

特 別 講 演

米国におけるエレクトロスラグ再溶解法 (ESR) の 現状について*

A Review of the Air Force Program Relative to Melting Super Alloys and Titanium by the Electroslag Process

G. K. BHAT**

非常に貴重な時間をさいて、ここに出席していただきましてありがとうございます。また、田畑専務理事、中野特殊鋼部会長にいろいろお世話になりまして、この会を開いていただきありがとうございます。

それから、もうひとつは、私が ASM のピッツバーグ支部を代表して来ているのだということもごあいさつ申し上げたい。

最初に ESR の歴史をちょっと紹介します。1937 年に、ご承知のように ホプキンスが electro-slag welding のアイデアで submerged arc を使つて、鉄基の超合金をつくるという方法を考えだしました。これは 1941 年に特許になり Kellogg cold mold process といわれました。ホプキンスは以来この発展に取り組んだのであります。1951 年にはファース・スターリングが本法の実施権を得ております。

一方ソ連では electro-slag welding を始めまして、それを AC でやりました。その結果、ベース・メタルと同じような品質の接合部分をつくることができ、その後どんどんその溶接の大きさを大きくしていくことに成功しました。

1955 年にソ連のほうでは非常に大きな electro-slag welding ではなくて remelting のほうの炉をつくりました。そのころちょうどアメリカでは、ガス・タービン工業が非常に発達し、そのために航空機用エンジンの部品が vacuum arc remelting (VAR) の方法でつくられると非常によいものがつくられるということがわかりました。その結果として、アメリカでは DC 電源を使った非常に大きな VAR が発達しました。一方ソ連のほうではそういう航空機材料はもつぱら ESR でつくるといような状況になつてまいりました。

1965 年になつてイギリスが ESR の研究を始めましたがその結果、工具鋼、軸受鋼、低合金鋼、耐熱鋼を ESR でつくることが実験的にわかりました。さらに ESR 設備費は VAR よりも非常に安いということもわかりました。

一方、フランスでは CAFL という会社がソ連から特許を買つて、単相の 3 トン鋼塊までつくれる ESR 装置をつくりました。その間にアメリカの空軍の Air Force Material Research Laboratory から人が訪問してその CAFL の歩留りが非常によいということに気がつきました。アメリカの空軍の研究所の人がアメリカに帰つてきて、だいたい、ESR はアメリカのホプキンス法ということでアメリカに発明されて発展したのにアメリカの工業界はなぜ、使わないかということをお願いしたら、工業界の人はもう真空溶解の装置は非常に大きいのを設置しているからいまさら ESR はやる必要がないという態度だつたそうでございます。1966 年に空軍はこの ESR に関する文献調査、図書館で調べるといようなことを、Mellon Institute と契約することを頼みにきたわけです。それがきっかけで私がこの仕事を始めることになつたのであります。その結果、私たちは装置の設計と建設、生産される鋼塊の価値評価、それからいろいろな合金の仕様をつくるというような仕事を始めたわけです。

これから、スライドによつて説明いたします。Table 1 の各合金は VAR で鋼塊をつくるにはなかなかむずかしい成分のものも示しております。

特に、析出硬化させる合金では、たとえばチタンとかそういうものが VAR では非常に大きな偏折を起こすので不適当なわけでありまして。たとえば、インコの 720 番とかいったものは ESR でやると非常に偏折が少なく、加工性がよい。すなわち加工性がよくていきなり板に加工することができます。先ほど空軍の依頼について

* 本特別講演は昭和44年10月8日、鉄鋼協会において鉄鋼協会主催のもとに行なわれた講演を速記したものである。

座長 特殊鋼部会長 中野邦弘
進行 特殊鋼部会直屬幹事 高橋俊雄

通訳 東京工業大学 後藤和弘

昭和45年3月9日受付

** Mellon Institute of Carnegie-Mellon Univ. Dr.

Table 1. Chemical composition of various super alloys.

Alloys	Composition (%)								
	C	Ni	Cr	Mo	Co	Ti	Al	Fe	Other
Iron base									
310	0.25	20.5	25.0	...	...	...	...	Bal.	
16-25-6	0.06	25.0	16.0	6.0	...	...	...	Bal.	0.70 Si, 1.35 Mn, 0.15 N
Disaloy 24	0.04	26.0	13.5	2.7	...	1.7	0.1	Bal.	0.8 Si, 0.005 B, 0.90 Mn
A 286	0.05	26.0	15.0	1.3	...	2.0	0.20	Bal.	0.50 Si, 0.015 B, 1.35 Mn
V57	0.08	25.0	15.0	1.25	...	3.0	0.25	Bal.	0.30 V
Unitemp 212	0.08	25.0	16.0	...	...	4.0	0.35	Bal.	0.50 Cb, 0.7 B, 0.05 Zr
Nickel-iron base									
Incoloy 800	0.04	32.0	20.5	...	...	0.3	0.30	Bal.	0.75 Mn
910	0.04	44.0	13.0	6.0	...	2.5	0.20	Bal.	0.10 B
CG 27	0.05	38.0	13.0	5.5	...	2.5	1.5	Bal.	0.1 Si, 0.01 B, 0.1 Mn
D979	0.05	Bal.	15.0	4.0	...	3.0	1.00	27.0	0.01 B, 0.27 Mn
718	0.04	Bal.	18.6	3.1	...	0.9	0.40	18.5	5.0 Cb
Rene 62	0.05	Bal.	15.0	9.0	...	2.5	1.25	22.0	0.01 B, 2.25 Cb
Nickel base									
Inconel 600	0.04	Bal.	15.8	...	...	...	...	7.2	0.20 Mn, 0.20 Si
Inconel X 750	0.04	Bal.	15.0	...	...	2.5	0.8	6.8	0.9 Cb, 0.7 Mn
Waspaloy	0.08	Bal.	19.5	4.3	13.5	3.0	1.3	...	
Rene 41	0.09	Bal.	19.0	10.0	11.0	3.1	1.5	...	0.005 B
Udimet 700	0.08	Bal.	15.0	5.2	18.5	3.5	4.3	...	0.030 B
Udimet 500	0.10	Bal.	19.0	4.0	19.0	3.0	3.0	...	0.007 B, 0.05 Zr
713C	0.12	Bal.	12.5	4.2	...	0.8	6.1	...	2.0 Cb
In 100	0.18	Bal.	10.0	3.0	15.0	4.7	5.5	...	0.014 B, 0.06 Zr
SM 200	0.15	Bal.	9.0	...	10.0	2.0	5.0	...	12.5 W, 1.0 Cb, 0.015 B
SM 211	0.15	Bal.	9.0	2.5	10.0	2.0	5.0	...	5.5 W, 2.7 Cb, 0.015 B
Cobalt base									
L 605	0.10	10.0	20.0	...	Bal.	...	...	1.0	15.0 W, 1.5 Mn
V36	0.27	20.0	25.0	4.0	Bal.	...	...	3.0	2.0 W, 2.0 Cb
S 816	0.38	20.0	20.0	4.0	Bal.	...	...	4.0	4.0 W, 4.0 Cb
J 1650	0.20	27.0	19.0	...	Bal.	3.8	...	...	12.0 W, 2.0 Ta, 0.02 B
NASA	0.40	...	3.0	...	Bal.	1.0	...	...	2.0 Re, 25.0 W, 1.0 Zr
X40	0.50	10.0	25.0	...	Bal.	...	...	1.0	7.5 W
Wi-52	0.45	1.0	21.0	...	Bal.	...	...	2.0	11.0 W, 2.0 Cb
SM 302	0.85	...	21.5	...	Bal.	...	...	...	10.0 W, 0.005 B, 9.0 Ta
SM 322	1.00	...	21.5	...	Bal.	0.75	...	...	9.0 W, 4.5 Ta, 2.25 Zr

述べたことは直接のきつかけでしたけれども、これを通して実験をそろそろ始めましたところ、非常に経済的であるということと同時に、いろいろ複雑な形状、たとえば中空のかつこうをしたものとか、あるいは矩形の断面のもの、あるいはギヤのようなかつこうをしたものいろいろな断面のものができるといことがわかりました。その結果、なるほど、アメリカでは真空溶解が非常に発達しているけれども、ESRには独自のよさのあることがわかりました。だから、VARにとつてかわるとい意味ではなくてESRの利点とVARとを組み合わせ、よい材料をもつと安くつくることができるのではないかとこのことを先頭に立つてやり出したわけです。

