

薄肉処分容器への放射性金属の溶融充填

石倉武*1 高橋賢次*2 植木浩行*2 小栗第一郎*1

原子力発電所の廃止措置により大量の放射性金属廃棄物が発生するため、放射性金属の処分量を低減することは処分場への負担軽減のため重要な課題である。筆者らは、低レベル放射性金属を薄肉の処分容器に溶融充填することにより、処分容器への放射性金属充填率の増加を図る技術について各種試験を行った。試験では実規模に近い処分容器を用いて、固体金属を前装した後に溶融金属を良好に充填する条件、除熱支持材などを用いることによる処分容器の薄肉化、および溶融金属に許容される不純物金属の限界量について実験的に検討した。この結果、比較的放射能レベルが高い低レベル放射性金属を前装し、薄肉容器中に放射性溶融金属を充填する金属溶融充填法が実機に適用可能であることを実証した。

Keywords : 放射性金属、金属溶融、溶融充填、薄肉処分容器、モノリスコンテナ

A large quantity and various level of radioactive waste is arisen due to nuclear power plant decommissioning. Minimizing radioactive waste is, therefore, vital in reducing the burden to the radioactive waste disposal site capacity. The authors have developed a technique to fill low level radioactive molten metal as filler in thin waste disposal containers. This is termed the "radioactive metal casting process for thin container". Demonstration tests using actual scale containers consist of 3 themes, i.e., conditions to properly fill molten metal in the container with pre-placed metal, thinning container material with support of heat removal blocks, and metal impurity limit mixed in raw waste metal. As a result, it was demonstrated that the casting process can achieve a good fill ratio with no harmful loss to the pre-placed metal and no harmful distortion to the container or shielding layer, when the filler metal was poured into the container with a proper layout of heat removal blocks at the proper temperature.

Keywords; radioactive metal, metal melting, melting and filling, thin waste container, monolith container

1. はじめに

原子力発電所の廃止措置により大量の低レベル放射性廃棄物(LLW)が発生するため放射性廃棄物の低減は処分場の負荷軽減および処分費用の低減のため重要な課題である。我が国では、LLWは放射能濃度に応じ3種類(LLW1, LLW2, LLW3)に区分され、それらの廃棄物の区分に応じた処分場に処分される。処分費用は廃棄物区分毎の体積当たりのコストで算定されるため、放射性廃棄物の減容を図り、廃棄体数を減らすことは重要である。

これまで、我が国では原子力発電所の運転中に発生したLLW金属は雑固体として処分容器に装入した後、通常のもルタルで充填固化する方法が用いられてきた。しかし、この方法は放射性金属の処分容器への充填率が約10-20%と低いため、廃止措置時に大量に発生するLLW金属を溶融し、処分容器中の充填率を上げる方法などが検討されている。

このようにLLW金属を全量溶融する方法は国内外ですでに実施され、特段の技術的課題はない。しかし、炉内構造物などの比較的放射能レベルが高い低レベル廃棄物(LLW1)金属を溶融するには取扱う処理工程に遮へいが必要になるため装置全体が大型化するなどの課題がある。このような課題に対応するため、ドイツのGNS/Siempelkamp社は炉内構造物を溶融せずに処分容器に前装入し、溶融鉄を充填する方法(Monolith Container)を実機に適用した実

績がある[1]。

筆者らは、LLW金属を効率よく減容するために、LLW1金属を処分容器に前装した後、通常の高レベル廃棄物(LLW2)金属を溶融充填するMonolith Containerの方法を改良し、処分容器肉厚を現在計画されているLLW処分容器より大幅に薄肉化することにより、廃棄体あたりの放射性金属の充填率を向上させる改良溶融充填法(Fig.1参照)について試験を行った[2-3]。試験には実規模に近い処分容器を用いて、固体金属を前装した後に溶融金属を良好に充填する条件、除熱支持材などを用いることによる処分容器の薄肉化、および溶融金属に許容される不純物金属の限界量を中心に検討した。また、廃止措置ではLLW金属として炭素鋼およびステンレス鋼が多量に発生するため、溶湯の組成をそれぞれ铸铁およびステンレス鋼を対象とした。その結果、放射性金属の溶融充填法が薄肉処分容器として実機に適用可能であることを実証した。

本稿では、この薄肉容器への溶融金属充填試験の概要と解体放射性金属の減容対策としての適用性について述べる。

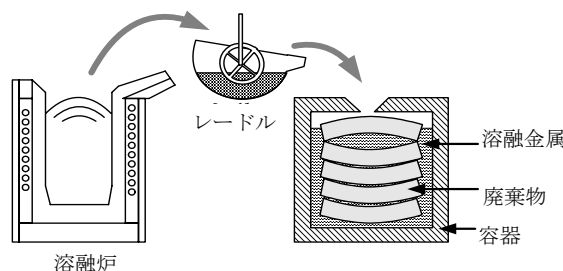


Fig.1 Schema of radioactive metal casting process for waste package

Radioactive metal casting process for thin container by Takeshi Ishikura(ishikura@nupec.or.jp), Kenji Takahashi, Hiroyuki Ueki, Daiichiro Oguri

*1 原子力発電技術機構 Nuclear Power Engineering Corporation (NUPEC)

〒105-0001 東京都港区虎ノ門 4-1-8 虎ノ門四丁目 MT ビル

*2 三菱マテリアル Mitsubishi Materials Corporation

〒112-0002 東京都文京区小石川 1-3-25 小石川大国ビル

2. 目的

放射性金属を熔融充填した薄肉処分容器が十分な健全性を保つ条件を把握することを目的に充填性試験を実施する。処分容器の健全性の指標として次の目標を設定する。

- ① 容器充填率：内容積の 95vol.%以上
根拠：現行の熔融処理による廃棄体製作に係る技術調査[4]を参考に設定（全残存空隙率 12vol.%－上部空隙率 7vol.%）
- ② 容器変形量：凹凸の変形 5mm 以下
根拠：遮へい層の厚さ(50mm)の 10%以下
- ③ 前装入材溶損量：充填材の 0.1%以下
根拠：充填相の溶損による放射能濃度上昇の抑制のため、前装入材(高βγ廃棄物)の 1/1000 以下

