

米国における船用エンジンの排ガス規制 動向に関する調査

2007年3月

社団法人 日 本 船 用 工 業 会

刊行によせて

当工業会では、我が国の造船関係事業の振興に資するために、競艇公益資金による日本財団の助成を受けて、「造船関連海外情報収集及び海外業務協力事業」を実施しております。その一環としてジェトロ船舶関係海外事務所を拠点として海外の海事関係の情報収集を実施し、収集した情報の有効活用を図るため各種調査報告書を作成しております。

本書は、当工業会が日本貿易振興機構と共同で運営しているジェトロ・ニューヨーク・センター船用機械部にて実施した「米国における船用エンジンの排ガス規制動向に関する調査」の結果をとりまとめたものです。

関係各位に有効にご活用いただければ幸いです。

2007 年 3 月

社団法人 日 本 船 用 工 業 会

はじめに

米国においては、環境に対する国民の意識が高く、環境と健康を守るため全米大気質基準が定められ、これを遵守するため、発電所等の汚染物発生源に対して厳しい排ガス規制を実施している。船舶もこの例外ではなく、窒素酸化物(NO_x)、炭化水素(HC)、一酸化炭素(CO)等の排出基準が定められ、規制が実施されている。

ディーゼルエンジンに関しては、エンジンの用途と大きさに応じて、1999 年から 2007 年までに排ガス規制が順次段階的に強化され、実施されている(いわゆる第 2 次規制)。この規制は、2005 年 5 月から世界的に実施されている MARPOL 条約附属書 VI (国際基準)が、単に NO_x と窒素酸化物(SO_x)についてのみ緩やかな基準を定めているのに比べ、複雑で厳しい基準である。ただし、外航貨物船のような大型船のエンジンについては、国際基準に整合させて基準を設定している。

米国環境保護庁(EPA)は、この規制をさらに進めるため、大型船のエンジンを除くエンジンに対し、高速バス等と同様の排ガス対策を導入し 2011 年モデルから実施するため、早急に規則を制定する提案を行っている(いわゆる第 3 次規制)。規則案は、 NO_x と PM の排出を 90 パーセント減少させるもので、クリアするためには触媒を用いた排気ガスの後処理や硫黄濃度 15ppm 以下の燃料(国際基準の 1 万分の 1)の使用が必要となるとも言われている。陸上車両部門では、当該規制に対応した設計が行われているが、船用部門では過去の対策と一線を画するもので、触媒設置スペースや大きな負荷変動に対応する触媒技術が未開発といった多くの技術的課題が指摘されている。

また、EPA は、国際基準に整合している大型船のエンジン基準を小型船エンジン並に引き上げることを考えており、この米国基準の強化にともない、国際基準の改正を国際海事機関(IMO)に対して提案し、行うこととしている。

さらに、米国では連邦規制とは別にカリフォルニア州政府の規制を実施しており、2007 年から補機に対して硫黄濃度 0.5%以下の燃料の使用を義務付けたり、港湾内停泊時の陸電使用の取組み等が行なわれており、これらは港湾内大気汚染防止策の先例となる可能性もある。

一方、ガソリンエンジンについては、連邦規制により、船外機と水上オートバイに対して、1998 年から 2006 年まで HC と NO_x の規制が順次強化されてきている。さらにカリフォルニア州政府は、2002 年から 2008 年までに連邦基準の 2 倍の厳しい基準を適応している。この規制をクリアするため、日米の船外機、水上オートバイメーカーは、サバイバルゲームを繰り広げている。この排ガス規制の強化により、従来は 2 ストロークエンジンが主流であったものが 4 ストロークエンジンに移りつつあり、ユーザーの嗜好自体も静寂で燃費の良い 4 ストロークに移ってきたという効果を生んでいる。

さらにカリフォルニア州政府は、連邦でも規制されていない船内機/船内外機に対して、船外機基準よりも 3 倍も厳しい基準を 2007 年からかけている。船用エンジンの基

準も自動車エンジンを追従するといった規制の動向を踏まえると、船外機、水上オートバイもさらに基準が強化されられると考えられる。そして、最早このレベルでは、自動車採用されている希薄燃焼技術や触媒技術の導入が必要となるものと考えられる。

米国市場にエンジンを販売したり、米国港湾内に船舶が停泊する場合等は、米国基準に満足しなければならないため、かかる規制動向を把握した上で技術的課題を克服する等の対応が不可欠である。また、各国とも厳しい社会の要請から、環境規制については国際的に厳しくなる傾向があり、この場合に世界に先駆けた米国基準が国際基準のベースとなる可能性は高く、国際的な排ガス対策への適合能力がエンジンメーカーとして生き残る鍵となると考えられる。

そのため、本調査では、米国におけるエンジン排ガス対策技術の権威であるサウスウエスト・リサーチ・インスティテュート（Southwest Research Institute）からの委託調査結果とその他の文献調査を基に、米国の連邦及び州における排ガス規制動向とエンジンの排ガス対策技術を調査するとともに、今後の規制強化の行方とそれに対応するために技術開発が必要な技術を考察した。排ガス対策はエンジンの基本設計に影響を及ぼすため、中長期的な視野に立った技術開発が必要となる。この調査結果が、日本船用エンジンメーカーの今後の技術開発戦略の検討に資することができれば幸いである。

ジェトロ・ニューヨーク・センター 船用機械部

Director	渡田 滋彦
Researcher	上野 まな美

目 次

I. ディーゼルエンジン

1. 規制動向	1
1-1 世界の排ガス規制	1
1-2 米国（連邦）の排ガス規制	3
1-2-1 大気浄化法	3
1-2-2 現行及び予定された規制動向	3
1-2-2-1 小型船舶（SMALL）の規制	4
1-2-2-2 商業用船舶 C1（COMMERCIAL C1）及び商業用船舶 C2（COMMERCIAL C2）	4
1-2-2-3 商業用船舶 C3（COMMERCIAL C3）	6
1-2-2-4 レクリエーション用船舶（RECREATIONAL）	6
1-2-3 3次規制への移行	6
1-2-3-1 3次規制による包括的な規制強化	6
1-2-3-2 3次規制の必要性	7
1-2-3-3 3次規制実施の問題点	7
1-2-3-4 国際基準の強化	8
1-2-4 燃料規制（SOX 対策）の取組み	8
1-3 カリフォルニア州の排ガス規制	9
2. 技術の紹介	
2-1 自然吸気（NATURALLY ASPIRATED:NA）	11
2-2 ターボチャージング（TURBOCHARGING）	11
2-3 スーパーチャージング（SUPERCHARGING）	12
2-4 コモンレール方式（COMMON RAIL INJECTION）	12
2-5 ピエゾ素子燃料噴射（PIEZO-INJECTION）	12
2-6 排気ガス再循環（EXHAUST GAS RECIRCULATION : EGR）	13
2-7 可変バルブ駆動技術（VARIABLE VALVE ACTUATION : VVA）	14
2-8 最新型センサーとアクチュエータ（NEW SENSORS AND ACTUATORS）	14
2-9 予混合吸気圧縮点火（HOMOGENEOUS CHARGE COMPRESSION IGNITION: HCCI）	14
2-10 オーバー・エキスパンディッド・サイクル（OVER-EXPANDED CYCLE）	15
2-11 低温拡散燃料（LOW TEMPERATURE DIESEL COMBUSTION）	15
2-12 NOx 吸蔵触媒（LEAN NOx ADSORBER CATALYST : LNT）	17
2-13 選択触媒還元方式（SELECTIVE CATALYTIC REDUCTION : SCR）	17
2-14 すす捕集フィルタ（DIESEL PARTICULATE FILTER : DPF）	18
2-15 DPNR（DIESEL PARTICULATE AND NOx REDUCTION SYSTEM）	18
2-16 海水洗浄（SEA WATER SCRUBBING）	18
2-17 ディーゼル燃料の低硫黄化	19
2-18 バイオ燃料エンジン（BIOFUEL）	20
2-19 天然ガス・エンジン（NATURAL GAS）	20
2-20 沿岸電力による排ガス削減	21
2-21 高性能海洋排ガス調整システム（AMECS）	21
3. 今後の技術	
3-1 ディーゼルエンジン技術の今後	22
3-2 日本への影響	24

II. ガソリンエンジン

1. 規制動向	26
1-1 米国（連邦）における排ガス規制	26
1-1-1 船外機・水上オートバイ	26
1-1-2 船内機・船内外機	28
1-1-3 船用小型発電機（出力 19KW 以下）	28
1-1-4 船用大型発電機（出力 19KW 超）	28
1-1-5 燃料蒸発ガス規制	28
1-2 カリフォルニア州の排ガス規制	30
1-2-1 船外機・水上オートバイ	30
1-2-2 船内機・船内外機	30
2. 技術の紹介	31
2-1 船外機エンジン概要	31
2-2 2 ストロークエンジン	31
2-3 4 ストロークエンジン	32
2-4 ガソリンエンジン技術	34
2-4-1 直噴 2 ストローク、成層チャージ燃焼 (DIRECT INJECTION 2-STROKE, STRATIFIED-CHARGE)	34
2-4-2 直噴 4 ストローク・リーン燃料 (DIRECT INJECTION 4-STROKE LEAN BURN)	35
2-4-3 ストライキによる直噴 4 ストローク (DIRECTED INJECTION 4-STROKE STOICHIOMETRIC)	35
2-4-4 ターボチャージング (TURBOCHARGING)	35
2-4-5 スーパーチャージング (SUPERCHARGING)	36
2-4-6 排気ガス再循環 (EXHAUST GAS RECIRCULATION : EGR)	36
2-4-7 可変バルブ駆動技術 (VARIABLE VALVE ACTUATION : VVA)	37
2-4-8 高エネルギー点火システム (HIGH ENERGY IGNITION SYSTEMS)	37
2-4-9 オーバー・エキスパンディッド・サイクル (OVER-EXPANDED CYCLE)	37
2-4-10 予混合吸気圧縮点火 (HOMOGENEOUS CHARGE COMPRESSION IGNITION: HCCI)	38
2-4-11 酸化触媒 (OXIDATION CATALYST)	38
2-4-12 三元触媒 (3-WAY CATALYST)	39
2-4-13 NOx 吸蔵触媒 (LEAN NOx ADSORBER CATALYST : LNT)	39
2-4-14 最新型センサーとアクチュエータ (NEW SENSORS AND ACTUATORS)	40
3. 今後の技術	
3-1 ガソリンエンジン技術の今後	41
3-2 日本への影響	43

I. ディーゼルエンジン

1. 規制動向

1-1 世界の排ガス規制

ディーゼルエンジンは、一般船舶にとって最も一般的な必要不可欠な推進動力である。

この船用ディーゼルエンジンからの排出ガスを規制する国際的な枠組みとして、1997 年に採択された海洋汚染防止条約(MARPOL 条約)附属書 VI「大気汚染防止」がある。同条約は 2005 年 5 月 19 日に発効し、これにより、窒素酸化物 (NO_x) と硫黄酸化物 (SO_x) の排出量が制限されることとなり、世界中の船用エンジンが基準に適合するために検査を受けなければならなくなった。

<NO_x 規制>

同条約では、出力 130 kW 以上のディーゼルエンジンは、図 I-1-1 の NO_x 排出基準に適合しなければならない。

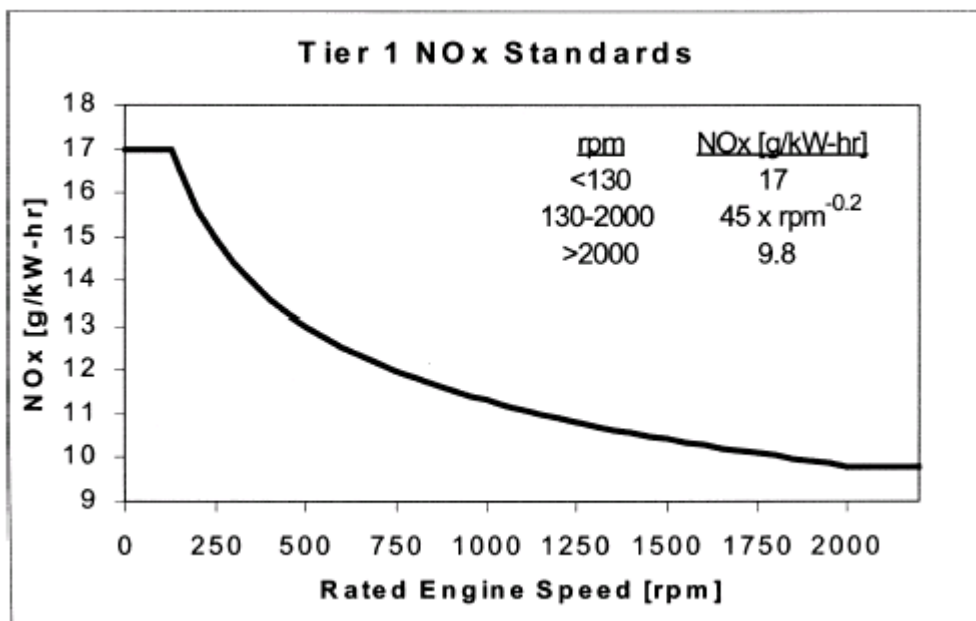


図 I-1-1 NO_x 排出基準

<SO_x 規制>

すべての海域で、硫黄分濃度 4.5% 以下の燃料を、また、特に硫黄酸化物排出規制特定海域 (SECA) に指定された海域では、硫黄分濃度 1.5% 以下の燃料を使用しなければならないこととなっている。現在のところ指定されている SECA は、バルト海 (2006 年 5 月から規制実施) と北海 (2007 年 11 月から規制実施) の 2 つである。

しかし、同条約の規制を更に強化する必要性が認識され、現在、国際海事機関 (IMO) では、強化するための技術的な検討が既に始まっている。2006 年 11 月に開催された大気汚染ワーキンググループ中間会合では、次の点が合意されている。

<NOx 規制の見直し>

エンジン内技術で NOx 排出量を 15%～20%減少させる 2 次規制を 2010 年から実施する。

後処理技術等の最新技術を用いて更に減少させる 3 次規制はとりあえず 2015 年から実施する (仮合意)。

NOx 基準値については、現行条約どおりすべてのエンジンを対象に一律に定格回転数に応じて規定するか、使用燃料 (Marine gas oil (硫黄分 0.2%以下 : 低硫黄留出油)、Marine diesel oil (硫黄分 2.0%以下 : A 重油)、Heavy fuel oil (硫黄分 4.5%以下 : C 重油)) ごとに分けて定格回転数に応じて規定するか、2 つのオプションがあることが認識された。

<SOx 規制の見直し>

今後の規制では、次のオプションがあることが認識された。

オプション A: 一般海域及び SECA の規制は現行どおり。

オプション B : 一般海域現行どおり。SECA は、1.0%(2010 年想定)、0.5%(2015 年想定)の 2 段階で強化する。

オプション C1: すべての海域で、Distillate fuel(A 重油)を使用し硫黄分濃度を 1.0%(2010 年想定)、0.5%(2015 年想定)の 2 段階で強化する。ただし、時期は精製施設の整備状況に応じ検討する。

オプション C2: すべての海域で、Distillate fuel(A 重油)及び Residual fuel(C 重油)の使用を認めつつ、燃料油中硫黄分又は排ガス洗浄装置等同等措置で、2 段階の硫黄分濃度 1.0%(2010 年想定)、0.5%(2015 年想定)レベルの排ガスを担保する。

これらは、まだ議論が始まったばかりのワーキンググループレベルでの技術的検討の結果であり、今後どのような形になっていくか予断を許さない。

しかし、このような方向性に対して、NOx 規制強化にともなうエンジンの技術上の問題の他、SOx に関する燃料規制の強化に関して大きな問題点が指摘されている。燃料規制に関して、すべての海域一律に規制を強化するのか、汚染の激しい海域を SECA として指定し規制強化するのか、という論点がクローズアップされている。海運界は、運航コストの関係からできるだけ粗悪油を使用しやむを得ない SECA だけ上質油を使用するというオプションではなく、むしろ複雑なオペレーションを強いられる地域規制を嫌っており、Intertanko によれば、規制強化ならば、一律低硫黄燃料にすることを望むと主張しているのには興味深い。また、同様にエンジンメーカーも燃料の切り替えということに技術的問題があることを強調していた。他方、船舶燃料業界は、低硫黄濃度の上質油を全世界的に供給することに困難さを示しており、かなり根本的な問題と受け止められる。

こういった国際的な取組みとは別に、欧米各国は独自規制の動きを見せている。

30 リットル以下の排気量の船舶エンジンに関しては、米国では 2006 年～2009 年にかけて自国籍の船舶に、欧州では沿岸及び内陸水域 (Inland Water) で活動する船舶に対して HC、NOx、一酸化炭素 (CO) の規制導入が進められている。

また、欧米では、燃料の硫黄含有量に対しても厳しい削減を求めていく方針を打ち出している。すでに、米国アラスカ、ハワイ、フロリダ、カリフォルニアの他、オランダのロッテルダム、独ハンブルクなどで目視できる排気ガスに対して独自の規制が設けられている。

いくつかの国では、規制とは別のスキームで排ガス削減対策を実施している。例えば、スウェーデンでは、環境保護に注力した港が建設され、停泊船に別途料金を課金している。また、ノルウェーでは、環境保護への対策によって税の課金額を変えるなどの工夫を凝らしている。さらに、米環境保護庁（EPA）の「ブルースカイ・シリーズ（Blue Sky Series）」やドイツの「ブルー・エンジェル（Blue Angel）」のように排ガス規制に準拠したエンジンを製造させるための推奨プログラム等も展開されている。

1-2 米国(連邦)の排ガス規制

1-2-1 大気浄化法

米国の大気汚染が進む中、EPA に対して排気ガス規制を求める声が高まっていた。米国では、すでに 1970 年に大気汚染を規制するための連邦法「The Clean Act:CAA」が公布され、その後 1990 年にさらに規制を強化するための修正法が導入された。CAA は、大気汚染物質として基準汚染物質(Criteria Pollutant : CP)を定めるとともに、CP に対して環境と健康を守るための基準として連邦大気基準(National Air Ambient Quality Standard : NAAQS)に定め、米国内のすべての地域が NAAQS を満たすように大気汚染対策を実施することを求めている。

CP には、オゾン、微粒子 (PM)、CO、NO_x、SO_x 及び鉛が定められている。CO、NO_x、SO_x、PM は煙霧スモッグの原因となり、NO_x と炭化水素(HC)はオゾンを生成し、光化学スモッグになり、視覚障害や喘息等の原因になる。

船用エンジンの排ガス規制は、発電施設や車両等他の汚染物発生源に対する対策とともに、この NAAQS を遵守するための一環であり、国際基準が NO_x、SO_x に限られているのとは異なり、HC、PM、CO 等に関する排出規制も含まれている。

しかし、当初実際に規制の中心になっていたのは自動車を含む高速道路を走行できる車両等で、船舶等を含むそれ以外の移動体への規制はほとんどなかった。その後の EPA の調査によって、自動車以外の移動体による排気ガスの影響が注目を浴びるようになってきたのである。

現在、米国は附属書 VI を批准していないが、同条約発効以前から自国内では独自の規制を実施して来ており、段階的な規制強化を積極的に進めている。

1-2-2 現行及び予定された規制動向

船用ディーゼルエンジンは、表 I-1-1 「船用ディーゼルエンジンの規制分類」のとおり、大きく分けて次の分類で規制されている。

表 I-1-1 船用ディーゼルエンジンの規制分類

分類	出力	気筒あたりの排気量	規則公布時期
小型 (Small)	≤37kW	制限なし	1998年
商業用船舶C1 (Commercial 1)	>37kW	5litters>D	1999年
商業用船舶C2 (Commercial 2)	>37kW	5litters≤D<30litters	1999年
商業用船舶C3 (Commercial 3)	>37kW	30litters≤D	2003年
レクリエーション用 (Recreational)	>37kW	5litters>D	2003年

1-2-2-1 小型船舶 (Small) の規制

出力 37kW (50 馬力) 未満の小型エンジンについては、船舶エンジンに特化した基準ではなく、1998 年の非道路用エンジン規則の中に組み込まれ、陸上で使用されるエンジンと同一の基準が適用される。米国では、同カテゴリーのエンジンが年間約 6,000 基製造されている。

具体的な基準は、表 I-1-2「小型船舶(Small)」分類の排出基準」のように出力に応じて、1 次(Tier1)、2 次(Tier2)規制に段階的に導入される。(40CFR 89)

表 I-1-2 小型船舶 (Small) の排出基準

排出基準単位 : g/kW・hr

分類	出力	CO	NO _x +HC	PM	規制分類	執行日
小型	出力<8kW	8.0	10.5	1.00	第1次規制	2000年
		8.0	7.5	0.80	第2次規制	2005年
	8kW≤出力<19kW	6.6	9.5	0.80	第1次規制	2000年
		6.6	7.5	0.80	第2次規制	2005年
	19kW≤出力<37kW	5.5	9.5	0.80	第1次規制	1999年
		5.5	7.5	0.60	第2次規制	2004年

1-2-2-2 商業用船舶 C1(Commercial C1)及び商業用船舶 C2(Commercial C2)

この分類のエンジンは、出力 500～8,000kW (700～1 万 1,000 馬力) である。エンジンの用途としては、タグボート、押船、供給船、漁船等の推進機関及び発電原動機に用いられる。米国では、C1 分類のエンジンが年間約 5,000 基、C2 分類のエンジンが年間約 100 基製造されている。

具体的な基準は、1 次(Tier1)、2 次(Tier2)規制と段階的に導入される。(40CFR94)

(1) 1 次(Tier1)規制

1 次規制は、NO_x 排出基準のみが定められた附属書 VI と同一基準である(ただし、試験方法に一部変更点あり)。

1999年船用エンジン排出基準では、任意基準として導入されたが、附属書 VI の発効が目前に迫ったことから、2003 年基準により 2004 年 1 月 1 日から強制化された。

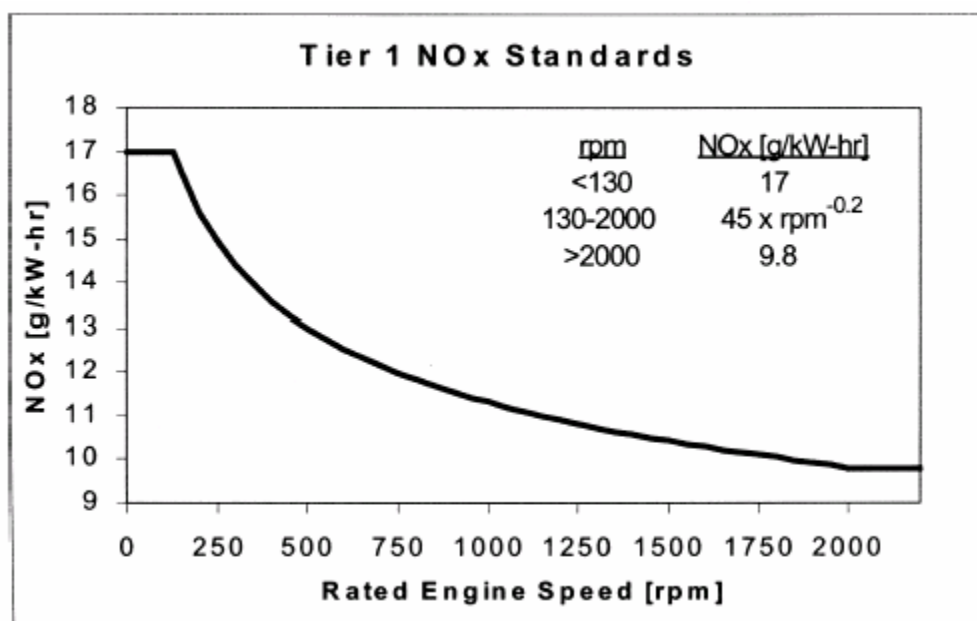


図 I-1-2 C1, C2 分類の 1 次規制 NOx 排出基準

(2)2 次(Tier2)規制

2 次規制は、表 1-1-3「C1, C2 分類の 2 次規制排出基準」に示すように、商業用 C1(Commercial C1) 及び商業用 C2(Commercial C2)の分類を更に出力と気筒当たりの排気量で細分化して、排出基準を定め、その施行日を定めている。この 2 次規制は、2004 年から 2007 年までに実施されることになっている。この 2 次規制は、1999 年船用エンジン排出基準により導入された。

商業用 C1 は、すでに規制を実施済みである。一方の商業用 C2 の規制は、すべて 2008 年 1 月以後になる。レクリエーション用機関への実施は、2006 年から開始されている。

表 I-1-3 C1 C2 分類の排出基準 (2 次規制)

排出基準単位 (g/kW-hr)

	気筒あたりの排気量 (D) 等	CO	NOx+HC	PM	執行日
商業用船舶C1	$D < 0.9 \text{ liters}$	5.0	7.5	0.40	2005年
	$0.9 \text{ liters} \leq D < 1.2 \text{ liters}$	5.0	7.2	0.30	2004年
	$1.2 \text{ liters} \leq D < 2.5 \text{ liters}$	5.0	7.2	0.20	2004年
	$2.5 \text{ liters} \leq D < 5.0 \text{ liters}$	5.0	7.2	0.20	2007年
商業用船舶C2	$5.0 \text{ liters} \leq D < 15 \text{ liters}$	5.0	7.8	0.27	2007年
	$15 \text{ liters} \leq D < 20 \text{ liters}$ 出力 < 3300kW	5.0	8.7	0.50	2007年
		5.0			2007年
	$15 \text{ liters} \leq D < 20 \text{ liters}$ 出力 $\geq 3300 \text{ kW}$	5.0	9.8	0.50	2007年
		5.0			2007年
	$20 \text{ liters} \leq D < 25 \text{ liters}$	5.0	9.8	0.50	2007年
	$25 \text{ liters} \leq D < 30 \text{ liters}$	5.0	11.0	0.50	2007年

1-2-2-3 商業用船舶 C3(Commercial C3)

この分類のエンジンは、出力 2,500～7 万キロワット (3,000～10 万馬力) である。エンジンの用途としては、コンテナ船、油タンカー、バルクキャリアー、クルーズ船等の大型外洋船の推進機関に用いられる。

排出基準は、C1、C2 分類の 1 次規制と同様に、NO_x 排出基準のみが定められた附属書 VI と同一基準である。1999 年船用エンジン排出基準では、任意基準として導入されたが、附属書 VI の発効が目前に迫ったことから、2003 年基準により 2004 年 1 月 1 日から強制化された。

1-2-2-4 レクリエーション用船舶(Recreational)

この分類のエンジンは、C1 分類と同じ規模のエンジンである。エンジンの用途としては、ヨット、クルーザー等に用いられる。米国では、この分類のエンジンは、年間約 1 万基製造されている。

具体的な基準は、表 I-1-4 「レクリエーション用分類の排出基準」に示すように、商業用 C1(Commercial C1)分類の 2 次規制と同様であるが、施行日が 2 年遅らされている。本基準は、2003 年のレクリエーション車両規則に組み込まれている。(40CFR 94)

表 I-1-4 レクリエーション用分類の排出基準 (2 次規制)

排出基準単位 (g/kW-hr)

	気筒あたりの排気量 (D) 等	CO	NO _x +HC	PM	執行日
商業用船舶 C1	$0.5\text{litters} \leq D < 0.9\text{litters}$	5.0	7.5	0.40	2007年
	$0.9\text{litters} \leq D < 1.2\text{litters}$	5.0	7.2	0.30	2006年
	$1.2\text{litters} \leq D < 2.5\text{litters}$	5.0	7.2	0.20	2006年
	$2.5\text{litters} \leq D < 5.0\text{litters}$	5.0	7.2	0.20	2009年

1-2-3 3 次規制への移行

1-2-3-1 3 次規制による包括的な規制強化

前述のとおり、2004 年から 2009 年まで、船用ディーゼルエンジンについては用途、出力、気筒当たりの排気量に応じて順次 2 次規制が開始されているが、EPA は、機関車用ディーゼルエンジンとともに、更に厳しい 3 次規制を 2011 年から開始したいとして、規則案に関する意見照会(規則策定に関する先行通知(Advanced Notice of Proposed Rule Making:ANPRM))を 2004 年 6 月に官報に掲載した(Federal Register/Vol.69, No.124/Tue., June 29, 2004/Proposed Rules)。EPA は、当該 ANPRM の意見を取り入れた上で 2005 年中頃までに具体的な規則案を作成し、2006 年中頃までに最終規則を公布したいとしている (2007 年 3 月時点で未実施)。

基準の内容としては、商業用船舶 C3(Commercial C3)を除くすべての分類の船用エンジンに対して、2007 年/2010 年の高速道路用エンジン(バス、トラック等)に対する基準及びそれからやや遅れて同等の基準が実施される非道路用ディーゼルエンジン(建設機械、農業機械等)の 4 次規制と同等の基準を適用するというものである。表 I-1-5 「非道路用ディーゼルエンジン (4 次規制) の排出基準」に示すとおり、提案された 3 次規制は、2 次規制に比べきわめて厳しいもので、NO_x と PM の排出量が 90%以上も減少されている。これは、硫黄分 15ppm(parts per million)のディーゼル燃料を使用し、高効率触媒後処理技術を用いて達成できるものであり、陸上用エンジンで確立した技術を船用ディーゼルエンジンにも導入しようというものである。

表 I-1-5 非道路用ディーゼルエンジン（4 次規制）の排出基準

排出基準単位 (g/kW-hr)

出力	NMHC+NO _x	NMHC	NO _x	PM	執行日
出力<1.85kW	5.6	－	－	0.3	2008年
1.86kW≤出力<5.55kW	3.5	－	－	0.02****	2013年
5.55kW≤出力<12.95kW	－	0.14	0.3	0.01	2012年
12.95kW≤出力<55.5kW	－	0.14	0.3	0.01	2011年
55.5≤出力	－	0.3	2.6***	0.075	2011年
	－	0.14**	2.6***	0.03**	2015年

注 1：NMHC は、非メタン炭化水素（Non Methane Hydro Carbon）を示す。

注 2（**）発動機以外のものに対する基準を示している。発電原動機の基準は、NMHC 0.14 PM 0.02 である。

注 3（***）88.8kW 以上の発動機については、NO_x 値が 0.5 となる。

注 4（****）中間基準として 2008 年より、PM 基準値が現行基準の 50%となる。

1-2-3-2 3 次規制の必要性

このような厳しい 3 次規制導入の背景として、EPA は、連邦大気基準(NAAQS)を達成できていない地域が多く存在することから、更なる規制強化が必要であると述べている。

オゾンに関して、連邦全体で 474 地域の一部又は全域で NAAQS を達成できておらず、1 億 5,900 万人が基準未達成地域での居住を余儀なくされている。また、PM に関しては、6,500 万人が基準未達成地域に居住している。地方政府は、基準未達成地域が基準を達成できるよう対策を講じなければならないが、この 3 次規制は、基準達成に大きな役割を担うものと考えられる。

対策を講じなければ、船舶及び機関車のディーゼルエンジンからの NO_x と PM の排出量は、これからも増えつづけるものと考えられ、一方、陸上用エンジンは、厳しい排出基準の適用により排出量は減少する。これらを考え合わせて試算すると、2030 年までに移動体からの排出量に占める船舶及び機関車の割合は、NO_x で 27 パーセント、PM で 45 パーセントにもなる。

このように船舶等のエンジンは、将来的に大きな大気汚染源となるが、一方、これらのエンジンは、陸上用エンジンから転用されたものが多く、陸上用エンジンの後処理技術は、船舶等に適用可能であろう。

1-2-3-3 3 次規制実施の問題点

EPA は、船用ディーゼルエンジンに対する 2 次規制についても、高速道路用エンジン基準及び非道路用ディーゼルエンジン基準と同様な基準を導入した経緯もあり、3 次規制についてもこれらの陸上用エンジンの基準を導入することに大きな問題はないと見ている。しかし、EPA は、船舶使用の特殊性に起因する技術的問題を指摘している。

(1)排気温度

触媒処理技術には、最低使用温度の制限がある。つまり、ある一定以上の温度でないと触媒の化学反応が効率的に進まないという特性がある。排気温度は、出力に依存し出力が高いと排気温度が上がるが、低いと温度は下がる。タグボート等では、大部分が低負荷(低出力)の運航で、大型船を押す時のみ高負荷(高出力)になる。こういったエンジンの排気温度は、触媒の最低使用温度を下回るおそれが

あるため、排気温度を高くするメカニズムを開発する必要があるかもしれない。

(2) 排気装置の表面温度

USCG が定めた安全規則により、火災防止の観点から、排気装置の表面温度は 100℃以下とすることとされている。そのため、船舶の排気管は、断熱カバーを行ったり、排気管を水で冷やしたり、排ガスを水と混合し、排気温度を下げたりしている。特に、レクリエーションボートや小型商業船では、水を用いた処理を行っており、この場合には、排気温度そのものが下がるため、触媒が機能しなくなる。この問題を克服するような設計変更が余儀なくされる。

1-2-3-4 国際基準の強化

上記のとおり、商業用 C3(Commercial C3)を除くすべての船舶には、2 次規制が実施され、そして 3 次規制が検討されている。他方、大型外洋船舶に搭載される C3 エンジンについては、未だに附属書 VI と同一基準で 1 次規制が適用されているところである。しかし、その C3 エンジンに対しても、2003 年船用エンジン排出基準により、EPA は 2007 年 4 月までに 2 次規制の基準を採用することとされている。

C3 エンジンに対して 2 次規制の基準を適用するに当たって、大型エンジンに水乳化 (Water Emulsification) や触媒といった先進技術の採用が必要となるが、エンジンメーカーでは、既に先進技術を適用したエンジンを開発している。EPA では、先進技術に関して多くの技術的知見を有しているが、一般市場での実用化には、燃料中の硫黄分濃度の影響、低負荷時の排ガス濃度、微粒子 (PM) の排出等の未解決の課題もあり、これらの課題を数年のうちに解決する必要があるとしている。

また、大型外洋船舶には外国から来る船舶も含まれることから、EPA は、C3 エンジンに対する 2 次規制基準の適用に当たって、米国の港湾に入港する外国船舶に対しても適用すべきか否かを検討している。外国船舶には、国際基準が適用されているので、EPA は、IMO における検討に参加して国際基準をより厳しくすることについて、提案していくこととしている。前述したがすでに、SO_xに関しては、IMO にあわせて自国の規制を強化する方針を打ち出している。

1-2-4 燃料規制(SO_x 対策)の取組み

米国は 2006 年、附属書 VI に船舶を準拠させるために、自国の排ガス規制基準を引き上げる独自の SO_x 排出規制区域 (Sulphur Emission Control Area: SECA) を設定する方針を打ち出した。最終的には 2008 年実施としているが、議会の可決が必要である。

2006 年 5 月にバルト海域が SECA として規制実施となり、附属書 VI によると、同区域では、船舶エンジンの燃料の硫黄含有量が 1.5%以下でなければならないとしている。しかし、その規制に従ったのは、船舶全体のわずか 25%以下にとどまっている。最大の原因として、欧州連合 (EU) 及び IMO に規制に準拠させる強制力がなく、罰則が存在しないことが指摘されている。このため、米国では、SECA の規制に準拠させるため、自国の規制を引き上げ、船舶に対して対応を強制的に求めていく。

こうした規制強化は、燃料消費市場にも影響を与えることになる。例えば、現在、低硫黄燃料への需要は、向こう 5 年間で 2,500 万トンに達すると見られているが、SECA を執行することによって同燃料の需要は 4,500 万トンに増大すると見ている。

