

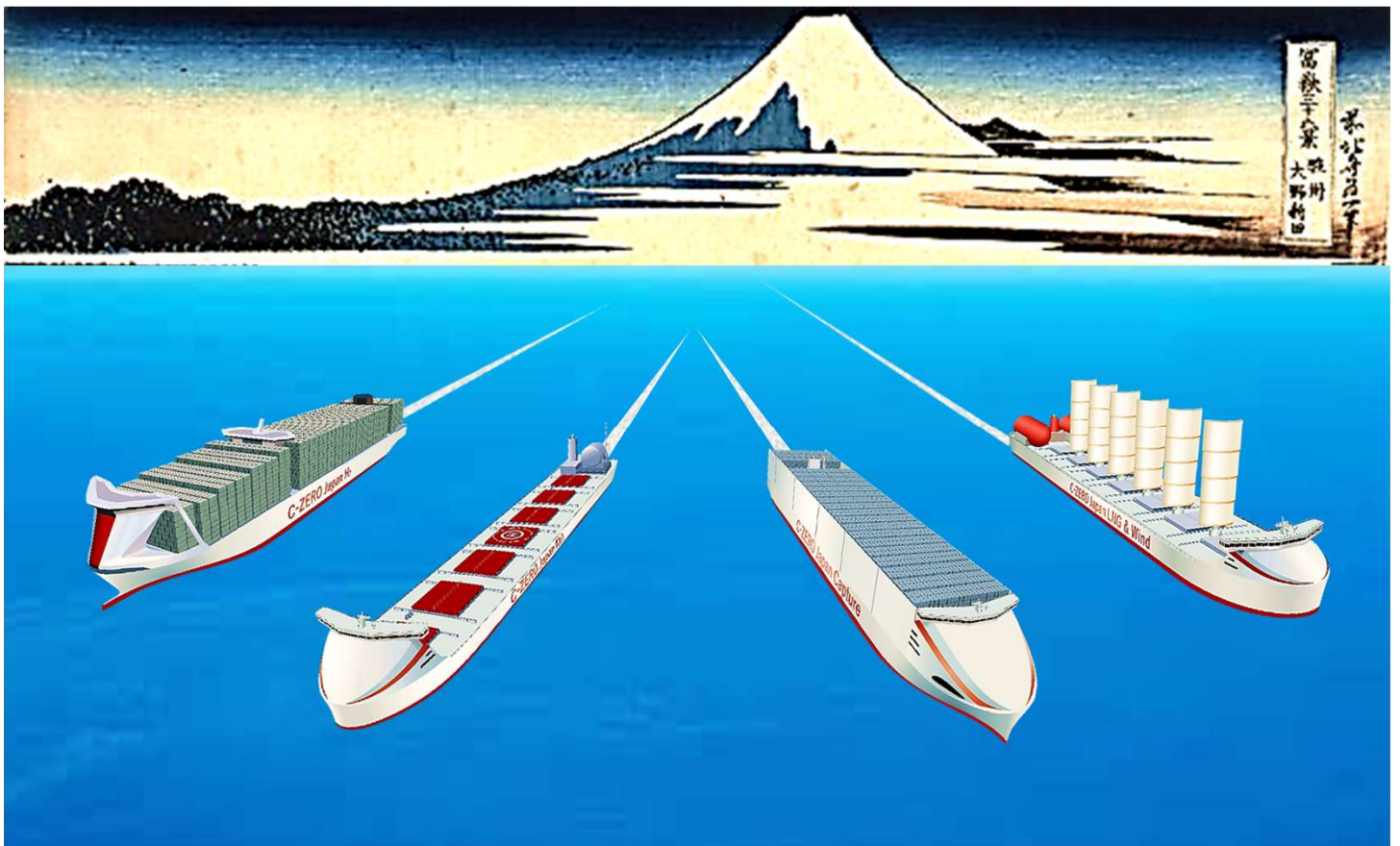


一般財団法人 日本船舶技術研究協会
JAPAN SHIP TECHNOLOGY RESEARCH ASSOCIATION



国土交通省
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism

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
国際海運ゼロエミッションプロジェクト

はしがき

2016 年にパリ協定が発効し、脱炭素化の世界的な機運が高まる中、今後、需要拡大が見込まれる国際海運分野でも、更なる温室効果ガス(GHG)の排出削減が喫緊の課題となっている。2018 年 4 月には、国際海事機関(IMO)において、国際海運分野からの GHG 排出量を 2050 年に半減させ、今世紀中早期にゼロとすることを旨とする「GHG 削減戦略」が採択された。目下、IMO においては、同戦略に基づき、2023 年までの合意を目指した短期対策等の交渉が行われている。

世界有数の海運・造船大国である我が国として、海上貿易や海事産業の持続的な発展を図りつつ、地球温暖化に対処するための国際的な取組に積極的に貢献すべく、2018 年に産学官公の連携による「国際海運 GHG ゼロエミッションプロジェクト」を設立した。本プロジェクトは、一般財団法人日本船舶技術研究協会の主催、国土交通省の共催により、日本財団の支援を受けて活動している。

本報告書は、本プロジェクトが 2019 年度に実施した、「国際海運のゼロエミッションに向けたロードマップ」の作成事業について、成果をとりまとめたものである。

<国際海運 GHG ゼロエミッションプロジェクト 参加機関・団体等>



国際海運 GHG ゼロエミッションプロジェクト

<ステアリンググループ メンバー>

坂下 広朗	国際海運 GHG ゼロエミッションプロジェクト プロジェクト・マネージャー 一般財団法人 日本海事協会 業務執行理事 副会長
高木 健	国立大学法人 東京大学 大学院新領域創成科学研究科 海洋技術環境学専攻 海洋技術政策学分野 教授
岡田 啓	学校法人 東京都市大学 環境学部 環境経営システム学科 准教授
北原 辰巳	国立大学法人 九州大学 大学院 工学研究院 機械工学部門 准教授
森本 清二郎	公益財団法人 日本海事センター 企画研究部 主任研究員
谷澤 克治	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 研究統括監
松本 俊之	一般財団法人 日本海事協会 執行役員 技術研究所長
麻岡 秀行	独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 共有船舶建造支援部長
岩佐 久美子	川崎汽船株式会社 環境推進グループ長
大藪 弘彦	株式会社商船三井 理事 技術部担当 執行役員補佐
高橋 正裕	日本郵船株式会社 環境グループ長
脇山 典広	川崎重工業株式会社 船舶カンパニー 技術本部付 基幹職
石黒 剛	ジャパン マリンユナイテッド株式会社 設計本部 技監
雲石 隆司	三菱造船株式会社 開発部 技監・環境技術担当部長
浅海 友弘	浅川造船株式会社 常務取締役 設計本部長
永澤 秀明	株式会社IHI原動機 技術センター技術開発部長
島田 一孝	株式会社三井 E&S マシナリー ディーゼル事業部 設計部 部長補佐

<関係者>

畔津 昭彦	日本船舶技術研究協会・省エネ性能向上技術基準検討プロジェクト プロジェクトマネージャー 学校法人 東海大学 工学部 機械工学科 教授
高崎 講二	日本船舶技術研究協会・大気汚染防止基準整備プロジェクト プロジェクトマネージャー 国立大学法人 九州大学 名誉教授

主催：一般財団法人 日本船舶技術研究協会

共催：国土交通省

支援：日本財団

本プロジェクトにおいては、ステアリンググループの下に、「船舶設計」、「船舶運航」及び「代替燃料」に関する3つのタスクフォースを設置し、関係業界・機関等から50名以上の参画を得て、本事業を推進してきた。

目 次

第 1 章	はじめに	...1
1.1 節	背景	...1
1.2 節	事業の目的	...1
1.3 節	事業の概要	...1
第 2 章	IMO GHG 削減戦略とその目標達成に向けた基本的な考え方	...2
2.1 節	IMO GHG 削減戦略の数値目標	...2
2.2 節	2030 年目標達成についての基本的な考え方	...2
2.3 節	2050 年目標達成についての基本的な考え方	...3
2.4 節	今世紀中の GHG 排出ゼロ達成についての基本的な考え方	...3
第 3 章	2030 目標達成のための方策	...4
3.1 節	新造船の設計効率改善(EEDI 規制)	...4
3.2 節	現存船の運航効率改善	...4
3.2.1	現存船対策の必要性	...4
3.2.2	現存船に対する燃費性能規制の概要	...4
3.2.3	EEXI 規制の導入による運航効率改善効果の試算	...5
3.3 節	更なる運航改善に向けて	...5
第 4 章	2050 目標達成のための削減シナリオ	...6
4.1 節	2050 年目標達成のための削減シナリオ作成の概略	...6
4.2 節	国際海運における海上荷動き量及び必要な GHG 削減幅の推計	...6
4.2.1	国際海運における海上荷動き量の推計	...6
4.2.2	従来の技術及び燃料が使用され続けた場合における将来の GHG 排出量(BAU 排出量)の推計	...8
4.2.3	2050 年目標を達成するために必要となる GHG 削減量及び船舶の炭素密度の改善率	...9
4.3 節	2050 年目標を達成するために必要な国際海運の燃料構成シナリオ	...10
4.3.1	今後活用の拡大する可能性のある燃料等の実現可能性等の検討	...10
4.3.2	IMO・GHG 削減戦略の数値目標に合致する燃料・技術の活用シナリオの検討	...14
4.4 節	ゼロエミッション／超低炭素船のコンセプト設計	...19
4.4.1	水素燃料船	...19
4.4.2	アンモニア燃料船	...22
4.4.3	船上 CO ₂ 回収システム搭載船	...23
4.4.4	超高効率 LNG＋風力推進船	...24
4.4.5	2050 年頃のゼロエミッション船のイメージ	...26

第 5 章	2050 年以降の目標達成のためのロードマップ	...27
5.1 節	ロードマップ検討の概略	...27
5.2 節	新たな燃料及び技術の導入のための研究開発等	...27
5.2.1	研究開発体制強化	...28
5.2.2	研究開発及び実用化	...28
5.3 節	新たな燃料及び技術の導入のための制度面の環境整備	...29
5.3.1	GHG 削減戦略、短期対策及び中長期対策	...29
5.3.2	既存の MARPOL 条約関連規制の改正	...30
5.3.3	船舶の安全及び船員に関する規則	...30
5.3.4	その他	...31
第 6 章	おわりに	...32
付録 1	国際海運における海上荷動き量の推計の詳細	...35
付録 2	代替燃料・CO ₂ 削減技術の実現可能性に関する検討の詳細	...52
付録 3	ゼロエミッション／超低炭素船のコンセプト船	...62
付録 3-1	水素燃料船	...62
付録 3-2	アンモニア燃料船	...74
付録 3-3	船上 CO ₂ 回収システム搭載船	...84
付録 3-4	超高効率 LNG＋風力推進船	...93
付録 4	カーボンリサイクル燃料等の排出の考え方	...110

第1章 はじめに

1.1 節 背景

国際海運から排出される温室効果ガス(GHG)について、2014年の国際海事機関(IMO)の調査によれば、2012年時点における国際海運全体からのCO₂排出量は約8億トンであり、世界全体のCO₂排出量の約2.2%を占める。世界経済の成長を背景に、海上輸送需要は今後も増大すると予測される。

世界全体の地球温暖化対策については、国連気候変動枠組条約(UNFCCC)の下で議論されているが、国境を越えて活動する国際海運及び国際航空セクターからのGHG排出対策については、船舶(又は航空機)の船籍国や運航国による区分けが難しく、UNFCCCにおける国別の削減対策には馴染まないため、国連の専門機関であるIMO及び国際民間航空機関(ICAO)にそれぞれ検討が委ねられている。

IMOにおいては、2018年4月に「GHG削減戦略」が採択された。同戦略においては、2008年を基準年として、①2030年までに国際海運全体の燃費効率(輸送量あたりのGHG排出量)を40%以上改善すること、②2050年までにGHG国際海運からの総排出量を50%以上削減すること、及び③今世紀中なるべく早期にGHG排出ゼロを目指すことが数値目標として掲げられている。

国際海運分野においては、GHG削減戦略策定以前から、船舶の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等、船舶から排出されるGHGを削減する取組が行われている。しかし、同戦略の数値目標、特に2050年以降の目標の達成のためには、従来の取組を継続するだけでなく、化石燃料を中心とする従来の燃料から、低・脱炭素燃料への切替えを進める等、従来と異なる様態・規模で取組を加速することが必要と考えられる。

世界有数の海運・造船大国である我が国としては、このような変化を機会と捉え、国際競争力強化に資する形で、世界をリードして船舶からのGHG削減の取組を進めていくことが重要である。

このような背景の下、2018年に、産学官公の連携による「国際海運GHGゼロエミッションプロジェクト」(以下、「本プロジェクト」)を設立した。

1.2 節 事業の目的

上記の背景を踏まえ、本事業においては、GHG削減戦略に掲げられた国際海運からのGHG削減目標を達成するために国際海運に導入すべきGHG削減対策を明らかにし、また、それらの対策を実現するために必要となる技術開発及び環境整備等の内容・時期をロードマップとして取りまとめ、今後の我が国海事産業としてのGHG削減の具体的な取組を決定・実施するための検討材料を提供することを目的として、調査研究を行った。

1.3 節 事業の概要

本報告書では、以下の構成で、本事業の成果を取りまとめている。

- (1) IMO GHG削減戦略とその目標達成に向けた基本的な考え方の整理(第2章)
- (2) 2030年目標達成のための方策の検討(第3章)
- (3) 2050年以降目標達成のための削減シナリオの検討(第4章)
- (4) 2050年以降目標達成のための削減シナリオ実現に向けたロードマップの作成(第5章)

第2章 IMO GHG 削減戦略とその目標達成に向けた基本的な考え方

2.1 節 IMO GHG 削減戦略の掲げる目標

2018 年 4 月、IMO 第 72 回海洋環境保護委員会 (MEPC 72) において、GHG 削減戦略が採択された。その概要は図 2.1-1 のとおり。同戦略においては、国際海運からの GHG 排出ゼロ実現に向けて、以下の数値目標を掲げている。

- 2030 年までに、国際海運全体の燃費効率 (輸送量あたりの CO₂ 排出量) を 40% 以上改善する (対 2008 年比)。
- 2050 年までに、国際海運からの GHG 総排出量を 50% 以上削減する (対 2008 年比)。
- 今世紀中なるべく早期に、国際海運からの GHG 排出ゼロを目指す。

また、同戦略の中では、上記の目標を達成するための GHG 削減対策の候補を挙げている。それらの対策は、以下の 3 つに分類されている。

- 短期対策: 2023 年までに合意。(例: 現存船に対する燃費性能規制)
- 中期対策: 2023 年から 2030 年までの間に合意。(例: 低炭素燃料の導入、市場メカニズム (MBM) の導入)
- 長期対策: 2030 年以降に合意。(例: ゼロ炭素燃料の導入)

現在、IMO においては、本戦略に基づき、2030 年目標の達成を目指した短期対策等の審議が行われており、我が国からも積極的に提案を行い、議論を主導している (詳細後述)。

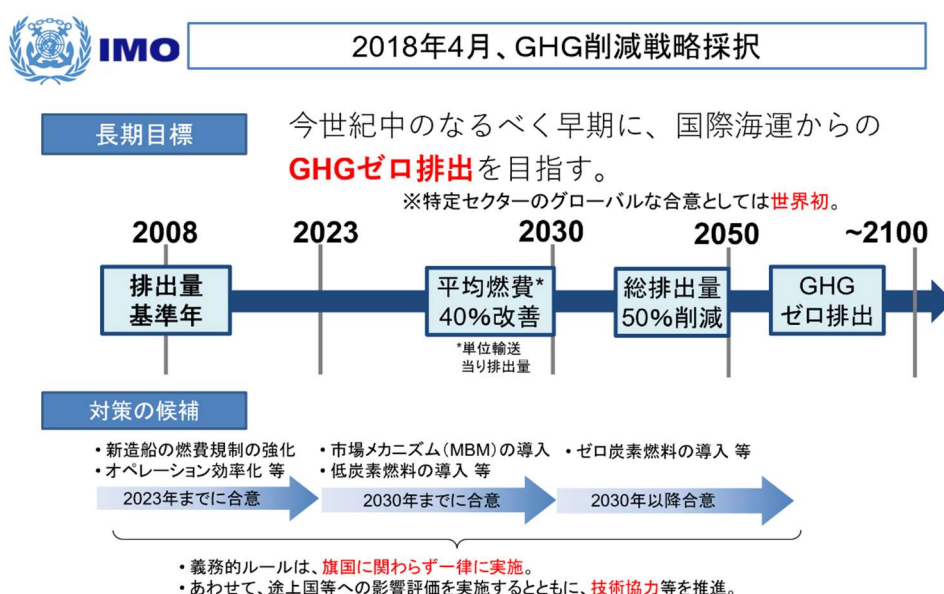


図 2.1-1 IMO・GHG 削減戦略の概要

2.2 節 2030 年目標達成についての基本的な考え方

海洋汚染防止条約 (MARPOL 条約) の下で実施中の新造船に対する燃費性能規制 (EEDI: Energy Efficiency Design Index) 及び 2018 年 5 月に開催された MEPC74 から我が国が提案している既存船に対する燃費性能規制 (EEXI: Energy Efficiency Existing Ship Index) を組み合わせた場合における、2030 年

時点での国際海運全体の GHG 排出量を試算した結果、GHG 削減戦略に掲げられた 2030 年目標は達成可能と見込まれている。

2.3 節 2050 年目標達成についての基本的な考え方

EEDI 及び EEXI 規制による、船舶の設計・運航効率の改善のみによって 2050 年目標を達成することは極めて困難であり、当該目標達成のためには、80～90%以上の GHG 削減効果を有する代替燃料・技術を 2030 年頃から投入していく必要がある。第 4 章において詳述のとおり、本事業においては、長期目標達成のための削減シナリオ及び当該シナリオを実現するためのロードマップを検討した。

2.4 節 今世紀中の GHG 排出ゼロ達成についての基本的な考え方

GHG 削減戦略において、国際海運からの GHG 排出ゼロを達成する具体的な目標年は記述されていないが、今世紀中なるべく早期に国際海運として GHG 排出量ゼロを達成することを掲げており、そのためには、GHG 排出ゼロの燃料を使用する、又は排ガス中の全ての GHG を船上 CO₂ 回収技術等を用いて回収することが必要となる。

これを踏まえ、2050 年目標達成のためのシナリオ達成のための代替燃料・技術としては、将来において国際海運のゼロエミッション実現を可能とするものを選択する必要がある。

第3章 2030年目標達成のための方策

3.1 節 新造船の設計効率改善(EEDI 規制)

EEDI 規制は、新造船を統一の燃費指標¹で評価し、一定値以下とすることを義務づけるものである。2011年7月に MARPOL 条約附属書 VI の改正が採択され、2013 年から規制が開始されている。EEDI の規制値は先進国、途上国の別なく船種毎に設定されており、その規制値は表 3.1-1 のとおり、基本的に5年ごとに10%ずつ強化されることが条約で規定されている。

表 3.1-1 EEDI 規制 MARPOL 条約上の各フェーズ開始年・規制値

	開始年 (建造契約ベース)	EEDI 規制値
フェーズ 0	2013～	1999～2008 建造船平均以上
フェーズ 1	2015～	フェーズ 0 より 10%強化
フェーズ 2	2020～	フェーズ 0 より 20%強化
フェーズ 3	2022 / 2025～	フェーズ 0 より 30～50%強化（船種・サイズ別に設定）

3.2 節 現存船の運航効率改善

3.2.1 現存船対策の必要性

2013 年から EEDI 規制が導入されたものの、EEDI 規制の対象外となる現存船については、何ら GHG 排出に対する規制は設けられておらず、大出力のエンジンを搭載している場合は運航速度選択の自由度が高い。一方で、EEDI 規制の対象となっている新造船については、燃費性能の向上を目的として低出力のエンジンを搭載した結果、高速航行ができず、現存船と比較して運航速度の自由度が相対的に小さくなっている。

このような状況では、新造船への代替インセンティブが低下し、燃費性能の悪い現存船が長期にわたり市場に残存する可能性が高く、結果として、海運全体の GHG 排出削減が停滞する恐れがある。

上記の課題を踏まえ、現存船に対して燃費性能を改善させる枠組みが必要不可欠であるとの認識に基づき、省エネ・燃費性能が良い船舶を差別化することを念頭に、燃費性能の悪い現存船に対して燃費効率改善を促すような制度的枠組みが必要であるとの結論に至った。

3.2.2 現存船に対する燃費性能規制の概要

本プロジェクトにおいて、現存船の燃費性能を改善させるための国際的な制度的枠組みを検討した結果、現存船に対する燃費性能(EEXI: Energy Efficiency Existing Ship index)規制案を取りまとめた²。これは、図 3.2.2-1 に記載する枠組みの下、現存船に一定のハード面の燃費性能を達成することを義務化するものである。

¹ EEDI : Energy Efficiency Design Index。1 トンの貨物を 1 マイル輸送する際の CO2 排出量。

² 2019 年 4 月の IMO 海洋環境保護委員会に提案済み。

EEXI 規制は、既存船の燃費性能を EEDI に準じた統一の燃費指標で算出し、その結果が一定の基準値以下となることを義務づけるものであり、検査や証書による認証等の制度の大枠は EEDI 規制を踏襲したものととなっている。EEXI 規制において、基準値を満たしていない現存船は、エンジンの出力制限や省エネ改造、新造船への代替等の対策を実施することにより、基準値を満足する必要がある。

EEXI 規制では、既に基準値をクリアしている燃費性能の高い現存船については、追加的な対応は必要とされない一方で、基準値を達成できていない現存船は、現在の燃費性能が悪いほど基準の達成に向けて燃費改善の努力を行う必要がある。EEXI 規制は、このような枠組みにより、各船舶の省エネ・燃費改善に向けた取り組みを適正に評価している。

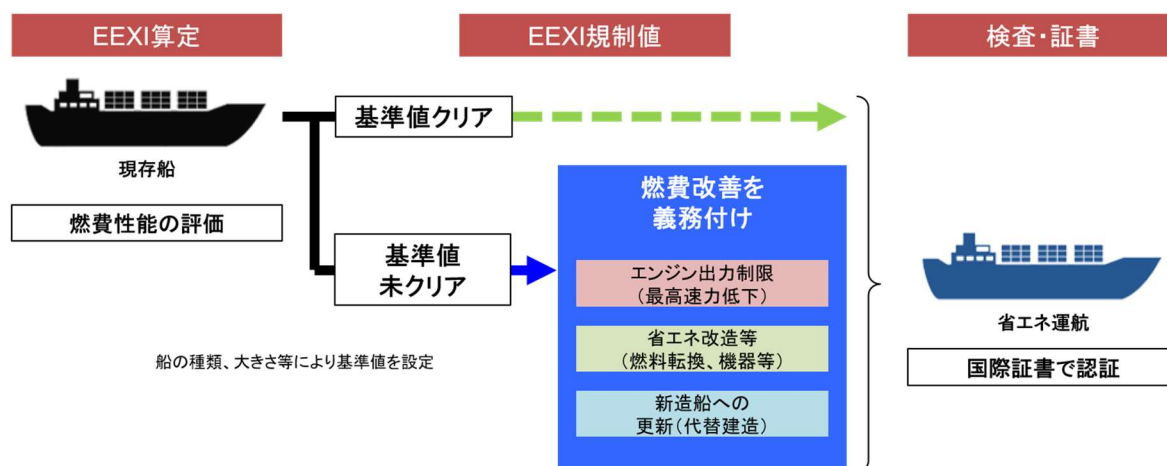


図 3.2.2-1 EEXI 規制の枠組みの概要

3.2.3 EEXI 規制の導入による運航効率改善効果の試算

EEXI 規制を導入した場合、2030 年時点で期待される運航効率の改善効果を試算した結果、EEXI 規制として、既存船に対し、2022 年契約船に適用される新造船の EEDI 規制と同じレベル（EEDI フェーズ 2 又は 3 に相当）の規制を適用した場合、国際海運全体で 40%の効率改善を達成することが確認できた。これは、EEDI 規制及び EEXI 規制の組み合わせによって、IMO の 2030 年目標が達成可能であることを意味する。

3.3 節 更なる運航改善に向けて

EEXI 規制は、義務的規制として全ての船舶に対して一定値以上の燃費性能の達成を求めることにより、海運全体の燃費性能を底上げする枠組みである。一方で、EEXI 規制のみでは、義務的要件以上の燃費性能の改善に対してのインセンティブは働かないことから、燃費改善にインセンティブを与えるような枠組みを規制のパッケージとすることで、海運全体の GHG 排出削減を更に加速することが可能となる。このため、我が国としても、EEXI 規制に加えてインセンティブ制度を国際ルールとして策定すべく取り組んでいく必要がある。

第4章 2050年目標達成のための削減シナリオ

4.1 節 2050年目標達成のための削減シナリオ作成の概略

本事業における GHG 削減シナリオ作成のプロセスは、下記のとおり。

- (1) 国際海運における 2050 年までの GHG 排出量(BAU 排出量³)の推計
- (2) 2050 年目標達成のために最低限必要な GHG 削減量及び炭素密度(単位輸送量当たりの CO₂ 排出量)の改善幅の算定
- (3) 各種代替燃料・技術の分析結果等に基づく 2050 年目標達成に向けた削減シナリオの作成

4.2 節 国際海運における海上荷動き量及び必要な GHG 削減幅の推計

4.2.1 国際海運における海上荷動き量の推計

国際海運における 2050 年までの CO₂ 排出量(BAU 排出量)を予測するため、海上荷動き量の推計を行った。推計は、①海上荷動き量を GDP、人口、エネルギー消費量等の社会経済指標で表現するモデルの作成、②2050 年までの品目別海上荷動き量(トン)の推計、③2050 年までの品目別海上荷動き量(トンマイル)の推計、④2050 年までの船種・船型別海上荷動き量(トンマイル)の推定という手順により実施した。その概要は次のとおり(詳細は付録 1 参照)。

4.2.1.1 海上荷動き量と社会経済指標の回帰式の作成

品目別海上荷動き量トンが、GDP、人口及びエネルギー消費量等に対して強い相関があるとの仮定の下、回帰モデルを作成した。モデルを決定するため、品目別海上荷動き量の実績値は、Clarkson の提供するデータを使用し、原油、石油製品、原料炭、燃料炭、鉄鉱石、ボーキサイト/アルミナ、穀物、マイナーバルク、コンテナ、その他乾貨物、LPG、LNG、ケミカル、自動車、冷凍貨物、クルーズ旅客を対象として検討を行った。GDP の実績値は OECD の公表データ、人口の実績値は国連の公表データ、エネルギー消費量の実績値は国際エネルギー機関(IEA)の公表データを使用した。

4.2.1.2 2050 年までの品目別海上荷動き量(トン)の推計

2050 年までの海上荷動き量(トン)は、回帰モデルに、将来の GDP、人口及びエネルギー消費量を入力することで推計した。GDP は、2050 年までの OECD の想定値を使用した。人口及びエネルギー消費量は、IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)の代表的濃度経路(Representative Concentration Pathways, RCP)及び社会経済シナリオ(Shared Socioeconomic Pathways, SSP)に基づいている。本プロジェクトでは、表 4.2.1-1 に示す RCP4.5、RCP2.6、RCP1.9 のシナリオに基づく 2030 年、2040 年、2050 年の人口とエネルギー消費量の想定値を使用した。表 4.2.1-2 は、2008 年の海上荷動き量合計(約 86 億トン)に対する 2050 年までの海上荷動き量推計値の比を示している。2050 年の海上荷動き量は、OECD、RCP4.5 では 2008 年比で 2 倍弱となり、温度上昇の抑制が強い OECD、RCP1.9 では 2008 年比で 1.5 倍程度との推計結果となった。

³ 国際海運からの GHG 排出削減対策無しの場合の排出量。2008 年以降、CO₂ 排出削減対策が行われず、海上輸送形態(船速、船型分布等)、設計技術、燃料等が維持され、平均燃費に変化がないと仮定した場合の、将来における CO₂ 排出量を BAU (Business As Usual) 排出量と定義。

表 4.2.1-1: 本調査対象の代表的濃度経路(RCP)

RCP 4.5 (中位安定化シナリオ)	今世紀末までに放射強制力 4.5W/m ² に安定化。 将来における温度上昇を約 2.5℃以下に抑える可能性が高い。
RCP 2.6 (低位安定化シナリオ)	放射強制力がピークアウトし、今世紀末頃には 2.6W/ m ² に低下。 将来における温度上昇を約 1.6℃以下に抑える可能性が高い。
RCP 1.9	今世紀末までに放射強制力 1.9W/ m ² に安定化。 ピーク時の温度上昇を 1.5℃以下に抑える可能性が高い。 (IPCC の 1.5℃特別報告書(2018)で使用)

表 4.2.1-2: 2050 年までの海上荷動き量(トン)の推計結果(対 2008 年比、旅客数を除く)

シナリオ	2020 年	2030 年	2040 年	2050 年
OECD, RCP4.5	1.44	1.65	1.82	1.91
OECD, RCP2.6	1.42	1.56	1.57	1.66
OECD, RCP1.9	1.39	1.36	1.40	1.47

4.2.1.3 2050 年までの品目別海上荷動き量トンマイルの推計

品目別海上荷動き量(トン)の推計値に対して、平均輸送距離(マイル)を掛け合わせることで、海上荷動き量(トンマイル)の推計を行った。平均輸送距離(マイル)は、Clarkson の公表データを用いた。

4.2.1.4 2050 年までの船種・船型別海上荷動き量(トンマイル)の推計

品目別の海上荷動き量(トンマイル)と、それを輸送する船種・船型別船舶の対応関係を設定し、船種船型別の海上荷動き量(トンマイル)の推計を行った。この推計は、3rd IMO GHG Study⁴における船種船型区分及び 2008 年における船舶の活動状況に基づいて行った。図 4.2.1-1 は、OECD, RCP4.5 シナリオにおける船種別トンマイル推計値である。全船種の合計としては、2008 年の海上荷動き量合計(約 41 兆トンマイル)に比べ、2050 年は約 2 倍に増加するという推計結果となった。表 4.2.1-3 は、主要船種である Oil tanker、Bulkер、Container の船型別荷動き量(トンマイル)の推計値を示している。

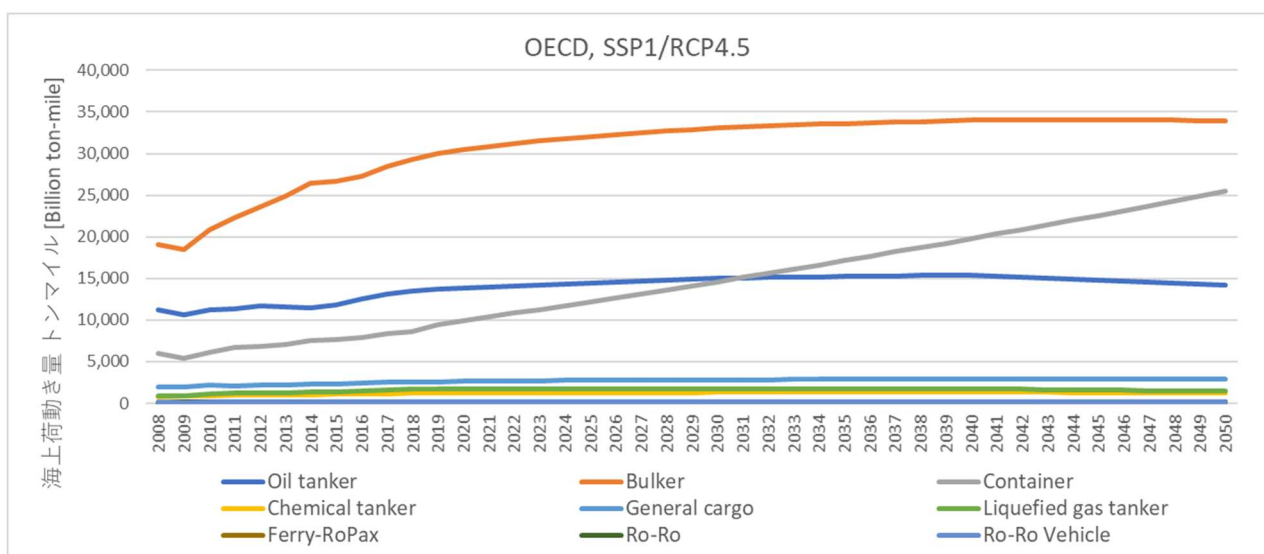


図 4.2.1-1: 2050 年までの船種別トンマイル推計 (OECD, RCP4.5 シナリオ)

⁴ IMO, 3rd IMO GHG Study, 2014

表 4.2.1-3: 主要船種の船型別トンマイルの推計結果 シナリオ OECD, RCP4.5

船種	船型	2008 年	2020 年	2030 年	2040 年	2050 年
Oil tanker	~4,999 dwt	127	161	176	181	166
	5k~9,999 dwt	72	91	99	102	93
	10k~19,999 dwt	76	96	105	108	99
	20k~59,999 dwt	1,082	1,368	1,497	1,542	1,409
	60k~79,999 dwt	940	1,188	1,300	1,339	1,224
	80k~119,999 dwt	3,219	4,070	4,453	4,588	4,191
	120k~199,999 dwt	1,391	1,664	1,805	1,845	1,727
	200k+ dwt	4,312	5,157	5,596	5,720	5,353
Bulk carrier	~9,999 dwt	131	198	218	225	226
	10k~34,999 dwt	3,516	5,309	5,825	6,008	6,038
	35k~59,999 dwt	6,402	9,667	10,607	10,940	10,994
	60k~99,999 dwt	4,150	6,935	7,543	7,863	7,805
	100k~199,999 dwt	3,893	6,681	7,078	7,148	7,108
	200k+ dwt	985	1,690	1,791	1,808	1,798
Container	~999 teu	228	379	556	754	973
	1k~1,999 teu	659	1,095	1,609	2,180	2,813
	2k~2,999 teu	724	1,203	1,767	2,395	3,090
	3k~4,999 teu	1,781	2,958	4,346	5,890	7,599
	5k~7,999 teu	1,644	2,731	4,012	5,438	7,016
	8k~11,999 teu	892	1,481	2,176	2,949	3,805
	12k~14,499 teu	54	90	133	180	232

単位: Billion ton-mile

4.2.2 従来の技術及び燃料が使用され続けた場合における将来の GHG 排出量(BAU 排出量)の推計

4.2.1 で算出された 2020 年から 2050 年までの船種・船型別の海上荷動き量(トンマイル)に、2008 年における船種別のトンマイルあたり CO₂ 排出量を乗じることにより、BAU 排出量を算出した。既述のとおり、本報告において、BAU 排出量とは「2008 年以降、CO₂ 排出削減対策が行われず、海上輸送形態(船速、船型分布等)、設計技術、燃料等が維持され、平均燃費に変化がないと仮定した場合の、将来における CO₂ 排出量」である。GHG 削減戦略における 2030 年及び 2050 年目標が 2008 年を基準年としていることを踏まえ、このような定義とした。2008 年における船種別のトンマイルあたり CO₂ 排出量は、IMO の 3rd GHG Study 結果および Clarkson の海上動き量実績値に基づき算出し、表 4.2.2-1 のとおりとなっている。

表 4.2.2-1: 船種毎の 2008 年におけるトンマイル当たりの CO₂ 排出量

	荷動き量 B-Tonmile/yr	CO ₂ 排出量 (Mton/yr)	Carbon Intensity (g- CO ₂ /Tonmile)
Bulk carrier	19077	194.1	10.17
Chemical tanker	821	61.5	74.88
Container	5983	213.6	35.69
General cargo	1996	101.3	50.76
Liquefied gas tanker	901	35.7	39.60
Oil tanker	11219	159.8	14.25

Other liquids tankers	165	0.9	5.25
Ferry - pax - only	80	1.3	16.13
Cruise	509	29.4	57.81
Ferry - ro-pax	106	44.5	421.69
Refrigerated bulk	1243	20.9	16.81
Ro-ro	144	29.9	207.22
Ro-Ro Vehicle	160	28.1	175.73
Total	42404	920.9	21.72

4.2.1 で使用した 3 つのシナリオのそれぞれにおける BAU 排出量の計算結果は図 4.2.2-1 のとおり。結果は、2008 年を 1 とした index として表示している。2050 年時点の数値としては、最も海上貨物輸送量が増加するシナリオである OECD-RCP4.5 のパターンでは 2008 年比の 2.29 倍、OECD-RCP2.6 のパターンでは 2008 年比の 2.13 倍、OECD-RCP1.9 のパターンでは 2008 年比の 1.97 倍となった。これらはいずれも、参考用の比較対象として記載している 3rd IMO GHG Study における推計値よりも低い値となっている。これは、両方で将来の海上輸送量の伸びの推計値が異なっている(3rd IMO GHG Study の方が、海上輸送量の伸びをより高く見積もっている)ためである。

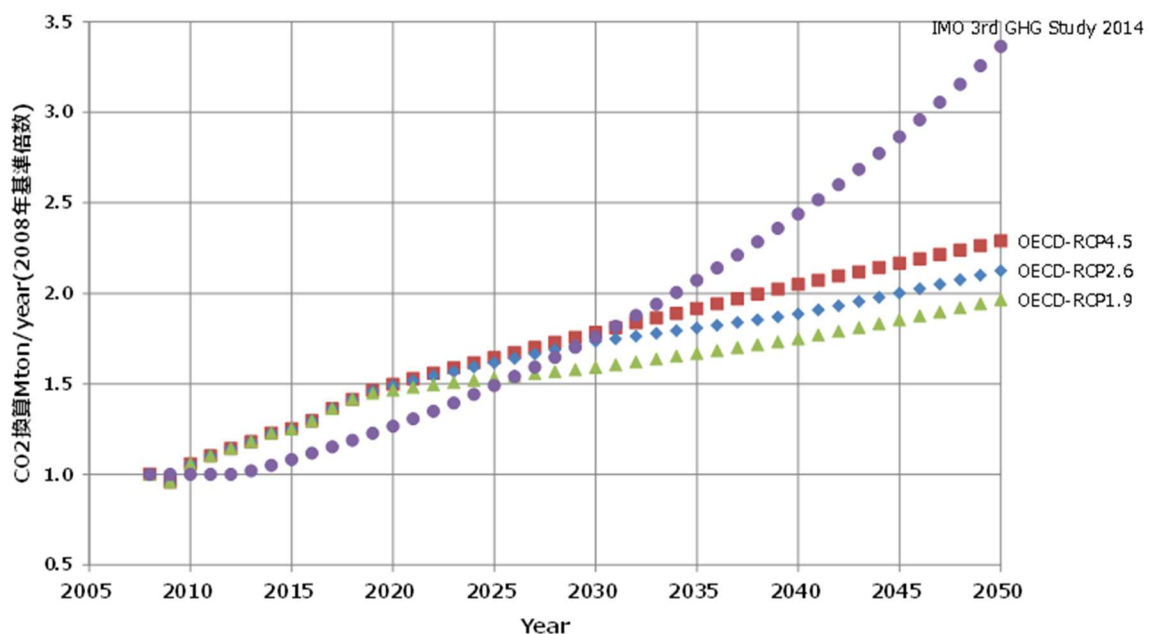


図 4.2.2-1: 経済成長予測及び気候変動予測シナリオ別の国際海運からの GHG 排出量
(2008 年排出量を 1 とする index 表示)

4.2.3 2050 年目標を達成するために必要となる GHG 削減量及び船舶の炭素密度の改善率

4.2.2 で算出された 3 つの将来ケースのうち、最も排出量の大きい OECD-RCP4.5 ケースにおける BAU 排出量から、2050 年目標を達成するために必要となる GHG 削減量及び船舶の炭素密度の改善率を計算した。必要となる GHG 削減努力を過小評価することとならないよう、最も排出量の大きいケースを採用した。

CO₂を対象とする計算結果は表 4.2.3-1 のとおり。CO₂削減必要量は、BAU 排出量と 2008 年実績の 50%（すわなち 460.5 百万トン／年）との差分である。日本の陸上セクターにおける 2018 年の総 CO₂ 排出量が 1,139 百万トンと報告⁵されており、2050 年に外航海運に求められる CO₂ 削減量はこれを上回ることとなる。

表 4.2.3-1: 2050 年目標を達成するために必要となる GHG 削減量及び船舶の炭素密度の改善率⁶

	BAU 排出量 (Mton- CO ₂ /year)	削減必要量 (△Mton- CO ₂ /year)	2050 年目標達成に必要な 船舶の炭素密度改善率(対 2008 年比)
2050 年	2108.3	1647.8	78.2%

4.3 節 2050 年目標を達成するために必要な国際海運の燃料構成シナリオ

4.3.1 今後活用の拡大する可能性のある燃料等の実現可能性等の検討

今後国際海運において活用の拡大する可能性のある代替燃料・GHG 削減技術について、開発状況を調査し、実現可能性を検討した。

4.3.1.1 代替燃料・CO₂ 削減技術の実現可能性

2050 年の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、バイオ燃料等が挙げられる。それぞれの代替燃料の主な物性と利点・課題をまとめたものは表 4.3.1-1 のとおり。また、代替燃料以外の主な GHG 削減技術としては、風力推進、バッテリー推進及び船上 CO₂ 回収等が挙げられる。これらの特徴をまとめたものは表 4.3.1-2 のとおり(より具体的な検討結果については付録 2 参照)。

⁵ 環境省, 2018 年度（平成 30 年度）の温室効果ガス排出量（速報値）について,
<http://www.env.go.jp/press/107410.html>.

