

© 1991 ISIJ

技術報告

スポンジチタンの電子ビーム溶解特性

金山 宏志*・草道 龍彦*²・村岡 哲弘*³
尾上 俊雄*²・西村 孝*⁴

Electron Beam Melting of Sponge Titanium

Hiroshi KANAYAMA, Tatsuhiko KUSAMICHI, Tetsuhiro MURAOKA,
Toshio ONOYE and Takashi NISHIMURA

Synopsis:

Fundamental investigations were done on electron beam melting of sponge titanium by using 80 kW electron beam melting furnace. Results obtained are as follows:

(1) To increase the melting yield of titanium in electron beam melting of sponge titanium, it is important to recover splashed metal and to prevent the evaporation of molten metal during melting. It is possible to collect the splashed metal by installation of water-cooled copper wall around the hearth and to decrease the evaporation loss of titanium by keeping the surface temperature of molten metal just above the melting temperature of titanium without local heating.

(2) Specific power consumption of drip melting of pressed sponge titanium bar and hearth melting of sponge titanium are approximately 0.9 kWh/kg-Ti and 0.5~0.7 kWh/kg-Ti respectively.

(3) Ratios of the heat conducted to water-cooled mould in the drip melting and to water-cooled hearth in the hearth melting to the electron beam input power are 50~65% and 60~65% respectively. Overall heat transfer coefficient between molten metal and hearth cooling water is about 0.01~0.03 cal/cm²·s·K.

Key words: electron beam melting; sponge titanium; splashing; evaporation; heat balance; power consumption; heat transfer coefficient.

1. 緒 言

最近、真空アーク再溶解法 (VAR) に代わる Ti の新しい溶解法として、電子ビーム (EB) 溶解法が注目され始めている^{1)~5)}。EB 溶解法は、1) 高真空、高温によるガス成分と微量不純物の蒸発除去が可能、2) ハース溶解による重い介在物の沈降分離が可能¹⁾、3) 電磁氣的制御による熱制御性が良好などの特徴があり、米国では既に大型の EB 溶解炉を用いて、Ti スクラップから直接スラブを工業的に製造している²⁾³⁾。しかし、Ti の溶解原料の大部分を占めるスポンジ Ti の EB 溶解については、スポンジ Ti に含まれる塩化物が溶解時に蒸発し、それが EB ガンや真空排気系に悪影響をおよぼすことなどから、実用化されていない。特に、塩化物蒸気の EB ガン内への侵入による EB 発生部のトラブル

は大きな問題とされていた。しかし、最近では、溶解炉内との間に 1~2 段の差動排気装置を設置し、溶解炉内でのガス発生の影響を極力小さくした EB ガンが開発され⁶⁾⁷⁾、スポンジ Ti の EB 溶解の実用化が期待されている。

ここでは、スポンジ Ti の EB 溶解の問題点を明らかにするために、小型の EB 溶解炉を用いてスポンジ Ti の EB 溶解時の溶解歩留り、蒸発損失、電力消費量、伝熱特性などに関して基礎的な検討を行った結果について報告する。

2. 実 験 方 法

2.1 実験用 EB 溶解炉

本実験に用いた小型 EB 溶解炉の概略図を Fig. 1 に、主な仕様を Table 1 に示す。EB ガンは拡散ポンプ

昭和 63 年 11 月本会講演大会にて発表 平成 2 年 7 月 20 日受付 (Received July 20, 1990)

* (株)神戸製鋼所鉄鋼技術研究所 (Iron & Steel Research Laboratories, Kobe Steel, Ltd., 1-3-18 Wakinohama-cho Chuo-ku Kobe 651)

*² (株)神戸製鋼所材料研究所 (Materials Research Laboratories, Kobe Steel, Ltd.)

*³ (株)神戸製鋼所高砂鋳鍛鋼工場 (Steel Casting & Forging Plant, Takasago, Kobe Steel, Ltd.)

*⁴ (株)神戸製鋼所鉄鋼技術研究所 工博 (Iron & Steel Research Laboratories, Kobe Steel, Ltd.)

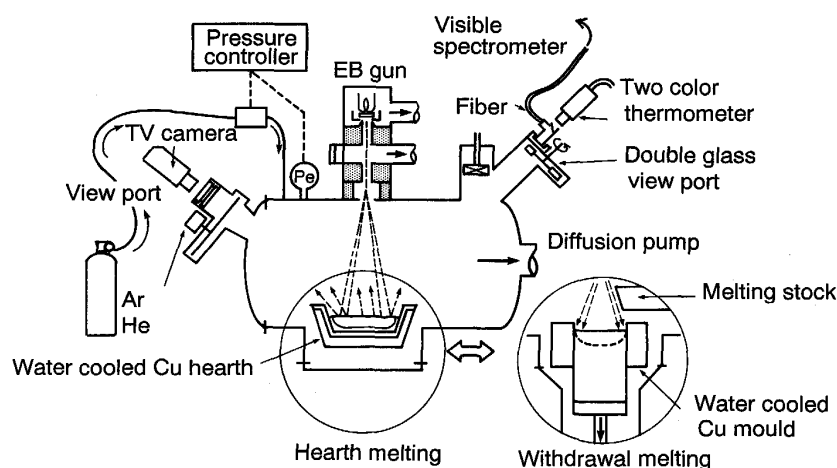


Fig. 1. Schematic diagram of experimental electron beam melting furnace used.

Table 1. Specifications of the experimental EB melting furnace.

