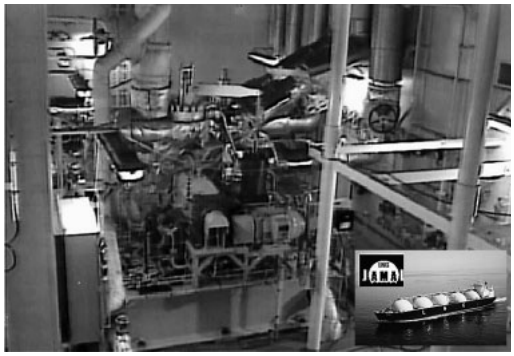
特　集　論　文

次世代LNG船の推進プラント開発動向とハイブリッド推進



Development of Next Generation LNGC Propulsion Plant and HYBRID System

岡　　勝[*1]　Masaru Oka
平岡和芳[*2]　Kazuyoshi Hiraoka
津村健司[*3]　Kenji Tsumura

最近のLNG船商談では蒸気タービン推進に替わる推進方式の要求が珍しくない．その背景には，世界的なLNG需要急増と新しいLNG取引契約形態の出現があり，多くの新規LNGプロジェクトにおいて，船型の大型船化や新推進システム導入により輸送コストを改善しようとする気運を高めている．一方，急激な新造船建造の増加は，熟練度が要求される蒸気タービン推進の要員不足も深刻化させた．近年，BOG再液化装置や混焼ガスエンジンに代表される技術の実用化が相次いだが，これらはそのようなLNG船市場の時流に沿った動きである． 現在，“ディーゼル化”を中心に進んでいる代替推進であるが，当社では様々な方式の開発に積極的に取り組んでいる．本論では，代替推進の最新動向を交えながら，当社が世界に先駆けて提案する“ハイブリッドLNG”方式を紹介する．

1. はじめに

現在就航している全てのLNG船(注1)は，混焼ボイラを装備した蒸気タービン推進を採用している．

オイルショック以降，ほとんど全ての商船で熱効率の良い低速ディーゼル主機(注2)直結推進方式への変換が進んだが，LNG船では，現システムがボイルオフガス（BOG）を安全かつ有効に処理できる最適な方法であったため，全てのLNG船が採用している．

深冷状態でLNGを運搬するLNG船では，タンク外からの侵入熱により不可避的にBOGが発生する．タンク圧上昇の抑制のため，これをボイラの燃料として処理し,蒸気タービン主機で推進力として利用する．燃焼熱量が推進力に対し余る場合は蒸気ダンプで海水へ投棄し，不足する場合はC重油，若しくはLNGの強制蒸発による追焚で所要熱量を賄う．このようにLNGからC重油まで燃料とすることが可能であり，最も経済的な運転が選択できる仕組みになっている．また，稼働率・信頼性・保守性は代替方式より優れており，熱効率以外に代替推進方式から劣る点はない．

しかし，一般商船では馴染みの薄いプラントになってしまった上，乗組員の習熟度への要求も高く，新造船の急増に見合った船員の育成と確保が厳しくなっていおり，代替推進化を促す主な要因になってきた．

注１：ここで“LNG船”は大気圧下の飽和状態で大規模輸送する船舶を意味し，蓄圧式の小規模輸送船は除外する．
注２：２サイクル・ロングストロークディーゼル機関．

2. 代替推進プラント

2．1　推進プラントの要件

LNG船の推進方式に求められるのは熱効率の改善だけではない．安全で無駄の少ないBOGの処理が求められる．無駄なく処理するには，“各種機関の燃料”として利用するか，“再液化して保全”する方法がある．BOG再液化やガス焚機関に関する技術は，舶用分野で近年急速に実用化された．

(1) BOG再液化プラント（**図１**）

当所で建造し，2000年11月に就航したS/S LNG Jamalは，世界で初めて再液化システムを搭載したLNG船である．2003年８月，初回ドックでの開放検査を無事終えて，約4年の運転実績がある．本船の推進方式は従来の蒸気タービン方式を採用，安価なC重油を燃料とし，積荷航海中のBOGを再液化で保全して運航されている．

再液化プロセスは窒素を冷媒としたブレイトンサイクルによる間接冷却方式を採用，BOGは加圧状態で液化，過冷却してタンクへ戻す．冷媒窒素は本船上で空気より製造するので補給の必要はない．BOGの圧縮はボイラ供給と共用するため，遠心式の単段圧縮機（電動）を２台連結して昇圧する方式を採用した．窒素圧縮は３段圧縮遠心式で１，２段は蒸気タービン駆動とし，３段目は窒素膨張機駆動で動力回収する．また，専用制御装置の開発により，

