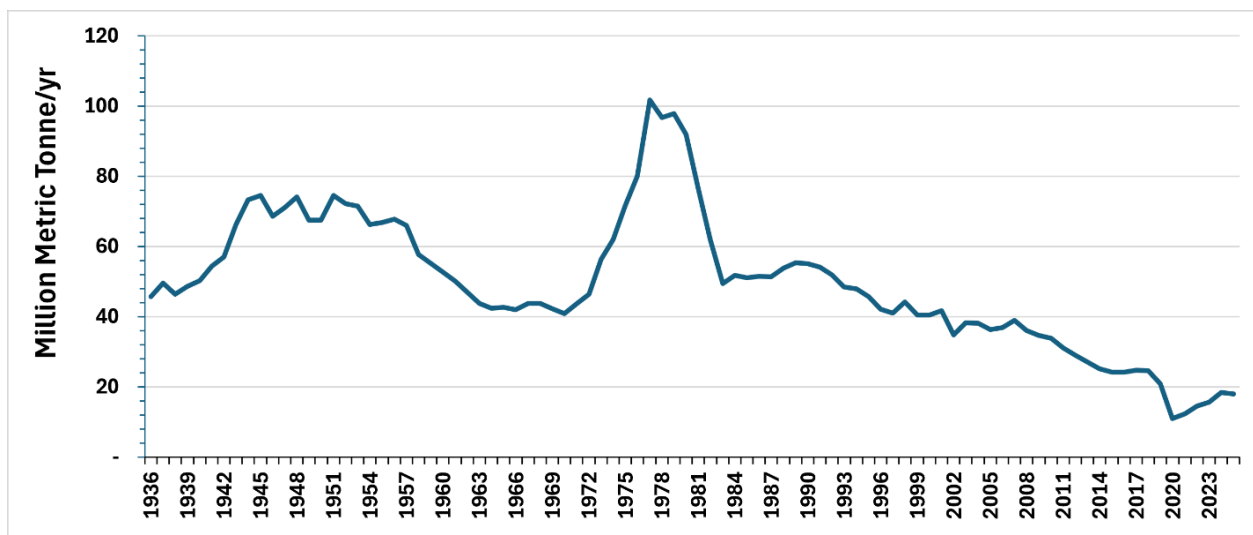


図4. 米国の製油所およびブレンダーによる残留燃料油の年間純生産量 [37]。

大気汚染物質の排出

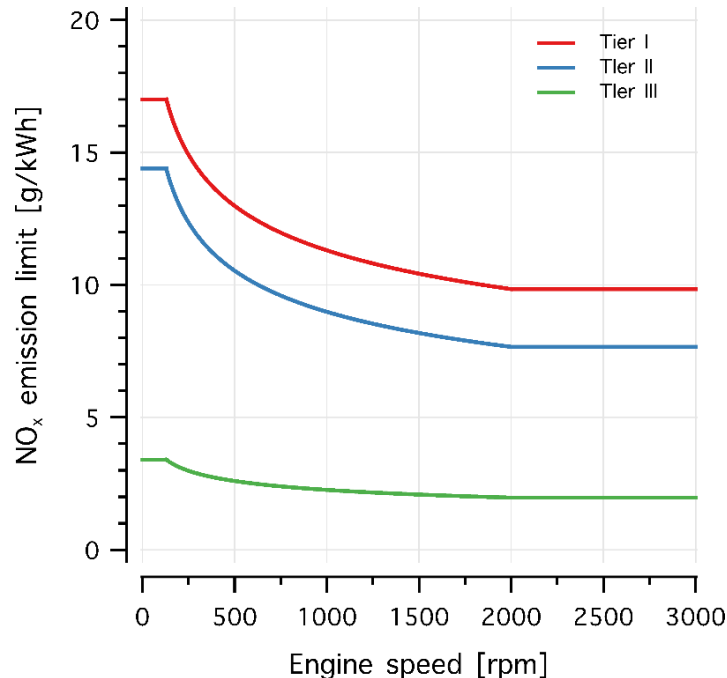
規制

「船舶からの汚染の防止に関する国際条約（MARPOL）」は、IMOによって採択され、船舶由来の汚染を防止するための国際基準を定めている。MARPOLの附属書VIは、NO_x [38]、SO_x、PM [39]、揮発性有機化合物 [40]、およびオゾン層破壊物質 [41] を含む大気汚染に特に焦点を当てている。同附属書は、船舶およびエンジンの製造、認証、運航に関する基準に加え、燃料品質に関する基準も定めている。これらの基準は世界中で適用されるが、排出規制海域（ECA）においてはより厳しい基準が適用される。ECAとは、IMOによって指定された水域であり、船舶はSO_x、PM、NO_x、あるいはそのすべてについて、より厳しい排出規制に従わなければならない。現在のECAには、バルト海、北海、地中海、および米国全土の沿岸とカナダの大部分を含む北米ECAが含まれる。附属書VIでは、以下の要件が定められている：

1. NO_x排出基準は、出力130 kWを超える船舶用ディーゼルエンジンに適用される。この要件は、主推進機関および補助機関の両方に適用され、NO_x排出レベルは表2および図5に規定されている。
 - A. Tier IおよびTier IIの排出制限は世界中で適用される。Tier II基準は、一般的にエンジンの燃焼プロセスの最適化によって達成可能である。燃料噴射タイミング、圧力、噴射量（レートシェーピング）、燃料ノズルの流路面積、排気バルブタイミング、シリンダー圧縮容積などのパラメータを変更することで、エンジンをこれらの規制に準拠した状態で運転することができる。
 - B. Tier IIIの制限値は、ECA（排出規制海域）でのみ適用される。Tier III基準を満たすには、通常、高度なNO_x制御技術の採用が必要となる。これには、燃焼プロセスへの水噴射（燃料、掃気、またはシリンダーへの直接噴射による）、排気ガス再循環（EGR）、あるいは選択的触媒還元（SCR）システムなどの対策が含まれる。最大規模の船舶を推進し、海船用燃料の大部分を消費する大型2ストロークエンジンについては、主機関の最高回転数（N）は130 rpm未満となる。

表2. MARPOL附属書VIにおけるNO_x排出制限値 [38]

ティア	日付	各種最大エンジン回転数 (N) (rpm) における NO _x 排出制限値 (g/kWh)		
		N < 130	130 ≤ N < 2,000	N ≥ 2,000
Tier I	2000	17.0	$45 \times N^{-0.20}$	9.8
Tier II	2011	14.4	$44 \times N^{-0.23}$	7.7
Tier III	2016	3.4	$9 \times N^{-0.20}$	1.96

図5. 各種エンジン回転数におけるMARPOL附属書VIのNO_x排出制限値 [38]。

- 船舶用燃料の硫黄含有量制限は、海運からのSO_x排出を抑制することを目的としている。SO_xおよびPMの排出規制は、船内のすべての燃料油およびすべての燃焼設備に適用される。これには、主機関および補助機関、ボイラー、不活性ガス発生装置が含まれる。規制への準拠は、主に燃料油の最大硫黄含有量を制限することで達成される。現在の燃料硫黄制限値は、ECA（排出規制海域）外での運航では0.5 wt %（VLSFOとして知られる）、ECA内での運航では0.1 wt %である。メタノールもエタノールも硫黄含有量はほぼゼロであり、これらの制限値を大幅に下回っている。船舶は、硫黄含有量の高い燃料を使用し、SO_xスクラバーを導入して運航することも可能である。

燃料油の流出

「バンカー油による汚染損害に対する民事責任に関する国際条約（2001年）」は、すべての外航船舶からの燃料油流出を規定する主要な法規である。同条約は、環境被害を含む汚染損害について船主に対する厳格責任制度を確立し、総トン数1,000トン以上の船舶に対して強制保険の加入を義務付けている。

HFOが海中に流出すると、高い粘度のため水面に厚い油膜を形成してゆっくりと広がり、環境に大きな影響を及ぼす可能性がある。密度によっては水面に浮き、1 g/mLを超える場合には水面下に浮遊することがある。蒸発が遅いため、大部分が長期間残留する。HFOは、油が水中に分散した乳化物や、水が油中に分散した乳化物を形成しやすい。これらは安定しており、自然には分解されにくく、回収も難しい。緩やかな酸化によって、粘度、密度、流動点に変化する場合もある[42, 43]。流出油を適切に封じ込めなければ、沿岸への影響は甚大となり得る。少量の流出でも、回収・除去に数百万ドルを要することがある。また、HFOには多環芳香族炭化水素など、水生生物に有害で、食物連鎖を通じて生物濃縮される。

海洋環境におけるMGOの流出は、主にその密度が低く揮発性が高いため、HFOとは異なる特徴を示す。軽油は粘度がかなり低いため、放出されると水面に急速に広がる。HFOとは異なり、MGOには高濃度の揮発性炭化水素が含まれており、これが広範囲にわたる蒸発を引き起こす。そのため、特に温暖で風が強い天候下では、MGOは放出後24～48時間以内に蒸発してしまうことがある。この蒸発により、水面に残留する油の量は減少するが、有毒な揮発性有機化合物が海洋生物に影響を及ぼし、対応作業員に対して関連する吸入リスクをもたらす可能性がある。MGOは水中に分散しやすく、化学分散剤を使用することで生分解が促進されるが、短期的な水生毒性のリスクが生じる可能性がある。MGOはHFOほど容易に、あるいは安定して乳化することはない。しかし、その溶解性と毒性により、MGOは海洋生物や沿岸環境に対して深刻な環境リスクをもたらす。海水中での残留性はHFOに比べて低いものの、初期の影響は極めて甚大になり得る。海岸への汚染は比較的まれであり、除去も比較的容易である。

船舶用エンジン

大型2ストロークエンジン

大型商用船舶用エンジンは、高効率、低速域での高トルク、および低コストの重油を燃焼できるという利点から、低速（100～300 rpm）の2ストロークエンジンが採用されている。2回転ごとに動力を発生させる4ストロークエンジンである陸上用ディーゼルエンジンと比較して、船舶用エンジンは1回転ごと（すなわち2ストローク）に動力を発生させ、1回転の間に掃気（排気ガスを新鮮な吸入混合気と置き換える過程）、圧縮、燃焼、排気が行われる。2ストロークエンジンは、4ストロークエンジンに比べて高い出力重量比を実現する。低速2ストローク船舶用ディーゼルエンジンの最大熱効率は50%を超える。HFOを用いた長時間の定常運転では、燃料消費率が160～170 g/kWhまで抑えられる。出力は1,100 kWから97,000 kW以上に及び、最大級の商船の推進にも対応できる。

これらのエンジンの回転数が低いため、減速ギア（すなわちトランスミッション）を必要とせずに、プロペラシャフトとクランクシャフトを直接機械的に連結することができる。複雑なギアシステムがないため、出力重量比が向上し、機械的な複雑さと製造コストが低減される。さらに、2ストローク構造では吸気バルブが使用されないため、機械的にシンプルであり、機械的故障を起こしやすい部品の数が増加する。その代わり、シリンダーライナーの上部から約3分の2の位置に吸気ポートが設けられており、ピストンの動きによって開閉される。

商用船舶用の船舶用エンジンは、船舶を推進するために必要な大型のピストンやクランクシャフトを収容するため、高さが10～15メートルにも及ぶことがある。2ストロークディーゼルエンジンは、空気の充填およびシリンダー内の排気を行うために、過給（ターボチャージャーおよび／またはスーパーチャージャー）を必要とする。

作動サイクルは、ピストンの下死点から始まるものと説明できる。ピストンが上昇するにつれて、吸気ポートを覆って閉じ、閉じ込められた空気を圧縮する。圧縮比は17:1から23:1の範囲であり、圧縮行程（第1行程）の終了時点での圧力は40バール程度となる。燃料は、圧縮行程の頂点に達する10～20クランク角度前に、シリンダーヘッドに設けられた複数のインジェクターを通じて直接噴射される。圧縮された空気の温度が高いため、噴射された燃料は自然発火し、スプレー状に燃焼する。これにより燃焼によってシリンダー内圧は上昇し、通常180～195 barで最大となる。この圧力が動力行程（第2行程）でピストンを押し下げる。動力はコネクティングロッドとクロスヘッド軸受を介してクランクシャフトへ伝わり、直線運動が回転運動に変換される。ピストンがさらに下降すると吸気ポートが開き、大気圧より30～70 kPa高い圧力（絶対圧約1.3～1.7気圧）の空気がシリンダー内に流入する。同時に排気弁が開き、空気の流れが排気ガスを押し出す。下死点に達するとピストンは再び上昇し、吸気ポートを閉じて次の圧縮行程に入る。

小型の4ストロークエンジン

船舶、ボート、フェリー、タグボートなどを含む中型および小型の船舶は、通常、4ストロークディーゼルエンジンで稼働している。大型船の発電用補助機関も4ストローク式の場合がある。ディーゼルエンジンは効率と耐久性が高く、運転条件が変化しても安定したトルクを得られるため、広く採用されている。多くの大型外航商船がHFOやVLSFOを使用するのにに対し、中小型船は通常、MGOまたは超低硫黄ディーゼル燃料（ULSD）を使用する。

