

平成23年度

外航海運からのCO₂削減の
ためのコスト算定と比較事業
報告書

平成24年3月

海洋政策研究財団
(財団法人 シップ・アンド・オーシャン財団)

ご あ い さ つ

本報告書は、ポートルースの交付金による日本財団の平成 23 年度助成事業「外航海運からの CO₂削減のためのコスト算定と比較」の成果をとりまとめたものです。

2011 年 7 月に国際海事機関(IMO)の第 62 回海洋環境保護委員会(MEPC62)において、国際船舶からの温室効果ガス(GHG:Green House Gas)排出低減に関して、MARPOL 条約附属書 VI 第 4 章の追加によりエネルギー効率設計指標(EEDI)の計算と一部船舶を対象としたその最大許容値の設定及び、船舶エネルギー効率マネージメントプラン(SEEMP)の保持の強制化が決定され、今後排出量の削減が促進されていくものと期待されます。一方で、国連気候変動枠組条約(UNFCCC)では、京都議定書によって削減義務から除外されている国際船舶に対して排出総量の上限を設けるべきであるといった主張があります。

そこで当財団では、温室効果ガスの削減量と削減費用を表す一つの指標である限界削減費用(MAC : Marginal Abatement Cost)に着目し、外航海運における CO₂削減量当たりの費用の試算・解析を行い、義務や負担が求められる国家や他の輸送機関、他産業に対して、外航海運としての説明力のある客観的な外航海運の削減目標や費用を示すことで CO₂ 排出削減方策に関する公平な議論に資することを目指して、平成 22 年度から本事業を開始しました。

本年度は、昨年度に得られた国際船舶における MAC の算定モデルについて、EEDI の義務化による整合性等から再検討し、各種パラメータ及びアルゴリズムおよび対象船舶の修正や再整理等を行い、MAC カーブを再度計算いたしました。さらに、IMO による調査などで MAC に関する中心的役割を担ったオランダの CE Delft 社に依頼して、排出削減技術導入を妨げる障壁に関する詳細な分析調査を実施しました。そして、最後にそれらの障壁克服のための提言をまとめました。本事業の成果が、外航海運による適正な CO₂ 排出削減方策の策定に役立ち、国際的な対策の決着と実行に貢献することを希望しております。

本事業を進めるにあたりましては、末岡英利東京大学大学院工学系システム創成学専攻特任教授を委員長とする「外航海運からの CO₂ 削減のためのコストに関する調査研究委員会」各委員の方々による熱心なるご審議とご指導を賜りました。また、海事関係者の方々から多くのご協力をいただきましたことに感謝申し上げます。

平成 24 年 3 月

海洋政策研究財団
会長 秋山昌廣

外航海運からの CO₂ 削減のためのコストに関する調査研究委員会名簿

(順不同、敬称略)

委員長	末岡 英利	東京大学大学院 工学系システム創成学専攻	特任教授
委員	城山 英明	東京大学大学院 法学政治学研究科	教授
	黒川 久幸	東京海洋大学 海洋工学部流通情報工学科	教授
	中村 靖	一般財団法人日本海事協会	副会長
	松岡 巖	財団法人運輸政策研究機構 国際問題研究所	調査役

オブザーバー

西室 麻里花	国土交通省 海事局 安全・環境政策課	政策係長
河本 賢一郎	社団法人日本船主協会 海務部	係長
直川 茂	川崎汽船株式会社 環境推進室	室長
信原 真人	株式会社 MTI 技術戦略グループ	技監
田中 太一	三菱重工業株式会社 船舶・海洋事業本部 船海技術総括部客船・物流グループ	主任

関係者

山口 建一郎	株式会社三菱総合研究所 環境・エネルギー研究本部 地球温暖化戦略研究グループ	主席研究員
白戸 智	株式会社三菱総合研究所 地域経営研究本部 地域経営コンサルティンググループ	主席研究員
相場 誠弥	株式会社三菱総合研究所上 環境・エネルギー研究本部 低炭素エネルギー戦略グループ	主任研究員
木村 紋子	株式会社三菱総合研究所 社会システム研究本部 ITS・モビリティグループ	研究員
岩田 まり	株式会社三菱総合研究所 環境・エネルギー研究本部 地球温暖化戦略研究グループ	研究員

事務局

華山 伸一	海洋政策研究財団 海技研究グループ	主任研究員
三木 憲次郎	海洋政策研究財団 海技研究グループ	長
加藤 隆一	海洋政策研究財団 海技研究グループ	長
森 勝美	海洋政策研究財団 海技研究グループ	長代理
南島 るりこ	海洋政策研究財団 海技研究グループ	海事研究チーム長

平成 23 年度

外航海運からの CO₂ 削減のためのコスト算定と比較事業報告書

目次

I. 調査の概要.....	i
II. 業務の実施経過.....	iv
1 限界排出削減コストカーブに関する概論.....	1
1.1 本調査の目的.....	3
1.2 限界排出削減コスト(Marginal Abatement Cost : MAC)とは.....	4
1.3 限界排出削減コストの基本式.....	4
1.4 限界排出削減コストカーブ(Marginal Abatement Cost Curve : MAC カーブ).....	6
1.5 限界排出削減コストカーブを用いた排出削減対策の解析の基本的考え方.....	7
1.5.1 排出削減目標・対策と限界排出削減コストカーブ.....	7
1.5.2 限界排出削減コストカーブの政策への適用の限界.....	8
1.5.3 排出権取引制度以外の温室効果ガス排出削減対策と限界排出削減コストカーブ.....	14
1.6 外航海運部門以外の産業・民生部門における限界排出削減コストカーブの算定・解析事例.....	15
1.6.1 McKinsey 文献における限界排出削減コストカーブの算定・解析事例.....	15
1.6.2 RITE 世界モデルにおける限界排出削減コストカーブの算定・解析事例.....	19
1.6.3 IEA ETP における限界排出削減コストカーブの算定・解析事例.....	22
1.6.4 英国気候変動委員会文献における限界排出削減コストカーブの算定・解析事例.....	24
1.6.5 各文献における限界排出削減コストカーブの算定・解析事例の比較.....	27
1.7 主要部門に関する限界排出削減コストの分析事例.....	27
1.7.1 自動車部門に関する限界排出削減コストの分析事例.....	27
1.7.2 航空部門に関する限界排出削減コストの分析事例.....	28
1.7.3 鉄鋼部門に関する限界排出削減コストの分析事例.....	31
1.7.4 電力部門に関する限界排出削減コストの分析事例.....	31
1.8 限界排出削減コストの検討と利用の総括.....	32
2 新造船に対する短期的削減技術を導入する際の限界排出削減コスト削減カーブの算出.....	34
2.1 外航海運における限界排出削減コストカーブの算定・検討事例.....	35
2.2 本年度調査の方針.....	45
2.3 個別対策技術における CO ₂ 排出削減量の算定.....	47

2.3.1	船型クラス別 2020 年までの造船量及び船腹量の算定	47
2.3.2	ベースライン(技術未導入時)の燃料消費量及び CO ₂ 排出量の算定	50
2.3.3	各技術の排出削減量の算定	50
2.4	個別技術の費用と便益の正味現在価値(NPV)の算定	63
2.4.1	算定に当たっての経済パラメータの検討	63
2.4.2	正味現在価値の計算手法の検討	66
2.4.3	正味現在価値算定にあたってのコストの設定	67
2.5	限界排出削減コストの算定	70
2.5.1	対策技術毎の限界排出削減コスト算定	70
2.5.2	限界排出削減コストカーブの作成	71
2.6	油価変動による感度解析	73
3	限界排出削減コストに対する導入障壁の把握	75
3.1	外航海運における導入障壁の把握	76
3.1.1	GHG 削減技術導入に対するコスト以外の障壁の解析	76
3.1.2	特定技術に着目した場合の障壁	82
3.1.3	GHG 削減技術導入に対するコスト以外の障壁の定量化	88
3.1.4	GHG 削減技術導入に対するコスト以外の障壁を下げるための方策	90
4	既存船への適用、オペレーションへの適用、新造船における中・長期的な排出削減対策に対する適用を考慮した限界排出削減コストカーブの算定	92
4.1	既存船に対する排出削減技術導入による限界排出削減コストカーブの算定	94
4.1.1	既存船に対する排出削減技術導入による限界排出削減コストカーブ算定方法の検討	94
4.1.2	既存船に対する排出削減技術導入による排出削減量の算定	97
4.1.3	既存船に対する排出削減技術導入による限界排出削減コストの算定	100
4.1.4	油価変動による感度解析	103
4.2	船舶のオペレーション対策導入による限界排出削減コストカーブの算定	104
4.2.1	船舶のオペレーション対策導入時における限界排出削減コストカーブ算定方法の検討	104
4.2.2	減速航行による排出削減量の算定	107
4.2.3	減速航行による限界排出削減コストの算定	112
4.2.4	油価変動による感度解析	118
4.3	中・長期的な排出削減対策に対する適用を考慮した限界排出削減コストの算定	120
5	他の部門における障壁及び克服手段に関する検討	121
5.1	住宅・建築物部門における障壁及び克服手段に関する検討	122

5.1.1	テナントビル対策としての省エネ法改正	125
5.1.2	自治体環境条例におけるテナントの省エネ推進義務(東京都の例).....	125
5.1.3	機器省エネ基準の設定.....	126
5.1.4	省エネラベリング制度.....	128
5.1.5	省エネ機器への補助金制度	129
5.1.6	建築物の省エネ基準	130
5.1.7	建築物の省エネ性能表示制度・証書制度	131
5.2	輸送部門における障壁及び克服手段に関する検討.....	133
5.2.1	自動車部門における障壁及び克服手段に関する検討	133
5.2.2	航空部門における障壁及び克服手段に関する検討	135
5.2.3	内航海運部門における障壁及び克服手段に関する検討.....	140
5.3	大規模排出施設における障壁及び克服手段に関する検討.....	140
5.3.1	鉄鋼業における障壁及び克服手段に関する検討	140
5.3.2	電気事業における障壁及び克服手段に関する検討	142
5.4	障壁及び克服手段の概要.....	144
6	外航海運における各種排出削減技術の広範な導入に対する障壁の克服のための提言	146
6.1	外航海運における削減ポテンシャルとそれに対する障壁の概要	147
6.2	新造船に対する排出削減技術の広範な導入に対する障壁の克服のための提言	150
6.3	既存船に対する排出削減技術の広範な導入に対する障壁の克服のための提言	151
6.4	オペレーションによる排出削減技術の広範な導入に対する障壁の克服のための提言.....	152
6.5	中長期的な排出削減技術の広範な導入に対する障壁の克服のための提言 ...	153
7	まとめ.....	155
	略語集	158
	参考資料.....	165
	参考資料 1 コンテナ船大型化に関する検討	165
	参考資料 2 LNG 焚き船に関する検討.....	167
	参考資料 3 中長期的な対策を想定した限界排出削減コスト算定手法について	169
1	新造船.....	169
1.1	CO ₂ について割り引かない場合	169
1.2	CO ₂ について割り引く場合	172
1.3	報告書本編のアプローチ(参考)	174
2	既存船.....	176
2.1	CO ₂ について割り引かない場合	176

2.2	CO ₂ について割り引く場合	177
2.3	報告書本編のアプローチ(参考)	178
3	オペレーションの改善	180
3.1	新造船	180
3.1.1	CO ₂ について割り引かない場合	180
3.1.2	CO ₂ について割り引く場合	182
3.1.3	報告書本編のアプローチ(参考).....	184
3.2	既存船	186
3.2.1	CO ₂ について割り引かない場合	186
3.2.2	CO ₂ について割り引く場合	188
3.2.3	報告書本編のアプローチ(参考).....	190

I . 調査の概要

1. 調査の概要

1. 船舶のコスト削減カーブの検証

(1) モデルの検証と修正

平成 22 年度事業において開発したモデルについて検証を行った。具体的には下記のとおりである。

- ・ 対象技術の拡大：設備として排熱回収についても検討するとともに、既存船に対する設備導入(レトロフィット)及びオペレーションに関する技術(減速航行)、長期に適用可能な技術として LNG 焚き船について検討した。これらのそれぞれについて 2020 年における CO₂ 排出削減量、対策の正味の便益及びそれらに基づく MAC の算出方法について検討した。
- ・ 技術導入に関する普及シナリオ及び排出削減ポテンシャルについて、船社、造船所及び(独)海上技術安全研究所等の専門家意見を踏まえて検証した。
- ・ コスト計算アルゴリズムについて、平成 22 年度調査において行った新造船及びオペレーションに関する技術(減速航行)について改めて検討すると共に、既存船及び中長期的な対策(LNG 焚き船)について新たに検討し、CD Delft 社への質問に対する回答を参考に複数の試算を行った。(報告書 第 2 章及び第 4 章)

(2) 排出削減ポテンシャルの推定

海運における主要な省エネ・低排出技術について再検討した。

- ・ 導入ポテンシャルの修正：船社、造船所、研究機関等からのヒアリングを基に、各技術について、障壁の影響や対策効果を考慮した現実的な導入シナリオを設定した。
- ・ 想定される船種・クラスの適合性の検討：船社、造船所、研究機関等からのヒアリングを基に、痩せ型船に導入されない(Stern Duct)、肥大船に導入されない(Optimal Stern shape)等の設定について再検討を行い、小型船に対する排熱回収については導入されないという前提を設けた。
- ・ 想定される障壁の影響：排出削減ポテンシャルの推定に当たり、非海運分野にも見られるインセンティブの乖離(住宅)、消費者のニーズに合致する製品の不在(自動車)等を考慮した現実的な導入シナリオを設定した。また既存船へのレトロフィットに関しては、新造船と比べたコスト上昇についての船社へのヒアリングを基にして設定した。
- ・ 想定される対策の効果：個別対策については、排出削減率を排出削減ポテンシャル、普及率、抵抗比率の積として推計し、対策の効果を算出した。これについては、技術間の相互干渉も加味し、建造年別、船型クラス別、導入技術別の排出削

減率を算出した。(報告書 第2章及び第4章)

(3) MAC の再推計

再検証したモデル及び上記の前提に基づく実態に即した排出削減ポテンシャルの再検討を踏まえ、新造船に対する技術的対策、既存船に対する技術的対策、新造船及び既存船に対するオペレーション上の対策、中長期的対策のそれぞれについて代表例を抽出し、MAC の再計算を行った。(報告書 第2章及び第4章)

2. 他の輸送機関及び大規模 CO₂ 発生施設との比較と削減目標の設定

外航海運以外の他のセクター等との比較については、McKinsey、RITE、IEA といった全部門を包括的に扱った研究結果による文献調査によって実施した。参照した文献は具体的には下記のとおりである。

- ・ McKinsey & Company, Pathways to a Low Carbon Economy(2009年1月発行)
- ・ RITE、排出削減に関するコスト面からの分析(2010年9月発行)
- ・ IEA、Energy Technology Perspectives 2010(2010年発行)

さらに、運輸部門に特化した検討についても調査した。参照した文献は下記のとおりである。

- ・ 英国政府、Building a Supply-Side Marginal Abatement Cost Curve (MACC) for the UK Transport Sector”(2008年)
- ・ Fraunhofer Institut, Air transport marginal abatement costs and cost reduction through learning(2009年発行)

以上の文献調査に基づき、海運における排出削減目標を検討する場合のあり方について検討し、さらに、外航海運における対策については、下記の文献の調査を基にしてとりまとめた。

- ・ Det Norske Veritas “Prevention of Air Pollution from Ships Updated Marginal Abatement Cost Curves for shipping”(2010年1月発行)
- ・ Second IMO GHG Study 2009(2010年3月発行)
- ・ “Reduction of GHG Emissions From Ships, Marginal abatement costs and cost-effectiveness of energy-efficiency measures”(2010年1月発行)
- ・ Technical support for European action to reducing Greenhouse Gas Emissions from international maritime transport(2009年12月発行)(報告書 第1章)

3. 他のセクターとの公平性のある削減目標の検討

他のセクターと同等程度の負担を前提とした公平性のある削減目標のあり方について検討した。具体的には国家目標及び排出量取引制度における公平性の要件と、それに関連した MAC のあり方についてまとめた。また、外航海運に関する本調査により算出された MAC カーブ及び他の文献にある MAC カーブについては、他のセクターに比べてマイナスコストとなる技術が多いことに鑑み、削減目標の検討に当たっての障壁を特定し、また障壁を克服するような対策の必要性について記載した。(報告書 第 1 章及び第 6 章)

4. 望まれる対策の検討

(1) 排出削減技術導入障壁の分析

昨年度及び今年度の CE Delft 社の調査結果を基に、外航海運についての障壁について把握・分析した。併せて、陸上施設(住宅、航空、自動車、鉄鋼、電力)の各部門について文献調査を行うと共に既存のコストデータから障壁の分析を行った。陸上施設の多くについてはコスト面が課題となっていると結論付けられたが、購入者のニーズに合致する商品がそもそも不在であり、他の障壁が顕在化しないこと(自動車)やインセンティブの乖離(住宅・建築物)等の課題もあった。外航海運における技術導入に関して特に重要と考えられるインセンティブの乖離については、住宅・建築物部門及び内航海運部門において講じられている諸対策(省エネ法の拡張、各種補助政策、ラベリング等)について分析し、とりまとめた。(報告書 第 3 章及び第 5 章)

(2) 日本の外航海運業に対する調査

上記の項目について、委員会において議論を行った。さらに国内船社、造船所、官公庁(内航)、及び船級検査機関に対するヒアリングを複数回行い、想定される主要な技術の概要、船種・クラスへの適合性、海運以外で講じられている対策の適合性等についての情報と知見を得た。

また、本調査の結果と、第 62 回 MEPC で採択された MARPOL 条約附属書 VI(required EEDI の水準)との比較を行い、整合する結果を得た。(報告書 第 2 章)

II. 業務の実施経過

平成 23 年

- 6 月 24 日 第 1 回 外航海運からの CO₂削減のためのコストに関する調査研究委員会
- 9 月 27 日 第 2 回 外航海運からの CO₂削減のためのコストに関する調査研究委員会

平成 24 年

- 1 月 20 日 第 3 回 外航海運からの CO₂削減のためのコストに関する調査研究委員会
- 2 月 14 日 海運における CO₂ 排出削減技術及びコストに関する専門家会議
- 2 月 24 日 第 4 回 外航海運からの CO₂削減のためのコストに関する調査研究委員会
- 3 月 9 日 委託業務完了

Ⅱ．調査の内容

1 限界排出削減コストカーブに関する概論

(本調査の目的)(1.1 節)

地球規模の温室効果ガス排出削減対策を講じるにあたり、各種対策の実施に対する費用対効果の検討およびその負担が課題となる。温室効果ガスの大半を占めるエネルギー起源 CO₂ の排出削減対策については、設備コスト、運営コストだけではなく省エネによる燃料費節減という便益(=対策による貨幣換算可能な効果、見返り)も想定されるため、対策者に対して費用負担を求めるのではなく、むしろ導入利益をもたらすと判断される場合もありうる。

世界的に地球温暖化ガス削減に向けた動きが加速される中、海運分野でも IMO において GHG 削減対策に向けた国際的な対策のあり方が検討されており、検討作業の過程において IMO 事務局や各国から、その費用対効果の技術的な背景情報として、限界排出コスト(Marginal Abatement Cost : MAC)、あるいはその排出削減量との関係を示した限界排出削減コストカーブ(Marginal Abatement Cost Curve : MAC カーブ)に関する情報が提出されている。

MAC、あるいは MAC カーブは、海運以外の分野においても、国際的あるいは国内の枠組みで、広く地球温暖化対策の検討に利用されており、我が国においても全世界を対象とした MAC カーブが政府の温室効果ガス排出目標の検討に活用されている。今後の国際的な対策の円滑の実施の観点から、外航海運分野における我が国独自の MAC カーブ作成に取り組む必要がある。

本調査では外航海運における主要な温室効果ガス排出削減技術について、エネルギー消費節減効果及びコストを把握した上で限界排出削減コストを算出し、併せて導入に際しての障壁及び克服手段について他分野の事例も踏まえつつ検討することを目的とした。

(限界排出削減コストカーブに関する概説)(1.2~1.4 節)

限界排出削減コスト(Marginal Abatement Cost : MAC)とは、ある技術や対策により温室効果ガスを追加的に 1 単位削減するのに必要な費用であり、通常は排出削減量 1t-CO₂ 当たりの金額(USD/t-CO₂)として表現される。限界排出削減コストが低い技術や対策ほど排出削減の面から見てその導入時の費用対効果が高く、また限界排出削減コストがマイナスの技術は導入によって経済的に利益が発生することを意味する。

限界排出削減コストカーブ(Marginal Abatement Cost Curve : MAC カーブ)は、対象とする分野について導入可能な、温室効果ガス削減のための複数の技術や対策について、排出削減量と限界排出削減コストとの関係を連続的に図示したものである。MAC カーブの算定の際には、複数技術・対策の導入による削減量への複合影響が考慮される。また、通常、グラフ上の各技術・対策は限界排出削減コストの低い順、すなわち経済的な導入のしやすい順に並べられる。

(限界排出削減コストカーブを用いた排出削減対策の解析の基本的考え方)(1.5 節)

MAC カーブは、目標とする排出削減量を達成するために要するコストの算出、あるいは、ある水準の炭素税等経済的インセンティブを設定した場合に導入されることが期待できる技術、その際に達成される排出削減期待量の算出などに利用可能である。

国家的な温室効果ガス排出削減目標の設定において、対策技術の MAC を調査し、それらの上限が均等となるような水準で各国の排出目標を設定することにより、国際的に公平な排出目標を設定できる。

ただし、排出削減目標の設定の際に勘案されるのは対策コストだけではないこと、限界排出削減コストの上限だけでなくそこに至る総コストも考慮すべきこと、そもそも政治的合意は MAC カーブのような技術的な次元とは異なる次元で決定されること、さらには低効率技術が多い途上国の方が MAC は低く算出され、途上国の方が厳しい目標を負うという結論になりや

すい等の要因により、実際は国家レベルの排出削減目標の設定は MAC に基づいた例はない。

排出量取引制度の設計に当たって、MAC は重要な要因となりうるが、現在 EU により実施されている EU 排出量取引スキーム(EUETS)等ではグランドファザリング方式(参加する主体(企業、工場等)に対して個別に排出枠を初期割当する方式)が採用されているが、排出枠の割当は産業の競争力確保等の観点から配分が行われており、必ずしもそれぞれの施設の MAC を直接反映したものとはなっていない。

一方、今後の展開が予想されるオークション方式(割り当て可能な総排出枠を設定し、政府等が競売形式で参加主体に販売する方式)の場合には、排出量取引制度に参加する主体は排出量取引を管理する機関から売り出される排出権を競売形式で購入することになるが、この購入価格と各主体の MAC は一致することとなる。従って MAC カーブの検討は排出権取引の制度設計において重要な要素となる。

国内における**政策順位の検討**や、**炭素税及び補助金の検討**等にも MAC カーブは活用可能である。

(外航海運部門以外の産業・民生部門における限界排出削減コストカーブの算定・解析事例)(1.6 節)

全世界・全分野を対象とした MAC カーブの算定事例としては、米国のコンサルティング機関 **McKinsey & Company** による **Pathways to a Low-Carbon Economy** が有名であり、我が国においても、**財団法人地球環境産業技術研究機構(RITE)**による **RITE 世界モデル**が構築され、全世界を対象とした MAC カーブを策定している。

(主要部門に関する限界排出削減コストの分析事例)(1.7 節)

自動車部門については、上記 McKinsey、RITE、IEA の分析の中で検討が行われ、いずれも将来のハイブリッド自動車(HV)、電気自動車(EV)、代替燃料自動車(CNG、バイオ燃料)等の導入が想定されている。本格的に導入可能な対策としてはマイナスコストの対策は少なく、概ね 100 USD/t-CO₂～最大 400 USD/t-CO₂ 程度の導入コストの上限を想定している。

近年、海運と共に国際的に対策が求められている**航空部門**における MAC 算出事例は少ないが、一般的に排出削減コストがプラスに算出される中、マイナスコストの対策としてエンジンの定期的洗浄や管制の改善等が挙げられている。これらの対策は実際に実施されている。

鉄鋼部門については、McKinsey 等による試算が行われているが、マイナスコストの対策としてはコージェネレーション、バイオマス燃料等が挙げられている。他に削減ポテンシャルが大きいのは CCS である。RITE の分析では先進国における設備更新の大幅前倒しによる省エネの MAC は 200～500 USD/t-CO₂ と算出されている。

世界のエネルギー起源 CO₂ 排出量の 40 %以上を占め、最大の温室効果ガス発生源である**発電部門**についても、McKinsey 等の試算により、原子力は約 10 ユーロ/t-CO₂、風力、太陽光等再生可能エネルギーの多くは 10～20 ユーロ/t-CO₂、CCS がそれ以上(最大 60 ユーロ/t-CO₂)と算出されている。これに対して RITE の分析では、先進国での MAC に関しては、天然ガス複合火力の導入及び風力発電について 100 USD/t-CO₂ 以内と算出されているが、太陽光発電については 200～500 USD/t-CO₂ に上ると算出されている。

(限界排出削減コストの検討と利用の総括)(1.8 節)

MAC は費用効果的な排出削減対策の特定に役立つとともに、国家間の排出削減目標の策定や、排出量取引、炭素税等の国内対策の策定にも理論上は活用しうる。しかしながら実際の国

家の排出量取引目標は国際的な交渉に基づいて決定され、またその検討は主として各国の温室効果ガス排出の推移に立脚すると考えられる。このように MAC を国際交渉の土台とすることは大きな困難を伴い、これまでのところ MAC に基づいて国家の排出削減目標が行われた事例はない。また排出量取引制度については、現行の EUETS 等の無償割当制度については参加主体の過去の実績に基づきつつ産業の国際競争力への配慮等が加味されており、MAC に基づく制度設計が行われているとは言えない。

各種文献を比較分析すると、低コストまたはネガティブコストで実施可能な排出削減技術が相当量存在するとしているが、排出削減の大半は何らかのコストを要すると考えられる。ただしどの分野の MAC が低いかについてはモデル間で相違が見られる。各種の MAC 算出結果についてとりまとめた IPCC 第 4 次評価報告書によると、2030 年までに 100 USD/t-CO₂ 以下で実施できる対策効果は 15.8~31.1 Gt-CO₂(総排出量の約 30%~50%)と算出され、この半分以上が 20 USD/t-CO₂ 以下で実施できるとしている。

1.1 本調査の目的

地球規模の温室効果ガス排出削減対策を講じるにあたり、各種対策の実施に対する費用の負担の多寡が課題となる。一般に大気汚染物質などの削減対策には、設備コスト、運営コストが必要となる。他方、温室効果ガスの大半を占めるエネルギー起源 CO₂ の排出削減対策については、設備コスト、運営コストをかけた場合、省エネによる燃料費節減という便益(=対策による貨幣換算可能な効果、見返り)も想定されるため、一概に対策実施者に対して費用負担を求めるものではなく、むしろ利益をもたらすと判断される場合もある。

世界的に地球温暖化ガス削減に向けた動きが加速される中、海運分野でも IMO において、各国による GHG 削減対策に向けた国際的な対策のあり方が検討され、その具体的手段として、MARPOL 条約附属書 VI Annex VI Chapter 4 の追加によりエネルギー効率設計指標(EEDI¹)の計算と一部船舶を対象としたその最大許容値の設定及び、船舶エネルギー効率マネジメントプラン(SEEMP)²の保持の強制化が決定された。こうした議論の過程において IMO 事務局や各国関係機関から、その検討の技術的な基礎として、限界排出コスト(Marginal Abatement Cost : MAC)、あるいはその排出削減量との

¹ Energy Efficiency Design Index (エネルギー効率設計指標)。

設計時点における船舶の輸送効率を推定するための指標。式の形式としては、{主機及び補機の出力(kW)} × {出力あたり燃料消費量 (t-fuel/kWh)} × {燃料の CO₂ 排出係数(t-CO₂/g-fuel)} ÷ {重量(DWT) × 速度(mile/hr)} であり、t-CO₂/トンマイルの次元を持つ。2009 年 7 月の MEPC59 では自主的な EEDI の算出方法、認証方法等に関する暫定ガイドラインが合意され、また 2010 年 3 月の MEPC60 では新造船に対する計算義務付けが合意された。2011 年 7 月の MEPC 62 における MARPOL 条約附属書 VI の改正案の採択により、総トン数 400 トン以上の新造船に対する EEDI の計算と一部船舶を対象としたその最大許容値の設定が義務付けられた。

² Ship Energy Efficiency Management Plan(船舶エネルギー効率管理計画)。船舶がエネルギー効率の良い航行を行うための手法及びモニタリング・改善計画。2011 年 7 月の MEPC 62 における MARPOL 条約附属書 VI の改正案の採択により、総トン数 400 トン以上の船舶に対する SEEMP の保持が義務付けられた。

関係を示した限界排出削減コストカーブ(Marginal Abatement Cost Curve : MAC カーブ)に関する論文等が提出され、議論されている。

MAC、あるいは MAC カーブは、海運以外の分野においても国際的あるいは国内の枠組みで、広く地球温暖化対策の検討に利用されており、我が国においても 2020 年に向けた我が国の温室効果ガス排出目標の検討の中で、MAC カーブが他の先進国との目標設定の比較(1.6.2 参照)等に活用されている。しかしながらこれまで、我が国においては外航海運分野での MAC カーブ作成に取り組んだ事例はなく、我が国が推進する EEDI の導入促進や、ネガティブコストが多いとされる外航海運における温室効果ガス排出削減対策の検討、今後の国際的な対策の円滑の実施の観点だけでなく、海運事業者や造船所が独自のコスト解析を行う際にも、我が国独自の外航海運分野における MAC カーブ作成する必要がある。

本調査では外航海運における主要な温室効果ガス排出削減技術について、エネルギー消費節減効果及びコストを把握した上で限界排出削減コストを算出し、併せて導入に際しての障壁及び克服手段について他分野の事例も踏まえつつ検討することを目的とした。

1.2 限界排出削減コスト(Marginal Abatement Cost:MAC)とは

限界排出削減コスト(Marginal Abatement Cost : MAC)とはある技術や対策により温室効果ガスを追加的に 1 単位削減するのに必要な費用であり、1 トン当たりの米ドルで表現されたコスト (USD/t-CO₂)として表現される場合が多い。これは、複数の温室効果ガス削減対策の経済的な効率性を横並びで見ると指標として位置づけることができ、限界排出削減コストが低い技術や対策ほど排出削減の面から見てその導入時の費用対効果が高く、また限界排出削減コストがマイナスということは、その技術や対策の導入が全体で見ると付加的なコスト無しで実施できる(むしろ経済的に利益をもたらす)ということの意味する。ただし、仮に限界排出削減コストがマイナスであっても、排出削減のためのコストを負担する主体と便益を享受する主体が異なる場合や、設備コストが多額のため資金調達自体が制限される等の要因があり、当該対策が自動的に導入されるとは限らない。このような資金以外の導入障壁としては、他には製造設備の制約、技術リスク等が挙げられるが、これらについては現在の MAC の計算方法には、明示的に反映されない。

1.3 限界排出削減コストの基本式

限界排出削減コスト(以降、「MAC」と記載)は一般的にある一定期間内において発生する「排出削減に要する正味費用(費用－省エネ等の便益)÷排出削減効果」で表される。ここで CO₂ 排出削減技術の多くは省エネルギー技術であるが、その場合の MAC

は MEPC 61・INF.18 (Reduction of GHG Emissions From Ships: Marginal abatement costs and cost-effectiveness of energy-efficiency measures) によれば、下記のような算定式により表される。

$$MAC = \frac{\Delta C}{\alpha_j \times CF \times F} = \frac{K_j + S_j - \alpha_j \times F \times P + \Sigma O_j}{\alpha_j \times CF \times F} \quad (1)$$

ここで、

- ・ MAC : 限界排出削減コスト(USD/t-CO₂)
- ・ ΔC : 正味費用(USD)
- ・ α_j : 技術 j による排出削減率()
- ・ CF : 燃料の CO₂ 排出係数(t-CO₂/t-fuel)
- ・ F : 燃料消費量(t-fuel)
- ・ K_j : 技術 j の資本コスト(設備コスト : USD)
- ・ S_j : 技術 j の運営コスト(USD)
- ・ P : 燃料価格(USD/t-fuel)
- ・ O_j : 技術 j の導入による機会損失の経済価値(USD)

即ち、MAC とは当該技術の設備・運営コストから燃料費節減という便益を差し引いた正味コストを、当該技術による排出削減量で割ったものである。従って、ある技術の導入によりもたらされる燃料費節減の便益が、当該技術の導入及び維持・利用に伴う費用を上回れば MAC の値はマイナス、下回ればプラスとなる。例えば設備コストを 100 万ドル、運営コストをゼロとおき、当該設備による年間燃料削減量を 1,500t-fuel (燃料の CO₂ 原単位を 3 t-CO₂/t-fuel とおくと年間 CO₂ 排出量は 4,500 t-CO₂)、燃料コストを 500 ドル/ t-fuel とし上式にあてはめると、MAC は(1,000,000－1,500×500)÷4,500 = 56 USD/t-CO₂ と算出される³。年間燃料削減量が 2,000t-fuel を超えると、コストを便益が上回り、MAC はゼロ以下のマイナスの値を取る。このように省エネ技術の場合、船舶に適用可能な技術の資本コスト及び/または運営コストが低く、かつ省エネ・排出削減効果が大きければ、MAC はマイナスの値を取る。逆に技術の資本コスト及び/または運営コストが高価であり、かつ省エネ・排出削減効果が小さければ MAC はプラスの大きい値を取る。

ここで技術導入に関する省エネ以外のコストや便益(たとえば CO₂ 排出削減クレジット等)を考慮しないとすると、上式は数式(2)のように単純化される。

³ ここでは回収想定年数や割引率(後述)については考慮しない。

$$MAC = \frac{\Delta C}{\alpha_j \times CF \times F} = \frac{K_j + S_j - \alpha_j \times F \times P + \Sigma O_j}{\alpha_j \times CF \times F} = \frac{-\alpha_j \times F \times P}{\alpha_j \times CF \times F} = -\frac{P}{CF} \quad (2)$$

即ち、設備・運営コストを必要とせず、また省エネのみが便益である技術の MAC は燃料価格を当該燃料の CO₂ 原単位で除した値となる。つまり燃料価格が 500 USD/t-fuel、燃料の CO₂ 原単位が 3 t-CO₂/t-fuel であるとする、そのような燃料を削減する技術の MAC は設備・運営コスト及び機会損失がゼロの場合約-167 USD/t-fuel の最小値を取る。

1.4 限界排出削減コストカーブ(Marginal Abatement Cost Curve: MAC カーブ)

前項で述べた限界排出削減コストは、導入される技術や対策ごとに計算される。実際には、単独の技術や対策が導入されることは希であり、様々な技術や対策を組み合わせ、ある一定の範囲内のコストで最大の CO₂ 削減量を期待する場合がほとんどである。この際に、一定の技術や対策の導入を組み合わせた削減シナリオを設定し、それぞれの技術や対策に対する MAC を算出して、排出削減量と費用の関係を連続的に図示したものが限界削減費用曲線(Marginal Abatement Cost Curve: MAC カーブと呼ぶ)である。MAC カーブを算定する際には、単独の技術の MAC を評価する場合とは異なり、技術の組み合わせによる削減量への複合的な影響(組み合わせによって MAC の分子に相当する燃料削減の費用及び分母に相当する CO₂ 排出削減量の双方について、増加する場合と減少する可能性がある)を考慮するとともに、技術の導入順を定める順序づけが必要となる。順序づけは、通常は経済的な導入のし易さに沿って、すなわち MAC が低く計算される技術・対策から順に並べていくが、その目的用途によってはそれ以外の方法も考えられる⁴。また MAC の低い順に並べる場合でも、後述(2.5 節)するように MAC は技術コストや便益に関する想定のほか、割引率⁵(MAC を算定するためのパラメータ、詳しくは 2.5.1 節参照)や回収想定期間(同左)等多数のパラメータに影響されるため、これらの設定次第で順序も変わりうる。例えば、導入コストが低く燃料削減便益の小さい対策と、それより MAC が高い、導入コストが高いが導入以降継続的に発生する燃料削減便益の大きい対策とは、回収想定期間が長くなれば後者の MAC が相対的に低下し、MAC が逆転しうる。

⁴ 例えば MAC が高い技術 A の導入が、MAC の低い技術 B の導入の前提になる場合、あるいは技術 A を先に導入するような政策措置が講じられる場合、そのようなグラフの作成も考えられる。

⁵ 将来の価値を現在の価値に換算する場合の係数。貨幣は利子を生み、投資は収益が期待されるので、例えば現在 100 万円の資金を保有することは、1 年後に 100 万円以上を手渡されることと同じ価値がある。この増分の比率が割引率である。現在 100 万円の資金を保有することと 1 年後に 105 万円の収入があることが同じ価値である場合、割引率は 5%となる。従って割引率は投資に対する収益率の期待値と同じである。

MAC カーブの算定事例については、主に陸上のセクターに関する事例を 1.6 に、海運を対象とした計算解析事例を 1.6 で紹介する。

1.5 限界排出削減コストカーブを用いた排出削減対策の解析の基本的考え方

1.5.1 排出削減目標・対策と限界排出削減コストカーブ

ある国や部門等において想定される各種の排出削減技術について MAC カーブを算出することにより、当該国、部門において、所与の排出削減量を達成するために要するコストが算出可能となる。例えば図 1.5-1 に示すような MAC カーブを描く国または部門において、 $X(t\text{-CO}_2)$ の排出削減を最小コストで達成するために必要な対策コストの総和は台形 OABC の面積(USD)で表され、MAC が $Y(\text{USD}/t\text{-CO}_2)$ の技術までを実施する必要があると算出される(ただし、2.4 で述べるように、MAC 割引率、回収想定期間等、業界ごとに異なる多くのパラメータに依存し、また MAC カーブも個別の技術ごとに並べた場合は、一般に非線形のカーブを描くため、図 1.6-1 に示すような単純化は容易ではない)。

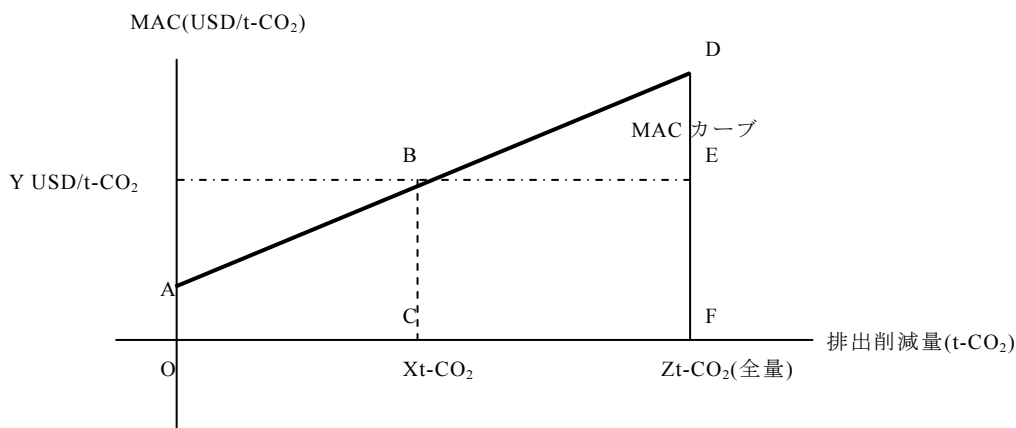


図 1.5-1 MAC カーブと排出削減対策コストの関係

また、MAC カーブはある水準の炭素税等の経済的インセンティブを設定した場合に導入されることが期待できる技術(とその組み合わせ)やその際に達成される排出削減期待量の算出にも理論的に適用可能である。例えば図 1.5-1 において $Y(\text{USD}/t\text{-CO}_2)$ の炭素税を課す場合、対象部門は四角形 OABC(単位:USD)に相当する対策コストを講じて排出量を削減し、MAC が $Y(\text{USD}/t\text{-CO}_2)$ を上回るようになると排出削減実施の代わりに炭素税を支払うことを選択する。結果として当該部門の温室効果ガス排出量は $OZ(t\text{-CO}_2)$ から XZ に $(t\text{-CO}_2)$ に減少し、炭素税の税収は四角形 BCFE(単位:USD)で表される。

このように MAC カーブの策定は国家、部門の温室効果ガス排出目標や排出削減費

用の算出を検討する上で有意義な情報を与える。ただしMACカーブを用いた解析を、温室効果ガス排出削減目標の策定や政策に反映するためにはいくつかの制約がある。それを以下に概観する。

1.5.2 限界排出削減コストカーブの政策への適用の限界

国家的な温室効果ガス排出削減目標の設定に当たり、各分野の対策技術のMACを調査し、それらの上限が均等となるような水準で各国の排出目標を設定すると、国によって目標とすべき排出削減率が異なっても、そのような目標を達成する時に必要な追加的な対策に要する上限コストの水準が各国間で理論上等しくなり、その意味で公平と言える。

逆に言えば、各国に対して基準年等のベースラインから見た排出削減率を一律に設けた場合(例：X年までにY年比Z%減、等)、各国の排出削減技術の排出削減ポテンシャル及び上限コストは、国家間の経済発展状況によって大きく異なる可能性が高い。例えば現有設備の効率が低く温室効果ガス排出原単位が高い国は、低排出型設備への更新が比較的容易であるが、既にそれら低排出型設備を導入している国が同様な排出削減を達成するためには削減の余地が限定されるか、非常に大きなコストを要する設備に代替する必要がある。日本は現時点で各種環境対策、省エネ対策が浸透していることから、今後講じることが可能な温室効果ガス排出削減対策は一般に高コストであると考えられている。このため各国が一律の排出削減率目標を採択した場合、MACカーブの考え方から言えば、日本が他国と同一の削減率を実現するためのコストが高価となるのは必然である。以上の観点から、MACが等しくなるような目標設定は公平性のひとつの基準になる。なおノルウェーからIMOに提案された文書では、MACカーブに基づく削減目標が提案されている。

国内では、平成21年の「地球温暖化問題に関する閣僚委員会副大臣級検討チーム・タスクフォース」において、日本、EU、米国におけるMACカーブを計算し、日本の主張した温室効果ガス排出目標である「1990年比25%減」を実現する日本のMAC値をEU、米国に当てはめた場合の、三者の排出削減率(あるべき削減目標値)を比較した例がある。日本の温室効果ガス排出目標(「1990年比25%減」)達成を行う技術・対策の組み合わせのMAC上限値は約500 USD/t-CO₂⁶と算出され、この同じコスト水準の対策(組み合わせは異なる可能性がある)を実施した場合、欧米の温室効果ガス排出量は1990年比で日本以上に大きく削減される結果となった。換言すれば、欧米が現在提案している排出削減目標は日本に比べて経済的負担が軽いとも言える。

以上の観点から日本は、各国の削減目標はMACカーブなどの解析に基づき経済的

⁶ 500USD/t-CO₂を炭素税に例えれば、ガソリン1リットル当たり約90円の上乗せに当たる。

な公平性の観点からも検討するべきであると主張してきた経緯がある。

表 1.5-1 日本と同等の MAC 上限値の限界排出削減費用から算出される米国及び EU の排出削減目標

	日本と同じ MAC の上限値を設定した場合の温室効果ガス排出削減目標 (2020 年)		日本の排出削減対策目標達成方法	「1990 年比 25 % 減」排出削減目標達成のための日本の MAC 上限値
	米国	EU		
財団法人地球環境産業技術研究機構(RITE)世界技術モデル(ケース)	1990 年比 44%減	1990 年比 39%減	全て国内対策	476USD/t-CO ₂
国立環境研究所 世界技術モデル	1990 年比 32%減	1990 年比 32%減	国内対策で-20 %、海外クレジットで 5 %	546USD/t-CO ₂
米国および EU が COP15 に引き続き提案した削減目標	2005 年比 17%減 (1990 年レベルとほぼ同等)	1990 年比 20 %減		

(出典：平成 21 年「地球温暖化問題に関する閣僚委員会副大臣級検討チーム・タスクフォース」報告書より作成)

ただし、実際に排出削減目標を各国の MAC カーブに基づいて設定させることには幾つかの困難が伴う。その主な理由は例えば以下のように大別される。

(1)限界排出削減コスト以外の要因の存在

前述のように MAC カーブに基づく解析・評価はは一定の公平性の基準となりうるが、排出削減目標の決定には MAC カーブだけではなく、当該国のエネルギー消費量及び温室効果ガス排出量の現状及び今後の動向等の要素も重視されよう。一般的に先進国に比べて途上国のほうが、エネルギー効率が低い設備が多いため、図 1.5-2 に見るように同じ排出量で見た場合には、途上国における MAC カーブは先進国と比べて低く算出されることが多い。しかしながら、実際に先進国と途上国に対する排出削減目標を検討する場合には、現状の 1 人当たりエネルギー消費量水準の相異や、今後これらの国々が目指している経済成長と、それに伴う温室効果ガス排出量の増加について勘案する必要が生じよう。その意味で MAC カーブを公平な目標の基準とする場合は、比較の対象となる国や地域が、エネルギー消費や生活水準の現状と将来動向についてほぼ均等な条件にあることが前提となると考えられる。

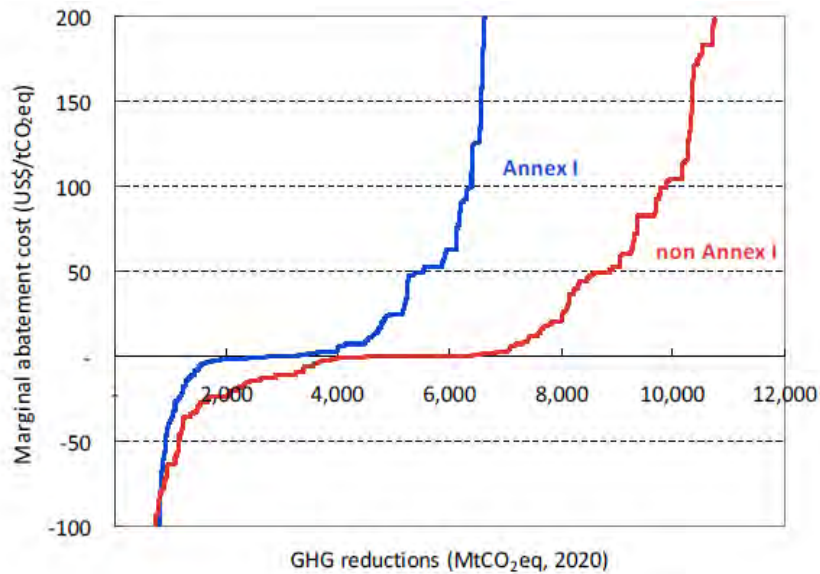


図 1.5-2 気候変動枠組条約附属書 I 国(先進国及び移行経済国)と非附属書 I 国(途上国)の MAC カーブ算出事例

(出典：地球温暖化問題に関する懇談会 中期目標検討委員会(第 1 回：2008 年 11 月)
資料：モデルは国立環境研究所 AIM エンドユースモデルに基づく算出結果)

また、経済全体に対する排出削減コストは、仮に排出削減目標とその際の MAC が同一であっても、それに到達するまでの総コストは MAC カーブの状況により、異なってくる。例えば図 1.5-3 において実線及び破線をそれぞれ A 国と B 国の MAC カーブとした場合、共に排出削減量が X(Mt-CO₂あるいは基準年比%)、排出削減目標を MAC の上限値が Y(USD/t-CO₂)となる点で排出削減目標を設定すると、A 国は最初から高価な対策を実施しなければならないのに対して B 国の初期の対策費用は安価である。従って、排出削減目標及び目標達成時点での MAC は等しくても、目標達成に至るための積算コストは A 国のほうが大きいと言える。

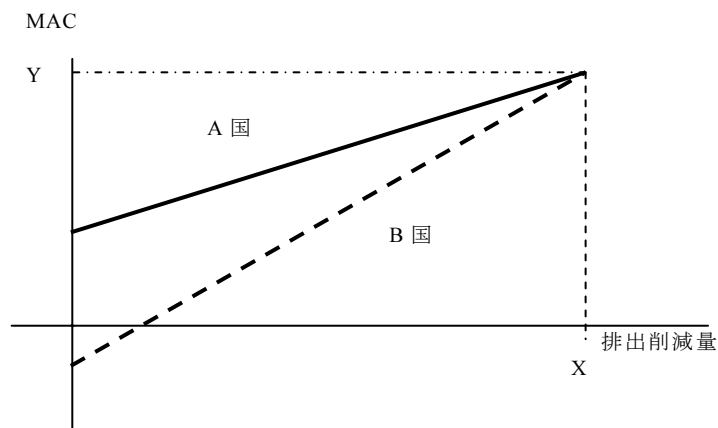


図 1.5-3 MAC カーブの異なる二カ国の排出削減目標

(2)政治的合意の困難さ

次に、現実的な課題として、排出目標を検討する多様な主体が合意しうるような MAC の算出自体が困難であるということが挙げられる。

本調査並びに多くの既存調査が示すように、MAC カーブは個別対象技術の種類、普及率、排出削減ポテンシャルといった技術的パラメータとともに割引率や回収想定期間等多くの経済的なパラメータに基づき算出され、これらの設定により大きく変化する。このようなパラメータについて各国がお互いに完全に情報を把握し、合意しうる数値を策定することは難しい。さらに燃料価格や割引率等の経済パラメータは外的要因により経年で変化しうるため、定期的な見直しが必要となる。

さらに、国際交渉において排出削減目標を策定する場合は、往々にして不完全な情報に基づいて大枠に関する政治合意に達し、細則については後日決定するという結果となる。京都議定書の採択時がまさにそのような状況であり、京都議定書の施行細則とも言えるマラケシュ合意の策定までには京都議定書採択後さらに 4 年を要した。京都議定書に基づく排出削減目標の設定に当たっては各国の MAC カーブに関する情報が適切に反映されたとは言いがたく、目標設定の根拠としては MAC カーブよりも現状の排出水準及び今後の排出動向が考慮された。京都議定書の目標検討に際して、旧ソ連・東欧等の移行経済国は先進国と比べて緩い目標を負ったが、これらの国においてエネルギー効率の低い設備が多く稼働しているという事実を鑑みると、MAC に基づく検討により示唆される排出目標とは逆の結論になっていると考えられる。

(3)排出量取引制度と限界排出削減コストカーブ

次に排出量取引制度における MAC カーブの適用について考えてみる。排出量取引制度においては、コストを自己負担して余剰な削減量を産み出した主体が、その余剰削減量を他の主体と売買することで自己負担の一部を回収する。つまり取引された排出量を通して各主体の MAC が等しくなるという言い方もできる。従って排出量取引制度の設計に当たり MAC カーブは重要な要因となりうる。

排出量取引制度における排出枠の配分または調達的方式には、大別すると参加する主体(企業、工場等)に対して個別に排出枠を最初に無償で割当する方式(無償割当方式)と、割り当て可能な総排出枠を設定し、政府等が競売形式で参加主体に販売する方式(オークション方式)がある。これらにおける MAC カーブの役割について以下に述べる。

(4)無償割当方式の排出量取引制度

初期の排出枠を参加主体に無償で割当てする場合、その配分方法には様々な手法があるが、MAC が完全に均等になるように配分すると、各主体が排出枠を達成するために必要な対策の MAC が一律となり、そもそも取引を行う必要がなくなる。これは排出

権売買による資金移転が起こらないと言う点で公平であるが、排出量取引制度に参加する各主体に対して課される排出削減率が一律ではなくなる(排出削減が容易な部門・施設もそうでないものも同率の排出削減が求められる)という点で、不公平感を醸成する可能性がある。

現行の EU 排出量取引スキーム(EUETS)は、各国が個別の排出施設(発電所、製鉄所等)に対して毎年の排出枠を無償で割り当てる方式であるが、個別施設に対する排出枠の配分は基本的には過去の排出実績に基づいた配分(グランドファザリング方式)である。例えば EUETS においては製鉄、セメント等の産業部門に対しては過去の排出実績をほぼ反映した排出枠が付与されている一方で、電気事業に対して過去の排出実績を大幅に下回る厳しい排出枠配分を行っており、石炭火力発電所の中には排出量の半分程度という到底遵守できない排出枠しか与えられていない対象施設もある。

このように EUETS に基づく個別施設の排出枠は MAC という観点からは極めて不公平であると考えられるが、これは排出削減義務を課すことによる産業の域外流出や、コスト転嫁の可能性を考慮したものであろう。

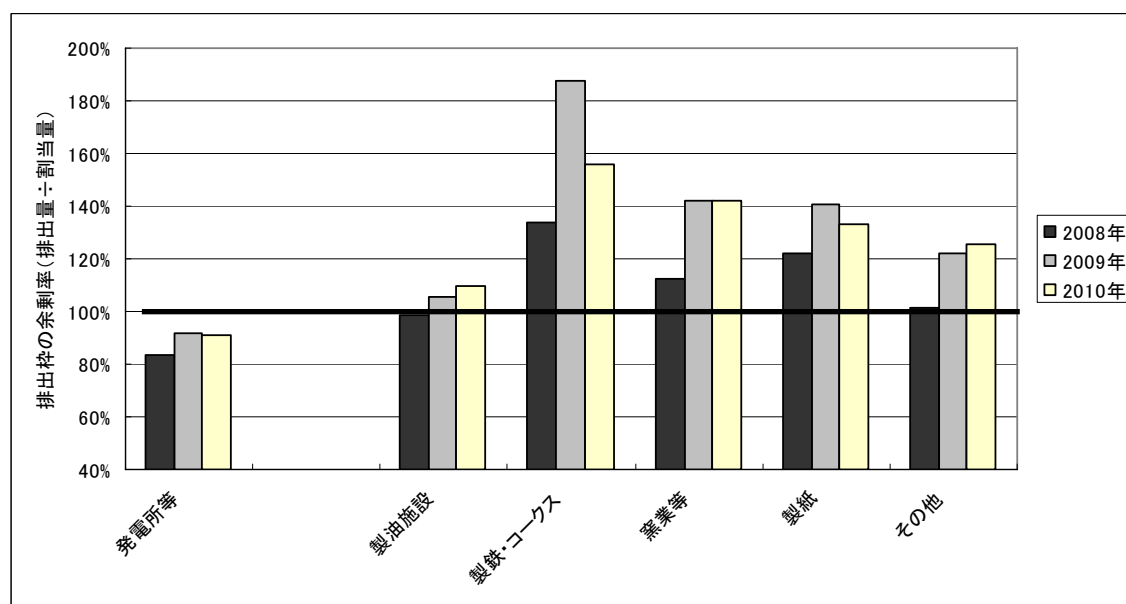


図 1.5-4 EUETS 参加各部門の温室効果ガス排出枠の排出量に対する比率
(出典：欧州委員会資料より作成：Y軸が高いほど排出枠が余剰となる)

このように国際的に競争状態にある産業に関して潤沢な排出枠を与えるような制度設計は、導入には至らなかったものの近年検討された豪州の排出量取引制度(Carbon Pollution Reduction Scheme(CPRS))や米国連邦議会提出法案(The American Clean Energy and Security Act、通称 Waxman-Markey 法案)にも存在する。これらの事例に見るように、排出量取引制度においても目標の設定は必ずしも MAC カーブを反映したものと

はなっていない。また、前述のように同一業種に限定しても、国外も含めた全ての参加主体の MAC カーブに関する情報を完全に把握した上で制度を決定することは不可能であろう。

(5)オークション方式の排出量取引制度

排出量取引制度に参加する主体が排出枠を与えられず、自らの排出量に応じた排出枠を政府からオークション(競売)で買い取る方式の排出量取引制度では、状況はやや異なる。このような方式の制度は現在までに存在しないが、EUETS では 2013 年から開始される第 3 フェーズにおいて、主として発電所について導入される予定である。オークション方式の場合には、排出量取引制度に参加する主体は、排出量取引を管理する機関から売り出される排出権を競売形式で購入することになるが、この購入価格と各主体の MAC は一致する。即ち自らの排出削減対策が排出権価格を下回る場合は排出削減対策を講じ、逆の場合は排出権購入を行う。その意味でオークション方式の排出量取引制度における全体目標の設定は、MAC カーブと密接な関連がある。対象分野の MAC カーブの策定により、排出枠総枠の達成とコスト・政府等の排出権収入等が推計される。従って MAC カーブの検討は全体の制度設計において不可欠の要素であろう。

排出削減制度の策定において MAC に基づく配分が検討された例として、上記の 2013 年以降の EUETS 第 3 フェーズの総排出枠の決定方法が挙げられる。これに関する文書⁷を分析すると、「2020 年までに 1990 年比 20 %減」という EU の全体排出削減目標に照らして、運輸部門や民生部門等の EUETS 対象外の部門に対する排出削減対策(炭素税や燃費効率等)によって生じる間接的な負担が、EUETS 対象部門(産業施設及び発電所)における排出削減対策の MAC とほぼ同等(約 40 ユーロ/t-CO₂)となるように、EUETS 対象部門全体の目標が設定された。これは EUETS 対象部門と非対象部門の双方において不公平感を低減することを目的としていたものと考えられる。

なお、EUETS 対象外の部門の排出削減目標を各国間に配分するに当たっては、配分の根拠として 1 人当たり GDP を用いている。図 1.5-5 を見ると、1 人当たり GDP の低いブルガリアやルーマニアの排出目標は 2005 年比 20 %増程度であるが、1 人当たり GDP の高いデンマーク、アイルランドやルクセンブルクは逆に 2005 年比 20 %減となっている。仮に国家間の MAC カーブを描いた場合、むしろ逆の結果が導かれる可能性が高い。

⁷欧州委員会、Impact assessment: Document accompanying the Package of Implementation measures for EU's objectives on climate change and renewable energy for 2020.

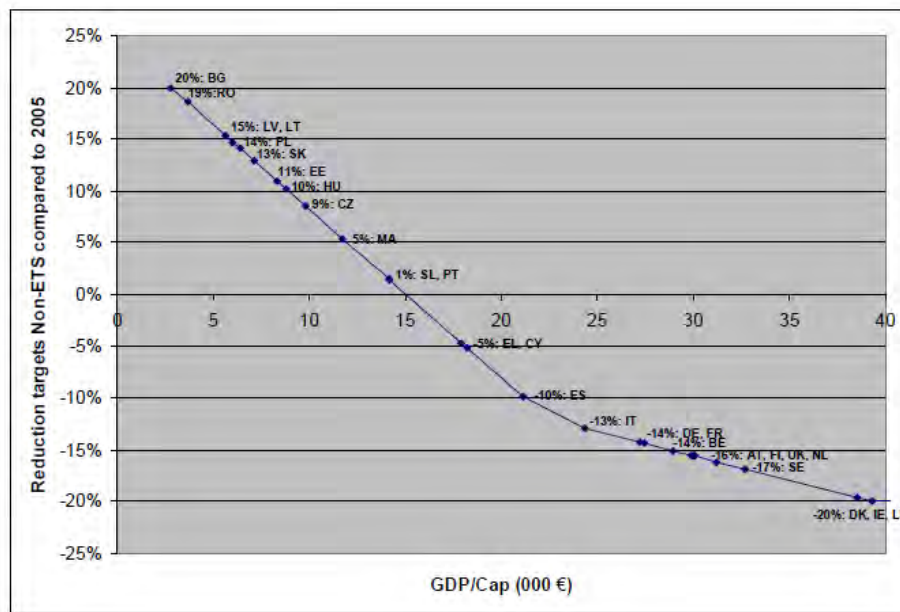


図 1.5-5 2013 年以降の EU 排出量取引スキーム対象外部部門の排出削減目標(対 2005 年比)と 1 人当たり GDP の関係

(出典：欧州委員会、Package of implementation relating to the EU's objectives on climate change and renewable energy for 2020)

1.5.3 排出権取引制度以外の温室効果ガス排出削減対策と限界排出削減コストカーブ

MAC 及び MAC カーブは排出量取引制度以外の温室効果ガス排出削減対策を検討する場合にも用いられる。以下に例を挙げる。

(1) 政策順位の検討

一般に温室効果ガス排出削減対策はコストの低いものから行う方が費用効果的であり、また経済影響も小さい。従って MAC カーブの作成は温室効果ガス排出削減のために講じるべき対策、対象とする分野の優先順位の決定に資する。ただし実際の政策策定には排出削減コスト以外の他の要因も考慮する必要がある。例えば太陽光発電は、これまでの多くの検討によれば MAC が高い技術となるが、電力需給の安定化等の要因もあり日本の温室効果ガス排出削減対策として重視されており、固定価格買取制度等の支援政策の策定・施行が進められている。

(2) 炭素税及び補助金の検討

ある省エネ技術の MAC が X USD/t-CO₂ と算出され、それと同額の炭素税を課した場合、炭素税を反映した燃料価格の上昇により燃料節減の便益が向上し、MAC はゼロとなる。このことは、炭素税により当該技術に対するコスト面での障壁は取り払われ

たことを意味する。同様の効果は、当該技術に対して X USD/t-CO₂に相当する補助金を付与することにより達成される。従って、MAC カーブは温室効果ガス排出削減対策の導入を容易にするための、炭素税や補助金などの枠組みの検討に活用できる。

ただし MAC カーブに基づいた炭素税や補助金対策の検討の前提として、対象となる排出削減技術の MAC がプラスの値を取っており、導入に関する障壁がコストに関するものと見なされることが前提となる。MAC がマイナスである(即ち現状において導入が費用効果的であると算出される)にも係らず技術の導入が進まない技術については、技術の導入に対するコスト以外の障壁の存在が示唆される。ここで炭素税が導入されると燃料コストが高くなることから燃料節減効果が高まり、MAC がさらに低い値を取るようになるが、既にマイナスとなっているのに技術の普及が進まない MAC の値をさらに低く誘導することによって技術の普及を促進することの効果については疑問が生じる。

1.6 外航海運部門以外の産業・民生部門における限界排出削減コストカーブの算定・解析事例

MAC の算定とその解析は既に多くの分野で行われており、全世界・全産業について対象とした調査結果も存在する。ここでは全世界・全産業についてについて MAC カーブ及びその諸要素について検討した事例のうち代表的なものを挙げ、整理した。また、それらとあわせて運輸部門について調査した英国の事例を併せて取り上げた。具体的には次の 4 つについて検討を行った。

- ・ McKinsey and Company(2009)、Pathway to a Low-Carbon Economy
- ・ 公益財団法人地球環境産業技術研究機構(RITE)世界モデル
- ・ IEA、Energy Technology Perspectives 2010
- ・ 英国気候変動委員会(CCC)による分析

1.6.1 McKinsey 文献における限界排出削減コストカーブの算定・解析事例

(1)対象

本文献(Pathways to a Low-Carbon Economy⁸)は、米国のコンサルティング機関 McKinsey & Company が、産業革命以前と比べて温度上昇を 2 度以内に抑えるために 2030 年の時点でなすべきことをとりまとめたものである。本文献の結論として、温度上昇の抑制のために 2030 年の温室効果ガス排出量を 1990 年比 35 %減とすることが必要であり、そのためのに必要な投資は年間 2,000 億～3,500 億ユーロ(2030 年の世界 GDP の 1%程度)としている。

⁸ http://www.mckinsey.com/client-service/sustainability/pathways_low_carbon_economy.asp よりアクセス可能。

本文献では主要産業部門に加えて、廃棄物、森林、農業等 10 のセクターについて、世界 21 地域における 200 以上の GHG 排出削減技術を対象に、MAC の算出が行われている。対象とされる技術は、60 USD/t-CO₂ 以下で削減実施可能な技術であり、これらが 2010 年より導入開始される場合を想定している。

算定対象期間は、2005 年を基準年とし、2010 年、2015 年、2020 年、2025 年、2030 年における削減ポテンシャルを予測している。

(2) 手法

a. 削減コストの算定方法

削減コストの算定方法を数式化すると下記のとおり。全ての地域及び年の加重平均として算定される。

$$ERC = \frac{(TCI_{ER} + TCO_{ER} - TB_{ER}) - TC_{BAU}}{CE_{BAU} - CE_{ER}} \quad (3)$$

ただし、

TCI_{ER} : CO₂ 削減が実施される場合の投資コスト

TCO_{ER} : CO₂ 削減が実施される場合のランニングコスト(人件費、材料費)

TB_{ER} : CO₂ 削減を実施することにより得られる収益(省エネ効果など)

TC_{BAU} : BAU における全コスト

CE_{BAU} : BAU における CO₂ 排出量

CE_{ER} : CO₂ 削減が実施される場合の CO₂ 排出量

なお、税金や補助金など政策により変動する部分や、通信費等の間接費は考慮しない。また、技術コストは、現状のコストおよび専門家による将来のコスト予測に基づくとしている。

b. BAU シナリオの設定

BAU シナリオは、下記の条件のもと設定される。

- ・ 2005 年から 2030 年にかけて GHG 排出量は 55 % 増加し、2005 年の 46 Gt-CO₂ から 2030 年の 70 Gt-CO₂ となる。地域別には、2005 年時点において先進国が 40 %、途上国が 56 %、国際運輸が 4 % を占めていたが、2030 年には先進国が 32 %、途上国が 63 %、国際運輸が 5 % となる。
- ・ 石油価格(60 USD / バレル)、及び IEA の World Energy Outlook 2007 に基づき地域ごとに GDP 及び人口増加率を設定する。

- ・ CO₂ 排出量 / GDP は、年間 1.2 % 低下する。

c. 算定の前提

経済的パラメータとして、割引率は、長期国債利率の過去の平均利率である 4 % に設定する。回収想定期間として、設備の耐用年数(functional life)を想定している。

(3)結果

60 USD/t-CO₂ 以下で実施可能な技術の積み上げにより、2030 年までに BAU 比 38 Gt-CO₂ の削減が可能であるとしている。計算結果について図 1.6-1 に示す。温室効果ガス排出量は無対策では 70 Gt-CO₂ に上るため、対策により排出量が半分以下に削減される(1990 年比では 10 % 減、2005 年比では 30 % 減)。この内訳は表 1.6-1 のとおり。

表 1.6-1 McKinsey 文献による各種対策による年間排出削減量

区分	年間排出削減量	具体的な対策
省エネ対策	14 Gt-CO ₂	高効率車両、建築物の断熱、産業機械の制御改善
エネルギー供給側の低炭素化	12 Gt-CO ₂	再生可能エネルギー発電、原子力発電、化石燃料発電所に対する炭素回収・貯留(CCS)付加。
森林・農業対策	12 Gt-CO ₂	森林減少の防止及び農業慣行の改善(ただしほとんどが途上国での実施となるため、困難としている)

全般的には住宅等における家電・空調、断熱、照明等設備に関する省エネ対策や、肥料管理や耕法改善等農業対策等がネガティブコスト(即ち費用効果的)であると算出されているのに対し、原子力、風力及び太陽光発電や、温室効果ガス排出削減以外に(省エネ等の)付随的便益を生じない炭素回収・貯留(CCS)等が高コストであると算出されている。

本文献によれば 100 USD/t-CO₂ 以下で実施可能な技術については算定にかかる不確実性が増すが、これも含めると、更に 5 Gt-CO₂ の削減が追加的に可能であるとしている。加えて消費者行動の変化が生じた場合には、更に 4 Gt-CO₂ の削減が可能となるとしている。但し、削減ポテンシャルの算定においては、特に森林、農業、新興技術については、不確実性が特に大きいとしている。

なお MAC カーブ上で算定されている削減に要するコストは、2030 年で 1,500 億ユーロと算出されている。これに加えて実際の削減には制度的インフラの整備等様々なトランザクションコストがかかることから、これを加味すると、2030 年で年間 2,000 億~3,500 億ユーロ(2030 年の GDP の 1%程度)と想定されている。

Global GHG abatement cost curve beyond business-as-usual – 2030

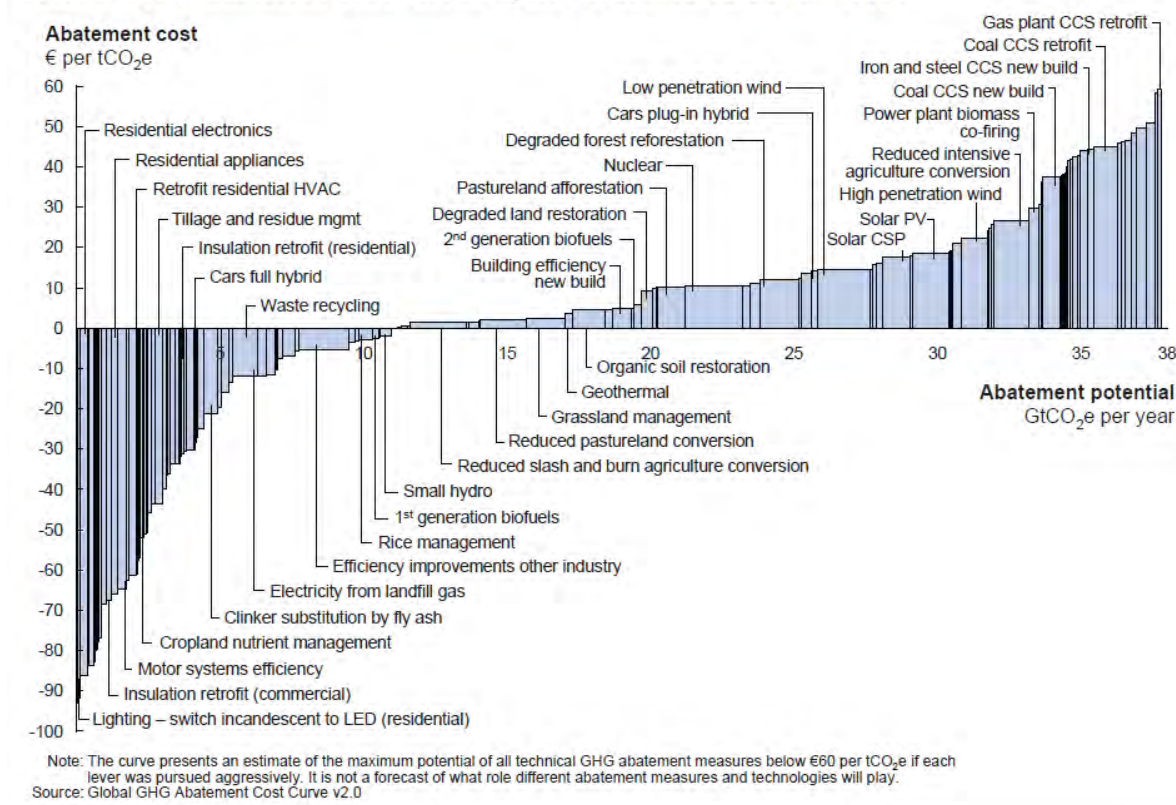


図 1.6-1 2030 年における MAC カーブ

(出典：McKinsey & Company (2009) Pathways to a Low-Carbon Economy)

運輸部門の取り扱い

運輸部門における将来像として、①内燃機関の効率向上が主体となるシナリオ(高効率車が 98 %)、②技術混合シナリオ(ハイブリッド及びプラグインハイブリッド車が 38 %、電気自動車 2 %)、及びハイブリッド/EV 主体シナリオ(同 49%及び 9%)の 3 つのシナリオを描いている。混合技術シナリオでの MAC は、乗用車の効率向上がネガティブコストであるのに比べ、バイオ燃料の MAC はほぼゼロであるとされ、ハイブリッド車や電気自動車は高くなっている。なおモーダルシフトは行動変化のひとつとして位置づけられており、2030 年の効果は最大でも 0.2~0.4 Gt-CO₂(5~10 %が自動車から鉄道、バス、徒歩、自転車へ移行)としている。ただし、トラック輸送から船舶輸送への転換に関する記載はない。

(4)海運の取り扱い

BAU において、海運全体では、2005 年の排出量を 1.1 Gt-CO₂とおき、これが年率 2 %で増加して 2030 年に 1.8 Gt-CO₂となる将来像が想定されている。このうち外航海運においては、排出量の年間増加率は 3 %と想定される。

海運における 2030 年までの削減ポテンシャルは、BAU 比 24 %削減(年間 0.43

Gt-CO₂削減相当)であり、主要対策技術として、下記の2つが挙げられている。

- ・ 代替燃料を含む削減技術：船体の最適化、個別注文による最適デザイン、塗装システム、エンジン最適化、廃熱回収等の機械における改善。ディーゼルやバイオ燃料等の代替燃料の使用が挙げられている。
- ・ 運行上の効率改善：船舶大型化、減速航行等。

一方、スカイセイルや潮流を利用した **semi-submerged ships** は、削減ポテンシャル算定の対象外とされた。

現在のエネルギー効率が低く見積もられているため、2015年の削減対策コストは、-5ユーロ/t-CO₂(コストではなく収益となる)であり、燃料価格の上昇に伴い、-7ユーロ/t-CO₂までになる。2010年から2030年までに必要な投資額は、およそ1,600億ユーロであり、2030年における年間投資額は100億ユーロとなる。なお航空については2030年の限界削減コストは13ユーロ/t-CO₂と算出されている。

1.6.2 RITE 世界モデルにおける限界排出削減コストカーブの算定・解析事例

次に、わが国の研究機関による世界を対象としたMACカーブ算出事例として、前述した日本の温室効果ガス排出削減目標の達成コストの検討にも用いられた、財団法人地球環境産業技術研究機構 RITE 世界モデルにおけるMACカーブ検討について分析する⁹。