3. 試験および結果

原子力発電所廃止措置により発生する代表的な放射性金属廃棄物は主に炭素鋼であり、次にステンレス鋼が多量である。このため、主として铸铁を中心に熔融充填特性を調査し、ステンレス鋼については基本的な熔融充填特性を調査した。

3.1 試験の共通事項

(1) 熔融充填材料

炭素鋼とステンレス鋼を熔融充填材に利用できるように、化学成分をそれぞれ共晶铸铁(C3.5%, Si2.7%)とステンレス鋼に調整した。充填金属の熔融には高周波誘導炉（炉容 1200kg ほか）を用いた。

(2) 試験容器

LLW1 用の処分容器として電力会社が計画中の 1m³ 角型鋼製処分容器(1m³ 処分容器)[5]を想定し、次の炭素鋼 (JIS G3101 SS400) 製試験容器を使用した。

試験容器 A：1m³ 処分容器の 2/5 規模の立方体容器（一辺の内寸 400mm）で肉厚は 50mm とした。熔融充填の基本特性試験に用いた。

試験容器 B：1m³ 処分容器の 1/2 規模を 1/4 分割した直方体容器（外寸 300×300×650mm）で肉厚は 1m³ 処分容器の 54mm に対し、12mm, 9mm および 6mm とした。処分容器の薄肉化試験および不純物限界試験に用いた。

(3) 前装入材

前装入材として次の炭素鋼 (JIS G3103 SS400) を使用した。

- ① 矩形ブロック：厚肉タイプ (50mm) と中肉タイプ (25mm)
- ② 実形状模擬材：実形状炉内構造物 (ガス炉のレストレイントポット付きカバープレート)
- ③ 金属ドロス：炭素鋼材の酸素ガス切断碎(100mm 以下)

(4) 試験手順

試験容器に前装入材を装入した後、水分除去などのため予熱した。その後、熔融充填材（铸铁またはステンレス鋼）の溶湯を注入した。固化後、試験体を切断し各切断面の充填状況を調査した。

3.2 熔融充填基本試験

試験容器に前装入材を装入し、铸铁およびステンレス鋼のそれぞれの溶湯が試験容器および前装入材に有害な変形や溶損がなく、良好な熔融充填ができる条件を調査した。

(1) 試験方法

試験容器 A に矩形ブロックを前装入した。熔融充填材、前装入材等の試験条件を Table 1 に、試験の概要を Fig.2 に示す。熔融充填試験は铸铁充填を 4 ケース、ステンレス鋼充填を 6 ケース行った。ステンレス鋼充填時には溶湯表面に酸化皮膜が形成されることにより流動性が低下しやすいため、あらかじめ容器内を不活性ガス(アルゴンガス)で置換し、酸化防止を図った。

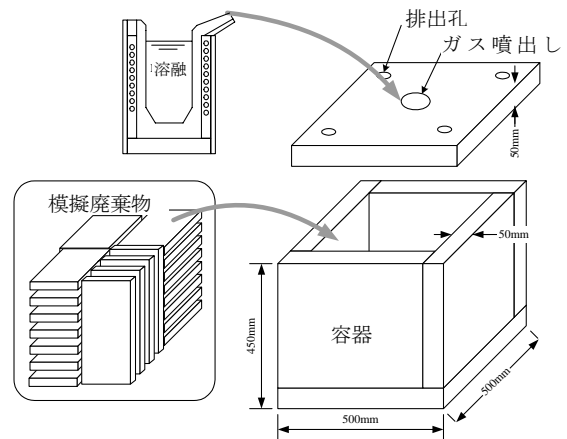


Fig.2 Schema of filling performance tests

Table 1 Basic filling test condition

充填材			試験容器		前装入材：矩形ブロック		
組成	温度℃	充填時間 sec	種類	厚さ mm	厚さ mm	姿勢	隙間 mm
共晶铸铁	1400, 1450	12~36	試験容器 A	50, 25	50, 25	水平	50~5
SCS(Si 0.71%)	1550, 1600	8~12	試験容器 A	50	50, 25	水平、垂直	50~5

(2) 試験結果

鋳鉄の試験結果は各試験容器には溶損や変形はなく、外観は良好であった。充填後に試験体を切断した断面の例を Fig.3 左に示す。写真の外側の灰色部分は試験容器の断面であり、内部の規則的な灰色の矩形は前装入材で、容器と前装入材の中間が溶融充填材である。写真からわかるように溶湯はおおむね細部まで流れ良好に充填されたが、前

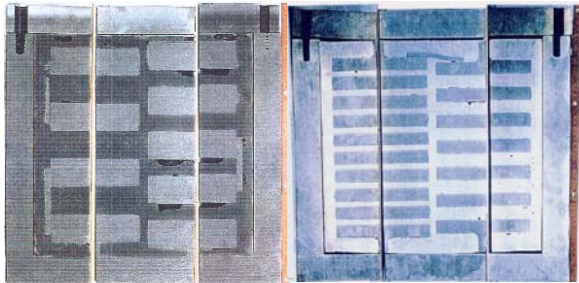


Fig. 3 Typical cross sections of test samples
Cast iron filling (left), stainless steel filling (right)

