

LNG とエクセルギー

LNG and Exergy

久角 喜徳 (大阪大学)

Yoshinori HISAZUMI (Osaka University)

e-mail: hisazumi@ed.jrl.eng.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

LNG の価格が高騰している。これに加えて円安が進行しており、原発の停止状態が続く電力各社の電気料金が値上げされた。LNG はわが国に 1969 年に導入され、1973 年の石油危機では、エネルギー価格の高騰で省エネ機運が高まり、電力・ガス大手事業者は、LNG 冷熱発電の開発に積極的に取り組んだ。1977 年にこの冷熱発電の効率を評価できるエクセルギーの解説書が出版された[1]。

当時から約 40 年が経過し、節電の要請からエクセルギーが再び注目を浴びだした。著者は、幸いにも LNG 冷熱発電の開発に関わり、その後もエクセルギーを用いた設計経験から、若手技術者や学生にエクセルギーを体験してもらえらる web サイト[2]や書籍を出版した[3]。本稿では、LNG をいかにうまく活用するかをエクセルギーの観点から紹介したい。

2. LNG の価格

2013 年度の火力発電の燃料費は、2010 年度対比 5 兆円の増加と見込まれている[4]。2012 年度の我が国への LNG 受入量は、約 8,860 万トン。そのうちの約 7 割にあたる 6,274 万トンが LNG 火力の燃料として使われている。2013 年度の LNG 火力の燃料費は、昨年度とほぼ同程度の量が受け入れられると予想され、前年度比 9,252 億円増の 5 兆 4,115 億円と見込まれている。この額は、石油・石炭を合わせた火力燃料費全体の約 62%に相当する。単純に計算すると 2013 年度の LNG1 トン当たりコストは、約 8 万 6 千円となる。LNG 価格の高騰に対して、西欧諸国では、石炭が火力発電の燃料として見直され、我が国では電力・ガス大手事業者が、2017 年に米国産シェールガスを LNG で輸入する動きが具体化している[5]。図 1 に発熱量換算による燃料別輸入価格の推移を示す[6]。CIF 価格 (運賃・保険等のコストを含んだ LNG 価格)

0.5 円/MJ の LNG 1 トン当たりコストは、LNG の分子量を 18.4、発熱量を $45\text{MJ}/\text{Nm}^3$ とすると、約 2 万 7 千円である。この約 3 倍に値上がりした燃料価格は、2008 年 9 月のリーマンショックで落ち込んだものの、景気の回復と化石燃料の枯渇並びにアジア諸国の経済発展に伴うエネルギー需要の増大から、今後も LNG 価格も含めて、高騰すると思われる。

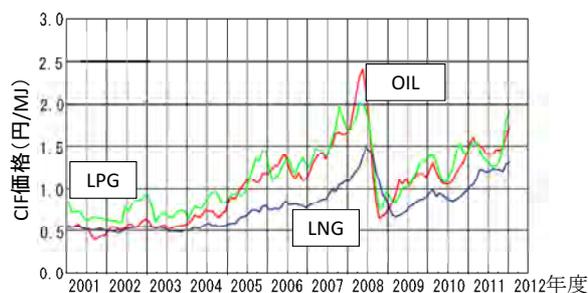


図 1 燃料別輸入価格の推移

3. LNG 冷熱利用

LNG は、メタンを主成分にエタン、プロパン、イソブタンからなり、大気圧での沸点は、約 -160°C である。外界の評価温度を 20°C とすると、LNG 1 トン当たりの冷熱と化学エクセルギーは、それぞれ約 250kWh と約 $14,200\text{kWh}$ となる。天然ガスの液化には当初 LNG 1 トン当たり約 850kWh の一次エネルギーが必要とされたが、最近では巨大な冷凍圧縮機を駆動するのに火力発電所用の高効率ガスタービンが転用され省エネが進んでいる[7]。

たとえばガス田からの天然ガスの産出圧力が 4.5MPa の液化用圧縮動力は LNG1 トンあたり約 260kWh との文献[8]があり、仮に動力と一次エネルギーの換算係数を 0.5 とすると、LNG 1 トン当たりの一次エネルギー消費は、約 520kWh となる。産出天然ガス圧力が下がれば、当然この値は、大きくなるが、約 40 年前の液化プラントに比べ消費動力は約 4 割削減されたことになる。ガス田やシ

