エネルギー有効利用からみた 石炭変換プロセスの評価 (IV)

—液化プロセスシステムの エネルギー・エクセルギー解析—

—1982. 3. 23 受理—

東京理科大学 西 田 直 矩*

東京工業大学 石 田 愈**

1. はじめに

前回¹⁾では、まず石炭のエンタルピーとエントロピーの推算法について概観し、ついで石炭ガス化における目的プロセスの設定法などについて論じた後、ガス化のモデルプロセスのエクセルギー解析例を示した。

今回は、石炭の液化プロセスシステムのエネルギー・エクセルギー解析を展開していく。そこで 2. で石炭液化油のエンタルピーとエントロピーの値ならびにその推算法について触れた後、液化のモデルプロセスシステムのエクセルギー解析例を示し、3. で現在米国で開発中の主要な液化プロセスのエンタルピーおよびエクセルギーの絶対量に基づいた効率について論じ、4. で直接液化法および間接液化法のプロセスから得られる液化生成油の最終用途とその消費を考慮した場合の一次エネルギーから製品の最終消費に至るエネルギー効率の評価例を紹介する。

2. SPEEDを用いた石炭液化プロセスのエクセルギー解析

石炭液化油は非常に多種多様な分子から成る混合物である。そこで鈴木ら²⁾は、原子団寄与の考え方を利用して、液化油を構成している主要な原子団の分布を推測し元素組成および沸点のみから液化油の生成エンタルピーと絶対エントロピーを推算する式を提案している。そして、それに基づき図1^{註)}に示す石炭液化モデルプロセスについて SPEED (Structured Process Energy-Exergy-Flow Diagram) によるエクセルギー計算を行っている。

この図1では、石炭液化プロセスのターゲットとして、石炭に水素が作用して液化油を生成する過程を選

び、それを(1)石炭と溶剤の混合、(2)スラリーの予熱、(3)水素化分解、(4)液化油の分離、の各サブターゲットに分割して、それぞれのエンタルピー変化とエクセルギー変化を算出している。

サブターゲット(1)では、固体と液体との単なる物理的混合とみなして、 ΔH と ΔS は0としている。

サブターゲット(2)の予熱では、スラリーの昇温と水素の昇温ならびに等温での石炭の水添反応とに細分している。これらは実際の予熱器内では同時に進行するが、このように分離して考えると、この段階での反応が若干の発熱反応で、熱源型 ($\Delta H < 0$, $\Delta \epsilon < 0$) の反応になっており、この発生した熱はスラリーの予熱に利用される。残りの必要な熱を 750°C の熱源を利用して与えると、この熱源に対する $\Delta \epsilon$ は -7.28kcal であるから、このサブシステムにおけるエクセルギー損失は、 $-(-7.28 + 3.15) = 4.13\text{kcal}$ となる。

サブターゲット(3)の水素化分解反応も、スラリーの昇温と水素の昇温ならびに等温での水素化分解反応に細分している。水素化分解は予熱段階の水添反応と同様、熱源型のプロセスとなっている。この段階での熱損失を 2.43kcal とおくと、サブシステム(3)におけるエクセルギー損失は、 $-(-2.82 - 0) = 2.82\text{kcal}$ と計算される。

図1の(4)の分離では、液混合物をナフサ、中質油、重質油に分離するのに必要なエクセルギーを算出している。この部分を蒸留プロセス等に置き換え、さらに加圧や熱回収の過程を考慮することによって、石炭液化プロセス内でのエネルギー変化、エクセルギー変化を検討していくことができる。

