

【特集】

船舶動力システムにおける環境問題と海技研の研究

国際海事機関による排ガス規制(NO_x , SO_x , PM)とGHG規制(EEDI規制)に対応する動力システムの環境及び省エネルギー対策として海上技術安全研究所で取り組んでいる、 NO_x 80%減のためのSCR触媒技術、低硫黄燃料の燃焼改善と船上脱硫技術、排熱回収とハイブリッド化による省エネルギー技術等について概要を報告します。
(動力システム系・海洋環境評価系)

1. はじめに

多くの船舶は、石油を原料とする燃料を用いてディーゼルエンジンによりプロペラを駆動して推進力を得ています。また、船内で必要とする電力を確保するために、ディーゼルエンジンで駆動される発電機を搭載しています。このような動力システムはいま、さまざまな環境問題に直面しています。船舶の活動域は海上であり、人の生活域から離れているため、環境への影響は限定的です。しかし、大気環境や海洋環境の保護が進み、その影響を地球規模で考える必要が出てくると、船舶からの環境への排出物への関心が高まってきました。また、温暖化効果があるとされる二酸化炭素の排出は、排出場所に関わりがないことから、海上であっても同様の規制が必要になります。

一方、人々の環境問題への意識の向上とともに、産業のあり方も変化してきます。環境対策を単なるコストと考えるのではなく、環境適合性の高さをアピールすることが営業政策上有利であるとの考え方も出てきています。1970年代以降、さまざまな環境対策技術の研究開発が進みましたが、その多くはコスト上の問題で実用化されることなく眠っていました。しかし、環境規制の強化と企業の環境への積極的取り組みが進むなかで、こうした技術が新たな形で実現しつつあります。本稿では、船舶の動力システムをめぐる環境問題の概要と海上技術安全研究所の取り組みについて紹介いたします。

2. 船舶の動力システムと環境問題

船舶の動力システムの主役であるディーゼルエンジンは、シリンダー内に吸い込んだ空気を圧縮して得られる高温・高圧の場に燃料を噴霧し、着火・爆発させて動力を得ます。ボイラで発生させた蒸気でピストンを駆動する方式やタービンを回す方式と比べると、同じ熱量から得られる動力が大きい、すなわち熱効率が高いのが特徴です。大型船舶に搭載される2ストロークエンジンでは50%程度の熱効率が得られ、単独の熱機関としては最高の値といえます。これは、燃焼室の中で高温・高圧の場が形成されるためです。しかし、その結果として空気中の窒素の酸化(燃焼)により窒素酸化物(NO_x)が生成しやすくなります。熱効率が高いということは、二酸化炭素の発生が少ないことを意味しますが、熱効率が高いほど NO_x の生成量も多くなるので、二酸化炭素と NO_x は相反関係(トレードオフ)にあるといえます。

船舶のディーゼルエンジンのもう一つの特徴は、多様な燃料に対応できることにあります。特に、石油精製の残渣を主成分とするC重油(残渣油)を燃料とすることができるので、低コストで燃料を調達できるし、また、原油の有効利用の観点からも意義が大きいことです。しかし、残渣ですから原油に含まれるさまざまな不純物が残り、それが燃焼ガスとともに大気に排出されます。特に硫黄分は多いもので燃料中に4~5%含まれるといわれます。ただ、現在は規制により最大で3.5%となっています。このほか、バナジウムなどの重金属も微量ですが

含まれることがあります。これらは環境に排出されると有害であるだけでなく、熱効率の向上や NOx 低減機器にも悪影響を及ぼします。

ディーゼル車の公害問題で広く知られるようになった粒子状物質 (PM) は、船舶からも排出されます。燃焼状態がよいときには黒煙の排出は多くありませんが、PM には硫黄分を起源とする粒子や潤滑油に起因する粒子もあり、その排出も環境問題の一つになっています。

3. 動力システムへの環境規制

外航船舶への規制は単独の国ごとの規制では実効性がないため、国際海事機関 (IMO) で条約として定められます。動力システムに関する大気汚染等の問題に関して図1に示すような規制が海洋汚染防止条約 (MARPOL) の第6議定書 (Annex VI) に定められました。