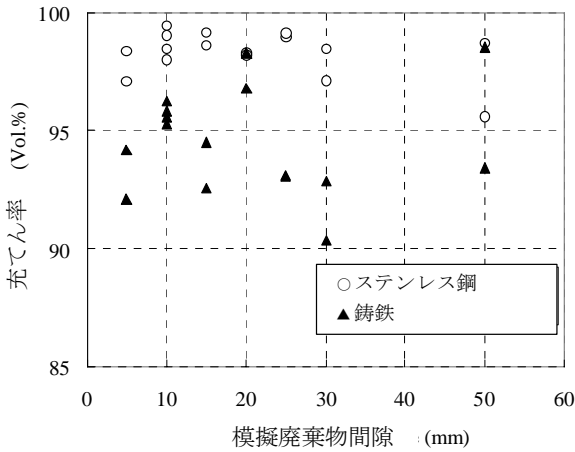


Fig.4 Relationship between filling ratio and mock waste gap

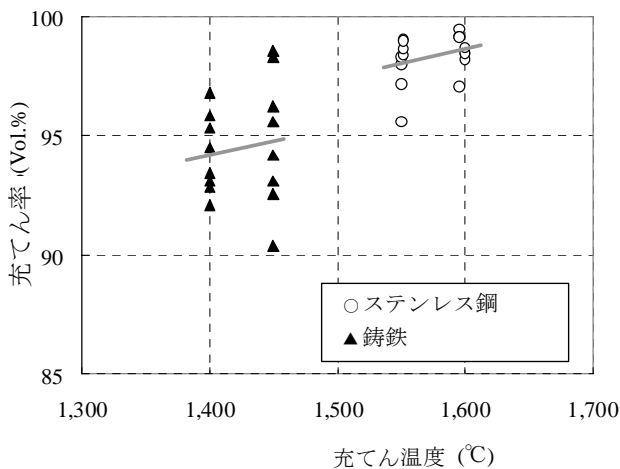


Fig.5 Relationship between filling ratio and temperature of filling material

装入材水平配置の下面の一部に巣(黒い部分)が見られた。前装入材の隙間と充填率との関係を Fig.4 に、充填温度と充填率の関係を Fig.5 に示す。いくつかの断面では充填率が 90~93vol.%程度に留まり、目標値を下回った。充填性が悪い部分は充填時に巻込まれたガスが閉じ込められたと考えられる。

ステンレス鋼の試験結果は各試験容器に溶損や著しい変形がなく(変形量は最大 1.3mm)、溶湯の充填状態も良好であった。充填後試験体の切断面の例を Fig.3 右に示す。前装入材の隙間と充填率との関係は Fig.4 に示すように、間隔が 5~50mm の範囲で目標値を満たし、間隔と充填率との明確な関係は見られなかった。

このように鋳鉄に比べステンレス鋼の注湯が良好であった原因は、溶湯表面の酸化防止策が寄与したものと考えられる。前装入材の矩形ブロックの姿勢は垂直姿勢の方が水平姿勢より充填率は高い傾向が見られた。これは巻込まれた空気などが抜けやすいためと考えられる。

(3) 評価

鋳鉄を溶湯温度 1400-1450°Cで充填した厚肉試験容器はほとんど変形がなかったが、充填率は半数程度の測定箇所目標値 95vol.%を下回った。目標値の達成には注湯条件の改善が必要と考えられる。一方、ステンレス鋼を溶湯温度 1550-1600°Cで充填した厚肉試験容器の変形はわずかで、充填率も目標値の 95vol.%を達成した。これは溶湯注入時の酸化防止策が寄与したものと考えられる。

3.3 容器薄肉化予備試験

現在、溶融充填用の処分容器はドイツの例があり、容器肉厚は 150mm である[1]。一方、我が国では特に溶融充填用に設計された処分容器はないが、LLW1 収納用に計画中の 1m³ 処分容器の肉厚は 150mm であり[5]、また、日本原子力研究所が開発した、鉄板型枠を用いた鉄球铸造法によりサンドウィッチ形の薄肉容器(以下、鉄板型枠铸造容器)も肉厚は 150mm である[6]。仮に、1m³ 処分容器の肉厚を 150mm から 10mm 程度まで薄肉化し、現行の容器設計に与えられている遮へい機能を溶融充填材(LLW2)で代替すれば、処分容器への廃棄物収納量を 2 倍程度に増加することができる。容器薄肉化について、基本試験において、肉厚 12mm 及び 9mm の試験を行い、充填材の流出や変形などの欠陥がないとの知見を得たため、さらに薄肉の肉厚 9mm と 6mm について調査した。

(1) 試験方法

試験容器 A の容器側面の肉厚を側面の 4 面のうち 2 面を 9mm、2 面を 6mm として、鋳鉄およびステンレス鋼のそれぞれを溶融充填した。薄肉化容器の変形防止および除熱を図るため、底面および側面に除熱支持板(100mm 厚)を配置するとともに、底面に溶損防止板を設置した。試験は容器への熱的条件の厳しい前装入材なしで行った。試験条件を Table 2 に、試験の概要を Fig.6 に示す。また、溶湯

