

# チタン溶解における介在物除去技術

## Removal Technology of Inclusion from Titanium Alloy Melt in Hearth

水上英夫\*  
Hideo MIZUKAMI  
和田将明  
Masaaki WADA

舟金仁志  
Hitoshi FUNAGANE  
白井善久  
Yoshihisa SHIRAI

北浦知之  
Tomoyuki KITAURA  
梅田 繁  
Shigeru UMEDA

武田宜大  
Yoshinari TAKEDA

### 抄 録

チタン製品の品質向上には、介在物の抑制が必要である。介在物には高密度介在物 HDI と低密度介在物 LDI がある。HDI は、水冷ハース内で容易に沈降して除去できるが、浮遊する LDI は鑄型内に流出する可能性がある。主な LDI である窒化スポンジチタンはポーラス構造である。この窒化スポンジチタンの見掛け密度を予測した結果、空隙にチタンの溶湯が浸入しない場合に溶湯に浮遊することがわかった。水冷ハース内の溶湯に浮遊する LDI の流動を制御するため、水冷ハースの給湯口近傍に電子ビームを帯状に照射してマランゴニ対流を発生させることで鑄型内への流出が抑制可能なことを数値解析と実機試験で確認した。

### Abstract

It is necessary to control the inclusion for improvement of quality of titanium products. There are two kinds of inclusions in titanium: high-density inclusion (HDI) and low-density inclusion (LDI). Though HDI can be removed by settling out in the water-cooled hearth, suspended LDI might flow out in the mold. The nitridated titanium sponge that is major source of LDI formed as a porous structure. From predicted result for apparent density of the nitridated titanium sponge, it has been understood that the sponge floats on titanium melt when the melt filled the pore of the sponge. To control flow behavior of LDI on the melt in water-cooled hearth, Marangoni flow was generated by electron beam irradiation near pouring gate. The effect of electron beam irradiation was confirmed by both numerical simulation and experiment.

## 1. 緒 言

チタンは酸素との親和力が強く、原料のチタン鉱石を直接還元するのは難しいため、通常はクロール法で製造されている。チタン鉱石は塩化して四塩化チタン ( $TiCl_4$ ) の状態で精製して純度を向上させた後、Mg で還元してスポンジ状のチタン金属 (スポンジチタン) を得ている<sup>1,2)</sup>。

スポンジチタンは高純度のチタン ( $Ti \geq 99.3\%$ ) かつ多孔質であるため、チタン製品を製造するためには、必要な副原料 ( $TiO_2$ , Fe, Al など) と均一に混合した後、融点 (1941K) 以上に加熱、溶解して鑄塊を得ている。溶解するスポンジチタンや副原料 (以下、溶解原料) に不可避に混入する介在物 (異物) が鑄塊に残留してチタン製品の品質欠陥となる場合がある。この介在物には低密度介在物 (LDI: Low Density Inclusion) と高密度介在物 (HDI: High Density

Inclusion) がある。LDI は主に窒化物である。 $TiCl_4$  を還元した後高温で真空分離して得られるスポンジチタン塊が部分的に窒化した場合や、後述する電子ビーム溶解で発生するチタン蒸着物が窒化した場合などに生成する。HDI は主にチタンの鑄塊を加工する際に用いられる工具の破片である。工具には Mo, W の化合物が用いられており、これらの密度はチタンの溶湯よりも大きい。これらの LDI や HDI は、チタンより融点が高いため、溶融したチタン (以下、チタン溶湯) の中でも容易に溶解されない。このため、チタンを溶解するまでの各々の製造工程で厳密に管理されている。ただ、万が一流出した場合のことを考えて、溶解工程でも除去あるいは無害化できるのが望ましい。

一方、チタンは酸素との親和力が強く融点が高いため、炭素鋼の精錬や鑄造などで使用されている耐火物 ( $Al_2O_3$  など) でチタン溶湯を保持することができない。このため、

\* 鉄鋼研究所 材料信頼性研究部 チタン・ステンレス研究室 主幹研究員 博士(工学) 新潟県上越市港町 2-12-1 〒942-8510

チタンの溶解は、消耗電極式アーク溶解 (VAR: Vacuum Arc Remelting) や電子ビーム溶解 (EBR: Electron Beam Remelting) などの特殊な溶解方法が用いられている<sup>3,4)</sup>。

VARは、溶解原料を加圧成形したブリケットを消耗電極として、真空中、直流アークで加熱、溶解する方法である。溶融したチタンは水冷された銅鑄型に直接滴下してチタン溶湯を形成した後、順次凝固して鑄塊となる。

