

平成27年度

管理型処分技術調査等事業

原子力発電所等金属廃棄物利用技術開発

報告書

平成28年 3月

(株)日本製鋼所

(株)神戸製鋼所

目 次

1. 事業概要	1
1.1 目的	1
1.2 全体概要	1
2. 全体計画の策定	3
2.1 概要	3
2.2 再利用プロセスの開発	3
2.2.1 開発する容器の要件・基準の整理	3
2.2.2 基礎試験の実施	4
2.2.3 再利用プロセスの開発	6
2.2.4 全体工程	7
2.3 再利用プロセスの評価	7
2.3.1 実証試験計画の策定	7
2.3.2 実証試験の実施	8
2.3.3 再利用プロセスの評価	9
2.3.4 全体工程	9
3. 再利用プロセスの開発	10
3.1 概要	10
3.2 開発する容器の要件・基準の整理	11
3.2.1 金属容器の使用環境	11
3.2.2 適用法令等の調査	17
3.2.3 クリアランス金属の性状調査	20
3.3 基礎試験の実施	25
3.3.1 代表化学成分(鋼種)の選定及び熱処理条件の検討	25
3.3.2 許容される不純物含有量の検討	32
3.3.3 補修溶接時の予熱条件の検討	37
3.3.4 熱処理条件の妥当性評価	44
3.3.5 耐久性(靱性)の妥当性評価	52
3.4 内容器の設計	57
3.4.1 内容器に求められる技術要件	57
3.4.2 内容器の設計	57
4. 再利用プロセスの評価	67
4.1 概要	67
4.2 実証試験計画の策定	67
4.2.1 クリアランス金属運搬計画	67
4.2.2 実証試験及び工場設備等への影響調査	69
4.2.3 住民説明会	73
4.3 経済性評価方法の検討	75

参考資料..... 77

添付資料

1. 住民説明会実施結果
2. 住民説明会における来場者アンケート結果
3. 住民説明会でいただいた主なご質問と回答

－ 表 目 次 －

表 2.2.4-1	再利用プロセスの開発全体工程	7
表 2.3.4-1	再利用プロセスの評価全体工程	9
表 3.2.1-1	内容器主要工程の概要	14
表 3.2.2-1	遮へい設計における材料物性値における密度と組成のデータ例	18
表 3.2.2-2	通常の輸送条件において廃棄体で考慮すべき技術項目	19
表 3.2.3-1	クリアランス物の種類	22
表 3.2.3-2	クリアランス物材質別物量	23
表 3.2.3-3	L1 処分容器の需要量	24
表 3.3.1-1	供試材の主要化学成分の狙い値	25
表 3.3.1-2	供試材の不純物成分範囲	25
表 3.3.1-3	供試材の化学成分（溶鋼および試験片分析値）（質量%）	28
表 3.3.1-4	引張、硬さ試験結果	30
表 3.3.1-5	シャルピー試験結果	30
表 3.3.2-1	供試材の不純物成分の狙い値	32
表 3.3.2-2	供試材の化学成分（溶鋼分析値）（質量%）	34
表 3.3.2-3	不純物元素が機械的性質に与える影響	37
表 3.3.3-1	試験および溶接条件（目標）	39
表 3.3.3-2	溶接施工実績	40
表 3.3.3-3	断面割れ調査結果	40
表 3.3.4-1	モックアップの化学成分（目標）	44
表 3.3.4-2	平均冷却速度	45
表 3.3.4-3	モックアップの成分分析結果（質量%）	49
表 3.3.4-4	モックアップの機械的試験結果	49
表 3.3.5-1	解析ケース	52
表 3.3.5-2	解析に用いた材料物性値	53
表 3.3.5-3	検討材料の-20℃における破壊靱性値 ( $K_{Ic}$ ) の推定結果	56
表 3.4.1-1	内容器に求められる技術要件	57
表 4.2.2-1	製造物一覧	70
表 4.2.2-2	製造物以外のアイテムリスト	70
表 4.3-1	クリアランス金属再利用に関する経済性評価方法についての検討結果	75

－ 図 目 次 －

図 3.2.1-1	内容器主要工程フロー図 (1/2) .....	12
図 3.2.1-1	内容器主要工程フロー図 (2/2) .....	12
図 3.2.2-1	耐荷重条件を満たすことが評価された処分容器の形状及び寸法 .....	20
図 3.3.1-1	熱処理シミュレーション条件 .....	26
図 3.3.1-2	ミクロ組織観察結果 .....	29
図 3.3.1-3	-20℃吸収エネルギーと熱処理条件 (冷却速度) の関係 .....	31
図 3.3.2-1	機械的特性と不純物元素 (P、S、Cu、Sn) 量の関係 (炭素鋼) .....	35
図 3.3.2-2	機械的特性と不純物元素 (P、S、Cu、Sn) 量の関係 (低合金鋼) .....	36
図 3.3.3-1	熱処理シミュレーション条件 .....	38
図 3.3.3-2	y 形溶接割れ試験片 (板厚 t=25mm) .....	38
図 3.3.3-3	ビード外観および浸透探傷試験外観 (試験温度 0℃) .....	41
図 3.3.3-4	断面マクロ観察結果 (炭素鋼、試験温度 0℃) .....	42
図 3.3.3-5	断面マクロ観察結果 (低合金鋼、試験温度 0℃) .....	43
図 3.3.4-1	モックアップの熱処理条件 (焼入れ焼戻し) .....	45
図 3.3.4-2	モックアップの熱処理形状および熱処理測温位置 .....	46
図 3.3.4-3	焼入れ (水冷) 時の各位置の温度変化 .....	47
図 3.3.4-4	試験片採取位置 .....	48
図 3.3.4-5	モックアップのミクロ組織観察結果 .....	50
図 3.3.4-6	ラボ試験とモックアップ試験結果の比較 .....	51
図 3.3.5-1	落下姿勢 .....	52
図 3.3.5-2	落下衝撃により容器に発生する相当塑性ひずみ解析結果 .....	53
図 3.3.5-3	落下衝撃におよぼす落下姿勢および標的 (床) の影響; (a)50mm、(b)200mm ....	54
図 3.3.5-4	落下衝撃におよぼす落下高さの影響 .....	55
図 3.4.2-1	耐荷重条件を満たすことが評価された処分容器の形状及び寸法 .....	58
図 3.4.2-2	内容器 (遮へい厚さ 100 mm) 外形図 .....	62
図 3.4.2-3	処分容器への収納状態図 .....	63
図 3.4.2-4	内容器 (遮へい厚さ 50 mm) 外形図 .....	65
図 3.4.2-5	内容器 (遮へい厚さ 200 mm) 外形図 .....	66
図 4.2.1-1	クリアランス金属の運搬計画 .....	68
図 4.2.1-2	東海発電所～日立港運搬計画 .....	68
図 4.2.1-3	JSW 埠頭での荷役作業～ヤード保管計画 .....	69
図 4.2.2-1	全体工程 .....	71

## 1. 事業概要

### 1.1 目的

運転を終了した原子力発電所の廃止措置では、クリアランスレベル以下の金属廃棄物（放射能が低く再利用が可能な金属廃棄物、以下、クリアランス金属廃棄物という。）が大量に発生することが予想されている。平成 17 年の原子炉等規正法の改正において、クリアランス制度が導入されたことを受けて、原子力発電所の廃止措置により発生する廃棄物において、クリアランスレベル以下であることの検認を経た上で再利用可能とされている。しかし、現時点での発生量・リサイクルの実績が少ないことや、クリアランス制度への国民の理解促進が不十分であること等により、今までに一般市場に十分に流通されてはいない。

一方、平成 26 年 4 月に閣議決定されたエネルギー基本計画においては、今後増加する廃止措置を円滑に進めることや、廃止措置の円滑な実現に向けた研究開発を進めること等が示されており、今後原子力発電所の廃止措置が本格的に開始される前に、クリアランス金属廃棄物の再利用の実現可能性について見通しを得ておくことは、我が国における円滑な廃止措置計画の策定に大きく貢献すると考えられる。具体的には、金属廃棄物の再利用により、廃止措置時の解体工事を解体物の処理に困ることなく円滑に進めることができ、かつ資源の有効利用、廃止措置コストの削減・廃棄物の減容化にも貢献するとともに、廃止措置により生じるクリアランス金属の一般への流通促進にも寄与することが期待される。また、廃炉から最終処分に至る過程には、最終処分場が決まっていない場合は、廃止措置によって生じる低レベル放射性廃棄物を一時的に容器保管することも必要となる可能性がある。

これらの状況を踏まえ、原子力発電所等の解体から生じるクリアランス金属廃棄物等を利用し、余裕深度処分を想定した放射線遮へい能力・耐久性を有する金属容器への利用プロセスを技術開発する。開発にあたっては、実際のクリアランス金属廃棄物の実物大の金属容器への再利用により、再利用技術の実現可能性を示す。さらに、本事業後の普及に向けた経済的合理性等に関する検討を行うと共に、成果の公開方法等の検討も行う。

### 1.2 全体概要

運転を終了した原子力発電所の円滑な廃止措置の早期の実現に向けて、今年度から 3 ヶ年の計画で進める。

廃止措置においては、様々な金属や不純物を含むスクラップが大量に発生することが予想さ

れる。雑多なスクラップを原料として再利用する場合、放射線遮へい能力及び耐久性といった所定の品質を有する製品の製造が容易でないことから、スクラップを用いて所定の品質を達成するための再利用技術開発が必要となる。

ここでは、低レベル放射性廃棄物を収納する金属容器を対象に再利用技術を開発するが、最初に、金属容器の使用環境（地上輸送・地上保管・余裕深度処分環境等）や適用法令等を整理して、製造する金属容器に求められる技術要件を明確にする。そして、廃止措置で発生するスクラップの性状及び量を調査して、各スクラップを適切に分別・回収・保管する方法、製造工場における原料の配合方法、精錬(原料を溶解したのち不純物を除去すること)方法からなる再利用プロセスを開発する。

次に、実際のクリアランス金属廃棄物等を用いた実物大の金属容器を試作する実証試験を通じて、製造工程中の設備への影響を把握すると共に、試作した金属容器の放射線遮へい能力や耐久性の確認を行うことにより、開発した再利用プロセスの評価を行う。

さらに、再利用技術の開発、実証を通じてクリアランス金属廃棄物の再利用における放射線影響を定量的に確認し、これらの結果の公開等を通じた国民の理解促進や安心感を得るための取り組み方策について、再利用プロセスの開発、評価の成果を踏まえ、3年目以降に外部の専門家・有識者等で構成する委員会で検討する。あわせて、開発した技術の利用促進に向け経済的合理性に関する検討を行う。

## 2. 全体計画の策定

### 2.1 概要

本開発では、運転を終了した原子力発電所の円滑な廃止措置の早期の実現に向け、原子力発電所の廃止措置によって発生する、クリアランスレベル以下であることの検認を経た上で再利用可能とされた金属スクラップを用いて、余裕深度処分を想定した放射線遮へい能力、耐久性を有する金属容器の利用プロセスの技術開発を行う。このとき、廃止措置によって生じる低レベル放射性廃棄物を一時的に容器保管することも考慮した金属容器とする。

開発は、以下について今年度から3カ年の計画で進める予定である。ここでは、全体計画の策定を行う。

- ① 再利用プロセスの開発
- ② 再利用プロセスの評価

なお、策定した計画は、各年度の開発成果を踏まえて、必要に応じて見直しを行うものとする。

### 2.2 再利用プロセスの開発

再利用プロセスの開発では、以下の検討を行う。

- ① 開発する容器の要件・基準の整理
- ② 基礎試験の実施
- ③ 再利用プロセスの開発

#### 2.2.1 開発する容器の要件・基準の整理

廃止措置により発生するスクラップは、鋼種により含有する不純物濃度が異なる。このとき、不純物が多い鋼種を原料とするほど製造した金属容器の耐久性が悪化すると考えられる。このため、一定の品質の金属容器（廃止措置により生じる低レベル放射性廃棄物を一時的に保管する容器（内容器））をクリアランス金属廃棄物で製造する場合は、性状の異なるスクラップ同士をどのように配合して不純物の偏りを平均化するか、溶解炉で溶かしたスクラップをどのように精錬して不純物を除去するのか、が開発のポイントとなる。このため、クリアランス金属廃棄物の鋼種及び鋼種ごとの発生量等の情報が再利用プロセスを開発する上で重要となる。また、製造プロセスや設備規模を検討する上で、クリアランス金属廃棄物の発生量と、廃棄物を

収納する内容物の必要量から評価される需給バランスを検討する必要がある。このため、想定されるクリアランス金属廃棄物の鋼種及び発生量を調査する。

また、金属廃棄物に収納する低レベル放射性廃棄物の性状（放射能レベル、発生量）、内容物の使用環境（発電所内でのハンドリング、地上保管・輸送、余裕深度処分環境等）、及び適用法令等を調査して、内容物に求められる技術要件を整理する。

これらの整理は、開発1年目の今年度に行うものとする。次年度以降は、新たな情報等が得られた場合に必要に応じて見直しを行うものとする。

## 2.2.2 基礎試験の実施

前項で整理されたクリアランス金属の種類から、技術要件を満足する内容物を製造するための検討・評価が必要となる。これらの評価のために、以下の基礎試験を実施する。なお、これらの試験は開発1年目の今年度を中心に行うものとし、次年度以降は今年度の成果を基に、必要なデータを取得するものとする。

### (1) 代表化学成分（鋼種）の選定及び熱処理条件の検討

内容物は、比較的放射能レベルの高い低レベル放射性廃棄物（L1 廃棄物）を収納するため、放射線の遮へい機能が求められ、また、多様な肉厚のものが必要になると考えられるため、熱処理条件が容器性能に影響を与える。熱処理の冷却方法も水冷・油冷・空冷と様々な方法があり、内容物に求められる技術要件を満足する最適な熱処理条件を設定する必要がある。

そこで、熱処理条件を設定するための熱処理シミュレーションを実施すると共に、熱処理された試験片に対して機械的試験を行って材料データを取得する。この結果から、必要な各条件等の設定を行う。

### (2) 許容される不純物含有量の検討

前項での技術要件の調査結果によるが、内容物は一定の耐久性（靱性）が求められる。一般に金属の靱性値は、リン（P）、硫黄（S）及び錫（Sn）のような不純物の含有量の増加に伴い悪化する。また、Snのような循環性元素（トラップエレメント）は、溶解炉で精錬（不純物を除去する製造工程）を行っても除去することが困難であるため、Snを多く含む

むスクラップは溶解する前に取り除く必要がある。

これらのことから、内容器に求められる耐久性（靱性）を満足するのに必要な不純物濃度レベルを把握する必要がある。

そこで、実験室規模で市販の金属を配合、精錬して、意図的に不純物含有量の異なる試験片を作製し、機械的試験を行って材料データを取得し、内容器の耐久性（靱性）の確保、製造条件の整備の観点で許容される不純物含有量を検討する。

### (3) 補修溶接時の予熱条件の検討

内容器は鋳造法により製造する。鋳造品には、引け巣（鋳造金属内部に残る空隙）等の鋳造欠陥が現出する場合がある。そのような欠陥は、溶接補修されるが、溶接後に補修部で低温割れを引き起こす場合があり、割れ防止のためには鋳鋼品を加熱しなければならない。このため、その必要な最低温度（予熱温度）を検討する必要がある。

そこで、材料を種々の温度に加熱して溶接した後、低温割れの有無を確認する試験（溶接割れ試験）を行い、割れ感受性を評価することにより鋳鋼品を加熱する最低温度（予熱条件）を設定する。

### (4) 熱処理条件の妥当性評価

先に示したように（本項(1)）、実験室規模の熱処理シミュレーションを行う予定である。しかし、実際の内容器は形状が複雑であるため、完全には熱処理条件の確認ができない可能性が考えられる。

そこで、市中スクラップを用いて内容器の形状を模擬した大きな試験片（対照用モックアップ）を試作し、熱処理シミュレーションで確認した熱処理条件の妥当性を評価する。

### (5) 耐久性（靱性）の妥当性評価

内容器の耐久性（靱性）を評価するために、使用環境や使用条件における耐久性（靱性）を確認する必要がある。

そこで、整理した内容器の使用環境において、落下事象を汎用の解析コードを用いて解析し、内容器に発生する衝撃値を予想して、先に評価した（本項(2)）の耐久性（靱性）が妥当であることを確認する。

## 2.2.3 再利用プロセスの開発

### (1) 内容物の設計

実際のクリアランス金属廃棄物を用いた実物大の内容物を試作する実証試験に向けて、内容物の設計を行う必要がある。

そこで、収納する低レベル放射性廃棄物の性状等から、求められる遮へい厚さ（内容物の肉厚）、また、すでに検討されている内容物を収納する処分容器の形状等から、内容物の設計を行う。なお、これらの設計は、2年目に実証試験を計画していることから、1年目の今年度行う。また、基礎試験の結果から、内容物に求められる不純物濃度等、材料設計を行う。

### (2) 材料規格案の策定

基礎試験の結果によるが、内容物に求められる材料規格は、現在日本工業規格（JIS）に規定されている鋳鋼材料とは異なる可能性が考えられる。このため、内容物にクリアランス金属廃棄物を使用して製造するためには、得られた材料組成、材料特性等を規格化する必要がある。ここでの材料規格案は、低レベル放射性廃棄物の内、余裕深度処分（L1）用の処分容器の遮へい体の材料規格を対象とするものとする。

そこで、各開発結果から、所定の性能を満足するための内容物の材料規格案を策定する。なお、材料規格案は、1年目の今年度は規格案のイメージとして、一般の鋼材で規定されている項目などについて調査する。2年目には、策定する材料規格案について、化学成分や熱処理、材料スペックとするのか、プロセスや検査までの規定するのか等、その範囲について検討を行う。さらに材料規格案を策定し、さらに必要と考えられるデータなどについて確認する。3年目は、2年目までの成果を踏まえて最終的な材料規格案とすると共に、規格化に向けたその後の進め方等について整理する。

### (3) 再利用プロセスの開発

以上の成果より、クリアランス金属廃棄物の内容物への再利用のためのプロセスの開発を行う。原子力発電所の廃止措置に伴い発生するクリアランス金属廃棄物を適切に回収・分別・保管する方法、内容物の製造工場における原料となるクリアランス金属廃棄物等の配合方法、精錬（原料を溶解した後不純物を除去する）方法からなる再利用プロセスを開発する。

なお、この開発は2年目までの各開発成果を踏まえて、3年目に実施する。

## 2.2.4 全体工程

前項までに示した再利用プロセスの開発における各実施内容について、全体工程を表2.2.4-1に示す。

表 2.2.4-1 再利用プロセスの開発全体工程

	平成27年度	平成28年度	平成29年度
1. 開発の前提条件の調査、整理	→		
2. 基礎試験の実施	→	→	-----→ (必要に応じて)
3. 再利用プロセスの開発			
① 内容器の設計	→		
② 材料規格案の策定 ・規格案のイメージの提示 ・規格案の提示 ・規格案の策定	→	→	→
③ 再利用プロセスの開発			→

## 2.3 再利用プロセスの評価

再利用プロセスの評価では、以下の検討を行う。

- ① 実証試験計画の策定
- ② 実証試験の実施
- ③ 再利用プロセスの評価

### 2.3.1 実証試験計画の策定

本事業では、開発2年目の次年度、日本原子力発電株式会社の東海発電所で発生した実際のクリアランス金属を用いて、日本製鋼所室蘭製作所での実物大内容器の試作を含む実証試験を行う予定である。開発1年目の本年度は、次年度の実証試験に向けた実証試験計画の策定を行う。

計画策定にあたっては、実証試験の管理ポイントを明確にし、クリアランス金属廃棄物の受け入れ～製造～スクラップ化までの製造工程、製造方法を検討する。実証試験計画は、2.2 項において検討された仕様等を踏まえて検討を行う。さらに、クリアランス金属を用いた場合の製品、工場設備、発生物（産業廃棄物）への放射能の影響度合いを測定するための調査方法を策定すると共に、試作した内容物の放射線遮へい能力や耐久性の確認方法の検討を行う。

クリアランス金属廃棄物の受け入れにあたっては、搬入航路について輸送業者とともに、地元住民の理解を念頭に、安全上の課題を最優先とし、効率的な輸送方法を慎重に検討する。また、次年度の計画を円滑に進めるために、関係者との調整を行う。

### 2.3.2 実証試験の実施

#### (1) クリアランス金属運搬計画

クリアランス金属を室蘭まで輸送する方法として、東海発電所からトラックで日立港に搬送し、日立港から室蘭港まで直接船輸送とする方法を採用する。

盗難・飛散を防止する観点から、クリアランス金属は蓋付き専用容器に入れて輸送・保管する。

クリアランス金属の輸送時の安全性を確認するために、輸送前後での船内の放射線量率（ $\mu$  Sv/h）測定を実施する。

東海発電所からクリアランス金属を持ち出す際には、外来性の放射能も考慮して、ゲートモニターで異常が無いことを確認し、クリアランス金属を室蘭港で受入れの際も、通常の原因受入れと同様、ゲートモニターで異常が無いことを確認する。

#### (2) 実証試験及び工場設備等への影響調査

日本製鋼所室蘭製作所において、実物大内容物の試作を含む実証試験を行う。実証試験では設計した 50mm 及び 200mm の内容物が実際に製造可能であることを確認し、製作した内容物の放射線遮へい能力、耐久性等について確認する。なお、放射線遮へい能力については密度を測定し、耐久性については引張試験及びシャルピー衝撃試験を行って評価する。

また、実証試験を通じて、製造工程中の製品、工場設備及び発生物（産業廃棄物）への放射能の影響を把握するために、製品に関しては実際にサンプリングして放射能濃度（Bq/g）測定を行い、クリアランスレベル以下であることを確認する。工場設備及び発生物に関して

は、放射線量率（ $\mu\text{Sv/h}$ ）を計測し、平常時との差を確認する。

### 2.3.3 再利用プロセスの評価

#### (1) 経済性評価方法の検討

開発した技術の利用促進に向け、実用化に向けた再利用プロセスの経済的合理性に関する評価方法の検討を開発1年目の本年度に行う。具体的にはクリアランス金属廃棄物の再利用の有無等による経済性評価方法の検討を行う。

#### (2) 経済性評価

前項の実証試験結果及び経済性評価方法に基づき、実用化に向けた再利用プロセスの経済的合理性に関する評価を開発3年目に行う。

### 2.3.4 全体工程

前項までに示した再利用プロセスの評価における各実施内容について、全体工程を表2.3.4-1に示す。

表 2.3.4-1 再利用プロセスの評価全体工程

	平成27年度	平成28年度	平成29年度
1. 実証試験計画の策定	→		
2. 実証試験の実施		→	
3. 再利用プロセスの評価			
① 経済性評価方法の検討	→		
② 経済性評価			→

### 3. 再利用プロセスの開発

#### 3.1 概要

スクラップは鋼種により含有する不純物濃度が異なるが、不純物が多い鋼種を原料にするほど製造した金属容器の耐久性が悪化する。よって、一定の品質の金属容器（廃止措置によって生じる低レベル放射性廃棄物を一時的に保管する容器（内容器））をクリアランス金属廃棄物で製造する場合は、性状の異なるスクラップ同士をどのように配合して不純物の偏りを平均化するか、溶解炉で溶かしたスクラップをどのように精錬して不純物を除去するかが開発のポイントとなる。このため、クリアランス金属廃棄物の鋼種及び鋼種ごとの発生量等の情報が再利用プロセスを開発する上で必要となる。また、製造プロセスや設備規模を検討する上で、クリアランス金属廃棄物の発生量と、廃棄物を収納する内容器の必要量から評価される需給バランスを考慮する必要がある。このため、想定されるクリアランス金属廃棄物の鋼種及び発生量を調査する。

また、内容器に収納する低レベル放射性廃棄物の発生量から想定される必要な内容器数、内容器の使用環境（地上輸送・地上保管・余裕深度処分環境等）及び適用法令等を調査して、内容器に求められる技術要件を整理する。

上記において整理されたクリアランス金属廃棄物の種類及び内容器の技術要件を基に、以下の検討・評価を行うため基礎試験を実施する。これらの検討・評価の結果に基づき金属容器の再利用プロセスを立案する。

- ① 代表化学成分（鋼種）の選定及び熱処理条件の検討
- ② 許容される不純物含有量の検討
- ③ 補修溶接時の予熱条件の検討
- ④ 熱処理条件の妥当性評価
- ⑤ 耐久性（靱性）の妥当性評価

また、実際のクリアランス金属廃棄物を用いた実物大の内容器を試作する実証試験に向けて、内容器の設計を行う。

想定されるクリアランス金属廃棄物の鋼種及び発生量の調査や、金属容器に求められる技術要件の調査結果から、内容器の形状等の設計を行う。

## 3.2 開発する容器の要件・基準の整理

### 3.2.1 金属容器の使用環境

#### (1) 目的

内容物を発電所に納入してから、廃棄物を内容物に充填、内容物を処分容器に収納、廃棄体として処分場に定置するまでの主要工程のフローを作成し、各工程で内容物に課される技術要件を抽出することを目的とする。

#### (2) 主要工程

内容物を発電所に納入してから、廃棄物を内容物に充填、内容物を処分容器に収納し、廃棄体として処分場に定置するまでの主要工程のフローを図 3.2.1-1 に示す。また、各工程の概要を表 3.2.1-1 にまとめる。なお、ここでは廃棄物の充填を水中で行う場合について示す。

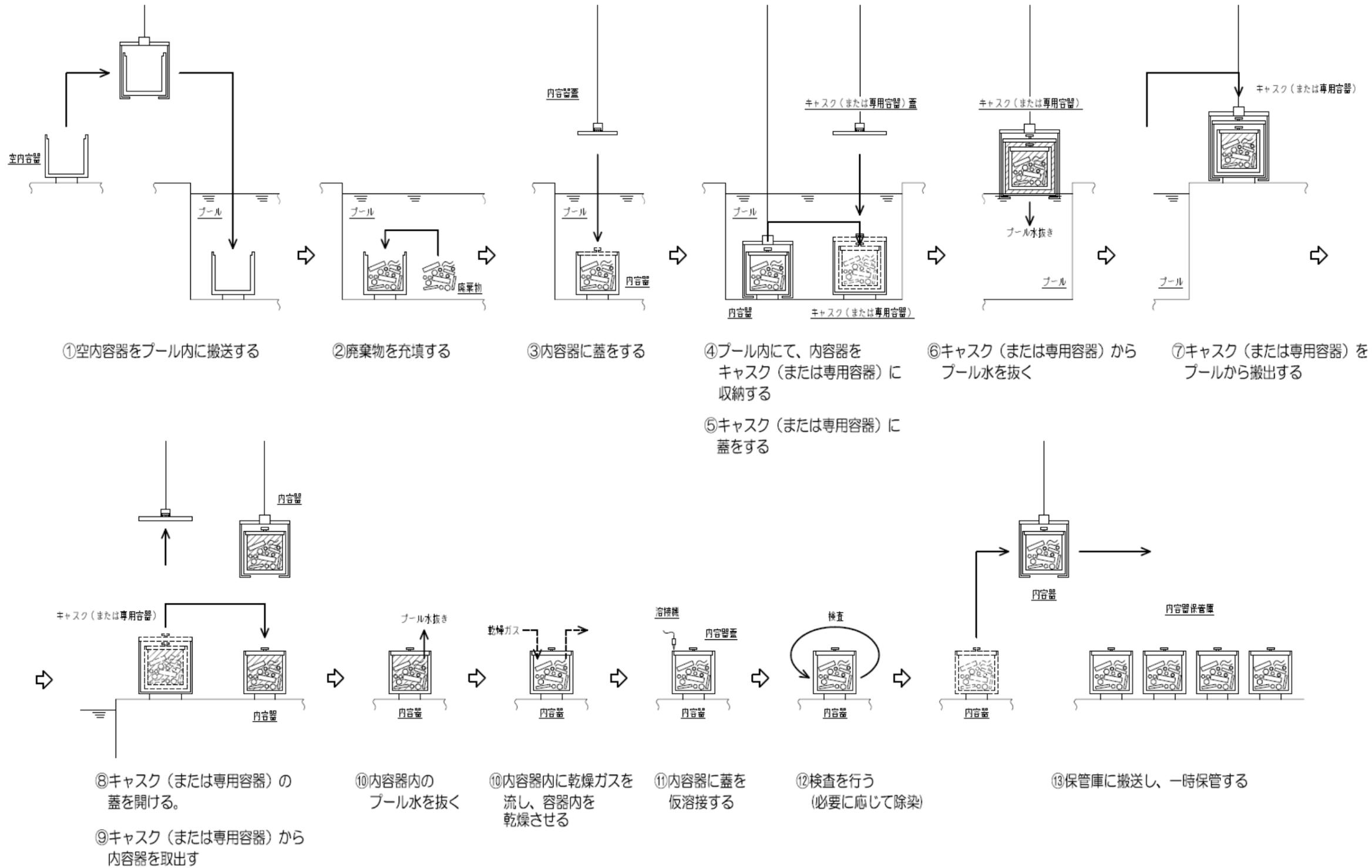


図 3.2.1-1 内容器主要工程フロー図 (1/2)

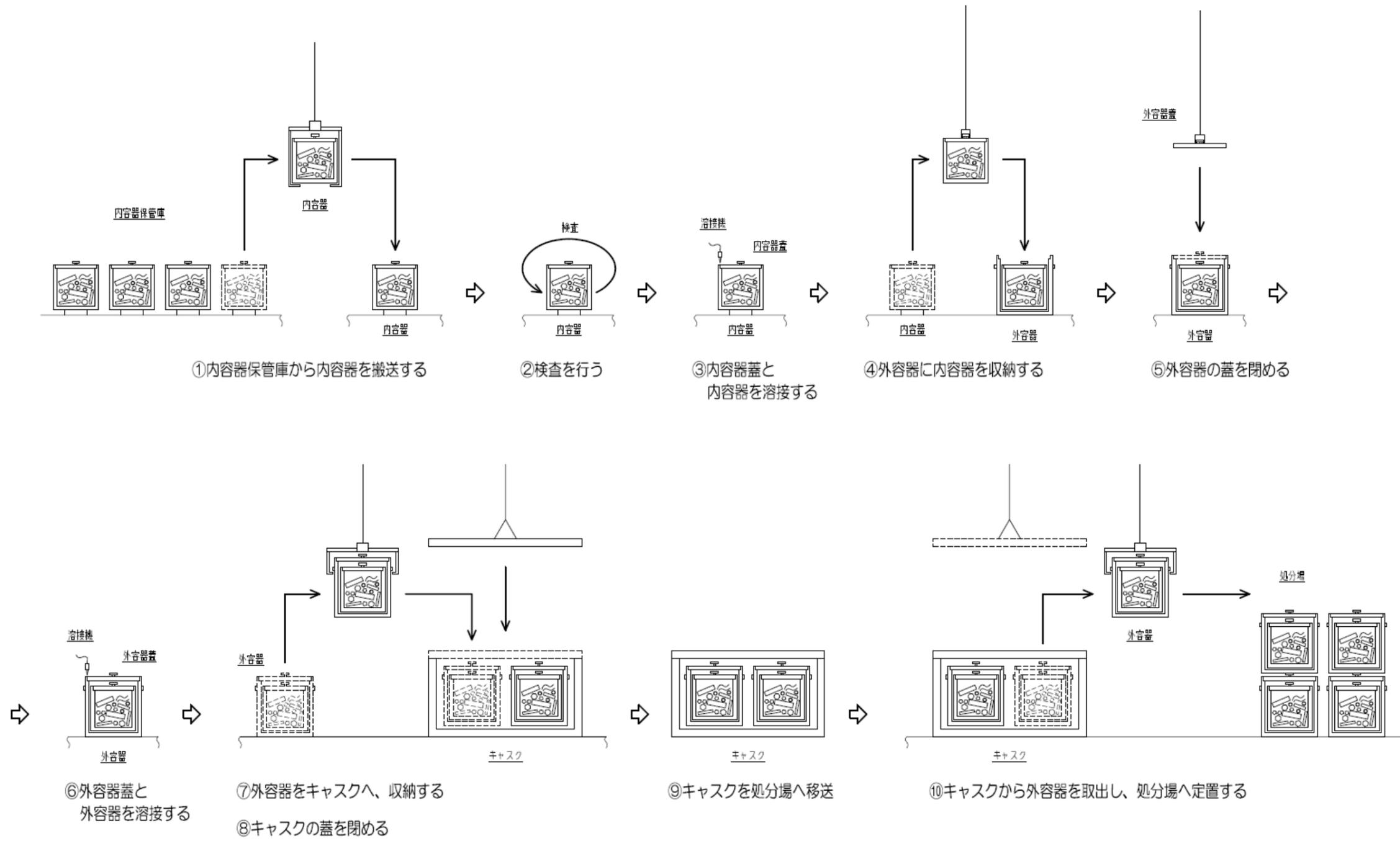


図 3.2.1-1 内容器主要工程フロー図 (2/2)