(1)対象

RITE 世界モデルは、エネルギー起源 CO₂ 排出量を評価する DNE21+モデルに対して、非エネルギー起源 CO₂ 排出及び非 CO₂ 温室効果ガスの排出を考慮したものである。CO₂ 排出量については世界 54 地域、非 CO₂ 温室効果ガスについては世界 18 地域に区分している。

DNE21+モデルは世界全体を 54 地域に分割し、それぞれについて 8 種の一次エネルギー源(天然ガス、石油、石炭、バイオマス、水力・地熱、太陽光、風力、原子力)を考慮したものである。エネルギー需要については産業、運輸、民生部門別にモデル化をしている。エネルギー需要はマクロ経済指標や人口から算出した最終需要の推計により算出される。分析対象期間は 2050 年までであり、2005、2010、2015、2020、2025、2030、2040、2050 年の 8 時点を最適化代表時点としている。

⁹ 参考資料は「統合評価モデル DNE21 の概要」(<http://www.rite.or.jp/English/lab/syslab/research/new-earth/download-page/downloadable-data/dne21-manual.pdf>)「RITE 世界モデルの概要」(http://www.rite.or.jp/Japanese/lab/sysken/about-global-warming/download-data/RITWorldModel_20090326.pdf)及び RITE モデル解説(<http://www.meti.go.jp/committee/materials2/downloadfiles/g100913bj08.pdf>)

(2)手法

a. 削減コストの算定方法

各技術の年間費用は、①技術ごとの設備費÷投資回収年数、②設備費に対する一定比率として算出した運転・メンテナンス費、及び③年間燃料費の合計としている。ある技術に比べて設備費が高くても省エネ効果が高く、年間燃料費が、([設備費] / [投資回収年数] + [運転・メンテナンス費])の増分以上に節約可能な技術は、相対的に限界削減費用がマイナスとなり、当該技術の選択がなされるとしている。

b. BAU シナリオの設定

DNE21+モデルのBAUシナリオは、下記の条件のもと設定される。

- ・ 温暖化対策が講じられないケースにおいては、世界のCO₂排出量は2020年に現状比約2倍、2030年に3倍以上となる見通しである。
- ・ 人口変化率については国連の予測を基にしている。GDP変化率については2020年までは独自の推定(日本1.3%/年、米国及びEU1.9%/年、中国8.2%等/年)を用い、2050年まではIPCC SRES B2シナリオで用いられている推定に基づいている。
- ・ 産業部門のうちエネルギー多消費産業(鉄鋼、セメント、紙パ、アルミ、化学)については生産量、運輸部門については自動車輸送需要、民生部門の一部について、それぞれ2050年までの想定を行っている。

c. 算定の前提

DNE21+モデルの経済的パラメータについては、企業行動では投下資本利益率(ROI)は10-20%、投下資金回収年数では5-10年が通常であるとの認識の下に、表1.6-2のように設定している。投資回収年数の下限は上限の2/3とおき、また運輸部門には通常型と環境配慮型の2種類の購買層を設けている。

表 1.6-2 投資回収年数のケース

	投資回収年数	
	上限	下限
発電部門	10	6.7
その他エネルギー転換部門	7	4.7
産業部門	10	6.7
運輸部門	5	3.3
同、環境配慮型購買層	10	
民生部門	3	2

(出典：RITE, "RITE 世界モデルの概要")

なお、非 CO₂ 温室効果ガスのモデルでは、割引率を 20 %に設定している。

(3)結果

RITE 世界モデルの結果のうち、限界削減費用について、エネルギー起源 CO₂ とそれ以外では曲線が大きく異なるのが特徴的である。前者については多様な選択肢を反映した MAC カーブを描くものの、後者はほぼ垂直であり、対策オプションが少ないことを示唆している。

MAC 及び排出削減ポテンシャルに関する数値が記載されている気候変動枠組条約附属書 I 国(先進国及び移行経済国)について、限界削減費用別に区分すると表 1.6-3 のとおり。

表 1.6-3 DNE21+モデルに基づく 2020 年における附属書 I 国の MAC と排出削減量

MAC(USD/t-CO ₂)	分野	排出削減ポテンシャル(Mt-CO ₂ /年)
<50	<ul style="list-style-type: none"> ・ 産業：鉄鋼・化学・アルミニウム部門等での省エネ等 ・ エネルギー転換：風力発電の普及、ガス複合発電の増加等 ・ 民生：廃棄物利用等促進等 ・ 運輸：バイオ燃料利用等 ・ 非 CO₂ GHG の削減 	3,639
50 - 100	<ul style="list-style-type: none"> ・ 産業：セメント・石油化学部門等での省エネ等 ・ エネルギー転換：ガス複合発電の増加等 ・ 民生：高効率家電の利用促進等 ・ 運輸：在来型自動車の燃費向上等 	1,976
100 - 200	<ul style="list-style-type: none"> ・ 産業：各種部門での省エネ等 ・ エネルギー転換：バイオマス発電の普及等 ・ 民生：各種高効率機器の利用促進等 ・ 運輸：ハイブリッド車の広範な導入等 	1,320
200<	<ul style="list-style-type: none"> ・ 産業：鉄鋼・セメント・石油化学部門等での設備更新の大幅前倒しによる省エネ等 ・ エネルギー転換：太陽光発電の普及等 ・ 民生：各種高効率機器の更なる利用促進等 ・ 運輸：自動車の更なる燃費改善、バイオ燃料の一層の普及等 	2,120

(出典：RITE, ” RITE モデル解説”)

(4)海運の取り扱い

DNE21+モデルは運輸部門に関しては自動車(小型乗用車、大型乗用車、バス、小型トラック、大型トラックに区分)のみを考慮しているように思われる。海運については特に記載されていない。また、航空部門やモーダルシフト等に関する記載は見られない。

1.6.3 IEA ETP における限界排出削減コストカーブの算定・解析事例

(1)概要

国際エネルギー機関(IEA の Energy Technology Perspectives(ETP))は、長期的な省エネ・温室効果ガス排出削減(エネルギー起源 CO₂ 排出量の 2050 年までの現状批判減)を最小費用で達成するための手法について検討した技術積み上げ式のモデルであり、MAC の算出が目的ではない。しかし排出削減目標を最小費用で達成するという条件を充たすために世界的な投資額の検討も行っているため本章に示す。

ETP は世界のエネルギー起源 CO₂ 排出量の予測及びその半減のための技術シナリオについて分析したものである。エネルギー消費の現状及びベースラインの将来推計は IEA の IEA World Energy Outlook 2009 に基づいており、これに対して 2050 年までに現状比でエネルギー起源 CO₂ 排出量の約半減を目指す排出削減シナリオ(Blue MAP シナリオ)の策定にあたっては 15 地域、1,000 技術の導入に関する ETP モデルを組み合わせている。

RITE によれば、IEA と RITE モデルの分析結果について”細部においてはそれなりの差異が認められる部分もあるものの、全体として見ると驚くほど似通った分析結果”と評価している¹⁰。

(2)手法及び結果

ETP における MAC 推計手法の概要は明らかにされていないが、割引率については政府プロジェクトは 3%程度、民間プロジェクトは 10~15 %程度とすることが多いとしている。Blue MAP シナリオでは、発電プロジェクトでは 8~14 %(多くは 10 %)の割引率を用いており、運輸部門では 10 %が用いられている。

割引を行わない場合、Blue MAP シナリオの達成のために追加的に必要な 2050 年までの総投資額は 46 兆 USD に達するが、それによりもたらされる省エネ便益は 112 兆 USD と算出されている。即ち「省エネ便益－省エネ投資額」で算出される正味の便益は 2050 年までに 66 兆 USD(112 兆 USD－46 兆 USD)となる。ただしこれは割引率を考慮しない場合の数字であり、割引率を 3%とすると、通常は便益が投資より後に生じるため 32 兆 USD、10 %とおくとその差額は 8 兆 USD にまで縮減する。

ETP で特徴的な点は投資の多くが運輸部門におけるものであり、Blue MAP シナリオのための追加投資額のうち半分近くに相当する 22 兆 USD が運輸部門におけるものである。これによる燃料節減効果は 48 兆 USD としている。ただし Blue MAP シナリ

¹⁰ RITE DNE21+と IEA ETP2008 シナリオの比較

http://www.rite.or.jp/Japanese/lab0/sysken/about-global-warming/download-data/Comparison_ScenarioDNE21+-ETP2008.pdf

オの達成により燃料価格が大幅に削減(120 USD/bbl→70 USD/bbl)されるとの想定のもとであり、燃料価格を固定すると便益は 2 兆 USD となる。IEA ETP に基づく運輸部門の分析シナリオについて表 1.6-4 に示す。

表 1.6-4 IEA ETP に基づく運輸部門の分析シナリオ

	ベースライン	Blue MAP	Blue Shift	Blue MAP+Shift
概要		バイオ燃料、EV、燃料電池車の推進。	ベースライン以上の技術的進歩はなく、モーダルシフトのみ	技術進歩+モーダルシフト。
乗用車	2050 年の新車の燃費は 2007 年比 30 %改善。	燃料電池車が 20 %、電気・プラグインハイブリッド(PHEV)が計 50 %に達する。	ベースラインに比べて乗用車旅客輸送が 25 %削減。	両者の相乗効果
トラック	2050 年の新車の燃費は 2007 年比 25 %改善。	燃料電池車 20 %、PHEV5-10 %、CNG 車 15 %	鉄道へのシフト	両者の相乗効果
その他	航空機の効率は 2007 年比 30 %改善、その他の効率は 5-10 %改善。	航空機の効率は 2007 年比 43 %改善。	ベースラインに比べて航空旅客輸送が 25 %削減。短距離旅客輸送は高速鉄道へシフト。	両者の相乗効果
バイオ燃料	2050 年に 160 Mtoe(輸送燃料の 4%)	2050 年に 745 Mtoe(輸送燃料の 27%)	2050 年に 130 Mtoe(輸送燃料の 4%)	2050 年に 600 Mtoe(輸送燃料の 26%)
水素利用	なし	2050 年に 200 Mtoe	なし	2050 年に 150 Moe
電力利用	2050 年に 27 Mtoe	2050 年に 350 Mtoe	2050 年に 44Mtoe(鉄道)	2050 年に 290 Mtoe
CO ₂ 排出量(貨物)	約 5.5 Gt-CO ₂	約 2.8 Gt-CO ₂	約 4.8Gt-CO ₂	約 2.5 Gt-CO ₂
CO ₂ 排出量(旅客)	約 11 Gt-CO ₂	約 4 Gt-CO ₂	約 8 Gt-CO ₂	約 3.5 Gt-CO ₂

(出典：IEA、Energy Technology Perspectives 2010、CO₂ 排出量はグラフ目測)

以上より、運輸部門の排出削減にはモーダルシフトも無視できないが、技術的な効率改善が欠かせないと結論している。Blue MAP+Shift シナリオはベースラインと比べて約 11Gt-CO₂ の排出削減を達成しているが、うち 5Gt-CO₂ が効率改善、4Gt-CO₂ が代替燃料、2Gt-CO₂ がモーダルシフトとされている。Blue MAP+Shift シナリオに基づく、旅客輸送の最大の排出源は航空機となる。

(3)海運の取り扱い

ETP には海運関連の記載も含まれている。ベースラインシナリオでは現在から 2050 年までに荷動き量が倍増するが、エネルギー効率が 25 %改善するため排出量は 50 %増加するとしている。これは IMO 2nd Study に比べて低い増加率である。高位推計でも荷動き量約 3 倍、排出量は 2 倍強というものである。これに対して Blue Map シナリ

オでは 2050 年までに荷動き量が倍増するがエネルギー効率が 50 %改善するため、排出量はほぼ現状と変わらない。

排出削減シナリオにおいて特徴的なのは燃料ミックスである。ベースラインシナリオでは船用燃料に占める CO₂ 排出原単位の低い軽油の比率が高くなる燃料ミックスを描いているが、Blue Map シナリオではバイオ燃料が全体の約 1/5 を占めるようになる。ただしこれは食糧生産と競合しない第 2 世代のバイオ燃料であり、これらの大量生産が可能となることが条件となっている。貨物輸送において最大の排出源はいずれのシナリオでも大型トラックであるが、代替燃料、電気、プラグインハイブリッド等の代替手段の浸透が船舶を上回る上にモーダルシフトで海運への転換が想定されるため、温室効果ガス排出に占める海運の比率は Blue MAP+Shift シナリオで最も高い。

1.6.4 英国気候変動委員会文献における限界排出削減コストカーブの算定・解析事例

(1)概要

本調査は、英国気候変動委員会が英国の排出削減目標達成の可能性を調査するため、英国運輸部門における MAC カーブの算出を行ったものである。調査は、気候変動委員会によるとりまとめのもと、複数のコンサルタントが協力している。対象となっているのは、運輸部門のうち、車、バン、HGV(Heavy Goods Vehicle、重量積載物車両)の 3 種類の車両のみである。算定対象期間は 2022 年までとしており、それを 2008-2012 年、2013-2017 年、2018-2022 年に区切り、それぞれについて排出削減目標を負うことを想定している。

(2)手法

a. 導入技術の想定

本モデルの特徴は、各車両タイプにおける技術群(technology bundles)について新車における導入割合を一定に想定している点である。モデルでは、ベースラインシナリオに加え、3 つのシナリオ(Current Ambition Scenario, Extended Ambition Scenario, Stertch Ambition Scenario)を想定しており、それぞれのシナリオによって、技術の導入状況も異なる。導入技術は、石油価格の想定によっても異なる。

b. 削減コストの算定

技術のコスト算定については、技術の習得によるコスト削減効果を見込んでいる。既に習熟された技術(通常のカソリンエンジン技術など)については、習熟効果を見込んでいないが、まだ限定的にしか導入されていない新技術(マイクロハイブリッド技術など)については生産量倍増により製造コスト 5 %減を、より新規の技術(電気自動車など)については生産量倍増により製造コスト 15 %減を織り込んでいる。

c. 算定の前提

特徴的な前提として、排出増につながる要因(リバウンド効果)を盛り込んでいることが挙げられる。例えば車両の性能向上は輸送距離の増加を促し、これは 2020 年における削減量を約 15 %減少させている。他に、新車として大型車が選択される傾向が強まること、一人当たりの車両保有台数が増加することもリバウンド効果として想定はされるが、車両燃費規制や車両税を含めて考えると、これらのリバウンド効果の影響は顕著ではないとして、考慮されていない。

割引率については下記の 2 つの割引率を想定し、それぞれについて MAC カーブを描いている。

- **Social MAC カーブ**：英国財務省”Greenbook guidance”に定められた 3.5 %の割引率を用いる。本ガイダンスは、公共事業の評価の手法を示したものである。燃料税の取り扱いとして、省エネ技術の導入により、政府の燃料税収入が減少し、結果的に社会に高いコストがかかることになるとして、この分がコストに算入される。
- **Private MAC カーブ**：消費者の加重平均資本コスト(付加価値税を含む)でコストを算定する。割引率は、乗用車とバンについては 7.05 %、HGV については 5.4 %とするが、その理由は示されていない。燃料税の扱いは、消費者が実際に支払う燃料税をコストとして算入するため、省エネ技術の導入により、その額は減少する。

(3)結果

シナリオ(3種類)、割引率(2種類)、石油価格(4種類と思われる)の組み合わせにより、複数パターンの MAC カーブが算定される。ここでは、Extended ambition scenario の中位石油価格(central fossil fuel price)の想定による MAC カーブを示す。

Social MAC カーブの方が、Private MAC カーブよりも高額になっている理由の一つは、上述の燃料税の取り扱いの違いによるものである。英国のガソリン税は、ガソリン 1 リットルあたり 0.5895 ポンド(約 70 円相当)と高額であるため、割引率の違いを差し引いてもなお、燃料税減少による社会コストの増加が大きくなる。

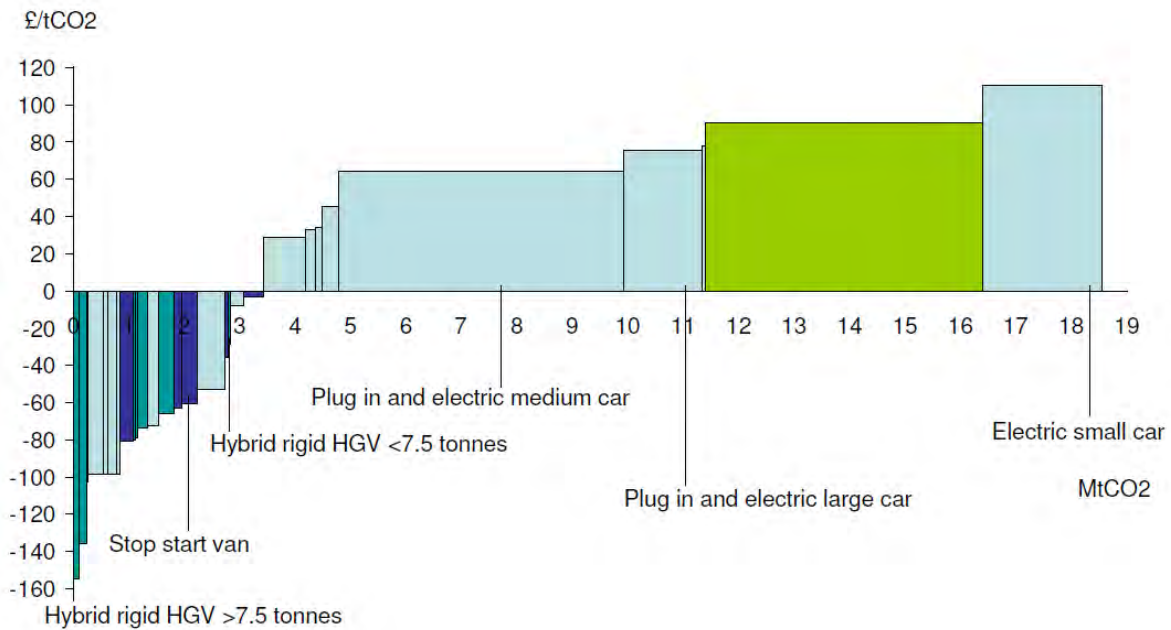


図 1.6-2 Social MAC カーブ(Extended ambition scenario,central fossil fuel price)
 (出典：CCC(2008)“Building a Supply-Side Marginal Abatement Cost Curve (MACC) for the UK Transport Sector”)

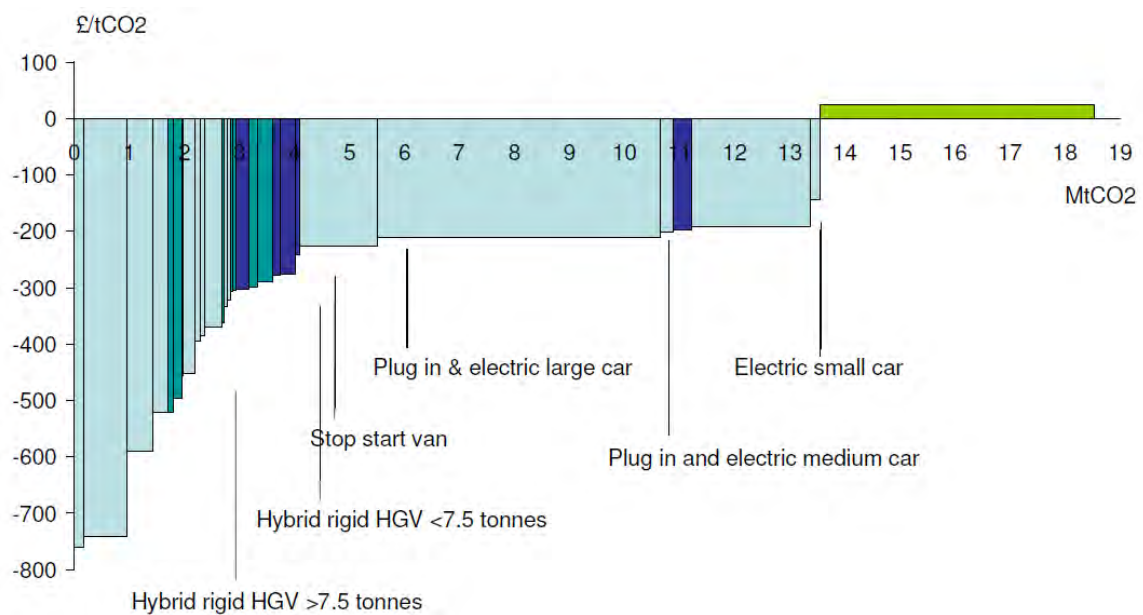


図 1.6-3 Private MAC カーブ(Extended ambition scenario,central fossil fuel price)
 (出典：CCC(2008)“Building a Supply-Side Marginal Abatement Cost Curve (MACC) for the UK Transport Sector”)

(4)海運の取り扱い

本モデルは、車、バン、重量積載物車両(HGV)のみを対象としており、海運への言及はない。

1.6.5 各文献における限界排出削減コストカーブの算定・解析事例の比較

3.1~3.4にて取り上げた各文献における、対象年度、ベースラインの設定、前提条件等を整理すると表 1.6-5 のとおりである。

表 1.6-5 MAC カーブ関連文献 比較一覧表

文献/モデル名	McKinsey & Company (2009)	RITE 世界モデル	IEA ETP	英国気候変動委員会 英国運輸部門 MAC
対象年度	2005 年を基準年とし、2030 年までに 5 年毎に算定	2050 年まで	2050 年まで	2022 年まで
対象分野、GHG	10 セクター、世界 21 地域における、200 以上の削減技術を対象 GHG(6 ガス)を対象	産業、運輸、民生セクターにおける削減ポテンシャルを算定 GHG(6 ガス)を対象	15 地域、1,000 技術の導入に関するモデル エネルギー起源 CO ₂ を対象	英国運輸部門(車、バン、HGV) CO ₂ を対象
主な前提 (技術的側面)	60 USD/t-CO ₂ 以下で削減実施可能な技術を想定	100 USD/t-CO ₂ 以下で削減実施可能な技術を想定	2050 年までにエネルギー起源 CO ₂ を半減可能な技術を想定	車両種別ごとに技術群が新車の一定の割合で導入されると想定
主な前提 (経済的側面)	GDP 成長率や人口成長率は、IEA の World Energy Outlook 2007 による	GDP 成長率は独自の推定と IPCC シナリオ、人口成長率は国連による	ベースラインのエネルギー消費予測は IEA の World Energy Outlook 2007 による	石油価格は DECC モデルによる
主な前提 (金融的側面)	年利 4 % (長期国債の利子率による)	エネルギー起源 CO ₂ は、部門ごとに異なる投資回収年数を想定、非エネルギー起源温室効果ガスは割引率 20 % を想定	割引率は、発電プロジェクトでは 8 ~ 14% (多くは 10 %)、運輸部門では 10 %	2 種類の割引率を設け、Social MAC では一律 3.5 %、Private MAC では車・バンが 7.05 %、HGV が 5.4 % と想定
海運の取り扱い	海運全体で、GHG 年間排出量が 2 % 増(うち、外航海運は、3% 増)と想定。2030 年までの削減ポテンシャルは、BAU 比 24% 削減(年間 0.43Gt-CO ₂ 削減相当)。	海運への言及はなし	海運部門のベースラインでは、2050 年までに排出量が現状比倍増と想定。削減シナリオではバイオ燃料の使用等により、排出量が現状比相当と算定される。	海運への言及はなし

1.7 主要部門に関する限界排出削減コストの分析事例

上記の検討結果より、主要な部門における MAC の分析事例について抽出し把握する。具体的には自動車、航空、大規模産業(鉄鋼)及び電力を取り上げる。

1.7.1 自動車部門に関する限界排出削減コストの分析事例

IEA ETP の分析によれば、限界コストは電源構成に依存するものの、短期的にはマイナスのコストをもたらす技術は、高度なサトウキビ由来エタノール車のみである。これに対してプラグインハイブリッド車(PHEV)の限界コストは 140-210 USD/t-CO₂ である。電気自動車(EV)/燃料電池車(FCV)の限界コストはいずれも 400 USD/t-CO₂ 以上と計算している。

これに対して McKinsey の分析では、対象をガソリン内機関車(ICE)、ハイブリッド

車両、電気自動車、圧縮天然ガス車両(CNG)、バイオ燃料の 5 つ限定している。水素自動車については、現時点ではコストが高すぎるとして、算定外とされている。また、MAC の検討では、各車種の浸透率に応じて、3 つのモデルが分析に使用されている。モデル分析の前提には、2030 年時点で 100 USD/t-CO₂ 以下の技術が採用されることを想定している(この価格を上回る、MDV や HDV のハイブリッド車等(HV)は算定から除外される)。

日本国内での排出削減を対象とした RITE の分析では、2020 年までの対策としてバイオエタノール拡大、乗用車燃費向上、商用車のハイブリッド車利用拡大等について検討しており、これらの対策コストは概ね 150 USD~400 USD 程度と見積もられている。

主要文献における自動車技術に関する将来シナリオについて表 1.7-1 に示す。大幅な排出削減のためには長期的にはハイブリッド車(HV)、プラグインハイブリッド車(PHEV)、電気自動車(EV)の大量導入が想定されている。なお RITE は全世界で 2050 年までに温室効果ガス排出量を 2005 年比で半減するというシナリオに基づく検討も行っているが、運輸部門における排出削減は約 9%に相当する 3.5Gt-CO₂ に相当し、2050 年の主な対策は PHEV であるとしている。

表 1.7-1 自動車技術に関する将来シナリオ

IEA ETP	RITE DNE21	McKinsey
ベースラインでは 2020 年時点ではガソリン車及びディーゼル車が主体であり、2050 年でも両者が大半を占める。	無対策ケースと 2050 年半減ケースについて想定。2020 年時点では両者に大きな変化はないが、2050 年には前者では HV 及び PHEV の比率は約半分であるのに対し、後者は HV、PHEV、EV で 80 %を占める。	内燃機関の効率向上を主体としたシナリオ、HV 及び EV の普及を想定したシナリオ、混合シナリオの 3 種類をについて検討している。
Blue Map シナリオでは 2020 年時点では HV 及び PHEV の導入が始まり、2050 年には両者及び電気自動車が大半を占める。		混合シナリオでは従来型の比率が 2020 年までに 90 %、2030 年までに 60 %に低下し、HV 及び PHEV が残りの大半を占める。

(上記研究機関の各種資料より作成)

1.7.2 航空部門に関する限界排出削減コストの分析事例

IMO 2nd Study によれば、全世界の CO₂ 排出量のうち 1.9%を国際航空輸送が担っており、国際海運よりも世界に占める排出割合は低い。個々の国において排出削減目標を設定することが困難なことから、IMO と同様、国際機関 International Civil Aviation Organization (ICAO)を中心とする排出削減に向けた取組みが求められている。また、2012 年から EU 排出権取引制度(EUETS)に、航空分野(国際・国内)が組み込まれることが決まり、航空機の国籍を問わず、EU 域内を離着陸する航空機が EUETS の対象となる(米国や中国はこれを不服としており、現在係争中である)。

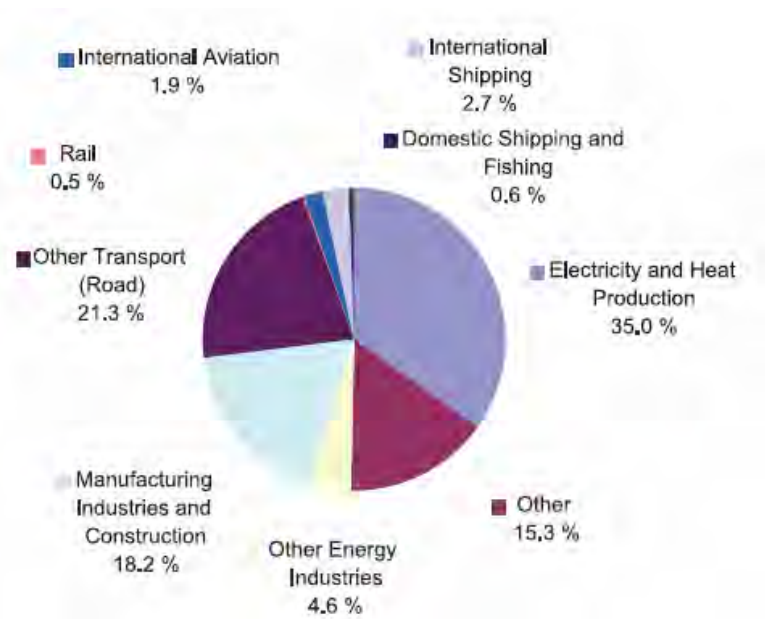


図 1.7-1 全世界の CO₂ 総排出量(2007 年)の内訳
(出典 : IMO, 2nd GHG Study)

McKinsey 文献によれば、現在あるいは今後容易に実用化される CO₂ 削減対策は BAU ケースにて適用されるとし、残る航空分野における削減対策全体の MAC を正としており、2015 年及び 2030 年にそれぞれに 16 ユーロ/t-CO₂ 及び 13 ユーロ/t-CO₂ と算出している。2015 年から 2030 年の MAC の変化は、燃料コストの上昇に起因するコスト低減による。))

航空部門の MAC カーブを算出した文献は少ないが、ドイツの Fraunhofer Institut による文献では個別対策毎の導入コストと累積の CO₂ 削減量を示した MAC カーブを算出しており、Improve load factor(乗客・貨物の積載率向上)、Cyclic engine Wash(定期的なエンジン洗浄)、Reduction of contingency fuel(予備燃料の削減)の 3 技術において MAC がマイナスと算出されている。これについて図 1.7-2 に示す。これらの技術は程度の差はあれ、各航空会社の燃費削減に関する企業努力の中で実際に導入されている。例えば、「Cyclic engine Wash」については、全日空で年 2~4 回の洗浄を行っている。「Improve load factor」、「Reduction of contingency fuel」についても、航空法等で規定されている安全運航を担保する範囲内での運用が行われている。

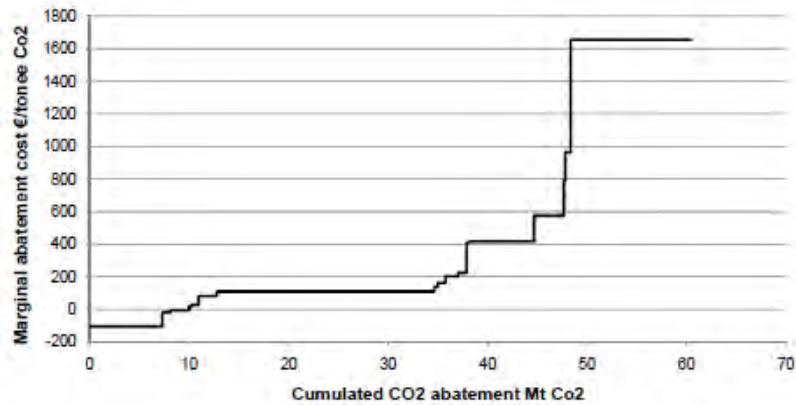


図 1.7-2 航空部門の MAC カーブ計算例(2020 年)

(出典：Fraunhofer Institut、2010, Air transport marginal abatement costs and cost reduction through learning)

また英国運輸省(UK DOT)文献では、レトロフィットの技術を含まない MAC カーブを算出しており、この中で、Action to reduce inefficiencies in Air Traffic Movements and Air Navigation Service Provider related operations(ATM efficiency：航空交通管制の効率)と Promotion of behavioral change aimed primarily at the leisure market (Behavioral change：行動変容)の両対策の MAC がマイナスと算出されている。また排出削減効果の最も高い技術はバイオ燃料であるという結果が得られている。算出結果について図 1.7-3 に示す。

ここで MAC がマイナスと算出される技術が航空管制に関するものであるが、このような対策の導入には空港側の協力が必要である。しかし対策による燃料節減効果の受益主体は航空機を保有・運営する航空会社である。3 章や 5 章で述べるように、このように対策を実施する主体と対策の便益を享受する主体が異なる場合、対策実施のインセンティブが有効に機能せず、対策導入の妨げとなりうる。

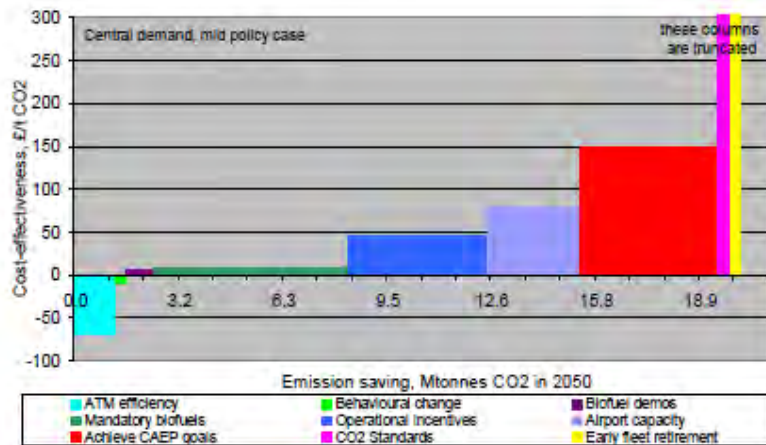


図 1.7-3 UK Department for Transport による MAC カーブ(2050 年)

1.7.3 鉄鋼部門に関する限界排出削減コストの分析事例

世界の鉄鋼生産量は約 10 億トンであり、代表的な生産手法である高炉での銑鉄製造～転炉での製鋼～圧延工程による鉄鋼製造の CO₂ 排出原単位は約 2 t-CO₂/トン製品である。従って世界の製鉄業起源の CO₂ 排出量は約 20 億 t-CO₂ と想定され、世界のエネルギー起源 CO₂ 排出量の約 7%程度を占める。

IEA ETP によれば鉄鋼部門で主要な削減技術となるのは、CCS の導入、リサイクルの促進を含む効率改善、及び直接還元鉄等の技術革新である。個別技術の MAC については算出されていないが、Blue Map シナリオでは 2050 年に 175USD/t-CO₂ で実現可能な技術や燃料は全て採用されていると想定しており、この結果 2007 年比 35-37 % の排出削減が達成されるとしている。具体的な対策として炭素回収・貯留技術(CCS) の導入、リサイクルの促進を含む効率改善、燃料転換が挙げられている。

McKinsey 文献では、粗鋼生産量は中国を中心に年 3.4 %増加すると予想されている。2005 年の同セクターの世界の鉄鋼起源の CO₂ 排出量は 2005 年の 26 億 t-CO₂(うち直接排出量が 21 億 t-CO₂、電力消費による間接排出量が 5 億 t-CO₂)から無対策では 2030 年には 56 億 t-CO₂ に達すると予測している。これに対して 2030 年には 50 ユーロ/t-CO₂ 以下のコストで年間約 15 億 t-CO₂(BAU 排出量の 25 %以上)の削減が可能であると見積もられており、うち約 3 億 t-CO₂ はマイナスコストと算出されている。

対策技術として想定されている技術のうち、主としてコージェネレーションおよびバイオマス燃料への転換がマイナスのコストとなっており、エネルギー効率向上が約 20 ユーロ/t-CO₂、CCS が約 40～50 ユーロ/t-CO₂ のコストと試算されている。削減ポテンシャルが大きいのは CCS であり、2020 年以降に商業化し、2030 年には製鉄所の 25 % に CCS が設備されているとしている。

RITE 文献では 2050 年までに温室効果ガス排出量を 2005 年比で半減するというシナリオに基づく鉄鋼部門の排出削減について検討しており、鉄鋼部門による排出削減は 2.0 Gt-CO₂(総排出削減量 39Gt-CO₂ の約 5 %)と推計している。このうち 1/4 に相当する 0.5Gt-CO₂ が CCS であり、残りは銑鉄→転炉鋼という現在の典型的な製鋼プロセスから電炉鋼・直接還元鉄への代替加速及び水素還元製鉄の導入によりもたらされるとしている。先進国での分析では、省エネ対策の MAC は 50～100 USD/t-CO₂(日本)、0～50 USD/t-CO₂(欧米)と算出されているが、の設備更新の大幅前倒しによる省エネの MAC は日本、欧米とも 200～500 USD/t-CO₂ と算出されている。

1.7.4 電力部門に関する限界排出削減コストの分析事例

発電は最大の排出源であり、2008 年の世界のエネルギー起源 CO₂ 排出量の 40 %以上を占める。この 70 %以上が石炭火力起源である。McKinsey 文献では電力部門の排

出削減対策として効率向上(需要削減)、再生可能エネルギー、原子力、CCS の 4 つを挙げており、これらに基づき原子力及び再生可能エネルギーの最大成長ケース(シナリオ A)及び原子力及び再生可能エネルギーの 50 %成長ケース(シナリオ B)を挙げている。2030 年の無対策時の排出量は 18.7 Gt-CO₂とされているが、それからの排出削減率はそれぞれ 77%(シナリオ A)及び 66%(シナリオ B)という大幅なものである。後者の場合は原子力及び再生可能エネルギーに代わり CCS の導入が進むと考えられている。

MAC に関しては、原子力については約 10 ユーロ/t-CO₂、風力、太陽光(PV、CSP)等再生可能エネルギーの多くは 10~20 ユーロ/t-CO₂、CCS がそれ以上(~60 ユーロ/t-CO₂)と算出されている。後述するように最近のわが国での分析結果である国家戦略室「コスト等検証委員会」報告データに基づく、2030 年においてもメガソーラーに起因する排出削減コスト(LNG 代替)は 23,500 円/t-CO₂と算出される。McKinsey 文献については習熟効果によるコスト低減が急であり、また一般的に設備コストを安く想定しているという評価がある¹¹。

RITE 文献では電力部門の排出削減の効果は総削減量 39 Gt-CO₂のうち半分に相当する 19.4 Gt-CO₂である。このうち 40 %に相当する 7.7 Gt-CO₂が CCS、約 25 %に相当する 4.7 Gt-CO₂が原子力の導入であり、次いでバイオマス、太陽光等の再生可能エネルギー、及び化石燃料の燃料転換(石炭→天然ガス)、高効率化が想定されている。先進国での MAC に関しては、天然ガス複合火力の導入及び風力発電について 100 USD/t-CO₂以内と算出されているが、太陽光発電については 200~500 USD/t-CO₂に上ると算出されている。

1.8 限界排出削減コストの検討と利用の総括

ここまでみてきたように、MAC は費用効果的な排出削減対策の特定に役立つとともに、国家間の排出削減目標の策定や、排出量取引、炭素税等の国内対策の策定にも活用しうる可能性を持っている。しかしながら実際の国家の排出量取引目標は国際的な交渉に基づいて決定され、またその検討は主として各国の温室効果ガス排出の推移に立脚すると考えられる。多大なデータを要し、前提や手法により大きく算出値が異なる MAC を国際交渉の土台とすることは大きな困難を伴うことなどから、MAC に基づいて国家あるいはセクターの排出削減目標が設定された事例はれまでのところ国内的にも国際的にも存在しない。

また排出量取引制度については、現行の EUETS 等の無償割当制度については参加主体の過去の実績に基づきつつ産業の国際競争力への配慮等が加味されており、MAC に基づく制度設計が行われているとは言えない。

¹¹ 日本エネルギー経済研究所「原子力発電による温室効果ガス削減の限界コストについて(補足説明)」2010 年 4 月 23 日

上記の MAC 推計事例を概観すると、いずれの文献でも低コストまたはネガティブコストで実施可能な排出削減技術が相当量存在するとしているが、排出削減の大半は何らかのコストを要すると考えられる。ただし、どの分野の MAC が低いかについてはモデル間で相違があり、McKinsey の分析は主に民生部門及び農業部門の MAC が低いとしているのに対し、RITE の分析では発電所の効率向上及び各種産業における排出削減ポテンシャルが高いとしている。また、運輸部門についての見解は異なり、RITE 及び IEA の分析では全般に対策実施コストが高いと算出されているが、McKinsey による分析では対策によりコスト評価が異なる。

IPCC 第 4 次評価報告書では各種の MAC 算出結果についてとりまとめているが、その概要を表 1.8-1 に示す。MAC がマイナスの対策は建築物部門について顕著であると考えられている。ただし、既存文献が低コストでの対策に集中しており、高コスト対策に関するデータが不足していることが指摘されている。これら対策による排出削減効果は 15.8～31.1 Gt-CO₂(総排出量の約 30%～50%)と算出され、その半分以上が 20 USD/t-CO₂ 以下のコストで達成可能とされている。

表 1.8-1 全世界における各分野の MAC に応じた排出削減ポテンシャル(2030 年)

部門	MAC(USD/t-CO ₂)				備考
	<0	0-20	20-50	50-100	
エネルギー供給	1.9		1.4	0.35	炭層メタンの回収等は含まれていない。
運輸	0.35	1.4	0.15	0.15	乗用車、航空機における対策及びバイオ燃料に限定。
建築物	5	0.5	0.6	0	高コスト対策に関する情報が不十分の可能性ある。
産業	1.1		2.4	0.55	エネルギー多消費産業に限定(全産業の 50%に相当)
農業	1.6		1.1	1.7	
林業	0.15	1.1	0.9	0.65	
廃棄物	0.4	0.18	0.1	0.04	
合計	6.1	7.4	6.0	4.5	

(出典：IPCC 第 4 次評価報告書 WGIII 第 11 章 Table 11.3 より作成。単位 1,000 Mt-CO₂)

2 新造船に対する短期的削減技術を導入する際の限界排出削減コスト削減カーブの算出

(外航海運における限界排出削減コストカーブの算定・検討事例)(2.1 節)

外航海運を対象とした代表的な MAC カーブの算定・検討事例として、**IMO(Second IMO GHG Study 2009)**、**DNV¹²**、**IMarEST¹³**、**CE Delft¹⁴**による検討がある。

それぞれ回収想定期間、割引率、油価等は複数設定での検討が行われている。概ね同じ条件の、IMO の A1B シナリオベースの海運需要、割引率(4~5%)、油価 500~700 USD/t-fuel の設定での 2020 年の温室効果ガス削減量(導入コストを度外視した技術的な限界値)は、IMO 2nd Study では 300 Mt-CO₂(中位推計)、DNV 文献では 550 Mt-CO₂、IMarEST 文献では 600 Mt-CO₂程度となっている。また、導入コストが 0 USD/t-fuel 以下の対策による削減量は、IMO は 250 Mt-CO₂(中位推計)、DNV 文献では 350 Mt-CO₂、IMarEST 文献では 550 Mt-CO₂程度となっている。

それぞれの対象とする対策、既存船の扱い等は若干異なっており、対象範囲を広く取っている DNV、IMarEST においては削減量が大きく出る傾向となっている。

(本年度調査の方針)(2.2 節)

本調査における MAC カーブ検討では、①削減技術適用の対象を新造船の技術的対策に限定した検討をまず行い、これを、②既存船への技術的対策、③減速航行等の運航による削減技術、④中長期的な技術的対策、の検討に拡張した。

(個別対策技術における CO₂ 排出削減量の算定)(2.3 節)

以下の手順で個別技術対策に対する排出削減量を算定した。

① 船型クラス別 2020 年までの造船量及び船腹量の算出

IMO 2nd Study による将来の海運需要、船腹量をベースに、2020 年まで各年の船腹量、造船量、解船量を設定した。解船量は前年度の総船腹量の 3%と設定した。

② ベースライン(技術未導入時)の燃料消費量及び CO₂ 排出量の算出

CO₂ 排出、燃料消費等に関する原単位は基本的に IMO 2nd Study によった。

② 各技術の排出削減量の算出

MEPC 60/4/36 に基づき、技術の導入シナリオ(導入技術、導入時期)を設定した。核技術に対して、新造船に対する普及率、CO₂ 削減ポテンシャルを、MEPC 60/4/36、MAC カーブに対する既存検討、我が国海事関係者の専門家意見により設定し、各年度の新造船に対する排出削減率を設定した。各種設定にあたっては船種・船型による効果、普及の違いを考慮した。

①で設定した造船量、船腹量と併せて、新造船に対する排出削減量を算定した。

上記の結果、新造船に対する技術的対策による 2020 年時点での排出削減量として、78.8 Mt-CO₂と算定された。これら新造船に対して技術的対策が導入されない場合の 2020 年における排出量は 920 Mt-CO₂であり、従って新造船への技術的対策の導入による排出削減率は 8.6%と算出される。また、新造船及び既存船を併せた 2020 年のベースラインの総排出量は 1,463 Mt-CO₂であり、これに対する新造船への技術的対策の導入による排出削減率は 5.4%と算出される。

船種別・建造年別のフリートに対する削減量と required EEDI との整合性を確認した結果、計算された削減量は 2015 年、2020 年の required EEDI をともに満足する結果となった。

(個別技術の費用と便益の正味現在価値(NPV)の算定)(2.4 節)

限界削減費用算定に向けて、対策コストの算定を行った。

¹² Det Norske Veritas(DNV)、MEPC60/INF.19、“Prevention Of Air Pollution From Ships Updated Marginal Abatement Cost Curves for shipping”

¹³ IMarEST、MEPC61/INF.18、“Reduction Of GHG Emissions From Ships, Marginal abatement costs and cost-effectiveness of energy-efficiency measures”

¹⁴ CE Delft、Technical support for European action to reducing Greenhouse Gas Emissions from international maritime transport

前提条件として、回収想定期間、割引率について、下記の組み合わせを想定した。

ケース A：割引率 5 %、回収想定期間 20 年(社会資本の検討に近い数値)

ケース B：割引率 10 %、回収想定期間 10 年(民間企業の投資判断に近い数値)

ケース C：割引率 5 %、回収想定期間 10 年(ケース A に近いが船舶または技術の老朽化が進むと想定したケース)

対象とするコストとしては、初期コスト(新造時の追加コスト)、ランニングコストを対象とし、これを上記回収想定期間、割引率を用いて正味現在価値化した。

(限界排出削減コストの算定)(2.5 節)

上記で算出された対策技術毎の排出削減量、各技術の費用から**限界排出削減コスト(MAC)の計算**を行った。各技術の MAC は、2008~2020 年の各技術の導入コスト(初期コスト及び回収想定期間内のランニングコスト)に、各技術の導入による回収想定期間内のエネルギー節減便益を加味し、正味現在価値(NPV)化した費用を、同じく回収想定期間内の CO₂ 総排出削減量で除した値となる。

個別記述については、割引率、回収期間の設定にかかわらず、全ての技術でマイナスの MAC が算定された。ただし、二重反転プロペラ(CRP)、熱回収技術(WHR)については相対的に MAC が高く(経済性が悪く)なっている。また、対策を社会的視点で捉えたケース A に対して、対策を実施する企業の視点で捉えたケース B では MAC が高く(経済性が悪く)なっている。また、ケース C では投資額が小さい技術では MAC が低く(経済性が良く)なっているが、投資額が大きい技術(CRP、WHR)では回収想定期間が短いために逆の結果となる。算出された排出削減量及び MAC は下記のとおり。

	Low friction coating	Stern duct-friction reduction	CRP	Stern duct-propulsion	Post-swirl system	Air lubrication	Opt. stern shape	WHR
年間排出削減量	11.7	2.8	14.8	6.5	6.5	14.1	6.2	16.1
MAC(ケース A)	-52.6	-54.6	-40.7	-61.3	-58.9	-49.3	-60.9	-37.6
MAC(ケース B)	-31.2	-28.9	-10.1	-37.9	-34.6	-24.6	-37.7	-6.7
MAC(ケース C)	-60.9	-58.9	-31.4	-72.3	-67.5	-51.6	-71.9	-28.0

上記の技術毎の MAC、削減量を MAC の低い順に図示した **MAC カーブ** のグラフも作成した。**(油価変動による感度解析)(2.6 節)**、標準ケースの 500 USD/t が 1000 USD/t に変化すると、燃料節減の経済的効果が向上することから、各対策とも平均的に 40 USD 程度 MAC が低く(経済性が良く)なり、逆に 100 USD/t に低下すると 35 USD 程度 MAC が高く(経済性が悪く)なる状況が確認された。

2.1 外航海運における限界排出削減コストカーブの算定・検討事例

外航海運を対象に、限界排出削減コストカーブの算定・検討事例について紹介する。参照した文献は下記のとおりである。

- ・ IMO、Second IMO GHG Study 2009
- ・ Det Norske Veritas(DNV)、MEPC60/INF.19、“Prevention Of Air Pollution From Ships - Updated Marginal Abatement Cost Curves for shipping”
- ・ IMarEST、MEPC61/INF.18、“Reduction Of GHG Emissions From Ships, Marginal abatement costs and cost-effectiveness of energy-efficiency measures”
- ・ CE Delft、Technical support for European action to reducing Greenhouse Gas Emissions from international maritime transport

海運分野の MAC カーブ関連文献を比較し、それらのケース設定等の前提条件や算定結果について、表 2.1-1 から表 2.1-3 に整理した。これら文献の特徴として下記が挙げられよう。

- ・ 基本的に、導入されうると考えられる技術は全て導入されるとしており、段階的な普及を想定していない。そのため 2020 年における各技術の導入による排出削減率は数百 Mt-CO₂(または外航海運起源の総排出量の 20~40%)にも上る。また、同様の理由により、MAC が高価に算定される技術についてもその広範な普及を見込んでいる。
- ・ 排出削減コストの算定に大きな影響を与えるパラメータである回収想定期間や割引率(2.5.1 節参照)、及び油価等について複数のケースを用いて算出している。

いずれの調査においても、MAC がマイナスの数値を取る技術が多く含まれていることが解る。このような技術は既に述べたように、理論上「省エネによる燃料費節減という便益(=対策による貨幣換算可能な効果、見返り)も想定されるため、一概に対策実施者に対して費用負担を求めるものではなく、むしろ利益をもたらすと判断」されるべきである。つまり、このような技術は市場原理から自然に普及すべき、あるいは既に普及すべき技術であるとも言える。

このような技術が未だに普及していない理由としては、下記の点が挙げられる。これらの点を考慮しつつ、独自の MAC 計算を試み、仮にそれでも MAC がマイナスの数値を取る技術が多く現出した場合は、その普及を拒むコスト以外の障壁があることが示唆されるため 3 章においてその解析を行うこととする。

- ・ 将来的に燃料価格が上昇することを想定している。
- ・ ベースラインにおける効率向上が行われないことを想定している。
- ・ 技術の調査、評価、モニタリングに関するコストは含まれていない。
- ・ 資金以外の障壁が考慮されていない。

表 2.1-1 海運分野の MAC カーブ文献 比較一覧表

文献名	IMO 文献 Second IMO GHG Study 2009	DNV 文献 Det Norske Veritas(DNV)(MEPC 60/INF.19) “Prevention Of Air Pollution From Ships Updated Marginal Abatement Cost Curves for shipping”	IMarEST 文献 IMarEST(MEPC 61/INF.18) “REDUCTION OF GHG EMISSIONS FROM SHIPS, Marginal abatement costs and energy-efficiency of energy-efficiency measures”	CE Delft 文献 CE Delft Technical support for European action to reducing Greenhouse Gas Emissions from international maritime transport
対象年度 ペーラスライン	2020 年 A1B シナリオ、同一船型の排出量は将来も 一定と想定	2020 年、2030 年 A1B シナリオ、B2 シナリオ、排出量も需 要に比例して伸びるとするが、技術対策の 中にコストゼロの一般的な改善 (General Improvement) を想定	2020 年、2030 年 A1B シナリオ、ペーラスラインでは現状技術 固定を想定し、技術革新が起らないと想 定する (frozen technology baseline) ;	2030 年 IMOStudy の複数シナリオ等を参考に、EU 関連の排出量の伸びとして年率 2~3 %を 想定。(現状並み(BAU)の効率改善を想定。)
船型クラス数	船種 14 種 船種×クラス数 合計 53 種	カービス船、漁船を除く 59 種	船種 14 種 船種×クラス数 合計 53 種(IMO と同一)	船種 14 種 船種×クラス数 合計 53 種
主な前提 (技術的側面)	下記について検討。 <ul style="list-style-type: none"> Propeller maintenance; Propeller/propulsion system upgrades; Hull coating and maintenance; Voyage and operations options; Main engine retrofit measures; Retrofit hull improvements; Auxiliary systems; Other retrofit options; Speed reduction; and Air lubrication. 	下記について検討。 <ul style="list-style-type: none"> 代替エネルギー源 Gas-fuelled engines Wind power: Kite Wind generator Wind power: Fixed sails or wings Solar panels <p>オペレーション対策</p> <ul style="list-style-type: none"> Trim/draft Engine monitoring Weather routing Speed reduction (port efficiency) Voyage execution Propeller efficiency Steam plant operation improvements <p>主機省エネに関する技術的対策</p> <ul style="list-style-type: none"> Electronically controlled engines Air cavity/lubrication Waste heat recovery Contra-rotating propeller Speed reduction (fleet increase) Propulsion efficiency devices Hull condition General improvements <p>補機省エネに関する技術的対策</p> <ul style="list-style-type: none"> Cold ironing Reduced auxiliary power use Fuel cells as auxiliary engines (including fuel switching) Exhaust gas boilers on auxiliary engines Frequency converters Energy efficient light system 	下記について検討。 <ul style="list-style-type: none"> Operational Speed Reduction (10%,20%) Weather Routing Autopilot upgrade/adjustment Propeller polishing at regular intervals Propeller polishing when required (include monitoring) Hull cleaning Hull coating Air lubrication Propeller rudder upgrade Propeller boss cap fin Propeller upgrade Common Rail Main Engine Tuning Waste Heat Recovery Wind engine Wind kite Solar Power Speed control pumps and fans Energy saving lighting Optimization water flow 	下記について検討。 <ul style="list-style-type: none"> Propeller/propulsion system upgrades. Propeller maintenance. Retrofit hull improvement. Hull coating and maintenance. Air lubrication. Main engine retrofit measures. Waste heat recovery. Auxiliary systems. Wind energy. Solar energy. Voyage and operations options. Speed reduction.

表 2.1-1 海運分野の MAC カーブ文献 比較一覧表(続き 1)

	IMO 文献	DNV 文献	IMarEST 文献	CE Delft 文献
主な前提 (経済的側面)	燃料費(Bunker Fuel) 500 USD/t-fuel (1,000 USD/t-fuel、1,500 USD/t-fuel で感度分析実施)	MTO : 500 USD/t-fuel, HFO : 350USD/t-fuel, LNG : 450USD/t-fuel(2030 年までに 350 USD/t-fuel まで減少)	2020 年の燃料費 500、700、900 USD/t-fuel 2030 年の燃料費 700、900、1100 USD/t-fuel (それぞれ低位、中位、高位設定値)	燃料費(Bunker Fuel) 700 USD/t-fuel (350 USD/t-fuel、1050 USD/t-fuel で感度分 析実施)
主な前提 (金融的側面)	割引率 4%(16%で感度分析実施) 回収期間 対策寿命 10 年未満=対策寿命 対策寿命 10~30 年未満=10 年間 対策寿命 30 年以上=30 年間	割引率 5% 回収期間: 対象船舶の残された運用寿命 (operational lifetime)と対策の想定寿命 (expected lifetime)のうちの、より短い期間	割引率: 10%(4%、18%で感度分析実施) ※社会的観点に加えて船に關わるステー クホルダーの意思決定に利用することを 想定しているため、割引率は高めの設定。 回収期間: 対象船舶の残された寿命 (remaining lifetime)と対策の供用期間 (service years)のうちの、より短い期間。	割引率 9%(4%、14%で感度分析実施) 回収期間 対策寿命 10 年未満=対策寿命 対策寿命 10~30 年未満=10 年間 対策寿命 30 年以上=30 年間
主要技術の導 入年度	主要技術の導入年度について記載なし。 対策の普及は、新造船・レトロフィットで 区別するが、適用可能な船種には全て対策 が普及と仮定。	主要技術の導入年度について記載なし。 対策の普及は、新造船・レトロフィットで 区別。	Wind Engine, Solar power のみ 2015 年、他 は 2007 年に導入。 対策の普及は、新造船・レトロフィットで 区別するが、適用可能な船種には全て対策 が普及と仮定。	主要技術の導入年度について記載なし。 対策の普及は、新造船・レトロフィットで 区別する。
主要技術のコ スト	減速航行 6,000~8,000 USD/日 それ以外は下記に記載されている(単位 1000USD) <ul style="list-style-type: none"> Weather routing 0.8~1.6 Increased frequency of propeller brushing 3~4.5 Hull brushing 26~39 Underwater hull hydroblasting 33~49.5 Hull Coating I 4.5~140 Hull Coating 2 25~720 Air lubrication 運用コスト 燃料費 ×0.3~0.5 t/day Propeller boss cap fin 20(735kw エンジ ン)、146(22,050kw エンジン) Hull performance monitoring 導入コス ト 45 (5 年毎)、運用コスト 5 Shaft power meter 26~31.2 Fuel consumption meter 46~55.2 Dry-dock full blast 68~81.6 Towing kite (面積 320 m²のとき)購入コス ト=480、導入コスト=26、運用コス ト=25~35/年 	不明	下記に記載されている(単位 1000 USD) <ul style="list-style-type: none"> Air lubrication 船価の 2~3% WHR: 中程度の投資回収を想定して算 出(1 年と 15 年の中間) Towing kites: 350~2,500 (1000 ユーロ) 太陽光発電: 1.5 億円 その他この技術については投資回収 年数データに基づき算出(0.5 年~10 年) Propeller boss cap fins 20~146. Propeller brushing 45(5 年毎) Hull performance monitoring 40(5 年毎) Hull brushing 26~39(5 年毎) Hull hydroblasting 33~49.5(5 年毎) Dry dock full blast 81.6~86 Shaft power meter 26~31.2 Fuel consumption meter 46~55.2 Weather routing 0.8~1.6(毎年) Hull coating 1 43~51.6(Panamax) Hull coating 2 221~265.2(Panamax) 	

※IMO2nd Study に記載されているコスト
と比較すると、概ねコスト帯は同様である
が、最大と最小の設定が異なっている。

表 2.1-1 海運分野の MAC カーブ文献 比較一覧表(続き 2)

排出削減率	IMO 文献	DNV 文献	IMarEST 文献	CE Delft 文献
	<p>下記が記載されている。</p> <ul style="list-style-type: none"> Weather routing 0.1~4% Autopilot upgrade/adjustment 1.75 % Increased frequency of propeller brushing 0.5~3 % Propeller brushing 3.50 % Hull brushing 1~10 % Underwater hull hydroblasting 1~10 % Hull coating I 0.4~2.9% Hull coating II 0.8~7.3% Transverse thruster opening(flow optimization, grids) 3.00 % Air lubrication 5~15 % Propeller/rudder upgrade 4.00 % Propeller upgrade(winglet, nozzle) 2.50 % Propeller boss cap fin 4~5 % Common rail upgrade 0.30 % Main engine tuning 0.45 % Low-energy/low-heat lighting 0.45 % Speed control pumps and fans 0.60 % Propeller performance monitoring 2.25 % Hull performance monitoring 0.5~5 % Shaft power meter 0.5~2 % Fuel consumption meter 0.5~2 % Power management 2.25 % Dry-dock full blast 5~10 % 	<p>不明</p>	<p>下記が記載されている。</p> <ul style="list-style-type: none"> 減速航行(10 %)19 % 減速航行(20 %)36 % Weather routing 0.1~4% Autopilot adjustment 0.5~3% Propeller polishing when required 2.5~8% Hull cleaning 1~10 % Hull coating I 0.5~2% Hull coating II 1~5 % Optimization water flow hull openings 1~5 % Air lubrication 5~15 % Integrated propeller and rudder upgrade 2~6% Propeller upgrade 0.5~4.5 % Propeller boss cap with fins 1~3% Common rail technology 0.1~0.5 % Main engine tuning 0.1~0.8% Waste heat recovery 6~8% Towing kites 2.1~25.8% Wind engines 3.6~12.4% Solar engine 0.1~3.3% Low energy/low heating lighting 0.1~0.8% Speed control of pumps and fans 0.2~1% <p>※IMO 設定の削減ポテンシャルと比較すると、Hull coating, Propeller boss cap fin では異なる値を設定しているが、その他の共通する技術に関しては、IMO の設定値は IMarEST の設定値の平均をとっているように見える。</p>	<p>下記が記載されている</p> <ul style="list-style-type: none"> Hull coating 1 0.5 %~2 % Hull coating 2 1~5 % Air lubrication 10~15 % (タンカー、バルカー)、5~9 % (コンテナ)；これは高位推計で、低位推計はこの半分。 WHR：8~10 % 風力推進：3.6~12.4%(船種による) 太陽光発電：0.2 % (VLCC)、3.75 % (ケミカルタンカー) Propeller/rudder upgrade 4% Propeller upgrade 2.5 % Propeller performance monitoring 2.25 % Propeller brushing 3.5 % Transverse thruster opening (flow optimization, grids) 3 % Main engine tuning 0.45 % Common rail upgrade 0.3 % Low-energy/low-heat lighting 0.45 % Speed control of pumps and fans 0.6 % Power management 2.25 % Autopilot upgrade/adjustment 1.75 % Propeller boss cap fins 4~5 % Propeller brushing 0.5~3 % Hull performance monitoring 0.5~5 % Hull brushing 1~10 % Hull hydroblasting 1~10 % Dry dock full blast 5~10 % Shaft power meter 0.5~2 % Fuel consumption meter 0.5~2 % Weather routing 0.1~4%
備考	<p>CE Delft による MAC カーブは、IMO の MAC カーブの拡張版であり、基本的な算出方法は IMO の方法に準じている。燃料費、割引率、算出対象の対策について差異がある。</p>			

表 2.1-2 海運分野の MAC カーブ文獻 比較一覧表(2)

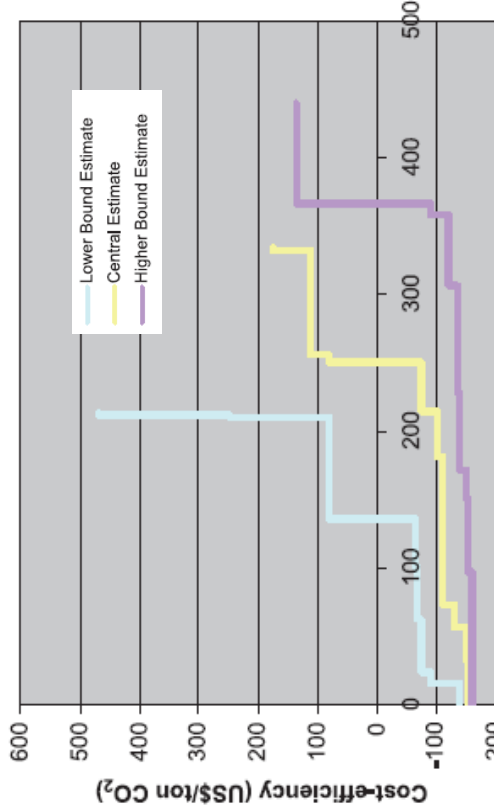
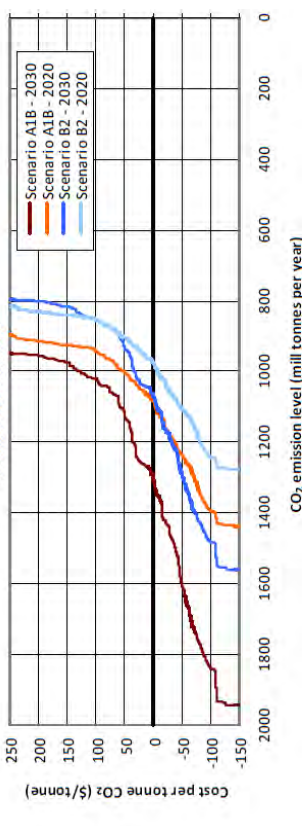
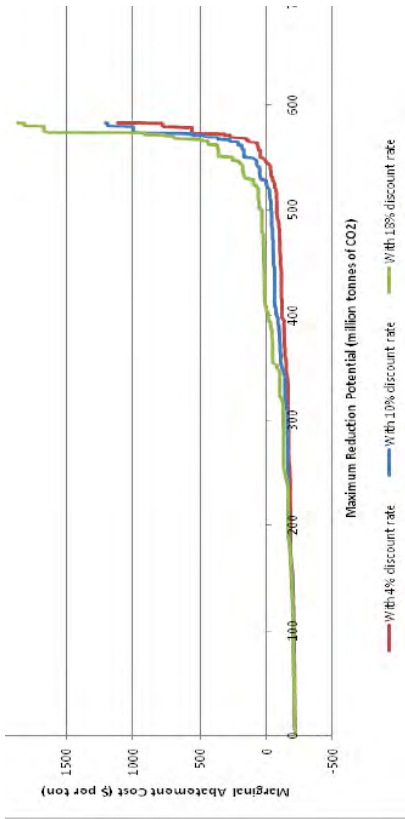
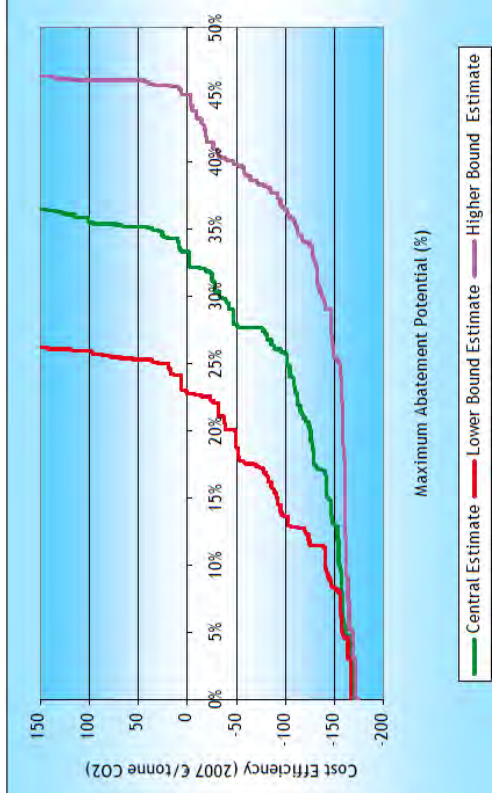
		IMO 文獻	DNV 文獻
対象年度	2020 年	2020 年	2020 年
割引率	4 %		5 %
燃料費	500 USD/t-fuel	500 USD/t-fuel	500 USD/t-fuel
ベースライン	A1B シナリオ、同一船型の排出量は将来も一定と想定	A1B シナリオ、同一船型の排出量は将来も一定と想定	A1B シナリオ、B2 シナリオ、排出量も需要に比例して伸びるとするが、技術対策の中にコストゼロの一般的改善(General Improvement)を想定
算出結果			
最小 MAC	-150 USD/t-CO ₂ (中位推計の場合)	-150 USD/t-CO ₂ (中位推計の場合)	-150USD/t-CO ₂ (中位推計の場合)
MAC ≤ 0 となる削減ポテンシャル	200 ~ 300 Mt-CO ₂ (中位推計の場合)	200 ~ 300 Mt-CO ₂ (中位推計の場合)	300 ~ 400 Mt-CO ₂ (中位推計の場合)
燃料価格による MAC の変化	燃料価格が標準の 500 USD / t-fuel の場合に対し、1000 USD / t-fuel の場合 MAC が平均的に 160 USD/t-CO ₂ 程度減少、1500 USD / t-fuel の場合 320 USD/t-CO ₂ 程度減少	燃料価格が標準の 500 USD / t-fuel の場合に対し、1000 USD / t-fuel の場合 MAC が平均的に 160 USD/t-CO ₂ 程度減少、1500 USD / t-fuel の場合 320 USD/t-CO ₂ 程度減少	— (燃料価格に対する感度分析は実施していない。)

表 2.1-3 海運分野の MAC カーブ文獻 比較一覧表(3)

		IMarEST 文獻	CE Delft 文獻
対象年度	2020 年		2030 年
割引率	4 %		9 %
燃料費	700 USD/トン		700 USD/トン
ベースライン	A1B シナリオ、現状技術固定を想定 (frozen technology baseline)		IMOS Study の複数シナリオ等を参考に、EU 関連の排出量の伸びとして年率 2~3% を想定。(現状並み(BAU)の効率改善を想定。)
算出結果	 <p>Marginal Abatement Cost (\$ per ton)</p> <p>Maximum Reduction Potential (million tonnes of CO2)</p> <p>— With 4% discount rate — With 10% discount rate — With 13% discount rate</p>	 <p>Maximum Abatement Potential (%)</p> <p>— Central Estimate — Lower Bound Estimate — Higher Bound Estimate</p>	
最小 MAC	-200 USD/t-CO ₂ (中位推計の場合)		-200~-150 ユーロ t-CO ₂ (中位推計の場合)
MAC ≤ 0 となる削減ポテンシャル	500~600 Mt-CO ₂ (中位推計の場合)		30%~35% (中位推計の場合)
燃料価格による MAC の変化	燃料価格が標準の 700 USD/トンの場合に対し、900 USD/トンの場合 MAC が平均的に 60 USD/t-CO ₂ 程度減少、500 USD/トンの場合逆に 60 USD/t-CO ₂ 程度増加		燃料価格が標準の 700 USD/トンの場合に対し、1,050 USD/トンの場合 MAC が平均的に 100 ユーロ t-CO ₂ 程度減少、350 USD/トンの場合逆に 100 ユーロ/t-CO ₂ 程度増加

ここでは、表 2.1-1 から表 2.1-3 に示された文献のうち、DNV 文献、IMarEST 文献及び CE Delft 文献の 3 件について、CeDELFT が行った比較解析を紹介する。特に DNV 文献は、他の計算結果に比較して、費用対効果が大きいと考えられる削減ポテンシャルが大きく計算されており、その背景を考察してみたい。

2030 年の予想された平均した燃料価格は、IMarEST 文献で比較的高く、DNV 文献でわずかに高い設定になっている。査定、費用対効果に優れた削減ポテンシャルは、IMarEST 文献で最も低いと予想され、他の 2 調査においては同様であると予想できる。燃料価格の将来設定は、DNV 文献の削減ポテンシャルの高さを説明できない。DNV 文献においては、排出量ベースラインが凍結されておらず、効率化がベースケースでも進むことが考慮に入れられるところから、削減ポテンシャルは、ベースラインにおいて効率化を見込まない他の 2 文献に比較して、減少する可能性が高い。

このような算定結果の違いは、3 文献において採用されている技術の種類とその普及率の設定によって説明できる。DNV 文献においては、下記に示す他の 2 文献で考慮されていない 12 種類の削減技術が採用されている。またこれらの技術が既存船に対しても適用されると仮定した結果、MAC カーブのグラフの目視では、これらの 12 の削減技術によって、約 400Mt の削減ポテンシャルが産み出されると考えられる。他方、2 文献では、DNV 文献において考慮されていない 9 種類の技術を採用しているが、これらから期待される削減ポテンシャルは約 200Mt であり、DNV 文献においては、将来的な技術(未だ未熟な技術)に対して、高い普及率とそれに伴う大きな削減量を期待していることがわかる。

1. Fuel cells used as auxiliary engines.
2. Electronic engine control.
3. Frequency converters.
4. Gas fuelled engines.
5. Steam plant operation improvements.
6. Engine monitoring.
7. Contra-rotating propeller.
8. Wind power (fixed sails or wings).
9. Speed reduction due to improved of port efficiency.
10. Exhaust gas boilers on auxiliary engines.
11. Wind powered electric generator.
12. Cold ironing.