1-3 カリフォルニア州の排ガス規制

米国全体(連邦)としての排ガス規制とは別に、州政府も独自に規制を行うことが米国の特徴である。その中でも、カリフォルニア州は、これまで他州に見られない積極性で排ガス規制を推進してきた。これは、同州が米国で最も大気汚染が深刻であるという背景がある。このため、同州はすでに CAA が制定された段階から独立立法権を持ち、独自の規制を強化してきた。その結果現在では、ガソリンエンジン等一部の基準について先にカリフォルニア州大気資源局 (California Air Resource Board: CARB) が基準作成し、これを連邦政府の EPA が追随する形で導入するという構図もできあがっている。

表 I-1-6 2005 年におけるカリフォルニア州の海洋船舶の排出ガス

(単位：トン/日)

船舶の種類	微粒子	NO _x	SO _x	HC	CO
商業船舶	25.74	338.53	143.62	19.98	44.43
レクリエーション	11.41	34.42	0.48	116.33	653.11

(CARB)

注：HC は全有機炭素化合物の排出量

船用ディーゼルエンジンに関し、カリフォルニア州の中でも特に排ガスが問題視されているのがロサンゼルス港やロングビーチ港を含む南カリフォルニア沿岸、そしてサンフランシスコ湾である。このため、これらの港を中心に、CARB は、厳しい規制を設けて、外国籍船舶を含めて排ガス規制を強化しなければならない現状となっている。

CARB は 2007 年 1 月より、カリフォルニア水域及びカリフォルニア沿岸 24 海里以内を航行する船舶の補機 (Auxiliary Engine) 及びディーゼル発電原動機の SO_x 排出規制(燃料油規制)を実施した。同規制は、補機及び発電原動機に硫黄分濃度が 0.5% に制限された蒸留船用燃料 (Marine gas fuel:ISO8217 で定義された DMX 又は DMA(硫黄分濃度 1.5% 以下等)又は Marine diesel oil:ISO8217 で定義された DMB(硫黄分濃度 2.0% 以下等)の使用を義務付けるものである。また、2010 年にはさらに厳しい 0.1% 以下の基準を設けるというものである。

しかし、海運業界はまだこうした規制への準備ができておらず、この取り決めに猛反発し、連邦地裁へ提訴している。

一部の海運会社には、州政府の基準に適合しようとする動きもある。例えば、マースクライン社は 2006 年 5 月、ロサンゼルス及びオークランド港に寄港する 37 隻のコンテナ船に対して、沿岸 24 マイル以内及び港域内で、すべての硫黄分 0.2% 以下の燃料に切り替える方針を打ち出し、他社に先駆けることとなった。

CARB は、停泊中の船舶による排ガスを削減するために「Goods Movement Emission Reduction Plan」を提案している。同案では、港湾における電力の使用を増やすことによって、停泊中の船舶エンジンの稼働率を低めるというものである。同案は 2007 年 11 月には正式に発表される予定である。

ロサンゼルス並びにロングビーチ港は 2006 年 6 月、「San Pedro Bay Prots Air Action Plan」を発表している。同案によると、向こう 5 年間で、港湾地区における船舶、鉄道、トラック、荷役機器からの NO_x を 45% 以上、粒子物質を 50% 以上削減していき、さらに、SO_x のさらなる

削減も盛り込まれている。

米国では、カリフォルニア州が沿岸 3 マイル区域に同様の規制「mini-SECA」の導入を検討している。また、ロサンゼルス港、ロングビーチ港がそれぞれ独自の規制を導入しようと検討している。

2. 技術の紹介

ディーゼルエンジンは、本来燃費性能に優れているものの、NO_x や PM の排出が最大の問題点となっている。これらの問題を解決する環境対策として、以前はエンジン自体の改良が主体となっていたが、最近では、酸化触媒、ディーゼル・パティキュレート・フィルター（すす補修）等、様々な技術の開発が進められている。

ディーゼルエンジンの問題は、「NO_x の低減」と「PM の低減／燃費向上」を両立させるのが非常に難しい点である。例えば、NO_x の放出を抑えると燃費が悪化、その結果 PM やすすの放出が増大してしまう。逆に燃費を改善して PM やすすの放出を減らすと NO_x が増大することになる。一見相反する 2 つの排出物を処理するには、これらの技術を組み合わせる必要がある。

また、SO_x の削減に関しては、エンジン自体の改良では対応できず、硫黄濃度の低い燃料の使用や燃料の変更、また排ガスからの SO_x の回収といった技術が必要である。

ここでは、エンジンの技術のみならず、燃料や港湾設備も含めて紹介する。

2-1 自然吸気（Naturally Aspirated : NA）

過給器（ターボチャージ）などを使用しない自然吸気による燃焼を行う従来のディーゼルエンジンを指している。ただし、気流を制御することができない。このため、PM 削減やピークパワーの向上に必要な空気/燃料の混合比を出すために必要なだけの気流を生み出す補助システム（ブースト・システム）が必要になる。

NA はコスト的に非常に安いのが特徴である。しかし、非道路の小型ディーゼルエンジンからすでに消えつつあり、過給器を取り付けたものが普及しつつある。

2-2 ターボチャージング（Turbocharging）

同技術は「過給器」とも呼ばれており、エンジン内の空気の流れを増加させるのが目的となっている。エンジンの排気管から放出される排気熱を利用して、圧縮した空気をエンジンに送り込む。これにより、出力密度（Power Density）を増加させることになる。コスト削減効果は非常に高く、例えば、小型エンジンでは V 型 6 気筒から直列 4 気筒に下げることが可能になる。

すでに、ディーゼルエンジンで利用されてきた息の長い技術ではあるが、これまでタービンの温度が高すぎるため、船舶エンジンには不向きと考えられていた。しかし、最近では自動車業界ではすでに、タービンの温度を低く保つ技術も出てきており、今後も船用（すでに採用されている）に改良が重ねられると見られている。例えば、融合型シリンダー・ヘッド・ターボチャージャ（Integrated Cylinder-Head Turbocharger）が解決策として期待されている。

同技術はまた、他の排ガス削減技術と組み合わせた利用も考えられる。例えば、希薄燃焼及び EGR を採用しているエンジンは、エンジン負荷の軽い状況では NO_x の削減に効果があるが、最大負荷（フルロード）がかかっている状況では、NO_x が増大してしまう。この時に、より大量の吸気が必要になるため、ターボチャージングを使用することによって吸気量を高め、NO_x の排出を抑えることができる。

NA エンジンで問題になっていた気流を増やすことで、空気/燃料比を向上させる。一般的には、高密度の空気を冷却して送り込むシステムとなっている。特に、ディーゼルエンジンで問題となる

高負荷（High Load）時の NOx 削減で効果がある。エンジンのサイズを小型化できるため、部分的にコスト削減につながる。

難点としては、オイルの交換期間が短くなるため、オイルのコストがかさむことになる。

2-3 スーパーチャージング（Surpercharging）

同技術は、エンジン内の空気の流れを増加させるのが目的である。エンジンのクランクシャフトの力を利用して、高密度の冷却空気をエンジンに送り込む。高密度の冷却空気を送り込むという点では、ターボチャージングと同様である。ディーゼルエンジンではエンジン性能が向上すると同時に、NOx の削減に非常に有効である。

他の排ガス削減技術との干渉がなく、4 ストローク・エンジンの出力密度を向上させるには非常に有効な技術と言える。コストは高いが、エンジンの小型化によるコスト削減が期待できる。

船用エンジンへの応用は非常に期待されており、同技術の導入によって希薄燃焼及び EGR が利用でき、触媒を必要としないエンジンの商用化が可能になる。

ディーゼルエンジンではエンジン性能が向上すると同時に、NOx の削減に非常に有効である。

2-4 コモンレール方式（Common Rail Injection）

ディーゼルエンジンの燃焼の最適化を行うには、混合気の生成を制御することがカギとなる。そこで重要になってくるのが、(1) 燃料の噴射パターン (2) 噴射圧力 (3) 噴射率などの効率化である。その中でも、コモンレール方式は、最新のディーゼルエンジン向け燃料噴射システム（ハードウエア）を指す。従来のディーゼルエンジンでは、燃料ポンプが燃料の「加圧」と「制御」を行う「ジャーク式」を採用していた。

しかし、この方法では加圧能力に限界があった。そこで登場したのがコモンレール方式で、これは、燃料の「加圧」をポンプに、一方の制御をインジェクタ（噴射装置）に分担させる「蓄圧方式」を採用している。頑丈な金属パイプ（レール）に高圧燃料を蓄えることからこの名前がついた。これによって、高い圧力で燃料を噴射することができ、燃料をシリンダー内に勢いよく送り込めるため、燃料がシリンダー内にくまなく行き渡る。そして、電子制御のインジェクタが、燃料噴射のタイミング・量・勢いなどを細かく制御することができ、より完全燃焼に近づけることで PM を大幅に減らす仕組みである。

燃料噴射の制御が従来のシステムに比べて容易であるのと、騒音や排ガスの削減にもつながる。

また、低温燃焼（Low Temperature Combustion: LTC）にも利用できることが示されている。すでに一部のディーゼルエンジンで採用されている。船用ディーゼルエンジンでも噴射システムとして採用されることになる。

このほか、シリンダーごとに燃料ポンプを備えているユニットポンプやインジェクト方式があるが、これらは、コモンレールに比べても高圧噴射が可能になる。

2-5 ピエゾ素子燃料噴射（Piezo-Injection）

燃料噴射口の開閉するニードルを制御する技術である。これにより、噴射タイミングをより精密に制御することができる。すでに、道路用ディーゼルエンジン市場には登場している。燃料噴射システムは、ディーゼルエンジンにとってコアの技術である。その技術は自動車部品メーカーによる

ところが大きいですが、ピエゾ・アクチュエーターも例外ではない。デルファイは 2006 年、ニードルを直接駆動させることができる「ダイレクトアクティング・ピエゾインジェクター (Directacting Piezo-Injector)」を開発し、ニードルの反応スピードと制御レベルを格段に向上させた

最先端のコモンレール方式との併用によって、すすなどの粒子の排出を抑えながら、中程度の負荷時に NO_x の排出量を 30%削減できる。軽負荷時には、低温燃焼 (LTC) の導入によってすすや NO_x を大幅に削減できる。さらに、EGR との併用によって、いかなる状況下でも NO_x の削減を実現する。現行の小型ディーゼルエンジンへ応用することで、5g/kW-hr 以下の HC+NO_x 排出を維持できる。

コスト的には現在、ディーゼルエンジン向けの噴射技術として最も高額である。船舶エンジンへの利用は、今後道路用エンジン向けの製品が大量生産されることで価格が下がることが前提となる。大型船舶向けの導入は不透明な状態である。

2-6 排気ガス再循環 (Exhaust Gas Recirculation : EGR)

生成された排ガス成分をいかに削減するかということも排ガス削減の重要な課題である。そこで、同問題に焦点を当てて開発されたのが EGR である。EGR は、排ガスを冷却して再び吸気に送り込む方法である。これにより、通常 21%から 13%に酸素含有量を減らした空気をシリンダー内に送り込む。その結果、燃焼炎の温度を下げ、NO_x の生成を抑える仕組みとなっている。また、吸気に排ガスを送り込むことで、吸気の熱容量を高め、燃焼温度を低くすることが可能になる。この反応過程によって、NO_x の生成量を通常 10~40%減じることが可能になる。

さらに、中速から最大速度にかけて燃費が向上する。特に、最大速度時は、他の技術を併用することで効果を上げることができる。EGR は、NO_x 削減の方法が同様のため、希薄燃焼と比較されることが多い。しかし、希薄燃焼は触媒との併用が難しいが、EGR は可能なため実用化の期待は大きい。

EGR システムには様々なコンポーネントが必要になる。例えば、排ガスから PM を除去するための電気集塵機や触媒、排 SO_x 技術、冷却システム等が含まれる。また、効果をあげるためには、硫黄濃度が低い燃料を使う必要がある。

暫定的な NO_x 削減技術としては非常有効であり、改良した点火システム、低速におけるポンプ・ロスの削減によって燃費をさらに向上できる。同様の効果が期待できる技術としては、直噴型のリーン燃焼システムがある。

現在、進展している技術の組合せとしては、EGR によって NO_x の低減を図る一方、NO_x の削減によって増大する PM はフィルタで除去する仕組みである。PM の増加によって燃費が悪くなるが、これにはターボチャージャの過給度を上げて対応する。また、EGR を利用するにあたり、PM の増加を減らすために「コモンレール式燃料噴射装置」やユニットインジェクタ方式などの高圧噴射が利用される。

注目を集めている EGR 技術として「内部 EGR」がある。この方法では、排出ガスをシリンダー内にとどめ、EGR の効果を引き上げる。これによりこれまで問題になっていた EGR 関連部位の腐食問題を回避できる。

コストは比較的安く、今後は船用ディーゼルエンジンでも普及していくと考えられている。

2-7 可変バルブ駆動技術 (Variable Valve Actuation:VVA)

エンジンの稼動状態に応じて、バルブ開閉のタイミングやバルブのリフト量などを変え、適正な出力を得る技術である。また、同時に広い回転域で吸排気効率を高めて燃費の改善を図っている。この調節は、電子制御と機械的なものを組み合わせた 2 種類が存在する。エンジンの性能、燃費、排ガス削減のいずれにも効果があるが、VVA の種類によってその効果は異なる。

現在もより優れた VVA が登場しつつある。自動車のような大量生産されるエンジンには最適の技術であり、ディーゼルエンジンに向いていると言われている。

ただし、現在ディーゼルエンジン向けにあるのは、比較的低コストの「Simple Valve-Catch Mechanism」である。シリンダーを制御する改良型「Cylinder-by-Cylinder Control」が出回れば、コストは膨れ上がることになる。ただし、VVA は予混合吸気圧縮点火(HCCI)が生産されない限り、現状ではあまり必要性がない。

2-8 最新型センサーとアクチュエータ (New Sensors and Actuators)

現在、注目されている技術としては、(1) シリンダー圧センサー (2) 広域酸素センサー (3) NO_x センサー、などがある。(1) は SI 型ガソリンエンジンへの応用も検討されている技術で (SI 型ガソリンエンジン技術を参照)、シーメンスとフェデラル・モーグルが共同開発を進めている。(2) は、排気流中の酸素濃度を監視するセンサーで、現在複数のメーカーが製造している。従来の酸素センサーと機能は同様であるが、広範囲に渡る空気/燃料の混合比に対応する。センサーは、空気/燃料の混合比を常時監視し、その結果をリアルタイムでフィードバックする。その結果、最適な燃料供給を確保できる。また、分析機能も重要である。しかし、現状ではなかなか実用化が難しい HCCI 等の技術が必要となるため、実用化はまだ先になる。コストは道路用ディーゼルエンジン向けで大量販売時の価格が 25 ドル以下になる見込みである。向こう 5 年以内に一部のディーゼル分野で採用されるようになって見られている。船用ディーゼルエンジン向けには、防水機能が必要になる。

NO_x センサーは、排気流中の NO_x 濃度を監視するセンサーである。広域酸素メーター同様に HCCI の採用が必要不可欠となるほか、船用としては防水機能が必要になる。コストは道路用ディーゼルエンジン向けで大量販売時の価格が 50 ドル以下になる見込みである。

2-9 予混合吸気圧縮点火 (Homogeneous Charge Compression Ignition : HCCI)

燃焼効率が高く、排ガスが非常に少ないクリーン技術として期待されているのが HCCI である。もし、EGR などを利用して混合燃料が希薄されていれば、NO_x の排気量をさらに削減することができ、その量は実に数 PPM 程度になる。

あらかじめほぼ均一に混ぜた空気と燃料の混合気を圧縮点火する方式で、特に NO_x の排出量が極端に少ないことが研究でわかっている。高速時の効果も研究されているが、エンジンの燃焼から発生するノイズをどう除去するかが課題となっている。また、HC や CO の排気が通常の点火エンジンに比べて多いため、酸化触媒の併用が必要と考えられている。

コストは、直噴、VVA、EGR 等の技術を併用する必要があるため、高いと考えられる。自動車業界でも普及までに向こう 10 年ほどかかると思われるため、船舶業界での導入はさらに時間がかかると見られているが NO_x 削減に絶大的な効果を持つ。

2-10 オーバー・エキスパンディッド・サイクル (Over-Expanded Cycle)

従来のエンジン・ストローク（膨張行程）のタイミングを圧縮行程より長くすることによって燃焼効率を引き上げる技術を指す。機械的にも可能であるが、従来のエンジンに比べて吸気弁を遅く閉じるミラー・サイクルとして導入されている。同技術を利用すると、エンジンに取り込まれる空気量を減らすことができ、圧縮行程を短くなることによって燃焼効率を上げることができる。

エンジンの効率は圧縮比を上げるほど向上するが、これはノッキング限界にて制限される。この圧縮比で実際に重要なのは、「膨張比」である。そのため、ノッキングを避けるため圧縮行程は短くし、膨張行程をそれより長くしたのがオーバー・エキスパンディッド・サイクルとなっている。現実的には、吸気行程後、圧縮行程に入ってからしばらく吸気弁を開いたままにして、吸気の一部を戻して圧縮しすぎないようにする方式が使われているが、これがいわゆる「ミラー・サイクル」となっている。

燃費という観点では、中速及び高速時にある程度の効果が見られるが、高速時における吸気が減少してしまうため、別の技術を併用する必要がある。通常はVVAが必要になるため、VVAのコストを見積もる必要がある。ディーゼルエンジンにはすでに採用されているが、さらなる燃費向上やHCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) エンジン制御への応用などが研究されている。実際に採用している会社としては、キャタピラー (Caterpillar) のACERTがある。ちなみにACERTは、希薄燃焼を合わせることによって、50%のNO_x削減に成功している。

短期的にはそれほど魅力はなく、業界へのインパクトもさほど大きくない。しかし、HCCI制御が将来的に認められるようになれば、注目を集めるだろう。

2-11 低温拡散燃焼 (Low Temperature Diesel Combustion)

低温で燃焼させることによって、すずやNO_xの排気量を削減する方法である。すでに、非道路用 (Light Duty) ディーゼルに採用されている。低NO_x燃焼技術 (Low NO_x Combustion) ともいい、燃焼室の条件をNO_xが発生しにくいようにするための技術で、バルブの開閉タイミング (ミラー・タイミング)、二段燃焼、噴射タイミング、EGRなどを掛け合わせた技術である。同技術には、湿式 (Wet) 及び乾式 (Dry) の2種類がある。

乾式はすでにエンジンに組み込まれているが、今後の規制に向けてさらなる改良が必要になってくる。

一方の湿式は、燃焼室に水を注入することによって、NO_xの生成を抑えるという方法である。これは、空気に比べて燃焼室の温度を下げる効果がある。水分の注入方法としては、空気を湿らせたり、スチームや水を燃焼室に直接注入する等いくつかある。

燃焼空気飽和システム (CASS) では、燃費を損なうことなく、NO_xを50~60%削減できる。同技術は、ターボチャージされた燃焼空気に高圧の水を噴霧し湿度を高め、燃焼室に注入する仕組みである。他の湿式に比べて構造が簡単のため、設置コストが安いというメリットがある。

水の乳化 (エマルジョン) では、燃焼シリンダーへの噴射前に水を燃料の中に混合させることで、燃料の噴霧を効率よくする。これにより、燃焼効率を上げるため、燃費も最大3%ほど変えること

ができるという。通常は水のエマルジョン濃度が1%でNO_xの生成を1%引き下げることができる。この比率は最大30%まで引き上げることができるが、これ以上の濃度になると、逆に燃焼温度を上げてしまい、微粒子の生成を促してしまう。そこで、カムの代わりに油圧装置を人的に操作することで、噴射圧力や噴射タイミングをエンジンの回転数によって調節する「メカトロ化」の方法もある。

一方、最大出力を下げってしまうという欠点もある。また、水のエマルジョンに海水は使えない。このため、船舶は真水用タンクあるいは水の浄化装置が必要になる。また、噴射機を新たに設計し直すためコストがかかる。代替技術としては、PuriNO_x エマルジョンがある。これは、20%の水に対して80%のディーゼル燃料、1%以下の添加剤を加えたもので、NO_xを20%削減でき、微粒子で50%の削減が可能である。

水のエマルジョンの最大の利点は、簡単に作動・停止を切り替えられること。このため、沿岸を航行する際などに発生する排ガスを抑えることができる。また、使用する真水の量が節約できるのも特徴である。

吸気を湿らせることによって、NO_xを削減する方法にはこのほか、連続水噴射（Continuous Water Injection : CWI）、直接水噴射（Direct Water Injection : DWI）、湿気モータ（Humid Air Motor : HAM）がある。

CWIでは、水を吸気の中に噴霧する方法を採用。これにより、NO_xを最大30%、微粒子を最大50%削減できる。DWIは、燃焼シリンダー内に直接水を噴射する方法である。電気ポンプを利用して200～400バールの圧力で水を燃料の前に注入する。システムは、燃料供給システムから独立しているため、エンジンのパフォーマンスを落とすことなく作動停止が行える。水の燃料に対する割合は、燃料に対して40～70%の量の水が必要になる。この割合がNO_xの生成を50～60%削減できる。使用期限は25年である。また、水の代わりに高圧蒸気をシリンダーに注入するストリーム・インジェクション方式もある。

一方のHAMは、水蒸気が飽和した状態の冷やした吸気を燃焼に利用する。エンジンによって海水を蒸気化させて利用するが、エンジンに注入する水の量は燃料のおよそ3倍となる。この割合がNO_xの生成を70～80%減じることができるという。しかし、大量の水蒸気を用いるため、新たにボイラーを設置する必要がある。船舶によってはすでに十分なスペースがない場合もある。使用期限は12～15年である。

これらの方法では、排気時の温度が上がるため、後処理用の触媒を活性化させておくことができる。船用ディーゼルに利用した場合、燃費に若干の影響が出るほか、すすを削減するためにDPFが必要になることも示唆されている。コスト的には中間程度である。将来的には船用ディーゼルエンジンで標準となる可能性もある。ディーゼルエンジン・メーカーのワルチラ（Wartsila）は、4ストロークのディーゼルエンジン全種にCASSを導入する予定である。

これまで上記で説明した各種技術（一部）の削減効果を下記に一覧で図I-2-1に示す。同表は、4ストロークエンジンが回転数500rpmで運転した時、NO_x排出量をIMO基準値と仮定した場合、その値(13g/kWh)からの削減効果を示している。

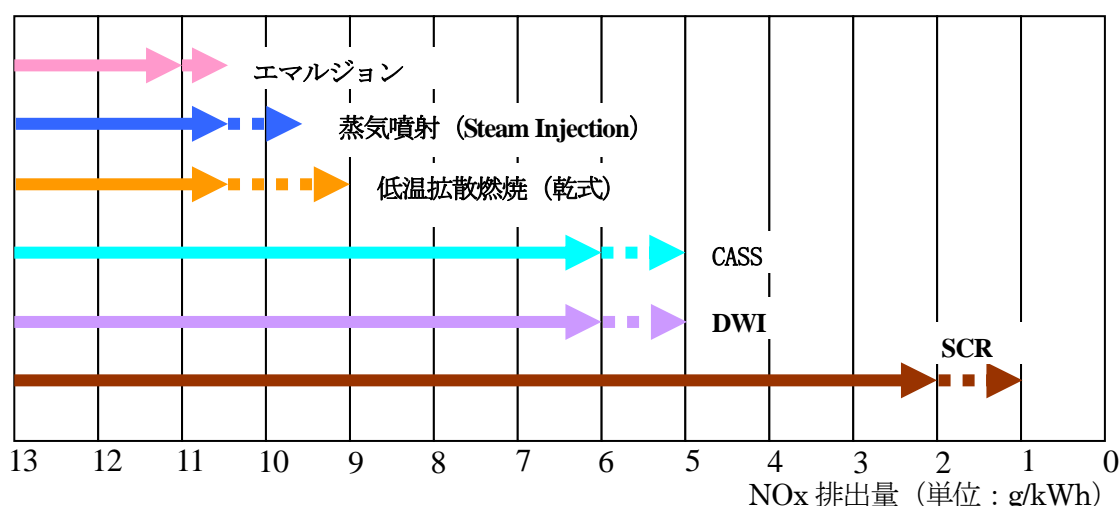


図 I-2-1 : 各種技術の NOx 削減効果

2-12 NOx 吸蔵触媒 (Lean NOx Adsorber Catalyst: LNT)

NOx 吸蔵触媒は、通常の運転時に NOx を硝酸塩の形で触媒中に吸収させて、間欠的な還元によって NOx を浄化する仕組みである。ただし、NOx 吸蔵還元触媒は、燃料軽油中の硫黄分により触媒が被毒・劣化し吸蔵性能が低下するため、触媒を定期的に高温化し、硫黄の除去・再生(被毒回復制御)が必要となる。船用ディーゼルエンジンへの採用は、今のところ取りたてて注目を集めていないが、将来的に必要な技術とも言われている。現在のところ、排水が問題となり実用化が認められていない。

2-13 選択触媒還元方式 (Selective Catalytic Reduction : SCR)

尿素を還元剤として添加することで発生するアンモニア (NH₃) を使って NOx を還元する方法である。具体的には、尿素水溶液を排気管の中に噴射すると、酸化触媒によって NH₃ になる。これが、NOx を窒素ガスに変換する。この方式は、ディーゼルエンジンのように酸素濃度が高い環境下でも反応が進むのが特徴である。過剰分の NH₃ が別の汚染物質 (スリップ NH₃ と呼ぶ) となるが、通常は排気管の下流に設置した酸化触媒によって浄化する。

排気管の逆圧によって NOx 削減効果が妨げられることが懸念事項である。今後の規制によって利用度が決まってくる。コストは、LNT と同じ程度で、酸化触媒や三元触媒に比べると高くなっている。今後、大量生産が可能になれば、価格が下がることも考えられるが、このほか、尿素ポンプ、ポンプ、尿素溶液の噴射システム等のコストも考慮する必要がある。

船用ディーゼルエンジンへの採用は、今のところ取りたてて注目を集めていないが、将来的に必要な技術とも言われている。現在のところ、排水が問題となり実用化が認められていない。

2-14 すず捕集フィルタ（Diesel Particulate Filter : DPF）

DPF は粒子をフィルタで物理的に捕集する技術を指す。捕集したすすを除去し、フィルタを再生する方式から（1）手動再生（2）自動再生（3）連続再生、の3種類が存在する。（1）及び（2）では、DPF ですすを捕集し、フィルタを高温にすることで焼却する。すすの削減にはつながるものの、他の排気ガス、特にディーゼルエンジンで多い NOx 削減には効果がない。そこで、触媒を組み合わせた（3）の開発が進められている。

（3）には、二酸化窒素（NO₂）を使った酸化方式と酸化触媒方式の2種類がある。前者では、酸化触媒（白金）によって生成した NO₂ を使って、低温化ですすを酸化して除去していく。これにより、フィルタを常時再生していく。これに対して、酸化触媒を利用する方法では、フィルタ自体に触媒を添加し、同様の酸化除去を行う。この方法では、すすの削減に加えて、CO や HC の削減効果もある。

DPF を利用した場合、すすの削減効果は 95%以上になる。しかし、一方、内部で捕集したすすが突然引火する可能性もあるため、別途センサーを備え付ける必要がある。また、燃料に含まれる硫黄分が触媒を劣化させるので、燃料の硫黄分低減（最終的にゼロ）が求められることになる。

しかし、非道路用ディーゼルエンジンでは、硫黄成分の割合が高い燃料が使用されていることから課題となっており、さらなる研究が必要と見られている。コスト的には、三元触媒に比べて高い。DPF は、現在欧米で一部ディーゼルエンジン向けに作られている。

船用ディーゼルエンジンへの採用は、今のところ取りたてて注目されていないが、将来的に必要な技術ともいわれている。現在のところ、排水が問題となり実用化が認められていない。

2-15 DPNR（Diesel Particulate and NOx Reduction System）

トヨタ自動車が開発した「四元触媒方式」のシステムで、最新のコモンレール式直噴ディーゼルエンジンをベースに触媒コンバータ、排気燃料添加弁、各種センサーから構成される。NOx（50%削減）、HC、CO、すす（80%削減）のすべてを除去する点で、NOx 削減技術と DPF の組み合わせと同じである。欧州7カ国ですでにトヨタ車に導入されている。

コスト的には高いが、ディーゼルエンジンにとっては、NOx 削減技術+DPF の組み合わせ以外のオプションとなる。

船用ディーゼルエンジンへの採用は今のところ取りたてて注目されていないが、将来的に必要な技術ともいわれている。現在のところ、排水が問題となり実用化が認められていない。

2-16 海水洗浄（Sea Water Scrubbing）

海水のアルカリ性質を使って SO_x の排出を削減する方法。排ガスを海水と混ぜることによって、硫化カルシウムと CO₂、炭酸カルシウムが生成される。排ガスを混ぜた海水から PM を除去した後、海に戻す。海水自体が硫黄を豊富に含む場所であることから自然に戻すことになる。

最大のメリットは、硫黄濃度の高い安い燃料を利用できることである。例えば、2.5%の硫黄濃度の燃料を使った場合、69～94%の SO₂ を削減できる。また、PM の除去効果も確認されており、その削減効果は 80%まで、NOx も 10～15%削減できる。使用期限は 15 年である。同技術の問題は、初期コストが非常に高いことが指摘されている。維持管理コストは、高価な硫黄濃度が少ない燃料を使用しないことで発生する差額で補填できる。

海水洗浄技術の一環として開発されたのが、カナダのマリン・エグゾースト・ソリューション

(Marine Exhaust Solutions) が開発したエコサイレンサー(EcoSilincer)である。同製品は、塩水を利用して SO₂ の排出を著しく削減する技術で、エンジン排気の煙突にある消音器の代わりに取付けることによって、大気に放出される排ガスを削減し、煤煙を取り除くことができる。また、騒音や有毒ガスを減少できる。エコサイレンサーは、商業用船舶と超大型ヨットの両方に使用することができる。

開発には 6 年かかったが、エコサイレンサーの塩水ガス清浄システムは、低硫黄燃料を使用するために割高になるコストを何百万ドルも節約することができ、低硫黄燃料に転換するよりも SO₂ の除去率が遥かに高いことが証明されている。

エコサイレンサーのシステム試験は成功を収めたことから、同社はすべての製品に性能保証を行う予定である。エンジンの形式にもよるが、エコサイレンサーは SO₂ の排出を最高 90%まで削減することができる。これは、硫黄濃度が最高 4.5%の燃料を使用することができ、また、規制されている硫黄分 1.5%の燃料を用いるよりも SO₂ の排出の削減量が多いことを表している。

エコサイレンサーは、高温の排ガスを塩水と良く攪拌し、混合する設計となっており、この設計は特許をとっている。この新しい技術は、排ガスと塩水が接触する表面が多くなり、汚染物質の吸収時間が十分確保できる。排ガスから除去された酸性ガスと微粒子は水処理システムを通過し、連続して廃棄物をろ過する設計になっており、排出水は環境に安全なものになる。

エコサイレンサーは、出力 100kW から 10 万 kW のエンジンに搭載することができ、エンジン負荷変動に容易に対応できる。

2-17 ディーゼル燃料の低硫黄化

触媒などを使い排ガス規制に対応していく上で重要なのは、使用する燃料そのものの硫黄成分を減少させることである。

自動車向けディーゼル燃料の硫黄成分は、非道路用のものに比べていち早く規制が導入され(2006 年) たが、船舶は 2007 年以降 500ppm 以下、さらに 2015 年には 15ppm 以下に抑えられる。

一般船舶の多くは、主要エンジンに対して中間重油 (Intermediate Fuel Oil : IFO) を使用しているが、これは硫黄の他、窒素化合物、灰などの残留物をかなり高い割合で含んでいる。このため、エンジンの燃焼後に排出されるガスが大気汚染の元凶となり、非常に問題になっている。一方、補機に対しては、蒸留された燃料を使用していることもある。現在、使用されているディーゼル燃料と硫黄含有量の関係を表 I-2-1 に示す。今後、燃料自体が改良されることによって排ガス量の削減も可能になる。

大型船舶が利用するディーゼルエンジン燃料 (表 I-2-1 の下 4 行) では、IFO が主力機関に、DMB と呼ばれる蒸留燃料が補機に利用される。表 I-2-1 には参考のために陸上用ディーゼル燃料 (上 3 行)、ヨーロッパで一部使用されている船用蒸留燃料 (4 行目から 7 行目) も掲載している。¹

¹ <http://www.arb.ca.gov/regact/marine2005/isor.pdf>

表 1：各種エンジン燃料と硫黄含有量

燃料型番	カテゴリ	一般名	硫黄含有量 (最大値：%)	硫黄含有量 (最大値：PPM)	使用状況
Grade No. 2-DS15	蒸留	ULSD	0.0015%	15	米国カナダで2006年から使用
Grade No. 2-DS500	蒸留	CARB/EPA Diesel	0.05%	500	現在使用中
Grade No. 2-DS5000	蒸留	EPA Offroad	0.50%	5000	S500に2007年に切り替え
LS MGO	蒸留	MGO	0.10%	1000	欧州で2008年から使用
LS MGO	蒸留	MGO	0.20%	2000	欧州のみで使用
DMX	蒸留	MGO	1.00%	10000	世界で使用中
DMA	蒸留	MGO	1.50%	15000	世界で使用中
DMB and DMC	蒸留	MDO	2.00%	20000	世界で使用中
IFO	残留	IFO/Buker Fuel	1.50%	15000	バルト海・北海で2007年から使用
IFO	残留	IFO/Buker Fuel	4.50%	45000	世界で2007年から使用
IFO	残留	IFO/Buker Fuel	5.00%	50000	現在一般的に使用されているが2007年に切り替え

出典：University of California Sannta Barbara

2-18 バイオ燃料エンジン (Biofuel)

これまで船用燃料として使用してきたディーゼル油の代替燃料を利用することで、排ガスを減らし、さらには化石燃料への依存度を低めようという動きがある。当然、燃料が変われば、エンジンの構造も変化することになる。

現在注目されているのが、バイオ燃料である。米国で使用されているバイオ燃料は、バイオディーゼルとエタノールである。バイオディーゼルは脂肪酸アルキッド・エステルから成る。特長としては、既存のディーゼルエンジンを大幅に変更することなく船用推進にも使用可能である。

バイオディーゼルを使用した例として、サンフランシスコ湾水上交通局(WTA)のケースがある。当局は2001年8月、サンフランシスコ湾内の大手フェリー運航会社「Blue & Gold Fleet」の400人乗り旅客船フェリー「Oski」で100%大豆油を燃料として使用する運行テストを実施した。Oskiは100%大豆油で運航された旅客船フェリーとしては最大の船である。

テストの結果、ディーゼル油に比べて5～15%燃料消費量が増大した。これは、バイオ燃料のカロリーが低く、エンジンの効率が低下したことを意味している。PMは減少したものの、NO_xが運行中に増大したという。またHCは減少したという。

2-19 天然ガス・エンジン (Natural Gas)

石炭から石油、そして天然ガスへと移行することで脱炭素化が進み、排ガスを大幅に減じることができる。さらに、天然ガスのコストが船用ディーゼル油に対抗できる程に安価であることも魅力となっている。下記にディーゼル油に比べた場合に、大気汚染物質の排出量がどれだけ低くなるかの実験結果を表している。

表 I-2-2 ディーゼル油と天然ガスの有害排出物比較

	標準船舶ディーゼル (iMARPOLVI)	天然ガス (iTYPICAL)	削減量
エンジン稼動環境	4000時間/1000 kW	4000時間/1000 kW	
二酸化炭素 (CO ₂)	(830x4000x1000)= 3320トン	(642x4000x1000)= 2568トン	(-22.6%)
一酸化炭素 (CO)	(15.5x4000x1000)= 62トン	(4x4000x1000)= 16トン	(-74.0%)
窒素酸化物 (NO _x)	(9.8x4000x1000)= 39.2トン	(1x4000x1000)= 4トン	(-89.7%)
炭化水素 (HC)	(1x4000x1000)= 4 トン	(0.5x4000x1000)= 2 トン	(-50.0%)
排気微粒子 (PM)	(0.15x4000x1000)= トン	(0.05x4000x1000)= 0.2トン	(-66.6%)

