

船舶分野のカーボンニュートラルに向けた研究開発

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 GHG削減PT

プロジェクトチームリーダー 平田 宏一

1. はじめに

- 令和3年に改訂された地球温暖化対策計画では、内航海運において、2030年度までにCO₂排出量181 万トン削減（2013年度比、約17%削減）の目標が掲げられ、省エネ船舶の開発・普及が進められている。
- 昨今、世界的な脱炭素に向けた動きが加速し、2050年ネットカーボンニュートラルなど、これまで以上のCO₂排出削減に向けた取り組みの強化が求められている。



2030年頃までの短期的取り組み・2050年ネットカーボンニュートラルの検討

① 内航カーボンニュートラル推進に向けた検討会（国交省）

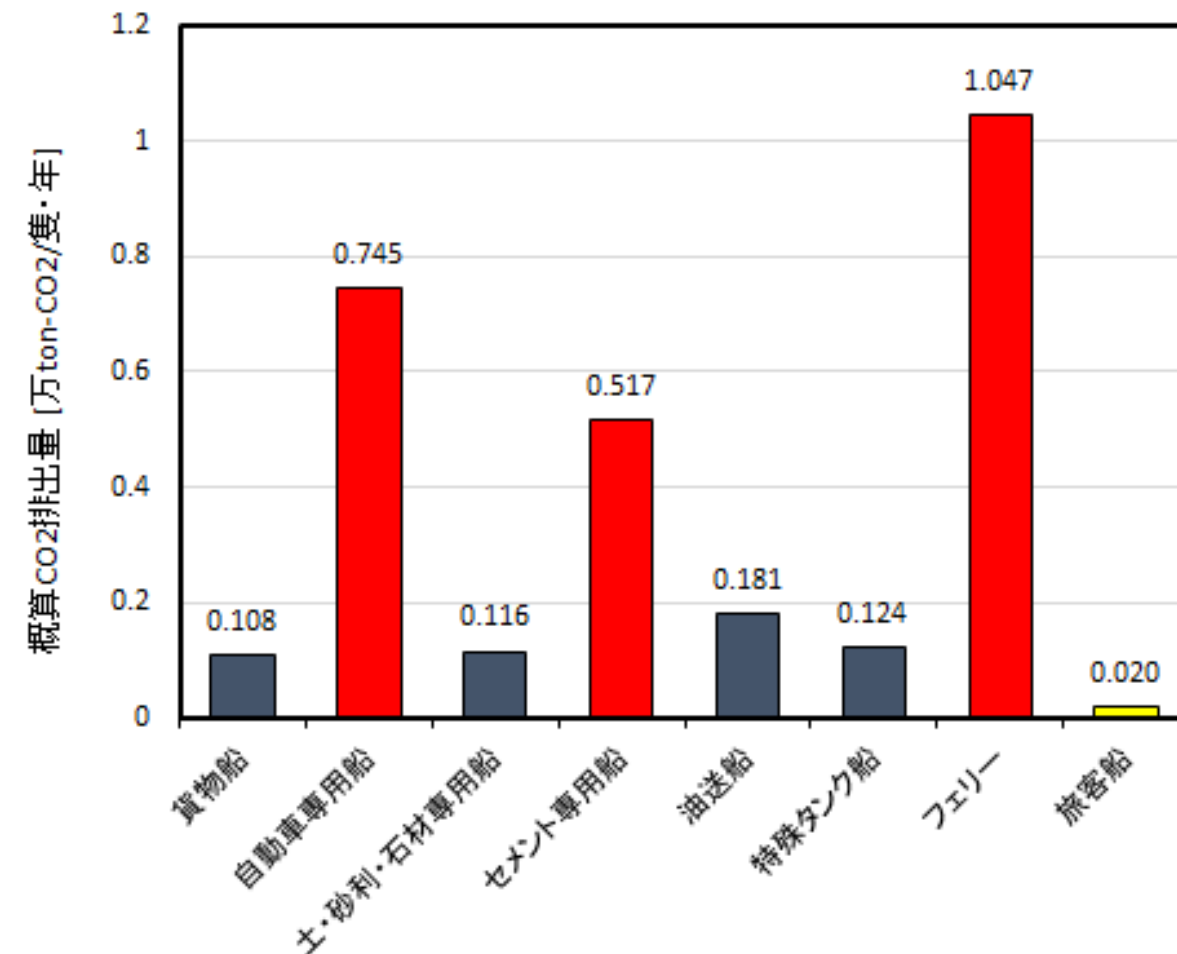
国土交通省は、2021年4月に「内航カーボンニュートラル推進に向けた検討会」を設置し、詳細な検討を行い、成果を取りまとめた。

② GHG削減プロジェクトチーム（海技研）

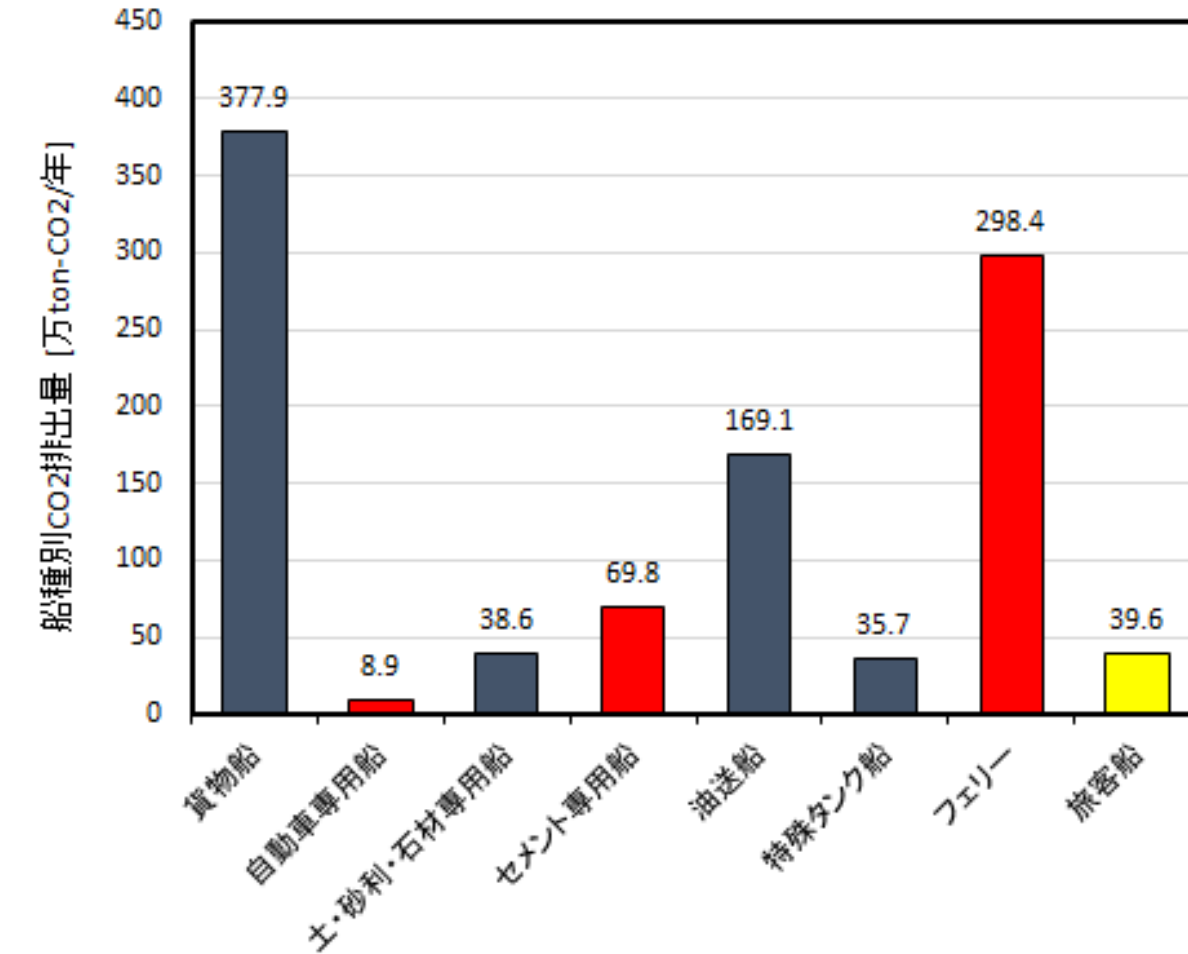
海技研は、2020年3月、GHG削減の技術開発を機動的に対応するため、GHG削減プロジェクトチームを設立した。

