



金属溶融設備における成型工程の合理化の検証

Verification of Improvement of the Casting Process in Metal Melting System

藤平 俊夫 中塩 信行 大杉 武史 石川 譲二 溝口 崇史 埴 律
染谷 計多 高橋 賢次 伊勢田 浩克 小澤 一茂 門馬 利行

Toshio TOUHEI, Nobuyuki NAKASHIO, Takeshi OHSUGI, Joji ISHIKAWA
Takafumi MIZOGUCHI, Ritsu HANAWA, Keita SOMEYA, Kenji TAKAHASHI
Hirokatsu ISEDA, Kazushige KOZAWA and Toshiyuki MOMMA

東海研究開発センター
原子力科学研究所
バックエンド技術部

Department of Decommissioning and Waste Management
Nuclear Science Research Institute
Tokai Research and Development Center

June 2010

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2010

金属溶融設備における成型工程の合理化の検証

日本原子力研究開発機構 東海研究開発センター
原子力科学研究所 バックエンド技術部

藤平 俊夫・中塩 信行・大杉 武史・石川 譲二
溝口 崇史・埴 律・染谷 計多*¹・高橋 賢次*²
伊勢田 浩克・小澤 一茂・門馬 利行

(2010年3月1日受理)

減容処理棟に設置されている金属溶融設備は、原子力科学研究所に保管廃棄された低レベル放射性廃棄物のうち、金属廃棄物について溶融し、溶融固化体とすることにより、放射性廃棄物の減容、安定化を図るものである。これまでの試験運転結果を踏まえて、本設備のうち、溶融した金属から金属塊（インゴット）を作製する成型工程の改善工事を実施した。また、平成20年10月から試験運転を実施し、合理化した成型工程の検証を行った。

本稿では、試験運転によって得られた合理化した成型工程での処理時間の短縮効果、ユーティリティ消費量の低減効果、保守作業の負担軽減効果等について報告する。

原子力科学研究所： 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

* 1 原子力エンジニアリング株式会社 東海減容事業所

* 2 三菱マテリアル株式会社 エネルギー事業センター

Verification of Improvement of the Casting Process
in Metal Melting System

Toshio TOUHEI, Nobuyuki NAKASHIO, Takeshi OHSUGI, Joji ISHIKAWA,
Takafumi MIZOGUCHI, Ritsu HANAWA, Keita SOMEYA*¹, Kenji TAKAHASHI*²,
Hirokatsu ISEDA, Kazushige KOZAWA and Toshiyuki MOMMA

Department of Decommissioning and Waste Management
Nuclear Science Research Institute, Tokai Research and Development Center
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun Ibaraki-ken

(Received March 1, 2010)

The Waste Volume Reduction Facility (WVRF) was constructed for volume reduction and the chemical stabilization of the low level radioactive waste in the Nuclear Science Research Institute of JAEA. The metal melting system in the WVRF treats radioactive metal waste. From the experience of trial operations, the improvement has conducted on the casting process in the metal melting system. The performance of the improved casting process was verified through the trial operations from Oct. 2008.

In this report, we describe the reduction of the processing time, of the utilities consumption, of the load of maintenance on the improved casting process.

Keywords : Waste Volume Reduction Facility, Low Level Radioactive Waste,
Metal Melting System, Volume Reduction, Improved Casting Process

* 1 Nuclear Engineering Corporation Tokai Volume Reduction Establishment

* 2 Mitsubishi Materials Corporation Energy Project & Technology Center

目次

1. はじめに	1
2. 金属溶融設備の概要	2
3. 設備改善	3
3.1 設備改善を実施した背景	3
3.2 設備改善の概要	3
4. 試験運転で検証する項目	4
4.1 設備改善の検証	4
4.2 処理時間の短縮、ユーティリティ消費量の低減効果の確認	4
4.3 成型物の後処理、保守作業負担の軽減効果の確認	5
5. 試験運転	6
5.1 試験運転の概要	6
5.2 設備改善の検証	6
5.3 処理時間の短縮、ユーティリティ消費量の低減効果の確認	7
5.4 成型物の後処理、保守作業負担の軽減効果の確認	8
6. まとめ	9
謝辞	9
参考文献	9

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of the Metal Melting System	2
3. Improvement of casting process in metal melting system	3
3.1 Background of the improvement	3
3.2 Outline of the improvement	3
4. Verification items on trial operation	4
4.1 Verification of improvement	4
4.2 Confirmation of reducing of processing time and utility consumption	4
4.3 Confirmation of reducing of the load of maintenance work for casting process	5
5. Trial operation	6
5.1 Outline of trial operation	6
5.2 Verification of improvement	6
5.3 Confirmation of reducing of processing time and utility consumption	7
5.4 Confirmation of reducing of the load of maintenance work for casting process	8
6. Summary	9
Acknowledgement	9
References	9

図表リスト

Fig. 1	注湯機を使用した処理での金属溶融設備処理系統図	10
Fig. 2	注湯機を使用した処理での出湯工程、成型工程の流れ	11
Fig. 3	直接造塊法での金属溶融設備処理系統図	12
Fig. 4	直接造塊法での出湯工程、成型工程の流れ	13
Photo. 1	注湯機での溶湯の固化、堆積状況	14
Photo. 2	溶融炉下部周辺機器に設置したガード	15
Photo. 3	飛散物の回収範囲	16
Photo. 4-1	溶融物の飛散状況（第 36 回）	17
Photo. 4-2	溶融物の飛散状況（第 37 回）	18
Photo. 4-3	溶融物の飛散状況（第 38 回）	19
Photo. 4-4	溶融物の飛散状況（第 39 回）	20
Photo. 4-5	溶融物の飛散状況（第 40 回）	21
Photo. 4-6	溶融物の飛散状況（第 41 回）	22
Table 1	金属溶融設備での試験運転の概要（第 33 回から第 41 回）	23
Table 2	直接造塊法での溶湯の飛散量	24
Table 3	注湯機を使用した処理と直接造塊法での処理時間（第 20 回から第 41 回）	25
Table 4	注湯機を使用した処理と直接造塊法による処理時間の短縮効果の比較	26
Table 5	注湯機を使用した処理と直接造塊法による消費電力の比較	27
Table 6	成型物の後処理、保守作業に要する人工の比較	28

Figure and Table List

Fig.1	Metal melting system processing flow of ladle using method.....	10
Fig.2	Outline of pouring process and casting process of ladle using method.....	11
Fig.3	Metal melting system processing flow of direct casting method.....	12
Fig.4	Outline of pouring process and casting process of direct casting method..	13
Photo.1	Situation of piling up of molten metal in ladle.....	14
Photo.2	Installation situation of guard.....	15
Photo.3	Recovery area of splashed molten metal.....	16
Photo.4-1	Situation of splashed molten metal (36th).....	17
Photo.4-2	Situation of splashed molten metal (37th).....	18
Photo.4-3	Situation of splashed molten metal (38th).....	19
Photo.4-4	Situation of splashed molten metal (39th).....	20
Photo.4-5	Situation of splashed molten metal (40th).....	21
Photo.4-6	Situation of splashed molten metal (41st).....	22
Table 1	Outline of trial operations (33rd-41st).....	23
Table 2	List of weight splashed molten metal in direct casting method.....	24
Table 3	List of working time, in ladle using method and direct casting method (20th-41st)	25
Table 4	Comparison between ladle using method and direct casting method in working time.....	26
Table 5	Comparison between ladle using method and direct casting method in electric power consumption.....	27
Table 6	Comparison between ladle using method and direct casting method in maintenance work load, post processing load	28

