

# 国際海運ゼロエミッション化 の経済的技術的問題とその 解決方策について

第7回海中海底工学フォーラム・ZERO

2022年4月22日

国立研究開発法人 海洋研究開発機構 大和裕幸

# 国際海運ゼロエミ化の問題点

- 船の設計が問題でなく、どのような船をいつ頃投入してゼロエミを達成するかが問題
- 船ではなくて燃料インフラの問題が大きい
- ゼロエミまでの資金対策はESG投資など新しい仕組みが必要
- 造船、海運、荷主、燃料、金融などのステークホルダーのとりまとめ
- ゼロエミ化のためには数値データによる考え方とステークホルダーの協調システムが必要

# 国際海運ゼロエミッション化の道筋と未確定な使用環境条件

IMOの道筋 2008年に比して・・・

～2030年：40%以上の燃費性能の向上

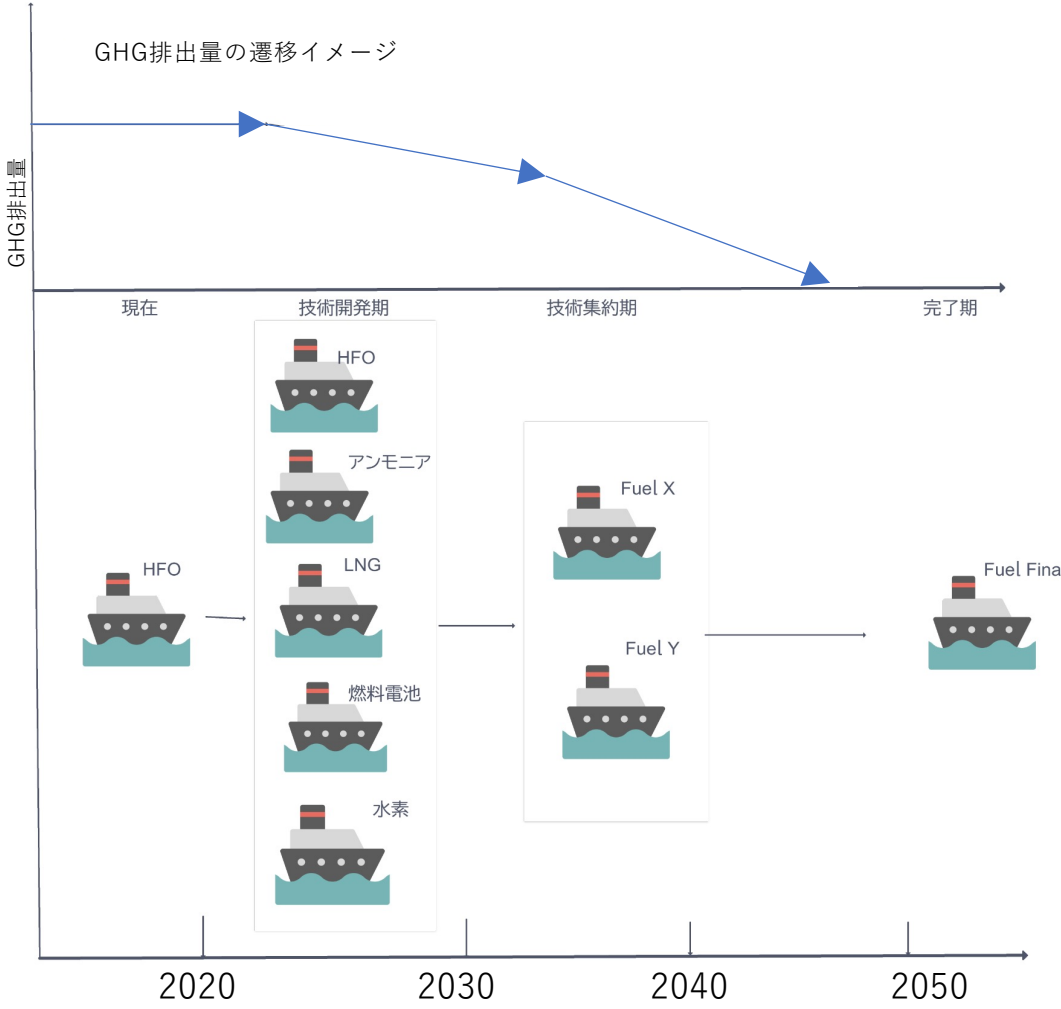
～2050年：国際海運からの排出総量50%以上の削減

～2100年：なるべく早い時期に排出量ゼロを達成→2050年までにネットゼロ

不確定な技術とインフラの状況

1. **機関・燃料技術**：LNG、アンモニア、水素、CCS、FC いずれも技術的に未完成
2. **インフラの整備**：燃料転換に伴う燃料価格と港湾バンカーインフラの整備
3. **規制**：炭素課金などの制度が未定

# GHG排出量と船の遷移



# 国際海運に係わるステークホルダーと合意形成

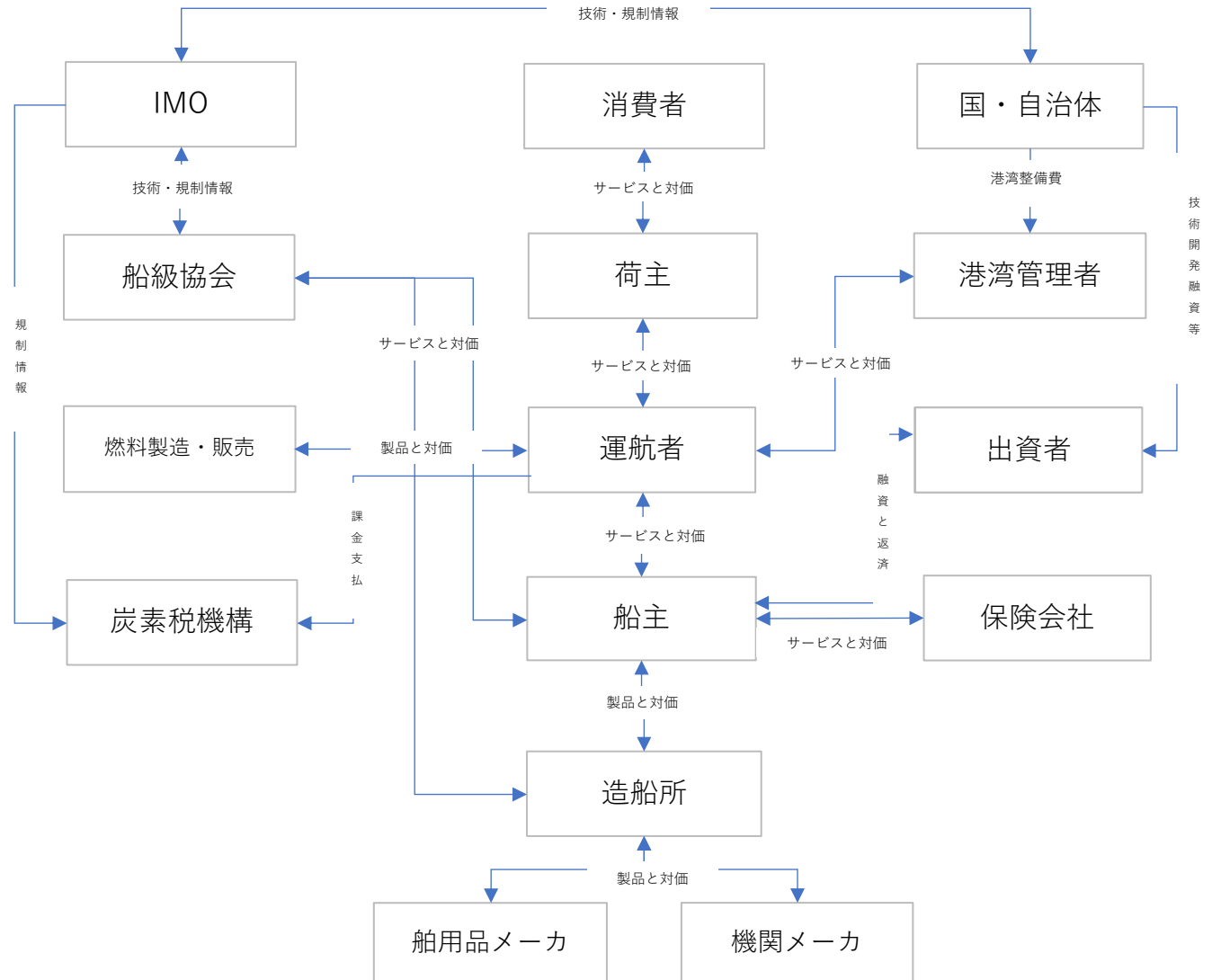
国際海運ゼロエミ化はみんな  
で解決する社会的問題



ステークホルダー間の合意  
形成の手法が必要



合意形成のための予測資料  
が必要



# 講演内容について

- 講演者が2022年3月31日まで在職した一般財団法人 次世代環境船舶開発センターでは、2021年度に国際海運ゼロエミ化への「最適解」を求めるために「ソリューション評価システム研究会」を設置して検討した。その成果である。
- 全世界モデルの検討：世界中のバルクキャリア10000隻余についてシミュレータを構築して、ゼロエミ化への道筋を検討した。
- 特定航路モデルの検討：日本西豪州間の鉄鉱石輸送船について課題を設定しプロジェクト計画手法について検討した。
- プロジェクト計画を行うオープンイノベーションシステムを構築し、ESG手法への展望を得た。
- オープンイノベーション型ビジネスモデルの提案と試作システムについて示し、提案する。

