LNG 火力発電のエネルギー収支

内 山 洋 司, 秋 田 調*

財電力中央研究所経済社会研究所 東京都千代田区大手町 1-6-1

* 財電力中央研究所柏江研究所電気物理部 東京都柏江市岩戸北 2-11-1

(1997 年 1 月 31 日受理)

Net Energy Analysis of LNG Power Generation System

Youji UCHIYAMA and Shirabe AKITA*

Socio-economic Research Center, CRIEPI, 1-6-1, Ohtemachi, Chiyoda-ku, Tokyo 100

* Electrical Physics Department, Komae Laboratory, CRIEPI, 2-11-1, Iwado Kita, Komae-shi, Tokyo 201

(Received January 31, 1997)

Synopsis :

This paper presents energy analyses of thermal power generation plants such as coal, oil and LNG. The input energy of power generation technology is estimated not only for the construction materials of the power plant but also for all fuel processes in mining, refining and transporting to a power station. Net and gross energy analyses on the power plants are calculated using the input and output energies of a generation plant. The analyzed net energy ratio of an LNG plant is one-third that of oil or coal plants, because it consumes a large amount of energy; approximately 10 to 15% of LNG production on the extraction, refining and liquefaction processes. Excellent liquefaction and re-gasification processes are expected to be realized with the knowledge of cryogenic engineering.

Keywords : LNG, power generation efficiency, life cycle analysis, liquefaction, power plant

1. はじめに

LNG 火力発電は、有害物質の発生が少ないクリーンな発電方式として定着し、現在も発電所の建設が進められている。特に最近では、ガスタービン発電とその排熱を利用した蒸気発電方式を組み合わせたコンバインド発電方式が採用され、50% を超える熱効率を達成している。

一方、最近各種発電方式を熱効率だけではなく、燃料の採集から発電所の建設エネルギーまでを含めた全エネルギーで評価する、ライフサイクルエネルギー分析法が開発され、新発電方式の評価に用いられている。財電力中央研究所では、この手法を用いて発電システムのライフサイクル分析を行った¹⁾。ここでは、LNG 火力発電および、関連のその他の発電方式についての分析結果を紹介する。

2. 発電プラントのエネルギー収支分析

2.1 エネルギー収支分析法

2.1.1 概 要

エネルギー収支分析とは、あるエネルギー生産システムについて、種々の財およびサービスに直接あるいは間接に投入されるエネルギーを、そのシステムが生産するエネルギーと比較するものである。エネルギー収支分析は現代の技術社会が産み出した様々な技術やシステムをエネルギーという客観的かつ普遍性を備えた指標でもって分析するものである。

2.1.2 エネルギー収支の表示式

エネルギー収支分析は、その計算方式から総エネルギー収支分析 (Gross energy analysis: GEA) と正味エネルギー収支分析 (Net energy analysis: NEA) の2種類に分類され Fig.1 のように表わされる。

火力発電で、もし投入エネルギー C に投入する燃料

Fig. 1 Gross and net energy analysis.

の一次エネルギーを含めたなら、 $GEA < 1$ 、 $NEA < 0$ となる。燃料を含めないエネルギー収支の場合、 $GEA > 1$ 、 $NEA > 0$ であることが発電プラントとして成立する条件である。

総エネルギー収支とは、発電プラントで生産されるエネルギー (P) とプラントに直接・間接に投入するエネルギー (C) を比 (P/C) で表す方法である。それに対し、正味エネルギー収支とは、そのプラントのライフタイムに利用できるエネルギーが正味でどれだけあるか、つまり、エネルギー生産量 (P) から投入エネルギー (C) を差し引いた値 ($P-C$) である。もし投入エネルギーに燃料を含めなければ、正味エネルギー収支の結果、すなわち発電プラントの正味の年間発電量は、プラントの発電容量に依存し、当然容量を大きくすると値も大きくなる。

