

# 船のGHG(温室効果ガス)排出削減 - 水素やアンモニアが船舶燃料に? -



2021年3月21日 三鷹ネットワーク大学  
(国研)海上・港湾・航空技術研究所  
海上技術安全研究所 春海一佳

# 目次

1. 海上技術安全研究所の紹介
2. 船について  
    大きさは？ 輸送における役割は？
3. 船のGHG規制  
    船の環境問題？ 規制はどこが？
4. 船からのGHG排出を減らすには？  
    消費エネルギー削減 代替燃料
5. まとめ

# 1. 海上技術安全研究所の紹介

# 海上技術安全研究所のご紹介

1963年4月～ 運輸省 船舶技術研究所

2001年4月～ 独立行政法人 海上技術安全研究所

2016年4月～ 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

(海上・港湾・航空技術研究所は港湾空港技術研究所、電子航法研究所と海上技術安全研究所が統合して生まれる)

<https://www.mpat.go.jp/>

海事・海洋技術に関する研究機関

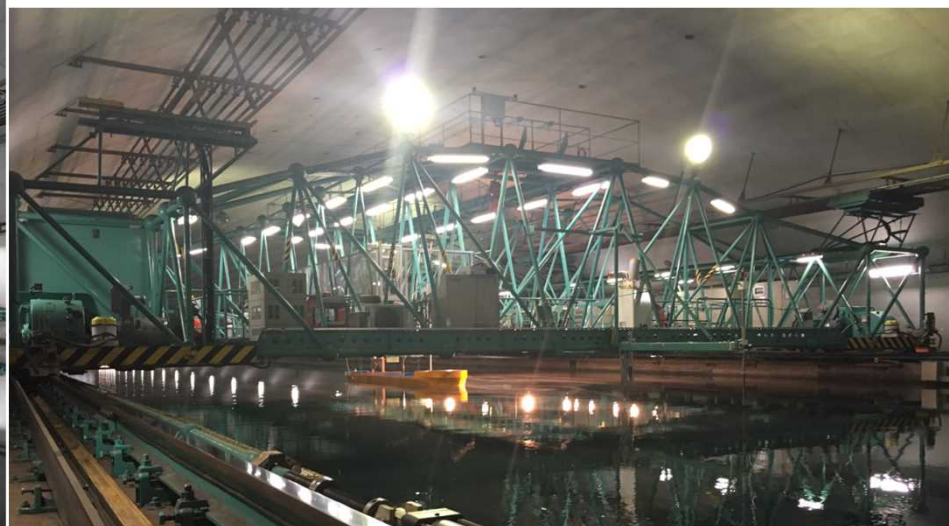
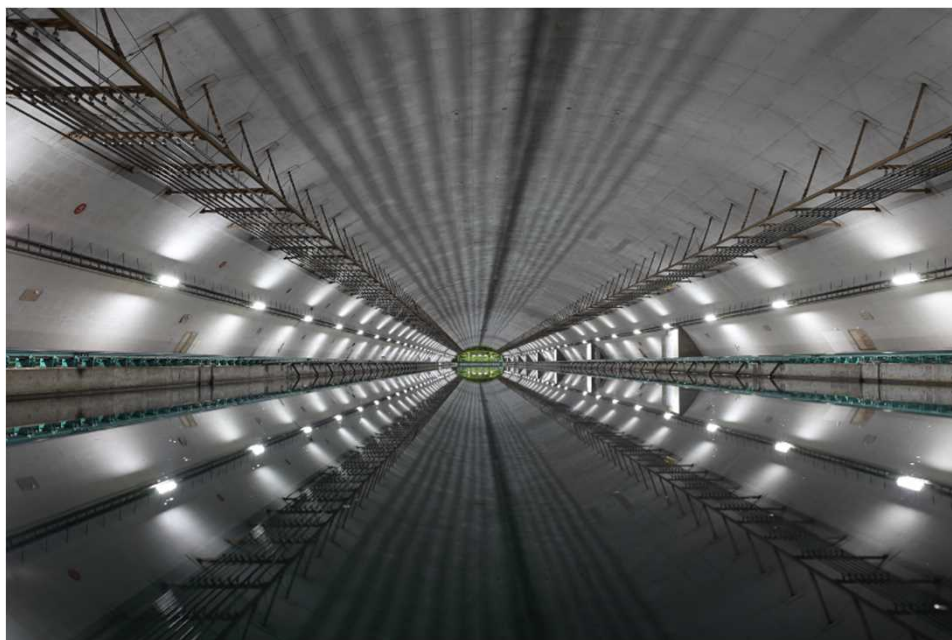
- ✓ 海上交通の安全及び効率の向上技術に関する研究開発
- ✓ 海洋資源及び海洋空間の有効利用のための技術に関する研究開発
- ✓ 海洋環境保全技術に関する研究開発



# 海上技術安全研究所のご紹介

## 主な実験設備

- ✓ 400m水槽、実海域再現水槽、海洋構造物試験水槽、深海水槽、操船リスクシミュレータ、複合荷重試験装置、ディーゼルエンジン、等々



400m水槽と台車(模型船をぶら下げて走ります)

ホームページ: <https://www.nmri.go.jp>

## 2. 船について

船は身近？  
船は必要？



# 船は身近ですか？

飛行機に乗ったことのある人より、船に乗ったことのある人の方が少ないのでは？

(都内だと、隅田川の水上市バスぐらい？ 井の頭公園のボート？)

- 港に行かないとみることができない。
  - マスコミが取り上げるのは事故の時だけ。
- ▶ 一般の人に情報が届いていない

海上技術安全研究所も業界では知られていますが…

「え？ 洗濯技術研究所ですか？」

仮名漢字変換では「会議研」、「会場技術安全研究所」  
悲しい……。

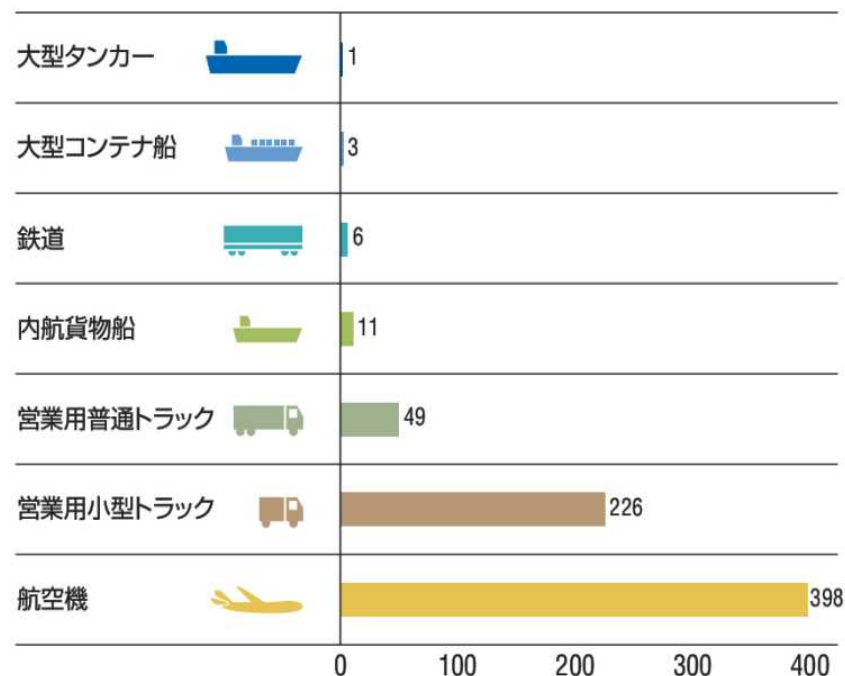
目立たない存在……、しかしとても重要な役割を…



# 船の話(その1)

輸送機関別CO<sub>2</sub>排出原単位

(単位:g-c/トンキロ)



- 船は日本の輸出入全体の99.7% (重量ベース)、あるいは、76.7% (金額ベース) を運んでいる (2013年)
- 省エネ、つまりCO<sub>2</sub>排出の少ない、輸送機関



船 = 大量輸送の主演

<https://www.mlit.go.jp/seisakutokatsu/freight/kannkyou/37mitsuiosklines.pdf>

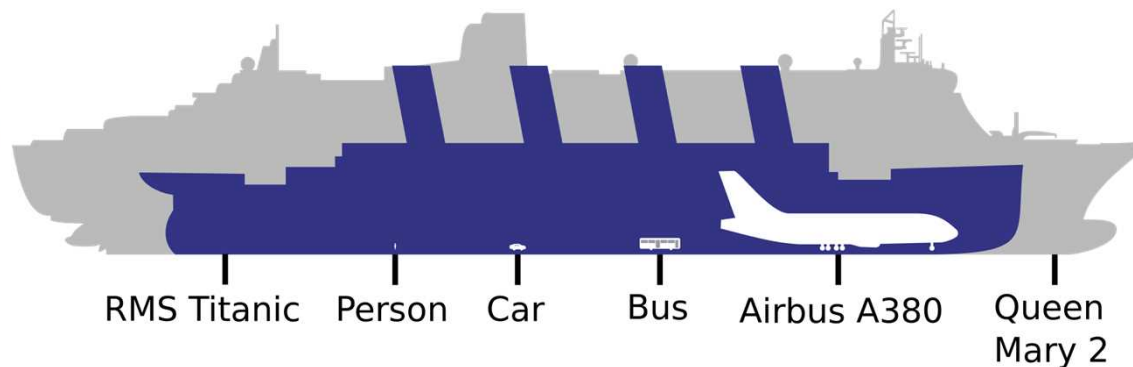
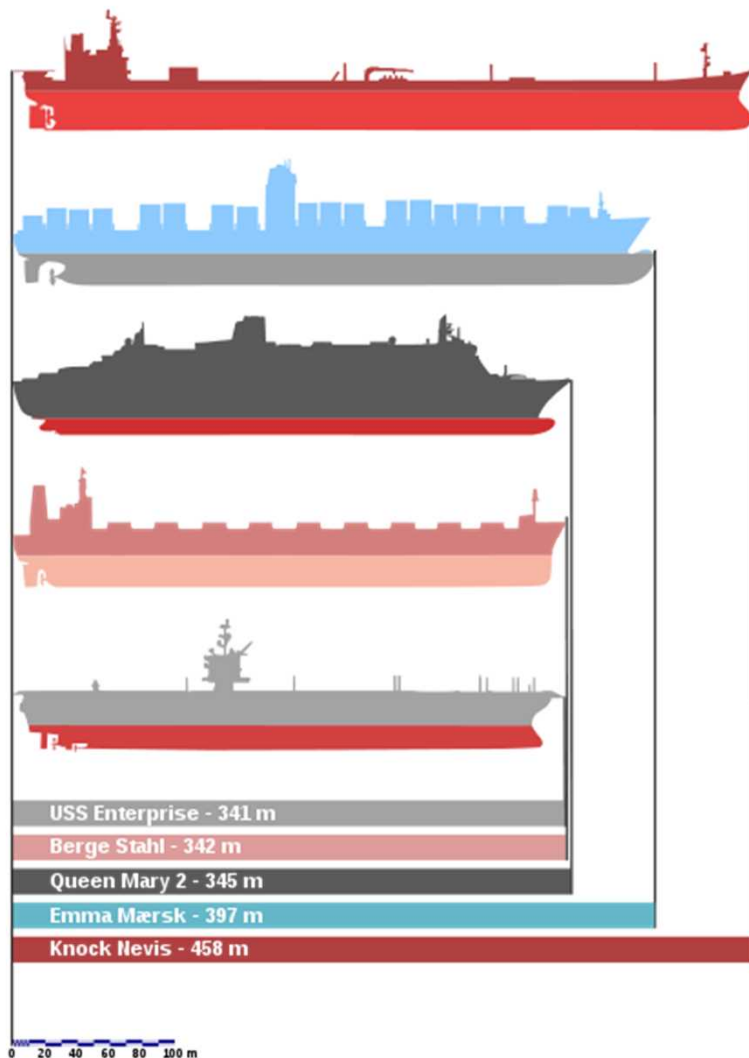


CMA CGM マルコ・ポーロ  
 (コンテナ船)  
 総トン数:175,343 トン  
 載貨重量トン数:187,625 トン  
 全長:396.0 m  
 ディーゼル 1基:108,800馬力  
 速力:25.1ノット  
 コンテナ積載数:16,020 TEU

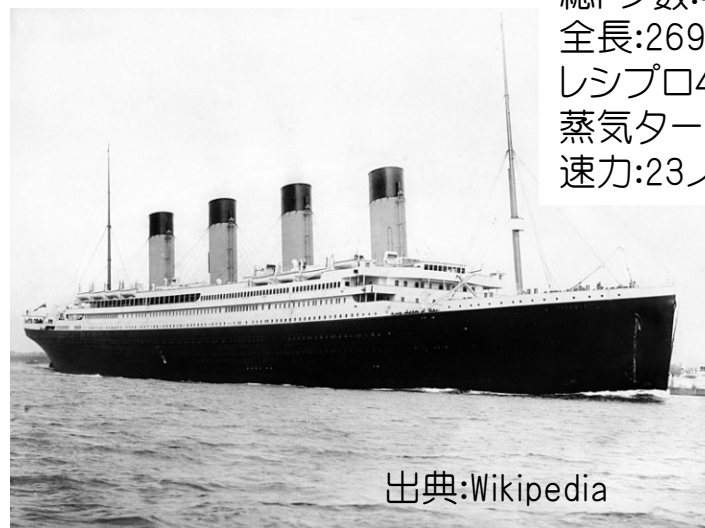


# 船の話(その2)

大きい!



タイタニック  
 総トン数:46,328トン  
 全長:269.1 m  
 レシプロ4気筒エンジン2基  
 蒸気タービン、5万馬力(37 MW)  
 速力:23ノット (42.6 km/h)



出典:Wikipedia



## 船の話(その3)

- ◆ 遅いけど24時間航行でき、物資の大量輸送が可能。
- ◆ 居住できる(水も電気もある)。

震災時にも物資を輸送できる(東日本大震災、熊本地震)



巡視船による物資の輸送(左)と市民への入浴支援(右)

[https://www.kaiho.mlit.go.jp/info/books/report2012/html/tokushu/p032\\_02\\_03.html](https://www.kaiho.mlit.go.jp/info/books/report2012/html/tokushu/p032_02_03.html)