# 全世界モデルの検討

出典

2021年12月3日 日本海洋政策学会

「国際海運ゼロエミッション達成のための環境・技術・経済のシミュレータによる評価」

海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所 和中真之介

東京大学大学院新領域創成科学研究科 稗方和夫

東京大学名誉教授 大和裕幸

# シミュレータ：SDモデル

$$V_i = V_{i-1} + B_{i-1} - S_{i-1}$$

$V_i$  :  $i$ 年の船腹量 =  $i$ 年の船腹需要 → given

→ 需要予測からバラスト航海比率で必要船腹量を求める。

$B_i$  :  $i$ 年の新造船腹量 →

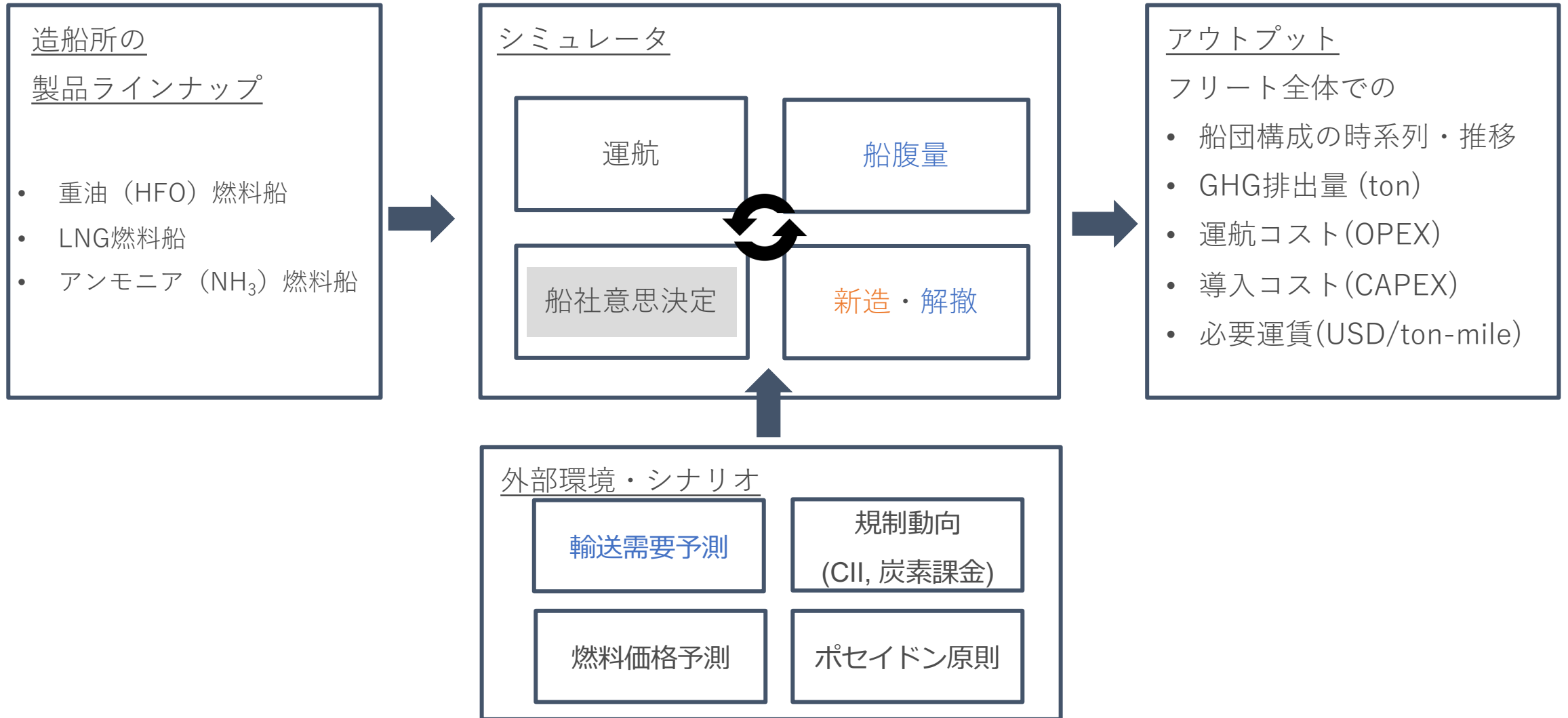
→ 各サイズへの分配は過去5年間の船腹量比率による。

$S_i$  :  $i$ 年の解撤量

→ 「CIIによる解撤」と「実績データによる解撤」、「船齢」で解撤される



# シミュレータ：アーキテクチャ

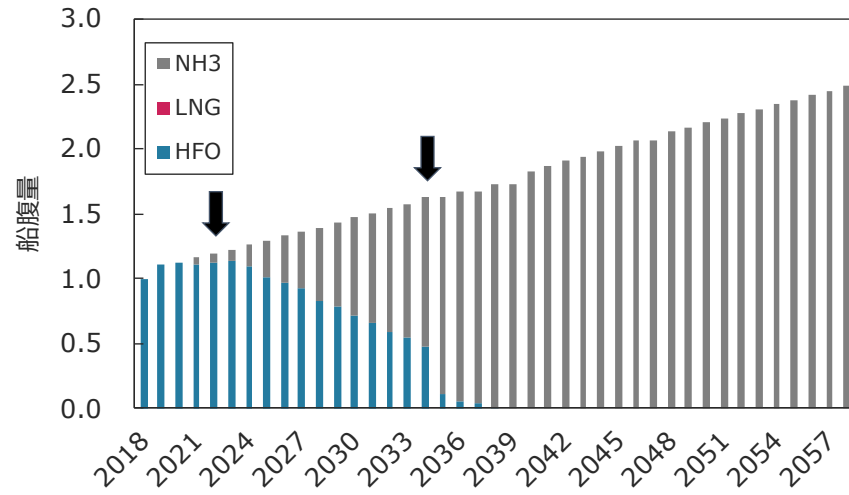


# 例題：世界のバルクキャリア10279隻のゼロエミ化

LNG燃料船がない場合	重油燃料船→アンモニア燃料船
LNG燃料船がある場合	重油燃料船→LNG燃料船→アンモニア燃料船

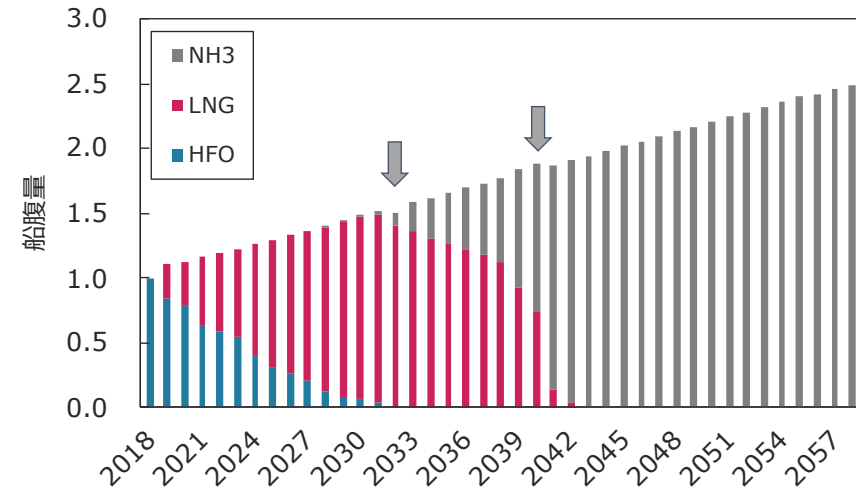
- 船腹量、コスト、環境負荷等の比較を通じて最適な戦略を考える。
- 炭素課金の影響も検討する。

# 例題：船腹量と船団構成の推移



## ■ LNG燃料船がない場合

- 重油燃料船の使用期間が長い
- アンモニア燃料船の導入時期が早まる  
→インフラ整備の時期が早くなる



## ■ LNG燃料船がある場合

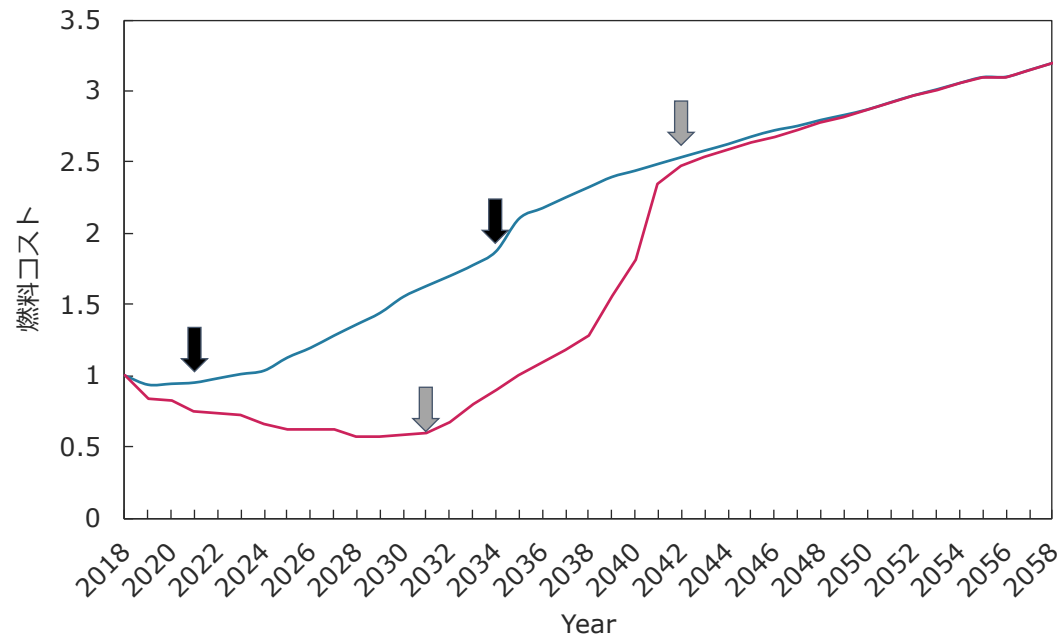
- 2040年頃の建造需要が過多  
→国際海運の破綻？  
→どのような投資をするか
- 2042年にゼロエミによる差別化は終わり  
りコスト競争の時代になる