[*1] 長崎造船所造船設計部計画課
[*2] 長崎造船所造船設計部機装設計課主席
[*3] 長崎造船所造船設計部計画課

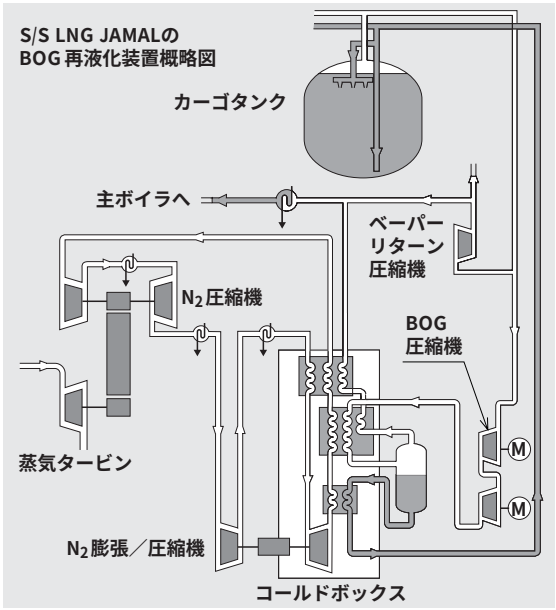


図１　LNG Jamal再液化システム概略

起動手順の自動化及び通常航海中の無人化連続運転が実現し，オペレータの負荷や熟練度の軽減がなされた．

(2) 混焼エンジン（DFE ： Dual Fuel Engine）

高い熱効率（48 % 低位発熱量ベース）と低NOx性（～３kg/kWh：ガス燃料時）を達成する発電機駆動用４サイクル内燃機関(注3)で，仏オルストム社造船所で建造中（2004年現在）の電気推進LNG船の主機関として採用された．

ガス燃料を主としディーゼル油をパイロット燃料とする“ガスモード（オットーサイクル）”と，“油モード（ディーゼルサイクル）”を切り替えて運転できる機関で，混焼エンジン（以下DFE）と呼ばれる．

同じく混焼機関である高圧ガス噴射式ディーゼル機関に較べ，ガス圧が約５barと非常に低く，安全性に優れ，舶用として受け入れられ易い．また，ガス専焼機関との違いは，LNGを積まない航海においてディーゼル油のみでの運転が可能であり，主機関構成をシンプルにする．

注３：Wärtsilä社製50DFの性能データによる．

２．２　代替推進方式一覧

有力な代替推進は，ディーゼル推進化が軸になっているが，当社ではそれらに加え，蒸気タービン推進の高効率化やガスタービン利用まで，幅広く開発を進めてきた（**図２**）．

機関の動力を推進力（プロペラ回転力）に変換する方式には直接方式と間接方式がある．

(1) 直接方式（機関直結）

大出力，且つ広い出力範囲での運転性能に優れた低速ディーゼル主機は，固定ピッチプロペラに直結して駆動することができる．また，大型商船で一般的な機関であり，運転要員の確保の問題はない．稼働率や保守負荷の面で蒸気タービンに劣るので，冗長性確保の目的で同型機２基（＝２軸船型）を要求される場合が多い．なお，高圧ガス噴射方式の低速ディーゼル機関も発電施設用として実用化されているが，信頼性・実績・高圧ガス取扱い等の理由で舶用では好まれず，別途BOG再液化プラント等のBOG処理系との組み合わせが選択される．

