電子ビーム溶解によるフローティング・ゾーン精製

吉 田 進*・田 村 良 雄*

(昭和36年10月4日受理)

Floating Zone Refining by Electron Beam Melting

Susumu YOSHIDA and Yoshio TAMURA

(National Research Institute for Metals)

1. ま え が き

偏析現象を利用する物理的精製法としてゾーン精製法は今日の半導体工業の発達の基礎となっている。

この方法によってはじめて、現在用いられているような超高純度の Si, Ge がえられるようになった。特に Si に対してはルツボからの汚染を避けるために、棒状の試料を垂直に支持して、熔融体の表面張力によって熔融帯を支えて精製を行なういわゆるフローティング・ゾーン精製 (floating zone refining) が一般に行われている。ゾーン精製法は将来は半導体材料以外の各種の金属材料にも工業的に応用されることが予想されるが、特に熔融状態ではルツボも反応しやすい高融点の reactive な金属については、フローティング・ゾーン法の採用が不可欠である。

一方、最近高真空中で電子ビームを用いて金属の溶解を行なう電子ビーム溶解法が発達して来た。これはよく知られているように、高真空中で高電圧で加速された電子ビームを試料にあてて、その時発生する熱によって溶解を行なう方法である。フローティング・ゾーン精製の場合の加熱方法としては、従来は高周波誘導による加熱が用いられる場合が多かったが、電子ビームによる加熱が更に多くの長所を持っていることが予想される。フローティング・ゾーン精製に電子ビーム加熱を応用することは、イギリスの Calverley らが実際にはじめて試みて成功し1956年に発表している¹⁾。その後次第に装置も改良され、金属、合金やその他の材料に応用する可能性が明らかにされつつあって将来の発展が予想されている。

2. 方法と装置

2.1 原 理

方法の原理は第1図に示す通りである。電子源となる

第1図 電子ビーム溶解によるフローティング・ゾーン精製法の原理

陰極には普通タングステンの線が用いられ、これが電流によって加熱される。陽極は試料そのものが用いられることが多く、陰極から放射された熱電子は、陰極と陽極との間の直流高電圧によって加速され、集束用の板によって集束されて陽極に衝突する。全体が高真空の容器中に入れられ、試料又は陰極系を上下方向に移動させることにより、熔融帯が移動しゾーン精製が行なわれる。

このような電極系の電気的特性は簡単な2極管のそれに相当する。すなわち電極の間隔に対して電圧が十分大きければ、陰極から発生する熱電子はすべて電子電流として陽極へ動き、いわゆる飽和熱電子電流 I_0 がえられる。 I_0 の値はよく知られているように Richardson-Dushman の式により以下のように定められる。

$$I_0 = AT^2 \exp \left(-\frac{\phi}{kT} \right) \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 T は絶対温度、 k はボルツマン定数、 ϕ は仕事函数、 A は定数である。電圧が比較的に小さい時は、空間電荷により電流が制限され、電子電流 I はラングミ

* 金属材料技術研究所 (東京都目黒区中目黒)

ューアの式（ここに K はパーヴィアンス、 V は電圧）

$$I = KV^{3/2} \dots \dots \dots (2)$$

に従い V により変化する。後に述べるように、電子電流の制御の点から、フローティング・ゾーン精製の場合は飽和電流の状態で使用される場合が大部分である。

ゾーン精製の原理や方法の細かい点については、良く知られているし、また文献²⁾も多いのでここでは省略する。

2.2 この方法の利点と欠点

電子ビーム溶溶解によるフローティング・ゾーン精製の利点としては次のような諸点がある。

- (1) 熱効率がよく、熱を集中出来る。従ってW, Moなどの高融点金属の溶解が容易であり、また狭いゾーンを作る可能性がある。
- (2) 電力の調整が簡単に出来る。
- (3) 高真空中で溶解を行なうため、本来のゾーン精製の効果の他に、不純物の分解、揮発による精製効果が発揮される。

