

SR 500
SHIP RESEARCH SUMMARY REPORT

「船舶技術の創造的展開に関する調査研究」

第503分科会

新エンジンシステム等の調査研究

成 果 報 告 書

平成15年3月

社団
法人 日本造船研究協会

SR503 新エンジンシステム等の調査研究

Ship Research Panel 503 Review and Research on the New Marine Propulsion Systems

Summary

In order to find out the important research and development projects, which will be required in the near future to break through the technical difficulties in marine propulsion systems, the review and research program was conducted in the years 2002 and 2003.

In the first year, reviews were carried out on the performances and properties of conventional marine propulsion systems, covering diesel engines, steam and gas turbines, fuel cells, as well as stirling and methanol engines, and various propulsion systems. The collected technical data on them are summarized in the matrix form.

In the second year, based on these data, the new research and development projects, which will lead to the breakthrough of technical problems and to practical application in the years 2010~2015, have been selected from the view points of global environmental protection, higher reliability, and more economical situations, as follows.

As for the diesel engines, it is expected that low-quality heavy fuel oil will continue to be used as the power source of diesel engines. The further technical developments should be required to reduce environmental loads and to improve engine reliability.

As for the steam turbines, it is necessary to develop such a soft wear that can control the warming-up procedures of steam turbine plants according to the knowledge and experiences which have been gained by high-quality, trained operators.

For further improvement of fuel consumption in total, the combined plants of gas and steam turbines are recommended as the prospective power plants in the near future. In that case, one of the key research projects is the development of high-efficiency steam turbines with smaller powers than 5 MW.

As for the fuel cells, the combined power plants with gas turbines are also recommended to be another prospective power systems.

As for the propulsion systems, the new types of electric propulsion systems such as pod units are proposed as an urgent research project.

1. 研究の目的

本調査研究は、造船・海運がその知見を集め、2010～2015年の世界市場における優位性を確保することは勿論、地球規模の環境保全、安全運航、経済運航をもたらす船用推進システムの開発に寄与する重点研究テーマを抽出することを目的とする。

2. 研究の目標

時代の要請に即した船用推進システムの質的転換を図るとともに、国民生活の向上、地球規模での環境保全等の新たな視点を踏まえ、近未来にブレークスルーを必要とする技術課題を抽出するための調査・研究を平成13年度と14年度の2年間にわたり実施し、2010～2015年をめどに船用推進システムの創造的展開を図るための技術課題を環境対応、信頼性および経済性等の視点に立って重点研究テーマを抽出すること。

3. 調査研究の内容

(1) 調査研究の方法等

船用推進システムを以下のように分類し、現状機関の問題点・課題、利用者・社会的ニーズ、各機器の研究開発動向を調査し、2010～2015年を想定した場合の優先的に実施すべき重点研究テーマを抽出した。

調査方法は、文献調査、有識者へのヒアリング調査にて実施。

① エンジンシステム

- | | |
|-------------|----------------|
| • 低速ディーゼル機関 | • 中速ディーゼル機関 |
| • 高速ディーゼル機関 | • ガスタービン機関 |
| • メタノール機関 | • 燃料電池 |
| • スターリング機関 | • コンバインドサイクル機関 |

② 推進システム

- | | |
|--------|-------------|
| • プロペラ | • ウォータージェット |
|--------|-------------|

(2) 結果

各船用推進システムに関して、以下の重点研究テーマを提案することとした。

(a) 低速ディーゼル機関については、今後とも粗悪燃料油の使用が続き、さらなる環境負荷低減および信頼性向上が求められるので、次のような課題があげられる。

- ① 低質油の使用を考慮した船用脱硝装置の研究開発
- ② 信頼性向上のための船陸一体型管理システムの研究開発

(b) 中速ディーゼル機関についても、さらなる性能向上や環境対応技術の開発、新燃料への転換技術等が必要とされるので、次のような課題があげられる。

- ① 中速ディーゼル機関を搭載した船舶の燃料消費量の低減化

- ② 環境対応技術（低速ディーゼルと同じ）
 - ③ L N G船への中速ディーゼル機関の採用
 - ④ 新燃料（G T L、D M E）の採用に関する研究
 - ⑤ 信頼性・保守性の向上（低速ディーゼルと同じ）
- (c) 蒸気タービンについては、暖気システムに関して熟練オペレータの経験を自動化・システム化する必要があり、次の課題があげられる。
- ① 船用蒸気タービン主機関の自動暖気システムの研究開発
- (d) ガスタービンについては、高温材料の開発などにより今後性能向上が期待されるが、その特徴を生かすには他機関との複合化が必要であり、(f)のコンバインドサイクルにまとめて提案している。
- (e) 燃料電池については、今後の開発が期待される重要な研究課題であり、次の研究テーマがあげられる。
- ① 船舶への燃料電池・ガスタービンのコンバインドサイクルの適用研究
- (f) コンバインドサイクル機関については、今後ますます重要な船用推進機関となることが予想される。そのために船種ごとに検討すべき技術課題がある。また、船用推進プラントにおけるコンバインドサイクル成否の鍵は小出力蒸気タービンの熱効率向上にかかっている。そこで、次の課題があげられる。
- ① コンテナ船等の貨物船を対象とした最適コンバインドサイクルの確立
 - ② 客船を対象とした最適コンバインドサイクルの確立
 - ③ L N G船を対象とした最適コンバインドサイクルの確立
 - ④ 5 MW以下の小型蒸気タービンシステムの高効率化
- (g) 推進システムについては、電気推進化が進み、船型形状の最適化にも及ぶ重要な課題があること、また、粘性摩擦の低減が重要となることから、次の課題があげられる。
- ① 新形式ポッド型電気推進システムの調査研究
 - ② 化学的表面処理技術のプロペラへの応用の調査研究
- なお、高速ディーゼル機関についても「新燃料（G T L、D M E）の採用に関する研究」が提案されているが、(b)の中速ディーゼル機関のところで取り上げられているので省略した。また、メタノール機関とスターリング機関については船用推進機関への適用は実用上考えられないもので、重点研究テーマとしては提案しないこととした。

4. 成果

本研究結果から、従来のディーゼル機関や蒸気タービンについては熱効率のさらなる向上は非常に困難で、環境対応技術、信頼性向上技術、保守の自動化等について地道な研究を継続していく必要がある。

熱効率のさらなる向上を実現するには、単体の機関では不可能で、ガスタービンを中心としたコンバインドサイクルとする必要があり、蒸気タービンとのコンバインドおよび燃料電池とのコンバインドが重要な研究課題となる。

蒸気タービンとのコンバインドでは小出力蒸気タービンの熱効率向上がキーポイントとなる。

また、推進システムについてはポッド型電気推進システムの調査研究は早急に進める必要がある。

平成13年、14年の2年間で調査研究を行ってきたが、近未来の2010～2015年をめどに舶用推進システムの創造的展開を図るための重点研究テーマを抽出し、提案できたと考える。

はしがき

本成果報告書は、日本財團の助成事業として実施した、日本造船研究協会第500研究部会「船舶技術の創造的展開に関する調査研究」のうち平成13年度から平成14年度の2カ年計画で実施した第503分科会「新エンジンシステム等の調査研究」の成果をとりまとめたものである。

第500研究部会委員名簿

(敬称略、順不同)

部会長	小山 健夫（東京大学名誉教授）	葉山 真治（東京大学名誉教授）
委員	大和 裕幸（東京大学）	荒井 宏範（日本海事協会）
	勝原光治郎（海上技術安全研究所）	木原 和之（日本海洋科学）
	油谷 正彰（商船三井）	河辺 勲（IHIマリンユナイテッド）
	青木征二郎（日本海洋科学）	
	小澤 宏臣（三井造船）	

第503分科会委員名簿

(敬称略、順不同)

分科会長	葉山 真治（東京大学名誉教授）	井龜 優（海上技術安全研究所）
幹事	青木征二郎（日本海洋科学）(H13年度)	宇佐美 俊（商船三井）
	金子 仁（日本海洋科学）(H14年度)	湯浅 逸也（川崎造船）
委員	刑部 真弘（東京商船大学）	福島 二郎（ユニバーサル）
	田中 良和（商船三井）	佐々木 耕（三井造船）
	永澤 映二（ユニバーサル）	大松 哲也（IHIマリンユナイテッド）
	豊田 健（川崎造船）	船越 文彰（住友重機械工業）
	松本 祥一（三菱重工業）	的場 正明（RITAコンサルティング）
	永所 和俊（三井造船）	
	主藤 英樹（IHIマリンユナイテッド）	
	石原 泰明（ナカシマプロペラ）	

討議参加者

(敬称略、順不同)

慶林坊 智（日本鋼管）	赤池 恵（ユニバーサル）
後藤 大祐（商船三井）	清河 勝美（日立造船）
立石 智裕（三菱重工業）	大竹 和彦（三菱重工業）
溝越 貴章（住友重機械工業）	黒瀬 康弘（商船三井）

事務局（日本造船研究協会） 宮澤 徹 大森 勝 海部 雅之

目 次

1. 研究の目的	1
2. 研究の目標	1
3. 調査研究の内容	1
3.1 低速ディーゼル機関	1
3.2 中速ディーゼル機関	3
3.3 高速ディーゼル機関	5
3.4 蒸気タービン機関	6
3.5 ガスタービン機関	7
3.6 メタノール機関	8
3.7 燃料電池	9
3.8 スターリング機関	13
3.9 コンバインドサイクル機関	17
3.10 推進器	23
4. 得られた成果	25
5. 成果の活用等	26

