

平成22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23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、ボートレースの交付金による日本財団の平成 22 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。

外航船舶からの CO₂削減方策については国際海事機関（IMO）において議論が進められておりますが、CO₂削減量の目標あるいは効率向上目標の設定に関してはまだ議論の段階にあり、これらの目標設定の検討または今後の排出削減方策の検討にあたっては外航船舶全体で削減可能な CO₂総量とその対策費用との関係が重要になっております。

温暖化対策の実施は国や企業が行うものの、その費用については製品価格へ転嫁され最終的に国民一人ひとりが負担することとなります。全体で CO₂を削減する場合、単に業種別に削減量を割り振るのではなく、費用対削減量を検討し、効果的かつ合理的な削減対策を実施することが必要です。外航船舶から排出される CO₂の削減においても、国際海事機関（IMO）で議論が進められているところですが、CO₂の削減だけを考えるのではなく、どのような削減方法があり、その削減効果及びそれに伴うコストを想定したうえで議論を進めることが海運関係者にとって、大変重要であり、IMO での議論を進めるうえで大きな影響を持つ要因の一つです。

また、全世界的な CO₂削減方策を考える時、義務や負担が求められる国家や他の輸送機関、他の産業に対して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も、CO₂削減方策に関する公平な議論を進める前提として必要なことです。

そこで当財団では、温室効果ガスの削減量と削減するのに要する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、責任ある差異を前提とした先進国や新興国ごとの排出量、削減可能量及びその総費用に関して比較検討を行い、義務や負担の公平性を前提とした削減の総量目標あるいは全体としての効率向上目標を設定することを目標として、本事業を開始しました。

本年度は、既存資料等から MAC の計算方法や船舶の CO₂削減対策を調査して整理し、今後建造される外航船舶への新技術の導入及び運航改善等の削減方策を検討し、外航船舶の代表的な船種・船型ごとに MAC を算定するアルゴリズムを開発しました。さらに、IMO による報告書「Second IMO Greenhouse Gas Study 2009」の作成に参加し、本件に関する調査で中心的役割を担ったオランダの CE Delft 社に我々の考え方や実施内

容及び既発表文献結果との比較等を含む分析評価を依頼しました。これらの結果を基に、限界削減費用曲線（MAC カーブ：Marginal Abatement Cost Curve）を作成し、外航海運全体の総削減費用を試算して、他の産業との比較検討を行いました。

次年度には、引き続き船舶の大きさや船種ごとの将来における MAC カーブの調査・検討を行うとともに、他の輸送機関及び陸上の大規模 CO₂発生施設との MAC カーブの比較、国ごとの排出量、削減可能量及びその総コストに関して比較検討を行い、他の産業と同等程度の負担を前提とした削減目標について検討する予定です。

本調査を進めるにあたりましては、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。また、IMO の海洋環境保護委員会（MEPC）において、市場ベースの温暖化ガス削減対策に関する議論に加わっている専門家の一人であり、「Second IMO Greenhouse Gas Study 2009」の主要な著者の一人であるオランダ CE Delft 社の Jasper Faber 博士から貴重なご意見をいただきましたことに心から厚くお礼を申し上げます。

平成 23 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算定と比較事業の実施体制

本事業は、下記の体制によって実施した。

海洋政策研究財団

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	同 海技研究グループ グループ長
池田 陽彦	同 海技研究グループ グループ長
森 勝美	同 海技研究グループ グループ長代理

関係者

Jasper Faber	Co-ordinator on aviation and maritime transport, CE Delft, The Netherlands
Dagmar Nelissen	Economist , Department of Economics, CE Delft, The Netherlands
Brigitte Behrends	Managing director of the Marena Ltd., The Netherlands

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 主任研究員
白戸 智	同 社会システム研究本部 国土経営研究グループ 主席研究員
木村 紋子	同 社会システム研究本部 ITS・モビリティグループ

目 次

1	限界排出削減費用と外航海運	1
1.1	限界排出削減費用とは	1
1.2	基本的な算出方法	2
1.3	本調査の基本前提	3
2	海運分野における限界排出削減コストカーブに関する文献調査	4
2.1	Second IMO GHG Study 2009	4
2.2	DNV 文献	10
2.3	IMarEST 文献 (MEPC61/INF.18)	16
2.4	CE Delft 文献	23
2.5	IMO, DNV, IMarEST, CE Delft の MAC カーブ算出方法の比較	26
3	その他文献にみる MAC 算出	33
3.1	マッキンゼー “Pathways to a Low-Carbon Economy”	33
3.2	RITE 世界モデル	37
3.3	IEA Energy Technology Perspectives 2010 (ETP)	40
3.4	英国気候変動委員会 (CCC) 英国運輸部門における MAC 算出	42
3.5	MAC 文献の比較	46
4	海運における MAC の算出	47
4.1	2020 年の船舶の状況の推計	48
4.2	日本政府 MEPC 提出文書 (60/4/36 : 以下 MEPC 文書) との対比	51
4.3	ベースライン排出量の算出	53
4.4	MEPC 文書の技術シナリオの定量化	55
4.5	個別技術による排出削減量の推計	57
4.6	減速航行の算入	59
4.7	コスト及び経済計算パラメータの検討	65
4.8	MAC の算出	70
4.9	結果	71
5	考察とまとめ	82
5.1	検討結果のまとめ	82
5.2	今後の課題	83
	用語集	84
	参考	

Analysis of GHG Marginal Abatement Cost Curves, CE Delft, March 2011

1 限界排出削減費用と外航海運

1.1 限界排出削減費用とは

今後の温室効果ガス排出削減対策の検討にあたり、限界排出削減費用（Marginal Abatement Cost : MAC）は欠くことのできない視点の一つである。限界排出削減費用とは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（例えば CO₂ の場合は排出量を追加的に CO₂ 換算で 1 トン削減するのに必要な費用）であり、温室効果ガス削減対策の経済的な効率性を見る指標の一つである。今、削減費用が安い対策から順次の導入を図っていく状況を考えると、これらの対策の限界排出削減費用は、全体的な温室効果ガス削減量が多くなればなるほど逡増する曲線または階段状の軌跡を描く。即ち、より経済的に困難な対策が行われる。このような、排出削減量と限界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 カーブにより、温室効果ガス排出に対してある一定の CO₂ 価格（ドル/t・CO₂）を課すような温室効果ガス排出削減対策（炭素税、排出量取引等）を実施することにより達成されうる排出削減量の全体量がわかる。

MAC カーブの典型的な形態について図 1-1 に示す。ある対策による排出削減費用は時として負の値を取ることもあるが、これは対策の実施により対策実施者（特定の個人、企業等もしくは国家、社会全体等で、限界排出削減費用の定義による）に例えば燃料削減等の利益が得られることを示す。言うまでもなく、排出削減費用の正負及び大きさは資金的な前提の変動により大きく変わる。投資額 1 億円で年間 2,000 万円の省エネ便益をもたらす対策の排出削減費用は、投資回収年数を 3 年と想定した場合はプラス（即ち費用が便益を上回る）であるが 10 年とした場合は逆にマイナスとなる。

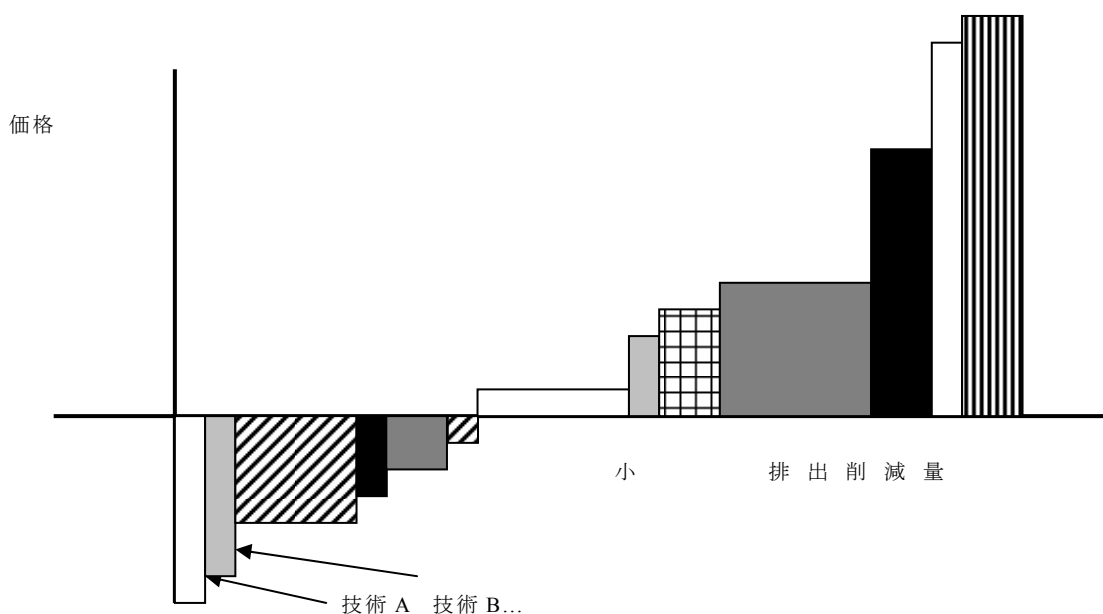


図 1-1 MAC カーブの形

MAC カーブは対策技術の排出削減ポテンシャル、導入量及びスケジュール、資金的なパラメータ等、多くの要因によって変化しうる。一般的にプロジェクトの投資回収が困難となるように条件を変化させると、MAC カーブは上方に移動する。温室効果ガス排出削減に関する MAC カーブの場合、そのようなパラメータの例としては対策導入価格の上昇、石油価格の低下、金利上昇、割引率の上昇、想定投資回収年数の短縮が挙げられる。これらと逆の想定に基く計算を行う場合 MAC カーブは下方に移動する。他方、対策によって達成しうる排出削減量に関する前提を変動させた場合は MAC カーブは左右方向に移動する。

1.2 基本的な算出方法

本調査での限界排出削減コストの基本的な算出方法は、個々の対策技術による排出削減に要した費用（対策実施費用、対策により得られる便益（燃料節約等）の和）を排出削減量で除することにより求められる。ここで導入する技術の便益及び対策実施費用は複数年にわたるため、現在価値換算する必要がある。これに対して温室効果ガス排出削減量についてはそのような割引を行わない。具体的には下記のように行う。

$$MAC_{tc,t} = \frac{-(\sum_i NPV_{tc,i,t})}{\sum_{yc=2008}^{2020} \sum_{yr=1}^{yr=n} ER_{tc,t}} \quad (1)$$

ここで

- ・ $MAC_{tc,t}$: 船種・クラス tc において導入された技術 t の限界排出削減費用 (MAC)
- ・ yc : 建造年（ここでは 2008 年から 2020 年を想定）
- ・ $ER_{tc,t}$: 船種・クラス tc において導入された技術 t の排出削減量
- ・ yr : 船齢（例：20 年を想定）
- ・ $NPV_{tc,i,t}$: 船種・クラス tc の個船 i における技術 t による排出削減費用の正味現在価値

NPV は正味現在価値（net present value）であり、下記のように算出する。

$$NPV_{tc,i,t} = \frac{1}{(1+r)^{yc-2008}} (C_{i,yc} - B_{i,yc}) + \dots + \frac{1}{(1+r)^{yc+X-2008}} (C_{i,yc+X} - B_{i,yc+X}) \quad (2)$$

$$B_{i,y} = FC_y \times EC_{i,t,y} - OPEX_{i,t,y} \quad (3)$$

ここで、

- ・ r : 割引率
- ・ $C_{i,y}$: 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）
- ・ $B_{i,y}$: 技術 t に起因する個船 i の便益
- ・ yc : 建造年
- ・ X : 使用年数
- ・ FC_y : y 年の燃料価格
- ・ $EC_{i,t}$: y 年の技術 t に基くエネルギー消費節減量
- ・ $OPEX_{i,t,y}$: y 年の技術 t にの正味ランニングコスト（通常は省エネ便益が対策実施費用を上回るため、マイナスの値を取る）

1.3 本調査の基本前提

本調査では、まず諸文献より MAC の基本的考え方を整理し、次いで海運における MAC の算出を行う。MAC 算出に当たっては、年度を 2020 年とおく。対象は、技術的対策に関しては現在（2008 年とおく）から 2020 年までに建造された船舶とし、運航上の対策（減速航行）に関しては 2020 年における全船舶を対象とする。（すなわち、2008 年時点での既存船に対するレトロフィット対策は対象としない。）

推計に当たっては可能な限り Second IMO Greenhouse Gas Study 2009（以下では Second IMO GHG Study 2009 または IMO スタディと略す。）の IPCC A1B シナリオでの推計に準拠し、また排出削減対策技術については日本政府の MEPC 提出文書（60/4/36：以下 MEPC 文書）に準拠する。

2 海運分野における限界排出削減コストカーブに関する文献調査

各国の研究機関等が、海運分野における CO₂削減対策の限界費用削減曲線（Marginal Abatement Cost Curve:通称 MAC カーブ）の算出を行っているが、本章では以下 4 団体の文献が各所において引用されており、海運分野の MAC カーブ算出の代表例であることから、これら機関が公表している算出方法をレビューする。対象となる文献について下記に示す。

- ・ Second IMO GHG Study 2009 (IMO, 2009)
- ・ Prevention Of Air Pollution From Ships: Updated Marginal Abatement Cost Curves for shipping[MEPC60/INF.19] (DNV, 2010)
- ・ Reduction Of GHG Emissions From Ships,Marginal abatement costs and cost-effectiveness of energy-efficiency measures [MEPC61/INF.18] (IMarEST,2010)
- ・ Technical support for European action to reducing Greenhouse Gas Emissions from international maritime transport (CE Delft, 2009)

2.1 Second IMO GHG Study 2009

ここでは、Second IMO GHG Study 2009（2010 年 3 月発行）に掲載されている MAC カーブの算出方法を整理する。

2.1.1 MAC カーブ算出方法

(1)基本的な考え方

社会的観点（social perspective）を採用し、世界経済が GHG 削減にどれだけのコストが必要かを示すものである。算出されたコストは船社が実施する GHG 削減対策への出費等を表現しているわけではないとしている。

2020 年時点の削減量の可能性（削減ポテンシャル）を表現しており、技術の普及に対する諸般の制約等は考慮していない。

また、データ収集可能な対策のみを対象としており、削減ポテンシャルは本文献で算出した量よりも高い可能性がある。

(2)各種パラメータの設定条件

a. 船舶数

IMO が発表している 2007 年の船舶数（IMO fleet inventory）と 2020 年の船舶数（IMO prediction A1B シナリオ）を用いて、以下の 4 つの仮定を置いて 2008～2020 年までの船舶数を推計している。

- ・ 2007 年には新造船の参入なし
- ・ 2007～2020 年まで船級ごとの隻数は線形に増加／減少

- ・ 船舶の寿命は 30 年
- ・ 2007 年の船舶については、船齢 1 年が 1/30、2 年が 1/30、……というふうに均等に分配している（即ち船齢構成を均一と仮定する）

新造船船舶数の推計式は下式のとおりであり、船の寿命を過ぎると解撤されることとなる。

新造船の数 = X 年の全船舶数 - ((X - 1) 年の全船舶数 - 1/30 * 2007 年の全船舶数)

MAC カーブ算出の際には、船の種類とサイズを考慮して 53 種に分類した上で船の種類ごとに MAC を算出している。具体的な船の分類は下表のとおりである。

表 2-1 船の分類（53 種）

種類	サイズ	種類	サイズ
CrudeTanker	200,000+ dwt	General cargo	10,000+ dwt
CrudeTanker	120 -199,999 dwt	General cargo	5,000-9,999 dwt
CrudeTanker	80 -119,999 dwt	General cargo	-4,999 dwt
CrudeTanker	60 -79,999 dwt	General cargo	10,000+ dwt, 100+ TEU
CrudeTanker	10 -59,999 dwt	General cargo	5,000-9,999 dwt, 100+ TEU
CrudeTanker	-9,999 dwt	General cargo	-4,999 dwt, 100+ TEU
ProductsTanker	60,000+ dwt	Other dry bulk carrier	Reefer
ProductsTanker	20 -59,999 dwt	Other dry bulk carrier	Special
ProductsTanker	10 -19,999 dwt	Unitized container vessel	8,000+ teu
ProductsTanker	5 -9,999 dwt	Unitized container vessel	5 -7,999 teu
ProductsTanker	-4,999 dwt	Unitized container vessel	3 -4,999 teu
ChemicalTanker	20,000+ dwt	Unitized container vessel	2 -2,999 teu
ChemicalTanker	10 -19,999 dwt	Unitized container vessel	1 -1,999 teu
ChemicalTanker	5 -9,999 dwt	Unitized container vessel	-999 teu
ChemicalTanker	-4,999 dwt	Unitized vehicle carrier	4,000+ ceu
LPGTanker	50,000+ cbm	Unitized vehicle carrier	-3,999 ceu
LPGTanker	-49,999 cbm	Ro-Ro vessel	2,000+ lm
LNGTanker	200,000+ cbm	Ro-Ro vessel	-1,999 lm
LNGTanker	-199,999 cbm	Ferry	Pax Only, 25kn+
Other tanker	Other	Ferry	Pax Only, <25kn
Bulk carrier	200,000+ dwt	Ferry	RoPax, 25kn+
Bulk carrier	100 -199,999 dwt	Ferry	RoPax, <25kn
Bulk carrier	60 -99,999 dwt	Cruise ship	100,000+ gt
Bulk carrier	35 -59,999 dwt	Cruise ship	60-99,999 gt
Bulk carrier	10 -34,999 dwt	Cruise ship	10-59,999 gt
Bulk carrier	-9,999 dwt	Cruise ship	2-9,999 gt
		Cruise ship	-1,999 gt

（出典：Second IMO GHG Study 2009）

b. CO₂削減効果とコスト

CO₂削減対策ごとに CO₂削減ポテンシャルとコストを算出するが、コストは導入費用（初期投資コスト）と運用費用に分けて考えている。

c. 初期投資コスト按分と対策寿命の考え方

初期投資コストを対策寿命（lifetime of a measure）に基づく支払期間に分割（利率を考慮）し、NPV を計算している。

また、支払期間となる対策寿命は次のように設定している。対策寿命 10 年未満は同期間、10～30 年未満は 10 年間、30 年以上は 30 年間である。

対策毎の寿命（または投資頻度）は、下表のようにバルチラ（2008）を参考として

設定。バルチラにデータが掲載されていない対策については、専門家により設定されている。

表 2-2 対策毎の削減ポテンシャル・回収期間・対策寿命

Table A4.15 Approximate average reduction potential and payback time for cost calculation of measures, taken from Wärtsilä (2008) [7]

Measure	Average reduction potential	Payback time (years)	Lifetime/frequency of investment
Autopilot upgrade/adjustment	1.75%	0.5	10
Common rail upgrade	0.30%	5	10
Low-energy/low-heat lighting	0.45%	10	10
Main engine tuning	0.45%	10	10
Propeller brushing	3.50%	0.5	1
Propeller performance monitoring	2.25%	0.5	10
Propeller/rudder upgrade	4.00%	10	10
Propeller upgrade (winglet, nozzle)	2.50%	10	10
Speed control pumps and fans	0.60%	10	10
Power management (newbuilds only)	2.25%	10	30
Transverse thruster opening (flow optimization, grids)	3.00%	0.5	10

(出典：Second IMO GHG Study 2009)

d. CO₂排出量

CO₂排出量のベースラインとして、Second IMO GHG Study 2009 における将来予測の基本ケースの 1 つである IPCC A1B シナリオ（外航海運起源の温室効果ガス排出量を 2020 年に 1250Mt・CO₂と想定）を採用している。

e. 燃料費

船用燃料（Bunker fuel）の価格を US500 ドル/トンと設定している。

f. 割引率

社会的利率（social interest rate）として米国と欧州の 10 年満期国債の過去 5 年の平均利回りが 3～5%であることから割引率は 4%に設定している。

g. CO₂削減対策

CO₂削減対策として 25 対策を対象にしている。対策が適用される船舶として、全船舶、新船舶の 2 種類を想定し、25 対策を次表の 10 グループに分けている。グループ内の対策は同時に実施されることはない。

表 2-3 CO₂削減対策一覧

Applicability of measures as assumed in the study	
Propeller maintenance	
Propeller performance monitoring	All ship types.
Propeller brushing (increased frequency)	All ship types.
Propeller brushing	All ship types.
Propeller/propulsion system upgrades	
Propeller/rudder upgrade	All ship types other than ferries and cruise ships.
Propeller upgrade (winglet, nozzle)	Tankers (crude oil, product, chemical, LPG, LNG, and other) only.
Propeller boss cap fins	All ship types.
Hull coating and maintenance	
Hull performance monitoring	All ship types.
Hull coating (two types)	All ship types.
Hull brushing	All ship types.
Hull hydroblasting (underwater)	All ship types.
Dry-dock full blast (as opposed to spot blast)	All ship types; assumed to be applied to old ships only.
Voyage and operations options	
Shaft power meter (performance monitoring)	All ship types.
Fuel consumption meter (performance monitoring)	All ship types.
Weather routing	
Autopilot upgrade/adjustment	All ship types.
Main engine retrofit	
Main engine tuning	All ship types other than ferries and cruise ships.
Common rail upgrade	All ship types.
Retrofit hull improvements	
Transverse thruster opening (flow optimization, grids)	All ship types.
Auxiliary systems	
Low-energy/low-heat lighting	Ferries and cruise ships only.
Speed control pumps and fans	All ship types.
Power management	Newly built ships only; all ship types.
Other retrofit options	
Towing kite	Bulk carriers, tankers (crude oil, product, chemical, LPG, LNG, and other)
Speed reduction	
10% speed reduction of the entire fleet	All ship types.
Air lubrication	
Air lubrication	Newly built ships only; crude oil tankers and bulk carriers > 60,000 dwt, LPG tankers > 50,000 m ³ , all LNG tankers, full container vessels > 2,000 TEU

(出典 : Second IMO GHG Study 2009)

h. CO₂削減対策普及率の考え方

基本的に対策が適用可能な船級には全て対策が普及すると想定するが、新造船のみに実施可能な対策、レトロフィットが可能な対策は区別している。(上表参照)さらに、レトロフィットは対策寿命が残された船齢より長い場合にのみ導入するとしている。

(3)減速航行の考え方

CO₂削減対策として減速航行を行ったときの MAC の算出は以下の考え方に則っている。

- ・ 減速航行による同一期間内の輸送量の減少を新船の建造で補填するため、隻数は増加すると想定している。
- ・ 一船当たりの消費エネルギーは、上記の隻数増加を考慮することによって、航行速度の二乗に比例するとしている。
- ・ 必要な新造船隻数の増加率は、 $1 / (1 - \text{減速率})$ で与えられるとしている。
- ・ 初期コストは新造船導入費用、運用コストは減速航行による“新造船”分の運航費としている。
- ・ 新造船の費用は UNCTAD(2008) Review of Maritime Transport の 2007 データに基づいたが、同年の船価が（リーマンショック前の好況期につき）高いと判断し、補正係数 0.7 を乗じて設定している。
- ・ 全ての船種の運用コストは 1 日当たり 6,000～8,000 ドル/隻の間に設定。ただし、クルーズ船、フェリー、RO-RO 船、自動車運搬船は設定していない。
- ・ 10%減速に対して計算された結果は以下のとおりである。上述のように、積載率変化等を想定していないので、保守的な推計結果と考えられる。

表 2-4 10%減速航行の場合のコストと削減ポテンシャル

削減コスト(ドル/t-CO ₂)		削減ポテンシャル	
低位推計	高位推計	Mt-CO ₂	削減率%
80	135	98.7	7.9%

(出典：Second IMO GHG Study 2009)

2.1.2 MAC カーブ算出結果

2020 年における MAC カーブを対策グループ（10 グループ）別に算出している。

Table A4.1 Approximate cost efficiency and maximum abatement potential for the different groups of measures* (2020, fuel price is US\$500/tonne, interest rate is 4%)

	Cost efficiency (US\$/tonne of CO ₂)	Maximum abatement potential (Mt)
	Central estimate (low bound estimate / high bound estimate)	
Retrofit hull measures	-155 (-140/-160)	30 (10/55)
Voyage and operational options	-150 (-140/-160)	25 (5/45)
Air lubrication	-130 (-90/-150)	20 (10/25)
Propeller/propulsion upgrades	-115 (-70/-155)	50 (45/60)
Other retrofit options	-110 (-75/-135)	70 (40/100)
Hull coating and maintenance	-105 (-65/-140)	40 (15/65)
Propeller maintenance	-75 (-65/-120)	45 (25/65)
Auxiliary systems	80 (250/-90)	5 (2/10)
Speed reduction	110 (80/135)	100 (90/110)
Main engine improvements	175 (470/-120)	5 (1/10)

* Note that, since the measures are sorted by their cost efficiency, the order of the measures differs for the different estimates.

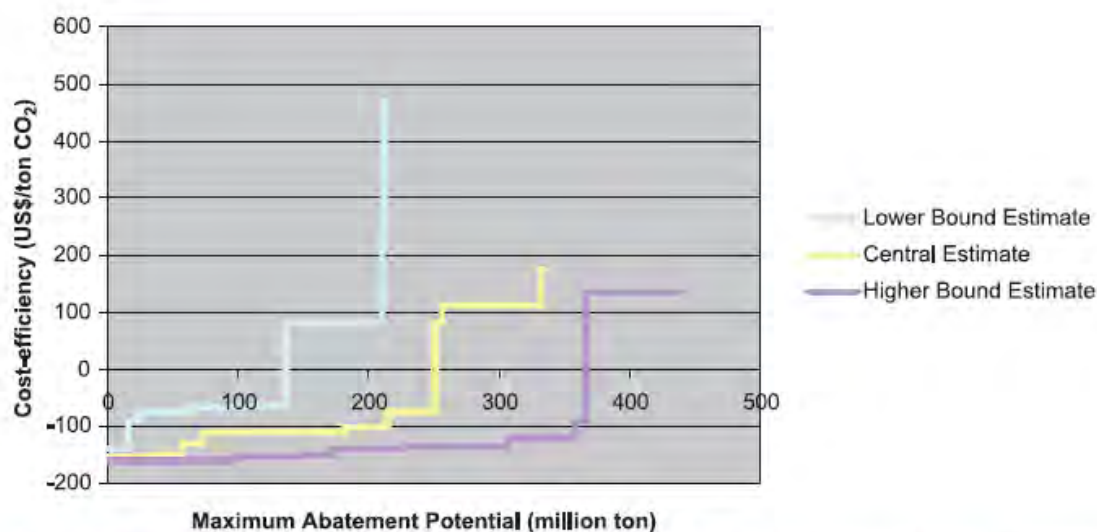


Figure A4.1 Marginal CO₂ abatement cost curve for 2020, a fuel price of US\$500/tonne and an interest rate of 4%

図 2-1 MAC カーブ算出結果

（出典：Second IMO GHG Study 2009）

2.2 DNV 文献

Det Norske Veritas (DNV) “Prevention Of Air Pollution From Ships: Updated Marginal Abatement Cost Curves for shipping” [MEPC60/INF.19] (2010 年 1 月発行) に掲載されている MAC カーブの算出方法を整理する。

2.2.1 MAC カーブ算出方法

(1) 基本的な考え方

一義的には政策判断、規制検討の支援のために MAC カーブを作成している。個々の船社の判断材料として本文献の MAC カーブを直接参照できないとしている。

また、2020 年、2030 年時点の削減ポテンシャルを表現している。

(2) 各種パラメータの設定条件

a. 船舶数

対象とする船舶は、2007 年時点で 59 種類 6 万隻である。実際には 100GT 以上の貨物用船舶は 68 種あるが、このうちサービス船・漁船を除く 59 種を選定している。対象船舶について、2030 年までに 8 万～10 万隻まで増加すると想定して推計を行っており、推計値には成長シナリオにより幅を持たせている。

推計の際のベースライン及び船種の分類は、IMO スタディを基にしている。輸送量の成長率は IPCC A1B シナリオ及び B2 シナリオを参照している。(フリートの成長率の設定方法については詳細な記述がないが、基本的な運用パターン等は変化がないと想定。)

表 2-5 輸送量の成長シナリオ (Mt-CO₂)

	ベースライン	A1B シナリオ		B2 シナリオ	
	2007	2020	2030	2020	2030
海運起源総排出量	1,046	1,443	1,962	1,283	1,574

(出典：PREVENTION OF AIR POLLUTION FROM SHIPS Updated Marginal Abatement Cost Curves for shipping submitted by Norway[MEPC60/INF.19])

また、推計方法はある年のある船種において稼動している船舶数となるように、増加率と減少率（船舶の解撤率）を調整している。解撤率を、2007～2012 年については近年の高い解撤率を反映し 4%、2012～2030 年については 3%と設定している。

また、モデルの中でフリート内の建造年 (YOB) データを変数として保持している。
(※ただし、DNV が IMO で発表した MEPC60/INF.19 では明記されていない。)

b. CO₂削減効果とコスト

1 つの船種において、平均的な船がその船種を代表すると仮定して、船種×対策ごとに、CO₂削減ポテンシャルとコストを算出している。算出の際には下記に挙げる点を考慮している。

- ・ 運用上の仮定（船速、海上に出る日数、平均燃料消費量、搭載動力等）
- ・ 2010、2020、2030 年における各 CO₂削減対策の削減ポテンシャル
- ・ 2010、2020、2030 年における各 CO₂削減対策の導入および運用コスト
- ・ CO₂削減対策の導入年
- ・ CO₂削減対策の運用寿命

c. 初期投資コスト按分と対策寿命の考え方

導入コスト（設計、設置等）と運用コスト（維持、訓練、収入損失等）を想定し、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、より短い期間を計上期間としてコストを算定している。これを、リスクフリー割引率（risk-free discounted rate）5%で現在価値に換算、これを運用期間で割って年間コストとしている。

対策毎の寿命は、IMO スタディ及び専門家の判断により設定している。

特に、船体、機関部のゼロコストの対策は、“一般的改良（General improvement）”として削減対策の一つに加えている。（＝ベースラインの改善を示す。関係論文では改善幅は 2010、2020、2030 にそれぞれ 5、8、10%）

d. CO₂排出量

全船舶からの CO₂排出量の推計の際に用いるベースラインとして、IPCC の A1B シナリオ（急速成長）と B2 シナリオ（持続性のある成長）の 2 種類のシナリオを用いている。

e. 燃料費

燃料費は燃料種ごとに下記のように設定している。

- ・ MDO 500 ドル/トン
- ・ HFO 350 ドル/トン
- ・ LNG 450 ドル/トン

（LNG のみ、2030 年に 350 ドル/トンと徐々に減少するよう設定）

f. 割引率（annual risk-free rate）

前述のように、割引率は 5%に設定している。

g. CO₂削減対策

CO₂削減対策として下表に挙げる 25 対策を考慮している。対策の適用の際には、全船舶、新船舶、運用中船舶の 3 種類を想定している。

表 2-6 CO₂削減対策一覧（25 対策）

Alternative energy sources			
Measure	Applies to	Measure	Applies to
Gas-fuelled engines	New ships	Wind power: Kite	All ships
Wind generator	All ships	Wind power: Fixed sails or wings	All ships
Solar panels	All ships		
Operational improvements to reduce fuel consumption			
Measure	Applies to	Measure	Applies to
Trim/draft	All ships	Engine monitoring	Existing ships
Weather routing	All ships	Speed reduction (port efficiency)	All ships
Voyage execution	All ships	Propeller efficiency	All ships
Steam plant operation improvements	All ships		
Technical measures to reduce main engine fuel consumption			
Measure	Applies to	Measure	Applies to
Electronically controlled engines	New ships	Air cavity/lubrication	New ships
Waste heat recovery	New ships	Contra-rotating propeller	New ships
Speed reduction (fleet increase)	All ships	Propulsion efficiency devices	All ships
Hull condition	All ships	General improvements	New ships
Technical measures to reduce auxiliary engine fuel consumption			
Measure	Applies to	Measure	Applies to
Cold ironing	All ships	Reduced auxiliary power use	Existing ships
Fuel cells as auxiliary engines (including fuel switching)	New ships	Exhaust gas boilers on auxiliary engines	New ships
Frequency converters	New ships	Energy efficient light system	New ships

（出典：Prevention Of Air Pollution From Ships Updated Marginal Abatement Cost Curves for shipping submitted by Norway[MEPC60/INF.19]）

(3)減速航行の考え方

減速航行は、フリート増加による減速、港湾停泊時間短縮による減速の二つの方法を考慮していると記載されているが、詳細は不明である。

(4)MAC カーブ算出式

DNV が他論文で提示している以下の式を用いて、CATCH を算出し、(CATCH, Δe) を全ての船種、全ての対策についてプロットしているものと予想される。基本的には、コストから便益を引き削減ポテンシャルで除算する方法をとっている。ただし、本文献内では算出式について言及がない。

算出式は以下のとおりである。

$$\text{CATCH} = (\Delta C - \Delta B) / \Delta E$$

ΔE：各対策手法導入によるライフタイム CO₂等価削減量[tCO₂-eq]

ΔC：各対策手法のライフタイム導入／運用コスト[USD]

ΔB：各対策手法導入によるライフタイム経済便益[USD]

あるいは、船齢を考慮に入れると、次のようになる。

In principle, a detailed MAC curve for a reference year could now be plotted using the $CATCH_{m,s,YOB}^r$ and $\Delta e_{m,s,YOB}^r$ values directly. However, in this study the CATCH values are averaged over all YOB;

$$CATCH_{m,s}^r = \frac{\sum_{YOB=2010}^r (\Delta C_{m,s,YOB}^r - \Delta B_{m,s,YOB}^r)}{L \cdot \sum_{YOB=2010}^r \Delta e_{m,s,YOB}^r} = \frac{\Delta C_{m,s}^r - \Delta B_{m,s}^r}{L \cdot \Delta e_{m,s}^r} \quad (3)$$

where

$CATCH_{m,s}^r$	is the marginal cost of measure m , applied to ship segment s , averaged over all YOB, for ships sailing in year r [USD/t CO ₂ -eq].
$\Delta C_{m,s,YOB}^r$	is the lifetime cost of measure m , applied to ship segment s , built in year YOB, for ships sailing in reference year r [USD].
$\Delta B_{m,s,YOB}^r$	is the lifetime benefit of measure m , applied to ship segment s , built in year YOB, for ships sailing in reference year r [USD].
$\Delta e_{m,s,YOB}^r$	is the annual emission reduction from measure m in segment s , built in year YOB, for ships sailing in reference year r [t CO ₂ -eq/year]
$\Delta e_{m,s}^r$	is the annual emission reduction from measure m in segment s , for ships sailing in reference year r [t CO ₂ -eq/year]

図 2-2 MAC カーブ算出式

(出典: Future Cost Scenarios For Reduction Of Ship CO₂ Emissions, DNV Eide 他, 2010)

参考までに、DNV が別論文で発表している MAC カーブの作成手順を掲載する。

※新造率の設定方法が MEPC60/INF.19 とは異なる。他の部分も異なる可能性がある。

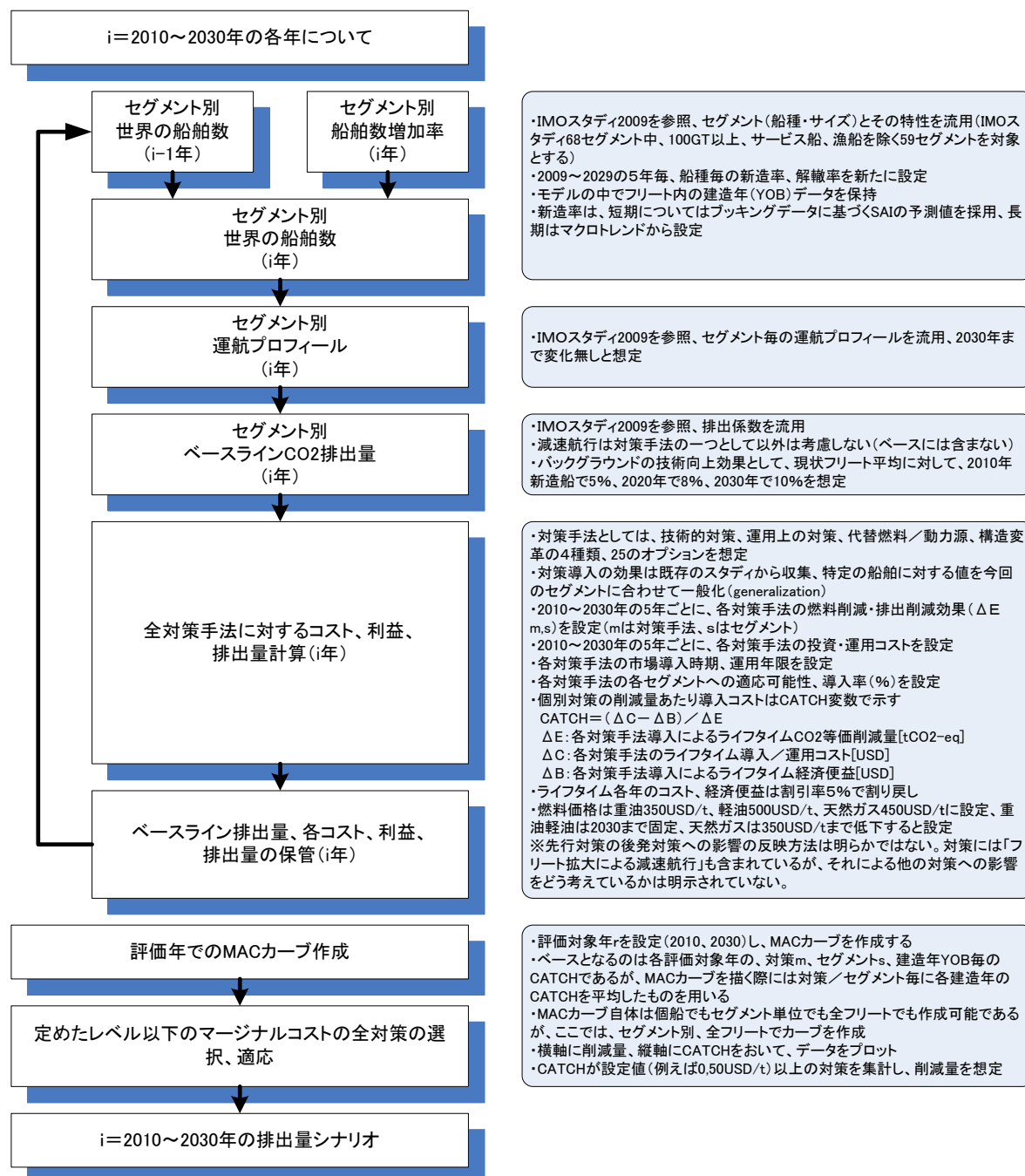


図 2-3 MAC カーブ算出手順

(『Future Cost Scenarios For Reduction Of Ship CO₂ Emissions, DNV Eide 他, 2010』に基づき作成)

2.2.2 MAC カーブ算出結果

2020 年と 2030 年のそれぞれについて、A1B シナリオと B2 シナリオを仮定した際の MAC カーブを算出している。

算出結果から導かれる結論としては下記が挙げられている。

- ・ 燃料費は結果を大きく左右する（敏感なパラメータである）
- ・ 燃料費、割引率、削減ポテンシャル、船舶数等是不確定要素であることに注意すべき。
- ・ ある船種の平均的な船舶について計算を行っているため、個々の船舶には本 MAC カーブは適用できないことに注意すべき。

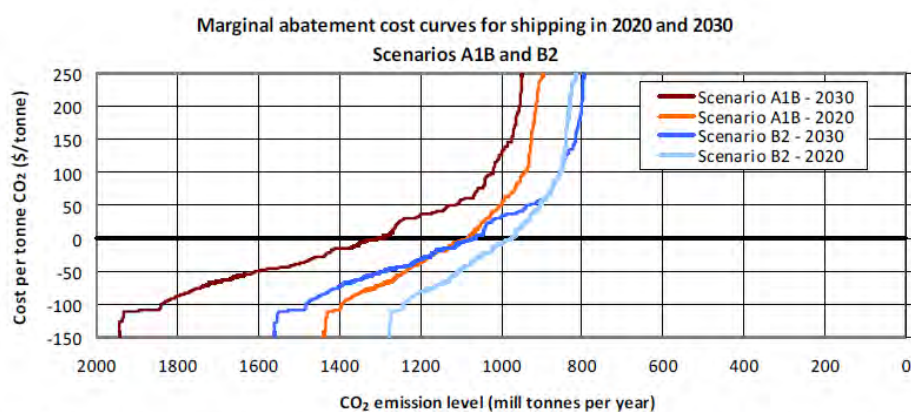


Figure 2: Marginal abatement cost curves for 2020 and 2030 under the A1B and B2 growth scenarios. The curves show the marginal cost (y-axis) for reaching a certain emission level (x-axis). The lines will move to the right with higher reduction potentials. The left ends of the curves indicate the baseline emissions (total shipping) for the different years and growth scenarios