表 3.2.1-1 内容器主要工程の概要

工程	搬入	廃棄物充填	キャスク内に収納	搬出	キャスク内から取出	乾燥	上蓋(仮)締め
工程の概要	製造工場から搬入	プール内にて廃棄物を充填	搬出のためキャスク（または専用容器）内に収納	プールから搬出	廃棄体処理施設にてキャスク（または専用容器）から廃棄物を収納した内容器を取出	内容器内の排水及び廃棄物の乾燥	一時保管のための上蓋の(仮)締め
内容器に求められる技術要件	・所定の構造及び材料で設計されたもの ・防錆処理（プール内での使用を想定）	・遮へいのためプール内にて廃棄物を充填 ・既設のクレーンまたは専用吊具での取扱が可能な構造	・キャスク（または専用容器）内に収納できる構造			・内容器内の排水及び廃棄物の乾燥が可能な構造	・構内搬送時などに廃棄物が外に出ないようにする ・一時保管時に、劣化などで封止が破れない
備考		・気中にて充填する場合は、別途技術要件の検討が必要					

工程	検査	(除染)	一時保管	搬出前検査	(砂充填・乾燥)	(上蓋締め)	処分容器に収納
工程の概要	表面汚染、封止確認などの検査	必要に応じて除染	発電所内で一時保管	処分容器への収納のための検査	必要に応じて、内容器内の空隙部に砂充填及び乾燥	(内容器の上蓋を取り付け密閉)	内容器を処分容器内に収納
内容器に求められる技術要件			・残留水の放射線分解による水素発生に対応し、水素ガス濃度を爆発限界以下に保つ	・内部確認が可能な構造	・砂などにより、上蓋溶接に影響を与えない ・内容器内の廃棄物の乾燥が可能な構造	・輸送時の落下事故により、シールが破れない	・処分容器に収納可能な構造
備考				・廃棄物の直接確認を行う必要がある場合に対応	・空隙がないこと、など内部確認が必要な場合		

工程	検査	搬出	輸送	処分
工程の概要	廃棄体の検査	廃棄体を輸送容器に収納し、発電所から処分場へ搬出	処分場へ輸送	輸送容器から廃棄体を取り出し、処分場へ定置
内容器に求められる技術要件			・輸送規則より、事故時（-20℃、9m 落下）において遮へい機能を喪失しないこと	
備考				

### (3) 内容器に求められる技術要件

表 3.2.1-1 に、各工程で求められる技術要件を併せて示した。

これらのうち、主要工程の技術要件を以下に示す。

#### (a) 全工程

全工程で求められる共通の要件として、吊具で安全に取扱いできること、本来の目的である遮へい性能を満足すること、等が必要であると考えられた。

全工程において求められる技術要件を以下に示す。

- ① 吊具で安全に取扱うことができること
- ② 転倒・落下により破壊しないこと
- ③ 材料が放射線により劣化しないこと
- ④ ストリーミング等の遮へい欠陥部がないこと

#### (b) 廃棄物充填工程

廃棄物の内容器内への充填は、作業員の被ばくに対する遮へい等を考えるとサイトバンカプール内等で行うことが考えられる。また、プールから出す際には、廃棄物を充填した内容器をキャスク（または専用容器）に入れて取り扱う必要があると考えられる。なお、廃棄物充填に関しては気中にて充填する概念もある。

プール内で内容器内に廃棄物を充填する場合、水中での遠隔操作となることから、構造上下記について考慮する必要があると考えられる。

本工程において求められる技術要件を以下に示す。

- ① プール内でのハンドリング
- ② 防錆
- ③ キャスク（または専用容器）との取合
- ④ 容器内の排水

なお、ここで防錆については、一時保管までの工程での錆防止が必要と考えられる。処分後は、外容器である処分容器において耐食性等の評価がなされている。

#### (c) 上蓋（仮）締め工程

内容器に充填した廃棄物は、発電所内に一時保管される。このため、一時保管場所までの構内輸送時、及び一時保管時に内容器内の放射性物質が漏れないようにする必要がある。また、放射線量率が高いと考えられることから遠隔での操作が必要となる。

ただし、一時保管後処分場に搬出する際には、内容器内の廃棄物確認を求められる可

性能もあることから、内容器内を確認できる構造とすることが好ましいと考えられる。

また、一時保管後の処分場の搬出を考慮して上蓋締めを行う場合には、上蓋を溶接し内容器を密閉する必要がある。

後述の輸送工程において、落下、転倒時等において遮へい機能を喪失しないことが求められる。このため、このような事故時にも遮へい性の面から溶接が破れないようにする必要がある。

なお、材料自身の破壊等の検討は、材料設計で行う。

本工程において求められる技術要件を以下に示す。

- ① 構内輸送時の放射性物質の飛散防止
- ② 遠隔操作によるハンドリング
- ③ 容器内の確認が可能
- ④ 構外輸送時の事故時の密封性

#### (d) 一時保管工程

プール内で廃棄物充填される場合、プールからの引上げ時に可能な限り排水したとしても、内容器内には相当量の水が残ると考えられる。

水分が残ったまま、上蓋を閉めると水の放射線分解による水素発生や、廃棄物の腐食等による劣化が想定される。

乾燥工程での乾燥の程度にもよるが、乾燥後どの程度の水分量となったかの精度のよい測定は難しいと考えられることから、発生した水素を排出する機能を持たせる必要があると考えられる。

なお、管理区域境界の遮へい及び必要な除熱は保管建屋側で行うことが合理的と考えられることから、ここでの技術要件とはしないものとした。

本工程において求められる技術要件を以下に示す。

- ① 水素ガス放出機能

#### (e) 処分容器への収納工程

上蓋を溶接し密閉された内容器は外容器である L1 処分容器<sup>[1]</sup>に収納され、廃棄体とする。

内容器の外側に把持部などを設けると、外容器となる L1 処分容器に収納するためには、内容器の最大外寸が規定されることからその分内容器の容量が小さくなり、廃棄物収納量が低下する。出来る限り内容積を大きくすることができる構造が求められる。

廃棄物の収納量を大きくするためには、L1 処分容器とのすき間を出来る限り小さくす

ることが望ましい。このとき、L1 処分容器の仕様も含めて、安全かつ効率的に収納できるようにする必要がある。

本工程において求められる技術要件を以下に示す。

- ① 処分容器に安全に収納可能
- ② 処分容器（外容器）とのすき間を出来る限り小さくする

#### (f) 輸送工程

廃棄物を充填された L1 処分容器（L1 廃棄体）は、将来、輸送容器に収納され BM 型核分裂性輸送物として埋設施設へ運搬される。

このとき、これらの材料においては、落下、転倒などの事故時に遮へい機能を喪失しないことが必要と考えられ、破壊しない靱性値を求めて材料を設計する必要がある。

なお、ここで規定されている規則、標準等は次項でまとめて示す。

本工程において求められる技術要件を以下に示す。

- ① 落下、転倒等の事故時に遮へい機能を喪失しない

### 3.2.2 適用法令等の調査

#### (1) 目的

内容物の設計を行うため、適用されると考えられる適用法令等を調査し、内容物に求められる技術要件を整理する。

#### (2) 適用法令等

内容物に適用されると考えられる適用法令等として以下が考えられる。

- ① 総理府令第五十七号 核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する規則<sup>[2]</sup>
- ② 日本原子力学会標準 低レベル放射性廃棄物輸送容器の安全設計及び検査基準：2008, AESJ-SC-F013:2008<sup>[3]</sup>
- ③ 日本原子力学会標準 余裕深度処分対象廃棄体の製作要件及び検査方法：2015, AESJ-SC-F014:2015<sup>[1]</sup>

ここで、総理府令第五十七号<sup>[2]</sup>には、BM 型核分裂性輸送物に係わる技術基準として制定されている。

規則の第6条第4号では、運搬中に予想される最も低い温度から 38℃までの周囲の温度の範囲において、き裂、破損等の生じる恐れがないことが要求されている。このとき、輸送物設計承認申請書に輸送物の最低使用温度を明記すれば、その温度を運搬中に予想される最も低い温度と限定でき、これまでの例では周囲温度-20℃以上で使用することが記載されている。

ここで、BM 型輸送物とは、輸送法令に定められた一定量を超える量の放射能を有する収納物を収納する輸送物で、国際輸送に当たっては、設計国、使用国及び通過国から輸送物の安全性などに関する許可を必要とするものである。

また、日本原子力学会標準のうち、低レベル放射性廃棄物輸送容器の安全設計及び検査基準<sup>[3]</sup>では、遮へい設計における材料物性値の例として、以下の通り示されている。

遮へい設計に使用する材料の物性値としては、信頼性の高い規格又は文献の値を基にし、密度については若干の余裕を考慮した値が通常用いられる。余裕の量はその材料の製造実績又は理論的に考慮すべき最小密度に基づいて設定されるが、必要に応じて（すなわち、使用実績が少ない場合）材料検査により確認する。

ここで示されている密度と組成のデータ例<sup>[3]</sup>を表 3.2.2-1 に示す。

表 3.2.2-1 遮へい設計における材料物性値における密度と組成のデータ例

	文献記載の密度	遮へい設計に使用する密度例	組成	備考
	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	wt%	
炭素鋼	7850/ 7860	7850	Fe:100	密度:炭素量の異なる二種類の炭素鋼に対する値 組成:微量元素無視
ステンレス鋼 (SUS304)	7920	7900	Cr:19, Fe:72, Ni:9	密度:SUS304 に対する値 組成:材料規格中央値

さらに、使用材料の低温特性評価として、以下の通り示されている。

静止状態での構成部品の低温特性について、この基準で対象としている輸送容器の金属製構成部品は落下試験のような過大の荷重下で耐えられるように設計する。したがって、静止状態においてはこれらの構成部品に発生する応力が微小であるので、通常の金属材料は-40℃の低温になっても低温脆性破損することはないと判断できる。

また、輸送物の要件に関する設計として、以下の通り示されている。

- ・ BM 型輸送物の場合、最低使用温度は輸送経路における過去の気温観測データより安全

側の評価となるように設定する。

- ・ 輸送容器構成部品の材料は、 $-40^{\circ}\text{C}$ の静置状態で破損が生じないことを信頼性のあるデータにより確認する。ここで、BM 型輸送物の場合は評価温度を最低使用温度としてよい。

さらに、使用材料の低温特性評価として、落下試験時の構成部材の低温特性について以下の通り示されている。

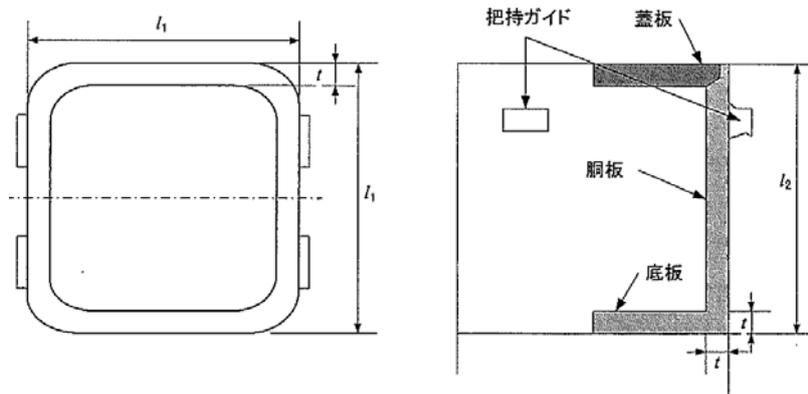
- ・ 当該金属材料が低温脆化を起こす可能性がある材料か判定する。
- ・ 低温脆化を起こす恐れのある金属材料については、材料試験を行うか又は公知の文献から得られる低温時の衝撃試験データから、最低使用温度が脆性破面遷移温度又は吸収エネルギー遷移温度より高いことを確認する。

日本原子力学会標準のうち、余裕深度処分対象廃棄体の製作要件及び検査方法<sup>[1]</sup>においては、廃棄体輸送に係る廃棄体の技術項目のうち、通常の輸送条件において廃棄体で考慮すべき技術項目として、表 3.2.2-2 の通り示されている。

表 3.2.2-2 通常の輸送条件において廃棄体で考慮すべき技術項目

輸送物の技術基準	廃棄体で考慮すべき技術項目
構成部品が $-40^{\circ}\text{C}$ ～ $70^{\circ}\text{C}$ の温度範囲において、き裂、破損等のおそれがないこと。ただし、運搬中に予想される温度の範囲が特定できる場合は、この限りではない。	この基準は、輸送容器構成部品の材料が、輸送物の静置状態において、 $-40^{\circ}\text{C}$ ～ $70^{\circ}\text{C}$ （予想される温度範囲が特定できる場合には、当該温度範囲を考慮できる。）の環境温度下でき裂、破損等が生じていないことの理解で運用されている。すなわち、輸送物の静置状態において、材料がこの温度域で熔融・溶解したり脆性破壊しなければよい。（形状が保たれば良い。）通常輸送中に廃棄体も、き裂、破損等が生じてはならないため、廃棄体で考慮すべき技術項目となる。
運搬中に想定される最低温度から $38^{\circ}\text{C}$ までの温度でき裂、破損等のおそれがないこと。	この基準は、単に通常の輸送条件に課されるものではなく、最低輸送環境温度（ $-20^{\circ}\text{C}$ 程度）～ $38^{\circ}\text{C}$ の環境温度において一般の試験条件、特別の試験条件での機械的荷重が作用した場合でも、輸送容器構成部品の材料にき裂、破損等が生じないことの理解で運用されている。一般の試験条件及び特別の試験条件において、それらに対する廃棄体の挙動を評価するときに、この環境温度を考慮する必要があると考えられる。

また、ここでは、内容物が収納される外容器としての処分容器の形状が規定されている。規定されている処分容器の形状を図 3.2.2-1 に示す。



単位 mm

長さ		許容差
$l_1$	1 600	$\pm 3$
$l_2$	1 600	$\pm 3$
	1 200	$\pm 3$
$t$	50 以上	プラス許容差指定

図 3.2.2-1 耐荷重条件を満たすことが評価された処分容器の形状及び寸法

以上より、法令等から内容器に求められる技術要件を以下にまとめる。

- ① 遮へい材に求められる所定の密度を持つ
- ② 運搬中に予想される最も低い温度 ( $-20^{\circ}\text{C}$ ) から  $38^{\circ}\text{C}$  までの周囲の温度の範囲において、き裂、破損等の生じる恐れがない
- ③ 低温脆化を起こす恐れのある金属材料については、材料試験を行うか又は公知の文献から得られる低温時の衝撃試験データから、最低使用温度が脆性破面遷移温度又は吸収エネルギー遷移温度より高いこと
- ④ 処分容器 (内寸 1,500mm) に収納可能

### 3.2.3 クリアランス金属の性状調査

#### (1) 目的

再処理プロセスを検討するために、原子力発電所の廃止措置により発生すると考えられるクリアランス金属の鋼種及び発生量を調査する。

内容器をクリアランス金属で製造する場合、クリアランス金属の鋼種、及び鋼種ごとの発生量等の性状を整理しておくことは重要となる。これは、クリアランス金属の鋼種により含有する不純物濃度は異なることから、材料設計のための基礎試験の結果を踏まえて、どのような配合が考えられるのか検討する上で参考となる。

## (2) 調査方法

クリアランス金属の鋼種及び各鋼種ごとの発生量は、電力会社にて検討されているため、電力会社からの情報提供によりまとめる。

また、実証試験の計画を行う上で、溶解炉での精錬（不純物を除去する製造工程）を行っても除去が困難な循環性元素（トラップエレメント）の有無の確認が必要と考えられる。そこで、実際のクリアランス金属におけるトラップエレメントとして錫（Sn）及び銅（Cu）の有無について確認する。なお、測定はポータブル分析装置により原位置にて行う。以下に主な仕様を示す。

- ① 対象鋼種：炭素鋼
- ② 評価元素：Cu、Sn
- ③ 測定装置：オリンパス社製 GeoChem DELTA Professional (測定モード：合金分析)

## (3) 調査結果

### (a) 金属の種類及び発生量

原子力発電所の解体に伴い発生するクリアランス金属としては、浜岡 1、2 号機のクリアランス金属の材質別内訳が整理されている。ここで示されている金属の種類を表 3.2.3-1 に示す。なお、ここでは非鉄や非金属も含むクリアランス物としてまとめた。

表 3.2.3-1 クリアランス物の種類

区分		材質	
鉄	普通鋼	<ul style="list-style-type: none"> <li>・SS材（一般構造用圧延鋼材）</li> <li>・SM材（溶接構造用圧延鋼材）</li> <li>・STPT材（高温配管用炭素鋼管）</li> </ul> など	
	特殊鋼	SUS	<ul style="list-style-type: none"> <li>・SUS材（ステンレス鋼）</li> <li>・SCS材（ステンレス鋼鋳鋼）</li> </ul> など
		その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>・STPA材（配管用合金鋼鋼管）</li> <li>・SCMV材（ボイラ及び圧力容器用クロムモリブデン鋼鋼板）</li> <li>・SUP材（ばね鋼鋼材）</li> </ul> Mn, Mo, Cr, Nb, W など添加物を含むもの
	鋳鍛鋼	鋳鋼	<ul style="list-style-type: none"> <li>・SCW材（溶接構造用鋳鋼）</li> <li>・FC材（ねずみ鋳鉄）</li> <li>・FCD材（球状黒鉛鋳鉄）</li> </ul> など
		鍛鋼	<ul style="list-style-type: none"> <li>・SF材（炭素鋼鍛鋼）</li> </ul> など
非鉄		<ul style="list-style-type: none"> <li>・AC材（アルミ鋳物）</li> <li>・C材（伸銅材）</li> </ul> その他、鉛、チタンなどの鉄以外の金属	
非金属、不明分		保温材、ネオプレンゴム、FRP(強化プラスチック) PVC(ポリ塩化ビニル)などの金属でないもの、材料が不明なもの	

また、これらのクリアランス物の発生量は、同様に浜岡 1、2 号機のクリアランス金属の材質別発生量内訳の割合に比例するとして、57 プラント分のクリアランス金属（559,000ton）について材質別物量が試算されている。ここで示されている材質別物量を表 3.2.3-2 に示す。

表 3.2.3-2 クリアランス物材質別物量

区分		材質	重量(ton)	
鉄	普通鋼	・SS 材 ・SM 材 ・STPT 材	283,689	
	特殊鋼	SUS	・SUS 材 ・SCS 材	17,490
		その他	・STPA 材 ・SCMV 材 ・SUP 材 Mn, Mo, Cr, Nb, W など添加物を含むもの	20,057
	鋳鍛鋼	鋳鋼	・SCW 材 ・FC 材 ・FCD 材	37,446
		鍛鋼	・SF 材	65,732
非鉄	・AC 材 ・C 材 (その他、鉛、チタンなどの鉄以外の金属)	42,903		
非金属、不明分	保温材、ネオプレンゴム、FRP(強化プラスチック)、PVC(ポリ塩化ビニル)などの金属でないもの、材料が不明なもの	91,682		
合計			559,000	

## (b) 金属の需給バランス

内容物の製造を検討する上では、内容物の需要量を把握し、どの程度の規模の設備となるのかを把握しておく必要がある。

また、材料設計においては、必要な材料性能を満たすためには、必要に応じてバージン材としての炭素鋼等を添加する必要がある可能性が考えられる。材料の精錬等の製造工程を検討する際、手間を掛けても不純物除去を行った方がいいのか、バージン材を加えた方がいいのか等について合理的に判断するには、発生するクリアランス金属量と、内容物として必要となる金属量のバランスを評価しておくことは有用である。

表 3.2.3-2 に示したクリアランス物のうち、非鉄及び非金属は内容物として使用に適さないとして除外する。すると、利用可能なクリアランス金属量は 42 万トン程度と推定される。

このクリアランス金属を用いて、内容物を作製した際の需給バランスについて検討を

行う。

低レベル放射性廃棄物のうち、L1 処分容器の需要量は、4 万個と想定されている<sup>[4]</sup>。

表 3.2.3-3 に推定された L1 処分容器の需要量から計算される内容器の需要量を示す。なお、内容器は 100mm の肉厚を想定して 8.5ton/個としている。

表 3.2.3-3 L1 処分容器の需要量

L1 処分容器	個	40,000
内容器(鑄造素材)	ton	340,000

内容器としての需要量は、34 万トンとなり、先に示した利用可能なクリアランス金属量の 80%程度となる。

この結果では、解体により発生すると推定されるクリアランス金属量に対する L1 処分容器の内容器としての需要量は、約 80%程度と推算された。しかし、これは単純な数値の比較であり、実際は精錬工程や鑄込み工程での歩留まり、今後検討する材料規格により求められるクリアランス金属の配合、さらには原子力発電所の解体に対するクリアランス金属の発生時期と内容器の需要の時期等により変動するため、参考情報として示す。

#### (c) 内容器に収納する低レベル廃棄物の性状調査

内容器は、低レベル放射性廃棄物のうち、比較的放射能レベルの高い廃棄物（L1 廃棄物）を収納するために用いられ、遮へい体としての役割も求められる。

L1 廃棄物を収納する処分容器について、必要な遮へい厚さについて検討がなされている。求められる遮へい厚さとしては、50mm～300mm が必要とされており、処分容器自身が 50mm の遮へい体となることから、内容器は 50mm～250mm の遮へい体としての役割が必要となること分かる。

#### (d) クリアランス金属の性状調査

クリアランス金属（炭素鋼）中の Sn 及び Cu の有無について確認した。

この結果、トランプエレメントとしての Sn 及び Cu は、いずれも検出下限以下（Sn : <0.12wt%、Cu : <0.03wt%）であり、含まれていなかった。

### 3.3 基礎試験の実施

#### 3.3.1 代表化学成分(鋼種)の選定及び熱処理条件の検討

##### (1) 目的

容器は遮へい機能の観点から 50mm から 250mm までの多様な肉厚が必要と考えられている。また、容器は輸送中に転倒・落下した場合でも破損することのない低温靱性 (-20℃における衝撃値) を備えていなければならない。しかし、厚肉の鋳鋼品では-20℃以下の衝撃値の報告例が少なく、容器に使用可能な材料の検討が必要である。また、鋳鋼品の熱処理での冷却は、空冷・油冷・水冷と様々あるが、冷却方法は衝撃値に影響を及ぼすため、最適な熱処理条件の設定が重要となる。そこで、実験室にて容器の一部を模擬した鋳鋼品を製作し、熱処理条件と機械的性質の関係を調査する。そして、その結果から容器の化学成分(鋼種)と熱処理条件を検討する。

##### (2) 試験方法

###### (a) 試験材の製作

鋳鋼品にて比較的靱性値が良好と考えられる鋼種を選定した。表 3.3.1-1 に選定した鋼種の主要化学成分を示す。一般の鉄鋼材料では、主要元素以外に原料のスクラップ等から混入する不純物が不可避免的に混在する。ここでの試験は主要成分および熱処理条件の影響を調査することが目的であるため、不純物は表 3.3.1-2 に示す低含有の範囲とした。ここで選定した代表化学成分(鋼種)をここでの基礎試験の基準材とした。

表 3.3.1-1 供試材の主要化学成分の狙い値

(質量%)

	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Al
炭素鋼	0.15	0.40	0.80	0.10*	0.10*	0.03*	0.02
低合金鋼	0.12	0.40	0.90	2.00	0.30	0.15	—

\*炭素鋼の Ni, Cr, Mo 量はスクラップからの混入を想定したレベルとした。

表 3.3.1-2 供試材の不純物成分範囲

(質量%)

P	S	Cu	Sn
0.015 以下	0.008 以下	0.15 以下	0.007 以下

ここでは、原料は市中で入手可能な金属を用いて実験室規模の設備で実施した。供試材は真空誘導溶解炉にて 90kg 溶解し、所定の成分となるよう調整した後に铸造した。

#### (b) 熱処理

一般的な鋳鋼品の熱処理には、①焼鈍、②焼ならしまたは焼入れ、③焼戻しがあり、通常はこの順に行われる。まず、①焼鈍とは铸造過程で発生する内部応力除去するための熱処理であり、通常は铸造した後の工程で行われる。②焼ならしまたは焼入れとは、製品に必要な機械的性質を付与するための熱処理である。加熱保持後の冷却は、一般に、空冷・油冷・水冷の方法がとられ、空冷の場合を焼ならし、油冷・水冷の場合を焼入れと呼ばれる。空冷・油冷・水冷では、加熱した状態から冷却過程の速度が異なり、この違いが材料の機械的性質に影響することになる。最後の③焼戻しとは、焼ならしまたは焼入れによって発生した内部応力の除去や機械的性質（強度と延性や靱性のバランス）を調整することを目的に行われる処理である。

今回の基礎試験では、作製した鋳塊から採取した 125×125×30mm の寸法の試験体を用い、熱処理シミュレーションを採取した。熱処理シミュレーションとは、実機の熱処理を模擬するものであり、試験片が実機の代表する位置の熱履歴（温度や加熱・冷却速度）と同じ熱履歴を与える熱処理のことである。図 3.3.1-1 に熱処理シミュレーション条件を示す。熱処理シミュレーションは、試験体中央に温度管理用の熱伝対を取り付け、試験片の温度が図 3.3.1-1 の条件となるよう制御しながら行った。図 3.3.1-1 は、内容器として検討されている最大の厚さ 250mm の容器の熱処理を模擬した条件である。本基礎試験では、加熱保持後の冷却速度を変えることで焼ならしあるいは焼入れ条件を模擬した。なお、ここでの冷却速度は、日本鋳鍛鋼会のデータ集<sup>[5]</sup>に収録されている冷却速度速見表を参照した（板厚 T=250, T/4）。

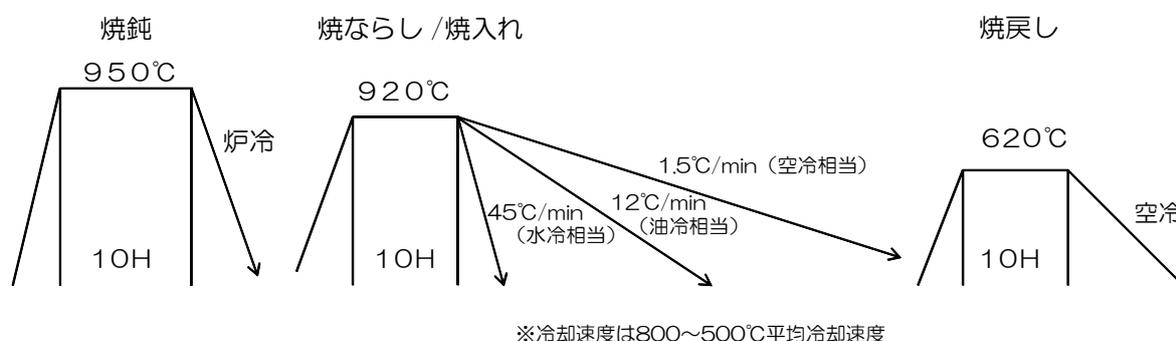


図 3.3.1-1 熱処理シミュレーション条件

### (c) 材料試験

熱処理後の試験体から、機械的試験用の試験片を採取し、以下に示す試験を実施した。

- ・ 引張試験 (JIS Z 2241 に準拠)

試験片： 14号A試験片 ( $\phi 6 \times 30GL$  mm)

測定項目： 0.2%耐力、引張強度、伸び、絞り

- ・ シャルピー衝撃試験 (JIS Z 2242 に準拠)

試験片： 2mmV ノッチ試験片

測定項目： 吸収エネルギー、延性破面率、延性破面遷移温度 (FATT)

※ 試験は $-20^{\circ}\text{C}$ を含む6温度にて行い、FATTを求めた。

- ・ ビッカース硬さ試験 (JIS Z 2244 に準拠)

試験片： シャルピー試験後の試験片の一つ

測定項目： ビッカース硬さ (荷重 10kgf で測定)

- ・ ミクロ組織観察

試験片： シャルピー試験後の試験片の一つ

測定項目： 100、400倍の顕微鏡組織

### (3) 試験結果

#### (a) 化学成分

表 3.3.1-3 に供試材の化学成分 (溶鋼分析値、試験片分析値) を示す。試験片分析値は casting 後に熱処理用に採取した試験体の分析結果である。試験片分析値は溶鋼分析値とほぼ同じ結果であり、健全な部位から採取されていることが確認できる。

#### (b) ミクロ組織観察結果

図 3.3.1-2 にミクロ組織観察結果を示す。炭素鋼は、いずれの条件ともフェライト-パーライト組織であり、冷却速度が速い方が結晶粒径は小さくなっている。一方、低合金鋼はフェライト-ベイナイト組織を呈しており、冷却速度が速いほどフェライトの割合が減少してベイナイト主体の組織となっている。

表 3.3.1-3 供試材の化学成分（溶鋼および試験片分析値）（質量%）

		C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Al
炭素鋼	溶鋼分析	0.15	0.40	0.82	0.11	0.11	0.03	0.020
	試験片分析	0.15	0.41	0.82	0.10	0.13	0.04	0.017
低合金鋼	溶鋼分析	0.12	0.40	0.93	2.03	0.33	0.16	<.003
	試験片分析	0.13	0.40	0.94	2.03	0.33	0.17	<.003

		P	S	Cu	Sn
炭素鋼	溶鋼分析	0.010	0.005	0.10	0.005
	試験片分析	0.010	0.006	0.10	0.006
低合金鋼	溶鋼分析	0.009	0.006	0.10	0.005
	試験片分析	0.009	0.005	0.10	0.006

(c) 引張、硬さ試験結果

表 3.3.1-4 に引張および硬さ試験の結果を示す。ここで検討した鋳鋼の強度レベルは、炭素鋼は 450MPa 級、低合金鋼は 500 MPa 級に相当する。

炭素鋼は冷却速度による特性変化はほとんどないが、低合金鋼は冷却速度が速くなるほど強度・硬さの上昇が確認される。これらの結果は、上述した熱処理条件によるマイクロ組織の変化に対応している。

(d) シャルピー衝撃試験結果

内容器は-20℃の環境の輸送を考慮する必要があるため、-20℃におけるシャルピー吸収エネルギーを中心に評価した。両鋼種ともに-20℃は延性-脆性遷移領域であり、吸収エネルギーの値はばらつくので、-20℃では複数の試験を行った。また、3.3.5 項で後述するが、ここで検討した材料の破壊靱性値を推定するために、複数の温度条件下でシャルピー試験を行い、FATT（延性破面率が 50%となる時の温度）および上部棚吸収エネルギー（100%延性破面の吸収エネルギー）を求めた。シャルピー試験の結果を表 3.3.1-5 に示す。

熱処理条件（冷却速度）と-20℃吸収エネルギーの関係を図 3.3.1-3 に示す。低合金鋼は、冷却速度が遅い場合でも安定して高い吸収エネルギーが得られている。一方、炭素鋼の吸収エネルギーは、焼入れ等により冷却を速くすることで若干向上することがわかる。