注: 2,000kW クラスの高速船で年間 (4,000 時間) の 1000kW 当たりのディーゼル油と LNG (天然ガス) の排出量を比較した場合

出典: シップ・アンド・オーシャン財団

さらに、硫黄及び黒煙の排出量がゼロ、がんの元凶であるベンゼンは、ディーゼル油の 97%減になったという。

排ガス対策として天然ガスは期待できるが、その一方で、ディーゼル油から変更することで、燃料システムや機関室の大幅な改良が必要になってくる。しかし、潤滑油はクリーンとなり、エンジンの損傷が減るので、オーバーホール間隔が長くなる。その結果、メンテナンスコストが節約され、エンジンのライフが長くなるのでリターンが大きいと考えられる。

現在、ディーゼル油と天然ガスの両方を利用する混焼エンジンがある。例えば、出入港時におけるエンジン負荷の高い時にディーゼル油を使い、通常の運行では天然ガスを利用するといった使い分けを利用している。

2-20 沿岸電力による排ガス削減

停泊中の船舶が電力を作るためにディーゼル発電機を使うが、これも排ガスを生み出す原因の 1 つとなっている。このため、船舶が停泊中に沿岸からの電力を補給を受けることによって、エンジンの発動時間を抑え、排ガスを削減するという試みだ。一例として、川崎汽船がある。同社が 100% 出資する米国コンテナ・ターミナル運営会社 (TIS) は、先にロングビーチ港湾局との施設借受契約で合意した際に、排ガスの削減措置として自社コンテナ船に陸上施設からの船内必要電力を受電できる設備を搭載し、停泊中の本船の発電原動機を使用しない体制を作り上げることで合意している。

また、州政府側も陸上電源供給を進めるためのプログラムを提供している。たとえば、ロサンゼルス港では、AMP(Alternative Maritime Power)設備を装備した定期寄港船を建造するにあたり、最高 81 万ドルの補助金を交付している。

2-21 高性能海洋排ガス調整システム (AMECS)

船舶の排ガス口にキャップをかぶせる。停泊している船舶から排出されたガスは、AMECS の配管を通して陸上の排ガスコントロール・システムへと運ばれる。この方法では、船舶を改良しないで利用できたため、コスト削減に強い。

3. 今後の技術

3-1 ディーゼルエンジン技術の今後

前述のとおり、商業用 C1 及び商業用 C2 エンジンの今後の排ガス基準は、第 1 次規制(附属書 VI 基準)から現在第 2 次規制に移行中で、EPA によれば、2011 年には第 3 次規制を開始したいとしている。一方、外国籍船を含めた大型船商業用 C3 エンジン、IMO における規制強化の検討推移を踏まえながら、2007 年の 4 月には第 2 次規制の基準を実施したいとしている。

<NO_x 及び HC>

規制値は、概ね次の水準で変遷する。

第 1 次規制(2003 年)

NO _x	回転数に応じ	9.8～17.0	g/kW・hr
-----------------	--------	----------	---------

第 2 次規制(2005 年から 2007 年までに順次導入)

NO _x +HC	エンジンの大きさに応じ	7.5～11.0	g/kW・hr
---------------------	-------------	----------	---------

第 3 次規制(2011 年からの予定)

NO _x +NMHC	エンジンの大きさに応じ	0.45～3.0	g/kW・hr
-----------------------	-------------	----------	---------

現在、第 2 次規制までは、電子制御直噴(EDI)等の燃料噴射技術等、エンジン内部の改良で対応してきている。その中で、ワルチラは、コモンレールを使ったディーゼルエンジンをロイヤル・カリビアン・クルーズ社から受注しており、最新エンジンの搭載は 2007 年から始まっており、今後もさらなる受注増が期待されている。また、ワルチラは、低音拡散燃焼の 1 つである燃焼空気飽和システム(CASS)を導入予定である。また、マン・ディーゼルも 2006 年 9 月にコモンレール搭載エンジンを発表している。

表 I-3-1 のとおり、いくつかの技術について、排ガスの削減効果と導入コストがまとめられている。

同表は、2006 年にカリフォルニア大学サンタバーバラ校の環境研究専門家が、船舶による大気汚染の影響及び削減方法を研究したレポート「Controlling Air Emissions from Marine Vessels: Problems and Opportunities」から抜粋である。同表は、米運輸省海事局(DOT, The Maritime Administration: MARAD)の「United States Maritime Administration DECISION FRAMEWORK FOR EMISSION CONTROL TECHNOLOGY SELECTION」のデータを採用している。

この表の排ガス削減効果は、対策が取られていないものをベースにした削減量であるが、現在、第 2 次規制を適合するために採用した技術は、エンジン内改良のうち、燃料噴射技術や駆動制御の改良が主体である。しかし、EPA が提案している第 3 次規制の

内容であると、もはやエンジン内改良や水の供給による改良では対応できず、選択触媒還元方式(SCR)を開発せざるを得ない。

しかし、商業用 C3 エンジンについては、最初の目標が第 2 次規制の基準への適合であることから、エンジン内改良や水の供給による改良で対応可能と考えられるが、これら大型エンジンは、実績のある道路用エンジンからの技術の転用ができないため、まったく新しい技術開発が必要となる。

表 I-3-1 排ガス対策技術の効果とコスト

技術カテゴリ	サブカテゴリ	削減効果 (%)					導入コスト(米ドル)			備考
		NO _x	PM	SO _x	CO	VOC	小型 (3000kW)	中型 (10,000kW)	大型 (25,000kW)	
エンジン内改良	燃料噴射 (Slide Valves)	-20%	-25~50%	0%	0%	~50%	\$10,920	\$36,400	\$91,000	
	駆動制御	-30%	0%	0%	0%	0%	\$134,105	\$149,705	\$215,725	
	排出ガス再循環 (EGR)	-35%	0%	0%	NA	NA	EGRの採用はまだ先			
	連続水供給 (CWI)	-20~30%	~50%	0%	NA	NA	コストは不明			1%の燃費低下が報告されている
水の供給による改良	湿気モータ (HAM)	-70%	0%	0%	0%	0%	\$578,500	\$1,740,500	\$4,055,000	改良
	水の乳化 (エマルジョン)	-30%	0%	0%	0%	0%	\$550,000~750,000			
	水の噴射 (インジェクション)	-50%	0%	0%	0%	0%	\$169,665	\$338,223	\$686,166	
燃焼後の処理	選択触媒還元方式 (SCR)	-90%	0%	0%	0%	0%	\$423,656	\$985,144	\$2,263,880	改良
	海水洗浄	0%	-25.0%	-89~94%	0%	0%	\$747,800	\$2,410,800	\$6,048,000	
沿岸による処理	AMECS	-95%	-99%	-99%	NA	-50%	コストは不明			
	沿岸電力**	NA	NA	NA	NA	NA	コストは不明			
燃料変換	硫黄含有量(2.7%→1.5%)	0%	-18%	-44%	0%	0%	\$0	\$0	\$0	
	硫黄含有量(2.7%→0.5%)	0%	-20%	-81%	0%	0%	\$0	\$0	\$0	
	バイオディーゼル	+2~20%	-90~95%	-90~100%	0%	0%	コストは不明			NO _x が増加する
	バイオオイル	-50%	0~50%	-90~100%	0%	0%	現在、研究段階			

出典：University of California Santa Barbara, 2006 年

**沿岸電力 (Shore-side Control)：港に停泊中の船舶が発電原動機を停止し、港湾施設から電力を提供するもの。

<PM>

同様に PM に関しては、概ね次の規制値で変遷する。

第 2 次規制(2005 年から 2007 年までに順次導入)

NO_x+HC エンジンの大きさに応じ 0.2~0.5 g/kW・hr

第 3 次規制(2011 年からの予定)

NO_x+NMHC エンジンの大きさに応じ 0.075~0.03 g/kW・hr

NO_x の場合と同様に、現在、第 2 次規制を適合するために採用した技術は、エンジン内改良のうち、燃料噴射技術や駆動制御の改良が主体である。しかし、EPA が提案している第 3 次規制の内容であると、もはやエンジン内改良では対応できず、すす捕集フィルタ(DPF)の開発が必要となる。

しかし、商業用 C3 エンジンについては、最初の目標が第 2 次規制の基準への適合で

あることから、エンジン内改良で対応可能と考えられるが、これら大型エンジンは、実績のある道路用エンジンからの技術の転用ができないため、まったく新しい技術開発が必要となる。

<SO_x>

CARBは、2007年からカリフォルニア水域で、補機のディーゼルエンジンに硫黄濃度0.5%の蒸留船舶燃料の使用を義務付け、2010年からは更に0.1%まで引下げると述べている。

また、IMOでは、すべての海域で同濃度を1.0%(2010年想定)、さらに0.5%(2015年想定)まで引下げることが視野にいて検討が進められている。

SO_x対策のための燃料規制の実施は、低硫黄濃度の蒸留船舶燃料の供給が前提となる。しかし、規制水域が、全世界に及ぶような検討もなされており、この場合に船舶燃料業界は、供給は困難と述べており、別のオプションとして、海水洗浄装置の開発実用化が必要となる可能性もある。

<港湾内排ガス対策>

生活圏に近い港湾内では、大気汚染の影響が大きい。そのため、カリフォルニア州のロスアンゼルス港では、港湾当局と海運会社が覚書を結び、停泊時は船舶の発電原動機をとめ、港湾施設から電力を供給している。また、高性能海洋排ガス調整システム(AMECS)により、停泊中の排ガスを回収している場合もある。大気汚染の影響に敏感な港湾区域では、このような動きが盛んになると思われる。

3-2 日本への影響

ここでは、船舶ディーゼルエンジンに対する米国排ガス規制の動向とそれに対応するために必要な技術について紹介したが、最後に、この規制の我が国に対する影響について考察したい。

米国規制が、我が国に与える影響は、大きく分けると次の3つがある。一番直接的な影響は、米国マーケットに販売するエンジンは、米国排ガス規制をクリアしなければならないことである。このケースでは、米国当局の基準認証を受けなければならない。

次に、大型船用エンジン C3 エンジンについて EPA が述べているように、入港する外国船を含めて外洋大型船に2次規制の基準を適用したいとの意向があり、そのためIMOの国際基準に2次規制を反映させようとする動きがあることである。将来のIMOにおける米国提案に対して、我が国も対応を余儀なくされるし、国際基準化された場合には、日本メーカーも新基準をクリアしなければならない。

3つ目が、米国基準が国際基準に反映されなかった場合にも、米国国内法により米国入港船舶に対して米国基準への適合を要求する可能性があることである。このような例としてタンカーの構造基準で実施したケースがあり、米国世論の環境対策への厳しい要求(カリフォルニア州では特に厳しい)が、国際的なコンセンサスを得ることなく米国独自での規制に踏み切る可能性も否定できない。この場合には、ダブルスタンダー

ドとなるが、エンジンメーカーの立場とすれば、実質的にはより厳しい米国規制への対応を余儀なくされることになるだろう。

米国内航船へのディーゼルエンジン市場は必ずしも大きくなく、米国との直接的なビジネスがあるとは限らないが、世界をリードする米国基準がやがて何らかの形で国際基準に反映することは十分に考えられる。したがって、日本メーカーも米国基準の動向を踏まえつつ、長期的な視野に立って、今後の技術開発プログラムを進めていく必要がある。

EPA は、外洋大型船用 C3 エンジンを除く船用エンジンに対して、3 次規制を導入することに自信を見せている。これは、3 次規制基準は陸上用エンジンで既に実施しているおり、陸上エンジンを供給するメーカーが船用エンジンも供給していることから、これら米国メーカーには技術的対応能力があるとの判断であろう。

他方、C3 エンジンについても規制強化の社会的要請は強いが、3 次規制どころか、2 次規制の導入に関して具体的な道筋が明らかではない。これは、外国船に対する配慮もあろうが、米国メーカーには船用エンジンをこれらの基準にクリアーさせるための技術的ポテンシャルがないことに起因するのかもしれない。

いうまでもなく、排ガス規制はエンジンの基本設計にも影響が及び、これをクリアーできるか否かは、エンジンメーカーにとってまさに生き残りを賭けたサバイバルゲームである。排ガス対策は、エンジンメーカーとしての存続にかかる問題であり、日本のエンジンメーカーが世界をリードしていくためには、10 年以上先を見据えた中長期的な視野での積極的な対応が必要となる。

II. ガソリンエンジン

1. 規制動向

船用ガソリンエンジンの国際的な排ガス規制の枠組みは、存在せず、米国が独自の規制を実施している他、EUにおいても規制が実施されている。ここでは、米国の連邦政府と州政府による規制について述べる。

1-1 米国(連邦)における排ガス規制

船用ガソリンエンジンは、船外機及び水上オートバイ(PWC)用エンジン、船内機・船内外機、船用小型発電機(出力 19Kw 以下)、船用大型発電機(出力 19kW 超)に分けて、規制されている。これまでの規制の制定経緯は、表 II-1-1 のとおりである。

表 II-1-1 船用ガソリンエンジンの主な規制

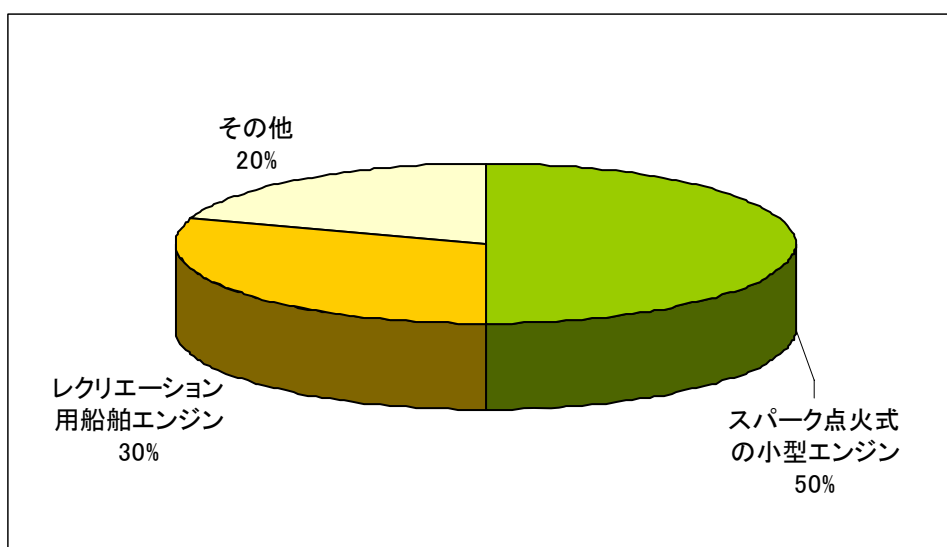
年代	導入した規制
1995	船舶用小型発電機 (19Kw以下) 向け排気基準 (フェーズ 1)
1996	船外機および個人用船舶 (OB/PWC) 向け排気基準
1999	船舶用小型発電機 (19Kw以下) 向け排気基準 (フェーズ2) *
2000	船舶用小型発電機 (19Kw以下) 向け排気基準 (フェーズ2) **
2002	船舶用大型発電機 (19キロワット以上) 向け排気基準
2002	蒸発排気向け排気基準
2003	カリフォルニア州政府***によるSI船舶エンジン向け排気規制の執行

*ハンドル付**ハンドル無し***California Air Resources Board: CARB

出展: EPA リポートより作成

1-1-1 船外機/水上オートバイ

1996 年 8 月、EPA は船外機 (OB) /水上オートバイ(PWC)用ガソリンエンジンに対する規制を導入した。規制導入時の EPA の調査によると、ガソリンを使用した船舶エンジンは、非道路用エンジンのなかで炭化水素(HC)の主要発生源の 1 つであり、HC の平均排出量では、芝刈り機等を含む園芸用機器用小型エンジンに次いで第 2 位の発生源であった。(図 II-2-1 参照)



出展：EPA リポート（1996 年、8 月）

図 II-2-1 非道路用エンジン別みた HC の排出量

同規制は、1998 年に始まり 2006 年まで順次厳しくなり、最終的には HC 排出量を 75%まで低減させる厳しいものである。表 II-1-2 に、米国における排ガス基準を示す。基準値は、出力 4.3kW 以上の場合出力が大きいほど、NO_x+HC 排出基準が設けられている。

同規制は、新造エンジンが対象である。そのため、全体の HC 排出量の低減量は、旧エンジンから新エンジンへの代替状況に依存するが、EPA では、2020 年までに規制導入前の 50%に 2025 年までに 75%までに低減できると予測している。

柔軟に規制を実施するため、メーカー毎の平均排出量が基準を達成すればよいということになっている。すなわち、新技術を採用した一部の製品は基準をクリアーし、一部の古い製品がクリアーしなくても、当該メーカーのすべての製品の平均排出量がクリアーすればよいという制度である。

(40CFR91)

表 II-1-2 OB/PWC 排出規制状況 (HC+NO_x)

モデル年数	HC+NO _x 排出規制 (単位：g/Kw・hr)	
	4.3Kw以下	4.3Kw以上
1998	278.00	$(0.917X(151+557/P^{0.9})+2.44)$
1999	253.00	$(0.833X(151+557/P^{0.9})+2.89)$
2000	228.00	$(0.750X(151+557/P^{0.9})+3.33)$
2001	204.00	$(0.667X(151+557/P^{0.9})+3.78)$
2003	155.00	$(0.500X(151+557/P^{0.9})+4.67)$
2004	130.00	$(0.417X(151+557/P^{0.9})+5.11)$
2005	105.00	$(0.333X(151+557/P^{0.9})+5.56)$
2006～	81.00	$(0.250X(151+557/P^{0.9})+6.00)$

注：P: Power Rating of Engine (規制量はエンジンの馬力を基に算出)

出展：EPA リポート（2004 年、8 月）

1-1-2 船内機/船内外機

船内機・船内外機に対する連邦規制は存在しない。ただし、排ガス規制の厳しいカリフォルニア州は、独自の規制を設けている(後述)。

1-1-3 船用小型発電機(出力 19Kw 以下)

船用小型発電機(出力 19kW 以下)は、園芸用機器用エンジンと同じカテゴリーで、1995、1999、2000 年と段階的に規制を導入した。これとは、別に EPA は、船上用補助エンジンなどに使用する SI エンジン向け規制を設けている。これは、地上用 SI エンジン向けの規制に準拠している。まず、19kW 以下のエンジンに対しては 1997 年の規制が適用されたのち、2001 年～2007 年にかけて新たな規制が導入されている。

表 II-1-3 HC+NOx に関する非道路用小型 SI エンジンの排出基準

排出基準単位 (g/kW-hr)

フェーズ	クラス	全排気量 *	モデル年次	HC+N0x	CO
フェーズ1a	I	CC<225	1997	16.1	519
フェーズ2	II	CC≥225	1997	13.4	519
	I-A	CC<66	2001	50	610
	I-B	66≤CC<100	2001	40	610
	I	100≤CC<225	2007年8月b	16.1	610
	II	CC≥0.225	2001	18	610
			2002	16.6	
			2003	15	
			2004	13.6	
			2005	12.1	

a:ゼロ時間基準(劣化などを考慮しない)

b:執行日(もし、新型エンジンが8月1日以降に販売されれば、フェーズ2の基準に従う)

*単位は平方センチメートル(CC)

1-1-4 船用大型発電機(出力 19kW 超)

EPA は 2002 年、燃料蒸発ガス規制(後述)とともに、船用大型発電機(出力 19kW 超)に対する規制を導入した。2004 年に第 1 次規制が実施され、2007 年に第 2 次規制が実施された。

表 II-1-4 大型 SI エンジンの規制動向

	HC+NOx	CO	導入年次
第 1 次規制	4.0 g/kW-hr	4.1 g/kW-hr	2004
第 2 次規制	4.0 g/kW-hr	4.1 g/kW-hr	2007

出典: EPA 資料(2002 年 9 月)

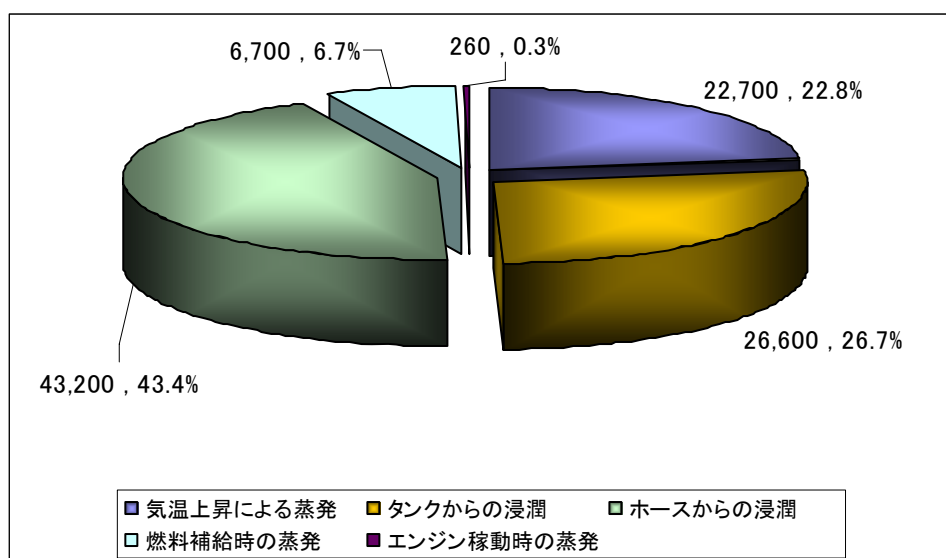
1-1-5 燃料蒸発ガス規制

EPA は 2002 年、いわゆる「2002 年ルール」と呼ばれるガソリンエンジンの燃料蒸発ガス(Evaporative Emissions)に対する規制を導入した。燃料蒸発ガスとは、ガソリン等の揮発性燃料が燃料システムから蒸発し、大気中に放出する HC を指している。対象がガソリンエンジンだけ

なのは、ディーゼル燃料は揮発性に乏しく、規制する必要がないためである。

同規制は、新規ボートが対象で、製造年や使用の有無に関係なく、2008 年の規制導入後に米国で登録したボートがすべて対象となる。

燃料蒸発ガスは、通常、(1) エンジンが稼動中にキャブレター等のエンジン表面から燃料が蒸発する (2) 気温上昇による日中の自然蒸発 (3) 燃料注入時の蒸発 (4) タンク及びホースからの浸潤 (プラスチック製品)、などによって発生する。この中でも特に浸潤による蒸発が最も多い。



単位 (トン)

出展 : EPA リポート (2002 年、8 月)

図 II-1-2 SI エンジンにおける蒸発排気の原因

2008 年から新規ボートに対する燃料蒸発ガス基準値は表 II-1-5 のとおりである。EPA は、新規ボートで平均して 80%の燃料蒸発ガスの削減が達成できると見ている。

表 II-1-5 2002 年燃料蒸発ガスの基準値

蒸発排気の種類	基準値	検査温度	目標値
気温上昇による排出口からの蒸発	1.1g/gallon/day	22.2～25.6℃	25%削減
燃料タンクからの浸潤	0.08g/gallon/day	40℃	95%削減
ホースからの浸潤	15g/m2/day	23℃	95%削減
ホースからの浸潤 (15%メタノール含有)	5.8g/m3/day	23℃	95%削減

出典 : EPA リポート (1996 年、8 月)

現在、米国にはおよそ 1700 社のボートメーカーがあり、そのうち 1200 社がガソリンエンジンを利用しているという。また、燃料タンクメーカーが年間に製造するタンク数はおよそ 55 万基で、そのうちのほとんどが浸潤の多いプラスチック製となっている。ボートメーカー及びタンクメーカーとも零細企業が多いため、EPA は、新規製品開発に必要な銀行の貸付プログラムなどを用意し、零細企業の規制対応を促している。

1-2 カリフォルニア州の排ガス規制

1-2-1 船外機/水上オートバイ

CARB は、船外機エンジンに対して、EPA より厳しい基準を設けている。もともと CARB の規制導入は 1991 年に始まり、2008 年までに完全実施される予定である。CARB と EPA の基準値の比較を表 II-1-6 に示す。

表 II-1-6 EPA 及び CARB の船外機排ガス基準比較

単位 (g/kW-hr)

	EPA (HC+NO _x)	CARB (HC+NO _x)
1998	151	—
1999	138	—
2000	125	—
2001	113	47
2002	99	47
2003	86	47
2004	72	36
2005	60	36
2006	47	36
2007	47	36
2008	47	16

出展：SwRI

1-2-2 船内機/船内外機

CARB は EPA に先んじて、2003 年に船内機/船内外機規制のフェーズ 1 を導入済みで、HC+NO_x の排気量を 16.0g/kW-hr とする基準を設けている。また、2007 年には 5g/kW-hr まで引き下げる予定である。CARB はさらに、2007 年から船上での検査 (On-Board Diagnostics: OBD-M) と 480 時間におよぶ耐久試験を義務付けることも発表している。

表 II-1-7 CARB の船内機/船内外機排ガス基準

単位 (g/kW-h)

モデル年数	HC+NO _x	負荷テスト時間
2003-2008	16.0	—
2008以降	5.0	480

*エンジンの最大出力 (Maximum Rated Power) が 373kW (500 馬力) 以上のエンジンは対象としない

**基準値は、州内で販売されたエンジンの重量平均を基に換算。

***2007 年のモデルに対しては少なくとも州内の全生産エンジンの 45%が基準値に達している必要がある。

2. 技術の紹介

2-1 船外機エンジン概要

船用エンジン業界は、一般的に炭素含有量の多い燃料を使用した 2 ストローク（2 サイクル）エンジンから、4 ストローク（4 サイクル）エンジンへの移行を図っている。これは、2 ストロークエンジンは燃焼効率が悪く、不完全燃焼から発生する HC 及び CO の量が多いことを考えれば、排ガス規制が強化され、それに対応する上でごく自然の流れである。こうした中、船用エンジンを取り巻くトレンドとしては、(1) 排気量（出力）の大きいエンジンでは、電子式燃料噴射装置（Electronic Fuel Injection : EFI）を採用 (2) 排気量の小さいエンジンでは引き続きキャブレター（気化器）が使用、が挙げられる。また、最新のエンジンは、ガソリンを直接噴射する直噴型 2 ストロークや高出力密度ポート燃料 4 ストローク（High Power Density Port-fuel 4 Stroke）等の技術が使われている。

このように様々なエンジン技術が導入されているが、同時に、顧客が求めるエンジン効率やコストとの兼ね合いも市場に普及させるためには重要な要素になってきている。歴史的に船外機向け 2 ストロークエンジンのように、船用エンジン業界独自に開発された技術もあるが、その他の多くの技術は、業界にとって非常に新しいものである。これは、ちょうど、自動車業界に対し 1970～1980 年代に排ガス規制法が導入され、多くの技術が登場したのと同じ状況である。自動車業界では、その後 1990 年代に入り、ごく一部の技術が生き残ることとなるが、船用エンジンでも同様のトレンドが予測される。

2-2 2 ストロークエンジン

船用エンジンの中でも船外機は、過去数十年にわたり 2 ストロークエンジンによって占められていた。長年にわたる改良によって、重量当りの馬力も非常に高くなり、ピークパワーにも優れるようになった。しかし、不燃焼 HC(UHC)の排気を制御することが非常に難しく、最近の規制強化によって新たな技術の開発が進められている。その中でも、直噴方式は非常に有効な技術として注目を集めている。この技術が登場したことで、2 ストロークエンジンは、引き続き生産されるめどが立ったぐらいである。しかし、今後排ガス規制がさらに強化されることによって、2 ストロークエンジンから 4 ストロークへの移行が進むという可能性もある。

こうした中、2 ストロークエンジンで今後、考えられる改良点としては、(1) クランクケース内でのオイル・空気混合の取止め (2) クランクケース内のスーパーチャージの取止め、などが考えられる。

(1) については、現在のエンジンでは、潤滑油を空気の中に噴射しているが、これが分子量の大きい HC を燃焼システム内に送り込む原因となっている。結果的に一部の HC が燃焼システムを抜け出し、不燃物として排気されてしまうわけである。従って、この混合をなくすことによって、排出源となる HC を減らすことが重要となってくる。さらに、触媒技術を導入することによって、漏れ出した HC を除去することが必要になってくる。

一方、(2) については、クランクケース内ではなく外部からのスーパーチャージングによ

って、クランクケース内の HC を減らすというものである。

以下に現在、メーカー各社が出している 2 ストロークエンジンを挙げてみる。

(1) ヤマハ

ヤマハは現在、多様な機種（最大馬力は、3.3 リットル、300 馬力）を販売している。同社の 2 ストロークエンジンは、高圧直噴システム (High Pressure Direct Injection Fuel System: HPDI) を採用している。エンジンは、あらかじめ均等に混合してある燃料を利用するため、HC 及び微粒子の排出が極端に低くなる。最大の特徴は、複数の水冷吸気管を統合する“マニホールド”構造によって吸気量を増やすことができ、エンジンの馬力を上げることになる。今後、この構造は、プレジャーボート業界で標準となっていくと考えられる。

(2) 日産

日産は、40～115 馬力クラスの 2 ストロークエンジンを製造している。同社のエンジンも同様に直噴型システムを採用しているが、「TLDI」の呼称で知られている。TLDI は空気ポンプを使って燃料を噴射する方式で、燃料を非常に細かなミスト状にすることによってシリンダー内で蒸発しやすくなり、結果的に燃焼効果を高めることになる。これにより、HC 及び微粒子の排出を削減できる。また、燃焼孔を付け加えることによって、空気と燃料の混合比を調節し、燃費を向上させている。

(3) マーキュリー

マーキュリーは、75～250 馬力クラスの 2 ストロークエンジンを製造しているが、「オプティミマックス (OptimiMax)」の名称がつけられている。これも日産同様に空気ポンプを使う仕組みで、同様の効果が得られる。

(4) エビンルード

エビンルードは、40～250 馬力クラスの 2 ストロークエンジンを製造しているが、「E テック (ETech)」の名称がつけられている。同社のエンジンは、空気ポンプを使用する代わりに“ソレノイド”と呼ばれる電磁力を使った制御システムを利用する。この方法は、同社の親会社ボンバルディア (Bombardia) 社が製造する船外機/水上オートバイエンジンにも採用されている。

2-3 4 ストロークエンジン

過去 10 年間にわたり、船用エンジン業界では、4 ストロークエンジンが市場に投入されるようになってきた。最近ではほとんどのメーカーが 4 ストロークエンジンを導入している。

これまで、4 ストロークエンジンは、従来の 2 ストロークエンジンに比べてエンジン重量に対する馬力が非常に小さく、さらにパーツが多いため、結果的に割高になるという欠点があった。しかし、船用エンジン業界は、自動車業界の技術を応用することによってこれらの欠点を改良しつつある。さらに、自動車エンジンと共有できる部品は、新たに製造する必要

がなくなるため、コストを削減できる。ここでは、以下に各社の船外機用 4 ストロークエンジン技術を説明する。

(1) ヤマハ

ヤマハは現在、2.5～250 馬力クラスの 4 ストロークエンジンを販売している。同社の 4 ストロークエンジンは、すでに自動車業界でも採用されている最先端の技術を用いている。これらには、4 バルブ燃焼室、デュアル・オーバーヘッド・カム、電子制御ポート噴射システム等がある。

(2) スズキ

スズキは現在、9.9～300 馬力クラスの 4 ストロークエンジンを販売している。なお、同社の 300 馬力のエンジンは、排気量が 4 リットルと船外機で最大となっている。同社のエンジンもヤマハ同様に自動車用エンジン技術を採用している。

(3) ホンダ

ホンダは現在、2～225 馬力クラスの 4 ストロークエンジンを販売している。ホンダの大型エンジンは、すべて自動車用エンジンの構造を基にしている。これにより、生産コストを引き下げている。同社はまた、自社で開発した自動車用エンジン技術「VTEC」を船外機エンジンにも導入した。これは、バルブタイミングとリフト量をエンジンの回転域に合わせて切り替える仕組みである。同社はまた、閉鎖型希薄燃焼方式を利用することによって、排気ガスの削減と燃費の向上に成功している。また、同社は業界で初めて排気用の酸素センサーの設置に成功。これは、今後、業界トレンドとなっていくと見られている。

(4) 日産

日産は現在、2～30 馬力クラスと比較的小型の 4 ストロークエンジンを販売している。同社は電子制御の燃料噴射システムを採用している。

(5) マーキュリー

マーキュリーは現在、2.5～275 馬力クラスの 4 ストロークエンジンを販売している。275 馬力エンジンは、スーパーチャージャーを利用しており、船外機業界では初の試みであると同時に、今後のトレンドになると見られている。同社はこのほか、他社同様に自動車用エンジン技術も採用している。

表 II-2-1 各社の主な OB エンジン一覧

メーカー名	エンジンタイプ	馬力	噴射方式	使用技術	重量
ヤマハ	4 ストローク	250	MPFI	デュアル OHカム、 カム・ フェイ ザーVVA	274kg
	2 ストローク	300	HPDI	吸引式冷 却システ ム	247kg
スズキ	4 ストローク	300	MPFI	デュアル OHカム	614kg
ホンダ	4 ストローク	225	MPFI	シングル OHカム、 VTEC VVAシス テム	277kg
日産	2 ストローク	115	TLDI 直噴	高出力ダ イナモ、 3段階ト ロリー ング用ス ピード制 御	178kg
マーキュリー	4 ストローク	275	MPFI	デュアル OHカム、 スマート クラフ ト・デジ タル・ス ロットル	288kg
	2 ストローク	250	直噴	-	229kg
エビンルード (Evinrude)	2 ストローク	250	ETEC直噴	層状給気 燃焼	234kg

2-4 ガソリンエンジン技術

2-4-1 直噴 2 ストローク、成層チャージ燃焼

(Direct Injection 2-Stroke, Stratified-charge)

同技術は、直噴型 2 ストロークエンジンに、マルチプル・インジェクション及び成層チャージ（吸気）によるリーン燃焼（希薄燃焼）方式を組み合わせたものである。リーン燃焼は、通常よりエンジン内に送り込む混合気を薄くすることによって、燃焼の効率化を図る方式である。ディーゼルエンジンでは利用されているが、これをガソリンエンジンに応用したものである。直噴型 2 ストロークは、すでに市場に出回っている。直噴自体は、エンジンのノッキングを減らし、燃料の圧縮率を高めるため、燃費の向上につながる。NO_x、HC、CO の削減に効果があるものの、触媒技術に比べて効果が薄い。将来的には、NO_x の排気が極端に低いタイプのエンジン（HCCI）への応用が見込まれている。

リーン燃焼において、単に混合気を薄くしてしまうと、着火に支障がでる。そのため、点火プラグの周りに理論混合比に近い層が形成する方法を「成層吸気」と呼ぶ。実現手段は、インジェクタからの噴霧を何らかの方法で点火プラグ近傍に導くことである。

向こう5年間は有効な技術と考えられるが、燃費等から考えると、4ストロークエンジンにはかなわない。従って今後、排ガス規制が強化されていけば、必然的に4ストロークエンジンへの移行が加速化していく。いわゆる、技術移転の間に出てきた代替技術と言える。

2-4-2 直噴4ストローク・リーン燃焼

(Direct Injection 4-Stroke Lean Burn)

同技術は、直噴型4ストロークエンジンにマルチプル・インジェクションを組み合わせることで、シリンダー内の燃料混合の状態を改良する。すでにある自動車用直噴及び2ストロークエンジンの燃料直噴システムを利用できるのが特徴である。直噴ガソリンエンジンのリーン燃焼は、「成層チャージ燃焼」とも呼ばれており、燃費は従来のエンジンに比べて20～30%向上する。HC、COの削減に効果があるものの、NO_xの排出は、従来型エンジンよりも多くなってしまうという欠点がある。また、排ガス削減量は、後に説明する三元触媒方式に比べると劣る。コスト的には従来のポートに燃料を噴霧する(Port Fuel Injection:PFI)型エンジンに比べて割高だが、すでに2ストロークエンジンでも出回っているので、4ストロークエンジンでも普及すると見られている。しかし、現在の状況ではあまりニーズがなく、少なくとも向こう5年間はPFI型エンジンが船外機では主流を占めると見られている。