※グラフの縦軸は、初期の船腹量を1として表示

# 例題：燃料コスト（排出総量）

赤: LNG燃料船あり

青: LNG燃料船なし

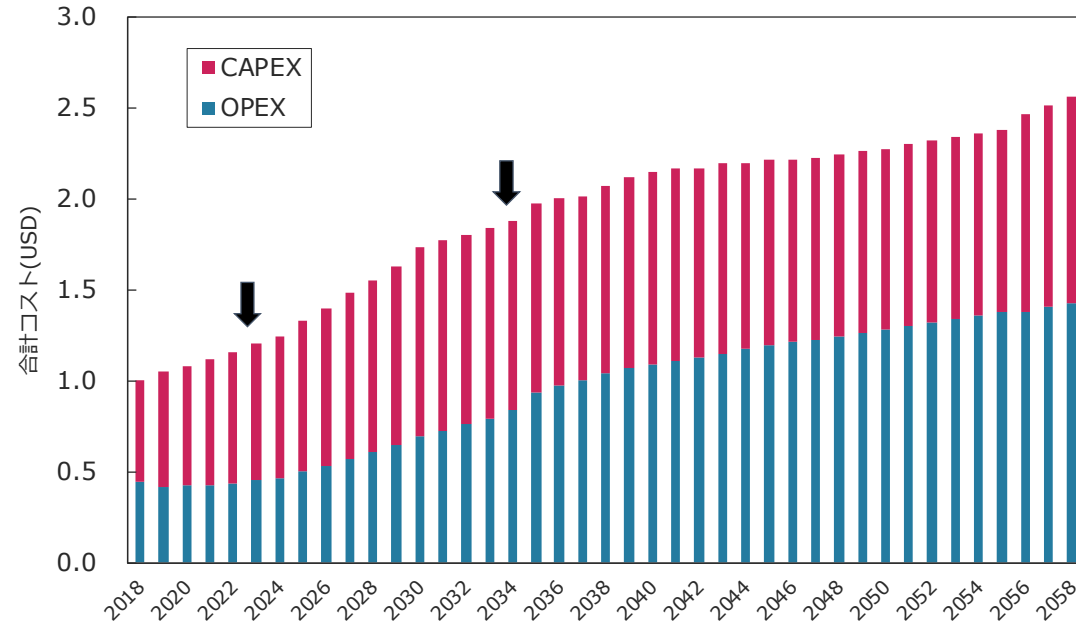


- LNG燃料船がない場合、ある場合に比べてコスト増  
→燃料価格に依存するので、バンカー価格などに注意  
→バンカー拠点整備が課題

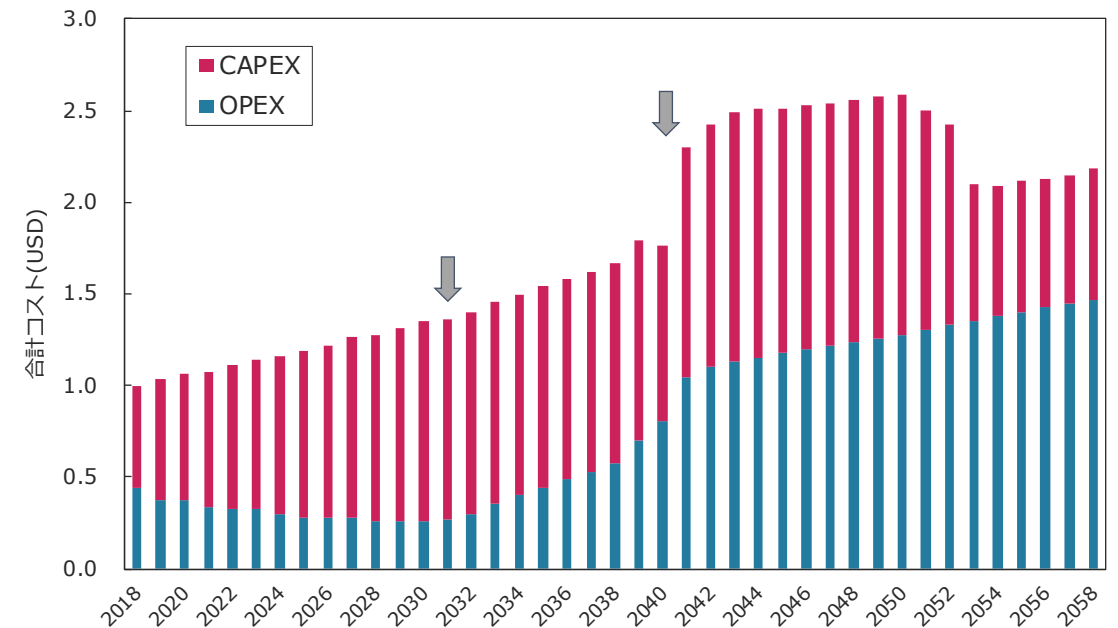
※グラフの縦軸は、初期の燃料コストを1として表示

# 例題：コストの比較

## ■ LNG燃料船がない場合



## ■ LNG燃料船がある場合

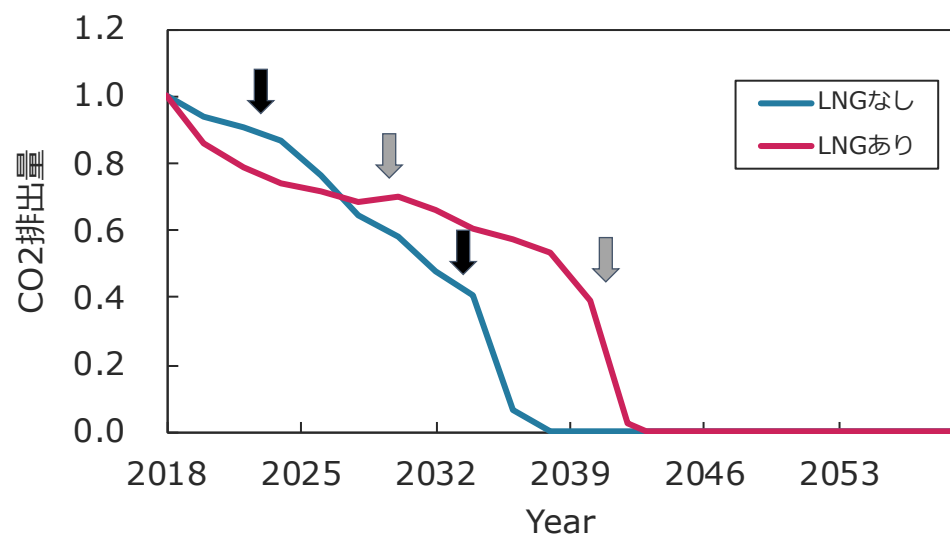


## ■ OPEXは燃料費のみ

- LNG燃料船を使用するとOPEXは節約できるが、リプレイス量が増えるため、2040年からCAPEXは増加

※グラフの縦軸は、初期の合計コスト(CAPEX+OPEX)を1として表示

## 例題：CO<sub>2</sub>排出量の比較



- LNG燃料船がある場合には初期にはCO<sub>2</sub>排出量が少なくなるが、その後逆転される。
- LNG燃料船がないほうがゼロ・エミッションは早く達成される。
- CO<sub>2</sub>排出量とコストとの関係で吟味が必要。
- 炭素課金がいつから始まるかの分析必要。

※グラフの縦軸は、初期のCO<sub>2</sub>排出量を1として表示

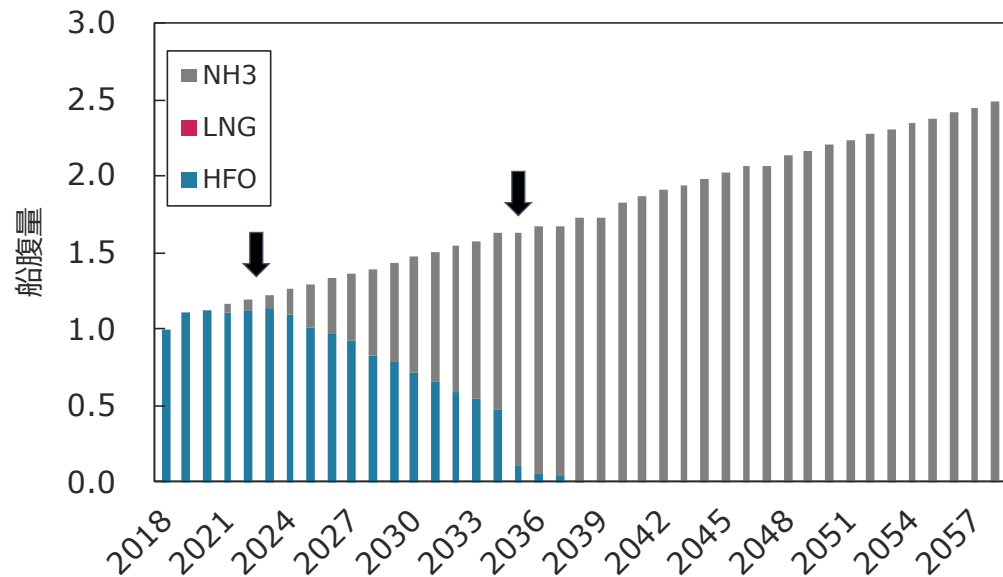
# 例題：環境規制の影響

- 炭素課金がない場合と、2030年から炭素課金が導入された場合の比較
- 炭素課金がある場合

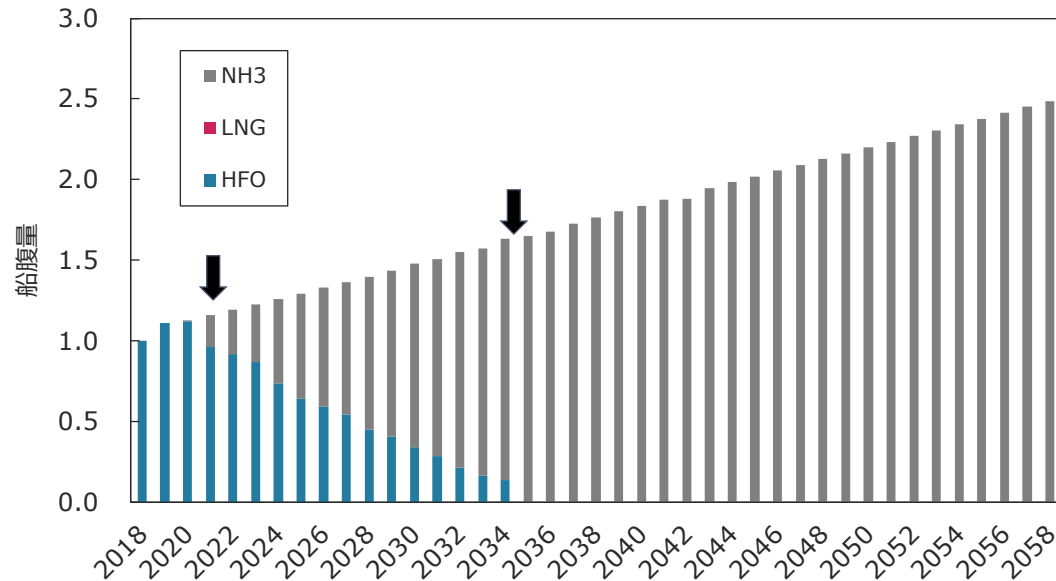
時期（年）	炭素課金（USD/CO <sub>2</sub> -ton）
2018-2029	なし
2030-	250

