令和４年度
ゼロエミッション漁船等技術調査事業
報告書

令和５年３月

一般社団法人海洋水産システム協会

目　次

第 1 章　事業の概要 …… 1
1.1 事業目的 …… 1
1.2 事業の内容 …… 1
(1) 代替エネルギーによる動力構成の試設計 …… 1
(2) 検討委員会 …… 2

第 2 章　ゼロエミッション化に向けた代替エネルギーの調査検討 …… 4
2.1 船舶のゼロエミッション化の動向 …… 4
(1) 国際海運の低炭素化…脱炭素化の動向 …… 4
(2) 内航船分野の脱炭素化について …… 8
2.2 ガス燃料エンジンの開発状況 …… 9
(1) ガスエンジンについて …… 9
(2) 二元燃料（DF）エンジン …… 11
2.3 ガス燃料船の艤装設計の留意事項 …… 13
(1) 燃料タンクの配置 …… 14
(2) 燃料タンク関連要件 …… 14
(3) ガス燃料配管系と機関区域の要件 …… 15
2.4 沖合漁船の脱炭素化に向けた代替燃料の選定 …… 16
(1) 代替燃料候補 …… 16
(2) ゼロエミッション漁船の代替燃料の選定 …… 18

第 3 章　沖合漁船の動力構成および燃油消費実態の調査 …… 20
3.1 調査対象漁船の選定 …… 20
3.2 沖合底びき網漁船（板びき 105GT、A 丸）の実態調査 …… 20
(1) 操業形態 …… 20
(2) 機関の運転状況および燃料消費量 …… 21
(3) 給油量とその頻度 …… 23
(4) その他 …… 23
3.3 沖合底びき網（かけまわし 144GT、B 丸）の実態調査 …… 25
(1) 操業形態 …… 25

(2) 機関の運転状況および燃料消費量 …… 27
(3) 年間を通した操業実績と給油量 …… 29
(4) その他 …… 30
3.4 大中型まき網漁業網船（北まき 199GT、C 丸）の実態調査 …… 32
(1) 操業形態 …… 32
(2) 機関の運転状況および燃料消費量 …… 33
(3) 給油量およびその頻度 …… 34
(4) その他 …… 35
3.5 大中型まき網漁業網船（遠まき 199GT、D 丸）の実態調査 …… 37
(1) 操業形態 …… 37
(2) 主要目と動力構成 …… 38
(3) 給油の実態および燃料消費量 …… 39
(4) その他 …… 41
3.6 ゼロエミッション漁船の代替燃料積載量の決定 …… 44

第 4 章　代替エネルギーを活用した漁船の試設計 …… 45
4.1 試設計の条件 …… 45
4.2 試設計の実施 …… 46
4.3 試設計の結果 …… 47
(1) 沖合底びき網漁船（板びき 105GT、A 丸） …… 47
(2) 沖合底びき網漁船（かけまわし 144GT、B 丸） …… 50
(3) 大中型まき網漁業網船（北まき 199GT、C 丸） …… 53
(4) 大中型まき網漁業網船（遠まき 199GT、D 丸） …… 56
4.4 試設計結果のまとめ …… 59
(1) 船の大きさについて …… 59
(2) 燃料油タンクについて …… 60
(3) 試設計結果についての所感 …… 60

第 5 章　まとめ …… 62
5.1 代替エネルギーによる動力構成の試設計 …… 62
5.2 今後の方向性 …… 62

第１章　事業の概要

1.1　事業の目的

水産業においても２０５０年までのカーボンニュートラルを図るため、沖合漁業における既存漁船のエネルギー消費を見直すとともに、化石燃料に代わり二酸化炭素を排出しない新たな代替エネルギーによる漁船の動力構成についての試設計に取組むことにより、漁船のゼロエミッション化技術の開発を促進することを目的とする。

1.2　事業の内容

漁船の新たな動力源として活用可能となりうる化石燃料に代わって二酸化炭素を排出しない新たな代替エネルギーの候補をリストアップし、技術的な整理を行うとともに、代表的な沖合漁業の既存漁船のエネルギー消費を見直し、適すると判断された代替エネルギーを活用した漁船の動力構成について試設計を実施する。

試設計の結果よりゼロエミッション漁船に対する課題を取りまとめる。

(1) 代替エネルギーによる動力構成の試設計

（ア）新たな代替エネルギーの候補のリストアップ

国際海運のゼロエミッションに向けたロードマップ（2020 年 3 月　国際海運 GHG ゼロエミッションプロジェクト）等を参考とし船舶関係における研究・開発の状況を調査し、舶用機器の動力源となりうる二酸化炭素の排出をしない代替エネルギーについてリストアップを行い、漁船での活用を前提に、技術的な整理（漁船への搭載可能性、補給の容易性、漁撈作業への影響等）を行う。

（イ）代表的な沖合漁業の動力構成および燃油消費実態の調査

大中型まき網漁業の網船、沖合底びき網漁船（いずれも２タイプ）を対象とし、代替エネルギーの活用を前提に、漁船漁業構造改革総合対策事業（もうかる漁業創設支援事業）で実証結果や操業・消費実態等の調査を行い、既存漁船の操業形態やエネルギーの消費構造を見直し、漁船の将来像と代替エネルギーとのマッチングの検討を行い、漁業での活用に適した代替エネルギーの絞り込みを実施する。

（ウ）代替エネルギーを活用した漁船の動力構成について試設計

将来の沖合漁船の想定し、２漁業種４タイプの代替エネルギーを活用した動力構成の要目表を作成して試設計を実施する。その結果を踏まえた沖合漁船の要目表を作成する。

(2) 検討委員会

代替エネルギーによる漁船の動力構成の試設計に関する分析・検討を行う機関として、外部の専門委員等からなる委員会を設置して検討を行った。委員会構成名簿ならびに開催実績は以下のとおり。

①検討委員会構成

表 1.1　検討委員会構成名簿

	氏　名	所属及び役職	備　考
1	小田　健一	元水産工学研究所　漁業生産工学部長	委員長
2	酒井　久治	国立大学法人東京海洋大学　名誉教授	
3	三好　潤	国立研究開発法人水産研究・教育機構　水産技術研究所 水産工学部　漁業生産工学グループ　主任研究員	
4	平田　宏一	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所 環境･動力系 動力ｼｽﾃﾑ研究ｸﾞﾙｰﾌﾟ ｸﾞﾙｰﾌﾟ長	
5	武井　篤	一般社団法人全国まき網漁業協会　専務理事	
6	郡司　理	一般社団法人全国底曳網漁業連合会　事務局長	

②検討委員会開催実績

第 1 回検討委員会

日　時：2022 年 7 月 19 日（火）10：00～

場　所：海洋水産システム協会　会議室

議　事：①ゼロエミッション漁船等技術調査事業について

②実施内容と進め方について

第 2 回検討委員会

日　時：2022 年 11 月 22 日（火）10：00～

場　所：海洋水産システム協会　会議室

議　事：①既存漁船の現地調査結果について

②代替エネルギーの絞り込みについて

③代替エネルギーを活用した試設計の方針について

第 3 回検討委員会

日時：2023 年 3 月 16 日（木）10：00～

場所： 海洋水産システム協会　会議室

議事：①ゼロエミッション漁船試設計の結果について

②本事業のまとめ方について（報告書案の確認）

表 1.2　検討委員会出席者名簿

	氏　名	所属及び役職	備　考
（委員）			
1	小田　健一	元水産工学研究所　漁業生産工学部長	委員長
2	酒井　久治	国立大学法人東京海洋大学　名誉教授	
3	三好　潤	国立研究開発法人水産研究・教育機構　水産技術研究所 水産工学部　漁業生産工学グループ　主任研究員	
4	平田　宏一	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所 環境･動力系 動力ｼｽﾃﾑ研究ｸﾞﾙｰﾌﾟ ｸﾞﾙｰﾌﾟ長	
5	武井　篤	一般社団法人全国まき網漁業協会　専務理事	
6	郡司　理	一般社団法人全国底曳網漁業連合会　事務局長	
（臨席）			
	南　克洋	水産庁　増殖推進部研究指導課　海洋技術室長	
	岡本　圭祐	水産庁　増殖推進部研究指導課　海洋技術室課長補佐	
	水野　一穂	水産庁　増殖推進部研究指導課　海洋技術室 生産技術班　指導係員	
（事務局）			
	平石　一夫	一般社団法人海洋水産システム協会　専務理事	
	長谷川　勝男		
	酒井　拓宏	一般社団法人海洋水産システム協会　研究開発部長	
	岩田　佳之	一般社団法人海洋水産システム協会　研究開発部兼設計部技師	