1. はじめに

金属溶融設備では、平成 15 年度から平成 17 年度までに模擬廃棄物を用いた試験運転を計 32 回実施しており、これら試験運転の経験から溶融した金属（以下、「溶湯」という。）から金属塊（以下、「インゴット」という。）を作製する成型工程において、処理コストの低減、保守作業の負担軽減、保守作業に伴う作業員の被ばくの低減等に向けた課題が抽出された。その課題を解決するための設計検討、改善工事を平成 18 年度から 19 年度に実施した。この詳細については、平成 21 年 4 月に「金属溶融設備における成型工程の合理化のための設備改善」（以下、「技術報告書」という。）として報告した。

ここでは、平成 20 年 10 月から平成 21 年 7 月までに実施した 9 回の試験運転を通して、この改善による効果の確認を行った。

2. 金属溶融設備の概要

本設備は、主として鉄鋼を処理対象としており、溶融した金属をインゴットに成型する他、焼却・溶融設備で溶かされた溶融物（以下、「スラグ」という。）を受ける収納容器（以下、「受容器」という。）を鑄造できる。設備の構成は、廃棄物搬入装置、廃棄物投入装置、溶融炉、測温装置、サンプリング装置、溶融物を固化させるための成型装置、溶融炉から成型装置に溶湯を取り分ける注湯機、排ガス処理設備等から構成される。

処理はバッチ処理で行い、処理能力は1バッチ最大4トン、減容率は約3分の1から約4分の1である。なお、1日1バッチの処理を標準とする。

3. 設備改善

3.1 設備改善を実施した背景

本設備の出湯工程は、溶融した金属をインゴット、または受容器に鑄造するため、溶融炉から溶融炉下部に設けられた注湯機に出湯し、注湯機からインゴット成型装置（以下、「モールド」という。）、または受容器の成型装置に注ぎわける2段階の工程を必要としていた。さらに試験運転の経験から、出湯した溶湯の保温のため、注湯機内に300kg程度の溶湯を残す必要があることから、成型物の作製に当たっては、相当数の出湯、注ぎわけを繰り返す必要があった。

注湯機を使用した成型工程での処理系統フローについて、Fig. 1に示す。注湯機を使用した出湯工程、成型工程の流れについてFig. 2に示す。

溶湯は、溶融炉内部で千数百度の高温に加熱、保持することにより、高い流動性が得られるが、出湯時の自然冷却や注湯機内での温度の低下により、流動性が低下する。そのため、試験運転では、注湯機への出湯や注湯機から成型装置への注ぎわけを繰り返す度に、注湯機の注ぎ口の部分、注湯機の内部で溶湯が固化し、堆積・成長した。

注湯機の注ぎ口での溶融固化物の堆積、成長について、Photo. 1に示す。このように注湯機の注ぎ口の形状が乱される。

このため、注湯機から成型装置への注ぎわけの際に、堆積物が流路を乱して成型装置外へ溶湯を排出するおそれがあった。このような漏出が生じても溶湯はチャンバ内に留まり、機器・系統には火災防止対策が施されているため、保安上の問題は生じないものの、復旧には一定の時間を要することになる。また、成長した堆積物が、設備の構造物と干渉し、注湯機の移動ができなくなり、処理運転が継続できなくなることから、注湯機の溶融固化物の除去が必須となり、処理コストの増大をもたらすことが判明した。

以上のことから、注湯機を使用した場合の処理時間の増大、処理コストの増大及び保守作業員の被ばく量の増大の対策として、成型工程の合理化により改善を図ることとし、平成18年度から平成19年度にかけて検討、改造工事を実施することとした。成型工程の合理化について3.2に示す。

合理化した成型工程（以下、「直接造塊法」という。）の処理系統フローについてFig. 3に示す。また、直接造塊法での出湯工程、成型工程の流れについてFig. 4に示す。

3.2 設備改善の概要

設備改善は、従来の注湯機を使用した処理の他、直接造塊法による処理のモードを追加することとした。直接造塊法は、注湯機を使用せず、溶湯を直接モールドに流し出す工程とし、(1)溶湯の移動が一段階となり工程が簡略化され、処理に要する時間が短縮されること、(2)溶融炉からモールドに直接出湯するため溶融固化物の堆積・成長が低減されることにより、工程の合理化を図るものである。

4. 試験運転で検証する項目

4.1 設備改善の検証

(1) 溶融炉出湯口での出湯流の乱れの有無及び溶融物の飛散状況

溶融炉底部からインゴット成型装置の底部まで落差が約3mあることから、出湯流の乱れや受湯時の溶融物の飛散は、チャンバ内での汚染拡大につながる他、機器メンテナンス等に時間を要する原因となりえることから、試験運転では、出湯流の乱れの有無、溶融物の飛散状況について確認する。

(2) 溶融炉下部周辺機器に設置したガード等の有効性の確認

溶融炉下部周辺機器に設置したガード等について、出湯流の乱れ、溶融物の飛散による溶損等の有無を確認する。また、ガード等を設置したことによる運転への影響がないことを確認する。

① 注湯機ケーブルガード

溶融炉下部には、注湯機の電源等のユーティリティを供給するケーブルが敷設されており、溶融炉から注湯機へ出湯する際の飛散物対策として、薄肉鋼板製のガードが設置してある。しかし、直接造塊法では、溶融炉と成型装置との落差が大きいため、出湯流が乱れ、直接、溶湯が接触した場合にケーブルが損傷するのを防ぐために設置した。

② モールド台車の側面板

出湯流の乱れにより、溶湯がモールドのふちに接触し、溶湯の塊が水平方向に飛散することを防ぐため、モールド台車の側面板をモールド上端から200mmの高さまで増設した。

③ 輻射熱防止用筒

直接造塊法では、溶融炉から出湯され、モールドに受湯するまで出湯流が暴露されることから、出湯流からの輻射熱による周辺機器、構造物への熱的な影響を緩和するため、出湯流の経路に鋼製の筒を設置した。

これら溶融炉下部周辺機器へのガードの設置状況について、Photo. 2に示す。

(3) 出湯操作の操作性、視認性の確認

直接造塊法での出湯操作は、手動操作であり、モールドへの溶湯の受湯状況を目視で確認しながら停止操作を行うことから、試験運転では、出湯操作の操作性、モールドへの溶湯の受湯状況の視認性について確認する。

4.2 処理時間の短縮、ユーティリティ消費量の低減効果の確認

直接造塊法の適用により、成型工程が大幅に簡略化されることから、処理時間の短縮と処理時間の短縮に伴うユーティリティ消費量が低減される。技術報告書において短縮される処理時間とユーティリティ消費量の低減効果について試算を行っている。

試験運転では、これらについてデータを取得し、改善効果の確認を行う。

4.3 成型物の後処理、保守作業負担の軽減効果の確認

注湯機を使用する場合には、成型物の後処理として、受容器の後処理、インゴットの脱塊作業があり、保守作業としては、スライドバルブメンテナンス、溶融炉内の確認整備、注湯機内の確認整備、溶融チャンバ内の飛散物の回収等がある。直接造塊法では、注湯機を使用せず、受容器も作製しないことから受け容器の後処理がなくなり、また、注湯機内の確認、整備もなくなることから、技術報告書においては、保守作業の軽減効果について試算を行っている。