EBRは、溶解原料に電子ビームを照射して溶解する方法である。大型の電子銃が製造できるようになってから、VARに比べて次のような利点があるため、量産されるチタンの溶解に適用されるようになった。

- ①種々の形状のスクラップを原料として使用できる。
- ②鑄型断面の形状に自由度があり、直方体形状のスラブ(熱間圧延素材)を直接鑄造できる。
- ③水冷ハースを使用することで、HDIを沈降除去できる。水冷ハースは、水冷された銅容器に溶解するチタン合金と同成分のチタン合金を充填して、電子ビームを照射しながらチタン溶湯を保持する容器である。

日本製鉄(株)でも上記の理由などから2012年に直江津製造所(現:東日本製鉄所直江津地区)にEBRを導入した。HDIの除去能力については、直径0.25~9.5mmのWCやMoなどを溶解原料に混ぜて溶解試験を行い、すべてのHDIが溶解終了後に凝固した水冷ハース内に残留していることをX線透過検査で確認できている。

一方、LDIは、HDIのようにチタン溶湯中で容易に沈降除去されないため、その除去能力の評価は難しい。LDIが溶解原料に混入し、溶解工程で水冷ハース内に入った場合でも、鑄型内への流入を抑制可能な溶解・鑄造技術の開発が必要である。

新良貴は、大型EBRでLDIを溶融除去するために、2つの水冷ハースを設けて滞留時間を確保するとともに、局所的にチタン溶湯を加熱して高温域を設けている<sup>5)</sup>。しかし、これらの対策は、大型の水冷ハースや多数の電子銃が必要になるとともに、真空チャンバーも大きくなるなど設備費が増すことになる。また、チタン溶湯中でのLDIの浮遊・流動挙動や溶解挙動についての検討はなされておらず、LDI除去能力の評価がなされていない。

そこで本研究では、電子ビーム溶解(EBR)において、低密度介在物(LDI)である窒化スポンジチタンのチタン溶湯中の浮遊や流動挙動を検討するために、その形態を調査して、その密度を推算した。次に、LDIを鑄型内に流出させない方法として、水冷ハース内の湯面に電子ビームを帯状に照射して発生させたマランゴニ対流の効果について、数値解析により評価を行った。さらに、EBRにおいてTi-6Al-4V溶湯に模擬LDIとして炭素棒を添加する試験を行い、その除去効果について検証した。

## 2. 電子ビーム溶解・鑄造装置

図1に、東日本製鉄所直江津地区に設置されている電子ビーム溶解・鑄造装置の模式図を示す。本装置は、電子銃、溶解原料の供給装置、水冷ハース、鑄型および鑄塊の引抜装置で構成される。これらの装置は真空容器内に置かれ、真空雰囲気下で操業が行われる。

溶解原料は、コンテナ内に配列され、所定の速度で水冷ハースに向かって原料の後方より押し出される。配列させた原料の端面が水冷ハースの壁面位置に達した際に、上方からこの端面に電子ビームを照射して溶解する。一定速度で押し出される原料の端面で溶解したチタン溶湯が水冷ハースに滴下供給され、水冷ハースの給湯口部から鑄型に供給される。チタン溶湯は鑄型内で凝固しながら鑄塊が下方に間欠的に引抜かれる。

溶解原料に混入したLDIは、原料端面に照射した電子ビームでは溶解されずに、水冷ハースに落下して水冷ハース内でも溶解されることなく鑄型内に侵入することが考えられる。鑄塊内部に取り込まれたLDIは、薄板ではすじ状の欠陥、線材では加工時の破断の原因になる。このような欠陥を抑制するには、水冷ハースに侵入したLDIを鑄型内に流出させないことが求められる。

## 3. 低密度介在物(LDI)の特徴

### 3.1 LDIの構造

代表的なLDIは原料の製造工程でスポンジチタンが窒化した窒化スポンジチタンである。窒化スポンジチタンの特徴を把握するために、スポンジチタンに窒化処理を施し、人工的に窒化スポンジチタンを作製した。この表面および断面のマイクロ組織を観察した。