エネルギー収支分析で、産出エネルギーは二次エネルギー (P) であり、投入エネルギーには一次エネルギー (C_1) と二次エネルギー (C_2) とが含まれている。二次エネルギーをそのまま使うか、一次エネルギーに換算して使うかでエネルギー収支の結果は異なってしまう。総エネルギー収支 (E) は、それにより 3 種類の式で表わせる。

(1) 一次エネルギーと二次エネルギーを区別しない：

$$E_1 = P / (C_1 + C_2)$$

(2) P は二次エネルギー、 C は一次エネルギー：

$$E_2 = P / (C_1 + C_2 \eta)$$

ただし、 η は一次エネルギー換算係数である。

(3) P も C も一次エネルギーで表わす：

Fig. 2 Plants and fuel processes to be evaluated.

$$E_3 = P \eta / (C_1 + C_2 \eta)$$

ここでは求めた総エネルギー収支は上の (3) 式を使っている。それは投入エネルギーを全て一次エネルギーに換算し、発生する電気エネルギーも一次エネルギーに換算して、その比で表わしたものである。換算係数は、わが国の平均的な発電効率を基に 2,250 kcal/kWh を用いた。

2.2 発電プラントのエネルギー収支分析

今回取り上げた、燃料の採集、輸送および発電所から構成される発電プラントは、石炭火力、石油火力、LNG 火力発電の大型電源である。発電プラントは、電気事業用の商用プラントの設計を基に対象プラントの発電容量や機器構成を決めている。Table 1 に各プラントの設備容量 (発電端) と年設備利用率等を示す。

エネルギー収支分析では、前提として分析の検討範囲を正確に設定しなければならない。Fig. 2 は対象の発電プラントについて、燃料の採掘から発電所までの各過程で検討した設備の建設とその運用に要するエネルギーを示したものである。

大型発電プラントのエネルギー収支は、米国での調査・分析²⁾を参考に行った。分析は、全ての過程について米国データを日本の状況に合わせて修正した。米国の検討では、発電プラントの設備エネルギーは素材エネルギーだけで、それ以外の機器の製造エネルギー、機器・資材の輸送エネルギー、プラントの現場建

Table 1 Power plants analyzed.

	石炭火力	石油火力	LNG火力
設備容量(発電端) (MW)	1,000	1,000	1,000
設備利用率 (%)	75	75	75
発電効率(発電端)(%)	39	39	39
所内率 (%)	7.4	6.1	3.5

Table 2 Heat rate of energy sources.

	単位	値
電力	kcal/kWh	2,250
石炭	kcal/kg-coal	6,200
石油	kcal/kg-oil (kcal/l)	10,000 (9,250)
天然ガス	kcal/kg-gas (kcal/m ³)	13,000 (9,286)

Table 3 Energy consumption rate of raw materials.

	単 位	電 力	石 油	石 炭	合 計
鋼 鉄	Mcal/t (kWh/t)	1,125 (500)	0	5,000	6,125
銅	Mcal/t (kWh/t)	3,825 (1,700)	5,900	1,000	10,725
アルミニウム	Mcal/t (kWh/t)	39,375 (17,500)	11,000	0	50,375
ステンレス	Mcal/t (kWh/t)	2,250 (1,000)	0	10,000	12,250
セメント	Mcal/t (kWh/t)	293 (130)	460	44	797
コンクリート	Mcal/t (kWh/t)	44 (20)	104	61	209
板ガラス	Mcal/t (kWh/t)	518 (230)	3,200	0	3,718
シリコン	Mcal/t (kWh/t)	562,500 (250,000)	0	0	562,500 (250,000)

設エネルギーは含まれていない。それでは不十分であるため、本研究では、分析のなかった発電プラントの製造、輸送、建設エネルギーを素材エネルギーの20%と仮定し、その値を含めて設備の投入エネルギーを算定した。

