

# 中小水力発電のエネルギー評価

## Net Energy Analysis for Run of River Hydro Power Plant

辻 明 宏\*

Akihiro Tsuji

### 1. はじめに

無資源の我が国では、エネルギー安定供給をめざして、エネルギー自給率向上をはかる努力がつけられている。

自然エネルギーを利用する発電は燃料を消費せず、エネルギーの節約をもたらせる。しかし、この自然エネルギーを利用する装置をつくるために、化石燃料や原子力発電などのエネルギーを消費する。この装置に投入されるエネルギー(投入エネルギー量)は、その装置から得られるエネルギー量(具体的には発電量)よりも十分小さくなければ、建設の意義が低くなる。

この投入エネルギー量は、建設に消費されるエネルギーのみならず設備を構成する材料(セメント、鉄鋼等)を生産するエネルギーも含まれる。水力発電所の場合、ダム、水路、水車、発電機……等々をそれぞれ作るために、多量のセメントと鉄、アルミ、銅……の材料を必要とし、この材料のつくるプロセスで消費される各種の石油、ガス、電力のそれぞれの消費量も勘定することになる。また、建設現場において活躍するブルドーザー、パワーショベルなどの建設機械も石油を消費する。このようにみれば、水力発電所の建設にも、多量のエネルギーを投入しており、「エネルギーなくして、水力発電所もつくれない」というわけである。

本文は水力発電所建設の投入エネルギー量を算定したものである。この計算方法は産業連関分析でなくて積上げ方式によった。しかし、現在、本計算に利用できる信頼性のあるデータは収集し難い状況にあり、これにもとづく数値計算結果は、経済性まで言及することは困難であろう。

### 2. エネルギー収支分析

水力発電は自然エネルギーの利用技術であり、運転エネルギーとしての燃料を必要としない。しかし、水力発電所を建設するには、直接および間接的に消費されるぼう大なエネルギーを必要とする。これが水力発電のエネルギー支出(投入エネルギー)であり、水力発電所からの発電量がエネルギー収入になる。これらの計算はエネルギー収支分析と呼ばれ、エネルギー収入量とエネルギー支出量の対比を行うものである。

ここで本文中で用いられる「エネルギー」の定義を行っておく；産業や交通の動力源となりうる石油、石炭、ガス、水力発電、原子力発電から得られるエネルギー。この「エネルギー」には人間や家畜の労働力、太陽や風力などの自然エネルギーなどが含まれない。

消費エネルギー量とは、石油や石炭の燃焼によるもの、電力使用量などの総和になる。これは当然のことであるが、「燃焼されないエネルギー」——燃やせばその含有発熱量がエネルギーになるが、エネルギーとして利用されないもの、例えば絶縁油、ナフサ、木材等——はエネルギーとして算定しないことにした。

#### 2.1 エネルギーの二元表現

石油と電力が同一のエネルギー量(発熱量)であっても、利用側から見た価値あるいは機能は異なる。このため、エネルギー量は電力(KWH)、石油(eot)などの化石燃料の二元表現とする。エネルギー量の単位は一般にKcalが用いられるが、ここでは石油換算物量eot(equivalent oil ton)を用いる。1eotは石油換算1t、すなわち、 $10^7$  Kcalのエネルギー量を示すものとした。

各々の燃料は、産地や種別による発熱量の差があるが、「エネルギー統計(資源エネルギー庁)」に示された発熱量でもって、石油換算値(eot)で示すことにした。石油および石炭の採掘・輸送、ガスの製造・輸送

\* (財)電力中央研究所研究開発本部環境部環境調査担当課長  
〒100 東京都千代田区大手町1-6-1

などのエネルギーは無視した(特にガス製造のエネルギーは無視できないほど大きい)が、ガスの種類やその含有発熱量自体が十分把握できていないこともあって簡略化した)。

電力に関しては、KWHの単位で表現する。この1 KWHをどれだけ石油換算値で示すかは、電源構成によっても大きく変わるし、原子力発電や水力発電をどのように評価するかによっても異なってくる。電力1 KWHのエネルギー換算は、先述の「エネルギー統計」に示される2,450Kcal/KWHを用いることとし、これはおおよそ火力発電の送電端効率38.5%、送変配電損失10%を見込んだものと見なすことができる。