2-4-3 ストイキによる直噴4ストローク

(Directed Injection 4-Stroke Stoichiometric)

同技術は、直噴型4ストロークエンジンにマルチプル・インジェクションを組み合わせるという点では前述した方式と一緒にだが、「ストイキ」と呼ばれる理論空燃比(14.7)の状態では酸素とガソリンを燃焼させることによって過不足なく反応させ、排ガスを削減するという仕組みである。自動車用直噴及び2ストロークエンジンの燃料直噴システムを利用できるのが特徴。

NO_x、UCH、COの排出は若干高めだが、三元触媒方式を併用できるのが特徴でもある。また、リーン燃焼及び理論空燃比燃焼の2重システムでエンジンを稼働できるため、最大速度及び低速の両方で燃費を向上させることが可能である。

3元触媒を利用しない場合、コストは直噴型2ストロークエンジンとほぼ同じ。現在の自動車エンジンのソリューションとなっている。これも前述のリーン燃焼型同様、当面は必要ないと考えられている。

2-4-4 ターボチャージング (Turbocharging)

同技術は「過給器」とも呼ばれており、エンジン内の空気の流れを増加させるのが目的となっている。エンジンの排気管から放出される排気熱を利用して、圧縮した空気をエンジンに送り込む。これにより、出力密度(Power Density)を増加させることになる。コスト削減効果は非常に高く、例えば、エンジンをV型6気筒から直列4気筒に下げることが可能に

なる。

すでに、自動車やディーゼルエンジンで利用されてきた息の長い技術ではあるが、これまでタービンの温度が高すぎるため、船用エンジンには不向きと考えられていた。しかし、最近では自動車やディーゼルエンジンのタービンの温度を低く保つことができるようになってきているため、船用エンジンの環境への応用も期待できる。例えば、融合型シリンダー・ヘッド・ターボチャージャ（Integrated Cylinder-Head Turbocharger）が解決策として期待されている。

同技術はまた、他の排ガス削減技術への利用も考えられる。例えば、希薄燃焼及び EGR を採用しているエンジンは、エンジン負荷の軽い状況では NO_x の削減に効果があるが、最大負荷（フルロード）がかかっている状況では、NO_x が増大してしまう。そのため、最大負荷時により大量の吸気が必要になる。こうした段階でターボチャージングを使用することによって吸気量を高め、NO_x の排出を抑えることができる。

2-4-5 スーパーチャージング（Supercharging）

同技術は、エンジン内の空気の流れを増加させるのが目的である。エンジンのクランクシャフトの力を利用して、高密度の冷却空気をエンジンに送り込む。高密度の冷却空気を送り込むという点ではターボチャージングと一緒である。エンジンの燃焼効率を画期的に向上させる一方で、排ガスを非常に低く抑えることができるのが特徴である。

すでに、マーキュリー・マリン社が製造しているエンジン「ヴェラド（Verado）」の実績があるが、コストはほぼターボチャージングに等しい。従って、ターボチャージング同様にエンジンを V 型 6 気筒から直列 4 気筒 4 に下げることが可能になる。

他の排ガス削減技術との干渉がなく、4 ストロークエンジンの出力密度を改良するには非常に有効な技術と言える。

船用エンジンへの応用は非常に期待されており、同技術の導入によって希薄燃焼及び EGR が利用でき、触媒を必要としないエンジンの商用化が可能になる。

2-4-6 排気ガス再循環（Exhaust Gas Recirculation:EGR）

生成された排ガス成分をいかに削減するかということも重要な課題である。そこで、同問題に焦点を当てて開発されたのが EGR である。EGR は、排ガスを冷却して再び吸気に送り込む方法である。これにより、通常の 21% から 13% に酸素含有量を減らした空気をシリンダー内に送り込む。その結果、燃焼炎の温度を下げ、NO_x の生成を抑える仕組みとなっている。また、吸気に排ガスを送り込むことで、吸気の熱容量を高め、燃焼温度を低くすることが可能になる。この反応過程によって、NO_x の生成量を通常 10~40% 減少することが可能になる。

さらに、中速から最大速度にかけて燃費が向上する。特に、最大速度時は、他の技術を併用することで効果を上げることができる。EGR は、NO_x 削減の方法が同様のため、希薄燃焼と比較されることが多い。しかし、希薄燃焼は触媒との併用が難しいが、EGR は可能なため実用化の期待は大きい。

EGR システムには様々なコンポーネントが必要になる。例えば、排ガスから PM を除去

するための電気集塵機や触媒、排 SO_x 技術、冷却システム等が含まれる。また、効果をあげるためには、硫黄濃度の低い燃料を使う必要がある。

暫定的な NO_x 削減技術としては非常に有効であり、改良した点火システム、低速におけるポンプ・ロスの削減によって、燃費をさらに向上できる。同様の効果が期待できる技術としては、直噴型のリーン燃焼システムがある。

2-4-7 可変バルブ駆動技術 (Variable Valve Actuation:VVA)

エンジンの稼動状態に応じて、バルブ開閉のタイミングやバルブのリフト量などを変え、適正な出力を得る技術である。また、同時に広い回転域で吸排気効率を高めて燃費の改善を図っている。この調節は、電子制御と機械的なものを組み合わせた 2 種類が存在する。エンジンの性能、燃費、排ガス削減のいずれにも効果があるが、VVA の種類によってその効果は異なる。現在もより優れた VVA が登場しつつある。自動車のような大量生産されるエンジンには最適の技術で、ディーゼルエンジンに向いていると言われている。すでに 4 ストローク技術の中ではすでに定着しつつあり、ホンダやヤマハが船用エンジンに採用している。自動車業界ではさらに高度な VVA を採用している。

2-4-8 高エネルギー点火システム (High Energy Ignition Systems)

最新の点火プラグ及び点火系回路技術の総称である。先端にイリジウムを使った点火プラグの使用がトレンドとなっている。また、高エネルギーインダクティブ点火システムも同様に普及しつつある。

高エネルギー点火は、超希薄燃焼や高 EGR といった燃焼技術にも対応する。その結果、NO_x の排出が非常に小さくなるのが特徴である。燃焼率 (Burn Rate) を改良することや点火進角 (点火時期のずれ) を減らすことによって、結果的に燃費を向上させる。また、エンジンのアイドリング状態を安定させる。この技術は、船用エンジン向けの技術としては非常に低コストであるが、通常併用される直噴リーン燃焼や EGR のコストが跳ね上がる。非常に有効な技術であるが、併用する新技術の改良コストがかさんでいるのが現状である。

2-4-9 オーバー・エキスパンディッド・サイクル (Over-Expanded Cycle)

従来のエンジン・ストローク (膨張行程) のタイミングを圧縮行程より長くすることによって燃焼効率を引き上げる技術を指す。機械的にも可能であるが、従来のエンジンに比べて吸気弁を遅く閉じるミラー・サイクルとして導入されている。同技術を利用すると、エンジンに取り込まれる空気量を減らすことができ、圧縮行程を短くなることによって燃焼効率を上げることができる。

エンジンの効率は圧縮比を上げるほど向上するが、これはノッキング限界にて制限される。この圧縮比で実際に重要なのは、「膨張比」である。そのため、ノッキングを避けるため圧縮行程は短くし、膨張行程をそれより長くしたのがオーバー・エキスパンディッド・サイクルとなっている。現実的には、吸気行程後、圧縮行程に入ってからしばらく吸気弁を開いたままにして、吸気の一部を戻して圧縮しすぎないようにする方式が使われているが、これがいわゆる「ミラー・サイクル」となっている。

燃費という観点では、中速及び高速時にある程度の効果が見られるが、高速時における吸

気が減少してしまうため、別の技術を併用する必要がある。通常は VVA が必要になるため、VVA のコストを見積もる必要がある。自動車及びディーゼルエンジンにはすでに採用されているが、さらなる燃費向上や HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) エンジン制御への応用などが研究されている。実際に採用している会社としては、キャタピラー (Caterpillar) の ACERT がある。ちなみに ACERT は、希薄燃焼を合わせることによって、50%の NO_x 削減に成功している。

短期的にはそれほどの魅力はなく、業界へのインパクトもさほど大きくない。しかし、HCCI 制御が将来的に認められるようになれば、注目を集めるだろう。

2-4-10 予混合吸気圧縮点火

(Homogeneous Charge Compression Ignition : HCCI)

燃焼効率がよく、排ガスが非常に少ないクリーン技術として期待されているのが HCCI である。もし、EGR などを利用して混合燃料が希薄されていれば、NO_x の排気量をさらに削減することができ、その量は実に数 PPM 程度になる。

あらかじめほぼ均一に混ぜた空気と燃料の混合気を圧縮点火する方式で、特に NO_x の排出量が極端に少ないことが研究でわかっている。高速での効果も研究されているが、エンジンの燃焼から発生するノイズをどう除去するかが課題となっている。また、HC や CO の排気が通常の点火エンジンに比べて多いため、酸化触媒の併用が必要と考えられている。

コストは、直噴、VVA、EGR 等の技術を併用する必要があるため、高いと考えられる。自動車業界でも普及までに向こう 10 年はかかるとされているため、船用エンジン業界での導入はさらに時間がかかると見られている。

2-4-11 酸化触媒 (Oxidation Catalyst)

排出ガスの中、HC や CO の除去に使われているのがいわゆる酸化触媒と呼ばれているもので、これらの排ガス成分を残存酸素で酸化して除去するという方法である。通常はリーン燃焼に利用されている。この化学反応行程では、白金やパラジウムといった白金元素を触媒に利用する。排気時に発生する逆圧によってエンジンの燃焼効率を若干下げるといった問題があるが、UHC や CO を 95%以上削減できる。こうした中、船用エンジンのように排気が湿った環境で行われる状況では有効と考えられている。自動車業界では、触媒をエンジン排気のすぐ脇に設置する方法を取っており、船用エンジンにとっても同方式は最適である。自動車業界の技術を応用するという点で、コストはそれほど高くつかない。今後 UHC や CO に対する規制が強化されれば、必然的に採用せざるを得ない状況に陥ると見られている。

最大の問題は、触媒が作用するためには非常に高温の環境が必要になるという点である。自動車の場合は問題がないが、船用エンジンの場合、高温の触媒が水と反応して爆発する危険性がある。また、酸素モニタが湿気に耐性を持つようにするという改良も必要になってくる。

また、米コーストガードは、触媒技術は、CO を放出するという問題を指摘している。

2-4-12 三元触媒 (3-Way Catalyst)

ガソリンエンジンの排ガス中の CO、UHC、NO_x を還元・酸化によって浄化する技術である。排気管の途中に触媒が入った装置を設置するが、3 種類の物質を同時に分解することからこの名称が付けられた。触媒には、白金などを使い、水、CO₂、窒素に還元又は酸化させる。効率よく還元・酸化をするためには、燃料が理論空燃比の状態（ストイキ）であることが必要条件となる。このため排ガス中の酸素濃度を酸素センサーなどで絶えず測定し、この情報を元に燃料噴射量などを制御しなければならない。

三元触媒では燃焼にて生成された NO_x は還元され、この際に発生する酸素で不完全燃焼成分である HC や CO を酸化する。このため NO_x と HC や CO が適量ずつ存在して最適の浄化が行われる仕組みである。排気情報→制御演算→吸気パラメーター→燃料噴射量→排気への影響、のように情報と制御がループすることから「閉鎖式ループ (Closed Loop) 制御」あるいは「フィードバック制御」とも呼ばれている。

排ガス削減効果は非常に高く、それぞれの物質を 95%以上削減する。しかし、酸化触媒同様、逆圧によって低速時のエンジン効率が落ちる。また、車の走行距離や年数によって触媒効果が落ちると、酸化・還元効果が極端に低下する。酸素の含有が多い、リーン燃焼型エンジンには直接利用できない。自動車業界ですでに実用化されており、船用エンジンへ直接技術移転できるため、長期的には有望な技術として見込まれている。

船内機メーカー大手インドマー・マリンは、2007 年に ETX/CAT ((Extreme Tuned Exhaust with Catalyst))を導入し、他社に先んじて次世代のエンジンを導入した。製品は、同社の 5.7 リットル ETX/CAT は、CARB が設定するガソリンエンジンの排気格付け「フォースター・スーパー・ウルトラ低排気」に合格した製品となっている。

製品は三元触媒を利用したもので、セラミックをパラジウムとローディウムでコーティングしている。セラミック自体は、表面積を最大限に広くするために蜂の巣構造に作られている。まず、HC と CO がパラジウムと反応して、水と CO₂に変換される。さらに、NO_x がローディウムと反応して窒素ガス及び酸素に変換される仕組みである。同技術の優れている点は、米コーストガードが懸念していた CO も最大 95%削減できる点である。さらに、触媒の持続性なども改良が加えられている。

実際に行われた試験では、使用しないエンジンとの比較で加速や最高速度等の性能にはそれほど差が見られなかったが、燃費で大きな差が出ているという。同社は 2007 年から販売する 350 馬力、5.7 リットルの V-8 エンジンに装着していく。

2-4-13 NO_x 吸蔵触媒 (Lean NO_x Adsorber Catalyst: LNT)

同技術は、通常運転時に NO_x を硝酸塩の形で触媒中に吸蔵し、さらに還元することによって窒素として浄化する方式で、リーン燃焼型エンジンに利用できる。リーン燃焼時に UHC と CO の酸化を行う。これら 3 つの物質の削減効果は平均して 80%程度である。しかし、燃料油中の硫黄分(S)により触媒が被毒・劣化し吸蔵性能が低下するため、触媒を定期的に高温化し硫黄の除去・再生(被毒回復制御)が必要となる。このため、硫黄濃度の低い燃料が必要になる。

現在は、酸化触媒や三元触媒に比べて割高だが、大量生産によってコストを引き下げるこ

とが可能と考えられる。長期的には期待されているが、酸化触媒や三元触媒のほどの期待度はない。

2-4-14 最新型センサーとアクチュエータ (New Sensors and Actuator)

シリンダー圧センサーは、現在シーメンス・フェデラルモーグルが共同開発を進めており、軽量ディーゼル業界に3～5年ぐらいに導入される予定である。センサーは、燃焼効率を逐一モニタし、その結果をリアルタイムでフィードバックする。その結果、常時、最適な燃焼を確保する仕組み。これにより、しかし、現状ではなかなか実用化が難しいHCCIなどの技術が必要となるため、実用化はまだ先になる。現行ではまだ市場に出回っていないが、シリンダー当たり100ドル以下になる見込みである。シリンダーごとにセンサーを設置することで、結果的にエンジン全体のセンサー数を削減できるため、コスト安になると見られている。普及には10年近くかかると見られている。

3. 今後の技術

3-1 ガソリンエンジン技術の今後

プレジャーボート用エンジンに対する今後の規制は、まだはっきりと定まっていない。

しかし、図 II-3-1 に示す、米国における道路、非道路、CARB 船内機、CARB 船外機、EPA 船外機の排出ガス基準の推移でも分かるように、船用ディーゼルエンジンの規制は、今後も道路や非道路のディーゼルエンジンを追隨していくものと考えられる。そして、既に CARB は、2007 年から船内機/船内外機の HC+NOx 基準を 5g/kW-hr 以下としていることから、その他の船用エンジン(船外機)についても、この基準がここ数年内の当面の目標となるものと考えられる。その基準の導入時期は定かでないが、おそらく EPA と CARB の規制導入時期を考慮すると 4～8 年の間になると見られている。

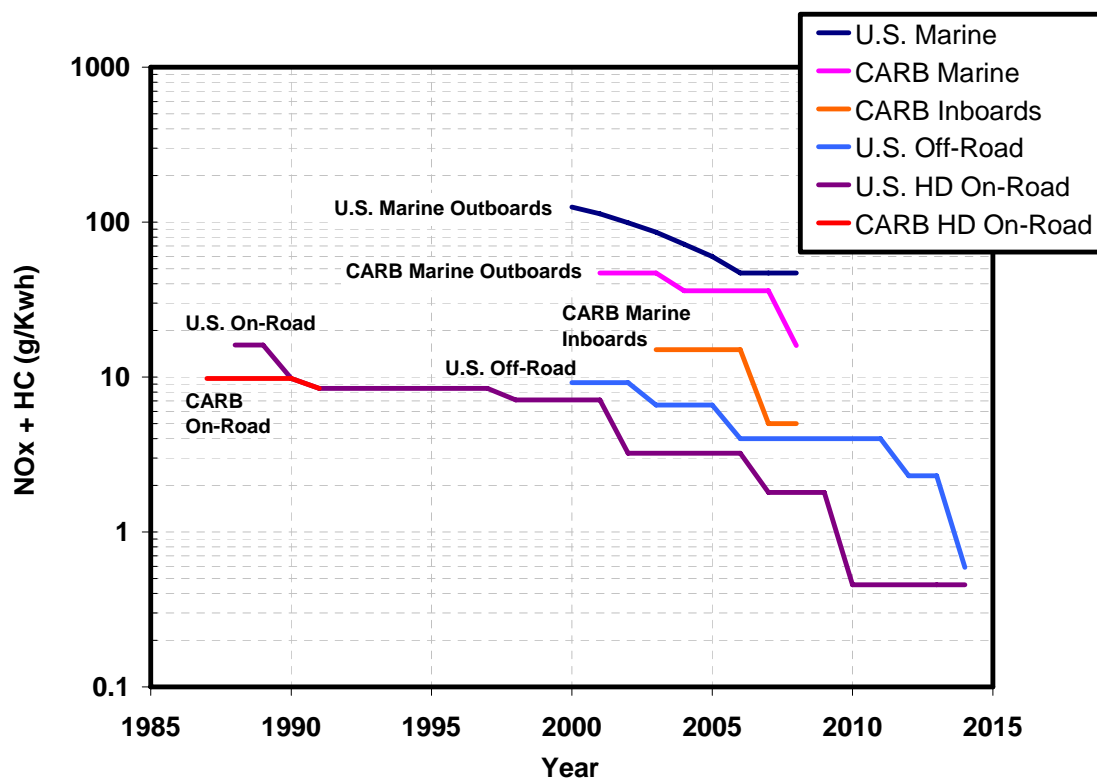


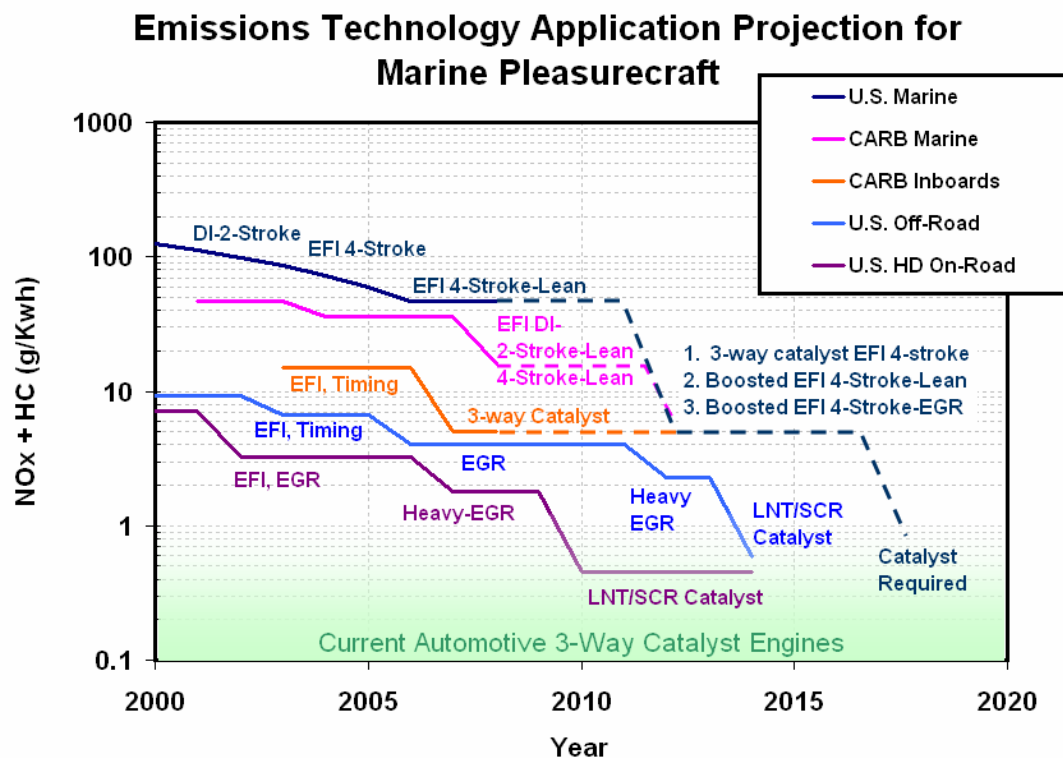
図 II-3-1 米国の排ガス基準の推移

図 II-3-2 に排ガス基準値に対応した排ガス削減技術の動向を示す。

道路、非道路が、HC+NOx 基準が 10→4→2→0.5g/kW-hr と変遷するに連れ、EFI/Timing→EGR→HeavyEGR→LNT/Catalyst と変遷している状況は、今後の船用エンジンの研究開発の方向性を示唆している。

当面の目標の HC+NOx 基準 5g/kW-hr 以下について言えば、サウスリサーチ研究所(Southwest Research Institute : SWRI)によれば、CARB が 2007 年に船内機ガソリンエンジンに規制がかかることによって、三元触媒技術が導入されると予測されている。

また、SWRI は、これにともない、自動車産業で導入が進んでいるその他の技術も船用エンジンに導入がされると予測している。



出典：SWRI

図 II-3-2 排ガス削減技術の動向

触媒のみによる排ガス削減でも将来的な規制に耐え得るといわれているが、最高出力（ピークパワー）や負荷等を考慮していく場合に、複数の技術を組み合わせるのが望ましい。自動車エンジンでは、高い負荷がかかる状況が少ないため、こうした環境での排ガス基準をクリアする必要はない。しかし、船用エンジンでは、高い負荷のかかる状態での使用が多く、そのためそのような状況でも排ガス基準をクリアする必要がある。したがって、触媒技術がこうした状況下でも同様に効果を発揮し、安全性が確保されるということが証明されなければならない。そこで、三元触媒に加えて、ストイキや希薄燃焼等が必要になってくる。さらに、最大負荷のかかる状況下で排気温度を下げるために、EGRなども求められてくると見られている。また、これらの技術を導入する一方で、出力密度を維持するためには、エンジンの過給(ブースティング)が必要になる。したがって、長期的には触媒と過給技術の組み合わせが一般的になっていくと見られている。

現在、NO_x+HC の規制基準（～5g/kW・hr）に対応できる有望技術として

- (1) EFI4 ストローク＋三元触媒
（海水及び高温への対応が課題）
- (2) 過給 EFI4 ストローク希薄燃焼
（コスト及び設置の難しさが課題）
- (3) 過給 EFI4 ストローク＋EGR
（コスト及び設置の難しさが課題）

があるという。しかし、いずれも課題があることから、引き続き改良が必要になってくる。SWRI は、基準値として求められている 5g/kW・hr までの排ガス削減が向こう 4～8 年でできると予測している。

3-2 日本への影響

排ガス規制といえば、古くは、日本の自動車メーカーが米国の排ガス規制をクリアできたために今日の地位を得たように、また現在でも、船外機では、日本メーカーが排ガス対策に優位であるため米国市場でシェアを伸ばしているとの例があり、エンジンメーカーにとって将来を占うきわめて重要な問題である。

船外機を製造している日系メーカーは自動車メーカーでもあり、自動車産業で培ったノウハウを元にして、米国の基準に沿った新型エンジンを開発している。

また、自動車工場で製造してきた部品をそのまま使うことによって、大量生産へと導き、コストを削減できるというメリットがある。同様の部品を使うようエンジンを設計していくことで、迅速に市場に新型エンジンを導入できる一方、自動車部品メーカーにとっても新たな市場を開拓できる可能性がある。

米国市場ですでに優位にある日系企業にとって、米国の規制がおよぼす影響は、大型船舶用エンジン業界に比べて少ないものと考えられる。むしろ、環境規制の強化は、この分野における日系企業の躍進に向けた好機と見るべきである。

参 考 資 料

4-1 参考 URL

(1)Clean Air Act に関する説明

<http://www.nsc.org/EHC/mobile/acback.htm>

(2)EPA 船舶ディーゼルガソリンエンジン(全般)に関する情報サイト

<http://www.epa.gov/otaq/marine.htm>

(3)EPA 船舶ディーゼルエンジン、ガソリンエンジンの基準の概要

<http://www.epa.gov/otaq/regs/nonroad/marine/420f04031.pdf>

(4)EPA 船舶ディーゼルエンジン第3次規制導入のための先行通知

<http://www.epa.gov/fedrgstr/EPA-AIR/2004/June/Day-29/a11294.pdf>

(5) カリフォルニア州 SO_x 対策燃料規制

<http://www.arb.ca.gov/regact/marine2005/marine2005.htm>

(6)EPA 船舶ガソリンエンジン(全般)に関する情報サイト

<http://www.epa.gov/otaq/marinesi.htm>

(7)EPA 船舶ガソリンエンジンに関する規制

<http://www.epa.gov/nonroad/marine/si/420f96012.htm>

(8)カリフォルニア州の船舶ガソリンエンジン(全般)に関する情報サイト

<http://www.arb.ca.gov/msprog/marine/marinectp/marinectp.htm>

(9)カリフォルニア州船外機/水上オートバイに関する規制

<http://www.arb.ca.gov/msprog/marine/marinectp/reg.pdf>

(10)カリフォルニア州船内機/船内外機に関する規制

<http://www.arb.ca.gov/msprog/marine/marinectp/revreg.pdf>

(11)Controlling Air Emissions from Marine Vessels: Problems and Opportunitéis

Anthony Fournier University of California Santa Barbara

<http://www.westcoastdiesel.org/files/sector-marine/Fournier%20Marine%20Emissions%20Problems%20and%20Opportunities.pdf>

(12)United States maritime Administration DECISION FRAMEWORK FOR
EMISSION CONTROL TECHNOLOGY SELECTION

http://www.marad.dot.gov/nmrec/energy_technologies/images/Decision%20Framework%20for%20Technology%20Selection.pdf

(13) 排ガス対策技術の解説(ワルチラ)

http://www.wartsila.com/Wartsila/global/docs/en/ship_power/media_publications/marine_news/2005_1/guide_to_controlling_emissions.pdf

(14)CARB に関する SWRI のレポート

<http://www.swri.edu/3pubs/ttoday/Summer04/Craft.htm>

(15) 船用エンジンにおける三元触媒（インドマーの実用例）

http://www.boatingmag.com/article.asp?section_id=8&article_id=858

4-2 添付資料

「A Study on Environmental Load Reduction Technologies for Next Generation Marine Engines」 SwRI Project No.03.12910

Final Report: A Study on Environmental Load Reduction Technologies for Next Generation Marine Engines

SwRI Project No. 03.12910

Prepared for:

JETRO

January, 2007



SAN ANTONIO, TEXAS • HOUSTON, TEXAS • WASHINGTON, DC

Final Report: A Study on Environmental Load Reduction Technologies for Next Generation Marine Engines

SwRI Project No. 03.12910

Prepared for:

JETRO

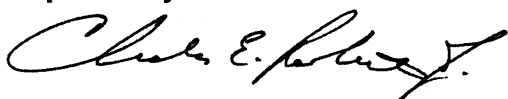
Prepared by:

Dr. Charles E. Roberts

**6220 Culebra Rd.
San Antonio, Texas, U.S.A., 78238**


January, 2007

Prepared by:



**Charles E. Roberts, Manager
Department of Engine and Emissions Research**

Approved by:



**Franz J. Laimboeck, Program Director
Department of Engine and Emissions Research**

*This report must be reproduced in
full, unless SwRI approves a
summary or abridgement.*

EXECUTIVE SUMMARY

Southwest Research Institute (SwRI) conducted a study of engine technologies that may have impact on the marine industry of the future.

The U.S. and Europe have been promoting increasingly-strict emission control regulations for recreational marine engines. Additionally, the Japan Boating Industry Association is also considering tightening its current emission control initiative for recreational marine engines that are manufactured for Japanese market. It is expected that future emissions regulations for recreational boats as well as automobile and other sources will continue to be reduced.

Marine engine manufacturers are under increasing pressure to adopt environmental regulations that follow the trends of other areas of the engines and transportation industry. The Japan Boating Industry Association (JBIA) and the Japanese Marine Equipment Association (JMEA) are seeking to research new emission reduction technologies applicable to marine engines towards year 2020 and would like to provide R&D guidance for the Japanese marine engine industry. The subject of this study includes spark ignition and compression ignition marine engines for pleasure craft less than 24 meters in length.

This report is the result of a study of marine emissions regulations and technologies that may be utilized to meet future marine engine emissions goals. The subject engines include outboard engines, personal watercraft (PWC) engines and stern drive /inboard engines. This document reports the findings of the study, including prospectives on various technologies, their applicability to future marine engines and references to supporting publications and documents.

The result of the emissions review task indicates that marine pleasure-craft emissions levels could be reduced to levels near 5 g/Kwh within the next 4-8 years. This emissions level would be expected to be implemented for pleasure-craft in the outboard, inboard, and sterndrive markets. Following previous trends in the industry, smaller, lower power output engines, including some personal watercraft, are expected to face emissions levels slightly less severe than the higher power output engines.

The technologies identified that have the highest chance of success for meeting future regulations include 4-stroke, EGR, lean-burn and boost. Catalyst technology is a strong possibility for the future, but may not be required to meet a 5 g/Kwh NO_x + HC target.

TABLE OF CONTENTS

	<u>Page</u>
1.0 BACKGROUND AND INTRODUCTION.....	55
1.1 Background and Motivation	55
1.2 Objective	55
1.3 Approach and Project Overview	55
1.4 Reporting and Deliverables.....	56
2.0 MARINE EMISSIONS REVIEW	57
2.1 Introduction.....	57
2.2 Marine Emissions Review	57
2.3 Current Standards	57
2.4 Future Prospectives for Emissions Standards.....	65
3.0 STUDY DETAIL.....	67
3.1 Introduction.....	67
3.2 Current Marine Engine Technologies.....	67
3.2.1 Two-stroke engines	67
3.2.2 Four-stroke engines	70
3.2.3 Inboard/Sterndrive	73
3.3 Emerging Technologies: Gasoline Spark Ignition Engines.....	73
3.3.1 Direct Injection 4-stroke Lean Burn	74
3.3.2 Direct Injection 4-stroke Stoichiometric.....	77
3.3.3 Turbocharging.....	78
3.3.4 Supercharging	80
3.3.5 Exhaust Gas Recirculation.....	82
3.3.6 Variable Valve Timing	84
3.3.7 Advanced ignition systems	86
3.3.8 Oxidation Catalyst	87
3.3.9 Three-way Catalyst with Closed Loop.....	88
3.3.10 Direct Injection Two-stroke.....	89
3.3.11 Homogeneous Charge Compression Ignition.....	90
3.3.12 Over-expanded cycles	91
3.3.13 New sensors and actuators.....	92
3.4 Emerging Technologies: Diesel Engines	93
3.4.1 Naturally Aspirated Diesel Engine.....	94
3.4.2 Common-Rail Injection	95
3.4.3 Piezo-Injection.....	96
3.4.4 Turbocharging.....	97
3.4.5 Supercharging	99
3.4.6 Exhaust Gas Recirculation.....	101
3.4.7 Variable Valve Timing	103
3.4.8 Lean NO _x Adsorber	105
3.4.9 Selective Catalytic Reduction.....	107
3.4.10 Particulate Matter Trap	108
3.4.11 DPNR	109
3.4.12 Homogeneous Charge Compression Ignition.....	110
3.4.13 Low Temperature Diesel Combustion	111

3.4.14	Overexpanded cycles	112
3.4.15	New sensors and actuators	113
4.0	SUMMARY	114
4.1	Introduction.....	114
4.2	Future Emissions Prospective.....	114
4.3	Emissions Technology Solutions for the Future Marine Industry	117
4.4	Closure	121

LIST OF ILLUSTRATIONS

	<u>Page</u>
FIGURE 2.1. U.S. Emissions Standards for Outboards/Personal-Water-Craft.....	58
FIGURE 2.2. View 2-U.S. Emissions Standards for Outboards/Personal-Water-Craft.....	59
FIGURE 2.3. U.S. Small SI Engine Emissions Limits and Trends with Time.....	61
FIGURE 2.4. U.S. Off-Road Engine Emissions Limits and Trends with Time	61
FIGURE 2.5. Emissions Regulation History and Technology Trends for U.S. Light-Duty Automotive	63
FIGURE 2.6. History of U.S. Heavy-duty On-Road Engine Emissions Regulations and Technologies Utilized to Meet Emissions Goals.....	65
FIGURE 4.1. Emissions Standards for Various Engines' Industries	115
FIGURE 4.2. Emissions Standards for Various Engines' Industries	116
FIGURE 4.3. Emissions Technology Application Projection for the Marine Pleasure-craft Industry	120

LIST OF TABLES

	<u>Page</u>
TABLE 2.1. U.S. Emissions Standards for Outboards/Personal-Water-Craft.....	58
TABLE 2.2. CARB Outboard Emissions Regulations	59
TABLE 2.3. CARB HC + NO _x Regulations for Inboard and Sterndrive Engines ..	60
TABLE 4.1. Technology Comparison for Future Marine Applications.....	118

1.0 BACKGROUND AND INTRODUCTION

1.1 Background and Motivation

The U.S. and Europe have been promoting increasingly-strict emission control regulations for recreational marine engines. Additionally, the Japan Boating Industry Association is also considering tightening its current emission control initiative for recreational marine engines that are manufactured for Japanese market. It is expected that future emissions regulations for recreational boats as well as automobile and other sources will continue to be reduced.

Marine engine manufacturers are under increasing pressure to adopt environmental regulations that follow the trends of other areas of the engines and transportation industry. The Japan Boating Industry Association (JBIA) and the Japanese Marine Equipment Association (JMEA) are seeking to research new emission reduction technologies applicable to marine engines towards year 2020 and would like to provide R&D guidance for the Japanese marine engine industry. The subject of this study includes spark ignition and compression ignition marine engines for pleasure craft less than 24 meters in length.

This report is the result of a study of marine emissions regulations and technologies that may be utilized to meet future marine engine emissions goals.

1.2 Objective

Multiple objectives existed for this project. A first objective was to review historical emissions regulations for engine-classes that may impact future legislation for the marine pleasure-craft industry. The historical regulations would then be utilized to make tentative predictions for the direction of emissions regulations for the marine pleasure-craft industry. A further goal of the program was to review current and future technologies that may be utilized by the marine pleasure-craft industry to meet potential emissions and performance goals of the future.

1.3 Approach and Project Overview

The project followed the general approach listed below:

- a.) Emissions Review of marine industry and related engines industry
- b.) Prospective on possible emissions regulations for the future
- c.) Review of existing marine-engines technologies
- d.) Broader review of engines technologies that may be applied to marine pleasure-craft engines of the future
- e.) Prospective on applicability of technologies for use in the pleasure-craft marine industry
- f.) Summary of technology implementation possibilities for the future

Technologies considered in this study are described in separate sections of the report, where each technology is described in detail, followed by statements as to the applicability of the technology to marine use, including an opinion on potential time-to-market.

1.4 Reporting and Deliverables

The full results of the marine technology study are included herein. However, Powerpoint presentations describing the details of the study have also been prepared and delivered to JETRO.

