

# 消耗電極式アーク溶解における合金成分と反応時間について\*

(消耗電極式アーク溶解法の基礎研究—III)

西原 守\*\*・八木芳郎\*\*・成田貴一\*\*・栗原正男\*\*\*

## Behavior of Alloying Elements and Reacting Time in Consumable-Electrode Arc-Melting.

(Basic study on consumable-electrode arc-melting method—III)

Mamoru NISHIHARA, Yoshiro YAGI,  
Kiichi NARITA and Masao KURIHARA

### Synopsis:

Since consumable-electrode arc-melting is carried out at a high temperature in vacuum, some alloying elements of high vapor-pressure should evaporate in this method. In many meltings the Mn content is decreased clearly, but the contents of Cu and Sn, which show a high vapor-pressure next to Mn, is not decreased noticeably. Analyses of adhered substances on the wall of a crucible make clear that the Cu and Sn also evaporate, elements remelt into molten pool as the melting proceeds is ascertained by pulling-down and a pulling-down arc-melting shows that the evaporated elements remelt into molten pool as the melting process goes on. It should be one reason for that Cu and Sn is not decreased noticeably.

Durations of molten state under various melting conditions calculated from the shapes of molten pools are found to be rather short. Therefore the molten metal shall be solidified before various reactions will have completed.

## I. 緒 言

消耗電極式アーク溶解法においては高温、真空中にて溶解が行なわれるため、前報に述べたごとく不純物が除去されるがそれとともに蒸気圧の高い合金元素は蒸発により減少する。本報告においては多数の溶解例における溶解前後の合金成分の変化について述べ、その挙動を明らかにするために行なつたルツボ附着物の分析ならびに引出式溶解実験の結果について述べる。

また本溶解法においては溶湯が layer by layer に凝固するため溶湯状態に保持される時間が比較的短かく諸種の反応が十分進行しないうちに凝固する。そこで本報告においては各種条件下における溶湯体積をしらべそれより溶湯状態に保持される時間を推定し、また多数の溶解例における酸素含有量とその平衡値とを比較した。

## II. 合金成分について

### 1. 溶解前後の合金成分

蒸気圧の高い金属や介在物は本溶解が高温、真空中であるため一部蒸発する。その量は蒸気圧とともに溶湯中における活量係数によつて影響され、必ずしも純粋状態における蒸気圧に比例しないが溶鋼中において減少する可能性のあるものは Mn について Sn, Cu といわれ

ている<sup>2)</sup>。しかし第1報<sup>1)</sup>に述べた多数の溶解例において明瞭に減少の認められるのは Mn で、鋼種、電極中の含有量によつて異なるが真空中溶解の場合はもとの含有量の約 30% 減少する。Sn, Cu については時には少量減少する場合もあるが結論を下し難い。これは前者に比し後者の含有量が少ないこと、後述するごとく本溶解における反応時間が短いこととともに一旦蒸発したこれらの元素がルツボ壁に附着し、溶解が進んで湯面が上昇すると再び溶湯中に溶け込むことに起因すると考えられる。かくのごとき溶解中における合金元素の挙動を明らかにするため次の実験を行なつた。

### 2. 溶解中における合金元素の挙動

#### 1) ルツボ附着物の分析

消耗電極式アーク溶解においては溶解中に溶湯面から金属の飛沫がとび、あるいは蒸発してルツボ内壁に附着する。炭素鋼 SS-41 を真空中 ( $10^{-3}$  mmHg) 消耗電極式アーク溶解した時にルツボ内壁に附着した状況を Photo. 1 に示す。