## 2.2 計算方法

エネルギー収入とエネルギー支出の計算方法を示すことにする。

### エネルギー支出 (エネルギーインプット)

エネルギー支出はつくるエネルギー (設備投入エネルギー) と動かせるエネルギー (運転投入エネルギー) に分類して計算する。(分類項目は水力発電を対象とした場合に限定する。)

#### (1) 設備投入エネルギー

- a. 素材エネルギー; 使用している材料 (損失分も含めて) を生産に消費するもの。
- b. 製造エネルギー; 材料を切断、溶接などの機器を製造するために消費するもの。
- c. 建設エネルギー; 機器および装置の基礎工事などプラントの建設で消費するもの。
- d. 輸送エネルギー; 材料を素材生産工場から機器製造工場まで、機器製造工場からプラント建設現場までなど、輸送消費分

#### (2) 保守投入エネルギー

- a. 保守エネルギー; 修繕による部品取替に伴うもの。

エネルギー支出には、上記のほか環境保全のためのもの、ダム保守にかかわるもの等があるが、評価が難しく試算するに至らなかった。

計算方式は積上げ方式であり、それぞれの項目における「物量」からそれに消費されたエネルギー量を計算する。この計算は「物量」にそのエネルギー原単位を乗じて得る。このエネルギー原単位とは単位量 (1 t, 1 kl, 1 m<sup>3</sup> など) だけ生産、製造、輸送するのに要する投入エネルギー量である。設備投入エネルギーの計算式は次のようになる。

- a 素材エネルギー-A

$$A = \sum \frac{\text{(素材材料重量)}}{\text{各素材材料の総和}} \times \frac{\text{(その素材材料生産のエネルギー原単位)}}{\text{ギ一原単位}}$$

生産のエネルギー原単位は素材材料1 tを生産するのに要した石油、非石油化石燃料 (石炭とガス)、電力の各々消費量である。ここで素材材料重量とは、製品化された素材材料のみならず、加工段階で廃棄される屑分も含むものである。

#### b. 製造エネルギー-B

$$B = \text{(製品重量)} \times \text{(その製品の製造エネルギー原単位)}$$

製造エネルギー原単位はその製品1 tを製造するのに要した石油、非石油化石燃料、電力の各々消費量である。

#### c. 建設エネルギー-C

$$C = \text{(建設の直接エネルギー消費量)} + \text{(建設に使用した機器損耗分)}$$

第一項の建設に要したエネルギー消費量には、同じく石油、非石油化石燃料、電力を含むものである。第二項は機器損耗分であり、機器の全製造エネルギー (機器をつくるための、素材エネルギーと製造エネルギーの総和) から算出する。

#### d. 輸送エネルギー-D

$$D = \sum \frac{\text{(各輸送手段の輸送距離)}}{\text{素材材料}} \times \frac{\text{(その輸送のエネルギー原単位)}}{\text{機器 建設資材}}$$

輸送手段とは、鉄道、トラック、トレーラ、船舶を指し、その輸送のエネルギー原単位とはそれぞれの輸送手段において1 t 1 km輸送するのに要した石油、電力の各々消費量である。この輸送距離には往路のみならず、復路も含まれる。

設備投入エネルギー-Fは上述のaからdの総和で示される。

$$I_s = A + B + C + D$$

運転投入エネルギー-I<sub>0</sub>は水力発電の場合、発電所の保守エネルギー-Fのみである。

$$I_0 = F$$

保守エネルギーは修繕取替される機器の全製造エネルギーである。

エネルギー支出Iは上記の設備投入分I<sub>s</sub>と運転投入分I<sub>0</sub>との和で表わせる。

$$I = I_s + I_0$$

エネルギー収入 (エネルギーアウトプット)