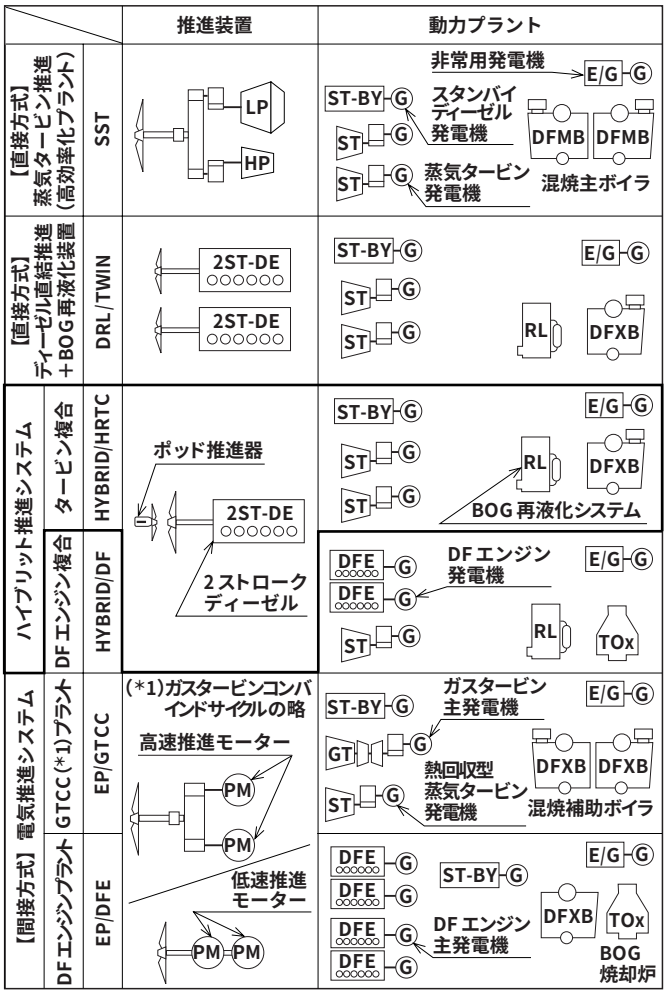


図２　代替推進システム候補

(2) 間接方式（電気推進）

運転性能上DFEやガスタービンのプロペラ直結方式は難しいと考えられており，電気推進による間接方式が選択される．プロペラを駆動する電動機は２基を連結した冗長性の高い構成が求められ，高速型２基を減速する方式と，低速型の直結方式が候補とされる（前述の新造電気推進船では減速方式を採用）．電気推進は高信頼性で振動・騒音が小さいことから客船用主機として知られるが，高価な装置ゆえに大型商船では採用されていない．初期投資の高さに見合った燃費改善が実現できるかが焦点となる傾向にある．

3．ハイブリッドLNG推進

当社が独自に提案する“ハイブリッドLNG”は，推進部とBOG処理部各々において，ディーゼル直結推進と補助電気推進，再液化系とガス燃焼系を複合したシステムである．

3．1　推進部のハイブリッド

当社で建造し，2004年６月に就航したフェリーが世界で初めて採用したCRPポッド方式（**図３**）は次世代高速コンテナ船等，高速船や大出力船の推進方式として有望視されている．同方式は大出力化，燃費改善，高操船性が比較的容易に達成できる．

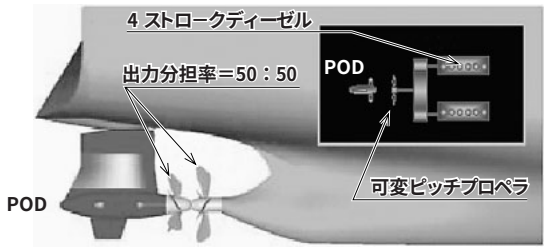
ハイブリッドLNGの推進部も類似した構成で，低速ディーゼル主機と電気推進部（POD）により構成する．

主機とPODの出力分担率はPOD単独による港内航行（低速航行）を基本要件とした上で，大洋航海での付加推進力を考慮して決定する．

3．2　BOG処理部のハイブリッド

ハイブリッドLNGの補助動力系統は再液化系統と連携し，状況に併せて再液化量と燃焼処理量を調整することでBOGを安全かつ効率的に処理する（**図４**）主機関排熱やBOGの一部を燃焼した際に発生する熱を利用するコジェネレーションシステムは，大きな動力消費先であるPOD電力や液化動力を供給する．LNG船の場合，液化動力はその他の船内動力に比べてかなり大きい（135 000～200 000 m³船型において，全量液化する場合，３～５ MW）．

本システムは再液化システムも含め，既存の舶用（商用）技術で構成されており，乗組員の熟練への依存度は他の代替推進方式より低いと思われる．



新日本海フェリー（株）向“はまなす”

図３　フェリーに適用されたハイブリッド推進

3．3　ピークシェービングによる液化プラント最適化

LNG船のBOG量は一航海で大きく変動する（**図５**）．

ハイブリッドLNGは一時的に多量のBOGが発生する場合，液化能力を超える分をボイラの燃料（熱源）として利用する．この液化のピークシェービングにより再液化システムは積荷航海の自然BOG量に最適化され，高い効率での運転が可能となる．