* 工学部経営工学科 東京都新宿区神楽坂1-3
** 資源化学研究所 横浜市長津田4259

註) 図中の記号等の説明については 前回のを参照されたい。

```

#####
;Liquefaction of coal
<COAL> + 0.292 H2 => <GAS> + <NAPHTHA> + <MIDDLE> + <HEAVY>
                                + <RESIDUE> + 0.0522 H2O :
dH= -4.78 dEx= -5.00 D= -0.047
#####
; 1) Pretreating
<COAL> @298 ,150 + {<SOLV>} => {<SLURRY>} :
dH= 0, dEx= 0, D= 0
#####
; 2) Preheating
{<SLURRY>} @298 ,150 + 0.0676 H2 @400 ,150 => {<SLURRY'>} @713, 150 :
dH= 10.27, dEx= 3.15, D= 0.693
#####
{<SLURRY>} @298, 150 => {<SLURRY>} @713, 150 :
dH= 11.47, dEx= 4.25, D= 0.629
#####
0.0676 H2 @400 ,150 => 0.0676 H2 @713, 150 :
dH= 0.151, dEx= 0.07, D= 0.543
#####
{<SLURRY>} @713 ,150 + 0.0676 H2 => {<SLURRY'>} :
dH= -1.36, dEx= -1.17, D= 0.140
-----
HEAT SOURCE @ 1023
dH=-10.27, dEx=-7.28, D= 0.291
#####
3) Hydrogenation
{<SLURRY'>} @713 ,150 + 0.2244 H2 @400 ,150 => <GAS>
                                + {<OIL> + <SOLV>} + <RESIDUE> + 0.0522 H2O @730, 150 :
dH= -2.43, dEx= -2.82, D= -0.159
#####
{<SLURRY'>} @713 ,150 => {<SLURRY'>} @730, 150 :
dH= 0.471, dEx= 0.277, D= 0.413
#####
0.2244 H2 @400 ,150 => 0.2244 H2 @730, 150 :
dH= 0.519, dEx= 0.237, D= 0.542
#####
{<SLURRY'>} @730 ,150 + 0.2244 H2 => <GAS> + {<OIL> + <SOLV>}
                                + <RESIDUE> + 0.0522 H2O
dH= -3.42, dEx= -3.33, D= 0.027
-----
HEAT SINK @ 298.15
dH= 2.43, dEx= 0, D= 1.00
#####
4) Separation
{<OIL> + <SOLV>} => {<NAPHTHA>} + {<MIDDLE>}
                                + {<HEAVY>} + {<SOLV>} @723, 150 :
dH= 0, dEx= 0.335, D= Infinite

;Remarks
<COAL> = C H.845 0.111 N.014 S.017
<GAS> = 7.68E-3 CO2 + 1.54E-3 CO + 1.54E-2 H2S + 4.61E-3 NH3
      + 4.30E-2 CH4 + 1.84E-2 C2H6 + 1.08E-2 C3H8 + 3.07E-3 C4H10
<OIL> = <NAPHTHA> + <MIDDLE> + <HEAVY>
<NAPHTHA> = 0.0937 C H1.690 0.029 N.009 S.001
<MIDDLE> = 0.218 C H1.293 0.037 N.010
<HEAVY> = 0.126 C H1.012 0.015 N.013 S.002
<RESIDUE> = 0.429 C H.729 0.068 N.011 S.003
<SLURRY'> = {3.07E-4 CO2 + 9.06E-3 H2S + 4.61E-4 NH3
            + 1.54E-4 CH4 + 1.54E-4 C2H6} + 0.0261 H2O
            + {0.0645 C H1.638 0.035 N.010/LIGHT OIL}
            + 0.730 C H.859 0.081 N.014 S.006/SRC
            + 0.206 C H.845 0.111 N.014 S.017/UNREACTED COAL

```

図 1 石炭の液化モデルプロセスシステムの SPEED

表 1 モデル液化プロセスの石炭および液化生成物の ΔH_f° と S° の推算値

	<COAL>	<NAPHTHA>	<MIDDLE>	<HEAVY>	<RESIDUE>	<LIGHT OIL>	<SRC>
ΔH_f° [Kcal/mol-C]	-2.51	-6.38	-3.37	0.12	-0.03	-6.19	-1.48
S° [Cal/mol-C K]	4.25	14.36	9.37	5.26	3.94	13.84	4.11

なお、表1はこのモデル液化プロセスのエクセルギ
ー解析で用いた石炭および液化生成物のエンタルピー

およびエントロピーを鈴木らの推算法で求めた値であ
る。

3. 主要な石炭直接液化プロセスのエネルギー効率

米国で開発が進められているいくつかの直接液化プロセスについては、想定される商業プラントの概念設計のデータが公表されている。ここではこれらのデータに基づいて、代表的な直接液化プロセスである SRC-I プロセス、SRC-II プロセスおよび H-Coal プロセスのエネルギー効率の評価を行う。

3.1 評価プロセスの概要

3.1.1 SRC (溶剤精製炭) を主製品とするプロセス

SRC-I プロセスの開発を進めている ICRC (International Coal Refining Company) に参加している Catalytic 社が EPRI の要請に基づいて SRC を主製品とする概念的な商業プロセスのフローを提案している⁹⁾。そこでは、以下に示すような4つのプロセスを提案している。

