エルー式電氣爐の消費電力量

(鑄鐵の熔解)

(昭和 23 年 4 月本會講演大會にて講演)

中 村 元 和*

ELECTRIC ENERGY CONSUMPTION OF HÉROULT TYPE ELECTIRC ARC FURNACES

(Melting of Cast Iron)

Motokazu Nakamura, Dr. Eng.

Synopsis:

Electric energy consumption of an Héroult type electric arc furnace was written in the form of the following polynomial, (as shown by "Tetsu to Hagane" Vol. 34, No. 9, 1948)

$$W=h_1M+h_2T+h_3$$

where W Electric energy cousumption

M Quantity charged

T Melting period

h_1 h_2 h_3 Constants

When we measure M, T and W, it will be easy to calculate h_1 h_2 and h_3. up to the present the author arranged the data by the aid of stochastics. How is it applied here, will be seen later.

1. The frequency distributions of W or T were collected and arranged. As the result, it was found that the distributions made a form just like a normal form of probability curve.

2. From the distribution diagrams of M, T and W shown as Table 2, 3 and 4, coefficients of simple correlation between them were calculated.

3. From the coefficients of simple correlation, the regression equation was deduced.

This was the polynomial above mentioned. Thus the anthor showed an example of stochastics applied to the electric energy consumption of an Héroult type electric arc furnace, and described experimentally that the electric energy consumption varied in accordance with the above linear equation of quantity charged and melting period.

I. 緒 言

エルー式電氣爐を使用して溶解作業を行う時，一回の操業で消費する電力量はどの位になるであろうか．此の點に關する理論的說明は既に發表した通りである[1]．其の時は紙面の都合上，實例を記載する餘裕が無かつたので止むを得ず省略した．其の後測定結果を補充すると共に，新たに推計學の助けをかりて結果を整理した．これが爲外見では本會講演大會の豫稿と異る樣に見えるが，根本の考え方は同一である．測定値は設備の關係上3t爐に限定されているが，同樣の考え方が種々の容量の爐に適用出來ると思う．鑄鐵以外の場合，例えば鑄鋼の如く精錬期を含むもの，或は二重溶解法等に就ても多少變更を加える事により同樣に應用出來るが，これは稿を改めて發表する豫定である．