ェールガス鉱床の他、世界の LNG 液化基地、受入基地などの最新情報は文献[9]を参照されたい。海外の LNG 基地における冷熱利用の代表は、BOG (Boil off gas) 再液化であり、一部の基地での空気液化分離や台湾の冷熱発電を除いて、日本ほど LNG 冷熱利用に積極的でない。この理由は、ガスの送出圧力が 7MPaG と高く、LNG 冷熱の約 6 割が有効に利用できるためである。一方、日本の LNG 基地の冷熱利用[10]は、表 1 に示す冷熱発電[11]の他、空気液化分離 (7 基)、液化炭酸ドライアイス製造 (3 基)、冷凍倉庫 (2 基)、BOG 再液化 (2 基)、液化水素製造 (1 基)、エチレン液化 (1 基) [12]、冷水発生 (3 基) と多岐にわたる。

冷熱発電以外の設備の LNG 利用量は、50ton/h 以下であるが 24 時間同じ流量を必要とする。しかし冷熱発電では、ガスの送出量に応じて流量を変えることができ、LNG 利用量を大きくとれる。

表 1 の方式は、R: 単一冷媒ランキンサイクル、NG: 天然ガス直接膨張サイクル、MFR: 混合冷媒ランキンサイクルである。基地名の (供) は、ガバナーの代わりに減圧する際の圧力エネルギーを回収するためにガス供給所に設置されている天然ガスの直接膨張タービンであることを示す。

現在これらの冷熱発電の内、オゾン破壊係数の高い冷媒を使った方式やボイラー焚き蒸気タービンからガスタービンコンバインド方式に切り替わった基地の設備は、運用停止の状況にある。

表 1 わが国において建設された冷熱発電

基地	運開	出力 MW	方式	LNG t/h	送出圧力 MPaG
泉北第 2	1979	1.45	R	60	3.0
	1982	6.0	R/NG	150	1.7
知多共同	1981	1.0	R	40	1.4
北九州	1982	9.4	R/NG	150	0.9
知多	1983	7.2	R/NG	150	0.9
	1984	7.2	R/NG	150	0.9
日本海	1984	5.6	NG	175	0.9
根岸	1985	4.0	MFR	100	2.4
東扇島	1986	3.3	NG	100	0.8
	1987	8.8	NG	170	0.4
	1991	8.8	NG	170	0.4
姫路	1987	2.8	R	120	4.0
	2000	1.5	NG	85	0.7
泉北第 1	1987	2.4	NG	83	0.7
四日市	1989	7.0	R/NG	150	0.9
岩崎橋(供)	1996	1.15	NG	45	0.2
西島(供)	2002	5.0	NG	220	0.7

4. エクセルギー

4.1 エクセルギー誕生の歴史と普及状況

カルノーの論文「火の動力による考察」(1824) が「エクセルギー」に関する最初の論文である。

エクセルギーに対応する英語の述語として availability や available energy が 1950 年頃から使われ出したが、1956 年に Z.Rant が energy に倣ってギリシャ語を用い、exergy を造語したとされる。

この語は、当時のソ連、ドイツ、東欧圏を通じて広まり、1961 年にエクセルギーの研究成果を総括したドイツの雑誌「エクセルギー特集号」が組まれた。わが国でエクセルギーの導入活動が本格化したのは、石谷清幹氏による「エネルギー評価標準研究委員会」を通じてである。最近の動きとしては、エクセルギーをテーマとした科学研究費の重点領域研究「エクセルギー再生産の学理(1994 年度～1998 年度)」や普及本も出版されている [13-15]。しかしエネルギー関連産業ですら、なかなか実際に受け入れられていないのが現状である。

4.2 エンタルピーとエクセルギーによる評価

著者は、2001 年 11 月に JSME 熱工学部門の岡山大学での特別企画セッション「熱力学 One-Point Lecture」においてエクセルギーの講演を行った[16]。

