地球環境対策と主機プラント

正員 糸山直之* 串山 弘*

Global Environment and Propulsion Plant

by Naoyuki Itoyama, *Member* Hiroshi Kushiyama

Summary

An energy saving is the most important subject in planning propulsion plants of merchant ships. In the future, however, measures for the global environment must be added to the energy saving. That is, carbon dioxide (CO₂ gas of greenhouse effect) and nitrogen oxides and sulphur oxides (NO_x・SO_x, gases of air pollution and acid rain) must be reduced to maintain the global environment.

In this paper, influences of additional costs for reduction of these gases are investigated in LNG carriers, in which various propulsion plants such as steam turbines, diesel engines are studied in parallel today. Three major plants are investigated; steam turbine (S/T), dual fuel diesel (DFD) and oil burning diesel with reliquefaction plant (DRL). Firstly generation of CO₂, NO_x and SO_x gases during operation is calculated for each plant and fuel (heavy oil and boil-off gas). Secondly costs for reduction of these gases are investigated, that is, carbon tax is imposed for CO₂ generation, NO_x reduction cost is estimated for diesel, and low-sulphur heavy oil is used in coastal voyages.

Calculation results of transportation cost (T/C) with these additional costs indicate that T/C will increase by 3-4% in each plant and T/C of S/T is minimum. That means that S/T will be optimum even if costs for the global environment is added in the future.

In tankers, bulkers, etc. whose production prices are much lower than those of LNG carriers, T/C will increase by 6-8%, 10% or even more.

Carbon tax is estimated to be very high while costs for NO_x and SO_x reduction are not so high. In this connection, energy saving and development of new fuels and new power plants must be accelerated.

The CO₂ problem is much bigger in land plants. Therefore, technology on CO₂ fixation in marine farm or meadow, CO₂ storage in deep sea, etc. must be developed by marine engineer.

1. 緒 言

商船の主機プラント計画には省エネルギーが最も重要である。これは今後も変わらないが、今これに地球環境対策が加わりつつある。すなわち二酸化炭素 (CO₂) が地球温暖化の原因と考えられており、窒素酸化物 (NO_x)・硫黄酸化物 (SO_x) が大気汚染・酸性雨の原因であり、これらの排出量削減が、陸上と同様に海上でも今後の重要課題となる。

ある試算によると、日本の総発生量に占める船の発生量の比率は Table 1 のとおりとなっている¹⁾。CO₂ は少ない

が、NO_x・SO_x はかなり多いことが判る。船では高効率の (高温高压燃焼の) ディーゼルを使うので NO_x 発生量が多く、石油精製後の残滓である (高い硫黄含有率の) 重油を焚くので SO_x 発生量が多いのであろう。今後はこれらの削減のためのコストによって経済性が影響され、最適の主機プラントが変わる可能性がある。なお、内航船で NO_x・SO_x 対策の重要であることも Table 1 より判る。

本論文ではこうした状況をふまえて、現在も蒸気タービン・ディーゼルなど種々の主機プラントが並行検討されて

Table 1 Gas discharge from ships

(% to total discharge in Japan)			
	Coastal	Ocean-going	Sum
CO ₂	3	2	5
NO _x	25	12	37
SO _x	18	19	37

* 三菱重工業(株)

いる LNG 船をモデルにして、地球環境対策費の影響を検討する。これによって将来の LNG 船の最適プラントを探るとともに、一般商船に対する地球環境対策費の影響の大きさにも敷衍したい。

LNG 船は -162°C という温度の沸点状態で LNG を海上輸送するため、種々の超低温対策・ボイルオフガス対策が必要となる。また液化・貯蔵積出し設備も巨額の投資となり、輸入された LNG は電力・都市ガスという公共用に使われる。こうした技術面・商業面の特徴より、LNG 船の設計運航には一般商船とかなり異なる特殊性がある。ここでは LNG 船に特有の主機プラント計画・運航の考え方・経済性評価データは全て文献 2) によっており、記述の重複を避けている。必要の際は同文献を参照されたい。