EB gun	Input power Accelerating voltage Beam current	5~80 kW 0~30 kV Maximum 2.7 A
Ultimate pressure in melting chamber		1×10^{-6} mmHg
Melting and casting system		Hearth melting (Hearth size: 200 mm ϕ × 30 mmh 90 × 150 × 30 mmh) Withdrawal melting (Ingot size: 150 mm ϕ × 800 mmh 50 × 150 × 30 mmh)
Feeding system of raw materials		Horizontal rod feeder (Rod size: 100 mm ϕ × 1 000 mm) Vibrating granule feeder (Granule size: ~30 mm)

による2段の差動排気構造を持ち、炉内圧力 1×10^{-2} mmHg 以下において安定した EB 照射が可能である。EB 照射パターン制御装置を用いて、1本の電子ビームで2種類の照射パターンを描くことができ、それぞれの照射パターンを描く時間を制御することができる。炉内は拡散ポンプにより真空排気されており、圧力制御装置を介して種々のガスを導入する方法により炉内圧力を $10^{-6} \sim 10^{-2}$ mmHg の範囲で制御できる。

スポンジ Ti の実用 EB 溶解炉は、精錬効果の面から水冷銅製容器（ハース）と水冷銅鑄型を組み合わせた溶解方式が採用されると予想される。本実験炉は、装置構造上、ハースと鑄型を組み合わせた溶解はできないため、ハース内で一定量を溶解するバッチ方式と原料を連続的

に鑄型内に供給する鑄塊引抜方式に分けて実験を行った。なお、実験に応じて、ハースは丸型（200 mm ϕ ）と矩形（150 × 90 mm）、鑄型も丸型（150 mm ϕ ）と矩形（150 × 50 mm）を使い分けた。

溶解炉へは、丸棒状（~100 mm ϕ ）あるいは粒状（~30 mm）の溶解原料が連続あるいは断続的に装入できる。

溶湯表面温度は高温用2色温度計（測定波長 500, 580 nm）および可視光範囲（400~800 nm）の分光測定器を用いて測定した⁸⁾。

2.2 溶解原料

本実験の溶解原料として、Mg還元法で製造した通常のスポンジ Ti (B) と、比較のため塩化物含有量の少ないスポンジ Ti (A) および Na還元法で製造したスポンジ Ti (C) を用いた。その他に、JIS 第1種グレードの工業用純 Ti 丸棒（100 mm ϕ ）および同グレードのスクラップ Ti（20~30 mm 角 × 2~3 mm t）も用いた。これらの溶解原料の化学組成を Table 2 に示す。

スポンジ Ti はそのまま粒状で、あるいはプレス成型して溶接し、丸棒（100 mm ϕ ）として溶解した。

2.3 スポンジ Ti 溶解歩留り調査実験

ここでは、ハース溶解方式でスポンジ Ti の溶解挙動を調査し、鑄塊引抜溶解方式でスポンジ Ti の連続溶解を行った。

基準の溶解実験は EB 出力 60~70 kW（26~28 kV, 2.2~2.7 A）、炉内圧力 10^{-4} mmHg 以下で行い、炉内

Table 2. Chemical composition of raw titanium materials used (wt%).

Raw materials		C	Fe	Si	O	N	H	Mg	Na	Cl
Sponge Ti	A	0.005	0.024	0.001	0.061	0.002	0.004	0.014	N. d.	0.023
	B	0.004	0.030	<0.010	0.043	0.003	0.002	0.026	N. d.	0.076
	C	0.006	0.006	0.002	0.045	0.001	0.002	N. d.	0.075	0.092
Ti bar		0.009	0.051	0.004	0.077	0.005	0.002	N. d.	N. d.	N. d.
Scrap Ti		0.010	0.050	0.008	0.090	0.005	0.003	N. d.	N. d.	N. d.

N. d. : Not detected

圧力の影響を調査する実験では圧力制御装置を介して、Ar, H₂などを炉内に導入した。なお、溶解歩留りは溶解前後の重量変化から求めた。

2.4 伝熱特性調査実験

ここでも、ハース溶解および鋳塊引抜溶解の両方式でEB溶解時の伝熱特性を調査した。基準の溶解実験条件は2.3の実験と同様である。

EB実験炉のEBガン、炉体、引抜装置、ハース、鋳型など各部の冷却水流量と入口・出口水温を測定して各部への伝熱量を計算し、その結果に基づき熱収支をとった。また厚さ12 mmの銅鋳型内にシース型K熱電対を深さ6 mmの位置で、鋳型の上端より40, 70, 100, 130 mmの場所に埋め込み、銅鋳型温度も測定した。

3. 実験結果と考察

3.1 スポンジ Ti の溶解歩留り

塩化物含有量の異なる3種類のスポンジ Ti および Ti 丸棒あるいはスクラップ Ti を溶解原料として、鋳塊引抜溶解方式(丸型鋳型)およびハース溶解方式(丸型ハース)で溶解した場合の溶解歩留りを、それぞれFig. 2, 3に示す。両溶解方式ともスポンジ Ti 中の塩化物含有量(Mg + ClあるいはNa + Cl)の増加に伴って溶解歩留りが低下している。これは、スポンジ Ti のEB溶解時に観察される激しい溶滴飛散現象によるものである。

Fig. 2で、スポンジ Ti のプレス成型丸棒を溶解する場合に比べて、溶湯に直接スポンジ Ti を装入する場合

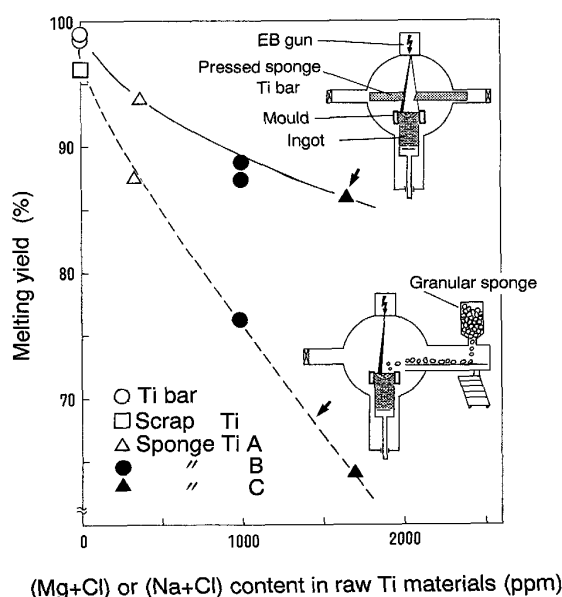


Fig. 2. Influence of chloride content in sponge Ti on melting yield in withdrawal melting.