MGOは、陸上用ディーゼルに類似した精製留分燃料であるが、船舶用途向けに配合されており、燃料密度が高い。従来の船舶用燃料に比べて硫黄含有量ははるかに低いため、特に排出規制海域（ECA）での運航において、船舶が厳しい国際排出基準を満たすことを可能にする。ULSDは、通常15 ppm未満の硫黄含有量を有する燃料である。陸上用ディーゼルエンジン（オンロードおよびオフロード）の両方で使用されているため広く入手可能であり、船舶と陸上利用者が共用する港湾で給油を行う小型船舶でも容易に入手できる。ULSDは、ディーゼル微粒子フィルターや選択的触媒還元（SCR）システムを含む、最新の排出ガス制御技術と互換性がある。船舶用ディーゼルエンジンでMGOやULSDを使用することには、いくつかの運用上の利点がある。しかし、MGOとULSDはHFOに比べてトン当たりのコストが高いため、経済性を確保するにはエンジンの効率を最大限に高める必要がある。

デュアルフューエルエンジン

デュアルフューエル2ストロークエンジンは、長距離輸送に必要な出力密度と信頼性を維持しながら、低セタン価の代替燃料を燃焼させる技術として普及してきた。HFOまたはMGOのみを使用するモードと、少量のHFOまたはMGOを点火用のパイロット燃料として用い、LNG、メタノール、エタノールなどを燃焼させるモードの2通りで運

転できる。燃料を切り替えられる柔軟性は、規制の先行きが不透明な中で、長寿命かつ高額な船舶の運用価値を維持したい海運会社にとって大きな利点である。

船舶用エンジンメーカーは、デュアルフューエル技術を発展させ、超大型コンテナ船、タンカー、ばら積み貨物船から小型船舶に至るまで、広く採用されている成熟した技術へと昇華させた。図6はインジェクターの配置図を示している（同様の図は機器メーカーによっても提示されている）[44]。空気がシリンダー内に入ると、渦を巻く流場が形成される。

通常、パイロットインジェクターと低セタン価燃料インジェクターが2～3セットあり、渦巻く空気の流れに対して、パイロットインジェクターは主燃料インジェクターの上流側に配置される。この空気の流れが、燃焼中のパイロットスプレーを主燃料ジェットへと押し込み、それが点火されてスプレーとして燃焼する。

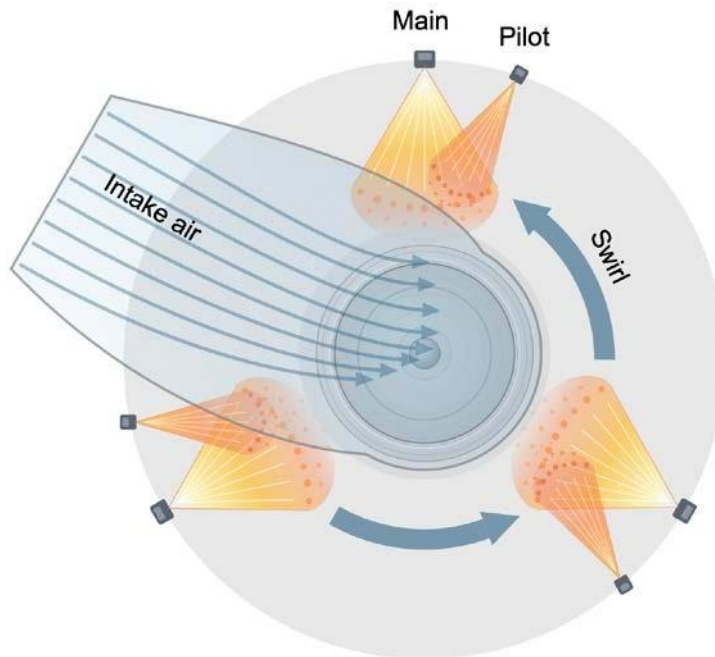


図6. デュアルフューエルエンジンのパイロットおよび主燃料インジェクターの配置 (図 : N. Naser, NLR)。

LNGデュアルフューエルエンジンは、最も広く導入されているデュアルフューエルエンジンであり、気化した天然ガスをシリンダー内に噴射し、高圧で噴射された少量のパイロット用液体燃料（MGOまたはHFO）によって点火させるリーンバーン戦略を採用している。これにより、ディーゼルエンジンのような圧縮着火プロセスを維持しつつ、LNGを主なエネルギー源としている。

パイロット燃料の割合は通常、総エネルギー入力1%～5%程度であり、これは広い負荷範囲にわたって安定した点火と燃焼を確保するのに十分である。

LNGが入手できない場合[45]、あるいは低負荷や過渡的な運転操作などの特定の運転条件下では、ハードウェアの変更を行うことなく、同じエンジンを従来の液体燃料のみで運転することができ、運用上の柔軟性と冗長性を確保できる。これは、シリンダー内圧力測定に基づく制御（パイロット噴射タイミングを制御する）や、目標出力と回転数を維持しつつ失火やその他のエンジン燃焼上の問題を回避するための空気管理など、高度なエンジン管理システムによって実現されている。

LNGの場合、天然ガスの硫黄含有量が極めて低いためSOxは発生せず、重質芳香族化合物が含まれていないためPM排出量も低くなる。従来のHFOエンジンと比較して85%～90%のNOx削減が可能であるが、これらのエンジンはTier III排出ガス規制を満たすために追加のNOx低減措置を必要とする。

Everllence ME-LGIM [46]、WinGD X-DF-M [47]、およびWartsila [48]やCaterpillar

[49]製のメタノールデュアルフューエルエンジンは、同じディーゼルエンジン設計を採用しながら、メタノールまたは従来の船舶用燃料のいずれかを使用することができる。

メタノール運転では、燃焼を開始するために少量のパイロット燃料（総エネルギー投入量の1%～5%）が噴射される[50]。メタノールは、噴霧の微細化を図るために高圧で噴射され、噴射後はスプレー状となって燃焼する。

海運におけるメタノール

メタノールは広く利用されている化学物質および溶剤であり、2024年の世界生産量は9,280万トン（340億ガロン）に達した。2030年までに、生産量は1億1,630万トンに増加すると予測されている[51]。メタノールは世界中に貨物として輸送される汎用品であり、2023年には生産量の35%が輸出された[52]。メタノールはほぼ完全に天然ガスから製造されるが、石炭、バイオマス、廃棄CO₂など、多くの原料から製造することも可能である。製造方法に応じて、メタノールには以下の色名が付与される：

- グリーンメタノールは、バイオマス、または回収されたCO₂とグリーン水素（再生可能エネルギーを用いた水の電気分解によって製造されたもの）から製造される。
- ブルーメタノールは、回収されたCO₂とブルー水素（天然ガスを原料とし、CO₂の回収・隔離を伴う水蒸気メタン改質法によって製造されたもの）を用いて製造される。
- グレー・メタノールは、天然ガスから製造されます。
- ブラウン・メタノールは、石炭を原料として製造されます。

現在生産されているメタノールのほぼすべては、グレー・メタノールである。

メタノールは、燃料システムの設計、換気、漏洩検知、消火などを含む、メタノールおよびエタノールの使用に関する安全要件に関する暫定ガイドラインをIMOが公表しているという意味で、船舶用燃料として承認されている[9]。これらの暫定ガイドラインは、強制的な「人命の安全に関する国際条約（SOLAS）」の「ガスまたはその他の低引火点燃料を使用する船舶の安全に関する国際コード」というセクションに組み込まれつつある[53]。現在、稼働中のメタノール対応船舶は計112～120隻あり、そのうち38隻は2026年に新造船として引き渡される予定である[32]。さらに700隻がメタノール対応準備済み（将来的なメタノールデュアルフューエルへの転換を目的として建造されたもの）であり、300～350隻が発注済みである。最初の受注はメタノール運搬タンカーだったが、現在、受注中のメタノール対応船の大部分は超大型コンテナ船（14,500 TEU超）および新型パナマックス型コンテナ船（10,000～14,500 TEU）であり、コンテナ海運業界におけるアルコール燃料への強い関心を浮き彫りにしている[54]。メタノール対応船は、最初に導入されて以来、著しい発展を遂げてきた[55]。これらの船舶はすべて、従来の燃料油またはメタノール（MGOまたはHFOをパイロット点火源とするデュアルフューエルモード）での運航が可能であり、現在は主に従来の燃料油で運航されている。²

メタノールには、大型商用船舶において従来の船舶用燃料に比べていくつかの利点がある。メタノールは実質的に硫黄を含まないため、SO_x排出を事実上ゼロにできる。酸素含有燃料として、煤（すす）の排出量が極めて少なく、燃焼温度も低いいためNO_xを低減できるが、IMO Tier IIIの規制値を満たすにはさらなる低減が必要である[56, 57, 58]。例えば、Everllence社は、同社のME-LGIMエンジンにおいて、MGOと比較してNO_xを30%～50%削減したと報告している[59]。大規模なメタノール流出が発生した場合、燃料は速やかに溶解し、急速に拡散・生分解されるが、これに対し、大規模なHFO流出の場合は、多大なコストを伴う悪影響が生じる[60, 61]。

純メタノールの基本特性は表3に示されており、MGOの特性と比較されている。メタノールの沸点ははるかに低いものの、液体であるため、貯蔵や取り扱いとは従来の燃料と同様である。引火点は11°Cであり、可燃性混合物が存在し得ることを示している

²

メタノール・デュアルフューエルエンジンにおいては、メタノールは燃料油に不溶であるため、メタノールと燃料油が混合されない点を強調しておくことが重要である。図6に示すように、これらは別々のタンクに貯蔵され、別々にエンジンに噴射される。

タンクの空隙部にメタノールが滞留するため、船舶および給油船内での不活性ガスによるブランケット処理が必要となり、船舶における火災検知および換気システムの強化が求められる[9]。このタンクヘッドスペースのパージは、湿った空気からの水分吸収を抑制する効果もある[62]。比エネルギーおよびエネルギー密度はMGOの値の半分以下である一方、質量密度は10%低い。エネルギー密度が低いため、同じ航続距離を達成するには、ディーゼル燃料やMGO燃料に比べて2.4倍の体積のメタノールが必要となる[50]。

表3. メタノールとMGOの物性

物性	単位	メタノール	MGO
沸点またはT90	°C	64.6 ^a	--
引火点	°C	11 ^a	>60 ^c
純燃焼熱（比エネルギー）	MJ/kg	20.0 ^b	43 ^d
正味燃焼熱（15°Cにおけるエネルギー密度）	MJ/L	15.9	38
15°Cにおける密度	kg/m ³	796.1 ^a	<890 ^c
20°Cにおける動粘度	mm ² /s	0.75 ^e	2 – 6 ^c

^a ISO 6583:2024 より。

^b NIST WebBook からの値。

^c ISO 8217:2024 における DMA グレード。

^d [63] からの代表値。

^e Engineering Toolbox

メタノールは人体に有毒であり、吸入、摂取、あるいは皮膚や目への接触によって体内に取り込まれる可能性がある。燃料を取り扱う者および船員の曝露を防ぐよう細心の注意を払わなければならない。メタノールは従来の燃料油とは腐食特性が異なるため、タンク塗装、配管、シール、その他の構成部品の適合性について慎重に検討する必要がある。

現在、メタノールは主に化学原料として生産されており、さまざまな製品の製造に使用するための純度や特性を規定した国際メタノール生産者・消費者協会（IMPCA）の規格を満たしている[64]。IMPCA規格の主な要件を表4に示す。この規格は、ISO 6583:2024「船舶用燃料としてのメタノール—一般要件および仕様」の策定における出発点として用いられた。本規格における3つのグレードの要件も表4に示されている。船舶用途には関連しないIMPCAの要件のいくつかは、ISO規格には含まれていない。

ISO 6583:2024の各種グレードは、メタノールが主成分であり、エタノール、アセトン、硫黄、塩化物、酸などの不純物が最小限に抑えられていることを保証している。MMAグレードは基本的にIMPCAと同じであるが、高速4ストロークエンジンの燃料噴射装置の耐久性にとって重要な潤滑性および粒子数に関する許容限界について、買い手と売り手が合意することを認めている。MMBグレードはMMAと同じであるが、潤滑性および粒子数に関する要件はない。MMCグレードはMMBと同じ要件を持つが、記載されている多くの特性について許容範囲が広い。ISO 6583:2024におけるエタノール含有量に対する厳格な制限には、技術的な根拠がないと思われる。なぜなら、数重量パーセントのエタノール（あるいはそれ以上）であっても、燃料の性能特性や燃焼に影響を与えることはないはずだからである。

