

次世代環境船舶開発センターの取り組みについて

垣内 隆太郎*

1. はじめに

現在、SDGsへの取り組みやそれに伴うESG投資が全ての企業の行動規範となっている。特に温室効果ガス（GHG）排出削減の動きは、企業活動・製品における価値観の大きな変換をもたらしており、地球温暖化対策の取り組みは世界的に益々加速される方向である。

国際海運についても国際海事機関（IMO）にてGHG排出削減戦略が2018年4月に採択され、2050年までにGHG排出総量を2008年比で50%以上削減（中期目標）、今世紀のできるだけ早い時期にゼロにする（長期目標）とされているが、国内外の主要海運会社が2050年ネットゼロへの挑戦を明言するなど、もはや国際海運においては2050年ネットゼロを前提に取り組んでいく時代となりつつある。このような状況において、GHG排出削減を始めとする環境性能及びその関連技術が、船舶にとって益々大きな価値を持つようになってきている。

四方を海に囲まれた日本において、海運・造船を中心とする海事産業は欠かせない産業である。一方で、熾烈な国際競争の中で生き残っていくためには、世界に先んじて様々な環境関連技術を統合し、競争力ある船舶として成立させる努力を加速していく必要がある。

当センターは、このような社会的、産業的な変革を背景に、これまでに日本の造船業が蓄積してきた力を糾合し、現在ある、また、今後開発が進む環境関連技術を統合して、最先端の船舶を持続的に企画・発信する中核的な組織として、趣旨に賛同した国内の造船業有志により2020年10月に設立された。2022年3月現在における会員企業は、今治造船株式会社、株式会社大島造船所、尾道造船株式会社、ジャパンマリンユナイテッド株式会社、株式会社新来島サノヤス造船、株式会社新来島どつく、住友重機械マリンエンジニアリング株式会社、内海造船株式会社、株式会社名村造船所、一般財団法人日本海事協会、株式会社三井E&Sマシナリー、三菱造船株式会社（五十音順）である。

当センターでは、個別企業の枠を超えた幅広い情

報収集や技術開発を行い、中長期的な環境規制の強化に対応する、様々な環境関連技術を統合した高度な環境船舶の企画・開発・商品化を促進し、日本造船業の発展に資することを目指している。

2. 船舶設計に影響を与える脱炭素化に関わる規則や燃料の動向

2.1 国際海運におけるGHG排出削減に向けた規制動向

国際海運におけるGHG排出削減は、便宜置籍や第三国間輸送等の事情から、特定の国に排出量を帰属させることが困難であること、また、国際海運が世界単一市場であることから、IMOにおける議論を通じ、全世界一律の取り組み・規制としての削減が進められている。IMOによる技術上及び運航上の削減対策の全体像を図1に示す。

国際規制の枠組みは、2011年に導入が決定された、設計時における船舶の省エネ性能を義務付ける「エネルギー効率設計指標（EEDI）」及び、CO₂排出量削減のために最も効率的な運航方法を立案した計画書を船上に備え付けることを義務付ける「船舶エネルギー効率管理計画書（SEEMP）」に始まる。EEDIの導入により、船型改良や、省エネ装置の採用等による推進効率の向上を通じたGHG排出削減が進められてきた。ただし、ようやく低炭素のLNG燃料船が増えつつあるが、ゼロ炭素燃料への転換までには至っていない。

運航上の削減策としては、これまでSEEMPによる効率運航が図られてきたが、直接的に運航におけるCO₂排出削減を求める規制はなかった。しかし2018年に採択されたIMOのGHG排出削減戦略に基づき、2021年6月に開催された第76回海洋環境保護委員会（MEPC 76）において、船舶の省エネ性能規制を現存船にも遡及適用するEEXI規制と、CO₂排出量実績に基づく新たな規制「CII燃費実績格付け制度」を導入するためのMARPOL条約付属書VIの改正が採択された。これらの規制は2023年から導入される予定である。