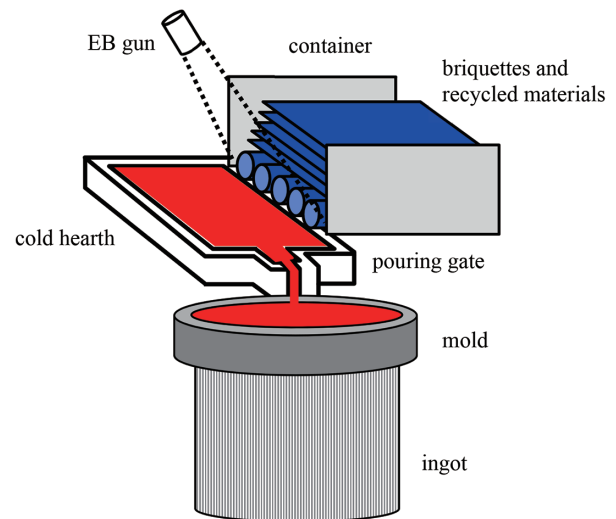


図1 東日本製鉄所直江津地区に設置されている溶解・鑄造装置の模式図

Schematic diagram of melting and casting system at Naoetsu Area of East Nippon Works

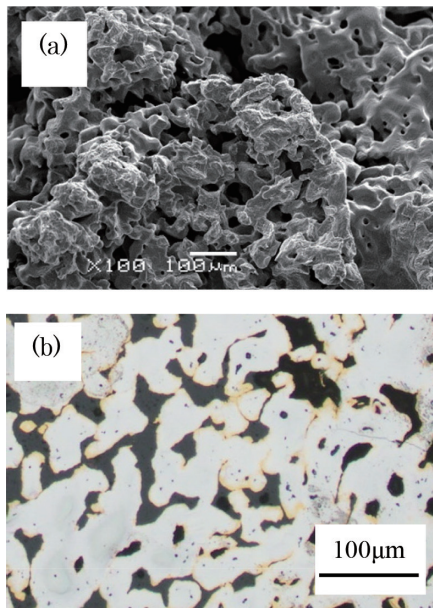


図2 窒化スポンジチタンの表面と断面中央部  
(a) Surface and (b) center of cross section of nitridated titanium sponge

図2 (a) に窒化スポンジチタンの表面の二次電子線像を、図2 (b) に断面中央近傍の光学顕微鏡による観察結果を示す。これらの観察結果から、窒化スポンジチタンはポーラス構造であり、その間隔は約  $50\mu\text{m}$  であることがわかった。

窒化スポンジチタンの気孔率を評価するため、X線CTを用いて室温で測定した。その結果、開気孔率は38%、閉気孔率は0.1%であった。窒化スポンジチタンの気孔は開放されていることがわかった。

### 3.2 LDIの見掛け密度

ポーラス構造である窒化スポンジチタンがチタン溶湯より重ければ水冷ハース内で沈降するが、軽ければ上に浮遊して鋳型内に流出すると考えられる。これを判断するためには、チタンの溶湯温度における窒化スポンジチタンの見掛け密度を評価する必要がある。しかし、ポーラス構造で不定形な窒化スポンジチタンの見掛け密度を高温で直接測定するのは困難である。

そこで本研究では次のような手順で、緻密な窒化チタンを用いて窒化スポンジチタンの密度を推定した。まず、緻密な窒化チタンの室温における密度（気孔を含まない真密度）をアルキメデス法で推定した。次に、窒化チタンの線膨張係数の予測式<sup>9)</sup>を用いて、チタン溶湯の液相線温度における密度を求めた。窒化スポンジチタンがポーラス構造であることから、その気孔率を考慮した補正を行った。これにより、窒化スポンジチタンの見掛け密度を推定した。

図3にはN濃度の異なる緻密な窒化チタンの室温での密度をアルキメデス法で測定した結果を示す。また、文献値<sup>7)</sup>も併せて示す。窒化チタンの密度はN濃度の増加につれて大きくなることがわかった。次に、温度1977Kにお

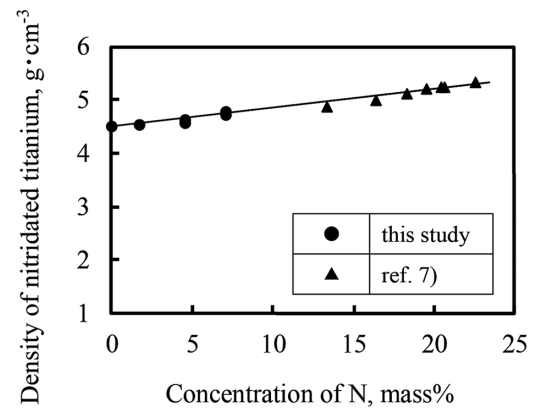


図3 アルキメデス法で測定した室温における窒化チタンの密度

Density of nitridated titanium at room temperature measured by Archimedes method

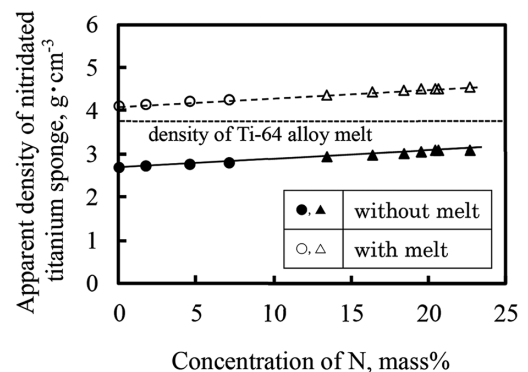


図4 Ti-6Al-4Vの液相線温度における窒化スポンジチタンの見掛け密度

Apparent density of nitridated titanium sponge at liquidus temperature of Ti-6Al-4V alloy melt