1. ろ過法を用いた SRC-I プロセス
2. CSD 法を用いた SRC-I プロセス
3. Short Residence Time 2 段液化プロセス
4. CSD 法および 2 次水添工程を併せた Short Residence Time プロセス

第1のプロセスは、Wilsonville, Ala. のパイロットプラントで開発が進められている SRC-I プロセスにおいて石炭液化生成スラリーの固液分離に加圧ろ過

装置を用いたプロセスのフローに基づくものである。

第2のプロセスは、固液分離工程に Kerr-McGee 社の開発した CSD (Critical Solvent Deashing) 装置を採用した SRC-I プロセスである。

第3および第4のプロセスは、一段目の液化を短時間で行った後、灰分を含む液化残渣を固液分離工程で除き、さらに2段目の液化工程で水素ガスを用いて水添を行って低硫黄の SRC を主製品として生産するプロセスである。一段目の液化の反応条件は、約30atm、440℃で水素ガスは用いていない。スラリー滞留時間は約4分である。このように一段目の液化を短時間で行うプロセスは一般に Short Residence Time (SRT) あるいは Short Contact Time (SCT) プロセスといわれ、水素消費量の低減を目的としたプロセスである。第3の SRT 2 段液化プロセスでは、ろ過法を固液分離工程に採用している。固液分離工程で残渣を除かれた生成油は2段目の液化工程で、水素ガス存在下、113atm、474℃の反応条件で水添が行われ、低硫黄の SRC を生産する。

一方、第4の SRT-SRC プロセスにおいては、一段目の液化工程で水素供与性のプロセス溶剤 (hydrogenated Process Solvent) を用いた SRT プロセスを想定している。一段目の液化工程からの生成油スラリーは、CSD プロセスにおいて脱灰され、SRC が生

図2 Syncrude モード H-Coal プロセスのフローシート

産される。さらに、この SRC は軽質分と重質分の SRC に分留され、軽質 SRC は、沸騰床型の反応器において、103atm、400℃ の反応条件で水添が行われる。この水添された低硫黄の軽質 SRC は、重質 SRC と混合されて、製品 SRC となる。

3.1.2 H-Coal プロセス

Flour Engineers and Constructors 社は、EPRI の要請に基づいて Syncrude モード H-Coal プロセスの 14,448 t/d (short ton) 商業プラントの概念設計を行っている⁴⁾。概念設計は、歴青炭の Illinois No. 6 炭および亜歴青炭の Wyodak 炭を原料とする 2 つの場合について行っており、図 2 はそのプロセスのフローシートである。ここでは、Illinois 炭を原料とするプロセスを第 5、Wyodak 炭を原料とするプロセスを第 6 番目の評価対象プロセスとする。

3.1.3 SRC-II プロセス

ICRC に参加している Air Products and Chemicals 社は、SRC-I プロセスを基本としたいくつかの想定される商業プロセスのフローを提案している⁵⁾。またプロセスの経済性の比較を目的として、SRC-II プロセスの想定商業プロセスのフローも提案している。ここでは、この SRC-II プロセスの原料および製品に関するデータに基づいてエネルギー解析を行い、これを第 7 番目の評価プロセスとする。

3.2 評価プロセスの石炭処理量および製品生産量

各評価プロセスの原料石炭の処理量を表 2 に示す。なお、No.1~4 の SRC プロセスのフローはいずれも grass roots プラントに基づいている。従って、ユーティリティ（電力、スチームなど）はすべてプラント内で自給しており、原料石炭の一部は石炭液化工程以外にも利用されているプロセスもある。同様に、No.5 および 6 の H-Coal プロセスも grass roots プラントの設計に基づいている。ただし、No.7 の SRC-II プロセスでは、プラント内の所要電力は、外部より購入

表 2 評価プロセスの原料石炭処理量

Process No.	Process	Feed Coal to Plant t/d (MAF Basis)
1	SRC with Filtration	9772.0
2	SRC with CSD	9209.2
3	Two-stage SRT SRC	9992.0
4	SRT-SRC	8549.4
5	H-Coal (Illinois)	11598.6
6	H-Coal (Wyodak)	12179.2
7	SRC-II	24385.5