第2図 Carlson の装置⁽³⁾

第3図 Calverley らの装置⁽⁴⁾

欠点としては次の諸点が考えられる。

- (1) 陰極のフィラメントからの汚染がおこりうる。
- (2) 融点において蒸気圧の高い金属では蒸発による損失が大きく、また金属蒸気、飛沫がフィラメントに附着してその寿命を短かくする。

2.3 装置の構成

以下装置をその各構成部分に従って説明する。

2.3.1 溶解室

最初の実験室的な装置には、バイレックス硝子製のベルジャー管が用いられたが、溶解室の容量が大きくなるにつれ金属製になっている。第2図はベルジャーを用いた Carlson の装置で、第3図は軽合金製の Calverley の装置である。

2.3.2 真空排気系

溶解室の真空度は電子ビーム溶解を安定に行なうためには、作業状態で少なくとも 10^{-4} mmHg 以上であることを必要とする。ガス不純物の多い試料も取り扱いうるためには、排気速度は出来るだけ大きい方がよく、また反応性の高い試料に対しては真空度はさらに高いことが望ましい。

排気装置としては油拡散ポンプとコールドトラップの併用が普通であるが、Calverley らは油の分解による試料の炭素による汚染をさけるため水銀拡散ポンプを使用したこともある⁽⁵⁾。現在発表されている装置の多くは、ブランクの状態に到達真空度 10^{-6} mmHg 台、作業状態で 10^{-5} mmHg 台の真空度を確保している。Witzke⁽⁶⁾は、Tiゲッターを使用する Evapor-ion ポンプを使用して、Wのゾーン精製で作業状態で 10^{-6} mmHg 台の真空度をえ、好結果をえた（第4図）。この場合はイオンポンプの作

第4図 Witzke の装置⁽⁶⁾

(a) タングステン線を用いたもの
(b) タングステンリボンを用いたもの

第5図 陰極

第6図 タングステン線の陰極⁷⁾

第7図 筆者の使用している陰極系

動状態では、油拡散ポンプとの連絡を遮断し、回転ポンプを停止することが出来るので、油による汚染や振動による悪影響が完全に除かれる。将来はこのようなイオンポンプの使用による真空度の向上が一般的になるものと予想される。

2.3.3 陰極系

陰極としては径 0.2~0.5mm のタングステン線、または厚さ 0.02~0.05mm のタングステンリボンをループ

状にしたものが使用される(第5図)。リボンは線に比し、加熱による変形は少ないが、側面から熔融部分を観察しにくくする欠点がある。ループのまき方は第5図の方式は加熱した際短絡することが多いので第6図のようなやり方がよい。

Belk⁷⁾ は試料から蒸発する金属がタングステン線に附着してこれを損なうのを出来るだけ防ぐために、0.7mmφの線を予め加熱してロールし、厚さ0.3mmの扁平な形にして使用した(第6図)。これによって熔融帯に面するタングステン線の面積が小さくなり、陰極の寿命が伸びたということである。

試料に熱電子を集中するため、フィラメントを上下に挟んで2枚の集束板が用いられる。材料としては Mo, Ta が使われる。普通これは陰極と同電位におかれるが、負のバイアス電圧を加えている例もある。第7図は筆者の使用している装置の陰極である。集束板は 0.5mm厚の Mo板で、絶縁体にはすべてジルコニアを使用している。

2.3.4 試料支持装置

試料を上下で支持するチャックの材質は耐熱性と電気伝導性が良好であることを要する。Mo が用いられることが多い。第8図は Calverley⁴⁾ に用いられているチャックである。タングステンのパネで試料をおさえ、熱による試料の伸縮に対し調整出来るようになっている。石英の絶縁物は試料を高電位にする場合も予想して用いられている。Moの遮蔽は絶縁物に金属が蒸着するのを防ぐ。

試料の長さの違いや、上下別々の試料をつき合せて溶解を始める場合に備えて、上下のチャックは各々軸方向の移動が可能にしておいた方がよい。またゾーンの場所がくびれた時や切れた場合にそなえ、場合によっては溶