- ◆ 世界には病院船もある。
- ◆ 陸上に電気を供給することが可能

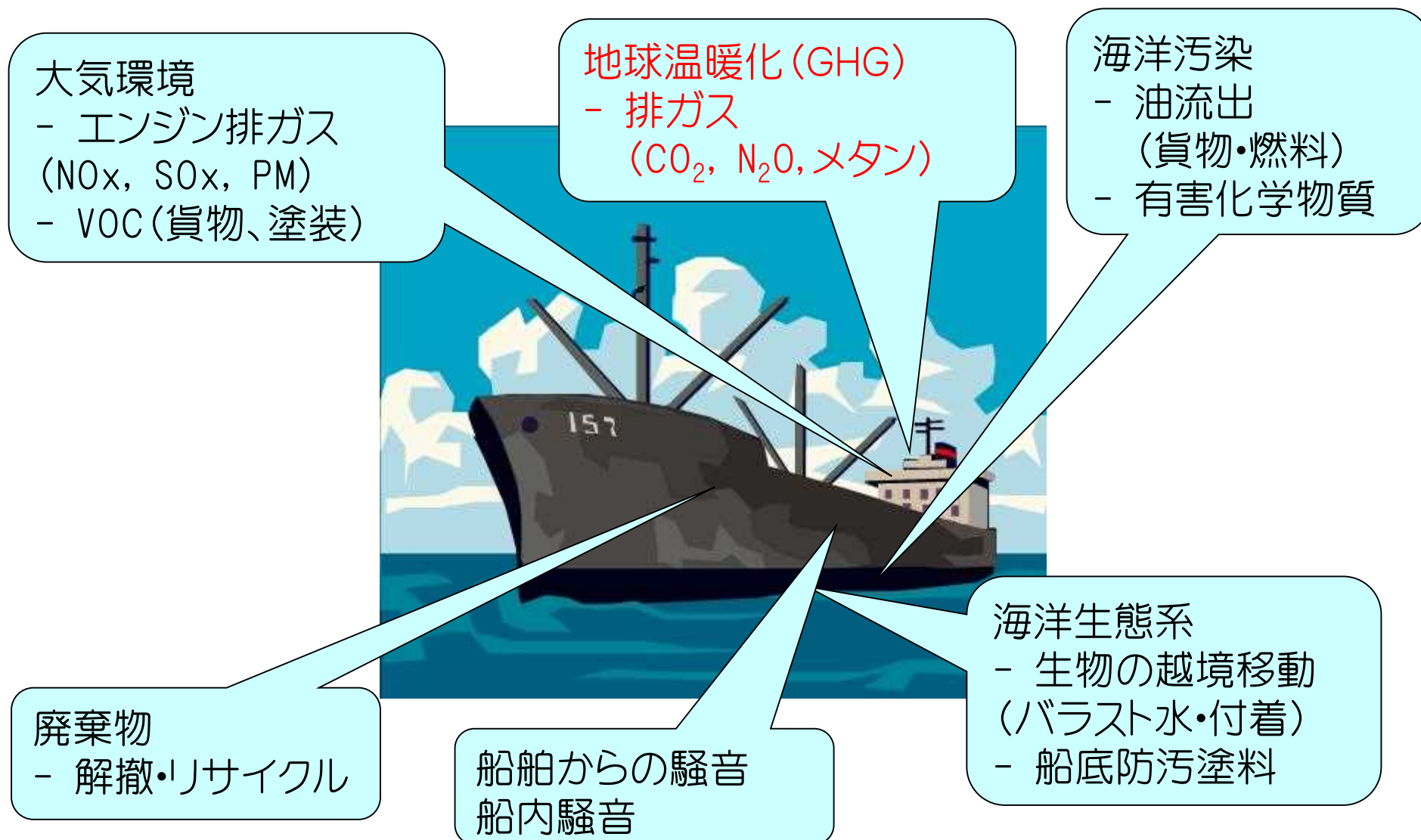


### 3. 船のGHG規制

船に関する環境問題ってどんなものがあるの？  
規制はどこが定めるの？  
どんな規制？



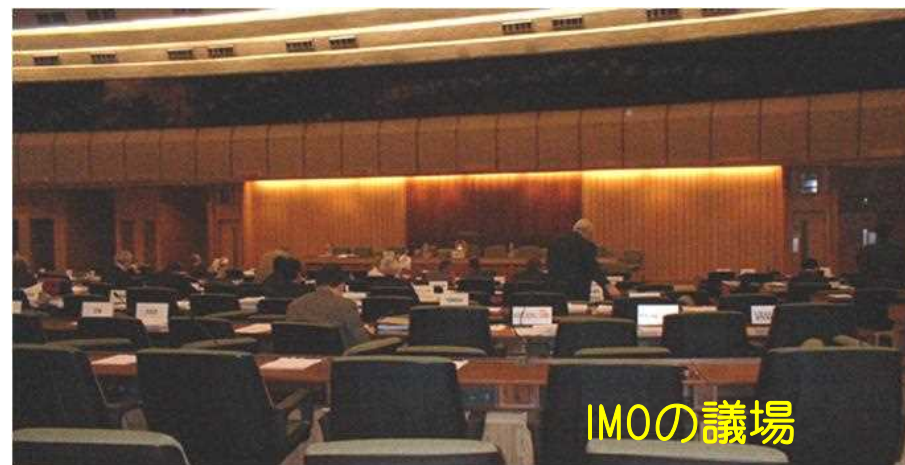
# 船舶に起因する環境問題





# 海運・造船の環境規制

- 海運は国際的な活動
  - 船籍, 船主, 運航者, 船員, 荷主, 発着地の国籍が異なる
  - ➔ 国毎の規制が困難
  - 国際海事機関 (IMO: International Maritime Organization、国連の専門機関) による国際的な規制が先行. 国内規制に反映
- 船舶への規制は, 安全から環境へ
- 海洋汚染防止条約 (MARPOL) (1973/78/97)
  - 油汚染防止, 化学物質 (有害液体物質) 汚染防止, 有害物質による汚染防止, 糞尿及び汚水の排出, 廃物による汚染防止, 大気汚染防止
  - 「大気汚染」 (Annex VI) の中にエンジン排ガスと地球温暖化対策
- その他の環境規制
  - 船底防汚塗料 (TBT問題)
  - 生物多様性 (バラスト水問題)





# 船の排ガス規制

- ・ 排ガス規制
  - IMOによる有害排ガス( $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ , PM)規制
  - 大洋上と陸域近くは規制の重要度が異なる(地理的規制)
    - $\text{NO}_x$ はg/kWh値で規制, 新造船から3段階  
(Tier 1~Tier 3: Tier 3 は2016年1月1日以降の新造船かつ規制海域のみ)
    - $\text{SO}_x$ , PMは燃料油の硫黄分(S分)規制  
(2020年1月1日以降の使用燃料のS分3.5%→0.5%)
- ・ 温暖化ガス規制
  - 国際海運は京都議定書の対象外(国別規制になじまない)
    - IMOで規制することが要請されている(国際航空はICAO)



# 船舶(海運)の二酸化炭素排出

- ・ IMOの見積り
  - 外航:870MtonのCO<sub>2</sub>排出(2007年)
  - 世界の3.3%(2.7+0.6)、ドイツ(3.0%)に相当
- ・ 京都議定書(国別の削減目標)の外
  - IMOで削減枠組みを策定
- ・ IMOの最初の議論
  - 輸送量の抑制ではなく効率の改善で解決
  - 技術的手法, 運航的手法, 経済的手法
  - 指標 = CO<sub>2</sub>排出量(g) / 輸送量(ton·mile)  
→ 指標が低くなるような技術開発

だけど、それだけではなかった



# 海運・造船のGHG規制

<IMOによる規制の経緯>

2013年1月1日～ 「エネルギー効率設計指標 (EEDI)」及び「船舶エネルギー効率管理計画書 (SEEMP)」が強制化(2011年採択)

**EEDI** (Energy Efficiency Design Index): 新造船にかかる指標。  
単位輸送量 (ton・mile) あたりのCO<sub>2</sub>排出量

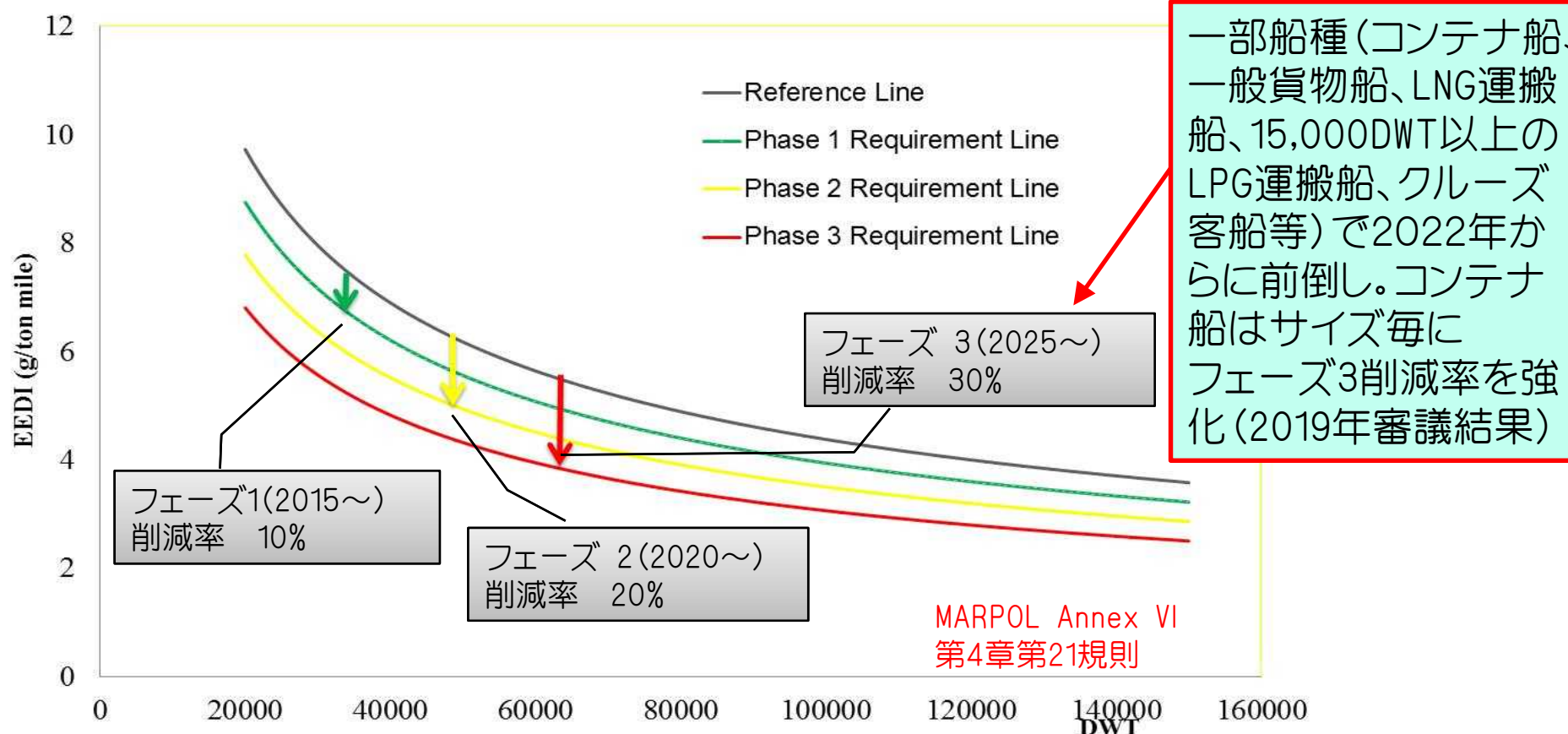
**SEEMP** (Ship Energy Efficiency Management Plan): 既存船を対象。エネルギー効率を改善するための運航上の取り組みを示す計画書を船上保持。「エネルギー効率運航指標 (EEOI: Energy Efficiency Operational Indicator)」(実燃費)をモニタリング。



# 「指標」＝EEDI

- ・ 総量規制ではなく, 技術発展に期待する排出率規制
- ・ リファレンスライン(2013～2014年既存船平均値)を基準とし段階的に強化
- ・ 船種・サイズ(DWT)により異なる規制値

$$\text{EEDI} = \text{燃費} \times \text{機関出力} \times \text{排出係数} / (\text{積載重量} \times \text{速度})$$





# EEDI規制への対応

EEDI:

燃費 × 機関出力 × 排出係数 / (積載重量 × 速度)

- ・ 排出係数:
  - 新燃料 (LNG, バイオ燃料)
  - 自然エネルギー (ハイブリッド化 ~ 太陽光等)
- ・ 機関出力
  - 船体抵抗低減、推進効率向上、低速航行
- ・ 燃費・燃料消費量:
  - 高効率化 (排熱回収, ハイブリッド化)



# 海運・造船のGHG規制

< IMOによる規制の経緯 >

2019年1月1日～ 燃料消費実績報告制度 (2016年採択)

船舶の燃料油の消費実績を「見える化」

総トン数5,000トン以上の外航船舶の燃料油の年間の消費実績を収集、翌年3月までに国土交通省又は船級協会に報告。報告された実績は、各国の主管庁等からIMOに報告、世界的なデータベースが構築される。そのデータ分析に基づき、更なる国際的な削減対策の検討、フォローアップ等。

**2018年 IMO GHG削減戦略を採択**

輸送効率: 2030年までに40%の改善

2050年までに70%の改善

**GHG総排出量:** 2050年までに50%削減

今世紀中のなるべく早期に、ゼロ排出を目指す



## 4. 船からのGHG排出を減らすには？

船がGHGを排出するのはなぜ？  
GHGを減らす方法は？



# 船が出すGHG

GHGはどうして出る？

- ✓ 船を動かす牛のげっぷい？
- ✓ こぎ手の呼気？



そんなわけが無い！

他の輸送機関同様、動力源に化石燃料を使っている  
→燃料の燃焼によってエネルギーを得て、エンジンを回している

自動車:ガソリンエンジン、ディーゼルエンジン、ハイブリッド、電池、燃料電池

航空機:ジェットエンジン、レシプロエンジン

船のエンジンは？

# 船用大型低速2ストロークディーゼルエンジン

## 船の主機関に使われます

(主機関:プロペラを回す、補機関:船内電力を供給する4ストローク発電機用エンジン)

### <特徴>

- 低速(低回転速度:<100rpm)  
→高効率(～50%), NOx高濃度
- 重質燃料油(石油精製の残渣油)の利用可  
→高粘度(>100cSt)・高硫黄分(～3%)

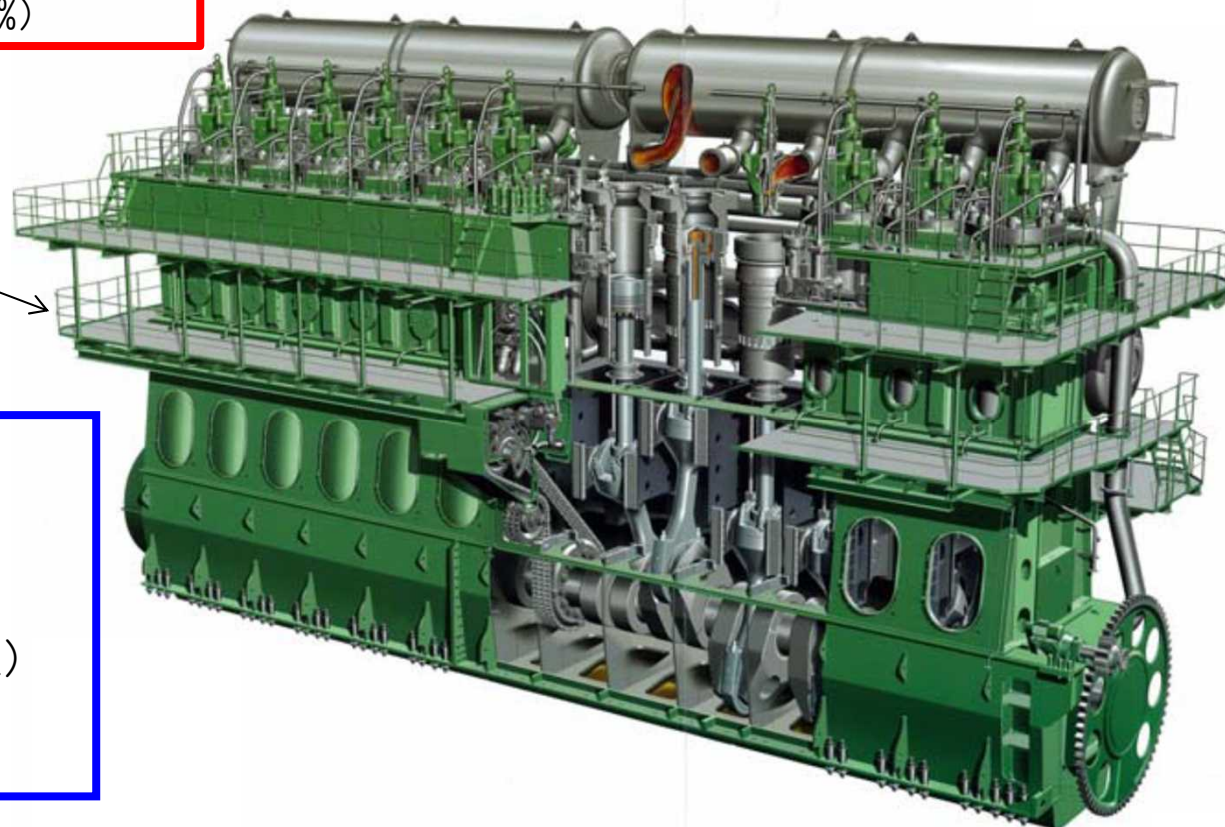
### ➤ 有害排ガス問題

- 高NOx→燃焼制御+後処理装置(SCR)
- 高SOx→燃料油のS分低減(蒸留油への転換)
- PM→サルフェート成分の抑制(燃料低S化)

### ➤ CO<sub>2</sub>削減・省エネルギー

- 排ガス:低温(～300℃), 高硫黄分(SO<sub>2</sub>等)
- 常時定格運転:変動分小

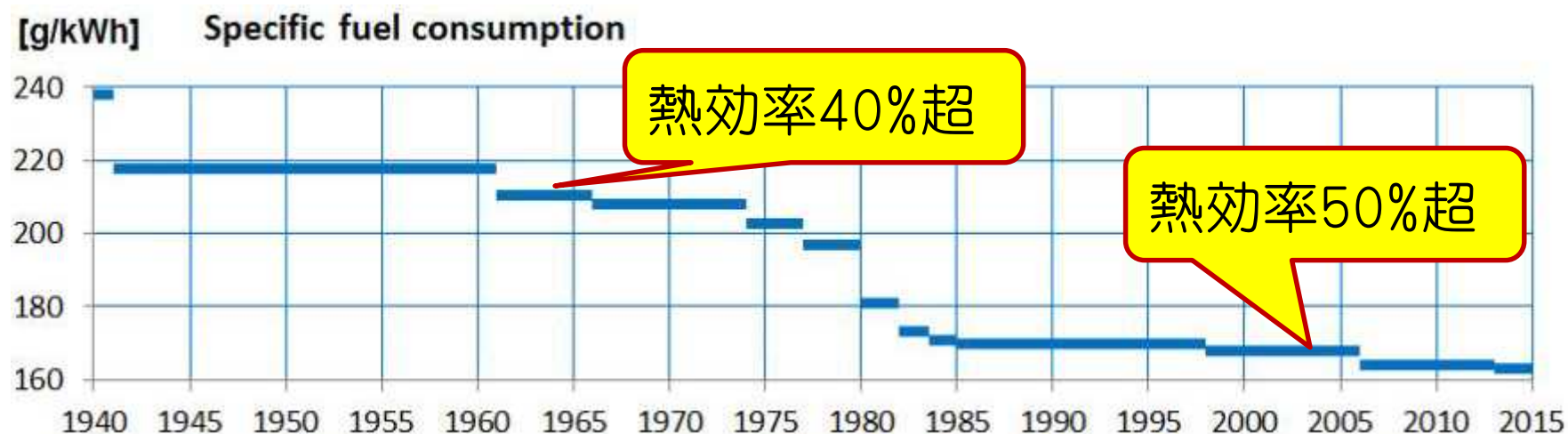
ここは人が  
歩くための  
通路です!



