

平成27年度～平成28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)

平成29年度 低レベル放射性廃棄物の処分に関する技術開発事業

(原子力発電所等金属廃棄物利用技術開発)

—3ヶ年研究成果の取りまとめ—

## 報告書

平成30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. 再利用プロセスの開発	3
2.1 概要	3
2.2 開発する容器の要件・基準の整理	3
2.2.1 発生するクリアランス金属廃棄物	3
2.2.2 開発する容器の要件・基準	4
2.2.3 内容容器の設計	5
2.3 材料規格案策定に関する主な項目と試験内容	7
2.3.1 実施概要	7
2.3.2 材料規格案策定のための基礎試験結果	7
2.3.3 機械的性質	13
2.3.4 内容容器の耐久性の検証	15
2.3.5 製造方法	19
2.4 材料規格案の策定	24
2.4.1 実施概要	24
2.4.2 材料規格の項目案	24
2.4.3 材料規格案の各項目の詳細	24
2.5 再利用プロセスの開発	29
2.5.1 実施概要	29
2.5.2 発生するクリアランス金属廃棄物	29
2.5.3 クリアランス金属廃棄物の回収・分別・保管方法	30
2.5.4 内容容器製造工場における原料配合方法、精錬方法	31
2.5.5 まとめ	31
3. 再利用プロセスの評価	33
3.1 概要	33
3.2 実証試験結果のまとめ	33
3.3 経済的合理性の検討	34
3.3.1 経済的合理性の検討方法	34
3.3.2 経済的合理性の検討結果	36
3.4 国民の理解促進や安心感を得るための取り組み方策の検討	37
3.4.1 社会的受容性向上のための活動実績	37
3.4.2 国民の理解促進や安心感を得るための取組方策	38
参考文献	41

－ 表 目 次 －

表 2.2.1-1	クリアランス物材質別物量.....	4
表 2.3.1-1	材料規格案策定に関する主な項目と試験内容一覧.....	7
表 2.3.2-1	供試材の主要化学成分の狙い値.....	8
表 2.3.2-2	不純物元素が機械的性質に与える影響.....	9
表 2.3.3-1	試験材の化学成分.....	13
表 2.3.4-1	解析ケース.....	16
表 2.3.4-2	各ケースの脆性破壊評価（炭素鋼）.....	18
表 2.3.4-3	各ケースの脆性破壊評価（低合金鋼）.....	18
表 2.3.5-1	モックアップの化学成分（目標）.....	20
表 2.4.3-1	化学成分及び炭素当量.....	25
表 2.4.3-2	機械的性質.....	26
表 2.4.3-3	靱性（0℃以下）に規格がある鋼の要求特性.....	27
表 2.4.3-4	材料規格案の各種別の限界欠陥サイズ.....	27
表 2.5.2-1	クリアランス材質別物量.....	30
表 2.5.3-1	回収・分別・保管区分.....	31
表 3.2-1	実証試験の実施内容及び実施結果.....	33
表 3.3.1-1	L3 廃棄物を処分するまでの評価項目.....	35
表 3.3.1-2	クリアランス（CL）金属を搬出するまでの評価項目.....	36
表 3.3.2-1	解体除染作業後から構外輸送・処分までの費用試算まとめ.....	36
表 3.4.1-1	社会的受容性向上のための理解活動実績.....	37
表 3.4.2-1	一般の方への情報提供方法・方針.....	38
表 3.4.2-2	情報提供・説明のポイント.....	39
表 3.4.2-3	検討しておくべき質疑.....	40
表 3.4.2-4	その他、得られたノウハウ.....	40

－ 図 目 次 －

図 2.2.3-1	内容器（遮へい厚さ 100 mm）外形図 .....	6
図 2.3.2-1	熱処理条件 .....	8
図 2.3.2-2	-20℃吸収エネルギーと熱処理条件（冷却速度）の関係.....	9
図 2.3.2-3	機械的特性と不純物元素（P、S、Cu、Sn）量の関係（炭素鋼） .....	10
図 2.3.2-4	機械的特性と不純物元素（P、S、Cu、Sn）量の関係（低合金鋼） .....	10
図 2.3.2-5	不純物含有量と-20℃シャルピー吸収エネルギーの関係.....	11
図 2.3.2-6	Cr 含有量と-20℃シャルピー吸収エネルギーの関係 .....	12
図 2.3.3-1	蓋溶接及び補修溶接部の吸収エネルギーの平均値の比較.....	13
図 2.3.3-2	動的破壊靱性試験結果（B=70mm に統一） .....	14
図 2.3.4-1	落下衝撃におよぼす落下姿勢及び標的（床）の影響.....	15
図 2.3.4-2	ケース A（低合金鋼） 解析結果 .....	17
図 2.3.4-3	母材の鑄造欠陥から脆性破壊強度評価 .....	19
図 2.3.5-1	モックアップの熱処理条件（焼入れ焼戻し） .....	20
図 2.3.5-2	焼入れ（水冷）時の各位置の温度変化 .....	21
図 2.3.5-3	ラボ試験とモックアップ試験結果の比較.....	22
図 2.3.5-4	断面マクロ観察結果.....	23
図 2.4.3-1	降伏点または耐力と引張強さの関係.....	26
図 3.3.1-1	経済性評価に用いる作業項目のイメージ.....	34
図 3.3.1-2	浜岡 1， 2 号機を解体した場合の廃材の発生量.....	35

## 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年の原子炉等規制法の改正において、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

本事業は、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て、3ヵ年の計画で実施した。

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。

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、外部の専門家・有識者等で構成する委員会で検討する。併せて、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. 再利用プロセスの開発

### 2.1 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。そこで、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した。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した。

内容器の技術要件を満足する材料を検討、評価するため、基礎試験を実施した。これらの検討・評価の結果に基づき金属容器の材料規格案を策定した。

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、内容器の設計を行った。

### 2.2 開発する容器の要件・基準の整理

#### 2.2.1 発生するクリアランス金属廃棄物

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、等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。そこで、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した。

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の調査結果を、表 2.2.1-1 に示す。

表 2.2.1-1 クリランス物材質別物量

区分		材質	重量(ton)	
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>	283,689	
	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>	17,490
		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 等添加物を含むもの	20,057
	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>	37,446
		鍛鋼	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ SF 材 (炭素鋼鍛鋼)</li> </ul>	65,732
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、チタン等の鉄以外の金属)	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) 等の金属でないもの、材料が不明なもの	91,682	
合計			559,000	

### 2.2.2 開発する容器の要件・基準

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)、内容器の使用環境 (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、内容器に求められる技術要件を整理した。