⁶ 「総 CO₂ 排出量／総海上輸送量」として計算を行ったもの。

表 4.3.1-1 代替燃料の主な物性と利点・課題

	熱量あたり CO ₂ 排出 量※1	熱量あたり 燃料体積 ※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・燃料電池船は実績 あり ・陸上ボイラー・ガスタービンの実績あり	・燃料体積(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 ・燃焼制御等の技術課題
アンモニア	0 N ₂ O 未考 慮	2.72	・船上 CO ₂ 排出ゼロ ・ガスタービン燃焼の実績あり	・燃料体積(C 重油の約 2.7 倍) ・NO _x 発生 ・N ₂ O 発生(温室効果は CO ₂ の約 300 倍 と言われている) ・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	・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 削減効果限定的 ・メタンスリッ プ ・化石燃料使用に対する国際的な逆風の 可能性
メタン (CH ₄)	0.71 [0※2] メタンスリッ プ未考慮	1.80	・バイオは IPCC ガイドラインにおいてカーボ ンニュートラル扱い ・実用化済の LNG と技術的に同等に使用可 能 ・LNG のインフラ転用可能	・現在 IPCC ガイドラインにおいて、カーボ ンリサイクルメタンをカーボンニュートラルと する明示的な記載は無い
バイオディー ゼル	[0]	(~1.2)	・バイオは IPCC ガイドラインにおいてカーボ ンニュートラル扱い ・陸上において混焼は商業レベル	・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 ₃ OH)	0.90 [0※2]	2.39	・バイオは IPCC ガイドラインにおいてカーボ ンニュートラル扱い ・メタノール燃料船は建造実績あり ・取扱い容易	・現在 IPCC ガイドラインにおいて、カーボ ンリサイクルメタンをカーボンニュートラルと する明示的な記載は無い ・燃料体積(C 重油の約 2.4 倍) ・着火性、大出力化の技術課題
エタノール (C ₂ H ₅ OH)	0.93 [0※2]	1.79	・バイオは IPCC ガイドラインにおいてカーボ ンニュートラル扱い ・バイオエタノールの生産は商業レベル ・取扱い容易	・現在 IPCC ガイドラインにおいて、カーボ ンリサイクルメタンをカーボンニュートラルと する明示的な記載は無い ・着火性、大出力化の技術課題

※1 熱量あたりの CO₂ 排出量及び燃料体積(液化時)は、低位発熱量 40.4 MJ/kg、CO₂ 排出係数 Cf=3.114 t-CO₂/t-Fuel、比重 0.94 の船用重油(C 重油)を基準としている。熱量あたりの CO₂ 排出量は IPCC ガイドライン及び IMO の EEDI 計算ガイドライン⁷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 0 となる。

※3 各燃料を使用する際、設計上必要となるスペースについては燃料体積以外の要素も考慮する必要がある。

⁷ 2018 GUIDELINES ON THE METHOD OF CALCULATION OF THE ATTAINED ENERGY (MEPC.308(73))

表 4.3.1-2 各種 CO₂ 削減技術の特徴

	効率改善 ポテンシャル	利点	課題
風力推進	活用程度による	・ 船上排ガス全てゼロ	・ 規模的に主たる推進エネルギーとならない
太陽電池	活用程度による	・ 船上排ガス全てゼロ	・ 規模的に主たる推進エネルギーとならない
空気潤滑	2～6%程度改善	・ 既存技術で実施可能	・ 効果は船体形状や運航状況により異なる。
低摩擦塗料	2～5%程度改善	・ 既存技術で実施可能	・ 効果は船体形状や運航状況により異なる。
省エネダクト	2～5%程度改善	・ 既存技術で実施可能	・ 効果は船体・船尾形状や運航状況により異なる。
船首形状変更	2～5%程度改善	・ 既存技術で実施可能	・ 効果は船体・船首形状や運航状況により異なる。
廃熱回収発電装置	1～5%程度改善	・ 既存技術で実施可能	
バッテリー推進	活用程度・活用方法による	・ 船上排ガス全てゼロ ・ 一部小型船の主推進機関として、一部大型船の推進補助機関として実績あり	・ 重量及び体積エネルギー密度が低い ・ 高圧充電インフラ未整備 ・ (通常の燃料補給よりも) 長い補給所要時間
船上 CO ₂ 回収	排ガス中の CO ₂ を 85%以上回収	・ (理論上) 燃料油を問わない ・ (理論上) 削減率大	・ 船上搭載実績なし ・ 燃料種によっては排ガスの前処理が必要(脱硝、脱硫等) ・ 回収後の CO ₂ 体積・重量大

4.3.1.2 有望な技術・代替燃料オプションの洗い出し

4.2 節の検討により、GHG 削減戦略の 2050 年目標達成のためには、2050 年時点で、国際海運の平均効率(トンマイル当たり排出量)を、対 2008 年比で約 80%以上改善する必要があることが確認された。これは、外航船の寿命を 20 年とする単純なケースを想定した場合、2030 年頃から、80%以上の効率改善を実現する船舶の投入を開始する必要があることを意味する。外航船の寿命がより長いとすれば、2030 年時点では、90%以上の効率改善を実現する船舶の投入開始を目指すべきであり、また、我が国が世界をリードしてゼロエミッション船の導入を進める観点から、投入開始時期を 2030 年より早めることも目指すべきである。

加えて、2050 年目標達成に向けて採用する対策は、今世紀中の GHG 排出ゼロの達成へと繋がるものである必要がある。

以上を踏まえて、下記条件の下で、現在実現可能な燃料・技術・運航改善に加えて、今後考慮すべき代替燃料及び技術オプションとともに、長期目標達成に向けた GHG 削減シナリオを検討した。

<オプション絞り込みの条件>

- ・ 2028 年までに、対 2008 年比で 90%程度以上の効率改善の達成が期待できるものであること。
- ・ 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であること。

表 4.3.1-3 は、本プロジェクトにおける検討をもとに、オプション洗い出しの結果をまとめたものである。同表において、緑色で示したオプションは 2028 年までに実用化可能と考えられるもの、黄色で示したオプションは技術開発課題が比較的小さく 2028 年までに実用化の可能性があると考えられるものを示している。

上述の条件を満たすオプションとしては、水素燃料船(液化水素、直接燃焼)、アンモニア燃料船(直接燃焼)、カーボンリサイクルメタン燃料船(合成燃料)及び船上 CO₂ 回収設備を持つ比較的大型の船舶が挙げられる。ここで、カーボンリサイクルメタンとは、回収 CO₂ 及び水素から製造されるメタンを指す。

液体水素及びアンモニア燃料は、専焼の場合はいずれも GHG 排出ゼロであり、既述のとおりそれぞれに技術課題はあるが、今後、内燃機関等の開発の加速が見込まれることから、これらの燃料を使用する船舶が 2028 年までに投入が可能になると考えられる。表 4.3.1-1 に示すとおり、水素とアンモニアにはそれぞれ異なる利点と課題があり、現時点でいずれが優位であるか断定することは困難である。

表 4.3.1-3 長期目標の達成に向けた代替燃料及び技術オプションの検討

	内航船 想定航続距離 200 mile (例: 東京-苫小牧)	外航 短距離 想定航続距離 1,000 mile (例: 日本-中国)	外航 中距離 想定航続距離 3,000 mile (例: 日本-シンガポール)	外航 長距離 想定航続距離 5,000mile (例: 日本-LA/LB)
バッテリー推進船	ポッド推進等を想定。 200 mile 程度は可能。	電池のエネルギー密度が低いため困難。		
水素燃料船 (液化水素、直接燃焼)	燃料供給装置の技術開発が必要。 国内で内燃機関の技術開発機運あり。 短い航続距離であれば 貯蔵時のスペース効率が課題。 可能。			
水素燃料船 (液化、燃料電池)	気化器の技術開発が必要。 燃料電池単独では、負荷追従性および始動性に劣る。 小容量バッテリーとの組合せの可能性。 大型船の場合、大出力モーターの開発が必要。			
水素燃料船 (水素キャリア、直接燃焼及び燃料電池)	水素燃料船の「液化、直接燃焼」及び「液化、燃料電池」に準じる。 分離機の技術開発は難易度高い。 分離機のスペースも必要(敢えてキャリアを使用する必要性は低い)。 大型船の燃料電池の場合、大出力モーターの開発が必要。			
アンモニア燃料船 (直接燃焼)	燃焼性の課題。 N ₂ O の実態把握(及び削減対策)が必要。			海外ライセンサーにおいて 2 サイクル機関の技術 開発機運あり。
アンモニア燃料船 (燃料電池)	直接燃焼に比べ開発が未成熟。			
カーボンリサイクルメタン燃料船	LNG 燃料船の技術を転用可能。 当該燃料がカーボンニュートラルであるとの評価が与えられることが前提。 メタンスリップ対策が必要。			
船上 CO ₂ 回収	CO ₂ の貯蔵スペース効率(小型船は特に困難)。 回収率向上。 陸上 CO ₂ 受入れ施設整備が必要。	CO ₂ の貯蔵スペース効率。 回収率向上。 陸上 CO ₂ 受入れ施設整備が必要。		

※1 本表には、燃料の供給可能性・供給規模に関する考察は含まれない。

※2 水素・アンモニアを燃料に使用する場合、安全上の措置や船員教育が必要となる。

※3 キャリアとは、水素を輸送・貯蔵する担体。ここでは、液体水素とアンモニアを除いた、水素吸蔵合金や有機ハイドライド等を想定。

カーボンリサイクルメタン燃料船について、LNG の主成分(約 9 割)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 の技術を使用でき、LNG 燃料船や燃料共有のインフラもそのまま転用できる。ただし、回収された CO₂ を原料として製造されるカーボンリサイクルメタンがカーボンニュートラルであるとの評価がなされることが前提となるほか、メタンスリップ対策が必要である点に留意を要する。

船上 CO₂ 回収は、CO₂ 貯蔵スペースが必要となるため、小型船への適用は困難であるが、陸上において実用化済の技術であり、外航船への適用は可能と考えられる。ただし、上述の 3 種類の代替燃料と異なり、GHG を 100%削減できるものではないため、90%以上の効率改善達成のためには CO₂ 回収率の向上が必要であること、また、CO₂ の陸上受入れ施設の整備が必要である点に留意を要する。

燃料電池については、大型船への対応への課題が大きいことから、2028 年までに主推進動力源として実用化される期待度は相対的に低いと評価した。また、液体水素やアンモニア以外の水素キャリアについては、体積効率や分離機の技術開発課題を踏まえると、現時点ではあえてこれらを使用する必要性は低いと考えられる。

代替燃料の利用技術は現在活発な研究開発が進められている段階であり、現時点では、ここに挙げた代

替燃料・技術オプション間の優位性や導入割合を正確に推定することは難しい。今後、各機器の開発動向やコストを含めたエネルギー供給動向を見つつ、より詳細な検討が必要となる。

4.3.2 IMO・GHG 削減戦略の数値目標に合致する燃料・技術の活用シナリオの検討

4.3.1.2 において、2028 年までに、対 2008 年比で 90%程度以上の効率改善を達成する実船の投入が期待できる代替燃料・技術のオプションとして、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 CO₂回収が洗い出された。これらのオプションを活用しながら、GHG 削減戦略の 2050 年目標を達成するシナリオを検討した。

まず、上記の代替燃料・技術オプションの投入が期待できるのは 2028 年以降であることから、当面の間、国際海運の GHG 削減を進めるために選択し得る現実的な選択肢は、既に実用化されている LNG 燃料である。したがって、あらゆる削減シナリオにおいて、LNG 燃料が普及拡大する傾向は共通するものと考えられる。この傾向を土台としつつ、将来的な国際海運における燃料転換の主な可能性として 2 通りが考えられる。一つ目は、普及の進んだ LNG 燃料のインフラを転用する形で、バイオメタン及びカーボンリサイクルメタン燃料の使用が拡大する可能性、二つ目は、LNG 燃料と別途、燃焼時に CO₂を一切発生しない水素燃料若しくはアンモニア燃料又はその両方の使用が拡大する可能性である。そこで、以下の 2 つのパターンに分けて、削減シナリオを検討した。

- LNG→カーボンリサイクルメタン移行シナリオ
- 水素・アンモニア燃料拡大シナリオ

4.3.1 の検討結果に基づき、上記 2 通りの削減シナリオにおいては、船舶の使用燃料等の変化に関する想定を図 4.3.2-1 のとおりとしている。特に、4.3.1.2 において検討のとおり、水素燃料、アンモニア燃料、船上 CO₂回収技術は、2028 年から導入が開始されることを想定した。また、石油系燃料油（重油等）を使用する船舶の建造は、LNG 燃料船の普及に伴って徐々に減少し、2035 年以降はゼロとなることを想定した。

図 4.3.2-1 に示す条件の下で、2050 年目標の達成を可能とするような、2050 年時点での各種代替燃料・技術の普及状況を検討した。その結果は図 4.3.2-2 のとおり。

まず、上記 2 通りのシナリオのいずれにおいても、省エネ・運航効率化は、2030 年に短期目標である効率改善 40%を達成し、その後、2050 年までに更に 5%の改善が進むこと、また、国際海運全体の約 2%が風力推進・バッテリー推進を採用することを想定している。

LNG→カーボンリサイクルメタン移行シナリオにおいては、LNG 燃料船が普及し、同燃料の供給インフラも拡大する一方、水素・アンモニア燃料のインフラ整備は大幅には進まないことを想定している。この場合、2050 年に国際海運で消費されるエネルギーの約 75%が LNG 燃料又はカーボンリサイクル燃料若しくはバイオメタン燃料、約 10%が水素又はアンモニア燃料により賄われ、LNG 燃料船の約 20%が船上 CO₂回収を導入することで、2050 年目標の達成が可能となる。

水素・アンモニア燃料拡大シナリオにおいては、水素燃料若しくはアンモニア燃料又はその両方について、船舶の技術開発及び燃料供給が拡大することを想定している。ただし、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、LNG 燃料の普及もある程度進むと想定することがより現実的と考えられる。2050 年に国際海運で消費されるエネルギーの約 45%が水素又はアンモニア燃料、約 35%が LNG 燃料、約 7%がカーボンリサイクルメタン又はバイオメタン燃料で賄われ、国際海運全体の約 5%が船上 CO₂回収を導入することで、2050 年目標の達成が可能となる。

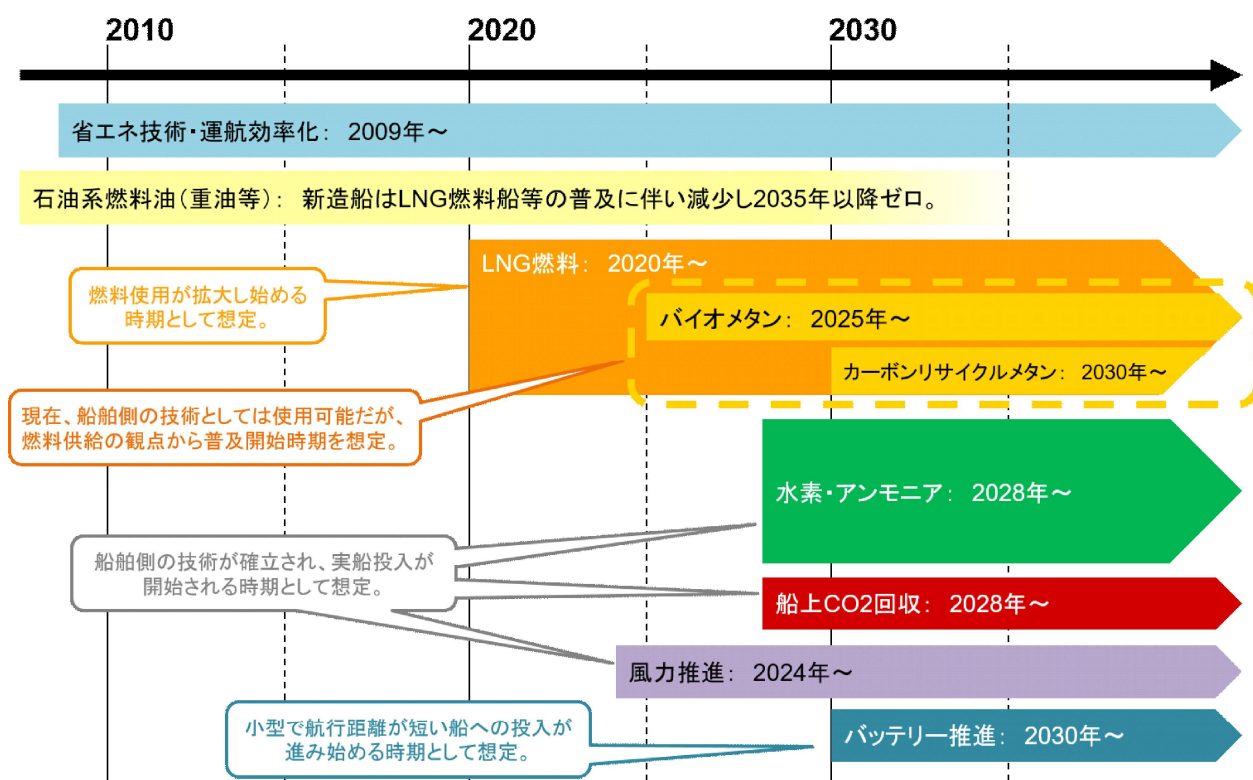


図 4.3.2-1 削減シナリオにおける船舶の使用燃料等の変化に関する想定

LNG→カーボンリサイクルメタン移行シナリオ		水素・アンモニア燃料拡大シナリオ	
省エネ技術・運航効率化 2030年に国際海運全体の平均燃費40%改善を想定。 2050年に国際海運全体の平均燃費45%改善を想定（2030年から+5%の改善）。			
石油系燃料油の使用 2050年までに陸上において燃料としての原油需給が減少し、これに伴って船用重油の供給が減少すると想定。 - 石油系燃料油を使用する船舶の建造が減少し、2035年以降は全ての新造船がLNGその他の代替燃料を使用すると想定。			
LNG燃料 2050年時点で、国際海運の消費エネルギーの約35%がLNGで賄われると想定。		LNG燃料 2050年時点で、国際海運で消費されるエネルギー約35%がLNGで賄われると想定。	
カーボンリサイクルメタン・バイオメタン 2050年時点で、国際海運の消費エネルギーの約40%がカーボンリサイクル／バイオメタンで賄われると想定。		カーボンリサイクルメタン・バイオメタン 2050年時点で、国際海運の消費エネルギーの約7%がカーボンリサイクル／バイオメタンで賄われると想定。	
水素・アンモニア 2050年時点で、国際海運の消費エネルギーの約10%が水素又はアンモニアで賄われると想定。		水素・アンモニア 2050年時点で、国際海運の消費エネルギーの約45%が水素又はアンモニアで賄われると想定。	
船上CO₂回収 2050年時点でLNG燃料を使用する船舶の約20%が導入することを想定。		船上CO₂回収 2050年時点で、国際海運全体の約5%が導入すると想定。	
風力推進・バッテリー 風力推進、バッテリーともに、2050年時点で、国際海運全体の約2%が導入すると想定。			

図 4.3.2-2 2つの削減シナリオにおける2050年の想定

以下では、2通りの削減シナリオにおける、GHG削減の推移及び国際海運のエネルギー消費に占める各種代替燃料等の割合を示す。

4.3.2.1 LNG→カーボンリサイクルメタン移行シナリオ

LNG燃料及びカーボンリサイクルメタン燃料を中心的に活用するシナリオにおける、GHG排出量・削減量の推移及びエネルギー消費に占める各燃料等の割合はそれぞれ図4.3.2-3及び図4.3.2-4のとおり。

図4.3.2-3において、グラフ上端の点線はBAU排出量を、下端の実線は2050年以降の目標を達成する排出量推移を示す。両者の差分が各種の代替燃料・技術によるGHG削減を意味する。本削減シナリオにおいては、省エネ技術及び運航効率化による改善を除くと、カーボンリサイクルメタン燃料がGHG削減に最も大きく貢献する。図4.3.2-3において、カーボンリサイクルメタン燃料とバイオ燃料は、いずれもカーボンフリー燃料であることから、同一カテゴリとして扱っている。バイオ燃料は他セクターにおける消費動向の影響を受ける等の不確実性のため、現時点で両者の内数を定量的に推定することは困難である。

LNG燃料は、GHG削減削減量(図4.3.2-3)における割合は大きくないが、国際海運のエネルギー消費(図4.3.2-4)に占める割合は大きい。これは、表4.3.1-1に示したとおり、LNGの熱量あたりCO₂排出量が対C重油比で0.74であることに起因する。このように、LNG燃料自体のGHG削減効果は限定的であるが、当該燃料の普及が、2025年以降のカーボンリサイクルメタン及びバイオメタン導入の土台となる点が重要な意味を持つ。

本シナリオは、カーボンリサイクルメタン燃料の供給が十分になされること、また、当該燃料がIMO等においてカーボンフリー燃料として認められことを前提としている点に留意する必要がある。

4.3.2.2 水素・アンモニア燃料拡大シナリオ

水素及びアンモニア燃料を中心的に活用するシナリオにおける、GHG排出量・削減量の推移及びエネルギー消費に占める各燃料等の割合はそれぞれ図4.3.2-5及び図4.3.2-6のとおり。本削減シナリオにおいては、省エネ技術及び運航効率化による改善を除くと、水素又はアンモニア燃料がGHG削減に最も大きく貢献する。4.3.1.2で述べたとおり、水素とアンモニアにはそれぞれ異なる利点と課題があり、現時点でいずれが優位であるか断定することは困難である。また、LNG・カーボンリサイクルメタン燃料を中心的に活用するシナリオだけでなく、本シナリオにおいても、LNG燃料の使用は拡大すると想定している。

本シナリオは、水素又はアンモニア燃料が十分に供給されることを前提としている点に留意が必要である。

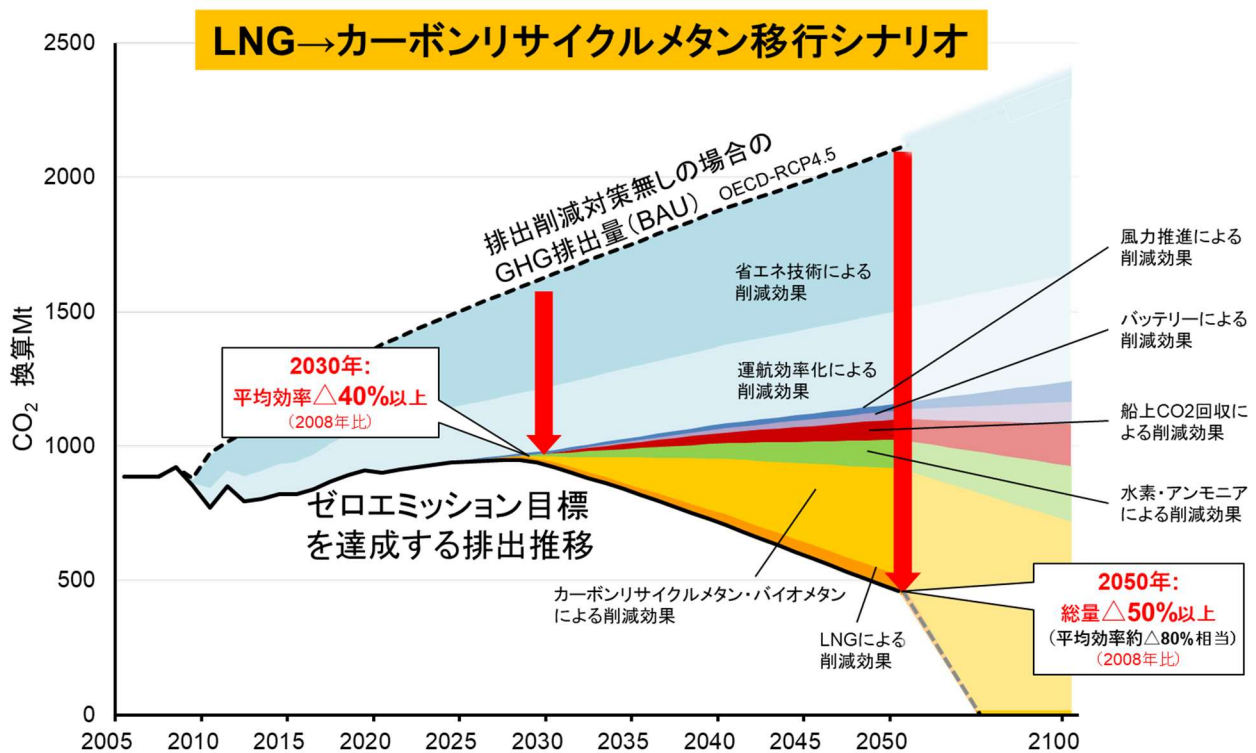


図 4.3.2-3 GHG 排出量・削減量の推移(LNG→カーボンリサイクルメタン移行シナリオ)

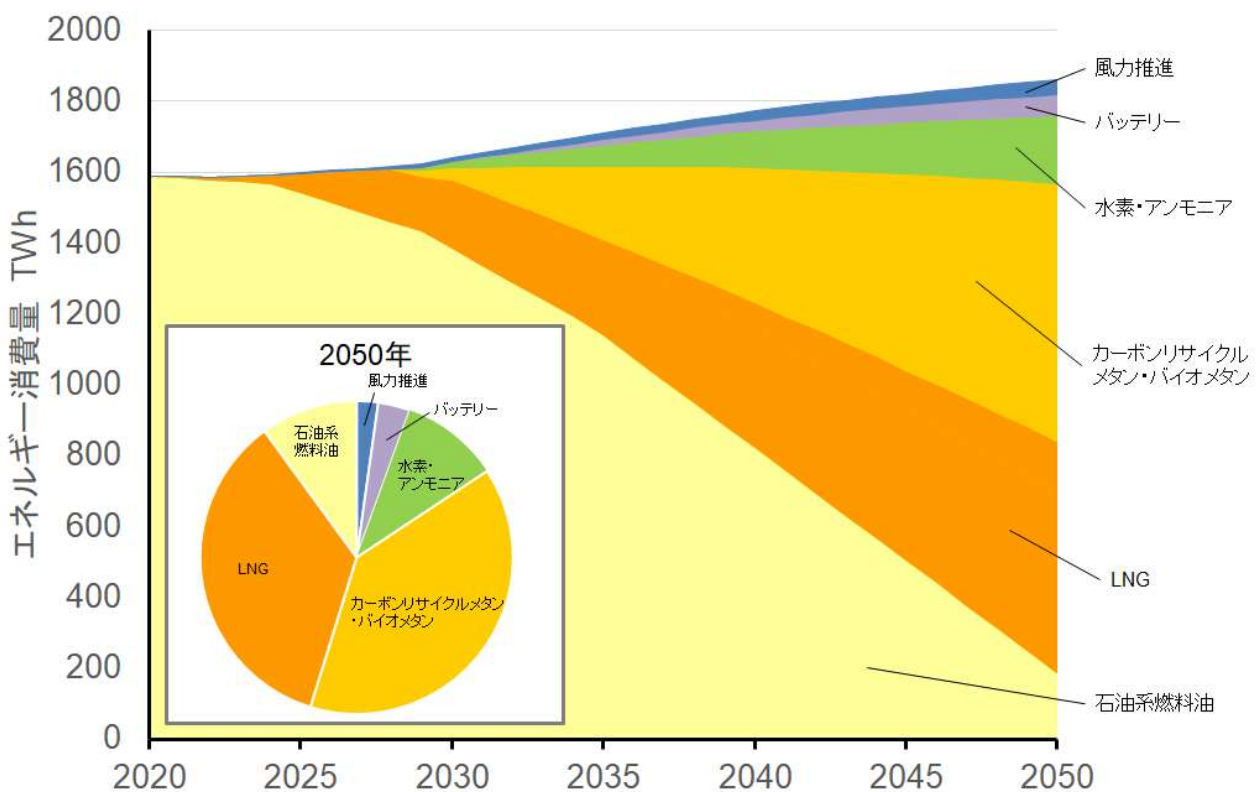


図 4.3.2-4 エネルギー消費に占める各燃料等の割合(LNG→カーボンリサイクルメタン移行シナリオ)

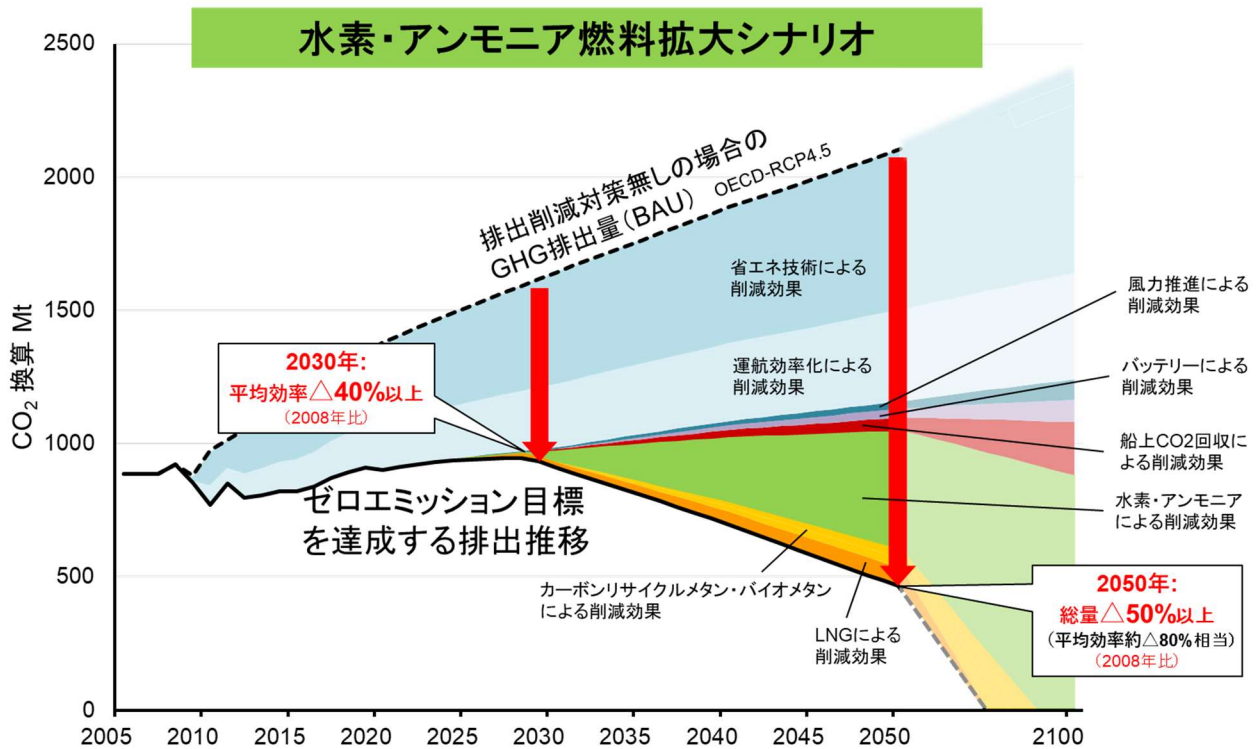


図 4.3.2-5 GHG 排出量・削減量の推移(水素・アンモニア燃料拡大シナリオ)

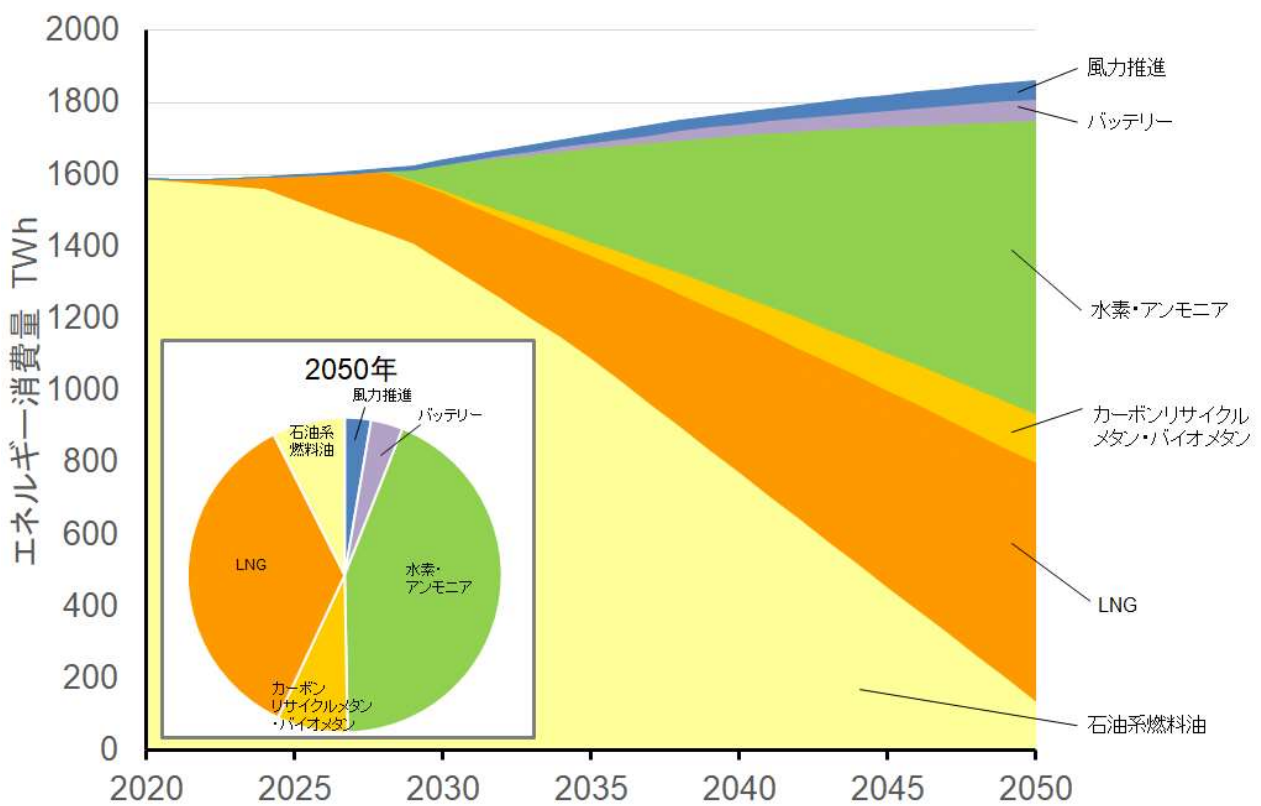


図 4.3.2-6 エネルギー消費に占める各燃料等の割合(水素・アンモニア燃料拡大シナリオ)

4.4 節 ゼロエミッション／超低炭素船のコンセプト設計

2028～2030 年までに投入が開始されることを想定したゼロエミッション／超低炭素船として、①水素燃料船、②アンモニア燃料船、③船上 CO₂ 回収システム搭載船及び④超高効率 LNG＋風力推進船のコンセプト設計を行った。①～④のそれぞれについて、20,000TEU 級コンテナ船又は 80,000DWT 級バルクキャリアを想定したコンセプト設計を通じて 2028～2030 年の実船投入の可能性を検討するとともに、技術的な課題等の洗い出しを行った。その概要は次のとおり（詳細は付録 3 参照）。

4.4.1 水素燃料船

80,000DWT 級バルクキャリア及び 20,000TEU 級コンテナ船の 2 船型を対象として、液体水素燃料船のコンセプト設計を行った。

液化水素の補給地は世界 5 か所（欧州、中東、豪州、日本、南米）を仮定し、80,000DWT 級バルクキャリアの航続距離は 7,000NM、20,000TEU 級コンテナ船の航続距離は 11,500NM（片道分）と設定した。主機関としては、二元燃料式のレシプロエンジンを想定した。対象船の側面図及び平面図を図 4.4.1-1 及び図 4.4.1-3 に、主要目を表 4.4.1-1 及び表 4.4.1-2 に示す。

また、本コンセプトの実用化に向けて、エンジン及び燃料供給システム、タンクの大型化、防熱システム、水素漏洩対策、燃料補給に関する技術的課題を洗い出した（付録 3-1 参照）。

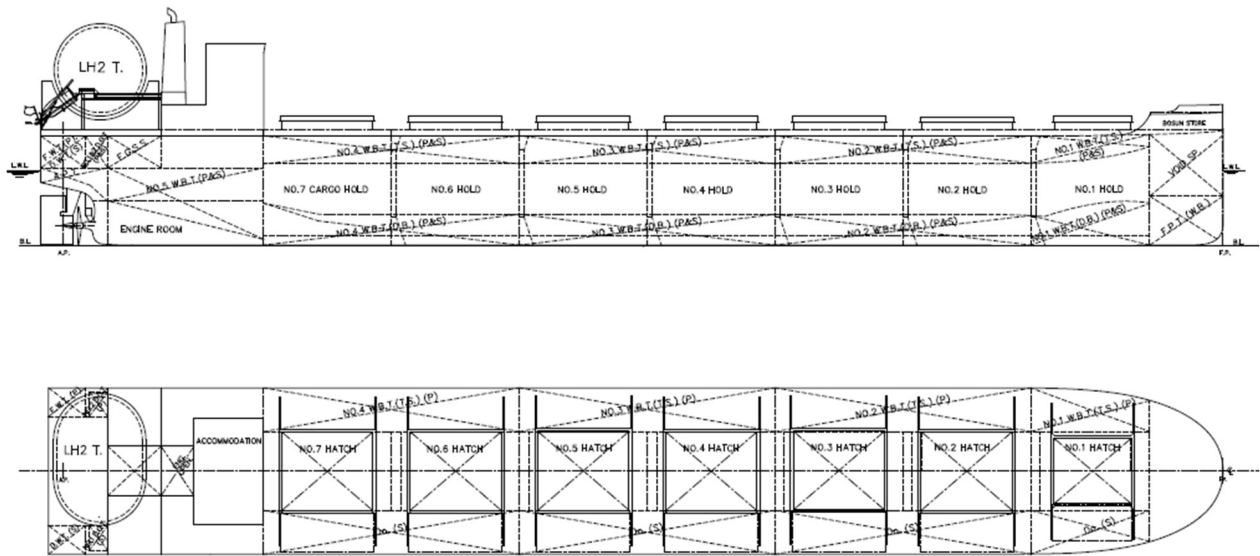


図 4.4.1-1：80,000DWT 級バルクキャリアの側面図及び平面図（水素燃料船）

表 4.4.1-1： 80,000DWT 級バルクキャリアの
主要目（水素燃料船）

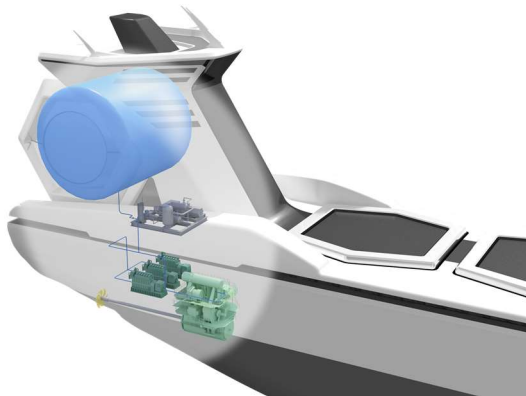


図 4.4.1-2： 80,000DWT 級バルクキャリアの水素
燃料関連機器配置イメージ

全長	228.9 m
船長	226.00 m
全幅	32.24 m
深さ	21.20 m
喫水	
計画喫水	12.20 m
夏季満載喫水	14.50 m
載貨重量	
計画喫水	63,500 ton
夏季満載喫水	80,000 ton
液化水素タンク	4,000 m ³
計画速力	14.0 knots
航続距離	7,000 NM
主機	1 台
最大出力	8,000kW x 84 rpm
常用出力	6,800kW x 80 rpm
発電機	3 台
	1,000 kW

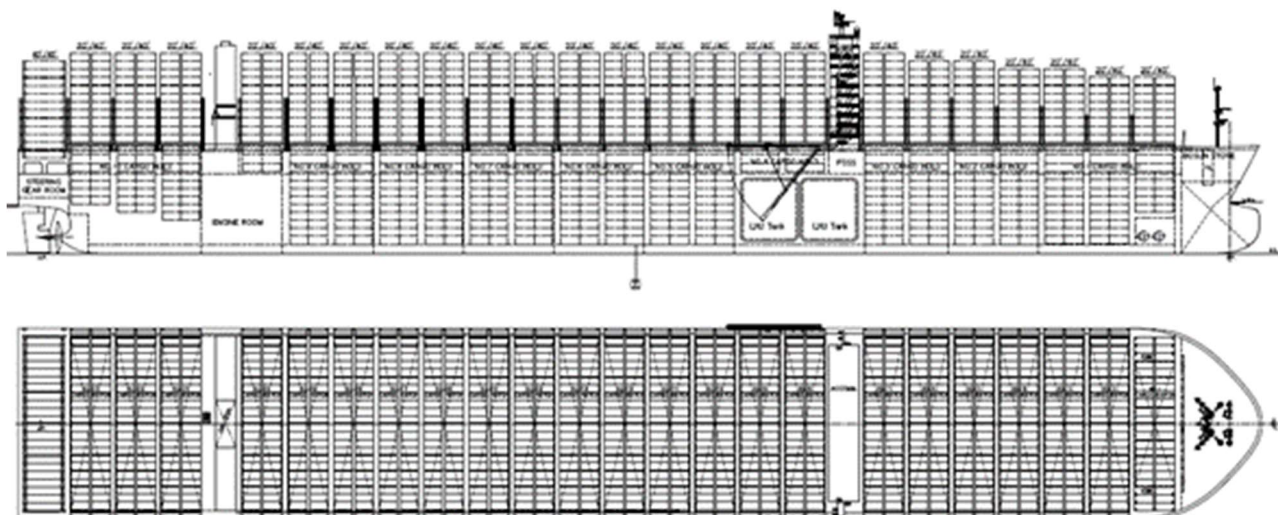


図 4.4.1-3 : 20,000TEU 級コンテナ船の側面図及び平面図(水素燃料船)

表 4.4.1-2: 20,000TEU 級コンテナ船の
主要目(水素燃料船)

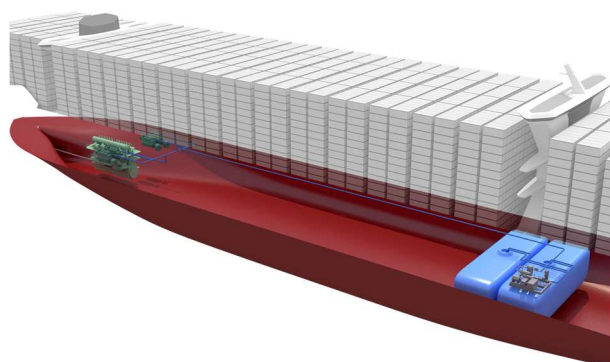


図 4.4.1-4: 20,000TEU 級コンテナ船の水素燃料
関連機器配置イメージ

全長	399.90 m
船長	383.00 m
全幅	61.50 m
深さ	33.00 m
喫水	
計画喫水	14.50 m
夏季満載喫水	16.50 m
液化水素タンク	30,000 m ³
コンテナ個数	21,000 TEU
冷凍コンテナプラグ	1,100 TEU
計画速力	22.5 knots
航続距離	11,500 NM
主機	1 台
最大出力	60,000 kW x 80 rpm
常用出力	54,000 kW x 77 rpm
発電機	3 台
	5,000 kW

4.4.2アンモニア燃料船

80,000DWT 級バルクキャリアを対象として、アンモニア燃料船のコンセプト設計を行った。

航路としては日本～豪州航路を想定した。主機関は、メタノールや LPG 等の液体燃料を噴射する機構を有する二元燃料レシプロエンジンを想定し、アンモニア燃料は難燃性であることから、着火を安定させるためのパイロット燃料噴射弁を有する機関とした。パイロット燃料を加味した上で、従来の同型船に比べ 91.9%の CO₂削減効果を見込む。対象船の側面図及び平面図を図 4.4.2-1 に、主要目を表 4.4.2-1 に示す。

また、本コンセプトの実用化に向けて、アンモニアの毒性等に関するリスク評価、アンモニアの漏洩リスク管理及び非常時の大気への放出、NO_x 及び N₂O 等に関する技術的課題を洗い出した(付録 3-2 参照)。

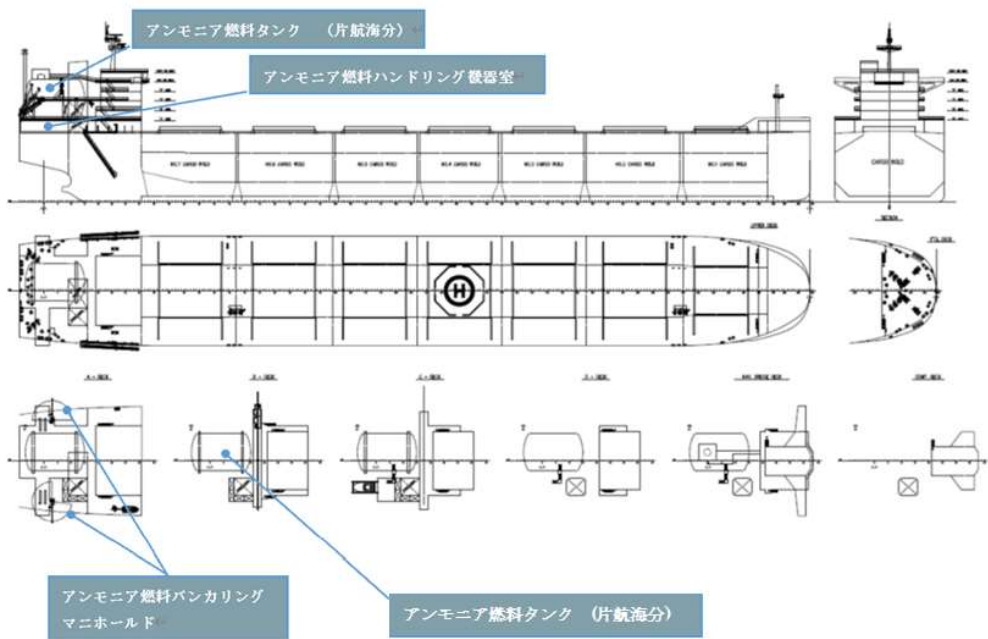


図 4.4.2-1: 80,000DWT 級バルクキャリアの側面図及び平面図(アンモニア燃料船)