シリンダー直径:980 mm  
シリンダー数:12  
エンジン回転数:94 rpm  
最大出力:68,640 kW  
(約9万2千馬力:自動車920台ほど)  
高さ:約20m  
(MAN 12K98ME)



# 熱効率（燃料消費率）の変遷

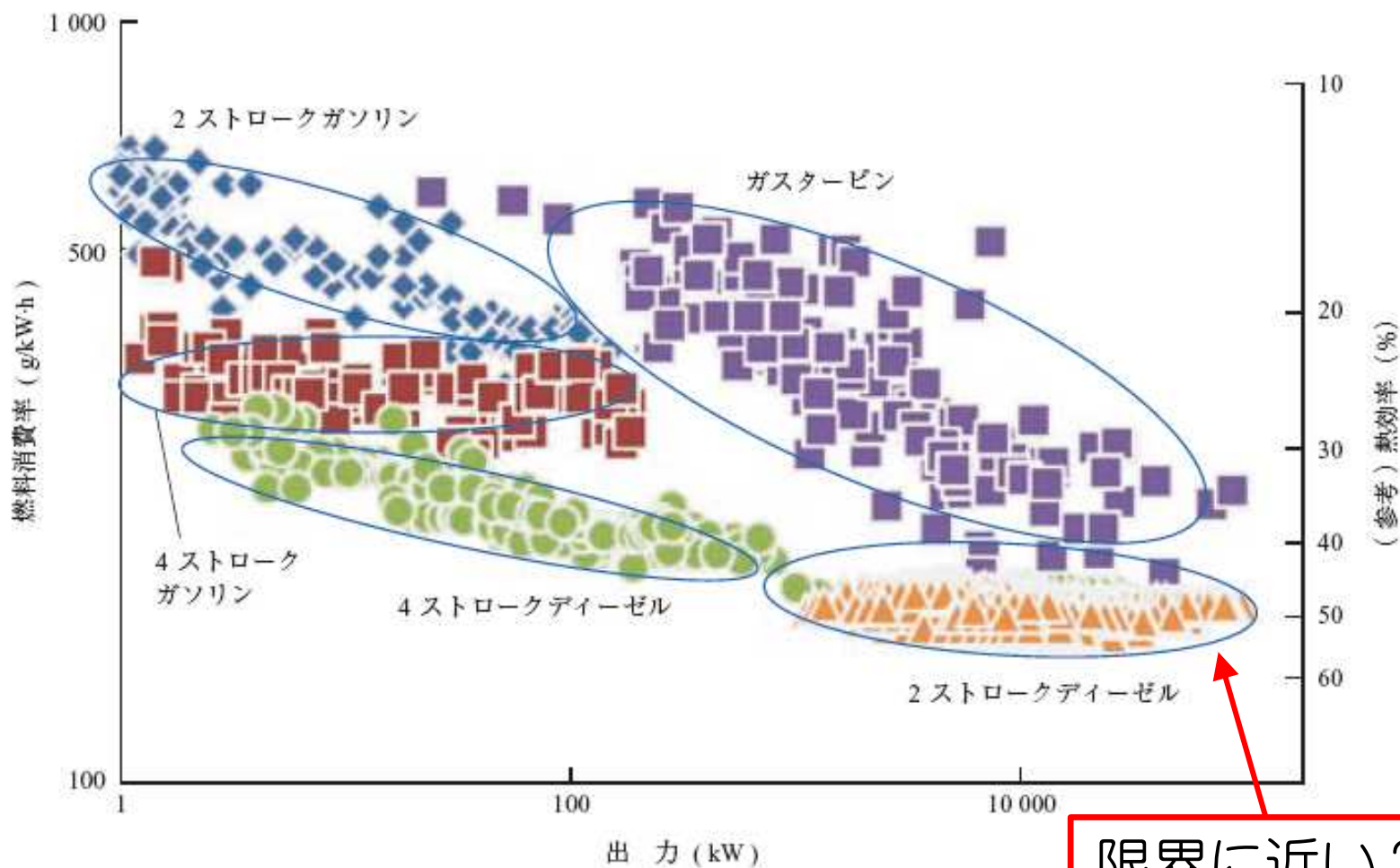


## 船用2ストロークディーゼルエンジンの熱効率の向上

[https://www.wingd.com/en/documents/general/papers/the-development-of-the-modern-2-stroke-marine-diesel-engine-\(cimac\).pdf/](https://www.wingd.com/en/documents/general/papers/the-development-of-the-modern-2-stroke-marine-diesel-engine-(cimac).pdf/)

エンジンの効率向上によるGHG削減は？

# 熱機関ごとの熱効率の比較



IHI技報 Vol.52 No.3 (2012)

[https://www.ihi.co.jp/var/ezwebin\\_site/storage/original/application/74f1e26e260891c417da1d0012f4fd28.pdf](https://www.ihi.co.jp/var/ezwebin_site/storage/original/application/74f1e26e260891c417da1d0012f4fd28.pdf)





# エンジンそのものの効率アップは？

自動車用ガソリンエンジンの熱効率:2025年には50%？

## Wärtsilä 31

- 4200～9800kW (720 or 750rpm) 4ストロークエンジン
- ディーゼル、デュアルフュエル、ガス専焼の3バージョン
- 2スト並の燃料消費率
- 2段過給
- 電子燃料噴射
- 可変吸排気バルブタイミング



項目	スペック	参考値
ボア	310mm	
シリンダ当たりの出力	610kW(ディーゼル)	429kW
正味平均有効圧	30.1bar	22bar
燃料消費率	165g/kWh	170～180g/kWh台



高効率のエンジンからのGHG排出を減らすには？

エンジンが燃料を燃やしてからGHGを排出  
エンジンは船の動力源(エネルギー源)



燃えてもGHGが出ない燃料は？

→ 水素等

別のエネルギー源は？

→ 電池、風力等

船で使用するエネルギーを減らす

(だけど船が動くためにはエネルギーは必要)



# 燃やしてもGHGを出さない燃料(1)

なぜ燃料を燃やすとGHG ( $\text{CO}_2$ ) が発生するのか？

<答え>

炭素(C)を含んだ燃料だから

1.  $\text{CO}_2$ を出さない燃料

水素( $\text{H}_2$ )、アンモニア( $\text{NH}_3$ )

… あれ？製造にエネルギーが必要では？

2. カーボンニュートラルな燃料

バイオ燃料

e-Fuel(水素と二酸化炭素から合成:メタン、メタノール等)

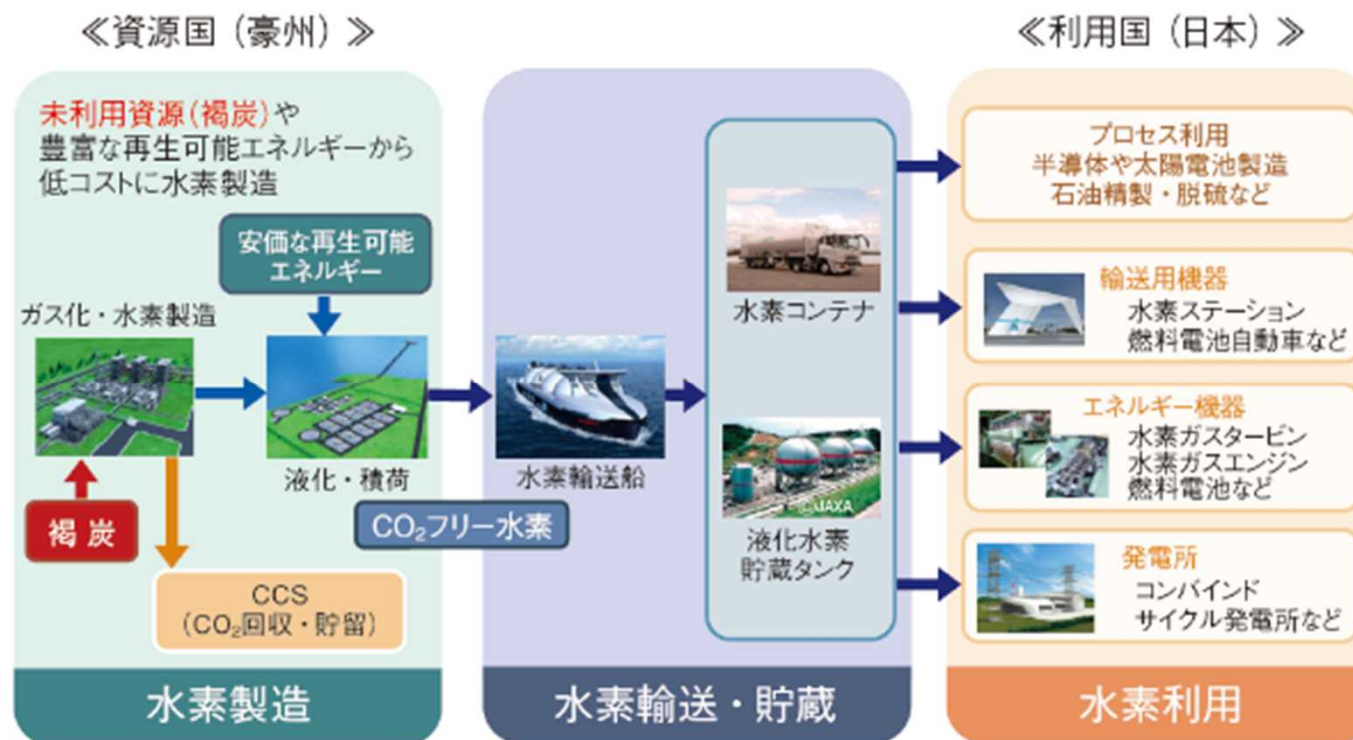
… あれ？炭素を含んでる。



## 燃やしてもGHGを出さない燃料(2)

電気自動車はCO<sub>2</sub>を排出しない？ → 発電が火力なら出しているのと変わらない  
 <水素(H<sub>2</sub>)、アンモニア(NH<sub>3</sub>)>

自然エネルギー由来の電気(水力、風力、太陽光等)を使った電気分解による水素生成やアンモニア合成。CO<sub>2</sub>が出る場合は回収・貯留  
 (自然エネルギーを他の地域で使えるように=エネルギーキャリア)



<https://www.khi.co.jp/rd/magazine/pdf/176/n17610.pdf>

風力:アルゼンチン、水力:カナダ、北欧、太陽光:サウジ、等



## 燃やしてもGHGを出さない燃料(3)

バイオ燃料も炭素を含んでいる。でも、もともと大気中に存在したCO<sub>2</sub>を吸収したものの。なので、±0！  
→「カーボンニュートラル」

e-Fuel(合成燃料)もカーボンニュートラル？

- ✓ 水素は再生可能エネルギーを使って生成
- ✓ CO<sub>2</sub>は大気中、あるいは工場等で発生したものを回収
- ✓ 合成に使うのは再生可能エネルギー

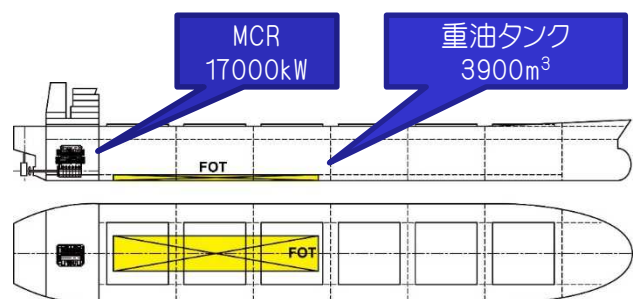
コストの問題、供給量の問題はあるけど、燃料を変えれば全て問題は解決・・・、にならない。どうして？



# ゼロエミッション船の検討例

## 80,000DWTバルクキャリア (80~90%のGHG削減)

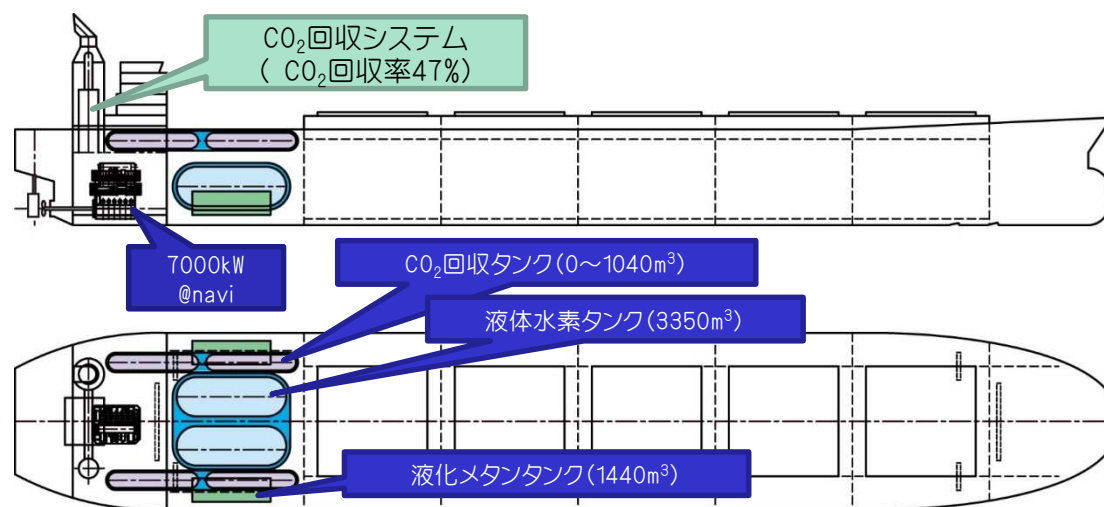
- ◆ 50%水素混焼の合成燃料(メタン)エンジンを使用する。
- ◆ 抵抗低減技術等によりCO<sub>2</sub>を20%削減し,さらに20%の減速航行を行う。
- ◆ 連続航続距離を30%短くする。



従来の重油炊きケープサイズBC (基準船)

全長:280 m 幅:45 m  
航海速度:15kt 航行距離:22000mile(約60日)

✓ IMO GHG削減目標に合わせて,2008年時の既存船を想定。



ゼロエミッション船(80~90%GHG削減)

全長:280 m 幅:45 m  
航海速度:12kt 航行距離:15400mile(約53日)