溶解中に蒸発する金属は当然蒸気圧の高い金属の量が多いと考えられるので、その附着物中にはそれらの金属

\* 昭和36年10月本会講演大会にて発表

\*\* 神戸製鋼所中央研究所, 工博

\*\*\* 神戸製鋼所中央研究所

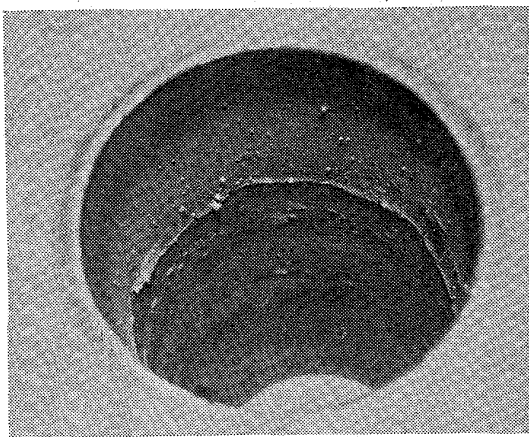


Photo. 1. Adhered substances on the inside wall of a copper crucible as seen from the top side after the ingot has been taken off.  $\times 2.5$  (4/5)

Table 1. Analyses of adhered substances on to the inside wall of a crucible.

Classification	Composition(%)		
	Mn	Cu	Sn
Adhered substance	26.18	3.24	0.57
Electrode	0.53	0.25	0.042
Ingot	0.31	0.24	0.030

が濃縮されるはずである。図に示した附着物を剝離し、化学分析を行なった結果は Table 1 に示すごとく蒸気圧の最も高い Mn について Cu, Sn の濃度が著しく増大している。このことから消耗電極式アーク溶解時には Mn の他に Cu, Sn が蒸発していることがわかる。

2.) インゴット引出溶解による実験

Mn の他に Cu, Sn も蒸発していることが分つたが、

インゴットの分析値ではあまり明瞭な減少が認められないのはすでに述べたようにこれらが再び溶湯中に溶け込むためと考えられる。そこで湯面上昇させずに一定に保持する引出式溶解を行ない、得られたインゴットの分析をした。

引出式溶解に用いた装置の説明図を Fig. 1 に示す。インゴットがその上に形成される炉底の下部にこれを引下げるためのインゴット引出用支持棒が取り付けられ、これは冷却室の底蓋から真空シ

ールを通じて大気中に出ている。炉底ははじめルツボの上方に位置しておりその上にインゴットが形成されて約 90mm の高さになった時、炉底を徐々に降下させて湯面を一定の場所に保持して溶解した。炉底を降下させる速度はインゴットの成長速度に一致させればよく、これは電極の降下速度と溶湯面のルツボ径、消耗電極の径から算出できる。(次節参照)このようにして炭素鋼 SS-41 を溶解し得られたインゴットを縦割りし各所の分析を行なった結果を Table 2~3 および Fig. 2 に示す。これらの結果から Mn, Cu および Sn 含有量は電極材のそれらより減少し、またインゴットの底部より頭部の方

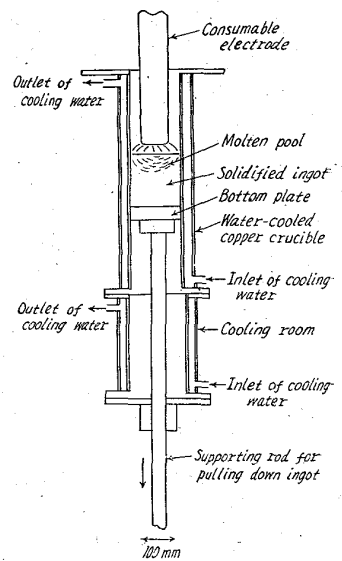
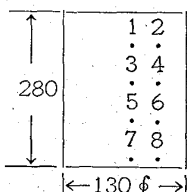


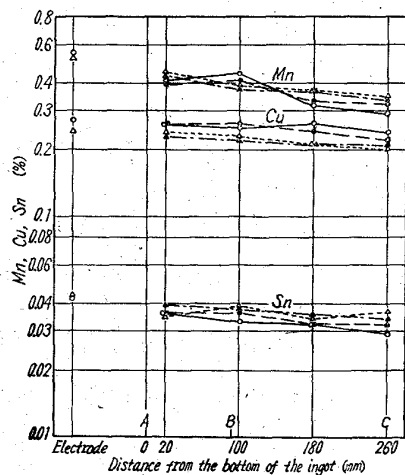
Fig. 1. Principle of pulling-down consumable electrode arc-melting method.