II. 測定法及び整理法

一般にエルー式電氣爐による溶解作業に於て，一回の操業で消費される電力量は次式で表わされる[1]．

$$W=h_1M+h_2T+h_3$$

但し，W 一回の消費電力量 kwh

M 一回の裝入量 t

* 山梨大學工學部 工博

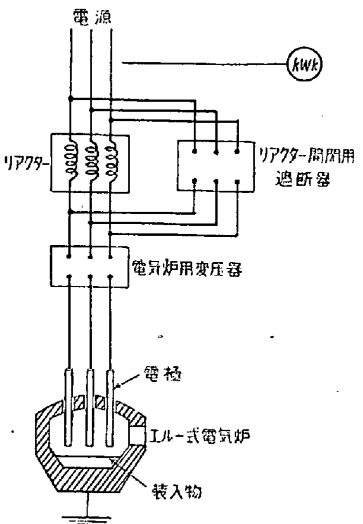
T　　一回の操業時間　　min

h_1　　1t の裝入物が出湯時に保有する熱量である．從つて裝入物の材質によつて異り，爐の容量，形狀には無關係な常數である．kwh/t

h_2　　單位時間に熱源から外氣中え直接放散する熱量である．爐の寸法，構造により影響をうける，卽ち爐容量の大小によつて定まる常數である．kwh/min

h_3　　熱源から爐壁に傳導する熱量であり，爐壁の熱容量，冷却時間，冷却の時常數等によつて異る．爐容量の大小及び過去の操業經歷によつて定まる常數である．kwh

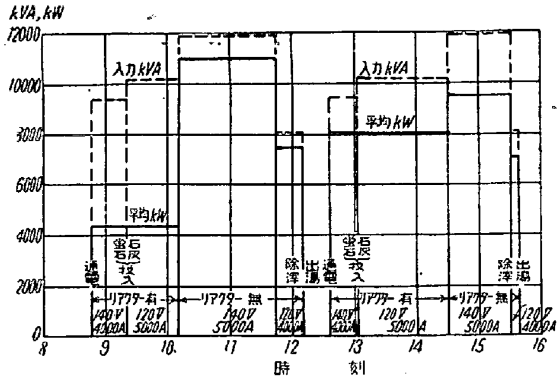
今3回以上の操業記錄を採り出し W, M 及び T の値を得れば，h_1 h_2 及び h_3 が計算出來る筈である．然し測定回數が餘りに少いと，結果が不精密になるから，此處では多數の實例から推計學的に h_1 h_2 及び h_3 を求める方法を說明する．



第1圖　エルー式電氣爐の結線圖

エルー式電氣爐の回路の主要部分は第1圖の如く簡易化して表わす事が出來る．電力量の測定は，電氣爐變壓器の電源側に取り付けた積算電力計により行う．從つて W 中には當然，變壓器や回路の電氣的損失等が含まれている．M は一回に裝入される銑鐵，鐵屑，ダライ粉等の合計量を指す．溶劑，添加物等は量が比較的少いし，一應裝入量の中から除外した．T は通電から出湯に至るまでの時間を採つた．鑄鐵の溶解に於ては，精錬期が無いからである．尙測定時の溶解作業標準は大略第2圖の通りである．測定に當つては實驗用として特別な操業を行わず，製品を作る時の操業記錄を集めて整理した．

先づ第一に M の似たものを集めて，W, T の度數分布



第2圖　熔解作業標準

がどんな形をするかしらべた[2]．第二には W と M, M と T, T と W との間の相關係數を求めた[3]．第三には以上の相關係數を用いて回歸方程式を求めた[4]．此の式が頭初に述べた一次式に相當し，其の係數が h_1 h_2 及び h_3 である．

III. 實　測　例

(A)　測定結果

日立製作所淸水工場に於ける3t電氣爐の溶解記錄をとりまとめたのは第1表である．材質は FC-15 及び FC-19 である．兩者の差により消費電力量に差があるか否かを檢定する必要があるが，此處では一應ひとまとめにして取扱つた．消費電力量に及ぼす影響は別に發表する豫定であるが，極めて少い樣である．

消費電力量に及ぼす影響が最も大きいものは，爐が冷却しているか，溫まつているかと言う事である．これを表わす適當な尺度が無いので不滿足ながら，其の尺度として過去に於ける爐の操業經歷を採り上げ，次の如き區別を行つた．

操業經歷　A　前日は休止したる後，當日の第1回目の操業

〃　B　前日は操業したる後，當日の第1回目の操業

〃　C　同一日に於て第2回目以降の操業

實測の結果によれば，AB の差は極めて少ないので，これをひとまとめにして，AB とし C と區別した．第1表の AB, C の區別はこれである．以下これを操業經歷の差と名づける．

(B)　消費電力量及び溶解時間の度數分布[2]

最初に測定上にどんな誤差が起りうるか考える．消費電力量と裝入量とは每回實測するから，記錄の書き誤りが無ければ誤差は少い筈である．次に鑄鐵溶解の場合には通電から出湯に至る間を溶解時間とするから，溶解時間の測定は容易である．然し溶解工場と鑄型工場との關

第1表 3トン電氣爐操業回數

操業經歴＼年月	22/9	10	11	12	23/1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	計
AB							24	24	22	20	22	25	21	22	24	16	220
C	11	2	5	5	8	10	10	20	14	12	18	21	17	18	28	16	215
計							34	44	36	32	40	46	38	40	52	32	435