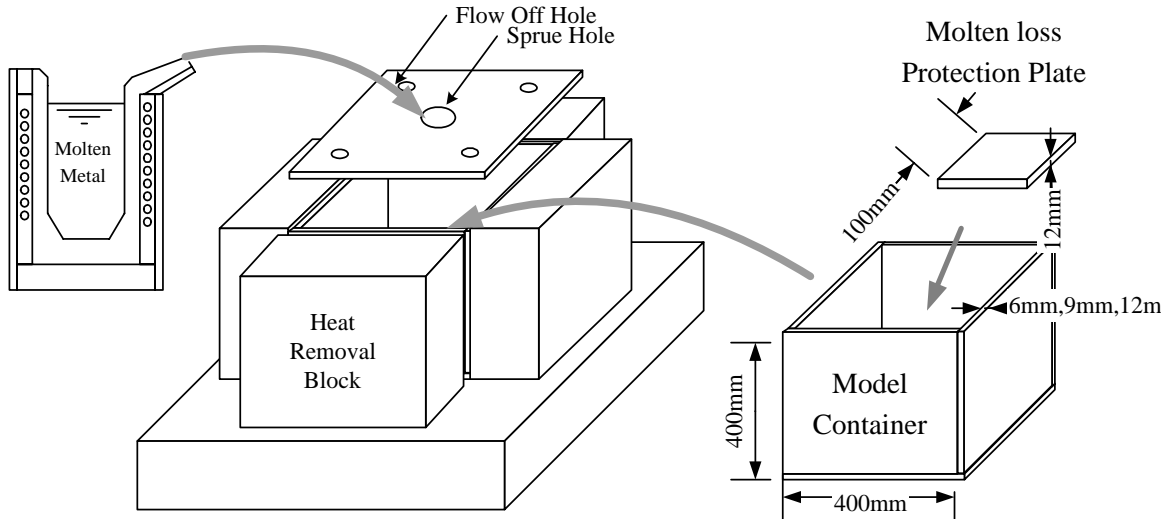


Fig.6 Schematic of container material thinning tests

Table 2 Material thinning preliminary test condition

充填材		試験容器		前装入材
組成	注湯温度℃	種類	厚さ	
共晶鋳鉄	1450	試験容器 A	9, 6mm	なし
SCS(Si 0.71%)	1600	試験容器 A	9, 6mm	なし

注湯時の容器表面温度, 冷却後の容器材料の機械的強度性状を測定した.

(2) 試験結果

鋳鉄では 1450℃で充填し充填率は良好だったが, ステンレス鋳鋼では 1600℃で溶融充填し充填率は引け果のため目標値には達しなかった.

容器が溶損してステンレス鋳鋼の充填で下部コーナーの1箇所から溶湯がわずかに流出したが, 除熱支持板で冷却され穴は閉塞した. そのほか鋳鉄でもステンレス鋳鋼でも試験容器側面(肉厚 6~9mm)の下部コーナー部などで 1~2mm 程度減肉している部分が見られた. このような溶損と減肉は溶湯の激しい流れによる浸食と考えられる. また, 容器の変形は鋳鉄では最大 4.1mm, ステンレス鋳鋼では最大 9.9mm であった. また, 肉厚 6mm と 9mm よる差は見られなかった.

試験容器の表面温度は Fig.7 に示すように, 除熱支持材を用いない場合約 1100℃近くまで上昇するのに対し, 除熱支持材を用いた場合 650℃程度で, 共析温度(727℃)以下に抑えられ, 鋼の相変化による容器の変形や材質の劣化が抑制されると考えられる. また, ミクロ組織観察から粒度が特に粗大化は見られなかった. しかし, 容器材料の降伏点, 引張強さなどが規格値 (JIS SS400 の規格) をやや下回る箇所が見られた. これは溶融充填時の熱的影響によ

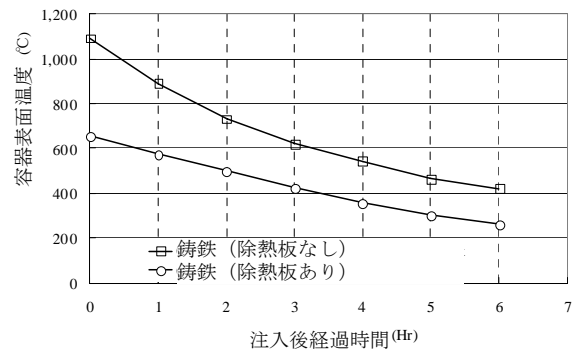


Fig.7 Surface temperature of container after pouring

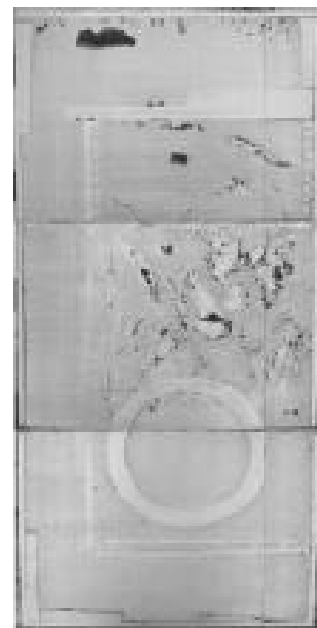


Fig.8 Typical cross sections of test samples Cast iron filling with core internals and metal dross

る強度性状の低下と考えられる。

(3) 評価

鑄鉄の溶湯（1400-1450℃）およびステンレス鑄鋼の溶湯（1550-1600℃）を前装入材なしで除熱支持板付きの試験容器に充填した結果、容器は共析温度以下であったものの、溶損(1箇所)、減肉(2mm)、変形(4mm)があった。湯流れが当たる部分に対する溶損防止策が必要と考えられる。

3.4 容器薄肉化確認試験

薄肉化予備試験の所見を踏まえ、溶湯流れが直接当たる容器内の要所に溶損防止板を取り付け、鑄鉄の溶融充填による容器材料の薄肉化の限界を調査する。

(1) 試験方法

肉厚 6mm の試験容器 B を用いて、試験容器周りに除熱支持板を配置した。容器内底面および側面の上部及び下部に溶損防止板（炭素鋼製）を取り付けた。試験容器には実形状模擬材および金属ドロスを前装入した。1m³ 容器に設計上考慮された遮へい機能を持つ容器材料の空間が薄肉容器では溶融充填材で充填されるように、前装入材を入れる内籠を用意した。また、溶損量を測定するための丸棒（8mmφ）を内籠外面に取り付けた。試験条件を Table 3 に示す。試験の概要は Fig.6 と同様である。