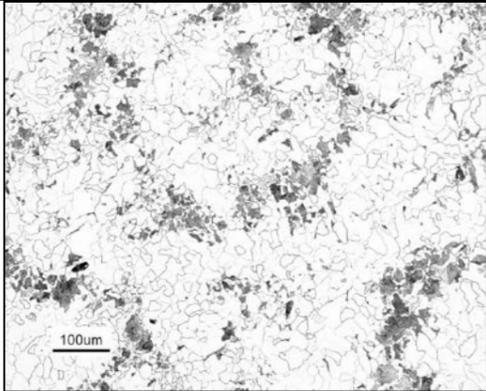
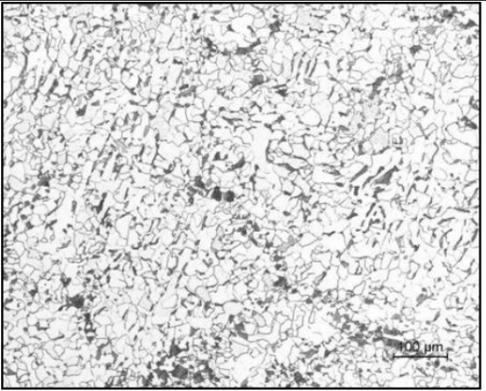
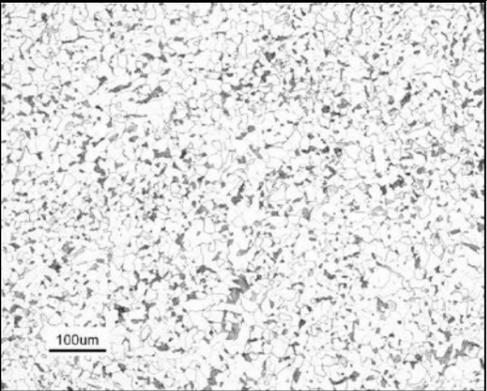
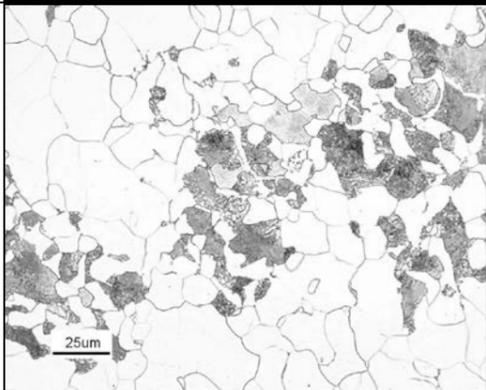
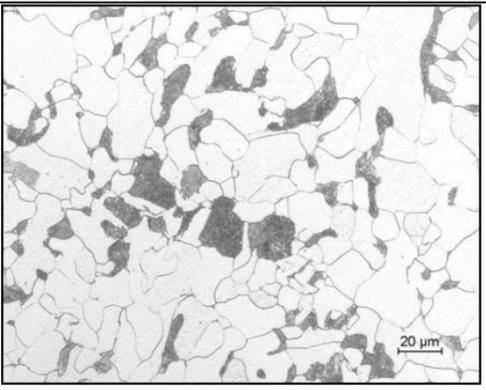
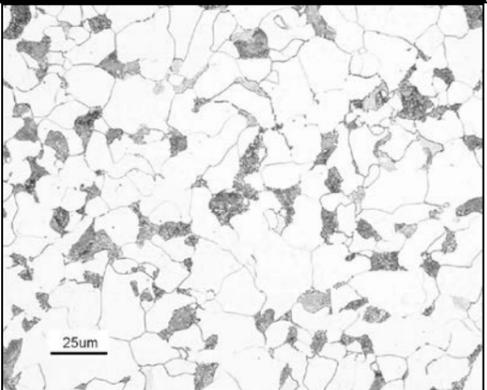
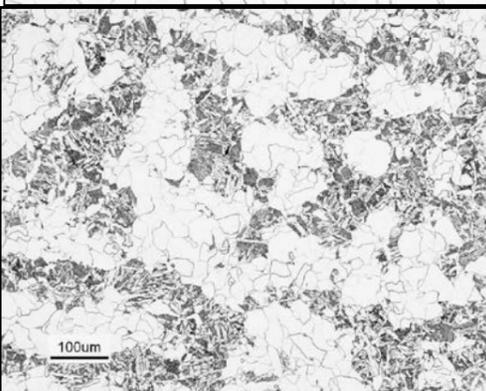
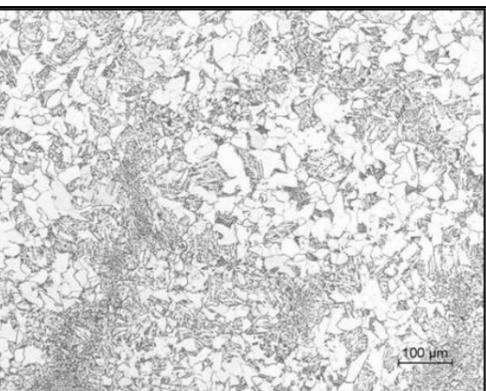
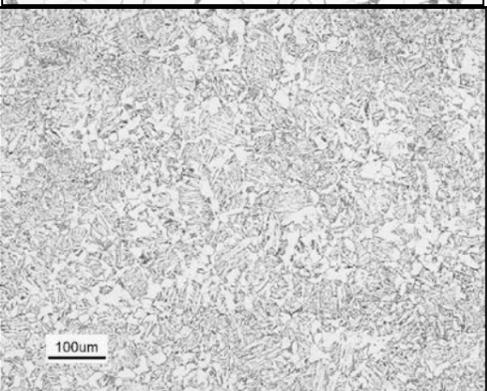
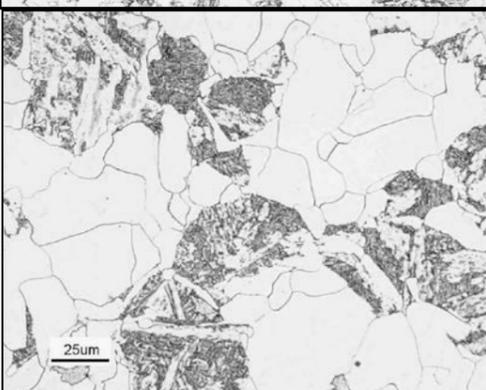
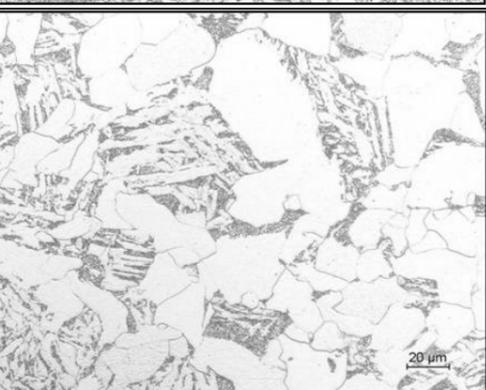
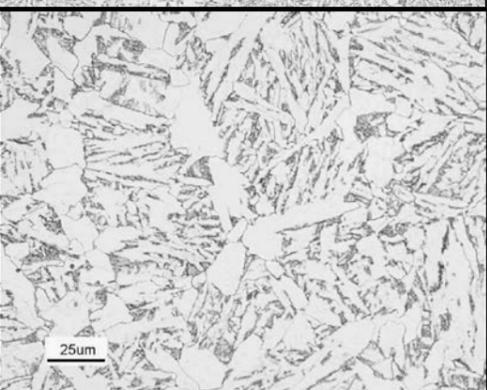
		冷却速度		
		1.5°C/min	12°C/min	45°C/min
炭素鋼	低倍			
	高倍			
低合金鋼	低倍			
	高倍			

図 3.3.1-2 ミクロ組織観察結果

表 3.3.1-4 引張、硬さ試験結果

	冷却速度 (°C/min)	0.2%耐力 (MPa)	引張強度 (MPa)	伸び (%)	絞り (%)	硬さ HV <sub>10</sub>
炭素鋼	1.5	283, 292 [288]	452, 452 [452]	35, 38 [37]	70, 70 [70]	123, 124, 130 [126]
	12	315, 304 [310]	460, 463 [462]	37, 34 [36]	72, 72 [72]	126, 125, 124 [125]
	45	328, 297 [313]	466, 462 [464]	35, 39 [37]	73, 74 [73]	128, 129, 127 [128]
低合金鋼	1.5	360, 366 [363]	523, 524 [524]	32, 35 [33]	69, 71 [70]	160, 158, 156 [158]
	12	407, 417 [411]	545, 548 [547]	28, 31 [30]	70, 73 [72]	154, 163, 158 [158]
	45	430, 431 [431]	571, 573 [572]	31, 29 [30]	74, 70 [72]	182, 184, 180 [182]

※ 引張試験は各条件2本、硬さ試験は3点実施。表中[ ]内の数値は平均値を示す。

表 3.3.1-5 シャルピー試験結果

	冷却速度 (°C/min)	-20°C吸収エネルギー (J)		FATT (°C)	上部棚吸収 エネルギー (J)
		個別	平均		
炭素鋼	1.5	53, 53, 56, 61, 61, 27, 46	51	2	157
	12	91, 79, 111, 94, 88	93	-14	175
	45	82, 71, 53, 119, 80, 43, 63	73	-6	152
低合金鋼	1.5	163, 168, 177, 145, 151, 145, 134	155	-33	202
	12	135, 54, 158, 156, 124	125	-32	214
	45	131, 102, 122, 154, 157, 157, 131	136	-26	211

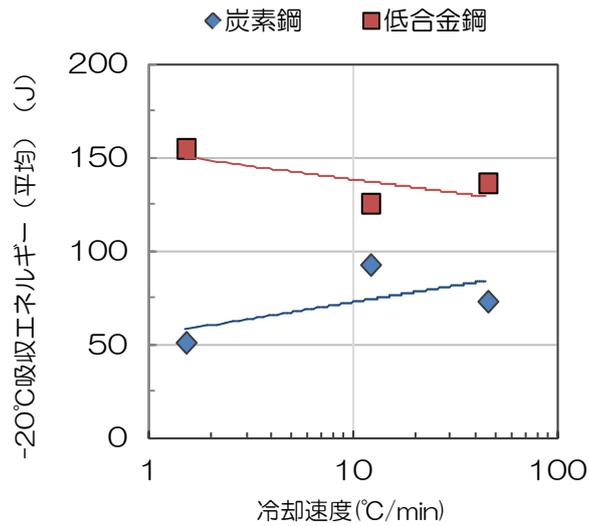


図 3.3.1-3 -20°C吸収エネルギーと熱処理条件（冷却速度）の関係

(4) まとめ

低温靱性が良好と考えられる鋼種を2種類（炭素鋼、低合金鋼）選定し、熱処理条件の影響を評価した。ここでわかったことを以下に示す。

低合金鋼 : 熱処理条件によらず、低温で高い吸収エネルギーを確保できる

炭素鋼 : 熱処理条件の選択（例えば、焼入れ等）により、低温で高い吸収エネルギーを確保できる

低温での吸収エネルギー確保により、破壊靱性（破壊に対する抵抗）の確保が期待できる。

### 3.3.2 許容される不純物含有量の検討

#### (1) 目的

一般に鋼の靱性は、リン (P)、硫黄 (S) のような不純物の含有量に伴い劣化する傾向が知られている<sup>[6]</sup>。また、不純物元素の中で、銅 (Cu) や錫 (Sn) は代表的な循環性元素 (トランプエレメント) であり、溶解炉で精錬 (不純物を除去する製造工程) を行っても除去することは容易でない。このようなトランプエレメントの含有が内容器の耐久性 (靱性) に影響を及ぼす場合、問題となる元素を多量に含有するスクラップは溶解する前に取り除く必要がある。そこで、内容器の耐久性の確保と製造条件の整備の観点から、不純物元素の含有量が機械的性質に及ぼす影響を調査し、許容される不純物含有量を検討する。

#### (2) 試験方法

3.3.1 項で検討した 2 種類の鋳鋼品を基準に、不純物濃度が表 3.3.2-1 となるよう意図的に不純物元素を添加した試験体 (8 体×2 鋼種) を作製し、それらに熱処理を与えた後の機械的性質を評価した。ここで、試験体の製作、熱処理、材料試験の要領は、3.3.1 項(2) に示した方法と同じである。

表 3.3.2-1 供試材の不純物成分の狙い値

(質量%)

	P	S	Cu	Sn
基準 (項 3.3.1 の供試材)	0.010	0.005	0.10	0.005
P 添加①	0.025	0.005	0.10	0.005
P 添加②	0.040	0.005	0.10	0.005
S 添加①	0.010	0.020	0.10	0.005
S 添加②	0.010	0.040	0.10	0.005
Cu 添加①	0.010	0.005	0.25	0.005
Cu 添加②	0.010	0.005	0.50	0.005
Sn 添加①	0.010	0.005	0.10	0.015
Sn 添加②	0.010	0.005	0.10	0.030

#### (3) 試験結果

表 3.3.2-2 に供試材の化学成分 (溶鋼分析値) を示す。また、表 3.3.2-2 には、供試材の炭素当量 (Ceq) もあわせて示している。炭素鋼、低合金鋼でそれぞれの Ceq はほぼ同じであり、ここでの試験結果は P、S、Cu、Sn 以外の元素の影響は含まれないと考えられる。

製作した鋳鋼は 3.3.1 項と同様に、熱処理条件（冷却速度）を変えた熱処理シミュレーションを行った後に機械的試験を実施した。図 3.3.2-1、図 3.3.2-2 に炭素鋼および低合金鋼の強度・低温衝撃特性と不純物（P、S、Cu、Sn）量の関係をそれぞれ示す。熱処理冷却速度は、1.5、12、45°C/min の 3 水準を評価しているが、熱処理の影響は 3.3.1 項で示した傾向と同様であったため、ここでは不純物元素濃度の影響を中心に整理した。図 3.3.2-1、図 3.3.2-2 から、不純物元素が機械的性質に与える影響は鋼種によらず同じ傾向を示すことがわかり、それぞれの不純物元素が与える影響を表 3.3.2-3 にまとめた。

表 3.3.2-2 供試材の化学成分（溶鋼分析値）（質量%）

		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Sn	Al	Ceq
炭素鋼	基準*	0.15	0.40	0.82	0.010	0.005	0.10	0.11	0.11	0.03	0.005	0.020	0.34
	P 添加①	0.15	0.41	0.83	0.026	0.004	0.10	0.11	0.11	0.03	0.005	0.020	0.34
	P 添加②	0.15	0.40	0.81	0.040	0.005	0.10	0.11	0.11	0.03	0.005	0.020	0.33
	S 添加①	0.15	0.40	0.82	0.010	0.022	0.10	0.11	0.10	0.03	0.005	0.019	0.34
	S 添加②	0.15	0.40	0.81	0.010	0.043	0.10	0.11	0.10	0.03	0.005	0.019	0.33
	Cu 添加①	0.15	0.40	0.82	0.010	0.005	0.25	0.11	0.10	0.03	0.005	0.020	0.33
	Cu 添加②	0.15	0.40	0.81	0.010	0.004	0.50	0.11	0.10	0.03	0.006	0.021	0.33
	Sn 添加①	0.15	0.40	0.82	0.010	0.004	0.10	0.11	0.10	0.03	0.015	0.020	0.34
	Sn 添加②	0.15	0.41	0.82	0.010	0.005	0.10	0.11	0.10	0.03	0.029	0.020	0.33
低合金鋼	基準*	0.12	0.40	0.93	0.009	0.006	0.10	2.03	0.33	0.16	0.005	<0.003	0.45
	P 添加①	0.12	0.39	0.91	0.023	0.005	0.10	1.98	0.30	0.14	0.005	<0.003	0.44
	P 添加②	0.12	0.40	0.90	0.037	0.005	0.10	1.98	0.30	0.14	0.005	<0.003	0.44
	S 添加①	0.12	0.40	0.90	0.009	0.020	0.10	1.98	0.30	0.14	0.006	<0.003	0.43
	S 添加②	0.12	0.40	0.90	0.010	0.041	0.10	1.98	0.30	0.14	0.006	<0.003	0.43
	Cu 添加①	0.12	0.40	0.91	0.010	0.004	0.25	2.01	0.30	0.14	0.005	<0.003	0.43
	Cu 添加②	0.12	0.39	0.91	0.010	0.005	0.49	2.00	0.30	0.14	0.006	<0.003	0.43
	Sn 添加①	0.12	0.40	0.92	0.009	0.007	0.10	2.00	0.30	0.14	0.014	<0.003	0.43
	Sn 添加②	0.12	0.39	0.91	0.009	0.006	0.10	1.97	0.30	0.14	0.030	<0.003	0.43

\*基準材は、3.3.1 項の評価に用いた供試材と同一

$$Ceq (\%) = [C] + [Si]/24 + [Mn]/6 + [Ni]/40 + [Cr]/5 + [Mo]/4 + [V]/14$$

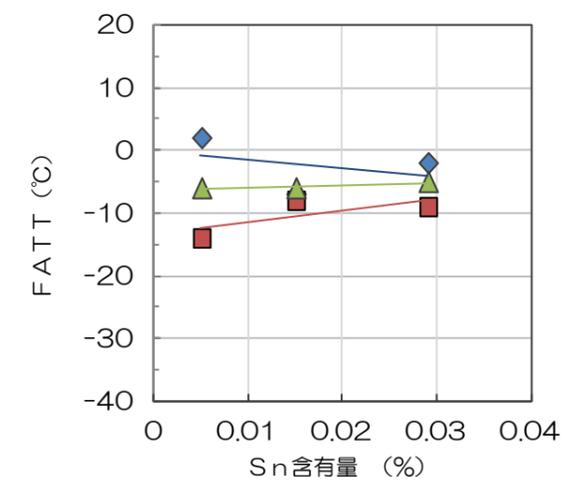
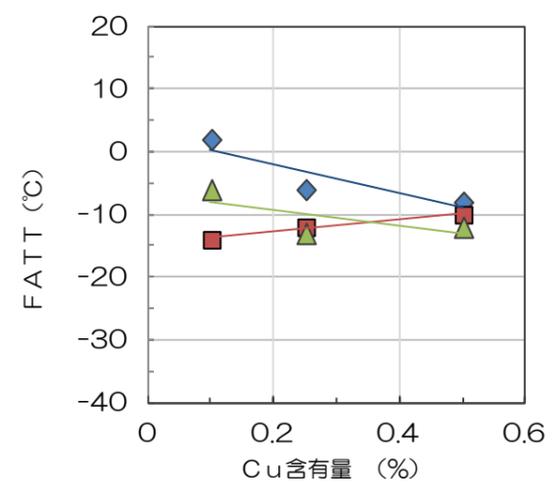
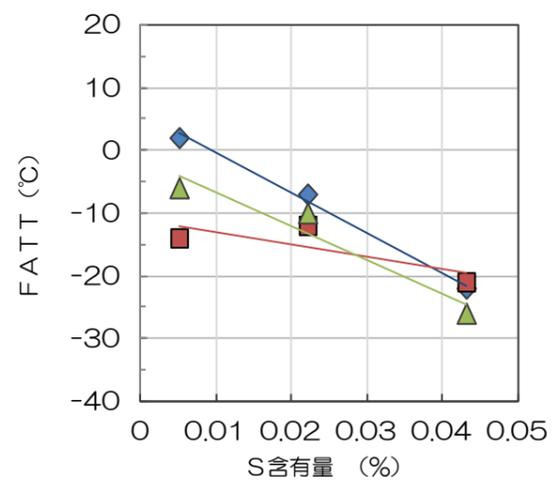
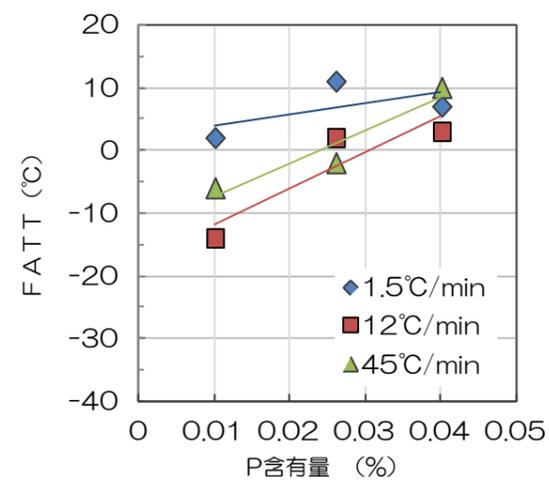
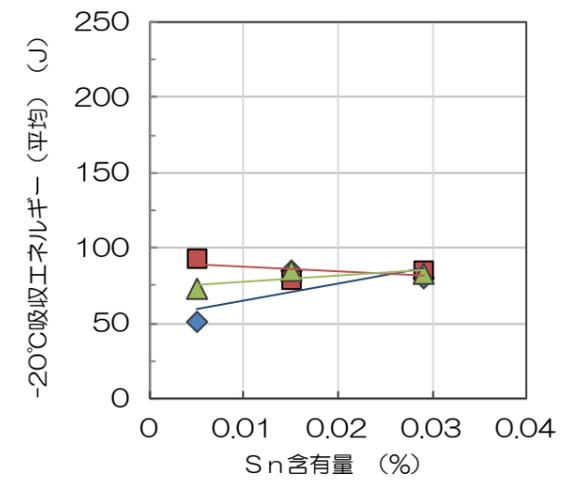
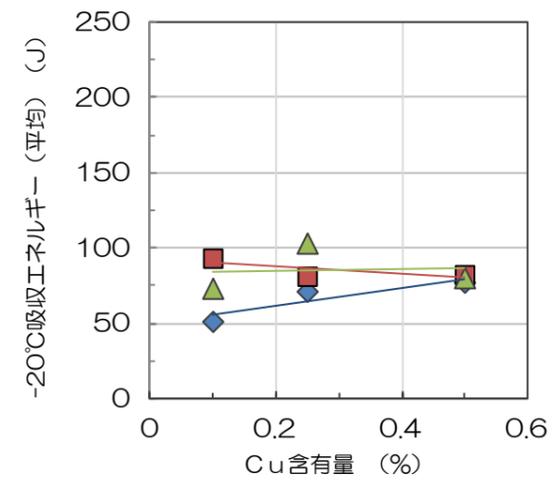
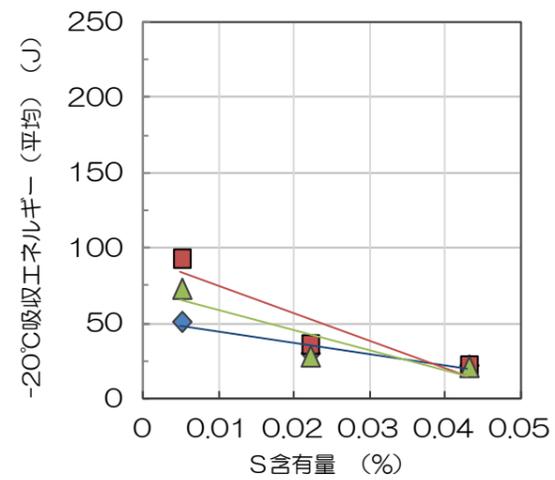
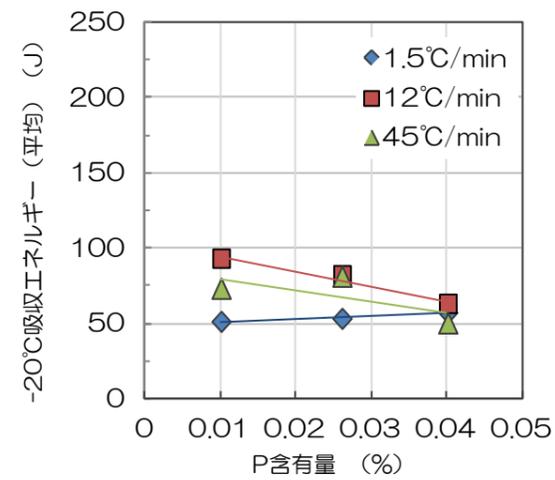
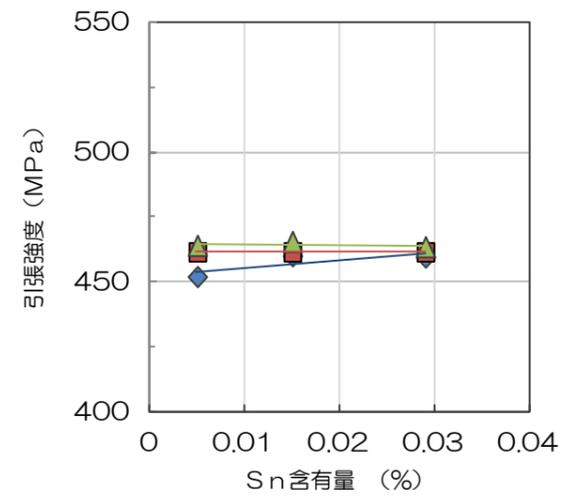
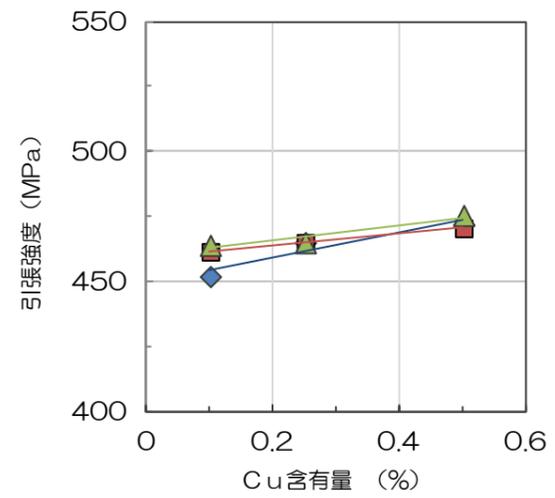
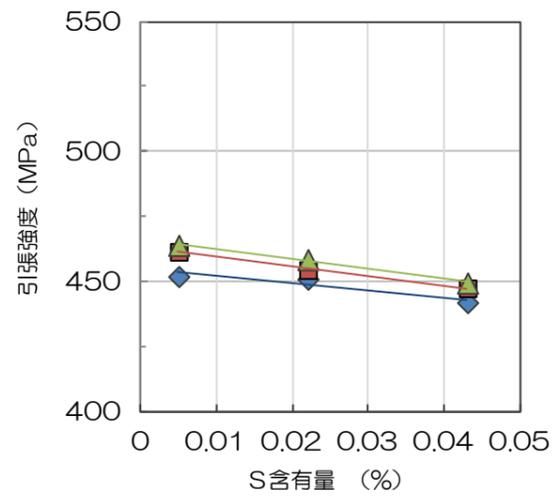
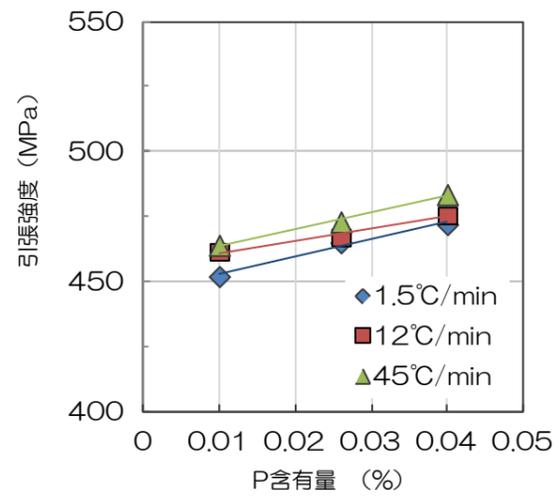


図 3.3.2-1 機械的特性と不純物元素 (P、S、Cu、Sn) 量の関係 (炭素鋼)

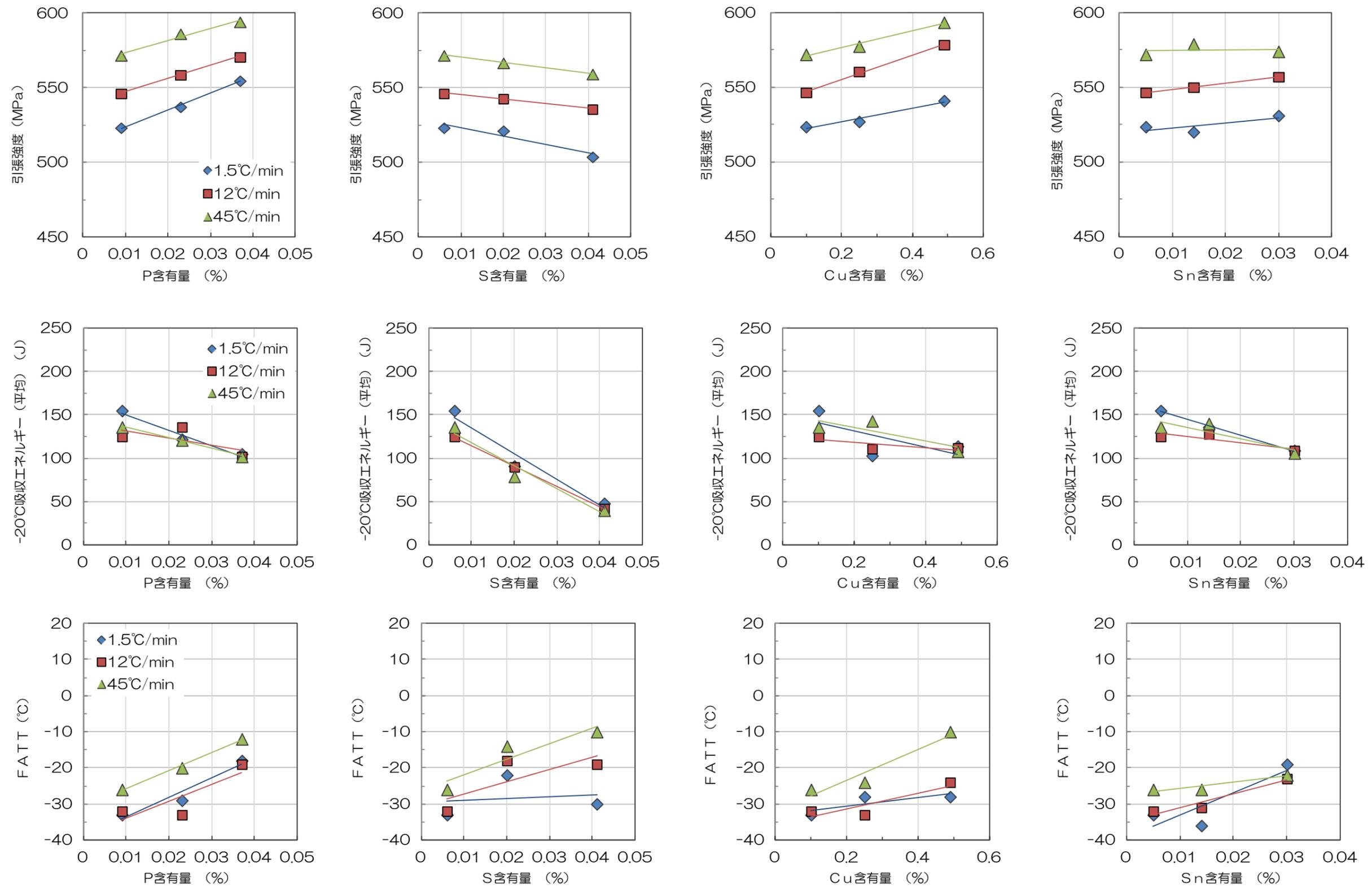


図 3.3.2-2 機械的特性と不純物元素 (P、S、Cu、Sn) 量の関係 (低合金鋼)

表 3.3.2-3 不純物元素が機械的性質に与える影響

不純物元素	確認した範囲 (%)	機械的性質への影響
P	0.010~0.040	含有量に伴い ・強度が上昇 ・FATTが上昇し、低温吸収エネルギーが低下
S	0.005~0.040	含有量に伴い、低温吸収エネルギーが著しく低下
Cu	0.10~0.50	含有量に伴い強度が上昇 低温吸収エネルギーへの影響は小さい
Sn	0.005~0.0030	影響は小さい

(4) まとめ

PおよびSの含有は低温吸収エネルギーに著しく影響を及ぼす。

PやSの含有は破壊靱性値が減少すると考えられるため、今後、破壊靱性等の詳細な検討を行った上で含有量の上限值を設定する必要がある。

3.3.3 補修溶接時の予熱条件の検討

(1) 目的

内容物の製造法には鋳造法が検討されている。鋳造品は、引け巣（鋳造金属内部に残る空隙）のような鋳造欠陥が不可避免的に発生する。そのため、特に問題となる欠陥は溶接補修が施されるが、溶接条件によって補修後に低温割れを起こす場合がある。この低温割れを防止するためには、溶接前に鋳鋼品を予熱（所定の温度範囲に加熱）しておく必要がある。そこで、内容物を溶接補修する場合の最低予熱温度の設定のため、3.3.1項にて検討された鋼種の溶接割れ感受性を評価する。