熱力学を学んでいない学生にも、難しい数式を使わずに比喻で「エクセルギーの大切さ」を理解してもらえるように考えた。図 2 に熱力学第一法則でのエネルギー消費機器の発熱量に対する有効熱と損失の関係と給与の支給額と控除の関係に喩えた類似性を示す。熱力学第一法則の熱精算では、外界条件がないエンタルピーにもとづく第一種損失しか表わせない。またプロセスに導入される入熱は、燃料、電力の他外気など異なる質のものを同等に扱う。一方給与の明細では、所得税など消費税がかからない項目のみである。

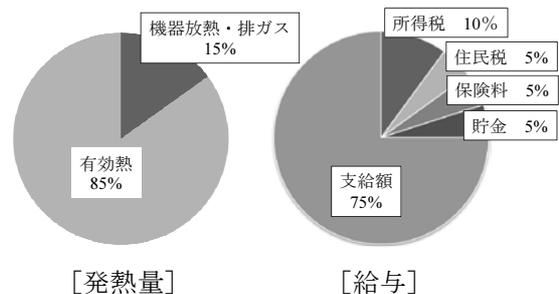


図 2 熱力学第一法則と給与の類似性

図3に熱力学第二法則でのエネルギー消費機器の有効熱量（投入エクセルギー）に対する有効仕事と損失の関係を家計簿の小遣いと消費税のかかった経費の関係に喩えた類似性を示す。熱力学第二法則の熱精算では、外界条件があるエンタルピーとエントロピーにもとづく第二種損失を電力や動力、蒸気などの有効仕事と同じ質で扱う。またプロセスに導入される入熱は、有効仕事と同質のものとなるため、外界条件と同じ外気などは有効熱量に含まれない。一方家計簿では、食費をはじめすべてに消費税がかかる経費である。したがって小遣いを増やすには、まずは大きな経費の見直しが必要となる。この有効仕事と小遣いの類似性は以下の数式で表わせる。

$$\begin{aligned} \text{小遣い} &= \text{支給額} - (1 + \text{消費税}) \times (\text{必要経費}) \\ \text{有効仕事} &= \text{有効熱量} - (\text{外界温度}) \times \Delta S \end{aligned}$$

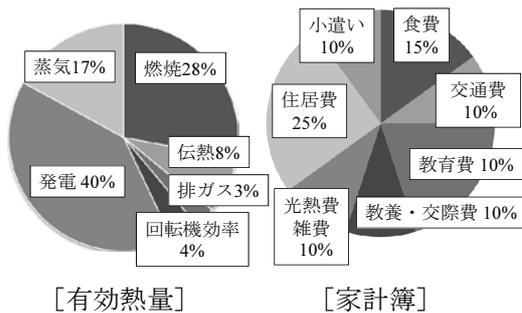


図3 熱力学第二法則と家計簿の類似性

表2にエンタルピーとエクセルギーによる評価の比較を示す。この比較表から両者をカメラに喩えれば、エンタルピーはレンズ付きフィルムカメラ、エクセルギーはデジタル一眼カメラとなる。

表2 エネルギー変換尺度の比較

項目	エネルギー変換尺度		備考
	エンタルピー	エクセルギー	
エネルギーの量	○	○	熱量は状態量ではない
エネルギーの質	×	○	エクセルギーは動力と質的に等価
基準温度の概念	×	○	流体の有効エネルギーを表現可能
圧力の評価	×	○	負担は定義式から違和感あるが負担
組成の評価	×	○	純酸素・純窒素の混合で損失発生
排ガス・放熱損失	○	○	常にエクセルギー<エンタルピー
混合損失	×	○	異温度液体の混合で損失発生
燃焼損失	×	○	純酸素燃焼なら損失を大幅に低減できる
回転機損失	×	○	断熱効率 100%なら損失ゼロ
伝熱損失	×	○	温度差なしの熱交換なら損失ゼロ
減圧損失	×	○	流れの制御や計測でも損失発生

4.3 エクセルギー損失低減策

伝熱学会の会員に今更説明するまでもないが、エネルギー消費機器における最大のエクセルギー損失は、燃焼と伝熱である。伝熱はさておき燃焼に関しては、純酸素燃焼を行っても空気予熱を行うリージェネバーナ[17]とほぼ同じ約 17%の燃料の化学エクセルギーに対する損失を生じる。ここで化学エクセルギーとは、都市ガス 13A では高位発熱量の約 92%であり、ガス給湯器の 1500℃燃焼（空気比 1.53）で約 36%の燃焼損失が生じる。