Table 2. Segregation test of a carbon steel SS-41 ingot melted by pulling down consumable-electrode arc-melting method in vacuum, ( $10^{-3}$ mmHg)

Classification	Composition (%)	C	Mn	Si	P	S	Cu	Sn	Ni	Cr	Al		N	O
											Sol. Al	Insol. Al		
Electrode		0.16	0.55	0.25	0.015	0.040	0.27	0.042	<0.10	<0.10	0.007	0.005	0.0047	0.0043
Arc-melted ingot	1	0.16	0.31	0.22	0.016	0.035	0.22	0.032	<0.10	<0.10	0.007	0.001		
	2	0.16	0.29	0.25	0.016	0.033	0.24	0.029	//	//	0.008	0.002		
	3	0.16	0.33	0.22	0.015	0.035	0.24	0.032	//	//	0.007	0.002	0.0046	0.0032
	4	0.16	0.32	0.25	0.016	0.035	0.26	0.032	//	//	0.008	0.002		
	5	0.15	0.41	0.23	0.014	0.033	0.26	0.036	//	//	0.007	0.004		
	6	0.14	0.44	0.26	0.016	0.034	0.25	0.033	//	//	0.008	0.002		
	7	0.17	0.40	0.23	0.016	0.038	0.26	0.036	//	//	0.008	0.002		
	8	0.16	0.41	0.24	0.016	0.039	0.26	0.036	//	//	0.008	0.002		
Average		0.16	0.36	0.24	0.016	0.035	0.25	0.033	<0.10	<0.10	0.007	0.002	0.0046	0.0032

Table 3. Segregation test of a carbon steel SS-41 ingot melted by pulling down consumable-electrode arc-melting method in vacuum ( $10^{-1}$ mmHg).

Classification	Composition (%)	C	Mn	Si	P	S	Cu	Sn	Ni	Cr	Al		N	O
											Sol. Al	Insol. Al		
Electrode		0.15	0.52	0.24	0.018	0.042	0.24	0.043	<0.10	<0.10	0.009	0.004	0.0055	0.0042
	1	0.15	0.34	0.23	0.017	0.039	0.21	0.034	<0.10	<0.10	0.009	0.001		
	2	0.17	0.35	0.23	0.018	0.041	0.20	0.037	//	//	0.008	0.001		
	3	0.16	0.37	0.23	0.017	0.041	0.21	0.035	//	//	0.008	0.002	0.0051	0.0035
	4	0.15	0.37	0.23	0.017	0.039	0.21	0.034	//	//	0.007	0.002		
	5	0.16	0.38	0.23	0.017	0.041	0.22	0.037	//	//	0.007	0.003		
	6	0.16	0.40	0.23	0.018	0.040	0.23	0.039	//	//	0.008	0.002		
	7	0.17	0.44	0.23	0.017	0.043	0.23	0.039	//	//	0.007	0.001		
	8	0.16	0.45	0.24	0.017	0.044	0.24	0.035	//	//	0.008	0.002		
Average		0.16	0.39	0.23	0.017	0.041	0.23	0.036	<0.10	<0.10	0.008	0.002	0.0051	0.0035



A: Starting point of melting  
 B: Starting point of pulling down  
 C: Finishing point of melting

Melting condition	Sampling place	Electrode	Ingot	
			Central part	Side part
Vacuum of $10^{-3}$ mmHg	○	○	●	○
Vacuum of $10^{-1}$ mmHg	△	△	▲	△

Fig. 2. Mn, Cu and Sn contents of carbon steel SS-41 ingot melted by pulling-down consumable electrode arc-melting method.