技術要件を以下に示す。

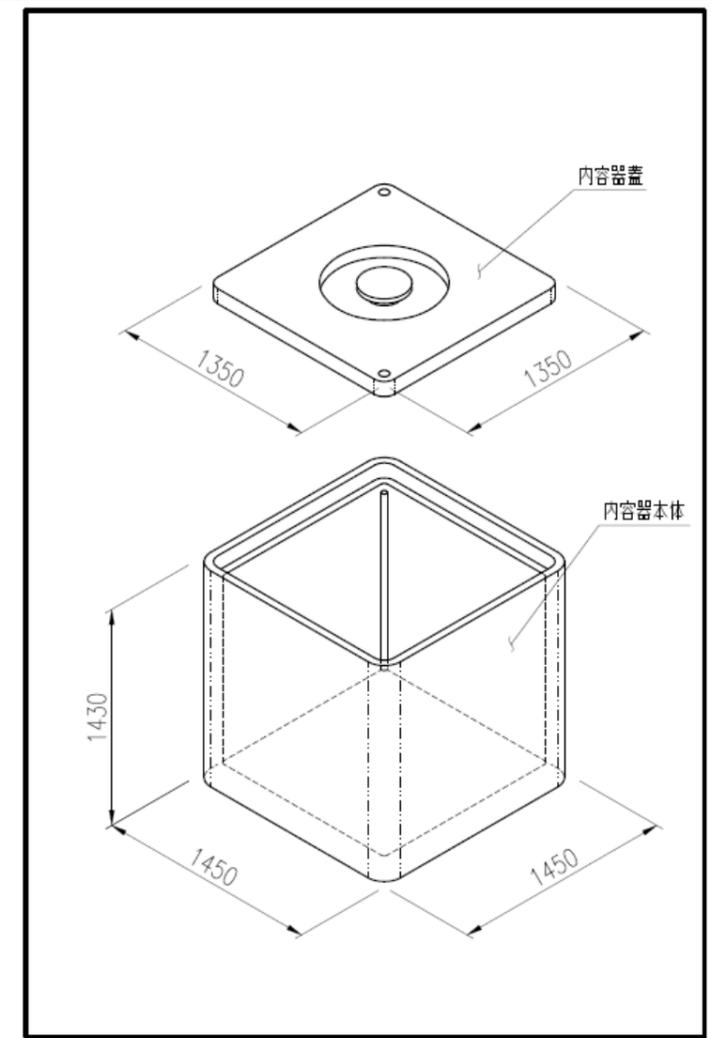
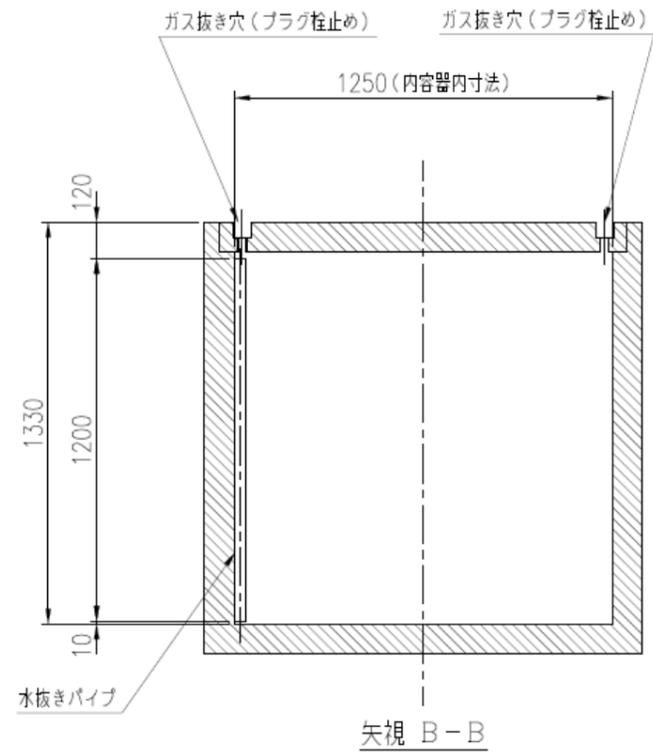
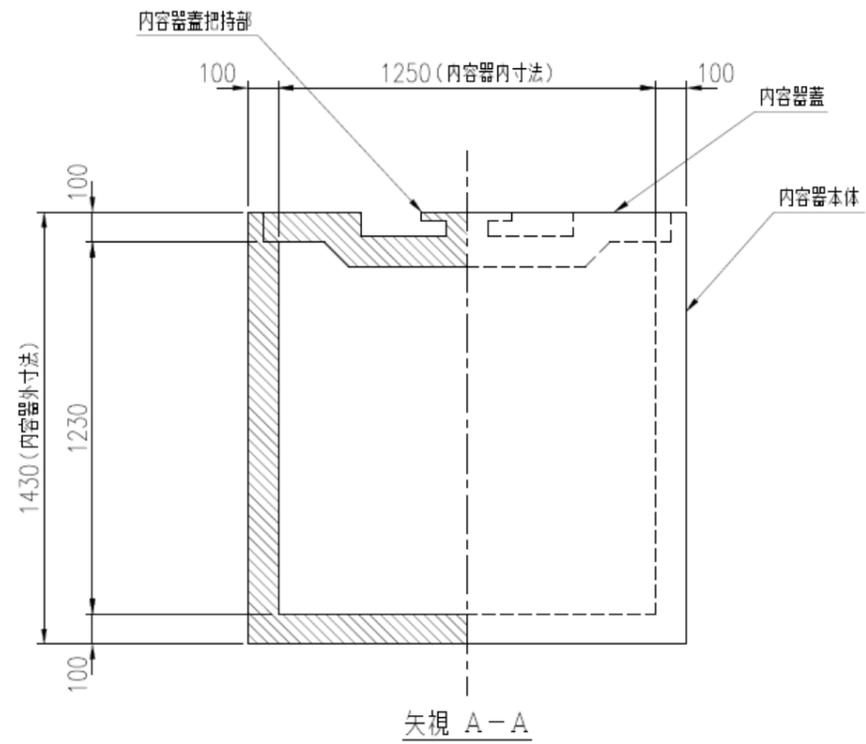
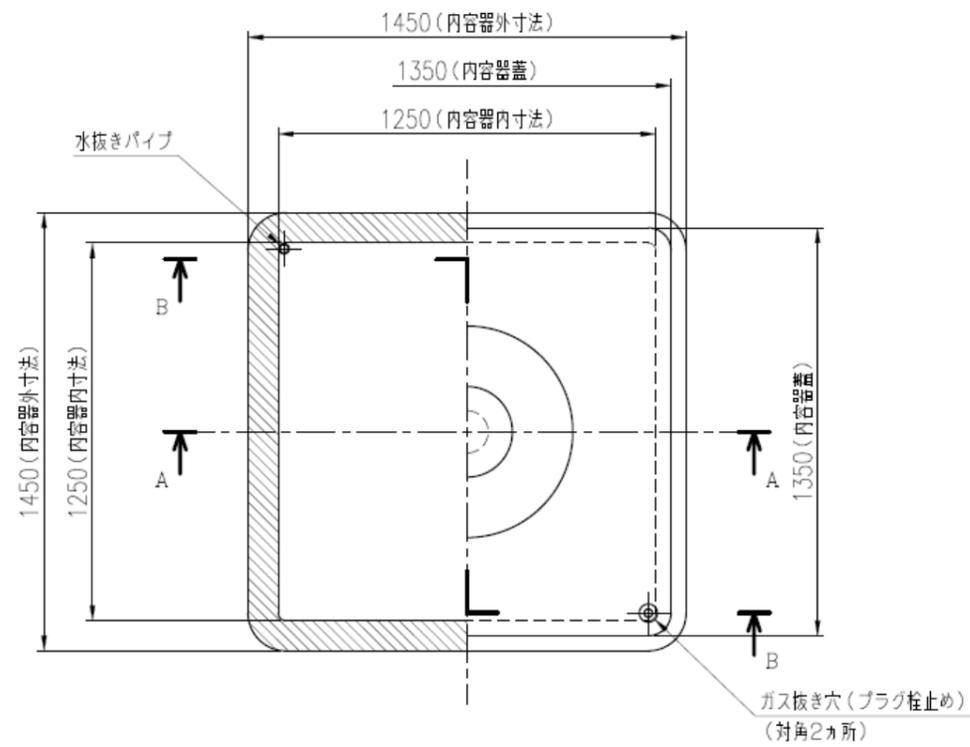
- ① 遮へい材に求められる所定の密度を持つ
- ② 運搬中に予想される最も低い温度 (-20℃) から 38℃までの周囲の温度の範囲において、き裂、破損等の生じるおそれがない
- ③ 低温脆化を起こすおそれのある金属材料については、材料試験を行うかまたは公知の文献から得られる低温時の衝撃試験データから、最低使用温度が脆性破面遷移温度または吸収エネルギー遷移温度より高いこと
- ④ 処分容器 (内寸 1,500mm) に収納可能