することを想定した設計になっている。表 3 は各プロセスからの製品とその生産量を示したものである。No.1~4 の SRC プロセスでは、grass roots プラントということで、液化工程で発生したガスは、すべてユーティリティ生産のための燃料などに利用されているため、製品として表われていない。なお、これらのすべてのプロセスでは、副製品としてフェノール類、アンモニア、硫黄などが得られるが、エネルギー効率の評価においては、目的製品とせず計算から除外した。

3.3 絶対量としてのエンタルピー、エクセルギーの計算方法

各石炭液化プロセスの効率の評価は、後述するように、エンタルピーおよびエクセルギーの絶対量に基づいて行う。そのためには、各液化プロセスシステムについて、入力されたすべてのエネルギー源となる物質（石炭、電力など）、および目的物（製品）のエンタルピー、エクセルギーの絶対量を求めなければならない。石炭のエンタルピーの絶対量については、第 3 報で述べた方法、すなわち鈴木ら⁶⁾の提案した推算式を使って、まず石炭の元素分析値に基づいて ΔH_f° を求め、それから完全燃焼したときの ΔH_c° を求める。また室温で固体である SRC（溶剤精製炭）のエンタルピー

表 3 評価プロセスの製品とその生産量

Process No.	Products and their Production Rate [t/d]
1	SRC [5458], Light Solvent [279], Medium Solvent [360], Heavy Solvent [109]
2	SRC [4799], Light Solvent [727], Heavy Solvent [159]
3	SRC [5743], Light Solvent [136], Medium Solvent [47], Heavy Solvent [185]
4	SRC [4574], Light Oil [118], Process Solvent [472]
5	Fuel Gas [503], Naphtha [1635], Turbine Fuel [2430], Boiler Fuel [1443]
6	Naphtha [1927], Turbine Fuel [1743], Boiler Fuel [1079]
7	Fuel Gas [3924], Naphtha [2756], Medium Distillate [4535], Heavy Distillate [2634]

ーについても、同様な方法で計算した。各種製品液化油については、元素分析値および平均沸点に基づき、鈴木ら⁷⁾の提案している推算式を用いて ΔH_f° を求め、それから、完全燃焼したときの ΔH_c° を求めた。

石炭および製品液化油のエクセルギーの絶対量は以下のようにして求めた。

石炭および液化油を $\text{CH}_x\text{O}_y\text{N}_z\text{S}_w$ のように炭素 1 mol 当りの値を採り、1mol-C の石炭あるいは液化油とする。このとき 1mol-C の石炭および液化油のエクセルギー、 $\varepsilon^\circ_{\text{CH}_x\text{O}_y\text{N}_z\text{S}_w}$ は以下のように表わされる。

$$\varepsilon^\circ_{\text{CH}_x\text{O}_y\text{N}_z\text{S}_w} = \varepsilon_C^\circ + \frac{1}{2}x\varepsilon_{\text{H}_2}^\circ + \frac{1}{2}y\varepsilon_{\text{O}_2}^\circ + \frac{1}{2}z\varepsilon_{\text{N}_2}^\circ + w\varepsilon_S^\circ + \Delta G_f^\circ_{\text{CH}_x\text{O}_y\text{N}_z\text{S}_w}$$

ε_C° , $\varepsilon_{\text{H}_2}^\circ$, $\varepsilon_{\text{O}_2}^\circ$, $\varepsilon_{\text{N}_2}^\circ$ および ε_S° は、それぞれ、C, H_2 , O_2 , N_2 および S に対する化学エクセルギーで、25 °C, 1atm に対して、表 4 のように与えられている⁷⁾。また、 $\Delta G_f^\circ_{\text{CH}_x\text{O}_y\text{N}_z\text{S}_w}$ は石炭あるいは、液化油 1mol-C 当りの生成自由エネルギーである。石炭あるいは液化油の生成自由エネルギーについては、データがないので、以下のように推算した。

まず、石炭あるいは液化油の ΔH_f° および絶対エントロピー S° を鈴木らの推算式によって求めた。つぎに、これらの ΔH_f° および S° を用いて、石炭あるいは、液化油の生成自由エネルギーを以下の関係から求めた。