試験運転では、これらについてデータを取得し、試改善効果の確認を行う。

成型物の後処理、保守作業の概要を以下に示す。

(1) 成型物の後処理

① 受容器の処理

作製した受容器を鋳型から取り出し、表面の研磨作業を行う。研磨は自動回転式の金ブラシにより行われるが、粉じんの発生が多く、放射性物質の汚染管理の観点から、使用後の清掃作業が重要となる。

② インゴットの脱塊作業

作製したインゴットをモールドから取り出す作業の他、使用したモールド内の清掃作業を行う。放射性物質の汚染管理の観点から、使用後の清掃作業が重要となる。

(2) 保守作業

① スライドバルブメンテナンス

スライドバルブは、金属溶融炉底部に設置されたスライド式の開閉装置であり、本装置の開閉により、出湯が制御される。スライドバルブは処理毎に取り外しを行い、出湯口に付着したスラグの除去、開閉機構の健全性の確認等の作業を行う。

② 溶融炉内の確認整備

溶融炉内は、耐火物が設置され、溶融炉本体への熱的な影響を防いでいる。耐火物は、急激な温度上昇や溶湯との相互作用により亀裂、侵食等により損耗することから、処理毎に溶融炉内の耐火物の状態確認等を行う。

③ 注湯機内の確認整備

注湯機内は、溶融炉と同じように耐火物が設置され、注湯機本体への熱的な影響を防いでいる。耐火物は、急激な温度上昇や溶湯との相互作用により亀裂、侵食等により損耗することから、処理毎に注湯機内の耐火物の状態確認等を行う。

④ 溶融チャンバ内の飛散物の回収

溶湯の出湯に際しては、溶融物の流動性が高いため、溶融チャンバ内に溶融物が飛散する。放射性物質を用いて溶融を行った場合には、放射性物質が溶融チャンバ内に飛散することから、放射性物質による汚染管理の観点から処理運転毎に溶融チャンバ内の飛散物の回収作業を行う。

5. 試験運転

5.1 試験運転の概要

直接造塊法の検証のための試験運転は、平成 20 年 10 月から平成 21 年 7 月まで、第 33 回から第 41 回までの試験運転として計 9 回実施し、20,452kg の金属を溶融し 31 基のインゴットを作製した。試験運転は、段階的に溶融量の増加、また、炭素鋼以外の材質の金属の混入、可燃物、難燃物の混入を行い、実際の前処理作業後の放射性廃棄物を模擬して行った。溶融試験運転での溶融量、出湯回数、溶融した主な材質等について Table1 に示す。

5.2 設備改善の検証

(1) 溶融炉出湯口での出湯流の乱れの有無及び溶融物の飛散状況

第 33 回から第 41 回までの試験運転において、計 31 回の出湯を行った。

出湯流の乱れについては、出湯時に目視、I T V カメラでの画像により確認を行ったが、モールド外へ出湯されるような乱れは確認されなかった。

溶融物の飛散状況については、溶融炉から出湯した重量に対して、モールド内に受湯した溶融物（以下、「インゴット」という。）の重量とモールド内以外（モールド上部、モールド台車内、溶融チャンバ内）から回収された溶融物（以下、「飛散物」という。）の重量から飛散率を算出し、評価することとした。なお、出湯した重量については、インゴットの重量及び飛散物の重量を合算した重量とした。飛散物の回収範囲について、Photo. 3 に示す。

第 36 回から第 41 回の溶融物の飛散状況（モールド上部及びモールド台車内）について Photo. 4 に示す。また、インゴット重量と飛散物の重量の詳細について Table2 に示す。

飛散した溶融物については、小型のほうき、磁石等を用いて回収を行った。飛散重量量は、1.326kg から 8.510kg であった。出湯量に対しての飛散率は、下段に示す式により 0.09% から 0.34% 程度であり、落差が約 3 m あっても、出湯量の 99% 以上がモールドに受湯されることから、直接造塊法の懸案であった、チャンバ内の汚染、機器メンテナンスに要する時間は最小限に留められることが確認できた。

$$R_s = \frac{W_s}{W_f} \times 100 \quad \dots (1)$$

$$W_s = W_m + W_v + W_c \quad \dots (2)$$

$$W_f = W_{it} + W_s \quad \dots (3)$$

R_s : 飛散率 [%]
 W_s : 飛散物の重量 [kg]
 W_f : 出湯した重量 [kg]

W_m : モールド上部から回収された溶融物の重量 [kg]
 W_v : モールド台車内から回収された溶融物の重量 [kg]
 W_c : 溶融チャンバ内から回収された溶融物の重量 [kg]
 W_{it} : インゴットの重量 (合計) [kg]

(2) 溶融炉下部周辺機器に設置したガードの有効性の確認

① 注湯機ケーブルガード

試験運転終了後、注湯機ケーブルガード表面の状態を確認したところ、飛散物の付着は認められたものの、熱的な損傷は確認されなかった。

② モールド台車の側面板

試験運転後、モールド台車内部の側面板を確認したところ、飛散物の付着は認められたものの、熱的な損傷は確認されなかった。また、モールド上端から 200mm の高さまで側面板があっても、出湯流の確認に問題はなかった。

③ 輻射熱防止用筒

試験運転後、輻射熱防止筒の内部を確認したところ、飛散物の付着は認められたものの、熱的な損傷は確認されなかった。また、出湯流の確認に問題はなかった。

(3) 出湯操作の操作性、視認性の確認

第 33 回から第 41 回までの試験運転において、計 31 回の出湯を行った。モールドへの受湯量は、目標の受湯高さに標線を設けることで調整が可能であった。最終的には、目標とする受湯量に対して $\pm 50\text{kg}$ 程度での調整が可能であった。

出湯流の視認性については、遮光眼鏡を着用することにより、モールドへの受湯状況、溶湯面の目視確認が可能であった。これら出湯操作の操作性、視認性について、出湯操作を行った作業員からの聞き取り調査でも操作性、視認性に運用上の問題はないとの回答を得た。

5.3 処理時間の短縮、ユーティリティ消費量の低減効果の確認

(1) 処理時間の短縮

試験運転の実績から溶融時間（加熱開始から出湯開始まで）、出湯時間（出湯開始から出湯完了まで）及び処理時間（溶融時間と出湯時間を合わせた時間）を算出した。

第 20 回から第 41 回までの試験運転の処理時間、溶融時間、出湯時間について Table3 に示す。

注湯機を使用した処理では、第 21 回の試験運転において溶湯量 2,511kg でインゴット 4 基を作製しており、出湯時間は 80 分、インゴット 1 基当たりには要する時間は 20 分であった。一方、直接造塊法では、ほぼ同量の処理を実施した第 37 回、第 38 回の試

験運転において、溶湯量 2,504kg で 4 基のインゴットを作製しており、出湯時間はそれぞれ、4 分及び 5 分、インゴット 1 基当たりには約 1 分であった。

これらのことから出湯時間については、インゴット 1 基当たり 19 分、95%の短縮が確認された。溶融時間については、溶融物の材質、形状等により変化するため、溶融時間を 213 分（第 37 回、第 38 回の試験運転の実績の平均値）として、全体の処理時間として比較すると 71 分、注湯機を使用した処理と比較して、約 24.2%の短縮が確認された。

