

よみがえるスターリングエンジン

環境・エネルギー研究領域 大気環境保全研究グループ *平田 宏一

1. はじめに

スターリングエンジンは、高熱効率性、低公害性、使用熱源の多様性などの優れた特徴を持つ外燃機関である。このエンジンは、1816年にスコットランドの牧師ジェームス・スターリングによって発明されて以来、幾度かの発展と低迷を繰り返しながら高性能化・実用化への挑戦が試みられてきた。そして、エネルギー枯渇や環境汚染が深刻な社会問題となっている現在、スターリングエンジンへの期待が再び高まってきている。

本報では、スターリングエンジンの基本構造と特徴、さらに原理の発明から現在に至るまでの発展経緯について概説する。そして、当研究所で進めてきたスターリングエンジンに関連した研究を踏まえて、現在の関連技術を紹介する。さらに、平成17年度より開始しているスターリングエンジンを用いた内航船舶用排熱回収システムの開発研究の概要を紹介する。

2. スターリングエンジンの概要

ガソリンエンジンやディーゼルエンジンに代表される内燃機関は、燃料をシリンダ内で爆発させてその圧力変化を利用して運転している。それに対して、外燃機関であるスターリングエンジンは、作動ガスの移動に伴う温度変化と容積変化の関係を利用して運転している。以下、スターリングエンジンの基本構造、特徴および開発経緯について述べる。

2.1 スターリングエンジンの基本構造と特徴

図1にスターリングエンジンの基本構造を示す。同図に示すように、2ピストン形スターリングエンジンは、温度差を持つ2つのシリンダと約90°の位相差を持つ2つのピストン、ヒータ・再生器・クーラと呼ばれる熱交換器、さらに平滑な連続運動を可能とするためのフライホイールから構成されている。運転時には、2つのピストンの運動により、エンジン内の作動ガスが高温空間と低温空間の間を往復し、圧力変化を生じさせると同時に、膨脹・圧縮を繰り返すサイクルを構成する。図2に示すように、スターリングエンジンには様々な形式がある。それぞれの形式は、作動空間の構成がやや異なるが、作動ガスの移動により圧力変化を生じさせ、膨脹・圧縮を繰り返すという原理は全く同じである。

以上のように、作動ガスの移動

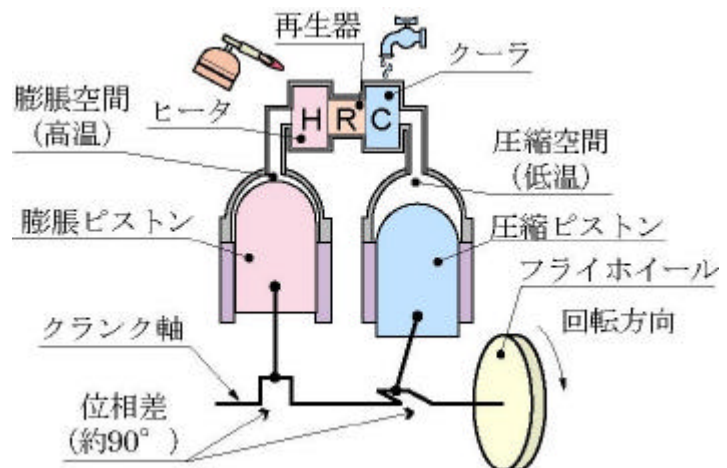


図1 スターリングエンジンの基本構造

により圧力変化を生じさせるスターリングエンジンは、内燃機関のような燃料の爆発がないため、非常に静粛な運転が可能である。また、原理的に、温度差があれば運転できるエンジンであるため、化石燃料ばかりでなく、多様な熱源を利用することができる。さらに、ヒータとクーラの間に再生器と呼ばれる蓄熱式熱交換器を用いることで、冷却行程で作動ガスから奪う熱を、加熱行程で再利用することができ、高い熱効率を得ることができるという特徴がある。

一方、実用的な出力・性能を得るためには、作動空間内に高压の作動ガスを封入し、運転する必要がある。また、伝熱性能の向上や熱交換器における圧力損失の低減の観点から、ヘリウムや水素等の分子量の小さい作動ガスが用いられることが多い。したがって、エンジン自体を圧力容器構造とするためエンジンが大型化すること、高性能なシール技術を必要とすることなどの技術的な問題がある。