### 2.2.3 内容器の設計

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

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（内容器の肉厚）、また、すでに検討されている内容器を収納する処分容器の形状等から、内容器の設計を行った。設計は、必要となる容器として 50 mm、100 mm、150 mm 及び 200 mm について行った。

ここでは代表として、内容器（遮へい厚さ 100 mm）の外形図を図 2.2.3-1 に示す。



SCALE 1/20  
ISSUED BY 原子カプロジェクト部

**KOBE STEEL, LTD.**  
TITLE  
内容器 外形図

図 2.2.3-1 内容器 (遮へい厚さ 100 mm) 外形図

## 2.3 材料規格案策定に関する主な項目と試験内容

### 2.3.1 実施概要

材料規格案策定のために必要な項目と実施した基礎試験の内容を表 2.3.1-1 に示す。

表 2.3.1-1 材料規格案策定に関する主な項目と試験内容一覧

項目	内容	基礎試験による検討・確認事項
適用範囲	クリアランスレベル以下の検認を得た金属より製造される鋳鋼品に適用する	
化学成分	化学成分範囲の規定	①代表成分(鋼種)の検討 ②不純物の上限値 ・P、S等の微量元素 単独影響 複合影響 ・その他合金元素の影響
機械的性質	引張試験、-20℃シャルピー試験の規定	①破壊靱性値の把握 ・低合金鋼 ・炭素鋼
製造方法	溶解、鋳造、溶接補修等熱処理方法	①熱処理方法の影響 ②補修溶接条件の把握
検査	非破壊等検査項目を規定	①検査方法の検討

### 2.3.2 材料規格案策定のための基礎試験結果

原子力発電所の廃炉から発生するクリアランス金属を再利用して製造する開発中の内容器は、L1 処分容器の遮へい材として求められる、放射線遮へい能力及び耐久性という所定の品質（主に低温靱性）を有する必要がある。しかし、このようにクリアランス金属を原料として、必要な品質を満たす材料は JIS 等において規定がないことから、内容器の製造を目指すにあたって、予め規格・基準類に示しておくことが有効である。そのため、材料規格案を策定するために必要なデータを採取した。

以下、材料規格案を策定するため、実施した試験結果の概略を示す。

#### (1) 化学成分

##### 1) 代表化学成分（鋼種）の選定及び熱処理条件の影響

内容器は遮へい機能と低温靱性（-20℃における衝撃値）が必要である。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いため、内容器に使用可能な材料の検討す

るため、内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した。

## 2) 試験方法

表 2.3.2-1 に示す 2 鋼種（炭素鋼、低合金鋼）の試験体を作製し、内容器の熱処理を模擬した。

図 2.3.2-1 に示す熱処理を実施した。冷却速度は、日本鋳鍛鋼会のデータ集[1]に収録されている冷却速度速見表を参照した（板厚  $T=250$ ,  $T/4$ ）。

内容器は  $-20^{\circ}\text{C}$  の環境の輸送を考慮する必要があるため、熱処理後の試験体を使用して、材料試験（引張試験、シャルピー衝撃試験、ビッカース硬さ試験、マイクロ組織観察）を実施した。

表 2.3.2-1 供試材の主要化学成分の狙い値 (質量%)

	C	Si	Mn	Ni*	Cr*	Mo*	Al	P	S	Cu	Sn
炭素鋼	0.15	0.40	0.80	0.10	0.10	0.03	0.020	0.010	0.005	0.10	0.005
低合金鋼	0.12	0.40	0.90	2.00	0.30	0.15	—	0.010	0.005	0.10	0.005

\*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。

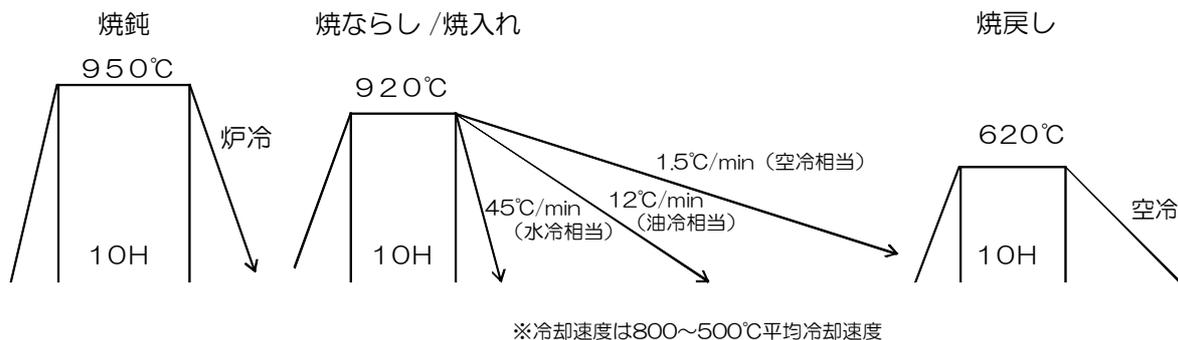


図 2.3.2-1 熱処理条件

## 3) 試験結果

冷却速度と  $-20^{\circ}\text{C}$  吸収エネルギーの関係を図 2.3.2-2 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。

## 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。ここで明らかになった知見を以下に示す。

炭素鋼：熱処理条件の選択により、 $-20^{\circ}\text{C}$  で高い吸収エネルギーを確保できる。

低合金鋼：熱処理条件によらず、 $-20^{\circ}\text{C}$  で高い吸収エネルギーを確保できる。

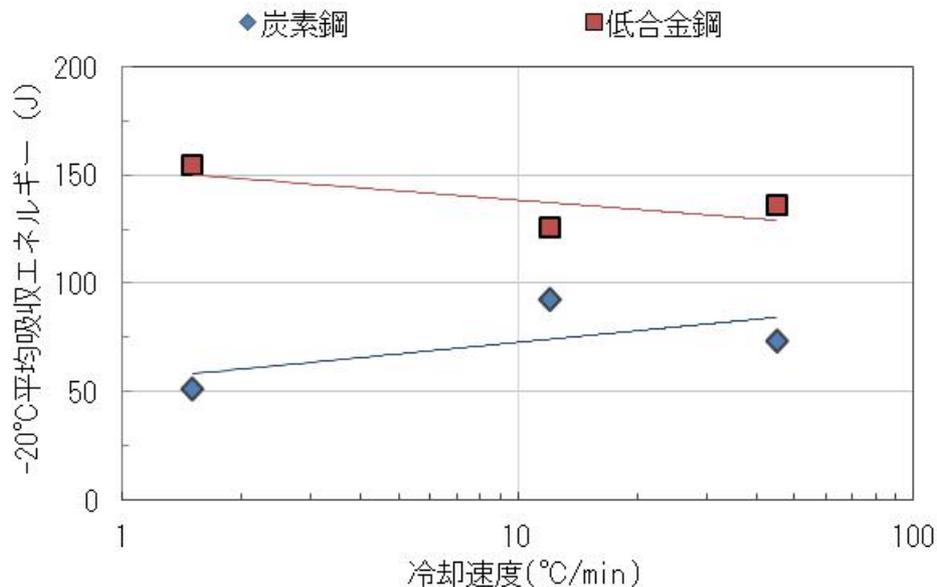


図 2.3.2-2 -20°C吸収エネルギーと熱処理条件（冷却速度）の関係

## (2) 不純物元素単独影響の検討

### 1) 許容される不純物含有量の検討

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あることが知られている[2]。また、銅 (Cu) や錫 (Sn) は代表的な循環性元素（トランプレメント）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。そこで、内容物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した。