図 4.4.2-2: アンモニア燃料関連機器配置イメージ

表 4.4.2-1: 80,000DWT 級バルクキャリアの
主要目(アンモニア燃料船)

全長	233.00 m
船長	225.5 m
全幅	32.26 m
深さ	20.10 m
喫水	
計画喫水	12.20 m
夏季満載喫水	14.45 m
載貨重量	81,000 ton
アンモニアタンク	1,550 m ³
計画速力	14.2 knots
主機	1 台
最大出力	9,660 kW
常用出力	7,052 kW
発電機	3 台
	600 kW

4.4.3 船上 CO₂ 回収システム搭載船

20,000TEU 級コンテナ船を対象として、船上 CO₂ 回収船のコンセプト設計を行った。

航路としては極東～欧州航路を想定した。主機関は、メタノール燃料の二元燃料レシプロエンジンに加え、液体アミン吸収法による船上 CO₂ 回収システム及び回収 CO₂ の貯蔵用タンクの搭載を想定した。本コンセプト設計における回収・液化装置全体として、CO₂ 回収率 85.7%を見込むが、将来的には回収システムの性能向上により 90%以上の回収率の実現することが期待される。対象船の側面図及び平面図を図 4.4.3-1 に、主要目を表 4.4.3-1 に示す。

また、本コンセプトの実用化に向けて、CO₂ 回収・液化装置等に関する技術的課題を洗い出した(付録 3-3 参照)。

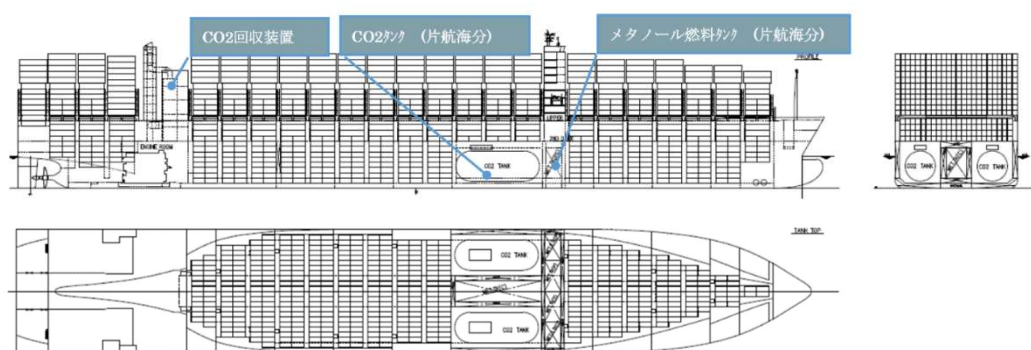


図 4.4.3-1: 20,000TEU 級コンテナ船の側面図及び平面図(船上 CO₂ 回収船)

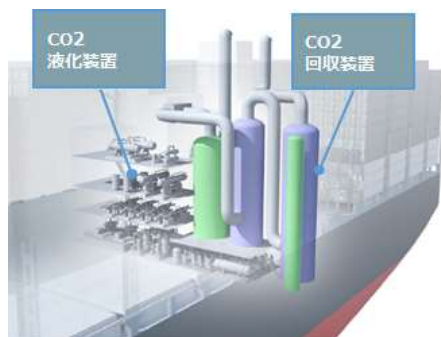


図 4.4.3-2: CO₂ 回収装置及び CO₂ 液化装置の配置イメージ

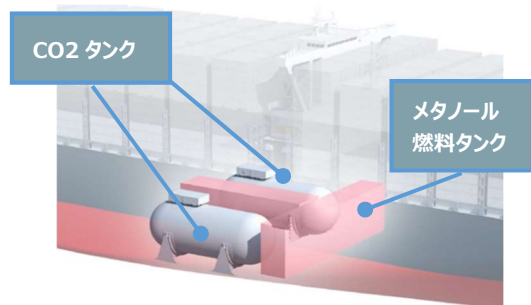


図 4.4.3-3: CO₂ タンク及びメタノール燃料タンクの配置イメージ

表 4.4.3-1: 20,000TEU 級コンテナ船の主要目
(船上 CO₂ 回収船)

全長	399.90 m
船長	383.00 m
全幅	61.00 m
深さ	33.50 m
喫水	
計画喫水	14.50 m
夏季満載喫水	16.00 m
コンテナ個数	21,300 TEU
メタノールタンク	13,200 m ³
CO ₂ タンク	6,400 m ³ x 2 sets
コンテナ搭載数影響	-1,820 TEU
計画速力	21.8 knots
主機	1 台
最大出力	55,000 kW
常用出力	49,500 kW
発電機	5 台
	6,870 kW

4.4.4 超高効率 LNG＋風力推進船

80,000DWT 船型をベースとするバルクキャリア及び 20,000TEU 級のコンテナ船を対象として、LNG 燃料等の既存技術の組合せによって対 2008 年比で 80%以上の効率改善を達成する船舶のコンセプト設計を行った。

それぞれの対象船について、従来船型をベースに、船型改良、減速・大型化、電気推進を前提としたハイブリッド型二重反転プロペラの搭載、LNG 燃料の適用及び革新的省エネ技術（風力推進システム及び空気潤滑システム）の適用を想定した。IMO の EEDI 計算ガイドラインに基づく試算によると、いずれの対象船においても、ベースの船型から Attained EEDI が 86%改善する結果となった。対象船の側面図及び平面図を図 4.4.4-1 及び図 4.4.4-2 に、主要目を表 4.4.4-1 及び表 4.4.4-2 に示す。

また、本コンセプトは、目下導入が可能と考えられる技術の組合せであるため、技術的な課題は大きくないと考えられる一方で、実用化のための環境整備として、IMO の関連規則・ガイドラインの見直し等が必要になることを確認した（付録 3-4 参照）。

表 4.4.4-1: 80,000DWT 級バルクキャリアの
主要目（超高効率 LNG＋風力推進船）

全長	229.00 m
船長	225.00 m
全幅	42.00 m
深さ	20.60 m
喫水	
計画喫水	12.20 m
夏季満載喫水	14.45 m
載貨重量	102,000 ton
LNG タンク	3,800 m ³
計画速力	11.5 knots
推進モーター	2 台
定格出力	1,750kW

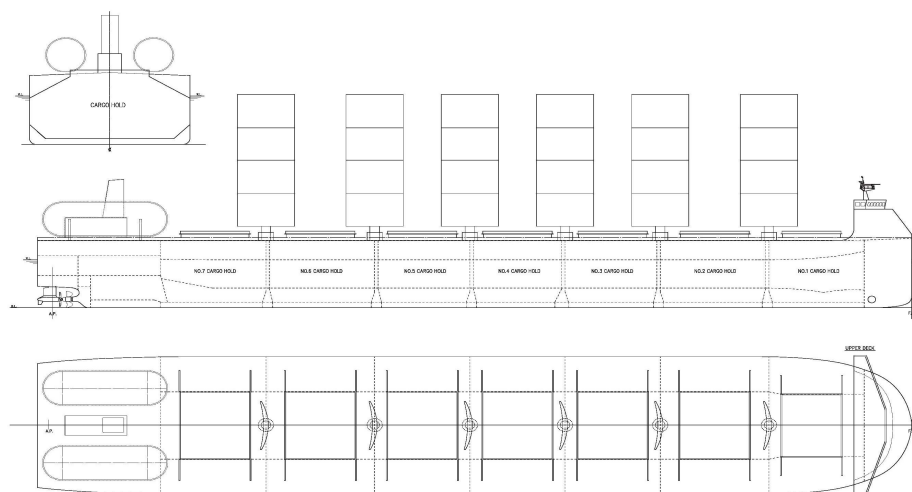


図 4.4.4-1 : 80,000DWT 級バルクキャリアの側面図及び平面図（超高効率 LNG＋風力推進船）

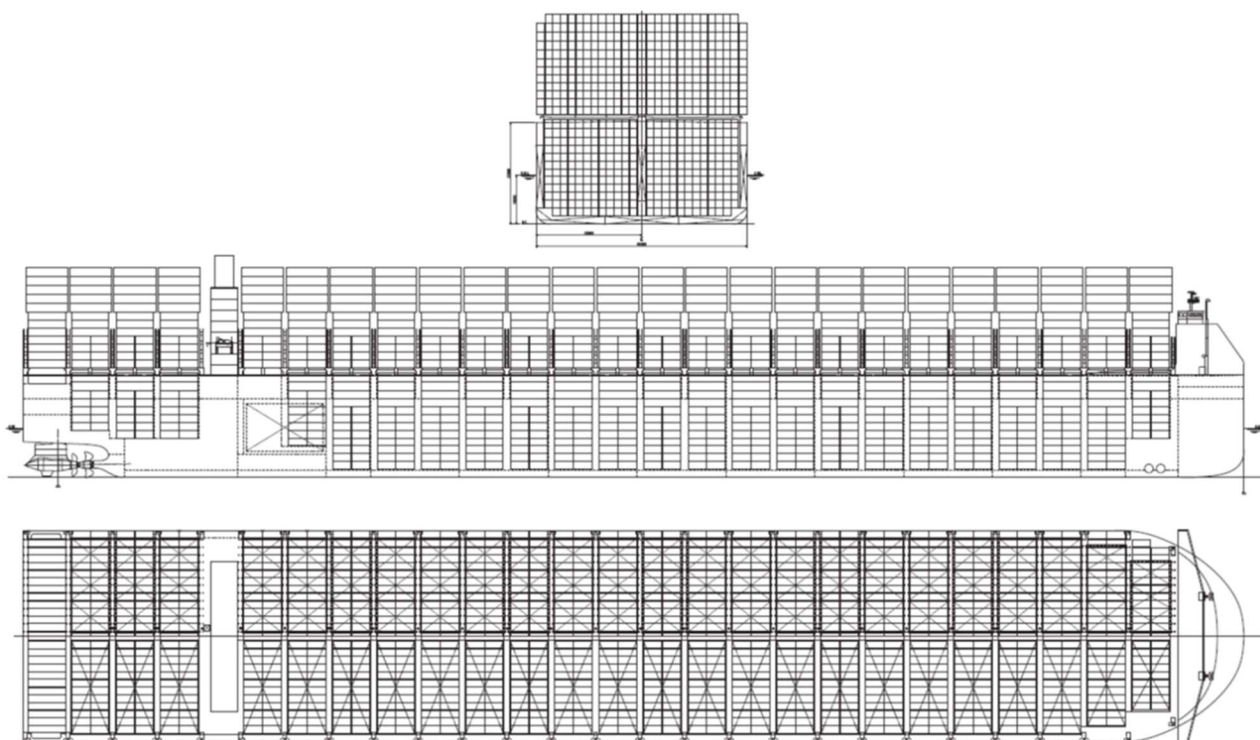


図 4.4.4-2 : 20,000TEU 級コンテナ船の側面図及び平面図(超高効率 LNG+風力推進船)

表 4.4.4-2: 20,000TEU 級コンテナ船の
主要目(超高効率 LNG+風力推進船)

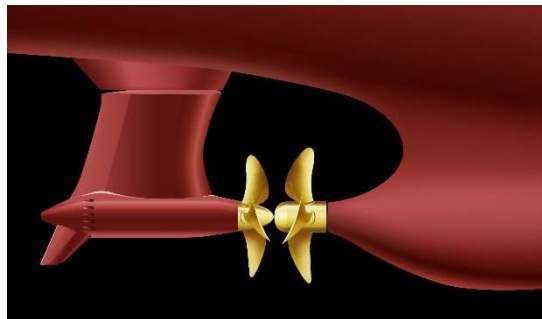


図 4.4.4-3: ハイブリッド型二重反転プロペラ
システム

全長	400.00 m
船長	387.00 m
全幅	69.20 m
深さ	33.20 m
喫水	
計画喫水	13.00 m
夏季満載喫水	16.00 m
コンテナ個数	27,000 TEU
LNG タンク	11,000 m ³
計画速力	15.2 knots
推進モーター	2 台
定格出力	5,500 kW

4.4.5 2050 年頃のゼロエミッション船のイメージ

上記で検討した 4 種類のコンセプト船について、更なる将来の姿として、2050 年頃におけるイメージを図 4.4.5-1 のとおり作成した。。



図 4.4.5-1: 2050 年における各コンセプト船のイメージ

第5章 長期目標達成のためのロードマップ

5.1 節 ロードマップ検討の概略

第4章において、GHG削減戦略の2050年目標を達成するためには、2050年までに対2008年比で約80%の効率改善が必要となることを確認し、それを達成し得る代替燃料・技術の活用シナリオとして、「LNG→カーボンリサイクルメタン移行シナリオ」及び「水素・アンモニア燃料拡大シナリオ」を示した。以上を踏まえ、これら2つのシナリオを実現させるためのロードマップとして、産学官公が取り組む必要があると考えられる各種の取組・対策の内容及び時期を検討した。

ロードマップの概略は図5.1-1のとおり。2050年目標達成に向けて、2028～2030年の期間を、「対2008年比で90～100%の効率改善を達成する船舶（以下、「ゼロエミッション船」）」の投入開始時期としている。この目標年に向けて、研究開発、技術の実証及び導入促進を順次進めるとともに、ゼロエミッション船の建造・運航のための環境整備として、関連ルールの検証・策定・改正も並行して進めることが必要となる。2030年以降は、ゼロエミッション船の普及フェーズとなることを想定するが、代替燃料の普及促進のためには、陸上における燃料供給体制の整備が重要となる。

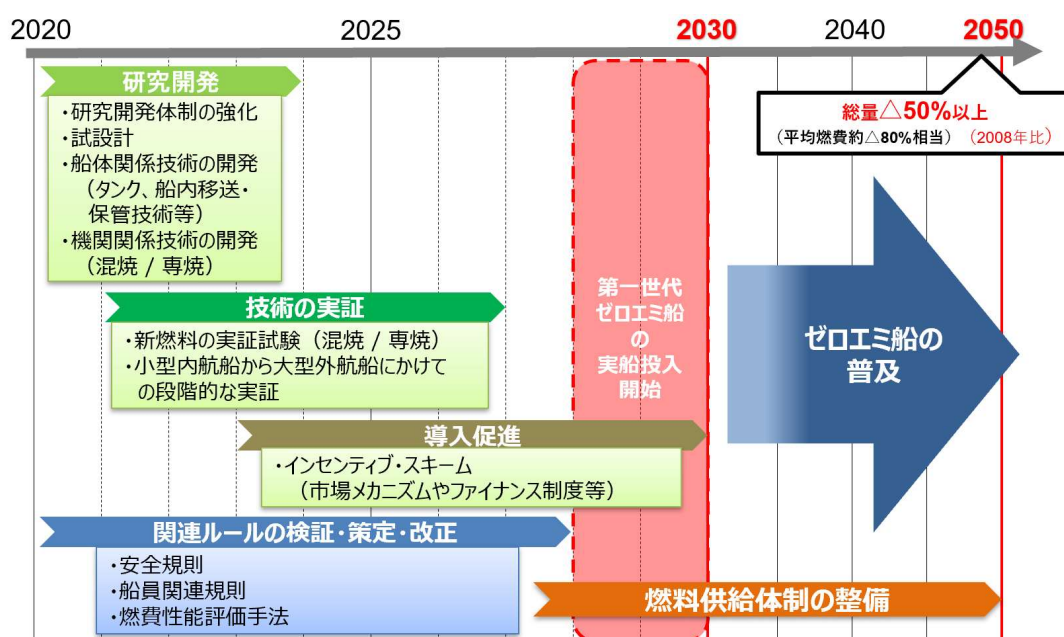


図 5.1-1 ロードマップの概略

5.2 節 新たな燃料及び技術の導入のための研究開発等

ゼロエミッション船の導入に向けて必要になると考えられる研究開発関連の取組・対策の検討結果を示したものが図5.2-1である。研究開発及び実用化の取組に加え、それを実施する体制の強化についても検討した。

5.2.1 研究開発体制強化

研究開発体制強化の方法として、第一に、国内設計拠点の集約化が考えられる。ゼロエミッション船の実現に向けた新燃料・技術の研究開発を行うにあたり、それらを実施する体制次第で、研究開発の費用対効果及び成果は異なってくると考えられる。特に、一つの開発課題について、複数の企業や研究機関がそれぞれの資本を投じて研究開発を行う状況を極力避け、連携や協業を進めることにより、効率化が期待できる。具体的には、複数の造船所の共同出資による設計会社の設立等を通じて、各社における設計コストの削減が可能と考えられる。

第二に、共同研究開発体制の整備が挙げられる。こちらは船舶の設計ではなく技術開発を共同で行うものである。多企業による共同研究のための合併会社の設立等が考えられる。このような連携・協業及び研究開発の実施においては、官民の様々な枠組みや支援制度の活用を検討していくべきである。

第三に、研究開発(R&D: Research and Development)を促進するための国際的なスキームの創設が挙げられる。ゼロエミッション船の導入・普及のための研究開発には、大規模な投資が必要となることから、その資金を確保するための国際的な枠組みを設けることが望ましい。例えば、各船舶の船主が、年間の燃料消費量に応じた金額を拠出し、集まった資金により基金を設立し、国際的に選定された研究開発プロジェクトへ資金を投入する仕組みである。燃料油 1 トンあたり約 2 ドルを拠出すれば、年間 5 億ドル規模の R&D 資金を確保することが可能となる。我が国は、海事産業の主要国として、このような国際的なスキームの早期創設・運用開始、活用に向け積極的に取り組むべきである。

5.2.2 研究開発及び実用化

水素燃料、アンモニア燃料、LNG／カーボンリサイクルメタン／バイオメタン燃料、風力推進、船上 CO₂ 回収、超低速・肥大設計及びバッテリー推進に関して、2028～2030 年の実船投入開始を想定する場合に必要なと考えられる取組・時期を検討した。

代替燃料のうち、水素燃料若しくはアンモニア燃料、又はその両方の導入を目指す場合、2024 年までを中途にエンジン等の開発を進めるとともに、2026 年までに混焼や小型内航船への搭載等から順次実船による実証を行い、その後は導入促進策により、2028 年に向けて実船投入を促していくことが必要と考えられる。

LNG／カーボンリサイクルメタン／バイオメタン燃料の普及拡大を図る場合は、早期にメタンスリップ対策を確立することが重要となる。

風力推進については、既に、海運企業・造船企業等により様々なシステムの開発が進められていることから、今後は、実船による実証及び導入促進策が必要と考えられる。

船上 CO₂ 回収については、陸上で既に実用化された技術であるが、船舶での使用のためには、船上搭載用のシステム開発及び実証が必要と考えられる。

超低速・肥大船については、試設計により開発課題を洗い出すとともに、同設計特有の技術的課題を解決することが必要と考えられる。特に、操縦性の面で従来と異なる設計が必要になることが想定される。

バッテリー推進については、国内の小型内航船において実用化した例があり、既に実証の段階にあると言える。ただし、4.3 節の検討のとおり、現在のバッテリーのエネルギー密度では、比較的大型の外航船への適用は困難と考えられる。

また、水素燃料、アンモニア燃料、船上 CO₂ 回収の普及は、燃料供給又は回収した CO₂ の払い出しのための陸上インフラの整備状況に大きく影響される点に留意が必要である。

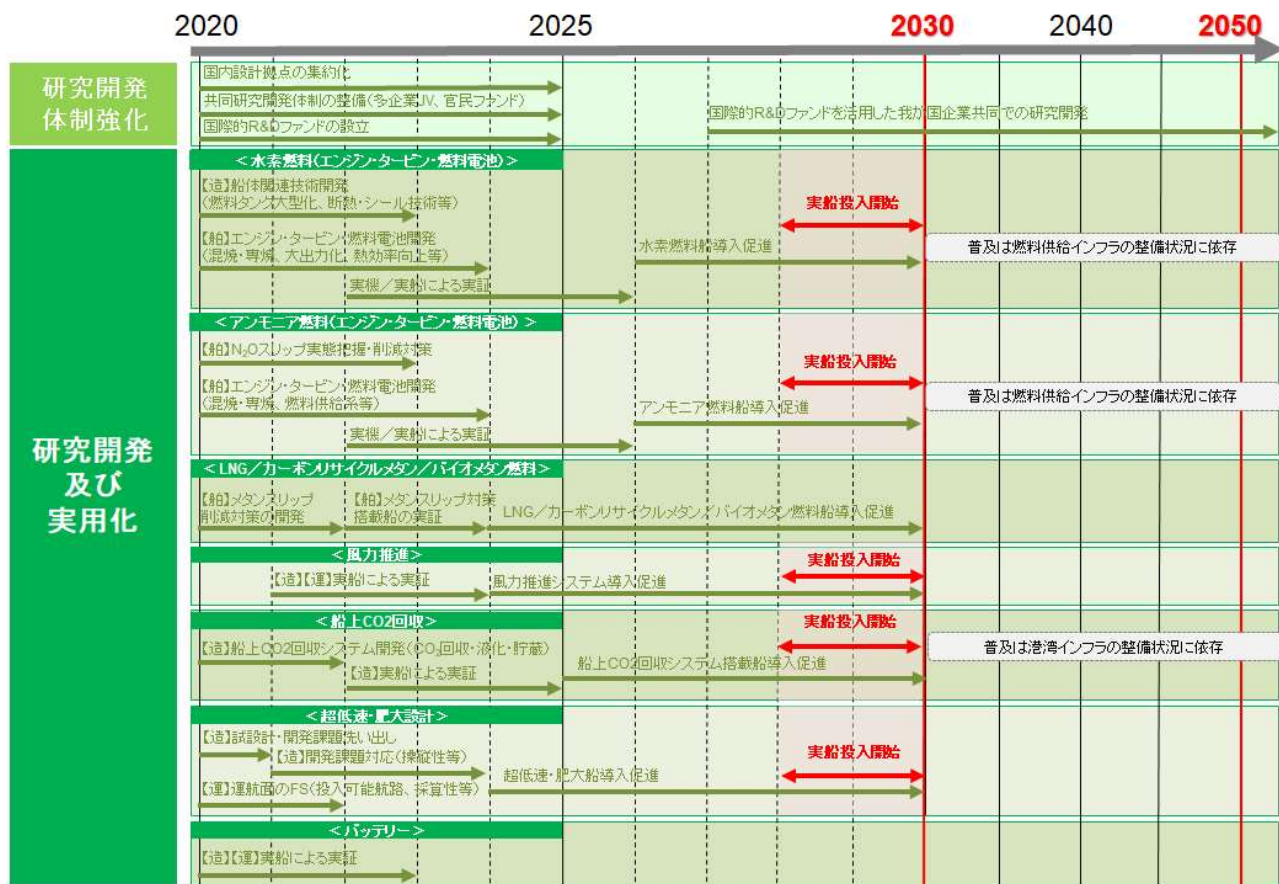


図 5.2-1 研究開発及び実用化に関するロードマップ

5.3 節 新たな燃料及び技術の導入のための制度面の環境整備

ゼロエミッション船の導入に向けて必要になると考えられる制度面の環境整備に関する取組・対策の検討結果を示したものが図 5.3-1 である。主に、IMO における関連規則の検証・策定・改正について検討を行った。

5.3.1 GHG 削減戦略、短期対策及び中長期対策

GHG 削減戦略は、2023 年に改正することを視野に、IMO においてレビューを行うことが合意されているほか、その後も、5 年おきにレビューを行うことが想定されている。同戦略は、国際海運からの GHG 排出削減の基本的な方向性を定めるものであるため、我が国として、レビューにおいて中心的な役割を担うべく対応する必要がある。

短期対策については、2.1 節及び 3.2 節にて既述のとおり、2023 年までの合意を目指し、対策の具体的な内容について IMO で議論が行われており、我が国から現存船に対する燃費性能規制 (EEXI) を提案し、その実現に努めている。EEXI 規制が採択された場合、その発効後には、現存船のリプレースや燃料転換を促進する観点から、当該規制の段階的強化も検討し得る。このほか、実燃費を可視化するための格付け制度の導入等も考えられる。

中長期対策について、現在、IMO においては、燃料のライフサイクル炭素密度ガイドラインの策定について議論が行われている。また、今後は、経済的なインセンティブに基づき GHG の削減を促進する市場メカニ

ズム(MBM)を策定する可能性もある。MBM の主な類型としては、船用燃料に対する課金や、排出権取引が考えられる。このほか、カーボンリサイクル燃料やバイオ燃料を使用した場合の GHG 排出量・削減量及びその越境時の扱いを定める観点から、IPCC ガイドラインの改正も必要となる可能性がある。

5.3.2 既存の MARPOL 条約関連規制の改正

既存の GHG 削減対策である EEDI 規制については、MARPOL 条約においてフェーズ 3(2022/2025 年から実施)までが規定されているが、代替燃料等の導入を見据えたフェーズ 4(2030 年頃から実施)以降の規制の可能性についても検討していく必要がある。具体的な例として、以下が考えられる。

- 代替燃料適用機関の認証スキーム：水素燃料エンジン及びアンモニア燃料エンジン等の開発状況に応じ、認証スキームの整備が必要となる可能性がある。
- 電気推進船の EEDI 計算：現行の EEDI 規制においては、LNG 船又はクルーズ客船以外の電気推進船は EEDI 非適用となり、計算方法も規定されていない。従って、上記以外の船種における電気推進システムの排出削減効果を EEDI に反映させるためには、関連規則及びガイドラインの改正が必要になると考えられる。
- 風力推進システムの EEDI への算入：風力推進システムによる主機出力低減効果を EEDI に算入するためには、システムのパフォーマンステストの実施・認証手順についての議論・承認、及び風の発現頻度分布についての承認が必要になると考えられる。
- 最低出力及び非常用出力基準：現行の EEDI 規制では、設計に用いられる一般的な値として、シーマージン 20%を前提に、PME を 75%MCR と定めているが、低出力船に対しては、妥当な条件が上記と異なる可能性がある。また、現行の最低出力要件に定められる出力を下回る速力の船舶の建造を可能とするためには、現在 MEPC で議論されている非常用出力コンセプトの承認が必要である。

上記のほか、MARPOL 条約においては、技術研究を目的とする船舶に対して規制の適用免除を可能とする規定(附属書 VI 第 3.2 規則)があるが、各種の研究開発促進のため、当該規定を拡充・緩和することが考えられる。例として、代替燃料導入初期に建造される船舶に対し、無期限に同条約附属書 VI の一部規定の適用免除を認めること等が考えられる。

5.3.3 船舶の安全及び船員に関する規則

代替燃料の導入に当たっては、船舶の安全及び船員に関する規則について、各種の代替燃料・技術の研究開発動向に応じ、現行規則の検証・改正又は新規規則の策定が必要となるものがある。

船舶の安全に関する例として、現在、IMO においては、ガス又は他の低引火点燃料を使用する船舶の安全に関する国際規則(IGF コード⁸)により、LNG 燃料船についての安全基準が定められているが、水素やアンモニアについては詳細な安全基準が定められていない。また、液化ガスのばら積み運送のための船舶の構造及び設備に関する国際規則(IGC コード⁹)により、現時点ではアンモニア燃料の使用を認めないこととされている。したがって、水素燃料及びアンモニア燃料を導入するに当たっては、安全を確保しつつ、それらを使用できるようにするための規則の改正等が必要となる。このほか、風力推進システムや船上 CO₂ 回収装置を船上に搭載する際の安全基準の整備が必要になると考えられる。

水素燃料やアンモニア燃料等の代替燃料や、船上 CO₂ 回収等の新たなシステムを船舶に導入するに当

⁸ IMO, International Code of Safety for Ships Using Gases or Other Low-Flashpoint Fuels

⁹ IMO, The International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk

たつては、新たに船員技能に関する基準の整備の必要性を検討すべきである。

5.3.4 その他

代替燃料に関連する技術開発の動向や、それらの燃料の供給状況に応じて、船用燃料油の現行規格 (ISO 8217) の改正又は新たな規格の策定が必要となると考えられる。

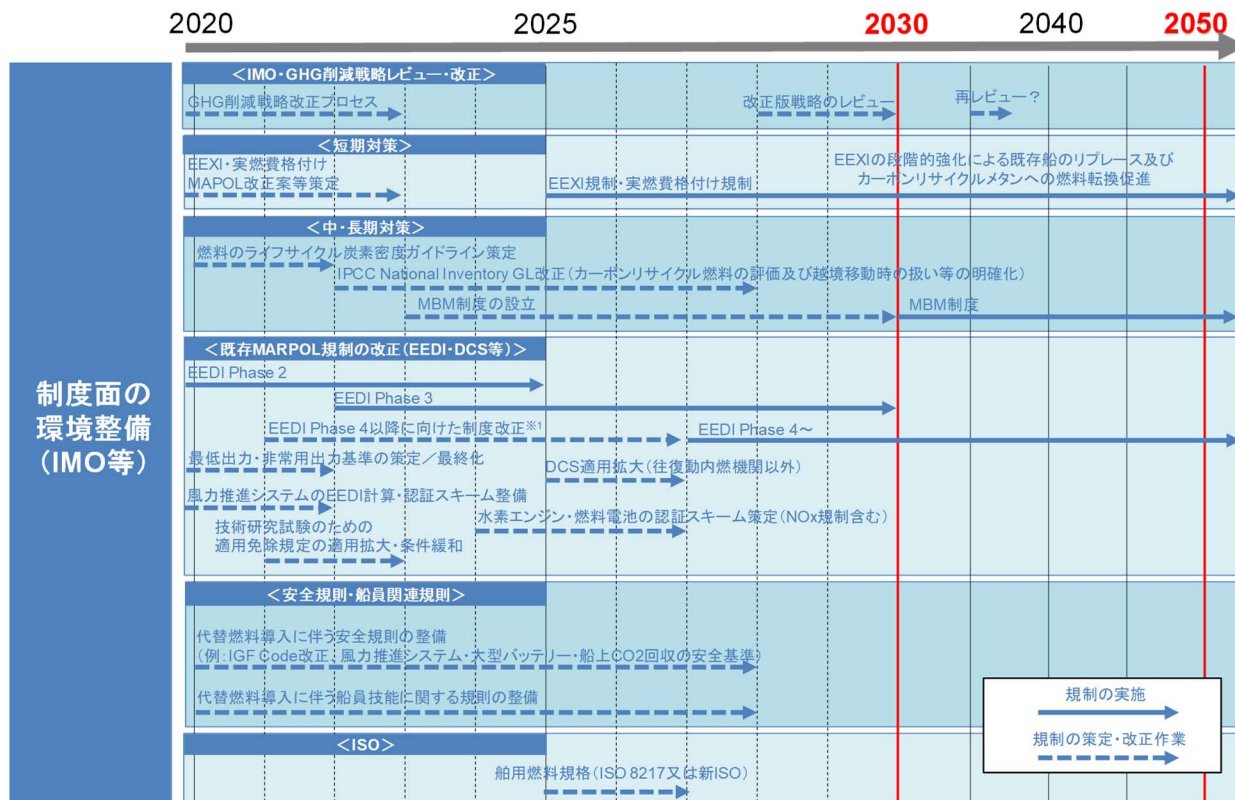


図 5.3-1 制度面の環境整備に関するロードマップ

第6章 おわりに

国際海運の GHG 排出ゼロに向けた今後の動向は、技術開発課題、燃料供給サイド、コスト等の不確定要素が複合的に絡むものであり、断定的な将来予測を行うことは困難である。その中で、本事業においては、現時点で入手可能な情報に基づき、GHG 削減戦略に掲げられた国際海運からの GHG 削減目標を達成するために国際海運に導入すべき GHG 削減対策を分析・検討し、それらの対策を実現するために必要となる技術開発及び環境整備等の内容・時期をロードマップとして提示した。

今後は、陸上及び国際海運分野の動向に応じて、GHG 削減シナリオの見直しや、ロードマップに掲げた対策の絞り込みを随時行っていくとともに、ゼロエミ船の建造・運航をビジネスとして成立させることを視野に、本ロードマップの実施に向けた方策、役割、体制及び資金面の仕組み等について、更に検討を掘り下げていくことが望まれる。

付録

付録 1 国際海運における海上荷動き量の推計の詳細

国際海運における将来の CO₂ 排出量 (BAU 排出量) を予測するため、国際海運における 2050 年までの海上荷動き量の推計を行った。その詳細は次のとおり。

1 国際海運における海上荷動き量の推計方法の概要

海上荷動き量の推計方法の概略は図 付録 1-1 のとおり。

海上荷動き量は、社会経済指標 (GDP、人口、エネルギー消費量) と相関関係があるとの仮定の下、対象の各品目について、海上荷動き量を社会経済指標で説明する回帰モデルを設定した。将来、荷動き量が抑制的となると想定される品目についてはこれに対応する回帰モデルを使用した。

次に、作成した回帰式に、2050 年までの社会経済指標の予測値を入力することにより、品目別の将来の海上荷動き量 (トン) を求めた。社会経済指標の予測値として、OECD による GDP 成長率予測データ及び国際応用システム分析研究所 (IIASA: International Institute for Applied Systems Analysis) によるエネルギー消費量・人口の予測データを利用した。

更に、トン数ベースでの海上荷動き量の推計値に対して、品目別の海上荷動き量の平均輸送距離を掛け合わせることで、トンマイルベースでの将来の品目別の海上荷動き量を推計した。

最後に、品目別の海上荷動き量と、それを輸送する船種・船型別船舶の対応関係を設定し、船種船型別のトンマイルベースでの海上荷動き量の推計を行った。

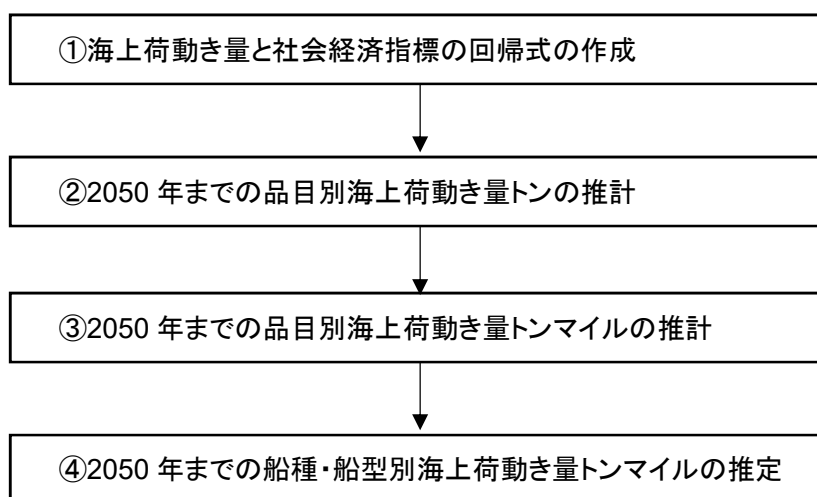


図 付録 1-1: 海上荷動き量の推計方法の概要

2 海上荷動き量と社会経済指標の回帰式の作成

(1) 使用データ

回帰式の作成では、社会経済指標に対応して、品目別海上荷動き量 (トン) が変化することを仮定した。そ

の仮定を検証するため、品目別海上荷動き量の実績値は、品目分類が詳細である Clarkson のデータ¹⁰を使用した。Clarkson のデータは、IMO が過去に行った調査(3rd IMO GHG Study¹¹)や CE delft¹²の海上荷動き量の分析内容等に広く使用されている。ここでの分析における対象品目は、Clarkson の分類に従い以下とした。

<対象品目>

- 原油(Crude Oil)
- 石油製品(Oil Products)
- 原料炭(Coking Coal)
- 燃料炭(Steam Coal)
- 鉄鉱石(Iron ore)
- ボーキサイト/アルミナ(Bauxite/Alumina)
- 穀物(Grain)、マイナーバルク(Minor Bulk)
- コンテナ(Container)
- その他乾貨物(Other Dry Cargo)
- LPG、LNG、ケミカル(Chemical)
- 自動車(Car)
- 冷凍貨物(Reefer)
- クルーズ旅客(Cruise Passenger)

ここで、Cruise Passenger の単位は旅客数であり、その他の品目の単位はトンである。なお、Clarkson のデータには、出版物とオンラインデータがあり、出版物では、Bauxite/Alumina、Reefer、Car の荷動き量が示されていないが、オンラインデータには Bauxite/Alumina、Reefer、Car のデータが示されている。そのため、オンラインデータの Bauxite/Alumina、Reefer、Car について、出版物の一覧表における Minor Bulk の値から Bauxite/Alumina 分の値を控除し、出版物の一覧表における Other Dry Cargo の値から Reefer 分と Car 分の値を控除して用いた。

GDP の実績値は OECD の公表データ¹³、人口の実績値は国連の公表データ¹⁴、エネルギー消費量の実績値は IEA の公表データ¹⁵を使用した。OECD の GDP データは、世界合計の値(2010 年価格ドル)を使用しており、1995 年以降の世界合計の GDP が使用可能である。国連の人口データは、世界合計の値を使用しており、1950 年以降の値が使用可能である。IEA のエネルギー消費量データは、石油、石炭、ガスの世界合計値(一次エネルギー供給量:ジュール)を使用し、1990 年以降の世界合計のエネルギー消費量が使用可能である。

(2) 回帰式

¹⁰ Clarkson Research, Shipping Review & Outlook, Spring 2019, pp115, pp145.

¹¹ IMO, Third IMO Greenhouse Gas Study 2014, 2015.

¹² CE Delft, Update of maritime greenhouse gas emission projections, January 2019.