第 2 章　ゼロエミッション化に向けた代替エネルギーの調査検討

世界的な地球温暖化防止対策については、国連気候変動枠組条約（UNFCCC）において議論され、COP21（第 21 回気候変動枠組条約締約国会議、2015 年 12 月）で採択された「パリ協定」では、すべての国が 2020 年以降の温室効果ガス排出削減に取り組む枠組みが合意された。パリ協定では、脱炭素化に向けて各国が 5 年ごとに削減目標を提出することとし、更新の際には以前の目標より前進させることを規定している。また、世界共通の長期目標として「産業革命前からの平均気温上昇を 2℃未満に抑制、さらに 1.5℃以内に向けた努力」を設定している。2018 年 10 月、国連気候変動に関する政府間パネル（IPCC）では、平均気温昇を 1.5℃以内に抑えるためには 2050 年近辺までにカーボンニュートラルが必要であることが報告された。世界全体で気候変動対策の重要性が認識されるなか、多くの国が「2050 年カーボンニュートラル実現」を表明し、世界的な脱炭素の動きが加速している。我が国も 2020 年 10 月に菅総理より「2050 年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指す」ことが宣言された。2021 年 4 月の地球温暖化対策推進本部及び気候サミットにおいて、我が国は 2050 年カーボンユートラルに向けて、「2030 年度において、温室効果ガスを 2013 年度から 46%の削減を目指し、さらに 50%の高みに向け挑戦を続ける」という従来の目標を 7 割以上引き上げる野心的な目標を発表した。日本政府は、2050 年カーボンニュートラルの実現に向け、全ての社会経済活動において脱炭素を主要課題の一つと位置づけ、脱炭素を軸として成長に資する政策を推進していくとしている。

2.1 船舶のゼロエミッション化の動向

(1) 国際海運の低炭素化・脱炭素化の動向

世界全体の地球温暖化対策は UNFCCC の下で議論されるが、国境を越えて移動する国際海運からの温室効果ガス（GHG）排出削減については、国際海事機関（IMO）に検討が委ねられている。IMO において、2018 年 4 月に「GHG 削減戦略（図 2.1）」が採択され、2008 年を基準年として、①2030 年までに単位輸送当たりの CO_2 排出量を 40%以上削減、②2050 年までに GHG 総排出量 50%以上削減、③今世紀中なるべく早期に GHG 排出ゼロを目指すことが、目標として掲げられた。

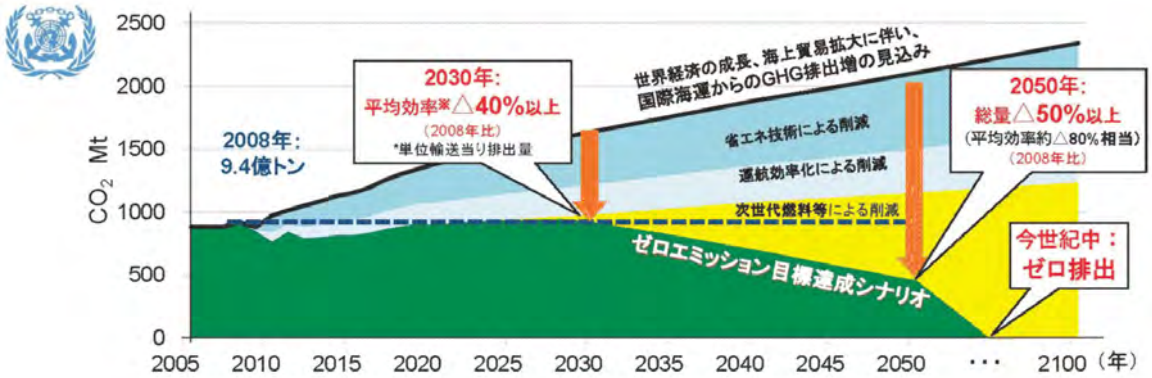

図 2.1　国際海運の GHG 削減目標　（文献 2 から転載）

国際海運分野では、2013 年から新造船に対してエネルギー効率設計指標（EEDI）を導入し、段階的に規制値を強化する取り組みが行われているものの、既存船については EEDI 規制対象外となっているため、既存船に対する GHG 削減の新たな枠組みが議論されている。GHG 削減戦略の 2050 年数値目標達成のためには EEDI 規制の強化だけでは不十分であり、化石燃料を主とする従来の燃料から脱炭素燃料への切り替えが不可欠となる。

このような国際海運のＧＨＧ削減の動きを受け、2018 年 4 月に産官学の連携による「国際海運 GHG ゼロエミッションプロジェクト」が設立され、IMO の GHG 削減目標達成に向けた基本的な考え方の整理、2030 年目標値達成のための方策の検討、2050 年以降の目標達成に向けたロードマップが検討され、2020 年 3 月に「国際海運のゼロエミッションに向けたロードマップ」[1)]として発表された。また、国交省は 2021 年 7 月に「次世代船舶の開発」プロジェクトの研究開発・社会実装計画（案）[2)]を公表した。この中には、2050 年の目標達成のための代替燃料移行シナリオ、今後の技術開発の工程表等が明記されている。

これらの検討のなかで、2050 年の GHG 削減目標値を達成するために活用される可能性のある代替燃料として、水素、アンモニア、LNG、合成燃料、バイオ燃料等がリストアップされている。それぞれの代替燃料の特徴について表 2.1 に示す。

表 2.1　GHG 削減のための代替燃料　（文献 1 をもとに作成）

	熱量当たりのCO_2排出量（C重油比*1）	熱量当たりの燃料体積（液化時・C重油比*1）	利　点	課　題
水素（H_2）（燃料電池含む）	0	4.46	・船上CO_2排出ゼロ ・小型の水素燃料混焼船は実績あり ・小型の燃料電池船は実績あり	・燃料体積がC重油の約4.5倍 ・貯蔵安定性の技術課題（液体時-253℃） ・供給インフラ未整備・バンカリング技術未成熟 ・エンジンの燃焼制御技術等
アンモニア（NH_3）	0	2.72	・船上CO_2排出ゼロ	・NOx発生、N_2O発生（温室効果はCO_2の約300倍） ・毒性あり ・専焼での燃焼性、大出力化等の技術課題
LNG	0.74（メタンスリップ未考慮）	1.65	・LNG燃料船は実用化済 ・水素等に比べエネルギー体積密度が高い ・合成/バイオメタン用にインフラ転用可能 ・現行IGFコードで規則整備済	・CO_2削減効果は限定的 ・メタンスリップ（温室効果はCO_2の約25倍）
メタン（CH_4）	0.71 【0】*2 （メタンスリップ未考慮）	1.80	・実用化済のLNGと利用技術は同等 ・LNGのインフラ転用可能	・メタンスリップ（温室効果はCO_2の約25倍）
バイオディーゼル	【0】	（～1.2）	・陸上において混焼は商業レベル ・バイオ燃料はカーボンニュートラル扱い	・貯蔵安定性の技術課題 ・他セクター消費のため海運への供給不足の可能性
メタノール（CH_3OH）	0.90 【0】*2	2.39	・メタノール燃料船は建造実績あり ・取扱い容易	・燃料体積がC重油の約2.4倍 ・低着火性、大出力化の技術課題
エタノール（C_2H_5OH）	0.93 【0】*2	1.79	・バイオエタノール生産は商業レベル ・取扱い容易	・低着火性、大出力化の技術課題

＊1　熱量当たりのCO2排出量及び燃料体積（液化時）は、低位発熱量40.4MJ/kg、CO2排出係数Cf=3.114t-CO2/t-Fuel、比重0.94の舶用重油（C重油）を基準としている。熱量当たりのCO2排出量は、IPCCガイドライン及びMOのEEDI計算ガイドラインの低位発熱量を基に算出している。
＊2　カーボンリサイクル燃料（CO2を分離・回収して再利用する技術によって人工的に製造される燃料）やバイオ燃料の場合ゼロとなる。

また、代替燃料以外の GHG 削減手法として、風力の利用、バッテリー推進や排気 CO_2 回収等がオプションとして挙げられるものの課題も多い。外航商船では、風力とバッテリー利用による GHG 削減は限定的であり、補助的な役割に留まると思われる。陸上では排ガス中の CO_2 を回収する実証化済の技術である CO_2 回収法は、GHG を一定以上削減するためには CO_2 回収率の向上が課題となる。CO_2