(2) 試験結果

鑄鉄を 1300～1400℃ で充填した結果、容器底部、側面ともに良好であったが、上部には比較的大きな巣の発生が

みられた(Fig.8)。充填率はおおむね良好で、目標値を満足した。遮へい層の充填性も上部の巣以外は特に問題はなかった。また、試験容器の変形もわずかで、溶損防止板が容器材料の溶損を防止した。前装入材の溶損は、溶融充填温度を 1,350℃ 以下とすることで目標値の 0.1% 以下を達成した (Fig.9 左)。溶損防止板の溶損は特に上部湯口直下では 3～12mm、側壁 0.5～1.0mm であった (Fig.9 右)。

(3) 評価

肉厚 6mm の試験容器に除熱支持板と溶損防止板を配置して、鑄鉄を溶湯温度 1300～1400℃ にて充填した結果、溶湯温度 1350℃ でほぼ目標値を満足した。容器内の上部遮へい層の空隙を防止する対策が必要である。なお、容器内に配置する溶損防止板には LLW 金属を活用することができる。

3.5 不純物限界試験

炭素鋼を溶融充填材として用いる場合、解体時に発生するステンレス鋼、低合金鋼、銅、アルミ、鑄鉄などが混在し不純物になる可能性があるため、溶湯への不純物の許容範囲を把握する必要がある。この試験では金属不純物を一定量混入させて鑄鉄で溶融充填したときの充填性を調査する。溶融充填材の充填性を低下させる可能性がある金属として、ステンレス鋼とアルミを選定した。ステンレス鋼が不純物の場合は組成成分のクロムが硬い酸化皮膜を形成して溶湯の流動性を低下させ、充填を阻害することが懸

Table 3 Material thinning demonstration test condition

充填材組成	溶融充填材			試験容器		前装入材		
	注湯温度 ℃	充填時間 sec	充填量 kg	種類	厚さ mm	実形状物 重量 kg	金属ドロス 重量 kg	装入率 vol. %
共晶鑄鉄	1400	60	317	試験容器 B	6	29	14	36%
共晶鑄鉄	1350	70	328	試験容器 B	6	29	11	31%
共晶鑄鉄	1300	60	317	試験容器 B	6	29	11	32%
共晶鑄鉄	1350	60	316	試験容器 B	6	29	14	36%

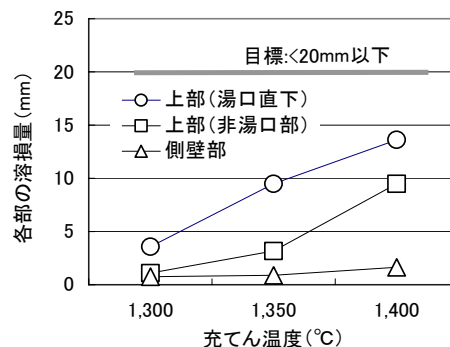
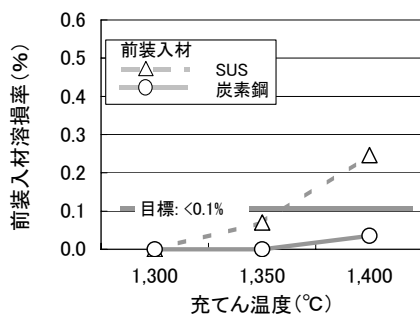


Fig.9 Relationship between molten loss and filling temperature

Table 4 Impurity limit test condition

充填材 基本成分	溶融充填材					試験容器		前装材: 矩形ブロック		
	充填 温度 ℃	不純物		充填時間 sec	充填量 kg	種類	厚さ mm	厚さ mm	隙間寸法 mm	
		種類	混入量 %						垂直	水平
共晶鋳鉄	1300	Al	1	34	243	試験容器 B	6	20	5~10	5~20
共晶鋳鉄	1350	SUS304	8	32	245	試験容器 B	6	20	5~10	5~20



Fig.10 Impurity limit test result
Cross section of aluminum impurity test (left), appearance (center), cross section of stainless impurity test (right)

念される。アルミニウムが不純物の場合は生成した Al_2O_3 が充填層中に混入し、欠陥を生じさせることが懸念される。

(1) 試験方法

容器薄肉化確証試験と同様、試験容器 B, 容器肉厚 6mm を用い、溶湯流が直接当たる湯口と側面と底面には溶損防止板(12~15mm 厚)を、また薄肉容器周りには除熱支持板(100mm 厚)を配した。前装材として、矩形ブロック(25mm 厚)を隙間間隔 5~25mm にて積層した。溶損量を測定するため丸棒(8φ)を取り付けた。ステンレス鋼不純物試験では SUS304 を 8% 添加し、鋳鉄の注入温度を 1350℃ とし、アルミ不純物試験では純アルミニウムを 1% 添加し鋳鉄の注入温度を 1300℃ とした。試験条件を Table 4 に示す。各試験において、注湯前には熱風予熱を行い、注湯時には不活性ガス(アルゴンガス)をページして、酸化を防止した。また、注湯前予熱には参考ケースとしてガスバーナーによる予熱も行った。

(2) 試験結果

ステンレス鋼不純物試験およびアルミ不純物試験ともに充填率 95% 以上の良好な充填性が得られた(Fig. 10)。ステンレス鋼不純物試験では、遮蔽層の上部に若干の空隙が残留し、遮蔽層の上部に局所的な空隙が見られた(押湯なし)。アルミ不純物試験では、前装材間隔が狭い(5mm) ところではやや充填性が悪かったが、押湯をしたため、上部の充填性は良好であった。

