

天然ガスを燃料とする環境負荷低減船舶

Environmental Friendly Ship with LNG as Fuel



雲石 隆司*1
Takashi Unseki

今まさに船舶に対する環境保全・改善への要請が高まっており、国際海事機関(IMO)においてNO_x、SO_xのみならず、トン・マイル当たりのCO₂排出量も規制(EEDI:Energy Efficiency Design Index)することが批准されている。それらに対応する有望策の一つとして、これまで使用していた重油燃料をLNG燃料へと変換することが検討、実施されている。本報では当社開発のLNG燃料を適用することで環境負荷の低減を図ったコンセプト船を紹介する。

1. はじめに

IMOの2016年より適用されるNO_x排出3次規制は1次規制比80%減と機関内部の燃焼技術改善のみでは達成困難なレベルと考えられ、各種技術の組合せ、あるいは別のアプローチが必須である。またCO₂排出規制(EEDI)は機関のNO_x排出削減技術にとっては相反するものである。SO_x規制に関しては2015年よりECA(大気汚染物質放出規制海域)域内においては燃料中の硫黄分含有量が0.1%以下に規制され、Global域でも2020年から0.5%に規制されるため低硫黄燃料への転換、脱硫装置等、技術革新が求められている。それら規制に対する解決策の一つとして、これまで主として使用していた重油燃料をLNG燃料に転換することで、NO_xを大幅に削減できる可能性があり、またLNGは硫黄分を含有していないためSO_xフリーである。更に燃焼によるCO₂発生も低減傾向にあるためその将来は有望である。当社はLNG燃料を船舶に適用する際の課題を整理し、LNGを燃料とすることで、環境への負荷を大幅に低減したROPAX(Roll-on/Roll-off Passenger)とVLCC(Very Large Crude Oil Carrier)を開発した。

2. IMO 環境規制

2.1 ECA

海洋においては2005年開催のIMO MEPC53(第53回海洋環境保護委員会)においてバルト海と北海の一部をECAに指定。続いて2009年MEPC59では米国、カナダの沿岸200海里もECAに指定され、今後も段階的な規制強化、及び指定海域も拡大される。特に2016年から適用されるNO_x3次規制ではECA域内において1次規制対比80%削減を目標としている(図1)。また、SO_xに関しても2015年よりECA域内においては燃料中の硫黄分含有量が0.1%以下に規制される(図2)。