* 一般財団法人次世代環境船舶開発センター

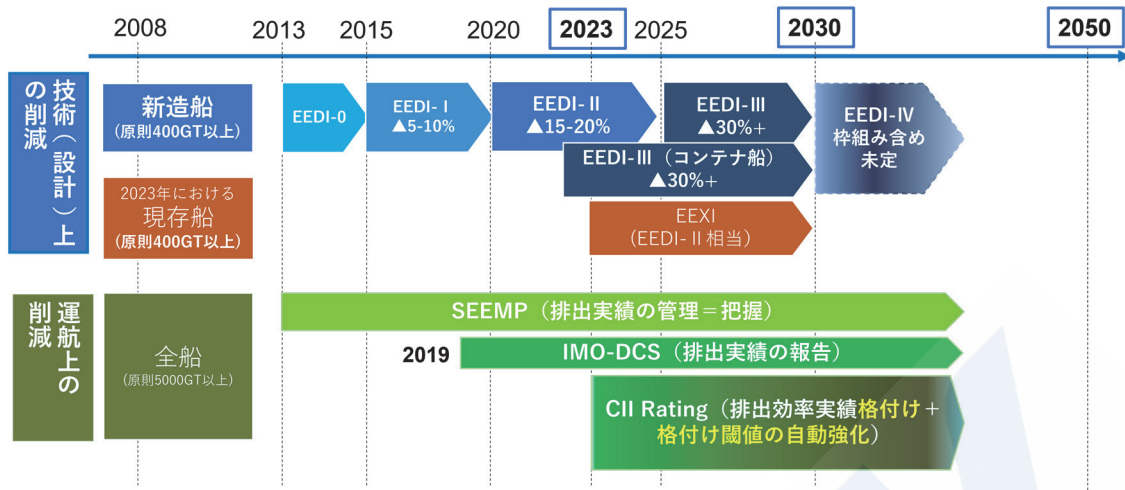


図1 技術上及び運航上の削減対策の全体像

EEXI規制は、就航船の燃費性能に基準値を設けることで、就航船から排出されるCO₂排出量を削減する技術上の削減策である。本規制は、就航船の船舶の完工日を問わず、400GT以上の国際海運に従事する全ての船に適用される。また、規制値の段階的な強化はなくEEDI Phase2と同レベルの一定値に設定されている。EEXIの導入により、就航船に対しても現時点の新造船と同程度の燃費性能が求められることになる。

一方で、CII (Carbon Intensity Index) GHG排出効率実績格付け制度は、今後の船舶の設計に大きな影響を与える可能性がある規制である。これまで、船舶設計における規制の中核となってきたのは、EEDI規制であり、現在はPhase2が適用されている。今後、Phase3が予定されているが、EEDI規制は、IMOの船舶設計規制として伝統的な手法であり、就航時に適合すれば証書が発給され、原則として、一度合格すれば、その状態を維持する限り本船の運航はその船舶の生涯に亘り可能である。

他方、CII規制は、船舶の年間GHG排出実績をA～Eの5段階で格付けし、格付けの低い(3年連続でDランクまたは単年でEランク)船舶は主管庁から改善指導がなされることとなっている。制度としては環境負荷改善を促す運用上の規制と位置付けられているが、積載量等も関係するため実際には船舶設計にも影響する。注目すべきは、格付けの基準値(削減率)が毎年自動的に強化される仕組みとなっており、新造時の燃費性能を維持したとしても、次第に格付け評価が下がっていくことである。基準値は2026年までが決定済みで、2027年以降の基準値は未定であるが強化されることは決まっている。この点が、先述の伝統的な手法であるEEDI規制と全く異なっている。また、排出実績による評価であるので、減速などの運航上の対策だけで対応できない

場合、船舶設計にも大きな影響を及ぼす可能性がある。さらに、2050年ネットゼロに向けた将来の基準値によっては、製品寿命が20年を超える船舶において、運航中いずれかの時点でゼロカーボン燃料への切り替えが必要となる事態も想定される。