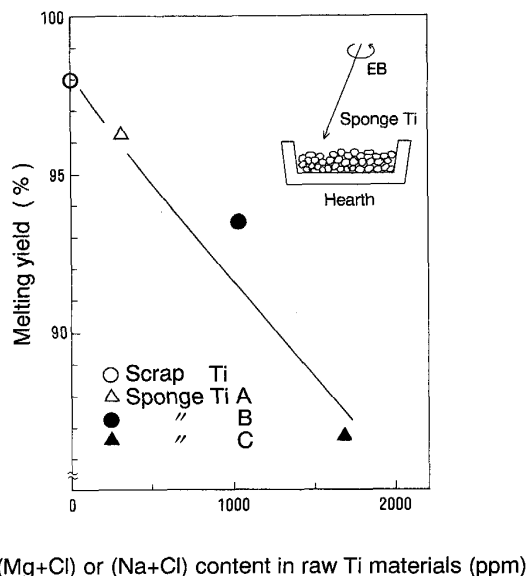


Fig. 3. Influence of chloride content in sponge Ti on melting yield in hearth melting.

に溶解歩留りの低下が著しい。これは、プレス成型丸棒や、ハース内での Ti 溶湯のない場所での溶解のように、スポンジ Ti に直接 EB を照射して溶解する場合には、飛散溶滴径が1 mm 前後と小さく、かつ比較的均一であるのに対し、溶湯内でスポンジ Ti を溶解する場合には10 mm にも達する溶滴が飛散するためである。

Ti 丸棒あるいはスクラップ Ti の溶解時には、溶滴飛散は観察されない。この場合でも、溶解歩留りが100%に達しないのは溶湯からの Ti の蒸発損失が主な原因である。

3.2 スポンジ Ti 溶解時の溶滴飛散現象

Table 2 からわかるように、スポンジ Ti 中には製造工程で除去しきれなかった MgCl₂ (Mg 還元法で製造したスポンジ Ti の場合) あるいは NaCl (Na 還元法で製造したスポンジ Ti の場合) などの塩化物が300~2000 ppm 程度残留しており、スポンジ Ti 破面を走査型電子顕微鏡で調査すると、粒径5 μm 前後の塩化物結晶が観察される。真空下で固体のスポンジ Ti を一定温度で2 h 保持した実験の結果、MgCl₂ は1200°C 以下、NaCl は1300°C 以下ではほとんど除去されず、沸点近くの温度で保持した場合に塩化物含有量が減少することが確認された。

MgCl₂ と NaCl の沸点はそれぞれ1418°C, 1465°C であり、Ti の融点1670°C より低い⁹⁾。EB溶解時にはスポンジ Ti 粒の外周に熔融 Ti 層が急速に形成され、その際にスポンジ Ti 内に蒸気として閉じ込められていた塩化物が急速に開放されるため、周辺の熔融 Ti の一部

が吹き飛ばされる。スポンジ Ti に直接 EB を照射して溶解する場合には、形成される溶融 Ti 層の厚みが 1~2 mm 程度と薄く、飛散する溶滴径も小さいが、Ti 溶湯内でスポンジ Ti が溶解する場合は、周辺の溶融 Ti 浴が吹き飛ばされるため、粒径が大きくなると考えられる。

以上のようにスポンジ Ti の溶解においては溶滴飛散現象は不可避であり、溶解歩留り向上には飛散溶滴の回収が重要である。実用 EB 炉ではハース溶解方式が精錬効果の面で優れていると考えられる。ここでは、Ti 溶湯が存在しない領域におけるハース内でのスポンジ Ti 溶解を行う場合の溶滴飛散現象について定量的な検討を行った。なお、Ti 溶湯内でスポンジ Ti が溶解する際に飛散する溶滴は粒径が大きく、遠方まで飛散しないので、その回収は比較的容易である。

周囲に垂直に Ti 板壁を設置した丸型水冷ハース（内径 200 mm）内に高さ 20 mm 程度スポンジ Ti (B) (750 g) を装入してその表層部（5~10 mm）を EB 溶解し、飛散する溶滴を Ti 板側壁で捕集した。ここでは、装入物の表面全体が均一に加熱溶解されて、ハース内の各領域から同じ条件で溶滴が飛散する実験条件とするため 5 重円の EB 照射パターンを用い、所定の EB 出力を急速に与える方式で溶解した。飛散した溶滴の粒径は 1 mm 前後であり、それらは 150~200 mm 程度の高さまで飛散し、ほとんどすべて Ti 板に付着していた。

飛散溶滴の Ti 板側壁への付着状況を付着面積率（＝飛散溶滴付着面積/Ti 板面積×100 と定義）で表し、下端から 40 mm 幅に区切った領域ごとに平均付着面積率を求めて高さ方向に対してプロットすると、Fig. 4 が