規制はいずれも段階的に強化されることになっています。NOx ではエンジン出力 (kWh) 当りの NOx 排出量 (g) で規制され、全海域において 2000 年の規制値に対して 2011 年以降の新造船で 20% 減とすること、また、特に指定された放出規制海域 (ECA) では 2016 年以降の新造船で 80% 減という規制値が設定されました。SOx・PM 規制としては燃料中の硫黄分規制として設定され、一般海域では 2012 年から 3.5%、2020 年から 0.5% に規制されます。ECA 海域では 2010 年から 1.0%、2015 年から 0.1% となります。一般海域の 0.5% 規制の実施時期は燃料供給事情等のレビューを行い、場合によっては 2025 年に延期することもありうるようになっていきます。

一方、温暖化ガス (GHG) 排出規制では、船の種類と大きさごとに現存船の燃料消費率の平均値から燃費の基準値を定め、段階的に新船の燃費の上限値を下げていき、適用除外はあるものの、2025 年には 30% 減を義務付けるという規制になります。燃費はエネルギー効率設計指標 (EEDI) がトン・マイル (載荷重量 × 船速) 当たりの CO₂ 排出量として定義されます。動力システム側から EEDI を低減させる方法として燃費向上と燃料の転換が考えられます。すなわち、従来の石油燃料に代わって、炭素・水素比が低い天然ガスを用いることや再生可能でいわゆるカーボンニュートラルとみなされるバイオ燃料に転換することも EEDI 低減につながります。

以下では、このような背景のなか、海上技術安全研究所で実施している大気汚染防止 (NOx 低減と低硫黄燃料対応) と省エネルギー (燃料消費量の低減) に関する研究についてご紹介します。

4. NOxの低減

NOx生成は、エンジン燃焼室の中で形成される高温場で起きる空気中の窒素の酸化反応 (燃焼) です。したがって、NOxの発生を抑えるためには燃焼温度を下げる必要があります。このために燃料の噴射タイミングを遅らせる、排ガスの一部をもどして吸気中の酸素濃度を下げる、燃料に水を添加する等の手法があります。しかし、これではNOx 20%減は達成できますが、80%減の達成はかなり困難です。そこで、排気にアンモニアを添加して触媒上でNOxを還元する選択触媒還元法 (SCR) が有力な選択肢になります。



図1 MARPOL条約 Annex VI に規定された排ガスと GHG 排出規制

SCR は陸上の発電所や自動車で既に実用化されていますから、触媒等の基本的な要素は確立しています。しかし、船舶に適用する場合には燃料に含まれる硫黄分が触媒に対して有害である問題の解決と限られた機関室スペースに設置するための小型化が必要です。硫黄分は ECA の 0.1% であっても ppm オーダーの自動車燃料と比べると高い含有量です。燃料に含まれる硫黄分から生成される亜硫酸ガス (SO₂) がアンモニアと反応すると硫酸水素アンモニウムを生成し、触媒表面に付着して活性を阻害します。この物質は温度が高い (350℃ 以上) 状態では気体になるので、高温ガスを通すことで触媒を回復させることができます。

海上技術安全研究所では、中速エンジン (回転数 1000rpm) への SCR の適用に関する研究を実施しました。脱硝反応に関与するのはアンモニアですが、アンモニアは可燃性で有毒のため、船上では尿素水で供給します。排気管に噴霧された尿素水が排ガス中でアンモニアに転換し、ハニカム構造のチタニア-バナジウム系のセラミックスの触媒上で NO_x を窒素ガスに還元します。

小型化のためには尿素水の噴霧が一つのキーです。すなわち、できるだけ短い距離で排ガスと混合させ、かつアンモニア (あるいは中間生成物のイソシアン酸) への転換を完了させなければなりません。そのため、噴霧ノズルや配管形状に工夫が必要です。現在は、こうした問題を克服して、図 2 の写真のようにプロトタイプを実船に搭載して、長時間の試験運転を行っています。既にエンジンの運転時間 (排ガス流通時間) で 11,000 時間を超え、そのうち、SCR 運転で 2,500 時間以上という実績があります。触媒の汚れは観察されますが、順調に運転されています。