これに対して両方で共通している削減技術の評価については、IMO 文献を基に計算

を行っているため、3者において大きな差異は無いと思われる。

更に DNV 文献においては、学習曲線を用いて将来における削減ポテンシャルを高め誘導する手法がとられている。たとえば、WHR、空気潤滑では、将来において基準年よりも高い削減率が設定されていると報告されている(具体的な数値が文献から明らかでない)。

図 2.1-1 に 3 文献における最大削減ポテンシャルの比較を示した。ここで最大ポテンシャルとは、同じ経済的パラメータ設定(割引率と回収想定期間)における MAC カーブで導かれる最大の削減量を示す。左から①DNV 文献のオリジナルの値、② ①の値をベースラインを凍結したと仮定して修正した値、③ 更に同じ削減技術を用いたとした場合の値、④CE Delft 文献の値とそれをフリートの代替率と学習曲線で調整した値を示している。図から、同じ削減技術、同じ経済的パラメータ設定、同等と考えられるフリートの代替率と学習曲線を用いた場合は、ほぼ同量の削減ポテンシャルが計算されることがわかる。

図 2.1-2 に 3 文献における最大費用対効果の大きい削減ポテンシャルの比較を示した。ここで削減ポテンシャルは同じ経済的パラメータ設定(割引率と回収想定期間)における MAC カーブと X 軸の交点を示す。左から①DNV 文献のオリジナルの値、② ①の値をベースラインを凍結したと仮定して修正した値、③ 更に同じ削減技術を用いたとした場合の値と、更にそれをフリートの代替率と学習曲線で調整した値、④CE Delft 文献の値を示している。最大費用対効果の大きい削減ポテンシャルについても、同じ削減技術、同じ経済的パラメータ設定、同等と考えられるフリートの代替率と学習曲線を用いた場合は、ほぼ同量の削減ポテンシャルが計算されることがわかる。

このことから、削減ポテンシャルはその計算において採用されている技術シナリオ、特に採用されている技術毎の普及率の設定によって大きく影響されることがわかる。

本調査においては、このことを考慮し、特に 2 章においては、削減技術のうち既に普及が一部始まっている手堅い技術のみを抽出し、かつ既存船に対する適用は考慮しないこととした。

そのため、これらの既存文献の削減ポテンシャルとは直接の比較ができないことに留意されたい。

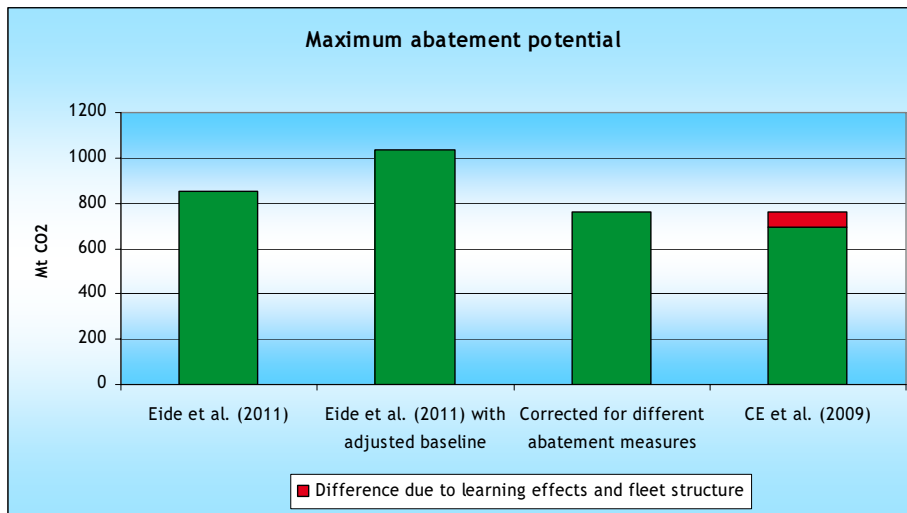


図 2.1-1 3 文献における最大削減ポテンシャルの比較

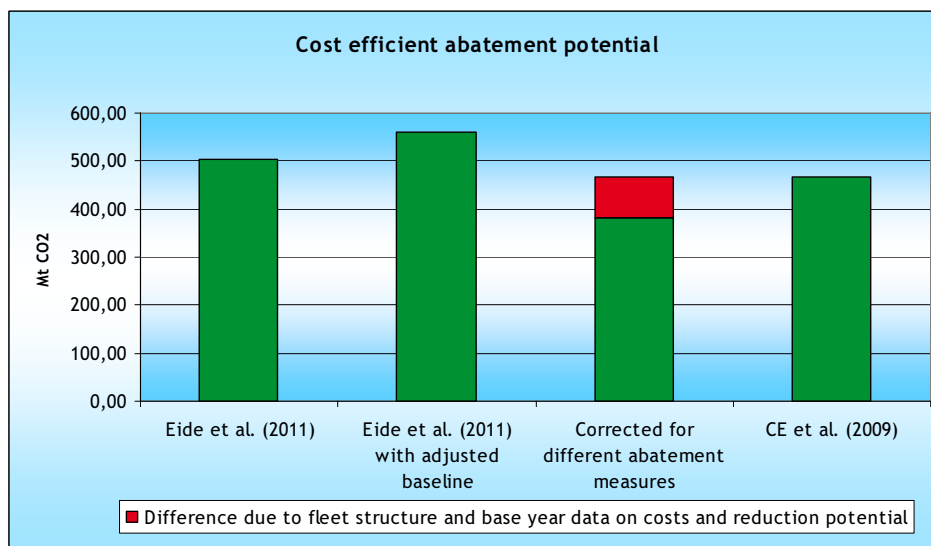


図 2.1-2 3 文献における費用対効果の大きい削減ポテンシャルの比較

また、MAC カーブの形状の差異も重要である。外航海運を対象にしたすべての MAC カーブには、ほぼ同様の形状をなしている。Y 軸から始めに浅い負の値と傾きの小さい形状を示す領域が有り、その後傾きが急速に立ち上がり、最終的には垂直に近くなる。カーブの形状は、上記で解析したように選択されている技術シナリオ(技術毎の削減率と普及率の組み合わせ)にも影響されるが、それ以外に将来の燃料価格などの経済的なシナリオによっても左右される。別の言い方をすれば、どの経済的パラメータの設定が代表性を持つかを見極める必要がある。

2.2 本年度調査の方針

2008年から2020年に建造される船舶のMACカーブ算定に当たっての前提等について、平成22年度調査を踏まえて再検討を行った。本年度調査の方針について以下に述べる。

本年度では事象を単純化するために、まず、①削減技術適用の対象を新造船に限定し、②運航による削減技術(減速航行等)を考慮せず、③削減技術を短期的に導入される技術に限定した上で、MACカーブを算定した。更に、このように作成されたMACカーブについて、④required EEDIで定められた個船の削減目標値との整合を検討することで、技術シナリオの妥当性を検討することとした。

③、④のため、対象技術はEEDIの議論の技術的背景文章となったMEPC 60/4/36に記載されている諸技術を基にした。MEPC文章と本章で対象とする削減技術の比較について表2.2-1に示す。

表 2.2-1 MEPC 文書と 2 章で対象とする削減技術の比較

	MEPC 60/4/36	H23 年度調査
対象技術	<ul style="list-style-type: none"> ・ 下記を対象として含む。 - Low friction coating - Stern duct-friction reduction - Contra. Rotating Propeller (CRP) - Stern duct-propulsion - Post-swirl system - Optimal superstructure - Air lubrication - Optimal stern shape - 排熱回収(WHR) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ MEPC 60/4/36に記載されている技術のうち optimal superstructureを除くもの。
排出削減ポテンシャルの年変化	<ul style="list-style-type: none"> ・ 排熱回収のみ考慮する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 排熱回収のみ考慮する。
普及率の年変化	<ul style="list-style-type: none"> ・ 考慮しない(個船ベースでの検討のため) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 考慮する(MAC および障壁に応じた設定)
船型クラス毎の普及率の変化	<ul style="list-style-type: none"> ・ 考慮する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 排熱回収のみ考慮する。

算定のフローを図 2.2-1 に示す。

平成 23 年度「外航海運からの CO2 削減のためのコスト算定と比較」業務 算定フロー(新造船 技術対策のみ)

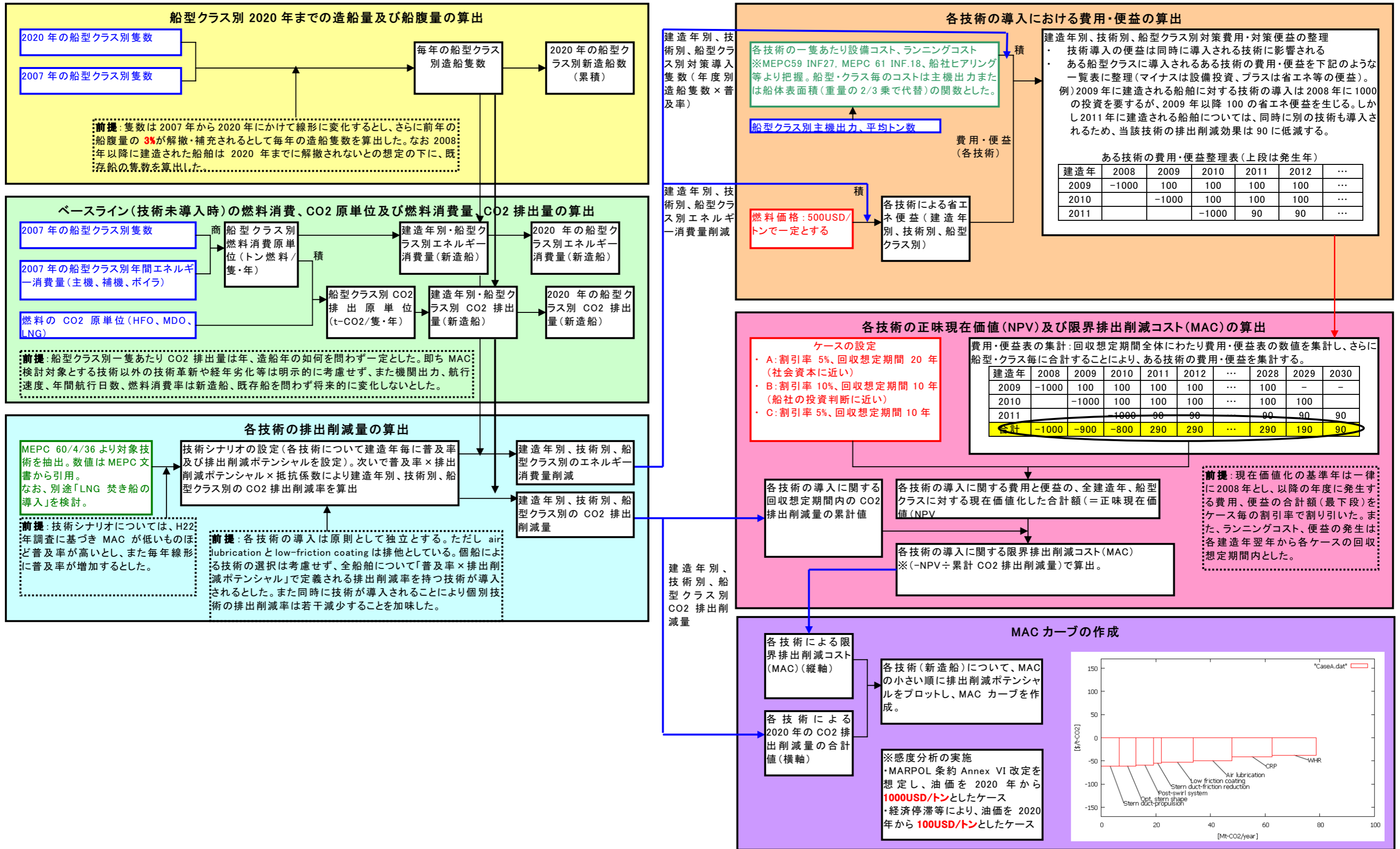


図 2.2-1 本調査での MAC 算定フロー(新造船 技術対策のみ)¹⁵

¹⁵ 青字に青枠: IMO 2nd Study(及び中間資料)のデータ。緑字に緑枠: 他の文献からのデータ。点線枠: 前提等。赤字: H22 年度調査モデルで可変可能なパラメータ及び条件。矢印は計算パラメータとしての算入を指す。

2.3 個別対策技術における CO₂ 排出削減量の算定

1.3 で述べたように、MAC は、「排出削減対策技術のもたらす正味の便益 ÷ 排出削減量」で算出される。具体的には、1.3 で述べた式のうち分母に相当する $a_j \times CF \times F$ (排出削減率 × 燃料の CO₂ 排出係数 × 燃料消費量) について求める。このうち燃料の CO₂ 原単位 CF は既知であり、燃料消費量 F もまた IMO 2nd Study に基づく 2007 年の個船当たり燃料消費量が当該船型クラスについて不変と置くため既知である。そのため排出削減量の算出は、実際は a_j を求めることである。

まずは上式の分母に相当する各々の排出削減対策技術による CO₂ 排出削減量の算出方法について以下に整理する。算出は以下の 3 つのプロセスを経る。(上記フロー参照)

- ・ 船型クラス別 2020 年までの造船量及び船腹量の算出
- ・ ベースライン(技術固定)の燃料消費量(t-fuel)CO₂ 排出量(t-CO₂)の算出
- ・ 各技術の排出削減量(t-CO₂)の算出

2.3.1 船型クラス別 2020 年までの造船量及び船腹量の算定

本調査で対象とする船型クラスを、IMO 2nd Study(2007 年)及び MEPC 58 INF.6 (2020 年)に記載されている各船型クラスの中で Yacht 及び Service 以外の 63 クラスと設定し、それらの 2020 年までの造船量及び船腹量について船型クラス別に算出した。結果について表 2.3-1 に示す。具体的には IMO 2nd Study に基づく 2007 年の隻数データ及び MEPC 58/INF.6 (IPCC A1F1 / A1B1 シナリオ)に基づく 2020 年の隻数予測値をもとに、2007 年から 2020 年まで船腹量が一定量ずつ増加するとし、かつ解撤・消失等の比率を前年度の船腹量の 3%と想定することにより、2008 年～2020 年までの毎年の造船量を算出した。具体的には下記のとおり。

$$FL_{tc,y} = FL_{tc,2007} + (FL_{tc,2020} - FL_{tc,2007}) \times (y - 2007) \quad (4)$$

$$SB_{tc,y} = (FL_{tc,y} - FL_{tc,y-1}) + 0.03 \times FL_{tc,y-1} \quad (5)$$

ただし、

- ・ $FL_{tc,y}$: 船型クラス tc の y 年における総隻数
- ・ $FL_{tc,2007}$: 船型クラス tc の 2007 年における総隻数(IMO 2nd Study)
- ・ $FL_{tc,2020}$: 船型クラス tc の 2020 年における総隻数(MEPC 58 INF.6)
- ・ $SB_{tc,y}$: 船型クラス tc の y 年における造船隻数
- ・ y : 建造年(2008～2020 年)

ここで、隻数の減少が著しい船型クラスでは上式では $SB_{ic,y}$ がマイナスとなることがあるため、 $SB_{ic,y}$ の最小値を 0 とした。また大型コンテナ(8,000TEU 以上)と大型 LNG タンカー(200,000DWT 以上)の 2 船型については上式では適切に算出されない(2007 年時点での隻数が少なく、以後急増するため、上式では 2007 年時点での隻数を上回る隻数が解撤されると算出されるため、解撤率を 1%とおいている)。以上の計算より、本調査で対象とする 2008 年から 2020 年までの新造船は 62,461 隻である。

なお、大型コンテナ船については隻数が 2007 年の 118 隻から 2020 年には 1,010 隻に増加しているが、この貨物容量がさらに増加し、逆に隻数が減少した場合、大型化によるエンジン出力の増加は運搬貨物量の増加を下回り、結果としてエネルギー消費、CO₂ 排出の削減につながる。このようなコンテナ船の大型化の影響については参考資料 1 にまとめた。コンテナ船の貨物容量が 10 %及び 20 %増加した場合、大型コンテナ船に起因する CO₂ 排出量はそれぞれ約 3.9 Mt-CO₂ 及び 8.3 Mt-CO₂ 減少すると算出された。これはこの船型クラスの排出量のそれぞれ 2.4 %及び 5.1 %に相当する。

表 2.3-1 本調査で対象とした船型クラスの概要

船型	クラス (単位：無記載のものは dwt)	隻数		造船隻数 2008-2020 年	1 隻あたり燃料消費量 (kt/隻)	
		2007 年	2020 年		主機のみ	全体
Crude oil tanker	200,000+	494	474	169	21.8	24.3
Crude oil tanker	120,000-199,999	353	425	223	16.5	18.8
Crude oil tanker	80,000-119,999	651	847	485	12.2	16.1
Crude oil tanker	60,000-79,999	180	120	3	8.2	12.0
Crude oil tanker	10,000-59,999	245	150	0	6.1	8.4
Crude oil tanker	0-9,999	114	136	70	1.1	1.8
Products tanker	60,000+	198	535	475	7.7	12.2
Products tanker	20,000-59,999	456	610	360	4.5	8.4
Products tanker	10,000-19,999	193	121	0	2.9	5.3
Products tanker	5,000-9,999	466	848	633	1.8	3.0
Products tanker	0-4,999	3,959	4,499	2,181	0.6	1.0
Chemical tanker	20,000+	1,010	1,810	1,338	8.5	9.5
Chemical tanker	10,000-19,999	584	902	603	4.7	5.4
Chemical tanker	5,000-9999	642	1,558	1,331	3.0	3.5
Chemical tanker	0-4,999	1,659	940	0	0.7	1.0
LPG tanker	50,000+	138	184	108	12.1	13.3
LPG tanker	0-49,999	943	1,271	755	1.9	2.3
LNG tanker	200,000+	4	103	100	28.6	32.4
LNG tanker	0-199,999	239	442	333	31.0	33.8
Other tanker		402	523	300	0.9	1.1
Bulk carrier	Other	119	291	249	15.2	16.4
Bulk carrier	200,000+	686	1,215	892	13.1	14.1
Bulk carrier	100,000-199,999	1,513	2,024	1,193	8.8	9.6
Bulk carrier	60,000-99,999	1,864	2,411	1,372	7.0	7.8
Bulk carrier	35,000-59,999	2,090	2,187	930	5.4	6.1
Bulk carrier	10,000-34,999	1,120	1,343	700	0.9	1.2
General cargo	0-9,999	674	694	286	5.8	6.3
General cargo	10,000+	1,528	2,288	1,493	3.1	3.5
General cargo	5,000-9,999	11,006	12,376	5,909	0.5	0.6
General cargo	0-4,999	1,225	1,022	238	5.8	6.5
General cargo	10,000+	1,089	3,616	3,407	2.1	2.6
General cargo	5,000-9,999	1,486	1,725	862	1.1	1.4
Other dry reefer		1,239	1,104	324	4.3	5.0
Other dry special		228	276	146	4.1	4.8
Container	8,000+TEU	118	1,010	907	46.2	52.1
Container	5,000-7,999 TEU	417	710	508	37.5	42.1
Container	3,000-4,999 TEU	711	1,165	813	25.2	28.0
Container	2,000-2,999 TEU	667	770	382	15.6	17.7
Container	1,000-1,999 TEU	1,115	1,531	926	9.7	11.1
Container	0-999 TEU	1,110	1,144	473	3.1	3.9
Vehicle	4,000+CEU	398	634	434	13.2	14.4
Vehicle	0-3,999 CEU	337	339	134	7.3	8.0
Ro-Ro	2,000+1m	194	293	192	10.0	11.2
Ro-Ro	0-1,9991m	1,517	1,565	648	1.7	2.1
Ferry	Pax only 25kn	984	1,302	759	2.6	2.7
Ferry	Pax only <25kn	2,108	2,648	1,459	1.2	1.3
Ferry	RoPax, 25kn	177	338	259	18.3	19.4
Ferry	RoPax, <25kn	3,144	3,030	1,092	4.5	5.2
Cruise	100,000+	24	40	28	47.5	49.5
Cruise	60,000-99,999	69	93	55	32.6	36.9
Cruise	10,000-59,999	130	142	65	12.5	14.8
Cruise	2,000-9,999	74	53	4	3.2	4.2
Cruise	0-1,999	202	438	357	0.5	0.7
Misc	Fishing	12,849	13,445	5,714	0.3	0.5
Misc	Trawlers	9,709	9,612	3,672	0.8	1.2
Misc	Other	1,291	1,214	413	1.3	1.6
Misc	Other	667	905	541	4.2	5.1
合計		94,112	115,922	62,461		

2.3.2 ベースライン(技術未導入時)の燃料消費量及びCO₂排出量の算定

次に、上記の各船型クラスにおけるベースライン(技術未導入時)の燃料消費量及びCO₂排出量の算出を行った。本調査ではIMO 2nd Study 及びMEPC 58 INF.6に記載されている船型クラス別の隻数、主機・補機別の年間燃料消費量等のデータに基づき、IMO 2nd Study の基準年である2007年時点の個船当たりエネルギー消費量、及びまたそれを使用して輸送する貨物量(トンマイルベース)が将来にわたり不変であるとの前提に基づいて算出を行っている。即ち本調査において検討対象とする技術以外の技術革新や経年劣化等は明示的に考慮せず、また機関出力、航行速度、年間航行日数、燃料消費率は新造船、既存船を問わず将来的に変化しないと想定している。

以上を踏まえ排出削減技術が導入されず、燃焼のCO₂原単位に変化がないと仮定した、本調査における新造船と既存船の2020年におけるベースラインの状況を表2.3-2に示す。

表 2.3-2 2020年における新造船と既存船の隻数とベースラインCO₂排出量

	新造船	既存船	合計
隻数	62,461 (54%)	53,461 (46%)	115,922
CO ₂ 排出量 (Mt-CO ₂)	920 (63%)	543 (37%)	1,463

新造船からのCO₂排出量は、約920 Mt-CO₂(2020年の新造船及び既存船を合わせたCO₂排出量の約63%)と算出される。1隻当たりの燃料消費量は約5,000トンと算出され、2007年(約3,500トン)から増加しているが、IMO 2nd Studyの各船型クラスに属する船舶の平均船腹量(GT)を不変と考えると、新造船は2007年のフリートと比べると約44%増加している(7,994 GT→11,486 GT)ことから、1隻当たりの燃料消費量の増加は新造船の大型化がもたらしていると考えられる。

2.3.3 各技術の排出削減量の算定

(1)技術シナリオの検討

次に、MAC算出モデルに含まれる技術及びその導入シナリオについて検討する。具体的には2020年までに建造される船舶の無対策時の排出量を現状と同一と仮定し、MEPC 60/4/36¹⁶に基づく対策技術及びそれらの排出削減ポテンシャルを用いた上で、現実的かつ技術的な裏づけに基づいた技術導入シナリオを策定する。この際に、MARPOL 73/78条約附属書VI第4章における2015年および2020年におけるrequired

¹⁶ MEPC 60/4/36に基づく、2013年～2017年(フェーズ1)は全船型について10%、2018年～2022年(フェーズ2)はタンカー、バルクキャリア等は25%、コンテナ船、RoRo船等は15%となっている。

EEDIとしての個船のCO₂排出削減目標値(2015年～2019年(フェーズ1)は全船型について10%、2020年から2024年(フェーズ2)についてはタンカー、バルクキャリア、コンテナ船は20%、その他は15%)が概ね達成されていることを確認する。

なお、実際のMACの計算においては、EEDIリファレンスラインに基づく輸送効率あるいは燃料消費率を用いず、IMO 2nd Studyの実航行速度と年間稼働日数データに基づく輸送効率あるいは燃料消費率を用いている。別の言い方をすれば、船型・船型クラス毎の平均的EEOIを用いていると言ってもよい。また、減速航行を除き、CO₂排出削減技術にともなうEEOIの削減比率はEEDIの削減比率と同一であると仮定している。

本年度調査における技術シナリオの検討フローについて図2.3-1に示す。

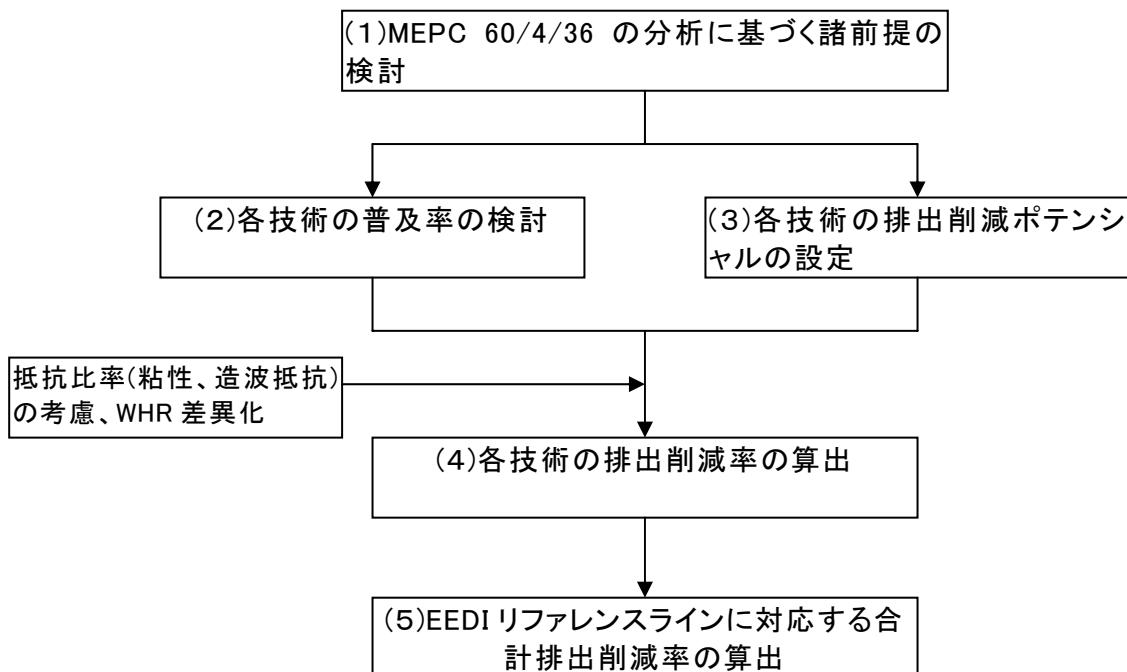


図 2.3-1 技術シナリオの選定フロー

a. MEPC 60/4/36 の分析に基づく諸前提の検討

まず、本調査で対象とする MEPC 60/4/36 に記載されている各種の排出削減技術について前提等を把握・分析した。それに基づき、本調査では下記のような前提を置くこととした。

- ・ MEPC 60/4/36 の対象技術の一つである optimal superstructure は、平水時には効果があるが、実海域における影響は小さいと考えられることから、EEDI との整合を検証するという目的に鑑み対象から外すこととする。
- ・ MEPC 60/4/36 での排出削減技術には排熱回収(以下 WHR)が想定されており、これを含めることとする。ただし、WHR の導入対象には小型船舶を除くこととする。

b. 各技術の普及率の検討

次に、それぞれの船型クラスにおける排出削減技術の普及率について検討した。ここでは下記のように設定した。

- 一般的に先進的な技術は、その技術が実用化される当初において普及率は低い段階的に普及率が增大すると考えられるため、2020年へ向けて普及率が增大するような設定を設けた。
- 普及率に関しては、初期費用が低くかつ費用対効果が高いと考えられるもの、または既に導入がある程度進んでいるものについては高い普及率を想定し、初期コストが比較的高く現時点での導入が限定的であるもの(CRP、Air lubrication)については比較的低い普及率を想定した。

本調査で用いた建造年別のフリート平均普及率の設定を表 2.3-3 に示す。

表 2.3-3 建造年別のフリート平均普及率の設定

MAC (USD / t-CO ₂)	対象技術	造船が行われる年				
		2007	2013	2015	2020	2025(参考)
0 未満	Stern duct	0 %	40 %	60 %	80 %	100 %
	Post Swirl System					
	Opt. Stern Shape					
	Low friction coating					
	WHR	20 %				
0 以上 50 未満	Air Lubrication CRP	0 %	20 %	30 %	40 %	50 %
50 以上 100 未満		0 %	10 %	15 %	20 %	25 %
100 以上		0 %	5 %	7.5 %	10 %	12.50 %

(普及率は全て隻数ベース)

c. 各技術の排出削減ポテンシャルの設定

本調査において排出削減ポテンシャルとは、各技術が導入された場合に発揮される効果を指すこととする。厳密には技術ごとの排出削減ポテンシャルも技術の進歩や経験に伴う運用改善、あるいは他の技術との相互影響などに従って経年変化すると想定されるが、全体の排出削減率の変化に与える影響は前述の普及率に比べれば小さいと考えられる。したがって、このような排出削減ポテンシャルの経年変化は普及率で考慮していると想定し、技術ごとの排出削減ポテンシャルの調整は行っていない。

ただし排熱回収(WHR)については MEPC 60/4/36 における記載を受け、排出削減ポテンシャルは 2015 年に 5%、2020 年に 10%を採用した。とし、また 2007 年における初期の排出削減ポテンシャルを 2%とし、2020 年までの年は線型内挿した。

本調査で対象とした技術の排出削減ポテンシャルの設定について表 2.3-4 に示す。

表 2.3-4 建造年別・技術別の排出削減ポテンシャルの設定

排出削減ポテンシャル	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Low friction coating	5.0 %	5.0 %	5.0 %	5.0 %	5.0 %	5.0 %	5.0 %	5.0 %	5.0 %	5.0 %	5.0 %	5.0 %	5.0 %	5.0 %
Stern duct-friction reduction*	2.0 %	2.0 %	2.0 %	2.0 %	2.0 %	2.0 %	2.0 %	2.0 %	2.0 %	2.0 %	2.0 %	2.0 %	2.0 %	2.0 %
CRP	8.0 %	8.0 %	8.0 %	8.0 %	8.0 %	8.0 %	8.0 %	8.0 %	8.0 %	8.0 %	8.0 %	8.0 %	8.0 %	8.0 %
Stern duct-propulsion*	4.0 %	4.0 %	4.0 %	4.0 %	4.0 %	4.0 %	4.0 %	4.0 %	4.0 %	4.0 %	4.0 %	4.0 %	4.0 %	4.0 %
Post-swirl system*	4.0 %	4.0 %	4.0 %	4.0 %	4.0 %	4.0 %	4.0 %	4.0 %	4.0 %	4.0 %	4.0 %	4.0 %	4.0 %	4.0 %
Opt. superstructure														
Air lubrication	10.0 %	10.0 %	10.0 %	10.0 %	10.0 %	10.0 %	10.0 %	10.0 %	10.0 %	10.0 %	10.0 %	10.0 %	10.0 %	10.0 %
Opt. stern shape**	10.0 %	10.0 %	10.0 %	10.0 %	10.0 %	10.0 %	10.0 %	10.0 %	10.0 %	10.0 %	10.0 %	10.0 %	10.0 %	10.0 %
WHR	2.0 %	2.4 %	2.8 %	3.1 %	3.5 %	3.9 %	4.3 %	4.6 %	5.0 %	6.0 %	7.0 %	8.0 %	9.0 %	10.0 %

*タンカー、バルカー等のみ、**コンテナ、RoRo 等のみ。網掛け部は MEPC 60/4/36 記載された削減率とその導入開始年を示す、イタリックは本調査で暫定的に設定したもの。

d. 各技術の排出削減率の算定

当該技術がある船型クラスに対して実際に適用される場合の排出削減率は、上記で設定した普及率及び個別技術の排出削減ポテンシャルの積で表される。具体的には下記の式で算出した。

$$ERR'_{t,tc,yc} = ERP_{t,tc,yc} \times DR_{t,tc,yc} \times RC_{t,tc} \quad (6)$$

ただし、

- ・ $ERR_{t,tc,yc}$: 建造年度 yc 年に船型クラス tc に技術 t が単独で導入された場合の排出削減率(%)
- ・ $ERP_{t,tc,yc}$: 建造年度 yc 年に船型クラス tc に導入された技術 t の排出削減ポテンシャル(%)
- ・ $DR_{t,tc,yc}$: 建造年度 yc 年に船型クラス tc に導入された技術 t の普及率(%)
- ・ $RC_{t,tc}$: 船型クラス tc に導入された技術 t の抵抗比率(%)

ここで抵抗比率 $RC_{t,tc}$ については、粘性抵抗を低減させる技術、即ち Low friction coating、Air lubrication 及び Stern duct (friction reduction) に対しては全抵抗に占める粘性抵抗の比率を乗じ、造波抵抗を低減させる技術、即ち Optimal stern shape に対しては全抵抗に占める造波抵抗の比率を乗じた。比率は、肥大船については粘性抵抗比率 90 %、造波抵抗比率 10 %とおき、やせ型船についてはそれぞれ 70 %及び 30 %とおいた。

前述のように、WHR は小型船には導入されない想定している。この条件を付すことにより、同じ船種内において船型クラスごとに上式で示される削減率が異なる。各年度で新造される船舶数で加重平均した場合の技術・船型クラスごとの排出削減率の算出結果を表 2.3-5 に示す。

表 2.3-5 建造年別の各技術の排出削減率(タンカー、バルカー等)

建造年	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Low friction coating	0.4%	0.6%	0.8%	1.0%	1.2%	1.4%	1.6%	2.0%	2.4%	2.6%	2.7%	2.9%	3.0%	3.2%
Stern duct-friction reduction	0.0%	0.1%	0.2%	0.3%	0.4%	0.5%	0.6%	0.8%	1.0%	1.0%	1.1%	1.2%	1.2%	1.3%
CRP	0.0%	0.3%	0.5%	0.8%	1.1%	1.3%	1.6%	2.0%	2.4%	2.6%	2.7%	2.9%	3.0%	3.2%
Stern duct-propulsion	0.0%	0.3%	0.5%	0.8%	1.1%	1.3%	1.6%	2.0%	2.4%	2.6%	2.7%	2.9%	3.0%	3.2%
Post-swirl system	0.0%	0.3%	0.5%	0.8%	1.1%	1.3%	1.6%	2.0%	2.4%	2.6%	2.7%	2.9%	3.0%	3.2%
Opt. superstructure														
Air lubrication	0.0%	0.3%	0.5%	0.8%	1.1%	1.3%	1.6%	2.0%	2.4%	2.6%	2.7%	2.9%	3.0%	3.2%
Opt. stern shape	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
WHR	0.2%	0.2%	0.3%	0.4%	0.5%	0.6%	0.7%	1.0%	1.3%	1.7%	2.1%	2.5%	3.0%	3.5%

表 2.3-6 建造年別の各技術の排出削減率(コンテナ船等)

建造年	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Low friction coating	0.4%	0.5%	0.7%	0.9%	1.1%	1.2%	1.4%	1.8%	2.1%	2.2%	2.4%	2.5%	2.7%	2.8%
Stern duct-friction reduction	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
CRP	0.0%	0.3%	0.5%	0.8%	1.1%	1.3%	1.6%	2.0%	2.4%	2.6%	2.7%	2.9%	3.0%	3.2%
Stern duct-propulsion	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Post-swirl system	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Opt. superstructure														
Air lubrication	0.0%	0.2%	0.5%	0.7%	0.9%	1.2%	1.4%	1.8%	2.1%	2.2%	2.4%	2.5%	2.7%	2.8%
Opt. stern shape	0.0%	0.2%	0.4%	0.6%	0.8%	1.0%	1.2%	1.5%	1.8%	1.9%	2.0%	2.2%	2.3%	2.4%
WHR	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.2%	0.2%	0.2%	0.3%

e. EEDI リファレンスラインに対応する合計排出削減率の比較検討

次いで各々の技術について排出削減率を積算し、全技術による合計排出削減率を算出することにより、EEDI リファレンスラインとの概略比較を行った。算出に当たり各技術の導入は相互に独立ではあるが、効果は相互に干渉すると想定した。即ち技術 A 及び B の排出削減率をそれぞれ ER_A と ER_B とした場合、合計の排出削減率は $1-(1-ER_A)(1-ER_B)$ で算出している。ただし air lubrication と low friction coating は同一目的であるため、効果を加算している。即ち両者の合計排出削減率は $1-(1-ER_A-ER_B)$ で表している。個別技術に関する表 2.3-5 及び表 2.3-6 の算出結果をこのように単純に(隻数を考慮せず)累計した結果を表 2.3-7 及び表 2.3-8 に示す。

表 2.3-7 建造年別のフリート全体の合計排出削減率

建造年	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
タンカー、バルカー等	0.6%	2.0%	3.4%	4.8%	6.2%	7.6%	9.0%	11.3%	13.5%	14.6%	15.7%	16.8%	17.9%	19.1%
コンテナ、RoRo等	0.4%	1.2%	2.1%	3.0%	3.8%	4.7%	5.6%	6.9%	8.3%	8.8%	9.4%	9.9%	10.5%	11.0%

表 2.3-8 同、2007年基準で補正

建造年	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
タンカー、バルカー等	0.0%	1.4%	2.9%	4.3%	5.7%	7.1%	8.5%	10.8%	13.0%	14.1%	15.2%	16.3%	17.5%	18.6%
コンテナ、RoRo等	0.0%	0.9%	1.8%	2.6%	3.5%	4.3%	5.2%	6.6%	7.9%	8.5%	9.0%	9.6%	10.2%	10.7%

表 2.3-7 及び表 2.3-8 で算出した個別技術の排出削減率を集計し required EEDI で要求される値との整合性をみた。具体的には上で算出した各船種の平均削減率が、2015年付近においてフェーズ 1 のリファレンスライン 10%を、タンカー、バルカー、コンテナ船ともにクリアできているか、さらに 2020 年においてフェーズ 2 のリファレンスラインである 20%をタンカー、バルカー、コンテナ船ともにクリアできているかを確認した。仮に、船種平均でこの値に到達しない場合は、これまでに設定してきた計算条件あるいは 2020 年までに導入が予想される削減技術や対策のリストアップが不十分であることを意味する。

結果として、いずれの船種でも、EEDI のリファレンスラインに対する削減率にわずかに足りない計算結果となった。しかし、①EEDI は設計時達成すべき値に対して、ここでの削減率は建造終了時点での値であり年時が異なること、②required EEDI の達成にはこれまで議論してきた技術による対策以外に設計速度(V_{ref})を低下させて数値を達成させることも現実的に選択肢に入ること、③required EEDI は大型船のみに適用されるが上記数値は小型船も含めたものである点、等を考慮すると、これまで検討してきた削減シナリオは EEDI と概ね整合した値と考えられる。

なお、本来であればこの整合性のチェックは個々の船型クラスから排出量に応じて検討すべきであり、その詳細な試算は後段で行った((2)c 参照)。後述するとおり、2015年に想定される排出削減量は EEDI フェーズ 1 の適用に基づく排出削減量をやや上回り、2020 年に建造される船舶において想定される排出削減量は EEDI フェーズ II の適用に基づく排出削減量とほぼ同等と算出される結果となっている。

(2)CO₂ 排出削減量の算定

以上のような技術シナリオに基づき、まず各技術の排出削減量について算出した。それらの検討結果の概要を下記に示す。

a. 個別対策技術の複合効果を考慮した排出削減率の調整

本調査では個別技術ごとに普及率を想定するため、厳密には個船単位でそれぞれの技術の普及率のもとで技術が複合するケースを設定し、それぞれのケースに応じた排出削減率を算出する必要がある(例えば技術 A と技術 B が存在する場合、双方導入されるケース、技術 A のみ導入されるケース、技術 B のみ導入されるケース、いずれも導入されないケースの 4 通りが存在する)。しかしながらこのような算出方法を採用する場合、対象となる技術が多くなると計算が非常に困難になる反面、通常想定されるパラメータの範囲では「排出削減ポテンシャル×普及率」で定義する排出削減率を持つ技術が船型クラス全体に導入されたと想定して計算した場合とほとんど結果は変わらない結果となる。

従って、本調査では表 2.3-5 及び表 2.3-6 で示した排出削減率を持つ技術が船型クラス全体に導入されると想定し、造船年次、船型クラス毎に排出削減量を算出した。この場合でも、建造年度が後になるほど普及率が高まるため、個別技術の排出削減率は他の技術の干渉を受けてより大きく低下することになる。例えば、排出削減率 5 % の技術 A と 10 % の技術 B の双方を導入した場合、合計排出削減率は $1 - (1 - 0.05) \times (1 - 0.1) = 14.5\%$ となる。このような場合に、技術 A と技術 B が同時に導入された場合のそれぞれの排出削減率は、両技術が同時に導入された場合の合計排出削減率に対し、両技術が個別に導入された場合での排出削減率を按分し、約 4.8% と 9.7% とおくこととする。以上より、個別排出削減技術の排出削減率が、建造年度、船型クラス別に求められる。数式としては下記のように表される。

$$ERR_{adj,t,tc,yc} = \frac{ERR_{t,tc,yc}}{\sum_t ERR_{t,tc,yc}} \times \{1 - \prod_t (1 - ERR_{t,tc,yc})\} \quad (7)$$

ただし、

- ・ $ERR_{adj,t,tc,yc}$: 排出削減量算出に用いるための建造年度 yc 年に船型クラス tc に導入された技術 t の排出削減率(%)
- ・ $ERR_{t,tc,yc}$: 建造年度 yc 年に船型クラス tc に導入された技術 t の、そのみが導入された場合の排出量取引率(%)

上記に基づき、個別排出削減技術による排出削減量は下記の式により求められる。

$$ER_t = \sum_{yc} \sum_{tc} ERR_{adj,t,tc,yc} \times BEME_{yc,tc} \quad (8)$$

ただし、

- ER_t : 新造船に導入された排出削減技術 t の年間排出削減量(t-CO₂)
- $BEME_{yc,tc}$: 建造年度 yc 年、船型クラス tc の新造船のベースラインでの主機起源年間 CO₂ 排出量(t-CO₂ : ただし本調査では建造年度によらないとする)

b. 個別対策技術における排出削減量の算定

上記のように計算した、2008年～2020年に建造した船舶に対する各技術の導入による2020年時点での年間排出削減量を表2.3-9に示す。このMEPC文書に示された技術の導入による、2008年～2020年に建造した船舶に対して導入される対策技術によりもたらされる温室効果ガス排出削減量は約79 Mt-CO₂であり、新造船による年間CO₂排出量(約920 Mt-CO₂)の約8.6%に相当する。また、新造船及び既存船を併せた2020年のベースラインの総排出量は1,463 Mt-CO₂であり、これに対する新造船への技術的対策の導入による排出削減率は5.4%と算出される。

2020年における各技術の排出削減量を主要船型ごとに表2.3-9及び図2.3-2に示す。Low friction coating, CRP, Air lubrication, WHRの排出削減量が高く算出されるが、これらの技術の個別の排出削減率が高いことに加え、対象となる船型クラスが広範であり、それらの排出削減量が大きいことに起因する。

表 2.3-9 2020年における新造船に対する各排出削減技術の年間排出削減量 船型別
(単位 Mt-CO₂/年)

	Low friction coating	Stern duct-friction reduction	CRP	Stern duct-propulsion	Post-swirl system	Air lubrication	Opt. stern shape	WHR	合計
原油タンカー	0.7	0.3	0.7	0.7	0.7	0.8	0.0	1.1	5.1
その他タンカー	2.0	1.0	2.3	2.3	2.3	2.4	0.0	2.9	15.3
バルクキャリア	2.2	1.0	2.3	2.3	2.3	2.6	0.0	3.4	16.1
一般貨物	0.9	0.4	1.2	1.2	1.2	1.0	0.0	1.0	6.9
コンテナ	4.1	0.0	5.6	0.0	0.0	4.9	4.2	6.8	25.5
その他	2.0	0.0	2.7	0.0	0.0	2.4	2.0	0.9	10.0
合計	11.7	2.8	14.8	6.5	6.5	14.1	6.2	16.1	78.8

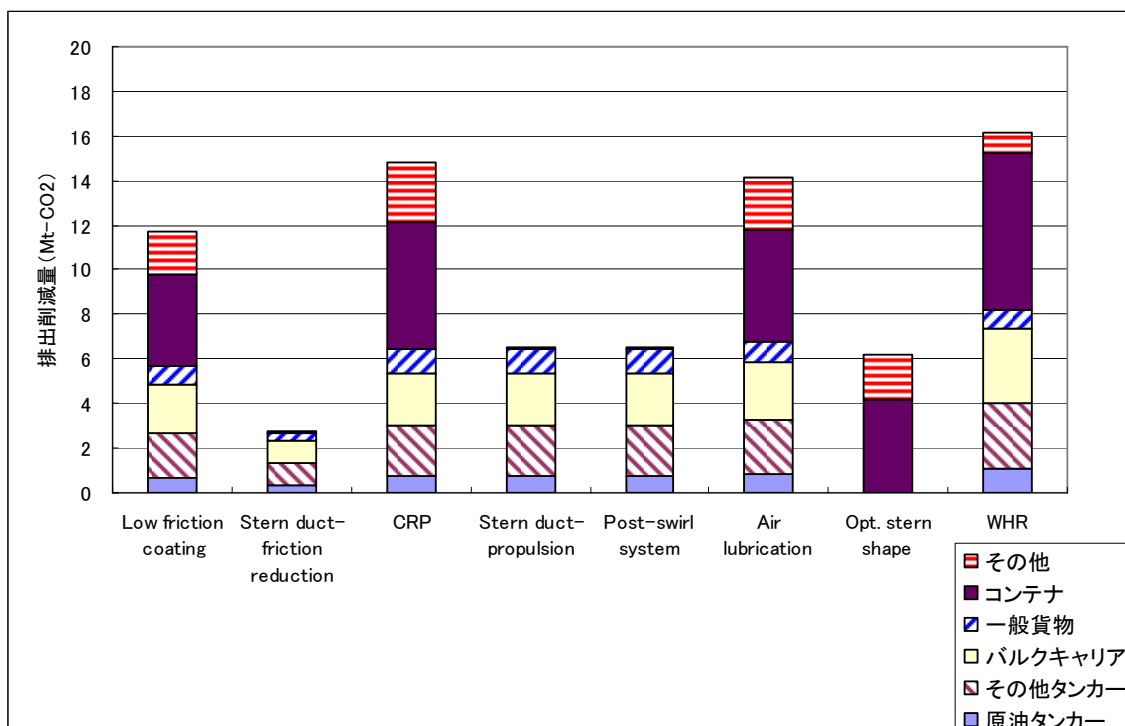


図 2.3-2 2020 年における新造船に対する各排出削減技術の年間排出削減量船型別
(単位 Mt-CO₂/年)

c. Required EEDI との整合性の検討

本調査の結果算出された建造年毎の船舶のエネルギー効率の向上率と、MEPC 62 で決定された MARPOL 条約附属書 VI 改正(Inclusion of Regulation on energy efficiency for ships in MARPOL Annex VI Chapter 4 Regulation 21 Paragraph 2¹⁷)との整合について、下記のように更に詳細に検討した。

船型クラスごとの DWT の算出

各船型の required EEDI は DWT ごとに区分されているが、IMO 2nd Study における各船型クラスには平均 GT のデータはあるが DWT の記載はない。このため IMO 2nd Study における各船型クラスの平均 GT のデータ(table A1.8)を DWT に換算した。換算方法は国土技術政策総合研究所「統計解析による船舶諸元の研究」¹⁸に基づき、7つの船型についてそれぞれ別個の定数を乗じることとした。これにより、IMO 2nd Study における各船型クラスの DWT が算出される。

¹⁷ MEPC 62/24/Add.1 Annex 19 に記載。

¹⁸ <http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/rpn/rpn0028.htm>(本調査では第 7 章「船舶の主要諸元以外の解析項目」を参照した)

船型クラスごとの required EEDI の算出

次いで、上記で算出した船型クラス毎の DWT に対して、MARPOL Annex VI Chapter 4 Regulation 21 Paragraph 2 に規定されている各船型の required EEDI を当てはめた。当てはめ方について、下記の規則を設けた。

- IMO 2nd Study の船型クラスのうち、その平均 DWT が、MARPOL Annex VI Chapter 4 Regulation 21 Paragraph 2 において一定値で固定された EEDI が設定される基準を上回るもの(例：200,000 DWT 以上の原油タンカーの平均 DWT は 290,783 DWT と算出され、固定された EEDI が適用される区分である 20,000 DWT を上回る)については、該当するフェーズごとに固定された EEDI が適用される则认为。
- IMO 2nd Study の船型クラスのうち、その平均 DWT が、MARPOL Annex VI Chapter 4 Regulation 21 Paragraph 2 において一定値で固定された EEDI が設定される基準を下回るが、DWT に応じた EEDI が設定される基準を上回るもの(例：5,000～9,999 DWT 以上の一般貨物船の平均 DWT は 8,901 DWT と算出され、DWT に応じた EEDI が適用される区分である 3,000～15,000 DWT に属する)については、該当するフェーズごとに DWT に応じた EEDI が適用される则认为。
- IMO 2nd Study の船型クラスのうち、その平均 DWT が、MARPOL Annex VI Chapter 4 Regulation 21 Paragraph 2 において DWT に応じた EEDI が設定される基準を下回るもの(例：0～9,999 DWT 以上の原油タンカーの平均 DWT は 3,894 DWT と算出され、DWT に応じた EEDI が適用される区分である 4,000～20,000 DWT を下回る)については、当該船型クラスに対して EEDI は適用されないと考える。

排出削減量の比較

以上のように分類して、建造年 2015 年の船舶とフェーズ 1、2020 年の船舶とフェーズ 2 を対応させることにより、MARPOL Annex VI Chapter 4 Regulation 21 Paragraph 2 に規定されている required EEDI が適用された場合と、本調査において前提とした排出削減率が適用された場合との排出削減量の整合を見た。結果を表 2.3-10 に示す。

表 2.3-10 MEPC 62/24/Add.1 Annex 19 に規定される EEDI が適用された場合と、本調査に基づき排出削減率が適用された場合の排出削減量 (kt-CO₂)船型クラス別 (MARPOL Annex VI Chapter 4 Regulation 21 Paragraph 2 に基づく required EEDI)

船型	クラス	クラス平均 GT(IMO 2nd Study)	クラス平均 DWT(GT データからの換算値)	本調査に基づき排出削減率 (2015 年建造船)		本調査に基づき排出削減率 (2020 年建造船)	
				削減率	建造隻数	削減率	建造隻数
Crude oil tanker	200,000 dwt	155,685	290,783	10.0%	13	14.9%	13
Crude oil tanker	120,000-199,999dwt	80,711	150,749	10.0%	17	14.9%	18
Crude oil tanker	80,000-119,999dwt	56,921	106,315	10.0%	38	14.9%	40
Crude oil tanker	60,000-79,999dwt	39,498	73,773	10.0%	0	14.9%	0
Crude oil tanker	10,000-59,999dwt	24,290	45,368	10.0%	0	14.9%	0
Crude oil tanker	0-9,999dwt	2,085	3,894	—	5	12.6%	6
Products tanker	60,000dwt+	46,775	87,365	10.0%	37	14.9%	41
Products tanker	20,000-59,999dwt	24,262	45,316	10.0%	28	14.9%	30
Products tanker	10,000-19,999dwt	9,723	18,160	8.9%	0	14.9%	0
Products tanker	5,000-9,999dwt	4,264	7,964	2.5%	50	12.6%	54
Products tanker	0-4,999dwt	1,056	1,972	—	169	12.6%	175
Chemical tanker	20,000dwt+	24,917	46,539	10.0%	105	14.9%	114
Chemical tanker	10,000-19,999dwt	9,357	17,477	8.4%	47	14.9%	51
Chemical tanker	5,000-9,999dwt	4,651	8,687	2.9%	105	12.6%	115
Chemical tanker	0-4,999dwt	1,331	2,486	—	0	12.6%	0
LPG tanker	50,000dwt+	43,784	51,834	10.0%	8	14.9%	9
LPG tanker	0-49,999dwt	4,834	5,723	1.1%	59	14.9%	63
LNG tanker	200,000dwt+	135,846	99,143	10.0%	8	13.7%	8
LNG tanker	0-199,999dwt	90,933	66,365	10.0%	26	13.7%	28
Other tanker	Other	2,030	3,792	—	23	13.7%	25
Bulk carrier	200,000dwt+	114,519	216,687	10.0%	20	14.9%	22
Bulk carrier	100,000-199,999dwt	83,619	158,219	10.0%	70	14.9%	76
Bulk carrier	60,000-99,999dwt	39,568	74,868	10.0%	93	14.9%	99
Bulk carrier	35,000-59,999dwt	27,596	52,216	10.0%	107	14.9%	113
Bulk carrier	10,000-34,999dwt	15,351	29,046	10.0%	72	14.9%	73
Bulk carrier	0-9,999dwt	1,942	3,675	—	54	12.6%	57
General cargo	10,000dwt+	11,382	21,536	10.0%	22	13.7%	22
General cargo	5,000-9,999dwt	4,704	8,901	4.9%	117	11.4%	125
General cargo	0-4,999dwt	1,061	2,008	—	458	11.4%	474
General cargo	10,000dwt+	15,641	29,595	10.0%	18	13.7%	16
General cargo	5,000-9,999dwt	5,294	10,017	5.8%	268	13.7%	297
General cargo	0-4,999dwt	2,724	5,154	1.8%	67	11.4%	70
Other dry	reefer	4,998	9,457	10.0%	25	13.7%	23
Other dry	special	12,201	23,086	10.0%	11	13.7%	12
Container	8,000TEU+	100,082	113,510	10.0%	70	10.3%	70
Container	5,000-7,999 TEU	70,290	79,721	10.0%	40	10.3%	43
Container	3,000-4,999 TEU	45,317	51,397	10.0%	64	10.3%	69
Container	2,000-2,999 TEU	29,363	33,303	10.0%	30	7.9%	31
Container	1,000-1,999 TEU	16,438	18,644	10.0%	72	7.9%	77
Container	0-999 TEU	6,967	7,902	—	36	7.9%	37
Vehicle	4,000CEU+	51,549	18,991	9.4%	34	10.3%	37
Vehicle	0-3,999 CEU	20,561	7,575	2.2%	10	7.9%	10
Ro-Ro	2,000 CEU +lm	25,725	14,543	6.6%	15	10.3%	16
Ro-Ro	0-1,999 CEU +lm	3,557	2,011	—	50	7.9%	51

(対象は MEPC 62/24/Add.1 Annex 19 の required EEDI 設定の対象となるタンカー、バルクキャリア、パルクキヤリア、一般貨物船、コンテナ船、自動車輸送船、RoRo 船とした)

表 2.3-11 MARPOL Annex VI Chapter 4 Regulation 21 Paragraph 2 に規定される EEDI が適用された場合と、本調査に基づく排出削減率が適用された場合の排出削減量(kt-CO₂)：集計値

	2015 年建造船における排出削減量 (単位 kt-CO ₂ /年)		2020 年建造船における排出削減量 (単位 kt-CO ₂ /年)	
	フェーズ 1 required EEDI の適用	本調査	フェーズ 2 required EEDI の適用	本調査
Required EEDI が設定される船型クラスのみ	4,905	6,367	10,348	10,627
対象船型クラス全て	同上	6,571	同上	10,908
排出削減率 (required EEDI が設定される船型クラスのみ)	9.4%	12.2%	18.7%	19.2%

(対象は MARPOL Annex VI Chapter 4 Regulation 21 Paragraph 2 の required EEDI 設定の対象となるタンカー、バルクキャリア、一般貨物船、コンテナ船、自動車輸送船、RoRo 船とした)

以上のように、本調査で想定した技術導入シナリオに基づく排出削減率は 2015 年時点で概ねフェーズ I の required EEDI を上回るため、それらの技術が導入された場合における 2015 年に建造された船舶による排出削減量は、MARPOL Annex VI Chapter 4 Regulation 21 Paragraph 2 において数値または算出方法が規定されている EEDI が適用された場合に期待される排出削減量を上回る。また、2020 年に建造された船舶において想定される排出削減率は、2020～2024 年設計された船舶に適用されるフェーズ II EEDI とほぼ同等と算出される。

表 2.3-12 2020 年における新造船に対する各排出削減技術の年間排出削減量

船型クラス別(単位 kt-CO₂/年)

	クラス	Low friction coating	Stern duct-friction reduction	CRP	Stern duct-propulsion	Post-swirl system	Air lubrication	Opt. stern shape	WHR	合計
Crude oil tanker	200,000dwt+	-186	-90	-199	-199	-199	-224	0	-289	-1,386
Crude oil tanker	120,000-199,999dwt	-190	-91	-203	-203	-203	-228	0	-300	-1,419
Crude oil tanker	80,000-119,999dwt	-307	-148	-328	-328	-328	-369	0	-486	-2,294
Crude oil tanker	60,000-79,999dwt	0	0	0	0	0	-1	0	0	-3
Crude oil tanker	10,000-59,999dwt	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Crude oil tanker	0-9,999dwt	-4	-2	-4	-4	-4	-5	0	0	-23
Products tanker	60,000dwt+	-193	-93	-206	-206	-206	-232	0	-308	-1,445
Products tanker	20,000-59,999dwt	-84	-41	-90	-90	-90	-101	0	-133	-630
Products tanker	10,000-19,999dwt	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Products tanker	5,000-9,999dwt	-60	-29	-64	-64	-64	-71	0	0	-350
Products tanker	0-4,999dwt	-66	-32	-70	-70	-70	-79	0	0	-388
Chemical tanker	20,000dwt+	-598	-287	-639	-639	-639	-718	0	-952	-4,471
Chemical tanker	10,000-19,999dwt	-150	-72	-160	-160	-160	-180	0	-238	-1,122
Chemical tanker	5,000-9,999dwt	-214	-103	-228	-228	-228	-257	0	0	-1,259
Chemical tanker	0-4,999dwt	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LPG tanker	50,000dwt+	-68	-33	-73	-73	-73	-82	0	-108	-508
LPG tanker	0-49,999dwt	-73	-35	-78	-78	-78	-87	0	-115	-543
LNG tanker	200,000dwt+	-106	-51	-147	-147	-147	-128	0	-214	-940
LNG tanker	0-199,999dwt	-401	-193	-550	-550	-550	-481	0	-821	-3,546
Other tanker		-11	-5	-15	-15	-15	-13	0	-22	-94
Bulk carrier	Other	-201	-96	-214	-214	-214	-241	0	-321	-1,502
Bulk carrier	200,000dwt+	-615	-295	-656	-656	-656	-738	0	-978	-4,596
Bulk carrier	100,000-19,999dwt ⁹	-548	-263	-585	-585	-585	-658	0	-867	-4,090
Bulk carrier	60,000-99,999dwt	-503	-242	-537	-537	-537	-605	0	-796	-3,757
Bulk carrier	35,000-59,999dwt	-258	-124	-276	-276	-276	-311	0	-405	-1,928
Bulk carrier	10,000-34,999dwt	-32	-16	-35	-35	-35	-39	0	0	-191
General cargo	0-9,999dwt	-66	-32	-90	-90	-90	-79	0	-132	-580
General cargo	10,000dwt+	-194	-93	-267	-267	-267	-234	0	0	-1,323
General cargo	5,000-9,999dwt	-132	-64	-182	-182	-182	-159	0	0	-900
General cargo	0-4,999dwt	-52	-25	-72	-72	-72	-63	0	-101	-455
General cargo	10,000dwt+	-301	-145	-413	-413	-413	-361	0	-619	-2,665
General cargo	5,000-9,999dwt	-38	-18	-52	-52	-52	-45	0	0	-257
Othre dry reefer		-54	-26	-74	-74	-74	-65	0	-107	-475
Other dry special		-24	-12	-33	-33	-33	-29	0	-49	-215
Container	8,000TEU+	-1,700	0	-2,341	0	0	-2,049	-1,756	-3,428	-11,274
Container	5,000-7,999 TEU	-800	0	-1,098	0	0	-961	-824	-1,641	-5,325
Container	3,000-4,999 TEU	-858	0	-1,178	0	0	-1,031	-883	-1,759	-5,708
Container	2,000-2,999 TEU	-249	0	-343	0	0	-300	-257	0	-1,149
Container	1,000-1,999 TEU	-382	0	-525	0	0	-459	-394	0	-1,760
Container	0-999 TEU	-61	0	-84	0	0	-74	-63	0	-282
Vehicle	4,000CEU+	-240	0	-330	0	0	-288	-247	-492	-1,598
Vehicle	0-3,999 CEU	-41	0	-56	0	0	-49	-42	0	-187
Ro-Ro	2,000 CEU +Im	-80	0	-110	0	0	-96	-82	-164	-533
Ro-Ro	0-1,999 CEU +Im	-45	0	-62	0	0	-54	-47	0	-208
Ferry	Pax only 25kn	-83	0	-114	0	0	-100	-86	0	-383
Ferry	Pax only <25kn	-75	0	-103	0	0	-90	-77	0	-346
Ferry	RoPax, 25kn	-202	0	-277	0	0	-242	-207	0	-928
Ferry	RoPax, <25kn	-201	0	-277	0	0	-243	-208	0	-929
Cruise	100,000+	-57	0	-78	0	0	-68	-58	-116	-376
Cruise	60,000-99,999	-75	0	-103	0	0	-90	-77	-153	-499
Cruise	10,000-59,999	-34	0	-47	0	0	-41	-35	0	-156
Cruise	2,000-9,999	0	0	-1	0	0	0	0	0	-2
Cruise	0-1,999	-8	0	-11	0	0	-10	-9	0	-39
Service	Research	-26	0	-36	0	0	-32	-27	0	-122
Service	Tug	-396	0	-544	0	0	-476	-408	0	-1,823
Service	Dredging	-27	0	-37	0	0	-33	-28	0	-126
Service	SAR	-25	0	-34	0	0	-30	-26	0	-116
Service	Workboats	-14	0	-19	0	0	-17	-14	0	-64
Service	Other	-29	0	-39	0	0	-34	-30	0	-132
Misc	Fishing	-66	0	-91	0	0	-80	-69	0	-306
Misc	Trawlers	-118	0	-162	0	0	-142	-122	0	-544
Misc	Other	-22	0	-30	0	0	-26	-23	0	-101
Misc	Other	-96	0	-132	0	0	-115	-99	0	-443
合計		-11,741	-2,754	-14,805	-6,541	-6,541	-14,116	-6,198	-16,115	-78,813

2.4 個別技術の費用と便益の正味現在価値(NPV)の算定

2.3 で説明したように算出した個別技術の排出削減量は、MAC 計算式の分母に相当する。次に分子である個別技術の費用と便益の算出を行う。ここである技術の費用及び便益を検討する場合、通常は初期の投資コストに加え、複数年にわたる技術の導入効果(省エネ効果による燃料費節減)と、技術によってはランニングコストを検討する必要が生じる。そのため費用と便益の算出をどのような観点で行うかについて整理が必要である。

ここでは、本調査における MAC の考え方、特にコスト計算の考え方について 2.4.1 に示す。

2.4.1 算定に当たっての経済パラメータの検討

(1)回収想定期間

1.3 に示した基本式により算出される MAC は、対象とする期間の設定方法によって大きく変動する。海運における温室効果ガス排出削減技術のほとんどを占める省エネ技術の場合、一般的には導入時には設備コストの占める割合が大きいが、導入後は省エネの便益がコストを上回る。従って省エネ技術の MAC を計算する場合、「利益を回収するために想定する」期間が長いほど当該技術の費用に対する便益の割合が向上し、同期間を十分に長く取ると最終的には累計した便益が費用を上回り、CO₂ 排出削減効果は省エネ効果に比例する。

例えば設備コスト 100 万 USD、年間燃料節減量 300 トンの技術を想定する。燃料価格 500 USD/t-fuel、ランニングコストをゼロとおくと年間の便益は 150,000 USD、CO₂ 原単位 3 t-CO₂/t-fuel とすると年間温室効果ガス排出削減効果は 900 t-CO₂ と算出される。この技術により算定される累積的な正味費用(費用－省エネ便益)、排出削減効果、及び「正味費用÷排出削減量」で算出される MAC は下記のように変化する。割引率を考慮しないとすると、このような技術の正味費用は導入後時間が経つほど漸減し、7 年目において便益が費用を上回るためにマイナスに転じる(正味便益となる)。一方、CO₂ 排出削減効果は毎年一定であると仮定しているため、表 2.4-1 に示すように費用・便益を累積する期間を長く取るほど CO₂ 削減量を正味費用で除した MAC は年々階段状に低下し、便益が費用を上回る 7 年目にマイナスに転じる(即ち対策が費用効果的と算出される)。このように、MAC を計算するに当たっては「利益を回収するために想定する」期間(本調査では回収想定期間と呼ぶ)を設定することが必要となる。なお、回収想定期間はあくまで MAC を算定するための計算期間であり、個々の技術に対して一般的に用いられるコスト回収年(この期間に必ずコスト回収が実現する期間)ではないことに注意が必要である。

表 2.4-1 回収想定期間と MAC の関係

考慮年数(年)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
累積正味費用 (1000 USD)	1,000	850	700	550	400	250	100	-50	-200	-350	-500
排出削減効果 (t-CO ₂)		900	1,800	2,700	3,600	4,500	5,400	6,300	7,200	8,100	9,000
MAC(USD/t-CO ₂)		944	389	204	111	56	19	-8	-28	-43	-56

回収想定期間の設定方法についてはいくつかの考え方がある。新造船に対して排出削減技術を導入する場合、その効果は基本的には当該技術の耐用年数(船舶と同等の場合は船舶の耐用年数)と考えることが妥当である。従って新造船の場合は対象期間は20～30年と考えるというアプローチがある。

これに対して技術への投資を行う側である船主の観点に立つと、MACを算出するための期間はその企業・業界にとって投資と回収を考える典型的な期間と置くことが妥当と考えられる。このような投資回収年数は一般的に10年またはそれ以内であることが多い。

1章や2章で紹介したように既存のMACの計算においては、双方の設定条件が用いられている。一般的に、民間企業にとっての投資という観点が相応しい対象(例：工場での省エネ)では回収想定期間は企業等が投資回収を考える場合に用いる期間であり、10年またはそれ以下の期間である(欧州では道路、鉄道インフラの経済的耐用年数に10年を用いている場合が多い)。技術自体の耐用年数が短いものについても同様に回収想定期間は短い。逆に社会資本や長期的に投資回収を図るようなプロジェクトでは回収想定期間は対象の技術的な耐用年数と想定するため、耐用年数の長い設備の場合は長くなる。

(2)割引率と回収想定期間の組み合わせ

次に、ある事業の収益性を考える上では将来の支出・収入ほど割り引かれるべきであるという考え方に立ち、1.3で述べた式の正味費用 ΔC の計算においてはコスト・便益の総和ではなく、割引率を考慮した正味現在価値(Net present value : NPV)¹⁹として計算するのが適切である。NPVは一般的には式(9)により算出される。

$$NPV = \Delta C_0 + \frac{\Delta C_1}{(1+r)} + \frac{\Delta C_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{\Delta C_n}{(1+r)^n} \quad (9)$$

¹⁹ ある投資について、初期コスト、運営コスト、毎年の期待収入をもとに、収益・費用を割引率(後述)を用いて現在価値に換算したもの。NPVがマイナスになるということは投資の期待収入が支出を下回ることであり、投資が望ましくないということになる。

ここで、

- ・ r : 割引率 (%)
- ・ ΔC_y : 導入後 y 年における正味費用技術 t に起因する個船 i の対策実施費用 (投資コスト及びその他運営コスト : USD)
- ・ n : 回収想定期間(年)

回収想定期間と同様、割引率の設定は、省エネ技術の導入を民間企業の投資と見るか、船舶を一種の社会資本と見るか、の二つの視点で異なる。前者の場合は企業の期待する収益率が割引率として妥当な数値であり、このため既存調査では割引率について一定値としている。

以上の議論に基づき回収想定期間と割引率の組み合わせを考えると表 2.4-2 のような組み合わせが考えられる。本調査ではこれら 3 つの組み合わせに基づき算出を行う。

表 2.4-2 回収想定期間と割引率に関する組み合わせ

ケース	回収想定期間	割引率	概要	本調査で用いた組み合わせ
A	長期 (20-30年)	低い	・ 対象となる施設や排出削減技術について、耐用年数全体にわたって効果を計測する場合について該当すると考えられる(公共事業、社会資本に多いアプローチ)。	・ 割引率 5 % ・ 回収想定期間 20 年
B	短期(10 年程度)	高い	・ 対象となる施設や排出削減技術について、導入・利用主体にとっての投資回収という観点から効果を検討する場合について該当すると考えられる(民間企業の投資案件に多いアプローチ)。	・ 割引率 10 % ・ 回収想定期間 10 年
C	短期	低い	・ ケース A について、対象となる施設あるいは排出削減技術の耐用年数が短い場合について該当すると考えられる。	・ 割引率 5 % ・ 回収想定期間 10 年

なお、回収想定期間が長期であり、かつ割引率が高いという組み合わせは、前者が社会資本的なアプローチ、後者が民間企業的なアプローチを反映しているため全体の考え方に矛盾が生じかねないことから、本調査では試算を行わないこととした。

(3) 割引の対象

割引率の議論に関して、初期コスト並びに燃料節減効果からなる NPV と併せ、CO₂ 排出削減量についても割り引くことも考えられる。CO₂ 排出についても割り引く理由

としては、対策を遅らせるほど排出削減が費用効果的となるという結果をもたらす懸念、あるいは排出量取引や炭素税の導入を考える場合、CO₂ 排出削減量は貨幣換算でできる経済価値を持つので、他の支出・便益同様に割り引くという考え方に起因するが、本調査における MAC の計算は中短期的な技術導入を視野に入れており、また排出量取引制度や炭素税の検討の一環として行うものではないとの位置づけから、CO₂ 排出削減量については割り引かないこととする(2.1 で述べた DNV 文献も同様のアプローチである)。CO₂ 排出削減量について割り引くことについては 6.5 で議論することとする。

2.4.2 正味現在価値の計算手法の検討

既存調査の多くは、MAC の算定対象年を 2020 年や 2030 年という単年度に置いている。ここで船舶に導入されうる排出削減技術の普及は毎年変化(増加)し、それとともに個別技術の排出削減率も変化する。本調査ではこのような複数年度にわたり建造される船舶と導入される排出削減技術を総体として捉える必要があるため、2008 年～2020 年に建造される船舶に対する排出削減技術導入という時間的に幅のある対策を束ねて MAC を算出することとし、次のように実施した。

- ・ 船型クラス毎、建造年次(2008 年～2020 年)毎に各技術の導入コストと便益を、それぞれの建造年次²⁰からの回収想定期間にわたって集計し、全ての建造年次の船舶に対する回収想定期間全体にわたる技術導入の正味現在価値(NPV)を求める。
- ・ 併せて、技術毎、船型クラス毎、建造年次(2008 年～2020 年)毎に各技術の導入による単年度あたりの CO₂ 排出削減量を算出し、全ての建造年次の船舶に対して回収想定期間全体にわたって集計することにより、技術導入の CO₂ 排出削減量を算出する。
- ・ 上記より MAC を算出する。

NPV 算出手法の具体例を表 2.4-3 に示す。ある船型クラスに対して投資コスト 30、毎年の省エネ効果が 5 という技術が 2012 年～2014 年に導入されたと仮定する。また、その技術の省エネ効果は 2014 年からは他に導入される技術の影響を受け、4 に低下すると考える。なお、投資年度は導入年度の前年と置き。それぞれの温室効果ガス排出削減量を省エネ効果に比例して 2012 年及び 2013 年に導入された船舶は 0.5、2014 年に導入された船舶は 0.4 とおく。

²⁰ 各技術の導入コストは建造年次の前年に発生することとしている。

表 2.4-3 NPV 算出手法の例(期間 20 年)

年	年間排出削減量	費用便益												
		2008	...	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	...	2031	2032	2033
船型クラス A(2012 年建造)	0.5	0	...	-30	5	5	5	5	5	5	...	5	0	0
同(2013 年建造)	0.5		...		-30	5	5	5	5	5	...	5	5	0
同(2014 年建造)	0.4		...			-30	4	4	4	4	...	4	4	4
合計		0	0	-30	-25	-20	14	14	14	14	...	14	9	4

この場合の NPV の計算は、上表の「合計」欄を対象に、下記のように行う。期間 20 年の場合は、式(10)のように表現される。なお、ここで r は割引率を示す。

$$NPV = \frac{1}{(1+r)^4} \times (-30) + \frac{1}{(1+r)^5} \times (-25) + \frac{1}{(1+r)^6} \times (-20) + \frac{1}{(1+r)^7} \times (14) + \dots + \frac{1}{(1+r)^{26}} \times (4) \quad (10)$$

ここで設備投資の判断は船舶を発注する段階で行われるため、将来の投資を割り引かず、投資判断時点で NPV を計算するという手法もある。しかし本調査で対象とする排出削減技術は全て現在導入するか将来的に導入するかについて船主が判断することが可能であり、従って技術の導入を将来に繰り延べる場合はその割り引かれるべきとも考えられる。本調査はこの手法を採用している。本手法の限界としては、長期的に導入される対策の MAC を推計する場合は割引の効果により MAC の絶対値がゼロに収斂する可能性がある。このような問題に対処する手法として各年度の投資判断時点における NPV を計算する手法があるが、これは本調査で重視している技術の段階的導入の効果について比較検討することが出来ないという点が課題として挙げられる。この手法については 6.5 で述べる。

2.4.3 正味現在価値算定にあたってのコストの設定

NPV 算出にあたってのコストの設定について以下に示す。

(1) 初期コストの把握

MAC の計算は、各技術の導入コスト(初期コスト及びランニングコスト²¹)及び導入によるエネルギー節減便益を加味した正味現在価値(NPV)を CO₂ 総排出削減量で除した値となる。算定に用いたコストの設定方法及びデータを表 2.4-4 及び表 2.4-5 に示す。

²¹ air lubrication のみ。

表 2.4-4 本調査で想定した各技術のコスト設定方法

対象技術	コスト設定方法
Low friction coating	MEPC 61/INF.18 “Marginal abatement costs and cost-effectiveness of energy-efficiency measures” (IMarEST)に記載されている”Hull Coating 2)のデータ(高位推計と低位推計の平均値)に基づいた。データが記載されていない船舶については、コストは船体の表面積に比例するとの想定の下、各船型クラスの GT データの 2/3 乗に比例するとした。
Stern duct-friction reduction	MEPC 59 /INF.17 “Detailed information on the prospect of energy efficiency improvement of new ships”における”Reduction of friction resistance and improvement of propeller efficiency by shape of stern”のコストを下に設定した。データが記載されていない船舶については、MEPC 61/INF.18 “Marginal abatement costs and cost-effectiveness of energy-efficiency measures” (IMarEST)に記載されているエンジン・駆動関連の対策における各船型クラスのコスト比率に沿うと想定して算出した。
CRP	MEPC 59 /INF.17 “Detailed information on the prospect of energy efficiency improvement of new ships”における”Improvement of propeller efficiency (CRP)を下に設定した。データが記載されていない船舶については、MEPC 61/INF.18 “Marginal abatement costs and cost-effectiveness of energy-efficiency measures” (IMarEST)に記載されているエンジン・駆動関連の対策における各船型クラスのコスト比率に沿うと想定して算出した。
Stern duct-propulsion	MEPC 59 /INF.17 “Detailed information on the prospect of energy efficiency improvement of new ships”における”Reduction of friction resistance and improvement of propeller efficiency by shape of stern”のコストを下に設定した。データが記載されていない船舶については、MEPC 61/INF.18 “Marginal abatement costs and cost-effectiveness of energy-efficiency measures” (IMarEST)に記載されているエンジン・駆動関連の対策における各船型クラスのコスト比率に沿うと想定して算出した。
Post-swirl system	MEPC 59 /INF.17 “Detailed information on the prospect of energy efficiency improvement of new ships”における”Reduction of friction resistance and improvement of propeller efficiency by shape of stern”のコストを下に設定した。データが記載されていない船舶については、MEPC 61/INF.18 “Marginal abatement costs and cost-effectiveness of energy-efficiency measures” (IMarEST)に記載されているエンジン・駆動関連の対策における各船型クラスのコスト比率に沿うと想定して算出した。
Air lubrication	MEPC 61/INF.18 “Marginal abatement costs and cost-effectiveness of energy-efficiency measures” (IMarEST)に記載されている”Air lubrication”のデータ(高位推計と低位推計の平均値)に基づいた。データが記載されていない船舶については、コストは船体の表面積に比例するとの想定の下、各船型クラスの GT データの 2/3 乗に比例するとした。
Opt. stern shape	MEPC 59 /INF.17 “Detailed information on the prospect of energy efficiency improvement of new ships”における”Reduction of friction resistance and improvement of propeller efficiency by shape of stern”のコストを下に設定した。データが記載されていない船舶については、MEPC 61/INF.18 “Marginal abatement costs and cost-effectiveness of energy-efficiency measures” (IMarEST)に記載されているエンジン・駆動関連の対策における各船型クラスのコスト比率に沿うと想定して算出した。
WHR	MEPC 61/INF.18 “Marginal abatement costs and cost-effectiveness of energy-efficiency measures” (IMarEST)に記載されている”Waste heat recovery”のデータ(高位推計と低位推計の平均値)に基づいた。データが記載されていない船舶については、コストは同文献に記載されているエンジン・駆動関連の対策における各船型クラスのコスト比率に沿うと想定して算出した。