図3は各種エンジンの出力レベルと熱効率の関係を模式的に表している。スターリングエンジンは、比較的低い出力レベルにおいて、高い熱効率を得られやすいという特徴がある。このような特性をうまく活かすことで、スターリングエンジンは様々な用途で活躍できるものと考えられる。

2.2 スターリングエンジンの発展

スターリングエンジンは、1816年に発明されて以来、発展と低迷を繰り返しながら開発が進められ、現在に至っている(図4)。対象とする用途や開発目的は、それぞれの時代背景によって異なっていたようである。

(1) 人力に変わる高出力動力源の開発

1816年に発明されたスターリングエンジンは、当時の蒸気機関とともに様々な機械を動かす主動力源として発展した。発明当時のスターリングエンジンは、既に再生器が利用さ

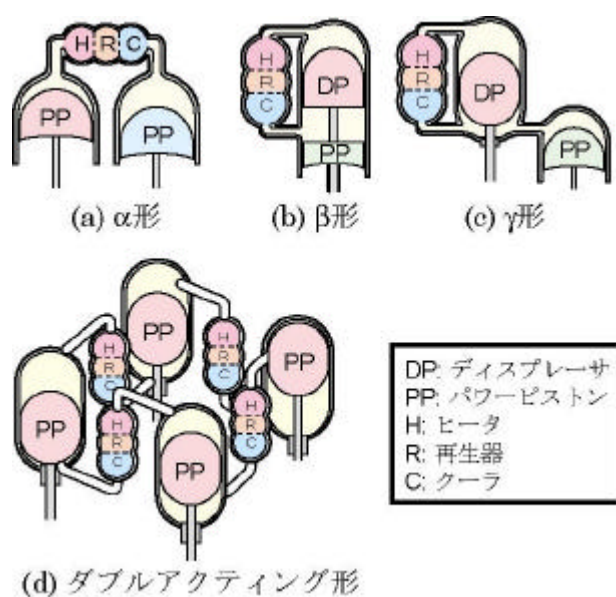


図2 スターリングエンジンの形式

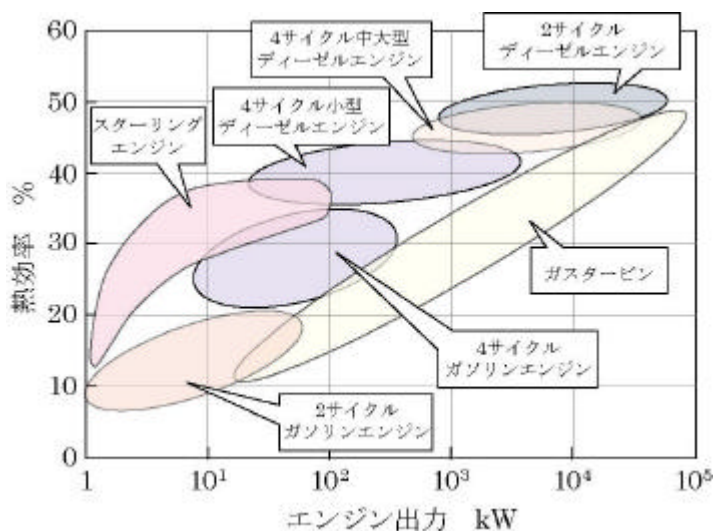


図3 各種エンジンの出力レベルと熱効率

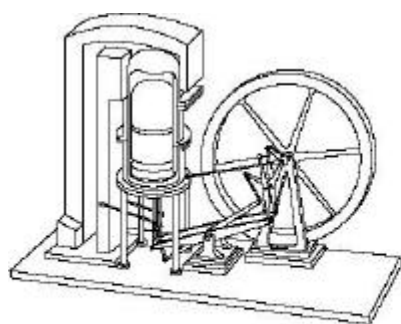
れており、熱効率を高める工夫が施されていた。さらに、人力に変わる動力源として、高出力化に着目して開発が進められたと考えられる。しかし、その後に発明されたディーゼルエンジンなどの内燃機関が高出力化に適していたため、スターリングエンジンや蒸気機関などの外燃機関は次第に衰退していった。

