



船舶から排出される GHG を削減するための技術に関する
調査研究報告書

平成 21 年 4 月

財団法人 日本船舶技術研究協会
株式会社 三菱総合研究所

目 次

1. 調査の概要	1
1-1 調査の目的.....	1
1-2 調査期間	1
1-3 調査項目	1
1-4 調査成果の概要	3
2. 特定4テーマに関する調査研究	22
2-1 船上CO ₂ 回収技術.....	22
2-2 代替燃料利用技術.....	34
2-2-1 LNG	34
2-2-2 バイオ燃料	39
2-2-3 水素	49
2-2-4 その他燃料（電力）	58
2-3 ハイブリッド化技術	64
2-4 運航最適化技術	76
3. 技術戦略マップの作成	85
3-1 検討の基本方針	85
3-1-1 GHG 排出量削減を巡る動向の概観	85
3-1-2 国際海運荷動量の推計.....	86
3-1-3 技術開発期間の設定	88
3-2 GHG 排出削減に係る技術体系の整理.....	92
3-2-1 技術体系化	92
3-2-2 適用技術の整理	94
3-3 個別技術分野の現況	98
3-3-1 主機関技術	98
3-3-2 実海域性能改良技術	101
3-3-3 総合的運航プロセス管理	106
3-4 導入ロードマップ案	108
3-4-1 主機・補機系技術.....	108
3-4-2 船体系・船型系技術	109
3-4-3 推進系技術	110
3-4-4 運航・保守系技術.....	110
4. 削減シナリオの検討.....	111
4-1 枠組の設定.....	111
4-1-1 世界の温室効果ガス排出量の長期的半減シナリオの検討.....	111
4-1-2 技術シナリオの検討	112
4-1-3 海運シナリオの検討	116

4-2 排出削減対策の検討	121
4-2-1 荷動き量及び船舶量の推計（積載効率向上）	121
4-2-2 技術開発による効率向上	121
4-2-3 バイオ燃料の導入.....	122
4-2-4 減速航行.....	123
4-2-5 総合的な温室効果ガス排出削減率の試算	123

図 表 一 覧

図 1-1	主機・補機系技術のロードマップ	100
図 1-2	船体・船型系技術のロードマップ	100
図 1-3	推進系技術のロードマップ	111
図 1-4	運航・保守系技術のロードマップ	111
図 1-5	A1B シナリオ・ベースの荷動き量と船舶量の推計結果	155
図 1-6	技術革新ハイケースの GHG 排出量推計結果 (対 2007 年比)	166
図 1-7	技術革新ハイケースの荷動き量当たり GHG 排出量(対 2007 年比)	166
図 1-8	技術革新ローケースの GHG 排出量推計結果 (対 2007 年比)	177
図 1-9	技術革新ローケースの荷動き量当たり GHG 排出量(対 2007 年比)	177
図 1-10	技術革新ハイケースの要因別 GHG 削減率 (対 2007 年比)	188
図 1-11	技術革新ローケースの要因別 GHG 削減率 (対 2007 年比)	188
図 1-12	新造船導入加速ケースの GHG 排出量推計結果 (対 2007 年比)	19
図 1-13	新造船導入加速ケースの荷動き量当たり GHG 排出量 (対 2007 年比)	19
図 2-1	燃焼排ガスと CO ₂ 分離回収/貯留技術	234
図 2-2	化学吸収法の概念図	24
図 2-3	CO ₂ 貯留の模式図 (Sleipner ガス田)	26
図 2-4	CO ₂ 貯留の模式図 (In salah ガス田)	27
図 2-5	Moving Ship 方式による海洋隔離のイメージ図	29
図 2-6	上記ボイラ+上記タービンによる推進システム	35
図 2-7	ハイブリッド推進システムの概要	336
図 2-8	天然ガスの形態別輸出入量	38
図 2-9	バイオエタノール生産量の推移	40
図 2-10	バイオディーゼル生産量の推移	40
図 2-11	バイオディーゼル実験の結果 (BioMerCanada)	41
図 2-12	バイオ燃料の温室効果ガス排出削減効果	44
図 2-13	バイオ燃料の用途 (BLUE シナリオ)	47
図 2-14	トヨタプリウスとそのメカニズム	65
図 2-15	非接触給電ハイブリッドバス	677
図 2-16	他分野における関連技術の見通し：高効率天然ガス火力発電..	68
図 2-17	他分野における関連技術の見通し：電力貯蔵	669
図 2-18	TG,TCS の組み合わせ例	70
図 2-19	船舶用低温排熱回収システム	771

図 2-20	各種原動機の熱効率.....	73
図 2-21	主機の将来ビジョン.....	74
図 2-22	Route Map for Low Energy, Low Emissions Ship	75
図 2-23	運航最適化技術の概念.....	76
図 2-24	ユニバーサル造船「Sea-Navi」の概要.....	80
図 3-1	トリマラン高速旅客船（ドルフィン・ウルサン号）.....	102
図 3-2	マイクロバブルによる船体抵抗低減装置のイメージ.....	103
図 3-3	ポッド推進器.....	103
図 3-4	CRP ポッド推進器.....	1044
図 3-5	帆を用いた帆走技術の概念.....	105
図 3-6	高揚力複合帆を装備したばら積み船のイメージ（左：縮帆時、右： 展帆時）.....	105
図 3-7	主機・補機系技術のロードマップ.....	108
図 3-8	船体・船型系技術のロードマップ.....	109
図 3-9	推進系技術のロードマップ.....	110
図 3-10	運航・保守系技術のロードマップ.....	110
図 4-1	検討のフロー.....	111
図 4-2	IEA BLUE シナリオ.....	112
図 4-3	BLUE シナリオにおける燃料構成.....	113
図 4-4	限界排出削減コストと削減量の関連.....	114
図 4-5	BLUE シナリオにみる海運の温室効果ガス排出量.....	1155
図 4-6	IMO スタディに基づく CO2 排出予測.....	116
図 4-8	IMO スタディのアルゴリズム.....	117
図 4-9	A1B シナリオ・ベースの荷動き量と船舶量の推計結果.....	125
図 4-10	技術革新ハイケースの GHG 排出量推計結果（対 2007 年比）	126
図 4-11	技術革新ハイケースの荷動き量当たり GHG 排出量（対 2007 年 比）.....	126
図 4-12	技術革新ローケースの GHG 排出量推計結果（対 2007 年比）	1277
図 4-13	技術革新ローケースの荷動き量当たり GHG 排出量（対 2007 年 比）.....	1277
図 4-14	技術革新ハイケースの要因別 GHG 削減率（対 2007 年比）.....	128
図 4-15	技術革新ローケースの要因別 GHG 削減率（対 2007 年比）.....	128
図 4-16	新造船導入加速ケースの GHG 排出量推計結果（対 2007 年比）	129
図 4-17	新造船導入加速ケースの荷動き量当たり GHG 排出量（対 2007 年比）.....	129

表 1-1	GHG 排出削減に係る技術体系化.....	5
表 1-2	GHG 排出削減に寄与する技術	6
表 1-3	IEA BLUE シナリオと IMO スタディの比較	12
表 2-1	地中隔離のコスト推定値.....	23
表 2-2	ガス燃料船舶リスト	35
表 2-3	代替技術の現在コストと目標コスト (IEA ETP)	46
表 2-4	燃料電池の種類	49
表 2-5	燃料電池自動車用 固体高分子形(PEFC)ロードマップ	50
表 2-6	大容量システム用固体酸化物形(SOFC)ロードマップ	50
表 2-7	ハイブリッドの方式の分類	64
表 2-8	ハイブリッド車の特徴	66
表 2-9	排熱利用に関する技術要素	68
表 2-10	動力回収率の比較表	72
表 3-1	IMO スタディにおける荷動き量の予測 (中位推計 2007=100)	86
表 3-2	GHG 排出削減に係る技術体系化.....	92
表 3-3	GHG 排出削減に寄与する技術	93
表 3-4	船種別の適用技術	94
表 3-5	当面着手すべき技術開発要素 (2020 年頃まで)	95
表 4-1	温室効果ガス排出削減へ向けた IPCC の要請	112
表 4-2	BLUE シナリオによる GHG 排出削減量 (単位 : Gt-CO ₂) .	113
表 4-3	IMO スタディにおける技術革新による効率改善率	118
表 4-4	IMO スタディにおける減速航行率	118
表 4-5	IEA BLUE シナリオと IMO スタディの比較	120
表 4-6	新造船の効率向上とフリート平均の効率向上の関係	121

1. 調査の概要

1-1 調査の目的

IPCC による第4次報告を受けて、各国政府、民間レベルでの取組が本格化する中、船舶起源の温室効果ガス(GHG)削減対策についても、その早急な実施が求められている。

国際航海に従事している船舶が排出する GHG に関しては、国連気候変動枠組条約(UNFCCC)及びその京都議定書の下では、国別の GHG 排出には算入されず、IMO が包括的に検討することとなっているが、それを担保するための技術開発については、造船先進国である我が国が、先導的に実施する必要がある。

本調査では、財団法人日本船舶技術研究協会殿が実施する排出削減技術開発計画の公募について支援するとともに、技術開発上の重要4テーマに関する詳細調査、造船分野における GHG 対策技術に関する技術戦略マップの作成、外航海運における GHG 削減シナリオ検討を行い、今後の我が国及び世界の船舶起源の GHG 削減に資することを目的とする。

1-2 調査期間

平成20年7月1日～平成21年4月10日

1-3 調査項目

下記の項目について検討を行った。

(1) 特定4テーマに関する調査研究

1) 船上CO2回収技術

CO2回収、固定化技術の現状及び今後の研究開発動向の調査を行い、船用転用の可能性の検討(課題、問題点等の明確化)を実施した。

2) 代替燃料利用技術

GHG削減に貢献する可能性のある代替燃料全般(LNG、バイオ燃料、水素等)について、現状、船用利用の課題、普及した場合の効果、コスト等についてとりまとめた。

3) ハイブリッド化技術

GHG削減に貢献する可能性のあるハイブリッド化技術(2種類以上の動力源を状況に応じて単独又は複数と変化させて推進力等に利用する技術全般)につ

いて、他分野での普及状況、今後の発展の見込みについて整理した。

船用での利用に関しては、排熱回収、大容量蓄電池、燃料電池等の技術に関し、現状、課題、普及した場合の効果、コスト等についてとりまとめた。

4) 運航最適化技術

GHG 削減に貢献する可能性のある運航最適化技術全般について、現状、課題、普及した場合の効果、コスト等についてとりまとめた。

(2) 技術戦略マップの作成

関係者へのヒアリング（安全・環境技術委員会での検討を含む）等を踏まえて、GHG 排出削減分野の技術マップ案（中長期開発テーマが中心）を作成した。また、個別技術毎の要素技術開発時期等を示した導入ロードマップ案を作成した。

(3) 削減シナリオの検討及び報告書作成

以上の2章から5章の調査結果、安全・環境技術研究会等関係委員会の検討結果を踏まえて、中長期的な観点から GHG 排出削減のシナリオを作成した。以上を、報告書にとりまとめた。

1-4 調査成果の概要

(1) 特定4テーマに関する調査研究

各テーマに対する今後の導入可能性について以下のように整理した。

1) 船上CO₂回収技術

炭素の回収・分離・貯留は技術的にほぼ確立されており、船上搭載に関してはコスト増、貯留スペースの不足等の課題はあるが、現在でも技術的に不可能ということはない¹⁾。しかしながら、大型船舶の場合でも機関出力は大型火力発電所の1/10程度以下の規模であり、かつ移動排出源であるため、スケールメリットの点で大規模固定型排出源の優位は揺るがない。さらに、海運燃料の脱硫等の処理の必要性、装置搭載時の安定性検討に必要なリードタイムを考えると、IMOによる低硫黄燃料の利用が義務付けられる2020年頃からは、比較的構造面での不安が小さいVLCCより実験的に配備を検討することが想定される。

陸上排出源から排出されたCO₂を所定の最終処分地点まで運搬する「CO₂タンカー」はニーズが早期に顕在化する可能性がある。

2) 代替燃料利用技術

① LNG燃料

LNG燃料による推進方式自体は、現在実用化されている技術の延長線上にあるため、技術的なハードルは高くないが、普及はLNG供給インフラの整備状況に大きく依存すると考えられる。そのため、普及の初期段階においてはLNGインフラが整備された国・地域における内航船、近距離外航船等の中小型船において導入され、その後長距離外航船への適用が広がる、というシナリオが妥当である。IEAの予測によれば今後、欧州・米国ではLNGでの天然ガス輸入が急速に増加するとされており、LNGインフラの整備もそれに伴って進展すると考えられる。

② バイオ燃料

現状のバイオ燃料には食料生産との競合等多くの問題があるが、今後20-40年で第2世代バイオ燃料の開発・普及が進んだ場合、その間に電気自動車、プラグインハイブリッド等の開発も進むと考えられることから、結果的にバイオ燃料は海運及び航空燃料として消費される、というシナリオが考えられる。

第2世代バイオ燃料も生化学的手法（エタノール）が先に実現する場合と熱化学的手法（バイオディーゼル等）が先に実現する場合とでは状況が変化する

¹⁾ 識者ヒアリング。

が、2030年以降、ポスト・バイオ燃料に自動車に移行し、かつ2020年以降、航空・海運部門での燃料コストの増加（海運の場合にはA重油並みの品質の義務付け）により限界排出削減コストが高くなると、2050年には航空・海運分野においてバイオディーゼルが一定の地位を占める可能性が想定される。

③ 水素燃料

数MW程度の出力を必要とする外航船の場合、中容量定置型ハイブリッドシステム（SOFC+マイクロガスタービン）の導入が考えられるが、2015年頃の目標から見ると設置面積、燃料タンクのスペースの確保等の課題がある。また、水素供給についても現在の天然ガス、LPGからの改質では本質的な改善とならないため再生可能エネルギーが利用できるよう開発しなければならない。

この他、コストや安全性の点で解決すべき課題、開発すべき要素技術は多く、また普及するかどうかは環境規制等の状況に依存している。2020年以降に環境規制が厳しい地域での短距離航路や資金負担力のある大型外航船等で一部普及することが考えられるものの、本格的に実用化が可能となるのは2030年以降になる見込みである。

3) ハイブリッド化技術

エンジンから排出される熱エネルギーの有効活用を出発点として、電気として回収し推進補助として利用することで、全体としての熱効率の向上を目指す多種多様なシステムの開発が進められており、当面こうしたディーゼル排熱発電ハイブリッドの導入が進む。

長期的には、外航船動力も化石燃料依存の内燃機関を廃し、完全電気推進を目指すことになるであろうが、そこに向かう過程においては、ディーゼルエンジンと他の動力源（燃料電池など）のハイブリッド化、さらに電気推進系の出力割合を高めることと合成燃料や燃料電池などの代替機関の活用へと、段階的な動力源の転換を進めることになる。

4) 運航最適化技術

運航最適化技術はソフト面からのGHG削減手段であり、単船単位では、モニタリングや最適化を実現するシステム、通信手段が実現されれば、コスト面からも導入は比較的容易である。ただし、より大きな効果の実現のためには、①多くの船舶からリアルタイムの運航情報を収集し、最適化を実現する、②個別船舶の個別詳細な情報（実海域性能・積荷やバラストの状況）に応じ、より詳細な外部情報（気象・海象情報）を高度に活用する、③上記を支える通信技術や予報技術、シミュレーション技術を高度化する、④運航最適化により実現さ

れる GHG 削減量を定量化する手法を確立する、等の課題解決が必要である。

(2) 技術戦略マップの作成

1) 技術体系化

GHG 排出削減に寄与する技術を「主機・補機系技術（動力、エネルギー系）」「船体・船型系技術」「推進系技術」「運航・保守系技術」の4つの技術分野に分類した（表 1-1）。

表 1-1 GHG 排出削減に係る技術体系化

	技術分野	概要
主機・補機系	回収エネルギーの利用	排熱エネルギーを回収し推進利用する。
	代替燃料	LNG と石油燃料のハイブリッドディーゼル、バイオ燃料ディーゼル等による GHG 削減。
	燃料電池	ディーゼルと燃料電池のハイブリッド等による GHG 削減。
	ガスタービン	ガスタービンと燃料電池のハイブリッド等による GHG 削減。
	バッテリー走行	陸上 CCS、再生エネルギー利用によるバッテリー走行。
船体・船型系	大型化	船体を大型化することにより効率を改善する。
	船型形状・船首形状改良	新造船ではカタマランやトリマランのような船体形状の適用により、従来船では船首形状の改良により抵抗軽減を図る。
	軽量化	ノンバラストあるいはバラスト低減、部材の軽量化により効率化を図る。
	舵・船尾改良	舵や船尾形状の改良により抵抗軽減を図る。
	粘性抵抗低減	船底に生成した空気膜や、摩擦低減効果のある塗料により摩擦抵抗の軽減を図る。
	風圧抵抗低減	居住区の外壁に抵抗低減用の板を装着することによる風圧抵抗低減。
	船内省電力化	照明機器、航海機器、荷役機器等の省電力化、送電ロス対策等により省エネを図る。
推進系	プロペラ改良	CRP、ポッド推進、遊転プロペラ等、プロペラ自体の効率を改善する。
	省エネ付加物	プロペラの前後に省エネデバイスを装着することにより効率を改善する。
	外乱エネルギー利用	太陽光、波浪や風など外乱を利用した推進力を補助的に利用することにより、主機関の省エネを図る。
運航・保守系	運航面の高度化	ウェザールーチン、オートパイロットや配船計画等の運航管理に係る技術の高度化により効率改善を図る。陸上輸送を含めた運航最適化も必要である。
	運航支援の高度化	シームレス物流や、自動離着岸技術など荷役支援や修繕ドックの機能向上等メンテナンスに係る技術の高度化により効率改善を図る。停泊時の陸電利用や ICT 活用による通関、荷物追跡等も運航支援の高度化に位置づけられる。

2) 適用技術の整理

それぞれの技術分野ごとに、GHG 排出削減に寄与する主な適用技術を整理した。

表 1-2 GHG 排出削減に寄与する技術

	技術分野	適用技術・インフラ
主機・補機系	回収エネルギーの利用	熱交換器効率向上技術，蒸気製造技術向上技術，造水装置技術，蒸気タービン発電機，パワータービン，インバータ効率向上，リチウムイオン電池，キャパシタ改良
	代替燃料	天然ガス輸送・貯蔵技術開発，天然ガスハイドレート化，蒸気タービン改良エンジン，デュアルフューエル・ディーゼル，LNG・CNG 搭載技術，バイオディーゼル
	燃料電池	ディーゼル・燃料電池ハイブリッド，ガスタービン・燃料電池ハイブリッド，燃料電池船，船用燃料電池スタック開発，船用水素貯蔵技術，船用水素輸送技術，洋上水素供給
	ガスタービン	ガスタービンエンジン
	バッテリー走行	インバータ効率向上，リチウムイオン電池，電気二重層キャパシタ，ハイブリッドキャパシタ，超伝導フライホイール，次世代電池（リチウム金属電池，リチウム硫黄電池），洋上発電・給電プラットフォーム技術，超伝導モータ，太陽光発電
船体・船型系	大型化	大型船建造，ドック大型化，ハブ港ネットワーク
	船型形状・船首形状改良	双胴船（カタマラン），三胴船（トリマラン），単胴船船首形状改良（球状バルブ等）
	軽量化	高張力鋼利用，アルミ部材適用，構造部材低減，FRP，CFRP，バラスト低減・ノンバラスト
	舵・船尾改良	形状最適化，フィン装着
	粘性抵抗低減	マイクロバブル，空気潤滑法，空気膜法，摩擦低減塗料
	風圧抵抗低減	居住区外壁への板装着
	船内省電力化	低電力消費型照明機器，低電力消費型航海計器，荷役機器の省エネ化，送電ロス対策
推進系	プロペラ改良	CRP，遊転プロペラ，ポッド推進，二軸化
	省エネ付加物	プロペラ前後への省エネデバイス装着
	外乱エネルギー利用	波浪推進，帆走技術（凧），帆走技術（高揚力帆）
運航・保守系	運航面の高度化	ウェザールーチン，オートパイロット改良，陸電利用，配船計画の高度化，陸上輸送を含めた運航最適化
	運航支援の高度化	シームレス物流のための接点機能改善，自動着岸技術，港湾荷役機器改善，ICT を利用した通関・荷物追跡，将来船への機能対応，メンテナンス最適化，修繕ドック機能向上

3) 技術開発ロードマップの作成

技術シナリオを構築するために、2050年までを3つの期間に区切り、それぞれの期間における投入技術についてその概略を検討した。併せて、上記のような前提のもとづき、それぞれの期間で実現が期待されるトン・マイルベースでのGHG削減率を想定した。

【Tier 1 (～2020年) : 従来船への新技術追加・改修により GHG 排出量をトン・マイルベース 30%削減】

○外航海運を取り巻く状況変化 (仮説)

- ・ IMO の SO_x、NO_x 規制強化等により、重油から船用軽油への転換が進む。
- ・ 原油コストが再度上昇を始め、運航の経済性に対する要求が高まる。減速航行が速達性の求められない一部航路で定常的に実施されるようになる。
- ・ 原油に対する LNG 価格が相対的に低下し、外航海運でも LNG 船以外にタンカー等の船内空間に余裕のある船舶を中心に LNG 利用が進む。
- ・ GHG 削減に対する社会的関心や、環境税などの導入開始の中、GHG 削減に対する要求が高まり、一部の先進的な船社では GHG 排出削減に対する積極的な取組が開始される。

○外航海運において投入が予想される主な技術

コスト削減、環境対策に向けて、既存ディーゼル船をベースとした効率改善(主機関、船体)、船用軽油への対応等が進む。併せて減速航行を含む運航計画最適化が積極的に導入される。

○技術開発による GHG 削減量

GHG 削減に関しては、国際海事機関 (IMO) の試算² (以降、IMO スタディ) による、従来船への技術改良適用による 2020 年の改善目標 20-40% (High シナリオ) から最大 30%程度の削減 (新造船・改修船) が図られると考えられる。

【Tier 2 (～2040年) : 新造船でトン・マイルベース 60%削減】

○外航海運を取り巻く状況変化 (仮説)

- ・ 原油コストは現状の 2 倍程度に達し、運航経済性に対する要求が更に高まる。
- ・ 外航海運部門についても、GHG 削減の目標が設定され、高排出船には炭素プレミアム³が課せられる。

²国際海事機関 (IMO) の外航海運からの温室効果ガス (GHG) 排出量についての推計作業
([Updated Study on Greenhouse Gas Emissions from Ships])

³過度の GHG 排出に伴う懲罰的な課金

- このような状況の中、コンテナ船のようなコスト負担力の高い船舶においては、高効率、ハイテクな省エネ・環境対応船舶の導入が進められる。
- コスト負担力の高くない、一般のバルク船等では、減速航行導入が更に加速する他、バイオ燃料の供給状況、供給コストによっては、その利用が急激に進む。
- 陸上輸送等も加えた輸送プロセス全般にわたる船隊単位での総合的な運航／輸送管理が実施され、航行速度、利用船舶の最適化が図られる。

○外航海運において投入が予想される主な技術

コンテナ船等においては、ディーゼル・蓄電池ハイブリッド、ディーゼル・燃料電池ハイブリッドなどの新世代の主機関技術が投入される。バルク船では、バイオ燃料への対応が進められるとともに、総合的な運航／輸送管理システムの導入による、輸送効率改善が進められる。

○技術開発による GHG 削減量

これらの技術の導入により、新造船では運航管理の最適化を含めて、トン・マイルベースで 60%の GHG 削減が図られる。

【Tier 3（～2050年）：新造船でトン・マイルベース 80%削減】

○外航海運を取り巻く状況変化（仮説）

- 原油コストは現状の 3～4 倍程度に達し、非原油由来の燃料への転換が急激に進む。
- 外航海運部門の GHG 削減について、新造船に関してはゼロ・エミッションもしくはそれに近い目標が設定され、既存船についても、高排出船には高額な炭素プレミアムが課せられる。
- このような状況の中、燃料電池船、全電気推進船、原子力船などのゼロ・エミッション船の導入が進められる。
- バルク船では、超大型・低速走行船などの新コンセプト船の導入が進む。
- 運航／輸送管理には陸上における生産／供給工程等も融合され、船社の枠を越えた総合的な運航／輸送管理が実施される。

○外航海運において投入が予想される主な技術

原油価格高騰、環境制約の中、新造船については基本的にゼロ・エミッション船となる。そのために、燃料電池船、全電気推進船、原子力船等が投入される。これらの船舶に対してカーボンフリーなエネルギー供給を行うために、再生エネルギーや陸上の CCS 発電の電気エネルギー、水素エネルギー供給技術が

導入される。また、外航海運におけるゼロ・エミッション船導入を実現するため、航路上での洋上発電・給電、水素供給等のインフラ開発が行われる。

一般の船舶についてはバイオ燃料対応を進めることにより GHG 削減に対応する。

船社の枠を越えた総合的な運航／輸送管理システムが構築され、航行速度、利用船舶の最適化が行われる。

○技術開発による GHG 削減量

一部ゼロ・エミッション化の難しい船種・地域が残ることを考慮し、新造船については平均 80%程度の GHG 削減が実現される（IMO スタディによる将来の海運荷動量（IPCC A1B シナリオ⁴、中位推計）によれば、全船種計として現在の 4.02 倍の荷動量が想定されている）。この前提に基づけば、GHG 排出削減率 80%で概ね現状維持が達成される。

上記 IMO スタディでは、高位ケースにおいても 66%程度の原単位削減、中位ケースでは 40%削減を想定するにとどまっており、本ロードマップの削減率は、IMO シナリオでの技術革新と減速航行による効率改善より、10 から 20 年程度の前倒しを行うことを意味する。

以上をベースに、主要技術分野における技術開発ロードマップを、次ページ以降のように整理した。

⁴ IPCC のシナリオ A1 は高成長型社会を想定し、新技術や高効率化技術が急速に導入される。また世界人口は 21 世紀半ばにピークに達した後減少する未来を想定する。IPCC には他に A2 シナリオ（多元化社会）、B1 シナリオ（持続可能型社会）、B2 シナリオ（地域共存型社会）の 4 シナリオに大別される。A1B は各エネルギー源のバランスを重視する。A1 シナリオには他に A1F1（化石燃料主体）、A1T（再生可能エネルギー発展）の 3 つがある。IPCC 第 4 次評価報告書では、A1B シナリオの元で 2000 年～2099 年までの温度上昇は 2.8℃（1.7～4.4℃）と想定されている。

① 主機・補機系技術

当面、既存機関の排熱回収技術などによる省エネルギー化、低燃費化が進む。LNG（デュアルフューエルまたは専燃）、DME、GTLなどの代替燃料は、石油需給の逼迫度等によっては導入が進む。

2020～2030年頃からは、燃料電池技術の成熟を待って、ディーゼル・燃料電池ハイブリッドが導入され、バイオディーゼルの導入も進む。

2050年頃には、自然エネルギー起源の水素・エタノール燃料電池やCCS陸上発電・自然エネルギー利用の完全バッテリー走行の導入が開始される。

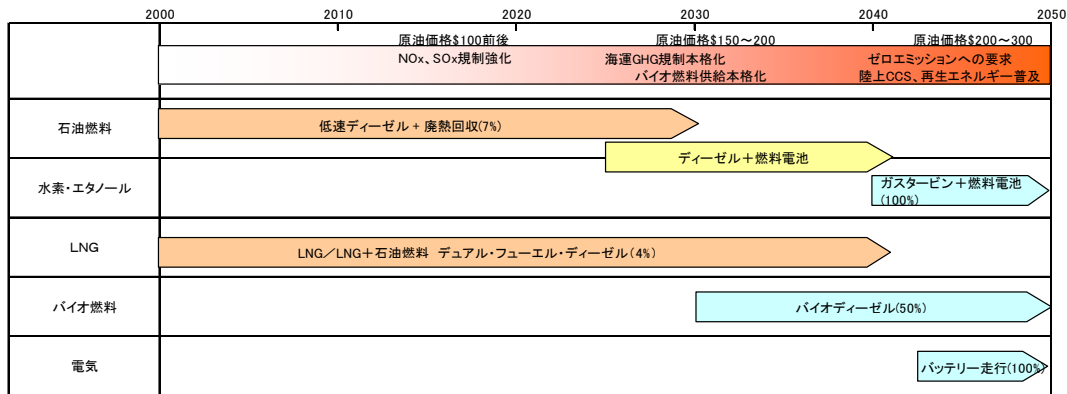


図 1-1 主機・補機系技術のロードマップ

② 船体系・船型系技術

全体の大きな流れとして、超大型・低速走行船などの新コンセプト船の導入と、軽量材料の導入等が進む。造波抵抗低減技術については、単胴船の首尾形状最適化、双胴船、三胴船などの高速航行を目的とした船型の外航船での実用化、将来技術としては潜水輸送船技術研究の着手が期待される。

粘性抵抗低減については、塗料技術、空気膜法などの性能向上、コストダウンが期待され、船内省エネ機器の導入も加速する。

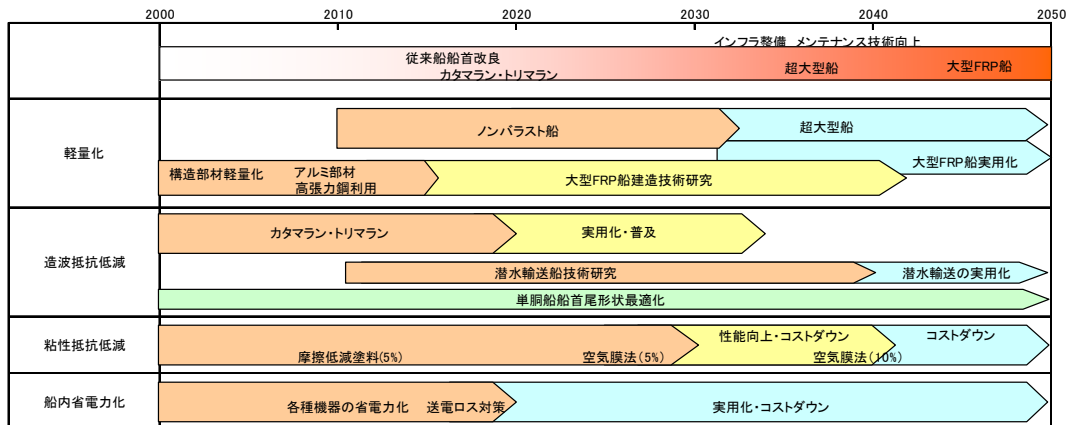


図 1-2 船体・船型系技術のロードマップ

③ 推進系技術

全体の大きな流れとして、当面は既存船等のプロペラ効率改善技術が主流であるが、ポッド推進技術の大型外航船への適用が中心的な技術となる。風力や波浪等の外乱エネルギーによる推進補助にも期待が持たれる。

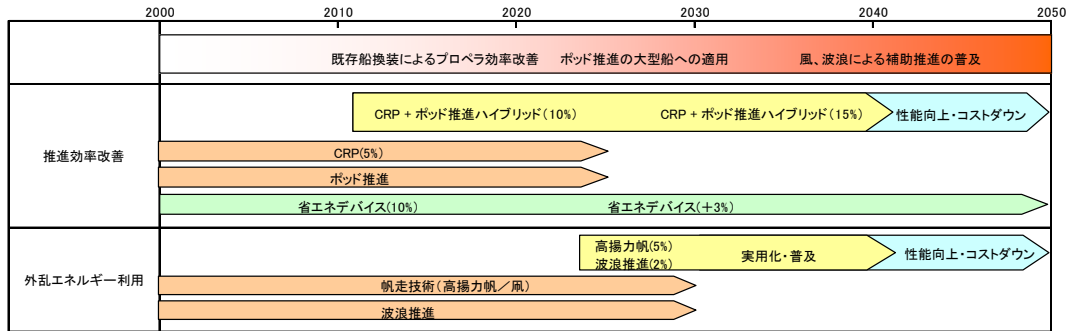


図 1-3 推進系技術のロードマップ

④ 運航・保守系技術

この分野は、現在もすでに実用化に向けた技術開発が進められており、単船の航路・運航最適化から、配船や貨物（コンテナ）の最適化などの運航会社における総合的運航管理、そして他の輸送部門（陸上、航空）を含めた物流全般としての最適化が求められる。

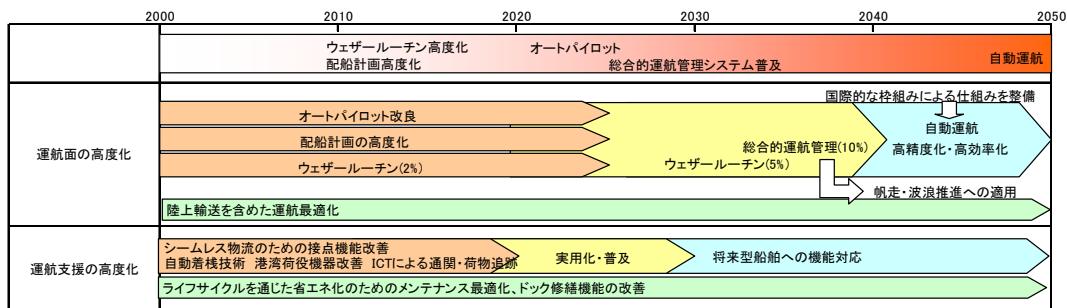


図 1-4 運航・保守系技術のロードマップ

(3) 削減シナリオの検討及び報告書作成

1) 海運部門の全体削減シナリオ

国際エネルギー機関（IEA：Energy Technology Perspectives 2008）の世界エネルギー需要予測に関する BLUE シナリオ及び、国際海事機関（IMO）の外航海運からの温室効果ガス（GHG）排出量についての推計作業（IMO スタディ）を踏まえ、本調査の前提としての 2050 年像について、以下を想定した。

- ・ 効率向上による 2050 年までのフリート平均のエネルギー削減率は最低で現状比 25%程度の改善を想定する。これは IMO の Base シナリオ及び IEA BLUE の双方にほぼ共通する。一方で、技術ロードマップ目標が達成された場合にはフリート平均で現状比 55%程度の改善を想定する。
- ・ 燃料については、バイオ燃料が導入されないケースと、一定量導入されるケースを想定する。バイオ燃料の導入は IMO スタディでは想定されておらず、IEA では想定と評価が別れているが、第 2 世代バイオ燃料製造技術が開発されたとすると、他の再生可能エネルギーに比べればバイオ燃料は船舶用途において大量かつ安定した供給を想定することも可能であり、既存技術との乖離、経済性のギャップは比較的小さいと考えられる。

表 1-3 IEA BLUE シナリオと IMO スタディの比較

	IEA BLUE	IMO スタディ
現状の排出量	約 750Mt-CO ₂ (2005)	840Mt-CO ₂ (2007)
2050 年無対策時排出量	約 1,200Mt-CO ₂	約 3,000Mt-CO ₂ (A1 ファミリー)
技術革新による削減率	約 25% (1,000Mt-CO ₂ → 750Mt-CO ₂)	Base : 17.5%~25% High : 30%~45% Low : 5%
代替燃料による削減率	約 20% (1,250Mt-CO ₂ → 1,000Mt-CO ₂)	0%
減速航行による削減率	(検討されていない)	Base : 10%~20% High : 20%~40% Low : 0%

2) 排出削減対策の検討

上記想定に沿って、排出削減対策として、積載効率向上、技術開発による効率向上(フリート平均で25~55%程度)、バイオ燃料の導入(最大で30%程度)、及び減速航行を想定し、その総合的な効果を試算した。

① 荷動き量及び船舶量の推計(積載効率向上)

過去50年にわたる船腹量の増加率は年4%程度であり、また過去15年間における船舶の建造率、解撤・消失率は(年毎の差こそ大きいものの)それぞれ船腹量比で5~7%、1~3%程度である(以上、海運統計要覧より)。

一方で、IPCC A1B シナリオに基づく IMO 推計の荷動き量は、今後年間3.0~3.4%程度増加することとなっている。また、今後の積載効率向上を、2050年までに対2007年比で5.0%見込むこととする。今後の毎年の解撤・消失船舶の船腹量(同)を総船腹量比2%と見込むと、毎年の新造船舶の建造量(総トン数)の年間増加率は4.7~5.4%程度と見込まれる。

② 技術開発による効率向上

「効率向上25~55%」とは商船船腹の全てに係るものであり、2008年から2050年にわたる期間で達成される。耐用年数が長い船舶の場合、単年度で高効率のものが建造されたとしても、その技術が商船隊全体に行き渡るまでには相当の期間を要する。反面、解撤される船舶は老朽・低効率のものが多くと想定され、その意味で、代替する新旧船舶の効率差は、単年度の「技術向上率×耐用年数」程度の差があると想定できる。

上記の解撤・消失率、新造船舶の建造率から、2050年の技術開発による効率向上25%を実現するためには、2050年時点で新造船平均約4割程度の効率向上が必要である。一方で、技術ロードマップに示した2020年で3割、2040年で6割、2050年で8割の新造船平均の効率向上が達成された場合には、フリート平均の効率向上は55%に達する。

③ バイオ燃料の導入

IMO スタディによれば、外航海運の利用燃料に関しては今後環境制約上から軽油またはA重油、及びLNGの導入が進むと考えられており、他の燃料の本格導入は想定されていない。バイオ燃料は、価格が高いため自動車用途に限定されるとして、船舶用には想定されていない。

しかし、前述のように、将来予測に関する他の文献(IEA、McKinsey)はバイオ燃料の生産増加を想定している。IEAが検討しているBLUEシナリオでは、海運の消費燃料の30%程度をバイオ原油のような第2世代のバイオ燃料とし、

それらによる温室効果ガス排出削減効果は15%と想定されている。IEA BLUE シナリオで想定するバイオ燃料の供給には膨大な植林が必要となるが、船用エネルギー用途のバイオ燃料（約90Mtoe）は総供給量（約700Mtoe）の13%程度である。バイオ燃料の生産に関する技術的課題は多く、2015年～2020年以前に商業化プラントが建設される可能性は低い。ただしこれらの技術的障壁が克服されれば植林面積の不足による需給逼迫は障壁とは想定されていない。

また、将来のバイオ燃料の供給価格が不透明であること、バイオ燃料を利用可能な船舶の普及や、供給インフラが港に整備されることがボトルネックとなることも考慮される必要があるが、第2世代バイオ燃料が実用化されると、製造されるバイオ燃料の品質調整は柔軟になり、A重油と互換性のあるバイオ燃料の生産も可能性がある。

以上を踏まえ、技術開発ローケースの場合の2050年時点における船舶燃料に占めるバイオ燃料の割合は最大30%程度を見込む。しかしながら、前提条件として、第2世代バイオ燃料の実用化と適正な価格での提供が求められる。

一方で、技術ロードマップ目標達成時には、ディーゼル機関自体が減少していくことを踏まえ最大20%程度の導入を想定する。

その他の燃料については、2020年頃を目途に船舶用軽油の大幅な普及や、陸上でのLNG利用量拡大を受けて、一部の船舶でLNG普及が進むことが想定される。また、長期的には、水素エネルギーや電力エネルギーの利用と、その一次エネルギー源としての再生エネルギーの導入が進む。

④ 減速航行

IMOスタディでは、燃料価格高騰に起因した減速航行を想定している。IMOスタディにおける3種類の減速航行導入シナリオを比較し、2020年時点では平均10%、2050年時点では平均30%の減速航行が行われると想定する。