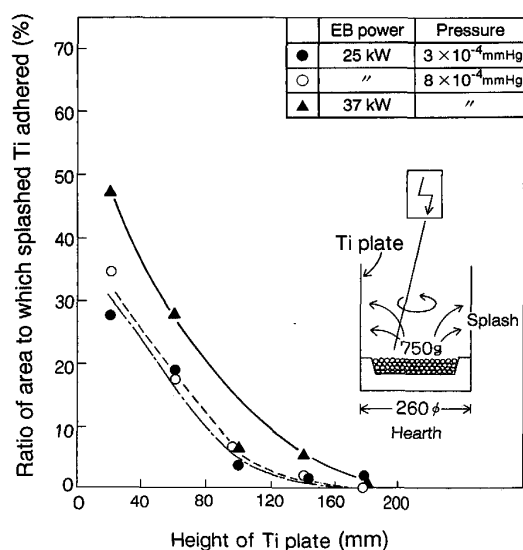


Fig. 4. Change in ratio of area to which splashed Ti adhered along height during melting of sponge Ti (B) in hearth melting.

得られる。

このような溶滴飛散状況を定量的に表すため、次のような仮定に基づく溶滴飛散モデルを考えた。

1) 溶滴の飛散はスポンジ Ti 中の塩化物の蒸発に伴うものであり、溶滴はすべての方位に同じ確率で飛散する。

2) 飛散する溶滴の初速度 V_0 は塩化物の蒸発圧力および溶滴径で決まるが、塩化物の蒸発圧力は 1 気圧程度、溶滴径も 1 mm 前後と比較的均一であるため、ある溶解条件ごとの平均的な初速度 V_0 を定めることができる。

3) 飛散する溶滴の単位時間当たりの発生個数はスポンジ Ti が溶解する際に生じる塩化物蒸気の生成速度、すなわち、EB 照射エネルギーに比例する。

ハース内のスポンジ Ti 溶解領域を分割し、各分割領域から溶滴を空間のすべての方位に対して一定の初速度 V_0 で飛散させ、ハース周囲に設置した Ti 板側壁位置まで飛散する溶滴の数を、すべての分割領域について求めて、積算した。

Ti 板側壁の高さ方向の溶滴飛散状況を、付着する溶滴の Ti 側壁高さ方向の累積量割合（高さ 200 mm で累積量 100% とする）で表し、種々の溶解条件における実験結果をプロットすると Fig. 5 が得られる。また同図には前述のモデルで溶滴飛散の初速度 V_0 を 1.0, 1.8, 2.0 (m/s) として計算した結果を実線で示した。

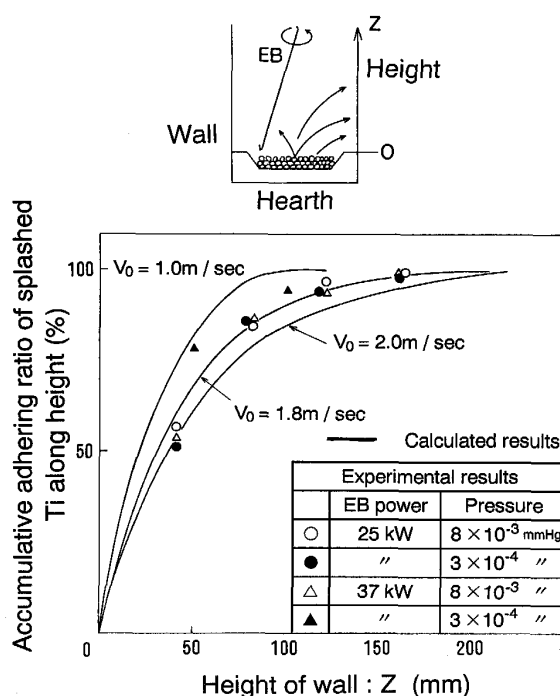


Fig. 5. Comparison of accumulative adhering ratio of splashed Ti along height with calculated lines during melting of sponge Ti (B) in hearth melting.

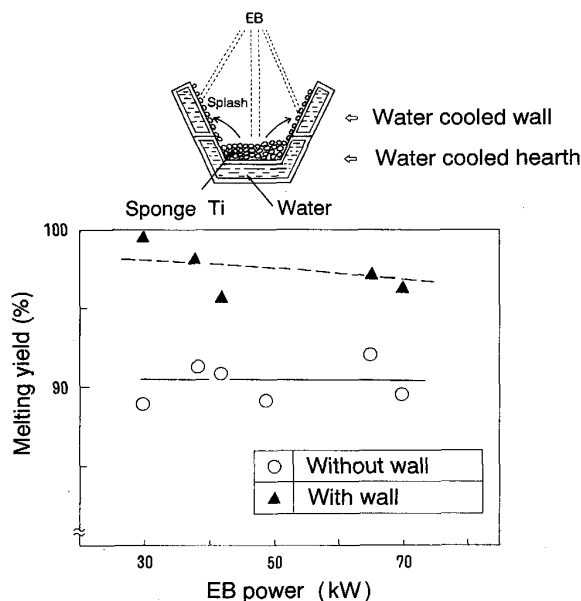


Fig. 6. Increase in melting yield during melting of sponge Ti (B) in hearth with water-cooled wall.

