

電子ビーム真空蒸発装置における 溶融金属液レベルモニタの開発

Development of Molten Metal Level Monitoring system
for Electron Beam Heat Vapor Deposition Equipment

技術本部 若元 郁夫*¹ 国光 智*²
手島 和範*³
神戸造船所 金川 昭宏*⁴ 福田 信幸*⁴

各種材料に高融点金属を蒸着するための真空蒸着装置では、真空中でるつぼ内の処理対象金属を電子ビーム加熱により溶解・蒸発させる。蒸発特性の安定化や長時間運転のためには、るつぼ内溶融金属の液レベルを検出して原料を補給し、これを一定に保つ必要がある。このような目的に沿って、X線ピンホールカメラを検出器とするるつぼ液レベルモニタを開発した。原理は2台のX線ピンホールカメラを利用して、電子ビーム照射位置から発生するX線を2方向から検出して三角測量を行うものである。本モニタにより約±1mmの精度で液レベルのリアルタイム測定が可能となり、先に開発した電子ビームプロファイルモニタ装置と合せて、真空蒸着装置の運転制御性が飛躍的に向上した。

In the vacuum evaporating equipment which is used to deposit a high melting point metal on various materials, the metal in the crucible is heated by an electron beam gun. In order to evaporate the metal stably, the surface of the molten metal needs to be controlled to a constant level by feeding the raw material to the crucible. It is necessary for this purpose to detect the level position precisely by any method. We have developed a level monitoring system composed of two X-ray pin hole cameras based on triangular measurement. The camera detects the X-rays generated by the electron beam irradiation on the metal surface. This system ensures the level position for an accuracy within ± 1 mm. The controllability of the vacuum evaporating equipment will be improved by this monitor.

1. ま え が き

近年、フィルムや鋼板の表面に高融点金属を蒸着し、機能向上を図ることが行われている。そこでは金属蒸気が発生させるための熱源として電子銃が用いられ、長尺のるつぼ中の金属を高温に加熱する。

これらの装置では所定の位置に電子ビームを照射し、なおかつ所定の入熱を与える必要がある。

そのため当社では、X線照射部から発生するX線を用いて電子ビームの照射位置や形状が蒸着膜を介しても監視できるX線カメラを開発した⁽¹⁾。さらに、金属蒸発に伴って減少するるつぼ内金属を一定レベルに保つことによって蒸着装置としての安定性向上が望まれた。

これを受けて本研究ではX線カメラを2台用いて、2方向から同時に電子ビーム照射位置を検出することにより、三角測量の原理で溶融金属レベルを測定するシステムを開発した⁽²⁾。従来は、窓ガラスを通して目視により液レベルの増減を監視し、レベルが不足すれば原料金属を供給するという手法であったため、窓ガラスへの蒸着などの問題もあり長時間の監視も困難であった。

このX線カメラによる三角測量法は、電子ビームの軌道が不確かな場合や外乱の影響で所定の照射位置から外れた場合でも安定したレベル監視ができ、また長時間連続監視ができるのが特徴である。

なお、従来から連続蒸着装置で利用されてきたX線式レベル計は、るつぼを挟んだ両端にX線源とラインセンサを配置して液体部分を投影するものであり、るつぼのサイズや材質の制約が厳しく、本研究のものとは原理的に異なる。

2. X線カメラの概要⁽³⁾

本研究で使用したカメラはX線源自身の画像を得るために、ピンホール（厚さ1mmの鉛板に直径0.1~0.5mmの穴をあけたもの）による光学系を用いている。図1にその結像概念図を示す。電子ビームを金属面に照射すると、照射面は電流密度分布に対応した強度分布を持つX線光源となる。そこから発するX線はピンホールによってX線画像の検出器有感面に結像される。このときX線は可視光とは異なり、蒸着膜やBe窓を透過して真空容器外側に導くことができる。X線有感面は二次元電子増倍素子であるマ