(2) 試験方法

(a) 試験材の製作および熱処理

3.3.1項で検討した2種類の基準材（炭素鋼および低合金鋼）の化学組成からなる鋳塊をそれぞれ製作した。この基礎試験でも、3.3.1項と同様に市販の金属を配合・精錬し、170kgの鋳塊をそれぞれ得た。この鋳塊から、幅160×長さ210×厚さ30mmの試験体をそれぞれ4個ずつ採取し、3.3.1項(2)と同様の方法で熱処理シミュレーションを与えた。この基礎試験での熱処理の冷却方法は、図3.3.3-1に示すように空冷（冷却速度1.5°C/min）と水冷（冷却速度45°C/min）相当の2条件とした。

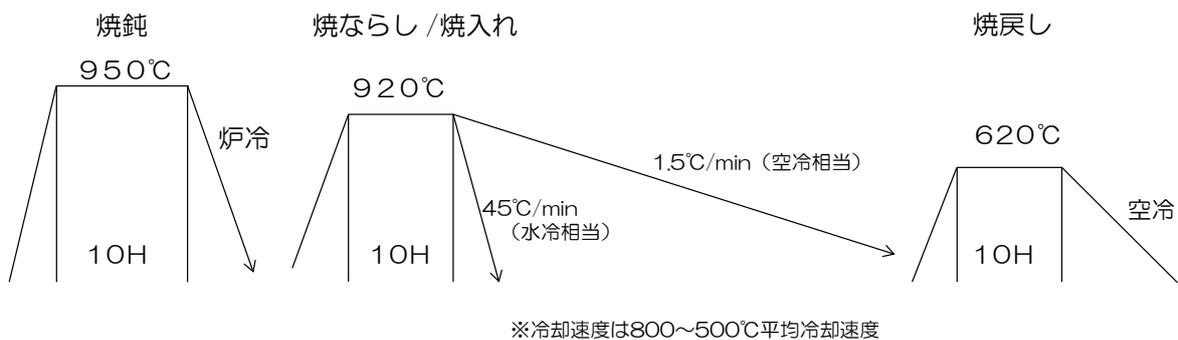


図 3.3.3-1 熱処理シミュレーション条件

(b) 溶接割れ感受性の評価

溶接部の低温割れ感受性評価は、y 形溶接割れ試験 (JIS Z 3158) にて行った。以下にその試験方法の詳細を示す。

1) 試験片の形状および寸法

熱処理後の試験体から JIS Z 3158 に従い板厚 25mm の y 形溶接割れ試験片に加工した後、拘束溶接を行い、図 3.3.3-2 に示す試験片を得た。

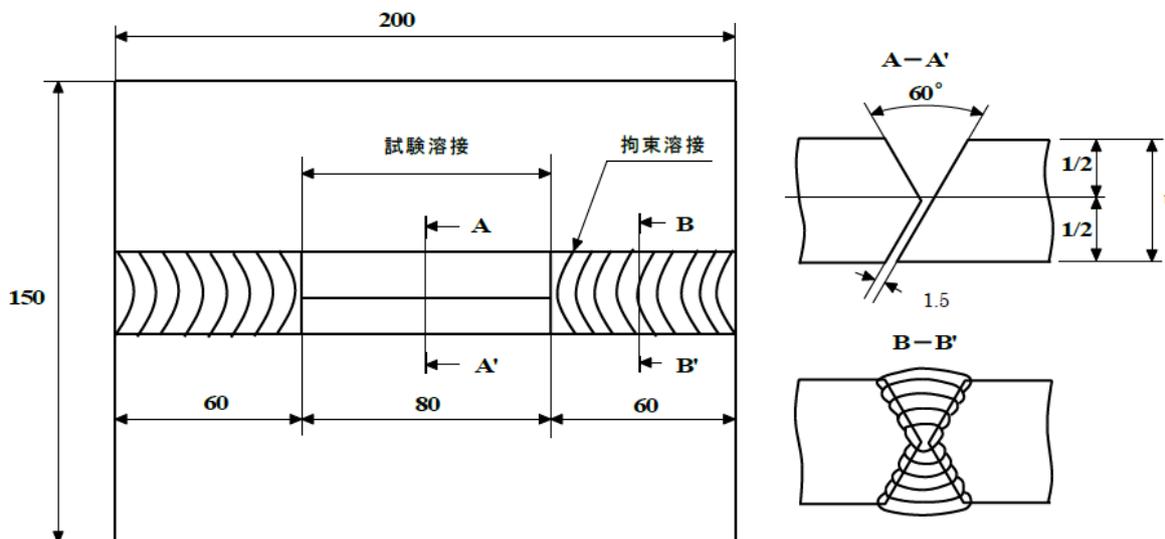


図 3.3.3-2 y 形溶接割れ試験片 (板厚  $t=25\text{mm}$ )

2) 溶接条件

試験は表 3.3.3-1 に示す条件 (目標) にて行った。溶接法は半自動  $\text{CO}_2$  溶接 (シールドガス流量  $25\text{ l/min}$ ) とした。また、 $0^\circ\text{C}$  での溶接は、環境試験室内にて施工した。

表 3.3.3-1 試験および溶接条件（目標）

鋼種	溶接ワイヤ	試験温度	溶接条件（目標）		
			電流	電圧	送り速度
炭素鋼	MG-50 (φ1.2)	0℃	260A	29V	27cm/min
		室温			
		50℃			
		100℃			
低合金鋼	MG-60 (φ1.2)	0℃	260A	29V	27cm/min
		室温			
		50℃			
		100℃			

### 3) 評価方法

試験溶接後 48 時間経過した後、以下の評価を実施した。

- ① 試験溶接部の表面割れ観察（浸透探傷検査（PT）による）」
- ② 断面割れの観察（各ビードにつき、5 断面の断面マクロ組織の観察による）

### (3) 試験結果

表 3.3.3-2 に溶接施工実績を示す。溶接は全ての試験片に対してビード部表面の割れの有無を観察した。ビード外観観察および浸透探傷試験（PT）の結果の一例を図 3.3.3-3 に示す。図 3.3.3-3 は今回の試験で最も厳しい条件（試験温度 0℃）で溶接した試験片の結果である。PT 結果から表面割れは認められないことがわかる。これら試験のビード部の任意 5 断面のマクロ観察を行い、断面割れの有無を観察した。図 3.3.3-4、図 3.3.3-5 に炭素鋼と低合金鋼の断面マクロ観察結果をそれぞれ示す。0℃で溶接試験した試験片はいずれも断面割れは認められない。同様の観察を全ての試験条件で行った結果を表 3.3.3-3 にまとめた。いずれの条件とも、溶接割れは観察されなかった。

表 3.3.3-2 溶接施工実績

鋼種	熱処理	試験片記号	試験温度 (°C)	溶接ワイヤ	溶接条件
炭素鋼	焼ならし 冷却速度 1.5°C/min	C1-1	0	MG-50 φ 1.2mm	260A-29V-25cm/min (試験ビード溶接時間： 19sec)
		C1-2	17		
		C1-3	51		
		C1-4	101		
	焼入れ 冷却速度 45°C/min	C2-1	0		
		C2-2	16		
		C2-3	52		
		C2-4	99		
低合金鋼	焼ならし 冷却速度 1.5°C/min	L1-1	-1	MG-60 φ 1.2mm	260A-29V-25cm/min (試験ビード溶接時間： 19sec)
		L1-2	16		
		L1-3	51		
		L1-4	101		
	焼入れ 冷却速度 45°C/min	L2-1	-1		
		L2-2	16		
		L2-3	52		
		L2-4	100		

表 3.3.3-3 断面割れ調査結果

鋼種	熱処理	試験片記号	試験温度 (°C)	断面割れ (5断面)	断面割れ率 (%)
炭素鋼	焼ならし 冷却速度 1.5°C/min	C1-1	0	なし	0
		C1-2	17	なし	0
		C1-3	51	なし	0
		C1-4	101	なし	0
	焼入れ 冷却速度 45°C/min	C2-1	0	なし	0
		C2-2	16	なし	0
		C2-3	52	なし	0
		C2-4	99	なし	0
低合金鋼	焼ならし 冷却速度 1.5°C/min	L1-1	-1	なし	0
		L1-2	16	なし	0
		L1-3	51	なし	0
		L1-4	101	なし	0
	焼入れ 冷却速度 45°C/min	L2-1	-1	なし	0
		L2-2	16	なし	0
		L2-3	52	なし	0
		L2-4	100	なし	0

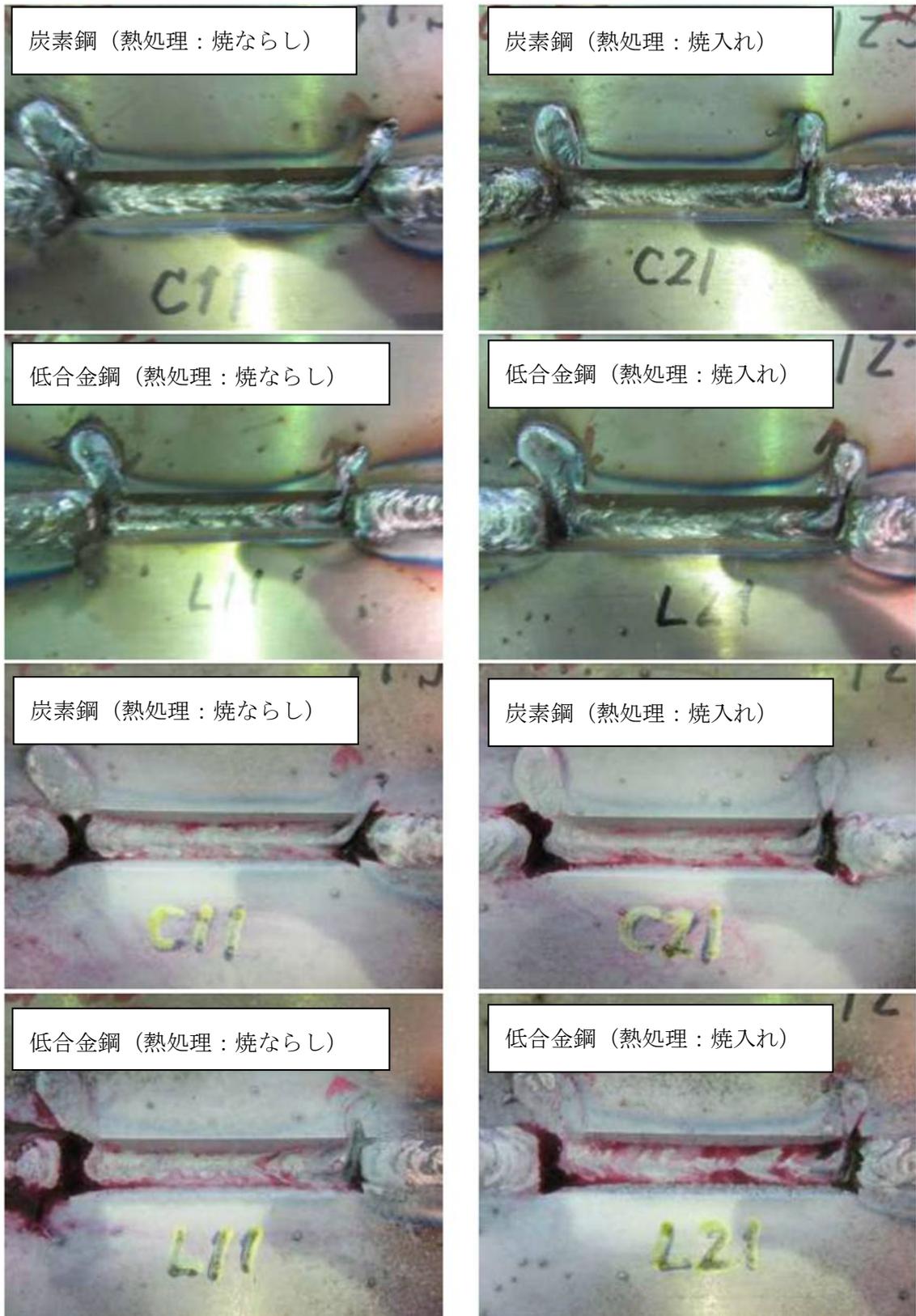
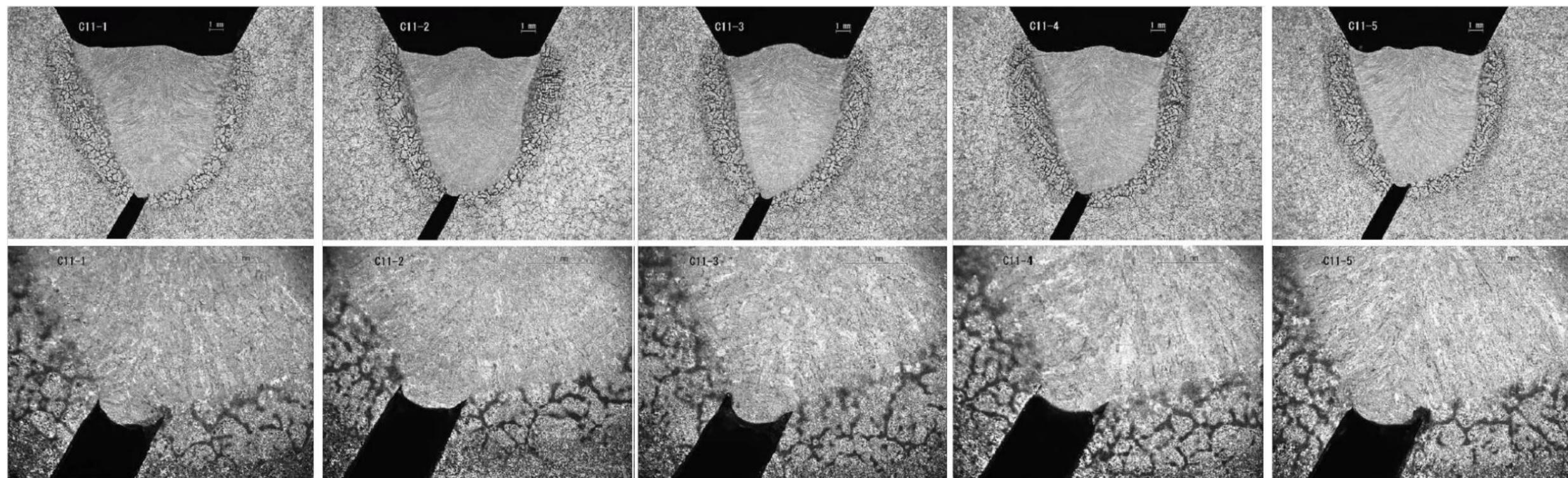


図 3.3.3-3 ビード外観および浸透探傷試験外観（試験温度 0°C）

試験片記号 C1-1 (熱処理: 焼ならし模擬)



試験片記号 C2-1 (熱処理: 焼入れ模擬)

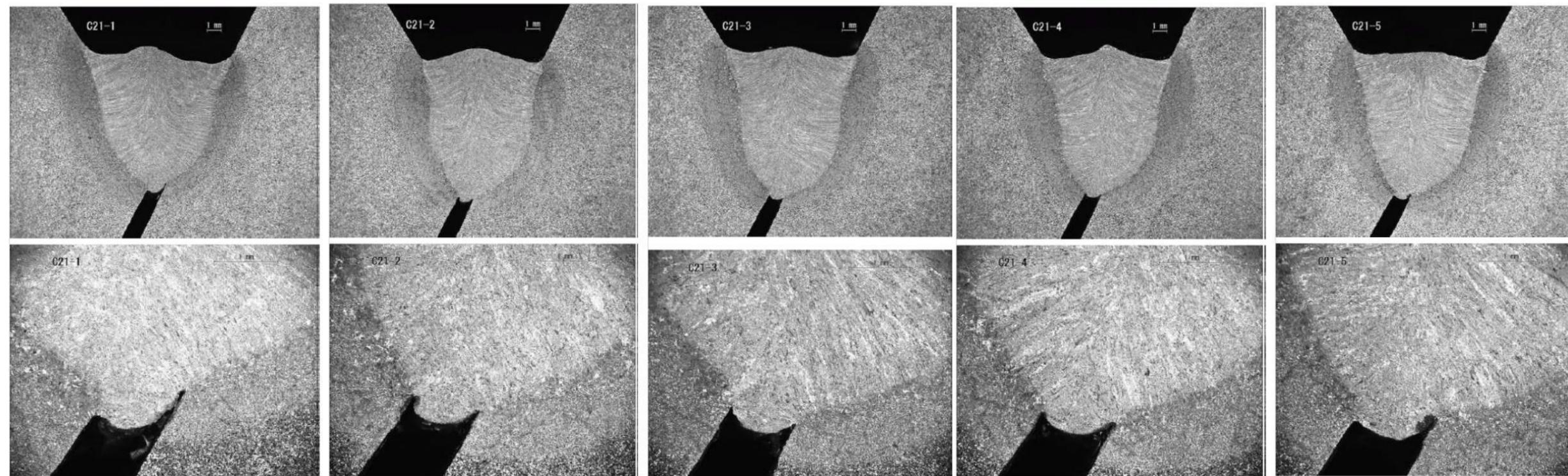
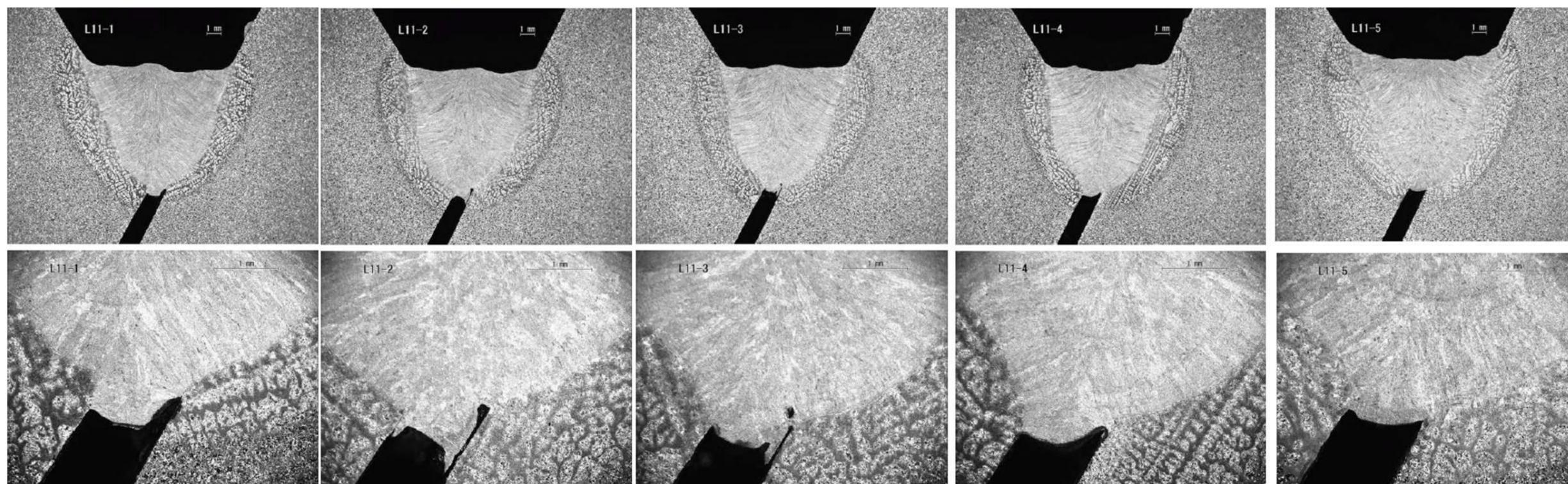


図 3.3.3-4 断面マクロ観察結果 (炭素鋼、試験温度 0°C)

試験片記号 L1-1 (熱処理: 焼ならし模擬)



試験片記号 L2-1 (熱処理: 焼入れ模擬)

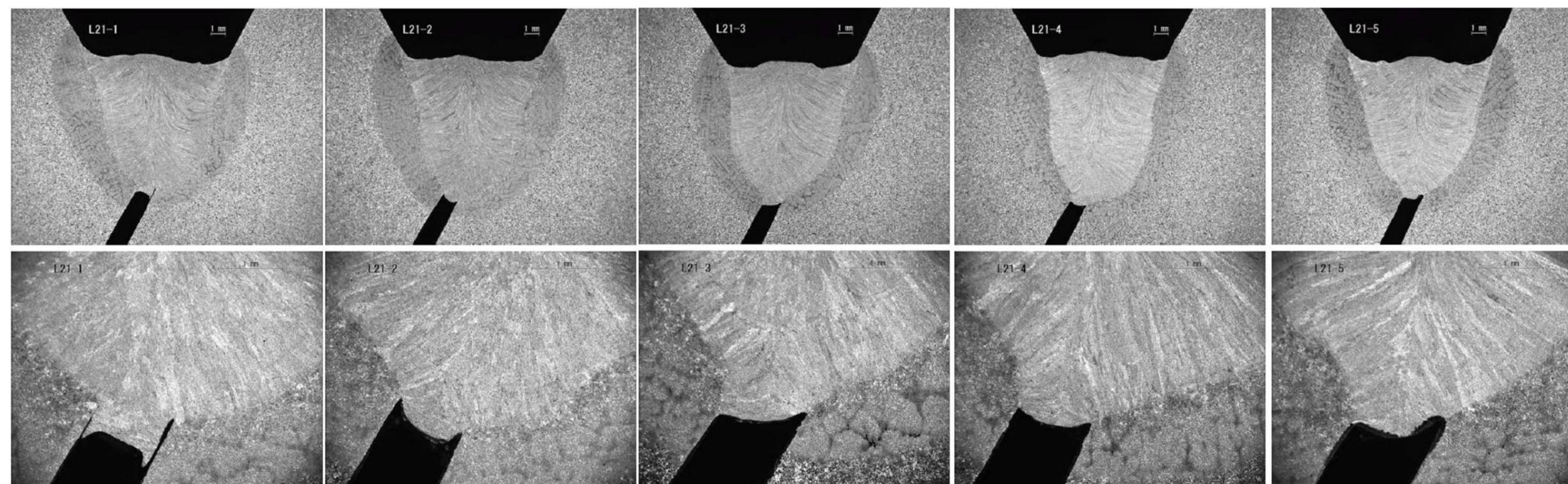


図 3.3.3-5 断面マクロ観察結果 (低合金鋼、試験温度 0°C)

#### (4) まとめ

ここで検討した炭素鋼、低合金鋼はいずれの試験条件とも溶接割れは認められない。  
検討鋼種は良好な溶接性を有しており、予熱レス（0℃）でも割れは生じない。

### 3.3.4 熱処理条件の妥当性評価

#### (1) 目的

3.3.1 項では、実験室規模の設備で作製した試験体に対し内容器の一部を模擬した熱処理を与えて評価した。しかし、実際の容器は形状が単純ではなく、さらに容器の厚み深さ方向に対して熱履歴が異なるので複雑である。そのため、3.3.1 項で評価された結果が内容器を代表するものかどうかの検証が必要と考えられた。そこで、内容器の形状を模擬した大型の試験体（対照用モックアップ）を試作し、熱処理シミュレーションで検討した熱処理条件の妥当性を評価する。

#### (2) 試験方法

実際の容器形状での熱処理を評価するために、代表として板厚 200mm の内容器形状の試験体（モックアップ）を試作した。モックアップは、一般的な砂型鋳造法（鋳物用の砂で作った型に溶鋼を流し込んで作る方法）にて製作した。ここでは、3.3.1 項にて検討した結果の妥当性評価が目的なので、モックアップ製作には市販のスクラップ・金属を原料・副資材として用い、鋼種は 3.3.1 項で検討した低合金鋼とした。表 3.3.4-1 にモックアップの化学成分の目標値を示す。

モックアップの熱処理条件を図 3.3.4-1 に示す。今回の試験では、熱処理の冷却方法は水冷とし、熱処理前に仕上げ寸法に対して 8mm の仕上げ代を残して全面機械加工（荒加工）した状態で熱処理を行った。ここで、モックアップ品を熱処理で水冷したときの冷却速度を調査するために、内容器に熱伝対を数ヶ所取り付け冷却中の温度変化を計測した。熱処理後は、代表する部位から試験片を採取し、3.3.1 項と同様の機械的試験を実施した。

表 3.3.4-1 モックアップの化学成分（目標）

(質量%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Sn
0.12	0.40	0.90	0.015 以下	0.008 以下	0.15 以下	2.00	0.30	0.15	0.010 以下

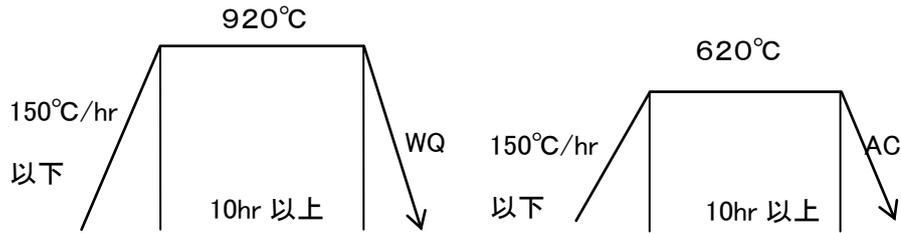


図 3.3.4-1 モックアップの熱処理条件（焼入れ焼戻し）

(3) 試験結果

(a) 熱処理結果

図 3.3.4-2 にモックアップの熱処理形状と測温位置を示す。内容器の熱処理時の板厚（T）は 216mm であり、一般に鋳鋼品の機械的性質の検査に用いられる試験片を付着した状態である。今回のモックアップの試験片は、厚み（t）が 100mm（試験片 A）と 70mm（試験片 A'）の 2 種類を付着している。内容器は 1/4T、1/2T、3/4T 深さに、付着試験片は 1/2t 深さに熱伝対を取付け、焼入れ（水冷）時の温度変化を計測した。測温結果を図 3.3.4-3 に示す。厚みが小さい試験片の冷却は速く、内容器の 1/2T（中心）が最も冷却が遅いことがわかる。図 3.3.4-3 から求めたモックアップの各位置の平均冷却速度を表 3.3.4-2 にまとめて示す。ここで、冷却速度は 800 から 300°C までの平均速度を算出した。表 3.3.4-2 から内容器代表位置の焼入れ冷却速度は 30°C/min 前後であり、3.3.1 項で検討した範囲（1.5~45°C/min）内であることがわかる。

表 3.3.4-2 平均冷却速度

		板厚	深さ	800→300°C 平均冷却速度 (°C/min)
内容器		T=216mm	1/4T	34
			1/2T	29
			3/4T	29
付着試験片	A	t=100mm	1/2t	139
	A'	t=70mm	1/2t	172



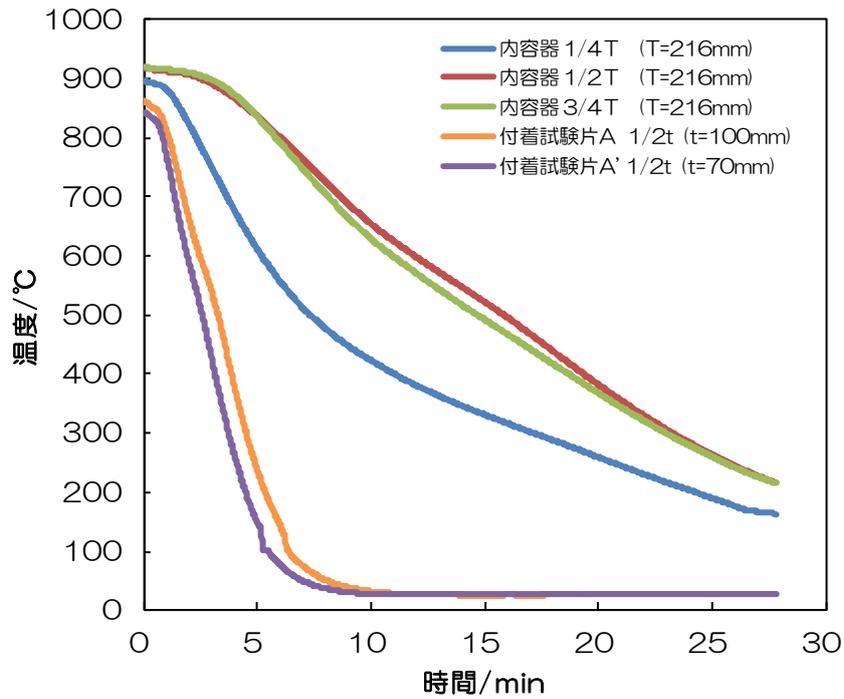


図 3.3.4-3 焼入れ（水冷）時の各位置の温度変化

(b) 材料試験結果

熱処理後は、冷却速度を測定した位置から試験片を採取して、3.3.1 項と同様に材料試験を実施した。試験片の採取位置を図 3.3.4-4 に示す。内容器は側面と底面の代表 2 断面とした。ここで、内容器底面は製品の最終凝固部の押湯直下の位置である。

表 3.3.4-3、表 3.3.4-4、図 3.3.4-5 にモックアップの成分分析結果、機械的試験結果、マイクロ組織観察結果をそれぞれ示す。内容器底面は溶鋼分析値に対して炭素 (C) 偏析が確認され、特に中心 (1/2T) が最も濃化している。このような偏析に伴い、強度・硬さの上昇が確認されるが、低温 (-20°C) の吸収エネルギーへの影響は認められない。マイクロ組織は初析フェライトが僅かに確認されたが、ベイナイト主体の組織を呈していた。

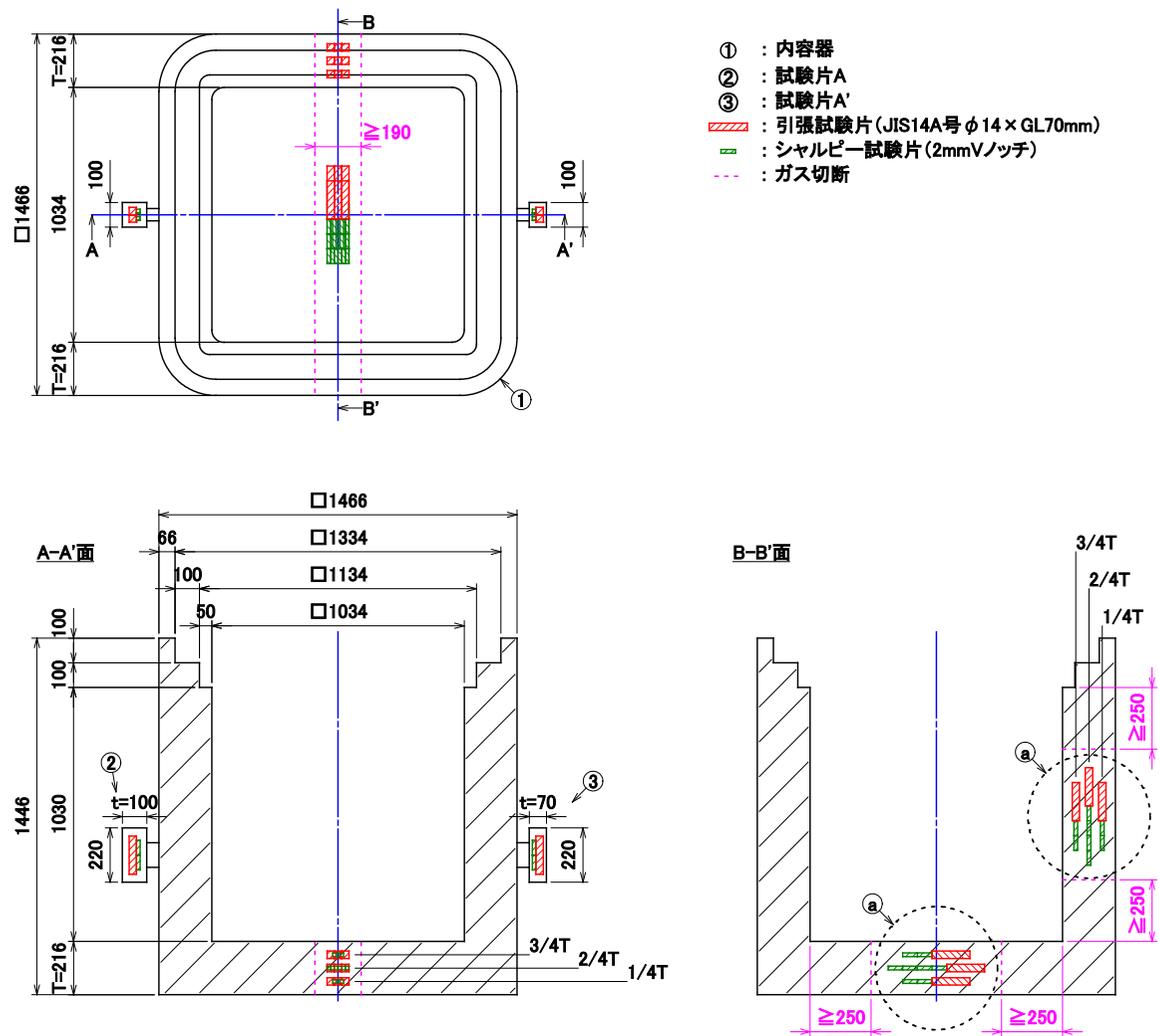


図 3.3.4-4 試験片採取位置

表 3.3.4-3 モックアップの成分分析結果 (質量%)