2. 内航海運のGHG排出量

- 船種毎の隻数および合計総トン数のデータから、船種毎の1隻あたりのCO₂排出量並びに船種毎の総CO₂排出量を概算した。
- 自動車専用船、セメント専用船、フェリーの平均総トン数は大きく、1隻あたりのCO₂排出量が多い。
- 隻数が多い貨物船（平均約600GT×3500隻）やフェリー（平均約3000GT×300隻）の総CO₂排出量が多く、これらの船種のCO₂削減対策が内航船舶全体の総排出量低減に有効であると考えられる。



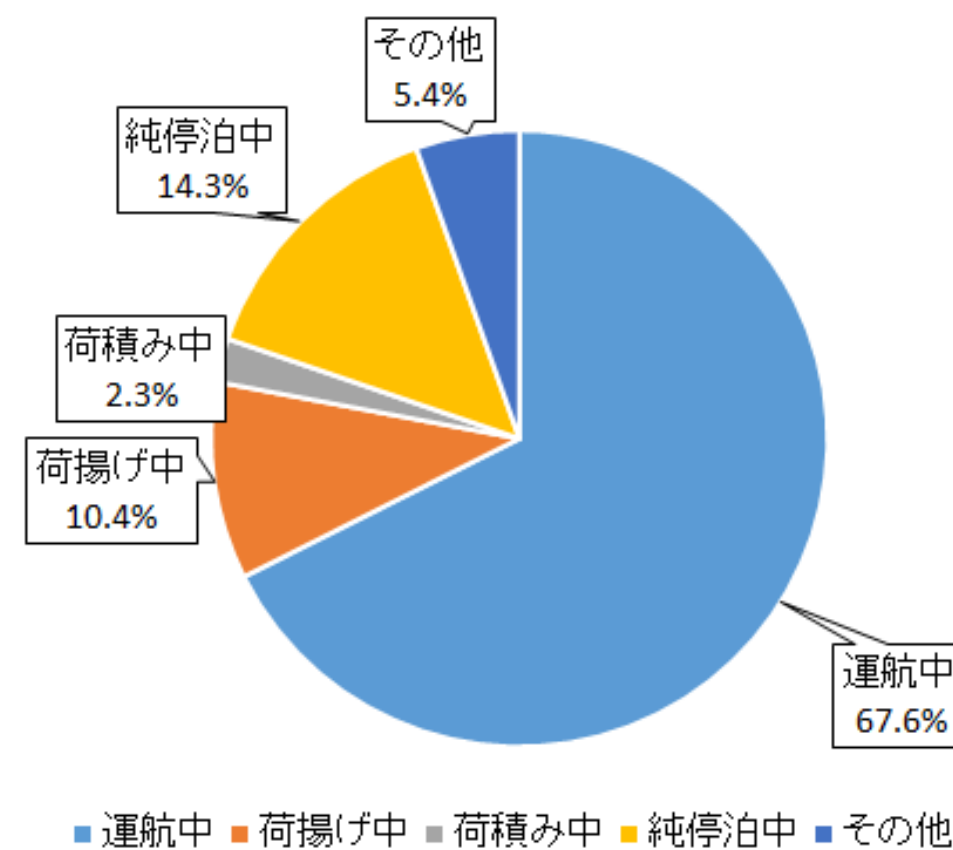
1隻あたりのCO₂排出量の推定（2019年）



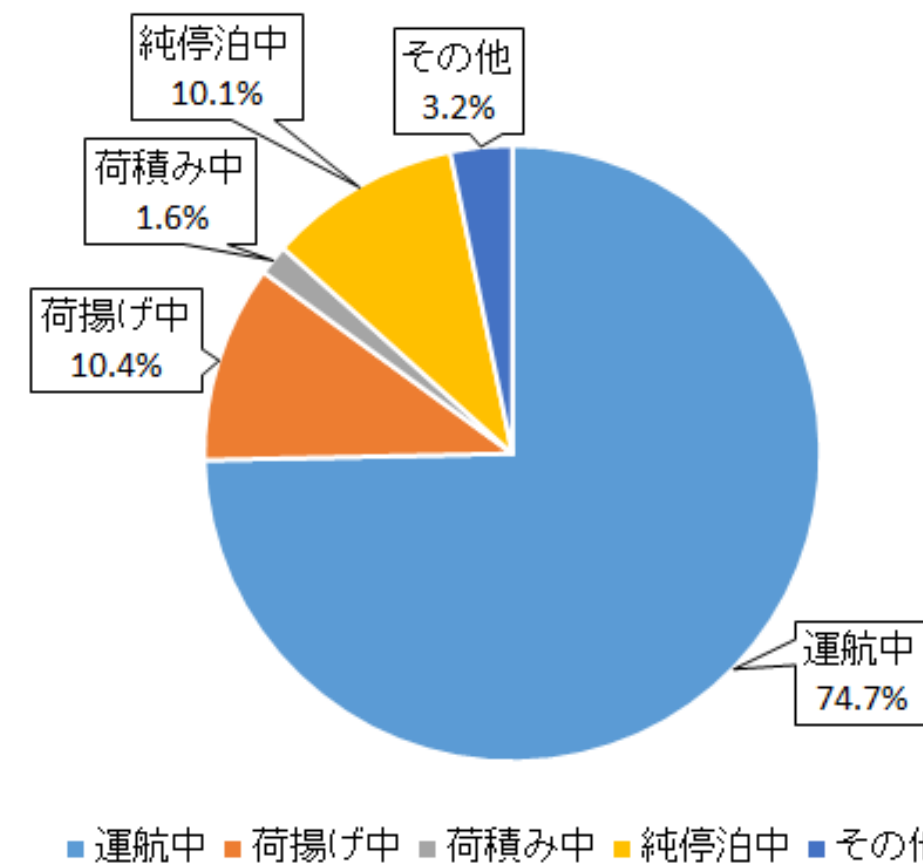
船種毎の総CO₂排出量の推定（2019年）

●内航貨物船のCO₂排出の内訳

- 749GTおよび約5,000GTのセメント運搬船における、約1年間のデータを整理し、それぞれの運航モードにおけるCO₂排出量（燃料消費量）をまとめた。
- 運航中のCO₂排出量の割合は70～75%程度、純停泊中のCO₂排出量の割合は10～15%程度、荷役時のCO₂排出量の割合は10%程度である。
- 船種や航路によって異なるが、運航時ばかりでなく、停泊時や荷役時の省エネ技術も有効であると考えられる。