この損失に比べれば、純酸素燃焼やリージェネバーナ燃焼は、大幅な損失低減策になる。既に販売が開始されている家庭用燃料電池は、LHV 発電効率 46.5%、総合効率 90%と発電出力 700W にしては極めて高い性能である[18]。この高い性能の根源は、燃焼損失を約 11%に抑えた点にある。

さらに発電効率を 55%に上げる取り組みもなされており[19]、後述で説明するが、エクセルギー面から見ると燃料利用率の向上に合わせた熱交換器類の伝熱に伴う損失低減が最大の課題となる。

4.4 エクセルギーデザイン学とは

これは、プロセスシミュレータ[20-21]を用いて、最適な機器構成をモデリングし、エクセルギー解析より求まる損失を機器性能の向上や運用条件により最小化させ、有効エクセルギーを増大させる手法である。PDCA (Plan-Do-Check-Action) は、業務改善の手法として知られている。

エクセルギーデザイン学ではこの手法と同様に Process modeling - Exergy Analysis - loss Evaluation - Payback Review を何度も繰り返し、現行技術レベルにおいて、CO₂低減効果を加味しながら、最大の経済的効果が得られるプロセスを決定する学問領域である。エクセルギー解析を行わない従来の手法では、この作業を開発者が無意識の内に頭の中で行うが、エクセルギー解析の場合はそれを数値化して、「見える化」できる利点がある。ちなみにプロセスシミュレータの活用は、パソコンの導入に負うところが大きい。この 30 年間の IT 技術の進歩にはまったく驚かされる。プロセスシミュレータに関しては、1970 年に入ると各種の物性推算式が提唱され、エンジニアリングに活用され出した。日本の大学においても化学工学会システム・情報シミュレーション部会情報技術教育分科

会主催のプロセスデザイン学生コンテストが実施されている[22]. 著者も2003年から関西大学と2010年から大阪大学で機械工学専攻の特別講義でプロセスシミュレータを用いてエクセルギーデザイン学を受講学生に体験させている. 講義では, 主に LNG 冷熱発電とガスタービンなどを取り上げているが, 次項でその内容を紹介したい.

5. エクセルギーデザインによる LNG 冷熱発電

5.1 運用中の冷熱発電設備のエクセルギー効率

図4に代表的なプロパンランキン+天然ガス直接膨張サイクルによる LNG 冷熱発電のプロセスフローを示す. 熱源の海水温度に対する発電特性は文献[23]を参照されたい. 図5に LNG100ton/h, ガス送出圧力 1.9MPaG での LNG 冷熱発電のエンタルピーとエクセルギーによる熱精算図を示す.

エンタルピーでは, 熱源は海水であり, LNG の気化と発電に供される. 一方, エクセルギーでは有効熱量は LNG 冷熱であり, ガスの送出圧力やタービン出力の他, 各機器での損失に供される.

したがってこの設備のエクセルギー効率は, 自家使用のポンプ電力を差し引き, 56.9%となる.

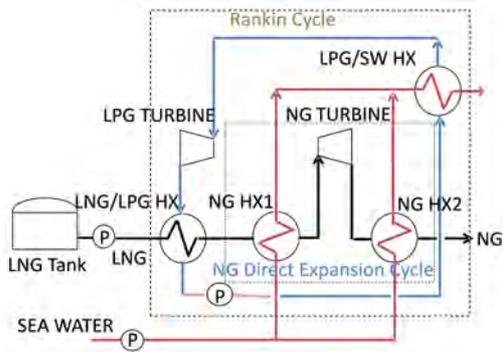


図4 LNG 冷熱発電のプロセスフロー

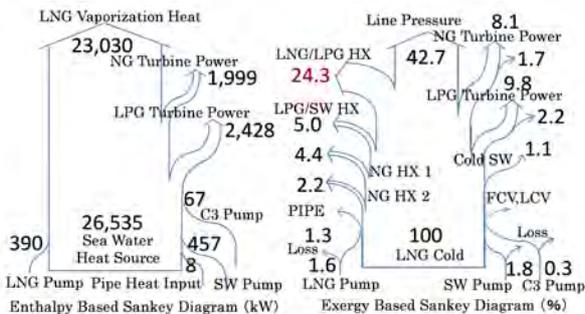


図5 冷熱発電の熱精算図 (評価温度 20°C)