⑤ 総合的な温室効果ガス排出削減率の試算

上記に基づく総合的な温室効果ガス排出削減量を試算した。

- ・ベースは2007年とした。
- ・荷動き量はIMOのIPCC A1Bシナリオ・ベースのものを用い、積載効率向上を2050年で5%とした。（船型大型化の効果は技術革新に含む。）
- ・技術革新はハイケース（2050年のフリート平均55%）とローケース（同25%）を想定した。（船型大型化の効果を含む。）
- ・減速航行率は両ケースとも2050年で30%とした。
- ・2005年におけるバイオ燃料の利用率は、技術革新ローケースではIEA BLUEシナリオと同様の30%（温室効果ガス排出削減原単位は化石燃料の1/2）、ハ

イケースでは 20%とした。

参考までに、2050 年時点の技術革新ハイケース（対 2007 年比、バイオ燃料導入無し）、ローケース（同、バイオ燃料導入有り）の GHG 排出率は、下記のように計算される。

○技術革新ハイケース（対 2007 年比、バイオ燃料導入無し）

$(1-0.05)$	*	0.453	*	$(0.9*(1-0.3)^2 + 0.1/(1-0.3))$	=	0.252
積載効率 向上 95%		技術革新 45.3%		減速航行 (主機) 58.4%		減速航行 (補機)

○技術革新ローケース（対 2007 年比、バイオ燃料導入有り）

$(1-0.05)$	*	$(1 - 0.25)$	*	$(0.9*(1-0.3)^2 + 0.1/(1-0.3))$	*	0.85	=	0.354
積載効率 向上 95%		技術革新 75.0%		減速航行 (主機) 58.4%		減速航行 (補機)		バイオ燃料 85%

ア) 外航海運の荷動き量、船腹量

IMO の IPCC A1B シナリオ・ベースの推計では、2050 年までに、対 2007 年比 4.02 倍の荷動き量が想定されている。2050 年までに 5%前後の積載効率向上を想定すると、船腹量（船型大型化による船腹量減少は考慮しない）は 3.83 倍となる。

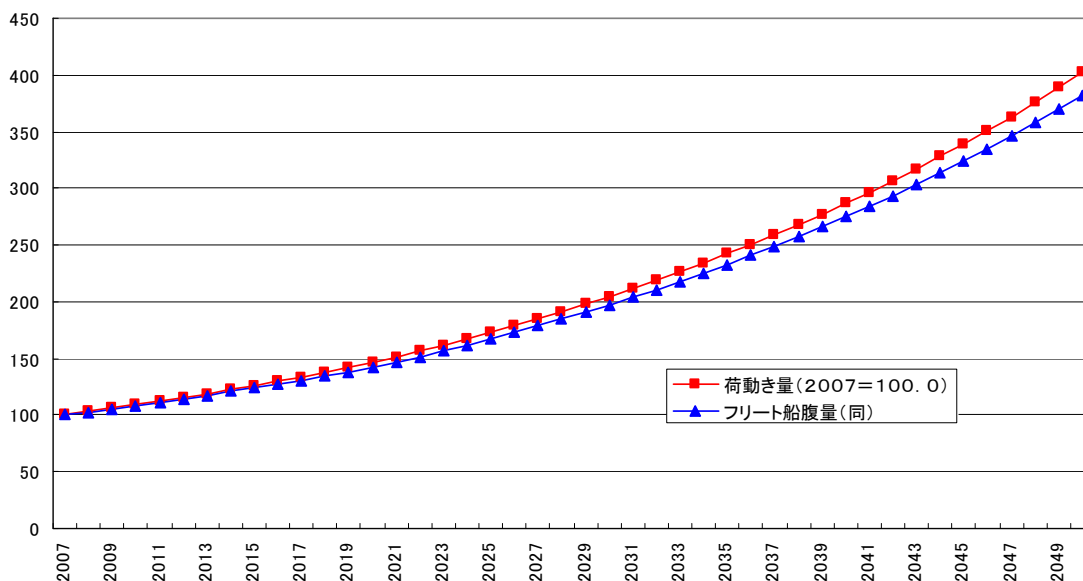


図 1-5 A1B シナリオ・ベースの荷動き量と船舶量の推計結果

イ) 技術ロードマップ実現ケース（技術革新ハイケース）の排出量

技術ロードマップの目標とする技術革新ハイケースでは、バイオ燃料導入無しで、2050年時点ではほぼ2007年比現状維持の排出量が達成される。荷動き量当たりの排出原単位は対2007年比25%程度となる。

さらに、バイオ燃料の20%程度の導入を想定すると、2050年時点の排出量は対2007年比9割程度に削減される。

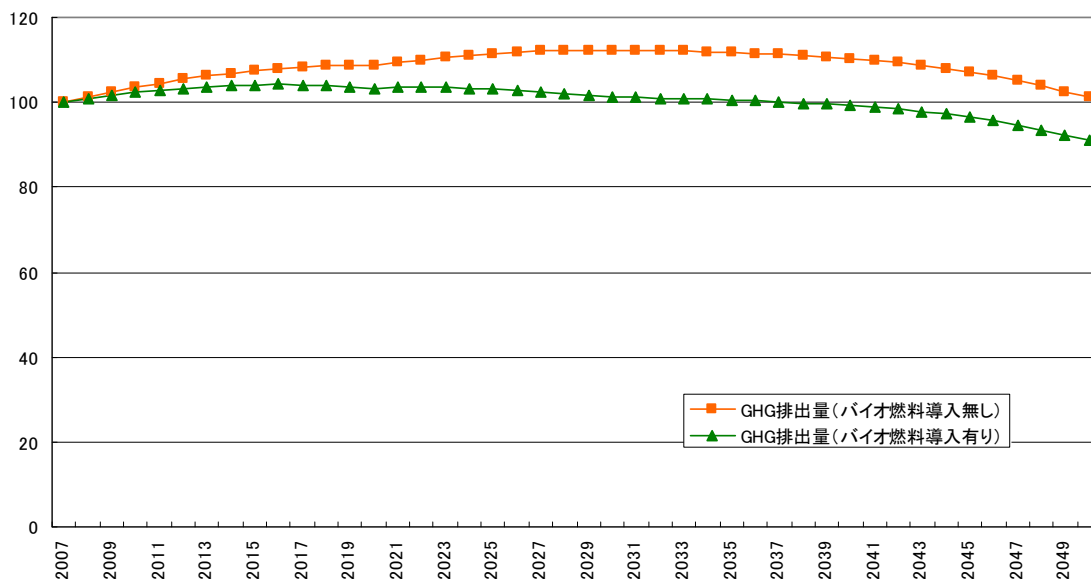


図 1-6 技術革新ハイケースの GHG 排出量推計結果（対 2007 年比）

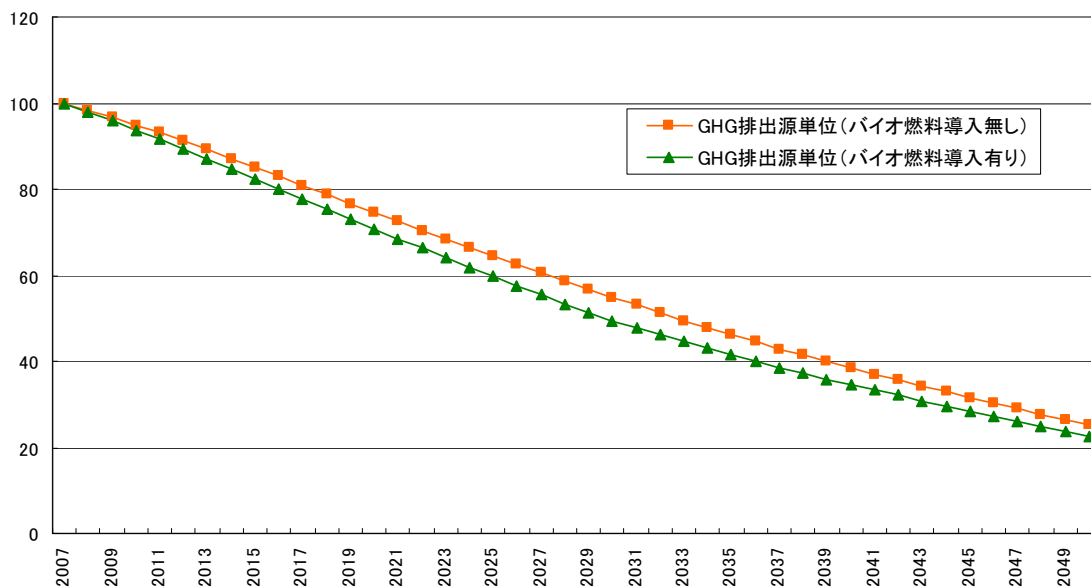


図 1-7 技術革新ハイケースの荷動き量当たり GHG 排出量（対 2007 年比）

ウ) 技術革新ローケースの排出量

技術革新ローケースでは、バイオ燃料導入無しで、2050年時点の排出量は、2007年比1.7倍程度に達する。荷動き量当たりの排出原単位は対2007年比40%程度となる。

一方で、バイオ燃料の30%程度の導入を想定すると、2050年時点の排出量は対2007年比1.4倍程度に抑制される。

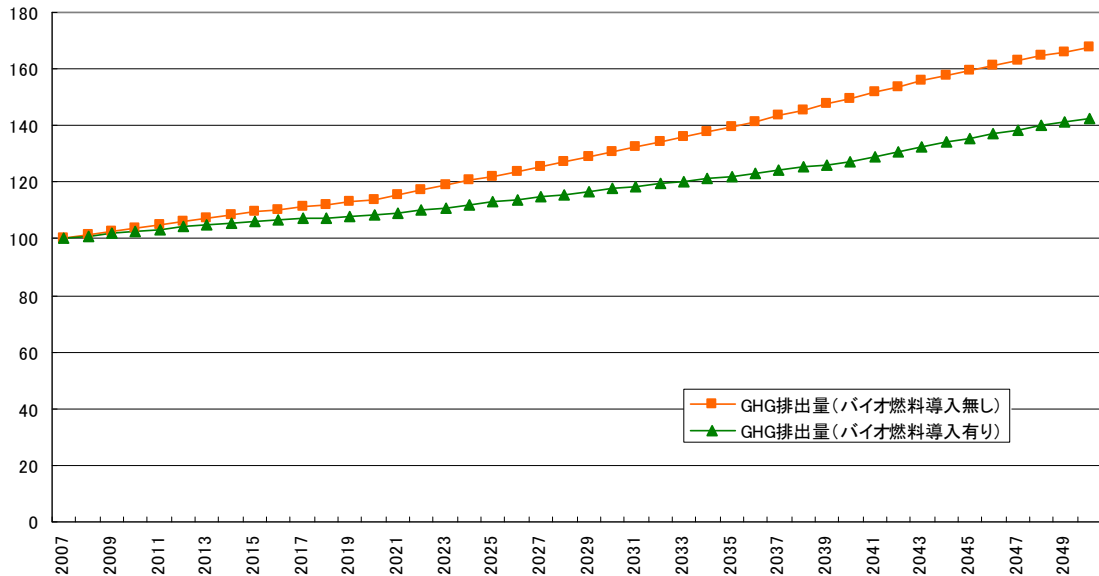


図 1-8 技術革新ローケースの GHG 排出量推計結果 (対 2007 年比)

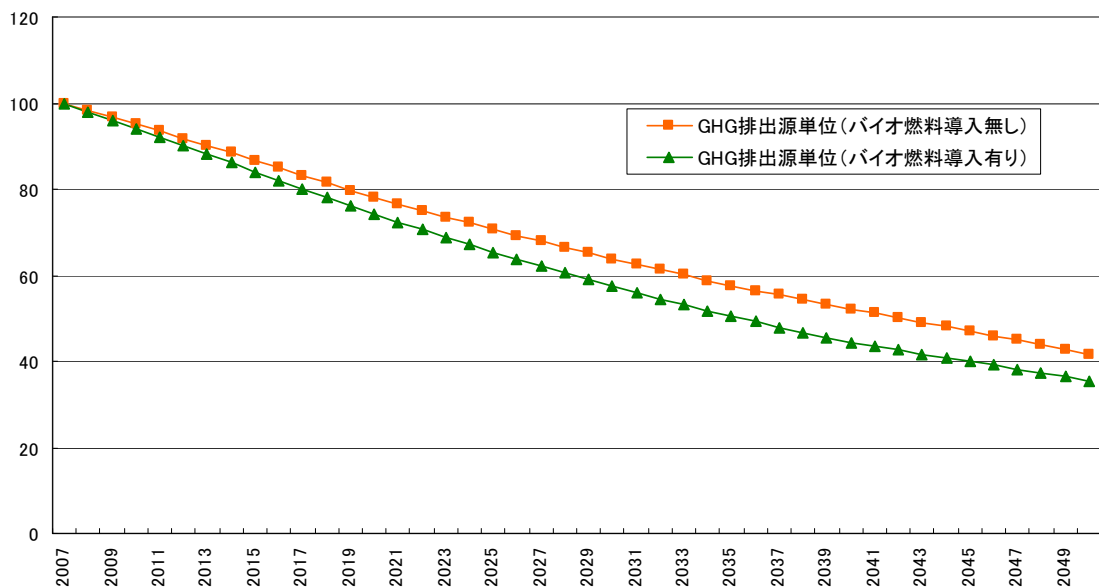


図 1-9 技術革新ローケースの荷動き量当たり GHG 排出量 (対 2007 年比)

エ) 削減要因

技術革新ハイケースでは、フリートの中の新造船の比率が高くなっていくにつれ、技術革新が GHG 削減の最大要因となる。これに対して、技術革新ローケースでは、減速走行が GHG 削減の最大要因となり、バイオ燃料導入の場合の削減効果も大きい。

以上のように、海運分野における GHG 削減においては、技術開発の占める重要性が大きく、技術ロードマップの実現が強く求められる。

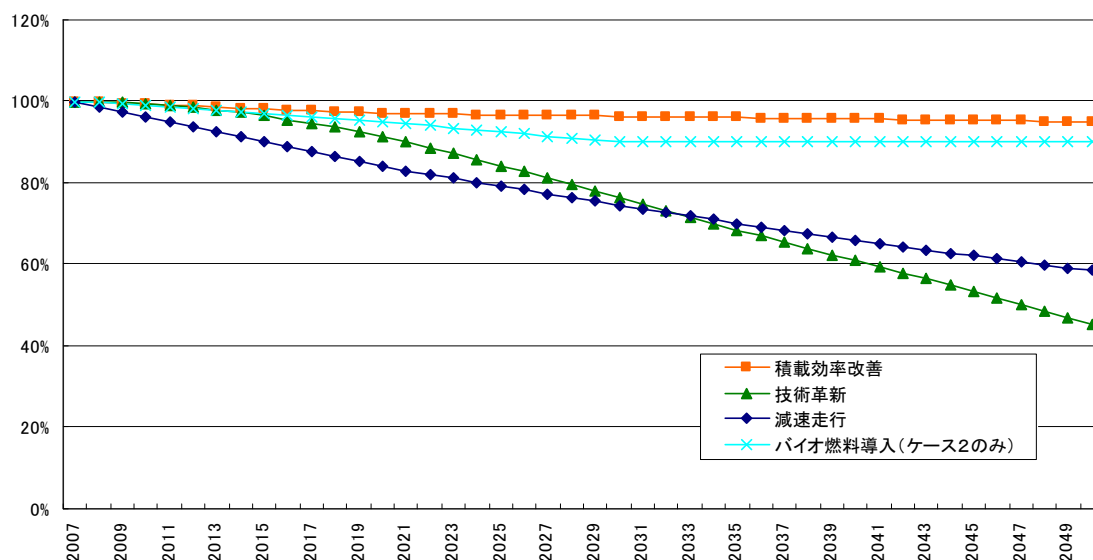


図 1-10 技術革新ハイケースの要因別 GHG 削減率 (対 2007 年比)

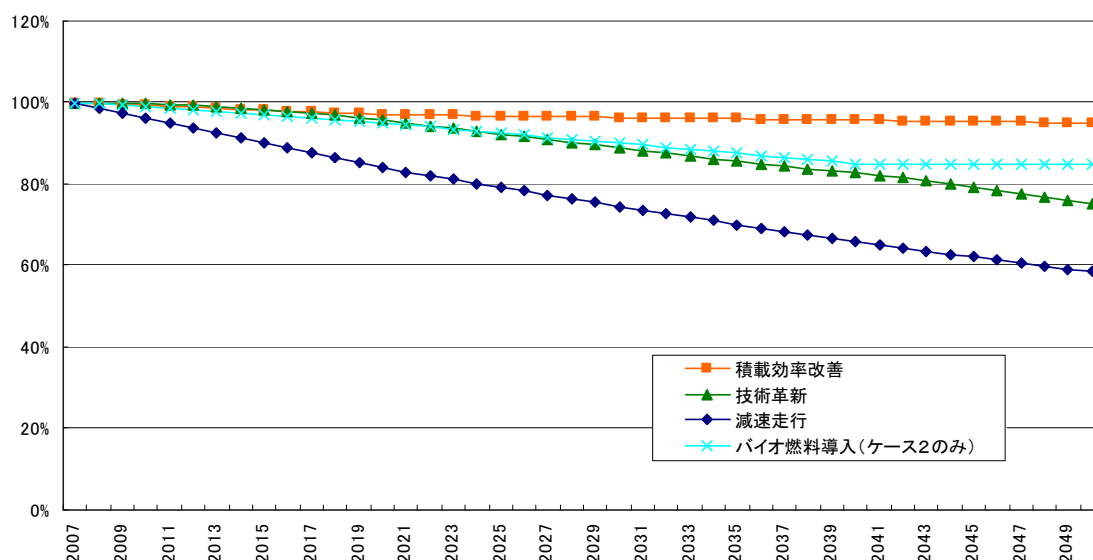


図 1-11 技術革新ローケースの要因別 GHG 削減率 (対 2007 年比)

オ) 新造船導入加速ケースの排出量

技術革新ハイケースで、利用者にとって経済的優位性の高い技術開発を優先的に進める等の対策により、毎年の解撤量を 1.5 倍（3%）としたケースを想定する（新造船進水量もその分だけ増加する）。バイオ燃料導入無しの場合でも、2050 年時点の排出量は、2007 年比 87%程度となり、現状ベース（BAU）の解撤率の場合より改善が図られる。

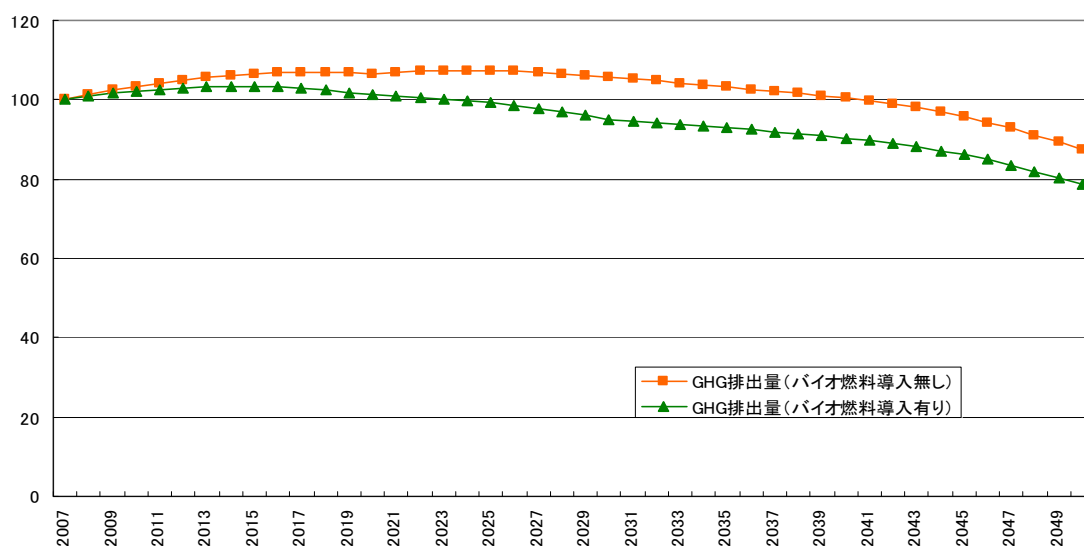


図 1-12 新造船導入加速ケースの GHG 排出量推計結果（対 2007 年比）

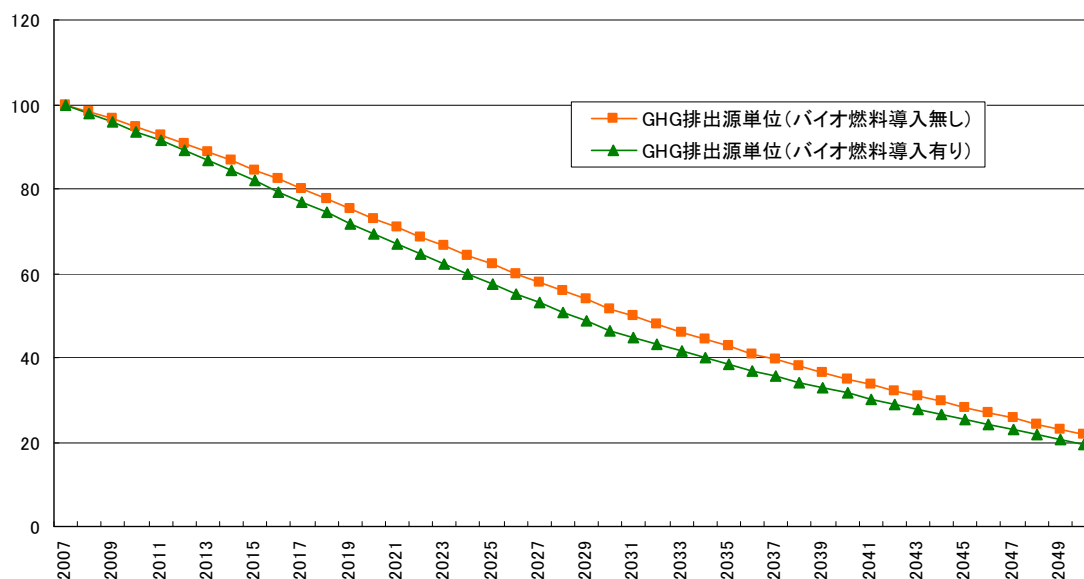


図 1-13 新造船導入加速ケースの荷動き量当たり GHG 排出量（対 2007 年比）

(4) シナリオについての総括

IPCC 報告書に基づき、地球温暖化による温度上昇を 2 度程度に抑制するため 2050 年までに現状比で GHG 排出量を 50%削減するという目標が示されているが、外航海運については世界経済の中で果たしている役割の大きさ、一方で陸上輸送等と比較した GHG 排出量の小ささ等を考え、現実的な制限が課せられる必要がある。

今回のシナリオ検討では、GHG 削減技術ロードマップの目標に沿った技術革新ハイケースと、IMO 等の中位想定に沿った技術革新ローケースを想定した。前者の、技術ロードマップに示された単船での削減目標が達成された場合には、不確実性のある第 2 世代バイオ燃料導入に頼らなくとも、GHG 排出量を現状程度のレベルに抑えられることが示された一方で、後者では、減速航行やバイオ燃料導入等を図っても、GHG 排出量が現状比 1.5 倍程度まで増加してしまうことが示された。

世界的な海運国である我が国としては、GHG 削減技術ロードマップの実現により、2050 年時点での外航海運分野の排出量の現状維持という目標を実現していくことが強く求められる。また、我が国の国際競争戦略として、そして、技術先進国の我が国の果たすべき世界への貢献として、本調査の技術ロードマップに示されたような GHG 対策技術の国際的な普及を図り、世界の外航海運分野における GHG 削減を先導していくことが望まれる。

特に以下の点に着目した技術開発が必要である。

① 経済原理に即した対策技術の開発

通常、経済活動の環境影響は外部経済性を持ち、そのままでは企業等の経済主体は十分な対策を実施しない。そのために、政府による規制や補助制度、近年では排出量取引等の枠組みが導入されている。船社や荷主が自ら進んで積極的に対策を実施するように、技術開発を進める側でも、各種支援制度等を意識した、「経済原理に則った対策の開発」を意識していく必要がある。例えば、燃料コストの削減や、輸送効率の向上につながる対策の開発に注力すべきである。

② 社会情勢に応じた対策技術の開発

代替燃料など今回見た多くの船上の対策が、それを支える資源供給や、陸上インフラ等を必要としている。こうしたインフラ等が揃わない段階で技術開発を進めても、実際の導入が図られず、開発努力が無駄となる可能性もある。陸上分野などの他分野での導入状況を見極めつつ、対策技術の開発タイミングを設定する必要がある。

また、環境問題に関する規制も対策の大きな導入要因であり、国際的な規制の制定に対して我が国が発言力を持つことも含めて、規制と一体感のある技術開発を進める必要がある。

③ 他分野と協調した対策技術の開発

燃料電池など、他分野での技術開発が先行している技術がある。こうした技術については、他分野の開発動向を見つつ、その最新の研究成果を船舶分野での開発の出発点とする必要がある。一方で、バイオ燃料等については、陸上交通機関との資源の取り合いが発生する可能性がある。こちらについても他分野での利用動向等を良く把握し開発を進める必要がある。

④ 我が国の優位性を意識した対策技術の開発

諸外国においても船舶のGHG削減技術開発が進められている。こうした動きを把握しつつ、我が国の優位性のある分野については、国際競争力の観点からもその開発を進める必要がある。一方で、諸外国に優位性がある分野については、状況を見つつ、開発資源の効率利用の観点から独自にキャッチアップを急ぐ分野と、諸外国と協力して開発を進める分野等を峻別していく必要がある。

2. 特定4テーマに関する調査研究

2-1 船上CO₂回収技術

CO₂回収、固定化技術の現状及び今後の研究開発動向の調査を行い、船用転用の可能性の検討（課題、問題点等の明確化）を実施した。なお、CO₂回収には燃料を予め脱炭素改質するというもの（燃焼前回収）も含まれるが、これは大規模な改質プラントを陸上に設置する必要があるほか、新しい船用エンジンの開発も必要であるためここでは取り扱わず、燃焼後回収のみについて言及することとする。

（1）当該技術の概要

炭素の分離・回収・貯留技術（以下 CCS）は排ガス中に含まれる二酸化炭素を分離・回収し、地中や海中に貯留する技術である。

現在のところ、火力発電所、鉄鋼プラント等大規模発生源から排出される二酸化炭素を対象として技術開発がなされており、石油掘削技術や、天然ガスの地下貯蔵や石油増進回収（EOR）等で蓄積された技術を CO₂ 圧入・貯留に応用できることから、ある程度の実用化が達成されている。

将来的な課題としては、CO₂ を分離・回収の低コスト化、長期にわたって安定して隔離し続けるための技術や漏出のモニタリング等が挙げられる。

（2）当該技術の実用化状況

現時点では船舶への適用を前提とした CCS の技術開発はほとんど行われていない。よって、ここでは大規模発生源を対象とした一般的な CCS について実用化状況をまとめ、船舶への適用について検討する。

1) 分離・回収について

現状では、CO₂ の分離・回収は、集中発生源の種類（火力発電所、製鉄高炉、石油化学工場、セメント工場等）の種類と、そこから排出されるガスの組成や圧力等によって化学吸収法、吸着法、膜分離法等が使い分けられている。



図 2-1 燃焼排ガスと CO₂ 分離回収／貯留技術

出典：CCT Journal,第 10 号,石炭エネルギーセンター,2004. 3

石炭火力発電所から排出される CO₂ 分離・回収に係るコストの試算は、これまで（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）および国際エネルギー機関（IEA）により行われている。いずれも微粉炭ボイラ+化学吸収法を想定している。これらによれば、いずれも総コストの 70~90%を分離・回収に係るコストが占め、分離・回収コストの低減が CCS における大きな技術的課題であることがわかる。

表 2-1 地中隔離のコスト推定値

	NEDO	IEA
分離・回収コスト	45\$/t-CO ₂	15-40\$/t-CO ₂
圧入まで含めたトータルコスト	62-67\$/t-CO ₂	17-45\$/t-CO ₂

出典：2007 年 1 月 30 日「第 2 回石炭火力発電の将来像を考える研究会」資料 4

以下に各分離技術の詳細をまとめる。化学吸収法、膜分離法、吸着法の 3 手法について紹介するが、各手法の特性から船舶への適用については化学吸収法が最も現実的な手法であると考えられる。

① 化学吸収法

化学吸収法は、ガス中の CO₂ をアミン水溶液等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り、比較的大規模な常圧ガスからのCO₂分離に優れている。すでに小規模ではあるが化学吸収法で100～700トン/日クラス実用プラントが稼動している。

化学吸収法の概念図を図2-2に示す。脱塵、脱硫、脱硝などの処理をほどこした燃焼排ガスは吸収塔の下部に導入され上向きに流れる。これに対向させて吸収液を吸収塔の上部から落下させ、燃焼排ガスと直接接触させることによってCO₂を吸収液に取り込む。一方、吸収塔の下部にたまるCO₂を多く含んだ吸収液は再生塔の上部に供給され塔内を落下する。このとき、再生塔の下部にたまる吸収液をリボイラに循環させて過熱すると吸収液に取り込まれたCO₂が解離される。現状の技術では火力発電所に適用した場合、再生塔で消費するエネルギーが発電出力の20%にも達するため、化学吸収法の現在の主な開発課題は、分離回収コストを低減することが可能な新吸収液の開発である。

船舶への適用の課題は、上記に加え、吸収塔という構造物を必要とする点（小型化すれば回収量・回収率は低下する）、また、現状の船用燃料であれば燃焼排ガスの脱硫・脱硝が必要な点が挙げられよう。後者については、2020年以降、船用重油の硫黄分の大幅削減が義務付けられると、相当程度解決されることになる。

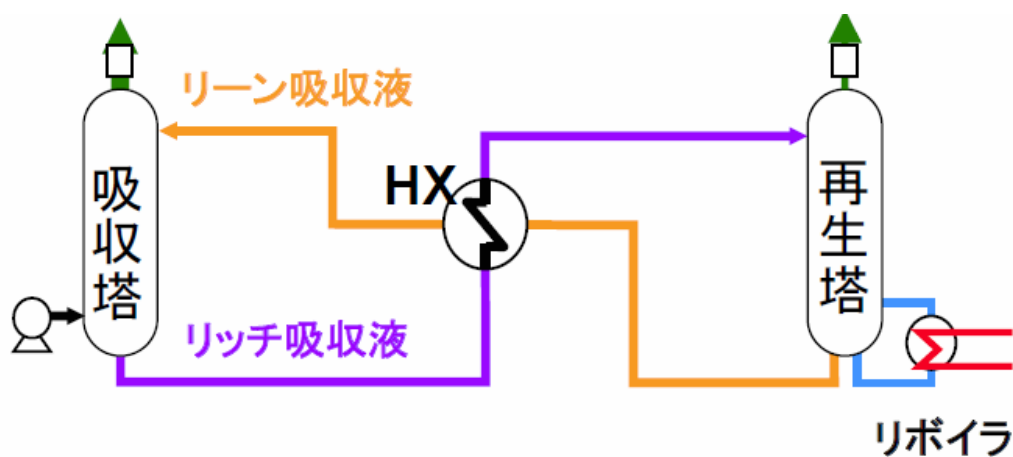


図 2-2 化学吸収法の概念図

出典：RITE 資料

② 膜分離法

膜による、各気体のふるい効果や拡散速度の違いを利用して、混合ガスから各気体を分離する方法。高分子膜、液膜などが利用され、いずれの膜でも、膜を介する分圧差によって気体の透過を促し、必要とする気体のみを通過さ

せて抽出する。

メリットとしては、

- ・装置がシンプルであり、小規模プラントに適する。
- ・相変化を伴わないため、エネルギー的に有利。

が挙げられるが、デメリットとして

- ・現時点では膜が高価
- ・排ガスから固体粒子、液体成分の事前除去が必要。

等が挙げられる。

鉄鋼プラントやセメントプラントのような CO₂ 濃度の高い排ガス（25%～）に対しては化学吸収法よりも低エネルギー・低コストで分離回収できる可能性がある。反面、CO₂ 濃度が数%程度である船舶の排ガスへの適用は現状水準の技術では困難である。

③ 吸着法

固体の吸着材を用いる方法。吸着材として合成ゼオライトや活性炭が用いられる。ゼオライトは CO₂ が比較的 low 分圧でも多く吸着できる特徴があるので、低濃度 CO₂ の処理に、活性炭は水蒸気を吸着しないこともあって CO₂ 高分圧での吸着操作に使用される。吸着容量に達した吸着材は脱着させて CO₂ を取り出す。この脱着操作は吸収の場合と同様に温度ないし圧力（減圧）を利用する。すなわち脱着・再生には加熱再生法、圧カスイング法（PSA）、熱・圧力併用法（PTSA）がある。吸着法では吸着材は塔内に固定されるので、同一の吸着塔について吸着－再生のサイクルを繰り返し替えておこなう。プロセス全体としては複数の吸着塔を交互に操作して、連続的に分離操作が行われる。一般に CO₂ を吸着する吸着材は水蒸気もまた多く吸着するので、処理ガス中の水蒸気をあらかじめ除去することが必要となる。

この手法では二酸化炭素の分圧によって吸着量に大きな差が出る。よって、排ガス中の CO₂ 濃度が低い船舶に適用すると、脱着のためのエネルギー消費量が大きくなってしまふ点が船用への適用の課題であろう。

2) 貯留について

貯留には地中貯留と海洋隔離の 2 通りが考えられる。海洋隔離では生態系に与える影響や拡散について不明な点が多く、研究段階と言える。地中貯留については EOR 等で地中への CO₂ 圧入自体は既に行われており、技術的には確立されている。CCS に関する IPCC 特別報告書（2005 年）では、100 年間漏洩しない確率は 99% であり、1,000 年間でも 90% としている。しかし貯留した CO₂ の漏出可能性の低減及び検知は現在の CCS 技術確立に向けた

研究の主要な課題点であり、かつ CCS が CDM として相応しいかどうかといった政治的な論点でもある。

ここで、地中貯留についてノルウェーの Sleipner ガス田とアルジェリアの In salah におけるプロジェクトを概略的に紹介する。

・ Sleipner ガス田 (ノルウェー)⁵

ノルウェー沖 250km に位置し、1993 年より原油・天然ガスを生産しており、CCS は 1996 年より実施されている。貯留する CO₂ は Sleipner ガス田より産出される天然ガスに高い濃度 (9%) で含まれているもの。

貯留する CO₂ の量は年間 100 万トン (日量 2800 トン) であり、ノルウェーの排出量の 2% に相当する。2008 年 4 月、累計貯留量が 1000 万トンに達した。

年間の費用総額は合計 1660 万ドル (資本費 960 万ドル、操業費 700 万ドル) であり、1t-CO₂ あたりの年間費用は 16.6 ドルである。

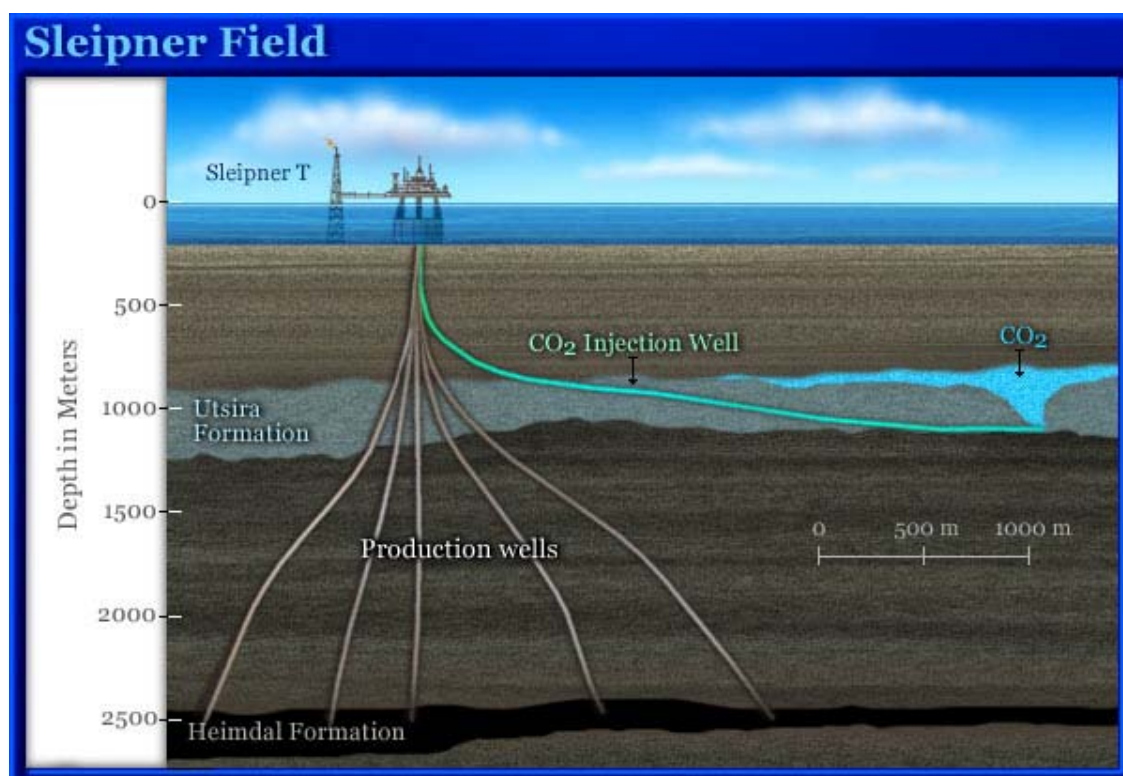


図 2-3 CO₂ 貯留の模式図 (Sleipner ガス田)

⁵ ノルウェー：二酸化炭素の分離・回収、貯留 (CCS) の現状、石油天然ガス・金属鉱物資源機構 調査部 宮本善文より。

出典：http://www.seed.slb.com/en/scictr/watch/climate_change/sleipner.htm

・ In salah ガス田（アルジェリア）⁶

In Salah Gas(アルジェリア国営会社 Sonatrach、BP、Statoil のジョイントベンチャー)が開発したガス田で、2004年に操業開始している。

輸出ガスの条件を満たすためには、生産ガス中の CO₂ を 0.3%以内に抑える必要がある。算出ガスの CO₂ 含有レベルは 1~10%となるため、回収貯留を行う必要がある。

プロジェクト実施期間中に貯留する CO₂ の量は 1700 万トンであり、それにかかる費用は 1 億ドルである。よって、1t-CO₂ あたりの回収・貯留費用は 6 ドルとなる。