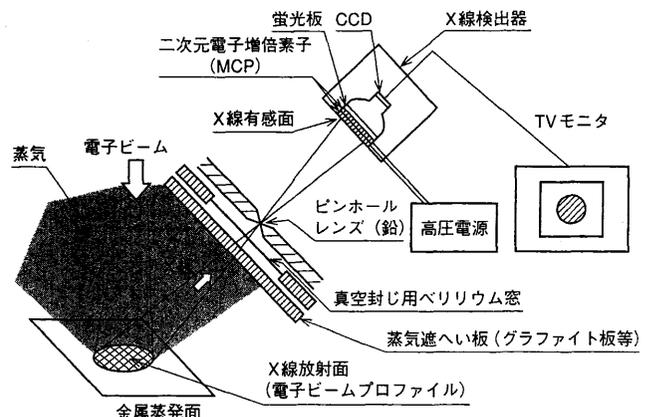


図1 X線カメラを用いた電子ビームプロファイルモニタ装置の概念図 電子ビーム照射面から発生するX線をピンホール光学系でX線検出器の有感面に結像する。
Schematic view of electron beam profile monitoring system by X-ray pinhole camera

*1 広島研究所応物・振動研究室主務

*3 広島研究所応物・振動研究室

*2 広島研究所機構技術グループ

*4 原子力プラント技術部量子システムグループ

イクロチャンネルプレート（以下、MCPと称す）にCsIなどをコーティングしたもので、MCP 2枚で最大10°の利得が得られる。

そのMCPは小型の真空容器中に封じ込めてあり、増倍した電子が蛍光面で可視光に変換され、光ファイバを介して真空容器外のCCD素子に導かれビデオ信号として出力される。図2にX線カメラ2台を蒸着装置に取付けた状況を示す。X線カメラ全体の構成は図2に示すようなX線遮へい性能を有するケースの中にMCPを内蔵したX線検出器とピンホール光学系から成る。ピンホールは外部から操作して移動できる構造になっており、有感面に結像する像の大きさを変化させることが可能である。

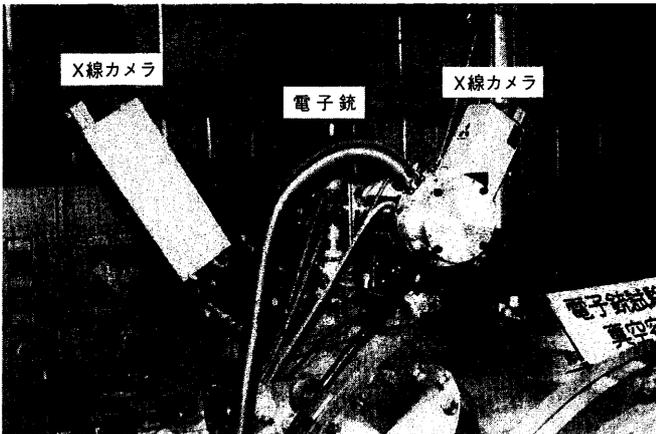


図2 X線カメラの取付け状況 電子銃を挟んで2台のX線カメラが真空蒸着試験装置の上部に設置されている。
Attaching situation of two X-ray cameras