(2) 省エネルギー化のための高効率エンジンの開発

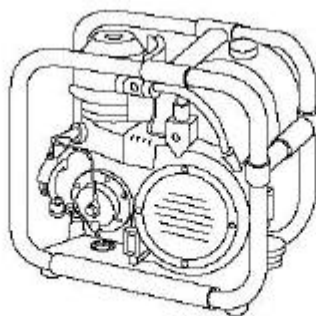
近代的なスターリングエンジンの発展は、オランダのフィリップス社による多くの研究開発から始められた。1973年の石油ショックをはじめとする省エネルギー化の時代背景の中で、スターリングエンジンは再び脚光を浴びるようになった。日本国内では、1982～1987年に実施された通商産業省のムーンライト計画において、多くの高性能スターリングエンジンが開発され、その高効率性が実証された¹⁾。出力3～30 kWで熱効率30%を上回る高い性能が得られたものの、高温・高圧条件下で使用される特殊ニッケル合金製ヒータの製作コストなどに課題が残され、民生レベルでの実用化・製品化には至らなかった。その後、1980年代後半からのバブル景気の時代には、エネルギーの価値が低下し、エンジン開発を進めてきた国内民間企業の多くはスターリングエンジンの開発から撤退、あるいは規模を縮小した。

(3) 環境調和型エンジンへの期待

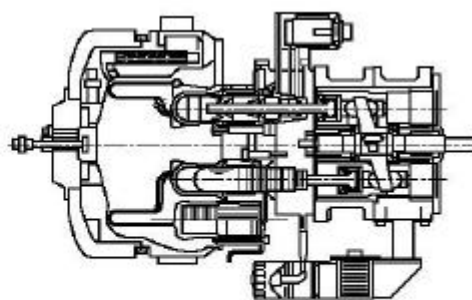
1990年代後半に入り、地球温暖化などの環境問題が社会的に大きく取り沙汰されるようになる。すなわち、地球温暖化の原因となる二酸化炭素やメタンガスの大気への放出を削減する必要が生じ、環境調和型動力源の需要が高まってきた。1980年代は化石燃料を利用する高効率エンジンの開発が主流であったのに対し、近年は燃料電池をはじめとする水素エネルギーの利用や再生可能と言われるバイオマスエネルギーなどの有効利用が注目されている。燃料の多様性という特徴を持つスターリングエンジンは、この時代背景を受けて、再び脚光を浴びている状況にある。



(a) 発明当時のエンジン (1816)



(b) 1940年頃のエンジン発電機



(c) ムーンライト計画で開発されたエンジン (1980年代)

図4 スターリングエンジンの発展

3. スターリングエンジンの技術

以上のように、スターリングエンジンは、それぞれの時代背景に合わせて、発展と低迷を繰り返しながら開発が進められてきた。一方、スターリングエンジンに関連する技術は、本エンジンに関連する多くの研究者・技術者がどのような時代にも技術の蓄積と向上を目指して研究・開発を進めてきたため、常に前進している。

当研究所においても，スターリングエンジンに関連する研究は1970 年頃から継続して進められている（当時は船舶技術研究所）。研究開始当初，一色らによって図5 に示すような実験用スターリングエンジンの開発やシール装置などの要素研究が行われ，多くの技術を蓄積するとともに，その後の高性能スターリングエンジンの開発に大きく貢献した²⁾。その後も性能解析やエンジン設計のためのシミュレーション開発，エンジンの小型化，出力制御に関する基礎的な研究などを進め，現在に至っている。以下，当研究所における関連研究を踏まえて，昨今のスターリングエンジンの技術について解説する。