回収装置は、外航船への適用は可能と考えられているが、排ガスの前処理（脱硝、脱硫など）が必要なこと、回収後の CO_2 体積・重量が大きいこと等の理由から小型船舶への適用は無理があるのが現状である。

以上のように脱炭素化に資する代替燃料・技術オプションのリストアップを行うとともに、GHG 削減の中長期目標達成に向けた外航海運の GHG 削減シナリオが検討された。オプション絞り込みの条件は、①2028 年までに対 2008 年比で 90%以上の GHG を削減する船舶の投入が期待できること、②長期的には国際海運のゼロエミッション実現を可能とするものとしている。これらの条件を満たすオプションとして、水素燃料船、アンモニア燃料船、カーボンリサイクルメタン燃料船および船上 CO_2 回収設備を搭載する大型船舶を挙げている。カーボンリサイクルメタンとは、回収した CO_2 と水素から製造されるメタン（合成燃料）を指す。液体水素及びアンモニア燃料は、それぞれ技術的課題はあるものの、今後、専焼エンジンの開発の加速が見込まれており、2028 年までにはこれらの燃料を使用する船舶の投入が可能と考えられている。カーボンリサイクルメタン燃料船については、LNG の主成分はメタンであることから、カーボンリサイクル燃料として製造されるメタンは、既に実用化されている LNG 燃料船にそのまま利用可能である。

GHG 削減戦略の 2050 年目標を達成するシナリオが二通り考えられた（図 2.2）。水素燃料、アンモニア燃料、カーボンリサイクルメタン燃料及び船上 CO_2 回収の代替燃料・技術オプションの投入が期待できるのは 2028 年以降となるため、当面の GHG 削減を進めるための現実的な選択肢は、既に実用化されている LNG 燃料であり、両シナリオとも LNG 燃料が普及拡大するとしている。水素・アンモニア拡大シナリオでは、水素・アンモニア燃料について、船舶の技術開発が進み燃料供給の拡大を想定している。これらの燃料は、2028 年頃から新造船の投入が開始される前提であるため、その間、LNG 船の普及もある程度進むことが想定される。このシナリオでは、2050 年には国際海運で消費されるエネルギーの約 45%が水素・アンモニア、約 30%が LNG、約 7%がカーボンリサイクルメタン又はバイオメタンで賄われ、約 5%が船上 CO_2 回収を導入することで 2050 年の目標値達成を見込んでいる。

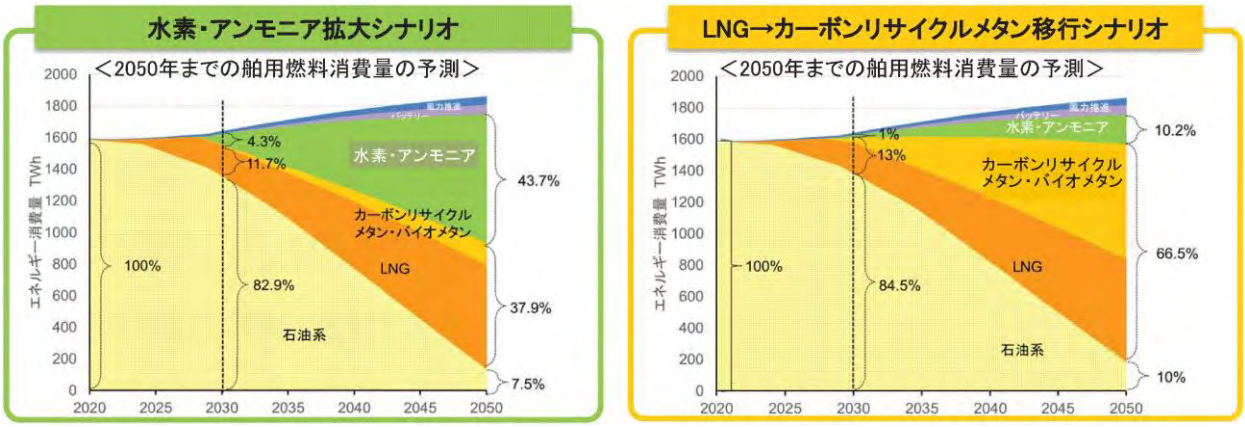

図 2.2　国際海運のエネルギー消費に占める代替燃料等の割合（文献 2 から転載）

二つめの LNG→カーボンリサイクルメタン移行シナリオでは、LNG 燃料船の普及と LNG 燃料の供給インフラ整備が進む一方、水素・アンモニア燃料のインフラ整備は大幅に進まないことを想定している。このシナリオでは、2050 年に国際海運で消費されるエネルギーの約 75%が LNG 又はカーボンリサイクルメタン若しくはバイオメタン、約 10%が水素・アンモニアにより賄われ、LNG 燃料船の約 20%が船上 CO_2 回収を導入することで 2050 年目標値が達成できるとしている。

以上のような検討を踏まえて作成された国際海運のゼロエミッションに向けたロードマップを図 2.3 に示す。水素やアンモニア等、ゼロエミッション船の燃料の選定については、それぞれにメリット・デメリットがあることから、長期的にどれが主要燃料となるか、或いは複数の燃料が共存するかを現時点で見極めるのは困難とされる。また、燃料供給インフラの整備状況等、寄港地や船の種類によって代替燃料の棲み分けも考えられるため、現時点では代替燃料を絞り込まず、それぞれの技術開発を進めるとしている。水素は 2030 年までに実証運航完了、アンモニアは 2028 年までに商業運航実現を目指すためには、水素・アンモニアとも専焼エンジンの早期開発が必要となる。

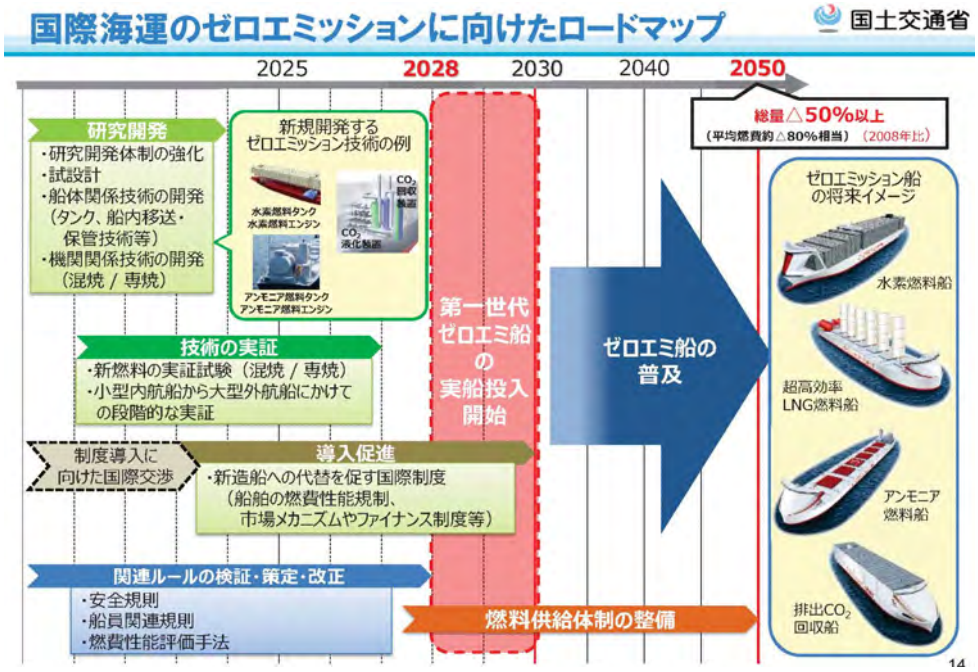

図 2.3　国際海運のゼロエミッションに向けたロードマップ（文献 2 から転載）

水素燃料船およびアンモニア燃料船を実現するためには、エンジン、燃料タンク、燃料供給システムの開発が不可欠である。水素は、着火エネルギーが小さく燃焼速度が大きいことからエンジンにおいては、高度な燃焼制御技術と水素の漏洩・脆性対策が必要である。液体水素は重油の 4.5 倍の体積となるため、省スペース化、極低温保管（-253℃）に伴う BOG 発生を含めた圧力管理対策が必要となる。一方、アンモニアは、常温保管が可能で貯蔵面のメリットはあるが、難燃性であるアンモニアの燃焼制御の問題、排気中の N_2O（CO_2 の 300 倍の温室効果）対策に加え、アンモニアの腐食性、毒性への対策が必要である。