1. 研究の目的

本調査研究は、造船・海運がその知見を集め、2010～2015年の世界市場における優位性を確保することは勿論、地球規模の環境保全、安全運航、経済運航をもたらす船用推進システムの開発に寄与する重点研究テーマを抽出することを目的とする。

2. 研究の目標

時代の要請に即した船用推進システムの質的転換を図るとともに、国民生活の向上、地球規模での環境保全等の新たな視点を踏まえ、近未来にブレークスルーを必要とする技術課題を抽出するための調査・研究を平成13年度と14年度の2年間にわたり実施し、2010～2015年をめどに船用推進システムの創造的展開を図るための技術課題を環境対応、信頼性および経済性等の視点に立って、以下の対象機種に重点研究テーマを抽出すること。

①エンジンシステム

- 低速ディーゼル機関
- 中速ディーゼル機関
- 高速ディーゼル
- ガスタービン機関
- メタノール機関
- 燃料電池
- スターリング機関
- コンバインドサイクル機関

②推進システム

- プロペラ
- ウォータージェット

3. 調査研究の内容

3.1 低速ディーゼル機関

3.1.1 重点研究テーマの選択に関して

今回、検討されたエンジンシステムの中では、今までほとんどの大型商船に採用されてきており、既に成熟に近い領域に達している機関である。高熱効率、C重油対応、低製造コストを考慮すれば、近い将来も、低速ディーゼルは一般商船の推進システムの中心であると考えられる。市場に出る総数、総出力が圧倒的に多いため、低速ディーゼルの改良、改善による海上輸送におけるトータルメリットは大きい。

将来更に重要視される環境対応技術と、船舶の陸上支援、管理体制への移行に関連して更なる信頼性、保守性向上のための取り組みが重点研究テーマとして抽出された。

(1) 環境対応技術

IMO（国際海事機関International Maritime Organization）の「船舶からの大気汚染防

止に関する規則M A R P O L 73／78の新付属書VI」で船舶からの大気汚染物質の排出について規制されることになった。規則自体は未だ発効されていないが、ディーゼル機関から排出されるものとしては、排ガス中の窒素酸化物（N O x）、硫黄酸化物（S O x）が規制の対象になる。

また、北欧を中心に各国、地域がより厳しい水準のローカル規制（税制等で低環境負荷のシステムを優遇）を強化し始めており、これに対応していくことが不可欠になっている。

ディーゼル機関は、N O x 排出率が他機関に比べて多く、環境負荷低減を追及する場合の弱点になっている。

C O₂ の排出については、M A R P O L では規制の対象になっていないが、地球温暖化に関連して総排出量の削減の要求が高まっている。将来を考えると船用ディーゼルにも何らかのC O₂ 低減対策を強いられる可能性が大きい。C O₂ の削減には、熱効率の向上と炭素分の少ない燃料への転換の2通りの選択肢があるが、低速ディーゼルの熱効率は既に非常に高いレベルにあり、機関単体でのこれ以上の向上は困難である。廃熱回収技術も古くから開発され、実用化されてきたが、極度の廃熱回収は信頼性の低下につながる傾向があり、現在は、大出力機関の一部で信頼性を損なわない程度の廃熱回収をしている。大出力機関のみでなく、中小型機関にも適用できるように低コストで信頼性を確保したシステムの開発が望まれる。

燃料については、陸上でも、いわゆるクリーン燃料への転換が進められている。船用の低速ディーゼルにおいてもD M E、ガス等の新燃料を使用する技術の開発は必要である。同時に、これらの新燃料に対応した船内の燃料供給システムについても開発が必要である。

(2) 信頼性、保守性の向上

これまでにも研究されてきたが、利用者側は、更なる信頼性、保守性の向上を求めている。例えば、海象、燃料性状等の機間に影響するデータを含む運転状態の陸上でのモニタリング、リアルタイムのデータに基づいた陸上での保守、整備指針の立案、豊富なデータに基づいた故障事例データベースの構築とそれによる故障予知、本体のみならず部品レベルでM T B F (Mean Time Between Failure、平均故障間隔) 等の数値で信頼性を把握し、それをベースとした保守、整備間隔延長に向けた開発等が挙げられた。将来には、陸上、航空用ガスタービンで研究されている最新の信頼性管理を船用ディーゼルに取り込むことを検討していくべきであると考える。

3. 1. 2 重点研究テーマ

低速ディーゼル機関の重点研究テーマは以下のとおりである。

(1) 環境対応技術

① 研究開発テーマ名

- 低質油の使用を考慮した船用脱硝装置の研究開発

② 研究範囲

- ・現在開発されつつある排ガスの脱硝技術の調査、舶用転用・低質油対応への技術問題解決、コンパクト・安価な舶用脱硝装置の開発

③研究効果

- ・大気汚染物質の排出率の削減による排出総量の大幅削減

(2) 信頼性、保守性の向上

①研究開発テーマ名

- ・信頼性向上のための船陸一体型管理システムの研究開発

②研究の範囲

- ・運転状態の船上データ蓄積システム開発、運転状態の陸上モニタリングシステム開発、船上保全実績データ蓄積システム開発、平均故障間隔・平均保全間隔データ蓄積システム開発、機関メーカーでのデータ利用に関する研究

③研究の効果

- ・機関メーカーにおいては機関の信頼性向上のためのデータとなる。船舶ユーザにおいては整備間隔の延長による乗組員の負担減、信頼性向上による安全運航の確保となる。

3.2 中速ディーゼル機関

3.2.1 重点研究テーマの選択に関して

中速ディーゼル機関は低速ディーゼル機関と共に技術的には成熟した機関と言える。低速ディーゼル機関では満足出来ない特殊船分野では今後共採用されてゆくものと思われる。

将来中速機関が採用されるためには、低速ディーゼル機関に比較し不利と考えられている燃料消費量の改善、ガス燃料等の新燃料の採用、環境対応技術の開発、さらなる信頼性の向上が重点研究テーマとして抽出された。

(1) 燃料消費量の改善

機関単体の燃料消費率は低速機関に比較し不利であることは否定できないが、排ガス・冷却水の廃熱利用、寸法的に有利である機関室の小型化や配置の自由度、回転数選択の自由度等を考慮しトータル的に燃料消費量の低減をはかることが重要と考えられる。

(2) 環境対応技術

中速ディーゼル機関は用途としてフェリー・RORO船・客船等に多く採用され、国内主要港への出入港が頻繁に行われ、排煙の問題もクローズアップされつつある。また、客船においての黒煙は乗船客にも不快感を与え、フェリー・RORO船では煤が岸壁の貨物に悪影響を与えることもある。未だ、法的規制は無いがディーゼル機関排ガス中の粒子状物質(PM)が人体や環境に与える影響を指摘する声もある。

MARPOL73/78の新付属書VIの発行以降、機関メーカーでは種々のNOx低減技術を開

発発表してきたが、粒子状物質（PM）、未燃炭化水素（HC）の排出削減についてもさらなる研究が重要と思われる。

(3) 新燃料への転換

自動車用ディーゼル機関では、既にGTL(Gas to Liquid、天然ガス液体化燃料)、DME(ジメチルエーテル、天然ガスや石炭ガスなどを原料とした合成燃料)等の新燃料への転換が各社で研究されている。船舶用においてはLNG船向けガス焚き機関が開発されてはいるが国内においては未だガス焚きディーゼル機関は搭載されていない。LNG船の場合、運航の安全を考え複数台の中速ディーゼル機関を装備したプラントも候補として挙げられているが、最も有効なシステムはどの様なものなのか、安全なガスの供給システム、その周辺装置等の検討を進めなければならない。

また、GTL、DME等の新燃料を舶用に使用するためには機関本体の開発が最優先であるが船社・造船所では船での貯蔵方法、ガス供給装置、安全設備等についての研究やその輸送方法についても研究を進める必要がある。

GTL、DME等新燃料の採用は高速及び中速ディーゼル機関が内航に多く採用されることより高速及び中速ディーゼル機関での研究が優先されるものと思える。

(4) 信頼性・保守性の向上

フェリー、RORO船等定時運航が原則であり機関故障による遅延は経営をゆるがしかねない。これまでにも機関本体、付属品について継続的に研究されてきたが、更なる信頼性の向上、保守性の向上をユーザーは求めている。運転状態を監視し故障予知、部品交換時期の予告等を行うことにより事前にメンテナンスを実施することが大事故を未然に防ぐことになる。そのためには、信頼性のあるセンサーの開発、部品寿命の把握、故障データの蓄積と分析などが必要との意見が挙げられたが、長い実績のあるディーゼル機関であるが故に可能ではと言う考え方も提案された。