また、投入されるエネルギー（石油、ガス、石炭、電気）の原単位（Table 2）と素材のエネルギー原単位は文献3）のものを利用した（Table 3）。

2.3 分析結果

実際の発電プラントについて、発電電力量、設備と運用のエネルギー量、およびエネルギー収支を検討した。分析した発電プラントは、Table 1 に既に示した

石炭火力、石油火力、LNG 火力発電の3種類であるが、ここでは LNG 火力発電の結果だけを詳細に示す。発電容量は、発電端出力で1,000 MW に全てを統一した。

2.3.1 LNG 火力発電の設備エネルギー

LNG 火力は、発電プラントに関しては欧米における天然ガス発電と同じものと考えられる。本研究では、米国での700 MW発電プラントの調査データ²⁾に基づいて、発電プラントの設備エネルギーを算定した（Table 4）。

天然ガスの採掘に必要な素材量は、石油の掘削で求めた素材量から推定できる。米国の1975年の調査²⁾

Table 4 Raw materials required for the construction of a LNG-fired power plant.

	単 位	鋼 鉄	アルミニウム	コンクリート
鉄 筋	t	5,330	—	—
コンクリート	t (m ³)	—	—	70,440 (36,250)
ケーブル	t (km)	83 (411)	230	—
配 管	t (km)	2,700 (37)	—	826 (37)
ケーブル・トレイ	t (km)	110 (74)	—	—
導 管	t	2,320	—	—
タービン	t	38,300	—	—
ボイラー	t	2,289	—	—
小 計 (70%)	t	51,130	230	71,270
計	t	73,043	329	101,810

によると、油田 16,408 か所でガス井 7,580 か所に相当するエネルギーが取り出せ、石油 17979.3 TBtu (1 Btu=1055.06 J) を採油するに要する資材量は 39.1 TBtu であり、天然ガス 21103.5 TBtu を採掘するに要する資材量は 18 TBtu である。これから同じエネルギーを取り出すのに必要な素材エネルギー量は、天然ガスの場合は石油に比べ 39% で済むことになる。両者の素材必要量を比較すると以下ようになる。

〔素材〕	〔石油〕	〔天然ガス〕
鋼 材	1.192 kg/t 石油	0.604 kg/t 天然ガス
銅	0.0016 kg/t 石油	0.00081 kg/t 天然ガス
アルミニウム	0.0009 kg/t 石油	0.00056 kg/t 天然ガス

1,000 MW の LNG 火力を年設備利用率 75% で運

転すると、1 年間に消費する LNG 燃料は次のようになる。

$$\begin{aligned} &1,000(\text{MW}) \times 10^3(\text{kW/MW}) \times 8,760(\text{h/年}) \\ &\times 0.75(\text{設備利用率}) \times 860(\text{kcal/kWh}) / \\ &0.39(\text{熱効率}) / 13,000(\text{kcal/kg}) / 1,000(\text{kg/t}) \\ &= 1,114,500(\text{t/年}) \end{aligned}$$

これから発電プラントで消費する燃料を供給するのに必要な天然ガス採掘設備の素材量が求まる。その値は、鋼材が 673.2 t、銅が 0.90 t、アルミニウムが 0.51 t である。これをエネルギーに換算すると、4.27 Tcal となる。なお、今回の検討では、天然ガスを LNG に液化するプラント素材量は入手できなかったの、液化装置の設備エネルギーは検討から外した。

日本ではガスの産地で LNG 化を行って LNG 専用船で輸送する。わが国へ LNG 燃料を運ぶ輸送船は、通常その積載容量は 125,000 m³ である。LNG の液比

Table 5 Energy consumption of raw materials required for the construction of a LNG-fired power plant.