エネルギー収入は発電所の場合、電力エネルギーのみであり、発電所から供給できる耐用期間の総発電電力量で示される。この送端発電電力量は正味発電電力量であり、耐用期間にわたる総発電電力量よりその所内動力量を差し引いて得られる。

$$\text{正味発電電力量} = (\text{総発電電力量}) - (\text{所内動力量})$$

### 3. 中小水力発電モデル

中小水力発電モデルとしては、今後開発される代表的な出力規模の発電所が望ましいが、そのようなデータが得られないので、既設の水力発電所24カ所のデータから検討した。

水力発電所の土木設備量は同一発電所出力であっても水系条件が種々様々であり、ダムの数と規模、水路の太さと巨長などによって大きく変る。既設24カ所の水力発電所の実績データから、表1に示すような水力発電所の土木モデルを作成した。しかし、このようなデータは各発電所の建設記録より完璧に得られたものが少なく、種々の条件から推定した値も含まれている。また、機器の製品重量から素材料重量への換算は、それぞれの機器に応じた歩留を用いて行った。各発電出力における単位出力当りの所要資材量は、次のようになる。

発電所最大出力	5,000 kw	1.11 t/kw
	セメントを除けば	0.116 t/kw
〃	10,000 kw	0.78 t/kw
	セメントを除けば	0.077 t/kw
〃	20,000 kw	0.72 t/kw
	セメントを除けば	0.075 t/kw

表1 水力発電の土木モデル  
—各発電出力における土木設備重量<sup>(1)</sup>と工事エネルギー—

発電所の最大出力 (KW)		5,000	10,000	20,000	50,000
建設 資材 使用量	セメント (t)	5,000	7,000	13,000	48,000
	異形丸鋼 (t)	400	500	780	2,200
	その他の鋼材 (t)	75	82	94	140
	銅材 (t)	24	30	48	185
ゲート総重量 <sup>(2)</sup> (t)		26	42	96	620
スクリーン除じん機総重量 <sup>(2)</sup> (t)		16	20	32	100
水圧鉄管総重量 <sup>(2)</sup> (t)		110	160	300	820
所要資材量 (t)		5,582	7,768	14,493	52,578
工事 エ ネ ル ギ ー	電力使用量 (MWH)	4,300	5,200	7,200	14,000
	石油使用量 (Kℓ)	1,700	1,900	2,300	3,900

注 (1) 素材料重量

(2) 製品重量から歩留0.75を考慮して計算した素材料重量

〃 50,000 kw 1.05 t/kw  
セメントを除けば 0.092 t/kw

土木設備量は5,000~20,000kwの範囲内においてスケールメリットがみられるが、ダム容量が相対的に大きいため、50,000 M出力では、逆に所要重量が大きくなっている。

水力発電所の電気モデルは建設記録から仕様、容量、台数などを引用し、各電気機器の重量調査によって表2のように作成した。各機器の製品重量からの素材料重量の算出は、各機器の個別調査によって行った。

電気設備は主要設備が70~80%を占める。各発電出力における単位出力当りの重量は表2にみられるようにスケールメリットがみられ、出力が10倍になれば、重量が約半分になっている。

なお、主要設備の一つである水車は、フランス、ベルトン、プロペラ、カプラン、チューブラなどの型式があるが、調査発電所のなかでフランス水車ももっとも多いので、これを用いてモデルを定義した。

水力発電モデルは、上述のように既設水力発電所のデータから、5,000kwから50,000kwまで作成できたが、今後期待できる中小水力発電モデルとして10,000 kwの発電出力を選定し、エネルギー評価を行った。