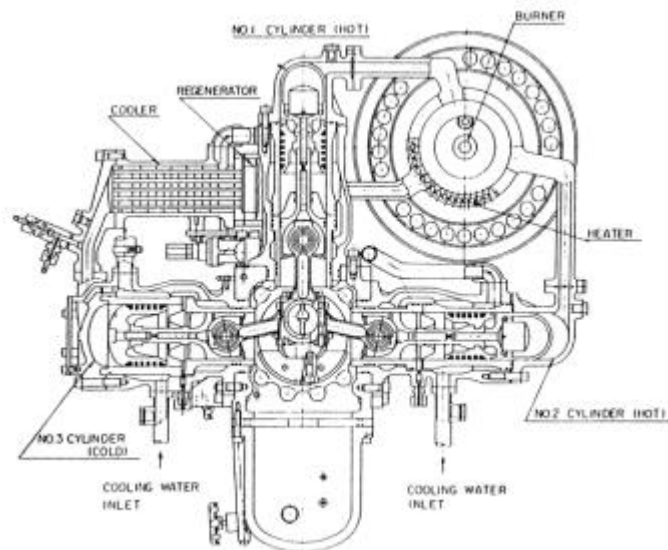


図5 逆T型スターリングエンジン(船舶技術研究所)

3.1 スターリングエンジンの出力制御技術

当研究所では，研究初期の頃からスターリングエンジンの出力制御技術に関する研究を進めてきた。その一つは，塚原らが研究を進めてきた動特性シミュレーションである³⁾。従来からスターリングエンジンのシミュレーションは作動ガスの熱的变化を扱うものが主流であったが，本動特性シミュレーションは運転条件の変動やエンジンへの負荷変動も考慮しており，実際のエンジンの運転状況を模擬できる解析モデルである。昨今の排熱利用エンジンの開発においても，入熱量の変動に応じたエンジン制御技術が必要不可欠であり，現在でも実験的基礎研究を進めている。

また，図6 に示す位相差可変式スターリングエンジンは，運転中にピストン位相差を変

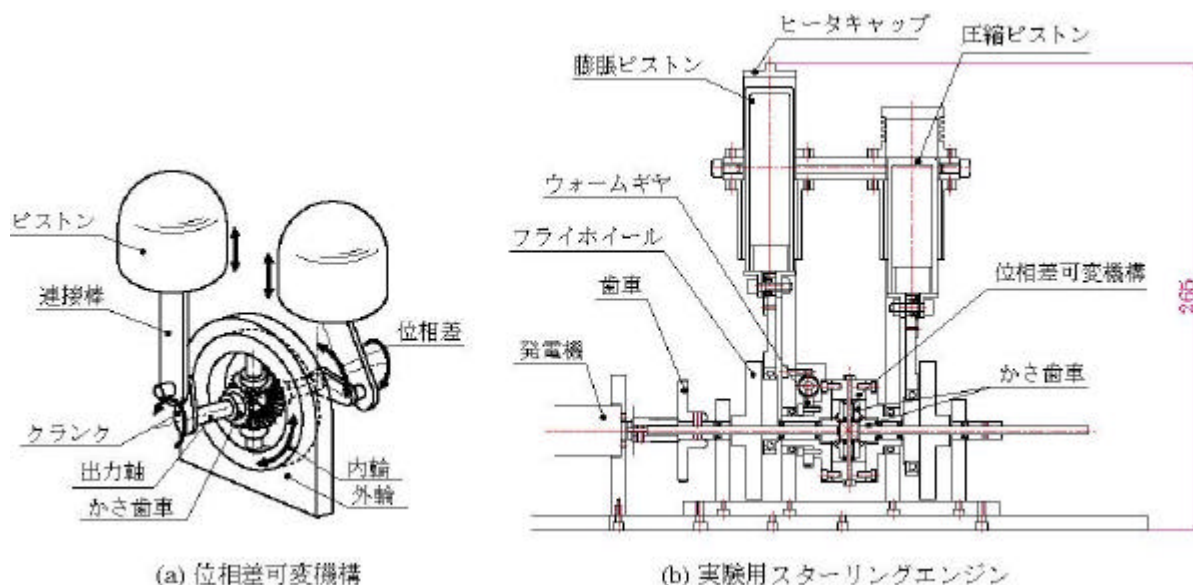


図6 位相差可変式スターリングエンジン

化させることができる機構が取り付けられており，入熱量の変動に応じてエンジンの最適制御を試みたものである。本研究所では，模型レベルの実験用エンジンを試作し，実験的研究を進め，その有効性を確認した⁴⁾。