第8図 試料チャック⁴⁾

解中にゾーンの形や長さを調整出来るために、一方のチャックは上下に微動調整出来ることが望ましく、Calverley⁴⁾や著者の装置はこの点が考慮されている。また著者の装置では下部のチャックは回転出来るようになっていて、これによって完全にゾーンが形成されたかどうかを判定したり、溶けたゾーンの回転を行なうことが出来る。第9図は著者の装置の概略と陰極系及び試料部の写真である。

第9図(a) 筆者の装置

第9図(b) 筆者の装置の陰極系及び試料部

a: 試料、b: チャック、c: 遮蔽板、d: 高圧電線

2.3.5 駆動装置

溶融帯を上又は下の方向に移動させるための装置であるが、これには試料を動かす方式と陰極系を動かす方式とが考えられる。事実両方の例がみられるが、前者は限られた容積の溶解室で精製出来る試料の長さが後者に比し短かく、また試料に振動を与える恐れがあるので、後者の方式が多く採用されている。移動速度の各実験者の例は第1表に示されている。筆者の装置では $0 \sim 4 \text{ mm/min}$ の範囲で可変でさらに 180 mm/min の早送りが可能である。

駆動軸を高真空容器内へ導入する部分にはウィルソンシールが用いられる。

2.3.6 電源および電子電流安定回路

電源としては陰極フィラメント加熱用の低電圧交流電源と、直流高電圧を発生させる高圧整流電源が必要である。それらの容量は各実験者のデータが第1表に示されている。また各種の金属のゾーン精製の際に実際消費される電力の実例は第2表に示されている。

電子ビーム溶解を行なうとき、最も問題になるのは電子電流の安定性である。すなわち溶解の際に試料から放出されるガスはイオン化して陰極にぶつかり陰極の温度を上げて電子電流を増加させる。これを放置するとアーク放電にまで発達して溶解は不可能となる。このような電子電流の増加は急激におこるから、手動によって調整することは出来ず是非とも自動的な安定回路が必要である。

電子電流の安定回路としては、

- (1) 陰極の温度を調整してそのエミッションを一定に

第2表 電子ビームフローティング・ゾーン精製の消費電力

材料	実験者	試料の直径 (mm)	消費電力(W)
W	Calverley	4.5	400
	Witzke	3.1	595
	Schadler	3.1	590
	材技研	3	900~1.1K
Mo	Belk	6.4	770
	材技研	3	390
	Buehler*	9.5	6 K
Ta	Lawley	3.1	325
V	Calverley	6	120
Si	材技研	5~10	280~300
Fe	Calverley	6.5	130
	材技研	5	140

(* は高周波加熱)