# 例題：環境規制の影響(LNG燃料船がない場合)

## 炭素課金がない場合



## 炭素課金がある場合



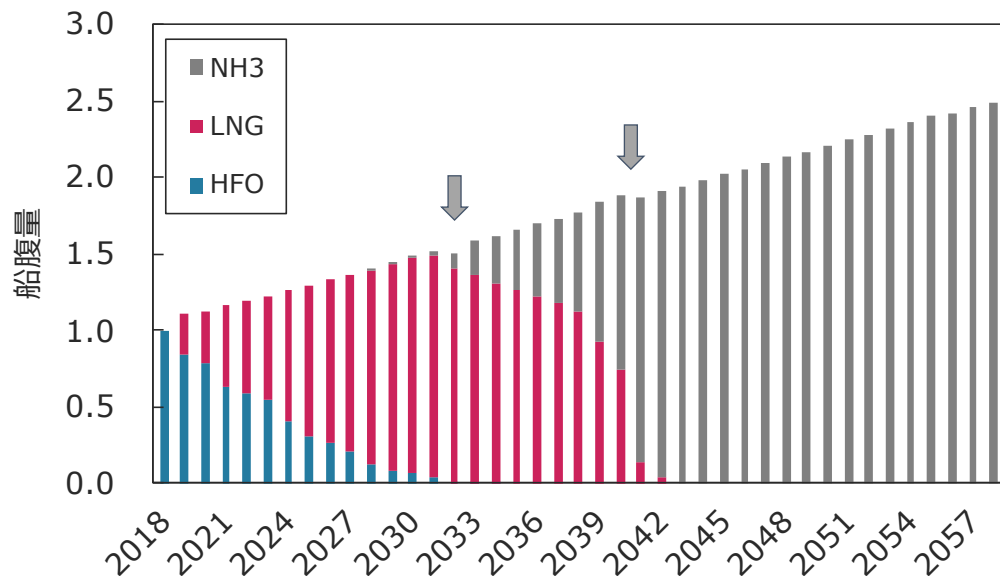
CII評価による強制解撤の影響が大きく、重油(HFO)燃料船が解撤されるタイミングは変わらない

一方で、炭素課金によってアンモニア燃料と重油の価格差が縮まるため、アンモニア燃料船導入量が増加する

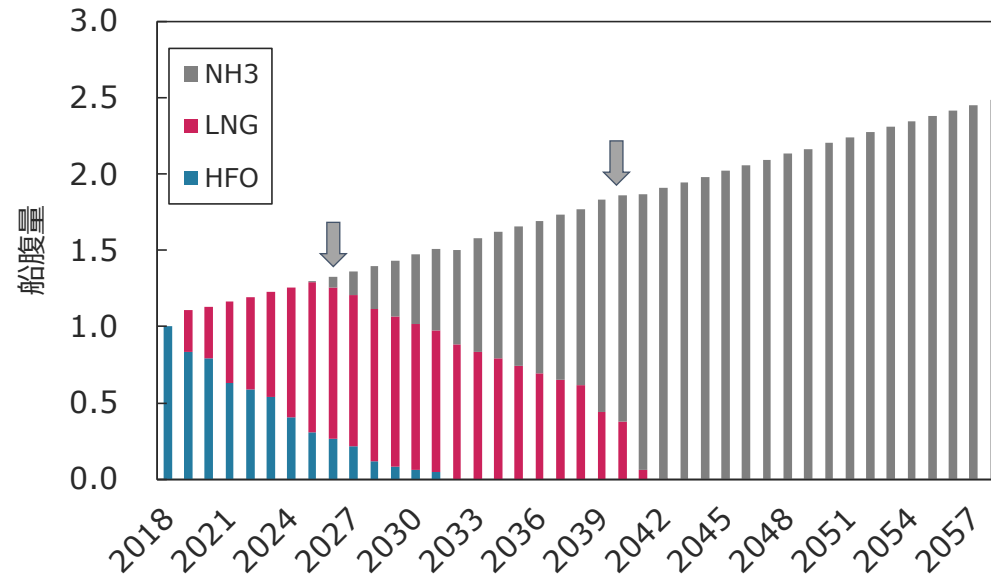


# 例題：環境規制の影響(LNG燃料船がある場合)

## 炭素課金がない場合



## 炭素課金がある場合



- 現在でもLNG燃料船が大量に建造され、2025年頃からアンモニア燃料機関が使われ、アンモニア燃料もどこでも得られる、という仮定での計算
- 炭素課金によってアンモニア燃料とLNG燃料の価格差のメリットが減少し、アンモニア燃料船導入のタイミングが早まり、結果としてアンモニア燃料船の導入量が増加する
- CII評価による強制解撤の影響が大きいため、重油(HFO)、LNG燃料船が解撤されるタイミングは変わらない

# 例題からわかること

- ① LNG燃料船が導入されない場合には、2023年までは重油のみが使われるが、そこからアンモニアへの転換が始まる。LNG燃料船が導入される場合には、2019年からLNGへの切り替えがおこり、2030年頃からアンモニア燃料船に変わっていく。
  - ② アンモニア供給インフラの整備はLNG燃料船がない場合はすぐに開始しなくてはならない。
  - ③ コストはLNG燃料船を入れたほうが低い。
  - ④ 二酸化炭素排出量は、LNG燃料船を使わない方がアンモニアへの転換が早く進むために少ない。
  - ⑤ 炭素課金の導入はLNG燃料船がないときは効果はなく、あるときはアンモニアへの転換が早まり総排出量も削減され有効。
- これらシミュレーション結果から、ステークホルダーに技術的、環境的、経済的評価のためのデータを示すことが出来る

# 結論と今後

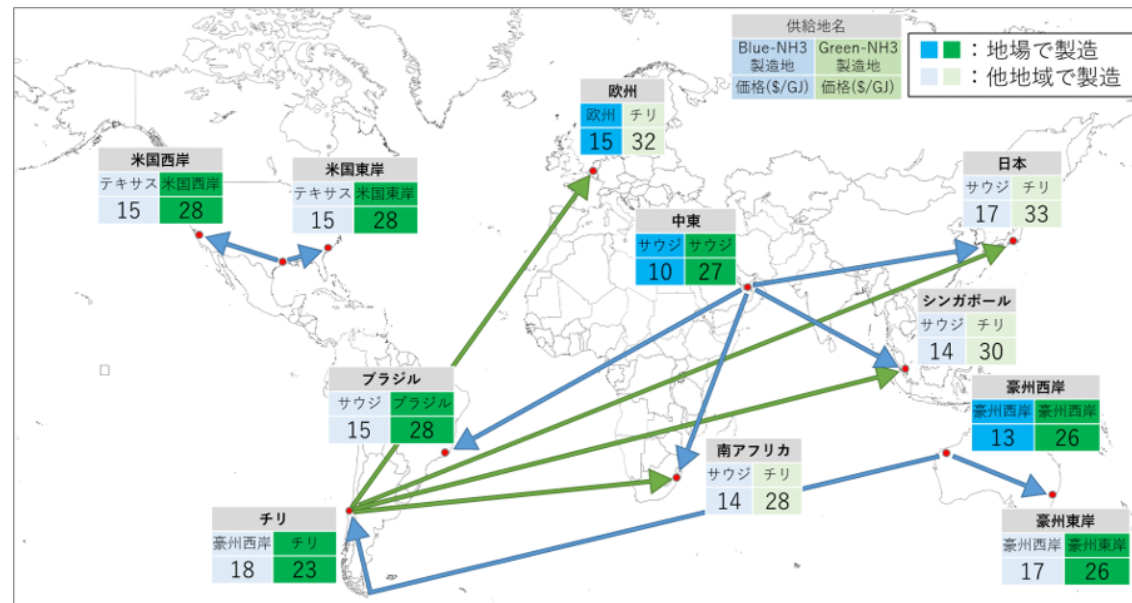
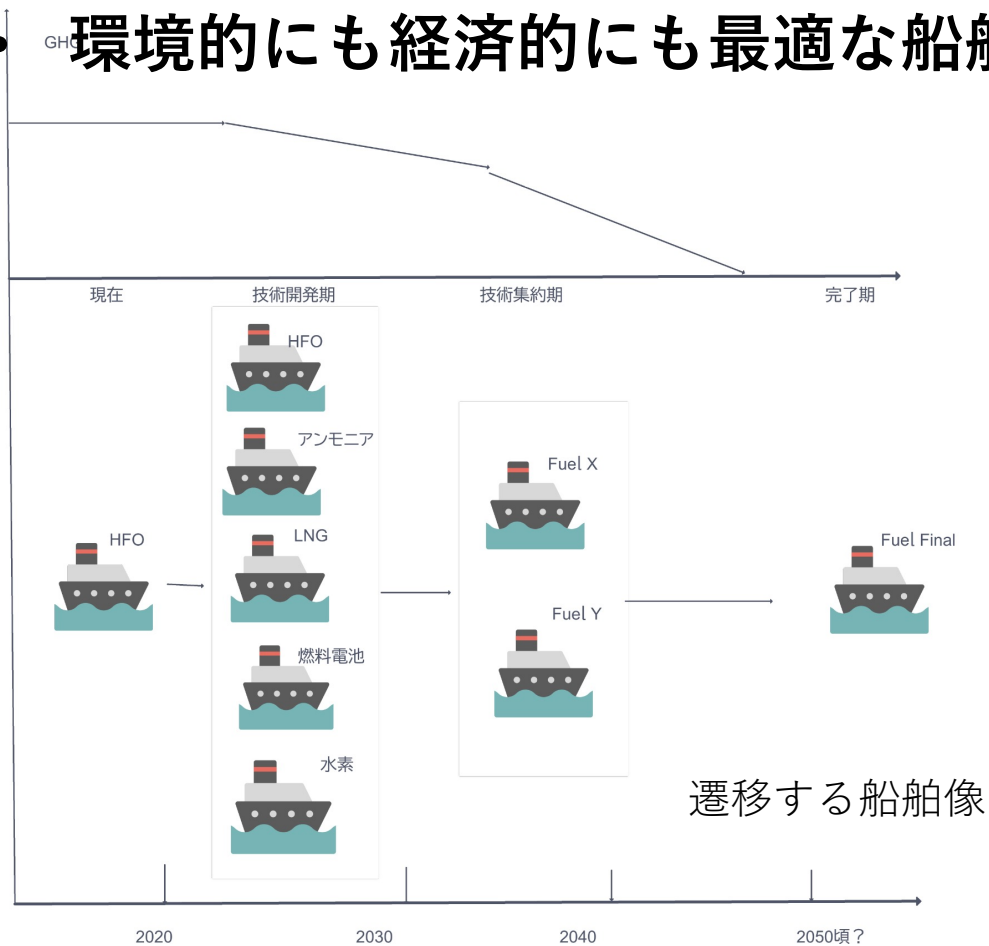
- 使用する船舶群の設計や投入時期などゼロエミまでの遷移を具体的に提案し、環境、経済、技術の様々なデータをステークホルダーに示し実行可能解を求める
- 本研究ではそのためのシミュレーターを構築し、例題を通して有効性を検討
- シミュレーターにより環境・技術・経済に関するデータを具体的に示し、評価が可能
- 環境や産業政策の設計にも利用できる
  