容器本体には溶損は見られなかった。溶損防止板の溶損は湯口直下が最も大きく、参考ケース(ガスバーナー予熱)

で 10mm (1350℃) ないし 3mm 以下 (1300℃) であったが、予熱方法を熱風とすることにより 1350℃ で 2mm に低減し、1300℃ では溶損は認められなかった(Fig.11 : No.1 及び No.2)。また、薄肉容器の変形量は溶湯温度 1300℃ での 1% アルミニウムの場合 0.3~2.0mm、溶湯温度 1350℃ での 8% ステンレス鋼の場合 0.1~0.5mm の凸状変形であった(Table 5)。

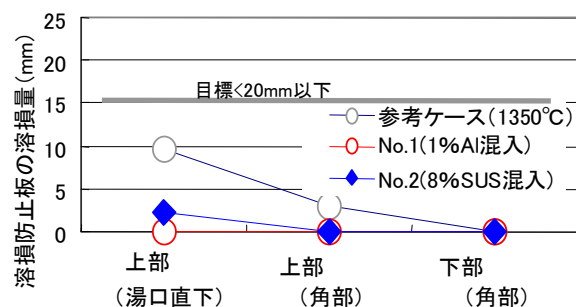


Fig.11 Molten loss of melt protection plate

Table 5 Distortion of thin container

測定位置/上端からの距離 mm	Al 不純物試験 mm	SCS 不純物試験 mm
0-100	2.0	0.5
100-200	1.9	0.5
200-300	1.4	0.5
300-400	1.8	0.4
400-500	1.6	0.5
500-600	0.7	0.4

Table 6 Condition for temperature distribution analysis

界面	熱伝達率 Kcal/m ² °C
容器－充填材	800
充填材－溶損防止板	800
溶損防止板－容器	200
容器－大気	50

材料	初期温度 °C	固相線 °C	液相線 °C	密度 kg/m ³	比熱 kcal/kg°C	熱伝導率 kcal/mh°C	潜熱 kcal/kg
充填材	1400	1140	1200	7,000	2.0	0.07	50
容器	20	-	-	7,800	0.11	0.1	-
溶損防止板	20	-	-	7,800	0.11	0.1	-

(3) 評価

鋳鉄の溶融充填において溶損防止板、除熱支持材、内カゴを配置し、注湯前に熱風予熱を実施し、注湯時に容器内部をアルゴン置換し、押湯をすることにより、上部遮へい層を含めて良好な充填が可能である。アルミニウムは1300°Cで試験したが、ステンレス鋼は1350°Cで良好な充填が確認され、1350°Cとしても充填性が良好になる程度の変化しか考えられないので、ステンレス鋼およびアルミニウムは不純物混入を想定した場合でも溶湯温度は1350°Cで良好な充填が可能である、と評価される。

4. 考察

4.1 薄肉容器の変形解析

溶融金属充填時における薄肉容器の熱による変形を推定するため、まず温度推移を市販の凝固解析コード(JS-CAST)で解析し、得られた温度分布から有限要素法の解析コード(MARK)を用いて変形を解析した。

(1) 温度分析の解析

凝固解析コード(JS-CAST)は差分法で3次元の非定常の凝固解析および湯流れ解析の伝熱解析ができる。凝固解析は熱伝導方程式を、湯流れ解析は連続の式、運動方程式、エネルギー方程式を基本方程式として用いている。

解析ケースとして、試験容器 A(充填温度 1450°Cと

1600°C、容器厚さ 6mm と 9mm、除熱支持板有りとなし)および実処分容器(内寸 1000mm 立方、充填温度 1450°C、容器厚さ 16mm、除熱支持板ありとなし)を選定した。伝熱率ほかの物性値を Table 6 のように設定した。要素分割した総要素数は 7700~36000 である。試験容器 A での解析値は 4 時間後のピーク値で、1450°C の場合 600°C (除熱支持板あり) と 300°C (除熱支持板なし) となり、実測値のそれぞれ 550°C と 350°C とほぼ一致した。

(2) 変形解析

変形解析に用いた解析コード(MARK)は有限要素法による構造用汎用プログラムで、弾塑性、変形、破壊、熱伝導などの解析ができる。

変形解析のモデルは 4 つの平板、4 つの角柱と 1 つの底板がそれぞれ一体になるように作成した。変形解析に用いた物性値と加工硬化係数は Table 7 のように設定した。JS-CAST で計算した温度を試験容器 A では次の間隔で MARK にトランスポートした。実処分容器ではこの 2 倍の間隔とした。なお、変形解析は塑性変形が大きい 600°C 以上で行った。

200, 400, 600, 800, 1,000 秒, 20, 40, 80, 120, 160, 200, 240 分

試験容器 A へ 1450°C で除熱支持板なしの場合、底面の解析変形量 6mm に対し、測定値は 4mm であった。また、除熱支持板有りの場合、底面の解析変形量 2mm に対し、測定値は 1mm であった。このように、解析結果と測定値

Table 7 Condition for distortion analysis

項目		値
材質	SS400	—
密度	kg/m ³	7,800
ヤング率	Kg/mm ²	18,000
ポアソン比	—	0.27
線膨張係数	/°C	1.5×10 ⁻⁵