3.2.2 重点研究テーマ

中速ディーゼル機関の重点研究テーマは以下のとおり。

(1) 燃料油消費量の低減

①研究開発テーマ名

- ・中速ディーゼル機関を搭載した船舶の燃料消費量の低減化

②研究範囲

- ・代表的な船種において、船型、有効なカーゴスペース、最適な推進システム、排ガス・冷却水等の廃熱利用等のシステムの研究

③研究効果

- ・省エネルギー、環境保全

(2) 環境対応技術

重点研究テーマとして低速ディーゼル機関の分野と同じ、低質油を考慮した舶用脱硝装置の研究開発が挙げられた。

詳細は低速ディーゼル機関を参照。

(3) L N G船の中速ディーゼル機関の採用

①開発テーマ名

- L N G船の中速ディーゼル機関の採用に関する研究

②研究の範囲

- L N G船における最適推進装置・ガス供給装置・制御方法・安全装置

③研究の効果

- L N G船においては蒸気タービンシステムに比較し燃料消費率の削減が可能となり（省エネルギー、環境保全）、機関室面積も削減可能となる。

(4) 新燃料（G T L、D M E）の採用

①研究開発テーマ名

- 新燃料（G T L、D M E）の採用に関する研究

②研究範囲

- G T L、D M E燃焼システムの研究
- G T L、D M E燃料の輸送手段、船内貯蔵設備・供給設備・安全装置等
- G T L、D M E燃料出現時に対するF Sの実施

③研究の効果

- 環境保全

(5) 信頼性・保守性の向上

信頼性・保守性の向上が重点研究テーマとして挙げられているが、内容は低速ディーゼル機関の分野と同じである。

3.3 高速ディーゼル機関

3.3.1 重点研究テーマの選択に関して

高速ディーゼル機関の主要な用途は高速船用主機関であるが、ガスタービンもジェットフォイルや高速カーフェリーのように大出力が求められるケースで採用されている。しかしながら、高速ディーゼル機関の軽量化、高出力化も著しく、依然、高速船の主機関として主要な地位を占めており、高速ディーゼル機関が対応できない大出力を要求される場合や特殊な用途以外を除けば、ガスタービンに主役の座を譲ることは予想できない。

一方、高速化、高出力化と共に徹底した軽量化設計がなされてきている高速ディーゼル機関の重要な課題として、信頼性の確保や環境対策が挙げられている。今後も、高速・高出力化と

小型軽量化を目的とした着実な技術開発が試みられると予想するが、同時に、信頼性、環境対策や操作性・保守性も製造者の重要な開発課題となっている。

製造者に依存するこれらの課題以外には高速ディーゼル機関に求められる重点研究テーマは見いだせない。

しかしながら、新燃料の採用に関しては、現状の軽油・重油に代わる新しい代替燃料の開発、供給体制などの基盤整備ができれば、大きな技術開発の転機となる可能性もある。市場規模や燃料供給基盤整備の制約から、陸上用機関に先行して舶用機関に技術開発を求められる状況は想定できないものの、前述の中速機関に取りあげたDME等の新燃料に対応する研究開発は環境保全対策として効果が期待されており、高速ディーゼル機関にも共通したテーマである。

3.3.2 重点研究テーマ

中速ディーゼル機関と同様に「新燃料（GTL、DME）の採用」に関する研究が抽出された。詳細は中速ディーゼル機関の重点研究テーマを参照。

3.4 蒸気タービン機関

3.4.1 重点研究テーマの選択について

蒸気タービンに関する技術開発テーマに関しては、主に熱効率の改善と運用上の課題解決が考えられる。

熱効率の改善については各タービンメーカーで実施されていることから、今回のテーマは運用上の課題である熟練したオペレータが必要（暖機状態、状態変化への対応は乗組員の経験により対処）で、経験による部分が大部分を占めるタービンの暖機システム等の自動化/システム化への取り組みについて重点研究テーマとして抽出された。

船員が減少し、しかも高い質が望めなくなる現状を考えると熟練オペレータの経験を自動化/システム化していくことは大きな意味を持つものと考える。

なお、運航に携わる外航日本人船員は昭和50年に5万人以上いたが、平成13年には3,500人まで減少し、代わりに外国人船員が増加して、運航担当者の量と質とも変化してきている。

3.4.2 重点研究テーマ

蒸気タービン機関の重点研究テーマは以下のとおり。

①研究開発テーマ名

- ・舶用蒸気タービン主機関の自動暖機システムの研究開発

②研究範囲

- ・現状暖機システム、乗組員運転状況の調査
- ・暖機終了判断基準の設定（温度、時間、熱伸び量、音、振動）

- ・自動化装置検討（暖機蒸気量とプロペラ起動トルク）

③研究の効果

- ・蒸気タービンのオペレーションが容易となり信頼性の向上及び乗組員の負担減が図れる。

3.5 ガスタービン機関

3.5.1 重点研究テーマの選択に関して

海外においては25MW級の出力で燃料消費率200g／kW・h以下を目指とした低燃費型大出力ガスタービンの開発プロジェクトが進行している（WR21 Intercooled Recuperated Marine Gas Turbine）。WR21はRolls社の航空エンジンRB211を基にした複雑な舶用ガスタービンで、中間冷却器と再生器を組み込むことによって中速ディーゼル機関に匹敵する燃費特性を持った低燃費ガスタービンである（図3.5.1-1参照）。

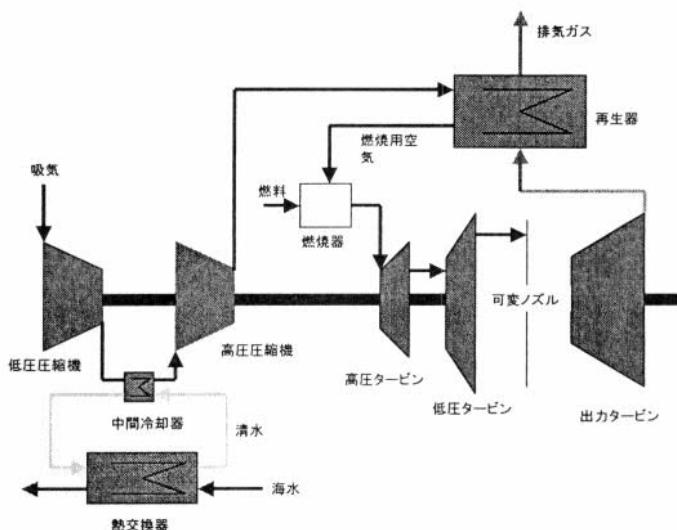


図3.5.1-1 WR21のサイクル線図

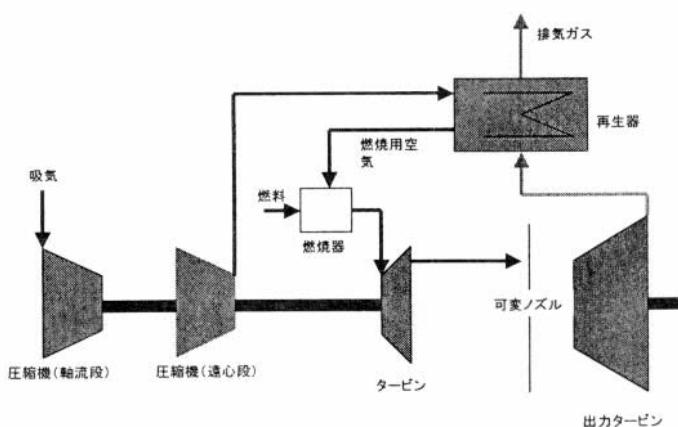


図3.5.1-2 スーパーマリンガスタービンのサイクル線図

国内においては国土交通省の「次世代内航船プロジェクト」の一環として、1997年より国内5社で構成される技術研究組合が内航船、高速フェリーの推進機関としてスーパーマリンガスタービン（定格出力2,500kW）を開発している。

開発目標は低NO_x化(1g/kW・h)、熱効率向上(38~40%、燃費率で220~210g/kW・h)、A重油焚きの3点である。（図3.5.1-2 参照）

このように、舶用ガスタービンユニットとしての性能は今後も継続的に向上していくものと思われる。

しかし、初期コストと運航コストが優先される一般商船分野への近未来における適用を考える場合に、これらユニットとしての性能向上だけでは限界があることも事実であり、他の機関とのコンバインドにより、ガスタービンの課題である燃費、初期コスト、保守性の面を補っていく方法が有効である。その場合の対象とする船種として、LNG船が適していると考えられる。

LNG船ではカーゴタンクからの自然発生ガスの取扱いが容易であることから、従来から蒸気タービンプラントが使用されている。この自然発生ガスを蒸気タービンに比べて熱効率の良いガスタービンにて処理し推進に利用することで、トータルとしての燃費改善に繋がる。自然発生ガスだけでは推進力を確保することは困難な場合が多いので、不足分は何らかのコンバインド機関にて補う必要がある。油焚きディーゼルやガスタービンの廃熱を利用した蒸気タービン駆動の発電機タービン等が考えられるが、今のところ決定的なコンバインドサイクルは見出されていない。コンバインドさせる機関の選定には、総合熱効率、コスト、環境、保守等の面からの総合的な評価が必要となろう。また、電気推進をはじめ推進システムの検討も必要である。

3.5.2 重点研究テーマ

ガスタービン機関の重点研究テーマは、「LNG船を対象とした最適コンバインドサイクルの確立」が抽出された。

このテーマはコンバインドサイクル機関においても抽出されたので、詳細をコンバインドサイクル機関に記述した。

3.6 メタノール機関

メタノールは主として天然ガスなどの資源から製造することができ、石油の代替燃料として適している。

メタノールは含酸素燃料であるので、従来の石油燃料よりもNO_xの排出が少ない利点があり（約2/3~1/2となる）、生産技術、コスト流通機構のいずれの面でも代替燃料の要件を満たしている。