### 2) 試験方法

(1) 項で検討した 2 種類の鋳鋼品を基準に、意図的に不純物元素を添加した試験体を作製し、それらに同様の熱処理、材料試験を実施した。

### 3) 試験結果

図 2.3.2-3、図 2.3.2-4 に炭素鋼及び低合金鋼の強度・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。それぞれの不純物元素が与える影響を表 2.3.2-2 にまとめた。

表 2.3.2-2 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、低温吸収エネルギーは低下
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	低温吸収エネルギーへの影響は顕著ではない
Sn	0.005~0.030	低温吸収エネルギーへの影響は顕著ではない

4) まとめ

P及び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、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。

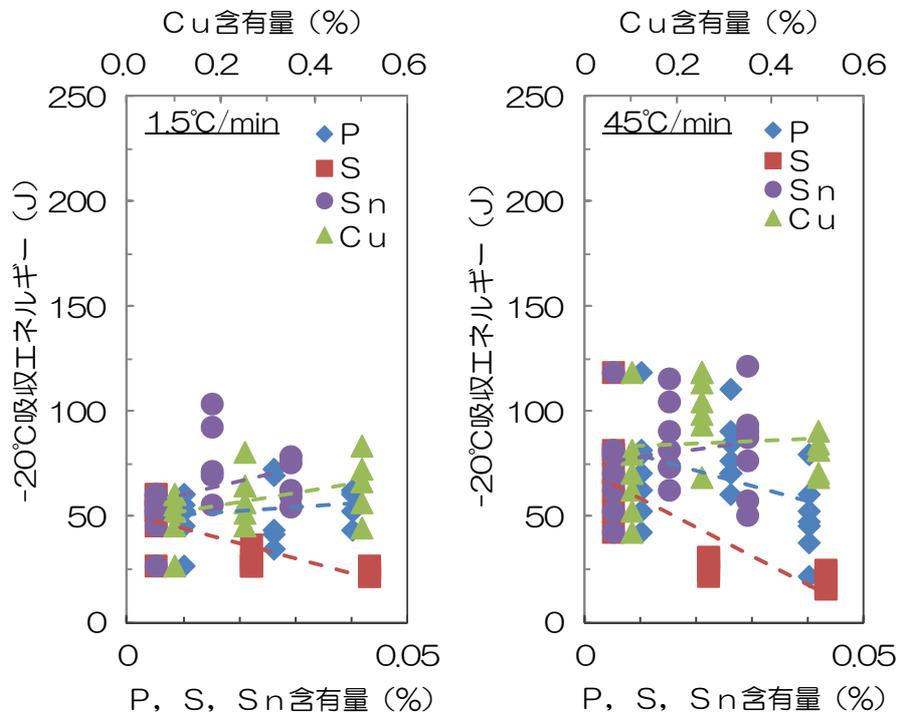


図 2.3.2-3 機械的特性と不純物元素 (P、S、Cu、Sn) 量の関係 (炭素鋼)

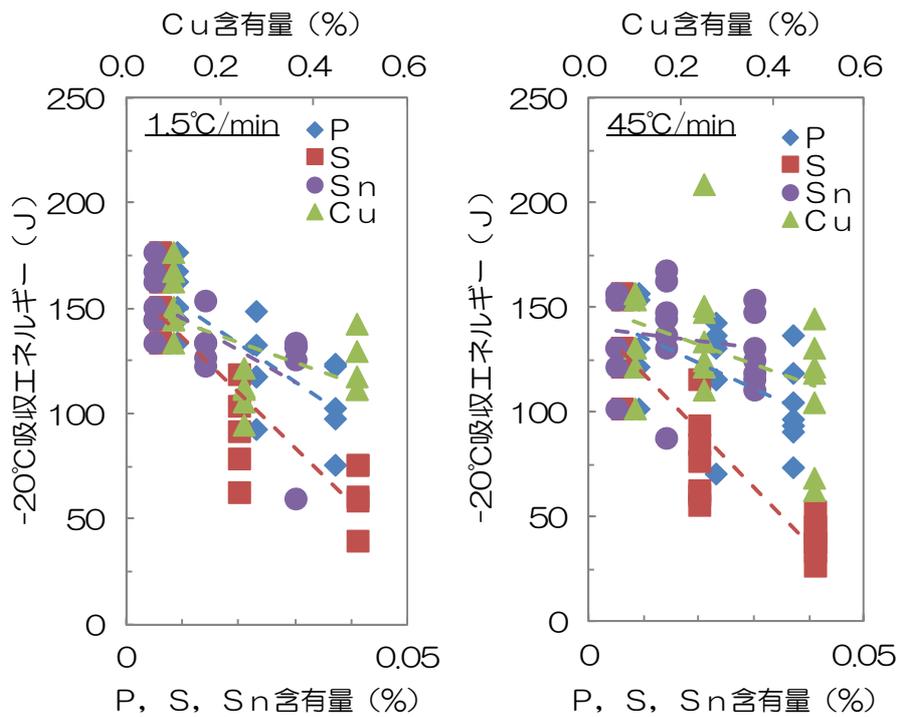


図 2.3.2-4 機械的特性と不純物元素 (P、S、Cu、Sn) 量の関係 (低合金鋼)

### (3) P と S の複合影響

#### 1) 概要

P、S の含有が低温衝撃値に大きな影響を及ぼすことが分かった。ここでは、P 及び S について、その 2 成分の組合せによる低温衝撃値への影響を定量的に把握した。

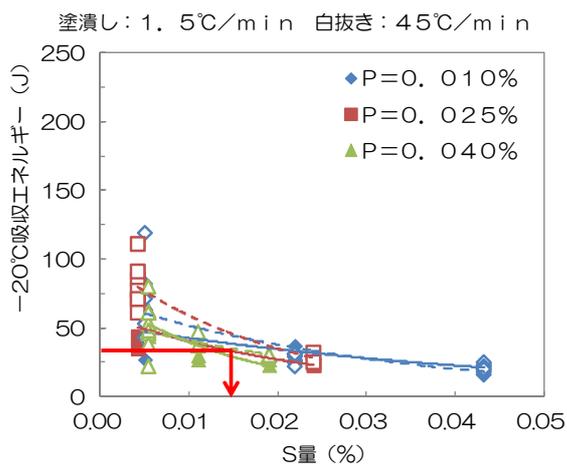
#### 2) 試験方法

(1) 項で検討した炭素鋼、低合金鋼を基準に、意図的に不純物元素を添加した試験体を作製し、熱処理を実施した後に材料試験を行った。

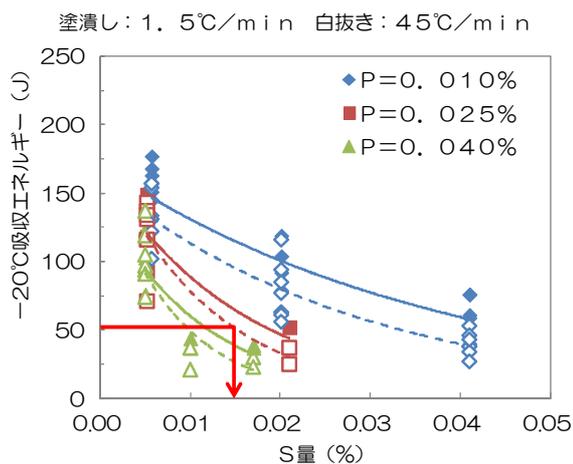
#### 3) 試験結果

図 2.3.2-5 に炭素鋼及び低合金鋼の不純物含有量と $-20^{\circ}\text{C}$ 吸収エネルギーの関係を示す。不純物元素が $-20^{\circ}\text{C}$ 吸収エネルギーに与える影響は鋼種によらず同じ傾向を示しており、S 及び P 含有量が多いほど吸収エネルギーは減少する。