それでは、これからスライドを1枚1枚やりますけれども、あとのほうでは最新の情報としてアメリカでいま、どうのことを考えているとか、あるいはほかの各国でどうのことをやっているかということの説明いたします。Fig. 1で、1400°F以下の耐熱合金では析出硬化させるための元素を含んでもVARでだいたいよいぶである。しかし、その下の2つのワクの中に書いてある合金は

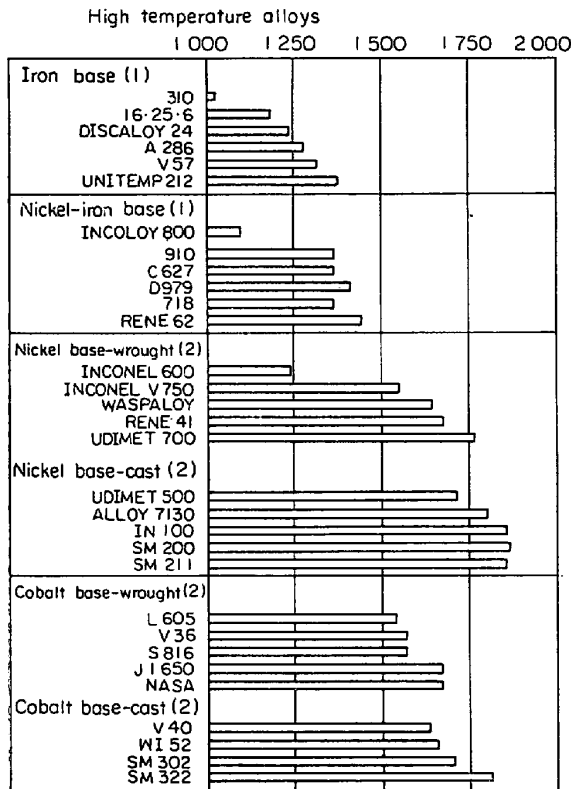
析出硬化のための元素を多く含んでおり、これはESRでないといけないようです。

Fig. 2に示すようにいずれも最初は真空誘導溶解で電極をつくるわけですが、その後、ESRのほうは鍛造がいらぬ。いきなりシートなどにすることができるとを示しています。

Fig. 3はESRとVARの歩留はどちらが大きいかを示す図です。左側がESRで歩留が大きいことを示しております。要するにESRとVARを比べると、ちょうど、黒い線だけ歩留がよくなったという図でございます。

この図は、コールド・フラックス・スタートです。なおホット・スタートであらかじめ、フラックスを溶解してそれをついで始めると、コールドに比べて約14%歩留があがります。

ご承知と思えますけれども、Fig. 4はESRの図でちよつと重要なことはモールドは銅・モールドでなくて鉄のモールドでもいいということです。Fig. 5に示すごとく、ESRで重要なことは加熱の熱はジェネル熱、フラックスの中を流れる抵抗熱であるといふことと、も



- (1) Maximum temperature (°F) for 100 hours rupture life at 50 000 psi stress.
- (2) Maximum temperature (°F) for 100 hours rupture life at 20 000 psi stress.

Fig. 1. Temperature capability of various alloys.

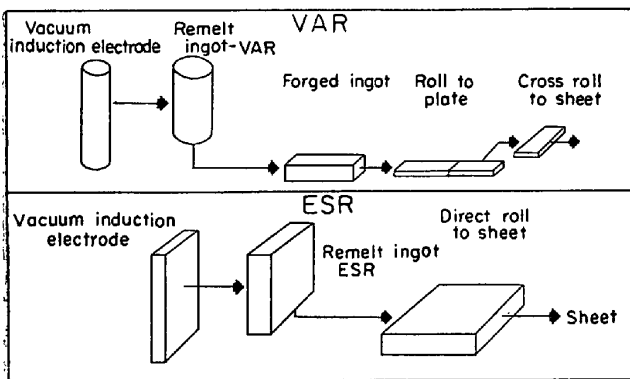


Fig. 2. Superalloy sheet production.

うひとつはドロップレットは1個だけフラックスの中にあるということです。そして1個、1個落ちてくるというようなプロセスが重要であるということです。

この図は電極を取り出して急冷したときのかっこうですが、左側が非常にゆっくり溶かしたときで、このときはフラックスの表面にさわるか、さわらないかの程度に電極をつけている。あとは真中のがちょうどよいということをお願いのですが、ちょうどよい深さにフラックスにつけてあります。右はじのは、もうほとんど、metal poolに近いところへつけて溶解した場合です。もちろん、溶解速度もそれに従って違ってきます。引き出

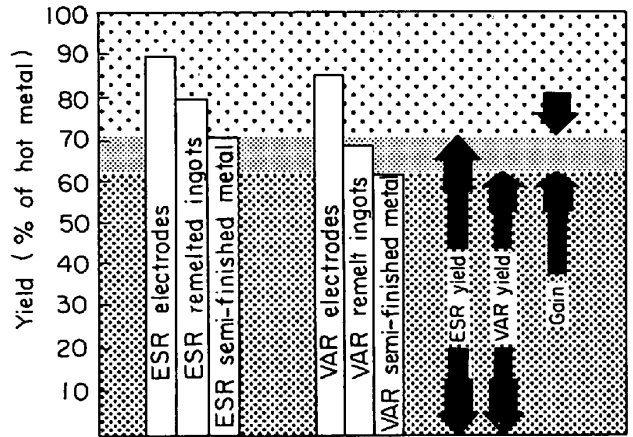


Fig. 3. Comparison of semi-finished product yield for electroslag remelting and vacuum arc remelting.

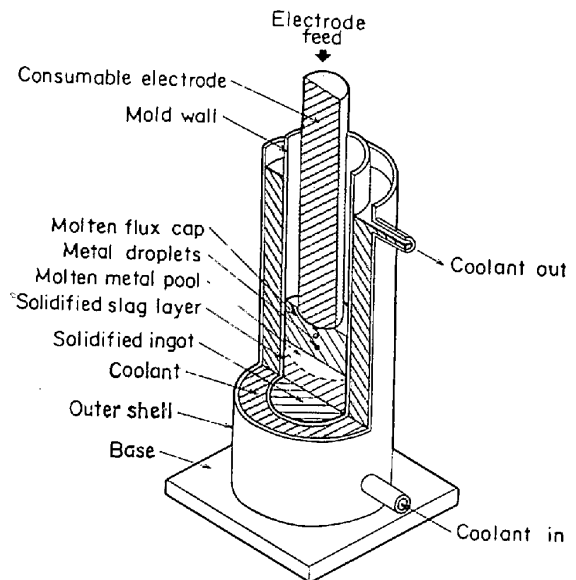


Fig. 4.

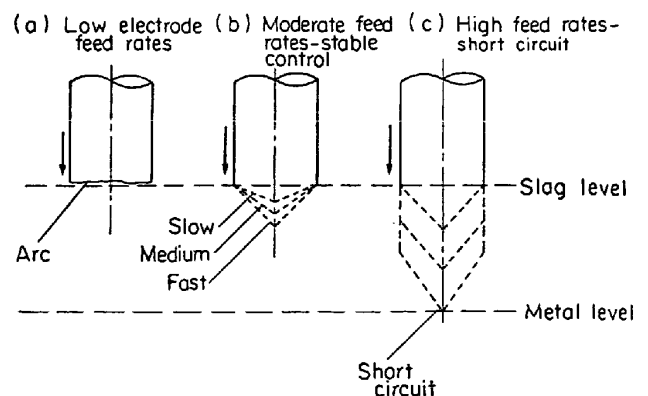


Fig. 5.

して急冷した電極の形というのは metal pool のかっこうを推定するのに役立ちまして、metal pool のかっこうと凝固面の形によって凝固組織の形が当然変わってきます。左はじのように一番浅くフラックスにつけた場合

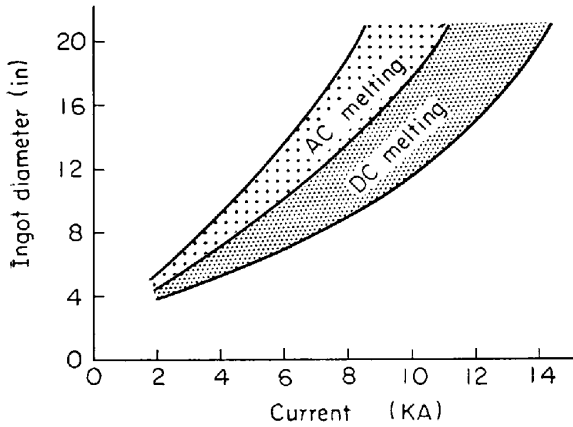


Fig. 6.