¹³ OECD, Economic Outlook No103 – July 2018 – Long-term baseline projections, https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=EO103_LTB#

¹⁴ United Nations, World Population Prospects 2019, <https://population.un.org/wpp/>

¹⁵ IEA, Data and statistics, <https://www.iea.org/data-and-statistics>

回帰式の作成では、海上荷動き量を被説明変数とし、社会経済指標を説明変数として、式(1)～(3)に示す線形、線形(対数)、S字(ロジスティック曲線)の3種を用いて、変数間の関係を検討した。

$$\text{線形} \quad Y = a X + b \quad \cdots \text{式(1)}$$

$$\text{線形(対数)} \quad LN(Y) = a LN(X) + b \quad \cdots \text{式(2)}$$

$$\text{S字} \quad Y = \frac{c}{1 + a \exp(-bX)} \quad \cdots \text{式(3)}$$

ここで、Y:被説明変数、X:説明変数、a、b、c:パラメータである。

線形の回帰式では、説明変数Xが増減した量に比例して、被説明変数Yも増加する直線関係を仮定し、線形(対数)の回帰式では、X、Yの弾力性が一定であることを仮定した。また、将来の需要が抑制的と考えられる一部の品目については、S字(ロジスティック曲線)の適用を検討した。この曲線の特徴として、対象物の増加傾向に関して、最初に増加に拍車がかかり、最終的には飽和する現象を表現する場合に良く用いられ、抑制的な効果を表現できる。ロジスティック曲線では、パラメータcが回帰式における被説明変数の上限値を示す。

回帰式における説明変数は、品目との関係性が強いと考えられる指標を採用し、Crude Oil、Oil Products、LPG、Chemicalは石油消費量、Steam coalは石炭消費量、LNGはガス消費量、Grainは人口とする。他の品目は、GDPを説明変数として検討を行った。

回帰式におけるパラメータは、GDPの場合が1995年から2018年まで、人口の場合が1985年から2017年まで、エネルギー消費量の場合が1990年から2017年までの実績値を用いて回帰分析によって決定した。採用する回帰式は、変数間の適応度合いを示すR2(決定係数)値(1に近いほど良い相関)を比較して決定した。ただし、ロジスティック曲線のパラメータcは、事前に決定する必要があるため、パラメータcの値を変化させて変数間の適合度合いを示すR2値が妥当となるパラメータcを決定した。

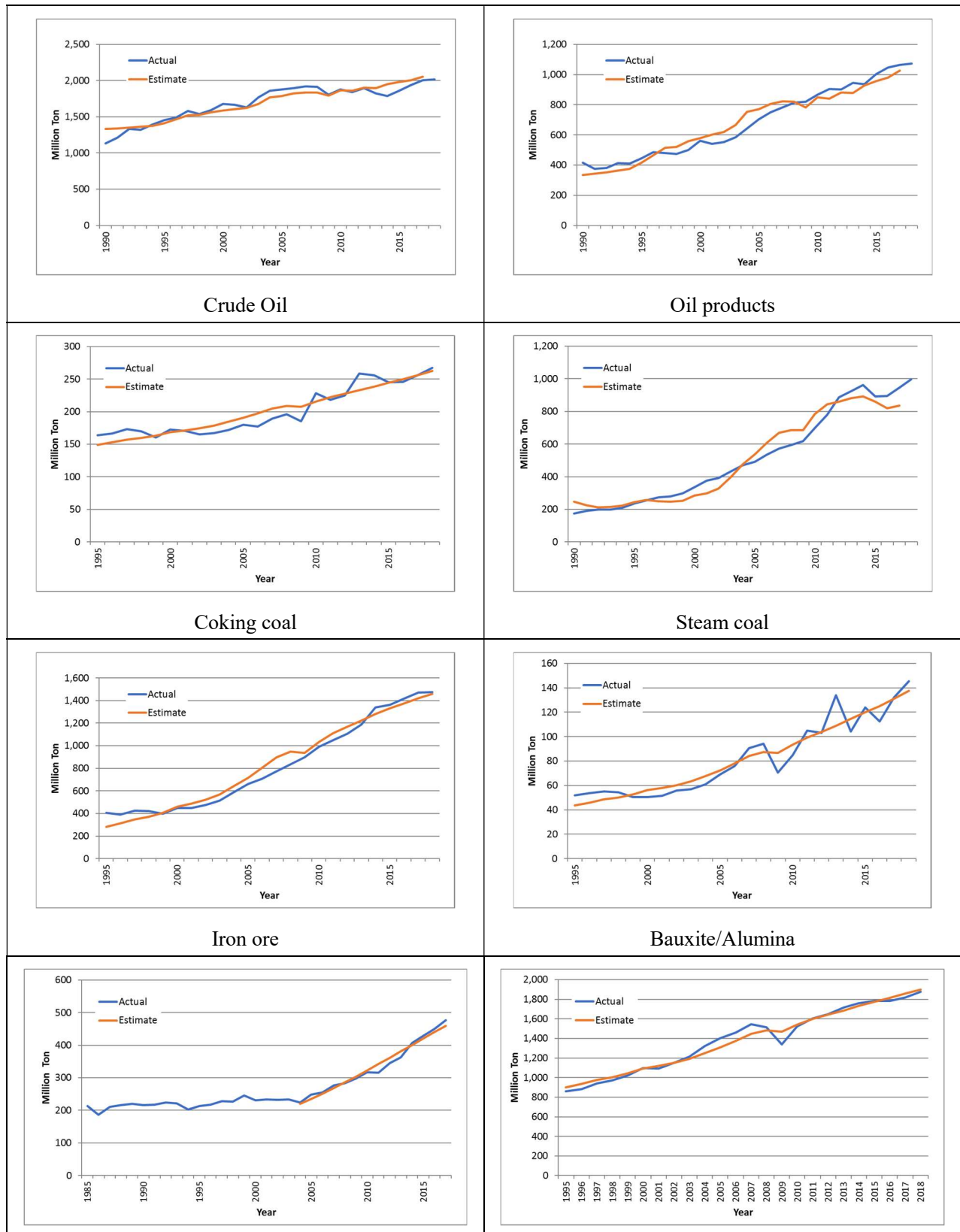
表 付録 1-1 は、対象品目別の説明変数、設定した回帰式及びR2値を示している。

表 付録 1-1: 回帰式の検討結果

番号	品目	説明変数: 単位	被説明変数 単位	回帰式		R2
1	鉄鉱石 Iron Ore	GDP : 10 億ドル	100 万トン	S 字	$Y=1614/(1+97.723\exp(-7.122E-05 X))$	0.98
2	原料炭 Coking Coal	GDP : 10 億ドル	100 万トン	S 字	$Y=362/(1+4.152\exp(-2.501E-05 X))$	0.94
3	燃料炭 Steam Coal	石炭消費量 : EJ	100 万トン	線形	$Y=8.960X-584.922$	0.95
4	ボーキサイト/アルミナ Bauxite/Alumina	GDP : 10 億ドル	100 万トン	S 字	$Y=206/(1+18.596\exp(-3.778E-05 X))$	0.96
5	穀物 Grain	人口 : 100 万人	100 万トン	S 字	$Y=722/(1+8733.995\exp(-1.275E-03 X))$	0.98
6	マイナーバルク Minor Bulk	GDP : 10 億ドル	100 万トン	S 字	$Y=2238/(1+8.185\exp(-4.002E-05 X))$	0.99
7	コンテナ Container	GDP : 10 億ドル	100 万トン	線形	$Y=0.029X-869.709$	0.99
8	その他乾貨物 Other Dry cargo	GDP : 10 億ドル	100 万トン	S 字	$Y=710/(1+18.900\exp(-5.127E-05 X))$	0.98
9	原油 Crude Oil	石油消費量 : EJ	100 万トン	線形	$Y=14.161X-586.546$	0.89
10	石油製品 Oil Products	石油消費量 : EJ	100 万トン	線形	$Y=13.563X-1500.875$	0.95
11	LPG	石油消費量 : EJ	100 万トン	線形(対数)	$Y=\exp(-8.710+2.489 \ln(X))$	0.88
12	LNG	ガス消費量 : EJ	100 万トン	線形(対数)	$Y=\exp(-7.300+2.670 \ln(X))$	0.99
13	ケミカル Chemicals	石油消費量 : EJ	100 万トン	線形	$Y=3.661X-399.872$	0.94
14	自動車 Car	GDP : 10 億ドル	100 万トン	S 字	$Y=44/(1+10.209\exp(-3.561E-05 X))$	0.90
15	冷凍貨物 Reefer	GDP : 10 億ドル	100 万トン	S 字	$Y=345/(1+7.639\exp(-3.190E-05 X))$	0.99
16	クルーズ旅客 Cruise Passenger	GDP : 10 億ドル	旅客 100 万人	線形	$Y=3.864E-04X-9.327$	0.99

GDP: 2010 年価格、EJ: エクサジュール

図 付録 1-2 には、品目別海上荷動き量の実績値と回帰式による推計値を示している。ただし、Grain と Other dry cargo は、対象とする詳細品目の相違が考えられる実績値のトレンドの変化があることを踏まえ、近年のトレンドのみを考慮して回帰式を作成した。



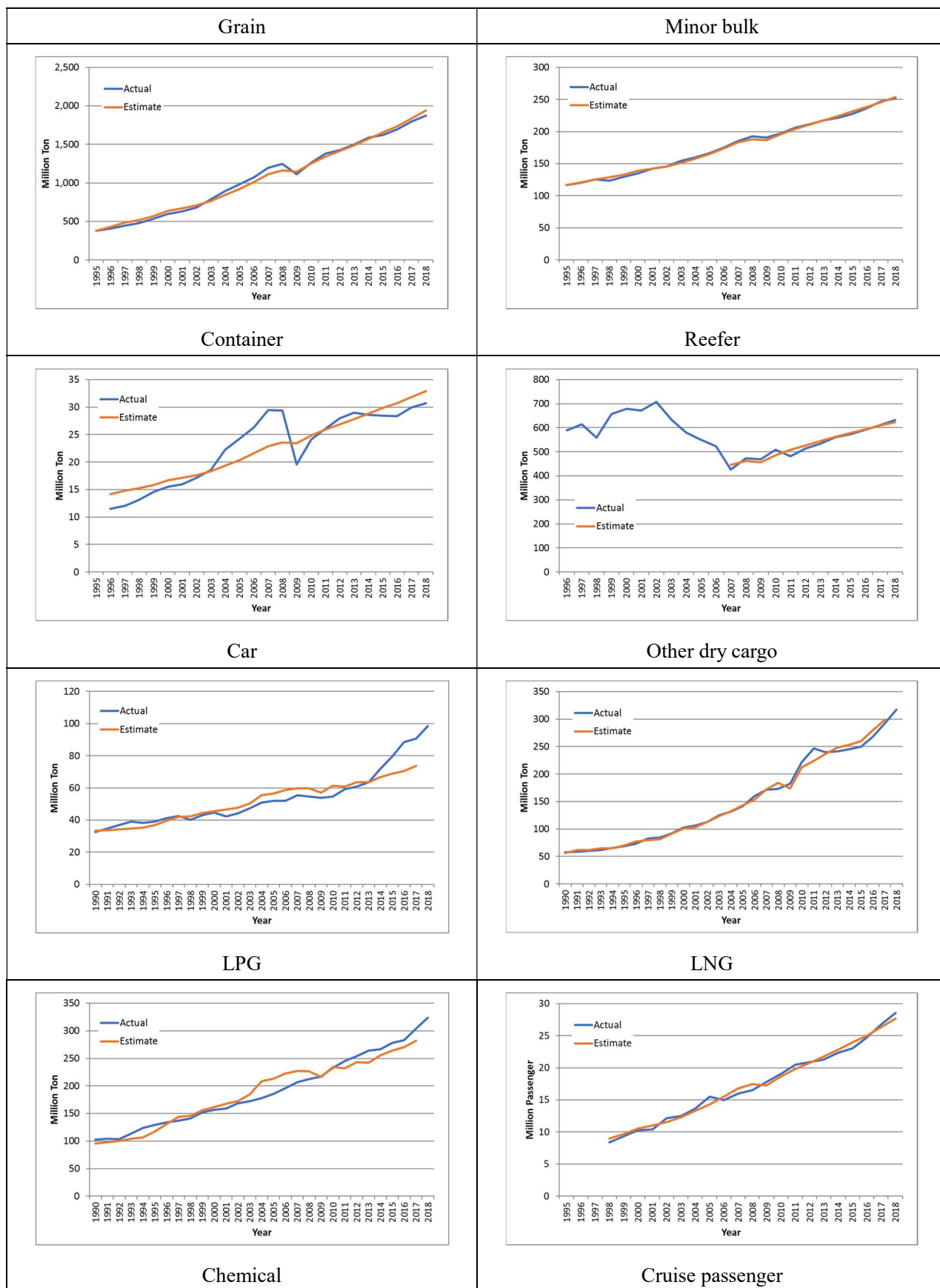


図 付録1-2: 品目別の海上荷動き量実績値と推計値の比較(青:実績値、オレンジ:推計値)

3 品目別海上荷動き量(トン)の推計

2050 年までの海上荷動き量は、作成した回帰式に、代表的な社会経済指標の予測値を入力しトン単位で推計した。将来の社会経済指標として使用したデータは以下のとおり。

将来の GDP の値は、OECD の予測値を使用した。なお、OECD の GDP 予測値は、3rd IMO GHG Study においても使用された IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) の複数の GDP 予測値において、成長が控えめである SSP3 シナリオに比較的近いものとなっている。

人口とエネルギー消費量については、IIASA のデータベース¹⁶を使用した。同データベースでは、IPCC の代表的濃度経路 (Representative Concentration Pathways, RCP) と社会経済シナリオ (Shared Socioeconomic Pathways, SSP) に基づき、エネルギー消費量を計算した結果が示されている。本調査では、RCP シナリオと SSP シナリオに基づき、国立環境研究所の AIM/CGE (Asia-Pacific Integrated Model/Computable General Equilibrium) モデルによって算出されたエネルギー消費量の予測値を利用した。SSP シナリオは、GDP や人口等の社会経済指標を示す。RCP シナリオは、IPCC の気候モデル予測で用いられている GHG の代表的な濃度シナリオであり、末尾に記載される数値は放射強制力 (単位: W/m²) という物理指標で、正の値が大きいほど地表を暖める効果が高い。本調査では、IPCC が 2018 年に示した RCP1.9 も含め、表 付録 1-2 に示す 3 つのシナリオにおける 2030 年、2040 年、2050 年のエネルギー消費量及び人口の予測値を利用した。なお、社会経済状況は SSP1 シナリオを使用し、SSP1 の GDP の予測値を OECD の予測値に置き換えて分析を行った。

表 付録 1-2: 本調査対象の代表的濃度経路(RCP)

RCP 4.5 (中位安定化シナリオ)	今世紀末までに放射強制力 4.5W/m ² に安定化。 将来における温度上昇を約 2.5℃以下に抑える可能性が高い。
RCP 2.6 (定位安定化シナリオ)	放射強制力がピークアウトし、今世紀末頃には 2.6W/m ² に低下。 将来における温度上昇を約 1.6℃以下に抑える可能性が高い。
RCP 1.9	今世紀末までに放射強制力 1.9W/m ² に安定化。 ピーク時の温度上昇を 1.5℃以下に抑える可能性が高い。 (IPCC の 1.5℃特別報告書(2018)で使用)

図 付録 1-3 は、本調査で使用した GDP、人口、エネルギー消費量の実績値と 2050 年までの予測値を示している。

¹⁶ IIASA, SSP Database (Shared Socioeconomic Pathways) - Version 2.0, December 2018, <https://tntcat.iiasa.ac.at/SspDb>

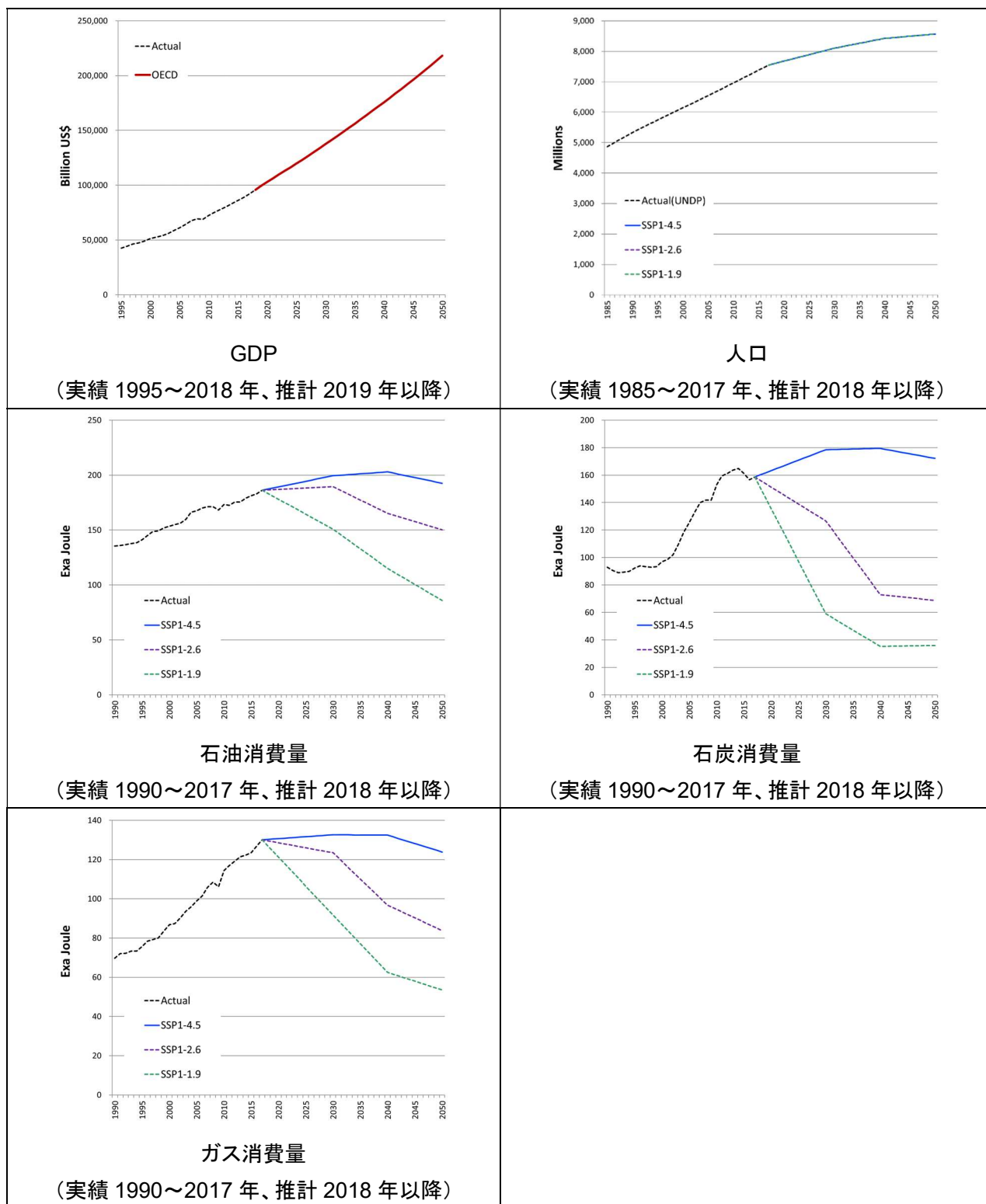


図 付録 1-3:2050 年までの GDP、人口、エネルギー消費量の予測値

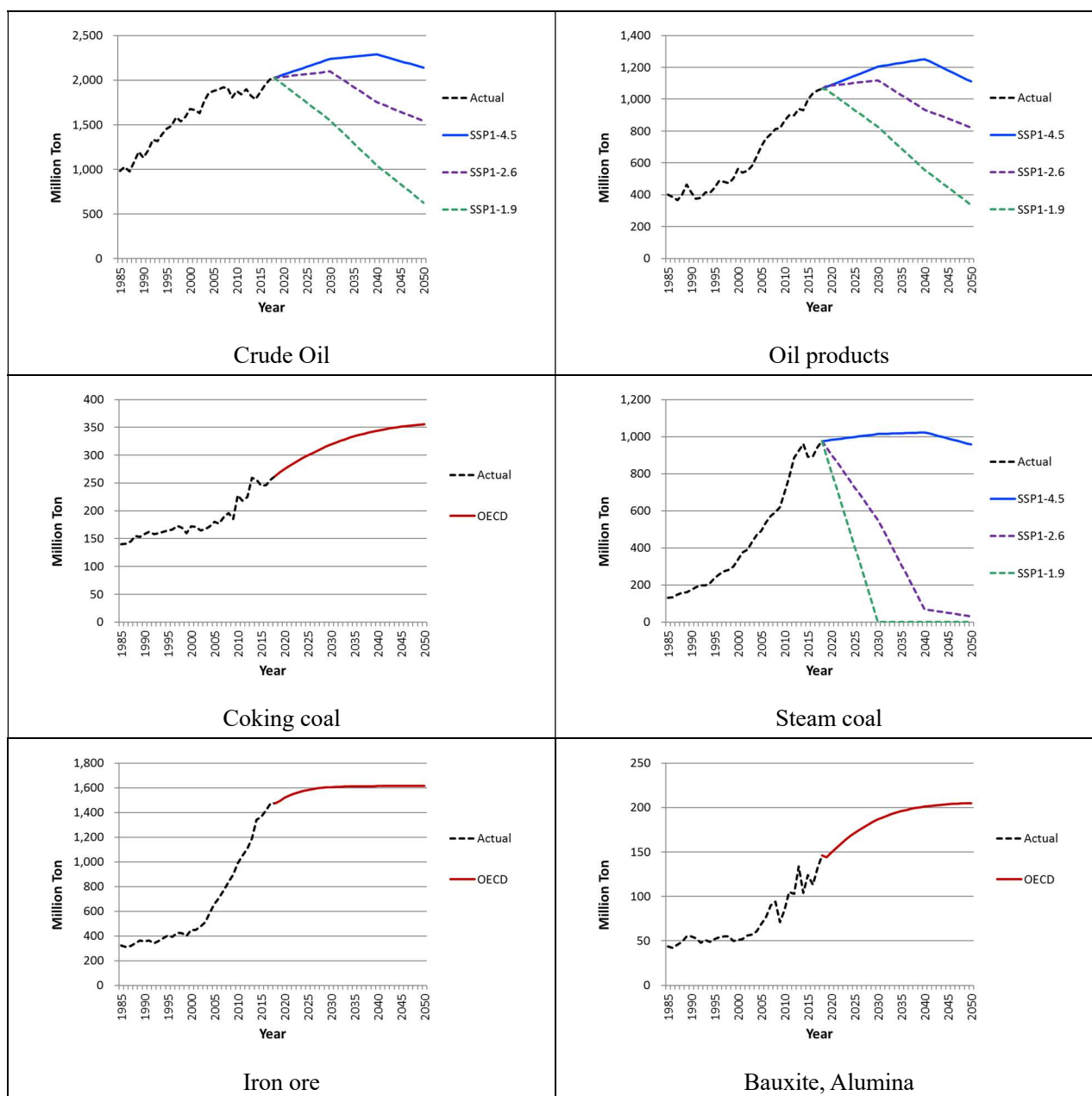
前述の回帰式に OECD と SSP/RCP の説明変数の予測値を入力し、将来の海上荷動き量(トン)の推計を行った。この際、Oil products の推計値は、回帰式による推計値の修正を行った。具体的には、Oil products の海上荷動き量は、Crude Oil の海上荷動き量に対して一定の比率であることを仮定した。Clarkson の実績値では、2014 年から 2018 年の Crude Oil の海上荷動き量トンに対して、Oil products の海上荷動き量トンは平均で 0.533 の比率である。そのため、将来の Oil products の海上荷動き量は、将来

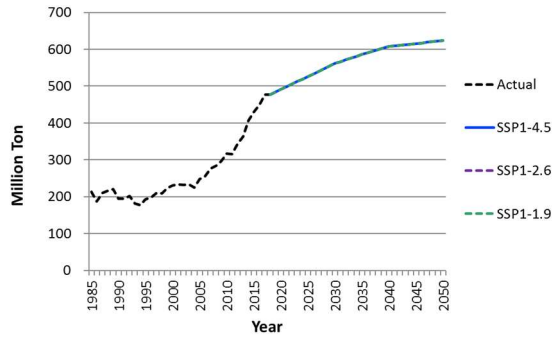
の Crude Oil の海上荷動き量に対して上記比率を維持するとの仮定の下で推計を行っている。

表 付録 1-3 は、修正結果を踏まえて、2008 年の海上荷動き量合計(86 億 2,700 万トン)に対する 2050 年までの推計値の比率を示している。品目別の結果は図 付録 1-4 に示す。

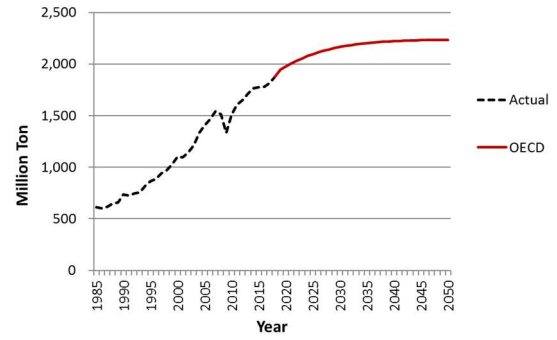
表 付録 1-3: 2050 年までの海上荷動き量トンの推計結果(品目合計値、旅客数を除く)

シナリオ	2020 年	2030 年	2040 年	2050 年
OECD, SSP1/RCP4.5	1.44	1.65	1.82	1.91
OECD, SSP1/RCP2.6	1.42	1.56	1.57	1.66
OECD, SSP1/RCP1.9	1.39	1.36	1.40	1.47

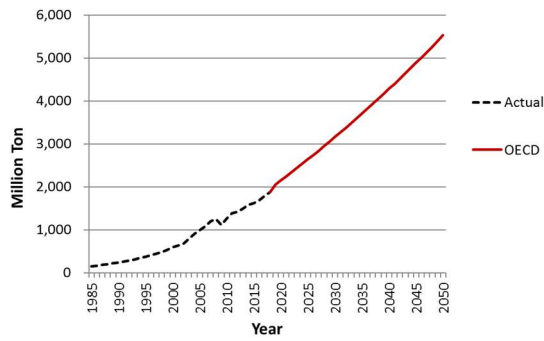




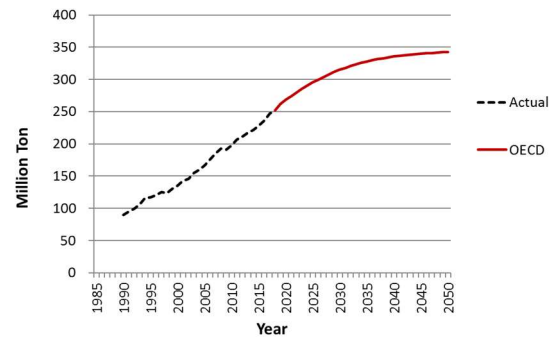
Grain



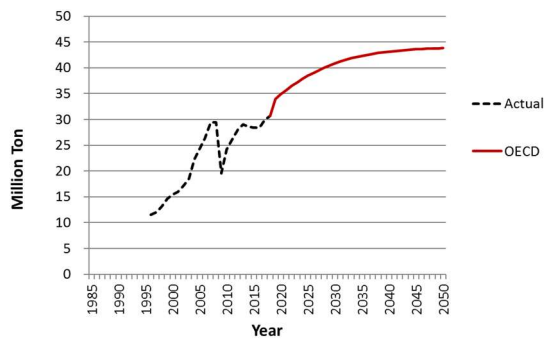
Minor bulk



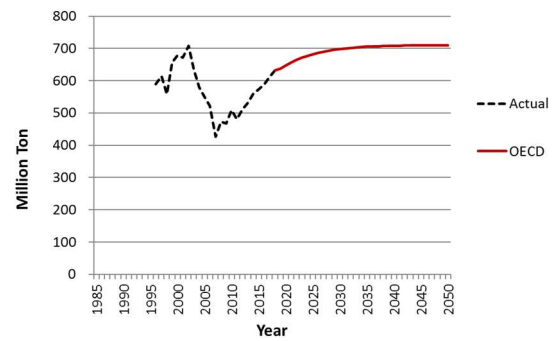
Container



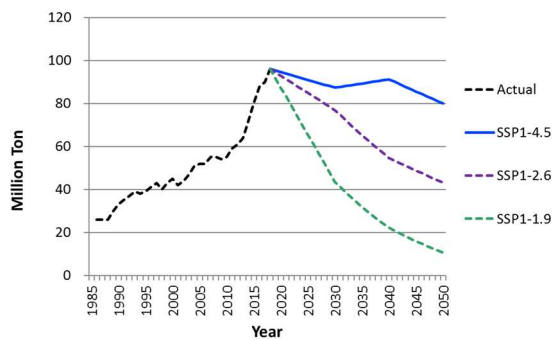
Reefer



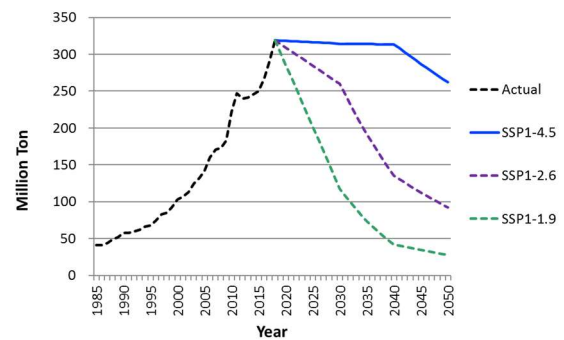
Car



Other dry cargo



LPG



LNG

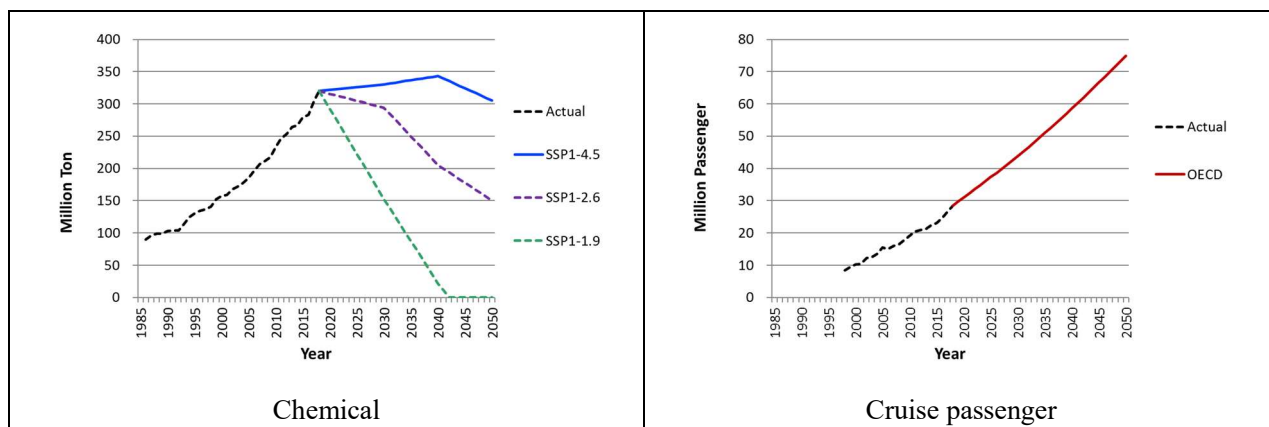


図 付録 1-4: 2050 年までの品目別海上荷動き量トンの推計結果

4 品目別海上荷動き量(トンマイル)の推計

海上荷動き量(トン)に対して、平均輸送距離(マイル)を掛け合わせることで、海上荷動き量(トンマイル)の推計を行った。平均輸送距離(マイル)は、Clarkson が公表するトンマイル単位とトン単位の海上荷動き量¹⁷から算出した。Coal については、Clarkson のトンマイルのデータにおいて、Coking coal と Steam coal の区別が無い場合、両者の合計値を利用した。また、対象品目である Reefer、Cruise Passenger についてはトンマイルの公表値がないため、輸送距離(マイル)を考慮せず、海上荷動き量(トン)の変化のみを考慮した方法も作成した。上記データにおいては、Car も同様にトンマイルの公表がないが、主要国間に関して、2017 年の海上荷動き量(車両数)が別途公表されている¹⁸ため、これを使ってトンマイルの海上荷動き量を推計した。具体的には、この主要国間の距離を設定し、主要国間の車両数×距離の合計を算出し、この合計を車両数合計(2017 年値、932 万台)で割った値を平均輸送距離とした。

5 船種船型別海上荷動き量(トンマイル)の推計

品目別の海上荷動き量(トンマイル)と、それを輸送する船種・船型別船舶の対応関係を設定し、船種船型の海上荷動き量(トンマイル)の推計を行う。船種船型区分は、3rd IMO GHG Study に対応させた。設定した船種と対象品目の対応関係は表 付録 1-4 のとおり。

¹⁷ Clarkson Research, Shipping Review & Outlook, Spring 2019, pp115, pp145.

¹⁸ Clarkson Research, Car Carrier Trade and Transport 2018.

表 付録 1-4: 船種と海上荷動き対象品目の対応関係

番号	3 rd GHG Study 船種	海上荷動き対象品目
1	Bulk carrier	Coking coal, Steam coal, Iron ore, Bauxite/Alumina, Grain, Minor Bulk
2	Chemical tanker	Chemical
3	Container	Container
4	General cargo	Other Dry Cargo の一部
5	Liquefied gas tanker	LPG, LNG
6	Oil tanker	Crude Oil, Oil Products
7	Other liquids tankers	なし
8	Ferry-pax only	なし
9	Cruise	Cruise Passenger
10	Ferry- RoPax	Other Dry Cargo の一部
11	Refrigerated	Reefer
12	Ro-Ro	Other Dry Cargo の一部
13	Ro-Ro Vehicle	Car

船種と対象品目の対応関係に従い、以下に示すデータ利用可能性のカテゴリー(1)～(3)毎に、船種船型別の荷動き量の推計を行った。推計においては、3rd IMO GHG Study より、船種船型別の 2008 年から 2012 年における船腹量(DWT)と運航距離(マイル)のデータを活用した(運航距離は、航海日数と平均船速から算出。)。本調査では、船種船型別の船腹量(DWT)×運航距離(マイル)の大きさが当該船種船型の活動量を示し、この比率(船種船型 DWT マイル比率)によって海上荷動き量が配分されると仮定している。

(1) 船種と品目が一対一で対応するもの(Chemical tanker, Container, Cruise, Reefer, Car)

海上荷動き量トンマイルの Clarkson 実績もしくは推計値が存在する Chemical, Container, Car については、船種船型 DWT マイル比率により、品目トンマイルを船型別に分配。トンマイル値が存在しない Cruise、Reefer については、船種船型 DWT マイル比率により、品目トンマイルを船型別に分配した。

(2) 船種と品目が一船種 対 多品目で対応するもの(Bulk carrier, Oil tanker)

Bulk carrier は、IHS 社の資料¹⁹における船型(Supra/Handysize, Panamax, Capesize)²⁰毎の品目トンマイルシェアに基づき、それぞれにトンマイル比率を設定した(Iron ore は cape の比率が高い等、一般的なシェアの設定)。本調査の船種船型区分に対応させるため、船種船型 DWT マイル比率を掛け合わせて、品目トンマイルを船型別に分配した。

¹⁹ IHS Markit, Bulk Shipping Market Outlook, 2018 Maritime Silk Road Port International Cooperation Forum, <http://www.mpforum.org/>

²⁰ Supra/Handysize ; 1 万 8,000～4 万 5,000DWT 程度の世界のほとんどどこでも通航できる船型。Panamax ; 6 万～6 万 8,000DWT 程度パナマ運河を通航可能な最大船型。Capesize ; パナマ運河やスエズ運河を通航できない 15 万 DWT 程度の大型船。

Oil tanker では、Crude Oil は、船種船型 DWT マイル比率より、品目トンマイルを船型別に分配した。Oil products は、120,000DWT 以上の Oil tanker を除いて、船種船型 DWT マイル比率より、品目トンマイルを船型別に分配した。

(3) 船種と品目が多船種対一品目で対応するもの (General cargo、Ferry- RoPax、Ro-Ro)

品目 Other dry cargo のトンマイルを、船種・船型別 DWT マイル比率に基づき、General cargo、Ferry- RoPax、Ro-Ro に分配した。

以上、BAU の検討を行うため、2008 年の船種船型別の DWT マイル比率を利用して、2050 年までの船種船型別の海上荷動き量トンマイルの推計を行った。ただし、対象品目の設定が行われていない船種である Other liquid tanker、Ferry pax only、またトンマイル値を設定していない船種 Cruise、Refrigerated については、ここでの推計結果に含まれていない。図 付録 1-5、図 付録 1-6、図 付録 1-7 は、シナリオ別のトンマイル推計値である。船種・船型別の推計値は、表 付録 1-5、表 付録 1-6 及び表 付録 1-7 に示す。RCP4.5 のケースを見ると、全船種の合計としては、2008 年の海上荷動き量合計 (約 41 兆トンマイル) に比べ、2050 年は約 2 倍に増加するという推計結果となった。

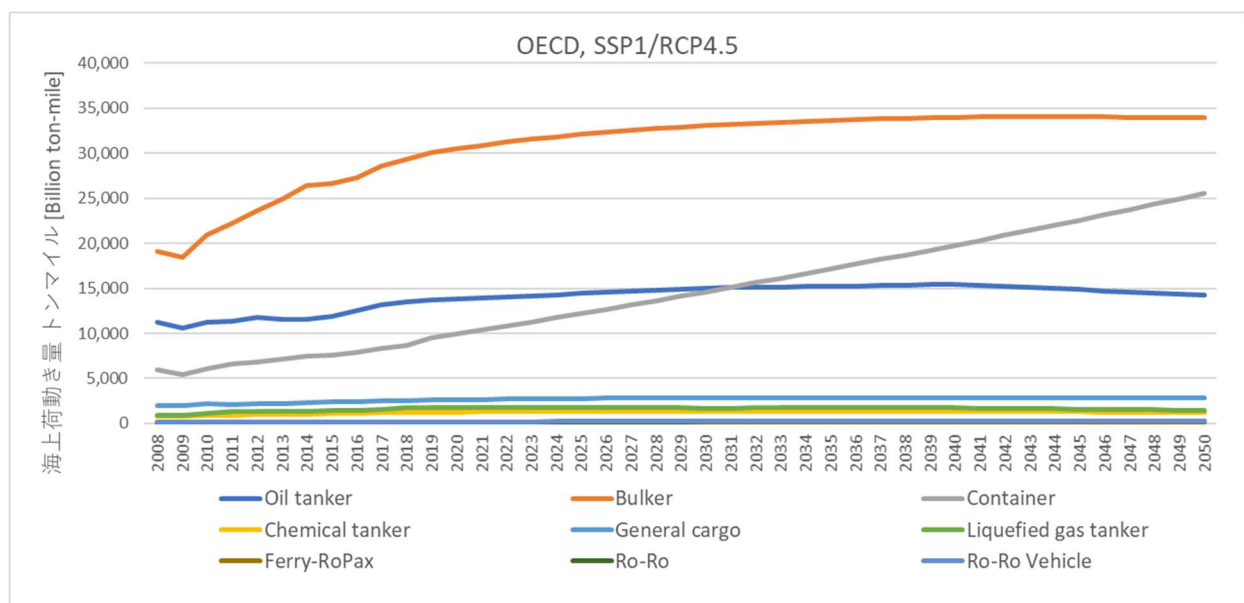


図 付録 1-5:2050 年までのトンマイル推計 (OECD, SSP1/RCP4.5 シナリオ)

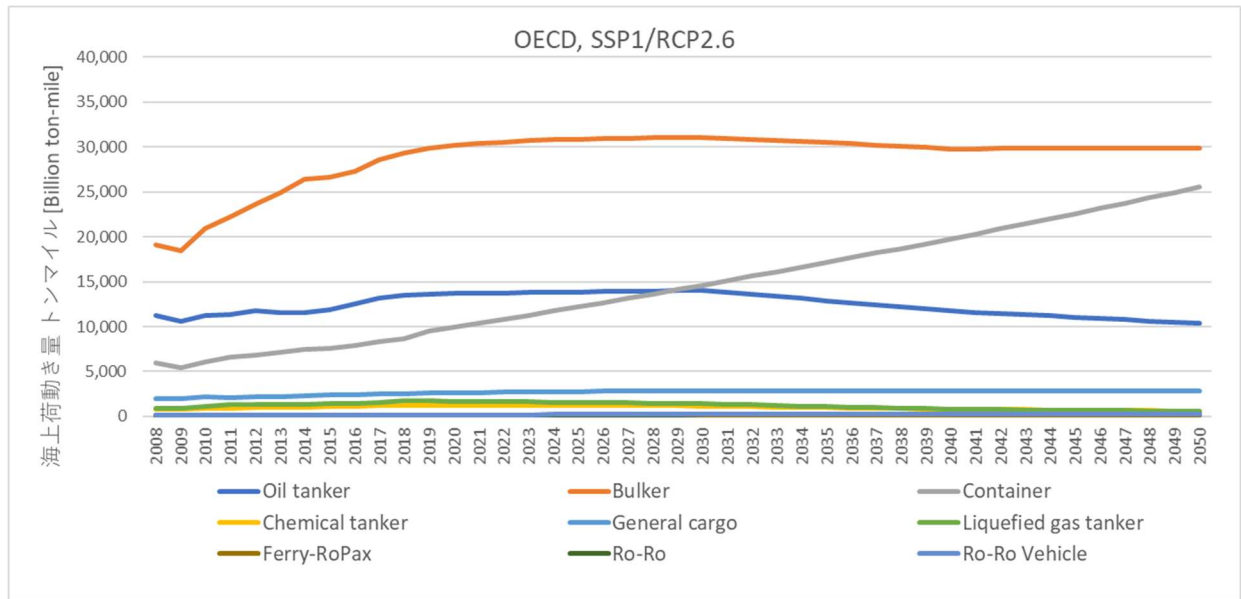


図 付録 1-6: 2050 年までのトンマイル推計 (OECD, SSP1/RCP2.6 シナリオ)

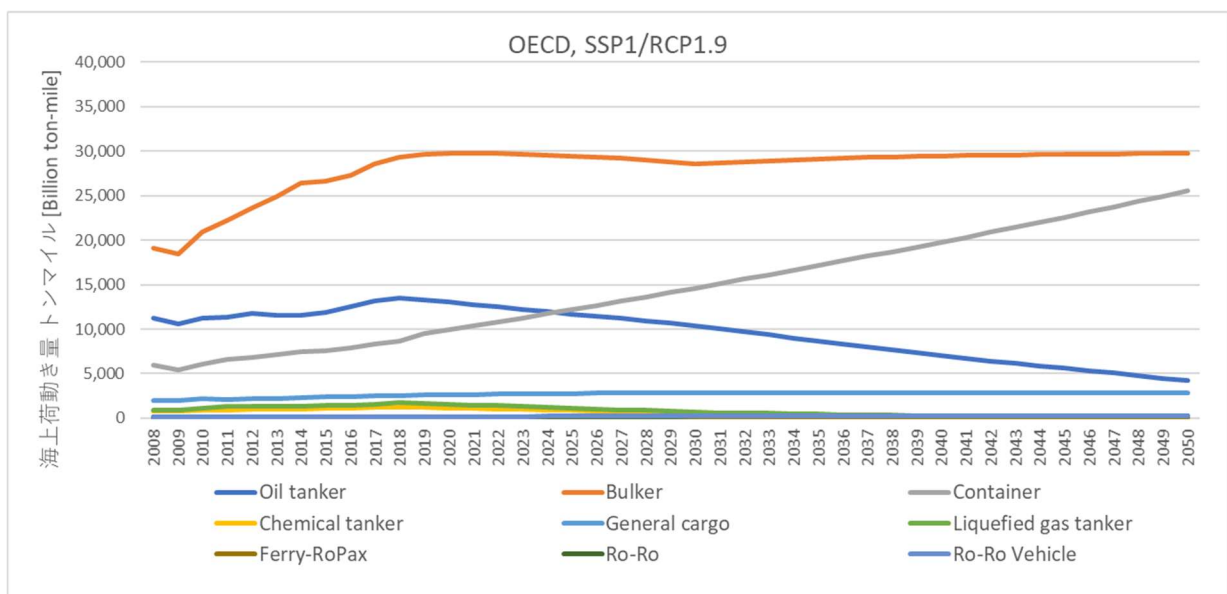


図 付録 1-7: 2050 年までのトンマイル推計 (OECD, SSP1/RCP1.9 シナリオ)

表 付録 1-5: 船種・船型別海上荷動き量トンマイルの推計結果
(シナリオ OECD, SSP1/RCP4.5)

船種	船型	2008 年	2020 年	2030 年	2040 年	2050 年
Oil tanker	-4,999 dwt	127	161	176	181	166
	5k-9,999 dwt	72	91	99	102	93
	10k-19,999 dwt	76	96	105	108	99
	20k-59,999 dwt	1,082	1,368	1,497	1,542	1,409
	60k-79,999 dwt	940	1,188	1,300	1,339	1,224
	80k-119,999 dwt	3,219	4,070	4,453	4,588	4,191
	120k-199,999 dwt	1,391	1,664	1,805	1,845	1,727
	200k+ dwt	4,312	5,157	5,596	5,720	5,353
Bulkер	-9,999 dwt	131	198	218	225	226
	10k-34,999 dwt	3,516	5,309	5,825	6,008	6,038
	35k-59,999 dwt	6,402	9,667	10,607	10,940	10,994
	60k-99,999 dwt	4,150	6,935	7,543	7,863	7,805
	100k-199,999 dwt	3,893	6,681	7,078	7,148	7,108
	200k+ dwt	985	1,690	1,791	1,808	1,798
Container	-999 teu	228	379	556	754	973
	1k-1,999 teu	659	1,095	1,609	2,180	2,813
	2k-2,999 teu	724	1,203	1,767	2,395	3,090
	3k-4,999 teu	1,781	2,958	4,346	5,890	7,599
	5k-7,999 teu	1,644	2,731	4,012	5,438	7,016
	8k-11,999 teu	892	1,481	2,176	2,949	3,805
	12k-14,499 teu	54	90	133	180	232
Chemical tanker	-4,999 dwt	21	32	33	34	30
	5k-9,999 dwt	57	89	92	95	85
	10k-19,999 dwt	139	216	222	230	205
	20k+ dwt	605	942	967	1,005	893
General cargo	-4,999 dwt	324	428	461	468	469
	5k-9,999 dwt	497	656	707	717	719
	10k+ dwt	1,174	1,549	1,671	1,694	1,698
Liquefied gas tanker	-49,999 cbm	93	182	177	178	151
	50k-199,999 cbm	706	1,376	1,340	1,349	1,140
	200k+ cbm	102	199	194	195	165
Ferry-RoPax	-1,999 grt	21	28	30	31	31
	2k+ grt	106	139	150	152	153
Ro-Ro	-4,999 dwt	44	58	62	63	63
	5k+ dwt	101	133	143	145	145
Ro-Ro Vehicle	-3,999 vehicle	35	42	49	52	53
	4k+ vehicle	125	148	173	183	186

単位: Billion ton-mile

表 付録 1-6: 船種・船型別海上荷動き量トンマイルの推計結果
(シナリオ OECD, SSP1/RCP2.6)