# なぜ燃料タンクが大きくなる？

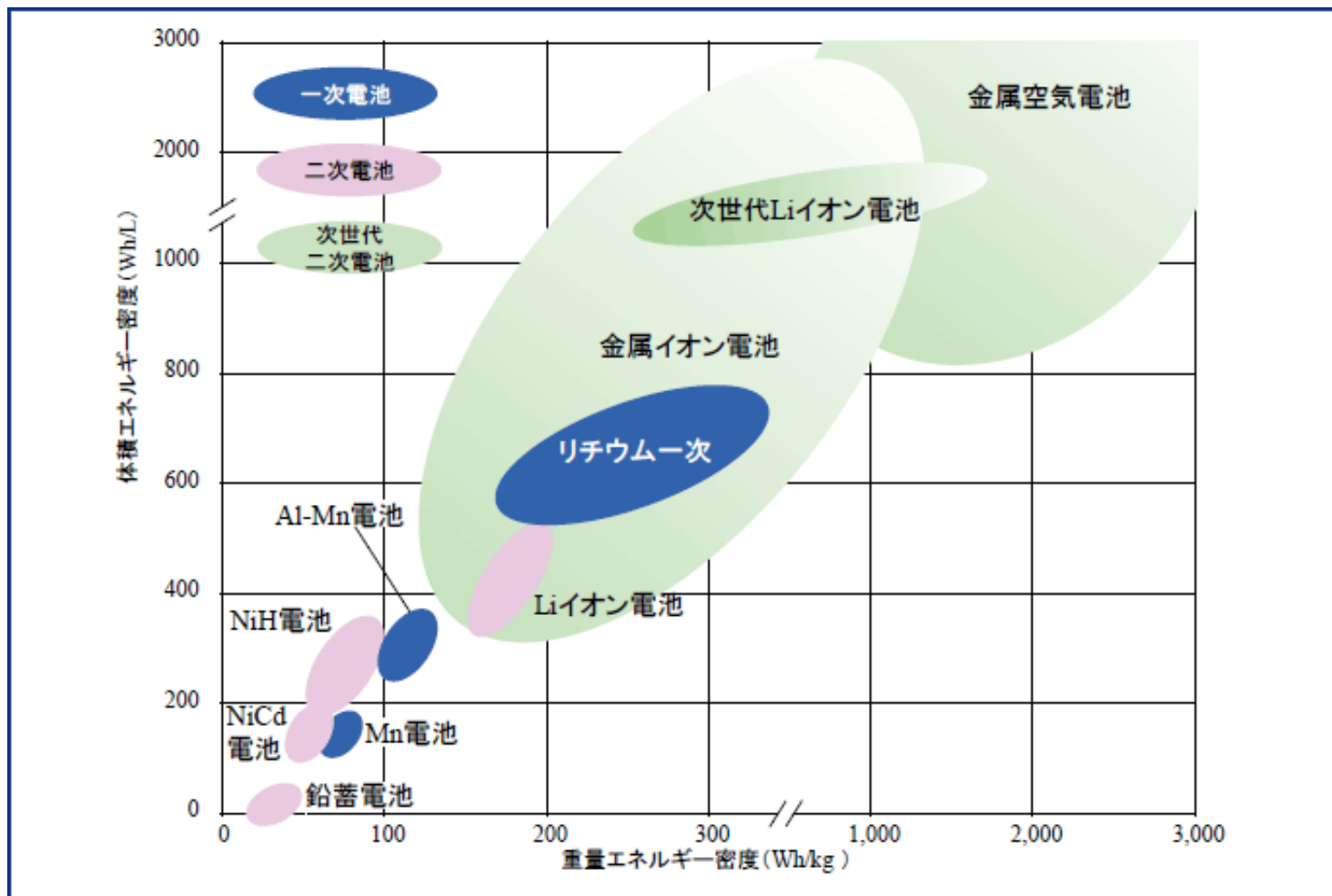
燃料の体積エネルギー密度が効いている

	単位体積当たりの発熱量 (MJ/L)	液化条件 (0.1MPa)	補足
C重油	41	-	船の主燃料
ガソリン	33.4	-	
メタン (液体)	21.1	111.7K (-161.5°C)	LNGの主成分 190.5K (-82.6°C) 以上では加圧しても液化しない
メタノール	15.8	-	e-fuelの一例
アンモニア (液体)	12.7	240K (-33.3°C)	常温 (298K) の場合 1.0MPaで液化
水素 (液体)	8.5	20.6K (-252.6°C)	32.9K (-240.3°C) 以上では加圧しても液化しない

低温を維持するタンクはコストを押し上げる  
 → 搭載燃料量は少ない方がコスト、スペースの有効利用の観点から有利。



# ちなみに電池のエネルギー密度は？



電池のエネルギー密度 (1Wh=0.0036MJ, 3000Wh=10.8MJ)

みずほ情報総研技術動向レポート

[https://www.mizuho-ir.co.jp/publication/report/2019/mhir18\\_battery\\_04.html](https://www.mizuho-ir.co.jp/publication/report/2019/mhir18_battery_04.html)





## 代替燃料の問題点のまとめ

体積エネルギー密度が低い燃料を使用する

→燃料タンクが大きく

→積み荷の量が減る

低温高圧タンクが必要な場合もある

→船の価格が上がる

燃料そのものの価格が高くなる可能性がある



搭載燃料量は少ない方がコスト、スペースの有効利用の観点から有利。

GHGフリーな燃料だけではだめ！  
使用エネルギーを減らすことも必要



4. 船からのGHG排出を減らすには？
- ①消費エネルギーを減らす:省エネ



# 船舶の省エネはどうやって？

◎船舶の省エネを技術的に見ると…

- ① 船体の改良(抵抗低減等):造船所
- ② 推進系の改良(推進効率改善):造船所
- ③ 運航の改良(スケジューリング等の改善):船会社
- ④ エンジンの改良(熱効率改善):エンジンメーカー

船舶用エンジン=高効率なディーゼルエンジン → 効率向上は容易ではない

そもそもエネルギー効率の高い船

→ 1つの技術だけでは消費エネルギーの大幅削減はたぶん無理  
(よほどのブレークスルーがあれば別だけど)

船体:90%×プロペラ周り:90%×運航:90%×エンジン:90%=66%

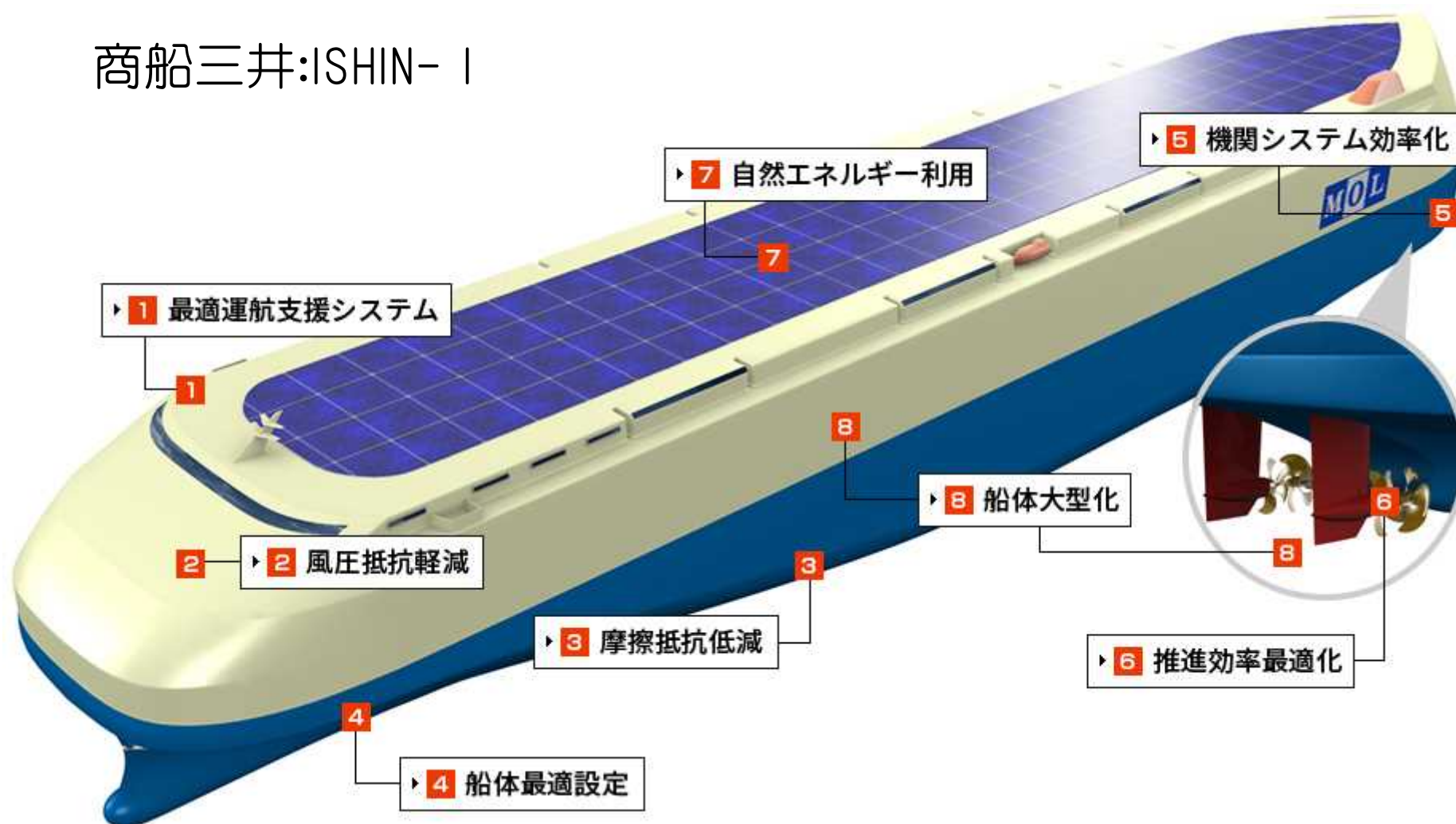
船体:80%×プロペラ周り:80%×運航:80%×エンジン:100%=51%

90%×90%×80%×80%=52%

トータルなアプローチが必要

# 省エネ船舶のコンセプト例

商船三井:ISHIN-1



<https://www.mol.co.jp/sustainability/technology/ishin/carcARRIER/future.html>



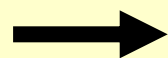
# ①抵抗低減技術例:空気潤滑への掃気バイパスの適用

空気潤滑: 気泡を船底に投入→摩擦抵抗低減

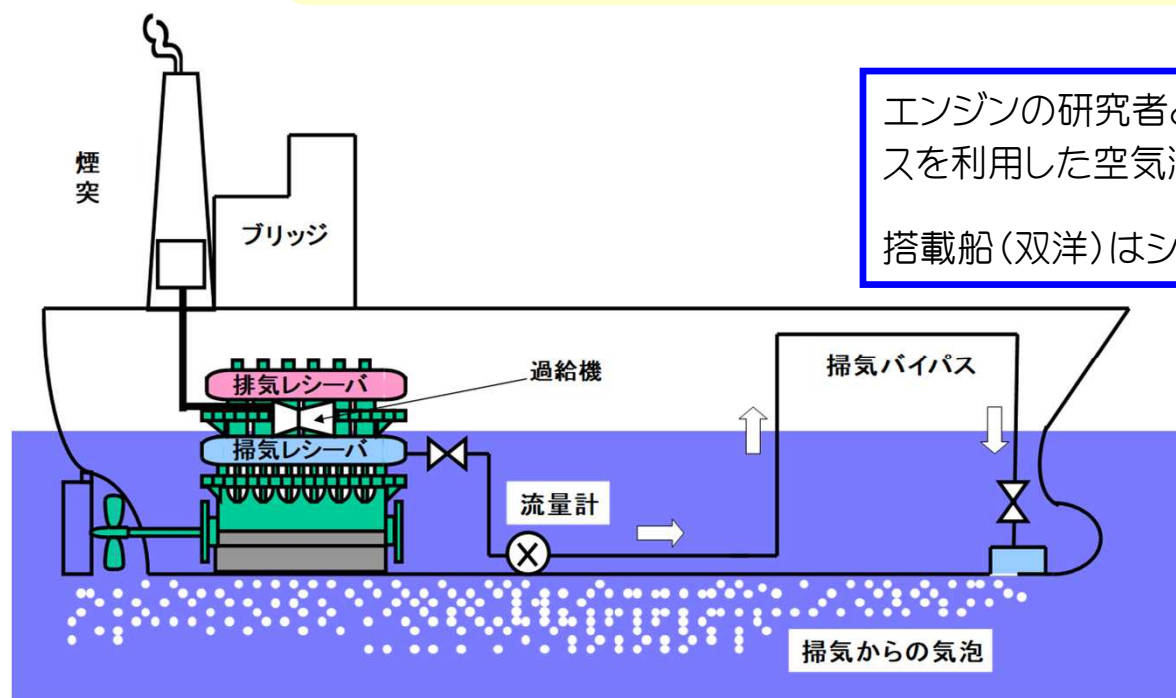
課題:気泡投入エネルギー(空気加圧)が必要



主機掃気の利用(掃気バイパス)



排気エネルギーの利用



エンジンの研究者と船の研究者とのコラボで主機掃気バイパスを利用した空気潤滑システムを開発

搭載船(双洋)はシステムシップ・オブ・ザ・イヤー2012受賞





## ①抵抗低減技術例:船底防汚塗料

- ・ 生物付着による船舶性能の低下
  - －抵抗の増大、燃料消費の増大
  - －船体の損傷、腐食の加速
- ・ 防汚システム
  - －紀元前:タール、ピッチ、鉛
  - －18世紀～:
    - 銅、砒素、水銀化合物、亜酸化銅
  - －1970年頃～:有機スズ
  - －1970年代後半～:有機スズポリマー
  - －1990年頃～:非スズ系  
(biocide、silicone-base)
- ・ 生物付着による抵抗増加の防止
- ・ 塗料そのものの抵抗低減効果

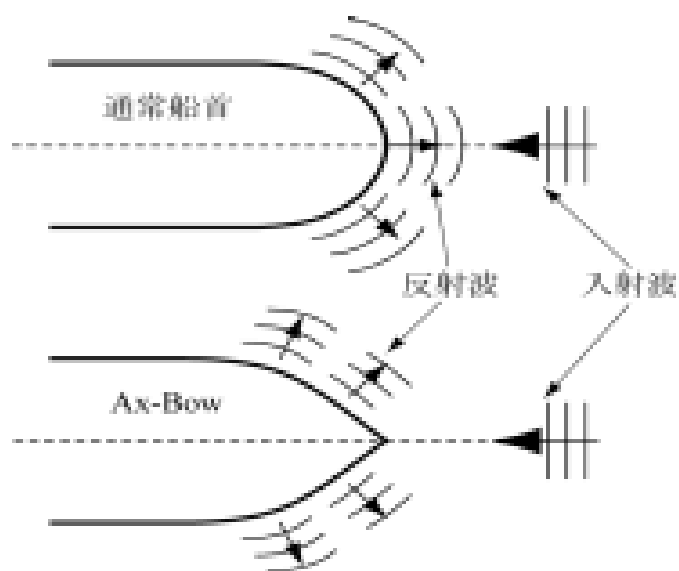




# ①波浪中抵抗低減船首

## Ax-Bow

荒天時の波浪抵抗の低減と同時に、積み荷を満載したときの低燃費効果がある船首形状。前方への波の反射を抑制。省エネ効果は4～6%



搭載船 (KOHYOHASAN) はシステムシップ・オブ・ザ・イヤー2001受賞



[https://www.jfe-steel.co.jp/archives/nkk\\_giho/176/pdf/176\\_24.pdf](https://www.jfe-steel.co.jp/archives/nkk_giho/176/pdf/176_24.pdf)  
[https://www.spf.org/opri/newsletter/46\\_4.html](https://www.spf.org/opri/newsletter/46_4.html)



## ①実海域省エネ装置

### STEP (Spray Tearing Plate)

実海域中を航行する船舶に働く波による抵抗増加を低減させる省エネ装置で、船首部の波が当たる位置に装着。船首部での波の反射方向を船幅方向に変えることにより、波浪中抵抗を低減。



- 船舶が波のない平水中を航行すると船体周りの水面が盛り上がるが、STEPはその水位上昇位置より上方に装着するため、平水中での抵抗性能に影響を与えない。
- 実船での省エネ効果は約3%

[https://www.nmri.go.jp/study/research\\_organization/fluid/actual\\_sea\\_performance/research/step.html](https://www.nmri.go.jp/study/research_organization/fluid/actual_sea_performance/research/step.html)