が減少している傾向が見られる。これは前述のようにインゴットの高さが約 90mm になるまで溶解が進行してから引出を開始したため、底部に近い方はふつうの溶解と同じく一旦蒸発した合金元素の再溶け込みが行なわれ、インゴットの上方では引出式溶解の効果があらわれたためと考えられる。その他の元素については、分析上では偏析は認められなかった。また  $10^{-3}$ mmHg の真空

中での溶解と  $10^{-1}$ mmHg の真空中での溶解では、高が空中での溶解の方がわずかに Mn, Cu, Sn の含有量真少ない傾向があるが大きな差異は認められなかった。

これらの実験結果より、蒸気圧の高い Mn, Cu, Sn は消耗電極式アーク溶解中に蒸発しており、蒸発してルツボ内壁に付着したこれらの元素は溶解の進行とともに再び溶湯中に溶け込むことが確認された。引出式溶解は再溶け込みを防止するが、この方法により有害な Cu, Sn を除去しようとするれば当然それより蒸気圧の高い Mn はそれら以上に除去され、また Cu, Sn の減少もそれほど著しくないから、この意味での実用上の効果はあまり期待されない。

### III. 消耗電極式アーク溶解における反応時間について

消耗電極式アーク溶解法の特長として、溶湯が layer by layer に凝固することを述べたが、そのため普通の溶解法におけるごとく溶湯状態に保持する時間を任意に調整することが不可能で、比較的短時間に凝固する。

本節ではまず以下に述べるごとく方法により平均の溶湯保持時間を算出し

た。Fig. 3 においてある時刻に湯面が AA' なる位置にありその溶湯の状態が図示のごとくであるとする。湯面における溶湯の薄層を考えるとそれが溶湯状態に保持される時間は場所によって異なる。

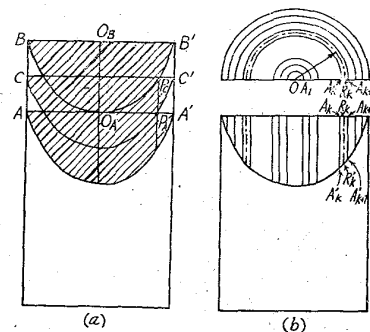


Fig. 3. Calculation of the duration of molten state from the shape of molten pool.

中心部  $O_A$  点においては溶解が進行してその時の溶湯の底部がちょうど  $O_A$  点となるような湯面  $BB'$  になるまで、すなわち  $\overline{O_A O_B}$  の高さだけ湯面が上昇する時間溶湯状態に保持される。中心から周辺にゆくにつれて保持時間は短くなり、例えば  $P_A$  点においてはその部分の溶湯底部がちょうど  $P_A$  点となるような湯面  $CC'$  となるまで、すなわち  $\overline{P_A P_C}$  の高さだけ湯面が上昇する時間が保持時間である。定常状態においては溶湯の形状はそのまま上方に移動すると考えられるから  $\overline{O_A O_B}$ ,  $\overline{P_A P_C}$  などは湯面のそれぞれの位置における溶湯深さである。後述のごとき方法で求めた溶湯の状態が Fig.3 (b) のごとくである時、溶湯面をいくつかの同心円によつて分割するとその隣り合う円周によつて囲まれた部分の溶湯ではその平均の半径の位置 ( $R_k$ ) における溶湯の深さ  $(\overline{R_k R_k'})$  だけ湯面が上昇する時間がその部分の平均溶湯保持時間である。となり合う同心円周で囲まれた溶湯面の面積を  $s_1, s_2 \dots s_k \dots s_n$  とし、それぞれの平均溶湯深さを  $d_1, d_2 \dots d_k (= \overline{R_k R_k'}) \dots d_n$  (mm) とする。インゴットの形成速度を  $h$  (mm/mn) とすればそれぞれの部分の溶湯保持時間は

$$d_1/h, d_2/h, \dots, d_k/h \dots d_n/h \quad (\text{mn})$$

となり、したがつて平均溶湯保持時間  $\tau_m$  は溶湯面全部について平均すればよいから、

$$\tau_m = (s_1 d_1/h + s_2 d_2/h + \dots + s_n d_n/h) / S$$

$$= 1/h S \cdot (s_1 d_1 + s_2 d_2 + \dots + s_n d_n) = V/h S \quad (\text{mn})$$

ただし  $S$ : 湯面の全面積 (mm<sup>2</sup>)

$$S = s_1 + s_2 + \dots + s_n$$

$V$ : 溶湯の体積 (mm<sup>3</sup>)