図 2-4 DNV 作成による MAC カーブ

(出典：Prevention Of Air Pollution From Ships Updated Marginal Abatement Cost Curves for shipping submitted by Norway[MEPC60/INF.19])

2.3 IMarEST 文献(MEPC61/INF.18)

IMarEST (The Institute of Marine Engineering, Science & Technology : ロンドン) の “Reduction Of GHG Emissions From Ships, Marginal abatement costs and cost-effectiveness of energy-efficiency measures” [MEPC61/INF.18] (2010 年 7 月発行) に掲載されている MAC カーブの算出方法を整理する。

2.3.1 MACカーブ算出方法

(1)基本的な考え方

これまでの海運での MAC カーブ検討を踏まえ、政策決定者に加え、船舶設計者、建造者、船主、船社それぞれの判断に役立つことを目的に作成しているとし、算出の際には以下の点を考慮している。

- ・データの公開等、透明性を確保
- ・IMO で議論されているいかなる経済的手法をも応援するものではない
- ・2020 年、2030 年時点の削減ポテンシャルを試算
- ・導入価格以外の削減技術の導入可能性を左右する要因についても検討

アプローチとしては、船種、クラス、技術ごとにその現在価値を推計し、耐用年数相当の排出削減量で除することにより MAC を推計している。

(2)各種パラメータの設定条件

a. 船舶数

新造船と現存船を、船のタイプごとに 14 種に分類し、さらにサイズも考慮して、IMO スタディと同じく 53 種類に分けている。また燃費効率向上技術のコストは船齢によって大きく異なるため、船の寿命を 30 年と仮定して、Lloyds Register/Fairplay Sea-Web ship database をもとに船齢を 6 つに分類している。ただし、どの船齢の船舶にも削減対策を適用すると仮定している。船齢の分類は残り寿命により 4.5 年、9.5 年、14.5 年、19.5 年、24.5 年、29.5 年の 6 種類に分類している。

船齢ごとの船舶数は現状を反映し、2020 年にはより新しい船舶が増えると仮定するため、船齢ごとの 2020 年における船舶数の割合は、新しい船舶のほうが大きくなっている。

燃料節約は 2020 年、2030 年で不変（各船種×サイズの燃料消費率は IMO スタディの現状値を利用）とし、燃費と船舶数が増えると仮定している。つまり、ベースラインの燃費改善は考慮していない。

b. CO₂削減効果とコスト

各船種（サイズと船齢）、対策ごとにコスト効率性を低位ケースと高位ケースで推計している。低位推計と高位推計の差は、運用パターンの違い、各対策の削減ポテンシャルおよびコスト推計の不確実性を反映している。船種（サイズ、船齢別）別のオリジナルの燃料消費は IMO スタディより引用し、将来も一定と仮定している。ベースラインとして、BAU（Business As Usual）が達成されるためにどの技術が利用されるかは仮定していない。

c. コスト

本文献での分析の特徴として、通常の運用コストに加え、機会損失コスト（Opportunity cost）を考慮していることが挙げられる。具体的には高効率対策を導入するための損失日を計上している。これは下表のように仮定し、この期間については傭船費（Term Charter Rate）の 75%に相当する金額が機会損失として計上されている（ただし Wind Engine 以外は低位推計では損失日数は生じない）。

表 2-7 対策を導入するための損失日

対策技術	損失日数(低位推計)	損失日数(高位推計)
Wind Engine	2	7
Towing Kite	0	2
Solar Power	0	2
Main Engine Tuning	0	2
Common Rail Upgrade	0	2
Air Lubrication	0	2
Boss Cap Fin	0	2
Optimization Water Flow	0	2
Speed Control Pumps	0	2
Hull Coatings	0	2

（出典：Reduction Of GHG Emissions From Ships,Marginal abatement costs and cost-effectiveness of energy-efficiency measures
Submitted by the Institute of Marine Engineering, Science and Technology (IMarEST) [MEPC61/INF.18]

また、IMarEST の調査では新しい技術が紹介されたときのラーニングカーブ（習熟曲線）を考える。最初の 5 年は習熟効果によるコスト削減効果が合計 10%見込まれ、それ以降は習熟効果を考慮していない¹。習熟効果を考慮している技術及び習熟率（コスト削減率）は、空気潤滑、廃熱回収については 10%、風力、帆、太陽光については 15%としている。

¹通常船舶に対するダブルハルタンカーの費用の低減等を分析した結果である。

d. 初期投資コスト按分と対策寿命の考え方

対策の資本コストを、利率で割引を行い、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、より短い期間を計上期間として配分計算している。

e. ベースラインシナリオ

ベースラインシナリオの CO₂排出量は、IMO スタディの需要予測をもとにしており、技術の向上は考慮しないシナリオ（frozen technology baseline）を採用している。

f. 燃料費

燃料費の推計に関しては、米国エネルギー情報局（EIA）の原油価格の予測に対して HFO 価格と crude oil の相関関係を考慮し、さらに MARPOL AnnexVI regulation に基づく SO_x 規制のインパクトを想定している。具体的には下記のとおり。

表 2-8 燃料価格の設定（ドル/トン）

	2020 年	2030 年
低位推計	500	700
中位推計	700	900
高位推計	900	1100

（出典：Reduction Of GHG Emissions From Ships, Marginal abatement costs and cost-effectiveness of energy-efficiency measures Submitted by the Institute of Marine Engineering, Science and Technology (IMarEST) [MEPC61/INF.18]）

g. 割引率

割引率は投資分析で通常行われる加重平均資本コスト（Weighted Average Cost of Capital：WACC）として算出されている。これは米国債の長期利回りで定義されたリスクフリー割引率（3%程度）に加え、主要海運会社の株式のリターン（市場リスクの考慮）を資本資産評価モデル（Capital Asset Pricing Model：CAPM）を用いて推計し、さらに企業の資産/負債を考慮することで投資と融資のコストを加重平均するものである。これは 10%程度と見積もられている。さらに割引率 4%、18%の感度分析も実施している²。

² 4%は社会資本として捉える考え方に即しており、18%は逆にカントリーリスクの高い途上国での海運事業に相応しいと思われる。

h. CO₂削減対策

CO₂削減対策は、データ取得が可能な以下に挙げる 22 対策について検討し、同種の対策は相互排除となるように 15 グループにわけられている。各対策の効果、コストは、既存のスタディ、企業の情報、専門家インタビュー等で設定している。また、新造船のみに実施可能な対策、レトロフィットが可能な対策を区別し、対象年に対策を一斉導入すると仮定している。船の残り寿命が技術の寿命より短い場合も、投資は行われると想定している。

Operational Speed Reduction (10%)

Operational Speed Reduction (20%)

Weather Routing

Autopilot upgrade/adjustment

Propeller polishing at regular intervals

Propeller polishing when required (include monitoring)

Hull cleaning

Hull coating 1

Hull coating 2

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 hull openings

(3)減速航行の考え方

CO₂削減対策として減速航行を行ったときの MAC の算出は以下の考え方に則っている。

- ・ 一船当たりの消費エネルギーは、減速航行による隻数の増加を考慮して航行速度の二乗に比例するとしている。

- ・ ただし、最大連続出力の 25%といった出力では、エンジン効率が低下し、燃費が増加と想定している。

表 2-9 速度、エンジン出力、燃料消費率の関係

設計速度に対する減速率	エンジン出力 (設計出力に対する比率)	燃料消費率
100%	75%	100%
90%	55%	73%
80%	38%	52%
70%	26%	35%

(出典：Reduction Of GHG Emissions From Ships ,Marginal abatement costs and cost-effectiveness of energy-efficiency measures Submitted by the Institute of Marine Engineering, Science and Technology (IMarEST) [MEPC61/INF.18])

- ・ 減速航行による輸送量の減少を新船の建造で補填と想定。補填の程度は個々の船舶の航海状況（days at sea）に依存するとしている。

(4)MAC カーブ算出式

上記に基づき、他の文献と概ね同じように、（コストーベネフィット）を CO₂削減ポテンシャルで除算することにより MAC を算出している。具体的には以下の通り。

$$MAC = \frac{K_j + S_j - \alpha_j \times F \times P + \sum O_j}{\alpha_j \times CF \times F}$$

ここで、

Kj： 技術 j の資本コスト
 Sj： 技術 j の運営コスト
 Oj： 技術 j の機会損失
 αj： 技術 j の燃料消費削減率
 F： 技術導入前の燃料消費量
 P： 燃料価格
 CF： 燃料の CO₂排出原単位

次表に、対策 Hull Coating 1 をとったときの、船種別（サイズ、船齢別）の MAC 数値データを示す。

表 2-10 船種別 MAC 数値データ

Table A3-1-A The Marginal Abatement Cost of Hull Coating 1 by ship type, size, and age

				2020	MAC low reduction potential		MAC high reduction potential		2030	MAC low reduction potential		MAC high reduction potential	
Category 1	Category 2	Category 3 (big or small)	Category 4 (size)	Category 7 (ship remaining life time)	Low Estimate	High Estimate	Low Estimate	High Estimate	Category 7 (ship remaining life time)	Low Estimate	High Estimate	Low Estimate	High Estimate
01 Crude	Tanker	B	A 200,000+ dwt	14.5	-166.6	-104.8	-209.9	-195.0	4.5	-225.5	-159.4	-272.6	-256.4
01 Crude	Tanker	B	A 200,000+ dwt	9.5	-166.6	-104.8	-209.9	-195.0	29.5	-230.5	-168.7	-273.8	-258.9
01 Crude	Tanker	B	A 200,000+ dwt	4.5	-161.6	-94.5	-208.7	-192.5	24.5	-230.5	-168.7	-273.8	-258.9
01 Crude	Tanker	B	A 200,000+ dwt	29.5	-166.6	-104.8	-209.9	-195.0	19.5	-230.5	-168.7	-273.8	-258.9
01 Crude	Tanker	B	A 200,000+ dwt	24.5	-166.6	-104.8	-209.9	-195.0	14.5	-230.5	-168.7	-273.8	-258.9
01 Crude	Tanker	B	A 200,000+ dwt	19.5	-166.6	-104.8	-209.9	-195.0	9.5	-230.5	-168.7	-273.8	-258.9
01 Crude	Tanker	B	B 120-199,999 dwt	14.5	-175.7	-123.9	-212.1	-199.6	4.5	-235.4	-179.1	-275.0	-261.4
01 Crude	Tanker	B	B 120-199,999 dwt	9.5	-175.7	-123.9	-212.1	-199.6	29.5	-239.6	-187.8	-276.0	-263.5
01 Crude	Tanker	B	B 120-199,999 dwt	4.5	-171.5	-115.2	-211.1	-197.5	24.5	-239.6	-187.8	-276.0	-263.5
01 Crude	Tanker	B	B 120-199,999 dwt	29.5	-175.7	-123.9	-212.1	-199.6	19.5	-239.6	-187.8	-276.0	-263.5
01 Crude	Tanker	B	B 120-199,999 dwt	24.5	-175.7	-123.9	-212.1	-199.6	14.5	-239.6	-187.8	-276.0	-263.5
01 Crude	Tanker	B	B 120-199,999 dwt	19.5	-175.7	-123.9	-212.1	-199.6	9.5	-239.6	-187.8	-276.0	-263.5
01 Crude	Tanker	B	C 80-119,999 dwt	14.5	-182.5	-129.8	-213.7	-201.0	4.5	-242.9	-185.6	-276.9	-262.9
01 Crude	Tanker	B	C 80-119,999 dwt	9.5	-182.5	-129.8	-213.7	-201.0	29.5	-246.4	-193.7	-277.6	-264.9
01 Crude	Tanker	B	C 80-119,999 dwt	4.5	-179.0	-121.7	-212.9	-199.0	24.5	-246.4	-193.7	-277.6	-264.9
01 Crude	Tanker	B	C 80-119,999 dwt	29.5	-182.5	-129.8	-213.7	-201.0	19.5	-246.4	-193.7	-277.6	-264.9
01 Crude	Tanker	B	C 80-119,999 dwt	24.5	-182.5	-129.8	-213.7	-201.0	14.5	-246.4	-193.7	-277.6	-264.9
01 Crude	Tanker	B	C 80-119,999 dwt	19.5	-182.5	-129.8	-213.7	-201.0	9.5	-246.4	-193.7	-277.6	-264.9
01 Crude	Tanker	B	D 60-79,999 dwt	14.5	-183.6	-123.0	-214.0	-199.3	4.5	-244.0	-175.1	-277.0	-261.1
01 Crude	Tanker	B	D 60-79,999 dwt	9.5	-183.6	-123.0	-214.0	-199.3	29.5	-247.5	-186.9	-277.9	-263.2
01 Crude	Tanker	B	D 60-79,999 dwt	4.5	-180.1	-114.2	-213.1	-197.2	24.5	-247.5	-186.9	-277.9	-263.2
01 Crude	Tanker	B	D 60-79,999 dwt	29.5	-183.6	-123.0	-214.0	-199.3	19.5	-247.5	-186.9	-277.9	-263.2
01 Crude	Tanker	B	D 60-79,999 dwt	24.5	-183.6	-123.0	-214.0	-199.3	14.5	-247.5	-186.9	-277.9	-263.2
01 Crude	Tanker	B	D 60-79,999 dwt	19.5	-183.6	-123.0	-214.0	-199.3	9.5	-247.5	-186.9	-277.9	-263.2
01 Crude	Tanker	B	E 10-59,999 dwt	14.5	-186.0	-115.6	-215.0	-198.3	4.5	-248.8	-173.3	-278.2	-260.0
01 Crude	Tanker	B	E 10-59,999 dwt	9.5	-186.0	-115.6	-215.0	-198.3	29.5	-251.9	-182.5	-278.9	-262.2
01 Crude	Tanker	B	E 10-59,999 dwt	4.5	-184.9	-105.5	-214.3	-196.1	24.5	-251.9	-182.5	-278.9	-262.2
01 Crude	Tanker	B	E 10-59,999 dwt	29.5	-186.0	-115.6	-215.0	-198.3	19.5	-251.9	-182.5	-278.9	-262.2
01 Crude	Tanker	B	E 10-59,999 dwt	24.5	-186.0	-115.6	-215.0	-198.3	14.5	-251.9	-182.5	-278.9	-262.2
01 Crude	Tanker	B	E 10-59,999 dwt	19.5	-186.0	-115.6	-215.0	-198.3	9.5	-251.9	-182.5	-278.9	-262.2
01 Crude	Tanker	S	F 9,999 dwt	14.5	-174.0	-52.5	-211.7	-182.3	4.5	-233.6	-101.6	-274.6	-242.7
01 Crude	Tanker	S	F 9,999 dwt	9.5	-174.0	-52.5	-211.7	-182.3	29.5	-237.9	-116.4	-275.6	-246.2
01 Crude	Tanker	S	F 9,999 dwt	4.5	-169.7	-37.7	-210.6	-178.8	24.5	-237.9	-116.4	-275.6	-246.2
01 Crude	Tanker	S	F 9,999 dwt	29.5	-174.0	-52.5	-211.7	-182.3	19.5	-237.9	-116.4	-275.6	-246.2
01 Crude	Tanker	S	F 9,999 dwt	24.5	-174.0	-52.5	-211.7	-182.3	14.5	-237.9	-116.4	-275.6	-246.2
01 Crude	Tanker	S	F 9,999 dwt	19.5	-174.0	-52.5	-211.7	-182.3	9.5	-237.9	-116.4	-275.6	-246.2

(出典 : Reduction Of GHG Emissions From Ships, Marginal abatement costs and cost-effectiveness of energy-efficiency measures Submitted by the Institute of Marine Engineering, Science and Technology (IMarEST) [MEPC61/INF.18])

2.3.2 MAC カーブ算出結果

船種、対策ごとに MAC と CO₂削減ポテンシャルをプロットした結果、MAC カーブは下図のようになっている。

算出結果を解釈する際の留意事項として下記が挙げられる。

- ・ 燃料費、割引率は結果を大きく左右する。(敏感なパラメータである。)
- ・ 船のオーナーや運用者がこの結果を適用して投資することは想定していない。
- ・ 減速航行による削減ポテンシャルは大きい。

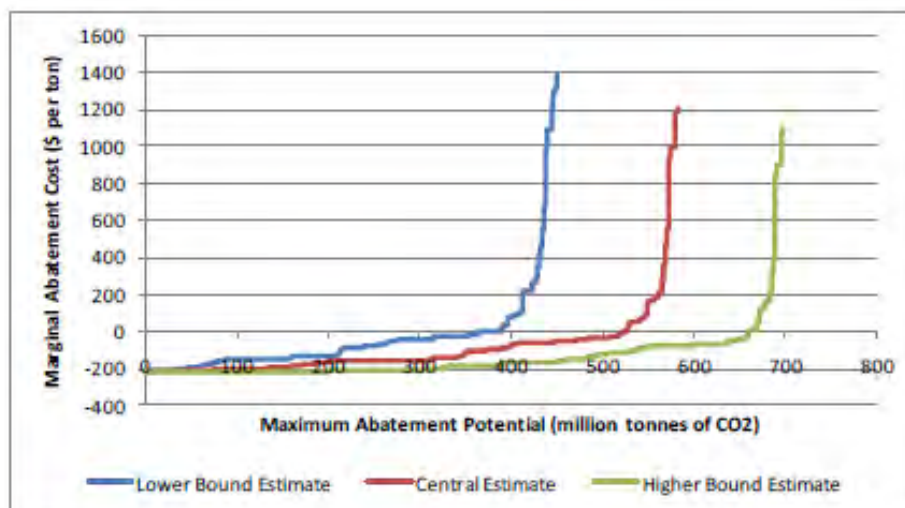


Figure 6-1 Aggregated MACC in 2020 with \$700 per ton fuel price and 10% discount rate for all ship types.

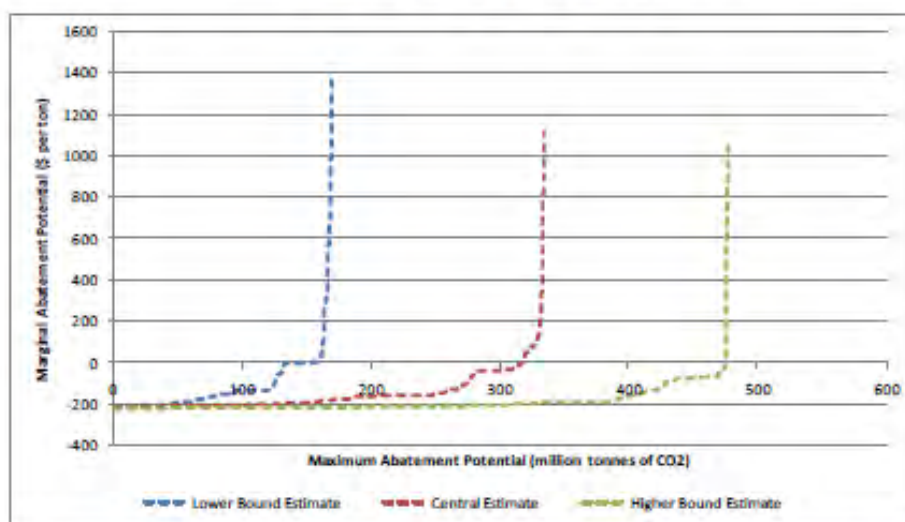


Figure 6-2 Aggregated MACC in 2020 with \$700 per ton fuel price and 10% discount rate for all ship types (without speed reduction)

図2-5 MACカーブ By IMarEST

(出典 : Reduction Of GHG Emissions From Ships, Marginal abatement costs and cost-effectiveness of energy-efficiency measures Submitted by the Institute of Marine Engineering, Science and Technology (IMarEST) [MEPC61/INF.18])

2.3.3 障壁分析

IMarEST 文献では、上記のような MAC 計算に引き続き、MAC がマイナスの値を取る技術が多いにもかかわらず導入されていない理由について検討し、次のような原因を挙げている。

表 2-11 海運分野の MAC カーブ文献 障壁分析

要因	概要	具体例
技術的要因	当該技術が初期の効果を上げるかどうかに対する懸念、海運業務を妨げる懸念。	- 導入初期の事故頻発。 - 場所がない等の問題。 - 技術間の排他性。
制度的要因	当該技術の導入を妨げるような法規制及び商慣行	- 船主と海運事業者のインセンティブの乖離。 - 省エネ投資を船価に反映できない。 - 船主は船舶を転売するため、短期的な視野となる。 - 遅延に対する追加徴収。 - Hull cleaning を環境上の理由で制限(カリフォルニア)。
資金的要因	油価が一定以上で安定的に高価でない限り投資回収が困難	- 燃料価格の不確実性。 - 船舶需要が高い時期には船主は省エネ投資のための資金があるが、省エネ設備導入に要する期間が機会損失となる。 - 多くの船舶は多様な航路に用いられるため、個別技術の効果を把握しにくい。

(出典：Reduction Of GHG Emissions From Ships, Marginal abatement costs and cost-effectiveness of energy-efficiency measures Submitted by the Institute of Marine Engineering, Science and Technology (IMarEST)[MEPC61/INF.18]より作成)

2.4 CE Delft 文献

Technical support for European action to reducing Greenhouse Gas Emissions from international maritime transport (2009 年 12 月発行) は、欧州委員会の委託により、CE Delft を筆頭に Fearnley Consultants や Marintek 等の海運専門家に加え、ドイツの環境政策研究機関 Oeko-Institut や英国の法務コンサルティング機関 Norton Rose を加えたチームにより作成された文献である。これに掲載されている MAC カーブの算出方法を整理する。

2.4.1 MAC カーブ算出方法

(1) 基本的な考え方

欧州連合では、海運分野における GHG 排出量低減に向けた取組みについて、IMO と UNFCCC の動向を見守っている段階であるが、2011 年末までにこれら機関で排出量削減に向けた国際合意が成立しない場合、欧州委員会において政策提言を行う予定である。そこで、本文献では欧州委員会への技術支援の目的で MAC カーブの算出を含む、海運分野における GHG 排出量低減に向けた政策立案の支援を行っているとし

ている。本文献では 2030 年における MAC カーブを算出している。

(2)各種パラメータの設定条件

a. 船舶数

IMO が発表している 2007 年の船舶数 (IMO fleet inventory) と 2020 年、2050 年の船舶数を用い、船の種類とサイズを考慮して 53 種に分類した上で 2008～2030 年までの船舶数を推計している。

b. CO₂削減効果とコスト

CO₂削減対策ごとに、CO₂削減ポテンシャルとコストを算出しており、コストは導入費用 (初期投資コスト) と運用費用に分けて考えている。

c. 初期投資コスト按分と対策寿命の考え方

初期投資コストを対策寿命 (lifetime of a measure) に基づく支払期間に分割 (利率を考慮) し、NPV を計算している。

また、支払期間となる対策寿命は IMO と同様に設定している。つまり、対策寿命 10 年未満は同期間、10～30 年未満は 10 年間、30 年以上は 30 年間としている。

d. CO₂排出量

IMO2009GHGStudy の需要予測をもとにしている。ベースラインは frozen technology baseline を採用している。

e. 燃料費

船用燃料 (Bunker fuel) を 700 ドル/トンと設定している。また、350 ドル/トンと 1,050 ドル/トンで感度分析を実施している。

f. 割引率

割引率は 9% と設定し、4%、14% で感度分析を実施している。この設定方法について特段の理由は記載されていない。

g. CO₂削減対策

CO₂削減対策として 29 対策を対象にしている。対策が適用される船舶として、全船舶、新船舶の 2 種類を想定し、29 対策を 12 グループに分けている。グループ内の対策は同時に実施されることはないとしている。

具体的には、Second IMO GHG Study 2009 で取り上げられた 25 対策に、「Wind

Engine」「Solar Energy」「20%の減速航行」の3対策を加えたものである。

h. CO₂削減対策普及率の考え方

基本的に対策が適用可能な船級には全て対策が普及すると想定するが、新造船のみに実施可能な対策、レトロフィットが可能な対策は区別している。(上表参照)さらに、レトロフィットは対策寿命が残された船齢より長い場合にのみ導入するとしている。(IMO と同一)

2.4.2 MAC カーブ算出結果

船種、対策ごとに MAC と CO₂削減ポテンシャルをプロットした結果、割引率 9%、燃料費 700 ドル/トンのとき、MAC カーブは下図のようになっている。

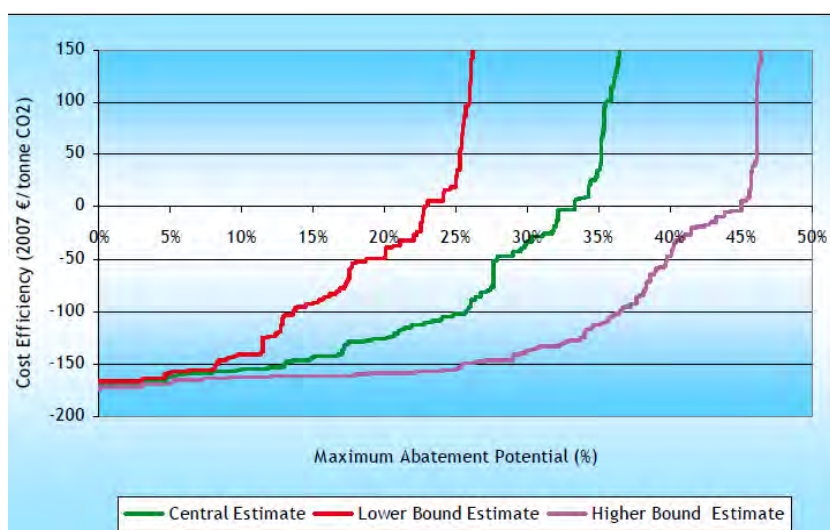


図 2-6 European CE Delft による MAC カーブ

(出典 : Technical support for action to reducing Greenhouse Gas Emissions from international maritime transport, CE Delft)

2.5 IMO, DNV, IMarEST, CE Delft の MAC カーブ算出方法の比較

前節までに 4 機関による MAC カーブ算出方法の概要を述べたが、本節では 4 機関の比較を行う。

まず、MAC カーブ算出の際の基本姿勢を各文献より抜粋すると、IMO 及び DNV の姿勢は社会的観点から政策・規制等の実施の際に MAC カーブを役立てるというものであるが、IMarEST では、船舶設計者、建造者、船主、船社等の意思決定にも活用されることを念頭において、海運事業の観点から MAC カーブを算出している。また CE Delft は欧州委員会の政策提言に係る技術協力という位置づけであるが、中心となる割引率は 9%というどちらかといえば民間企業に近い視点で MAC カーブを算出している。

以下に各文献の該当部分を抜粋する。

<IMO>

“The curve adopts a **social perspective**. In other words, it answers the question of what it would cost the world economy to reduce emissions. It does not represent the expenditures that ship operators would have to make to do this.”

<DNV>

“This analysis is primarily designed to support decisions regarding **policy and regulations**. Hence, a ship owner should read the results with care and not expect the results to be directly transferable to own ships or fleet.”

<IMarEST>

“The outcome of this report does not favour a particular market-based approach, or specific energy efficiency standards. The methodologies and analysis are structured to support the development and implementation of any **regulatory and/or corporate policies** that may be adopted. As well we expect that **the results may be used by ship designers, builders, owners and operators as a tool in their decision making to employ one or more technologies or operational measures.**”

<CE Delft>

“This report provides the European Commission with technical assistance in the preparation of a policy to reduce CO₂ emissions from maritime transport.”

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次頁の表のとおりである。

表 2-12 海運分野の MAC カーブ文献 比較一覧表（上記文献より作成）

	IMO 文献	DNV 文献	IMarEST 文献
文献名 (リファレンス)	Second IMO GHG Study 2009	Det Norske Veritas (DNV) “Prevention Of Air Pollution From Ships Updated Marginal Abatement Cost Curves for shipping”	IMarEST “ REDUCTION OF GHG EMISSIONS FROM SHIPS, Marginal abatement costs and cost-effectiveness of energy-efficiency measures”
対象年度	2020 年	2020 年、2030 年	2020 年、2030 年
ベースライン	A1B シナリオ	A1B シナリオ、B2 シナリオ	frozen technology baseline (IMO Study を基にしていると記述あるが、明示的に示されていない。)
船種・クラス数	船種 14 種 船種×クラス数 合計 53 種	サービス船、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)
主な前提 (技術的側面)	25 対策を 10 グループに分類。 ※グループ内の対策は同時に実施されない。 ※先進的な対策として Towing Kite, Air Lubrication 等	25 対策 ※先進的な対策として Solar panels, Kite, Wind generator, Electronically controlled engine, Waste heat recovery 等	22 対策を 15 グループに分類。 ※グループ内の対策は同時に実施されない。 ※先進的な対策として Solar power, Wind kite, Wind engine, Air lubrication, Waste heat recovery 等
主な前提 (経済的側面)	燃料費 (Bunker Fuel) 500 ドル/トン (1,000 ドル/トン、1,500 ドル/トンで感度分析実施)	MTO : 500 ドル/トン、HFO : 350US ドル/トン、LNG : 450US ドル/トン (2030 年までに 350 ドル/トンまで減少)	2020 年の燃料費 500、700、900 ドル/トン 2030 年の燃料費 700、900、1100 ドル/トン (それぞれ低位、中位、高位設定値)
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関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。 Wind Engine, Solar power のみ 2015 年、他は 2007 年に導入。
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。	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。
主要技術のコスト	減速航行 6,000～8,000 ドル/日 Weather routing 0.8～1.6 US 千 \$ Increased frequency of propeller brushing 3 ～4.5US 千 \$ Hull brushing 26～39 US 千 \$ Underwater hull hydroblasting 33～49.5 US 千 \$	不明	減速航行 (10%・20%) 導入コスト＝ 20,951～173,040US 千 \$、運用コスト＝616～3,684 US 千 \$ /年 Weather routing 0.8～1.6 US 千 \$ /年 Autopilot adjustment 1.6～144 US 千 \$ Propeller polishing when required 2～185 US 千 \$ /年

	IMO 文献	DNV 文献	IMarEST 文献
	Hull Coating1 4.5～140US 千 \$ Hull Coating2 25～720US 千 \$ Air lubrication 運用コスト 燃料費×0.3～0.5 t/day Propeller boss cap fin 20US 千 \$ (735kw エンジン)、146US 千 \$ (22,050kw エンジン) Hull performance monitoring 導入コスト 45 US 千 \$ (5 年毎)、運用コスト 5 US 千 \$ Shaft power meter 26～31.2 US 千 \$ Fuel consumption meter 46～55.2 US 千 \$ Dry-dock full blast 68～81.6 US 千 \$ Towing kite (面積 320 m² のとき)購入コスト =480US 千 \$、導入コスト=26US 千 \$、運用コスト=25～35US 千 \$ /年		Hull coating I 1.9～146 US 千 \$ /年 Hull coating II 9.9～760 US 千 \$ /年 Optimization water flow hull openings 2.8～247 US 千 \$ /年 Air lubrication 導入コスト=737～5,040 US 千 \$、運用コスト 燃料費×0.3～0.5 t/day Integrated propeller and rudder upgrade 73～6,590 US 千 \$ Propeller upgrade 69～2664 US 千 \$ Propeller boss cap with fins 19～462 US 千 \$ Common rail technology 2.8～247 US 千 \$ Main engine tuning 8.2～741 US 千 \$ Waste heat recovery 2,119～9,593 US 千 \$ Towing kites 導入コスト=516～3,683 US 千 \$、運用コスト=24～514US 千 \$ /年 Wind engines 720～1,200 US 千 \$ Solar engine 1.330 US 千 \$ Low energy/low heating lighting 9.5～59 US 千 \$ Speed control of pumps and fans 11～988 US 千 \$ ※ I MO 設定の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。 (Hull coating, Propeller boss cap fin, Towing kite)
排出削減率	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 %	不明	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%

	IMO 文献	DNV 文献	IMarEST 文献
	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%		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% ※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。 空気潤滑、廃熱回収、風力、帆、太陽光の各対策のコストについて習熟曲線を考慮。(5 年で合計 10～15% の低減。年率換算で 2～3%)
備考			

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。

	CE Delft 文献
文献名 (リファレンス)	CE Delft Technical support for European action to reducing Greenhouse Gas Emissions from international maritime transport 2030 年
対象年度	2030 年
ベースライン	frozen technology baseline
船種・クラス数	船種 14 種 船種×クラス数 合計 53 種
主な前提 (技術的側面)	29 対策を 12 グループに分類。 ※グループ内の対策は同時に実施されない。 ※先進的な対策として Towing Kite, Air Lubrication, Wind engine, Solar energy 等
主な前提 (経済的側面)	燃料費 (Bunker Fuel) 700 ドル/トン (350 ドル/トン、1050 ドル/トンで感度分析実施)
主な前提 (金融的側面)	・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。

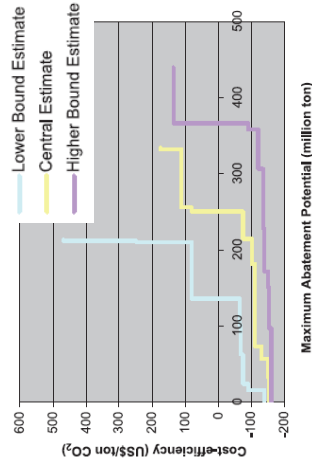
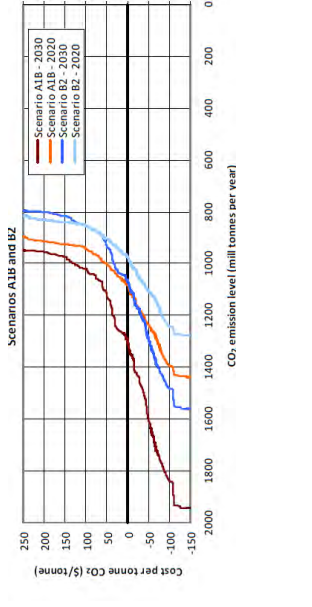
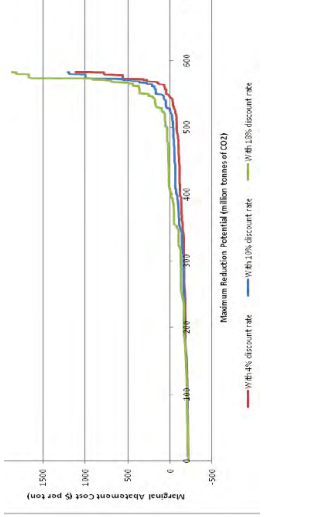
MAC カーブの算出結果の比較は、前提条件（割引率、燃料費、算定に組み入れる削減対策の種類）が異なるために単純な比較はできないが、次頁に示すとおり、概ね同じような傾向のカーブが描かれており、限界削減費用が負から正へと緩やかに変化するが、右端は急激に立ち上がる曲線となっている。

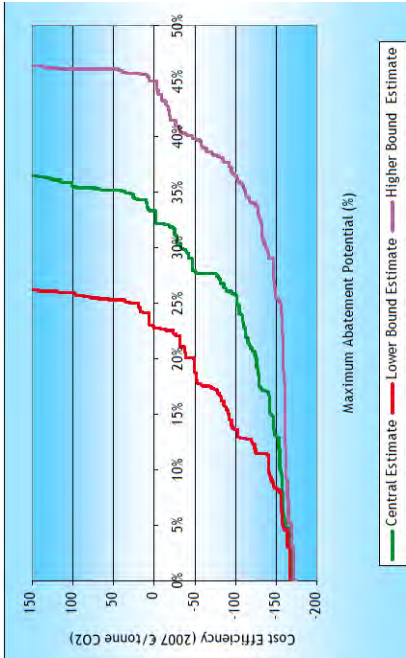
IMO、CE Delft と IMarEST では、割引率、燃料費を変化させることによる感度分析を実施しており、割引率を変化させると MAC カーブが左右にシフト（割引率が大きくなると左に移動）、燃料費を変化させると MAC カーブが上下にシフト（燃料費が大きくなると下に移動）する。

IMO の MAC カーブは対策グループ別にプロットしているため、曲線の立ち上がりが見えにくい。

なお、IMO では DNV、IMarEST と比較して対象とする対策が少なく、先進的な対策（Solar panel, Wind engine 等）を組み込んで算出を行っていないため、中位推計の場合 CO₂排出削減量が 300 百万トンを超えたところで曲線が急激に立ち上がり、それが最大削減量となっている。一方で DNV（A1B、2020 年）、IMarEST では 500 百万トンを超えたところで曲線が急激に立ち上がって最大削減量となっている。また、限界削減費用についても、IMO 中位推計の場合、最大で 200 ドル/t-CO₂程度である一方、IMarEST の場合 1,000 ドル/t-CO₂（割引率 4% ケース）を超えるような対策がプロットされている。

表 2-13 海運分野のMACカーブ 比較一覧表

	IMO 文献	DNV 文献	IMarEST 文献
対象年度	2020 年	2020 年	2020 年
割引率	4%	5%	4%
燃料費	500 ドル/トン	500 ドル/トン	700 ドル/トン
ベースライン	A1B シナリオ	A1B シナリオ	frozen technology baseline
算出結果			
最小MAC [ドル/t-CO ₂]	-150 (中位推計の場合)	-150 (中位推計の場合)	-200 (中位推計の場合)
MAC-0 となる削減ポテンシャル [Mt-CO ₂]	200～300 (中位推計の場合)	300～400 (中位推計の場合)	500～600 (中位推計の場合)

	CE Delft 文献	
対象年度	2030 年	
割引率	9%	
燃料費	700 ドル/トン	
ベースライン	frozen technology baseline	
算出結果		
最小MAC [ドル/t-CO ₂]	-200~-150 (中位推計の場合)	
MAC = 0 となる削減 ポテンシャル [million ton]	30%~35% (中位推計の場合)	

3 その他文献にみる MAC 算出

本章では、海運以外の部門に重点を置いた MAC 算出文献について分析を試みる。対象として取り上げるのは以下の文献である。

- ・ Pathways to a Low-Carbon Economy (McKinsey & Company, 2009)
- ・ 「統合評価モデル DNE21 の概要」(RITE, 2003)、「RITE 世界モデルの概要」(RITE, 2009) 及び「排出削減に関するコスト面からの分析」(RITE, 2010)
- ・ IEA Energy Technology Perspectives 2010 (IEA, 2010)
- ・ Building a Supply-Side Marginal Abatement Cost Curve (MACC) for the UK Transport Sector (Climate Change Committee, 2008)

3.1 マッキンゼー“Pathways to a Low-Carbon Economy”

3.1.1 対象

本文献は、著名コンサルティング機関 McKinsey & Company による Pathways to a Low-Carbon Economy³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、年間 2,000 億～3,500 億ユーロ（2030 年の世界 GDP の 1%程度）の投資により 2030 年の温室効果ガス排出量を 1990 年比 35%減とすることが出来るとしている。

本文献は 10 セクター（電力、石油・ガス、セメント、鉄鋼、化学、運輸、建物、廃棄物、森林、農業）、世界の 21 地域（ブラジル、カナダ、中国、フランス、ドイツ、インド、イタリア、日本、メキシコ、ロシア、南アフリカ、英国、米国、中近東、その他中南米、その他 EU27 ヶ国、その他欧州 OECD 加盟国、その他東欧、その他アフリカ、その他アジア発展途上国、その他太平洋 OECD 加盟国）における 200 以上の GHG 排出削減技術を対象に、MAC の算出を行ったものである。対象とされる技術は、60 ドル/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。

3.1.2 手法

(1)削減コストの算定方法

削減コスト（2005 年ユーロ額）は、次式により求め、全ての地域／年の加重平均として算定される。

³ http://www.mckinsey.com/clientservice/sustainability/pathways_low_carbon_economy.aspよりアクセス可能。

$$\text{削減コスト} = (\text{CO}_2\text{削減が実施される場合の全コスト} - \text{BAUにおけるCO}_2\text{削減コスト}) / (\text{BAUにおけるCO}_2\text{排出量} - \text{CO}_2\text{削減が実施される場合のCO}_2\text{排出量})$$

CO₂削減が実施される場合の全コスト

＝投資コスト（資産の耐用年数における、年利４％ローンの年間返済額として算出）
 ＋運用コスト（人件費、材料費）
 －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）

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。

(2)BAU シナリオの設定

BAU シナリオは、下記の条件のもとに設定される。

- ・ 2005 年から 2030 年にかけて GHG 排出量は 55%増加し、2005 年の 46Gt-CO₂ から 2030 年の 70Gt-CO₂となる。セクター別には、2005 年から 2030 年にかけてエネルギー供給部門、産業部門、森林・農業部門の占める割合が、各 2～3% 上昇し、他方、土地利用関係の排出量が占める割合は、2005 年の 30%から 2030 年の 22%に減少する。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 ドル/バレル）、GDP 増加率（下表）および人口増加率（下表）については、IEA の World Energy Outlook 2007 に基づき、設定される。
- ・ CO₂排出量/GDP は、年間 1.2%改善する。