図2は、CIIの基準値(Cランクの中央値)が2050年ネットゼロ目標となった場合に、それを達成するためのCII削減率を試算したものである。

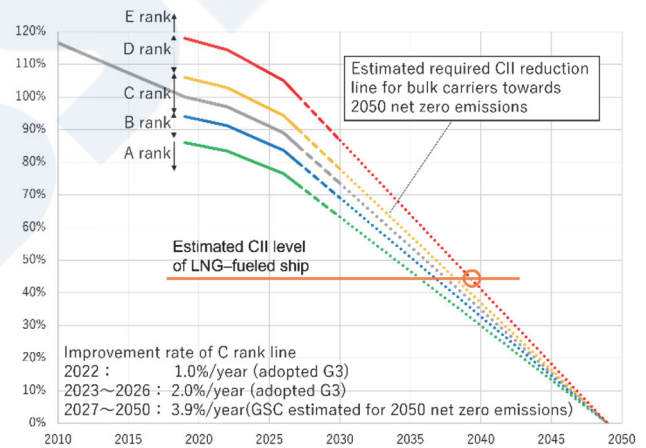


図2 CII Rating 将来の削減率 (GSC想定)

2050年ネットゼロ目標の場合は、毎年4%近くCO₂排出量を削減していく努力が要求されることとなる。図2に示すように省エネとLNG燃料化によりCII性能50%前後までCO₂排出量を削減した船舶であっても、2030年代後半にはEランク評価となり、即ち、その頃には図3に示すようにゼロカーボン燃料への転換が必要になると考えられる。また、現時点では規制上のペナルティは改善指導のみであるが、欧米の大手荷主や金融機関を中心に、用船している船舶及び貸出対象船舶のCO₂排出量を評価する動きが強まっている。荷主における取り組みはSea

Cargo Charter, 金融機関における取り組みはPoseidon原則があり, IMOの削減目標に沿って船舶のCO₂排出量削減を促すことを目的としており, その評価指標にはIMOの燃費指標が用いられているので, 用船やファイナンス調達におけるCII格付けの低い船舶へのビジネス上の圧力は今後高まっていくものと思われる。

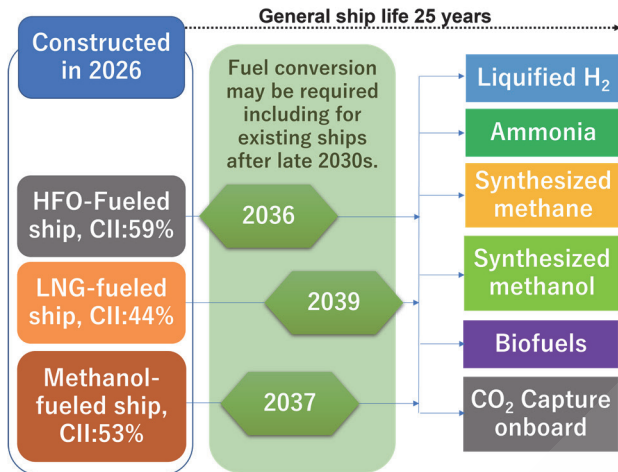


図3 GSCが考える燃料代替シナリオ

2.2 低カーボン, ゼロカーボン燃料の動向

ゼロ炭素燃料については, 水素, アンモニア, また合成メタノールやバイオ燃料など様々な燃料の可能性があり, 当センターでは, 燃料の生産技術動向からみた燃料コストの試算, 現時点の供給インフラの状況といった情報について収集分析を行ってきた。調査結果に基づく各燃料の性状と将来の供給可能性は, 付録に掲載する。現時点においては将来の燃料選択を決定できる状況にはないが, 国際海運における普及を考える上で, 安定的な燃焼, 船上での貯蔵性, 船上での取り扱い (安全性, 環境影響), 価格, 入手可能性などが特に重要であると考えている。IEAやNEDOなどの資料を参考に, 2030年から2050年までを対象にした代替燃料の製造コスト予想を図4に示す。

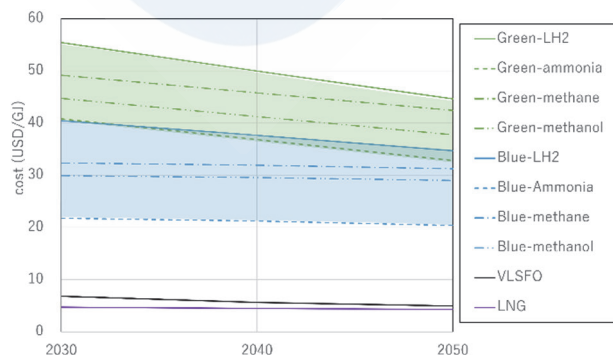


図4 代替燃料の製造コスト予想 (GSC試算)