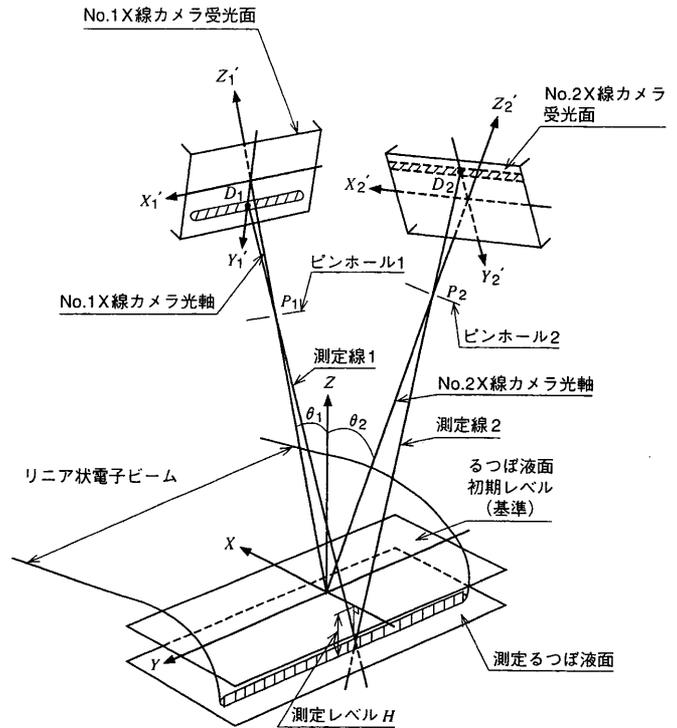


図3 液レベル測定原理図 2台のX線カメラ受光面に、ピンホールを通過したX線が結像すると三角測量の原理でX線発生位置が特定できる。

Explanation drawing of level measuring system

$$X_p = L_2 \sin \theta \tag{2}$$

$$Y_p = 0 \tag{3}$$

$$Z_p = L_2 \cos \theta \tag{4}$$

3.2 液レベルの算出

図3に示したX線カメラ受光面上において結像した画像の重心座標をそれぞれ D_1, D_2 とし、ピンホールの座標を P_1, P_2 とする。すると直線 D_1P_1 （測定線1）と直線 D_2P_2 （測定線2）は元来同一のX線発生源から直進したX線の道筋を示しているから、理想的には両直線は交点があるはずである。したがって、交点は測定する液面上にある電子ビーム照射形状の重心位置を示すと同時に、交点のZ座標が測定液レベル H を示す。ただし、現実的にはX線カメラの設置誤差などの影響から完全なる交点は存在しない。よって、2本の測定線 D_1P_1 と D_2P_2 の最も接近した位置を交点として求めることとした。なお、以下に示す式の座標系はすべて (XYZ) 座標系である。

測定線1, 2はそれぞれ次式で表される。

$$\frac{X - X_{P1}}{X_1 - X_{P1}} = \frac{Y}{Y_1} = \frac{Z - Z_{P1}}{Z_1 - Z_{P1}} = k \tag{5}$$

$$\frac{X - X_{P2}}{X_2 - X_{P1}} = \frac{Y}{Y_2} = \frac{Z - Z_{P2}}{Z_2 - Z_{P1}} = h \tag{6}$$

ここで、

- (X_1, Y_1, Z_1) : D_1 点の座標
- (X_2, Y_2, Z_2) : D_2 点の座標
- $(X_{P1}, 0, Z_{P1})$: ピンホール1の座標
- $(X_{P2}, 0, Z_{P2})$: ピンホール2の座標

さらに測定線同士が最も接近する座標がそれぞれ存在し、そのZ座標を Z_{1e}, Z_{2e} とすると、求めたいレベル H はその平均値で表し、以下のようになる。

$$H = (Z_{1e} + Z_{2e}) / 2 \tag{7}$$

ここで、

3. レベル検出原理

3.1 座標系の設定

図3に液レベル算出に関する測定原理説明図を示す。

るつば液面が初期レベルのとき、その液面を基準とする。そして、電子ビーム照射形状の重心点を原点とした XYZ 座標系を設定する。つぎに、両カメラの光軸が $X-Z$ 平面内に入り、かつ受光面上の X' 軸が基準座標上の Y 軸と平行になるようにそれぞれのX線カメラを設置したとする。また、このときのX線カメラの取付け角度は基準座標Z軸からの傾斜角度とし、それぞれ θ で示す。

図3に示す測定るつば液面のように液レベルが変化すると、電子ビーム照射位置から発するX線の結像位置は両カメラの受光面上において、図に示すように移動する。したがって、受光面上の $X'Y'$ 座標上の重心 D はそれぞれ Y' 軸方向に移動する。

レベルを計算するためには、まず、受光面上の $X'Y'$ 座標系を基準座標に座標変換する必要がある。その変換式はつぎのとおりである。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \cos \theta \\ -1 & 0 \\ 0 & -\sin \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \end{bmatrix} + (L_1 + L_2) \begin{bmatrix} \sin \theta \\ 0 \\ \cos \theta \end{bmatrix} \tag{1}$$

ここで、

- L_1 : 受光面座標原点からピンホールまでの距離 (mm)
- L_2 : ピンホールから基準座標までの距離 (mm)
- θ : X線カメラの傾斜角度 (°)