表 3-1 GDP 増加率と人口増加率の前提

	GDP 増加率		人口増加率	
	2005-2015 年	2015-2030 年	2005-2015 年	2015-2030 年
北米	2.6	2.2	1.0	0.7
西欧	2.3	1.8	0.1	0.0
東欧	4.7	2.9	-0.2	-0.3
太平洋 OECD 加盟国	2.2	1.6	0.1	-0.2
中南米	3.8	2.8	1.2	0.9
その他アジア発展途上国	6.9	4.8	1.1	0.8
アフリカ	4.5	3.6	2.2	1.9
中国	7.7	4.9	0.6	0.3
インド	7.2	5.8	1.4	1.0
中東	4.9	3.4	2.0	1.5

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

(3)算定の前提

経済的パラメータとして、割引率は、長期国債利率の歴史的な平均利率である 4 % に設定する。投資回収年数は、設備の運用年数 (functional life) を想定している。

3.1.3 結果

60 ドル/t- CO_2 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 38Gt- CO_2 の削減が可能である(1990 年比 11%削減、GHG 排出量に換算すると、2030 年の BAU 排出量が、70Gt- CO_2 であるのに対し、削減シナリオでは 32Gt- CO_2 となる)。消費者行動の変化による消費量の減少は想定しない。38Gt- CO_2 の削減を技術別に積み上げて算定された MAC カーブは下表の通りである。対策種別による内訳は、14Gt- CO_2 が省エネ対策、12Gt- CO_2 がエネルギー供給側の低炭素化対策、12Gt- CO_2 が森林・農業対策によるものである。全般的には省エネ対策、農業対策等がネガティブコストであるのに対し、コストの高い太陽光や付随的便益を生じない 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 ドル/t- CO_2 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 5Gt- CO_2 の削減が追加的に可能である。加えて、消費者行動の変化が生じた場合には、更に 4Gt- CO_2 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。

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 億ユーロである。これに、実際の削減には、様々なトランザクションコスト(制度的インフラの整備等)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 億ユーロとなる(2030 年の GDP の 1%程度)。

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

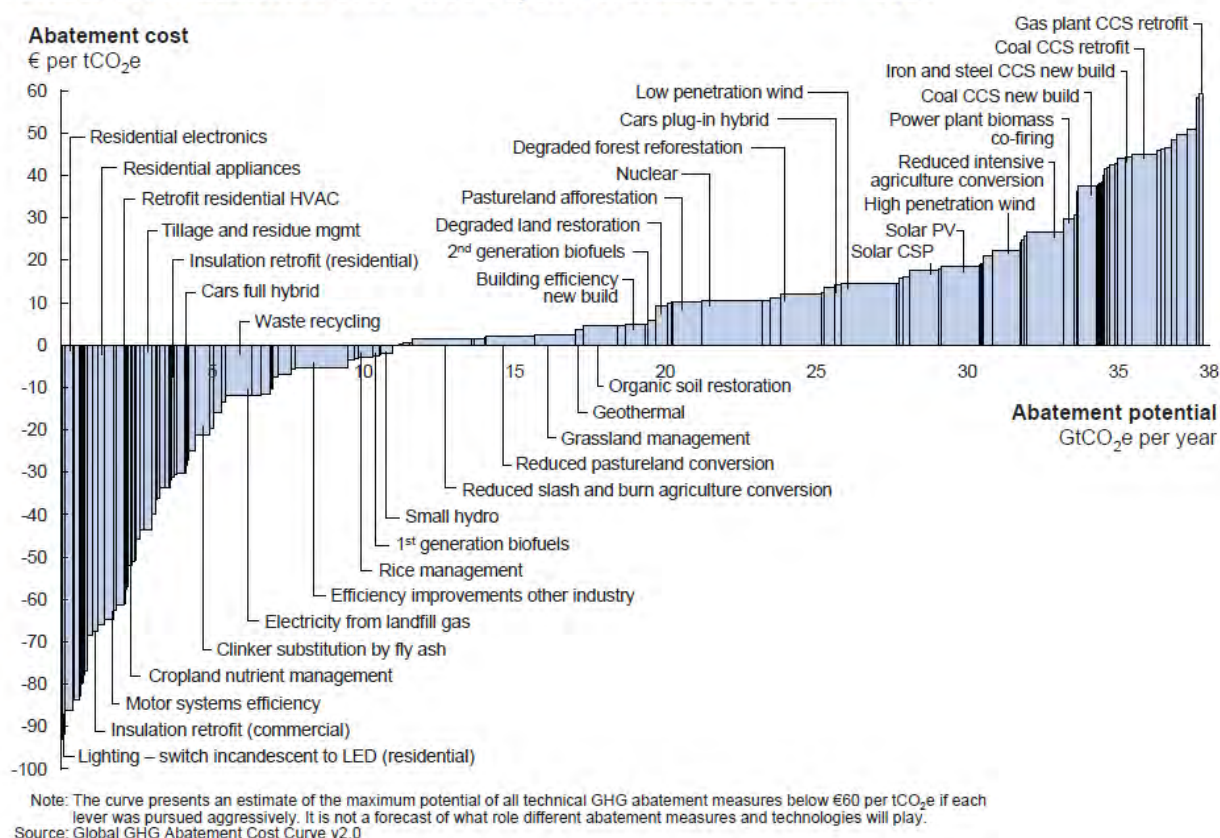


図 3-1 2030 年における MAC カーブ

(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、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 0.2~0.4Gt-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。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。

3.1.4 海運の取り扱い(海運以外を主対象とした MAC 算出の場合)

BAU において、海運全体では、2005 年 1.1Gt-CO₂の排出量が、年間 2%増加し、2030 年に 1.8Gt-CO₂となる姿が想定されている。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 0.43Gt-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、塗装システム等の水力学上の改善。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。
- ・ 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 年の限界作戦コストは 13 ユーロ/t-CO₂と算出されている。

3.2 RITE 世界モデル

次に、財団法人地球環境産業技術研究機構による RITE 世界モデルにおける MAC 検討について分析する⁴。

3.2.1 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。

⁴ 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/RITEWorldModel_20090326.pdf）及び RITE モデル解説（<http://www.meti.go.jp/committee/materials2/downloadfiles/g100913bj08.pdf>）

3.2.2 手法

(1)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。

(2)BAU シナリオの設定

DNE21+モデルの BAU シナリオは、下記の条件のもとに設定される。

- ・ 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%、米国 1.9%、EU1.9%、中国 8.2%等）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た。

(3)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、下記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 3-2 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。

3.2.3 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。

限界削減費用別に区分すると下記のとおりとなる。

表 3-3 DNE21+モデルに基づく MAC 分析の結果（附属書 I 国）

MAC (ドル/t・CO ₂)	分野	排出削減ポテンシャル (Mt・CO ₂ /年)
<50	- 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	3,500
50 - 100	- 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	2,000
100 - 200	- 産業：各種部門での省エネ等 - エネ転：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	1,000
200<	- 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 - エネ転：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	2,500

（出典：RITE, "RITE モデル解説"、排出削減ポテンシャルはグラフ目測）

3.2.4 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。なお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。

3.3 IEA Energy Technology Perspectives 2010(ETP)⁵

3.3.1 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 の算出が所期の目的ではない。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おり、本調査での紹介に有意義であるためここに示す。

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。エネルギー消費に関する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、これに対して排出削減シナリオ（Blue MAP シナリオ：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）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⁶。

3.3.2 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 兆ドルに達するが、それによりもたらされる省エネ便益は 112 兆ドルと算出されている。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 兆ドル（112 兆ドル－46 兆ドル）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 32 兆ドル、10%とするとその差額は 8 兆ドルにまで縮減する。これは便益が投資より後に生じるためである。なお ETP においてはこれらの推計は 2050 年で区切られており、従って本来的な便益を過小評価している可能性がある。

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

⁵ <http://www.iea.org/techno/etp/index.asp>（本文は有料）

⁶ RITE DNE21+と IEA ETP2008 シナリオの比較

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

オのための追加投資額のうち半分近くに相当する 22 兆ドル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 兆ドルとしている。ただし Blue MAP シナリオの達成により燃料価格が大幅に削減（120 ドル/bbl→70 ドル/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 兆ドルとなる。

表 3-4 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、モータールシフトのみ	技術進歩＋モータールシフト。
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 160Mtoe（輸送燃料の 4%）	2050 年に 745Mtoe（輸送燃料の 27%）	2050 年に 130Mtoe（輸送燃料の 4%）	2050 年に 600Mtoe（輸送燃料の 26%）
水素利用	なし	2050 年に 200Mtoe	なし	2050 年に 150Mtoe
電力利用	2050 年に 27Mtoe	2050 年に 350Mtoe	2050 年に 44Mtoe（鉄道）	2050 年に 290Mtoe
CO ₂ 排出量（貨物）	約 5.5Gt-CO ₂	約 2.8Gt-CO ₂	約 4.8Gt-CO ₂	約 2.5Gt-CO ₂
CO ₂ 排出量（旅客）	約 11Gt-CO ₂	約 4Gt-CO ₂	約 8Gt-CO ₂	約 3.5Gt-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ター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がモーター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。

3.3.3 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、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 スタディ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組成である。ベースラインシナリオでは軽油の比率が高くなるが、Blue Map シナリオではバイオ燃料が全体の約 1/5 を占める。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。

3.4 英国気候変動委員会(CCC) 英国運輸部門における MAC 算出⁷

3.4.1 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、複数のコンサル会社（AEA, E4Tech, Metroeconomica, Ricardo, IEEP, CE Delft）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、英国の炭素バジェット（2008-2012 年、2013-2017 年、2018-2022 年について国全体の排出上限を示したもの）が定められている 2022 年である。

3.4.2 手法

(1)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。例として、Current Amiton Scenario における車の導入技術の想定を下図に示す。

⁷Building a Supply-Side Marginal Abatement Cost Curve (MACC) for the UK Transport Sector (Climate Change Committee, 2008)

Figure 3. Uptake rate for car technologies in the Current Ambition scenario

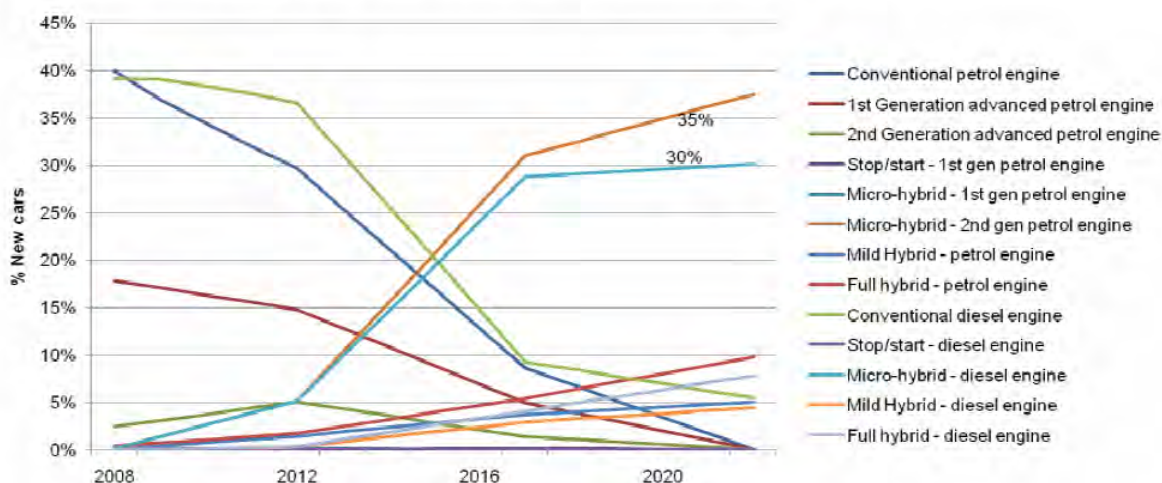


図 3-2 Current Amiton Scenario における車の導入技術の想定

(出典：CCC (2008) "Building a Supply-Side Marginal Abatement Cost Curve (MACC) for the UK Transport Sector")

導入技術は、石油価格の想定によっても異なる。石油価格については、英国エネルギー・気候変動省 (DECC) の石油価格予想モデルにより、算定している。報告書から確認できる範囲ではおそらく central, low fossil fuel, high fossil fuel, high-high fossil fuel の 4 種類が想定されている。

(2)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（通常のガ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。

(3)算定の前提

リバウンド効果

車両の性能向上による輸送距離の増加を想定し、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あり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

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。燃料税の取扱いは、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。

3.4.3 結果

シナリオ（3種類）、割引率（2種類）、石油価格（おそらく4種類）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 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 1ℓあたり 0.5895 ポンド（78.76 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。

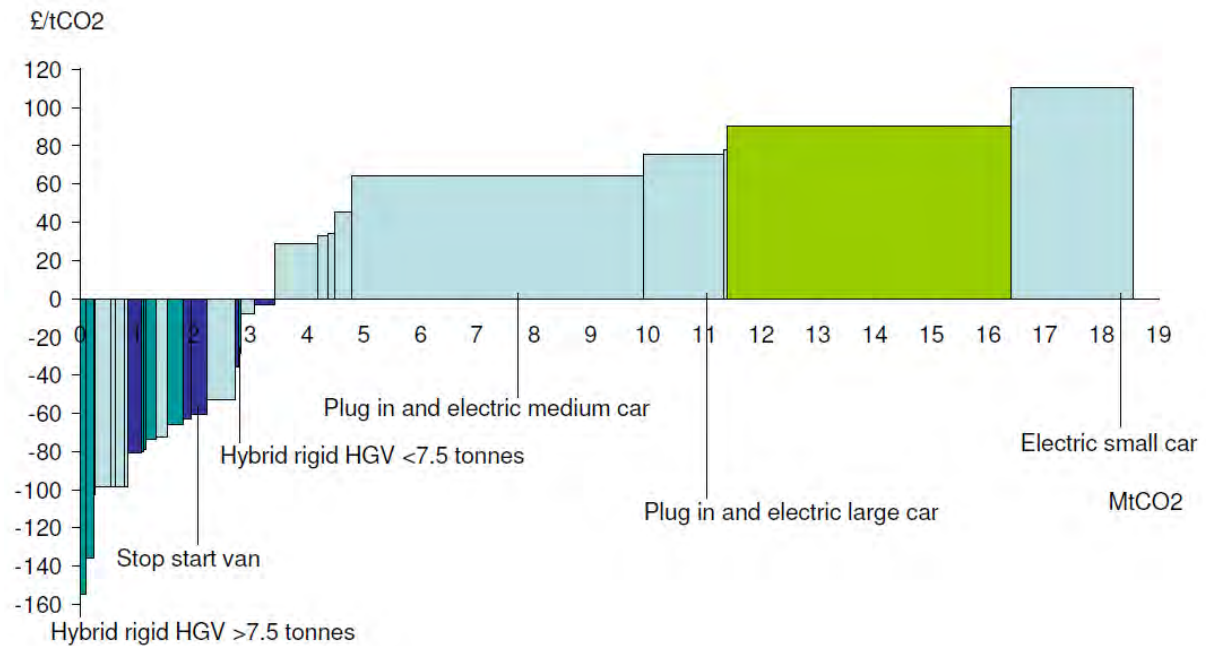


図 3-3 Social MAC カーブ (Extended ambition scenario, central fossil fuel price)

(出典：CCC (2008) "Building a Supply-Side Marginal Abatement Cost Curve (MACC) for the UK Transport Sector")

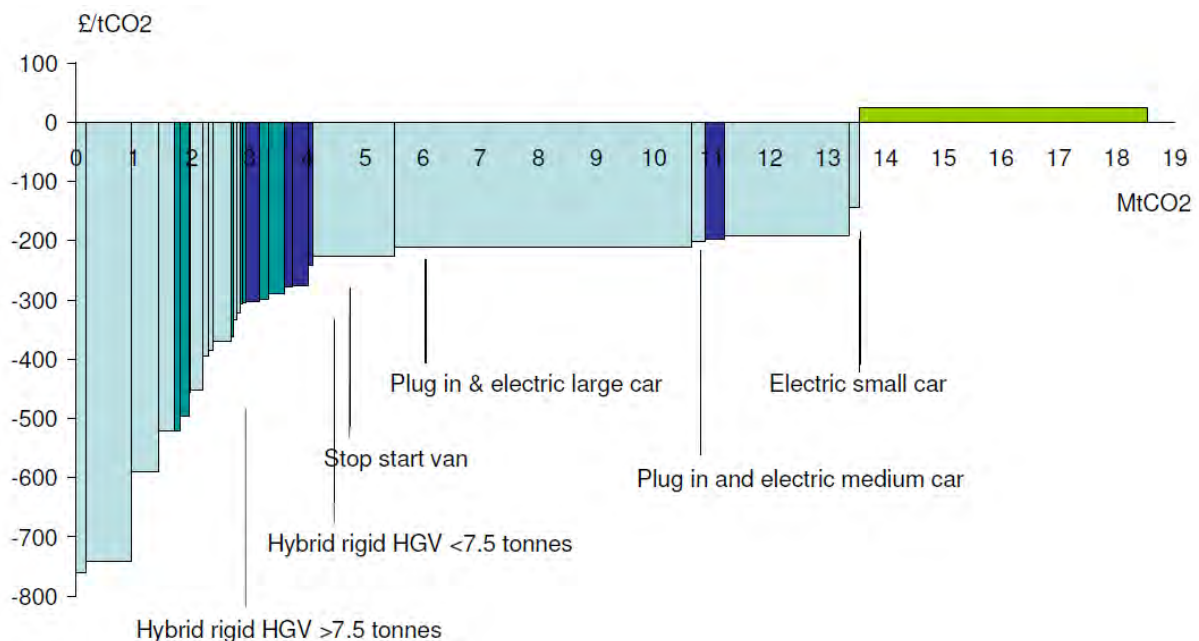


図 3-4 Private MAC カーブ (Extended ambition scenario, central fossil fuel price)

(出典：CCC (2008) "Building a Supply-Side Marginal Abatement Cost Curve (MACC) for the UK Transport Sector")

3.4.4 海運の取り扱い

本モデルは、車、バン、HGVのみを対象としており、海運への言及はない。

3.5 MAC 文献の比較

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次表のとおりである。

表 3-5 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 GHGs (6 ガスを想定) 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 GHGs (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、HGVs) CO ₂ を対象
主な前提 (技術的側面)	60 ドル/t-CO ₂ 以下で削減実施可能な技術を想定	100 ドル/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 を半減するための削減を描いている	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慮即ち 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、5.5 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
備考 (海運の取り扱い等)	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

4 海運における MAC の算出

本章では、海運における MAC の算出を行う。算出に当たっては、IMO スタディ⁸に沿った造船・船腹量の推計を行い、その上で対策技術としては日本政府が MEPC に提出した文書 60/4/36（以下、「MEPC 文書」）の技術シナリオを想定する。なお、ベースとなる IPCC シナリオは A1B とおく。

MAC 推計の全体フローを以下に示す。

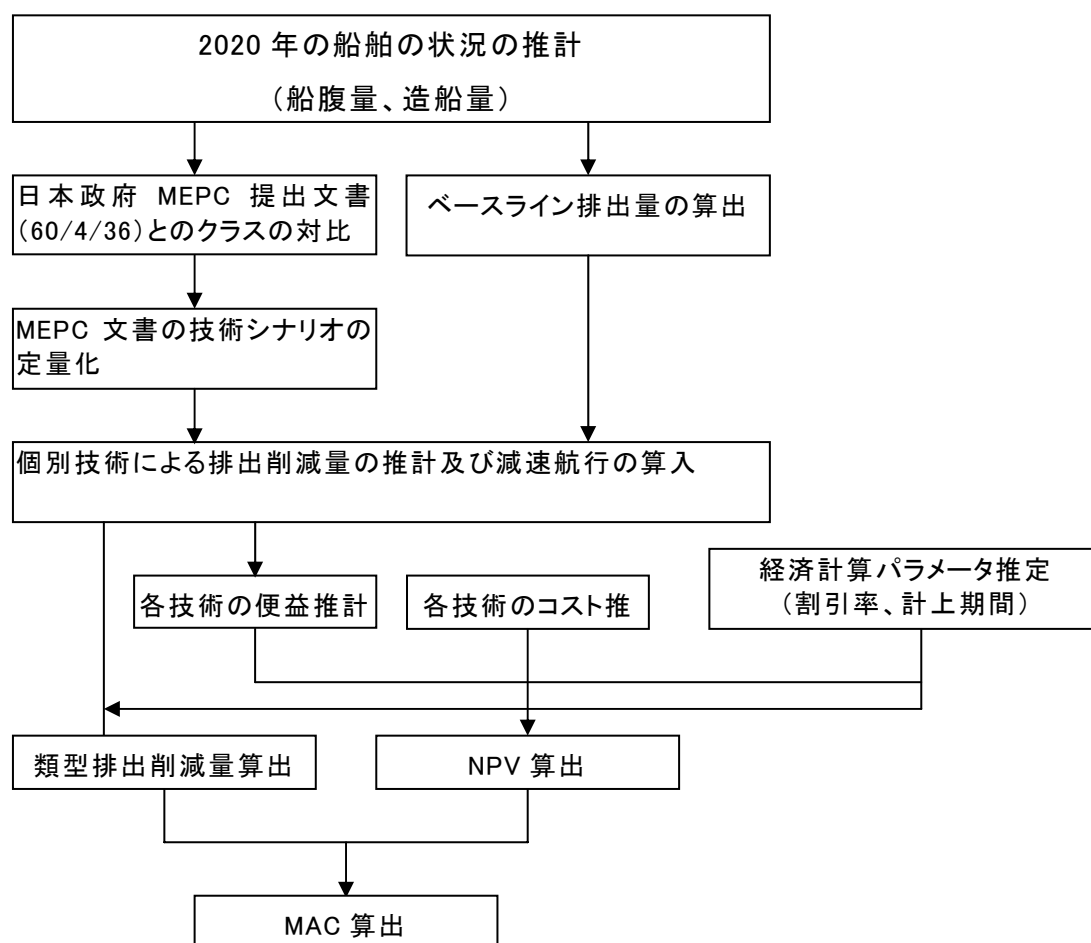


図 4-1 推計フロー

⁸ 2nd GHG Study2009 及びその検討過程の資料である Updated 2000 Study on Greenhouse Gas Emissions from Ships (MEPC58/INF.6) の双方を参照する。

4.1 2020 年の船舶の状況の推計

4.1.1 2007 年の船種・クラス別船腹量の算出

まず、2007 年の船種・クラス別船腹量を算出する。これは IMO スタディの table A1.8 に記載されている 2007 年の船種・クラス別隻数（隻）に 1 隻あたり平均総トン数（GT/船舶）を乗じ、2007 年時点での船種・クラス別船腹量（GT）を算出した。その結果の概要を以下に示す。IMO スタディ table 7.8 の推計とは若干結果が異なる。

4.1.2 2020 年の船種・クラス別船腹量の算出

IMO スタディのデータに基づく 2020 年の船種・クラス別船腹量は、上記のように計算した 2007 年船腹量が、IMO スタディに基づく 2007 年（実績）と 2020 年（予測：IPCC A1B シナリオ）の船種・クラス別の隻数に比例して増加すると想定した⁹。

表 4-1 2007 年及び 2020 年の船腹量（GT）

	2007 年船腹量 (IMO スタディ table 7.8: 参考)	2007 年船腹量 (本調査)	2020 年船腹量 (本調査)
Ocean-going shipping	536,731,017	510,313,531	707,661,923
Coastwise shipping	80,986,919	123,058,443	162,128,441
Container	126,217,091	118,987,854	259,529,361
Total	743,935,027	752,359,828	1,129,319,725
その他		7,388,577	12,074,027

（その他はヨット、オフショアプラットフォーム等）

4.1.3 2008 年から 2020 年までの毎年の造船量

船腹量の純増分は造船によってもたらされるため、造船インフラに制約され、既存船腹量の一定比率で増加するというような手法（生物の繁殖と同様の増加パターン）は不適と考えられる。他方、船舶の解撤・消失は前年度までの船腹量に依存すると考えられる。しかし、報告されている解撤・消失データは不確実性が大きい。これらを調整し、2020 年までの造船量については、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%（船腹量増加率と造船量の差分の長期的な数値と取れる）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。

なお、ごく一部の船種・クラスについては 2020 年に船腹量が大幅に減少すると推計されているため、上記の方法で算出された造船量がマイナスの値を取ることがあるが、その場合はゼロと置いた。また、輸送量については船腹量に比例するとした。

結果として算出された諸数値を以下に示す。

⁹ 2020 年の予測隻数は IMO スタディには記載されておらず、その phase 1 report (MEPC58/INF.6) に記載されている。hase 1 report と IMO スタディの 2020 年予測結果は同一であり、従って 2020 年の船種・クラス別隻数予測に関して hase 1 report と IMO スタディの差はないものとする。

表 4-2 2007 年及び 2020 年の船腹量（1000GT）及び輸送量（100 万トンマイル）

	船腹量 200(GT _{2007,tc})	船腹量 202(GT _{2020,tc})	輸送量 200(TW _{2007,tc})	輸送量 202(TW _{2020,tc})
Crude oil tanker 200=<	76,908	73,795	7,013,341	6,729,400
Crude oil tanker 120-199	28,491	34,302	2,479,626	2,985,386
Crude oil tanker 80-119	37,056	48,212	2,875,945	3,741,821
Crude oil tanker 60-79	7,110	4,740	473,384	315,589
Crude oil tanker 10-79	5,951	3,644	372,161	227,854
Crude oil tanker <10	238	284	10,384	12,388
Products tanker 60=<	9,261	25,025	691,307	1,867,926
Products tanker 20-59	11,063	14,800	608,160	813,547
Products tanker 10-19	1,877	1,176	89,555	56,146
Products tanker 5-9	1,987	3,616	79,552	144,764
Products tanker <5	4,181	4,751	148,851	169,154
Chemical tanker 20=<	25,166	45,100	1,850,187	3,315,682
Chemical tanker 10-19	5,464	8,440	479,099	739,978
Chemical tanker 5-9	2,986	7,246	245,694	596,247
Chemical tanker <5	2,208	1,251	119,693	67,819
LPG tanker 50=<	6,042	8,056	332,759	443,679
LPG tanker <50	4,558	6,144	84,522	113,921
LNG tanker 200=<	543	13,992	22,689	584,251
LNG tanker >200	21,733	40,192	907,560	1,678,416
Other tanker	816	1,062		
Bulk carrier 200=<	13,628	33,325	1,297,224	3,172,204
Bulk carrier 100-199	57,363	101,597	5,325,597	9,432,361
Bulk carrier 60-99	59,866	80,086	5,781,720	7,734,436
Bulk carrier 35-59	51,439	66,534	4,181,092	5,408,054
Bulk carrier 10-34	32,084	33,573	2,651,294	2,774,345
Bulk carrier <10	2,175	2,608	76,414	91,629
General cargo 10=<	7,671	7,899	584,028	601,359
General cargo 5-9	7,188	10,763	558,246	835,907
General cargo <5	11,677	13,131	846,865	952,281
General cargo 10=<,*	19,160	15,985	1,177,291	982,197
General cargo 5-9,*	5,765	19,143	265,280	880,857
General cargo <5,*	4,048	4,699	179,714	208,618
Othre dry reefer	6,193	5,518	486,904	433,852
Other dry special	2,782	3,367		
Container 8kTEU+	11,810	101,083	822,258	1,923,246
Container 5kTEU+	29,311	49,906	1,765,365	4,275,825
Container 3kTEU+	32,220	52,794	2,005,250	2,002,430
Container 2kTEU+	19,585	22,610	987,297	1,724,440
Container 1kTEU+	18,328	25,167	644,848	445,321
Container <1kTEU	7,733	7,970	199,588	275,288
Vehicle 4kCEU+	20,517	32,682	291,568	838,073
Vehicle <4kCEU	6,929	6,970	76,346	143,630
Ro-Ro 2000+lm	4,991	7,537	71,431	124,820
Ro-Ro <2000+lm	5,396	5,567	86,774	16,760
Ferry Pax 25kn	297	393	7,013,341	6,729,400
Ferry Pax <25kn	826	1,038	2,479,626	2,985,386
Ferry RoPax 25kn	2,145	4,096	2,875,945	3,741,821
Ferry RoPax <25kn	14,849	14,311	473,384	315,589
Cruise 100k=<	2,857	4,762		
Cruise 60-99	5,488	7,397		
Cruise 10-59	3,843	4,197		
Cruise 2-9	359	257		
Cruise <2	134	291		
Yacht	589	1,064		
Offshore Crew	149	280		
Offshore Platform	1,953	3,248		
Offshore Tug	498	653		
Offshore Anchor	1,839	3,625		
Offshore Support	724	1,120		
Offshore Pipe	1,638	2,084		
Service Research	1,469	1,802		
Service Tug	3,465	5,069		
Service Dredge	2,642	3,013		
Service SAR	519	761		
Service Workboats	1,663	2,186		
Service other	1,106	1,443		
Misc Fishing	4,022	4,208		
Misc Trawler	5,835	5,777		
Misc Other fishing	1,673	1,573		
Misc Other	7,668	10,405		
Ocean-going	510,314	707,662	39,633,366	54,711,155
Coastwise	123,058	162,128	3,188,894	4,524,198
Container	118,988	259,529	6,424,607	10,646,550
Total	752,360	1,129,320	49,246,867	69,881,902
Other	7,389	12,074		

表 4-3 2008 年から 2020 年までの毎年の造船量 (1000GT)

	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Total
Crude oil tanker 200=<	2,068	2,061	2,053	2,046	2,039	2,032	2,025	2,017	2,010	2,003	1,996	1,989	1,982	26,320
Crude oil tanker 120-199	1,302	1,315	1,329	1,342	1,355	1,369	1,382	1,396	1,409	1,422	1,436	1,449	1,463	17,969
Crude oil tanker 80-119	1,970	1,996	2,021	2,047	2,073	2,099	2,124	2,150	2,176	2,202	2,227	2,253	2,279	27,616
Crude oil tanker 60-79	31	26	20	15	9	4	0	0	0	0	0	0	0	104
Crude oil tanker 10-79	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Crude oil tanker <10	11	11	11	11	11	11	11	11	12	12	12	12	12	147
Products tanker 60=<	1,490	1,527	1,563	1,600	1,636	1,672	1,709	1,745	1,781	1,818	1,854	1,891	1,927	22,213
Products tanker 20-59	619	628	637	645	654	662	671	680	688	697	706	714	723	8,724
Products tanker 10-19	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
Products tanker 5-9	185	189	192	196	200	204	207	211	215	219	222	226	230	2,697
Products tanker <5	169	171	172	173	175	176	177	178	180	181	182	184	185	2,303
Chemical tanker 20=<	2,288	2,334	2,380	2,426	2,472	2,518	2,564	2,610	2,656	2,702	2,748	2,794	2,840	33,336
Chemical tanker 10-19	393	400	407	413	420	427	434	441	448	455	461	468	475	5,642
Chemical tanker 5-9	417	427	437	447	457	466	476	486	496	506	516	525	535	6,192
Chemical tanker <5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LPG tanker 50=<	336	341	345	350	355	359	364	369	373	378	383	387	392	4,733
LPG tanker <50	259	262	266	270	273	277	281	284	288	292	295	299	303	3,649
LNG tanker 200=<	1,051	1,082	1,113	1,144	1,175	1,206	1,237	1,268	1,299	1,330	1,361	1,392	1,423	16,081
LNG tanker >200	2,072	2,115	2,157	2,200	2,242	2,285	2,328	2,370	2,413	2,455	2,498	2,541	2,583	30,258
Other tanker	43	44	45	45	46	46	47	47	48	48	49	50	50	608
Bulk carrier 200=<	1,924	1,969	2,015	2,060	2,106	2,151	2,197	2,242	2,288	2,333	2,379	2,424	2,469	28,558
Bulk carrier 100-199	5,124	5,226	5,328	5,430	5,532	5,634	5,736	5,838	5,940	6,042	6,144	6,246	6,348	74,568
Bulk carrier 60-99	3,351	3,398	3,445	3,491	3,538	3,585	3,631	3,678	3,725	3,771	3,818	3,865	3,911	47,207
Bulk carrier 35-59	2,704	2,739	2,774	2,809	2,844	2,878	2,913	2,948	2,983	3,018	3,053	3,088	3,122	37,873
Bulk carrier 10-34	1,077	1,080	1,084	1,087	1,091	1,094	1,098	1,101	1,105	1,108	1,111	1,115	1,118	14,270
Bulk carrier <10	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	1,359
General cargo 10=<	248	248	249	249	250	250	251	251	252	252	253	253	254	3,260
General cargo 5-9	491	499	507	515	524	532	540	548	557	565	573	581	590	7,022
General cargo <5	462	465	469	472	476	479	482	486	489	492	496	499	502	6,269
General cargo 10=<,*	331	323	316	309	301	294	287	279	272	265	257	250	243	3,726
General cargo 5-9,*	1,202	1,233	1,264	1,295	1,326	1,356	1,387	1,418	1,449	1,480	1,511	1,542	1,572	18,034
General cargo <5,*	172	173	175	176	178	179	181	182	184	185	187	188	190	2,347
Othre dry reefer	134	132	131	129	128	126	125	123	121	120	118	117	115	1,619
Other dry special	129	130	131	133	134	135	137	138	139	141	142	143	145	1,776
Container 8kTEU+	7,221	7,427	7,633	7,840	8,046	8,252	8,458	8,664	8,870	9,076	9,282	9,488	9,694	109,948
Container 5kTEU+	2,464	2,511	2,559	2,606	2,654	2,701	2,749	2,796	2,844	2,891	2,939	2,986	3,034	35,733
Container 3kTEU+	2,549	2,597	2,644	2,692	2,739	2,787	2,834	2,882	2,929	2,977	3,024	3,071	3,119	36,843
Container 2kTEU+	820	827	834	841	848	855	862	869	876	883	890	897	904	11,207
Container 1kTEU+	1,076	1,092	1,107	1,123	1,139	1,155	1,171	1,186	1,202	1,218	1,234	1,249	1,265	15,217
Container <1kTEU	250	251	251	252	252	253	254	254	255	255	256	256	257	3,296
Vehicle 4kCEU+	1,551	1,579	1,607	1,636	1,664	1,692	1,720	1,748	1,776	1,804	1,832	1,860	1,888	22,357
Vehicle <4kCEU	211	211	211	211	211	212	212	212	212	212	212	212	212	2,751
Ro-Ro 2000+lm	346	352	357	363	369	375	381	387	393	399	404	410	416	4,952
Ro-Ro <2000+lm	175	175	176	176	177	177	177	178	178	179	179	179	180	2,306
Ferry Pax 25kn	16	17	17	17	17	17	18	18	18	18	19	19	19	229
Ferry Pax <25kn	41	42	42	43	43	44	44	44	45	45	46	46	47	572
Ferry RoPax 25kn	214	219	223	228	232	237	241	246	250	255	259	264	268	3,139
Ferry RoPax <25kn	404	403	402	400	399	398	397	395	394	393	392	390	389	5,156
Cruise 100k=<	232	237	241	245	250	254	259	263	267	272	276	281	285	3,362
Cruise 60-99	311	316	320	325	329	334	338	342	347	351	356	360	364	4,393
Cruise 10-59	143	143	144	145	146	147	147	148	149	150	151	152	152	1,917
Cruise 2-9	3	3	2	2	2	2	2	1	1	1	1	0	0	20
Cruise <2	16	16	17	17	18	18	18	19	19	19	20	20	20	237
Yacht	54	55	56	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	791
Offshore Crew	15	15	15	15	16	16	16	17	17	17	18	18	18	212
Offshore Platform	158	161	164	167	170	173	176	179	182	185	188	191	194	2,290
Offshore Tug	27	27	28	28	28	29	29	29	30	30	30	31	31	378
Offshore Anchor	193	197	201	205	209	213	217	221	226	230	234	238	242	2,825
Offshore Support	52	53	54	55	56	57	58	59	60	60	61	62	63	750
Offshore Pipe	83	84	85	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	1,165
Service Research	70	70	71	72	73	74	74	75	76	77	77	78	79	966
Service Tug	227	231	235	238	242	246	250	253	257	261	264	268	272	3,244
Service Dredge	108	109	109	110	111	112	113	114	115	115	116	117	118	1,467
Service SAR	34	35	35	36	36	37	38	38	39	39	40	40	41	489
Service Workboats	90	91	92	94	95	96	97	99	100	101	102	103	105	1,265
Service other	59	60	61	61	62	63	64	65	65	66	67	68	68	829
Misc Fishing	135	135	136	136	137	137	138	138	138	139	139	140	140	1,789
Misc Trawler	171	170	170	170	170	170	170	170	169	169	169	169	169	2,207
Misc Other fishing	43	42	42	42	42	41	41	41	41	40	40	40	40	535
Misc Other	441	447	453	459	466	472	478	485	491	497	504	510	516	6,220
Ocean-going	30,490	30,950	31,411	31,874	32,336	32,798	33,263	33,730	34,198	34,666	35,134	35,602	36,070	432,522
Coastwise	6,705	6,797	6,889	6,982	7,074	7,166	7,259	7,351	7,443	7,536	7,628	7,721	7,813	94,363
Container	14,381	14,705	15,029	15,354	15,678	16,002	16,326	16,651	16,975	17,299	17,624	17,948	18,272	212,244
Total	51,575	52,451	53,330	54,209	55,088	55,967	56,848	57,732	58,617	59,501	60,386	61,270	62,155	739,129
Other	582	593	604	615	625	636	647	658	669	679	690	701	712	8,410

4.2 日本政府 MEPC 提出文書(60/4/36:以下 MEPC 文書)との対比

IMO スタディの船種・クラス別データに MEPC 文書のクラスを照合した。前者は 70 分類（うち貨物船は 53 分類）、後者は 16 分類であるため、前者を後者に当てはめるルールを下記のように作成した。

- ・ IMO スタディのクラス下限の最大値 > MEPC 文書のクラス下限の最大値 → MEPC 文書区分の下限最大値のクラスに分類（Bulk carrier <200,000dwt は Dry cargo carrier >175,000dwt に分類）
- ・ IMO スタディのクラスのレンジが MEPC 文書区分のクラス下限最大値を含む → MEPC 文書区分の下限最大値のクラスに分類
- ・ IMO スタディのクラスのレンジが 2 つの MEPC 文書区分のクラスに属する → MEPC 文書区分のうち重複するトン数が多いクラスに分類
- ・ IMO スタディスタディのクラスのレンジ < MEPC 文書区分の下限最小値 → MEPC 文書区分の下限最大値のクラスに分類（IMO での Crude oil tanker <9.999dwt は Tanker >45,000dwt に分類）
- ・ コンテナ船：1TEU=7dwt 換算
- ・ カーフェリー：1CEU=1.5dwt 換算（同上）

これらの結果について以下に示す。

表 4-4 IMO スタディと MEPC 文書の区分の照合

IMO スタディ区分	MEPC 提案区分 (左記)
Crude oil tanker 200=<	9
Crude oil tanker 120-199	8
Crude oil tanker 80-119	8
Crude oil tanker 60-79	7
Crude oil tanker 10-79	7
Crude oil tanker <10	7
Products tanker 60=<	6
Products tanker 20-59	5
Products tanker 10-19	5
Products tanker 5-9	5
Products tanker <5	5
Chemical tanker 20=<	6
Chemical tanker 10-19	5
Chemical tanker 5-9	5
Chemical tanker <5	5
LPG tanker 50=<	6
LPG tanker <50	5
LNG tanker 200=<	6
LNG tanker >200	6
Other tanker	5
Bulk carrier 200=<	3
Bulk carrier 100-199	4
Bulk carrier 60-99	3
Bulk carrier 35-59	3
Bulk carrier 10-34	1
Bulk carrier <10	1
General cargo 10=<	15
General cargo 5-9	16
General cargo <5	15
General cargo 10=<,*	15
General cargo 5-9,*	16
General cargo <5,*	15
Othre dry reefer	1
Other dry special	1
Container 8kTEU+	12
Container 5kTEU+	11
Container 3kTEU+	10
Container 2kTEU+	10
Container 1kTEU+	10
Container <1kTEU	10
Vehicle 4kCEU+	13
Vehicle <4kCEU	13
Ro-Ro 2000+1m	13
Ro-Ro <2000+1m	13
Ferry Pax 25kn	13
Ferry Pax <25kn	13
Ferry RoPax 25kn	13
Ferry RoPax <25kn	13
Cruise 100k=<	14
Cruise 60-99	14
Cruise 10-59	14
Cruise 2-9	13
Cruise <2	13