再生可能電力由来の水素を原料として用いるグリーン燃料 (液体水素, アンモニア, 合成メタン, 合成メタノール), 天然ガス+CCS由来のブルー燃料 (液体水素, アンモニア, 合成メタン, 合成メタノール) の価格について, 燃料製造コストの観点から試算・比較を行った。なお, 合成メタノールの原料となるCO₂はDAC由来及びバイオ副生由来で試算した。また, 製造・供給プロセスとして, 豪州で代替燃料を生成・貯蔵→日本へ輸送→国内貯蔵・二次輸送→各船舶へバンカリングするとした。ただし, バンカリングのコストは算入していない。

2050年に向け, 再生可能電力の価格低下に伴ってグリーン燃料の価格は低下していくものの, 総じてブルー燃料が安価であり, 最も安価なのはブルーアンモニアである。なお, 熱量 (GJ) 当たりのブルーアンモニアと重油・LNGとの価格差は15USD前後となり, CO₂換算では250-300USD/CO₂-t程度である。液体水素は液化・貯蔵・輸送に係るコストが多くなった。もちろん今後の製造技術革新による価格変動はあり得るが, 現在想定される技術ベースではこのような見通しとなる。

2.3 外航船舶向けゼロカーボン燃料の見通し

当センターでは, 現時点において外航船舶向けとしては, 2030年代までは当面の低炭素燃料としてLNGの利用拡大が進み, その後にブルーアンモニアへの転換が進むシナリオが有力とみている。その理由としては下記が挙げられる。

- 供給量, 供給拠点からして, 当面の低炭素を進めるための燃料としてはLNGが現実的な解とならざるを得ない状況である。ただし, メタンスリップ対策はより重視される。
- ゼロ炭素燃料 (グリーン及びブルー) の燃料生産コスト予想としてはブルーアンモニアが最も有利であり, 液体水素は液化・貯蔵・輸送のコストが嵩む上, 船上での貯蔵性及び取り扱いの難しさの課題もあり普及には困難が予想される。アンモニアは毒性やN₂Oの懸念があるものの, 機関メーカーや船級協会ではそれへの対処も想定した機器開発・ガイドライン整備を進めており, 普及に向けて大きな障害にはならないのではないかと考えられる。
- カーボンニュートラル合成メタン及び合成メタノールは, 原料となるDAC由来, バイオ由来のCO₂のコストと供給力が不透明であり, 排気ガス回収由来のCO₂では排出権の扱いが課題となる。
- バイオ系燃料は生産スケールに課題がある。また, バイオ油は航空機燃料との需要競合も指摘されており, 船舶用燃料としての必要量を確保するのは困難が予想される (Pilot燃料などでの活用は期

待される)。

ただし、ゼロカーボン燃料の中では比較的安価と予想されるブルーアンモニアでも現在の船用燃料に比べると相当の高価格になると想定され、ゼロカーボン燃料への転換の実現には、IMOによる国際的な規制の確立や脱炭素化に向けた投資促進といったビジネス面での後押しが不可欠である。

なお、既存インフラを活用できる合成燃料(メタン、メタノール)も円滑なトランジションの点から期待する声も強い。また、近距離航路では必要とされる総エネルギー量も少ないため、水素や電力(燃料電池・バッテリー等)なども活用可能と考えられ、航路や船種によって様々な燃料が使用されると見込まれる。

3. 国際海運からのGHG排出削減・ゼロエミッションに対応した次世代環境船舶の開発

3.1 規制や燃料動向を踏まえた次世代環境船舶の方向性

国際海運におけるGHG排出規制動向やゼロカーボン燃料の関連技術、インフラ整備動向等を踏まえた上で、2050年ネットゼロに至る海事産業のトランジション期における船舶の姿はどのようなものであるかについて、当センター設立以来、規制動向、代替燃料の動向や関連技術の動向等の様々な調査分析を行いつつ検討を進めてきた。規制動向や代替燃料関連技術開発動向、バンカリングインフラ整備動向に不確実性が大きく、いまだ将来像は不透明ではあるものの、蓋然性の高いトランジションシナリオとして、LNGからアンモニアの利用が進むとの想定のもと、下記のような状況認識、方針で具体的な