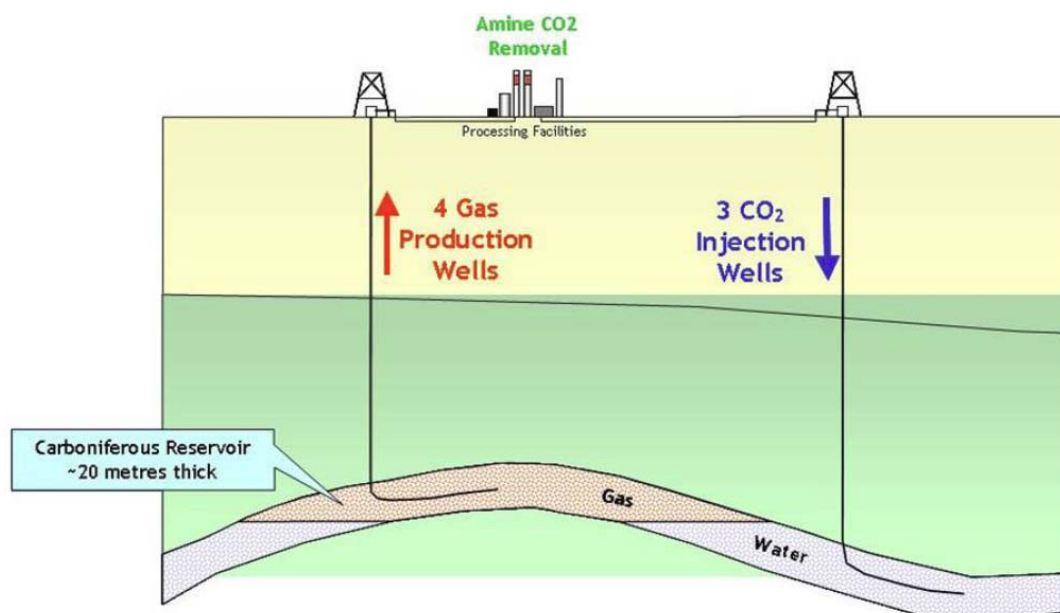


図 2-4 CO₂ 貯留の模式図 (In salah ガス田)

出典：

<http://www.opec.org/home/Press%20Room/EU-OPEC%20presentations/HaddadjiSonatrach%20Algeria.pdf>

⁶ The In-Salah CCS experience Sonatrach, Algeria, Redouane HADDADJI Sonatrach, Algeria (<http://www.opec.org/home/Press%20Room/EU-OPEC%20presentations/HaddadjiSonatrach%20Algeria.pdf>) より

(3) 将来技術の研究・開発動向

前述のように、現時点では船舶への適用を念頭に置いた CCS 技術の開発はあまり行われていない。下記には、一般的な CCS 技術開発の方向性について述べる。

1) 分離・回収について

化学吸収法では現在用いられている吸収液の性能改善が研究課題となる。新吸収液に望ましい性能は、吸収液と CO₂ との反応において、反応熱が小さくかつ吸収分離が容易なことであり、それにより CO₂ を低エネルギーで分離回収が可能となる。さらに、不純物による劣化等が少ないことが求められる。

RITE では新たな吸収液 (RITE-5、6 系) の開発を推進中である。これまで開発した吸収液の分離回収エネルギーは、MEA (モノエタノールアミン) 標準吸収液が 1 トンの CO₂ あたり 4.0 G J (平成 16 年の技術水準) であったのに対して平成 20 年時点で 2.5 G J と低減してきており、2020 年の目標として 1.8 G J を設定している。

2) 貯留について

CCS 技術の基幹である CO₂ 二酸化炭素の地中への注入については、石油増進回収 (EOR) などですでに実用化されているものの、地球温暖化対策の観点からは、隔離技術の社会的認知を新たに得る必要がある。CCS 技術に対する信頼醸成に関わる環境影響・安全性評価手法の開発、CO₂ 挙動予測手法の確立等に取り組む必要がある。

また、現在は貯留先として地中(帯水層)が対象とされているが、海洋隔離の可能性も検討されている。我が国では地球環境産業技術研究機構 (RITE) が研究事業を実施している。海洋隔離技術は、大きく分けて① 陸上からパイプで、気体や液体の CO₂ を、直接海へ溶解希釈する方法、② Moving Ship 方式で、液体 CO₂ を海洋の中深層へ溶解する方法 ③ 液体 CO₂ をそのまま海底へ貯留する方法があるが、RITE では②の Moving Ship 方式を開発している。

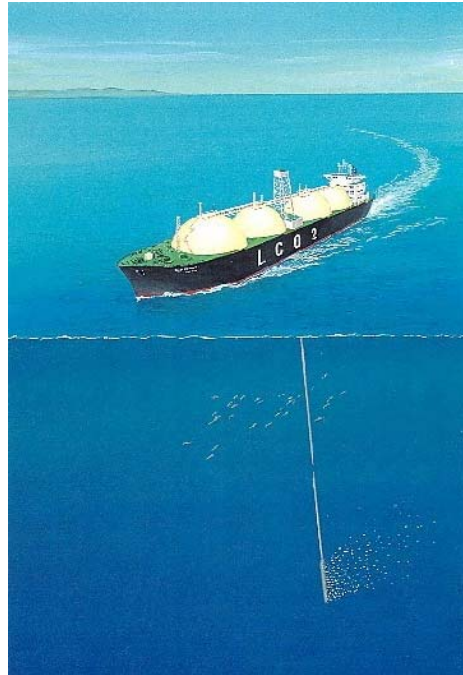


図 2-5 Moving Ship 方式による海洋隔離のイメージ図

出典：RITE web サイト

現在、RITE では以下の 3 点を研究開発事業の目的として取り組んでいる。

- ・ CO₂ 海洋隔離能力の技術評価
- ・ 環境影響評価技術の開発
- ・ CO₂ 希釈技術の開発

(4) 船用分野における導入メリット・デメリット

増大する船舶からの CO₂ 排出の対策として、CCS 技術を船舶へ適用し、船用エンジンにより排出される CO₂ の分離・回収・貯蔵を行うことが考えられる。しかし、現状では CCS の船舶への適用については下記のように大きな課題がある。

1) 船上設備について

船用エンジンより排出される CO₂ を分離・回収するに当たり、最大の課題は分離・回収のための設備を船上に設置する際のスペース、重量の問題であると考えられる。CO₂ の分離・回収のためにはアミン等の媒体に吸着させる必要があるが、効率の良い吸着のためには吸収塔を設置する等の設備が望ましい。

Updated Study on Greenhouse Gas Emissions from Ships (IMO, 2008)

に示された船種別の平均年間燃料消費量、航海日数等から算出すると、VLCC及び5,000-7,999TEU積みコンテナ船の主機の1日当たり燃料消費量はそれぞれ109トン/日及び234トン/日である。原油タンカーの1航海あたり航海日数を20日（中東～日本の航海日数に相当）、コンテナ船の1航海あたり航海日数を25日（欧州～日本の喜望峰回りの航海日数に相当）とおくと、燃料1トンにつき3t-CO₂の排出とすれば、1日当たりCO₂排出量は327t-CO₂（タンカー）、672t-CO₂（コンテナ船）、航海当たりCO₂排出量は6,540t-CO₂（タンカー）、17,550t-CO₂（コンテナ船）となる。

現在肥料工場等に納入されているCO₂回収プラントは日処理量200～450t-CO₂の規模であり、船上CCS装置とほぼ同等規模であるが、これらは高さ数十メートル、表面積数十メートル四方、重量は1000トン程度となると想定される（既存事例より目測⁷）。ここでVLCCや大型コンテナ船のサイズは全長300m以上、全幅50-60m、深さ30m（満載喫水20m）程度であり、設置面積および重量の点では負担不可能なレベルではない。高さについては、特にコンテナ船では重心位置が高くなる満載時や、空荷の時に荒天を航行する場合における復原力に対する影響を検証する必要がある。

仮に高さや重心位置も含めた設置スペースの点で負担不可能ではないとしても、コンテナ船の場合はコンテナ荷役を行う必要があるため必要な設備を設置することに課題が残るであろう。スペースや荷役の問題が少ないタンカーやばら積み船の方が設置は容易であると推測される。

2) CO₂の貯蔵について

重油1tを燃焼させると、約3tのCO₂が発生する。つまり、純粋なCO₂を貯蔵するとしても燃料タンクに比べて重量ベースで約3倍のCO₂貯蔵施設を船舶に設置する必要がある。実際には化学吸収法であれば溶液を、吸着法であれば多孔質固体をそれぞれCO₂とともに貯蔵する必要があり、上記以上の貯蔵スペースを必要とする。これについて概算する。

前述の通りタンカーでは1航海あたり6,540t-CO₂が発生し、その重量についてみる限り、絶対的に負担不可能と言うレベルではない。ただし、例えばタンカーの場合、6,540tのCO₂を貯蔵するために同量の積載スペースを削減しなければならないとすると、運賃収入が2～3%程度低下することになる。日本商船隊の平均経常利益率（2001年～2006年⁸）は8.1%であり、運賃収入

⁷ 例えば直径5m、高さ50m、厚さ2cm程度の鋼材で吸収塔・分離塔を建設すると、その重量は合計約250トン、さらに、10m×10m×10m程度の密な配管部が存在するが、鋼材の占める率を10%とおくと、その重量は約800トンとなる。

⁸ 海運統計要覧より

の 2~3%低下は経常利益が 2/3 に低下することを意味する。

また、船上で液化して保存する場合、液化のための設備装置及び高圧低温容器が必要となる。-20℃、20kg/cm²の液体CO₂の比重は1.030kgであり、6,540tでは約6,350m³の体積となる（この状態では体積も消費した燃料の約3倍）。

3) エネルギー消費量の増加について

石炭火力発電所からの化学吸収法によるCO₂分離・回収についての検討結果によると、理論分離エネルギーは7×10⁸J/t-Cである。一方、現状のエネルギー消費量は98×10⁸J/t-Cであり、分離エネルギー効率は7%程度にとどまる。石炭の発熱量が410×10⁸J/t-Cであるため、CO₂圧縮に必要な14×10⁸J/t-C CO₂を合わせると分離・回収には石炭発熱量の28%程度の追加的なエネルギーを必要とすることになる。石油系燃料を燃焼する船舶についても同程度の燃料消費量の増加が見込まれ、これは海運産業の収支を相当程度悪化させる原因となる。再生塔と接続するリボイラは低温熱源も利用可能であり、エンジン排熱の利用により追加的なエネルギー消費量を抑える技術開発が必要となろう。

仮に燃料価格を500ドル/トンとし、CO₂の分離・回収に必要な追加的なエネルギー消費量を石炭と同程度の28%とおくと、これは燃料価格が640ドル/トンに上昇したと実質的に同等である。CO₂排出量を3トン削減するために追加的に140ドル/トンを要するのであるから、これは実質的に47ドル/t-CO₂のコストとなり、前述の石炭火力発電所から排出されるCO₂の分離・回収に係るNEDOの検討結果と一致する。これは環境税にたとえるとガソリン1リットル当たり約12円に相当する。

4) イニシャルコストについて

上記ではランニングコスト（≒燃料費用）について検討を行ったが、ここではイニシャルコストについて述べる。IPCC特別報告書によれば、CO₂の分離・回収にかかる設備の設置費用は最新の石炭火力発電所の場合で500USD/kW程度とされている。最先端の発電所と船用エンジンの効率はほぼ同等なので、これが船舶にも当てはまると想定すると、大型原油タンカーのエンジン（30MW）では設備コストとして1,500万ドルを要し、現在の船舶価格の1/10に相当しよう。現時点で導入する場合は脱硫装置も併せて導入する必要があるため、実際のインパクトはさらに増大しよう。

一方、この大型タンカーの燃料使用量を110t/日、年間稼働日数を280日と仮定すると、年間の燃料消費量は約3万トン、CO₂排出量にして約10万

t-CO₂ となる。仮に炭素クレジットの価格を 20 ドル/t-CO₂ とし、全排出量分のクレジットをこの価格で購入する状況を想定した場合、初期投資を回収するのに必要な年数は、回収率 100%、金利ゼロを想定して 7.5 年、30 ドル/t-CO₂ とすると 5 年となる。

5) 貯留について

前述の海洋隔離に関する課題より、CO₂ を海洋中に廃棄しながら航行することは現状では課題が多い。従って地中貯留が可能な場所に寄港・停泊して、その場に設けられたパイプライン等により隔離すること、あるいは港湾において冷却した上でタンカー輸送・廃棄が考えられる。容量削減及び最終処分を容易にするために輸送は液体で行うことが望ましく、これは低温・高圧が条件となる。現状では CO₂ の輸送は LPG タンカーとほぼ同様のマイナス 50°C、7 気圧程度が想定されているが、液体 CO₂ の比重は LPG や LNG の 2 倍程度になり、より強度の高い船舶が必要となろう。

(5) 今後の導入可能性・課題

炭素の回収・分離・貯留は技術的にほぼ確立されており、船上への搭載についても現状で技術的に不可能ということはない⁹。しかし、上記の検討より、CCS の船舶への適用にあたっては分離・回収・輸送・貯留の全てのフェーズについて課題が多いことがわかる。具体的には下記が挙げられよう。

- ・ 分離・回収
 - 約 30% の増エネによるコスト増をいかに吸収するか。
 - 吸収塔を含むインフラの船上設置。船種により導入難易度が異なる。
 - 化学吸収法では、排ガス中の NO_x、SO_x が除去されている必要がある。この点、現在の船舶燃料では基準を満たすかどうか疑問。ただし、IMO では 2020 年以降燃料油に含む硫黄分の規制が厳格化される。
- ・ 船上貯蔵
 - 天然ガスに比べて重い CO₂ の貯留スペースの確保
- ・ 最終処分
 - 海中貯留という選択肢がない現在、港湾に二酸化炭素の積み取り施設、船舶による出荷のための施設（近傍に貯留施設がない場合）を設置する必要がある。船舶で輸送する場合、長距離輸送を行うのであれば追加的に燃料を消費することになるため、CCS が十分に浸透し世界各地で実施されている必要がある。

現時点では CCS は発電所や製油所のような大規模・固定型排出源に最も

⁹ 識者ヒアリング。

適した温室効果ガス排出削減技術と言える。これに対して船舶は、大型船舶といえどもエンジンの出力は大型火力発電所の 1/10 程度以下の規模であり、かつ移動排出源であるという難点がある。上記の論点は今後の技術開発により解決されることが期待されるが、それでも CCS の対象として、スケールメリットの点で大規模固定型排出源の優位は揺るがないと考えられる。さらに、海運燃料の脱硫等の処理の必要性、装置搭載時の安定性検討に必要なリードタイムを考えると、IMO による低硫黄燃料の利用が義務付けられる 2020 年頃から、比較的構造面での不安が小さい VLCC より実験的に配備を検討することが想定される。

「船舶と CCS」というテーマではむしろ、陸上排出源から排出された CO₂ を所定の最終処分地点まで運搬する「CO₂ タンカー」がニーズとして顕在化する可能性がある。

2-2 代替燃料利用技術

GHG 削減に貢献する可能性のある代替燃料全般 (LNG、バイオ燃料、水素等) について、現状、船用利用の課題、普及した場合の効果、コスト等についてとりまとめた。

2-2-1 LNG

(1) 当該技術の概要

オイルショック以降、ほとんど全ての商船で熱効率の良い 2 サイクル・ロング ストロークディーゼル機関直結推進方式が採用されてきたが、LNG 船では、混焼ボイラを装備した蒸気タービン推進がボイルオフガス (BOG) を安全かつ有効に処理できる最適な方法であったため、大半の LNG 船で採用されている。

将来的には、原油価格の高騰により原油に対する LNG 価格の相対的な低下、また、NO_x、SO_x 規制の強化が予想され、一般船においてもより効率のすぐれる、石油燃料と LNG のデュアルフューエル・ディーゼルへの転換が期待される。

また、一部で LNG のみを燃料として航行する船舶が建造されているが、LNG はディーゼルとの比較で燃料容積が 2 倍であること、LNG を液体に保つには低温で保持しなければならないこと、専燃の場合 LNG インフラが整備されていない地域での航行が不可能となってしまうこと等から、デュアルフューエル・ディーゼルが主流になっていくと考えられる。そのため、専燃については簡単に触れることとする。

(2) 当該技術の実用化状況

1) デュアルフューエル方式

現在、大半の LNG 船で採用されている推進システムは、図 2-6 に示したような上記ボイラと蒸気タービンを組み合わせたシステムである。BOG と重油の両方をボイラで焚いて蒸気を作り、蒸気タービンにて推進するというシステムはシンプルであり、多くの LNG 船で採用された。

ディーゼルシステムと比較して燃費が悪いという問題はあるが、ガスのみ、重油のみでも走行できる利便性、ガスのみで航行すれば SO_x、NO_x を大幅に削減できるという環境面での優位性、タービン・ボイラには故障が少ないという保守性の高さ、また、発生を完全に抑えることが出来ない BOG を有効利用できる点が本システムの長所である。

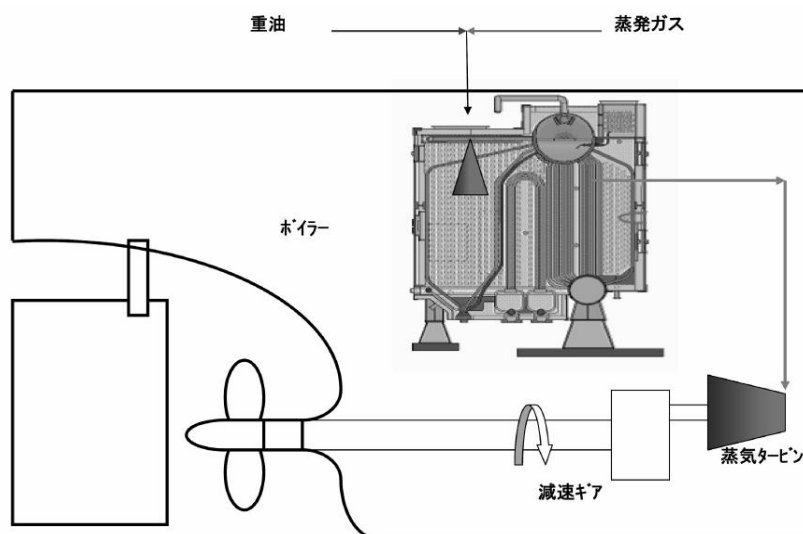


図 2-6 上記ボイラ+上記タービンによる推進システム

出典：LNG 輸送チェーンにおける海上輸送の技術革新および最新動向について¹⁰

2) LNG 専燃方式

前述のように2サイクル・ロングストロークディーゼル機関直結推進方式と比較して燃費が悪いことから LNG のみによって航行する船舶は一部でのみ建造されてきた。表 2-2 にガス燃料船舶のリストを示す。近年、ノルウェーにおける建造数が多くなっているが、これは、環境税の一つとして NO_x 税が適用されており、フェリーなどの近距離貨物船、沿岸警備艇の燃料を天然ガスに転換する動きが進んでいるためである。

表 2-2 ガス燃料船舶リスト

Name	Location	Service	Fuel Storage	Year
Accolade li	Australia	Bulk Carrier	CNG	1982
Klatwa	Canada	Car (26) Passenger (146) Ferry	CNG	1985
Kulleet	Canada	Car (26) Passenger (146) Ferry	CNG	1988
Canel Boat	Netherlands	Passenger Boat	CNG	1992
Canel Boat	Netherlands	Passenger Boat	CNG	1994
Tourist Boat	Russia	Tourist Cruise	CNG	1994
Tourist Boat	Russia	Tourist Cruise	CNG	1999
Elisabeth River I	USA	Passenger (149) Ferry	CNG	1995
Glutra	Norway	Car (100) Passenger (300) Ferry	LNG	2000
Osprey	Canada	Car-Passenger Ferry	CNG	2000
Viking Energy	Norway	Supply-Cargo Vessel	LNG	2003
Strill Pioneer	Norway	Supply-Cargo Vessel	LNG	2003
Pioneer Knutsen	Norway	Mini LNG Tanker	LNG	2004

出典：LNG 輸送チェーンにおける海上輸送の技術革新および最新動向について

¹⁰ 田部井 純、石油技術学会誌 第73巻 第2号 (平成20年3月) 125~133頁

(3) 将来技術の研究・開発動向

前述のように、これまでの LNG 船では混焼ボイラを装備した蒸気タービン推進を採用しているが、一般商船では馴染みの薄い機関となってしまったこと、乗組員の成熟度への要求も高く、新造船の増加に見合った船員の育成と確保が厳しくなっていること等から代替推進機関へのニーズが生じている。

図 2-7 にデュアルフューエル・ディーゼル推進機関の一例として、三菱重工業が開発しているハイブリッド推進システムの概要を示す。LNG 船への適用を念頭において開発されているが、一般商船への適用も可能な技術だと考えられる。

このシステムの推進部は低速ディーゼル主機と電気推進部（ポッド）により構成する CRP ポッド方式を採用している。また、BOG 再液化設備を備え、状況に合わせて再液化量と燃焼処理量を調整する。大洋航海においては高熱効率のディーゼル主機を主力に航行し、沿岸及び港内航行の低負荷時はポッドで航行、等の柔軟な対応が可能である。

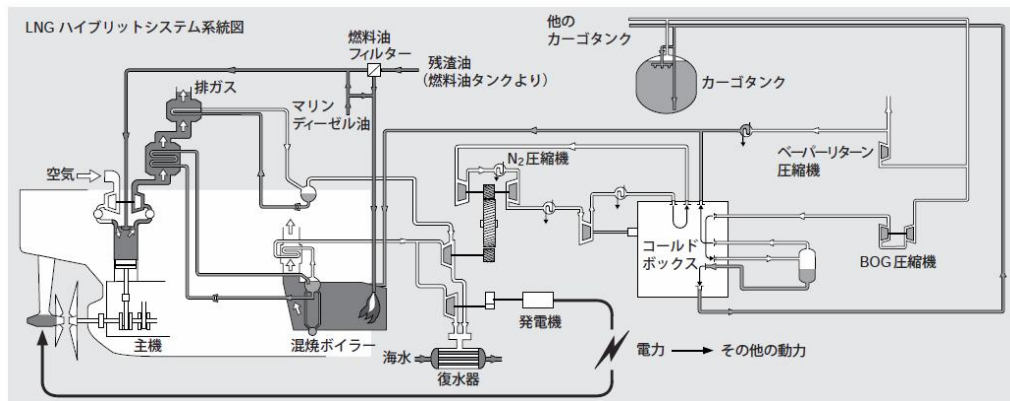


図 2-7 ハイブリッド推進システムの概要

出典：次世代 LNG 船の推進プラント開発動向とハイブリッド推進¹¹

(4) 船用分野における導入メリット・デメリット

LNG のメリットとしては下記が挙げられる。

- ・ 重油に比べ、CO₂ で 10%、NO_x で 90%、SO_x や微粒子でほぼ 100%の削減が見込める。
- ・ 燃料として使用する場合、潤滑油はクリーンとなり、エンジンの損傷が減るので、オーバーホール間隔が長くなり、メンテナンスコストが節約され、エンジンの寿命が長くなる。

¹¹ 三菱重工技報 Vol.41 No.6

- ・ CNG と比較すると燃料容積が 1/3 倍であり、安全性も高い。
- ・ すでに LNG スタンドが設置されているサンフランシスコ港では、ディーゼルの価格が\$0.34、LNG が\$0.14 で、LNG の燃料消費量がディーゼルの 2 倍であっても LNG での運行のほうがコスト的に有利である¹²。

反面、デメリットは下記のように挙げられる。

- ・ LNG の供給インフラを整備する必要がある。
- ・ 保存・貯蔵時の冷却設備 (-163 度) に関連するコスト、エネルギーが必要
- ・ 保存・貯蔵時の安全性確保のための設備 (換気、検出器、自動停止システム等) が必要
- ・ 船の運航には安全基準の整備と遵守が必要
- ・ エネルギー密度は、ディーゼル油比 2 倍
- ・ 船体のコストが高い (Glutra の例では、従来船舶に対して 30% 高)。
- ・ 採掘・液化に伴う生産コスト、運搬コストが高い。

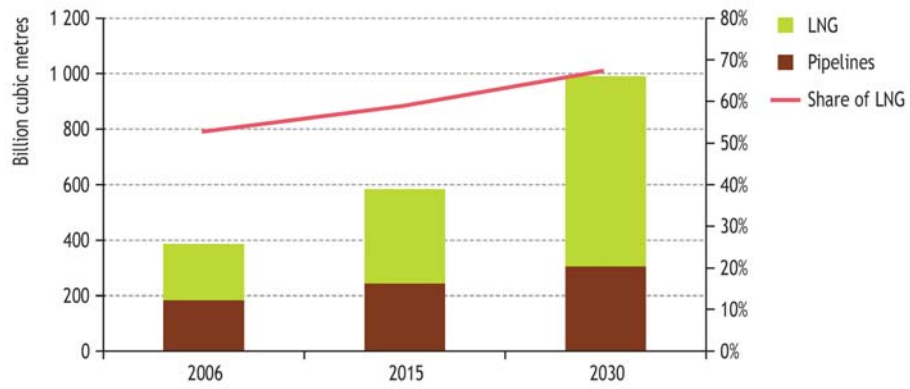
(5) 今後の導入可能性・課題

LNG 燃料による推進方式自体は、現在実用化されている技術の延長線上にあるため、技術的なハードルは高くない。LNG 推進船の普及は、LNG 供給インフラの整備状況に大きく依存すると考えられる。そのため、普及の初期段階においては LNG インフラが整備された国・地域における内航船、近距離外航船等の中小型船において導入され、その後長距離外航船への適用が広がる、というシナリオが妥当であろう。

IEA の予測によれば今後、ガスの輸出入に占める LNG の割合は上昇する。2006 年にその割合は 50% 強だが、2030 年には 70% 程度になる (図 2-8 参照)。また、欧州・米国では LNG での天然ガス輸入が急速に増加するとされており、LNG インフラの整備もそれに伴って進展すると考えられ、こうした地域では船舶分野における LNG 利用も実現化していくと考えられる。

¹² A First Time for Everything, 1999 年 9 月, Maritime Reporter and Engineering News (MR/EN)

Figure 4.7 • World inter-regional natural gas trade* by type in the Reference Scenario



*Trade from major WEO regions, not including international trade within each region.

図 2-8 天然ガスの形態別輸出入量

出典：World Energy Outlook 2008 (IEA)

2-2-2 バイオ燃料

(1) 当該技術の概要

バイオ燃料 (biofuel) とは、ここでは石油系燃料の代替として液体で用いるものを指す。現状ではバイオ燃料はほぼエタノールとバイオディーゼル (不定形) に限定され、前者はガソリン、後者はディーゼルの代替または混合形態として用いられる。

エタノールは、現在では主としてサトウキビやトウモロコシ等に含まれる澱粉・糖質を発酵・蒸留させて製造する。エタノール単体を燃料とする場合はそのままであるが、ガソリンと混合する場合は混合性を高めるため無水物として用いることになる。

バイオディーゼルは、現在では主としてパーム油や大豆油等の植物油を工業的に製造されたメタノールでエステル化させて製造されることが多い、これはトリグリセリドである植物油とメタノールにより、メチルエステル (バイオディーゼル) とグリセリンを生成するものである。このグリセリンは不純物が含まれるため通常は用途がない。

(2) 当該技術の実用化状況

バイオ燃料は既に自動車燃料として実用化されている。特にブラジルのエタノール車は有名であるが、近年では各地でエタノール及びバイオディーゼルの利用が進んでいる。

エタノール、バイオディーゼルの混合比率は様々である。ブラジルではエタノール混合率 25% であるが、米国で販売されている混合燃料は 10% (E10) である。日本では品確法 (揮発油等の品質の確保等に関する法律) が 2003 年に改正され、これ以上では金属 (特にアルミニウム) への腐食、ゴム・樹脂への劣化を引き起こす可能性あり、という観点から混合率は 3% に限定された。なお、エタノール混合は水分により相分離を起こし、オクタン価の低下等、燃料の性状を変化させる可能性が指摘されているが、ブラジルではエタノールの混合率をいかなる比率としても対応しうる車両 (フレックスフューエル車) が開発されており、ブラジル等で販売されている。エタノールは長年ブラジルが他を圧倒していたが、2005 年頃より、農地への手厚い保護を背景に米国がトウモロコシを原料としたエタノールを大量に生産、現在はブラジルを上回る生産量となっている。

バイオディーゼルは主として欧州で推進されているが、これは地球温暖化対策の観点から欧州ではディーゼル車が域内販売新車の大半を占めていることに起因する。

エタノール及びバイオディーゼルの生産量の推移を以下に示す。

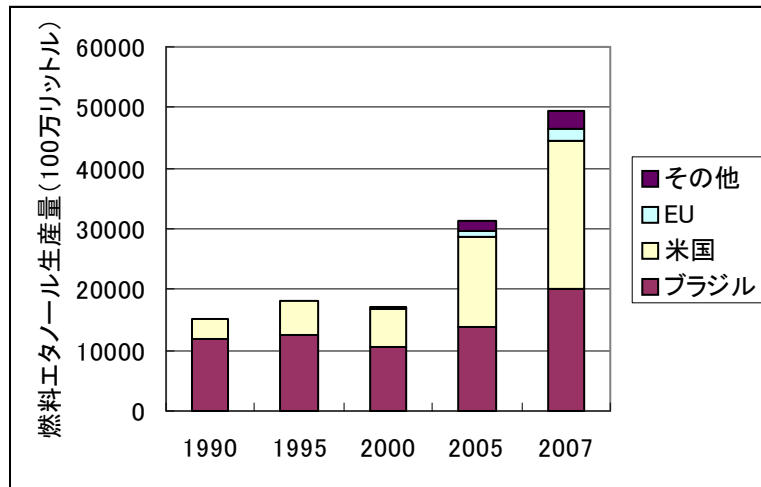


図 2-9 バイオエタノール生産量の推移
(出典：F.O.Licht より MRI 作成)

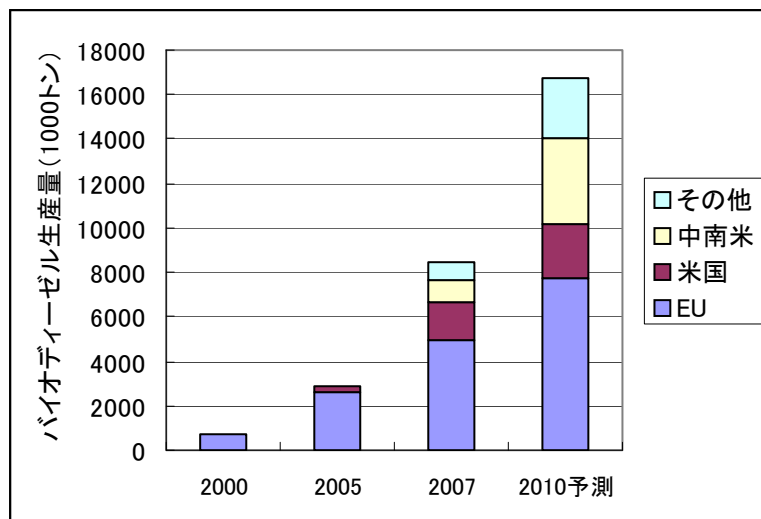


図 2-10 バイオディーゼル生産量の推移
(出典：F.O.Licht より MRI 作成)

これらの合計は約 35Mtoe となり、世界の輸送用石油消費量の約 2%である。2008年にEUは「気候パッケージ」に合意したが、この中で2020年までにバイオ燃料が運輸部門燃料の10%を占めるべきとしている。これは即ち約27Mtoeに相当する。しかし2010年に予測されているEUのバイオディーゼル生産量は約800万トン(=7.5Mtoe)であり、目標値に至るまでにはさらに3倍程度の増加が必要となろう。

航空・船舶部門ではバイオ燃料は実用化に端緒が付けられた段階である。両

分野とも燃料に関するトラブルの影響が甚大であるため慎重にならざるをえないが、温室効果ガス排出削減への要請と並びエネルギー多様化のニーズもあるため、取り組みが進められている。具体的には下記の例が挙げられる。

航空

- ・ 英ヴァージンアトランティック航空は 2008 年 2 月 26 日、B747 のエンジンの 1 つにヤシの一種ババスとココナツから製造したバイオ燃料を使用した（ロンドン→アムステルダム）。これは旅客機としては世界初の試み。
- ・ 米コンチネンタル航空は 2009 年 1 月 7 日、B747 のエンジンの 1 つに藻から抽出したバイオ燃料を 50%混合した燃料を用いた旅客機の試験飛行に成功。
- ・ 日本航空は 2009 年 1 月 30 日、B747 のエンジンの 1 つにバイオ燃料を 50%混合した燃料を用いた旅客機の試験飛行に成功（羽田～仙台往復）。同社によるとバイオジェット燃料を用いたデモンストレーションフライトは世界で 4 例目。バイオ燃料の内訳は植物の「カメリナ(アブラナ科の植物:84%)」、「ジャトロファ（ナンヨウアブラギリ：15%)」、「藻（1%)」

海運

- ・ 海運へのバイオ燃料は大規模導入例はないが、米国五大湖での実験（ダイズ起源バイオディーゼル）や湾内フェリー等で用いられている。
- ・ 17,850 トンの貨物船の 4 基の補機（発電機）のうちひとつについて、船用ディーゼルにバイオディーゼルの 20%混合した燃料を用いた運航を行った。4 ヶ月間の航行の結果、燃料消費量は不変、エンジンパフォーマンスは若干低下、エンジン劣化は見られず、大きな問題はないと結論されている（2006 年のカナダの Innovation Maritime プロジェクト）。
- ・ 12 隻の船舶（客船。最大のものは 750 席）で廃油起源バイオディーゼルの 5%、20%、100%混合した軽油を混合。成果は下記のとおり（BioMerCanada）。熱量は若干低下しているが、エンジン出力はむしろ微増している。

	Difference in Biodiesel Energy Content per Unit Volume	Difference in Engine Performance	Difference in Fuel Consumption
B5	-0.3 %	+2.3 %	-1.8 %
B20	-1.4 %	+2.3 %	-0.8 %
B100	-7.2 %	+3.3 %	+3.3 %

図 2-11 バイオディーゼル実験の結果 (BioMerCanada)

(出典：Biofuels in Ships、Zero Emission Resource Organizatoin)

その他、英国での事例（プレジャーボート、菜種油）、ニュージーランド（スピードボート）、カリブ海クルーズ船等での事例がある。いずれも問題は報告されていない（ただしバイオディーゼルの価格及び供給安定性は課題として指摘されている）。

（３）メリット及び課題点

現状指摘されているバイオ燃料のメリット、課題点について以下に示す。これらの多くはディーゼルを使用する小型船舶に対するバイオ燃料混合を想定して述べられており、重油への混合ではないことに留意する必要がある。

1) メリット

技術的メリット

- ・ 軽油と混合した場合、潤滑性能が向上し、低回転でスムーズな運航が可能になるとされている（米国政府資料等）。
- ・ 必要なエンジンの改変度合いが小さい（20%以下の低率の場合は不要とされている）航続距離、補給時間等の制約が小さい（ほぼ化石燃料と同等）。
- ・ バイオディーゼルの場合、軽油と組成が似ており、必要なエンジンの改変度合いが小さい（20%以下の低率の場合は不要とされている）

環境的メリット

- ・ SO_x、芳香族炭化水素等、粒子状物質の排出が少ない。
- ・ 生分解性があり、また海洋生物に対する毒性も少ないため、漏出事故の影響が小さい。
- ・ 多くの場合、温室効果ガス排出削減効果がある。

その他のメリット

- ・ 原油価格高騰及び需給逼迫に対するヘッジとなる。
- ・ 航続距離、補給時間等の制約が小さい（ほぼ化石燃料と同等）。

2) 課題

技術的課題

- ・ 燃料噴射ポンプでの気泡発生。
- ・ 高温による燃料の重合・固化の可能性。エンジンの温度管理が必要となる。
- ・ エンジン部品の腐食を起こす可能性がある。

- ・ 寒冷地で粘性が高いという問題がある。ただし粘性は現在の重油の方が高く、プレヒーティングが必要となる点では同様である。

環境的課題

- ・ 食糧生産との競合
- ・ 森林破壊等、温室効果ガス排出増要因の排除
- ・ NO_x 及び一酸化炭素の排出は増加（既存事例）

その他の課題

- ・ コストが高い。

これら課題のうち、いくつかの課題は致命的なものではなく、技術革新により克服可能と考えられている。例えば燃料噴射ポンプでの気泡発生についてはこれはポンプの改造により対処することが出来よう。NO_x の排出量は B100 と B0 の差で 10%程度である。上記の事例はいずれもバイオ燃料で軽油を代替したものであるが、船用として広範に使われるためには重油を代替する必要がある。しかし、バイオ燃料と重油の混合または同一のエンジンでの併用は可能であり、エンジン自体に問題を生じるものではない。課題は燃料貯蔵・供給システムであり、重油とバイオ燃料は異なる貯蔵・プレヒーティングを行う必要がある可能性が指摘されている。

より本質的な課題としては①食料生産との競合、及び②温室効果ガス排出の純増となる可能性の 2 点がある。これらについて以下に示す。

①食糧生産との競合

現在、バイオ燃料の原料となっている植物（サトウキビ、トウモロコシ等）は食料、飼料作物であり、これらをバイオ燃料に転用することにより、食料生産に影響を与える。近年の食料価格の高騰の原因の一端は米国におけるバイオ燃料補助であったと考えられる。

②温室効果ガス排出の純増となる可能性

バイオ燃料については、燃焼して CO₂ になった分と同量が光合成により新たなバイオ燃料の原料として固定される限りにおいて、CO₂ を排出しない。しかし、上流部門（栽培・伐採・原料輸送・加工）の諸工程が化石燃料の使用等の排出源となるため、ゼロエミッション燃料ではない。バイオ燃料の CO₂ 排出の度合いは燃料・原料により大きく異なり、甚だしい場合は代替した化石燃料以上の排出源ともなりうる（ブラジルのダイズ起源バイオディーゼル、米国のラ

イ麦及びトウモロコシ起源エタノールがその範疇に含まれる)。一般的に、バイオ燃料の温室効果ガス排出削減効果は代替する化石燃料の半分程度と言える。EUは2020年までに輸送燃料の10%をバイオ燃料とする方針を打ち出したが、その温室効果ガス排出削減効果は35%以上とすべきとしている。

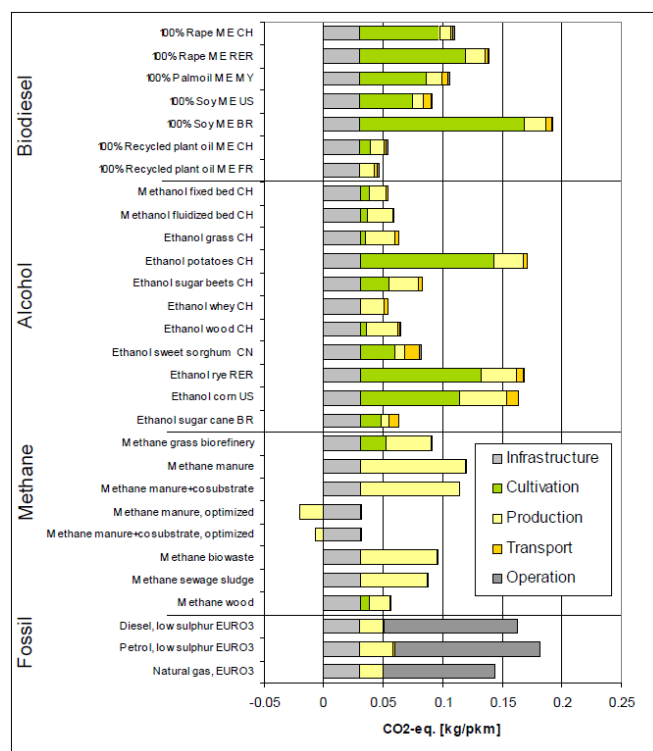


図 2-12 バイオ燃料の温室効果ガス排出削減効果
(Rainer Zah et al. (Empa): Life Cycle Assessment of Energy Products: Environmental Assessment of Biofuels)