749GTセメント運搬船の
CO₂排出の内訳（2020年）

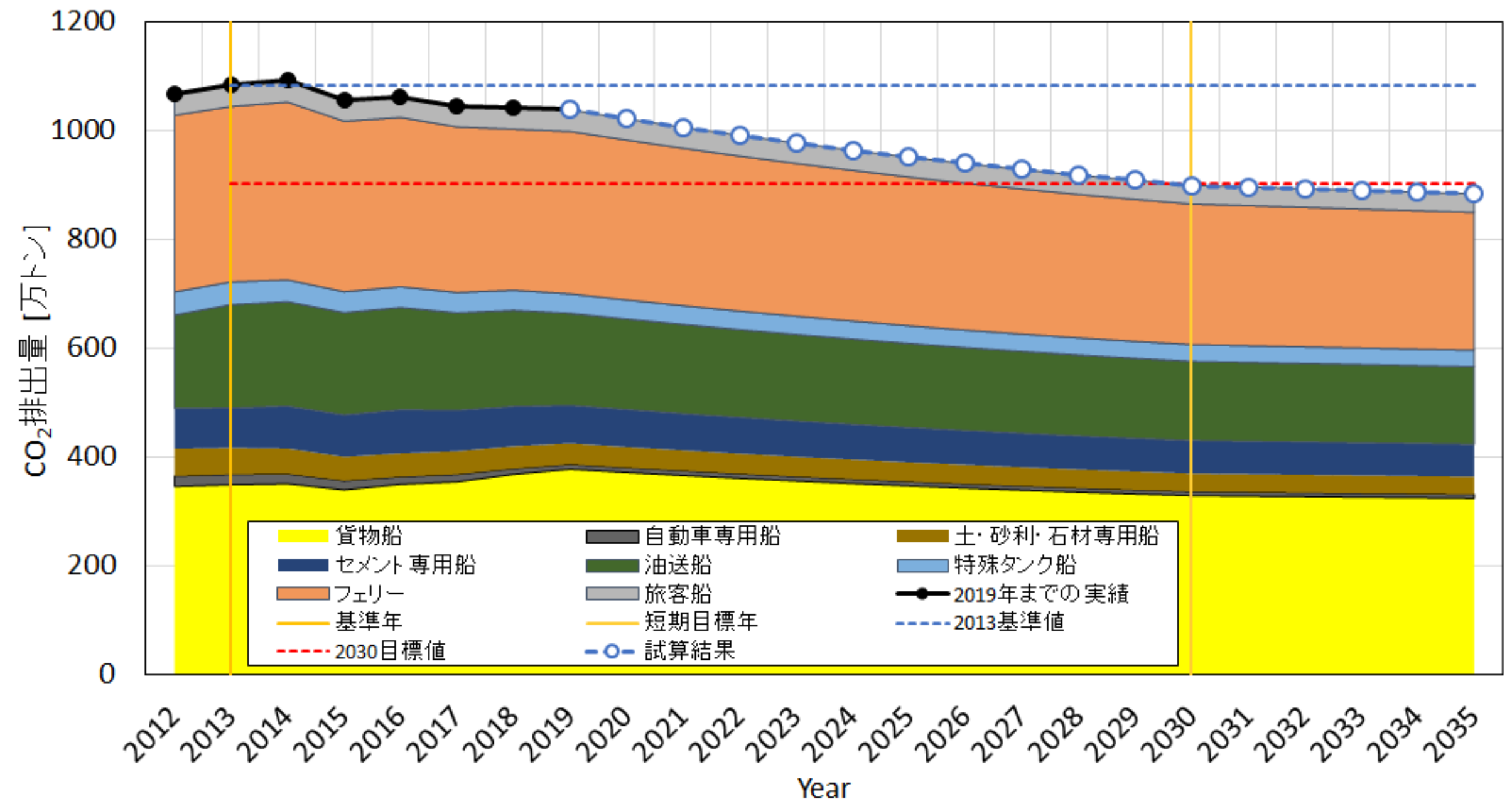


5,000GTセメント運搬船の
CO₂排出の内訳（2020年）

※ セメント運搬船は荷揚げ時に主機駆動コンプレッサを使用するため、荷役中のCO₂排出量がやや多い。

●GHG削減船導入によるCO₂排出量の試算例

- 右図は、既存船の寿命を25年として、今後建造される新造船の50%を25%CO₂削減船、その他の新造船および既存船を10%CO₂削減とした場合の試算結果である。
- 2030年時には現在の3/5の既存船が残るため、新造船ばかりでなく、既存船のCO₂削減も重要である。