EB 照射出力、炉内真空度など溶解条件が異なっても、飛散する溶滴の初速度は 1.8 m/s 程度のほぼ一定の値が得られた。

単位時間当たりの飛散溶滴の発生量は、EB 照射出力などにより異なるが、飛散する溶滴の初速度は一定であることから、スポンジ Ti のハース溶解では、どのような溶解条件下でも飛散溶滴捕集のためには高さ 200 mm 程度の壁を設置すればよいと考えられる。

実際に、周囲に高さ 200 mm の水冷銅壁を設置した矩形水冷ハース内でスポンジ Ti (B) を溶解し、飛散した溶滴を水冷銅壁で捕集した。水冷銅壁に付着した Ti 溶滴を水冷銅を溶損しない程度のエネルギー密度に制御した電子ビームを照射して再溶解した場合の溶解歩留りを Fig. 6 に示す。水冷銅壁を設置して、飛散溶滴を回収することによって溶解歩留りを 7% 程度改善できた。

3.3 Ti の蒸発損失

スポンジ Ti の EB 溶解では、Fig. 3 のように溶湯表面からの蒸発損失も溶解歩留り低下の原因となる。

まず、蒸発損失におよぼす溶湯表面温度の影響を調査した。丸型水冷ハース内で EB 照射出力を変化させ、スクラップ Ti を 20 min 溶解した場合の溶湯表面温度と溶解歩留りとの関係を Fig. 7 に示す。溶湯表面温度の上昇に伴って Ti の急激な蒸発が認められる。

次に、蒸発損失におよぼす炉内圧力の影響を調査した。溶解炉内に圧力制御装置を介して Ar, H₂ を導入することによって炉内の圧力を 3 段階変化させ、EB 照射出力も 28, 42, 72 kW の 3 段階変化させて、丸型水冷ハース

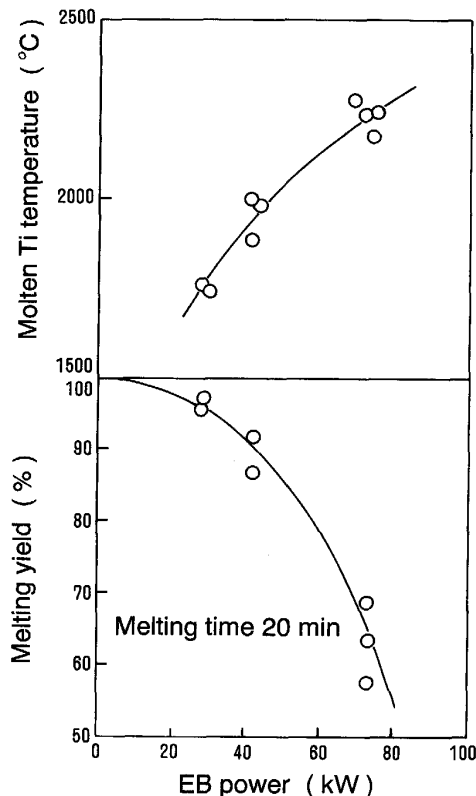


Fig. 7. Influence of molten Ti temperature on melting yield during melting of scrap Ti in hearth.

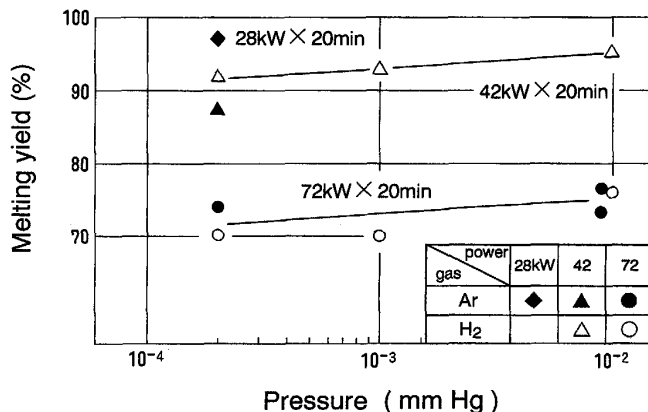


Fig. 8. Influence of pressure controlled by gas introduction in melting chamber on melting yield during melting of scrap Ti in hearth.

ス内でスクラップ Ti を溶解し、20 min 保持した場合の溶解歩留りを Fig. 8 に示す。炉内圧力の上昇により若干蒸発損失は低減するが、温度の低下ほどは効果的ではない。

以上から、Ti の EB 溶解における蒸発損失の低減にはできるだけ Ti の融点直上で溶解し、ビームを平均的に照射して、局所的な温度上昇を防止することが重要であることがわかる。

3.4 溶解の電力消費量

スポンジ Ti の EB 溶解時の電力原単位を把握するため、スポンジ Ti プレス丸棒の溶解とハース内でのスポンジ Ti 溶解の両方で電力と溶解速度とを調査した。

まず、3 種類のスポンジ Ti プレス成型丸棒 (100 mm ϕ) を溶解原料として、鋳塊引抜溶解 (丸型鋳型) した場合での丸棒および鋳型内の溶湯に照射したビーム出力の内、丸棒照射分を照射パターンの時間設定割合から算出し、丸棒の溶解速度との関係として Fig. 9 に示す。溶解速度はスポンジ Ti の種類に関係なく、ほぼ照射電力と比例関係にある。これから、スポンジ Ti プレス丸棒を溶解するのに必要な電力原単位を求めると、約 0.9 kWh/kg が得られ、この値は理論上の電力原単位 (0.42 kWh/kg)¹⁰⁾ の 2 倍程度である。これは、EB が照射されている丸棒先端部溶融ゾーンからの放射伝熱や丸

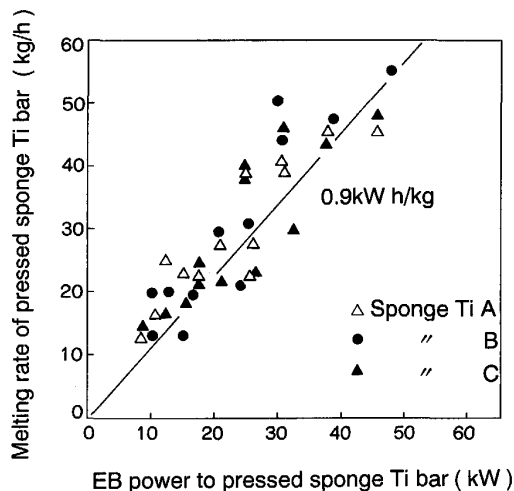


Fig. 9. Relation between melting rate of pressed sponge Ti bar and EB power irradiated to pressed sponge Ti bar in withdrawal melting.