る密度とN濃度の関係を求めた。この温度はTi-6Al-4Vの液相線温度に相当する。密度の換算は次式で示される線膨張係数と温度、N濃度の関係式<sup>9)</sup>を用いた。

$$\alpha = \frac{\left( \left( 1.2206 + 0.8348 \times \frac{[N]}{[Ti]} \right) \times 10^{-6} + \left( 2.697 - 0.2256 \times \frac{[N]}{[Ti]} \right) \times 10^{-9} \times T \right)}{\text{Lattice}}$$

$$\begin{aligned} \text{Lattice} = & 0.41823 + 0.00530 \times \frac{[N]}{[Ti]} + \left( 1.2206 + 0.8348 \times \frac{[N]}{[Ti]} \right) \times 10^{-6} \times T \\ & + \left( 1.3485 - 0.1128 \times \frac{[N]}{[Ti]} \right) \times 10^{-9} \times T^2 \end{aligned}$$

ここで、 $\alpha$ : 線膨張係数 ( $\text{K}^{-1}$ )、 $T$ : 温度 (K) である。

図4に温度1977K、気孔率38%における窒化スポンジチタンの見掛け密度とN濃度の関係を示す。窒化スポンジチタンの密度はN濃度の増加につれて大きくなる。Ti-6Al-4Vの溶湯の密度と比較すると、窒化スポンジチタンの気孔内にチタン溶湯が全く浸入しない場合は見掛け密度が小さく、完全に浸入する場合は大きくなる。これより、水冷ハース内に落下した窒化スポンジチタンは、その気孔内に溶湯が侵入すれば水冷ハース内で沈降し、溶湯が浸入しなければ湯面に浮き、溶湯とともに流れることになる。窒化スポンジチタンの鋳型への流出を抑制するには、水冷ハース内



で気孔内に溶湯が浸入していない浮遊する窒化スポンジチタンの動きを抑制する必要がある。

#### 4. 計算方法および結果

チタン溶湯が流れる水冷ハース内の溶湯表面に浮遊するLDIの挙動を三次元熱流体解析で予測した。なお、本解析では、LDIは最も厳しい条件として、窒化スポンジチタンの気孔にはチタン溶湯が浸入せず、窒化スポンジチタンは未溶解（粒径は常に一定）とした。また、溶湯の流れはLDIの挙動に影響を及ぼすが、LDIの挙動は溶湯の流れに影響を及ぼさないと仮定した。

##### 4.1 溶湯流動とLDI挙動の数値解析モデル

溶湯の流速と温度は、仮定 (a)–(c) の下で立てた連続の式 (式 (1)), 運動量方程式 (式 (2)), エネルギー方程式 (式 (4)), 液体分率の式 (式 (6)) を反復計算することで求めた。

(a) 溶湯の流れは層流

(b) 密度変化によって生じる自然対流はブジネスク近似でモデル化する。式 (2) の右辺 4 項に対応する。

(c) 水冷ハースの壁面近傍で凝固した領域は多孔質媒体として扱い、固体の存在のために生じる圧力損失は式 (2) に運動量のシンク項を追加することでモデル化する。式 (2) の右辺 5 項に対応する。完全に凝固した領域は液体の体積分率 ( $\beta$ ) がゼロ、液体の領域では空隙率が 1、それ以外は 0 ~ 1 の間の値をとる。

$$\nabla \cdot (\rho \bar{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\rho \bar{u} \bar{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau} + \rho \bar{g} - \rho \beta' (T - T_0) \bar{g} + \frac{(1-\beta)^2}{\beta^3 + \varepsilon} A_{mesh} \bar{u} \quad (2)$$

$$\bar{\tau} = \mu (\nabla \bar{u} + \nabla \bar{u}^T - \frac{2}{3} \nabla \cdot \bar{u} I) \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (\rho \bar{u} H) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (4)$$

$$H = c_p T + \beta L \quad (5)$$

$$\beta = \begin{cases} 0 & \text{if } T < T_S \\ 1 & \text{if } T > T_L \\ \frac{T - T_S}{T_L - T_S} & \text{if } T_S < T < T_L \end{cases} \quad (6)$$