国際海運の 2050 年カーボンニュートラルに向けた課題が図 2.4 のように整理されている。カー

ボンニュートララル実現のためには、海運、造船、舶用及び船員の分野のほか、燃料供給サイド面も含めて、時間軸も意識して総合的に課題解決を進める必要がある。

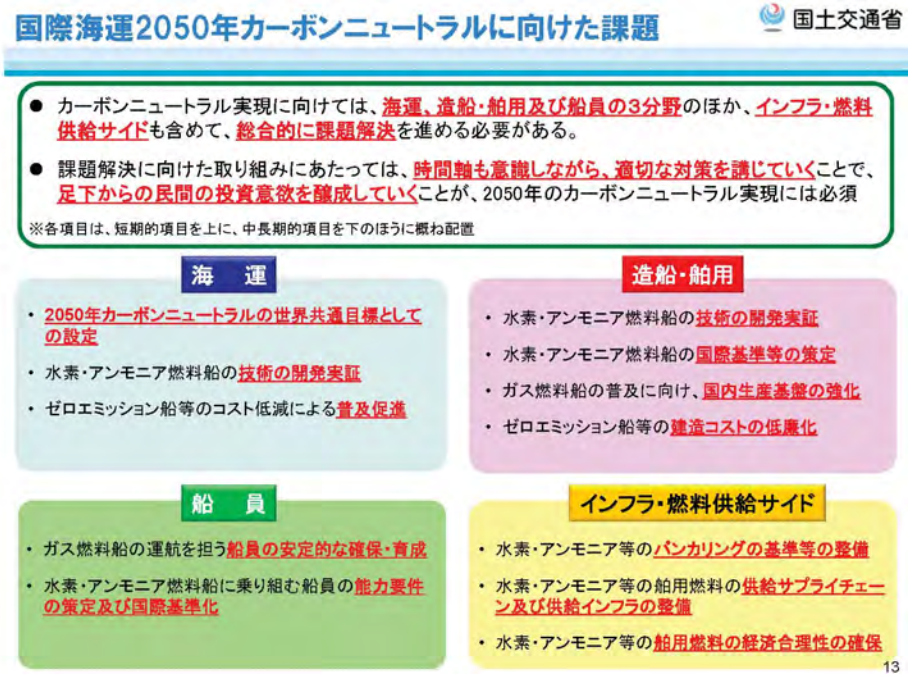

図 2.4　国際海運 2050 年カーボンニュートラルに向けた課題（文献 3 から転載）

(2) 内航船分野の脱炭素化について

沖合漁船の脱炭素化を考えるときに、船舶の総トン数規模から内航船分野の脱炭素に向けた取り組みが参考になろう。第 2 回内航カーボンニュートラル推進に向けた検討会（2021 年 5 月）資料[4]では、燃料と動力システムの種類毎に、GHG 削減率、航続距離、機器構成等を踏まえて、実現性が高いと考えられる GHG 削減船を取りまとめている（表 2.2）。

表 2.2　内航船の代替燃料による GHG 削減の検討（文献 4 から転載）

	GHG削減	呼称	概要	特徴・適用性
短期	低（20%程度）	水素混焼ディーゼルエンジン船	水素混焼率10～30%程度の水素・重油混焼エンジンを搭載	技術的ハードルがやや低く，早期に実現できる。
		LNG燃料エンジン船	LNG専焼ガスエンジンを搭載	既存技術で対応できる。
	中（50%程度）	水素混焼ディーゼルエンジン船	水素混焼率50%程度の水素・重油混焼エンジンを搭載	水素混焼率を高めることでGHG削減率を高める。
		水素燃料電池ハイブリッド船	水素燃料電池と重油炊きディーゼル発電機を組み合わせた電気推進船	バランスがよく，中・小型の船舶への適用性が高い。
	高（100%）	電池推進船	蓄電池だけのエネルギーで推進	短距離航路の船舶に有効である。
		水素燃料電池船	主に水素燃料電池で推進	比較的小さい船舶に有効である。
		水素燃料電池・蓄電池ハイブリッド船	蓄電池と水素燃料電池のハイブリッド電気推進船	バランスがよく，既存技術で対応しやすい。
中長期	高（100%）	バイオ燃料船	バイオ燃料炊きエンジンを搭載	技術的ハードルが低く，燃料供給ができれば既存船を適用しやすい。
		水素・バイオ燃料混焼船	バイオ燃料炊きエンジンの一部を水素混焼（10～50%）	燃料供給のバランスが取りやすくなる可能性がある。
		アンモニア専焼エンジン船	アンモニア専燃エンジンを搭載	大型船への適用性がやや高い。
		水素専焼エンジン船	水素専燃エンジンを搭載	中・小型の船舶への適用性がやや高い。

そこでは、様々なGHG削減技術の選択肢があり、技術開発と実装に取り組むことで、短期目標(2030年）と中長期目標（2050年）のGHG削減を達成するオプションを提示している。また、内航船舶へのカーボンニュートラル技術それぞれの適用性が、船の大きさや運航距離とも関連づけた技術導入オプションとしてマップ化された（図2.5)。短距離航路の小型船では蓄電池の利用や、バイオ燃料の利用が選択肢の一つとなる。水素燃料は、小型から大型の船舶まで幅広く利用できる可能性が高い。アンモニア燃料は、長距離航路の大型船舶に有力と考えられる。この図を漁船に当てはめると、沖合漁船の総トン数100～200GT規模では、水素、LNG、アンモニアそれぞれが適用可能と考えられる。ゼロエミッション燃料の絞り込みには今後の技術開発動向等の推移を見守る必要がある。

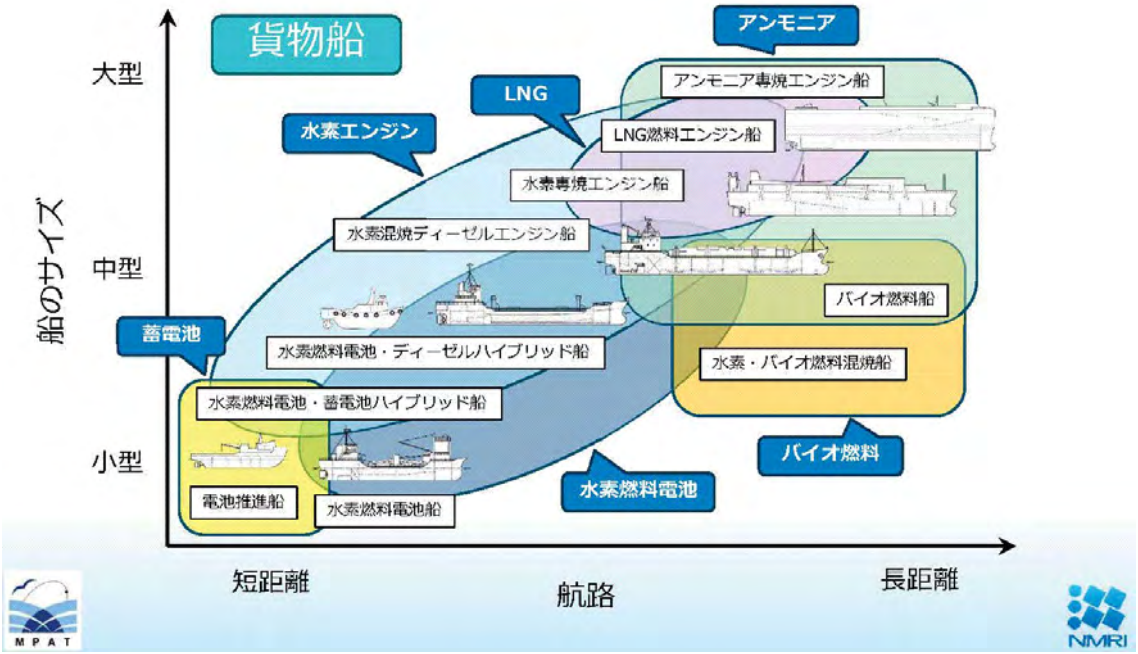

図2.5　内航船舶のカーボンニュートラル技術適用マップ（文献4から転載）

2.2　ガス燃料エンジンの開発状況

（1）ガスエンジンについて

低炭素・脱炭素燃料として、LNG、水素、アンモニア等がリストアップされるが、それぞれの物性・燃焼性は異なるものの、これらはエンジンへはガス燃料として供給されるため、ゼロエミッション対応のガス燃料エンジンの技術開発が基盤となる。既にLNGと重油の二元燃料エンジンは実用化されているが、現段階で舶用の水素専焼エンジンおよびアンモニア専焼エンジンは技術開発の途上であり、ゼロエミッション船実現に向けては、これらの開発・実証が大きな課題である。グリーンイノベーション基金「次世代船舶の開発プロジェクト」[5)]では、水素・アンモニアを燃料とするゼロエミッション船のコアとなるエンジン、燃料タンク、燃料供給システム等の開発・実証を進めている。