表 4 基本物質の化学エクセルギー⁷⁾

Substance	State	ε° (298K, 1.0atm) (KJ/Kmol)
N_2	g	599
O_2	g	3902
H_2	g	235400
C	graphite	410780
S	crystalline	584730

$$\begin{aligned}\Delta G_f^\circ_{\text{CH}_x\text{O}_y\text{N}_z\text{S}_w} &= \Delta H_f^\circ_{\text{CH}_x\text{O}_y\text{N}_z\text{S}_w} \\ &\quad - T_o \Delta S_f^\circ_{\text{CH}_x\text{O}_y\text{N}_z\text{S}_w} \\ &= \Delta H_f^\circ_{\text{CH}_x\text{O}_y\text{N}_z\text{S}_w} \\ &\quad - T_o \left(S^\circ_{\text{CH}_x\text{O}_y\text{N}_z\text{S}_w} - S_c^\circ - \frac{1}{2}xS_{\text{H}_2}^\circ \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{2}yS_{\text{O}_2}^\circ - \frac{1}{2}zS_{\text{N}_2}^\circ - wS_s^\circ \right)\end{aligned}$$

S_c° , $S_{\text{H}_2}^\circ$, $S_{\text{O}_2}^\circ$, $S_{\text{N}_2}^\circ$ および S_s° はそれぞれ、C, H_2 , O_2 , N_2 , S の絶対エントロピーである。

3.4 結果の概要

表 5 は原料石炭の元素分析値と 1mol-C 当りの分子量である。この元素分析値に基づいて求めた、各石炭の 1mol-C 当りの 25 °C, 1atm 基準の ΔH_f° , S° , ΔG_f° , ΔH_c° , ε° を表 6 に示す。また、各液化プロセスの製品についても、元素分析値、平均沸点に基づいてこれらの熱力学データを求めた。ここでは、紙数も限られているので、SRT-SRC プロセスの製品および H-Coal

表 5 原料石炭の元素分析値と 1 mol-C 当りの分子量

Process No.	Coal Type	Ultimate Analysis, %wt MAF Basis					Molecular Weight of 1mol-C
		C	H	N	S	O	
5	Illinois No. 6	78.83	5.55	1.66	3.92	10.04	15.2360
1, 2, 3	Kentucky No. 9/14	79.70	5.46	1.60	3.24	10.00	15.0704
4	Kentucky No. 9/14	78.60	5.65	1.52	3.78	10.45	15.1330
7	Kentucky No. 9	78.80	5.58	1.56	3.79	10.27	15.2435
6	Wyodak	71.65	5.31	1.13	1.23	20.68	16.7628

表 6 原料石炭の ΔH_f° , S° , ΔG_f° , $-\Delta H_c^\circ$, ε° の推算値

Process No.	Coal Type	ΔH_f°	S°	ΔG_f°	$-\Delta H_c^\circ$	ε°
		[Kcal/mol-C]	[Cal/mol-C·K]	[Kcal/mol-C]	[Kcal/mol-C]	[Kcal/mol-C]
5	Illinois No. 6	-1.87	4.17	2.06	122.16	126.49
1, 2, 3	Kentucky No. 9/14	-1.66	4.14	2.15	121.36	125.47
4	Kentucky No. 9/14	-2.15	4.20	1.87	122.43	126.71
7	Kentucky No. 9	-1.99	4.18	1.97	122.17	126.45
6	Wyodak	-6.88	4.91	-2.14	117.77	121.86

表 7 SRT-SRC プロセスの製品の元素分析値と熱力学定数の推算値

	Light Oil	Process Solvent	SRC
Ultimate Analysis wt%	C	79.41	86.43
	H	15.97	9.49
	N	0.47	0.74
	S	0.00	0.19
	O	4.20	3.15
Cut[°F]	IBP/450	450/780	780 ⁺
ΔH_f° [Kcal/mol-C]	-12.69	-3.02	-1.18
S° [Cal/mol-C·K]	25.11	9.68	4.06
ΔG_f° [Kcal/mol-C]	-8.29	0.84	2.66
$-\Delta H_c^\circ$ [Kcal/mol-C]	163.22	135.78	122.29
ε° [Kcal/mol-C]	157.32	135.95	125.42

表 8 H-Coal プロセス (Illinois ケース) の製品の元素分析値と熱力学定数の推算値

	Naphtha	Turbine Fuel	Boiler Fuel
Ultimate Analysis wt%	C	85.34	88.35
	H	13.79	10.11
	N	0.24	0.47
	S	0.07	0.08
	O	0.56	0.99
Cut[°F]	c ₄ /350	350/600	500/800
ΔH_f° [Kcal/mol-C]	-7.38	-2.77	-0.93
S° [Cal/mol-C·K]	16.92	9.58	6.80
ΔG_f° [Kcal/mol-C]	-3.00	1.22	2.88
$-\Delta H_c^\circ$ [Kcal/mol-C]	152.46	137.88	132.11
ε° [Kcal/mol-C]	149.38	137.81	133.20