*1 船舶・海洋事業本部 船海技術総括部 技監・主幹技師

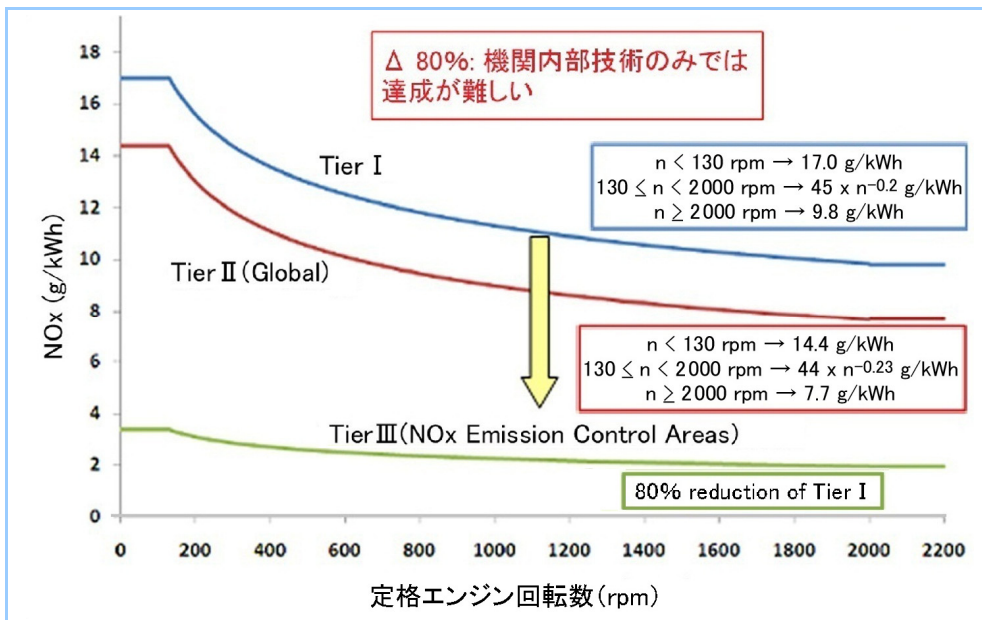


図1 IMO NOx 規制

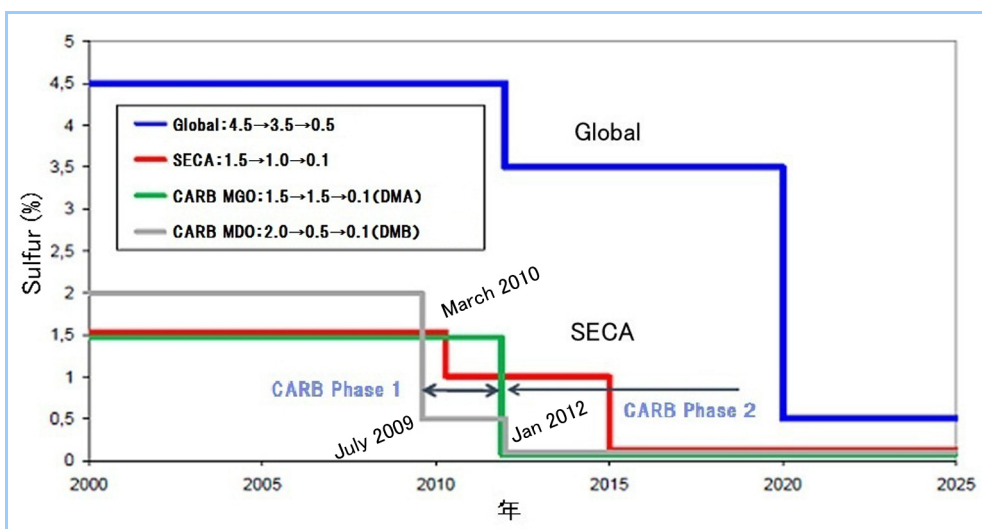


図2 IMO 及び CARB(カリフォルニア大気資源局)の Fuel Sulfur 規制

2.2 燃料油使用による ECA 対策技術

各機関製造者において検討されている対策技術概要は以下のとおりである。SO_x 対策については低硫黄燃料への切り替え以外に、排ガスを海水または清水(中和剤注入)により洗浄し、排ガス中の SO_x を規制値まで低減する装置が検討、搭載されている(図3)。