2. 基本計画

まず最初に比較対象とする LNG 船の主要目・コスト指数を Table 2 のとおりとする。すなわちタンク容積を $125,000\text{ m}^3$ 、速力 18.5 ノット(主機出力 $30,000\text{ ps}$)とし、推進/ボイルオフガス処理プラントは：

- 蒸気タービン (S/T)
 - 二元燃料ディーゼル (DFD)
 - 重油焚きディーゼル/再液化装置 (DRL)
- の 3 種類とする。S/T・DFD では強制蒸発システム付きとする。

船のコストは S/T が最低であり、DFD では高压ガス供給システム・安全システム等で 3% 、DRL では再液化装置・給電設備等で 7.5% のコスト増となる。

3. 基礎的条件

3.1 ガス発生量

主機プラント・燃料ごとの CO_2 ・ NO_x ・ SO_x 発生量を計算すると、Table 3 のとおりとなる。ここで：

- CO_2 ・ SO_x 発生量は燃料中の C・S 含有量によって決まり、いずれも FO の方が BOG (ボイルオフガス) より多い。

Table 2 Leading particulars of LNGCs

Case No.	1	2	3
Plant	S / T	DFD	DRL
Tank capacity (m^3)	125,000	Do.	Do.
Main engine Type x No.	Steam turbine x 1	Dual fuel diesel x 1	Oil burning diesel x 1
Max output (ps)	30,000 SHP	30,500 BHP	30,500 BHP
Fuel consumption rate (g/ps-h)	215 *1	120 *2	120
Service speed (kn)	18.5	Do.	Do.
Boil-off rate (%/day)	0.15	0.10	0.10
Reliquefaction plant	None.	None.	100% x 2
Forcing vaporizer	Provided.	Provided.	None.
Ship cost ratio	100	103	107.5

Note: *1 2-Stage feed water heating
*2 Oil burning case

BOG はメタン (CH_4) とほぼ同じであり、C 含有量が 75% と小さいのに発熱量が大きいのは、残りの 25% の H_2 が燃焼・発熱するからである (25% は水素燃料である)。このゆえにメタン(天然ガス)は CO_2 発生率最小の化石燃料である。BOG は S 分を含有しない。このように天然ガス・LNG は、地球環境問題の出現に対しても回答を出せる燃料である。

- NO_x 発生量はサーマル NO_x (燃焼時の高熱により空気中の N_2 が酸化して発生する NO_x)のみを考える。フューエル NO_x (燃料中の N 分の酸化による NO_x)は少量ゆえ無視する。

サーマル NO_x は燃焼温度に関係するため、S/T で少なく DFD で多く、DRL は DFD に近い。

- S/T で BOG を燃料とする場合 (強制蒸発ケース)、
—FO 燃料の場合より CO_2 発生量は少なく、
—ボイラ焚きでは NO_x 発生量は少なく、
—BOG では SO_x 発生量はゼロである。

これらの点で低公害のプラント・燃料である。

3.2 環境対策費

船からの排ガスに対する規制とその対策費を次のとおりと考える (Table 4 参照)。

ここで、いったん発生した CO_2 ・ NO_x ・ SO_x を船上で回収・除去するのは現実的ではないので、検討対象にはしない。

(1) 炭素税

一般に CO_2 削減対策としては、 CO_2 発生量の抑制、発生した CO_2 の回収・処理など種々の直接的対策が検討されている。これに対して炭素税は課税によって化石燃料の消費の抑制、 CO_2 ・環境対策の財源確保を目的としている。

炭素税はすでに北欧諸国を主に欧州 5 カ国で導入されている。しかし、EC では 1993 年より段階的に増額していき、2000 年には US \$ 10/boe (バレル・オイル・イクイバレン

Table 3 Gas generation

(t-gas/t-fuel)			
Case No.	1	2	3
Plant	S / T	DFD	DRL
CO_2 (t) / FO (t) *1 / BOG (t) *2	3.15 2.75	3.15 2.75	3.15
NO_x (t) / FO (t) / BOG (t)	0.005 0.002	0.108 0.128	0.108
SO_x (t) / FO (t) *3 / BOG (t)	0.063 0	0.063 0	0.063

Note: *1 Assuming 86% C content.
*2 Assuming 73% C content.
*3 Assuming 3% S content.