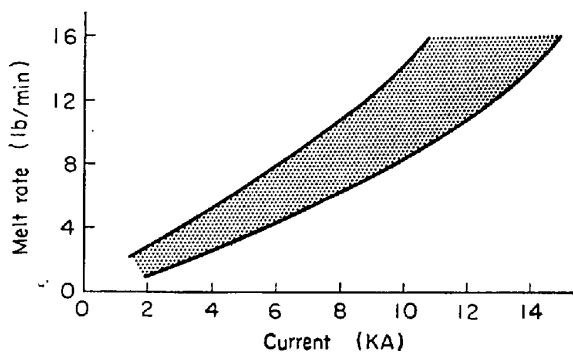


Fig. 7.

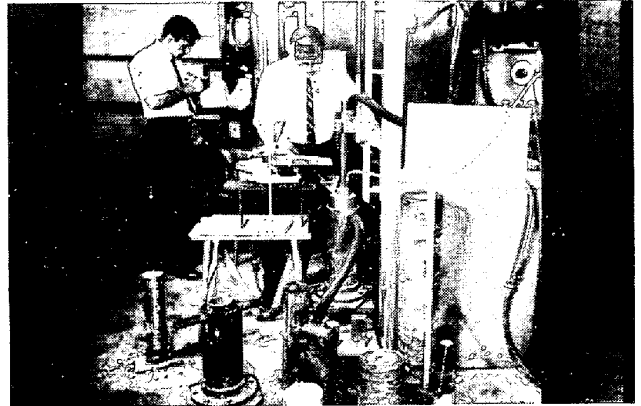


Photo. 1



Photo. 2

には、Bell shape のいわゆる普通の凝固面になります。適当な深さにすると、凝固面が平らになりまして、等軸の結晶組織になるわけです。ですから、そのほうが非常によい凝固組織をえることができます。左はじめのはホプキンスが一番最初に始めたように、submerged arc により電極がフラックスの表面にさわるか、さわらないかの状態で溶かす。真中のがかなりついていて完全にジュール熱抵抗発熱ということです。VAR の場合は電極を上下に動かして微妙な調整をするわけですが、この場合、そういうことをしすぎるとショートが起りやすいようです。すなわち、DC の VAR 炉を使う場合に、自動装置をそのまま使うとショートしやすいということです。

AC か DC かというのは当然質問として予想しておりましたので、Fig. 6 を用意してきました。同じ鋼塊直径なら、この図では AC のほうが電流が少なくてもよいということを示しています。

Fig. 7 は AC も DC も平均した溶解速度と電流の関係です。どちらかというこの図の上の曲線に近いほうが AC で下のほうが DC です。

Photo. 1 はメロン研究所で最初につくった装置で、直径は 10 センチメートルまでの鋼塊で DC, AC の両方の研究に使いました。この装置を 4 日間で作りました。

Photo. 2 は空軍の研究のためにつくったマルエジング鋼でこれをいきなり圧延にかける。そういうためにこういふかっこうにしてあるのです。



Photo. 3

Photo. 3 は、René 41 という超合金の 17.5 センチメートル直径の鋼塊を圧延したものです。

Table 2.

Specimen identif.	Heat treatment	Direct. to rolling	Ingot position	0.2% Offset yield strength	Ultimate tensile strength	Reduction of area	Elongation % IN 2 IN
				(ksi)	(ksi)	(%)	
SMT 18	4 hr-900°F	L	Middle	262.4	275.8	41.3	9.0
SMT 19	6 hr-900°F	L	Middle	269.6	282.2	38.2	8.5
SMT 20	4 hr-925°F	L	Middle	274.7	286.2	38.5	8.0
SMT 21	4 hr-925°F	L	Middle	281.7	291.0	38.9	9.0
SMT 22	4 hr-925°F	L	Middle	277.8	286.9	47.2	10.0
SMT 23	6 hr-925°F	L	Middle	234.2	293.7	41.6	8.5
SMT 24	6 hr-925°F	L	Middle	279.8	290.6	45.9	10.0
SMT 25	6 hr-925°F	T	Middle	284.8	296.0	38.6	8.0
SMT 26	6 hr-925°F	T	Middle	281.2	291.7	39.5	7.5

Table 3.

Sample ident.	Test Temp.	Speed of rotation	Stress	Number of cycles to failure	Endurance limit 10 ⁷ cycles
	(°F)	(ppm)	(ksi)		(psi)
8 ACF 10	1 400	7 600	70.4	16 000	
8 ACF 9	1 400	7 800	65.2	57 300	
8 ACF 6	1 400	7 700	60.0	489 600	
8 ACF 7	1 400	7 600	55.4	997 500	
8 ACF 8	1 400	7 700	50.2	10 000 000	54 200

Table 4. Mechanical property data obtained for electroslag material from René 41 ring.

Room tensile test		
0.252" round-0.005 in/in/min strain rate		
	Actual	Required
Ultimate strength	196.5 ksi	180 ksi
0.2% Yield strength	134.9 ksi	150 ksi
Elongation (g)	22.0	10
Reduction of area (%)	20.4	12
Elevated tensile (1 400°F)		
0.252" round-0.005 in/in/min strain rate		
	Actual	Required
Ultimate strength	133.4 ksi	125 ksi
0.2% yield strength	118.5 ksi	105 ksi
Elongation (%)	37.0	8
Reduction of area (%)	34.0	10

1 350°C Stress rupture
85.0 ksi
Run to fracture after 100hr

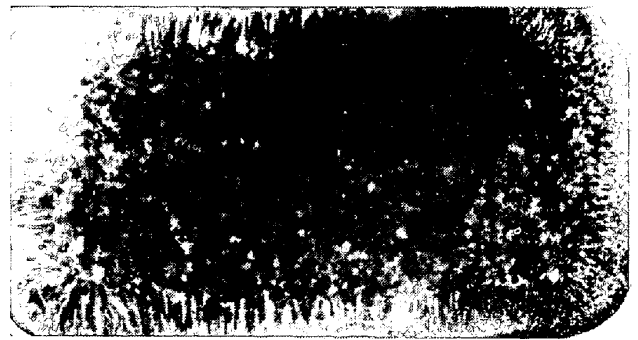


Photo. 4

この同じ鋼種を VAR で溶解して板にすると、最初の段階でいろいろな割れがいつぱいできるわけです。これを取り除くためにいろいろな手段を講ずるのですが、こつちは全然、何もしなくても、こういうふうにきれいに伸びて割れが全然ありません。

Photo. 4 は René 41 の鋼塊の底の部分のマクロ組織です。このスラブは 11×24 インチの大きさです。

Table 2 は先ほどのマルエージ鋼の機械的性質ですが、ここで注意していただきたいのは、伸びどしほりが非常によくついているということです。

Table 3 はマルエージ鋼ですけれども、クラック破壊の進行の性質を示し、VAR でつくつたマルエージ鋼より非常によいということがわかります。

Table 4 は René 41 のロケット・エンジン用リングの機械的性質ですが、右側が要求されている性質で、左側が実際につくつたものの値であります。どれを見ても非常にそれを満足していて、こういう性質のものは非常に簡単にできるということが重要です。

Table 5 は疲労試験の結果ですが、やっぱり VAR よりは非常によい結果を示しています。

エンジンメーカーはいろいろな割合で塑性変形したものの寿命を知りたいわけですが、それについては ESR でやつたものは、高温での特性が VAR よりもよい結果を示しています。ただし、常温では VAR と ESR の製品では差がないようです。

Table 6 では 11×20 インチの René 41 板の要求されている性質が下にかいてありますけれども、その上方に実際にやられた結果がかいてあります。

Table 5 (a). Average stress rupture properties 1 inch plate 11×20 inch Rene 41 ingot.

Temperature	Stress	Time to rupture
(°F)	(ksi)	(hrs)
1 400	95	10.4
1 400	90	17.8
1 400	85	34.2
1 400	80	62.7
1 400	75	100.0*
1 400	70	100.0*
1 350	90	28.5
1 350	85	81.9

* Test terminated

Table 5 (b). Average stress rupture properties 30 mil sheet 7×14 inch Udimet 700 ingot.