図 2 実船搭載された SCR 装置

5. SO_x, PMの低減

現在の船舶の燃料は、石油精製の残渣を主成分とする C 重油 (残渣油) です。燃料中の硫黄分は燃焼して硫酸化物 (SO_x) を生成するほか、粒子状物質 (PM) となる硫酸塩を生成します。このため、MARPOL 条約 Annex VI では、燃料の硫黄分を一般海域で 0.5%、排出規制海域 (ECA) で 0.1% に規制することになっています。

硫黄分 0.1% の燃料は、現在の低硫黄 A 重油に相当します。ECA 海域だけであれば使用量も限定的であり、残渣油から 0.1% までの脱硫が困難であることから燃料転換が主流になると考えられています。一方、対象が全海域となる硫黄分 0.5% の燃料は通常の A 重油に相当しますが、石油業界では、使用量が膨大であるため、残渣油から軽油留分 (A 重油相当) への転換は困難であるとしています。また、残渣成分の精製や分解を進めると、芳香族を多量に含む成分が得られ、これらの蒸留温度からいえば軽油留分であるが着火性・燃焼性が悪いライトサイクル油 (LCO) 等は、用途が限定されます。

船用のディーゼルエンジンでもこれらの成分が多量に

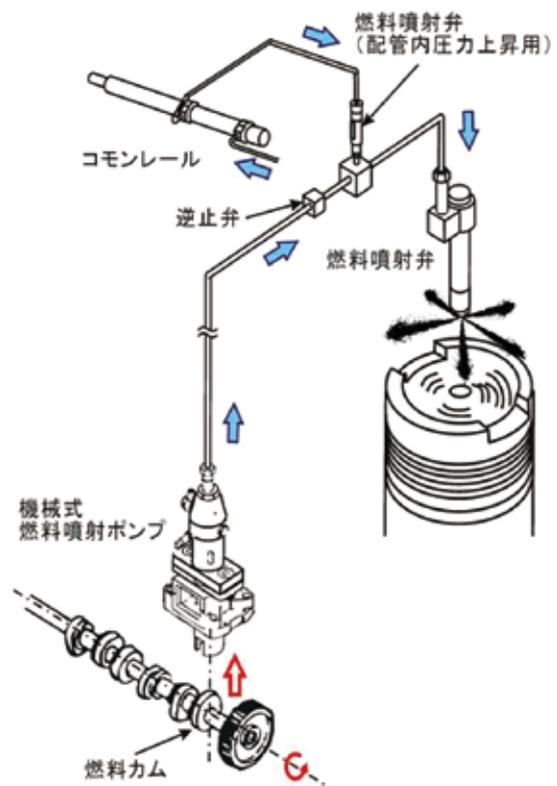


図 3 ハイブリッド・インジェクション・システム (HIS) : 既設の燃料供給系に、小型電子制御噴射系を付加することで、パイロット噴射等の制御を可能とする。

れることにより、着火性の低下によるトラブルを生じます。海上技術安全研究所では、燃焼トラブルと燃料組成の関係を明らかにするとともに、難燃性燃料でもトラブルを起こすことなく、利用するための技術を開発しています。図3は海上技術安全研究所が開発してハイブリッド・インジェクション・システムとよぶ補助燃料噴射系です。通常のカム式の燃料噴射系に小型（自動車用の量産品）コモンレールを付加し、パイロット噴射等の補助噴射を電子制御で行うものです。これにより、着火性の低い燃料でもトラブルなく燃焼させられることを示しています。

このような0.5%規制に対して船上脱硫装置による対応は条約上の「同等手段」に相当すると考えられ、従来の高硫黄の残渣油を使用できることから、重要なオプションの一つといえます。残渣油から低硫黄の留出油への転換は、現在のC重油とA重油の価格差（30～50%高）程度の差が見込まれます。石油会社の見積もりでもコーカー設備や直接脱硫装置等によるコスト上昇はほぼこの程度になるとしています。船上脱硫では装置の初期投資が必要ですが、燃料の価格差を前提にすると数年で償却できると予測されています。