すなわち溶湯の体積、インゴットの形成速度より平均溶湯保持時間を算出することができる。

溶湯の体積は溶解中の溶湯の状態から算出できる。溶湯の状態は溶解の終了時 hot top を行なわずに大電流のまま電源を切断し、その寸前に異物質例えば Al と

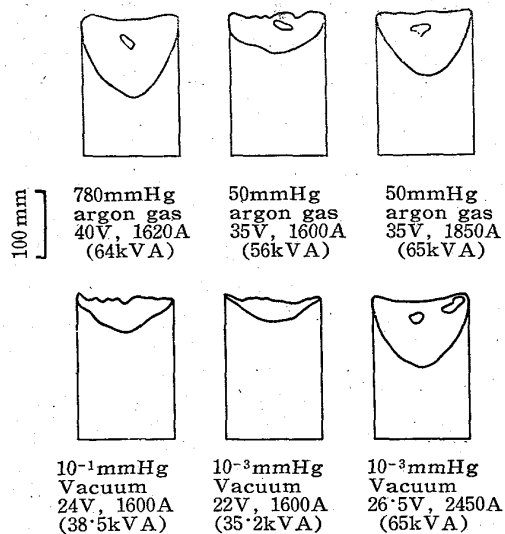


Fig. 4. Shapes of molten pool of SS-41 steel as melted by consumable-electrode arc method under various conditions.

金属 Mo の小片を投入して凝固後の縦断面のマクロ組織をみると Al は溶湯中に拡散し、また融点の高く比重の大きい金属 Mo は溶湯の下端に沈殿するので、これよりその状態を推定することができる。このようにして求めた各種条件下の溶湯状態のスケッチを Fig. 4 に示す。

インゴットの形成速度および溶解速度は電極降下速度から求められる。単位時間にインゴットの形成される高さを  $h$  mm/mn, 溶解速度を  $W$  g/mn とすれば電極とインゴットの幾何学的な関係より容易に次式が導かれる。

$$W = \rho l / (1/s - 1/S) \quad \text{g/mn}$$

$$h = l / (S/s - 1) \quad \text{mm/mn}$$

ただし  $S$ : インゴット(ルツボ)断面積 mm<sup>2</sup>

$s$ : 電極断面積 mm<sup>2</sup>

$l$ : 電極降下速度 mm/mn

$\rho$ : 電極材料およびインゴットの比重 g/mm<sup>3</sup>

Table 4. Effect of conditions for consumable electrode arc melting on the melting factors.

Melting factors	Atmosphere	Argon gas (780 mmHg)	Argon gas (50 mmHg)	Vacuum (10 <sup>-1</sup> mmHg)	Vacuum (10 <sup>-3</sup> mmHg)		
	E*	40V, 1620A 65kVA	35V, 1600A 56kVA	35V, 1850A 65kVA	24V, 1600A 38.5kVA	22V, 1600A 35.2kVA	26.5V, 1850A 65kVA
Falling-down speed of electrode $l$ (mm/mn)		17.2	13	18.9	10	9	18.9
Melting speed $W$ (g/mn)		1020	850	1150	660	590	1150
Forming speed of ingot $h$ (mm/mn)		112	56	94	47	35	98
Average time of molten state $t$ (mn)		6.9	4.0	4.4	3.1	2.2	5.1

\* Electric power for melting, crucible diameter 130mm  $\phi$ , electrode diameter 80mm  $\phi$

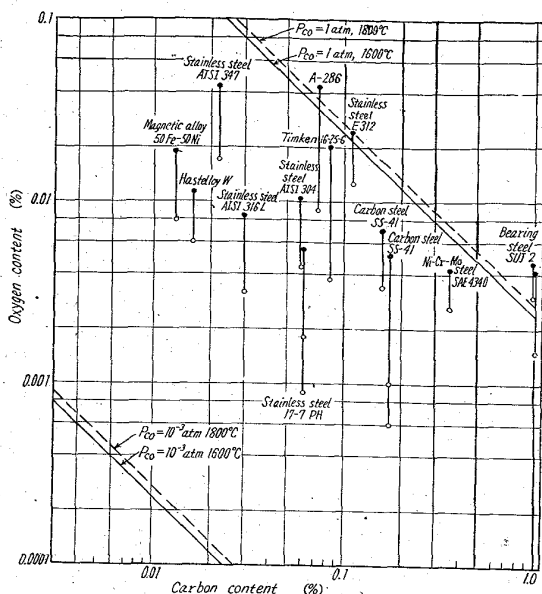


Fig. 5. Equilibrium oxygen content in molten steel with  $C$  and oxygen contents of various metals before and after consumable-electrode arc-melting.