表 2.4-5 本調査で想定した各技術のコストデータ(単位：USD)

	クラス	Low friction coating	Stern duct-friction reduction	CRP	Stern duct-propulsion	Post-swirl system	Air lubrication	Opt. stern shape	WHR
Crude oil tanker	200,000dwt+	697,375	200,000	4,000,000	200,000	300,000	2,163,205	0	4,425,805
Crude oil tanker	120,000-199,999dwt	450,045	155,186	3,103,729	155,186	232,780	1,464,615	0	3,512,550
Crude oil tanker	80,000-119,999dwt	356,575	132,808	2,656,152	132,808	199,211	1,159,040	0	2,938,903
Crude oil tanker	60,000-79,999dwt	279,480	99,165	1,983,309	99,165	148,748	1,031,065	0	2,194,435
Crude oil tanker	10,000-59,999dwt	202,105	69,792	1,395,841	69,792	104,688	626,906	0	1,544,430
Crude oil tanker	0-9,999dwt	39,325	14,993	299,858	14,993	22,489	121,983	0	331,778
Products tanker	60,000dwt+	312,830	100,956	2,019,110	100,956	151,433	970,368	0	2,234,047
Products tanker	20,000-59,999dwt	201,950	69,377	1,387,536	69,377	104,065	626,428	0	1,535,241
Products tanker	10,000-19,999dwt	109,770	43,790	875,800	43,790	65,685	340,494	0	969,030
Products tanker	5,000-9,999dwt	63,370	24,607	492,149	24,607	36,911	196,571	0	544,539
Products tanker	0-4,999dwt	24,985	8,354	167,085	8,354	12,531	77,489	0	184,872
Chemical tanker	20,000dwt+	205,570	78,217	1,564,333	78,217	117,325	637,654	0	1,730,859
Chemical tanker	10,000-19,999dwt	107,000	44,794	895,875	44,794	67,191	331,895	0	991,243
Chemical tanker	5,000-9,999dwt	67,145	28,493	569,858	28,493	42,739	208,275	0	630,520
Chemical tanker	0-4,999dwt	29,150	7,927	158,548	7,927	11,891	90,421	0	175,426
LPG tanker	50,000dwt+	299,350	109,374	2,187,475	109,374	164,061	1,575,000	0	2,420,335
LPG tanker	0-49,999dwt	68,895	19,272	385,442	19,272	28,908	362,469	0	426,473
LNG tanker	200,000dwt+	636,790	266,786	5,335,729	266,786	400,180	4,200,000	0	5,786,800
LNG tanker	0-199,999dwt	487,285	278,902	5,578,035	278,902	418,353	2,625,000	0	6,033,730
Other tanker		38,635	9,136	182,730	9,136	13,705	208,109	0	198,177
Bulk carrier	Other	568,265	340,961	5,114,413	340,961	511,441	3,740,490	0	2,932,808
Bulk carrier	200,000dwt+	460,790	293,792	4,406,881	293,792	440,688	1,494,090	0	2,527,081
Bulk carrier	100,000-19,999dwt9	279,810	200,000	3,000,000	200,000	300,000	921,750	0	1,720,320
Bulk carrier	60,000-99,999dwt	220,055	161,933	2,428,989	161,933	242,899	724,913	0	1,392,879
Bulk carrier	35,000-59,999dwt	148,840	127,647	1,914,712	127,647	191,471	490,317	0	1,097,972
Bulk carrier	10,000-34,999dwt	37,510	24,846	372,696	24,846	37,270	123,567	0	213,719
General cargo	0-9,999dwt	121,925	131,351	1,970,258	131,351	197,026	401,646	0	1,129,825
General cargo	10,000dwt+	67,650	71,955	1,079,326	71,955	107,933	222,855	0	618,929
General cargo	5,000-9,999dwt	25,060	13,363	200,449	13,363	20,045	82,547	0	114,945
General cargo	0-4,999dwt	150,710	134,543	2,018,149	134,543	201,815	496,477	0	1,157,287
General cargo	10,000dwt+	73,195	53,262	798,935	53,262	79,894	241,118	0	458,141
General cargo	5,000-9,999dwt	47,005	29,850	447,754	29,850	44,775	154,839	0	256,760
Othre dry reefer		70,445	103,429	1,551,432	103,429	155,143	232,059	0	889,653
Other dry special		127,710	98,749	1,481,235	98,749	148,124	420,707	0	849,399
Container	8,000TEU+	519,440		5,000,000			2,061,375	500,000	9,136,325
Container	5,000-7,999 TEU	410,420		4,029,522			1,674,435	395,060	7,430,935
Container	3,000-4,999 TEU	306,295		2,677,346			1,408,075	294,831	5,054,810
Container	2,000-2,999 TEU	229,350		1,694,391			1,269,060	220,766	3,327,960
Container	1,000-1,999 TEU	155,785		1,065,359			861,987	149,951	1,946,694
Container	0-999 TEU	87,900		374,515			486,382	84,611	556,599
Vehicle	4,000CEU+	333,770		1,373,832			1,846,863	321,280	1,388,892
Vehicle	0-3,999 CEU	180,855		765,189			1,000,701	174,082	509,304
Ro-Ro	2,000 CEU +lm	209,990		1,069,426			1,161,936	202,130	2,229,265
Ro-Ro	0-1,999 CEU +lm	56,145		197,674			310,661	54,043	377,088
Ferry	Pax only 25kn	10,855		256,155			60,075	10,451	440,384
Ferry	Pax only <25kn	12,910		126,661			71,457	12,431	194,902
Ferry	RoPax, 25kn	127,140		1,855,199			703,491	122,379	3,529,144
Ferry	RoPax, <25kn	67,835		496,021			375,362	65,298	773,119
Cruise	100,000+	583,130		4,736,229			3,226,638	561,306	8,672,840
Cruise	60,000-99,999	445,685		3,529,308			2,466,115	429,006	6,551,915
Cruise	10,000-59,999	230,370		1,417,753			1,274,721	221,750	2,841,380
Cruise	2,000-9,999	69,055		399,609			382,118	66,473	730,192
Cruise	0-1,999	18,345		71,019			101,525	17,661	129,771
Service	Research	9,708		37,298			185,507	24,037	
Service	Tug	1,627		42,526			57,204	7,412	
Service	Dredging	3,694		10,460			224,931	29,145	
Service	SAR	560		13,475			86,554	11,215	
Service	Workboats	9,550		5,449			179,274	23,229	
Service	Other	4,538		98,135			163,674	21,208	
Misc	Fishing	1,070		7,884			61,468	7,965	
Misc	Trawlers	717		101,357			94,959	12,304	
Misc	Other	12,296		105,645			158,498	20,537	

(2)ランニングコストの把握

次に毎年発生する個別排出削減技術のランニングコストについて把握する。便益は、2.3 で算出した各技術の省エネ量に対して燃料価格を乗じることにより算出される省エネ便益とする。ここで燃料価格は 500 USD/t-fuel を基本ケースとする。また、初期コストだけではなくランニングコストを要する技術として Low friction coating(再塗装)及び Air lubrication(装置駆動のための燃料消費)が挙げられる。前者については初期投資額の 10 %の費用が毎年発生するとし、後者については大型タンカーについて毎日 0.3~0.5 トンの燃料を消費するとした MEPC 61/INF.18 の記載に基づき、船体表面積(DWT の 2/3 乗)に比例した量で消費されるとした。

(3)正味現在価値の算定

2.4.2 で述べた手法を用い、表 2.4-4 で述べたデータに基づき、各技術の正味現在価値(NPV)を算出した。

2.5 限界排出削減コストの算定

2.3 で算出した個別技術の排出削減量、2.4 で算出した費用便益(NPV)に基づき、MAC を算出する。なお前述のように、NPV 算出に当たっては前述のように下記の 3 つのケースをおいた。

- ・ ケース A : 割引率 5 %、回収想定期間 20 年(社会資本の検討に近い数値)
- ・ ケース B : 割引率 10 %、回収想定期間 10 年(民間企業の投資判断に近い数値)
- ・ ケース C : 割引率 5 %、回収想定期間 10 年(ケース A に近いが船舶または技術の老朽化が進むと想定したケース)

2.5.1 対策技術毎の限界排出削減コスト算定

次に、個別の排出削減対策毎に、回収想定期間内に発生するコスト(設備コスト、運営コスト)及び便益を割引率を考慮して 2.4.2 で示したように累計した NPV を、回収想定期間内に達成する温室効果ガス排出削減量(単年度排出削減量×回収想定期間)で除することにより、排出削減対策毎の MAC(単位 USD/t-CO₂)を算出した。即ち MAC は回収想定期間内における正味コストの合計を回収想定期間における総排出削減量で除したものであり、期間内の排出削減コストの平均的な数値を表す。

新造船に対する技術導入の年間排出削減量及び MAC の算出結果について表 2.5-1 に示す。

表 2.5-1 新造船に対する技術導入の年間排出削減量及び MAC 算出結果

	Low friction coating	Stern duct-friction reduction	CRP	Stern duct-propulsion	Post-swirl system	Air lubrication	Opt. stern shape	WHR
NPV(ケース A)	12,349	3,007	12,061	8,020	7,705	13,922	7,552	12,125
NPV(ケース B)	3,666	795	1,499	2,480	2,266	3,468	2,337	1,084
NPV(ケース C)	7,146	1,624	4,642	4,729	4,414	7,282	4,455	4,519
年間排出削減量	11.7	2.8	14.8	6.5	6.5	14.1	6.2	16.1
回収想定期間の排出削減量(ケース A)	234.8	55.1	296.1	130.8	130.8	282.3	124.0	322.3
同、ケース B	117.4	27.5	148.1	65.4	65.4	141.2	62.0	161.1
同、ケース C	117.4	27.5	148.1	65.4	65.4	141.2	62.0	161.1
MAC(ケース A)	-52.6	-54.6	-40.7	-61.3	-58.9	-49.3	-60.9	-37.6
MAC(ケース B)	-31.2	-28.9	-10.1	-37.9	-34.6	-24.6	-37.7	-6.7
MAC(ケース C)	-60.9	-58.9	-31.4	-72.3	-67.5	-51.6	-71.9	-28.0

(単位 100 万 USD(NPV)、Mt-CO₂(年間排出削減量)、USD/t-CO₂(MAC))

(ケース A : 割引率 5%、回収想定期間 20 年、ケース B : それぞれ 10%及び 10 年、ケース C、5%及び 20 年)

一般的に技術の導入に先立ち投資コストが発生し、技術の便益は導入後に発生する。従って割引率が高いほど、また回収想定期間が短いほど NPV は減少し、(-NPV÷排出削減量)で計算される MAC は高くなる傾向がある。ここで表 2.5-1 を見ると、CRP についてはケース A(回収想定期間 20 年、割引率 5%)の MAC はケース C(同 10 年、5%)より低く算出され、このような傾向を裏付けているが、Low friction coating については逆である。これは、投資が回収できる期間が回収想定期間よりかなり短い場合、NPV において対策コストの影響が小さく、ほぼ省エネの便益により NPV が決定されてしまうことによる。この場合 CO₂ 排出削減量は回収想定期間に比例して増減するが、NPV は将来ほど割り引かれるために CO₂ 排出削減量ほど変化せず、そのため回収想定期間を短くすると MAC が減少することになる。

2.5.2 限界排出削減コストカーブの作成

以上で算出した個別排出削減技術の MAC を列記して図示することにより MAC カーブを作成する。図示の方法は、ほとんどの文献においては MAC が低い方から X 軸に単年度の排出削減量、Y 軸に MAC を示すことにより行うため、本調査でもこのような図示を行った。図 2.5-1～図 2.5-3 に、ケース A～C について図示する。なお MAC カーブは単年度に想定される排出削減量を達成するためのコストについて示唆を与えるものであるが、その達成に必要な追加的投資は 2008 年から開始する技術シナリオを採用している。このため、費用と便益及び CO₂ 排出削減量は回収想定期間全体にわたって計算される必要がある。具体的には、X 軸は個別排出削減技術による 2020 年の排出削減量(合計 79 Mt-CO₂/年)を表示しているが、Y 軸には 2008 年から 2020 年に建造

された全ての船舶の回収想定期間の終了までにおわたって合計した NPV を同期間における CO₂ 排出削減量で除した値を示している(表 2.5-1 参照)。

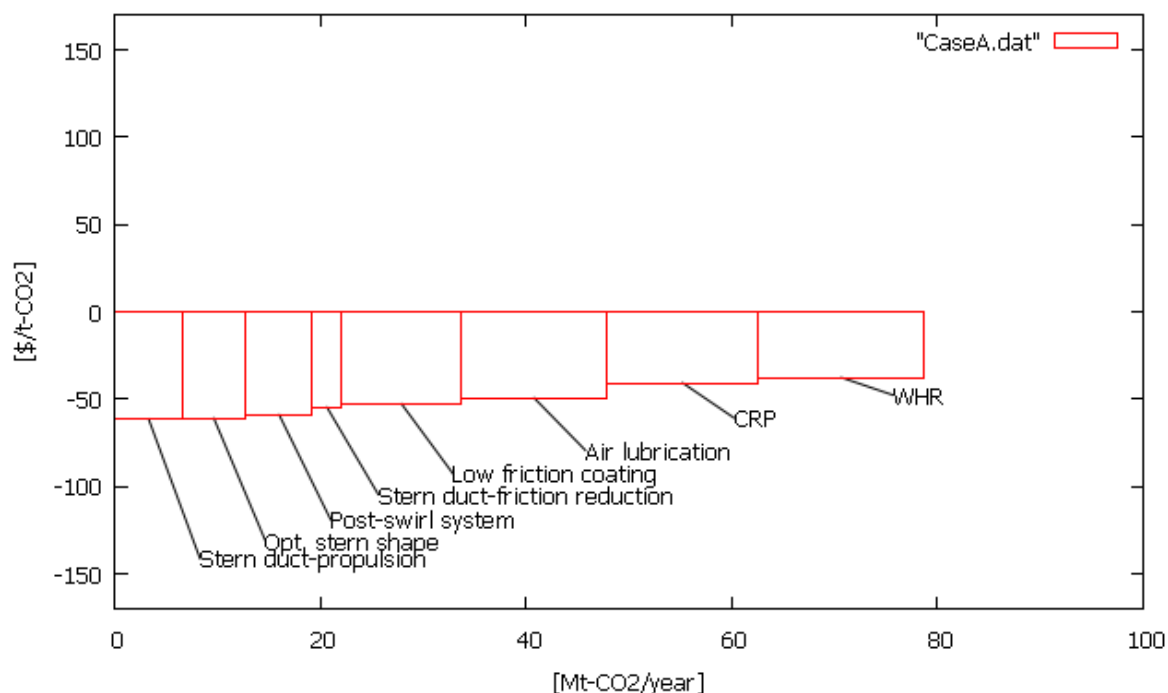


図 2.5-1 排出削減技術の MAC(新造船：ケース A(割引率 5%、回収想定期間 20 年))

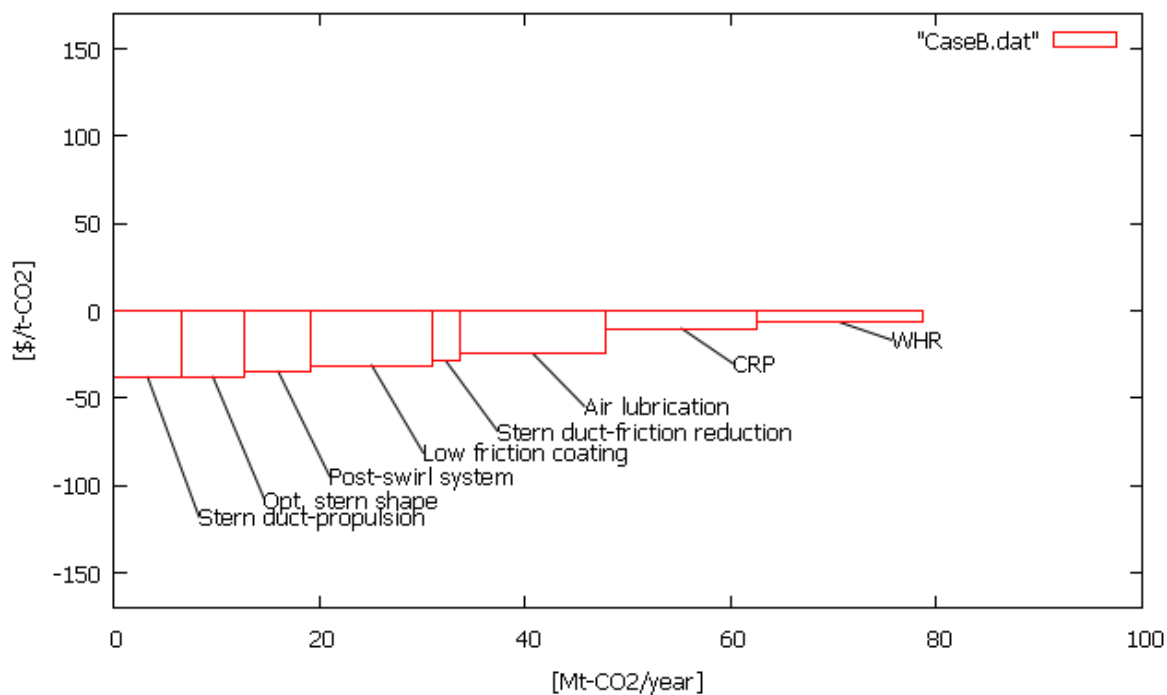


図 2.5-2 排出削減技術の MAC(新造船：ケース B(割引率 10%、回収想定期間 10 年))

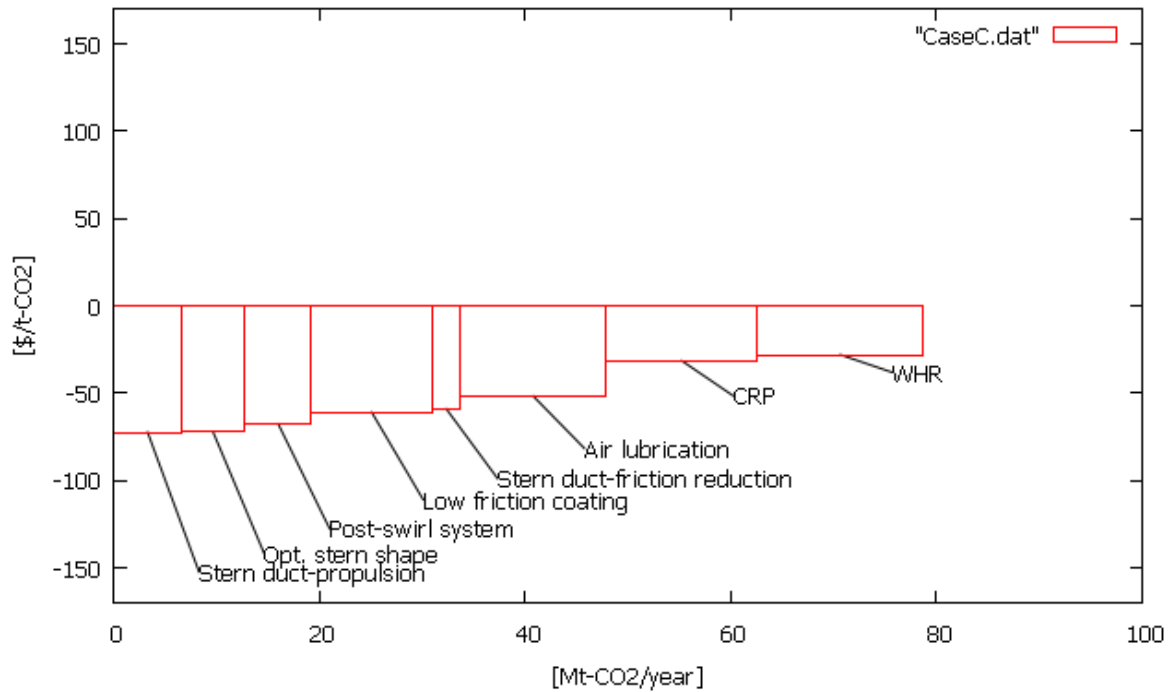


図 2.5-3 排出削減技術の MAC(新造船：ケース C 割引率 5%、回収想定期間 10 年))

2.6 油価変動による感度解析

MARPOL 条約 AnnexVI の改正により船用燃料中の硫黄分に関する規制が設けられ、油価が上昇した場合の算出について表 2.6-1 及び図 2.6-1 に示す。2020 年から油価が 1000 USD/t-fuel に上昇した場合、省エネの経済的便益が向上し、各排出削減技術の MAC はもともとの MAC に関わらず、平均的に 40 USD 程度低下する。逆に経済停滞等により 2020 年から油価が 100 USD/トンに低下するとした場合、MAC は 35 USD 程度上昇する。ただし多くの技術について依然としてマイナスの数値をとる。

表 2.6-1 油価変動による感度解析結果(USD / t-CO₂)

	Low friction coating	Stern duct-friction reduction	CRP	Stern duct-propulsion	Post-swirl system	Air lubrication	Opt. stern shape	WHR
ケース A)基本ケース(油価 500 USD/t-fuel)	-52.6	-54.6	-40.7	-61.3	-58.9	-49.3	-60.9	-37.6
同、2020 年から 1000 USD/t-fuel と なる	-98.9	-100.7	-86.7	-107.4	-105.0	-92.4	-106.7	-85.9
同、2020 年から 100 USD/t-fuel と なる	-15.6	-17.7	-4.0	-24.4	-22.0	-14.8	-24.3	1.0

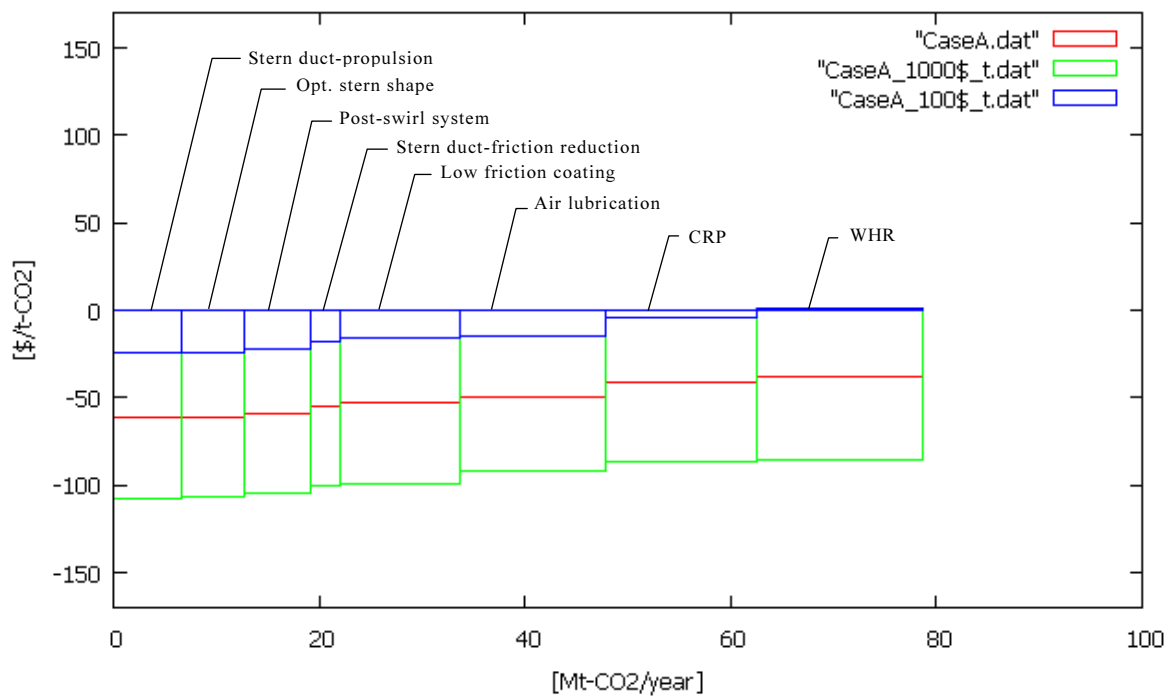


図 2.6-2 油価変動による感度解析結果(USD / t-CO₂)

3 限界排出削減コストに対する導入障壁の把握

(外航海運における導入障壁の把握)(3.1 節)

前章でほとんどの技術に対して限界排出削減コストがマイナスと算定されているにもかかわらず、現状では、これらの対策技術は新造船に積極的に採用されるには至っていない。このように短期的に導入が期待される CO2 削減技術について、コスト以外の面での何らかの導入障壁があることが想定される。

本調査では、CE Delft 社による調査及び船社ヒアリングに基づき、外航海運における導入障壁について整理した。

①CE Delft 社の分析は下記のとおり。

CE Delft 社からは、技術的対策の導入に対する障壁として下記が指摘された。

- ・ 船主と用船者の間のインセンティブの乖離がある。
- ・ 省エネ技術に関する独立したデータが不足している。
- ・ 技術の探索・評価に関するコスト(トランザクションコスト)が高い可能性がある。
- ・ 海運市場及び他の技術への投資の必要性からくる資金の逼迫が存在する。
- ・ ヤードは往々にしてこれら技術をリスク要因と捉え、導入に意欲的ではないほか、実施可能なヤードに制約がある。
- ・ 船主と用船者は(船員に比べ)船舶の燃料消費率に関して正確な情報を持っていない(依頼人-代理人問題)。
- ・ レトロフィットにおけるタイムラグの存在。
- ・ 過去、省エネに関する優先順位が低かった(ただし近年は変わりつつある)

②わが国船社に対するヒアリング結果

我が国の船社からは、2020 年までの温室効果ガス排出削減対策として想定される技術の導入に対する障壁として、以下が指摘された。

- ・ 燃料価格の上昇と運賃の低下という状況の中、省エネに関する意識は高い。
- ・ 実海域での性能が必ずしも保証されていない点、公海上での故障リスク
- ・ 船価の 10%程度以上に相当する多額の追加的投資を伴う対策もあり、船主の資金調達上負担の負担が大きい
- ・ 排出削減技術が導入された船舶を中古市場で売却する場合において、それらが導入されていない船舶に対して価格面で差別化できない場合が多い

最後の点については、今後新造船に対して EEDI が算出され、かつ開示される場合は、それが価格差別化に資することが期待される。また減速航行については、荷主の要請に対応するために高速航行を必要とする場合があることが指摘された。

CE Delft 社から報告された障壁の多くについては、日本の外航海運事業にも共通したものとなっている。ただし、我が国の船社においては、燃料関連支出が備船に伴う費用の大きな部分を占める外航海運事業において、省エネインセンティブは高いという見解が主流であった。

3.1 外航海運における導入障壁の把握

ここでは、CE Delft 社による調査及び船社ヒアリングに基づき、外航海運における導入障壁についてとりまとめた。

3.1.1 GHG 削減技術導入に対するコスト以外の障壁の解析

(1) 背景

外航海運に関する全ての Marginal Abatement Cost Curves(MACCs)の解析結果が、同セクターには GHG 大きな潜在的削減可能性があり、その実現可能性は MAC がマイナスと算定されることにより蓋然性が高いことが導かれている(Buhaug et al 2009; CE et al 2009; IMarEST 2010a; Eide et al. 2011; Yanaguchi et al 2012)。このような可能性は、MAC を算定していない他の論文においても支持されている(Devanney 2010)。MAC が負の値を取る理由として、下記を挙げられる。

① 将来的に燃料価格が上昇することを想定している。

いずれの調査も 2020 年あるいは 2030 年において、現在より高い燃料コストを想定している。つまり、現時点においては、MAC が正の値と取る技術についても、将来の計算においては負の値を取り得る。ただし、OPRF の計算によれば、2 章で検討したように、短期的に導入が期待される削減技術については、2020 年における燃料価格を 2020 年から油価が 100 USD/トンに低下するとした場合であっても、多くの技術は引き続き負の値をとり続けている。一方、将来燃料価格が上記設定のように減ずる可能性がある場合は、市場心理として MAC が正の値を取り得る削減技術を追加的に採用しにくいことは事実であり、このことが、MAC 計算結果と現実の市場心理の乖離(障壁)を産んでいる一つの要因となっている。

② ベースラインにおける効率向上が行われなことを想定している。

多くの調査が 2020 年あるいは 2030 年のベースラインの予測において、削減技術は現状レベルを凍結するとの仮定を置いている。この仮定は MAC の計算上には必要であるが、実際の市場心理としては①に記述したように、MAC が負の値を取る技術は市場原理として自然に普及が進むべきものであり、MAC 計算結果と現実の市場心理の乖離の別の要因となっている。

③ 技術の調査、評価、モニタリングに関するコストは含まれていない。

MAC(NPV)の計算上は、イニシャルコストとランニングコストのみが考慮される。それ以外に GHG 削減技術を最終的に採用するためには、船主あるいは造船所において、その技術に対する調査、評価、モニタリングに関するコストが別途に必要な場合がほとんどであり、これらは船用機器メーカーから提供されるイニシ

コストには多くの場合反映されていない。また、このような追加的なコストは新規技術の採用において高価となるが、その学習曲線についても、OPRF を含む全ての MAC 計算においては採用されていない。コストに関する学習曲線が採用されるのは、新規技術がある程度市場に普及した後の生産効率の向上による生産コストの学習のみである(OPRF 計算では不採用)。

④ コスト以外の障壁が考慮されていない。

最後にコスト的にはその技術を採用するべきであっても、その採用を拒む障壁の存在があげられる。本章ではこれをコスト以外の障壁と呼び、以下において詳細な検討を行う。

文献調査とインタビューによる調査によれば、コスト以外の主な障壁は、①インセンティブの乖離、②技術に関する信頼性のある情報の欠如、③依頼人－代理人問題、④資金アクセスおよび⑤ヤードの消極性などがあげられる。それ以外に、過去において海運会社が燃料節約によるコスト節減の消極的であること、既存船への技術適用に資するドックヤード不足があげられたが、最近の燃料高騰の状況を鑑みると、これらの項目は今後大きな障壁にはなり得ないと考える。

上記の⑤のうち、特に重要と考えられる①インセンティブの乖離及び②技術に関する信頼性のある情報の欠如については、更に詳細に検討を加える。

(2)文献調査及びインタビュー調査

文献として4件(CE 2009; IMarEST 2010a, Devanney 2011; Eide et al. 2011)を選択した、また、下記に示すフリートの異なる船社6社、ステークホルダー7機関²²を対象としたインタビューを実施した。なお、いずれに対しても匿名を条件にインタビューを行っている。船社に対しては、具体的な有効な削減技術についても尋ねたが、インタビューの過程において、回答が困難であるとの意思を表示する会社が多かったため、コスト以外の障壁のみについてインタビュー内容をまとめた。

²² ヤード、船級検査機関、海運エンジニアリング研究所、外航海運の業界団体、海運研究所、国際海運関連機関、先進技術メーカー

船社 6 社

1. Container ships and bulk carriers.
2. Container, Chemical, VLOC and PCTC ships and bulk carriers.
3. Cruise ships.
4. Heavy Lift and Multi-Purpose ships.
5. Bulk carriers, Multi-Purpose vessels and RoRo carriers.
6. Tankers.

ステークホルダー 7 機関

1. A shipyard, mainly for cruise liners.
2. A classification society.
3. An institute for maritime engineering.
4. An international shipping federation.
5. A maritime research institute.
6. An independent international shipping association.
7. A manufacturer of an innovative technology.

a. インセンティブの乖離

インセンティブの乖離は最も普遍的に特定された障壁である。船主は燃料効率向上技術に投資を行っても、燃料効率向上の恩恵はオペレーターが享受するために、両者は別の経営形態である場合が多く、技術投資のインセンティブが働かない(CE et al., 2009)。売船を行う市場においても、このような削減技術を適用した船舶に対して、追加的な価値が認められないことも同様である(IMarEST 2010a). Eide et al. (2010)。このようなインセンティブの乖離は、新規技術の導入に対する障壁という形で顕在化しているが、もっと一般的に外航海運セクターにおける「省エネを推進する主体が存在していないこと」と位置づけることもできる。両者が同一の場合もかつては燃油調整料 (Bunker Adjustment Factor) 等の適用により価格転嫁が可能であったため、省エネへのインセンティブが働かなかった。このように、商慣行において省エネに対する積極性が見られないことがこの乖離の一要因になっているとも言える

Z.S. Zannetos (1967)によると、1950 および 1960 年代のチャーターレートは、船舶の大きさ、スポット単価、及び航海期間のみで規定されるため、この間に消費される燃料消費量はチャーターレートに大きな影響を及ぼしていないとされている。

シップブローカーによって決定される近年のチャーターレートについても、運航効率や燃料消費量はその主な決定要因となっていないことが記述されている(CE et al., 2009)。

他方で、Wijnolst と Bartelds(1995)は、1990 年初頭のバルカーのチャーターレートとほとんどすべてのチャーターには、それらのサンプルの前の 1990s.のバラ積船の定期用船チャーターレートと、1 日あたりの燃料コストの合計には明確な相関関係があると述べている。また、個人的な経験としながら、Devanney(2011)は、1980 年代から 2005 年までのタンカーの定期用船レートが燃料消費量を考慮に入れたと述べている。

このような二つの矛盾する主張は、Veenstra and Van Dalen (2011)によっても指摘されている。チャーターレートと船舶の燃料消費率の間には相関がないという結果と、あるという結果の双方がある。彼らは、1997 年と 2005 年の用船契約のデータベースを分析した結果として、船主は設計船速よりも低い船速、設計燃料消費量よりも高い燃料消費量を（安全側を見て）契約書上に保証することが挙げられている。また船舶に対する需要が高い時期には、そうでない時に比べて船主は船舶のエネルギー効率についてより積極的に提示することが示された。これはチャーター需要が安定しており、自らの保有する船舶が再度チャーターされる可能性が高い場合、保証した燃料消費率を上回る評価のリスクが低いことを示している。現時点でもチャーターレート部分的には燃料消費率あるいは運航効率を反映しているが、更に正確な同率を反映することで、一般的には船主と傭船社の両者にインセンティブが付与されるが、両者が納得する割合を規定することは困難であると解析している。

なお、近年の燃料高騰によって、チャーターレートあるいは傭船形態そのものが変化しているかを明確に示す文献はなかった。

インタビューの結果は、「インセンティブの乖離」を認め、その存在を裏付けるものであった。短期的に傭船を行う場合、傭船者は船舶の燃料消費率に対する関心が低いという意見が多かった（ただし長期契約の場合はこの限りではない）。他方、幾つかの船社は、傭船前に船主に対して対象船舶の燃料消費率あるいは運航効率に関する情報を求めているとのことだった。船主側から見た場合、契約時点で一定の効率を保証することは、運航形態が不明なためリスクがある。今後は、運航形態が不明であっても EEDI を活用することによって、船主と傭船社間の利益の分配率の調整がはかられることが期待される。

このようなインセンティブの乖離は他の運輸部門では大きな障壁ではない。自動車、鉄道部門においては、所有者と運航者は同一の経営形態であることが多く、国際航空においては近年リース形態が増えてきているもの、その契約形態は機材のみがリースされランニングコストは全てオペレーターが負担する形を取る場合が多い。更に、主に安全面の観点から、レトロフィッティングに積極的であり、主機換装も日常的に行われているため、新規技術の導入に障壁は少ない者と考えられる。

b. 技術に関する信頼性のある情報の欠如

独立データの不足はインセンティブの乖離に次ぐものである。IMarEST (2010a)は、新規技術に対して信憑性のある情報が欠如しており、かつ 技術が適用された際の失敗事例だけが強調されている点をあげている。インタビューにおいてもこれらは確認された。独立した研究機関による評価結果に対しても、過去に同様な技術を用いて失敗した経験をもつ船主あるいはオペレーターは懐疑的な態度を取ることが多い。もちろん、背景には c. 項で示すとおり信頼性のあるデータを得るためには多大のコストが必要となるために、研究機関の独立性を担保できていないこともあげられる。

信頼性のある技術データについては、現時点ではメーカーに依存するしかなく、再現性が低い等の問題も生じている。リスク回避型の市場においてこの問題は重要であり、また先行者は知見の共有には積極的ではない。

c. トランザクションコスト

前項で示した省エネに関して信頼のある情報を得るためのコストは、長い試験機関、正確な燃料消費量および平均化された運航形態を必要とするため、非常に高額である。大規模に導入されていない技術については尚更である。また、このようなコスト

d. 資金面の制約

資金面での制約を生じる要因として、下記が挙げられる。

- ・ レトロフィット技術に対して短期間の投資回収を要請する投資評価手法
- ・ 燃料価格の不確実性を織り込むために低い燃料価格を設定する（即ち技術導入の効果を安全側に立って評価する）投資評価手法

また、インタビューへの回答としては以下が挙げられた。

- ・ とりわけ小規模の船主にとって、金融機関からの融資が困難となる。また金融機関技術に対して未成熟と評価する（用船者との協力により金融機関の信頼を勝ち得る場合もある）。
- ・ バラスト水処理装置や NO_x、SO_x 対策等、他の支出要因の存在。
- ・ 運賃の低下と燃料価格の上昇による資金的逼迫

e. 依頼人－代理人問題

依頼人-代理人問題とは、依頼人の利益のために動くはずの代理人が自らの利益を優先させることを指す。その意味で船員と雇用主の間にもインセンティブの乖離が見られる。天候等の変化に対応するための燃料の余裕を見たり、申告よりも少ない燃料で

運航することにより利益を得る等の理由により船員は燃料消費を多めに報告することが多く、雇用主であるオペレーターにおいて船舶の燃料効率を正しく見積もることが難しくなっている。

f. ヤードの消極性

ヤードは標準的な設計を提供するため、先進的な設計の導入・保証には消極的となる場合がある。船主との協力関係の構築により解決する可能性があり、またいくつかのヤードは先進的技術の導入に非常に積極的である。近年、造船の発注が低迷する中で先進的な技術の導入に対して積極的となることで競争力を上げるべきである。

g. タイムラグ

技術の導入は船舶がドック入りするまで行われなため、費用効果的となるまで成熟してから実際に導入されるまでの間に時間を要する。

h. 省エネに対する優先順位がこれまで低かったこと

過去海運業界では、燃料価格が安価であったことから、コスト削減の検討は主として船員コストに向けられてきた。このため船社や関係者の間で燃料効率向上技術を評価するノウハウが蓄積されてこなかった。また他の文献では、燃料効率向上に対する優先度が低かったことから、本業界では燃料効率向上に対して保守的であると指摘している。

インタビューにおいても、省エネに対する優先順位がこれまで低かったことが確認された。しかし近年はこの傾向が変わりつつある。

i. 結論

費用効果的な省エネ技術の導入に対する主要な障壁は下記のように要約される。

- ・ 船主と用船者の間のインセンティブの乖離がある。
- ・ 省エネ技術に関する独立したデータが不足している。
- ・ 技術の探索・評価に関するコストが高い可能性がある。
- ・ 海運市場及び他の技術への投資の必要性からくる資金の逼迫が存在する。
- ・ 最近まで船主・オペレーターの双方と省エネに高い関心を持っていなかった。
- ・ ヤードは往々にしてこれら技術をリスク要因と捉え、導入に意欲的ではない。
- ・ 船主と用船者は（船員に比べ）船舶の燃料消費率に関して正確な情報を持っていない。
- ・ レトロフィットにおけるタイムラグの存在。
- ・ 過去、省エネに関する優先順位が低かった（ただし近年は変わりつつある）

(3) インセンティブの乖離について

燃料消費率の向上の便益の帰属は複雑な問題である。船主は用船者と比べて船舶の燃料消費率について熟知しており、情報の非対称性があるが、燃料消費率は航行状況によって大きく左右される。このため高い燃料消費率の便益は船主と用船者の間で共有されるが、どのように共有されるかは多様な要因が介在する。

船主とオペレーターが締結する用船契約において、用船者は契約書において保証された船速と燃料消費が実現できなかった場合（保証速度より遅い速度でしか運行できない、保証燃料消費以上に燃料を消費する場合）に補償を求めることが出来る。しかし用船契約においてその場合に関する手続きが掲載されていないものもあり、その場合の紛争を避けるために船主は設計船速よりも低い船速、設計燃料消費量よりも高い燃料消費量を（安全側を見て）契約書上に保証することがある。

3.1.2 特定技術に着目した場合の障壁

ここでは、特定の GHG 削減技術に着目して、その技術的評価と広範な普及を阻む障壁についてインタビューを中心にして紹介する。

(1) 技術の評価

図 3.1-1 に抵抗低減技術と推進効率の向上技術について、その採用状況についてインタビューした結果を示す。これらの回答は、既存の調査結果をほぼ同一であり、操舵系の技術及び空気潤滑を含めた抵抗低減技術については、現時点でも厳しい評価を下している会社がある事がわかる。

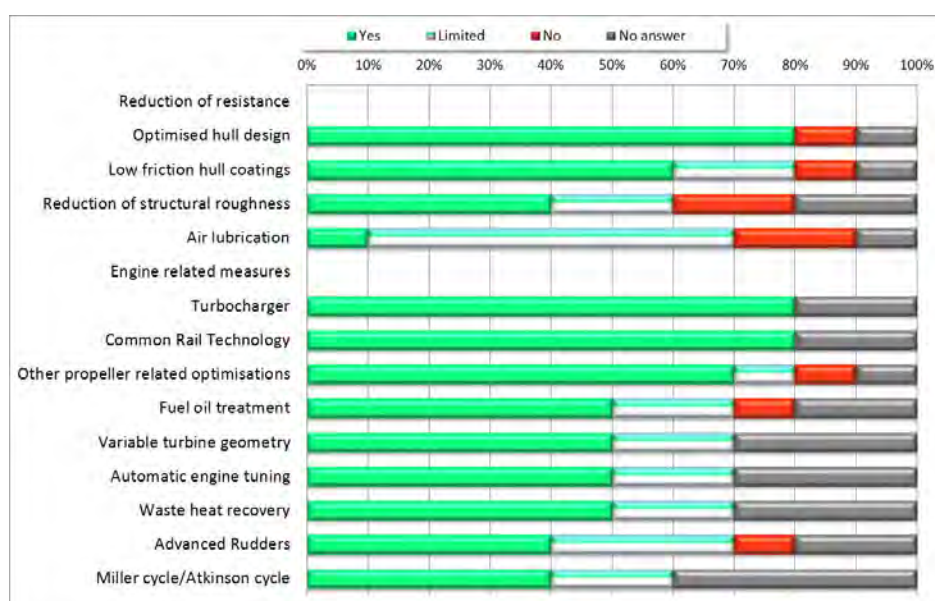


図 3.1-1 抵抗低減技術と推進効率の向上技術の採用状況

図 3.1-2 にその他の削減技術の採用状況についてインタビューした結果を示す。これらの回答はこれらの回答は、欧米の RORO 船や客船会社を対象にしていることもあり、日本国での意識より多くの採用が見られる。たとえば、SOx 等と同時に CO2 を回収する技術についても、二つの船主が陸上のパイロット施設を利用しての回収に取り組んでいると回答している。

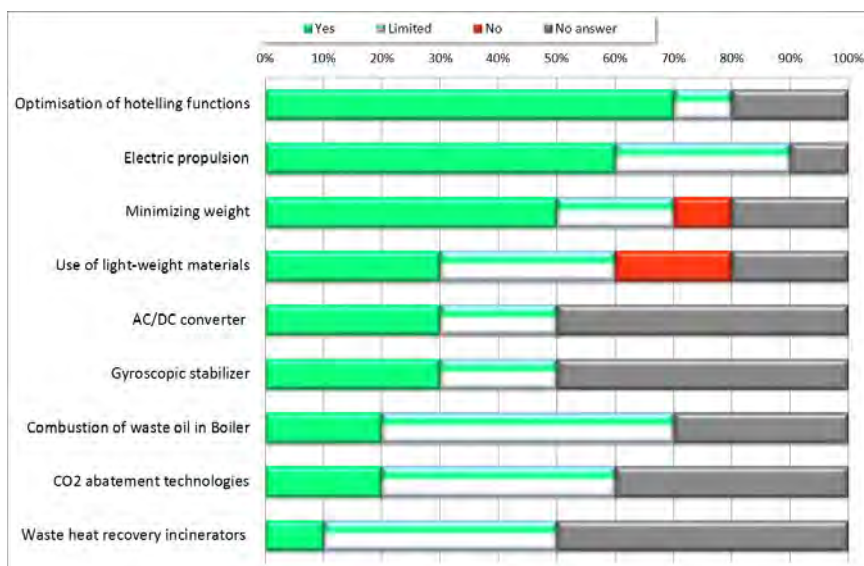


図 3.1-2 その他の削減技術の採用状況

図 3.1-3 に代替燃料の採用状況についてインタビューした結果を示す。これらの回答は、欧米の RORO 船や客船会社を対象にしていることもあり、日本国での意識より、代替燃料特に陸電の使用が採用されていることが注目される。なお、1 隻でも採用している場合は、Yes の回答として集計していることに留意されたい。

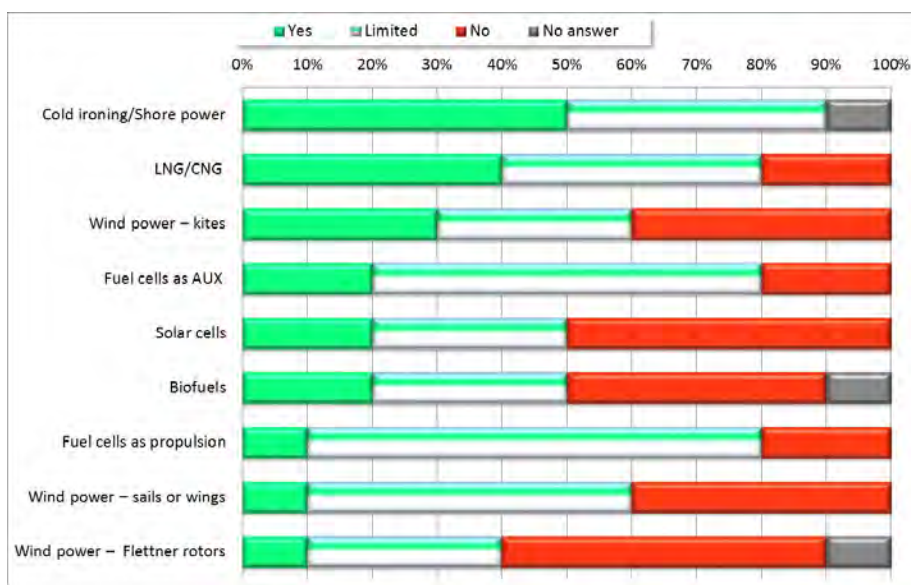


図 3.1-3 代替燃料の採用状況

図 3.1-4 に運航上の削減技術の採用状況についてインタビューした結果を示す。これらの回答は、既存の調査結果をほぼ同一であり、運航速度の最適化は、インセンティブの乖離の問題とは別に全ての会社で実施していることがわかる。

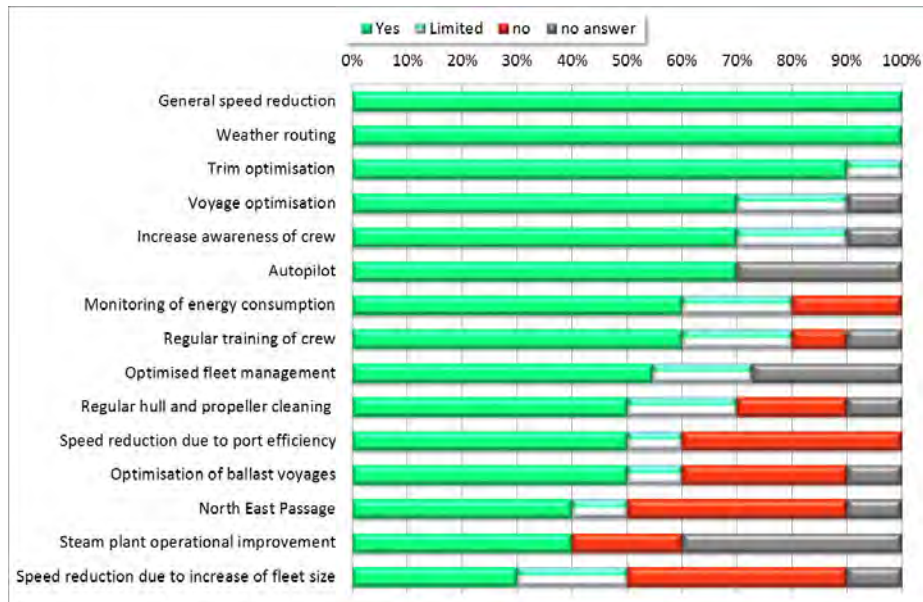


図 3.1-4 運航上の削減技術の採用状況

(2) 技術毎の障壁の解析

表 3.1-1 から表 3.1-5 に(1)で示した各技術の導入に対する障壁としてあげられた点を列記した。

既に述べたように、独立データの不足を指摘する声が多い一方で、操舵系に関しては安全性や冗長性との兼ね合いを懸念する意見を多くあり、船舶の使用形態の特殊性がうかがわれる。他方で、技術的には比較的導入の障害が少ないと考えられる陸田使用については、業界全体の標準化が進んでいないこと、代替燃料については燃料供給インフラが整備されていないことが障壁としてあげられている。航路と速度の最適化に対する沖待ちが障壁としてあげられことから、船舶単独で実行できることは限られており、港湾側・荷役側の協力が不可欠であるが、この場合もインセンティブの乖離が発生することに留意する必要がある。

表 3.1-1 抵抗低減技術の導入に対する障壁

対策	障壁の概要
船体設計の最適化	<ul style="list-style-type: none"> 船体構造の変更を望まないヤード側が導入障壁となっている。
低摩擦塗装	<ul style="list-style-type: none"> 独立データの不足。 塗料そのものではなく塗装工程に伴うコストを要する。 中古船価格に影響がない。 バイオフィウリングの増加の可能性。
水流最適化	<ul style="list-style-type: none"> Wartsilaによれば Transverse thruster による水流最適化は省エネ率 5% で投資回収 1 年とされているが、船体設計の変更や認識の低さが障壁となるほか、水面に近いために空気を閉じ込め、出力低下、騒音、振動の原因となる。
空気潤滑	<ul style="list-style-type: none"> 複雑性、利用可能な船体の制約、波が大きい場合の性能低下、不確実性が認識されている。 レトロフィットの場合の日数ロス(14 日)。 全体的な関心の低さ。

表 3.1-2 推進効率向上関連技術の導入に対する障壁

対策	障壁の概要
エンジン関連	<ul style="list-style-type: none"> ターボチャージャー、コモンレール技術等については、船主以外の認識が低い。 排熱回収・先進的な舵については、コストが高く、対象船種が制限されると考えられている。
プロペラ関連	<ul style="list-style-type: none"> コストは高いが障壁は低いと思われるが、CRP の場合メンテナンスコストの高さ及び故障リスクがある。 一般にプロペラと舵に関する改変は非常にセンシティブな問題である。
排熱回収	<ul style="list-style-type: none"> 想定される省エネ率は 10% 程度で、投資回収年数は数年程度。 主要な障壁は投資額で、9000TEU コンテナ船で 500 万ユーロとする意見もあった。 また、対象船舶が限定される。
燃料油調整	<ul style="list-style-type: none"> 省エネポテンシャルは 2% 程度と考えられている。 最大の課題はエンジンメーカーの保証対象から外れることである。 重油の電解処理（粘性の低下）は海運では認知されていない。
先進的な舵	<ul style="list-style-type: none"> 高速船等には導入されており、2%～5% の効率向上が報告されているが、高価であること、技術リスクがあること、メンテナンスコストが高いことが認識されている

表 3.1-3 その他の GHG 削減技術の導入に対する障壁

対策	障壁の概要
居住部分の省エネ (hotelling function)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 空調・照明の省エネで、客船では特に有効。SEEMP の一部となる。
電気推進	<ul style="list-style-type: none"> ・ 客船にのみ適用される。 ・ 長距離・固定された航路では解決策とならない。 ・ 想定排出省エネ率は 6~8%
軽量素材の利用	<ul style="list-style-type: none"> ・ 客船ではポテンシャルが大きいですが、貨物船では排水トン数の 70~80% を貨物が占めることにより効果が限定的であると考えられ、また耐久性・安全性の懸念から限界がある。
直交変換	<ul style="list-style-type: none"> ・ 客船のようなベース電力需要の高い船舶で有効。 ・ 全体的には認知度は低い。
廃油燃焼	<ul style="list-style-type: none"> ・ コストの問題がある (汚泥を燃焼させるコストは廃棄するコストの 10 倍と言われている)。 ・ 規制上認められない地域がある。
CO2 回収処理	<ul style="list-style-type: none"> ・ 一種のスクラバーであり、効率向上には資さないが大気中への CO2 排出削減は削減される。技術への信頼と海運業界の保守性が原因。
焼却施設からの排熱回収	<ul style="list-style-type: none"> ・ 焼却施設を保有しない船舶もあり、認識が低い。

表 3.1-4 代替燃料・エネルギー源技術の導入に対する障壁

対策	障壁の概要
陸電供給	<ul style="list-style-type: none"> ・ 最大の障壁は電源の標準化がなされていないことである。次いで船主は (環境意識から) 再生可能エネルギー電源を要求するが、その供給は保障されていない点が挙げられる。 ・ 既に高効率の発電機が搭載されているため、非生産的とする意見もある。
LNG、CNG	<ul style="list-style-type: none"> ・ 造船コストの上昇は障壁とはならないが、LNG、CNG 供給インフラ不足が課題。
燃料電池	<ul style="list-style-type: none"> ・ 将来的な技術 (補機としての実用可能性は 5 年先だが主機としては 30 年先)。 ・ コストも高い。
太陽電池	<ul style="list-style-type: none"> ・ 上面面積の大きい一部船舶 (フェリー等) にのみ適用可能だが、エネルギー密度が低い。
バイオ燃料	<ul style="list-style-type: none"> ・ 供給はまだ少ない。また環境上の評価も高くない (インタビューした客船会社はコストと悪評により利用中止)。
風力	<ul style="list-style-type: none"> ・ 長期的対策として認識。

表 3.1-5 オペレーション技術の導入に対する障壁

対策	障壁の概要
減速航行	<ul style="list-style-type: none"> 省エネポテンシャルは大きいが用船契約、燃料価格に依存する。 用船契約への反映が必要。
ウェザールーティング	<ul style="list-style-type: none"> 広く受け入れられており障壁はないが、地域ごとに効果は異なる。
トリム最適化	<ul style="list-style-type: none"> 広く受け入れられており SEEMP にも含まれる。障壁はなく、4%～10%までの省エネが可能とされている。
航路最適化	<ul style="list-style-type: none"> 気象・海象による最適化は広く受け入れられており事業者によれば2%程度の省エネが可能。 障壁は用船契約と沖待ち（port mentality）
船員の訓練	<ul style="list-style-type: none"> 効率、安全、排出に基づくインセンティブ雇用。ポテンシャルは20%にも上り障壁はない。
自動操舵	<ul style="list-style-type: none"> 障壁はなくポテンシャルは高い。SEEMP に含まれると回答した船社もあった。
エネルギー消費モニタリング	<ul style="list-style-type: none"> インタビューした船社中2社が採用。船員の意識向上に有効。障壁はないが計器費用が高いと思われる。
最適フリート管理	<ul style="list-style-type: none"> 3社が採用しているが情報不足のため障壁が特定できない。
船体・プロペラ洗浄	<ul style="list-style-type: none"> インタビューした船社中2社が採用。塗料の剥離によるバイオサイドの放出や外来種の移入が課題。
停泊の最適化による減速	<ul style="list-style-type: none"> インタビューした船社中2社が時折採用。用船契約に依存する。
バラスト航行の最適化	<ul style="list-style-type: none"> 認知度は高い。商慣行が唯一の課題。
北極海航路	<ul style="list-style-type: none"> 気象条件、ice class、砕氷船のコスト、ロシアの許認可が課題。
蒸気プラント最適化	<ul style="list-style-type: none"> ボイラのある船舶のみに適用。蒸気推進自体が稀となっている。
船体大型化による減速航行	<ul style="list-style-type: none"> インタビューした船社のうち導入した船社はいない。 ポテンシャルは高いが、燃料は船価に比べてまだ安価すぎる点が障壁となっている。
エネルギーパフォーマンスモニタリング	<ul style="list-style-type: none"> トリム最適化等も含めた総合的なパフォーマンスモニタリング。 費用は50,000～80,000USD/隻であり、これに加えて年間利用料が発生する。省エネポテンシャルは2～4%とされているが、それ以上である。
大型化	<ul style="list-style-type: none"> 船体抵抗の低減、積載効率の向上により効果は大きい。 Maersk Triple-E クラス（400m、18,000TEU）はアジア－欧州を航行している平均的な（コンテナ）船に比べて50%の排出削減となる。

3.1.3 GHG 削減技術導入に対するコスト以外の障壁の定量化

ここでは、コスト以外の障壁の定量化について考察してみたい。既に述べたように DNV、IMarEST および CeDELFT の 3 文献においては、削減技術の普及率の設定はこのようなコスト以外の障壁を考慮しているとは言いがたい。別の言い方をすれば、技術の普及率を過大評価していることになる。そこで CeDELFT としては、下記の 3 つのシナリオで MAC カーブの試算を行った。この際以下の点を考慮している。

2 章において、OPRF としては、独立データが十分に用意できない技術を採用していないことに類似している。

1. インセンティブの乖離については、運航会社にもたらされる利益配分率を変更することで反映させる。中位のシナリオでは、利益は船社とオペレーターに折半されるが、高い障壁のシナリオでは、船社には 25% しか配分されず(用船料はそのまま)、残りはオペレーターの利益となる
2. 独立データの不足は、対象技術を絞ることで対応。
3. トランザクションコストは、定量化が困難であるため、トランザクションコストを支払えない結果として、流通チェーンにおいて減速航行が実施できない定期運航会社が存在すると仮定。

表 3.1-6 コスト以外の障壁を考慮した MAC の考え方

	Central barrier scenario	Low barrier scenario	High barrier scenario
Split incentive: share of benefits reflected in time charter rates	50%	25%	75%
Lack of independent data	Air lubrication, advanced rudders, wind power are not available	Air lubrication, advanced rudders, wind power, applied to 50% of the relevant ships	Air lubrication, advanced rudders, wind power, waste heat recovery are not available
Transaction costs	50% of the non-container ships are not able to slow down	25% of the non-container ships are not able to slow down	75% of the non-container ships are not able to slow down

これらの3シナリオと元のシナリオ間の差異を、CeDELFTモデルで計算した結果を、図 3.1-5 に示す。ベースの MAC カーブは CeDELFT のモデルを用いた 2030 年を対象としたもの、また燃料価格は USD 900 per metric ton、割引率は 10%である。ベースのシナリオでは、費用効率的な削減ポテンシャル(X軸と交点)は全体総量の約 32%に達する。他方、中位バリアシナリオでは、削減ポテンシャルは 24%まで減少するが、低位・高位バリアシナリオでは、それぞれ 28%と 17%まで減少している。

ごく初期の MAC と高いコストを必要とする MAC のカーブの型には影響がないが、中盤の技術の普及率とそのコスト配分に影響が特に出ている。中盤の技術では MACC の上方移行し、その結果、費用効率的な削減ポテンシャルの大幅な減少を導いており、障壁の導入が多くの技術の原価を押しあげていることがわかる。

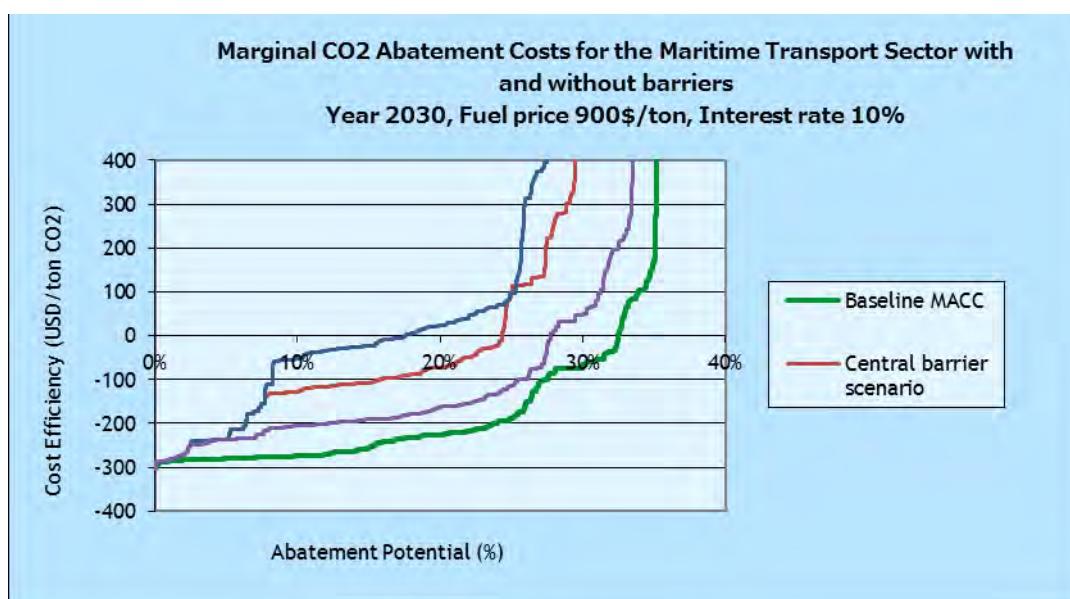


図 3.1-5 コスト以外の障壁を考慮した場合の MAC カーブへの影響

3.1.4 GHG 削減技術導入に対するコスト以外の障壁を下げるための方策

表 3.1-7 にインタビューなどから得られた GHG 削減技術導入に対するコスト以外の障壁を下げるための方策をまとめた。インセンティブ乖離の問題は、不服申し立て時の解決費用の低減も含め、既存の契約形態や商慣習の変更を伴う者が多い。

これに対して独立データの不足については、新造船に対する EEDI の強制化が、依頼人－代理人問題については、SEEMP の強制化が今後その克服に対してよい影響をもつことが期待できる。このことは間接的にヤードの消極性や航路依存性の解消にも繋がるとともに、独立データを用意できる造船所に対しては新たな競争力を付けることにも繋がると考えられる。

インタビューによると、EEDI の公開とその比較が定期用船市場の透明性を増加させることに期待していると同時に、EEDI と EEOI の間に直接のリンクがないために間違った使われ方をする可能性を指摘する声もある。同基準が比較的容易に操作できることから、それが測定基準として市場で誤解無く使われるためには長くかかると考えるステークホルダーもいた。別の考え方として、EEDI をある限界の中で信頼できるとするならば、これまでよりは確実に透明性をあげることができるというものである。EEDI と実際の排出量あるいは EEOI との関係の必要性がましていることを考慮した場合、これらの 2 つの視点はそれほどかけ離れたものではない。

また、独立データの不足による障壁は、主として新しいか改良された技術に関連する。Rogers (2003) は革新的技術の成功には 5 つの要素があると指摘している。

1. 既存技術と厳密に比較された新技術の相対的優位性
2. 既存の価値観と習慣を考慮した上での技術の互換性
3. 技術の簡単さと使いやすさ
4. 多くの危険を冒さずに革新的技術を実験・体験できるやりやすさ
5. 結果(相対的優位、互換性、および使いやすさを含む)がモニター可能である程度

インタビューの結果によると、これまでの革新的な GHG 削減技術は特に最後の 2 つの項目に欠けているのは明確である。まず、測定を開始前に、船主は、投資しなければならない、そして、船が賃貸していた状態で技術を試行するためには、追加搭載及び潜在的な除去作業を考慮すると、船主は通常操作を妨げる新技術の試行に積極的でない。近年の燃料代の高騰によって、船主と造船所が協力して技術の試行を行う例が多くなっている。また、革新的技術の開発だけでなく試行についても公的資金を投入することは一つの解決方法としてあげられる。

表 3.1-7 障壁と将来におけるその克服のための方策

障壁の種類	重要性	克服のための方策
インセンティブの乖離	重要	<ul style="list-style-type: none"> ■ 不服申し立て時の解決費用の低減。 ■ 船舶の効率に関する情報伝達の改善（高効率船ほど高いチャーターレートを確保できるようにする）。 ■ 燃料コストを（速度で補正の上）チャーターレートに含める。
依頼人－代理人問題	不明瞭	<ul style="list-style-type: none"> ■ 燃料消費の自動モニタリングによる燃料消費量の誤報告の回避。 ■ 燃料節減に対するインセンティブを与えるような雇用契約。
独立データの不足	重要	<ul style="list-style-type: none"> ■ 独立した試験の実施。 ■ メーカーによる一定レベルの性能保証によるリスク共有。
ヤードの消極性	現在、新造及び修理用のヤードが余剰、	<ul style="list-style-type: none"> ■ 人員の訓練。 ■ 既に開発された先進的な設計の受容（ヤードをパートナーとして求めている設計者もいる）。
ヤードのキャパシティ	同上	<ul style="list-style-type: none"> ■ ヤードが自ら先進的な技術に基づく船舶を製造する（シンガポールのヤードが実施中）。 ■ バラスト水処理装置の搭載等でヤードの能力が使い果たされる可能性がある（とりわけ大型船）。従って修理用ヤードは増設される必要がある。
資金アクセス(運賃の下落、燃料価格の上昇)	現状課題となっている	<ul style="list-style-type: none"> ■ 外的な経済要因に起因するため、克服のための方策は分析していない。
効率の航路依存性	エネルギー効率を勘案したチャーターレートが標準的になると課題となる。	<ul style="list-style-type: none"> ■ 船主と用船者とが燃料消費量の計算を調和させる必要がある。
低い環境意識	重要	<ul style="list-style-type: none"> ■ 船員の訓練及び報奨制度等が望ましい。

4 既存船への適用、オペレーションへの適用、新造船における中・長期的な排出削減対策 に対する適用を考慮した限界排出削減コストカーブの算定

2章で行った新造船に対する短期的な技術的対策の分析に加え、既存船に対する技術的対策のレトロフィット、技術的対策以外のオペレーションの変更、及び中長期的に想定される排出削減対策の中から代表的なものを抽出し、排出削減量及び MAC カーブの算定に関する検討を行った。

(既存船に対する排出削減技術導入による限界排出削減コストカーブの算定)(4.1 節)

本調査において「既存船」とは、2008 年以前に建造され、2020 年時点において就航している船舶と定義している。2020 年において既存船は隻数ベースでは全船舶の 46 %、温室効果ガス排出量ベースでは 36%を占める。既存船について、その船腹量の 1/5 ずつが 5 年に一度ドック入りすると想定し、各年度にドック入りする船舶に対して、新造船と同様の率で排出削減技術が導入されるとして、排出削減量及び限界排出削減コスト(MAC)を算出した。

既存船に対する対策は、新造船対策に比べはるかにコストがかかること、導入された技術のパフォーマンスも新造船への導入に比べて劣る場合が多いこと等を踏まえ、各技術の排出削減量、対策コストを想定した結果、**既存船に対する短期的な技術的対策による排出削減量**は約 56 Mt-CO₂ と既存船のベースライン排出量の約 10.4%と算出された。また、新造船及び既存船を併せた 2020 年のベースラインの総排出量は 1,463 Mt-CO₂ であり、これに対する新造船への技術的対策の導入による排出削減率は 3.8 %と算出される。

また、**既存船に対する MAC** は全体的に新造船より悪化(上昇)し、特に二重反転プロペラ(CRP)、船尾形状最適化(Optimal Stern Shape)、熱回収技術(WHR)については数百 USD/t-CO₂ に上る高い MAC が計算されている。算出結果を以下に示す。

	Low friction coating	Stern duct-friction reduction	CRP	Stern duct-propulsion	Post-swirl system	Air lubrication	Opt. stern shape	WHR
年間排出削減量	14.2	1.5	9.0	3.6	3.6	13.4	2.7	8.2
MAC (ケース A)	-50.7	6.1	358.7	-38.2	-22.2	-6.1	633.0	199.3
MAC (ケース B)	-27.4	59.7	547.4	-4.0	19.1	35.0	961.7	357.5
MAC (ケース C)	-53.0	65.6	769.0	-23.0	9.1	34.6	1,319.1	451.4

油価変動に対する感度解析では、二重反転プロペラ(CRP)、船尾形状最適化(Optimal Stern Shape)、熱回収技術(WHR)についてはどの油価でも経済性の大幅な向上は見られなかったが、空気潤滑(Air Lubrication)などの、もともと標準ケースでゼロコストに近い技術については、油価によって MAC がプラスにもマイナスにも変動する結果となり、レトロフィットも可能な技術として位置づけられる。

(船舶のオペレーション対策導入による限界排出削減コストカーブの算定)(4.2 節)

MEPC62 で策定された Ship Energy Efficiency Management Plan(SEEMP : MEPC 62/5/4 Annex 2) には、各種の船舶オペレーション上実施可能な排出削減対策がベストプラクティスとして列記

されている。この中で最も排出削減効果が大きく、かつ排出削減コストが定量的に把握可能と考えられる減速航行について、排出削減量及び限界排出削減コスト(MAC)の算出を行った。

新造船に対する減速航行については、前提条件として、減速航行を行うことによる個船の輸送可能貨物量減少を新たな船舶の調達で補完することとして、航行日数の増加(停泊時の効率向上)積載率の向上等は考慮しないこととした。

減速航行の実施時期は 2020 年とし、新たな船舶の調達は 2020 年に一斉に行うとした。また、個船では減速航行による抵抗減少により主機の燃料消費量は三乗則で減少、ただし補機については航行中、停泊中の如何を問わず稼働という条件を想定した。フリート全体としては、減速航行による輸送量減少を補う新造船による排出を考慮した。

その結果、**新造船のフリート全体の削減量**は、5%減速では約 70 Mt-CO₂ (新造船のベースライン排出量の 8%)、10%減速では約 136 Mt-CO₂ (同 15%)、20%減速では、約 252 Mt-CO₂ (同 27%) と算定された。即ち、2008 年～2020 年に建造された船舶が 5%の減速航行を行った場合による排出削減量はMEPC文書に記載されている技術的対策による排出削減量にほぼ匹敵する排出削減効果を持つ結果となった。

既存船のフリート全体の削減量についても同様の想定で算出を行った結果、5%減速では約 39 Mt-CO₂ (新造船のベースライン排出量の 7%)、10%減速では約 75 Mt-CO₂ (同 14%)、20%減速では約 139 Mt-CO₂ と (同 26%) 算定された。

一方、減速航行による MAC は、荷動きを確保するための追加的な備船コスト(船価、船価以外の付随的成本(毎年船価の 10%と想定)、減速航行による追加的な備船分を含む燃料削減を考慮した燃料費から算出した。

その結果、**新造船の減速航行による MAC**は 5%減速、10%減速、20%減速の全ての場合でケース A についてはマイナスコスト、ケース B については 5%減速のみがマイナスコスト、ケース C については 5%、10%減速の場合がマイナスコストと算定された。算出結果を以下に示す。

減速率	5%	10%	20%
年間排出削減量	70.2	135.6	252.0
排出削減率 (新造船の総排出量比)	7.6%	14.7%	27.4%
排出削減率 (新造船及び既存船の総排出量比)	4.8%	9.3%	17.2%
MAC(ケース A)	-20.0	-16.6	-8.3
MAC(ケース B)	-1.6	1.2	8.1
MAC(ケース C)	-12.1	-6.8	6.5

既存船の減速航行による MACは、ベースとなる新造船と既存船の技術的対策導入の違いにより新造船より若干高く(経済性が悪く)算出され、20%減速では各ケースともプラスコストとなっている。算出結果を以下に示す。