メタノール機関は黒煙（すす）が出にくく、NO_xが低減されるメリットはあるものの、発熱量が小さいため、燃料油タンクの容量は2倍程度必要となる。また、燃料油の性状からSO_xの排出はない。

メタノール機関の現状の課題として、

- ①着火、燃焼性能の改善
- ②燃料噴射系統の耐食性
- ③燃料ポンプの潤滑
- ④燃料タンクの容量増加（通常燃料の2倍）
- ⑤沸点が64.4°Cへの対策

の5項目が考えられる。

しかし、実際に舶用機関として製造された実績があり、大きな問題ではないと考えられる。

また、今後の課題として、

- ①メタノールの価格低減
- ②供給インフラの整備

の2項目が考えられる。

ネックとなる技術課題は比較的少ない。

メタノール機関の評価を考えると以下の3点となる。

- ①外航船・内航船への適応性

メタノールの供給インフラの必要性、および燃料油タンクの容量から考えて、内航船への適用しか現実味がないと思われる。

- ②2010-15年の燃費向上(10%)の可能性

不明。ただ、発熱量が小さいためボリュームの問題は残る。

- ③環境特性（低公害性）

NO_xが低く、黒煙が出にくいため、これらの低公害性のメリットがこの先数年でより強く注目されるようなら研究の価値がある。しかし、燃料電池の低公害性にまで及ぶものではない。

上記③のようなメリットは考えられるが、同じメタノールであれば燃料電池の研究を進めた方がより現実的と思われる。

メタノール機関に対する重点研究テーマは見出せないと判断された。

3.7 燃料電池

3.7.1 重点研究テーマの選択について

自動車用燃料電池の急速な開発で、燃料電池の1スタック当たりの出力が大きくなっている。1スタック当たりの出力は100kWをほぼ達成しつつあり、大きさの点でも内燃機関に近づいてきたといえる。出力的には小型船舶の推進出力に近づき、オランダの内航船（運河を動く船）では水素燃料電池が推進装置選択のターゲットの入っている。燃料電池は環境、振動、騒音面で他の熱機関より大変優れており、この性能が評価されている。

燃料電池の種類について表3.7.1-1にまとめた。今までの船用としての実績と船用推進機関に求められる出力を考慮すると、燃料電池の中で船用として使用される可能性があるものは、表中のリン酸型(PAFC)、溶融炭酸塩型(MCFC)、固体高分子型(PEFC)の三つが可能性高いと考えられる。

表3.7.1-1 燃料電池の種類

	アルカリ型 (AFC)	リン酸型 (PAFC)	溶融炭酸塩型 (MCFC)	固体電解質型 (SOFC)	固体高分子型 (PEFC)
作動温度	60~90°C	200 °C	650~700°C	900 ~1000°C	70~90°C
燃料	水素	天然ガス (改質) メタノール (改質)	天然ガス 石炭ガス化ガス	天然ガス 石炭ガス化ガス	水素 天然ガス (改質) メタノール (改質)
推進出力			~30,000kW 大出力向き		~2,000kW 小出力向き
1stackの出力 (目標値)			500kW (2,500kW)		100kW
発電効率 (LHV)	純水素／純酸素運用~60%	35~42%程度	45~60%	45~65%	改質ガスを用いた場合30~40%
用途	宇宙船用電源 海中作業船電源 潜水艦電源	定置用電源 分散設置型発電プラント、 集中発電所	定置用電源 分散設置型発電プラント、 集中発電所	定置用電源 分散設置型発電プラント、 集中発電所	宇宙船・潜水艦電源、ポータブル電源 電気自動車用電源、家庭用・定置用電源

燃料電池は停泊中や湾内航行中に周囲に与える、大気汚染、騒音、振動問題を軽減できる。大気中のエミッションについては、窒素酸化物 (N O x) は他の内燃機関と比べ、1/1000程度となりかなり低い。硫黄酸化物 (S O x) はゼロとなる。但し、これは燃料油中に硫黄分が含まれていないためであり、他の内燃機関でも同様な燃料の選択により実現可能である。二酸化

炭素（CO₂）は熱効率を高めることにより削減可能であるが、化石燃料を使う限りCO₂は発生する。同燃料、同効率の場合、CO₂排出量は同じとなる。

騒音振動は他の内燃機関に比べかなり低いレベルにある。従来の船舶で問題となる停泊中や湾内航行中に近隣に与える騒音を低減できるため潜水艦や、気象観測船等に適用のメリットが大きい。

燃料電池発電はシステムとして、ユニット、モジュール化が容易にできるため、建造面で搭載を容易にできるメリットがある。ユニットでシステムが完結するため上甲に置くことも可能である。上甲板に搭載する場合は、主機関とプロペラ軸を直結する必要がなくなるので船尾形状、居住区配置等の自由度が高まり、推進性能、建造効率を最優先に考慮し設計することが可能となり、船の推進性能を向上できるメリットもある。

また、燃料電池は部分負荷での運転が容易で部分負荷の多い船舶への適用や、部分負荷の不得意な内燃機関と組合せることも可能である。特にガスタービンとのコジェネレーションシステムは双方の特徴を組合せできるメリットがあり、プラント全体の熱効率を非常に高いレベルまでもっていくことが可能である。

表3.7.1-2に、舶用、自動車用、家庭用の用途別に燃料電池の要求条件をまとめた。

表3.7.1-2 用途別の要求条件の比較

	船 舶	自 動 車	家 庭 用
効 率 (LHV)%	40~50	30~40	40
容 積 (m ³ /kW)	0.5	0.003	0.13
重 量 (kg/kW)	90	3	40
寿 命 (Hr)	40,000以上	5,000	40,000
負荷変動条件	厳しい（高出力領域）	厳しい（低出力領域）	緩やかまたは一定負荷
価 格 (万円/kW)	10以下	0.6 以下	30
備 考	数値は内航船試設計値 容積・重量は推進モータを含んだ値	数値は2004年のDOE 目標値	価格以外の数値は、米 国NUVERA社の家庭用5 kW PEFCの値

寿命、信頼性では自動車用が5,000hrに対し舶用では40,000~50,000hrとかなり長時間要求される。信頼性（寿命）についてはリン酸型のみ長期の稼動実績があり証明されている。寿命を証明する耐久試験は時間を短縮して試験できないため、実証に必要な相当の時間がかかることが厳しい課題となる。

自動車用の使用条件は20~30%負荷で運転される時間が多いため、舶用では85~90%あたりでの連続運転が要求されるため、高負荷連続運転での信頼性の実証が必要とされる。

燃料電池で使用可能かつ市場で容易に入手可能な液体化石燃料油は軽油が限度であり、重油は使用できない。LNG船のカーゴタンクからLNGの一部が気化して発生するBoil Off Gas (BOG) は使用可能である。従来、消費されている安価な粗悪燃料油の使用はできない。経済性の観点から、安価な新燃料油の開発と燃料電池のコストダウンは必要である。

燃料電池を採用する場合は電気推進となり、機関室の軸系、補機の配置の自由度が上がる。また、燃料電池のメンテナンスを考慮すると燃料電池は機関室内に配置するより、デッキ上に配置したほうがよいと考えられる。今までの一般商船の機関室配置、船全体の配置が貨物のハンドリング、安全性、推進性能の観点から最適船型の再考が必要となる。

ガスタービンとのコンバインドシステムにおいては従来のディーゼル機関が持つものより高い熱効率を得ることが可能であり、省エネルギーで地球環境にやさしい舶用推進機関として確立されるべき技術である。特に舶用として高出力をカバーし、高熱効率を達成するために、溶融炭酸塩型(MCFC)とガスタービンのコンバインドサイクルの検討がもっとも有効であると考える。

一方で触媒の寿命(劣化)の延長と、1 stack 出力の向上によるユニット数削減等による信頼性向上の為の課題、使用燃料油としての軽油、灯油といった、世界中で容易に入手可能でハンドリングが容易な舶用に適した新燃料油の選択といった課題も残されている。燃料電池の1 stack の小型化とコスト低減、安価な燃料油の使用を可能にすることは経済性の向上の観点からも必要課題と挙げられる。上記は主に燃料電池の開発メーカ中心の課題である。

燃料電池の配置上の制約自由度から、推進性能を最優先にした新しい船型の検討は造船所に残された大きな課題である。

舶用の高出力に対応した推進機関として燃料電池とガスタービンの組合せたプラントが考えられる。このプラントを検討する上で、燃料電池とガスタービンの出力配分はシステム全体の熱効率を最大化するために最適化が必要である。仮に燃料電池：ガスタービン=3：7とした場合、巡航時の出力は双方でまかない、騒音、振動に配慮が必要な港湾地域では燃料電池を使用することにより、熱効率、騒音、振動を考慮したプラントが成立する。

燃料電池は自動車用として開発が進んでいる固体高分子型(PEFC)を利用する場合と、燃料電池の出力配分を高めるためには溶融炭酸塩型(MCFC)の適用が考えられる。改質器で発生した余剰水素をガスタービンに供給し、ガスタービンの効率が約5%UPできることが既存の研究で知らされている。

燃料電池を応用した推進プラントでは、環境を重視すべき航路、主に港湾内など陸地に近いエリアと、グローバルは地球温暖化対策をメインとして推進効率最優先で航行する大洋航路で推進プラントのモードを切り替えて運転することも可能となる。例として港湾内では燃料電池を主に利用し、海上ではガスタービン機関で推進馬力を賄うといった形である。燃料電池とガスタービン機関の出力配分を最適化することによってプラント熱効率を高め、消費する化石燃料消費量を減らすることで、二酸化炭素(CO₂)を削減できる。