MEPC 文書の区分		
MEPC 提案区分	船種	クラス(下限)
1	Dry cargo carrier	20000
2		52000
3		77000
4		175000
5	Gas tanker(Excluding steam turbine ship)	9000
6		45000
7	Tanker	45000
8		84000
9		300000
10	Container	12000
11		39000
12		91000
13	Ro-ro cargo ship (Vehicle carrier)	7000
14		18000
15	General cargo ship	9000
16		13000

- IMO スタディのクラス下限の最大値>MEPC 文書のクラス下限の最大値→MEPC 文書区分の下限最大値のクラスに分類
- IMO スタディのクラスのレンジが MEPC 文書区分のクラス下限最大値を含む→MEPC 文書区分の下限最大値のクラスに分類
- IMO スタディのクラスのレンジが 2 つの MEPC 文書区分のクラスに属する→MEPC 文書区分のうち重複するトン数が多いクラスに分類
- IMO スタディスタディのクラスのレンジ< MEPC 文書区分の下限最小値→MEPC 文書区分の下限最大値のクラスに分類
- コンテナ船：1TEU=7dwt 換算
- カーフェリー：1CER=1.5dwt 換算

4.3 ベースライン排出量の算出

ベースライン排出量、即ち 2008 年～2020 年に建造された船種・クラス（tc）において技術導入が行われないことを想定した場合の 2020 年における排出量は、各船種・クラスの 2007 年における船腹量あたりの CO₂排出量に、2020 年の当該船種・クラスの 2007 年における船腹量を乗じることにより算出する。即ち、ベースラインとしては 2020 年に至るまで、新造船舶のエネルギー効率向上が見られないことを想定している。

具体的には下記のとおり。

$$BE_{ME,2020,tc} = \sum_{yc=2008}^{2020} \frac{CE_{2007,tc}}{GT_{2007,tc}} \times GT_{tc,yc} \quad (4)$$

ここで、

- ・ $BE_{ME,2020,tc}$ ：船種・クラス tc 別の主機起源 2020 年のベースライン排出量
- ・ $GT_{2007,tc}$ ：船種・クラス tc 別の 2020 年の船腹量（総トン数）
- ・ $CE_{2007,tc}$ ：船種・クラス tc 別の 2007 年の CO₂排出量（IMO スタディ Table A1.25 の船種・クラス別 2007 年燃料別消費量（主機のみ）×燃料別原単位¹⁰×Table 7.4 の輸送量増加率を考慮）
- ・ $GT_{tc,yc}$ ：yc 年に建造された船種・クラス毎の船腹量

以上の算出結果を表 4-5 に示す。

¹⁰ 船種・クラス毎の燃料の炭素含有率×44/12（MEPC58 INF.6）

表 4-5 ベースライン排出量（2008～2020 年に建造された船舶による 2020 年排出量）

及びその算出指標

	2007 排出量 (主機)	2007 排出量 (主機以 外含む)	2020 年 排 出 量 (新規船舶、主 機)	2020 年 排 出 量 (新規船舶、主 機以外含む)	2020 年 排 出 量 (全船舶、主 機)	2020 年 排 出 量 (全船舶、主機 以外含む)
Crude oil tanker 200=<	33,384	37,183	11,425	12,725	32,032	35,678
Crude oil tanker 120-199	18,028	20,617	11,370	13,002	21,705	24,822
Crude oil tanker 80-119	24,550	32,538	18,296	24,250	31,941	42,334
Crude oil tanker 60-79	4,592	6,719	67	98	3,062	4,479
Crude oil tanker 10-79	4,674	6,422	1	1	2,861	3,932
Crude oil tanker <10	378	639	233	395	450	763
Products tanker 60=<	4,716	7,523	11,310	18,042	12,742	20,326
Products tanker 20-59	6,361	11,893	5,016	9,378	8,509	15,909
Products tanker 10-19	1,745	3,172	3	6	1,094	1,989
Products tanker 5-9	2,534	4,287	3,439	5,818	4,611	7,801
Products tanker <5	7,059	12,377	3,889	6,819	8,022	14,065
Chemical tanker 200=<	26,601	29,716	35,238	39,364	47,672	53,254
Chemical tanker 10-19	8,599	9,845	8,879	10,166	13,281	15,206
Chemical tanker 5-9	5,937	6,845	12,310	14,195	14,407	16,612
Chemical tanker <5	3,701	4,920	0	0	2,097	2,788
LPG tanker 50=<	5,170	5,681	4,050	4,450	6,893	7,574
LPG tanker <50	5,398	6,797	4,320	5,441	7,275	9,161
LNG tanker 200=<	334	379	9,890	11,215	8,605	9,758
LNG tanker >200	21,688	23,612	30,196	32,874	40,110	43,667
Bulk carrier 200=<	1,091	1,380	813	1,029	1,420	1,796
Bulk carrier 100-199	5,619	6,055	11,774	12,690	13,740	14,808
Bulk carrier 60-99	27,868	30,079	36,227	39,100	49,359	53,273
Bulk carrier 35-59	41,307	45,146	32,572	35,599	55,258	60,394
Bulk carrier 10-34	40,713	45,048	29,976	33,168	52,660	58,268
Bulk carrier <10	35,224	39,815	15,667	17,708	36,859	41,663
General cargo 10=<	3,045	4,128	1,903	2,580	3,651	4,949
General cargo 5-9	12,029	13,202	5,113	5,611	12,386	13,594
General cargo <5	14,813	16,316	14,471	15,939	22,181	24,431
General cargo 10=<,*	18,622	21,825	9,998	11,717	20,940	24,541
General cargo 5-9,*	21,888	24,587	4,256	4,781	18,261	20,513
General cargo <5,*	7,194	8,607	22,504	26,925	23,887	28,580
Othre dry reefer	4,907	6,580	2,845	3,815	5,696	7,638
Container 8kTEU+	16,501	19,009	4,314	4,969	14,703	16,938
Container 5kTEU+	2,912	3,341	1,859	2,133	3,526	4,045
Container 3kTEU+	16,931	19,066	157,625	177,501	144,916	163,189
Container 2kTEU+	48,545	54,530	59,182	66,478	82,655	92,844
Container 1kTEU+	55,550	61,776	63,520	70,639	91,021	101,221
Container <1kTEU	32,226	36,682	18,440	20,990	37,202	42,346
Vehicle 4kCEU+	33,693	38,549	27,973	32,005	46,263	52,932
Vehicle <4kCEU	10,754	13,491	4,583	5,749	11,084	13,904
Ro-Ro 2000+1m	16,329	17,744	17,794	19,336	26,012	28,266
Ro-Ro <2000+1m	7,671	8,368	3,046	3,322	7,717	8,418
Ferry Pax only 25kn	5,993	6,733	5,946	6,680	9,051	10,169
Ferry Pax only <25kn	7,903	9,673	3,377	4,134	8,153	9,979
Ferry RoPax 25kn	7,901	8,116	6,094	6,261	10,454	10,739
Ferry RoPax <25kn	7,982	8,597	5,525	5,951	10,026	10,799
Cruise 100+GT	9,979	10,574	14,602	15,473	19,055	20,192
Cruise 60-99	43,898	50,219	15,242	17,437	42,306	48,398
Cruise 10-59	3,555	3,704	4,182	4,358	5,924	6,173
Cruise 2-9	7,000	7,935	5,603	6,351	9,434	10,694
Cruise 0-2	5,046	6,005	2,518	2,996	5,512	6,559
Service (Research)	738	963	41	53	529	690
Service (Tug)	342	467	605	826	742	1,013
Service (Dredging)	1,840	2,481	2,472	3,332	3,326	4,485
Service (SAR)	1,374	1,552	1,954	2,208	2,575	2,910
Service (Workboats)	3,860	5,874	4,525	6,887	6,419	9,769
Service (Other)	895	1,406	679	1,067	1,174	1,846
Misc (Fishing)	5,847	8,360	8,983	12,844	11,527	16,482
Misc (Trawlers)	1,218	1,652	1,263	1,713	1,886	2,557
Misc (Other fishing)	888	1,591	632	1,132	1,130	2,025
Misc (Other)	2,963	4,177	1,948	2,747	3,635	5,124
Ocean-going	375,084	432,078	308,110	353,566	511,810	588,294
Coastwise	280,543	349,677	201,073	243,825	357,841	440,231
Container	197,699	224,093	331,324	373,362	413,141	466,436
Total O,C, Container	853,326	1,005,847	840,507	970,752	1,310,831	1,535,035

4.4 MEPC 文書の技術シナリオの定量化

前述のように本調査では日本が提出した MEPC/60/4/36（以下、MEPC 文書）を参照し、文書の技術シナリオを導入年毎に分類した。導入年は MEPC 文書にある expected year the improvement reaches the maximum とした。本調査は排出削減ポテンシャルの推計という意味合いを持つことから導入率は 100%（即ち同年に建造された船舶の全てに導入される）とし、またある年に導入された技術はそれ以降に建造された船舶にも継続導入されるとした。ただし低摩擦塗装と空気潤滑は併用できないため、空気潤滑の導入が想定されている年（2020）には対象船舶について低摩擦塗装は導入されないとした。

MEPC 文書の技術一覧について以下に示す。なお MEPC 文書には技術シナリオの種類がタンカー、バルカーとその他（コンテナ、RORO 等）の 2 種類のみである。

表 4-6 導入対策のポテンシャル（タンカー、バルクキャリア等）

Year	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Low friction coating					5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	0%
Stern duct-friction reduction						2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%
CRP						8%	8%	8%	8%	8%	8%	8%	8%
Stern duct-propulsion						4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%
Post-swirl system						4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%
Opt. superstructure												30%	30%
Air lubrication													10%

表 4-7 導入対策のポテンシャル（コンテナ、自動車輸送船、RoRo、フェリー等）

Year	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Low friction coating					5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	0%
Opt. stern shape		10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%
Opt. superstructure												30%	30%
CRP						8%	8%	8%	8%	8%	8%	8%	8%
Air lubrication													10%

ここで、これらの技術は主機のエネルギー消費に関して効果を持ち、補機には影響を及ぼさないと想定される。また、これらの技術は基本的に相互独立に効果を持つと想定される。即ち、エネルギー消費削減率 X%の技術 A とエネルギー消費削減率 Y%の技術 B を併用することによる効果は $1 - (1 - X\%) \times (1 - Y\%)$ で表されると仮定する（前述の低摩擦塗装と空気潤滑は相互排他的と考える）。即ち、これらの技術導入による 2020 年の合計削減率は、例えばタンカー、バルクキャリア等では 2019 年には 47.7%、コンテナ、自動車輸送船、RoRo、フェリー等では 47.8%と算出される。しかし、このような前提で計算した場合、MEPC 文書に提案されている要求 EEDI 削減率（2013～2017 年までに 10%、2018～2022 年までに 15%～25%）を上回ってしまう。

このため、本報告書ではこれらの技術の導入による合計排出削減率を MEPC 文書の数値である 2015 年に 10%、2020 年に 25%（タンカー、バルクキャリア等）または

15%（コンテナ、自動車輸送船、RoRo、フェリー等）との整合を取るため、MEPC 文書で想定されている個々の排出削減率に調整項を乗じる。この結果を以下に示す。修正排出削減率では、MEPC 文書に記載された全ての排出削減率に約 45%を乗じている。ただしコンテナ、自動車輸送船、RoRo、フェリー等に対して 2019 年から導入されると想定される Optimal superstructure は 30%の排出削減率が計上されており、これを含めると（45%割り引いても）エネルギー消費効率の改善は 15%を大きく上回る。このためこれらについては改善率を 6%とおいた。

表 4-8 導入対策のポテンシャル（タンカー、バルクキャリア等）：修正版

Year	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Low friction coating					2.3%	2.3%	2.3%	2.3%	2.3%	2.3%	2.3%	2.3%	0.0%
Stern duct-friction reduction						0.9%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%
CRP						3.6%	3.6%	3.6%	3.6%	3.6%	3.6%	3.6%	3.6%
Stern duct-propulsion						1.8%	1.8%	1.8%	1.8%	1.8%	1.8%	1.8%	1.8%
Post-swirl system						1.8%	1.8%	1.8%	1.8%	1.8%	1.8%	1.8%	1.8%
Opt. superstructure												13.6%	13.6%
Air lubrication													4.5%
合計					2.3%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	22.2%	24.0%

表 4-9 導入対策のポテンシャル（コンテナ、自動車輸送船、RoRo、フェリー等）：修正版

Year	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Low friction coating					2.2%	2.2%	2.2%	2.2%	2.2%	2.2%	2.2%	2.2%	0.0%
Opt. stern shape		4.5%	4.5%	4.5%	4.5%	4.5%	4.5%	4.5%	4.5%	4.5%	4.5%	4.5%	4.5%
Opt. superstructure												6.0%	6.0%
CRP						3.6%	3.6%	3.6%	3.6%	3.6%	3.6%	3.6%	3.6%
Air lubrication													4.5%
合計		4.5%	4.5%	4.5%	6.6%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	15.4%	17.3%

4.5 個別技術による排出削減量の推計

上記のベースライン排出量を背景に、2008 年～2020 年に建造された船舶の 2020 年における排出削減量を推計する。ここでこれらの技術は船舶の推進に関するものであるため、排出削減量は主機のみに対応すると想定する。ある年に建造された船種・クラス tc に対する個別技術 t の排出削減量の合計値として、下記のように求める。

$$ER_{ME,tc,t,2020} = \sum_{yc=2008}^{2020} [BE_{ME,2020,yc,tc} \times \frac{ER_t}{\sum_{t,tc,yc} ER_t} \times \{1 - \prod_t^{t,tc,yc} (1 - ER_t)\}] \quad (5)$$

ここで、

- ・ $ER_{ME,tc,t,2020}$: 2020 年の船種・クラス tc に対する個別技術 t の主機に起因する排出削減量
- ・ $BE_{ME,2020,yc,tc}$: yc 年に建造された船舶の船種・クラス tc 別の 2020 年の主機に起因するベースライン排出量（上記参照）
- ・ ER_t : yc 年に建造された船舶の船種・クラス tc に導入可能な技術 t の排出削減率（MEPC 文書）
- ・ yc : 建造年
- ・ $\sum t,tc,yc$: yc 年に建造された船舶の船種・クラス tc に導入可能な技術 t の総数

前述のように、上記の式の仮定として、個々の排出削減技術が完全に独立であることを想定している。例えば排出削減技術が 2 種類（Ta、Tb）あり、それぞれのベースラインに対する排出削減率を 5%及び 10%とすると、両者が複合する場合の削減率は合計すると $1 - (1-0.05) \times (1-0.1) = 14.5\%$ となる。従って技術 Ta と Tb が同時に導入されている状況では Ta の削減率は Tb が導入されている分減少し、Tb の削減率は Ta が導入されている分減少する。即ちベースラインに対する Ta と Tb のそれぞれの排出削減率は 5%、10%とはならず、それぞれ 4.8%及び 9.7%となる（合計 14.5%）。

表 4-10 技術ごとの 2020 年までの排出削減量 (kt-CO₂)

	Low friction coating	Stern duct-friction reduction	CRP	Stern duct-propulsion	Post-swirl system	Opt. superstructure	Air lubrication	Opt. stern shape	Total w/o speed reduction
Crude oil tanker 200=<	-152	-60	-240	-120	-120	-215	-36	0	-943
Crude oil tanker 120-199	-154	-62	-247	-123	-123	-230	-38	0	-978
Crude oil tanker 80-119	-249	-100	-399	-200	-200	-375	-63	0	-1,585
Crude oil tanker 60-79	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Crude oil tanker 10-79	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Crude oil tanker <10	-3	-1	-5	-3	-3	-5	-1	0	-20
Products tanker 60=<	-156	-63	-252	-126	-126	-243	-41	0	-1,007
Products tanker 20-59	-68	-27	-110	-55	-55	-103	-17	0	-436
Products tanker 10-19	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Products tanker 5-9	-47	-19	-76	-38	-38	-73	-12	0	-303
Products tanker <5	-53	-21	-84	-42	-42	-78	-13	0	-332
Chemical tanker 20=<	-484	-195	-780	-390	-390	-744	-124	0	-3,107
Chemical tanker 10-19	-122	-49	-195	-98	-98	-186	-31	0	-778
Chemical tanker 5-9	-170	-69	-274	-137	-137	-264	-44	0	-1,094
Chemical tanker <5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LPG tanker 50=<	-55	-22	-88	-44	-44	-83	-14	0	-352
LPG tanker <50	-59	-24	-94	-47	-47	-89	-15	0	-375
LNG tanker 200=<	-137	-56	-222	-111	-111	-216	-36	0	-891
LNG tanker >200	-415	-167	-669	-334	-334	-639	-107	0	-2,665
Other tanker	-11	-4	-18	-9	-9	-17	-3	0	-70
Bulk carrier 200=<	-162	-66	-262	-131	-131	-252	-42	0	-1,047
Bulk carrier 100-199	-498	-200	-801	-401	-401	-765	-128	0	-3,193
Bulk carrier 60-99	-444	-178	-712	-356	-356	-671	-112	0	-2,828
Bulk carrier 35-59	-408	-163	-654	-327	-327	-614	-102	0	-2,596
Bulk carrier 10-34	-211	-84	-334	-167	-167	-306	-51	0	-1,321
Bulk carrier <10	-26	-10	-41	-21	-21	-39	-6	0	-164
General cargo 10=<	-69	-27	-109	-54	-54	-99	-16	0	-430
General cargo 5-9	-198	-80	-318	-159	-159	-302	-50	0	-1,266
General cargo <5	-135	-54	-215	-108	-108	-200	-33	0	-853
General cargo 10=<,*	-55	-21	-84	-42	-42	-70	-11	0	-327
General cargo 5-9,*	-311	-126	-503	-251	-251	-486	-81	0	-2,010
General cargo <5,*	-39	-15	-62	-31	-31	-57	-10	0	-244
Other dry reefer	-57	-22	-89	-44	-44	-77	-13	0	-346
Other dry special	-25	-10	-40	-20	-20	-38	-6	0	-160
Container 8kTEU+	-2,183	0	-3,550	0	0	-1,547	-584	-6,424	-14,287
Container 5kTEU+	-811	0	-1,311	0	0	-561	-211	-2,405	-5,299
Container 3kTEU+	-870	0	-1,405	0	0	-601	-226	-2,580	-5,682
Container 2kTEU+	-249	0	-400	0	0	-167	-62	-746	-1,624
Container 1kTEU+	-381	0	-614	0	0	-260	-98	-1,135	-2,488
Container <1kTEU	-61	0	-98	0	0	-40	-15	-185	-399
Vehicle 4kCEU+	-244	0	-393	0	0	-168	-63	-723	-1,590
Vehicle <4kCEU	-41	0	-65	0	0	-26	-10	-123	-265
Ro-Ro 2000+lm	-81	0	-131	0	0	-56	-21	-241	-531
Ro-Ro <2000+lm	-45	0	-72	0	0	-30	-11	-136	-294
Ferry Pax only 25kn	-83	0	-133	0	0	-56	-21	-247	-541
Ferry Pax only <25kn	-75	0	-121	0	0	-51	-19	-224	-489
Ferry RoPax 25kn	-201	0	-324	0	0	-139	-52	-594	-1,310
Ferry RoPax <25kn	-203	0	-321	0	0	-130	-48	-614	-1,316
Cruise 100+GT	-57	0	-93	0	0	-40	-15	-170	-374
Cruise 60-99	-76	0	-123	0	0	-52	-20	-227	-498
Cruise 10-59	-34	0	-54	0	0	-22	-8	-102	-221
Cruise 2-9	0	0	-1	0	0	0	0	-2	-3
Cruise 0-2	-8	0	-13	0	0	-6	-2	-25	-54
Service (Research)	-34	0	-55	0	0	-24	-9	-100	-222
Service (Tug)	-27	0	-43	0	0	-19	-7	-79	-175
Service (Dredging)	-62	0	-100	0	0	-43	-16	-184	-405
Service (SAR)	-9	0	-15	0	0	-6	-2	-28	-60
Service (Workboats)	-123	0	-200	0	0	-86	-32	-365	-807
Service (Other)	-17	0	-28	0	0	-12	-4	-51	-113
Misc (Fishing)	-9	0	-14	0	0	-6	-2	-26	-56
Misc (Trawlers)	-26	0	-42	0	0	-18	-7	-79	-172
Misc (Other fishing)	-395	0	-636	0	0	-271	-102	-1,173	-2,577
Misc (Other)	-27	0	-44	0	0	-18	-7	-82	-178
Ocean-going shipping	-4,206	-1,540	-6,748	-3,079	-3,079	-6,065	-1,063	-1,087	-26,868
Coastwise shipping	-2,736	-455	-4,390	-910	-910	-2,800	-691	-4,786	-17,678
Container	-4,556	0	-7,377	0	0	-3,176	-1,195	-13,475	-29,779
Total	-11,498	-1,995	-18,515	-3,989	-3,989	-12,041	-2,950	-19,347	-74,325

4.6 減速航行の算入

4.6.1 減速航行の算定方法

減速航行もまた多くの温室効果ガス排出削減対策のひとつである以上、その効果は他の対策の影響を受ける。具体的には他の技術により主機に対する排出削減が行われると、総温室効果ガス排出量に占める主機の排出量が相対的に低下し、このことは減速航行の削減効果を相対的に低減させることにつながる。

このような減速航行の影響について、以下のように算出する。

(1)主機

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量（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用船が必要となる。よって航行速度 V から ΔV だけ減速した場合の主機の CO_2 排出量 $CE_{ME,V \rightarrow \Delta V}$ は下記のように表される。

$$CE_{ME,V \rightarrow \Delta V} = CE_{ME,V} \left(\frac{(V - \Delta V)^3 \times \frac{V}{V - \Delta V}}{V^3} \right) = CE_{ME,V} \left(\frac{(V - \Delta V)^2}{V^2} \right) = CE_{ME,V} \left(1 - \frac{\Delta V}{V} \right)^2 \quad (6)$$

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。今、減速航行前の主機及び補機のエネルギー消費量/温室効果ガス排出量がそれぞれ90及び10であった船舶を想定し、技術革新により主機に起因するエネルギー消費量を基準年比で50%とすることが達成されたと仮定すると、減速航行後の主機及び補機のエネルギー消費量/温室効果ガス排出量はそれぞれ45（＝90/2）と10となる。このような船舶に対して50%の減速航行を実施すると、主機の排出量が11.25（＝45/4）、補機の排出量は17.5となり、合計の排出量28.95、即ち実質的には基準年排出量に対して16.05の排出削減効果しか持たないことになると算出される（これは技術革新が行われない場合の減速航行の効果60に比べて実に70%以上の減少となる）。従って一般的には主機の省エネが進むほど減速航行の効果は低下する。

(2)補機

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。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 $V/(V -$

ΔV)の比率で増加する。従って補機による CO_2 排出量 $CE_{\text{AUX},V \rightarrow \Delta V}$ は下記のように表される。

$$CE_{\text{AUX},V \rightarrow \Delta V} = K' \frac{\left(\frac{DAS}{1 - \frac{\Delta V}{V}} \right) + 365 - DAS}{365} \quad (7)$$

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¹¹。

4.6.2 前提条件

減速航行の前提条件として、下記を想定する。

- ・ ベースライン減速率：IMO スタディ Table 7.11 の low ケース同様の 0% とおく。
- ・ 減速率：IMO スタディ Table 7.11 の base ケース同様、5% とおく。
- ・ 対象：導入技術と異なり、減速航行は全船舶について導入可能であることから、対象は全船舶とおく。
- ・ 他の技術との兼ね合い：減速航行は他の技術と異なり、一旦導入したものをやめる（即ち減速をやめる）ことが可能である。ここで、減速航行は追加的な用船コストをかけるため、投資がコミットされたものと考えることとすることもできるが、他のハード的技術と異なり可逆的であり、減速航行を行わない、というオプションを常に行使することが可能であるため、ある技術と共に減速航行が併用される場合のベースラインは、当該技術のみ導入され減速航行が行わない場合、とするのが適切と考えられる。

4.6.3 算出方法

まず、2007 年の商船全体に対して、ある年に建造された船舶に対して可能な技術的対策が導入された場合の技術及び減速航行による排出削減量の合計値を推計する。

¹¹ これは IMarEST 文献の式 7 と同じである。

$$ER_{SR,t,tc} = \underbrace{CE_{ME,2007,tc} \times \left(\prod_t (1 - ER_t) \times \left(1 - \frac{\Delta V}{V}\right)^2 \right)}_{\text{減速後の主機の排出量：2007 年の商船全体について、減速航行が行われたと想定した場合の船舶の船種・クラス tc 別の主機起源 CO₂排出量}} + \underbrace{CE_{AUX,2007,tc} \times \frac{\frac{DAS_{2007,tc}}{\left(1 - \frac{\Delta V}{V}\right)} + (365 - DAS_{2007,tc})}{365}}_{\text{2007 年の商船全体について、減速航行が行われたと想定した場合の船舶の船種・クラス tc 別の補機起源 CO₂排出量}} - \underbrace{(CE_{ME,2007,tc} + CE_{AUX,2007,tc})}_{\text{技術革新減速航行が行われない場合の補機、主機起源 CO₂排出量}} \quad (8)$$

ここで、

- $ER_{SR,t,tc}$ ：2007 年における船舶の船種・クラス tc 別の技術 t 及び減速航行 ΔV に起因する排出削減量
- $CE_{ME,2007,tc}$ ：2007 年における船舶の船種・クラス tc 別の 2007 年の主機起源 CO₂ 排出量（IMO スタディ table A1.25 より算出）
- $CE_{AUX,2007,tc}$ ：2007 年における船舶の船種・クラス tc 別の 2007 年の補機起源 CO₂ 排出量（同）
- $DAS_{2007,tc}$ ：2007 年における船舶の船種・クラス tc 別の 2007 年の航行日数（IMO スタディ table A1.8 より）
- ΔV ：減速量（ノット）

即ち、 $ER_{SR,t,tc}$ は 2007 年の商船の CO₂ 排出量と比較して、技術的対策 t と減速航行との双方を盛り込んだ排出削減量を示す。ここから技術対策のみに起因する主機の排出削減量を差し引くと、それら技術を導入した場合における減速航行に起因する排出削減量が（補機の排出量増加分を含め）求められる。これを当該船種・クラスの 2007 年の主機起源温室効果ガス排出量（前述の $CE_{ME,2007,tc}$ ）で割ると、建造年 yc におけるある技術の組み合わせ（t-yc）を導入した船舶に対する減速航行による排出削減率を算出することができる。これについて以下に示す。

$$ERR_{SR,tc,yc} = \frac{\{ER_{SR,t-yc,tc} - CE_{ME,2007,tc} \times (1 - \prod_t^{t-yc} (1 - ER_t))\}}{CE_{ME,2007,tc}} \quad (9)$$

- $ERR_{SR,tc,yc}$ ：yc 年に建造された船舶の船種・クラス tc 別の減速航行に起因する排出削減率

さらに、yc 年に建造された船舶の船種・クラス tc 別の減速航行に起因する排出削

減量は下記のように表される。

$$ER_{SR,tc,yc} = ERR_{SR,tc,yc} \times BE_{ME,2020,tc} \quad (10)$$

ここで、

- ・ $ER_{SR,tc,yc}$: yc 年に建造された船舶の船種・クラス tc 別の減速航行に起因する排出削減量

結果について表 4-11 に示す。2008 年から 2020 年までに導入可能な技術的対策のみでの排出削減量は 74,325kt-CO₂であり、2008 年から 2020 年までに建造される船舶において技術革新が行われないと想定した場合の排出量（主機、補機を含むと 970,752kt-CO₂）に対して 7.7%の排出削減となる。これに 5%の減速航行が加わると、これら新造船合計排出削減量は 144,639kt-CO₂（新造船の総排出量の 14.9%）とほぼ倍増する。既存船舶も含めると合計排出削減量 184,961kt-CO₂となり、2020 年の全船舶からの排出量 1,535,035kt-CO₂の 12.4%となる。

表 4-11 5%減速航行を想定した場合のエネルギー消費量の変化率及び技術的対策との対比 (kt-CO₂)

	技術的対策合計	減速航行 (新造船)	減速航行 (既存船)	新造船合計	減速合計	全対策合計
	A	B	C	D=A+B	E=B+C	F=A+B+C
Crude oil tanker 200=<	-943	-971	-1,917	-1,914	-2,887	-3,830
Crude oil tanker 120-199	-978	-949	-950	-1,927	-1,899	-2,877
Crude oil tanker 80-119	-1,585	-1,411	-1,168	-2,997	-2,579	-4,164
Crude oil tanker 60-79	0	-5	-244	-6	-250	-250
Crude oil tanker 10-79	0	0	-242	0	-242	-242
Crude oil tanker <10	-20	-17	-17	-37	-34	-54
Products tanker 60=<	-1,007	-839	-119	-1,846	-957	-1,964
Products tanker 20-59	-436	-339	-266	-775	-605	-1,040
Products tanker 10-19	0	0	-83	0	-83	-83
Products tanker 5-9	-303	-245	-94	-548	-339	-642
Products tanker <5	-332	-273	-324	-605	-597	-929
Chemical tanker 20=<	-3,107	-2,983	-1,160	-6,090	-4,143	-7,250
Chemical tanker 10-19	-778	-744	-407	-1,522	-1,151	-1,929
Chemical tanker 5-9	-1,094	-1,027	-193	-2,121	-1,220	-2,314
Chemical tanker <5	0	0	-187	0	-187	-187
LPG tanker 50=<	-352	-345	-266	-696	-611	-963
LPG tanker <50	-375	-356	-268	-731	-624	-999
LNG tanker 200=<	-891	-828	119	-1,718	-709	-1,599
LNG tanker >200	-2,665	-2,578	-932	-5,244	-3,510	-6,176
Other tanker	-70	-67	-55	-137	-122	-192
Bulk carrier 200=<	-1,047	-1,009	-185	-2,055	-1,194	-2,241
Bulk carrier 100-199	-3,193	-3,105	-1,238	-6,298	-4,344	-7,537
Bulk carrier 60-99	-2,828	-2,782	-2,129	-5,610	-4,911	-7,740
Bulk carrier 35-59	-2,596	-2,549	-2,120	-5,145	-4,669	-7,265
Bulk carrier 10-34	-1,321	-1,323	-1,964	-2,643	-3,286	-4,607
Bulk carrier <10	-164	-152	-154	-316	-306	-470
General cargo 10=<	-430	-438	-683	-867	-1,120	-1,550
General cargo 5-9	-1,266	-1,230	-721	-2,496	-1,951	-3,217
General cargo <5	-853	-847	-1,018	-1,700	-1,865	-2,718
General cargo 10=<,*	-327	-365	-1,306	-692	-1,671	-1,997
General cargo 5-9,*	-2,010	-1,883	-128	-3,893	-2,011	-4,021
General cargo <5,*	-244	-228	-253	-472	-481	-725
Other dry reefer	-346	-363	-955	-709	-1,317	-1,663
Other dry special	-160	-156	-154	-316	-311	-471
Container 8kTEU+	-14,287	-13,285	1,183	-27,572	-12,101	-26,388
Container 5kTEU+	-5,299	-4,994	-2,186	-10,292	-7,179	-12,478
Container 3kTEU+	-5,682	-5,383	-2,570	-11,064	-7,953	-13,635
Container 2kTEU+	-1,624	-1,547	-1,735	-3,172	-3,283	-4,907
Container 1kTEU+	-2,488	-2,334	-1,685	-4,822	-4,019	-6,507
Container <1kTEU	-399	-378	-591	-777	-969	-1,368
Vehicle 4kCEU+	-1,590	-1,517	-772	-3,107	-2,289	-3,879
Vehicle <4kCEU	-265	-260	-439	-525	-699	-964
Ro-Ro 2000+1m	-531	-505	-291	-1,035	-795	-1,326
Ro-Ro <2000+1m	-294	-281	-438	-575	-719	-1,013
Ferry Pax only 25kn	-541	-535	-421	-1,076	-956	-1,497
Ferry Pax only <25kn	-489	-475	-426	-965	-901	-1,390
Ferry RoPax 25kn	-1,310	-1,267	-425	-2,577	-1,692	-3,003
Ferry RoPax <25kn	-1,316	-1,277	-2,496	-2,593	-3,773	-5,089
Cruise 100+GT	-374	-365	-167	-739	-532	-906
Cruise 60-99	-498	-473	-357	-971	-830	-1,328
Cruise 10-59	-221	-208	-273	-429	-482	-702
Cruise 2-9	-3	-3	-43	-6	-46	-49
Cruise 0-2	-54	-48	-12	-102	-60	-114
Service (Research)	-172	-152	-146	-324	-297	-470
Service (Tug)	-2,577	-2,462	-1,526	-5,038	-3,987	-6,564
Service (Dredging)	-178	-153	-179	-330	-332	-510
Service (SAR)	-163	-148	-91	-311	-239	-402
Service (Workboats)	-91	-79	-64	-170	-143	-234
Service (Other)	-187	-177	-144	-363	-321	-508
Misc (Fishing)	-434	-276	-430	-710	-706	-1,140
Misc (Trawlers)	-770	-600	-1,093	-1,370	-1,693	-2,463
Misc (Other fishing)	-144	-134	-287	-278	-421	-565
Misc (Other)	-625	-592	-439	-1,217	-1,031	-1,656
Ocean-going shipping	-26,868	-25,845	-18,760	-52,713	-44,606	-71,474
Coastwise shipping	-17,678	-16,548	-13,978	-34,226	-30,526	-48,204
Container	-29,779	-27,920	-7,583	-57,699	-35,504	-65,283
Total	-74,325	-70,314	-40,322	-144,639	-110,636	-184,961

上記の概要を図 4-2 に示す。一般的に、技術的対策より減速航行の効果が大きく算出される。また船種で見るとコンテナ船が全体の排出削減量の 45%を占めている。

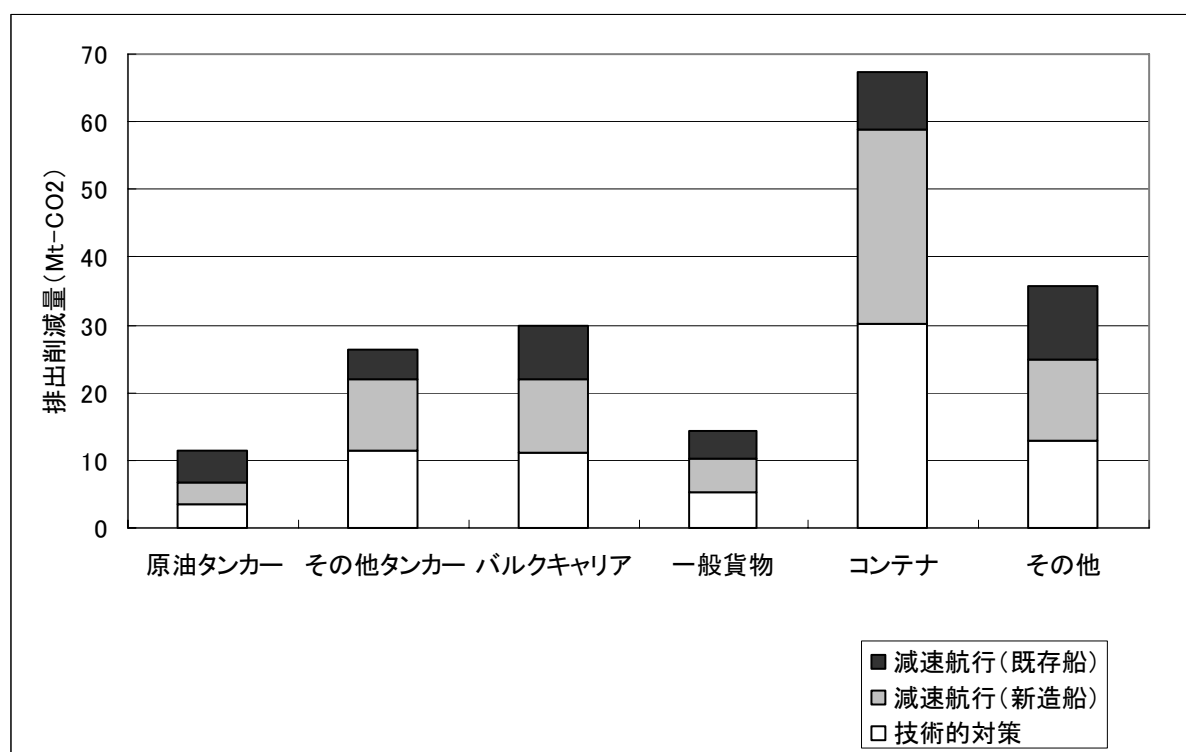


図 4-2 船種別の排出削減サンプル

個別対策の排出削減率を EEDI 目標で補正せず、MEPC 文書のままとした場合を表 4-12 に示す。技術的対策による排出削減量が 2 倍以上となる反面、その影響で減速の効果は約 10%減少している。

表 4-12 排出削減率を補正しない場合 (kt-CO₂)

	技術的対策合計	減速航行 (新造船)	減速航行 (既存船)	新造船合計	減速合計	全対策合計
Ocean-going shipping	-56,079	-22,997	-18,760	-79,077	-41,758	-97,837
Coastwise shipping	-39,523	-14,418	-13,978	-53,941	-28,396	-67,919
Container	-70,377	-23,962	-7,583	-94,339	-31,545	-101,923
Total	-165,980	-61,377	-40,322	-227,357	-101,699	-267,679

また、減速率を 10%とした場合を表 4-13 に示す。減速航行の排出削減効果は技術的対策に劣後して算出しているため、技術的対策の効果は減速率に依存しない。減速航行の効果は減速率 5%の場合と比べて 1.94 倍と算出されるが、これは減速率の変化より理論的に導かれる比率 (1.95 倍) と整合が取れている (補機のエネルギー消費増加があるため効果が若干小さくなっている)

表 4-13 減速率を 10%とした場合 (kt-CO₂)

	技術的対策合計	減速航行 (新造船)	減速航行 (既存船)	新造船合計	減速合計	全対策合計
Ocean-going shipping	-26,868	-50,109	-36,380	-76,978	-86,489	-113,358
Coastwise shipping	-17,678	-32,031	-27,027	-49,709	-59,058	-76,736
Container	-29,779	-54,169	-14,714	-83,948	-68,883	-98,661
Total	-74,325	-136,309	-78,121	-210,634	-214,430	-288,755

4.7 コスト及び経済計算パラメータの検討

次に、MAC カーブを算出するために必要な経済計算パラメータの検討を行う。これは下記に二分できよう。

表 4-14 経済データの種類

価格データ	経済計算パラメータ
- 各技術の導入価格（可能な限り船種・クラスごとに推計）。 - 燃料価格	- 割引率 - 計算年数

4.7.1 価格データ

価格データの分析について、初期コストとランニングコストに分類して以下に示す。

(1)初期コスト

価格データについては、MEPC59/INF.27（日本提案文書）及び IMarEST ”Reductions of GHG Emissions from Ships (MEPC61/INF.18)¹²”を参考にした。IMarEST 文献については貨物船及び客船に関して IMO スタディと同様の区分でデータが存在するが、MEPC59/INF.27 については一部の船種・クラスについてのみ価格データが存在する。このような状況下で、価格データについては下記のように考えた。

本調査で対象とした技術において、IMarEST 文献において IMO スタディと同じ船種・クラスのすべてについて価格データを記載しているのは low friction coating(hull coating)のみであり、これについては IMarEST 文献のデータをそのまま採用した。残りの技術のうち、空気潤滑（air lubrication）についてはいくつかの船種・クラスについて IMarEST 文献のデータが存在する。これについては IMarEST 文献のデータが存在する船種・クラスについてはそのデータを採用し、残りの船種・クラスについては本技術が船体関係の技術であることから価格が船舶総トン数の 2/3 乗に比例する（即ち表面積に比例する）と想定した。なお IMarEST 文献に記載された諸技術のうち、各船種・クラスにおける hull coating のコストは IMO スタディに記載されて

¹² <http://www.imarest.org/Community/InternationalMaritimeOrganizationIMO.aspx>

いる船種・クラス別一隻あたり総トン数の 2/3 乗に比例している。

他の技術については対応する技術のデータが IMarEST 文献に存在しないため、船社へのヒアリングを通じてデータを入手した。一次データはタンカー、バルカー、コンテナ各 1 クラスについて入手し、他の船種・クラスへは IMarEST 文献における駆動系技術の関係を用了。IMarEST 文献において記載されていない船種・クラスについては、IMarEST 文献における駆動系技術の関係が IMO スタディにおける各船種・クラスの主機出力にほぼ比例し、 $Y=X^A$ （ Y は IMarEST 文献データ、 X は主機出力）を想定すると $A=0.9$ の場合が最も相関が高い（即ち規模が 2 倍になると価格は $2^{0.9}$ 倍 = 1.87 倍。相関係数は $R^2=0.966^{13}$ ）ため、そのように推計した。