ソリューションとしての船舶の概念設計、基本計画を行っている。

- IMOで実燃費格付け制度(CII規制)が導入され、製品評価における環境価値、製品寿命に対する重要性が高まる。
- CII規制の格付け基準値は毎年厳しくなる。
- IMOで「2050年ネットゼロ」目標が導入されることを想定し、2025年から2050年までのトランジション期を通じて競争力を持つ船舶を目指す(市場投入は2025年頃を想定)。
- 国際海運におけるゼロカーボン燃料としては、アンモニアが有力と判断。
- 2030年代までは低炭素燃料としてLNG燃料の利用拡大が進み、その後ゼロエミッションに向けてアンモニアへの転換が進むというシナリオを想定。ただし、合成メタンの可能性も考慮。
- 日本造船業の商品ポートフォリオを考慮し、太宗船分野のゼロカーボン化促進及び日本造船業界の次世代主力商品開発として、バルカー、タンカー、コンテナを主たる開発対象船種に選定。設計難度が高い中小型の船型を対象に開発することで設計の汎用性も確保。

具体的な開発対象燃料コンセプトとしては、船舶の生涯コストや燃料見通し、不確実性を孕む外部環境へのフレキシビリティ等を勘案したメリット、デメリットについて評価を行った。その結果、様々なコンセプト候補の中から、有利と考えられるLNG-DF (Dual Fuel) (CII改良型)、LNG-DF (アンモニア-DF化Ready型)、HFO-専焼 (アンモニア-DF化Ready型)、アンモニア-DFの4つのコンセプトを開発対象に選定した。図5にそれぞれのコンセプト船のトランジションイメージを示す。

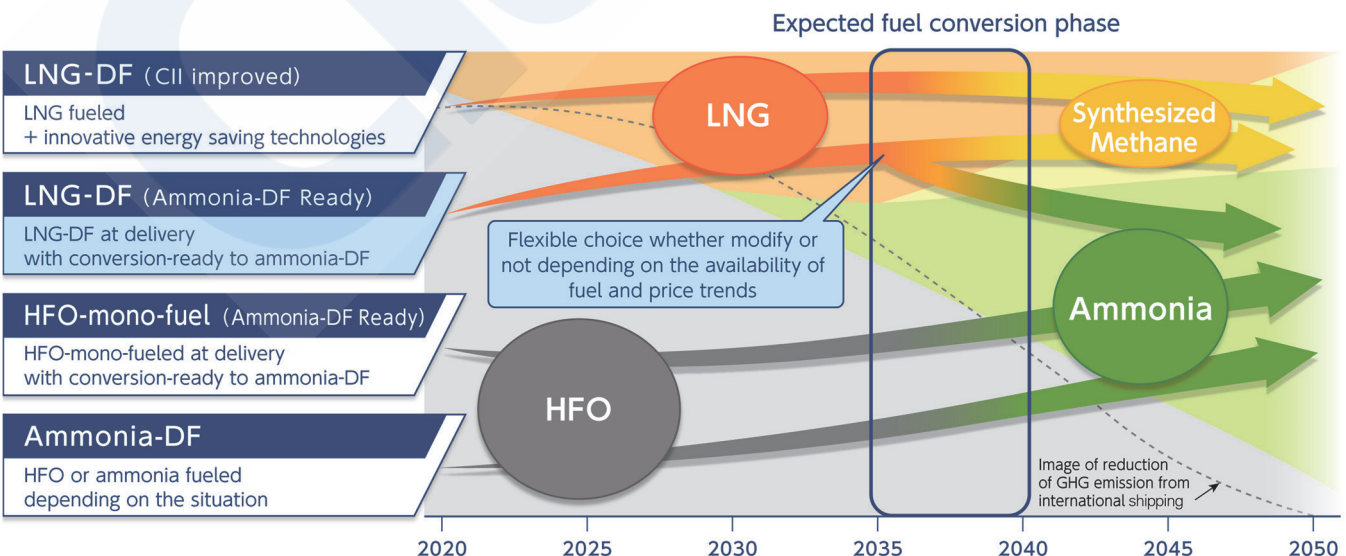


図5 トランジション期におけるソリューション(船舶コンセプト)イメージ

環境負荷の低いLNGや、アンモニア燃料を使用するコンセプト船を検討する際の設計上の主な課題としては、エネルギー密度の関係から、燃料タンク容積・形状に、設計上大きな影響があるという点である。各代替燃料における体積当たりのエネルギー密度と、重量当たりのエネルギー密度の関係性及び想定されるタンク形式の例を図6に示す。