精油所で残渣油を脱硫するためには、高温高压の炉に大量の水素を投入して硫黄を水素に置換する操作が行われますが、これには大きなエネルギーを必要とする

プロセスです。燃焼させて生成する硫黄酸化物を除去する方がトータルの消費エネルギーは低くなります（ある石油会社の試算では、C重油燃焼に対してA重油<硫黄分0.5%未満>への転換で約18%、海水スクラバによる脱硫で4%程度のCO₂排出増加となるとされます）。さらに、脱硫装置では通常粒子状物質も捕獲・除去されるため、PM排出削減にも効果があると考えられます。

船上の脱硫装置には湿式と乾式があります。湿式はタンカーのイナートガスシステムで実績がある海水スクラバとよばれるシステムで、排ガスと海水を接触させることでガスを冷却し、硫酸分を水に溶解させて除去します。一方、乾式脱硫はカルシウム系の脱硫剤と反応させてSO_xを除去するもので、温度の高い排ガスを処理するのが特徴です。このため、SCRや排熱回収装置等の後処理装置の上流側に設置できるため、クリーンな排ガスがこれらの機器に供給されます。陸上の発電所やゴミ焼却場等で使われる技術ですが、船舶用に小型化することが課題になります。生成する硫酸カルシウム（石膏）は有価物で売却が可能とされます。

海上技術安全研究所では、排ガスを高温のまま脱硫することのできる乾式脱硫にメリットが大きいと考えてその研究に着手しています。小型化のために反応炉に流動層式を採用し、また、反応性の高い脱硫剤の開発を進めています。図4は、開発した脱硫剤では径の大きな空孔容積が増したため反応性が向上したことを示しています。

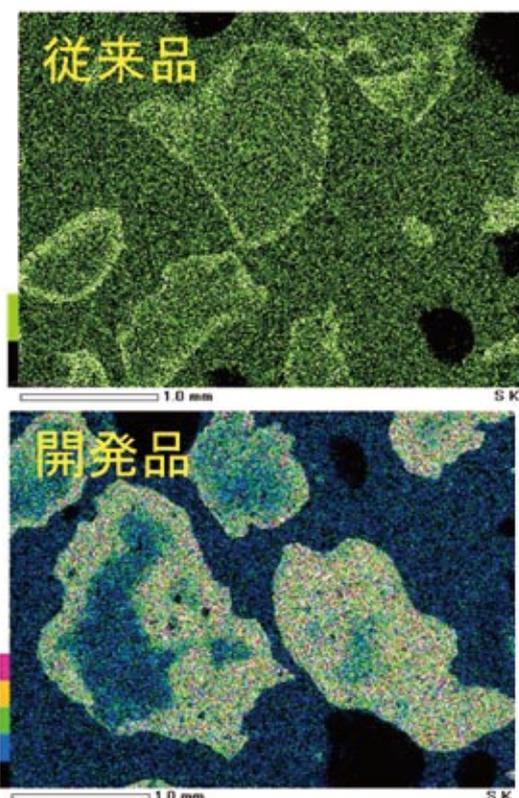


図4 脱硫剤の開発。従来品と比較して反応性が向上。

6. 省エネルギー（GHG排出低減）

温暖化ガス（GHG）削減には省エネルギーが有効な手段ですが、省エネルギーは低コスト化にも結び付くことから、本来は技術開発意欲の高い課題です。当面、2025年までに30%減を達成する必要があるため、このために造船所や海運会社はさまざまな省エネルギー船舶のコンセプトを発表しています。そのなかで動力システムでの省エネルギーは数%（最大で10%）が見込まれています。既に十分な効率を達成しているディーゼルエンジン本体には熱効率向上の余地がなく、動力システムで数%の省エネは妥当な数字です。海上技術安全研究所では、さまざまな余剰エネルギーを使って動力を補助する技術についての研究開発を進めています。