第1表 移動速度の実験者例

実験者および文献番号	材料の種類と大きさ	溶解室 (容量と材質)	真空度 (到達真空度と作動状態の真空度)	排気速度 (ポンプの種類)	電源容量 (高圧電源とフィラメント熱電源)	ゾーン移動速度および移動距離
A. Calverley ^{1), 3)} M. Davis R. F. Lever	W, Mo, Ta, V, Re, Si, Fe Ni, Cu, Ti 2~10mmφ×160mm	6"φ×20" バイレックガラス	(到) 3×10 ⁻⁶ mmHg (作) 2×10 ⁻⁵ ~4×10 ⁻⁶ mmHg	20l/sec (2"水銀拡散ポンプ)	2.5kV, 500mA 14V, 10A	1.25 cm/min 2.25 cm/min
F. E. Birbeck ^{4), 14)} A. Calverley	同L, およびTa-Nb, ×220mm, Taで最小 0.06"φ	Al-Mg 合金	(到) 10 ⁻⁷ mmHg 台 (作) 10 ⁻⁶ mmHg 台	150l/sec (油拡散ポンプ)	10kV, 500mA 6V, 40A	0~350cm/hr 22cm以上
J. A. Belk ⁷⁾	Mo(¹ / ₄ , ³ / ₈ , ¹ / ₂ "φ), Mo-W	銅	(到) 10 ⁻⁷ mmHg	(水銀拡散ポンプ)		3 mm/min
R. G. Carlson ⁸⁾	W (¹ / ₈ "φ)	10 ¹ / ₂ "φ×14" バイレックガラス		(油拡散ポンプ MCF-60 CEC, 回転ポンプ Kinney-KC2)	5kV, 300mA	0.3~4 cm/min W...0.5cm/min
J. W. Pugh ¹³⁾	W (0.12"φ), Mo, Ta, Pt	ガラスベールジャー	(作) 5×10 ⁻⁵ mmHg	100l/sec	5 kV, 300mA	0.1~100mm/min
H. W. Schadler ¹²⁾	W (¹ / ₈ "φ)	黄銅	(作) 10 ⁻⁴ mmHg		4 kV, 1 A	0.25~12.5mm/min
G. A. Geach ¹⁸⁾ F. O. Jones	W, Mo, Re, Ta, Ni Mo-Re (³ / ₃₂ φ), 0.3~0.4"φ×8"	ステンレス鋼	(到) 1×10 ⁻⁵ mmHg		3 kV	7.5cm/min 1.25cm/min
W. P. Alfred ¹⁶⁾ R. C. Himes H. L. Goering	Pt, Rh, Pd...0.15"φ×10" Ru ¹ / ₈ "φ×8"					
J. L. Orehtsky ¹¹⁾ A. J. Opinsky	W ¹ / ₈ "φ×15"	10"φ×2 ft バイレック管	(到) 10 ⁻⁵ mmHg	(4"油拡散ポンプ)	2.5 kV, 300mA	1.25×50mm min
W. R. Witzke ⁶⁾	W ¹ / ₈ "φ, ³ / ₁₆ "φ	10"φ×24" 銅	(作) 1~5×10 ⁻⁶ mmHg	(Evapor-ion ポンプ)	5kV, 500mA 25V, 25A	2.5mm/min
A. Lawley ¹⁹⁾	Mo-Re (0.085"φ) Ta(0.125"φ), Mo(0.15"φ)	12"φ×12" バイレックガラス	(到) 3×10 ⁻⁵ mmHg	200l/sec (4"油拡散ポンプ)		0~5 mm/min 7 ¹ / ₂ "
材技研	Fe, Si, Mo, W 3~10mmφ×200mm	350mmφ×250mm 軟銅	(到) 3×10 ⁻⁶ mmHg (作) 1×10 ⁻⁵ mmHg	400l/sec (4"油拡散ポンプ)	10kV, 400mA 15V, 25A	0~4 mm/min 180mm/min 200mm以上
E. Buehler ²⁰⁾ (高周波加熱方式)	Mo (¹ / ₄ , ³ / ₈ "φ), Nb (³ / ₈ "φ) W (¹ / ₈ "φ, ³ / ₈ "φ)	ガラスベールジャー	(到) 1×10 ⁻⁶ mmHg	600l/sec (6"油拡散ポンプ)	2~6 MC 高周波	1.5mm/min 0.75mm/min

試料

水冷支持台

陽極

集束電極

陽極

陰極リボン

保つ方法と、

(1)は2.1の(1)式の示す飽和電流の状態では制御を行なうのであり、(2)は(2)式の状態では制御を行なうわけである。(2)の方式だと、制御のために必然的に電圧が変動するから、一定の電子電流でも電力は一定にならない欠点がある。しかし制御の動作が速いという点では(1)の方式よりもすぐれている。実際は(1)の陰極温度調整の方式が多く用いられている。