船種	船型	2008 年	2020 年	2030 年	2040 年	2050 年
Oil tanker	-4,999 dwt	127	160	164	137	121
	5k-9,999 dwt	72	90	92	77	68
	10k-19,999 dwt	76	95	98	82	72
	20k-59,999 dwt	1,082	1,358	1,397	1,168	1,027
	60k-79,999 dwt	940	1,179	1,213	1,014	892
	80k-119,999 dwt	3,219	4,040	4,156	3,474	3,054
	120k-199,999 dwt	1,391	1,645	1,692	1,414	1,243
	200k+ dwt	4,312	5,098	5,244	4,384	3,854
Bulkер	-9,999 dwt	131	198	213	214	216
	10k-34,999 dwt	3,516	5,286	5,689	5,728	5,765
	35k-59,999 dwt	6,402	9,625	10,359	10,430	10,498
	60k-99,999 dwt	4,150	6,739	6,369	5,453	5,463
	100k-199,999 dwt	3,893	6,616	6,688	6,347	6,330
	200k+ dwt	985	1,674	1,692	1,606	1,601
Container	-999 teu	228	379	556	754	973
	1k-1,999 teu	659	1,095	1,609	2,180	2,813
	2k-2,999 teu	724	1,203	1,767	2,395	3,090
	3k-4,999 teu	1,781	2,958	4,346	5,890	7,599
	5k-7,999 teu	1,644	2,731	4,012	5,438	7,016
	8k-11,999 teu	892	1,481	2,176	2,949	3,805
	12k-14,499 teu	54	90	133	180	232
Chemical tanker	-4,999 dwt	21	31	29	20	15
	5k-9,999 dwt	57	88	82	57	42
	10k-19,999 dwt	139	212	197	138	101
	20k+ dwt	605	924	861	600	440
General cargo	-4,999 dwt	324	428	461	468	469
	5k-9,999 dwt	497	656	707	717	719
	10k+ dwt	1,174	1,549	1,671	1,694	1,698
Liquefied gas tanker	-49,999 cbm	93	177	148	84	60
	50k-199,999 cbm	706	1,340	1,123	634	451
	200k+ cbm	102	194	163	92	65
Ferry-RoPax	-1,999 grt	21	28	30	31	31
	2k+ grt	106	139	150	152	153
Ro-Ro	-4,999 dwt	44	58	62	63	63
	5k+ dwt	101	133	143	145	145
Ro-Ro Vehicle	-3,999 vehicle	35	42	49	52	53
	4k+ vehicle	125	148	173	183	186

単位: Billion ton-mile

表 付録 1-7: 船種・船型別海上荷動き量トンマイルの推計結果
(シナリオ OECD, SSP1/RCP1.9)

船種	船型	2008 年	2020 年	2030 年	2040 年	2050 年
Oil tanker	-4,999 dwt	127	153	121	82	49
	5k-9,999 dwt	72	86	68	46	28
	10k-19,999 dwt	76	91	72	49	29
	20k-59,999 dwt	1,082	1,297	1,032	695	419
	60k-79,999 dwt	940	1,126	896	604	364
	80k-119,999 dwt	3,219	3,859	3,069	2,068	1,247
	120k-199,999 dwt	1,391	1,571	1,250	842	508
	200k+ dwt	4,312	4,869	3,874	2,609	1,574
Bulkер	-9,999 dwt	131	197	207	213	215
	10k-34,999 dwt	3,516	5,259	5,527	5,707	5,756
	35k-59,999 dwt	6,402	9,576	10,064	10,393	10,482
	60k-99,999 dwt	4,150	6,507	4,980	5,279	5,385
	100k-199,999 dwt	3,893	6,539	6,227	6,289	6,304
	200k+ dwt	985	1,654	1,575	1,591	1,595
Container	-999 teu	228	379	556	754	973
	1k-1,999 teu	659	1,095	1,609	2,180	2,813
	2k-2,999 teu	724	1,203	1,767	2,395	3,090
	3k-4,999 teu	1,781	2,958	4,346	5,890	7,599
	5k-7,999 teu	1,644	2,731	4,012	5,438	7,016
	8k-11,999 teu	892	1,481	2,176	2,949	3,805
	12k-14,499 teu	54	90	133	180	232
Chemical tanker	-4,999 dwt	21	29	15	2	0
	5k-9,999 dwt	57	81	42	6	0
	10k-19,999 dwt	139	196	102	14	0
	20k+ dwt	605	855	446	63	0
General cargo	-4,999 dwt	324	428	461	468	469
	5k-9,999 dwt	497	656	707	717	719
	10k+ dwt	1,174	1,549	1,671	1,694	1,698
Liquefied gas tanker	-49,999 cbm	93	164	71	28	17
	50k-199,999 cbm	706	1,243	537	215	129
	200k+ cbm	102	180	78	31	19
Ferry-RoPax	-1,999 grt	21	28	30	31	31
	2k+ grt	106	139	150	152	153
Ro-Ro	-4,999 dwt	44	58	62	63	63
	5k+ dwt	101	133	143	145	145
Ro-Ro Vehicle	-3,999 vehicle	35	42	49	52	53
	4k+ vehicle	125	148	173	183	186

単位: Billion ton-mile

付録 2 代替燃料・CO₂ 削減技術の実現可能性に関する検討の詳細

1 代替燃料の実現可能性検討

2050 年目標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、バイオ燃料等が挙げられる。

表 付録 2-1 にそれぞれの代替燃料の主な物性をまとめた。同表における熱量あたりの CO₂ 排出量及び燃料体積は、低位発熱量 40.4 MJ/kg、CO₂ 排出係数 Cf=3.114 t-CO₂/t-Fuel、比重 0.94 の船用重油(C 重油)を基準としている。また、熱量あたりの CO₂ 排出量は IPCC 国別温室効果ガスインベントリガイドライン²¹ (以下、IPCC ガイドライン) 及び EEDI 計算ガイドライン²²の低位発熱量を基に算出している。IPCC ガイドラインは、2018 年のパリ協定締約国会合における決議 (Decision 18/CMA.1) によって、各国の温室効果ガスインベントリ作成の際に使用することが求められている。

表 付録 2-1 代替燃料の主な物性

	比重 (液化時)	低位発熱量 [GJ/ton]	CO ₂ 排出係数 Cf (t-CO ₂ /t-Fuel)	熱量あたり CO ₂ 排出量 (C 重油を 1 と した index)	熱量あたり燃 料体積 (液化時、C 重 油を 1 とした index)
水素	0.071	120	0	0	4.46
アンモニア	0.68	20.5	0	0	2.72
LNG	0.48	48.0	2.750	0.74	1.65
メタン	0.422	50.0	2.750	0.71*	1.80
バイオディーゼル	0.88	27.0	[2.816]	[0]	1.60
メタノール	0.80	19.9	1.375	0.90*	2.39
エタノール	0.79	26.8	1.913	0.93*	1.79

* カーボンリサイクル燃料(合成燃料、バイオ燃料)の場合は「0」。カーボンリサイクル燃料等の排出の考え方については付録4参照。

表 付録 2-2 に各代替燃料の特徴をまとめている。各代替燃料の特徴・開発状況等の詳細については以下のとおりである。

²¹ 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories

²² IMO, 2018 GUIDELINES ON THE METHOD OF CALCULATION OF THE ATTAINED ENERGY (MEPC.308(73))

表 付録 2-2 代替燃料の主な特徴

	熱量あたり CO ₂ 排出 量※1	熱量あたり 燃料体積 ※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・燃料電池船は実績 あり ・陸上ボイラー・ガスタービンの実績あり	・燃料体積が C 重油の2倍を超える ・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 ・燃焼制御等の技術課題
アンモニア	0 N ₂ O 未考 慮	2.72	・船上 CO ₂ 排出ゼロ ・ガスタービン燃焼の実績あり	・燃料体積が C 重油の2倍を超える ・NO _x 発生 ・N ₂ O 発生(温室効果は CO ₂ の約 300 倍 とされている) ・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	・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 削減効果限定的 ・メタンスリッ プ ・化石燃料使用に対する国際的な逆風の 可能性
メタン (CH ₄)	0.71 [0※2] メタンスリッ プ未考慮	1.80	・バイオは IPCC ガイドラインにおいてカーボ ンニュートラル扱い ・実用化済の LNG と技術的に同等に使用可 能 ・LNG のインフラ転用可能	・現在 IPCC ガイドラインにおいて、カーボ ンリサイクルメタンをカーボンニュートラルと する明示的な記載は無い
バイオディー ゼル	[0]	(~1.2)	・バイオは IPCC ガイドラインにおいてカーボ ンニュートラル扱い ・陸上において混焼は商業レベル	・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 ₃ OH)	0.90 [0※2]	2.39	・バイオは IPCC ガイドラインにおいてカーボ ンニュートラル扱い ・メタノール燃料船は建造実績あり ・取扱い容易	・現在 IPCC ガイドラインにおいて、カーボ ンリサイクルメタンをカーボンニュートラルと する明示的な記載は無い ・燃料体積が C 重油の2倍を超える ・着火性、大出力化の技術課題
エタノール (C ₂ H ₅ OH)	0.93 [0※2]	1.79	・バイオは IPCC ガイドラインにおいてカーボ ンニュートラル扱い ・バイオエタノールの生産は商業レベル ・取扱い容易	・現在 IPCC ガイドラインにおいて、カーボ ンリサイクルメタンをカーボンニュートラルと する明示的な記載は無い ・着火性、大出力化の技術課題

※1 熱量あたりの CO₂ 排出量及び燃料体積(液化時)は、低位発熱量 40.4 MJ/kg、CO₂ 排出係数 Cf=3.114 t-CO₂/t-Fuel、比重 0.94 の船用重油(C 重油)を基準としている。熱量あたりの CO₂ 排出量は IPCC ガイドライン及び IMO の EEDI 計算ガイドライン²³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 0 となる。

※3 各燃料を使用する際、設計上必要となるスペースについては燃料体積以外の要素も考慮する必要がある。

(1)水素

水素は、利用時に温室効果ガスを排出しないため、電力、運輸、熱・産業プロセスのあらゆる分野の低炭素化を達成できる燃料として国内外で期待されている。また、再生可能エネルギーの余剰電力で水素を製造・貯蔵することによって再生可能エネルギーの導入を拡大することができること、世界的に偏在する石油と異なり再生可能エネルギーや多種の化石燃料から製造することが可能であり、一次エネルギーの調達リスクを低減できること等の特徴を持つ。また、水素を船舶の直接的な燃料として使用しない場合であっても、水素はアンモニアや合成燃料の製造にも関連する重要なエネルギー源である。

水素を船舶のエネルギー源として用いる場合には、往復動内燃機関(レシプロエンジン)及び燃料電池を用いる方法等があり、船舶分野においては小型の水素燃料混焼船および水素燃料電池船の実績^{24,25}がある。

²³ 2018 GUIDELINES ON THE METHOD OF CALCULATION OF THE ATTAINED ENERGY (MEPC.308(73))

²⁴ CMB, <http://www.hydroville.be/en/hydroville/>.

²⁵ Water-GO-Round, <https://watergoround.com/>.

また、陸上分野においてはボイラやガスタービン等の連続燃焼の技術開発が活発に行われており、多くの実績がある²⁶。表 付録 2-3 に水素を燃料とする動力源の特徴をまとめる。

水素を直接貯蔵・輸送する方法としては、液体水素及び高圧タンクがあげられる。また、水素を他の物質に吸着、又は転換する技術の研究開発も盛んであり、吸蔵合金による水素貯蔵、アンモニアや有機ハイドライド等の物質に水素を転換して輸送する方法が提案され、一部で開発・商用化が進められている²⁷（アンモニアについては別途後述）。いずれの方法にしても、船舶用の供給インフラ設備の整備やバンカリング技術の開発・確立が必要不可欠である。表 付録 2-4 にそれぞれの水素貯蔵技術の特徴をまとめる。

表 付録 2-3: 水素を燃料とする動力源の特徴

形式	特徴
往復動内燃機関 (レシプロ エンジン)	● 小型船舶では水素混焼エンジン搭載の実績がある。 ● 国内においても小型船舶に水素混焼エンジンを搭載する計画がある²⁸。 ● 30～50%程度までの水素混焼エンジンは比較的容易に実現できると考えられる。 ● 水素専焼エンジンについては、燃焼制御技術が必要となり得る（最小着火エネルギーが小さい。燃焼速度が速い。）。 ● 水素脆性があるため使用する材料に制限を受ける。 ● 燃料電池使用と比べて、純度が低い水素でよい（低コスト化の可能性）。 ● 混焼・専焼機関では NO_x 濃度が天然ガス焚き機関（リーンバーン）より高くなる。 ● 排ガス中に未燃の水素が含まれる可能性があるが、爆発下限界（LEL）の 4 %より低いため安全上の問題はなく、環境への影響も極めて小さいと考えられる。 ● 予混合エンジンでは、クランクケースへの水素漏れが問題となり得る（ブローバイガス）。
燃料電池	● 自動車用の燃料電池が（水素直接使用）として一部商用化されている。 ● 水素燃料電池船の実証試験や商用船の建造計画が進められている。 ● 燃料電池単体の場合、現在の内燃機関と同等以上の効率を持つ（ただし、補機類を含めると船用主機と同程度。）。 ● 負荷変動に対して燃料電池は対応できない可能性がある。 ● エンジン使用と比べて、高い純度の水素が必要となる。 ● 電気推進の場合、モーターの大型化が必要であり、設置の課題がある。また、大型船舶の場合、大出力モーターの開発が必要となる。 ● 通常、NO_x を発生しない（固体電解質型では高温反応となるため微量ながら NO_x 発生あり。）。 ● 余剰水素の処理が必要となる（通常は問題ないレベル）。
ガスタービン	● 1 MW 級水素タービン発電機の実証プラント等が開発されている。
ボイラ	● 混焼ボイラは十分に商業レベルである。

²⁶ NEDO：水素発電・Power to Gas（P2G）分野，<https://www.nedo.go.jp/content/100895064.pdf>。

²⁷ 瀬川敦司：有機ハイドライドからの高純度水素回収技術開発，ENEOS Technical Review，第 52 巻第 1 号，2010。

²⁸ ツネイシクラフト&ファシリティーズ，<https://www.tsuneishi-g.jp/news/topics/2019/08/26601>。

表 付録 2-4: 水素貯蔵技術の特徴

形式	特徴
液体水素	● 熱量基準、重油と比べ貯蔵タンクの大きさが約 4.5 倍大きくなる。 ● ボイルオフガス(BOG)の処理・利用が可能。 ● 比重が軽くポンプで圧力をあげにくい。 ● 潜熱が天然ガスより高いため、熱交換器が大きくなる。 ● ガスの密閉に注意が必要となる。 ● 20 K(-253℃)程度の極低温となり、高度な断熱技術、シール技術が必要となる。
高圧タンク	● 最高圧力 35~70 MPa 程度の高圧タンクが燃料電池自動車等で使われている。 ● 中小型船舶の場合、高圧ボンベ型高圧水素の使用が考えられる(ただし短距離航行のみ。陸上のインフラも必要。) ● 主に強度面から高圧タンクの大型化が難しい。 ● 大型の付属機器(安全弁等)の開発が必要となる。
吸蔵合金	● 低いエネルギー密度により補給される船舶までの運送効率がほかの技術より劣る(貯蔵効率が低い。) ● 燃料供給に長時間を要する可能性がある。また、供給時は発熱反応となるため、温度管理が必要となり得る。 ● 燃料として使用する際、重量あたりの貯蔵量が小さい(エネルギー密度が MCH(メチルシクロヘキサン)比約 0.1 倍と小さい。)ため、船舶への適用が難しい。 ● 使用時は吸熱反応となるため、ヒーティング設備等の温度管理が必要となり得る。 ● 新しい水素吸蔵物質の研究・開発が進められており、引き続き調査が必要。
有機ハイドライド	● MCH 等を使用する場合、陸上のインフラ整備が必要となる。 ● 水素の熱発生率から換算すると現在の約 7 倍のタンク容量が必要(専焼機関を想定する場合。) ● 水素分離装置が必要となる。 ● 水素貯蔵・脱水素反応の高効率化が必要である。

(2) アンモニア

アンモニア(NH₃)は、水素と同様、利用時に温室効果ガスを排出しないカーボンフリー燃料として期待されている。二元燃料レシプロエンジン、ガスタービン及び燃料電池の研究開発が国内外で行われているものの、現時点でアンモニアを燃料として利用する動力システムは実用化されていない。また、水素と比べて液体貯蔵がしやすく、バンカリングについても既存の荷役技術を利用できるといった特徴がある。

エンジン開発の例として、海外船用エンジンメーカーが、今後 2~3 年でアンモニアを利用する 2 ストロークエンジンを開発する計画を発表している²⁹。開発するアンモニアエンジンは、LPG と重油の二元燃料用と同様の燃料噴射システムをベースに開発するとされている。LPG は、プロパン又はブタンを主成分とするガスで、アンモニアと似た圧力・温度状態で液化することができる。そのため、アンモニア特有の腐食性への対策がなされれば、LPG 用の施設において容易にアンモニアを扱うことができると考えられる。

アンモニアガスタービンの研究開発事例としては、SIP(戦略的イノベーション創造プログラム)エネルギーキャリア、アンモニア直接燃焼の研究開発の一部として、平成 26 年度~平成 30 年度までに実施された研究開発が挙げられる³⁰。50 kW 実証機による専焼運転の他、ガスタービンに用いる燃焼機の個別の研究開発も実施された。また、触媒技術や温度管理が課題となるが、燃料電池(SOFC)の使用も見込まれ、研究開発が

²⁹ R. S. Laursen, "Ship Operation Using LPG and Ammonia as Fuel on MAN B&W," in NH₃ Fuel Conference 2018, Pittsburgh, 2018.

³⁰ SIP エネルギーキャリア「アンモニア直接燃焼」：アンモニアガスタービンコジェネレーションの技術開発終了報告書, <https://www.jst.go.jp/sip/dl/k04/end/team6-5.pdf>.

進められている³¹。

一方、アンモニアは、他の燃料と比べて燃焼反応性が低く、専焼が難しいこと、それに伴い未燃アンモニアが発生しやすいこと、燃焼時に NO_x が発生しやすいことに加え、人体への毒性があることが課題として挙げられる。また、アンモニアの使用により、温室効果が CO₂ の約 300 倍と言われている亜酸化窒素 (N₂O) が発生する可能性があることから、実態把握とともに課題解決のための技術開発が必要になると考えられる。

(3) 液化天然ガス (LNG)

天然ガス (Natural Gas) は地中から採掘される可燃性ガスである。ガス田から純粋に採掘される場合や原油産出時の随伴ガスとして採掘される場合が多い。一方、これまで採掘が困難であったシェール層からの採掘ガス (シェールガス) も利用されるようになっている。

天然ガスの性状は産出される地域によって異なるが、いずれもメタンを主成分とし、その他にエタン、プロパン、ブタン等の炭化水素、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。液化して貯蔵・運搬する場合、不純物は液化設備の閉塞やガス設備の腐食の原因となるため、一般に、前処理行程において分離・除去される。したがって、液化天然ガス (LNG) に含まれる不純物は非常に少なくなり、より清浄な燃料として使用できる。

LNG を燃料とするエンジン及び船舶は既に実用化されており、IMO において関連規則も整備されている。また、水素等と比べてエネルギー体積密度が高いこと、関連機器やインフラ設備を容易に、後述のカーボンリサイクル燃料及びバイオメタン燃料へ転用できること等の特徴がある。

一方、CO₂ 削減効果は船用重油 (C 重油) に対して▲26 %程度であり限定的である (表 付録 2-1 参照)。また、内燃機関で使用する場合はメタンスリップの評価とそれにより抽出される課題への対応を検討する必要がある。

(4) カーボンリサイクル燃料 (合成燃料)

カーボンフリー燃料は炭化水素を介せずに水素を生産する方法等の呼称であるのに対して、カーボンリサイクル燃料とは、カーボンリサイクル技術 (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である。当該燃料は、E-Fuel (エレクトロ・フューエル)、E-Gas、E-diesel 等の名称でも呼ばれている。

CO₂ を原料に製造可能な合成燃料のうち、船用で使用中もしくは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、ジメチルエーテル (DME) がある。これらは燃焼時に CO₂ を発生するものの、カーボンリサイクル技術を利用することから大気中への CO₂ 排出を抑制することができる。現行の IPCC ガイドラインに基づけば、陸上で回収された CO₂ 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 (現行の IPCC ガイドラインに基づく、本プロジェクトとしての解釈。付録4参照。)。

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 の技術を使用でき、LNG のインフラ設備も転用できる。また、メタノールは取り扱いが容易であり、メタノール燃料船の建造実績もある。

(5) バイオ燃料

バイオ燃料は、IPCC ガイドラインにおいてカーボンニュートラルとして扱われている。菜種油、大豆油、パーム油、廃食油等からエステル化処理をして製造されるバイオディーゼル (BDF、FAME) の他、メタン、メタ

³¹ 戦略的イノベーション創造プログラム : <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20170703-2/index.html> (2019 年 2 月参照)。

ノール、エタノール等の燃料を生成することができる。バイオディーゼルやバイオエタノールの生産は十分に商業レベルであり、特にバイオディーゼルの混焼は陸上分野において商業レベルで使われている。

一方、バイオ燃料は石油燃料と比べて酸化しやすいため長期保管が課題となること、供給量に制限があり、さらに陸上分野・航空機分野における消費が見込まれていることから、船用分野への供給が期待できるか不明確であること等の課題がある。

2 各 GHG 削減技術の実現可能性検討

代替燃料以外の主な GHG 削減技術としては、風力推進、バッテリー推進及び船上 CO₂ 回収等が挙げられる。表 付録 2-4 にこれらの特徴をまとめている。

表 付録 2-4 各種 CO₂ 削減技術の特徴

	効率改善 ポテンシャル	利点	課題
風力推進	活用程度による	・ 船上排ガス全てゼロ	・ 規模的に主たる推進エネルギーとならない
太陽電池	活用程度による	・ 船上排ガス全てゼロ	・ 規模的に主たる推進エネルギーとならない
空気潤滑	2～6%程度改善	・ 既存技術で実施可能	・ 効果は船体形状や運航状況により異なる。
低摩擦塗料	2～5%程度改善	・ 既存技術で実施可能	・ 効果は船体形状や運航状況により異なる。
省エネダクト	2～5%程度改善	・ 既存技術で実施可能	・ 効果は船体・船尾形状や運航状況により異なる。
船首形状変更	2～5%程度改善	・ 既存技術で実施可能	・ 効果は船体・船首形状や運航状況により異なる。
廃熱回収発電装置	1～5%程度改善	・ 既存技術で実施可能	
バッテリー推進	活用程度・活用方法による	・ 船上排ガス全てゼロ ・ 一部小型船の主推進機関として、一部大型船の推進補助機関として実績あり	・ 重量及び体積エネルギー密度が低い ・ 高圧充電インフラ未整備 ・ (通常の燃料補給よりも) 長い補給所要時間
船上 CO ₂ 回収	排ガス中の CO ₂ を 85%以上回収	・ (理論上) 燃料油を問わない ・ (理論上) 削減率大	・ 船上搭載実績なし ・ 燃料種によっては排ガスの前処理が必要(脱硝、脱硫等) ・ 回収後の CO ₂ 体積・重量大

(1) 船上 CO₂ 回収

船上 CO₂ 回収とは、熱機関から排出される排ガス中の CO₂ を分離・回収する技術である。船舶分野においては実績がないものの、陸上分野においては、CCS (Carbon dioxide Capture and Storage) と呼ばれる発電所や化学工場等から排出された CO₂ を分離して集めて地中等に貯留する技術、あるいは CCUS (Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage) と呼ばれる分離した CO₂ を利用する技術が、国内外で実用化・実証プロジェクトとして進められている。

CO₂ 回収技術にはいくつかの方法があり、船上 CO₂ 回収技術の候補は表 付録 2-5 のようにまとめられる。膜分離は CO₂ のみを選択的に分離できる膜を使う方法で分離回収に要するエネルギーは他の方法に比べて少ないといった特徴がある³²。

吸着分離は吸着材に CO₂ を吸着させる方法で、吸着材にはゼオライト系多孔質等が使われている³³。CO₂ の吸着と分離は圧力差もしくは温度差で駆動するため若干のエネルギー消費を伴うものの常温で貯蔵できる

³² 甲斐照彦：新規 CO₂ 分離膜の創製と実用化への導入，Vol.35，No.4，pp.194-200，2010。

³³ 峯元雅樹，松隈洋介，ハニカム吸着材を用いた CO₂ 分離・回収システムの最適化に関する研究，九州大学グローバル COE プログラム新炭素資源学ニューズレター，Vol.4，pp.5-8，2010。

といった特徴がある。

吸収分離は化学的に CO₂ を吸収剤に吸収させる方法で、その材料にはアミン系水溶液が多く使われている³⁴。この方法も吸収後は常温で貯蔵でき、排出 CO₂ の 85%以上の回収が可能と見られる等の優れた特徴を持つ。一方、CO₂ の吸収と分離には圧力差か温度差に伴うエネルギー消費が生じる。そのため現在はこの消費エネルギーを減らすための吸収剤の研究開発が進められ、これを使った実証プラントが稼働している。

回収後の CO₂ は単成分、固気二相、CO₂ を含む多成分液体のいずれかでの貯蔵が有望である(表 付録 2-6 参照)。単成分の CO₂ はドライアイス、液体(三重点-56.6℃、0.52 MPa 以上)、超臨界状態(31.1℃、7.4 MPa 以上)のいずれかの状態で貯蔵可能であるがいずれもエネルギー消費を伴う。また、固気二相あるいは多成分液体で船舶に積載する場合、吸収剤や吸着材の軽量化と単位体積あたりの CO₂ 吸収・吸着量の増加が課題となる。

船上 CO₂ 回収の課題としては、燃料種や CO₂ 回収方法次第では排ガスの処理(脱硝、脱硫、ばいじん除去等)が必要であること、回収・貯蔵する CO₂ の体積及び重量が大きいこと(液体貯蔵とした場合、燃料として使用する船用重油の 4 倍程度)等があげられる。また、船舶用 CO₂ 回収装置や CO₂ 荷揚用インフラ設備の低コスト化を含めた技術開発、燃料として再利用する場合にはメタネーション等による再燃料化技術の確立、CO₂ 取引制度の整備等が必要である。

表 付録 2-5 船上 CO₂ 回収技術の候補

回収法	所要エネルギー	開発状況	備考
膜分離	小	分離膜を開発中	高分子膜、イオン液体膜等
吸着分離	中	高濃度 CO ₂ 用は商用化、低濃度 CO ₂ 用は開発中	事前の水分除去を必要とする
液体吸収分離	大(熱)	所要エネルギーが小さい吸収剤を開発中	実証プラントが稼働中
固体吸収分離	中(熱)	吸収・吸着剤を開発中	材料としてアミン化合物と多孔質の単体等

表 付録 2-6 CO₂ 貯蔵技術の種類と特徴

状態	内容	所要エネルギー	CO ₂ 純度
単成分	ドライアイス、液体 CO ₂ 又は超臨界 CO ₂	中	高
固気二相	CO ₂ を含む固体(吸着剤又は吸収剤)	低	高
多成分液体	CO ₂ 吸収済みの吸収剤、水	低	中

(2) 風力推進

風速の 3 乗に比例する風力エネルギーを推進力に利用する方法であり、軟質帆、硬質帆、ロータ式、風牽引式等、様々な方式の技術開発が進められている。欧州では Ro-Ro 船やフェリー等、数隻の内航船が運用中であり、外航船における実証試験の準備も進められており、国内においても風力推進を実船に搭載する取

³⁴ 北村英夫, 江上法秀, 大橋幸夫, 石炭火力発電所排ガスからの CO₂ 分離回収パイロットプラント試験, 東芝レビュー, Vol.65, No.8, pp.31-34, 2010.

組が進められている^{35,36}。

風力推進は、自然エネルギーの直接利用という観点で有望な GHG 削減技術であるが、船舶の定時性を維持するためにはエンジン推進との併用が必要となり、規模的に主たる推進エネルギーとならず補助的に使用されるものと想定される。GHG 削減効果は、導入する船種や方式、航路、季節、天候等により変動し、CE Delft の報告³⁷によれば船用重油による GHG 排出量の 1～23%の削減効果があるとされている。

風力推進は確立された技術であり、導入時期は早いと考えられるが、高い初期コスト、荷役時の扱い(帆の場合)、運航中の展開・回収(カイトの場合)のほか、上甲板部の構造や荷役機器の制限等により導入が一部の船種に限られる可能性等の課題がある。

(3)太陽電池

太陽電池は、光エネルギーを電気エネルギーに変換する素子から構成される電力機器であり、電力を蓄える機能はなく、光から直接電力を生成する発電機である。現在実用化されている太陽電池の種類としては、大別してシリコン系、化合物系、有機系等があり、光吸収層の材料や素子の形態等によりさらに細分化されている。

現在普及している太陽電池のエネルギー変換効率は 15～20 %程度であるが、多接合型化合物系の太陽電池等、同効率 40 %を目指した研究開発も進められている³⁸。

太陽電池の設置面積が広く確保できる船舶では、発電電力を適切に利用することによって、GHG 排出削減に有効な技術であると考えられる。

一方、太陽電池は、太陽光が必要であるため日中のみ発電することができ、日中を通して入射太陽光が変化することから、発電電力を安定化することはできない。このため、船上で利用するためには二次電池との併用が必要であるとともに、二次電池への充電装置(コンバータ)が必要となり、初期コストが高くなる。また、エネルギー変換効率 40 %以上の太陽電池が実用化・普及した場合においても、太陽電池だけで船舶のすべての推進動力を賄うのは困難であると考えられる。

(4)二次電池による電池推進

現在、陸上分野において普及が進められている二次電池には、ニッケル・水素電池、リチウムイオン電池、ナトリウム・硫黄電池、スーパーキャパシタ等がある。また、次世代二次電池として期待されている二次電池としては、全固体電池(全固体リチウム電池)や、リチウム空気電池、空気亜鉛電池、アルミニウム空気電池等の金属空気電池がある。表 付録 2-7 に主な次世代蓄電池の特徴と開発動向をまとめている³⁹。

船舶分野においても、リチウムイオン電池を用いた小型船舶の主推進装置、あるいは大型船舶の推進補助装置として実績がある。

これらの二次電池の課題として、重量及び体積エネルギー密度が低いことがあげられる。現状の二次電池

³⁵ 株式会社商船三井, <https://www.mol.co.jp/pr/2019/19074.html>

³⁶ 川崎汽船株式会社, <https://www.kline.co.jp/ja/news/csr/csr-2630416184971214499/main/0/link/190607JP.pdf>

³⁷ CE Delft, Study on the analysis of market potentials and market barriers for wind propulsion technologies for ships, 2016.

³⁸ 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構：太陽光発電開発戦略（NEDO PV Challenges）, 2014, <https://www.nedo.go.jp/content/100575154.pdf>, .

³⁹ 菅野了次, 加藤祐樹：次世代電池を牽引する全固体電池開発, Nature Energy, AUTHOR INTERVIEW, Vol.1, No.4, 2016.

は、重量・体積エネルギー密度が船用重油と比較して数十分の一程度であり、2030 年以降普及するであろう次世代二次電池においても重量・体積エネルギー密度は船用重油と比較して 1/6～1/10 程度であると予想される。

二次電池は船上で排ガスや GHG を発生しないという点で理想的な技術であるが、高圧充電インフラ設備の整備や通常の燃料補給よりも長い充電時間を必要とすること等の課題があり、長距離航路の船舶に適用するのは難しく、比較的短距離を航行する船舶に導入されやすいと考えられる。

表 付録 2-7 主な次世代蓄電池の特徴と開発動向

		(金属)空気電池	全固体電池
材 料	正極	空気(酸素)、電気伝導性多孔質(炭素等)	リチウム酸化物(コバルト、ニッケル・マンガン系等)
	負極	リチウム金属、亜鉛、アルミニウム、マグネシウム、鉄	炭素、合金系(リチウム金属等)
	媒介	電解質、電解液等	固体電解質
特 性	長所	・高エネルギー密度(1 kWh/kg 以上) ・埋蔵量が多い材料を使用できる(材料調達が容易) ・火災が起きにくい	・高エネルギー密度(800 Wh/kg 以上) ・高出力 ・充電時間の短縮 ・安全性向上(液漏れや火災が起きない)
	課題	・正極の高性能化 ・電解液の耐久性 ・電極の再生	・リチウムイオンの移動抵抗が少ない固体電解質の発見と大量生産 ・極材料と固定電解質との接合
動向		・亜鉛空気電池とマグネシウム空気電池(共に一次電池)として実用化 ・二次電池としての研究が進行中	・固体電解質と接合技術に関する研究が進行中

(5)その他の GHG 削減技術

その他の GHG 削減技術として、空気潤滑、低摩擦塗料、省エネダクト、船首形状変更、廃熱回収発電装置等があげられる。

空気潤滑とは、船底を均一な気泡で覆うことにより摩擦抵抗を低減する技術である。本技術が搭載された実証試験では、約 6 %の正味省エネ効果が確認された例がある⁴⁰。本技術は、喫水が深い船舶ではその効果は小さくなるが、幅広の浅喫水船では省エネ効果が大きく、船種によっては CO₂ 排出削減に有効な技術であると考えられる。

低摩擦塗料は、船体表面は塗装される塗装表面と海水との間に生じる摩擦抵抗を低減する塗料であり、様々な塗料メーカーにより開発され、製品化されている。効果は船体形状や運航状況により異なるが、今までに行われてきた実船実証試験の結果を踏まえると2～5 %程度の CO₂ 削減が可能であると考えられる⁴¹。

図 付録 2-3 に示す船尾ダクト型省エネデバイス WAD(Weather Adapted Duct)は、船尾部のプロペラ直前に装備する省エネダクトであり、2016 年度末時点で 110 隻の実船に搭載されている。本デバイスは、瘦型

⁴⁰ 上入佐光，他：空気潤滑法による船舶の省エネルギー技術，海上技術安全研究所報告，第 14 巻，第 2 号，pp.135-156，2014，https://www.nmri.go.jp/en/_src/26928/PNM21140206-00.pdf。

⁴¹ 矢野吉治，他：新型船底防汚塗料による船舶の省エネルギー化，神戸大学大学院海事科学研究科紀要，第 9 号，pp.79-87，2012，<http://www.lib.kobe-u.ac.jp/repository/81003940.pdf>。

船における効果は大きくないものの、肥大船においては水槽試験において約 5 %程度の CO₂ 削減効果が確認されており、船種によっては有効な技術であると考えられる。

船首形状を変更することによっても船体抵抗を減らすことができる⁴²。効果は船体形状や運航状況により異なるが、概ね 5 %程度の CO₂ 削減効果があると推定され、有効な技術であると考えられる。

廃熱回収発電装置としては、エンジン排ガスの熱エネルギーで蒸気等の媒体を生成し、蒸気タービン発電機を用いる方法等があげられる。既存の技術を利用することができ、概ね 1～5 %程度の CO₂ 削減効果があると推定される。



図 付録 2-3 実船搭載された WAD⁴³

⁴² 櫻田顕子，他：実海域省エネ船首 COVE の開発，海上技術安全研究所第 16 回研究発表会講演集，2016，<https://www.nmri.go.jp/oldpages/main/publications/paper/pdf/2B/16/00/PNM2B160003-00.pdf>，.

⁴³ 川島英幹，他：実海域省エネデバイスの開発に関する研究，海上技術安全研究所報告，第 17 巻，第 1 号，pp.73-86，2017.

付録 3 ゼロエミッション／超低炭素船のコンセプト船

1 水素燃料船

(1) 設計コンセプト

ア 概要

20,000TEU 級コンテナ船及び 80,000DWT 級バルクキャリアの 2 船型を対象に、水素燃料船として必要である主機や補機の水素ガスエンジンの検討、水素燃料として必要な燃料タンクの種類や配置、燃料ガス供給システム、バンカリングシステム等の付帯設備の検討を行い、さらに技術的課題の抽出を行った。

イ 水素燃料

水素の特徴として一般的に極端に低い沸点、低い発火エネルギー、広い可燃燃範囲、火炎の低い視認性、高い透過性、水素脆化には留意を要する。

ウ 水素貯蔵方法の選定

本コンセプト設計では水素キャリアとして液化水素を採用した。水素は密度が小さくエネルギー量に対して体積が大きいため、メタンと比較して燃料タンク容積を必要とする。燃料タンク容積は貨物スペースに影響するため小さくすることが望ましい。水素は-253℃まで冷却することで液化させ、体積を気体比で 1/800 に圧縮して水素密度を高く保つことができる。これが、容積効率の観点からの液化水素のメリットである。

燃料使用時は蒸発器で気化させたのち直接使用でき、脱水素工程や精製等が不要な点も、船舶のように設備の設置スペースが限られている場合には大きなメリットである。

液化水素を燃料として使用する場合において、極低温に対応する大型防熱タンクの開発や液化に要するエネルギーの低減等の課題はあるものの、燃料供給の機器構成は LNG/LPG 燃料船と類似しており、既存技術の応用で対応することが可能である。

エ 設計コンセプト基本方針

現状運航しているコンテナ船及びバルクキャリアから要求事項や制約条件等を大きく変更せず、燃料を油もしくは天然ガスから水素に変更した場合に必要な検討を行うことを基本方針とした。

オ 水素補給地

共通コンセプトとして前提とする水素補給地を図 付録 3.1-1 に示す。液化水素の補給地は世界 5 か所として欧州、中東、豪州、日本、南米と仮定した。

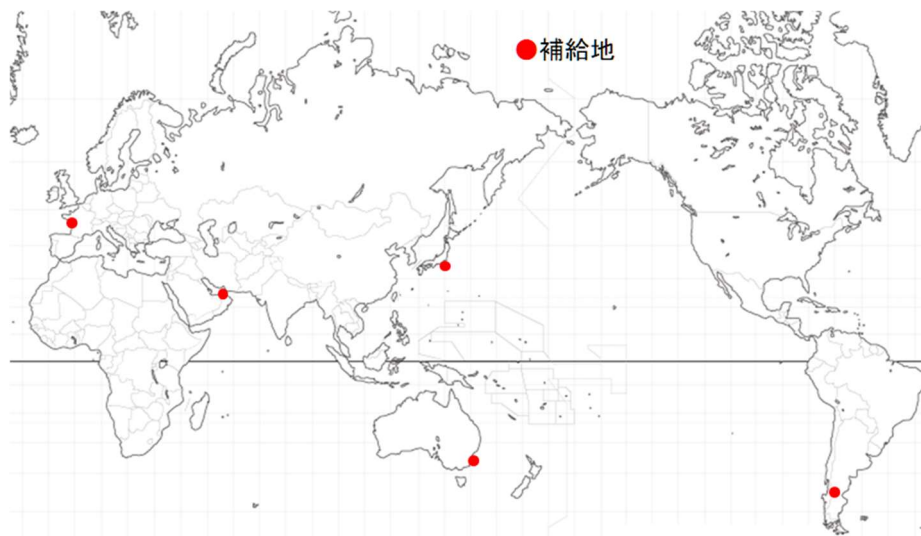


図 付録 3.1-1:水素補給地

カ 航路及び航続距離

80,000DWT 級バルクキャリアについては貨物や航路が限定されることは珍しいため、今回のコンセプトとしては図 付録 3.1-1 に示す水素補給地を可能な限り経由しながら、貨物を運ぶことと仮定した。下記の主な航路を想定し、80,000DWT 級バルクキャリアの航続距離は 7,000NM と設定した。

<主な航路>

- 日本-豪州 約 5,200NM
- 中東-欧州 約 4,400NM
- 日本-中東 約 6,800NM
- 欧州-南米 約 6,900NM

20,000TEU 級コンテナ船については、図 付録 3.1-2 の定期航路を想定した。航路は東シナ海、マラッカ海峡、インド洋、スエズ運河、地中海、ジブラルタル海峡、ケルト海を経由する日本⇄欧州航路と設定した。日本、欧州とも補給地であるため、航続距離は片道分と仮定し、11,500NM と設定した。

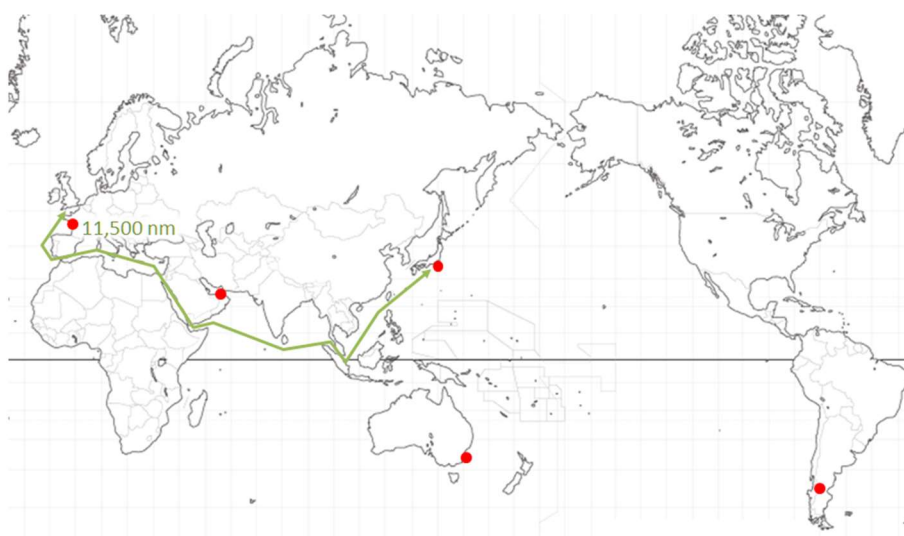


図 付録 3.1-2 コンテナ船航路

キ 水素燃料適用機関

GHG ゼロエミッション船舶に搭載する推進用の主機関及び発電用の補機関は、水素ガスを燃料とする燃焼機関として技術的に高い熱効率の達成を想定することができる二元燃料式のレシプロエンジンとした。

推進システムの基本コンセプトとして、現在、世界的に普及しつつある天然ガス燃料の二元燃料式レシプロエンジンが主たる動力源となる推進機器構成をそのまま維持・継承することとし、天然ガスを水素に燃料転換することによって GHG ゼロエミッションを実現させることを想定した。水素燃料を使用できないような運航状況やエンジン状態においては、低硫黄燃料油への燃料切替によってエンジンの運転継続を可能とする二元燃料式エンジンを前提とした。

水素ガスをエンジンで燃焼する方式としては、予混合希薄燃焼(オットーサイクル)と直噴拡散燃焼(ディーゼルサイクル)があり、どちらも適用の可能性がある。本コンセプトにおいては、以下の点を踏まえてオットーサイクル型のエンジンをガス燃焼方式として想定した。

- 液化水素燃料タンクで発生するボイルオフガス(気体水素)を無駄にすることなくエンジンで消費するためには、水素ガスを圧縮して供給する必要がある。
- 水素ガスは体積発熱量が小さいために、供給する燃料体積は格段に大きくなり、これに伴って水素ガス圧縮に必要な動力も非常に大きくなることが予想される。
- オットーサイクルは、比較的低・中圧の水素ガス供給でも燃料として利用可能である。

水素ガスを予混合希薄燃焼させる場合の技術的課題として、水素燃焼の伝播が速いことや、着火エネルギーが非常に小さいことに起因する異常燃焼(ノッキング)の発生のし易さ、水素燃焼温度が高いことに起因するサーマル NO_x の生成・排出量の増加が予想されるため、これらを効果的に抑制する手段として、排ガス再循環システム(EGR system : Exhaust Gas Recirculation system)の搭載を計画した。これに加え、シリンダ内燃焼圧力を現在の予混合希薄燃焼式の天然ガスエンジンに比べて若干低めに設定した。このような場合、熱効率は現状の天然ガスエンジンから若干の低下が見込まれるものの、他の燃焼機関と比べれば依然として同等以上の熱効率を達成し得る水素ガスエンジンが、近い将来において技術的に実現可能と考えられる。

機関室内におけるエンジンへの水素ガス供給配管はエンジン付き配管も含めて全て、排気式の強制換気によって常時負圧に維持される二重管方式を採用して水素ガス漏洩の事象にも安全に対処する設計とした。

80,000DWT 級バルクキャリア並びに 20,000TEU 級コンテナ船を対象として、以上のコンセプト・仕様を有する水素ガス利用の二元燃料式レシプロエンジンの搭載を計画する場合に必要なとされるエンジン主要諸元について、表 付録 3.1-1(推進用主機関)及び表 付録 3.1-2(発電用補機関)に示した。