注湯機を使用した処理と直接造塊法での処理時間の短縮効果の比較について Table4 に示す。

(2) ユーティリティ消費量の低減

注湯機を使用した処理（第 20 回から第 32 回）及び直接造塊法での処理（第 33 回から第 41 回まで）における電力消費量及び電力料金の比較について Table5 に示す。

その結果、第 33 回から第 41 回までの試験運転の結果、電力消費量について約 24.3%の低減が確認された。

その他のユーティリティについては、注湯機を使用した処理では、1 回の溶融運転の平均使用量が、アルゴンガス 5.4m³、LPG 229.5kg であるのに対し、直接造塊法での処理では、アルゴンガス 1.3m³、LPG 110.4kg と、それぞれ約 75.9%、約 51.9%の低減効果が認められた。

5.4 成型物の後処理、保守作業負担の軽減効果の確認

注湯機を使用した処理（第 20 回から第 32 回）及び直接造塊法での処理（第 33 回から第 41 回まで）での試験運転での成型物の後処理、保守作業に要した人工数の比較について、Table6 に示す。

第 20 回から第 32 回までの試験運転の実績から、注湯機を使用した処理での成型物の後処理、保守作業については、合計 47 人・日の作業量を必要とするが、第 33 回から第 41 回までの試験運転の実績から、直接造塊法での成型物の後処理、保守作業については、合計 20 人日の作業量であった。

これらのことから、直接造塊法の適用により 27 人・日、約 57.4%の作業量の軽減効果が確認された。また、成型物の後処理、保守作業の作業量が減少することにより、放射性物質を取り扱った場合の被ばく量についても作業量の減少に応じた低減が見込まれる。

6. まとめ

金属溶融設備での試験運転を通じて、直接造塊法での処理が適用可能であることを確認した。直接造塊法の適用により、注湯機を使用せずにインゴットを作製することが可能となり、出湯時間の大幅な短縮効果が認められた。その結果、全体の処理時間の約3割の短縮が可能となり、電力、アルゴンガス、LPG等のユーティリティ消費量の低減が認められた。また、注湯機を使用しないことから保守作業の約6割の負担軽減が確認され、作業員の被ばく量の低減も可能であるとの見通しを得た。

これらのことから、直接造塊法の適用により、本設備の運転に要するコストの削減と、年間稼働率の大幅な向上が見込まれる。

今後、本設備での試験運転を継続し、安定運転のための運用上の経験、技術上の知見を蓄積する予定である。

謝辞

金属溶融設備における直接造塊法での試験運転を行うにあたって、試験運転の準備、運転・保守、データ取得等、幅広くご協力頂きました原子力エンジニアリング株式会社の柳橋比呂也氏、横堀智彦氏、遠藤喜伸氏、坏好弘氏、長山勇二郎氏、中根誠一氏、秋山俊一氏、真庭達男氏、小野高幸氏に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 藤平俊夫 他：JAEA-Technology 2009-031 “金属溶融設備における成型工程の合理化のための設備改善” (2009)
- 2) 樋口秀和 他：JAEA-Technology 2007-038 “高減容処理施設の建設整備及び運転管理について” (2007)