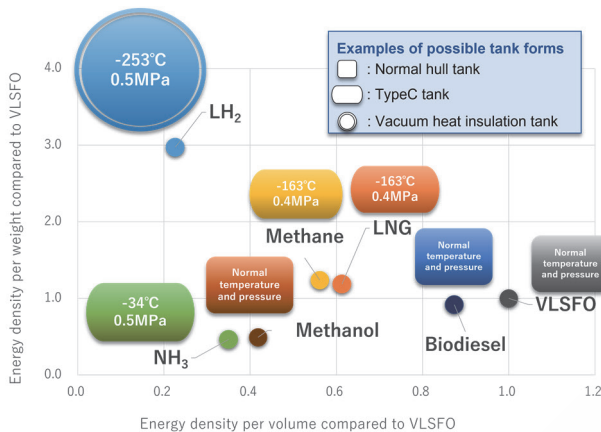


図6 各燃料のエネルギー密度と想定タンク形式のイメージ

従来の重油燃料船並である20,000SMの航続距離を確保しようとする、燃料の熱量と体積の関係からLNGは重油の約1.7倍、アンモニアは約2.7倍の容積を確保する必要がある。このため、本船には想定する出入港ターミナルで許容される主寸法制限範囲内で、貨物積載能力に大きな影響を与えることなく燃料タンクを配置する工夫が求められる。

従来の重油とは全く異なる性状の燃料、即ち常圧では低温、侵入熱によりガス化する、引火性が高い、毒性がある、燃焼性が重油と異なるといった特性を持つ燃料を扱う必要があるため、燃料供給システムがこれまでと大きく異なった物となる。加えて、燃料タンク、燃料供給装置、居住区等の配置や防火、消火、脱出経路の確保といった安全性への配慮が重要となってくる。さらに、配置検討のみならず、ゼロエミ達成に向けて、GHGをこれまで以上に大きく削減するが、従来よりも非常に高価になると予想されるゼロカーボン燃料の使用量を削減し、経済性を向上させるための省エネ装置の評価と採否の検討も併せて行っている。省エネ装置の評価においては、これまでの燃費改善による直接的なメリットのみならず、CII格付け改善による製品寿命の延長効果も見込めるため、従来とは異なった視点も加えて本船に採用する省エネ装置の評価を行う必要がある。

3.2 次世代環境船舶の設計事例

以上のような開発の一環として、当センターは、会員造船会社との連携によりアンモニア燃料パナマックスバルクキャリアの設計を我が国で初めて開発し、本年1月20日、一般財団法人日本海事協会（ClassNK）より設計基本承認（Approval in Principle：AiP）を取得した。AiP取得船の概略GAを図7に示す。

この度AiPを取得した設計では、ClassNKのアンモニア燃料船のガイドラインの要件に従って一般配置、燃料供給コンセプト、防火・消火・避難経路、危険区画コンセプト、アンモニア処理対策、バンカリング時緊急離脱要領、トリム・復元性計算等の検討を行い、十分な安全対策を施すとともに、重油に比べて大幅に容積が増えるアンモニア燃料のタンク容量及びタンク配置について入念な検討を行い、貨物積載量・航続距離への影響を最小限にとどめるなど、安心して使いやすい船舶としている。また、ケーブサイズなど、より大型の船舶や、就航後の改造を想定した「アンモニアレディ」のLNG燃料バルクキャリアなどへの展開も考慮した設計とした。