3.2 ハーメティック式スターリングエンジン

スターリングエンジンを高出力化するためには，エンジン内部の作動ガスを高圧に保つ必要がある。作動ガスを密閉するには，従来からメカニカルシールなどのシール装置が使われてきたが，比較的出力が小さいエンジンでは，その摩擦損失の割合が大きく，出力性能に大きく影響する。そこで，出力が数 kW 以下のスターリングエンジンにおいては，発電機を圧力容器に内蔵したハーメティック式と呼ばれる形式が昨今の主流となっている。

図 7 は，当研究所で研究を進めている出力 100 W 程度の実験用スターリングエンジンである。メカニカルシールを利用した従来形式のエンジンをハーメティック式に改造し，詳細な性能評価を行った結果，ハーメティック式とすることで，発電出力が 40 % 程度も向上できることを確認している⁵⁾。

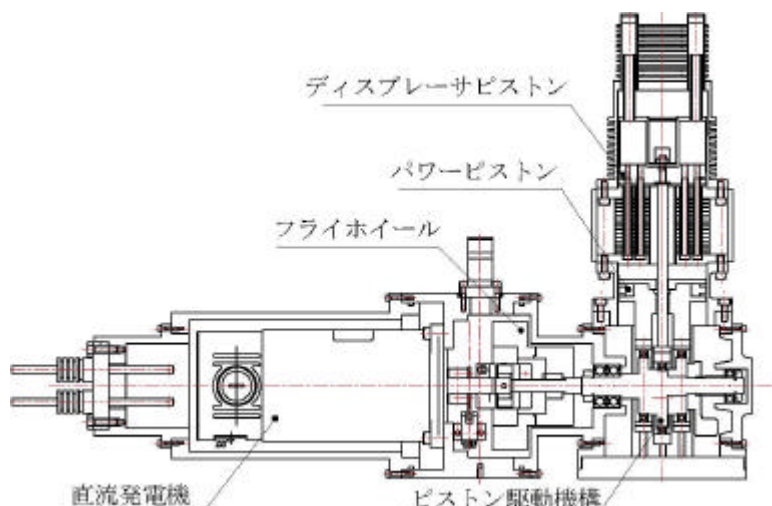


図 7 ハーメティック式スターリングエンジン

3.3 多段式スターリングエンジン

図 8 および図 9 は，当研究所で実験的研究を進めている多段式スターリングエンジンの概念図並びに実験用エンジンである⁶⁾。本エンジンは排熱利用を想定したものであり，図 8 において，3 台のエンジンユニットが直列に配置され，排熱は左から右の方向に流れる。

各エンジンで段階的に熱エネルギーを回収するため，排熱の温度は徐々に低下する。したがって，それぞれのエンジンユニットの動作温度並びに出力レベルが異なるため，各ユニットのディスプレースおよびパワーピストンの行程容積が異なっていることが特徴である。

このようなエンジン形式にすることで，エンジン全体として多くの温度落差を利用できるため，1 段で構成されたスターリングエンジンより，排熱エネルギーを有効に利用できる。多段化構成の有効