Temperature	Stress	Rupture life
(°F)	(ksi)	(hrs)
1 400	80	53.0
1 400	74	63.5
1 600	52	6.6
1 600	40	32.8

Table 7 には鋼塊の縦方向と横方向で機械的性質が変わらないということを示してあります。

Table 8 は先ほどからの鋼種に関する限りでは ESR のほうが VAR よりも非常に疲労強さが強いということを示しています。1 200°F の場合ですが、そのときには ESR の場合は 59.5 ksi ですが、VAR だと 50.0 ksi であるということです。

Photo. 5, 6 は介在物の写真ですがどんなマルエジング鋼でも ESR でつくと一番大きい介在物の大きさが 10 ミクロンを越すことは絶対にないという非常によい

Table 5 (c). Average tensile properties 7×14 inch Udimet 700 ingot.

Condition	Temperature	Yield strength	Ultimate strength	Elongation
	(°F)	(ksi)	(ksi)	(%)
30 mil sheet	80	137.3	198.6	25.2
30 mil sheet	1 400	122.9	163.0	11.3
30 mil sheet	1 600	80.1	114.8	15.3
0.9 inch plate	80	157.8	203.4	16.4
0.9 inch plate	1 400	124.5	145.9	24.5
0.9 inch plate	1 700	66.5	90.8	25.0
P & W Forging Specification	80	140.0	195.0	16.0
	1 400	125.0	150.0	20.0

Table 8. Average fatigue properties 1 inch plate 11×20 inch Rene 41 plate.

Temperature	Fatigue endurance limit
(°F)	(ksi)
80	77.0
1 000	56.0
1 200	59.5

結果を示しています。これはご承知の方もずいぶんいらつしやると思いますが、metal pool における介在物の浮上速度を示すストークスの法則に大体従っています。

ストークスの法則を解くと介在物の浮上速度がわかるわけです。凝固速度を 0.08"/sec から 0.10"/sec の間に保持していれば浮上速度よりもおそいから絶対に介在物はつかまらないわけです。

Table 9 はフラックスの電気伝導度と融点を示すものですが、大体、このようなフラックスを使っています。

Fig. 8 でマルの中に×印がかいてあるのはアメリカで

Table 6. Average tensile properties 1 inch plate 11×20 inch Rene 41 plate.

Direction	Temperature	Yield strength	Ultimate strength	Area reduction	Elongation 1 inch
	(°F)	(ksi)	(ksi)	(%)	(%)
Longitudinal	80	146.5	194.0	31.7	20.3
Transverse	80	147.0	193.9	20.2	17.7
Longitudinal	1 400	119.3	155.6	18.8	14.0
Transverse	1 400	117.7	157.5	12.5	13.5
Longitudinal	1 700	56.2	72.1	54.2	33.2
Transverse	1 700	55.9	72.9	48.8	27.1
Required Properties	80	130.0	180.0	12.0	10.0
	1 400	105.0	125.0	10.0	8.0

Table 7. Average tensile properties 1 inch plate 11×20 inch maraging steel ingot.

Direction	Yield strength	Ultimate strength	Area reduction	Fracture toughness	Fatigue endurance limit
	(ksi)	(ksi)	(%)	ksi √IN	(ksi)
Longitudinal	282.0	292.0	43.8	91.6	107.0
Transverse	283.0	293.9	39.1	89.6	98.3

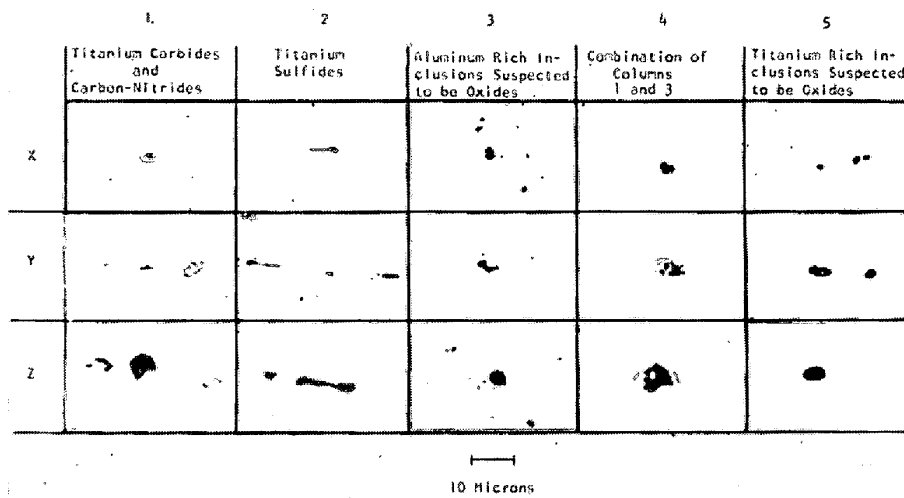


Photo. 5.

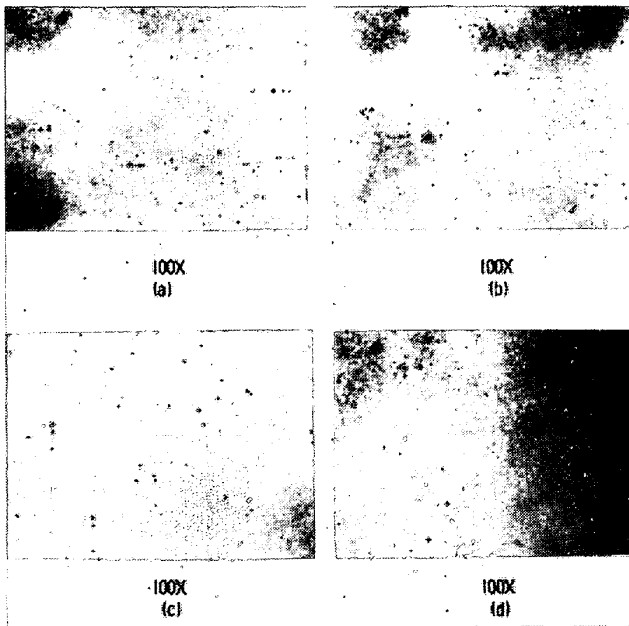


Photo. 6.

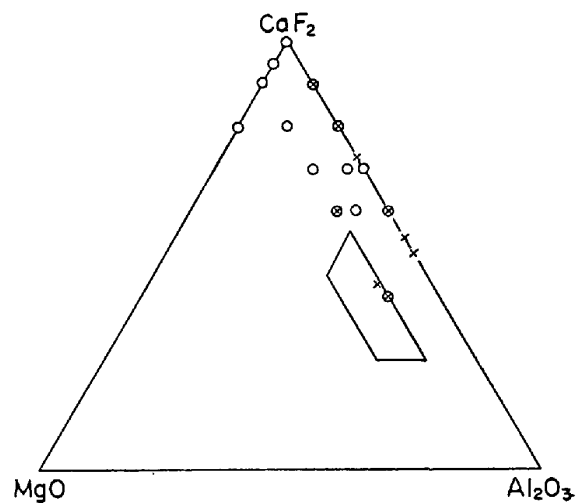


Fig. 8.

Table 9. Molten conductivity values and approximate melting.

Temperatures of certain fluxes used in electroslag remelting.				
Flux composition	1 600°C	1 700°C	1 800°C	Melting temperature
70% CaF ₂ , 30% Al ₂ O ₃	1.29	2.02	2.85	1 270±10C
65% CaF ₂ , 30% Al ₂ O ₃ , 5% TiO ₂	1.42	2.03	2.76	1 290±10C
50% Al ₂ O ₃ , 50% CaO	0.19	0.38	1.02	1 340±10C
30%CaF ₂ , 40% Al ₂ O ₃ , 17% CaO, 13% MgO	0.90	1.36	1.92	1 320±10C

よく使われているフラックスの組成で、あとはイギリスとソ連でよく使われているフラックス組成です。

Fig. 9 の左側がチタンの普通の鋼塊のつくり方で、最初、スポンジ・チタンを圧縮したものをつくるわけです。それで圧縮したものを何本かつなぎ合わせて溶接し

て電極をつくる。右側の電極は水冷の銅の電極を使ってこれを非消耗にして、それで材料は側から落としていく。そして consolidate する。要するに VAR に使う電極をつくる方法です。で、銅の型にスクラップをつめていつて、抵抗加熱で焼結させるということです。ESR

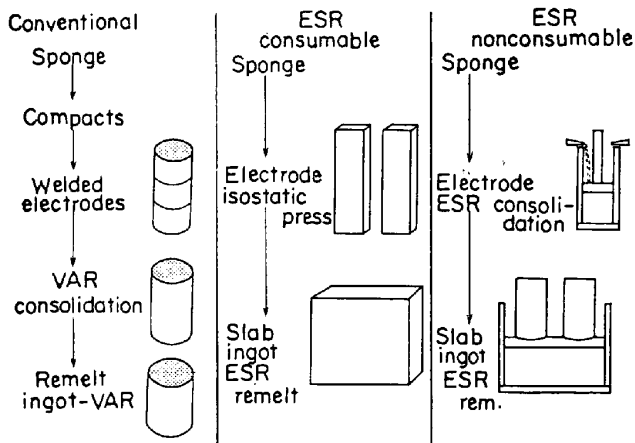


Fig. 9. Titanium production.