従って、今後のバイオ燃料の開発は、食糧生産と競合せず、かつ温室効果ガス排出が小さいものに重点を置くことが必要となろう。短期的には、荒廃地・休耕地等、食糧生産と競合しない地点で生育が可能な作物（現在実用化段階にあるものはナンヨウアブラギリ (*Jatropha*) 等が有望視されている) について、かつ灌漑、農作業を行わなくても高い収率が確保できる品種の開発が課題となるが、将来的には第2世代バイオ燃料と言われる固体バイオマス起源の燃料開発が必要となる。

(4) 将来技術の研究・開発動向

これまでの議論を踏まえ、船舶におけるバイオ燃料の適用については以下のように結論できる。

- ①現状のバイオ燃料製造技術では、運輸部門の需要を賄いきれない。
- ②現状の（一時期の高騰が収束した）原油価格ではバイオ燃料は石油系燃料に対して競争できない。このことはまた、バイオ燃料は価格面で有引力がある（石油系燃料の価格が高い）自動車燃料から導入されることを示唆する。
- ③現状のバイオ燃料の中には、温室効果ガス排出削減効果という点で疑問視されるものがある。
- ④バイオ燃料の技術的障壁は、少なくとも他の代替技術に比べて大きいものとはいえない。

従って、バイオ燃料が船用エンジン（あるいは自動車燃料としての大量消費）で用いられるためには、第 2 世代バイオ燃料の開発が前提となる。これについて以下に述べる。

現状のバイオ燃料の生産量（エタノール 5000 万 kl≒約 4000 万トン、バイオディーゼル 800 万トン、合計エネルギー量は約 35Mtoe）は、世界の輸送用原油需要（2006 年に 2,105Mtoe）の 2%に満たず、しかも既に食糧生産との競合が生じている。このため、バイオ燃料が将来的に重要な位置づけを占めるためには、第 2 世代と呼ばれるバイオ燃料、即ち木材廃棄物、間伐材、枯死材等の森林廃材を原料とする固体バイオマス（リグノセルロース）の液化技術の開発が必要条件である。手法は下記に大別される。

- ・ 生化学的手法（酵素によりセルロース、ヘミセルロースを糖に転換し、エタノールを製造）
- ・ 熱化学的方法（熔融またはガス化により合成ガスを製造、さらに Fischer-Tropsch 法により液化し、バイオディーゼル等を製造）。

現在、これら両方式とも実証段階にある。前者はエタノールに限定されるため、船舶での仕様には適さない。

IEA Energy Technology Perspectives (IEA ETP) では、主要な代替技術について、これまでの類似技術のコスト低減率「商業化までの目標コスト」を想定している。この中で、バイオ燃料に関連するものは下記のとおりである。

表 2-3 代替技術の現在コストと目標コスト (IEA ETP) ¹³

技術	現在コスト	目標コスト	備考
リグノセルロース起源エタノール	0.8 USD/ガソリン換算リットル	0.5 USD/l	想定コスト：0.5 – 0.65USD / ガソリン換算リットル
Biomass-to-Liquid (BtL) バイオディーゼル	1 USD/ガソリン換算リットル	0.5 USD/l	想定コスト：0.5 – 0.7USD / ガソリン換算リットル

上記の価格には税が含まれない。従って、バイオ燃料価格でのガソリンと競合するためには、原油価格は 100 ドル/バレル以上である必要があり、石油会社にとってバイオ燃料は他の代替的石油燃料（タールサンド等）に比べて魅力が低いのが現状である。さらなるコストダウンのためには大規模な技術開発が必要と想定される。

IEA BLUE シナリオで想定されている 2050 年のバイオマスの生産量は 3,600Mtoe、うち輸送部門で消費するバイオ燃料はその 19%に相当する 700Mtoe を消費するとの想定である。2025 年頃までは穀物及びサトウキビを原料とするエタノールが主体となるが、最終的には biomass-to-liquid が大半（約 450Mtoe）を占める。バイオ燃料のために必要な土地面積は約 160 万 km²（日本の国土面積の 4.2 倍¹⁴）とされ、うち 110 万 km² が（船用燃料に用いられる）biomass-to-liquid である。

技術革新のみを考慮した場合の船舶の温室効果ガス排出量は 1,000Mt-CO₂⇔ 約 300Mtoe であり、その 30%がバイオ燃料に代替されるとの想定であるため、船用バイオ燃料の需要は約 90Mtoe と想定される。これは現在のバイオ燃料生産量 (50Mtoe 程度、そのほとんどはバイオエタノール) を上回るものであるが、2050 年に想定されるバイオ燃料生産量 700Mtoe の 13%、うち軽油を代替する燃料の 20%程度である。上記の試算に基づくと、船用に想定されるバイオ燃料の生産に必要な面積は約 20 万 km² と想定される。2000 年～2004 年の森林減少面積は年間 13 万 km² に上るため、バイオディーゼル全量を供給するための森林面積は森林減少面積の 10 年分以下と考えられる。

¹³ 各種文献より集約したものであり、不確実性が高く、またコストとプライスの峻別が困難である等の注釈が記載されている。

¹⁴ バイオマス全体では 375～750 万 km² とされている。

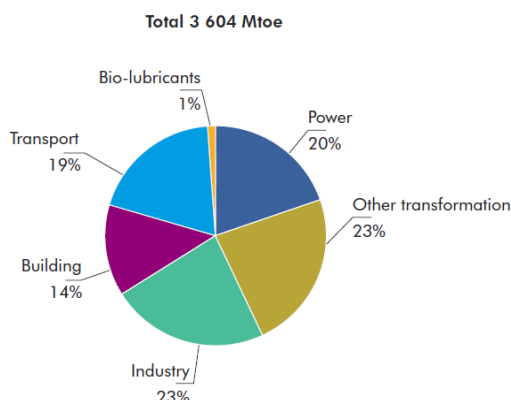


図 2-13 バイオ燃料の用途 (BLUE シナリオ)

大きな課題は、「第2世代」バイオ燃料としてどのようなものが選好されるか、及び運輸燃料の大半を占める自動車燃料技術がどうなるか、であろう。生化学的手法が選好されると、生産物はエタノールであるため、船舶（及び航空機）利用に適さず、用途は自動車におけるガソリン代替が主となろう。逆に、熱化学的手法が選好されると、生産物はバイオディーゼルはじめ広範な炭化水素となり、用途は広がる。

現在、自動車の代替燃料は米国ではエタノール、欧州ではバイオディーゼルが選好されているが、可能性として、2020～2030年までに自動車技術がエタノールを指向すると、結果的にエタノール製造（生化学的手法）が選好され、バイオディーゼル製造（熱化学的手法）が進まないというものがある。船用燃料より自動車燃料の方が需要が多く、しかも価格が高いため、代替燃料は当初は自動車燃料の動向に左右される。他方、自動車技術は中長期的には電気自動車、プラグインハイブリッド（場合によっては燃料電池自動車）を指向する可能性が高い。

（5）今後の導入可能性・課題

上記を総合すると、今後20-40年で第2世代バイオ燃料の開発・普及が進んだ場合には、その間に電気自動車、プラグインハイブリッド等の開発も進むことから、結果的にバイオ燃料は海運及び航空燃料として消費される、というシナリオが考えられる。

第2世代バイオ燃料の開発・普及が進んだにも係らず電力を用いた自動車の普及開発が進まない場合は、バイオ燃料は（燃料価格の高い）自動車から消費されることが想定される。なお、前述のように第2世代バイオ燃料も生化学的手法（エタノール）が先に実現する場合と、熱化学的手法（バイオディーゼル等）が先に実現する場合とでは状況が変化する。しかしながら、2030年以降、

ポスト・バイオ燃料に自動車に移行し、かつ 2020 年以降、航空・海運部門での燃料コストの増加（海運の場合には A 重油並みの品質の義務付け）により限界排出削減コストが高くなると、2050 年にはこれら分野におけるバイオディーゼルが一定の地位を占める可能性が想定される。

参考文献

- ・ IEA, 2008, Energy Technology Perspectives 2008
- ・ IEA, 2008, World Energy Outlook 2008
- ・ IEA, 2008, From 1st to 2nd Generation Biofuel Technologies
- ・ IMO, 2008, Updated 2000 Study on Greenhouse Gas Emissions from Ships, Phase I Report, 2008
- ・ Opdal, Hojem, 2007, Biofuels in Ships

その他、文中で標記。

2-2-3 水素

(1) 当該技術の概要

水素の利用方法としては、水素を燃料として燃料電池に用いる方式と、水素を内燃機関で燃焼させる方式とがある。

燃料である水素は、液化（液化温度は-253℃）、高圧タンク保存、または、金属吸収あるいは水や有機化合物(化石燃料の石炭、石油、天然ガスなど)の形で保持または供給され、その中から取り出す形で生成して利用される。現在では、主に天然ガス等を改質して生成した水素を使用しているが、将来は、太陽電池発電等の再生可能エネルギーから電気分解によって得た水素を利用することにより、水素生成プロセスでの環境負荷やコストの低減が可能になることが考えられる。

1) 燃料電池

燃料電池では、水素を用いた化学反応を利用して発電する。燃料電池は、物質（水素）の化学エネルギーを直接電気エネルギーに変換するため、理論的な発電効率が極めて高く¹⁵、また低出力運転時でも定格運転時と同様の高い発電効率がある点が特徴である。また、燃料電池において、化石燃料からの改質で水素を利用する場合には水素貯蔵の必要性がない。

表 2-4 燃料電池の種類

型式	低温型		高温型	
	固体高分子形 (PEFC)	りん酸形 (PAFC)	熔融炭酸塩形 (MCFC)	固体酸化物形 (SOFC)
運転温度	常温～100度	200度	650度	1,000度
出力規模	1～250kW	50～1万kW	数千～数十万kW	～数十万kW
用途分野	家庭用、自動車、 オンサイト	オンサイト、 分散電源	分散電源、 大容量発電	小型～大容量発 電まで

出典：燃料電池導入ガイドブック

家庭用または電気自動車用では固体高分子形（PEFC）が、高出力を要する船舶では固体酸化物形（SOFC）が主流となると考えられる。

また、新エネルギー産業技術総合開発機構（NEDO）が策定した「燃料電池・

¹⁵ 理論的には燃料を水素とした場合の発電効率は83%、通常の火力発電所の発電効率は40から50%程度。

水素技術開発ロードマップ 2008」(平成 20 年 6 月)で示されている PEFC、SOFC のロードマップを次に示す。

表 2-5 燃料電池自動車用 固体高分子形 (PEFC) ロードマップ

	現在	技術検証	技術検証から 社会実証へ	普及初期	本格商用化
		2008 年～	2010 年頃	2015 年頃	2020～30 年頃
車両効率	約 50%	約 50%	約 50%	60%	60%以上
耐久性	約 1000 時間	2000 時間	3000 時間	5000 時間	5000 時間以上
作動温度	約 80 度	-30～約 80 度	-30～約 90 度	-30～ 90-100 度	-40～ 100-120 度
製造原価 (kW 当り)	数十万円	数十万円	約 5～6 万円	約 1 万円	約 4000 円未満

出典：NEDO 燃料電池・水素技術開発ロードマップ 2008

表 2-6 大容量システム用固体酸化物形 (SOFC) ロードマップ

	現在	2010 年頃	2015 年頃	2020～30 年頃
家庭用 コー ジェネ (1kW ～数 kW)	開発・実証段階 40%、5 千時間 約 1 千万円		初期導入 40%、4 万時間 約百万円	普及 >40%、 9 万時間 <40 万円
業務用 コー ジェネ (数～ 数百 kW)	システム開発段階 40%、3 千時間 数百～1 千万円	開発実証 40%、1～2 万時間 数百万円	初期導入 40%、4 万時間 約百万円	普及 >45%、 9 万時間 <20 万円
産業用 コー ジェネ (数百 k～数 MW)	ハイブリッドシステム開発 48% 数百～1 千万円	開発実証 50%、1～2 万時間 数 1～数百万円	初期導入 >50%、4 万時間 約十～1 百万円	普及 >55%、 9 万時間 <15 万円
事業用・自家 発(数 MW～)				事業用・自家発コンバイン ド発電システムへの適用 >60%

出典：NEDO 燃料電池・水素技術開発ロードマップ 2008

2) 水素内燃エンジン

燃焼方式では、適当な割合で酸素と混ぜた水素が着火¹⁶して爆発的に燃焼した際のエネルギーを使用する。水素は燃焼させた場合でも、副生物として排出するのは水のみであるため、クリーンなエネルギーとされている。

¹⁶ 着火濃度は 4%から 75%と幅広い。着火は 570 度、燃焼は約 3,000 度である。液化温度は-253 度。

自動車用には水素を燃料とする水素ロータリーエンジンが試作されている。従来の内燃機関の技術や部品が流用できるため、エンジンコストや耐久性の問題の解決は比較的容易である。また、ガソリンとのデュアルフューエルシステムとすることも可能であるため、水素供給において利便性の点で有利である。

(2) 当該技術の実用化状況

水素の利用については、国内では経済産業省が水素・燃料電池実証プロジェクト JHFC において、燃料電池での利用を中心とした自動車での応用を目的とした研究が進んでいる。また、アイスランドでは水素燃料動力の漁船の開発を目標とするプロジェクトが推進されていたが、現在は船舶用の燃料電池の発電機の実証に主眼をおいたプロジェクトとして軌道修正された¹⁷。日本国内では、漁船用水素エンジン船舶の開発の試行例が一例ある（後述）が、これ以外の例が見当たらない。これらの状況より、水素内燃エンジンより燃料電池での利用による水素利用の実用化が中心となると考えられる。

また、(財) エネルギー総合工学研究所の「エネルギー技術戦略（技術戦略マップ 2008）」では、「運輸部門の燃料多様化」に関する技術のロードマップにおいて「高性能船舶」について、軽量化やエンジン排熱回収のほか燃料電池利用をあげており、船舶分野では燃料電池での水素利用が主に検討されることが想定される。

燃料電池については、2007 年度末で、日本国内では 1kW 級固体高分子形燃料電池(PEFC)が約 2000 台、1kW 級固体酸化物形燃料電池(SOFC)が約 30 台実証試験されている。また、りん酸形燃料電池(PAFC)や熔融炭酸塩形燃料電池(MCFC)は商用化されており、PAFC は 100kW 級が現在 10 台程度運転されている。PAFC は燃料電池にとって重要な信頼性の面でも、通算運転時間が 40000 時間以上稼動しているものがあり、技術面では十分に信頼が得られるレベルになっている。さらに MCFC では 250kW 級が 10 台程度運転されている。

定置型燃料電池については、電力および給湯を用途とした家庭用燃料電池(PEFC)の稼動試験が進んでおり、日本国内での家庭用燃料電池設置は 2008 年 5 月に 2000 個目を達成している。

現在の家庭用定置型燃料電池は、都市ガス、LP ガスまたは灯油のいずれかから水素を取り出し、酸素との化学反応により発電する発電ユニットと、排熱で

¹⁷ NEW-H-SHIP(2005 年 4 月)、EURO-HYPORT(～2003 年 6 月)、FC-SHIP(～2004 年 6 月)を経て、SMART-H2(2007 年 3 月以降)において、船舶の予備動力としての燃料電池の設計・研究が実施されている。

あたためたお湯を貯めておく貯湯ユニットからなり、建物内に給電および給湯を行うものである。定格発電出力は 500W～1kW 程度で、3人から5人家族の一般的な家庭の場合、建物内の需要に対して、電気が約4割、お湯が約7割程度を供給可能で、不足分は電線からの電力供給を利用する。

財団法人新エネルギー財団(NEF)は、「定置用燃料電池大規模実証研究事業」で、家庭用燃料電池の試験稼動および設置を進めている。当事業は、NEDOからの助成金を受け平成17年から実施し、第1期は平成17年10月から平成18年9月までの12か月間で175サイトに設置、以降平成20年度も実施中である。この稼動試験では、都市ガスからの改質により水素を得るもので、定格発電出力700W～1kW、年間CO₂排出削減量は約28%で850kg-CO₂相当である。

輸送機関用の燃料としては、船舶および自動車において試験を兼ねた実用化が始まった段階であり、利用例はまだ少ない。

水素の取り扱い等安全性については慎重を期する必要があるが、温室効果ガス排出削減への要請と並びエネルギー多様化のニーズもあるため、取り組みが進められている。具体的には下記の例が挙げられる。

船舶

- ・ ドイツでは、燃料電池を動力とする100人乗り観光船 Zemship が2008年より運航している。出力48kWの燃料電池2個とバッテリーのハイブリッド型で、3日間分連続航行分として50kgのガス状水素を高圧水素タンクに搭載している。
- ・ フィンランドのヴァルツィラ (Wärtsilä) 社では、船用補助動力源 (APU) にも使える大出力の固体酸化物型燃料電池 (SOFC) を開発している。同社の燃料電池は天然ガスの改質により得た水素を燃料としている。
- ・ 日本国内では、水産大学校と下関近郊の船舶関連会社により漁船用水素エンジン (内燃機関) の開発が試行されている。山口県周南市の化学工場から排出される副生水素を利用して、水産大学と共同調達しながら、開発に役立っている。なお、山口県は水素生産量が国内1位(国内の14%)。

他の輸送モード

- ・ 自動車では、燃料電池自動車、水素内燃エンジン車ともに各メーカーより試作車等が市場に投入されている¹⁸が、現状では導入例はリースを含み、官公庁などに限定されておりわずかである。
- ・ 平成 18 年、財団法人鉄道総合技術研究所では、燃料電池による電車の試験走行に成功した。燃料電池は最大出力 120kW（出力 18.75 kW/スタック×8 スタック、燃料電池内部での消費分を差し引く）のハイブリッド型で、水素は高圧タンクで搭載している。

（3）将来技術の研究・開発動向

燃料としての水素利用の課題点として、NEDO「新エネルギーガイドブック 2008」では、飛躍的な普及のためには、長期運転信頼性の向上、イニシャルコスト、ランニングコストの低減、総合エネルギー効率の向上、小型・軽量化、メンテナンスの簡易性および多燃料対応性の向上等が必要としている。

1) 長期運転信頼性、安全信頼性の向上

前述の通り、本格商用化のためには、250kW 程度までの燃料電池自動車用で 5,000 時間、数十万 kW 程度の大容量のもので 9 万時間の耐久性を目安として、長期運転時の信頼性の向上を目指している。

また、水素の補給および貯蔵時の安全性の確保でも十分な対策が必要である。水素貯蔵方法では、高圧や液化での保持については、高圧タンクまたは低温貯蔵技術の開発が必要である。水素の補給および貯蔵については、法整備（認可制）なども必要であろう。

2) コストの低減

まず、燃料電池単体でも低コストを実現する要素技術（燃料電池の触媒、電解質、セルスタックモジュールの低コスト化）¹⁹が必要である。現在実証試験されている 1k 級家庭用固体高分子形燃料電池は、開発段階であるので、機器だけ

¹⁸ 2009 年国際水素・燃料電池展（2009 年 2 月 25～27 日）では燃料電池車として、ホンダ「FCX CLARITY」、トヨタ「FCHV-adv」、GM「EQUINOX FUEL CELL」、日産「X-TRAIL FCV」、ダイムラー「F-Cell」が展示・出典されている。GM は 2015 年までに「EQUINOX FUEL CELL」の市販化を目指すとしている。期間中はトヨタと日野自動車が開発した燃料電池バスがりんかい線国際展示場駅と東京ビッグサイトの間をシャトル運行した。このほか、水素内燃エンジンでは、2009 年 3 月にマツダが水素ハイブリッド自動車「プレマシーハイドロジェン RE ハイブリッド」リース販売を開始したほか、BMW など各自動車メーカーで開発は進んでいる。

¹⁹ 従来の自動車エンジンに比べ、kW コストは 100 倍以上である。

の価格で 450 万円/kW 程度である²⁰。さらに、現状では、燃料電池を利用した車体（船体）もコスト高である。従来の自動車エンジンに比べ、100 倍以上の kW コストがかかっている²¹。コスト高のため、現段階ではリース販売のみに限られている。

また、ランニングコストとして、水素価格が重要となるが、現在は用途が限られていること、高圧や液化などの特殊な貯蔵方法のための設備が必要なことより、コスト高である。現在の水素製造価格は 150 円/Nm³である（輸送、貯蔵等を含まない）が、2020 年には CO₂ 同時吸収型石炭利用水素製造技術、吸収剤リサイクル技術、CO₂ 回収技術等により 40 円/Nm³にするとしている²²。

これらに対して NEDO は補助制度（地域新エネルギー等導入促進事業）などを実施して普及促進をはかっている。

さらに、今後の普及、および水素社会の実現のためには、水素供給インフラの整備など社会全体としてのコストが必要である。エネルギー総合工学研究所の試算では、都市ガスからの改質または電力供給による水電解からの製造した水素の高圧水素供給スキームにおいて、1 箇所の供給ステーションの設置に 3 億 3,000 万円必要としている（土地価格 1 億 2800 万円を含む）²³。

3) 総合エネルギー効率の向上

安定した実利用のためには、総合エネルギー効率の向上をはじめとする燃料電池技術の向上が重要である。

自動車用 50～100kW クラスは商用化のレベルまで来ているが、250kW は試験稼動中である。船舶などまで適用範囲を拡大するためには、燃料電池の大容量化、エネルギー密度の向上、航続時間の延長、高出力化、燃料電池の長寿命化が必要である。また、低温時機動性も確保しなければならない。

なお、船舶用として想定される中容量定置型ハイブリッドシステム（SOFC + マイクロガスタービン）の場合、2015 年頃の目標は設置面積あたり 5-13kW/m² 程度²⁴である。

²⁰ NEDO「新エネルギーガイドブック 2008」より。

²¹ NEDO「新エネルギーガイドブック 2008」より。

²² (財) エネルギー総合工学研究所「エネルギー技術戦略（技術戦略マップ 2008）」より。

²³ NEDO 燃料電池自動車・家庭用燃料電池の実用化に向けて 平成 18 年度成果報告シンポジウム (H18 年 7 月)「水素供給価格シナリオ分析等」より。

²⁴ NEDO 燃料電池・水素技術開発ロードマップ 2008 より。

(4) 船用分野における導入メリット・デメリット

水素使用のメリットとしては下記が挙げられる。

- ・ 水素を燃料として使用した場合、発生するのは水蒸気が主体で環境負荷が小さい（NO_x や水以外の水素化合物も若干発生）
- ・ 内燃機関方式の場合、既存のエンジンの大幅な改良の必要性は低い（自動車の場合）

反面、デメリットは下記のように挙げられる。

- ・ 水素の原料及びエネルギー源にもよるが、通常利用されているもの（天然ガス、LPG からの改質）は温室効果ガス排出削減効果が小さい
- ・ エンジン技術の問題（水素脆化等）
- ・ 貯蔵の課題（高圧タンク、液体水素容器、水素吸蔵合金等）
- ・ 水素製造の課題（改質・水電解の効率向上、低コスト化、コンパクト）
- ・ 燃料電池のコストが高い
- ・ 水素直接充填の場合、補給インフラの不足
- ・ 補給・貯蔵の安全性

最大の課題は、水素の搭載技術で、貯蔵方法、貯蔵密度の向上、補給方法、安全性、低コスト化などの要素技術が実用レベルを満たすことである。

(5) 今後の導入可能性・課題

上記を総合すると、水素を利用した場合の環境負荷は既存のシステムに比べて大幅に小さく、水素利用への期待が高くなっている。

ただし、数 MW 程度の出力を必要とする外航船の場合、中容量定置型ハイブリッドシステム（SOFC+マイクロガスタービン）とする必要があるが、2015 年頃の目標から見ると設置面積は数百 m²²⁵となる。また水素はエネルギー密度が低いため、燃料タンクはディーゼル機関に比べ 7 倍程度の大きさが必要となる。このため、スペースの確保が必要となる。また、水素供給についても現在の天然ガス、LPG からの改質では本質的な改善とならないため再生可能エネルギーが利用できるよう開発しなければならない。

この他、コストや安全性の点で解決すべき課題、開発すべき要素技術は多く、また普及するかどうかは環境規制等の状況に依存している。2020 年以降に環境規制が厳しい地域での短距離航路や資金負担力のある大型外航船等で一部普及することが考えられるものの、本格的に実用化が可能となるのは 2030 年以降になる見込みである。

²⁵ 平置きした場合

参考文献

- ・ NEDO 新エネルギーガイドブック 2008
<http://www.nedo.go.jp/kankobutsu/pamphlets/dounyuu/shinenegaido2008/all.pdf>
- ・ NEDO 燃料電池・水素技術開発ロードマップ 2008
<https://app3.infoc.nedo.go.jp/informations/koubo/events/FA/nedoeventpage.2008-06-18.1414722325/>
- ・ NEDO よくわかる技術解説
<http://app2.infoc.nedo.go.jp/kaisetsu/evm/ev05/index.html>
- ・ (財) エネルギー総合工学研究所「エネルギー技術戦略(技術戦略マップ 2008)」
http://www.iae.or.jp/research/project/ene_2008/ene_2008_0529.pdf
- ・ (財) 新エネルギー財団 低地用燃料電池大規模実証事業
<http://happyfc.nef.or.jp/summary.html>
- ・ 経済産業省 定置用燃料電池大規模実証事業の運転結果
<http://www.meti.go.jp/press/20070118002/20070118002.html>
- ・ 「平成 18 年度 欧米における燃料電池自動車の政策動向技術動向調査報告書」
日本自動車技術研究所(平成 19 年 3 月)
http://www.jhfc.jp/data/report/2006/pdf/ea_report_01.pdf
- ・ 固体高分子形燃料電池産学連携プロジェクト(ver.4)、NEDO
<http://www.nedo.go.jp/kankobutsu/pamphlets/nenryo/kotaikobunshi2008.pdf>
- ・ 第 5 回国際水素・燃料電池展(2009 年 2 月 25 日) HP
http://www.fcexpo.jp/2009_jp/index.phtml
- ・ 水素・燃料電池実証プロジェクト JHFC
<http://www.jhfc.jp/index.html>
- ・ 第 5 回国際水素・燃料電池展専門技術セミナー「Wärtsilä 社における SOFC システムの開発」
http://www.fcexpo.jp/2009_jp/web/doc/FC09_J_seminar.pdf
- ・ 「フィンランド技術紀行」、株式会社エフティオークラ HP
http://www.ft-okura.com/story/pdf/finland_story01.pdf
- ・ パナソニック HP (燃料電池)
<http://panasonic.co.jp/corp/news/official.data/data.dir/jn080414-1/jn080414-1.html>
- ・ ”Proton Motor supplies hybrid fuel cell drive for the world’s first fuel cell-driven passenger ship”, FuelCellWorks.com
<http://www.fuelcellworks.com/Supppage9136.html>
- ・ 「燃料電池での電車の試験走行」、財団法人 鉄道総合技術研究所

http://www.rtri.or.jp/press/h18/sep29_2.html

・「水素供給価格シナリオ分析等」、NEDO 燃料電池自動車・家庭用燃料電池の実用化に向けて 平成 18 年度成果報告シンポジウム (H18 年 7 月)

<http://www.nedo.go.jp/informations/events/190710/shiryu/oral17-2.pdf>

・マツダ水素ロータリーエンジン車「プレマシーハイドロジェン RE ハイブリッド」

<http://www.mazda.co.jp/corporate/publicity/release/2009/200903/090325b.html>

<http://www.jsae.or.jp/~dat1/mr/motor24/mr20062408.pdf>

・アイスランド 水素関連プロジェクト

https://www.hfpeurope.org/uploads/1099/1590/NewHShip_SKULASON_TechDays05_051128.pdf

http://www.newenergy.is/en/projects/finished_projects/new-h-ship/

・水産大学校と船舶関連会社による水素内燃エンジン船舶の開発事例

http://www.fish-u.ac.jp/kenkyu/sangakukou/kenkyuhoukoku/56/04_14.pdf

2-2-4 その他燃料（電力）

（１）当該技術の概要

電力を動力として利用し、モータで車体（船体・機体）を駆動する方式である。船舶での利用において、電気供給の方式としては、蓄電池に陸上の電力を供給する方式と、船上で発電する方式が考えられる。ここでは電気エネルギーを貯蔵（充電）してエネルギー源とする方式（電力貯蔵方式）と船上で再生可能エネルギーから発電してエネルギー源とする方式（再生可能エネルギー発電方式）を扱い、内燃機関等による発電および原子力は扱わない。

現在の技術では、充電電池による航行は航続時間および出力の制約から、内航海運の中でも近距離または港内船が前提となり、国際海運および大型貨物船は、船上発電方式が前提となる。船上での発電方法は、燃料電池による発電や、再生可能エネルギーの利用、および、内燃機関と併用するハイブリッド式も考えられるが、ここでは再生可能エネルギーの利用のみを取り上げ、ハイブリッド式についても補足的に触れる（燃料電池については「水素」参照）。

（２）当該技術の実用化状況

電気自動車については、その開発の歴史は古く、現在でも実用化されている。しかし、貯蔵・補給インフラ整備の問題から一般への普及は進まず、現状では官公庁など限定された範囲で使用されている。また、出力不足、充電時間、航続距離の点でも課題がある。ただし、運転時の回生エネルギーを利用した内燃機関とのハイブリッド型は、出力不足や供給インフラの問題がなく、近年は、乗用車だけでなく大型バスにおいても急速に普及しており、予め充電して走行ができるプラグインハイブリッド方式も一部で実用化されている。また電気自動車についても蓄電池の技術向上により今後の普及が期待されている。

船舶については、動力として電気を使用するものはあるが、再生可能エネルギーによる船上発電、または電力貯蔵装置による航行の実用例はまだない。また、加減速が頻繁な自動車と異なり、ほぼ一定速度で航行する船舶の場合は回生エネルギーを得にくく、自動車と同様の内燃機関とのハイブリッド方式のメリットは得にくく、実現されていない。

なお、現在、推進方式が電力の場合（電気モータでスクリューを回す電気推進方式）には、電力貯蔵装置または再生可能エネルギーによる発電を導入するに当たり、ポッド推進システムなどの既存の駆動設備をそのまま用いることが可能である。

- ・ポッド推進システム：クルーズ船、砕氷船、サプライ船などの運航中に負荷が大きく変わる船を中心に 1990 年代の初頭から欧州における採用実績

が急増している。導入実績はABB社が147基1423MW、RR社47基558MW。導入先はクルーズ船、砕氷船が約30%ずつ（海技研：2005年12月）。スーパーエコシップの特徴の一つ。

船舶と自動車の現状の実用化の状況を示す。船舶については開発計画・実験の段階のものである。

船舶

- ・ スウェーデンの Wallenius 社は、2025 年の導入を目指して風力・太陽光・燃料電池船（Orecelle）の概念設計を発表している。
- ・ 日本郵船、新日本石油が共同開発した、太陽光エネルギーを動力源の一部とする自動車運搬船「アウリガ・リーダー」（6万213トン、太陽光パネル328枚を装備）が、2008年12月19日に竣工し神戸より出帆した。最大で動力用電力の0.3%、照明などの生活電力の6.9%を供給する。
- ・ 商船三井が船用風力発電装置を開発し、木材チップ運搬船 TAIHO MARU（4万322トン）に搭載し、2004年3月10日より実用化に向けた実験を開始した。
- ・ 電力貯蔵装置により航行する船舶の実用例はまだない。

他の輸送モード

- ・ 家庭用100Vから充電が可能な電気自動車（プラグインハイブリッド車）も開発され、実用されているが、出力不足、充電時間、航続距離の問題に加え、電池の小型化などの課題もある。
- ・ ソーラーカーでは、高出力化が課題となり、現時点では実用化には遠いと思われる。ソーラーカーレースに参加する1人乗りレース用車体の例では、5.92m²の太陽電池パネルを設置し、出力800W、8時間耐久レースで平均速度70km/h)

(3) 将来技術の研究・開発動向

電力貯蔵方式では、長時間・高出力を可能にする大容量電力貯蔵方式や給電方式の検討、再生可能エネルギー発電方式では、太陽光発電や風力発電などの天候による変動を補い安定的に電力を供給するための電力貯蔵技術²⁶、および発電効率やエネルギー密度の向上²⁷、コスト²⁸等の課題が挙げられており、これらに対応した研究・開発動向を次に示す。

1) 電力貯蔵技術および給電システム

まず、電力貯蔵技術として必要なのが、大容量化、高出力の電力貯蔵装置の開発であるが、現在の電力貯蔵技術では、エネルギー密度が高いリチウム二次電池でもエネルギー密度が100-160Wh/kg程度と低くまた数十kWh程度の出力しか対応できない。

長時間・高出力を必要とする船舶への適用においては、既存のリチウム電池技術だけでなく、高性能キャパシタや、フライホイール等の利用による容量の増大などが研究されており、技術的ブレークスルーが期待される。さらに、非接触給電システム等の高効率給電システムの開発も必要である。

2) 再生可能エネルギーの安定供給性

太陽光発電や風力発電の利用においては、季節や天候によらない安定した電力の供給を行うことができることが前提である。2030年に向けた太陽光発電ロードマップ(PV2030)」においても、2010年以降は電気貯蔵技術との組み合わせによって安定電源として実現する方向性が示されている。

船舶への適用においては系統電力からの供給を受けることができないため電気貯蔵技術との組み合わせやバックアップ電源の確保はより重要となる。また塩害・風圧・振動下での耐久性も重要であり太陽光発電に対する実証実験もされている。

²⁶ 米国エネルギー省(DOE)は、電気エネルギー貯蔵方法の改善は、風力や太陽光等の再生可能エネルギーの大規模導入に向けた主要な課題の1つであり、風力や太陽光が得られない間は、備えられたエネルギー貯蔵は決定的に重要であると述べている。(出典: "New Carbon Material Shows Promise of Storing Large Quantities of Renewable Electrical Energy", University of Texas) http://www.utexas.edu/news/2008/09/16/carbon_energy/

²⁷ NEDO 「2030年に向けた太陽光発電ロードマップ(PV2030)」

²⁸ NEDO 「新エネルギーガイドブック 2008」

3) 発電効率、エネルギー密度の向上、低コスト化

「2030年に向けた太陽光発電ロードマップ (PV2030)」では、2030年までの期間を“市場対応型技術開発”の期間として、太陽電池の高性能化、製造技術の進歩によるモジュールやシステム周辺機器・設置工事などの低コスト化、およびモジュール等システム機器の耐久性向上や長寿命化に関連する目標設定を行っている。

発電効率では、2030年の目標値を2010年の約150%に設定している（他結晶シリコン太陽電池で2010年16%、2030年で22%）としている。また、発電効率の向上は、エネルギー密度の向上や、電池パネルの必要面積の縮小化を可能にし、最終的には太陽電池の経済性改善となる。太陽電池のコストについて、2010年には従量電灯電力料金並み（23円/kWh程度）、2020年には業務用電力料金並み（14円/kWh程度）、2030年には汎用電力並み（7円/kWh程度）の発電コストを目指すとしている。

風力発電についても、太陽光発電と同様に、小型かつ高効率の風車の開発、低コスト化などが必要である。

船舶へ適用した場合には、航続時間や航続距離を向上させるために、船体側の技術開発として躯体の軽量化、躯体形状の改良、重量バランスの改善などがあり、また電力伝送システムの改善として、エネルギー伝送効率の向上がある。

（4）船用分野における導入メリット・デメリット

電気使用のメリットとしては下記が挙げられる。

- ・ 電力に転換後のエネルギー効率が高いため、とりわけ化石燃料を用いない発電方式での温室効果ガス排出削減効果が高い。
- ・ 電気推進に伴うメリットとしては、船体のレイアウトの自由度が高いこと、騒音を低く抑えることができること（客船）、低速トルクが取れること（砕氷船）等のメリットがある。さらにポッド推進では舵抵抗が小さいというメリットもある。

反面、デメリットは下記のように挙げられる。

- ・ 現段階では電力貯蔵技術が未成熟で、給電のためのインフラも不足している。
- ・ 再生可能エネルギーについて、太陽電池の場合は、船舶の動力として必要な電力を得るために太陽電池を敷設するためには大面積が必要²⁹なこと、電池のコストが高く、天候に依存するため出力が安定しないこと、また、風力の

²⁹ VLCC（330m*60m）の面積の半分の10,000m²に太陽光パネルを置くと、出力は1.5MWとなり、エンジン出力25MWの約6%

場合も大きな設置スペースが必要なこと、風向きや風速に依存するため出力が安定しないことがあげられる。

- ・ 電気推進船では、一般的に発電機を介するため、装備機器が増大する。

(5) 今後の導入可能性・課題

上記を総合すると、電力貯蔵方式、再生可能エネルギー方式ともに電力貯蔵技術が重要である。現在利用できる蓄電池については、エネルギー密度が低く大容量タンクが必要(ディーゼル:リチウムイオン電池=1:15.5程度)であり、2.5MW程度の外航船(VLCC)を想定するとエネルギー密度が100Wh/kg程度の場合、1日航行するために600tもの蓄電池を必要とする。このため大規模、長距離輸送には対応できず、性能向上が重要な課題である。導入には現行のリチウムイオン電池の次世代電池(リチウム金属電池、リチウム硫黄電池)を待つ必要があり、10年以上先になると予想される。また電池以外にもキャパシタ及びフライホイールの活用が先に進むことも考えられる。導入する場合でもまず港内船等の航続距離が短い船舶から限定的に導入されると考えられる。

再生可能エネルギーについては、設置スペース(VLCC(330m*60m)の面積の半分の10,000m²に太陽光パネルを置くと、出力は1.5MWとなり、エンジン出力25MWの約6%)や電力供給の安定性が最大の問題であるため、当面は内燃機関に対して補助的な使用にとどまる可能性も大きい。現時点では、バイオ燃料を使用した内燃機関との併用が現実的な利用方法である。将来的には燃料電池と蓄電池の組み合わせや再生可能エネルギーと蓄電池の組み合わせが考えられる。

参考文献

- ・ NEDO 新エネルギーガイドブック 2008

<http://www.nedo.go.jp/kankobutsu/pamphlets/dounyuu/shinenegaido2008/all.pdf>

- ・ NEDO「2030年に向けた太陽光発電ロードマップ(PV2030)」(2004年6月)

http://www.nedo.go.jp/informations/other/161005_1/gaiyou_j.pdf

- ・ 環境技術ライブラリ「電力貯蔵技術の動向」、国立環境研究所

http://ecotech.nies.go.jp/library/report/repo_22.html

- ・ 独立行政法人 交通安全環境研究所 2007年フォーラム「新燃料自動車の導入分野と普及に関する調査研究－研究開発の方向性と普及に向けた課題検討－」
「IPTハイブリッドバスの開発と実証試験」

http://www.ntsels.go.jp/ronbun/happyoukai/forum_2007_.html

- ・「はとバス、ハイブリッドバスを導入」(2008年6月11日)

http://response.jp/issue/2008/0611/article110356_1.html

<http://search.hatobus.co.jp/main/detail.php?id=10134&kbn=N&kind=f>

- ・「日野が非接触給電ハイブリッドバスなどを提供」(2008年6月17日)

http://response.jp/issue/2008/0617/article110569_1.html

- ・「世界初、太陽光エネルギー船が出帆(日本郵船、新日本石油共同プロジェクト)」

http://www.eneos.co.jp/company2/press/2008_2009/20081219_01_0794529.html

- ・「太陽光で自動車運搬 世界初の大型船舶「アウリガ・リーダー」完成」産経ニュース

<http://sankei.jp.msn.com/life/environment/081219/env0812191510000-n1.htm>

- ・「世界初・船用風力発電装置の実船実験を開始～チャレンジし続ける商船三井の環境技術～」

<http://www.mol.co.jp/pr-j/2004/j-pr-2410.html>

2-3 ハイブリッド化技術

GHG 削減に貢献する可能性のあるハイブリッド化技術について、他分野での普及状況、今後の発展の見込みについて整理した。

船用での利用に関しては、排熱回収、大容量蓄電池等の技術に関し、現状、課題、普及した場合の効果、コスト等についてとりまとめた。

(1) 当該技術の概要

ハイブリッド技術は、原理の異なる2種類以上の動力源を状況に応じて、単独又は複数と変化させて推進力等に利用する技術全般のことであり、近年では、地球温暖化対策や化石燃料枯渇への懸念から、自動車などにおいて、エネルギー効率の向上あるいは温暖化ガス排出削減に向けた取り組みとして、着目されている。