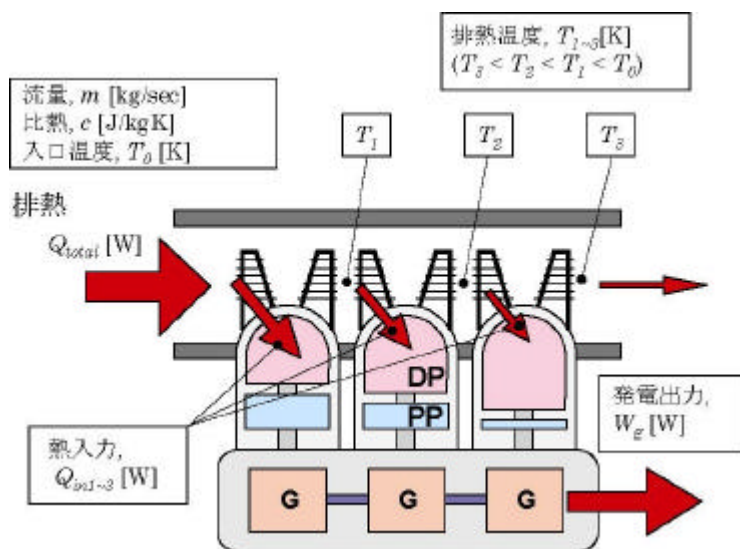
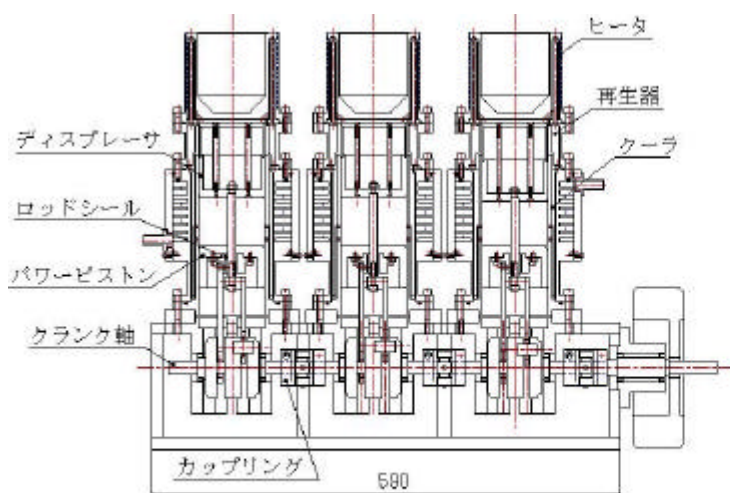


図 8 多段式スターリングエンジンの概念図



(a) 実験用エンジンの構造



(b) 実験用エンジンの外観

図 9 実験用多段式スターリングエンジン

性は、実験用エンジンによる動作試験によって確認されている。一方、動作温度並びに出力レベルが異なるエンジンユニットの組み合わせを最適化するのは難しく、性能評価実験を踏まえてエンジン設計の高精度化を図る必要がある。

3.4 スターリングエンジンの用途開発

著者らはこれまでの研究過程において、スターリングエンジンの様々な用途を検討してきた。その一例として、図 10 は大型船舶に用いるスターリングエンジンの概念図を示している⁷⁾。設計出力は 20,000 kW であり、経験則やシミュレーション計算を利用して概念設計を行った。本エンジンは、同出力レベルのディーゼルエンジンと比べて高さ寸法は概ね同じであるが、クランク軸方向の長さが約 2 倍の寸法となっている。また、熱効率についても、現在のディーゼルエンジンに対する優位性は確認されなかった。図 2 に示したように、スターリングエンジンは、比較的低い出力レベルにおいて高い熱効率を得られやすいという特徴がある。これはエンジンを大出力化する場合、圧力容器構造の制限によってエンジンの構造部材の肉厚が増大し、それに伴う熱損失が増大するためである。