水素は燃焼速度が大きいため「過早着火」への対応がキーポイントとされる。水素燃焼エンジンでは、混焼率（CO_2削減率）を向上させて「専燃」とすれば、ゼロエミッションが達成できる。また、難燃性の燃料であるアンモニアは、石油燃料の混焼が基本となる。中高速機関では、燃焼時間の確

保が難しいことから、未燃アンモニアが排出される。排ガス中の NOx 除去に加えて未燃 NH_3 および N_2O に対する後処理技術が必要となる。これらを考慮すると、沖合漁船の中高速機関では、アンモニアよりも水素の適用性が高いと考えられる。

既に実用化されている LNG 燃料のガス焚きエンジンは 3 種類の燃焼方式がある。①ガスエンジン（ガス専焼エンジン）：希薄予混合燃焼方式（リーンバーン方式）によるガス燃料専用で、ガスは低圧で噴射され、エンジンは火花点火によって燃焼が開始するオットーサイクルで運転される（図 2.6a）。燃料の混合比が小さい希薄燃焼方式であるため、燃焼温度が低く NOx 発生が少なくなるが、ノッキングが起こりやすい。②二元燃料（Dual Fuel）エンジン：ガスと液体燃料両方の運転が可能であり、始動はディーゼルモードとし燃焼安定後にガス燃料に切り替わる。ガスモード運転中にガス供給が遮断された場合には自動的にディーゼルモードへ切り替わる。低圧ガスで予混合気をつくり燃焼開始はパイロット燃料（A 重油等）で着火させる。③ガスディーゼルエンジン（高圧 DF エンジン）：ガス混焼またはディーゼル専焼で運転される（図 2.6b）。ガス燃料は圧縮後の燃焼室に直接噴射するため高い圧力が必要となる。ノッキングは起こらず高効率・高出力化が可能であるが、NOx が多いのが欠点である。

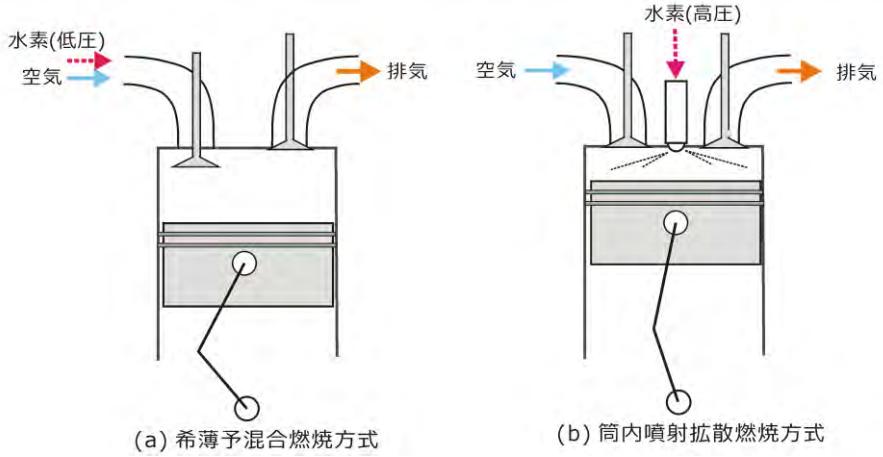

図 2.6　ガスエンジンの燃焼方式

ガスエンジンの燃焼方式として、筒内へ高圧ガスを噴射する方法は、ディーゼルと同様の拡散燃焼を可能とするが、燃焼室にガスを直接噴射するために 300 気圧以上が必要であることから、圧縮機動力が大きく総合的なエンジン効率が低下すること、NOx が高いため排気後処理装置が必要となることからその採用は大型商船の低速エンジンに限られている。一般に、予混合燃焼・強制着火方式のガスエンジンは、拡散燃焼・自己着火方式のディーゼルエンジンと異なる特性を有する。予混合燃焼に起因して急加速時など空燃比が小さくなるとノッキングが発生する。また、急減速時など空燃比が大きいと失火が発生する。そのため、安定燃焼できる範囲が限られている（図 2.7）。エンジン負荷が高くなるほど安定燃焼域は狭くなる一方、熱効率はノッキング域に近いほど高くなる特性である。このため、ガスエンジンの高出力・高効率化には、空燃比・吸気温度の制御、異常燃焼の検出、点火時期の制御など高度な電子制御システムが必要となる。

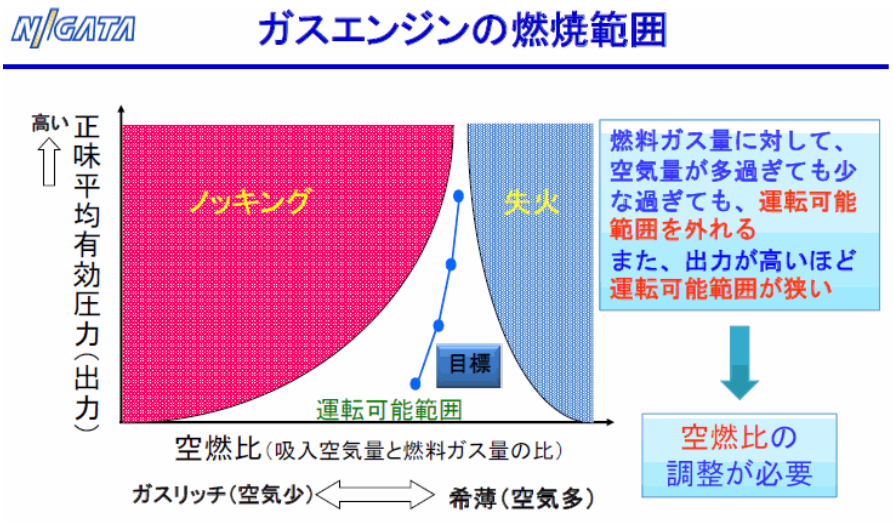

図 2.7　ガスエンジンの燃焼範囲（文献 6 から転載）

(2) 二元燃料（DF）エンジン

船舶では環境対策として、燃料を重油からより環境に優しい天然ガス（LNG）に転換する取り組みとして LNG 燃料エンジンの開発が進められてきた。日本初の LNG 燃料船として 2015 年に竣工したタグボート魁（さきがけ、272GT）にデュアルフューエル（DF）機関（IHI 原動機製 28AHX-DF）が搭載された[7]。LNG 燃料船として 2019 年にはタグボートいしん(250GT)にヤンマー製 DF 機関(6EY26DF)が搭載された。ガスエンジンとディーゼルエンジンの特性を併せ持つ DF エンジンは、航行する条件に合わせた燃料の選択が可能となる。燃料供給系として、メイン燃料系統、パイロット燃料系統、ガス燃料系統の 3 つの噴射系を持つ構造となっている（図 2.8）。

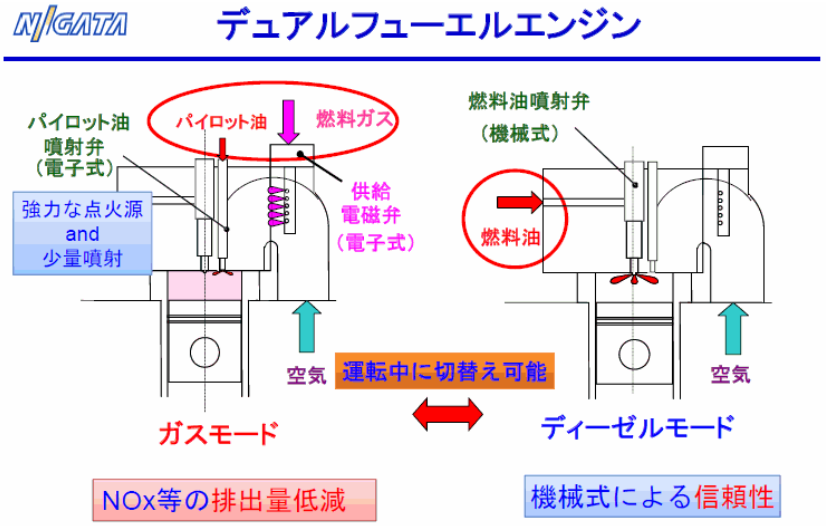

図 2.8　LNG・重油の DF エンジン（文献 6 から転載）

DF エンジンの制御系は、コモンレール・ガス噴射・空燃比制御等の運転制御、各気筒間の筒内圧バランス・ノッキング回避制御、負荷変動時や運転モード切種制御装置および多数のセンサ類で構成されている（図 2.9）。DF エンジンの操作領域として、全ての負荷に対してガスモード運転が可能