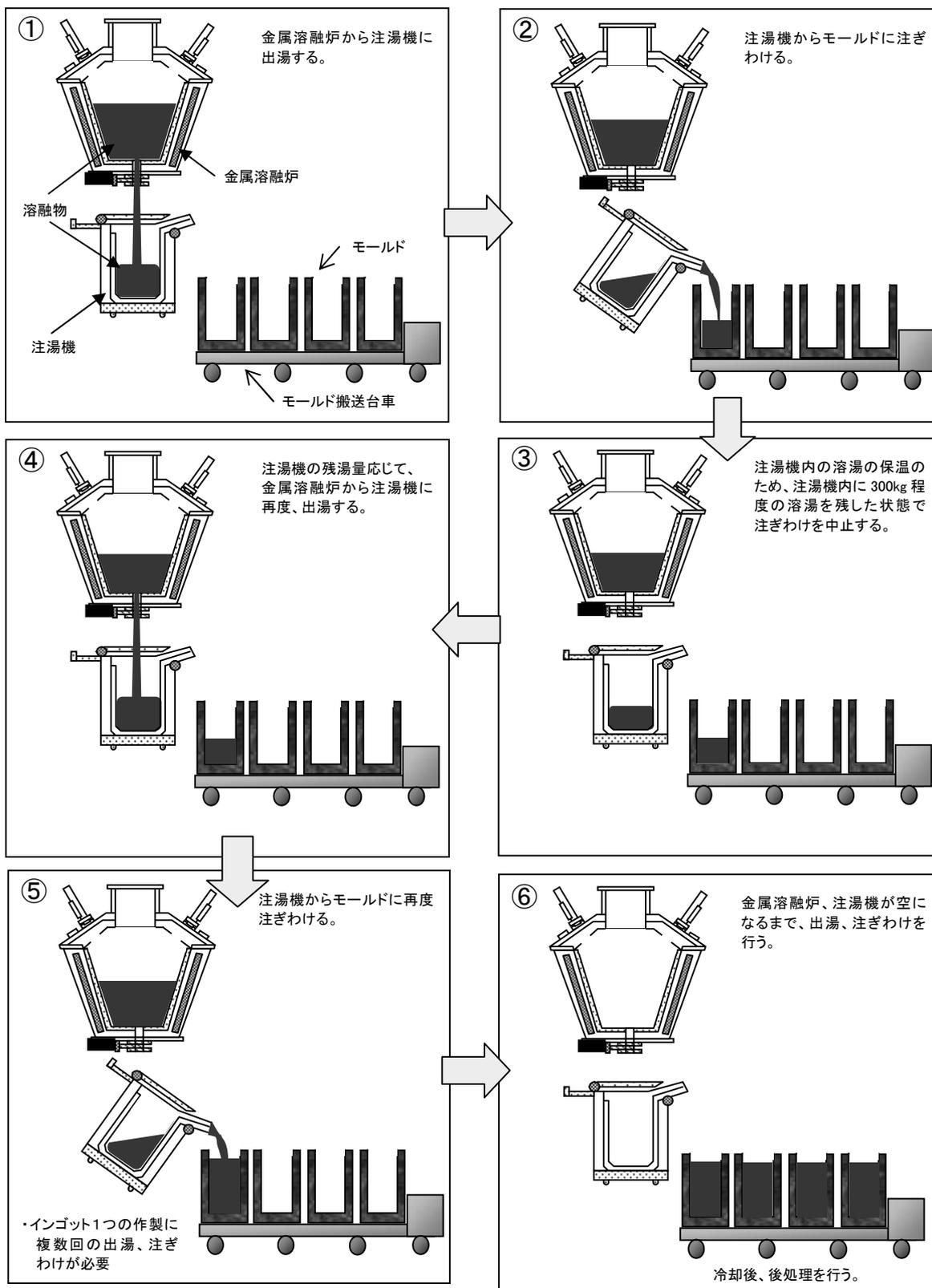


Fig. 2 注湯機を使用した処理での出湯工程、成型工程の流れ

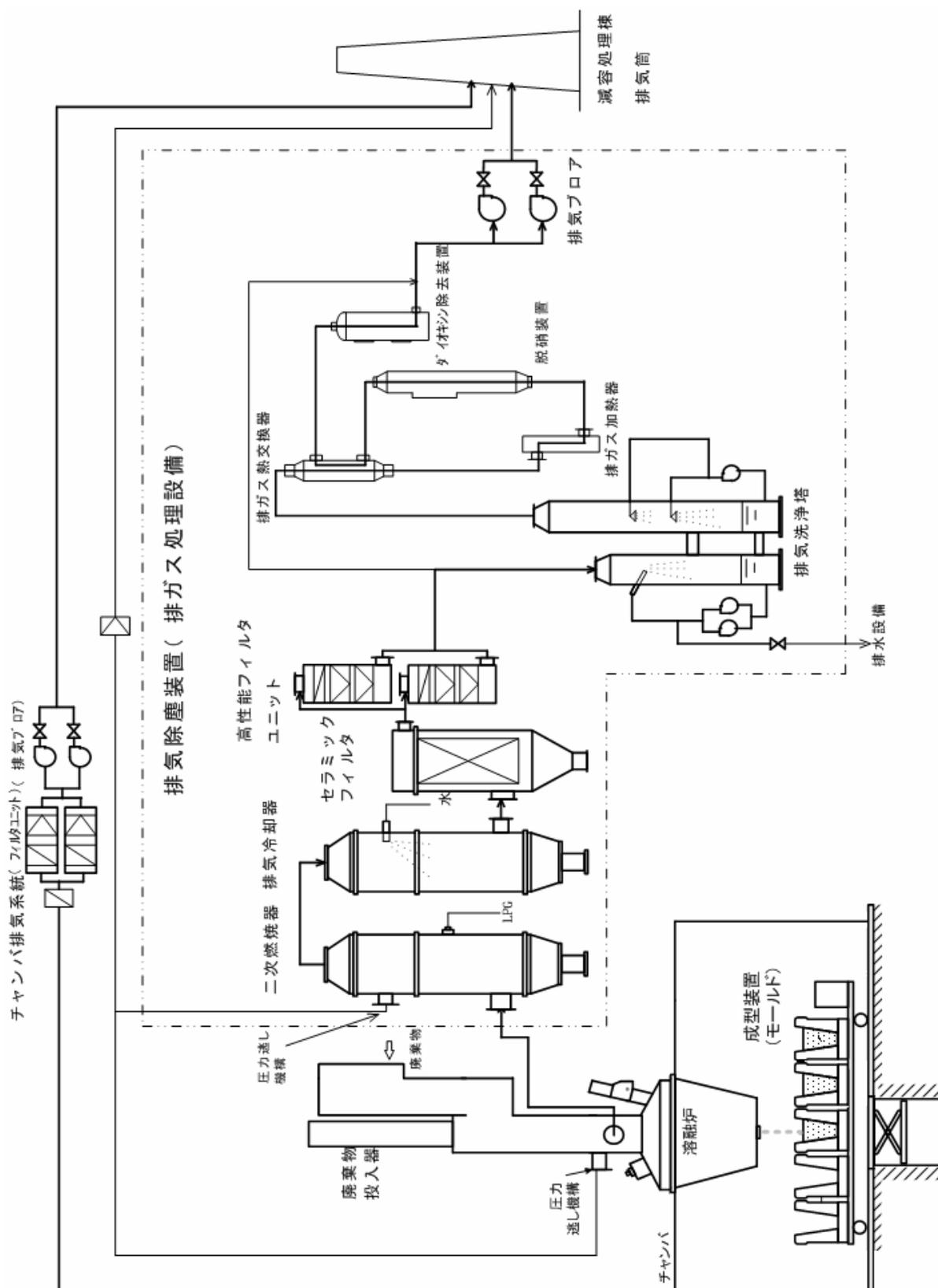


Fig. 3 直接造塊法での金属溶融設備処理系統図

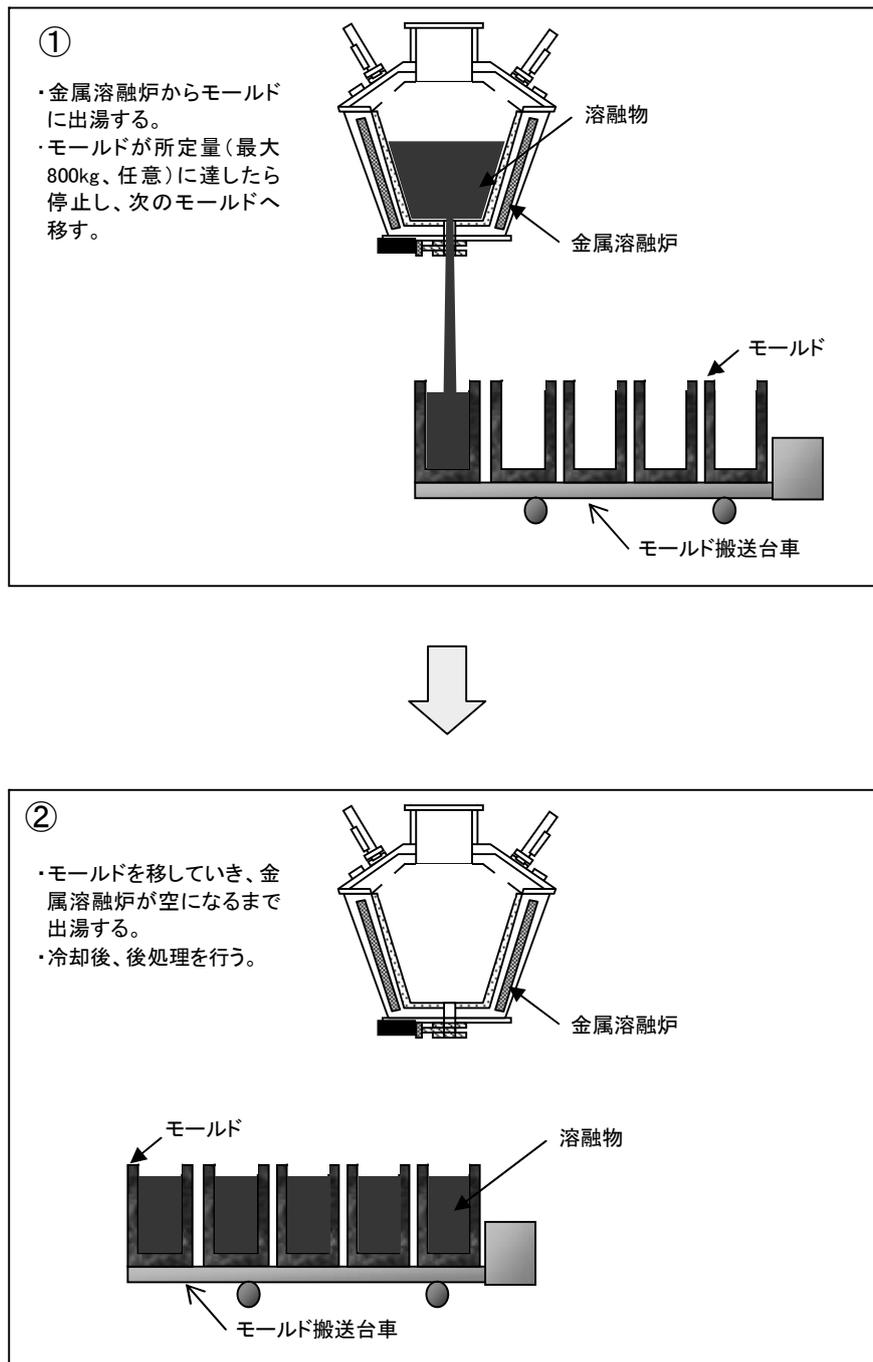


Fig. 4 直接造塊法での出湯工程、成型工程の流れ



注湯機での溶湯の固化、堆積の状況
(注湯機上部から撮影)