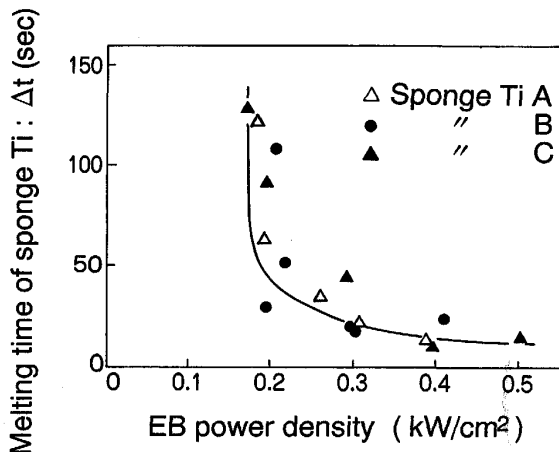


Fig. 10. Relation between melting time of sponge Ti and EB power density in hearth melting.

棒への伝導伝熱による熱ロスが大きいためである。

次に、矩形水冷ハース内にスポンジ Ti を装入し、ハース内装入物の上側表面が均一に加熱されるように 4 重四角形のビームパターンを用いて、種々の EB 出力で加熱し、その表面全域が溶け落ちるまでに要する時間と EB 照射電力密度との関係を求めた。その結果を Fig. 10 に示すが、スポンジ Ti の種類に関係なく、ある一定の関係が得られた。この結果を一般化するため、以下のような簡単な溶解モデルによる検討を行った。

本モデルは体積 V (cm³) の領域内に存在するスポンジ Ti の上部表面 A (cm²) を EB 照射した際の温度変化を表すもので、簡単のため、領域内のスポンジ Ti の温度 T (K) は均一、領域から外部への出熱はスポンジ Ti 層と水冷銅ハース壁との直接的な接触面積が全体に比べると極めて小さいと考えられることから、領域の全表面 S (cm²) において放射伝熱のみで行われると仮定した。領域の体積 V における熱収支は、次式で表される。

$$V \cdot \rho \cdot C \cdot \frac{dT}{dt} = q_{in} - q_{out} \dots \dots \dots (1)$$

ここで ρ : スポンジ Ti の見掛け密度 (1.3 g/cm³)

C : 平均比熱 (0.22 cal/g·K)

q_{in} : EB 加熱量 (= 238.9 · $P \cdot A$: cal/s)

q_{out} : 放熱量 (= $1.36 \times 10^{-12} \cdot \epsilon \cdot S \cdot (T^4 - T_0^4)$: cal/s)

P : EB 出力密度 (kW/cm²)

ϵ : 放射率 (後述の実験結果から 0.6 を使用)

T_0 : 炉壁・水冷銅ハースなどの周辺の温度

(ここでは $T_0 = 323$ K を使用)

本実験条件下で (1) 式をルンゲ・クッタ法により数値的に解き、EB 照射電力密度と溶解までに要する時間との関係を求めて Fig. 10 にプロットしたのが実線であり、粗いモデルであるが、実測値とよく対応している。本結果から、Ti 溶湯が存在しない条件下でのハース内のスポンジ Ti を溶解するまでに必要な電力原単位として 0.5~0.7 kWh/kg が得られた。

3.5 EB 溶解時の伝熱特性

EB 溶解時の伝熱特性を調査するため、鋳塊引抜溶解とハース溶解の両方で熱収支を測定した。鋳塊引抜溶解での EB 炉各部冷却水への伝熱量の総合計は EB 出力の 90~110% の値が得られており、ばらつきは大きい。ほぼ発熱量の全量が冷却水に伝熱されていると考えられる。本実験では鋳塊の引抜速度が 4~12 mm/min と遅いこともあり、インゴットへの蓄熱の効果は少ないと考えられる。そこで、炉内各冷却部への伝熱割合を冷却水への総伝熱量に対して求めた結果を Fig. 11 に示す。EB ガンでの熱損失が 7~17% 程度、溶湯表面から炉体

壁への放射伝熱割合は 22~27% で、水冷銅鑄型への伝熱割合が 50~65% と最も大きい。

この際の銅鑄型内へ埋め込んだ熱電対により測定した鑄型の温度分布の一例を Fig. 12 に示す。鑄型の長辺、短辺、コーナー部の温度測定結果に大きな差がないのは、溶湯表面の温度分布が均一となるような EB 照射パ