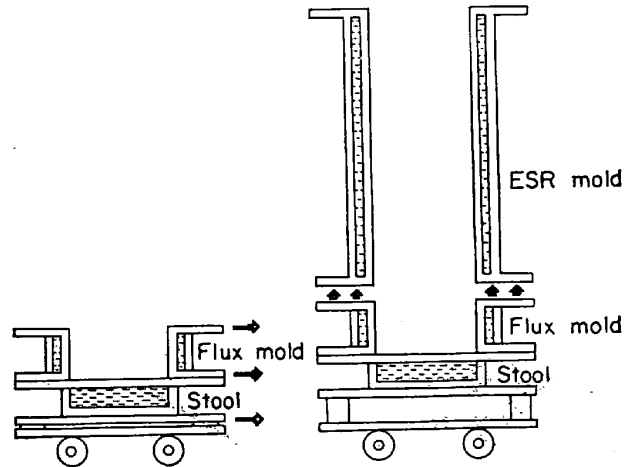


Fig. 10.

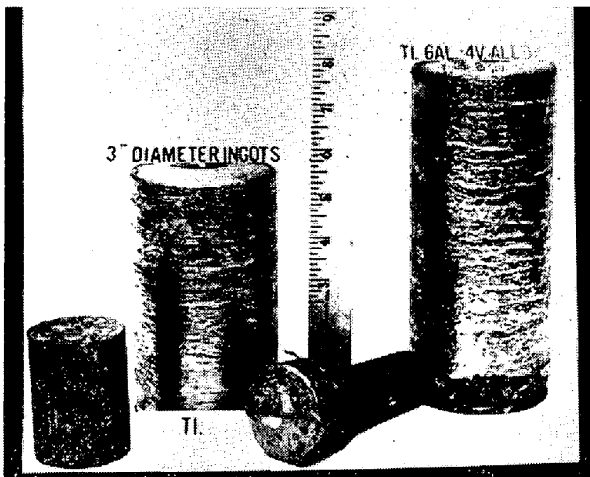


Photo. 7.

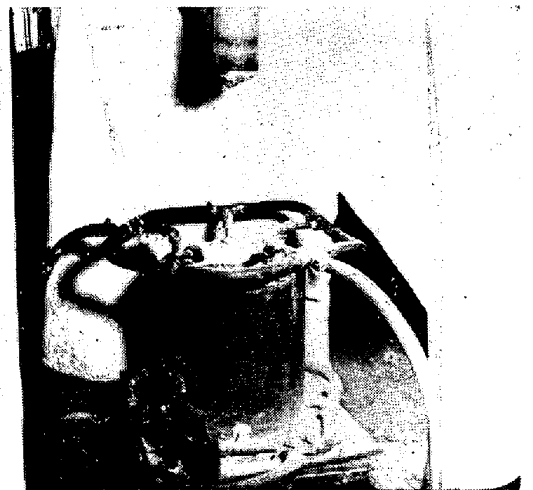


Photo. 9.

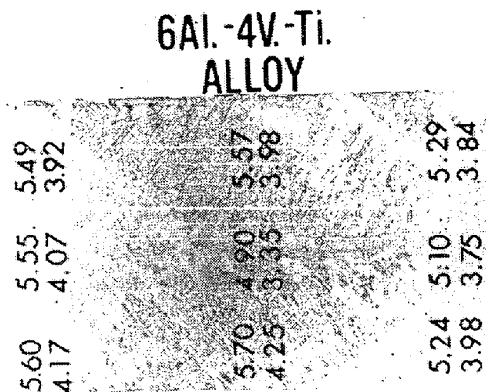


Photo. 8.

の方法ですと isostatic な圧力でコンパクトをつくつて、それをいきなり電極にしてスラブや鋼塊をつくる。要するに、長いコンパクトをつくつて、溶接する必要がなくていきなりつくります。

将来はこういう方法で工業化に進もうと考えていますが、現在、実際にもためしてみた方法です。

Photo. 7 はチタン合金で、チタンのコンパクトを電極として使つてやつたものです。

Photo. 8 は凝固後のアルミニウムとバナジウムの分布

を示しております。上の例がたとえば右はじの1番上の5.49%がアルミニウムで、下の3.92がバナジウムとこういう分析結果は偏析がほとんどないということを示しています。

Fig. 10 はホット・スタートの1つのやり方ですが、あらかじめ、こつち側で、フラックスを溶かしておいて型の下に移動させるという方法ですが、そのフラックスをつくるためには水冷の銅型を使い、黒鉛は一般に使いません。炭素を含まぬ超合金の場合に黒鉛を使うと、当然炭化物として溶解するのでいけないからです。また、この種の方法としてソ連では溶かしたフラックスをサイフォンで入れるという方法、それから、イギリスの方法はコールド・スラッグです。そういう特許があったので、アメリカではそのどちらにもひつかからないようにこういう方法を考えたのです。

つぎに連続エレクトロ・スラッグ・リメルティングという方法はコンシューマブル・エレクトロードの場合は水冷の銅製の非常に高さの狭いモールドの間で固めて、それを下のほうにロールで引っぱり、下げる。またコンシューマブルではないエレクトロードにしてそれを

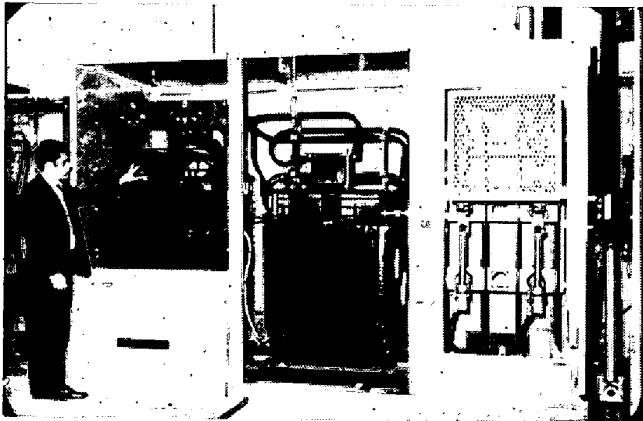


Photo. 10.



Photo. 11.

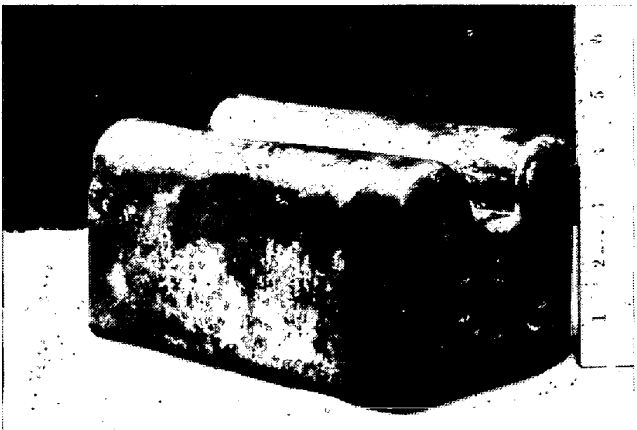


Photo. 12.

フラックスの上から、マテリアルを足していく方法があります。現在、両方ともメロン研究所で設計が終わった段階です。

Photo. 9 は 1 トン溶解の ESR 炉でメロン研究所でこ

Table 10. Super alloys that could be switched to ESR.

Inco 718
Hastelloy X
Waspaloy
713-c
Udimet 500
901
A-286
Udimet 700
L-605
Inco 625
16-25-6

Other super alloys having high hardener content and difficult to forge.