ひずみ(%)	応力(kg/mm ²)
3.0×10 ⁻²	65.1
1.5×10 ⁻¹	20.6
5.3×10 ⁻¹	26.8

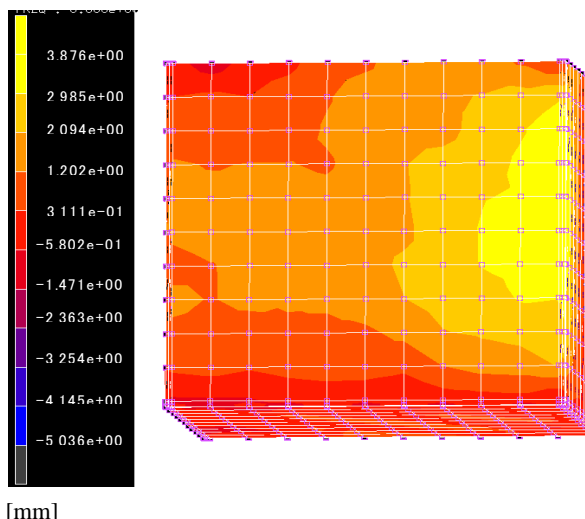


Fig.12 Analyzed distortion of full size waste container

がほぼ一致した。

(3) 実処分容器変形量の解析

この手法を用いた解析結果の一例として、実処分容器の除熱支持材有りのモデル (Y 方向(側面)変位) を Fig. 12 に示す。 実処分容器の変形解析の結果から、除熱支持板有りの場合は側面の変形量は最大 5~6mm, 底面の変形量は最大 7mm となった。 また、 除熱支持板なしの場合は側面の変形量は最大 7~9mm, 底面の変形量は最大 14mm となった。 以上の結果から、 薄肉処分容器の変形量は除熱支持板を用いるなどの対策をとることにより、 実用的な変形量に収まると予想される。

5. 実機適用性

5.1 現行の溶融充填法との関連

現在、原子力発電所から発生した廃棄物の一部は溶融充填され、 充填廃棄体として処分されている。 現行の溶融充填の廃棄体の製作方法は「埋設規則」(核燃料物質又は核燃料物質で汚染された物の廃棄物埋設の事業に関する規則)の廃棄体の技術上の基準(経済産業省令第8条)および「埋設告示」(核燃料物質等の埋設に関する措置等に係る技術的細目を定める告示)の廃棄体の技術基準の細目(科学技術庁告示第4条)に基づき定められた通知「充填固型化の廃棄確認の実施について」(平成12年8月改正)における放射性廃棄物の充填固型化法の規定に基づいている。 さらに、 これらの規則に準拠して作成された10電力会社の「充填固型体の標準的な製作方法」手順書に具体的な方法や数値目標が定められている [7]。

このような現行の溶融充填処理は、原子力発電所運転中に発生した固体状廃棄物を 200L ドラム缶で処分する廃棄体について定められており、対象廃棄物は金属のほか、コンクリート類、ガラス類、プラスチック類、保温材・フィルタ類などを含んでいる。 さらに、 現行の方法は溶融充填した容器をさらに処分用容器に収容した後、 固型化材料

などで充填し廃棄体を製作することを前提にしている。

本技術開発の溶融充填法は、 上記の 200L ドラム缶への充填に適用できないものではないが、 廃止措置で発生する LLW1 の金属廃棄物の合理的な溶融充填法を念頭に、 溶融充填した容器そのものを処分容器と想定している。 従って、 本技術開発に沿った薄肉処分容器への放射性金属の溶融充填法は LLW1 の処理処分が具体化する段階で適用が期待される。

5.2 実機プロセスの検討

実機の溶融充填プロセスは、 LLW1 を対象にしているため、 遠隔注湯することが必要である。 溶融充填プロセスの構成は、 予熱、 遠隔注湯、 廃棄体冷却、 仕上げ、 排ガス処理、 搬送などに区分することが考えられる。 これらの各サブシステムの概要を Table 8 に、 概念図を Fig.13 に示す。

5.3 放射性廃棄物処分量の低減効果

本試験の薄肉溶融充填法の減容効果について検討した。 まず、 現行の 1m³ 処分容器(1300mm 立方、 肉厚 150mm)に対し、 薄肉容器処分容器(1300mm 立方、 肉厚 15mm)と

Table 8 Sub-systems of radioactive metal casting process

項目	概要仕様
予熱システム	熱風発生機による予熱(約 100℃)
遠隔注湯システム	ストップ式取鍋による精密出湯管理
廃棄体冷却システム	充填~1000℃ : セル内冷却 1,000~500℃ : セル外冷却 500~常温 : 除熱支持材を分離
仕上げシステム	湯口などの溶接封止
排ガス処理システム	充填ガス捕集フィルタの設置
搬送システムなど	レール台車による搬送

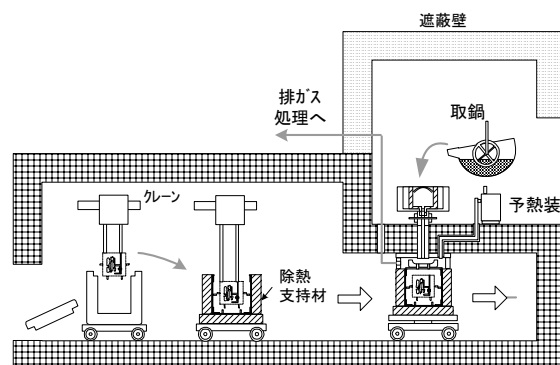


Fig.13 Radioactive metal casting process concept

すると、処分容器中の廃棄物収納量が約2倍となり、処分量が1/2となる。また、溶融充填法がLLW1を前装入した容器に、LLW2を溶融充填するとして、BWRとPWR各1基の解体廃棄物を対象として減容効果を試算すると、LLW1処分容器中にLLW2金属が充填される結果、溶融なしで処分する場合に比べ1/3以下に減少する (Table 9)。なお、溶融充填法を実機適用する場合、溶融炉等を含む大型施設を必要とするため、単一プラントへの適用では設備費用が大きく経済的ではない。このため、複数プラントの解体廃棄物を集中処理施設にて処理することを前提として経済性の効果を試算した結果を Fig.14 に示す。