Table 4 Cost of Measures for environment

Gas	Measures	Cost
CO_2 - phase 1 - phase 2 - phase 3	Carbon tax " "	0 ¥ 5,000/t-C 10,000 "
NO_x SO_x	NO_x reduction Low S-FO	¥10,000/t- NO_x 50% extra/t-FO

ト)とする案がまとめられたが、実施時期は上記5ヶ国以外では、未定である。アメリカ・日本でも早急に導入するという動きは、今のところ見当たらない³⁾。目的に合うだけの炭素税を導入すると、国内経済・国際競争力などに大きな影響があるため、実施は慎重にせねばならないわけである。

なお、上述の欧州5カ国では、所得税減税・間接税増税という税制改革の大きな枠組みの中で炭素税が導入されており、総税収は増加しない。また、国際競争にさらされるエネルギー多消費型産業には炭素税を減免税する。同じく国際航路のバンカー油・航空燃料は免税するなど、他国に先行してスタートすることに対する優遇措置が取られている。しかし、炭素税が広く導入されれば、それらの措置はなくなる筈であり、ここで論じるのも、優遇措置のない場合についてである。

日本で炭素税が将来本格的に導入されれば、先述の目的を達成するために10,000円/t-Cのレベルになろうと言われている。ここではEC案にならない段階的に増額されることを想定して、フェーズ1, 2, 3に分けて、それぞれ0, 5,000, 10,000円/t-Cと仮定して影響を試算する。

EC案の\$10/boeは100円/\$の為替レートで、石油比重0.80、石油中のCを85%として換算すると約9,200円/t-Cとなる。このようにECと日本の案はほぼ同レベルとなる。

(2) NOx 規制

現在IMOでNOx排出濃度を現状より約30%削減する規制値を検討中で、大型ディーゼルに対して今年決議され1997年頃より規制される濃度は17g/kWhになると予測される。

DFD・DRLのNOxは燃料噴射タイミングの調整やシリンダ内への水噴射により現状より50%近い削減が達成できる。このコストは部品追加・調整などで高くないが、1~2%のFOC悪化分も算入することにし、やや高めに10,000円/t-NOxとする。S/TのNOx発生量は少ないので、t-NOx当り同コストとみなす。

NOx規制値は5年ごとに見直して、規制を次第に厳しくすることになっているが、当分はこのコストで十分であろう。

なお内航船のNOx削減も重要であるが、小型船用の高回転数の中小型ディーゼルではNOx発生率が比較的に少ない。

(3) SOx 規制

同様に審議中であるが、現在のFO(C重油)が約3%Sであるのに対して、港内・沿岸部で使用するFOを1.5%Sにすることとなる。

1.5% S-FOの単価については種々のデータがあるが、ここでは平均的に50%増とみなす。またLNG船の全航路の5%でこのFOを使用するものとみなす。

Table 5 Extra cost

Case No.	1	2	3
Plant	S / T	DFD	DRL
Phase 1 FO (¥ / t) BOG (¥ / t)	550 20	1,130 1,280	1,580
Phase 2 FO (¥ / t) BOG (¥ / t)	4,850 3,770	5,430 5,030	5,880
Phase 3 FO (¥ / t) BOG (¥ / t)	9,150 7,520	9,730 8,780	10,180

Note: *1 Assuming 25% price for calorific value (Ref.2)

なお、内航船では全航路でSOx削減をせねばならないので、外航船より問題がはるかに大きくなる。

3.3 運航条件

(1) 運航速度

LNG船は輸送量を決してショートさせないために、輸送力マージンを大きく取るよう計画される。この結果比較的低速で航行するのが実態である。ここでは代表的な運航計画に則って、平均速度が満載で16.2ノット、バラストで17.4ノットの低速航行とする。

(2) 燃料コスト

FO価格は現在の市場価格に合わせて10,000円/tとする。

BOGの価格は、発熱量当りのFO価格との比を取ることとし、FO 10,000円/tの場合はその25%とする²⁾。この場合BOGの価格は約3,000円/tとなる。BOGを発熱量当り割安に使用できるのは、BOGはもはやLNG貨物でなく、これを貨物に戻すには再液化・回収のコストが掛かるからである。