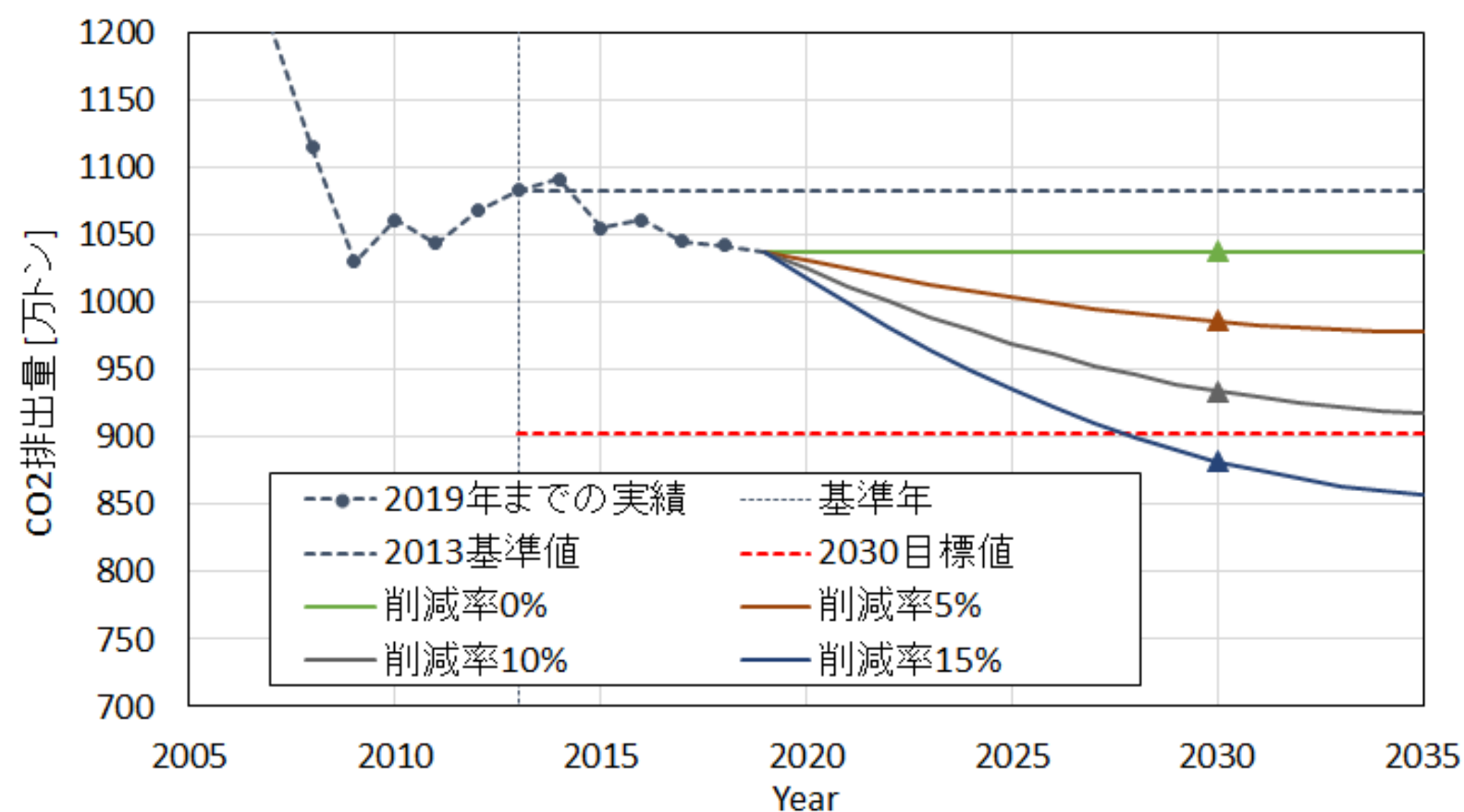
GHG削減船導入によるCO₂排出量の試算例

●2030年目標の181万トンCO₂削減の試算例

- 2030年には、3/5程度の2020年時既存船が運航している（寿命25年の場合）。
- 既存船のCO₂削減の効果が大きい。

◆全既存船を約15%のCO₂削減（2019年比）にできれば目標を達成する。

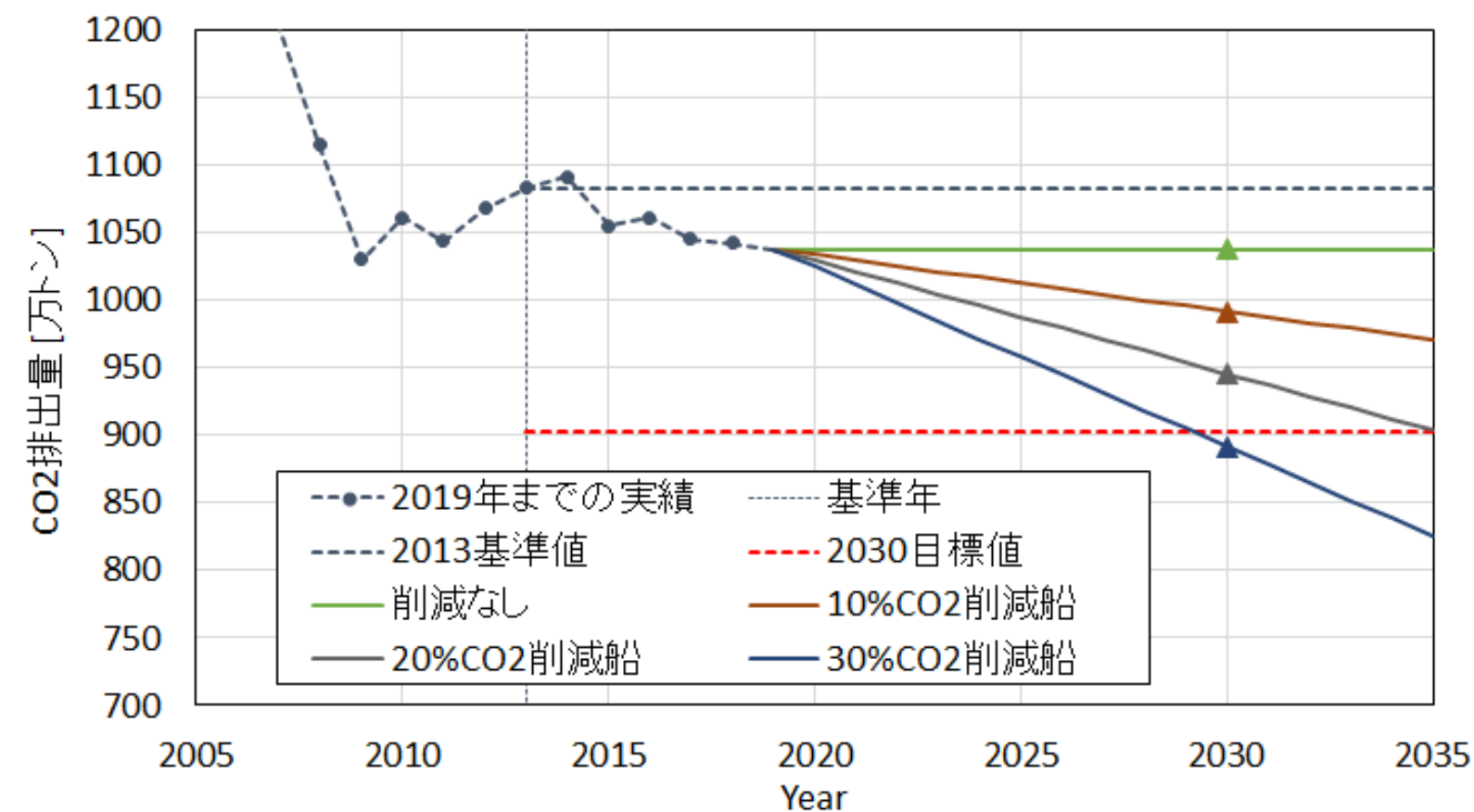
※ 新造船の削減率は既存船と同じとして試算している。



既存船のCO₂削減を含めた試算例

◆全新造船を30%CO₂削減船（2013年比）とすれば目標を達成する。

※ 既存船は現状維持として試算している。



新造船だけのCO₂削減による試算例

3. 内航海運のCO₂排出削減に向けての課題

➤ 今後、さらなるCO₂削減に向けて取り組みを加速していく必要があり、そのための内航海運の課題が取りまとめられている。

No.	課題	概要・備考
①	内航分野の省エネ・省CO ₂ に向けた選択肢や時間軸が見通しにくい	サイズ・航路・船種等がバラエティに富んでおり、現時点では選択肢や時間軸が見通しにくい
②	省エネ・省CO ₂ 効果の把握	省エネ性能が高い船舶への投資に対するインセンティブ
③	モーダルシフトの効果の把握	モーダルシフトによる日本全体での貢献が見えにくい
④	投資余力の不足	省エネ技術の導入や船舶の代替建造が容易でない
⑤	陸上輸送モードとのバランス	フェリー、RORO船、コンテナ船などの陸上輸送モードとの競合とバランス
⑥	荷主等との連携	運航計画等、関係者が一体となって取り組む必要性
⑦	荷役中、停泊中のCO ₂ 排出削減対策	荷主や陸上側と連携した荷役・停泊中の省エネ
⑧	LNG燃料船、バッテリー船等への対応上の課題	建造・運航コストの増加、燃料・電力供給体制、造船所や船員等の人材育成が課題
⑨	水素燃料船、アンモニア燃料船への対応上の課題	現時点で内航船への導入時期は見通しにくい。スペースが限られた内航貨物船への適用やコストなど。