メタノールは世界120以上の港で入手可能である[65]が、2026年6月時点で商業的なメタノール給油サービスを提供している港はわずか48か所程度である[66]。したがって、燃料給油インフラは船舶の開発に遅れをとっており、メタノール対応船舶のほとんどは重油（HFO）で運航されている[54]。メタノールのバンカー供給には、専用のバージまたはメタノールタンカーが必要となる。2025年時点で、世界には12隻の専用メタノールバンカーバージが存在し、その大半はシンガポールに集中している[54]。

専用バージを含むサプライチェーンが整備されるまでの間、船上のバンカーステーションは、小型のメタノールタンカーやケミカルタンカーに対応できるよう設計されている[59]。

HFOと比較してメタノール給油がさらに複雑になる要因として、バージと船舶の両方で不活性ガスの被覆を維持する必要がある点が挙げられる。これは、船舶のタンクから置換された窒素・メタノール蒸気をバージに戻す閉ループシステムを構築することで実現される[67]。

メタノール給油は、シンガポールや中国の港湾で日常的に行われている。

メタノール給油の実証実験は、米国を含む他の多くの港湾でも実施されている（表5）。2024年には、シンガポールで初めてメタノール給油と貨物荷役の同時作業が行われた[68]。グリーンメタノールの供給量が限られているため、メタノール給油は依然として限定的なものにとどまっている。例えば、2025年には上海で10,000

mt、シンガポールで3,000 mt [69]、ロッテルダムで12,000 mt

[70]のグリーンメタノールが給油された。比較として、2025年のシンガポールにおける全燃料の年間総給油量は5,620万 mtであった [34]。

主要なエンジンOEMメーカー（Everllence、Wartsila、WinGD、Caterpillarなど）からは、新造船向けにメタノール対応エンジンが提供されており、大型の2ストローク主機関から、4ストロークである場合もある発電用の小型補助機関まで含まれる。

就航中の船舶も、メタノールデュアルフューエル船へと改造することが可能である。改造は主に、就航後5年から10年の船舶で、電子式エンジン制御システムを搭載しているものに適用される。メタノールデュアルフューエル運航のための改造は、機械部品の交換、船体の延長、新しい燃料タンクの追加、燃料処理室および燃料供給システムの交換に加え、制御装置、警報装置、監視システムの更新などを伴う大規模な工事となる[71]。

「マースク・ハリファックス」号の場合、船体を半分に切り分けて15メートル延長する工事が必要となった[72]。

現在、メタノール対応船は合計 112 隻から 120 隻が就航しており、これには 2026 年に新造船として引き渡される 38 隻が含まれる [32]。これらの船舶が平均して 1 日あたり 100 mt の燃料油を消費する大型コンテナ船であり、表 3 に示すメタノールおよび MGO の比エネルギー値を用いると、各船舶の 1 日あたりの消費量は 215 mt となる。

年間330日運航する112隻の船舶の場合、メタノールの総需要は年間約800万mtとなる。表5には、海運用燃料としてのメタノールの開発における主要な出来事が記載されており、最も重要な出来事は図7にグラフで示されている。

表4. IMPCAおよびISO 6583:2024のメタノール仕様要件

	単位	方法	IMPCA	ISO MMA	ISO MMB	ISO MMC
外観		IMPCA 003	均一で、透明であり、浮遊物質を含まない			
純度（乾燥基準）	wt %	IMPCA 001	99.85 以上	99.85 以上	99.85 以上	99.70 min.
不純物（乾燥基準）	wt %	IMPCA 001	該当なし	0.15 以下	0.15 以下	0.30以下
アセトン	mg/kg	IMPCA 001	30以下	30以下	30以下	30以下
エタノール	mg/kg	IMPCA 001	50以下	50以下	50以下	最大 150
色	Pt-Co	D1209 または D5386	最大5	該当なし	該当なし	該当なし
水	wt %	E1064	0.1 以下	0.1 以下	0.1 以下	0.5以下
蒸留範囲	°C	D1078	1.0 以下	1.0 以下	1.0 以下	レポート
比重 20°C/20°C		D4052	0.7910– 0.7930	該当なし	該当なし	該当なし
15°Cにおける密度	kg/m ³	ISO 12185/D4052	該当なし	795.0– 797.0	795.0– 797.0	795.0– 798.0
15°Cにおける過マンガン酸カリウムの反応時間	分	D1363	60分	該当なし	該当なし	該当なし
塩化物（Cl ⁻ として）	mg/kg	IMPCA 002	0.5以下	0.5以下	0.5以下	0.5以下
硫黄	mg/kg	D5453	0.5以下	0.5以下	0.5以下	10（最大）
水との混和性		D1722	合格	該当なし	該当なし	該当なし
炭化可能材	Pt-Co	E346	30以下	該当なし	該当なし	該当なし
酢酸換算による酸度	mg/kg	D1613	30以下	30以下	30以下	30以下
溶液中の鉄	mg/kg	E394	0.10以下	該当なし	該当なし	該当なし
不揮発性物質	mg/1,000 mL	D1353	最大8	該当なし	該当なし	該当なし
潤滑性	μm	IP PM FK	該当なし	a	--	--
粒子数		IP PM FI	該当なし	b	--	--

^a 潤滑性は、買い手と売り手の間で合意されるものとする。

^b 粒子数は、買い手と売り手の間で合意するものとする。

表5. メタノール・デュアルフューエル船舶における重要な出来事

年	出来事
2015	フェリー「ステナ・ゲルマニカ」が改造され、世界初のメタノールデュアルフューエル船（ワルツィラ製4ストロークエンジン）となった [73]
2016	主にメタノールを積載する新造ケミカルタンカー7隻が就航した [74]
2018	IMOは、船舶用燃料としてのメタノール／エタノールに関する規格の策定をISOに要請した [75]
2020	IMOは、船舶におけるメタノールおよびエタノールの安全な取り扱いに関する暫定ガイダンスを公表した [9]
2021	ロッテルダムで、メタノールタンカーへの初のバージから船舶へのメタノール給油が実施される [68]
2023	世界初のメタノール対応コンテナ船「ローラ・マースク」（2,100 TEU）が、韓国・蔚山からデンマーク・コペンハーゲンへ向けて処女航海を実施 [76]
2023	タンカー「ステナ・プロ・マリン」号および「ステナ・プロスペラス」号が、ヒューストン港および米国で初めてとなるメタノール給油を実施。この際、石油製品の荷下ろしと並行して、バージからメタノールの給油が行われた [77]
2024	マースクとエバーレンスは、15,226 TEUのコンテナ船「マースク・ハリファックス」のメタノールデュアルフューエル船への改造を完了した [78, 72]
2024	「ステナ・プロヴィデント」号がサバンナ港で史上初のメタノール給油を完了した [79]
2024	シンガポールで、コンテナ荷下ろし作業とメタノール給油を同時に行う史上初の作業が行われた [80]
2024	ISOがISO 6583:2024「船舶用燃料としてのメタノール一般要件および仕様」を公表した
2024	メタノール対応の大型（16,000 TEU）コンテナ船として初の新造船「Ane Maersk」が進水 [81]

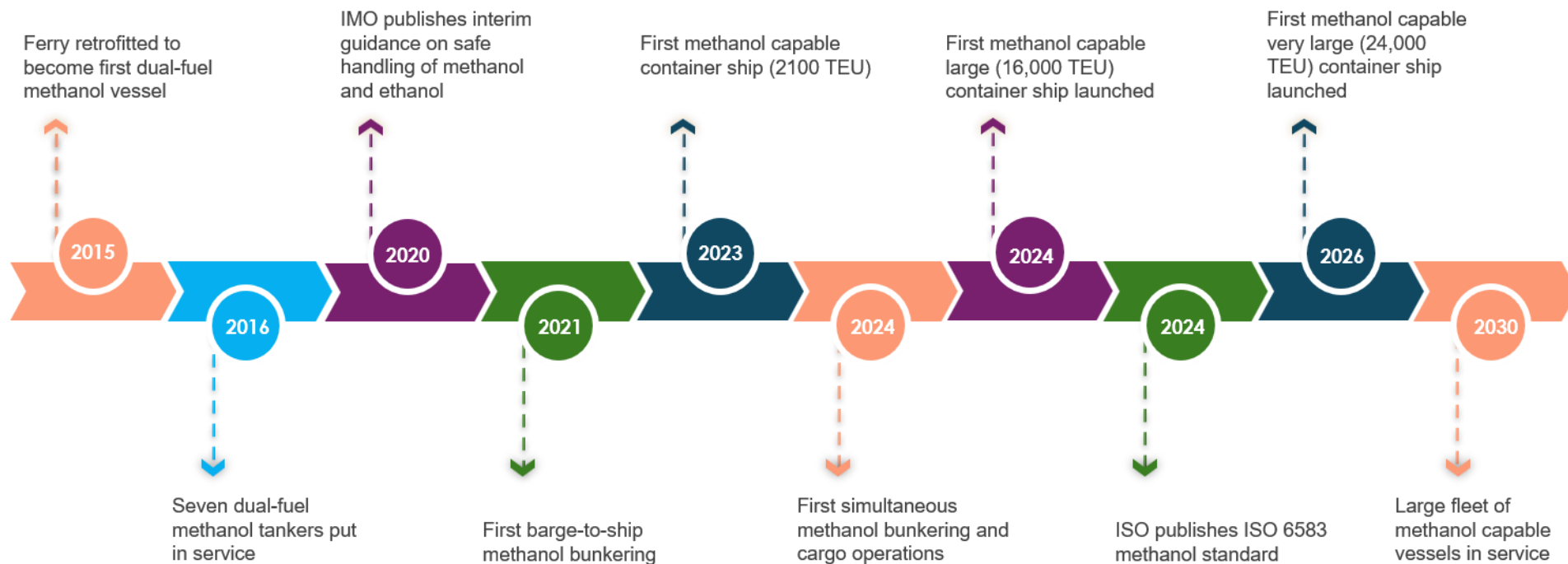


図7. 海運用燃料としてのメタノール開発における重要な出来事

エタノールとメタノールの比較

メタノールとエタノールの両方の使用については、IMOの暫定ガイダンス [9] で取り上げられている。しかし、燃料品質に関するISO規格の存在、シンガポールのメタノール給油に関するTR 129規格などの港湾レベルの基準 [82]、および多くの船舶でメタノールが使用されてきた実運用実績があるため、メタノールの方がより成熟している。メタノールもエタノールもアルコールであり、類似した性質を持つため、メタノールの運用実績やインフラの共有可能性、および「2種類のアルコール戦略」により、エタノールの普及は急速に進む可能性がある。

物理的性質と可燃性

メタノールとエタノールはいずれもアルコールであり、化学的性質は非常によく似ているが、完全に同一ではない。これらは表6にまとめられている。類似しているものの、メタノール（CH₃OH）の炭素原子1個からエタノール（C₂H₅OH）の炭素原子2個への変化は、沸点、密度、引火点には比較的小さな影響しか及ぼさないが、低発熱量（LHV）には大きな影響を与える。エタノールの低発熱量（LHV）は35%高い。メタノールのLHVはMGOより54%低い一方、エタノールのLHVはわずか37%低いに過ぎない。

エネルギー密度（体積ベース）の観点から検討すると、MGO（それぞれ3⁸ GJ/m³および⁸⁵⁰ kg/m³の密度）での運航と同等の航続距離を確保するには、メタノールの場合は燃料貯蔵容量を2.4倍に、エタノールの場合は1.8倍に増やす必要がある。図7は、MGOと比較した各種代替燃料に必要な相対体積を示している[60]。特に、エタノールはメタノールやLNGよりも燃料貯蔵体積が少なく済む。

引火点が類似しているため、窒素ブランキング、火災検知、換気に関しては、エタノールもメタノールと同様の手順で取り扱わなければならない。両アルコールとも、肉眼では検知が困難なほば見えない炎で燃焼するため、火災検知は重要である。

自然発火温度はMGOと同範囲（250°C～500°C）にあり、高温の金属表面との接触による着火という観点からは同等の安全性が確保されている。メタノールは可燃範囲が広いため、不活性ガスシステムが故障した場合、火災や爆発のリスクが高まる可能性がある。

表6. メタノールとエタノールの物性比較

性質	メタノール	エタノール
沸点、°C ^a	64.7	78.4
凝固点、°C ^a	-97	-114
15°Cにおける密度、kg/m ^{3b}	796.1	793.5
20°Cにおける動粘度、mm ² /s ^(g) /s ^g	0.75	1.36
低発熱量、MJ/kg	19.9 ^c	26.9 ^d
エネルギー密度、MJ/L	15.9	21.4
25°Cにおける気化熱、kJ/kg ^a	1,174	918
引火点（°C、密閉カップ法）	12 ^e	14 ^e
自然発火温度、°C ^f	464	363
可燃性限界、体積% ^f	6–36	3.3–19

^a NIST ウェブブック [28]; ^b Measurement Canada [29]; ^c メタノール協会 [83]; ^d Christensen et al. [30]; ^e Sigma-Aldrich、エチルアルコール（純）の安全データシート。製品番号：E7023；^f Ellis および Tanneberger [60]；^g Engineering Toolbox。