材質 FC-15 及び FC-19　　期間 自 22-8-21 至 23-12-11

係が溶解時間に大きい影響をもつている．何等かの都合で造型が遅れた時，型の出來上るのを待つ爲溶解時間が延びる事がある．又出湯が何回にもわたる時，其の間に通電を止める事もあるが，溶解時間の計算には，一々精密に記錄されないから，こゝに誤差が含まれる餘地がある．次に出湯後電氣爐の扉を開いたまゝか，或は閉ぢたか，出湯の直後裝入物を入れたか等により，冷却狀態が著しく變り，毎回一定しない．從つて消費電力量の値が變動する原因の大半は此處にあると思う．爐床の溫度卽ち爐床が溫まつているか冷却しているかが簡單に豫測出來ぬ所が，消費電力量の研究に際して困難な點である．

そこで裝入量（M）を一定にした時，消費電力量（W）或は溶解時間（T）はどんな度數分布をしているかしらべた．第1表の記錄の中から下記の條件に屬するもののみ拔き出した．

$$2{\cdot}70 \leqq M \leqq 3{\cdot}30$$

爐の公稱容量が3tだから，其の附近を採つた．

$$140 \geqq T \leqq 169$$

裝入量を一定の範圍内に制限しても溶解時間により，電力量は著しく異るから，平均に近い所を採る意味で，此の樣に制限した．

操業經歴

AB 又は C

これが合計 117 例ある．M と T の値はそれぞれ狹い範圍をとつてあるから，W の變動は主として h_3 の變動に起因すると想像出來る．この度數分布を圖示したのが第3圖であつて，この累積和を求めて確率紙上に打點したのが第5圖である．第5圖に圖示の如くほゞ直線となるから W は正規分布をしている事がわかる．