減速率	5%	10%	20%
年間排出削減量	38.7	74.8	138.8
排出削減率 (既存船の総排出量比)	7.1%	13.8%	25.5%
排出削減率 (新造船及び既存船の総排出量比)	2.6%	5.1%	9.5%
MAC(ケース A)	-12.2	-8.4	1.2
MAC(ケース B)	3.9	7.0	14.5
MAC(ケース C)	-0.7	5.4	20.5

技術的対策と減速航行の両者を取り入れた **MAC カーブ** では、新造船、既存船とも減速航行が技術的対策のゼロコスト周辺に割って入り、横軸方向に大きな削減量を占める結果となっている。

なお、港湾における効率化等により、追加的な備船を行うことなしに減速航行を行うケースも、とりわけ減速率が小さい場合には想定できる。この場合は追加的な備船は不要であるため排出削減量は増加し、また追加的な備船コストが発生しないために MAC は大幅に低下する。算出結果を以下に示す。

	新造船		既存船	
	追加備船あり	追加備船なし	追加備船あり	追加備船なし
年間排出削減量	70.2	104.5	38.7	59.2
MAC	-20.0	-56.1	-12.2	-53.4

(ケース A、減速率 5 % とおいた。単位 Mt-CO₂(年間排出削減量)、USD/t-CO₂(MAC))

(中・長期的な排出削減対策に対する適用を考慮した限界排出削減コストの算定)(4.3 節)

これまで取り上げなかったスカイセイル、バイオ燃料等の長期的な対策技術については、計算に必要なパラメータの多くについて不確実性が高く、将来の船舶の建造量についても不確実である。比較的現実的な導入シナリオが想定しやすい、LNG 焚き船についての検討結果を参考資料 2 に示した。

2 章で行った MAC カーブの算定は、新造船に対する技術的対策のうち短・中期的に想定されるものに焦点を当てたものである。ここでは 2 章での分析に加え、既存船に対する技術的対策のレトロフィット、技術的対策以外のオペレーションの変更、及び中長期的に想定される排出削減対策の中から代表的なものを抽出し、排出削減量及び MAC カーブの算定に関する検討を行った。

4.1 既存船に対する排出削減技術導入による限界排出削減コストカーブの算定

4.1.1 既存船に対する排出削減技術導入による限界排出削減コストカーブ算定方法の検討

本調査において「既存船」とは、2008 年以前に建造され、2020 年時点において就航している船舶と定義する。このような既存船の隻数は 2020 年の総隻数から 2.2 に示した手法で計算した新造船の隻数を差し引くことで求められる。2020 年において既存船は隻数ベースでは 53,461 隻(2020 年に存在する全船舶の 46 %)、温室効果ガス排出量ベースでは 543 Mt-CO₂(同 36 %)を占める。従って 2020 年時点における外航海運に占める既存船の比率は決して小さくなく、それらへの対策についても検討することが海運における温室効果ガス排出削減ポテンシャルの包括的評価につながる。

ここで既存船への排出削減技術の導入に際しては、多くの場合同じ技術の新造船へ

の導入と比べて一般的にはるかにコストがかかるほか、導入された技術のパフォーマンスも新造船への導入と比べて劣る場合が多いと考えられる。以上を踏まえ、2章での検討に倣い、既存船における排出削減技術導入に関する検討フレームを下記のように設定した。なお、既存船については設備導入にあたり通常のドック入りに追加的な時間を要するための機会損失も生じるが、本調査での計算対象には含めていない。

既存船に対する排出削減技術導入における MAC の算定フローを図 4.1-1 に示す。

表 4.1-1 既存船における排出削減技術導入に関する検討フレーム

項目	概要
対象技術	・ 新造船と同様、MEPC 60/4/36 に基づく技術とした。
各技術の普及率の検討	・ 既存船は 5 年おきにドックに入ると仮定し、毎年同じ数の船舶(=既存船の総数÷5)がドック入りすると想定した。 ・ ある年にドック入りした既存船に対し、当該年における新造船に対する技術導入率と同率で導入されるとした。2020 年以前に 2 回目のドック入りに際しては、未導入の船舶に対して当該年における新造船に対する技術導入率と同率で導入されるとした。
各技術の排出削減ポテンシャルの設定	・ low friction coating : 新造船と同等。 ・ Air lubrication 及び WHR : 新造船の 75 % ・ 他の技術: : 新造船の 50 %。
各技術の排出削減率の算出	・ 新造船同様、個別技術の排出削減ポテンシャル×普及率×抵抗比率により、年度ごとに既存船に導入される各技術の全体に対する排出削減率を算出した。船型クラス毎の抵抗比率は新造船と同一とした。
技術が複合した場合を考慮した排出削減率の調整	・ 新造船と同様、毎年新たに導入された技術の相互干渉を考慮した。また 2 回目以降のドック入りの場合、新規に導入された技術は前回に導入された技術の影響を受けるとした。
排出削減量の算出	・ 2.3.3 で述べた新造船と同様に、排出削減率×主機 CO ₂ 排出量により算出した。
コストの把握	・ 新造船のコストデータに基づき、下記のように調整した。ただし low friction coating と Air lubrication について生じるランニングコストは、新造船の場合と同一とした。 - Low friction coating : 新造船の 2 倍 - Stern duct : 3 倍 - CRP : 同 7.5 倍 - Air lubrication : 同 3 倍 - Optimal stern shape : 同 60 倍 - Waste heat recovery : 同 4 倍

平成 23 年度「外航海運からの CO2 削減のためのコスト算定と比較」業務 算定フロー(既存船 技術対策のみ)

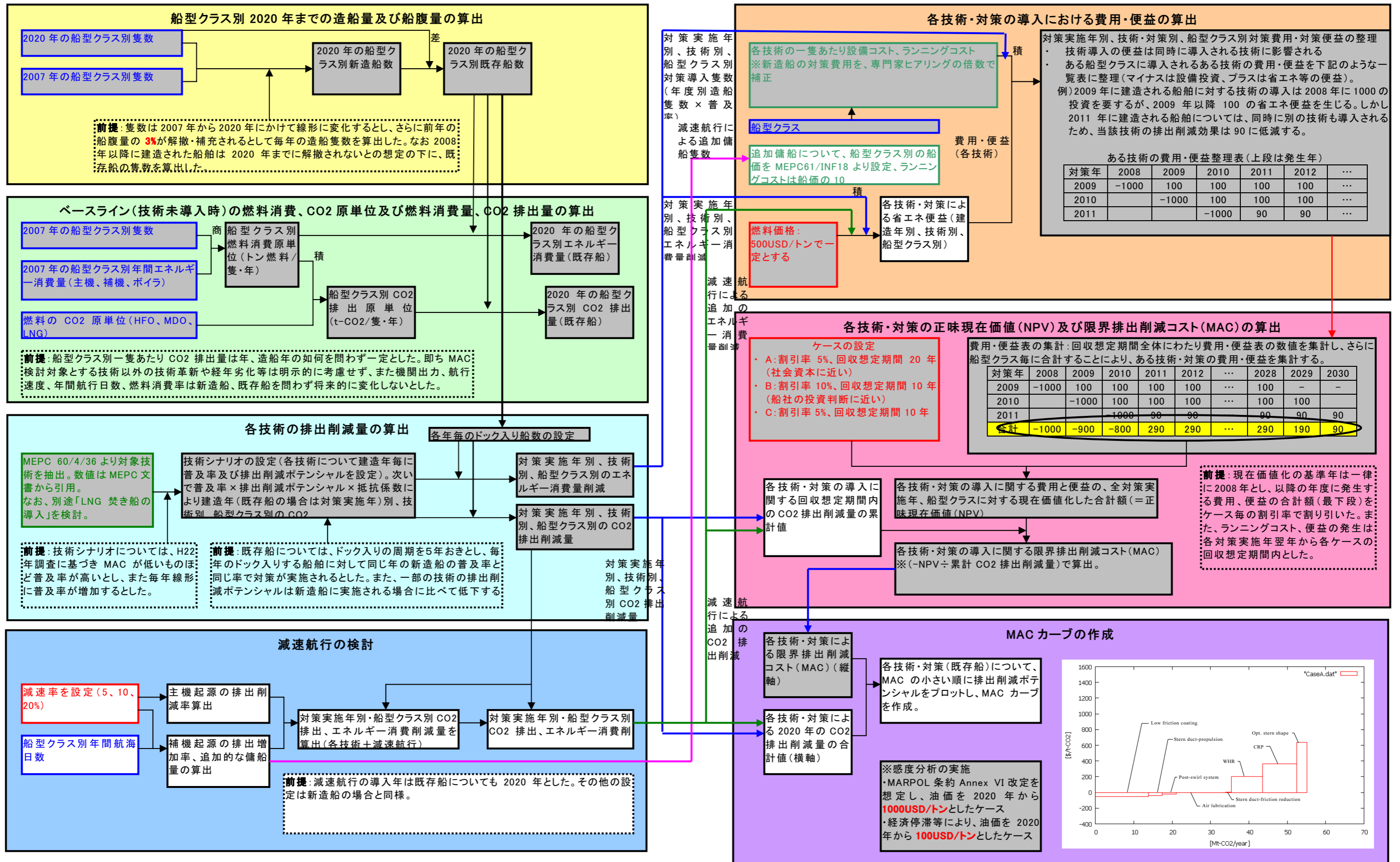


図 4.1-1 既存船に対する排出削減技術導入における MAC カーブの MAC 算定フロー(既存船 技術対策のみ)²³

²³ 青字に青枠: IMO 2nd Study (及び中間資料) のデータ。緑字に緑枠: 他の文献からのデータ。点線枠: 前提等。赤字: 可変パラメータ、条件。枠内灰色は「既存船技術のみ」と計算方法等に差異がある部分。矢印は計算パラメータ(太線、色は識別のため)

4.1.2 既存船に対する排出削減技術導入による排出削減量の算定

次に、排出削減量の算定を行う。各技術の普及率に関して、新造船については2008年～2020年の各年度に建造された船舶について一定の普及率で排出削減技術が導入されたと想定したが、既存船については、2008年～2020年の各年度にドック入りした船舶について一定の普及率で排出削減技術が導入されたと想定する。手法について表4.1-2に示す。

表 4.1-2 既存船に対する排出削減技術普及率の算出方法

年	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
当該年の新造船に対する導入率	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%
当該年にドック入りした既存船に対する導入率	5%	10%	15%	20%	25%	(100-5%)×30%=28.5%	(100-10%)×35%=31.5%
既存船全体に対する当該年の新規導入率	2.5%×(1/5)=0.5%	5.0%×(1/5)=1.0%	7.5%×(1/5)=1.5%	10.0%×(1/5)=2.0%	12.5%×(1/5)=2.5%	28.5%×(1/5)=5.7%	31.5%×(1/5)=6.3%

5年おきと同じフリートがドック入りすると想定。その場合、以前のドック入り時に未導入であった船舶に対して導入されるとした。

表4.1-2に示した方法により、ある技術の既存船全体に対する新規導入率が年毎に求められる。既存船に対して導入される技術の排出削減率は、2.3.3に示した新造船に対する排出削減率の推計方法に倣い、下記のように求められる。

$$ERR_{EX,t,tc,y} = ERP_{EX,t,tc,y} \times DR_{EX,t,tc,y} \times RC_{t,tc,y} \quad (11)$$

ただし、

- ・ $ERR_{EX,t,tc,y}$: y 年に船型クラス tc の既存船に技術 t が単独で導入された場合の排出削減率(%)
- ・ $ERP_{EX,t,tc,y}$: y 年に船型クラス tc の既存船に導入された技術 t の排出削減ポテンシャル(%)
- ・ $DR_{EX,t,tc,y}$: y 年に船型クラス tc の既存船に導入された技術 t の普及率(%)
- ・ $RC_{t,tc,y}$: y 年に船型クラス tc の既存船に導入された技術 t の抵抗比率(%)

ここで新造船同様、既存船に対して導入された技術も他の技術の影響を受ける。既存船の場合、ドック入りする度に同じフリートに対して繰り返し技術が導入されるので、ある年に導入された技術の排出削減率は、同年またはそれ以前に導入された他

の技術の影響を受ける。ここで、厳密には既に導入された技術の排出削減率もそれ以降に導入された技術の影響を受けるが、過度の複雑化を避けるため、本調査では一度導入された技術の排出削減率は、それ以降に導入された技術に影響されないとした。即ち、 y 年に船型クラス tc の既存船に導入されたある技術 t の排出削減率については、下記のように $K_{EX,tc,z}$ で表される補正係数を算出し、導入効果の減少について近似的に算出した。

$$ERR_{EX,tc,y} = 1 - \prod_u (1 - ERR_{EX,u,tc,y}) \quad (12)$$

$$K_{EX,t,tc,z} = \frac{(\prod_{y=2008}^{z-1} (1 - ERR_{EX,tc,y}) - \prod_{y=2008}^z (1 - ERR_{EX,tc,y}))}{\sum_{y=2008}^z \sum_u ERR_{EX,u,tc,y}} \quad (13)$$

$$ERR_{adj,EX,t,tc,y} = ERR_{EX,t,tc,y} \times K_{EX,t,tc,z} \quad (14)$$

ただし、

- ・ $ERR_{EX,u,tc,y}$: y 年に船型クラス tc の既存船に技術 u (t 以外の技術)が単独で導入された場合の排出削減率(%)
- ・ $ERR_{EX,tc,y}$: y 年に船型クラス tc の既存船に導入された技術 u の合計排出削減率(%)
- ・ $K_{EX,t,tc,z}$: z 年において新たに既存船に導入される技術 t に対する他技術の影響の補正係数(%)
- ・ $ERR_{EX,t,tc,y}$: y 年に船型クラス tc の既存船に技術 t が単独で導入された場合の排出削減率(%)
- ・ $ERR_{adj,EX,t,tc,y}$: 補正後の y 年に船型クラス tc の既存船に技術 t が単独で導入された場合の排出削減率(%)

上記に基づき、個別排出削減技術による排出削減量は下記の式により求められる。

$$ER_{EX,t} = \sum_y \sum_{tc} ERR_{adj,EX,t,tc,y} \times BEME_{EX,tc} \quad (15)$$

ただし、

- ・ $ER_{EX,t}$: 既存船に導入された排出削減技術 t の年間排出削減量(t-CO₂)
- ・ $BEME_{EX,tc}$: 船型クラス tc の既存船のベースラインでの主機起源年間 CO₂ 排出量 (t-CO₂ : ただし本調査では既存船と同一とする)

以上の検討を踏まえて算出した結果は表 4.1-3 のとおり。既存船に対する各排出削減技術の導入による排出削減量は約 56 Mt-CO₂ と算出される。これは 2.3.2 で算出した既存船の CO₂ 排出量（543 Mt-CO₂）の約 10.4 % に相当する。また、新造船及び既存船を併せた 2020 年のベースラインの総排出量は 1,463 Mt-CO₂ であり、これに対する新造船への技術的対策の導入による排出削減率は 3.8 % と算出される。

表 4.1-3 2020 年における既存船に対する各排出削減技術の排出削減量 船型別

	Low friction coating	Stern duct-friction reduction	CRP	Stern duct-propulsion	Post-swirl system	Air lubrication	Opt. stern shape	WHR	合計
原油タンカー	1.8	0.3	1.0	0.8	0.8	1.7	0.0	1.4	7.7
その他タンカー	1.6	0.3	0.9	0.7	0.7	1.5	0.0	1.1	7.0
バルクキャリア	2.9	0.6	1.6	1.3	1.3	2.7	0.0	2.3	12.6
一般貨物	1.5	0.3	1.1	0.9	0.9	1.4	0.0	1.0	7.0
コンテナ	3.0	0.0	2.1	0.0	0.0	2.8	1.3	1.9	11.1
その他	3.4	0.0	2.4	0.0	0.0	3.2	1.4	0.5	10.9
合計	14.2	1.5	9.0	3.6	3.6	13.4	2.7	8.2	56.3

(単位 Mt-CO₂/年)

表 4.1-4 2020 年における既存船に対する各排出削減技術の年間排出削減量 船型クラス別

(単位 kt-CO₂/年)

	クラス	Low friction coating	Stern duct-friction reduction	CRP	Stern duct-propulsion	Post-swirl system	Air lubrication	Opt. stern shape	WHR	合計
Crude oil tanker	200,000dwt+	-715	-139	-387	-311	-311	-672	0	-580	-3,115
Crude oil tanker	120,000-199,999dwt	-358	-70	-194	-156	-156	-337	0	-291	-1,563
Crude oil tanker	80,000-119,999dwt	-473	-92	-257	-206	-206	-445	0	-384	-2,063
Crude oil tanker	60,000-79,999dwt	-104	-20	-56	-45	-45	-98	0	-84	-453
Crude oil tanker	10,000-59,999dwt	-99	-19	-54	-43	-43	-93	0	-81	-432
Crude oil tanker	0-9,999dwt	-8	-1	-4	-3	-3	-7	0	0	-27
Products tanker	60,000dwt+	-50	-10	-27	-22	-22	-47	0	-40	-216
Products tanker	20,000-59,999dwt	-121	-24	-66	-53	-53	-114	0	-98	-528
Products tanker	10,000-19,999dwt	-38	-7	-21	-16	-16	-36	0	-31	-165
Products tanker	5,000-9,999dwt	-41	-8	-22	-18	-18	-39	0	0	-146
Products tanker	0-4,999dwt	-145	-28	-79	-63	-63	-137	0	0	-516
Chemical tanker	20,000dwt+	-431	-84	-234	-188	-188	-405	0	-350	-1,880
Chemical tanker	10,000-19,999dwt	-153	-30	-83	-66	-66	-144	0	-124	-666
Chemical tanker	5,000-9,999dwt	-74	-14	-40	-32	-32	-69	0	0	-262
Chemical tanker	0-4,999dwt	-74	-14	-40	-32	-32	-69	0	0	-262
LPG tanker	50,000dwt+	-99	-19	-53	-43	-43	-93	0	-80	-430
LPG tanker	0-49,999dwt	-102	-20	-56	-45	-45	-96	0	-83	-447
LNG tanker	200,000dwt+	-8	-2	-6	-4	-4	-7	0	-8	-39
LNG tanker	0-199,999dwt	-268	-53	-188	-151	-151	-252	0	-281	-1,343
Other tanker		-16	-3	-12	-9	-9	-15	0	-17	-82
Bulk carrier	Other	-68	-13	-37	-30	-30	-64	0	-55	-297
Bulk carrier	200,000dwt+	-455	-89	-247	-198	-198	-428	0	-370	-1,985
Bulk carrier	100,000-19,999dwt9	-787	-153	-427	-342	-342	-740	0	-638	-3,430
Bulk carrier	60,000-99,999dwt	-787	-153	-426	-342	-342	-740	0	-638	-3,429
Bulk carrier	35,000-59,999dwt	-735	-143	-398	-320	-320	-691	0	-596	-3,204
Bulk carrier	10,000-34,999dwt	-61	-12	-33	-27	-27	-58	0	0	-218
General cargo	0-9,999dwt	-196	-39	-138	-111	-111	-185	0	-206	-985
General cargo	10,000dwt+	-211	-41	-149	-119	-119	-199	0	0	-838
General cargo	5,000-9,999dwt	-299	-59	-211	-169	-169	-282	0	0	-1,189
General cargo	0-4,999dwt	-378	-74	-266	-213	-213	-355	0	-397	-1,897
General cargo	10,000dwt+	-37	-7	-26	-21	-21	-35	0	-39	-187
General cargo	5,000-9,999dwt	-78	-15	-55	-44	-44	-74	0	0	-310
Other dry reefer		-280	-55	-197	-158	-158	-264	0	-295	-1,407
Other dry special		-45	-9	-32	-25	-25	-42	0	-47	-226
Container	8,000TEU+	-402	0	-284	0	0	-379	-170	-424	-1,659
Container	5,000-7,999 TEU	-641	0	-452	0	0	-605	-271	-675	-2,644
Container	3,000-4,999 TEU	-751	0	-529	0	0	-708	-317	-791	-3,097
Container	2,000-2,999 TEU	-519	0	-367	0	0	-491	-220	0	-1,597
Container	1,000-1,999 TEU	-506	0	-358	0	0	-479	-214	0	-1,556
Container	0-999 TEU	-180	0	-127	0	0	-170	-76	0	-553
Vehicle	4,000CEU+	-224	0	-158	0	0	-212	-95	-236	-926
Vehicle	0-3,999 CEU	-129	0	-91	0	0	-122	-55	0	-398
Ro-Ro	2,000 CEU +1m	-85	0	-60	0	0	-80	-36	-89	-350
Ro-Ro	0-1,999 CEU +1m	-132	0	-93	0	0	-125	-56	0	-406
Ferry	Pax only 25kn	-121	0	-85	0	0	-114	-51	0	-371
Ferry	Pax only <25kn	-124	0	-88	0	0	-118	-53	0	-383
Ferry	RoPax, 25kn	-123	0	-87	0	0	-117	-52	0	-379
Ferry	RoPax, <25kn	-749	0	-530	0	0	-708	-317	0	-2,303
Cruise	100,000+	-48	0	-34	0	0	-45	-20	-50	-196
Cruise	60,000-99,999	-105	0	-74	0	0	-99	-44	-110	-432
Cruise	10,000-59,999	-83	0	-59	0	0	-78	-35	0	-255
Cruise	2,000-9,999	-13	0	-10	0	0	-13	-6	0	-42
Cruise	0-1,999	-4	0	-3	0	0	-4	-2	0	-12
Service	Research	-47	0	-33	0	0	-44	-20	0	-143
Service	Tug	-450	0	-318	0	0	-425	-190	0	-1,383
Service	Dredging	-59	0	-42	0	0	-56	-25	0	-181
Service	SAR	-28	0	-20	0	0	-27	-12	0	-87
Service	Workboats	-21	0	-15	0	0	-20	-9	0	-63
Service	Other	-43	0	-30	0	0	-41	-18	0	-132
Misc	Fishing	-186	0	-131	0	0	-176	-79	0	-572
Misc	Trawlers	-397	0	-281	0	0	-376	-168	0	-1,222
Misc	Other	-90	0	-64	0	0	-85	-38	0	-276
Misc	Other	-131	0	-93	0	0	-124	-55	0	-403
合計		-14,184	-1,522	-9,034	-3,626	-3,626	-13,370	-2,701	-8,193	-56,257

4.1.3 既存船に対する排出削減技術導入による限界排出削減コストの算定

上記の前提に基づき既存船に対する各排出削減技術に関する MAC を算出した。算出結果は表 4.1-5 及び図 4.1-2～図 4.1-4 のとおり。既存船に対する技術導入の場合、新造船に対する導入と比べて設備コストが高価となり、また(low friction coating 以外は)排出削減ポテンシャルが低下することの双方が影響し、MAC が新造船に比較していずれも高く算出されている。

表 4.1-5 既存船に対する技術導入の年間排出削減量及び MAC 算出結果

	Low friction coating	Stern duct-friction reduction	CRP	Stern duct-propulsion	Post-swirl system	Air lubrication	Opt. stern shape	WHR
年間排出削減量	14.2	1.5	9.0	3.6	3.6	13.4	2.7	8.2
MAC(ケース A)	-50.7	6.1	358.7	-38.2	-22.2	-6.1	633.0	199.3
MAC(ケース B)	-27.4	59.7	547.4	-4.0	19.1	35.0	961.7	357.5
MAC(ケース C)	-53.0	65.6	769.0	-23.0	9.1	34.6	1,319.1	451.4

(単位 Mt-CO₂(年間排出削減量)、USD/t-CO₂(MAC))

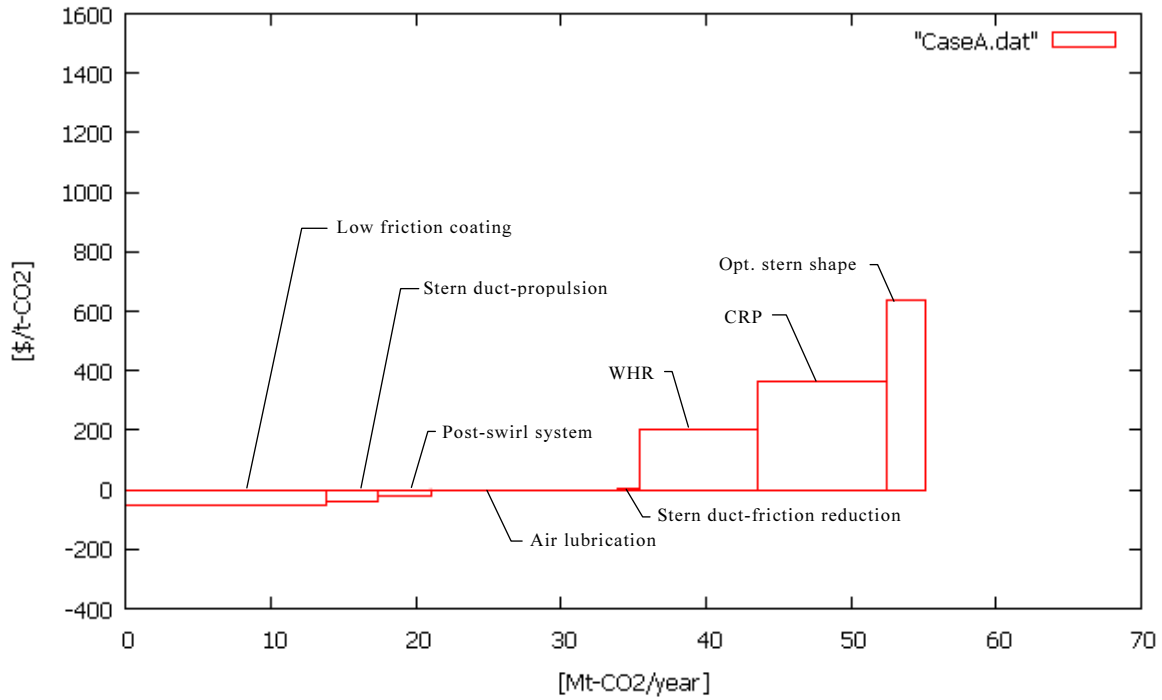


図 4.1-2 排出削減技術の MAC(既存船：ケース A(割引率 5%、回収想定期間 20 年))

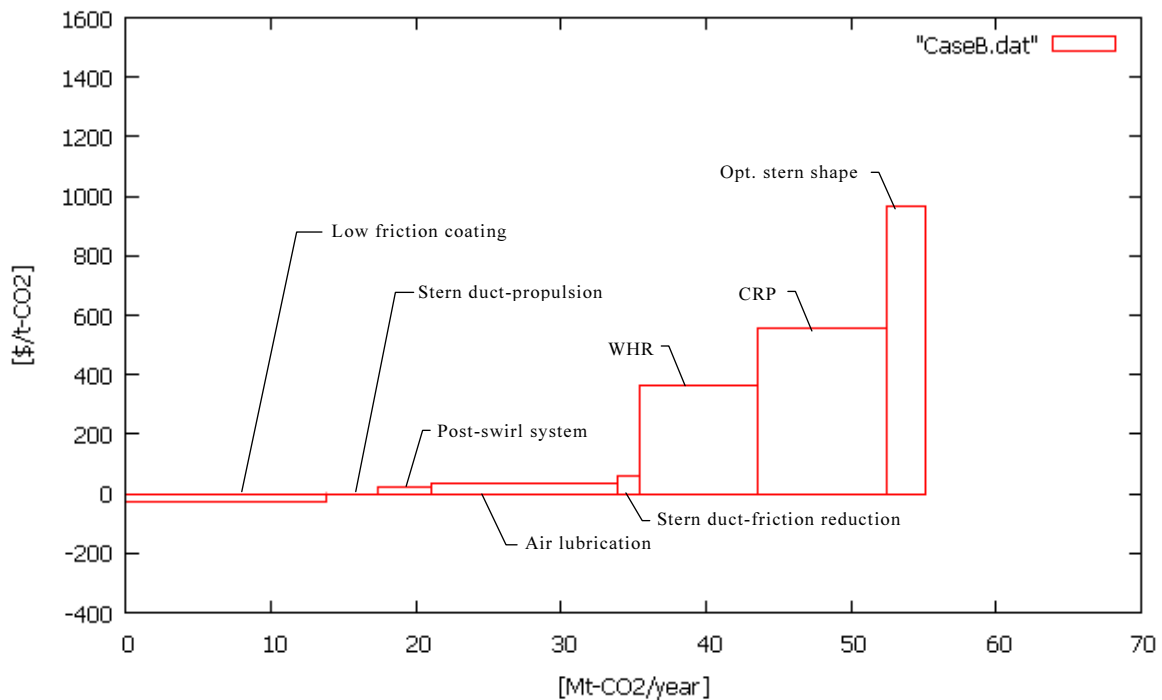


図 4.1-3 排出削減技術の MAC(既存船：ケース B(割引率 10%、回収想定期間 10 年))

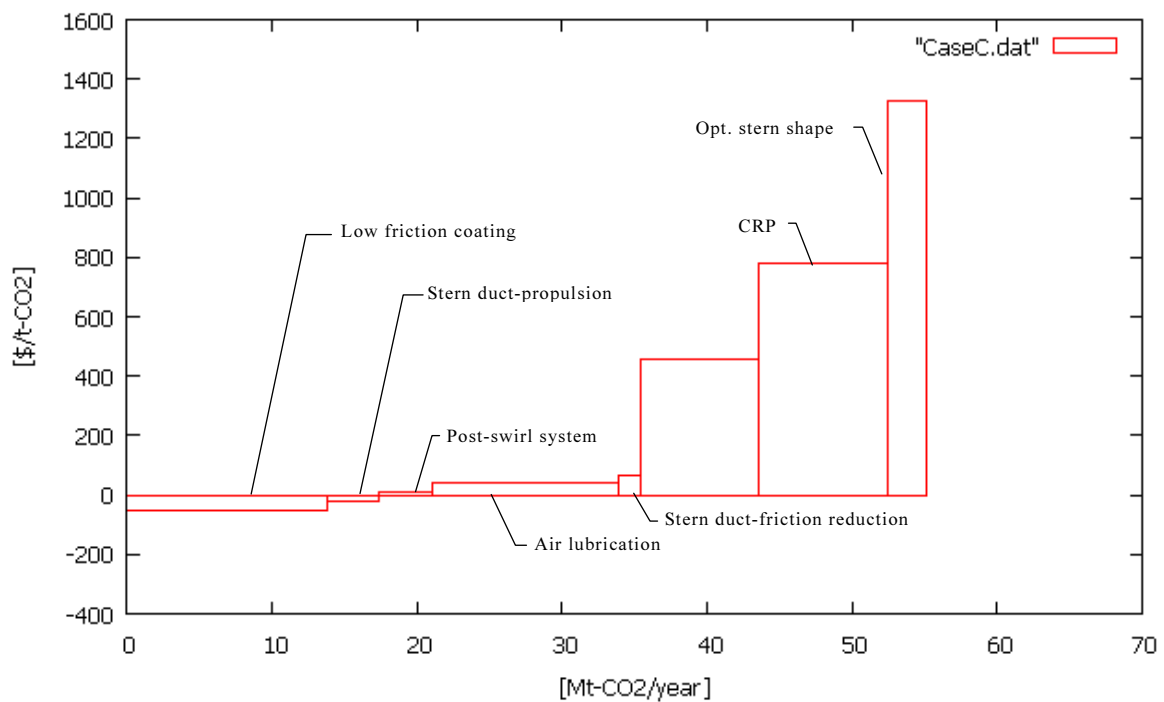


図 4.1-4 排出削減技術の MAC(既存船：ケース C(割引率 5%、回収想定期間 10 年))

表 4.1-5 及び図 4.1-2～図 4.1-4 に示した結果は、既存船に対する排出削減技術の導入がコスト面で非常に難しいことを示している。この評価結果は海上技術安全研究所が示した既存船に対する GHG 削減技術適用の検討結果(MEPC 63/INF.13)と異なるが、これは MEPC 63/INF.13 においては既存船に対する導入コストを新造船に対する導入コストの 20%～100%増としているのに対し、本調査では表 4.1-1 に示すとおり、既存船に対する技術導入コストを新造船に比べ数倍から数十倍と設定し、また多くの技術について、既存船に対する導入の場合、新造船ほどには排出削減効果を発揮できないという設定条件を与えているためである。

4.1.4 油価変動による感度解析

新造船同様、既存船についても 2020 年から油価が 1000 USD/トンに上昇した場合の影響について感度解析を行った。結果について表 4.1-6 及び図 4.1-5 に示す。既存船へのレトロフィットの場合、コストが新造船への導入に比べて相当程度高価となる技術(例：optimal stern shape のような船型自体の改造を必要とする場合)については油価の上昇を想定しても MAC は依然としてプラスの値であるが、Air lubrication 等については油価に応じてプラスにもマイナスにも変動すると算出された。

表 4.1-6 油価変動による感度解析結果(USD/t-CO₂)

	Low friction coating	Stern duct-friction reduction	CRP	Stern duct-propulsion	Post-swirl system	Air lubrication	Opt. stern shape	WHR
ケース A)基本ケース(油価 500 USD/t-fuel)	-50.7	6.1	358.7	-38.2	-22.2	-6.1	633.0	199.3
同、2020 年から 1000 USD/t-fuel と なる	-93.0	-37.2	314.0	-81.5	-65.5	-46.9	589.7	155.6
同、2020 年から 100 USD/t-fuel と なる	-16.9	40.7	394.4	-3.6	12.5	26.5	667.6	234.2

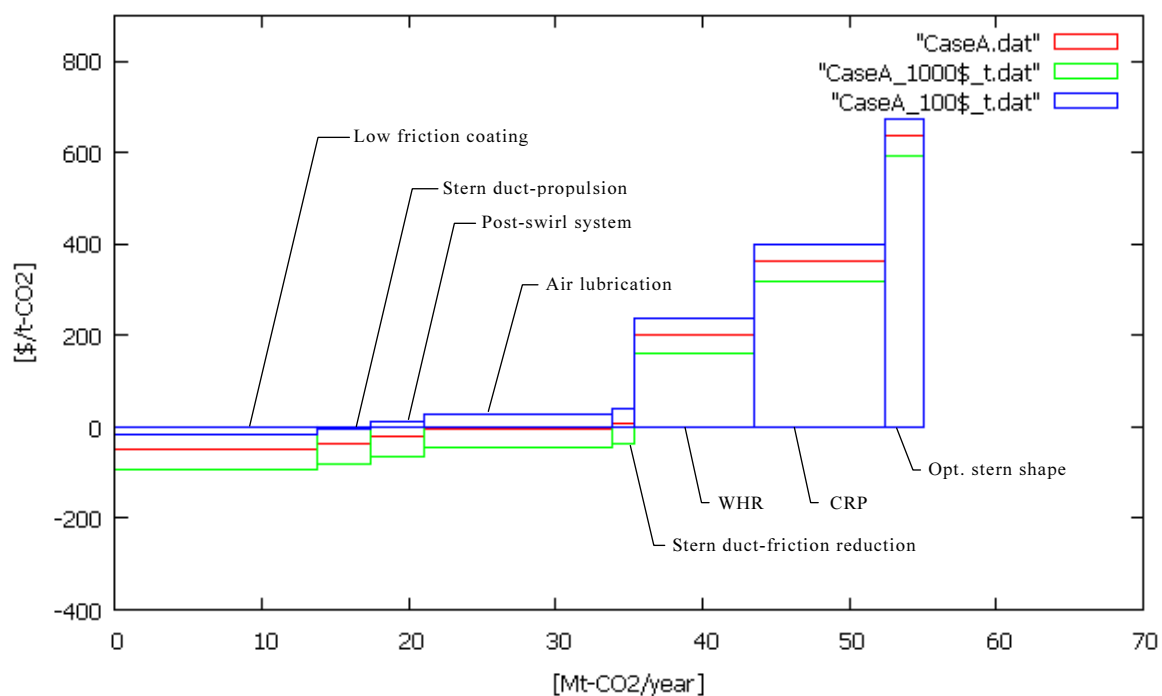


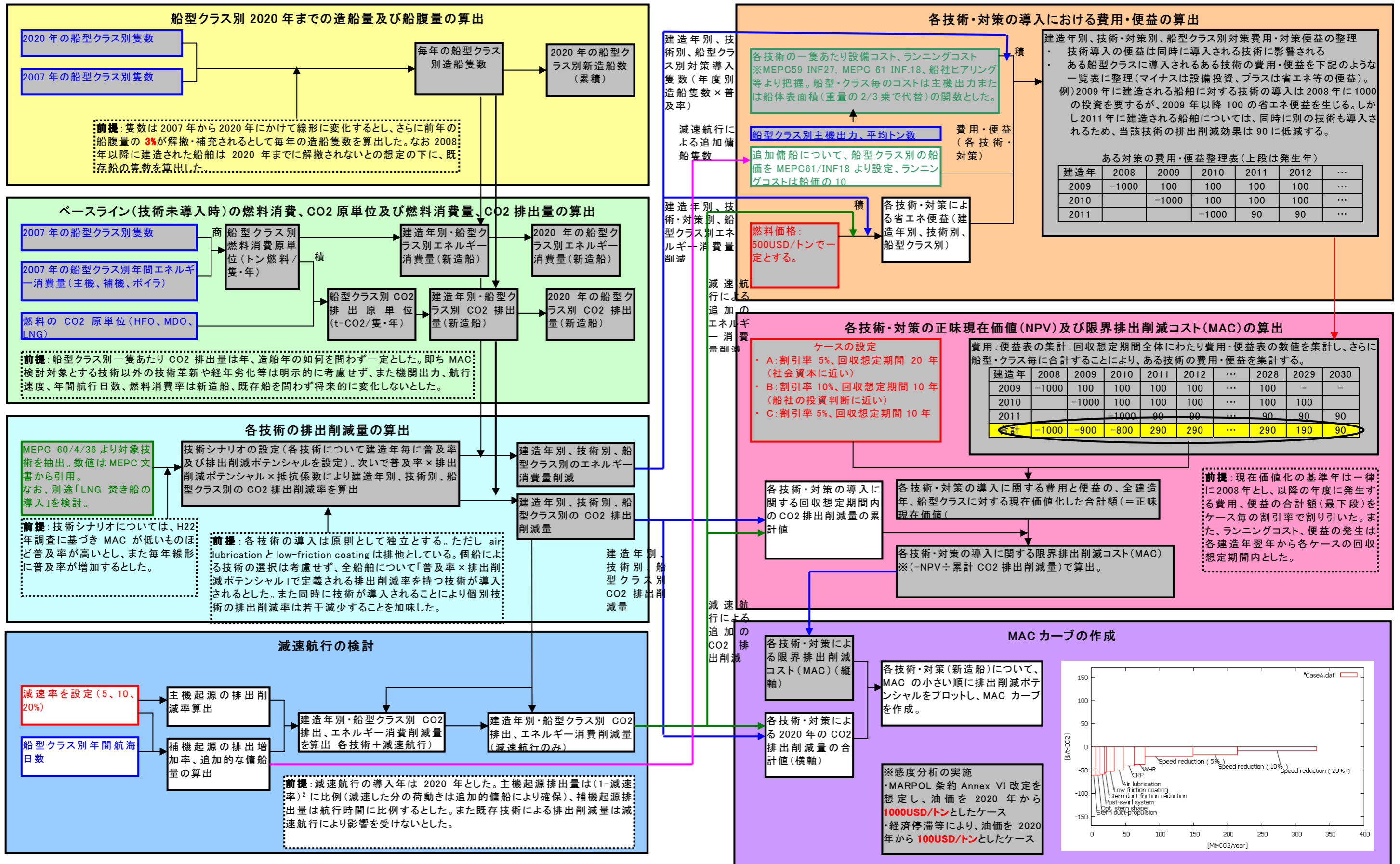
図 4.1-5 排出削減技術の MAC(既存船：ケース A 油価変動)

4.2 船舶のオペレーション対策導入による限界排出削減コストカーブの算定

4.2.1 船舶のオペレーション対策導入時における限界排出削減コストカーブ算定方法の検討

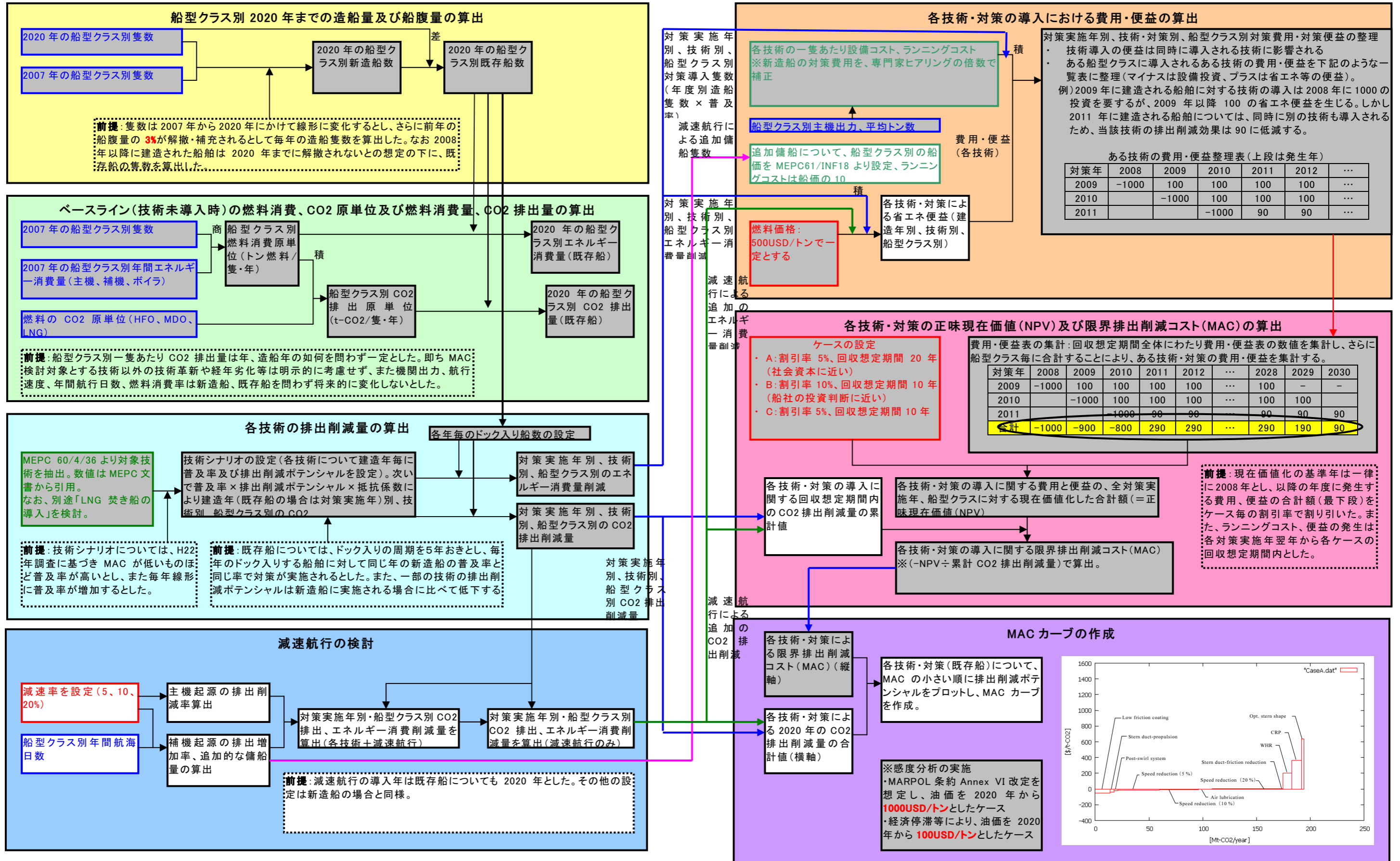
船舶における温室効果ガス排出削減は技術的対策によってのみ達成されるのではなく、諸般のオペレーションの改善でも多大な効果があることが認識されている。MARPOL 条約附属書 VI の改正により強制化された Ship Energy Efficiency Management Plan(SEEMP : MEPC 62/5/4 Annex 2)には、各種の船舶オペレーション上実施可能な排出削減対策がベストプラクティスとして列記されている。これらは Fuel-efficient operations (Improved voyage planning, weather routing, just-in-time, speed optimization, optimized shaft power), Optimized ship handling, Hull maintenance, 等に分類され、減速航行は Fuel-efficient operations の中の speed optimization に相当する。ただし speed optimization については、機関の熱効率の観点から最適な速度(機関負荷率)があるため、操舵が効く最低限の速度で航行することとは異なるとしている。この中で最も排出削減効果が大きく、かつ排出削減コストが定量的に把握可能と考えられる減速航行について、排出削減量及び MAC の算出を行った。算定フローを図 4.2-1 に示す。

平成 23 年度「外航海運からの CO2 削減のためのコスト算定と比較」業務 算定フロー(新造船 技術対策+減速航行)



²⁴ 青字に青枠: IMO 2nd Study (及び中間資料) のデータ。緑字に緑枠: 他の文献からのデータ。点線枠: 前提等。赤字: 可変パラメータ、条件。枠内灰色は「新造船技術のみ」と計算方法等に差異がある部分。矢印は計算パラメータ(太線、色は識別のため)

平成 23 年度「外航海運からの CO2 削減のためのコスト算定と比較」業務 算定フロー(既存船 技術対策のみ)



²⁵ 青字に青枠: IMO 2nd Study (及び中間資料) のデータ。緑字に緑枠: 他の文献からのデータ。点線枠: 前提等。赤字: 可変パラメータ、条件。枠内灰色は「既存船技術のみ」と計算方法等に差異がある部分。矢印は計算パラメータ(太線、色は識別のため)

新造船における減速航行の実施による排出削減量及び MAC については、次のような前提を置いて算定した。

まず減速航行による排出削減量算定に当たって、下記の前提を置いた。

- ・ 減速航行を行うと、ある期間内に個船が輸送可能な貨物量(トンマイル/隻/期間)が減少する。本調査ではこのような輸送可能な貨物量の減少に対応するために、新たに船舶を調達する必要があるとした。現実にはこのような輸送すべき貨物量の減少を、とりわけ減速率が小さい場合において航行日数の増加(1回の停泊時間の短縮)により解決可能な場合がある。また船舶が貨物を満載していない場合には貨物の消席率を増加させることで対応することが可能な場合もある。しかし本調査の基本ケースではそのようなシナリオは想定せず、新たな船舶の調達の必要があると仮定した。なお減速航行において追加的な備船を必要としないケースについても排出削減量と MAC を算出し、表 4.2-6 に示した。
- ・ 減速航行の実施時期は 2020 年とし、新たな船舶の調達は 2020 年における船舶の建造という形を取るとした。ただし MAC については他の技術対策との整合を取る意味で 2007 年時点に割り引いた。
- ・ 減速航行実施時の補機による燃料消費量の変化は、実際には補機のオペレーションや使用状況によりさまざまであるが、本調査では、補機は航行中、停泊中の如何を問わず同じように稼動すると仮定した。従って減速航行により個船の主機によるエネルギー消費量は減少するが、逆に補機によるエネルギー消費量は増加することになる。

4.2.2 減速航行による排出削減量の算定

(1)新造船に対する減速航行による排出削減量の算定

船舶航行時の抵抗は概ね速度の二乗に比例するため、個船のエンジン出力(MW)は速度の三乗に比例する。また、個船の主機の燃料消費量はエンジン出力×航行時間(MWh)に比例する。反面、減速の場合は減速分の荷動きを確保するための追加的な用船が必要となる。即ち航行速度 V から ΔV だけ減速した場合の個船 i の主機の CO_2 排出量 $CE_{i,ME,V \rightarrow \Delta V}$ は式(16)のように表される。

$$CE_{i,ME,V \rightarrow \Delta V} = CE_{,ME,V} \left(\frac{(V - \Delta V)^3}{V^3} \right) \quad (16)$$

ただし、

- ・ $CE_{i,ME,V \rightarrow \Delta V}$: 速度 V から ΔV だけ減速した場合の個船 i の主機の CO_2 排出量(t-CO_2)
- ・ $CE_{i,ME,V}$: 速度 V で航行する場合の個船 i の主機の CO_2 排出量(t-CO_2)
- ・ V : 航行速度(ノット)
- ・ ΔV : 航行速度の変化(ノット)

ここである船型クラス全体に着目すると、減速航行にもかかわらず従前と同じ荷動きを確保するためには、全体の隻数が $(V/V - \Delta V)$ の比率で増加する必要がある。即ち、フリート全体では主機の CO_2 排出量 $CE_{ME,V \rightarrow \Delta V}$ は式(17)のように表される。

$$CE_{ME,V \rightarrow \Delta V} = CE_{ME,V} \left(\frac{(V - \Delta V)^3 \times \frac{V}{V - \Delta V}}{V^3} \right) = CE_{ME,V} \left(\frac{(V - \Delta V)^2}{V^2} \right) = CE_{ME,V} \left(1 - \frac{\Delta V}{V} \right)^2 \quad (17)$$

即ち減速航行による排出量の変化は速度変化の二乗に比例する。換言すれば、10%減速すると排出削減率は19%となり、50%減速すると排出削減率は75%となる。ここで上式は既存の船舶と減速航行により追加的に必要となる船舶を区別していないが、前述の前提に基づくと減速航行により追加的に必要となる船舶は減速航行の実施に伴い新たに建造される必要があり、減速航行は2020年に行われるとする前提より、それらは2020年における対策が盛り込まれた船舶となる。この点を加味すると、上式は以下のようなになる。

$$CE_{ME,V \rightarrow \Delta V} = CE_{ME,V} \times \left(\frac{(V - \Delta V)^3}{V^3} \right) + CE_{ME,V} \times (1 - ERR_{t,2020}) \times \left(\frac{(V - \Delta V)^3}{V^3} \right) \times \frac{\Delta V}{V - \Delta V} \quad (18)$$

ただし、

- ・ $ERR_{t,2020}$: 2020年に建造される船舶における技術的対策による効率改善率(%)

ここで $ERR_{t,2020}$ がゼロ、即ち2020年までに船舶の効率向上がない場合、上の2つの式は同一となる。

次いで補機に関する検討を行う。減速航行の補機に対する影響は、実際には補機の性質によりさまざまであるが、ここでは、補機は航行中、停泊中の如何を問わず同じように稼動すると仮定する。従って航行速度 V から ΔV だけ減速した場合、1年間の航行日数(days at sea: DAS)は $V / (V - \Delta V)$ の比率で増加する。従って補機による CO_2 排出量 $CE_{AUX,V \rightarrow \Delta V}$ は式(19)のように表される。

$$CE_{i,AUX,V \rightarrow \Delta V} = K' \frac{\left(\frac{DAS}{1 - \frac{\Delta V}{V}} \right) + 365 - DAS}{365} \quad (19)$$

ただし、

- ・ $CE_{i,AUX,V \rightarrow \Delta V}$: 速度 V から ΔV だけ減速した場合の個船 i の補機の CO_2 排出量(t-CO_2)
- ・ DAS : 航行日数(days at sea : 日数/年)

上式の分子は減速前と同じ荷動きを行うために必要な日数に相当し、365 を超えるが、これは減速分の荷動き減少を補填するために必要な船腹量の増加と同等である。

以上を総合して減速航行の効果を算出する。算出に当たり、減速航行のようなオペレーション上の対策は 2.3 及び 4.1 で述べた技術的対策とは異なり可逆的であることから、その対策効果は技術的対策に劣後する(即ち減速航行の効果は導入される技術的対策の影響を受けるが、技術的対策の効果は減速航行の影響を受けない)とした。上記に従い、各年度に建造された船型クラスについて、式(20)、式(21)および式(22)により減速航行の効果を算出した。

$$ERR_{SR,tc} = \frac{\{(CE_{ME,SR,tc}) + (CE_{AUX,SR,tc})\} - \{(CE_{ME,BL,tc}) + (CE_{AUX,BL,tc})\}}{CE_{ME,BL,tc}} \quad (20)$$

$$ERR_{adj,SR,tc,yc} = \frac{(1 - \sum_t ERR_{adj,t,tc,yc}) \times (1 - ERR_{SR,yc}) \times CE_{ME,BL,tc} - CE_{ME,BL,tc}}{CE_{ME,BL,tc}} \quad (21)$$

ただし、

- ・ $ERR_{SR,tc}$: 船型クラス tc の新造船が減速航行のみを行った場合による排出削減率(%)
- ・ $CE_{ME,SR,tc}$: 船型クラス tc の新造船が減速航行のみを行った場合による主機起源の排出量(t-CO_2 : 減速航行により減少)
- ・ $CE_{AUX,SR,tc}$: 船型クラス tc の新造船が減速航行のみを行った場合による補機起源の排出量(t-CO_2 : 減速航行により増加)
- ・ $CE_{ME,BL,tc}$: ベースラインの主機起源の排出量($\text{t-CO}_2 / \text{yr}$)

- ・ $CE_{AUXBL,tc}$: ベースラインの補機起源の排出量(t-CO₂/ yr)
- ・ $ERR_{adj,t,tc,yc}$: 排出削減量算出に用いるための建造年度 yc 年に船型クラス tc に導入された技術 t の排出削減率(%)
- ・ $ERR_{adj,SR,tc,yc}$: 技術的対策の導入を考慮した減速航行の排出削減率(%)

さらに、

$$ER_{SR} = \sum_{yc} \sum_{tc} ERR_{adj,SR,tc,yc} \times BEME_{yc,tc} \quad (22)$$

ただし、

- ・ ER_{SR} : 新造船に対する減速航行による年間排出削減量(t-CO₂/ yr)
- ・ $BEME_{yc,tc}$: 建造年度 yc 年、船型クラス tc の新造船のベースラインでの主機起源年間 CO₂ 排出量(t-CO₂/ yr : ただし本調査では建造年度によらないとする)

以上のような前提に基づく減速航行による排出削減効果は表 4.2-1 のとおり。

表 4.2-1 2020 年における減速航行による年間排出削減量(新造船 : Mt-CO₂/年)

減速率	5 %	10 %	20 %
排出削減量(Mt-CO ₂)	70.2	135.6	252.0
排出削減率 (新造船の総排出量比)	7.6%	14.7%	27.4%
排出削減率 (新造船及び既存船の総排出量比)	4.8%	9.3%	17.2%

即ち、2008 年～2020 年に建造された船舶が 5 %の減速航行を行った場合による排出削減量は、MEPC 60/4/36 に記載されている技術的対策による排出削減量(約 79 Mt-CO₂)にほぼ匹敵すると算出される。前述のように補機起源の排出量は増加するため、排出削減量は減速率には比例せず、表 4.2-1 に示した範囲では減速率の増加分よりやや小さい比率で増加する。

(2)既存船に対する減速航行による排出削減量の算定

既存船に対する減速航行の効果算出に当たっては、新造船同様、導入年を 2020 年と定めて算出した。ここで新造船と同様に、既存船の減速航行の効果は他に導入された排出削減技術に影響されるが、排出削減技術の効果は減速により影響を受けないという前提を置いた。具体的には式(23)のように計算した。

$$ERR_{adj,EX,SR,tc,y} = \frac{(1 - \sum_t ERR_{EX,tc,y}) \times (1 - ERR_{SR,yc}) \times CE_{ME,BL,tc} - CE_{ME,BL,tc}}{CE_{ME,BL,tc}} \quad (23)$$

ただし、

- ・ $ERR_{EX,tc,y}$: y 年に船型クラス tc の既存船に導入された全技術の合計排出量削減率(%)
- ・ $CE_{ME,SR,tc}$: 船型クラス tc の新造船が減速航行のみを行った場合による主機起源の排出量(t-CO₂: 減速航行により減少)
- ・ $CE_{AUX,SR,tc}$: 船型クラス tc の新造船が減速航行のみを行った場合による補機起源の排出量(t-CO₂: 減速航行により増加)
- ・ $CE_{ME,BL,tc}$: ベースラインの主機起源の排出量(t-CO₂/ yr)
- ・ $CE_{AUXBL,tc}$: ベースラインの補機起源の排出量(t-CO₂/ yr)
- ・ $ERR_{adj,t,tc,yc}$: 排出削減量算出に用いるための建造年度 yc 年に船型クラス tc に導入された技術 t の排出削減率(%)
- ・ $ERR_{adj,SR,tc,y}$: 技術的対策の導入を考慮した減速航行の排出削減率(%)

さらに、

$$ER_{SR,tc,y} = \sum_{yc} \sum_{tc} ERR_{adj,EX,SR,tc} \times BEME_{y,tc} \quad (24)$$

ただし、

- ・ $ER_{SR,tc,y}$: y 年に船型クラス tc の既存船に対する減速航行による年間排出削減量 (t-CO₂/ yr)
- ・ $BEME_{c,tc}$: 建造年度 yc 年、船型クラス tc の新造船のベースラインでの主機起源年間 CO₂ 排出量(t-CO₂/ yr: ただし本調査では建造年度によらないとする)

既存船の減速航行による CO₂ 排出削減量について表 4.2-2 に示す。

表 4.2-2 減速航行による CO₂ 排出削減量(既存船: Mt-CO₂/年)

減速率	5 %	10 %	20 %
排出削減量(Mt-CO ₂)	38.7	74.8	138.8
排出削減率 (既存船の総排出量比)	7.1%	13.8%	25.5%
排出削減率 (新造船及び既存船の総排出量比)	2.6%	5.1%	9.5%

4.2.3 減速航行による限界排出削減コストの算定

減速航行における MAC の算出に当たっては、減速航行の便益と併せ、コスト要因として船舶量の増加を考慮する必要がある。これは設備コスト及び運営コストの双方の要因がある。減速航行により個船の年間航行日数は速度に反比例して増加し、停泊日数は不変とした。これは以下の式(25)のように表される。

$$\Delta FL_{V \rightarrow \Delta V} = \frac{DAS \times \frac{V}{V - \Delta V} + (365 - DAS)}{365} - 1 \quad (25)$$

ただし、

- ・ $\Delta FL_{V \rightarrow \Delta V}$: 速度 V から ΔV へ減速した場合の隻数の変化(%)
- ・ DAS : 年間航行日数(日)

例えば航行 2 日、停泊 1 日、計 3 日という周期で運行している船舶に対して 50 % の減速を行うと、荷動きの周期は航行 4 日、停泊 1 日、計 5 日となる。即ち従来は 3 日で完了していた荷動き業務に 5 日を要することとなり、それを補填する船舶数($5 \div 3 - 1 = 67\%$ の隻数増加)が必要となる。従ってこの船舶が半分の速度で減速航行を行う場合、荷動きを従来レベルに保つためには 1 隻につき 0.67 隻の追加的な備船が必要となると算定される。この設備コストは式(26)のように算出できる。

$$CAPEX_{V \rightarrow \Delta V} = SP \times \Delta FL_{V \rightarrow \Delta V} \quad (26)$$

ただし、

- ・ $CAPEX_{V \rightarrow \Delta V}$: 速度 V から ΔV へ減速した場合の備船コストの増加(USD)²⁶
- ・ SP : 船価(USD)

なお 2020 年の船舶のコストには導入された排出削減技術の分が上乗せされるが、多くの技術について運営コストはゼロまたは設備コストに比べて小さいため、これらは船価についてのみ影響を与えるとした。

また、増加した船舶の運行に伴い、船員、保険、潤滑油等の付随費用が毎年発生する(燃料費については削減効果として織り込まれる)。これらについては、増加した船

²⁶ 世界の造船能力を考慮すると、追加的に必要な船舶は実際には大規模な減速航行実施年(2020年)の5年前程度から追加的に建造することが必要になると考えられる。ただしここでの計算では、これら設備コストは2019年に全て発生するとしているが、導入技術の追加的コストの前倒しによる影響は軽微である。

船の設備コストの10%とした。運営コストの増加は式(27)のように表される。

$$OPEX_{V \rightarrow \Delta V} = R_{OPEX} \times CAPEX_{V \rightarrow \Delta V} \quad (27)$$

ただし、

- ・ $OPEX_{V \rightarrow \Delta V}$: 速度 V から ΔV へ減速した場合の備船に伴い毎年発生する運営コストの増加(USD)
- ・ R_{OPEX} : 船価に対する運営コストの比率(10%)

以上のようにして算出した新造船の減速航行のMACを表4.2-3に示す。

表 4.2-3 減速航行によるMAC算出結果(新造船)

減速率	5%	10%	20%
年間排出削減量	70.2	135.6	252.0
MAC(ケースA)	-20.0	-16.6	-8.3
MAC(ケースB)	-1.6	1.2	8.1
MAC(ケースC)	-12.1	-6.8	6.5

(単位 Mt-CO₂/年(年間排出削減量)、USD/t-CO₂(MAC)。主機関の小型化は行われないと想定)

結果として減速航行のMACはプラスにもマイナスにもなり、全体としては個別排出削減技術の導入と比べて費用対効果は低く算出される。

なお、新造船については、減速航行に関しては主機関の小型化により対応するという選択肢もある。設計速度で航行している船舶が5%の減速を行うと、主機関の設計出力を $1 - 0.95^3 = 14\%$ 減じることが可能であり、その分船価は低下する。船価の低下をエンジン設計出力1kWあたり800USDとおいた場合のMAC変化を表4.2-4に示す(エンジン設計出力低下に伴う貨物容量増大等の付随的便益はここでは考慮しない)。減速航行に伴う主機関の設計出力低下の影響は小さい。減速航行への対応策としての主機関の小型化を開始する時期が早ければこの差は大きくなるが、主機関を小型化した船舶の発注と減速航行の開始の時期が乖離するのは不自然であると考えられる。なお、主機関の小型化により、変化する輸送需要への対応の柔軟性が失われることを想定すると、減速航行の対策としての導入は想定しにくい。

表 4.2-4 2020年建造船舶の主機関小型化によるMAC(新造船:USD/t-CO₂)

	減速率5%		減速率20%	
	小型化しない	小型化する	小型化しない	小型化する
ケースA	-20.0	-20.1	-8.3	-8.7
ケースB	-1.6	-1.7	8.1	7.8
ケースC	-12.1	-12.2	6.5	6.0

同様に算出した既存船の減速航行の MAC について表 4.2-5 に示す。新造船に比べて MAC がやや高く算出されているが、これは本モデルにおける技術導入シナリオにより既存船のほうが排出削減技術が導入されうると計算されるため、同じ減速率では既存船のほうが排出削減効果が低く(即ち MAC が高く)算出されることが挙げられる。

表 4.2-5 減速航行による MAC(既存船)

減速率	5 %	10 %	20 %
年間排出削減量	38.7	74.8	138.8
MAC(ケース A)	-12.2	-8.4	1.2
MAC(ケース B)	3.9	7.0	14.5
MAC(ケース C)	-0.7	5.4	20.5

(単位 Mt-CO₂/年(年間排出削減量)、USD/t-CO₂(MAC))

新造船及び既存船に対して減速航行対策を適用した際の MAC カーブについて図 4.2-3～図 4.2-5 (新造船)、図 4.2-6～図 4.2-8 (既存船) に示す。

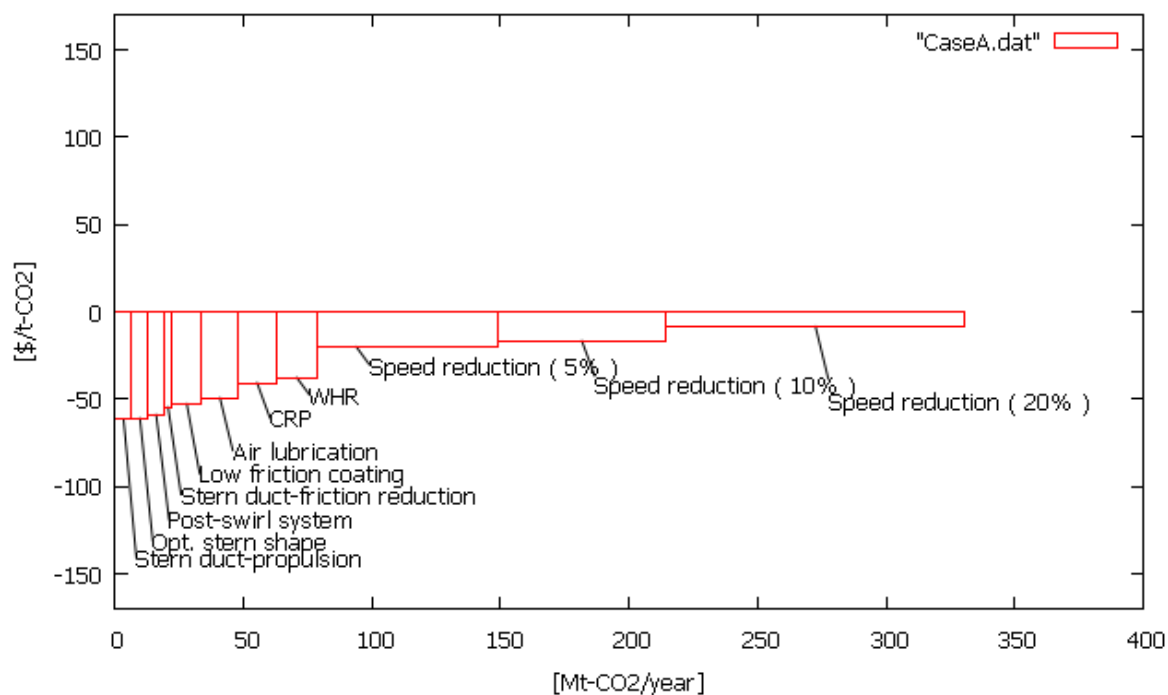


図 4.2-3 排出削減技術の MAC

(新造船+減速航行：ケース A(割引率 5 %、回収想定期間 20 年))

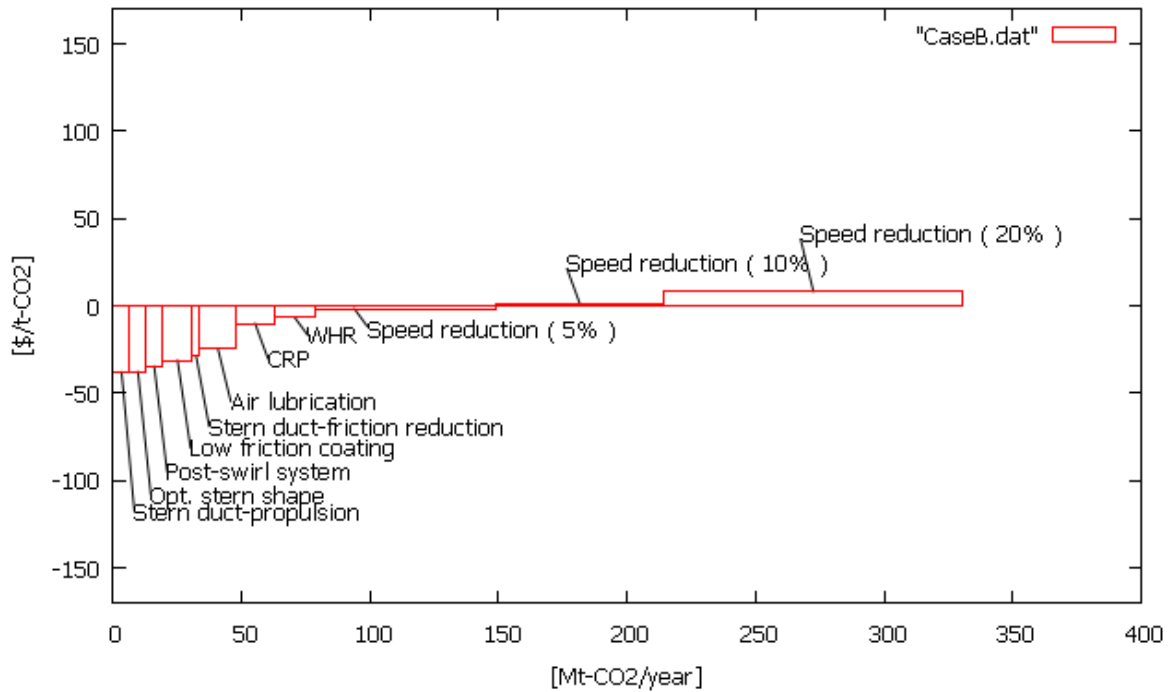


図 4.2-4 排出削減技術の MAC

(新造船+減速航行：ケース B(割引率 10 %、回収想定期間 10 年))

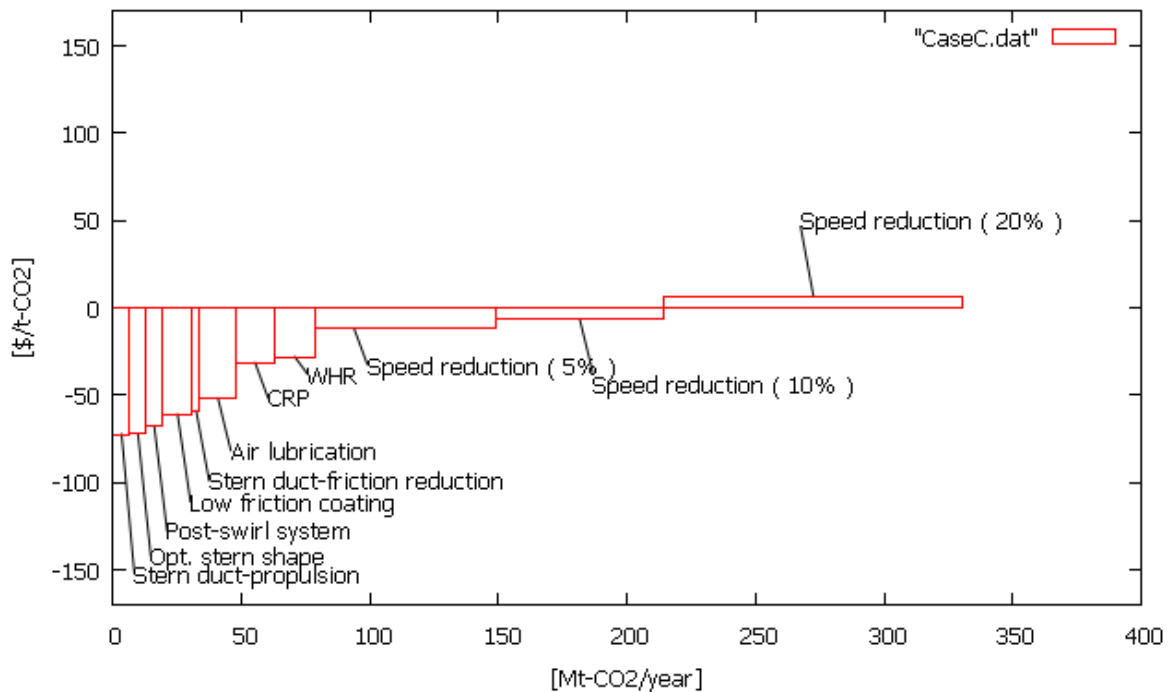


図 4.2-5 排出削減技術の MAC

(新造船+減速航行：ケース C(割引率 5 %、回収想定期間 10 年))

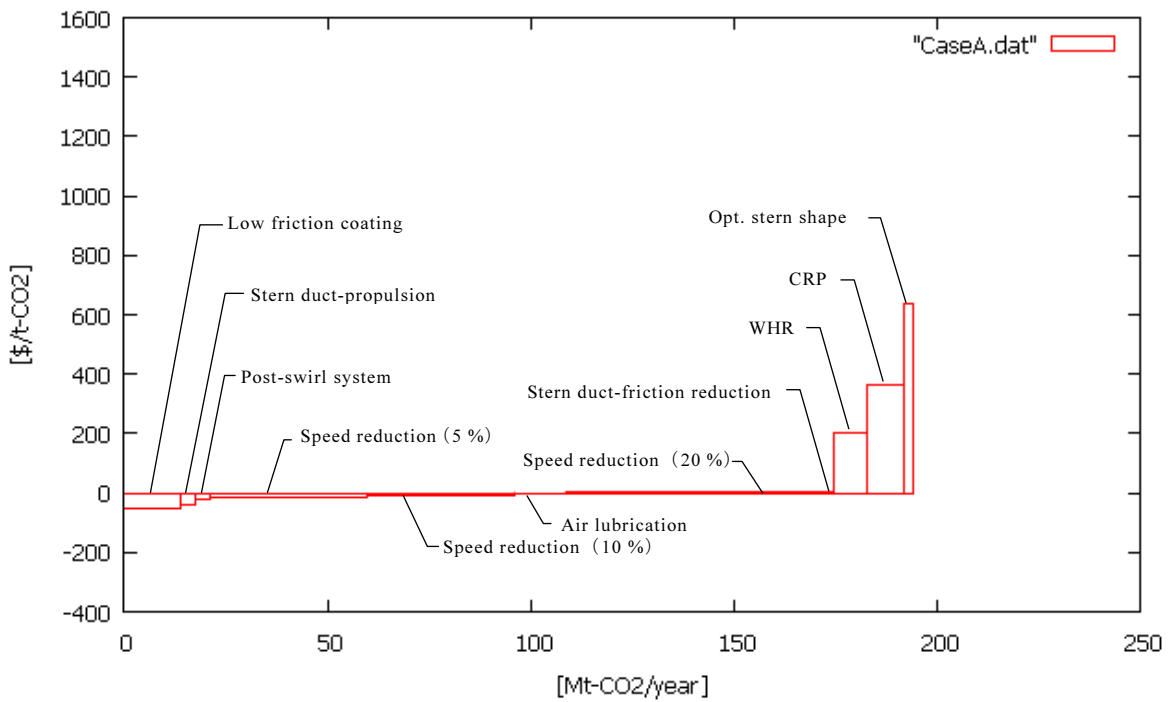


図 4.2-6 排出削減技術の MAC

(既存船+減速航行：ケース A(割引率 5%、回収想定期間 20 年))