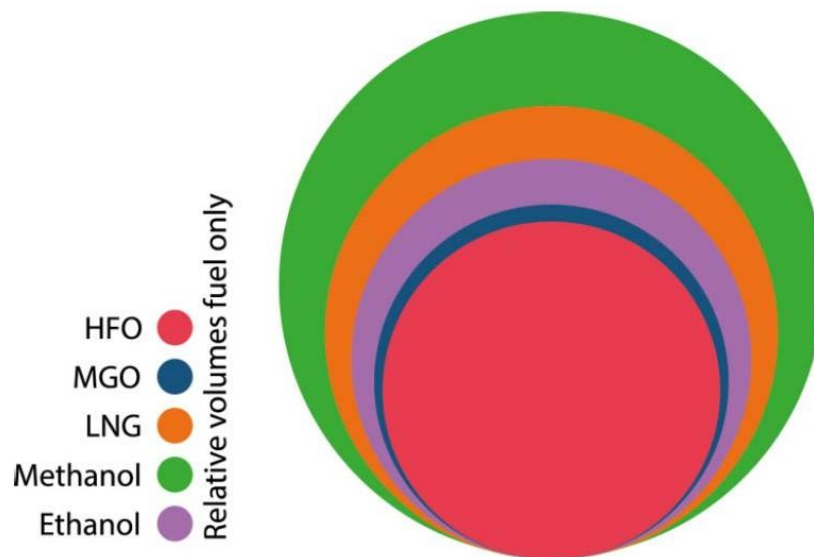


図8. エネルギー密度に基づく相対燃料体積 [60]

仕様

ISOは、ISO 6583:2024「船舶用燃料としてのメタノール—一般要求事項および仕様」を公表した。この規格は、船舶市場で使用されるメタノールの純度および特性を規定している。また、ISOは予備作業項目6583-2「船舶用アルコール燃料—第2部：エタノール」を設定しており、現在、船舶輸送用エタノールに関するISO規格が策定中である。この規格は、ASTMインターナショナル、ブラジル石油・天然ガス・バイオ燃料庁（ANP）、および欧州標準化委員会（CEN）が公布したエタノール規格を基に策定される見込みであり、表7では、これらの規格とISO 6583のMMCグレードのメタノール規格との比較が示されている。

MMCグレードは、各種メタノールグレードの中で不純物の許容範囲が最も広い。メタノール規格はメタノール化学規格（IMPCA）に基づいているため、不純物の許容レベルは、ガソリン製造用のブレンドストックとして使用されることを目的としたエタノール規格よりも大幅に低い。各種エタノール規格におけるメタノールの制限は、自動車用燃料システムの材料がより高い濃度に対応できない可能性があること、メタノールが低混合濃度でもガソリンの蒸気圧を著しく上昇させること、およびメタノールの炭化水素への溶解度が限られていることに起因する。

ガソリンの最大蒸気圧は、通常、蒸発エミッションを低減するために規制されている。これらの考慮事項は、エンジンや燃料供給システムがほぼ純粋なエタノールまたはメタノールを使用している船舶輸送には当てはまらない可能性がある。メタノールのISO規格におけるエタノール濃度の上限値150 ppmには、技術的な根拠がないと思われる。なぜなら、体積パーセントで数パーセント以上のエタノール濃度であっても、物理的特性や燃焼特性に影響を与える可能性は低いからである。エタノールの許容酸度は高いが、経験上、一般的な鋼種においてエタノールが腐食速度を増加させることはないことが示されている。

エタノール製造時点での無機塩化物濃度はほぼゼロであるが、サプライチェーンにおける汚染を考慮して、規格では最大6.7 mg/kgまで許容されている。経験上、この低濃度の塩化物では腐食の問題は生じないことが分かっている。次の節で述べるように、エタノール製造業者および流通業者は、インフラやエンドユーザーの燃料システムを保護するために、エタノールに腐食防止剤を日常的に添加している。

表7. エタノールおよびISO6583 MMCグレードメタノールに関する世界各国の規格の比較

特性	エタノール				メタノール
	ASTM D4806-25	ASTM D8651-25 ^a	ANP No 19/2015 ^b	EN 15376	ISO 6583 (MMC グレード)
エタノール、体積% (最小値)	92.1	95	98.0		--
エタノールおよびそれ以上の飽和アルコール、重量% 最低				98.7	
高級飽和 (C3~C5) 単一アルコール、重量% (最大)				2.0	
エタノール (乾燥基準)、mg/kg (上限)	--	--	--		150
メタノール、体積% (最大)	0.5	0.5	0.5	0.300	
メタノール (乾燥基準)、重量%	--	--	--		99.70
不純物 (乾燥基準、重量%)	--	--	--		0.30
溶媒洗浄ガム、mg/100 mL (最大)	5	5	--		--
水分、重量% (最大)	1.26	1.26	0.7		0.500
無機塩化物、mg/kg、最大値	6.7	6.7	1	1.5	0.5
銅、mg/mg (最大値)	0.1	--	--	0.1	--
銅 (mg/L) 上限値	--	--	0.07		--
リン、mg/L (上限)				0.15	
酸度 (酢酸換算)、mg/kg	70	70	30	70	30
pHe	6.5-9.0	6.5-9.0	6.0~8.0	--	--
硫黄、mg/kg	30	10	報告	10	10.0
既存硫酸塩、mg/kg	4	4	4	3.0	--
変性剤/炭化水素、体積%	1.96-2.5	--	最大3	-- ^c	--
蒸発残留物、mg/100 mL (上限)	--	--	5	10	--
アルコール度数 (重量%)、最低値	--	--	99.3		--
20°Cにおける密度、kg/m ³ 最大	--	--	791.5		--
15°Cにおける密度、kg/m ³	--	--	--		795.0-798.0
鉄、最大 mg/kg	--	--	5		--
ナトリウム、mg/kg (上限)	--	--	2		--
電気伝導度、μS/m (最大)	--	--	300	2.5	--
アセトン (乾燥基準)、mg/kg	--	--	--		30
101.3 kPaにおける蒸留範囲、最高温度 (°C)	--	--	--		報告

^a 非変性燃料用エタノール。^b ANP無水グレード。^c 各国の規制で要求されるもの。

ASTM D4806、ANP No. 19、およびEN15376では、エタノールを人間の飲用に適さないものにするために変性剤の使用が義務付けられている。これは通常、天然ガソリン（天然ガス生産の副産物）である。船舶用エタノールにおける変性剤の必要性およびその影響については、現在も議論が続いている。天然ガソリンの使用が望ましくない場合は、他の変性剤を用いた特別に変性されたアルコールを使用することができる。例えば、SDA-3Aは5 vol %のメタノールを用いて変性されている（ただし、これはASTM D4806の要件を満たさない）。あるいは、ASTM D8651に規定される未変性燃料用エタノールを使用することも可能である。

メタノールとエタノールには類似点があるため、両者がアルコール燃料としてほぼ互換性を持って使用される船舶用燃料市場が想定される。これにより、アルコール専用バンカーバージはタンクを洗浄することなく燃料を切り替えられるほか、船舶は、一方のアルコールで部分的に満たされたタンクの上に、もう一方のアルコールを積み込むことが可能になるという利点がある。

これが可能となるのは、船員が毎週、あるいは毎日、タンク内燃料の残量を測深やその他の測定によって綿密に監視しているためである。新しい燃料を積み込む前にタンク内の燃料量を正確に測定することは、あらゆる燃料積み込み作業において極めて重要な工程であり、これにより船長はタンク内のメタノール／エタノール混合物のエネルギー含有量を算出し、ひいては船舶の航続距離を算出することができる。

材料の適合性

一般的に、材料の適合性の観点からは、エタノールよりもメタノールの方が扱いが難しい。メタノールは極性が高く、水素結合を形成しやすい性質があり、これがエタノールに比べて分子サイズが小さいことも相まって、エラストマーやプラスチックとの相互作用がより強くなる。

この相互作用により、エラストマーやプラスチックの膨潤が促進され、物性が劣化します。アルコールのこうした特性は、表8に示すように、溶解度パラメータやモル体積を用いて定量化することができる[84]。

表8. メタノールおよびエタノールのエラストマーおよびプラスチックとの相容性に関連するパラメータ

分散	溶解度パラメータ		モル体積、cm ³ /mol	
	極性	水素結合		
メタノール	14.7	12.3	22.3	40.6
エタノール	15.8	8.8	19.4	58.6

金属の腐食という観点から、メタノールは水よりも酸性度が高く、エタノールは酸性度が低いという点に注目すべきである[85]。さらに、メタノールの分解生成物（ギ酸）は、エタノールの分解生成物（酢酸）よりもはるかに強い酸である。微量の水を含む環境下では、メタノールはエタノールよりも腐食性が高くなる。

これは、メタノールの貯蔵にはステンレス鋼（または内面にコーティングを施した軟鋼製タンク）を使用すべきであるという推奨事項と一致している[59]。一方、エタノールの貯蔵には軟鋼でも許容される場合がある[60]—

特に、腐食防止添加剤が一般的に使用されていることを考慮すればなおさらである。いずれのアルコールもアルミニウム合金や鉛に対して腐食性を示す可能性が高く、異なる金属が電氣的に接触している場合にはガルバニック腐食を促進することもある。

規格上の義務はないが、燃料用エタノールには通常、生産段階で腐食防止剤を添加する。これにより、エンドユーザーの機器を含む供給網全体で腐食を防ぐ[86]。多くの腐食防止剤はpH緩衝剤を含み、特定の条件下で生成する酸を中和する[87]。適切な添加濃度を決定するための評価手順も公表されている[88]。

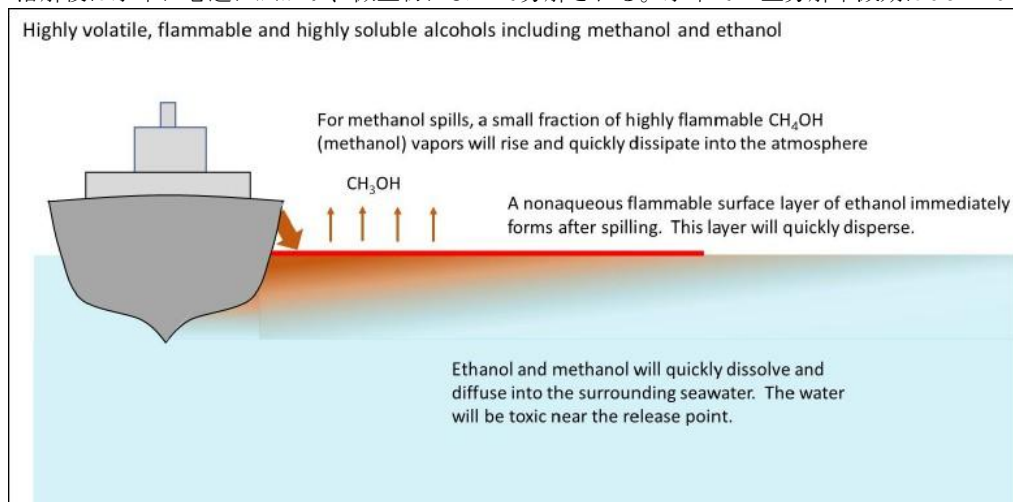
メタノールの貯蔵および取り扱い用に開発されたシステムは、エタノールとも容易に互換性があるはずである。

環境へのメタノールおよびエタノールの流出

Kass ら [43] は、エタノールやメタノールを含む代替船舶用燃料の大量流出や放出による潜在的な環境影響を調査した。これらの燃料は非常によく似ているが、海洋に流出した場合の影響には重要な違いがある。これらは図9に示されている。

エタノールの沸点は78°Cで、揮発性が高く、空気にさらされると最終的に気化する。水と完全に混和し、溶解後は揮発性が大幅に低下する。図9に示すように、水面への流出時には、一部が一時的に薄い非水性の液膜を形成する場合がある。流出中と直後には、液膜の上に空気より重いエタノール蒸気が生じ、流出地点付近の酸素を置換する。蒸気の拡散によって可燃範囲の混合気ができると、着火する可能性がある。ただし、水への溶解度が高いため、液膜は主に溶解、次いで蒸発によって速や

かに消失する。溶解後は水中に急速に広がり、微生物によって分解される。水中での生分解半減期は6.5～26時間である[89]。



エタノールは海洋生物に有害であるが、急速な拡散によって、流出地点付近の生物への悪影響は回避される。また、生物濃縮係数が低く、食物連鎖を通じて蓄積しない。

図9. 海洋におけるエタノール流出シナリオ [61]

メタノールはエタノールと性質が類似しているため、流出時の挙動も同様となる。ただし、メタノールは蒸気圧が高く、より速く蒸発する。メタノール蒸気はエタノールの場合よりも速く上昇・拡散するため、水面にメタノールが蓄積する可能性は低い [61]。