であるが、起動時・緊急時・停止時はディーゼルモードとしている。なお、現在、漁船機関メーカー各社が DF エンジンを製品化しており、その出力範囲は 1000～4000kW である。

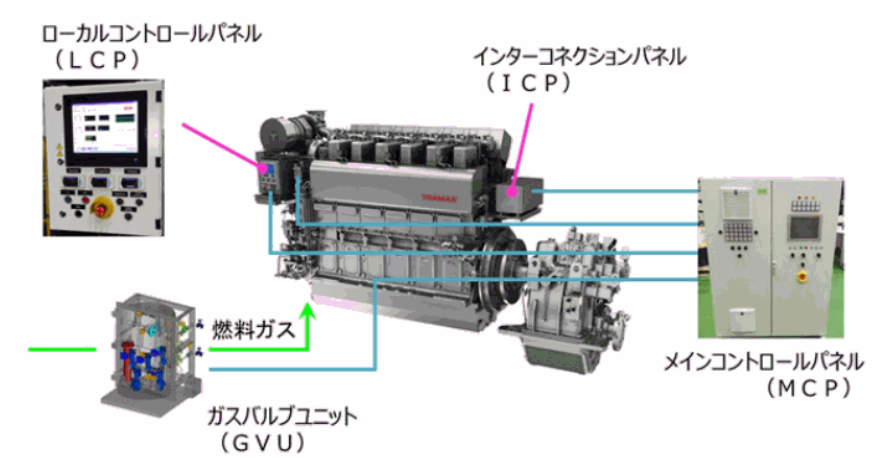

図 2.9　DF エンジン制御装置の概要（文献 8 から転載）

DF エンジンの燃料切り替え運転時の例を図 2.10 に示す。ディーゼルモードからガスモードへ移行する際のディーゼルとガスのガバナ操作割合の変化を示している。ガスモードへ移行する間は空燃比変動によるノッキング発生を防ぐために、モード移行に 30 秒ほどの時間を要している。一方、ガスモードからディーゼルモードへ移行する場合は、ディーゼルモードではノッキングは発生しないため全負荷域において瞬時に移行が可能である。このため、ガスモード運転中に何か故障が発生しても機関を停止することなく速やかにディーゼルモードで運転が継続可能となる。このように船舶推進系の冗長性確保の観点からも DF エンジンは効果的である。水素専焼エンジンの開発・実証は、DF エンジンの延長線上で進むものと考えられる。

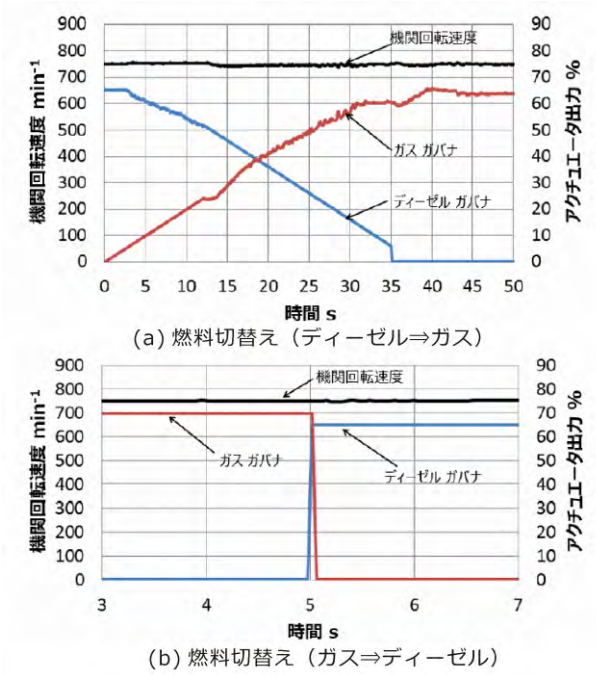

図 2.10　DF エンジンの燃料切替え時の運転事例（文献 8 から転載）

2.3 ガス燃料船の艤装設計の留意事項

ゼロエミッション船の燃料は、水素、アンモニア、カーボンリサイクルメタン等が候補として挙がっている。しかし、長期的にどれが主要な燃料になるかは、燃料価格や供給インフラの整備状況等にも依存するため、現時点では見極めが困難な状況にある。これらの代替燃料は、液化状態から気化させたガス燃料をエンジンや燃料電池に供給する方式であり、ガス燃料の性状は、従来の油燃料に比べ引火点が低く、ガスが船内に漏洩した場合には爆発性雰囲気を形成する可能性がある。また、船内での貯蔵方法は、低温貯蔵であり同時に BOG（ボイルオフガス）によってタンク内は高圧化するといった特殊な環境であるため、油燃料を対象とした従来の安全設備要件では従来船と同等の安全性確保は困難である。

船舶における燃料電池については、IMO で IGF コード改正の前段階として、燃料電池使用の安全要件をとりまとめた暫定ガイドラインを策定することが合意された。この状況を受けて、2019 年 3 月に ClassNK「燃料電池搭載船ガイドライン」が発行されている。水素・アンモニア燃料船についても、その実用化・普及のためには、船舶の設計・運航のための国際的に統一された安全基準策定が必要であり、2022 年から IMO にて水素燃料船・アンモニア燃料船の安全ガイドライン策定に向けた作業が開始されている。水素・アンモニア燃料は、液化温度や燃焼速度等の物性はそれぞれ異なるものの、低引火点燃料であることはＬＮＧとも共通している。そこで、既にガス燃料船として実用化されている LNG を使用するガス燃料船の安全要件が参考となる。

LNG 燃料船の安全指針の策定については、SOLAS 条約では原則として低引火点燃料の使用が禁止されていたことから、IMO ではガス燃料および低引火点燃料を使用する船舶に対する国際規則 IGF Code の審議を 2004 年より開始し、2015 年 6 月に IMO の第 95 回海上安全委員会（MSC95）で採択された。IGF コードは、将来的に使用が予想される LNG 以外のガス燃料（プロパン、ブタン、等）および低引火点液体燃料（メタノール、エタノール、等）も IGF コードの適用範囲とし、コード名称を「International Code of Safety for ships gases or low-flash point fuels」とすることが合意されている [9]。それぞれの燃料の性状に応じた安全要件の検討が必要となることから、当面は優先的に LNG のみが適用範囲となった。IGF コードは、目的と機能要件を規定することで、設計・建造・オペレーションの指針を与える構成となっており、その目的は、「ガス又は低引火点燃料を使用する推進機関、補機発電機関及び/又は他の目的に使用する機関を搭載する船舶に対し、安全で環境に配慮したシステムの設計、構造及び運用を提供することである」としている。IGF コードは、主に 4 つの Part から構成され、Part A には船舶の構造および設備に関する要件、Part B には製造・工作・試験に関する要件、Part C/D には船員への研修やオペレーションなど船舶の運航・運用面に関する要件を規定している。この IGF コードを準拠して Class NK ではガス燃料船を対象とした「鋼船規則　GF 編　低引火点燃料船」を制定された。これらを参照して、LNG 燃料船の艤装設計上の留意事項を以下に示す。

(1) 燃料タンクの配置

燃料タンクの配置については、タンクおよびその接続部からの漏洩による低温、可燃性および毒性によって、船舶および乗組員が危険に曝されることがないように規定されている。甲板下にタンクを設ける場合、衝突又は座礁等による船体損傷を考慮し、外板から 0.80m 以上離して設置すること（図 2.11）、燃料温度が-10℃以下の場合は二重底によりホールドスペースを海水から隔離すること、燃料温度が-50℃以下の場合は船側タンクを構成する縦通隔壁を設けることが規定されている。