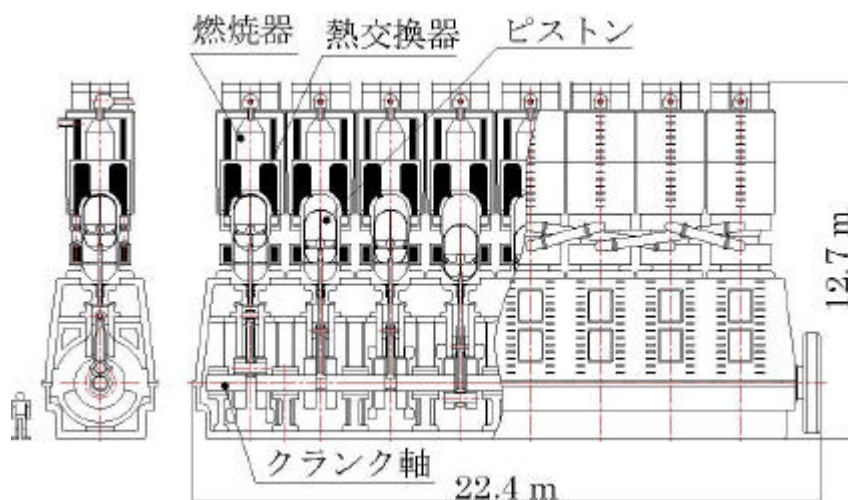


図 10 大型船舶用スターリングエンジンの概念図

一方，出力が数 kW の小型スターリングエンジンは，バイオマスエネルギーや排熱の有効利用に適している。当研究所は，民間企業や関連団体と共同で，スターリングエンジンの用途開発に関する調査研究並びに開発研究を進めている。2005 年 4 月には，当研究所と共同開発を進めてきた松下電器産業社が，ベンチャー企業 e スター社を発足した。現在，e スター社と当研究所は，セラミックス製熱交換器や新型リニア発電機を搭載したスターリングエンジンの開発など，高性能化・量産化のための新しい技術開発を進めている。

3.5 船舶用排熱回収システムの開発

港湾に停泊している船舶のディーゼルエンジンから放出される排ガスは，港湾地域の空気環境汚染の原因となっている。当研究所は港湾地域の環境汚染を改善することを目的とし，平成 17 年度より鉄道建設・運輸施設整備支援機構からの受託研究「港湾内の環境保全を目指した内航船舶用排熱回収システムの開発」を開始している。本排熱回収システムは，運航中の推進に使うディーゼルエンジンの排熱エネルギーをスターリングエンジン