- 今後は、多くの仮定から成り立っている結果について十分な吟味が必要
- また、造船ばかりでなく、海運、金融、燃料などの各業界や政府などの観点からの検討が必要

# 特定航路モデル（プロジェクト評価）

- 国際海運ゼロエミ化の基本的構造
  - 技術・燃料インフラ・規制の不確定
  - 合意によるソリューション決定
- 合意によるソリューション策定
  - 方法論
    - ステークホルダー図とデザインスパイラル
  - システム
    - シミュレーターによる将来予想とそれに対するステークホルダー間のコミュニケーションをサポートするシステムを結合して構成

# 技術・インフラ・規制の進展の中で遷移する船舶

- ゼロエミに至るまでどのような船をいつ投入すればよいか
- 環境的にも経済的にも最適な船舶の設計



GSC調査内部資料より

# 条件を想定→結果を合意する

## 評価・決定レイヤー

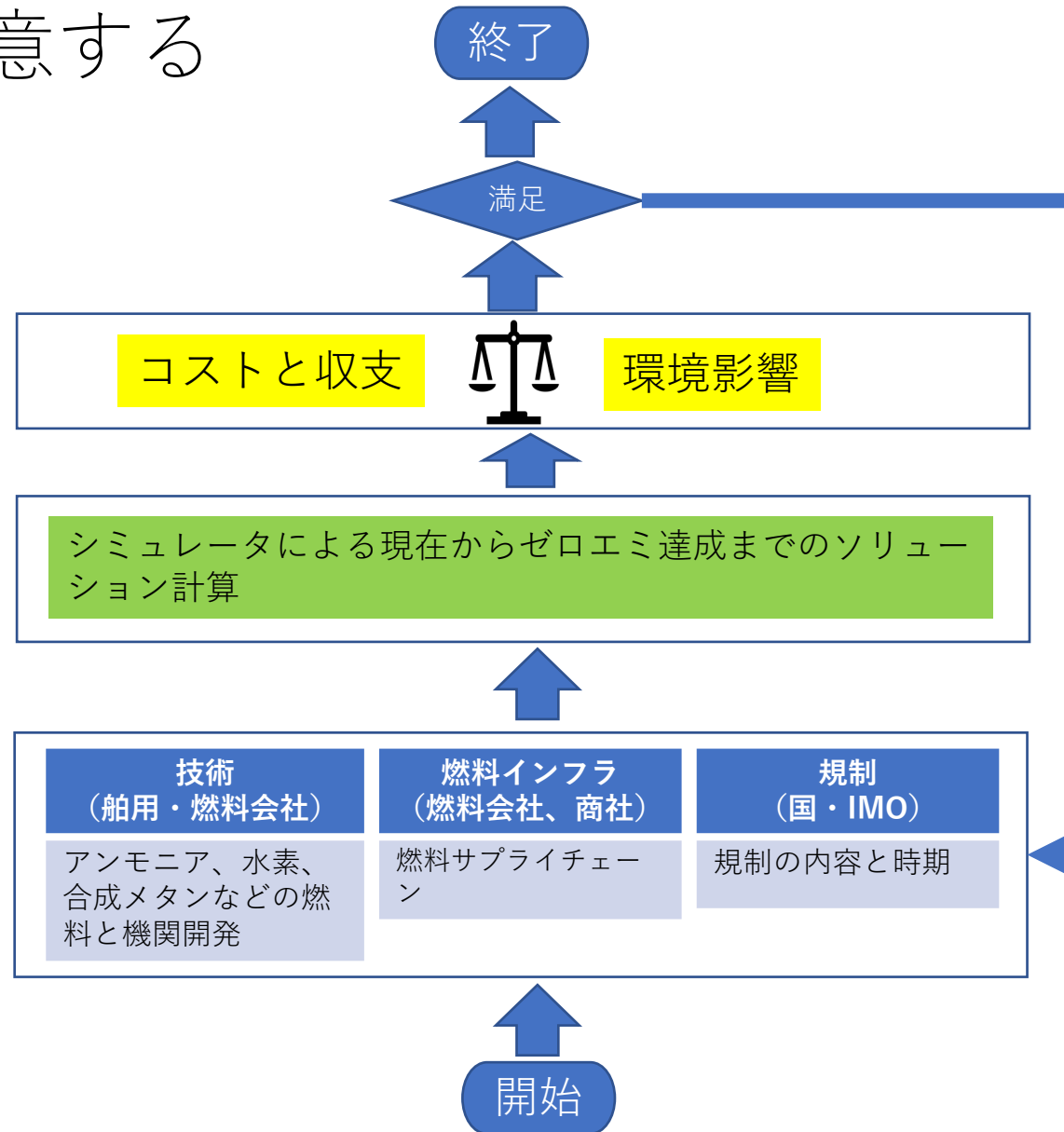
(「コストと収支」と「環境影響」の間ですべてのステークホルダーが満足する実行可能解を決定する)

## ソリューション計算レイヤー

(想定レイヤーで決めた条件で船舶設計データを用いて計算する)

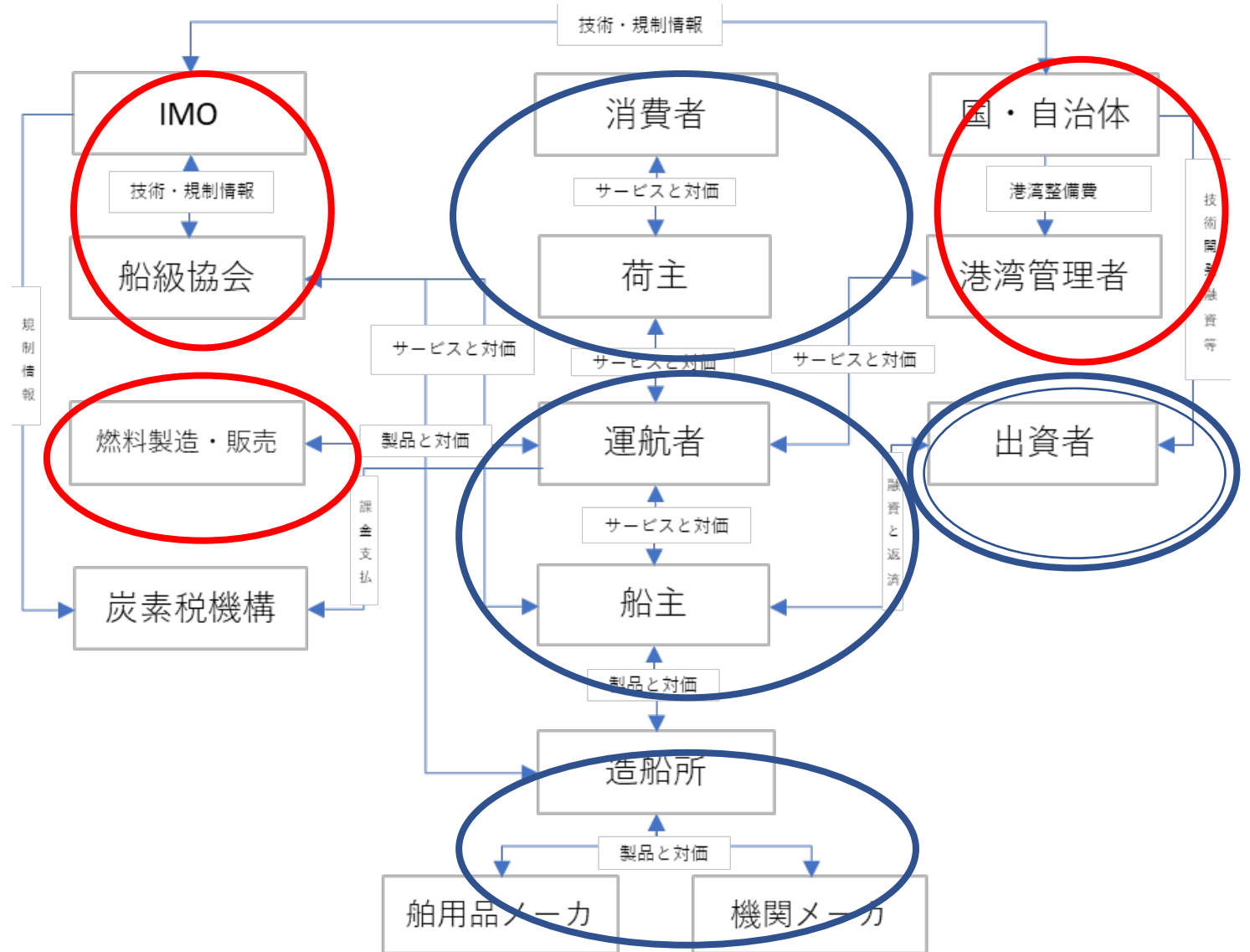
## 条件想定レイヤー

(未確定な技術、燃料インフラ、規制について、ステークホルダー間で合意し、計算条件とする)