また、ピンホール座標 (X_p, Y_p, Z_p) は XYZ 基準座標では、次式で表せる。

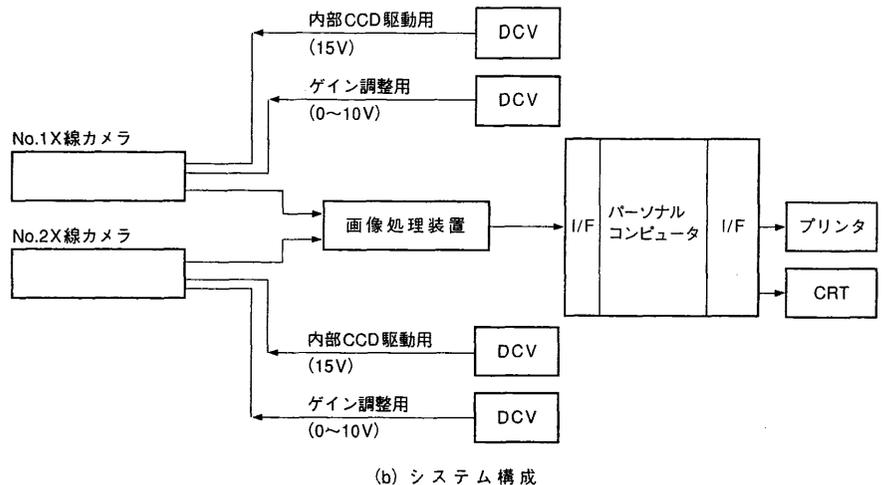
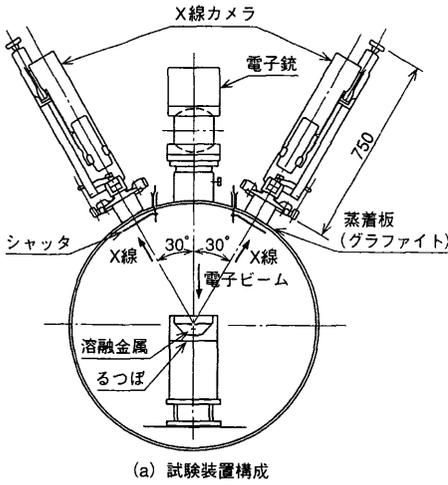


図4 試験装置及びシステム構成 装置は2台のX線カメラの光軸を、るつぼ液面上の中心に合せてある。2台のX線カメラからの画像情報が同時に画像処理装置に導かれ、X線画像の重心検出が行われる。パーソナルコンピュータは液レベル演算処理を行う。
Schematic view of test equipment and block diagram of level monitoring system

$$Z_{1e} = Z_{P1} + k(Z_1 - Z_{P1})$$

$$Z_{2e} = Z_{P2} + h(Z_2 - Z_{P2})$$

4. 性能評価結果

4.1 試験装置

図4(a)にX線カメラを設置した試験装置構成の例を示す。半径約1mの真空容器内中央に蒸発対象金属を満したるつぼを設置し、電子銃は真空容器天井からるつぼ中心をねらっている。また、2台のX線カメラは電子銃を挟んで左右に分かれて設置しており、両カメラ共るつぼ中心に光軸が合せてある。この状態で電子ビームをるつぼ中心に照射して金属蒸気を発生させると、金属蒸気はBe製X線窓を蒸着させてしまう恐れがある。したがって、保護のためのグラファイト製の蒸着板で金属蒸気を遮るように配慮されている。なお、図4に示した電子銃の姿勢や設置位置にはほとんど制限はない。磁界を利用して電子ビームがるつぼに到達するように配慮すればよい。

4.2 システム構成

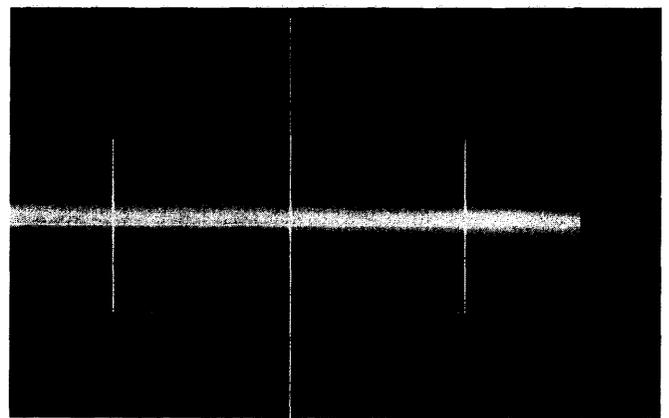
図4(b)にシステム構成を示す。2台あるX線カメラはそれぞれNo.1、No.2と呼び、それぞれのカメラの作動に必要なCCD用電源とMCPへの印加電圧調整用の電源が接続されている。そして、両カメラの映像信号は1台の画像処理装置にリアルタイムで導かれる。さらにパーソナルコンピュータにより、画像処理装置をコントロールして画像処理データを用いてレベル演算処理を行う。なお、X線画像は50回積算したものを処理し、測定に要する時間は約1minであった。