位置		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Sn	Ceq	
溶鋼分析値		0.12	0.38	0.89	0.005	0.001	0.08	2.02	0.29	0.15	0.005	0.43	
内容器	側面 (T=216mm)	1/4T	0.12	0.38	0.88	0.006	0.001	0.05	2.01	0.31	0.15	0.004	0.43
		1/2T	0.13	0.39	0.90	0.007	0.001	0.05	2.04	0.32	0.16	0.004	0.45
		3/4T	0.12	0.38	0.88	0.006	0.001	0.05	2.02	0.31	0.15	0.004	0.43
	底面 (押湯下) (T=216mm)	1/4T	0.13	0.39	0.91	0.007	0.001	0.05	2.07	0.32	0.16	0.004	0.45
		1/2T	0.14	0.39	0.92	0.007	0.001	0.06	2.07	0.32	0.16	0.004	0.47
		3/4T	0.13	0.38	0.91	0.007	0.001	0.05	2.05	0.32	0.16	0.004	0.45
付着 試験片	A (t=100mm)	0.13	0.38	0.91	0.008	0.001	0.05	2.07	0.32	0.16	0.004	0.45	
	A' (t=70mm)	0.12	0.39	0.92	0.008	0.001	0.05	2.08	0.32	0.16	0.004	0.45	

$$Ceq (\%) = [C] + [Si]/24 + [Mn]/6 + [Ni]/40 + [Cr]/5 + [Mo]/4 + [V]/14$$

表 3.3.4-4 モックアップの機械的試験結果

位置	位置	引張試験				シャルピー試験	硬さ試験	
		0.2%耐力 (MPa)	引張強度 (MPa)	伸び (%)	絞り (%)	-20℃吸収エネルギー (J)	ビッカース硬さ HV <sub>10</sub>	
内容器	側面 (T=216mm)	1/4T	452	563	15	36	135, 159, 96	173, 187, 177
		1/2T	445	574	11	31	91, 95, 106	182, 175, 196
		3/4T	436	565	16	36	152, 119, 159	192, 190, 201
	底面 (押湯下) (T=216mm)	1/4T	494	612	30	34	76, 82, 81	185, 188, 192
		1/2T	490	609	14	29	133, 125, 122	206, 206, 197
		3/4T	486	594	19	38	153, 147, 139	193, 190, 190
付着 試験片	A (t=100mm)	495	622	23	74	160, 117, 169	190, 197, 192	
	A' (t=70mm)	500	617	23	74	135, 180, 148	201, 200, 195	

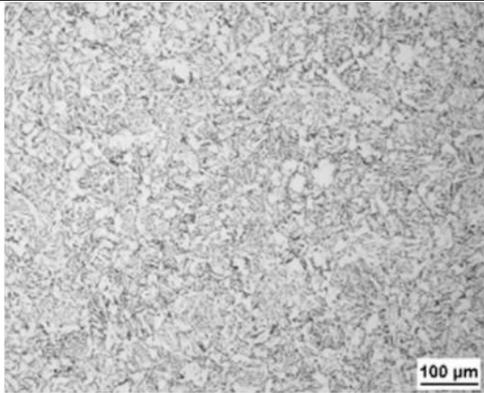
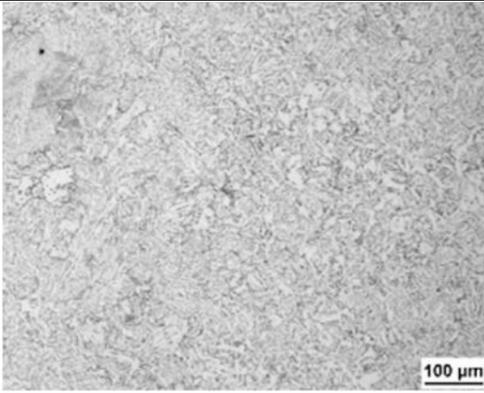
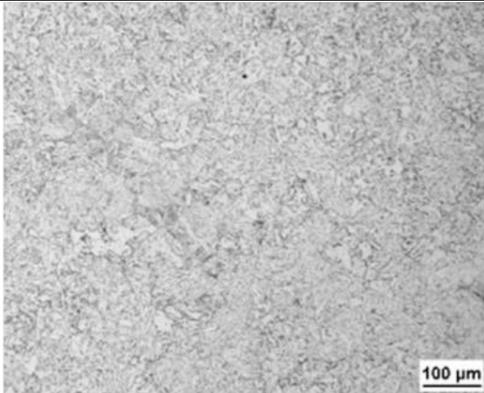
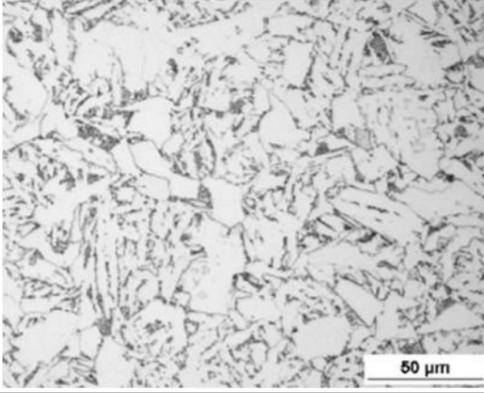
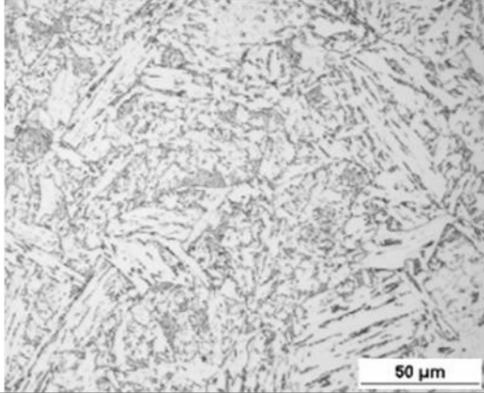
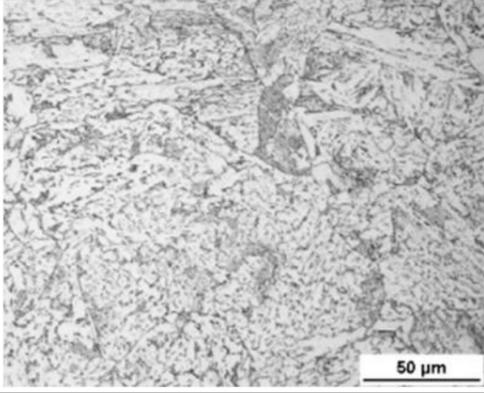
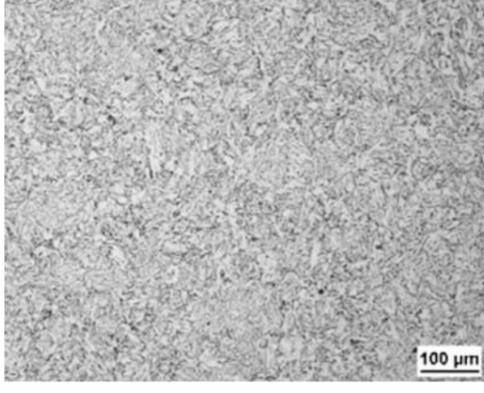
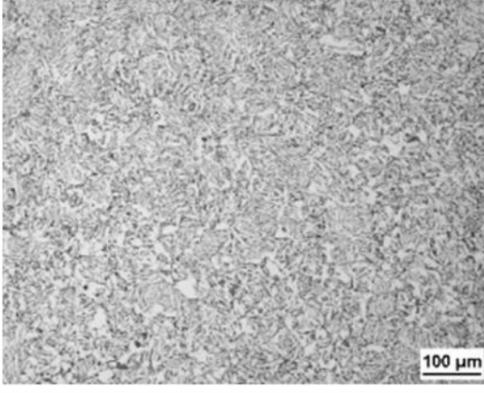
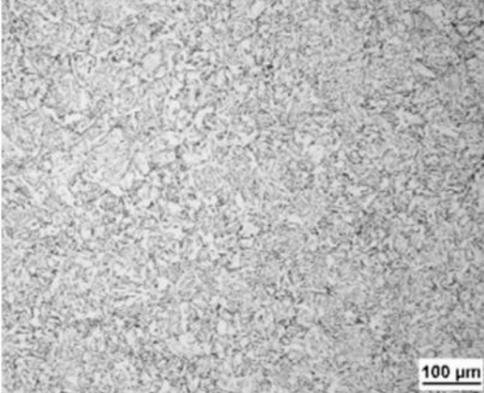
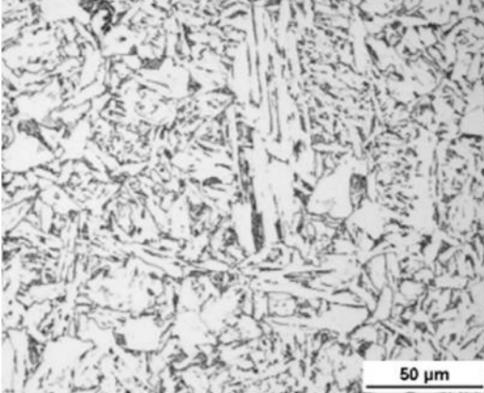
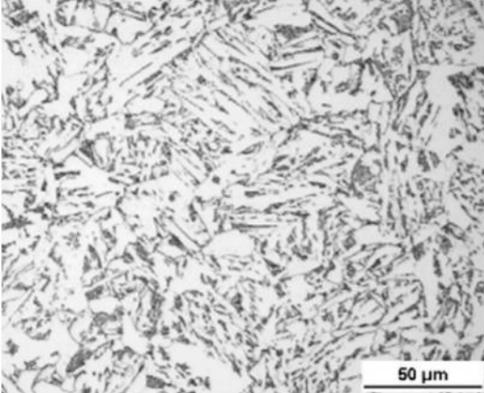
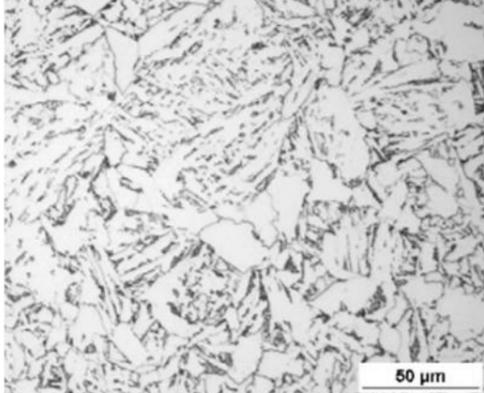
		位置 (板厚深さ方向)			
		1/4T	1/2T	3/4T	
内容器	側面 (T=216mm)	低倍			
		高倍			
	底面 (T=216mm)	低倍			
		高倍			

図 3.3.4-5 モックアップのマイクロ組織観察結果

### (c) 熱処理条件の妥当性評価

3.3.1 項の実験室規模で行った熱処理シミュレーション試験（ラボ試験）の結果とここでのモックアップ試験結果を比較する。ラボ試験およびモックアップ試験結果を焼入れ冷却速度の関係で整理した。図 3.3.4-6 に冷却速度と引張強度および $-20^{\circ}\text{C}$ 吸収エネルギーの関係を示す。冷却速度と引張強度の関係において、ラボ試験と内容器（側面）の結果はよい一致を示した。また、 $-20^{\circ}\text{C}$ 吸収エネルギーにおいても、個々の値にばらつきがあるが概ねラボ試験で確認された値が得られている。内容器（底面）で引張強度が高いのは、上述したように、底面は最終凝固部付近であるためC偏析によるものと考えられる。一般にC偏析により低温吸収エネルギーは低下する傾向を示すが、今回のモックアップ試験においては著しい低下は認められなかった。

以上のように、ラボ試験結果は概ね内容器を代表する結果となっており、熱処理シミュレーション試験による評価は妥当と考える。

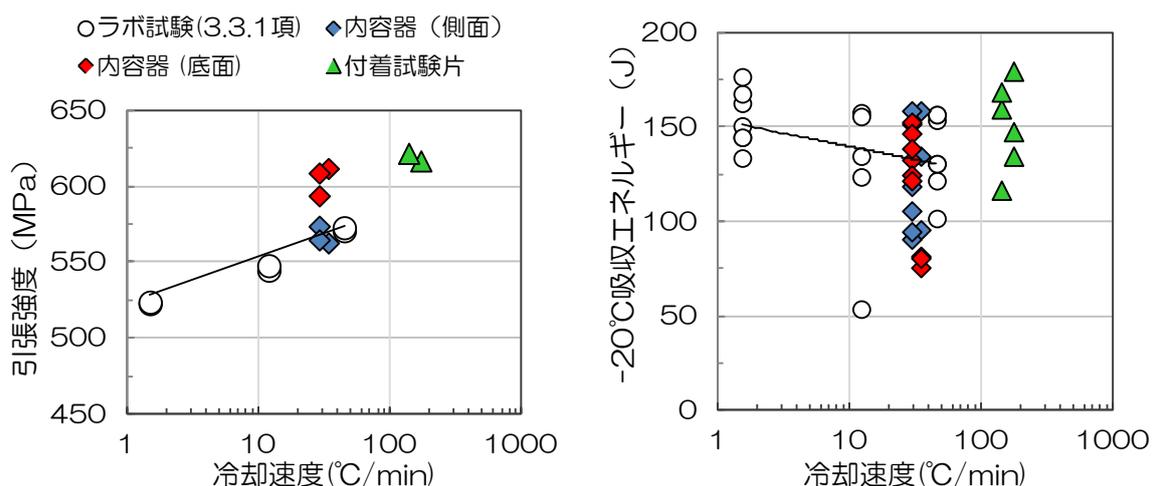


図 3.3.4-6 ラボ試験とモックアップ試験結果の比較  
(焼入れ冷却速度と引張強度、 $-20^{\circ}\text{C}$ 吸収エネルギーの関係)

### (4) まとめ

内容器の代表する位置の焼入れ冷却速度は、実験室規模で実施した熱処理シミュレーション試験の検討範囲内であることを確認した。

冷却速度と低温吸収エネルギーの関係はラボ試験とモックアップ結果は概ね一致し、熱処理シミュレーション試験による評価は妥当と言える。

### 3.3.5 耐久性（靱性）の妥当性評価

#### (1) 目的

内容器は安全性確保の観点から、その使用環境の中で輸送中に落下したとしても、遮へい機能を維持することが求められる。したがって、容器は落下・転倒した場合でも破損しない耐久性（靱性）を備えている必要がある。そこで、汎用の解析コードを用いて内容器の使用環境における落下事象を把握し、先に評価した鋳鋼品の靱性が妥当であることを確認する。

#### (2) 試験方法

内容器の使用環境における落下事象を把握するために、表 3.3.5-1 に示す 21 ケースを汎用の解析ソフト LS-DYNA を用いて動的解析した。内訳は、容器 2 種類×落下姿勢 3 種類×床 3 種類+落下高さを 8m とした場合の落下姿勢 3 種類（一番厳しい容器、床の組合せ）とした。今回の解析では、内容器はいずれも蓋と容器を一体化したモデルとし、内容器の材料物性値は表 3.3.5-2 に示す SS400 の物性値で代用した。ここで、実際の内容器は鋳鋼で検討されているが、3.3.1 項で示したように検討された鋳鋼品は SS400 よりも高い機械的性質を有するので、安全側の評価になると考えられる。

表 3.3.5-1 解析ケース

容器	落下姿勢	床	落下高さ
2 種類 ・幅 1450×奥行き 1450×高さ 1430×厚さ 50 ・幅 1450×奥行き 1450×高さ 1430×厚さ 200 (内容物は、剛性を考慮せず質量相当を内容器に付加し、重量を 21.4ton とした)	3 種類 (a) 辺コーナー (b) 水平 (c) 角コーナー (図 3.3.5-1)	3 種類 ・剛 (L1 建屋相当) ・普通 (通常の RC) ・中間 (剛と普通の中間強度)	8m

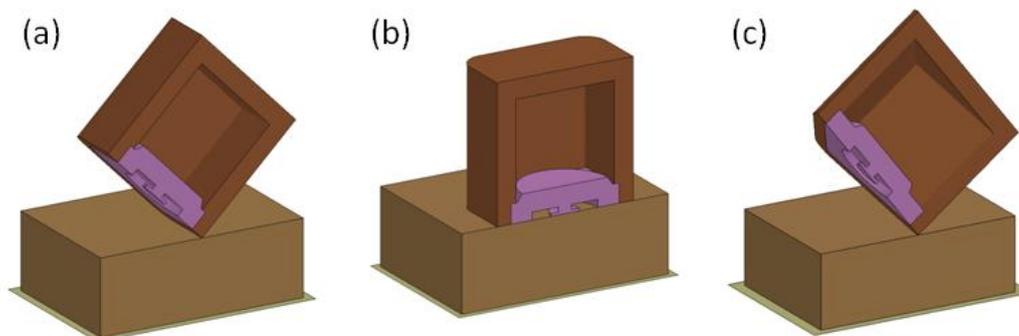


図 3.3.5-1 落下姿勢

表 3.3.5-2 解析に用いた材料物性値

部材		ヤング率 (MPa)	ポアソン 比	静的	備考
				降伏応力 (MPa)	
容器本体	SS400	$2.06 \times 10^5$	0.3	255	ひずみ速度依存性を 考慮
鉄筋*	SD345	$2.03 \times 10^5$	0.3	440	

\*: 普通、中間床は硬化係数を設定

部材		ヤング率 (MPa)	ポアソン比	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	密度 (kg/m <sup>3</sup> )
コンクリ ート	剛	$4.10 \times 10^4$	0.237	139.7	8.9	2.43
	中間	$4.10 \times 10^4$	0.237	80	8.0	2.43
	普通	$4.10 \times 10^4$	0.237	24	2.4	2.43

### (3) 試験結果

#### (a) 落下解析結果

落下解析結果の一例として、図 3.3.5-2 に 200mm 厚の内容容器を 8m 高さから剛床に落下させたときに内容容器に発生する相当塑性ひずみを求めた結果を示す。最大塑性ひずみは内容容器の角近傍もしくは蓋に発生していることが確認された。このような最大相当塑性ひずみ発生位置は、内容容器の厚み、落下標的（床）、落下高さによらず同様の傾向であった。

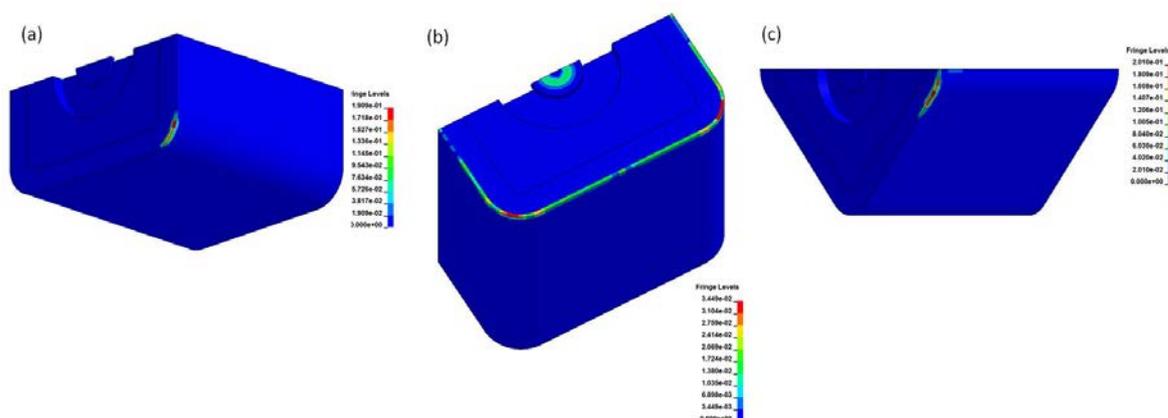


図 3.3.5-2 落下衝撃により容器に発生する相当塑性ひずみ解析結果

(容器厚：200mm／落下高さ：8m／床：剛コンクリート／落下姿勢：(a) 辺コーナー、  
(b) 水平、(c) 角コーナー)

(b) 内容器に求められる耐久性（靱性）の検討

鋳鋼製の内容器は内部に引け巣が存在する可能性がある。そのような場合でも落下衝撃によって容器が破損しない条件を線形破壊力学にて検討した。内部に半径  $a$  (mm) の円盤状のき裂がある場合のき裂先端の応力状態を表す  $K$  値（応力拡大係数）は以下式 (3.3.5.1) のように与えられる。

$$K = 2\sigma\sqrt{\frac{a}{\pi}} \quad \dots \quad (3.3.5.1)$$

ここでは、内部に 3mm の円盤状の引け巣がある場合を想定し、上述した落下解析にて求めた落下衝撃にて発生する応力を基にそれぞれの落下条件での  $K$  値を求めた。図 3.3.5-3 に 50 および 200mm 容器を 8m 高さから落下した場合の  $K$  値を比較した結果を示す。 $K$  値は容器板厚により大きく異なるが、落下姿勢の影響は同様の傾向を示しており、それぞれの容器の  $K$  値は角コーナー落下が大きいことがわかる。また、 $K$  値は落下標的（コンクリート床の材質）によっても変化し、コンクリート強度の高い剛床（L1 建屋相当の床）が最も大きい。以上の結果から、50mm 厚容器の角コーナーから剛床への落下が最も厳しい落下条件であることがわかった。さらに、ここで把握した最も厳しい条件に対し、落下高さの影響を把握するために 6m 高さから落下した場合の落下解析を行い、同様に  $K$  値を比較した。図 3.3.5-4 に落下高さの影響を比較した結果を示す。 $K$  値は落下高さが低くなると若干小さくなる傾向が確認された。

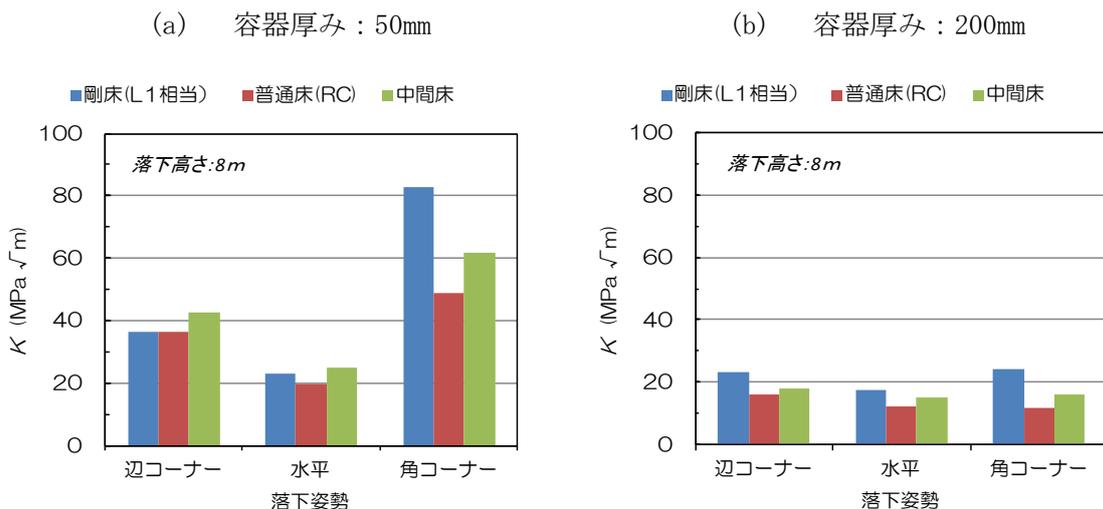


図 3.3.5-3 落下衝撃におよぼす落下姿勢および標的（床）の影響； (a)50mm、(b)200mm

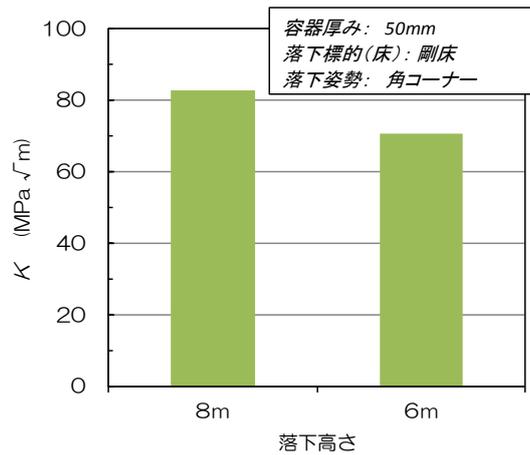


図 3.3.5-4 落下衝撃におよぼす落下高さの影響

上述したような落下衝撃で容器が破壊しないためには、容器は図 3.3.5-3～3.3.5-4 に示した  $K$  値よりも高い破壊靱性値を備えている必要がある。ただし、容器に求められる破壊靱性値は、内在する欠陥寸法によって異なるので、今後より詳細な検討が必要である。

#### (c) 検討材料（鋳鋼）の妥当性評価

3.3.1 項にて評価した材料が、上述した容器に求められる破壊靱性を満足し得るかを検討した。ここでの基礎試験では、材料の破壊靱性値を測定していないが、静的な破壊靱性値 ( $K_{Ic}$ ) は材料の降伏強度とシャルピー試験結果から推定できることが経験的に知られており、岩館らにより提案された手法<sup>[7]</sup>をもとに  $K_{Ic}$  を推定した。

表 3.3.5-3 に推定に用いた材料物性 ( $\sigma_y$  (降伏強度)、 $vEu$  (上部棚吸収エネルギー)、FATT (50%破面遷移温度)) と  $-20^{\circ}\text{C}$  における  $K_{Ic}$  の推定結果を示す。ここで、材料物性値は、項 3.3.1 の試験結果をもとに決定した。推定した低合金鋼の  $K_{Ic}$  は、上記 (b) にて検討した容器に必要とされる破壊靱性値よりも高く、最も厳しい 50mm 厚の容器も含むすべての容器への適用が期待できる。炭素鋼は、200mm 厚容器や使用環境（施設床の状態や運搬高さ）の考慮等により容器に適用できる可能性がある。ただし、正確には落下衝撃の場合に動的破壊靱性の評価が必要である。また、3.3.2 項にて検討したように、P や S 等の不純物元素の含有が低温衝撃特性に影響を及ぼす。今後、動的破壊靱性値の評価を踏まえた上で、不純物元素の含有量を設定する必要があると考えられる。

表 3.3.5-3 検討材料の-20°Cにおける破壊靱性値 ( $K_{Ic}$ ) の推定結果

	$\sigma_y$ (MPa)	vEu (J)	FATT (°C)	-20°C $K_{Ic}$ 推定値 (MPa $\sqrt{m}$ )
炭素鋼	280	150	5	58
低合金鋼	360	190	-20	112

(4) まとめ

落下衝撃におよぼす容器厚みや落下標的（床）等の影響を解析にて把握し、容器に必要な破壊靱性を推定した。

この結果、容器形状（厚み）、鋼種、使用環境（施設床の状態や運搬高さ）等による選択・組合せにより検討した鋳鋼品を容器に適用できる可能性が示された。

### 3.4 内容器の設計

#### 3.4.1 内容器に求められる技術要件

##### (1) 目的

実証試験において実際に製作する内容器の設計を行う。

抽出された技術要件を満足する内容器を検討する。

##### (2) 内容器に求められる技術要件

3.2 項に示した抽出された内容器に求められる技術要件を表 3.4.1-1 に示す。

表 3.4.1-1 内容器に求められる技術要件

ハンドリングなどから抽出された要件	<ul style="list-style-type: none"><li>① 解体クリアランス金属を使用</li><li>② 遮へい体として所定の機能を持つ（ストリーミング等の遮へい欠陥部がないこと、等）</li><li>③ 吊具で安全に取扱うことができること（プール及び構内施設）</li><li>④ 転倒・落下などにより密封性が破れない</li><li>⑤ 水素ガス放出機能</li><li>⑥ 防錆</li></ul>
法規などから抽出された要件	<ul style="list-style-type: none"><li>① 所定の処分容器内（内寸 1500mm）に収納が可能</li><li>② -40℃～70℃の温度範囲において、き裂、破損等のおそれがない</li><li>③ 落下、転倒などの事故時に遮へい機能を喪失しない（最低輸送環境温度（-20℃程度）～38℃の環境温度）</li></ul>

#### 3.4.2 内容器の設計

##### (1) 目的

内容器に求められる仕様に基づき、内容器の設計を行う。本事業では、実際のクリアランス金属廃棄物を用いた実物大の内容器を試作する実証試験を行う予定のため、内容器の設計を行う必要がある。

内容器に求められる技術要件から、内容器に求められる形状及び寸法について設計を行う。なお、材質などの材料設計については、今後基礎試験結果により検討するものとする。

## (2) 内容器の設計

### (a) 構造設計

形状等の構造設計を行うにあたり、内容器が収納される外容器としての処分容器は、学会標準<sup>[1]</sup>で規定されている通りの構造とする。学会標準に示されている処分容器の構造を図 3.4.2-1 に示す。

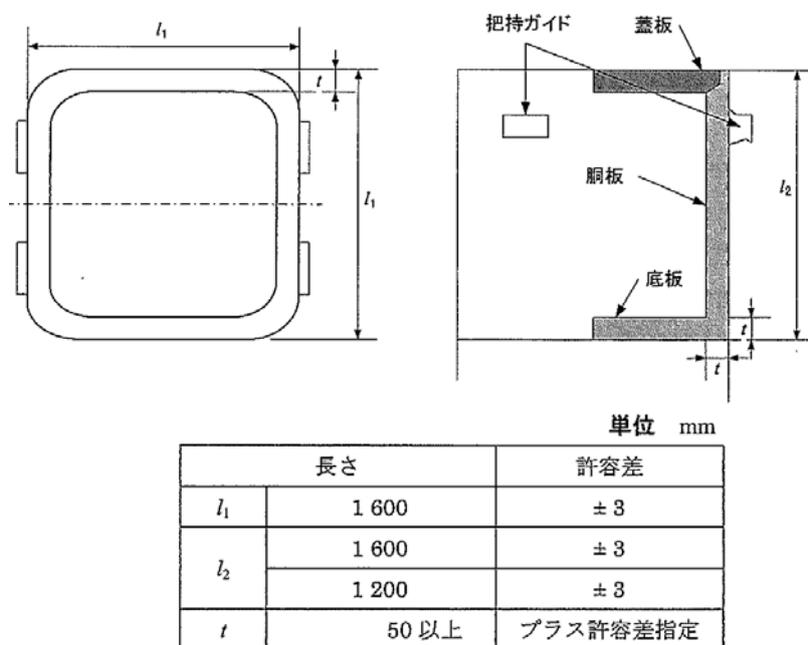


図 3.4.2-1 耐荷重条件を満たすことが評価された処分容器の形状及び寸法

#### 1) 外寸法

内容器の外寸法は、廃棄物の収納効率の観点から処分容器の内寸法に可能な限り近い値であることが要求される。一方、廃棄物を収納した内容器周辺の空間線量率は高く、人が近づいて作業できないレベルであることから、内容器を処分容器に収納する作業は遠隔から実施するものと考えられる\*1。そのため、遠隔ハンドリングでも内容器を処分容器に収納できるように処分容器と内容器の間には十分な隙間を設けておく必要がある。この隙間はガイド等治具を利用することで小さくすることが出来ることを考慮に入れて、内容器の外寸法を処分容器内寸法□1500 mmに対して片側 25 mmの余裕を持って□1450 mmとする。なお、片側 25 mmは内容器の製作公差を考慮しても十分なものと考えられる。