原研の鉄板型枠鋳造容器の開発においても、薄肉の鉄板型枠に対する溶融金属の充填法で処分容器を製作するために試験が行われている。このような処分容器(1300mm立方、鉄板型枠肉厚15mmと仮定)が実用化できると想定すると、本技術開発の容器内への溶融充填法の成果と併用することにより、この薄肉処分容器と同様の減容効果が得られる。ただし、鉄板型枠鋳造容器を用いる場合には、鉄板型枠への鋳造(容器製造)と容器への溶融充填(廃棄体製造)で鋳造処理が2回必要で、その作業人工、設備費、作業線量率などが増加要因となるので、薄肉溶融充填法の方が有利になると評価される。試算結果を Fig.14 に併記した。

6. まとめ

薄肉処分容器への放射性金属の溶融充填に関し、LLW1レベル用の1m³処分容器の約1/2規模の試験用容器を用いて試験をし、次のような結果がえられた。

- ① 鋳鉄(溶湯1400-1450℃)およびステンレス鋳鋼(溶湯1550-1600℃)を厚肉試験容器に充填した結果、容器の変形はわずかで、充填性も比較的良好だった。しかし、充填率を目標値の95vol%以上とするには、溶湯注入時の酸化防止などが必要と考えられる。
- ② 薄肉処分容器(肉厚6mm)に除熱支持材と溶損防止板を配置した場合、鋳鉄を溶湯温度1350℃において、前装入材溶損量及び容器変形はわずかで、両者とも目標値を満足した。充填性も比較的良好であったが、容器内の上部遮へい層の空隙を防止する対策が必要であることがわかった。
- ③ 鋳鉄の溶融充填において溶損防止板、除熱支持材、内籠を配置し、注湯前に熱風予熱を実施し、かつ注湯時に容器内部をアルゴン置換し、押湯をした結果、溶損防止板の溶損量はさらに低下し、かつ上部遮へい層を含めて良好な充填性が得られた。また、ステンレス鋼などの不純物混入を想定すると溶湯温度は1350℃が最適である。
- ④ 薄肉容器溶融充填法は現在計画中のLLW1用1m³処分容器への金属溶融に比べ、減容効果があり、複数プラン

Table 9 Effect of thin container on radioactive waste volume

対象廃棄物 (軽水炉集中処理)	発生量 t	全量処分ケース 廃棄体数	厚肉溶融充填ケース 廃棄体数	薄肉溶融充填ケース 廃棄体数
LLW1	180	210	210	210
LLW2(溶融充填分)	1,112	1,296	0	0
LLW2(溶融充填余剰分)	488	569	569	532
LLW2計	1,600	1,865	569	532
LLW3		評価対象外(トレンチ処分のため)		

注：発生量はPWR, BWR各1基の合計値

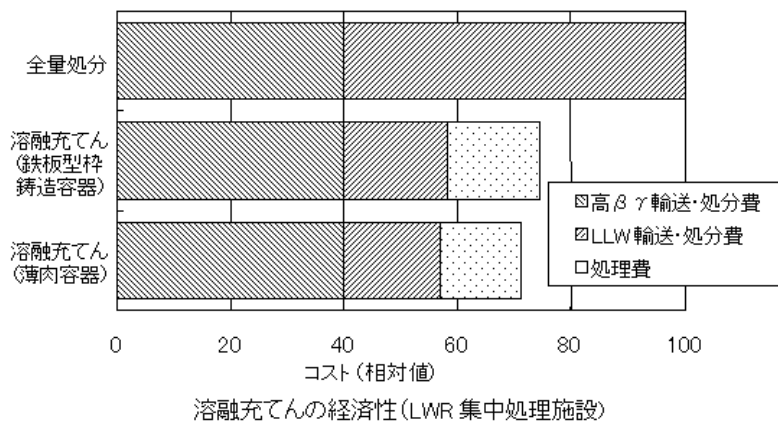


Fig.14 Cost comparison on thin container

ト用に集中処理を想定すると経済的な効果が大きい。

今後、このような成果が放射性金属の薄肉容器中への溶融充填技術を我が国の放射性金属廃棄物の減容対策として具体化するための一助となれば幸いである。

参考文献

- [1] Bruening, D. et al.: The Monolith Container a new development for transport and storage of reactor vessel equipment and reactor vessel parts, Int. Conf. on Environmental Restoration, Brugge, Belgium, September 30-October 4, 2001 (CD-ROM).
- [2] Ishikura, T. et al.: Development of Radioactive Metal Casting Process for Waste Container, SPECTRUM'00, Chattanooga, TN, USA, September 24-28, 2000, (CD-ROM).
- [3] Ishikura, T. et al.: Demonstration Tests Regarding Techniques to Minimize Low Level Radioactive Metal Waste, SPECTRUM'02, Reno, ND, USA., August 4-8, 2002, (CD-ROM).
- [4] (財)原子力環境整備センター: 低レベル放射性廃棄物処分用廃棄体製作技術について (各種固体状廃棄物). 平成 10 年 3 月.
- [5] 刈込敏: 解体放射性廃棄物の処理処分対策. 日本原子力情報センター講座 東海発電所の廃止措置への取り組み, 2001 年 12 月 13-14 日.
- [6] 中村寿 他: 放射性金属廃棄物の限定再利用技術開発 - 廃棄物収納容器彫像試験 -. 日本機械学会 第 6 回動力・エネルギー技術シンポジウム'98 講演論文集, p.371, 1998 年 11 月 10-11 日.
- [7] 9 電力会社, 日本原子力発電: 充填固化体の標準的な製作方法. 改訂 2 (2000 年 7 月).