ハイブリッド技術自体は、その歴史は古く、1900年頃、初期の自動車においてエンジン技術が未熟であったため、エンジン出力不足を電気モータで補助するハイブリッドカーが考えられ、いくつかの試みがなされていた。その後、1970年代の大気汚染とオイルショックを契機に、排出ガス対策と省燃費化に対して、各自動車メーカーが各種対策に本腰を入れて取り組み、この取り組みの一つとしてハイブリッドカーの研究開発が進んだ。

そして、地球温暖化対策が国際的に注目されるようになる1990年代になると、トヨタからプリウスが発売（1997年）され、その後の加速度的な普及となる。

表 2-7 ハイブリッドの方式の分類

シリーズ方式（直列方式）	初期のハイブリッドカーはこの方式であり、エンジンを発電のみに使用し、モータを車軸の駆動と回生のみに使用するものである。機構的には、エンジンで発電機を駆動し、発生した電力を大容量バッテリーに一旦蓄え、その電力でモータを駆動し、走行することになる。ディーゼル・エレクトリックと呼バレル方式は鉄道、船舶などで長く実用化されている。
パラレル方式（並列方式）	複数の動力源を駆動に使用する方式である。エンジンはトランスミッションを介して車輪の駆動も行い、同時に発電機の駆動も行う。蓄えられた電気エネルギーはモータへと送られ、走行用として使われる。モータは回生ブレーキにも用いられる。一般に、重量、および効率の点でシリーズ方式よりも優れるが、構造や制御が複雑とされてきた。バスやトラックなどで実用化が進められている。
スプリット方式（分割方式）	パラレル方式にさらにバッテリー充電専用の発電機を加えたシステムである。動力として、エンジンとモータ双方の出力を駆動に利用できる点ではパラレル方式と同様であるが、エンジンからの動力をプラネタリーギアを用いた動力分割機構により分割（スプリット）し、一方は発電機の駆動、他方は直接車輪の駆動と、それぞれに利用できる点でエネルギー効率に優れる。トヨタプリウスにより実用化され、現在の主流の方式である。

(2) 当該技術の実用化状況

輸送分野、エネルギー分野におけるハイブリッドシステムの実用化状況について述べる。一般的には、ハイブリッドシステムは、内燃機関での低効率域において、電気モータ駆動を組み入れることにより、総合的なエネルギー効率を目指すシステムであるが、以下に見るように、ガソリン車で燃費向上等に大きく寄与し、普及促進している。一方、ディーゼル車でのハイブリッド化は、いまだ普及途上の技術といえよう。

1) 車両分野

乗用車などにおいて内燃機関（ガソリンエンジンやディーゼルエンジン）に、発電モータと蓄電池（二次電池あるいはキャパシタ）を搭載し、モータの回転動力を組み合わせた動力源とし、エンジン効率の向上を行っている。

①乗用車

1997年にトヨタが初代プリウスを販売開始したことにより、一気に普及が進んでいる。



図 2-14 トヨタプリウスとそのメカニズム

出典：toyota.jp

プリウスは、シリーズ・パラレルハイブリッド方式を採用しており、走行条件の変化により、「エンジン単体」、「モータ単体」「エンジン・モータ併用」の切替えを頻繁に行うことで、燃費効率を向上させている。現在のプリウスは、ニッケル水素電池を 28 ユニット（直列）で搭載し、容量 6.5Ah（3 時間率）である。

表 2-8 ハイブリッド車の特徴

メリット	デメリット
<p>エネルギーロスの低減</p> <ul style="list-style-type: none"> ● アイドリング運転を自動停止し（アイドルストップ）、無駄となっていたエネルギーを削減。 <p>エネルギーの回生</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 減速・制動時に熱となって捨てていたエネルギーを、電気エネルギーとして回収し（回生ブレーキ）、その電気エネルギーを、スターターやモータの電力として再利用。 <p>高効率運転制御</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 特に発進・加速時のエンジン効率の低い走行条件で、回転トルクに優れる電気モータで走行し、エンジン効率の高い条件で発電するなど、車両のトータル効率が最も高くなるように制御。 	<p>クルージング時</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 長距離巡航時は、本来効率の優れるエンジン駆動となるために、通常のガソリン車と比べると重い蓄電池を搭載するために重量面で不利となる。 <p>導入費用</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 一般の車に比べ車体価格が高く、燃費向上による燃料代節約にて、初期費用を回収するためには相応の走行距離が必要となる。

②バス・トラック

1990年前半より、ディーゼルエンジンと蓄電池、モータの組合せによるハイブリッドバスの開発、試験運行が行われている。ハイブリッド方式には、エンジン出力を充電のみに利用するシリーズ方式と、エンジン、モータ両方で駆動するパラレル式が採用されている。

さらに次世代低公害バス・トラック導入・普及を目指し、国土交通省にて実施している「非接触給電ハイブリッドバス」では、路面に埋めこまれた給電装置から電磁誘導で搭載バッテリーに充電するシステムの実用化に取り組んでおり、よりモータ駆動の割合増を目指している。

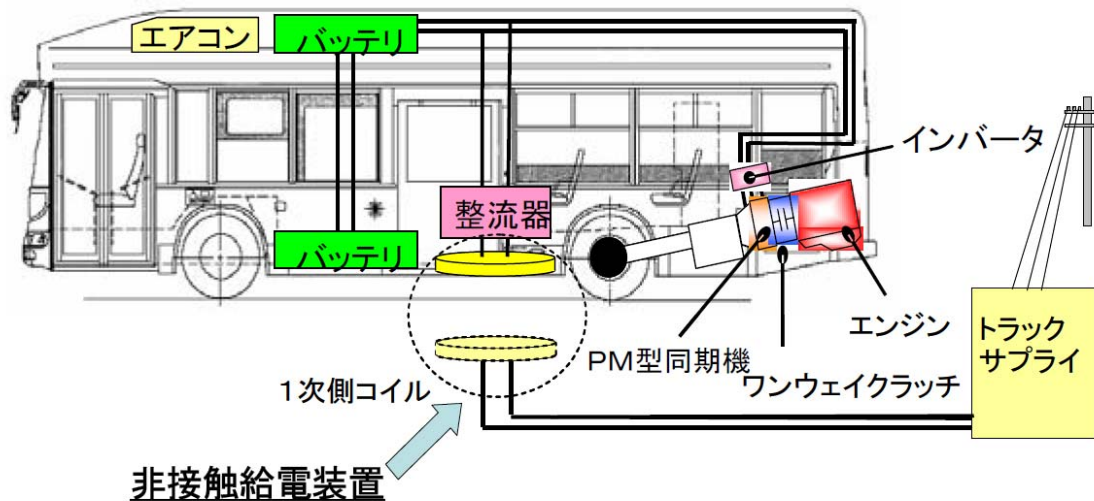


図 2-15 非接触給電ハイブリッドバス

出典：国土交通省

③鉄道分野

JR 東日本を中心にディーゼルエンジンと電気動力を併用するもの、燃料電池と蓄電池の電気動力を併用するものなどの研究が実施されている。

2) エネルギー分野

発電効率を上げるべく、2種類以上のエネルギー発生技術を組み合わせることで、相補的・効率的なエネルギー運用を目指している。特徴的な例は、天然ガスを燃料とするガスタービンエンジンからのその高温排気により蒸気タービンを回す「ガスタービンコンバインドサイクル発電システム」や、高温型燃料電池をガスタービンサイクルの内部に組み込むことで、燃料電池とガスタービンの両方のエネルギー効率を上昇させ、総合効率を飛躍的に高める「燃料電池・ガスタービンハイブリッド技術」である。

これは、コンバインドサイクル発電（現在は 1500℃コンバインドサイクル級発電が実用化；発電効率 52%）、その先の複合発電として、蒸気タービンの代わりに燃料電池と組み合わせ、更なる効率向上を目指すものである。将来的には、CCS との組み合わせにより、二酸化炭素排出をほぼゼロにすることを目標としている。

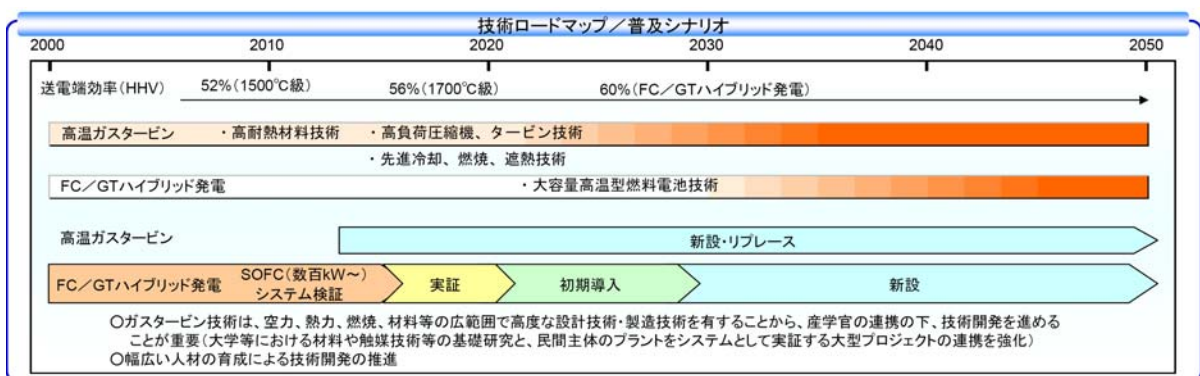


図 2-16 他分野における関連技術の見通し：高効率天然ガス火力発電

出典：「環境エネルギー技術のロードマップ及び普及シナリオ
 (総合科学技術会議(第75回)資料)」より

(3) 将来技術の研究・開発動向

将来予想される国際海運のGHG排出削減の制度化に向け、外航大型船用エンジンの更なる効率向上(燃費向上)対策は、喫緊の課題となる。

大型船用エンジンにおけるハイブリッド技術の導入は、当面は、エンジンから排ガスとして捨てられる熱エネルギーを電力として再生し、さらに動力として活用する技術からの着手となる。排熱利用に関する主な技術要素を表2-9に示す。

表 2-9 排熱利用に関する技術要素

機能	主要な技術要素
温熱・冷熱・蒸気回収	熱交換器 蒸気製造 蒸気吸収冷凍機
動力・電気回収	蒸気タービン パワータービン 熱電素子 スターリングエンジン等の外燃機関
蓄電・給電	蓄電池 キャパシタ フライホイール インバータ

また、内燃機関と電力とのハイブリッドシステムにおいては、その電力貯蔵技術が重要な技術開発項目となる。他分野における電力貯蔵関連技術の見通し

を以下に示す（図 2-17）。

- 太陽光・風力等の再生可能エネルギーの大規模な系統連携や電気自動車等の普及に必須となる蓄電池、高出力密度を有するキャパシタが有望である。
- 蓄電池には、リチウムイオン、ニッケル水素、ナトリウム硫黄（NAS）、レドックスフロー等があり安全性、耐久性、効率等の面が課題である。
- キャパシタでは、電気二重層キャパシタが電力貯蔵（無停電電源装置）や安全性、耐久性、環境性能などの性能面で優位にある。課題は、蓄電容量とコストとなる。
- プラグインハイブリッド自動車や電気自動車を夜間に充電することで電力負荷平準化の効果も期待される。
- 定置用蓄電池としては、2030年頃の開発目標値として、寿命20年（現在の2倍強）、コスト1.5万円/kWh（現在の1/3弱）である。



図 2-17 他分野における関連技術の見通し：電力貯蔵

出典：「環境エネルギー技術のロードマップ及び普及シナリオ（総合科学技術会議（第75回）資料）」より

将来技術である熱電素子は、両端に温度差を生じさせると起電力が生じるゼーベック効果を利用し、p型半導体、n型半導体を組み合わせて使用される。

排熱利用の有望技術として、我が国でも国が主導し研究開発（傾斜機能材料(科技庁,1993-97)、焼却場発電(科技庁,1995-97)、熱電発電システム(NEDO,2002-06))を進めてきているが、熱電素子の変換効率が低い、熱抵抗が大きい、耐熱性/耐腐食性、コストなどの要因で、実用としては人工衛星（原子力電池）、腕時計などに限られてきた。

船用エンジンからの排熱回収の現状と研究開発動向を以下に示す。

- 排ガスエコノマイザーおよびタービン発電機 (TG : Turbo Generator)
 - 排ガスの熱で蒸気を発生させ、蒸気タービン発電機で船内電気を供給
 - すでに設置事例あり。効率向上のための開発、および推進系への補助動力としての活用のための研究が必要である。
- ターボコンパウンドシステム (TCS : Turbo Compound System)
 - 通常、ディーゼルエンジンの排気ガスはすべて過給機に送られるが、その一部をパワータービンに送り、発電機能を持たせる。(PTO : Power Take Out)
 - または、減速して直接クランク軸に結合する。(PTI : Power Take In)
 - 1980年代後半より大型コンテナ船等で導入実績有り。
- TG、TCS の組み合わせ利用 (併設型)
 - TCS を装備すると排気温度が上がるため、これと TG を組み合わせて利用する。一般に TG だけで十分な船内電力が得られることが多いため、TCS は PTI として利用するか、PTO の電力をクランク軸に設置したモータ経由でプロペラ駆動力として利用する。
- TG、TCS の組み合わせ利用 (接続型) (三井造船の WHR : Waste Heat Recovery など)
 - 併設した TG と TCS を、さらに減速機を介して接続し、双方の回転エネルギーを電気エネルギーとして回収する。回収された電気エネルギーの一部はクランク軸に設置したモータ経由でプロペラ駆動力として利用する。
 - 船内電力需要の高い一部のコンテナ船に搭載された実績がある。

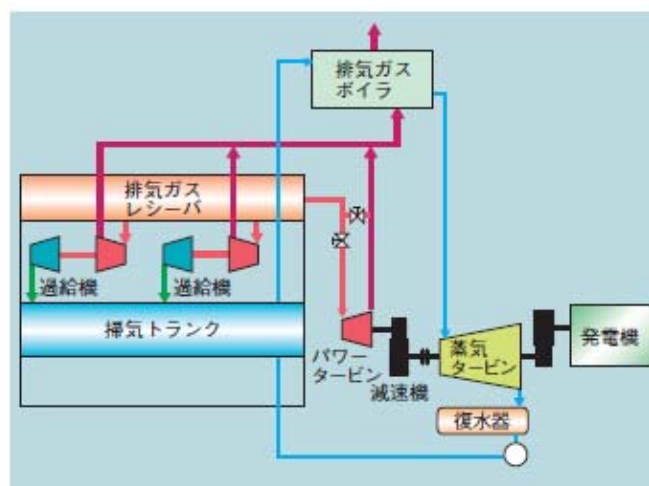


図 2-18 TG, TCS の組み合わせ例

出典 : 「高速発電・電動機を内蔵するハイブリッド過給機」三菱重工技報
VOL.44 、 NO.1: 2007

- ターボチャージャー発電装置 (TCG) (三井造船の TGU (Turbo Generator Unit)、三菱重工のハイブリッド過給機 (Hybrid Turbocharger) など)
 - 過給機のロータ軸に高速発電機を直結し、余剰の排ガスエネルギーを電気エネルギーとして回収する。TCS よりシステムが簡単となるというメリットがある。
 - TGU は小型ガスエンジンでは実績があり、大型ディーゼル機関への適用に向けた開発が進められている。
- THS : Turbo Hydraulic System
 - 過給機のロータ軸に減速機を介して油圧ポンプを接続し、油圧を発生するシステム。発生した油圧は主機関のクランク軸に接続した油圧モータを駆動して、軸出力として回収する。
 - 船舶用には現在開発が進められている。
- 熱電素子
 - 排ガス内の熱エネルギーを、熱電エネルギー変換材料を用いて電力エネルギーに変換する。少ない温度差を利用可能であり、他の廃熱利用システムの補助的に用いることが考えられる。
 - 野外用の冷蔵庫や発電装置等で民生用に広く使われ始めているが、船舶搭載用には今後研究開発が必要である。
- 造水装置
 - ディーゼルエンジン冷却水の排熱を利用して、海水を蒸発させ、高純度の水を造る。
 - すでに設置事例あり。ただし、熱効率を向上させても船内需要を超過するだけである。
- スターリングエンジン排熱回収
 - 排熱を熱源として、スターリングエンジンにより発電、蓄電を行う。
 - 船停泊時の船内電力として利用することで、エネルギーの有効利用が可能となるばかりでなく、港湾内で発電用ディーゼルエンジンを運転する必要をなくすことができれば港湾内の地域環境の改善が期待されている。

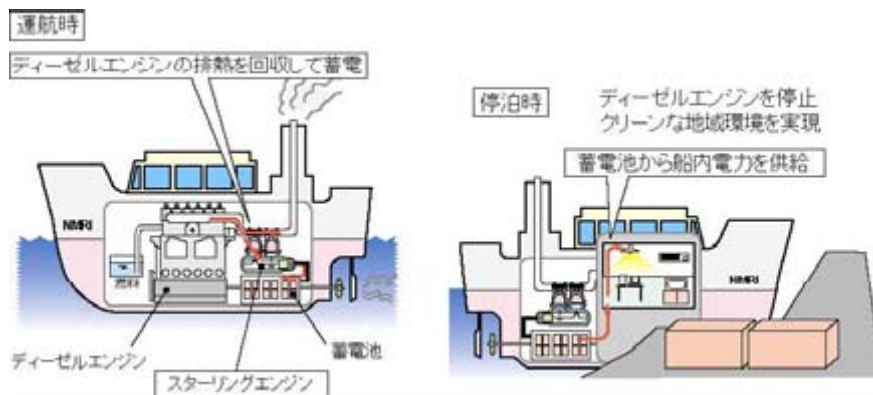


図 2-19 船舶用低温排熱回収システム

出典：海上技術安全研究所

表 2-10 動力回収率の比較表

名称	回収率	費用	実現性
廃熱利用技術			
・TCS 単独	～4%	中	適用可能
・WHR(TCS+ST)	～10%	高	適用可能
過給機余剰動力利用技術			
・TGU	～4%	中	確認テスト要
・THS	～4%	低	確認テスト要
・THS+排ガス分離技術	～6%	中	確認テスト要

出典：「ディーゼル機関の排ガスからのエネルギー回収」三井造船、社団法人マリンエンジニアリング学会、第52回特別基金講演会、講演予稿集

(4) 船用分野における導入メリット・デメリット

本来のハイブリッドシステムの導入メリットとなる、「内燃機関での低効率域において、電気モータ駆動を組み入れることにより、総合的なエネルギー効率向上」であるが、国際海運など外航用の大型船用エンジンにおいては、発進・加速の低効率域での運用機会は出入港時などごく限られ、さらに回生ブレーキによるエネルギー回収も原理的に困難であることから、自動車で普及したスプリット方式ハイブリッドの導入メリットは限定的となる。

船用分野におけるハイブリッドシステムの導入メリットとしては、「多様化していく技術の中、総合効率を向上」と「将来のゼロエミッション船への進化の途中形態」として整理できる。

前者については、負荷の異なる状況においてより最適な推進方式（例えば、ディーゼルと電気の組合せ）を中心とすることにより、全体効率を向上させることが可能である。特に内航船、短距離外航船、あるいは客船においてはすでにガスタービン発電によるポッド推進とディーゼル推進のハイブリッドシステムの導入が進みつつある。

後者については、石油燃料の高騰と GHG 排出削減化への期待から、代替機関・燃料への転換が必要となることが十分に想定されるが、当面、代替機関・燃料の技術成熟度が不十分であることを鑑みると、その出力不足を補うために、ディーゼル推進とのハイブリッドが必要不可欠となる。

一方、デメリットとしては、やはり複雑な機器を余計に搭載するために導入費用が嵩む点が上げられるが、客船における静穏性や、GHG 排出削減という付加価値を織り込むことで、デメリットが健在化しないケースもある。

また、複数の燃料からなるハイブリッドシステムの場合には、それぞれの燃料貯蔵を船内に設置する必要、そして燃料充填に関しても作業が増えることになる。

(5) 今後の導入可能性・課題

現在、国際海運において用いられている 2 サイクル低速回転ディーゼルエンジンは、およそ 300rpm 以下で回転し、一般に巨大であり大直径で長尺のシリンダを複数備えている。水中では、大きな翼面を持つプロペラを低速で回した方がエネルギー効率がいため、低速回転のエンジンでは減速歯車が不要でプロペラ・シャフトに直結できる。このため、重量、保守、故障、騒音振動などの面で有利であり、タンカーやコンテナ船などのサイズが大きく比較的速度も遅い船は低速回転のディーゼルエンジンを搭載している。

この船用 2 サイクル低速回転ディーゼルエンジンは、原動機単体としては、理論上の限界に近い高い熱効率 (50%前後) をすでに達成している (図 2-20)。

このように、エンジン単体で見ればかなり最適化されていること、さらに外航船の長寿命化 (30~40 年) も合わさり、現行の大型船用エンジンが次世代の低 GHG 排出の代替機関、さらには完全電動化への転換がなされるには、陸上輸送に比べ、長い時間を要すると予測されている。

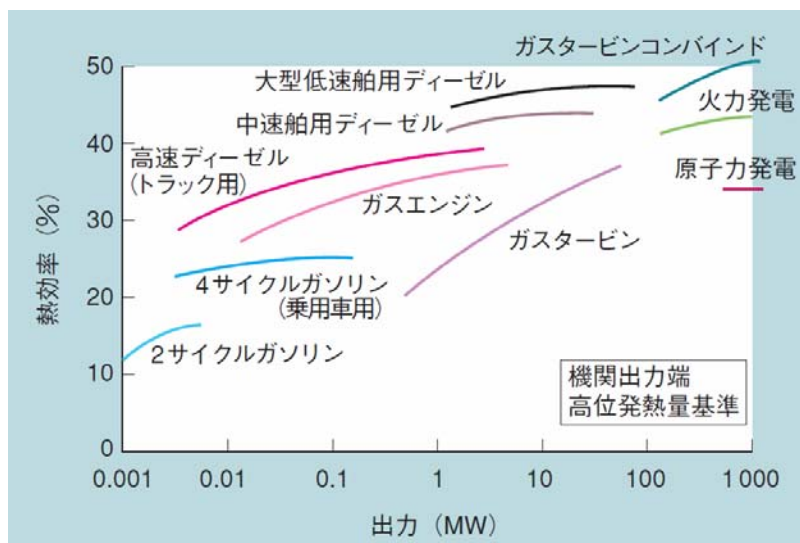


図 2-20 各種原動機の熱効率

出典：三菱重工技報 Vol. 45 No.1 (2008)

当面、エンジンから排出される熱エネルギーの有効活用を出発点として、電気として回収し推進補助として利用することで、全体としての熱効率の向上を目指す、ディーゼル排熱発電ハイブリッドの導入が進むと考えられる。現在は、

排ガスエコマイザー等による限定的な排熱利用であるが、これを動力に転換し、動力系全体の省エネルギーに貢献する既存船用エンジンへの改修付加が可能であり、現実的かつ即効性のある技術開発要素のひとつと成りうる。

長期的には、外航船動力も化石燃料依存の内燃機関を廃し、完全電気推進を目指すことになるであろうが、そこに向かう過程においては、ディーゼルエンジンと他の動力源（燃料電池など）のハイブリッド化、さらに電気推進系の出力割合を高めることと合成燃料や燃料電池などの代替機関の活用へと、段階的な動力源の転換を進めることになろう（図 2-21）。

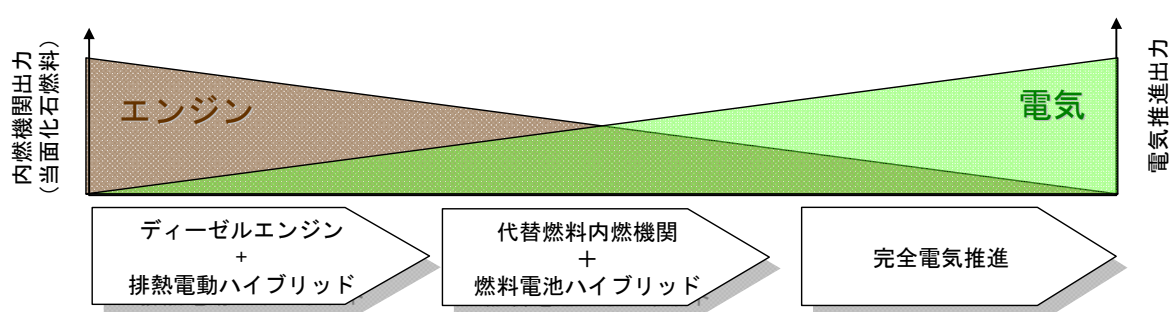


図 2-21 主機の将来ビジョン

海外に目を向けると、欧州産業界と政府が共同で組織されている欧州テクノロジー・プラットフォーム（ETP）³⁰のうち、船舶部門を担当するのは *WATERBORNE* と呼ばれるプラットフォームである。

WATERBORNE では、*Vision2020* と題する長期ビジョンを作成し、それを具現化するための研究ロードマップを作成しており、その1分野として「Route Map for Low Energy, Low Emissions Ship」がある（図 2-22）。

この中でも、GHG 排出削減に向けた技術開発ターゲットである *Low Energy, Low Emissions Ship*（省エネルギー・低排出船）への道筋として、当面は、燃料電池を含む多様な動力源の研究開発と、それらを組合せたハイブリッドシステムの研究開発に取り組むことが示されている。

³⁰ 技術分野ごとに組合の形態の組織を設立し、欧州全体として研究開発に取り組む枠組み。2007年時点で33のプラットフォームが設立されている。

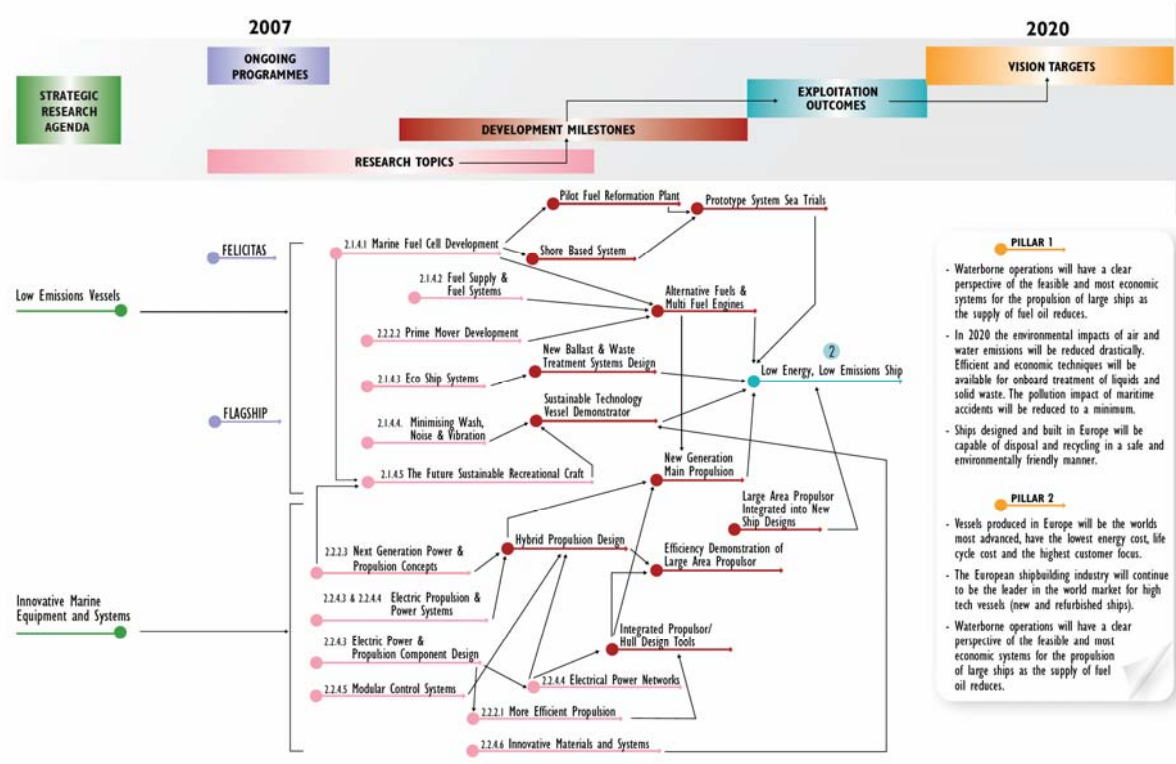


图 2-22 Route Map for Low Energy, Low Emissions Ship

出典：WATERBORNE^{TP}

2-4 運航最適化技術

GHG 削減に貢献する可能性のある運航最適化技術全般について、現状、課題、普及した場合の効果、コスト等についてとりまとめた。

(1) 当該技術の概要

運航最適化技術は、配船や航路選択を高度化することにより、①空船率を低減するための技術及び②航海時間や船舶の速力を抑制するための技術であり、主にソフト面での GHG 削減対策といえる。運航最適化技術の概念を図 2-23 に示す。

航海時間や船舶の速力を抑制することは、直接的に燃料消費量すなわち GHG 排出量の抑制につながる。船用エンジンの必要出力は一般に速度の 3 乗に比例し、燃料消費量はエンジン出力にほぼ比例する。航海時間が速度に反比例するとすれば、燃料消費量は速度の約 2 乗に比例することとなる。

ここでは、運航最適化技術を、複数船舶からなる船団あるいは単一船舶の調達及び運用を効率化することを目的とした「運航管理の最適化」と、個別船舶の洋上での航路選択を効率化することを目的とした「航路最適化」に分けて述べることとする。これは、技術的には、主に運航管理側の技術と船上技術それぞれで共通点が多いためである。

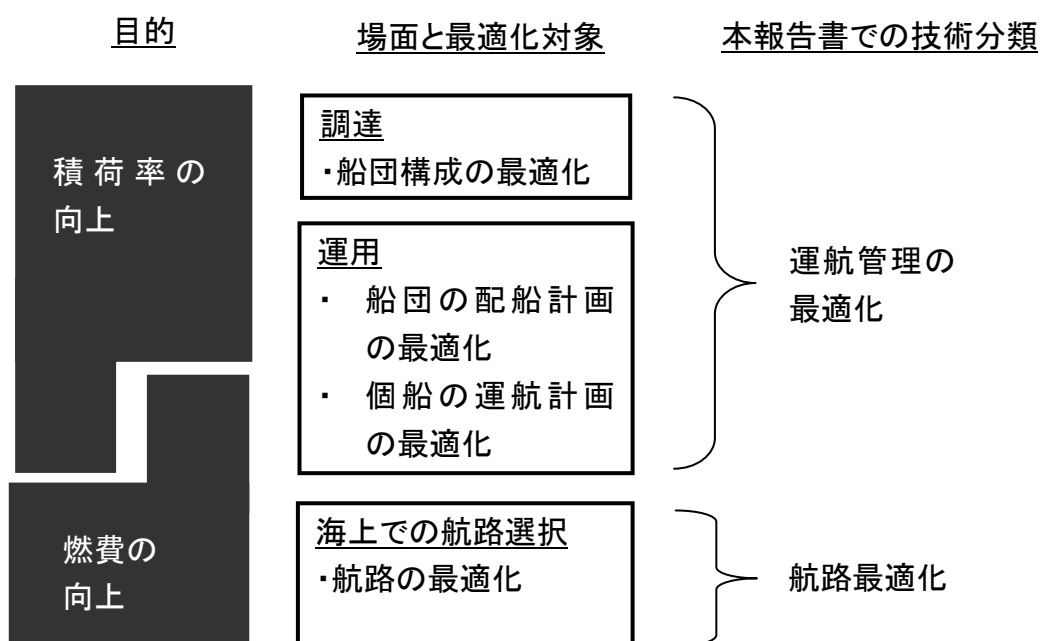


図 2-23 運航最適化技術の概念

1) 運航管理の最適化（配船、スケジューリング）

出発地、寄港地及び到着地、ならびに時間の選定等の配船計画の高度化により、輸送効率の向上（空船回航の削減）、揚げ地の待機（沖待ち）時間の削減、速力（回転数）の低減を図ることである。多数の船腹を保有するロジスティクス会社が、配船スケジュールを最適化することにより輸送を効率化するような技術がこれにあたる。構成要素としては、以下が挙げられる。

i) 船団構成の最適化

➤ 船腹数の最適化

- ◇ 輸送能力、輸送速度とエネルギー消費の関係の分析、データベース化
- ◇ 船舶の調達と運用を含めた長期的計画支援

ii) 運航計画の最適化

➤ 運航スケジュールの最適化

- ◇ 外部アライアンスを含む配船計画の最適化による空船回航の削減、積荷率の向上
- ◇ 単一船舶及び多数船舶系での最適化計算手法

➤ 港湾・運河スケジュール管理と最適化

- ◇ 荷役や運河通航等のスケジュールに合わせて到着するためのスケジュール管理最適化
- ◇ 情報収集、予約のシステム

iii) 航海中の情報収集、管制を通じた燃費の節減

➤ 船舶のリアルタイムモニタリング

- ◇ 位置情報、機関情報の収集

➤ 運用を通じた船舶の軽量化

- ◇ 給油地点の調整
- ◇ バラスト水量の低減

2) 航路最適化（ルーティング）

出発地と到着地と到着すべき時間が設定された際に、気象、海象条件や船舶の耐航性能等を総合的に判断し、航海時間及び速力（回転数）の低減を図ることである。構成要素としては、以下が挙げられる。

i) 気象・海象の把握

- 気象・海象予報の収集、可視化

ii) 船体応答、速度の算定

- 波浪応答、風の抗力等の計算
- 回転数と速力の関係の把握、データベース化

iii) 航路最適化計算

- 時間最小化、燃費最小化等の目的関数に応じた計算

(2) 当該技術の実用化状況

1) 運航管理の最適化

海運会社内部においては、将来の市場予測に基づき、船団構成を最適化すべく船舶の発注等を行っているが、製品化された船団構成最適化システムの例はない。

運航計画の最適化についても同様である。研究事例は多数あり、後述する。多数の船舶を多数の制約条件のもとで、時々に応じた目的関数を最小化するための最適化問題が大規模であるため、これを適切に解く実用性のあるシステムが存在しないのが現状である。

航海中の情報収集、管制に係るシステムの事例としては、日本郵船が、備船を含めた全運航船を対象にデータの収集管理を行うシステム「ECO REPORTING SYSTEM」を導入している。同社ではまた、燃料消費の性能をリアルタイムで表示する燃費計 (FUELNAVI) を導入している。この燃費計では、速力、進路、風向・風速、舵角、メインエンジンの回転数などを計測し、気象・海象、船体運動が燃料消費に与える影響分析が可能となっている。

三井造船では、インターネットを活用した、運航および保守業務支援システム「e-GICS」を販売している。e-GICS では、主機の性能診断および保守診断機能、ディーゼル主機関シリンダ圧力計測システムとのデータ連携機能追加などを実現している。

2) 航路最適化

波浪、風、海流等の気象・海象が船速・燃費に与える影響を計算し、航路を最適化する仕組みは、ウェザールーティング (シッフルーティング) サービスとして広く普及している。サービス形態は、

- 船上システムを利用する (ウェザーニューズ社など)
- FAX等を通じ推奨航路を提供する (気象協会など)

の2種類に大別できる。

ただし、従来の航路最適化は安全 (暴風、高波浪からの避航) が最も重視されてきた。同時に、到着時間予測や航海時間短縮には活用されてきているが、燃費節減を主目的とした活用は、近年の原油価格高騰を背景に、一部で始まっ

たところである。以下に、その事例を示す。

- ウェザーニューズ社 **BRIDGE** (ブリッジ：船上搭載航路選定システム)
航行中の船長自らが最新の海気象情報を基にした航路上の荒天状況が確認できる航海シミュレーションや航路比較、最短時間航路と最小燃費航路の検証等を行う、船上パソコンでのシステムサービスである。2008年7月に導入された **BRIDGE (Version5.2)**では、海流予測を利用した航路選定の機能を追加した。海流予測情報には、米海軍によるモデル予測結果を使っている。到着時間予測や最適航路選定機能も搭載している。
- 海流予測情報利用有限責任事業組合 (**FOP**) のサービス
(独) 海洋研究開発機構が開発した海洋予報システムによる海流予測情報を船上へメールで配信し、船上パソコンのビューワーで可視化するサービスを行っている。日本郵船では、2006年から2007年にかけて **VLCC** 船 13 隻で実証実験を行った結果、黒潮流域を **FOP** の海流予測情報システムに基づいて航行すると、従来の海流推測図に基づく場合に比べ、当該海域における燃料消費量および **CO2** 排出量を最大 9%削減できることを確認している。
- **NAPA JAPAN** 社 燃費最適化システム **NAPA Power**
運航スケジュール、本船固有の特性 (推進、操縦、耐航性能)、本船状態 (積付、汚損など)、海気象情報、潮流などを考慮し、例えば航路変更やスピード変更など、運航計画者の決定する個々のアクションに対し、燃料コスト影響や **ETA** 変化、**ETA** 回復シミュレーションなどの分析を行え、さらに燃費最適航路や制約条件付最適航路の探索が可能である。

(3) 将来技術の研究・開発動向

1) 運航管理の最適化

GHG 削減を目的とした船団構成あるいは運航計画の最適化に関しては、(独) 海上技術安全研究所の研究がある。「内航船の環境調和型運航計画支援システムの研究開発」では、荷役ルール等の制約条件下で、①使用備船数の最小化、②最小使用備船数の下での全ての船舶の総移動コストの最小化等を実現するためのシステムの開発を行っており、実船実験の段階に入っている。ここでいう移動コストとは、移動距離、移動時間、燃料消費量、**CO2** 排出量などである。海技研では、アライアンスの外航定期船の航路編成作業を、遺伝的アルゴリズムを用いて自動化する研究も実施している。

ユニバーサル造船では、運航最適化による GHG 削減を目的として、運航支援システム「Sea-Navi」の開発を行っている。同システムは、以下の3機能を実現することを目指している。

1. 最適航路探索システム、
2. 船体・機関・海気象の現況をモニタリングし、陸上に転送するモニタリング機能
3. モニタリングデータに基づき、個別船の構造余寿命を推定する保守・管理機能

船舶のリアルタイムモニタリングシステムとしては、国土交通省国土技術政策総合研究所「船舶動静広域監視・解析システム」がある。これは、船舶の AIS（Automatic Identification System：船舶自動識別装置）から発信される情報を複数の陸上受信局において受信し、世界的なデータベース（ロイズデータ等）と統合処理することにより、船舶の動静（船舶の航行、離着棧、係船、沖合停泊、避泊等）を広域的かつリアルタイムに監視するとともに、海域の効率的利用のためのデータ解析を実現したシステムである。