Slab ingots
Extrusion shapes
Direct forging "ingot-billets"

れを 4 週間でつくりました。

Photo. 10 は変圧器ですが、空冷の変圧器で、これを炉体のすぐそばにつけ水冷のリード・ワイヤーを使っています。

Photo. 11 はメロン研究所でつくりましたホロー・鋼塊の断面の写真です。

Photo. 12 は押しだしのための凹型断面の鋼塊で、少し大きい不銹鋼の断面です。

Table 10 はアメリカで今後 5 年間に生産される超合金の 70% がこういう仕様のものであることを示しています。

こういう超合金の大きな鋼塊が今後非常に要求される。それは VAR ではできなくて、ESR ではできる。こういうことです。

スラブとか押し出しに適したようなかつこう、あるいは直接鍛造の鋼塊をつくるというような可能性ですが、特に低合金鋼についてこれが応用されると 1975 年までに 10 億ドルの生産が予想されます。ですから、当然、低合金鋼のほうにこれが応用されると非常に鋼塊が大きくなっていつて、最大のもは 200 トンのものもできるのではないかと考えます。

いままでの話で、ほんのはじめのところから、現在何を考えているかというところまで、全部、お話ししたわけですが、こういうことに関しては今後活発に情報の交換をしたい。とくに、空軍の研究所を代表いたしましてこのことを申しあげたい。それで、ESR のプロセスというのは非常に flexible な応用範囲の非常に広い方法であるということを知っていただければ非常に幸いです。

討 論 会

司会 出口喜勇爾 (日本特殊鋼・現新日本製鉄)
真殿 統 (理研ピストン)
通訳 後藤和弘 (東京工業大学)
真殿 統 (理研ピストン)

司会 (出口) : 何かご質問でもございませんか。この間ピッツバーグで行なわれました、ESR に関する第2回国際シンポジウムでも、各国からずいぶんいろいろな質問もでまして、白熱的な討論でたいへんだつたらしいのでございますので、そこでとくに問題になつたポイントだけを簡単にお話しいします。

真殿 : いまちよつと BHAT さんをお願いしますが、ちょうど私もその会議に出席したのでございます。世界的にいまこの ESR に非常に関心が高まっているのですが、その高まり方が国によって非常に違つておりました。航空機工業を持つてゐるソビエトとアメリカはおもにこれを利用いたしまして VAR ではいろいろ不十分な非常に高級な材料をこれで作りたいというのが両国の非常に大きな努力を払つてゐるキーポイントです。それから、ヨーロッパはどつちかといいますと、航空工業は非常に小さいスケールであるために、むしろこれを大型鋼材、ロール材ですとか、シャフト材、ローターといったような大きな鋼塊をつくるために非常に努力をしてゐる。で一応現在 1000 ミリメートルから 1300 ミリメートルぐらいの直径で、高さ 6 メートルぐらいまでのものが、鋼塊にしますと約 40 トンぐらいになると思いますが、25 トンから 40 トンぐらいのものまでできております。これを早く 2 メートルを越すところまでいきたいというのがヨーロッパ勢の努力の焦点だと思います。そういったような点、それから特に議論しましたポイントについて BHAT さんにちよつとお話しいしたいと思ひます。

BHAT 博士 : ピッツバーグの国際シンポジウムにだいたい、238 名の方が参加されて、先ほどちよつと申しましたように各国で現在いろんなデベロプメントについて努力を払つてゐるのでありますが、そういったような方々が一堂に会して情報を交換するという非常に有意義な会議でそれに対してソビエト、それからヨーロッパのオーストリア、ドイツ、ルクセンブルグ、イギリス、スイス、イタリーそれから日本を含めてインド、カナダと非常にたくさんの方が参加され、非常に熱心な討議をされたわけです。とくに、単に技術的な問題だけではなくて、コマーシャルのビジネスとしての ESR というふうなものについても非常に熱心な討議が行なわれました。しかしだいたい、ESR というものが今後どういう風に大きな工業として発展するかということについてはいろんな問題があるわけです。とくに、鋼塊の大きさと、それから治金的などういふ分野にこれが応用されるかとい

つたような問題は非常に重要なこれから討議すべき問題です。自分たちのように、超合金をつくるということになると実際超合金をつくるコストの問題と VAR などに比較してどうかといったようなことはビジネスとしての ESR の発展に非常に大きな影響をすと思ひますが、また一面においてヨーロッパ勢のように低合金鋼といったようなものをつくるということになると、要するにそういったものは低合金鋼の場合には歩どまりのいかんということがおそらくこの ESR の将来の応用のきめ手になるんじゃないか。で歩どまりが非常にいい、あるいは圧延などの工程の節減によつて、メリットをかかげるならば、これは将来非常に発展するのではないのでしょうか。いまの話の補足になりますが、材質的な問題からいいますと、低合金鋼も VAR でもつて十分優秀なものができるということはもう確認されているのに、物を売るという側からいいますと、必ずしもこれが成功してどんだん伸びているという状況ではないのであります。そういったものは、要するにコストの問題がそこにかからなくてゐる。単に VAR で溶製したものがコストが高いから低合金鋼の商売がうまくいかないということのほかにもう一つ鋼塊の大きさというものが VAR の場合にはどうしても限度がある。どんな大きさでも自由につくるとか、あるいは形状を任意に変えられるというわけにいかない。こういった鋼塊の大きさの制限ということがどうしても VAR の非常な欠点として登場する。これに対して ESR はそういったような点が解決されるんじゃないかここに非常に大きな将来性が期待されています。それから超合金というと現在はダブル・メルトあるいはトリプル・メルトといいますか、何回も溶解を繰り返すということによつて超合金の性質のいいものをつくろうとしている。VAR の場合はどうしてもダブル・メルトなどで溶解を繰り返すけれども、ESR の場合には 1 回の溶解でもつてある品物ができる可能性がある。そういったことから超合金についてもコストを切り下げるといふ問題について、いろんな興味を持たれてゐるんだということです。それにしても、アメリカの現状においては、すでに VAR については 20 もの大きな特殊鋼の会社がこの装置に対して 1600 万ドルの投資をすでにしてゐる。したがって、このイナーシャというのが非常に大きな障害になつておりました、なかなかこれを ESR に切りかえるというわけにいかないというのが現状であります。

VAR の場合にはその応用というのは、チタンから始まり、超合金あるいはダイス鋼という高級鋼からスタートして低合金鋼というものはむしろあとまわしになつた。しかし、ESR の場合にはおそらくむしろ低合金鋼のほうが、大きな鋼塊の製造という点で先にくるんじゃないかというのが自分の見方です。で、これについてそういったような大型鋼塊をつくる場合に単相でい

くか3相でいくかというのが今度のシンポジウムで皆さんが非常に熱心に討議された中心議題であります。で、この单相につきましてはオーストリアのペラー、あるいはソビエトにおいてすでに5000 KVAの変圧器容量でもつて非常に立派な鋼塊ができてつあります、しかし、それがさらにこれ以上大きくした場合にこれがそのままいけるかどうかということについてはいろんな討議が行なわれたのであります。しかし、こういつたような問題について、まあ自分もそうですが、3相でやるということについて、ドイツのラインシュタルを中心とした研究陣が相当の大きな鋼塊をすでにつくっているのがあります、そういつたような3相が非常に大きなメリットを示している、で、これについてはイギリスも同調をしているし、私も3相の将来性ということにいろんな期待をかけているわけです。自分のところで現在計画しているのは、大体、3つのタイプの炉をつくらうとしている。それで、1つは小さい鋼塊をつくる。これは大体直径が100ミリ以下です。これは单相で、1本の電極で、できれば連続鑄造をしたいというのが1つ、それから、もう1つ单相で電極を2本、できればこの一次側の空冷の変圧器と二次側も空冷といった変圧器にして、そしてだいたい2000 KVAのトランスを考える。なぜ、できれば空冷でいきたいかというのは油冷にしますとどうしても図体が大きくなって炉に近づけることができない。なるだけ電気の損失を減らすためにも変圧器と炉体とを近づけたいだけけれども、そういう目的で2000KVAぐらいまでは空冷ということを一とつ考えている。第3番目の炉として大体50トンまでの鋼塊のできるもの、これは自分のところでは3相でいきたいと思つている。で、3本ないしは6本の電極で大型鋼塊をつくる。この3種のものを現在設計しております。

司会：各社からいろいろなご質問をいただいております、これを拝見しますと、かなり共通の問題もございますし、それからすでにBHATさんがさつきのご説明でふれているものもございまして、最初、各社さんで出されたうちから、1つか2つぐらい、われわれのほうでこれに関しては一とつうかがつておこうじやないかというものを相談いたしましたので、ちよつとそれを申し上げて質問していただくことにしまして、あと時間がある限り、自由にどんどんご質問をお願いしたいと思います。