3．4　環境保全への対応

近年，欧州沿岸や米国西海岸海域を先鋒に低硫黄分燃料の義務化や，主機関や発電機関からの窒素酸化物（NOx）排出規制の強化の動きが活発化している．

LNGは硫黄分を含まないクリーンな燃料でもあり，

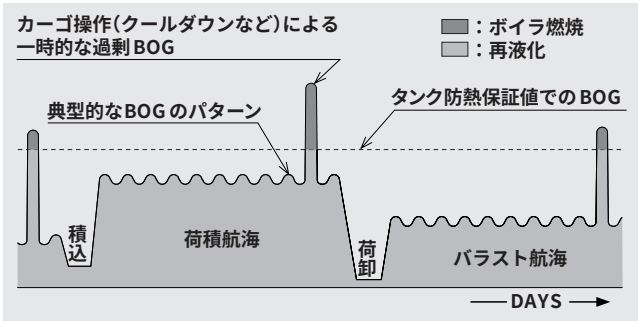


図５　BOG発生パターンと液化のピークシェービング
再液化システムの容量は，自然ボイルオフ（タンク防熱保証値）を設計点とし，一時的に過剰発生する分はボイラ燃料とする．

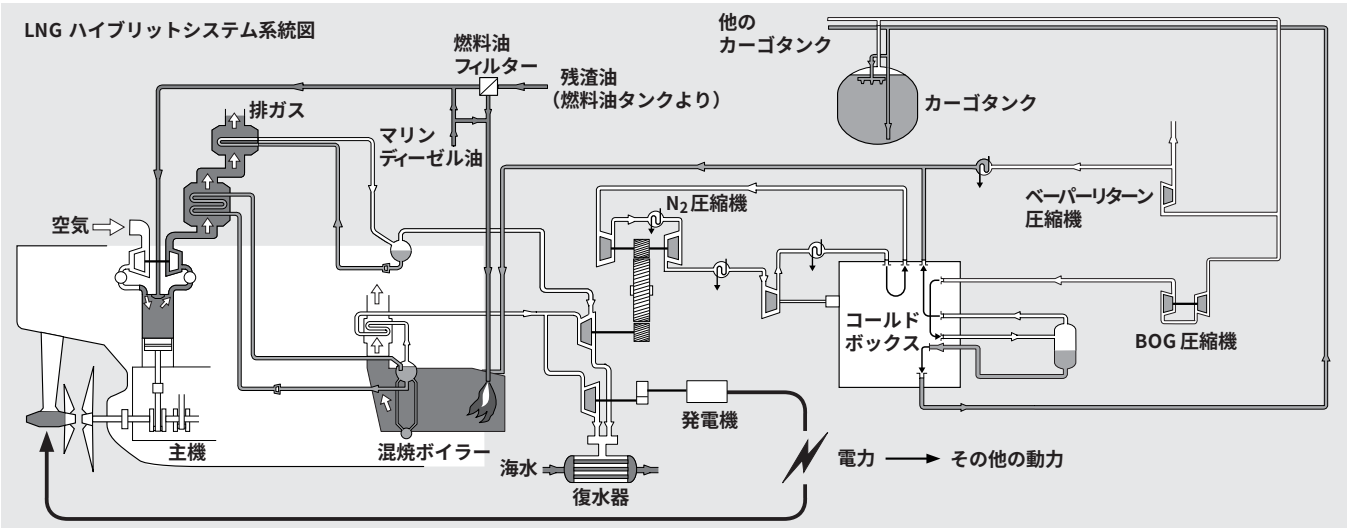


図４　ハイブリッドシステムの概要

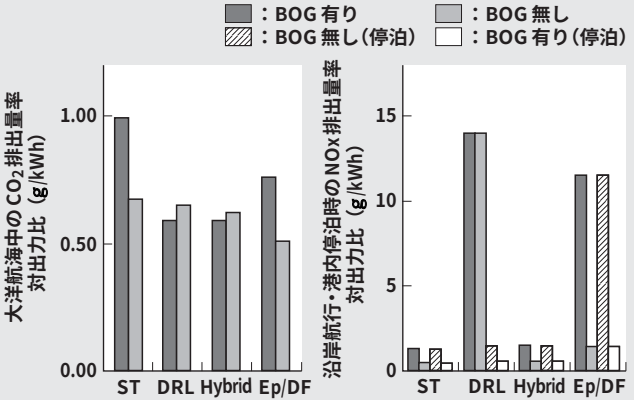


図６　CO2，NOx排出量比較

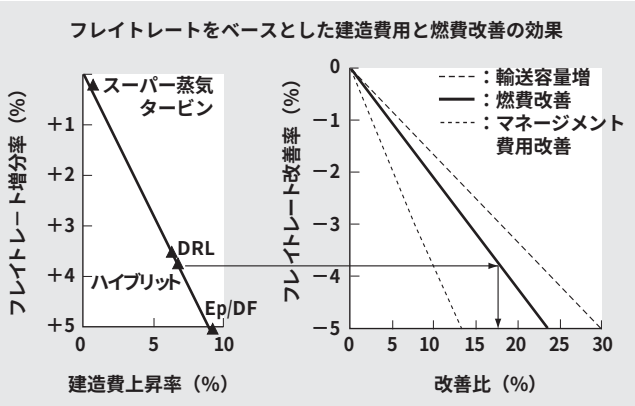


図７　輸送費改善効果と船価　輸送費をベースにした燃料費改善と船価増の均衡線.

A重油や低硫黄重油よりは安価である．ハイブリッドLNGは，大洋航海において高熱効率のディーゼル主機を主力に航行しBOGは再液化して保全するが，沿岸及び港内航行の低負荷時はポッドで巡航，BOGをボイラ燃料とし，余剰分を再液化して保全する．余剰ガス処理の無駄も無い上，高価なA重油や低硫低硫黄分重油等を使うことはなく，硫黄酸化物（SOx）排出量をゼロにする．またボイラによるガス燃焼プロセスは，内燃機関のそれに較べてNOx排出量が極めて少ない（**図６**）.

4．輸送費低減効果の評価

4．1　船価と燃費改善

いずれも大幅な燃費改善が期待される代替推進方式だが，全てにおいて初期投資は上昇する．これらが相殺した上で，総合的な輸送費の低減に繋がらなければ代替の魅力はない．ハイブリッド方式の場合，船価上昇に対して，燃費削減率で15～20 %の付近で均衡する（**図７**）

4．2　燃費の評価

一方，燃費はLNG／燃料油の単価（比）に依存する（**図８**）．単価比はLNGの取引形態（CIF・FOB等）

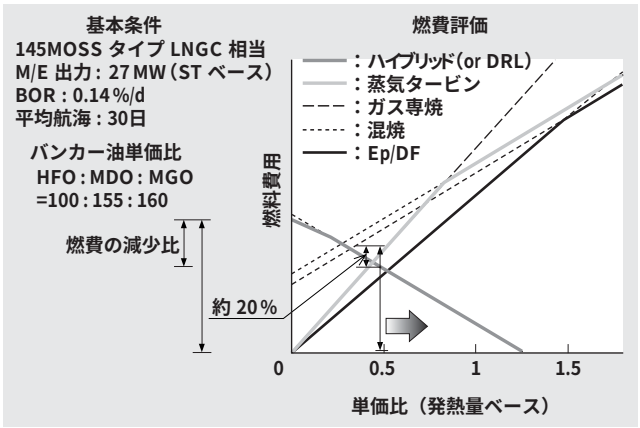