注湯機の注ぎ口での溶湯の固化、堆積の状況
(注湯機側面から撮影)

Photo. 1 注湯機での溶湯の固化、堆積状況



設置前



設置後

注湯機ケーブルガードの設置状況



設置前



設置後

モールド台車の側面板の増設状況



出湯流の輻射熱防止筒の設置状況

Photo. 2 溶融炉下部周辺機器に設置したガード

モールド台車

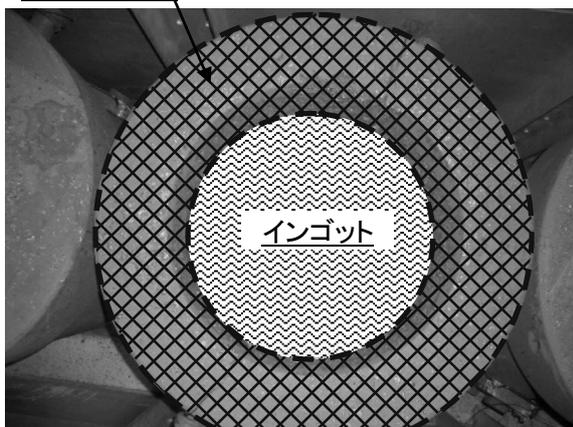


溶融チャンバ内飛散物の回収範囲
(床面、構造物上を含む。)



受湯後のモールド台車内

モールド上部

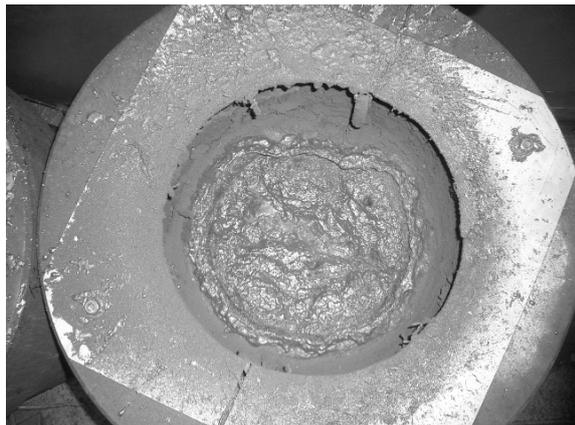


モールド上部の飛散物の回収範囲
(モールド内は、インゴットとして扱う)

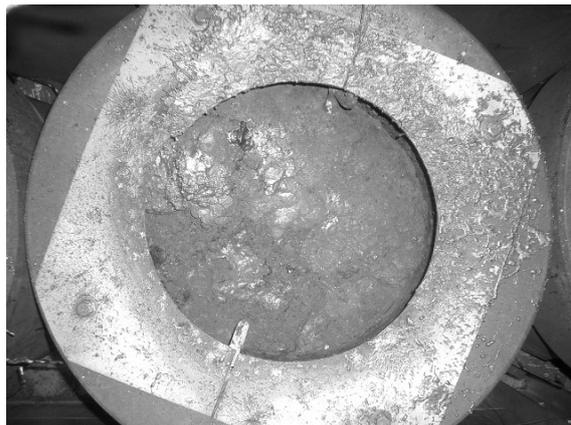


モールド台車内飛散物の回収範囲
(モールド台車床面、側面部)