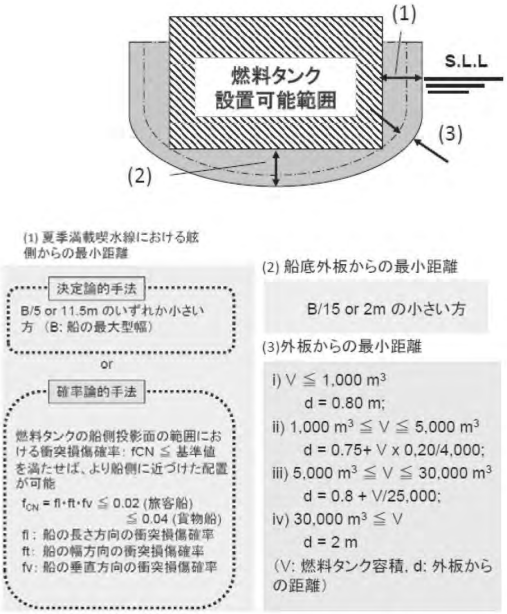

図 2.11　燃料タンクの配置要件（文献 10 から転載）

(2) 燃料タンク関連要件

開放甲板下（密閉区域）に設置されるガス燃料タンクの全てのタンク接続部、付属品、フランジ、弁類はタンクコネクションスペース内に設置すること、隣接区画に対してガス密であること、独立した開放甲板からの直接の出入口を設けること、毎時 30 回以上の換気可能な排気ファンを設けること、ガス検知器及び火災検知器を設けること等が要求される（図 2.12）。

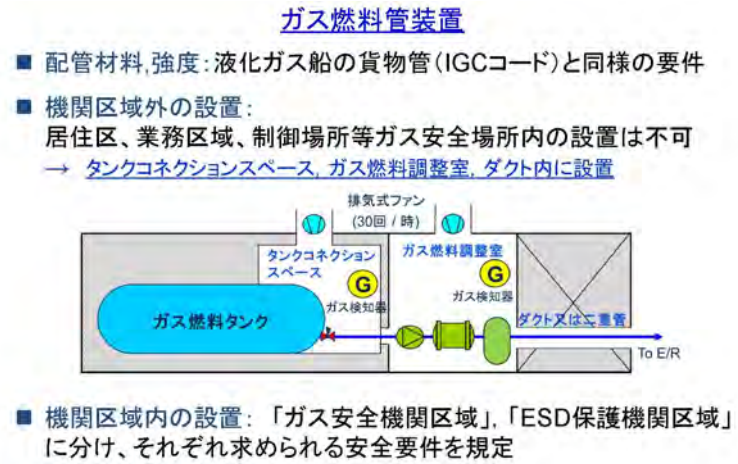

図 2.12　ガス燃料管装置の配置要件（文献 11 から転載）

(3) ガス燃料配管系と機関区域の要件

燃料タンクから機関区域前の範囲では、ガス燃料管装置をガス安全場所に直接設置することは認められず、ガス燃料機器室、バルブユニット室又はダクト内の設置が要求される。機関区域は、ガス漏洩時の安全性に応じて「ガス安全機関区域」と「ESD 保護機関区域」の 2 つの機関区域の概念が規定されている。ガス安全機関区域は、正常状態のみならず異常状態においてもガス安全とみなされる機関区域と規定され、例えば、機関区域内にガスを引き込む配管は二重管とすることで内管からのガス漏洩があっても機関区域にガスの漏洩が起きないような設備としている（図 2.13)。

ESD 保護機関区域は新しい概念であり、正常状態において危険はないが、特定の異常状態では危険が生じる機関区域と規定され、単一の故障が機関区域へのガス燃料放出の原因となりうるため、ガス漏洩等の異常時には、ガス燃料の供給を停止し、着火源となりうる機器は自動的に緊急停止が要求される。また、爆発および機関区域外部の損傷に対する保護および推進力・電力供給の冗長性の確保が要求される。その一例として、1 箇所の機関区域への燃料供給が遮断された場合に動力の喪失とならないように、異なる機関区域に機関を分配して配置することが要求される。内航船への LNG 主機関搭載について、高度な電子制御を必要とするガスエンジンでは、機関の複数台化や二元燃料等により冗長性の確保が必要とされる。水素専焼エンジンを搭載する場合も推進力・電力供給の冗長性の確保が求められる。

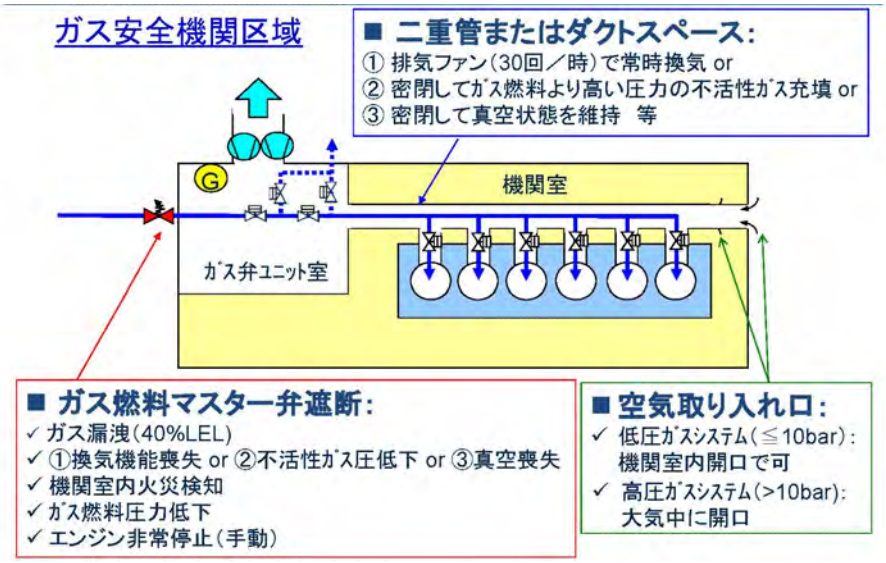

図 2.13　ガス安全機関区域の要件（文献 11 から転載）

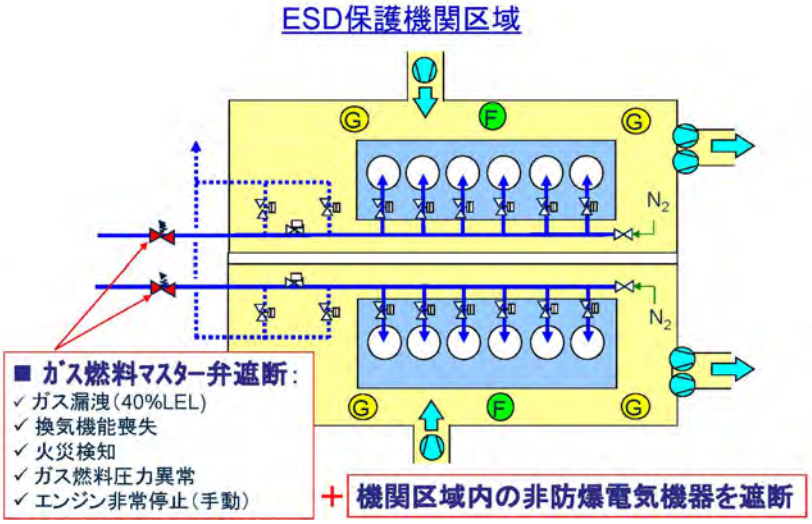

図 2.14　ESD 保護機関区域の要件（文献 11 から転載）

2.4 沖合漁船の脱炭素化に向けた代替燃料の選定

ここまで国際海運および内航分野について、船舶のゼロエミッション化に向けた技術的動向を整理した。表 2.1 で GHG 削減が可能となる代替燃料候補を示した。ここでは、再度、代替燃料候補をリストアップし、それぞれの物性とメリット・デメリットを紹介し、ゼロエミ漁船で使用する代替燃料を絞り込む。

(1) 代替燃料候補

漁船のゼロエミッション化に向けた代替燃料の候補を表 2.3 に示す。沖合漁業に従事する船は燃料として A 重油を使用していることから、ここでは MGO（A 重油）に対比して示した。

バイオディーゼル燃料（BDF）には、菜種油、パーム油、廃食油等からエステル処理をして製造される FAME の他、植物油に石油精製で使われている水素化処理を施して製造される HVO 等があり、これらは軽油とほぼ同じ性状のため既存エンジンにそのまま使用可能であるが、精製コストが高いことと供給量に制限があることが課題となる。将来的にも沖合漁船の代替燃料となりうる可能性は低いと考えられる。

液化天然ガス（LNG）の性状は、算出される地域によって異なるものの、いずれもメタンを主成分（約 90%）とし、その他にエタン（約 6%）、プロパン（約 2%）、ブタン等の炭化水素を含む。不純物として水分、酸素、窒素、二酸化炭素、硫化水素等が含まれているが、液化して貯蔵・運搬する場合は、不純物は前処理工程で分離・除去される。LNG を燃料とするエンジンおよび船舶は既に実用化され、関連規則も整備されている。LNG は水素・アンモニアに比べてエネルギー体積密度が高いこと、将来的に実用化が期待されるカーボンリサイクルメタンの利用に移行する際に現状の LNG 燃料船のインフラ設備が使用可能であることなど、ゼロエミッション船実現の選択肢の一つとなる。その一方で、温室効果の大きい未燃のメタンが排出されるメタンスリップを抑制する技術開発が必要である。