※ 国土交通省「内航カーボンニュートラル推進に向けた検討会」中間とりまとめより

4. 内航ゼロエミッション化のコンセプト

① 省エネ・省CO₂技術の導入と“連携型省エネ船”

- ➡ ●従来燃料を利用するときのCO₂排出削減技術
- 代替燃料を利用するときの燃料搭載量削減に貢献

② 代替燃料利用技術

- ➡ ●水素やアンモニアなどのカーボンフリー燃料の利用
- 代替燃料利用時の課題と対策

③ 自動化システム・陸上サポートによるGHG削減

- ➡ ●自動化システムによるGHG削減への貢献
- 陸上サポートによるGHG削減への貢献と必要性

(1) 内航船に導入可能な省エネ・省CO₂技術

モード	分類	省エネ技術	CO ₂ 削減効果 ※1 [%]	レトロ フィット性 ※2	備考
運航	エンジン効率改善	高効率エンジン	2.5	△	
	推進効率改善	高効率プロペラ	4.0	△	
		省エネ付加物	4.0	○	
	抵抗低減	船型改善	5.0		
		空気潤滑	2.5		
		低摩擦塗料	2.5	○	
		船体健全化（健全性の維持）	2.5	○	
		低抵抗スラストトンネル	1.0		
		船体軽量化	2.0		
		風圧抵抗低減形状	1.0	△	
	高度設計技術	水槽試験による最適設計	2.0		最適設計の実装が必要
		CFDによる最適設計	2.0	△	
	運航効率改善	ウェザールーティング	3.5	○	
		陸上サポート（荷主連携）	5.0	○	
		船速最適化（減速航行）	5.0	○	
	補機効率改善	補機インバータ制御	0.6	△	
	その他	電気推進	5.0		効果は船種や形式によって異なる
		ハイブリッド推進	5.0		

(1) 内航船に導入可能な省エネ・省CO₂技術

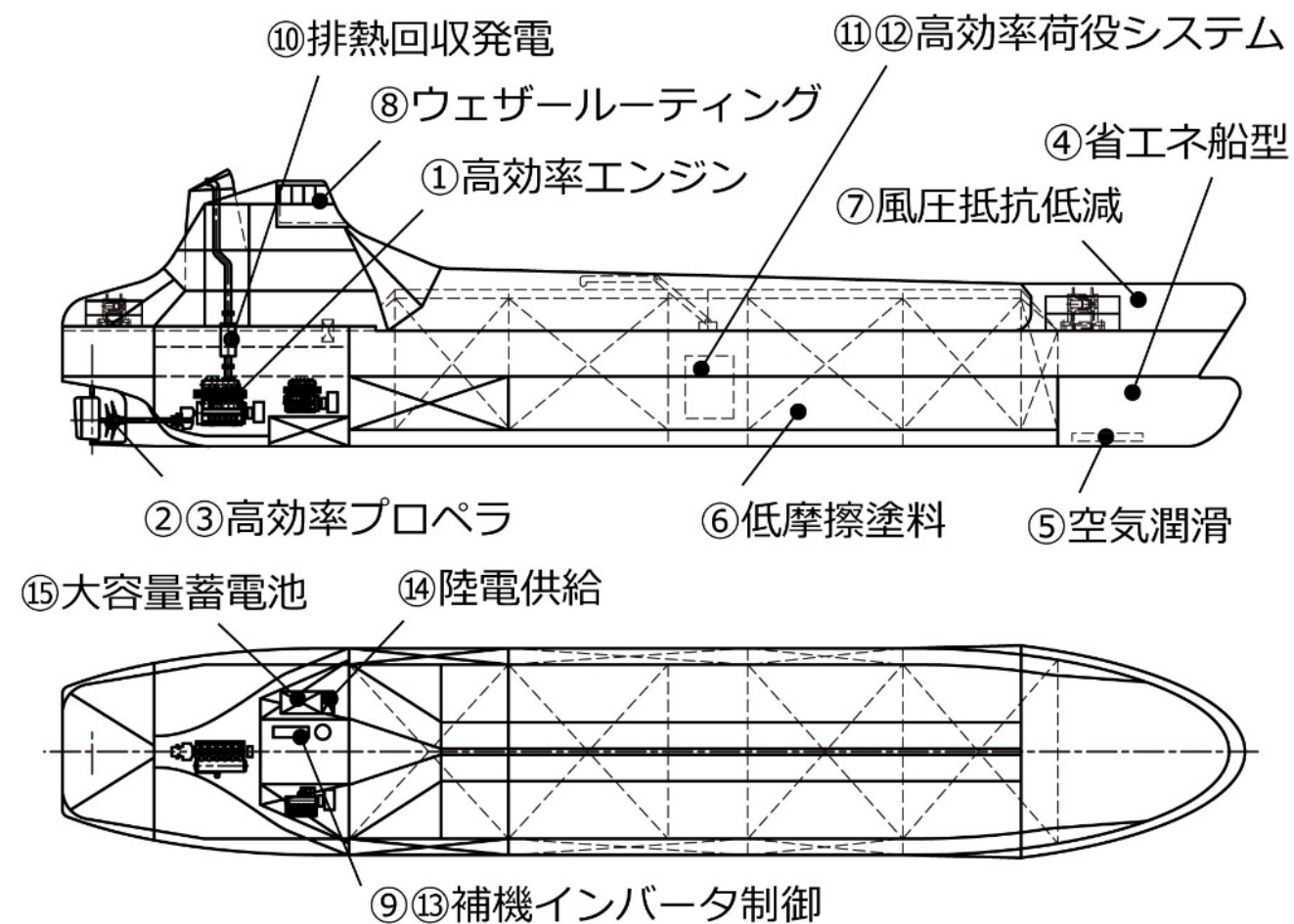
モード	分類	省エネ技術	CO ₂ 削減効果 ※1 [%]	レトロ フィット性 ※2	備考
離着棧	離着棧時間短縮	高機能スラスト	30.0		離着棧時間及びその準備時間の短縮による効果
		大舵角舵・特殊舵	25.0		
		高機能操船支援装置	20.0	○	
		高機能甲板機器	5.0		
荷役	荷役効率改善	高効率機器の採用	5.0	△	必要な設備は船種により異なる
	荷役時間短縮	運用効率改善	2.0	○	
停泊	電気機器効率改善	補機インバータ制御	5.0	△	
	陸電利用	陸電設備	25.0	△	効果は使用時間（使用割合）による
	蓄電池	大容量蓄電池搭載	3.0		使用方法による
その他	排熱回収	高性能蒸気プラント	2.0		タンカーなどの一部船舶に適用可
		排熱回収発電	1.5		
	船内電力消費削減	高効率船内電力機器（LEDなど）	0.2	○	
		太陽電池パネル	0.5		
	定時運航維持	陸上サポート（機器管理）	2.0	○	

※1 CO₂削減効果は目安の数値であり，船種・サイズによって大きく異なる。また，それぞれのモードにおける割合としている。

※2 数百総トンの貨物船を想定した主観的判断である（○：既存船への適用可能性が高い，△：改造・換装により適用可）。

(2) 連携型省エネ船の検討例

- 様々な既存省エネ技術の内航船への導入を検討し、そのとき省エネ効果を試算した。
- 省エネ効果が数%の技術を組み合わせることで、トータル22%のCO₂削減と試算される。