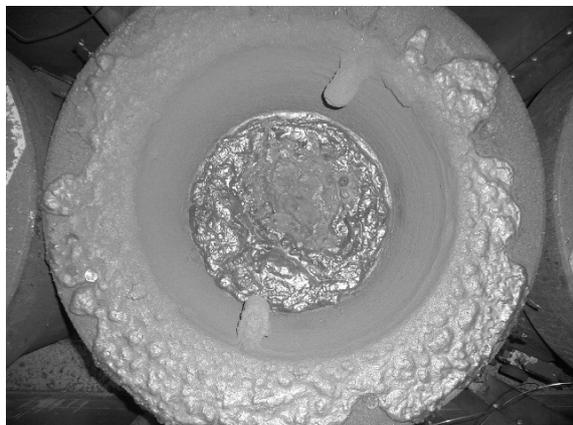
Photo. 3 飛散物の回収範囲



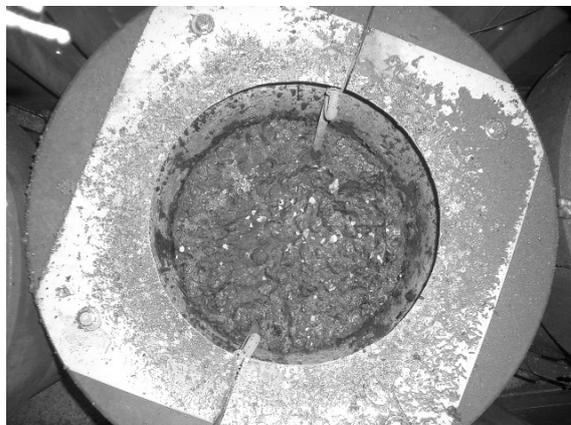
モールド5上部の飛散物
⇒0.808kg



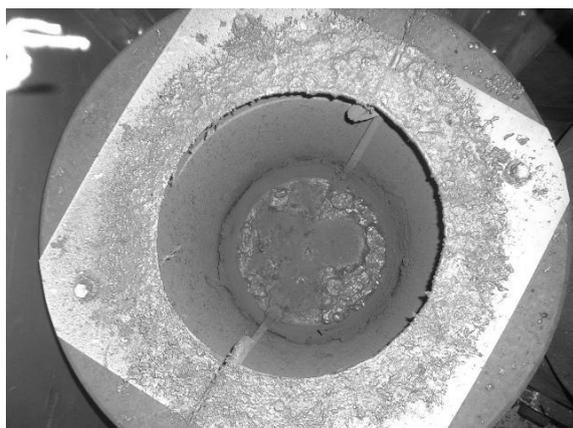
モールド4上部の飛散物
⇒1.112kg



モールド3上部の飛散物
⇒0.247kg



モールド2上部の飛散物
⇒0.304kg



モールド1上部の飛散物
⇒2.093kg



モールド台車内の飛散物
⇒2.619kg

Photo. 4-1 溶融物の飛散状況（第36回）



モールド5上部の飛散物
⇒3.500kg



モールド4上部の飛散物
⇒0.624kg



モールド3上部の飛散物
⇒0.197kg



モールド2上部の飛散物
⇒0.111kg



モールド台車内の飛散物
⇒2.202kg

Photo. 4-2 溶融物の飛散状況（第37回）



モールド5上部の飛散物
⇒2.243kg



モールド4上部の飛散物
⇒0.475kg



モールド3上部の飛散物
⇒0.226kg



モールド2上部の飛散物
⇒0.282kg



モールド台車内の飛散物
⇒1.526kg

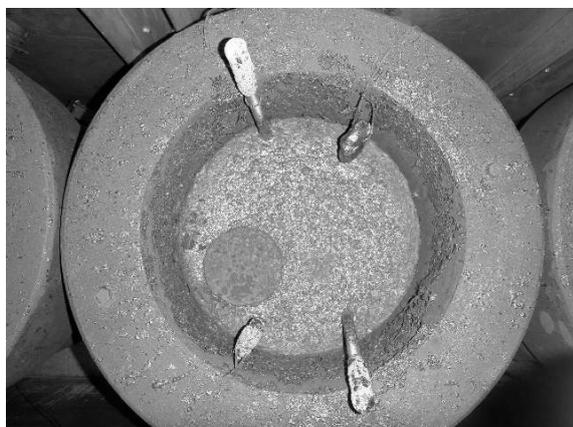
Photo. 4-3 溶融物の飛散状況（第38回）



モールド5上部の飛散物
⇒1.560kg



モールド4上部の飛散物
⇒1.700kg



モールド3上部の飛散物
⇒0.280kg

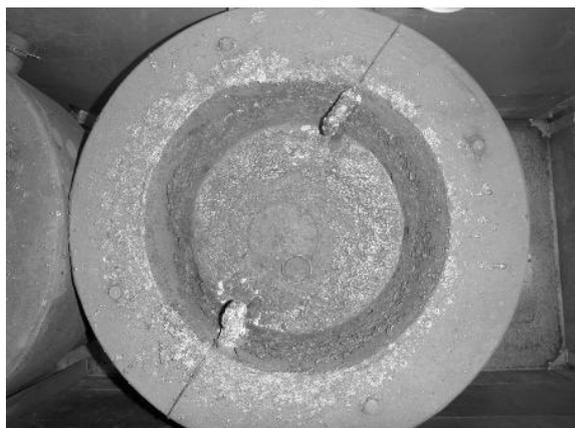


モールド2上部の飛散物
⇒0.080kg



モールド台車内の飛散物
⇒1.567kg

Photo. 4-4 溶融物の飛散状況（第39回）



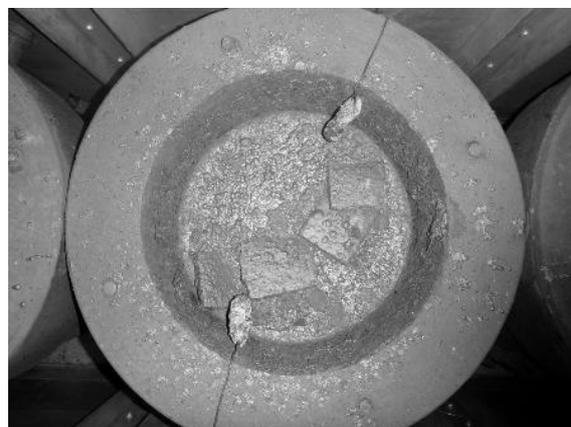
モールド5上部の飛散物
⇒0.367kg



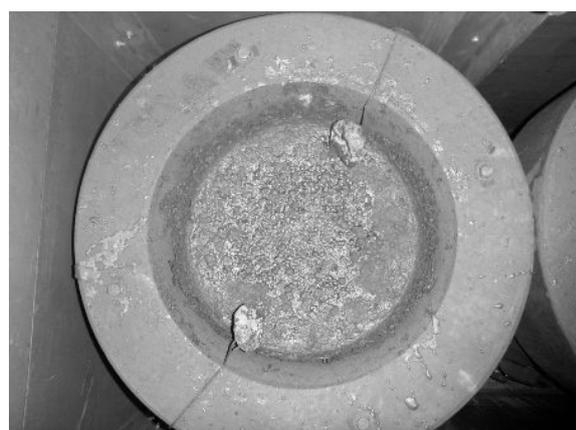
モールド4上部の飛散物
⇒0.090kg



モールド3上部の飛散物
⇒0 kg(受湯なしのため、モールド台車に合算)



モールド2上部の飛散物
⇒0.211kg



モールド1上部の飛散物
⇒0.226kg



モールド台車内の飛散物
⇒0.838kg

Photo. 4-5 溶融物の飛散状況 (第40回)



モールド5上部の飛散物
⇒0.620kg



モールド4上部の飛散物
⇒0.744kg



モールド3上部の飛散物
⇒1.262kg



モールド2上部の飛散物
⇒0.094kg



モールド台車内の飛散物
⇒2.714kg

Photo. 4-6 溶融物の飛散状況 (第 41 回)

Table 1 金属溶融設備での試験運転の概要 (第33回から第41回)

試験番号	実施日	溶融量 [kg]	成型方法	出湯回数 [回]	溶融した主な材質
第33回	H20.10.15	1204	直接造塊法	2	炭素鋼
第34回	H20.12.18	1880	直接造塊法	0 ^{*1}	炭素鋼
第35回	H21.2.18	1804	直接造塊法	4	炭素鋼
第36回	H21.3.3	2504	直接造塊法	5	炭素鋼(銑鉄を含む。)
第37回	H21.3.17	2504	直接造塊法	4	炭素鋼
第38回	H21.5.12	2504	直接造塊法	4	炭素鋼(銑鉄を含む。) ステンレス その他(可燃物)
第39回	H21.5.27	2652	直接造塊法	4	炭素鋼
第40回	H21.6.16	2650	直接造塊法	4	炭素鋼 銅 その他(可燃物、難燃物、無機物)
第41回	H21.7.7	2750	直接造塊法	4	炭素鋼 亜鉛、銅、アルミニウム その他(可燃物、難燃物、無機物)

*1 出湯口の閉塞のため、出湯はなかった。

Table 2 直接造塊法での溶湯の飛散量

試験番号	出湯重量*1 Wf[kg]	インゴットの重量*2[kg]					合計 Wit	飛散物の重量[kg]								飛散率*4 [%]
		5	4	3	2	1		モールド上部*3 Wm					モールド 台車内 Wv	チャンバ内 Wc	合計 Ws	
								5	4	3	2	1				
第33回	921.726	440.2	480.2	---	---	---	920.4	0.042	0.05	0.149	0.002	0.001	0.893	0.189	1.326	0.14
第34回*5	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
第35回	1774.408	475.1	462.1	470.1	364.4	---	1771.7	0.862	0.435	0.078	0.024	---	0.908	0.401	2.708	0.15
第36回	2496.610	581.6	660.6	674.8	421.9	149.2	2488.1	0.808	1.112	0.247	0.304	2.093	2.619	1.327	8.510	0.34
第37回	2516.301	691.9	748.2	774.9	293.9	---	2508.9	3.5	0.624	0.197	0.111	---	2.202	0.767	7.397	0.29
第38回	2477.107	636.5	601.6	706.7	527.0	---	2471.8	2.243	0.475	0.226	0.282	---	1.526	0.555	5.307	0.21
第39回	2580.395	781.4	830.1	725.6	237.4	---	2574.5	1.56	1.7	0.28	0.08	---	1.567	0.708	5.895	0.23
第40回	2477.361	623.4	402.8	---	727.2	721.8	2475.2	0.367	0.09	---	0.211	0.226	0.838	0.429	2.161	0.09
第41回	2757.674	744.4	778.2	774.9	454.3	---	2751.8	0.62	0.744	1.262	0.094	---	2.714	0.44	5.874	0.21