\*1：廃棄体の表面線量率は最大で 500mSv/h、処分容器の遮へい厚さが 50 mmであることから、廃棄体の表面線量率における支配核種を Co-60 とし、Co-60 の鉄に対する半価層を 20 mmとすると、内容器の表面線量率は最大約 3Sv/h と試算できる。

## 2) 内寸法(遮へい厚さ)

内容器の内寸法は、内容器に求められる遮へい厚さによって決まる。必要な遮へい厚さは廃棄体表面で 500 mSv/h すなわち内容器表面で約 3 Sv/h 未満、あるいは発電所での廃棄体の仕様として検討されている廃棄体表面で最大 20mSv/h とする他に、各発電所内での廃棄物充填作業、一時保管、廃棄体処理化などの各作業において既設設備にて適切にハンドリングできる表面線量率（例えば 2mSv/h）から定められる。廃棄物の放射能濃度は一律でないことから、放射能濃度に応じた最低限必要な遮へい厚みの内容器を用いて、内容積を大きくし収納する廃棄物量を多くすることとなると考えられる。一方、内容器は鋳鋼製であることから製作上 50 mm以上であることが望ましい。

以上のことより、内容器は異なる遮へい厚さを持ったものを準備することとし、その遮へい厚さは製作する内容器の種類をある程度限定するため 50 mmピッチとすることが適切と考えられる。最低厚みを 50 mmとすると、100 mm、150 mm、200 mm、250mm の 5種類程度の遮へい厚みの内容器が想定される。

## 3) ハンドリング方法

内容器をハンドリングするための構造として、処分容器と同様な把持部を外表面に用いる方法や輸送容器と同様なトランシオンを設ける方法が考えられるが、内容器の重量が最大で 22ton 程度(廃棄体重量が最大 28ton、処分容器を 6ton と想定)となると考えられる。このとき、内容器の外表面にこの重量物をハンドリングできる構造物を取り付けると、内容器を処分容器に収納する際の隙間が大きくなり、廃棄物の収納効率が悪くなるため望ましくない。内容器内面に同様な構造を設ける場合は、内容器に廃棄物を収納する際のスペース並びに収納方法に制限を生じさせることから好ましくない。これらのことを踏まえて、内容器全体（4 辺）を底から抱えるような専用の吊り具を用いることが望ましい。ただし、処分容器に内容器を収納する際には上記方法では処分容器と内容器の隙間を大きくしておく必要があることから、内容器の蓋に処分容器の蓋と同様な把持構造部を設け、ここを掴んでハンドリングすることとする。

## 4) 蓋締め方法

内容器は廃棄物収納後に発電所内で一時保管されることから、保管中あるいは構内輸送中に廃棄物が漏洩しないように密閉性が求められる。このため、内容器の蓋締め

方法として溶接あるいはボルト止めが考えられる。

また、一時保管後の廃棄体化に際し、内部確認を行うことも考慮し、蓋を取り外しできる、或いは内部を確認できる構造を検討することが考えられる。

ボルト構造の場合は溶接構造に比べて一時保管時の密閉性の維持管理方法等に議論が必要になること、及び処分容器の蓋締め方法に溶接が採用される可能性が高いことを踏まえて内容物の蓋締め方法も本検討では溶接とする。

## 5) その他

内容物はプール内での廃棄物収納後における「水抜き」、「乾燥」、一時保管時の「ガス抜き」、廃棄体化における「乾燥・砂充填（必要な場合）」、「内部確認」が実施できる構造としておく必要がある。そのため、内容物の蓋部に口径 25A 程度のプラグ開口を 2 カ所設けておき、それぞれの作業において必要な装置類のプラグを接続できるものとする。プラグ開口の使用が終了した場合は、当該開口部に遮へいを考慮した閉止プラグを取り付けて、内容物の蓋締めに時に閉止プラグの周囲を溶接閉止するものとする。

### a) 水抜き

プール中にて内容物に廃棄物を収納する場合、一時保管及び廃棄体化に向けて内容物中のプール水を抜く必要がある。蓋部に設けたプラグの一方に水抜き用のパイプ（又はチューブ）を挿入し、もう一方をエア入れ口として利用するものとする。この際、水抜き用のパイプが収納廃棄物に干渉せず、内容物内の底面近傍まで挿入できるように、蓋部上にプラグ開口を設ける位置は可能な限り内容物の四隅に相当する位置とするとともに、内容物内部の水抜き用パイプが挿入される場所に廃棄物が収納されないように内容物内部にガイド類をあらかじめ設けるものとする。

### b) 乾燥

水抜き作業後にも内容物内にはいくばくかの水が残存していることが考えられる。そのため一時保管時に要求される水分量とするため、真空乾燥あるいは乾燥流体を通気する作業が必要になるものと考えられる。これら作業を実施するために蓋部に設けたプラグ開口には真空乾燥の場合は一方に排気口、もう一方に閉止プラグを、乾燥流体による通気の場合は一方に乾燥流体の給気口、もう一方に排気口を接続することとする。

c) ガス抜き

一時保管時に内容容器内にて水の放射線分解により水素が発生する懸念があることから、蓋部に設けたプラグ開口にガスを透過する焼結フィルタを取り付けて内容容器内の空隙内の水素ガス濃度が高くなることを防止するものとする。

d) 乾燥・砂充填

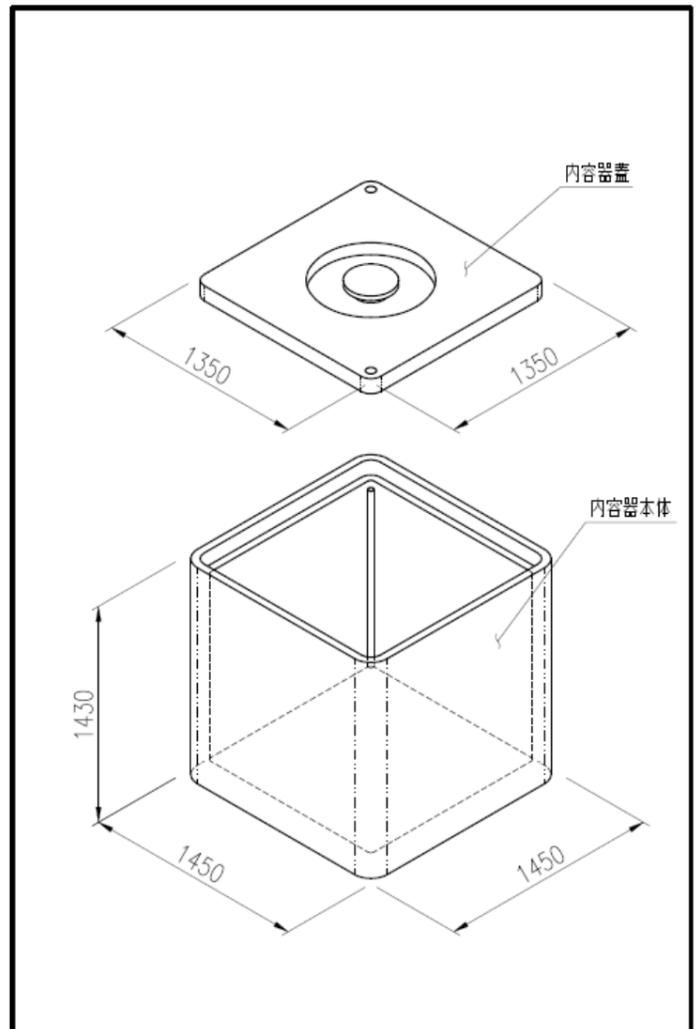
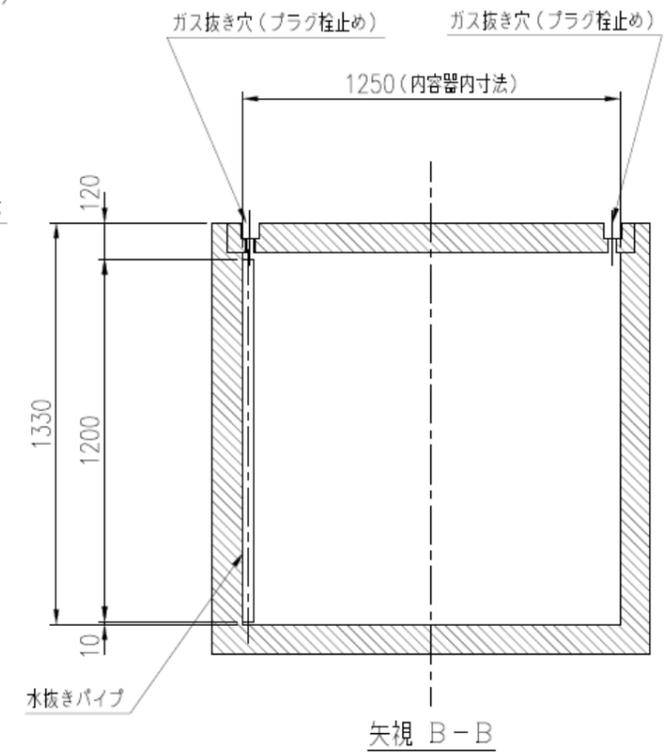
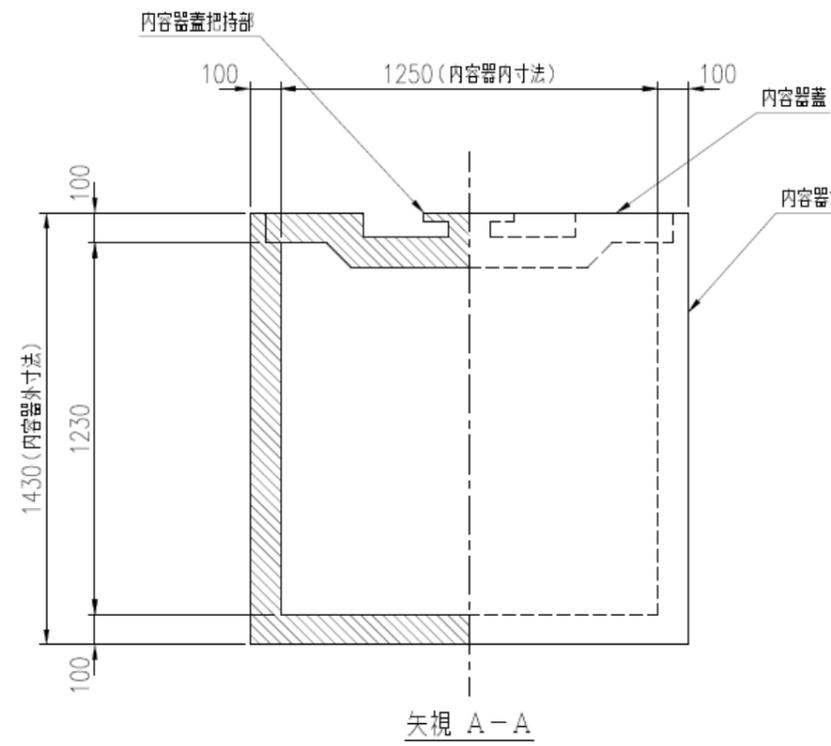
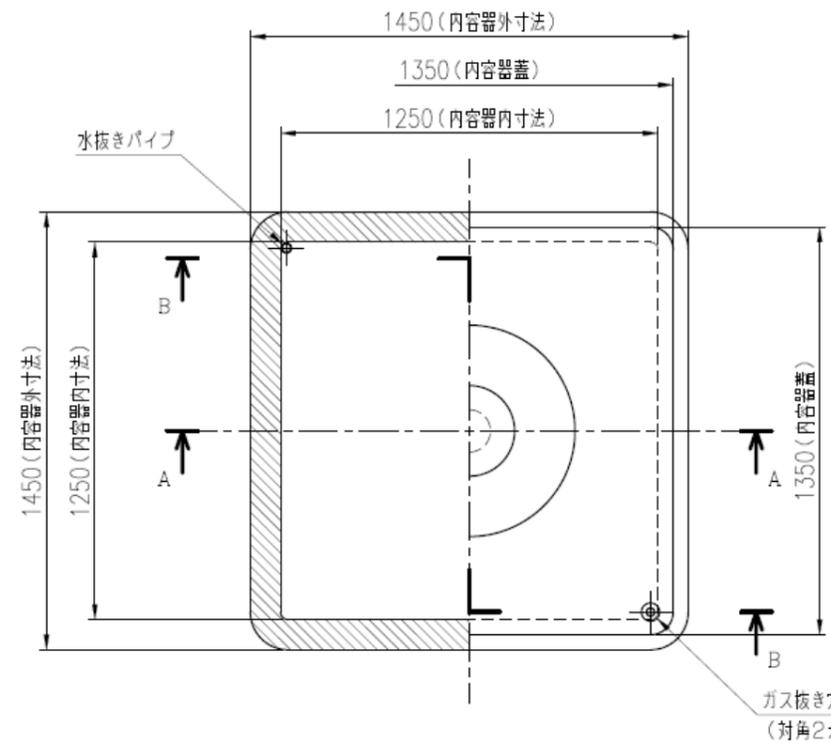
一時保管後の内容容器を処分容器に収納する前に、廃棄体内の水分量を規定値とするために内容容器内を乾燥することが考えられる。その作業内容、開口プラグの使用方は上述の「乾燥」と同等とする。ただし、期間によっては一時保管後には内容容器内に水分はほぼないことも考えられる。

また、廃棄体仕様における有害な空隙率の取扱いに応じて、内容容器内に砂を充填することが求められる可能性があることから、必要に応じて蓋部に設けたプラグ開口から砂を供給して内容容器内に充填できるものとする。

e) 内部確認

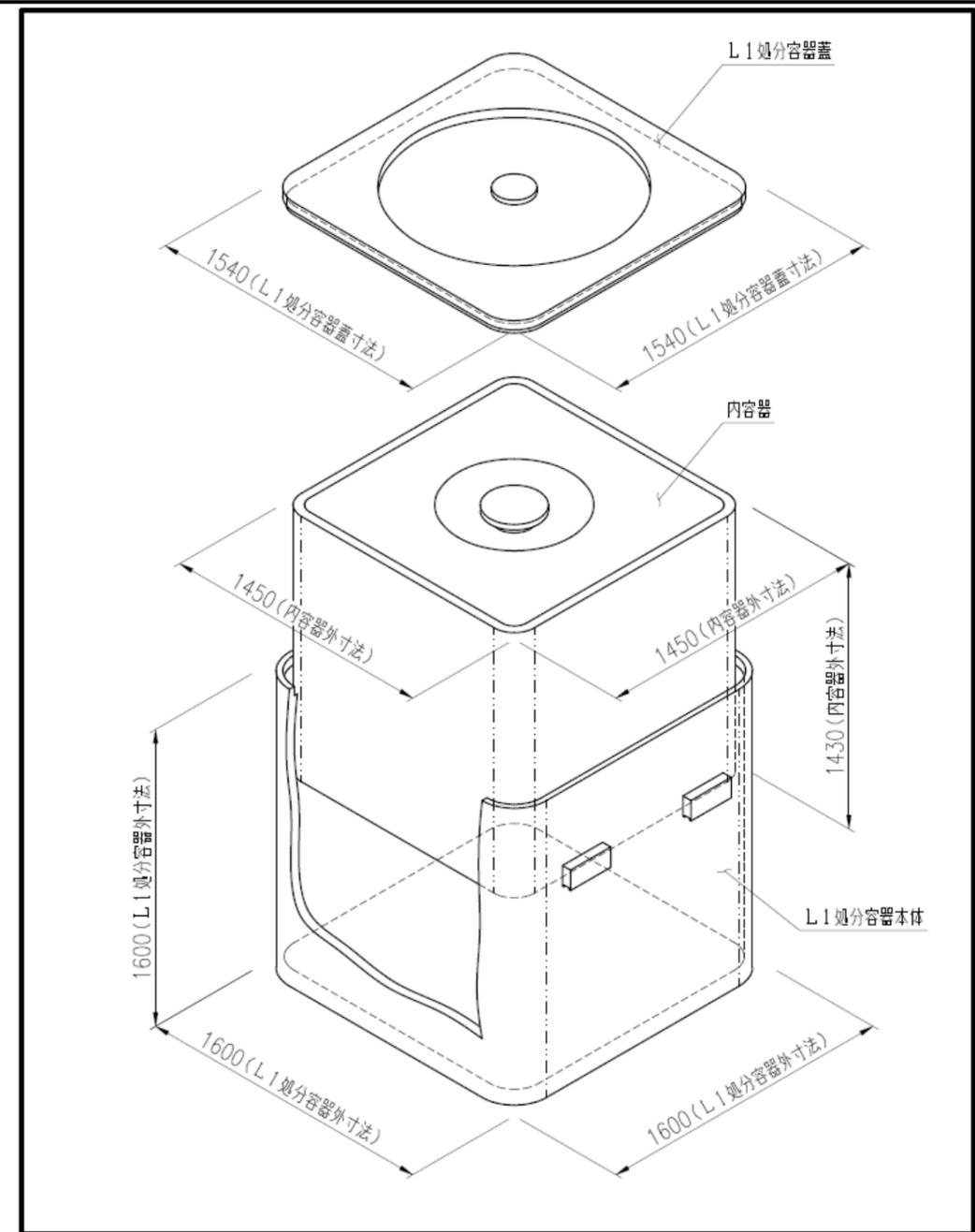
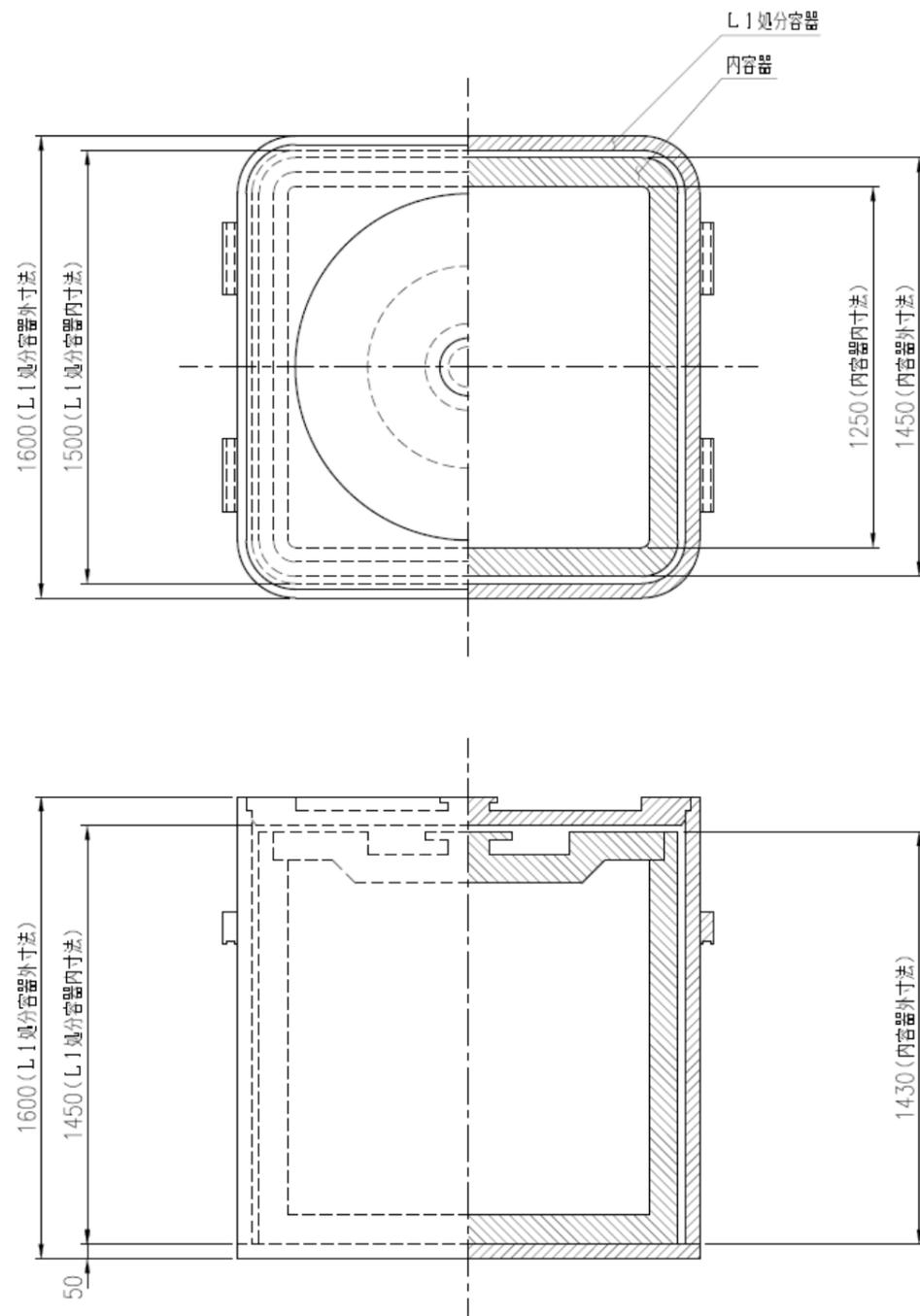
内容容器に収納された廃棄物の状態を確認する場合には、内容容器の蓋を再度取り外して ITV カメラで確認する、あるいは小型のカメラを内容容器内に挿入して確認することが考えられる。小型カメラによる確認の場合は蓋部に設けたプラグ開口から小型カメラが挿入できるものとする。

上記の設計結果を踏まえた内容容器（遮へい厚さ 100 mm）の外形図を図 3.4.2-2 に示す。また、参考として、処分容器への収納状態を図 3.4.2-3 に示す。



<b>KOBE STEEL, LTD.</b>	
TITLE	
内容器 外形図	
SCALE	1/20
ISSUED BY	原子カプロジェクト部

図 3.4.2-2 内容器 (遮へい厚さ 100 mm) 外形図



SCALE 1/20  
ISSUED BY 原子カプロジェクト部

**KOBE STEEL, LTD.**

TITLE

L1 処分容器 / 内容器 外形図

図 3.4.2-3 処分容器への収納状態図

### (b) 材料設計

内容器に材料面から求められる技術要件として、処分場への構外輸送時に想定される $-20^{\circ}\text{C}$ にて、落下、転倒などの事故時に遮へい機能を喪失しないことがある。このため、この温度にて破壊しない靱性値を満足する材料を設計する必要がある。

炭素鋼において破壊靱性値に影響を与える不純物元素を抽出し、その濃度を最適化する必要がある。

内容器に求められる材料特性として、前項の基礎試験の結果から、破壊靱性に影響する元素として、リン (P) 及び硫黄 (S) が抽出された。その濃度については、今後含有量の上限値を設定する必要があると考えられた。

### (3) 内容器の製作

鋳造による金属容器の製作においては、より薄肉及びより厚肉のものが技術的に困難であると考えられる。

内容器に求められる遮へい厚さとしては、 $50\text{mm}\sim 250\text{mm}$  が想定された。しかし、遮へい厚さ  $250\text{mm}$  のものは想定される必要個数が少ないことから、実証試験による確認は、以下の遮へい厚さの金属容器を製作するものとする。

- ① 遮へい厚さ： $50\text{mm}$
- ② 遮へい厚さ： $200\text{mm}$

前項の仕様に基づき設計した遮へい厚さ  $50\text{mm}$  の金属容器を図 3.4.2-4 に、 $200\text{mm}$  のものを図 3.4.2-5 に示す。

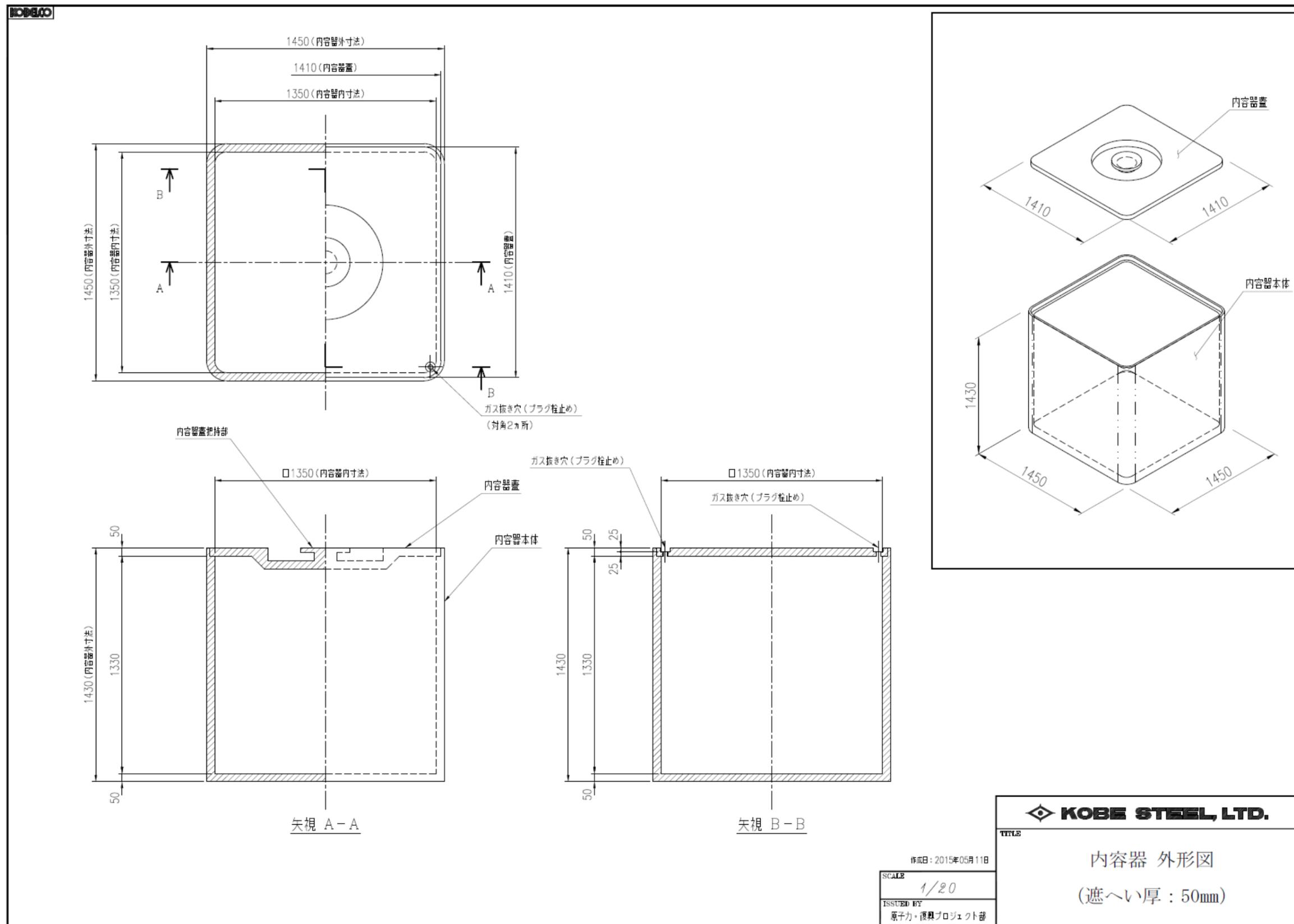
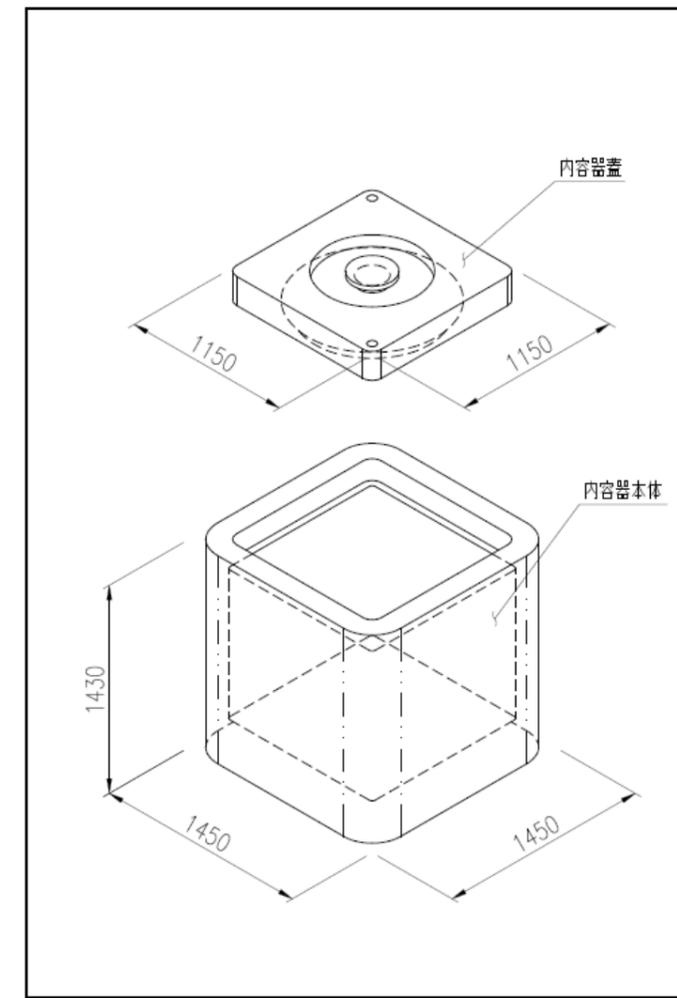
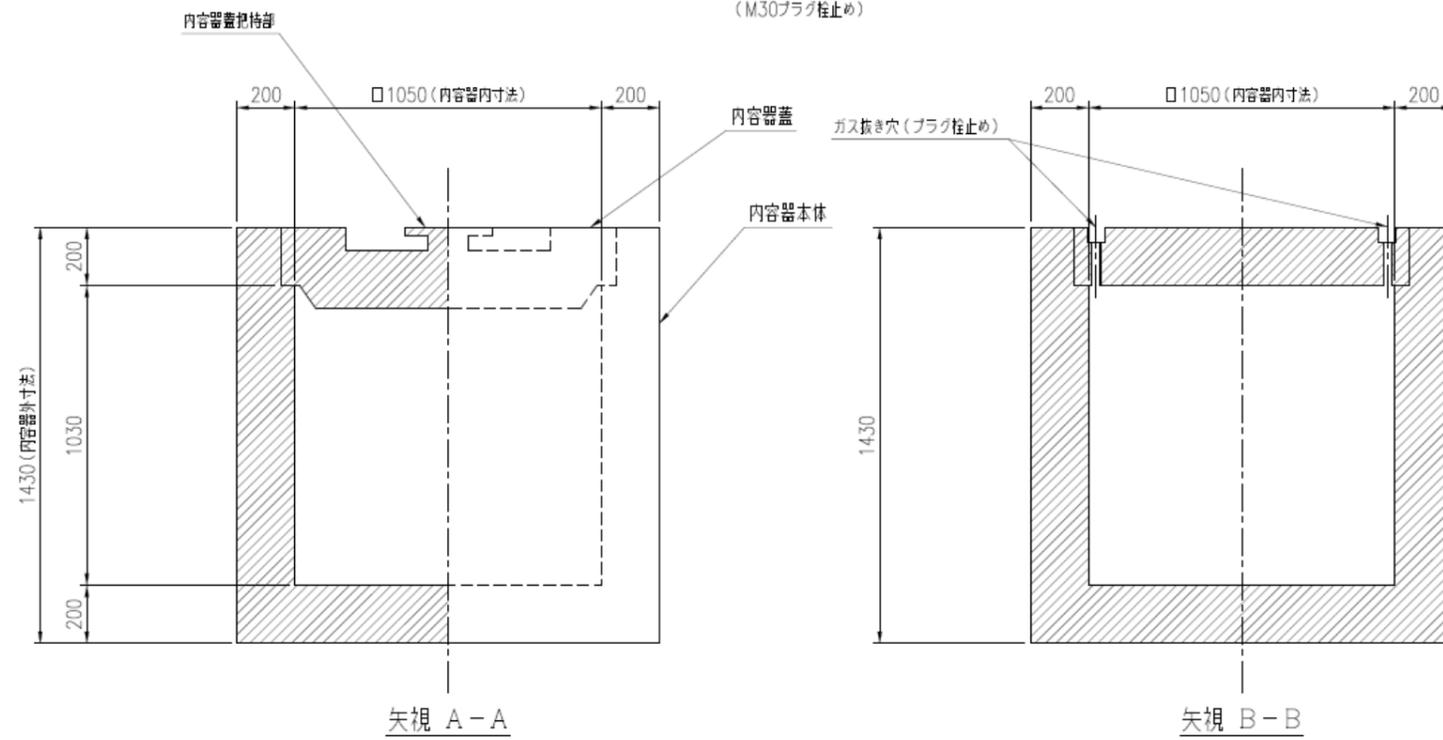
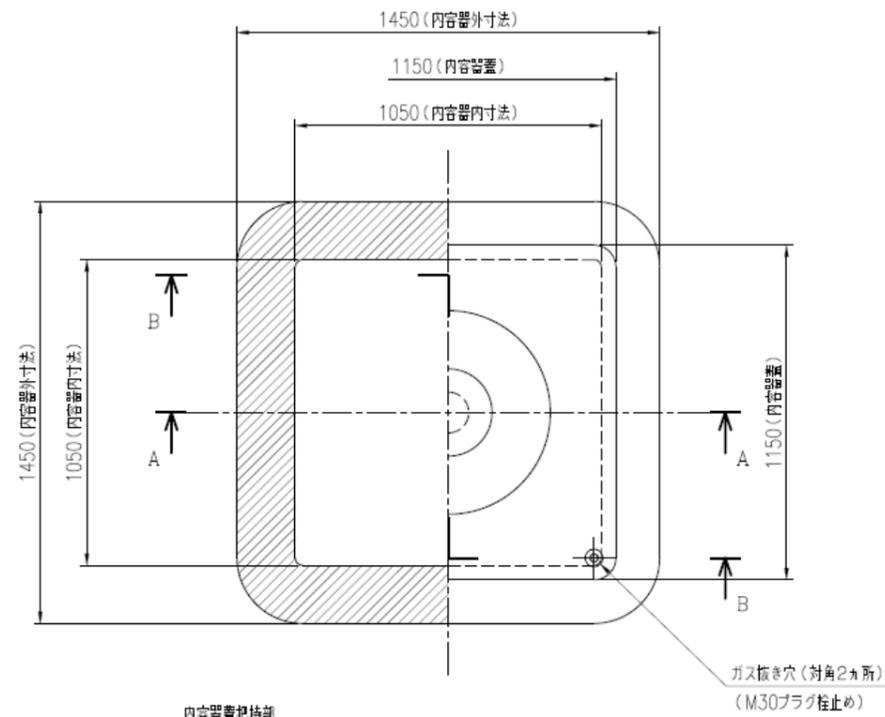