流出事故の際に火災のリスクは残るものの、メタノールの大部分はすぐに水に溶解し、そこで半減期1～7日で生分解されるが、これはエタノールよりも著しく遅い [89]。

したがって、両アルコールとも流出時には火災のリスクが相当程度存在するが、メタノールの場合、蒸発や大気中への拡散、および水への溶解によって、このリスクはより迅速に軽減される。ただし、一旦水に溶解すると、エタノールはメタノールよりも速く生分解される。

メタノールとエタノールは水との混和性が高いため、現在の流出検知技術では検出できない可能性がある。油と水の熱的および偏光の違いを利用する油流出検知用の赤外線技術は、メタノール／エタノールが水と類似した性質を持つため、適用できない。油流出を検知できるレーダー技術も、表面波の高さが異なるため、メタノール／エタノールの流出を検知できない可能性がある。紫外線技術は、適切な改良を加えれば適用可能であると考えられる[61]。

海運業界におけるエタノールの導入

規制

エタノールは、安全要件、燃料システムの設計、換気、漏洩検知、および消火活動などを含むIMOの暫定ガイドラインに基づき、承認された燃料である[9]。海事分類協会は、船舶の設計、建造、および運航に関する技術規則を策定・施行しており、これらはIMOの概括的な規制よりも詳細で、船舶の全寿命にわたる構造的および機械的完全性に重点を置いている。DNV、米国船級協会（ABS）、ロイド船級協会（LR）、ビューロー・ベリタス（BV）、日本海事協会（Class NK）、中国船級協会（CCS）など、複数の船級協会が、メタノールおよびエタノールの使用に関する詳細な技術要件を公表している。

エタノールが海運分野で広く利用されるためには、その特性を規定するISO規格の策定が必要である。この規格は現在、ISO/TC 28/SC 4/WG 18によって策定が進められている。同作業部会は、2027年の最終規格の公表を目指している。

海運業界における代替燃料利用の推進要因の一つはIMO NZFであり、この枠組みがIMO加盟国に対して法的拘束力を持つものとして採択されることも、海運におけるエタノール利用の大きな推進要因となるでしょう。燃料がIMO NZFの下で認定されるためには、米国産トウモロコシ由来のエタノールについて、IMOが承認した経路およびデフォルトのGFI（グローバル・フットプリント・インデックス）が必要となる。2021年のレビューによると、米国産トウモロコシ由来のエタノールの炭素強度は51.4 gCO₂eq/MJであり、石油燃料よりも46%低いことが判明した[26]。米国のエタノール生産者は、エネルギー消費を削減し、エタノール収率を向上させる技術に投資しており、この数値をさらに低減させようとしている。複数の生産者がCO₂の隔離技術を採用しており、これは米国の税額控除の対象となり、炭素強度を最大30 gCO₂eq/MJまで低減させる可能性がある[27]。

エンジンの現状と実地走行試験

エンジンの性能

メタノールもエタノールもアルコール類に属し、その物理的性質のほとんどは類似している。材料の適合性の観点からメタノールの方が扱いが難しいため、エタノールはメタノール燃料の貯蔵、取り扱い、および噴射システムと互換性がある。メタノール対応の船舶は、ほとんどまたは全く改造を加えずにエタノールで運航できることがますます認識されているが、完全に最適化されたエンジンの方がわずかに優れた性能を発揮する [90, 91, 92, 93, 94]。

2025年、Everllence社は、メタノールデュアルフューエル用に設計された大口径2ストロークME-LGIMエンジンが、あらゆる負荷条件下でエタノールを燃料として正常に稼働できることを確認した。ME-LGIMエンジンは2016年にメタノールタンカーで就航しており、稼働中のエンジンが50基、受注数が225基に上るなど、メタノールデュアルフューエルエンジンの中でも特に普及している機種の一つである[95]。メタノールデュアルフューエル用に設計された4気筒試験用エンジン（4S90-LGIM）は、エンジンに大きな変更を加えることなく、メタノールと水とエタノールの両方で稼働した。エタノールでの性能は許容範囲内であったが、噴射の最適化や熱効率の向上の余地はあった。2台目の実規模メタノールデュアルフューエルエンジン（7G95-LGIM）も、エンジンに何の変更を加えることなく無水変性エタノールで運転され、メタノールと比較して性能にわずかな変化しか見られなかった。Everllence社

は、4ストロークエンジンL21/31のエタノールデュアルフューエル運転の実証も行っている[96]。このエンジンは、大型船舶の発電用として広く使用されている。

WinGDは、船舶用エンジンへの適用を目的として、メタノールおよびエタノールの広範な試験を実施した[97]。エタノールの試験は、メタノールで稼働するように設計されたエンジンを用いて行われた。WinGDはまた、噴霧燃焼室実験も実施し、メタノールおよびエタノールの噴霧伝播がディーゼル燃料のそれと非常に類似していることが示された。その結果、燃焼特性、性能、排出ガスはほぼ同等であり、両燃料に同じ設計および安全原則を適用できることが示された。エタノールはメタノールよりも低発熱量（LHV）が高いため、燃焼を最適化するには、エタノールとメタノールの噴射量の差をエンジン側で補正する必要がある。もともとメタノール運転用に設計された噴射システムは、改造なしにエタノール運転にも対応できる。ただし、エンジンがメタノールで稼働するかエタノールで稼働するかによって、ノズル先端の形状を最適化することは可能である。WinGD社は現在、エタノール、メタノール、あるいはその混合燃料で稼働可能なデュアルフューエルエンジンを提供している[97]。同社は最近、主にエタノールで稼働するように設計された6気筒の6X82DF-M/Eエンジン2基の受注を獲得した[98]。

ヴァルティラ社による同様の研究では、エタノールとメタノールには類似した特性があることが確認されており、つまり、エタノール用に開発されたものと同じ燃料システムや安全対策を、ごくわずかな変更を加えるだけで、現在のメタノールエンジンプラットフォームに活用できる[94]。メタノール用に策定された安全対策やオペレーター向けの研修も、エタノールの場合に適用可能である。もともとメタノール用として設計されたヴァルティラ社製 W6L32M 多気筒エンジンを用いた研究では、EN 15376 に準拠した無水エタノールが使用された。このエタノールには微量の水分が含まれており、変性剤として 3% のイソブタノールが添加されていた。ハードウェアの改造や制御システムの設定変更を行わない状態で、さまざまな負荷条件下において、エタノールはメタノールと比較して、単位ブレーキエネルギー当たりの消費量がわずかに高く、発熱率が低かった。

キャタピラー社も、同社のデュアルフューエル式メタノール船舶用4ストロークエンジンにおけるエタノールの使用を検討していることを認めている[99]。

アルコールデュアルフューエルエンジンは、デュアルフューエルモードで運転する場合、NO_xを含むTier IおよびTier IIの排出ガス規制を容易に満たす。Tier IIIのNO_x排出ガス規制を満たすには、尿素選択的触媒還元（SCR）などの追加の制御手段が必要となる。

試験航海

エタノールデュアルフューエルシステムを用いた海上試験に関する公開報告は、Everlence 6G50ME-C9.9-LGIMエンジンを搭載した世界初のメタノール対応コンテナ船「ローラ・マースク」での試験に限られている。2025年10月から12月にかけて、バルト海でメタノールに10%のエタノールを混合した燃料を用いた試験航海が実施され、この混合燃料がエンジンの性能を損なうことなく使用できることが確認された。2025年12月には、エタノール50%混合燃料を用いた第2回目の試験が開始され、これも成功を収めた[100]。2026年初頭には、無水変性エタノール100%を用いた第3回目の試験が実施され、エタノールの使用に何ら問題が見られないことが確認され、これも成功した[101]。

港湾における燃料補給と供給状況

最近、商業用エタノール給油において重要な節目がいくつかあった。2026年5月、ローラ・マースク号はロッテルダムで、2,000 mt（670,000ガロン）のエタノールのバージから船舶への給油を完了した。

[102]。また、同5月にロッテルダムでは、コンテナ船「エコ・レヴァント」(X-Press Feeders社)が、バージから船舶への移送により、90%のバイオメタノールと10%のエタノールを別々に給油し、これら2種類のアルコールを船内タンクで混合した[103]。7月には、16,000 TEUのコンテナ船「アントニア・マースク」が、バルセロナでバージから船舶への移送により2,800 mt (938,000 gal) のエタノールを給油した[104]。これらの船舶はすべて、その後、給油された燃料を使用して商業運航を行った。
米国におけるエタノールのバンカー燃料化に向けた取り組みは、現在計画段階にある[105]。

エタノールは、輸出または輸入が行われる港で入手可能である。米国におけるエタノールの輸出・輸入に使用される特定の港は、エタノールを船舶用燃料として利用する上で重要となる可能性がある。これらの港にはエタノールの貯蔵・取扱施設があり、船舶へのエタノール供給が可能と推測されるためである。米国のエタノール輸出のほぼ半分はヒューストンから、さらに12%はニューオーリンズから行われており、ニューヨークやシアトルを通じた輸出も相当量ある[24]。

エタノールの輸入量はごくわずかではあるが、2024年にはそのほぼ全量がサバンナ港を経由していた。

米国においてエタノールを船舶用燃料として導入する方法を理解する上での課題は、米国の港湾におけるバンカーリングトン数や、どのような種類の船舶がバンカーリングを行っているかに関するデータが不足していることである。情報源によると、2025年の米国のバンカー市場総量は約1,800万mtであったとされる[35]。グレート・ヒューストン地域は、年間400万～500万mtと最大の市場を有すると考えられている。このようなデータを提供している数少ない米国の港湾の一つであるロサンゼルス港の統計によると、2025年のバンカー総量は100万mtであった[106]。

現在運航中のメタノール・デュアルフューエル船112隻による潜在的なエタノール消費量を検討することで、短期的な市場の上限を推定することができる。これらを平均して1日あたり100 mtの燃料油を消費する大型コンテナ船と仮定すると、1日あたり160 mtのエタノール消費に相当する。このシナリオでは、年間のエタノール消費量は(330日間の運航を想定して)約600万mt、すなわち約20億ガロンとなる。

代替燃料とのエタノール価格比較

表9には、2026年2月(イラン戦争前)および2026年6月の価格比較が示されている。メタノールとエタノールの価格は、1メトリックトン当たりおよびVLSFO換算(VLSFOeq)ベースで示されている。VLSFOeq価格は、VLSFOの比エネルギー(43 MJ/kgと仮定)とアルコールの比エネルギー(メタノールは2.161、エタノールは1.599)の比率を乗じて算出されている。これは、VLSFOと同等のエネルギー量および航続距離を確保するために追加で調達する必要があるアルコールの量を反映したものである。これらの価格は、特定の2つの時点における一時点の数値に過ぎず、相対的な価格水準のおおよその目安を示すことを目的としている。以下に述べる価格に関する考察は、エネルギー換算ベースで行われる。

2月時点では、グレーメタノールはVLSFOより65%高価だったが、エタノールはおおよそ2倍の価格だった。しかし、6月になるとエタノール価格はわずか10%の上昇にとどまり、これはおそらく米国における夏季のガソリン需要の増加を反映したものであり、その結果、エタノールはVLSFOより43%高価にとどまった。一方、VLSFOとグレーメタノールの価格は、はるかに大幅な上昇を見せた。グリーンメタノールの信頼できる価格データは入手困難だが、ロッテルダムにおけるバイオメタノールの単一の見積もりに基づく、その価格はエタノールの約2倍の水準にある。

表9. VLSFOとグレーメタノール、グリーンメタノール、エタノールの価格比較

\$/mt (\$/gal)	2026年2月	2026年6月
VLSFO ^a	455 (1.64)	744 (2.68)
グレーメタノール ^a	365 (1.10)	554 (1.67)
グレーメタノール VLSFOeq	751 (2.26)	1,140 (3.43)
グリーン・メタノール ^b	--	988 (2.98)
グリーンメタノール VLSFOeq	--	2,033 (6.13)
エタノール ^c	591 (1.78)	666 (2.00)
エタノール VLSFO換算	944 (2.84)	1,064 (3.20)

^a shipandbunker.com によるヒューストンの価格。

^b 2026年5月中旬のロッテルダムにおけるグリーンメタノール（バイオメタノール）価格 [107]。

^c アメリカ穀物パイオプロダクツ協会（U.S. Grains & BioProducts Council）によるエタノール価格 [108]。

エタノール導入の概要

表10および図10は、海運分野におけるエタノールの導入に関して、これまでに発生した主な出来事を示している。2025年後半以降、極めて急速なペースで重要な出来事が相次いでいる。