最初に、日本製鋼さん、一番目の鋼塊の大型化の場合だとか、それから单相電極で到達可能な最大の鋼塊径だとか、いろいろいままでのところでBHATさんの説明でふれられたこともございましてけれども、もう一度ちよつと詳しく具体的なところをうかがつたらどうかと思つていますが日本製鋼さん、よろしうございませうか。

日本製鋼：鋼塊のインゴットが鋼塊が40インチ以上になつた場合、20インチ以下の小さいインゴットと同

じような内部性状、たとえば偏析とかそういつたものが小さいものと同じものが可能かどうかということをやうか

BHAT 博士：小さいのは100ミリから500ミリくらいまで私も経験しました。ペラーは大体14インチから42インチまでのサイズを現在つくつております。もう数百本もすでにつくつたといつておりますが、その限りにおいてはともかく小さくても大きくても差がない。これは確実だと思います。しかし、さらに大きくなつてきた場合には、おそらくそこに多少の差ができる可能性はあるだろう。いずれにしても、そういつたような差が出るか出ないかというのは、このESRの特徴として、溶解速度を制御することに関係してくる。そしてmolten poolの形状を調節することができ、それによって凝固をまた制御することができる。で、それによつていまいつた大きな鋼塊になつた場合にも、そういう因子を制御することによつて大体同じようなものができるんじゃないかと思う。ただし、1本の電極で70インチ以上の鋼塊をつくるという場合にはおそらくいろんな問題が起こる心配もあります。

单相の場合でも電極をたくさん使えば65インチぐら

司会：富士鉄さん、いかがでございますか、ずいぶんたくさんご質問いただいております、何か富士鉄さんのほうでこれをとくに聞きたいということでもございませうれば……

富士鉄：非常に抽象的な質問になるかと思いますが、普通の鋼塊に対する場合とESR鋼塊の場合と圧下率に対してどういふふうにかつて考えるかということです。

BHAT 博士：そういつたような問題について、ペラーが特に現在一番大きな鋼塊をつくつておりますので、そのデータをいろいろ聞いたのでありますが、ペラーの説明によると、こういう方法でつくつた鋼塊は、さつきご覧になつたように縦方向に柱状晶が通つておりますが、そのために非常に鍛造性がよく、あまりにトラブルはない。しかし向こうでもやはりそういつた鋼塊を気にしてしまつて、八角だとか六角だとかいつた鋼塊の形状について、非常にいろいろ研究している。その結晶の発達～方向の改良ということをはかつているということです。それで普通の鑄型に鑄造した場合は、そういつたようなたとえば結晶構造を変えるということは非常にむずかしいだろう。しかし、この場合にはさつきいつたような条件を変えることによつて、molten poolの大きさとか、それからさらにスラッグのパスの大きさを変えることによつて冷却の速度を調節し、結晶構造を変えることができる。で、その最高の条件をみつかること

も可能だと思う。まあ、それについてまだベラーといえどもデータが蓄積しているわけじゃないけれども、ともかくもそういったような結果からすればかなり期待ができるんじゃないかと思つています。

司会：それから、もうひとつ、おたくのご質問で、今まで DC と AC の問題はずいぶん出ているのですけれども、それが品質に及ぼす影響というような点で、データをお待ちかどうかわかりませんが、ちよつと確かめてもらおうじゃないかというので聞いてみたいと思つています。

BHAT 博士：これについて、いま AC と DC の製品についての実際に比較したデータを自分は持つております。

AC と DC を比べた場合に、AC のほうが介在物も非常に小さいし少ない。そのほかに最初の投資・設備費が少なく済む。しかし、AC に対して DC のメリットといえますと、電極と鑄型の断面積の比というものが DC のほうが大きくできるといったような利点と申しますか、そういう点は DC の特徴です。AC の場合にはとくに酸化物系介在物については大体、十分の一ぐらいに減つてしまう。また、大きな鋼塊においては AC のほうが窒化物の介在物が少なくなる。で、そういうことで AC のほうがベターだということでもある。で、DC について極性がひとつ問題になるわけですが、レバースの電極を正にした場合には溶解速度は非常に速くなります。しかし非常によごれがひどくて品質的には非常にマイナスになる。で、DC ストレート、すなわち電極を負にした場合には、溶解速度は非常に下がってくる。しかし、品質的には非常によい。AC はちよつどその中間というふうなことになるのでありますがともかくそういったような点で DC のレバースは溶解速度が早いけれども、品質が下がってしまう。DC のストレートの場合には品質のほうはいいけれども、溶解速度が下がり、経済的でない。そういったような点から、AC が推奨されるとういうことです。

司会：あとはまだありますけど、もし時間があつたらご質問していただくことにしまして、特殊製鋼さんのいろんなご質問の中で、フラックスについての問題があるんですけど、これはいろいろすでに出ておるんですけど、一応、非常に問題がある点ですから、特殊製鋼さんから聞いていただけませんか。

特殊製鋼：スラッグのリターン使用ということについてどういうふうにご考慮されるのか、それから、スラッグの使用済みのものについての利用方法について、どういうふうにご考慮されるのか。

BHAT 博士：だいたい、1つのスラッグは3回までは繰り返して使えます。しかし、そう使つていきますと、中の酸化物がふえてくるということで、これはそのままでは使えなくなる。このスラッグを還元・脱酸、すなわち

アルミニウムの粉をその中へ放り込むことによって還元するのでありますが、そうすればもう一回使える。しかし、そうして使つてしまつたものは、もうつくりかえさないのであります。一般に繰り返し使用については新しいものを 65% 配合し、35% の古くなつたものを加えて、繰り返し使用しております。すなわち、新しいのだけでなく、必ず 35% 古いのを加えるということです。もしも、いまいつたようなことをしない場合には、新しいのだけを使おうとした場合がありますね。古いものを使わない場合には、その場合には 3回やつてやめる。それはもう使わないということです。しかし、還元した場合にはもう 1回使う。それはもうそれで捨てちやうということ。何回使えるかといわれれば、新しいのからスタートして 3回までだと考えます。それ以上は酸化物がふえちやう。これはインゴットの高さに非常に影響しますが、いまの 3回は私のところで高さが 1メートルちよつとですから、それを頭に入れて、その程度だと考えます。

特殊製鋼：低合金と高合金とかいう、そういう区別はありませんか。

BHAT 博士：さつきお話ししたように超合金の場合には普通の CaF_2 と Al_2O_3 に CaO を加え、それと MgO がはいつておりましたですね。で、そういうのと、それからマルエージングのほうは CaF_2 と Al_2O_3 だけなんですけれどもこれは自分の経験であらう配合をつくつたのです。

特殊製鋼：繰り返し使用に対する考え方としては同じだということですね。

BHAT 博士：これは同じです。

司会：問題があろうかと思つていますが、またあとから詳しくじかに話す機会をつくりたいと思つていますが、三菱製鋼さんから、ずいぶん盛りだくさんにいろいろあるんですけども……われわれのほうでは、電極の電極の電気回路だとか、それから電源、この問題なんかもう一度確かめておきたいと思つたんですが、これらのうち、ひとつ三菱製鋼さんから聞いておきたいというものがあれば……

三菱製鋼：歩どまりが非常に改善されておりますが、鋼塊のほんとの数値を聞きたいんですが……

BHAT 博士：どんな種類の鋼についてですか。

三菱製鋼：低合金鋼ぐらいです。

BHAT 博士：ちよつと何か具体的なものがないと非常にむずかしいのです。6% とか 8% とか、とにかく非常によくなるのですけど、どんな鋼材でどういふものを基準としての話か具体的でないとしよつと……

三菱製鋼：VAR に比べてですね。

BHAT 博士：たとえば、1つの例でいいますと、VAR というのが、すでに普通ののに比べるとよくなつている。たとえば、それが 82% ぐらいになつたとするこれを

ESR にした場合には 91% とか 92% とか、そういうふうなことになるのです。大ざっぱな話でいえばそういうことになる。

とくに、いまのホット・チャージ・スタートで溶融・スラグを装入して、ホット・スタートをした場合はもちろん非常に改善されるし、もう一つ重要な歩どまりの改善はホット・トップですね。ホット・トップを十分にやらない場合は損失が多くなるし、ホット・トップを十分にやつた場合には、非常に歩どまりは改善される。それから、モルトン・スタートでした場合は 95% とか 96% とかいう歩どまりのものがある。