図 3.4.2-4 内容器 (遮へい厚さ 50 mm) 外形図



**KOBE STEEL, LTD.**

TITLE

内容器 外形図  
(遮へい厚 : 200mm)

SCALE  
1/20  
ISSUED BY  
原子力・環境プロジェクト部

図 3.4.2-5 内容器 (遮へい厚さ 200 mm) 外形図

## 4. 再利用プロセスの評価

### 4.1 概要

日本原子力発電株式会社の東海発電所で発生した実際のクリアランス金属を用いて、日本製鋼所室蘭製作所での実物大内容器の試作を含む実証試験計画の策定を行う。

計画策定にあたっては、実証試験の管理ポイントを明確にし、クリアランス金属廃棄物の受け入れ～製造～スクラップ化までの製造工程、製造方法を検討する。実証試験計画は、前章において検討された仕様等を踏まえて検討を行う。さらに、クリアランス金属を用いた場合の製品、工場設備、発生物（産業廃棄物）への放射能の影響度合いを測定するための調査方法を策定すると共に、試作した内容器の放射線遮へい能力や耐久性の確認を行う。

クリアランス金属廃棄物の受け入れに当たっては、搬入航路について輸送業者とともに、地元住民の理解を念頭に、安全上の課題を最優先とし、効率的な輸送方法を慎重に検討する。また、次年度の計画を円滑に進めるために、関係者との調整を行う。

さらに、開発した技術の利用促進に向け、実用化に向けた再利用プロセスの経済的合理性に関する検討を行う。

### 4.2 実証試験計画の策定

#### 4.2.1 クリアランス金属運搬計画

クリアランス金属を室蘭まで輸送する方法として、東海発電所からトラックで日立港に搬送し、日立港から室蘭港まで直接船輸送とする方法を採用する。地理的なイメージを図 4.2.1-1 に示す。

クリアランス金属の東海発電所からの持ち出しから日立港までのトラック輸送の管理は、日本原子力発電株式会社に依頼する。盗難・飛散を防止する観点から、クリアランス金属は蓋付き専用容器に入れて輸送・保管する。東海発電所からクリアランス金属を持ち出す際には、外来性の放射能も考慮して、ゲートモニターで異常が無いことを確認する。具体的な持ち出し・輸送方法を図 4.2.1-2 に示す。

日立港から室蘭港までの船輸送後、室蘭港岸着船上渡しでクリアランス金属を荷揚げする。その後、通常の原料受入れと同様、ゲートモニターで異常が無いことを確認する。具体的な受入方法を図 4.2.1-3 に示す。

クリアランス金属の輸送時の安全性を確認するために、輸送前後での船内の放射線量率（ $\mu$  Sv/h）測定を実施する。具体的には輸送船にクリアランス金属を搭載する前（日立港）、搭載

後（日立港）、荷降ろし後（室蘭港）の計三回測定する。



図 4.2.1-1 クリアランス金属の運搬計画



図 4.2.1-2 東海発電所～日立港運搬計画

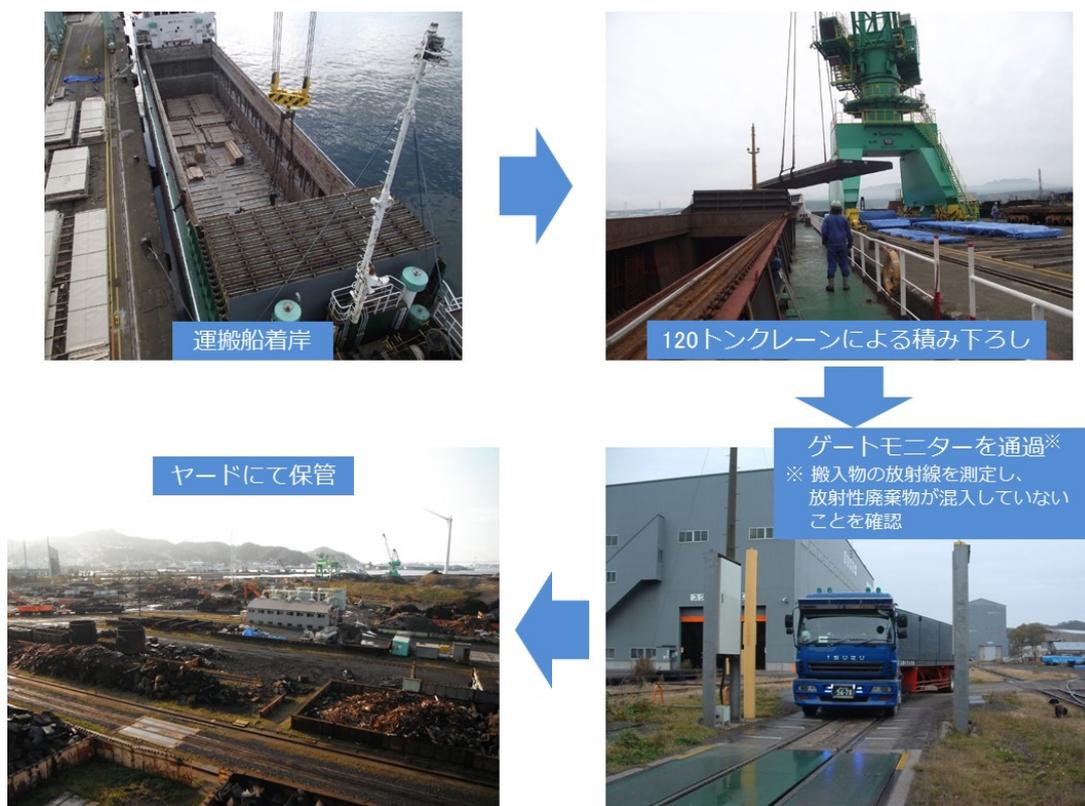


図 4.2.1-3 JSW 埠頭での荷役作業～ヤード保管計画

#### 4.2.2 実証試験及び工場設備等への影響調査

##### (1) 目的

実際に発生したクリアランス金属を原料として用いた内容器を試作し、製造性および製品の性能を検証する方法を決定することを目的とする。

この実証試験には、クリアランス金属を用いて内容器仕様に基づく鋳鋼製モックアップを製造し、製造工程中の製品、工場設備、発生物への放射能の影響を調査すること、及び製造されたモックアップの非破壊検査による内部調査、所定の材料特性が満足できることを分解調査や材料試験等によって確認することを含む。

##### (2) 検討内容

###### (a) 製造物および員数

製造物及び員数を表 4.2.2-1 に示す。肉厚 50mm の内容器及びそれに対応した蓋を模したモックアップ（本体 A 及び蓋 A）、肉厚 200mm の内容器及びそれに対応した蓋を模したモックアップ（本体 B 及び蓋 B）を製造する。さらに解体調査用の肉厚 200mm の内容器を模したモックアップ（本体 C）を製造する。

表 4.2.2-1 製造物一覧

符号	名称	員数	単重(kg)	肉厚等	備考
01	本体 A	1	3,471	50(mm)	組み立て試験に供する。
02	蓋 A	1	882	50(mm)	組み立て試験に供する。
03	本体 B	1	11,947	200(mm)	組み立て試験に供する。
04	蓋 B	1	2,336	200(mm)	組み立て試験に供する。
05	本体 C	1	12,323	200(mm)	解体試験に供する。

上記の他、表 4.2.2-2 に示した溶接手順試験に供する試験板、溶鋼の放射線測定に供するサンプルを製造する。

表 4.2.2-2 製造物以外のアイテムリスト

名称	員数	単重(kg)	肉厚等	備考
溶接手順試験板	2	35.33	45×200×500(mm)	溶接手順試験に供する。
溶鋼サンプル	1	0.79	50×50×40(mm)	溶鋼の放射能測定に供する。

(b) 材料・溶解・精錬

SS400 相当のクリアランス金属 60ton を原料として使用する。

内容器モックアップの材質は、JIS G5102 SCW550 相当とし、クリアランス金属を溶解・精錬したあと、SCW550 の指定化学成分を満足するために、合金鉍を添加する。添加する合金鉍はクリアランス物ではなく、市中一般に流通しているものを用いる。

(c) 調査・評価

本実証試験での調査・評価項目は下記とする。

- ・溶鋼分析
- ・材料特性調査（本体付試験材、モックアップ由来のもの）
- ・非破壊検査
- ・材料の放射能測定（溶鋼由来のもの、押湯部由来のもの、本体付試験材由来のもの）
- ・工場設備の放射線量測定
- ・発生物（産業廃棄物）の放射線量測定
- ・溶接手順試験（ASME Boiler & Pressure Vessel Code Section IX 準拠）

(3) 全体工程

全体工程は下記とする。



図 4.2.2-1 全体工程

#### (4) 検証試験後の処理

完成したモックアップ、分解後のモックアップ、材料試験片残材、機械加工切粉は、一ヶ所に集積して保管する。

ノロ、スラグ、廃ウエス、廃液等は、異常が無いことを確認した後、一般産業廃棄物として処理する。

#### (5) 製品・工場設備・発生物への影響調査

本作業による放射能の影響を確認するために、実施前後の線量測定を行う。

対象箇所は、下記の通りとする。

- ・製品（明らかに金属に由来する発生物を含む）
- ・工場設備（製鋼工場、熱処理工場、铸造工場、機械工場）
- ・発生物（産業廃棄物として処理されるべき物件）

##### (a) 製品への影響調査

溶解・精錬が完了した溶鋼の铸込み流、本体付試験材および製品の押し湯部分からサン

プルを採取し、成分分析、放射能測定を行う。

・化学成分分析

JIS G5102 SCW550 に求められている元素に加え、下記化学成分について測定を行う。

合金元素(規格)	C、Si、Mn、P、S、Ni、Cr、Mo、V、炭素当量
不純元素(参考用)	Cu、Al、As、Sn、Sb、Ti、Pb
その他(参考用)	(残留・混入が想定される放射性元素)

・放射能測定

サンプルを外部の検査機関に送付し、放射能測定を依頼する。

放射能測定元素	Cs134, Cs137, Co60, Mn54
測定条件	Ge 検出器
測定時間	8 万秒
対象核種	$\gamma$ 線核種のみ。 $\beta$ 線、 $\alpha$ 線核種は含まず。

測定結果は、放射能(Bq/g)にて表示する。

(b) 工場設備・発生物・金属地金への影響調査

製造工程のうち、下記設備および半製品の指定箇所に、シンチレーションサーベイメータを用いて、 $\gamma$  線測定する。測定結果は、線量率( $\mu$  Sv/h)にて表示する。

- ・製鋼工場の集塵装置
- ・取鍋（とりべ）内壁
- ・製鋼工場の溶鋼残滓
- ・鑄放し後の製品表面の酸化被膜
- ・鑄造工場のガウジング作業の溶剤残滓

比較用として、クリアランス金属を用いない、平常時の製品サンプルをあらかじめ採取しておき、放射線測定を実施する。このときの製品材質は SCW550 相当に限定されることはない。

また、設備および半製品の指定箇所に対して、クリアランス金属を用いない、平常時の値を把握するべく、 $\gamma$  線の予備測定を行っておく。

設備および半製品の予備測定は、数か月程度の期間にわたり、適当な間隔をあけて 3 回

程度定期的に実施する。

平常時と、クリアランス金属使用直後の測定結果を比較できるよう、全ての測定結果を報告する。

#### (6) 解体調査

製品各部での材料特性の分布を把握するべく、符号 05、モックアップ材を対象に解体調査を行う。

解体調査における調査項目は下記とする。

- ・ 機械的特性の分布
- ・ 化学成分の分布
- ・ 放射線遮蔽能力の推定（サンプルの密度測定）
- ・ 放射能の分布（各部サンプルによる放射能測定）

#### (7) 報告事項

下記事項につき報告する。

- ・ 製造履歴（化学成分、熱履歴）
- ・ 非破壊検査結果
- ・ 材料特性調査結果
- ・ 製品サンプルを用いた  $\gamma$  線測定結果
- ・ 設備各所における  $\gamma$  線測定結果
- ・ 放射能測定記録（溶鋼、本体付試験材、押し湯）
- ・ 放射線測定記録（設備、発生物、金属地金）
- ・ 解体試験結果（材料試験、成分分析、密度測定、放射能測定）

#### 4.2.3 住民説明会

日本製鋼所室蘭製作所にて実際のクリアランス金属を用いた技術開発研究を行うことから、地元住民への安心・理解活動のため、この事業についての住民説明会を平成 27 年 11 月 27 日、28 日に室蘭市の 2 会場で実施した。説明者は、経済産業省、日本製鋼所、神戸製鋼所及び電気事業連合会が行い、「事業の背景、必要性」、「事業の実施内容」及び「使用するクリアランス金属について」の内容をスクリーン資料に基づき説明した。資料は、当日印刷物としても配布

した。

住民説明会の事前のお知らせは、以下により行った。

- ① 広報むろらの「お知らせステーション」
- ② 新聞広告（北海道新聞及び室蘭民報：11月10日及び11月24日の朝刊にて）
- ③ 室蘭市内主要箇所へのポスター掲示・チラシ配布
- ④ 町内回覧板

住民説明会では、アンケート調査を行い、説明会の満足度及びクリアランス金属を再利用することに対する考えを質問したところ、回答者の約7割の方から満足できたとの評価をいただき、再利用に関しても同様の割合で肯定的な意見をいただいた。

この住民説明会の概要、参加者の皆様からのご質問やアンケート結果などの住民説明会の概要、アンケート結果及びいただいた主なご質問及びその回答（Q&A）を巻末に添付する。

#### 4.3 経済性評価方法の検討

##### (1) 目的

クリアランス金属の再利用メリットの明確化、さらには一般への流通促進への寄与に資することを目的として、実用化に向けた再利用プロセスの経済的合理性、具体的にはクリアランス金属廃棄物の再利用の有無等による経済性評価方法の検討を行う。

##### (2) 検討結果

ここでは、クリアランス金属を L1 用内遮へい容器（内容器）として再利用した場合と再利用しない場合について検討した。

再利用しない場合の処分方法としては、L3（浅地中にトレンチ型）として処分する方法と産業廃棄物として処分する方法が考えられた。しかしながら、クリアランス金属は有価資源であり、産業廃棄物として処分することが適切でなく、事例もないことから、このケースで経済性評価しないこととした。

再利用した場合の前提条件として、フリーリリースを想定している。つまり、近場のスクラップ業者が近場のメルターに販売する前提である。

表 4.3-1 にクリアランス金属再利用に関する経済性評価方法についての検討結果を示す。

(1) ～ (4) の費用項目はすでに公表されている項目を列挙した。

表 4.3-1 クリアランス金属再利用に関する経済性評価方法についての検討結果

	再利用しない場合 【L3 として処分】	再利用した場合 【L1 用内遮蔽容器として再利用】
(1) 処理費 <sup>※1</sup>	①解体後除染費（解体後除染作業人件費、解体後除染設備費） ②現場管理費（安全対策費、放射線管理費） ③その他諸経費（一般管理費、保険料、宿泊費用）	
(2) 確認検査費	①確認検査作業人件費 <sup>※1</sup>	①CL 測定費 <sup>※2</sup>
(3) 構内輸送費 <sup>※1</sup>	必要	不要（解体引当金ではみていない）
(4) 構外輸送・処分費 <sup>※1</sup>	必要	不要（金属は有価物として再利用できることが背景）
(5) L1 用内遮蔽容器製作費	一般スクラップ材料を用いた製作費	クリアランス金属を用いた製作費（トレーサビリティ管理費用含む）

※1 総合エネルギー調査会原子力部会中間報告「商業用原子炉発電施設解体廃棄物の処理処分に向けて」（平成 11 年 5 月）に基づく費用項目

※2 「総合資源エネルギー調査会電気事業分科会 原子力発電投資環境整備小委員会報告書（平成 19 年 5 月）」に基づく費用項目

クリアランス金属を再利用した場合の（３）及び（４）については、スクラップ業者が有価物であるクリアランス金属を買い取ることを前提としているため、費用計上は不要と判断した。

（５）について、不明な点を以下に列挙する。

- ・クリアランス金属の不純物含有量をどこに設定するか。
- ・比較対象は、L1 用内遮へい容器の代表厚さ 100mm、数量 1 とするか、それとも全数、全厚さとするか。

現状、クリアランス金属を再利用した内遮へい容器の材料規格が定まっておらず、どの程度精錬して不純物成分を低減させるのか不明である。そもそも炭素鋼にステンレス鋼を混ぜて無理に精錬せず、適用製品を拡大することで、無理の無い製造方法を採用すれば、（５）の項目の差は限りなく縮まるはずである。これらについて、開発 3 年目までに考え方を明確にして、比較検討を行う。

一方で、本事業の実施に当たり、外部の専門家・有識者等で構成される委員会を設置し、研究計画、実施方法及び結果の評価等について審議、検討を行っている。委員会は、検討委員会と技術委員会を設置し、各々社会的受容性及び技術的課題について検討している。社会的受容性に関する検討とは、クリアランス金属再利用の安全性に対する国民理解を得るために必要と考えられるエビデンスデータ、及び実証試験を通して取得したデータにより、クリアランス金属の利用の安全性を確認し、国民の理解の観点から必要と考えられる情報発信方法について検討することである。

この検討委員会において、ライフサイクルアセスメントという面を見た場合に、単に経済面だけでなく、環境面も含めた議論をすべき、等のコメントがあった。したがって、今後は環境面での付加価値についても検討し、経済性評価の中で議論していく。

## 参考資料

- [1] 日本原子力学会標準, 「余裕深度処分対象廃棄体の製作要件及び検査方法: 2015」, AESJ-SC-F014:2015
- [2] 総理府令第五十七号, 「核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する規則」
- [3] 日本原子力学会標準, 「低レベル放射性廃棄物輸送容器の安全設計及び検査基準: 2008」, AESJ-SC-F013:2008
- [4] 電気事業連合会, 「原子力発電所等の廃止措置及び運転に伴い発生する放射性廃棄物の処分について」, 第 2 回廃炉等に伴う放射性廃棄物の規則に関する検討チーム会合, 資料 2-1, 平成 27 年 2 月 12 日,
- [5] 日本鑄鍛鋼会 鍛鋼研究部会 (編) 「衝撃値を主体とした炭素鋼鍛鋼品の機械的性質データ集」, 平成 15 年 2 月, P. 51
- [6] 日本鉄鋼協会 (編) 「新版 鉄鋼材料と合金元素」, ISBN978-4-930980-87-8, 2015 年 11 月
- [7] 岩館忠雄, 田中康彦, 竹俣裕行, 寺島周平: 材料, 35 (1986)、P. 873

## 添付資料

1. 住民説明会実施結果
2. 住民説明会における来場者アンケート結果
3. 住民説明会でいただいた主なご質問と回答

# 廃止した原子力発電所から発生する再利用可能金属の技術開発に関する住民説明会の結果について

日本製鋼所では、平成27年度より神戸製鋼所と共同で、廃止した原子力発電所から発生する再利用可能金属（クリアランス金属（裏ページ参照））の技術開発を行っております。この事業では、室蘭製作所にてクリアランス金属を用いた技術開発研究を行うことから、平成27年11月27日と28日、この事業についての住民説明会を開催しました。

この説明会の概要、参加者の皆様からのご質問やアンケート結果などについてお知らせいたします。

## 説明会の実施結果

	日時	場所	参加人数
第1回	平成27年11月27日 18:00~19:30	サンルート室蘭	44人
第2回	平成27年11月28日 13:30~15:00	セピアス花壇	52人

説明者：経済産業省、日本製鋼所、神戸製鋼所、電気事業連合会

主な説明内容：○事業の背景、必要性

○事業の実施内容

○使用するクリアランス金属について

説明の方法：・スクリーン資料に基づく説明（資料は当日紙でも配布）

・会場後方の展示ブースによる個別質疑対応

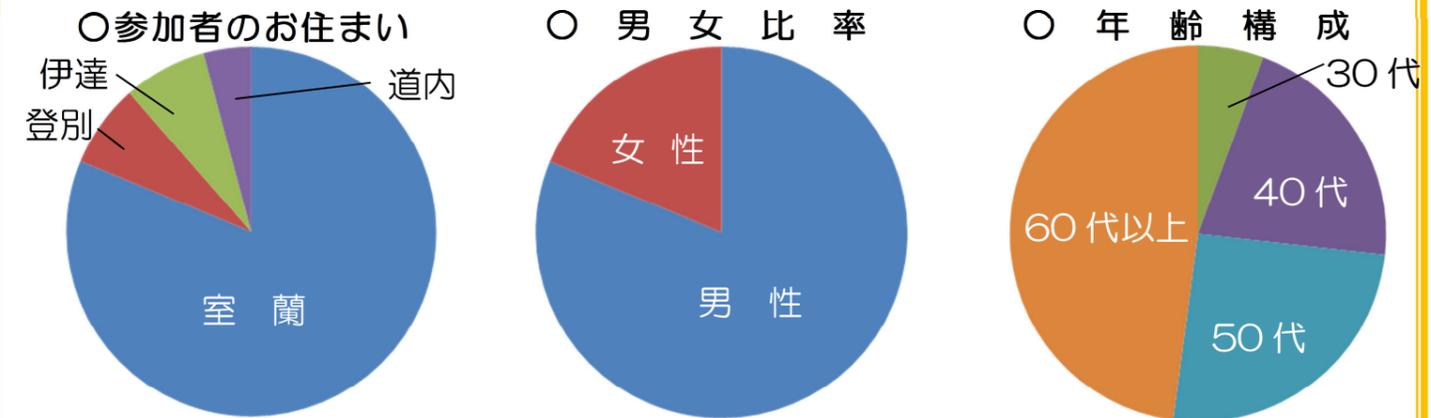
※住民説明会の事前のお知らせは、

- ①広報むろらんの「お知らせステーション」
  - ②新聞広告（北海道新聞及び室蘭民報：11/10と11/24の朝刊にて）
  - ③室蘭市内主要箇所へのポスター掲示・チラシ配布
  - ④町内回覧板
- により行いました。

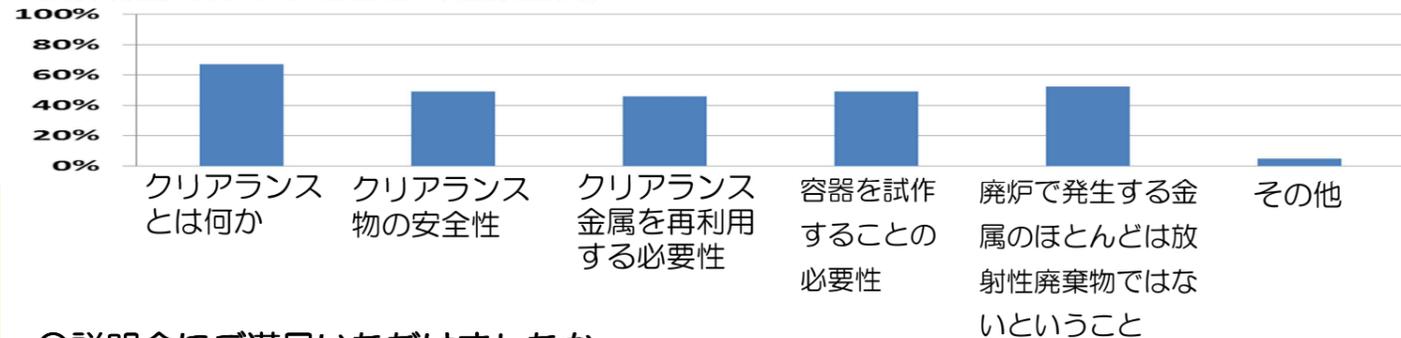


## アンケート結果

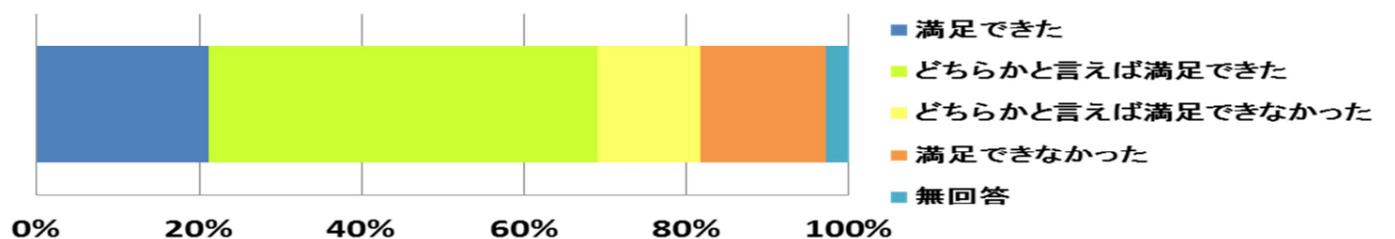
アンケート回答率：74%（71人/96人）



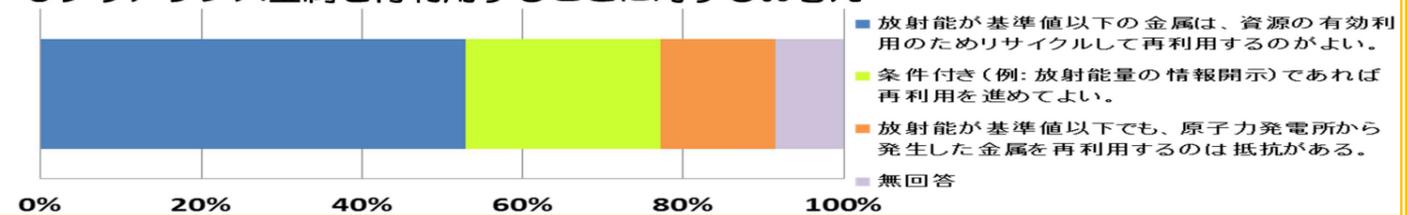
○説明会でわかったこと（複数回答）



○説明会にご満足いただけましたか。



○クリアランス金属を再利用することに対するお考え

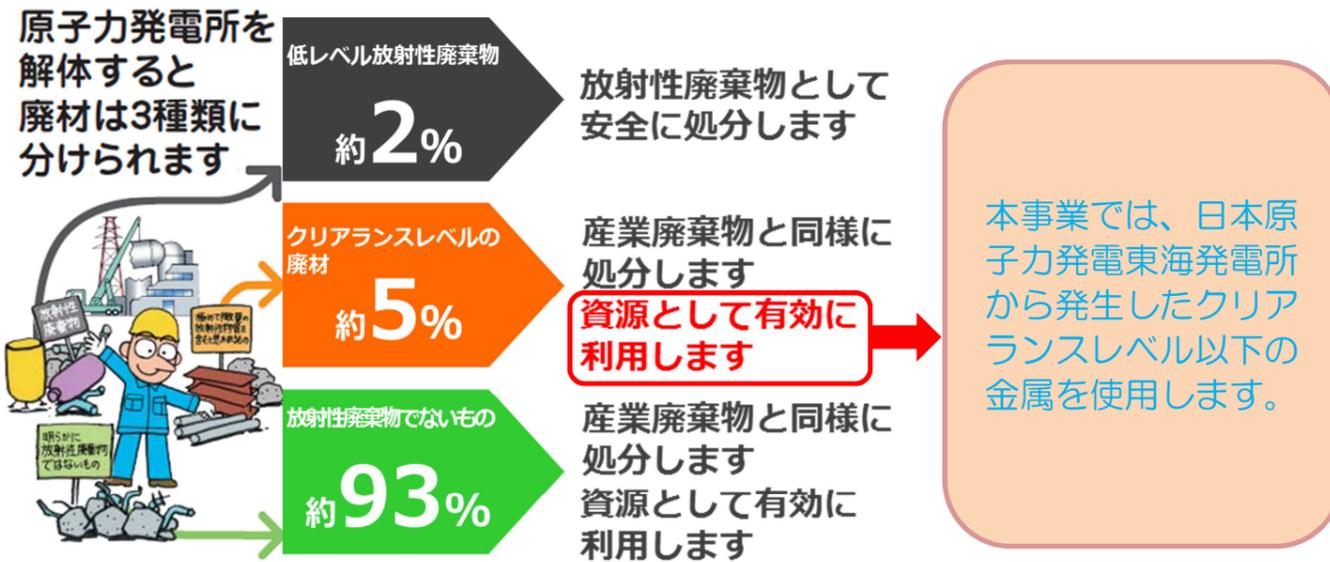


## クリアランス（金属）とは？

○原子力発電所の解体や運転によって発生する大量の金属やコンクリートなどのうち、放射能が非常にわずかなものは、国の確認を受けることにより、一般の物と同様に再利用や処分ができるようになります。この手続きのことを「クリアランス」と言い、法律<sup>(\*)</sup>で認められた制度です。

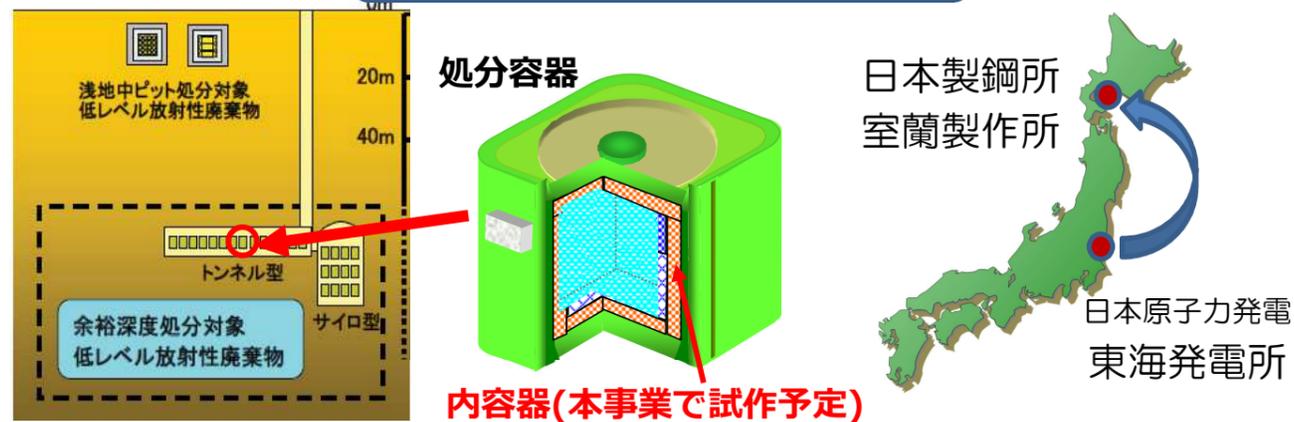
○国の確認を受けたものを「クリアランス物」といいます（本事業では金属）。

(\*1)「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」第六十一条の二（放射能濃度についての確認等）