# ステークホルダー全員で合意する

- 国際海運に関わるステークホルダーは多岐に亘る
- 全てのステークホルダーの利害を考慮した設計が必要
- 情報分析・予測をベースにコミュニケーションにより、各ステークホルダー間のコンセンサスを得る。これが実行解になる。

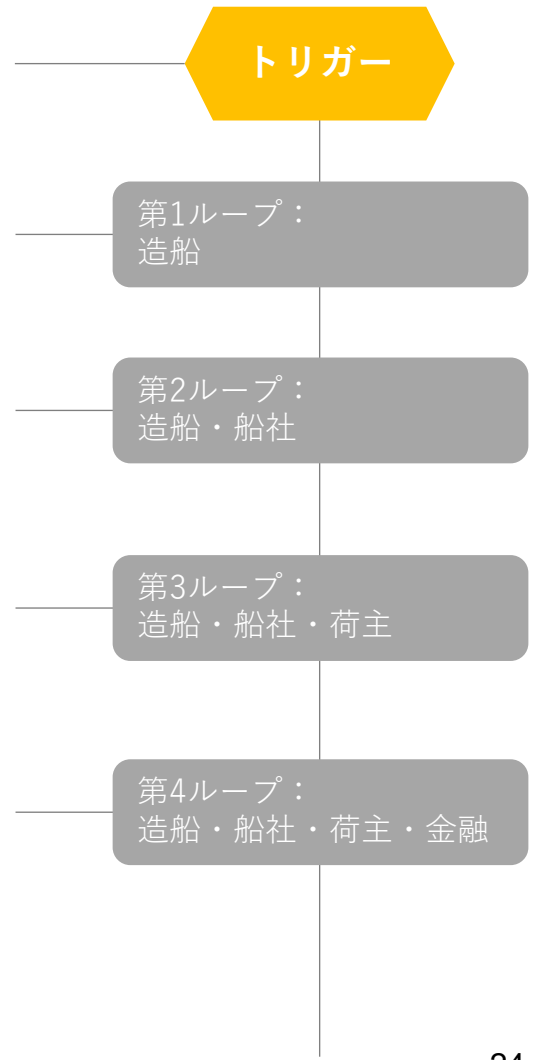
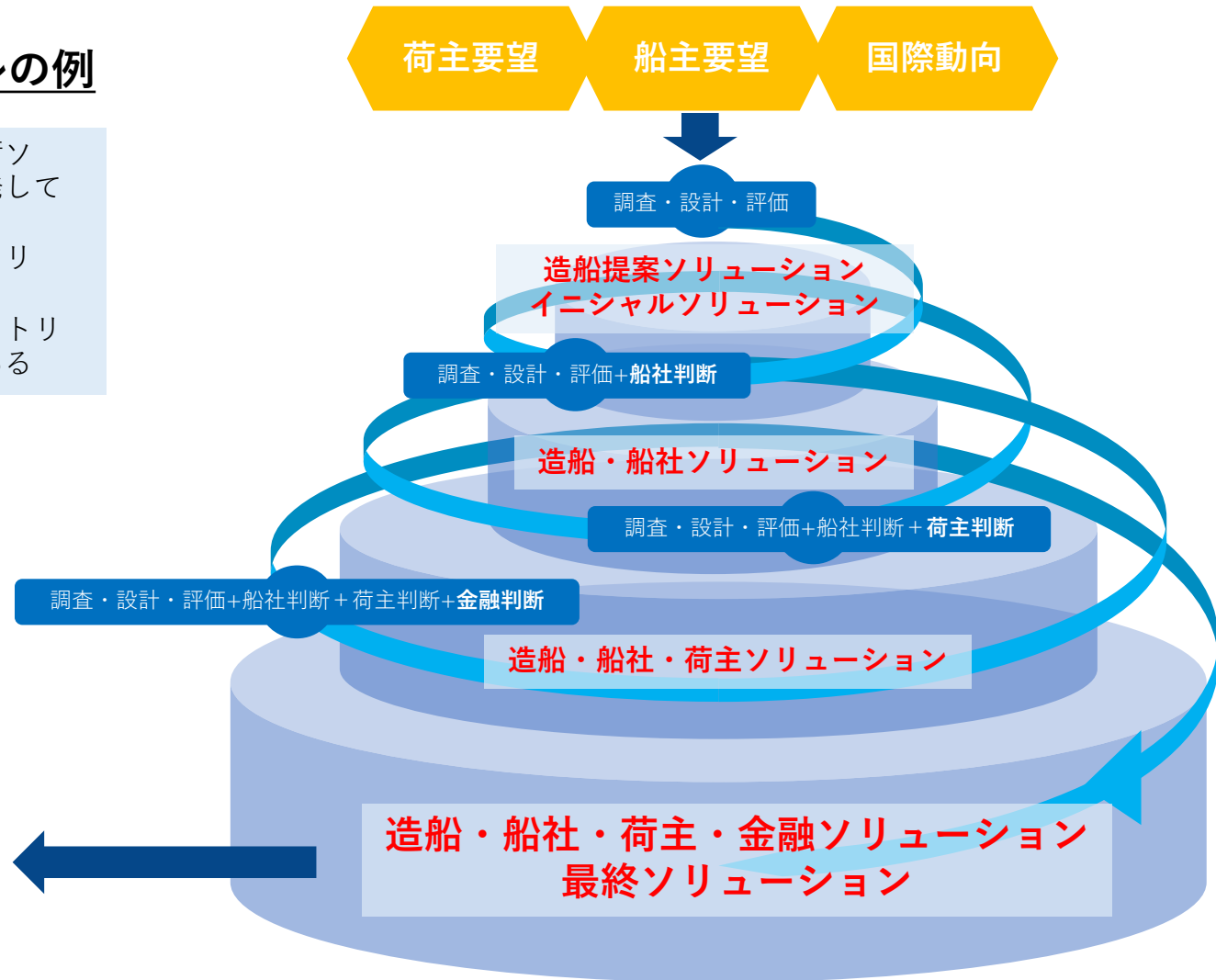


# デザインスパイラル→ステークホルダー合意解の達成

## デザインスパイラルの例

- 造船所が中心となって技術ソリューションを企画・開発していく場合のスパイラル
- ステークホルダーごとにトリガーは異なる
- 荷主圧力、造船技術など、トリガーのためのトリガーもある

国  
 港湾設置者  
 燃料製造供給社  
 IMO  
 船級協会





# 特定航路モデル

## ー日本西豪州鉄鉱石運搬船ゼロエミ化プロジェクト

- 世界の動向ではなく、特定の航路についてソリューションの評価手法を用いてプロジェクトを設計する
- 全世界モデルとは違う答え

# 特定航路モデル シナリオ全体概要

項目	内容	備考/確認内容
対象船	20万DWT級ケーブサイズBC (19万DWT~21万DWT)	まずはケーブで検討
航路/貨物	西豪州-日本 / 鉄鉱石	まずは豪州-日本を対象
積地	Port Hedland	西豪州を仮設定
揚地	日本	国内ミル（N製鉄）向けの輸送を想定。港湾ごとの航続距離、設備制限などの差は考慮しない
初期船団	建造年ごとの性能差を考慮して設定	想定する輸送に従事するフリートに対し、船齢分布から個船ごとに燃費性能を推測
輸送需要	輸送需要：3,500万トン/年、 需要の変化：将来に亘り増減なし	初期輸送量：2014-2020年の実績から仮設定
初期船団の隻数	23隻	AISから、平均運航船速/運航プロファイルを仮設定し、輸送需要から算出
アンモニア燃料技術普及時期	2025年以降	船用機器メーカー動向参照の上、仮設定
給油地/インフラ整備時期	揚地/揚地近郊：極東 中間地点：シンガポール ※積地でのバンカリングは考慮しない	各プロジェクト動向フォローの上で各地点でのインフラ整備時期を仮設定 ⇒外部環境条件として設定 ※ シンガポール：プロジェクトあり、日本：輸入アンモニアの船用燃料転用