3.7.2 重点研究テーマ

重点研究テーマとして燃料電池とガスタービン機関のコンバインドサイクルの研究が抽出された。

最適な燃料電池種類の選択、ヒートバランス計算の最適化を含むコンバインドサイクルの設計、高い冗長性の確保、新船型の開発、機関室配置の最適化、船全体配置の最適化、メンテナンス計画の作成が主な作業項目と予想される。

また、燃料電池を船舶に適用するには、触媒の寿命（劣化）の延長、1 stack 出力の向上、使用燃料油の種類の確保といった点も重要であり、調査・検討が必要である。

①研究開発テーマ名

- 船舶への燃料電池・ガスタービンのコンバインドサイクルの適用研究

②研究範囲

- 燃料電池とガスタービンとの最適コンバインドサイクルの検討
- 燃料電池搭載船の新船型の開発
- 機関室配置、船全体配置の検討
- 低質油の利用限界の調査
- 1 スタック当たりの出力の向上に対する検討
- 信頼性（寿命）の確認
- メンテナンスに関する検討
- 船舶へ適用するための問題点の検討
- 対象燃料油種に関する検討

③研究の効果

- 新技術の獲得、省エネルギー、環境保全

3.8 スターリング機関

スターリング機関は、外燃機関であることによるサイクル最高温度の制限、高伝熱性能、低流動損失、コンパクトさ（デッドボリュームの減少）を同時に満足する熱交換器（加熱器、再生器、冷却器）を実現することの困難さ、流動抵抗とのバランスによる回転速度の制約、無潤滑ディスプレーサシールの耐久性等の問題があり、高効率、高出力の機関を実現する上で、この機関特有の問題を有している。スターリング機関では、熱効率や出力は各種熱交換器の伝熱性能や流動性能に複雑に関係しているが、これまで研究・開発されたスターリング機関の性能データに基づいてその性能を検討した。

これまでに作られた代表的なスターリング機関の要目を表3.1.8-1に示す。これらの作動流体最高温度はおよそ700 °Cで、熱効率は30～40%の範囲にある。しかし出力は、ほとんどが1ユニット当たり200kW以下で、小型の船用主機あるいは補機レベルの出力を目指したものは、

S R 173研究で実験的に作られた機関のみであった。^{1)~5)}

表3.1.8-1 代表的なスターリング機関の要目

開発会社	開発年	形式	Cyl.数	行程容積 cc	最高出力 PS	回転数 rpm	熱効率	回転数 rpm	平均圧力 atm	最高温度 °C	作動流体	用途
Philips	1954	RD	1	365	56	2100	38	1200	165	700 H ₂	ポート、発電用	
Philips	1959	RD	1	98	25	3500	33	120	210	700 H ₂	ポート、発電用	
Philips	1966	RD	4	235	200	3000			220	700 H ₂ or He	ポート、バス用	
Philips	1968	DA Sw	4	65	60							
Philips	1972	DA Sw	4	215	170	4000			200	750 H ₂	乗用車用	
United Stirling	1968	RD	4	235	200	3000			220	700 He	ポート、バス用	
United Stirling	1971	RD	4	615	200	2400	35	1000	150	H ₂		
United Stirling	1973	DA			100	2400	32	1200	150	H ₂		
MAN MWM	1971	RD	1	400	30	1500				110		実験用
SR173実験機関	1981	SA	2	5700	200	720	35	720	113	690 He	実験用(計画値)	
SR173実験機関	1981	SA	2	5700	89	556	21	556	110	702 He	実験用(実験点)	
SR173開発目標		DA	4		800			40	720	H ₂ or He	計画値	

RD:ロンピック型、SA:単動型、DA:複動型、Sw:スワッシュプレート型

表3.1.8-1に示された実験機関の要目から、膨張空間の最高ガス温度と圧力の関係をまとめると、図3.8-1が得られる。

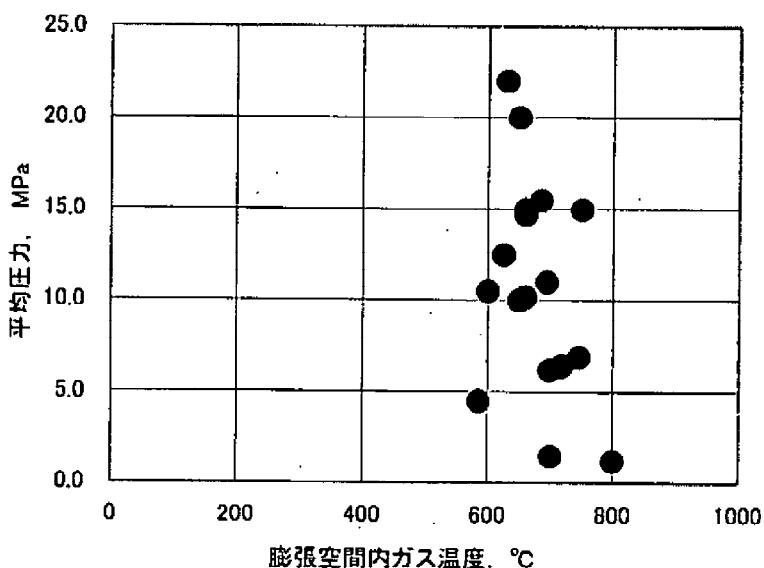


図3.8-1 最高ガス温度と圧力の関係

膨張空間の最高ガス温度は 700°C 程度であり、現用の材料（ヒータ管及びそのロウ付け材）の耐熱温度から200~300°C低い温度になっている。

図示熱効率は理想サイクルの熱効率の70%程度になることが経験的に知られているので、現状技術を想定すれば、熱効率を式 (3.8-1) で近似的に評価できる。

$$\eta = 0.7 \eta_b \eta_{mech} (1 - \tau) \quad \dots \dots \dots \quad (3.8-1)$$

ここで η_b はボイラ効率、 η_{mech} は機械効率、 τ は温度比である。 $\eta_b = 0.9$ 、 $\eta_{mech} = 0.9$

とし、サイクルの最高温度と最低温度をそれぞれ700°C、50°Cとすれば、 $\tau = 0.3$ となり、熱効率は約40%となる。耐熱材料の開発状況から、現状では40%を大幅に越える熱効率の実現は困難と考えられる。

平田がホームページ上で公開しているスターリング機関性能の推算法⁸⁾に基づいて、現状技術に基づいて作られるスターリング機関の膨張行程容積と回転数、出力の関係を推算した結果を図3.8-2に、膨張行程容積と比出力の関係を図3.8-3に示す。計算条件は、作動空間平均圧力を15MPa、膨張空間ガス温度を700°C、圧縮空間ガス温度を50°Cそして作動流体は水素とした。膨張行程容積を基準にした、単位体積当たりの出力（比出力）は、出力100kWのものでおよそ $100\text{kW}/(10^{-3}\text{m}^3)$ と推算され、総行程容積で単純に比較すれば4サイクルガソリン機関並となる。出力の上昇と共に、比出力、回転数ともに低下する傾向がある。

現状のスターリング機関の軸出力は、近似的に式 (3.8-2) で表される。

$$W_{out} = 0.2 P_m V_e (n/60) \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (3.8-2)$$

ここで W_{out} ：軸出力 (W)、 P_m ：平均圧力 (MPa)、 V_e ：膨張空間掃気容積 (cm³)、n：回転数 (rpm)である。

幾何学的な相似条件を保って大きくした場合、温度及び圧力の条件を一定（耐熱材料強度の制約）にするため、ヒータ管の厚み／直径比は一定に保つ必要がある。この場合、ピストン平均速度は一定（大きくなると回転数は低くなる）となる。これは熱交換器の流動損失及び無潤滑ディスプレーサシールの耐久性に起因するもので、従って作動流体の流動速度は同じになる。