#### (a) 炭素鋼



#### (b) 低合金鋼



(P=0.010% (◆、◇のプロット) は(2)項の基礎試験結果による)

図 2.3.2-5 不純物含有量と $-20^{\circ}\text{C}$ シャルピー吸収エネルギーの関係

#### 4) まとめ

P 及び S について、その 2 成分の組合せで、不純物含有量による鋼品の低温衝撃値への影響を定量的に把握した。ここで取得したデータと内容物の耐久性評価の結果を踏まえて、P 及び S 含有上限値を規定する。

### (4) Cr 添加の影響

#### 1) 概要

クリアランス金属は普通鋼だけでなく、クロム (Cr) 等の合金を多く含むステンレス等も一定量発生することが分かった。溶解に用いるスクラップの種類・配合に応じて、合金元素

も高濃度含有する可能性があり、合金元素が鋳鋼品の低温衝撃特性に影響を及ぼす可能性があると考えられた。そこで、ここではステンレスに多く含まれる Cr について、Cr 含有量による鋳鋼品の低温衝撃値への影響を定量的に把握した。

## 2) 試験方法

検討した炭素鋼及び低合金鋼 2 種類の鋳鋼品を基準に、意図的に Cr 量を添加した試験体を作製し、熱処理を実施した後に材料試験を行った。

## 3) 試験結果

図 2.3.2-6 に炭素鋼及び低合金鋼の Cr 含有量と $-20^{\circ}\text{C}$ 吸収エネルギーの関係を示す。炭素鋼では、Cr 含有量の増加に伴い、 $-20^{\circ}\text{C}$ 吸収エネルギーは増加する。低合金鋼では $-20^{\circ}\text{C}$ 吸収エネルギーは低下するが、試験範囲の上限である Cr 含有量 1.0wt%でも、後述する材料規格案に対して平均値及び個別値ともに余裕がある。低 C 化すると大きく $-20^{\circ}\text{C}$ 吸収エネルギーは増加する。これはフェライト量の増加の影響と考えられる。

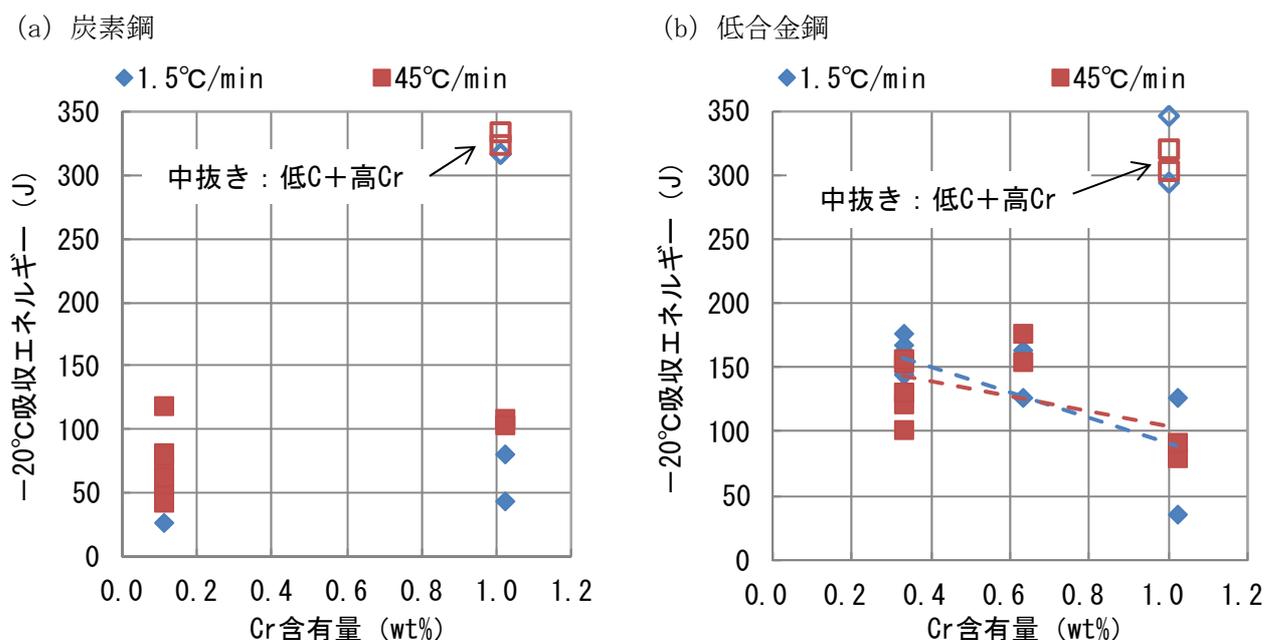


図 2.3.2-6 Cr 含有量と $-20^{\circ}\text{C}$ シャルピー吸収エネルギーの関係

## 4) まとめ

Cr 含有量による鋳鋼品の低温衝撃値への影響を定量的に把握した。ここで取得したデータと内容物の耐久性評価の結果を踏まえて、Cr 含有上限値を検討する。

### 2.3.3 機械的性質

#### (1) 破壊靱性値の取得

##### 1) 概要

内容器の耐久性評価に必要な基本物性データを取得するために、容器の主要部である、炭素鋼及び低合金鋼の鋳鋼品とその補修溶接部及び蓋溶接部を対象に機械的試験を実施した。

##### 2) 試験方法

表 2.3.3-1 に示す化学組成の鋳鋼試験片を用いて補修溶接部及び蓋溶接を模擬した溶接試験体を作製し、鋳鋼及びその溶接部について、-20℃におけるシャルピー衝撃試験、破壊靱性試験を実施した。

表 2.3.3-1 試験材の化学成分 (質量%)

鋼種	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Sn
炭素鋼	0.18	0.40	0.78	0.006	0.002	0.05	0.10	0.24	0.07	-
低合金鋼	0.12	0.38	0.89	0.005	0.001	0.08	2.02	0.29	0.15	0.005