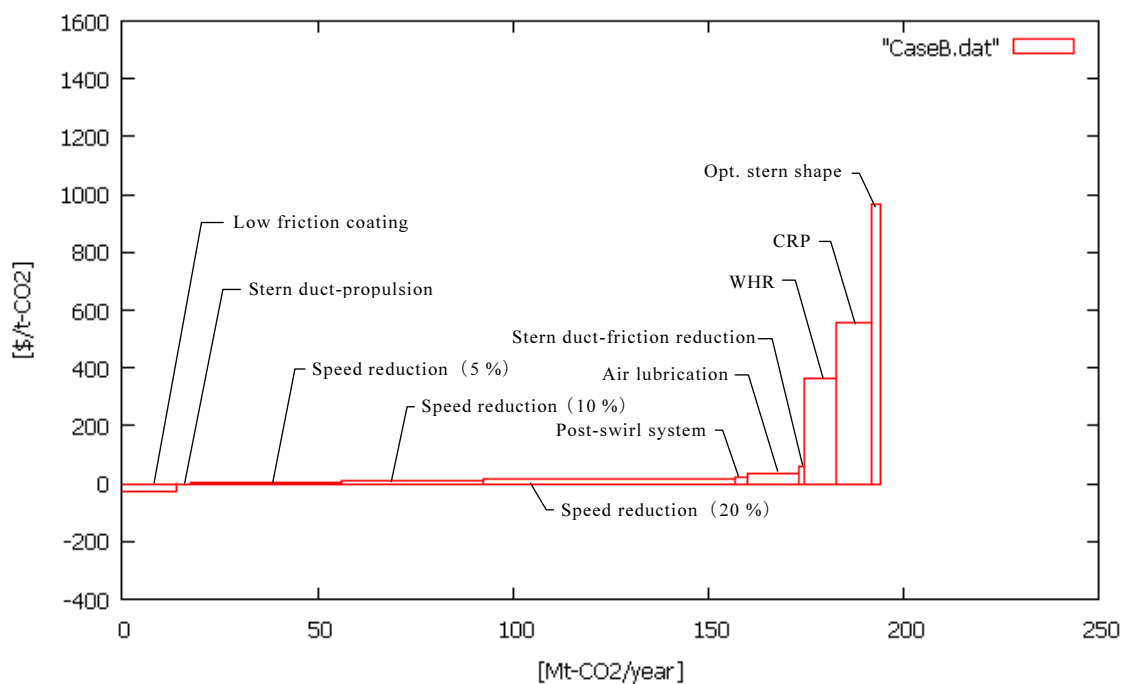


図 4.2-7 排出削減技術の MAC

(既存船+減速航行：ケース B(割引率 10%、回収想定期間 10 年))

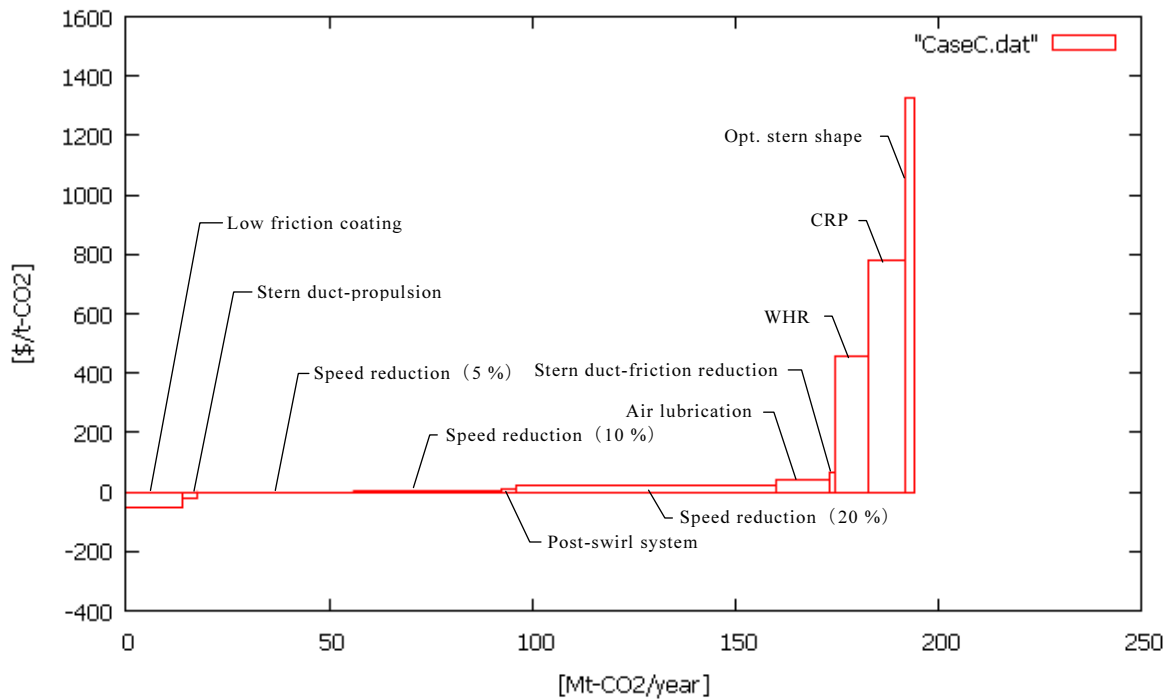


図 4.2-8 排出削減技術の MAC

(既存船+減速航行：ケース C(割引率 5%、回収想定期間 10 年))

なお、港湾における効率化等により、追加的な備船を行うことなしに減速航行を行うケースも、とりわけ減速率が小さい場合には想定できる。この場合、減速後の排出削減量は下記の式(28)で算出できる。

$$CE_{i,ME,V \rightarrow \Delta V} = CE_{,ME,V} \left(\frac{(V - \Delta V)^3}{V^3} \right) \quad (28)$$

ただし、

- ・ $CE_{i,ME,V \rightarrow \Delta V}$: 速度 V から ΔV だけ減速した場合の個船 i の主機の CO_2 排出量(t-CO_2)
- ・ $CE_{i,ME,V}$: 速度 V で航行する場合の個船 i の主機の CO_2 排出量(t-CO_2)

上式により算出した年間排出削減量と MAC を表 4.2-6 に示す。この場合は追加的な備船は不要であるため排出削減量は増加し、また追加的な備船コストが発生しないために MAC は表 4.2-3 及び表 4.2-5 より大幅に低下する。

表 4.2-6 減速航行による MAC 算出結果(追加備船の要否に関する比較)

	新造船		既存船	
	追加備船あり	追加備船なし	追加備船あり	追加備船なし
年間排出削減量	70.2	104.5	38.7	59.2
MAC	-20.0	-56.1	-12.2	-53.4

(ケース A(割引率 5%、回収想定期間 20 年)、減速率 5%とおいた。単位 Mt-CO₂(年間排出削減量)、USD/t-CO₂(MAC))

4.2.4 油価変動による感度解析

減速航行についても油価変動による感度解析を行った。結果について表 4.2-7 及び図 4.2-9～図 4.2-10 に示す。油価の上昇により減速航行の MAC は低下し、大きくマイナスになると算出されるが、反面油価の大幅下落によりプラスに上昇する。即ち油価変動は減速航行のインセンティブに対して大きな影響がある。

表 4.2-7 油価変動による感度解析結果(USD/t-CO₂)

	新造船	既存船
ケース A(ベースケース、500 USD/t-fuel)	-20.0	-12.2
同、油価上昇(2020 年から 1000 USD/ t-fuel)	-76.1	-65.6
同、油価低下(2020 年から 100 USD t-fuel)	24.9	30.5

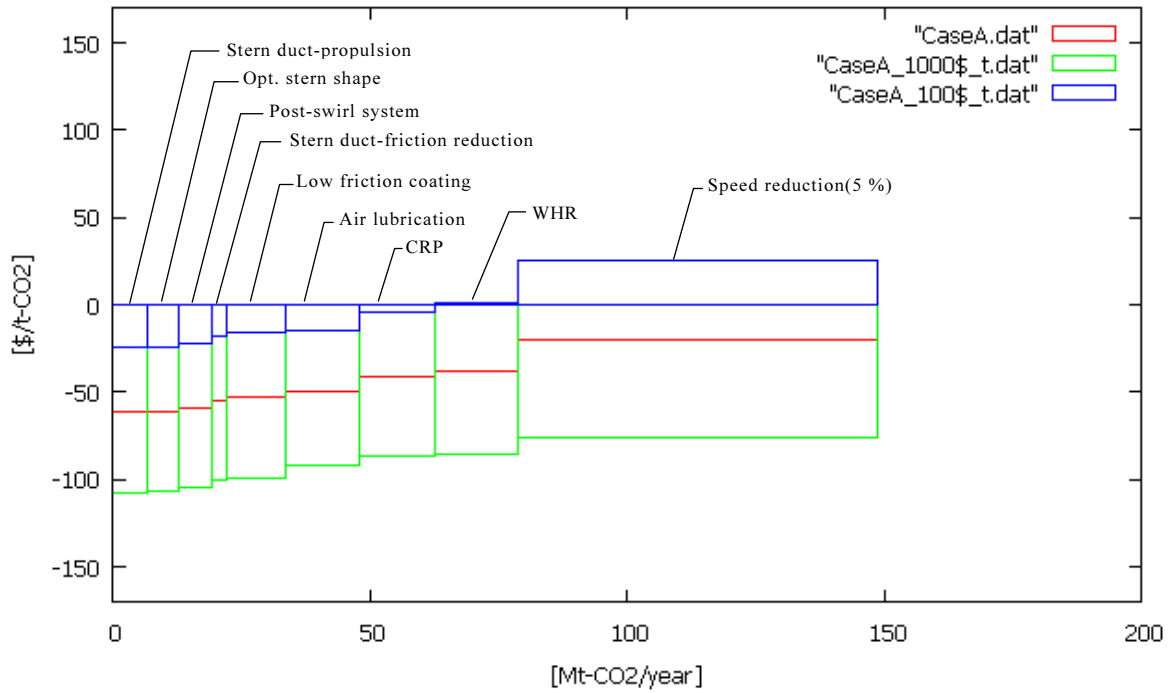


図 4.2-9 排出削減技術の MAC

(新造船+減速航行：ケース A(割引率 5 %、回収想定期間 20 年) 油価変動)

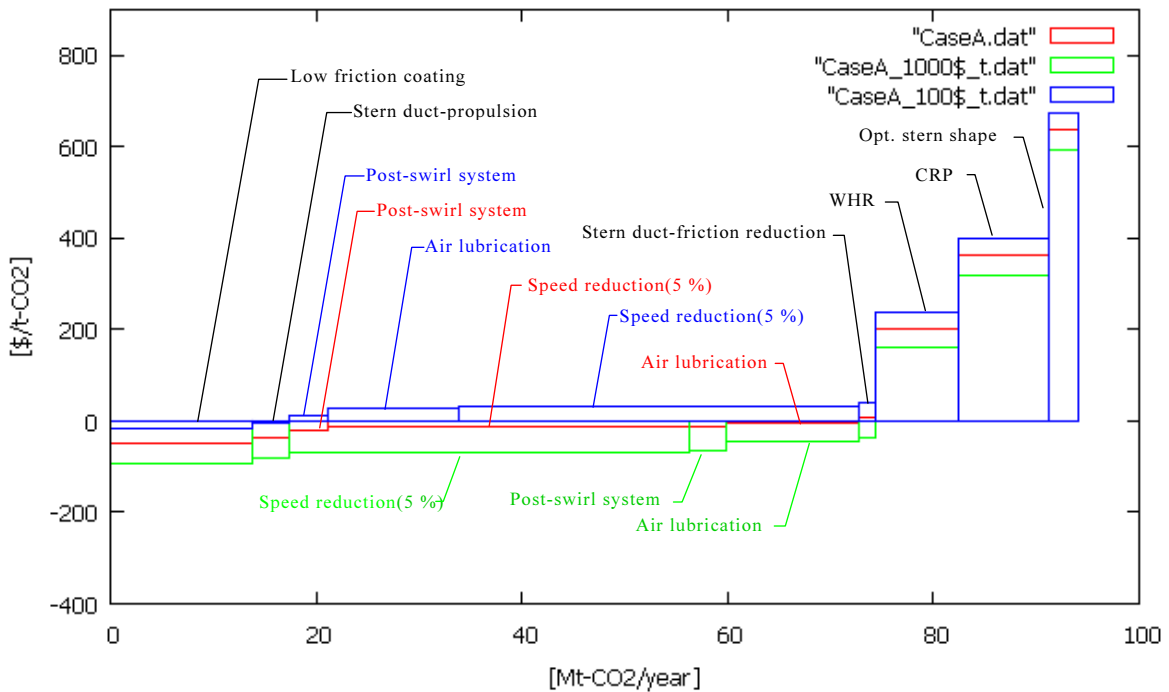


図 4.2-10 排出削減技術の MAC(既存船+減速航行：
ケース A(割引率 5 %、回収想定期間 20 年) 油価変動)

4.3 中・長期的な排出削減対策に対する適用を考慮した限界排出削減コストの算定

上記以外の排出削減対策についても検討したが、スカイセイルやバイオ燃料等の長期的な排出削減技術については、それらによる排出削減量を算定するために必要なパラメータ(排出削減ポテンシャル、普及率、イニシャルコスト)について不確実性が高いものが多い。さらに、2020年において中・長期的な排出削減対策が、全体の排出量に影響するほどの普及率とそれに伴う排出削減量を持つという将来シナリオも現時点では蓋然性が低い。一方で、対象年をたとえば2050年にした場合、普及対象である船舶の建造量、必要な資金パラメータや油価についての不確実性が大きくMAC算定を行っても意味のある解析になり得ないと判断した。

このため、本調査では現実的な導入シナリオが比較的想定しやすいLNG 焚き船の導入について検討したが、これに関する分析は参考資料2に記載することとする。

5 他の部門における障壁及び克服手段に関する検討

海運部門における排出量削減対策の導入障壁克服に資するため、海運以外の分野における排出削減技術導入に対する障壁について検討した。

(住宅・建築物部門における障壁及び克服手段に関する検討)(5.1 節)

MAC がネガティブとなる技術に対する障壁の一つとして、所有者と利用者が異なることなどに起因する「インセンティブの乖離」があげられる(3 章参照)。このような「インセンティブの乖離」の特徴を持つ住宅・建築物部門における障壁と、その対策について分析した。

従来の省エネ法では、一定量以上のエネルギーを使用する建物のオーナーに省エネ対策実施の義務が課されてきたが、テナントビルではビルオーナーとテナント側の省エネ意識の相違から省エネ化が進みづらいという課題があった。このため、平成 22 年の省エネ法改正で、一定量以上のエネルギー使用者を「特定事業者」、フランチャイズチェーン等を「特定連鎖化事業者」として指定し、省エネ対応を義務づける特定事業者、特定連鎖化事業者の指定制度が導入された。

住宅分野では、マンション建築時のデベロッパーと居住者のニーズの相違や居住者の省エネ意識の問題が存在し、業務分野・産業分野でも特定事業所以外の事業者が利用するテナントスペースや中小規模建物での省エネ化は進んでいない。これらの分野を含め広く省エネ化を推進するため、2000 年より機器メーカーを対象に、目標年次までに自社の出荷する機器の平均効率を定められた目標値以下にすることを求めた、機器の省エネ基準制度である「トップランナー基準」が導入された。

さらに、上記のようなトップランナー対象機器の普及を促進するため、一部品目について、自社カタログに「省エネルギー基準の達成率」等を表示したラベルの表示を義務づける、省エネラベリング制度が導入された。

その他、省エネ機器への補助金制度等が導入されているほか、海外では米国の「ENERGY STAR Label for Commercial Buildings」、欧州の「Energy performance certificates」建築物を対象とした省エネ性能表示制度・証書制度等も導入されている。

(輸送部門における障壁及び克服手段に関する検討)(5.2 節)

輸送部門では、住宅・建築物部門とは異なり短期的な削減技術は既に導入が進んでいるため、現時点でコスト面から広範な普及が望めない技術の普及を目指すための取組を整理した。

自動車部門では、電気自動車、ハイブリッド自動車を対象に MAC の試算を行うといずれも数万円/t-CO₂という非常に高い対策コストとなる。その導入期においては国からの補助金が一定の役割を果たしたが、現在は消費者ニーズに即した多様な商品の提供や環境意識への訴求が効果をあげていると考えられる。

航空分野については、一般的に航空機の所有者は航空会社そのものであるため、船舶のようなインセンティブの乖離は生じにくい。既存の検討や、今回調査での軽量新型機の導入による MAC 試算の結果では対策費用は必ずしもマイナスではないが、航空機メーカーは新型機開発の際に一定の対策技術を適用し、また航空会社側も定期的に機材を更新する必要があるため、対策を織り込んだ新型機の導入により対策が進捗するものと想定される。

内航海運は、船主と事業者とのインセンティブの乖離をはじめ外航海運と類似した障壁が存在すると考えられる。改正省エネ法に基づく特定旅客輸送事業者及び特定貨物輸送事業者に 2 万総トン以上の船腹の船舶が含まれているほか、これらに対して輸送を委託する特定荷主に対する省エネ計画の策定・提出及びエネルギー使用量の報告が 2007 年 4 月より義務付けられている。このほか、内航海運省エネ診断推進委員会による省エネ推進体制の構築及び啓発、環境低負荷船に対する特別償却、省エネ設備を搭載する船舶の建造・改造に対する関連費用の補助制度、省エネ船の共有建造の際の船舶使用料の削減等の取り組み、エコシップマークの採用によるモーダルシフト推進等、多面的な対策が推進されている。

(大規模排出施設における障壁及び克服手段に関する検討 (5.3 節))

製鉄所、発電所等の大規模排出施設における排出削減対策について整理した。

鉄鋼業における個別技術として、例えば高炉での銑鉄製造を含む製鋼過程で最も排出削減効果が大きいとされている技術であるコークス乾式消火(Coke dry quenching : CDQ)は日本の製鉄所の全てにおいて導入されており、現在最大の鉄鋼生産国である中国でも導入が進んでいる。しかしその他諸国では未導入の製鉄所が多くなっている。

省エネ技術の導入への障壁として、エネルギー価格の上昇や市場環境の悪化のため、企業が投資に踏み切れないこと、地域毎の規制レベルの相違等が指摘されており、中国など国によっては**規制的手法**が導入され効果を挙げている。

電気事業における排出削減対策の導入コストとしては、国家戦略室の試算で、例えば一般水力による石炭火力の代替(4,375 円/t-CO₂)、陸上風力による LNG 火力の代替(9,500 円/t-CO₂)、メガソーラーによる LNG 代替(70,375 円/t-CO₂)等、再生可能エネルギー導入に関しては比較的高い導入コストが試算されている。

これに対し、**各種補助金対策**が導入されているほか、電力の**固定価格買取制度**の購入価格設定がその導入動向に大きな影響を与えると考えられる。

(障壁及び克服手段の概要)(5.4 節)

外航海運部門の持つ、「インセンティブの乖離」、「独立した省エネデータ・成果検証の欠如」等の障壁については、類似した障壁を持つ内航海運部門、住宅・建築物部門でのラベリング等も含めた包括的な取組が参考となる。

その他一般的な障壁については、自動車部門、電気事業における補助金等の対策実施者へのインセンティブ付与、海外鉄鋼業界における規制的手法等も参考とすることができる。

排出削減対策の導入がほとんど新型機の導入により実現される航空部門も、造船所と船社との関係という観点では参考となる。

5.1 住宅・建築物部門における障壁及び克服手段に関する検討

外航海運において MAC がマイナス(即ち導入が費用効果的)と算出される技術の導入に対する障壁の一つとして、所有者と利用者が異なることなどに起因する「インセンティブの乖離」があげられる(3 章参照)。住宅・建築物部門においても、建築物のオーナーと賃貸者が異なるという一般的によく見られる事象があり、外航海運同様のインセンティブの乖離が見られることから、住宅・建築物部門における各種温室効果ガス排出削減技術の導入に対する障壁及び克服手段について分析する。

わが国では政府の規制を中心に、各種施設における省エネ化への取り組みが工場やビルのオーナー等に対する「義務」として定められてきた。その中心は「エネルギーの使用の合理化に関する法律(省エネ法)」である²⁷。具体的には、経済産業省と国土交通省所管のもとで、産業分野・民生分野・運輸分野の各分野においてビルや工場のオーナー、製造機器メーカー等に省エネ推進の義務を課しており、その概要は図 5.1-1

²⁷ 1979 年に制定され、以後適用範囲が拡大されてきた。1998 年には、自動車や電気機器等に対し、市場に流通している機器のうち最高水準のものをエネルギー効率の基準とするトップランナー基準が導入された。また 2005 年には運輸部門(荷主)への拡張と併せ、建築物の新築・増改築にも対象を拡大した。2010 年の改正ではこれまでの工場・事業場単位のエネルギー管理から、事業者単位(企業単位)でのエネルギー管理に規制体系が変わり、年間エネルギー消費量が石油換算 1,500k1 以上の事業者(特定事業者)に対して年平均 1%以上のエネルギー消費原単位の削減が求められることとなった。

の通りまとめられる。

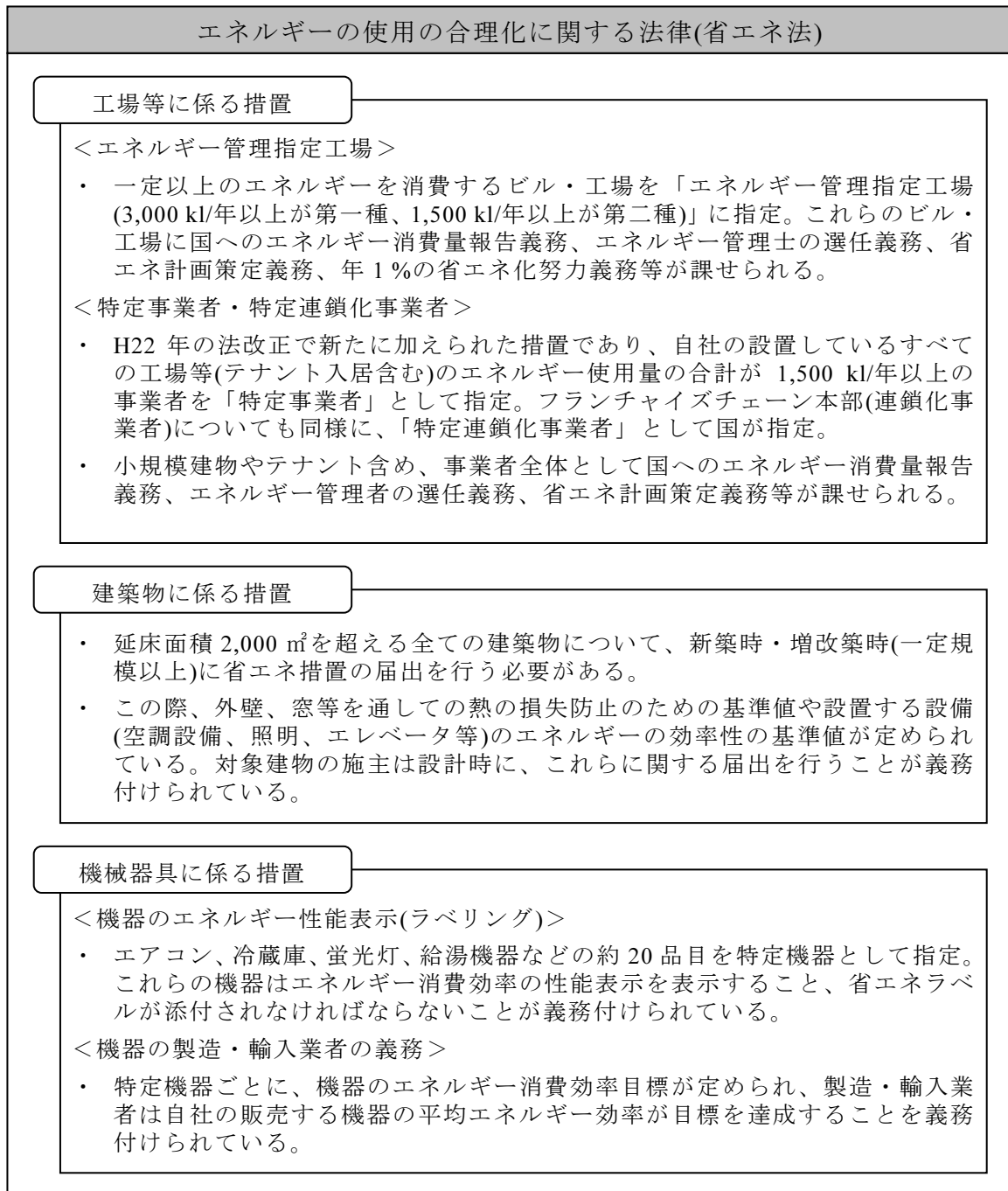


図 5.1-1 省エネ法の概要

業務用ビル(オフィスビル、学校、病院等)、マンション、工場のそれぞれについて、各分野における省エネ技術導入の障壁や過去に障壁となってきた点についての情報を収集した。まずは主要な障壁についての全体像を図 5.1-2 にまとめた上で、それぞれの障壁の概要についてまとめる。

住宅・建築物部門における主要障壁

業務用ビルにおける省エネ技術の浸透に対する障壁としては下記が挙げられる。

業務用ビル	
①テナント・オーナー間のニーズの相違	
①-1 テナントビルにおけるオーナーサイドの省エネインセンティブ欠如	<ul style="list-style-type: none"> ・ 新築ビルの省エネ性能に影響。 ・ テナントビルでは、テナント側で使用する光熱費はテナント側が負担をする。省エネ投資は、オーナーにとっては初期投資の負担増は賃料上昇による空室率低下などマイナスの側面が大きいいため進みづらい。
①-2 テナントサイドの省エネ意識欠如	<ul style="list-style-type: none"> ・ 竣工後のビルの省エネ活動等に影響。 ・ 一部のテナントビルでは、オーナーが省エネ化に積極的であってもテナントサイドの省エネ意識が乏しいことが省エネ化の障壁となっている。
②投資回収年数に関するオーナーの厳しいニーズ	<ul style="list-style-type: none"> ・ 多くのオーナーの省エネ投資に対する意識は「投資回収は2~3年、長くとも5年」。このため、ライフサイクルでの経済性が既存技術に比べて優れていたとしても、導入に至らない技術が多い。
マンション	
①マンションにおけるデベロッパーと居住者のニーズの相違	<ul style="list-style-type: none"> ・ デベロッパーの建築時の重視項目は「完成在庫物件の低減」であり、販売価格の上昇につながる「省エネ」への投資は進みづらいのが現状。
②マンション居住者側の省エネ意識欠如	<ul style="list-style-type: none"> ・ 現行の法規制ではマンションの個別住戸への措置や規定がなく、居住者に省エネ意識がない場合には住戸の省エネ化は野放しの状態。
工場	
①資金調達	<ul style="list-style-type: none"> ・ 特に中小企業では、設備投資資金は本業の遂行に必要な投資分をまかなうのみで手一杯という場合が多く、省エネ機器への設備投資は限定的。
②与信問題	<ul style="list-style-type: none"> ・ 中小企業の場合、信用力がネックとなりリースやESCO事業の導入が難しくなるケースがある。
省エネに関する情報不足	<ul style="list-style-type: none"> ・ 工場では使用される設備の詳細が異なることもあり、省エネ技術の実際の効果や品質面への影響などの情報が不足し、普及が進まないという面もある。

図 5.1-2 陸上施設における省エネルギー技術導入障壁の概要

5.1.1 テナントビル対策としての省エネ法改正

これまでの省エネ法では、一定量以上のエネルギーを使用する建物ごとに省エネ対策推進義務等の規定を行ってきた。全て建物のオーナーに省エネ対策実施の義務が課されてきたものであり、自社ビルに対しては大きな効果があった。しかし、前述のようにテナントビルではビルオーナーとテナント側の省エネ意識の相違から省エネ化が進みづらいという課題があった。

この課題解決のため、平成 22 年に省エネ法が改正され「特定事業者」「特定連鎖化事業者」指定制度が導入された。具体的な内容は以下の通りである。

<特定事業者>

自社の設置しているすべての工場等(本社、工場、支店、営業所、店舗等であり、テナント入居含む)のエネルギー使用量の合計が電力消費量を含み原油換算 1,500 kl / 年以上の事業者は「特定事業者」として指定され、自社の使用するテナントスペースや営業所を含めた全体でのエネルギー使用量の報告義務、省エネ対策推進義務等が課された。報告義務に従わない場合は罰金の対象となる。また省エネルギー化の取り組みが不十分であると見なされた場合は改善命令が出されるが、それに従わない場合も公表、さらには罰金が罰則として適用される。

<特定連鎖化事業者>

フランチャイズチェーンの飲食店や小売業など小規模店舗を数多く保有する企業等についても「特定連鎖化事業者」として指定され、自社の保有する店舗や使用するテナントスペースを含めた全体でのエネルギー使用量の報告義務、省エネ対策推進義務等が課された。

つまり、改正前の省エネ法では事業者がテナントとして入居するスペースや小規模な営業所は事業者の省エネ義務の対象とはなっていなかった。しかし、改正によって事業者の使用する建物・スペース全体で原油換算値 1,500 kl/年以上のエネルギーを消費する場合には、自社がテナントとして入居するスペース等も含めて省エネ対策を実施する義務が課されることになった。これにより、省エネ法の規制対象となる業務用ビルのカバー率が改正前の 13 %から 50 %に向上している。

5.1.2 自治体環境条例におけるテナントの省エネ推進義務(東京都の例)

全国で最も省エネ対策推進に積極的な自治体の一つと考えられる東京都では、平成 22 年 4 月より「環境確保条例」を改正し、テナントを規制の対象に加えた。具体的には、一定規模以上(5,000 m² 以上の占有面積のテナント等)を占有するテナントは「特

定テナント等事業者」として省エネ計画等を自治体に提出する義務が課されるようになった。

省エネ法の特定事業者指定制度は「テナントを含む事業者全体」を規制するのに対し、本制度はテナント部分、つまり事業所のみ部分に義務を課するという面で異なる制度となっている。

5.1.3 機器省エネ基準の設定

前述のように、住宅分野ではマンション建築時のデベロッパーと居住者のニーズの相違や居住者の省エネ意識の問題から省エネ促進が難しい面が大きい。また業務分野・産業分野においても特定事業所以外の事業者が利用するテナントスペースや中小規模建物での省エネ化は進んでいないのが現状である。これら分野を含め広く省エネ化を推進するため、2000年より機器の省エネ基準制度である「トップランナー基準」が導入された。概要は以下の通りである。

<トップランナー制度の概要>

規制対象：

機器メーカーを対象にした制度であり、各メーカーは目標年次までに自社の出荷する機器の平均効率を定められた目標値以下にすることが求められる。機器の目標値が「市場で最も効率の高い機器」をベースに決められることから「トップランナー制度」と称される。目標値を達成できなかった場合は、事業者名の公表、さらには罰金を課するという措置が定められている。

対象品目：

現在 23 品目が特定機器として指定されている。

乗用自動車、	貨物自動車、	エアコンディショナー、
テレビジョン受信機、	蛍光灯器具、	ビデオテープレコーダー、
複写機、	電子計算機、	磁気ディスク装置、
電気冷蔵庫、	電気冷凍庫、	ストーブ、
ガス調理機器、	ガス温水機器、	石油温水機器、
電気便座、	自動販売機、	変圧器、
ジャー炊飯器、	電子レンジ、	DVD レコーダー、
ルーティング機器、	スイッチング機器	

目標値：

例として家庭用エアコンでは表 5.1-1 に示すように目標値が定められている。

表 5.1-1 家庭用エアコンの目標値

区分名	ユニットの形態	冷房能力	目標値(APF)
1	直吹き形で壁掛け形のもの(マルチタイプのもののうち室内機の運転を個別制御するものを除く)	4.0 kW 超 5.0 kW 以下	5.5
2		5.0 kW 超 6.3 kW 以下	5.0
3		6.3 kW 超 28.0 kW 以下	4.5
4	直吹き形で壁掛け形のもの以外の分離形のもの(マルチタイプのもののうち室内機の運転を個別制御するものを除く)	3.2 kW 以下	5.2
5		3.2 kW 超 4.0 kW 以下	4.8
6		4.0 kW 超 28.0 kW 以下	4.3
7	マルチタイプのものであって室内機の運転を個別制御するもの	4.0 kW 以下	5.4
8		4.0 kW 超 7.1 kW 以下	5.4
9		7.1 kW 超 28.0 kW 以下	5.4

以上のような取り組みの結果として、トップランナー対象品目のエネルギー消費効率改善実績は表 5.1-2 の通りとなっている。いずれの対象品目についても顕著な効率向上効果が認識されている。

表 5.1-2 トップランナー対象品目のエネルギー消費効率改善実績

機器名	改善率(出荷台数で加重平均)	年度
磁気ディスク装置	85.7 %	2001～2007
電子計算機	80.8 %	2001～2007
エアコン*	67.8 %	1997～2004(冷凍年度)
電気冷蔵庫	55.2 %	1998～2004
DVD レコーダー	40.9 %	2004～2008
照明器具*	35.7 %	1997～2005
テレビ	29.6 %	2004～2008
電気冷蔵庫	29.6 %	1998～2004
電気便座	14.6 %	2000～2006

(出典：省エネルギーセンター「省エネ性能カタログ(2011年夏)」)

*を付した機器は単位エネルギー当たり能力の改善率)

図 5.1-3 はエアコンの効率改善実績データである。2000 年の制度創設時のトップランナー制度におけるエアコン効率目標は 2004 年と定められていたが、目標年の前年である 2003 年から 2004 年にかけて平均効率が急激に改善した。特にメーカーが目標達成のため「効率の悪い製品の生産・販売停止」によって自社製品の平均効率を高めたことが分かる。

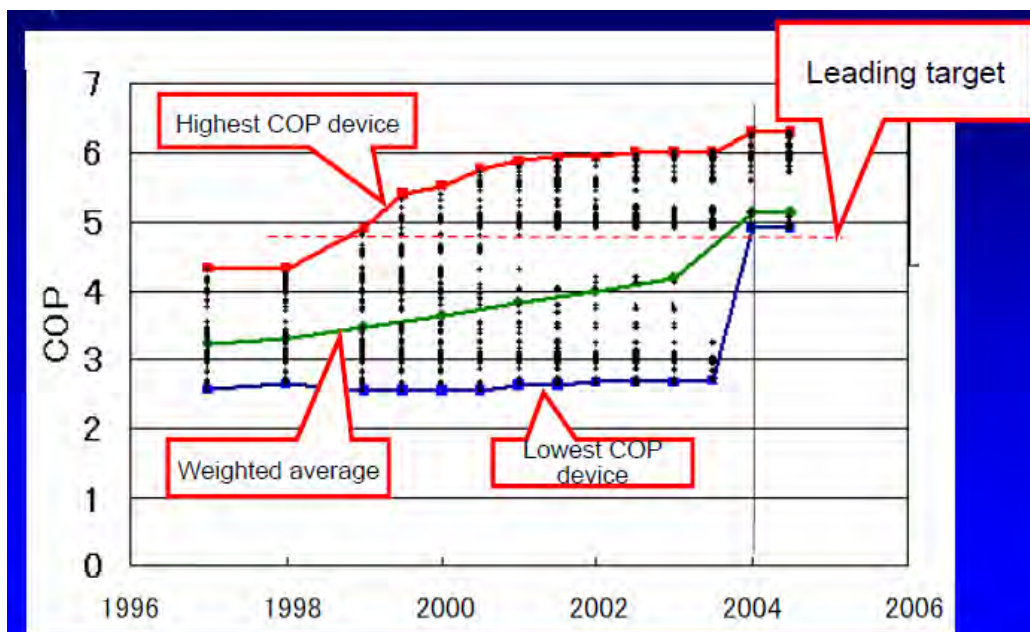


図 5.1-3 エアコンの効率改善実績(2.8 kW タイプ)と省エネ法目標値
(出典：日本冷凍空調工業会資料)

5.1.4 省エネラベリング制度

前述の省エネ基準は、「機器メーカーが達成すべき最低の効率基準」を定めたものである。加えて、トップランナー基準が達成された高効率の機器の普及をより促進させることも必要であり、消費者に対する情報提供が重要であるとの考えのもと設けられたのが「省エネラベリング制度」である。具体的には、トップランナー対象機器のうち 18 品目について「省エネルギー基準の達成度合を示すシンボルマーク(e マーク)」「省エネルギー基準の達成率」「エネルギー消費効率」「目標年度」等を表示したラベルを付した。

なお、省エネラベルの表示は製造事業者が製造して自社のカタログ等に表示することは義務として定められているが、小売事業者に対しては店頭等で表示する努力義務として定められている。トップランナー対象機器のうち機器単体のエネルギー消費量が大きく、省エネ性能のばらつきが大きいエアコン・冷蔵庫・テレビ・照明器具等についてはさらに詳細な情報を付加した「統一省エネラベル」が表示されることになっている。

5.1.5 省エネ機器への補助金制度

一般に省エネ性能に優れた製品は、特に市場投入初期段階ではインシヤルコストが高くなる。加えて前述のように業務用ビルオーナーの投資回収に対する厳しいニーズや住宅の居住者の省エネ意識の問題から、たとえエネルギーコスト削減によってインシヤルコスト増分を回収可能であったとしても、回収年数が長ければ市場の拡大に結びつかないケースが多い。

このため、先進的な省エネ製品にはしばしば設置助成制度が設けられてきた。助成により初期の市場拡大をサポートすると共に、出荷量増加(量産効果)による価格低減の促進を主な目的としたケースが多い。例えば省エネ機器に対する助成制度としては具体的には表 5.1-3 に示すようなものが挙げられる。

表 5.1-3 省エネ機器への設置助成制度の例(H23 年度実施制度)

対象機器	制度名	交付団体	概要
住宅用燃料電池システム	民生用燃料電池導入支援補助金制度	(社)燃料電池普及促進協会	補助率は「従来型給湯器」の購入費との差額の 1/2+工事費の 1/2、上限額は 105 万円。
潜熱回収給湯機、ヒートポンプ給湯機	住宅用高効率給湯器設置費補助事業	各自治体	もともとは経済産業省が補助を行っていたが、2009 年をもって終了。現在は自治体ベースで独自の助成が実施されている。補助率は自治体により異なる。
中小ビル、一般家庭向けエネルギー管理システム(それぞれ BEMS 及び HEMS と呼称)	エネルギー管理システム導入促進事業費補助金	資源エネルギー庁(交付団体は未定)	補助率は 1/2
住宅用省エネ機器(空調+給湯、空調+照明など複数の高効率機器の組合せを対象)	住宅・建築物高効率エネルギーシステム導入促進事業(住宅に係るもの)	(社)環境共創イニシアチブ	対象とする個別機器については「APF(期間効率)3.1 以上」などの基準が定められている。補助率は 1/3。
業務用省エネ機器(空調・換気・照明・給湯・冷蔵/冷凍等の単位ごとに 30%の省エネ化の可能な機器)	住宅・建築物高効率エネルギーシステム導入促進事業(建築物に係るもの)	(社)環境共創イニシアチブ	設備区分(空調、照明など)は 2 種以上行うこと。
産業用省エネ機器(「技術の先端性」、「省エネ効果」及び「費用対効果」面で政策的意義の高いもの)	エネルギー使用合理化事業者支援事業	(社)都市ガス振興センター (社)環境共創イニシアチブ	単独事業の場合 補助率 1/3 以内 1 件当たり補助金の上限は 50 億円/年度

5.1.6 建築物の省エネ基準

省エネ法では、機器の省エネ基準のみならず建築物の省エネ基準も定められている。これらはインセンティブの乖離という問題の解決というよりは国の省エネ推進のための重要テーマとして早い段階から定められてきた規制であるが、陸上施設の省エネ化推進に果たしてきた役割の大きい規制である。

基準の概要を以下にまとめる。

<対象建築物>

延床面積の合計が 300 m²以上の建築物における新築及び大規模増改築。

<規制概要>

省エネ法では「建築物の省エネ基準」が定められており、上記建築物の建築を行う者は以下の2つの指標について定められた基準値を満たすことが求められる。これらについて以下に示す。

(1)外壁、窓等を通しての熱の損失の防止

本指標は"PAL (Perimeter Annual Load)"として定められており、対象となる全ての建築物はこの PAL の値が下表の判断基準値以下になるように外壁、窓等の断熱化、日射の遮へい、プラン等を工夫する必要がある。

<PAL 値の定義式は下記のとおり。>

$$\text{PAL (Mcal/m}^2\text{)} = \text{ペリメータゾーンの年間熱負荷(MJ/年)} / \text{ペリメータゾーンの床面積(m}^2\text{)}$$

PAL 基準値を表 5.1-4 に示す。

表 5.1-4 PAL 基準値

	ホテル	病院	物販店舗	事務所	学校	飲食店
PAL (Mcal/m ²)	420	340	380	330	320	550

(2)建築設備に係わるエネルギーの効率的利用

本指標は"CEC (Co-efficient of Energy Consumption) "として定められており、対象となる全ての建築物はこの CEC の値が下表の判断基準値以下になるように各設備の効率について検討する必要がある。CEC の判断基準値を表 5.1-5 に示す。

表 5.1-5 CEC の判断基準値

	ホテル	病院	物販店舗	事務所	学校	飲食店
CEC/AC(空調設備)	2.5	2.5	1.7	1.5	1.5	2.2
CEC/V(換気設備)	1.0	1.0	0.9	1.0	0.8	1.5
CEC/L(照明設備)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
CEC/HW(給湯設備)	システムのパイプ長により異なる値が定められる。					
CEC/EV(エレベータ)	1.0			1.0		

5.1.7 建築物の省エネ性能表示制度・証書制度

その他、海外では機器ではなく建物について省エネ性能を表示する制度・証書制度を実施している国もある。

例えば米国では省エネ製品を認証する政府プログラムである **Energy Star** が建築物及び工場にも拡張されている。一定の基準を満たした効率の良い建物やプラントが認証を受け、認証バッジや看板などを得ることができる制度であり、この証書は不動産取引においてビルの価値向上に影響を与えるものとして位置づけられている。

また、EU においても「**Energy performance certificates**」と呼ばれるビル省エネ性能表示制度が導入されている。これは 2003 年に施行された EU 指令(**Directive on the energy performance of buildings**)によって 2006 年までに欧州各国が導入することを義務付けられた制度であり、ビルのオーナーはビルの建築時、売却時、賃貸時の全てにおいてこのラベルを取得・表示することが義務付けられている。省エネ性能の高い建物の資産価値向上等を目的とした制度である。ラベルの内容は国によって異なっている。

以上を取りまとめると、インセンティブの乖離という障壁の除去のために講じられてきた対策は図 5.1-4 のとおり。

テナントビルの省エネ化対策	
①	<p>省エネ法における「特定事業者」「特定連鎖化事業者」指定制度</p> <p>規制対象：テナントスペース入居の事業者</p> <p>概要：事業者の使用する建物・スペース全体で 1,500 kl/年以上のエネルギーを消費する場合には、自社がテナントとして入居するスペース等も含めて省エネ対策を実施する義務</p>
②	<p>自治体環境条例におけるテナントの省エネ推進義務(東京都の例)</p> <p>規制対象：テナントスペース入居の事業者</p> <p>概要：一定規模以上(5,000 m²以上の占有面積のテナント等)を占有するテナントは「特定テナント等事業者」として省エネ計画等を自治体に提出する義務が課される。</p>

住宅・業務等全般における省エネ対策	
①	<p>機器の省エネ基準</p> <p>規制対象：機器製造メーカー(および輸入事業者)</p> <p>概要：エアコン、照明など 23 品目について省エネ効率の目標値が決められ、各メーカーは目標年次までに自社の出荷する機器の平均効率を目標値以下にすることが求められる。</p>
②	<p>省エネラベリング制度</p> <p>規制対象：機器製造メーカー(義務)および小売事業者(努力義務)</p> <p>概要：18 品目について「省エネ基準の達成度合を示すマーク(e マーク)」「省エネルギー基準の達成率」「エネルギー消費効率」「目標年度」等をラベルとして表示する。</p>
③	<p>省エネ機器への設置助成制度</p> <p>助成対象：機器の設置者</p> <p>概要：省エネ性の優れた機器に対して設置費用の一部を助成する。(高効率空調機器、高効率給湯機器、ビルや住宅のエネルギー管理システム、産業用省エネ機器等)</p>
④	<p>建築物の省エネ基準</p> <p>助成対象：建物の新築・改築を行うオーナー(実質的には設計者)</p> <p>概要：300 m²以上の建築物における新築及び大規模増改築に際して、満たすべき建築物の基準として「外壁、窓等を通しての熱の損失の防止」「建築設備に係わるエネルギーの効率的利用」の基準値が定められている</p>
④	<p>建築物の省エネ性能ラベリング制度・証書制度</p> <p>規制対象：建物のオーナー</p> <p>概要：【米国】一定の基準を満たした効率の良い建物やプラントが認証を受け、認証バッジや看板などを得ることができる制度であり、不動産価値にも影響。</p> <p>【欧州】すべてのビルについて建物の省エネ性能を A~G の 7 段階で評価しラベルを表示することが義務付けられている。</p>

図 5.1-4 陸上施設における省エネルギー技術導入障壁に対する対策

5.2 輸送部門における障壁及び克服手段に関する検討

次に、輸送機関における障壁について分析する。具体的には、自動車、航空、内航海運について、それぞれの対策について把握し、障壁及び克服手段を検討する。

CE Delft の調査によれば、自動車や航空と言った部門は外航海運と異なり、所有者と利用者が同一である場合が多いため、インセンティブの乖離が小さいと考えられる。これに対して内航海運については外航同様にインセンティブの乖離は生じる。

5.2.1 自動車部門における障壁及び克服手段に関する検討

世界の運輸部門起源温室効果ガス排出量の約 3/4 が道路輸送に起因する。ここでは自動車部門における代表的な温室効果ガス排出削減対策として考えられるハイブリッド自動車と電気自動車について障壁及び克服手段を検討する。

(1)技術とコストの検討

ここで、自動車の例として、乗用車における電気自動車とハイブリッド車を挙げる。なおこれら自動車に対しては各種の補助金・税制優遇制度が講じられているが、これらは消費者にとっての排出削減費用削減には資するが、一国全体としての排出削減費用の算出という観点に立つと、補助金は費用を負担する主体を変えるのみであることに留意する必要がある。

電気自動車

電気自動車については、市販の電気自動車と、同型ガソリンエンジン乗用車(軽自動車)を比較した。前提等について表 5.2-1 に示す。

表 5.2-1 電気自動車と同型ガソリンエンジン車の比較(1)前提等

	電気自動車	同型ガソリンエンジン乗用車
価格	260 万円	122 万円
燃料消費率	110 Wh/km 23 円/kWh	19.8 km/l(JC08) 130 円/l
燃料原単位	0.4 kg-CO ₂ /kWh(日本の系統電力の平均原単位)	2.32 kg-CO ₂ /l(環境省)

(価格、性能はメーカー情報より)

電気自動車に関する分析結果は下記のとおり。MAC は表 5.2-1 に記載した価格、燃料消費率をはじめ多くのパラメータに影響されるが、ここでは年間走行距離で分類した。上記の設定に基づくと電気自動車は同型ガソリンエンジン乗用車に比べて走行距離あたりコストが低いため、走行距離が長いほど便益が高くなる。

表 5.2-2 電気自動車と同型ガソリンエンジン車の比較(2)算出結果

ケース	A	B	C
年間走行距離(km)	2,000	5,000	10,000
年間燃料費節減効果(万円)	0.81	2.02	4.04
年間 CO ₂ 排出削減効果(t-CO ₂)	0.15	0.37	0.73
NPV(5%/10年：万円)	-125.5	-116.6	-101.8
MAC(万円/t-CO ₂)	85.6	31.8	13.9

以上より、あるガソリンエンジン車に対して同型の電気自動車の MAC は日本での通常の走行を想定する限りは 10 万円/t-CO₂ を上回ると算出される。なおこの電気自動車には(当該モデルの場合)72 万円の補助金給付の対象となり、加えて重量税が免除となるが、これを考慮する場合は、年間走行 10,000 km の場合の MAC は 3.5 万円/t-CO₂ と、約 1/4 に減少する。3.5 万円/t-CO₂ という数値は温室効果ガス排出削減対策としては高価な部類に属するが、消費者の観点から見れば後述ハイブリッド車と同等であり、補助金は購入のインセンティブにはなると思われる。現状の電気自動車の販売台数と補助金申請数を比較すると、補助金の効果は相当程度あるものと考えられる。なお電気自動車については H22 年度に販売が急増したが、これは消費者のニーズに応える車種が販売されたことが大きい。

ハイブリッド自動車

ハイブリッド自動車については、市販のハイブリッド自動車と、同型ガソリンエンジン乗用車(ワンボックス)を比較した。前提等について表 5.2-3 に示す。

表 5.2-3 ハイブリッド自動車と同型ガソリンエンジン車の比較(1)前提等

	ハイブリッド車	同型ガソリンエンジン乗用車
価格	376 万円	274 万円
燃料消費率	18 km/l(JC08)	11 km/l(JC08)

(価格、性能はメーカー情報より)

電気自動車と同様に、年間走行距離について 2,000 km、5,000 km、10,000 km の 3 つのケースについて MAC を算出した。結果について表 5.2-4 に示す。

表 5.2-4 ハイブリッド自動車と同型ガソリンエンジン車の比較(2)算出結果

ケース	A	B	C
年間走行距離(km)	2,000	5,000	10,000
年間燃料費節減効果(万円)	1.2	3.1	6.2
年間 CO ₂ 排出削減効果(t-CO ₂)	0.2	0.6	1.1
NPV(5%/10年：万円)	-88.1	-74.4	-51.7
MAC(万円/t-CO ₂)	39.9	13.5	4.7
同(減税額の差分を考慮)	34.3	11.2	3.6

ハイブリッド自動車の場合、電気自動車と比べると MAC は約半分程度と算出されるが、それでも数万円/t-CO₂ のレベルである。なお減税効果については、比較の対照となるガソリン車もエコカー減税の対象となっていることもあり、同型のガソリンエンジン乗用車に対してハイブリッド自動車を購入する選択肢の MAC に大きな影響を与えない。MAC をマイナスとするためには、年間走行距離を 10,000 km とした場合でも 50 万円以上の補助が必要となる。

(2)障壁と克服手段の検討

電気自動車についてはコストが大きな制約になっていると思われるが、近年販売が急増した主な理由は主として一般消費者のニーズに合致した車種の販売が開始されたからであり、コストや充電インフラ等の制約の影響が明らかになるのはむしろ今後であろう。

ハイブリッド自動車については平成 18 年以降は補助金の対象ではなくなり、またエコカー減税において非ハイブリッド車と顕著な差がない中、販売台数を伸ばしており、現在、国内販売台数の 10%以上をハイブリッド自動車が占めるまでになった。消費者意識調査ではトータルコストでガソリン車より多少高くても購入するとした層は全体の 5%にとどまり、そのうち許容できるトータルコストの幅はガソリン車の 10~20%増と応えた層が 90%を占めているが、ハイブリッド自動車については消費者ニーズに即した多様な商品の提供や環境意識への訴求が効果をあげていると考えられる。

5.2.2 航空部門における障壁及び克服手段に関する検討

(1)技術とコストの検討

航空分野における CO₂ 排出削減技術を分類すると、①技術的対策、②代替燃料の利用、③運航改善、④インフラと航空交通管理の 4 つに整理できる。(本分類は、McKinsey & Company が航空分野における MAC カーブ算出の際に分類として用いているものである。)

①技術的対策としては、機体の空気力学的な改善、表面平滑化、翼端付加物、推進装置の高効率化、機体の重量軽減(軽い構造部材の適用)等が行われる。これらは、既存機材へのレトロフィットとして行われることもあるが、多くの場合は新しい機材の導入により一体的に導入される。エアラインにとってはこれらの技術改善がもたらす燃費改善、運航コストの削減が大きな導入インセンティブとなる。運航コスト削減要求により一部のエアラインで運航速度の低減等も行われる中、設計速度の低減も技術的な対策として考えられるが、航空機の特長である速達性とのトレードであるため、現在のところ余り思い切った導入は見られない。

②代替燃料として期待されているのはバイオ燃料であり、International Air Transport Association(IATA)においても加盟航空会社に対して、「2017 年までに代替燃料(バイオ燃料)の利用率を 10 %まで引き上げる」という目標を設定している。一方、水素燃料については、商用に実用化されるのは 2050 年頃とも言われ、長期的な CO₂削減技術として位置づけられる。

③運航改善としては、運航時の重量軽減のための旅客・貨物量の調整、予備燃料(緊急時の対応や計算上と実際の消費燃料の誤差を補正するために余分に搭載する燃料のことで、通常消費燃料の 8~10 %程度を搭載する。)の削減や、離着陸時、地上走行時の燃料消費の削減等が考えられる。

④インフラと航空交通管理については、航空管制システムの改善が有効であり、適切な航空交通管制による航空路や空港の輻輳の回避、最適高度・経路の提供や、適切な空域・航空路設定による飛行経路短縮、着陸援助施設による悪天候時のダイバートの回避等が挙げられる。これにより、航空機運航時の燃料消費が低減する。

McKinsey & Company、Fraunhofer、UK Department for Transport の各機関では、航空分野の省エネ技術(CO₂排出削減技術)の MAC カーブを算出している。そこで考慮されている技術を上記の分類に沿って、表 5.2-5 及び表 5.2-6 で整理した。なお、Pew Center(米国に拠点を置く、気候変動に関する調査研究を行っている独立系財団)によって整理されている航空分野の省エネ技術についても同様に整理を行った。参照した文献は以下のとおり。

- ・ McKinsey and Co., 2009, Pathways to a low-carbon economy version2 of the global greenhouse gas abatement cost curve, 2009(以下 McKinsey 文献)
- ・ Pew Center, 2010, Climate techbook (aviation)(以下 Pew 文献)
- ・ Fraunhofer Institut, 2010, Air transport marginal abatement costs and cost reduction through learning(以下 Fraunhofer 文献)

UK Dept. of Transport, 2011, A marginal abatement cost curve model for the UK aviation sector Technical Report: Final(以下 UKDOT 文献)

表 5.2-5 航空分野における排出削減対策の分類(1)

省エネ技術の分類	McKinsey & Company	PEW Center	Fraunhofer	UK Department for Transport	
Technological Solutions ① 技術的対策	Aerodynamic improvements	Laminar flow control (to reduce drag)	Polishing instead of painting (all)		
		Winglets	Winglets (retrofit)		
		Increased wingspans	Riblet (new)		
		Blended wing body			
	Reduced speed design				
	Engine retrofit and upgrades			Open rotors/propfan (new)	
				Turboprop development (new)	
				Turbofans for smaller airliners (new)	
				Engine upgrades (retrofit)	Engine upgrades
				Engine replacement (retrofit)	
			Lightweighting: new aircraft (new)		
Alternative fuels ② 代替燃料の利用	Accelerated fleet replacement	Lightweight laminate	Lightweighting: current fleet (retrofit)		
	Biofuel			Early retirement of aircraft (new)	Early fleet retirement with regulation/ incentive
				Biofuels (20 % blend) (all)	Biofuel
	Hydrogen		Fischer-Tropsch fuel		
	Operations-efficiency improvements ③ 運航改善	Improved fuel management		Reduction of contingency fuel	
		Cabin-weight reduction			
		Increased load factors		Improve load factor	
		Optimized take-off and landing procedures			
Taxiing with shut-off engines			Taxi-in/out: Single Engine Taxi		
			Taxi-in/out: Ground towing		
		Reduction of Auxiliary Power Unit use			
		Cyclic engine Wash			

表 5.2-6 航空分野における排出削減対策の分類(2)

省エネ技術の分類	McKinsey & Company	PEW Center	Fraunhofer	UK Department for Transport
Infrastructure and air-traffic management ④インフラと航空交通管理	Air traffic management	Advanced navigation, and surveillance and air traffic management systems (CNS/ATM)	ATM improvement: SESAR system + continuous descent	Airport traffic management efficiency
	Redesigned airspace Flexible use of military airspace Improved flight tracks	Reducing airport congestion Optimizing flight paths High speed rail		Airport capacity
	Alternative Modes of Transport			Behavioural change aimed primarily at the leisure market Remote meetings including Webinar and videoconferencing, aimed primarily at the business market
Regulatory standard CO ₂				Regulatory CO ₂ standard introduced by ICAO Achieve ICAO - CAEP fuel - burn goals
	Pathways to a low-carbon economy version2 of the global greenhouse gas abatement cost curve, 2009	Climate techbook (aviation), March 2010	Air transport marginal abatement costs and cost reduction through learning, December 2010	A marginal abatement cost curve model for the UK aviation sector Technical Report: Final, August 2011
出典名				

軽量新型機の新規導入

前述のように航空部門においてはインセンティブの乖離は主要な障壁ではない。また、航空部門は安全規制によりレトロフィットの機会は限定される。このため、ここでは障壁の分析のために「軽量新型機の新規導入」を対策として取り上げ、簡易に MAC を試算する。ここで、既存機として Boeing767-300ER を軽量新型機として Boeing787-8 を仮定する。

Boeing767-300ER は、1986 年に初飛行し、全世界の航空会社に広く使われている中型旅客機である。一方 Boeing787-8 は 2011 年に初号機が全日本空輸に納入された、次世代の中型旅客機である。機体の構造材に炭素繊維強化プラスチック等の複合材料を使用することで、機体の軽量化に務めており、これにより燃費が約 20 %改善すると試算している。前提等を表 5.2-7 に示す。

表 5.2-7 在来型航空機に対する軽量新型機の導入に関する MAC 計算(1)前提等

	Boeing 787-8	Boeing767-300ER
価格	193.5 百万 USD	163.5 百万 USD (B787-8 と同じ座席数と仮定して試算)
燃料消費率	21.5 g/(km・席) 0.022 USD/(km・席)	26.9 g/(km・席) 0.027 USD/(km・席)
CO ₂ 排出量原単位	0.070 kg-CO ₂ /(km・席)	0.087 kg-CO ₂ /(km・席)

(価格、性能、CO₂ 排出量はメーカー、航空会社情報より)

「軽量新型機の導入」対策の MAC 試算結果は下記のとおりである。ここでは、ある航空会社の 1 機あたりの年間国際線旅客輸送実績を用いて、軽量新型機を 1 機導入したときの分析結果を表 5.2-8 に示す。

表 5.2-8 在来型航空機に対する軽量新型機の導入に関する MAC 計算(2)算出結果

燃料価格(USD/t)	999.4 (2012 年 1 月現在)
年間国際線旅客輸送実績(km・席/機)	366,834,833
年間燃料費節減効果(百万 USD)	2.0
年間 CO ₂ 排出削減効果(t-CO ₂)	6,407
NPV(5%/10 年：百万 USD)	-14.1
MAC(USD/t-CO ₂)	220

(輸送実績は航空会社情報より。回収年数 10 年、割引率 5 %と仮定して算出。)

(2)障壁と克服手段の検討

航空機についても燃料価格の高騰に伴い、MAC の値も減少する。MAC の値は正となっているものの、航空機メーカーは世界に数社しかなく、また一般的に航空機の所有者は航空会社そのものであるため、船舶のようなインセンティブの乖離により、費

用効果的な航空機技術が導入されない、という状況も生じにくいと思われる(管制等の運営管理技術についてはその限りではない)。従って、航空機技術についてはメーカーの供給する新型機種の動向によっては、軽量新型機の導入が進むものと予想される。

5.2.3 内航海運部門における障壁及び克服手段に関する検討

内航海運においても、前述した船主と事業者とのインセンティブの乖離をはじめとした、温室効果ガス排出削減に対する諸般の障壁が存在する。内航海運については総船腹量2万総トン以上の船腹の事業者が改正省エネ法に基づく特定旅客輸送事業者及び特定貨物輸送事業者となるほか、これらに対して輸送を委託する特定荷主に対する省エネ計画の策定・提出及びエネルギー使用量の報告が2007年4月より義務付けられている。この一環として平成21年度より内航海運省エネ診断推進委員会が組織され、省エネに関する推進体制の構築及び啓発に当たっている。これらと併せて、環境低負荷船に対する特別償却、省エネ設備を搭載する船舶の建造・改造に対する関連費用の1/3に相当する補助制度、省エネ船の共有建造の際の船舶使用料の削減等の取り組みや、エコシップマークの採用によるモーダルシフト推進、内航海運の省エネ診断等が推進されている。

この結果、既存船舶については減速航行を中心としたオペレーションの改善効果が指摘されており、輸送需要の減退という困難な状況下において省エネ法に基づく輸送トンマイル当たり排出量の改善を達成し、現在までに指導を要する事態には至っていない。また省エネ設備に対する補助制度に対する応募は、主として低摩擦塗料が多い状況である²⁸。これらの対策の推進とあわせ、CO₂排出の見える化及び荷主・オペレータ・オーナーが連携した省エネ促進の仕組みについてさらに検討が行われている状況である。

5.3 大規模排出施設における障壁及び克服手段に関する検討

次に、大規模排出施設における障壁及び克服手段について検討する。具体的には、製鉄部門及び電力部門に関する主要な温室効果ガス排出削減技術としてそれぞれコークス乾式消火(CDQ)及び再生可能エネルギーを取り上げ、コストと導入障壁について把握する。

5.3.1 鉄鋼業における障壁及び克服手段に関する検討

鉄鋼業における個別技術のMAC試算の例として、高炉での銑鉄製造を含む製鋼過程で最も排出削減効果が大きいとされている技術であるコークス乾式消火(CDQ)につ

²⁸ 国土交通省海事局内航課ヒアリング結果。

いて、既存の導入フィージビリティスタディを例として取り上げる。CDQは石炭から高炉原料であるコークスを製造するコークス炉において1000℃にまで熱せられるコークス(赤熱コークス)に対する冷却を従来の水に代わって窒素を用いて行うことにより熱を回収し、それにより発電等を行う技術である。製鉄所においては各種の製鉄ガスを回収して熱及び電力供給に利用することが慣行となっているが、これと併せて一般的に系統電力等の購入も多く行われている。ここでCDQの利用により製鉄所に必要な電力の相当程度を賄うことが可能である。CDQは日本の製鉄所のほぼ全てにおいて導入されており、現在最大の鉄鋼生産国である中国でも導入が進んでいる。しかしその他諸国では未導入の製鉄所が多く、インド等での導入がCDMプロジェクトとして検討されている。

CDQのMACについて、既存の事例分析(インドでの導入検討事例)²⁹のデータに基づく設備データよりMACの計算を行った。MACは多くのパラメータの影響を受けるが、ここでは電力価格と為替レートの2つについて考察した。結果について表5.3-1に示す。

表 5.3-1 コークス乾式消火設備(CDQ)の導入検討事例分析

	基本ケース(電力価格 3.5 ルピー/kWh、為替レート：1.6 円/ルピー)	電力価格 2.5 ルピー/kWh	為替レート：2.5 円/ルピー	回収想定期間 20 年
設備コスト(100 万円)	-15,464	同左	同左	同左
年間便益(100 万円)	1,578	1,258	2,466	2,466
NPV(100 万円)	-6,558	-7,958	-2,684	-23
MAC(円/t-CO ₂)	3,900	4,733	1,596	7

(データ：地球環境・プラント活性化事業等調査「インド・コークス乾式消火方式によるCDM事業化調査」より。基本ケースについて、電力価格3.5ルピー/kWh、為替レート1.6円/ルピーとした。また割引率は15%、回収想定期間は10年とおいた)

CDQの費用便益は節減する電力価格に大きく依存するほか、日本の技術を海外で導入する場合は設備コストが外貨であるのに対して、便益(購入電力削減)が内貨となるため、為替レートに影響される。上述のインドでのケーススタディにおけるデータに基づき試算すると、2000年以降、2008年の経済危機以前の数年間の平均的なレートである1ルピー=2.5円を用いると、CDQ導入のMACは1,596円/t-CO₂となるが、現状の為替レートである1ルピー=1.6円を想定した基本ケースのデータを用いると、機器価格が増加するため3,900円/t-CO₂と倍以上に増加し、結果として導入が困難と

²⁹地球環境・プラント活性化事業等調査「インド・コークス乾式消火方式によるCDM事業化調査」年間粗鋼生産量180万トンの製鋼施設にCDQを導入し、年間約200GWh(16MW×2)の排熱回収発電を行う。年間CO₂排出削減量は168,162t-CO₂と算出されている。

なることが読み取れる。上記のデータに基づくと、インドでの CDQ 導入に際しては電力価格、為替レート等に関して導入に好適な条件が成立し、かつ導入対象企業が長期的視野に立った投資回収を検討する必要がある。

上記の前提を日本に当てはめて CDQ の導入における MAC を検討すると、日本では低い割引率(5 %程度)、高い電力料金(産業用で 10 円/kWh 程度以上)等、CDQ 導入の収益性を高くする要因が揃っており、上記プロジェクトと同様の設備コスト及び発電量を想定すると多くの場合において MAC はマイナスと算出される。例えば電力価格を 12 円/kWh、割引率を 5 %、インドと日本の系統電力の原単位をそれぞれ 0.9 kg-CO₂/kWh 及び 0.4 kg-CO₂/kWh とおくと、MAC は-6,771 円/t-CO₂と算出される。

なお世界的にみて CDQ の導入率は日本(90 %以上)が圧倒的に高く、韓国(70 %程度)がそれに次ぎ、他の国は 20 %程度以下と低く、むしろ中国のほうが欧米より高いことが報告されている。中国では新設高炉に対する CDQ の導入義務付け等の規制的な対策が講じられており、コスト以外にもこのような規制的措置の影響や、当該地域における高炉製鉄業の生産動向の影響が大きいことを示唆している。

なおこのような省エネ技術の導入への障壁として、エネルギー価格の上昇や市場環境の悪化のため、企業が投資に踏み切れないこと、地域毎の規制レベルの相違等も要因として指摘されている。

5.3.2 電気事業における障壁及び克服手段に関する検討

次に、電気事業における排出削減対策に関して、個別技術に基づいて検討を行った。発電施設の限界排出削減コストについては多様な要因が関与する。まず、何を代替すると考えるか、という問題がある。例えばガス火力発電(CO₂原単位約 0.4 t-CO₂/MWh)について考える場合、石炭火力発電(同、約 0.8 t-CO₂/MWh)を代替すると考えれば温室効果ガス排出削減になるが、CO₂を排出しない原子力発電を代替すると考えるとむしろ温室効果ガス排出増加要因となる。次に、電気事業者と電力消費者のいずれの視点から考えるか、という問題もある。同じ発電設備でも、自家発電等により購入電力(約 10~20 円/kWh)を代替すると考えるか、発電事業として他の電力(発電コスト 5~10 円/kWh)を代替すると考えるか、購入電力は家庭用か業務用か、で全く異なる。

現在、国家戦略室「コスト等検証委員会」において主要な電源の発電単価について検討中である³⁰。現在までに算出された主要なデータは表 5.3-2 のとおり。

³⁰ <http://www.npu.go.jp/policy/policy09/archive02.html>

表 5.3-2 主要な発電方式による発電コスト(円/kWh)試算例

	原子力	石炭火力	LNG火力	石油火力	陸上風力	洋上風力	地熱	住宅太陽光	メガソーラ	一般水力	小水力
2004年	5.9	5	6.2	10.7						11.9	
2010年下限	8.9	7	9.6	18.7	9.9	9.4	9.2	33.4	30.1	10.6	19.1
2010年上限		7.2	10	20.3	17.3	23.1	11.6	38.3	45.8	10.6	22
2030年下限		7.3	9.6	20.9	8.8	8.6	9.2	9.9	12.1	10.6	19.1
2030年上限		7.6	10.1	23.8	17.3	23.1	11.6	20	26.4	10.6	22
前提条件等											
割引率	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%
設備利用率	70%	80%	80%	80%	20%	20%	80%	12%	12%	45%	60%
稼働年数	40	40	40	40	20	20	40	40	40	40	40

(出典：エネルギー・環境会議 コスト等検証委員会 報告書案(平成 23 年 12 月 19 日)より作成)

上記のデータを下に、石炭火力、LNG火力の CO₂ 原単位をそれぞれ 0.8kg-CO₂/kWh、0.4kg-CO₂/kWh とおき、いくつかのケースにおいて排出削減コストを算出した。結果について表 5.3-3 に示す。

表 5.3-3 電力部門の排出削減コスト試算結果

ケース	排出削減コスト(円/t-CO ₂)
原子力による石炭火力の代替	2,250
一般水力による石炭火力の代替	4,375
陸上風力による LNG火力の代替	9,500
メガソーラーによる LNG代替	70,375
同、2030年	23,500

(出典：エネルギー・環境会議 コスト等検証委員会 報告書案(平成 23 年 12 月 19 日)及び典型的な CO₂ 排出原単位データより算出)

上記の検討結果は、日本における再生可能エネルギーの導入が依然としてコスト的に高価であることを示唆している。以上の状況に鑑み、再生可能エネルギーについては各種補助金が施行されている(事業者に対しては一般社団法人新エネルギー導入促進協議会による「新エネルギー等導入加速化支援対策事業」が挙げられる)。

なお、利用者の視点から住宅用太陽光発電を設置することにより系統を代替するようなケースについて検討する。「コスト等検証委員会 報告書案」における住宅太陽光のコストデータを下に、電力価格 23 円/kWh の系統電力を代替すると想定すると、住宅への設置を想定して回収想定期間として 30 年を想定した場合の MAC は約 2.0 万円/t-CO₂ と算出される(系統の CO₂ 排出係数 0.4kg-CO₂/kWh とおく)。固定価格買取制

度等の活用により高価格で電力販売が可能になるため、住宅用太陽光発電設置の MAC は低下しよう。

5.4 障壁及び克服手段の概要

上記の検討を踏まえ、CE Delft によって特定された外航海運に対する温室効果ガス排出削減技術の導入に対する障壁と照合すると、表 5.4-1 のように概観できよう。

6 外航海運における各種排出削減技術の広範な導入に対する障壁の克服のための提言

(外航海運における削減ポテンシャルとそれに対する障壁の概要)(6.1 節)

これまでの検討を総括し、新造船に対する個別技術の導入、既存船に対する個別技術の導入、オペレーション対策(減速航行)、中長期的な対策(LNG 焚き船)のそれぞれについて、2020 年における排出削減ポテンシャル、2020 年における MAC について示すと共に、技術の導入に対する主要な障壁であるインセンティブの乖離、独立データの不足、資金面での制約、ヤードの消極性及び制約について示すと共に、期待される障壁克服の手段について表 6.1-1 にとりまとめた。

(新造船に対する排出削減技術の広範な導入に対する障壁の克服のための提言)(6.2 節)

本調査の検討により、2020 年における新造船に対する排出削減技術の導入による排出削減量は外航海運起源の CO₂ 排出量の増加に比べて小さいこと、MARPOL 73/78 条約附属書 VI 第 4 章に規定された required EEDI を達成するような排出削減技術の MAC は概ねマイナスとなることが示唆された。

これらは、外航海運全体の大幅な排出削減のためにはさらなる技術開発・導入が必要であること、マイナスコストである対策技術の早期普及を進めるための対策が必要であることを示している。

設備投資を行う船主と、それによる便益を享受する船社との間の**インセンティブの乖離**については、建築主とテナントの間で同様の乖離が存在する住宅・建築物部門、内航海運における、利用者側への対策義務付け、機器の省エネ基準設定、ラベリング制度、助成制度等が参考となる。ただし外航海運は国際的な自由競争が行われており、法制度の拘束力の限界があり、また特定国船籍船や商船隊にのみ経済的負担が発生するような規制を課すと、競争上の不公平を生じる可能性がある。また、燃料価格に対する課金等の対策も、上記の乖離から、直接の技術的対策導入には結びつきにくい。

新造船への技術導入に関する**船主の資本制約**という問題については、新規技術の導入に対する補助制度または省エネ設備を導入する船舶を建造する船主に対する低利融資等が有効となる可能性があり、日本が提案している Efficiency Incentive Scheme(EIS)に基づく課金の使途として盛り込むことも考えられる。

排出削減技術に対する投資を行っても売却される場合に価格に反映されないという**中古市場の問題**については、EEDI の開示(一種のラベリング)や各種省エネ技術の長期的な実証により、排出削減技術を搭載した船舶が船社にとって費用効果的であることが示され、より高い価格で中古市場で販売できるような対策が求められる。

required EEDI を達成した船舶に対する登録料優遇等の措置(シンガポールが実施)は、そのような基準に合致する船舶の建造に対するインセンティブを促し、また PR 効果等も期待できる。

(既存船に対する排出削減技術の広範な導入に対する障壁の克服のための提言)(6.3 節)

2020 年時点では全フリートの相当程度(隻数ベースで約 46%)は 2008 年以前に建造された船舶(本調査における既存船)であるため、これらに対する排出削減技術の導入による排出削減ポテンシャルは相当程度存在する。

しかし、既存船への排出削減技術の導入(レトロフィット)する場合のコストは同種の技術を新造船に盛り込む場合の数倍以上に達する場合があります、また既存船に導入された排出削減技術の効果は一般的に新造船に導入した場合を下回る。