4.3 基礎試験

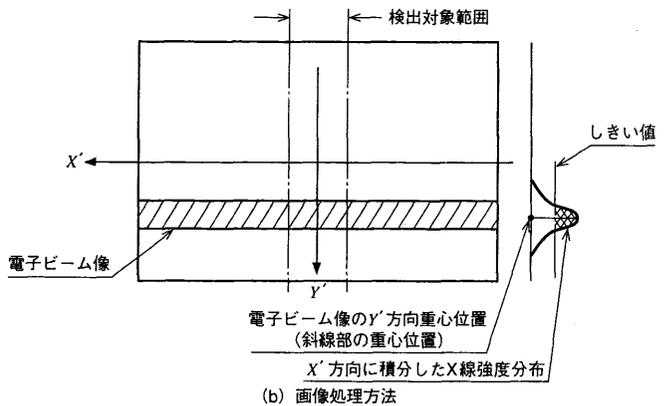
図5(a)に基礎試験時にX線カメラで捕えた電子ビーム像を示し、図5(b)に重心座標検出に至る画像処理方法の説明を示す。

3.1節で説明したとおり、X線カメラは、画面X'軸がリニア状の電子ビーム像に対して平行に写るように設置してある。したがって、画像の重心座標を求めるための画像処理は、X'軸方向に積分したX線強度分布を得ることで容易に求まる。すなわち、電子ビーム像のY'方向重心位置は、X線強度分布に適切なしきい値で区切られた範囲内の重心演算で得られる。こうした手法で得られたX'Y'座標上での重心座標を式(1)に従って座標変換して、式(7)に代入して液レベルHが求まる。

基礎試験では検出精度を確認するため、るつぼの代りに上下に



(a) X線カメラが捕えた画像



(b) 画像処理方法

図5 X線カメラが捕えた画像及び画像処理方法 走査電子ビームの照射形状がリニア状に映し出されている。中央の十字線はX線カメラの光軸中心を示している。X'軸方向にリニア画像を積分処理してX線強度分布を求める。
Example of picture taken by one X-ray camera and image processing

20μmの精度で昇降できる台を設置し、その上に融点の高いタングステン板を乗せて模擬的な液面を用意した。

図6に検出精度の確認試験結果を示す。

横軸は昇降台の設定レベルを示しており、縦軸は表示されたレベルを示している。それぞれの点は同一レベルで10回づつ測定した平均値を示している。図に示されているとおり、両レベルは良い一致を示している。

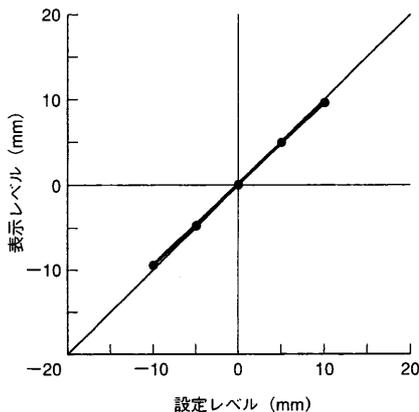


図6 測定精度評価結果 るつばの代りに高精度昇降台を設置して得られるレベルの平均値をプロットした。
Appraised accuracy of measurement

4.4 蒸発試験結果

図7に連続的に測定した液レベルの推移を示す。時刻が経過するにつれて、蒸発に伴ったレベルの減少が確認できる。例えば、0 min から 18 min ころまでに約 2 mm 程度減少している。また、下向きの矢印は原料を供給した時刻を示している。原料はペレット状のものを使用している。それぞれの原料供給個数は 1 個であり、1 個のペレットの体積と溶融域の面積から換算して約 1 mm の液レベルの上昇が見込まれる。図中の原料供給前後に見られる液レベルの上昇も平均して 1 mm 程度上昇しており、見込みどおりの結果を得たものと評価される。

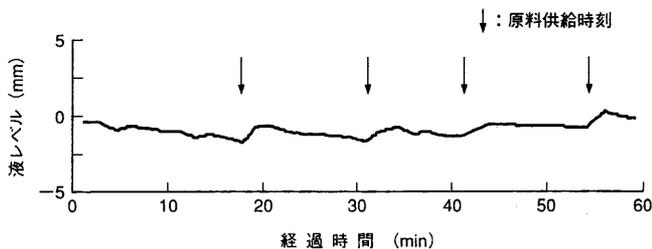


図7 液レベルの推移 原料供給前後で 1 mm のレベル上昇が確認できる。
Example of transiting level

4.5 測定誤差評価

表1に液レベルの測定誤差評価結果を示す。誤差の要因としては以下の3点が挙げられる。

(1) 光学パラメータの誤差

X線カメラの据付けや組立から加算される寸法誤差については、真空容器等に JIS B0408 C 級の公差が適用されるものとし、角度誤差はこの公差から算出した値である。表1中に示した光学パラメータ誤差はこうした公差から決定した。