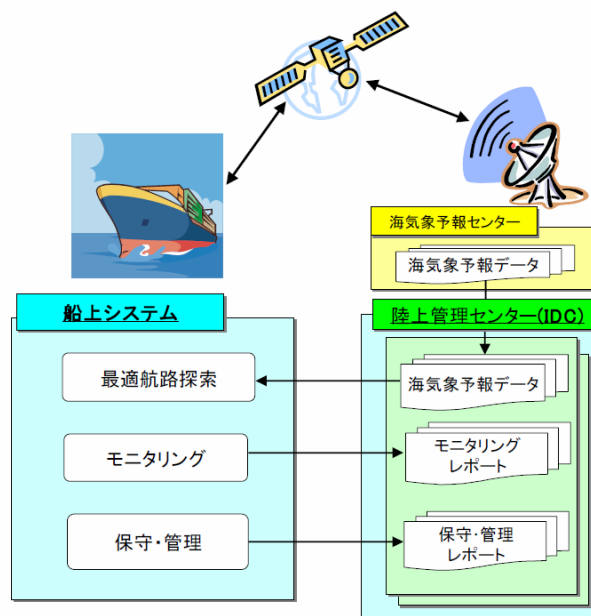


図 2-24 ユニバーサル造船「Sea-Navi」の概要

出所：ユニバーサル造船テクニカルレビュー No.2 (2008)

2) 航路最適化

海上における航路最適化の原理は明らかであるが、個別船舶の実海域性能（主機関性能、波浪応答等）が必ずしも明らかでない点が精度的な問題となる。国土交通省では、船舶の実海域での燃費性能を設計段階で評価できる指標を開発する「海の10モードプロジェクト」を2008年より開始しており、一般商船で速力や動揺を計測する実船計測を行っている。

3) 周辺技術としての陸船間通信

船舶のリアルタイムモニタリング及び陸上からの管制、船上での最適航路選定等においては、陸と海をつなぐ通信が特に重要である。しかし、衛星通信に依存する外航船においては、従来64kbps程度の速度しか実現されておらず、陸上に比べはるかに通信環境が悪い状態である。海上のブロードバンド化に向けた動きはあり、現在では、携帯電話(200-600kbps程度)に匹敵する速度の通信が可能となってきている。

KDDI やトラネ社(デンマーク)では、インマルサット第4世代衛星を用いて、最大432kbps(ベストエフォート)の衛星データ通信サービスを提供している。

船舶向けの高速度大容量(ブロードバンド)通信サービス提供については、実証実験段階に入っている。JSATでは、2009年度初頭に打ち上げ予定の衛星Intelsat15(IS-15)を利用したインド洋でのブロードバンド通信サービスを予定しており、商船三井およびエム・オー・エルエヌジー輸送と共同で海洋ブロードバンド実証実験を行っている。

(4) 導入メリット・デメリット

運航最適化技術の特性として、既存船への導入が比較的容易である点が挙げられる。したがって、新造船を待つことなく、即座に普及させ、GHG削減効果を得ることができる。燃費の節減は、直接的にコストの低減につながるため、既存船への導入を促す経済的なメリットがある。

コストは、機関のモニタリング対象などにより変動するが、主機やプロペラの交換に比較すれば小さなものである。ただし、陸船間の通信量が増大することによる通信コスト(アンテナ・通信回線使用料)の増大が懸念される。

航路最適化については、船長ら乗組員の作業負荷が増大する懸念がある。この点は、実現されるシステムにより克服されるべき課題である。

(5) 今後の導入可能性・課題

既に述べたとおり、運航最適化技術はソフト面からのGHG削減手段であり、

(1) で述べたモニタリングや最適化を実現するシステム、通信手段が実現されれば、コスト面からも導入は比較的容易である。

実現と普及のための課題は、以下のとおりである。

① 運航管理の最適化に関する課題

運航管理に関しては、多くの船舶からリアルタイムの運航情報を収集し、大局的な（多数の船舶数・船舶のライフサイクルを考慮した時間のもとでの）最適化を実現する方向であろう。これを実現するうえでの課題は、以下のとおりである。

i) 最適化アルゴリズムの高度化

- 多数の対象を、多数の拘束条件のもとで、都度異なる目的関数を実用的な時間で最小化する数学的あるいは数値的解法の実現、あるいは計算機性能の向上

ii) 最適化対象範囲の拡大への対応

- 将来的には、陸上を含めた物流のシームレス化が見込まれ、陸上インフラ（鉄道・高速道路）との結節による輸送効率の向上が図られることとなる。そうした条件下では、陸上輸送を含めた輸送効率の最適化が必要とされるため、拡大した最適化対象範囲に応じた最適化技術、情報整備が必要である。
- ライフサイクルを通じた省エネ化のためのメンテナンス最適化、及びそのための修繕ドック機能向上

iii) 減速航行に適したエンジンの開発

- 減速航行の長期化による排気系へのカーボン堆積、ピストンリング・シリンダライナの低温腐食等が発生しない、減速航行に適したエンジンの開発

iv) GHG 削減と経済性の両立

- 船腹数の調整には長期的な需要の展望が必要であるが、これが信頼できるものでなければ、船腹数の最適化はあり得ない点、軽量化のための給油地点の最適化とコスト低減は必ずしも符合しない点などを勘案し、ユーザの方針と判断のもとで最適化を実施できる柔軟なシステムの実現

② 航路最適化に関する課題

航路最適化に関しては、個別船舶の個別詳細な情報（実海域性能・積荷やバラストの状況）に応じ、より詳細な外部情報（気象・海象情報）を高度に活用することにより、精度を高め、GHG 削減効果を高めていく方向であろう。それ

を実現するうえでの課題は、以下のとおりである。

i) 実現上の課題

- 個別船舶の特性を反映した航路最適化手法の実現
 - ◇ 船舶固有の特性（波浪中船体運動、回転数－速力関係、積荷・喫水による変化等）の把握と、これらを反映した最適化
- 最適化アルゴリズムの高度化

ii) 普及上の課題

- 効果の実証
 - ◇ 同一条件（気象等）下あるいは同一性能船での比較の困難さから、海域での効果実証の事例が乏しい。普及を促進するためには、一定規模の船団に一定期間導入することによるトータルの効果実証を積み重ねていく必要がある。
- 船員への浸透
 - ◇ 船上作業の船上システムによる簡素化
 - ◇ 到着遅延の可能性を排除する「最適化」結果の信頼度の確保
- ビジネスモデルの確立
 - ◇ 燃費節減のコストを誰が負担し、メリットを誰が享受するか（荷主か海運会社か）

③ 周辺技術の課題

- 画像や大容量データの授受を可能とする通信（インターネット）のブロードバンド化
- 波浪、風、海流等の気象・海象予報の信頼度（予報精度、予報頻度、予報期間、空間解像度、対象範囲、対象要素）向上
 - ◇ 従来の机上計算の「効果」は予報が完全に正しいことを前提としているが、現実には GHG 削減効果は予報精度に依存する
 - ◇ 漁場の避航等により、最適化航路を航行できるとは限らない。日々変化する漁場や海上演習等の位置情報についても収集し、最適化に含めることにより、最適航路を利用できる機会が増大する。

④ GHG 削減効果の指標化上の課題

運航最適化により実現される GHG 削減は、機械の交換などの場合に比べ、以下の理由により効果を測定することが難しい。したがって、運航最適化を GHG 削減技術の中に明確に位置づけるためには、対策を講じない、いわゆる BAU(business as usual)に対する「追加性」を指標化するための「方法

論」の検討と確立が必要である。

- ◇ 現実の船舶の運航は、気象・海象や港湾の状況により変化するため、計画上想定される机上計算上の GHG 削減効果が、海上で実現するという保証がない。
- ◇ 対策を講じなかった場合との、同一条件下での 1 対 1 の比較が不可能である。
- ◇ 船団総体で一定期間の燃料消費量が低減していることがモニターできたとしても、他の対策による効果と分離することが難しい。

3. 技術戦略マップの作成

関係者へのヒアリング（安全・環境技術委員会での検討を含む）等を踏まえて、GHG 排出削減分野の技術マップ案（中長期開発テーマが中心）を作成した。また、個別技術毎の要素技術開発時期等を示した導入ロードマップ案を作成した。

3-1 検討の基本方針

技術戦略マップを検討するにあたり、到達目標の設定を行い、その目標に向けての技術シナリオを検討する。まずは、GHG 排出削減を巡る世界の動向、および海運荷動量の推計について概観し、将来（2050年頃）の国際海運を取り巻く状況を整理する。なお、本整理については、5章で詳細を述べるので、そちらを参照されたい。

3-1-1 GHG 排出量削減を巡る動向の概観

IPCC 第4次報告書によれば、2050年にGHG排出量を現状比半減を目指すことが、2100年におけるCO₂濃度450ppmの達成を恐らく担保し、温度上昇を2度台に抑えることが可能になる手段であるとしており、これが国際的な共通認識となりつつある。

国際海運分野からのGHG排出については、現在、国連気候変動枠組条約の京都議定書における削減対象に含まれておらず、IMOの海洋環境保護委員会（MEPC）においてその削減方法等に関する検討が進められている。現時点においては、具体的な削減策は合意されていないが、その排出規模の大きさから、将来的には排出総量規制の議論に発展する可能性はある。

なお、国際海運からのGHG排出量については各種の推計値があるが、国際海事機関（IMO）によれば、2007年の国際海運からのCO₂排出量は約8.5億t-CO₂と世界全体のCO₂排出量の3%近くを占め、世界の温室効果ガス排出国の上位のCO₂排出国に相当する水準であると見られている。

3-1-2 国際海運荷動量の推計

IMO スタディによる将来の荷動きの推計は以下のとおりである。将来の荷動き予測は IPCC による 6 種類の排出シナリオでの GDP 予測値をベースとし、それぞれ、高位、中位、低位の 3 ケースを設定している。中位推計結果を以下に示す。

表 3-1 IMO スタディにおける荷動き量の予測（中位推計 2007=100）

2050	A1-B	A1-F	A1-T	A2	B1	B2
Intercontinental	245	245	245	190	185	155
Short Sea	245	250	245	215	185	185
Container	900	875	905	645	615	525
Average all ships	402	397	403	302	288	247
2020	A1-B	A1-F	A1-T	A2	B1	B2
Intercontinental	131	131	131	121	120	114
Short Sea	131	132	131	126	120	120
Container	194	193	195	176	173	165
Average all ships	146	146	146	135	133	127

出典：IMO スタディ

ここで、各船種カテゴリは以下のとおりである。

Intercontinental： 大量かつ大陸間輸送に用いられる大型船

Short Sea： 地域内における海運に用いられる船舶のうち外航用に用いられているもの。大部分が小型船およびフェリー等

Containerships： 全てのサイズのコンテナ船

IMO スタディで想定する将来的な社会・経済シナリオの標準ケースと位置づけられた IPCC A1B シナリオ³¹における 2020 年と 2050 年の荷動き量は、それぞれ現状の 1.46 倍および 4.02 倍となる。年間の荷動量増加率は、およそ 3%程度の増加と算出される。

この前提に基づけば、トンマイル単位あたりの GHG 排出削減率 80%（現状

³¹ IPCC のシナリオ A1 は高成長型社会を想定し、新技術や高効率化技術が急速に導入される。また世界人口は 21 世紀半ばにピークに達した後減少する未来を想定する。IPCC には他に A2 シナリオ（多元化社会）、B1 シナリオ（持続可能型社会）、B2 シナリオ（地域共存型社会）の 4 シナリオに大別される。A1B は各エネルギー源のバランスを重視する。A1 シナリオには他に A1F1（化石燃料主体）、A1T（再生可能エネルギー発展）の 3 つがある。IPCC 第 4 次評価報告書では、A1B シナリオの元で 2000 年～2099 年までの温度上昇は 2.8℃（1.7～4.4℃）と想定されている。

比)を2050年に達成すれば、GHG総排出量も半減は難しいが、概ね現状維持を達成することができる。(詳細な予測は5章参照。)

3-1-3 技術開発期間の設定

全体の技術シナリオを構築するために、2050年までを3つの期間に区切り、それぞれの期間における投入技術についてその概略を検討した。併せて、上記のような前提にもとづき、それぞれの期間で実現が期待されるトン・マイルベースでのGHG削減率を想定した。なお、GHG削減目標が先送りになれば、それに呼応し、技術到達時期も将来側に先延ばしになることとなる。

【Tier 1（～2020年）：従来船への新技術追加・改修によりGHG排出量をトン・マイルベース30%削減】

○外航海運を取り巻く状況変化（仮説）

- ・IMOのSO_x、NO_x規制強化等により、重油から船用軽油への転換が進む。
- ・原油コストが再度上昇を始め、運航の経済性に対する要求が高まる。減速航行が速達性の求められない一部航路で定常的に実施されるようになる。
- ・原油に対するLNG価格が相対的に低下し、外航海運でもLNG船以外にタンカー等の船内空間に余裕のある船舶を中心にLNG利用が進む。
- ・GHG削減に対する社会的関心や、環境税などの導入開始の中、GHG削減に対する要求が高まり、一部の先進的な船社ではGHG排出削減に対する積極的な取組が開始される。

○外航海運において投入が予想される主な技術

コスト削減、環境対策に向けて、既存ディーゼル船をベースとした効率改善（主機関、船体）、船用軽油への対応等が進む。併せて減速航行を含む運航計画最適化が積極的に導入される。

GHG削減に関しては、国際海事機関（IMO）の試算³²（IMOスタディ）による従来船への技術改良適用による2020年の改善目標20-40%（Highシナリオ）から最大30%程度の削減（新造船・改修船）が図られると考えられる。

この時期の、主要な投入技術は、下記となる。

- 改質石油燃料ディーゼル機関：排熱回収・動力還元などを組み合わせた既存主機関の効率向上、SO_x、NO_x規制に対応した改質燃料への対応が行われる。
- LNG・石油燃料デュアルフューエル・ディーゼル機関：LNG運搬船以外にも、重油とLNGとのデュアルフューエル・エンジンの搭載普及が始まる。
- 従来船のプロペラ、フィン等の改良、新造船の船首・船尾形状の最適化、摩

³²国際海事機関（IMO）の外航海運からの温室効果ガス（GHG）排出量についての推計作業（「Updated Study on Greenhouse Gas Emissions from Ships」）

擦低減塗料、空気潤滑、排熱回収の改善などにより効率化を図る。

- 減速航行を含む航路上における運航計画の最適化が行われる。

【Tier 2（～2040年）：新造船でトン・マイルベース 60%削減】

○外航海運を取り巻く状況変化（仮説）

- ・原油コストは現状の2倍程度に達し、運航経済性に対する要求が更に高まる。
- ・外航海運部門についても、GHG削減の目標が設定され、高排出船には炭素プレミアム³³が課せられる。
- ・このような状況の中、コンテナ船のようなコスト負担力の高い船舶においては、高効率、ハイテクな省エネ・環境対応船舶の導入が進められる。
- ・コスト負担力の高くない、一般のバルク船等では、減速航行導入が更に加速する他、バイオ燃料の供給状況、供給コストによっては、その利用が急激に進む。
- ・陸上輸送等も加えた輸送プロセス全般にわたる船隊単位での総合的な運航／輸送管理が実施され、航行速度、利用船舶の最適化が図られる。

○外航海運において投入が予想される主な技術

コンテナ船等においては、ディーゼル・蓄電池ハイブリッド、ディーゼル・燃料電池ハイブリッドなどの新世代の主機関技術が投入される。バルク船では、バイオ燃料への対応が進められるとともに、総合的な運航／輸送管理システムの導入による、輸送効率改善が進められる。

これらの技術の導入により、新造船では運航管理の最適化を含めて、トン・マイルベースで60%のGHG削減が図られる。

この時期の、主要な投入技術は、下記となる。

- 改質石油燃料ディーゼル機関と蓄電池（一部は燃料電池）とのハイブリッド化による部分電化船、ポッド推進の導入。
- バイオ燃料ディーゼル機関：重油・軽油等の石油由来燃料から、バイオ燃料へ燃料転換した内燃機関。
- 陸上輸送も含めた輸送プロセス全般に対する、船隊としての総合的な運航管理技術。

³³過度のGHG排出に伴う懲罰的な課金

【Tier 3（～2050年）：新造船でトン・マイルベース 80%削減】

○外航海運を取り巻く状況変化（仮説）

- ・原油コストは現状の3～4倍程度に達し、非原油由来の燃料への転換が急激に進む。
- ・外航海運部門のGHG削減について、新造船に関してはゼロ・エミッションもしくはそれに近い目標が設定され、既存船についても、高排出船には高額な炭素プレミアムが課せられる。
- ・このような状況の中、燃料電池船、全電気推進船、原子力船などのゼロ・エミッション船の導入が進められる。
- ・バルク船では、超大型・低速走行船などの新コンセプト船の導入が進む。
- ・運航／輸送管理には陸上における生産／供給工程等も融合され、船社の枠を越えた総合的な運航／輸送管理が実施される。

○外航海運において投入が予想される主な技術

原油価格高騰、環境制約の中、新造船については基本的にゼロ・エミッション船となる。そのために、燃料電池船、全電気推進船、原子力船等が投入される。これらの船舶に対してカーボンフリーなエネルギー供給を行うために、再生エネルギーや陸上のCCS発電の電気エネルギー、水素エネルギー供給技術が導入される。また、外航海運におけるゼロ・エミッション船導入を実現するため、航路上での洋上発電・給電、水素供給等のインフラ開発が行われる。

一般の船舶についてはバイオ燃料対応を進めることによりGHG削減に対応する。

船社の枠を越えた総合的な運航／輸送管理システムが構築され、航行速度、利用船舶の最適化が行われる。

一部ゼロ・エミッション化の難しい船種・地域が残ることを考慮し、新造船については平均80%程度のGHG削減が実現される（IMOスタディによる将来の海運荷動量（A1Bシナリオ、中位推計）によれば、全船種計として現在の4.02倍の荷動量が想定されている）。この前提に基づけば、GHG排出削減率80%で概ね現状維持が達成される。

上記IMOスタディでは、高位ケースにおいても66%程度 of 原単位削減、中位ケースでは40%削減を想定するにとどまっており、今回の検討では、IMOシナリオでの検討での技術革新と減速航行により効率改善より、10から20年程度の前倒しを行うことを意味する。

この時期の、主要な投入技術は、下記となる。

- ガスタービン・燃料電池ハイブリッド電気推進船：水素あるいはエタノールを代表とするアルコール燃料を用いた発電システムによる電気推進船。
- バッテリー走行を中心とした全電気推進船：発電は定置発電（陸上、海上）と CCS の組合せ、あるいは船上自然エネルギー発電の組合せ。
- 超大型・低速推進船：低速航行を前提に、超大型化した省エネ運航バルク船

この時期では、燃料電池、蓄電技術、CCS 発電の電気エネルギー、あるいは水素エネルギー供給技術など他の産業分野での技術発展に大きく依存するシナリオとなっている。

ゼロ・エミッション船への転換が期待されるほど進まない状況であれば、これらの新技術の前倒しの導入も必要となってくるが、他産業での新技術の成熟度が十分でない場合、造船業界自体での莫大な研究開発投資が必要となるため、情勢変化を勘案しつつ対応をすることとなる。

3-2 GHG 排出削減に係る技術体系の整理

国際海運を対象とした造船、海運分野における GHG 排出削減に寄与する技術を抽出し、その技術の体系化を行った。

3-2-1 技術体系化

GHG 排出削減に寄与する技術を「主機・補機系技術（動力、エネルギー系）」「船体・船型系技術」「推進系技術」「運航・保守系技術」の4つの技術分野に分類した（表 3-2）。

表 3-2 GHG 排出削減に係る技術体系化

	技術分野	概要
主機・補機系	回収エネルギーの利用	排熱エネルギーを回収し推進利用する。
	代替燃料	LNG と石油燃料のハイブリッドディーゼル、バイオ燃料ディーゼル等による GHG 削減。
	燃料電池	ディーゼルと燃料電池のハイブリッド等による GHG 削減。
	ガスタービン	ガスタービンと燃料電池のハイブリッド等による GHG 削減。
	バッテリー走行	陸上 CCS、再生エネルギー利用によるバッテリー走行。
船体・船型系	大型化	船体を大型化することにより効率を改善する。
	船型形状・船首形状改良	新造船ではカタマランやトリマランのような船体形状の適用により、従来船では船首形状の改良により抵抗軽減を図る。
	軽量化	ノンバラストあるいはバラスト低減、部材の軽量化により効率化を図る。
	舵・船尾改良	舵や船尾形状の改良により抵抗軽減を図る。
	粘性抵抗低減	船底に生成した空気膜や、摩擦低減効果のある塗料により摩擦抵抗の軽減を図る。
	風圧抵抗低減	居住区の外壁に抵抗低減用の板を装着することによる風圧抵抗低減。
	船内省電力化	照明機器、航海機器、荷役機器等の省電力化、送電ロス対策等により省エネを図る。
推進系	プロペラ改良	CRP、ポッド推進、遊転プロペラ等、プロペラ自体の効率を改善する。
	省エネ付加物	プロペラの前後に省エネデバイスを装着することにより効率を改善する。
	外乱エネルギー利用	太陽光、波浪や風など外乱を利用した推進力を補助的に利用することにより、主機関の省エネを図る。
運航・保守系	運航面の高度化	ウェザールーチン、オートパイロットや配船計画等の運航管理に係る技術の高度化により効率改善を図る。陸上輸送を含めた運航最適化も必要である。
	運航支援の高度化	シームレス物流や、自動離着棧技術など荷役支援や修繕ドックの機能向上等メンテナンスに係る技術の高度化により効率改善を図る。停泊時の陸電利用や ICT 活用による通関、荷物追跡等も運航支援の高度化に位置づけられる。

表 3-3 には GHG 排出削減に寄与する主な適用技術を整理した。表中に太字で表示した GHG 削減に関して重要と思われる技術、大きな削減効果が期待される技術については 3-3 節にて技術の現況および展望を示す。

表 3-3 GHG 排出削減に寄与する技術

	技術分野	適用技術・インフラ
主機・補機系	回収エネルギーの利用	熱交換器効率向上技術、蒸気製造技術向上技術、造水装置技術、蒸気タービン発電機、パワータービン、インバータ効率向上、リチウムイオン電池、キャパシタ改良
	代替燃料	天然ガス輸送・貯蔵技術開発、天然ガスハイドレート化、蒸気タービン改良エンジン、 デュアルフューエル・ディーゼル 、LNG・CNG 搭載技術、 バイオディーゼル
	燃料電池	ディーゼル・燃料電池ハイブリッド 、 ガスタービン・燃料電池ハイブリッド 、 燃料電池船 、船用燃料電池スタック開発、船用水素貯蔵技術、船用水素輸送技術、洋上水素供給
	ガスタービン	ガスタービンエンジン
	バッテリー走行	インバータ効率向上、リチウムイオン電池、電気二重層キャパシタ、ハイブリッドキャパシタ、超伝導フライホイール、次世代電池（リチウム金属電池、リチウム硫黄電池）、洋上発電・給電プラットフォーム技術、超伝導モータ、太陽光発電
船体・船型系	大型化	大型船建造 、ドック大型化、ハブ港ネットワーク
	船型形状・船首形状改良	双胴船（カタマラン） 、 三胴船（トリマラン） 、単胴船船首形状改良（球状バルブ等）
	軽量化	高張力鋼利用、アルミ部材適用、構造部材低減、 FRP 、 CFRP 、 バラスト低減・ノンバラスト
	舵・船尾改良	形状最適化、フィン装着
	粘性抵抗低減	マイクロバブル 、 空気潤滑法 、 空気膜法 、 摩擦低減塗料
	風圧抵抗低減	居住区外壁への板装着
	船内省電力化	低電力消費型照明機器、低電力消費型航海計器、荷役機器の省エネ化、送電ロス対策
推進系	プロペラ改良	CRP 、遊転プロペラ、 ポッド推進 、二軸化
	省エネ付加物	プロペラ前後への省エネデバイス装着
	外乱エネルギー利用	波浪推進、 帆走技術（凧） 、 帆走技術（高揚力帆）
運航・保守系	運航面の高度化	ウェザールーチン 、オートパイロット改良、陸電利用、 配船計画の高度化 、陸上輸送を含めた運航最適化
	運航支援の高度化	シームレス物流のための接点機能改善、自動着岸技術、港湾荷役機器改善、ICT を利用した通関・荷物追跡、将来船への機能対応、メンテナンス最適化、修繕ドック機能向上

3-2-2 適用技術の整理

タンカー／バルカー，コンテナ船，ローロー船／フェリー（短期航路）の 3 種類に分け船種別に適用技術を整理するとともに、各種技術の新造船、あるいは既存船へのレトロフィットへの適用について整理した（表 3-4）。ここで、技術の適用性については、主に大きく効果を発揮するという視点であり、効果を否定するものではない。

表 3-4 船種別の適用技術

適用技術	タンカー／バルカー		コンテナ船		ローロー船／フェリー	
	新造船	レトロフィット	新造船	レトロフィット	新造船	レトロフィット
主機・補機系						
回収エネルギー利用	○		○		○	○
デュアルフューエル・ディーゼル	○	○	○	○	○	○
バイオ燃料	○		○		○	
ディーゼル・燃料電池ハイブリッド	○		○		○	
バッテリー走行	○		○		○	
船体・船型系						
大型化	○		○		○	
船型改良	○		○		○	
ノンバラスト	○		○		○	
バラスト低減	○	○	○	○	○	○
部材軽量化	○		○		○	
空気膜法	○	○	○	○	○	○
摩擦低減塗料	○	○	○	○	○	○
風圧低減(居住区)	○	○	○	○	○	○
船内省電力化	○	○	○	○	○	○
推進系						
CRP	○		○		○	
ポッド推進	○		○		○	
プロペラ二軸化	○					
プロペラ周り省エネデバイス	○	○	○	○	○	○
波浪推進	○		○		○	
帆走(風)	○	○			○	○
帆走(高揚力帆)	○				○	

また、表 3-3 の技術分野の中から、2020 年頃までを目処として当面取組むべき個別技術を表 3-5 に示す。これらは、すでに研究開発着手している技術、内航船などで技術実証され外航への適用評価を必要とする技術を含み、前節で述べた Tier 1 での目標を実現する上で有望となる技術を示したものである。

表 3-5 当面着手すべき技術開発要素（2020 年頃まで）

技術分野		適用技術・インフラ		備考
主機・補機系	回収エネルギーの利用	温熱、蒸気回収	熱交換器効率向上技術 蒸気製造技術向上技術（排ガスエコノマイザ） 造水装置技術	ディーゼルエンジンと排熱回収電気推進のハイブリッド化による省エネルギー化のための要素技術
		動力、電気回収	蒸気タービン発電機 スターリングエンジン等外燃機関	
	デュアルフューエル・ディーゼル	天然ガス輸送・貯蔵技術開発 天然ガスハイドレート化 DFDE エンジン、蒸気タービン改良エンジン等 LNG・CNG 搭載技術		デュアルフューエル・ディーゼル・エンジン船の一部普及
	代替燃料	バイオディーゼル燃料への対応化 GTL、DME エンジン開発		石油需給の逼迫など外部環境依存
	燃料電池	既存主機方式とのハイブリッド化	船用燃料電池スタック開発 ディーゼル・燃料電池ハイブリッド ガスタービン・燃料電池ハイブリッド	
水素燃料		船用水素貯蔵技術 船用水素輸送技術		
バッテリー走行（蓄電・給電関連技術）	インバータ効率向上、リチウムイオン電池、電気二重層キャパシタ、ハイブリッドキャパシタ、超伝導フライホイール、洋上発電・給電プラットフォーム技術、太陽光発電		他分野（自動車、電力分野等）での技術開発の進捗にあわせ、将来のゼロ・エミッション電気推進船実用化のための要素技術開発（回収エネルギー利用での適用技術を含む）	
船体・船型系	大型化・船体重量低減技術	高張力鋼利用 アルミ部材適用 構造部材低減 FRP、CFRP 利用 バラスト低減・ノンバラスト		各要素技術は部分的に新造船へ適用 ドック大型化など港湾施設整備と合わせ、将来の超大型船のための要素技術開発
	船型改良	双胴船（カタマラン）、三胴船（トリマラン）		2020 年にコンテナ船では一部実用化
	船体抵抗、粘性抵抗低減	摩擦低減塗料、空気膜法 船首形状改良		
推進系	プロペラ改良	CRP、遊転プロペラ ポッド推進 二軸化		CRP とポッド推進のハイブリッド化で効果増
	省エネ付加物	プロペラ前後への省エネデバイス装着		
	外乱エネルギー利用	帆走技術（凧）、帆走技術（高揚力帆）		補助的動力元として利用
運航・保守系	運航面の高度化	ウェザールーチン 陸電利用 配船計画の高度化、陸上輸送を含めた運航最適化		ウェザールーチン＋運航管理を含めた最適化により更なる削減を目指す
	運航支援の高度化	シームレス物流のための接点機能改善 港湾荷役機器改善 メンテナンス最適化		

①タンカー、バルカー

将来にむけた方向性として、超大型船により比較的低い航行速度で運航されることが予想されている。そのため、抵抗低減技術（船首形状、空気膜）が重要となる。また、ウェザールーティングを含めた運行管理も重要技術となる。また、風力や太陽光の補助的動力の活用も進む。

②コンテナ船

定期航路を比較的高速で運航する要求が高まると予想され、排熱回収を含めた主機周りや推進系（プロペラ周り）の技術開発が重要となってくる。また、船体の軽量化も重要となる。

③短距離船（ローロー船、フェリーなど）

上記の2船種に比べると、GHG排出削減に向けたより積極的な技術開発と導入が進むことになる。主機はハイブリッドなど電化が進み、推進系もポッド推進や舵周りの改良が進む。また、風力や太陽光の補助的動力の活用も進む。

（1）船種別の適用技術

船種別の適用技術整理において、船種間の相違が見られる技術は以下のとおりである。

【電気推進】

タンカー／バルカーとコンテナ船では、電池の大型化の課題の解決を前提とすれば実現可能であるが、当面電化は厳しく減速航行で補うこととなる。ローロー船やフェリーなどの短期航路船では比較的早期に電化が実現する。

【帆走技術】

コンテナ船では甲板に帆を設置することが構造上困難であり、帆走技術の適用は不可能である。

【プロペラ二軸化】

タンカー／バルカーについてはプロペラの二軸化が可能であるが、コンテナ船、ローロー船、フェリーについては、船舶の構造上二軸化は困難である。

（2）レトロフィットと新造船

新造船が普及し始める2020～2030年頃までは既存船のレトロフィットによりGHG排出削減を図る。主機・補機系の技術は新造船への適用となる。既存船への適用が可能な技術としては、プロペラ関連省エネデバイス、空気膜法によ

る摩擦抵抗低減、摩擦抵抗塗料などが挙げられる。このほか、フィンスタビライザー等の水中翼技術、風を利用した帆走技術、居住区の風圧抵抗改善技術についても既存船への適用が可能である。

新造船については既存船へ適用できる技術のほかに主機・補機系技術、CRPやプロペラの二軸化、船首形状改善技術が挙げられる。トリマラン・カタマランなどの船型の船舶が2020年までに数隻建造され、その後の普及状況次第では単胴船形状から船型が変化する可能性もある。外乱エネルギーを利用した高揚力帆船の実用化は2030年ごろと見られている。2040年前後には、さらなるGHG削減を目指しインフラ整備やメンテナンス技術の向上に合わせて超大型船が登場する。

(3) 運航管理などのソフト関連

当面はウェザールーチンを中心とした運航管理、配船計画の改善により、減速航行も含めた形でのGHG削減を目指す。中長期的には、オートパイロットとの組み合わせにより運航の自動化技術が開発されるが、国際的な運航管理体制（管制など）や制度の整備が必要となる。

3-3 個別技術分野の現況

3-3-1 主機関技術

(1) 既存船舶ディーゼルの改良：Tier 1 技術開発要素

この主機関技術では、低速 2 ストロークディーゼルエンジンと排熱回収と推進利用のハイブリッド化による省エネルギー化の普及を目指す。

2 ストロークディーゼルエンジン主機関の効率向上に関する技術として、電子燃料制御や加給器などの各構成要素の効率向上、排熱エネルギー回収技術そして回収エネルギーの推進利用があげられる。

特にキー技術としては、熱回収技術、回収した熱エネルギーの電気変換、そして蓄電技術、モータ技術となる。蓄電技術については、当面、自動車等の輸送機器や定置電力貯蔵用で採用実績があり、今後も技術開発の進む、リチウムイオン電池が主流となるほか、一部、電気二重層キャパシタの大容量化が進めば、蓄電としてキャパシタの採用も取りえる。

SO_x、NO_x 規制に準拠すべく燃料改質が行われるか、合成燃料の一部導入が進む。

(2) LNG・石油燃料デュアルフューエル・ディーゼル機関：Tier 1 技術開発要素

従来から、LNG 運搬船では、タンクから蒸発器を通し気化させたガス (Boil off gas) を燃焼システムへ供給、蒸気タービン機関推進を採用されてきているが、より効率のすぐれる、石油燃料と LNG のデュアルフューエル・ディーゼルへの転換がなされている。さらに、重油価格の高騰、そして NO_x 等規制に対応するために、一般船の LNG 燃料搭載が進むものと期待される。

(3) ハイブリッドディーゼル機関：Tier 2 技術開発要素

ディーゼルエンジンと燃料電池あるいは蓄電池とのハイブリッド化による部分電化を進めたポッド推進である。

バイオ燃料の普及が進むとしても、本期間では、国際海運でのエネルギー供給の大半を占めるのは、依然として石油燃料であろう。したがって、NO_x 等規制に対応した改質石油燃料ディーゼル機関が主流となるが、GHG 排出削減を加速させるために、エンジン出力のうち一部を電気動力に転換する主機関への転換が望まれる。これは将来の全電化に向けた段階的な移行の最初のステップとなる。

推進技術については、スーパーエコシップで実験中であるポッド推進の大型船への転換、ハイブリッド効率向上が課題である。

また、燃料電池については、自動車用にあるいは小型機器、家庭用コジェネ

用途で開発が急速に進む固体高分子形燃料電池（PEFC）より導入が進むが、その出力規模により、いずれ定置用発電用である熔融炭酸塩形燃料電池(MCFC)や固体酸化物形燃料電池（SOFC）が有望となる。また、燃料としては、この時期では天然ガスが主流となる。

（４） バイオ燃料転換：Tier 2～3 技術開発要素

陸上運輸部門においては、石油由来燃料から段階的にバイオ燃料への転換が始まりつつあるが、将来、海運部門においても、重油・軽油等からバイオ燃料への転換が訪れる可能性がある。そのような情勢になった場合に、船用エンジン側でも、バイオ燃料に適合しうるディーゼルエンジンへの技術改修を進める必要がある。この場合には、燃料成分の変化に伴う、触媒の改善、部材の対変質性などの改修が必要となるが、主機関の抜本的な転換を必要とせず、燃料供給インフラおよび海運部門への燃料供給が順調となれば、普及への障壁は他の新機関への転換と比べ低いと言える。

平成19年2月バイオマス・ニッポン総合戦略推進会議における農水省試算によれば、2030年ごろには600万キロリットルのバイオ燃料の生産が可能とこのことであり、IEAの予測によれば、2030年における一次エネルギー供給量として、石油換算で16億トンが見込まれている。

Tire2より、全体の10～15%程度がバイオ燃料船に置き換えられ、Tire3では、30～40%程度の普及率を目標とする。

（５） ガスタービンハイブリッド機関：Tier 3 技術開発要素

Tier 2において、船舶用燃料電池技術が徐々に成熟するが、更なるGHG削減にむけて、低GHG排出燃料やカーボンニュートラル燃料への転換が必要となる。そこで、小型発電として技術開発が進む高効率のガスタービンと燃料電池の複合発電を主機として採用する新造船の登場が望まれる。推進技術については、ポッド推進となる。

燃料としては、今後のインフラ整備、あるいは社会でのエネルギーシナリオに依存するが、水素あるいはエタノールを代表とするアルコール燃料を想定する。

（６） 燃料電池：Tier 3 技術開発要素

ディーゼルエンジン・燃料電池ハイブリッド、ガスタービン・燃料電池ハイブリッドの発展型として、燃料電池船の導入が考えられる。

自動車においても、燃料電池自動車はコスト面から導入の目処が立っておらず、現状では、燃料電池の主機としての導入はエネルギー供給、燃料の搭載方

式など不確定な要素が多い。新たな燃料電池技術の開発、水素の供給技術等のブレークスルーが求められる。

(7) バッテリー走行:Tier 3 技術開発要素

Tier 3 の後半になると、バッテリー走行を中心とした全電気推進船への転換に向けて、徐々に実海域での試験船が登場する。発電は定置発電（陸上、海上）と CCS の組合せにより GHG 排出フリーとなる電力、あるいは船上自然エネルギー発電による補助発電、さらに、洋上発電プラットフォームの整備を促進し、電源確保を行う。プラグイン電気自動車用で技術が牽引される蓄電技術は、現在の 100Wh/kg というエネルギー密度を技術開発により、2030 年以降では、その 5 倍まで高めることを目標としている。

3-3-2 実海域性能改良技術

短期的には既存船の改良と能力付加で一定の排出削減を目指すこととなるが、既存船の換装による対応であるため適用可能な技術は限定される。プロペラの改良で5~10%、プロペラ周りの省エネデバイスで3%、摩擦抵抗低減塗料などで5~10%程度の削減を目指す。船首から船底に微細気泡を注入することにより摩擦抵抗を低減する空気膜法についても既存船への適用が可能であり、2030年までに5%削減、その後2040年までに10%削減を目指す。

2050年にはガスタービン+燃料電池船が普及し、バイオディーゼル船については大型化が進む。これらの新造船では各種実海域性能改良技術が適用される。硬帆・軟帆・スラットからなる高揚力複合帆船など帆走技術など様々な研究・開発が進められており、実用化が期待されている。

以下に、船体・船型系および推進系に関する技術のうちGHG削減の観点から有効と考えられる技術について現況および将来の展望を整理する。

ー大型化

船舶の大型化、例えば長さ L を大きくすることにより、造波抵抗を軽減することができる。また、燃料消費は速度の3乗に比例するため、航行速度を落とすことによりCO₂排出量を削減することが可能となる。したがって、船舶の大型化と経済速力運航によりGHG削減を目指すこととなる。減速運航については既存船においても適用可能であり、すでに実施されている。

大型化のメリットは、大型化することによる造波抵抗低減効果、減速航行による荷動き鈍化を防ぐ効果が考えられる。現在も大型化が進んでいるが、更に大型化を目指すならば、ハブ港ネットワークの整備や超大型船対応の建造・修繕ドックなどの整備が必要となる。

ー双胴船、三胴船

双胴船（カタマラン）、三胴船（トリマラン）については摩擦抵抗、造波抵抗が大きいという課題を克服し、近年超細長双胴船（SSTH：Super Slender Twin Hull）や波浪貫通型双胴船（ウェーブピアサー）などが開発され実用化に至っている。双胴船、三胴船の特徴としては、高速運航に適していること、甲板面積を大きくすることが可能であることなどの長所がある。一方で、船体内部に貨物積載スペースを確保することができないことや、旋回性能が悪いという短所がある。2020年ごろまでに双胴船・三胴船の大型輸送船が開発されるが、普及するかどうかは現時点では不明である。