#### 3) 試験結果

##### a. シャルピー衝撃試験結果

各ノッチ位置について、吸収エネルギーの平均値を図 2.3.3-1 に示す。

- ・炭素鋼：試験温度によらず、母材の吸収エネルギーが最も低い。
- ・低合金鋼：蓋溶接、補修溶接とも溶接金属 (WM)、BOND、HAZ の順に高くなる。

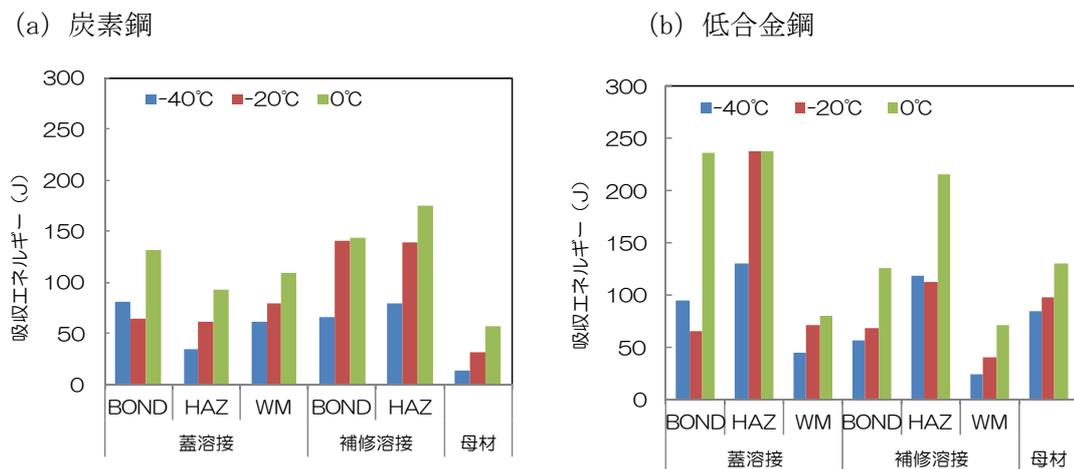


図 2.3.3-1 蓋溶接及び補修溶接部の吸収エネルギーの平均値の比較

## b. 動的破壊靱性試験結果

結果を図 2.3.3-2 に示す。

各部の破壊靱性値の結果の傾向は、以下の通りであった。

炭素鋼：蓋溶接の未溶着部 < 母材 < 蓋溶接金属 < 蓋溶接の HAZ < 補修溶接の HAZ

低合金鋼：蓋溶接金属 < 蓋溶接の未溶着部 < 補修溶接金属 < 蓋溶接の HAZ < 母材 < 補修溶接の HAZ

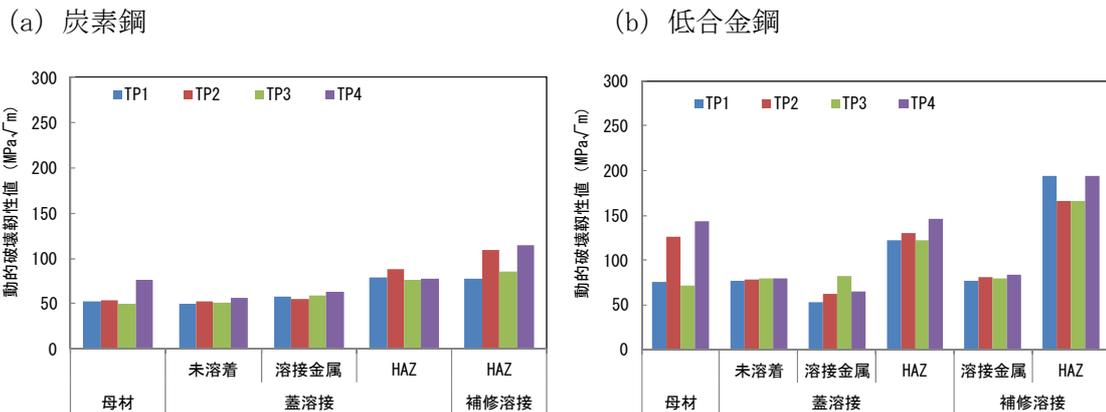


図 2.3.3-2 動的破壊靱性試験結果 (B=70mm に統一)

## 4) まとめ

低合金鋼、炭素鋼を対象に、耐久性評価に必要な材料物性値データを取得した。以下に結果の概要を示す。

- ① 低合金鋼の-20℃吸収エネルギーは蓋溶接、補修溶接とも溶接金属(WM)、BOND、HAZ の順に高くなる。
- ② 炭素鋼の-20℃吸収エネルギーは母材が蓋溶接部及び補修溶接部と比べて最も低い。
- ③ 低合金鋼の母材、蓋溶接の溶接金属、未溶着部、HAZ 部、補修溶接の溶接金属及び HAZ 部を対象に破壊靱性試験を実施した結果、蓋溶接の溶接金属が最も低い値を呈し、動的破壊靱性試験では最小値53MPa√mであった。また、母材の動的破壊靱性値の最小値は72 MPa√mであった。
- ④ 炭素鋼の母材、蓋溶接の未溶着部、溶接金属、HAZ部及び補修溶接のHAZ部を対象に破壊靱性試験を実施した結果、蓋溶接の未溶着部が最も低い値を呈し、動的破壊靱性試験では最小値50MPa√mであった。また、母材の動的破壊靱性値の最小値は51MPa√mであった。

## 2.3.4 内容物の耐久性の検証

### (1) 耐久性の基礎検証

#### 1) 概要

内容物は安全性確保の観点から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。そこで、汎用の解析コードを用いて内容物の使用環境における落下衝撃に対する挙動を把握した。

#### 2) 試験方法

内容物の使用環境における落下事象を把握するために、容器の厚み、落下姿勢、床の種類を変えて、汎用の解析ソフト LS-DYNA を用いて動的解析した。今回の解析では、内容物はいずれも蓋と容器を一体化したモデルとして実施した。

#### 3) 試験結果

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。図 2.3.4-1 に K 値を比較した結果を示す。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分かった。

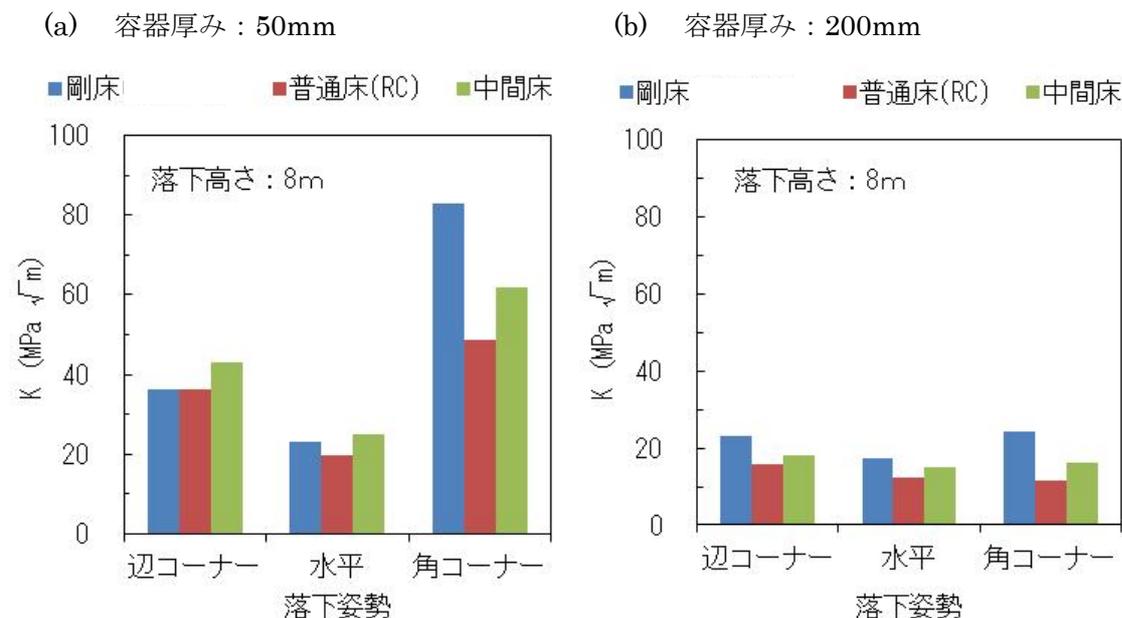


図 2.3.4-1 落下衝撃におよぼす落下姿勢及び標的（床）の影響

(a)50mm、(b)200mm

#### 4) まとめ

検証の結果、以下のことが分かった。

- ① 容器厚みが大きいほど応力拡大係数 K は減少する。
- ② 落下条件のうち、最も厳しい条件は剛床と角コーナーの組み合わせである。

## (2) 内容物の耐久性の検証

### 1) 概要

最も厳しい落下条件に対して実際の炭素鋼、低合金鋼・低合金鋼・低合金鋼の内容物を模擬した蓋溶接部を含めた破壊力学的評価を行い、耐久性（靱性）を評価した。

### 2) 試験方法

#### a. 落下解析

把握した落下事象から、最も厳しいと考えられる落下条件を検討した。表 2.3.4-1 に示す落下条件に対して、汎用の解析ソフト LS-DYNA（version:smps R7.1.2）を用いて応力解析を実施した。