# 航路・運航パターン

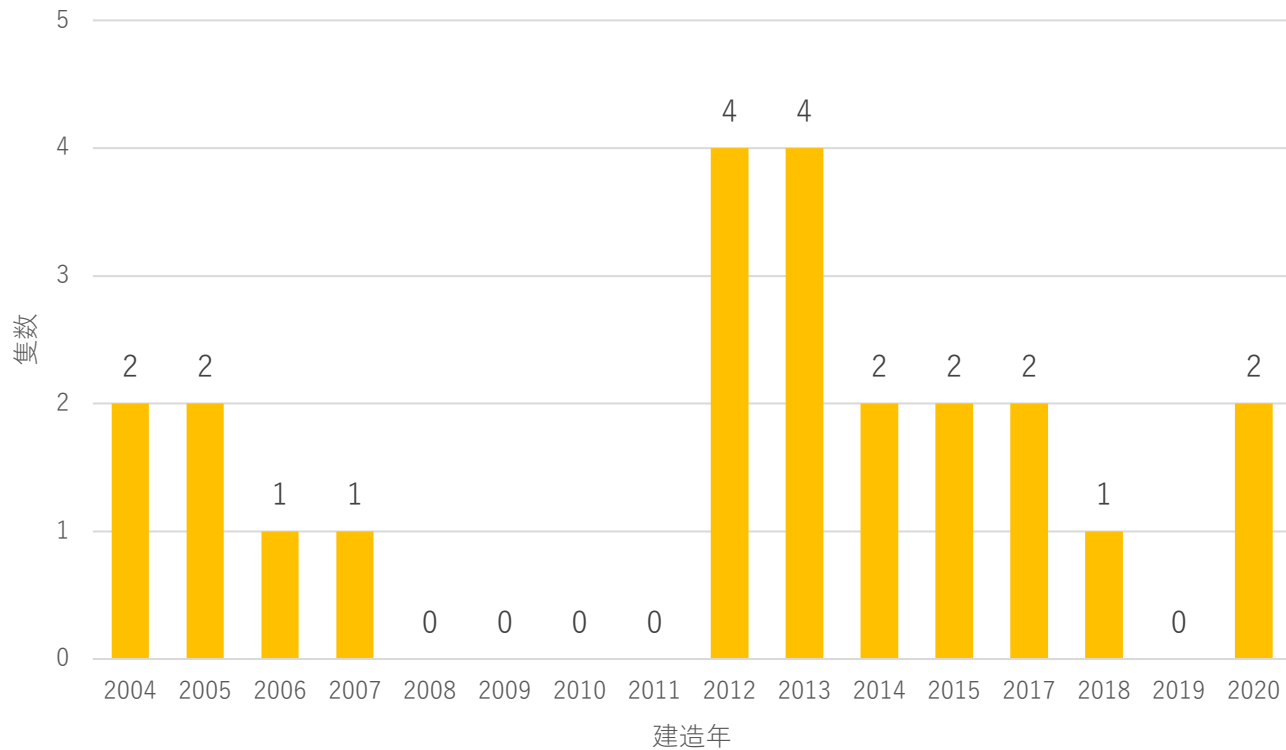
NH3 (2025~2035年)



HFO・LNG(2020年~)/NH3(2035年~)



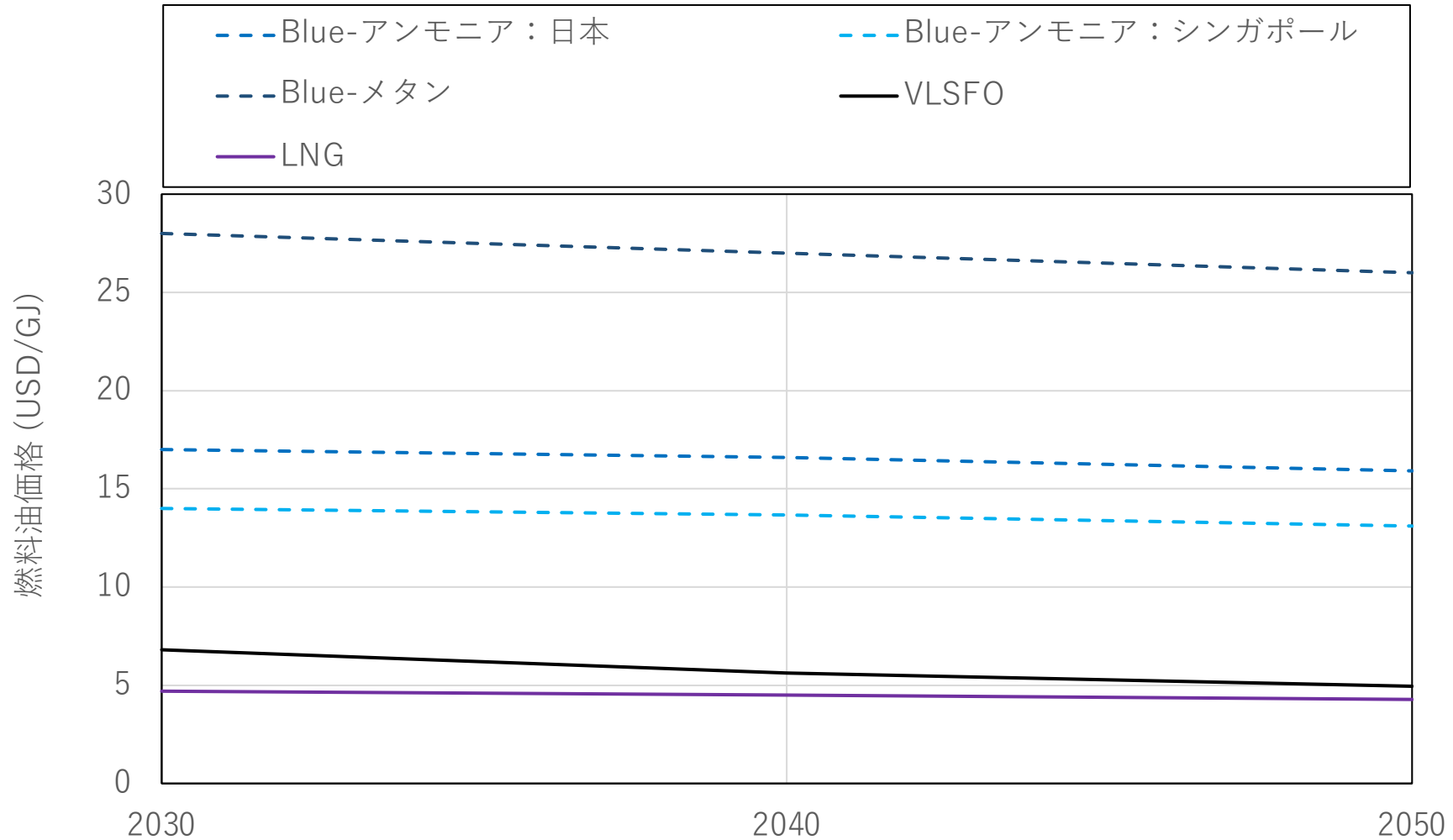
# 初期船団の設定 - 建造年分布



## 初期船団の燃費性能推定方針

- EEDI適用船：規制を満足するよう馬力性能を推定、当該年の竣工実績を考慮
- EEDI非適用船：当該年の竣工実績より馬力性能を推定

# 燃料油価格の設定（GSCによる調査）



# 特定航路モデルのまとめ

- 特定航路モデルは、航路の船団に関するシミュレーション評価が行える
- 環境負荷とコストの関係、あるいは環境重視型、コスト重視型などのオプションを考えられる
- これらオプションはステークホルダーの意向
- 全世界モデルと違い燃料インフラについては限定的整備でよい

# 全世界モデルと特定航路モデル

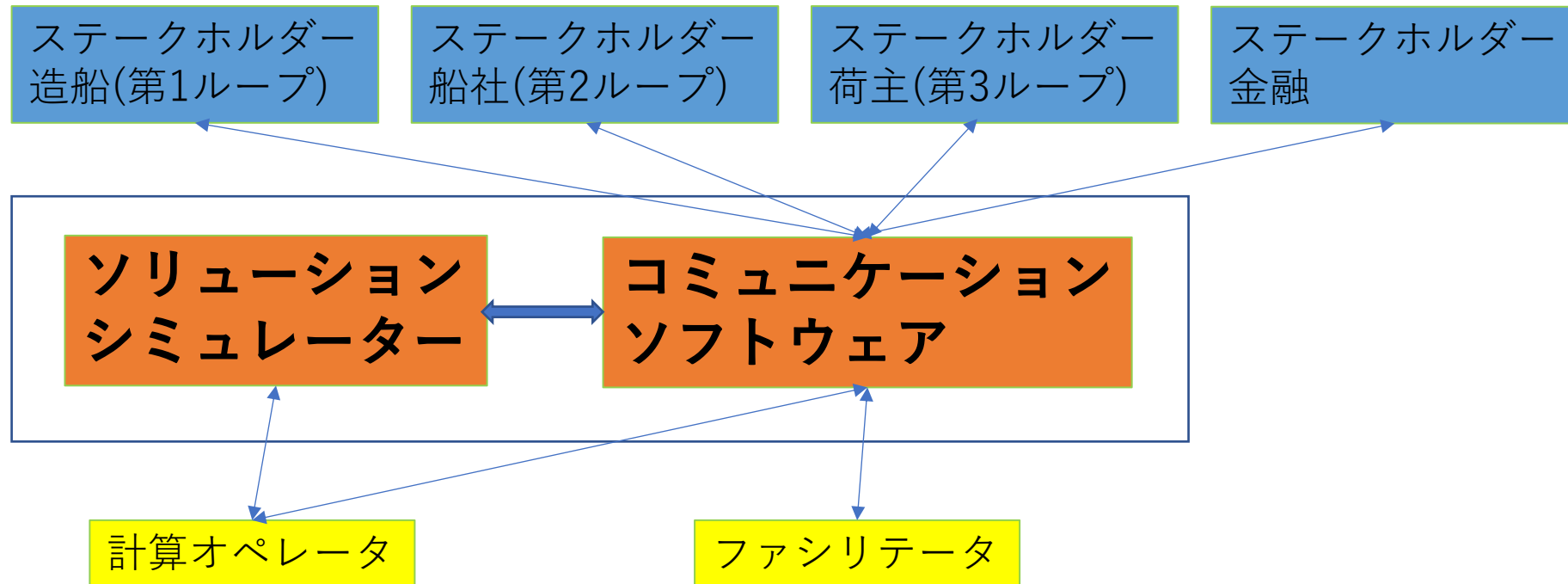
- 全世界モデルは世界のトレンド
- 特定航路モデルはシミュレーションベースのプロジェクト設計
- インフラ整備がポイントになる
  - 全世界モデルと全く違う答え
  - インフラを一か所だけ整備すればよい
  - 船主選好が船主意思決定モデルと異なっている
- 必要な船が異なる
  - 全世界モデルでは見えない結果

# ステークホルダーの合意達成のための ソリューション評価システムの試作

- 多分野協調のためのプロジェクトマネジメントソフトウェア「Notion」をベースに試作、検討
- 将来のクラウドでの運用を想定
- ファシリテータを想定
- 各ループでワークショップを行い、説明した後、期日までにコメントを集めて、ファシリテータが整理
- ループに応じてステークホルダーが変わっていく



# システムのアーキテクチャ



# 試作システムの紹介動画

- ファイルが大きくて配布資料には入れていません。
- プレゼンの際にお見せします。

# ESG時代のオープンイノベーションによる国際海運ゼロエミ化

- コストと環境負荷のバランスの中で社会に受け入れられる解に融資がなされる。
- ESG基準などが用いられる。
- これに対応したソリューションを提示し、金融界から融資投資を受けることが最後のゴール→ソリューションの社会受容性