これらの関係を用いて代表的な溶解条件のもとでの溶解諸元を算出すると Table 4 のごとくである。

径 130mm のルツボおよび径 80mm の電極を用いて真空中 ( $10^{-3}$ mmHg) で炭素鋼 SS-41 を消耗電極式アーク溶解するとき、その平均溶湯保持時間は電流 1600A のとき 2.2mn, 電流 2450A のとき 5.1mn, 780mmHg アルゴン中のときは、電流 1620A (64kVA) のとき 6.9mn である。

かくのごとく溶湯状態にある時間が比較的短かいため、これまでに述べた化学反応が十分進行しないうちに凝固するのであつて、平衡状態には達していないと考えられる。

Fig. 5 は消耗電極式アーク溶解における溶鋼温度が 1600~1800°C と推定されているので、それらの温度における [%C] と [%O] の関係を各種 CO 分圧下において求め、さらにその図中に前述した諸例における電極材ならびにアーク溶解材の炭素、酸素量の関係を示したものである。前項の諸例は純鉄中でないため合金元素の影響を受けるにしても、平衡値よりはるかに多い酸素量を含有することは上記の原因によるものであろう。

また第 1 報 Table 1, No. 2, No. 10 は消耗電極式アーク溶解したインゴットを再び電極として消耗電極式

アーク再溶解した結果、酸素、酸化物、窒素が溶解のたびごとに顕著に減少することを示すもので、1回の溶解では平衡値に達しなかつたものが2回目の溶解により平衡値の方向に近づくことを示すもので、これまでに述べた事情を示すものといえよう。

以上、消耗電極式アーク溶解法における溶湯保持時間すなわち反応時間の短いことを述べたが、これより消耗電極式アーク溶解用電極はできる限り清浄なことが必要であり、そのためとくに高純度を必要とするものには高周波真空溶解炉により電極を製作するのことが意味がでてくるものである。

#### IV. 結 言

本報告においては消耗電極式アーク溶解における合金元素の挙動と反応時間について述べた。

1) 各種化学成分のうち Mn 量は消耗電極式アーク溶解によりはじめの含有量の約 30% 減少するが、Mn について蒸気圧の高い Cu, Sn についてはインゴット分析では明らかでない。

2) 溶解中におけるこれらの合金元素の挙動を明らかにするため、ルツボ附着物の分析と引出式溶解実験を行なった。この結果、溶解中には Mn の他に Cu, Sn が蒸発しており、また一旦蒸発したこれらの元素が再び溶湯中に溶け込む現象のおこっていることを確めた。

3) 消耗電極式アーク溶解における溶湯保持時間を代表的な溶解条件について計算し、それらが比較的短かくそのため溶解中の諸反応が平衡状態に達しないうちに凝固することを述べた。

第 1 報より第 3 報にわたる一連の研究の遂行にあたり、御指導を賜わつた京都大学教授工学博士盛利貞先生に厚くお礼申し上げます。また終始御指導、御鞭撻をいただき、本報告の発表を許可された当社中央研究所長高尾善一郎博士に感謝の意を表する次第であります。

(昭和37年7月寄稿)

#### 文 献

- 1) 斎藤, 川合: 日本金属学会誌, 24 (1960) 1, (1960) A10
- 2) G. E. GILL, E. Ineson & G. Webley: J. Iron & Steel Inst. (U.K.), 191 (1959) 2, p. 172
- 3) 西原, 八木, 成田, 栗原: 49 (1962) 13, p. 1654
- 4) H. GRUBER: J. Metals, 10 (1958) 3, p. 193