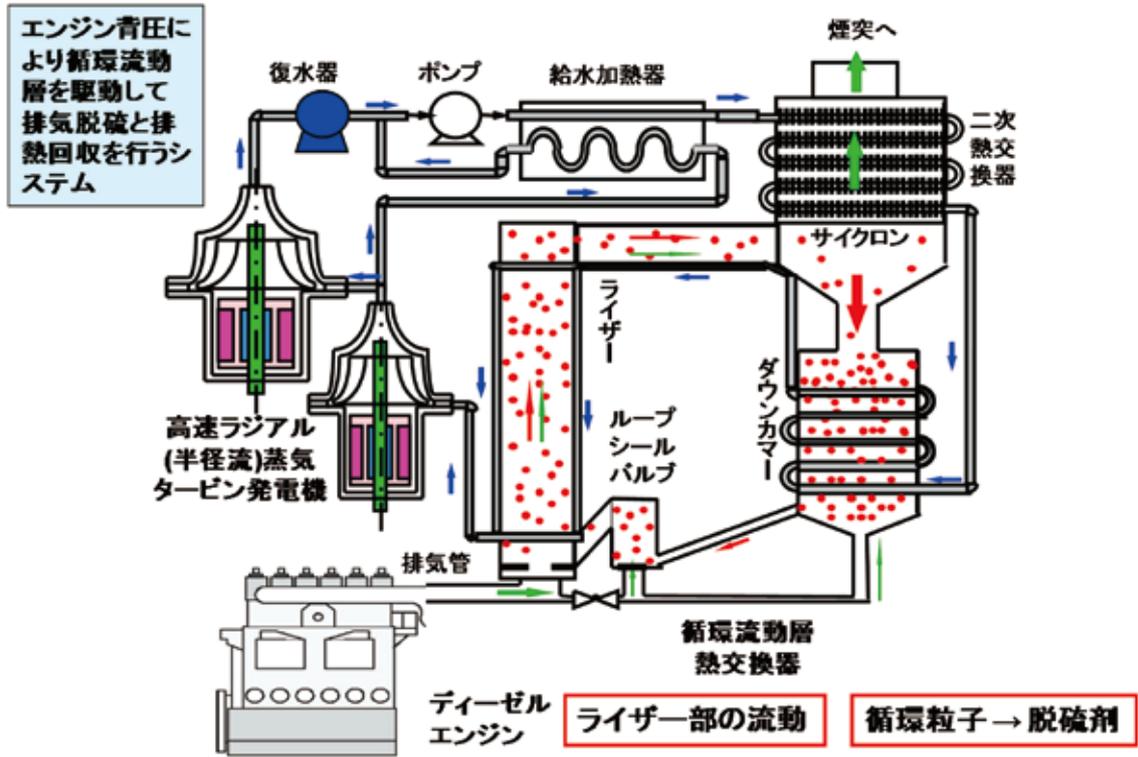


図5 流動床を用いた高効率排熱回収システムの概念図

6.1 排熱回収

未利用の余剰エネルギーでもっとも量的に大きいのは、排ガスや冷却水が持つ排熱です。排熱回収では、これまでスターリングエンジンを用いたシステムや熱交換器を流動層化して伝熱効率の向上を図るシステムの研究を実施してきました。図5は、海上技術安全研究所が提案したもので、流動床式の熱交換器とラジアルタービンを用いることで高効率の動力回収をはかり、ケーススタディで主機の8.5%の動力が得られると試算されたシ

ステムです。

スターリングエンジンについては、基礎的な研究を経て、2011年に実船（749GTの電気推進船）に搭載され、2012年8月現在で1,500時間以上、大きなトラブルなく運転されています。図6は搭載されたスターリングエンジンの外観です。また、近年、排ガス対策やGHG排出低減への対応の観点から注目されているLNG燃料船では、気化器の冷熱利用も検討しています。一般に熱機関は高温熱源と低温熱源の温度差が大きいほど効率が高くなりますから、低温源に通常の大気・海水ではなく