ここで、 $\rho$  は密度、 $\bar{u}$  は流速、 $p$  は圧力、 $\bar{\tau}$  は式 (3) で計算される応力テンソル、 $\bar{g}$  は重力加速度、 $\beta'$  は熱膨張係数、 $T$  は温度、 $T_0$  は参照温度、 $\beta$  は液体の体積分率、 $\varepsilon$  は発散を避けるための微小値 ( $10^{-3}$ )、 $A_{mesh}$  は半溶融領域の定数 ( $10^5$ )、 $\mu$  は分子粘度、 $I$  は単位行列、 $H$  は式 (5) で表されるエンタルピー、 $\lambda$  は熱伝導率、 $c_p$  は比熱、 $L$  は潜熱、 $T_S$  は固相線温度、 $T_L$  は液相線温度である。また、溶湯と水冷ハースの底面および側面との間の熱伝達係数はそれぞれ 1400, 200 W/m<sup>2</sup>K とした。解析で使用した物性値を表 1 に示す。

LDI は粒子とみなし、粒子に働く抗力と浮力を考慮した運動方程式 (7) を計算することでその挙動を推測した。

$$m_p \frac{d\bar{u}_p}{dt} = m_p \frac{\bar{u} - \bar{u}_p}{\tau_r} + m_p \frac{\bar{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} \quad (7)$$

$$\tau_r = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \frac{24}{C_d \text{Re}} \quad (8)$$

$$\text{Re} \equiv \frac{\rho d_p |\bar{u}_p - \bar{u}|}{\mu} \quad (9)$$

$$C_D = C_1 + \frac{C_2}{\text{Re}} + \frac{C_3}{\text{Re}^2} \quad (10)$$

ここで、 $m_p$  は粒子質量、 $\bar{u}_p$  は粒子の速度、 $\rho_p$  は粒子の密度 (3440 kg/m<sup>3</sup>)、 $\tau_r$  は式 (8) で表される粒子の緩和時間、 $d_p$  は粒子の粒径 (5.0 mm)、 $\text{Re}$  は式 (9) で定義される相対レイノルズ数、 $C_D$  は式 (10) で計算される抗力係数である。係数  $C_i$  ( $i=1\sim 3$ ) の値は文献<sup>8)</sup>を参照した。また、マランゴニ応力の表面張力勾配は -0.00027 N/mK とした。

##### 4.2 解析条件

矩形の水冷銅ハース (図 5) で溶解する場合を考えた。溶湯表面に照射する電子ビームの照射パターンは、電子ビームを帯状に照射しない場合と照射する場合の 2 パターンを考えた。前者では、溶湯表面全体を均一に照射する場合 (以降、均一照射と呼ぶ) を想定した。この場合、電子ビームの照射による溶湯表面への入熱量は、溶湯表面のすべての場所と同じ熱流束値を与えることでモデル化した。一方、後者では、溶湯の凝固を防止するため溶湯表面全体を照射しつつも、もう 1 つ電子銃を用意し、その電子銃で溶湯表面の特定の位置のみを帯状に照射する場合を想定した。この場合の溶湯表面の熱流束は、文献<sup>9)</sup>を参考にして、電子ビームの照射スポットで最大値をとり、照射スポットから離れるにつれて減衰するガウス分布 (式 (11)) でモデル化した。

$$q_w = \alpha q_0 \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (11)$$

$$Q = q_0 \iint_{\text{all } x, \text{all } y} \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2\sigma^2}\right) dx dy \quad (12)$$

表 1 溶湯の物性値  
Physical properties of melt

$\rho$	Apparent density (kg/m <sup>3</sup> )	3 820
$c_p$	Specific heat (J/kgK)	840
$\lambda$	Thermal conductivity (W/mK)	6.5 at 303 K 34.0 at 1973 K
$\mu$	Molecular viscosity (kg/ms)	$0.03856 - 2.85243 \cdot 10^{-5} T$ $+ 5.45115 \cdot 10^{-9} T^2$
$\beta'$	Thermal expansion coefficient (1/K)	0.00018324
$L$	Latent heat (J/kg)	286 000
$T_S$	Solidus temperature (K)	1 967
$T_L$	Liquidus temperature (K)	1 977