表10. 海運におけるエタノール導入の主な出来事

年	出来事
2018	WinGDがエタノールデュアルフューエルエンジンの実規模試験を実施 [97]
2018	IMO、ISOに対し、船舶用燃料としてのメタノール／エタノールの規格策定を要請 [75]
2020	IMO、船舶におけるメタノールおよびエタノールの安全な取り扱いに関する暫定ガイダンスを公表 [9]
2025	船舶「ローラ・マースク」が、メタノールに10%のエタノールを混合した燃料の試験を成功裏に完了し、50%混合燃料による試験に着手、その後100%エタノール混合燃料の試験も実施予定 [100]
2025	エバーレンス社は、同社のME-LGIMメタノールデュアルフューエルエンジンが、あらゆる負荷条件下でエタノールを燃料として稼働できることを実証した [95]
2025	WinGDは、2026年にエタノールデュアルフューエル2ストロークエンジンを導入すると発表した [97]
2025	WartsilaはCIMACで論文を発表し、メタノール最適化エンジンでもエタノールを使用できることを示したが、さらなる開発によりより高い熱効率を実現できると述べた [94]
2025	ISOは、予備作業項目6583-2「船舶用アルコール燃料—第2部：エタノール」の策定を開始した
2026	HD現代重工業は、同社の4ストロークH32DF-LMデュアルフューエルメタノールエンジンが、あらゆる負荷点においてエタノール燃料で安定した運転を行うことを確認した。このエンジンは商船の発電に使用されている [109]
2026	「ローラ・マースク」号において、100%変性燃料用エタノールの試験が成功 [101]；「ローラ・マースク」号への2,000 mtのエタノールの船対船バンカーリングが実施された [102]
2026	バルセロナにおいて、16,000 TEUコンテナ船「アントニア・マースク」に対し、バージから船舶への移送により2,800 mtのエタノールを商業用バンカーリングした [104]

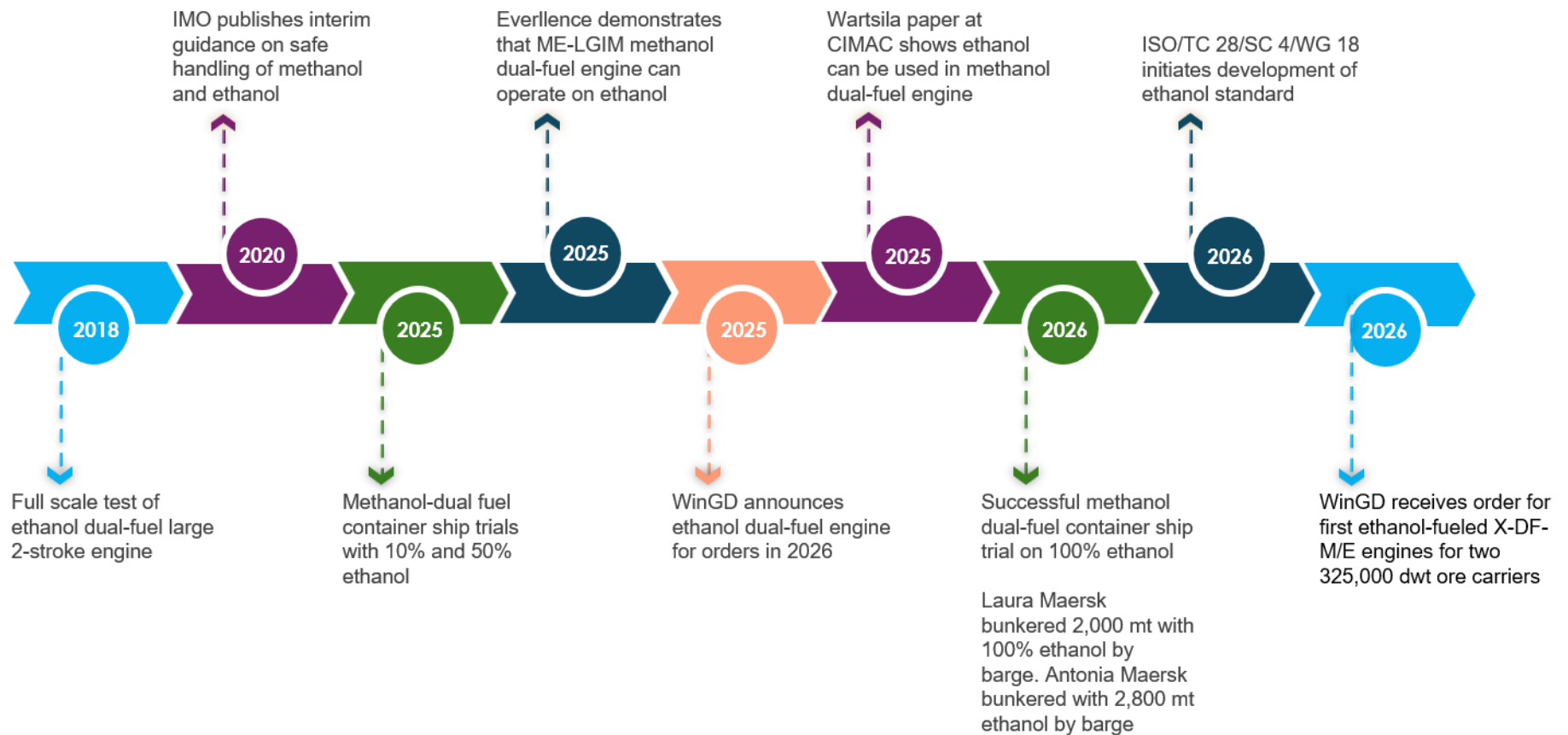


図10. 海運用燃料としてのエタノール開発における重要な出来事

まとめと残された障壁

本報告書では、エタノールが実用的な船舶用燃料となり得るかどうかを検討し、海運業界ですでに採用が進んでいるメタノールと広範に比較している。結論として、エタノールは船舶用途において技術的に実現可能であり、メタノールのためにすでに整備されているインフラ、エンジン技術、運用経験の多くを活用できると結論づけられている。しかし、大規模な導入は、規制の進展、燃料基準、給油インフラ、および認められたライフサイクル炭素会計に依存することになる。

現在、海運業界では重油（HFO）および低硫黄重油（VLSFO）が使用されており、IMOの規制対象となる国際海運において年間約2億1,100万～2億5,900万メートルトンの燃料が消費されている。世界全体では、この数値は3億メートルトンを超えると広く推定されている。海運からの排出物（SO_x、NO_x、PMなど）はIMOによって規制されている。バイオディーゼル、メタノール、エタノールなどの代替燃料は、これらの排出規制要件を満たすのに役立ち、IMOの脱炭素化目標に向けた手段として評価が進められている。

重要な知見の一つは、エタノールがメタノールと多くの重要な特性を共有しているという点である。既存のメタノール対応デュアルフューエル船舶用エンジンは、ほとんど、あるいは全く改造することなく、エタノールで稼働することができる。Everllence、WinGD、Wärtsilä、HD Hyundaiなどの主要なエンジン開発企業は、メタノール用に設計されたエンジンでのエタノール試験に成功している。試験では、許容可能な燃焼挙動、同等の排出特性、および全負荷範囲にわたる安定した運転が実証された。WinGDは、エタノール対応デュアルフューエルエンジンの生産を発表した。Everllence製エンジンを搭載したマースク社の船舶では、商業試験が実施されている。

本報告書は、メタノールと比較したエタノールのいくつかの利点を強調している。エタノールはメタノールよりもエネルギー含有量が約35%高く、人体への毒性が低く、バイオ由来の原料から生産された場合、ライフサイクル全体での温室効果ガス排出量が低くなる可能性がある。引用された研究によると、米国のトウモロコシ由来エタノールの排出量は約51.4

gCO₂eq/MJと推定されており、これは石油系燃料よりも約46%低く、エタノール工場での炭素回収・貯留（CCS）によりさらなる削減が可能である。

一方で、エタノールにはメタノールと同様の運用上および安全上の考慮事項がある。引火点が14°Cであるため、貯蔵や給油の際には不活性ガスによる被覆や特別な取り扱いが必要となる。メタノールと同様、エタノールは水と完全に混和し、極めて引火性が高い。

海洋環境におけるエタノールの流出は比較的速やかに拡散・生分解され、水中の生分解半減期は6.5～26時間である。高濃度ではエタノールは海洋生物に有害であるが、急速な溶解と低い生物蓄積性により、従来の石油流出に比べ、環境中での長期残留性は低くなる。メタノールも同様の挙動を示すものの、一旦溶解すると生分解はより緩やかになる。

また、本報告書では燃料基準や規制の動向についても概説している。IMO（国際海事機関）の暫定安全指針では、すでに適切に設計された船舶におけるメタノールおよびエタノールの使用が許可されている。ISO（国際標準化機構）は船舶用メタノール規格（ISO

6583:2024）を最終決定しており、これに対応する船舶用エタノール燃料規格であるISO 6583-

2は現在策定中である。既存のエタノール規格は、船舶用燃料用途というよりは自動車用ガソリンへの混合を主目的として策定されたものが多いため、さらなる規格策定作業が必要である。

経済的な観点から、本報告書は海運業界をエタノール生産者にとって将来的に巨大な市場となり得るものと位置付けている。IMOの規制対象となる海運におけるエタノールの理論上の最大需要は、年間約3億5,500万トン（1,180億ガロン）に達する可能性があるが、報告書では、従来の燃料を完全に置き換えることは現実的ではないとも認めている。

たとえ部分的な導入にとどまっても、年間数十億ガロン規模の需要が生まれる可能性がある。同報告書は、現在運航中のメタノールデュアルフューエル船隊だけでも、高い代替率を想定した場合、年間約20億ガロンのエタノールを消費し得ると推定している。

エタノールは船舶用燃料として技術的に実現可能であり、メタノールのインフラやエンジンとの互換性という利点がある。残る障壁としては、港湾におけるエタノール給油インフラの整備、国際的な燃料規格の策定、サプライチェーンへの投資、およびエタノールに関するIMOが認定するライフサイクル温室効果ガス排出強度の値の確立などが挙げられる。

参考文献

- [1] 国連貿易開発会議（UNCTAD）、「海運データ：UNCTADが新たな海上貿易統計を発表」、2025年。
- [2] J.-P. ロドリック、「コンテナ船の変遷」、[オンライン]。参照先：
<https://transportgeography.org/contents/chapter5/maritime-transportation/evolution-containerships-classes/>。
[2026年1月アクセス]。
- [3] LogiWorld、「コンテナ船は燃料を何ガロン積載しているか?」、[オンライン]。参照先：
<https://www.logiworldllc.com/how-many-gallons-of-fuel-does-a-container-ship-carry/>。[2026年1月アクセス]。
- [4] 国際海事機関（IMO）、「2021年改訂版MARPOL附属書VI」、決議MEPC.328(76)、2022年。
- [5] 国際海事機関（IMO）、「IMOネットゼロ・フレームワーク よくある質問（FAQ）」、[オンライン]。参照先：
<https://www.imo.org/en/mediacentre/hottopics/pages/faqs-the-imo-net-zero-framework.aspx>。[2026年アクセス]。
- [6] 国際標準化機構（ISO）、「ISO 8217:2024 石油、合成、および再生可能資源由来の製品 - 燃料（クラスF） - 船舶用燃料の仕様」、ジュネーブ、2024年。
- [7] 国際標準化機構（ISO）、「ISO 6583:2024 船舶用燃料としてのメタノール一般要件および仕様」、ジュネーブ、2024年。
- [8] メタノール協会、「船舶用メタノール：将来を見据えた船舶用燃料」、2023年。
- [9] 国際海事機関（IMO）、「メチル／エチルアルコールを燃料として使用する船舶の安全に関する暫定ガイドライン」、2020年。[オンライン]。参照先：
<https://futurefuels.imo.org/wp-content/uploads/2025/10/MSC.1-Circ.1621-Interim-Guidelines-For-The-Safety-Of-ShipsUsing-MethylEthyl-Alcohol-As-Fuel-Secretariat.pdf>。[2026年アクセス]。
- [10] 国際海事機関（IMO）、「船舶のエネルギー効率」、2024年。[オンライン]。参照先：
<https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Reporting%20year%202023.pdf>。[2025年11月アクセス]。
- [11] 国際海事機関（IMO）、「第3回IMO温室効果ガス調査 2014年」、[オンライン]。参照先：
<https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Third%20Greenhouse%20Gas%20Study/GHG3%20Executive%20Summary%20and%20Report.pdf>。
[2026年アクセス]。