図6 実船搭載された排熱回収スターリングエンジン

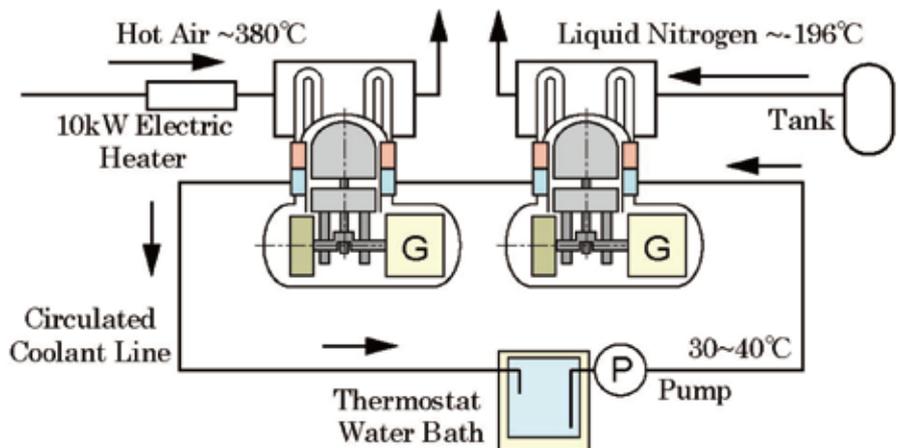


図7 LNG冷熱を利用した排熱回収スターリングエンジンシステム

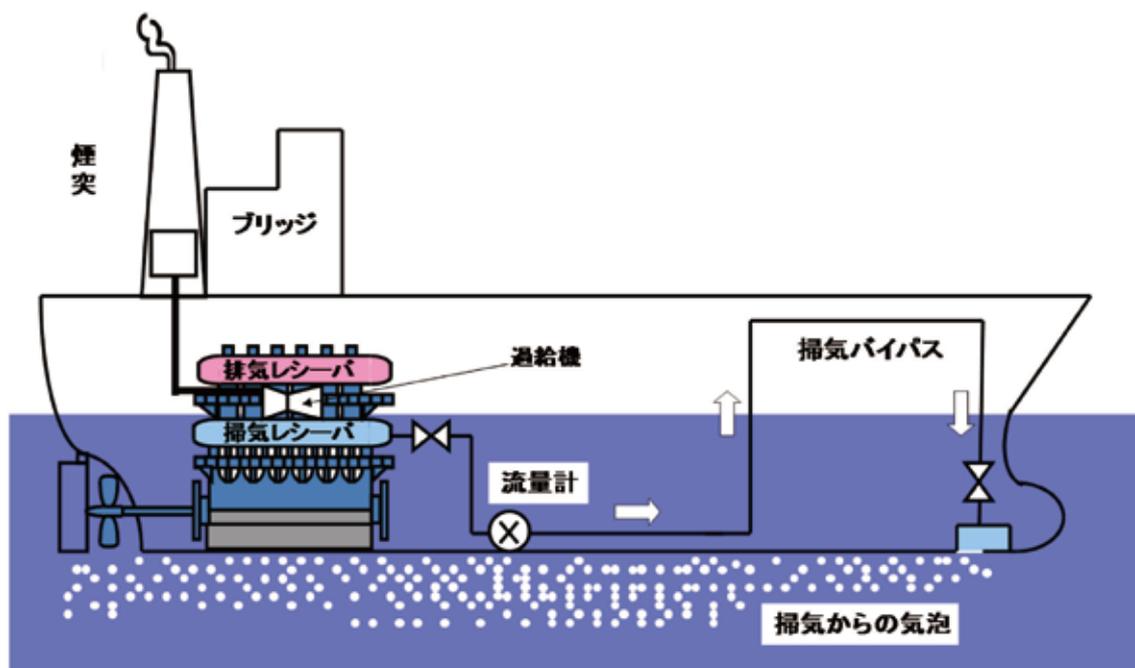


図8 主機の過給機から空気潤滑システムに空気を供給するシステム(掃気バイパスシステム)

-160℃のLNG 気化熱を用いれば、熱効率向上をはかることができます。図7はガスエンジンの排ガスを高温熱源とし、LNG 気化器を低温熱源とするシステムで、スターリングエンジンは高温用と低温用の2台を協調させて運転します。