減速航行については、IMarEST 文献に記載されている船価データをタンカー、バルカー、コンテナ等の 3 つに分類し、それぞれの分類ごとに総トン数で補正し、さらに、 $(V-\Delta V)/\Delta V$ で除することにより減速率に応じた用船コストの上昇を織り込んだ。

(2)ランニングコスト

本調査で検討した諸技術の中でランニングコストを要するものは空気潤滑及び減速航行（追加的な用船に伴う人件費、保険、修理費用等）である。空気潤滑については IMarEST 文献では毎日 0.3～0.5 トンの燃料消費を伴うとしており、このためタンカー、バルカー、コンテナ等の 3 つの分類のうち最大のものについて 0.5 トン/日を想定し、それ以外のものについては表面積に比例するとした、さらに各船種・クラスの days at sea を乗じて年間燃料消費量を算出した。

減速航行については、船員等のコストがかかるが、これらについては船舶の償却費と同等と見積もっている（償却期間については後述する）。

¹³ 陸上の施設では 0.6 乗則（規模が 2 倍→価格が 1.52 倍）が用いられることがあるが、それよりは規模と価格の関係が線形に近いことになる。これは船社ヒアリングでも確認されている。

表 4-15 技術価格の考え方

技術	一次データ	他のクラスへの適用
Stern duct-friction reduction	船社（タンカー、バルカー、コンテナ各 1 クラス）	IMO スタディに基づく主機出力の比率の 0.9 乗に比例するとした。
CRP	同上	同上
Stern duct-propulsion	同上	同上
Post-swirl system	同上	同上
Optimized. stern shape	同上	同上
Optimized superstructure	同上	同上
Low friction coating	IMarEST	全て IMarEST データ
Air lubrication	IMarEST	IMO スタディに基づく総トン数の比率の 0.5 乗に比例するとした。
減速航行 5%	IMarEST	IMarEST の船価データを適用し、ランニングコストについては船価と同等と考えた。

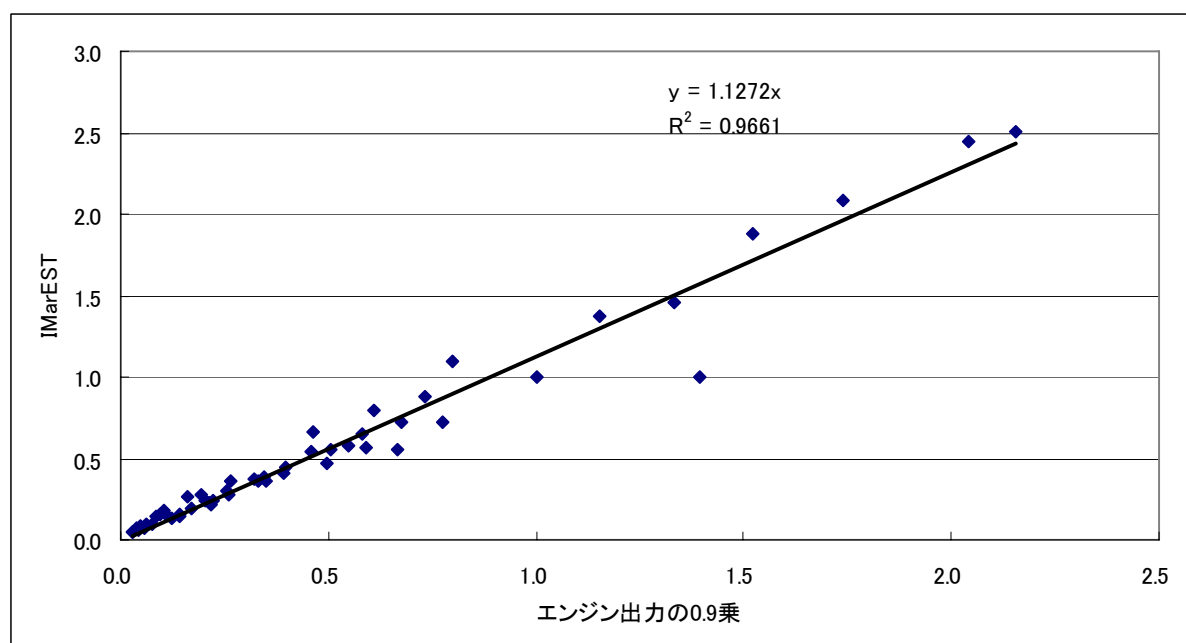


図 4-3 IMarEST の駆動系技術の価格データと IMO スタディにおけるエンジン出力の 0.9 乗との関係（VLCC の数値をを 1 とした相対値）

表 4-16 技術価格データ (USD/隻)

	Low friction coating	Stern duct-friction reduction	CRP	Stern duct-propulsion	Post-swirl system	Opt. superstructure	Air lubrication	Opt. stern shape	減速航行初期費用 (5%)
Crude oil tanker 200=<	697,375	200,000	4,000,000	200,000	200,000	32,000,000	2,163,205	0	7,105,263
Crude oil tanker 120-199	450,045	155,186	3,103,729	155,186	155,186	24,829,832	1,464,615	0	4,585,281
Crude oil tanker 80-119	356,575	132,808	2,656,152	132,808	132,808	21,249,215	1,159,040	0	3,947,368
Crude oil tanker 60-79	279,480	99,165	1,983,309	99,165	99,165	15,866,471	1,031,065	0	2,847,462
Crude oil tanker 10-79	202,105	69,792	1,395,841	69,792	69,792	11,166,725	626,906	0	2,059,134
Crude oil tanker <10	39,325	14,993	299,858	14,993	14,993	2,398,865	121,983	0	400,664
Products tanker 60=<	312,830	100,956	2,019,110	100,956	100,956	16,152,883	970,368	0	3,187,271
Products tanker 20-59	201,950	69,377	1,387,536	69,377	69,377	11,100,286	626,428	0	2,057,565
Products tanker 10-19	109,770	43,790	875,800	43,790	43,790	7,006,397	340,494	0	1,118,386
Products tanker 5-9	63,370	24,607	492,149	24,607	24,607	3,937,190	196,571	0	645,658
Products tanker <5	24,985	8,354	167,085	8,354	8,354	1,336,683	77,489	0	254,520
Chemical tanker 20=<	205,570	78,217	1,564,333	78,217	78,217	12,514,667	637,654	0	2,094,438
Chemical tanker 10-19	107,000	44,794	895,875	44,794	44,794	7,167,004	331,895	0	1,090,143
Chemical tanker 5-9	67,145	28,493	569,858	28,493	28,493	4,558,867	208,275	0	684,099
Chemical tanker <5	29,150	7,927	158,548	7,927	7,927	1,268,383	90,421	0	296,996
LPG tanker 50=<	299,350	109,374	2,187,475	109,374	109,374	17,499,802	1,575,000	0	3,049,980
LPG tanker <50	68,895	19,272	385,442	19,272	19,272	3,083,537	362,469	0	701,919
LNG tanker 200=<	636,790	266,786	5,335,729	266,786	266,786	42,685,835	4,200,000	0	6,487,960
LNG tanker >200	487,285	278,902	5,578,035	278,902	278,902	44,624,282	2,625,000	0	4,964,763
Other Tanker	38,635	9,136	182,730	9,136	9,136	1,461,837	208,109	0	393,604
Bulk carrier 200=<	568,265	340,961	5,114,413	340,961	340,961	34,096,089	3,740,490	0	5,000,000
Bulk carrier 100-199	460,790	293,792	4,406,881	293,792	293,792	29,379,207	1,494,090	0	2,894,737
Bulk carrier 60-99	279,810	200,000	3,000,000	200,000	200,000	20,000,000	921,750	0	1,757,780
Bulk carrier 35-59	220,055	161,933	2,428,989	161,933	161,933	16,193,263	724,913	0	1,382,411
Bulk carrier 10-34	148,840	127,647	1,914,712	127,647	127,647	12,764,750	490,317	0	935,037
Bulk carrier <10	37,510	24,846	372,696	24,846	24,846	2,484,638	123,567	0	235,642
General cargo 10=<	121,925	131,351	1,970,258	131,351	131,351	13,135,055	401,646	0	765,941
General cargo 5-9	67,650	71,955	1,079,326	71,955	71,955	7,195,506	222,855	0	424,985
General cargo <5	25,060	13,363	200,449	13,363	13,363	1,336,325	82,547	0	157,417
General cargo 10=<,*	150,710	134,543	2,018,149	134,543	134,543	13,454,324	496,477	0	946,784
General cargo 5-9,*	73,195	53,262	798,935	53,262	53,262	5,326,235	241,118	0	459,813
General cargo <5,*	47,005	29,850	447,754	29,850	29,850	2,985,026	154,839	0	295,278
Othre dry reefer	70,445	103,429	1,551,432	103,429	103,429	10,342,881	232,059	0	442,537
Other dry special	127,710	98,749	1,481,235	98,749	98,749	9,874,903	420,707	0	802,289
Container 8kTEU+	519,440		5,000,000			47,000,000	2,061,375	500,000	7,327,344
Container 5kTEU+	410,420		4,029,522			37,877,507	1,674,435	395,060	5,789,474
Container 3kTEU+	306,295		2,677,346			25,167,056	1,408,075	294,831	4,320,653
Container 2kTEU+	229,350		1,694,391			15,927,276	1,269,060	220,766	3,235,253
Container 1kTEU+	155,785		1,065,359			10,014,379	861,987	149,951	2,197,489
Container <1kTEU	87,900		374,515			3,520,438	486,382	84,611	1,239,948
Vehicle 4kCEU+	333,770		1,373,832			12,914,023	1,846,863	321,280	4,708,263
Vehicle <4kCEU	180,855		765,189			7,192,779	1,000,701	174,082	2,551,117
Ro-Ro 2000+lm	209,990		1,069,426			10,052,608	1,161,936	202,130	2,962,157
Ro-Ro <2000+lm	56,145		197,674			1,858,138	310,661	54,043	791,978
Ferry Pax only 25kn	10,855		256,155			2,407,853	60,075	10,451	153,151
Ferry Pax only <25kn	12,910		126,661			1,190,613	71,457	12,431	182,167
Ferry RoPax 25kn	127,140		1,855,199			17,438,866	703,491	122,379	1,793,432
Ferry RoPax <25kn	67,835		496,021			4,662,600	375,362	65,298	956,921
Cruise 100+GT	583,130		4,736,229			44,520,556	3,226,638	561,306	8,225,767
Cruise 60-99	445,685		3,529,308			33,175,498	2,466,115	429,006	6,286,942
Cruise 10-59	230,370		1,417,753			13,326,877	1,274,721	221,750	3,249,684
Cruise 2-9	69,055		399,609			3,756,327	382,118	66,473	974,145
Cruise 0-2	18,345		71,019			667,580	101,525	17,661	258,820
Service (research)	9,708		37,298			350,598	185,507	24,037	472,918
Service (Tug)	1,627		42,526			399,745	57,204	7,412	145,831
Service (Dredging)	3,694		10,460			98,325	224,931	29,145	573,423
Service (SAR)	560		13,475			126,667	86,554	11,215	220,655
Service (Workboats)	9,550		5,449			51,224	179,274	23,229	457,029
Service (Other)	4,538		98,135			922,473	163,674	21,208	417,259
Misc (Fishing)	1,070		7,884			74,114	61,468	7,965	156,703
Misc (Trawlers)	717		101,357			952,758	94,959	12,304	242,082
Misc (Other fishing)	12,296		105,645			993,065	158,498	20,537	404,064
Misc (Other)	12,127		228,259			2,145,638	679,220	88,009	1,731,555

(3)その他

船用燃料価格は省エネ効果を考える上で重要である。本調査では IMO スタディと DNV 文献同様に、船用燃料価格 500 ドル/トンとおいた。また、感度解析ケースとして、MARPOL 条約の改正に基づく SO_x 規制対応のため 2020 年から燃料価格が 1,000 ドル/トンに倍増したケースも想定した。なお石油以外の燃料（ガス、電気）は 2020 年においても船舶に占める割合が小さいと想定されるために考慮していない。

4.7.2 経済計算パラメータ

経済計算パラメータとして割引率及び計算年数が挙げられるが、これらについては以下のように考える。

(1)割引率

割引率については、社会資本の損益分析等には 4～5%が使われていると想定される。前述の文献のうち、IMO スタディと IMarEST 文献は 4%、DNV 文献は 5%を用いている。しかし RITE や IEA ETP 等の分析において取られている民間企業の視点から見ると、より高い率を用いるべきとも思われる。現状の経済情勢を見ると、民間企業の視点からは割引率を 10%程度とおくのが妥当と思われる。これは世界で標準的に用いられる米国の経済指標を用いて加重平均資本コスト（WACC）を算出した場合の結果に近い。ただし日本の場合は基準指標となる国債利回りや金利はいずれも低いため、5%という数字も想定できる。毎年 1 億円の収益が生じる対策を 20 年行った場合、総収益の NPV は割引率 10%では 9.4 億円、5%では 13.1 億円と算出される。

(2)計算年数

NPV を計算する年数については、短ければ短いほど投資回収期間が短いため、MAC が高めに算出される。オペレーターに傭船する船主の視点から見ると投資回収期間は 5～10 年程度と想定されるが、船主でありオペレーターでもある企業は船舶を通常 20～30 年程度は稼働させる。従って割引率と同様、年数についても複数のケースを考慮すべきであるが、短い年数で投資回収を考える企業は割引率も高いため、実際は「低い割引率と長い年数」のケースと「高い割引率と短い年数」のケースを設定すべきであろう。前者は社会資本、後者は民間企業の観点から投資回収を考える場合に適している。

4.8 MAC の算出

以上に基づき、次のようにして MAC を算出する。

- ・ 技術毎、船種・クラス毎、建造年次毎にコストと便益の表を作成する。
- ・ それらを集計し、NPV を求める。
- ・ 併せて温室効果ガス排出削減量を算出し、合計する。
- ・ 上記より MAC を算出する

例を以下に示す。例えば、ある船種・クラスに対して投資コスト 30,000 USD、船用燃料価格を 500USD／トンとして、毎年の省エネ効果がコストにして 5,000USD（≒ 10 トン）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、4,000USD（≒ 8 トン）に低下するとさらに仮定する。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 1 トン燃料≒約 3t・CO₂と近似して 30t・CO₂、2014 年に導入された船舶は 24t・CO₂と算出される。この場合の費用便益は下記のようになる。

表 4-17 NPV 算出データベース（期間 20 年、単位 1000 ドル）

年	年間排出削減量 (t・CO ₂)	費用便益												
		2008	...	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	...	2031	2032	2033
船種・クラス A (2012 年建造)	30	0	...	-30	5	5	5	5	5	5	...	5	0	0
同 (2013 年建造)	30		...		-30	5	5	5	5	5	...	5	5	0
同 (2014 年建造)	24		...			-30	4	4	4	4	...	4	4	4
合計		0	0	-30	-25	-20	14	14	14	14	...	14	9	4

この場合の正味現在価値 NPV の計算は、上表の「合計」欄を対象に、下記のように行う。稼働期間が 20 年の場合は、

$$NPV = \frac{1}{(1+r)^4} \times (-30) + \frac{1}{(1+r)^5} \times (-25) + \frac{1}{(1+r)^6} \times (-20) + \frac{1}{(1+r)^7} \times (14) + \dots + \frac{1}{(1+r)^{26}} \times (4) \quad (11)$$

となる。ここで r は割引率である。割引率と対象期間に応じて、NPV は次の表のように大きく変動する¹⁴。

¹⁴ 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、NPV を 2008 年時点で検討すべきではないとする指摘もある (CE Delft の Dr. Jasper Faber)。ただしこのようにすると厳密には現在価値とはならない可能性がある。これについては今後検討する必要がある。投資判断時点で NPV を計算する手法を採用すると、本調査での手法に比べて NPV (及び MAC) の正負は変わらないが、割り引かない分大きく算出される。その度合いは 1.4 倍程度 (割引率 5%)、2 倍程度 (割引率 10%) と想定される。

表 4-18 NPV の変動（上記より算出、単位 1000 ドル）

期間 \ r (割引率)	5%	10%	15%
20 年	66.7	18.7	-0.8
10 年	14.5	-2.1	-9.5

表 4-18 において NPV が正の値を取るということは対象期間全体では便益となるということで、ネガティブコストの状態である。また期間を 20 年及び 10 年とおいた場合の CO₂ の排出削減量はそれぞれ、

$$ER = (30 + 30 + 24) \times 20 = 1,680 \quad (20 \text{ 年}) \quad (12)$$

$$ER = (30 + 30 + 24) \times 10 = 840 \quad (10 \text{ 年}) \quad (13)$$

(単位 t-CO₂)

のように算出される（温室効果ガス排出削減量は通常は割り引かれない）。結果として MAC は下記のとおり。

表 4-19 MAC の変動（ドル/t-CO₂）

期間 \ r (割引率)	5%	10%	15%
20 年	-66.7/1.68=- 39.7	-18.7/1.68=- 11.1	0.8/1.68= 0.5
10 年	-14.5/0.84=- 17.2	2.1/0.84=2.5	9.5/0.84=11.4

4.9 結果

上記の推計による MAC 算出の結果について以下に示す。

4.9.1 想定ケース

本調査に基づく MAC 算出に関して、想定する経済パラメータのケースとして下記の 2 つを想定する。

- ・ ケース A：期間 20 年、r=5%
- ・ ケース B：期間 10 年、r=10%

前述した文献にもあるように、5%という割引率はリスクフリーレートに近く、従って船舶を一種の公共資本として見ることを想定している。これに対して後者は海運会社を含む民間企業の実態に近い。従って NPV 及び排出削減量を計上する期間もこれ

らを反映し、ケース A は船舶の耐用年数、ケース B は企業の投資回収年数を想定して設定すべきである。以上のような想定に基づき上記 2 ケースの設定を行った。

4.9.2 MAC の算出結果

技術別の MAC (USD/t-CO₂) 及び排出削減ポテンシャル (Mt-CO₂) は以下のとおりである。

(1) ケース A

表 4-20 MAC の算出 (ケース A)

	Low friction coating	Stern duct-friction reduction	CRP	Stern duct-propulsion	Post-swirl system	Opt. superstructure	Air lubrication	Opt. stern shape	5%減速航行
NPV	13,821	1,829	4,181	4,508	4,082	-22,305	3,278	27,139	60,620
年間排出削減量	11.5	2.0	18.5	4.0	4.0	12.0	3.0	19.3	111.9
合計排出削減量	230.0	39.9	370.3	79.8	79.8	239.6	59.0	386.9	2,238.8
MAC	-60.1	-45.8	-11.3	-56.5	-51.2	93.1	-55.6	-70.1	-27.1

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

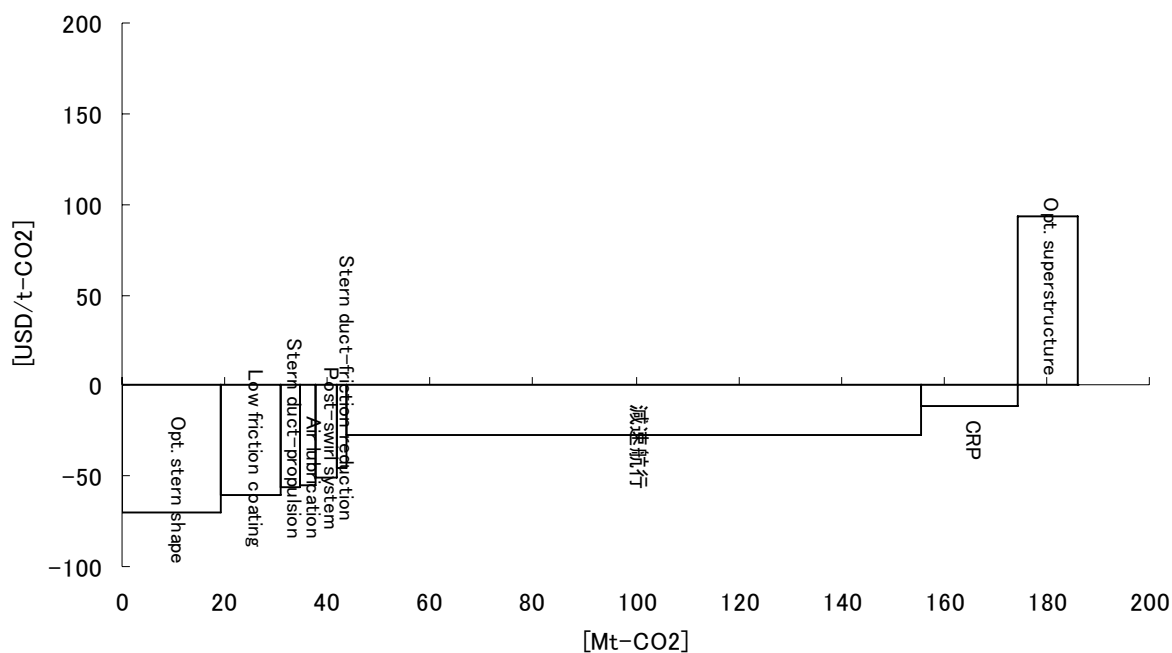


図 4-4 MAC の算出 (ケース A)

(2) ケース B

表 4-21 MAC の算出（ケース B）

	Low friction coating	Stern duct-friction reduction	CRP	Stern duct-propulsion	Post-swirl system	Opt. superstructure	Air lubrication	Opt. stern shape	5%減速航行
NPV	4,042	323	-5,705	1,226	936	-17,177	614	9,701	-27,466
年間排出削減量	11.5	2.0	18.5	4.0	4.0	12.0	3.0	19.3	111.9
合計排出削減量	115.0	19.9	185.2	39.9	39.9	119.8	29.5	193.5	1,119.4
MAC	-35.2	-16.2	30.8	-30.7	-23.5	143.4	-20.8	-50.1	24.5

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

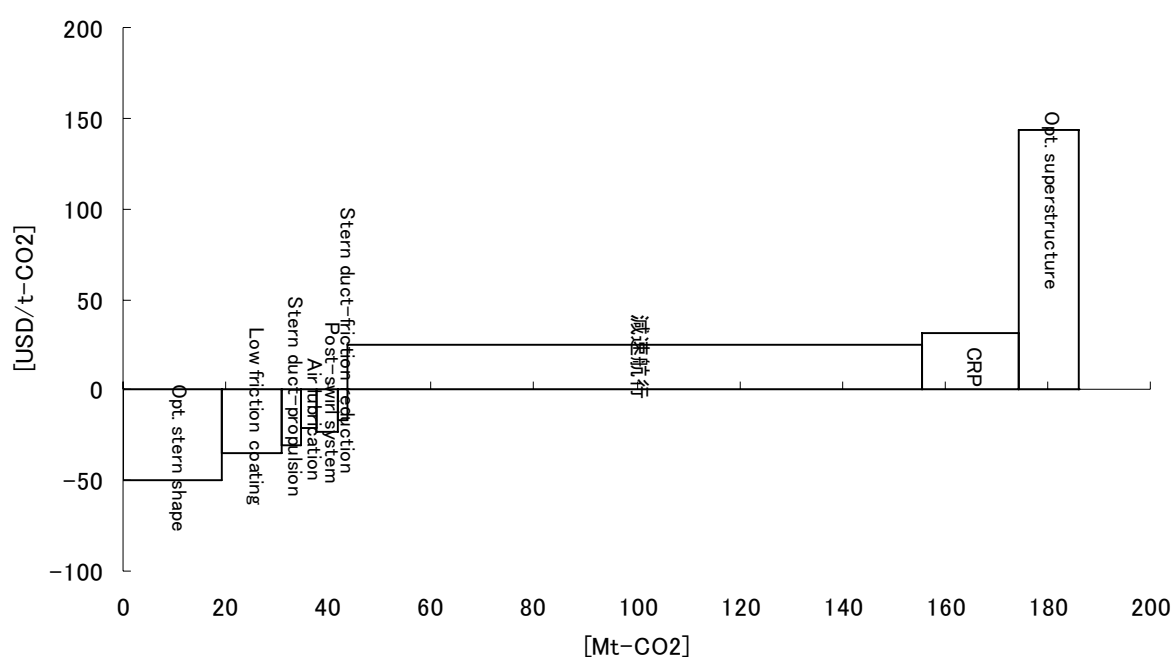


図 4-5 MAC の算出（ケース B）

以上の図に見るように、ケース A とケース B とでは MAC が大きく異なる。ケース A では Optimal superstructure を除く全ての技術について MAC がマイナスと算出されるがケース B では減速航行を含むいくつかの技術の NPV はプラスとなり、従って限界排出削減コストが生じる。最大では約 140USD/t-CO₂になる。これは割引率の影響が大きいという既存文献の結論を裏付けるものである。

4.9.3 感度分析

上記のように算出した MAC に対して、いくつかの感度分析を行った。具体的には次のとおりである。

- ・ 排出削減率の補正を行わない

- ・ 油価上昇
- ・ 技術革新によるパフォーマンス向上
- ・ 量産効果による価格低下

これらについて以下に示す。なお他のパラメータはケース A に統一した。

(1)排出削減率の補正を行わない

各技術の排出削減率の補正を行わず、MEPC60/4/36 の原典に記載された数値のままとした場合について以下に示す。

表 4-22 MAC の算出（ケース A：排出削減率の補正を行わない）

	Low friction coating	Stern duct-friction reduction	CRP	Stern duct-propulsion	Post-swirl system	Opt. superstructure	Air lubrication	Opt. stern shape	5%減速航行
NPV	31,895	4,729	31,236	10,309	9,884	4,040	8,923	59,760	48,843
年間排出削減量	24.3	4.1	38.7	8.3	8.3	34.9	5.8	41.3	103.0
合計排出削減量	486.6	82.9	773.4	165.9	165.9	697.6	116.4	825.6	2,060.0
MAC	-65.5	-57.0	-40.4	-62.2	-59.6	-5.8	-76.7	-72.4	-23.7
MAC(基本ケース参考)	-60.1	-45.8	-11.3	-56.5	-51.2	93.1	-55.6	-70.1	-27.1

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

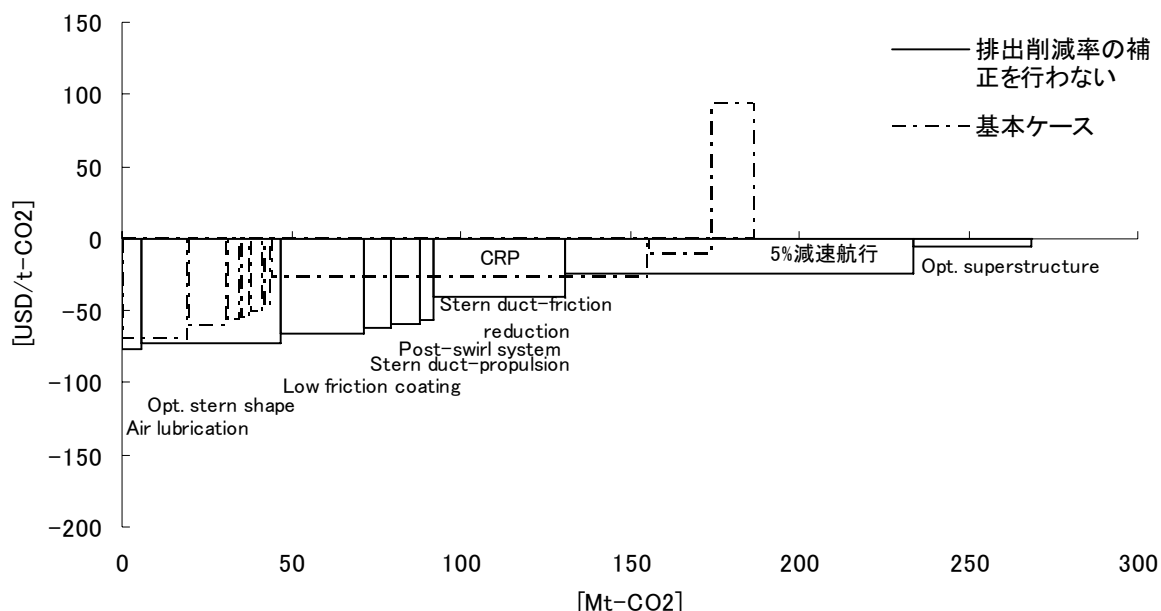


図 4-6 MAC の算出（排出削減率の補正を行わないケース）

(2)油価上昇

MARPOL 条約に基づく SOx 規制強化により 2020 年から船用燃料中の硫黄分濃度が現状の 4%程度から 0.5%まで大幅に下げられる。この影響として油価が上昇することが考えられる。上記ケース A(船舶燃料価格を 500 ドル/トンとして計算)に対して、船舶燃料価格を 2019 年までは 500 ドル/トン、2020 年からは 1,000 ドル/トンとすることによりこの影響を試算した。

表 4-23 MAC の算出（ケース A：油価上昇）

	Low friction coating	Stern duct-friction reduction	CRP	Stern duct-propulsion	Post-swirl system	Opt. superstructure	Air lubrication	Opt. stern shape	減速航行
NPV	24,777	3,817	22,175	8,484	8,059	-9,039	8,523	44,610	149,078
年間排出削減量	11.5	2.0	18.5	4.0	4.0	12.0	3.0	19.3	111.9
合計排出削減量	230.0	39.9	370.3	79.8	79.8	239.6	59.0	386.9	2,238.8
MAC	-107.7	-95.7	-59.9	-106.3	-101.0	37.7	-144.4	-115.3	-66.6
MAC(基本ケース 参考)	-60.1	-45.8	-11.3	-56.5	-51.2	93.1	-55.6	-70.1	-27.1

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

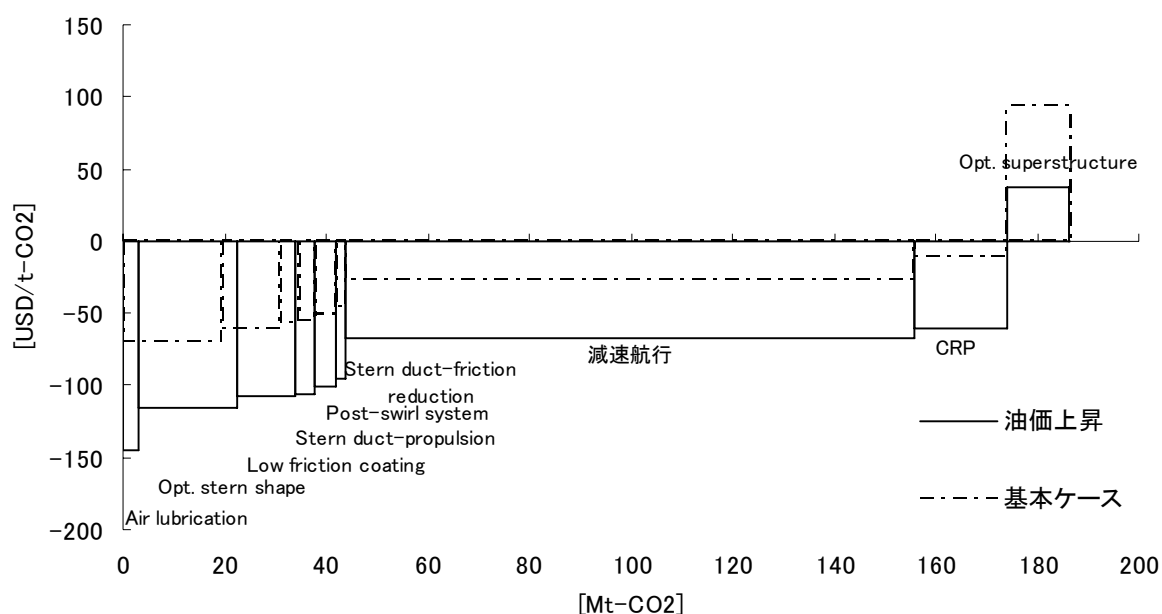


図 4-7 MAC の算出（油価上昇ケース）

(3)技術革新による性能向上

個別技術の導入が進む段階で、性能が向上する可能性がある。削減率が導入時と比較して年 3%ずつ向上した場合の結果を以下に示す¹⁵。

表 4-24 MAC の算出（ケース A：技術革新による性能向上）

	Low friction coating	Stern duct-friction reduction	CRP	Stern duct-propulsion	Post-swirl system	Opt. superstructure	Air lubrication	Opt. stern shape	減速航行
NPV	14,341	1,914	4,968	4,678	4,253	-22,312	3,259	28,593	60,314
年間排出削減量	11.9	2.1	19.2	4.1	4.1	12.0	2.9	20.4	111.7
合計排出削減量	238.0	41.3	383.0	82.5	82.5	239.5	58.8	408.9	2,234.0
MAC	-60.6	-47.4	-16.2	-57.0	-52.2	93.3	-55.1	-69.5	-26.8
MAC(基本ケース 参考)	-60.1	-45.8	-11.3	-56.5	-51.2	93.1	-55.6	-70.1	-27.1

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

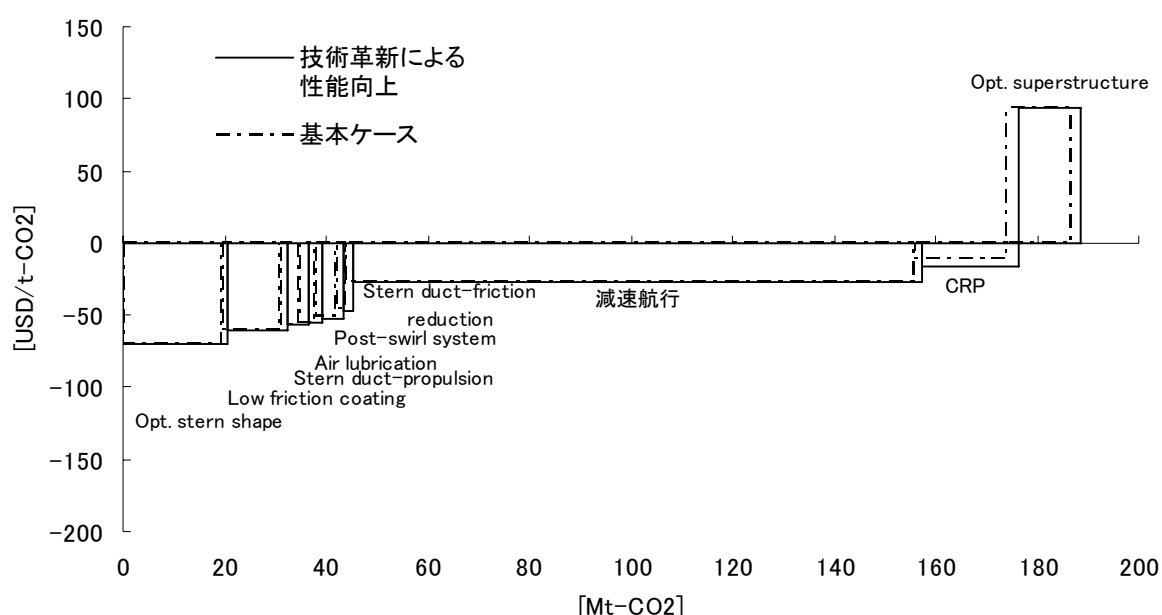


図 4-8 MAC の算出（技術革新による性能向上ケース）

上記より、年 3%程度の効率向上では MAC にほとんど影響を及ぼさないことが示唆される。なおパフォーマンスの向上により MAC が低下する対策と、パフォーマンスが向上するにも関わらず MAC が上昇する対策があるが、例えば CRP は効率の向上が効いて MAC が大きく低下するのに対して、技術的対策に劣後して効率が試算される減速航行では MAC が逆に増加している。

¹⁵ なお Second IMO Greenhouse Gas Study 2009 では 2007 年から 2020 年にかけての技術的効率向上率は高位推計で 4%、低位推計で 0%であり、高位と低位の差は年率約 0.3%に相当する。

(4) 量産効果による価格低下

同様に、導入が量産効果をもたらし、価格が低下することが考えられる。毎年の価格低下率を 5%¹⁶とおくと、下記のようなになる。

表 4-25 MAC の算出（ケース A：量産効果による価格低下）

	Low friction coating	Stern duct-friction reduction	CRP	Stern duct-propulsion	Post-swirl system	Opt. superstructure	Air lubrication	Opt. stern shape	減速航行
NPV	14,456	2,062	9,828	4,741	4,432	-20,541	3,278	27,650	60,620
年間排出削減量	11.5	2.0	18.5	4.0	4.0	12.0	3.0	19.3	111.9
合計排出削減量	230.0	39.9	370.3	79.8	79.8	239.6	59.0	386.9	2,238.8
MAC	-62.9	-51.7	-26.5	-59.4	-55.5	85.7	-55.6	-71.5	-27.1
MAC(基本ケース 参考)	-60.1	-45.8	-11.3	-56.5	-51.2	93.1	-55.6	-70.1	-27.1

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

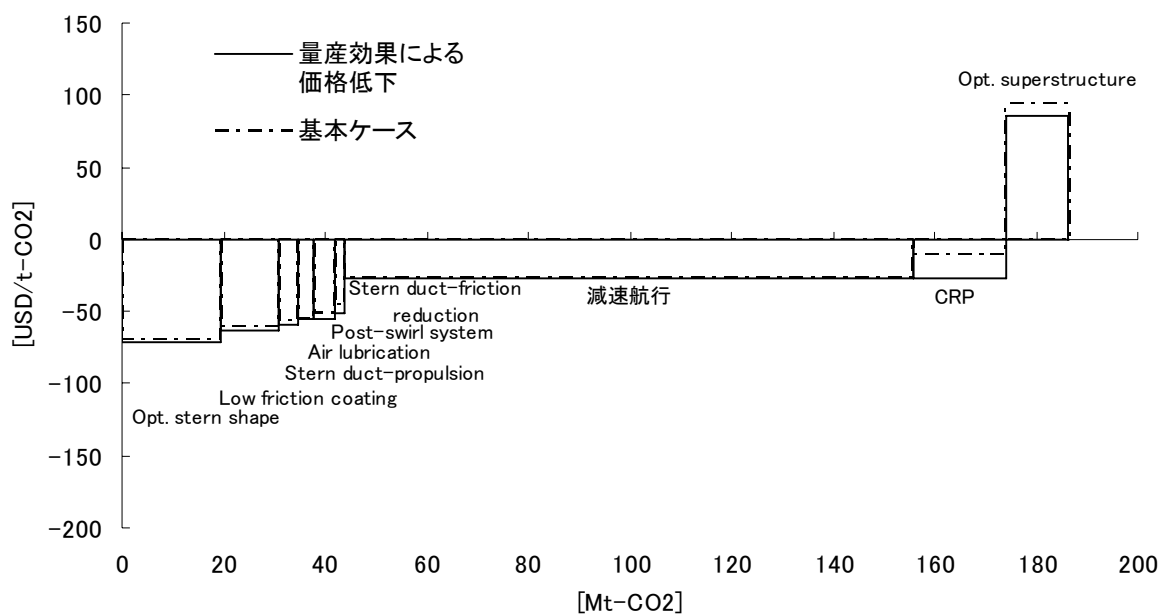


図 4-9 MAC の算出（量産効果による価格低下）

価格低下はコスト要因の低下を通じて NPV を向上させるため、MAC は改善するが、10%程度の変化でも比較的軽微である。なお減速航行は技術導入を伴わず、また空気潤滑は 2020 年からの導入であるため、影響は見られない。導入期間が長く、かつ設備費の影響が大きい CRP について改善が大きい、これは 2020 年という区切りの問題である。

¹⁶ IMarEST 文献での空気潤滑及び排熱回収の新技术の習熟による性能向上または新技术の価格の低下率（learning rate）は 5 年間で 10%～15%とされている。

4.9.4 船種別とりまとめ

船種（タンカー、バルカー、コンテナ、その他）別に見ると、5%減速航行の場合は以下ようになる。船種間で MAC に大差はないように見える。しかしケース B ではタンカーの MAC が大きく影響を受ける。この原因として、タンカーの船価が他より高く算出されている可能性がある。

表 4-26 船種別 MAC の算出（5%減速航行）

	NPV (100 万ドル)	年間排出削減量 (Mt-CO ₂)	合計排出量 (Mt-CO ₂)	MAC (USD/t-CO ₂)	MAC (USD/t-CO ₂)
ケース	A	A/B	A	A	B
Tanker	5,292	22.9	457.3	-11.6	51.8
Bulker	21,033	29.4	588.8	-35.7	11.2
Container	27,254	36.7	733.7	-37.1	5.4
Other	7,041	22.9	458.9	-15.3	45.1
合計	60,620	111.9	2,238.8	-27.1	24.5