NO_x 対策については機関形式により対策、検討内容も多岐にわたり、排ガス脱硝装置(図4)、排ガス再循環システム(図5)等、複数の技術が検討されている。

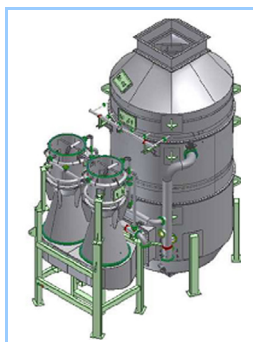


図3 排ガス脱硫装置

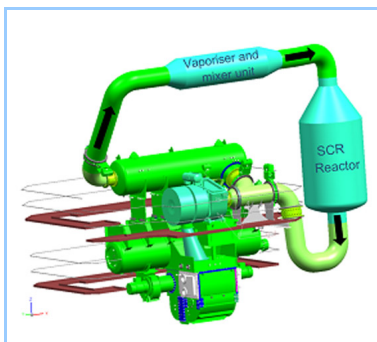


図4 排ガス脱硝装置

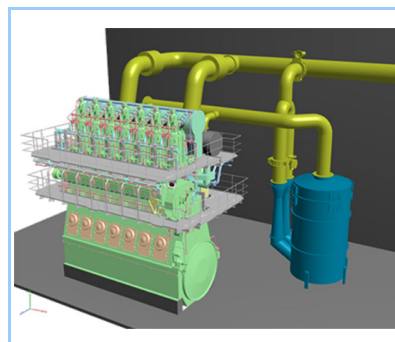


図5 排ガス再循環システム

2.3 LNG 燃料使用による ECA 対策技術

燃料油を LNG 燃料に転換することにより、特に4サイクル機関では最も厳しい規制に適合するだけではなく、それを超える環境特性を有することが確認されている。特に Spark Igniter 着火方式のガス機関においては排ガス中の SO_x 及び PM はほぼ 100%削減が可能であり、NO_x 及び CO₂ も各 90%以上、20%以上の削減が可能(図6)。ただし、現状の4サイクル機関の大きな課題は、1~2%のメタンスリップ(未燃焼メタンの排出。メタンは温暖化係数 CO₂ 対比 25 倍)が発生することで、これを削減するための技術が検討継続されている。

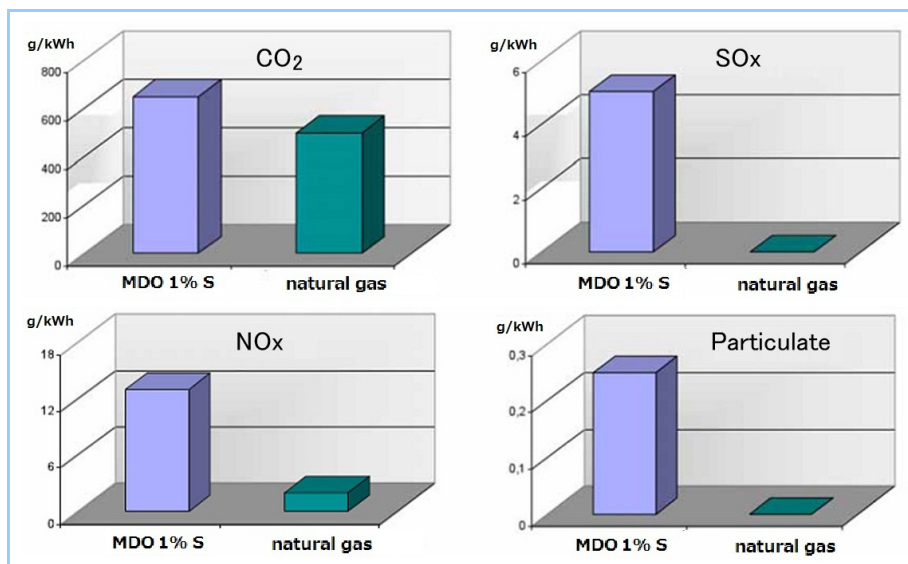


図6 4サイクル機関マリン Diesel Oil と LNG 燃料の Emission 比較

3. LNG 燃料船の課題

3.1 LNG タンク方式

タンク方式については表1に示すように5種類の形状/形式が想定される。それぞれに長所、短所があり、また付帯設備にも大きく差が出てくるために、適用する船舶の運航形態、燃料消費量、LNG タンクスペースの制限等を考慮してタンク方式を選定する必要がある。

表1 LNG タンク方式比較

	IMO Type B	IMO Type B or C	IMO Type C	
	外部防熱式	外部防熱式	外部防熱式	真空断熱 CE 式
	独立 方形タンク	独立 球形タンク	独立 円筒形タンク	船上設置式 LNG トレーラ式
形状				 
長所	・タンク形状自由	・高圧化可能 ・内部構造シンプル	・10bar 設計可 ・内部構造シンプル ・PBU 方式/Gas 圧縮機不要	・10bar 設計可 ・内部構造シンプル ・PBU 方式/Gas 圧縮機不要 ・港を選ばず/陸上施設不要
短所	・BOG/タンク圧制御要 ・内部構造複雑	・タンク形状自由度無し(積付け効率悪い) ・BOG/タンク圧制御(許容圧次第)	・ローディング時間長い ・胴径製作制限	・ローディング時間長い ・胴径製作制限 ・容量小/複数装備 ・固縛/安全対策
要検討	・高圧化/BOG ratio 減 ・陸側 BOG 処理装置	・高圧化/BOG ratio 減 ・陸側 BOG 処理装置(許容圧次第)	・スロッシング対策	・スロッシング対策 ・ローリー搭載/固定方法 ・船内配管接続方法 ・安全対策