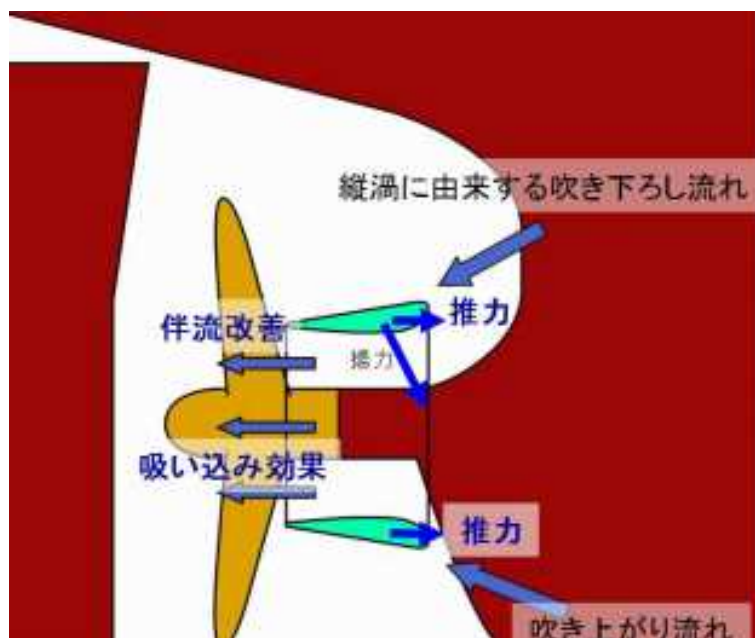


## ②推進系の効率化技術(WAD)

### WAD(Weather Adapted Duct)

プロペラ前方に取り付けるダクト型省エネ装置

- 波浪中船速低下時等で大きな効果
- 省エネ効果は4～6%



実船に搭載されたWAD

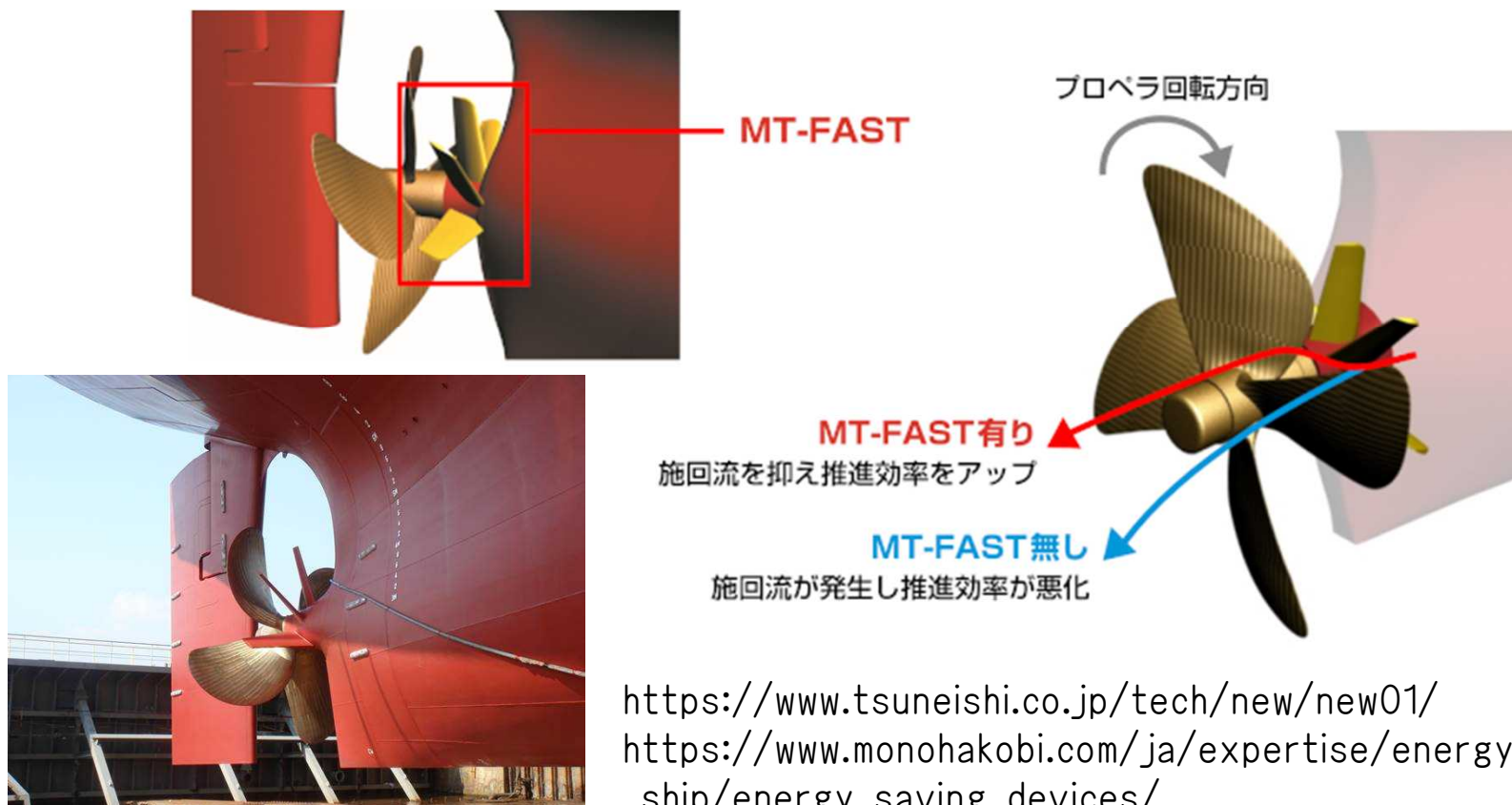


## ②推進系の効率化技術(MT-FAST)

### MT-FAST

プロペラ前方に複数のフィンを取り付ける省エネ装置

- プロペラ回転流によるエネルギー損失を回収
- 省エネ効果は3～5%





### ③ 運航の改良

船の顧客は荷主

荷物は期日に間に合わせて届けられないといけない



船の運航において外乱は多い

→ 早めについて沖で待つ(沖待ち)

ところが...

船はのんびり走る方が省エネ:抵抗は船速の2乗に比例

→ 船速が1割減れば燃料使用量は約2割減る

Slow Steaming (減速航行)

定時に到着できるように、天候予測等を活用。省エネ運航を支援

Weather Routing

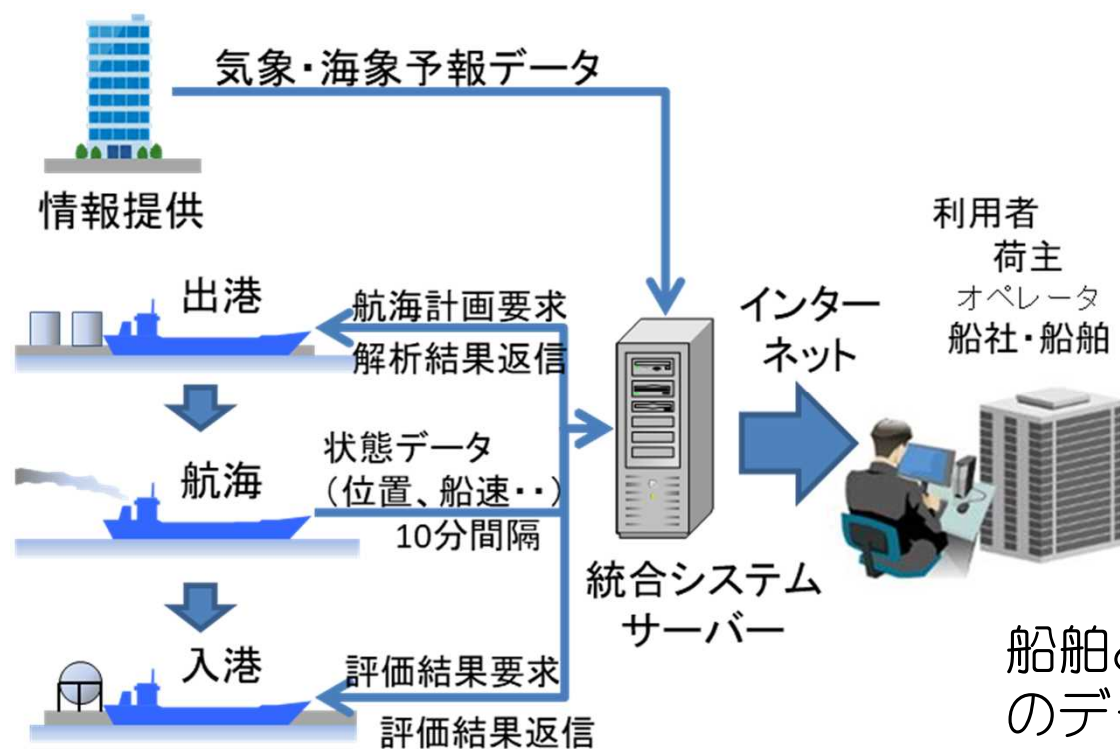


### ③航海・配船計画支援システム

#### eE-NaviPlan

内航海運のための省エネ航海支援、船隊運航管理システム

- 平均省エネ効果は4% (トップクラスは10%程度)



内航船40隻の実証実験により効果を  
確認し、サービス提供開始

船舶と陸上サーバー  
のデータ通信には主に  
携帯電話回線を利用



## ④エンジンの省エネ(排熱回収)

排熱回収＝熱源＋熱回収装置＋動力生成＋熱利用

熱源	エンジン冷却水、排気ガス(温度レベル、流量)
熱回収装置	熱交換器(例:排ガスエコノマイザ)
動力生成装置	蒸気タービン、蒸気機関、スターリングエンジン、 熱電発電
熱利用	高温の熱として利用:暖房、燃料加熱、造水
	冷熱生成:吸収冷凍機

組合せの自由度が高い:システムとして評価する必要



## ④排熱回収の背景(原理)

風車、蒸気機関等:エネルギーを変換して動力を取り出す装置

エネルギー保存則

電動機 = 電気エネルギー  $\rightarrow$  力学的エネルギー

•効率は90%程度以上、しかし電気は多くの場合熱機関により生成される

熱機関 = 熱エネルギー  $\rightarrow$  力学的エネルギー

•熱量 = 仕事？

(地球温暖化:暖かくなったのならその熱で仕事をさせればまた冷える?)

熱力学の第2法則

高温熱源から得た熱を全て仕事に変換する熱機関は存在しない  
(必ず捨てるべき熱がある)

300°C~400°Cの排ガス、冷却水:捨てすぎている熱



## ④排熱回収のための要素(熱源)

- エンジンの熱効率:最大で50%程度

エンジン排ガス

おおよそ25%程度の熱量  
高温(300°C近く~400°C近く)

排熱回収による動力回収にはエンジン排ガスの方が好都合  
(熱機関の熱効率は作動流体の温度が高い方が高くなる)

冷却水

おおよそ20%程度の熱量  
低温(数十°C)

低温ではあるが無視し得ない熱量

潤滑油、熱輻射

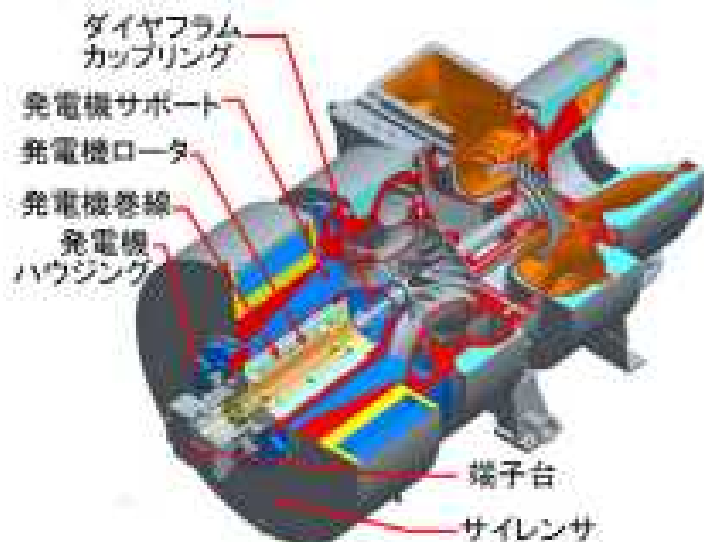
どの温度でどれだけの熱を得るのか?  
作動流体の温度・流量



## ④排熱直接利用の例(電力生成)

### ハイブリッド過給機

<https://www.mhi-mme.com/jp/products/metturbocharger/>



- 過給機のローター軸に高速電動・発電機を直結
- 燃焼用加圧空気の供給＋余剰の排ガスエネルギーを使った電力供給
- 発電機を電動機として作動させることで機関低負荷運転時には、補助ブロワの代用(この時に必要な電力は補助ブロワ運転時より小さく、高い省エネ効果)

### 背景に過給機の高効率化

国土交通省「船舶からのCO2削減技術開発事業」による支援

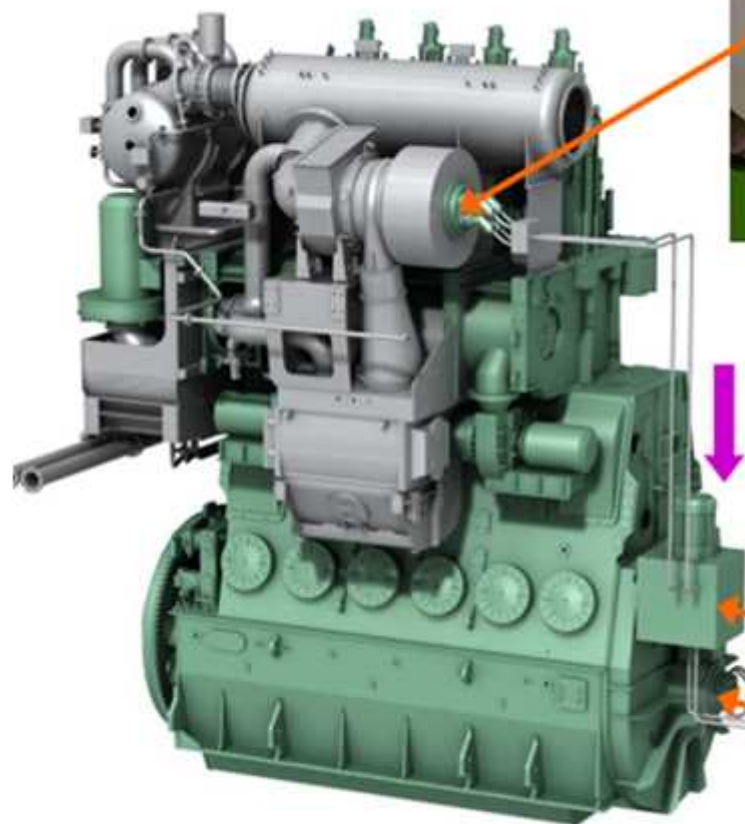


## ④排熱直接利用の例（動力生成）

油圧モーター

<https://www.mes.co.jp/archive-news/press/2017/20170516.html>

THS: Turbo Hydraulic System



燃料削減効果 2-4%



過給機付油圧ポンプ



油圧ユニット

クランク軸付油圧モーター

- 過給機のローター軸に油圧ポンプを直結
- クランク軸の油圧モーターを駆動
- 燃焼用加圧空気の供給 + 余剰の排ガスエネルギーを使った動力供給
- 過給機に加勢も可能
- コンパクトなので比較的小型の船舶（例えば、機関出力7,000kW程度）への搭載が容易

国土交通省「船舶からのCO2削減技術開発事業」による支援



# ④排熱回収のための要素(熱交換器)

排ガスエコノマイザ

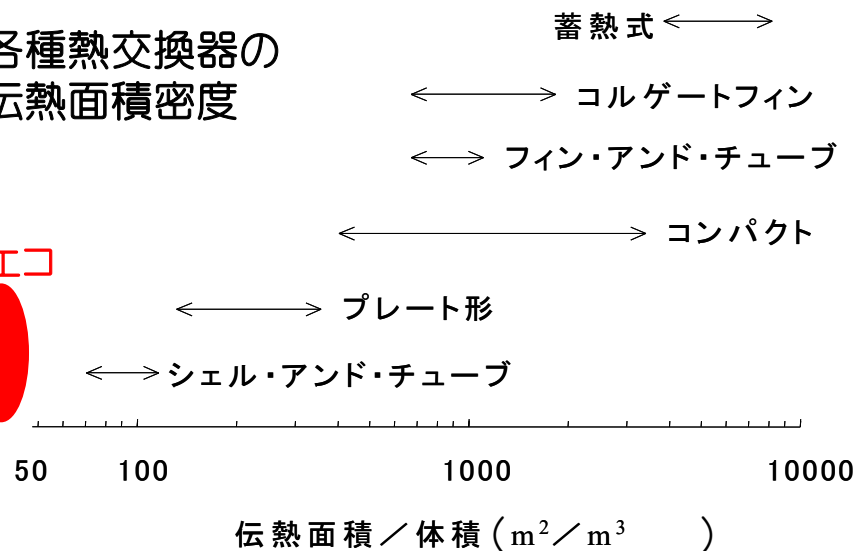
●高い信頼性 ↔ ●低伝熱面積密度  
(20~40m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>)



フィンチューブを用いた排エコ  
(<http://www.osakaboiler.co.jp/wp-content/uploads/2017/03/HE.pdf>)

各種熱交換器の  
伝熱面積密度

排エコ



スートファイア  
(付着したススが  
燃焼、機器損壊)

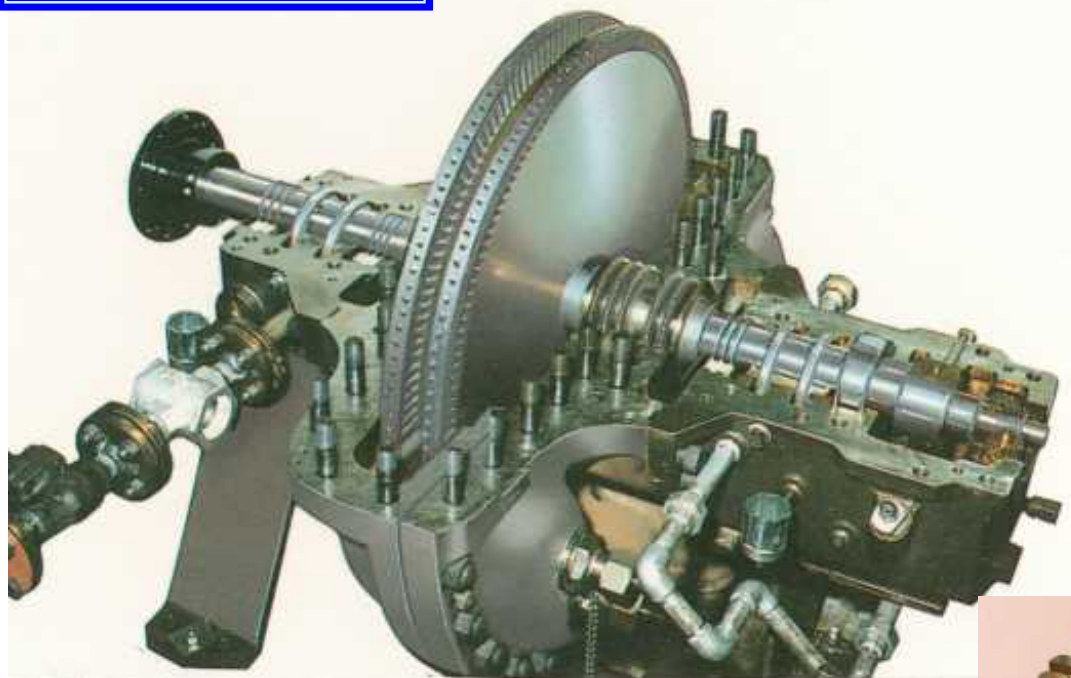


“The Current State and Measures Directed Toward Improvements in Reliability of Marine Exhaust Gas Economizer Systems in Japan” ICMES 2003, M. Umeda