図 3-1 トリマラン高速旅客船（ドルフィン・ウルサン号）

出所：九州の船ホームページ

<http://www.yado.co.jp/ship/dolphin/dolphin.htm>

ーバラスト低減・ノンバラスト

船舶の軽量化と生態系保護の観点からバラスト水処理装置の性能向上やノンバラストに関する研究が進められている。バラスト水の浄化についてはバラスト水処理装置の搭載義務が課され、2010年～2015年には実用化される。しかしながら、バラスト水処理は停泊時に処理を行うこととなるため、停泊時間がこれまでより長くなり、運航管理の高度化を妨げる要因となり得る。バラスト水処理の必要がないノンバラスト水船の実用化は 2015 年前後と見られる。

ー大型 FRP 船

現在は強度面から長さ 70～80m の船舶が限界であるといわれている。タンカー・バルカー級の大型船の FRP 化には強度面をはじめ課題が多く各種研究が進められている。2050 年前後の実用化が期待される。

ー船体表面摩擦軽減

船底に薄い空気膜を張ることにより摩擦抵抗を低減する空気膜法や微細気泡で船底を覆う方法が研究されている。実験レベルではあるが、5%程度の省エネ効果を得られることがわかっている。2030 年ごろまでに 5%省エネを達

成し、その後性能向上・コストダウンを行い 2050 年までに 10%程度の削減を目指す。摩擦低減塗料については、すでに実用化しており 5%程度の削減効果が得られている。今後は性能向上・コストダウンが求められる。

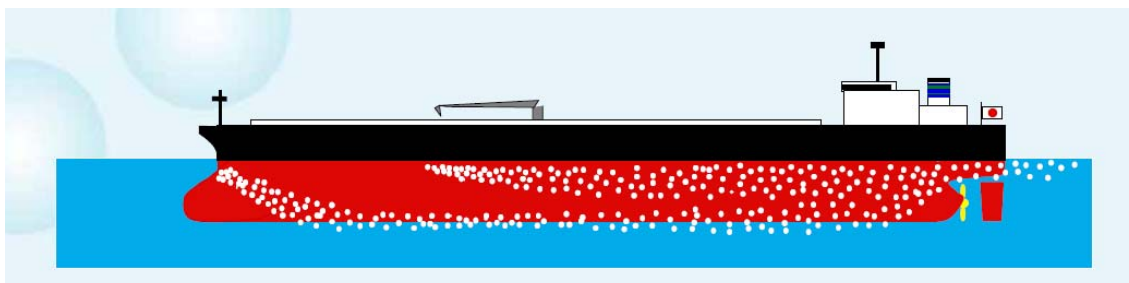


図 3-2 マイクロバブルによる船体抵抗低減装置のイメージ

出所：海技研ホームページ

[http://www.nmri.go.jp/main/news/others/sea_japan/sea_japan\(kodama\).pdf](http://www.nmri.go.jp/main/news/others/sea_japan/sea_japan(kodama).pdf)

ーCRP, ポッド推進

CRP (Contra-rotating propellers : 二重反転プロペラ) は、2組のプロペラを前後に配置し、それぞれのプロペラを逆方向に回転させることで、プロペラ効率を向上させ高出力を得る技術である。ポッド推進は図 3-3 に示すような回転楕円体の中に電動モータを内蔵し、船内に納めた旋回装置で回転させることができる推進装置である。CRP とポッド推進を併用したシステム(図 3-4) も開発されている。タンカー・バルカー、コンテナ船への適用に向けて研究開発が進められている。2025 年ごろから普及しはじめ、当初は 5~10% の削減、その後は性能向上・コストダウンにより 2040 年ごろには 10~15% 削減を目指す。



図 3-3 ポッド推進器

出所：海技研ホームページ

<http://www.nmri.go.jp/main/etc/kaisetsu/0009.html>



図 3-4 GRP ポッド推進器

出所：海技研ホームページ

<http://www.nmri.go.jp/main/etc/kaisetsu/0009.html>

一省エネデバイス

プロペラ前に装着するリングやプロペラの後ろに装着するものなど各種検討されてきた。頭打ち感があるが、各種技術との組み合わせや船体形状の変更による効率の変化に対応していく必要があり、今後も引き続き研究されていく分野である。現時点までで 10%程度の低減が達成されており、今後の上積みは 3%程度と考えられる。

一帆走技術

風力による推進力を補助的に利用し GHG 削減効果を得る技術であり、図 3-5 のように帆を利用する方式と図 3-6 のように高揚力複合帆を利用する方式がある。帆を利用する方式については既存船に適用可能であり、一定の削減効果もあるが、着岸時の帆のハンドリングに課題が残る。高揚力帆については、新造船での適用となる。コンテナ船では甲板上への設置が困難であるため適さない。実用化・普及は 2030 年以降と考えられ、削減効果は最大 5%程度と考えられる。



図 3-5 風を用いた帆走技術の概念

出所：<http://www.kiteship.com/>

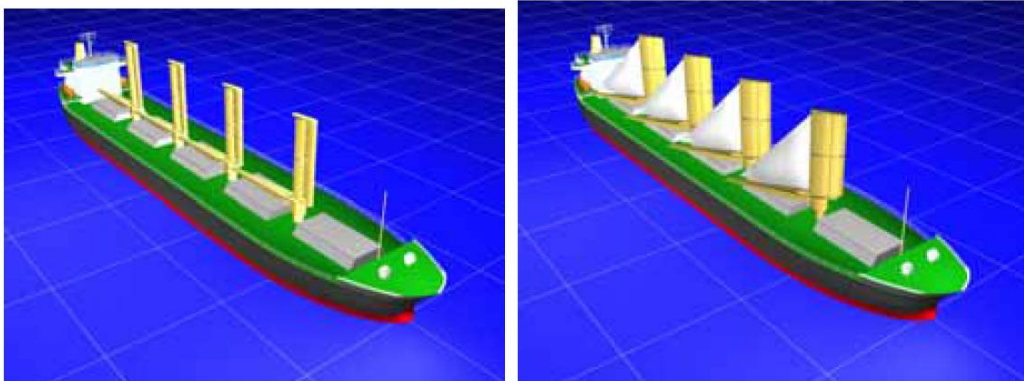


図 3-6 高揚力複合帆を装備したばら積み船のイメージ（左：縮帆時、右：展帆時）

出所：海技研ホームページ

<http://www.nmri.go.jp/main/news/press/press16.9.10.pdf>

3-3-3 総合的運航プロセス管理

(1) 運航管理の最適化

単一船舶の運航においては、荷役や運河通航等のスケジュールに合わせて到着するようスケジュール管理を最適化することで沖待ち時間の低減を図る。これにより航海速度低減が可能となる。多数の船舶の組合せを考える場合、配船計画の高度化および船腹数増大により航海速度の低減を図る。

短期的には既存船での減速航行を目指す。減速航行には排気系へのカーボン堆積、ピストンリング・シリンダライナの低温腐食などの悪影響もあるため、長期的には減速航行に適したエンジンの開発が必要となる。

【運航管理に係る技術要素】

- －単一・多数船舶系での最適化
- －船腹数の最適化
- －港湾・運河スケジュール管理システムの高度化
- －給油地点の調整やバラスト水量の低減による船舶軽量化
- －配船計画の高度化
- －荷役システム改善
- －自動離着岸技術の高度化
- －陸上輸送との結節による物流のシームレス化
- －ライフサイクルを通じた省エネ化のためのメンテナンス最適化
- －メンテナンス最適化のための修繕ドック機能の向上
- －減速航行に適したエンジンの開発

(2) 航路最適化

ウェザールーティングは波浪、風、海流等の気象・海象が船速・燃費に与える影響を計算し、航路を最適化する技術であり、すでにサービスは広く普及している。しかしながら、時間短縮目的に利用されているものであり、回転数制御目的での活用は一部で始まったところである。

最適航路選定については北極海新航路開通による燃費削減の可能性も考えられる。IPCCによると2050年には北極海の北西航路の渡航可能日数が125日に、ACIA(2005)によると2080年には北極海航路の渡航可能日数が90-100日になると予測されており、夏季に限定されるが東京ーロンドン航路（スエズ運河経由）の場合、約40%の航行距離短縮となる。ただし、夏季限定であること、流氷が増加すること、国際法・制度上の問題など実現に向けて解決すべき課題は多い。

【航路最適化に係る技術要素】

- －気象・海象予報
- －船体応答、速度推定
- －航路最適化計算
- －オートパイロット

(3) 総合的運航プロセス管理

船舶のオペレーションによる燃費削減のうち、短期的な対策として最も効果が期待できるのは減速航行である。しかしながら、減速航行だけでは増加する荷動き量に対応することはできない。減速航行を行いながらも荷動きの効率化、沖待ち船の削減、船腹数の増加抑制を達成するには、到着時間を考慮したウェザールーティング、荷役時間の削減、効率的な配船計画を組み合わせた総合的な運航プロセス管理が不可欠である。ウェザールーティングおよび総合的な運航プロセス管理の高度化、天気予報、海流予測、波浪予測の精度向上が期待される。

3-4 導入ロードマップ案

ここでは、4-2 で整理した技術体系ごとに、特に重要となる技術区分の導入ロードマップを作成し、それぞれの技術体系に置いて、削減可能な GHG 排出削減率を設定した。

3-4-1 主機・補機系技術

上記で想定した導入技術のうち、主機・補機系技術について概観すると以下のようなになる。

基本的には、将来の荷動量予測より、化石燃料由来の動力源に依存している状況では、2050 年で総排出量半減目標を達成することは不可能であるために、抜本的な動力系の転換が必要となる。具体的には、船用ディーゼルから、多様な燃料・機関が現れ、最終的にはゼロエミッション船へと収斂することとなる。

当面、NO_x 等規制に対応するための船用軽油など改質石油を燃料とするディーゼルエンジンは、現在の主流であるが、当面、排熱回収技術などにより、より省エネルギー化、低燃費化を進める。また細かい負荷調整が可能ポッド推進（エレクトリックディーゼル）とのハイブリッド化により全体効率を向上させる。また、LNG（デュアルフューエルまたは専燃）も短距離船を中心に、LNG 運搬船以外にも導入・普及が広まる。また、DME、GTL などの代替燃料は、石油需給の逼迫度等によっては導入が進む。

2020～2030 年頃からは、発電分野における燃料電池技術の成熟をまって、ディーゼルと燃料電池のハイブリッドに置き換わり始めるとともに、バイオディーゼルの導入が部分的に始まる。

2050 年頃には、自然エネルギー起源の水素・エタノール燃料電池や CCS 陸上発電や自然エネルギーによる完全バッテリー走行の導入が開始される。

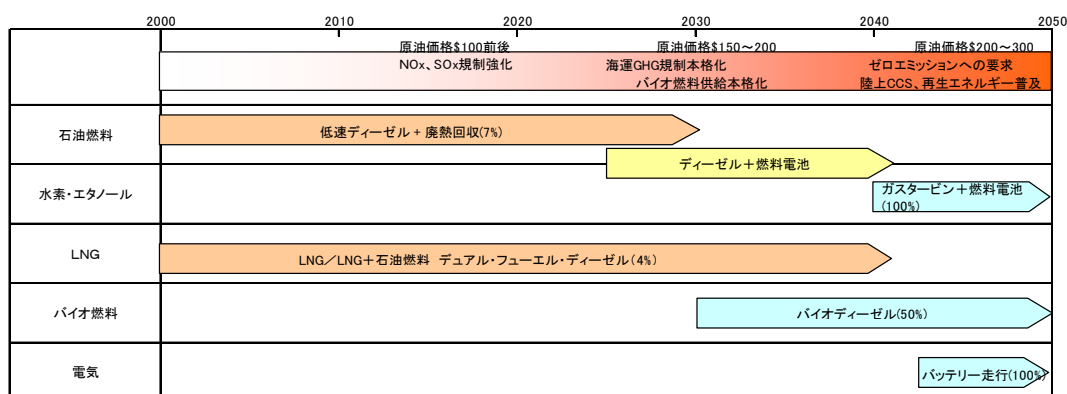


図 3-7 主機・補機系技術のロードマップ

3-4-2 船体系・船型系技術

上記で想定した導入技術のうち、船体系技術について概観すると以下のようなになる。

全体の大きな流れとして、超大型・低速走行船などの新コンセプト船の導入、あるいは短距離船でのマルチハル船型などの導入がある。

技術は大きく分けて、軽量化技術、造波抵抗低減技術、粘性抵抗低減技術、そして船内省力化技術の4つを取り上げている。軽量化については、FRPの導入が鍵となる。

造波抵抗低減技術については、単胴船の首尾形状最適化などを継続して行うほか、新技術として、双胴船、三胴船などの高速航行を目的とした船型の外航船での実用化、さらに将来技術としては抜本的な抵抗削減として潜水輸送船技術研究の着手が期待される。

粘性抵抗低減については、塗料技術、空気膜法などの性能向上、そしてコストダウンが期待される。

船内省エネ機器の導入は現在も進められており、比較的早い時期に技術は成熟するであろう。

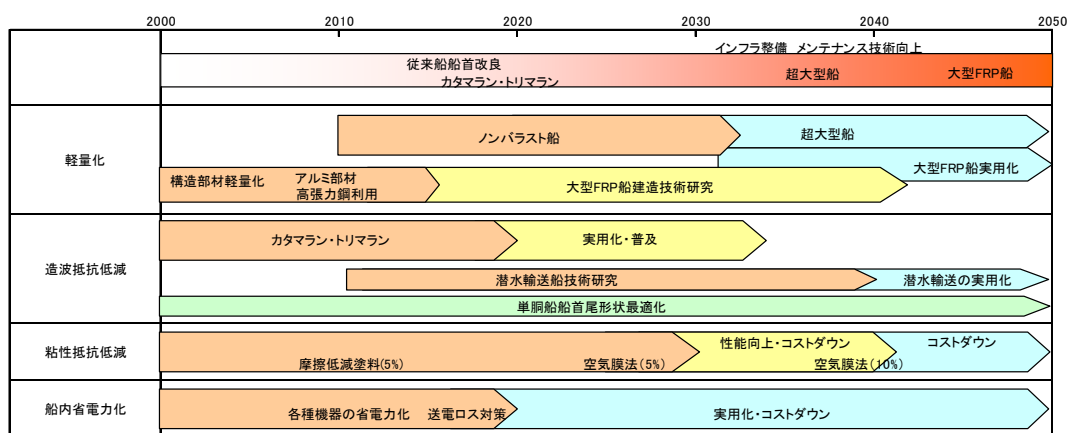


図 3-8 船体・船型系技術のロードマップ

3-4-3 推進系技術

上記で想定した導入技術のうち、推進系技術について概観すると以下のようなになる。

全体の大きな流れとして、当面は既存船等のプロペラ効率改善技術であるが、ポッド推進技術の大型外航船への適用が中心的な技術となる

推進系技術では、プロペラ周りの改良が当面の技術の主流となり、かつ GHG 排出削減に対して相応の期待が持たれている。その後、風力や波浪等の外乱エネルギーによる推進補助にも期待が持たれる。

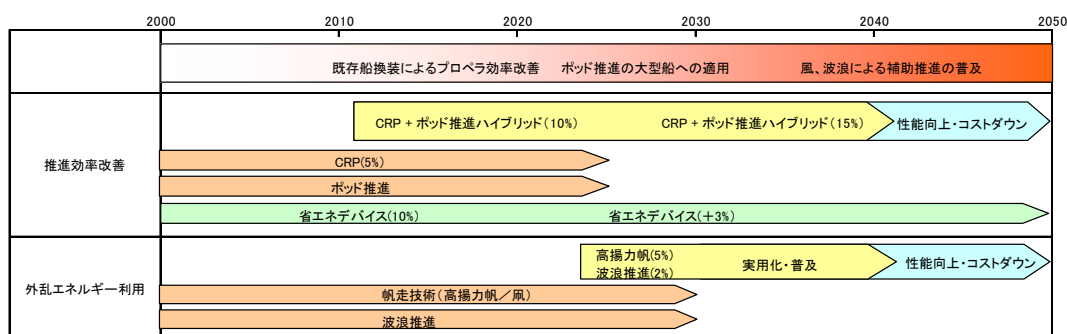


図 3-9 推進系技術のロードマップ

3-4-4 運航・保守系技術

上記で想定した導入技術のうち、運航・保守系技術について概観すると以下のようなになる。

この分野は、現在もすでに実用化に向けた技術開発が進められており、単船の航路・運航最適化から、配船や貨物（コンテナ）の最適化などの運航会社における総合的運航管理、そして他の輸送部門（陸上、航空）を含めた物流全般としての最適化が求められる。

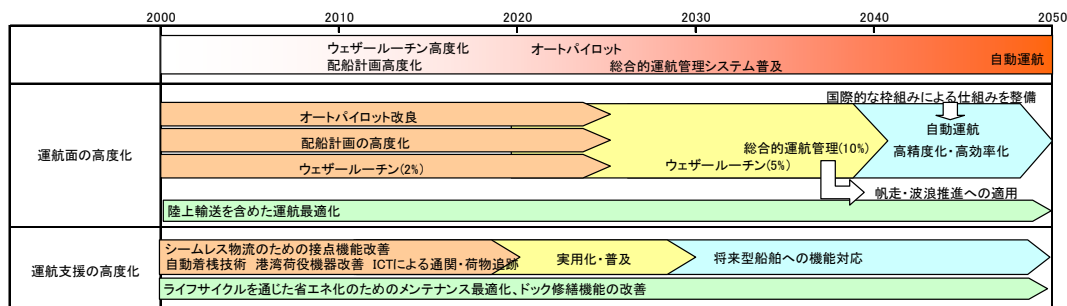


図 3-10 運航・保守系技術のロードマップ

4. 削減シナリオの検討

以上の 2 章から 4 章の調査結果、安全・環境技術研究会等関係委員会の検討結果を踏まえて、中長期的な観点から GHG 排出削減のシナリオを作成した。当該シナリオは、技術戦略マップ等を裏づけとして将来にわたっての削減の可能性を論じ、海事産業が取り組んでいくべき技術開発等の方向性を示すものである。

具体的には下記のフローで検討を行う。

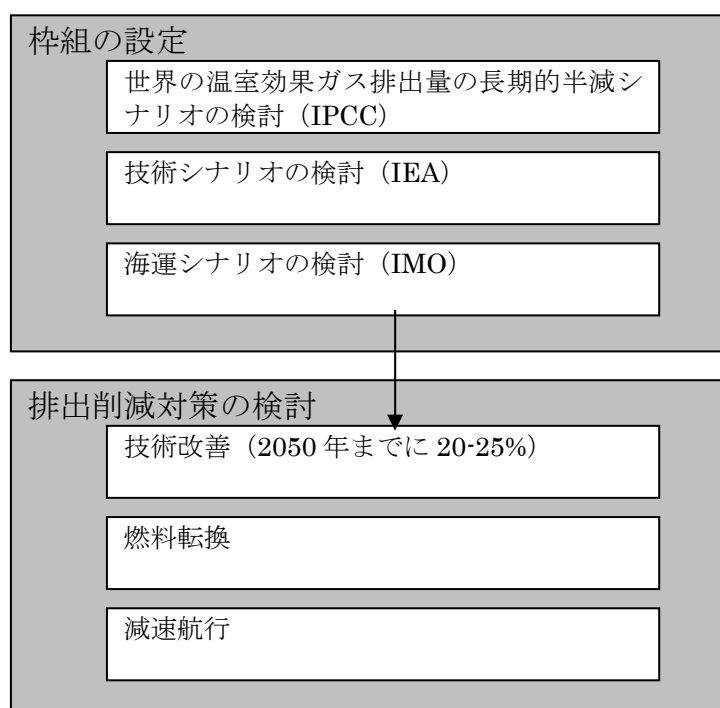


図 4-1 検討のフロー

4-1 枠組の設定

本章の基本的な考え方は下記のとおり。

4-1-1 世界の温室効果ガス排出量の長期的半減シナリオの検討

京都議定書の第 2 約束期間の動向については未確定な部分が多いが、IPCC 第 4 次報告書では、温室効果ガス (GHG) 排出量を現状比半減とすることが、2100 年における CO₂ 濃度 450ppm の達成を恐らく担保し、それはまた 2100 年における温度上昇を 2 度台に抑えることが可能になる手段であるとしており、これが一種の国際的な共通認識となっている。

表 4-1 温室効果ガス排出削減へ向けた IPCC の要請

Table TS.2: Classification of recent (Post-Third Assessment Report) stabilization scenarios according to different stabilization targets and alternative stabilization metrics [Table 3.5].

Category	Additional radiative forcing (W/m ²)	CO ₂ concentration (ppm)	CO ₂ -eq concentration (ppm)	Global mean temperature increase above pre-industrial at equilibrium, using "best estimate" climate sensitivity ^{a), b)} (°C)	Peaking year for CO ₂ emissions ^{c)}	Change in global CO ₂ emissions in 2050 (% of 2000 emissions) ^{c)}	No. of assessed scenarios
I	2.5-3.0	350-400	445-490	2.0-2.4	2000 - 2015	-85 to -50	6
II	3.0-3.5	400-440	490-535	2.4-2.8	2000 - 2020	-60 to -30	18
III	3.5-4.0	440-485	535-590	2.8-3.2	2010 - 2030	-30 to +5	21
IV	4.0-5.0	485-570	590-710	3.2-4.0	2020 - 2060	+10 to +60	118
V	5.0-6.0	570-660	710-855	4.0-4.9	2050 - 2080	+25 to +85	9
VI	6.0-7.5	660-790	855-1130	4.9-6.1	2060 - 2090	+90 to +140	5
Total							177

(IPCC 第4次評価報告書)

4-1-2 技術シナリオの検討

(1) 全体：IEA BLUE シナリオ

上記の排出シナリオを技術面から裏打ちするシナリオとして、国際エネルギー機関 (IEA : Energy Technology Perspectives 2008) の BLUE シナリオを参考とする。IEA では世界の将来エネルギー需要について、幾つかのシナリオを設定した予測を行っている。BLUE シナリオは GHG 削減対策のための膨大な投資 (2050 年までに 45 兆ドル) を早期より開始するものであり、現状の技術革新ペースを急加速させるものである。

BLUE シナリオでは、2005 年に全世界で 28Gt-CO₂ 排出されている温室効果ガスを 2050 年 14Gt-CO₂ に半減することを目標としている。

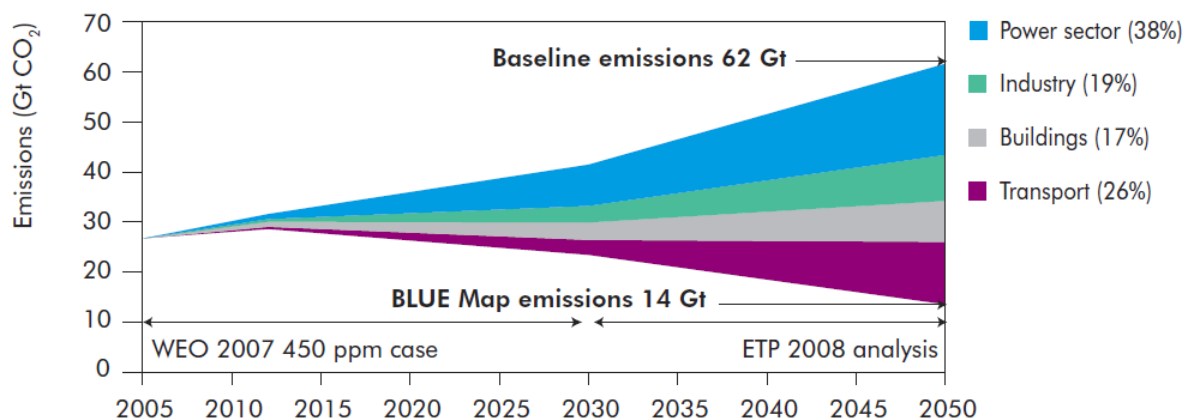


図 4-2 IEA BLUE シナリオ

(IEA : Energy Technology Perspectives 2008)

また、BLUE シナリオの一次エネルギー供給量におけるエネルギー源別の割合は下図のようになっている。化石燃料の中では石炭・石油が現状に比べて減少する一方、ガスが 34%増加するとされている。

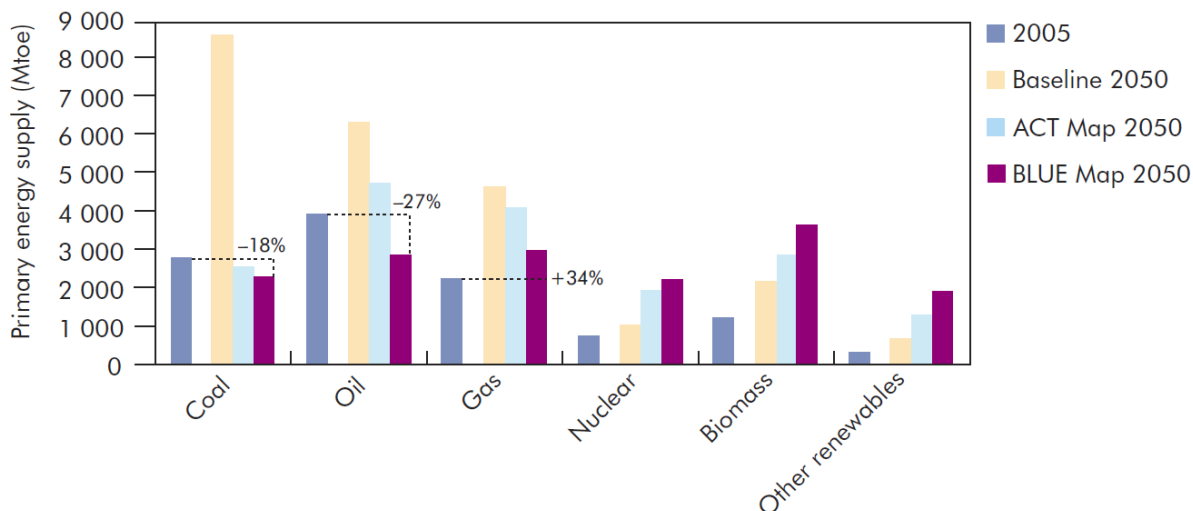


図 4-3 BLUE シナリオにおける燃料構成
(IEA : Energy Technology Perspectives 2008)

BLUE シナリオによる全体の排出削減量は 48Gt-CO₂(現状:28Gt-CO₂、2050年ベースライン:62Gt-CO₂) にのぼるが、その内訳は下記のとおり。

表 4-2 BLUE シナリオによる GHG 排出削減量 (単位: Gt-CO₂)

<ul style="list-style-type: none"> • 電力: 18.3 - うち CCS: 4.8 - うち原子力: 2.8 - うち太陽エネルギー: 2.5 - うち風力: 2.1 	<ul style="list-style-type: none"> • 民生: 8.2 	<ul style="list-style-type: none"> • 運輸: 12.5 - うち燃費向上: 6.6 - うち第二世代バイオ燃料: 2.2 - うちプラグインハイブリッド、EV: 2.0 - うち燃料電池車: 1.8 	<ul style="list-style-type: none"> • 産業: 9.2 - うち CCS (ガス改質): 4.3
--	---	--	---

以上のように、運輸部門は総削減量の約 1/4 を占める。これに対して、排出削減のための追加的な総投資額 45 兆ドルのうち実に 33 兆ドルまでが運輸部門に属し、同部門での排出削減がいかに難しいかが指摘されている。この理由として運輸部門での対策、とりわけ代替燃料の限界排出削減コストが高いということが挙げられる。

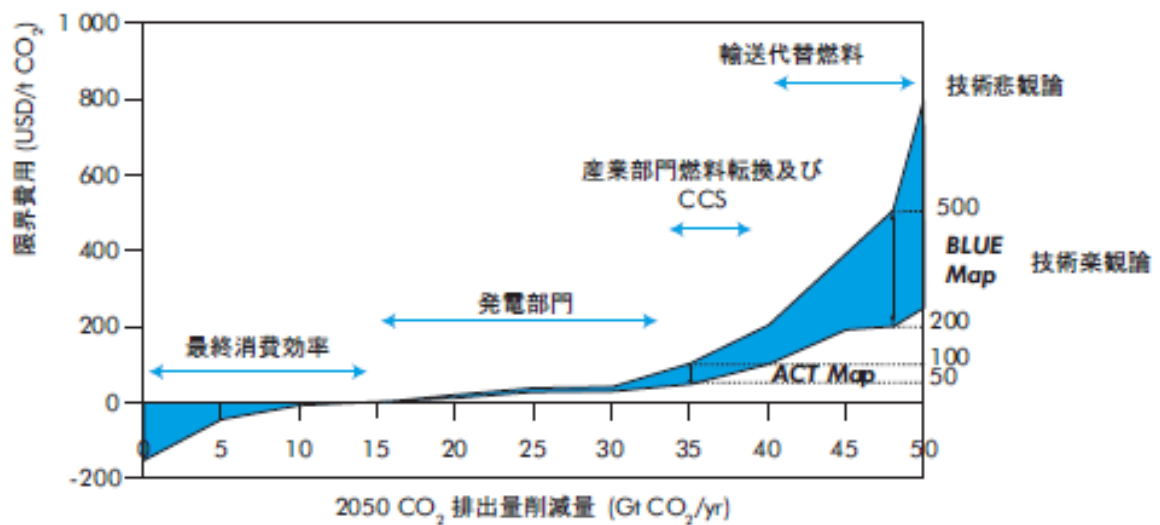


図 4-4 限界排出削減コストと削減量の関連

(IEA Energy Technology Perspectives 2008 日本語版エクゼクティブサマリー)

(2) IEA BLUE シナリオにおける運輸部門の動向

運輸部門では 2005 年の 7Gt-CO₂ に対し 2050 年までに 6Gt-CO₂ までという削減が求められている。即ち現状比約 14%減である。これは世界全体の排出量削減目標 (50%) より少ないが、運輸部門の排出増加への圧力及び代替的技術の希少性に起因する。

BLUE シナリオにおける運輸部門の設定は下記のとおり。

- 貨物輸送、海運及び空輸部門では、他の非炭化水素燃料のオプションを採用するのはコストが高くなりすぎるため、バイオ燃料が普及する。この場合バイオ燃料とは現状の作物ベースではなく、木質材料を下に FT 改質して製造される BTL (biomass-to-liquid : 軽油代替) またはバイオ原油 (重油代替) である。この比率は 30%に達する。バイオ原油の課題としては、高価であること、安定性に欠けること、混合燃料とするためには更なる改質が必要となる可能性があることが指摘されている。
- 乗用車については電気自動車または燃料電池車が期待されるが、このいずれが主流となるかは現状では予見できない。このいずれかが主体とならない場合、プラグインハイブリッドが乗用車の大半を占める。
- エネルギー効率は現状比 30%改善する。

(3) IEA BLUE シナリオにおける海運部門の検討

IEA によれば 2005 年の世界の運輸部門エネルギー消費量 21.8 億トン (石油換算) のうち約 3/4 に相当する 16 億トンが道路輸送に対するものであり、国際海運 (1.7 億トン)、内航海運 (3600 万トン) を合計しても 10%程度である。IEA

による 2050 年の海運起源の排出量は約 1,200Mt-CO₂（現状の 2 倍）であり、BLUE シナリオにより約 800Mt-CO₂ に削減される。

400Mt-CO₂ の排出削減のうち約 1/3（ベースライン排出量の 15%）はバイオ燃料、2/3 は技術的な効率向上により達成される。この論拠として、全体のエネルギー消費の 30%はバイオ燃料（バイオ原油等）であり、それらの温室効果ガス排出原単位は石油の約半分と想定が挙げられる。2050 年のベースライン排出量が 2005 年比で 50%程度しか増えないという前提、及び排出削減シナリオにおけるバイオ燃料の大量導入は、後述する IMO の検討（IMO: Updated Study on Greenhouse Gas Emissions from Ships）と比べて顕著な相違点である。

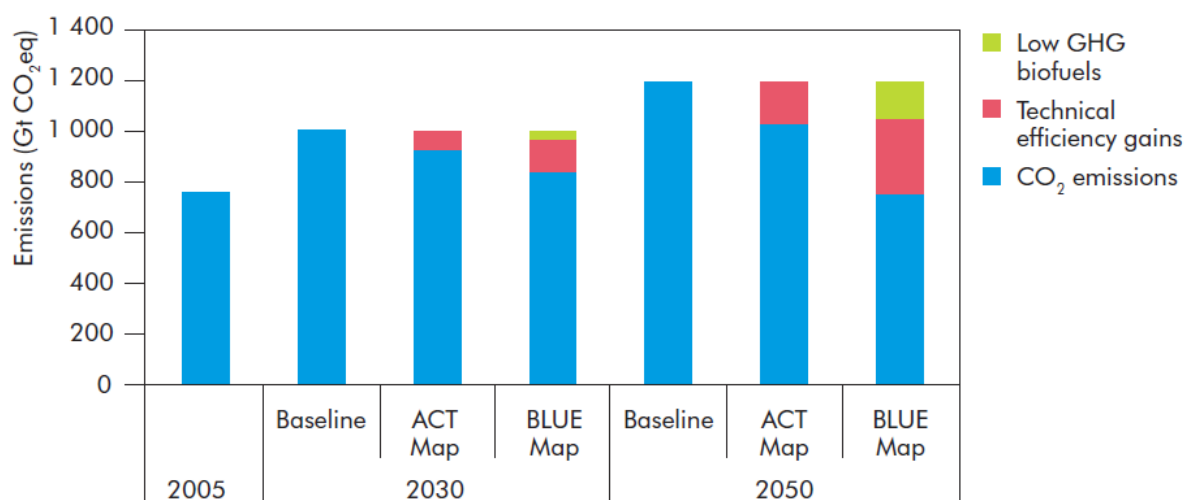


図 4-5 BLUE シナリオにみる海運の温室効果ガス排出量
(IEA : Energy Technology Perspectives 2008)

4-1-3 海運シナリオの検討

国際海事機関（IMO）において外航海運からの温室効果ガス（GHG）排出量についての推計作業（「Updated Study on Greenhouse Gas Emissions from Ships」：以下 IMO スタディ）が行われた。これは世界的に著名な海運関連研究機関がコンソーシアムを組んで実施したものであり、日本からは海上安全技術研究所及び海洋船舶研究財団が参加している。

IMO スタディによると、2007 年の外航海運からの CO₂ 排出量は約 8.5 億 t-CO₂ と世界全体の CO₂ 排出量の 3% 近くを占め、世界の温室効果ガス排出国の上位の CO₂ 排出国に相当する水準である。また、2020 年、2050 年時点での排出量予測も行っており、2020 年は 7.2～14.5 億 t-CO₂、2050 年には 7.5～73.4 億 t-CO₂ としている。平均的には、特に GHG 対策を実施しない場合の 2050 年の排出量は 2,000 Mt-CO₂（現状の 3 倍）程度としており、これは IEA の推計値よりかなり大きい。

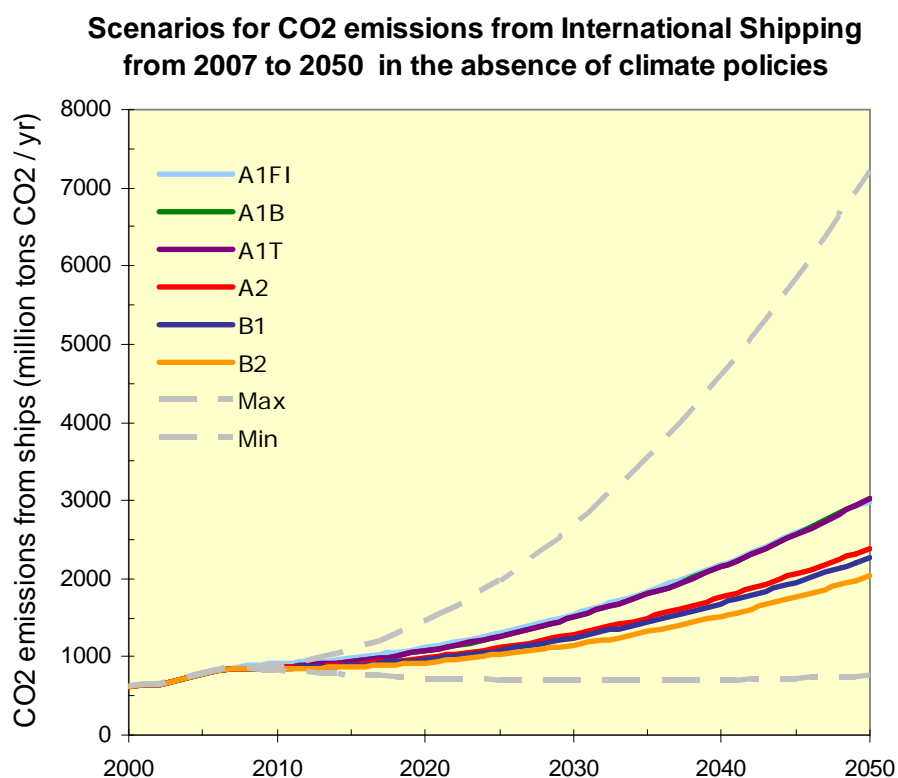


図 4-6 IMO スタディに基づく CO₂ 排出予測

(出典：IMO、Updated Study on Greenhouse Gas Emissions from Ships)

(1) 全体のアルゴリズム

IMO スタディでは、Lloyds Register Fairplay database における船舶データおよび Automatic identification system (AIS) による船舶の活動状況に関するデータ等から現状の荷動き量・CO2 排出量を把握する一方、IPCC による GDP の将来予測を基に 2050 年までの荷動き量 (トンマイル) を推定し、エネルギー消費量が荷動きに比例するとの仮定の基に、効率向上、減速航行による燃料消費量の削減等を加味して将来の CO2 排出量を推計している。

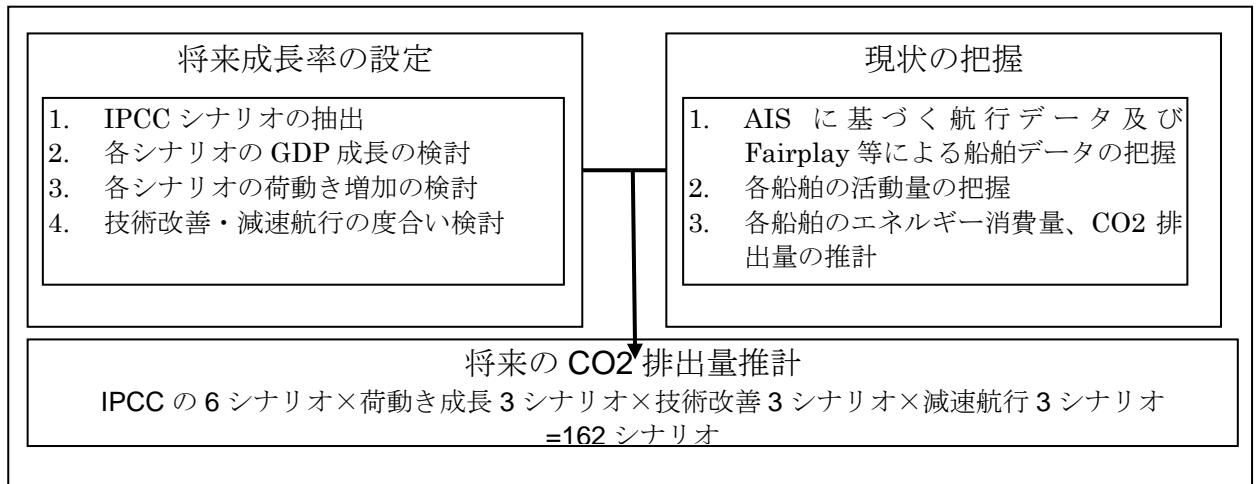


図 4-8 IMO スタディのアルゴリズム

1) 燃料構成

2007 年現在の燃料構成については、intercontinental では重油、その他では軽油が主体となると推定している。将来については、MARPOL 条約 Annex VI により 2020 年にまでに重油が全て船舶用軽油に置き換わること、最大で 10% 程度の LNG が導入されることが仮定されている。国際海運の燃料は化石燃料 (90%以上が船舶用軽油) によりまかなわれるとしており、バイオ燃料等の抜本的な燃料転換は想定されていない。