5.2 冷熱発電へのエクセルギーデザインの適用

エクセルギー損失が24.3%もある LNG/LPG HX の他, 低温 NG の昇温 (HX1 と HX2) や LPG 気化 (LPG/SW HX) での伝熱に伴う損失を経済性や運用性を考慮しながら, ガス送出圧力やタービン出力に変換する必要がある. 先ず LNG/LPG HX の損失を低減するため, 表1の根岸基地で実績のある MFR 方式を NG 循環直接膨張と LPG ランキンに採用する[24]. しかし海水だけを熱源に用いては, LNG/LPG HX 以外の熱交換器での損失を低減できない. そこで図6に示すコージェネ温水 (95°C) をヒータ熱源に用いる新 LNG 冷熱発電のプロセスを検討した. 都市ガスの送出は, 高圧 7MPaG と中圧 1MPaG の幹線に, また 3MPaG は基地に隣接する大型火力用燃料ラインとして, その送出比率を 40%, 5%, 55%とした. エンタルピーでは投入熱量の約 1/4 を占める温水はエクセルギーでは, LNG 冷熱に対して僅か 3.2%である.

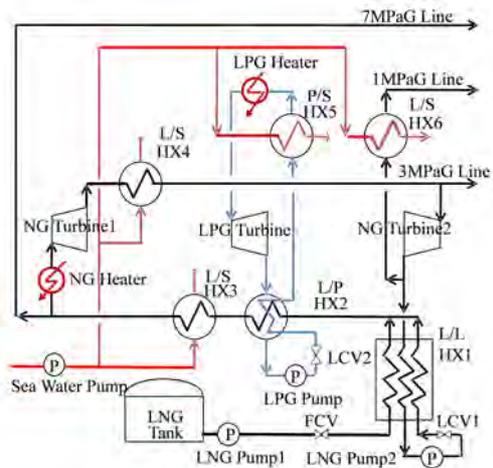


図6 新 LNG 冷熱発電のプロセス

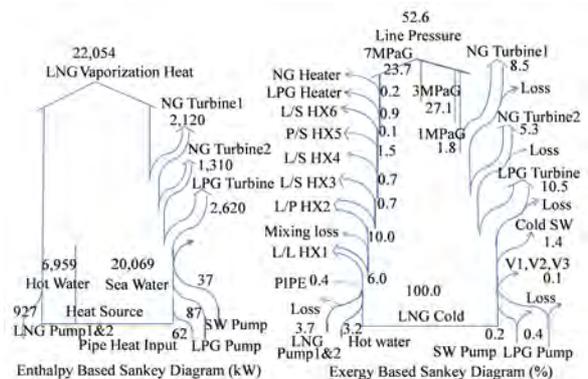


図7 新冷熱発電の熱精算図 (評価温度 20°C)

投入温水のエクセルギーは、LNG 1 トンの冷熱エクセルギー250kWh に流量 100ton/h を掛け 800kW となるが、温水を利用することで NG Turbine1 と LPG Turbine の出力をそれぞれ 230kW, 700kW 高められる。この設備のエクセルギー効率は、自家使用のポンプ電力を差し引き、投入温水も考慮に入れると 70.3%と現行設備に比べ約24%のアップとなる。このようにエクセルギーデザインの講義では、熱交換器の温度差に伴う伝熱損失がプロセスの見直しにより、有効な動力や圧力に変換できることを実際に体験してもらっている。

6. エクセルギーデザインによるガス利用

ここでは、送出された天然ガスをいかに有効に利用するかをエクセルギーの観点から説明したい。

第 1 は LNG 火力発電の高効率化である。ガスタービン入口燃焼ガス温度は今まで毎年約 25°C の高温化を達成してきており、現在 1600°C クラスのコンバインドサイクルが試運転段階にある[25]。