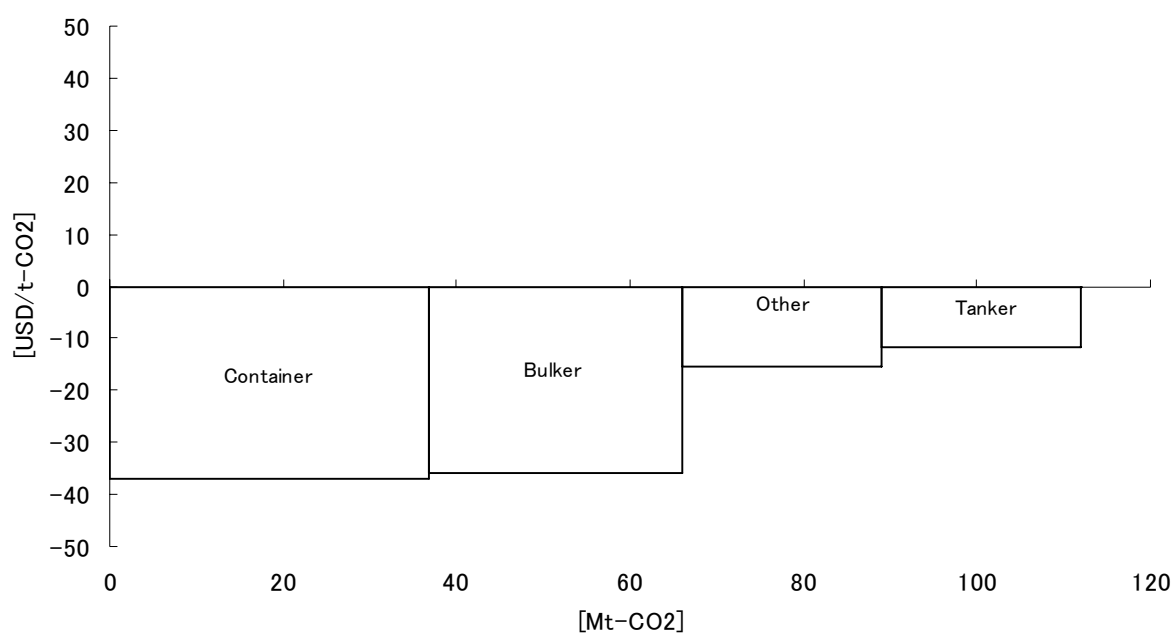


図 4-10 船種別 MAC の算出（ケース A、5%減速航行）

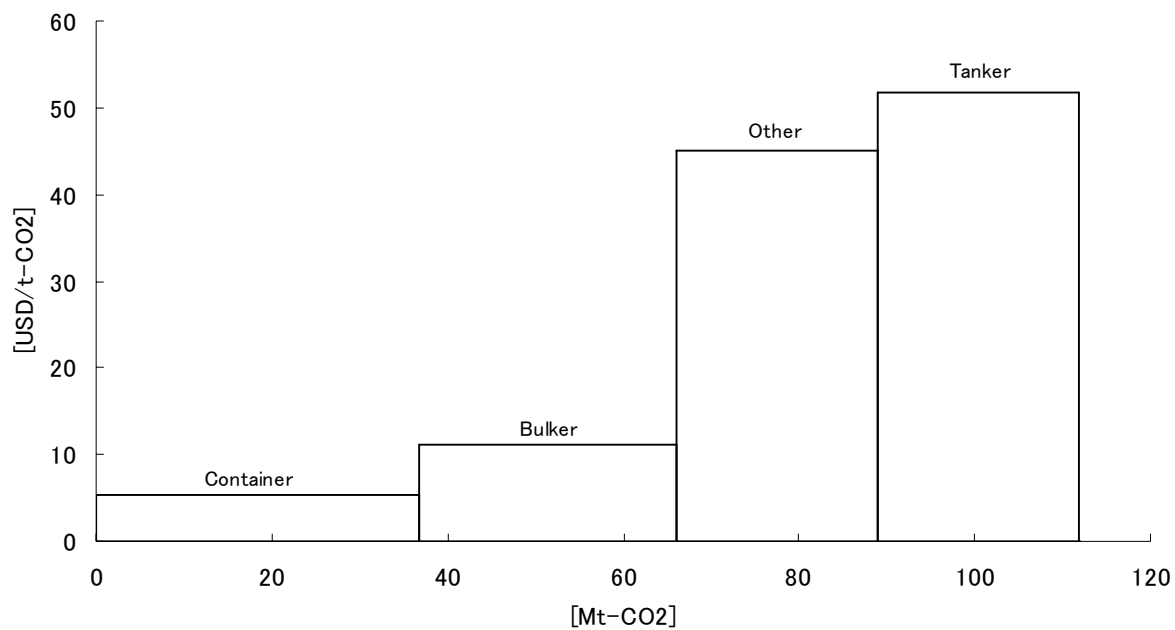


図 4-11 船種別 MAC の算出（ケース B、5%減速航行）

船種・クラス別に算出すると表 4-27 のようになる。船種・クラスごとには大きな差は見られないが、このレベルの細分化になると、個々の船種・クラスのデータに大きく左右される可能性がある。

表 4-27 船種・クラス別 MAC の算出（ケース A）

	Low friction coating	Stern duct-friction reduction	CRP	Stern duct-propulsion	Post-swirl system	Opt. superstructure	Air lubrication	Opt. stern shape	Total w/o speed reduction
Crude oil tanker 200=<	-53.7	-55.5	-9.7	-61.2	-58.3	50.8	-25.9		-5.8
Crude oil tanker 120-199	-55.9	-55.0	-8.1	-60.8	-57.9	53.7	-29.5		-15.5
Crude oil tanker 80-119	-54.9	-53.1	1.2	-59.9	-56.5	71.3	-28.0		2.8
Crude oil tanker 60-79	-61.7	-61.2	8.9	-69.9	-65.6				10.1
Crude oil tanker 10-79									2.9
Crude oil tanker <10	-51.4	-49.6	20.1	-58.4	-54.0	107.7	-25.1		23.9
Products tanker 60=<	-48.9	-50.2	15.0	-58.4	-54.3	97.5	-21.8		32.6
Products tanker 20-59	-46.8	-47.5	29.1	-57.1	-52.3	124.3	-18.3		55.3
Products tanker 10-19									30.3
Products tanker 5-9	-51.7	-49.5	20.1	-58.2	-53.9	107.7	-25.7		22.8
Products tanker <5	-48.0	-49.0	23.2	-58.1	-53.6	113.5	-19.7		45.5
Chemical tanker 20=<	-57.4	-55.1	-9.4	-60.8	-58.0	51.1	-33.8		-22.1
Chemical tanker 10-19	-58.3	-54.9	-8.1	-60.7	-57.8	53.8	-35.4		-26.5
Chemical tanker 5-9	-58.6	-55.0	-7.7	-61.0	-58.0	54.9	-35.7		-24.5
Chemical tanker <5									19.5
LPG tanker 50=<	-57.2	-55.4	-10.4	-61.0	-58.2	49.3	-21.1		-22.6
LPG tanker <50	-51.1	-54.0	-2.2	-60.5	-57.3	65.3	-7.2		11.4
LNG tanker 200=<	-61.8	-58.2	-9.1	-64.3	-61.3	55.9	-19.5		-24.3
LNG tanker >200	-65.5	-58.7	-11.5	-64.6	-61.7	51.5	-35.4		-45.6
Other tanker	-47.2	-53.7	-1.8	-60.2	-56.9	65.6	3.3		29.6
Bulk carrier 200=<	-50.6	-38.8	37.6	-52.6	-45.7	107.5	9.8		-2.3
Bulk carrier 100-199	-51.8	-38.7	37.8	-52.6	-45.7	107.8	-19.5		-29.0
Bulk carrier 60-99	-53.6	-38.4	39.1	-52.5	-45.5	109.9	-23.0		-35.7
Bulk carrier 35-59	-53.9	-38.1	40.4	-52.4	-45.2	111.9	-23.9		-36.6
Bulk carrier 10-34	-56.0	-37.6	42.8	-52.2	-44.9	115.6	-28.0		-44.2
Bulk carrier <10	-48.3	-31.9	65.0	-49.5	-40.7	151.0	-16.5		-15.6
General cargo 10=<	-59.2	-38.4	39.7	-52.6	-45.5	110.7	-34.2		-54.7
General cargo 5-9	-59.2	-38.4	40.1	-52.7	-45.6	111.8	-33.8		-50.7
General cargo <5	-46.8	-36.7	47.1	-51.9	-44.3	122.7	-13.6		-14.8
General cargo 10=<,*	-57.1	-38.1	42.4	-52.7	-45.4	114.6	-29.8		-49.1
General cargo 5-9,*	-52.5	-35.9	49.3	-51.4	-43.6	126.4	-24.3		-26.8
General cargo <5,*	-47.7	-32.2	63.6	-49.7	-41.0	148.7	-15.3		-13.9
Othre dry reefer	-62.3	-37.4	45.3	-52.4	-44.9	119.7	-39.5		-64.2
Other dry special	-54.4	-37.3	44.6	-52.2	-44.7	118.8	-25.4		-37.5
Container 8kTEU+	-63.9		-33.1			108.8	-42.9	-63.5	-38.7
Container 5kTEU+	-64.2		-33.3			107.7	-42.9	-82.3	-44.3
Container 3kTEU+	-63.6		-33.7			106.0	-40.1	-70.0	-40.5
Container 2kTEU+	-62.4		-33.0			109.9	-33.8	-87.7	-33.9
Container 1kTEU+	-61.7		-32.8			110.7	-31.7	-67.3	-27.8
Container <1kTEU	-55.5		-29.6			127.0	-16.1	-104.3	15.3
Vehicle 4kCEU+	-56.8		-34.4			102.3	-16.9	-61.9	3.5
Vehicle <4kCEU	-57.4		-34.4			102.9	-18.2	-102.8	-0.7
Ro-Ro 2000+lm	-59.0		-33.3			107.7	-25.1	-65.0	-10.6
Ro-Ro <2000+lm	-53.2		-30.6			123.3	-9.0	-71.1	33.2
Ferry Pax only 25kn	-68.3		-36.5			94.3	-50.0	-70.2	-71.1
Ferry Pax only <25kn	-65.0		-35.0			101.7	-40.3	-72.5	-49.4
Ferry RoPax 25kn	-66.8		-35.5			99.1	-46.0	-68.0	-58.1
Ferry RoPax <25kn	-62.9		-33.2			111.6	-33.6	-70.2	-34.9
Cruise 100+GT	-63.3		-35.6			96.9	-37.1	-91.9	-41.0
Cruise 60-99	-62.6		-32.9			110.6	-35.6	-68.1	-36.5
Cruise 10-59	-60.2		-31.3			119.0	-28.6	-77.8	-19.9
Cruise 2-9	-61.8		-30.0			136.2	-24.0	-565.7	-8.6
Cruise 0-2	-52.2		-26.0			145.3	-8.2	-58.3	41.0
Misc (Trawlers)	-65.3		-55.8			-3.6	-11.2	-60.4	33.9
Misc (Other fishing)	-68.8		-50.3			23.7	-37.2	-64.5	-39.4
Misc (Other)	-68.0		-63.4			-40.8	2.9	-163.2	78.1

本調査における MAC 試算の結論として、船舶の耐用年数程度の期間で投資回収を図ると経済的な便益をもたらす多くの温室効果ガス排出削減技術が存在するものの、それより短期的視点で利潤最大化を図ろうとする民間企業の投資インセンティブが必ずしも存在しないため、それらの技術が導入されていない可能性があることを示した。これは本調査でも分析した DNV、IMarEST 文献及び IMO スタディにおける MAC 算出の結果と概ね一致する。また、技術革新による新技術の性能向上や価格低下はそれ

それに影響を持つが、2020 年までの効果は限定的である。これに対して SO_x 規制対応等による油価上昇の効果は大きく、省エネ・低排出技術導入へのインセンティブを高めることがわかった。

5 考察とまとめ

5.1 検討結果のまとめ

本事業では、主な知見として以下が得られた。

まず、多くの技術については MAC がマイナスに算出されることがわかった。このことはこれらの技術の導入が経済的にメリットのあることを示唆している。

ただしこのような現象は、割引率及び償還期間といった経済パラメータを社会資本のそれに近似した場合に顕著である（割引率 5%、償還期間 20 年）。これらを民間企業の投資感覚により近づけた値（割引率 10%、償還期間 10 年）とした場合、これら技術の MAC がマイナスとなる技術の多くについては MAC が上昇し、一部の技術についてはプラスに転じるものもある。後者の場合は、これら省エネルギー・低排出技術の多くが投資対象として魅力的ではないと評価されることであり、社会資本としての船舶の位置づけと、民間企業の投資対象としての船舶の位置づけが大きく異なることを示唆している。このように長期的には利益をもたらすものであっても短期・中期的には損失をもたらす可能性が高い場合、技術の導入が進まない原因となりうる。

加えて船舶に特徴的な課題として、船舶に投資する主体（船主）と、燃料費を負担する主体（海運事業者）が必ずしも一致しないことが挙げられる。この場合、省エネルギー・低排出技術に対する投資インセンティブが機能しにくい。このような技術を新造船に盛り込むことが船舶の価格増につながったとしても、海運事業者が長期的なコスト削減効果を考慮して傭船の判断を行うことが出来れば、船主はそれら技術を盛り込むことが可能であるが、現実には船舶の価格決定において省エネ性能の考慮は限定的であると考えられる。なお似たような課題は、賃貸の比率が多い住宅部門についても該当する。

結論として、海運事業においては船舶の耐用年数程度の期間を考えると経済的な便益をもたらす多くの温室効果ガス排出削減技術が存在するものの、それより短期的視点での利潤最大化を図ろうとする民間企業の投資インセンティブが必ずしも存在しないため、それらの技術が導入されていない可能性があることを示した。これは本調査でも分析した DNV、IMarEST 文献及び IMO スタディにおける MAC 算出の結果と概ね一致する。また、技術革新による新技術の性能向上や価格低下はそれぞれに影響を持つが、2020 年までの効果は限定的である。これに対して SO_x 規制対応等による油価上昇の効果は大きく、省エネ・低排出技術導入へのインセンティブを高めることがわかった。

5.2 今後の課題

本調査において算出した MAC の数値の妥当性は、その算出の根拠となったデータ（削減率等の技術データ、価格データ、経済的パラメータ）に依存する。これらについては最新の知見を反映し、継続した精査を行うことが望ましい。対象となりうる技術についても、本調査で述べた以外にもエンジン関係の技術（コモンレール）、メンテナンス技術（Underwater hydroblasting）、航行技術（ウェザールーティング）、先進的な駆動技術（スカイセイル等）等多数あり、これらについて適宜検討対象に加えていくことは意義があると考えられる。

方法論的には、技術間の相互干渉あるいは相乗効果等に関しても、対象技術の種類を増やすにつれ、より厳密な考慮を行う必要性が高まると考えられる。減速航行については、本調査では船種・クラス毎に IMO スタディに記載された days at sea は不変としているが、港湾滞在時間短縮等の効果によって新規の船舶需要を減じる取組みが行われる可能性もある。また、本調査では（海外諸機関による調査と同様）補機及びボイラでの燃料消費は航行中及び停泊中も不変としているが、停泊中の補機停止等が行われることも考えられる。これらはいずれも減速航行のコストを引き下げる方向に作用し、その意味で本事業における減速航行の MAC はやや高めに算出されている可能性がある。

用 語 集

1. 海運・国際運輸関係

EEDI	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、 $\{\text{主機及び補機の出力 (kW)}\} \times \{\text{出力あたり燃料消費量 (t-fuel/kWh)}\} \times \{\text{燃料の CO}_2\text{排出係数 (t-CO}_2\text{/g-fuel)}\} \div \{\text{重量 (DWT)} \times \text{速度 (mile/hr)}\}$ であり、t-CO ₂ /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。遵守義務付けに関しては今後の検討事項となる。
EEOI	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 CO ₂ 排出量を示す指標。算出式は $\{\text{CO}_2\text{排出量 (t-CO}_2\text{)}\} \div \{\text{輸送量 (tonne-mile)}\}$
IMO	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/
MARPOL 条約	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。 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。
MEPC	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。

2. 経済分析関係

加重平均資本コスト (Weighted Average Cost of Capital : WACC)	企業等にとっての資本の調達コストを算出する方法。資本を株式等の投資によるものと、銀行等の融資によるものに分類し、それぞれの調達コストを推計し、加重平均する。 投資の調達コストは即ち株主が求める期待利回りであり、融資の調達コストは銀行、債権の金利である。従って WACC はある企業にとって、その企業の資本構造から導かれる達成すべき利回りを指す。期待収益率が WACC を下回る投資はすべきではなく、従って WACC は企業にとっての割引率 (後述) と等価となる。
--	---

限界排出削減費用 (Marginal Abatement Cost : MAC)	温室効果ガスの排出削減対策・技術は、コストの低いものから行われると考えるのが自然であるが、そのような前提に基づき、追加的に温室効果ガスを 1 トン削減するのに必要なコストを指す。横軸に削減できる温室効果ガスの量を取り、限界排出削減費用を、対策・技術ごとにそれぞれの排出削減量に応じて列記すると、一連の対策・技術について排出削減量とコストの関連が図示でき、対策コスト（＝対策コストを実現するための CO₂ 価格）あたりの排出削減量がわかる。これを限界排出削減費用曲線（MAC カーブ、MACC）と言う。 MAC は前提として用いる対策・技術の種類やコスト、想定削減率及び経済指標（割引率）や関連するパラメータ（石油価格等）により変動する。
資本資産評価モデル (Capital Asset Pricing Model : CAPM)	前述の加重平均資本コスト（WACC）算出の過程で用いられる、ある企業にとっての株主資本コスト（投資コスト）算出手法。
正味現在価値(Net Present Value : NPV)	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、投資すべきではないことになる。
内部収益率 (Internal Rate of Return : IRR) 割引率	ある投資について、正味現在価値（前述）がゼロになる割引率。投資の可否判断及び複数の投資先の比較を行うために用いることが多い。IRR が高いほど投資の期待収益が高い。 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。
Opportunity cost	機会損失。ある決定、行動を行ったために別の行動を行い利潤を獲得する機会を失う場合のコスト（例えば高効率対策を導入するために船を動かさないことによる営業機会損失によるコスト）

3. その他

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、***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（最新のものは 2007 年に刊行された第 4 次評価報告書）を刊行するほか、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

UNCTAD	United Nations Conference on Trade and Development（国連貿易開発会議）。 パリに本部を置く国際機関（国連機関）で、設立は 1964 年、加盟国は 193 か国。途上国の経済開発に関する調査研究、政策に関する意見交換を行う機関。 http://www.unctad.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
BAU	Business As Usual 「成り行きの」シナリオ。遵守すべき法制度は現状のままで（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。
frozen technology baseline	技術の向上を考慮しないシナリオ

参 考

Analysis of GHG Marginal Abatement Cost Curves

Report

Delft, March 2011

Author(s):

Jasper Faber (CE Delft)
Brigitte Behrends (Marena Ltd)
Dagmar Nelissen (CE Delft)

Preface

This report was written by CE Delft and Marena Ltd for the Ocean and Policy Research Foundation. The authors want to thank the interviewees from shipping companies and other maritime stakeholders for their willingness to co-operate in this project. We would also like to thank Tore Longva of DNV for providing details on the methodology of their Marginal Abatement Cost Curve. Of course, all eventual errors and shortcomings can only be attributed to the authors.

Contents

	Summary	93
1	Introduction	95
1.1	Objective	95
1.2	Outline	96
2	Comparison of MACCs	97
2.1	Overview of published MACCs	97
2.2	Descriptive comparison	99
2.3	Comparative analysis	103
2.4	Shape of the MACC	109
2.5	Conclusion	112
3	Implementation of cost-effective measures	113
3.1	Introduction	113
3.2	Literature review	114
3.3	Results from interviews	115
3.4	Conclusion	126
4	Conclusion	129
4.1	Impact of barriers on MACC	129
4.2	Policy recommendations	129
	References	131
Annex A	Abatement measures	133
A.1	Coverage of studies with regard to the individual abatement measures	133
A.2	Measure groups IMO (2010a) and CE et al. (2009)	134
Annex B	Questionnaire	137

Summary

Greenhouse gas emissions from maritime transport account for approximately 3% of global emissions and are projected to increase rapidly over the next decades. One of the ways to reduce these emissions is to improve the fuel efficiency of ships. Many measures can be implemented to do so, ranging from weather routing to installing solar cells.

Marginal abatement cost curves (MACC) present measures to reduce GHG emissions in order of their cost-effectiveness. Over the last years, several MACCs have been published that appear to project different abatement potentials. One thing the MACCs have in common is that they project a large cost-effective potential: several measures can be implemented at a net profit.

This report has analysed the different MACCs and finds that their differences can be explained to a large extent by the fact that they use different emission baselines and a slightly different set of measures. Other factors that contribute to the differences are small differences in the costs and potentials of specific measures, and differences in the projected fleet structure.

The differences in the cost-effectiveness of the most profitable options are caused predominantly by different assumptions about future fuel prices. Different assumptions on discount rates have a smaller impact.

This report presents a literature survey and reports on interviews that aim to analyse the reasons for the existence of a cost-effective abatement potential. There are three main reasons why not all cost-effective measures are taken:

1. Technological barriers. Not all the technologies that appear in the MACCs are considered to yield fuel savings by the ship owners and operators interviewed. Moreover, some technologies are perceived to be associated with a high risk of failure.
2. Institutional barriers. Two institutional barriers are of particular importance. The first is the fact that currently, neither charter rates nor second hand prices of ships reflect its fuel efficiency. This means that ship owners who invest in fuel efficiency improving measures cannot, in general, recoup their investment, unless they operate their own ships or have long term agreements with charterers. The second is that many yards do not have the capacity to offer changes to existing designs, or are only willing to do so against substantial costs. Many yards seem to have focussed on bringing newbuilding costs down, with little regard to lifecycle costs.
3. Financial barriers. The main financial barrier appears to be associated with the risk of certain technologies.

In the future, some of the institutional barriers may be lowered as EEDI and other measures of efficiency and broader environmental performance become standardised. These could potentially have the effect that more of the investments can be recouped by higher charter rates or second hand prices for better ships.

1 Introduction

Greenhouse gas emissions from maritime transport account for approximately 3% of global emissions and are projected to increase rapidly over the next decades (IMO, 2009). In order to reduce impact shipping has on climate, several policies have been proposed. Within the International Maritime Organization (IMO), operational, technical and market based instruments are being discussed.

In the evaluation of these proposals, cost-effectiveness and the impact on the shipping sector are important criteria. One way in which these can be assessed is through the use of Marginal Abatement Cost Curves (MACCs). These curves indicate how the marginal cost-effectiveness depends on the amount of emissions being reduced, relative to a baseline. Insofar as these curves identify specific technologies, they give an indication of the technologies that can be used to reach a certain emissions target in the most cost-effective manner.

Over the past years, four MACCs of the shipping sector have been published:

- IMO (2009), 2nd IMO GHG Study 2009, London.
- DNV (2010), Pathways to low carbon shipping/Eide et al. (2011), Future cost scenarios for reduction of ship CO₂ emissions.
- IMO (2010a), Marginal Abatement Costs and Cost Effectiveness of Energy-Efficiency Measures, MEPC 61/INF. 18. And
- CE et al. (2009), Technical support for European action to reducing Greenhouse Gas Emissions from international maritime transport.

In addition, the Ocean Policy Research Foundation (OPRF) is developing a MACC for shipping, which is mainly based on the analysis by the Japanese administration for EEDI. In this work, the OPRF envisages to compare its MACC to other MACCs that have been recently published. Such a comparison is not straightforward, however, as MACCs are a function of many variables, including fuel prices and discount rates. This report aims to provide a comparative analysis of the published MACCs.

Most MACCs of shipping indicate that there is a considerable potential to improve the efficiency of ships cost-effectively and that this potential will grow in the coming decades. From a conventional economic point of view, this can only be the case if there are barriers to the implementation of these measures that are larger than the potential profits. This report aims to identify these barriers and estimate their relevance.

1.1 Objective

The objective of this report is twofold:

1. Provide a comparative analysis of the various marginal abatement cost curves for shipping that have been published over the last years.
2. Identify barriers to the implementation of cost-effective measures to reduce GHG emissions and/or improve the fuel efficiency of ships.

1.2 Outline

Chapter 2 provides a comparative analysis of the published MACCs based on a comparison of the underlying assumptions and on an interview with the author of one of the reports. Chapter 2.5 analyses the barriers to the implementation of cost-effective measures to improve the fuel efficiency of ships. It is based on a literature review and on interviews with stakeholders. Chapter 4 concludes.

2 Comparison of MACCs

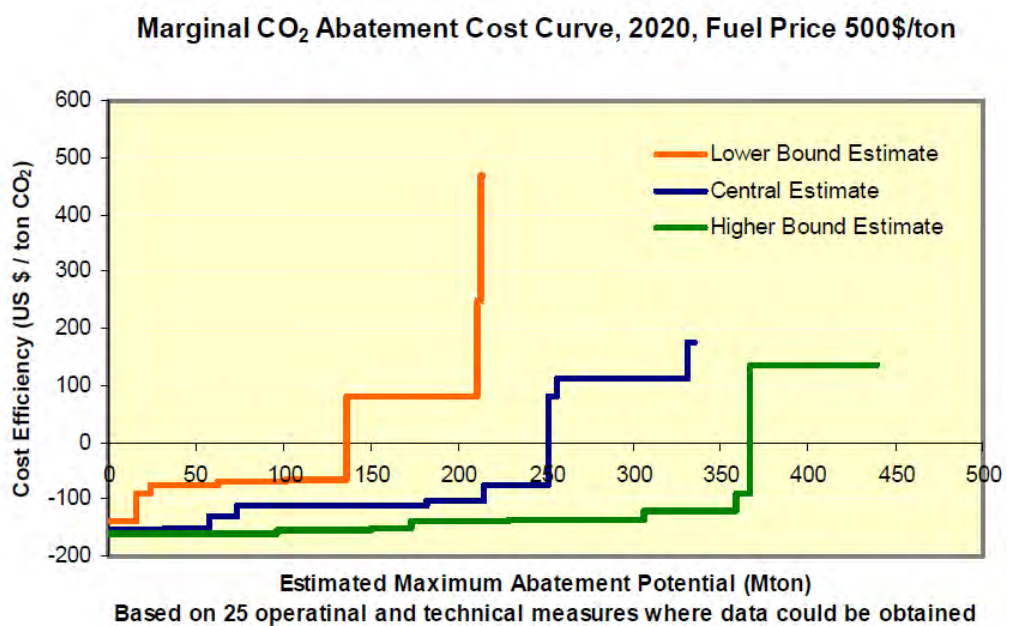
2.1 Overview of published MACCs

To our knowledge, four Marginal CO₂ Abatement Cost Curves of the maritime shipping sector have been published in recent years:

- IMO (2009), 2nd IMO GHG Study 2009, London (Figure 1).
- DNV (2010), Pathways to low carbon shipping (Figure 2)/Eide et al. (2011), Future cost scenarios for reduction of ship CO₂ emissions.
- IMO (2010a), Marginal Abatement Costs and Cost Effectiveness of Energy-Efficiency Measures, MEPC 61/INF. 18 (Figure 3). And
- CE et al. (2009), Technical support for European action to reducing Greenhouse Gas Emissions from international maritime transport (Figure 4).

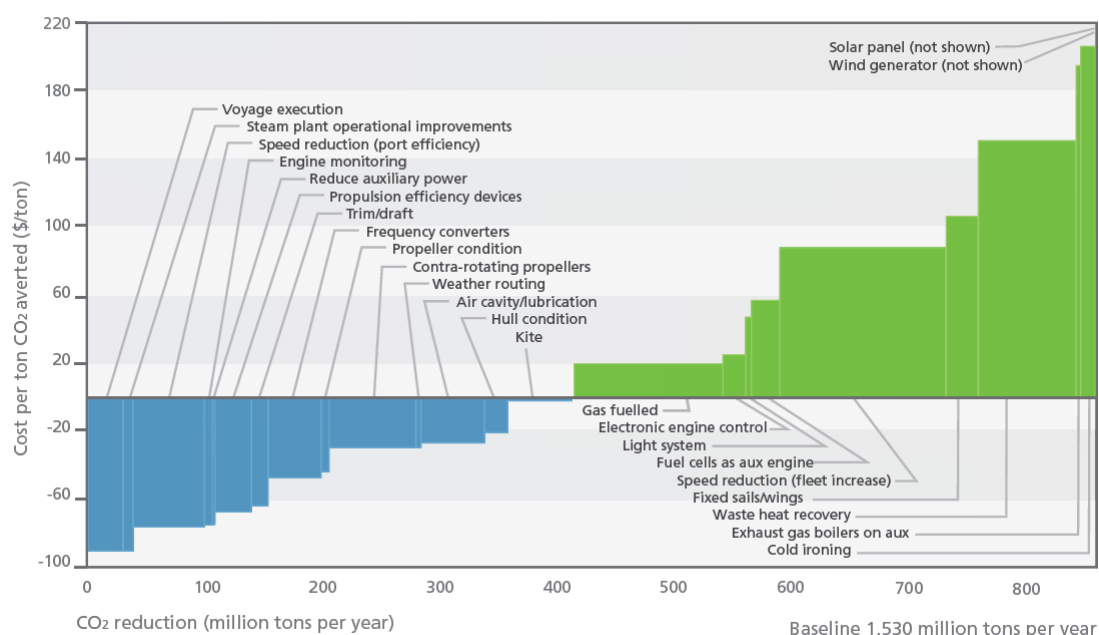
In addition, MACCs have been published in a Norwegian submission to MEPC, IMO (2010b) (Updated Marginal Abatement Cost Curves for shipping) and in Annex 10 to the *Full report of the work undertaken by the Expert Group on Feasibility Study and Impact Assessment of possible Market-based Measures* (MEPC 61/INF.2). Both of these were made using the same DNV database as Eide et al. (referenced above) and are therefore not included in the analysis.

Figure 1 Indicative marginal CO₂ abatement costs for 2020



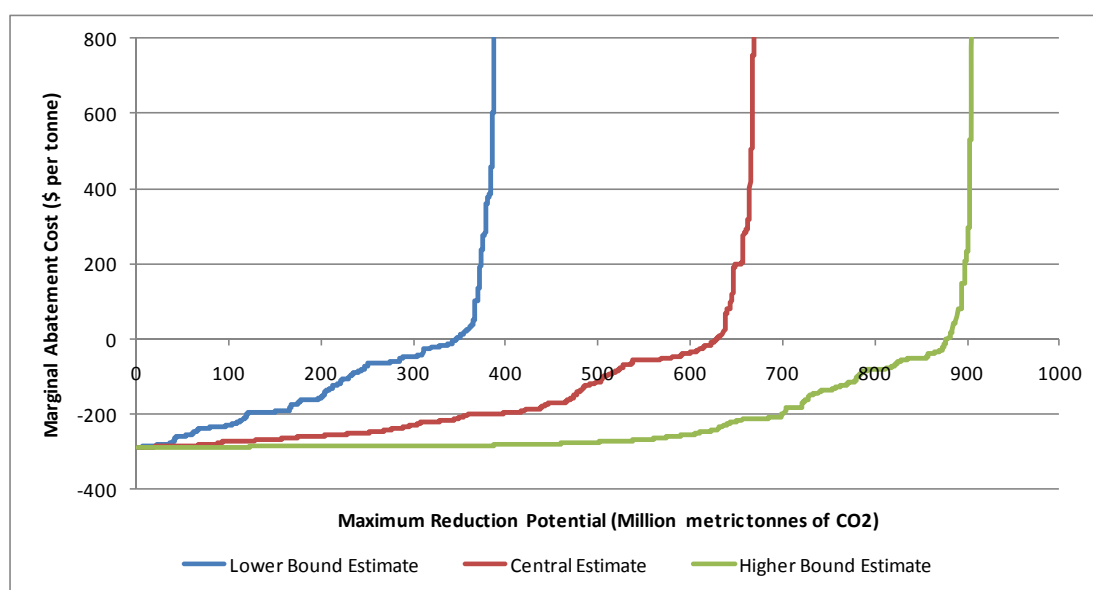
Source: IMO, 2009.

Figure 2 Average Marginal CO₂ Reduction Cost Per Option - World Shipping Fleet In 2030



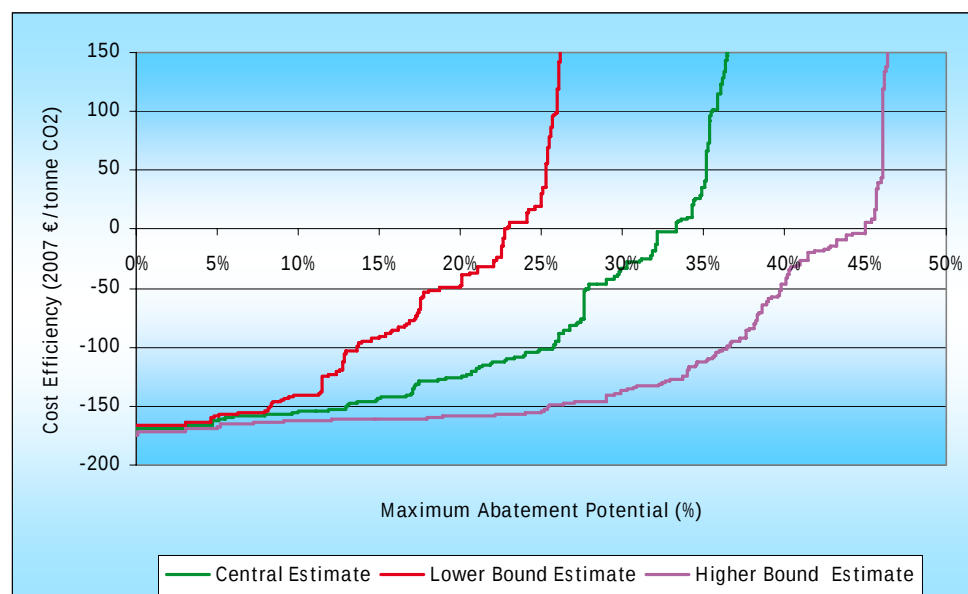
Source: DNV, 2010; Pathways to low carbon shipping. Abatement potential towards 2030.

Figure 3 Aggregated MACC in 2030 with \$900 per ton fuel price and 10% discount rate for all ship types



Source: IMO, 2010a.

Figure 4 Marginal CO₂ Abatement Costs for the Maritime Transport Sector in 2030 relative to frozen-technology scenario, Range of Estimates, US\$ 700/tonne fuel, 9% Interest Rate



Source: CE et al., 2009.

Previous analysis has shown that MACCs are sensitive to numerous assumptions. The most important assumptions are (IMO, 2010a):

- The projected price of fuel.
- The projected fleet.
- The projected fleet renewal rate.
- The abatement measures included in the MACC.
- The discount rate.
- The efficiency of the current fleet.
- The uptake of technologies in the current fleet.
- The future uptake of technologies.

For each of the MACCs studied, we have retrieved the assumptions. We have also assess the extent to which differences in assumptions can explain the differences in the MACCs.

2.2 Descriptive comparison

To our knowledge, the MACC published in IMO (2009) has been the first MACC for shipping. It has been derived in a collaborative effort of MARINTEK, CE Delft and DNV. The other three MACCs are based on this one.

The main differences between the MACC presented in IMO (2009) and the other MACCs are, first, the year of consideration, namely 2020 and not 2030, and, second, the resolution. Whereas the former is presented for fleet average cost-effectiveness values of a limited number of technologies, the latter three include a larger number of technologies and calculate cost-effectiveness for a large number of ship type and size categories. In the following we will compare the three MACCs for 2030, i.e. the MACCS published by Eide et al. (2011), IMO (2010a) and CE et al. (2009).

2.2.1 Abatement potential

Table 1 shows a comparison of the main MACCs on both cost-effective and maximum relative abatement potential.

Table 1 Comparison of cost-efficient and maximum relative abatement potential

	Eide et al. (2011)	IMO (2010a)	CE et al. (2009)
Fuel price in 2030	HFO, LNG: 350 USD/t MDO: 500 USD/t	700 USD/t*	350 USD/t
Discount rate	8% **	10%	9%
Cost-effective relative abatement potential in 2030	~30%	~27%	~25%
Maximum relative abatement potential in 2030	~56%	~34%	~37%

* This is a scenario presented in the sensitivity analysis; in the main scenario a fuel price of 900 USD/t is used.

** This is a scenario presented in the sensitivity analysis; in the main scenario a discount rate of 5% is used and the cost-efficient reduction potential is 11% higher.

In Table 1 the cost-effective and maximum relative abatement potentials derived in the different studies are given for the most comparable scenario.

The cost-effective relative abatement potential in 2030 is assessed to be slightly lower in IMO (2010a) and CE et al. (2009) compared to Eide et al. (2011) and the maximum relative abatement potential in 2030 is assessed to be significantly higher in Eide et al. (2011) than in IMO (2010a) and in CE et al. (2009).

2.2.2 Framework for the comparative analysis

There are five main factors that determine a Marginal Abatement Cost Curve:

1. The methodology.
2. The scope of the study.
3. The data of the base year.
4. The disaggregation level.
5. Expectations/projections.

These elements are all taken into account in the comparative analysis of the MACCs in Section 2.3. They are illustrated briefly below.

Methodology

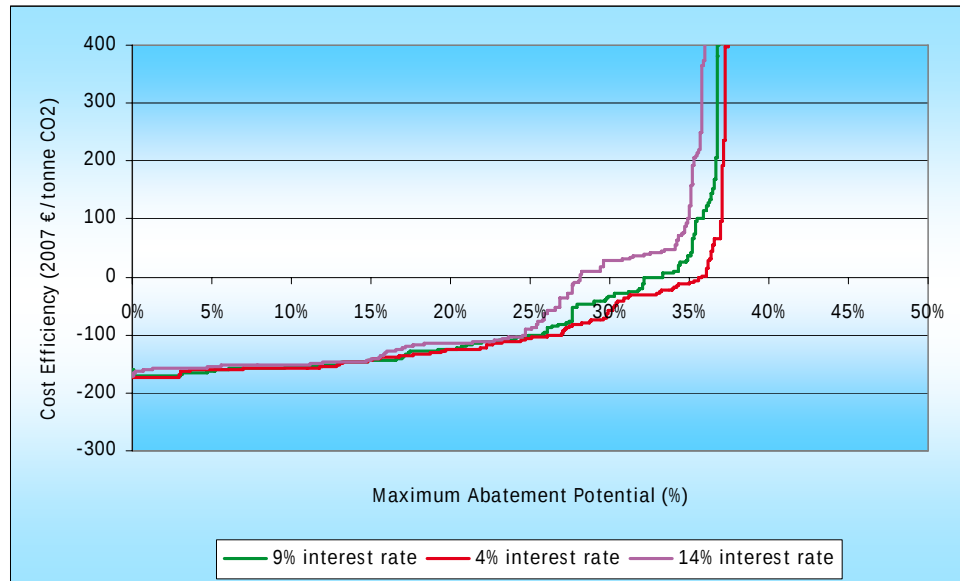
There are four major methodological choices to be made when setting up a Marginal Abatement Cost Curve. Choices have to be made regarding:

1. Whether a social or business perspective is taken.
2. Whether and how the abatement measures interact.
3. Whether a frozen technology emission baseline is chosen or a baseline that takes an autonomous efficiency improvement into account. And
4. Which measures are included in the analysis.

A MACC can be set up from two different perspectives, a social or a business perspective. This is mainly reflected in the level of the discount rate that is used to determine the costs that are associated with an abatement measure. The discount rate is higher when a private perspective is chosen, reflecting the fact that companies pay higher interest rates than states. A lower discount rate results in a higher cost-effective abatement potential. The sensitivity

analysis carried out in CE et al. (2009) shows that there is indeed a change in the cost-effective abatement potential but that this change can be relatively small:

Figure 5 Sensitivity analysis w.r.t. discount rate



Source: CE et al., 2009.

There are CO₂ abatement measures that are not likely to be adopted at the same time or measures that even exclude each other. The abatement potential is overestimated if it is assumed that those measures can be used at large. But even when it is taken into account that not all measures are relevant when determining the abatement potential, MACCs could differ inasmuch as different adoption behaviour can be presumed: different criteria can be used when modelling the choice of the abatement measure from a group of measures that exclude each other. It can, for instance, be assumed that the measure with most advantageous cost-effectiveness will be applied, irrespective of its abatement potential. Alternatively, it could be assumed that the measure with the highest profits or lowest costs is chosen.

The emission baseline can either be modelled as a frozen technology baseline or as an emission baseline with an autonomous efficiency improvement. Whereas absolute and relative abatement potential presented in the MACC are higher when a frozen technology baseline is used, the emission level that, irrespective of the costs, could be achieved should be the same under both approaches. However, the costs for achieving a certain emission level will be assessed different under these two approaches.