*1 出湯重量は、インゴットの重量と飛散物の重量との合算により算出した。

*2 吊り環(吊り上げ用金具)等の付加物を除いた重量。

*3 出湯のなかったモールド上の飛散物については、モールド台車内の飛散物として計上した。

*4 出湯重量に対する飛散物の重量から算出した。

*5 出湯口の閉塞のため、出湯はなかった。

Table 3 注湯機を使用した処理と直接造塊法による処理時間 (第20回から第41回)

試験番号	成型方法	溶融量	処理時間*1	溶融時間*2	出場時間*3	成型物	
						受容器	インゴット
第20回	注湯機を使用した処理	2629 kg	369分	253分	116分*6	0個	4個
第21回	注湯機を使用した処理	2511 kg	354分	274分	80分	0個	4個
第22回	注湯機を使用した処理	2659 kg	329分	235分	94分	1個	4個
第23回	注湯機を使用した処理	2729 kg	400分	306分	94分	3個	4個
第24回	注湯機を使用した処理	2478 kg	389分	265分	124分	1個	4個
第25回	注湯機を使用した処理	2359 kg	319分	225分	94分	3個	3個
第26回	注湯機を使用した処理	2500 kg	333分	239分	94分	2個	3個
第27回	注湯機を使用した処理	2501 kg	366分	233分	133分	2個	3個
第28回	注湯機を使用した処理	2499 kg	378分	270分	108分	1個	3個
第29回	注湯機を使用した処理	2802 kg	339分	243分	96分	0個	5個
第30回	注湯機を使用した処理	2501 kg	371分	271分	100分	2個	3個
第31回*4	注湯機を使用した処理	3212 kg	-----*7	-----*7	-----*7	-----*7	-----*7
第32回	注湯機を使用した処理	3200 kg	406分	280分	126分	4個	3個
第33回	直接造塊法での処理	1204 kg	307分	174分	2分	0個	2個
第34回*5	直接造塊法での処理	1880 kg	-----*7	-----*7	-----*7	-----*7	-----*7
第35回	直接造塊法での処理	1804 kg	297分	282分	4分	0個	4個
第36回	直接造塊法での処理	2504 kg	264分*8	215分*8	25分*9	0個	5個
第37回	直接造塊法での処理	2504 kg	251分*8	236分*8	4分	0個	4個
第38回	直接造塊法での処理	2504 kg	267分*8	256分*8	5分	0個	4個
第39回	直接造塊法での処理	2652 kg	285分*8	264分*8	5分	0個	4個
第40回	直接造塊法での処理	2650 kg	373分*8	351分*8	15分*10	0個	4個
第41回	直接造塊法での処理	2750 kg	329分*8	315分*8	7分	0個	4個

*1 処理時間については、加熱開始から出湯完了(溶融炉内、注湯機内の溶湯全量が成型装置に移される)までに要した時間とする。

*2 溶融時間については、加熱開始後、出湯するまでに要した時間とする。

*3 出場時間については、出湯開始から出湯完了(溶融炉内、注湯機内の溶湯全量が成型装置に移される)までに要した時間とする。

*4 第31回については投入装置不調により溶融を行わなかったためデータなし。溶融量は予定量を示す。

*5 出湯口の閉塞のため、出湯なし。

*6 インゴット4基作製後、注湯機内の溶湯に発泡現象が見られたため、注湯機内で固化。

*7 データなし。

*8 炉内出力と溶湯温度の変化についてのデータ取得時間等を含む。(S36:41分、S37:24分、S38:42分、S39:25分、S40:42分、S41:21分)

*9 溶湯表面に生成したスラグ層を崩壊させるための保持時間を含むため、出場時間が長くなっている。出場時間は5分程度。

*10 出湯口の閉塞改善のための炉内出力の上昇等の調整時間を含むため、出場時間が長くなっている。出場時間は6分程度。

Table 4 注湯機を使用した処理と直接造塊法による処理時間の短縮効果の比較

項目	注湯機を使用した処理	直接造塊法での処理
溶融時間(加熱開始から出湯開始まで)*1	213分*1	213分*1
出湯時間(成型装置注ぎ込み完了まで)*1	80分*2	9分*1
合計	293分	222分
短縮時間(短縮率)	71分(約24.2%) ⇒従来の約75.8%の時間	

*1 溶融時間は、溶融対象物の形状、材質により変動が大きく、直接比較できないため、第37回、第38回の試験運転での実績(測温データ取得時間等を除く。)の平均値とした。

*2 第21回の試験運転での実績。

Table 5 注湯機を使用した処理と直接造塊法による消費電力の比較

項目	注湯機を使用した処理	直接造塊法での処理
処理に投入する総電力量	約 3,634kWh/バッチ*1	約 2752kWh/バッチ*2
低減量(低減率)*3	882kWh(約 24.3%) ⇒従来の約 75.7%の電力量	
処理に投入する総電力量の料金*4	47,242 円/バッチ 1,889,680 円/年*5	35,776 円/バッチ 1,431,040 円/年*5
年間節約電力量(料金)		35,280kWh/年(458,640 円/年)

*1 第 20 回から第 32 回までの試験運転のうち、第 21 回及び第 30 回を除いた実績の平均値。

*2 第 33 回から第 41 回までの試験運転のうち、第 34 回を除いた実績の平均値。

*3 注湯機を使用しないことによる低減量を含む。

*4 1kWh あたり約 13 円として試算した。(平成 17 年度実績値)

*5 年間 40 バッチとして算出した。

Table 6 成型物の後処理、保守作業に要する人工の比較

項目	注湯機を使用した場合の人工数*1	直接造塊の場合の人工数*2
成型物の後処理作業	受容器の処理	-----
	インゴットの脱塊作業	4人×1日
保守・メンテナンス作業	スライドバルブのメンテナンス	4人×3日
	溶融炉内の確認・整備	4人×1日
	注湯機の確認・整備	4人×3日
	チャンバ内への飛散物の回収	2人×1日
合計	47人・日	20人・日
短縮工数(短縮率)	27人・日(42.6%) ⇒ 従来の57.4%の工数	

*1 注湯機を使用した処理における標準的な後処理、保守作業として算出。

*2 試験運転(第35回から第41回)の実績。

国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

基本量	SI基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質的量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の) 1	1
比透磁率 ^(b)	(数字の) 1	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電流量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光照度	ルーメン	lm		cd sr ^(c)
放射線量	ルクス	lx		lm/m ²
放射線種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		m ² cd s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性化	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についてのみに、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で「radioactivity」と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎平方メートル	J/m ²	m kg s ⁻³ A ⁻¹
表面電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ³ s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ³ s ⁻¹ mol

表5. SI接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値	
		名称	SI単位による値
分	min	1 min=60s	
時	h	1 h=60 min=3600 s	
日	d	1 d=24 h=86 400 s	
度	°	1°=(π/180) rad	
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad	
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad	
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²	
リットル	L, l	1 L=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³	
トン	t	1 t=10 ³ kg	

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm ² =(10 ⁻¹² cm ²)/2=10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベベル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁻⁴ cd m ⁻²
ファ	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガル	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≐ (10 ³ /4π) A m ⁻¹

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「≐」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 f=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1868 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 ⁻⁶ m