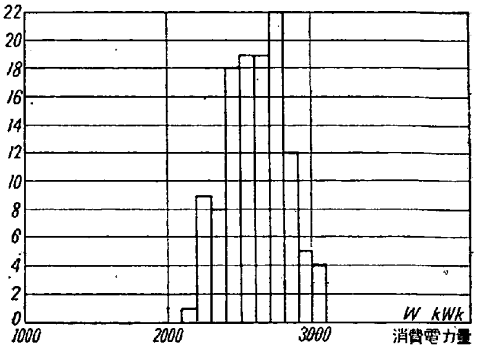
同樣にして T の分布をしらべる爲，下記の範圍に屬するものを採つた．

$$2{\cdot}70 \leqq M \leqq 3{\cdot}30$$

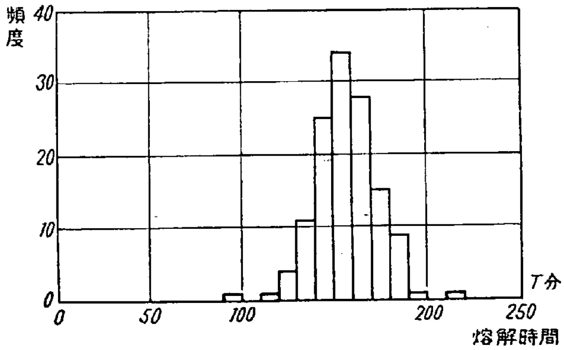
$$2300 \leqq W \leqq 2799$$

操業經歴　　AB 又は C

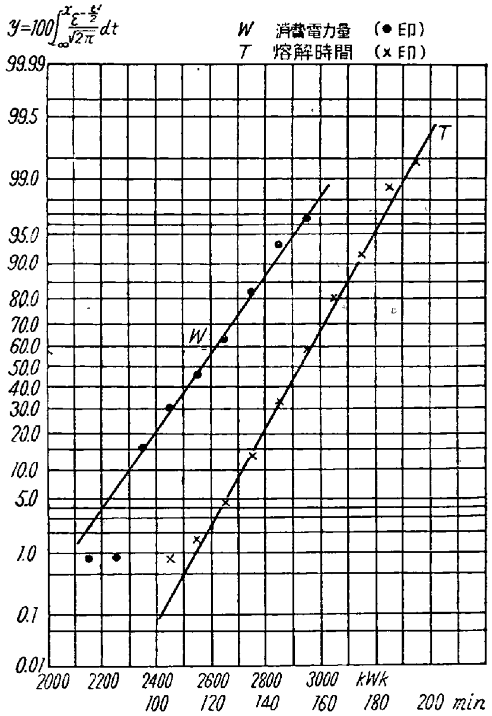
この度數分布を圖示したのが第4圖であつて，この累積和を求めて確率紙上に打點したものは第5圖である．



第3圖　消費電力量の度數分布



第4圖　操業時間の度數分布



第5圖　度數分布の累積和

第2表　裝入量と消費電力量（操業經歷C）

3 トン爐（5號爐）　　自 22—8—21　　至 23—12—11

	M	1·70〜1·79	1·80〜1·89	1·90〜1·99	2·00〜2·09	2·10〜2·19	2·20〜2·29	2·30〜2·39	2·40〜2·49	2·50〜2·59	2·60〜2·69	2·70〜2·79	2·80〜2·89	2·90〜2·99
W	v \ u	−11	−10	−9	−8	−7	−6	−5	−4	−3	−2	−1	0	1
1500〜1599	−9								1					
1600〜1699	−8													
1700〜1799	−7						1							
1800〜1899	−6						6	1						
1900〜1999	−5						3			4		2	1	
2000〜2099	−4				1		6	2	2	1	1		1	
2100〜2199	−3						4		1	3		2		
2200〜2299	−2						5		1	4		6	2	
2300〜2399	−1	1								6	1	5	2	
2400〜2499	0				1					1	2	1	3	1
2500〜2599	1							1		2		1	1	
2600〜2699	2										1			1
2700〜2799	3											1		
2800〜2899	4												1	
2900〜2999	5													
3000〜3099	6													
3100〜3199	7													
3200〜3299	8													
3300〜3399	9													
$f(u)$		1	0	0	2	0	25	4	5	21	5	18	11	2
$uf(u)$		−11	0	0	−16	0	−150	−20	−20	−63	−10	−18	0	2
$u^2f(u)$		121	0	0	128	0	900	100	80	189	20	18	0	2
V		−1	0	0	−4	0	−104	−13	−22	−45	−7	−29	−10	2
uV		11	0	0	32	0	624	65	88	135	14	29	0	2

第3表　溶解時間と消費電力量（操業經歷C）

3 トン爐（5號爐）　　自 22—8—21　　至 23—12—11

	T	90〜99	100〜109	110〜119	120〜129	130〜139	140〜149	150〜159	160〜169	170〜179	180〜189
W	v \ u	−8	−7	−6	−5	−4	−3	−2	−1	0	1
1500〜1599	−9				1						
1600〜1699	−8										
1700〜1799	−7				1						
1800〜1899	−6		1	4	2						
1900〜1999	−5		5		2	4		1			
2000〜2099	−4			1	6	7					
2100〜2199	−3				1	7	2	3			
2200〜2299	−2		1		4	9	7	1	1	1	
2300〜2399	−1			1	3	7	7	4	1	1	1
2400〜2499	0				1	3	6	9	1	2	
2500〜2599	1	1				2	5	9	7		
2600〜2699	2					1	4	6	2	2	2
2700〜2799	3						5	7	6	6	2
2800〜2899	4							3	5	2	1
2900〜2999	5				2				4	2	1
3000〜3099	6							1	1		1
3100〜3199	7										1
3200〜3299	8									1	
3300〜3399	9										
$f(u)$		1	7	6	21	42	36	44	28	17	9
$uf(u)$		−8	−49	−36	−105	−168	−108	−88	−28	0	9
$u^2f(u)$		64	343	216	525	672	324	176	28	0	9
V		1	−33	−29	−76	−80	1	40	72	45	31
uV		−8	231	174	380	320	−3	−80	−72	0	31