制御装置としては、

(b) 磁気増幅器を用いる。

ものがあげられる⁸⁾。著者の装置は(b)の方式をとっている。Calverley⁵⁾はサイラトロン回路を用い(d)の方式をとっている(第10図)。

2.4 陰極および陽極系の改良

これまで述べた装置は試料そのものが陽極になっているので、陽極が絶縁体である場合は、たまたま電荷の逃げ場所がないので具合が悪い。Calverley¹⁾はアルミナの溶解を行なう際、試料の表面に鉛筆の跡をつけその電導性を利用して一応ゾーン溶解に成功している。Strnad²⁾は積極的に試料とは別個に陽極を附加して、試料と陽極を切りはなした装置で絶縁体のゾーン精製を試みた。彼の装置の加熱部分を第11図に示す。

従来の陰極系は上に述べた欠点の他に種々の欠点をもっている。これについては既に 2.2 であげた点の他に、試料の蒸発およびガス放出のため電子電流が不安定となりアーク放電を起し易く、従って加えられる高電圧に限度がある点があげられる。このため電力をさらに上げるには電子電流を増加する必要がある、電子電流が増加するときは電子線の集束が十分に行えないから狭いゾーンがえられなくなる。いいかえれば試料面の単位面積あたりの電力は制限されてしまう。

(第5卷 第1号)

— (13) —

13

第12図 電子銃型のゾーン精製装置¹⁰⁾

- (1) 電子電流は余り増加せずに加速電圧を上げることが出来るから、電子束を細く絞ることが出来て、単位面積あたりの入力が増え、試料の深部まで加熱出来る。すなわち径の大きな試料で狭いゾーンを作ることが出来る。
- (2) 試料と電子銃との距離が大きいから、試料からの大量のガス放出や蒸発も許容出来、フィラメントの損傷が少ない。電子銃の部分を独立に排気すれば放電による暴走は殆んど完全にさけられるであろう。
- (3) 磁気レンズの使用により加熱部分のフォーカシングや位置調整は極めて容易となる。
- (4) 磁気的な電子束の偏向によって、ゾーンの移動を機械的に行なわず電気的に行なう可能性がある。

このような電子銃を用いる方式は、単純な電子ビーム溶解炉では既に大々的に取入れられて工業的に成功しているやり方であるから、フローティング・ゾーン精製の場合も将来はこの方式が最も有力なものとなることが予想される。

3. 結果

この方法を用いてゾーン溶解を行なった材料の実例については第1表にまとめて示してあるが、以下個々の場合について少し立入って述べよう。

3.1 W, Mo, Re

Calverley¹⁾らは最初 W, Mo, Re などについてゾーン溶解に成功し、1回のパスでこれらは単結晶になること

第13図 ゾーン精製されたW中のMoの分布
(ゾーンのパス5回)⁽⁵⁾

第14図 ゾーン精製されたW中のOの分布
(ゾーンのパス1回)⁽⁶⁾

を述べている。特にW, Moについては予め念入りのガス脱が必要で、ガス放出による金属の飛沫でフィラメントをこわすことが多いといっている。

その後、Wは多くの研究者によって試みられている。Carlson³⁾の用いた原材料は純度がよく、Mo以外の不純物はすべて10ppm以下で分光分析では認められなかったためMoのみについて精製効果を半定量的な分光分析で示している。原材料は10ppmのオーダーのMoを含んでいるがこの分光分析の相対強度を10として第13図の如き結果をえた。図にみられるように確かに精製効果はあるがこれはzone refiningによるというよりはdistillationによるものと考えられる。なおMoのW中の偏析係数は0.8~0.9程度とされている。Witzke⁶⁾は余り純度の高くない原材料を用いて、1回のパスで、Oは140ppmから4ppmへ、Moは80ppmから30ppm以下へ、Feは40ppmから10ppm以下へなったといっている。純度の高い原材料についてはOのみについて真空溶解分析を行い、第14図の結果をえた。図にみられるように原材料では3~4ppmあったOが試料の大部分で1.3~1.5ppmに減少した。この場合も精製効果は大部分distillationによると思われる。Orehotzky¹¹⁾はMoについてはCarlsonと同様な結果をえており、Cについては原材料の80ppmから溶解開始端において30ppmへ下ったと述べている。