司会：三菱さん、よろしいですか。

三菱製鋼：鑄型を回転するというお話がありますが、どういう目的でされるのですか。

BHAT 博士：フェース・スターリングというケロログ・プロセスを開発している会社が鑄型を回転するのをやつた。私のところではなく、スターリングでケロログのホプキンスのほうをずっとやつてきてそういう鑄型を動かす設備をやつたということですよ。

三菱製鋼：そういうのは鋼塊の対称性が問題になるわけですから、そういう目的じゃないわけですか。

BHAT 博士：そういうことじゃないと思います。鑄型を回転するやつは、抜きやすいからだと思うのです。いまは回転していないと思います。回転できない構造にみんななつております。それから、攪拌作用と磁場をかけたまして動かすやつを一時、ずいぶんやつたようです。しかしこれも現在はどこもやつていないようです。

司会：あと、大同さん、いかがですか。

大同製鋼：電極昇降調整装置について……

BHAT 博士：いま、それについて、一番の問題は電極を上下さすかどうかということです。さつき、ちよつとふれましたけれども、いままでの ESR だと上下でコントロールしたのですけれども、現在、世界中全部そうだと思いますけれども、下降一方で制御するという式で、メロン研究所のものもそうなつております。ですから VAR みたいなコントロールではありません。

司会：どうぞ、あといろいろ問題やご質問があたりだと思いますから、まだ時間が少しありますから……

[A]：スライドのあつた、マルエージ鋼のデータで縦横の性質に差がないということですが、VAR に比較してどうかということと、介在物との関係について

BHAT 博士：VAR の場合に縦方向と横方向の差が少ないという鋼塊をつくることは非常にむずかしいのではないかと思います。それで、自分のほうは普通の大気溶製した鋼塊を電極に使つて ESR で溶かしてみただけでもやはりその差は少ない。VAR の場合はその差を縮めることは非常にむずかしい。自分は、凝固のパターンを改善するために溶解速度というものの調節に一番力を注いだ。しかし、そういうふうなことが VAR にはでき

ないんじゃないか。

[A]：溶解速度を制御することによって介在物が非常に小さくなるということになると凝固のパターンと両方のパターンになつてきますね。このどちら側でしょうか。

BHAT 博士：両方とも影響してくるんじゃないか。これについては、まだ相当議論はあるようで、どんな大きさの介在物が影響しているのかなどについては学校あたりの研究がいます。

司会：何かほかに……

[B]：再溶解中のアロイングができれば非常に有用だと思えますが、そういう研究をされているかどうか、それから現状はどういうふうになつている……

BHAT 博士：全部を入れる場合ですか。調整だけですか。

[B]：なんでもいいのですが……

BHAT 博士：自分はそれは可能性はあると思う。最初のマルエージングをつくる時、初めに電極は鋼で、あとからそういつた合金元素をモルトン・フラックスの上に乗つけた。しかし、実際の品物をつくる時には合金インゴットにしている。がアロイ添加の可能性はある。しかし損失はずいぶん多くなりますね、放り込みますよ。ですから、正確に押えることは非常にむずかしいのです。

それから、ついでですが、電極の酸化を防ぐために非常に努力を払つています。これはやはりキーポイントです。酸化性の元素の損失を少なくするために……

[C]：電極交換とモールド材質について……

BHAT 博士：私の意見は、電極は交換しない方法をすすめます。大きい鋼塊にする場合には電極の数をふやしてそしてさらに長くする。あくまで切らないでそのまま鑄込んでいます。これはソビエトもその意見なんです。交換する方法は他の研究者が行なつています。

鑄型については、つくろうとする鋼塊の品質に非常に影響します。鋼塊の中に介在物が多少巻きこんでもいいのだというような、それからそれがふえることにあまり関心ないというものについては、これは銅みたいな高いものを使わないで、鉄で十分間に合う。しかし、材質的に非常にうるさくいうものについては、やはり銅でないとうまくいかない。その判断はつくろうとする鋼塊によります。それから、形をつくるという側からいえば、鋼で全然問題ない。できるだけ低炭素の軟鋼が材質として望ましい。

司会：ほかにございましたら、……どうぞ

[D]：さつきスラグで3回まで繰り返し使用とつてその理由として酸化物がふえるといいましたがその酸化物はどの酸化物、たとえば SiO_2 とか、その場合に SiO_2 のようなものであれば、そういうのがスラグの中に何%ぐらいまでが限度でしょうか。

BHAT 博士: SiO_2 は非常に少ない。大体 FeO でそれをアルミニウムで還元しているのです。ついでに脱磷のことで、特殊なスラグをやれば脱磷の可能性はあると思うが非常にむずかしい。

司会: それから、さつき VAR がアメリカでは非常にたくさんセットしてあるから、それが ESR の普及に非常に抵抗になっているんだというような話があったんですが、それについてもう少し詳しく……。

BHAT 博士: 現在の VAR を利用して ESR をやろうとするのは無理なのです。従来の VAR の設備を全部どけてくれないと ESR はやれない。たとえば電極も上下の調整は不要だし電気設備は全くいらぬ。米国でもいろいろ研究しているが、やはり VAR の設備では ESR はうまくゆかないというのが私の考えです。

大同製鋼: チタン合金関係で、チタンの歩どまりがどの程度なのか、あるいはその歩どまりを仕上げるために、不活性ガスその他を使っていると思うのですが、その原単位などについて、ちよつとお聞きしたいのですが……。

BHAT 博士: 歩どまりは普通の VAR に比べれば、大いに改善されますが、また、アルゴンを使っているけれどもそのコストに対する影響は微々たるものです。全体の 1% か、コンマ何% です。アルゴンの使い方として、まず炉内の空気を完全に真空にして抜きます。その後アルゴンを入れます。そうすれば、溶解損失はほとんどない。

なお、特殊のゴムパッキングを使つて完全に仕切つております。酸素を残しながら、ガスを入れるようなことでは困ります。完全にガスをパーキングすることが必要です。アルゴンのピュアリティは非常に大切です。それでも、アルゴンのコストは問題になりません。

日本製鋼: 鋼塊径と電極径の比が大きくなつた場合にはどのような問題が生ずるでしょうか。

BHAT 博士: 溶解温度が下がつて、とくにアークの下の温度が下がつて、これが非常に鋼塊に悪いわけで、鋼塊の電極を大きくしすぎることはいけません。大体 35% から 45% くらいです。

日本製鋼: 溶解の速度を調節するのは、電流だけでやつていいのですか。

BHAT 博士: 原則的にそうです。しかし、これはフラ

ックスの性質の影響を非常に強く受けるので、フラックスが一定の場合はそうだけれども、フラックスが変われば当然これは非常に大きく変わる。もしも溶解途中でフラックスの組成が変われば当然溶解速度に影響する。

だから、溶解の途中にフラックスの組成が変わらないように、細心の注意が必要なわけです。なお、電流密度の制御は、ホット・トップのときは別ですけれども、あとはもう完全に電流だけ、5000A なら 5000A に押えてやつております。それでも、フラックスの抵抗や、何か変われば、これは溶解速度に影響します。

住友金属: 電極の前処理について……。

BHAT 博士: 本日、配布した資料は全部真空処理してあります。真空処理したものを、ESR したのです。溶解するものによってはこれは絶対必要です。真空の前処理をした電極をもう一回 ESR 溶解するのです。バキュームの方向は DH とか RH でなく真空誘導溶解でないためです、これは真空で処理したものをさらに、改善するのに ESR しているので三重溶解にもなるわけです。

[E]: 先ほどの質問としてちよつと重複するのですが、40 トンもの大きい鋼塊を単相で溶解する場合、電極の数を多くしなければいけないのか、たくさんの電極をどんなふうに応用していくのでしょうか。束になつた電極を使うのでしょうか。

BHAT 博士: これはさつきいつたとおりで、50 トンの束の電極を使います。ただしベラーは現在 40 トン、50 トンをつくつておりますけれども、これは電極を次から次へ、1 つは 3 トンか 4 トンだと思いますけれども 40 トンの場合は 10 本か 15 本供給する。私とソビエトは束にして 1 本の電極でやるのです。

三菱製鋼: ベラーで補助電極を使うというのですね。交流の電源で補助電極を直流で使うという考え方、これに対してどういうふうに考えておられますか。

BHAT 博士: これは現在、やつておりませんので、まあ問題にされなくてもいいと思う。これは変圧器にも非常に問題がありますし、その必要はないようです。

進行: では、ご熱心なご討議、どうもありがとうございました。それでは、時間も定刻を 30 分超過しましたので、これで本日の講演会、討論会を終了したいと思います。