# 船舶融資の原則

内部要因	S (強み)	W (弱み)
	① 海事クラスターからの信頼 ② 競争力ある金融機関との関係 ③ 経営者の経験と資質 ④ 風通しのよい家族経営文化 ⑤ 信頼に足るトラックレコード ⑥ 安定した船舶管理能力 ⑦ 後継者の存在と経営の持続性	① 不明確なビジョン ② 不十分な経営環境分析 ③ 不明確な経営戦略 ④ 不十分なブランド力 ⑤ 不十分な資金調達力 ⑥ 不十分な情報ソース ⑦ 不明確な事業承継計画
外部要因	O (機会)	T (脅威)
	① オペレーターのオフバランiesz継続 ② 業界再編の可能性 ③ 船舶管理能力による差別化戦略 ④ 為替市場 (円安期待) ⑤ 船価回復期待 ⑥ 国際税制 (配当益金不算入税制など) ⑦ 協力的な金融機関の存在と支援	① オペレーターによる選別 ② 金融機関による選別 ③ 業界再編の可能性 ④ オペレーターの経営悪化 ⑤ 他国に劣後する法人税制 ⑥ 船舶管理にかかる高度化要求 ⑦ 金融リスク (金利・為替) ⑧ 5大海上リスク (SSBC) ⑨ 諸リスク (含む海賊) の現出

図 4-2 SWOT 分析 (例)

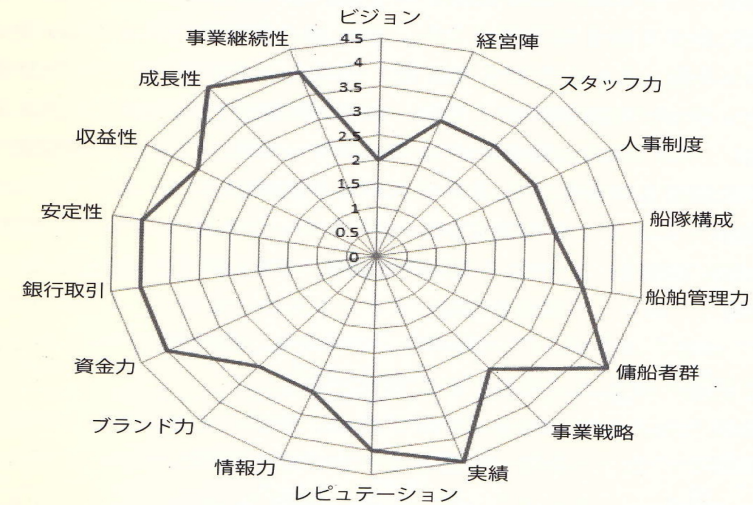


図 4-3 船主採点表 (例)

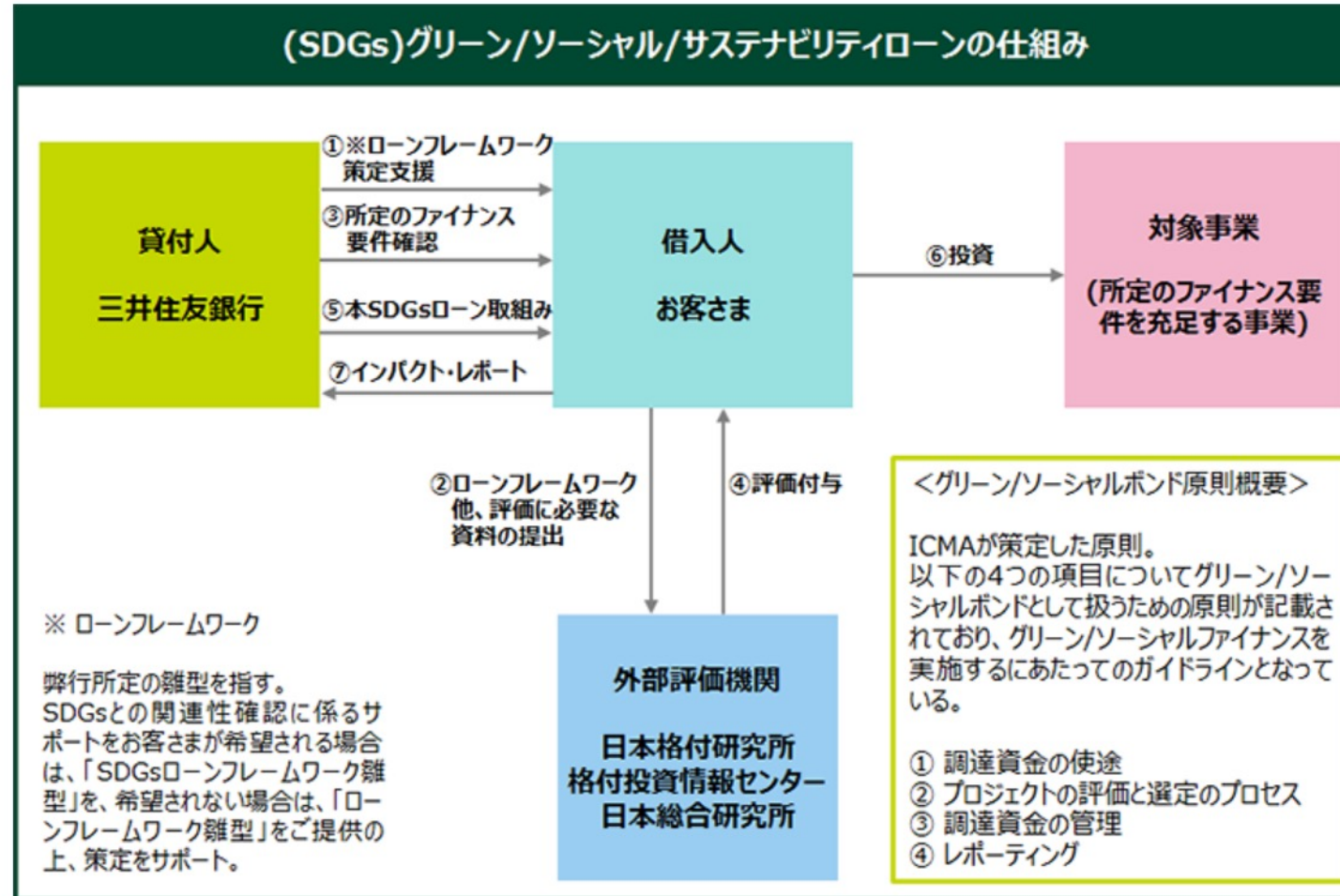
木原知巳：船舶金融論【2訂版】137ページ  
より

# 融資・投資の新しい考え方：SDG'sとESG

- SDG'sは目標設定
- ESG投資
  - 非財務情報－環境・社会・企業統治
  - 環境
    - GHG排出削減量・コスト・工事環境負荷・廃棄物削減
  - 社会
    - ステークホルダー管理/連帯性/統御・製造者管理・安全性/実行可能性
  - 企業統治
    - 企業環境戦略・内部統制システム・長期サステナビリティ戦略・取締役会・

# SDG's グリーン/ソーシャル/サステナビリティローンの仕組み

## スキーム図



# 日鮮海運様のスクラバー導入資金

## News Release



株式会社 日本格付研究所  
Japan Credit Rating Agency, Ltd.

19-D-0283  
2019年6月26日

———JCR グリーンローン評価 by Japan Credit Rating Agency, Ltd.———

株式会社日本格付研究所（JCR）は、以下のとおりグリーンローン評価の結果を公表します。

### 日鮮海運株式会社の長期借入金に Green 1を付与

- 評価対象 : 日鮮海運による下記借入金  
分類 : 長期借入金（コミット型タームローン）  
借入先 : 株式会社三井住友銀行をアレンジャーとするシンジケート団  
借入額 : 28億円  
借入契約日 : 2019年6月26日  
返済期限 : コミット期間1年+個別貸出後最大9年  
※スクラバー搭載対象船の船齢により返済期限（期間）が異なる。  
返済方法 : 個別の残存法定耐用年数以内での均等弁済（最長9年均等弁済）  
資金使途 : 設備投資（環境配慮設備（スクラバー）の設置）

#### <グリーンローン評価結果>

総合評価	Green 1
グリーン性評価（資金使途）	g1
管理・運営・透明性評価	m1

# ソリューション評価システムでできること

## ーデータに基づくESG戦略ソリューションの実現

- シミュレーションデータで具体的なコストと環境負荷が計算できる
- 長期的な展望・ビジョンが示せる
- ステークホルダーの範囲や社会的なつながりも明確
- ステークホルダーのすべきこと・責任も明確
- ソリューションの評価が融資可能性評価
- 融資に必要な情報を最後のループに追加
- 標準的なESGデータモデル構築



# まとめ

- ゼロエミ達成にはステークホルダーが技術・インフラ・規制に関して合意し、その条件のもとでソリューションを決定する
- 造船技術データ（コストと環境負荷）によってファシリテーションすることでソリューションを得る
- ステークホルダー全員でビジョンを共有する
- プロジェクト評価は、SDG + ESG経営の考え方で社会に発信し、資金を調達する
- これまでと異なる手法で金融まで含めたステークホルダー＝海事クラスターを駆動する
- （提案）オープンイノベーション型ビジネスモデルで国際海運ゼロエミ化を実現する。そのためのシステムを試作した。

# 謝辞

- 一般財団法人 次世代環境船舶開発センター様には研究会を設置され、多大のご支援をいただきました。
- 本研究会の委員として、さらには幹事としてご参加された皆様には多くの貴重な知見をいただきました。
- 東京大学 稗方和夫教授にはシステムオブシステムズの基礎や進め方全般についてご指導いただきました。
- 海上技術安全研究所 和中真之介博士には、シミュレーション計算をすべてやっていただきました。
- 藤田尚毅氏ほか三菱総合研究所の皆様はプロジェクトの進行にご尽力をいただきました。
- 古賀ソフトウェアの藤田芳寛氏、斉藤卓弥氏にはソフト開発についてご尽力いただきました。