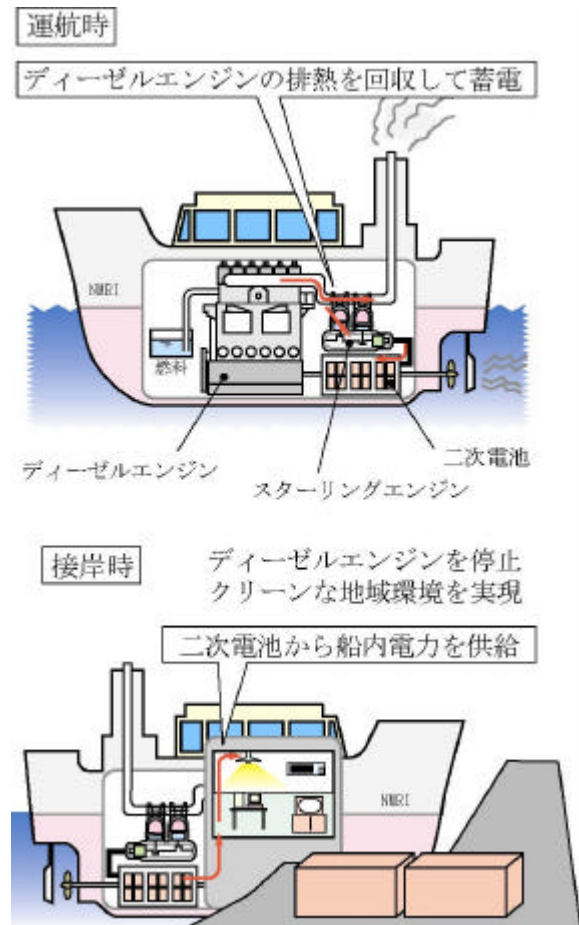


図 11 船舶用排熱回収システム

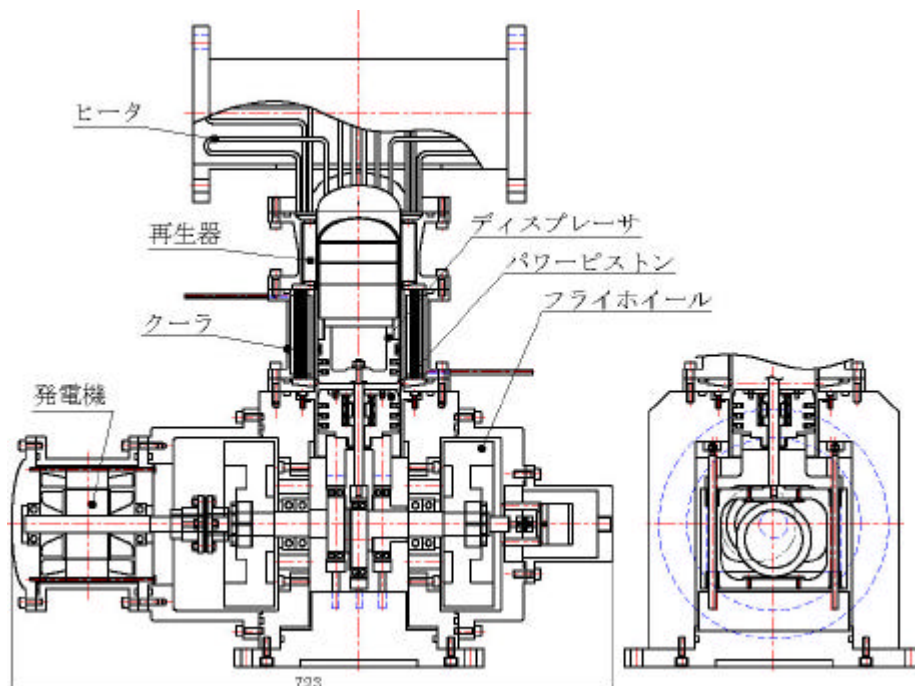


図 12 排熱利用スターリングエンジンの構造

によって回収し、電気として蓄え、停泊中の船内電力に使用する（図 11）。したがって、船舶が停泊している際、発電用ディーゼルエンジンの運転が不要となり、港湾地域の環境汚染が改善され、クリーンな地域環境を保つことができる。

平成 17 年度は、400 以下の熱源を利用するスターリングエンジン発電機の開発を進めている。図 12 は現在試作を進めている実験用エンジンの構造を示している。今後、排熱を模擬した高温空気を用いて本エンジンの性能評価を行い、平成 18 年度からはディーゼルエンジン排熱を利用した実証実験を進める予定である。

多様な熱源から動力を取り出すことができるというスターリングエンジンの特徴を活かすことで、このような排熱利用発電が可能となる。内燃機関の排ガスの他にも、排熱には工場排熱やボイラ・焼却炉からの排熱などがある。低温度熱源を利用するスターリングエンジンの実用化には、高性能熱交換器の開発など、様々なブレイクスルー技術が必要であるが、排熱の総エネルギー量は極めて大きく、300～400 程度の排熱を有効に回収する技術が確立されれば、その用途は極めて広いと考えられる。

4．おわりに

以上、スターリングエンジンの概要並びに関連技術や用途開発について解説してきた。燃料の多様性や低公害性など、様々な優れた特徴を持つスターリングエンジンであるが、このエンジンにはいくつかの問題点もある。例えば、高効率化のためには、耐熱性・耐圧性が高い特殊材料を使用することがあり、製作コストが高くなること、運転実績に乏しく信頼性が十分でないことなどである。これらの課題を順次克服し、スターリングエンジンが様々な分野で活躍することを期待している。

参考文献

- (1) 山下巖ほか 4 名，スターリングエンジンの理論と設計，1999，山海堂．
- (2) 一色尚次，スターリングエンジンの開発，1982，工業調査会．
- (3) TSUKAHARA, S., et al., Dynamic Characteristics of Marine Stirling Engine by Computer Simulation, Proc. of ISME KOBE '90, The Marine Engineering Society in Japan, p. D-1-7-13, 1990.
- (4) 平田宏一，川田正國，横川嘉徳，山下巖，位相差可変スターリングエンジンの基本特性，日本機械学会第 8 回スターリングサイクルシンポジウム講演論文集，p.63-64，2004．
- (5) HIRATA, K., Mechanical Loss Reduction of a 100 W Class Stirling Engine, Proc. of 11th International Stirling Engine Conference, p.338-343, 2003.
- (6) HIRATA, K. and KAWADA, M., Development of a Multi-cylinder Stirling Engine, Proc. of 12th International Stirling Engine Conference, p.315-324, Sept. 2005.
- (7) 平田宏一，20,000 kW 級船舶用スターリングエンジンの検討，日本機械学会第 6 回スターリングサイクルシンポジウム講演論文集，p. 21-22，2002．