各種省エネ技術を導入した船舶のイメージ

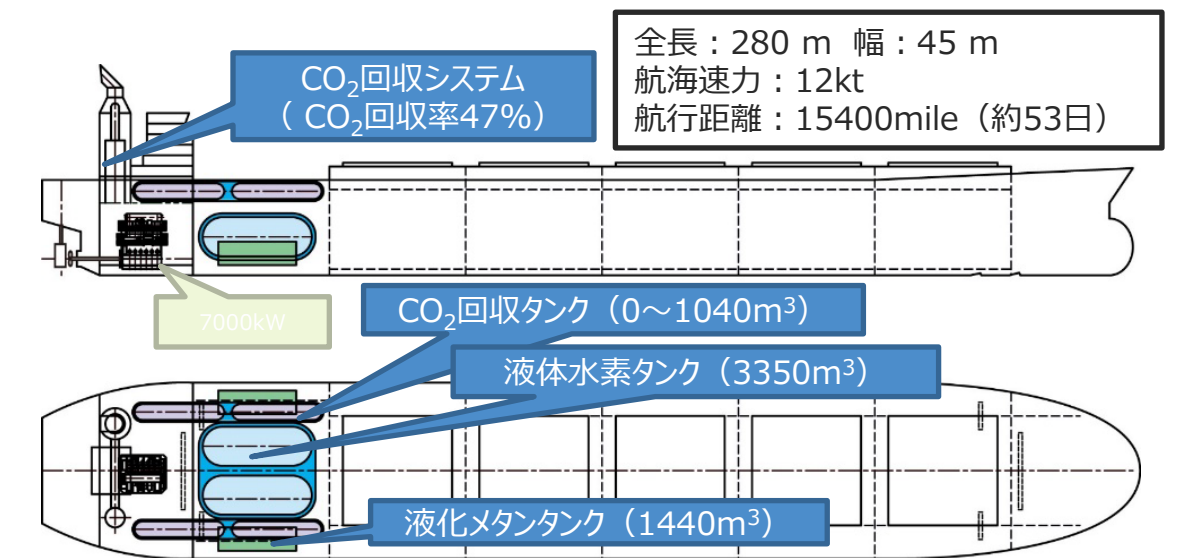
導入するCO₂削減技術

No.	モード	省エネ技術の導入例	省エネ効果 [%]	
1	運航	高効率エンジンの採用	2.5	運航時のCO ₂ 排出量を22%削減
2		二重反転プロペラ	4.0	
3		省エネダクト	2.0	
4		船型・船首形状改善	5.0	
5		空気潤滑	2.5	
6		低摩擦塗料	2.5	
7		風圧抵抗低減形状	1.0	
8		ウェザールーティング等	3.5	
9		補機インバータ制御	0.6	
10		排熱回収発電	1.5	
11	荷役	高効率機器の採用	5.0	荷役時のCO ₂ 排出量を7%削減
12		運用効率改善	2.0	
13	停泊	補機インバータ制御	5.0	停泊時のCO ₂ 排出量を31%削減
14		陸電利用	25.0	
15		大容量蓄電池搭載	3.0	

※ 省エネ効果はそれぞれのモードにおける割合としている。

(3) 代替燃料利用技術

- 船舶に代替燃料を使用する際のタンク寸法や燃料供給量を推定するために、各種燃料の体積あたりの発熱量などをまとめている。
- 同一の航続距離を運航する場合、天然ガスやアンモニアは従来船の2倍程度、水素は4～6倍程度のタンク寸法となることが課題である。



ゼロエミッション船（80～90%GHG削減）

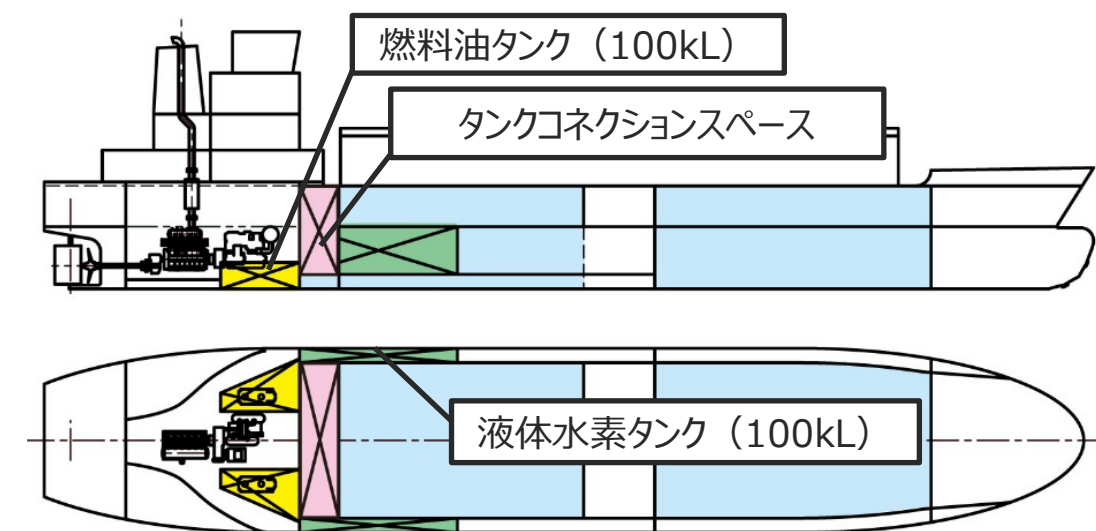
各種燃料の物性値

	重油	天然ガス (液体)	圧縮水素 (70MPa)	液体水素	水素燃料の有機ハイ ドライド貯蔵	アンモニア (液体)
発熱量	42.7 MJ/kg	49.2 MJ/kg	121 MJ/kg		---	22.5 MJ/kg
密度（液体）	900 kg/m ³	460 kg/m ³	---	70.8 kg/m ³	770 kg/m ³	695 kg/m ³
水素密度	---	---	700 Nm ³ -H ₂ /m ³	717 Nm ³ -H ₂ /m ³	527 Nm ³ -H ₂ /m ³	---
CO ₂ 排出係数	3.114 t/t _{fuel}	2.75 t/t _{fuel}	0	0	0	0
体積あたりの発熱量（重油比）	38.4 GJ/m ³ (100 %)	22.6 GJ/m ³ (59 %)	7.6 GJ/m ³ (22 %)	8.6 GJ/m ³ (22 %)	5.7 GJ/m ³ (22 %)	15.6 GJ/m ³ (41 %)
燃料タンク内容積 (重油タンク比)	1.0	1.7	5.0	4.5	6.6	2.5

(4) 749GT水素燃料貨物船の検討例

- 例えば、熱量比で50%の水素を利用することを想定し、既存重油タンクの1/2を液体水素タンクに置き換える（No.3）。
- CO₂削減50%の水素運転は4日程度となる。
- 残りを重油で運航した場合、トータルのCO₂削減は15%程度となる。