3·00 ~ 3·09	3·10 ~ 3·19	3·20 ~ 3·29	3·30 ~ 3·39	3·40 ~ 3·49	3·50 ~ 3·59	3·60 ~ 3·69	3·70 ~ 3·79	3·80 ~ 3·89	3·90 ~ 3·99	$f(v)$	$vf(v)$	$v^2f(v)$	U	vU
2	3	4	5	6	7	8	9	10	11					
										1	−9	81	−4	36
										0	0	0	0	0
										1	−7	49	−6	42
										7	−42	252	−41	246
2										12	−60	300	−28	140
										14	−56	224	−67	268
3										13	−39	117	−33	99
3			2							24	−48	96	−38	76
7	1		1							25	−25	25	−16	16
8	1		6		1					23	0	0	45	0
9	2		6	1						24	24	24	46	46
7			9							17	34	68	60	120
7	2		12	1	2	1				26	78	234	107	321
2			6		2					11	44	176	48	192
2			4	1	1		1			9	45	225	46	230
			1		1	1				3	18	108	20	120
			1						1	2	14	98	16	112
									1	1	8	64	11	88
			1				1			2	18	162	14	126
50	6	0	49	3	7	2	2	0	2	215	−3	2303	180	2278
100	18	0	245	18	49	16	18	0	22	180				
200	54	0	1225	108	343	128	162	0	242	4020				
30	7	0	121	9	25	9	14	0	15	−3				
60	21	0	605	54	175	72	126	0	165	2278				

190 ~ 199	200 ~ 209	210 ~ 219	220 ~ 229	230 ~ 239	240 ~ 249	$f(u)$	$vf(v)$	$v^2f(v)$	U	vU
2	3	4	5	6	7					
						1			−5	45
						0			−0	0
						1			−5	35
						7			−41	246
						12			−63	315
						14			−64	256
						13			−45	135
						24			−87	174
1						25			−78	78
						23			−52	0
						24			−56	−56
						17			−28	−56
						26			−33	−99
						11			−10	−40
						9			−11	−55
						3			−2	−12
		1				2			5	−35
						1			0	−0
1					1	2			9	−81
2	0	1	0	0	1	215	−3	2303	−566	1082
4	0	4	0	0	7	−566				
8	0	16	0	0	49	2430				
9	0	7	0	0	9	−3				
18	0	28	0	0	63	1082				

第4表　裝入量と溶解時間（操業經歷 C）

3 トン爐（5號爐）　　　　自 22—8—21　　至 23—12—11

	M	1·70〜1·79	1·80〜1·89	1·90〜1·99	2·00〜2·09	2·10〜2·19	2·20〜2·29	2·30〜2·39	2·40〜2·49	2·50〜2·59	2·60〜2·69	2·70〜2·79	2·80〜2·89	2·90〜2·99
T	v \ u	−11	−10	−9	−8	−7	−6	−5	−4	−3	−2	−1	0	1
90〜99	−8													
100〜109	−7						2			1		2		
110〜119	−6						4			1			1	
120〜129	−5				1		7	1	3	1	1	3	1	
130〜139	−4				1		9	2	2	6	2	4	2	
140〜149	−3	1					2			5	1	5	1	2
150〜159	−2						1			5	1	3	3	
160〜169	−1							1				1	1	
170〜179	0									1			2	
180〜189	1													
190〜199	2									1				
200〜209	3													
210〜219	4													
220〜229	5													
230〜239	6													
240〜249	7													
$f(u)$		1	0	0	2	0	25	4	5	21	5	18	11	2
$uf(u)$														
$u^2f(u)$														
V		−3	0	0	−9	0	−117	−14	−23	−65	−18	−67	−29	−6
uV		33	0	0	72	0	702	70	92	195	36	67	0	−6