When the probability that an abatement measure will be applied to a ship type/size category is rather low, one might choose not to take this abatement potential into account at all or, alternatively, to take this relative low abatement potential against relative high costs into account. This choice will have an impact on the maximum but not on the cost-effective abatement potential.

Scope of Study

The course of a MACC is further determined by the:

- Segment of the world fleet under consideration.
- Ship types considered.
- Ship sizes considered (threshold value). And
- The types of abatement measure that are taken into account (operational and/or technological, established and/or innovative, design and/or retrofit).

Data of base year

The data that is used/is available for the base year is of course crucial for the run of the MACC too. Data is needed w.r.t.:

- The fleet (fuel consumption and (age) structure).
- Costs of abatement measures.
- Reduction potential of measures.
- Diffusion rate of abatement measures.

Disaggregation level

The MACC will have a different run, depending on the disaggregation level with which is worked for setting up the curve. Data can be differentiated w.r.t.:

- Ship type/size categories.
- Age structure.
- Differentiation of cost and reduction potential data w.r.t. the above mentioned categories.

When abatement measures can only be applied to specific ship types and/or size categories, the abatement potential is difficult to determine when aggregated fleet data are used. The cost efficiency of a certain abatement measures for the average fleet can also deviate strongly from the cost efficiency for particular fleet segment.

Working with an age structure of a fleet allows, on the one hand, to predict more precisely the number of new ships that enter the market, and allows on the other hand to determine the number of relative old ships in the fleet. The more new ships enter the fleet, the higher the autonomous efficiency improvement. Relative old ships cannot be expected to invest in retrofit measures that have a relative long payback time.

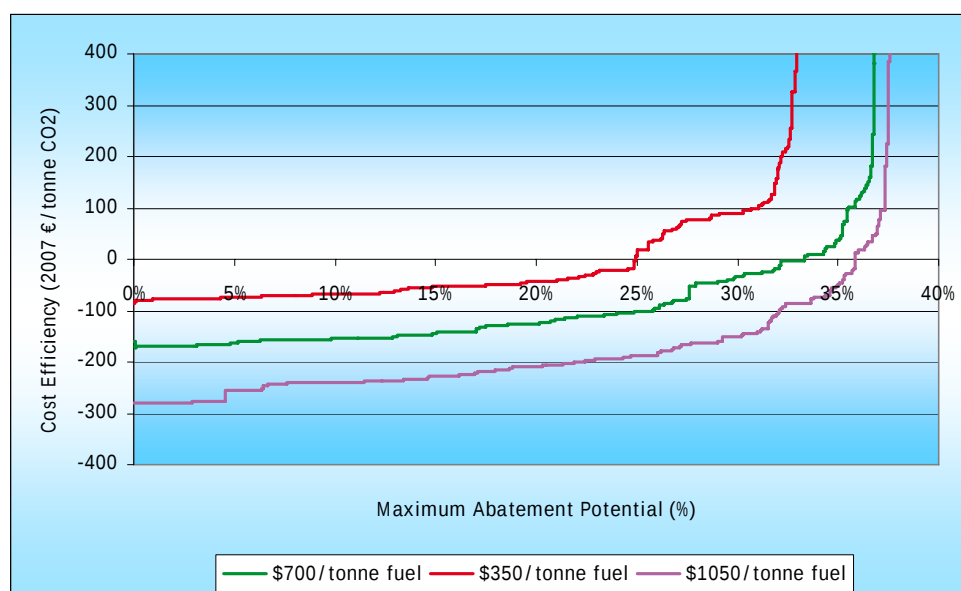
Expectations/projections

The expectations with respect to the following factors have an important impact on the course of the MACC too:

- Future fuel price.
- Development of fleet structure.
- Learning effects w.r.t. abatement measures.
- Expected life time of measures.
- Level of autonomous efficiency improvement.

The level of the fuel price in the year under consideration has a strong impact on the level of the cost-effective abatement potential. Figure 6 illustrates clearly that the higher the fuel price, the higher the cost-effective abatement potential.

Figure 6 Sensitivity of cost-efficient abatement potential w.r.t. future fuel price



Source: CE et al., 2009.

The expected development of the fleet is crucial for the baseline emissions.

Learning effects can have an impact on the future costs as well as on the future reduction potential of an abatement measure. Assuming an increase of the reduction potential over time definitely has an impact on the maximum abatement potential and it can also have an impact on the cost efficient abatement potential. A decrease of the abatement costs over time leads to an improvement of the cost-effectiveness of the respective measure.

The expected life time also has an impact on the cost-effectiveness of a measure. The longer a measure is expected to live, the better its cost-effectiveness.

And finally the expected level of an autonomous efficiency improvement has an impact on both, the abatement potential presented in the MACC and on the assessment of the costs for achieving a certain emission level.

2.3 Comparative analysis

In the previous section, the elements that determine the run of a MACC have been discussed. A comparison of the three studies with respect to these elements shows that the studies differ mainly with respect to nine elements (see Table 2 for an overview).

CE et al. (2009) and IMO (2010a) allocate the individual CO₂ abatement measures to measure groups. The measures that are unlikely to be applied together or that exclude each other are thereby allocated to the same measure group. Setting up the MACC, one measure per group is then chosen that is the most likely to be applied to this segment. Eide et al. (2011) take into account that two measures exclude each other, i.e. fuel cells (used as auxiliary engines) and gas fuelled engines.

Table 2 Main differences between the three studies

	Eide et al. (2011)	IMO (2010a)	CE et al. (2009)
Modelling interaction btw. measures	All measures can be combined with each other except for fuel cells (used as auxiliary engines) and gas fuelled engines.	Grouping Combination reduces reduction potential in absolute terms	Grouping Combination reduces reduction potential in absolute terms
Baseline emissions	Autonomous efficiency improvement: 2010: 5% 2020: 8% 2030: 10%	Frozen technology baseline	Frozen technology baseline
Baseline emissions in 2030	~1,500 Mt	~2,000 Mt	Reduction potential in rel. terms only (~1,900 Mt)
Coverage of measure types	25 measures	22 measures, 15 groups	28 measures, 12 groups
Cost and reduction potential data in base year	2 nd GHG Study data revised and amended	2 nd GHG Study data revised	2 nd GHG Study data
Fleet (age) structure	2008 fleet composition from LRF; SAI ship building and scrapping forecast for the short-run forecast; heuristic approach for long-term forecast	2007 age structure based on LRF data; 6 age categories of 5 yrs each; max. life time of ships = 30 yrs; IMO fleet data and forecast used for total ship numbers	Evenly distributed in 2007; max. life time of ships = 30 yrs; IMO fleet data and forecast used for total ship numbers
Fuel price 2030 (sensitivity analysis)	HFO: 350 USD/t MDO: 500 USD/t LNG: 350 USD/t	900 USD/t (700 USD/t, 1,100 USD/t)	700 USD/t (350 USD/t, 1,050 USD/t)
Discount rate (sensitivity analysis)	5% (8%)	10% (4%, 18%)	9% (4%, 14%)
Learning effects	Learning effects applied to several measures in terms of cost reductions and/or reduction potential increase; effect differs per measure.	For five innovative technologies, future cost reductions (10-15%) are anticipated for first 5 year period.	-

IMO (2010a) and CE et al. (2009) work with a frozen technology baseline. More precisely, the two studies work with the A1B scenario from the 2nd Greenhouse Gas Study and a sub scenario that is characterised by a medium demand level and the lowest level of transport efficiency improvement and speed reduction.¹ Baseline emissions in 2030 amount to 1,900 Mt in CE et al. (2009) and to about 2,000 Mt in IMO (2010a). In contrast, Eide et al. (2011) work with an autonomous efficiency improvement: “the improvement relative to the average ship in the current fleet is estimated to 5% for ships built in 2010,

¹ The lowest level is equal to zero in the 2020 forecast. In the 2050 forecast it is zero w.r.t. speed reduction and -0.05 with respect to transport efficiency. For 2030 total ship number have been interpolated.

increasing to 8 and 10% in 2020 and 2030, respectively.” This autonomous efficiency improvement is not assigned to specific abatement measures.

IMO (2010a) and CE et al. (2009) take almost the same individual abatement measures into account: relative to the latter, IMO (2010a) has excluded five individual measures joined two, thus reducing the total number of measures included by five. Compared to CE et al. (2009) in IMO (2010a) the measures are allocated to 15 instead of 12 measure groups – it has been assessed that more measures can be combined. In Annex A, Section 0 a detailed overview is given on these measure groups and the allocation of the individual measures to these groups.

Eide et al. (2011) include a larger number of measures in the cost curve. The following 12 measures are taken into account in Eide et al. (2011) but not in the other two studies:

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.

In contrast, the following 9 measures are covered in IMO (2010a) or CE et al. (2009) but not in Eide et al. (2011):

1. 20% speed reduction.
2. Wind engine (Flettner rotor).
3. Main engine tuning.
4. Common-rail technology.
5. Propeller-rudder upgrade.
6. Optimisation water flow hull openings.
7. Hull brushing.
8. Hull hydro-blasting.
9. Dry-dock full blast.

In Annex A, Section A.1 an overview of the coverage of the abatement measures is given for the three studies.

In all three studies, the cost and reduction potential data that underlies the MACC that is published in the 2nd IMO Greenhouse Gas Study is used. In IMO (2010a) and in Eide et al. (2011) the data has been reviewed by experts and changed slightly. In Eide et al. (2011) data for the extra measures covered has been added.

The fleet (age) structure is determined differently in the three studies. In CE et al. (2009) the annual total number of ships per ship segment is based on the IMO data and IMO forecast. The assumption is made that in the base year (2007) the ships are equally distributed w.r.t. their age per ship segment. Assuming that the maximum life time of ships is 30 years and knowing the total number of ships per year, the annual number of ships scrapped and added to the fleet can be derived. In IMO (2010a) the annual total number of ships per

segment is also based on the IMO data and IMO forecast. However, the age structure of the fleet in the base year is based on the LRF Sea-Web ship database: six age categories of 5 yrs each are differentiated. Thus again the maximum life time of a ship is taken to be 30 years. Knowing the total number of ships per year, again the annual number of ships scrapped and new ships can then be derived. In Eide et al. (2011), the fleet composition for 2008 is taken from the LRF database. For the short-run forecast (3-5 yrs) of the fleet structure ship building and scrapping forecasts as published by the Institute of Shipping Analysis (SAI) are used. For the medium and long-term forecast a heuristic approach is used, assuming in the medium-run a downturn of orders as a consequence of the economic crises. In Table 3 annual scrap and growth rates used in Eide et al. (2011) are given for 5-year averages:

Table 3 Annual scrap and growth rates used in Eide et al. (2011) (5-year average)

Year	Scrap rates (%)	Growth rates (%)					
	All ship types	Oil	Dry bulk	Container	LNG	Others	Total fleet
2009	4	12	8	10	29	3	9
2010-2014	3	4	6	4	6	2	4
2015-2019	3	0	0	0	3	1	0
2020-2024	3	1	4	4	3	2	3
2025-2029	3	1	4	3	2	3	3

The three studies also differ as to the expected fuel oil price in 2030. In Eide et al. (2011) the fuel price is expected to be relatively low in 2030. The price for HFO and LNG it is assumed to be 350 USD/ton and for MDO 500 USD/ton. CE et al. (2009) expect an average fuel price of 700 USD/ton; a sensitivity analysis is carried out for ± 350 USD/ton. IMO (2010a) expect a relative high average fuel price: 900 USD/ton; a sensitivity analysis is carried out for ± 300 USD/ton.

As to the discount rate, different scenarios are presented in each of the three studies. In Eide et al. (2011) the main analysis is carried out for a discount rate of 5%. In sensitivity analysis results are also presented for a 8% rate. In IMO (2010a) and CE et al. (2009) main results are derived for higher, similar discount rates, i.e. 10 and 9% respectively; in a sensitivity analysis results are also derived for 4% in both studies and for 18 and 14% respectively.

The three studies finally also differ with respect to whether and inasmuch learning effects are taken into account. In CE et al. (2009) learning effects are not taken into account. In IMO (2010a) learning effects are expected for five innovative technologies: cost reductions of 10-15% are anticipated for the first 5 year period. In Eide et al. (2011) learning effects are applied to several measures in terms of cost reduction and/or increase of reduction potential. The learning effects differ per measure.

2.3.1 Can the differences in assumptions explain the differences in the MACCs?

In Table 1 the cost-effective and maximum relative abatement potential derived in Eide et al. (2011), IMO (2010a) and CE et al. (2009) are presented for the most comparable scenario. For these scenarios, the cost-effective relative abatement potential in 2030 is assessed to be slightly lower in IMO (2010a) and CE et al. (2009) compared to Eide et al. (2011) and the maximum relative abatement potential in 2030 is assessed to be significantly higher in Eide et al. (2011) than in IMO (2010a) and in CE et al. (2009).

When it is taken into account that, compared to CE et al. (2009), the expected average fuel price in 2030 is relatively high in IMO (2010a) and is slightly higher in Eide et al. (2011), the assessment of the cost-effective abatement potential can be expected to be the lowest in IMO (2010a), and can be expected to be similar in Eide et al. (2011) and CE et al. (2009), but the difference can still be expected to be rather small.

The different expectations with respect to the fuel price however have no impact on the assessment of the maximum relative abatement potential and can therefore not explain the significant difference between Eide et al. (2011) and the other two studies in this respect.

Taking into account that Eide et al. (2011) work with an emission baseline where autonomous efficiency improvement is taken into account, one would even expect that the maximum abatement potential is assessed to be lower. And, if the autonomous efficiency improvement is based on cost-efficient abatement measures, one would also expect the cost-effective abatement potential to be lower. This however is not the case.

A large share of the difference in the maximum abatement potential can be explained by the different abatement measures that are taken into account in the studies. Eide et al. (2011) take 12 abatement measures into account that are not considered in the other two studies. Visual inspection of the average MACC graph shows that these abatement measures account for about 400 Mt abatement potential. This extra abatement potential is also assessed to be relative high, since for most of these measures it is assumed that they can be combined. On the other hand, IMO (2010a) and CE et al. (2009) take 9 abatement measures into account that are not considered in Eide et al. (2011). However not all of these 9 measures can be considered as adding to the maximum abatement potential as derived in Eide et al. (2011), since most of these measures would only constitute a substitute for and not complement to measures accounted for in Eide et al. (2011). We estimate that these 9 measures account for 200 Mt extra abatement potential at most.

As to the overlapping abatement measures, which are considered in Eide et al. (2011) as well as in IMO (2010a) and CE et al. (2009), cost and reduction potential data for the base year does not seem to be an important source for this difference, since only slight changes have been conducted to the data that is underlying the MACC published in the 2nd IMO GHG. What seems to be much more relevant are the different levels of learning effects that have been assumed. In Eide et al. (2011) learning effects are applied in terms of an increase of reduction potential to several measures, e.g. to waste heat recovery, to exhaust gas boilers, energy efficient lighting and the air cavity system. An increase of the abatement potential of the measures over time has not been assumed in IMO (2010a) and in CE et al. (2009).

Figure 7 shows a quantitative comparison of the differences in the maximum abatement potential. Starting from the maximum abatement potential as

reported in Eide et al. (2011), we have adjusted it for the baseline. Since CE et al. (2009) have a higher baseline, this results in an increase of the maximum abatement potential from 850 Mt CO₂ in 2030 to 1,040 Mt CO₂. If we subtract the twelve measures that are included in Eide et al. (2011) but not in CE et al. (2009), and add the measures that are included in CE et al. but not in Eide et al., the remaining potential is approximately 760 Mt CO₂. This is approximately 10% more than the maximum abatement potential as reported in CE et al. (2009). Hence, a major share of the difference can be attributed to two factors: a different baseline and a difference in measures. The remaining 10% difference can be attributed to differences in fleet composition and fleet rollover and learning effects of certain technologies.

Figure 7 Quantitative comparison of the differences in the maximum abatement potential

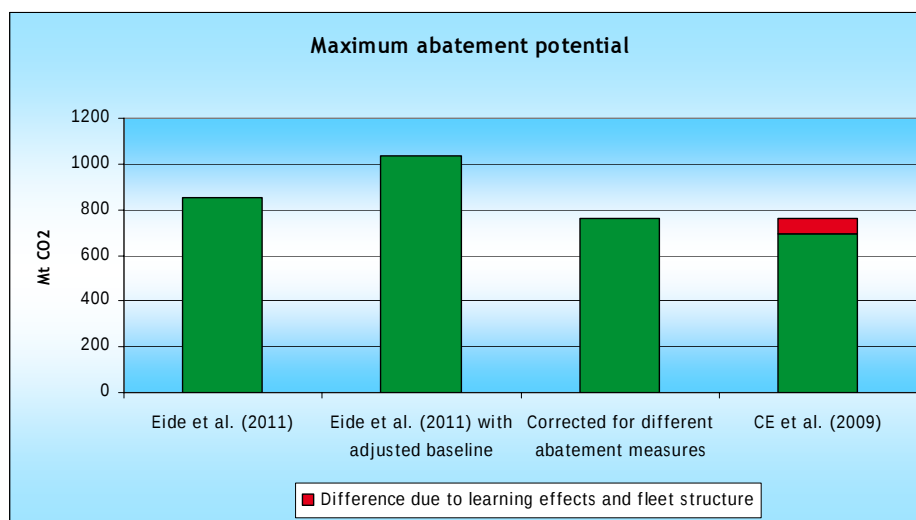
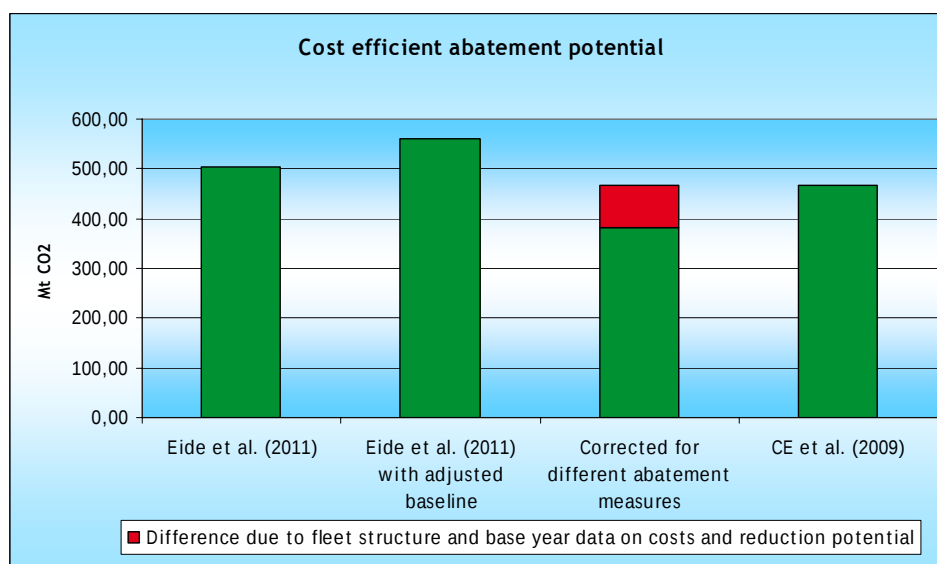


Figure 8 shows a quantitative comparison of the differences in the cost-effective abatement potential. Here, some assumptions have to be made that impact negatively on the quality of the comparison. We had to assume that measures which are cost-effective for a fleet average, are also cost-effective for each ship type and size category. While this is presumably not the case, this was the only way in which we could account for the difference in measures included in the two MACCs.

Starting from a cost-effective abatement potential of a little over 500 Mt CO₂ in the left bar of Figure 8, we again adjusted for the difference in the baseline, increasing the cost-effective potential to 560 Mt CO₂. The cost-effective potential of the measures that both MACCs have in common is shown to be about 380 Mt CO₂ in the third bar from the left. This is approximately 20% less than the cost-effective abatement potential as reported in CE et al. (2009) at the comparable fuel price of USD 350 per tonne of fuel. This difference can be attributed to the fact that some of the measures that are not cost-effective on average are cost-effective on some ship types in Eide et al., differences in fleet composition and fleet rollover and characteristics of certain technologies.

Figure 8 Quantitative comparison of the differences in the cost-effective abatement potential



2.4 Shape of the MACC

All MACCs for shipping have a similar shape: a rather shallow beginning with a negative cost-effectiveness, bending upwards and ending almost vertically (see Figure 1 through Figure 4). This section analyses the reasons for the shape, compares it with other MACCs and draws some general conclusions.

The shape of a MAC curve is to a large extent determined by two factors:

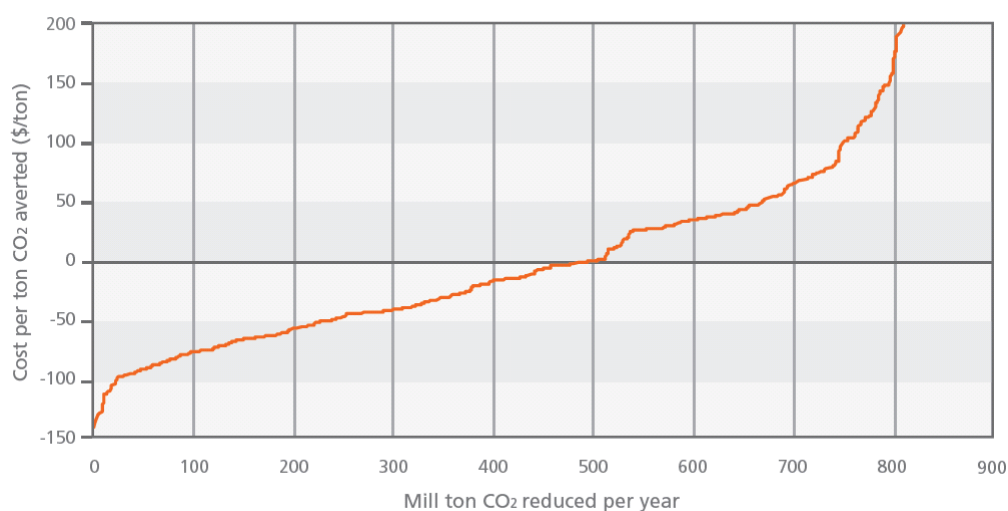
1. The measures included in the curve. And
2. The way in which the curve is represented.

We will discuss both factors subsequently.

The measures included in the curve are an important determining factor of the shape of a MACC. This is especially true for the almost vertical end of the curve. As can be inferred from the DNV curve (Figure 2), which excludes the least cost-effective measures, the end of the curve is dominated by measures like wind generators and solar cells, which have very high costs and a small abatement potential. Excluding these measures yields a significantly flatter curve.

There are several ways in which a curve can be presented. One is to include data on each measure applied to different ship types of different sizes. This yields a curve like in CE et al. (2009) (Figure 4) and IMO (2010a) (Figure 3). Another way is to aggregate the data by measure, in other words to present the fleet average cost-effectiveness of specific measures. This yields a curve like Figure 1 and Figure 2. By comparing these two sets, it becomes clear that the latter method yields a much shallower curve. This is also demonstrated by comparing Figure 2 with Figure 9, taken from the same publication, but using a different method to represent the data.

Figure 9 Detailed Abatement Curves For World Shipping Fleet 2030



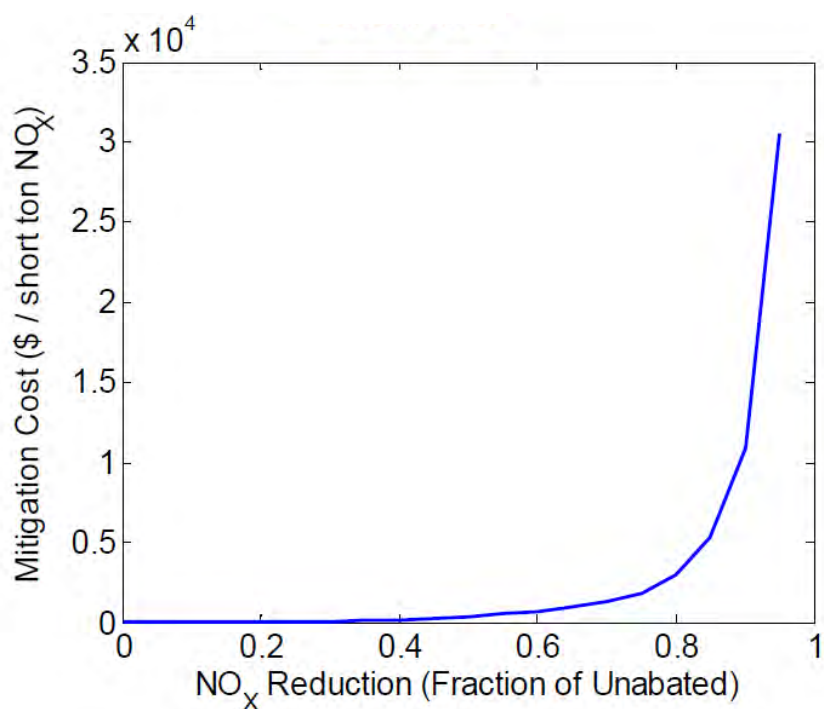
Source: DNV, 2010.

The reason why an aggregated presentation yields a shallower curve is that there can be a significant difference in the cost effectiveness of a specific measure when applied to different ships. For example, calculations underlying IMO (2010a) show that the cost-effectiveness of a 10% speed reduction varies from USD -210 per tonne of CO₂ to USD 1,500 per tonne of CO₂, depending on the ship type and size category. The weighted average cost-effectiveness of this measure is USD -60 per tonne of CO₂. Thus, by aggregating measures across ship types and size categories, the curve becomes shallower.

In summary, the steep end of a curve can be reduced by excluding just a few costly measures and the curve can be made to appear less steep by aggregating data.

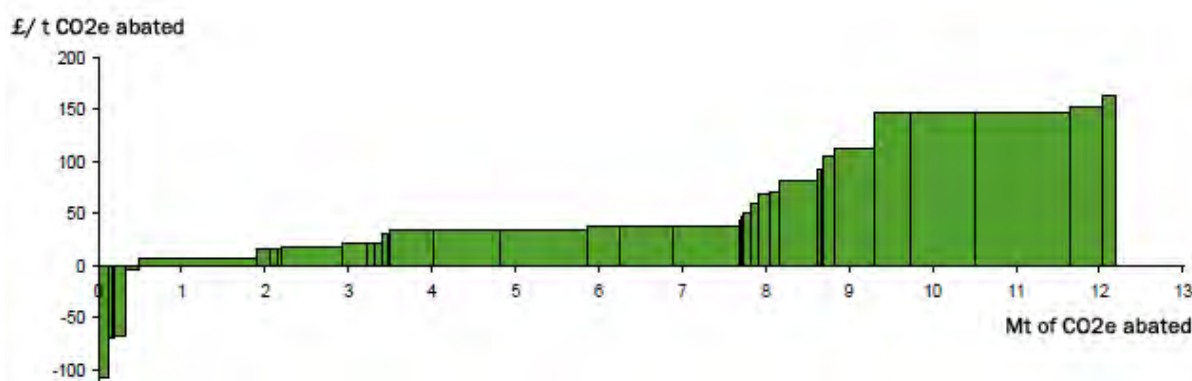
The shape of the shipping MACC is not unique. Figure 10 and Figure 11 show MAC curves for unrelated sectors, NO_x emissions from coal-fired utility boilers and CO₂ emissions from waste processing.

Figure 10 NO_x Abatement Cost Curves for Coal-Fired Utility Boilers



Source: IIASA, 2006.

Figure 11 Marginal Abatement Cost Curves for the Waste Sector



Source: Eunomia, 2008.

In many cases, the most costly options are new technologies or technologies that are attractive to niche markets only. This means that technologies which dominate the steep end of the curve are technologies that could be attractive to develop further, e.g. by R&D or innovation support, rather than by market based instruments. The cost-effectiveness of these options can be improved and their potential increased by pushing the technological frontier further (Kesicki, 2010).

2.5 Conclusion

This chapter has comparatively analysed three marginal abatement cost curves. The three curves are all based on the MACC as presented in the 2nd IMO GHG Study, but have been changed afterwards. The methodology is very similar. One study calculates the net present value of the measures if they are implemented in the year for which the MACC is calculated, the other two use annuitised costs. This does not result in significant differences, however.

The MACCs have different assumptions on fuel price and discount rates. These affect the cost-effectiveness of measures and the cost-effective abatement potential, but not the maximum abatement potential. They also have different fleet rollover assumptions.

The MACCs have a different methodology on how measures interact. While two MACCs exclude conflicting measures taken on the same ship (e.g. propeller boss cap fins, nozzles and propeller winglets), the other allows these measures to be taken on the same ship. This could potentially result in an overestimation of the maximum potential.

The MACCs have different business as usual baselines. Two MACCs have a frozen technology baseline with no autonomous efficiency improvements, while the other allows for efficiency improvements over time, which are not attributed to any of the measures in the MACC.

The main differences between the curves is their maximum abatement potential. One MACC has a considerable larger maximum potential than the other two. This can be attributed to a large extent to a difference in the baseline and a larger number of measures that are included. The remaining difference is about 10% and can be attributed to the other methodological differences.

3 Implementation of cost-effective measures

3.1 Introduction

Several studies have shown that many cost-effective abatement measures are not being implemented in the shipping sector (OECD, 2009; CE et al. 2009; IMO, 2010a; Eide et al., 2011). This is not unique to the shipping sector; there is a large body of literature on what is often called the energy efficiency gap (Jaffe and Stavins, 1994; Jaffe et al., 2001). Its existence may have several causes. First, there may be market *barriers*, such as low priority for energy issues and high demanded risk premiums; second there may be market *failures* (OECD/IEA, 2007), such as split incentives and transaction costs. Third, cost-effective measures may be an artifact of the way cost-effectiveness is calculated, e.g. real costs components may be overlooked or underestimated (see e.g. CE, 2009). Too high oil prices may have been assumed, for example, or the internal discount rate in the MACC does not reflect the market rates for investors.

Chicago school neoclassical economists would assume that the existence of cost effective measures, which are not implemented, *always* indicates calculation artifacts, i.e. that the costs of market barriers and failures ought to be included in the calculation of cost effectiveness (see e.g. Nickell, 1978). In their view the market barriers and market failures do not exist as they define optimality in terms of revealed preferences. In this view firms are profit maximising agents and if they decide not to invest in energy saving technologies, they do so because the benefits do not outweigh the costs. This view is debated, however: behavioural economics regards firms as satisficers rather than profit maximisers. Thus, they can cope with energy inefficiencies as long as they meet their expected profit margins. Others argue that the particular division of property rights will influence the outcomes. If not firms, but governments would be responsible for investment schemes, interest rates would drop as governments can lend money at more favourable conditions on the capital markets. Negative costs for energy saving measures then still reflect a suboptimal outcome, implying that social welfare could be enhanced if these measures were taken into account. The divergence between the social optimal outcome and the private outcome are called market failures (or market barriers).

This chapter adopts a practical approach to the energy efficiency gap in shipping. It analyses the literature on barriers to the implementation of cost-effective measures in Section 3.2, and reports on a series of interviews conducted with stakeholders on general and technology-specific barriers in Section 3.3.

3.2 Literature review

Several studies have looked into the reasons why not all cost-effective efficiency improvements are being implemented (CE, 2009; IMO, 2010a, Devanney 2010). CE et al. (2009) have identified a number of reasons, the four most important being:

1. The **low priority** given to improvements of fuel efficiency in the past. Over the past decades, shipping companies have focused on reducing crew costs rather than on reducing fuel costs. As a result, many shipping companies and other stakeholders lacked the knowledge to evaluate efficiency improving measures until recently. This was not irrational per se, as fuel was relatively cheap, so improvements in labour intensity yielded higher benefits than improvements in fuel efficiency. As fuel prices and fuel price forecasts have risen since around 2005, shipping companies and yards have paid more attention to fuel efficiency improvements.
2. The **split incentive** that occurs in much of the industry where fuel is paid by the charterer but technical modifications to a ship are paid for by the owner. Thus the owner is not always in a position to earn back his investments in fuel saving technologies. Even in market segments where the owner and the operator are the same, shipping companies are often shielded from fuel price increases, e.g. through the application of bunker adjustment factors.
3. The **transaction costs** involved in gathering reliable information on fuel saving technologies may be high, and even more so for technologies that are not applied on a large scale.
4. There may be a **time lag** between a measure becoming cost-effective and its implementation due to the fact that a measure may be only implemented when a ship is in drydock.

Eide et al. (2010) only mention the split incentive as a barrier to the implementation of cost-effective measures, although they also hint at a more general 'lack of responsiveness to economics' in the shipping sector.

In addition to these reasons, Devanney (2010) provides anecdotal evidence of yards' resistance to change and owners resistance to change. In other words, the low priority given to fuel efficiency improvements extends to yards and may be linked to a general conservatism within the industry.

IMO (2010a) have classified the various barriers in three groups, adding financial barrier that stem from company specific investment appraisal methods:

1. Technological barriers
 - a Real or perceived risk of failure of a technology.
 - b Incompatibility of certain technologies with the ship and/or the routes where it sails.
2. Institutional barriers
 - a Split incentive in which the ship owner has to make an investment in a new technology while the charterer receives the benefit of lower fuel consumption.
 - b The split incentive combined with the fact that neither the charter market nor the second hand market pay a premium for fuel efficient ships.
 - c Bunker adjustment factors and other financial arrangements which shield the ship operator from the costs of fuel and thus make investments in energy saving less profitable.

- d Lack of information on new technologies and/or the costs associated with finding out about new technologies.
- 3. Financial
 - a Investment appraisal methods in shipping companies which require very short payback times for retrofit technologies.
 - b Investment appraisal methods that prescribe a low fuel price in order to account for fuel price uncertainty.

3.3 Results from interviews

To understand the barriers regarding implementation of energy-efficient technologies, ship owners and other maritime stakeholders were interviewed regarding specific technological and operational measures.

Five different shipping companies were interviewed. Interview partners were the R&D managers and in one case the director of projects and new-building. The shipping companies have some different fleets:

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.

Additionally, seven other maritime stakeholders were interviewed covering:

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.

The shipping companies were asked which energy efficient measures are already applied and which are planned for the future. Further, they were enquired to give information regarding the expected energy saving potential and the costs of certain technologies, but these answered by none.

The other maritime stakeholders were invited to share their knowledge about the current status, i.e. if the different measures are already applied and their judgement about the future potential.

Section 3.3.1 reports on the section of the interview regarding general barriers. Technology specific barriers are discussed in Section 3.3.1.

3.3.1 General barriers

We have asked twelve stakeholders whether there are barriers and which barriers there are that prevent the implementation of energy saving measures on ships. This section presents an aggregated summary of these interviews. The reader should be aware that the conclusions drawn from the interviews reflect the assessment of the majority of the stakeholders and not of every stakeholder.

All the interviewees agreed that barriers exist that prevent the implementation of energy saving measures on ships. Some of barriers affect the market as a whole whereas others do affect small market participants only. Most of the interviewees recognised the barriers stemming from the literature review summarised in Section 3.2.

Six major barriers to the implementation of energy saving measures can be distinguished.

Low priority. First of all, many interviewees have indicated that, in general, energy efficiency of ships has not been ranked high on the agenda. A number of reasons are given for this, like low bunker fuel costs, a low environmental awareness and, until a few years ago, charter rates that allowed for a profitable operation of almost any ship. However, some interviewees perceive that the market currently is changing and that the awareness with respect to energy-efficiency is increasing.

Split incentives. In markets where ship owners do not operate their own ships, split incentives constitute a barrier to the implementation of energy saving measures too: the ship owner is the one to invest in the measure and the charterer is the one to profit from the investment. The charterer is often not allowed to make changes to the ships or has a short time horizon and is therefore not interested in making improvements in technical efficiency. Moreover, charterers, especially those chartering ships for a relatively short period of time, sometimes lack the technical expertise to rate the energy efficiency of the ships. Many interviewees have expressed the impression that charterers care little about the fuel efficiency of a ship. Exceptions exist, especially in long term charter markets where ship owners and charterers enter into a long term relationship. Some shipping companies have indicated that they require owners to inform them about the energy efficiency of a ship before they take it on lease.

For ship owners, guaranteeing a certain efficiency can be risky, since they do not always know in advance how a ship is operated. This makes them reluctant to guarantee a specific efficiency improvement. To arrange the sharing of costs and benefits between owners and charterers if there is a degree of uncertainty is a solution that can be observed in the market but is not common yet.

The interviewees disagreed about whether the EEDI and other indicators of fuel efficiency would increase the transparency in the market and allow owners of efficient ships to command higher charter rates. Some interviewees thought that the metric would allow for gaming and that it would take a long time for the market to get used to the metric. Others thought it could add transparency if it proved to be a reliable metric.

Lack of independent data. The third major barrier to the implementation of energy saving measures is the lack of trusted data on measures from an independent, third party. This barrier has been mentioned by shipping companies, research institutes and professional societies alike. This is especially of importance since the market is characterised by risk aversion with only some first movers that could provide such information. And first movers are not always willing to share their information. Small ship owners have no scope for carrying out their own tests.

Yards. The fourth major barrier is related to ship building. Ship yards offer standard designs and especially smaller owners may have problems with requiring changes to these designs. Some interviewees have the impression that yards have minimised the building cost of a ship, rather than the total costs of ownership. In a period of undersupply of ships changes are also not likely to be called for. Ship yards may be reluctant to make changes because of the warranties they give. Some ship owners indicated that established long term relationships with yards was a way around this problem.

Access to finance. The fifth major issue is, at least for small ship owners, the funding of the investment in energy saving measures. Whereas big ship owners are able to provide for internal funding or have relative easy access to credits, external funding may pose a problem for smaller ship owners. Some smaller shipping companies are able to overcome this problem by developing a ship in close cooperation with a charterer, thus providing additional security to a bank.

Route dependency of efficiency. The fact that the effectiveness of an energy saving measure is route-dependent constitutes the sixth major barrier. A measure can be highly effective on the one route, whereas it may be ineffective on the other. A measure that seems to be cost-effective for a specific ship type, may therefore turn out to be actually cost-ineffective. In the worst case, a ship may no longer be able to take certain routes when it adopts a certain measure. This could for example be the case when overall dimensions are adjusted.

3.3.2 Barriers for specific technologies

The technology-specific part of the questionnaire was sub-divided into following sections:

1. Reduction of ship hull friction.
2. Engine related measures.
3. Other technical measures.
4. Alternative fuels and power supplies.
5. Operational measures.

Outcome

10 out of 12 interview partners answered the questions regarding specific technological and operational measures to improve the efficiency of the fleet. One shipping company did not want to answer the questions, but claimed that they apply nearly all of the proposed technologies and operational measures. However, the data are not included in the analysis, but would change the figures slightly. The results of the interviews are discussed in the next chapter followed by a separate analysis of the four ship owners alone.

Results

Reduction of ship hull friction (Figure 12)

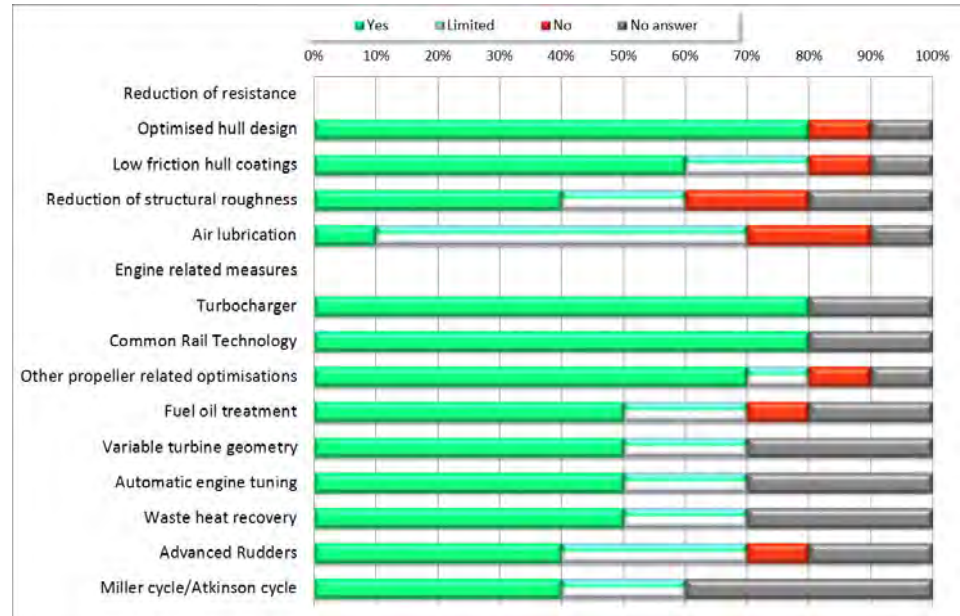
There is a strong perception that the **optimisation of the hull design** is important to improve energy efficiency. For certain ships the hull design is optimised continuously e.g. in towing tanks, whereas some say that it is difficult sometimes to get shipyards to accept a new ship design. The latter seems to be the highest barrier for a change in ship design.