表 9 H-Coal プロセス (Wyodak ケース) の製品の元素分析値と熱力学定数の推算値

	Naphtha	Turbine Fuel	Boiler Fuel
Ultimate Analysis wt%	C	84.66	86.97
	H	13.97	11.39
	N	0.10	0.22
	S	0.02	0.03
	O	1.25	1.39
Cut[°F]	c ₄ /350	350/600	500/800
ΔH_f° [Kcal/mol-C]	-8.01	-4.57	-2.15
S° [Cal/mol-C·K]	17.68	12.60	8.79
ΔG_f° [Kcal/mol-C]	-3.64	-0.56	1.68
$-\Delta H_c^\circ$ [Kcal/mol-C]	153.22	142.79	135.24
ε° [Kcal/mol-C]	149.88	141.54	135.56

プロセスの製品の推算結果のみを表 7～9 に示す。

以上の計算結果に基づき、各液化プロセスのエンタルピーおよびエクセルギーの絶対量に基づく効率を求める。ここでは、プロセスシステムの効率を以下のように定義する。

$$\eta_1 = \frac{\text{目的物のエンタルピー}}{\text{システムに入ってきたエンタルピーの合計}}$$

$$\eta_2 = \frac{\text{目的物のエクセルギー}}{\text{システムに入ってきたエクセルギーの合計}}$$

システムに入ってきたエンタルピーおよびエクセルギーは grass roots プラントの場合、石炭の値を用いる。第 7 番目の SRC-II プロセスでは、電力を外部から購入する設計になっているので、その所要電力のエンタルピーおよびエクセルギーも分母に加算される。目的物のエンタルピーおよびエクセルギーは、製品の値を用いる。

表 10 は各評価プロセスのエンタルピーおよびエクセルギー基準の効率 η_1 , η_2 の計算結果をまとめたものである。エンタルピー基準の効率もエクセルギー基準の効率も 0.64～0.71 の範囲にあることがわかる。またエクセルギー基準の効率が約 1～3% 低い程度で、ほとんど両者は接近している。この理由は、表 6～9 に示したように、石炭および液化油のエンタルピーおよびエクセルギーが実質的にはほとんど同じであり、それらの値を効率の計算に用いているからである。

表 10 からわかるもうひとつの特徴は、H-Coal プロセスにおいて、亜歴青炭の Wyodak 炭の場合の効率が、歴青炭の Illinois 炭の場合よりも約 10% 低いことである。この差は、表 3 からわかるように、Wyodak 炭の場合の製品の収率の低さに帰因しているといえよう。

また、SRC-II プロセスの効率が他のプロセスよりも優っている理由のひとつは、他のプロセスが電力を自給する設計になっているのに対して、この SRC-II プロセスの設計では、電力を外部より購

表 10 エンタルピーおよびエクセルギーの絶対量に基づいた石炭液化プロセスの効率

Process No.	Enthalpy Basis [MMM Kcal/day]		Thermal Efficiency η_1	Exergy Basis [MMM Kcal/day]		Exergy Efficiency η_2
	input	output		input	output	
1	78.69	53.55	0.681	81.36	54.71	0.673
2	74.16	50.06	0.675	76.67	50.82	0.663
3	80.46	52.30	0.650	83.19	53.53	0.644
4	68.50	44.65	0.645	70.89	45.60	0.643
5	92.99	62.54	0.673	96.29	62.14	0.645
6	85.57	49.57	0.579	88.54	48.98	0.553
7	203.75	145.56	0.714	210.65	143.76	0.683

入することになっているため、電力自給プロセスのように発電に伴う効率の低下が含まれていないためであろう。したがって、SRC-II プロセスも、もし電力自給のプラントであれば、他のプロセスとほとんど効率は同程度になるものと思われる。

4. 石炭液化生成物の用途を考慮した場合の最終消費効率

石炭の直接液化プロセスから得られる生成物の性状、製品の種類とその収率は、主として水素化分解の深度によって異なる。また石炭の間接液化法から得られる生成物の性状および製品は直接液化により得られるものとはかなり異なる。したがって、それらの得られた製品を二次エネルギーとして利用する場合、最終消費における利用形態によって用途が限定される。それに併って、一次エネルギー（石炭）から、最終消費に至るエネルギーの変換効率が異なってくる。