### 4. エネルギー原単位

エネルギー原単位の定義は、燃料、材料、製造、輸送について行う。

#### 4.1 燃料

- 石油製品はすべて1 eot/1kℓとする。
- 石炭は特にその含有発熱量が明示されない限り、

表2 水力発電の電気モデル  
—各発電出力における電気設備重量<sup>(1)</sup>—

発電所の最大出力(KW)		5,000	10,000	20,000	50,000	備 考
主要設備	水 車 ( ) 内 最大 出力	42 (5000)	60 (10000)	100 (20000)	240 (50000)	最大出力で変化
	発 電 機 ( ) 内 容 量	68 (5500)	92 (11000)	160 (22000)	420 (55000)	発電容量で変化
	主 変 圧 器 ( ) 内 容 量	29 (5500)	34 (11000)	52 (22000)	115 (55000)	変圧器容量で変化
付 帯 設 備	所 内 変 圧 器	0.98	1.2	1.9	5.2	発電所最大出力で変化
	計 器 用 変 成 器	1.6	2.1	3.4	9.5	"
	整 流 器	0.45	0.45	0.45	0.45	一定
	し ゃ 断 器	2.2	3.1	5.2	14.0	発電所最大出力で変化
	断 路 器	2.5	2.5	2.5	2.5	一定
	避 雷 器	1.0	1.0	1.0	1.0	"
	配 電 盤	4.3	4.3	4.3	4.3	"
	屋 外 鉄 構	4.0	4.0	4.0	4.0	"
	キ ュ ー ビ ク ル	3.4	4.1	5.7	12.5	発電所最大出力で変化
	配 管 バ ル ブ	6.6	6.6	6.6	6.6	一定
	電 力 ケ ー ブ ル 制 御 ケ ー ブ ル	9.6	9.6	9.6	9.6	"
	接 地 線	0.6	0.6	0.6	0.6	"
	ク レ ー ン	18.0	23	38	120	発電所最大出力で変化
小 型 モ ー タ そ の 他	3.5	3.5	3.5	3.5	一定	
蓄 電 池	1.4	1.4	1.4	1.4	"	
主 要 設 備 合 計		139.0	186.0	312	775	
付 帯 設 備 合 計		60.13	67.45	88.15	195.15	
合 計		199.13	253.45	400.15	970.15	
単 位 出 力 当 り の 重 量 kg/ KW		39.9	25.3	20.0	19.4	

注(1) 製品重量

一般炭 0.77eot/kg, 原料炭 0.62eot/kgとする。

- ・ガスについても特にその含有発熱量が明示されない限り, 1 eot/m<sup>3</sup>とする。

#### 4.2 材 料

材料のエネルギー原単位は直接分のみならず, 間接分も含めて定義すべきであるが, 産業関連分析による検討では物量データが不備のため, 信頼性の高い原単位が得られない。ここでは, データの信頼性が比較的高い工場の直接消費エネルギーからの直接分のみエネルギー原単位をベースにした。このような個々の数値は, 製法, 生産の規模, 技術進歩などによって大きく異なり, これらの関係を整理してデータの信頼性を高めるだけの十分な調査は行えなかった。

計算に必要なエネルギー原単位は表3のように定義した。同表において間接分は一律に直接分の20%とし

て加算した。この間接分は, 他工場の加工エネルギー, 工場の設備投資分など, 直接消費量に含まれないものを考慮した。

#### 4.3 製 造

製造エネルギーとは, 素材料を切断・溶接し, 機器を加工・組立するまでのエネルギー消費量である。しかし, 一工場でこれらの一連の工程をとることは少く, 半製品や部品の購入によって機器が製造されることが多い。これらの間接分に関しては費用の関連から直接消費エネルギーの30%と評価して, 表4のように定義した。

#### 4.4 輸 送

輸送機関の直接消費エネルギーは, 運輸白書より引用した。間接分は輸送機関の製造エネルギー分である。輸送機関のもっとも一般的な「トラック」について,

表3 材料のエネルギー原単位

	石油・石炭 eokg/t	電力 KWH/t	合計 eokg/t
異形丸鋼	490	430	595
普通鋼材 (型钢, 鋼管) (構造用鋼板)	810	430	915
硅素鋼板	810	1,230	1,111
鑄鋼	330	2,450	930
鍛鋼	630	1,990	1,118
ステンレス鋼	1,550	920	1,775
合金鋼	2,170	1,540	2,547
銅	690	1,700	1,107
アルミニウム	670	17,000	4,835
セメント	86	121	116
がいし	800	0	800
エポキシ樹脂	1,800	2,800	2,486
板紙	290	930	518
絶縁油	830	35	839
ポリエチレン	1,100	2,700	1,762
シリコン	0	430,000	105,350
鉛	200	620	352
塩化ビニール	3,600	1,100	3,870
板ガラス	770	610	919
ゴム	1,250	3,300	2,059
亜鉛	290	4,100	1,295

投入エネルギーを算出し、耐用期間中の輸送重量・距離 6 万 t・km の前提条件から、t・km 当り、石油・石炭 0.036eokg、電力 0.070 KWH を得た。これを間接分として表 5 のように定義した。