図８　燃費比較　横軸はLNG/C重油の価格比．最近の市況で現実的な値は～１．なお，再液化で保存されるBOGは，LNGと同価として燃費より差し引いて評価.

や燃料油市況により変動するので，なるべく広い領域での燃費改善が望まれる．ハイブリッドLNGの場合，BOG（LNG）単価がC重油単価のおよそ半分以上であれば輸送費改善が期待できる.

5．ま　と　め

LNG船の推進方式は蒸気タービンの寡占状態であったが，今後は幾つかの推進方式が共存する可能性がある.当社は各種代替推進方式の開発を進めているが，特に“ハイブリッドLNG”は，熱効率，燃料選択の自由度,環境保全等における優れた特徴を備えており，あらゆる客先の要望に沿った方式といえる．今後，積極的に新造LNG船市場に提案していきたい.

BOG再液化装置については，大阪ガス(株)，日本郵船(株)，千代田化工建設(株)を始め多くの関係各位にご指導戴きました.この機会に感謝の意を表します.

参　考　文　献

（1）N. Hatanaka et al, Osaka Gas Co.,Ltd, A Challenge to Advanced LNG Transport for the 21st Century-LNG Jamal: New LNG Carrier with Re-liquefaction plant, LNG 13（2001）
（2）M. Oka et al, Mitsubishi Heavy Industries Ltd, Proposals for LNG C Propulsion System with Re-Liquefaction Plant: Review from the World's First Application, GASTECH 2002（2004）
（3）M. Oka et al, Mitsubishi Heavy Industries Ltd, Advanced LNG Carrier with Energy Saving Propulsion Systems: Two Options, LNG 14（2004）

岡勝

平岡和芳

津村健司