3.2 LNG 焚き推進プラント

LNG 燃料主機関として表2の様にガス専焼機関，Dual Fuel 機関(2 Cycle 低速，4 Cycle 中速)，及び蒸気タービンの候補がある。一般商船の場合，タービンプラントの採用可能性は少ないと考えるが，ガス専焼機関採用の場合は Dual Fuel (DF) 機関には要求されない，LNG タンク，及び推進システムのバックアップを装備することを IMO IGF コードにて規定している。ちなみに既存機関として最も燃費の良い重油燃料低速 Diesel 機関をベースに DF 低速 Diesel 機関，DF 中速 Diesel 機関，及び LNG 焚きリヒート蒸気タービン(Re-heat Steam Turbine)の環境負荷比較を図7に示す。CO₂ 排出に関しては燃費の良い DF 低速 Diesel 機関が最も低い。対照的なのが蒸気タービンで CO₂ はわずかに増加するが，その他はほぼゼロに近い。

表2 LNG 燃料焚き 機関比較

	ガス専焼機関	Dual Fuel 機関	Dual Fuel 機関	リヒート 蒸気タービン
	4 Cycle(中速)	4 Cycle(中速)	2 Cycle(低速)	
点火方式	スパークイグナイタ	パイロット燃料油	パイロット燃料油	不要
LNG タンク	2-Tank 以上要	1-Tank で可		
NOx-Tier III 対応	可能	可能	後処理等，追加対策要	可能
補助推進システム	要	不要	不要	不要
Gas fuel 遮断時の対応	減速航行	燃料油運転に切替え	燃料油運転に切替え	燃料油運転に切替え
その他	バックアップ推進システム必要	ディーゼルモードでの燃費不利(低圧縮比)	低負荷(約 20%)以下で Gas 燃焼不可	LNG タンクスペース大

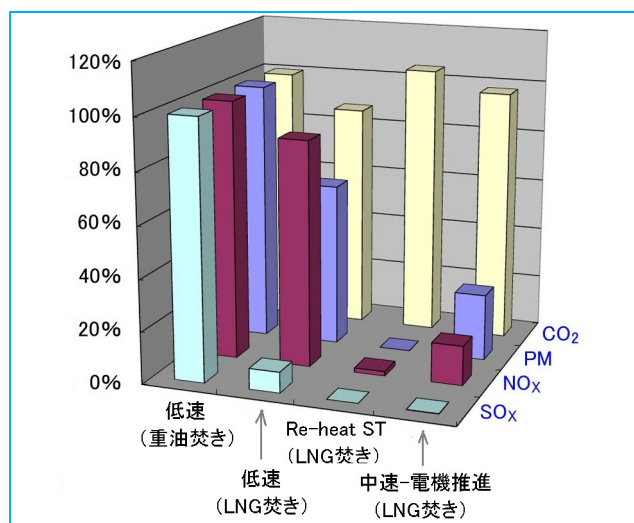


図7 LNG 燃料機関 Emission 比較

4. LNG 燃料船のコンセプト設計 ROPAX

LNG 燃料適用の ROPAX のコンセプト設計を以下に紹介する。

乗客:600 人乗り，トレーラ:150 台，常用速力:23 ノット(航続距離:450 海里)

4.1 LNG タンクの選定

LNG タンク方式については内航 ROPAX の運航形態，燃料消費，タンクスペースの制限から真空防熱加圧タンクを採用した。加圧型とすることで PBU (Pressure Built Unit) 方式で LNG 燃料を主機関に供給することが出来，また BOG (Boil Off Gas) の処理装置も不要なため，他のタンク方式に比べ比較的シンプルな設計となっている。設置場所については安全面を考慮すると旅客区画から離れた船尾暴露甲板上への設置が望ましいが，今回想定の内航 ROPAX では LNG タンク，及び以降に述べる電気推進システムの重量が数百トンレベルとなり，復元性，トリム性能の確保，及び推進性能への影響を最小限に抑える観点から，船体中央付近の機関室船首側に隣接した甲板下スペースに配置している(図8)。