## 5. エネルギー評価

### 5.1 エネルギー支出

3 に示した最大出力 10,000kw の自流水力発電所のエネルギー支出について、設備投入分と運転投入分を計算した。

#### 設備投入エネルギー

○材料エネルギー；水力発電所の重さの約 95% はセメントであり、「水力発電所はセメントである」といえる。

材料エネルギーは表 6 のようになり、セメントの占める比重がきわめて高くなるのは当然である。

○製造エネルギー；製造エネルギー原単位（表 4）を用いて算出した。

○建設エネルギー；直接消費エネルギーは工事用エネルギー（表 1）であり、間接投入エネルギーは建設機械の使用分であり、これらの機械の損耗分で計算した。

○輸送エネルギー；輸送距離は何れの場合も、自家用トラック 500km、海運 500km とした。

設備投入エネルギーの計算結果は表 7 のようになる。石油・石炭と電力の合計のエネルギーでみて、建設エネルギーがもっとも多く、製造エネルギーが少い。設

表4 機器製造エネルギー原単位

機 器	直接製造エネルギー原単位		製造エネルギー原単位		備 考
	石油・石炭 eokg/t	電力 KWH/t	石油・石炭 eokg/t	電力 KWH/t	
原動機 100t 級	212	1,590	280	2,070	電気使用合理化委員会データ
“ 50 “	313	2,410	410	3,130	
“ 10 “	394	3,470	510	4,510	
発電機 100t 級	172	1,350	220	1,760	
“ 50 “	242	1,880	310	2,440	
“ 10 “	383	2,940	500	3,820	
変圧器 100t 級	141	1,060	180	1,380	
“ 50 “	211	1,590	270	2,070	
“ 10 “	282	2,120	370	2,760	
しゃ断器、断路器	80	570	100	740	
配電盤	71	530	90	690	
ケーブル	0	960	—	1,250	

注) 1. 製造エネルギーは直接製造エネルギーに間接投入製造エネルギーを加えたもの

製造エネルギー原単位/直接製造エネルギー原単位=1.3を用いて算出

2. 重量tは製品重量

表5 輸送エネルギー原単位

輸送手段	直接消費エネルギー原単位 (石油) eokg/t・km	全輸送エネルギー原単位	
		石油 eokg/t・km	電力 KWH/t・km
自家用トラック	0.202 <sup>1)</sup>	0.238 <sup>2)</sup>	0.070 <sup>2)</sup>
内航海運	0.022 <sup>1)</sup>	0.058 <sup>3)</sup>	0.070 <sup>3)</sup>
営業用トラック	0.069 <sup>1)</sup>	0.105 <sup>2)</sup>	0.070 <sup>2)</sup>

- 注) 1. 運輸白書より引用  
 2. 全輸送エネルギー原単位は直接消費エネルギー原単位に、トラックエネルギー原単位を加算した。  
 3. 船のエネルギー原単位は未調査なので、トラックと同じに仮定した。

表6 材料エネルギー

分類	材料または機械名	製品重量 t	所要重量 t	エネルギー		備考
				石油・石炭 eot	電力 MWH	
土木モデル	セメント	-	7000	602	847	
	異形丸鋼	-	500	245	215	
	その他の鋼材	-	82	66.42	35.26	
	銅	-	24	15.56	40.8	
	ゲートスクリーン等	62	82.6	65.8	53.1	
	水圧鉄管	160	213.33	172.80	91.73	
	小計	222	7901.93	1167.58	1282.89	
電気モデル	水車	60	85.8	70.6	61.9	
	発電機	92	124.3	100.6	89.6	
	主変圧器	34	38.6	30.6	28.8	
	所内変圧器	1.2	1.36	1.08	1.01	主変圧器の値から重量比
	計器用変成器	2.1	2.63	2.05	1.12	
	製流器	0.45	0.64	0.54	0.81	
	しゃ断器	3.10	3.65	2.31	1.85	ガスしゃ断器を前提
	断路器	2.50	3.13	2.53	1.34	歩留0.8 すべて普通鋼材として
	避雷器	1.0	1.30	0.88	1.26	
	配電盤	4.3	4.8	4.55	8.06	
	屋外鉄構	4.0	4.44	3.60	1.91	歩留0.9 すべて普通鋼材として
	キュービクル	4.1	4.55	4.31	7.64	配電盤と同一原単位
	配管バルブ	6.6	8.25	7.82	13.85	" "
	ケーブル	9.6	10.56	19.80	18.90	
接地線	0.6	0.67	0.46	1.13	歩留0.9 すべて銅として	
クレーン, 小型モータ, その他	26.5	35.33	23.95	51.64		
蓄電池	1.4	1.56	0.31	0.96	歩留0.9 すべて鉛として	
小計	253.45	336.01	275.98	291.25		
合計		8237.94	1443.56	1574.14		
間接投入エネルギー 20%加算 合計				1732	1889	