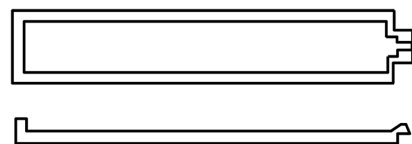


図 5 解析モデルで使用した水冷ハースの形状  
Shape of cold hearth using analytical model

ここで、 $q_w$  は溶湯表面の熱流束、 $\alpha$  は着熱効率 (0.25)、 $q_0$  は式 (12) で計算される照射スポットの熱流束、 $Q$  は電子ビームの熱量 (0.25 MW)、 $(x, y)$  は溶湯表面の位置、 $(x_0, y_0)$  は電子ビームの照射スポット、 $\sigma$  は標準偏差 (0.02 m) である。

解析は商用ソフトの ANSYS FLUENT を使用して行った。流速 - 圧力の連成ソルバーは PISO、圧力の空間離散化は PRESTO!、運動量の空間離散化は一次風上、温度の空間離散化は二次風上とした。また、本解析では LDI は未溶解 (粒径は常に一定) とした。

### 4.3 解析結果

溶湯表面温度、溶湯表面流動、LDI 挙動の解析結果を図 6 と図 7 に示す。溶湯は、水冷ハースの左端に供給され、右側の給湯口から排出される。LDI の投入個数は 53 である。均一照射の場合、溶湯表面の流動は左から右であり (図 6 (b))、溶湯表面を浮遊する LDI はこの流れに乗って、左から右に向かって移動し、途中で遮られることなく、給湯口部に到達している (図 6 (c))。一方、帯状の電子ビームを照射の場合、ハース右側の給湯口の手前で温度が高くなる領域が存在し (図 7 (a))、この領域が電子ビームを帯状に照射した領域に対応する。この周辺部の領域との温度勾配によってマランゴニ対流が誘起されるため、帯状に照射した領域から上流側に向かう流れが形成されている (図 7 (b))。なお、マランゴニ対流は、温度差により生じる表面張力勾配が駆動力となる対流である。この上流側に向かう流れにより、上流側から溶湯流れに乗ってやって来た LDI は、図 7 (c) に示すように、帯状の照射領域の前方で堰き止められる結果となった。

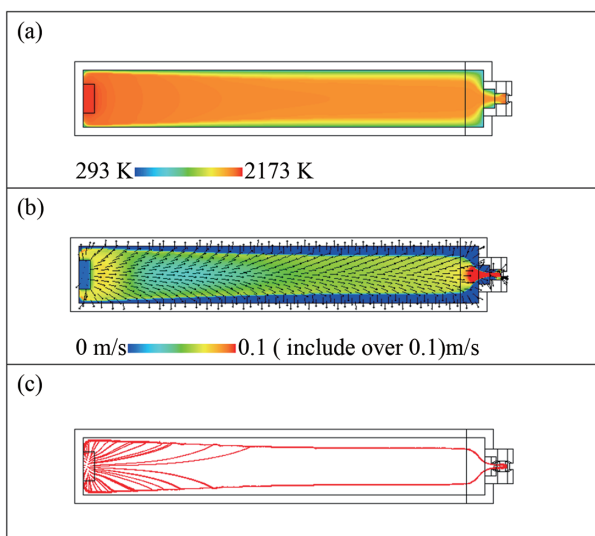


図 6 電子ビームを均一に照射した場合の計算結果

(a) 溶湯の表面温度、(b) 溶湯の表面流速、(c) LDI の挙動  
Calculated results of surface temperature of melt, melt flow of surface and behavior of LDI when electron beam was irradiated uniformly  
(a) temperature of molten alloy surface, (b) surface flow velocity of molten alloy and (c) behavior of LDI.

本解析では、LDI の溶解を考慮していないが、窒化スポンジチタンの溶解速度については、著者の一部が詳細な検討を行っている<sup>10)</sup>。今回の解析条件であるチタン溶湯温度が 2136 K の場合の窒化スポンジチタンの溶解速度は 0.1 mm/s 程度であることから、直径 5 mm の窒化スポンジチタンは数十秒間でチタン溶湯中に溶解すると推測される。このため、帯状に照射して堰き止められている間に溶解除去、もしくはハース側壁に形成される半熔融領域で動きが阻害されて捕捉除去されると考えられる。

## 5. 電子ビーム溶解 (EBR) 試験および結果

### 5.1 試験方法

水冷ハース内の湯面に浮遊する LDI の鋳型内への流出を抑制するには、水冷ハースの給湯口近傍の湯面に、電子ビームを帯状に照射することが有効であることが数値解析で予測できた。

実際の EBR で電子ビームを帯状に照射した場合の LDI 流出の抑制効果を見極めるために、模擬介在物を添加する実験を行った。

模擬介在物として、チタン溶湯の密度よりも小さく、チタン溶湯の温度よりも融点 (昇華点) が高く、かつチタン溶湯と反応し難い炭素棒 ( $\phi 10 \times 30$  mm) を選択した。