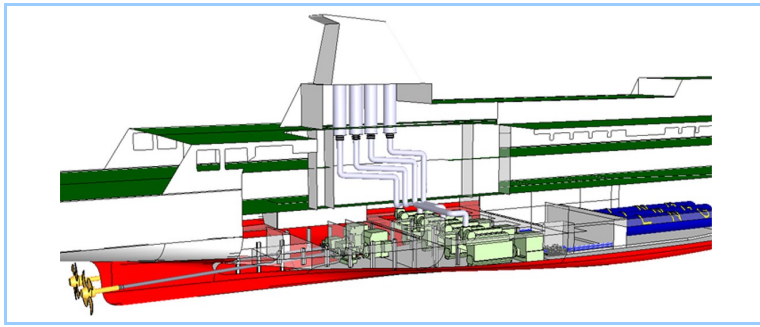


図8 ROPAX LNG 燃料推進プラント配置

4.2 LNG 焚き推進プラント

ROPAX の機関室配置要件、及び航行中の機関負荷変動によるノッキング、さらにはガス失火を避けるため Dual Fuel 4 サイクル中速機関と2軸電気推進システムの組合せとした(図9)。今回のコンセプト設計船と既存船の環境負荷を比較すると表3となる。重油燃料焚き中速 Diesel 直結2軸の推進プラントから、LNG 燃料焚き Dual Fuel 中速 Diesel 2軸電気推進プラントに変更することで、電気変換ロスによる燃費悪化を含めても、CO₂で25%、NO_xで87%、SO_xでは98%の削減が図られている。これらはIMO 規制値を遙かに下回る環境特性を示している。

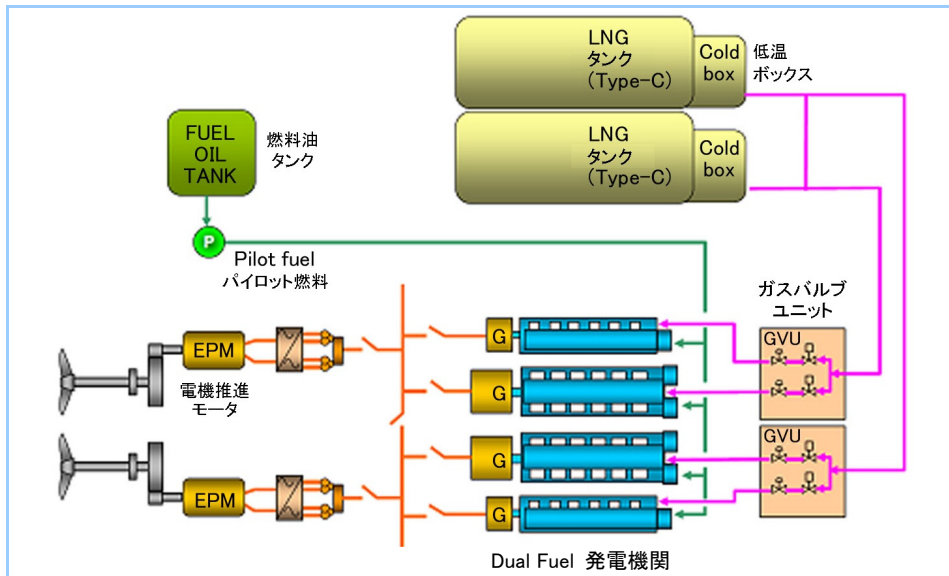


図9 ROPAX LNG 燃料推進プラント

表3 ROPAX Emission 比較

		ROPAX Emission 試算		
		HFO.:3%S, MDO:0.5%		
		中速 Diesel 2機2軸 CPP (Controllable Pitch Propeller)	DF Diesel 電機推進 2機2軸 FPP (Fixed Pitch Propeller)	
旅客定員		約 600 名		
車両台数	12mトレーラ	約 155 台		
	乗用車	約 50 台	—	
航海速度		約 23 ノット		
主機関		12 000kW×2sets	—	
主発電機関		—	8 400kW×2sets	
補助発電機関		1 270kW×3sets	5 400kW×2sets	
航海時間		19.5 時間		
年間航海数		300 航海		
年間の燃料消費	FO. (k-t/年)	26	0.2	
	LNG (k-t/年)	—	23	
Emission	CO ₂ (k-t/年)	82	62	-25%
	NO _x (t/年)	1 398	233	-83%
	SO _x (t/年)	1 432	28	-98%