Zielinski⁸⁾は、いくつかの具体的な直接液化法および間接液化法のプロセスを取り上げ、それらのプロセスから得られる製品の最終消費での用途を適当に定めて、一次エネルギーから最終用途でのエネルギーの消費に至る一連のエネルギーの変換効率を求め比較している。ここではその一部を紹介する。Zielinski は、一次エネルギーから二次エネルギーへの変換効率を次のように定義している。

$$\eta_E = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{E_S + \sum_{j=1}^m E_{Pj}}$$

Q_i は、変換によって得られる i 番目の二次エネルギー、 E_S は石炭変換プロセスに投入された一次エネルギー、 E_{Pj} は石炭変換プロセスに投入された j 番目のエネルギー源である。なおエネルギーの単位はいずれもエンタルピーの絶対量である。従って、この効率は熱

力学第一法則に基づいたものであり、以下に定義される効率も同様である。各 i および j については以下のように分類されている。

$i=1$ 電力	$i=9$ 中間化学製品
$i=2$ 燃料ガス	$j=1$ 水素
$i=3$ 加熱炉用燃料油	$j=2$ 酸素
$i=4$ ディーゼル油	$j=3$ 水蒸気
$i=5$ SRC	$j=4$ 動力発生源（電力、燃料など）
$i=6$ 合成ガソリン	
$i=7$ コークス燃料	
$i=8$ 熱エネルギー（水蒸気あるいは温水）	

また、一次エネルギー変換から二次エネルギーの最終消費に至る変換効率を次のように定義している。

$$E_U = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^r Q_i \cdot \rho_{i,k}}{E_S + \sum_{j=1}^m E_{Pj}} = \frac{\sum_{i=1}^n E_{U_i}}{E_S + \sum_{j=1}^m E_{Pj}}$$

$\rho_{i,k}$ は、二次エネルギー i から最終用途 k への変換を表わす指標、 E_{U_i} は二次エネルギー最終消費で有効に利用された二次エネルギー i の熱量を表わしている。最終用途 k は以下のように分類されている。

$k=1$ 重工業	$k=7$ 家庭用厨房
$k=2$ 軽工業	$k=8$ その他の家庭内消費
$k=3$ 化学工業	$k=9$ 道路輸送
$k=4$ 農業	$k=10$ 鉄道輸送
$k=5$ 家庭用加熱	$k=11$ 自動車用燃料
$k=6$ 家庭用照明	$k=12$ 電力工業

具体的な石炭液化プロセスとして、①Gulf SRC-I、②P. O. G. O. ③COED ④H-Coal ⑤ICHPW（ポーランドで開発中の液化プロセス）⑥Fischer-Tropsch を取り上げ、上記の変換効率の定義式に従い、計算し比較を行っている。これ以外に、石炭の直接燃焼によ

表 11 二次エネルギーの最終消費を考慮した場合の、種々の石炭液化プロセスの効率の比較

Coal processing method		Gulf SRC-I	COED	H-Coal	Fischer-Tropsch	Power plant
Energy input into conversion process	$E_s\%$	100	100	100	100	79
	j			$E_{pj}\%$		
	1	9.1	9.5	26.0	0	—
	2	0.5	1.0	2.3	6.9	—
	3	0.9	4.0	8.6	—	—
	4	8.3	10.2	9.6	17.2	—
	$\sum_{j=1}^4 E_{pj}$	18.8	24.7	46.5	24.1	21
	$E_s + \sum_{j=1}^4 E_{pj}$	118.8	124.7	146.5	124.1	100
Energy output in the form of secondary energy carriers	i			$Q_i\%$		
	1	0	0	0	0	33.0
	2	0	47.9	26.3	10.9	0
	3	22.5	31.9	71.8	3.9	0
	4	4.8	0	0	3.3	0
	5	43.9	0	0	0	0
	6	0	0	0	15.1	0
	7	0	0	0	0	0
	8	0	0	0	0	0
	9	1.1	0	0	11.6	0
	$\sum_{i=1}^9 Q_i$	72.1	79.8	98.1	44.8	33.0
Useful energy obtained through utilization of secondary energy carriers	i	k		$E_{uj} = Q_i \rho_{i,k}\%$		
	1	10	0	0	0	28.4
	2	7	0	16.2	9.2	3.8
	3	5	14.7	21.7	47.4	2.7
	4	9	1.4	0	0	0.9
	5	12, 10	16.2	0	0	0
	6	11	0	0	0	3.9
	7	5	0	0	0	0
	8	5	0	0	0	0
	9	3	1.1	0	0	11.6
	$\sum_{i=1}^9 E_{ui}$		33.4	37.9	56.6	22.9
$\eta_E = \frac{\sum Q_i}{E_s + \sum E_{pj}}$		0.607	0.640	0.670	0.361	0.330
$\eta_{Eu} = \frac{\sum E_{ui}}{E_s + \sum E_{pj}}$		0.281	0.304	0.386	0.185	0.284