本船の主な特徴は下記の通りである。

- ・船尾に居住区を配置することで、従来の主寸法を維持した上で大容量のアンモニア燃料タンクを効率的に配置
- ・アンモニア燃料タンクと救命艇を隔離することで、非常時にアンモニア燃料タンク近傍を通過しない、より安全な脱出経路を確保
- ・バルクキャリアにおける主要航路である極東～豪州往復、南米～南アジア片道を想定し、十分な航続距離を確保するアンモニア燃料タンク容量
- ・HFO容量も従来船並に確保し、燃料トランジション期におけるアンモニア燃料供給に対する不安へも対応
- ・貨物槽容積は従来の重油焚きパナマックスバルクキャリア並を確保
- ・NKのみならず主要船級ガイドラインを参照し、安全対策を実施
- ・タンク配置等基本的な配置をLNG燃料船と共通の配置・構造とすることで、就航後の改造を想定した「アンモニアレディ」のLNGバルクキャリアへの展開も考慮

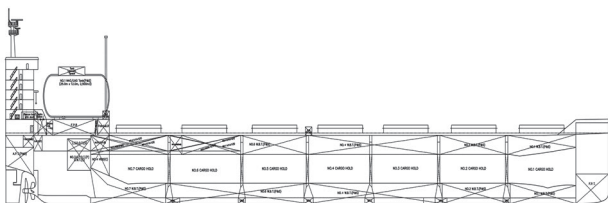


図7 AiP取得船概略配置図

主要目を表1, 外観を図8, 9に示す。

表1 AiP取得船の主要目

主要目	
LENGTH(O.A.)	abt. 228.9 M
LENGTH(B.P.)	225.45 M
BREADTH(MLD)	32.26 M
DEPTH(MLD)	20.10 M
DEADWEIGHT	abt. 80,400 MT
MAIN ENGINE	MCR 8,000 kW
SERVICE SPEED	abt. 14.2 KNOTS
NH ₃ FUEL TANKS	2,500m ³ x 2sets

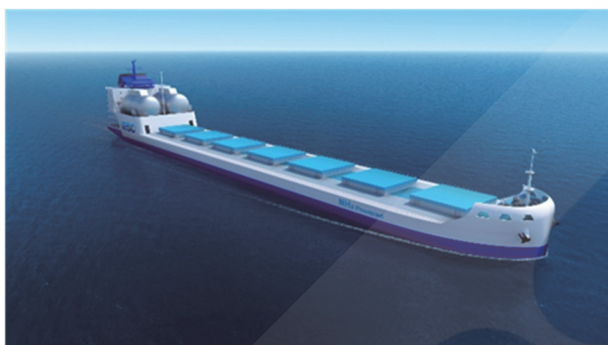


図8 AiP取得船外観（前方から）

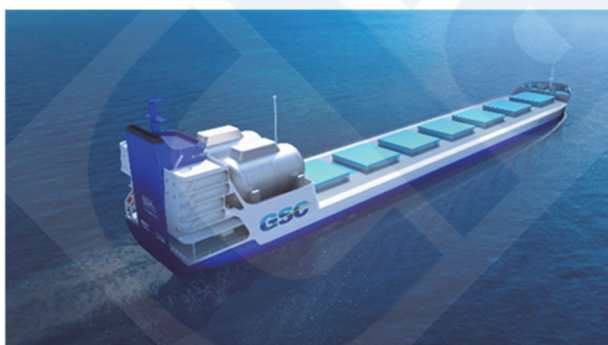


図9 AiP取得船外観（後方から）

めた世の中の動向は、今後めまぐるしく変化していくことが予想される。脱炭素に向けた環境価値の高まりによって、経済性に相反する評価基準への対応も迫られている。また、CII格付け制度の導入により、これまで建造後20年以上の長期に亘って運航することが当たり前であった船舶の製品寿命に大きな影響を与える可能性が生じている。こういった世の中の動向のもと、船舶を運航・管理するユーザーにとって、トランジション期における船舶の脱炭素化に関わる事業リスクをどう考え、どのような船舶を購入すべきかについて、これまで以上に難しい判断が求められる。

このような状況に対応するため、当センターでは、継続した情報収集、分析に基づいて、トランジション期においてどのような船舶を提供していくことが、海運・造船業界にとって合理的なソリューションとなりうるかを重要課題と捉え開発を行っている。