## ④排熱回収のための要素(動力生成)

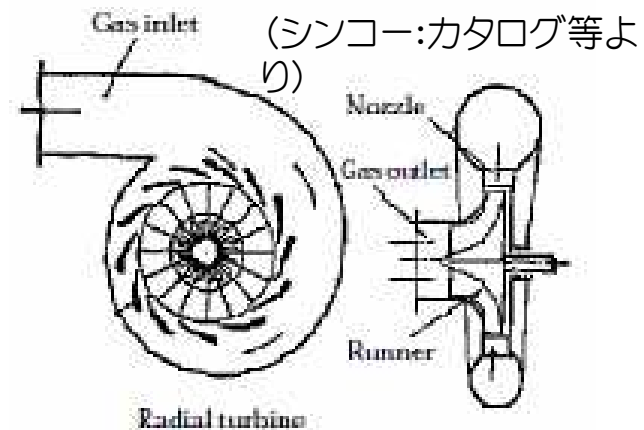
### 蒸気タービン



### 軸流タービン(Axial Turbine)

新日本造機 H-163 1,000kW 断面  
(出典:同社タービンのカタログ)

多段にしないと効率が悪い



動翼



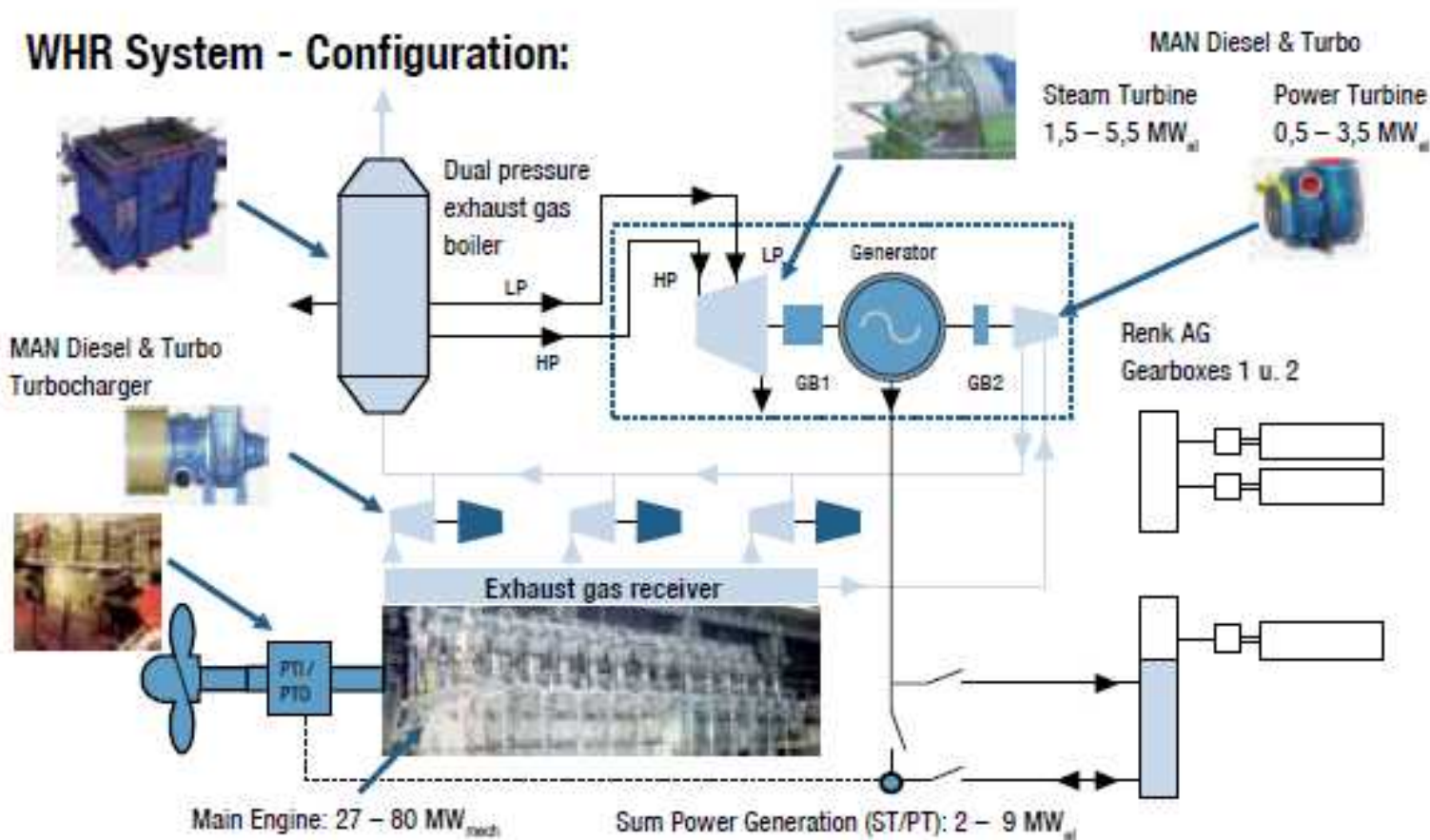
ノズル

### 半径流タービン(Radial Turbine)

単段でも高効率(高コスト)



## ④ 船用大型ディーゼルエンジン用排熱回収システム



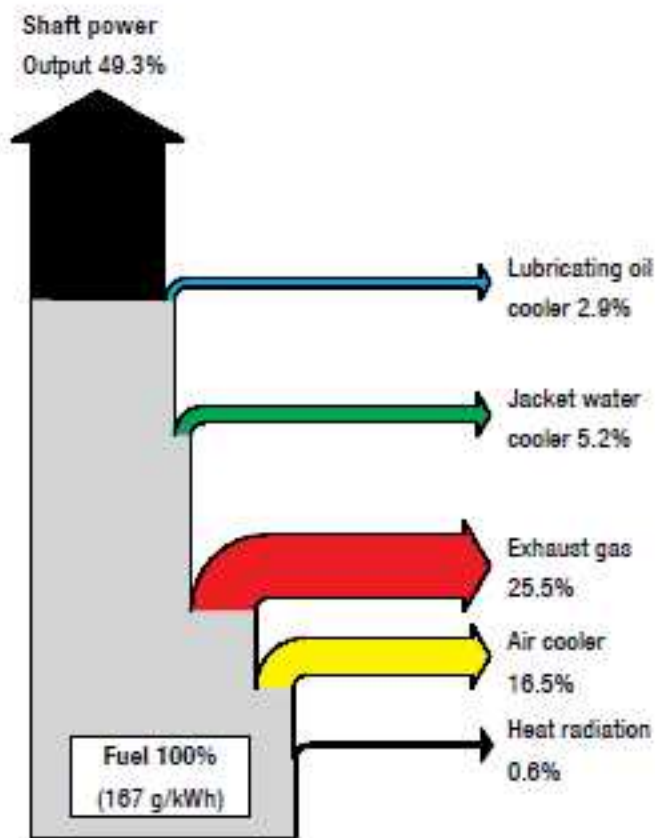
・排熱源:排ガス、シリンダジャケット冷却水や掃気空気冷却器

・動力生成:蒸気タービン、ガスタービン(パワータービン)

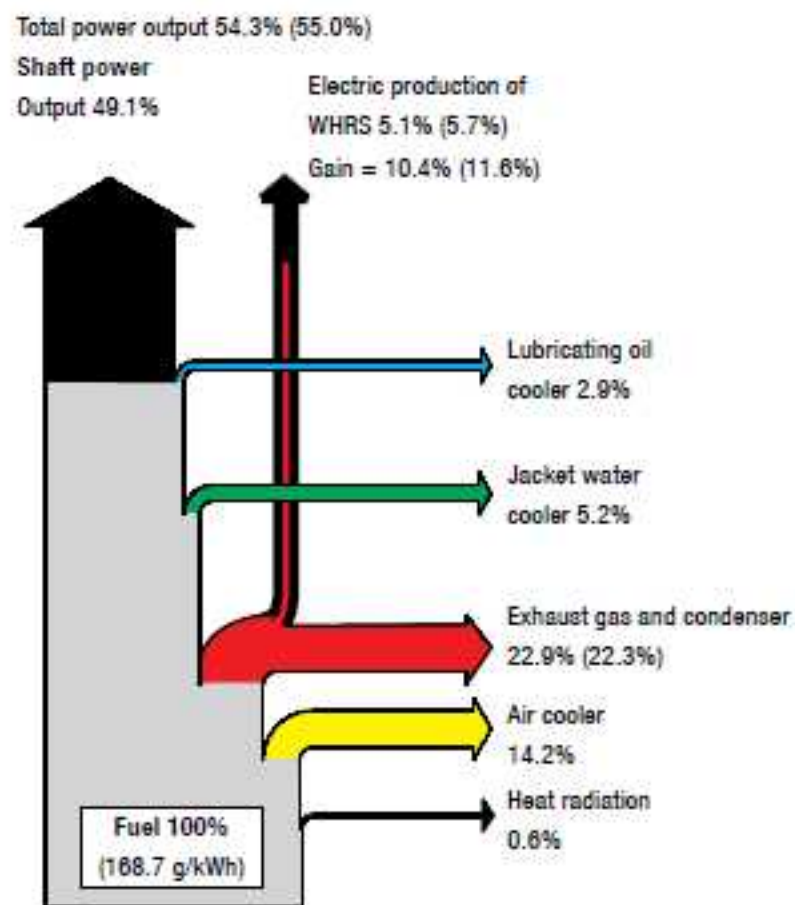
# ④ 船用大型ディーゼルエンジンを対象とした 排熱回収システムによる効率改善

12S90ME-C9.2 standard engine  
SMCR: 69,720 kW at 84 rpm  
ISO ambient reference conditions

12S90ME-C9.2 engine for WHRS  
SMCR: 69,720 kW at 84 rpm  
ISO ambient reference conditions  
WHRS: single pressure (Dual pressure)



排熱回収無し



排熱回収有り



## ④船舶ハイブリッドシステム

船舶の速度維持  
(エンジン回転数一定)



エンジンの負荷率変動



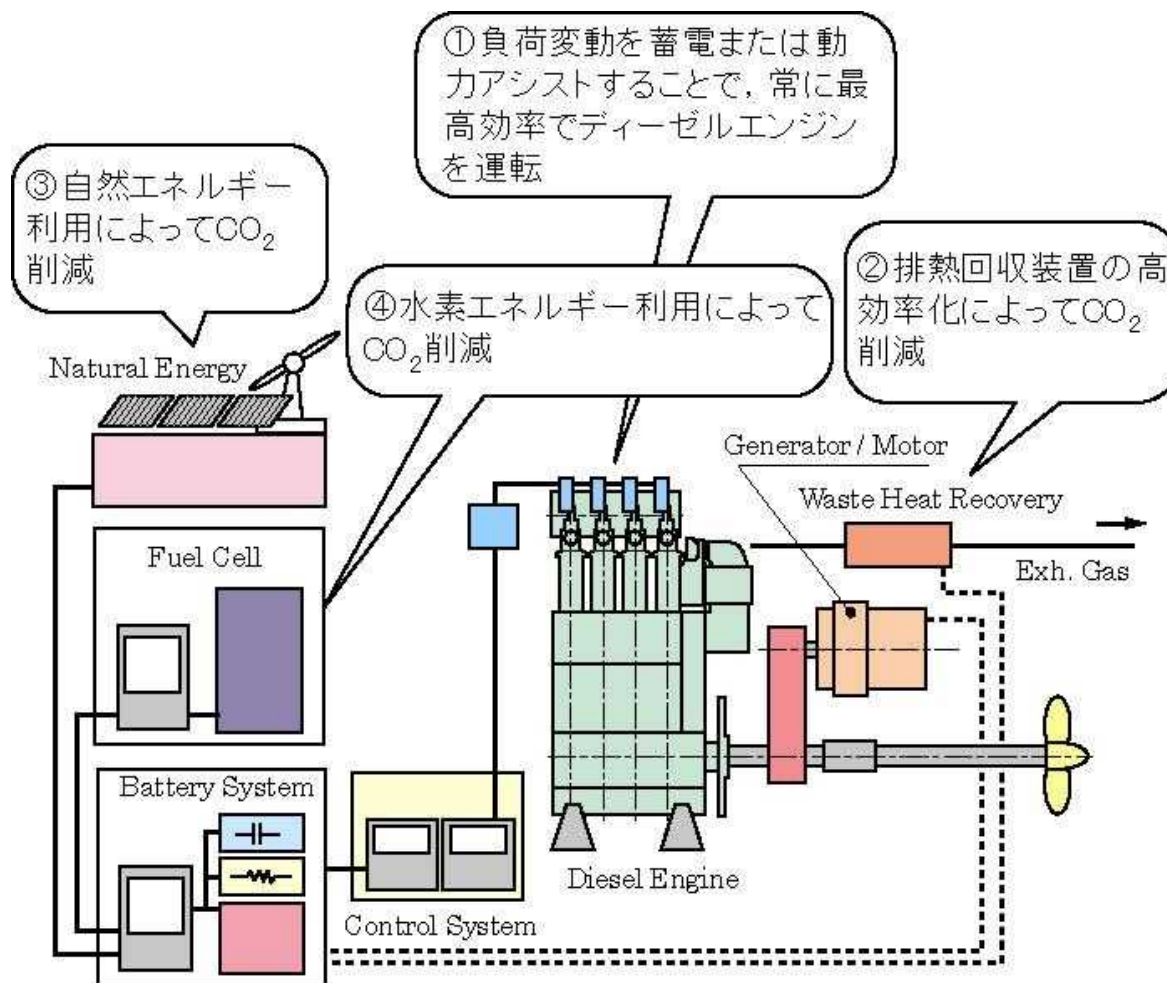
ハイブリッド化により最小燃料  
消費率の負荷率を維持

### 電気動力化

- 負荷変動の平滑化
- 排熱回収システム
- 推進アシスト技術
- 電気推進船

### ハイブリッド化

- 大容量蓄電デバイス
- 高効率排熱回収システム



船用ハイブリッドシステムの概念図



## ④ハイブリッドタグボート



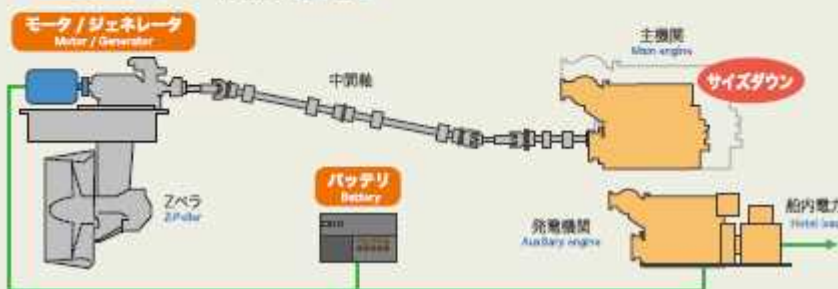
「翼」

マリン・エンジニアリング・オブ・ザ・イヤー2013

### ●従来機構 Conventional



### ●ハイブリッド機構 Hybrid



タグボートの特徴

大型船舶の離着岸を補助するために大出力のエンジン搭載  
 だけど、移動の時は大出力は不要→低負荷で使用  
 低負荷ではエンジンの効率が低下



ハイブリッド化の利点

航行時は電池による推進(エンジンは動かさない)  
 高出力が必要なときは主機関+電気





4. 船からのGHG排出を減らすには？  
②CO<sub>2</sub>回収、代替燃料



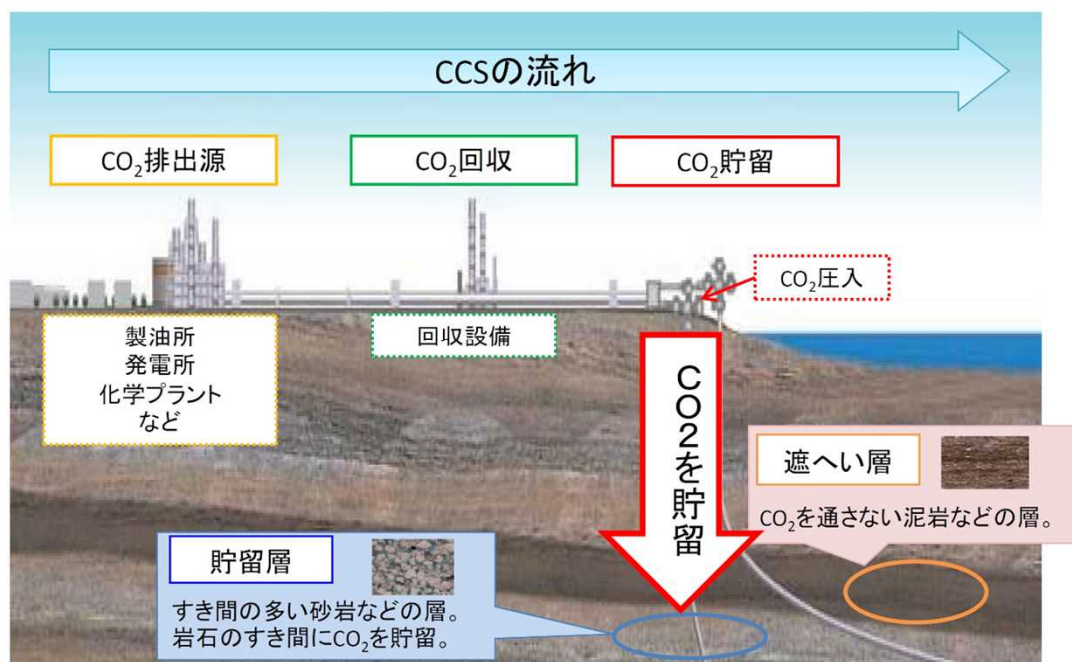
# 燃やしてもGHGを出さない燃料(1)