排熱回収では、このほかに静的な(可動部のない)熱電気変換ができる熱電素子を用いたシステムやランキンサイクル(蒸気タービンサイクル)を用いた動力生成についても研究を進めています。また、エンジンの過給機の性能向上に伴い、掃気(エンジンに供給する高圧空気)

の余剰が生じることから、図8に示すように、これを空気潤滑の空気源に用いる技術を提案してきました。これにより、空気潤滑の問題の一つであったプロペラ動力の低減をはかることができますが、これも排熱利用の一つの形態です。

6.2 ハイブリッド化

船舶の動力システムの省エネルギーを実現する方法として、エンジンの排熱等の様々なエネルギー源を利用し、これらをうまく制御することで数%の省エネルギーを達成できると考えています。ハイブリッド自動車と異なり、制動時のエネルギー回収を期待することはできませんが、電気動力を主機の機械的な動力と組み合わせるハイブリッド化により、エネルギーの有効利用が可能となります。

実海域の航行で風や波の影響を受けて変動するプロペラの負荷のため、エンジンの最適効率の条件で使用できないことで生じる無駄があります。たとえば、図9は、波浪中の船舶のプロペラ軸トルクの時間変化を計測した結果ですが、このプロットでも数%から10%程度の変動が計測されています。エンジンの出力をもっとも効率の良い負荷に固定し、これらの変動分を蓄電デバイスで吸収・付加することで効率向上をはかります。

このようにハイブリッド化では余剰のエネルギーを蓄え、必要ときに主機を補助する蓄電デバイスの技術が重要です。このため、鉛蓄電池やリチウムイオン電池等の2次電池やキャパシタ(たとえば大容量化に適する

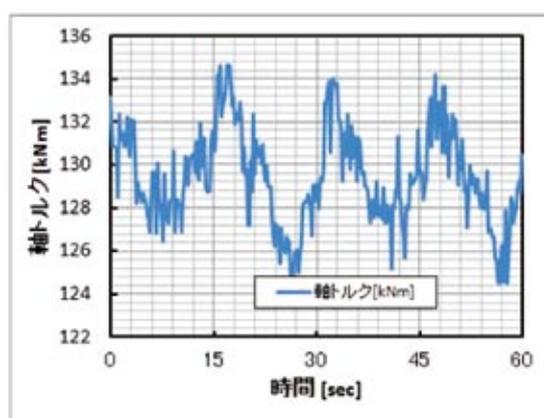


図9 波浪中航行における軸トルクの時間変動の計測例(上)と計測に用いた船舶(下)