具体的な次世代環境船舶の開発については、現状のソリューション案の検討を会員各社の協力も得ながらさらに詳細に設計展開し、客先への提案が可能となるよう検討を深めていく。また、並行して新燃料使用に必要な技術及びシステム、安全性、環境性能、燃料切り替えを想定した複数燃料への対応、さらなる燃費改善といったソリューション実現のために不可欠な共通課題について、検討や船用メーカーとのコラボ等を実施し、今後の設計に反映していきたい。

これらのセンターでの活動を通じ、日本の海事産業の脱炭素化並びに、さらなる日本造船業の発展に貢献していくことを目指している。

参考文献

- 1) 平松 彩, 竹内 智仁: 次世代環境船舶開発センター (GSC) の取り組み, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第57巻 第1号, 2022.
- 2) 竹内 智仁: 船舶分野における脱炭素化の展望, 日本エネルギー学会機関誌「えねるみくす」, 第101巻 2号, 2022.

付録

GSC調査結果に基づく各燃料の性状と将来の供給可能性 (次ページ参照)

4. おわりに

2050年ゼロエミッション達成に向け、規制を含

GSC調査結果に基づく各燃料の性状と将来の供給可能性は下表の通り。

	VLSFO	LNG	液化水素 (LH2)	アンモニア	カーボンリサイクル (CR) 合成メタン	CR 合成メタノール	バイオディーゼル (FAME)
低位発熱量 (GJ/t)	40.4 (39.8~41.7)	48.0 (46.5~50.4)	120.0	18.8	50.0	19.9	37.1
液体密度 (t/m ³)	0.93	0.48	0.0708	0.7	0.422	0.79	0.885
CO ₂ 換算係数 (CO ₂ -t/燃料-t)	3.126	2.693	0	0	(0*)	(0*)	0
熱量当たり体積比 (VLSFO比, @液化状態)	1.00	1.63	4.42	2.86	1.78	2.39	1.14
熱量当たりCO ₂ 排出量 (CO ₂ -g/GJ)	77.38	56.10	0	0	(0*)	(0*)	0
副生GHG及び温暖化係数 (IPCC AR5より)		メタン (スリップ) 温暖化係数: 28		N ₂ O 温暖化係数: 265	メタン (スリップ) 温暖化係数: 28		
沸点 (°C)	200~400	abt.-161	-253	-33	-161	65	345~354
船上での貯蔵方法 (液体状態)	常温常圧 船体付きタンク	Type C (低温or加圧) or 独立方形タンク/メムブレ	真空防熱タンク	Type C (低温or加圧) or 独立方形タンク/メムブレ	Type C (低温or加圧) or 独立方形タンク/メムブレ	常温常圧 船体付きタンク	常温常圧 船体付きタンク
船上貯蔵時の性状 (液体状態)	常温, 常圧	-160~-140°C, 0.07~0.5MPa	app.-250°C, 0.5MPa	-30~-10°C, 0.07~0.5MPa	-160~-140°C, 0.07~0.5MPa	常温, 常圧	常温, 常圧
発火点 (°C)	abt.407	abt.537	560	630	537	440	256~266
低速船用エンジンサイクル	ディーゼル	ディーゼル/オットー	ディーゼル/オットー	ディーゼル/オットー	ディーゼル/オットー	ディーゼル/オットー	ディーゼル
パイロット燃料	不要	要	要	要	要	要	FOとブレンド
将来の供給拡大の可能性 (世界全体・陸用) 留意点・影響要素	▲~△ 石油への投資減少	△ ガスへの投資減少	◎ 気体液体を問わず水素全体として拡大, 水素キャリアとして液化は極一部	○ 陸側の需要拡大 (エネルギー産業の参入, スケールアップと低コスト化)	△~○ 原料CO ₂ ガスのCN化, 長期的確保	△~○ 陸上 (自動車や火発等) でのメタノール燃料の利用拡大見通し不明	○ 第1世代は土地転換問題あり, 第2世代は作物の伸びと転換技術次第
将来の供給拡大の可能性 (船用) 留意点・影響要素	▲~△ 陸上需要の減少	○ メタンスリップ批判	▲~△ (液化水素)	○	△~○	△~○	△ Pilot燃料向けか航空機向けとの競合
バンカリングインフラ	◎	△~○ 拡大中	無し	輸出入インフラの活用?	△~○ LNGインフラ利用可能		FOのインフラ利用可能?