表 2.3.4-1 解析ケース

ケース	容器	鋼種	蓋溶接 深さ	落下姿勢	落下標的	落下 高さ
A	50mm 容器	・低合金鋼	35mm	角コーナー	剛床	8m
B	200mm 容器	・低合金鋼 ・炭素鋼				
C	50mm 容器 角 R 変更	・低合金鋼 ・炭素鋼				

### 3) K 値解析と脆性破壊強度評価

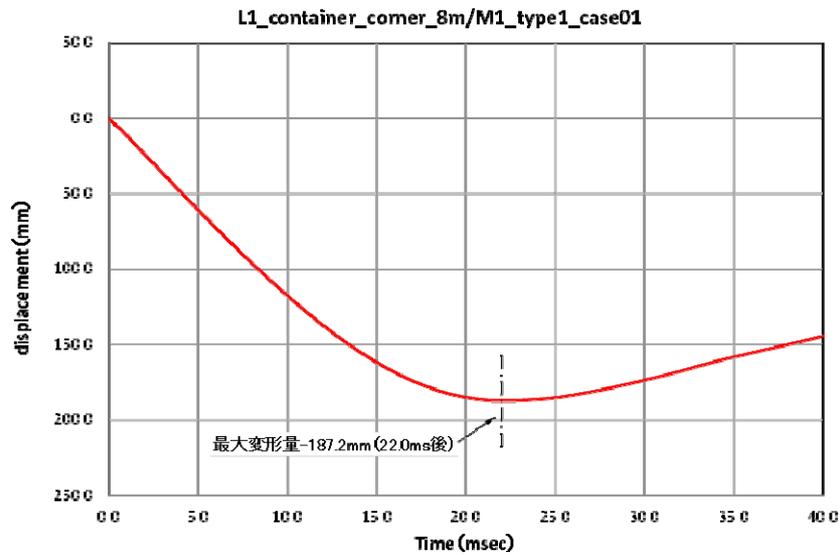
内容物の蓋を溶接で固定する場合、未溶着部が生じる。そこから脆性破壊が生じないか検討するため、落下解析の結果から未溶着部の応力拡大係数  $K$ （以降、 $K$  値と呼ぶ）を構造解析ソフト ABAQUS（ver. 6.14-3）による 3 次元数値解析により求めた。また、表面欠陥や内部欠陥を対象に、破壊力学を適用して作用応力と脆性破壊に対する限界欠陥寸法の関係を求めた。蓋溶接部の未溶着部からの脆性破壊強度は、上述の  $K$  値と求めた破壊靱性値を用いて評価した。

### 4) 試験結果

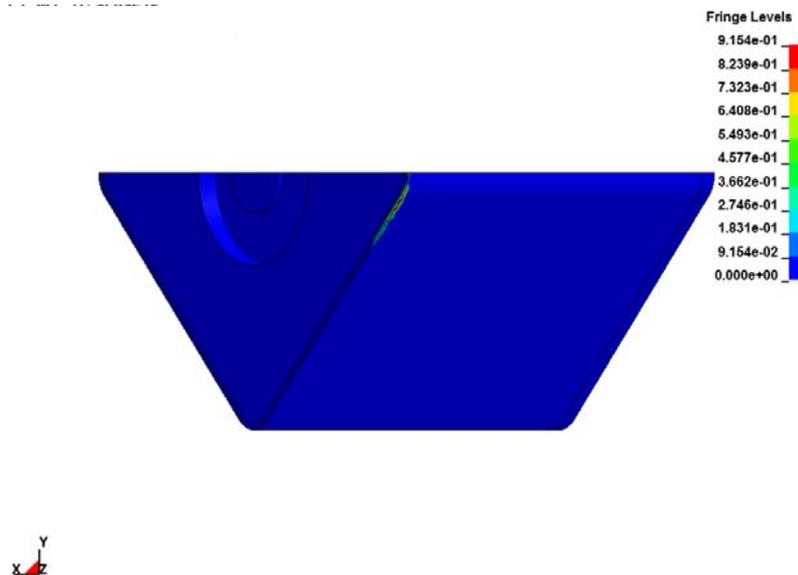
#### a. 落下解析結果

図 2.3.4-2 に蓋溶接未溶着先端の変位時刻歴と解析終了時刻に容器に発生した相当塑性ひずみの一例として、ケース A（低合金鋼）の結果を示す。最大塑性ひずみは内容物の角近傍に発生している。落下解析結果の概要を下記に示す。

- ・低合金鋼：最大塑性ひずみはケース A、ケース C、ケース B の順に大きい結果となった。
- ・炭素鋼：最大塑性ひずみはケース C、ケース B の順に大きい結果となった。



(蓋溶接未溶着先端の変位時刻暦)



(解析終了時刻に容器に発生した相当塑性ひずみコンター図)

図 2.3.4-2 ケース A (低合金鋼) 解析結果

b. K 値解析結果と脆性破壊強度評価

< 蓋溶接未溶着部の脆性破壊評価 >

表 2.3.4-2、表 2.3.4-3 に結果を示す。また、結果の概要を下記に示す。

- ・炭素鋼 : ケース B 及びケース C とともに  $K_r < 1$  となり、脆性破壊は生じない。
- ・低合金鋼 : ケース A の場合、溶接未溶着部、溶接金属において  $K_r > 1$  となり脆性破壊が発生する。ケース B、ケース C はともに  $K_r < 1$  となり、脆性破壊は生じない。

表 2.3.4-2 各ケースの脆性破壊評価（炭素鋼）

	ケース B (200mm 厚容器)		ケース C (50mm 厚容器 (角 R 変更))	
	未溶着	溶接金属	未溶着	溶接金属
$K_{\sigma \max}$ (MPa $\sqrt{m}$ )	18.3		24.6	
$\min. K_{I_d}$ (MPa $\sqrt{m}$ )	50	55	50	55
$K_r$ = $K_{\sigma \max} / \min. K_{I_d}$	0.37	0.33	0.49	0.45

表 2.3.4-3 各ケースの脆性破壊評価（低合金鋼）

	ケース A (50mm 厚容器)		ケース B (200mm 厚容器)		ケース C (50mm 厚容器 (角 R 変更))	
	未溶着	溶接金属	未溶着	溶接金属	未溶着	溶接金属
$K_{\sigma \max}$ (MPa $\sqrt{m}$ )	80.7		19.5		23.3	
$\min. K_{I_d}$ (MPa $\sqrt{m}$ )	76	53	76	53	76	53
$K_r$ = $K_{\sigma \max} / \min. K_{I_d}$	1.06	1.27	0.26	0.37	0.31	0.44

※線形破壊力学では、 $K_r$  ( $=K_{\sigma \max} / \min. K_{I_d}$ ) < 1 であれば脆性破壊は生じない。

< 鋳鋼品の許容欠陥寸法の検討 >

鋳造欠陥を直径  $2a$  の penny shaped crack として、作用応力  $\sigma$  と脆性破壊に対する限界寸法  $2a_{cr}$  の関係を計算した。図 2.3.4-3 に計算結果を示す。母材の降伏応力  $\sigma_{0.2}$  は、Bennett ら[3]の式から、ひずみ速度 100/sec での値を計算し、炭素鋼は 593MPa、低合金鋼は 722 MPa とした。また、各鋼種の限界欠陥寸法はそれぞれ、 $2a_{cr} = 11.4\text{mm}$ （炭素鋼）、 $15.6\text{mm}$ （低合金鋼）となる。これは、非破壊検査で検出できる欠陥寸法より十分に大きく（脆性試験用試験体の最大鋳造欠陥サイズ： $\Phi 2.6\text{mm}$ ）、鋳造欠陥から脆性破壊が生じる危険性は低いと思われる。