2.0 MARINE EMISSIONS REVIEW

2.1 Introduction

Choice of technology implementation for the marine industry of the future will be guided by requirements of the consumer, cost, and regulation levels. Of these requirements, emissions regulations will play a key role. This section of the study report reviews and discusses past and current emissions regulations for the marine industry and for industries that may have an impact on marine regulations of the future. Upon completion of the review, a brief prospectus of potential expectations for future marine industry emissions regulations is provided.

2.2 Marine Emissions Review

Emissions regulations for marine pleasure-craft engines have received new interest by legislators in the last decade. The general trend in emissions regulations has been that the highest contributors to the total emissions inventory are legislated first, with a trickle-down effect to contributors that have lesser effects on the total emissions inventory. For example, the light-duty automobile was the first to be required to meet emissions requirements in the U.S., followed by over-the-road trucks, and later by off-road industrial machinery. More recently, emissions legislation and regulation has been introduced for small engines used for industrial- and consumer- applications, including the marine pleasure-craft industry. A general summary of the history of important actions that have affected or will affect the marine industry are given below:

For gasoline marine engines, a 1996 rule was adopted in the U.S. establishing outboard and personal watercraft emissions standards. Subsequent to the 1996 emissions legislation, the U.S. EPA also passed a 2002 rule that established evaporative emissions standards for these engines. The 2002 rule also included notice of intent for future sterndrive (SD) and outboard/personal-watercraft (OB/PWC) emissions standards. In parallel with the marine pleasure-craft standards, the U.S. EPA also enacted emissions standards for lawn and garden engines in 1995, 1999, and 2000, including standards for small marine generators (<19kW). In addition the 2002 rule included industrial engine standards for applications such as forklifts, etc, and large marine generators (>19kW). More recently, in 2003, the California Air Resources Board (CARB) published a final regulation order for spark-ignited marine engines that established the strictest standards yet for this class of engines.

2.3 Current Standards

Current U.S. emissions regulations are shown in Table 2.1 and Figures 2.1 and 2.2. The regulations are scaled with engine power rating, with more powerful engines required to meet a stricter NO_x + HC standard than lower powered engines. Note in Table 2.1 and Figures 2.1 and 2.2 the schedule for implementation of the standards.

TABLE 2.1. U.S. Emissions Standards for Outboards/Personal-Water-Craft

Federal Register / Vol. 61, No. 194 / Friday, October 4, 1996 / Rules and Regulations 52107

HYDROCARBON PLUS OXIDES OF NITROGEN EXHAUST EMISSION STANDARDS [grams per kilowatt-hour]		
Model year	P < 4.3 kW HC+NO _x emission standard by model year	P > 4.3 kW HC+NO _x emission standard by model year
1998	278.00	$(0.917 \times (151 + 557/P^{0.9})) + 2.44$
1999	253.00	$(0.833 \times (151 + 557/P^{0.9})) + 2.89$
2000	228.00	$(0.750 \times (151 + 557/P^{0.9})) + 3.33$
2001	204.00	$(0.667 \times (151 + 557/P^{0.9})) + 3.78$
2002	179.00	$(0.583 \times (151 + 557/P^{0.9})) + 4.22$
2003	155.00	$(0.500 \times (151 + 557/P^{0.9})) + 4.67$
2004	130.00	$(0.417 \times (151 + 557/P^{0.9})) + 5.11$
2005	105.00	$(0.333 \times (151 + 557/P^{0.9})) + 5.56$
2006 and later	81.00	$(0.250 \times (151 + 557/P^{0.9})) + 6.00$

reference: EPA 2003 www.epa.gov/otaq/nonroad.htm

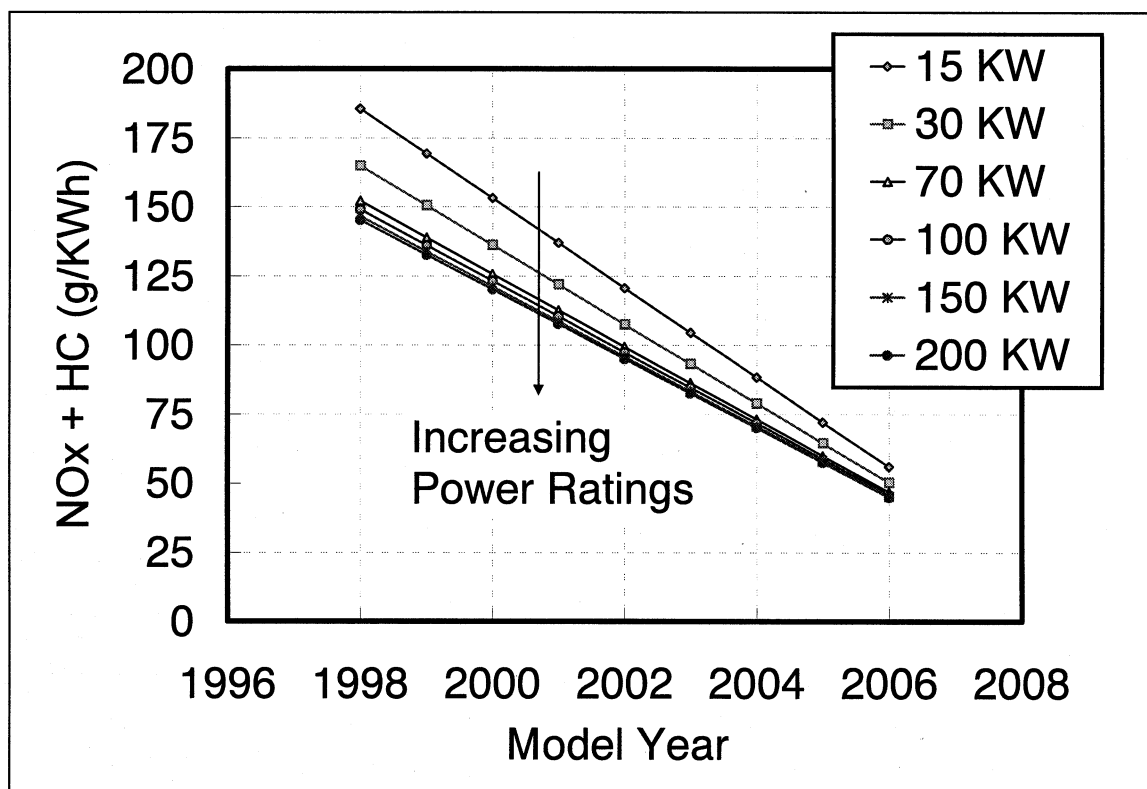


FIGURE 2.1. U.S. Emissions Standards for Outboards/Personal-Water-Craft

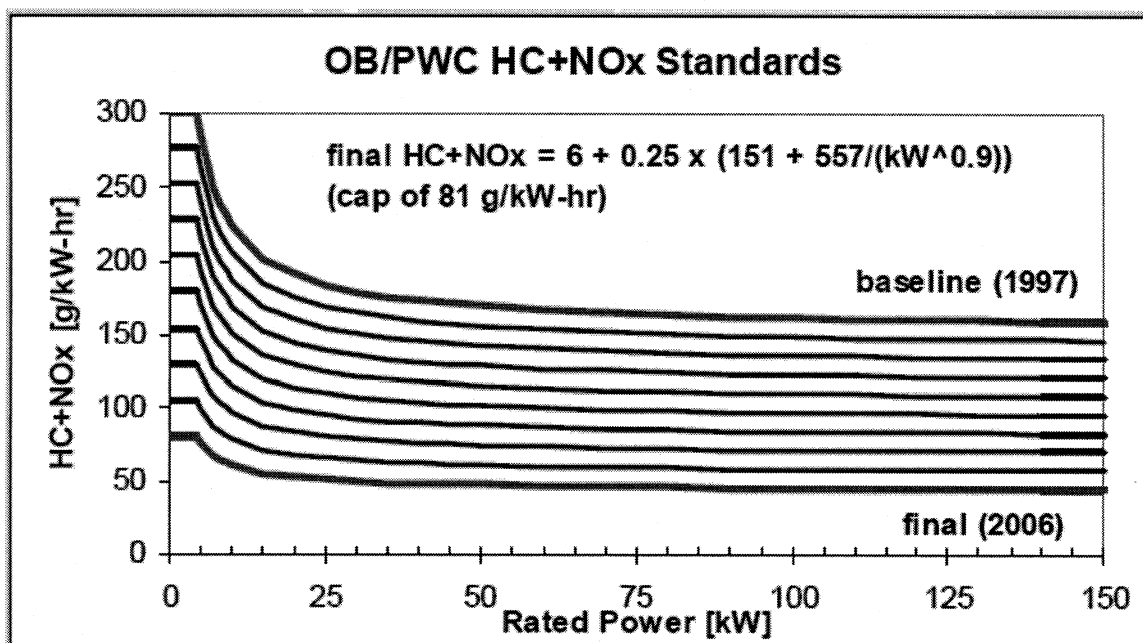


FIGURE 2.2. View 2-U.S. Emissions Standards for Outboards/Personal-Water-Craft

The California Air Resources Board has adopted stricter emissions standards for the marine outboard engine industry. Implementation of the CARB standards began in 1991 and the phase-in period of the standard will be completed by 2008. Table 2.2 shows the CARB regulation levels compared to the U.S. EPA emissions regulations.

TABLE 2.2. CARB Outboard Emissions Regulations

New Outboard Engine Emission Standards		
	Federal HC+NO _x g/kW-hr*	California HC+NO _x g/kW-hr
1998	151	—
1999	138	—
2000	125	—
2001	113	47
2002	99	47
2003	86	47
2004	72	36
2005	60	36
2006	47	36
2007	47	36
2008	47	16

The U.S. emissions standards lag the California standards by five years, in regard to implementation requirements. It is common for the U.S. EPA to monitor successful implementation of new emissions standards in California and later adopt similar or equal standards across the U.S.

Sterndrive / Inboard engines are not currently subject to emissions regulations in the U.S. However, in 2002, a notice of intent to develop emissions reduction standards was proposed by the EPA. The proposed standards are 9-10 g/kWh HC+NO_x (near term) with more strict longer-term standards of 5-7 g/kWh (long term; probably with catalyst application). CARB has already implemented emissions regulations for sterndrive / inboard applications. The CARB standards had a first-phase introduction in 2003, followed by a second-phase between 2007 and 2009. These standards suggested a CO emission baseline of 100-250 g/kWh and did not regulate emissions from the engine crankcase. CARB also published a proposed On-Board Diagnostics (OBD-M) requirement and 480 hour durability test requirement for 2007. Table 2.3 summarizes the CARB standard for NO_x + HC.

TABLE 2.3. CARB HC + NO_x Regulations for Inboard and Sterndrive Engines

Inboard and Sterndrive Emission Standards	
Model Year	HC+NO_x Emission Standard g/kW-hr
2003	15.0*
2007**	5.0

Emissions standards in other areas of the world generally lag the U.S. emissions standards, with the exception of a few areas. For example, the Swiss BSO standard (targeting emissions-limits for boats operated on the Lake-of-Constance) are some of the strictest standards in the world. The Swiss standard was first implemented in 1993 (Stage 1), with standards of 4-5 g/kWh HC and 15 g/kWh NO_x (SD/I and OB/PWC). Later, in 1996 (Stage 2), the standards were reduced to 1.3 g/kWh HC and 3.7 g/kWh NO_x (SD/I). European standards were introduced in 2003, with HC+NO_x limited to 31 g/kWh for outboard and personal watercraft engines. Additional standards were also implemented for sterndrive / inboard engines in 2003, with limits set at 21 g/kWh HC+NO_x.

The trend in emissions regulations is clear: Across all engine classes, emissions are being regulated to lower values, with the strictest limits placed on automotive applications. Figure 2.3 shows comparisons of U.S. emissions regulations for small Spark Ignited (SI) engines and their implementation through the last several years. Additionally, Figure 2.4 shows emissions regulation trends for U.S. off-road engines.

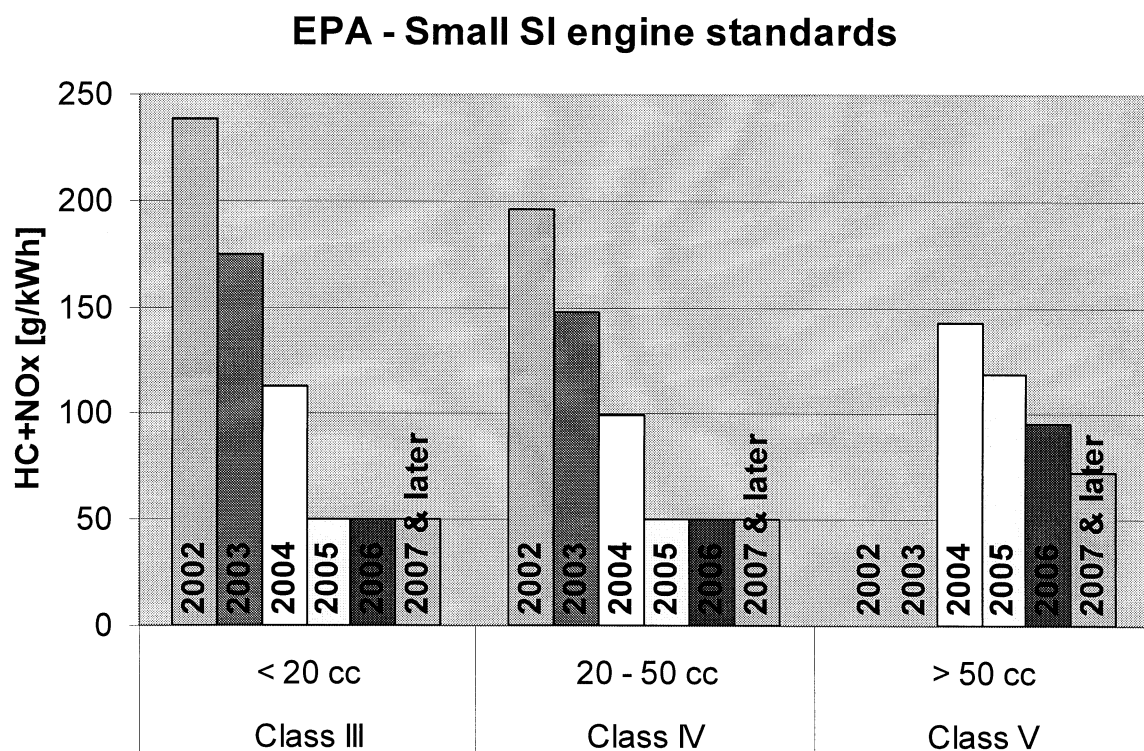


FIGURE 2.3. U.S. Small SI Engine Emissions Limits and Trends with Time

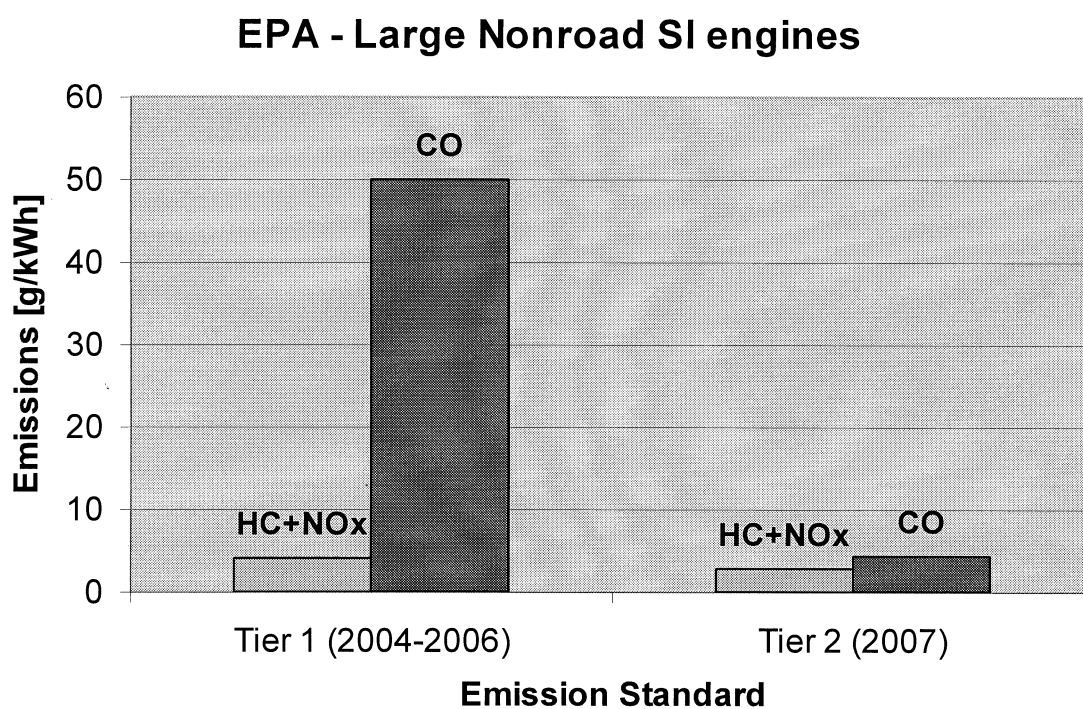


FIGURE 2.4. U.S. Off-Road Engine Emissions Limits and Trends with Time

The U.S. light duty automotive engine has no doubt endured the most severe emissions regulation of all engine classes. Because it represents the most visible engine class, both by volume production and by contribution to overall emissions inventories, the light-duty automobile has a long history of emissions regulation and development of new technology to meet emissions goals.

The first emissions regulations in the light-duty automotive industry were introduced in the U.S. over 30 years ago, when the U.S. Clean-Air Act was passed. Since, then, there have been a large number of emissions reductions put into place, with an accompanying number of new technologies. Figure 2.5 shows the history of light-duty emissions regulations in the U.S., including a review of technologies brought onto the market to meet each level of new regulations.

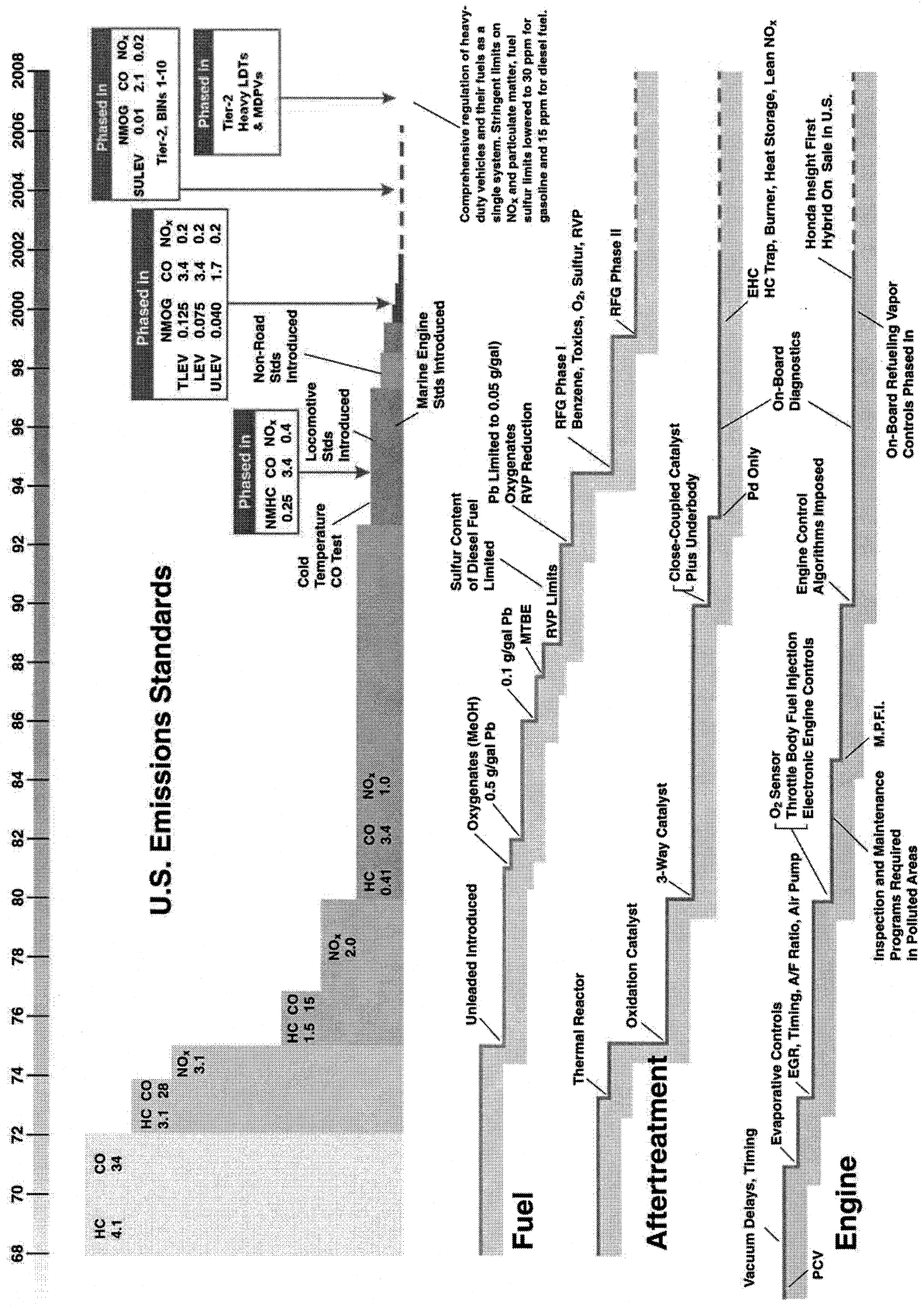
Early in the emissions regulation history for light-duty automotive, the manufacturers utilized new engine technology to meet NO_x requirements, including exhaust gas recirculation, retarded ignition timing, and lean burn operation. Unburned hydrocarbons were generally reduced by improving the technology of carburetion to provide better air-fuel ratio control and limiting rich-operation of the engine.

Later, as NO_x and HC emissions regulations became more strict, new, lean-burn technologies were introduced. The lean burn engine reduced engine-out NO_x considerably, with some advantages for HC and CO. Ultimately, some OEMs resorted to use of EGR for NO_x control, combined with use of an exhaust-mounted thermal reactor for HC and CO control. To effectively oxidize the exhaust CO and HC, the thermal reactor required that the engine be operated slightly lean or with an exhaust air pump. The combination of EGR and thermal reactor was quite effective, but only to a limited extent.

Ultimately, NO_x , CO, and HC regulations became strict enough that additional technology and solutions were needed. This period of time, the early 1980s, saw the introduction of complex carburetion systems combined with NO_x reduction catalysts and oxidation catalysts. These systems required improved air-fuel ratio control that allowed the NO_x reduction catalyst to be efficient. The NO_x reduction catalyst required that the engine be run stoichiometric-to-slightly rich. However, the oxidation catalyst required exhaust oxygen for proper oxidation of HC and CO. Hence, an air pump was utilized to admit air to the exhaust system just downstream of the NO_x reduction catalyst.

The mid-1980's demarks a major milestone in the engines' industry, where the 3-way catalyst was first implemented. The 3-way catalyst combined the NO_x reduction catalyst with the oxidation catalyst. The control technology necessary to make the catalyst operational was very complex, but could be achieved through use of an electronic fuel injection system combined with a new exhaust sensor for measurement and feedback of exhaust oxygen concentration.

Factors Contributing to the Evolution of Emission Control Compliance Strategies



The new sensor, termed a “switching” O₂ sensor, provided a clear and useable signal indicating if the engine was being operated near stoichiometric conditions. The 3-way catalyst required operation near stoichiometry and, in fact, was more efficient if the engine was operated with an air-fuel ratio that fluctuated around stoichiometry at a prescribed frequency and magnitude. The success of the 3-way catalyst has dominated the emissions control strategy of the automotive industry for the last 25 years. Initially, the 3-way catalyst was so successful that the engine could be operated closer to optimal combustion conditions than it had been for many of the previous production years. Additionally, with the improved fuel control obtained through electronic fuel injection, the 3-way catalyst engines out-performed previous engines in power, fuel economy and emissions.

More recently, light-duty emissions regulations have again become strict enough that simple application of a 3-way catalyst is insufficient to meet the emissions control needs of the industry. Now, the automotive market is again exploring new technologies that will replace or work in unison with the 3-way catalyst systems. These technologies include direct gasoline injection, close-coupled catalysts, combustion mode switching (including lean burn and high EGR), and new combustion methods, such as Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI).

In summary, the light-duty automotive industry was able to effectively utilize the 3-way catalyst to meet emissions regulations for a large number of years. This period of time allowed the catalyst technology and associated engine systems (fuel injection, electronic control, engine-sensing) to mature to a very high level, where costs and reliability have been optimized fully. Only now, with the implementation of new regulations, such as SULEV, does the light duty automotive industry have to reinitiate the search for new technologies to further improve emissions and performance. The new technologies will be discussed fully later in this report, but include variable valve actuation, direct injection, high EGR, and more.

The second major engine market (especially in the U.S.) is the over-the-road, heavy duty truck market. Soon after the initial implementation and success of emissions regulation in the light-duty market, the U.S. EPA began an initiative to set emissions standards for the heavy-duty trucking industry. This industry differed substantially from the light-duty industry in several ways. First, the heavy-duty truck industry is dominated by diesel engines instead of gasoline engines. Second, the duty-cycle on the engines is more severe than that placed on the light-duty automotive engine. These differences led to different technology applications for the heavy duty industry, especially in response to emissions regulation. Figure 2.6 shows the emissions history for U.S. on-road heavy-duty engines. The figure includes call-outs for major technology milestones implemented to successfully meet the emissions regulations. It should be noted that in a similar fashion to the automotive industry, the heavy duty truck industry quickly adopted electronic fuel and engine controls, as well as EGR, to ultimately meet emissions goals. Only recently has the emissions regulation become strict enough to force use of catalytic aftertreatment systems. The diesel industry adopted use of oxidation catalysts over the last several years, but has also just begun large-scale use of particulate matter filters and is expected to launch application of NO_x catalyst systems by 2010.

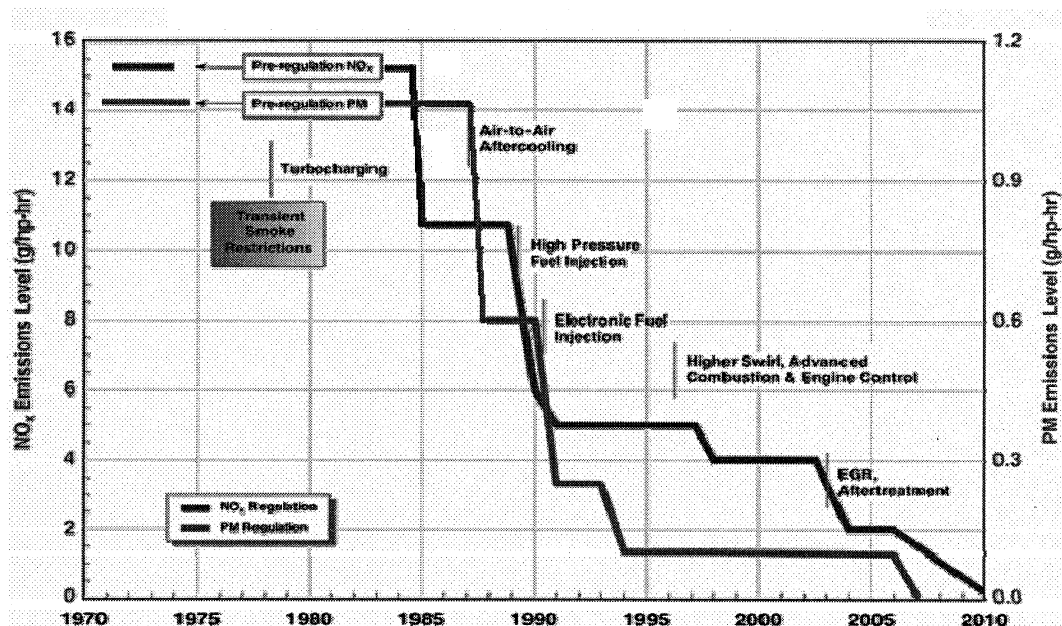


FIGURE 2.6. History of U.S. Heavy-duty On-Road Engine Emissions Regulations and Technologies Utilized to Meet Emissions Goals

2.4 Future Prospectives for Emissions Standards

The history of emission-reduction legislation across the engines' market provides us with a prospective on trends in legislative action, as well as a starting point for assembly of potential technologies that may be useful to engine classes that are now being subjected to new, more stringent emission regulation. For example, it is clear that governing bodies worldwide have recognized that emissions reduction actions in the U.S., Europe, and Japan have had a striking impact upon total emissions from light-duty (and now heavy duty) applications. It is expected that regulations for other classes of engines, including marine pleasure-craft, will continue to be forced to lower levels in the future. The limit on emissions reduction is driven by available, or nearly-available, technology, which is often adopted from the automotive or heavy-duty industries.

The marine pleasure-craft industry is currently facing new emissions standards, with a strong prospect for implementation of stricter standards in the future. The CARB emissions regulations in California define potential regulation levels for the U.S., Europe and Japan. The current CARB outboard / PWC emissions limit for NO_x + HC is 36 g/Kwh, with a reduction to 16 g/Kwh by 2008. It is expected that the 16 g/Kwh emissions level will be achievable with current 4-stroke outboard technology. However, the future emissions limits are not yet fully defined and required technology application is not clear. If we look to the CARB sterndrive / inboard regulations, the NO_x + HC limit is currently 15 g/Kwh, but will be reduced to 5 g/Kwh during the 2007-2009 phase-in period.

It is plausible to consider that regulators will impose an engine-neutral emissions standard in the future, where outboards and sterndrive / inboards might have to meet the same emissions standards. If this situation occurs, a $\text{NO}_x + \text{HC}$ standard of 5 g/Kwh would be conceivable for the marine pleasure-craft industry within a time period of a few years. The exact timing for a potential emission reduction of this magnitude is not clear. However, the previous U.S. outboard / PWC emissions phase-in was realized in 2006, with the most recent CARB regulation completing phase-in by 2009. Hence, another iteration of U.S. emissions reductions could be implemented during the next 4-8 years, with CARB potentially implementing new requirements in a similar time period.

Based upon the emissions standard review conducted for this report, it is believed that a future emissions standard of 5 g/Kwh $\text{NO}_x + \text{HC}$, for outboard/sterndrive./ inboard applications, is possible within a 4-8 year period in the U.S.

3.0 STUDY DETAIL

3.1 Introduction

This section of the study report provides details of current and prospective marine engine technologies, including those for two-stroke, four-stroke, gasoline-, and diesel-engine systems. The study is applicable to outboard, personal watercraft and inboard / sterndrive applications.

3.2 Current Marine Engine Technologies

The modern marine engine market is comprised of a large variety of engine types and competing technologies. Numerous engine technologies have been successful at meeting current emission regulations, while providing performance and cost that is acceptable to the consumer. Some of the current technologies are outgrowths of historical engine technology used within the marine industry, such as the two-stroke outboard engine. Other technologies are relatively new to some areas of the marine industry, such as the 4-stroke outboard. The high number of competing technologies is similar to the situation faced by the automotive industry of the 1970s-1980's, where emissions regulations were entering a range where historical-technology could not be successful and many new technologies were being explored. Ultimately, after considerable production experience was attained and multiple, reduced emissions levels were legislated, only a limited group of technologies survived into the 1990's. Hence, the emissions review presented herein provides a prospective on trends in the engines industry of the past, but also may provide a tool with which projections can be made for emissions trends of the future.

3.2.1 Two-stroke engines

The outboard engine industry has been dominated by 2-stroke engine technology for the last several decades. The historical, carbureted, crankcase-scavenged, 2-stroke engine provided excellent packaging, very good power-to-weight ratio, excellent peak power, and acceptable cost. However, control of unburned hydrocarbon emissions was difficult and recent, increasingly strict emissions regulations have led to several new technology developments for the 2-stroke engine.

Of the recent technologies utilized to control emissions from 2-stroke engines, the direct injector stands out as the most significant. Utilization of a direct injection fuel system has provided an avenue for continued production of the 2-stroke outboard, primarily because of almost total elimination of fuel-short-circuiting. The result is a drastic reduction of unburned hydrocarbon emissions from the modern 2-stroke engine, compared to historical, carbureted engines. However, as discussed in the emissions review section of this report, it is highly probable that stricter emissions regulations for the marine engine industry will continue to be enacted, ultimately reaching levels that will create a clearer separation between 2-stroke and 4-stroke technology. A key

consideration is that the 2-stroke engine continues to utilize oil injection into the crankcase (ultimately combustion) air. For these engines to remain viable into the long-term future, several technology changes would likely occur, possibly including:

- a. Discontinuation of oil-air mixing in crankcase.

The current strategy of injecting lubricating oil into the fresh air stream (near inlet reed valves) provides a source of heavy-molecular-weight hydrocarbons to the combustion system. Some fraction of these heavy hydrocarbons can escape the combustion process and contribute to the overall unburned hydrocarbon emissions from the 2-stroke engine. Additionally, in the more distant future, if catalysts become a necessity on marine industry outboard engines, the formulation of the crankcase-oil may require changes to strictly limit ash delivery to the catalyst.

- b. Introduction of externally supercharged 2-strokes (Discontinuation of crankcase supercharging)

As part of the research conducted for this report, a review of current marine-industry 2-stroke technologies was completed. The results of this review are provided in the following sub-sections.

Current 2-Stroke Technology: Yamaha

Yamaha currently offers a wide range of 2-stroke engines, with the most powerful being a 3.3 Liter, 300 hp system. The Yamaha 2-stroke utilizes a high pressure direct injection fuel system (HPDI) with inward-opening, direct injectors, running at a pressure of approximately 65 bar. The engine utilizes homogeneous, premixed combustion for most of the operating range, thus HC and particulate emissions are minimized. The engine is crankcase supercharged, with an oiling system that delivers controlled quantities of oil to the crankcase as a function of engine operating condition.

The Yamaha 2-stroke utilizes a cooled-intake manifold, which acts as a charge density improvement device, a feature new to the marine pleasure-craft industry.

The Yamaha engine weight is listed at 247 kg and its power density by displacement is 67 Kw/L.

Current 2-Stroke Technology: Suzuki

Suzuki does not market 2-stroke technology (in the U.S.). Suzuki markets 4-stroke engines across their entire range of power ratings, from 9.9 to 300 hp.

Current 2-Stroke Technology: Honda

Honda does not market 2-stroke technology (in the U.S.). Honda markets 4-stroke engines across their entire range of power ratings, from 2 to 225 hp.

Current 2-Stroke Technology: Nissan

Nissan markets 2-stroke technology from 40 to 115 hp. These engines are also sold under the name Tohatsu. Nissan's 2-stroke utilizes a direct injection fuel system designated TLDI. The TLDI system is air-assisted, so requires an air pump. The air-assist injection method has been utilized by other manufacturers, with mixed-success, for several years. Air-assist injection has been shown to make very small fuel droplets, which are easily vaporized in-cylinder, leading to improved combustion efficiencies and reduced HC and particulate emissions. The pistons are optimized, through addition of a small combustion cavity, to allow stratification of air-fuel ratio for improved fuel economy and engine combustion stability at some operating conditions.

The Nissan 115 hp engine weight is listed at 178 kg and its power density by displacement is 67 Kw/L.

Current 2-Stroke Technology: Mercury

Mercury markets 2-stroke technology from 75 to 250 hp. These engines are designated "OptiMax". Mercury's 2-stroke utilizes a direct injection fuel system. The DI fuel system is air-assisted, so requires an air pump. The air-assist injection method has been utilized by other manufacturers, with mixed-success, for several years. Air-assist injection has been shown to make very small fuel droplets, which are easily vaporized in-cylinder, leading to improved combustion efficiencies and reduced HC and particulate emissions. The pistons are optimized, through addition of a small combustion cavity or cup, to allow stratification of air-fuel ratio for improved fuel economy and engine combustion stability at some operating conditions.