※ 水素バンカリングの頻度が高ければ、CO₂削減50%を維持できる。



※ 液体水素タンクの断熱や配置は考慮していない。

749GT水素燃料貨物船の検討例（No.3）

No.	タンク寸法	設定モード	性能	特徴・備考
1	変更	100%水素利用（FCまたは専焼エンジン） 既存船と同じ航続距離	900kLの液体水素タンクが必要 （重油の4.5倍）	タンク寸法が大きくなる。
2	変更なし	100%水素利用（専焼エンジンなど）または重油運転の併用 既存重油タンクの1/2（100kL）に液体水素	85%負荷時、約2.5日の水素運転が可能	水素運転時間が短い。
3		50%水素利用（水素混焼エンジンなど） 既存重油タンクの1/2（100kL）に液体水素	85%負荷時、約4日の水素運転が可能、残りの重油で約12日の運転が可能 全航続距離は既存船の1/2	検討初期段階としては妥当と考えられる。
4		50%水素利用（水素混焼エンジンなど） 既存重油タンクの3/4（150kL）に液体水素	85%負荷時、約7日の水素利用運転、残りの重油で約5日の運転が可能 全航続距離は既存船の1/3	連続航続距離がやや短い。

(5) 代替燃料を利用するGHG削減内航船の検討

➤燃料や動力システムの種類毎に，GHG削減率，実用時期，タンク容積・航続距離，不純成分を含む水素の利用可否，燃料供給のしやすさ，機器構成，メンテナンス性を踏まえて，実現性が高いと考えられる「GHG削減船」を取りまとめた。

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

●各項目の評価基準

点数	混焼率（GHG削減率）	実現性（実用時期）	タンク容積・航続距離	不純成分を含む水素の利用可否	燃料供給のしやすさ	機器構成（導入コスト）	メンテナンス性
5	100%GHG削減を達成	開発が容易（2025年までの普及が可能）	現状の重油炊きエンジン船と同等	水素エンジン（不純成分があっても問題ない）	現状の重油炊きエンジン船と同等	現状の重油炊きエンジンと同等	現状の重油炊きエンジンと同等，または単一燃料で複雑な機器がない
4	最大80%程度のGHG削減を達成	開発がやや容易（2030年までの普及が可能）	タンク容積が2倍，または航続距離が1/2程度（LNG燃料船程度）	⇔	ほとんど重油と同じ，少量の代替燃料を供給	新たな機器が必要	複数の燃料を使うが，複雑な機器はない
3	50%GHG削減	開発がやや必要（2025年までにプロト機が運航）	⇔	⇔	アンモニアやLNGなどの液体代替燃料	電気推進船＋単一の代替燃料機器	⇔
2	最大30%程度のGHG削減を達成	開発が必要（2030年までにプロト機が運航）	⇔	⇔	多量の水素供給など	⇔	複数の複雑な機器が搭載されている
1	20%以下のGHG削減	開発がかなり必要（2040年までにプロト機が運航）	タンク容積が4倍以上，または航続距離が1/4以下（水素100%利用）	水素燃料電池（不純成分不可）	複数の代替燃料（水素＋アンモニア）	複数の複雑な機器が必要	⇔
備考	他の評価項目と横並びでよいのか要検討	最新情報に応じて適宜更新が必要	ほぼ使用燃料のエネルギー密度に関連（航路に応じた評価が必要か？）	水素エンジンが有利，燃料電池が不利	現状の評価はかなり曖昧（特にバイオ燃料の扱い），供給方法・供給形態（液体 or ガス）も未検討	より具体的な検討が必要	代替燃料を使用する際のメンテナンスが不明（例えば，水素とC重油ではどちらが有利か？）

【参考】各種船舶への適用性

- 様々な船舶があるため，船種・サイズに対する適用性の評価は難しい。
- 概ね下表のような船舶を想定し，適用性を検討した。

評価	大型船への適用性 (3000GT～)	中型貨物船への適用性 (～749GT)	小型貨物船への適用性 (～499GT)	小型船舶への適用性 (20GT未満)
特徴 (想定)	・長距離航路を航行する。 ・機器の設置スペースには余裕があるが，大型タンクの搭載はやや難しい。	・機器の設置スペースにやや余裕があり，設計の自由度が高い。	・機器の設置スペースに制限があり，新たな機器や大型タンクの搭載が難しい。 ・比較的短距離を航行し，バンカリングはややしやすい。	・短距離航路を航行する。 バンカリングがしやすい。 ・推進出力は数百kWとする。 (小型高速船は想定しない。)
◎	適用性が特に高い			
○	適用性が高い			
△	適用可能			
×	適用性が低い			
---	現時点では判断できない			

【参考】動力システムの定量的評価

➤各動力システムについて，主観的なランキング（点数付け）を行っている【一部抜粋】。

整理 No.	呼称	ベース燃料	混焼率 (GHG削減率)		実現性 (実用 時期)	タンク容 積・航続 距離	水素の 不純成 分	燃料供 給のしや すさ	機器構 成（導 入コス ト）	メンテナ ンス性	総合評 価（平 均）	大型船 への適 用性 (300 0GT)	中型貨 物船へ の適用 性 (749 GT)	小型貨 物船へ の適用 性 (499 GT)	小型船 への適 用性 (19G T)
1	水素混焼ディーゼルエンジン船	水素・重油	20%	2	4	4	4	4	4	4	3.7	○	○	○	○
2	水素混焼ディーゼルエンジン船	水素・重油	50%	3	2	3	4	3	4	4	3.3	△	○	△	△
7	バイオ燃料船	バイオ燃料	100%	5	3	5	---	3	5	5	4.3	△	△	○	○
8	水素・バイオ燃料混焼船	水素・バイオ	100%	5	3	4	4	3	4	4	3.9	△	○	○	△
10	水素専焼エンジン船	水素	100%	5	2	1	5	2	4	5	3.4	△	○	○	○
11	水素FC・DGハイブリッド船	水素	50%	3	4	3	2	3	3	4	3.1	△	○	○	○
12	水素燃料電池船	水素	100%	5	4	1	1	2	3	5	3.0	△	△	△	○
16	アンモニア専焼エンジン船	アンモニア	100%	5	3	4	---	3	4	4	3.8	○	△	×	×
18	LNGエンジン船	LNG	20%	1	5	4	---	3	4	5	3.7	○	○	△	△
20	水素タービン船	水素	100%	5	1	1	5	3	3	5	3.3	○	×	×	×
22	電池推進船	蓄電池	100%	5	4	1	---	3	3	5	3.5	×	△	△	○
23	水素FC・LiBハイブリッド船	水素・蓄電池	100%	5	5	1	1	3	2	4	3.0	×	△	△	○

※ 現状における国内外の技術開発状況に基づく主観的評価であり，今後の技術開発によっては評価が異なってくる可能性がある。

(6) 自動化システムによるGHG削減の検討

- 海技研では、自動着栈や避航操船などの自動運航船に関する研究開発を進めている。
- ウェイポイント運航や自動着栈、遠隔操船などの運航支援・自動化システムは、船員の労務負荷を上げずに、定時運航・船速最適化をしやすい、GHG削減に貢献する可能性がある。