以上より、既存船に対する排出削減技術の導入の MAC は高く、既存船に対する排出削減技

術の導入が大幅に推進するとは考えにくい。

対象とした技術の中で、**low friction coating**については新造船への導入と比べたコストの上昇が比較的小さく、また新造船への導入と同等の排出削減効果が期待される。内航海運における省エネ補助である「海上交通低炭素化促進事業費補助制度」に基づく補助金交付の大半が **low friction coating** に対するものであり、既存船対策として船主の立場から見て最も着手しやすいものであると言える。

前述したような新造船に対する排出削減技術の導入に関する検討と併せて考えれば、既存船への対策を打ち出すより、**新造船への早期代替**を含めて、新造船に対する排出削減技術の導入スケジュールを早めるための対策が重要であると考えられる。

(オペレーションによる排出削減技術の広範な導入に対する障壁の克服のための提言)(6.4 節)

新造船及び既存船による 5%程度の減速航行がもたらす排出削減効果は本調査で検討した新造船に対する排出削減技術の効果に匹敵する水準である。しかし本調査で用いた前提では荷動きを一定とするため、減速航行に必要な追加的な備船にコストがかかることになり、結果的に **MAC** は多くの排出削減技術より高くほぼゼロに近いと算出される。なお追加的な備船を伴わずに減速航行が可能な場合はこの限りではない。

減速航行の実施主体と燃料費節減効果の受益主体は同一であり、技術的対策と異なりインセンティブの乖離は生じない。従って油価の上昇は減速航行の実施インセンティブの向上に直結する。その意味では、**燃料課金**は減速航行を促進する **MBM** であると言える。

追加的な備船コストが **MAC** の上昇の原因であることに鑑み、船社に負担を生じない形で減速航行を促進するためには、追加的な備船を伴わずに個船の **days at sea** の増加を可能にするような対策(**港湾の荷役効率の向上**等)が望まれる。ただしこのような対策については対策の実施主体と受益主体が異なるというインセンティブの乖離が存在し、港湾や海運、陸運等の様々な主体が一体となった取り組みが求められる。

(中長期的な排出削減技術の広範な導入に対する障壁の克服のための提言)(6.5 節)

中長期的な技術の代表として検討した **LNG** 炊き船については、その対策コストが **LNG** 価格、**LNG** が代替する油価、**LNG** 化による船価の上昇等、多くのパラメータに左右されることが確認された。また現実には港湾における **LNG** インフラ等の制約要因も想定できよう。

本調査では **IMO 2nd Study** に従い、大型船には **LNG** 焚き船は導入されないと想定したが、ハイブリッド自動車の例を見ると多様なニーズに合わせた商品開発が普及に大きな役割を果たしており、その意味でも **様々な船種における開発**が望まれる。

併せて、本調査で示した **MAC** 算定手法を、中長期的な対策にも適用するための手法について検討した。とりわけ、**CO₂** 排出削減量についても割り引く手法についても検討し、参考資料 3 に示した、

6.1 外航海運における削減ポテンシャルとそれに対する障壁の概要

これまでの検討を総括し、新造船に対する個別技術の導入、既存船に対する個別技術の導入、オペレーション対策(減速航行)、中長期的な対策(**LNG** 焚き船)のそれぞれについて、2020年における排出削減ポテンシャル、2020年における **MAC** について示すと共に、技術の導入に対する主要な障壁であるインセンティブの乖離、独立データの不足、資金面での制約、ヤードの消極性及び制約について示すと共に、期待される障壁克服の手段について表 6.1-1(その 1)および表 6.1-1(その 2)にとりまとめた。

表 6.1-1 外航海運における削減ポテンシャルとそれに対する障壁の概要(その1)

障壁の種類	新造船に対する個別技術の導入	既存船に対する個別技術の導入	オペレーション対策 (減速航行)	中長期的な対策 (LNG 焚き船)
2020 年における排出削減ポテンシャル(総排出量に対する比率。新造船：920 Mt-CO ₂ 、既存船：543 Mt-CO ₂)	79 Mt-CO ₂ (8.6%)	56 Mt-CO ₂ (10.4%)	減速率 5% の場合： 新造船：70 Mt-CO ₂ (7.6%) 既存船：39 Mt-CO ₂ (7.1%)	4.8Mt-CO ₂ (0.5%) (IMO 2nd Study のシナリオを想定)
2020 年における新造船及び既存船の合計排出量 (1,463 Mt-CO ₂)に対する比率	5.4%	3.8%	新造船：4.8% 既存船：2.6%	0.3%
2020 年における MAC (ケース B：USD/t-CO ₂)	- 38~- 7	- 27~+ 962	新造船：- 20.0~+ 8.1 既存船：- 12.2~+ 20.5	+ 77
インセンティブの乖離	・重要な問題である。	・重要な問題である。	・対策実施者と省エネの受益者が同一(船社)であり、インセンティブの乖離はないが、実施するためには用船契約への反映及び荷主の理解が必要。	・重要な問題である。
独立データの不足	・とりわけ先進的な技術において重要な問題であるが、EEDI データの蓄積及び EEOI データの反映により改善が期待される。	・レトロフィットの場合、技術の排出削減率は既存船の状態に依存するので、新造船より重要な問題となる。	・重要な問題であるが、EEOI データの蓄積により改善が期待される。	・事例が少ないため、導入段階にある技術と比べて重要な問題であるが、EEDI データの蓄積により改善が期待される。

表 6.1-1 外航海運における削減ポテンシャルとそれに対する障壁の概要(その2)

障壁の種類	新造船に対する個別技術の導入	既存船に対する個別技術の導入	オペレーション対策(減速航行)	中長期的な対策(LNG 焚き船)
資金面での制約	<ul style="list-style-type: none"> 運賃低下、燃料費高等の二重の影響で、重要な課題となっている。 	<ul style="list-style-type: none"> レトロフィットのコストは新造船への導入に比べて高く、効果は低い。ため、さらに重要である。 	<ul style="list-style-type: none"> 追加的な備船コストが生じる場合、重要である(減速率が大きいほどその傾向が強い) 	<ul style="list-style-type: none"> 導入段階の技術と比べて一般的に高価で、かつ不確実性が高いと考えられるため資金的な制約は大きな課題である。 今後の技術開発の状況に左右される。技術コストが大幅に低下すれば軽減される。
ヤードの消極性及び制約	<ul style="list-style-type: none"> 市況にも依存し、現在は余剰であるが、課題となる。 	<ul style="list-style-type: none"> バラスト水対策等、講じらなければならない環境対策が多く存在するため、新造船よりさらに重要な問題である。 	<ul style="list-style-type: none"> 問題ではない。 	<ul style="list-style-type: none"> 今後の技術開発状況に左右される。
期待される障壁克服の手段	<ul style="list-style-type: none"> EEDI の継続的実施によるEEOI との整合性の確保及び開示。 新技術の実証の推進。 EIS 等を通じた支援。 	<ul style="list-style-type: none"> low friction coating 等の比較的low costで導入可能な技術の実証、導入支援。 新造船に対する対策の推進により、コスト的に高価な既存船対策を講じる余地を低める。 	<ul style="list-style-type: none"> 減速航行にはインセンティブの乖離がないが、費用効果的な減速航行の実施に際しては港湾とも協力した航行の効率化が望まれる。ここで港湾と船舶との間にインセンティブの乖離が生じるため、協力体制の確立が必要。 	<ul style="list-style-type: none"> 技術実証の推進。 LNG 焚き船が導入される船種の拡大。

6.2 新造船に対する排出削減技術の広範な導入に対する障壁の克服のための提言

2章で検討した新造船に対する排出削減技術の導入による排出削減及びMACの算定の結果、下記の点が明らかとなった。

1. 上記技術の普及率は段階的に増加すると想定されることもあり、2020年においてはこれら技術の導入による排出削減量(79 Mt-CO₂)は外航海運起源のCO₂排出量の増加に比べて小さい。このことは外航海運全体の大幅な排出削減のためにはさらなる技術開発・導入が必要であることを示唆している。
2. 本調査より、MARPOL 73/78条約附属書VI第4章に規定されたrequired EEDIを達成するような排出削減技術のMACは概ねマイナスとなることが示唆される。これは2.1で概観した外航海運における排出削減対策のMACに関する既存諸研究とほぼ一致する。しかし、MACがマイナスで計算される削減技術による排出削減可能量が大きいということは、別の視点からは、そのような技術の広範な普及が現時点では進んでいないことを意味している。これは、船主と海運事業者が異なる場合のインセンティブの乖離、技術リスク、燃料使用モニタリングの精度等、現時点でのコスト解析以外の要因が所在することを示唆する。更に、将来の燃料価格の不確実性が影響している可能性もある。また、燃料費が上昇しているにもかかわらず運賃が伸び悩んでいる中で船社の資金調達環境が悪化し、高価な技術の導入が（排出削減効果によらず）難しくなっている現状もある。
3. 設備投資を行う所有者と、省エネ設備による便益を享受する利用者との間のインセンティブの乖離により省エネ・排出削減技術の導入が進まないという事態が外航海運同様に起こっている住宅・建築物部門の事例を見ると、テナント(利用者)の省エネ法対象への包含による対策義務付け、機器の省エネ基準設定による低効率機器の漸減、ラベリング制度、設置助成制度等が設けられてきた。外航海運において同様の制度を設けることは技術導入の推進に資することが考えられ、同様にインセンティブの乖離が起こっている内航海運においては省エネ設備に対する補助、運行実態の見える化等を通じた省エネ対策が行われている。ただし外航海運は国際的な自由競争が行われており、法制度の拘束力の限界があり、また特定国船籍船や商船隊にのみ経済的負担が発生するような規制を課すと、競争上の不公平を生じる可能性がある。
4. 外航燃料に対する課金は、燃料価格の上昇を通じたこのようなMACを更にマイナスにする効果があると言われるが、現時点でもMACがマイナスで計算される国際海運に対して削減技術の普及させる方策として効果が限定的であると考えられる。
5. 他方、仮に課金で得られる基金を排出削減技術導入のための財源として利用することは、これまで述べてきたような障壁を減じる効果が期待できる。たとえば、

新規技術の導入に対する補助制度または省エネ設備を導入する船舶を建造する船主に対する低利融資等が有効となる可能性があり、日本が提案している Efficiency Incentive Scheme(EIS)に基づく課金の使途として盛り込むことも考えられる。

6. また、排出削減技術に対する投資を行っても売却される場合に価格に反映されないという中古市場の問題については船主にとって今ひとつの大きな課題であるが、この点についてはEEDIの開示(一種のラベリング)や各種省エネ技術の長期的な実証により、排出削減技術を搭載した船舶が船社にとって費用効果的であることが示され、中古市場においてより高い価格で販売できるように誘導する対策が求められる。
7. required EEDI を達成した船舶に対する登録料優遇等の措置(シンガポールが実施)は、そのような基準に合致する船舶の建造に対するインセンティブを促し、またPR 効果等も期待できよう。required EEDI の強制化に伴い、実証データが蓄積され、EEDI の達成手法と実績値である EEOI との整合に関する知見が蓄積される。即ち EEDI を達成するだけでなく、EEOI の向上にも資する技術の特定が進む。このように、高いレベルでの EEDI の達成、EEOI との比較検証、EEDI のあり方の再検討に関するサイクルを主導することが世界的な外航海運起源の温室効果ガス排出削減のためにも、日本の海運及び造船業の振興のためにも望ましい。船舶のエネルギー消費率に関する推計・表示方法に関して顕著な進捗が見られると、チャーターレートにエネルギー効率を反映できる可能性が高まる。

6.3 既存船に対する排出削減技術の広範な導入に対する障壁の克服のための提言

2.3 で検討した新造船に対する排出削減技術の導入による排出削減及び MAC の算定の結果、下記の点が明らかとなった。

1. 2020 年時点では全フリートの相当程度(隻数ベースで約 46%)は 2008 年以前に建造された船舶(本調査における既存船)であるため、これらに対する排出削減技術の導入による排出削減ポテンシャル(約 56 Mt-CO₂)は相当程度存在する。
2. しかし、既存船に対する技術の導入については、新造船における導入同様にインセンティブの乖離や独立データの不足という問題がある(既存船へのレトロフィットの場合、技術の排出削減率は既存船の状態に依存するので、新造船より重要な問題となる)。さらに、既存船へ技術を導入する場合のコストは同種の技術を新造船に盛り込む場合の数倍以上に達する場合がある(船体形状の変更を伴う場合は特にコスト増加が著しい)。また既存船に導入された排出削減技術の効果は一般的に新造船に導入した場合を下回る。
3. そもそも、このような大規模なレトロフィットは過去において例が少なく、これを実施できるヤードも少ないと考えられる。ヤードについては、今後バラスト水処理装置や大気汚染物質(NO_x、SO_x)対策が求められるようになると、ヤードの制

約は深刻化することが想定される。また、新造船と異なり、市場が 20 年程度で大幅に縮小する可能性もあり、このような市場に大規模な技術投資が可能であるか投資の観点からは疑問である。

4. 以上により、既存船に対する排出削減技術の導入の MAC は非常に高い場合がある。コスト増加が著しい排出削減技術の MAC は油価の上昇を考えた場合でも大きく下落せず、油価変動により既存船に対する排出削減技術の導入が大幅に推進するとは考えにくい。新造船についても資金的な制約は存在するが、既存船の場合は、バラスト水処理装置や大気汚染物質(NO_x 、 SO_x)対策を高価なレトロフィットという形で講じることが求められる中で、資金的な制約は深刻となることが想定される。
5. 対象とした技術の中で、low friction coating については新造船への導入と比べたコストの上昇が比較的小さく、また新造船への導入と同等の排出削減効果が期待される。内航海運における省エネ補助である「海上交通低炭素化促進事業費補助制度」に基づく補助金交付の大半が low friction coating に対するものであり、既存船対策として船主の立場から見て最も着手しやすいものであると言える。
6. このような結果は、前述したような新造船に対する排出削減技術の導入に関する検討と併せて考えれば、既存船への対策を打ち出すより、新造船への早期代替を含めて、新造船に対する排出削減技術の導入スケジュールを早めるための対策が重要であることを示唆する。
7. 新造船において EEDI の開示が一種のラベリング効果となるように、既存船においても EEOI の開示により、貨物量や航路、航行形態のどのような要因が作用するのかに関する知見が蓄積し、エネルギー効率が適性に評価されるようになると、レトロフィットの気運も高まることが期待される。

6.4 オペレーションによる排出削減技術の広範な導入に対する障壁の克服のための提言

4.2 で検討した船舶のオペレーション改善対策の代表的な例である減速航行による排出削減及び MAC の算定の結果、下記の点が明らかとなった。

1. 新造船及び既存船による 5 %程度の減速航行がもたらす排出削減効果は本調査で検討した新造船に対する排出削減技術の効果を上回る水準(約 109 Mt- CO_2)である。しかし本調査で用いた前提では荷動きを一定とするため、減速航行に必要な追加的な傭船にコストがかかることになり、結果的に MAC は多くの排出削減技術より高いと算出される。なお追加的な傭船を伴わずに減速航行が可能な場合はこの限りではない。
2. 減速航行の実施主体と燃料費節減効果の受益主体は同一であり、従って新造船及び既存船に対する排出削減技術の導入の場合とは異なり、インセンティブの乖離は生じない。従って油価の上昇は減速航行の実施インセンティブの向上につながる

る。その意味では、燃料課金は減速航行を促進する MBM であると言える。

3. 減速航行の効果実証に関するデータの不足については問題ではあるが、今後 EEOI データの蓄積により改善が期待される。
4. 追加的な備船コストが MAC の上昇の原因であることに鑑み、船社に負担を生じない形で減速航行を促進するためには、追加的な備船を伴わずに個船の days at sea の増加を可能にするような対策(港湾の荷役効率の向上)が望まれる。ただしこのような対策については対策の実施主体と受益主体が異なるという技術的対策とは別の種類のインセンティブの乖離が存在するため、港湾や海運、陸運等の様々な主体が一体となった取り組みが求められる。特に、減速航行により輸送期間が長期化するため、用船契約への反映や荷主の理解を得ることが必要となる。航空部門における算出事例では、MAC がマイナスと算出される数少ない対策の一つとして航空管制対策が挙げられており、対策を実施する空港と対策の便益を享受する航空会社のインセンティブが乖離している状況にあると思われる。

6.5 中長期的な排出削減技術の広範な導入に対する障壁の克服のための提言

4.3 で検討した中長期的対策の代表的な例である LNG 焚き船の導入による排出削減及び MAC の算定の結果、下記の点が明らかとなった。

1. LNG 焚き船の導入の MAC は LNG 価格、LNG が代替する油価、LNG 化による船価の上昇等、多くのパラメータに左右される。また現実には港湾における LNG インフラ等の制約要因も想定できよう。
2. 本調査では IMO 2nd Study に従い、大型船には LNG 焚き船は導入されないと想定している。このため LNG 焚き船の導入効果は限定的であるが、ハイブリッド自動車の例を見ると多様なニーズに合わせた商品開発が普及に大きな役割を果たしており、その意味でも様々な船種における開発が望まれる。
3. 中長期的な対策については、6.2 及び 6.3 で見た新造船や既存船に対する技術導入と同様に、インセンティブの乖離や独立データの不足と言った問題が存在する。
4. 将来的な観点からは、スカイセイルや代替燃料など中長期的技術こそが、GHG の排出削減に繋がることは確実である。他方、6.2 で述べたように、10 年以上前から開発が進められてきた短期的な技術でさえ、十分に使用されていない現状を鑑みると、中長期的な技術を開発するだけでなく、その導入に関する障壁を今から減じておく必要があると考えられる。新規技術の場合、独立した実証データは現在導入段階にある技術より少なく、またそのようなデータを取得した船種も限定される。また中長期的な技術は一般に早期導入した場合、コストは高く効果の不確実性も大きいいため、将来的な技術開発によるコスト削減及び対策効果の向上を予測して早期導入に消極的となることもある。
5. 公的資金を用いた多くの技術開発プロジェクトは、実用化までをその計画の終了

としており、たとえば海上公試で性能試験を行った後の商品化に対しては必ずしも積極的ではない。仮に技術的に排出削減に効果があったとしても、これまで述べてきたような障壁が導入に対する障壁になるのだとすれば、このような技術開発プロジェクトにおいても、特に技術リスクに起因する障壁を取り除く努力をするべきと考える。たとえば、1号機については海上公試以降も長期的な性能試験を継続し、その解析データについては第三者が検証した上で広く公開すると言ったスキームが考えられる(技術そのものについては工業所有権で保護されるべきである。ただし工業所有権の開示については、そもそも開示しても使われるか不明であること、船の燃料消費率の差別化で特に重要となる船型フォームについては知的財産権で保護されないことなどから、公開に慎重とならざるを得ないという意見がある。

なお、本調査で示した MAC 算定手法を、中長期的な対策にも適用する場合、長期間の割引により MAC の差異が小さくなり、ゼロに収斂する可能性がある。この解決策として、MAC の回収想定期間について単一の年次とせず、建造年別の投資時期とすることが考えられる。

また、特に中長期的な対策について検討する場合、設備コスト、運営コスト、省エネ便益といった経済的な支出・便益だけではなく、CO₂ 排出削減量についても割り引くという考え方がある。CO₂ 排出削減量についても割り引く理由としては、下記の 2 点が挙げられる。

- ・ CO₂ 排出削減量について割り引かず経済的な支出・便益のみを割り引くと、MAC がプラスの場合、将来に行われる排出削減ほど MAC が低く算出される(MAC がマイナスの場合は逆となる)。このことは、実際は CO₂ 排出削減は早期に行われるほど地球温暖化の被害を減じるのに対し、対策を遅らせるほど排出削減が費用効果的となるという結果を導く。
- ・ 排出量取引や炭素税の導入を考える場合、CO₂ 排出削減量は貨幣換算できる経済価値を持つので、他の支出・便益同様に割り引くべきである。

前者に関して、まだ気候変動対策効果としての CO₂ 早期排出削減の効果を定量化するための割引率の設定方法について定論はないという点が課題として挙げられる。また後者の立場を取る場合、排出量取引や炭素税という政策から離れ、純粹に技術の CO₂ 排出削減効果を比較する場合については適切かどうかという問題もある。

以上について検討した、中長期的な対策に関する MAC について参考資料 3 に示した。

7 まとめ

地球規模の温室効果ガス排出削減対策を講じるにあたり、各種対策の実施に対する費用の負担の多寡が課題となる。温室効果ガスの大半を占めるエネルギー起源 CO₂ の排出削減対策については、設備コスト、運営コストをかけた場合、省エネによる燃料費節減という便益(=対策による貨幣換算可能な効果、見返り)も想定されるため、一概に対策実施者に対して費用負担を求めるものではなく、むしろ利益をもたらすと判断される場合もある。

世界的に地球温暖化ガス削減に向けた動きが加速される中、海運分野でも IMO において、各国による GHG 削減対策に向けた国際的な対策のあり方が検討され、その具体的手段として、MARPOL 条約附属書 VI Annex VI Chapter 4 の追加によりエネルギー効率設計指標(EEDI)の計算と一部船舶を対象としたその最大許容値の設定及び、船舶エネルギー効率マネジメントプラン(SEEMP)の保持の強制化が決定された。こうした議論の過程において IMO 事務局や各国関係機関から、その検討の技術的な基礎として、限界排出コスト(Marginal Abatement Cost : MAC)、あるいはその排出削減量との関係を示した限界排出削減コストカーブ(Marginal Abatement Cost Curve : MAC カーブ)に関する論文等が提出され、議論されている。

MAC、あるいは MAC カーブは、海運以外の分野においても国際的あるいは国内の枠組みで、広く地球温暖化対策の検討に利用されているが、我が国においては外航海運分野での MAC カーブ作成に取り組んだ事例はない。省エネによって燃料費節減という便益が産み出すことが多いとされる外航海運における温室効果ガス排出削減対策の検討、今後の国際的な対策の円滑な実施の観点だけでなく、海運事業者や造船所が独自のコスト解析を行う際にも、我が国独自の外航海運分野における MAC カーブを作成する必要がある。本事業では、MAC カーブ算定プログラムを開発し、その公開を行っている。

まずは、全世界的な限界排出削減コストを算出・分析している文献として代表的なものを 3 件を精査し、手法及び運輸部門の位置づけについて把握した。これら文献では、温室効果ガス排出削減に関する投資について、投資主体の観点に即して算出していることが多く、そのため MAC は高く算出されていること、また全体の排出削減に占める運輸部門の位置づけについては文献ごとに大きく異なることがわかった。加えて、運輸部門に特化した文献 3 件について、運輸部門の MAC を調査した。MAC については算出方法や前提の相違等もあり大きく異なるが、航空については、外航海運や陸上予想に比較して、各種対策の MAC が高く算出されており、海運部門と異なる点のあることがわかった。(第 1 章)

また、MAC の国家目標及び国内排出削減制度に対する有用性について検討した結果、

MAC は国家目標の検討手段としては直接的に用いられた例がないこと、及び MAC カーブを用いた設定においては、途上国ほど CO2 排出削減ポテンシャルが高く算出される可能性の高いことが、文献調査により解った。(第 1 章)

次に海運分野における限界排出削減コスト(MAC)に関する文献として代表的なものを 4 件(IMO スタディ、DNV、IMAREST、CE Delft の各文献)調査し、手法及び前提条件、データについて把握し分析した。これらの分析により、MAC カーブの計算結果には割引率及び油価の影響が大きいことがわかった。

そして、これらを踏まえ、国際海運における MAC カーブの独自の算出を試みた。試算においては、①新造船に対して短期的削減技術を導入する場合、②既存船に対して短期的削減技術を導入する場合、③船舶のオペレーション対策を導入した場合、④中・長期的な排出削減対策を導入した場合の 4 つのケースに分けて計算を行った。なお、2 章において①を、4 章において②、③および④を算定している。

①の新造船に対する短期的な技術の適用については、船社及び研究機関等へのヒアリングを踏まえて普及率、排出削減ポテンシャル及び抵抗係数より排出削減率を算出し、それを集計することにより建造年別、船型クラス別の排出削減率を求めた。ここで推計した排出削減率については MARPOL 条約附属書 VI 改正に規定された required EEDI との比較を行い、概ね整合している結果を得た。(第 2 章)

他方、技術の設備コスト及び運営コストについての情報は、既存文献及び船社へのヒアリングにより入手した。一部の船種・クラスのみについての情報しか得られなかった場合は、技術の性質により船種の重量または主機出力等の大きさに応じて他の船種・クラスにも外挿し、各技術、船種・クラス、導入年次ごとにとりまとめて正味現在価値(NPV)を算出した。(第 2 章)

NPV の算出に当たっては、割引率及び回収想定期間を決める必要があるが、前述の文献調査を基にして、ケース A(割引率 5%、回収想定期間 20 年)、ケース B(割引率 10%、回収想定期間 10 年)、ケース C(割引率 5%、回収想定期間 10 年)の 3 種類を設定した。ケース A は船舶を社会資本と見る観点、ケース B は企業の投資対象と見る観点に概ね該当する。ケース C はケース A において技術の耐用年数が短い場合に対応する。以上の算定方法は全ての入力値について明確にされており、エクセルシートの入力値の変更により、ユーザー独自の計算も可能としている。(第 2 章)

各技術について、両ケースで計算した NPV を対象期間中の排出削減量で割ることにより MAC を求めた。新造船についてはケース A~C のいずれについても、対象とした技術の全てがマイナスの MAC となった。このように数字の上では費用効果的と算出される対策が導入されない状況は外航海運において顕著であり、同セクターにおいてコスト以外に技術の導入を阻む障壁の存在を示唆する結果を得た。(第 2 章)

CE Delft 社の分析を下に、技術導入に関する障壁について抽出した。最大の障壁は

インセンティブの乖離(船主とオペレーターの関係)であり、それ以外に、資金面の制約、省エネに関して信頼のある情報を得るためのコストが高いことを含めて独立データの不足、ヤードの消極性とヤードのキャパシティ、備船契約、船員と雇用者の利害相反等のあることを抽出した。(第3章)

新造船に関する報告書第2章の分析を受け、既存船、オペレーション、中長期的対策に関してMACを算出した。既存船に対する技術導入のMAC算出に当たっては、船社、メーカー等のヒアリングに基づき導入コストの上昇、新造船と比べたパフォーマンスの低下を織り込んだ。この結果、既存船に対して削減技術を適用する場合、そのMAC算定結果は、新造船のMACのそれを大きく上回る結果を得た。オペレーション技術に関しては代表的なものとして減速航行を取り上げ、MACの算出を行った。減速航行については、減速後にも一定の荷動きを確保する場合は追加的な備船が必要となるため、これらのコストを把握し、織り込んだ。この結果、減速航行のMACはほぼゼロと算出され、新造船については個別の技術的対策より高額になると算出されたが、既存船についてはその逆となった。中長期的対策としてLNG船を取り上げ、MACの算出を行った。この場合は船価の上昇、船用燃料及びLNGのそれぞれの価格に影響を受け、非常に多様な値を取ることがわかった。(第4章)

他の部門における障壁及び克服手段に関して検討した。対象として住宅・建築物部門、輸送部門(自動車、航空、内航海運)、大規模排出施設(鉄鋼、電力)を取り上げた。その結果、住宅・建築物部門は外航海運と同様のインセンティブの乖離が省エネ技術導入に対する障壁となっていたが、省エネ法の対象拡大、ラベリング、機器効率基準の設定、補助制度等の対策が講じることで一定程度の障壁の克服が謀られていることを把握できた。自動車及び航空に関しては省エネ・低排出製品はようやく市場に出現した段階であるため技術リスクの克服が、鉄鋼・電力については初期の導入コストの高さが障壁となっているという結果を得た。(第5章)

上記を踏まえ、新造船に対する排出削減技術導入、既存船に対する排出削減技術導入、オペレーションに対する排出削減技術導入及び中長期対策の導入のそれぞれについて、障壁の克服のための提言をまとめた。新造船についてはインセンティブの乖離を克服するための補助等を示唆し、既存船については技術導入が非常に高価となることからファイナンスが制約となり、そのためにも新造船に対する早期の導入促進策を講じる必要性を示唆した。オペレーションに対する排出削減技術導入については、船主とオペレーターのインセンティブの乖離は生じないが、対策コストの低減のためには港湾側とも協力した停泊時間の削減に効果があるため、船主とオペレーターとは異なるインセンティブの乖離が示唆された。中長期対策については、MAC算定値の不確実性は高かったが、中長期的な技術については技術リスクを提言する方策が有効であると考えられた。(第6章)

參考資料

略語集

1. 海運・国際運輸関係

EEDI	<p>Energy Efficiency Design Index (エネルギー効率設計指標)。 設計時点における船舶の輸送効率を推定するための指標。式の形式としては、{主機及び補機の出力(kW)}×{出力あたり燃料消費量 (t-fuel/kWh)}×{燃料の CO₂ 排出係数(t-CO₂/g-fuel)}÷{重量(DWT)×速度(mile/hr)}であり、t-CO₂/トンマイルの次元を持つ。2009年7月のMEPC59では自主的なEEDIの算出方法、認証方法等に関する暫定ガイドラインが合意され、また2010年3月のMEPC60では新造船に対する計算義務付けが合意された。2011年7月のMEPC62におけるMARPOL条約附属書VIの改正案の採択により、総トン数400トン以上の新造船に対するEEDIの計算と一部船舶を対象としたその最大許容値の設定が義務付けられた。</p>
EEOI	<p>Energy Efficiency Operational Indicator (エネルギー効率運航指標)。 運航時の船舶の実質輸送効率を示す指標。または、個々の船舶から実際に排出されたCO₂排出量を示す指標。算出式は{CO₂排出量(t-CO₂)}÷{輸送量(tonne-mile)}。SEEMPにおいてモニタリングすべき項目のひとつとなっている。</p>
IMO	<p>International Maritime Organization (国際海事機関)。海事全般に関する国際的な制度設計を行う。国連の特別機関の一つで、本拠地はロンドン。ウェブサイトは http://www.imo.org/</p>
MARPOL	<p>船舶の航行や自己による海洋汚染を防止するために、対象となる汚染物質に関する規定を定めた条約のこと。現在は、1973年に採択された条約に修正を行った上で、MARPOL73/78条約(1973年の船舶による汚染の防止のための国際条約に関する1978年の議定書)が作成され、1983年10月2日に発効している。一般的にMARPOL条約はMARPOL条約73/78のことを指す。</p> <p>同条約附属書VI(2005年5月19日発効)はオゾン層破壊物質、窒素酸化物(NO_x)、硫黄酸化物(SO_x)、揮発性有機化合物(VOC)の排出等の規制に関するものである。SO_x規制に関しては、一般海域での燃料油中の硫黄分を現行の4.5%から2020年には0.5%まで低下させることが合意されている。また2011年7月のMEPC62におけるMARPOL条約附属書VIの改正案の採択により、省エネ・温室効果ガス排出削減関連では新造船に対するEEDI計算、新造船及び既存船に対するSEEMPの保持が義務化された。</p>
MBM	<p>Market-Based Measures (経済的手法)。経済的なインセンティブの付与により目的を達成するような手法。海運においては燃料に対する課金(及び課金収入の付与)、船舶間の排出量取引がMBMに含まれる。</p>
MEPC	<p>Marine Environmental Protection Committee (海洋環境保護委員会)。IMO内に設けられた環境問題を検討する委員会。</p>
SEEMP	<p>Ship Energy Efficiency Management Plan(船舶エネルギー効率管理計画)。船舶がエネルギー効率の良い航行を行うための手法及びモニタリング・改善計画。2011年7月のMEPC62におけるMARPOL条約附属書VIの改正案の採択により、総トン数400トン以上の船舶に対するSEEMPの保持が義務付けられた。</p>

2. 技術関係

CRP **Contra-Rotating Propeller** (二重反転プロペラ)。同一の軸上に設置された2組のプロペラを互いに逆方向に回転させる技術。前プロペラでの回転流のエネルギーのうち推進力にならず無駄となるエネルギーの一部を後プロペラが回収することにより、高効率での航行が可能となるほか、振動を低減させる効果もある。

WHR **Waste Heat Recovery** (排熱回収)。船舶の主機関からの排熱を有効利用する技術の総称。排熱により蒸気を発生させ、タービン発電機(ターボジェネレータ)により発電を行い、船内電力に用いるほか、軸発電機モータと併せて推進力に用いる技術も開発されている。

3. その他

BAU **Business As Usual**
「成り行き」シナリオ。遵守すべき法制度は現状のまま(あるいは現状で想定されている変化を織り込み)、経済的合理性に従って行動する場合のシナリオを指すことが多い。

EUETS **EU Emissions Trading Scheme** (EU 排出量取引スキーム)。EU (ノルウェーも含む) による温室効果ガス排出量取引制度であり、世界で取引される温室効果ガス排出権の80%以上はEUETSに起因する。2005年に実施段階に入り、第1フェーズ(2005~2007年)、第2フェーズ(2008~2012年)、第3フェーズ(2013~2020年)に分かれる。第1フェーズは習熟段階とすべき位置づけであり、第2フェーズは参加施設に対して各国政府が排出枠を配分する方式を採用し、各国の京都議定書目標達成の一環となった。2013年より開始される第3フェーズは主として電気事業者に対して自らが排出する温室効果ガスに相当する排出権を競売により購入する義務が生じる。なお2012年よりEU域内に離着陸する国際航空も対象に含まれたが、米国、中国等は反発している。

IPCC **Intergovernmental Panel on Climate Change** (気候変動に関する政府間パネル)。

ジュネーブに本拠を置く国際機関で、1988年に国連環境計画(UNEP)と世界気象機関(WMO)により設立された。気候変動に関する科学的・社会経済的知見のとりまとめを行う。数年に1度の評価報告書(最新のものには2007年に刊行された第4次評価報告書)を刊行したほか、特定テーマに関する報告を随時行っている。

<http://www.ipcc.ch>。

IEA **International Energy Agency** (国際エネルギー機関)。

パリに本部を置く国際機関で、加盟国は主として先進国の28か国。石油ショックを契機として設立され、当初は石油の供給安定性に関する研究を主としてエネルギー消費者の立場から行っていたが、近年はエネルギー需給動向の把握及び予測、地球温暖化問題についても研究を行っている。

<http://www.iea.org>

UNFCCC **United Nations Framework Convention on Climate Change** (気候変動に関する国際連合枠組条約)。

1992年にリオデジャネイロで開催された地球サミットにおいて署名公

開され、1994年に発効した。同条約は、温室効果ガス濃度を危険な人為的干渉を及ぼすこととならない水準で安定化させることを究極の目的とする。同条約附属書Ⅰ国(先進国及び移行経済国)は排出削減への取組みを求められ、附属書Ⅱ国(先進国)は資金支援・技術移転等を求められるが、これらに関して遵守すべき定量的な目標はない。

附属書Ⅰ締約国、附属書Ⅱ締約国、非附属書Ⅰ締約国リストは、以下を参照。

http://unfccc.int/parties_and_observers/items/2704.php

現在、188カ国及び欧州連合が締結している。

http://unfccc.int/parties_and_observers/parties/items/2352.php

参考文献

Barnard, 2011

Bruce Barnard

Container Ship Charter Rates Retreat

In: Journal of Commerce online available at: <http://www.joc.com/maritime/container-ship-charter-rates-retreat>

Last visited at December 13th, 2011

Bickel et al., 2005

Peter Bickel, Rainer Friedrich, Arnaud Burgess, Patrizia Fagiani, Alistair Hunt

Gerard De Jong, James Laird, Christoph Lieb, Gunnar Lindberg, Peter Mackie

Stale Navrud, Thomas Odgaard, Andrea Ricci, Jeremy Shires, Lori Tavasszy

Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment (HEATCO)

Deliverable 5: Proposal for Harmonised Guidelines

Stuttgart : Universität Stuttgart, Institute of Energy Economics and the Rational Use of Energy (IER), 2005

Buhaug et al., 2009

Ø. Buhaug, J.J. Corbett, Ø. Endresen, V. Eyring, J. Faber, S. Hanayama,

D.S. Lee, D. Lee, H. Lindstad, A.Z. Markowska, A. Mjelde, D. Nelissen,

J. Nilsen, C. Pålsson, J.J. Winebrake, W. Wu, K. Yoshida

Second IMO GHG Study 2009, International Maritime Organization (IMO)

London : IMO, 2009

Carou, 2010

Pierre Cariou

Is slow steaming a sustainable means of reducing CO₂ emissions for container shipping?

Marseilles Cedex : Euromed-Management, 2010

CE et al., 2006

CE Delft, Germanischer Lloyd, MARINTEK, Det Norske Veritas

Greenhouse Gas Emissions for Shipping and Implementation of the Marine Sulphur Directive

Delft : CE Delft, 2006

CE et al., 2009

Jasper Faber, Agnieszka Markowska, Dagmar Nelissen, Marc Davidson

(CE Delft), Veronika Eyring, Irene Cionni (DLR), Espen Selstad (Fearnley Consultants), Per Kågeson (Nature Associates), David Lee (Manchester Metropolitan University), Øyvind Buhaug, Haakon Lindstad (MARINTEK), Philip Roche, Emma Humpries (Norton Rose), Jakob Graichen, Martin Comes (Öko Institut), Winfried Schwarz (Öko-Recherche), with assistance from DNV on some issues

Technical support for European action to reducing Greenhouse Gas Emissions from international maritime transport

Delft : CE Delft, 2009

CESA, 2011

Shipbuilding Market Monitoring, Report N° 25 – December 2011

Brussels : Community of European Shipyards Associations (CESA), 2011

Devanney, 2010

Jack Devanney

CO₂ Emissions from Ships: the Case for Taking our Time

Tavenier (FI) : Center for Tankship Excellence, 2010

Devanney, 2011

Jack Devanney

The Impact of Charter Party Speeds on CO₂ Emissions

S.I. : Center for Tankship Excellence, 2011

DNV, 2010

Sverre Alvik, Magnus S. Eide, Øyvind Endresen, Peter Hoffmann and
Tore Longva
Pathways to low carbon shipping
Høvik : Det Norske Veritas AS (DNV), 2010

Eide et al., 2007

Magnus S. Eide, Øyvind Endresen, Alvar Mjelde, Lars Erik Mangset,
Gjermund Gravir, 2007
In: Global emission inventories for scenarios of future maritime shipping for 2025, 2050 and 2100, Quantify
deliverable 1.2.3.2

Eide et al., 2011

Magnus S. Eide, Tore Longva, Peter Hoffmann, Øyvind Endresen,
Stig B. Dalsøren
Future cost scenarios for reduction of ship CO₂ emissions
In : Maritime Policy & Management: The flagship journal of international shipping and port research,
1464-5254, Vol. 38, Issue 1 (2011); p. 11–37

Eunomia, 2008

Dominic Hogg, Adam Baddeley, Ann Ballinger, Tim Elliott
Development of Marginal Abatement: Cost Curves for the Waste Sector
Bristol : Eunomia Research & Consulting Ltd, 2008

Eyring et al., 2005

V. Eyring, H.W. Köhle, A. Lauer, B. Lepmer
Emissions from international shipping : 2. Impact of future technologies on scenarios until 2050
In: Journal of Geophysical Research, vol. 110, D17306, (2005) 18 p.

Fonasba, 2000

The Federation of National Associations of Ship Brokers and Agents (Fonasba)
Time Charter Interpretation Code 2000
Available at:
<http://www.uio.no/studier/emner/jus/jus/JUR5401/h06/undervisningsmateriale/Fonasba%20time%20charter%20interpretation%20code%202000-1.pdf>

Hellenic Shipping News, 2012

Nikos Roussanoglou
Bunker prices to shift ship owners' attention towards more "eco-friendly" tankers
In: Online Daily Newspaper on Hellenic and International shipping,
Monday, February 20st, 2012

HM Treasury, [-]

The Green Book : Appraisal and Evaluation in Central Government
London : HM Treasury,[-]

IIASA, 2006

Samudra Vijay, Joseph DeCarolus and Ravi Srivastava (US EPA)
NO_x Abatement Cost Curves for Coal-Fired Utility Boilers
Presentation at International Energy Workshop, Cape Town, South Africa,
29 June, 2006

ILO,2009

International Labour Organisation (ILO)
Ship-breaking : a hazardous work
Available at: http://www.ilo.org/safework/info/WCMS_110335/lang--en/index.htm
Last visited at December 28th, 2011

IMarEST, 2010a

Institute of Marine Engineering, Science and Technology (IMarEST)
Reduction of GHG emissions from ships : Marginal abatement costs and cost-effectiveness of energy-efficiency measures (MEPC 61/INF. 18)

London : International Maritime Organization (IMO), 2010

See also: IMO, 2010a

IMarEST, 2010b

Prevention of air pollution from ships : Updated Marginal Abatement Cost Curves for shipping (MEPC 60/INF.19)

London : International Maritime Organization (IMO), 2010

IMO, 2009a

International consortium led by MARINTEK

Second IMO GHG Study 2009

London : International Maritime Organization (IMO), 2009

IMO, 2009b

Interim Guidelines on the method of Calculation of the Energy Efficiency Design Index for New Ships, MEPC/Circ.681

London UK : International Maritime Organization (IMO), 2009

IMO, 2009c

Guidance for the development of a ship energy efficiency management plan (SEEMP), MEPC.1/Circ.683

London UK : International Maritime Organization (IMO), 2009

IMO, 2009d

Guidelines for Voluntary use of the Ship Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI), MEPC.1/Circ.684

London UK : International Maritime Organization (IMO), 2009

IMO, 2010a

The ICCT, CE Delft and Navigistics Consulting

Reduction of GHG Emissions from ships : Marginal abatement costs and cost effectiveness of energy efficiency measure

London UK: International Maritime Organization (IMO), 2010

Available at: http://www.rina.org.uk/hres/mepc%2061_inf_18.pdf

See also: IMarEST, 2010a

IMO, 2010b

Expert Group on Feasibility Study and Impact Assessment of possible Market-based Measures

Reduction of GHG Emissions from Ships, MEPC 61/INF 2

S.I. : Marine Environment Protection Committee (MEPC), 2010

IMO, 2011a

Draft interim guidelines for determination of the effective CO₂ reduction by wind propulsion systems.

Submitted by Germany, MEPC 62/5/12

London UK : International Maritime Organization (IMO), 2011

IMO, 2011b

Annex 25 : Procedure for approving other methods of ballast water management in accordance with regulation B-3.7 of the BWM Convention, MEPC 62/24/add.1

London UK : International Maritime Organization (IMO), 2011

Intertanko and OCIMF, 2010

Virtual Arrival: Optimising Voyage Management and Reducing Vessel

Emissions : an Emissions Management Framework

Bermuda : Oil Companies International Marine Forum (OCIMF), 2010

Investopedia, 2011

Holding period

Available at: <http://www.investopedia.com/terms/h/holdingperiod.asp#ixzz1hpOwadOO>

Last visited at December 28th, 2011

IPCC, 2000.

Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

Emission Scenarios, A Special Report

Cambridge : Cambridge University Press, 2000

IPCC, 1999

S.C. Henderson, U.K. Wickrama, S.L. Baughcum, J.I. Begin, F. Franco,

D.L. Greene, D. S. Lee, M.L. McLaren, A.K. Mortlock, P.J. Newton, A. Schmitt, D.J. Sutkus, A. Vedantham and D.J. Wuebbles

Aircraft emissions : current inventories and future scenarios

In: Aviation and the Global Atmosphere, Chapter 9

J.E. Penner, D.H. Lister, D. J. Griggs, D. J., Dokken and M. McFarland (eds.) Special Report of the IPCC

Cambridge : Cambridge University Press, 1999

OECD, 2009

Philippe Christ

Greenhouse Gas Emissions Reduction Potential from International Shipping

Paris : Joint Transport Research Centre of the OECD and the International Transport Forum, 2009

OECD/IEA, 2007

Mind the Gap : Quantifying Principal-Agent Problems in Energy Efficiency

Paris : OECD/IEA, 2007

PWC, 2011

A game changer for the shipping industry? An analysis of the future impact of carbon regulations on environment and industry

S.l. : PWC, 2011

Rogers, 2003

Everett M. Rogers

Diffusion of Innovations, Fifth Edition

New York : The Free Press of Glencoe, 2003

UNCTAD, 2009

UNCTAD Secretariat

Review of maritime transport 2009

Geneva : United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD), 2009

UNCTAD, 2011

UNCTAD Secretariat

Oil prices and Maritime Freight Rates : An Empirical Investigation

Geneva : United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD), 2011

UNEP, 2011

Bridging the Emissions Gap Report

Nairobi : United Nations Environment Programme (UNEP), 2011

UNFCCC, 2009

CDM. Executive Board

Methodological Tool : Tool to determine the remaining lifetime of equipment

S.l. : United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), 2009

参考資料

参考資料1 コンテナ船大型化に関する検討

1. 基本的な考え方

航行速度は変化しないと想定すると主機出力は船舶に対する抵抗に比例する。この場合の抵抗を粘性摩擦抵抗と近似すると、それは船体面積に比例し、従ってエンジン出力は個船のサイズの 2/3 乗に比例すると近似できる。従って個船のサイズの 10 % [20 %]の大型化は、個船の主機出力は 6.6% [12.9%]増加する必要がある(IMO 2nd Study のデータによると、補機出力も若干増加する)。これに対して隻数は大型化に反比例して 9.1% [16.7%]減少する。

個船の航行パターン(days at sea)を不変と考えると、エネルギー消費量はエンジン出力に比例する。結果として大型化によるエンジン出力の増加は個船のサイズが増加することにより輸送貨物量の増加を下回り、結果としてエネルギー消費、CO₂ 排出の削減につながる事が考えられる。

2. 算出結果

IMO 2nd Study のコンテナ船のクラスのうち最大のもの(8,000TEU 以上)について計算を行った。2nd Study ではこのクラスの隻数は 2007 年の 118 隻から 2020 年には 1,010 隻に増加するとしている(IMO 2nd Study の中間ドラフトのデータに基づくと、この船型クラスに起因する温室効果ガス排出量は 163Mt-CO₂ であり、全船型クラスで最も大きい)。

これに基づく算出結果は下記のとおり。最も大きな 8,000TEU 以上のコンテナ船のサイズが 10 % [20 %]増加すると、同クラスの船舶からの CO₂ 排出量は 2.4% [5.1%]減少し、それぞれのケースの排出削減量は約 3.9Mt-CO₂ [8.3Mt-CO₂]と算出される。なお本調査で対象とした排出削減技術が導入された場合、2008~2020 年に建造されたコンテナ船のうち最大の船型クラスの排出率は 2008 年以前のものに比べて約 9%改善されるため、このクラスのコンテナ船が 2008 年以降に建造された船舶に完全に置き換わった大型化のみに起因する排出削減量も上記より 9%程度小さくなると思われる。

表 6.5-1

ケース	IMO 2nd Study ベースケース	ケース 1	ケース 2	備考
サイズ	—	+10 %	+20 %	サイズは無次元とし、個船の輸送可能貨物量と比例するとした。
隻数	1,010	918	842	貨物 capacity に反比例して減少。
主機出力(kW)	68,477	72,969	77,327	船舶のサイズの 2/3 乗に比例して増加
補機出力(kW)	3,081	3,500	3,756	IMO 2nd Study の補機出力と各船型クラスの貨物容量との関係により算出 ³¹
合計エンジン出力(kW)	71,558	76,469	81,084	主機出力+補機出力
個船あたり主機エネルギー消費量(kt/year)	46.2	49.3	52.2	合計エンジン出力に比例すると考えられる。
個船あたり補機エネルギー消費量(kt/year)	5.8	6.6	7.1	同上
総燃料消費量(kt/year)	52,599	51,331	49,939	個船あたり主機・補機エネルギー消費量×隻数
CO ₂ 排出量(kt-CO ₂ /year)	163,189	159,254	154,936	燃料を重油(約 3.1t-CO ₂ /t-fuel)として算出
排出削減量(対ベースケース比)	—	-3,935	-8,252	
排出削減率(対ベースケース比)	—	2.4%	5.1%	

³¹ IMO 2nd Study のコンテナ船全 6 クラスの貨物容量(CC)と補機出力(AUX)の相関を取ると、 $AUX=0.0374CC+677.62$ ($r^2=0.97$)となるが、この相関を用いた。

参考資料2 LNG 焚き船に関する検討

LNG 焚き船が IMO 2nd Study のシナリオに基づき導入された場合の排出削減量及び MAC について検討する。

IMO 2nd Study 等において LNG 焚き船の部分的導入が想定されている。LNG 焚き船を温室効果ガス排出削減対策と捉えた排出削減量、MAC の算出を行った。LNG 焚き船のような燃料代替の場合は省エネ技術とは異なり、導入によるランニングコスト低減があるかどうかはそれぞれの燃料コストに依存する(LNG 利用のほうがか在来の船用燃料より高額となれば、ランニングコストも正味で増加する)という点を考慮する必要がある。

(1)前提等

LNG 焚き船の導入は下記の前提を置いて検討した。

表 LNG 焚き船の MAC 検討に際しての前提条件等

項目	概要
導入対象	・ IMO 2nd Study に従い、2020 年に coastal shipping(燃料が HFO/MDO とされている船型クラスに該当)の 5 %の船腹を占めるように導入されるとした。
導入率	・ 上記の前提に基づき、2007 年時点の新造船に対する導入率はゼロとおき、以後新造船に占める導入率は線形に増加するとした。この仮定に基づくと、2020 年の新造船に占める LNG 焚き船の比率は 17.3%となる。
その他前提	・ LNG 焚き船のエンジン効率是在来燃料を利用する新造船と同一とした。 ・ LNG への燃料変更は主機と補機に対して行われ、タンカーで用いられるボイラは対象外とした
原単位等	・ IMO 2nd Study に従い、LNG の CO ₂ 原単位は 2.75t-CO ₂ /トンとした ・ IPCC 2006Guideline に従い、LNG 及び在来燃料(Gas diesel oil)の熱量原単位はそれぞれ 48TJ/Gg 及び 43.0TJ/Gg としている。
LNG 価格	・ 400 USD/トンとした(IEA データによる先進国の 2008 年～2010 年のガス輸入価格の平均的な値)
船価上昇率	・ 同じ船型クラスの在来燃料を利用する新造船に比べて 30 %増とした(ヒアリングより)

(2)結果及び感度分析

LNG 焚き船の MAC 算出結果について算出した。併せて、船価上昇率、LNG 価格、油価といった影響が大きいと考えられるパラメータを抽出し、感度分析を行った。結果は下記のとおり。

表 LNG 焚き船の MAC(USD/t-CO₂)

ケース	MAC(USD/t-CO ₂)
ケース A (ベースケース)	10.7
ケース B (ベースケース)	77.2
ケース C (ベースケース)	90.8
ケース A (船価上昇率 20 %)	-23.3
ケース A (船価上昇率 40 %)	44.7
ケース A (LNG 価格 300 USD / トン)	-47.0
ケース A (LNG 価格 500 USD / トン)	68.4
ケース A (油価 700 USD / トン)	-118.0

(ベースケースは油価 500 USD/トン、LNG 価格 400 USD/トン、船価上昇率 30 %)

以上より、LNG 焚き船の MAC は船価、燃料価格、回収想定期間及び割引率等多くの変数に敏感に影響を受け、LNG 焚き船への投資の収益の予見性が課題となることが読み取れる。

なお LNG 焚き船の排出削減量は年間 4.8Mt-CO₂ と算出される。これは本調査で考慮した他の技術的要因による新造船起源の排出削減量(約 79Mt-CO₂)と比べて約 6%程度である。

(3)考察

LNG 焚き船については、船価及び燃料価格に対して想定される変動が見られた。即ち LNG 焚き船の相対的な船価が高額であるほど、また在来燃料に対する LNG の価格が高額であればあるほど LNG 焚き船の MAC は増加する。LNG 価格が低く推移する(あるいは油価が上昇する)と LNG 焚き船は費用効果的と算出されるが、LNG 価格が上昇すると急激にコスト増となる。このことは、LNG 焚き船の導入の前提条件として LNG が安定的な価格で供給されることが必要であることを示唆する。

参考資料3 中長期的な対策を想定した限界排出削減コスト算定手法について

本調査で採用した手法は、異なる建造年において段階的に導入される技術について同列に扱わず異なる現在価値換算を行うため、技術の時系列的な導入に関する評価に適していると考えられる。反面、長期的な導入については割引が大きくなる等のデメリットがある。このため、本調査とは異なり、異なる建造年に導入される技術について、それぞれの導入年から割引を開始する手法も想定される。そのような手法に則ったMACについて算出する。

算出に当たっては、CO₂について割り引かない場合と、NPVと同じ率で割り引く場合の2つのケースについて算出した。前者は特定技術の温室効果ガス排出削減対策としての効果を検討するのに適しており、後者は環境税や排出量取引制度の検討のようにCO₂を貨幣と同じように考える場合に適していると言えよう。なお各技術・対策による排出削減量はMAC算出方法によらず変わらない。

1 新造船

1.1 CO₂について割り引かない場合

CO₂について割り引かない場合、MACは下記のように算出される。異なる建造年における技術導入の投資・回収効果が大きく異なる場合を除きMACの正負は同じであるが、MACの分子に当たるNPVに対する割引の影響が小さい分、絶対値が増大する。

表 1.1-1 新造船に対する技術導入の年間排出削減量及びMAC算出結果

(CO₂割引なし)

	Low friction coating	Stern duct-friction reduction	CRP	Stern duct-propulsion	Post-swirl system	Air lubrication	Opt. stern shape	WHR
年間排出削減量	11.7	2.8	14.8	6.5	6.5	14.1	6.2	16.1
ケース A	-77.2	-79.5	-59.2	-89.3	-85.8	-71.8	-88.8	-59.6
ケース B	-64.6	-58.7	-20.2	-77.3	-70.5	-49.9	-76.8	-20.8
ケース C	-89.4	-85.8	-45.5	-105.3	-98.3	-75.0	-104.7	-46.1

(単位 Mt-CO₂(年間排出削減量)、USD/t-CO₂(MAC))

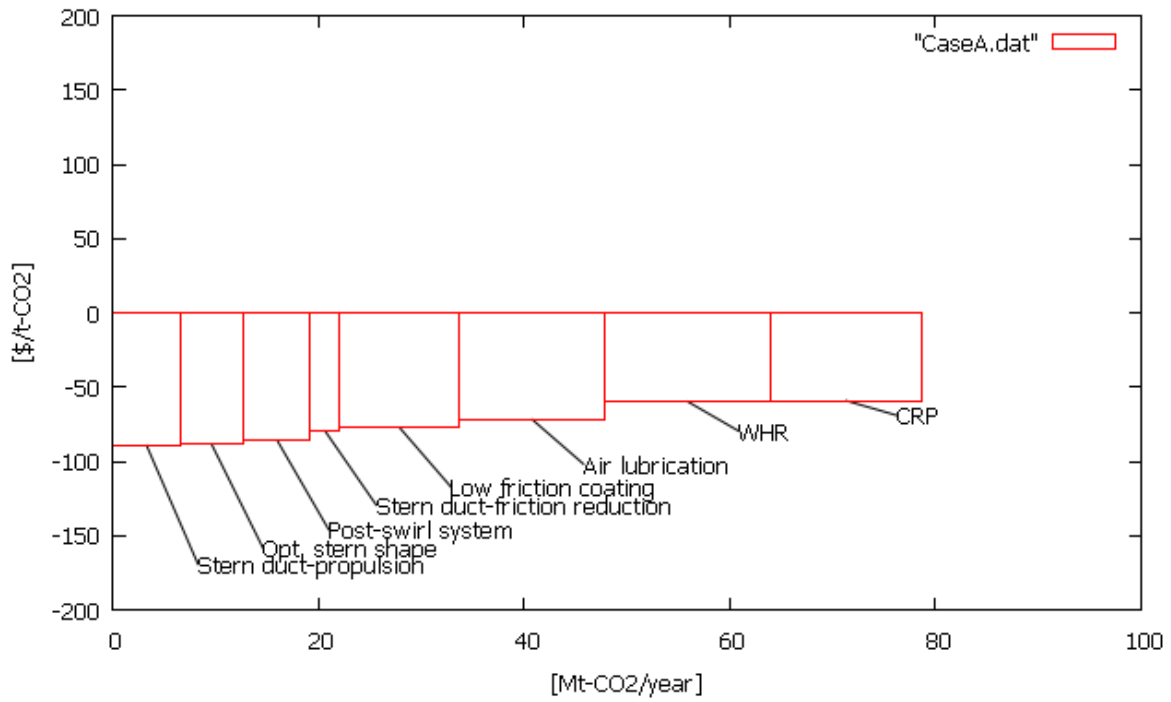


図 1.1-1 排出削減技術の MAC(新造船：ケース A、CO₂ 割引なし)

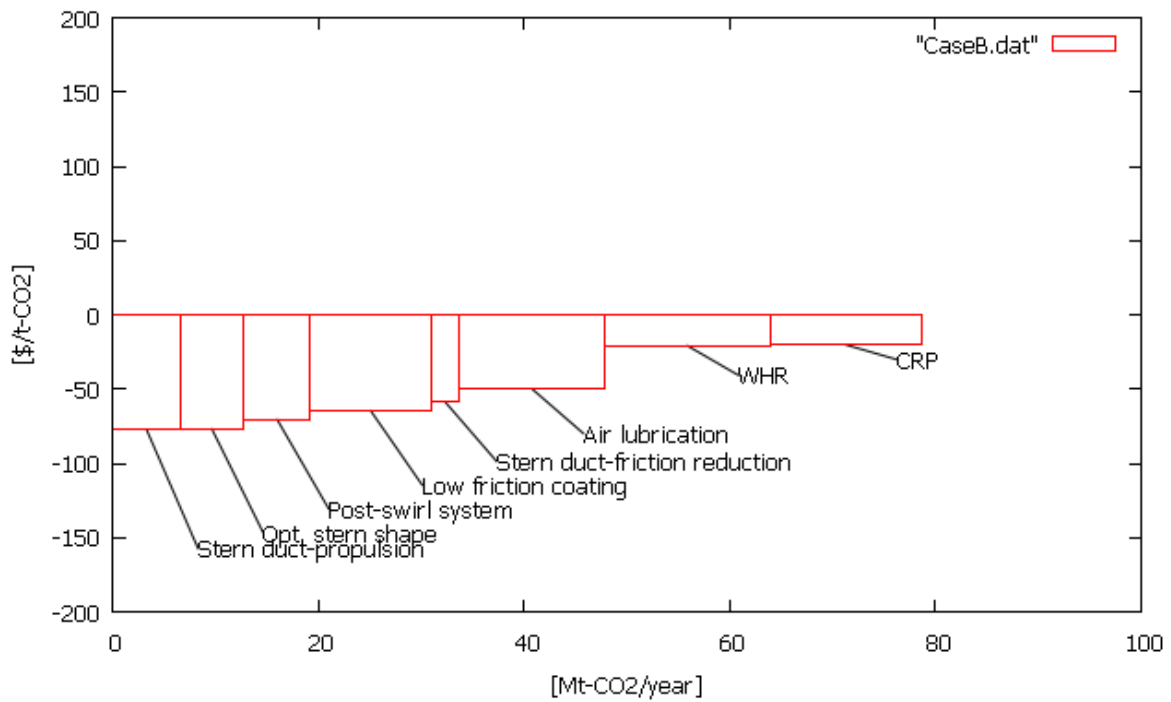


図 1.1-2 排出削減技術の MAC(新造船：ケース B、CO₂ 割引なし)

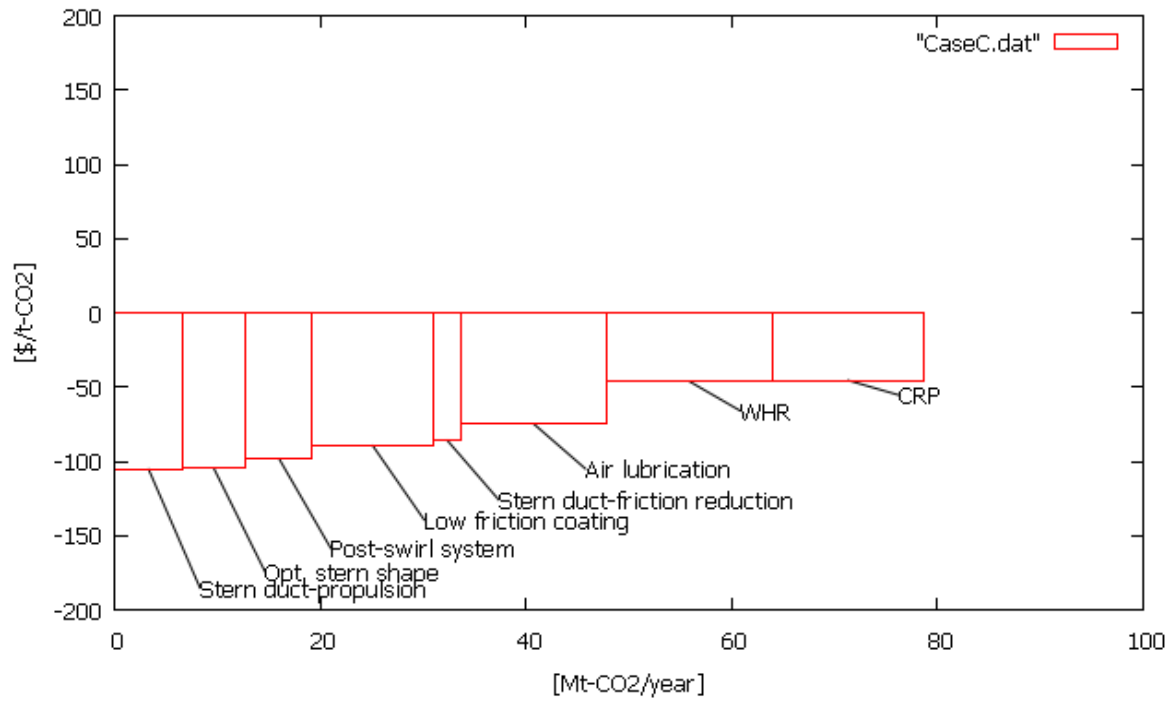


図 1.1-3 排出削減技術の MAC(新造船：ケース C、CO₂ 割引なし)

1.2 CO₂について割り引く場合

6.5 で述べたように、NPV だけではなく CO₂ についても割り引くという考え方も存在する。ここで割引率については 6.5 で述べたように早期の対策実施を評価する観点と、CO₂ 排出削減量は貨幣換算できる経済価値を持つためという観点の 2 つが存在すると考えられるが、ここでは後者の観点に立脚し、CO₂ について NPV と同じ割引率で割り引くこととした、この場合の MAC は下記のように算出される。MAC 計算の分母に相当する CO₂ 排出削減量が割り引かれるため、絶対値がさらに大きくなる。

表 1.2-1 新造船に対する技術導入の年間排出削減量及び MAC 算出結果
(CO₂ 割引あり)

	Low friction coating	Stern duct-friction reduction	CRP	Stern duct-propulsion	Post-swirl system	Air lubrication	Opt. stern shape	WHR
年間排出削減量	11.7	2.8	14.8	6.5	6.5	14.1	6.2	16.1
ケース A	-123.9	-127.6	-95.1	-143.4	-137.7	-115.2	-142.4	-95.6
ケース B	-105.2	-95.5	-32.9	-125.7	-114.8	-81.2	-125.0	-33.8
ケース C	-115.7	-111.1	-58.9	-136.4	-127.3	-97.2	-135.6	-59.7

(単位 Mt-CO₂(年間排出削減量)、USD/t-CO₂(MAC))

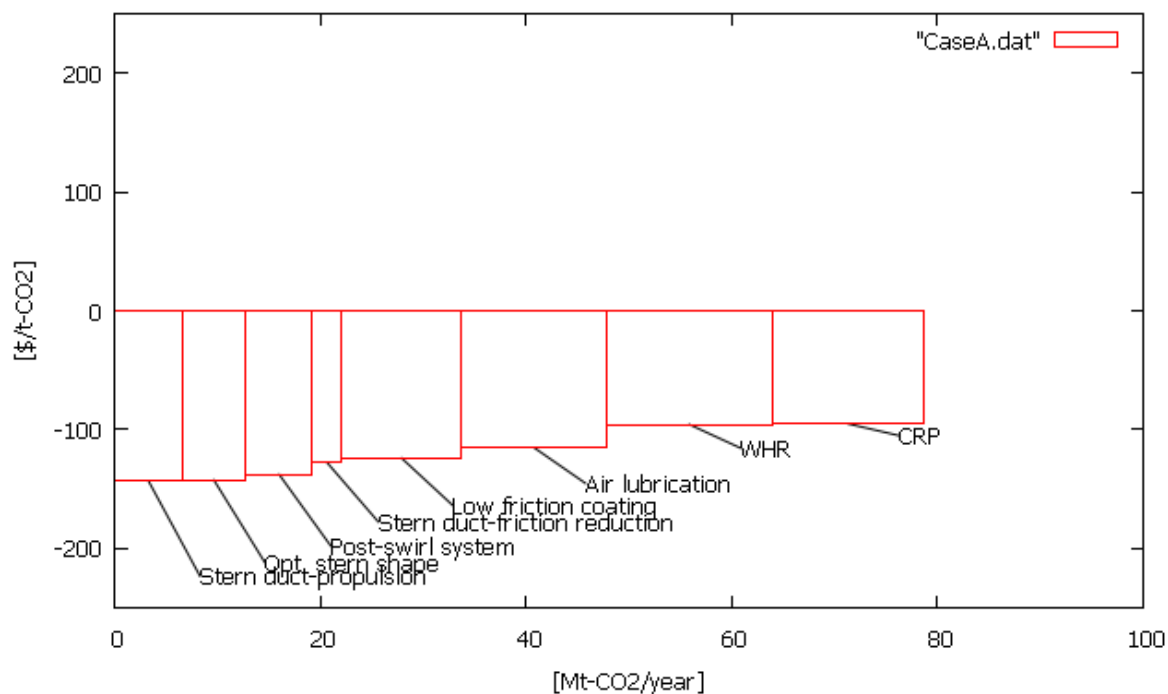


図 1.2-1 排出削減技術の MAC(新造船：ケース A、CO₂ 割引あり)

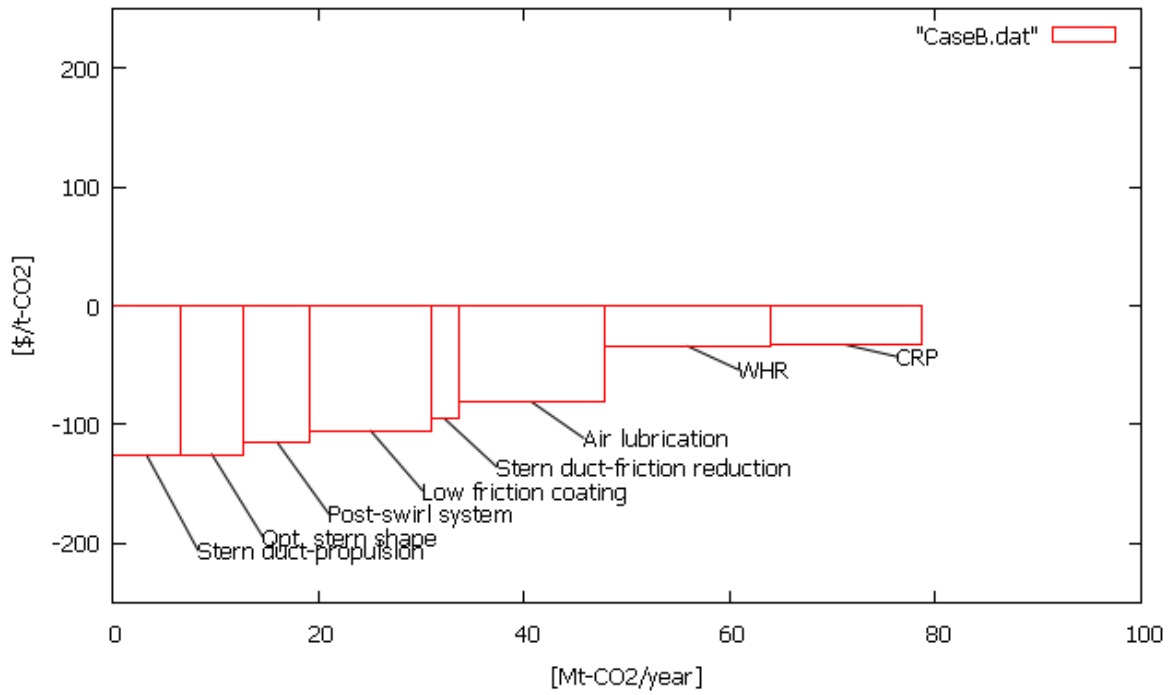


図 1.2-2 排出削減技術の MAC(新造船：ケース B、CO₂ 割引あり)

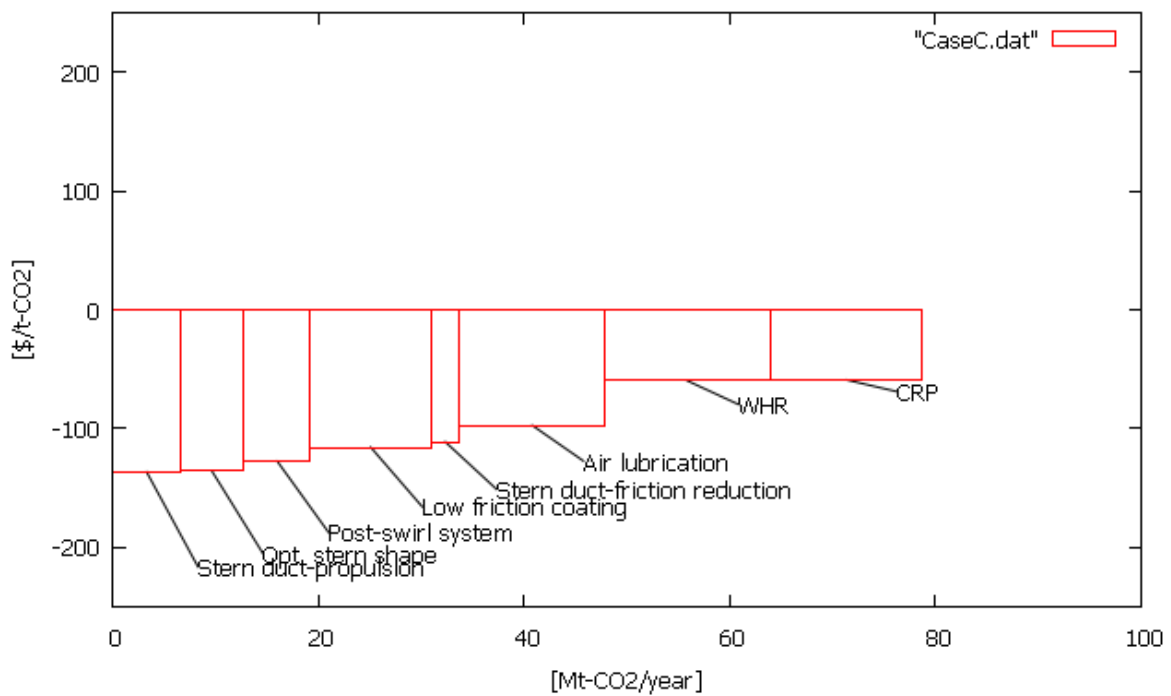


図 1.2-3 排出削減技術の MAC(新造船：ケース C、CO₂ 割引あり)

1.3 報告書本編のアプローチ(参考)

表 1.3-1 新造船に対する技術導入の年間排出削減量及び MAC 算出結果
(報告書本編のアプローチ)

	Low friction coating	Stern duct-friction reduction	CRP	Stern duct-propulsion	Post-swirl system	Air lubrication	Opt. stern shape	WHR
年間排出削減量	11.7	2.8	14.8	6.5	6.5	14.1	6.2	16.1
ケース A	-52.6	-54.6	-40.7	-61.3	-58.9	-49.3	-60.9	-37.6
ケース B	-31.2	-28.9	-10.1	-37.9	-34.6	-24.6	-37.7	-6.7
ケース C	-60.9	-58.9	-31.4	-72.3	-67.5	-51.6	-71.9	-28.0

(単位 Mt-CO₂(年間排出削減量)、USD/t-CO₂(MAC))