また、液レベル誤差は、液レベル計算式に代入した寸法や角度に対して、それぞれ独立に光学パラメータを加えたときに求まる液レベルの変動分である。誤差の加算は2乗平均加算で行い、両方のカメラ共、それぞれ 0.3 mm の誤差が見込まれる。

(2) 位置検出誤差

MCPでX線を電子に変換し、CCDに画像情報を伝える間に加わる誤差である。これは受光面上の1画素分に相当する。これも上記と同様に1画素分の検出位置誤差をレベル計算式に代

表1 液レベルの測定誤差評価結果
Total accuracy of level monitoring system

		No.1 X線カメラ		No.2 X線カメラ		
① 光学パラメータによる誤差		光学パラメータ誤差	液レベル誤差	光学パラメータ誤差	液レベル誤差	
	L_{11}	2.5 mm	0.2 mm	L_{21}	2.5 mm	0.2 mm
	L_{12}	6 mm	0.1 mm	L_{22}	6 mm	0.1 mm
	θ_1	1°	0.1 mm	θ_2	1°	0.1 mm
		計	0.3 mm	計	0.3 mm	
② 位置検出誤差		画素誤差	液レベル誤差	画素誤差	液レベル誤差	
	X_1' 方向	1画素	0 mm	X_2' 方向	1画素	0 mm
	Y_1' 方向	1画素	0.4 mm	Y_2' 方向	1画素	0.3 mm
	計		0.4 mm	計		0.3 mm
③ X線の統計的ばらつきによる液レベル誤差		0.3 mm (積算回数 50 回)				
液レベル総合誤差	④ 系統誤差 (①)		0.4 mm			
	⑤ 偶然誤差 (ばらつき誤差) (②, ③)		0.6 mm			
	総合誤差 (④, ⑤)		0.7 mm			

入した。結果は No.1 カメラで 0.4 mm、No.2 カメラで 0.3 mm の誤差となった。両者のカメラで誤差が異なるのは X 線カメラの取付け状態が異なり、若干の光学パラメータの違いから生じている。

(3) X線の統計的ばらつきによる誤差

到達する X 線は、瞬間的にはランダムなため画像重心は一定値を取らずばらつきが生じる。基礎試験時に得た、データのばらつきは 0.3 mm であり、画像の積算回数が各カメラごとに 50 回になるのが最適の条件であった。

以上(1)~(3)を総合すると次のようになる。

まず、系統誤差は光学パラメータ誤差から求め、両 X 線カメラ分の二乗平均値は約 0.4 mm である。つぎに、偶然誤差は位置検出誤差とばらつき誤差の二乗平均で求め、0.6 mm となる。したがって、総合誤差は系統誤差と偶然誤差の二乗平均で求めると 0.7 mm 程度となる。以上の結果から、液レベルの測定は約 ±1 mm 以下の精度で計測できるものと考えられる。

5. ま と め

るつば液レベルを測定する目的で、液面上の電子ビーム照射位置から発生する X 線を、2 台の X 線カメラによって三角測量する液レベル測定装置を開発し、以下の結果を得た。

- (1) 液レベルの計測サイクルは 1 回当たり約 1 min である。
- (2) 液レベルの測定誤差は ±1 mm 以内である。
- (3) 金属蒸発試験において、原料供給によってほぼ予想される液レベルまで回復でき、運転の制御性向上の役割を果たした。

今後原料供給の自動化や溶融金属表面の元素分布計測機能を有する X 線カメラを組込んだ、高性能型真空蒸着装置の開発を行う予定である。

参 考 文 献

- (1) 若元都夫ほか、超高感度 X 線カメラの開発、第 39 回応用物理学関係連合講演会予稿集 2 冊分 30 a-SNC-25 (1992) p.563
- (2) 寺田正文ほか、X 線ピンホールカメラを用いたるつば液レベルモニタの開発、日本原子力学会 1995 年秋の大会予稿集 II-9
- (3) 若元都夫ほか、電子ビームプロファイルモニタ装置の開発、三菱重工技報 Vol.30 No.4 (1993-7) p.329