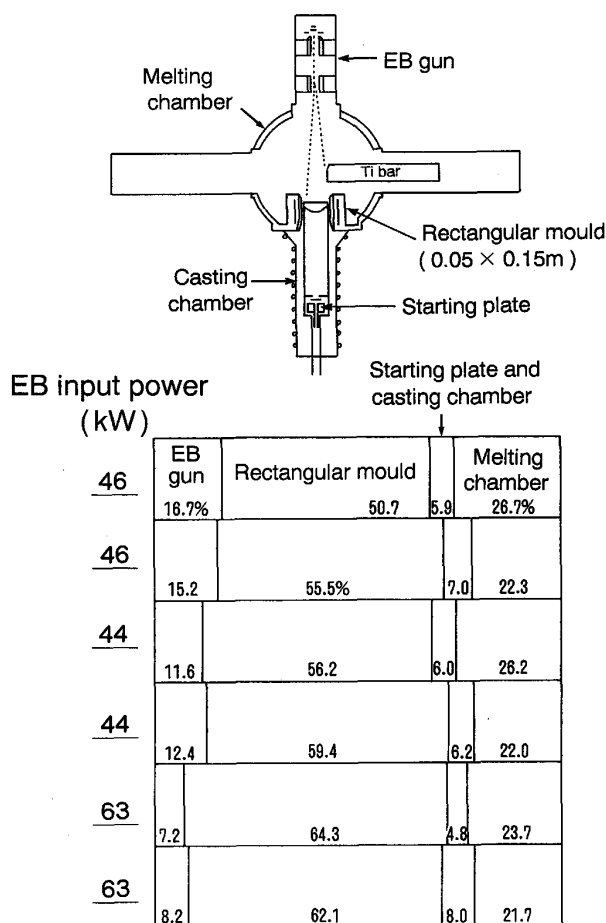


Fig. 11. Heat balance during melting of Ti bar and casting of rectangular ingot in withdrawal melting.

ターンを用いて溶解・鑄造したためと考えられる。鑄型の最高温度は溶湯表面レベル付近で 150°C 程度であるが、これはエレクトロスラグ再溶解法での銅鑄型温度測定結果¹¹⁾ とほぼ同程度である。また、下部方向に急激に鑄型温度が低下するのは、本溶解では溶湯プール深さが 10~30 mm と非常に浅いことに対応している。次に、スポンジ Ti (B) を丸型ハース内で溶解した場合の熱収支測定結果を Fig. 13 に示す。この場合も冷却水への総伝熱量の EB 出力に対する割合は鑄塊引抜溶解と同程度である。ハースへの伝熱割合は、鑄塊引抜溶解とほぼ同等の 60~65% が得られた。ハース冷却水の水温上昇より求めたハースへの伝熱速度、Ti 溶湯表面温度、ハース冷却水温度から、ハース内面面積での Ti-ハース冷却水間の総括伝熱係数を計算し、Ti 溶湯温度に対しプロットした結果を Fig. 14 に示す。得られた総括伝熱係数は 0.01~0.03 cal/cm²・s・K 程度であり、エレクトロスラグ再溶解法のスラグ浴と銅鑄型冷却水間で得られている総括伝熱係数の値¹¹⁾ とほぼ同程度である。

また、ハース溶解における炉体冷却水への放射伝熱量の測定結果と溶湯表面温度とから計算した Ti 溶湯の放射率は Fig. 15 に示すとおりであり、溶湯表面温度による影響は少なく、おおよそ 0.5~0.7 程度の値が得られた。

4. 結 言

小型の EB 溶解炉を用いてスポンジ Ti の溶解特性に関する基礎的検討を行った。得られた結果は次のとおり。

1) スポンジ Ti の EB 溶解における歩留り低下の原因はスポンジ Ti 溶解時の溶滴飛散と Ti の蒸発損失である。

2) 溶滴飛散は、溶解時のスポンジ Ti 中塩化物の蒸発圧力が原因であるが、飛散溶滴は高さ 200 mm 程度の壁でほとんどすべてが捕集可能である。

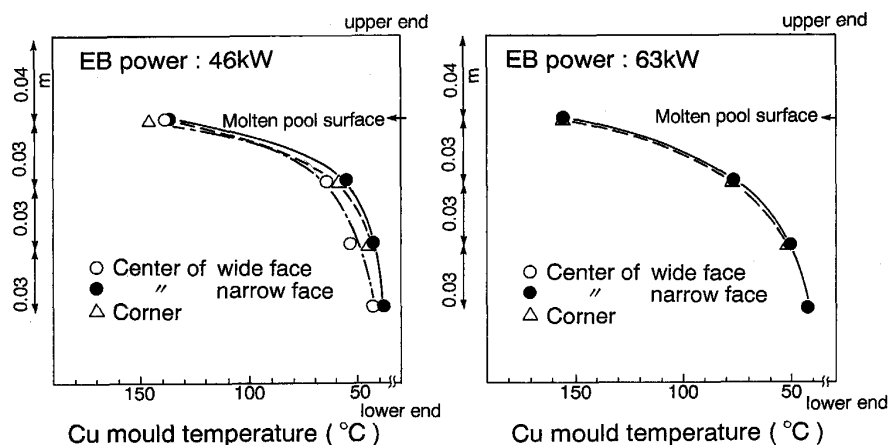


Fig. 12. Temperature distribution of rectangular mould in withdrawal melting.