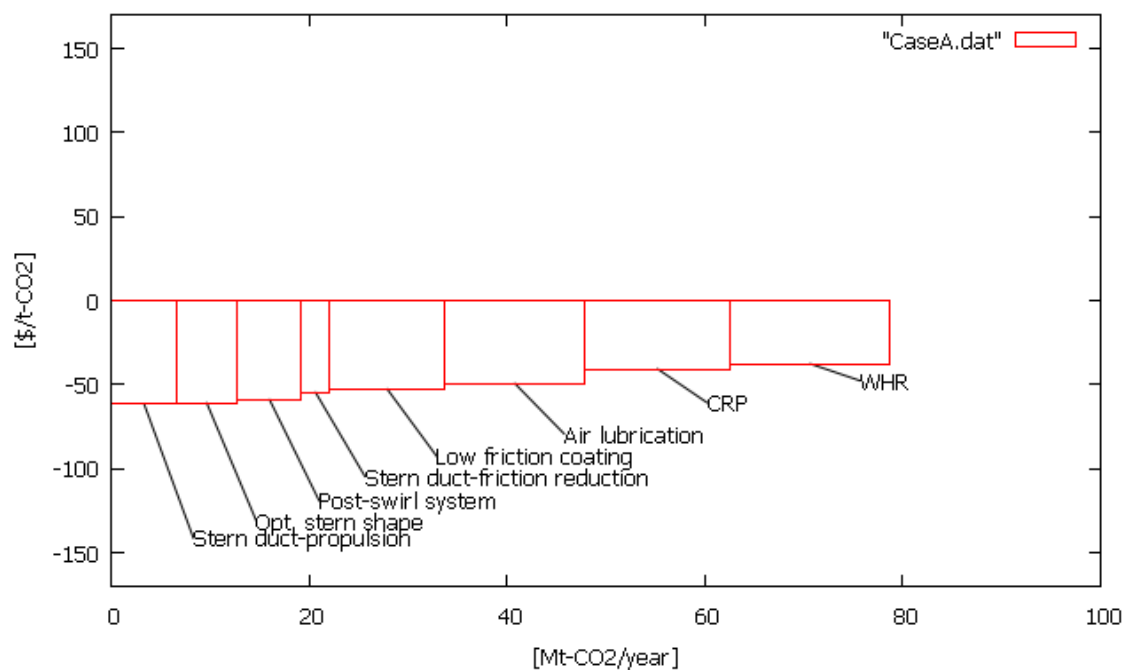


図 1.3-1 排出削減技術の MAC(新造船：ケース A)

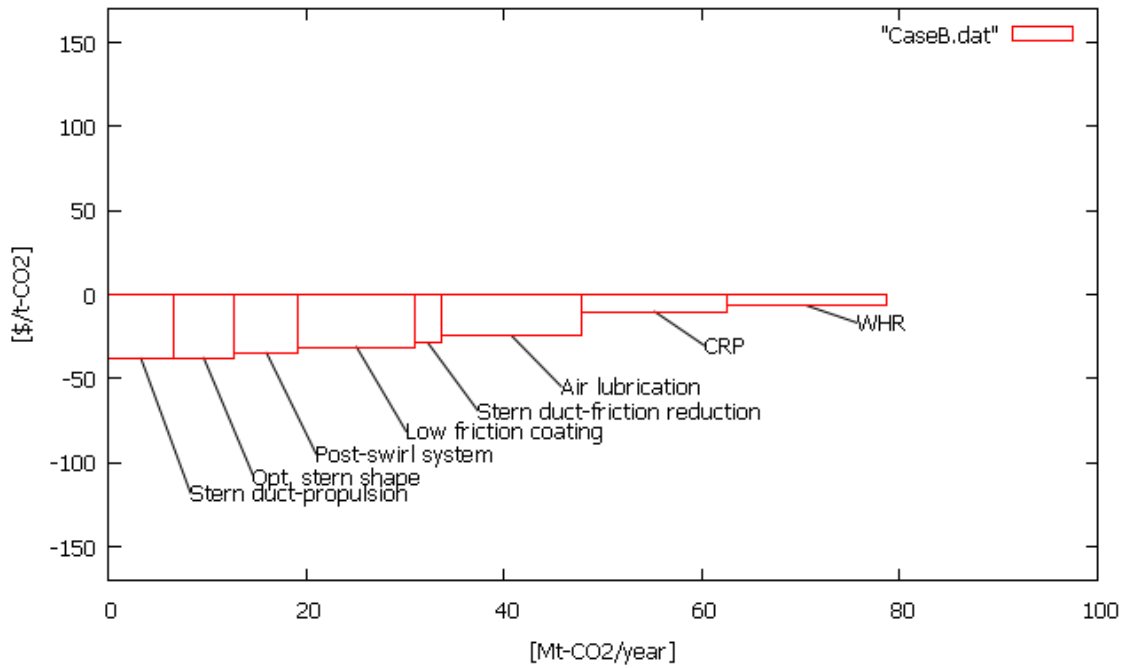


図 1.3-2 排出削減技術の MAC(新造船：ケース B)

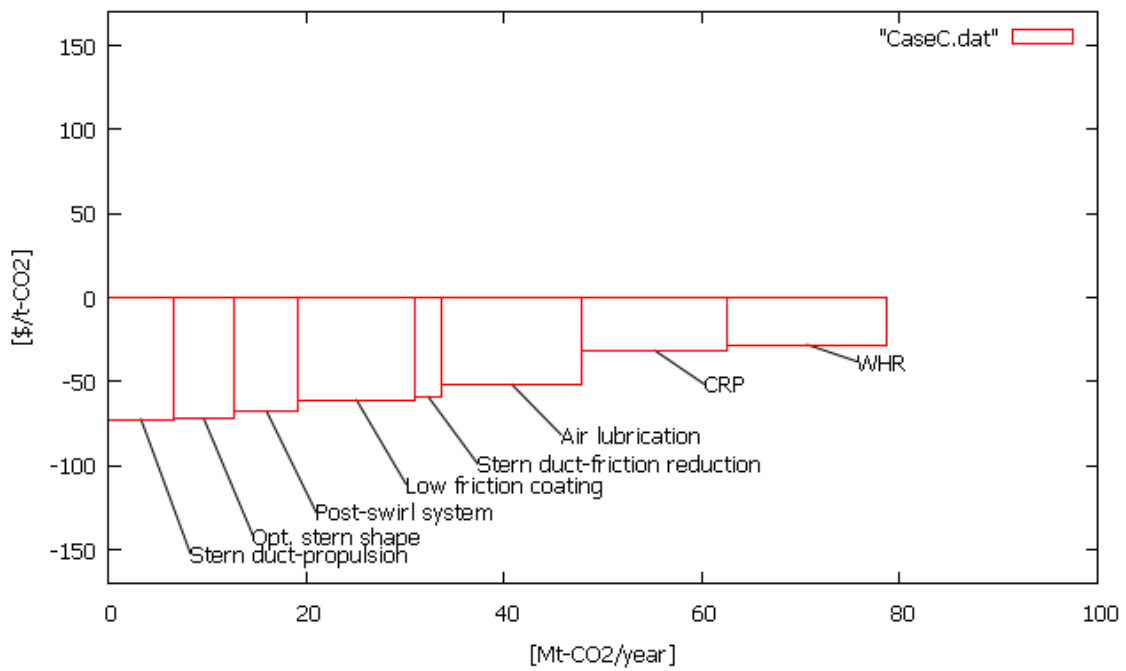


図 1.3-3 排出削減技術の MAC(新造船：ケース C)

2 既存船

既存船に対する技術のレトロフィットについて以下に同様に算出した。

2.1 CO₂について割り引かない場合

表 2.1-1 既存船に対する技術導入の年間排出削減量及び MAC 算出結果
(CO₂ 割引なし)

	Low friction coating	Stern duct-friction reduction	CRP	Stern duct-propulsion	Post-swirl system	Air lubrication	Opt. stern shape	WHR
年間排出削減量	14.2	1.5	9.0	3.6	3.6	13.4	2.7	8.2
ケース A	-67.7	8.9	511.9	-52.0	-30.0	-8.4	870.1	255.4
ケース B	-46.9	109.9	1,070.0	-6.3	35.7	68.5	1,753.7	580.4
ケース C	-70.7	90.9	1,096.7	-30.9	13.1	49.6	1,813.0	583.8

(単位 Mt-CO₂(年間排出削減量)、USD/t-CO₂(MAC))

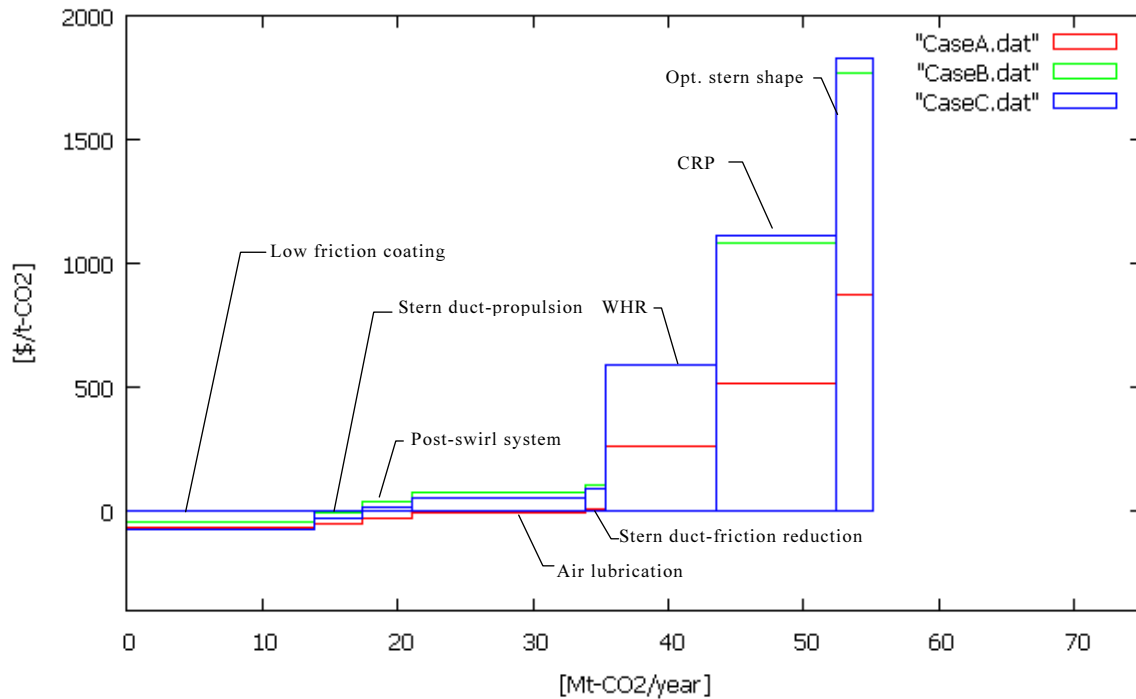


図 2.1-1 排出削減技術の MAC(既存船：ケース A・B・C、CO₂ 割引なし)

2.2 CO₂について割り引く場合

表 2.2-1 既存船に対する技術導入の年間排出削減量及び MAC 算出結果
(CO₂ 割引あり)

	Low friction coating	Stern duct-friction reduction	CRP	Stern duct-propulsion	Post-swirl system	Air lubrication	Opt. stern shape	WHR
年間排出削減量	14.2	1.5	9.0	3.6	3.6	13.4	2.7	8.2
ケース A	-108.7	14.3	821.5	-83.4	-48.1	-13.6	1,396.3	410.0
ケース B	-76.4	178.9	1,741.4	-10.3	58.1	111.4	2,854.1	944.7
ケース C	-91.6	117.7	1,420.3	-40.0	17.0	64.2	2,347.9	756.1

(単位 Mt-CO₂(年間排出削減量)、USD/t-CO₂(MAC))

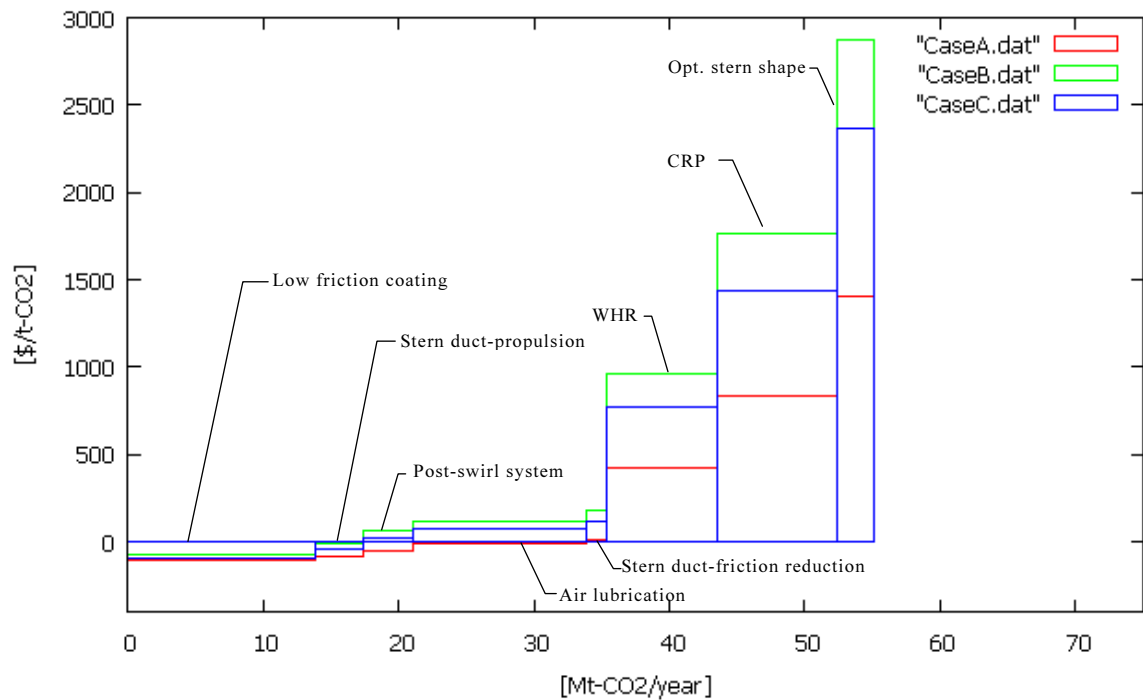


図 2.2-1 排出削減技術の MAC(既存船：ケース A・B・C、CO₂ 割引あり)

2.3 報告書本編のアプローチ(参考)

表 2.3-1 既存船に対する技術導入の年間排出削減量及び MAC 算出結果
(報告書本編のアプローチ)

	Low friction coating	Stern duct-friction reduction	CRP	Stern duct-propulsion	Post-swirl system	Air lubrication	Opt. stern shape	WHR
年間排出削減量	14.2	1.5	9.0	3.6	3.6	13.4	2.7	8.2
ケース A	-50.7	6.1	358.7	-38.2	-22.2	-6.1	633.0	199.3
ケース B	-27.4	59.7	547.4	-4.0	19.1	35.0	961.7	357.5
ケース C	-53.0	65.6	769.0	-23.0	9.1	34.6	1,319.1	451.4

(単位 Mt-CO₂(年間排出削減量)、USD/t-CO₂(MAC))

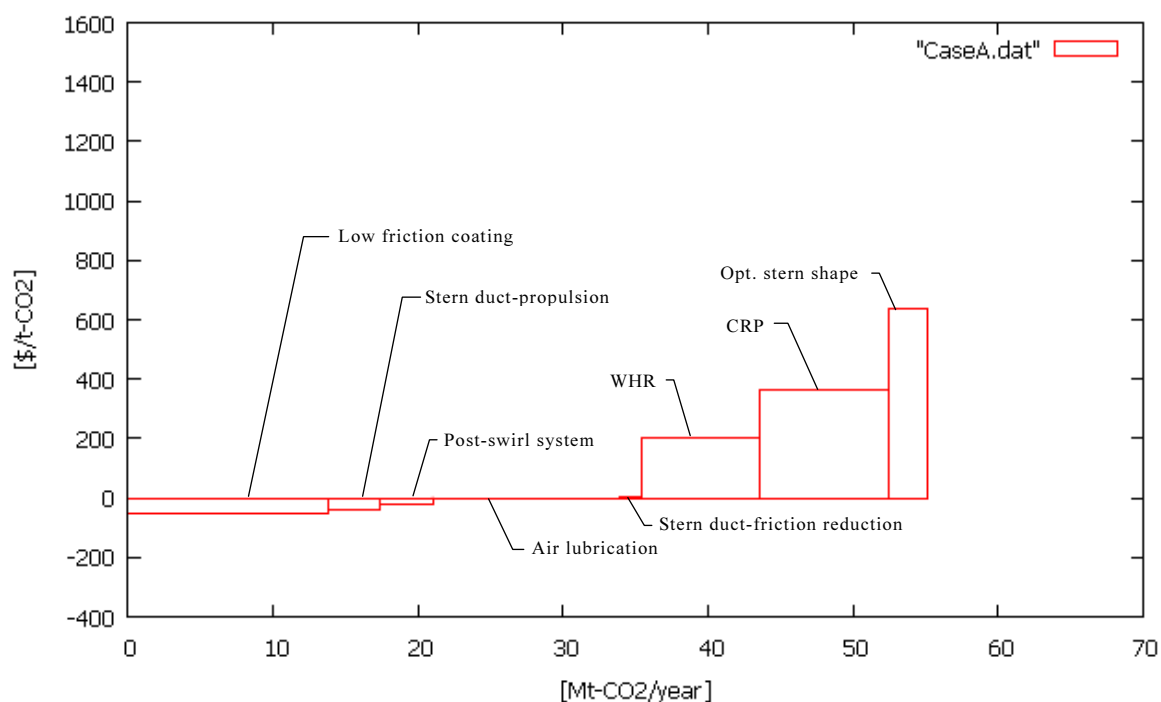


図 2.3-1 排出削減技術の MAC(既存船：ケース A)

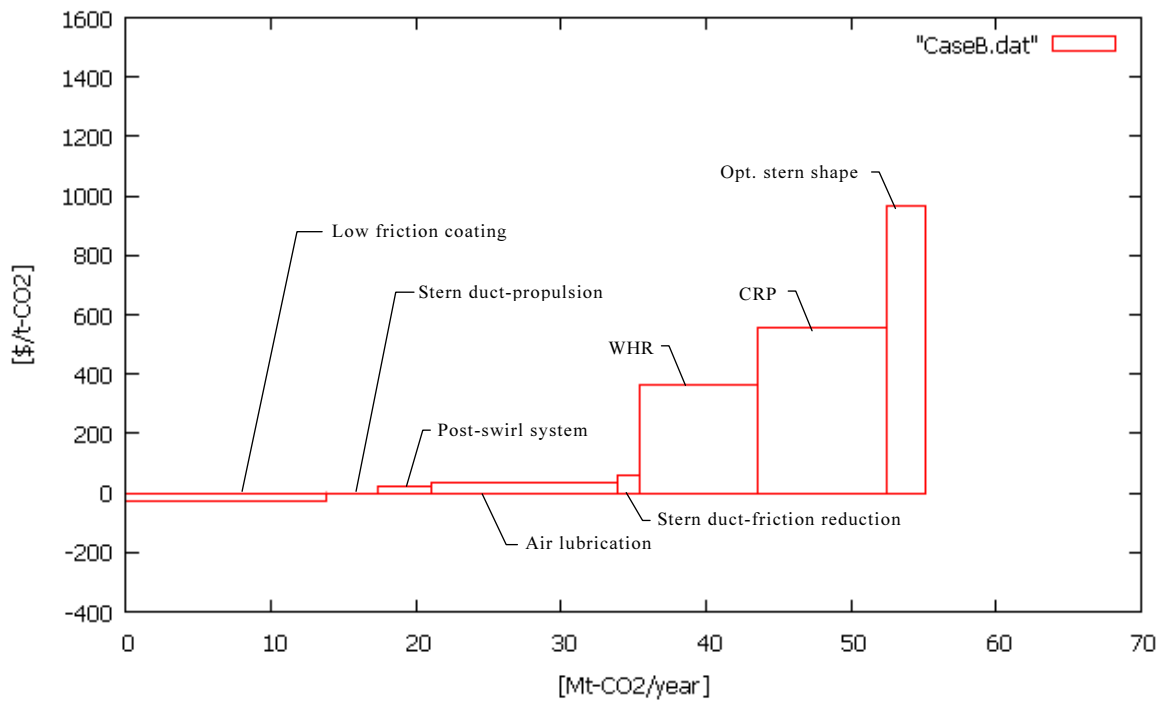


図 2.3-2 排出削減技術の MAC(既存船：ケース B)

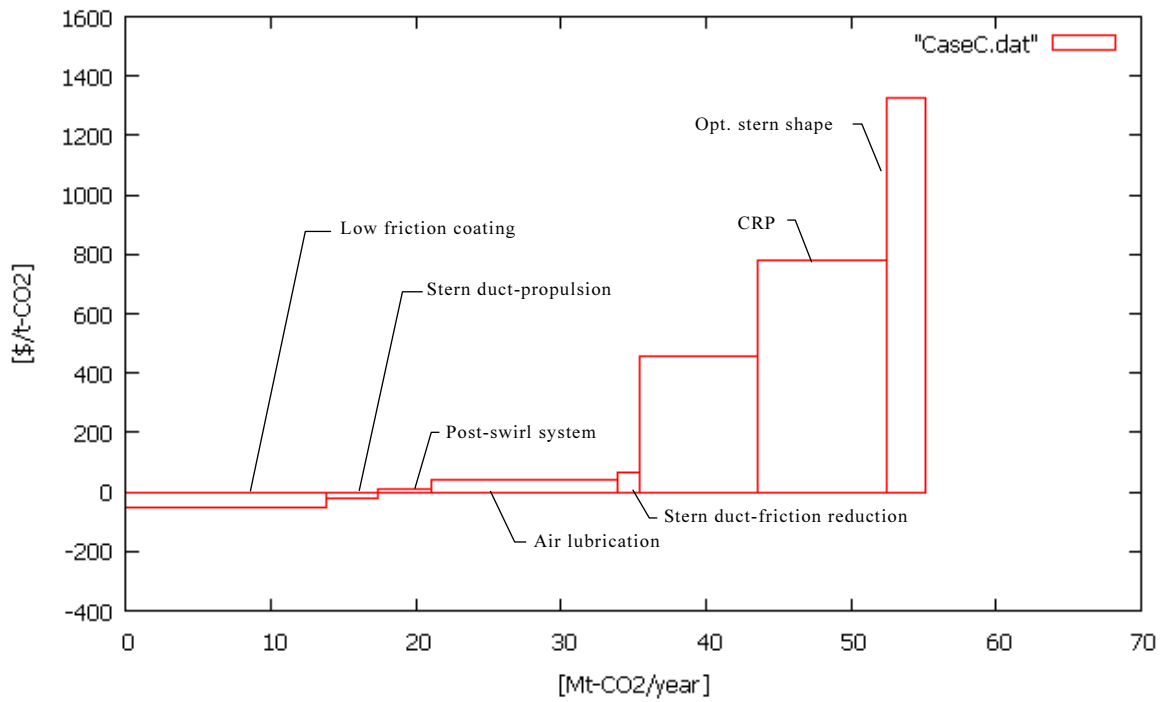


図 2.3-3 排出削減技術の MAC(既存船：ケース C)

3 オペレーションの改善

オペレーションの改善対策として減速航行について以下に取り上げる。

3.1 新造船

3.1.1 CO₂について割り引かない場合

表 3.1-1 減速航行による MAC 算出結果(新造船)
(CO₂ 割引なし)

減速率	5%	10%	20%
年間排出削減量	70.2	135.6	252.0
ケース A	-34.2	-28.5	-14.3
ケース B	4.5	3.4	23.1
ケース C	-20.6	-11.5	11.1

(単位 Mt-CO₂/年(年間排出削減量)、USD/t-CO₂(MAC))

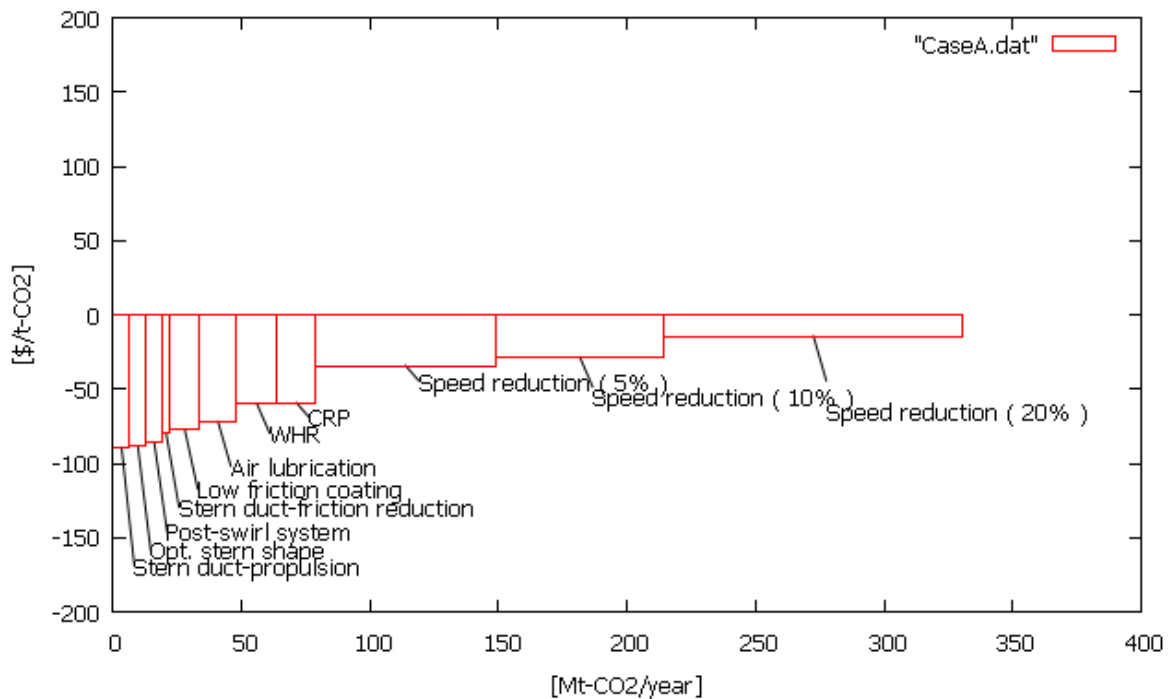


図 3.1-1 排出削減技術の MAC(新造船+減速航行：ケース A、CO₂ 割引なし)

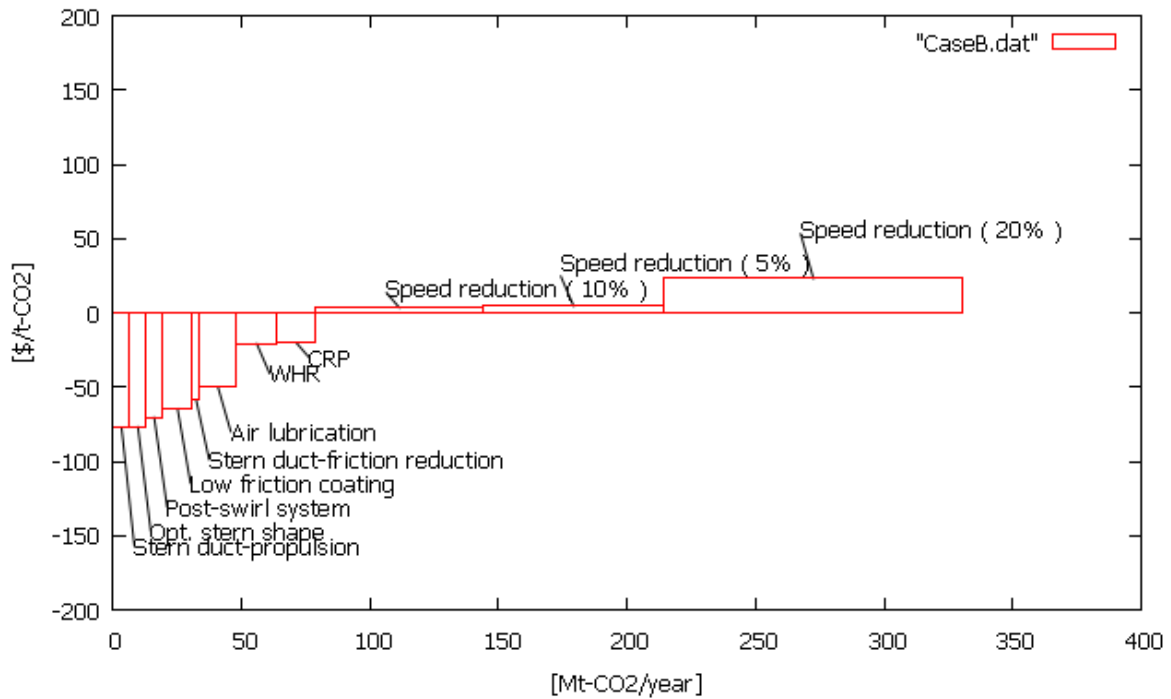


図 3.1-2 排出削減技術の MAC(新造船+減速航行：ケース B、CO₂ 割引なし)

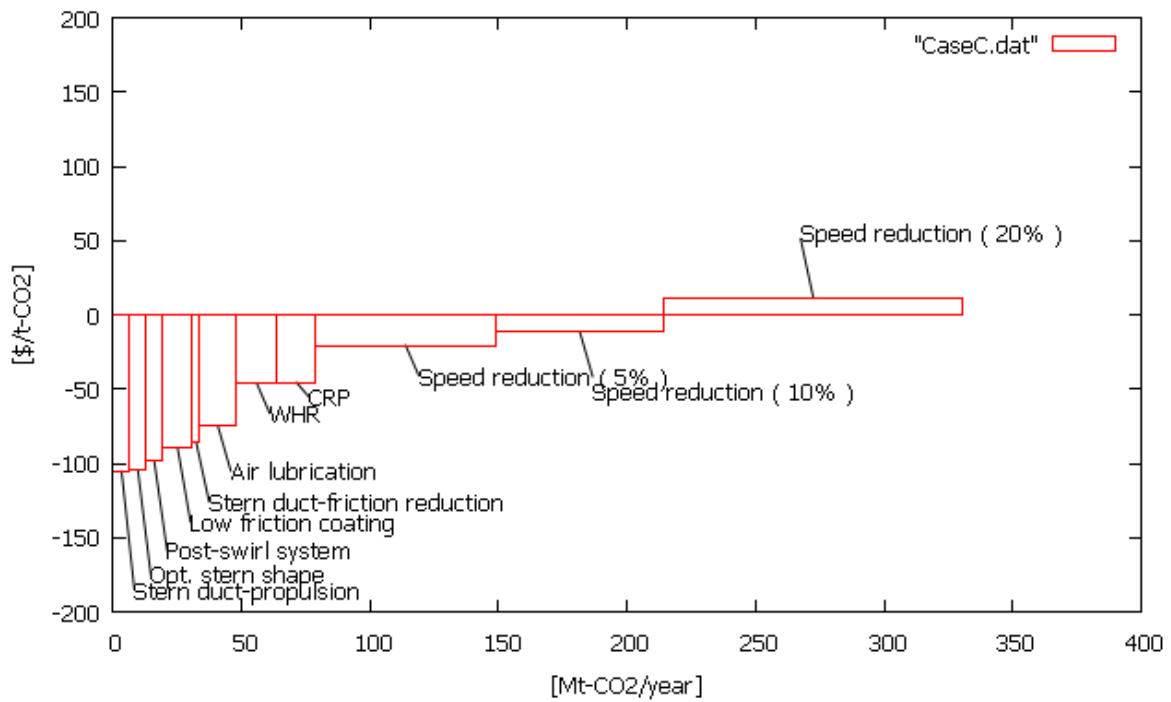


図 3.1-3 排出削減技術の MAC(新造船+減速航行：ケース C、CO₂ 割引なし)

3.1.2 CO₂について割り引く場合

表 3.1-2 減速航行による MAC 算出結果(新造船)
(CO₂割引あり)

減速率	5%	10%	20%
年間排出削減量	70.2	135.6	252.0
ケース A	-57.6	-48.0	-24.0
ケース B	-8.1	6.1	41.4
ケース C	-28.1	-15.7	15.1

(単位 Mt-CO₂/年(年間排出削減量)、USD/t-CO₂(MAC))

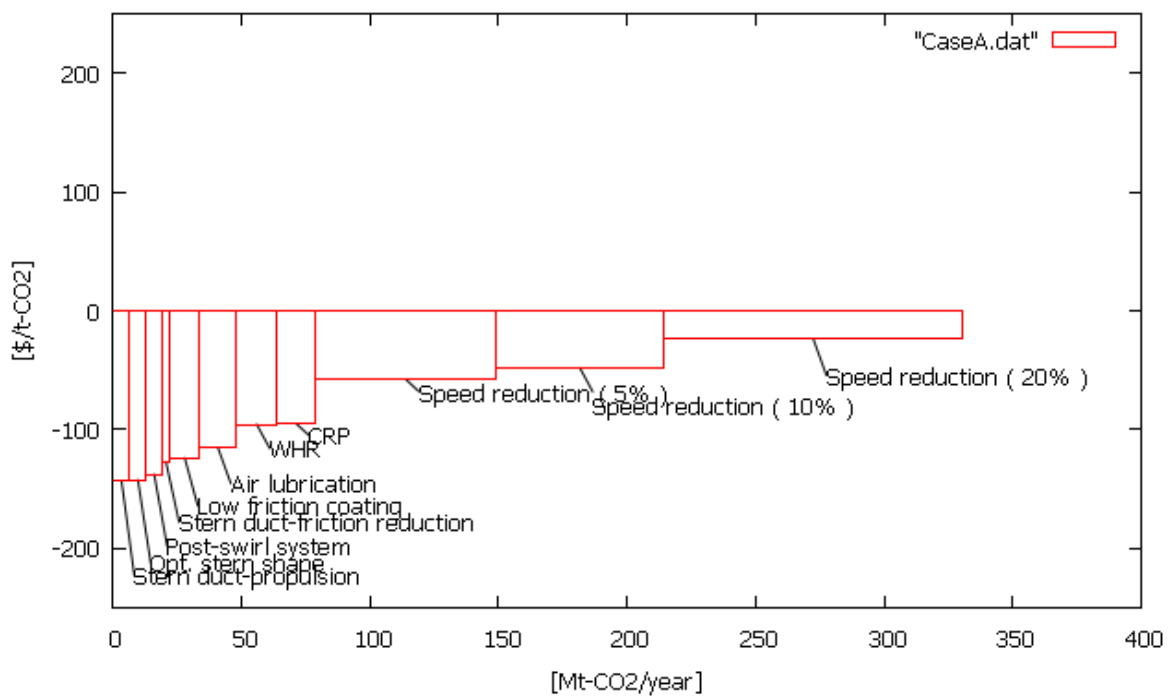


図 3.1-4 排出削減技術の MAC(新造船+減速航行：ケース A、CO₂割引あり)

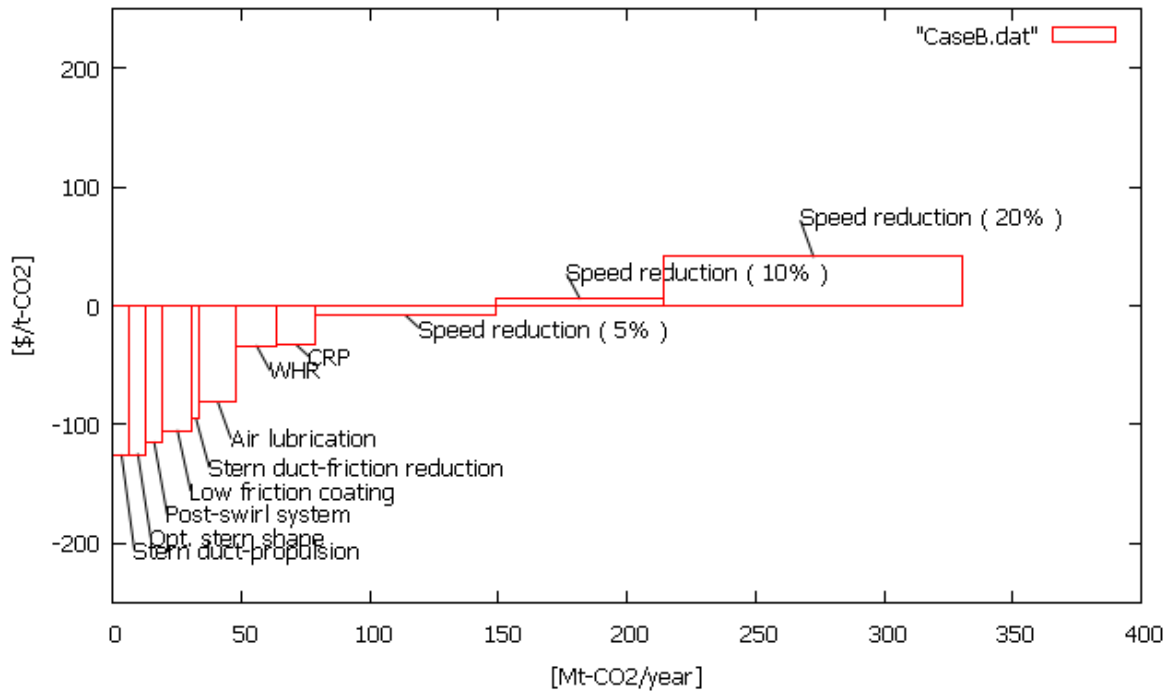


図 3.1-5 排出削減技術の MAC(新造船+減速航行：ケース B、CO₂割引あり)

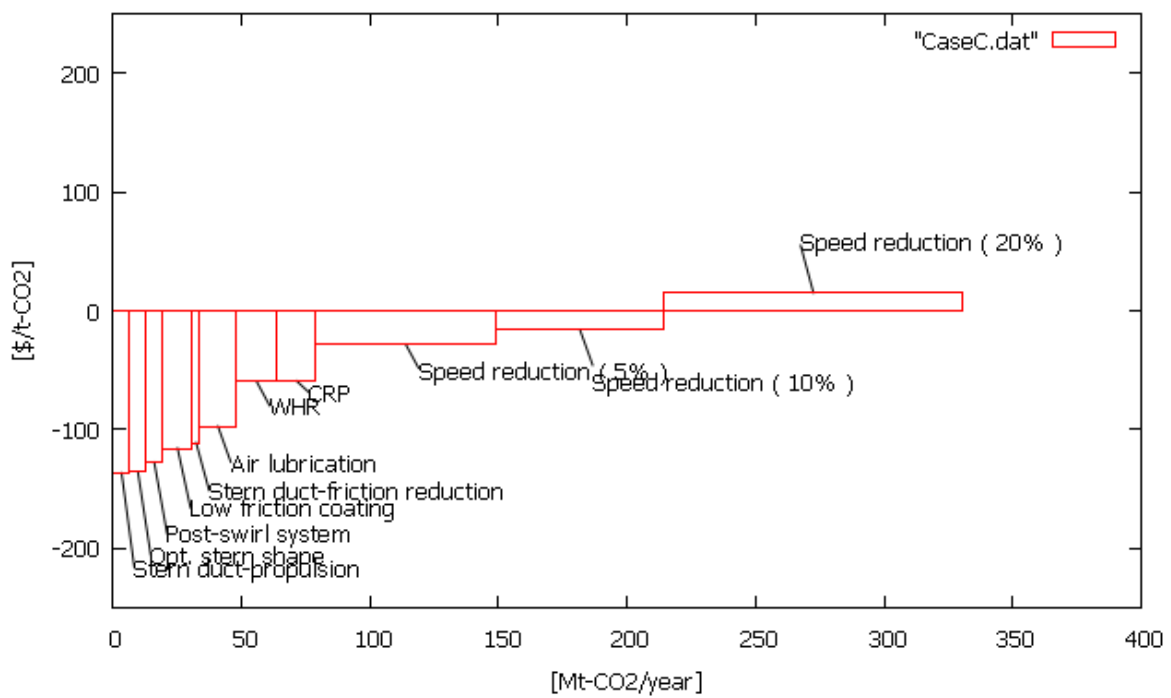


図 3.1-6 排出削減技術の MAC(新造船+減速航行：ケース C、CO₂割引あり)

3.1.3 報告書本編のアプローチ(参考)

表 3.1-3 減速航行による MAC 算出結果(新造船)
(報告書本編のアプローチ)

減速率	5%	10%	20%
年間排出削減量	70.2	135.6	252.0
ケース A	-20.0	-16.6	-8.3
ケース B	-1.6	1.2	8.1
ケース C	-12.1	-6.8	6.5

(単位 Mt-CO₂/年(年間排出削減量)、USD/t-CO₂(MAC))

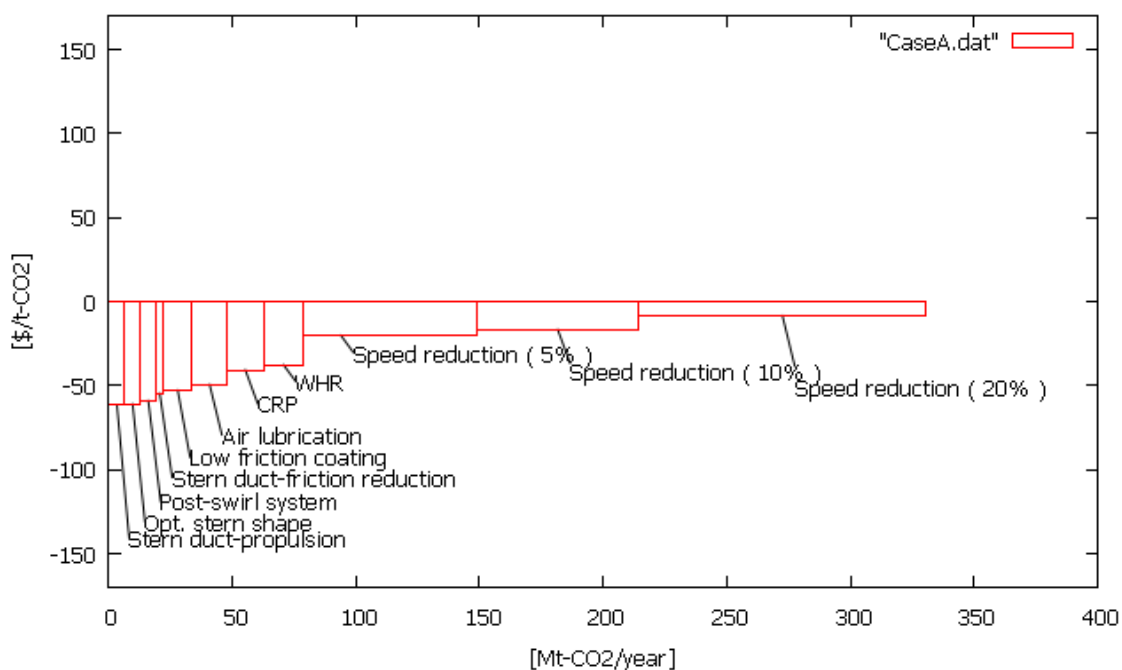


図 3.1-7 排出削減技術の MAC(新造船+減速航行：ケース A)

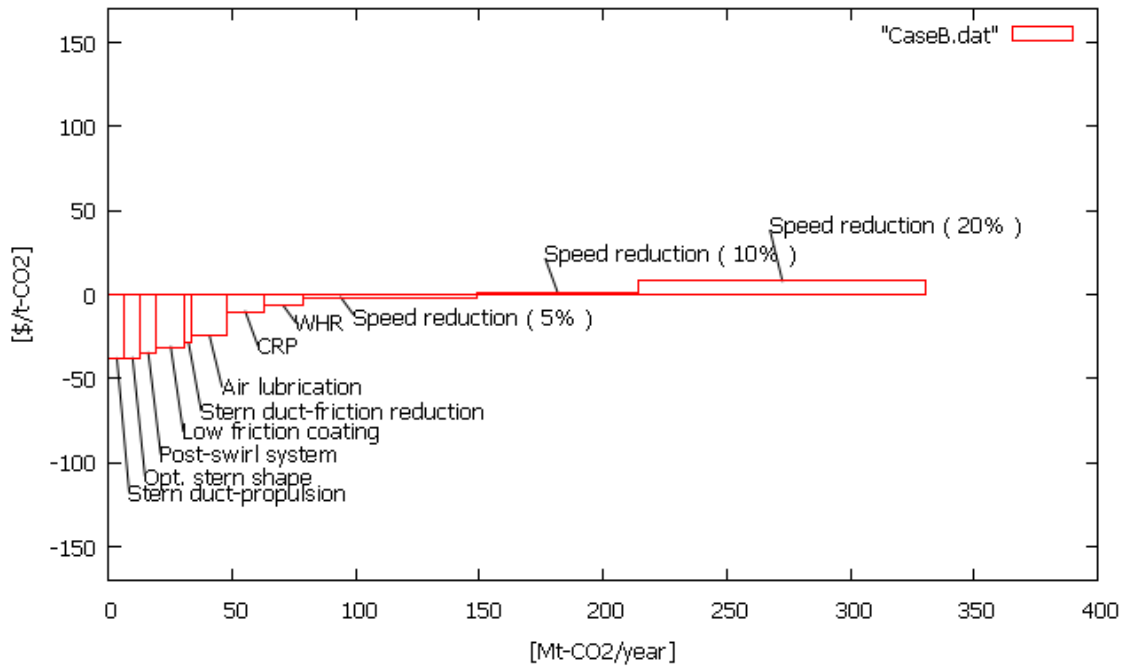


図 3.1-8 排出削減技術の MAC(新造船+減速航行：ケース B)

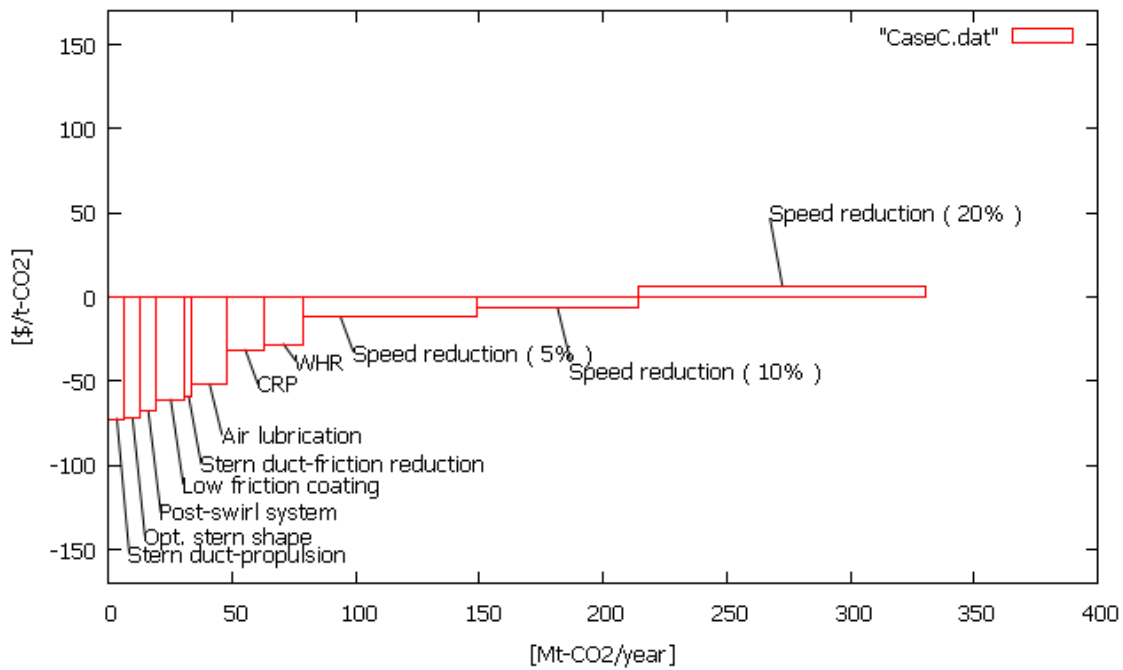


図 3.1-9 排出削減技術の MAC(新造船+減速航行：ケース C)

3.2 既存船

3.2.1 CO₂について割り引かない場合

表 3.2-1 減速航行による MAC 算出結果(既存船)
(CO₂ 割引なし)

減速率	5%	10%	20%
年間排出削減量	38.7	74.8	138.8
ケース A	-21.9	-15.1	2.1
ケース B	12.3	21.9	45.6
ケース C	-1.2	9.7	36.9

(単位 Mt-CO₂/年(年間排出削減量)、USD/t-CO₂(MAC))

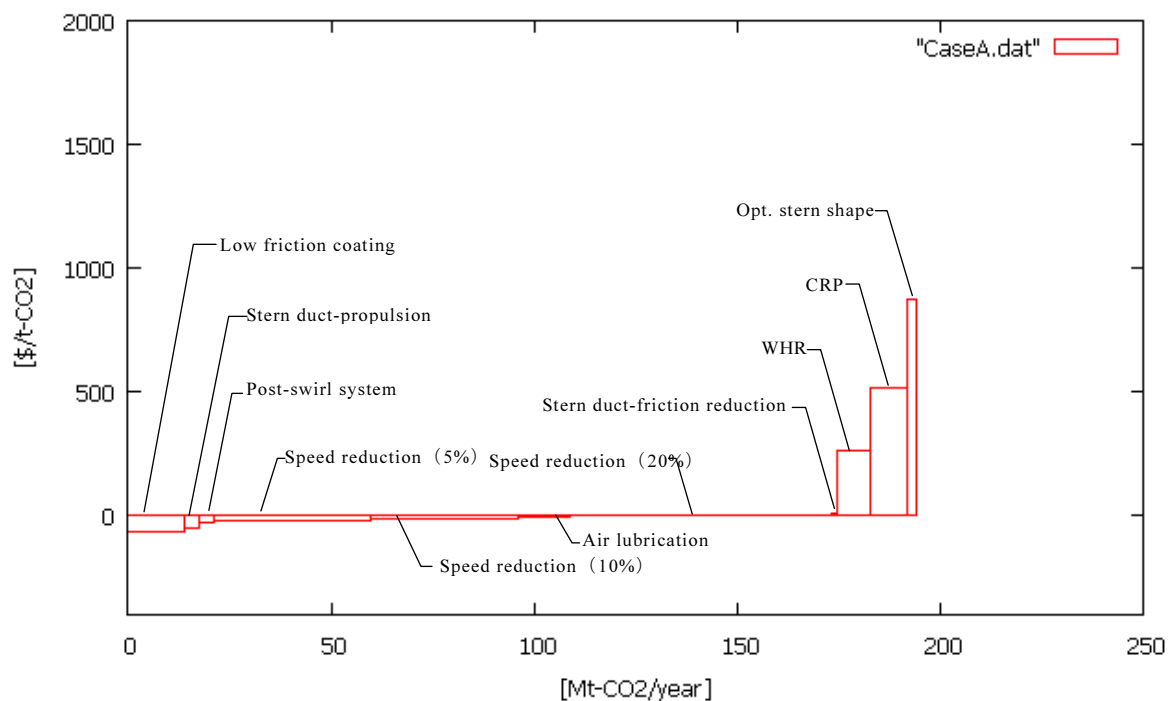


図 3.2-1 排出削減技術の MAC(既存船+減速航行：ケース A、CO₂ 割引なし)

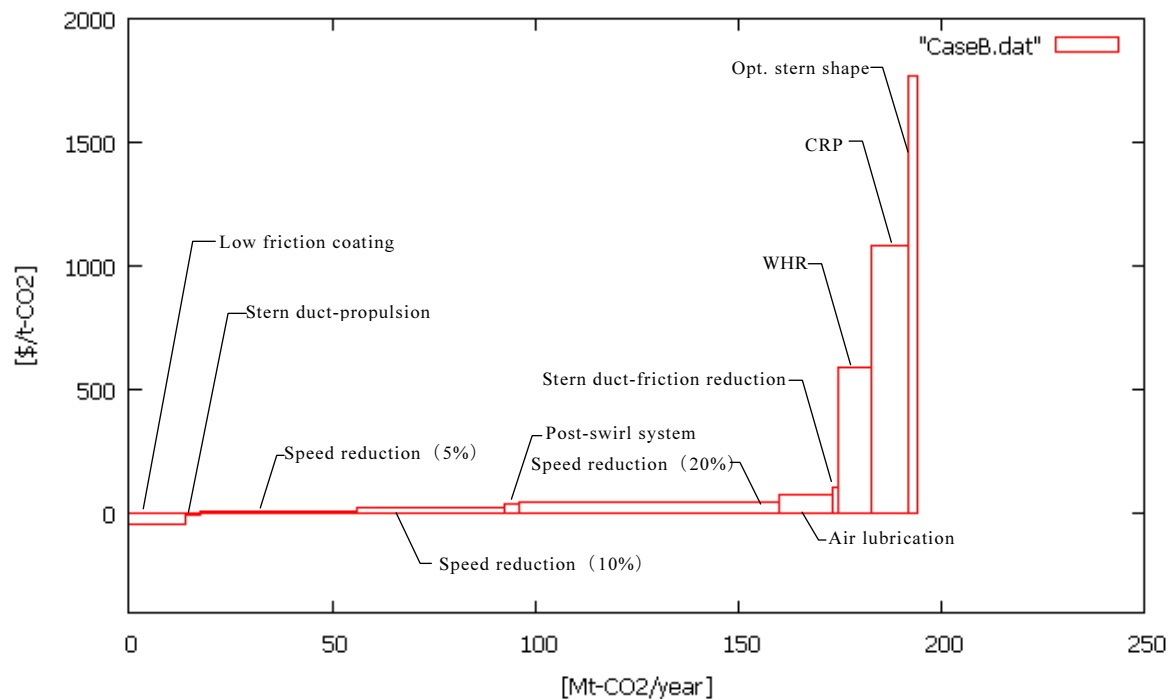


図 3.2-2 排出削減技術の MAC(既存船+減速航行：ケース B、CO₂ 割引なし)

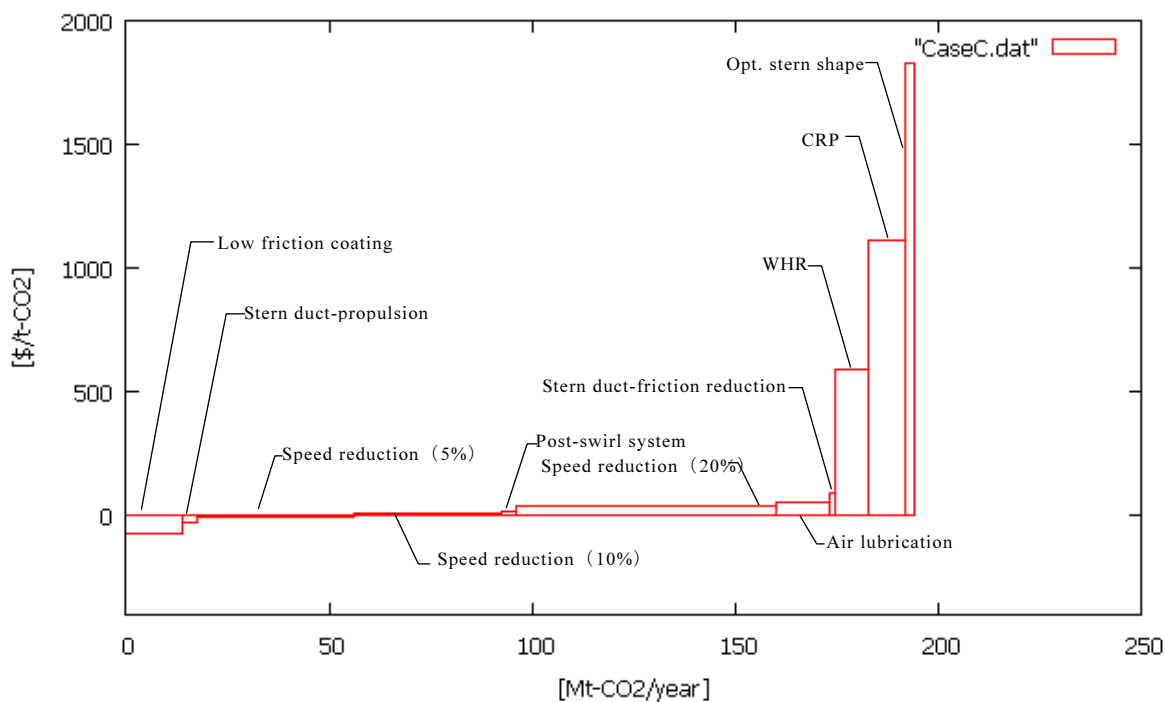


図 3.2-3 排出削減技術の MAC(既存船+減速航行：ケース C、CO₂ 割引なし)

3.2.2 CO₂について割り引く場合

表 3.2-2 減速航行による MAC 算出結果(既存船)

(CO₂ 割引あり)

減速率	5%	10%	20%
年間排出削減量	38.7	74.8	138.8
ケース A	-35.2	-24.2	3.3
ケース B	20.1	35.1	74.6
ケース C	-1.6	12.5	47.8

(単位 Mt-CO₂/年(年間排出削減量)、USD/t-CO₂(MAC))

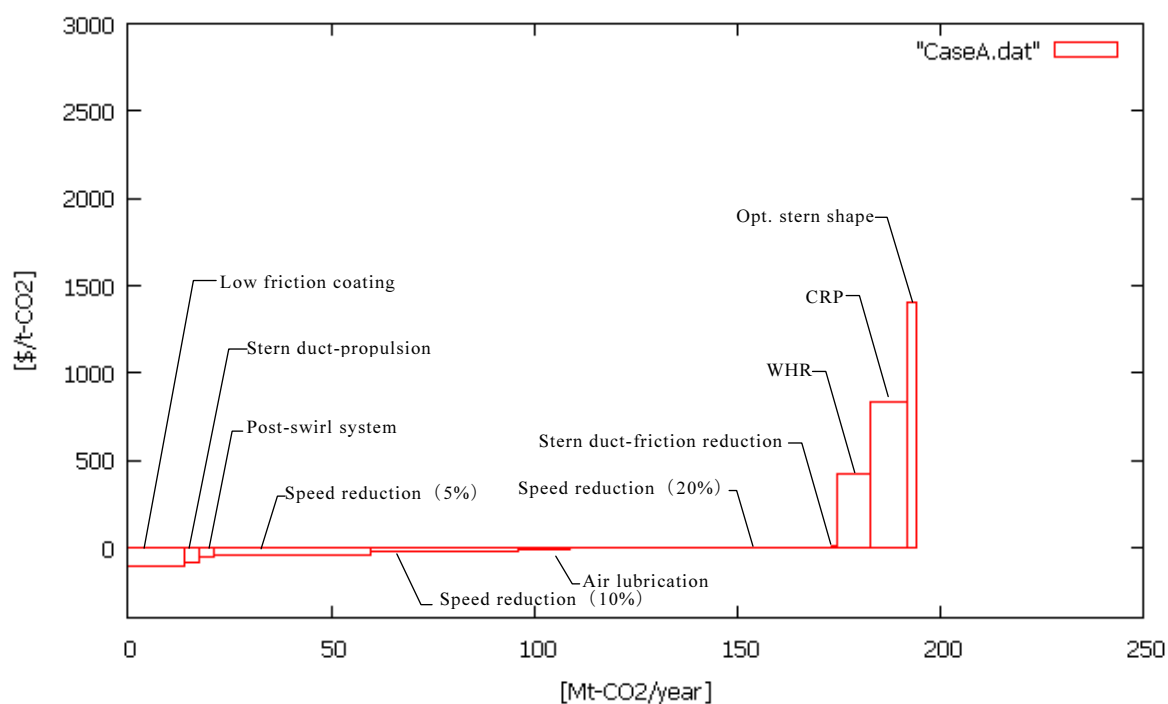


図 3.2-4 排出削減技術の MAC(既存船+減速航行：ケース A、CO₂ 割引あり)

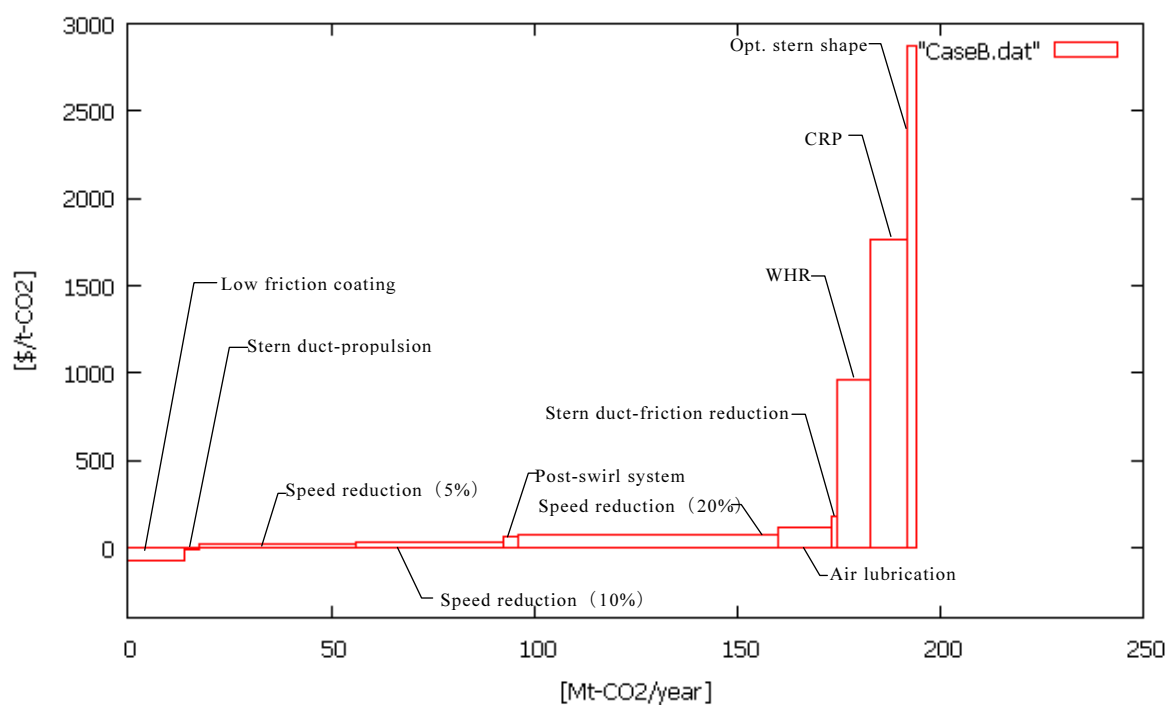


図 3.2-5 排出削減技術の MAC(既存船+減速航行：ケース B、CO₂ 割引あり)

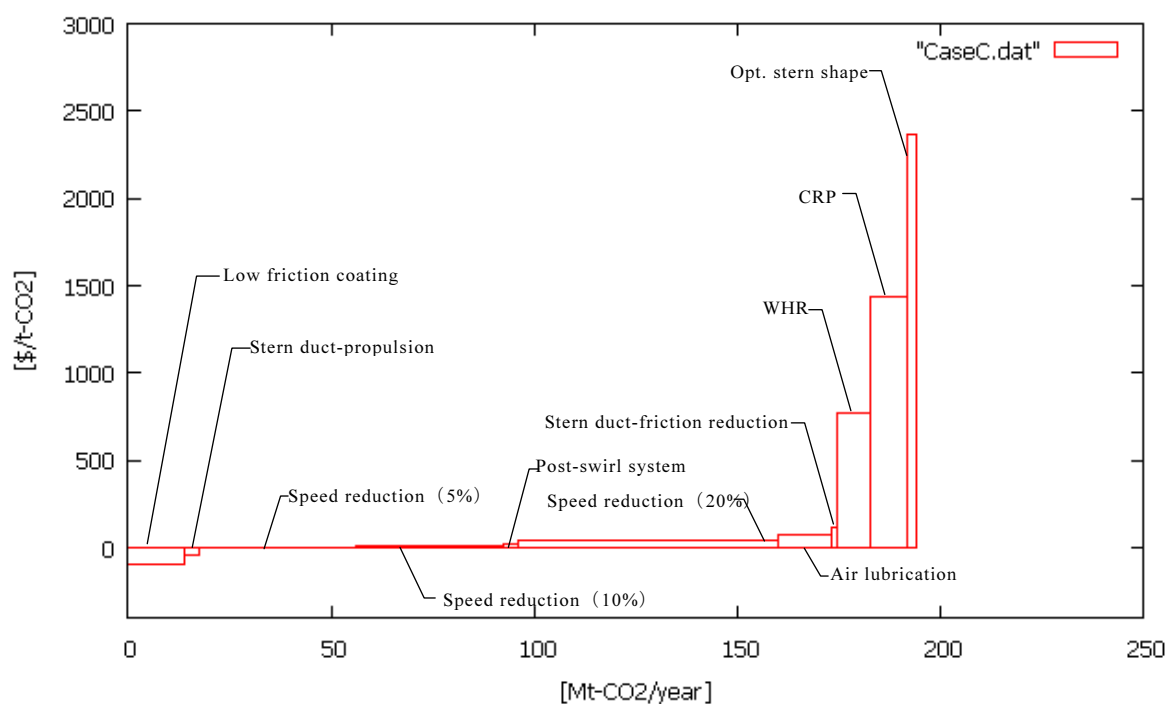


図 3.2-6 排出削減技術の MAC(既存船+減速航行：ケース C、CO₂ 割引あり)

3.2.3 報告書本編のアプローチ(参考)

表 3.2-3 減速航行による MAC(既存船)
(報告書本編のアプローチ)

減速率	5 %	10 %	20 %
年間排出削減量	38.7	74.8	138.8
MAC(ケース A)	-12.2	-8.4	1.2
MAC(ケース B)	3.9	7.0	14.5
MAC(ケース C)	-0.7	5.4	20.5

(単位 Mt-CO₂/年(年間排出削減量)、USD/t-CO₂(MAC))

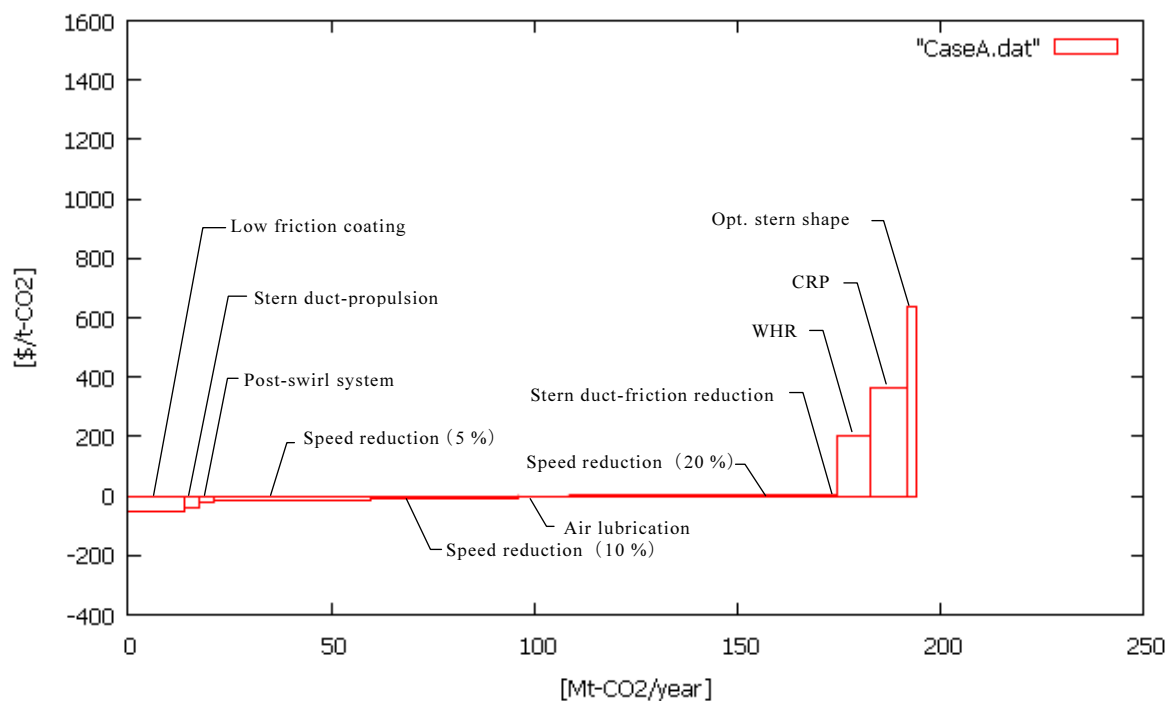


図 3.2-7 排出削減技術の MAC(既存船+減速航行：ケース A)

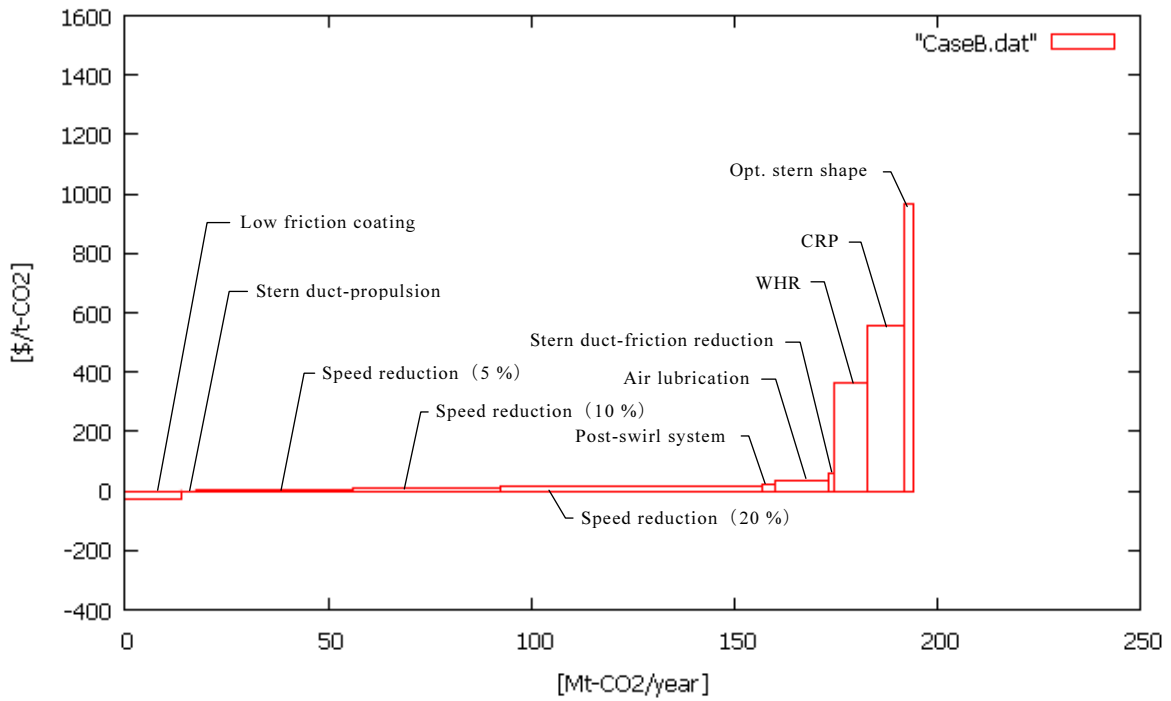


図 3.2-8 排出削減技術の MAC(既存船+減速航行：ケース B)

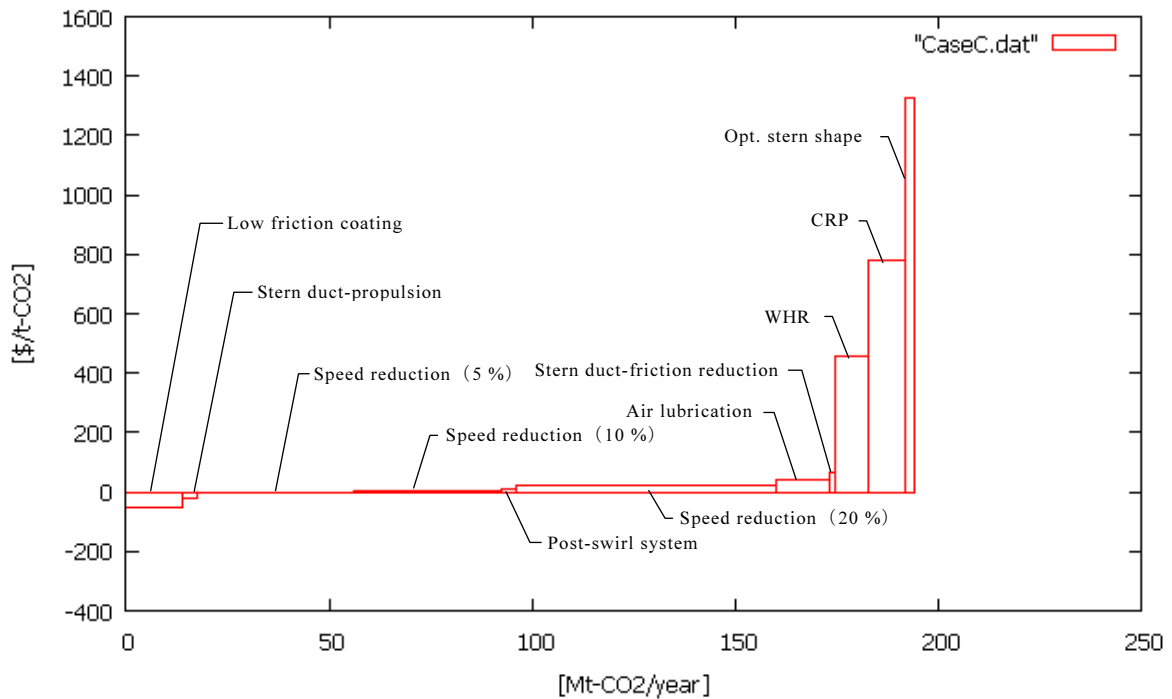


図 3.2-9 排出削減技術の MAC(既存船+減速航行：ケース C)



この報告書は、ボートレースの交付金による日本財団の助成金を受けて作成しました。

平成23年度 外航海運からのCO₂削減のためのコスト算定と比較事業報告書

平成24年3月発行

発行 海洋政策研究財団(財団法人シップ・アント・オーシャン財団)

〒105-0001 東京都港区虎ノ門1-15-16 海洋船舶ビル
TEL 03-3502-1828 FAX 03-3502-2033
<http://www.sof.or.jp>

本書の無断転載、複写、複製を禁じます。

ISBN978-4-88404-281-3