1. CO<sub>2</sub>を出さない燃料  
水素(H<sub>2</sub>)、アンモニア(NH<sub>3</sub>)
2. カーボンニュートラルな燃料  
バイオ燃料  
e-Fuel(水素とCO<sub>2</sub>から合成:メタン、メタノール等)

e-Fuelの原料のCO<sub>2</sub>は大気中から直接回収(直接空気回収、DAC:Direct Air Capture)、あるいは排ガス中から回収。回収、合成に必要なエネルギーは再生可能エネルギー



# CO<sub>2</sub>回収(1)



CCS: Carbon dioxide Capture and Storage (二酸化炭素回収・貯留)

CCUS: Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage

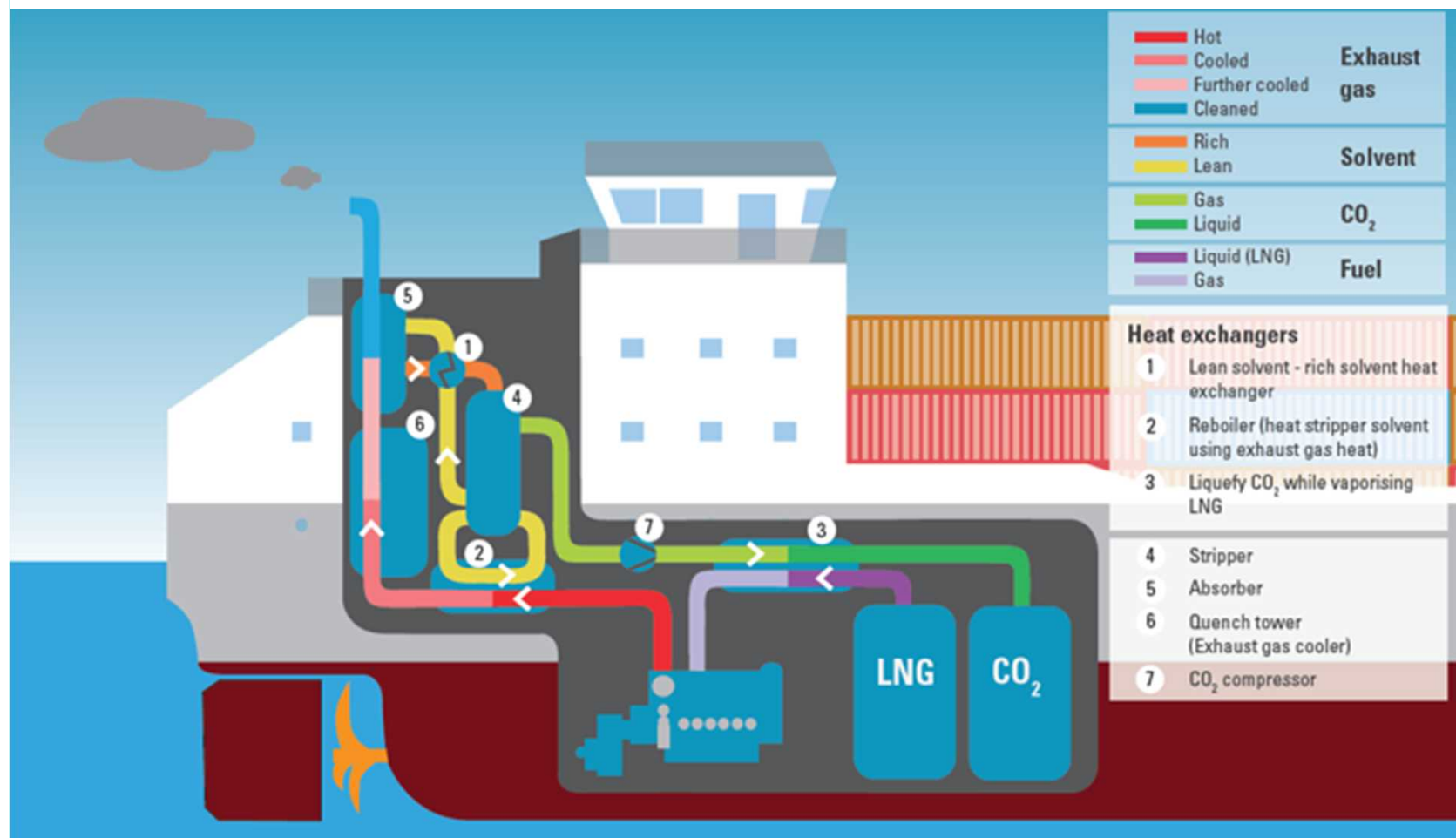
→回収したCO<sub>2</sub>を利用

右図: 船上回収テストプラント (CC-Ocean)、装置の回収能力は排出量の1000分の1程度になる。将来は同2~3割以上回収

左図) <https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/ccus.html>

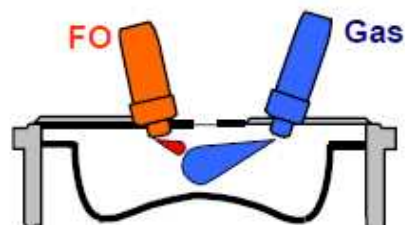
右図) <https://www.mhi.com/jp/news/20083101.html>

## CO<sub>2</sub>回収(2)



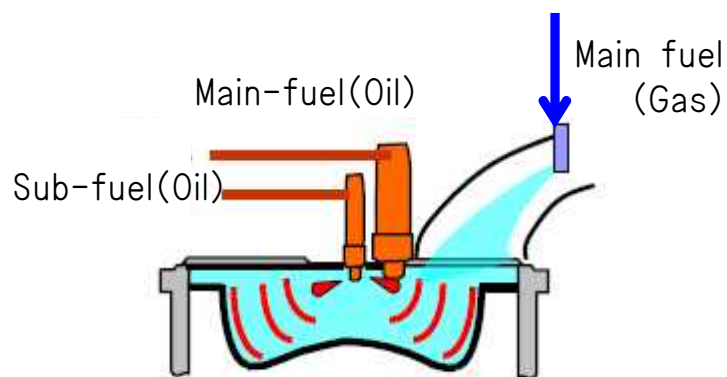
吸収剤で回収したCO<sub>2</sub>をLNGの冷熱を利用して冷却・液化  
貯蔵スペースを節約

# メタン利用技術 (LNG利用ガスエンジン)



Gas Injection: 大型2ストロークエンジン  
安定運転

×NOx3次規制には適合しない  
排ガス後処理が必要

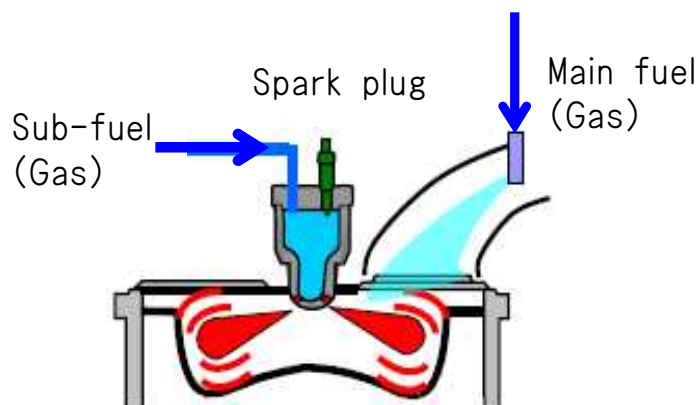


Lean-burn (Dual Fuel): 4ストロークエンジン  
NOx3次規制には適合

×負荷変動に弱い  
(不安定状態になったら  
液体燃料を使用)



ガス・液体2つの燃料タンクが必要  
×メタンスリップ



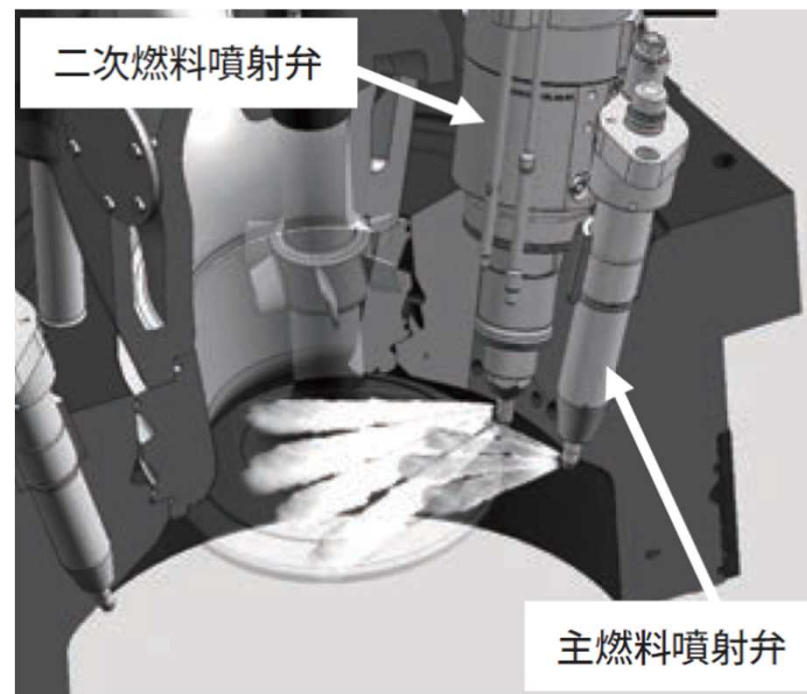
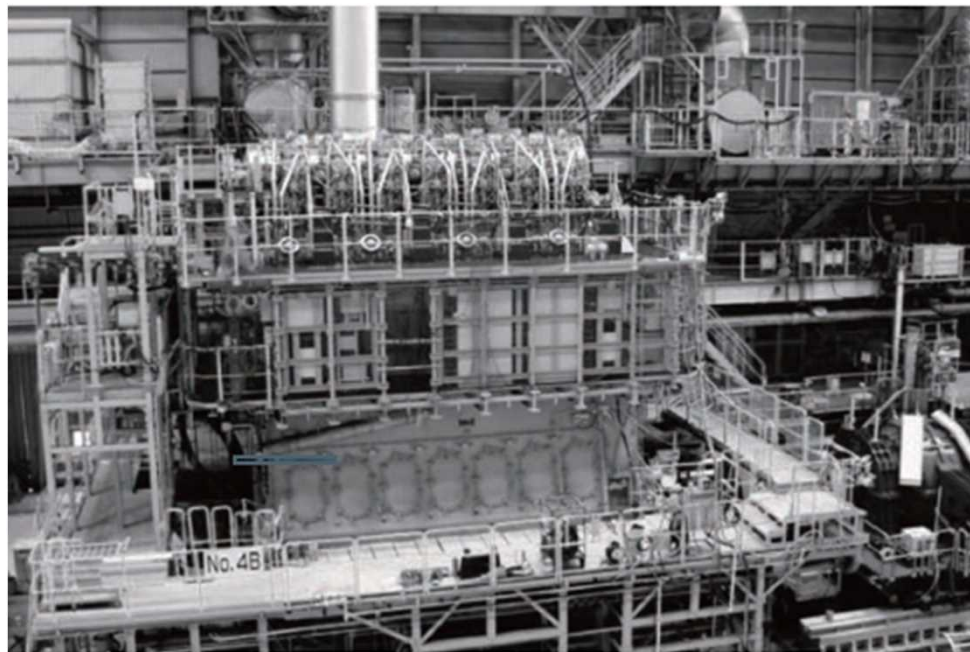
Lean-burn (ガス専焼): 4ストロークエンジン  
NOx3次規制には適合

×負荷変動に弱い  
×メタンスリップ

メタンの温暖化係数はCO<sub>2</sub>の25倍



## e-Fuel利用例(メタノール)



三井造船 メタノール焚きME-LGI 機関(マリンエンジニアリング・オブ・ザ・イヤー 2016)

<https://www.mes.co.jp/solution/pdf/218.pdf>

- メタノール, エタノール, LPG, DME (Dimethyl Ether)といった低引火点燃料 (LFL Fuel: Low Flash point Liquid Fuel) で運転可能(重油でも運転可能)
- 重油用とLFT燃料用のふたつの燃料噴射弁を備える
- 機関室内のメタノール配管に二重管構造を採用(メタノールは有害で引火性が高い)



## 代替燃料利用技術 (ディーゼルエンジン、ガスエンジン)

### 水素

最小点火エネルギーが小さい(着火しやすい)

→ノッキング

分子が小さい

→漏れ(ノズル等)

主として予混合燃焼(ガスエンジン)

### アンモニア

着火性が悪い

燃焼速度が遅い

→未燃アンモニア(予混合)

→火炎が延びる(直接噴射)

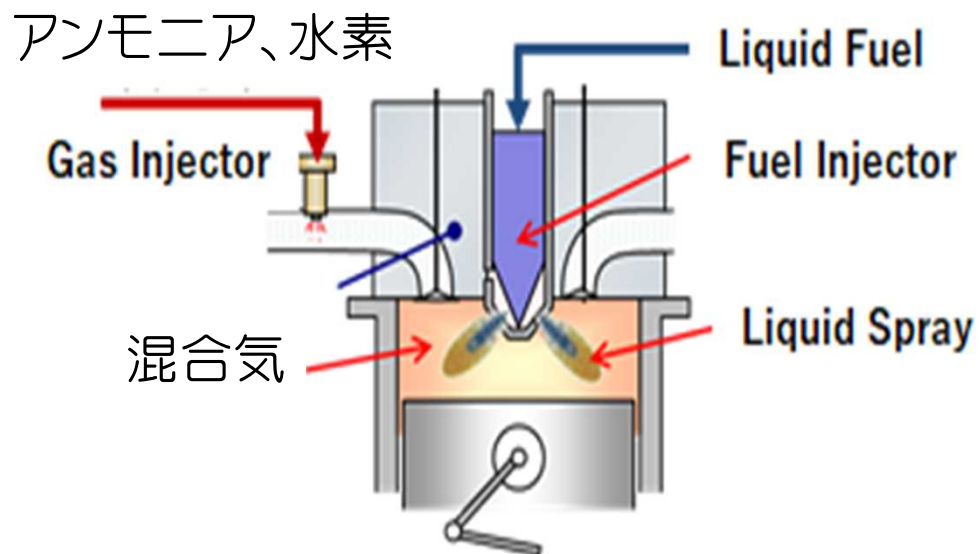
→壁面に火炎が到達

→熱損失大、壁面損傷

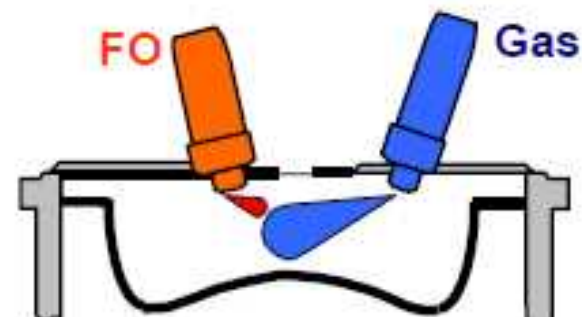
→NO<sub>x</sub>への懸念

(N<sub>2</sub>Oの温暖化係数はCO<sub>2</sub>の310倍)