Schdler¹²⁾の分析結果は第3表に示すようなもので、

第3表 W中の不純物元素のゾーン精製による変化¹²⁾
(重量%)

元 素	原 材 料	ゾーン精製後
Ca	0.001	N. D.
K	0.004	〃
Na	0.002	〃
Fe	0.001	〃
Mo	0.004	0.0001
Si	0.002	N. D.
C	0.007	0.002
O	0.0003	0.0001

(N. D. は検出されぬもので0.0001%以下)

第4表 ゾーン精製されたW棒の軸方向の比抵抗変化¹²⁾

ゾーン溶解開始端 よりの距離 (cm)	$P_{199.5^{\circ}\text{K}} / P_{4.2^{\circ}\text{K}}$
0	4300
0.6	5400
1.1	5200
3.1	3500
5.6	2800
8.2	2600
原 材 料	80

ゾーン精製後も相当量残留する不純物は Mo, C, O などである。Schadler は低温における残留電気抵抗を測定して総合的な純度を推定しているが、その結果は第4表に示す。この結果から、精製効果は zone 精製によるものと distillation によるものとが共に有効に働いていることがわかる。

ゾーン溶解を行なったWは単結晶になっていて、その機械的性質をしらべると延性の増加が著しい。Pugh¹³⁾ の常温における引張試験の結果によると、軸方向が [111] 又は [110] 方向の試料は100%の断面収縮率を示すが [100] 方向の試料は断面収縮率は0で(100)面で劈開破断する。しかし、いずれの場合も15~25%の伸び値がえられた。後はまた純度の低い試料について歪み焼鈍法で単結晶を作り引張試験を行なったところ、多結晶状態にくらべれば確かに延性は増すが伸び値は僅か2%であることを認めた。すなわちゾーン溶解による延性増加は単に単結晶になったためではなく、明らかに純度の向上によるものである。Witzke も常温で同程度の延性を認めたが、同じ材料を加工、再結晶させて多結晶状態で引張試験したとこと全く脆性であった。しかしこれは試料の加工の際に不純物が再び入ったためかも知れない。

Belk⁷⁾ は Mo について実験している。蒸発によるロス

第15図 ゾーン精製した Mo のシャルピー衝撃値
(数値は C の量を%でしめす) ⁷⁾

は相当大きく 6mmφ のもので13% 失われた。えられるものは単結晶でその軸の方位は一定ではないが、ステレオ投影図ですべて [001], [101], [112] のかこむ3角形の中に入るという特徴がある。C の分析の結果、約100ppm のCを含む原料から出発し、最も不純物の少ないゾーンの開始端で約10ppm、全体の大部分で20~30ppmまで精製され、明らかにゾーン精製の効果を示す。常温で引張試験を行なった結果、これはCの量に明らかな影響を受けCの量10ppmでは歪一応力曲線は滑らかであるが、40ppmになると明瞭な降伏点が出てくる。低温のシャルピー衝撃試験の結果、脆性-延性転移点は第15図の示すようにCの量と共に上昇し、Cの量が10ppmで-180°C、20ppmで-140°C、80ppmで-40°Cを示した。このような実験によって、単結晶状態のMoは純度の高い状態では低温でも延性にとむが、不純物のCによって歪速度に敏感となる。また高純度の単結晶でも切欠や表面状態によってその延性は鋭敏に影響されることがわかった。

3.2 V, Nb, Ta

Calverley⁵⁾¹⁴⁾ らはこれらの金属のゾーン溶解に成功している。これらはいずれも単結晶になり、硬度は低下するVは蒸発が甚しく30%のロスがある。Ta-Nb (50~50%) 合金はゾーン溶解出来るが、Ta-V合金はVが蒸発してしまうので具合が悪い。

3.3 白金属

Rhys¹⁵⁾ は Pt, Rh, Ru, Ir, Os についてゾーン溶解を行なった。Rh はガス放出が大きいが、他は比較的少なく、すぐ安定なゾーンがえられた。