LNG 燃料採用により、NO_x Tier-III/SO_x 全ての規制を満足

5. LNG 燃料船のコンセプト設計 VLCC

LNG 燃料適用の VLCC のコンセプト設計を以下に紹介する(図 10)。

Cargo Capacity: 35500m³, 常用速力: 15.5 ノット, LNG 燃料容量: 日本-ペルシャ湾(PG)往復

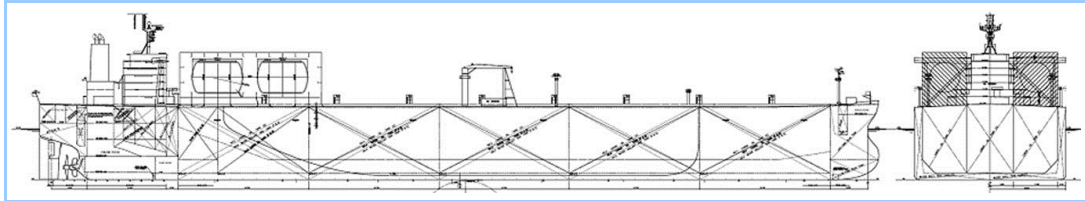


図 10 LNG 燃料 VLCC 外観図

5.1 LNG タンクの選定

VLCC の LNG タンク容量は日本-PG の往復を考慮すると 8000m³ を超える大型になるため、真空防熱方式は採用できない。しかし配置場所である暴露上甲板は特段のスペース制限が無いため、横円筒型外部防熱 Type-C タンクを採用した。

5.2 LNG 焚き推進プラント

VLCC に要求される推進馬力, 燃費効率, 排熱回収・発電プラントを考慮し, DF 低速 Diesel 機関を採用した。LNG 燃料は LNG を高圧ポンプにて加圧し, 常温まで昇温して供給する方式とした。Cargo Pump Turbine 駆動蒸気を供給する補助ボイラは Dual Fuel 仕様とし, LNG タンクから発生する BOG をガスヒータ経由ボイラに供給・燃焼させ, 発生した蒸気をタービン発電機を駆動・発電させて, その電力を軸加勢モータにより推進加勢させ, 回収する(図 11)。