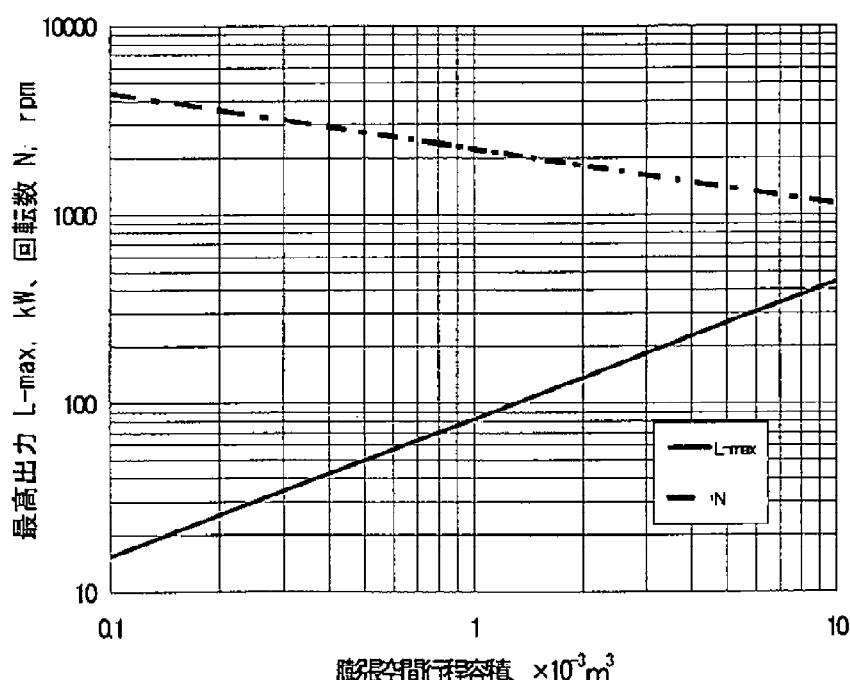


図3.8-2 出力と回転数と膨張空間行程容積の関係

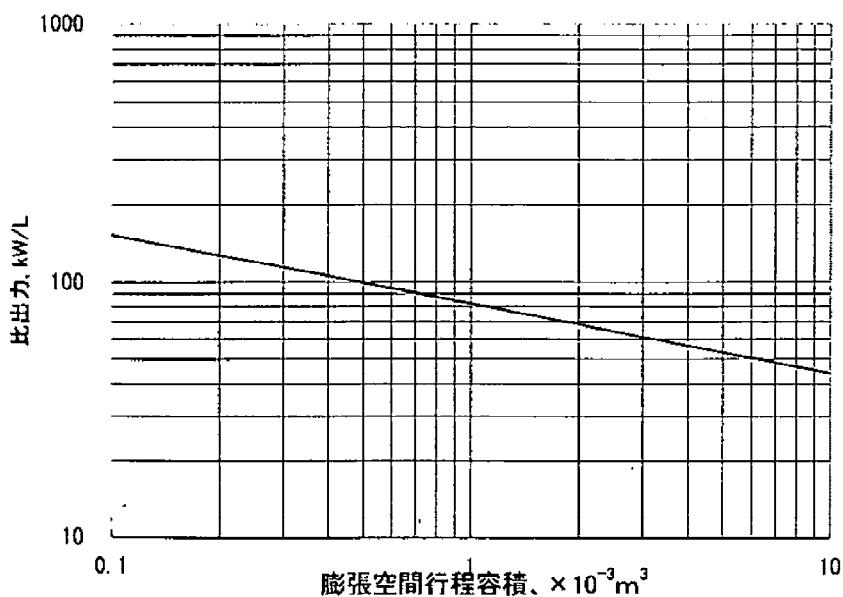


図3.8-3 比出力と膨張空間行程容積の関係

これらの条件によれば、比出力及び回転数は膨張空間掃気容積の $1/3$ 乗に逆比例し、出力は膨張空間掃気容積の $2/3$ 乗に比例する関係になる。ただし係数0.2は現用技術によるもので、この係数を大きくするには次のようなブレーキスルー技術を必要とする。例えば高性能熱交換器（高い伝熱性能と低流動損失）、高耐久無潤滑シールなどである。

大型の船用機関を想定した平田らの検討結果⁷⁾によれば、作動流体を実用的な空気とした例であるが、熱効率はおよそ30%程度であり、同程度の出力の現用ディーゼル機関に比較して熱効率面での優位性は見出せていない。また機関高さは大差ないものの長さがおよそ2倍になり、大きさの観点でも不利となっている。安全性、価格の問題を解決し、作動流体として水素又はヘリウムを使用することが可能になれば性能を改善し小型化できる。

いずれにせよ、スターリング機関は外燃機関であるため、加熱器伝熱面の耐熱強度が制約条件になり、大出力化しても、現用の耐熱材料では熱効率は高々40%になる。材料の耐熱温度は年々向上しているものの、大幅な上昇は望めず、熱効率40%、数百kWを越える出力のスターリング機関を、本研究が想定した時期に実現するための技術的道筋は見出せなかった。

参考文献：

- 1) 山下他4名、“スターリングエンジンの理論と設計”、山海堂、1999(H11). 3
- 2) 造研 SR173、“スターリング機関に関する研究”、研究資料No. 301、1978(S53). 3
- 3) 造研 SR173、“スターリング機関に関する研究”、研究資料No. 319、1979(S54). 3
- 4) 造研 SR173、“スターリング機関に関する研究”、研究資料No. 328、1980(S55). 3
- 5) 造研 SR173、“スターリング機関に関する研究”、研究資料No. 339、1981(S56). 3

- 6) <http://www.bekkoame.ne.jp/~khirata/index.htm>
- 7) 平田他1名、“20,000kW級船用スターリングエンジンの検討”、日本機会学会、第6回スターリングサイクルシンポジウム講演論文集、2002(H14).10

3.9 コンバインドサイクル機関

3.9.1 重点研究テーマの選択に関して

今後、コンバインドサイクル機関は以下の観点から需要増が予想され、研究開発を行なう価値がある。

(1) 環境問題

今後、厳しさを増す環境規制をクリアするためには、ガスタービンを用いたコンバインドサイクル機関は、ディーゼル等の他の機関に比べて非常に有利な立場にある。

(2) 船用機関の信頼性向上、維持管理費低減の可能性

ガスタービンを主体としたコンバインドサイクル機関は機関自体及びプラントとしての信頼性（冗長性を持たせた設計）は非常に高い。

陸上での定期メンテナンスにより維持管理費用は大きく抑制できる可能性がある。

(3) ガスタービン機関の初期投資額の低下が予想される背景

陸上においては、1基当たりの電気出力が100万kWを越える火力・原子力発電所に代わって中小規模電源を複数使用するシステムが注目されている。経済の浮き沈みに対応して時々刻々変化する電力需要に対して、柔軟に対応するためには、中小規模の分散電源をネットワークで結び、必要な電力に対して稼動電源の数を変える方法が非常に有効であると考えられている。

元々、負荷変動に柔軟に対応することを要求してきた船用機関は、この陸上ネットワークに必要とされている、信頼性が高く高効率な中小規模の分散電源そのものである。特に、ガス燃料にも対応可能であり、しかも環境調和型機関であるコンバインドサイクル機関は、陸上の高度エネルギー有効利用のために、今後、積極的に用いられることから、生産台数が増え、価格が大きく引き下がると予想される。

また、小型のコンバインドサイクル機関はアジアでの陸上発電所に対する需要があると考えられている。このことも価格を下げる要因となる。

(4) 客船用の機関プラントとしてのニーズ

客船は高付加価値船であり、今後も需要増が予想されるので、造船業発展のためにはさらなる高効率機関の技術開発は必須である。

客船では電気だけでなく熱（蒸気）も大量に必要とすること、排気ガスがディーゼル機関に比べ“クリーン”であること、信頼性を要求されること等から、コンバインドサイクル機関は客船には好都合である。

客船では航海のフェーズにより必要なエネルギーの形（電気、蒸気）が変化する。これに柔軟に対応するための蒸気タービン機関の熱電比可変システムは客船に特有な重要な技術の一つである。



図3.9.1-1 客船“Millennium”

図3.9.1-1 に示したのが、最初に建造されたガスおよび蒸気タービンのコンバインドサイクルを搭載した客船ミレニアム号の外観である。総トン数は91,000トン、水線長さ294m、乗務員数999名であり、船籍はリベリアとなっている。客室は全部で975部屋あるが、プライベートバルコニーが付いた部屋がその内590部屋あり、乗客定員は1,950名である。船内には、ショッピングアーケード、劇場、図書館、プール、サウナ、トレーニングジム、バスケットボールコートおよびカジノ等があり、一つの街を形成している。

機関システムは、コンバインドサイクルを採用しているが、従来のディーゼル機関と比べてNO_x排出量は80%低減、SO_x排出量も98%低減となっている。

図3.9.1-2に示したように、GEの航空転用ガスタービン（GT）であるLM2500+を2機、その排ガスの持つ熱で発生させた蒸気を利用した蒸気タービン（ST）1機により発電を行い、電気モーターを回転させ船を推進させる。燃料は軽油（Marine Gas Oil）を用い、大気圧復水器を採用したことに

より排気蒸気を船内で有効利用可能としている。

図3.9.1-3に実装したLM2500+の写真を示したが、このガスタービンの熱効率は39%であり、これ2機と蒸気タービンの合計最高電気出力は59MWとなっている。

ミレニアム号では、ポッド式推進モーターが用いられている。電気推進モーターは、船外のポッド中に収められ、直結したプロペラを回転させる。ポッド内は空気冷却され、モータ