表7 設備投入エネルギー

区 分	石油・石炭 eot <sup>1)</sup>	電 力 MWH	合 計 <sup>3)</sup> eot
素材エネルギー	1,732 (35.1)	1,889 (20.6)	2,195 (30.6)
製造エネルギー	124 (2.5)	1,319 (14.4)	447 (6.2)
建設エネルギー	1,920 (38.9)	5,214 (56.8)	3,197 (44.5)
輸送エネルギー	1,154 (23.4)	755 (8.2)	1,339 (18.7)
合 計	4,930 (100.0)	9,177 (100.0)	7,178 (100.0)

- 注) 1. 石油換算 1 eot = 10<sup>7</sup> Kcal  
 2. ( ) 内% 値  
 3. 電力 1 KWH = 0.245 eokg

備投入エネルギーにおける電力の比率は、約30%であるが、建設エネルギーの面では40%。

#### 保守投入エネルギー

- 保守エネルギー；修繕費の建設費に対する年経費率から推定して、設備投入エネルギーの1%とした。石油・石炭 49.3eot/年、電力 91.8 MWH/年。

#### 5.2 エネルギー収入

水力発電所の年間総発電々力量は、年間設備利用率から計算する。年間の設備利用率は既設24カ所の実績データ(発電所の最大出力で変化)から55.0%である。また、所内動力量は所内率の実績データ 0.39%を用いて算出できる。水力発電所の最大出力10,000kwの場合、次のようになる。

年間総発電々力量 (A)	48,180 MWH/年
年間所内動力量 (B)	187.9 MWH/年
年間送電々力量 (A - B)	47,992.1 MWH/年

#### 5.3 評価

水力発電所の建設のために投入したエネルギー、すなわち、設備投入エネルギーは何年間の正味エネルギー収入で回収できるか——エネルギー回収年は次のように計算できる。

$$\begin{aligned} \text{エネルギー回収年} &= \frac{\text{設備投入エネルギー}}{\text{年間(送電端発電々力量 - 保守エネルギー)}} \\ &= 0.61\text{年} \cdots \cdots \text{電力 } 0.245\text{eokg/KWH} \\ &\quad \text{の場合。} \\ &= 1.41\text{年} \cdots \cdots \text{電力 } 860\text{Kcal/KWH} \\ &\quad \text{の場合。} \end{aligned}$$

エネルギー回収は電力を0.245eokg/KWHで換算した場合、0.61年で完了し、電力を860Kcal/KWHとしても1.41ですむことになる。

水力発電所の耐用期間中に得られるエネルギーアウトプットと、そのために投入したエネルギーインプットの比、すなわち、エネルギー比は耐用年数35年とし

た場合、次のようになる。

$$\begin{aligned} \text{エネルギー比} &= \frac{\text{エネルギーアウトプット}}{\text{エネルギーインプット}} \\ &= \frac{(\text{年間送電端発電々力量}) \times 35\text{年}}{(\text{設備投入エネルギー}) + (\text{保守エネルギー/年}) \times 35\text{年}} \\ &= 42.5 \end{aligned}$$

エネルギー比は投入したエネルギーに対して利用できる比率であり、少なくとも1以上でなければならない。

これらの検討結果は、既設水力発電の実績値にもとづくものであり、今後開発される中小水力発電に関しては、土木モデルが大規模化することから考えて、エネルギー評価はこれらの検討結果より更に低くなることが予想される。