実験では、溶解原料として Ti-6Al-4V の成分に調整されたブリケットを用いた。これらのブリケットを原料供給装置内に並べ、ブリケットの間隙に炭素棒を配置した。電子ビームが照射されてブリケットが溶解すると、炭素棒が水冷ハース内に落下する。水冷ハースの給湯口近傍の湯面に、電子ビームを帯状に照射する領域を設けて、マランゴニ対

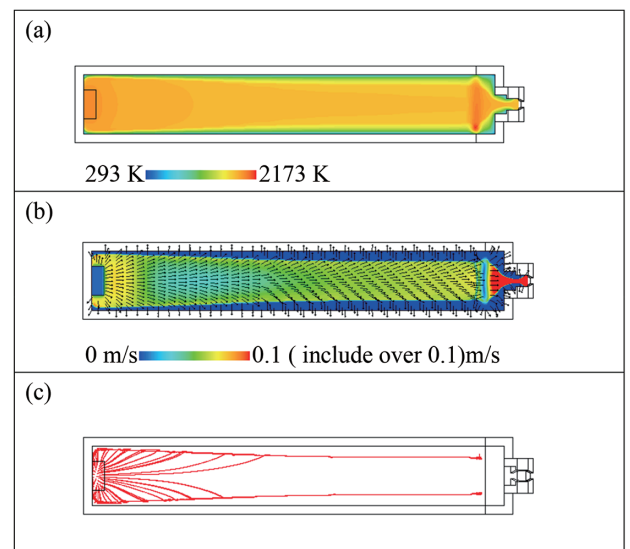


図 7 電子ビームを帯状に照射した場合の計算結果

(a) 溶湯の表面温度、(b) 溶湯の表面流速、(c) LDI の挙動  
Calculated results of surface temperature of melt, melt flow of surface and behavior of LDI when electron beam was irradiated intensively  
(a) temperature of molten alloy surface, (b) surface flow velocity of molten alloy and (c) behavior of LDI.

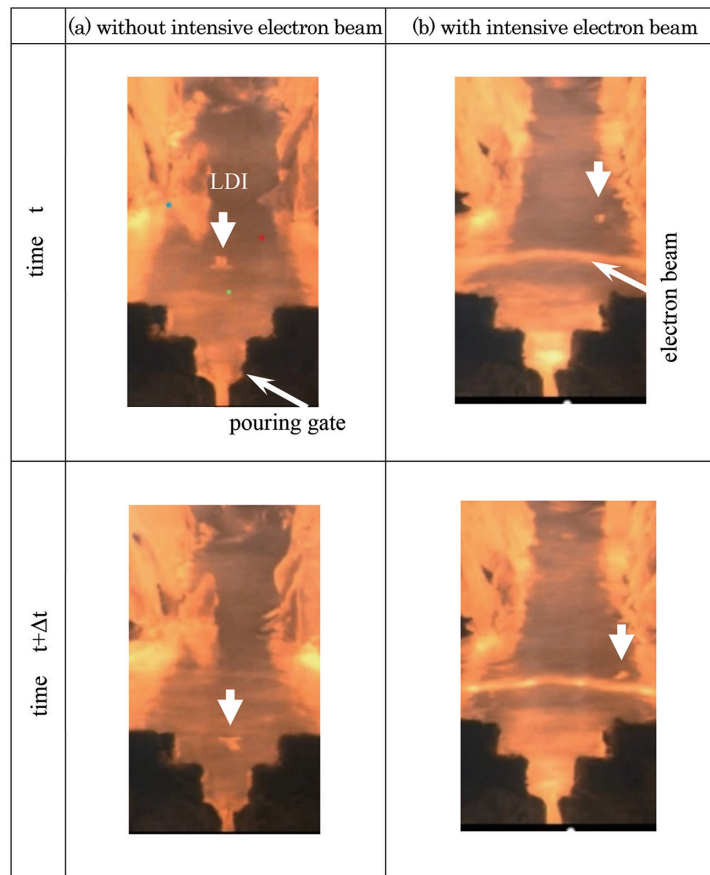


図8 電子ビームの照射パターンに依存した水冷ハース湯面における模擬 LDI の流動状況  
Flow pattern of synthetic LDI in cold hearth with and without intensive electron beam