プロセス	材 質	素材量		エネルギー量					
		単位	重 量	単 位	電 力	石 炭	石 油	天然ガス	合 計
採 掘	鋼 材	t/年	690.8	Tcal/年 (GWh/年)	0.8 (0.4)	3.5	—	—	4.2
	銅	t/年	0.9	Tcal/年 (GWh/年)	0.0 (0.0)	—	0.0	—	0.0
	アルミニウム	t/年	0.5	Tcal/年 (GWh/年)	0.0 (0.0)	—	0.0	—	0.0
	合 計		—	Tcal/年 (GWh/年)	0.8 (0.4)	3.5	0.0	—	4.3
輸 送	鋼 材	t/年	1477.0	Tcal/年 (GWh/年)	1.7 (0.7)	7.4	—	—	9.1
	ステンレス	t/年	41.0	Tcal/年 (GWh/年)	0.1 (0.0)	0.4	—	—	0.5
	アルミニウム	t/年	21.0	Tcal/年 (GWh/年)	0.8 (0.4)	—	0.2	—	1.1
	合 計		—	Tcal/年 (GWh/年)	2.6 (1.1)	7.8	0.2	—	10.6
発 電	鋼 材	t	51130.0	Tcal (GWh)	57.5 (25.6)	255.7	—	—	313.2
	アルミニウム	t	230.0	Tcal (GWh)	9.1 (4.0)	—	2.5	—	11.6
	コンクリート	t	71270.0	Tcal (GWh)	3.1 (1.4)	4.3	7.4	—	14.9
	小 計 (70%)		—	Tcal (GWh)	69.7 (31.0)	260.0	10.0	—	339.7
	合 計		—	Tcal (GWh)	99.6 (44.3)	371.4	14.2	—	485.2

重は 0.425 t/m^3 であることから1隻で運ぶ LNG 重量は $53,125 \text{ t}$ である。わが国へ輸入している LNG 産地にはインドネシア、マレーシア、ブルネイ、アブダビ、アラスカなどがある。そのうち半分以上はインドネシアから運ばれている。インドネシアからわが国までの距離は、約 $3,000 \text{ km}$ で、LNG 船が1往復するのに必要な航海日数は22日である。1年間の稼働日数を345日とし、LNG 船の耐用年数を20年間とすると、その寿命期間中に運べる LNG の総輸送量は、

$$53,125 \times 345 / 22 \times 20 = 16,662,000 \text{ t}$$

となる。これから $1,000 \text{ MW}$ の LNG 火力を1年間運転するために新たに建造を要する1年当りの船数は

$$1,114,500 / 16,662,000 = 0.069 \text{ 隻/年}$$

である。 $125,000 \text{ m}^3$ の LNG 船1隻の建設に必要な素材量は、

鋼 材 $21,400 \text{ t}$

ステンレス 600 t

アルミニウム 300 t

であることから、1年間相当の素材量は、

鋼 材 $1,477 \text{ t}$

ステンレス 41 t

アルミニウム 21 t

となり、これから素材エネルギー量は 10.61 Tcal である。

Table 5 は、LNG 火力についての採掘から発電に至るまでの素材量とそのエネルギーへ内訳を示したものである。表から発電プラントの寿命を30年として全過程の素材エネルギーを求めると 932.2 Tcal となる。そのうち発電プラントの素材エネルギーは、 485.2 Tcal で全体の52%になる。

2.3.2 LNG 火力発電の運用エネルギー

LNG の運用エネルギーで最も多く消費している過程は、LNG の液化過程である。OPEC 年報によると、液化設備の運転エネルギーは生産天然ガス量の10~15%で、天然ガスの LNG 利用で、フレアー量が低減し、通常は油田、ガス井併せて7.5%であるフレアー率が殆ど無視できるまで低下することになる⁴⁾。本研究では生産天然ガス量の12.5%を液化設備の運転エネルギーと考えて計算した。その結果、液化設備の運転に要する値は 2070.0 Tcal/年 となった。参考までに、天然ガスの生産に要する運転エネルギーを米国を例にして示すと、その消費エネルギーは天然ガス生産量に対し、採集動力として3.29%、再加圧用動力として4.08%、それに精製プラントのエネルギーとして

2.51%で、合計9.88%となる²⁾。これは、モデルプラントに換算すると 1588.4 Tcal に相当し、天然ガスは液化でなくてパイプラインで輸送しても膨大なエネルギーを消費していることが分かる。