発電端熱効率は、LHV 基準で 61.5%以上とあり、この値はエクセルギー効率では、都市ガス 13A の低位発熱量 40.4MJ と化学エクセルギー41.4MJ より、60%となる。最大のエクセルギー損失は、燃焼に伴う約 24.3%とボイラーの伝熱に伴う約 6.5%であり、残りのほとんどがタービンや圧縮機の効率による損失となる。1700°C級ガスタービンの開発ロードマップによれば、LHV 基準で 62~65%が目標とされている[26]。この 1700°C級ガスタービンでもやはり燃焼に伴う損失が約 23.0%と最大であるが、タービンと圧縮機の効率改善で上限の目標値は達成されると思われる。

第 2 は固体酸化燃料電池 SOFC による高効率化である。大型 LNG 火力発電への組み込みも検討されているが[27]、建設コストの面から実証はかなり先になると予想される。一方家庭用では、発電出力 700W で LHV 発電効率 46.5%を達成している[28]。著者の研究室では、エクセルギーデザインにより、家庭用 SOFC の効率改善余地の研究を行っている[29]。図 8 はセルスタックにおける燃料利用率を高め、LHV 発電効率を 55%に向上するためのプロセス条件の一例を示しており、図 9はそのエクセルギー熱精算図である。図9の()内数値は、燃料利用率を高める前のエクセルギー熱精算図からの増減を表す。燃料利用率を高め

ば発電効率は増加するが、そのためには、熱交換器類の伝熱に伴うエクセルギー損失を減らす必要がある。

最後にエクセルギーの良さを再度強調するため、図 10 の家庭におけるエネルギー機器の効率と一次エネルギー使用量の関係を示したい[30]。この図は冬場の戸建て住宅の一日の電力需要を固定して、熱電比を 0.5~3.0 に 0.5 刻みで変化させた場合のエネルギー機器の効率と一次エネルギー使用量の関係を示す。SOFC の熱主逆潮運転を別にすれば、給湯使用量の増加に合わせ、エンタルピーでは効率が上がるが一次エネルギー使用量も増加する。一方エクセルギーでは、効率の向上に伴い一次エネルギー使用量は減少する。これは高エクセルギー効率の機器の購入が省エネにつながることを物語っている。

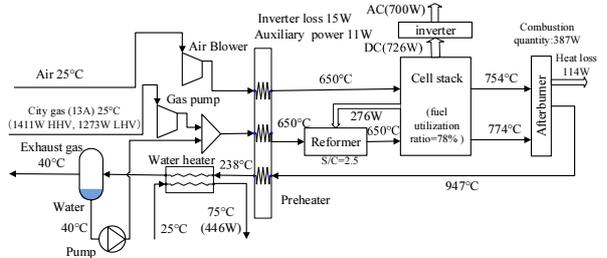


図 8 SOFC の運転フロー (一例)

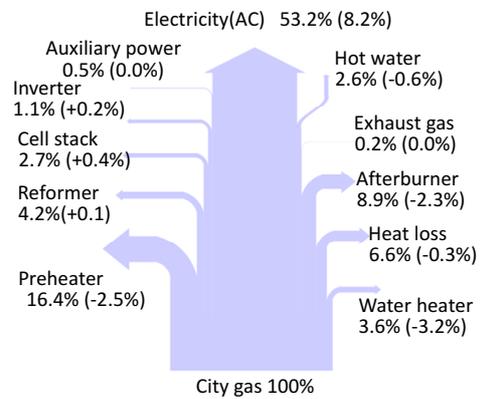


図 9 SOFC のエクセルギー熱精算図 (一例)

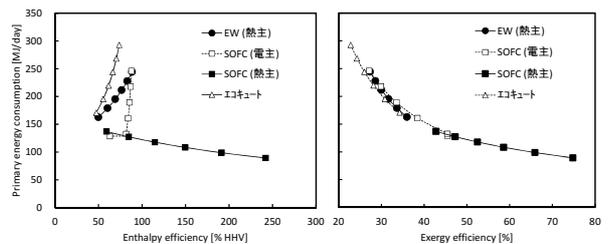


図 10 システム効率と一次エネルギー使用量

7. おわりに

LNG は、今後もわが国の基幹エネルギーとして重要な位置を占める。LNG 1 トン当たりの冷熱エクセルギーは、化学エクセルギーの僅か 1.76% に過ぎないが、40 年前は、省エネの機運のなかでこのエネルギー回収に各企業が必死で取り組んだ。