流を発生させた。

## 5.2 試験結果

図8(a)に電子ビームを帯状に照射しない場合の水冷ハース内の湯面の観察結果を示す。水冷ハースの上流から流れてきた炭素棒は、給湯口に到達し、鑄型内に流出した。

図8(b)に水冷ハースの給湯口近傍の湯面に帯状の電子ビームを照射した場合の湯面の観察結果を示す。水冷ハースの上流から給湯口に向かって流れてきた炭素棒は、電子ビームが帯状に照射された位置で方向が変わり、水冷ハースの側面に向かって流れた。その後、炭素棒は水冷ハースの壁面に形成されるスカル(凝固したチタン)に捕捉され、鑄型への流出が抑制できた。

このように、水冷ハースの給湯口近傍に電子ビームを帯状に照射することで、浮遊する LDI の鑄型内への流出を抑制できることを実際に確認することができた。

## 6. 結 言

電子ビーム溶解 (EBR) において、低密度介在物 (LDI) である窒化スポンジチタンのチタン溶湯中の浮遊や流動挙動を調査し、窒化スポンジチタンを鑄型内に流出させない方法を検討した。まず、水冷ハース内のチタン湯面に電子ビームを帯状に照射して発生させたマランゴニ対流の効果

について、数値解析により評価を行った。さらに、EBR において Ti-6Al-4V 溶湯に模擬 LDI として炭素棒を添加する試験を行い、その除去効果について検証した。

- (1) LDI となる窒化スポンジチタンは開放された気孔で形成されるポーラス構造を有する。その気孔率は約 38% であった。
- (2) Ti-6Al-4V の液相線温度における窒化スポンジチタンの見掛け密度は、N 濃度の増加にともない大きくなった。
- (3) 窒化スポンジチタンの気孔内にチタン溶湯が浸入する場合、窒化スポンジチタンの見掛け密度は Ti-6Al-4V 溶湯の密度より大きい、全く浸入しない場合は、Ti-6Al-4V 溶湯の密度よりも小さいことから、湯面に浮くことがわかった。
- (4) 水冷ハースの給湯口の近傍に、電子ビームを帯状に照射することで、浮遊する LDI の鑄型内への流出が抑制できることを数値解析から明らかにした。また、LDI を模擬した炭素棒を添加する EBR 試験を行い、炭素棒が鑄型内に流出することがなく、電子ビームを帯状に照射する効果が確認できた。

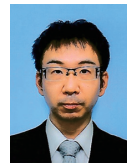
### 参照文献

- 1) 日本チタン協会編：チタンの加工技術。初版。東京，日刊工業新聞社，1992，p.2

- 2) 竹田修, 岡部徹: 軽金属. 67, 257 (2017)
- 3) 新家光雄, 仲井正昭: 軽金属. 67, 307 (2017)
- 4) 日本チタン協会編: 現場で生かす金属材料シリーズ チタン. 初版. 東京, (株)工業調査会, 2007, p.168
- 5) 新良貴健: チタン. 69, 96 (2021)
- 6) Aigner, K., Lengauer, W., Rafaja, D., Ettmater, P.: J. Alloys Compounds. 215, 121 (1994)
- 7) Lengauer, W.: J. Alloys Compounds. 186, 293 (1992)
- 8) Morsi, S.A., Alexander, A.J.: J. Fluid Mech. 55, 193 (1972)
- 9) Zhao, X.: Master Thesis, The University of British Columbia, 2006
- 10) Mizukami, H., Kitaura, T., Shirai, Y.: ISIJ Int. 59, 102 (2019)



水上英夫 Hideo MIZUKAMI  
鉄鋼研究所 材料信頼性研究部  
チタン・ステンレス研究室 主幹研究員  
博士(工学)  
新潟県上越市港町2-12-1 〒942-8510



和田将明 Masaaki WADA  
東日本製鉄所 直江津地区  
チタン部 チタン技術室  
(現 知的財産部 分野知財戦略課 主査)



舟金仁志 Hitoshi FUNAGANE  
先端技術研究所 数理科学研究部  
プロセス計算研究室 主幹研究員  
博士(工学)



白井善久 Yoshihisa SHIRAI  
鉄鋼研究所 材料信頼性研究部  
チタン・ステンレス研究室 主幹研究員  
(現 日鉄テクノロジー(株)  
尼崎事業所 技術営業部 専門主幹)



北浦知之 Tomoyuki KITAURA  
東日本製鉄所 直江津地区  
チタン部 チタン技術室  
形鋼・プレス技術課長 博士(工学)



梅田 繁 Shigeru UMEDA  
チタン事業部 チタン技術部 チタン技術室  
首席主幹



武田宜大 Yoshinari TAKEDA  
東日本製鉄所 直江津地区  
チタン部 チタン技術室  
(現 日鉄直江津チタン(株) 課長)