The Mercury 250 hp engine weight is listed at 229 kg and its power density by displacement is 62 Kw/L.

Current 2-Stroke Technology: Evinrude

Evinrude markets 2-stroke technology from 40 to 250 hp. These engines are designated "ETech". Evinrude's 2-stroke utilizes a direct injection fuel system. The DI fuel system is not air-assisted, so requires no air pump. The injection system is a derivative of the earlier Ficht, solenoid-driven, direct injection system. This fuel injection system is used widely by Evinrude's parent company, Bombardier, across a wide range of engine applications, including outboards and personal water-craft. The combustion system is optimized to allow stratification of air-fuel ratio for improved fuel economy and engine combustion stability at some operating conditions.

The Evinrude 250 hp engine weight is listed at 234 kg and its power density by displacement is 57 Kw/L.

3.2.2 Four-stroke engines

In the last decade, the marine outboard engine market has seen the introduction and growth of a number of 4-stroke engines and technologies. Initially, the 4-strokes generally followed trends of the small-industrial engine industry, but have more recently utilized increasing automotive engines' technologies. Smaller engines utilized carburetors and overhead-valve configurations. Larger engines have adopted electronic port fuel injection. Growth of the market for 4-strokes is occurring quickly, with most manufacturers recently introducing 4-strokes across a large power-rating range.

The primary consideration for 4-strokes in the outboard marine industry is the historical poor power-to-weight ratio compared to equivalently powered 2-stroke engines. Additionally, the 4-stroke engine total parts-count is higher than that for the 2-stroke engine, leading to higher costs. Manufacturers are addressing each of these issues in a number of ways. First, the power-to-weight ratio differences are becoming less discernable as the 4-stroke engines adopt modern automotive technologies, such as overhead cams, 4-valve combustion chambers, tuned intake systems, cam phasers, and sequential fuel injection systems. Further, the relative cost of the 4-stroke engine is being addressed by some manufacturers through direct implementation of existing automotive subsystems, such as cam phasers, oxygen sensors, and sometimes entire engine assemblies. Here, the marine industry is leveraging the ultra-high-volume production of the automotive industry by sharing common components.

As part of the research conducted for this report, a review of current marine-industry 4-stroke technologies was completed. The results of this review are provided in the following sub-sections. This part of the technology review was limited to outboard engine technologies. Later sections of this report include discussions of 4-stroke inboard/sterndrive technologies.

Current 4-Stroke Technology: Yamaha

Yamaha currently offers a wide range of 4-stroke engines, ranging from 2.5 to 250 hp. The 250 hp engine has a displacement of 3.35 Liters. The Yamaha 4-stroke utilizes a number of modern automotive 4-stroke technologies, including 4-valve combustion chambers, dual overhead cams, inlet-cam phasers, electronically-controlled port-fuel injection, and a tuned long-runner intake system. It is not clear if the Yamaha engine is lean burn or stoichiometric. The engine does not utilize an oxygen sensor for feedback control of air-fuel ratio.

The 250 hp Yamaha engine weight is listed at 274 kg and its power density by displacement is 56 Kw/L.

Current 4-Stroke Technology: Suzuki

Suzuki currently offers a wide range of 4-stroke engines, ranging from 9.9 to 300 hp. The 300 hp engine has a displacement of 4 Liters, making it the class leader amongst 4-stroke outboards. The Suzuki 4-stroke utilizes a number of modern automotive 4-stroke technologies, including 4-valve combustion chambers, dual overhead cams, inlet-cam phasers, electronically-controlled port-fuel injection, and a tuned dual-stage intake system. It is not clear if the Suzuki engine is lean burn or stoichiometric. The engine does not utilize an oxygen sensor for feedback control of air-fuel ratio.

The 300 hp Suzuki engine weight is listed at 274 kg and its power density by displacement is 55 Kw/L. The Suzuki 4-stroke is the most powerful 4-stroke outboard on the market.

Current 4-Stroke Technology: Honda

Honda currently offers a wide range of 4-stroke engines, ranging from 2 to 225 hp. The 225 hp engine has a displacement of 3.5 Liters. The larger Honda 4-stroke engines are all based upon automotive engines. Honda leverages the high-volume automotive engine to reduce technology costs, provide reliability, and to provide a strong marketing tool, based upon the excellent reputation Honda brings from the automotive market. The Honda 4-strokes utilize a number of modern automotive 4-stroke technologies, including 4-valve combustion chambers, variable valve actuation (based upon Honda's VTEC technology), electronically-controlled port-fuel injection, tuned dual-stage intake system, wide-range oxygen-sensor feedback control for fueling, and knock sensors. The Honda engine utilizes closed-loop lean burn combustion for improved emissions and fuel economy. The Honda 4-stroke outboard represents the most aggressive use of automotive high technology to the marine pleasure-craft industry. Honda's successful implementation of exhaust oxygen sensors in the marine environment is a first and may represent a new trend for the industry.

The 225 hp Honda engine weight is listed at 267 kg and its power density by displacement is 48 Kw/L. For its displacement, the Honda engine has a relatively low power density compared to other outboards currently on the market.

Current 4-Stroke Technology: Nissan

Nissan markets 4-stroke technology (in the U.S.) in the power range from 2 to 30 hp. Nissan's higher output 4-strokes utilize electronic fuel injection (EFI). Additionally, a selling point of the Nissan small 4-strokes is that the EFI system does not require a battery.

Current 4-Stroke Technology: Mercury

Mercury currently offers 4-stroke engines, ranging from 2.5 to 275 hp. The 275 hp engine has a relatively small displacement of 2.6 L. The Mercury 2.6 L engine utilizes a supercharger, making it the first outboard on the market to utilize an automotive technology trend termed "downsizing with boost". The Mercury 4-strokes utilize a

number of modern automotive 4-stroke technologies, starting with the supercharger, but also utilizing a charge air cooler, electronically-controlled port-fuel injection, tuned intake system, and a 4-valve combustion chamber. Mercury's implementation of an after-cooled, supercharged engine in the outboard, pleasure-craft marine environment is a first and may represent a new trend for the industry.

The 275 hp Mercury engine weight is listed at 288 kg and its power density by displacement is 79 Kw/L. For its displacement, the Mercury engine is a class leader for power density.

Current 4-Stroke Technology: Evinrude

Evinrude does not market 4-stroke technology (in the U.S.). Evinrude markets 2-stroke engines across the power-rating range from 40 to 250 hp. Evinrude's parent company Bombardier, markets lower power rating outboards under the company name Johnson. Johnson markets 4-stroke outboards in the low power rating levels from 9.9 to 25 hp. These outboards utilize 2-valve engine technology and will not be discussed further in this report.

3.2.3 Inboard/Sterndrive

The inboard / sterndrive industry has historically utilized modified automotive engines and this trend continues today. The market is dominated by spark ignited (SI) gasoline engines. Engine calibration for improved emissions is the primary emissions reduction strategy used for current inboard / sterndrive engines.

The CARB emissions standards for inboards / sterndrives have driven new research in low emissions solutions for inboard / sterndrive applications. Emissions reduction solutions being considered include closed-loop electronic fuel injection, EGR, lean-burn, and 3-way catalysts. Studies of 3-way catalyst application to sterndrive/inboard engines have occurred recently. Discussion of application issues associated with use of 3-way catalyst systems is discussed in detail in the "Emerging Technologies" section of this report.

3.3 Emerging Technologies: Gasoline Spark Ignition Engines

There are a number of emerging technologies that may be applicable to future marine pleasure-craft that utilize gasoline engines. These technologies can generally be divided by their application-intent for the engine, where the technology is considered in-cylinder technology, airflow technology, or aftertreatment technology. The various emerging technologies are discussed in the following sections, with discussions offered for technology descriptions, effects on performance and emissions, relative costs, and prospects for application within the pleasure-craft marine industry.

3.3.1 Direct Injection 4-stroke Lean Burn

Technology Description

Direct injection is being adopted within the current, light-duty automotive engine market. Direct injection offers many benefits, including potential emissions reduction and improved fuel economy. The automotive market performed a large amount of research in direct injection during the 1990s. Mitsubishi's 1998 GDI engine provides a good example of these efforts. The Mitsubishi GDI system utilized an in-cylinder gasoline injector in combination with a specially designed piston and optimized in-cylinder flow to enable stratified charge, overall lean engine operation. Lean burn allowed the engine to run with a wider throttle opening angle, reducing pumping losses and improving fuel economy. Additionally, sufficiently lean operation provided reduced engine-out NO_x levels. With careful control of mixture stratification, combustion stability and efficiency were maintained at levels that controlled unburned hydrocarbons.

The early implementations of direct injection utilized the so-called "wall-guided" injection approach, where the direct injector would use a late injection event (near piston top-dead-center) to inject a cloud of fuel droplets toward a specially-shaped piston crown. The shape of the piston crown would guide or "steer" the vaporizing fuel toward the spark plug. This technique could create a relatively rich fuel-air mixture near the spark plug, enhancing ignition and subsequent flame propagation, while also providing a relatively lean mixture in the outer portions of the combustion chamber. The lean areas of the combustion chamber provided low NO_x and acceptable hydrocarbon emissions.

The automotive industry developed the wall-guided direct-injection technology for a number of years. However, the systems were commonly plagued by unacceptable hydrocarbon and particulate matter emissions, ultimately traced to interactions of the injected fuel with the piston crown (the "wall"). It was found that fuel droplets and vapor would remain near the piston surface throughout the combustion event, sometimes escaping combustion completely. The near-wall fuel would either be emitted to the exhaust stream during the exhaust event, or would be burned as a relatively rich diffusion flame, or "pool fire", well after the normal combustion event. The occurrence of diffusion combustion is often accompanied by increased soot emissions.

More recently, the automotive industry has adopted a new direct-injection technology, to address the shortcomings of the earlier wall-guided systems. Four approaches to direct injection are now being employed. First, the wall guided systems have evolved to highly optimized piston / injector combinations that, when coupled with very good calibrations, can yield low smoke and hydrocarbons. However, the earlier history of the wall-guided systems has been difficult to overcome and most manufacturers are looking for different options. The second DI-gasoline technique is based upon avoidance of the fuel-wall interaction through use of a direct injection event that occurs during the intake stroke or early in the compression process. This technique does not provide an ability to stratify the air-fuel charge, but the efficient in-cylinder charge-cooling process allows increased compression ratios and more aggressive ignition

timing, both of which provide improved fuel economy and peak power. The third of the newer DI-gasoline strategies utilizes the charge-air motion within the cylinder to “guide” the directly injected fuel toward the spark plug. This system requires very careful design and tuning of the intake ports of the engine. The intake ports are utilized to create the necessary flow conditions for fuel-air stratification and improved ignition. However, to meet the stratification and ignition requirements across a large speed-load range may be difficult. Thus, many automotive manufacturers are utilizing controlled, variable-flow ports on DI-engines. Examples of actuators include cam phasing, controlled-tumble plates, swirl control valves, and phased valve opening and closing events (1 intake valve opens and closes at a different rate than the other). Finally, the last of the major DI-gasoline systems to be discussed is the “spray-guided” system, in which the direct fuel injector is usually located at the center of the combustion chamber, with the spark plug located in close proximity. The fuel injection plume is characterized by a spray-angle that places part of the fuel cloud at the spark plug gap, insuring very robust ignition. The remainder of the injected fuel mixes with available air to form a good far-field combustible mixture. The spray-guided system’s placement of a central injector also allows easy use as an early-injection engine, thus providing the capability to run the engine in a stratified-charge mode or in an early-injection homogeneous mode.

Emissions from the direct-injection engine depend very strongly upon fuel injection strategy, injector targeting, and injector type. However, compared to other non-catalyst solutions, direct injection offers improved NO_x through lean-burn capability and improved HC through elimination of fuel short-circuiting. Further, the peak power capacity of the direct injection engine (due to improved knock characteristic) has quickly made them the highest power density 4-stroke engines on the market, especially when combined with turbocharging or supercharging. The newest direct injection technology is based upon piezo-actuated injectors that operate at increased injection pressures (up to 1000 bar). Additionally, considerable work has been done with multi-hole injectors, where performance and emissions are very good, but long-term durability is unproven due to injector hole fouling issues.

Performance and/or Emissions Impact

Lean-burn direct-injection 4-stroke technology (with charge-air boosting) has allowed current automotive engines to exceed power-densities of 130 hp/liter (175 kw/liter). This power density capacity has allowed very successful downsizing of automotive engines. Downsizing allows light- to mid-load operation with higher intake manifold pressures, thus improving fuel economy. When combined with lean-burn, fuel economy improvements at these conditions may reach 10-15%. The emissions capability of DI-gasoline engines is very similar to port-fuel-injected gasoline engines. In Japan, lean-burn engines currently utilize Lean-NO_x-Adsorber (LNT) aftertreatment systems (discussed in a later section of this report). The U.S. and Europe are moving toward increased use of lean-burn systems, but only if aftertreatment system efficiencies can be improved. Further, the full-load strategy for most of these engines requires that the engine be operated rich of stoichiometric to reduce exhaust temperatures and improve knock tolerance. This high-load fuel-enrichment strategy is acceptable for light-duty

automotive, where the high-load points are not part of the emission test cycle. For marine pleasure-craft, the cycle is more heavily weighted to high-load, thus requiring that NO_x and HC be controlled at this condition. Therefore, a strategy change would be necessary for high load operation. It is possible that high-load lean operation could be accomplished, but only in combination with a charge-air boosting system.

Cost Projection

DI-gasoline technology is becoming common in the automotive industry. Hence, costs will decline with increases in high-volume production and competition amongst fuel system suppliers. The marine 2-stroke industry has already almost universally adopted direct injection for high power output engines. Therefore, it is assumed that the cost of the DI-injection system has been justified for 2-stroke use and if DI-lean-burn 4-stroke can achieve future emissions targets without catalyst, then again the DI system would be cost effective.

Prospective for Marine Industry

Lean-burn, direct-injection, 4-stroke technology has a low short-term potential. The port-fuel-injected 4-stroke has many of the same attributes, but at a lower cost. The DI-injected engine offers improvements to power density, but at the expense of increased hydrocarbon emissions. However, as emissions regulations tighten, it may lead to a choice of 3-way catalyst technology or advanced combustion technology including DI-injection. It is proposed that a port-fuel-injected, lean-burn (or EGR) 4-stroke can achieve near-term emissions standards, thus making the DI-gasoline 4-stroke unnecessary.

3.3.2 Direct Injection 4-stroke Stoichiometric

Technology Description

The technology description follows that given previously for direct injection lean burn engines. However, stoichiometric operation will be accompanied by relatively high NO_x emissions, unless a diluent, such as EGR, is used to decrease flame temperatures and reduce NO_x .

Performance and/or Emissions Impact

The impact of stoichiometric DI-gasoline on emissions is that NO_x increases unless a diluent, such as EGR, is utilized. Additionally, stoichiometric operation opens the door to later use of 3-way catalyst systems. Without use of EGR or a NO_x catalyst, stoichiometric operation will not be a successful strategy. Hence, all discussion of stoichiometric operation assumes the option of EGR or catalyst.

The expected performance of a direct-injected, stoichiometric engine is high. Early-injection, homogeneous operation, following current trends in the automotive industry, provides very good power capability. However, the automotive arena can tolerate higher hydrocarbon and NO_x emissions at full-load. The marine pleasure-craft engine emissions test has a heavier weighting on high load operation. Hence, the watercraft engines would necessarily have to implement a full-load strategy that emitted low NO_x and HC. When coupled with EGR and boost systems, the stoichiometric DI-gasoline engine can retain low high-load emissions while still producing high peak power.

Cost Projection

DI-gasoline technology is becoming common in the automotive industry. Hence, costs will decline with increases in high-volume production and competition amongst fuel system suppliers. The marine 2-stroke industry has already almost universally adopted direct injection for high power output engines. Therefore, it is assumed that the cost of the DI-injection system has been justified for 2-stroke use and if DI-4-stroke with EGR can achieve future emissions targets without catalyst, then again the DI system would be cost effective.

Prospective for Marine Industry

The short-term prospective for DI-gasoline 4-stroke is low. The port-fuel-injected 4-stroke has many of the same attributes, but at a lower cost. The DI-injected engine offers improvements to power density, but at the expense of increased hydrocarbon emissions. However, as emissions regulations tighten, it may lead to a choice of 3-way catalyst technology or advanced combustion technology including DI-injection. It is proposed that a port-fuel-injected stoichiometric (with EGR) 4-stroke can achieve near-term emissions standards, thus making the DI-gasoline 4-stroke unnecessary.

3.3.3 Turbocharging

Technology Description

Turbocharging is a means of increasing the boost, or charge air delivery to the engine. Turbochargers have a long history of use in the diesel industry, where high boost levels are required to maintain lean engine operation, even at full load. Gasoline turbocharging systems are gaining popularity, especially in combination with downsized engines. The turbocharger's compressor is driven by a directly-mounted turbine that is driven by excess exhaust heat, thus the turbocharger is typically mounted close to the engine exhaust ports. Almost all modern turbocharging applications are based upon centrifugal compressors and turbines. Historically, turbochargers utilized hydrodynamically-lubricated shaft bearings that required a pressurized, filtered oil-supply system and oil return. More recently, turbocharger shaft-lubrication concerns have been reduced substantially with the introduction of ball-bearing turbochargers. Some work has been accomplished using sealed bearings.

Performance and/or Emissions Impact

Turbocharging provides dramatic increases in engine power density. Emissions are improved if the engine is operated lean, where peak power and lean air-fuel ratios can be maintained with turbocharging. Historical issues with poor turbocharger transient performance have been addressed almost fully with modern, high-speed, small turbochargers. Additionally, high-end automotive applications are now using multiple turbochargers to allow fast boost response at low-loads and speeds, with full-load and high speed boost requirements met through a second turbocharger. Alternately, other automotive manufacturers have utilized variable geometry turbines to expand the turbocharger operating range and improve transient performance.

Turbocharging may be considered an enabler for other emissions reduction strategies. For example, in a non-boosted engine, the use of lean-burn or EGR to dilute the flame and reduce NO_x emissions is achievable at light and part loads. However, to maintain full load performance without large increases in NO_x (or hydrocarbons and CO due to fuel enrichment), the engine requires a high air-flow rate to support the power-output target, while sufficient EGR or excess air must also be introduced to maintain the low NO_x target. Hence, the engine requires addition of boosting machinery such as a turbocharger to provide the targeted air-flow and diluent-flow.

The current trend in the light-duty automotive and diesel industries is toward expanded use of turbocharging. This strategy allows much smaller displacement engines to be utilized, thus improving packaging size, weight, and through improved engine efficiency and weight reduction, brake specific emissions are improved. With the addition of strategies such as EGR and/or lean burn, the fuel economy is improved further. It should be noted that most high performance turbocharging application will utilize a charge-air aftercooler, which is a heat exchanger that cools the air exiting the turbocharger compressor. This cooled air provides improvements to knock tolerance and breathing efficiency for the engine.

Cost Projection

Turbochargers are considered expensive, relative to other automotive technologies. However, the diesel industry has adopted turbocharging almost universally, to meet emissions requirements through lean-burn and EGR strategies. Additionally, if the use of turbocharging allows downsizing of the engine from a 6-cylinder to a four-cylinder, the cost savings in engine hardware offsets part of the boost-system costs.

Prospective for Marine Industry

For the marine industry, concerns may surface in regard to turbocharger surface temperatures and exhaust heat/temperature requirements for efficient turbocharger application. Possible solutions include integrating the turbocharger turbine and housing into the cylinder head or exhaust manifold of the engine. This technique is now being utilized on some automotive applications, thus reducing the temperature of the downstream exhaust components. Additionally, modern turbocharging equipment can achieve good efficiencies at exhaust temperatures down to 500°C and are safe for operation at exhaust gas temperatures up to approximately 900°C. Modern diesel engines have relatively cool exhaust, due to high expansion ratios and use of excess air and/or EGR. If either of these strategies (excess air or EGR) is incorporated into the future gasoline marine engine, exhaust gases will be reduced to temperatures that are safe for turbocharging without exotic turbine or turbine wheel materials. Additionally, as proven by the S.I.-natural gas industry and now within the automotive industry, use of excess air or EGR (especially EGR) at full load reduces knock tendency, reduces exhaust gas temperatures, and allows operation without fuel enrichment. For stoichiometric EGR engines, this could allow a 3-way catalyst to remain active and efficient even at full load conditions.

Shorter term, the use of a boost-air system may provide lean-burn and/or EGR capability that will allow a non-catalyst equipped engine to be marketed into the future. Further, the downsizing and power density potential for boosted marine applications is high.

3.3.4 Supercharging

Technology Description

Supercharging (like turbocharging) is a means of increasing the boost, or charge air delivery to the engine. Superchargers have a long history of use in the diesel industry, where high boost levels are required to maintain lean engine operation, even at full load. Most applications of superchargers for diesel applications were for 2-stroke diesel engines. Often, the supercharger was also combined with a turbocharger for added boost and improved fuel efficiency. Gasoline supercharging systems are gaining popularity, especially in combination with downsized engines. Ford Motor Company has utilized superchargers successfully for performance-oriented applications, as has GM, Toyota, Nissan, Volkswagen, and others. The supercharger's compressor is driven directly by the crankshaft, either through mechanical connection or through chain- or belt-drive. Modern supercharging applications utilize a variety of compressor types (centrifugal, roots, etc.). Lubrication to the supercharger bearings also takes various forms, but salad bearings have been used successfully.

Performance and/or Emissions Impact

Supercharging provides dramatic increases in engine power density. Emissions are improved if the engine is operated lean, where peak power and lean air-fuel ratios can be maintained with the boost system. Because superchargers are driven directly by the engine crankshaft, the airflow pumping capacity of the engine is improved across the entire engine range. Additionally, for modern superchargers, the range of supercharging efficiency with speed and airflow requirement is impressive and competes strongly with that for variable geometry turbochargers. The fuel economy impact of supercharging is not as favorable as turbocharging, because the supercharger consumes usable crankshaft power, where the turbocharger is powered primarily by waste heat. However, modern superchargers can utilize bypass systems when boosted air is not needed, thus substantially reducing the losses from the system.

Like turbocharging, supercharging may be considered an enabler for other emissions reduction strategies. For example, in a non-boosted engine, the use of lean-burn or EGR to dilute the flame and reduce NO_x emissions is achievable at light and part loads. However, to maintain full load performance without large increases in NO_x (or hydrocarbons and CO due to fuel enrichment), the engine requires a high air-flow rate to support the power-output target, while sufficient EGR or excess air must also be introduced to maintain the low NO_x target. Hence, the engine requires addition of boosting machinery to provide the targeted air-flow and diluent-flow.

The automotive industry has successfully marketed supercharged engines for a number of years and the market is growing for all boosting applications (super- or turbo-charged). Additionally, the emissions reduction potential from supercharged engines is very similar to that for turbocharging.

Cost Projection

Superchargers are considered expensive, but usually not to the same extent as turbocharging. Because the supercharger does not utilize or require hot exhaust gases, it may be a viable strategy for downsizing marine engines of the future. Additionally, if the use of supercharging allows downsizing of the engine from a 6-cylinder to a four-cylinder, the cost savings in engine hardware offsets part of the boost-system costs. Finally, because the supercharger is not in contact with hot exhaust gasses, reliability is typically higher than that for turbocharging.

Prospective for Marine Industry

The prospective for use in the marine industry is good. In fact, Mercury marine's Verado engine is supercharged. Short term, the use of a boost-air system may provide lean-burn and/or EGR capability that can allow a non-catalyst equipped engine to be marketed into the future. Further, the downsizing and power density potential for boosted marine applications is high.

3.3.5 Exhaust Gas Recirculation

Technology Description

Exhaust Gas Recirculation (EGR) is a NO_x reduction technique that (re)introduces burned exhaust gases into the fresh air stream of the engine. The exhaust gasses act as a diluent to the combustion flame, thus cooling the peak flame temperatures and reducing NO_x formation. EGR has been utilized extensively in the automotive industry, as well as in the heavy duty on-road diesel industry, and now is being introduced into the off-road diesel industry.

EGR is often compared to lean-burn (excess-air) engine operation, because both techniques cool the combustion flame to reduce NO_x . However, to meet very strict NO_x emissions levels, lean-burn systems have proved difficult to couple with exhaust catalysts for NO_x reduction. Lean exhaust catalysts have not been proven as efficient as 3-way catalysts. EGR offers an easier solution to future catalyst applications, because EGR engines can be operated at stoichiometric air-fuel ratios, thus allowing application of a 3-way catalyst.

Performance and/or Emissions Impact

EGR provides a relatively easy technique for achieving significant NO_x reduction. For example, use of EGR at levels up to 10% can provide engine-out NO_x reductions of approximately 50%. When combined with high energy ignition systems, EGR levels of 20% have been shown to provide NO_x reductions of approximately 75%. Of course, the temperature of the EGR is an important factor and it should be recognized that the EGR gas should not be cooled to such an extent that condensation of exhaust water occurs.

For advanced automotive applications, combinations of hot- and cooled- EGR are utilized. The hot EGR is derived from trapped residual exhaust gas and is controlled by an exhaust cam phaser. Hot EGR (often termed "internal EGR") reduces NO_x , but also provides a means of reducing throttling losses and improving fuel economy. Cool EGR is most effective at higher loads, where NO_x reduction can be substantial and engine knock tolerance can be improved. Thus cool EGR can act as a high load NO_x reduction technique, while also providing improved peak power.

Cost Projection

For engines equipped with cam phasers (exhaust-side), cost of implementing EGR is relatively low, where internal EGR is an effective way to reduce NO_x by 10-25%. Further reduction of NO_x can be accomplished with more complex variable valve actuation systems, but will add considerable cost.

A cooled, external EGR system provides very good NO_x reduction potential (typically around 50%), but requires an EGR circuit, EGR valve, and EGR cooler. EGR systems are now being produced in high volume by suppliers, such as Dayco, Siemens, and others. The cost of these systems is considered low compared to other NO_x reduction technologies.

Additionally, it should be noted that the marine outboard emissions test includes significant mid- to high-load operating conditions. Because NO_x reduction will be necessary at those conditions, it is probable that a charge-air boost system may be required to achieve the desired engine air flow and EGR flow.

Prospective for Marine Industry

The marine industry will probably first utilize lean-burn combustion systems instead of EGR. Lean-burn offers substantial NO_x reduction, especially if lean-condition hydrocarbon emissions can be controlled through good combustion system design. EGR is a competing technology, but requires additional hardware, sensors, and actuators. The automotive industry utilizes EGR because it provides a means to obtain substantial NO_x reduction from a stoichiometric gasoline engine, while still allowing use of a downstream 3-way catalyst. The use of EGR may be used to downsize catalyst loadings and/or volumes, thus reducing cost and improving packaging.

The prospective for EGR use in the marine industry is fairly high. Lean burn application is higher, but may be super ceded by EGR if 3-way catalyst application is ultimately required to meet long-term emissions regulations.

3.3.6 Variable Valve Timing

Technology Description

Variable Valve Timing can be achieved through a number of different Variable Valve Actuation (VVA) technologies. Current, production automotive systems regularly utilize cam phaser systems, where the camshaft can be rotated in relation to the crankshaft, thus effecting changes in valve opening and closing timings (phasing of the cam). Cam phasers are utilized for intake and exhaust cams. A number of variations in these systems is available including single cam phasers (only one cam is phased), dual-equal cam phasing (here, both the exhaust and intake cams are phased together, so that the relation of each cam to the other is constant, but their relationship to the crankshaft is varied) and dual independent (both cams have independent phasers, allowing independent motion of each cam in relation to the crankshaft). Cam phasers have become common and their reliability is proven. Cam phasers have improved engine performance and emissions through improved engine airflow across large engine speed/load ranges, improved in-cylinder air motion, and through control of internal EGR.

More advanced VVA systems are now being introduced to the market. The Honda VTEC system provides multiple levels of valve lift and duration. BMW offers a system called “valvetronic” which provided variable lift and duration. Even more advanced systems are being studied for production, including lost-motion systems (where a collapsible hydraulic link allows motion to be modified or “lost” from a mechanical cam shape), and full camless systems (electromechanical or electrohydraulic).

Performance and/or Emissions Impact

VVA systems have proven to be very effective at reducing pumping losses and allowing improved optimization of intake and exhaust tuning. The result is improved engine breathing and pumping work. This provides improvements in fuel economy, especially at light loads. Optimized high-load breathing has also allowed increased peak power production.

Emissions impacts due to VVA are also significant. The VVA system can be used to control internal EGR, resulting in improvements of engine-out NO_x . Here, typical NO_x reductions are on the order of 10-25%. However, current research in modified combustion techniques, such as Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) have shown that use of cam phasers to implement “negative valve overlap”, combined with direct injection, yields NO_x reductions of greater than 90% at light loads. However, production engines are not yet implementing this combustion mode and it is still considered advanced research.

Variable intake valve closure timing has been utilized to implement “Miller-Cycle” engine operation, where a relatively high geometric compression ratio is utilized, but effectively reduced to optimum knock-free levels by adjustment of the valve closure event. This technique is being used within the diesel market (on the Caterpillar ACERT

engine) and in the light duty automotive market (Toyota Prius engine). Engine-out NO_x emissions can be reduced slightly through this technique, while fuel economy is slightly improved.

Cost Projection

A number of current 4-stroke outboard applications utilize cam phaser technology. This technology has been proven in the automotive industry and is available from multiple, high-volume suppliers. Therefore, the cost is considered appreciable, yet accepted in the industry. The next level of VVA includes systems that allow variable lift and duration, similar to the current Honda VTEC system, utilized in production Honda outboards. This type of system could be utilized to enable variable Miller-cycle engine operation. More complex VVA systems have been demonstrated, but costs are still considered prohibitive and system ruggedness and reliability are unproven in high-volume applications.

Prospective for Marine Industry

The use of cam-phaser VVA technology is already accepted. It is assumed that high-end 4-stroke marine applications of the future will utilize this technology. More advanced systems, that allow variable lift and/or duration will first enter the automotive market before being heavily utilized in the marine market. However, the initial entry has already occurred with Honda's VTEC system.

3.3.7 Advanced ignition systems

Technology Description

Recent development of lean-burn, EGR, and stratified-charge direct-injection systems for the light-duty automotive market have led to advancement of ignition system technologies. For example, all of the combustion technologies mentioned above place increased demands upon the ignition system to reliably initiate combustion. Through use of higher-energy coils, capacitors, and improved spark plug designs and materials, the performance of modern engines has been increased substantially. For example, the introduction of fine-wire iridium electrodes for spark plugs has allowed increased energy delivery levels without sacrificing spark plug durability. For markets where 100,000 mile spark plug durability is not required, the use of advanced spark plugs can allow even greater spark energy to be delivered to the combustion chamber. Higher spark energies can be tailored to provide substantial extension of lean-limits and EGR tolerance, thus allowing improved transient engine response, as well as substantial emissions improvements. Further, the use of multi-strike ignition systems, where the spark plug is struck multiple times to improve ignition probability, has been shown to provide significant engine performance and emissions improvements.

Performance and/or Emissions Impact

Advanced ignition systems act as an enabler for improved lean-limit combustion, as well as for extension of EGR tolerance. Both result in improvements in engine-out NO_x and hydrocarbons. Work at Southwest Research Institute has shown that engine-out NO_x can be reduced by over 90% with very high EGR levels. However, even at EGR levels of 15-20%, most traditional ignition systems fail to reliably ignite the mixture. Hence, higher energy systems are employed. Fine-wire, iridium tipped spark plugs have been successful at EGR levels of approximately 20%. When aided by multi-strike inductive coil technologies, the same spark plugs have allowed stable engine operation at EGR levels above 25%. This level of EGR tolerance can provide very substantial reduction in engine-out NO_x (approximately 75%+). Capacitive discharge ignition systems have not provided the same levels of ignition improvement as the inductive systems. Finally, advanced ignition systems allow improved combustion stability in lean and high EGR applications, resulting in improved hydrocarbon emissions.

Cost Projection

Advanced spark plugs are considered a low-cost technology addition. Improved inductive coil systems will add incremental cost to the engine.

Prospective for Marine Industry

The prospective for use of advanced ignition system technology is high for use in the marine pleasure-craft industry. Here, the incremental cost of the system enables other emission reduction technologies.

3.3.8 Oxidation Catalyst

Technology Description

Oxidation catalysts act to oxidize exhaust gas hydrocarbons and CO, resulting in CO₂ and water. An oxidation catalyst requires that oxygen be present in the gas mixture, so this type of catalyst is only applicable to lean-burn combustion systems. The catalyst is composed of three major elements: the substrate, the washcoat, and the catalytic coating. The substrate is often made from a ceramic or, more recently, from a metal. The washcoat is typically a proprietary material, but almost always includes alumina and ceria. The catalyst material itself is comprised of mixtures of platinum and palladium. Oxidation catalysts have been in high volume production since at least the 1980s. No special engine control technology is required and the oxidation catalyst is considered a passive catalyst system.

Performance and/or Emissions Impact

Oxidation catalysts can provide CO and HC conversion efficiencies above 95% and often exceeding 99%. Oxidation catalyst efficiency can be reduced by sulfur, but regeneration of the catalyst occurs relatively easy at higher exhaust gas temperatures. The durability of the catalysts is good, as required for automotive LD applications. Typical light-off temperatures for oxidation catalysts are approximately 200-250 deg C. Oxidation catalyst effects on engine breathing result in slight increases in pumping losses, usually resulting in slight fuel economy penalties.

Cost Projection

The cost of an oxidation catalyst for a large outboard engine application is similar to many of the more advanced technologies presented in this report, with an on-cost in the range of U.S. \$100. However, a more accurate cost approximation would require a study for necessary precious metal loading, catalyst volume, and special material needs possibly brought about by this new marine application.

Prospective for Marine Industry

Oxidation catalyst application in the short-term marine pleasure-craft industry is not required. However, for advanced low engine-out NO_x applications of the future (HCCI, ultra lean-burn, etc.) an oxidation catalyst may be required to oxidize HC and CO. Stoichiometric applications would utilize 3-way catalysts instead of oxidation catalysts. All catalyst applications must insure that water (especially saltwater) intrusion into the catalyst is minimized.

3.3.9 Three-way Catalyst with Closed Loop

Technology Description

Three-way catalysts act to simultaneously oxidize exhaust gas hydrocarbons and CO, while also reducing NO_x, forming products of carbon dioxide, water and nitrogen. The 3-way catalyst requires operation at- or very near-stoichiometric air-fuel ratios, requiring precise fueling and air control. The control requirements are severe enough that all modern 3-way catalyst engines utilize an exhaust oxygen sensor to provide feedback for closed-loop control of air-fuel ratio. Additionally, the control requirements also force use of electronic fuel injection. To extend the air-fuel ratio range under which the catalyst can effectively operate, it is now common to control the engine to oscillate its air-fuel ratio around the stoichiometric operating point, with the magnitude and frequency of the oscillation set through calibration. Like an oxidation catalyst, the 3-way catalyst is composed of three major elements: the substrate, the washcoat, and the catalytic coating. The substrate is often made from a ceramic or, more recently, from a metal. The washcoat is typically a proprietary material. The catalyst material itself is comprised of mixtures of platinum, palladium and rhodium. Three-way catalysts have been in high volume production since the mid-1980s. The three way catalyst is not considered a passive emissions control device.

Performance and/or Emissions Impact

Three-way catalysts can provide CO and HC conversion efficiencies above 95% and often exceeding 99%. NO_x conversion efficiency is regularly well above 99%. Three-way catalyst efficiency can be reduced by sulfur, but regeneration of the catalyst occurs relatively easy at higher exhaust gas temperatures. The durability of the catalysts is good, as required for automotive LD applications. Typical light-off temperatures for 3-way catalysts are approximately 200-250°C. Three-way catalyst effects on engine breathing result in slight increases in pumping losses, usually resulting in slight fuel economy penalties.