表 2.3　ゼロエミッション漁船の代替燃料候補

	MGO	BDF	天然ガス（LNG）	メタン CH_4	メタノール CH_3OH_8	水 素 LH_2	アンモニア NH_3
密　度（液体）　t/kL	0.864	0.860～0.900	0.48	0.42	0.79	0.071	0.696
真発熱量　GJ/t	42.5	29.2	49.8	50.0	19.9	120.0	22.5
沸　点　℃	180～360	345～354	-162	-161	65	-253	-33
発 火 点　℃	250	256～299	537	537	440	500～571	630
可燃範囲　vol % in air	0.7～5	―	5～15	4.4～17	6～26	4 ～76	15～34
層流燃焼速度　m/s	0.35～0.40	―	0.4	0.4	―	3	0.07
CO_2排出量　kg-CO_2/GJ	75	0	55.8	50.0	69.1	0	0
容積当たり発熱量　GJ/kL	36.7	33.2	21.6	21.0	15.7	8.5	15.7
発熱量当たり容積比（MGO基準）	1.00	1.11	1.70	1.75	2.34	4.32	2.35
船上での貯蔵方法（液体状態）	船体付きタンク（常温・常圧）	船体付きタンク（常温・常圧）	Type C（-160～-140℃、0.07～0.5MPa）	Type C（-160～-140℃、0.07～0.5MPa）	船体付きタンク（常温・常圧）	Type C・真空防熱タンク（-250℃、0.5MPa）	Type C（-30～-10℃、0.07～0.5MPa）
舶用エンジン燃焼サイクル	ﾃﾞｨｰｾﾞﾙ	ﾃﾞｨｰｾﾞﾙ	ﾃﾞｨｰｾﾞﾙ/ｵｯﾄｰ	ﾃﾞｨｰｾﾞﾙ/ｵｯﾄｰ	ﾃﾞｨｰｾﾞﾙ/ｵｯﾄｰ	ﾃﾞｨｰｾﾞﾙ/ｵｯﾄｰ	ﾃﾞｨｰｾﾞﾙ/ｵｯﾄｰ
備　考	舶用A重油	原料・製造法により性状が異なる	産地により性状が異なる、メタンスリップ(GWP:28)が課題	メタンスリップ。カーボンリサイクル合成メタンではCO2排出ゼロカウント。	毒性あり。カーボンリサイクル合成メタンではCO2排出ゼロカウント。	燃料タンクが課題	難燃性・毒性・N_2O(GWP:265)が課題

＊ 真発熱量・CO_2排出係数は「エネルギー源別標準発熱量・炭素排出係数の解説(資源エネルギー庁、2020年)」参照。
＊ 層流燃焼速度は、海上技術安全研究所・高橋千織「低炭素燃料・脱炭素燃料の特性」から引用。

カーボンリサイクル燃料（合成燃料）の実用化の技術開発も注目されている。カーボンリサイクル燃料とは、排気ガス中の CO_2 を分離・回収して再利用するリサイクル技術によって人工的に製造される燃料である [12)]。CO_2 を原料に製造可能な合成燃料のうち、舶用で使用が見込まれる燃料として、メタン、メタノール、エタノール等がある。陸上で回収された CO_2 により製造される合成燃料はカーボンフリー燃料として扱われる。液体燃料であるメタノールは取扱いが容易であることから、将来的にカーボンフリーメタノールが利用できるような環境を整えることができれば、ゼロエミション漁船の代替燃料の有力な選択肢となろう。

水素は、陸上の燃料電池車での利用など、多くの分野でゼロエミッションを実現できるカーボンフリー燃料として期待されている。既に、小型の水素燃料混焼船および水素燃料電池船も竣工している。一方、水素は従来の燃料とは著しく異なる特性を多く有している。分子量および粘性は非常に小さいため、漏洩を完全に防止することは難しいこと、金属材料中に侵入した水素によって材料の強度が低下する水素脆化が生じることなどが指摘されている。また、水素は空気との混合により容易に爆発性雰囲気を形成し、その爆発限界は下限 4%、上限 75%であり、他の可燃性ガスと比べて燃焼範囲が非常に広い（メタン：5～15%、プロパン：2～10.5%）。燃焼速度は約 3m/s でメタンの 0.4m/s と比較して数倍大きく、水素に着火すると短時間で炎が広がり、配管内を火炎が容易に伝播することにも留意する必要である。

アンモニア（NH_3）は、水素と同様にカーボンフリー燃料として期待される。沸点-253℃の水素と比べて、沸点-33℃のアンモニアは液体貯蔵およびバンカリングも容易となる。一方で、他の燃料と比べて燃焼性が低く燃えづらいためアンモニア専焼エンジンの実現は難しく、石油燃料による継続的な燃焼アシストが必要と指摘されている。難燃性のため未燃アンモニアが排出されること、燃焼

時にNOx発生が多くなること、温室効果がCO_2の300倍とされる亜酸化窒素（N_2O）が発生することから、これらの削減・後処理技術の開発が課題である。さらに、金属への腐食性と人体への毒性の対策も必要となる。

(2) ゼロエミッション漁船の代替燃料の選定

船舶の脱炭素化の代替燃料候補は、前述したように多岐に及んでいるが、将来的な社会実装に向けて、エンジン等のエネルギー機器と代替燃料の組み合わせのセットで脱炭素化へ適用技術が絞り込まれてくるもとと考えられる。現時点では、水素専焼エンジンおよびアンモニア専焼エンジンが開発・実証が計画通りに進捗するのか不透明な状況であるものの、ここでは、計画通りに進展することを想定して、ゼロエミッション漁船の試設計に向けた代替燃料として水素を選定することにした。主な理由は以下のとおりである。

・カーボンフリー燃料である水素とアンモニアを候補とした。
・沖合漁船搭載主機関（中速機関）を想定すると、水素専焼機関の技術開発の進展が見込まれること。アンモニア専焼機関の場合は、排気の後処理設備等が過大となり漁船への搭載は困難と判断した。
・水素社会実現に向けて水素供給インフラの整備が陸上を中心に全国的に期待できること。
・漁船搭載の補機関（中高速機関）は水素燃料電池への代替が可能。
・水素利用の最大の課題は水素燃料タンクが重油の4.5倍必要となるが、今回は、船体設計に及ぼすその影響も評価することが可能との認識のもと、水素燃料船を試設計することにする。

参考文献

(1) 国交省：国際海運のゼロエミションに向けたロードマップ、2020 年 3 月.

(2) 国交省：「次世代船舶の開発」プロジェクトの研究開発・社会実装計画（案）について、2021 年 7 月.

(3) 国交省：国際海運 2050 年カーボンニュートラルに向けた取組み、2022 年 4 月・

(4) 海技研・平田：内航船舶のカーボンニュートラル推進に向けた短期的取り組みの検討、第 2 回内航カーボンユートラル推進に向けた検討会、2021 年 5 月.

(5) 国交省： グリーンイノベーション基金事業「次世代船舶の開発」プロジェクトに関する研究開発・社会実装計画、2021 年 7 月.

(6) 新潟原動機：舶用デュアルフューエルエンジンの開発、日本海事協会環境セミナー、2014 年 9 月.

(7) 小林・元田：LNG 燃料タグボートに搭載する DF 機関の稼働状況と性能改善、日本マリンエンジニアリング学会誌、57(4)、2022 年.

(8) ヤンマー：6EY26DF 形デュアルフューエルエンジンの開発～IMO 3 次規制対応～、ヤンマーテクニカルレビュー、2019 年 4 月.

(9) 資源エネルギー部：LNG 燃料船に関連する国際規則（IGF コード）の審議状況とガス燃料船ガイドラインについて、日本海事協会誌、305、2013 年.

(10) 西藤・上田・酒井：ガス燃料船の設計要件（IGF Code)、日本マリンエンジニアリング学会誌、51(1)、2016 年.

(11) 日本海事協会：NK の取り組みーLNG 燃料船―、環境セミナー（天然ガス燃料船特集)、2014 年 9 月.

(12) 川又・渡辺・雲石：船上 CO2 回収装置の開発、ClassNK 技報 No.5、2022 年.