(3) 環境対策費

Table 3~4よりFO・BOG消費量当りの環境対策費(エキストラ・コスト)を計算すると、Table 5のとおりとなる。これより環境対策コストの中で炭素税が最も高く、燃料費が倍増するのと同様の影響であることが判る。

すなわち炭素税を10,000円/t-Cとすれば、FO中のC含有率が85%の場合には炭素税は8,500円/t-FOとなる。つまりFO価格が10,000円/tの際に、その85%増となる計算である。

4. 輸送コスト

経済性評価は、最も代表的な指数である輸送コスト(T/C)によることにする。

計算条件を設定して年間輸送量・総経費・燃料消費量を計算するとTable 6のとおりとなる。燃料消費量はS/Tが最大であるが、強制蒸発により追焚き燃料をBOGとすれば(ケース1-G)、FO消費量は最小となる。またDRLではFO消費量が最大となる。

これらによりT/Cを計算し、T/C指数をフェーズごとにとまとめると(Table 6)、次のことが判る。

4.1 フェーズ0 (現状ベース)

T/Cが最低になるのはS/T-強制蒸発ケース(ケース1-

Table 6 Transportation cost

Case No.	1-0	1-G	2-0	2-G	3
Plant	S / T		D F D		D R L
Additional fuel	FO	BOG	FO	BOG	—
Voyage length (sm)	3,700 (one way)				
LNG transport (1000 m ³ /y)	1,940	1,930	1,960	1,957	1,981
Total expense	4,766	4,776	4,948	4,958	5,103
excl. fuel cost (mil. ¥/y)					
FO consumption (t/y)	6,465	1,089	7,654	6,195	21,070
BOG " (t/y)	19,407	23,062	10,221	11,444	(-)14,451
T/C ratio					
Phase 0 - Min. basis	100.2	100	102.6	102.7	106.0
Phase 0 basis	[100]	[100]	[100]	[100]	[100]
Phase 1 - Min. basis	100.2	100.0	103.1	103.2	106.7
Phase 0 basis	[100.1]	[100.0]	[100.4]	[100.4]	[100.6]
Phase 2 - Min. basis	100.4	100.0	102.6	102.7	106.5
Phase 0 basis	[102.1]	[101.9]	[101.8]	[101.8]	[102.3]
Phase 3 - Min. basis	100.6	100.0	102.2	102.2	106.4
Phase 0 basis	[104.2]	[103.8]	[103.2]	[103.2]	[104.0]

G) であり、DFD (ケース 2) は 2.5 %, DRL (ケース 3) は 6 % 高くなる。

現在の LNG 船が S/T とされているのが、これからも裏づけられる。

4.2 フェーズ 1, 2

(1) フェーズ 1 (炭素税ゼロ)

NOx・SOx 対策費のみとすると、T/C への影響は小さく、S/T ではゼロに等しく、DFD・DRL ではわずかに 0.5 % 増である。

(2) フェーズ 2 (炭素税 5,000 円/t-C)

炭素税の影響はどのプラントも約 2 % であり、やはり S/T-強制蒸発ケースが T/C 最低となる。

S/T では燃料消費量は大きいが環境対策費の単価が安く、DFD・DRL では燃料消費量は小さいが対策費の単価が高いので、この結果となる。

4.3 フェーズ 3 (炭素税 10,000 円/t-C)

(1) 経済性

炭素税が本格的に導入された後の LNG 船の経済性について、次のことが判る：

- 炭素税が T/C に与える影響は DFD で 3 %, S/T・DRL で 4 % で、かなり大きい。
- S/T と DFD との差は縮まるが、S/T-強制蒸発ケースがやはり T/C 最低となる。想定した規制値・対策費で見ると、現在の最適プラントが将来も優位である。
- DRL は再液化・回収した LNG の価格を発熱量当たり 25 % と見るかぎり、有利にならない。

(2) 一般商船への影響

DRL は重油・ディーゼルを搭載する点で一般商船と同じであるので、一般商船でも炭素税の影響は大きい。

しかし、ここで LNG 船の特殊性として注意すべきことは、その船価との係わりである。

すなわち 125,000 m³ 型 LNG 船は 60,000~70,000 DWT であるが、その船価は約 300 億円ときわめて高いため、年間経費の 70~75 % が償却費・金利など船価リンク部分となる。これによって燃料費や環境対策費の影響が薄められているのである。