って電気エネルギーを得るケースについても考察している。ここではその一部を表11に示す。一次エネルギーから二次エネルギーへの変換効率 η_E は直接液化プロセスの場合0.6~0.7の間にあることがわかる。これは、前章での計算の結果と符合する。これに対して、間接液化法のFischer-Tropschプロセスは $\eta_E=0.361$ とかなり低い効率であることがわかる。これはF-Tプロセスの場合、石炭をガス化し合成ガスに変換してから炭化水素を合成するという2段の変換過程を経ているためである。ただし、間接液化化によって得られる製品は付加価値が高いので、直接液化法の効率と直接の比較は妥当ではない。ところで現在直接液化プロセスから得られる液化油にさらに水素を添加し、より軽質の製品を生産するアップグレーディングの技術開発が進められている。アップグレーディングによって得られる製品は間接液化化によって得られる製品(特にガソリン)と性状が類似するものもあるので、一次エネルギーから最終消費に至る効率の比較も可能となろう。今回は、この点も含めて解析を試みる予定である。

一次エネルギーから最終消費に至るエネルギーの変換効率 η_{Eu} は、直接液化を経由する場合0.28~0.4の間にある。これに対して間接液化化経由では0.185とかなり低い。この点についても前記の理由で直接比較できないので、次回改めて議論する予定である。

文 献

- 1) 石田, 西田, 燃協誌, **61**, 82 (1982)
- 2) 鈴木, 石田, 「原子団寄与法による石炭液化油の標準生成エンタルピーと絶対エントロピーの推算」, 燃協誌, 印刷中
- 3) Catalytic, Inc., "Preliminary Engineering Evaluation of Promising Coal Liquefaction Concepts", EPRI Report AF-884 (1979)
- 4) Fluor Engineers and Constructors, Inc., "Engineering Evaluation of Conceptual Coal Conversion Plant Using the H-Coal Liquefaction Process", EPRI Report AF-1297 (1979)
- 5) Phillips, E. M., et al., "A Comparative Study of Coal Liquefaction Performance and Economics for Solvent Refined-Based Processes", 88th AIChE National Meeting, Philadelphia, June (1980)
- 6) 鈴木, 石田, 「原子団寄与法による石炭の標準生成エンタルピーと絶対エントロピーの推算」, 燃協誌, **61**, 250 (1982)
- 7) Unrich, T. L., et al., "The Energetics of the COED Process for Coal Conversion from a Second Law Perspective", 72nd AIChE Annual Meeting, San Francisco, Nov. (1979)
- 8) Zielinski, H., "Oils and Gases from Coal", Pergamon Press, 73 (1980)

Evaluation of Coal Conversion Processes from an Energy Efficient Use Viewpoint (IV)

—Energy and Exergy Analysis of Liquefaction Processes—

Naonori NISHIDA*, Masaru ISHIDA**

(*Department of Management Science, Science University of Tokyo
**Research Laboratory of Resources Utilization, Tokyo Institute of Technology)

SYNOPSIS : —The evaluation of the thermodynamic properties of coal liquids is briefly discussed. A model process of a coal liquefaction is presented and its exergy analysis is developed using “SPEED (Structured Process Energy-Exergy-flow Diagram)”. Both the first law and the second law efficiencies of typical over all processes of coal liquefaction are calculated. Processes studied are several SRC-I based ones, SRC-II and H-Coal. The conversion efficiency of coal processing to the useful energy level through several direct coal liquefaction processes and through an indirect coal liquefaction process of Fischer-Tropsch synthesis is reviewed.

Key Words

Coal liquefaction, Exergy analysis, First law efficiency, Second law efficiency