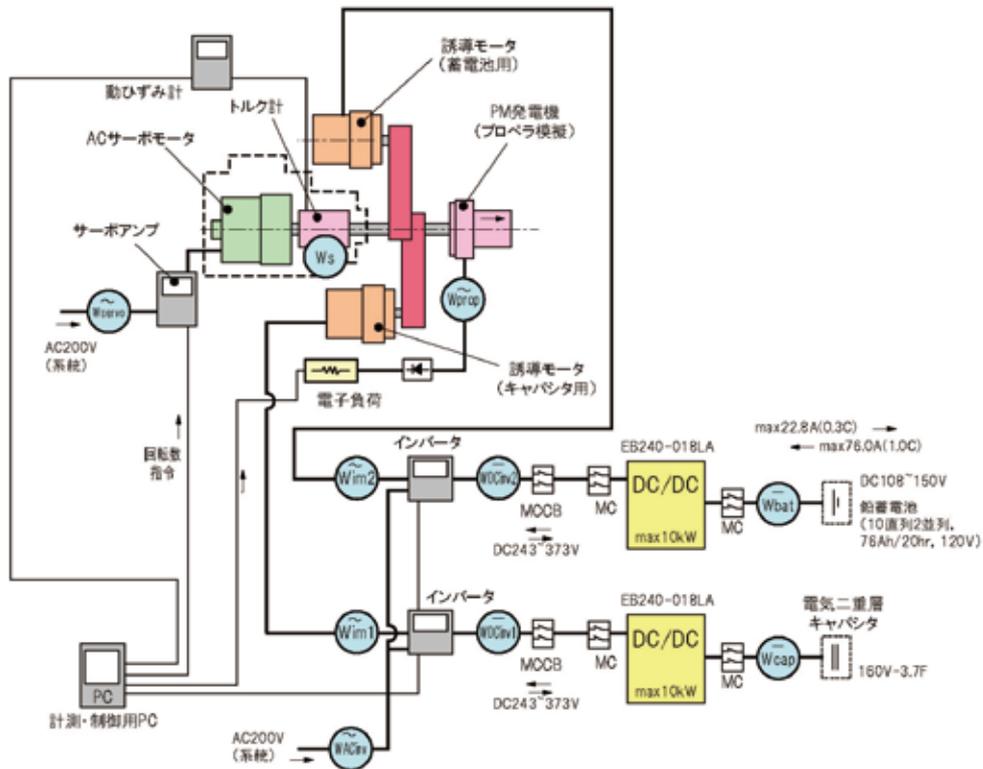


図10 負荷変動平滑化のための蓄電デバイス性能評価システムの構成

電気二重層キャパシタ) を用いて、充放電の基本特性や耐久性、安全性等、システムの研究開発を実施しています。図10にその試験システムの概念図を示します。

ハイブリッド化の一つのケーススタディとして小型高速船の省エネルギー化の検討を行いました。省エネルギーの方法として発電機エンジンではなく、熱効率の高い主機により発電することで0.8%、排熱回収で3.4%程度の省エネルギーが可能であるという試算をしています。

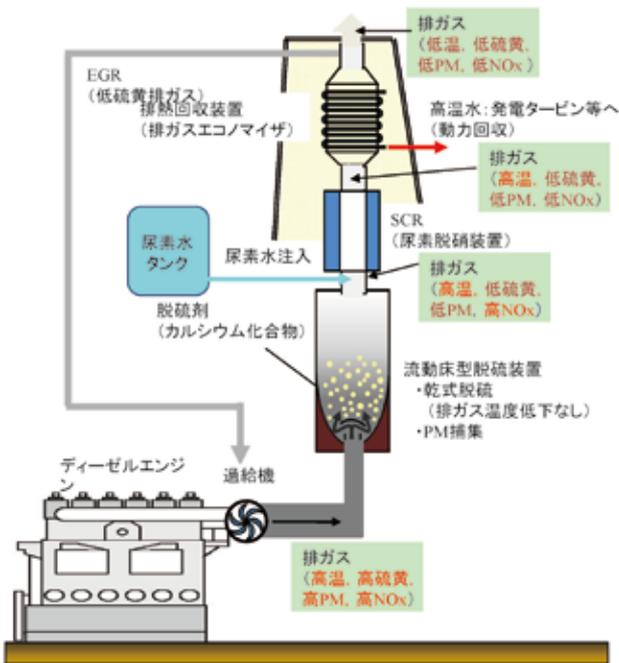


図11 流動床型乾式脱硫装置を組み込んだ排ガス後処理最適化の概念図

7. おわりに

これまで述べてきたように、大気汚染防止や省エネルギーといった動力システムが求められる環境対策を進めていくと、船舶の機関室にはさまざまな目的の機器が多数設置されることになります。これらは互いに協調して運転されなければならない、また全体としての省スペースも必要です。そこで海上技術安全研究所では図11のような排ガス処理システムを提案しています。

NOx低減のためのSCRも排熱回収のための熱交換器も硫黄分を含む排ガスの影響を受けます。そこで排ガスの最上流に脱硫装置を設置し、以降の後処理装置にクリーンな排ガスを供給するものです。この場合、SCRも熱交換器も高温排ガスを必要としますから、脱硫は乾式です。全海域用0.5%硫黄の燃料を使用しつつ、脱硫脱硝によりECA海域も航行することもC重油で一般海域を航行する(この場合、SCRは不要です)ことも可能です。

これは一例ですが、多様な環境対策に対応するためには広い視野をもって総合的な設計が必要になると考えられます。海上技術安全研究所では、引き続き動力システムの環境対応技術の発展のために努力したいと考えています。