<推進用主機関 (低速2ストローク)>

- 水素ガスと低硫黄留出油を燃料とする二元燃料低速2ストロークエンジン(予混合希薄燃焼)
- 水素ガスの希薄予混合気は微量のマイクロパイロット(低硫黄留出油)により着火
- 水素ガス燃焼によるノッキングを回避するためのシリンダ内圧力設定及び EGR 搭載
- 水素ガス燃焼による NO_x 排出量の増加を抑制するための EGR 搭載

表 付録 3.1-1：推進用水素燃料主機エンジンの主要諸元

項目	単位	80,000DWT 級 バルクキャリア	20,000TEU 級 コンテナ船	備考
最大出力	kW	8,000	60,000	
定格回転数	rpm	84	80	
燃料消費率	kJ/kWh	7,830		
全長	mm	10,700	25,500	
全幅	mm	8,200	11,500	
高さ	mm	10,400	15,300	

<発電用補機関（中速4ストローク）>

- ・ 水素ガスと低硫黄留出油を燃料とする二元燃料中速4ストロークエンジン（予混合希薄燃焼）
- ・ 水素ガスの希薄予混合気は微量のマイクロパイロット（低硫黄留出油）により着火
- ・ 水素ガス燃焼によるノッキングを回避するためのシリンダ内圧力設定及び EGR 搭載
- ・ 水素ガス燃焼による NO_x 排出量の増加を抑制するための EGR 搭載

表 付録 3.1-2：発電用水素燃料補機エンジンの主要諸元

項目	単位	80,000DWT 級 バルクキャリア	20,000TEU 級 コンテナ船	備考
最大発電出力	kWe	1,000	5,000	
定格回転数	rpm	720	600	
燃料消費率	kJ/kWh	9,000	8,000	
全長	mm	6,800 * ¹	8,800	
全幅	mm	2,000 * ¹	3,500	
高さ	mm	3,500 * ¹	5,200	* ¹ 共通台板付発電機セット

ク 水素燃料タンク

①タンク形式及び防熱システム

搭載する水素貯蔵タンクの仕様について IGF コードへの適合を前提として検討した。必要容量が大きいと予想される 20,000TEU 級コンテナ船のタンクについては、容積効率を考慮して方形タンクでタイプ B タンク、材質はアルミ合金とし、80,000DWT 級バルクキャリアのタンクについては、俵型でタイプ C タンク、材質はステンレス鋼として検討を実施した。

液化水素は極低温であり、高性能の防熱システムが必要なことから、陸上タンクや世界初の液化水素運搬船で採用されている真空防熱とした。内槽には積層断熱材を施す。

タンク構造についてはタンク大型化による問題等今後の課題として詳細展開が必要であるが、基本方針として各タンクは二重構造とし内槽と外槽の間を真空として断熱する。タイプ B タンクに要求される部分二次防壁の役割は外槽が担うこととした。また、ボイルオフガス量については液化水素運搬船での実績を基に推定

した。後述するタンク容量より一日当たりの水素蒸発量(BOR)は 80,000DWT 級バルクキャリアが 0.39%/day、20,000TEU 級コンテナ船が 0.27%/day となる。

また、タンクの最大許容設定圧力はタイプ B タンクについては IGF コードに準じて 0.07MPa とし、常時設計圧力範囲内に維持するための設備が追加が必要となる。タイプ C タンクについては、上記 BOR から IGF コード 6.9.1 要求の 15 日間保持より 0.2MPa とした。

②水素燃料タンク容量

上記にて設定した航続距離及び上記の主機燃費より各船の必要容量を検討した。また充填制限値は IGC コード 6.8.1-1 の以下の計算式にて算出した。

$$LL = FL \frac{\rho_R}{\rho_L}$$

LL が充填制限値、FL は積込制限値で規則にて 98%と定められている、 ρ_R は基準温度における水素の比重、 ρ_L は充填時の温度における水素の比重である。また算出された値より大きい値を認められることはあるが、95%を超えてはならないと定められている。

ここでタイプ B タンクは大気圧での充填となり LL は $\rho_L = \rho_R$ となり、上記要件より 95%となる。

また、タイプ C タンクでは ρ_L は大気圧での水素比重 0.071 とし、基準温度における水素比重は上記最大許容設定圧力の 0.2MPa に対し飽和温度 -250°C、 $\rho_R = 0.068$ とし、LL は 94%となる。

上記より各船の必要タンク容量は以下の値とした。

- 80,000DWT 級バルクキャリア : 4,000m³
- 20,000TEU 級コンテナ船 : 30,000m³ (15,000m³ x 2)

③タンク配置

80,000DWT 級バルクキャリアについては、カーゴホールドの甲板上ではカーゴホールドの開口や荷役作業の障害となるため配置が困難であり、甲板下では甲板上スペースに無駄なスペースができてしまう。従い、船尾甲板(係留設備の上部)に配置した。必要タンクサイズの影響により居住区位置を船首側へ配置し、全長は港湾制限(カムサ港と仮定)により延長が困難であるためカーゴホールドが削られるが、型深さを上げることでカーゴホールド容量は保持した。

20,000TEU 級コンテナ船は、甲板上及び甲板下にもコンテナを搭載され、荷役は上部から作業することを考慮し、さらに居住区下のコンテナを搭載できないスペースを有効活用するため、甲板下の居住区下のスペースを含めたホールドスペースに配置した。

ケ 水素燃料供給システム

燃料供給システムの概略図を図 付録 3.1-3 に示す。基本方針として LNG 燃料船の燃料供給システムと機器構成は同じと想定した。特徴としては、液化水素タンクよりポンプにて昇圧して送り、蒸発器と熱交換器からバッファータンクに供給、ボイルオフガスは圧縮機にて昇圧し、熱交換器からバッファータンクへ供給し、そこから各機器へガスを供給する。

燃料管は、極低温部分は真空二重管とする。また、機関室内等の安全区画に配置される燃料管はダクト内部に配置する。水素特有の極低温及び高い透過性等に対応した機器や配管の選定が必要となる。

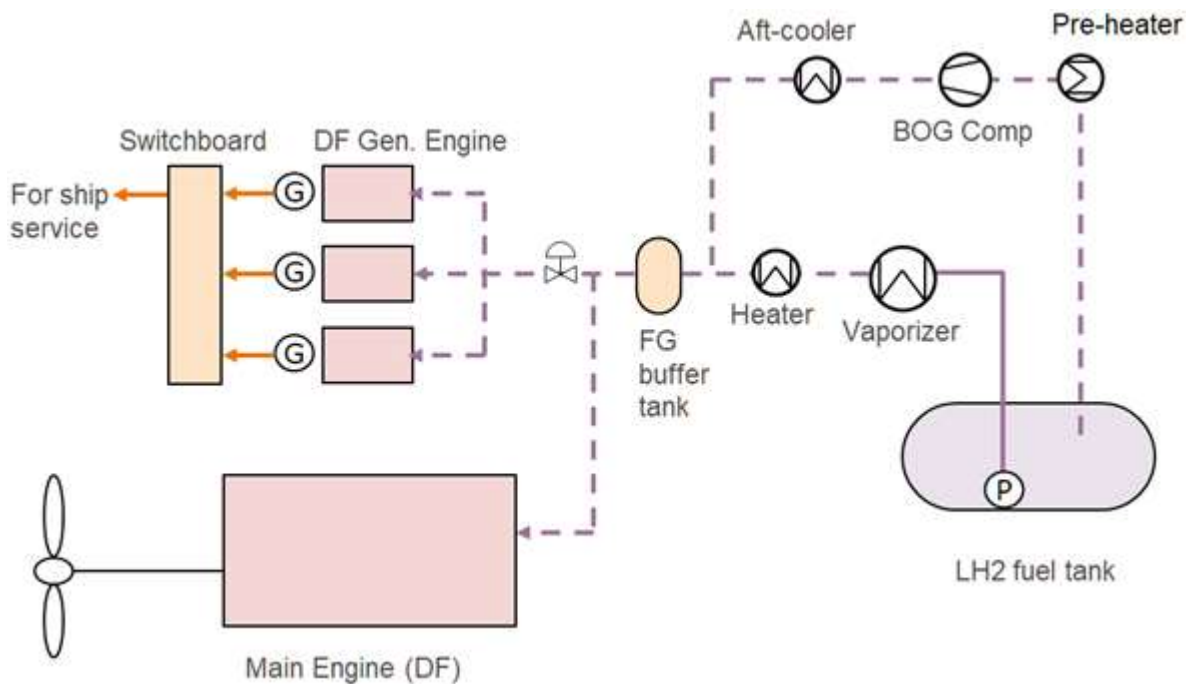


図 付録 3.1-3 燃料供給システム概略図

(2)コンセプト船の仕様

ア 80,000DWT 級バルクキャリアの仕様

80,000DWT 級バルクキャリアのコンセプトスケッチ(側面図と平面図)を図 付録 3.1-4 に示す。その主要目は表 付録 3.1-3 のとおりである。また、外観イメージを図 付録 3.1-5 に、水素燃料関連機器の配置を図 付録 3.1-6 に示す

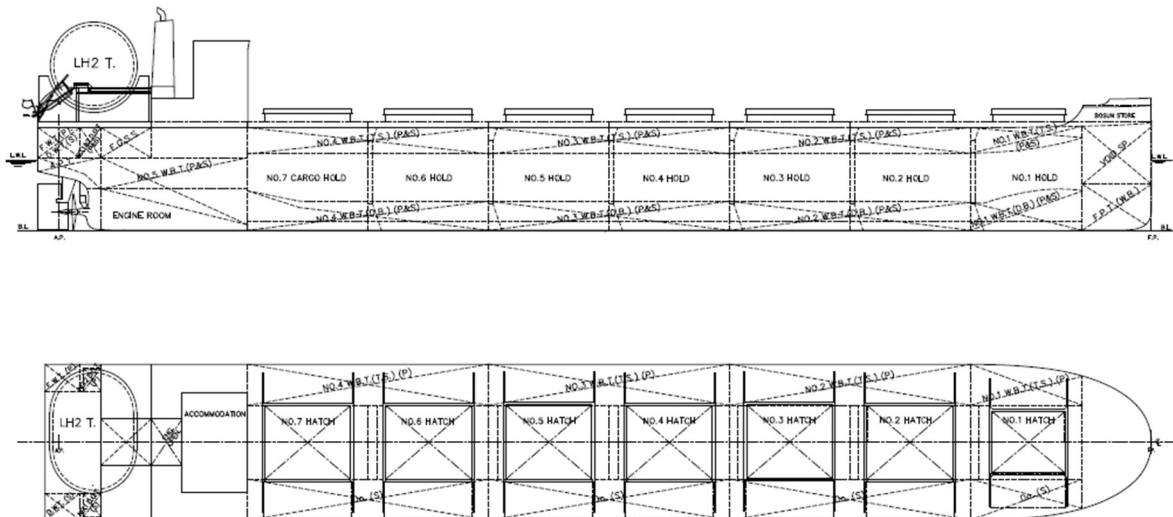


図 付録 3.1-4 : 80,000DWT 級バルクキャリア側面図及び平面図(水素燃料船)

表 付録 3.1-3 : 80,000DWT 級バルクキャリアの主要目(水素燃料船)

全長	228.9 m
船長	226.00 m
全幅	32.24 m
深さ	21.20 m
喫水	
計画喫水	12.20 m
夏季満載喫水	14.50 m
載貨重量	
計画喫水	63,500 ton
夏季満載喫水	80,000 ton
貨物ホールド	97,000m ³
液化水素タンク	4,000 m ³
計画速力	14.0 knots
航続距離	7,000 NM
主機	1 台
最大出力	8,000kW x 84 rpm
常用出力	6,800kW x 80 rpm
発電機	3 台
	1,000 kW



図 付録 3.1-5 : 80,000DWT 級バルクキャリアの外観イメージ(水素燃料船)

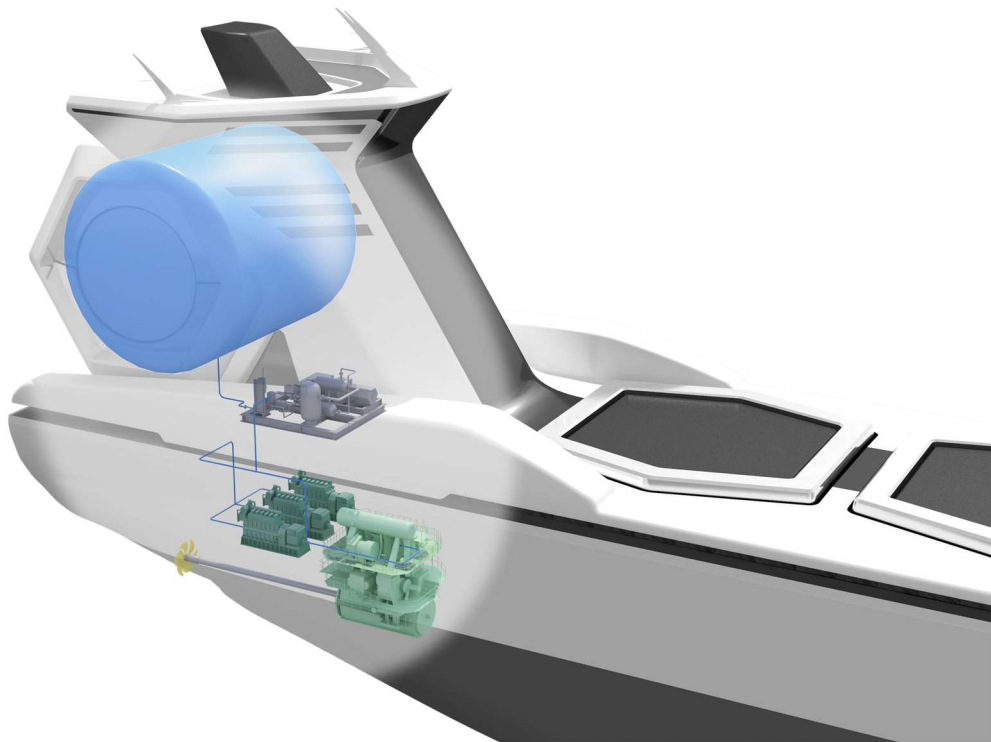


図 付録 3.1-6 : 80.000DWT 級バルクキャリアの水素燃料関連機器配置

イ 20,000TEU 級コンテナ船の仕様

20,000TEU 級コンテナ船のコンセプトスケッチ(側面図と平面図)を図 付録 3.1-7 に示す。その主要目は表 付録 3.1-4 のとおりである。また、2050 年での姿を図 付録 3.1-8 に水素燃料関連機器の配置を図 付録 3.1-9 に示す

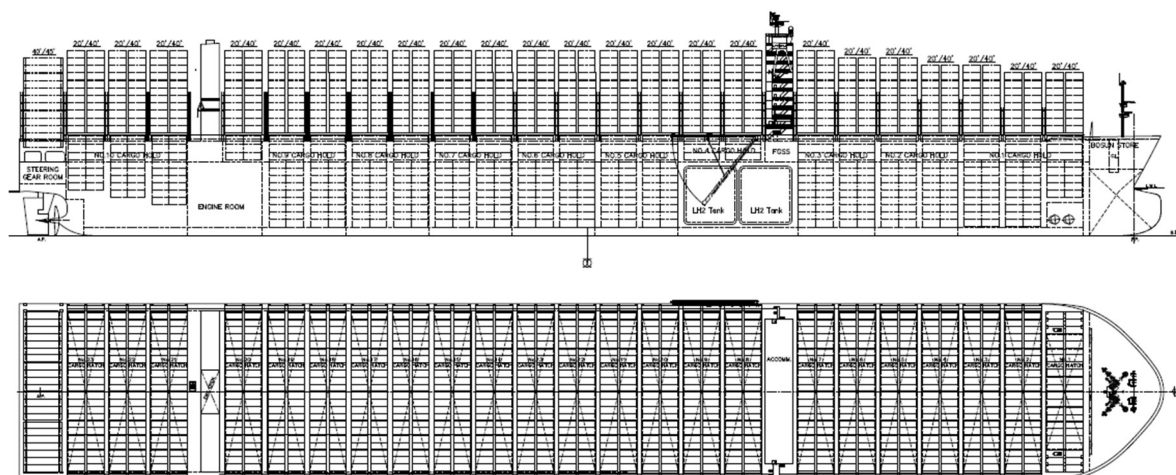


図 付録 3.1-7 : 20,000TEU 級コンテナ船側面図及び平面図(水素燃料船)

表 付録 3.1-4 : 20,000TEU 級コンテナ船の主要目(水素燃料船)

全長	399.90 m
船長	383.00 m
全幅	61.50 m
深さ	33.00 m
喫水	
計画喫水	14.50 m
夏季満載喫水	16.50 m
載貨重量	
計画喫水	184,000 ton
夏季満載喫水	228,000 ton
液化水素タンク	30,000 m ³
コンテナ個数	21,000 TEU
冷凍コンテナプラグ	1,100 TEU
計画速力	22.5 knots
航続距離	11,500 NM
主機	1 台
最大出力	60,000 kW x 80 rpm
常用出力	54,000 kW x 77 rpm
発電機	3 台
	5,000 kW



図 付録 3.1-8 : 20,000TEU 級コンテナ船の外観イメージ(水素燃料船)

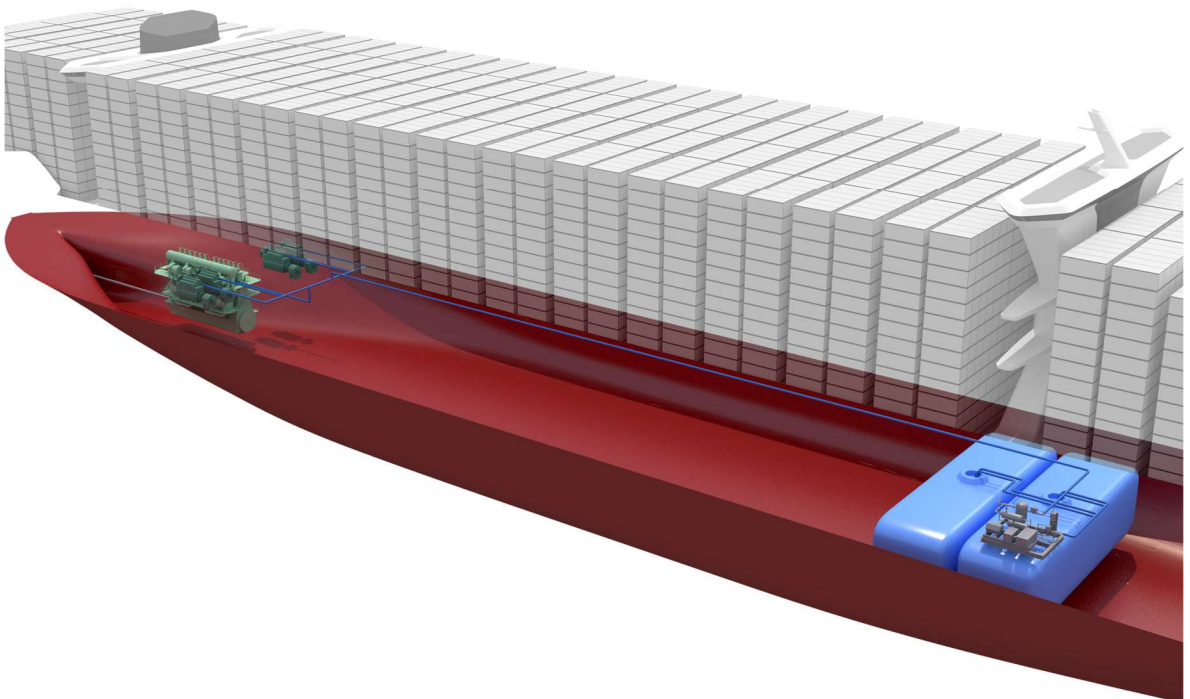


図 付録 3.1-9 : 20,000TEU 級コンテナ船の水素燃料関連機器配置

(3)コンセプト船実用化に必要な技術的課題

ア タンクの大型化

俵型タンクに関し、現存する液化水素運搬船の 1250m³ タンクにおいて既にサクシオンウェル、ドーム部及びその周り板厚が製造及び加工性を考慮した最大板厚となっており、タンクが大型化することにより当該箇所が発生応力が高くなると現実的な板厚に収まらなくなる課題がある。また、大型化により外槽の直径が大きくなるため、内外槽間の真空による負圧に対する外槽座屈強度が厳しくなる。

方形タンクに関し、材質がアルミ合金の場合、溶接による歪が大きくなることから精度管理や溶接部(特に手溶接部)の溶接品質管理が重要となる。

また、内槽と外槽間の支持要領及び相対変位の吸収機構の開発が必要である。

イ 防熱システム

燃料タンク及び輸送配管に真空防熱を採用しているが、金属が固有に持っている吸着ガス及び吸蔵ガスによる放出ガスや O リングやガスケットからの透過ガスにより真空が劣化するため、本劣化を止めるもしくは極力少なくする技術が必要である。また真空防熱の代わりに LNG 燃料船に用いられている発泡タイプの防熱を採用した場合、発泡ガスが極低温で凝固してしまい性能が発揮できない可能性があるため、新しい防熱システムの開発が必要である。

ウ 水素漏洩

水素は分子量が小さくフランジ等の接手から漏洩しやすいため、容易に漏洩しないような工夫が必要である。また、閉囲区画(機関室含む)において、水素ガスが漏洩した場合でも危険な濃度に達することなく開放区画に排出可能な換気システムの設計並びに閉囲区画の構造及び燃料水素ガス配管の保護が必要である。さらに水素ガス雰囲気下(漏洩時を含む爆発反応範囲内)において、火花や静電気の排除及び水素に適切なグレードの防爆等級を持った機器を採用する等、適切に設計する必要がある。

エ 燃料補給

体積当たりの発熱量が重油や天然ガスより低く、燃料補給の機会が増えると予想されるため、燃料補給地や水素燃料供給船の充実が必要である。また、燃料補給中の蒸発によるロスを防ぐための適切な補給要領を検討する必要がある。

オ 燃料供給システム

LNG/LPG 燃料と異なる物性(低い沸点、軽い比重)であるため、水素燃料エンジン要求圧力、温度及び負荷変動に対して適切な構成及び制御が必要である。また、機関室を含む閉囲区画において水素ガスの特徴に適した漏洩検知及び遮断、火災防止及び火災検知に対する装置の選定や設置場所等の検討が必要である。

カ 機関

水素ガスを火炎伝ば燃焼(予混合燃焼)させる場合、燃焼速度が速いことにより、異常燃焼し易く、かつ NO_x が生成し易いため、燃焼速度を制御する必要がある。実用化においては、予混合希薄燃焼(オットーサイクル)型と直噴拡散燃焼(ディーゼルサイクル)型のいずれが最適か、更なる技術評価が必要となる点を留意する必要がある。

燃料弁は水素の分子が小さく微小な隙間からでも漏れるため、燃料弁のシールが難しく、さらに潤滑性が小さいため摩耗が進みやすい。したがって十分な耐久性及び信頼性を備えた燃料弁の開発が必要である。また、水素ガスは可燃範囲が広く最小着火エネルギーが小さいため、万が一失火して排気管内に未燃水素ガスが流れた場合、管内で燃焼する可能性がある。

2 アンモニア燃料船

(1) 設計コンセプト

ア 概要

80,000DWT 級バルクキャリアを対象に、アンモニア燃料船のコンセプト設計を行うとともに、課題の抽出を行った。

イ アンモニア燃料

図 付録 3.2-1 に示すように、再生可能エネルギー由来の水素と窒素から製造したアンモニアを船用燃料として利用することでライフサイクル評価としても GHG ゼロエミッション船舶の達成が期待できることから、ゼロエミッション船の一つとしてアンモニア燃料船を選択した。

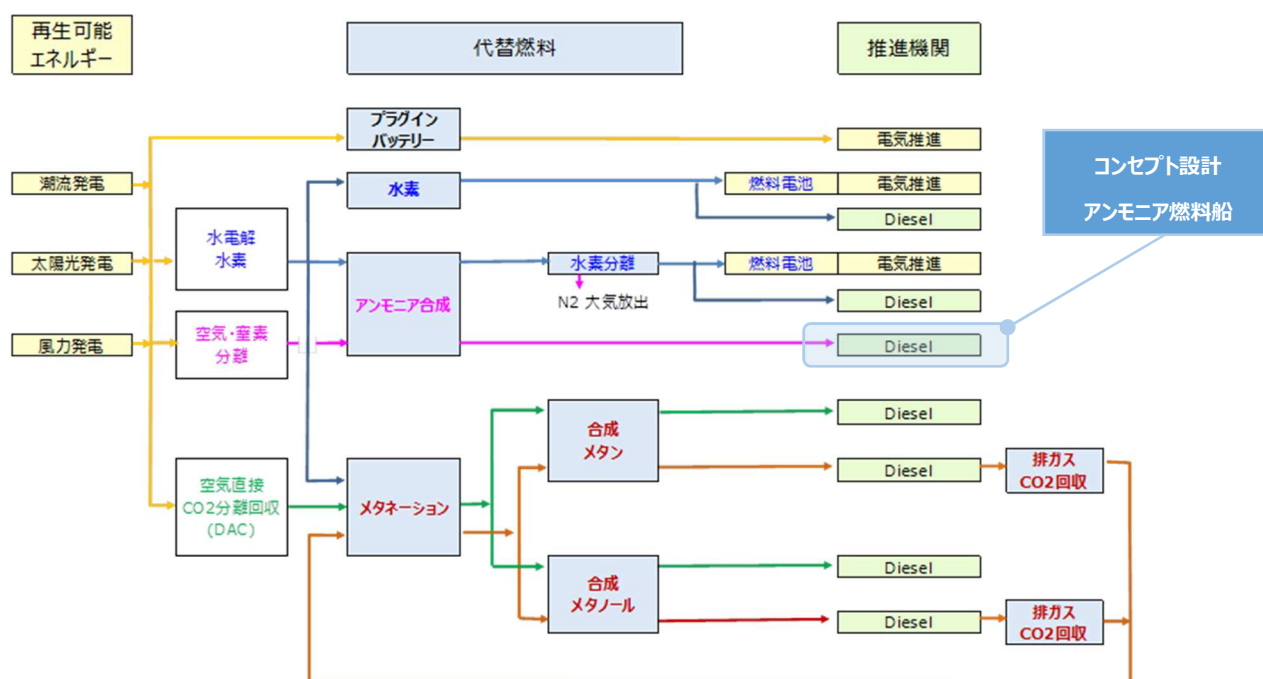
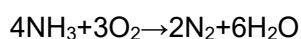


図 付録 3.2-1 代替燃料製造チャート

① 燃焼性

アンモニア燃焼の総括反応式は以下のとおりである。



アンモニアの可燃範囲は 15%-25%と狭く、また層流燃焼速度はメタンの概ね 20%程度しかなく、燃焼しにくい燃料と言える。ディーゼル燃料としても、オクタン価が 130 と自己着火しにくい一方で、着火温度が 650℃と既存のディーゼル燃料より高い。また、燃料中に窒素原子を含むため燃焼に伴い NO_x が発生する可能性がある。一方で、炭素が含まれないことから、不完全燃焼の場合に発生するのは窒素酸化物であり、すすは生成しない。

②毒性

アンモニアは、アルカリ性の無色の気体で、腐食性と極めて強い刺激臭がある。粘膜に対する刺激性が強く、高濃度のガスを吸入した場合、短時間で気道や肺に重大な損傷を引き起こす可能性がある。時間加重平均暴露限界（TVL-TWL: Threshold Limit Value – Time Weighted Average）は 25ppm に設定されている。

③貯蔵性

アンモニアの低位発熱量は 18.8MJ/kg と重油（42.7MJ/kg）の 44%程度である。既存の HFO タンクと比べると約 2.7 倍のタンク容量が必要で、LNG 燃料、LPG 燃料と比べるとそれぞれ 1.7 倍、2.0 倍のタンク容量が必要となる。アンモニアの貯蔵要件は LPG 船の燃料タンク要件に近いので、LPG 貯蔵タンクを利用することが可能である。

④腐食性

アンモニアは銅、銅合金、ニッケル濃度が 6%を超える合金、およびプラスチックに対して腐食性があるため、それら材料の使用は控える必要がある。また、シーリング材質としてテフロンを使用することが望ましい。

ウ 船種・船型・航路

コンセプト設計の検討対象とする船型・船種の条件としては、国際航路に従事し、且つ、将来的にも国際物流の多くを担い、多数の建造が予想される船舶であり、また、燃料補給候補地として欧州・中東・豪州・日本・南米(チリ等)等、World wide に寄港する可能性の高い船種とした。この条件に見合う船種の一つとして、パナマ運河を通峡できる 80,000DWT クラスの Bulk Carrier を本コンセプト設計の対象船舶に選定し、航路としては日本～豪州航路を想定した。

エ アンモニア燃料タンク

アンモニア燃料は発熱量が低い(重油の約 44%)。また、アンモニア燃料タンクは独立方式で防熱構造も必要になることから、既存の HFO タンクより 2～3 倍の容積が必要となる。今回は円筒横型 IMO Type-C タンクを選択した。

今回検討対象としたバルクキャリアの Upper deck エリアはほぼハッチカバーとその可動スペースとして占められているため、Cargo Hold area の大幅な改造をしない限りは燃料タンクを配置できる場所には限界がある。今回のコンセプト設計では居住区船尾側に燃料タンクを配置することとし、燃料ハンドリング設備や甲板機械、煙突等の設置スペースも考慮して、燃料タンク容量と航続距離を設定した。

オ アンモニア燃料適用機関

主機関としては、MCR 9,660 kW x 89.0 rpm、IMO NO_x Tier III 対応の、メタノールや LPG 等で実績のある液体燃料を噴射する機構を有する二元燃料機関を想定した。アンモニア燃料は難燃性であるため、着火を安定させるためのパイロット噴射が必要である。本コンセプト設計においては、図 付録 3.2-2 及び図 付録 3.2-3 に示すような、パイロット噴射弁を有し、油燃料単独でも機関出力を維持できる機関を想定した。

実用化に向けては、アンモニアの燃焼の安定性、アンモニアスリップ、N₂O の発生等を把握するとともに(必要な場合には)その対処法を確立する必要がある点に留意する必要がある。

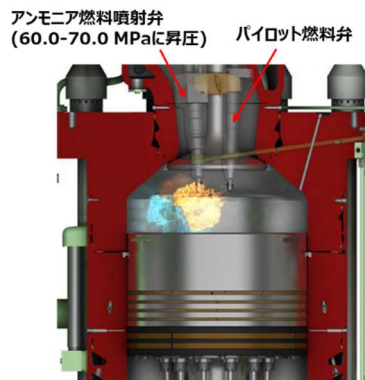


図 付録 3.2-2: アンモニア燃料機関

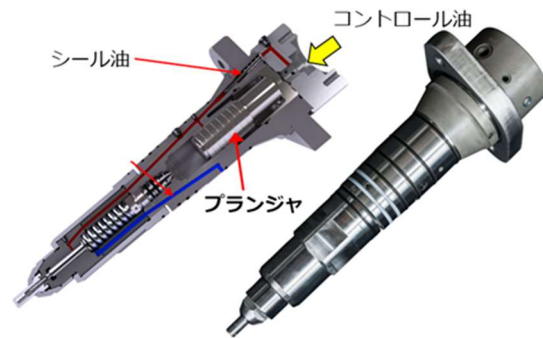


図 付録 3.2-3 アンモニア燃料噴射弁
FBIV 弁 (Fuel Booster Injection Valve)

燃料系統は IGF Code に準拠した二重管構造とし、ガス燃料系統の異常発生時には自動的にガス供給を停止し、重油運転を継続する制御を備える。パイロット燃料としては、重油、軽油等の使用を想定しているが、将来的にはパイロット燃料もバイオ燃料等の GHG 排出ゼロ燃料を使用することで、完全なゼロエミッションとすることが可能。なお、本検討では、パイロット燃料は MGO とした。

① 機関システム系統図

本コンセプトで採用する機関システムの系統図を図 付録 3.2-4 に示す。既存機関の系統を基本とし、ノックアウトドラム後のベント前にアンモニア濃度を下げる装置スペースを確保し、アンモニアリターンラインにシール油と燃料アンモニアを分離するオイルセパレータを設定している。アンモニアの機関供給圧力は 7MPa とした。

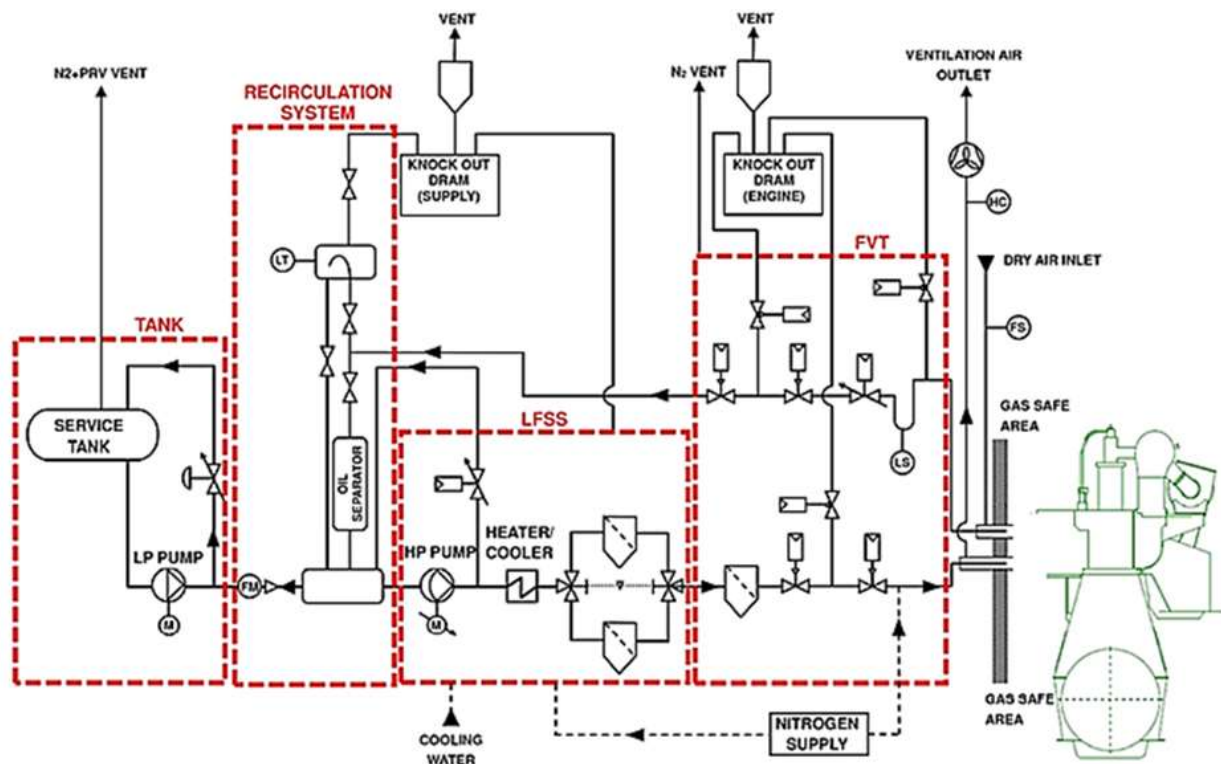


図 付録 3.2-4 アンモニア燃焼機関の燃料系統図

② NO_x Tier III 対応技術

NO_x 低減技術として EGR (Exhaust Gas Recirculation) 又は、SCR (Selective Catalytic Reactor) が適用可能であるが、今回は燃料がアンモニアであることから SCR を選択した。通常船舶用 SCR では媒体として尿素を使用するが、燃料であるアンモニアを共用する SCR とした。アンモニアを使用することで、別置きの尿素タンクが不要となる一方で、機関室内での二重管構造の採用等 IGF Code に準ずる安全面での追加対策が必要となる。

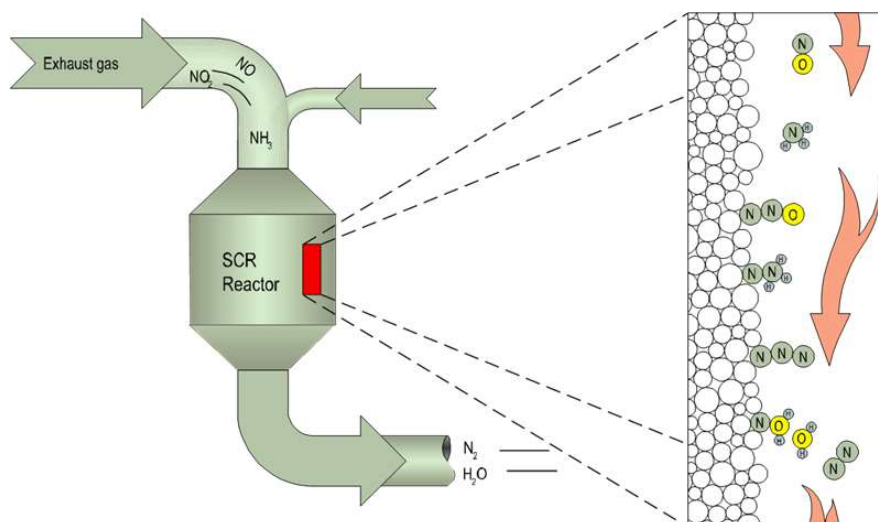


図 付録 3.2-5 高圧 SCR

アンモニア燃料の NO_x への影響はまだ不明であるが、仮に NO_x 排出が TierII 規制値から 3 割程度増加し 18.7g/kWh 相当と仮定した場合、Tier III レベルに NO_x を下げるために必要なアンモニア量は約 5.6g/kWh 程度で、燃料使用量(約 350g/kWh)の約 1.6%程度に相当するが、SCR によるアンモニア使用量は主機燃料消費量と比べると比較的軽微であると言える。

(2)コンセプト船の仕様

ア 主要目

前述で選定した 80,000DWT クラス Bulk Carrier のコンセプト設計主要目を表 付録 3.2-1 に示す。

81,000 DWT 外航 Bulk Carrier	
対象船	日本-豪州 航路 Loa / Lpp / Bm / D / ds / dd: abb.233 / 225.5 / 32.26 / 20.10 / 14.45 / 12.20 DWT : 81,000 ton 船速 (@NOR/15%SM) : 14.2 kn
推進プラント	Dual Fuel (Ammonia) 低速ディーゼルエンジン (将来実用化できると仮定) MAN B&W 6S60ME-C8.5-LGI(A)-HPSCR: MCR 9,660 kw、NOR 7,052 kw
発電プラント	Dual Fuel (Ammonia) 中速ディーゼルエンジン (将来実用化できると仮定) 600 kW x 3 sets
アンモニア タンク	円筒横型 IMO Type-C (400 kPaG x -33.3 °C、低温鋼) 1,550 m ³ (日本⇄豪州 片航分容量)
CO ₂ 削減率	削減率 91.9 % (MGO Pilot fuel 考慮)
アンモニア燃料適用影響 (DWT adjust)	約 -0.7 %

表 付録 3.2-1 80B/C 主要目表

主寸法に関しては、アンモニア燃料タンク等を居住区船尾に配置するため、居住区船尾の船体を既存船に比べ約 4m 延長することで、設置スペースを確保した。

なお、航続距離とアンモニアタンク容量に関しては片航分と往復分の 2 ケースを検討した。その結果を表 付録 3.2-2 に示すが、船体延長の影響とアンモニアタンク容量の 2 種類の影響は載貨重量の変化として評価した。それぞれの影響は片航 -0.7%、往復 -1.2% に相当する。

今回のコンセプト設計において、アンモニア燃料適用による CO₂ 削減効果評価は従来の 80,000DWT クラス Bulk Carrier に比べ -91.9% の結果であった。ただし、発電機関もアンモニア燃料仕様が開発されるものと仮定し、また、主機関のパイロット燃料、発電機関のパイロット燃料は共に MGO を採用すると仮定して計算した評価結果である。

イ 一般配置図及び鳥観図

本コンセプト設計船の鳥観図を図 付録 3.2-6 及び図 付録 3.2-7 に示す。ここに示す鳥観図は、本節冒頭のコンセプトイメージをベースとしつつも、早期の実船設計・建造に展開出来るものを想定して制作した。

居住区の船尾側へアンモニアタンクを配置するため、煙突及び Engine casing を右舷にオフセット配置している。またアンモニアタンクは、船体中央から左舷側にかけて設置し、タンク据え付けデッキの下にはアンモニアハンドリングのための機器室を設置している。また、アンモニア燃料のバンカリングマニホールドはホース

ハンドリングクレーンとともに両舷船尾に設置している。同船の平面図及び側面図は図 付録 3.2-8 のとおり。



図 付録 3.2-6: 80,000DWT 級バルクキャリアの外観イメージ(アンモニア燃料船)①



図 付録 3.2-7: 80,000DWT 級バルクキャリアの外観イメージ(アンモニア燃料船)②

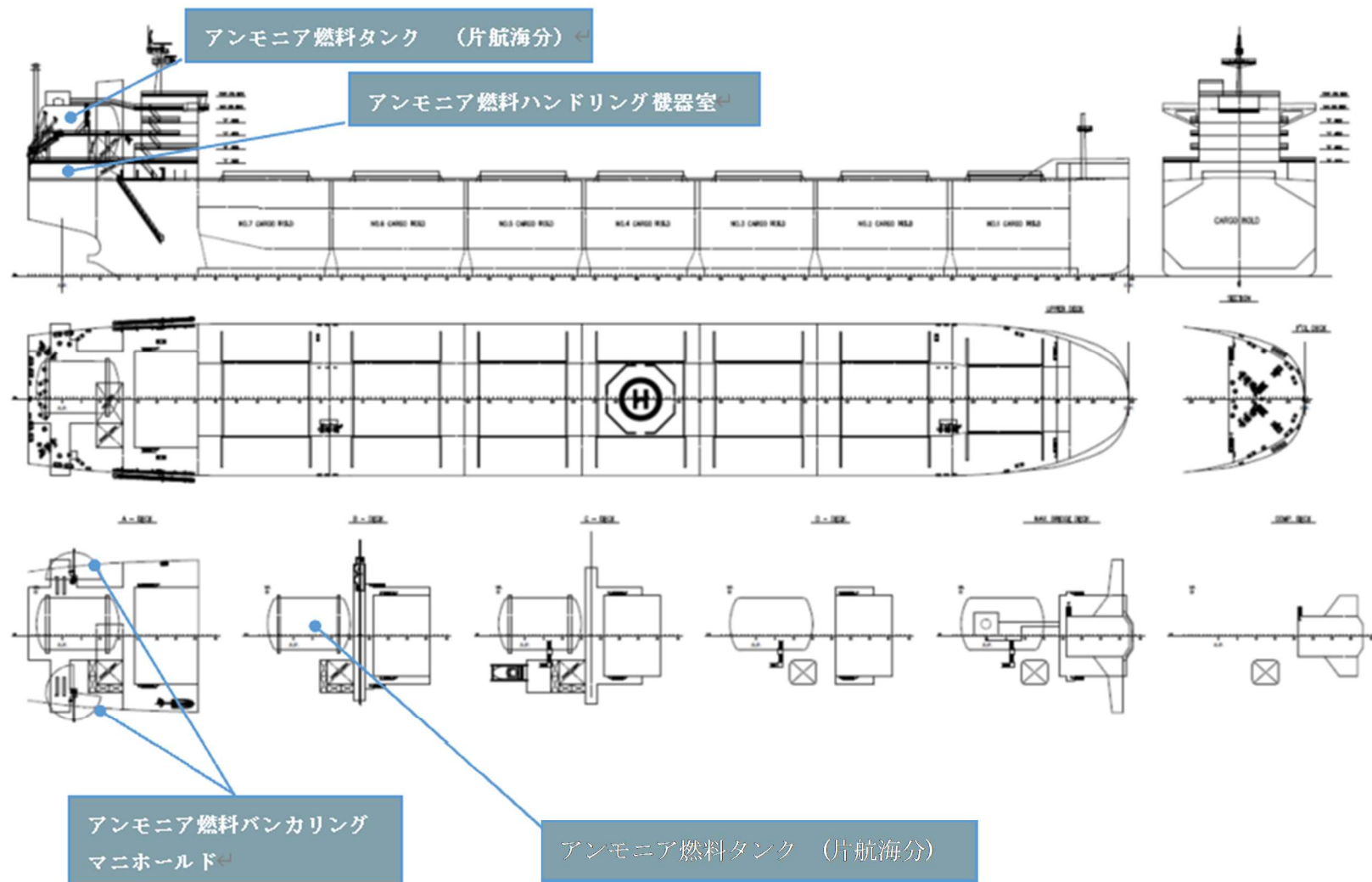


図 付録 3.2-8: -80,000DWT 級バルクキャリア側面図及び平面図(アンモニア燃料船)