The awareness and expectations for **low friction hull coatings** also seem to be very high, however, the savings potential is difficult to prove. One ship owner prefers to keep the conventional self-polishing antifouling to prevent biofouling of the ship hull. Some regard the alternatives as too expensive. Therefore the lack of proven savings potential and high costs pose barriers.

The **reduction of structural roughness** has less importance, as there is less awareness and understanding by the ship owners regarding the impact of macro-roughness on ships speed, but some research is going on.

There is a very high barrier for the application of **air lubrication**. The interest was very low by all ship owners that have been interviewed, due the complexity, unsuitability for certain ship types and failure during high wave action. There is also huge uncertainty regarding the efficiency. Finally, the power consumption to produce compressed air has to be taken into account. However, air lubrication is observed by the other maritime stakeholders.

Figure 12 Technical measures: Reduction of resistance and engine related measures already applied



Engine related Measures (Figure 13)

Most of the engine related measures especially **turbo charger, common rail technology and automatic engine tuning or electronic engine control** were regarded as state of the art by the ship owners. There was only one exception where the shipping company only applies turbo chargers and common rail technology and none of the other measures. Also variable turbine geometry, Miller and Atkinson cycle are regarded as proven technologies to improve fuel efficiency, but are also implemented for the reduction of NO_x emissions. Knowledge about the special engine related measures was very low outside the ship owners community. Therefore many other stakeholders did not answer the questions. For the directly engine related optimisations there seem to be little barriers.

Other propeller related optimisations are regarded to have medium impact. Ship owners apply flow improvement fins (boss fin caps) and propeller polishing. A lot of research is going on in this area. There are surprisingly little barriers, although the costs can be high and there is a risk of high maintenance.

The main barrier for the implementation of **waste heat recovery** and **advanced rudders** was found to be the costs as they are considered to be extremely expensive. "Waste heat recovery is fancy to have but very expensive", was one of the statements. The vast majority of ships do not have enough power or heat to power the waste heat technologies. Therefore, it is not applicable or suitable for all ship types. Some ship owners see a high potential especially for cruise liners, others use the waste heat for fuel oil heating only.

Fuel oil treatment is regarded to have only limited impact on energy efficiency. The saving potential could be 2%. Some additives work by increasing lubrication some do not. The biggest barrier (authors knowledge) is engine manufacturers warranties, as the fuel and lube oil specifications are quite strict. In case of an engine failure the warranty might expire. New innovative technologies like electrolytic treatment of fuel oil to decrease viscosity seem to be unknown in the maritime market. Therefore, the biggest barriers are confidence and lack of knowledge.

The **propeller** is regarded as most important and improvements pose an advantage, but **advanced rudders** are very expensive and there is also a risk of introducing new failures. The propeller and the shaft are regarded as highly sensitive and highly stressed parts. Therefore changes in these areas are investigated carefully. A lot of research is going on in the area of advanced rudders, especially for fast ships. The main barrier is the costs, risk of failure and high maintenance.

Other technical measures

The **optimisation of hotelling functions** is well perceived by the maritime industry especially for passenger ships. The energy saving potential for these ship types is huge. The cruise liners use power optimisation programs for ventilation, light, etc. There is a lower effect on all other ship types, but still this energy saving option is implemented by shipyards and designers. It will also be part of the SEEMP.

Electric propulsion is applied by cruise liners only, as it is very dependent on the operational profile of the ships. For long fixed routes this does not seem to be a solution nowadays. However, electric propulsion is a good measure to optimise and control energy consumption. This can improve efficiency, but at higher costs. The expected saving potential is 6-8%.

Minimising the weight of the ship and the use of **lightweight materials** represents a huge saving potential for passenger ships, but not so much for other ship types. Weight can only be reduced to a certain extent. In most ships freight constitutes 70-80% of the water displacement. So only limited total weight reductions can be achieved. Moreover, the lifetime of a ship and its strength pose limits. In terms of light weight material one big barrier is the lack of suitable materials and safety aspects. For example high tense steel causes cracking.

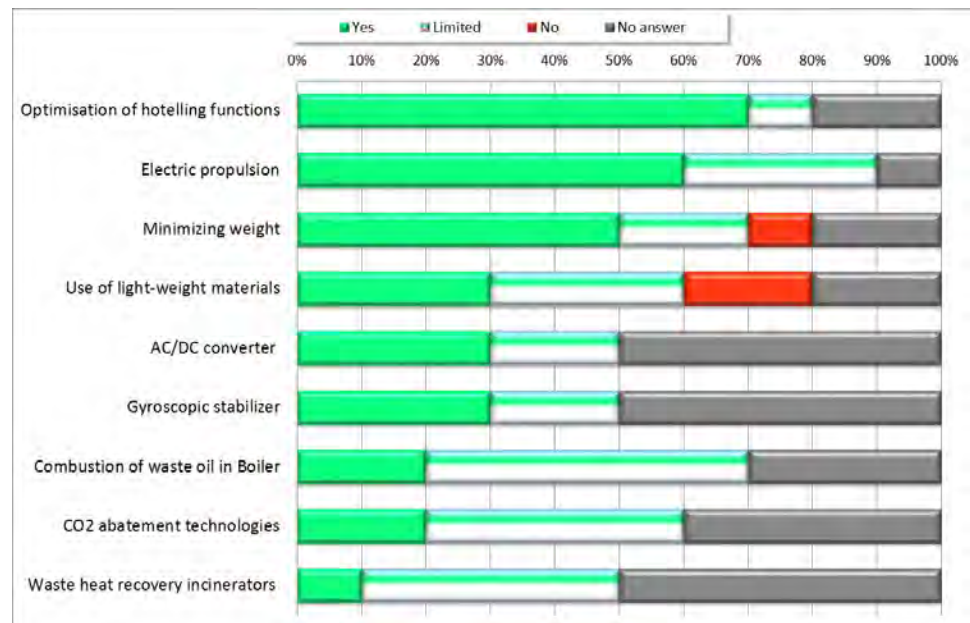
AC/DC converters are increasingly used in special ships such as passenger ships, special purpose vessels. They are useful on ships with a high base load like cruise liners. Thyristor controlled rectifiers are used to convert AC to DC power for high power requirements like azipods and electric propulsion, as the energy consumption can be optimised. Savings are also good in terms of space and energy loss through the cables and instruments. However, AC/DC converters are not suitable for all ship types. As a result of the interviews it was found that the general knowledge about AC and DC power is quite low and consequently is regarded as the highest barrier. Only one ship owner applies the thyristor technology.

Combustion of waste oil is not well perceived due to costs ("about 10 times more expensive to burn sludge than land it"), and environmental concerns, as the exhaust gas will contain many pollutants. Further, local regulations limit the combustion of waste oil in certain areas. Only one ship owner has the technical option installed on several ships. The barriers are therefore costs, environmental concerns and legislation.

CO₂ abatement technologies do not increase the fuel efficiency, but reduce GHG emissions of ships. These are in a research and pilot stage at two ship owners, others tend to observe. The main barrier here is the trust in the technology and the conservative behaviour of the maritime scene.

Waste heat recovery of incinerators is not well known as not all ships have waste incinerators. Incinerators waste heat recovery is only used on passenger ships like cruise liners. The barriers therefore are lack waste incinerators, lack of knowledge, but also technical problems which might outbalance the benefit.

Figure 13 Other technical measures already applied



Alternative fuels and power supplies

Cold ironing (shore power) does not save energy, but reduces local emissions. Only one ship owner has installed shore power connections on several ships. There are a number of barriers. The most important is the deficiency in standardisation of power supply (variable frequency, voltage and connectors). The second is that ship owners want to have power from renewable energy sources, but this is not guaranteed by the energy suppliers. Others regard cold ironing as counterproductive, as a highly effective power plant is already on board.

LNG and CNG also do not save energy, but are very interesting as alternative fuel in terms of price and emission limits for NO_x and SO₂. Yet the costs for ship construction increase significantly, although this does not pose a barrier. Barriers are the low availability of LNG and CNG, lack of infrastructure for supply and the size of storage tanks (lack of space). Nowadays these fuels are only attractive for gas carriers and for short sea shipping like ferries. Most of the ship owners are watching the developments carefully.

From the three **wind power** options, the use of kites has the lowest acceptance due to operational limitations, kite durability and replacement costs and difficult handling. One ship owner is in a trial stage. All three technologies are dependent on wind directions and therefore on the operational profile of the ship. Additionally the **kites, wings and sails** are only suitable for relatively slow ships (10–15 knots) and the flettner rotors could

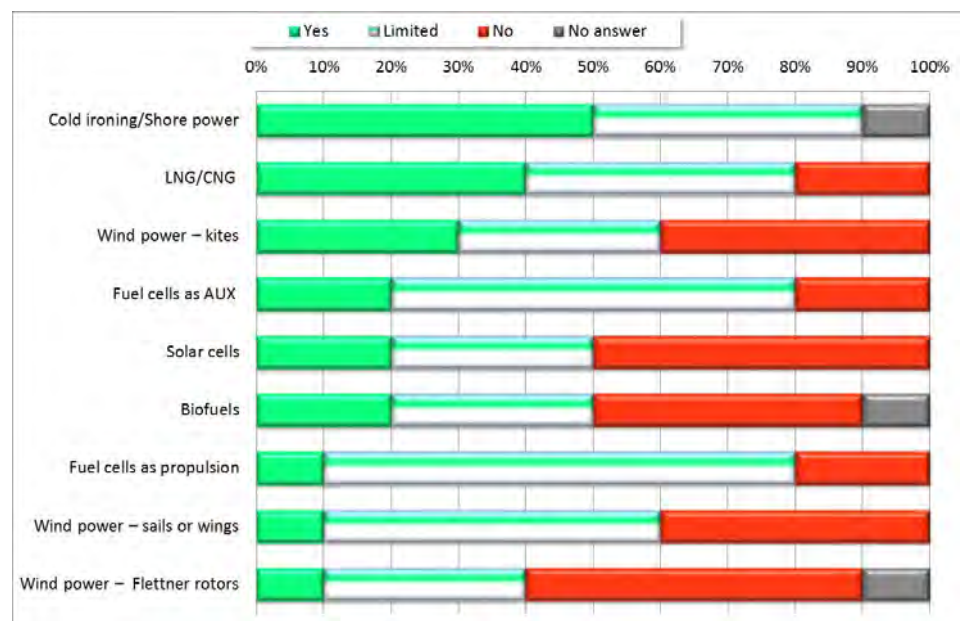
cause some stability problems. The interview partners however know that all of the options are in a trial stage and one ship owner is investigating the impact on ship design. In summary there is interest, but many limitations.

Fuel cells are regarded a promising technology but not mature enough at the moment. There are a number of research projects going regarding their implementation on ships. The application as auxiliary power is more than 5 years away and as main propulsion more than 30 years. None of the interviewed ship owners apply fuel cells on their ships today, but it is known that fuels cells are used for submarines and for small ferries. The barriers are lack of maturity, but also cost. Fuel cells and hydrogen are very expensive compared to other fuels.

Solar cells are only suitable for a niche market like cruise liners, car carriers and ferries (ships with a large available top surfaces). Yet the power generation per square meter is very low.

Biofuels do not save energy and do not seem to be an attractive measure in shipping. There is limited supply of biofuels, no cost advantage and the production is regarded to have very negative environmental impacts. The interviewed cruise liner company stopped the use of biofuels due to costs and bad public reputation.

Figure 14 Alternative fuels and power supplies already applied



Operational measures

General speed reduction is believed to have the highest impact on energy efficiency. However, this issue is still very market driven and depends on charter contracts (charter rate/day) and fuel prices. Further, the ship has a specified design speed and needs to maintain its flexibility in terms of weather, cargo, etc. Otherwise, speed reduction is regarded as a very strong tool, probably the most promising.

Weather routing is applied by all ship owners and is well accepted. The saving potential depends on ship routes. Savings can be made especially on North Atlantic and Pacific routes. The indirect saving is the prediction of arrival time

and therefore the possibility to run the ship at a constant lower speed instead of driving at full load. There are no barriers at all.

Trim optimisation is well accepted in the maritime industry, nearly state of the art. One ship owner started to improve training to raise awareness on the benefits of correct trim in relation to fuel savings. On large container ships savings up to 10% can be achieved. Further improvement would be the combination with ballast water optimisation. There is software available on the market to improve trim and ballast water. There does not seem to be any barrier, instead a medium to high potential for power optimisation.

Voyage optimisation is well known and is applied by most shipping companies. The saving potential is regarded as medium up to high. The barriers are the contracts with charter parties and port mentality.

A lot of effort is put into **the increase of awareness and regular training of the crew**. Awareness is increased by sending monthly environmental bulletins to the crew, increase of competition and comparison of ships regarding fuel efficiency, accidents and emissions. One stakeholder also reported about a propulsion based payment or salary applied in cruise liner industry. Others say that awareness in combination with training decides the most about energy efficiency in shipping. Classification societies support this with a software tool. Some ship owners have environmental officers, which provide on board training for the crew. The saving potential is regarded as very high (up to 20%). There are no barriers at all.

Autopilots optimise the steering of a ship under different weather and load conditions. All interviewed ship owners make use of autopilots in their fleet. One ship owner states that the autopilot is part of their SEEMP. The saving potential is very high and there is room for improvements. There is no barrier at all.

Monitoring of energy consumption is applied by two ship owners. The other two can only record fuel consumption by the amount of fuel bunkered after a voyage, but this is not the same. The monitoring of fuel consumption is regarded to have a high potential, especially for crew awareness training. No barrier was identified, but the authors view is that active energy monitoring instrumentation is very expensive.

Optimised fleet management is applied by three of the ship owners, but there is still space for improvement. The limited information given to this option does not allow identifying any barriers.

Regular hull and propeller cleaning reduces the drag caused by biofouling and is regarded to have a huge saving potential. However, the conventional self-polishing antifouling coatings are not suitable for polishing, as the paint would be polished causing a peak release of biocides into the environment. Only two interviewed shipping companies have implemented the regular propeller and hull cleaning. The other problem is the local release of invasive species, which can cause the same problems like ballast water. This can be subject to local legislation like in Australia and New Zealand. Here the limited application is due to the type of coatings and possibly due to legislation.

Speed reduction due to port efficiency is sometimes applied by two ship owners and is routinely applied in container shipping, but is generally also dependant on the charter contracts. It is believed that there is a high saving opportunity, but it requires a shift in port mentality (e.g. queues in ports). There is also a potential for short sea shipping on fixed routes.

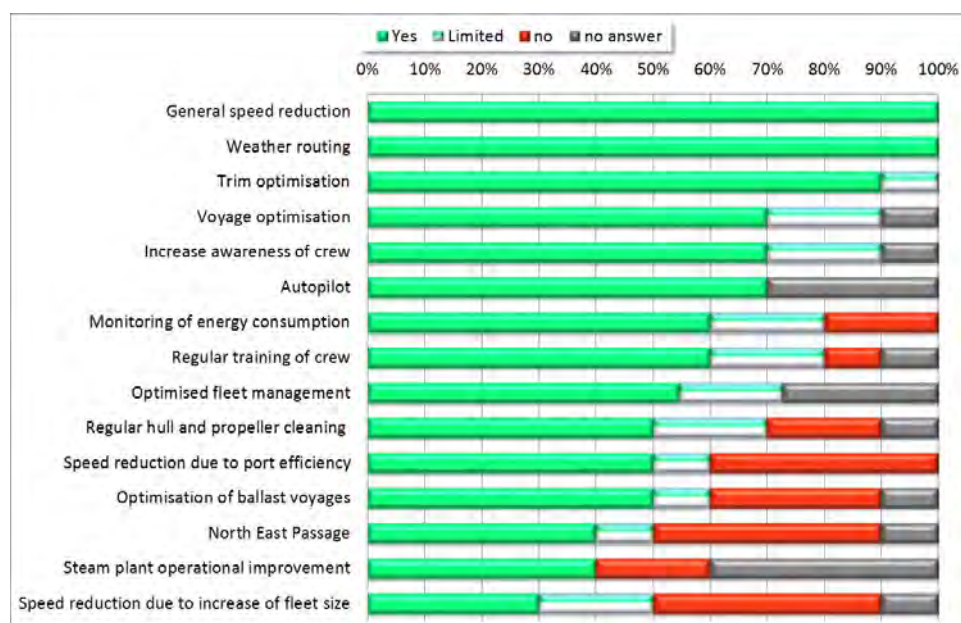
Optimisation of ballast voyages is not applied on cruise liners, as they do not have as much ballast water as other ships and should always carry passengers. Another ship owner currently investigates this option. Otherwise optimisation of ballast voyages is applied and it is well known that ballast water and ballast voyages should be kept at a minimum. The only barrier could be commercial aspects.

North East Passage is a special case of voyage optimisation, but is limited to some months in summer due to ice coverage. Ships sailing the Northern Route require the highest ice class, are guided by ice breakers and require approval from the Russian Authorities. Consequently there are a number of barriers: weather conditions, ships' ice class, costs for ice breakers and time for the Russian approval.

Steam plant operational improvement is regarded as state of the art, but limited to ships that have boilers. Steam plants use the waste heat from the flue gas. Only two of the ship owners apply steam plant optimisation, however some believe that there is a good potential to save energy. The barrier is the principal use of steam plants. Steam as propulsion became very rare.

Speed reduction due to an increase of the fleet size is not applied by any of the interviewed ship owners. The other stakeholders could report that this applied to a limited extent. There is a general agreement that this measure offers a huge opportunity to save energy and to increase the effective use of the fleet. The main barrier is that the fuel is still too cheap compared to the cost of a new ship, which is reflected by a careful cost-benefit calculation. There is also the opportunity to increase the size of single ships to reduce the costs per ton of cargo, which is more common practise.

Figure 15 Operational measures already applied



Analysis of ship owners questionnaires (Figure 16)

Four out of five ship owners answered the detailed questions. One shipping company only reported that most of the technological and operational measures are applied in their fleet. However, this information is not reflected by the graphs as no detailed information was given

The most important energy reducing measures are the operational optimisations (Figure 15), which should be reflected in the MACCs to a large extent. The largest impact on MACCs is expected by the general speed reduction and by increasing the environmental awareness of the crew, followed by the frequent training of the crew. All interviewed shipping companies use weather routing, trim and voyage optimisation and make use of autopilots. However the savings potential is unknown. So far no ship owner increased its fleet size to reduce speed.

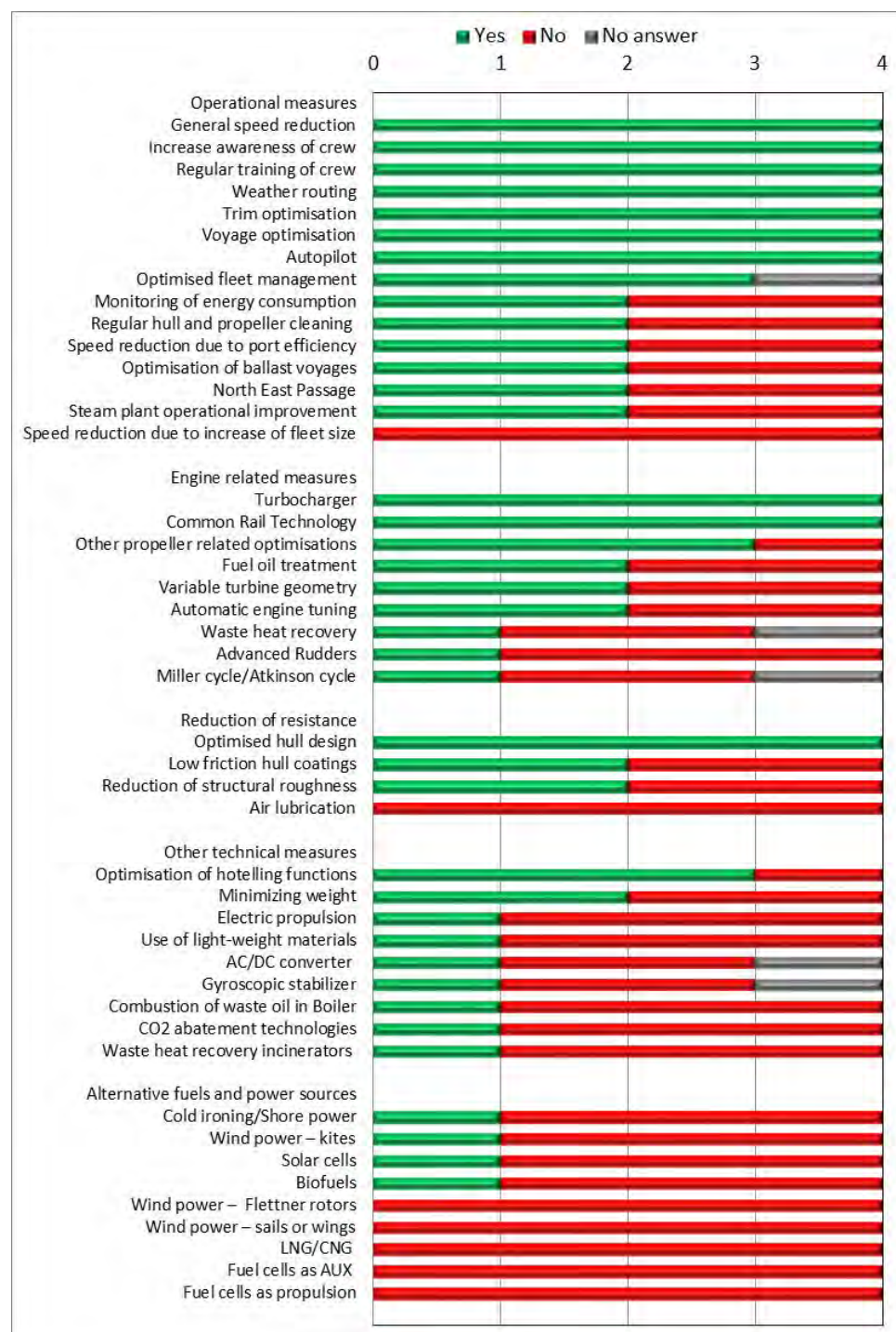
The second important energy measure improvements are engine and propeller related. Most of the engine related measures are state of the art and are implemented. This should be echoed by the MACCs. Most ship owners also try to improve the water flow around the propeller rather than investing in expensive advanced rudders. The reason might be costs and safety aspects.

Reduction of resistance is important as all ship owners optimised their hull design to reduce resistance, whereas reduction of friction by coatings and structural roughness was applied by two ship owners only. The reason is the uncertainty in savings potential and cost-benefit. Air lubrication was not applied at all due to technical constraints and complexity. The latter technology should appear in the MACCs in the higher end.

Other important energy saving measures are optimisation of hotelling functions and minimising weight. All other measures in this section have less importance or sometimes are unknown and are applied in cruise liners only. CO₂ abatement technologies are in a trial stage at one ship owner and are currently planned by another shipping company.

The least promising measures are in the section alternative fuels and power sources. There is huge interest in LNG/CNG as future alternative fuel, but there is a lack of infrastructure and ship construction becomes more expensive. Wind propulsion is applied by one ship owner on a trial basis but the general view is that this is not suitable for most ships. Fuel cells are not ready for the maritime market, especially not as main propulsion. Solar cells deliver too little energy at high costs. Biofuels were applied by one ship owner in the past, but not anymore due to its bad reputation. The figures surely will change and have an impact on MACCs when fuel prices increase.

Figure 16 Analysis of already applied technologies and measures by the different shipping companies



3.4 Conclusion

The barriers for the application of the different energy efficiency measures are largely suitability for the different ship types, costs, uncertainty regarding the saving potential, technical problems and infrastructure for alternative power supplies. The motivation to implement new technologies will be increasing fuel costs. As the MACCs are very dependent on the development of fuel prices, this will change the shape of the curve significantly.

The overall comparison of the different measures showed that the optimisation of operational measures is most important. The reason might be a comparable little effort for the implementation, little technological changes of the ship structure and comparable low investment. Ship owners and other maritime stakeholders both judged these measures as the highest energy saving measure and therefore have a huge impact on the MACCs. In detail the most accepted operational measures are speed reduction, increase of crew awareness and crew training. Awareness is e.g. increased by fuel saving competition between crews and ships.

Engine related measures are well perceived by the ship owners, whereas the knowledge other maritime stakeholders was very low. Most engine related improvements are regarded as state of the art and are also related to reduction of NO_x emissions. They should appear in the MACCs as already applied technologies. Improvements in engine performance are largely dependent on new developments at the engine manufacturers. Barriers for the other technologies are the high costs for e.g. waste heat recovery and advanced rudders. Changes to the propulsion system are not only costly but also regarded as very sensitive in term of ships safety. Therefore there is a strong reluctance for the implementation and should appear in the tail of the MACCS. Fuel oil treatment has the lowest potential and is regarded as very uncertain with little potential and is not implemented on a broad basis.

Reduction of ship hull friction is well accepted as energy saving measure, especially the optimisation of the ship hull design. Optimisation of the ship hull design is state of the art. The only barrier is the acceptance at the shipyards, who do not like changes of designs. The extent of the fuel saving potential is mainly unknown. The barriers for low friction hull coatings are uncertainty of saving potential and high costs. Air lubrication was the least accepted method for a number of technical and operational reasons. Energy savings between 1-10% are possible, but air lubrication is simply not suitable for most ship types and has very limited potential to be implemented.

Other technical measures are less accepted or simply unknown. On the top range are optimisation of hotelling functions and minimisation of weight. The remaining technological measures are mainly applied on cruise liners only and not relevant for other ship types. Here the MACCs should differ significantly for the different types of ships with high impact on cruise liners and less impact for other ship types.

The lowest acceptance was for alternative fuels and alternative power sources. Ship owners largely do not accept alternative power sources and other maritime stakeholders see a limited or no impact at all. Shore power is applied by one ship owner and largely fails due to standardisation of the power supply. Fuel cells are not regarded as mature for shipping and are only applied in a very small niche market. It will take many years until fuel cells can be implemented in ships, especially as main propulsion. Even when the technical problems are solved, the price of the technology and hydrogen has to be much lower to support the implementation of fuel cells. Wind power is applied by

one ship owner only in a ship trial. Kites have the lowest acceptance compared to flettner rotors, sails and wings. Barriers are the handling, costs for the replacement parts plus the fact that they are only useful on relatively slow ships (<15 knots). However, if wind propulsion is applied, there will be a huge impact on the MAC curve, as the saving potential can be very large. The barriers for the use of LNG and CNG are lack of infrastructure for their global supply, increase of shipbuilding costs and space requirements. All ship owners are very interested in the use of LNG/CNG, but observe the developments only. This alternative fuel again can only be applied in a niche market like gas carriers and short sea shipping.

4 Conclusion

This report has analysed and compared three marginal abatement cost curves. It has found that, although the MACCs appear to be different, the differences can be accounted for mainly by the measures that are included in the curves and by the baseline.

The published MACCs do not account for barriers to the implementation of certain measures but rather show the potential emission reductions that could be achieved if all the measures would be implemented. The barriers were studied in a separate part of this study.

The results from the analysis of the barriers has implications for the MACC and give rise to policy recommendations.

4.1 Impact of barriers on MACC

The purpose of a MACC is to show the abatement potential and the associated costs of various emissions target. It can be argued that MACCs should not take barriers into account. However, if barriers are clearly linked to specific technologies, one could merge them with the MACCs.

For several technologies, there appear to be significant technological barriers to the implementation of measures. Some measures are not considered to be effective, e.g. low friction hull coatings and air lubrication. Since both have a considerable potential in the published MACCs, incorporation of this barrier in the MACC would adjust the abatement potential downwards. Other measures are considered to be risky or very costly, e.g. kites and waste heat recovery systems. For some measures, ship owners indicated that fairly long drydocking periods were needed to implement them. Incorporating these barriers in the MACC would shift the curve upwards and reduce the cost-effective abatement potential.

For some technologies, there are no barriers as they are widely applied by the stakeholders contacted. This is the case for speed reduction, weather routing, trim optimisation, turbochargers and a set of other measures. To the extent that these measures have become state of the art, they should be excluded from the MACC. This would reduce both the maximum and the cost-effective abatement potential.

The MACCs studied here do not include optimised design of new build ships. The reason is probably that the costs and the abatement potential are very hard to quantify. However, many stakeholders we have interviewed indicated that substantial savings can be made in this area.

4.2 Policy recommendations

It is clear from both the literature review and the interviews that important barriers exist to the implementation of cost-effective technologies. Two important barriers appear to be the lack of independent information and the split incentive between owners and charterers. Both could potentially be addressed by policy measures.

Independent information can be provided by government-supported research institutes, centers of excellence, and so on. Furthermore, information can be gathered by encouraging pilot projects for the implementation of measures, coupled with dissemination of the experiences gained.

The split incentive can to a degree be remedied by providing the market with good metrics to evaluate the fuel-efficiency of ships. The EEDI could be one of those metrics, although according to many stakeholders, it still has to prove itself in practice. If it turns out to be a reliable metric, regulators could consider extending the EEDI to existing ships in order to increase the transparency in the market.

References

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 Lindtsad (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

Devanney, 2010

Jack Devanney

CO₂ Emissions from Ships: the Case for Taking our Time

Tavenier (FI) : Center for Tankship Excellence, 2010

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., 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

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

IMO, 2009

International consortium led by MARINTEK

2nd IMO GHG Study 2009

London : International Maritime Organization (IMO), 2009

IMO, 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

IMO, 2010b

Prevention of air pollution from ships : Updated Marginal Abatement Cost Curves for shipping (MEPC 60/INF.19)
London : International Maritime Organization (IMO), 2010

Jaffe et al., 2001

A. B. Jaffe, R. G. Newell and R. N. Stavins
Technological change and the environment : Discussion paper
Washington DC : Resources for the Future, 2001

Jaffe and Stavins, 1994

Adam B. Jaffe and R.N. Stavins
The Energy Efficiency Gap: What Does It Mean?
In : Energy Policy, 22(10), 804-81047

Kezicki, 2010

Fabian Kesicki
Marginal Abatement Cost Curves for Policy Making : Expert-Based vs. Model-Derived Curves
London : Energy Institute, University College London, 2010

Nickell, 1978

S.J. Nickell
The investment decisions of firms
Cambridge (UK) : Cambridge University Press, 1978

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

Annex A Abatement measures

A.1 Coverage of studies with regard to the individual abatement measures

The following table gives an overview of the different CO₂ abatement measures that underly the MACCs in the different studies. Note thereby that summing up the ticked boxes per column does not give the actual number of measures considered in the studies. This is the case because both a measure group with which is worked in a study is given (e.g. reduced auxiliary power usage) but also single measures which could be subsumed to this group (e.g. speed control of pumps and fans) with which in the other study is worked are given.

Table 4 CO₂ abatement measures underlying the MACCs of the different studies

	Eide et al. (2011)	IMO et al. (2010a)	CE et al. (2009)
Main engine tuning	-	x	x
Common-rail	-	x	x
Electronic engine control	x	-	-
Frequency converters	x	-	-
Gas fuelled engines	x	-	-
Steam plant operation improvements	x	-	-
Waste heat recovery	x	x	x
Engine monitoring	x	-	-
Propeller-rudder upgrade	-	x	x
Propeller upgrade (nozzle, tip winglet)	x	x	x
Propeller boss cap fins	x	x	x
Improvement flow to/from propeller	x	x	x
Contra-rotating propeller	x	-	-
Propeller performance monitoring	-	-	x
Propeller polishing	x	x	x
Air lubrication	x	x	x
Hull coating	x	x	x
Hull performance monitoring	-	-	x
Hull brushing	-	x	x
Hull hydro-blasting	-	x	x
Dry-dock full blast (old ships)	-	-	x
Optimisation water flow hull openings	-	x	x
Towing kite	x	x	x
Wind power (fixed sails or wings)	x	-	-
Wind engine (Flettner rotor)	-	x	x
Speed reduction due to improvement of port efficiency	x	-	-
Speed reduction 10% (due to fleet increase)	x	x	x
Speed reduction 20% (due to fleet increase)	-	x	x
Reduced auxiliary power usage (low energy lighting etc.)	x	x	x
Speed control of pumps and fans	x	x	x
Energy efficient light system	x	x	x
Exhaust gas boilers on auxiliary engines	x	-	-
Solar panels	x	x	x
Fuel cells used as auxiliary engines	x	-	-

	Eide et al. (2011)	IMO et al. (2010a)	CE et al. (2009)
Wind-powered electric generator	x	-	-
Power management system	-	-	x
Cold ironing	x	-	-
Optimisation trim/draft (based on load condition)	x	x	x
Voyage optimisation using shaft power meter	x	-	x
Voyage optimisation using fuel consumption meter	x	-	x
Voyage execution (const. speed and load; rudder position)	x	-	-
Weather routing	x	x	x
Autopilot upgrade/adjustment	-	x	x

A.2 Measure groups IMO (2010a) and CE et al. (2009)

In IMO (2010a) and in CE et al. (2009) the individual CO₂ abatement measures are grouped. The measures that are not likely to be used together/that exclude each other are thereby allocated to one group. As can be seen in the following overview, in IMO (2010a) five individual measures are taken less into account and two measures were joined, whereas three more measure groups are differentiated. In Table 5 those measure groups that differ are listed first.

Table 5 Comparison of measure groups in IMO (2010a) and CE et al. (2009)

IMO (2010a)		CE et al. (2009)	
Measure Group	Individual Measure	Measure Group	Individual Measure
Weather routing	Weather routing	Voyage and operations options	Weather routing
Autopilot upgrade/adjustment	Autopilot upgrade/adjustment		Autopilot upgrade/adjustment
	-		Optimisation using shaft power meter
	-		Optimisation using fuel consumption meter
Reducing onboard power demand (hotel services)	Low energy lighting	Auxiliary systems	Low energy lighting
Speed control of pumps and fans	Speed control of pumps and fans		Speed control of pumps and fans
	-		Power management
Propeller maintenance	Propeller polishing (at regular intervals)	Propeller maintenance	Propeller brushing (at regular intervals)
	Propeller polishing (when needed; including propeller performance monitoring)		Propeller brushing (increased frequency)
			Propeller performance monitoring

IMO (2010a)		CE et al. (2009)	
Hull coating	Hull coating I	Hull coating and maintenance	Hull coating I
	Hull coating II		Hull coating II
	-		Dry dock full blast
	-		Hull performance monitoring
Hull cleaning	Hull brushing		Hull brushing
	Underwater blast		Underwater blast
Speed reduction	10% speed reduction	Speed reduction	10% speed reduction
	20% speed reduction		20% speed reduction
Optimisation hull openings	Optimisation water flow of hull openings	Retrofit hull improvement	Transverse thruster opening (flow optimisation, grids)
Air lubrication	Air cavity system	Air lubrication	Air cavity system
Propulsion upgrade	Propeller-rudder upgrade	Propeller/propulsion upgrade	Propeller-rudder upgrade
	Propeller upgrade (nozzle, tip winglets, etc.)		Propeller upgrade (nozzle, tip winglets, etc.)
	Propeller boss cap fins		Propeller boss cap fins
Main engine adjustments	Common rail technology	Main engine retrofit measures	Common rail technology
	Main engine tuning		Main engine tuning
Waste heat recovery	Waste heat recovery	Waste heat recovery	Waste heat recovery
Wind power	Towing kite	Wind power	Towing kite
	Wind engines		Wind engines
Solar power	Solar power	Solar power	Solar power

Annex B Questionnaire

Questionnaire for maritime stakeholders

This questionnaire helps to identify the efforts of the maritime industry to reduce GHG emissions. The results will feed into a GHG study and will help to identify the differences in the various published marginal CO₂ abatement cost curves. The study is carried out by CE Delft and Marena Ltd for the Ocean Policy Research Foundation, Japan. Names of companies and individuals will be treated confidential and are only classified into major groups, unless agreed otherwise. We thank all parties for their contribution.

1. Barriers to the implementation of energy saving measures

Several studies have indicated that shipping companies can increase the energy efficiency of their ships at no costs or even at a profit. DNV, for example, has estimated that on average, ships can improve their energy efficiency by 10% while at the same time reducing their costs. What is your opinion about these studies?

1.1 Several studies have looked into the reasons why not all cost-effective efficiency improvements are being implemented. IMarEST (2010) has identified a number of reasons:

1. Technological barriers
 - a. real or perceived risk of failure of a technology
 - b. incompatibility of certain technologies with the ship and/or the routes where it sails
2. Institutional barriers
 - a. split incentive in which the ship owner has to make an investment in a new technology while the charterer receives the benefit of lower fuel consumption
 - b. the split incentive combined with the fact that neither the charter market nor the second hand market pay a premium for fuel efficient ships
 - c. bunker adjustment factors and other financial arrangements which shield the ship operator from the costs of fuel and thus make investments in energy saving less profitable
 - d. lack of information on new technologies and/or the costs associated with finding out about new technologies
3. Financial
 - a. investment appraisal methods in shipping companies which require very short payback times for retrofit technologies
 - b. investment appraisal methods that prescribe a low fuel price in order to account for fuel price uncertainty

Questions

1.1.1. Do you think these barriers exist?

1.1.2. Do you think other barriers are also important? If so, which?

1.1.3. Which barrier or barriers are the most important in your opinion?

1.2. Many stakeholders have perceived the split incentive to be an important reason why not all cost-effective technologies are implemented. This means that a charterer will not pay a premium for a more fuel efficient ship, even though he has to pay less for the fuel.

1.2.1. Is this true, in your opinion, and if so, why isn't the fuel-efficiency reflected in the charter rate?

- 1.2.2 If you charter a ship, do you assess its fuel efficiency and if so, how?
- 1.2.3 Will the increased transparency in the market (e.g. EEDI and EEOI) change this situation?
- 1.2.4 Are some technologies perhaps regarded as risky so that they actually result in lower charter rates? If so, which?
- 1.2.5 How do you think that innovative technologies affect the second hand price of a ship?
- 1.2.6 Do the classification societies approve all technologies?
- 1.2.7 Do you have a specific fuel price in mind when assessing different technologies?
- 1.2.8 **In general**, do you think the general mentality is to watch others before taking action?
- 1.2.1 do shipowners wait for the legislation to be in place before applying an energy saving measure?

2. Energy Efficiency Measures: State of the Art/Plans for the Future

Which energy efficiency measures do you believe is already applied and accepted by shipowners and which are most promising from your point of view? Under comments the measures can be related to certain ship types.

2.1 Technical measures

No.		Already applied	Application planned	(Expected) Energy saving (%)	Costs	Comments
1	Reduction of resistance					
2	Low friction hull coatings to reduce roughness of wetted surface					
3	Reduction of structural roughness (e.g. less hull openings)					
4	Optimised hull design to reduce wave resistance					
5	Air lubrication					
6	Electric propulsion					
	Engine related measures					
7	Turbocharger					
8	Common Rail Technology					
9	Variable turbine geometry					
10	Miller cycle/Atkinson cycle					
11	Automatic engine tuning					
12	Waste heat recovery					
13	Fuel oil treatment e.g.					
14	Advanced Rudders					
15	Other propeller related optimisations					
	Other technical measures					
16	AC/DC converter For the propeller and generator					
17	Optimisation of hotelling functions					

No.		Already applied	Application planned	(Expected) Energy saving (%)	Costs	Comments
18	Minimizing weight					
19	Use of light-weight materials in ship construction					
20	Waste heat recovery incinerators					
21	CO ₂ abatement technologies					
22	Gyroscopic stabiliser					
23	Combustion of waste oil in Boiler					
24	Others					

2.2 Alternative fuels and power sources

No		Already applied	Future potential	(Expected) Energy saving (%)	Costs	Comments
1	Cold ironing/Shore power					
2	Fuel cells as AUX (hybrid auxiliary power generation)					
	Fuel cells as propulsion					
3	LNG/CNG					
4	Biofuels					
6	Wind power – kites					
7	Wind power – sails or wings					
8	Wind power – wind generators (Flettner rotor)					
9	Solar cells					
10	Others					

2.3 Operational measures

No		Already applied	Future potential	(Expected) Energy saving (%)	Costs	Comments
1	General speed reduction					
2	Speed reduction due to port efficiency					
3	Speed reduction due to increase of fleet size					
4	Weather routing					
5	Voyage optimisation					
6	Steam plant operational improvement					
7	North East Passage					
8	Trim optimisation					
9	Optimisation of ballast voyages					
10	Monitoring of energy consumption					
11	Autopilot					
12	Regular hull and propeller cleaning					
13	Increase awareness of crew					
14	Regular training of crew					
15	Optimised fleet management					
16	Others					



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22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23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。

ISBN 978-4-88404-266-0