いま仮に船価を 1/2~1/3 として DRL の T/C を試算すると、フェーズ 3 で 4 % 増であった T/C は：

○船価 1/2 のとき 6 % 増、

○船価 1/3 のとき 8 % 増

となる。従って LNG 船よりはるかに低船価のタンカー・バルカーなど一般専用船では、炭素税 10,000 円/t-C の場合に T/C は現状より 6~8 % の幅で増加しよう。条件次第では約 10 % 増となることも十分に考えられる。

特に高速コンテナ船のような大型高速船では、主機出力は約 60,000 ps (LNG 船の 2 倍) となり、FO 消費量が大きく、また船価はさほど高くないため、T/C に占める FO 費比率も大きくなる。この場合は炭素税の影響は、きわめて大きくなるわけである。(一般商船への炭素税の影響は、別の機会に検討してみたい。)

(2) 考 案

これらの検討により、今後は次のように考えねばならない：

○炭素税は上述のように大きく影響するので、将来の更なる省エネ、燃料の選択、新燃料・新動力プラントの開発を推進せねばならない。20 年前のオイルショック程のマグニチュードはないが、FO 価格倍増に等しいというミニ・オイルショック程の「炭素税ショック」が来るものと覚悟をし、早めに対策を考えねばならない。

省エネは従来の効果だけではなく、排ガス量削減・地球環境対策の一環にもなり、二重の効果があることに注意すべきである。

○ここでは現在の標準的な主要目で評価するととどめたが、大型化による輸送量当りの燃料消費量の削減も、重視せねばならない。

船の大型化による省エネはよく知られているが、LNG 船では同一の貨物輸送量当りの必要燃料量を計算すると、200,000 m³ 型では 135,000 m³ 型の 15 % も削減できる⁴⁾。

○炭素税が課される頃にもし BOG 価格比が高くなれば、S/T 不利の側に働く²⁾。このことに注意を要する。

○内航船の NOx・SOx 削減も、今後の大きな課題として取組まねばならない。

○陸上では CO₂ 問題は船以上に大きい。船舶海洋の技術分野の我々は、回収した CO₂ の海洋農場・牧場への活用、深海貯留など CO₂ 活用・処理の研究開発をもっと加速せねばならない。

5. 結 言

種々の主機プラントが適用できる LNG 船に対して、将来の CO₂・NOx・SOx 対策費を加味して輸送コストを比較した。また一般商船への影響も試算した。この結果次のことが判った：

○S/T が最も有利であることは変わらない。

ただ DFD がやや近づく。

DRL は設定した条件下では有利にならない。

- 輸送コストは NO_x・SO_x 対策費だけでは影響が小さい。炭素税の与える影響は最大 4 % とかなり大きい。
- LNG 船の経済性はもともと変動要素があり、これに更に環境対策費が加わるので、これらの将来動向に注意を要する。
- ディーゼルを搭載する一般商船では、LNG 船より低船価であるので、輸送コストへの炭素税の影響は 6～8 % に、条件次第では 10 % に、またはそれ以上にも膨らむことがある。
- 炭素税の影響は大きいので、更なる省エネ、新燃料・新動力プラントの開発を加速せねばならない。
- 内航船の NO_x・SO_x 対策も、今後の大きい課題として取組まねばならない。
- 海洋による CO₂ の活用・処理の研究を加速せねばならな

い。

謝辞：炭素税については、松尾直樹博士（(財)日本エネルギー経済研究所・総合研究部）にご教示いただいたことを記し、謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 日本原子力研究所, 「原子力導入による大気汚染物質の低減効果について」(1993.7)
- 2) 糸山直之, 「LNG 船の省エネルギー設計」, 日本造船学会論文集(1993.11)
- 3) 日本エネルギー経済研究所報告書, 「主要先進国におけるエネルギー税制の現状と環境税導入の動き」(1993.3)
- 4) N. Itoyama et al., "A Breakthrough for Future LNG Carriers, The Trend of Size Enlargement", ISOPE93 (1993. 6)