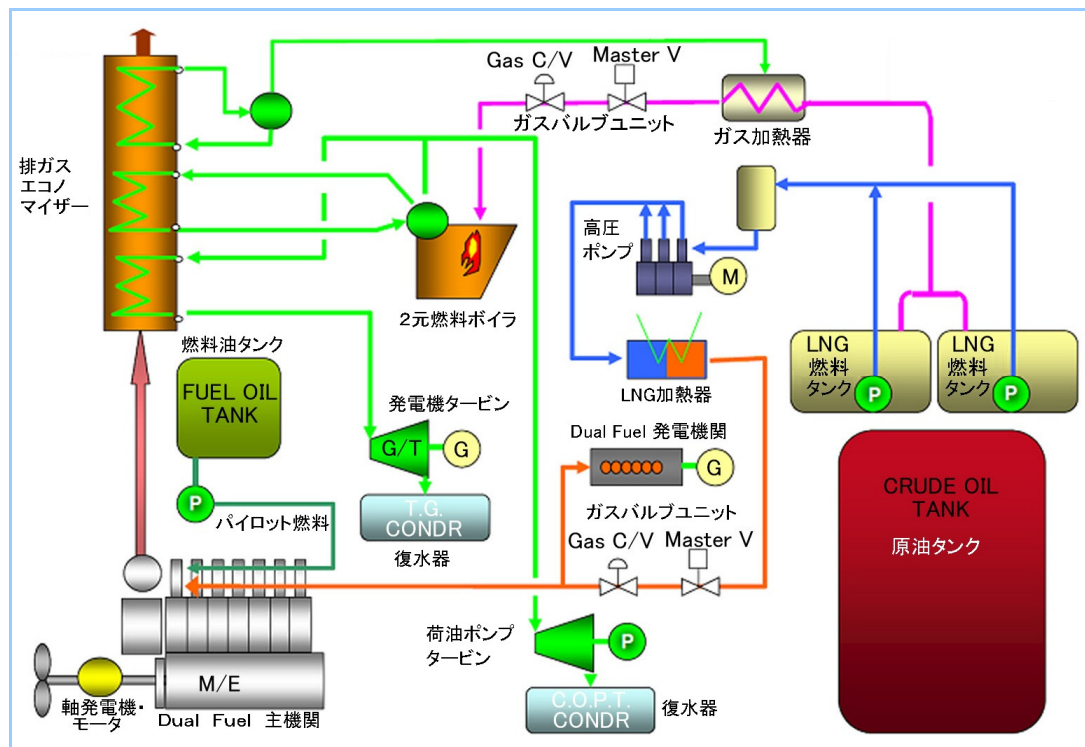


図 11 VLCC LNG 燃料 推進プラント

今回のコンセプト設計船と既存船の環境負荷を比較すると表 4 となる。重油燃料焚き低速 Diesel 推進プラントから, LNG 燃料焚き仕様(Plant-A)に変更するだけで, CO₂ で 14.4%, NO_x で 12.6%, SO_x では 92%の削減を図ることが出来る。これに対し, 最新の推進性能を更に折り込むことで, CO₂ で 29.5%, NO_x で 19.1%, SO_x では 92.6%の削減を図ることが出来る(Plant-B)。IMO NO_x3次規制を満足するためには EGR (Exhaust Gas Recirculation) 等, 他の技術組合せが必要である。

表4 VLCC Emission 比較

VLCC Emission 試算						
主機関仕様		低速 Diesel 重油 焚き	DF 低速 Diesel LNG 焚き		DF 低速 Diesel LNG 焚き	
			Plant-A		Plant-B	
航海速力		約 15.5 ノット				
主機関		27 000kW×76rpm			25 000 kW×63rpm	
発電機関	T/G	1 100 kW×1set	2 000 kW×1set		—	
	STG	—	—		2 000 kW×1set	
	D/G	1 100 kW×2sets	1 400 kW×2sets		1 400 kW×2sets	
	SGM	—	1 000 kW×1set		1 000 kW×1set	
Cargo Capacity		355 000	326 000		326 000	
年間航海日数		300 日				
燃料消費	FO. (t/d)	90	5.2		5.5	
	LNG (t/d)	—	81.8		66	
Emission	CO ₂ (k-t/年)	84 605	72 401	-14.4%	59 649	-29.5%
	NO _x (t/年)	1 913	1 672	-12.6%	1 548	-19.1%
	SO _x (t/年)	1 811	145	-92.0%	135	-92.6%

6. まとめ

燃料を LNG に転換するにあたり、船舶仕様の変更のみならず、LNG 燃料運搬、供給設備等のインフラ整備も含め、相当な投資を伴うため、それを進めることは一朝一夕には行かない。一方、今後使用される燃料油にも環境に配慮した仕様が要求され、それに伴い低硫黄油の付加価値に加え、CO₂ サーチャージも加算されると推測されていることから、価格の大幅な上昇も予測されている。そのため LNG 燃料転換の採否検討においては将来の燃料油価格、及び LNG 燃料価格推移予測が非常に重要なファクターになる。これまで、ガスの価格はある価格差を保ちつつ、原油価格のトレンドに沿って推移してきた。今後は更に低価格のシェールガスが燃料市場に投入されることで、石油燃料から環境特性の高い LNG 燃料への転換促進に繋がる可能性が高くなってきている。