Allred¹⁶⁾ らは Pt, Rh, Ru, Pd について実験した。Pt, Rh につき1.3mm/minの速度でゾーンを動かした結果、Cu が両方で減少し、Ca が Rh だけで減少することが判った。しかし偏析はみとめられず、これらは distillation で減少するものと考えられる。Ru の場合ゾーン移動速度を0.2mm/minとしたところ、各種の金属不純物について明らかにゾーン精製の効果が認められ

た。以上の3元素についてガス分析の結果、OおよびHは著しく減少していることが判ったが、これは恐らく揮発によるものと思われる。Pdもゾーン溶解は出来るが蒸気圧が高いのが問題である。

3.4 酸化物、炭化物

Strnad⁹⁾は2.4で述べた装置で Al_2O_3 についてゾーン溶解を試みた。一応可能であるが、これらの試料は透明であるため加熱能率が悪く大きな電力を必要とする。蒸発が激しく溶解中にゾーンの部分はくびれて細くなる。蒸発したアルミナは陽極やフィラメントに附着し実験を困難にする。ルビーを溶解するとゾーン溶解した部分は色が失せて無色となる。これは偏折か揮発かいずれかの原因によってCrが除かれたことを示している。

Jones¹⁷⁾は各種の炭化物について実験した。 TiC 、 W_2C は溶解点以下の温度で分解してしまう。 WC は溶解は出来るがCが揮発して失われる。 TaC も分解してCを失なう。いずれにせよこれらは高真空中で不安定でゾーン溶解は困難であった。

〔文 献〕

- 1) M. Davis, A. Calverley, and R. F. Lever : *J. Appl. Phys.*, 27, 195 (1956)
- 2) W. G. Pfann : "Zone Melting" John Wiley (New York), 1958.
- 3) R. G. Carlson : *J. Electrochem Soc.*, 106, 49 (1959)
- 4) F. E. Birbeck, and A. Calverley : *J. Sci. Instr.*, 36, 460 (1959)
- 5) A. Calverley, M. Daris, and R. F. Lerer : *J. Sci. Instr.* 34, 142 (1957)
- 6) W. R. Witzke : *Proc. First Symposium on Electron Beam Melting, Boston*, 73 (1959) (以下 *Boston Conf.* と略す)
- 7) J. A. Belk : *J. Less-Common Metals*, 1, 50 (1959)
- 8) D. Allenden : *J. Sci. Instr.* 36, 66 (1959)
- 9) A. R. Strnad : *Boston Conf.* 82 (1959)
- 10) N. F. Eaton : *J. Less-Common Metals*, 2, 104 (1960).
- 11) J. L. Orehotsky, and A. J. Opinsky : *Boston Conf.* 44 (1959)
- 12) H. W. Schadler : *Boston Conf.* 51 (1959)
- 13) J. W. Pugh : *Boston Conf.* 89 (1959)
- 14) A. Calverley : "Symposium on Electron Bombardment Floating Zone Melting and Allied Electron Bombardment Techniques", Baldock, England (1959) (以下 *Baldock Conf.* と略す)
- 15) D. W. Rhys : *Baldock Conf.*
- 16) W. P. Allred, R. C. Himes, and H. L. Goering : *Boston Conf.* 38
- 17) F. O. Jones : *Baldock Conf.*
- 18) G. A. Geach, F. O. Jones : *J. Less-Common Metals*, 1, 56 (1959).
- 19) A. Lawley, and R. Maddin : *Baldock Conf.*
- 20) E. Buehler : *Trans. Met. Soc. AIME*, 212, 694 (1958)

合本用ファイルをご利用下さい

ビン1本で簡単に、そして美麗に、1カ年分を合本出来る独特のものです。

書棚を飾るにも、本誌の整理にも、是非必要なファイル。

頒価 1部 150円 送料 40円

お申込み先

東京都中央区日本橋兜町 3の5 (米山ビル)

真 空 協 会 合 本 係

電 話 4 3 2 7 番