一の発熱分を除去する。このポッド自体が周方向に回転可能であるので舵の役割もすることになる。

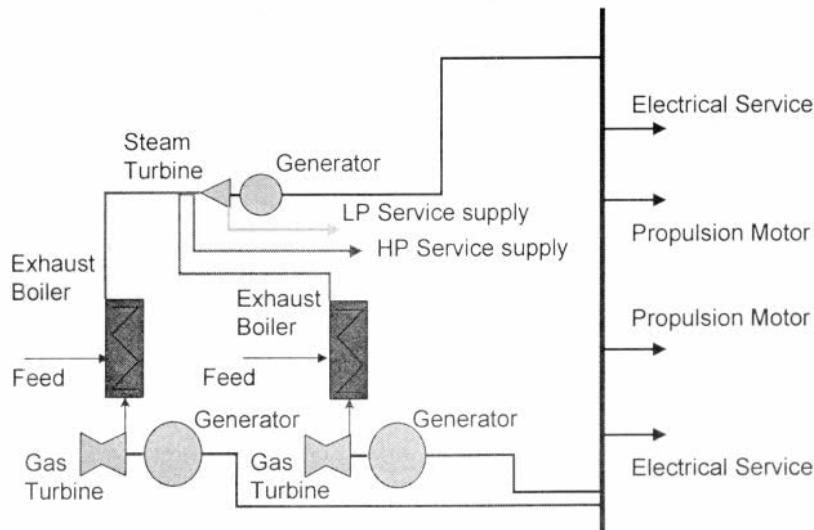


図3.9.1-2 エンジンシステムの概念図

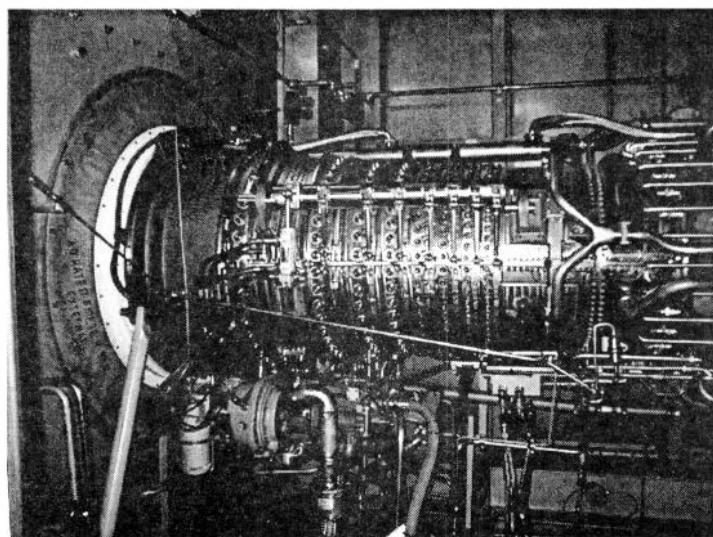


図3.9.1-3 ガスタービンの船内据付状況

また、発生した電気は推進だけではなく、船内の空調システムや照明等のサービスにも供給される。発電に使われなかった蒸気に関しては、熱源や洗浄等を目的として、高圧（HP 9 bar）および低圧（LP 3 bar）蒸気が船内に供給される。

複合サイクル機関に期待されるメリットとしては、

- ① NO_x、SO_x および排出粒子状物質（PM）を低減し、IMOの規制をクリアする

こと

- ② 客船にとって重要な煙突からの煙が見えないこと
- ③ 蒸気タービンを併用することによる燃費低減
- ④ 機関室の縮小による、客室等に使えるスペースの3～6%の増加
- ⑤ 高い信頼性
- ⑥ 船上での整備作業の低減
- ⑦ エンジン騒音や振動の低減

が挙げられる。

特に機関室スペースの縮小分を客室等に使うことは、ガスタービンの燃費がディーゼルよりも高いことを補った以上に、経済的に価値のあるものと考えられている。また、高い信頼性や船上での整備保守作業の低減は、人件費等の節約にもつながりこれも高い燃費を補うことになる。さらに、複合サイクル機関は、従来のディーゼル機関に比べて、補機類、パイプ、バルブや制御機器の点数がはるかに少ない。機器数が少ないと、据付や保守点検費用が安いことを意味している。ある試算によると、複合サイクル機関にすることによって、従来採用されていた中速ディーゼル機関に比べて機器数が90、ポンプ数が30、バルブ数が350、制御機器数が800、パイプやダクト長さが5,600m削減できるとされている。この削減されたパイプ類の重さは150トンにもなる。船全体としては、コンバインドサイクルの採用により約1,000トン軽くなり、推進力を1.6%削減することができた。

表3.9.1-1に示したのは、高速航海、通常航海、停泊中におけるエネルギーバランスである。高速航海ではG T 2機とS T 1機、通常航海および停泊時においてはG T 1機とS T 1機が用いられる。例えば通常航海においては、G T発電の効率は37%であり、これにS T発電を加えた発電効率は42%に達する。さらに蒸気を利用すると総合効率は48%に達する。また、高速航海と通常航海に必要とされるCoGES (Combined Gas turbine Electric and Steam systems)総合出力は、それぞれ53,500kWおよび28,700kWであるが、この大きな負荷の違いにも関わらず効率42%を維持している。これは、より高効率な大型G T 1機を用いた負荷変動システムとしないで、小型G Tを2機導入しその稼動数を変えることにより、効率を低下させること無く負荷の調整が可能となったことに依る。

表3.9.1-1 エネルギーバランス

Operation Mode	High Speed Transit	Cruise	In Port
Speed Requirements	> 22 Kn	18 Kn	0 Kn
Power Plant Configuration	2xLM2500+ & 1xSTG	1xLM2500+ & 1xSTG	1xLM2500+ & 1xSTG
Total GTG Output	46,000 kWe	25,000 kWe	10,000 kWe
GTG SFC	0.236 Kg/kWh	0.230 kg/kWh	0.310 Kg/kWh
GTG Efficiency	36 %	37 %	27 %
32 bar Steam Production	64,000 Kg/h	35,000 kg/h	19,000 Kg/h
STG Output	7,500 kWe	3,700 kW	1,500 kW
CoGES Output	53,500 kWe	28,700 kW	11,500 kW
CoGES SFC	0.203 Kg/kWh	0.200 kg/kWh	0.270 Kg/kWh
CoGES Efficiency	42 %	42 %	31 %
STG Exhaust to Service Steam	22,000 Kg/h	22,000 kg/h	19,000 Kg/h
Energy Available in Service Steam	3,776 kW	4,028 kW	4,276 kW
Total Plant Output	57,276 kW	32,728 kW	15,776 kW
Total Plant SFC	0.190 Kg/kWh	0.176 kg/kWh	0.197 kg/kWh
Total Plant Efficiency	44 %	48 %	43 %

(5) LNG船の機関プラントとしてのニーズ

- LNG船では蒸気タービン機関が主流である。しかし、近年、蒸気タービン機関より効率が高い機関の要求がある。
- LNG船は高付加価値船であり、今後も需要増が予想されるので、造船業発展のためには高効率機関の技術開発は必須である。

(6) コンバインドサイクル機関における小型蒸気タービンの高効率化ニーズ

- 今後、ガスタービン+蒸気タービンのコンバインドサイクル機関ではプラントの効率を上げるには小型蒸気タービンの効率を上げることが重要となる。

3.9.2 重点研究テーマ

コンバインドサイクル機関の重点研究テーマは以下のとおりである。

(1) コンテナ船等の貨物船を対象とした最適コンバインドサイクルの確立

客船“Millennium”では、推進+船内サービスの総合効率用に48%である。また、陸上で熱効率50%を超えるものがある。

一般に陸上、舶用とも大出力機関は高効率のコンバインドサイクルは実用化されているが、

中・小出力機関では実用化されていないのが現状である。

のことより、コンテナ船等の貨物船に必要とされる一般的な出力領域に対応できるコンバインド機関の研究開発は価値があると思われる。

舶用では機器のクイックスタート、機器の最適な負荷分担システムは重要である。また、コンバインドサイクル機関では機器が複数台となることで運転が複雑となり自動化は重要である。

① 研究開発テーマ名

- コンテナ船等の貨物船を対象とした最適コンバインドサイクルの確立

② 研究の範囲

- 一般的な貨物船の出力範囲に関して以下の研究を行う。
 - 開発中の新型ガスタービンの調査、最適ガスタービンの選定、コンバインドする相手機関の選定、推進システムの検討、総合熱効率評価、各船種適用に関する技術問題の解決
 - コンバインドサイクル機関の自動化のシステム検討

③ 研究の効果

- 省エネルギー、環境保全

(2) 客船を対象とした最適コンバインドサイクルの確立

客船では電気出力だけでなく熱（蒸気）も大量に必要とするので、前述の貨物船とは異なる仕様の要求がある。

研究内容は基本的には、前述(1)の「コンテナ船等の貨物船を対象とした最適コンバインドサイクルの確立」と同じである。

① 研究開発テーマ名

- 客船を対象とした最適コンバインドサイクルの確立

② 研究の範囲

- 開発中の新型ガスタービンの調査、最適ガスタービンの選定、コンバインドする相手機関の選定、推進システムの検討、総合熱効率評価、客船への適用に関する技術問題の解決
 - 蒸気タービン機関の熱電比可変システムの試設計、模型製作、試験
 - コンバインドサイクル機関の自動化システム検討

③ 研究の効果

- 省エネルギー、環境保全

(3) LNG船を対象とした最適コンバインドサイクルの確立

欧州では、LNG船へコンバインドサイクル機関を採用している。今後、LNG船の建造量が増加すると考えられ、現在の主流の蒸気タービン機関より高効率の機関の検討を行なう社会要請があり、LNGボイルオフガスを燃焼させるガスタービン機関と他機関を組み合わ

せたコンバインドサイクル機関の研究は価値があると考えられている。

(1)、(2)と同様に最適な自動化の検討も行なう。

LNG船に関するコンバインドサイクル機関の研究に関してはガスタービン機関に関する研究開発テーマとしても抽出されている。

① 開発テーマ名

- LNG船を対象とした最適コンバインドサイクルの確立

② 研究の範囲

- 開発中の新型ガスタービンの調査、最適ガスタービンの選定、コンバインドする相手機関の選定、推進システムの検討、総合熱効率評価、各船種適用に関する技術問題の解決
- コンバインドサイクル機関の自動化のシステム検討