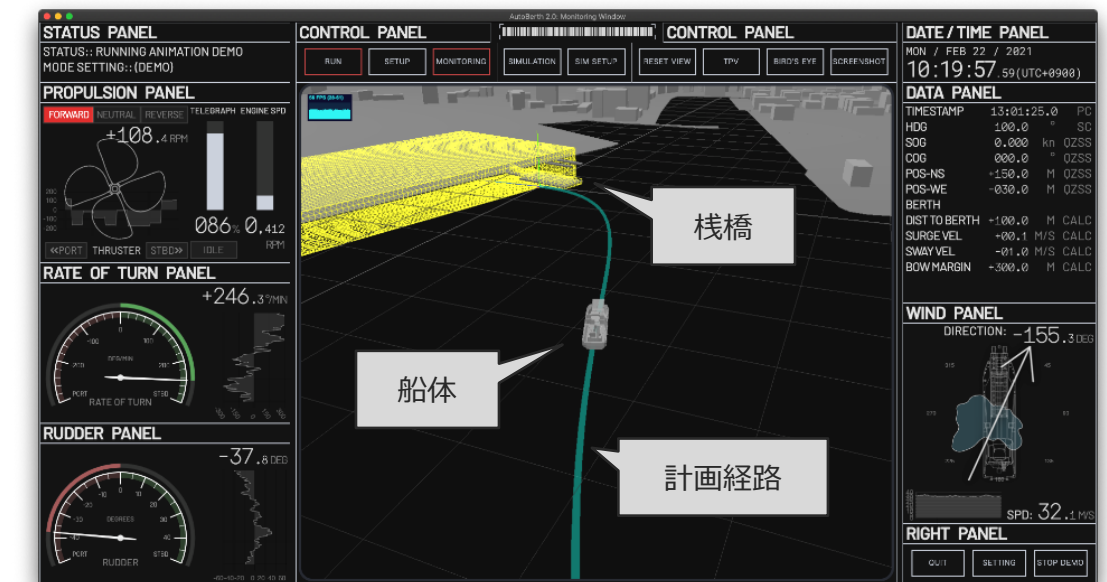


小型実験船による実証試験（因島）



決められた航路を運航する場合、WP運航は操船者の負荷低減に極めて有効である。

技術的なハードルは低い、ユーザビリティには開発要素がある。

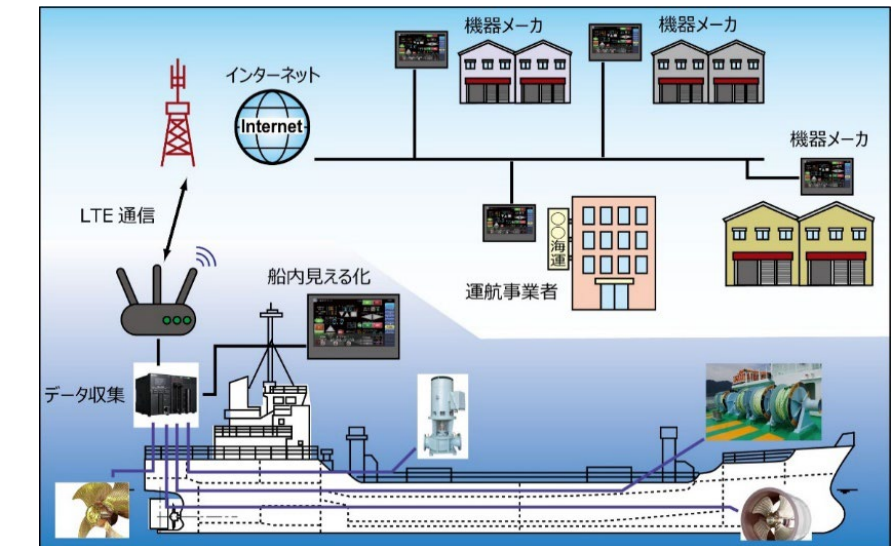


安全な自動着栈を行うための
制御・リアルタイム監視画面

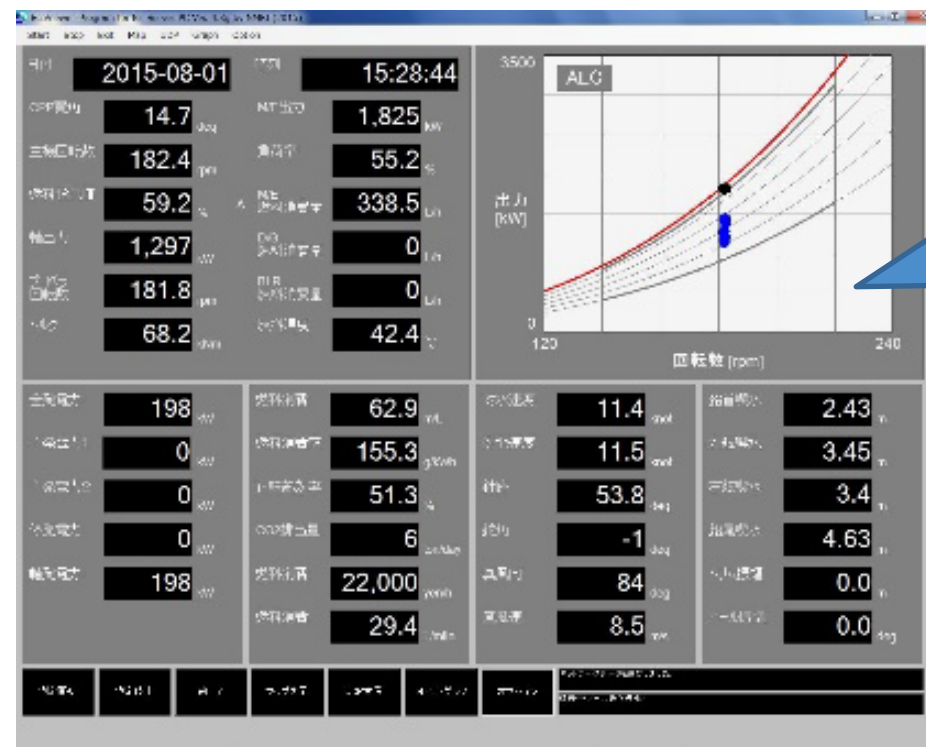
ウェイポイント運航のイメージ

(7) 遠隔監視・陸上サポートシステム

- GHG削減や運航効率改善を目指した「見える化」システムの開発を進めてきた（ECOモニター）。
- 運航の安全と船員の労務負担低減のための船内機器の遠隔監視を含めた陸上サポート機能の実証試験を行っている。
- 機器の故障を未然に防ぎ、荷主・船主が連携できる陸上サポートシステムの実装によって、欠航率低減や船速最適化を実現でき、トータルのGHG削減に貢献する可能性がある。



陸上サポートシステムのイメージ
(NEDO事業において、SKウインチ、内航ミライ研究会、海技研が実施中)



主に燃料消費特性や
燃費特性を表示する。

主に主機関の不具合を監視し、
警報を発令する。



機関部遠隔監視画面（小型船舶向け）のイメージ

セメント運搬船に搭載しているECOモニターの表示画面

5. まとめ

➤内航船舶のカーボンニュートラル化への取り組みと課題，今後の検討事項をまとめる。

- ①様々なGHG削減技術の選択肢があり，技術開発と実装に取り組むことで，短期のGHG削減と中長期のカーボンニュートラルを実現する必要がある。
- ②様々な省エネ・省CO₂技術があり，それらを適切に組み合わせることによって，GHG削減目標を達成し得る内航船となる。
- ③CO₂削減技術は，新造船だけでなく既存船にも適用し，普及させることが重要である。
- ④水素などのカーボンフリー燃料の利用については，関連機器の開発の他，インフラ設備の整備や安全対策，船員育成などが必要となる。
- ⑤石油燃料や天然ガス，バイオ燃料などの燃焼時にCO₂を発生する燃料を利用する場合，持続可能なカーボンリサイクル技術の開発が必要不可欠である。