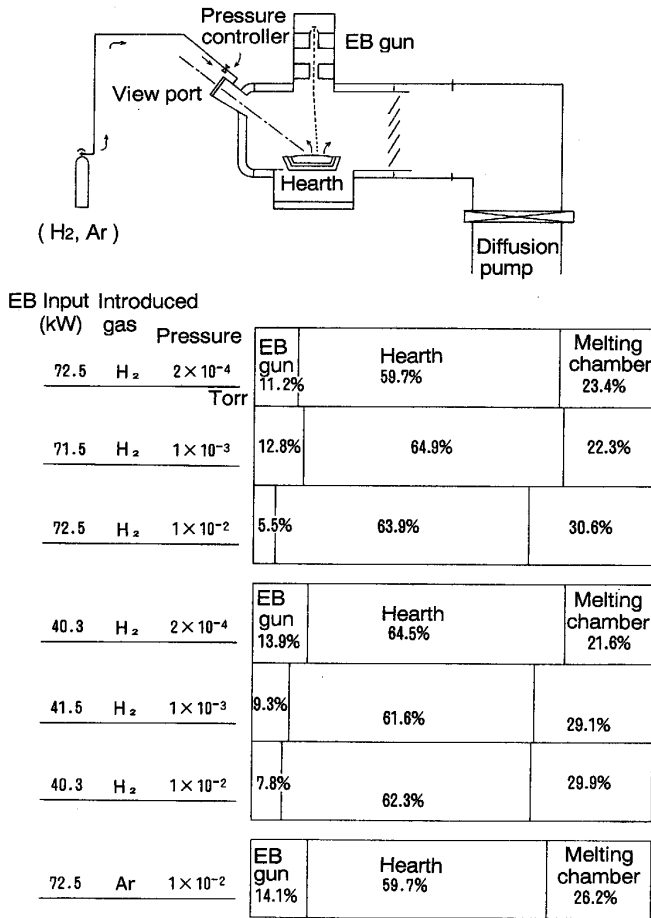


Fig. 13. Heat balance during melting of sponge Ti (B) in hearth melting.

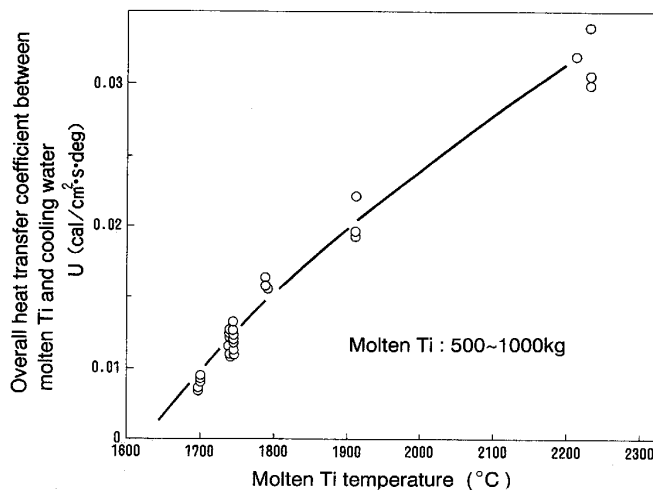


Fig. 14. Change in overall heat transfer coefficient between molten Ti and cooling water in hearth melting.

3) Ti 溶湯からの蒸発損失防止には、Ti の融点直上であつ、局部的な温度上昇を防止して操業する温度制御が重要である。

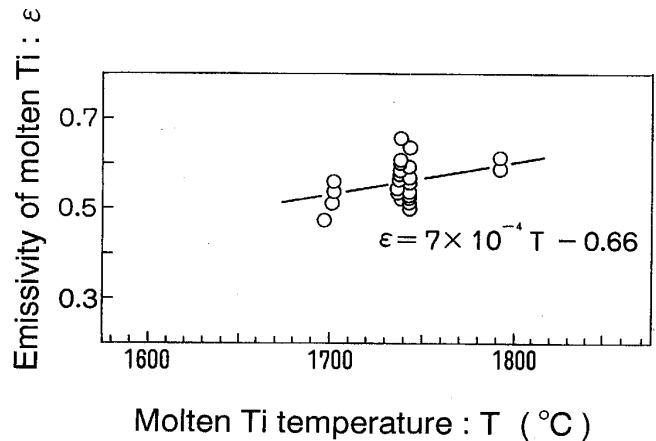


Fig. 15. Emissivity of molten Ti calculated from heat balance in hearth melting.

4) スポンジ Ti のプレス成形丸棒だけの EB 溶解に必要な電力原単位は約 0.9 kWh/kg, ハースに装入したスポンジ Ti の溶解までに必要な電力原単位は 0.5~0.7 kWh/kg 程度である。

5) EB 滴下溶解時の熱収支測定では、鋳型への伝熱割合は 50~65% 程度であり、深さ 6 mm の位置の銅鋳型温度は溶湯表面レベルで 150°C 程度である。

6) ハース溶解でも、ハースへの伝熱割合は 60~65% 程度であり、Ti 溶湯-冷却水間の総括伝熱係数は 0.01~0.03 cal/cm²·s·K, Ti 溶湯の放射率は 0.5~0.7 程度である。

文 献

- 1) C. H. ENTREKIN: Electron Beam Melting and Refining State of the Art (1985), p. 40
- 2) L. C. HAINZ, II: Electron Beam Melting and Refining State of the Art (1983), p. 191
- 3) H. R. HARKER and C. H. ENTREKIN: Titanium (1986), p. 939
- 4) R. N. JARRETT: Electron Beam Melting and Refining State of the Art (1986), p. 332
- 5) S. FUKUMOTO, N. NAKAO, M. FUJI and H. TAKEUCHI: Electron Beam Melting and Refining State of the Art (1989), p. 100
- 6) J. A. KNECHT, II and H. R. HARKER: Electron Beam Melting and Refining State of the Art (1984), p. 175
- 7) H. RANKE, V. BAUER, W. DIETRICH, J. HEIMERL and H. STEPHAN: Electron Beam Melting and Refining State of the Art (1985), p. 77
- 8) T. KUSAMICHI, H. KANAYAMA, H. MATSUZAKI and T. ONOYE: Electron Beam Melting and Refining State of the Art (1989), p. 137
- 9) O. KUBASCHEWSKI and C. B. ALCOCK: Metallurgical Thermochemistry (1979) [Pergamon Press]
- 10) I. BARIN and O. KNACKE: Thermochemical Properties of Inorganic Substances (1973), p. 749 [Verlag Stahlwissenschaften, m. b. H.]
- 11) 草道龍彦, 石井照朗, 尾上俊雄, 成田貴一: 鉄と鋼, 66 (1980), p. 749