2) 技術革新による効率改善率

プロペラ効率の向上や抵抗の少ない船型の開発等、技術革新によるハード面での効率改善率は、2020 年と 2050 年について、船種別に Base ケース、High ケース、Low ケースの 3 ケースを設定している。

表 4-3 IMO スタディにおける技術革新による効率改善率

2050	全シナリオ		
	Base	High	Low
Ocean going	-20%	-35%	-5%
Coastal	-25%	-45%	-5%
Container	-17.5%	-30%	-5%
2020	全シナリオ		
	Base	High	Low
Ocean going	-2%	-4%	0%
Coastal	-2%	-4%	0%
Container	-2%	-4%	0%

(出典：IMO、Updated Study on Greenhouse Gas Emissions from Ships)

3) 減速航行

今後の燃料価格高騰等の影響により各船舶が減速して航行することを想定し、減速航行の実施によるエネルギー消費量削減効果を織り込んでいる。減速率は2020年と2050年について、船種別に Base ケース、High ケース、Low ケースの3 ケースを設定している。

表 4-4 IMO スタディにおける減速航行率

2050	全シナリオ		
	Base	High	Low
Ocean going	- 10 %	- 20 %	0
Coastal	- 10 %	- 20 %	0
Container	- 20 %	- 40 %	0
2020	全シナリオ		
	Base	High	Low
Ocean going	- 5 %	- 10 %	0
Coastal	- 5 %	- 10 %	0
Container	- 10 %	- 20 %	0

(出典：IMO、Updated Study on Greenhouse Gas Emissions from Ships)

IMO スタディにおける技術革新による効率改善と、減速走行の効果については、以下の特徴が読み取れる。

- High ケースを複合させる場合、2050 年には最大で 75%もの原単位改善が予測されているが、減速航行の寄与が大きい。IMO スタディでは減速航行は燃料価格が高騰すれば自然に導入されると考えられており、IEA が 2030 年に原油価格が 1 バレル 200 ドルまで上昇すると予測していることを考慮すれば、一定規模の減速航行は BAU でも実施されると推測される。
- 2020 年における技術革新による効率改善幅は最大でも 4%程度である。船舶はリプレース期間が 20 年以上と長いことから、効率が顕著に改善するまでには相当の期間がかかるためと考えられる。
- IMO スタディではバイオ燃料等、革新的な燃料転換については考慮されていない。
- A1 シナリオの中位推計で 2050 年の荷動き量が 2007 年比約 4 倍であることから、それに伴って船腹量も約 4 倍にする必要がある。さらに、減速航行を行った場合、輸送量を確保するためにさらに船腹量をさらに増加させなければならないが、それだけの船舶を製造する造船業のキャパシティの有無については、IMO スタディでは検討していない。

(2) 両シナリオからの示唆

上記のように IPCC 報告書は、地球温暖化による温度上昇を 2 度程度に抑制するためには 2050 年までに現状比で少なくとも 50%減という大幅な温室効果ガス排出削減を達成する必要があることを示唆している。(2050 年排出量は 2000 年比でほぼ 2.5 倍増となるため、これは同年無対策比では約 1/5 程度となる。) この中で国際海運対策が担うべき比率は特定されていない。また運輸部門は各部門の中で最も排出削減が困難な部門である。

前述のように、IEA の BLUE シナリオと IMO シナリオでは異なる点が多い。これらについて下記に再掲する。IEA の BLUE シナリオで想定する技術革新の比率は IMO シナリオの Base より若干高い程度であり、ほぼ同程度であるが、将来へ向けた排出(荷動き)の自然増、代替燃料、減速航行に関する考え方のいずれについても大きく異なっている。

なお、上記以外の長期推計として、2009 年 1 月に公表された McKinsey の Pathway to a Low Carbon Economy が挙げられる。本書では海運起源の排出量は 2005 年の 1,100Mt-CO₂ から 2030 年には 1,800Mt-CO₂ に増加するとしており、そこから 24% (430Mt-CO₂) の排出削減が可能としている。具体的な対策は技術革新、バイオ燃料のような技術・燃料対策と、大型化、積載率向上、減速航行のような運用改善の双方について記載しているが、定量的な推計は行っていない。また対象も外航・内航の双方を包含していると思われる(全 192 ペ

ージに占める sea transport 関連記述は半ページ程度)。McKinsey の文献では、上記の削減の達成のために必要な投資額は 2030 年までに 1,600 億ドルであるが、航空（2030 年までに 360Mt-CO₂ を削減するために 2,800 億ドル必要）と比べて費用効果的であり、省エネ効果を併せれば純益をもたらすとしている。

表 4-5 IEA BLUE シナリオと IMO スタディの比較

	IEA BLUE	IMO スタディ
現状の排出量	約 750Mt-CO ₂ (2005)	840Mt-CO ₂ (2007)
2050 年無対策時排出量	約 1,200Mt-CO ₂	約 3,000Mt-CO ₂ (A1 ファミリー)
技術革新による削減率	約 25% (1,000Mt-CO ₂ → 750Mt-CO ₂)	Base : 17.5%~25% High : 30%~45% Low : 5%
代替燃料による削減率	約 20% (1,250Mt-CO ₂ → 1,000Mt-CO ₂)	0%
減速航行による削減率	(検討されていない)	Base : 10%~20% High : 20%~40% Low : 0%

上記を踏まえ、本調査の前提としての 2050 年像について、下記を想定する。

- 効率向上による 2050 年までのフリート平均のエネルギー削減率は最低で現状比 25%程度の改善を想定する。これは IMO の Base シナリオ及び IEA BLUE シナリオの双方にほぼ共通する。一方で、技術ロードマップ目標が達成された場合にはフリート平均で現状比 55%程度の改善を想定する。
- 燃料については、バイオ燃料が導入されないケースと、一定量導入されるケースを想定する。バイオ燃料の導入は IMO スタディでは想定されておらず、IEA では想定と評価が別れているが、第 2 世代バイオ燃料製造技術が開発されたとすると、他の再生可能エネルギーに比べればバイオ燃料は船舶用途において大量かつ安定した供給を想定することも可能であり、既存技術との乖離、経済性のギャップは比較的小さくなる可能性も考えられる。

4-2 排出削減対策の検討

上記想定に沿って、排出削減対策として、積載効率向上、技術開発による効率向上（フリート平均で25～55%程度）、バイオ燃料の導入（最大で30%程度）、及び減速航行を想定し、その総合的な効果を試算した。

4-2-1 荷動き量及び船舶量の推計（積載効率向上）

過去50年にわたる船腹量の増加率は年4%程度であり、また過去15年間における船舶の建造率、解撤・消失率は（年毎の差こそ大きいものの）それぞれ船腹量比で5～7%、1～3%程度である（以上、海運統計要覧より）。

一方で、IPCC A1B シナリオに基づくIMO 推計の荷動き量は、今後年間3.0～3.4%程度増加することとなっている。また、今後の積載効率向上を、2050年までに対2007年比で5.0%見込むこととする。今後の毎年の解撤・消失船舶の船腹量（同）を総船腹量比2%と見込むと、毎年の新造船舶の建造量（総トン数）の年間増加率は4.7～5.4%程度と見込まれる。

4-2-2 技術開発による効率向上

「効率向上25～55%」とは商船船腹の全てに係るものであり、2008年から2050年にわたる期間で達成される。耐用年数が長い船舶の場合、単年度で高効率のものが建造されたとしても、その技術が商船隊全体に行き渡るまでには相当の期間を要する。反面、解撤される船舶は老朽・低効率のものが多くと想定され、その意味で、代替する新旧船舶の効率差は、単年度の「技術向上率×耐用年数」程度の差があると想定できる。

上記の解撤・消失率、新造船舶の建造率から、2050年の技術開発による効率向上25%を実現するためには、2050年時点で新造船平均約4割程度の効率向上が必要である。一方で、技術ロードマップに示した2020年で3割、2040年で6割、2050年で8割の新造船平均の効率向上が達成された場合には、フリート平均の効率向上は55%に達する。

なお、上記の場合の毎年建設される船舶による効率向上率はハイケースで2%程度、ローケースでは0.6%程度である。

表 4-6 新造船の効率向上とフリート平均の効率向上の関係

		2007	2020	2040	2050	通期平均 効率向上
技術革新	新造船	100%	85%	75%	60%	0.9%
ローケース	フリート平均	100%	96%	83%	75%	0.6%
技術革新	新造船	100%	70%	40%	20%	1.9%
ハイケース	フリート平均	100%	91%	61%	45%	1.3%

注1) フリート平均は後述のシミュレーションによる試算結果。

注2) 上記時点間の新造船効率向上は、各時点間を直線補間。

注3) 通期平均効率向上は、2007-2050の効率向上を43年間で割ったもの。

参考までに、国内の自動車の燃費は1996年～2006年の10年間で年平均2.7%（販売平均、理論燃費）、1.1%（保有平均、理論燃費）、0.5%（実走行燃費）という比率で向上している。従って、前述した「2050年までに効率向上25～55%」に必要な単年度の新規建造船舶の効率向上率は、自動車における過去の実績には及ばない程度である。

ただし、ここでは理論燃費と実走行燃費の差異については想定しておらず、また前述のように船齢の高い（＝効率の低い）船舶から解撤されることを前提としている。自動車同様に、安全性向上等、他の分野での改善・進歩がエネルギー効率面ではマイナスに作用することがある。例えばタンカーの安全性を向上させたダブルハル化は積載量の減少をモータらすため、トンマイル当たり燃料消費を増大させる要因となった。さらに、トンマイル当たり燃料消費量の高いコンテナ船の相対的な増加という近年の傾向は今後も続くと考えられ、これも海運総体として見ると効率の低下という形で現れる。

なお、5-2-1において積載効率の向上を想定しており、本来であればこれもトンマイル当たり燃料消費量の概念に含むが、どちらかといえば運用上の改善で達成される部分でもあり、技術開発による効率向上には含まないものとする。

4-2-3 バイオ燃料の導入

IMO スタディによれば、外航海運の利用燃料に関しては今後環境制約上から軽油またはA重油、及びLNGの導入が進むと考えられており、他の燃料の本格導入は想定されていない。バイオ燃料は、価格が高いため自動車用途に限定されるとして、船舶用には想定されていない。

しかし、前述のように、将来予測に関する他の文献（IEA、McKinsey）はバイオ燃料の生産増加を想定している。IEAが検討しているBLUEシナリオでは、海運の消費燃料の30%程度をバイオ原油のような第2世代のバイオ燃料とし、それらによる温室効果ガス排出削減効果は15%と想定されている。IEA BLUEシナリオで想定されるバイオ燃料の供給には膨大な植林が必要となるが、船用エネルギー用途のバイオ燃料（約90Mtoe）は総供給量（約700Mtoe）の13%程度である。バイオ燃料の生産に関する技術的課題は多く、2015年～2020年以前に商業化プラントが建設される可能性は低い。これらの技術的障壁が克服されれば、植林面積の不足による需給逼迫は障壁とは想定されないが、現状のバイオディーゼル製造方法では食糧生産との競合及び森林伐採、資源（水、動力、肥料）の消費による温室効果ガス排出等の影響があり、バイオ燃料の普及には第2世代バイオ燃料技術の開発が不可欠である。

さらに、将来のバイオ燃料の価格が不透明であること、バイオ燃料を利用可能な船舶の普及や、供給インフラが港に整備されることがボトルネックとなることも考慮される必要があるが、第2世代バイオ燃料が実用化されると、製造されるバイオ燃料の品質調整は柔軟になり、A重油と互換性のあるバイオ燃料の生産も可能性がある。

以上を踏まえ、技術開発ローケースの場合の 2050 年時点における船舶燃料に占めるバイオ燃料の割合は最大 30%程度を見込む。しかしながら、前提条件として、第 2 世代バイオ燃料の実用化と適正な価格での提供が求められる。

一方で、技術ロードマップ目標達成時には、ディーゼル機関自体が減少していくことを踏まえ最大 20%程度の導入を想定する。

その他の燃料については、2020 年頃を目途に船舶用軽油の大幅な普及や、陸上での LNG 利用量拡大を受けて、一部の船舶で LNG 普及が進むことが想定される。また、長期的には、水素エネルギーや電力エネルギーの利用と、その一次エネルギー源としての再生エネルギーの導入が進む。

4-2-4 減速航行

IMO スタディでは、燃料価格高騰に起因した減速航行を想定している。IMO スタディにおける 3 種類の減速航行導入シナリオを比較し、2020 年時点では平均 10%、2050 年時点では平均 30%の減速航行が行われると想定する。

4-2-5 総合的な温室効果ガス排出削減率の試算

上記に基づく総合的な温室効果ガス排出削減量を試算した。

- ・ベースは 2007 年とした。
- ・荷動き量は IMO の IPCC A1B シナリオ・ベースのものを用い、積載効率向上を 2050 年で 5%とした。(船型大型化の効果は技術革新に含む。)
- ・技術革新はハイケース (2050 年のフリート平均 55%) とローケース (同 25%) を想定した。(船型大型化の効果を含む。)
- ・減速航行率は両ケースとも 2050 年で 30%とした。
- ・2050 年におけるバイオ燃料の利用率は技術革新ローケースでは IEA BLUE シナリオと同様の 30% (温室効果ガス排出削減原単位は化石燃料の 1/2)、ハイケースでは 20%とした。

参考までに、2050 年時点の技術革新ハイケース (対 2007 年比、バイオ燃料導入無し)、ローケース (同、バイオ燃料導入有り) の GHG 排出率は、下記のように計算される。

○技術革新ハイケース (対 2007 年比、バイオ燃料導入無し)

$(1-0.05) * 0.453 * (0.9*(1-0.3)^2 + 0.1/(1-0.3)) = 0.252$				
積載効率 向上 95%	技術革新 45.3%	減速航行 (主機)	減速航行 (補機)	58.4%

○技術革新ローケース（対 2007 年比、バイオ燃料導入有り）

$(1-0.05) * (1 - 0.25) * (0.9*(1-0.3)^2 + 0.1/(1-0.3)) * 0.85 = 0.354$				
積載効率 向上 95%	技術革新 75.0%	減速航行 (主機)	減速航行 (補機) 58.4%	バイオ燃料 85%

(1) 外航海運の荷動き量、船腹量

IMO の IPCC A1B シナリオ・ベースの推計では、2050 年までに、対 2007 年比 4.02 倍の荷動き量が想定されている。2050 年までに 5% 前後の積載効率向上を想定すると、船腹量（船型大型化による船腹量減少は考慮しない）は 3.83 倍となる。

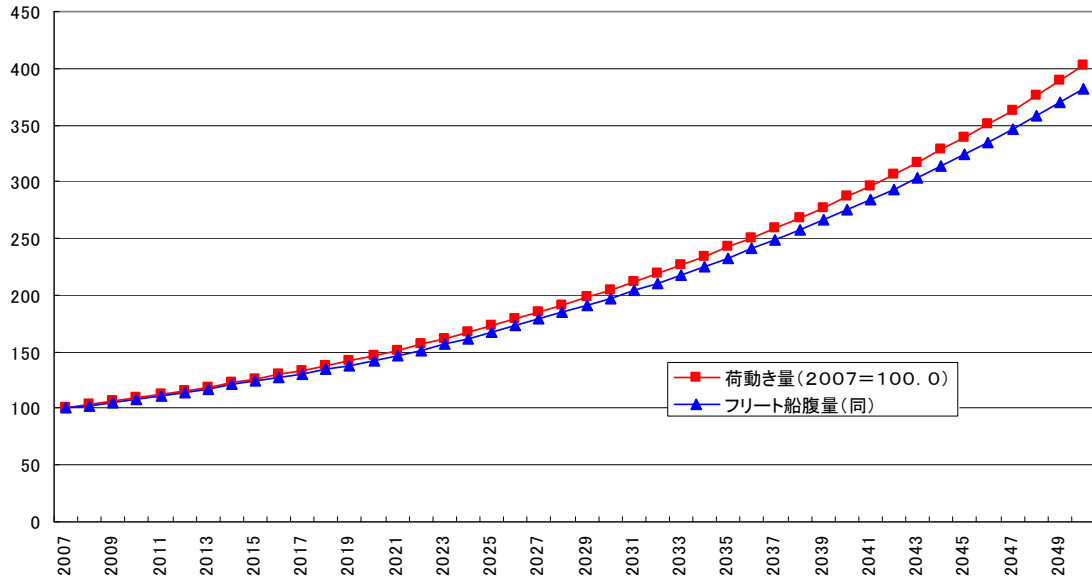


図 4-9 A1B シナリオ・ベースの荷動き量と船舶量の推計結果

(2) 技術ロードマップ実現ケース（技術革新ハイケース）の排出量

技術ロードマップの目標とする技術革新ハイケースでは、バイオ燃料導入無しで、2050年時点ではほぼ2007年比現状維持の排出量が達成される。荷動き量当たりの排出原単位は対2007年比25%程度となる。

さらに、バイオ燃料の20%程度の導入を想定すると、2050年時点の排出量は対2007年比9割程度に削減される。

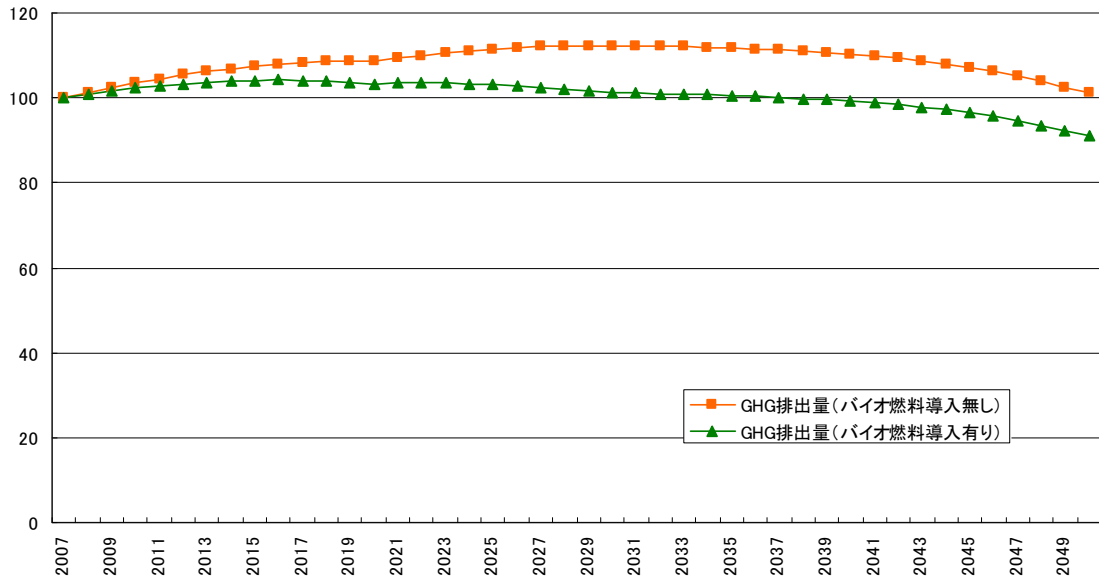


図 4-10 技術革新ハイケースの GHG 排出量推計結果（対 2007 年比）

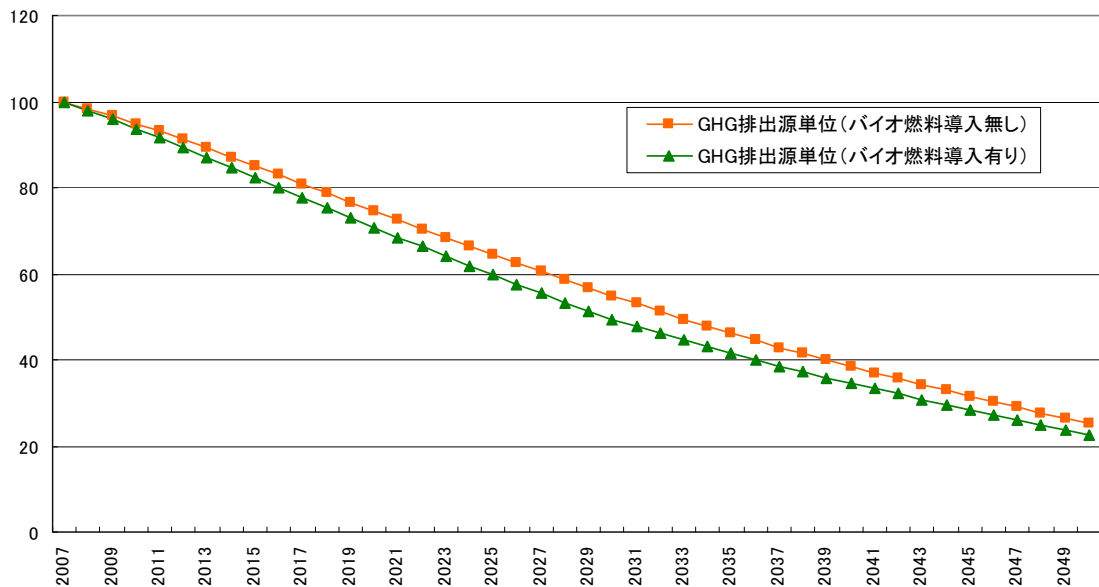


図 4-11 技術革新ハイケースの荷動き量当たり GHG 排出量（対 2007 年比）

(3) 技術革新ローケースの排出量

技術革新ローケースでは、バイオ燃料導入無しで、2050年時点の排出量は、2007年比1.7倍程度に達する。荷動き量当たりの排出原単位は対2007年比40%程度となる。

一方で、バイオ燃料の30%程度の導入を想定すると、2050年時点の排出量は対2007年比1.4倍程度に抑制される。

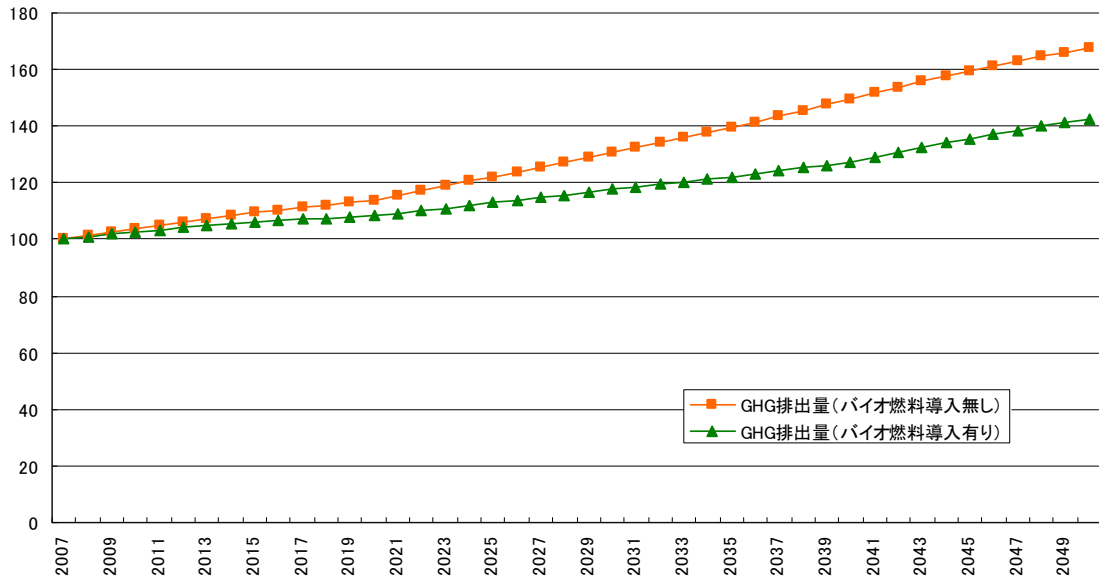


図 4-12 技術革新ローケースの GHG 排出量推計結果 (対 2007 年比)

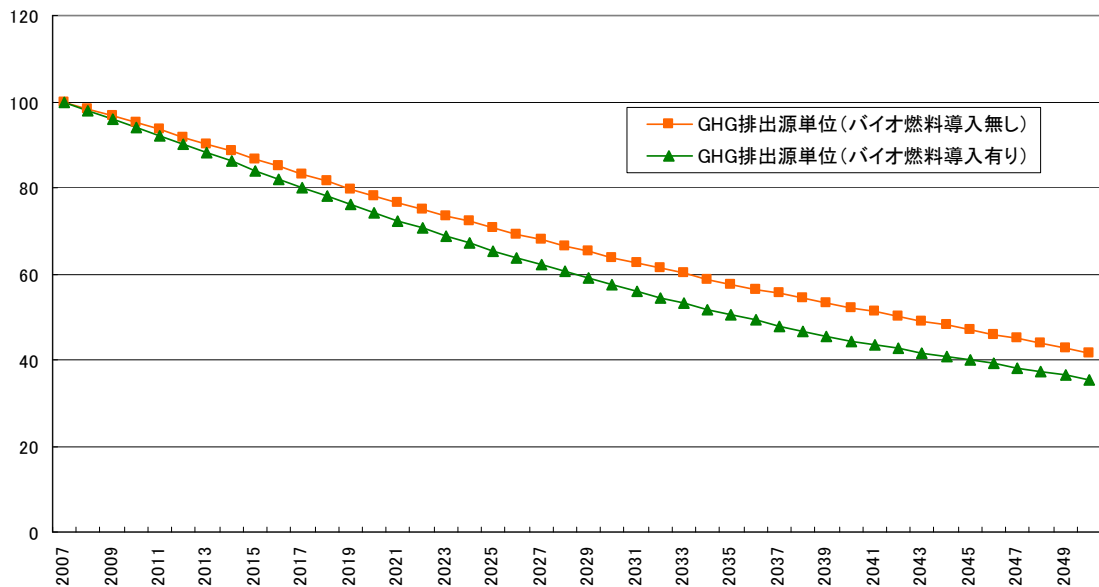


図 4-13 技術革新ローケースの荷動き量当たり GHG 排出量 (対 2007 年比)

(4) 削減要因

技術革新ハイケースでは、フリートの中の新造船の比率が高くなっていくにつれ、技術革新が GHG 削減の最大要因となる。これに対して、技術革新ローケースでは、減速走行が GHG 削減の最大要因となり、バイオ燃料導入の場合の削減効果も大きい。

以上のように、海運分野における GHG 削減においては、技術開発の占める重要性が大きく、技術ロードマップの実現が強く求められる。

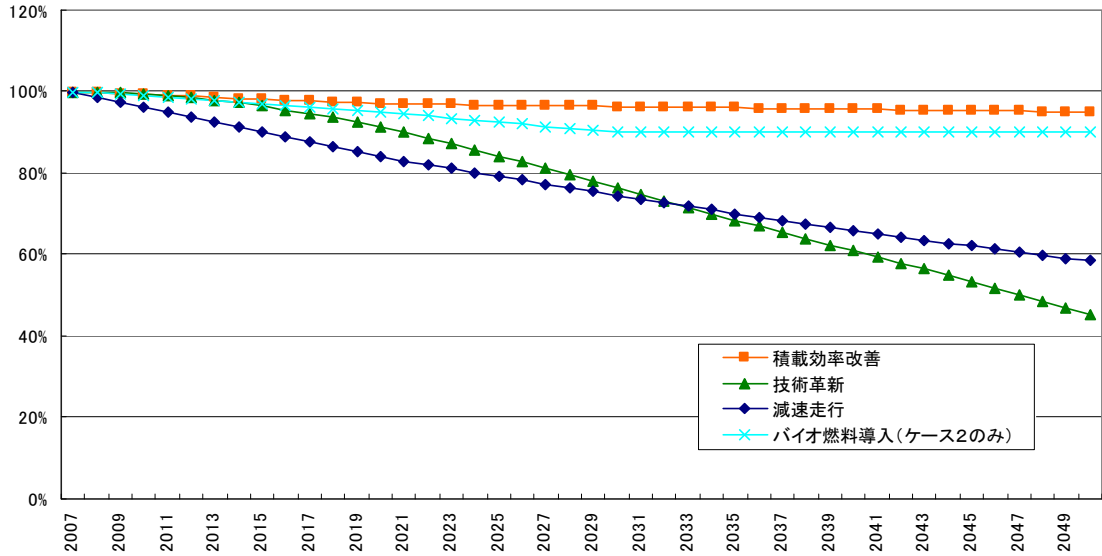


図 4-14 技術革新ハイケースの要因別 GHG 削減率 (対 2007 年比)

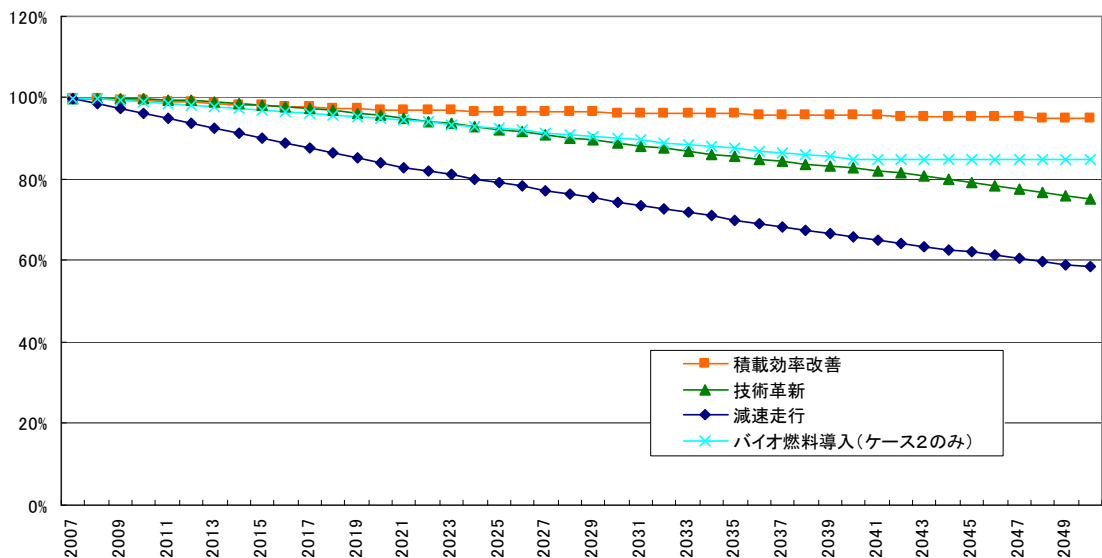


図 4-15 技術革新ローケースの要因別 GHG 削減率 (対 2007 年比)

オ) 新造船導入加速ケースの排出量

技術革新ハイケースで、利用者にとって経済的優位性の高い技術開発を優先的に進める等の対策により、毎年の解撤量を 1.5 倍（3%）としたケースを想定する（新造船進水量もその分だけ増加する）。バイオ燃料導入無しの場合でも、2050 年時点の排出量は、2007 年比 87%程度となり、現状ベース（BAU）の解撤率の場合より改善が図られる。

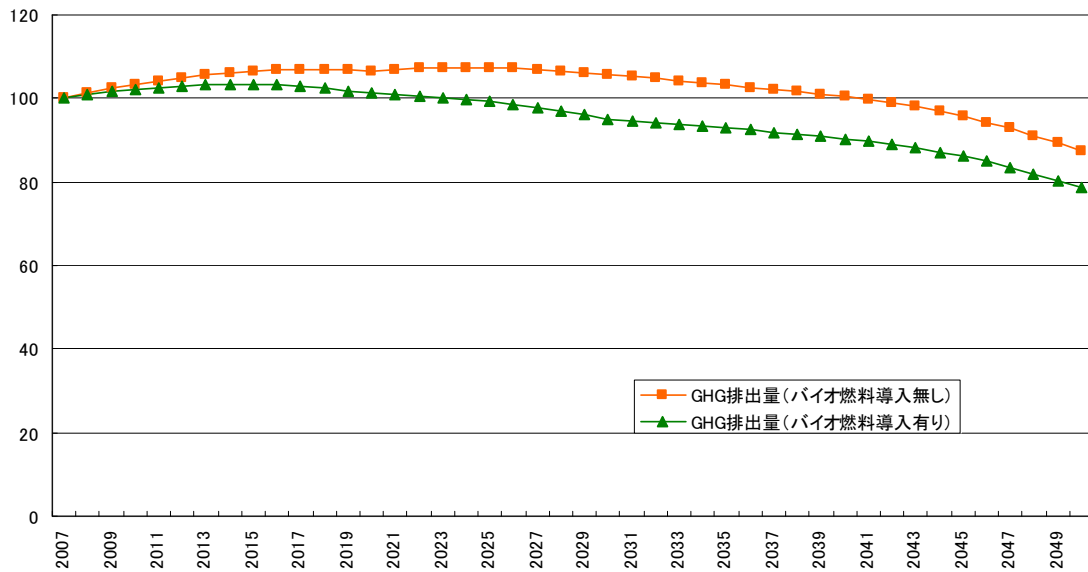


図 4-16 新造船導入加速ケースの GHG 排出量推計結果（対 2007 年比）

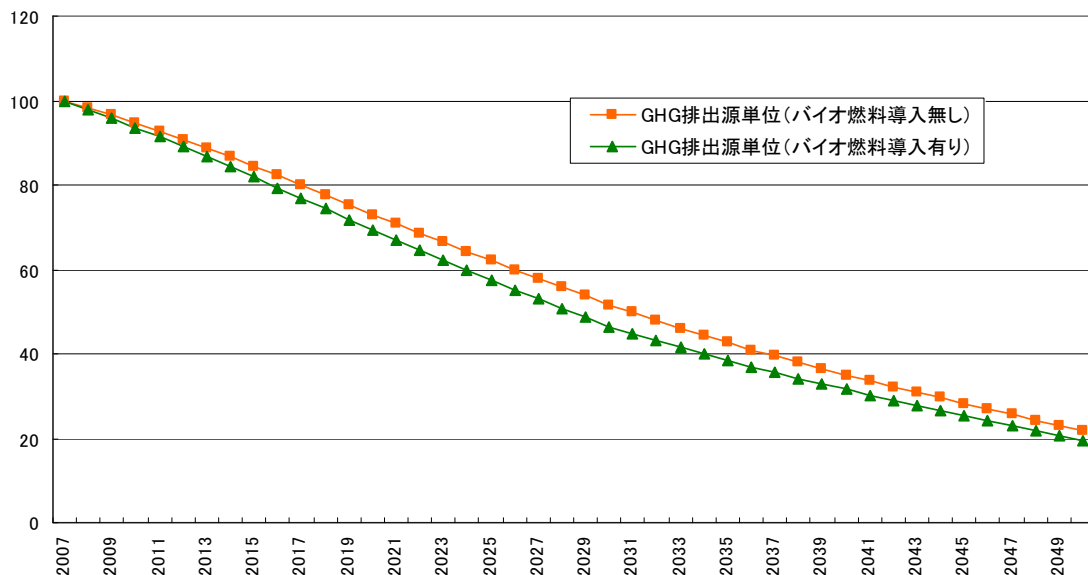


図 4-17 新造船導入加速ケースの荷動き量当たり GHG 排出量（対 2007 年比）

(5) シナリオについての総括

これまで見てきたように、IPCC 報告書に基づき、地球温暖化による温度上昇を 2 度程度に抑制するため 2050 年までに現状比で GHG 削減量を 50%削減するという目標が示される中、外航海運部門においても大幅な抑制が求められている。具体的な目標設定については依然明確でないが、外航海運が世界経済の中で果たしている役割の大きさ、一方で陸上輸送等と比較した GHG 排出量の小ささ等を考えると、必ずしも他分野と同様の対現状比半減という目標を課すことが適切であるとは考えられない。特に IMO 等により予測されている外航海運荷動き量の大幅な伸びは、そのまま今後の世界経済の発展を支えるためのものであり、こうした面からも現実的な制限が課せられる必要がある。

しかしながら、一方で、外航海運分野だけに野放図な伸びが許されないのは当然であり、削減に向けたあらゆる努力が図られるべきである。特に多くの対策については、燃料コストの削減等船社、荷主ひいては消費者の利益にもつながるものであり、むしろこうした経済原則の観点からの早期導入が期待される。現在は収まっているが今後の原油価格の高騰も、対策導入のトリガーの一つと考えられる。

今回のシナリオ検討では、GHG 削減技術ロードマップの目標に沿った技術革新ハイケースと、IMO 等の中位想定に沿った技術革新ローケースを想定した。その結果、技術革新ハイケースでは IPCC の A1B シナリオという世界の活力と均衡ある発展を想定したケースでも、不確実性のある第 2 世代バイオ燃料導入に頼らなくとも GHG 排出量を現状程度のレベルに抑えられることが示された。一方で、技術革新ローケースでは、減速航行やバイオ燃料導入等を図っても、GHG 排出量が現状比 1.5 倍程度まで増加してしまうことが示された。

世界的な海運国である我が国としては、技術ロードマップの実現により、2050 年時点での外航海運分野の排出量の現状維持という目標を実現していくことが強く求められる。また、我が国の国際競争戦略として、そして、技術先進国の我が国の果たすべき世界への貢献として、本調査の技術ロードマップに示されたような GHG 対策技術の国際的な普及を図り、世界の外航海運分野における GHG 削減を先導していくことが望まれる。

特に以下の点に着目した技術開発が必要である。

① 経済原理に即した対策技術の開発

通常、経済活動の環境影響は外部経済性を持ち、そのままでは企業等の経済主体は十分な対策を実施しない。そのために、政府による規制や補助制度、近年では排出量取引等の枠組みが導入されている。船社や荷主が自ら進んで積極的に対策を実施するように、技術開発を進める側でも、各種支援制度等を意識した、「経済原理に則った対策の開発」を意識していく必要がある。例えば、燃料コストの削減や、輸送効率の向上につながる対策の開発に注力すべきである。

② 社会情勢に応じた対策技術の開発

代替燃料など今回見た多くの船上の対策が、それを支える資源供給や、陸上インフラ等を必要としている。こうしたインフラ等が揃わない段階で技術開発を進めても、実際の導入が図られず、開発努力が無駄となる可能性もある。陸上分野などの他分野での導入状況を見極めつつ、対策技術の開発タイミングを設定する必要がある。

また、環境問題に関する規制も対策の大きな導入要因であり、国際的な規制の制定に対して我が国が発言力を持つことも含めて、規制と一体感のある技術開発を進める必要がある。

③ 他分野と協調した対策技術の開発

燃料電池など、他分野での技術開発が先行している技術がある。こうした技術については、他分野の開発動向を見つつ、その最新の研究成果を船舶分野での開発の出発点とする必要がある。一方で、バイオ燃料等については、陸上交通機関との資源の取り合いが発生する可能性がある。こちらについても他分野での利用動向等を良く把握し開発を進める必要がある。

④ 我が国の優位性を意識した対策技術の開発

諸外国においても船舶のGHG削減技術開発が進められている。こうした動きを把握しつつ、我が国の優位性のある分野については、国際競争力の観点からもその開発を進める必要がある。一方で、諸外国に優位性がある分野については、状況を見つつ、開発資源の効率利用の観点から独自にキャッチアップを急ぐ分野と、諸外国と協力して開発を進める分野等を峻別していく必要がある。