Cost Projection

The cost of a 3-way catalyst is similar to that for oxidation catalysts, with expected costs for a large outboard engine application in the range of U.S. \$100. However, a more accurate cost approximation would require a study for necessary precious metal loading, catalyst volume, and special material needs possibly brought about by this new marine application.

Prospective for Marine Industry

Three-way catalyst application in the short-term marine pleasure-craft industry is probably not required, unless NO_x + HC emissions regulations fall below 5 g/Kwh. All catalyst applications must insure that water (especially saltwater) intrusion into the catalyst is minimized.

3.3.10 Direct Injection Two-stroke

Technology Description

Direct injection fueling for 2-stroke engines has been utilized in the marine pleasure-craft (outboard) industry for several years. Current systems can be classified as air-assisted or non-air-assisted. Both have had good success to-date. Non-air-assist systems follow technology similar to that utilized for 4-stroke DI engines. Typical injection pressures for non-air-assist systems range from 60-100 bar. Diesel direct injection systems utilize pressures in the range of 1600+ bar. Air-assisted systems usually run at lower pressures, but require an external air-pump in addition to the fuel pump.

Performance and/or Emissions Impact

The DI 2-stroke engine has been successful at drastically reducing unburned hydrocarbons compared to traditional 2-stroke engines. Additionally, the DI system has allowed lean-burn or stratified charge to be implemented, thus improving fuel economy and reducing engine-out NO_x . Although DI 2-stroke provides very good relative emissions compared to traditional 2-stroke operation, they continue to struggle to produce emissions or fuel economy as low as well-tuned, modern 4-stroke engines. A key area of concern is the requirement for oil-addition to the charge-air of a crankcase supercharged 2-stroke. Because the 2-stroke breathing process continues to rely upon ports, the potential for short-circuiting of lubrication oil to the exhaust is inherent to the current design. Oil transferred to the exhaust by short-circuiting or by incomplete combustion leads to unburned hydrocarbons and potential barriers to later-use of catalysts. Further, the fuel economy of 2-stroke engines is limited compared to 4-strokes, due to the shorter effective expansion stroke of the engine.

Cost Projection

Two-strokes represent the most cost-effective solution for the current marine pleasure-craft market. However, as emission regulations become more strict, the 2-stroke cost will increase substantially as technology is added to address 2-stroke emissions and fuel economy deficiencies. It is expected that 2-stroke technology to meet 5g/Kwh NO_x + HC emissions levels will be similar to 4-stroke costs.

Prospective for Marine Industry

Two-strokes will continue to be utilized in the marine industry, but will be heavily represented by direct injected engines. It may be possible to meet 5 g/Kwh NO_x + HC with 2-stroke technology. However, for emissions goals below this level the prospect for 2-stroke technology diminishes quickly, due to technical problems using aftertreatment equipment with traditional 2-stroke designs.

3.3.11 Homogeneous Charge Compression Ignition

Technology Description

Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) is a method of operating a combustion system that provides high efficiency with ultra-low NO_x emissions. Fundamentally, HCCI is accomplished by premixing the air-fuel charge and then compression igniting the mixture to force a combustion event. If the air-fuel mixture is dilute (EGR or excess air), the NO_x emissions can be controlled to single-digit ppm concentrations. The technology has been pursued by R&D teams worldwide for the last 25+ years, with no successful implementations in production that demonstrate low NO_x, broad speed/load range, and good fuel economy. Key barriers to HCCI success have been difficulty in controlling the ignition timing and excessive engine noise. Production will probably first occur in the on-road, automotive or diesel markets, with limited application at light-loads only.

Performance and/or Emissions Impact

Engine-out NO_x from an HCCI engine can be very low, possibly meeting almost all foreseeable emissions standards of the future without need for NO_x aftertreatment. HC emissions are typically at levels consistent with modern, SI-engines (~ 1000-2000 ppm). Therefore, HCCI engines of the future are expected to require oxidation catalysts.

Cost Projection

HCCI has been accomplished in laboratory situations, where technologies such as direct injection, VVA, and fast controls have been necessary for successful demonstration of HCCI benefits. Therefore, HCCI is assumed to require several engine technologies that have been discussed independently but all increase engine cost. However, HCCI may eliminate the need for NO_x aftertreatment, thus reducing overall aftertreatment costs. Note that HCCI will probably require oxidation catalysts due to high engine-out HC emissions. Additionally, full-load HCCI would require a charge-air boost system, increasing cost again. Finally, some researchers argue that production HCCI will only be successful if in-cylinder pressure measurement can be used as a feedback control sensor.

Prospective for Marine Industry

The short-term prospect for HCCI in the marine pleasure-craft industry is low. Longer term (10 yrs), it is expected that some form of HCCI combustion will be utilized for automotive and/or diesel applications. Success in these industries may provide impetus to utilize HCCI in the marine industry. Note that HCCI is a dilute combustion process. Hence, it may be utilized in a multi-combustion-mode engine as a light-load solution, or if successful for full-load, would require a charge-air boost system to maintain acceptable power density.

3.3.12 Over-expanded cycles

Technology Description

An over-expanded cycle utilizes a longer (effective) expansion stroke than compression stroke. Although it is possible to achieve this requirement through complex mechanical reciprocating systems, most often, over-expansion is accomplished through use of late-intake-valve closure timing. Use of a late (or early) intake valve closure leads to reductions in the trapped air that enters the engine. For example during the intake stroke of the engine, air is drawn-in to the engine cylinder. Subsequently, the piston begins to move upward, beginning the normal compression stroke. If the intake valve is controlled to remain open during a significant portion of the compression stroke, minimal compression of the cylinder charge will occur. Hence, the cylinder pressure near top-dead-center will be reduced, as would occur for a traditional engine with a shorter compression stroke. After combustion, the expansion and exhaust process occurs normally. Because the compression stroke is effectively shorter than the expansion stroke, a form of Miller-cycle is achieved. It is common to utilize a higher compression ratio piston in the Miller-cycle engine, thus creating a large expansion ratio than traditional engines. Additionally, variable intake valve closure provides a means of optimizing the effectiveness of the Miller-cycle across a larger speed/load range of the engine.

Performance and/or Emissions Impact

The variable Miller-cycle technique is being used within the diesel market (on the Caterpillar ACERT engine) and in the light duty automotive market (Toyota Prius engine). Engine-out NO_x emissions can be reduced slightly through this technique, while fuel economy is also slightly improved. The production diesel application (Caterpillar ACERT) achieved approximately 50% NO_x reduction through combined use of variable Miller-cycle and lean-burn.

Cost Projection

The cost of implementation of the variable Miller follows the cost of application of a VVA system. The light-duty automotive market has utilized cam phasers to control an effective Miller-cycle. However, some concessions in fuel economy and emissions reduction were made because of the simultaneous change in valve overlap that occurs when a cam phaser is employed to vary intake valve closure. Caterpillar has utilized an electro-hydraulic valve-latch mechanism to hold the intake valve open and control valve closure to implement Miller-cycle. This solution represents a low-cost method of achieving partial VVA for Miller-Cycle and control of effective compression ratio.

Prospective for Marine Industry

This strategy may be adopted for engines with cam phasers, but will have low impact and may be considered a secondary approach to incremental emissions reduction.

3.3.13 New sensors and actuators

Technology Description

In-cylinder pressure measurement is a technology being pursued by several large suppliers to the engines' market. Most notable is the work being accomplished by Siemens and Federal Mogul. They are pursuing development of a production-intent cylinder pressure transducer for the diesel engine market. Their current design combines the diesel engine glow-plug adapter with pressure-sensing technology. Real-time measurement of cylinder pressure could enable improved emissions and performance for SI- or diesel engines. It may be an enabler for future combustion systems such as HCCI.

Performance and/or Emissions Impact

In-cylinder pressure measurement allows feedback control of the combustion event itself. The pressure created during combustion is the direct thermodynamic quantity that provides work to the piston and ultimately to the engine crankshaft. The use of in-cylinder pressure feedback for conventional engines may act to allow optimal operation across all engine operating conditions, thus improving emissions (a few percent compared to a well-calibrated modern engine) and acting as a diagnostic tool. However, for some new combustion technologies (such as HCCI), the in-cylinder pressure sensor may be an enabling technology. HCCI offers very high potential for ultra-low engine-out NO_x . HCCI has not been successful, primarily due to combustion control difficulties. Many researchers argue that in-cylinder pressure measurement will be required to successfully produce an HCCI engine.

Cost Projection

Current research-grade pressure transducers have costs in the range of U.S. ~\$2000. Production targets for the diesel industry are in the range of U.S. ~\$50. Light-duty automotive would require substantial cost reduction below this, especially if each cylinder was instrumented. The most probable introduction of this technology will be for the diesel industry.

Prospective for Marine Industry

The short term prospective for in-cylinder pressure transducers is low. Longer-term, if success is achieved in other high volume markets such as on-road diesel, application would expand, especially if costs can be made acceptable. Durability of these sensors (as with any in-cylinder sensor) is questionable.

3.4 Emerging Technologies: Diesel Engines

There are a number of emerging diesel engine technologies that may be applicable to future marine pleasure-craft. Diesel engines are not generally utilized within this market, except in niche areas. However, the potential emergence of new emissions standards and new diesel system technologies might impact the current marine market. Therefore, diesel technologies should be included in any prospective for the future of the industry. The technologies can generally be divided by their application-intent for the engine, where the technology is considered in-cylinder technology, airflow technology, or aftertreatment technology. The various emerging technologies are discussed in the following sections, with discussions offered for technology descriptions, effects on performance and emissions, relative costs, and prospects for application within the pleasure-craft marine industry.

3.4.1 Naturally Aspirated Diesel Engine

Technology Description

Although naturally-aspirated diesel engines are not considered new technology, they represent a technology that has been previously utilized in niche marine engine markets. Additionally, future naturally-aspirated diesel engines might leverage other new technologies, such as electronic fuel injection and low temperature combustion to be viable for expanded use in some markets. Naturally aspirated means that no charge-air boost device is utilized. For the traditional, lean-burn diesel engine, lack of a boost system resulted in low peak power and poor power density. However, the naturally-aspirated diesel engine represents the lowest cost diesel alternative available.

Performance and/or Emissions Impact

The naturally aspirated diesel engine has slowly been replaced by boosted diesel engines, primarily because the boosted engine can provide much improved brake-specific emissions, especially for particulate matter. All higher powered applications in the U.S. off-road industry now utilize boost systems. Naturally-aspirated diesel systems would require a particulate trap if they were to be utilized of many applications today.

Cost Projection

The naturally-aspirated diesel engine represents the lowest cost diesel engine, but still struggles to be competitive for cost with modern naturally-aspirated gasoline engines.

Prospective for Marine Industry

The prospective for use of naturally aspirated diesel engines in the marine pleasure-craft industry is low.

3.4.2 Common-Rail Injection

Technology Description

Common-rail injection is a classification of fuel injection systems that are primarily utilized for diesel engines. The system consists of a high-pressure fuel pump, a pressure regulator, fuel-rail, and multiple, electronic direct-injection fuel injectors. The rail is "common" to all injectors on a bank of the engine. The fuel rail is pressurized to a target level for each engine operating condition. Typical fuel rail pressures are 1600-1800 bar. The common-rail system offers advantages over previous-technologies in that multiple, high-pressure fuel injection events can be accomplished for each combustion cycle of the engine. In production, this has allowed implementation of early pilot-injection events that result in substantial noise reduction from the diesel engine. Additionally, the use of multiple, split-injections has resulted in substantial improvement to the NO_x /particulate tradeoff for modern diesel engines. Finally, the ability to control multiple injection events has enabled new combustion modes, such as limited-HCCI and Low Temperature Combustion (LTC). The newest of the common-rail systems are now being coupled to piezo-actuated injectors, thus allowing even finer control of fueling.

Performance and/or Emissions Impact

The common-rail injection system has provided substantial improvement to the noise and emissions from modern diesel engines. Carefully calibrated multiple injection pulses have resulted in NO_x emissions reductions at mid-load of up to approximately 30%, without increases of soot. At lighter loads, the multi-injection capability has resulted in successful implementation of Low Temperature Combustion (LTC), a combustion mode in which soot formation and engine-out NO_x are drastically reduced. However, high load operation must still utilize traditional diesel combustion. The common-rail system is often used in combination with EGR and turbocharging to provide NO_x and soot control across the entire engine operating range. Current diesel engines can provide $\text{NO}_x + \text{HC}$ emissions below 5 g/Kwh, with potential to meet even lower standards. Current on-road applications now utilize particulate matter traps to further control soot.

Cost Projection

All diesel fuel control systems are considered high cost, due to precision parts requirements, high-pressure requirements, and advanced controls requirements. The diesel common-rail system is substantially more expensive than current DI-gasoline fuel systems.

Prospective for Marine Industry

Common-rail injection has been adopted almost universally for the light-duty on-road diesel industry and is becoming very common for off-road engines. It is expected that diesel engine applications to the marine pleasure-craft industry would utilize common-rail injection systems.

3.4.3 Piezo-Injection

Technology Description

Piezo-injection is the newest class of fuel injectors for common-rail fuel systems. The fuel injector utilizes a piezo-crystal stack to actuate the fuel control needle within the injector. Many piezo-injector systems actuate the "stack" in both the "on" and "off" directions. Fuel delivery is controlled very precisely with piezo-actuated injectors, thus allowing very precise refinement of multiple injection events for modern diesel engines. It should be noted that piezo-actuators are also being pursued for use in the direct-injection gasoline engine market, where fuel delivery and control are also critical to future emissions and performance.

Performance and/or Emissions Impact

The precise fuel delivery control offered by piezo-actuated injectors, especially for multiple, closely-staged injection events, results in improvements in soot/NO_x tradeoff for modern diesel systems. As with more typical common-rail systems, carefully calibrated multiple injection pulses have resulted in NO_x emissions reductions at mid-load of up to approximately 30%, without increases of soot. At lighter loads, the multi-injection capability has resulted in successful implementation of Low Temperature Combustion (LTC), a combustion mode in which soot formation and engine-out NO_x are drastically reduced. However, high load operation must still utilize traditional diesel combustion. The piezo-actuated common-rail system can be used in combination with EGR and turbocharging to provide NO_x and soot control across the entire engine operating range. Current diesel engines can provide NO_x + HC emissions below 5 g/Kwh, with potential to meet even lower standards. Current on-road applications now utilize particulate matter traps to further control soot.

Cost Projection

As with other common rail systems, cost is considered high. Piezo-actuated injectors further increase cost.

Prospective for Marine Industry

It is unclear how piezo-injectors will be adopted within the larger diesel engine industry. Additionally, it is expected that diesel systems in general will not impact the marine pleasure-craft industry to a significant extent. Currently cost reduces the integration of piezo-injector systems into wide-spread diesel engine use. The overall prospective for marine application is low.

3.4.4 Turbocharging

Technology Description

Turbocharging is a means of increasing the boost, or charge air delivery to the engine. Turbochargers have a long history of use in the diesel industry, where high boost levels are required to maintain lean engine operation, even at full load. The turbocharger's compressor is driven by a directly-mounted turbine that is driven by excess exhaust heat, thus the turbocharger is typically mounted close to the engine exhaust ports. Almost all modern turbocharging applications are based upon centrifugal compressors and turbines. Historically, turbochargers utilized hydrodynamically-lubricated shaft bearings that required a pressurized, filtered oil-supply system and oil return. More recently, turbocharger shaft-lubrication concerns have been reduced substantially with the introduction of ball-bearing turbochargers. Some work has been accomplished using sealed bearings. Additionally, diesel application turbochargers run at lower temperatures than gasoline systems.

Performance and/or Emissions Impact

Turbocharging provides dramatic increases in engine power density. Emissions are improved if the engine is operated lean, where peak power and lean air-fuel ratios can be maintained with turbocharging. Historical issues with poor turbocharger transient performance have been addressed almost fully with modern, high-speed, small turbochargers. Additionally, high-end automotive applications are now using multiple turbochargers to allow fast boost response at low-loads and speeds, with full-load and high speed boost requirements met through a second turbocharger. Alternately, other automotive manufacturers have utilized variable geometry turbines to expand the turbocharger operating range and improve transient performance.

Turbocharging may be considered an enabler for other emissions reduction strategies. For example, in a non-boosted engine, the use of lean-burn or EGR to dilute the flame and reduce NO_x emissions is achievable at light and part loads, but causes excessive soot at higher loads. To maintain full load performance without large increases in NO_x and soot, the diesel engine requires a high air-flow rate to support the power-output target, while sufficient EGR or excess air must also be introduced to maintain the low NO_x target. Hence, the engine requires addition of boosting machinery such as a turbocharger to provide the targeted air-flow and diluent-flow.

The current trend in the light-duty automotive and diesel industries is toward expanded use of turbocharging. This strategy allows much smaller displacement engines to be utilized, thus improving packaging size, weight, and through improved engine efficiency and weight reduction, brake specific emissions are improved. With the addition of strategies such as EGR and/or lean burn, the fuel economy is improved further. It should be noted that most high performance turbocharging applications utilize a charge-air aftercooler, which is a heat exchanger that cools the air exiting the turbocharger compressor. This cooled air provides improvements to NO_x emissions and breathing efficiency for the engine.

Cost Projection

Turbochargers are considered expensive, relative to other automotive technologies. However, the diesel industry has adopted turbocharging almost universally, to meet emissions requirements through lean-burn and EGR strategies. Additionally, if the use of turbocharging allows downsizing of the engine from a six-cylinder to a four-cylinder, the cost savings in engine hardware offsets part of the boost-system costs. Turbochargers are standard equipment for all modern diesel engines.

Prospective for Marine Industry

The prospective for diesel applications to the marine pleasure-craft industry is low. However, addressing turbocharging for marine diesel engines, concerns may surface in regard to turbocharger surface temperatures and exhaust heat/temperature requirements for efficient turbocharger application. Possible solutions include integrating the turbocharger turbine and housing into the cylinder head or exhaust manifold of the engine. This technique is now being utilized on some automotive applications, thus reducing the temperature of the downstream exhaust components. Additionally, modern turbocharging equipment can achieve good efficiencies at exhaust temperatures down to 500°C and are safe for operation at exhaust gas temperatures up to approximately 900°C. Modern diesel engines have relatively cool exhaust, due to high expansion ratios and use of excess air and/or EGR. Shorter term, the use of a boost-air system may provide lean-burn and/or EGR capability that will allow a non-catalyst equipped engine to be marketed into the future. Further, the downsizing and power density potential for boosted marine applications is high.

3.4.5 Supercharging

Technology Description

Supercharging (like turbocharging) is a means of increasing the boost, or charge air delivery to the engine. Superchargers have a long history of use in the diesel industry, where high boost levels are required to maintain lean engine operation, even at full load. Most applications of superchargers for diesel applications were for 2-stroke diesel engines. Often, the supercharger was also combined with a turbocharger for added boost and improved fuel efficiency. The supercharger's compressor is driven directly by the crankshaft, either through mechanical connection or through chain- or belt-drive. Modern supercharging applications utilize a variety of compressor types (centrifugal, roots, etc.). Lubrication to the supercharger bearings also takes various forms, but sealed bearings have been used successfully.

Performance and/or Emissions Impact

Supercharging provides dramatic increases in engine power density. Emissions are improved if the engine is operated lean, where peak power and lean air-fuel ratios can be maintained with the boost system. Because superchargers are driven directly by the engine crankshaft, the airflow pumping capacity of the engine is improved across the entire engine range. Additionally, for modern superchargers, the range of supercharging efficiency with speed and airflow requirement is impressive and competes strongly with that for variable geometry turbochargers. The fuel economy impact of supercharging is not as favorable as turbocharging, because the supercharger consumes useable crankshaft power, where the turbocharger is powered primarily by waste heat. However, modern superchargers can utilize bypass systems when boosted air is not needed, thus substantially reducing the losses from the system.

Like turbocharging, supercharging may be considered an enabler for other emissions reduction strategies. For example, in a non-boosted engine, the use of lean-burn or EGR to dilute the flame and reduce NO_x emissions is achievable at light and part loads. However, to maintain full load performance without large increases in NO_x and smoke, the engine requires a high air-flow rate to support the power-output target with low smoke, while sufficient EGR or excess air must also be introduced to maintain the low NO_x target. Hence, the engine requires addition of boosting machinery to provide the targeted air-flow and diluent-flow.

The automotive industry has successfully marketed supercharged engines for a number of years and the market is growing for all boosting applications (super- or turbo-charged). Additionally, the emissions reduction potential from supercharged engines is very similar to that for turbocharging.

Cost Projection

Superchargers are considered expensive, but usually not to the same extent as turbocharging. Because the supercharger does not utilize or require hot exhaust gases, it may be a viable strategy for downsizing marine engines of the future. Additionally, if the use of supercharging allows downsizing of the engine from a 6-cylinder to a four-cylinder, the cost savings in engine hardware offsets part of the boost-system costs. Finally, because the supercharger is not in contact with hot exhaust gases, reliability is typically higher than that for turbocharging.

Prospective for Marine Industry

The prospective for diesel engine applications to the marine pleasure-craft industry is low. Further, it is expected that if diesel engines were to enter the market, they would most probably utilize boosting technology from the higher volume engine markets, thus making turbocharging the most probable diesel engine boost technology.

3.4.6 Exhaust Gas Recirculation

Technology Description

Exhaust Gas Recirculation (EGR) is a NO_x reduction technique that (re)introduces burned exhaust gases into the fresh air stream of the engine. The exhaust gases act as a diluent to the combustion flame, thus cooling the peak flame temperatures and reducing NO_x formation. EGR has been utilized extensively in the automotive industry, as well as in the heavy duty on-road diesel industry, and now is being introduced into the off-road diesel industry.

EGR is often compared to lean-burn (excess-air) engine operation, because both techniques cool the combustion flame to reduce NO_x . However, to meet very strict NO_x emissions levels, lean-burn systems have proved difficult to couple with exhaust catalysts for NO_x reduction. EGR has offered a good alternative for NO_x emissions reduction in the diesel industry.

Performance and/or Emissions Impact

EGR provides a relatively easy technique for achieving significant NO_x reduction. For example, use of EGR at levels up to 10% at full load can provide engine-out NO_x reductions of approximately 50%. EGR levels of 40-50% have been shown to provide NO_x reductions of approximately 50% at light load conditions. Of course, the temperature of the EGR is an important factor and it should be recognized that the EGR gas should not be cooled to such an extent that condensation of exhaust water occurs. EGR is now widely utilized across most of the diesel industry.

For advanced diesel applications, combinations of hot- and cooled- EGR are utilized. Hot EGR stabilizes the diesel combustion process at light loads and allows operation of the engine in a low temperature combustion process (described elsewhere), resulting in very low engine-out NO_x and smoke.

Cost Projection

The cost of implementing a cooled, external EGR system is moderate, with very good NO_x reduction potential (typically around 50%), but requires an EGR circuit, EGR valve, and EGR cooler. EGR systems are now being produced in high volume by suppliers, such as Dayco, Siemens, and others. The costs of these systems are considered very competitive compared to other NO_x reduction technologies.

Additionally, it should be noted that the marine outboard emissions test includes significant mid- to high-load operating conditions. Because NO_x reduction will be necessary at those conditions, it is probable that a charge-air boost system may be required to achieve the desired engine air flow and EGR flow.

Prospective for Marine Industry

The prospective for diesel engine applications to the marine pleasure-craft industry is low. However, if diesel engines were utilized, EGR would most certainly be part of the technology package. Overall the prospective for diesel engine EGR use in the marine pleasure-craft industry is fairly low.

3.4.7 Variable Valve Timing

Technology Description

Variable Valve Timing can be achieved through a number of different Variable Valve Actuation (VVA) technologies. Current, production automotive systems regularly utilize cam phaser systems, where the camshaft can be rotated in relation to the crankshaft, thus effecting changes in valve opening and closing timings (phasing of the cam). Cam phasers are not commonly used for diesel engine applications.

More advanced VVA systems are now being introduced to the diesel market, starting with “collapsible-tappet” systems that can be used to open the intake or exhaust valve, even when no cam lift is available. These systems are used in production for implementation of variable Miller cycle operation (see section on overexpanded cycles). Even more advanced systems are being studied for production, including lost-motion systems (where a collapsible hydraulic link allows motion to be modified or “lost” from a mechanical cam shape), and full camless systems (electromechanical or electrohydraulic).

Performance and/or Emissions Impact

VVA systems have proven to be very effective at reducing pumping losses and allowing improved optimization of intake and exhaust tuning. The result is improved engine breathing and pumping work. This provides improvements in fuel economy for diesel engines, but typically only on the order of 1-2%. Optimized high-load breathing (through the so-called Curtil technique) has also allowed increased low-speed, peak torque production.

Emissions impacts due to VVA can be significant. The VVA system can be used to control internal EGR, resulting in improvements of engine-out NO_x . Here, typical NO_x reductions are on the order of 10-25%. However, current research in modified combustion techniques, such as Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) have shown that use of variable valve timings yields NO_x reductions of greater than 90% at light loads. However, production engines are not yet implementing this combustion mode and it is still considered advanced research.

Variable intake valve closure timing has been utilized to implement “Miller-Cycle” engine operation, where a relatively high geometric compression ratio is utilized, but effectively reduced to optimum performance and/or emissions levels by adjustment of the valve closure event. This technique is being used within the diesel market (on the Caterpillar ACERT engine) and in the light duty automotive market (Toyota Prius engine). Engine-out NO_x emissions can be reduced slightly through this technique, while fuel economy is slightly improved.

Cost Projection

Diesel VVA systems are considered expensive and are comparative in cost and technology to fuel systems. Diesel use of VVA is being considered as a production option because it can be integrated into an engine braking system. This cost-sharing will not occur for diesel marine applications, as there is no need for an engine brake.

Prospective for Marine Industry

The use VVA technology for marine pleasure-craft diesel applications is very low. It is not expected to impact the market.

3.4.8 Lean NO_x Adsorber

Technology Description

The lean NO_x adsorber (often termed Lean NO_x Trap, or LNT) is an NO_x, HC, and CO aftertreatment device for lean-burn engines. It acts to simultaneously oxidize exhaust gas hydrocarbons and CO, while also reducing NO_x, forming products of carbon dioxide, water and nitrogen. The LNT catalyst allows normal operation at lean engine conditions, where NO₂ is adsorbed onto (or stored in) the catalyst while HC and CO are slightly oxidized. When the NO₂ storage capacity is reached, the engine must be run for a short time at slightly rich air-fuel ratios (or fuel must be injected into the exhaust) to allow chemical reaction of the stored NO₂ with HC and CO. During this period, the stored NO₂ is used to oxidize the CO and HC to products of N₂, H₂O, and CO₂. The short regeneration periods typically last about 2 seconds and are repeated approximately every 60-90 seconds, depending primarily upon engine speed, load, and catalyst volume. Like an oxidation catalyst, the LNT catalyst is composed of three major elements: the substrate, the washcoat, and the catalytic coating. The substrate is often made from a ceramic or, more recently, from a metal. The washcoat is typically a proprietary material. The catalyst material itself is comprised of mixtures of platinum, palladium and rhodium. LNT catalysts have been in production since the late-1990s for lean-burn SI-gasoline engines, but have only just entered the diesel engine market. The LNT catalyst is not considered a passive emissions control device and requires precise control systems.

Performance and/or Emissions Impact

LNT catalysts can provide CO and HC conversion efficiencies up to about 90%. NO_x conversion efficiency is can also be above 90%. Overall emissions reduction efficiencies of LNT catalyst applications on engines is usually less than the maximum possible, due to sub-optimal air-fuel ratio control during regeneration events, resulting in HC slip and uncontrolled NO_x release from the catalyst. LNT catalyst efficiency is severely reduced by sulfur and requires regular high-temperature regeneration of the catalyst to regain some catalyst efficiency. The durability of the catalysts is still being proven for diesel systems. Typical light-off temperatures for LNT catalysts are approximately 200-250 deg C. LNT catalyst effects on engine breathing result in slight increases in pumping losses, usually resulting in slight fuel economy penalties. The requirement to run the engine slightly rich during regeneration (or addition of fuel into the exhaust) imposes a fuel economy penalty of 2-10% for most LNT engine applications.

Cost Projection

The cost of an LNT catalyst is higher than that of a 3-way catalyst. Presumably, this is because of the difference in production quantities, as both catalysts utilize similar construction methods and materials. However, a more accurate cost approximation would require a study for necessary precious metal loading, catalyst volume, and special material needs possibly brought about by this new marine application.

Prospective for Marine Industry

The prospective for diesel engine applications to the marine pleasure-craft industry is low. Further, application of LNT technology to marine pleasure-craft diesel engines is not probable in the next ten years. This technology is only just reaching the diesel on-road industry and is considered a high-risk technology.

3.4.9 Selective Catalytic Reduction

Technology Description

The Selective Catalytic Reduction system (SCR) is a NO_x reduction device for lean-burn engines. It acts to reduce NO_x through chemical reaction with ammonia. The ammonia is derived from thermal or catalytic hydrolysis of a liquid urea/water mixture that is injected into the exhaust gas, upstream of the SCR catalyst. The SCR catalyst is often combined with an oxidation catalyst to oxidize exhaust HC and CO. Unlike most other catalysts for engine use, the SCR does not require precious metals. SCR catalysts are only now entering the on-road diesel market in the U.S., but have been utilized extensively for HD on-road diesel applications in Europe. The SCR catalyst is not considered a passive emissions control device and requires precise urea injection and control systems.

Performance and/or Emissions Impact

SCR catalysts can provide NO_x conversion efficiencies up to about 95%. Overall emissions reduction efficiencies of SCR catalyst applications on engines is usually less than the maximum possible, due to sub-optimal urea injection control, resulting in reduced NO_x efficiency when urea is under-injected and ammonia slip when urea is over-injected. Unlike the LNT catalyst, the SCR catalyst efficiency is not severely reduced by sulfur. The durability of SCR catalysts is still being proven for diesel systems, but good experience has been gained in Europe. Typical light-off temperatures for SCR catalysts are approximately 200-250°C. SCR catalyst effects on engine breathing result in slight increases in pumping losses, usually resulting in slight fuel economy penalties. The requirement to utilize urea as a reductant leads to an "effective" fuel economy penalty (due to the cost of urea). However, the effective fuel economy penalty is usually considered less than that for a comparable LNT.

Cost Projection

The cost of an SCR catalyst system is very similar to that of an LNT system. Both are considered expensive aftertreatment options. Additionally, the SCR system usually is coupled with an upstream oxidation catalyst and sometimes a downstream oxidation catalyst to consume any ammonia that slips past the SCR catalyst.

Prospective for Marine Industry

The prospective for diesel engine applications to the marine pleasure-craft industry is low. Further, application of SCR technology to marine pleasure-craft diesel engines is not probable in the next ten years. This technology is only just reaching the diesel on-road industry and is considered a high-risk technology.

3.4.10 Particulate Matter Trap

Technology Description

The Particulate Matter Trap (PMT, PM Trap, Diesel Particulate Filter, DPF) is an aftertreatment device for reduction of soot or particulate matter from diesel engines. It acts to reduce soot through a trapping and oxidative combustion process. PM traps are being introduced to the on-road diesel industry now. The PM Trap acts as a filter, physically removing particulate matter from the exhaust stream. The particulate matter that is trapped must ultimately be removed, otherwise the pressure drop across the filter will become high and engine operation is degraded. Additionally, if the trapped particulate reaches a loading condition and temperature that are sufficiently high, uncontrolled combustion of the particulate matter can occur, causing severe damage to the aftertreatment device. Therefore, the PM Trap must regularly, or continuously regenerate. The regeneration amounts to controlled combustion or oxidation of the particulate matter within the device. Many PM Traps today are catalytic and promote soot oxidation. When the PM Trap reaches an equilibrium between soot loading rate and soot oxidation rate, the process is termed "at the balance point". The balance point varies as a function of temperature, so control of the PM Trap regeneration is not easily accomplished. Most PM Traps in production utilize a differential pressure sensor to indicate excessive soot loading. Even in a continuously regenerating system, if the soot loading becomes excessive, a forced- high temperature regeneration is usually initiated and controlled by the engine control system.

Performance and/or Emissions Impact

PM Traps are now in production for U.S. HD on-road applications. The particulate reduction efficiency of these units can exceed 99%. The back-pressure imposed on the engine by the PM Trap degrades fuel economy slightly. Additionally, forced regenerations require energy addition to the exhaust stream, either through advanced in-cylinder injection control or through an exhaust mounted fuel injector and/or burner. Frequent regenerations of the PM Trap can lead to increased fuel consumption.

Cost Projection

The cost of a PM Trap system is very similar to that of an LNT or SCR system. All are considered expensive aftertreatment options. Additionally, the PM Trap system may require an upstream burner or exhaust fuel injection system, adding more cost.

Prospective for Marine Industry

The prospective for diesel engine applications to the marine pleasure-craft industry is low. Further, application of PM Trap technology to marine pleasure-craft diesel engines is not probable in the next 5-10 years. This technology is only just reaching the diesel on-road industry and is considered a high-risk technology.

3.4.11 DPNR

Technology Description

The DPNR technology is being developed by Toyota, for lean-burn engine applications. Effectively, the DPNR system can be called a 4-way catalyst, in that it reduces emissions of NO_x, HC, CO, and particulate matter. In operation, the system utilizes many of the individual technologies discussed in previous sections of this report, but combines them to create an efficient 4-way catalyst system.

Performance and/or Emissions Impact

The DPNR technology is reported to have emissions reduction efficiencies as good as other lean-burn emissions control systems. The performance impact is expected to be similar to LNT/PMT combinations from other manufacturers.

Cost Projection

The DPNR system would require licensing from Toyota and is expected to have a cost similar to other competitive solutions. No further information is available for DPNR.

Prospective for Marine Industry

The prospective for diesel engine applications to the marine pleasure-craft industry is low. Further, application of DPNR technology to marine pleasure-craft diesel engines is not probable in the next 5-10 years. This technology is only just reaching the diesel engine industry and is still considered a high-risk technology.

3.4.12 Homogeneous Charge Compression Ignition

Technology Description

Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) is a method of operating a combustion system that provides high efficiency with ultra-low NO_x emissions. Fundamentally, HCCI is accomplished by premixing the air-fuel charge and then compression igniting the mixture to force a combustion event. If the air-fuel mixture is dilute (EGR or excess air), the NO_x emissions can be controlled to single-digit ppm concentrations. The technology has been pursued by R&D teams worldwide for the last 25+ years, with no successful implementations in production that demonstrate low NO_x, broad speed/load range, and good fuel economy. Key barriers to HCCI success have been difficulty in controlling the ignition timing and excessive engine noise. Additionally, high load operation using diesel fuel has not been successfully demonstrated. Production will probably first occur in the on-road, automotive or diesel markets, with limited application at light-loads only.

Performance and/or Emissions Impact

Engine-out NO_x from an HCCI engine can be very low, possibly meeting almost all foreseeable emissions standards of the future without need for NO_x aftertreatment. HC emissions are typically at levels consistent with modern, SI-engines (~ 1000-2000 ppm). Therefore, HCCI engines of the future are expected to require oxidation catalysts. Particulate matter emission from HCCI engines has been demonstrated at very low levels.

Cost Projection

HCCI has been accomplished in laboratory situations, where technologies such as direct injection, VVA, and fast controls have been necessary for successful demonstration of HCCI benefits. Therefore, HCCI is assumed to require several engine technologies that have been discussed independently but all increase engine cost. However, HCCI may eliminate the need for NO_x aftertreatment (and possibly PM aftertreatment), thus reducing overall aftertreatment costs. Note that HCCI will probably require oxidation catalysts due to high engine-out HC emissions. Additionally, full-load HCCI would require a charge-air boost system, increasing cost again. Finally, some researchers argue that production HCCI will only be successful if in-cylinder pressure measurement can be used as a feedback control sensor.