- [12] 国際海事機関（IMO）、「2023年IMO船舶由来温室効果ガス排出削減戦略」
」[オンライン]。参照先：<https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/2023-imo-strategy-on-reduction-of-ghg-emissions-from-ships.aspx>。[2025年11月アクセス]。
- [13] 国際海事機関（IMO）、「GESAMP-LCA作業部会による提案されたデフォルト排出係数の提出、科学的レビューおよび勧告に関する方法論」、2025年。[オンライン]。参照先：
[https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/MEPC.1-Circ.916%20-%20Methodology%20For%20Submission,%20Scientific%20Review%20And%20Recommendation%20Of%20Proposed%20Default%20Emiss...%20\(Secretariat\)%20\(2\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/MEPC.1-Circ.916%20-%20Methodology%20For%20Submission,%20Scientific%20Review%20And%20Recommendation%20Of%20Proposed%20Default%20Emiss...%20(Secretariat)%20(2).pdf)。[2026年アクセス]。
- [14] 国際海事機関（IMO）－海洋環境保護委員会、「2024年 船舶用燃料のライフサイクル温室効果ガス（GHG）排出強度に関するガイドライン：決議 MEPC.391(81)」、2024年。[オンライン]。入手先：
[https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.391\(81\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.391(81).pdf)。
。[2026年7月アクセス]。
- [15] B. Solomon、J. Barnes、K. Halvorsen、「穀物およびセルロース系エタノール：歴史、経済、およびエネルギー政策」、『*Biomass and Bioenergy*』、第31巻、416-425頁、2007年。
- [16] J. マッカーシーおよび M. ティエマン、「ガソリン中のMTBE：大気汚染および飲料水に関する問題」、2007年。
- [17] 米国エネルギー情報局（U.S. Energy Information Administration）、「ガソリンに含まれるエタノールの量はどれくらいか、また燃費にどのような影響を与えるか?」、[オンライン]。参照先：
<http://www.eia.gov/tools/faqs/faq.cfm?id=27&t=10>。[2026年アクセス]。
- [18] 米国環境保護庁、「ガソリンの許容エタノール含有率を15パーセントに引き上げるため、Growth Energyが提出した『大気浄化法』免除申請の一部承認」、『*連邦官報*』、第76巻、第17号、4662頁、2011年。
- [19] アイオワ州歳入局、「小売業者燃料ガロン報告書」、[オンライン]。参照先：
<https://tax.iowa.gov/retailers-fuel-gallons-annual-report>。[2025年アクセス]。
- [20] ミネソタ州商務省、「E85および中程度混合ガソリン販売所の報告書」[オンライン]。参照先：
<https://mn.gov/commerce/business/weights-measures/fuel/biodiesel/ethanol.jsp>。[2026年アクセス]。
- [21] 再生可能燃料協会、「年間エタノール生産量」、[オンライン]。参照先：
<https://ethanolrfa.org/markets-and-statistics/annual-ethanol-production>。[2025年11月アクセス]。

- [22] Fortune Business Insights、「エタノール市場の規模、シェアおよび業界分析」、[オンライン]。
参照先：<https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/ethanol-market-101567>。[2026年アクセス]。
- [23] 米国農務省、「農業マーケティング局」、[オンライン]。参照先：<https://agtransport.usda.gov/stories/s/Biofuels-Dashboard/d5wt-am5z/>。[2026年7月アクセス]。
- [24] 再生可能燃料協会、「2024年米国エタノール貿易統計概要」、2025年。[オンライン]。参照先：
<https://ethanolrfa.org/file/2909/2024%20Ethanol%20Trade%20Summary.pdf>。[2026年1月アクセス]。
- [25] 米国農務省、「海外農業研究局」、2024年。[オンライン]。参照先：
https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Biofuels%20Annual_Brasilia_Brazil_BR2024-0022。[2026年1月アクセス]。
- [26] M. Scully、G. Norris、T. Alarcon Falconi、D. MacIntosh、「米国におけるトウモロコシエタノールの炭素強度：科学の現状」、*Environ Res Lett*、第16巻、p. 043001、2021年。
- [27] グローバルCCS研究所、「米国、『One Big Beautiful Bill Act』において45Q税額控除を維持・拡大」[オンライン]。参照先：<https://www.globalccsinstitute.com/u-s-preserves-and-increases-45q-credit-in-one-big-beautiful-bill-act/>。[2026年7月アクセス]。
- [28] P. Liinstrom および W. Mallard 編、『NIST Chemistry Webbook』、NIST標準参照データベース第69号、米国国立標準技術研究所（NIST）、2024年。
- [29] Measurement Canada、「体積補正係数 - エタノールおよび体積補正係数 - メタノール」,[オンライン]。参照先:
<https://ised-isde.canada.ca/site/measurement-canada/en/laws-and-requirements>。[2025年12月アクセス]。
- [30] E. Christensen、J. Yanowitz、M. R. Ratcliff、「ガソリンの物性に対する再生可能酸素化合物の混合効果」、*『Energy and Fuels』*、第25巻、pp. 4723-4733、2011年。
- [31] SEA-LNG、「海運業界のメタン脱炭素化への道筋が、未来への明確な道筋となる」, 2026年。[オンライン]。参照先：<https://sea-lng.org/2026/01/shippings-methane-decarbonisation-pathway-becomes-a-clear-runway-for-the-future/>。[2026年1月アクセス]。
- [32] DNV、「DNV 代替燃料インサイト」、[オンライン]。参照先：<https://afi.dnv.com/>。[2026年7月アクセス]。

- [33] Bunker Market, 「2024年世界のバンカー供給港トップ10ランキング：総取扱量は111.93百万MT」 [オンライン]. 参照先：<https://bunkermarket.com/global-top-10-bunkering-ports-2024-rankings-combined-volume-hit-111-93m-mt/>. [2026年1月アクセス].
- [34] Ship & Bunker, 「分析：シンガポールの年間バンカー販売量が2025年に過去最高を更新」, [オンライン]. 参照先：<https://shipandbunker.com/news/apac/456201-analysis-singapore-annual-bunker-sales-reach-new-record-high-in-2025>. [2026年アクセス].
- [35] Mordor Intelligence, 「米国のバンカー燃料市場規模およびシェア分析 - 成長動向と予測（2026-2031年）」, [オンライン]. 参照先：<https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/united-states-bunker-fuel-market>. [2026年7月アクセス].
- [36] 米国運輸省、運輸統計局、「港湾実績および貨物統計：2025年年次報告書」、ワシントンD.C.、2025年。
- [37] 米国エネルギー情報局、「米国の製油所およびブレンダーによる残留燃料の純生産量」 [オンライン]. 参照先：<https://www.eia.gov/dnav/pet/hist/LeafHandler.ashx?n=PET&s=MRERPUS1&f=M>. [2026年2月アクセス].
- [38] 国際海事機関（IMO）、「窒素酸化物（NOx）－規則13」 [オンライン]. 参照先：[https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/nitrogen-oxides-\(nox\)-%E2%80%93regulation-13.aspx](https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/nitrogen-oxides-(nox)-%E2%80%93regulation-13.aspx). [2026年1月アクセス].
- [39] 国際海事機関（IMO）、「硫黄酸化物（SOx）および粒子状物質 - 規則14」、[オンライン]. 参照先：[https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/sulphur-oxides-\(sox\)-%E2%80%93regulation-14.aspx](https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/sulphur-oxides-(sox)-%E2%80%93regulation-14.aspx). [2026年1月アクセス].
- [40] 国際海事機関（IMO）、「揮発性有機化合物（VOC）－規則15」 [オンライン]. 参照先：[https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/volatile-organic-compounds-\(voc\)-%E2%80%93regulation-15.aspx](https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/volatile-organic-compounds-(voc)-%E2%80%93regulation-15.aspx). [2026年1月アクセス].
- [41] 国際海事機関（IMO）、「オゾン層破壊物質（ODS）－規則12」 [オンライン]. 参照先：[https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/ozone-depleting-substances-\(ods\)-%E2%80%93regulation-12.aspx](https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/ozone-depleting-substances-(ods)-%E2%80%93regulation-12.aspx). [2026年1月アクセス].
- [42] J. Fritt-Rasmussen、S. Wegeberg、K. Gustavson、K. Sørheim、P. Daling、K. Jørgensen、O. Tonteri、J. Holst-Andersen、「重油（HFO）：低温海水におけるHFO流出の運命と挙動に関するレビュー（生分解、環境への影響、油流出対応を含む）」、Vols. <https://doi.org/10.6027/TN2018-549>、北歐閣僚理事会、2018年。

- [43] M. Kass、C. Sluder、B. Kaul、「新興の
非従来型船舶用燃料の流出挙動、検知、および緩和策」、2021年。
- [44] L. Knipstrom、「燃料としてのエタノール」、ISO TC28/SC4/WG 18、2025年。
- [45] 米国船級協会（American Bureau of Shipping）、「サステナビリティ白書：船舶用燃料としてのLNG」、
2022年。[オンライン]。参照先：<https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/advisories-and-debriefs/sustainability-whitepaper-lng-as-marine-fuel.pdf>。[2026年1月アクセス]。
- [46] MAN Energy Solutions、「MAN B&W ME-LGIエンジン：液体ガス噴射 - メタノールおよびLPG」、2018年。[オン
ライン]。参照先：https://www.man-es.com/docs/default-source/document-sync-archive/b-w-me-lgi-engines-liquid-gas-injection-methanol-and-lpg-eng.pdf?sfvrsn=c4f46ed1_8。[2026年1月アクセス]。
- [47] WIN GD、「エンジン：当社の2ストローク低速エンジンは、お客様の動力ソリューションの中核をなしていま
す」, [オンライン]。参照先：<https://wingd.com/products-solutions/engines?f=33104>。[2026年1月アクセス]。
- [48] Wartsila、「メタノールエンジン－カーボンニュートラルを実現する力」, [オンライン]。参照先：
<https://www.wartsila.com/marine/products/engines-and-generating-sets/methanol-engines>。
- [49] Caterpillar Marine、「Caterpillar Marine、メタノール・デュアルフューエル技術の計画を推進」[オンライン]。参
照先：https://www.cat.com/en_US/news/engine-press-releases/caterpillar-marine-advances-plans-for-methanol-dual-fuel-technology.html。[2026年アクセス]。
- [50] ロイド・レジスター、「Fuel for Thought: メタノール」、ロンドン、2023年。
- [51] リサーチ・アンド・マーケット、「メタノール- グローバル戦略ビジネスレポート」、[オンライン]。参照先：
https://www.researchandmarkets.com/reports/338607/methanol_global_strategic_business_report?utm_code=jj7v7p。
[2025年7月アクセス]。
- [52] World Integrated Trade Solution、「2023年の国別メタノール輸出量」, [オンライン]。参照先：
<https://wits.worldbank.org/trade/comtrade/en/country/ALL/year/2023/tradeflow/Exports/partner/WLD/product/290511#:~:text=In%202023%2C%20Top%20exporters%20of%20メタノール（メチル、1,889,220,000 kg）の主要輸出国は、オマーン（515,508.77K%20、1,052,070.> [2026年1月アクセス]。
- [53] ビューロー・ベリタス、「船舶用燃料としてのエタノール：市場調査報告書」、2026年。[オンライン]。入手
先：<https://gcc02.safelinks.protection.outlook.com/?url=https%3A%2F%2Facrobat.adobe.com%2Ffid%2Furn%3Aaaid%3Asc%3AAP%3A25cf80b9-9d3a-4128-bec2-6313b5e1050f&data=05%7C02%7CRobert.McCormick%40nlr.gov%7C42748f70eebb4b0551f908de75a4ffc5%7Ca0f29d7e28cd4f5484427885a>。[2026年アクセス]。

- [54] DNV, 「海運におけるメタノール燃料」, ハンブルク, 2025年.
- [55] Everllence, 「Everllence B&W ME-LGIM エンジンのサービス実績」, 2025年. [オンライン]. 参照先 : https://www.everllence.com/docs/default-source/marine-documents/technical-papers/5510-0282-00.pdf?sfvrsn=f40100aa_3. [2026年アクセス].
- [56] P. Gilbert, C. Waslh, M. Traut, U. Kesieme, K. Pazouki, A. Murphy, 「代替船舶用燃料の全ライフサイクルにおける大気排出量の評価」, *J Clean Prod*, vol. 172, pp. 855-66, 2018年.
- [57] B. Zincir, C. Deniz および M. Tuner, 「船舶エンジンにおける低速運転時のメタノール部分予混合燃焼の環境的、運用上および経済的性能に関する調査」, *J Clean Prod*, vol. 235, pp. 1006-19, 2019.
- [58] N. Ammar, 「セル型コンテナ船におけるメタノール燃料の環境的・経済的分析」, *Transport Res D-Tr E*, 第69巻, pp. 66-76, 2019年.
- [59] Everllence, 「メタノール燃料を用いたEverllence B&W LGIMエンジン」, 2026年. [オンライン]. 参照先 : https://www.everllence.com/docs/default-source/marine-documents/technical-papers/the-methanol-fuelled-everllence-b-w-lgim-engine.pdf?sfvrsn=91a0a405_6. [2026年アクセス].
- [60] J. エリスおよびK. タンネバーガー, 「海運における代替燃料としてのエチルアルコールおよびメチルアルコールの利用に関する研究」, 欧州海上安全庁、ヨーテボリ、2015年.
- [61] M. Kass, C. Sluder, B. Kaul, 「新興の非従来型船舶用燃料の流出挙動、検知、および緩和策. No. DTMA91X20A65」, 2021年.
- [62] G. フィオローニ、J. カヴァレリ、Z. シャン、C. マケナリー、K. カー、R. マコーミック, 「船舶用燃料としてのメタノールの取り扱いと特性」, *『Sustainability』*, 第18巻、p. 4931, 2026年.
- [63] The Engineering ToolBox, 「一般的な燃料の高発熱量：参考資料およびデータ」, [オンライン]. 参照先: https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html. [2025年7月アクセス].
- [64] 国際メタノール生産者・消費者協会, 「メタノール参照仕様書、バージョン9、2021年6月10日付」, [オンライン]. 参照先 : <https://impca.eu/wp-content/uploads/2024/06/IMPCA-Ref-Spec-01-July-2021.pdf>. [2025年7月アクセス].
- [65] メタノール協会, 「船舶用」 [オンライン]. 参照先 : <https://www.methanol.org/marine/>. [2025年7月アクセス].
- [66] PortProcure, 「メタノール燃料補給インフラのギャップ：2026年までに112隻の船舶が48港を上回る」 2026年」 [オンライン]. 参照先 : <https://portprocure.com/news/methanol-bunkering-gap-2026-vessels-ports>. [2026年7月アクセス].