③ 研究の効果

- 省エネルギー、環境保全

(4) 小型蒸気タービンシステムの高効率化

船舶でガスタービンと蒸気タービンのコンバインドサイクル機関を考えた場合、蒸気条件が悪いため（低温度、低圧力）、蒸気タービン効率が低く、全体の効率に影響することが想定される。

そのため、コンバインドサイクルでは小型蒸気タービンシステムの高効率化は重要である。

① 研究開発テーマ名

- 5 MW以下の小型蒸気タービンシステムの高効率化

② 研究の範囲

- 三次元翼等の高効率タービン技術に関する調査、小型蒸気タービンの試設計、模型製作、試験

③ 研究の効果

- 省エネルギー、環境保全

3.10 推進器

3.10.1 重点研究テーマの選択について

(1) ポッド型電気推進装置

環境問題および省エネ（駆動源の分散化）の観点から船内機器の電動化が進み、さらに舶用燃料電池機関の実用化により電気推進が最適システムになると予測される。

特に近年、船体設計の自由度が増し、船型開発により推進効率が向上するなど盛んに研究されているポッド型電気推進装置は今後もメインテーマになるであろう。

この推進装置の研究開発は、米国で実用実験されている高温超伝導モーターの実用化にも直ちに対応でき、米国企業が開発しているリム・ドライブ・プロペラなどの新しいプロペラ

の概念（電動機と一体となったプロペラ）にも容易に対応できる基礎技術を蓄積できるだけでなく、推進器メーカと電動機メーカにとって将来発展のための必須技術と言える。

なお、リム・ドライブ・プロペラの特徴は以下のとおりである。

- ① リム・ドライブ・プロペラとは、電動機のステータコイルをダクトプロペラのダクト部に設置し、外周リング付きのプロペラの外周部（電動機ローター部）に永久磁石を設置する永久磁石型の電動機である。電動機であるので、ダクト部とリム部のクリアランスは最小（1 – 3 mm）かつ一定に保つため、プロペラに接続されるプロペラ軸の後方に海水潤滑のスラストベアリングを介してステータが設置され、ステータがダクトとリムの位置決めをすることになる。
- ② リムドライブの主な利点
 - ポッド内に電動機が無いため、プロペラシャフトを収めるポッドが非常に小さくなる。（長さで従来の1/3）したがって、旋回径が小さくなり、従来型ポッドより多数配置が可能である。
 - 船尾変動圧が小さいため、プロペラと船体とのクリアランスを小さくでき、プロペラの大径化、低回転化が可能である。さらに、キャビテーション性に優れるため、翼面積を小さくでき、ステータによるプロペラ後流の整流により推進効率が向上する。

(2) 低摩擦プロペラ

プロペラ効率を下げる三つの、①流体の加速に伴う運動量損失、②粘性抗力、粘性抵抗による損失、③後流の回転による損失がある。

①流体の加速に伴う運動量損失に対して、低回転・大直徑プロペラ化が解決策であり、③後流の回転による損失に対して、二重反転プロペラが解決策である。

しかし、②粘性抗力、粘性抵抗による損失に対しての解決策は実用化されていない。

地球温暖化ガス（CO₂）削減に直接寄与する効率の向上要求は益々大きくなることから、最新の表面改質技術の適用による低摩擦プロペラの実用化を追求すべきである。

3. 10. 2 重点研究テーマ

推進器に関する重点研究テーマは以下のとおりである。

(1) ポッド型電気推進システム

① 研究開発テーマ名

- 新形式ポッド型電気推進システムの調査研究

② 研究範囲

- 現在欧米で研究開発されているリム・ドライブ・プロペラの調査研究及び高温超伝導モーターの実用化・国産化・ポッドへの応用の調査研究
- 試設計し、性能試験用模型を製作し推進性能を確認する。実用化、採算性評価のための

基礎資料作成。次期研究開発テーマの提案。

③ 研究効果

- ・推進システム技術開発の国産化の促進。舶用工業の進歩発展に寄与。

(2) 低摩擦プロペラ

① 研究開発テーマ名

- ・化学的表面処理技術のプロペラへの応用の調査研究

② 研究範囲

- ・金属表面処理において、摩擦抵抗低減になる処理について調査し評価する。有望なものについて、基準とする模型プロペラに適用しプロペラ単独性能試験を実施し検証する。

③ 研究効果

- ・低摩擦プロペラの表面処理技術の確立。
- ・新規性のあるプロペラの誕生。他機器、部品への応用。
- ・省エネルギー

4. 得られた成果

時代の要請に即した舶用推進システムの質的転換を図るとともに、国民生活の向上、地球規模での環境保全等の新たな視点を踏まえ、近未来にブレークスルーを必要とする技術課題を抽出するための調査・研究を平成13年度と14年度の2年間にわたり実施した。

平成13年度は既存の舶用推進システムにおける現状の性能、特性等を調査し、課題を整理した。平成14年度はこれらのデータを基にして、2010～2015年をめどに舶用推進システムの創造的展開を図るための技術課題を環境対応、信頼性および経済性等の視点に立って抽出し、各機種別に以下の重点研究テーマを提案することとした。

(1) 低速ディーゼル機関については、今後とも粗悪燃料油の使用が続き、さらなる環境負荷低減および信頼性向上が求められるので、次のような課題があげられる。

① 低質油の使用を考慮した舶用脱硝装置の研究開発

② 信頼性向上のための船陸一体型管理システムの研究開発

(2) 中速ディーゼル機関についても、さらなる性能向上や環境対応技術の開発、新燃料への転換技術等が必要とされるので、次のような課題があげられる。

① 中速ディーゼル機関を搭載した船舶の燃料消費量の低減化

② 環境対応技術（低速ディーゼルと同じ）

③ LNG船への中速ディーゼル機関の採用

④ 新燃料（GTL、DME）の採用に関する研究

⑤ 信頼性・保守性の向上（低速ディーゼルと同じ）

(3) 蒸気タービンについては、暖気システムに関して熟練オペレータの経験を自動化・システム化する必要があり、次の課題があげられる。

① 船用蒸気タービン主機関の自動暖気システムの研究開発

(4) ガスタービンについては、高温材料の開発などにより今後性能向上が期待されるが、その特徴を生かすには他機関との複合化が必要であり、(6)のコンバインドサイクルにまとめて提案している。

(5) 燃料電池については、今後の開発が期待される重要な研究課題であり、次の研究テーマがあげられる。

① 船舶への燃料電池・ガスタービンのコンバインドサイクルの適用研究

(6) コンバインドサイクル機関については、今後ますます重要な船用推進機関となることが予想される。そのため船種ごとに検討すべき技術課題がある。また、船用推進プラントにおけるコンバインドサイクル成否の鍵は小出力蒸気タービンの熱効率向上にかかっている。そこで、次の課題があげられる。

① コンテナ船等の貨物船を対象とした最適コンバインドサイクルの確立

② 客船を対象とした最適コンバインドサイクルの確立

③ LNG船を対象とした最適コンバインドサイクルの確立

④ 5 MW以下の小型蒸気タービンシステムの高効率化

(7) 推進システムについては、電気推進化が進み、船型形状の最適化にも及ぶ重要な課題があること、また、粘性摩擦の低減が重要となることから、次の課題があげられる。

① 新形式ポッド型電気推進システムの調査研究

② 化学的表面処理技術のプロペラへの応用の調査研究

なお、高速ディーゼル機関についても「新燃料（GTL、DME）の採用に関する研究」が提案されているが、(2)の中速ディーゼル機関のところで取り上げられているので省略した。また、メタノール機関とスターリング機関については船用推進機関への適用は実用上考えられないもので、重点研究テーマとしては提案しないこととした。

平成13年、14年の2年間で調査研究を行ってきたが、近未来の2010～2015年をめどに船用推進システムの創造的展開を図るために重点研究テーマを抽出し、提案できたと考える。

5. 成果の活用等

本研究結果から、従来のディーゼル機関や蒸気タービンについては熱効率のさらなる向上は非常に困難で、環境対応技術、信頼性向上技術、保守の自動化等について地道な研究を継続していく必要がある。

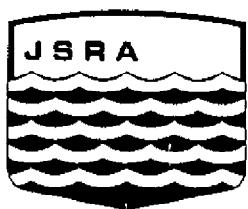
熱効率のさらなる向上を実現するには、単体の機関では不可能で、ガスタービンを中心としたコンバインドサイクルとする必要があり、蒸気タービンとのコンバインドおよび燃料電池とのコンバインドが重要な研究課題となる。蒸気タービンとのコンバインドでは小出力蒸気タービンの熱効率向上がキーポイントとなる。

また、推進システムについてはポッド型電気推進システムの調査研究は早急に進める必要がある。

最後に、本研究の実施にあたりましては、日本財団より多大なご支援をいただいたことに対し深く御礼を申し上げるとともに、終始積極的に研究に取り組んでいただいた委員各位に感謝する次第である。

発行 平成15年3月
発行所 社団法人 日本造船研究協会
〒105-0001 東京都港区虎ノ門一丁目15番16号
海洋船舶ビル6階
電話 総務部 03-3502-2132
研究部 03-3502-2133
FAX 03-3504-2350

「本書は、競艇の交付金による日本財團の助成金を受けて
作成したものを増刷し頒布するものです。」



The Shipbuilding Research Association of Japan