毒性がある



混焼あるいは予混合イメージ

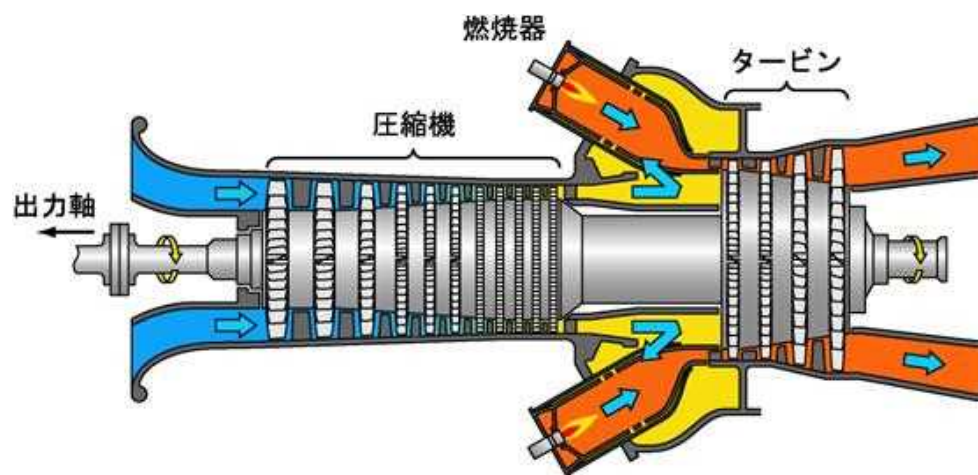


直噴イメージ(着火用の燃料はGHGフリー)

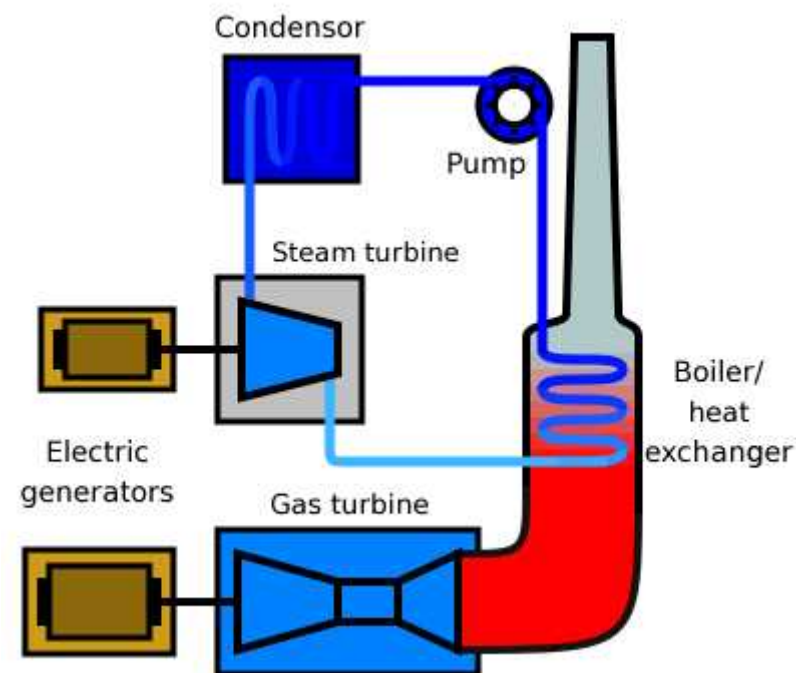
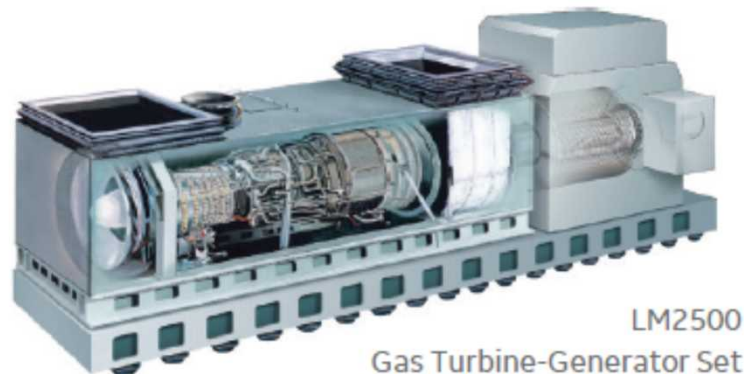


# 代替燃料利用技術(ガスタービン)

ガスタービン: ジェットエンジン。単体での効率は40%程度。連続燃焼のため、水素、アンモニア燃焼の実証済み



<http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/jetlab/gtsj/>



## 効率向上の手段

COGES (COmbined Gas turbine Electric and Steam): コンバインドサイクル発電の船舶版でターボ・エレクトリック方式の一種でガスタービンエンジンと蒸気タービンを組み合わせた複合推進方式

<https://www.geaviation.com/sites/default/files/datasheet-lm2500.pdf>



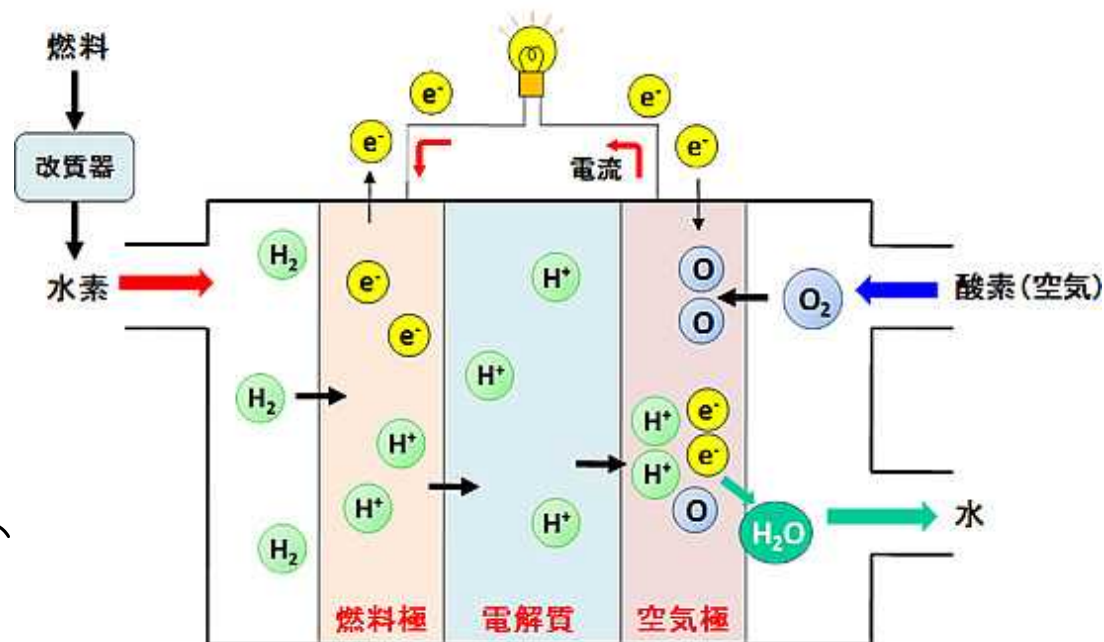
# 代替燃料利用技術(燃料電池)

## 燃料電池

- 化学エネルギーを電気エネルギーに変換
  - 高効率(PEFCで40%程度、SOFCなら45~65%程度まで)
  - NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>とは無縁
  - ✓ 負荷変動にどう対応する?
  - ✓ 塩の影響は?
  - ✓ 高価

PEFC(Polymer Electrolyte Fuel Cell/固体高分子形燃料電池)

- 低温動作可能(トヨタミライ、エネファーム)
- ✓ 水素が燃料(他の燃料を使うなら改質器が必要)



燃料電池概念図(電解質をH<sup>+</sup>が動く)

<http://www.ifs.tohoku.ac.jp/nanoint/jpn/about/index.html>

# 代替燃料利用技術(燃料電池)

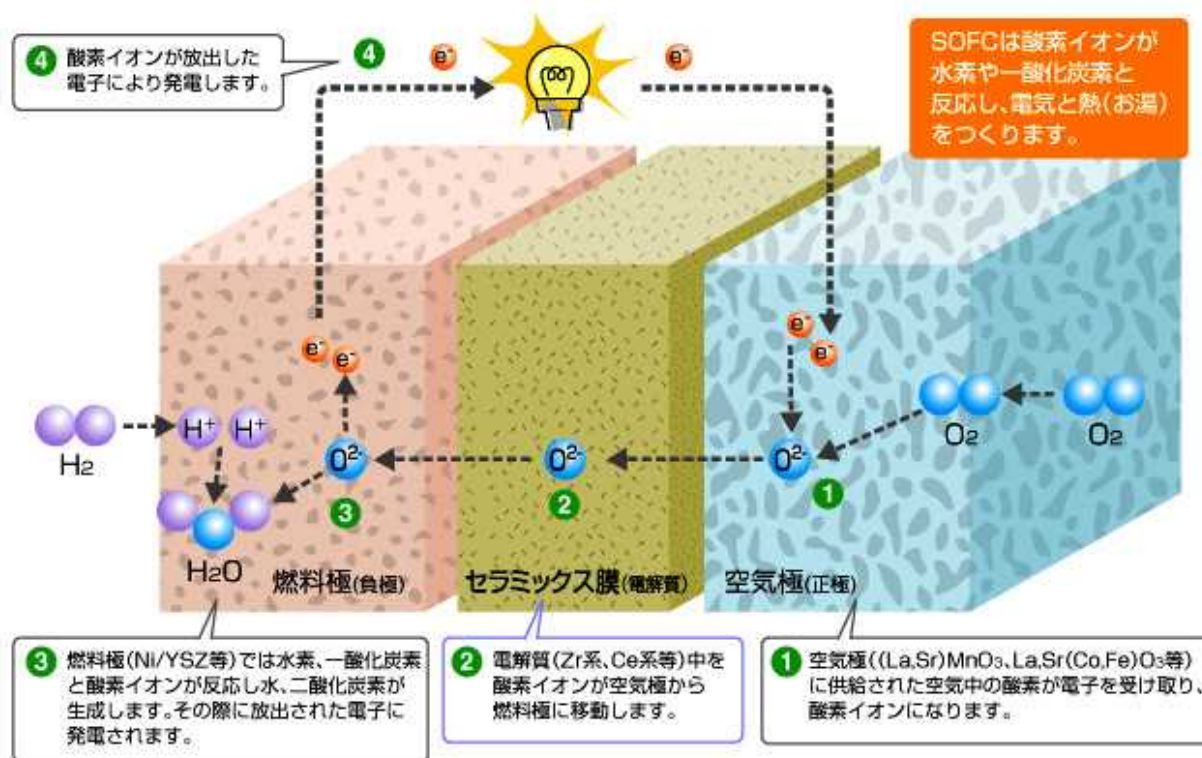
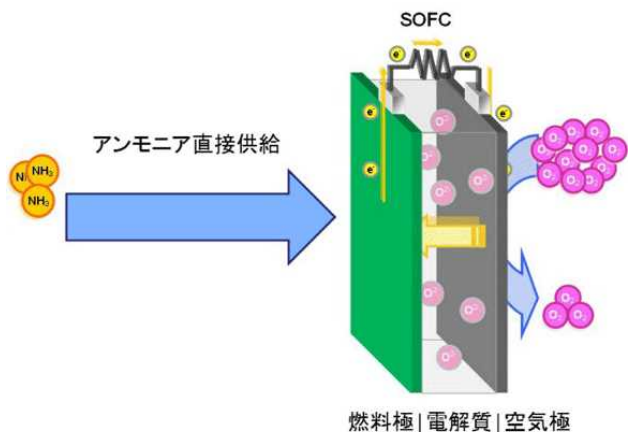
## SOFC(Solid Oxide Fuel Cell/固体酸化物形燃料電池)

### <特徴>

- セラミックスを使用(高価な触媒は不要)
- 高温で動作(HだけでなくCOも燃料に)
- 内部で改質可能(複数の燃料に対応可能、アンモニア直接利用も可能)
- $O^{2-}$ が移動

### <懸念点>

- ✓ 荒天下で割れないか?
- ✓ 起動に時間がかかる。



<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20170703-2/index.html>

<https://www.osakagas.co.jp/rd/fuelcell/sofc/sofc/>

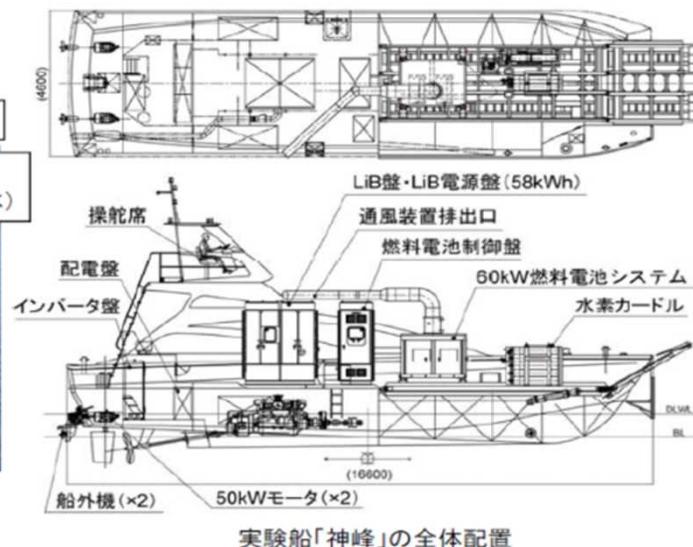


# 海技研の取り組み例

## 水素燃料電池船



船用燃料電池推進システムを搭載した  
実験船(平成29年度)



実験船「神峰」の全体配置

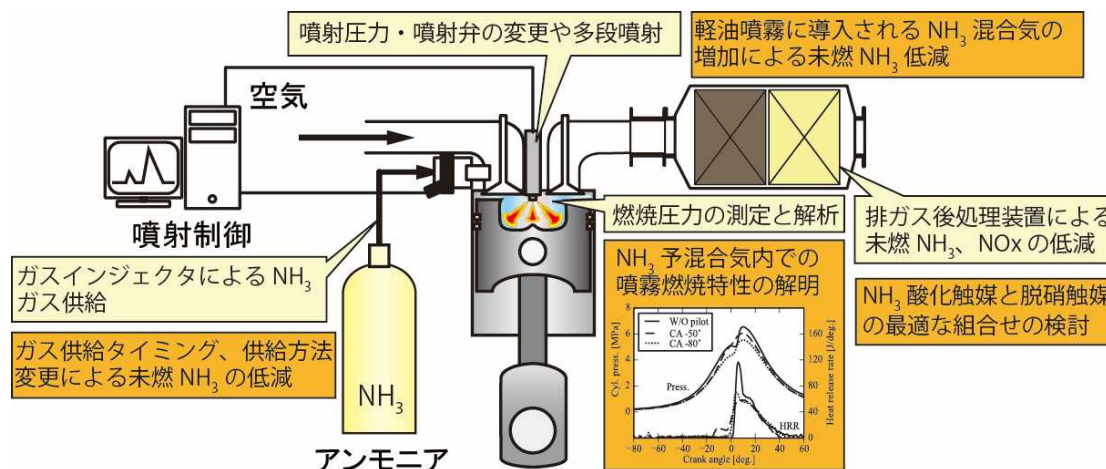


- 実船システムを構築
- 安全性や機能を検証  
(安全ガイドライン策定に貢献)

<https://www.nmri.go.jp/event/seminar/2018kouenkai-kenkyu2.pdf>

## アンモニア燃焼

- 混焼時の未燃アンモニア低減
- $N_2O$ 低減



<https://www.jst.go.jp/sip/dl/k04/end/team6-18.pdf>

[https://www.jstage.jst.go.jp/article/jcombsj/61/198/61\\_61.198\\_313/\\_pdf/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jcombsj/61/198/61_61.198_313/_pdf/-char/ja)



4. 船からのGHG排出を減らすには？  
③いくつかの試み



# GHG削減船の例(1)

ゼロエミッション船 (Energy Observer)



<https://wired.jp/2018/07/14/energy-observer/>

世界一周を実施中  
全長: 30.5m  
太陽電池パネル、風力で水素を生成  
燃料電池(トヨタ製?)で動力生成  
バッテリーも搭載

大型風力船 (Oceanbird); 開発中。



<https://ideasforgood.jp/2020/12/01/oceanbird/>

スウェーデンのプロジェクト  
全長: 200m  
高さ: 最大105m  
GHG排出90%以上削減



## GHG削減船の例(2)

### 電池推進らいちょう



東京海洋大学  
エンジン搭載のハイブリッド船もある(右  
上:「らいちょうN」)

<http://www2.kaiyodai.ac.jp/~takamasa/kaiyodai-ees-project/>

### 風力アシスト船(Wind Challenger);開発中



- 商船三井、大島造船のプロジェクト
- 伸縮可能な硬翼帆
- 2022年中に硬翼帆を1本実装した新造船の運航開始を目指す(航路によるが5~8%のGHG削減効果)
- 複数の帆の実装も視野に

<https://www.mol.co.jp/pr/2019/19074.html>



## まとめ

- 周囲を海に囲まれた日本において、船による物資の輸送は不可欠
- 船の規制は国際的なもの(IMO)
- GHG削減のためには、様々な方策が有効かつ必要
- GHG排出ゼロにするには、燃料転換が不可欠



業界全体での、あるいはこれまでつながりの無かった業界も含めた取り組みが必要

ご清聴ありがとうございました