次に LNG 船の消費燃料のエネルギーを求めた。LNG 船の燃料は、燃料油のほかに、ボイルオフガス(輸送中の LNG が気化したもの)を使用している。LNG を $1,000$ 海里 ($1,852 \text{ km}$) 輸送するには、LNG 1 t 当たり燃料油 1.5 kg と、LNG 7.6 kg が必要である。LNG の平均輸送距離は片道約 $3,000 \text{ km}$ である。従って、輸送船が1往復するのに必要な燃料は、

$$\text{石油 } 1.5 \times 3,000 / 1,852 \times 2 = 4.86 \text{ kg 石油}$$

$$\text{LNG } 7.6 \times 3,000 / 1,852 \times 2 = 24.62 \text{ kg 天然ガス}$$

である。よってモデルプラント1年間の燃料の運搬に、

$$\text{石油 } 4.86 \times 1,114,500 = 5,416,000 \text{ kg}$$

$$= 5,416 \text{ t}, \quad 54.16 \text{ Tcal}$$

$$\text{LNG } 24.62 \times 1,114,500 = 27,439,000 \text{ kg}$$

$$= 27,439 \text{ t}, \quad 356.71 \text{ Tcal}$$

$$\text{合計} \quad 410.87 \text{ Tcal}$$

の燃料が必要である。

2.3.3 投入エネルギー量とエネルギー収支

求めた各過程の設備エネルギーと運用エネルギーを円グラフで表すと Fig. 3 となる。LNG 火力の投入エネルギーの中で液化設備の運用エネルギー $2,070 \text{ Tcal/年}$ は、全体の81.4%となり大きな割合である。それにより設備エネルギー 33.6 Tcal/年 は、大

Fig. 3 Energy inputs of LNG-fired power plant (plant life: 30 years).

Table 6 Energy input and output for a LNG-fired power plant.

単 位			LNG 火力発電				
生産エネルギー							
設 備 容 量	(1)	MW	1,000				
設備利用率	(2)	%	75				
発電電力量（発電端）	(3)	GWh/年	6,570				
所内動力エネルギー量	(4)	GWh/年	230				
所 内 率		%	3.5				
発電電力量（送電端）	(5)=(3)-(4)	GWh/年 (Tcal/年)	6,340 (14,265)				
燃 料 (LNG)		Tcal/年	14,488				
			電 力	石 炭	石 油	天然ガス	計
投入エネルギー							
設備エネルギー							
採 掘	素材エネルギー量	Tcal/年 (GWh/年)	0.8 (0.4)	3.5	0.1	—	4.3
輸 送	素材エネルギー量	Tcal/年 (GWh/年)	2.6 (1.2)	7.8	0.2	—	10.6
小 計	(6)	Tcal/年 (GWh/年)	3.4 (1.5)	11.3	0.2	—	14.9
発 電	素材エネルギー量	Tcal (GWh)	99.6 (44.3)	371.4	14.2	—	485.2
	製造エネルギー量	Tcal	19.9	74.3	2.9	—	97.0
	建設エネルギー量	(GWh)	(8.9)				
	輸送エネルギー量						
小 計	(7)	Tcal (GWh)	119.5 (53.2)	445.7	17.1	—	582.2
運用エネルギー							
採掘・液化		Tcal/年 (GWh/年)	—	—	—	2070.0	2070.0
輸 送		Tcal/年 (GWh/年)	—	—	54.2	356.7	410.9
発 電		Tcal/年 (GWh/年)	6.0 (2.7)	22.3	0.9	—	29.1
小 計	(8)	Tcal/年 (GWh/年)	6.0 (2.7)	22.3	55.1	2426.7	2510.0
エネルギー回収年数[(7)+(6)×30]/[(5)-(8)] 年					0.09		
エネルギー収支							
比	耐用年数20年	(5)×20/[(6)×20+(7)+(8)×20]	5.59				
	耐用年数30年	(5)×30/[(6)×30+(7)+(8)×30]	5.61				
正味	耐用年数20年	GWh	104,099				
	(5)×20-[(6)×20+(7)+(8)×20]	(Tcal)	(234,223)				
	耐用年数30年	GWh	156,278				
	(5)×30-[(6)×30+(7)+(8)×30]	(Tcal)	(351,625)				

Fig.4 Results of gross energy analysis
(plant life: 30years).