110万キロワット級の沸騰水型原子力発電所  
1基を解体した場合  
(出典：原子力安全・保安院パンフレット)

## 本事業の概要



- 放射性廃棄物を地中深く処分するための処分容器（内容器）の製作技術を開発します。
- 内容器の試作のため、廃止措置中である東海発電所から、クリアランス金属を室蘭製鋼所に搬入します。

## 説明会に参加された方からの主なご質問

**Q1：クリアランスレベル（基準値）はkgあたりのベクレル（Bq）で表されるのに、説明の中ではミリシーベルト（mSv）が使用されており、わかりづらい。**

A1：クリアランスレベルとは、クリアランス物が様々な用途で利用または処分された場合でも人への影響が1年間で0.01mSvに相当する放射能濃度（クリアランス物1gあたりに含まれる放射能の量（Bq））であり、法令で規定されています。

なお、ベクレルとは、放射線を出す強さを表す単位、ミリシーベルトとは、放射線による人体への影響を表す単位のことです。

**Q2：クリアランス金属を溶かす過程で出てくる気体や、冷却に使われる水等に放射能が移り、周囲に拡散するのではないか。**

A2：本事業で使用するクリアランス金属の放射能濃度は保守的に見積もってクリアランスレベルの約半分（0.52）であることが確認されています。これは年間約0.005mSv以下に相当し、自然放射線による年間線量2.4mSv（世界平均）の約500分の1以下となることから、仮にクリアランス金属を溶かす際に放射性物質が周囲に拡散したとしても人体に影響がない程度の線量です。

**Q3：室蘭の持つ技術を活かし、廃止措置が円滑に進むよう、社会貢献として安心・安全にこの委託事業を実施してほしい。**

A3：ご指摘のとおり、安全を最優先してこの委託事業を進めてまいります。

クリアランス金属は、その放射能レベルが人体への影響が無視できる程度であることが確認されたものですが、今後の本委託事業の中で、さまざまな放射線・放射能データを採り、その情報をみなさまに開示しながら進めてまいります。

---

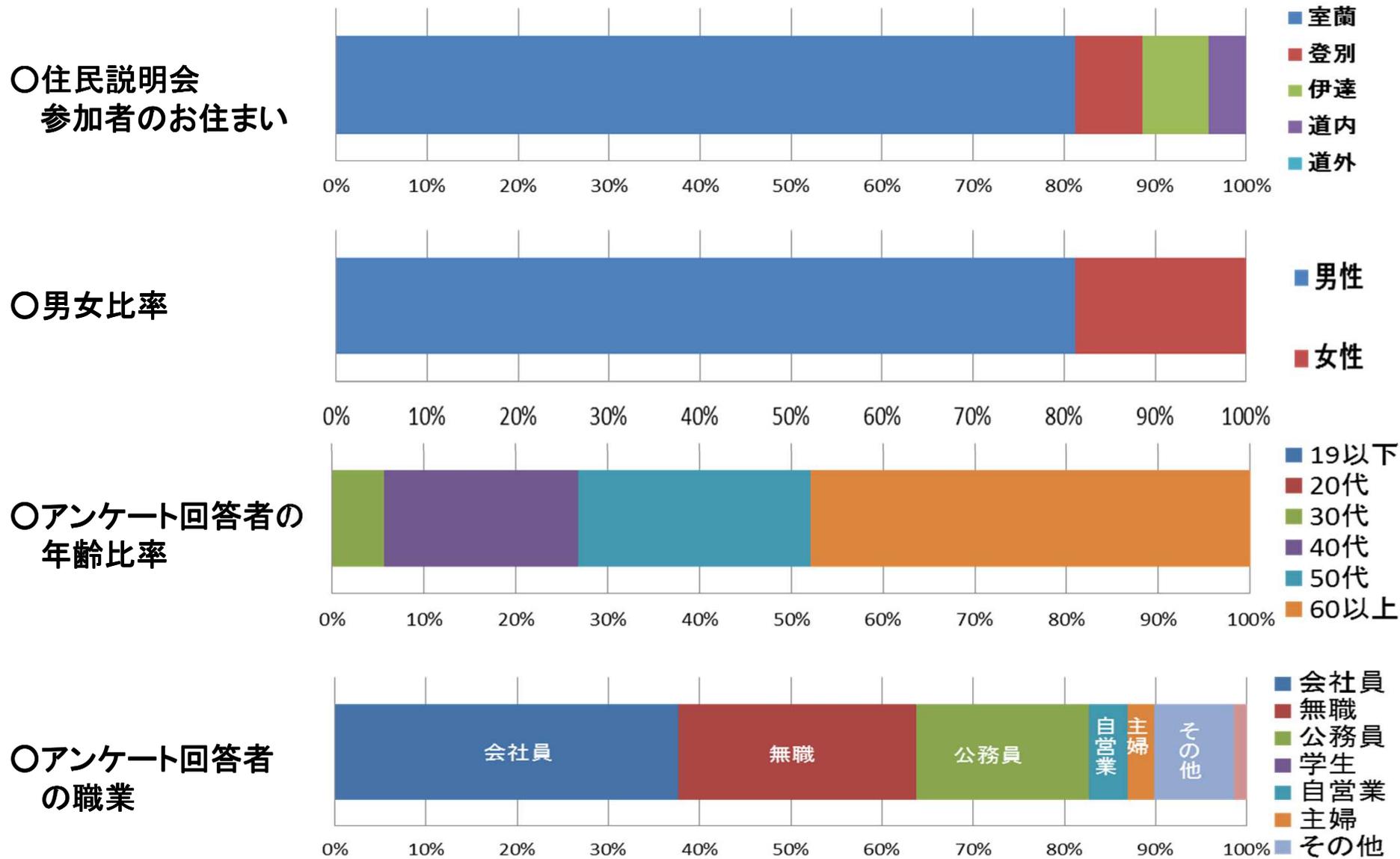
# 住民説明会における 来場者アンケート結果

平成27年11月27日、28日に行いました、**廃止した原子力発電所から発生する再利用可能金属の技術開発**に関する住民説明会において、ご来場された方にご協力いただきましたアンケートの結果をお知らせいたします。

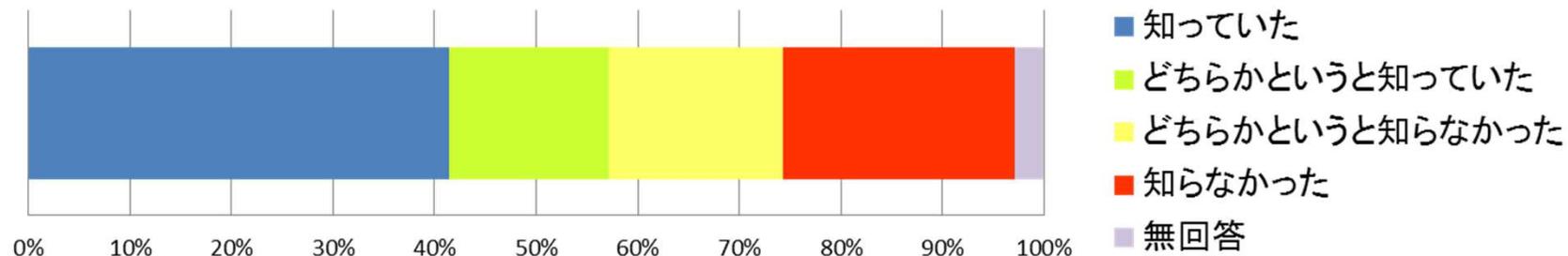
(アンケート結果は、統計的に集計を行ったものとしてお知らせしております)

---

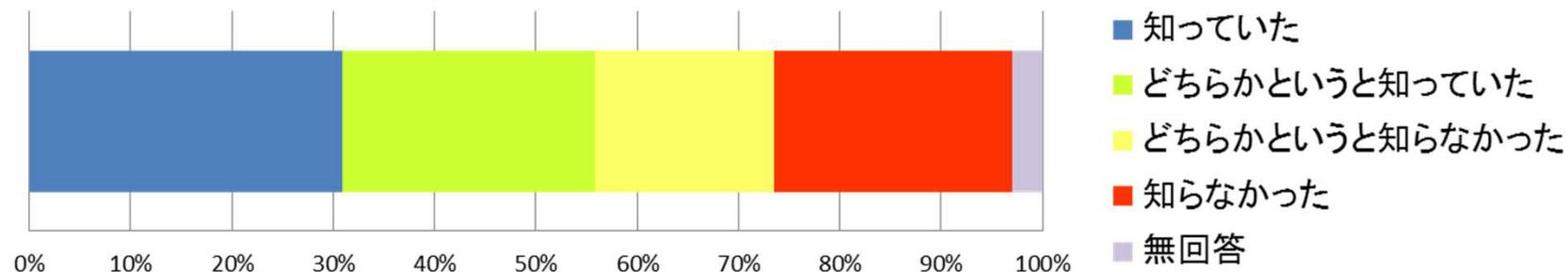
▶ アンケート回答率: 74% (71人 / 96人)



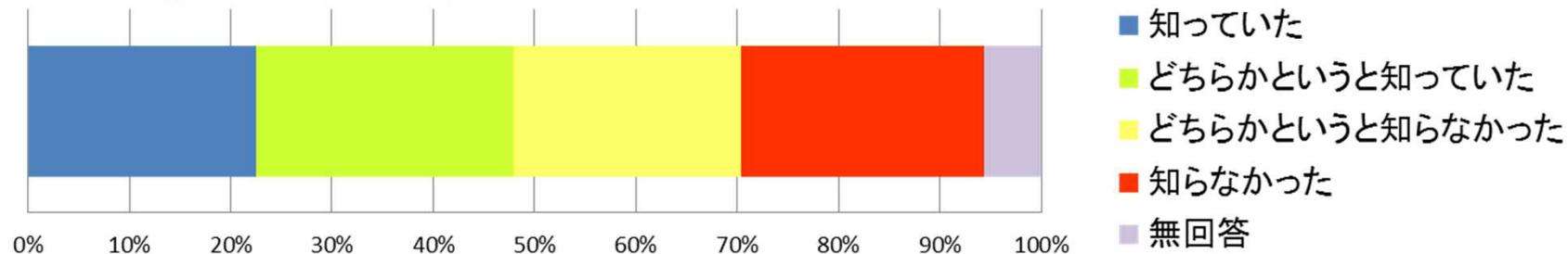
○原子力発電所から放射能が基準値以下の金属は放射性廃棄物ではなくなる(クリアランス)をご存知でしたか。



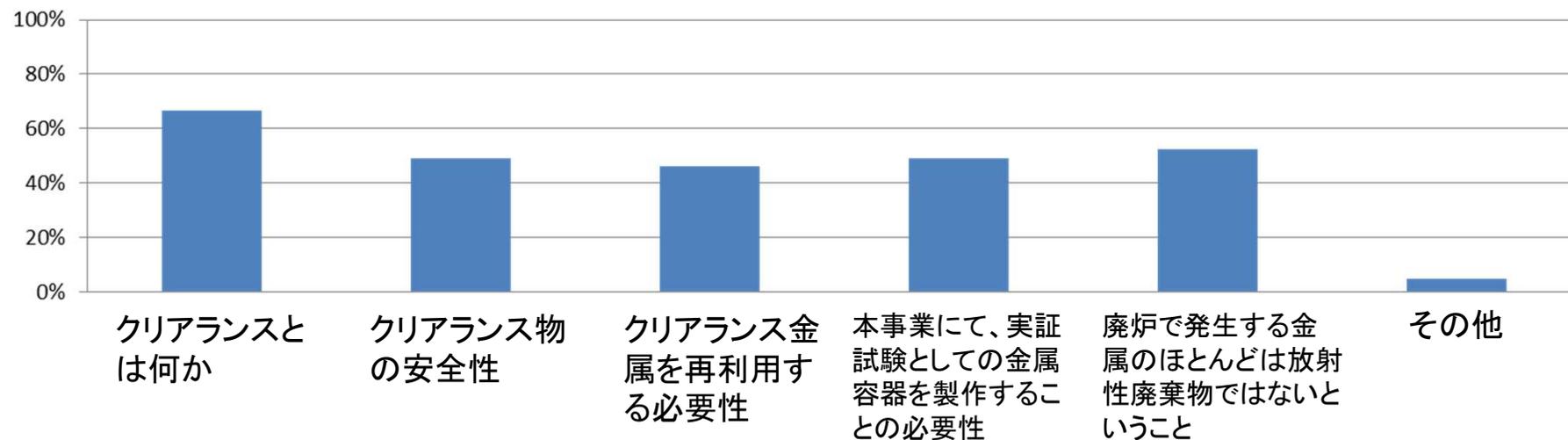
○放射能が基準値以下の金属は放射性廃棄物ではないことが、IAEAや日本の法律でも示されていることをご存知でしたか。



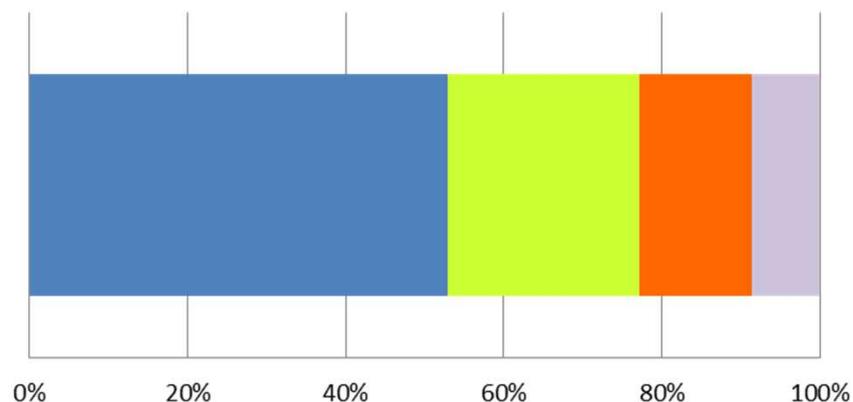
○原子力発電所から廃炉に伴い大量の金属類が出てきますが、大部分は放射性廃棄物でないことをご存知でしたか。



○今回の説明会を通してわかったことを教えてください。(複数回答可)



○資源の有効利用として原子力発電所の金属をリサイクルすること(クリアランス制度の活用)について、どのようにお考えですか。



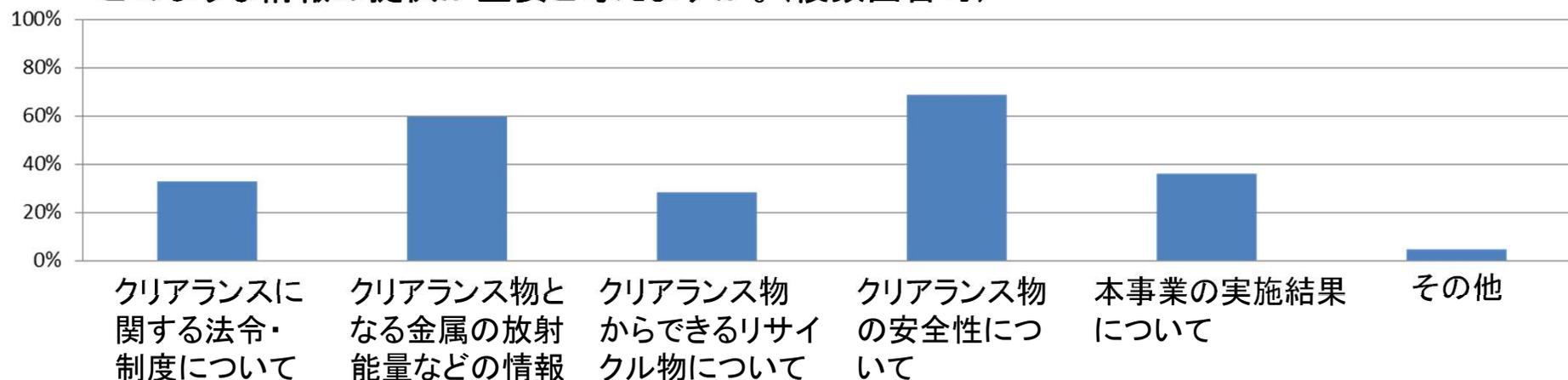
- 放射能が基準値以下の金属は、資源の有効利用のためリサイクルして再利用するのがよい。
- 条件付き(例:放射能量の情報開示)であれば再利用を進めてよい。
- 放射能が基準値以下でも、原子力発電所から発生した金属を再利用するのは抵抗がある。
- 無回答

---

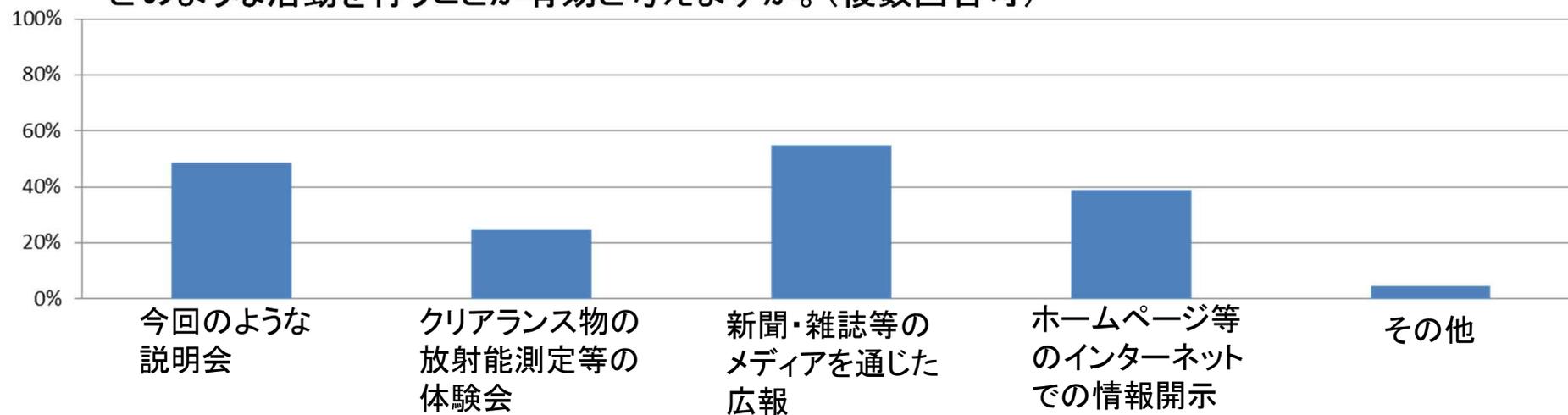
前の問いにおいて、「条件付き(例:放射エネルギーの情報開示)」とご回答いただいた方からの、条件についてのご意見は以下のとおりでした。

- 情報開示(試験方法、処理する部位、放射エネルギー(処理前・後))
  - 履歴のトレーサビリティ確保(放射エネルギーデータ、使用部位等)
  - 市民による受入物の放射能測定(全数)
  - 住民説明会の実施
  - 再利用用途の限定
  - 安全性の確認
-

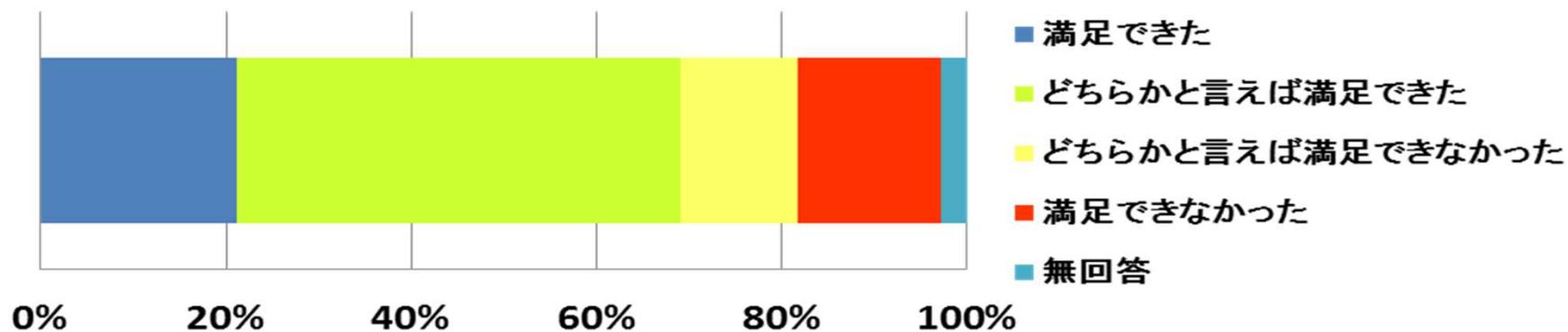
○今後、原子力発電所の金属のリサイクルを進める(クリアランス制度の活用)には、どのような情報の提供が重要と考えますか。(複数回答可)



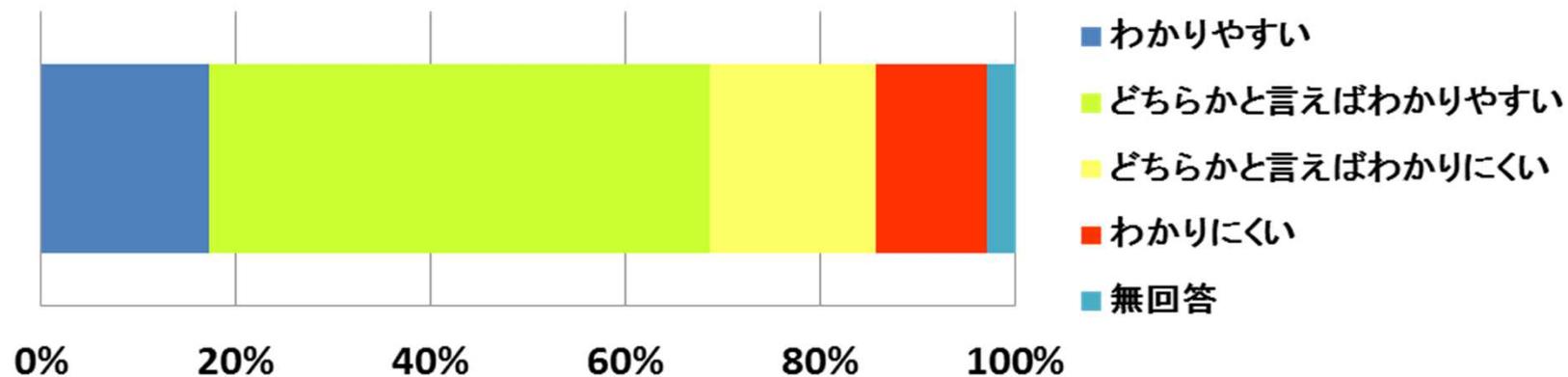
○今後、原子力発電所の金属のリサイクルを進める(クリアランス制度の活用)には、どのような活動を行うことが有効と考えますか。(複数回答可)



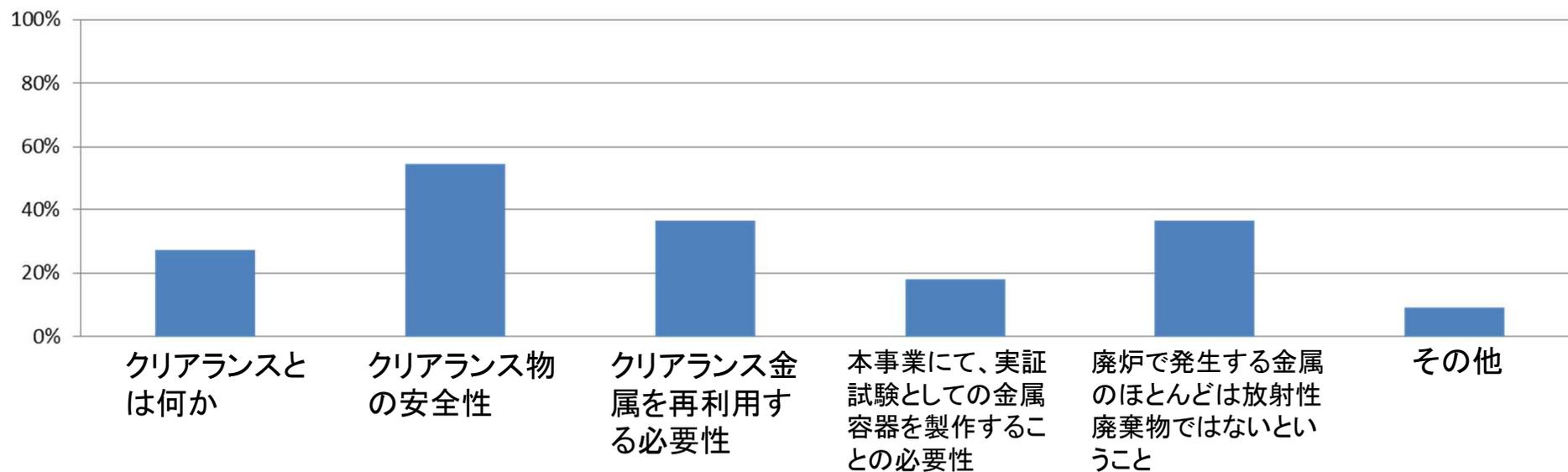
○本日の説明会について満足いただけましたか。



○本日の説明会について、全体として分かりやすい内容でしたか。



○「どちらかといえばわかりにくい」「わかりにくい」と答えた方にご質問です。  
わかりにくかった点を教えてください。(複数回答可)



## 住民説明会でいただいた主なご質問とご回答

説明会においていただきましたご質問と、そのご回答をご紹介します。  
(本事業及びクリアランスに関するもののみを記載)

### Q1：放射性物質は動かさず、その場に関じ込める方がいいのではないか。

A1：今回使用するクリアランス金属は、クリアランス制度に基づき放射性物質として扱う必要がないと認められたものであり、取り扱いにおいて閉じ込め等の放射性物質としての措置が必要ないものです。

(参考)

日本における原子力発電所の廃止措置では、国の方針として、安全の確保を前提に、地域社会との強調を図りつつ進め、さらに敷地を原子力発電用地として引き続き有効利用するという考えを原則としています（「原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画」（平成12年11月24日、原子力委員会）を参照）。また、海外においても、運転を停止した原子力発電所を長期間保管することのリスクや、現世代の負担の先送り回避の観点から、原子炉は運転終了後できるだけ早く解体撤去するものが増えてきています。このため、原子炉の解体から発生する廃棄物（放射性廃棄物、クリアランス物等）は、早期に処理処分する必要があります。

### Q2：今回の事業で使用するクリアランス金属は何に使われるのか。

A2：クリアランス金属は放射性廃棄物を処分するための処分容器の「内容器」の技術開発に用います。

### Q3：クリアランスレベル（基準値）はkgあたりのベクレル（Bq）で表されるのに、説明の中ではミリシーベルト（mSv）が使用されており、わかりづらい。

A3：クリアランスレベルとは、クリアランス物が様々な用途で利用または処分された場合でも人への影響が1年間で $10\mu\text{Sv}$ （ $0.01\text{mSv}$ ）に相当する放射能濃度（クリアランス物1gあたりに含まれる放射能の量（Bq））として法令で規定されたものです。クリアランスの安全性の説明にあたっては、放射能の濃度又は量よりも人体への影響として示す必要があることから、ミリシーベルトの単位を用いて説明を行ったものです。

なお、ベクレルとは、放射線を出す強さを表す単位、ミリシーベルトとは、放射線による人体への影響を表す単位のことです。

(参考)

単位の詳細な説明につきましては、下記の電気事業連合会のホームページもご参照ください。

<http://www.fepec.or.jp/nuclear/houshasen/houshanou/tani/>

**Q4：クリアランス金属を溶かす過程で出てくる気体や、冷却に使われる水等に放射能が移り、周囲に拡散するのではないか。**

A4：本事業で使用するクリアランス金属の放射能濃度は保守的に見積もってクリアランスレベルの約半分（0.52）であることが確認されています。これは年間約 0.005mSv 以下に相当し、自然放射線による年間線量 2.4mSv（世界平均）の約 500 分の 1 以下となることから、仮にクリアランス金属を溶かす際に放射性物質が周囲に拡散したとしても人体に影響がない程度の線量です。

**Q5：開発する容器の強度等について、具体的に教えてほしい。**

A5：今回開発する容器は、放射性廃棄物を処分するための処分容器の「内容器」です。内容器は、発電所内で放射性廃棄物を運搬したり、処分場に処分するまでの間は発電所内に保管したりする必要があることから、これらに耐えうる十分な強度が必要となります。このため、本事業において内容器の技術開発を行います。

**Q6：クリアランス金属の搬出、受入にあたり「ゲートモニターで念のため放射能の混入を確認する」となっているが、安全確認は確実にされるのか。**

A6：日本製鋼所では、資材を搬入する時には異物混入防止の観点よりゲートモニターによる放射線測定確認を恒常的に行っております。今回のクリアランス金属についても、この恒常作業と同様の測定を実施し、有意な放射線が検出されないことを確認することとしています。

**Q7：自然界から受ける年間の放射線量 2.4mSv と、クリアランス金属から被ばくする放射線量は別物であり、同様に比較するのはおかしいのではないか。**

A7：放射線を出す放射性物質には、セシウム 137 やストロンチウム 90 など、核実験や原子力発電などによって生成される人工放射性物質と、カリウム 40 やトリウム 232 など、天然に存在する自然放射性物質があります。人工放射性物質から放出される放射線を人工放射線、自然放射性物質から放出される放射線を自然放射線と言う事がありますが、人工放射線も自然放射線も人体等へ与える影響は同じです。

（参考）

人工放射線には、核実験や原子力発電所で生成される放射性物質によるもののほか、病気の診断などに用いられるエックス（X）線撮影や CT などのエックス（X）線なども含まれ、これらの人工放射線も人体等へ与える影響は自然放射線と同じです。

**Q8：説明資料に記載されている、クリアランス金属の測定データは[Bq/g]濃度の単位だが、この事業で持ち込まれるクリアランス金属はトンオーダーである。放射能濃度ではなく、放射エネルギーでの管理が必要なのではないか。**

A8：クリアランス金属の管理は人体への放射線影響を考慮した上で実施する必要がありますが、物量[kg]が大きくなって合計の放射エネルギー[Bq]が大きくなっても、単位重量あたりの放射エネルギー[Bq/g]が小さければ人体への影響は大きくならないことから、放射エネルギー[Bq]での管理は重要ではありません。

なお、クリアランスレベルは、人体への放射線影響が無視できるレベルとして規定されたものであり、放射能濃度[Bq/g]の単位で基準値が示されています。通常の産業活動を行う場合の量を考慮した上での評価による基準となっております。よって、法律上も量を制限するような基準とはなっておりません。

**Q9：室蘭の持つ技術を活かし、廃止措置が円滑に進むよう、社会貢献として安心・安全にこの委託事業を実施してほしい。**

A9：ご指摘のとおり、安全を最優先してこの委託事業を進めてまいります。

**Q10：専門用語が多く、わかりづらい。**

A10：今後、様々な情報発信を通して、用語の解説等を行っていきたいと考えております。

**Q11：本事業の実施が決定した経緯は。**

A11：本事業の実施にあたっては、事前に国において審議<sup>(\*)</sup>が行われ、必要性が確認されております。本事業は、経済産業省の委託事業に係るルールにのっとり、企画競争という応募を平成28年5月から行い、これに対し日本製鋼所と神戸製鋼所が応募したものです。受託にあたっては、専門家による審査を経て、受託するに足る資質があるかの確認を行い、事業者が決定されています。

(\*参考)

平成26年度政策評価（事前評価・事後評価）において、平成27年度実施施策の技術評価（事前評価）を行っております。

[http://www.meti.go.jp/policy/policy\\_management/26fy-seisakuhyouka/53a.pdf](http://www.meti.go.jp/policy/policy_management/26fy-seisakuhyouka/53a.pdf)

以上