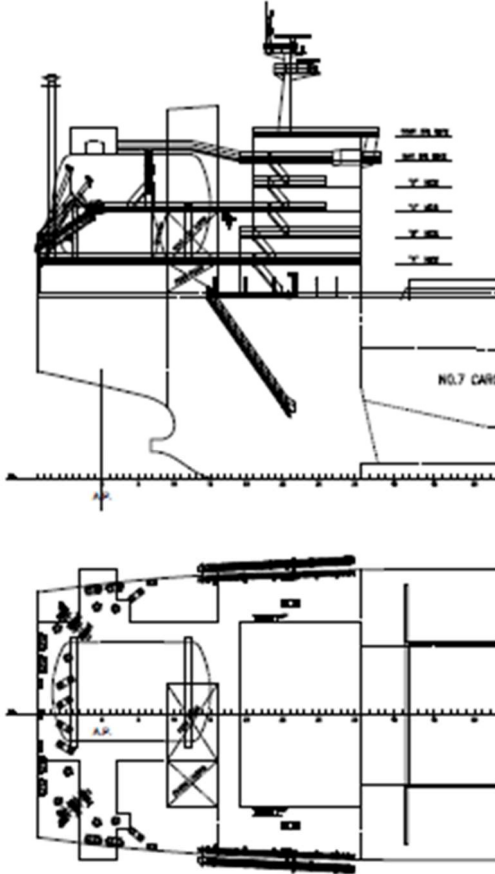
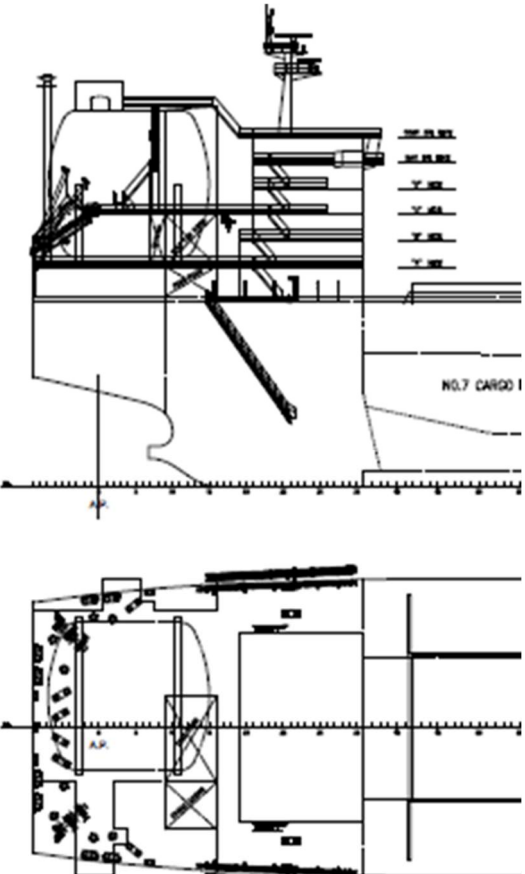
タンク 配置図		
アンモニア タンク	日本⇄豪州 片航分容量 1,550 m³	日本⇄豪州 往復分容量 3,100 m³
適用影響 (DWT adjust)	約 - 0.7 %	約 - 1.2 %

表 付録 3.2-2: 80B/C 燃料タンク容量影響比較

(3)コンセプト船実用化に必要な技術的課題

ア リスク評価の実施

本コンセプト船の機関は、ガス状燃料を使用する上での主要な設計について IGF Code の要件に準拠したものを想定しているが、アンモニア燃料の毒性に係る人体影響等、アンモニア燃料固有の条件を考慮したリスク評価(HAZID / HAZOP)を実施し、リスクを洗い出す必要がある。

イ 非常時のアンモニアの大気への放出に係るガイダンス

アンモニアは大気中でガスとなるため、短時間で広範囲に拡散する可能性がある。港湾等では船舶外への人的影響も懸念されるため、現在のガス燃料船と比べ、デッキ上機器についての追加の漏洩対策や二重管外管空気の外部放出等の追加対策が必要となる可能性がある。

エ アンモニア運転停止時のアンモニア放出

本コンセプト船の機関では、ガス運転終了時に機関室内部配管のガス燃料を窒素に置換し、機関室内をガスフリーに保つ安全機能を有するものを想定している。アンモニア燃料の場合には、この際のアンモニア放出量を最小化する処置が必要となる。アンモニア放出量を最小化する手法としては、10ppm 以下に希釈する方法、アンモニアを回収する方法、ベント管を十分安全な高さに上げる等の方法が考えられる。

オ 大量のアンモニア漏洩リスクの最小化

通常アンモニアは大気条件下でガスとなり、空気より比重が軽いいため、上方に拡散すると考えられる。しかし、アンモニアの蒸発潜熱は高く、大量のアンモニアが漏洩した場合には、周辺の空気を冷やすため、気化が抑えられて下方に長期滞留することも想定されることから、火災や窒息のリスクも高まる。外部からの衝撃等によりアンモニア燃料供給管が破損するようなことがあれば、大量漏洩となり、想定外のリスク要因が増える可能性もあるため、このようなリスクを最小限にするよう配管ルート設計や機械的ダメージへの保護、また、ガス運転中の配管へのアクセス制限等、大量漏洩につながるリスクを最小化する必要がある。

カ 排ガス成分

前述のとおりアンモニア燃料による燃料起因の NO_x 排出について未確認である。特に、温室効果ガスの一種である亜酸化窒素(N_2O)については排出量そのものが不明であり、調査が必要である。亜酸化窒素については、触媒又は空燃比制御により排出量抑制が可能との報告もあるところ、既存の情報も踏まえつつ、削減対策の検討が必要と考えられる。

キ 油タンク(パイロット用)の容量設計及びガス燃料系統の冗長性

本コンセプト船の機関では、ガス燃料系統の不具合時には、油焚機関として機関運転を継続できるものと設定し、運航に必要な十分な油タンク容量を有することから、ガス燃料系統の冗長性は持たせていない。将来的には油タンクを大幅に縮小し、ガス系統を二重化することも検討課題として挙げられる。

ク 保護装置

メンテナンス時には、アンモニアが作業人員の目や肌に直接接触しないよう、保護装置を装備する必要がある。また、有毒ガスの吸引防止のためマスクの着用も必要である。また、機関室火災時には有毒ガス発生

の恐れがあるため、排気位置等に留意が必要と考えられる。

ケ 主機関以外のアンモニア燃料仕様補機の検討課題

アンモニア燃料燃焼仕様の発電機関、大型高効率の軸発電機（発電機関のアンモニア燃料仕様開発の代替策）、船内電力を賄うためのアンモニア燃料電池、又はアンモニア燃料燃焼仕様のボイラ／GCU の開発が必要である。

コ その他

上述の技術的課題のほか、第 5 章における検討のとおり、IMO の関連する規則・ガイドライン（例：IGF コード、IGC コード）の見直し等の環境整備が必要と考えられる。

3 船上 CO₂ 回収システム搭載船

(1) 設計コンセプト

ア 概要

20,000TEU 級コンテナ船を対象に、船上 CO₂ 回収船のコンセプト設計を行うとともに、課題の抽出を行った。

イ メタノール燃料

4.3 節において記載のとおり、GHG 排出ゼロを達成し得る燃料の一つとして、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) が挙げられる。カーボンリサイクル燃料の代表的な例としては、メタンとメタノールがある。その製造プロセスのチャートを図 付録 3.3-1 に示す。

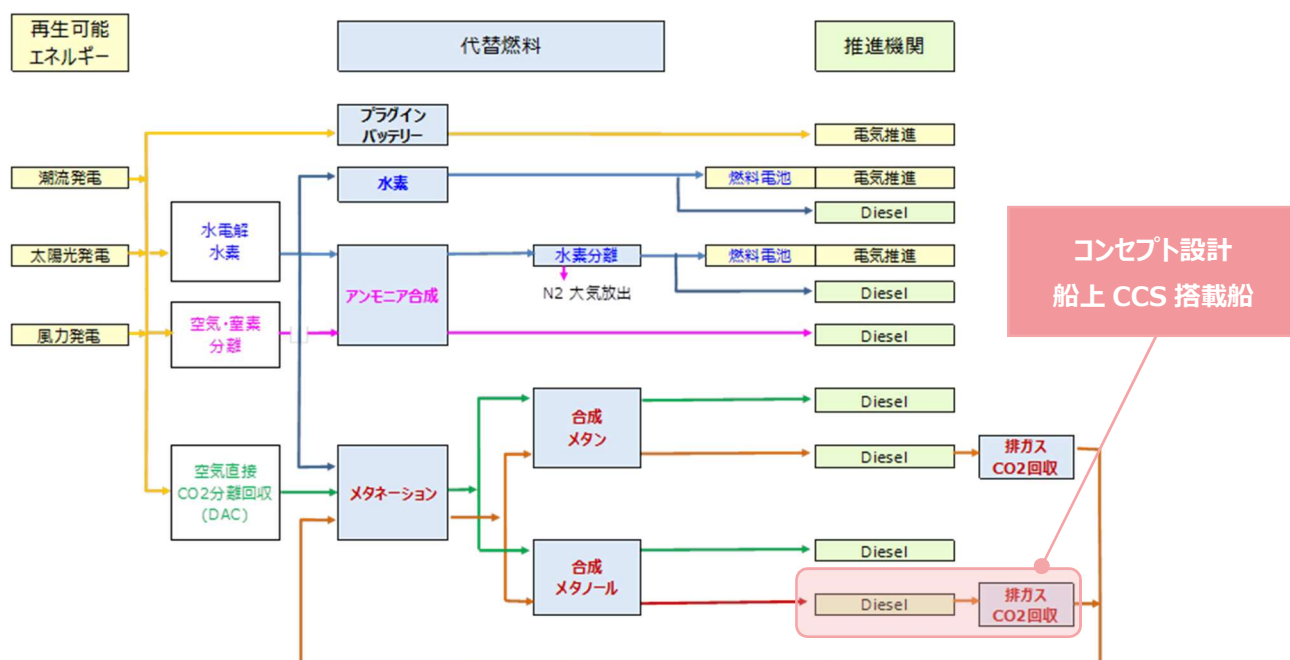


図 付録 3.3-1: 代替燃料製造チャート

ウ 船種・船型・航路

コンセプト設計の検討対象とする船型・船種の条件としては、国際航路に従事し、且つ、将来的にも国際物流の多くを担い、多数の建造が予想され、また、燃料補給候補地としても欧州・中東・豪州・日本・南米(チリ等)等、World wide に寄港する可能性の高い船舶として、20,000TEU クラスのコンテナ船をコンセプト設計の対象船舶として選択した。航路は極東～欧州航路を想定した。

エ 燃料タンク及び CO₂ 回収システムの配置

メタノール燃料は発熱量が低く、重油の約 47% しかない。また、回収した CO₂ タンクは独立方式で防熱構造も必要になることから、コンテナホールドの一部をそのスペースに転換する必要がある。今回のコンセプト設計では CO₂ 回収装置を船尾煙突の船首側コンテナスペースに配置し、CO₂ タンクとメタノール燃料タンクを船首居住区下に配置することとした。なお、航続距離については、燃料消費量・回収 CO₂ タンクの容量とコン

テナ個数への影響を勘案して整理した。

オ 船上 CO₂ 回収技術、CO₂ 液化技術

本コンセプトに採用した CO₂ 回収・液化・貯蔵装置のスケルトンを図 付録 3.3-2 に示す。

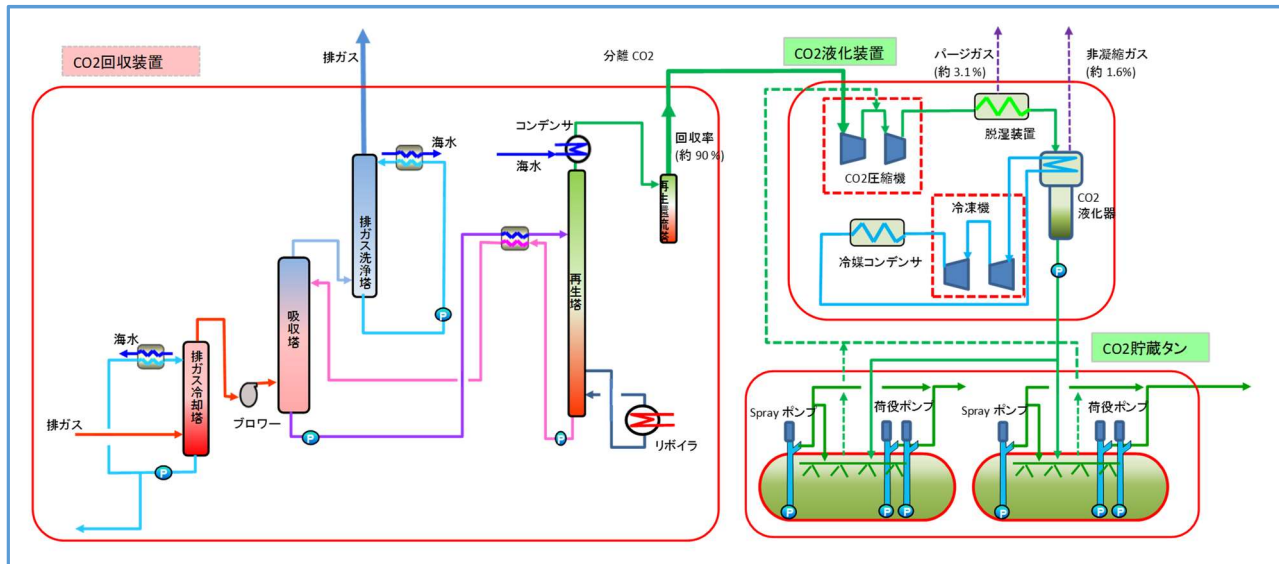


図 付録 3.3-2: CO₂ 回収・液化・貯蔵装置

① 液体アミン吸収方法 CO₂ 回収装置

CO₂ 回収技術としては、石炭火力発電所の CO₂ 回収装置として実績のあるアミン吸収法を採用した。排ガス中の CO₂ をアミン水溶液の化学吸収液に選択的に吸収させた後、加熱して分離させる方法である。この吸収法は、比較的大規模な常圧ガスからの CO₂ 分離に優れており、200～5,000 トン／日クラスのプラントが稼働している。

本装置は排ガス冷却塔、CO₂ 吸収塔、排ガス洗浄塔、CO₂ 再生塔、再生循環塔、及び再生用リボイラで構成している。

CO₂ 回収分離装置出口における CO₂ の状態は、気体(水: 4.6 mol.% 飽和状態)、温度 40℃、圧力 0.6kg/cm²G である。

また、CO₂ 回収装置単体としての分離効率は、ほぼ 90%の性能が一般的であるが、最近では、単体効率を 90%⇒95%へ達成させるためのプロセスシミュレーション検討がなされており、将来的にはその単体効率が達成可能となるものと期待できる。

② CO₂ 液化装置、貯蔵装置

本装置は CO₂ の圧縮機、脱湿装置、液化装置、冷凍機、液化 CO₂ 移送ポンプ、貯蔵タンク（スプレーポンプ、荷役ポンプ）で構成している。液化冷凍システムは乗組員の操作性を考慮して、出来るだけシンプルなプロセス・機器構成とし、以下の条件で設計した。

- 液化装置出口条件: CO₂ 組成: 99.95%、運転温度: -46℃、運転圧力 715kPaG
- CO₂ タンクの設計条件: 温度: -50℃、圧力: 1.0 MPaG

計算の結果、CO₂ プロセスにおける排出ロス率は下記のとおりとなった。

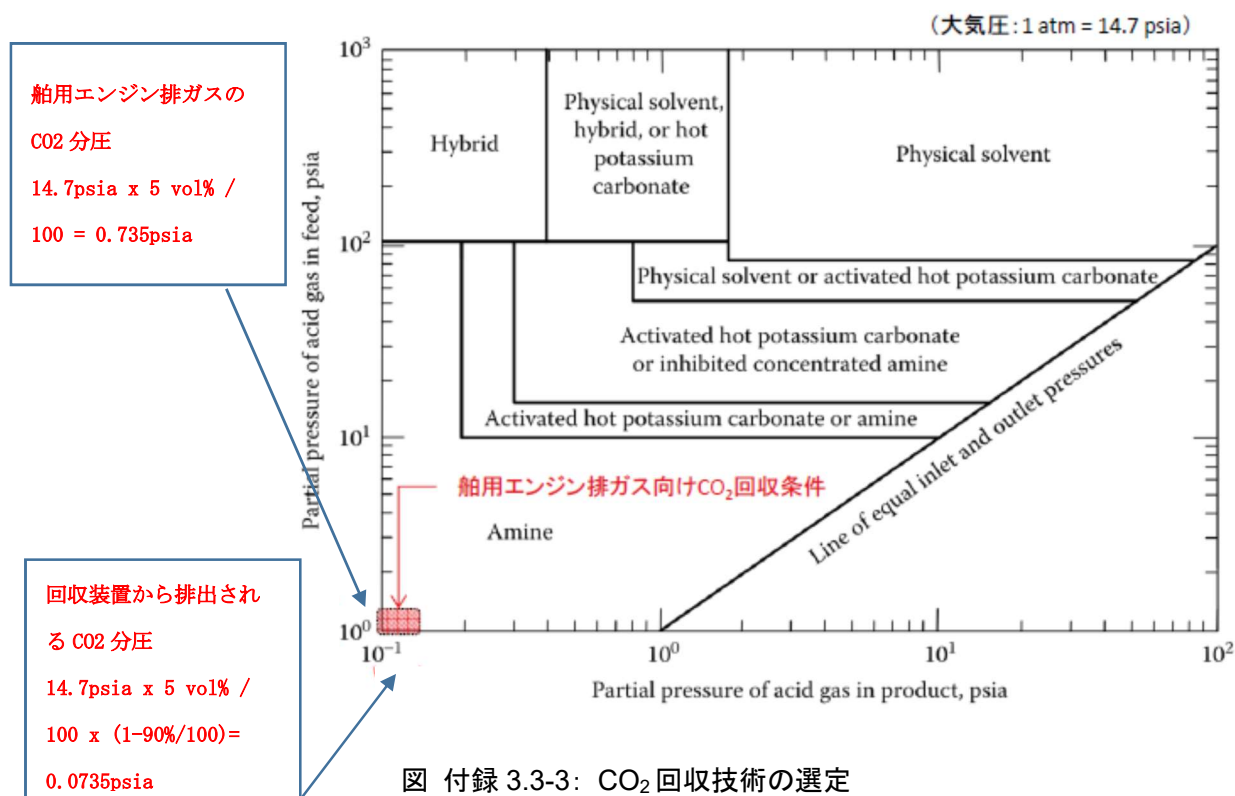
- 脱湿装置パージガス: 約 3.1%、液化装置非凝縮ガス: 約 1.6%

③ CO₂ 回収装置方式の相対評価(アミン吸収法と分離膜法)

<アミン吸収法>

図 付録 3.3-3 は、縦軸を CO₂ 回収装置に供給するガス中の CO₂ 分圧、横軸を CO₂ 回収装置から排出されるガス中の CO₂ 分圧とした場合における、望ましい CO₂ 回収技術選定(湿式法に限る)を示している。この図の縦軸では、供給するガス中の CO₂ 分圧が低いほど、ガス中の CO₂ 濃度が低いことを示しており、また横軸では、排出されるガス中の CO₂ 分圧が低いほど、CO₂ 回収率が高くなることを示している。

船用エンジン排ガスは、ほぼ大気圧、且つ CO₂ 濃度が約 5 vol%と CO₂ 分圧が非常に低い条件となっている。このような多ボリュームで低 CO₂ 分圧の排ガスから、高回収率で CO₂ を回収する場合はアミン法が適している。複数あるアミン法の吸収液中でも、特に KS-1TM 吸収液は CO₂ との親和性が高いため、低 CO₂ 分圧の排ガスから CO₂ を回収するのに適している。



<膜分離法>

分離膜方式は圧力差をドライビングフォースとして分離するため、濃度(CO₂ 分圧)の高いガスからの粗分離に適しており、主に陸上の Oil & Gas 分野で適用されている。そのため、大気圧に近い船舶の排ガスに膜分離法を適用する場合、膜中を CO₂ が透過できるように透過側の CO₂ 分圧を更に低くさせる必要があり、そのために真空ポンプの設置が求められる。この手法でアミン法と同様の CO₂ 回収率と CO₂ 純度に近づけるには、減圧のための多大な動力や、透過側に蒸気パージ等の追加対策が必要となる。

Oil & Gas 分野において、CO₂ 濃度を低濃度まで除去するには膜分離法とアミン吸収法との組み合わせが用いられ、概略 10vol%までは分離膜が有利だが、10vol%以下にしようとすると、アミン吸収法が有利と言われている。

分離膜は面積当たりのガス透過量に上限があるため、スケールアップの観点からはアミン吸収法が優位であり、処理ガス量が多くなるほど、図 付録 3.3-4 のようにアミン吸収法が適する範囲が拡大する。

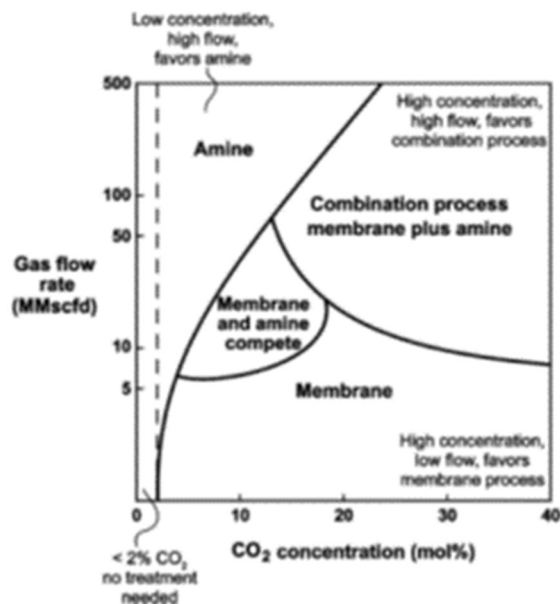


図 付録 3.3-4: 高圧条件下における CO₂ 分離能力

(2) コンセプト船の仕様

ア 主要目

本コンセプト設計の対象とした 20,000TEU クラスのコンテナ船の主要目を表 付録 3.3-1 に示す。

21,000 TEU 外航コンテナ船 (メタノール燃料適用)	
対象船	極東－欧州 航路 Loa / Lpp / Bm / D / ds / dd: 399.9 / 383.0 / 61.0 / 33.5 / 16.0 / 14.5 コンテナ積載数: 21,300 TEU 船速 (@NOR/15%SM): 21.8 kn
推進プラント	Dual Fuel (Methanol) 低速ディーゼルエンジン (将来実用化できると仮定) MAN B&W 11G90ME-LGI-C10.5-EcoEGR MCR 55,000 kw, NOR 49,500 kw
発電プラント	Dual Fuel (Methanol) 中速ディーゼルエンジン 6,870 kW x 5 sets
メタノールタンク	船体付きタンク 合計 13,200 m ³ (極東⇄欧州 片航分容量、及び既存船の実運航平均負荷約70%も勘案し設定)
CO ₂ 排出量 (回収前)	@NOR 766 t/day (含む、CCS装置駆動による追加発生CO ₂)
CCS装置のCO ₂ 回収率 本船としてのCO ₂ 削減率	回収率 85.7 % / 削減率 80.3 % (追加エネルギー消費による増加CO ₂ を考慮) (CO ₂ 回収装置効率= 90 %, CO ₂ 液化バージガス ロス= 3.1 %, CO ₂ 液化非凝縮 ロス= 1.6 %) 改善ポテンシャル考慮= 回収率 90 % / 削減率 85 % (追加エネルギー消費による増加CO ₂ を考慮)
CO ₂ タンク	6,400 m ³ x 2 sets、円筒横置型 IMO Type-C タンク (1.0MPa x -50 °C、低温鋼)
CCS 装置駆動 追加エネルギー	追加エネルギー +37.7 % ・ CO ₂ 回収装置 = 吸収液ポンプ、排ガスブロー、冷却海水ポンプ ・ CO ₂ 液化装置 = CO ₂ 圧縮機、冷凍装置 ・ CO ₂ 再生装置加熱蒸気
CCS装置搭載影響 (コンテナ個数 adjust)	約 -1,820 TEU

表 付録 3.3-1: 20,000TEU クラスコンテナ船要目表

主寸法に関しては、コンテナ搭載数 20,000TEU 以上を確保しながら、CO₂ 回収装置を船尾煙突前のコンテナホール位置、CO₂ タンクとメタノール燃料タンクを船首居住区下部に配置するため、従来の一般的な 20,000TEU コンテナ船に比べコンテナホルドの列数を 1 列追加した。CO₂ 回収のための関連設備追加によるコンテナ搭載個数への影響は -1,820TEU に相当する。

航続距離とコンテナ搭載個数影響に関しては片航と往復の 2 ケースを検討し、その比較を表 付録 3.3-2 に示す。コンテナ搭載個数への影響は、片航で-1,820TEU、往復で-2,550TEU に相当する。

今回のコンセプト設計における回収・液化装置全体としての CO₂ 回収率は、液化ステップのロスを考慮すると 85.7%となる。また船としての CO₂ 削減率は装置駆動追加エネルギー（主機関消費エネルギー対比で +37.7%に相当）を考慮すると 80.3%である。ただし、最近ではアミン吸収液方式 CO₂ 回収装置にて単体効率を従来の 90%から 95%へ達成させるためのプロセスシミュレーション検討がなされ、将来的にはそれが達成可能と期待されており、装置全体の CO₂ 回収率 90%、船としての CO₂ 削減率 85%を達成することも期待できる。本試算は、発電機関や補助ボイラもメタノール燃料仕様が開発された場合を想定している。

イ 一般配置図及び鳥観図

本コンセプト設計船の鳥観図を図 付録 3.3-5、図 付録 3.3-6 及び図 付録 3.3-7 に、一般配置図を図 付録 3.3-8 及び図 付録 3.3-9 に示す。これらの鳥観図は、本節冒頭のコンセプトイメージをベースとしつつも、早期の実船設計・建造を想定して制作した。



図 付録 3.3-5: 20,000TEU 級コンテナ船の外観イメージ(船上 CO₂ 回収船)



図 付録 3.3-6: 20,000TEU 級コンテナ船
(CO₂ 回収装置)

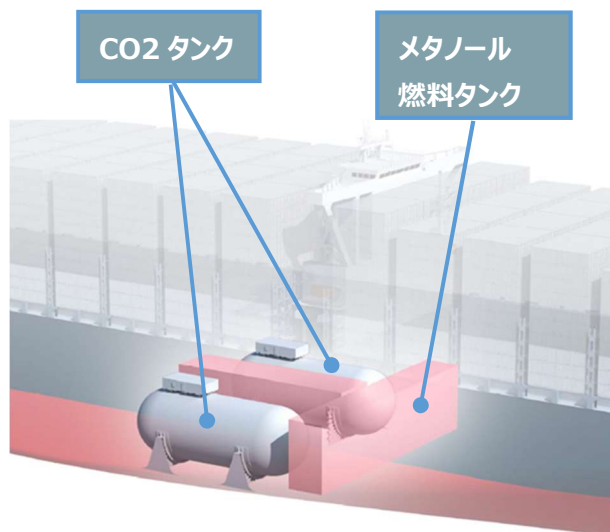


図 付録 3.3-7: 20,000TEU 級コンテナ船
(CO₂ タンク、メタノールタンク)

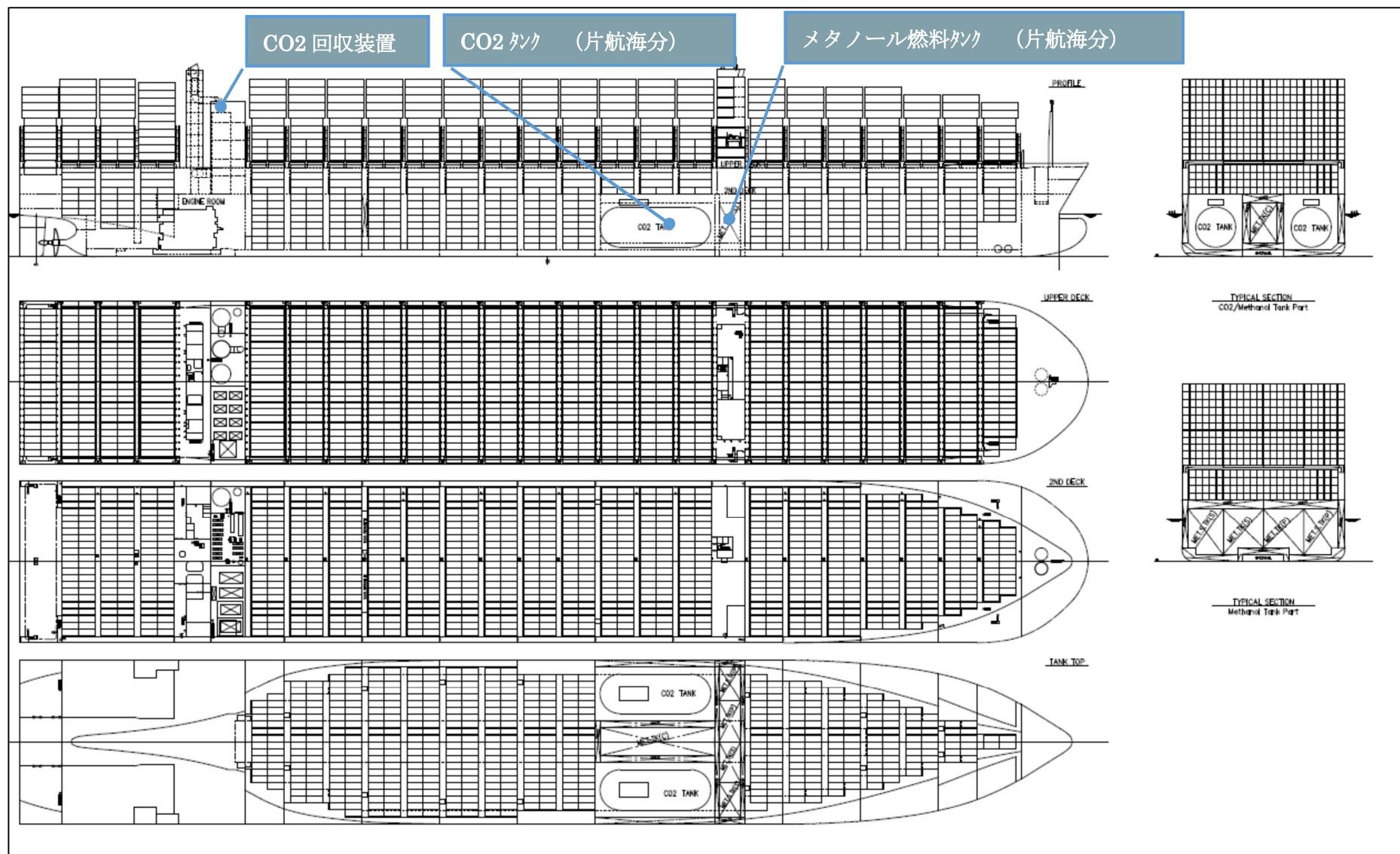


図 付録 3.3-8:20,000TEU 級コンテナ船側面図及び平面図(船上 CO₂ 回収船)

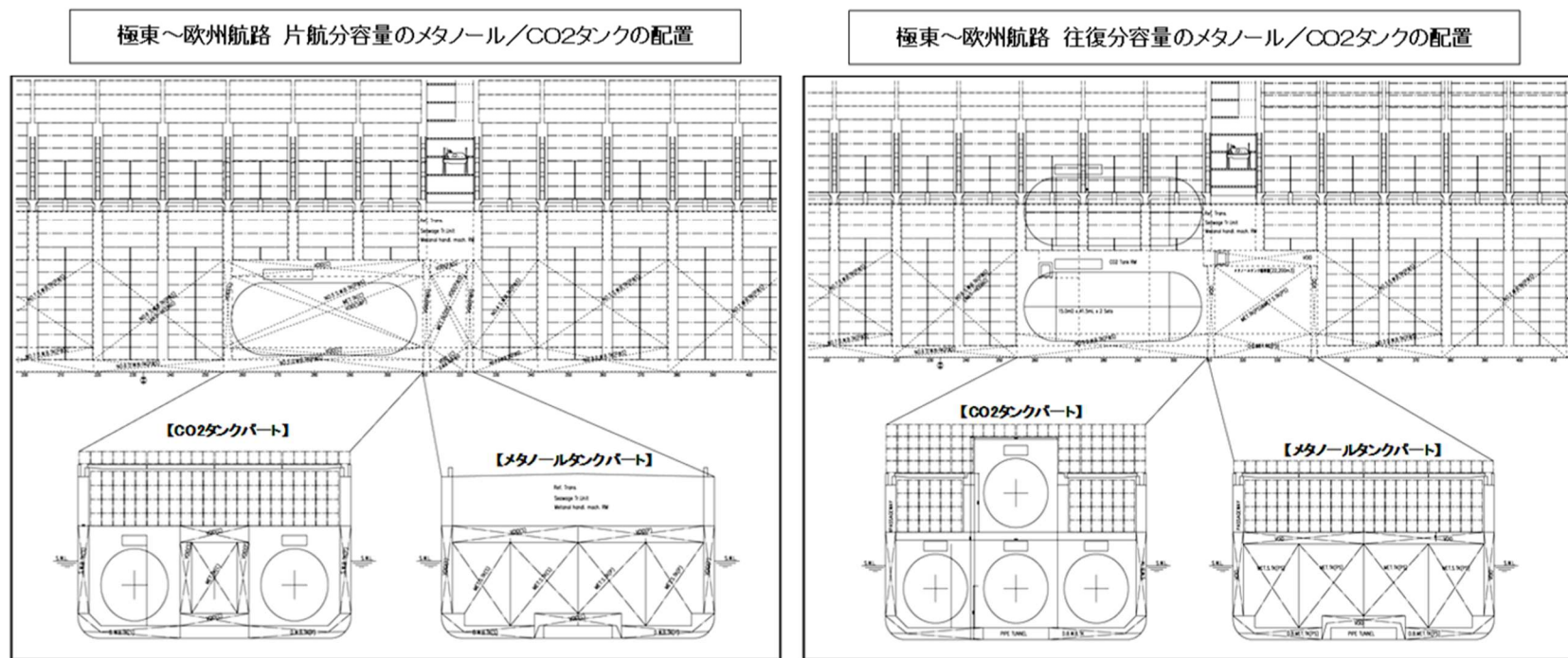


図 付録 3.3-9:20,000TEU 級コンテナ船(船上 CO₂ 回収船)メタノール／CO₂ タンクの配置

表 付録 3.3-2:20,000TEU 級コンテナ船(船上 CO₂ 回収船)メタノール／CO₂ タンクの容量影響比較

メタノールタンク	極東⇄欧州 片航分容量 合計 13,200m ³	極東⇄欧州 往復分容量 合計 23,400m ³
CO ₂ タンク	6,400 m ³ x 2 sets	6,400 m ³ x 4 sets
適用影響 (コンテナ個数 adjust)	約 -1,820 TEU	約 -2,550 TEU

(3)コンセプト船実用化に必要な技術的課題

本コンセプトの検討を通じて、以下の課題が確認された。

ア CO₂回収・液化装置

装置及び技術は陸上大型設備として実績も多く、技術的には確立している。今回の検討により、船舶に搭載装備する事に問題は無いと評価できた。詳細設計時点に於いては以下の検証、整理が必要とはなるが、克服できない課題では無いと考えられる。

- 航行中の船体動揺への配慮
- CO₂吸収液アミン水溶液のハンドリング
- 塩害対策（配置場所次第）
- 機器（CO₂吸収、再生塔）の高さ、振動対策
- CO₂回収率の向上（今回検討のCO₂回収・液化装置全体の回収率は85.7%、船としてのCO₂削減率は80.3%と試算）
- 液化装置の動力削減（例：深冷減圧法を導入する。その場合、乗組員の操作・メンテ増。）
- 小型化、省エネ化、コストダウン

イ その他

- メタネーション燃料製造コストダウン
- 正確な計量・記録システム（回収CO₂量、及びCO₂削減率）
- メタネーション燃料バンカリング設備、及びCO₂荷揚げ設備
- メタノール燃料焚き仕様の発電機関の開発
- 大型・高効率の軸発電機開発（メタノール燃料仕様の発電機関開発の代替策として）
- メタノール燃料焚き仕様のボイラーの開発

4 超高効率 LNG＋風力推進船

(1) 設計コンセプト

80,000DWT 船型をベースとするバルクキャリアと 20,000TEU 級のコンテナ船を対象に、既存技術の組合せにより、対 2008 年比で 80%以上の効率改善を達成する船舶としてコンセプト設計を行った。

具体的には、EEDI 値を指標として効率改善の評価を行い、目標設定を「リファレンスライン比で 80%以上の削減」と設定し、設計を行った。

(2) コンセプト船の仕様

ア バルクキャリア(80,000DWT 船型ベース)

① 基本仕様

本コンセプト船の基本仕様を表 付録 3.4-1 に示す。

表 付録 3.4-1 コンセプト船(バルクキャリア)の基本仕様

主寸法 (m)	Loa / Lpp / Bm / D / ds / dd : 229.0 / 225.0 / 42.0 / 20.6 / 14.45 / 12.20		
積載能力	102,000DWT		
計画速力	11.5 kn (@NOR/15%SM)		
使用燃料	LNG		
推進システム	POD 推進器と一軸電気推進によるハイブリッド型二重反転プロペラシステム		
発電機関	Type&Manufacturer : 10V31DF, Wartsila		
	SMCR : 5,500 kW		
	Number of set : 2 sets		
推進モーター		Main propulsion motor	POD
	Rated output	1,750 kW	3,500 kW
	Number of set	2	1
	Type&Manufacturer	PV500, GE	MERMAID POD, KONGSBERG
革新的省エネ技術	風力推進用帆 (40m x 15m x 6 sets)、空気潤滑システム		

② 採用技術の概要及び EEDI 改善率

本コンセプト船において採用した各技術による EEDI 改善率をステップごとにまとめたものを表 付録 3.4-2 に示す。最新のエコシップの実績データに基づき、2019 年時点で船型改良により 2008 年比で既に約 21% 改善されているものとし、これを「Step-1」と定めて検討のベースとし、これに Step-2～Step-6 までを追加することで、EEDI 改善率を 86%まで向上させた。

表 付録 3.4-2 採用技術の概要及び EEDI 改善率

	Base 船型 (2008 レベル)	Step-1	Step-2	Step-3	Step-4	Step-5	Step-6
		船型改良 (2019 レベル)	+減速設計	+大型化	+Hybrid 型 二重反転プロペラ (一軸電気推進 &POD)	+LNG 燃料化	+革新的 省エネ技術
Lpp (m)	222.0	225.0	225.0	225.0	225.0	225.0	225.0
B (m)	32.24	32.24	32.24	42.0	42.0	42.0	42.0
D (m)	20.1	20.1	20.1	20.1	20.1	20.1	20.1
d _s (m)	14.45	14.45	14.45	14.45	14.45	14.45	14.45
d _d (m)	12.20	12.20	12.20	12.20	12.20	12.20	12.20
DWT	83,000	81,000	81,000	102,000	102,000	102,000	102,000
M/E MCR (kW)	11,060	9,660	4,200	4,800	3,940 ^{*1}	3,940 ^{*1}	3,940 ^{*1}
計画速力 (knots)	14.5	14.5	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5
燃料	HFO	HFO	HFO	HFO	HFO	LNG	LNG
革新的 省エネ技術	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	風力推進用帆 &空気潤滑 システム
EEDI 値 改善率 (前 Step 比)	-	21%	41%	10%	-6%	23%	61%
EEDI 値 改善率 (積上げ)	-	21%	53%	58%	55%	65%	86%

*1: 推進用モーター定格出力

< 減速設計及び大型化 (Step-2, Step-3) >

次のステップとして減速設計及び大型化を実施した。現在、低速運航が実施されているため、設計船速は実運航速度と乖離しているという実態はさておき、大型化せずに設計船速のみ低速化すると、補完的に隻数を増やす必要が生じるため、設計船速で最適化されている輸送コストが上昇し、経済性の観点から現実的ではなくなることから、ここでは、隻数を増やすことなく輸送能力(船速×DWT)を保つことを前提とし、減速により低下した分の輸送能力を、大型化によって補うこととした。また、ベース船のバース制限等の条件を引き継ぐという観点から、船長及び喫水は変更せず、幅広化によって大型化を図り、推進性能や操縦性能の著しい低下を避けられる限界まで肥大化させた結果、幅は 42.0m となり、102,000DWT まで大型化した。このような条件のもとで輸送能力をキープできる計画速力として、11.5kn を採用した。この結果、EEDI 値は、大型化により約 10%、主機出力の大幅な低下により約 41%改善された。この低速化により、現在 IMO で規定されている最低出力要件を満たさなくなることから、本試設計では、非常用出力のコンセプトの導入を前提としている。

非常用出力は、EEDI 値の改善を目的に主機出力に制限をかけ、非常時(荒天時)に限りこの制限を解除することを認めるコンセプトである。非常用出力のコンセプトを取り入れる船舶については、通常航海時は制限された出力の範囲で運航するため、EEDI 計算は制限をかけた出力で計算し、非常時(荒天時)には制限

解除により登録出力まで出せるため、最低出力は登録出力を用いて評価する。これにより、EEDI 規制と最低出力要件の両立が可能となる。最低出力の評価については後述する。

<POD 推進器と一軸電気推進によるハイブリッド型二重反転プロペラシステム (Step-4)>

低出力化及び大型化により、波浪中での操縦性能不足が懸念されることから、POD 推進器による操縦性能を向上させるため、POD 推進器と一軸電気推進によるハイブリッド型二重反転プロペラシステムを採用した。プロペラが 2 つになったことでプロペラ効率が向上し、EEDI 値が約 10%改善した。