きさで見れば石炭火力や石油火力の設備エネルギーにほぼ同じであるが、その比率では1.3%と約4分の1の値である。

Table 6 は、LNG 火力のエネルギー収支を求めたものである。LNG 火力は、ガス井で天然ガスの液化に生産ガス量の10~15%と多量のエネルギーを消費しているため、エネルギー収支の値は総エネルギー収支で5.6と小さいことが分かる。これは LNG 火力のエネルギー収支の改善には、液化で消費するエネルギーの低減、すなわち圧縮機動力の削減が如何に重要であるかを意味している。しかし、LNG 火力は耐用年間での正味エネルギー収支の値で見れば、他の火力電源に比べ大きな差はないことがわかる。

天然ガスは、液化しないでパイプラインで需要地に輸送する場合でも、自噴のガス圧(~20気圧)にもよるが搬送圧が50~60気圧であることから、かなりの搬送動力が必要になる。ガス井から採掘し送り出すに必要なエネルギーは、生産ガス量の10%近くに達しており²⁾、パイプライン輸送でも液化に近い多量のエネルギーを消費していることが分かる。結局、地中にガス状態で希薄なエネルギー密度で蓄えられている天然ガスを、どのような手段をとるにせよ、採掘して需要地に輸送するには多量のエネルギーを消費することになる。

2.4 エネルギー収支の比較

今回検討した発電プラントのエネルギー収支(耐用年数30年)の結果をFig.4に示す。図より、検討したプラント中でエネルギー収支の高いのは、石炭火力、石油火力であり、その値は17~21である。この結果は、エネルギー密度が大きいエネルギー源を利用

する発電方式は、基本的に見ればエネルギー収支が高くなることを示している。

それに対して、地下のガス田に希薄な状態で埋蔵する天然ガスは、もともと単位体積あたりのエネルギー密度が小さいため、LNG 火力は大型プラントであってもエネルギー収支が約6と低い。これは、希薄なエネルギーの密度を高めるため天然ガスの採掘および液化エネルギーとして、生産ガスが持つエネルギーの10~15%を必要とするためである。

3. おわりに

LNG 火力発電について、財電力中央研究所が実施した、プラント建設から天然ガスの採集、液化、輸送までを含む全発電システムを対象にした、エネルギー収支分析結果を紹介した。結果に示された通り、LNG 発電は、大変クリーンな発電方式ではあるが、燃料の採集と液化に、天然ガスが有するエネルギーの一部を使用するため、ここで定義したエネルギー収支は6程度と低くなってしまう。その後の検討によれば、この値はコンバインドサイクルとし発電効率を上げることにより使用する LNG 量が減少し、液化設備の運用エネルギーが小さくなるので、8程度まで向上することが示された。しかし、いずれにしても他の火力発電方式に比較すれば、まだ低いと言わざるを得ない。

値が低い原因は、既に示した通り液化および再ガス化プロセスの効率が低いためである。低温工学を御専門とする諸兄から、画期的なプロセスのアイデアを出して頂き、LNG 火力発電の効率向上、強いては地球温暖化の防止が実現できればと念ずるものである。

本解説は、財電力中央研究所で内山洋司、山本博巳両研究員によって行われた研究を抄録したものであることを付記する。

参考文献

- 1) 内山洋司、山本博巳：発電プラントのエネルギー収支分析、電力中央研究所報告 Y90015 (1991)
- 2) A. T. Amr, J. Golden and R. P. Quellette: *Energy Systems in the United States*, Marcel Dekker Inc., New York and Basel (1981)
- 3) 科学技術庁資源調査会：自然エネルギーと発電技術、大成出版社 (1983)
- 4) 重田 潤：季報エネルギー総合工学 (1990)