Prospective for Marine Industry

The prospect for diesel-fuelled HCCI in the marine pleasure-craft industry is low.

3.4.13 Low Temperature Diesel Combustion

Technology Description

Low temperature diesel combustion (LTC) describes a mode of combustion for diesel engines in which very low levels of NO_x and smoke are achieved. This combustion process is based heavily upon achieving combustion at temperatures below that in which soot formation occurs. It is believed that low-temperature combustion limits the formation of precursor species (polycyclic aromatic hydrocarbons) that normally lead to soot formation. Technologies necessary to achieve successful low temperature combustion in a diesel engine include EGR, and advanced direct injection, such as common-rail. Low temperature combustion is generally limited to light and medium engine loads. At higher loads, in-cylinder temperatures exceed the soot formation threshold and traditional diesel diffusion combustion occurs.

Performance and/or Emissions Impact

Low Temperature Diesel Combustion (LTC) is being adopted widely in the modern diesel industry. The primary reason for this is that modern on-road diesels are now utilizing aftertreatment systems that require sufficient exhaust temperature to remain active. Traditional diesel combustion occurs very lean and produces relatively low exhaust gas temperatures. The light-off temperature for many aftertreatment systems occurs at or above 250°C . Low Temperature Combustion, although providing low flame temperatures in-cylinder, produces moderate HC and CO in the exhaust, providing a convenient means of creating exotherms in oxidative elements of an aftertreatment system. Hence, the HC and CO generated from the combustion event are used to maintain the aftertreatment system at temperatures above its activity threshold.

Cost Projection

Low temperature combustion requires technologies such as EGR and advanced fuel systems. These systems are becoming standard on most modern diesel engines, but may require slight modifications to extend the LTC range. Therefore, the cost of implementing LTC for a diesel engine is considered low.

Prospective for Marine Industry

The prospective for diesel engine application in the marine pleasure-craft industry is low. However, the implementation of LTC for modern diesel engines is growing and is expected to become a common strategy for diesel systems of the future.

3.4.14 Overexpanded cycles

Technology Description

An over-expanded cycle utilizes a longer (effective) expansion stroke than compression stroke. Although it is possible to achieve this requirement through complex mechanical reciprocating systems, most often, over-expansion is accomplished through use of late-intake-valve closure timing. Use of a late (or early) intake valve closure leads to reductions in the trapped air that enters the engine. For example during the intake stroke of the engine, air is drawn-in to the engine cylinder. Subsequently, the piston begins to move upward, beginning the normal compression stroke. If the intake valve is controlled to remain open during a significant portion of the compression stroke, minimal compression of the cylinder charge will occur. Hence, the cylinder pressure near top-dead-center will be reduced, as would occur for a traditional engine with a shorter compression stroke. After combustion, the expansion and exhaust process occurs normally. Because the compression stroke is effectively shorter than the expansion stroke, a form of Miller-cycle is achieved. It is common to utilize a higher compression ratio piston in the Miller-cycle engine, thus creating a large expansion ration than traditional engines. Additionally, variable intake valve closure provides a means of optimizing the effectiveness of the Miller-cycle across a larger speed/load range of the engine.

Performance and/or Emissions Impact

The variable Miller-cycle technique is being used within the diesel market (on the Caterpillar ACERT engine) and in the light duty automotive market (Toyota Prius engine). Engine-out NO_x emissions can be reduced slightly through this technique, while fuel economy is also slightly improved. The production diesel application (Caterpillar ACERT) achieved approximately 50% NO_x reduction through combined use of variable Miller-cycle and lean-burn.

Cost Projection

The cost of implementation of the variable Miller follows the cost of application of a VVA system. The light-duty automotive market has utilized cam phasers to control an effective Miller-cycle. However, some concessions in fuel economy and emissions reduction were made because of the simultaneous change in valve overlap that occurs when a cam phaser is employed to vary intake valve closure. Caterpillar has utilized an electro-hydraulic valve-latch mechanism to hold the intake valve open and control valve closure to implement Miler-cycle. This solution represents a low-cost method of achieving partial VVA for Miller-Cycle and control of effective compression ratio.

Prospective for Marine Industry

This strategy has a low prospective for use within a diesel marine pleasure-craft application.

3.4.15 New sensors and actuators

Technology Description

In-cylinder pressure measurement is a technology being pursued by several large suppliers to the engines' market. Most notable is the work being accomplished by Siemens and Federal Mogul. They are pursuing development of a production-intent cylinder pressure transducer for the diesel engine market. Their current design combines the diesel engine glow-plug adapter with pressure-sensing technology. Real-time measurement of cylinder pressure could enable improved emissions and performance for SI- or diesel engines. It may be an enabler for future combustion systems such as HCCI.

Performance and/or Emissions Impact

In-cylinder pressure measurement allows feedback control of the combustion event itself. The pressure created during combustion is the direct thermodynamic quantity that provides work to the piston and ultimately to the engine crankshaft. The use of in-cylinder pressure feedback for conventional engines may act to allow optimal operation across all engine operating conditions, thus improving emissions (a few percent compared to a well-calibrated modern engine) and acting as a diagnostic tool. However, for some new combustion technologies (such as HCCI), the in-cylinder pressure sensor may be an enabling technology. HCCI offers very high potential for ultra-low engine-out NO_x . HCCI has not been successful, primarily due to combustion control difficulties. Many researchers argue that in-cylinder pressure measurement will be required to successfully produce an HCCI engine.

Cost Projection

Current research-grade pressure transducers have costs in the range of U.S. ~\$2000. Production targets for the diesel industry are in the range of U.S. ~\$50. Light-duty automotive would require substantial cost reduction below this, especially if each cylinder was instrumented. The most probable introduction of this technology will be for the diesel industry.

Prospective for Marine Industry

The short term prospective for in-cylinder pressure transducers is low. Longer-term, if success is achieved in other high volume markets such as on-road diesel, application would expand, especially if costs can be made acceptable. Durability of these sensors (as with any in-cylinder sensor) is questionable.

4.0 SUMMARY

4.1 Introduction

The marine pleasure-craft industry has entered a period of rapid change. Emissions regulations are expected to continue to be made more strict, following historical engines' industry trends. As the emissions regulations become more aggressive, so must the technologies and strategies that are employed by the manufacturers to meet the new requirements. In some circumstances, existing technology from other markets may provide a direct solution. However, the difference in marine engine use, compared to other engine applications, often requires that the implementation strategy be modified.

This chapter reviews the major findings of the current marine study and presents a prospective on future emissions targets and technologies that might be employed to meet those targets. As each technology-solution is discussed, it is ranked, compared to other possible solutions, so that informed decisions may be made in the future.

4.2 Future Emissions Prospective

Emissions goals for the future are difficult to project. This task is even more difficult when emissions goals for various geographic regions are included in the projection. However, it is evident from historical records of emissions regulations that certain trends exist. For example, the California Air Resources Board often adopts and sets emissions regulations that lead the U.S. (and often the rest of the world). Historically, the U.S. EPA emissions regulations follow the trends established by CARB, but lagging in adoption and implementation by a number of years. Additionally, success in regulations and reduction of emissions within part of the engines' industry often leads to regulation and implementation within other parts of the industry. With this in mind, emissions regulations for several engines' areas are compared in Figure 4.1, where data is included for U.S. marine outboards, CARB marine outboards, CARB marine inboards, U.S. off-road engines, and U.S. on-road engines. The marine outboard data represents higher-power-level engines. The choice of comparative data was made based upon engine types that were subject to emissions tests that regulated brake-specific emissions levels. To maintain consistency in presentation, for cases where the NO_x and HC are regulated separately, the sum of the two contributors was plotted. It should be noted that each of the different engine applications presented (especially marine vs. off-road vs. on-road) is certified based upon different emissions tests. However, the emissions test cycles for all of the engines shown in Figure 4.1 contains load points across the entire operating range of the engine. This is in contrast to light-duty automotive emissions tests, where the emissions levels are only regulated over a limited portion of the light- to mid-load operating range (representing the most common area of operation).

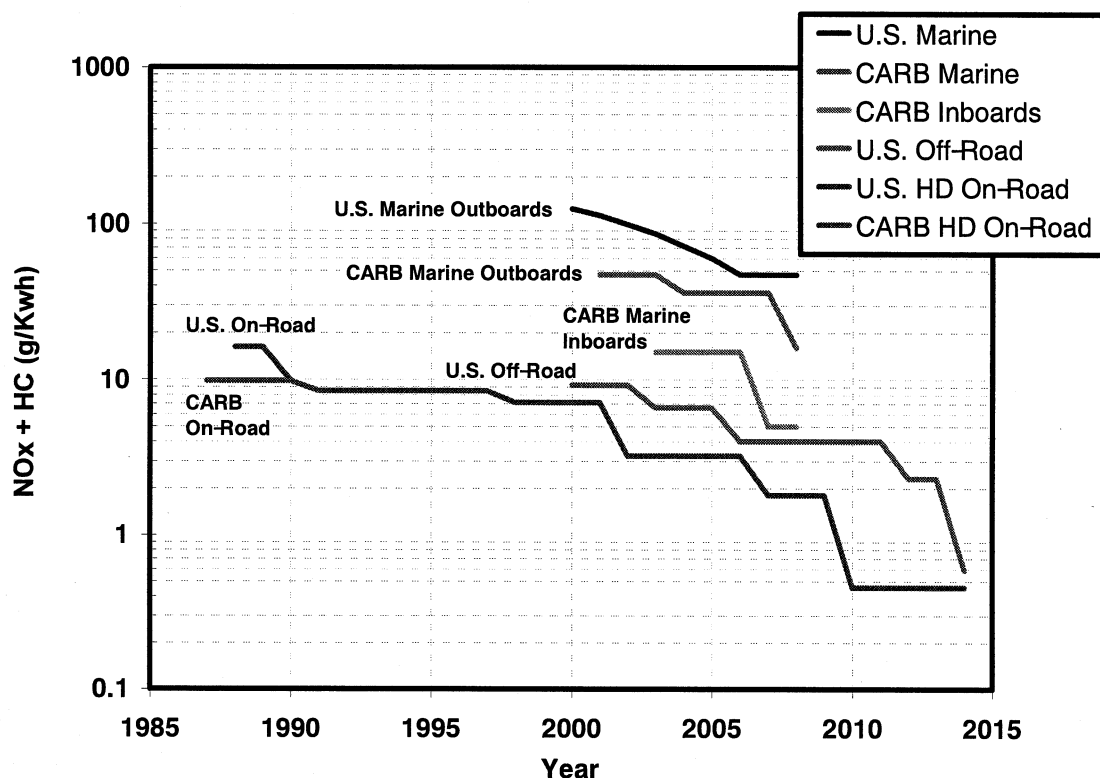


FIGURE 4.1. Emissions Standards for Various Engines' Industries

Comparison of the historical emissions regulations (Figure 4.1 and Chapter 2 of this report) reveals trends in regulations. For example, successful implementation of emissions regulations within the high-volume automotive industry in the 1980s led to initiation of emissions regulations in the Heavy-Duty (HD) on-road engine market in 1987-88. Here, CARB set initial standards (1987) that were followed quickly by the U.S. EPA (1988). By 1990, the U.S. and CARB standards for HD-on-road had become coincident. The introduction of emissions regulations to new market areas follows a strategy in which the highest mobile-source contributors to the total emissions inventory are regulated, one after another. Initially, the most significant emissions contributors were the segments of the engine market that represented the highest engine volumes. Therefore, the successful introduction of emissions regulations in the on-road industry pre-empted regulation of the off-road industry. Only more recently have the lower volume engine markets, such as the marine industry, been regulated.

It should also be recognized that after implementation of a first-level of emissions standards, it is common for further regulations to be implemented. Figure 4.1 shows a rough trend in schedule between regulation changes for a given industry. Generally, once a new regulation is fully-implemented for an engine classification, a new regulation is not scheduled for approximately 4 years. This trend is only an approximation, but can be seen more clearly in Figure 4.2, where a variety of emissions regulations are shown on an expanded scale.

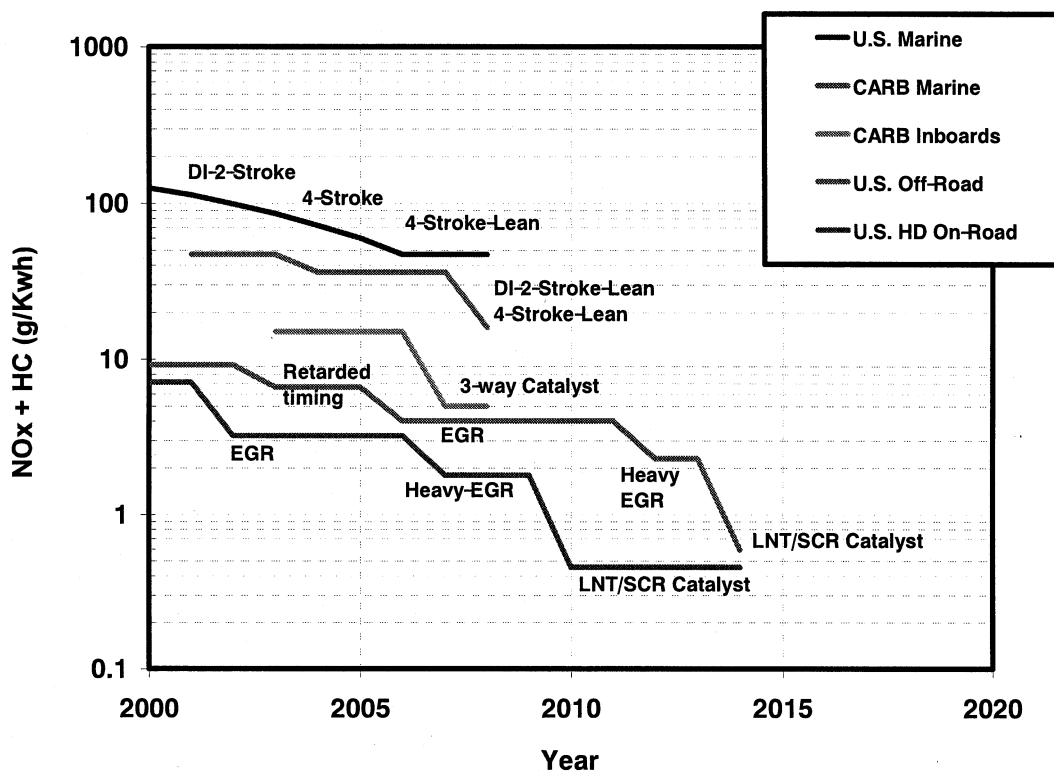


FIGURE 4.2. Emissions Standards for Various Engines' Industries

Each new level of emissions regulations is often accompanied by application of technology that is new to the affected engine class. Figure 4.2 shows various technologies that were applied to meet historical emissions regulations for marine, off-road, and on-road engines. Note that many of the applied technologies were “borrowed” from engine classes that previously met more stringent emission regulations. For example, use of EGR for on-road HD engines was introduced in 2002 in the U.S., and is now being followed by the off-road industry in 2007, where the overall NO_x + HC requirements are similar. Additionally, projections are shown in Figure 4.2 for the expected use of “heavy-EGR” for the off-road industry in 2012, again following the introduction of this strategy to the on-road industry for 2007. Finally, decisions are being made now for technologies to be used to meet 2010 on-road HD standards, where it is fully-expected that NO_x reduction catalyst will be required. The off-road industry will face similar emissions requirements for the planned 2014 emissions regulation and application of NO_x reduction technology borrowed from the on-road industry is also fully expected.

Some of the trends in emissions solutions and implementation between the on-road and off-road industries can be extended to the future marine industry. However, the marine industry of the future is expected to be primarily represented by gasoline engines, where technologies from the automotive industry will be applied heavily. The marine industry has already faced recent emissions regulation implementations that have resulted in application of several new technologies to the industry. For example, the phase-in of

outboard marine regulations in the U.S. between 2000 and 2006 has resulted in introduction of multiple 2-stroke direct fuel injected engines. This technology has significantly reduced the unburned hydrocarbons from these engines. In addition, the engine-out NO_x has been reduced further by application of stratified-charge and lean operation at some operating conditions. During the same period, many manufacturers increased the number of 4-stroke engines they marketed, with widespread application of automotive technology such as sequential electronic port-fuel injection. The 4-stroke engine provided good hydrocarbon and NO_x control, especially at lean conditions.

The dilemma now facing the marine industry is, "What is the technology path to meeting future emissions standards?" A review of Figure 4.2 indicates that the trend in emissions levels is downward and that other industries have already faced more severe emissions standards and have been successful meeting them. CARB has announced a new 5 g/Kwh standard for $\text{NO}_x + \text{HC}$ for inboard engines, scheduled for implementation in 2007. It is expected that outboard standards will follow the 5g/Kwh inboard standard within a few years. Hence, the marine industry will very soon face a new emissions standard that will be in the 5g/Kwh range, thus requiring new strategies and/or technologies.

4.3 Emissions Technology Solutions for the Future Marine Industry

The expectation that marine industry emissions levels will soon reach the 5 g/Kwh level will drive selection and application of new emission control strategies and/or technologies. There are a number of possible solutions to meeting the future emissions goals. However, considerations such as system applicability to the marine engine, complexity, cost, and durability all play a role. Table 4.1 presents a comparison of various technology groupings. Each technology-group is assigned a number of scores, ranging from one to ten, with one representing a poor ranking and ten being the best. Scores were assigned for a variety of system requirements, including emissions, power, weight, fuel economy, complexity, durability and cost. Finally, the total score for each technology is presented. The technologies included for consideration were discussed in Chapter 3 of this report.

The four, highest scoring technologies are listed below:

1. EFI 4-Stroke + 3-way Catalyst + Supercharger
2. EFI 4-Stroke + 3-way Catalyst + Turbocharger
3. DI 2-Stroke Stoich + 3-way Catalyst (catalyst/oil interactions not clear)
4. DI 4-Stroke + 3-way Catalyst + Supercharger

TABLE 4.1. Technology Comparison for Future Marine Applications

Technology	Technology Ratings										TOTALS
	NOx score	HC score	CO score	Power score	Weight score	Fuel Economy score	Durability score	Complexity score	Cost score		
DI 2-Stroke Lean with Oxidat	5	5	5	5	7	6	8	8	8	57	
	6	6	6	5	7	6	4	7	6	53	
	8	8	8	5	7	5	3	4	4	52	
	1	1	1	8	7	6	8	8	8	48	
DI 2-Stroke Stoich with 3-way Catalyst	10	10	10	7	7	6	4	6	6	66	
	5	5	5	6	5	7	8	7	6	54	
EFI 4-Stroke Lean + Oxidat	6	6	6	6	5	7	6	5	5	52	
	8	8	8	6	5	6	4	3	2	50	
	1	1	1	7	6	5	8	7	7	43	
	5	5	5	6	6	6	7	6	6	52	
EFI 4-Stroke Stoich + EGR + Turbo	5	5	5	9	7	7	5	5	5	53	
	5	5	5	9	7	6	7	5	5	54	
	10	10	10	7	6	5	6	5	5	64	
	10	10	10	9	7	7	5	4	4	66	
EFI 4-Stroke Stoich + 3-way Catalyst + Turbo	10	10	10	9	7	7	6	4	4	67	
	5	5	5	7	5	6	8	7	6	54	
	8	8	8	7	5	5	4	3	1	49	
	5	5	5	9	7	7	6	4	4	52	
DI 4-Stroke Lean + Supercharger	5	5	5	9	7	6	7	5	4	53	
	1	1	1	8	6	5	8	7	6	43	
	5	5	5	7	6	6	7	6	5	52	
	5	5	5	9	7	8	5	4	4	52	
DI 4-Stroke Stoich + EGR + Turbo	5	5	5	9	7	7	6	5	4	55	
	10	10	10	8	6	5	6	5	4	64	
	10	10	10	9	7	7	4	4	3	64	
	10	10	10	9	7	7	6	4	3	66	

It should be noted that the TOTALS from the scoring results in Table 4.1 do not guarantee the ability of each technology to meet a specific emissions goal. To determine the emissions ability, each technology should be assessed according to the emission score alone. If emissions reduction capability is independently assessed, the following ordering of technologies is achieved:

Emissions-Reduction Potential

- 1.) All 3-way catalyst options are very highly ranked
- 2.) LNT catalyst options are all highly ranked
- 3.) Lean-Burn and EGR rank nearly equal, but lower than catalysts

The durability of any catalyst application in the production marine industry is still questionable. This statement is especially true for outboard engines and personal watercraft. However, the emissions reduction potential of the catalyst easily balances the durability issue in the overall scoring of technologies. Ultimately, it is assumed that the engineering hurdles facing the industry, in regard to catalyst implementation, will be surmountable. This statement does not include 3-way catalyst application to 2-stroke engines, where crankcase oil delivery to the catalyst may be insurmountable without significant changes to the 2-stroke engine system.

Figure 4.3 shows projections for potential emissions reduction plans for the future marine industry. Also shown are technology groups that may be utilized to meet specific emissions goals. It should be noted that for an emissions goal of 5 g/Kwh $\text{NO}_x + \text{HC}$, it is predicted that non-catalyst solutions will be successful. However, subsequent emissions reductions will almost surely require catalyst application.

As shown previously in Table 4.1, application of a catalyst alone may provide a means to meet future emissions regulations. However, to maintain peak-power, emissions targets, and durability (especially catalyst) it may be necessary to utilize other technologies to enable catalyst operation at full load. For example, today's automobiles do not utilize the 3-way catalyst at high load. The light-duty U.S. emissions test (U.S. FTP 75) does not include any significant high load operating points. So, during high load operation, the engine is run rich ($\phi = \sim 1.20$) to provide knock tolerance and to reduce exhaust gas temperature so that catalyst life is insured. For the marine industry, high load is a common operating condition and is tested for emissions certification. Therefore, the catalyst would have to be active and safe at this condition. The catalyst will require stoichiometric or lean operation, depending upon catalyst type (3-way vs. LNT). Therefore, alternative techniques are necessary to control full-load exhaust gas temperature. Possibilities include high-load EGR or high load lean-burn. Both strategies will require engine boosting if power density is to be maintained. Hence, it is expected that longer-term marine engine applications will combine use of boost technology with catalysts.

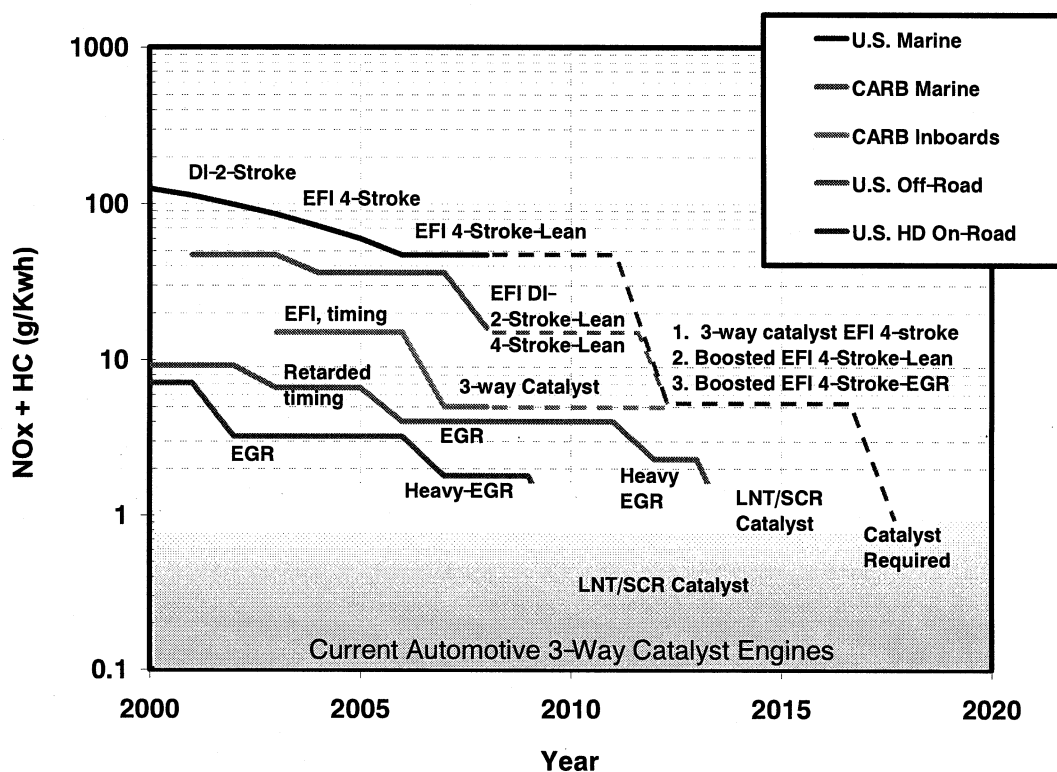


FIGURE 4.3. Emissions Technology Application Projection for the Marine Pleasure-craft Industry

The potential for multiple technologies to meet a ~ 5 g/Kwh NOx +HC goal is shown in Figure 4.3. Three solutions are mentioned:

1. EFI 4-Stroke 3-way Catalyst
2. Boosted EFI 4-Stroke Lean
3. Boosted EFI 4-Stroke EGR

Each of these options presents technical challenges. 3-way catalyst application brings uncertainty for salt-water and high-temperature catalyst durability. Catalyst manufacturers have indicated that modern catalyst substrates and coatings can successfully undergo thermal shock due to liquid water intrusion to the catalyst. However, concern is still high for the corrosive and chemical effects of salt water vapor on the catalyst. To reduce water intrusion possibilities, many applications (outboard and personal water craft) will have to mount the catalyst very close to the engine exhaust ports, thus exposing the catalyst to high temperatures during high load operation. Therefore, catalyst durability is reduced unless solutions to the temperature issues are found. The boosted applications may be able to provide reduced exhaust gas temperatures (through lean-burn or EGR) while also providing improved peak-power and power density. However, the added cost and complexity of boosting must be considered. Turbocharging offers an efficient method of extracting wasted exhaust energy and using

it to provide boost to the engine. However, because the turbocharger utilizes exhaust energy, it is always in direct communication with the exhaust gases and will operate at elevated temperatures and is subject to water exposure from the exhaust. Of the two boosting options, supercharging may present the most viable solution, as it does not come in contact with the exhaust system and is relatively safe from water-intrusion effects. Additionally, a supercharger operates at lower temperatures than the turbine-side of a turbocharger. Hence, under-deck or under-cowling temperatures are more easily controlled. Finally, supercharger efficiencies are now regularly above 60% across a large range of flow rates. For superchargers with zero internal compression, a bypass may be utilized to improve fuel efficiency for many conditions where full boost capacity is not required.

4.4 Closure

This report was the result of a study of marine emissions regulations and technologies that may be utilized to meet future marine engine emissions goals. The subject engines include outboard engines, personal watercraft (PWC) engines and stern drive/inboard engines. This document reports the findings of the study, including prospectives on various technologies and their applicability to future marine engines.

The result of the emissions review task indicates that marine pleasure-craft emissions levels could be reduced to levels near 5 g/Kwh within the next 4-8 years. This emissions level would be expected to be implemented for pleasure-craft in the outboard, inboard, and sterndrive markets. Following previous trends in the industry, smaller, lower power output engines, including some personal watercraft, are expected to face emissions levels slightly less severe than the higher power output engines.

The technologies identified that have the highest chance of success for meeting future regulations include 4-stroke, EGR, lean-burn and boost. Catalyst technology is a strong possibility for the future, but may not be required to meet a 5 g/Kwh NO_x + HC target.

APENDIX A - LIST OF REFERENCES

1. Purpose of Study

U.S. and Europe have been promoting Tier 2 emission control regulations for recreational marine engines. Japan Boating Industry Association is also considering tightening its current emission control initiative for recreational marine engines that are manufactured for Japanese market. In the future, emissions from recreational boats as well as automobile and other sources are also expected to be controlled more stringent in the US.

The marine engine manufacturers are urged to catch up the movement of environmental regulations. Japan Boating Industry Association (JBIA) and Japanese Marine Equipment Association (JMEA) are seeking to research new emission reduction technologies applicable to marine engines towards year 2020 and would like to provide R&D guidance for the Japanese marine engine industry.

The subject of this study will include spark ignition type and compression ignition type marine engines for pleasure crafts less than 24 meters.

SwRI, the contractor for this program, is expected to provide a Powerpoint presentation and report reviewing technologies that may be of importance to the marine industry of the future. The content of the report and presentation will be based upon the experience and opinion of SwRI, supported, where applicable, by information from the open literature.

2. Area of Concern

How will environmental regulations proceed in the future?

How will spark ignition recreational marine engines with emission reduction technologies advance by the year 2020?

Subject engines: outboard engines, PWC engines and stern drive /inboard engines

Environmental factors and restriction levels: emissions, PM, CO₂ and fuel efficiency

The following technologies are already researched in the automobile industry and also small engine industries.

— for spark ignition type marine engines —

Catalyst

Direct injection 2 stroke

4 stroke DI lean burn

Closed loop control.

— for compression ignition type marine engines —

Common Rail System

EGR

HCCI

Diesel Particulate Filter

Catalytic Systems such as Urea SCR (Selective catalytic reduction)

LNT

DPNR

Will these technologies be applicable to recreational marine engine?

Future trend of fuels for pleasure craft are also concerning area.

Alternative fuel, E10/E85.

Infrastructure for high quality diesel fuel in marine market. (Especially, sulfur will be harmful for some catalytic technologies)

As analyzing the feasibility of technologies, marine engines' cost and weight, availability of components, and ability of factories are also important factors to be considered. Additionally, following special technical conditions for marine use have to be taken into consideration.

Use in salt water (intake in salty atmosphere, Salty mist backflow by the exhaust pulsation, salt water resistance of components, and etc.).

Wide temperature changes in cylinder and exhaust pipe by direct cooling

Very few transient modes during actual operation

High load and full throttle continuous for many hours

Compliance with the USCG safety requirements such as fire protection

If some technologies are applied to recreational marine engines, how much can we expect to reduce

emissions, PM and CO₂ and improve fuel efficiency?

When can we expect to mass-production marine engines with the environmental load reduction technologies?

3. Schedule

Order: November, 2006

Interim report using Power Point presentation: Mid December, 2006.

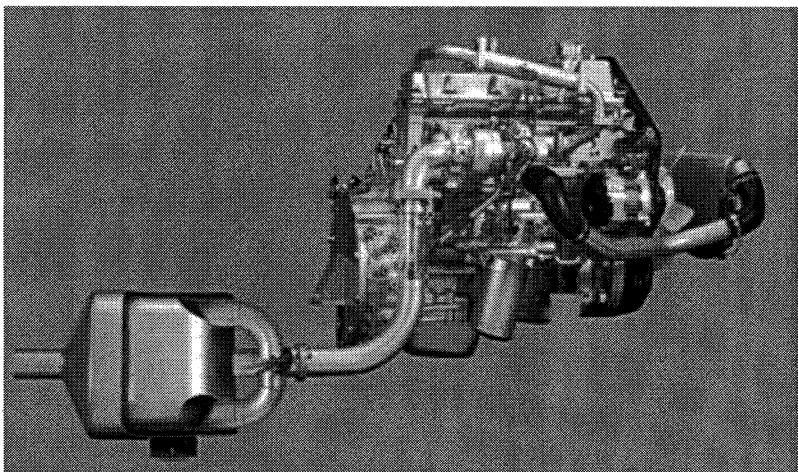
Final report including executive summary, entire text and data and completed Power Point material: End of January, 2007

Toyota's DPNR will lead to clean diesels



June 2002

by Raymond Bernard



The new diesel purification system currently under field tests with selected Toyota Avensis customers in a number of European countries is aimed at overcoming what the company refers to as the 'final obstacle' to clean diesels.

The Diesel Particulate-NOx Reduction system (DPNR) reduces particulates and NOx simultaneously, brings emissions to well below Euro Step IV levels, and is servicing-free.

The launch of DPNR is yet another chapter in Toyota's long history of developing technology for cleaner diesel engines by using catalytic converters and improved combustion technologies, such as direct fuel injection, electronically controlled exhaust gas recirculation (EGR) and, most recently, high pressure common rail fuel injection.

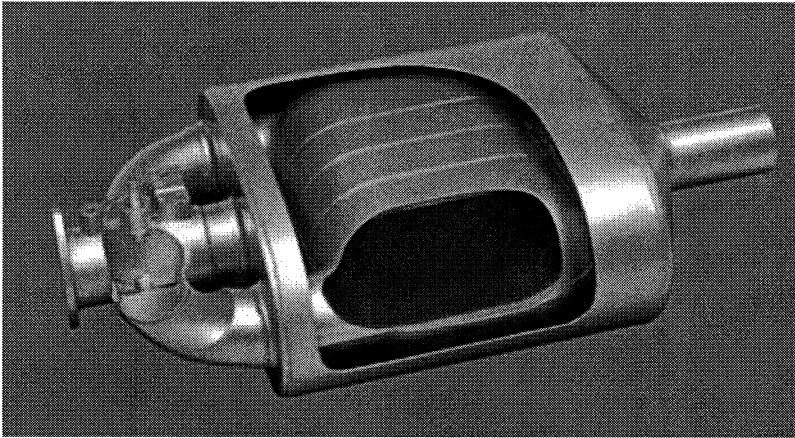
The widespread commercial introduction of DPNR, following successful field trials, is likely from next year, and would eliminate one of the few remaining possible objections to diesel as an environmentally clean fuel.

A fleet of 60 Toyota Avensis 2-litre D-4D models were offered to selected customers in Germany, UK, Austria, Italy, Norway, Finland and Belgium. These customers are involved in a wide range of commercial activity.

The world's first common rail diesel system, developed by Toyota subsidiary company Denso, was introduced for truck application in 1995. In 1999, Toyota and Denso introduced the system to passenger cars and, such is the pressure for improved environmental control, the majority of diesel engines are forecast to use common rail by 2004.

Now a second generation common rail system, capable of rail pressures of 180 MPa, is complementing the DPNR technology. A high response, large amount flow, high resolution EGR system has been added to create low temperature combustion, itself a factor in greatly reducing the base emission levels from the engine.

The DPNR catalytic converter is mounted close to the exhaust manifold and a simple oxidation catalytic converter is further downstream in the exhaust system.



The DPNR converter features a newly developed, highly porous ceramic filter coated with a catalyst exclusively developed by Toyota for its NOx storage reduction catalytic converter, initially designed for use with Toyota's lean-burn (high-oxygen) gasoline engines.

In the DPNR purification process, during conventional lean-burn combustion, particulate matter is first oxidised using active oxygen which has been created when NOx is temporarily stored inside the catalytic converter.

Then, when the engine momentarily switches to low-oxygen stoichiometric (rich) combustion – through a 'rich spike' exhaust port injection - the stored NOx is reduced producing more active oxygen. This additional oxygen is used to further oxidise particulate matter inside the catalytic converter.

Unlike other particulate filters, it is servicing-free, meaning that during the entire vehicle's life is not scheduled a periodic replacement of any of DPNR's components and it doesn't require the use of any fuel additive.

For maximum effect and to avoid catalyst deterioration, DPNR requires the use of diesel fuel with less than 10ppm of sulphur, which is currently being introduced across many countries in Europe.

©2002irishcar.com



この報告書は競艇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。

米国における船用エンジンの排ガス規制動向に関する調査

2007 年（平成 19 年）3 月発行

発行 社団法人 日本舶用工業会 業務部

〒105-0001 東京都港区虎ノ門 1-15-16 海洋船舶ビル

TEL 03-3502-2041 FAX 03-3591-2206

URL : <http://www.jsmea.or.jp>

E-mail : info@jsmea.or.jp

本書の無断転載、複写、複製を禁じます。

ISBN978-4-9903018-7-3