本推進システムのイメージ図を図 付録 3.4-1 に、主推進器及び POD 推進器の仕様を表 付録 3.4-3 に示す。主推進器と POD 推進器の出力分担比は 50:50 とした。

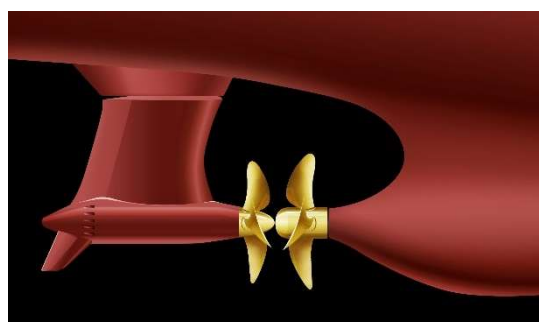


図 付録 3.4-1 ハイブリッド型二重反転プロペラシステム

表 付録 3.4-3 主推進器及び POD 推進器の仕様

	POD	Main propeller
Diameter (m)	5.9	6.7
Blades number	4	4
Revolution (RPM)	80	60

電気推進化に伴い、発電機・コンバータ・モーターでの損失により約 9%、減速機での出力損失により 1.5%、それぞれ EEDI 値が悪化した。これに加え、主推進用機関を 2 ストロークの主機関から 4 ストロークの発電機関に変更したことによる燃費の悪化に伴い、EEDI 値は約 6%悪化した。本システムの採用により、トータルで EEDI 値が約 6%悪化した。

幅広船型化及び低出力化による操船性能の悪化を補うためには、2 軸化や電動化等、種々の選択肢があるが、本試設計では、以下の理由により上記システムを採用した。

- 排出削減のみを考慮すると直結 2 機 2 軸が優位であるが、電気推進化及び POD は、機関室配置の自由度が高く、操船性能が大幅な向上が期待でき、2 軸船と比較して推進効率(船殻効率 η_H)が勝る。
- 電気推進化を採用する場合、EEDI 値の悪化は避けられないが、一方で、将来の発展性の観点からは、再生エネルギーによる発電効率の向上や大容量バッテリーの性能向上の恩恵を受けて更なる GHG 削減への寄与が可能となる。

<LNG 燃料化 (Step-5)>

表 付録 3.4-4 に示すとおり、LNG 燃料の採用によって、CO₂ 換算係数の減少及び燃料消費率が向上し、EEDI 値が約 23%改善された。LNG 燃料の燃料消費率は 158g/kWh、パイロット燃料の燃料消費率は 5.0g/kWh とした。

LNG タンクについては、上甲板上とファンネルの両舷に IMO Type-C 型を配置し、タンク容量については、南北航路(日本－豪州)の往復航分として、総容量を 3,800m³とした。

表 付録 3.4-4 CO₂ 換算係数及び燃料消費率の比較

	CO ₂ 換算係数 (C _F)	燃料消費率 (SFC)
Diesel / Gas Oil	3.206	約 180 g/kWh
LNG	2.750	約 160 g/kWh

<革新的省エネ技術 (風力推進システム) (Step-6) >

風力の利用による出力低減効果を狙って、風力推進用の帆を、各貨物ホールド間に 1 基ずつ、計 6 基搭載した。帆のサイズは高さ 40m、幅 15m とし、船橋視界の確保を考慮して船橋を船首部に配置した。4 段伸縮構造の帆を採用していることから、必要に応じて縮めることが可能なため、荒天時の安全性が確保でき、また向風の場合には抵抗を低減するといった効果も見込んだ。

風力の効果については、国内プロジェクトの報告⁴⁴において、1 基の設置で約 5%の EEDI 改善効果があると試算(日本－豪州東岸航路における風の発現頻度に基づく試算)されていることから、本船では当該プロジェクトとの帆の本数差等を考慮して、主機出力低減効果として 2,000kW を算入した。

一方、風力推進システムによる主機出力低減効果の EEDI への算入に当たっては、当該システムの推進力特性及び風の発現頻度データが必要である。推進力特性の算出・認証手順や発現頻度データの使用については、今後の MEPC での議論・承認が必要であるが、本コンセプトでは、これが完了した状況を想定している。

<革新的省エネ技術 (空気潤滑システム) (Step-6) >

更なる出力低減効果を狙って、掃気バイパスによる空気潤滑システムを搭載した。本システムは、掃気の一部を抜き出して船底に導き、船体と海水の摩擦抵抗を低減させて CO₂ 削減効果を得るシステムである。国内造船所建造 100,000DWT バルカーの実績報告⁴⁵において、約 4%の主機出力低減効果が報告されていることから、本コンセプト船においても、これと同程度の摩擦抵抗低減効果が得られるものとした。

③ EEDI 計算

関連ガイドラインに従い、以下のとおり EEDI 計算を実施した。

⁴⁴ 一般財団法人日本海事協会 環境セミナー「脱炭素時代に向けた未来型風力船開発の現状」
“ウインドチャレンジャープロジェクトの実現に向けて” 株式会社 商船三井, 2019

⁴⁵ プレスリリース “空気潤滑システム搭載バルカー「SOYO」 竣工ー世界初の主機掃気バイパスによる空気潤滑システムの実船搭載ー” 日本郵船株式会社

<設計仕様>

- MPP_{Motor} (for EEDI calculation) : 3,940 (kW)
- $SFC_{ME(i)}$:
 - $SFC_{ME(i)_{Gasfuel}}$: 158 (g/kWh)
 - $SFC_{ME(i)_{Pilotfuel}}$: 5.0 (g/kWh)
- Deadweight : 102,000 (ton)

<Vref(EEDI 計算ガイドライン⁴⁶2.2.6)>

デザイン喫水(dd=12.2m)における 15%シーマージンを含んだ計画速力 11.5kn を基に、EEDI 喫水(ds=14.45)における 83%MPPmotor での Vref をアドミ修正及び三乗則を用いて推定し、さらに減速機の出カ損失分 1.5%を考慮した結果、Vref は 10.82kn となった。

<Capacity (EEDI condition) (EEDI 計算ガイドライン 2.2.3) >

バルクキャリアの場合、Capacity=DWT となるため、102,000 (ton) を使用した。

<P_{ME} (EEDI 計算ガイドライン 2.2.5.1) >

$$\begin{aligned} P_{ME} &= 0.83 \times \frac{MPP_{Motor}}{\eta} \\ &= 0.83 \times \frac{3,940}{0.913} \\ &= 3,582(\text{kW}) \end{aligned}$$

ηは発電効率を表し、本コンセプト船ではガイドラインに規定されたデフォルト値 0.913 を使用した。

<P_{AE} (EEDI 計算ガイドライン 2.2.5.6) >

$$\begin{aligned} P_{AE} &= 0.05 \times MPP_{Motor} \\ &= 0.05 \times 3,940 \\ &= 197(\text{kW}) \end{aligned}$$

<風力推進システム(革新的省エネ技術の取扱いに関するガイドライン⁴⁷Appendix 2)>

風力推進システム(帆)による出力低減効果については、国内プロジェクトの報告を参照し、以下のとおり 2,000kW を採用した。

$$f_{eff} \cdot P_{eff} = 2,000(\text{kW})$$

f_{eff} : 本システムによる効果の受益率

P_{eff} : EEDI 計算に参入可能な推進出力低減値

⁴⁶ 2018 GUIDELINES ON THE METHOD OF CALCULATION OF THE ATTAINED ENERGY (MEPC.308(73))

⁴⁷ 2013 GUIDANCE ON TREATMENT OF INNOVATIVE ENERGY EFFICIENCY TECHNOLOGIES FOR CALCULATION AND VERIFICATION OF THE ATTAINED EEDI (MEPC.1/Circ.815)

<空気潤滑システム（革新的省エネ技術の取扱いに関するガイドライン Appendix 1）>

空気潤滑システムによる出力低減効果については、国内造船所建造船の実績報告を参照し、以下のとおり 380kW を採用した。

$$f_{eff} \cdot P_{eff} = 380(\text{kW})$$

f_{eff} : 本システムによる効果の受益率. 空気潤滑システムの場合 $f_{eff}=1.0$

P_{eff} : EEDI 計算に参入可能な推進出力低減値

<積載能力補正係数 (f_{iCSR}) (EEDI 計算ガイドライン 2.2.11.3) >

$$\begin{aligned} f_{iCSR} &= 1 + (0.08 \cdot LWT / DWT) \\ &= 1 + 0.08 \cdot 16,300 / 102,000 \\ &= 1.0128 \end{aligned}$$

<Attained EEDI (EEDI 計算ガイドライン 2 章) >

$$\begin{aligned} EEDI &= \frac{P_{ME} (C_{FME_Gas} \cdot SFC_{ME_Gasfuel} + C_{FME_Pilot} \cdot SFC_{ME_Pilotfuel})}{f_{iCSR} \cdot Capacity \cdot V_{ref}} \\ &+ \frac{P_{AE} (C_{FAE_Gas} \cdot SFC_{AE_Gasfuel} + C_{FAE_Pilot} \cdot SFC_{AE_Pilotfuel})}{f_{iCSR} \cdot Capacity \cdot V_{ref}} \\ &- \frac{\sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME}}{f_{iCSR} \cdot Capacity \cdot V_{ref}} \\ &= \frac{3,582 \times (2.75 \times 158 + 3.206 \times 5.0) + 197 \times (2.75 \times 158 + 3.206 \times 5.0) - (2,000 + 380) \times 2.75 \times 158}{1.0128 \times 102,000 \times 10.82} \\ &= 0.598(\text{g} / \text{ton} \cdot \text{mile}) \end{aligned}$$

<EEDI 削減率>

$$Original \ EEDI(2008 \ \text{ベース}) = 4.383 \ (\text{g} / \text{ton} \cdot \text{mile})$$

$$EEDI \ Reduction \ Rate(vs. \ Original \ EEDI) = 1 - \frac{0.598}{4.383} = \mathbf{86\%}$$

④最低出力評価

現行の最低出力ガイドライン⁴⁸に従って Level2 評価を実施した。評価に用いた各要素を以下に示す。

- 船型データ、形状影響係数及び自航要素: Type Ship 法により推定。
- 風圧抵抗: 藤原の式⁴⁹より算出。

⁴⁸ 2013 INTERIM GUIDELINES FOR DETERMINING MINIMUM PROPULSION POWER TO MAINTAIN THE MANOEUVRABILITY OF SHIPS IN ADVERSE CONDITIONS (MEPC.1/Circ.850)

⁴⁹ Fujiwara T., Ueno M., Ikeda Y. Cruising performance of a large passenger ship in heavy sea, Proc. of Sixteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, Vol. III, 2006

- 波浪中抵抗増加：海技研法⁵⁰で算出。
- 必要前進速度：必要前進速度は舵面積等に応じて4～9kn間で変動し、旋回性能が良い船舶ほど必要前進速度は小さくなるが、本コンセプト船においてはPOD推進器の採用によって十分な旋回性能を有するものと想定し、必要前進速度を最低限度の4knとした。
- トルク特性：本コンセプト船は電気推進船でありトルク一定制御を行うため、ロードダイアグラムは図 付録 3.4-2 に示すとおり、通常のエンジン直結推進と比較してトルクリミットに余裕のある特性を持つ。

ソフトウェア PrimeShip-GREEN/MinPower を用いて評価した結果、表 付録 3.4-5 に示すとおり、7,000kW 以上のモーター定格出力があれば要件を満たすことを確認した。したがって、非常用出力コンセプトの承認が前提となるが、最低出力要件を満たす出力 7,000kW を登録出力とし、通常航海時は出力制限をかけ、EEDI 計算には制限された出力 3,940kW を用いた。

表 付録 3.4-5 最低出力評価結果

Adverse conditions											
1	Number		1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	Significant wave height	(m) h_s	4.75	4.75	4.75	4.75	4.75	4.75	4.75	4.75	4.75
3	Peak wave period	(s) T_p	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0
4	Mean wind speed	(m/s) V_w	17.35	17.35	17.35	17.35	17.35	17.35	17.35	17.35	17.35
5	Required ship advance speed through the water in head wind and waves	(m/s) V_s	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06
		(knot)	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
6	Relative wind speed	(m/s) $V_{w, rel}$	19.41	19.41	19.41	19.41	19.41	19.41	19.41	19.41	19.41
Resistance in adverse conditions											
7	Calm-water resistance	(kN) R_{cw}	71.36	71.36	71.36	71.36	71.36	71.36	71.36	71.36	71.36
8	Aerodynamic resistance	(kN) R_{air}	141.21	141.21	141.21	141.21	141.21	141.21	141.21	141.21	141.21
9	Added resistance in long-crested irregular waves	(kN) R_{aw}	458.25	485.28	525.12	592.84	685.17	717.04	680.19	599.24	479.88
Calculation of required brake power and torque in adverse conditions											
10	Required propeller thrust	(kN) T	849.15	883.37	933.79	1019.51	1136.39	1176.73	1130.09	1027.62	876.52
11	Load factor	K_T/J^2	12.104	12.592	13.311	14.533	16.199	16.774	16.109	14.648	12.494
12	Advanced coefficient	J	0.218	0.214	0.209	0.201	0.191	0.188	0.192	0.200	0.215
13	Propeller revolution	(rpm) N	50.75	51.65	52.95	55.07	57.83	58.75	57.68	55.27	51.47
14	Torque coefficient	K_Q	0.0681	0.0683	0.0686	0.0690	0.0695	0.0697	0.0695	0.0691	0.0683
15	Required brake power	(kW) $P_{B, req}$	3624	3831	4143	4691	5471	5749	5428	4744	3790
16	Required torque	(kN*m) Q_{req}	681.86	708.32	747.29	813.44	903.47	934.51	898.62	819.69	703.03
Load diagram corresponding to propeller revolution											
17	Brake power on load diagram	(kW) $P_{B, LD}$	4448	4607	4841	5237	5774	5959	5745	5275	4576
18	Torque on load diagram (Maximum torque)	(kN*m) Q_{max}	836.97	851.79	873.13	908.17	953.54	968.68	951.15	911.40	848.85
Judgement											
19	Judgement	$P_{B, req} \leq P_{B, LD}$	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
20		$P_{B, req} / P_{B, LD}$	81.5%	83.2%	85.6%	89.6%	94.7%	96.5%	94.5%	89.9%	82.8%

50 参考：Tsujimoto M., Shibata K., Kuroda M., Takagi K. A Practical Correction Method for Added Resistance in Waves. J. JASNAOE, Vol. 8, 2008

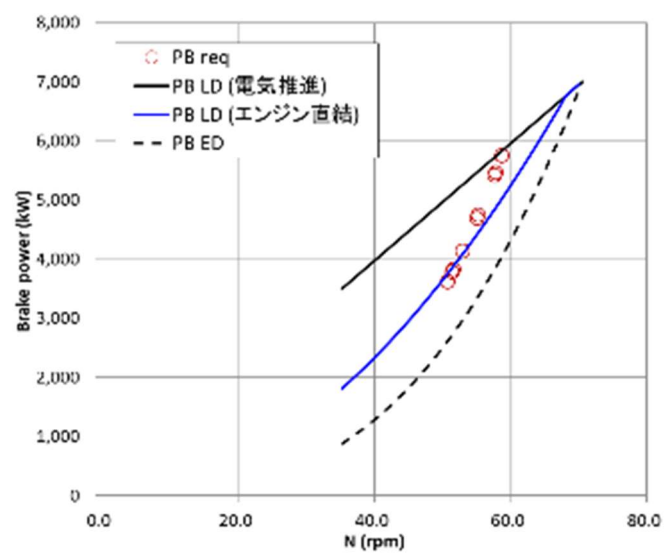


図 付録 3.4-2 最低出力評価結果図

イ コンテナ船(20,000TEU 船型ベース)

① 基本仕様

本コンセプト船の基本仕様を表 付録 3.4-6 に示す。

表 付録 3.4-6 コンテナ船の基本仕様

主寸法 (m)	Loa / Lpp / Bm / D / ds / dd :400.0 / 387.0 / 69.2 / 33.2 / 16.0 / 13.0		
積載能力	270,000DWT / 30,000TEU (incl.1,500 Ref.con)		
計画速力	15.2 kn (@NOR/15%SM)		
使用燃料	LNG		
推進システム	POD 推進器と一軸電気推進によるハイブリッド型二重反転プロペラシステム		
発電機関	Type&Manufacturer : 12V50DF (2sets) / 8L50DF (2sets), Wartsila		
	SMCR : 11,700 kW / 7,800 kW		
	Number of set : 4 sets in total		
推進モーター		Main propulsion motor	POD
	Rated output	5,500 kW	11,000 kW
	Number of set	2	1
	Type&Manufacturer	N37 HY630S4C, GE	MERMAID POD, KONGSBERG
革新的省エネ技術	風力推進用カイト、空気潤滑システム		

② 採用技術の概要及び EEDI 改善率

本コンセプト船において採用した各技術による EEDI 改善率をステップごとにまとめたものを表 付録 3.4-7 に示す。最新のエコシップの実績データに基づき、2019 年時点で船型改良及び減速設計により 2008 年比で既に約 50%改善されているものとし、これに Step-2～Step-6 までを追加することで、EEDI 改善率を 86% まで向上させた。

表 付録 3.4-7 採用技術の概要及び EEDI 改善率

	Base 船型 (2008 レベル)*1	Step-1 船型改良 &減速設計 (2019 レベル)	Step-2 +更なる 減速設計	Step-3 +大型化	Step-4 +Hybrid 型 二重反転プロペラ (一軸電気推進&POD)	Step-5 +LNG 燃料化	Step-6 +革新的 省エネ技術
Lpp (m)	387.0	387.0	387.0	387.0	387.0	387.0	387.0
B (m)	58.8	58.8	58.8	69.2	69.2	69.2	69.2
D (m)	32.9	32.9	32.9	33.2	33.2	33.2	33.2
ds (m)	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0
dd (m)	14.5	14.5	14.5	13.0	13.0	13.0	13.0
DWT	199,692	199,692	199,692	270,000	270,000	270,000	270,000
TEU	20,000	20,000	20,000	30,000	30,000	30,000	30,000
M/E MCR (kW)	132,440	59,300	18,700	18,900	16,200*2	16,200*2	16,200*2
計画速力 (knots)	29.2	22.8	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2
燃料	HFO	HFO	HFO	HFO	HFO	LNG	LNG
革新的 省エネ技術	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	風力推進用 カイト &空気潤滑 システム
EEDI 値 改善率 (前 step 比)	-	50%	51%	23%	-11%	26%	10%
EEDI 値 改善率 (積上げ)	-	50%	76%	81%	79%	84%	86%

*1: 2008 年時点では、実際には 20,000TEU 船型は存在しないが、仮想船型として Reference Line 相当の 20,000TEU を仮設計

*2: 推進用モーター定格出力

<減速設計及び大型化 (Step-2、Step-3) >

更なる減速設計及び大型化を実施した。ここでは、バルクキャリアのケースと同様に、隻数を増やすことなく輸送能力(船速×TEU)を保つことを前提としており、減速により低下した分の輸送能力を大型化によって補うこととした。また船長及び喫水は変更せず、バルクキャリアと同様に幅広化によって大型化を図り、収益性を考慮したうえでの最適肥大度まで肥大化させた結果、幅は 69.2m となり、30,000TEU まで大型化した。このような条件のもとで輸送能力をキープできる計画速力として 15.2kn を採用した。その結果、EEDI 値は、大型化により約 23%、主機出力の大幅な低下により約 51%改善された。ただし、バルクキャリアと同様に、この低速化については非常用出力のコンセプトの承認を前提としている。

本コンセプト船は欧州ーアジア航路を想定しており、船幅 69.2m におけるスエズ運河の航行最大喫水は 12.9m であるが、スエズ運河までの航海における燃料消費等による喫水の減少分を考慮して、Design 喫水を 13.0m とした。さらに、コンテナスペースを確保するために、船幅増大によって広がったファンネル両舷ス

ペースに居住区を配置し、船橋視界を確保するために船橋は船首に配置した。

また、幅広化に伴って二重底の突上げ荷重に対する強度が低下するため、これを補う目的で二重底を 30cm 高くした結果、深さが 33.2m となった。

<POD 推進器と一軸電気推進によるハイブリッド型二重反転プロペラシステム (Step-4)>

低出力化及び大型化により操縦性能が大幅に悪化し、操縦性基準を満たせない懸念があることから、操縦性能を向上させるため、POD 推進器と一軸電気推進によるハイブリッド型二重反転プロペラシステムを採用した。プロペラを 2 つにしたことでプロペラ効率向上するものの、プロペラ荷重度の関係上、バルクキャリアほどの向上は見られないため、EEDI 値は約 6%の改善に留まった。

本推進システムの拡大イメージ図を図 付録 3.4-3 に、主推進器及び POD 推進器の仕様を表 付録 3.4-8 に示す。尚、主推進器と POD 推進器の出力分担比は 50:50 とした。

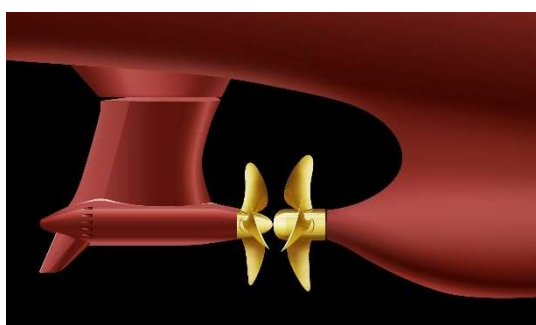


図 付録 3.4-3 ハイブリッド型二重反転プロペラシステム

表 付録 3.4-8 主推進器及び POD 推進器の仕様

	POD	Main propeller
Diameter (m)	5.9	6.7
Blades number	4	4
Revolution (RPM)	80	60

一方、電気推進化に伴い、バルクキャリアと同様に、発電機・コンバータ・モーターでの損失により約 9%、減速機での出力損失により 1.5%、それぞれ EEDI 値が悪化した。これに加え、主推進用機関を 2 ストロークの主機関から 4 ストロークの発電機関に変更したことによる燃費の悪化に伴い、EEDI 値が約 7%悪化した。本システムの採用により、トータルで EEDI 値が約 11%悪化した。

バルクキャリアと同様に、種々の選択肢の中から、以下の理由により上記システムを採用した。

- 電気推進化による上記のような損失は避けられないが、これもバルクキャリアと同様に将来の発展性がある。
- 本コンセプト船のような低出力コンテナ船においては、冷凍コンテナ搭載等による船内必要電力が相対的に大きくなるため、オール電化によって電力の融通性が向上する。また直結推進＋補機発電機という配置と比較して省スペース化が可能である。

<LNG 燃料化 (Step-5)>

EEDI 値を大幅に改善するために、LNG 燃料を採用した。CO₂ 換算係数の減少及び燃料消費率の向上により、EEDI 値が約 26%改善された。LNG 燃料の燃料消費率を 155g/kWh、パイロット燃料の燃料消費率を 1.5g/kWh とした。

LNG タンクは、機関室周辺にメムレン型を配置し、タンク容量については、欧州ーアジア航路の往復航分として、総容量を 11,000m³ とした。

<革新的省エネ技術(風力推進システム) (Step-6)>

風力の利用による出力低減効果を狙って、風力推進用のカイトを採用した。カイトの展開、滑空中の動き、収納すべてを電子コントロール化し、風の状況に応じて最大限の効果が得られるよう最適化されたカイトであり、メーカー調査報告⁵¹によるとパナマックスバルカーにおいて 23.7%の EEDI 改善効果があると試算されている。本コンセプト船ではマージンを加味して、1,000kW の出力低減効果を算入した。

既述のとおり、風力の EEDI への算入のためには、推進力特性の算出・認証手順や発現頻度データの使用について今後の MEPC での議論・承認が必要であるが、本コンセプトでは、これが完了した状況を想定している。

<革新的省エネ技術(空気潤滑システム) (Step-6)>

更なる出力低減効果を狙って、バルクキャリアと同様、本コンセプト船にも空気潤滑システムを搭載し、同程度の効果を見込んだ。

③ EEDI 計算

関連ガイドラインに従い、以下のとおり EEDI 計算を実施した。

<設計仕様>

- MPP_{Motor} (for EEDI calculation) : 16,200 (kW)
- $SFC_{ME(i)}$:
 - $SFC_{ME(i)_{Gasfuel}}$: 155 (g/kWh)
 - $SFC_{ME(i)_{Pilotfuel}}$: 1.5 (g/kWh)
- Deadweight : 270,000 (ton)

<Vref(EEDI 計算ガイドライン 2.2.6)>

Vref については、バルクキャリアと同様、計画速力をベースに推定したものを使用した。デザイン喫水 (dd=13.0m)における 15%シーマージンを含んだ計画速力 15.2kn を基に、EEDI 喫水 (d70%DWT=12.79m)における 83%MPPmotor での Vref をアドミ修正及び三乗則を用いて推定し、さらに減速機の出力損失分 1.5%を考慮した結果、Vref が 14.96kn となった。

⁵¹ 一般財団法人日本海事協会 環境セミナー「脱炭素時代に向けた未来型風力船開発の現状」
“Airseas 社製 kite を利用した省エネ機器の採用について” 川崎汽船株式会社, AIRSEAS, 2019

<Capacity (EEDI condition) (EEDI 計算ガイドライン 2.2.3)>

コンテナ船の場合、Capacity は DWT の 70%となるため、270,000 × 0.7 = 189,000 (ton) を使用した。

<P_{ME}(EEDI 計算ガイドライン 2.2.5.1)>

$$\begin{aligned} P_{ME} &= 0.83 \times \frac{MPP_{Motor}}{\eta} \\ &= 0.83 \times \frac{16,200}{0.913} \\ &= 14,727(\text{kW}) \end{aligned}$$

ηは発電効率を表し、本コンセプト船ではガイドラインに規定されたデフォルト値 0.913 を使用した。

<P_{AE}(EEDI 計算ガイドライン 2.2.5.6)>

$$\begin{aligned} P_{AE} &= 0.025 \times MPP_{Motor} + 250 \\ &= 0.025 \times 16,200 + 250 \\ &= 655(\text{kW}) \end{aligned}$$

<風力推進システム(革新的省エネ技術の取扱いに関するガイドライン Appendix 2)>

風力推進システム(カイト)による出力低減効果については、メーカー資料を参照し、1,000kW を採用した。

$$f_{eff} \cdot P_{eff} = 1,000(\text{kW})$$

<空気潤滑システム(革新的省エネ技術の取扱いに関するガイドライン Appendix 1)>

空気潤滑システムによる出力低減効果については、国内造船所建造船の実績報告をベースに、本コンセプト船との船幅の差異を考慮して以下のとおり 600kW を採用した。

$$f_{eff} \cdot P_{eff} = 600(\text{kW})$$

<Attained EEDI (EEDI 計算ガイドライン 2 章)>

$$\begin{aligned} EEDI &= \frac{P_{ME} (C_{FME_Gas} \cdot SFC_{ME_Gasfuel} + C_{FME_Pilot} \cdot SFC_{ME_Pilotfuel})}{f_{iCSR} \cdot Capacity \cdot V_{ref}} \\ &+ \frac{P_{AE} (C_{FAE_Gas} \cdot SFC_{AE_Gasfuel} + C_{FAE_Pilot} \cdot SFC_{AE_Pilotfuel})}{f_{iCSR} \cdot Capacity \cdot V_{ref}} \\ &- \frac{\sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME}}{f_{iCSR} \cdot Capacity \cdot V_{ref}} \\ &= \frac{14,727 \times (2.75 \times 155 + 3.206 \times 1.5) + 655 \times (2.75 \times 155 + 3.206 \times 1.5) - (1,000 + 600) \times 2.75 \times 155}{270,000 \times 14.96} \\ &= 2.104(\text{g} / \text{ton} \cdot \text{mile}) \end{aligned}$$

<EEDI 削減率>

$$\text{Original EEDI(2008 ベース)} = 14.11 \text{ (g/ton} \cdot \text{mile)}$$

$$\text{EEDI Reduction Rate(vs. Original EEDI)} = 1 - \frac{2.104}{14.11} = \mathbf{86\%}$$

④最低出力評価

コンテナ船の最低出力評価に関するガイドラインは未整備のため、Bulk・Tanker 用の最低出力ガイドラインを準用して Level2 評価を実施した。評価に用いた各要素を以下に示す。

- 船型データ、形状影響係数及び自航要素：Type Ship 法により推定。
- 風圧抵抗：藤原の式⁵²より算出。
- 波浪中抵抗増加：海技研法⁵³で算出。
- 必要前進速度：必要前進速度は舵面積等に応じて 4～9kn 間で変動し、旋回性能が良い船舶ほど必要前進速度は小さくなるが、本コンセプト船においては POD 推進器の採用によって十分な旋回性能を有するものと想定し、必要前進速度を最低限度の 4kn とする。
- トルク特性：本コンセプト船は電気推進船でありトルク一定制御を行うため、ロードダイアグラムは図 付録 3.4-4 に示すとおりとなり、通常のエンジン直結推進と比較してトルクリミットに余裕のある特性を持つ。

ソフトウェア PrimeShip-GREEN/MinPower を用いて評価した結果、表 付録 3.4-9 に示すとおり、22,000kW 以上のモーター定格出力があれば要件を満たすことを確認した。したがって、非常用出力コンセプトの承認が前提となるが、最低出力要件を満たす出力 22,000kW を登録出力とし、通常航海時は出力制限をかけ、EEDI 計算には制限された出力 16,200kW を用いた。

⁵² Fujiwara T., Ueno M., Ikeda Y. Cruising performance of a large passenger ship in heavy sea, Proc. of Sixteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, Vol. III, 2006

⁵³ Tsujimoto M., Shibata K., Kuroda M., Takagi K. A Practical Correction Method for Added Resistance in Waves. J. JASNAOE, Vol. 8, 2008

表 付録 3.4-9 最低出力評価結果

Adverse conditions											
1	Number		1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	Significant wave height	(m) h_s	5.50	5.50	5.50	5.50	5.50	5.50	5.50	5.50	5.50
3	Peak wave period	(s) T_p	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0
4	Mean wind speed	(m/s) V_w	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00
5	Required ship advance speed through the water in head wind and waves	(m/s) V_s	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06
		(knot)	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
6	Relative wind speed	(m/s) $V_{W,rel}$	21.06	21.06	21.06	21.06	21.06	21.06	21.06	21.06	21.06
Resistance in adverse conditions											
7	Calm-water resistance	(kN) R_{CW}	153.08	153.08	153.08	153.08	153.08	153.08	153.08	153.08	153.08
8	Aerodynamic resistance	(kN) R_{air}	587.20	587.20	587.20	587.20	587.20	587.20	587.20	587.20	587.20
9	Added resistance in long-crested irregular waves	(kN) R_{aw}	494.92	568.38	676.46	835.11	1062.70	1222.56	1299.33	1322.51	1296.01
Calculation of required brake power and torque in adverse conditions											
10	Required propeller thrust	(kN) T	1446.37	1532.39	1658.94	1844.71	2111.22	2298.40	2388.29	2415.44	2384.42
11	Load factor	K_T/J^2	7.813	8.278	8.962	9.965	11.405	12.416	12.901	13.048	12.881
12	Advanced coefficient	J	0.194	0.189	0.183	0.174	0.164	0.158	0.155	0.154	0.155
13	Propeller revolution	(rpm) N	39.08	40.11	41.57	43.62	46.39	48.23	49.09	49.34	49.05
14	Torque coefficient	K_Q	0.0343	0.0345	0.0346	0.0349	0.0351	0.0353	0.0353	0.0354	0.0353
15	Required brake power	(kW) $P_{B,req}$	7056	7656	8566	9959	12068	13624	14392	14627	14359
16	Required torque	(kN*m) Q_{req}	1724.16	1822.84	1967.82	2180.28	2484.37	2697.56	2799.84	2830.71	2795.43
Load diagram corresponding to propeller revolution											
17	Brake power on load diagram	(kW) $P_{B,LD}$	11942	12256	12702	13328	14174	14737	14999	15077	14988
18	Torque on load diagram (Maximum torque)	(kN*m) Q_{max}	2917.84	2917.84	2917.84	2917.84	2917.84	2917.84	2917.84	2917.84	2917.84
Judgement											
19	Judgement	$P_{B,req} \leq P_{B,LD}$	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
20		$P_{B,req} / P_{B,LD}$	59.1%	62.5%	67.4%	74.7%	85.1%	92.5%	96.0%	97.0%	95.8%

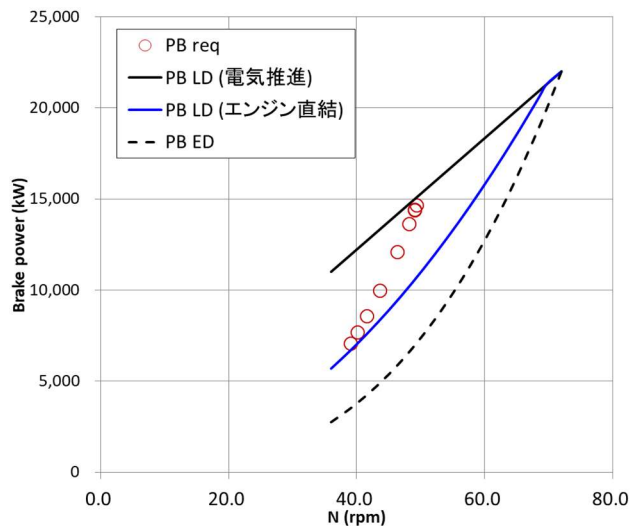


図 付録 3.4-4 最低出力評価結果図

ウ 一般配置図及び鳥瞰図

バルクキャリア(80,000DWT 船型ベース)の一般配置図を図 付録 3.4-5 に、鳥瞰図を図 付録 3.4-6 にそれぞれ示す。また、コンテナ船(20,000TEU 船型ベース)の一般配置図を図 付録 3.4-7 に、鳥瞰図を図 付録 3.4-8 にそれぞれ示す。

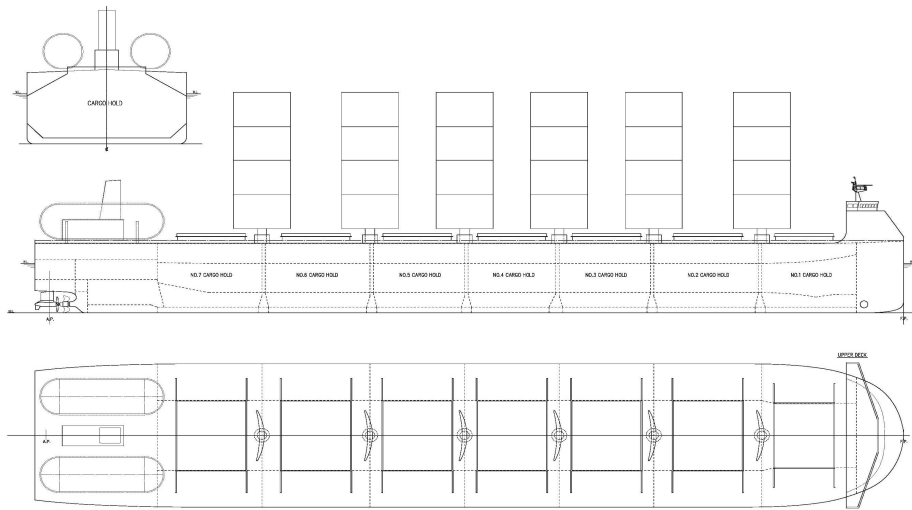


図 付録 3.4-5: バルクキャリアの平面図及び側面図(超高効率 LNG+風力推進船)



図 付録 3.4-6 バルクキャリアの外観イメージ(超高効率 LNG+風力推進船)

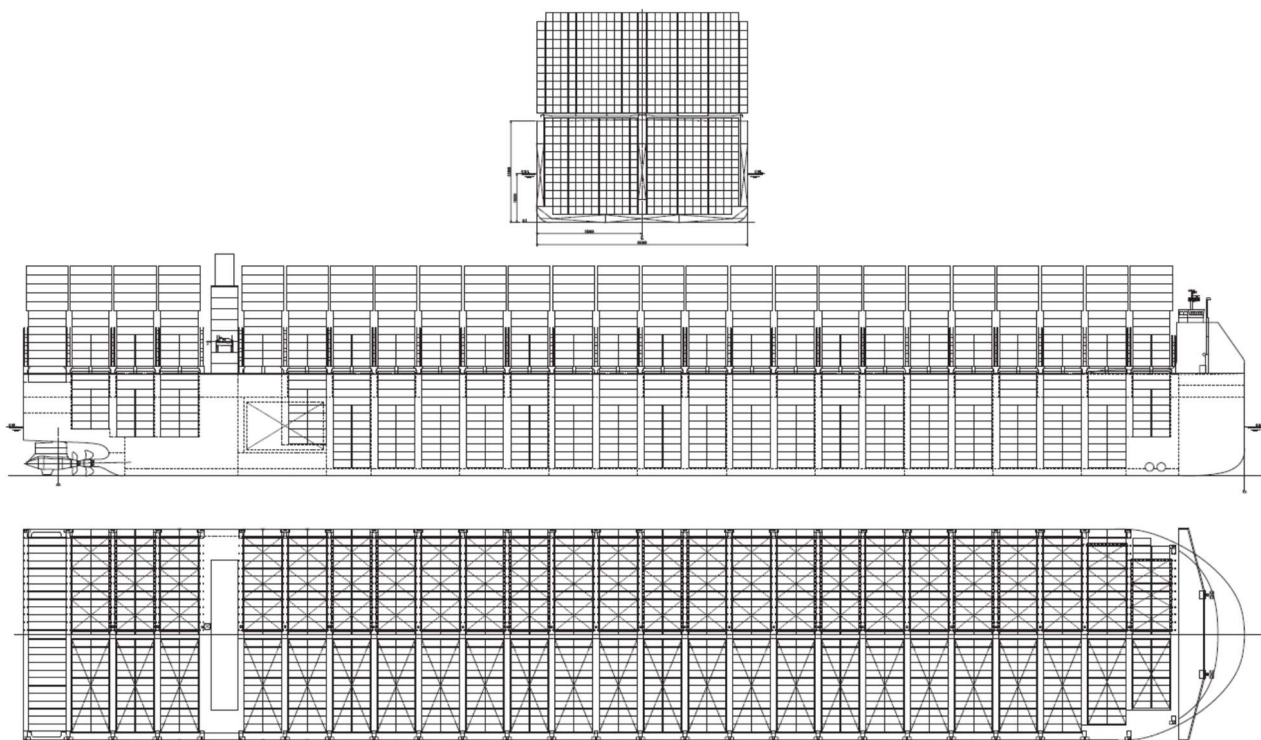


図 付録 3.4-7 コンテナ船の平面図及び側面図(超高効率 LNG+風力推進船)

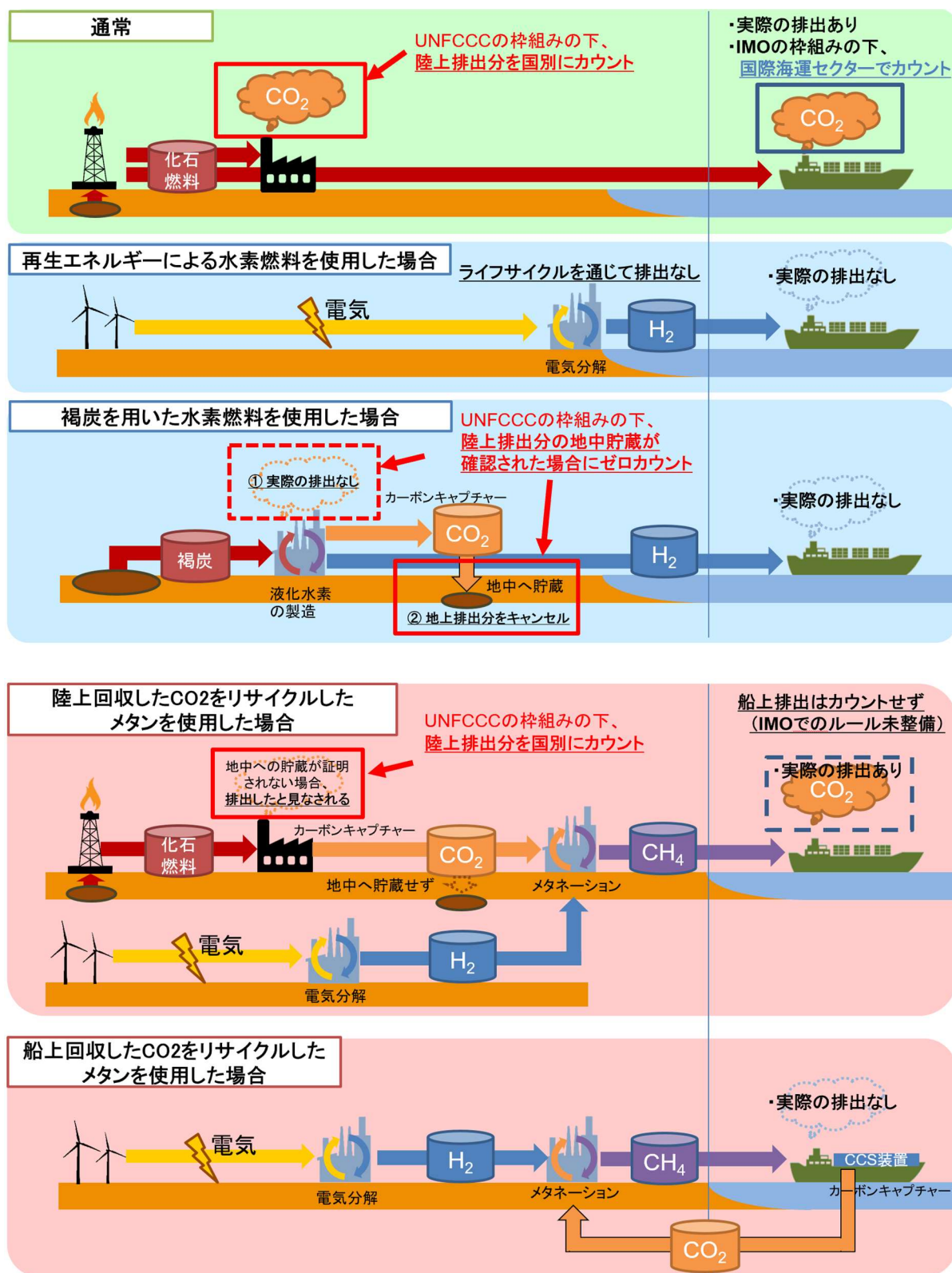


図 付録 3.4-8 コンテナ船の外観イメージ(超高効率 LNG+風力推進船)

(3)本コンセプト船の実用化に向けた課題

本コンセプト船は、目下導入が可能と考えられる技術を組み合わせたものであることから、実用化に向けた技術的な課題は大きくないと考えられる。他方で、本コンセプトの実用化に当たっては、第 5 章における検討のとおり、IMO の関連する規則・ガイドラインの見直し等の環境整備が必要と考えられる。

付録4 カーボンリサイクル燃料等の排出の考え方



※本付録は、2018年のパリ協定締約国会合における決議 (Decision 18/CMA.1) によって、各国の温室効果ガスインベントリ作成の際に使用することが求められている2006年IPCCガイドライン (2019年改訂版) に基づき、本プロジェクトにおける解釈として作成。国際海運からのGHG排出の取扱いについては、IMOにおける将来の結論を予断するものではない。