第5圖に示した様にほゞ直線となるから T も亦正規分布をなす事がわかる．

これ故に M がほゞ一定な範圍内のものを採る時，W 又は T は夫々正規分布をしている事がわかる．從つてこれらの統計量を取り扱う上に甚だ便利が多い．

（C）　相關係數[3]と回歸方程式[4]

次に W, M 及び T の間の相關係數を求める．其の前に略號を定めておく．平均値は文字の上に—を書いて表わす，例えば $\overline{W}$ は W の平均値を示す．σ は標準偏差を示し，W の標準偏差は $\sigma(W)$ と書く．γ は相關係數を示し，W と T との間の相關係數は $\gamma(W\ T)$ と區別して書く．相關係數は度數分布表から文獻[3]に發表されている方法により容易に計算出來る．

第2表より　$\gamma(W\ M)=0{\cdot}763$

$\sigma(M)=0{\cdot}4245$

$\sigma(W)=327$

$\overline{M}=2{\cdot}933$

$\overline{W}=2449$

第3表より　$\gamma(W\ T)=0{\cdot}735$

$\sigma(T)=20{\cdot}82$

$\overline{T}=148{\cdot}2$

第4表より　$\gamma(M\ T)=0{\cdot}572$

此の値を用いて係數 R を計算する．

$R(WW)=1-\gamma^2(MT)=0{\cdot}673$

$R(WM)=\gamma(WT)\cdot\gamma(M\ T)-\gamma(W\ M)=-0{\cdot}341$

$R(WT)=\gamma(W\ M)\cdot\gamma(M\ T)-\gamma(WT)=-0{\cdot}298$

これ故に回歸方程式は次の如くなる．

$$(W-\overline{W})\frac{R(W\ W)}{\sigma(W)}+(M-\overline{M})\frac{R(W\ M)}{\sigma(M)}+(T-\overline{T})\frac{R(WT)}{\sigma(T)}=0$$

この式に以上の數値を代入すれば

$W=391M+6{\cdot}95T+270$

となる．

IV. 結　　言

エルー式電氣爐の消費電力量は簡單な一次式で表わしうる事を實測値を用いて明かにした．斯の如く測定値の整理に當り推計學を應用したのも一つの試みである．

尙此の測定は筆者が日立製作所淸水工場に在勤中行つたもので，測定に當り協力された各位に深く感謝の意を表わす次第である．（昭和26年9月寄稿）

3·00 ~ 3·09	3·10 ~ 3·19	3·20 ~ 3·29	3·30 ~ 3·39	3·40 ~ 3·49	3·50 ~ 3·59	3·60 ~ 3·69	3·70 ~ 3·79	3·80 ~ 3·89	3·90 ~ 3·99	$f(v)$	$vf(v)$	$v^2f(v)$	U	vU
2	3	4	5	6	7	8	9	10	11					
			1							1			5	−40
2										7			−13	91
										6			−27	162
2			1							21			−66	330
10			4							42			−66	264
8	1		8	1	1					36			29	−87
15	3		11		1	1	1			44			83	−166
10	1		9	1	3					28			98	−98
2	1		8	1		1			1	17			69	0
1			6		2					9			46	46
			1							2			2	4
										0			0	0
									1	1			11	44
										0			0	0
										0			0	0
							1			1			9	63
50	6	0	49	3	7	2	2	0	2	215	−566	2430	180	613
										180				
										4020				
−127	−10	0	−76	−4	−6	−2	6	0	4	−566				
−254	−30	0	−380	−24	−42	−16	54	0	44	613				

文　献

1) 中村元和：鐵と鋼第 34 年第 9 號 (1948) 2 以下文獻が甚だ多いから一例のみ述べる．

2) 河田龍夫：統計學概論 p 35 4·1

3) 〃 〃 p 51 5·2

4) 〃 〃 p 48 5·1