- [67] 米国船級協会（American Bureau of Shipping）、「メタノール燃料補給：技術および運用に関する勧告」、2024年。[オンライン]。参照先：<https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/advisories-and-debriefs/methanol-bunkering-advisory.pdf>。[2026年アクセス]。
- [68] Vopak、「ニュース：世界初のバージから船舶へのメタノール給油作業」、[オンライン]。参照先：https://www.vopak.com/newsroom/news/news-first-barge-ship-methanol-bunkering-operation-world?language_content_entity=en。[2026年アクセス]。
- [69] Ship & Bunker、「2025年、上海がメタノールバンカー販売でシンガポールを上回る」[オンライン]。参照先：<https://shipandbunker.com/news/apac/938720-shanghai-outpaced-singapore-in-methanol-bunker-sales-in-2025>。[2026年アクセス]。
- [70] Manifold Times、「Evos Rotterdam、高まるバンカー需要に対応しメタノール・エタノールの生産能力を拡大」、[オンライン]。参照先：<https://www.manifoldtimes.com/news/evos-rotterdam-expands-methanol-ethanol-capacity-for-growing-bunkering-demand/>。[2026年アクセス]。
- [71] エマーソン、「エマーソンのソリューションを統合した世界初のメタノールデュアルフューエル改造コンテナ船」[オンライン]。参照先：<https://www.emerson.com/documents/automation/case-study-world-s-first-retrofitted-methanol-dual-fuel-container-vessel-integrated-emerson-solutions-en-11492938.pdf>。[2026年アクセス]。
- [72] Everllence、「VLCVをメタノール船へ転換するための青写真」、[オンライン]。参照先：<https://www.everllence.com/discover-stories/maersk-halifax-retrofit>。[2026年アクセス]。
- [73] ロイド・レジスター、「世界初のメタノール推進フェリー『ステナ・ゲルマニカ』が引き渡される」[オンライン]。参照先：<https://www.lr.org/en/knowledge/press-room/press-listing/press-release/2015/stena-germanica-the-worlds-first-methanol-powered-ferry-is-delivered/>。[2026年アクセス]。
- [74] gCaptain、「今日の注目写真－世界初のメタノール推進タンカー」、[オンライン]。参照先：<https://gcaptain.com/ship-photos-of-the-day-worlds-first-methanol-powered-tankers/>。[2026年アクセス]。
- [75] IBIA、「ISO、メチル・エチルアルコール燃料の規格を策定へ」、[オンライン]。参照先：<https://ibia.net/iso-to-develop-standard-for-methyl-ethyl-alcohol-fuels/>。[2026年アクセス]。
- [76] Everllence、「海運業界のグリーンメタノール・パワーハウス」[オンライン]。参照先：<https://www.man-es.com/discover/methanol-fueled-ships>。[2026年アクセス]。
- [77] 『The Maritime Executive』、「米国メキシコ湾で初のバージから船舶へのメタノール燃料補給がヒューストンで実施」[オンライン]。参照先：<https://maritime-executive.com/article/first-us-gulf-barge-to-ship-methanol-bunkering-completed-in-houston>。[2026年アクセス]。

- [78] マースク、「マースク、大型コンテナ船のデュアルフューエル・メタノールへの改造を完了」[オンライン]。参照先：<https://www.maersk.com/fr-fr/news/articles/2024/11/18/maersk-completes-first-large-container-vessel-conversion-to-dual-fuel-methanol-engine>。[2026年アクセス]。
- [79] プロマン、「ステナ・プロヴィデント号、サバンナ港で史上初のメタノール給油を成功裏に完了」、[オンライン]。参照先：<https://www.proman.org/news/stena-provident-successfully-completes-first-ever-methanol-bunkering-at-the-port-of-savannah/>。[2026年アクセス]。
- [80] PSA、「PSAシンガポール、トゥアス港で初のメタノール給油と貨物荷役の同時作業を成功裏に完了」[オンライン]。参照先：<https://www.globalpsa.com/psa-singapore-completes-first-successful-simultaneous-methanol-bunkering-and-cargo-operation-at-tuas-port/#:~:text=2023年5月27日、PSAシンガポール、X%2DPress,約300メトリックトン（MT）のbi.> [2026年アクセス]。
- [81] マースク、「マースク、大型メタノール対応船隊の1番船を『Ane Maersk』と命名」[オンライン]。参照先：<https://www.maersk.com/news/articles/2024/01/26/maersk-names-first-vessel-of-its-large-methanol-enabled-fleet-ane-maersk>。[2026年アクセス]。
- [82] シンガポール規格協会、「TR 129-1:2024 メタノール燃料補給 – 第1部：総論」、[オンライン]。参照先：<https://www.singaporestandardseshop.sg/Product/SSPdtDetail/5c87e193-80e2-4e1a-8236-c53c4718c926>。[2026年アクセス]。
- [83] メタノール協会、「純メタノールの物理的性質」[オンライン]。参照先：<https://methanol.org/wp-content/uploads/2016/06/Physical-Properties-of-Pure-Methanol.pdf>。[2025年12月アクセス]。
- [84] Hansen Solubility、「HSPiPソフトウェア」、[オンライン]。参照先：<https://hansen-solubility.com/index.php>。[2026年アクセス]。
- [85] H. Abrash, 「水とメタノールの相対酸性度」, *J Chem Ed*, 第78巻, 第11号, p. 1496, 2001.
- [86] 再生可能燃料協会、「燃料用エタノール産業のガイドライン、仕様および手順」、2018年。[オンライン]。参照先：<https://ethanolrfa.org/file/1989/Fuel-Ethanol-Industry-Guidelines-Specifications-2018.pdf>。[2026年7月アクセス]。
- [87] エコラボ、「エタノール用腐食防止剤」、[オンライン]。参照先：https://www.ecolab.com/solutions/nwpr/ethanol-corrosion-inhibitors#sortCriteria=%40offering_type_order%20ascending%2C%40page_og_title%20asc

ending&f-taxonomy_solutions=Ethanol%20Corrosion%20Inhibitors&f-taxonomy_applications=Corrosion%20Protection。[2026年7月アクセス]。

- [88] 再生可能燃料協会、「燃料用エタノール向け腐食防止剤の評価プロトコル」、2015年。[オンライン]。参照先：https://ethanolrfa.org/file/1180/RFA-Evaluation-Protocol-for-Corrosion-Inhibitors-for-Fuel-Ethanol_V073010a.pdf。[2026年7月アクセス]。
- [89] P. Howard, 『環境劣化速度ハンドブック』, CRC Press, 1991年。
- [90] 『Offshore Energy』、「エバーレンス社が日本で『世界初』のエタノール燃料2ストロークエンジンを稼働」[オンライン]。[2026年アクセス]。
- [91] マースク、「エタノールの可能性を探る：『ローラ・マースク』号で新燃料の試験運用を開始」[オンライン]。参照先：<https://www.maersk.com/news/articles/2025/12/05/new-fuel-trial-laura-maersk-ethanol-methanol-blend>。[2026年アクセス]。
- [92] Advanced Biofuels USA、「ワルティラ、細分化された船舶用燃料市場においてエタノールの役割を見出す」[オンライン]。参照先：<https://advancedbiofuelsusa.info/interview-wartsila-sees-role-for-ethanol-in-fragmented-bunker-fuel-landscape>。[2026年アクセス]。
- [93] Ship Technology, 「WinGD、2026年からエタノール燃料の2ストローク船舶用エンジンを提供へ」, [オンライン]。参照先：<https://www.ship-technology.com/news/wingd-ethanol-fuelled-two-stroke-marine-engines/>。[2026年アクセス]。
- [94] J. Repo, J. Alkio, K. Juoperi, K. Portin, M. Wideskog, T. Asplund, 「エタノール：実行可能な代替燃料の選択肢」、*CIMAC Congress 2025 論文80*、チューリッヒ、2025年。
- [95] Everllence, 「Everllence、世界初のエタノール燃料2ストロークエンジンの稼働に成功」, [オンライン]。参照先：<https://www.everllence.com/company/press-releases/details/2025/09/23/everllence-confirms-successful-running-of-world-first--ethanol-fuelled--two-stroke-engine>。[2026年アクセス]。
- [96] Everllence, 「Everllence、エタノール燃料による4ストロークエンジンの稼働に成功したことを確認」, [オンライン]。参照先：<https://www.everllence.com/company/press-releases/details/2025/12/09/everllence-confirms-successful-running-of-ethanol-fuelledfour-stroke-engine>。[2026年7月アクセス]。
- [97] WinGD, 「デュアルフューエルのパイオニアが提供する実証済みで信頼性の高いクリーン燃料技術：メタノールおよびエタノール用 x-DF-M/E」[オンライン]。参照先：<https://wingd.com/design-development/engine-technologies/x-df-dual-fuel-design>。[2026年アクセス]。
- [98] M. Schuler, 「WinGD、Vale社の鉱石運搬船向けエタノールエンジンで世界初の受注を獲得」[オンライン]。参照先：<https://gcaptain.com/wingd-lands-world-first-ethanol-engine-order-for-vale-ore-carriers/>。[2026年7月アクセス]。

- [99] M. ウィングローブ、「メタノール4ストロークエンジン、初の搭載準備完了」[オンライン]。
参照先：<https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/methanol-four-stroke-engines-ready-for-first-installations-83387#:~:text=The%20first%20set%20of%20methanol,approach%20to%20development%20and%20trials..> [2026年アクセス]。
- [100] The Maritime Executive, 「マースク、初の試験成功を受けエタノール試験を推進中」, [オンライン]. 参照先:
<https://maritime-executive.com/article/maersk-is-proceeding-with-ethanol-tests-after-first-successful-trial>. [2026年アクセス].
- [101] AP Moller - Maersk A/S, 「2026年5月7日付中間報告書」、[オンライン]。参照先：
<https://investor.maersk.com/static-files/7a6a7475-6b35-4597-9675-3dc9c97141c8>。[2026年アクセス]。
- [102] Bunker Market, 「ローラ・マースク、ロッテルダムでバージにより100%エタノール船舶用燃料を積み込み」, [オンライン]. 参照先: <https://bunkermarket.com/laura-maersk-100-ethanol-delivery-barge-rotterdam/>. [2026年7月アクセス].
- [103] ロッテルダム港、「ロッテルダム港で初のエタノール燃料補給が成功」[オンライン]。参照先：
<https://www.portofrotterdam.com/en/news-and-press-releases/first-ethanol-bunkering-rotterdam-port-successful>。[2026年7月アクセス]。
- [104] Ship&Bunker, 「レプソル、バルセロナでマースクへの初のバイオエタノール供給を発表」[オンライン]。参照先：
<https://shipandbunker.com/news/emea/787357-repsol-announces-first-bioethanol-supply-to-maersk-in-barcelona>。[2026年7月アクセス]。
- [105] Ship&Bunker, 「マースク、米国初のコンテナ船向けエタノール燃料補給を計画」, [オンライン]. 参照先:
<https://shipandbunker.com/news/am/286715-maersk-planning-first-us-container-vessel-ethanol-bunkering>. [2026年7月アクセス].
- [106] ロサンゼルス港、「2025年のトン数統計」、[オンライン]。参照先：
<https://portoflosangeles.org/business/statistics/tonnage-statistics>。[2026年7月アクセス]。
- [107] J. ジョーダン、「マースク、グレーメタノールの使用増加により2025年の再生可能燃料消費量が減少」[オンライン]。参照先：
<https://shipandbunker.com/news/world/441694-maersk-saw-renewable-fuel-consumption-halve-in-2025-on-increased-grey-methanol-use>。[2026年7月アクセス]。
- [108] アメリカ穀物パイオプロダクツ協会、「エタノール報告書」[オンライン]。参照先：
https://grains.org/ethanol_report/。[2026年7月アクセス]。
- [109] Manifold Times, 「HD HHI-EMD、メタノールデュアルフューエルエンジンがエタノールでも安定して稼働することを実証
エタノールでも安定して稼働できることを実証」[オンライン]。参照先：
<https://www.manifoldtimes.com/news/hd-hhi-emd-verifies-methanol-dual-fuel-engine-can-operate-stably-on-ethanol/>。[2026年アクセス]。