燃料価格が高騰する昨今において「もったいない」の精神に立ち返り、来年である 2014 年までには高効率な LNG 冷熱発電の開発に官民挙げて取り組み、わが国の戦略的輸出プラント商品となっていることが私の夢である。皆様にも是非エクセルギーデザイン学の深掘りをしていただきたい。

参考文献

- [1] 『熱管理士教本—エクセルギーによるエネルギーの評価と管理』, 石谷清幹著編, 共立出版 (1977).
- [2] <http://www.ed.jrl.eng.osaka-u.ac.jp/>.
- [3] 『エクセルギーデザイン学の理解と応用—続熱管理士教本』, 久角喜徳, 中西重康, 毛笠明志監修, 大阪大学出版会 (2012).
- [4] 日本総研, 円安により高まる火力発電燃料費の増加懸念(2013 年 5 月 2 日)No.2013-003, <http://www.jri.co.jp/MediaLibrary/file/report/researchfocus/pdf/6752.pdf>.
- [5] 東洋経済 ONLINE, シェール革命で世界はどう変わるか, <http://toyokeizai.net/articles/-/12863>.
- [6] 中部電力, LNG (天然ガス) の輸入価格の推移.
- [7] <http://www.chiyoda-corp.com/technology/lng/liquefaction.html>.
- [8] Shahrooz Abbasi Nezhad, Bizhan Shabani and Majid Soleimani, Thermodynamic Analysis of Liquefied Natural Gas Production Cycle in APCI Process, Journal of Thermal Science(2012), Vol. 21, Issue 6, pp. 564-571.
- [9] ガスエネルギー新聞, World Natural Gas Map 2013.
- [10] 国際 LNG 市場の動向と LNG 冷熱利用の現状と取り組み, エネルギー資源, Vol.27, No.5, pp.320-339 (2006).
- [11] 久角喜徳, LNG 冷熱発電, 機械工学便覧応用システム編 γ 5, エネルギー供給システム, 日本機械学会, pp.198-201 (2005).
- [12] http://www.osakagas.co.jp/company/press/pr_2011/1193064_4332.html.
- [13] 『エクセルギー工学—理論と実際』, 吉田邦夫編, 共立出版 (1999).
- [14] 唐木田健一『エクセルギーの基礎』, オーム社 (2005).
- [15] 『エネルギーの新しいものさしエクセルギー』, アベイラブルエナジー研究会編, (社)日本電気協会新聞部 (2010).
- [16] 久角喜徳, よくわかるエクセルギーと都市ガス事業におけるその活用事例, 熱工学講演会講演論文集, pp.654-648 (2001.11).
- [17] http://www.osakagas.co.jp/company/efforts/rd/needs/1191093_3922.html.
- [18] <http://www.osakagas.co.jp/topics/topics20130124.html>.
- [19] 次世代型高効率 SOFC プロトタイプ機, http://www.osakagas.co.jp/company/press/pr_2013/1201415_7831.html.
- [20] http://www.aspentech.co.jp/product/pdf/HYSYS_SS.pdf
- [21] <http://www.virtualmaterials.com/vmgsim>
- [22] 第 11 回プロセスデザイン学生コンテスト, http://altair.chem-eng.kyushu-u.ac.jp/scej_contest2012/.
- [23] http://www.osakagas.co.jp/company/efforts/rd/technical/1191168_3909.html.
- [24] 朴燦容, 久角喜徳, 堀司, 若林努, 毛笠明志, エクセルギーデザインによる韓国 LNG 基地での複合発電の導入検討, 第 18 回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集 (2013.6).
- [25] <http://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/491/491019.pdf>.
- [26] http://www.meti.go.jp/committee/summary/0001640/034_05_07.pdf.
- [27] <http://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/483/483016.pdf>.
- [28] 若林卓, 家庭用燃料電池「エネファーム type S」, クリーンエネルギー Vol.21 No.8 (2012), pp.1-5.
- [29] 堀司, 後藤稔, 久角喜徳, 若林努, 毛笠明志, 家庭用燃料電池コージェネのエクセルギーデザイン, 第 18 回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集 (2013.6).
- [30] 堀司, 平野駿, 久角喜徳, 若林努, 毛笠明志, エクセルギー解析による SOFC の高効率化, 第 31 回エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集, pp.383-386 (2012.6).