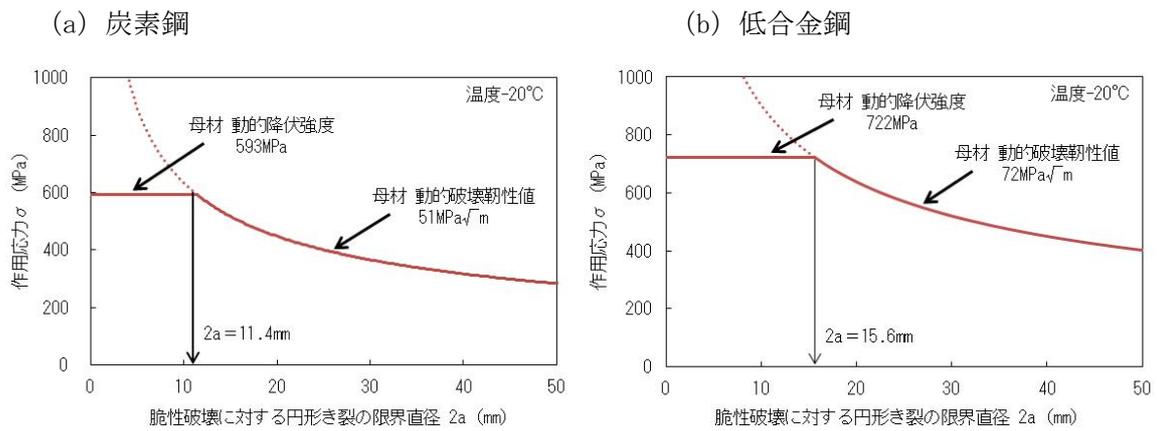


図 2.3.4-3 母材の鑄造欠陥から脆性破壊強度評価

### 5) まとめ

炭素鋼、低合金鋼の内容器の溶接部において脆性破壊が生じるかについて、破壊力学を適用して評価した。以下に結果概要を示す。

- ① 50mm 厚容器は、低合金鋼でも蓋溶接部から脆性破壊は生ずる結果であった。しかし、角コーナーの内 R 形状を大きくすれば、発生応力は低減し、炭素鋼及び低合金鋼どちらでも蓋溶接部からの脆性破壊は発生しない。
- ② 200mm 厚容器は、低合金鋼でも、炭素鋼でも蓋溶接部から脆性破壊は生じない。
- ③ 脆性破壊に対する母材の許容欠陥寸法は、炭素鋼で 11.4mm、低合金鋼で 15.6mm と推定され、非破壊検査で検出できる欠陥寸法より十分に大きく、鑄造欠陥から脆性が生じる危険性は低いと思われる

## 2.3.5 製造方法

### (1) 熱処理方法の影響

#### 1) 概要

実験室規模の試験に比べ、実際の容器は形状が複雑で、厚み深さ方向に対して熱履歴が異なる。そのため、評価された結果が妥当であるかどうかの検証が必要と考えられたため、内容器の形状を模擬した大型の試験体（モックアップ）を試作し、熱処理条件の妥当性を評価した。

#### 2) 試験方法

板厚 200mm の内容器形状の試験体（モックアップ）を製作した。表 2.3.5-1 に化学成分の目標値、図 2.3.5-1 に熱処理条件を示す。このとき、熱処理で水冷したときの冷却速度を調査するために、モックアップに熱電対を取り付け冷却中の温度変化を計測した。熱処理後は、測温を実施した位置から試験片を採取し、材料試験を実施した。

表 2.3.5-1 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

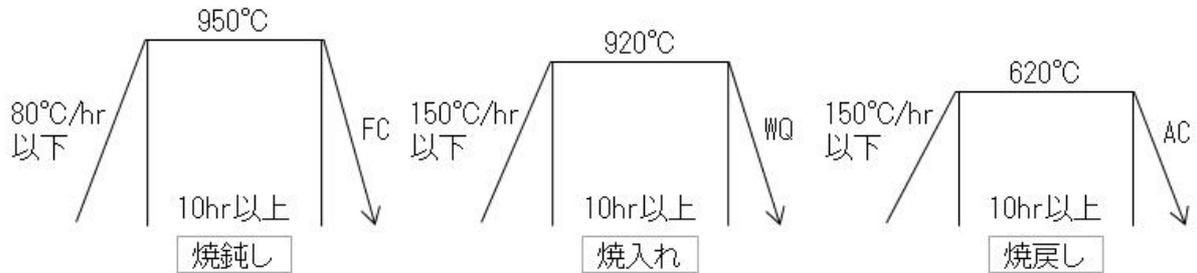
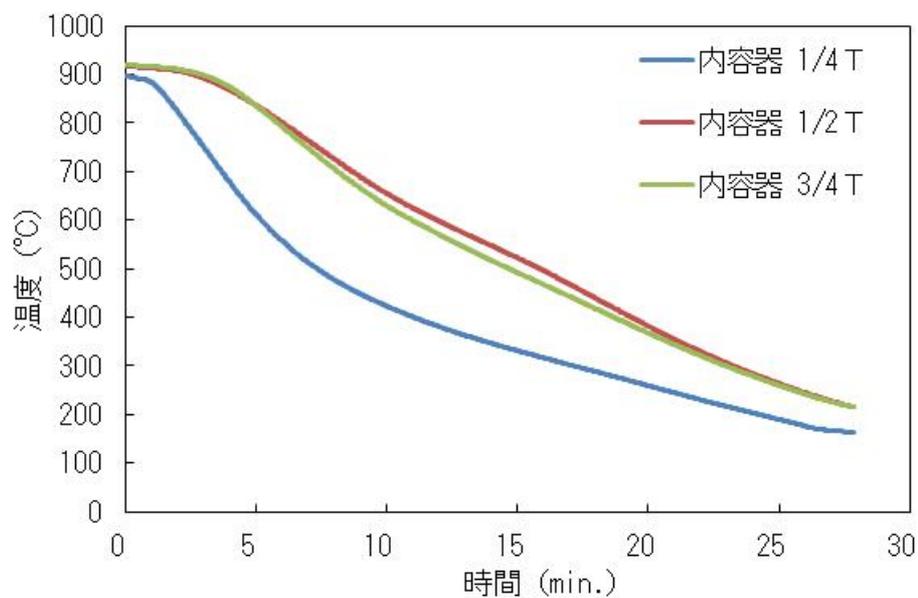


図 2.3.5-1 モックアップの熱処理条件（焼入れ焼戻し）

### 3) 試験結果

内容器は 1/4T、1/2T、3/4T 深さに、付着試験片は 1/2t 深さに熱電対を取付け、焼入れ（水冷）時の温度変化を計測した。測温結果を図 2.3.5-2 に示す。内容器代表位置の焼入れ冷却速度は 30°C/min 前後であり、検討した範囲（1.5~45°C/min）内であることが分かる。



測定位置		平均冷却速度 (°C/min.)
内容器	1/4T	34
	1/2T	29
	3/4T	29

図 2.3.5-2 焼入れ（水冷）時の各位置の温度変化

#### 4) 熱処理条件の妥当性評価

図 2.3.5-3 に冷却速度と引張強度及び $-20^{\circ}\text{C}$ 吸収エネルギーの関係を示す。

引張強度は、実験室規模試験と内容器（側面）の結果はよい一致を示した。内容器（底面）の強度が高い理由は最終凝固部付近であり、C が偏析しているためであると考えられる。

$-20^{\circ}\text{C}$ 吸収エネルギーについて、個々の値にばらつきがあるが概ね実験室規模試験で確認された値が得られている。

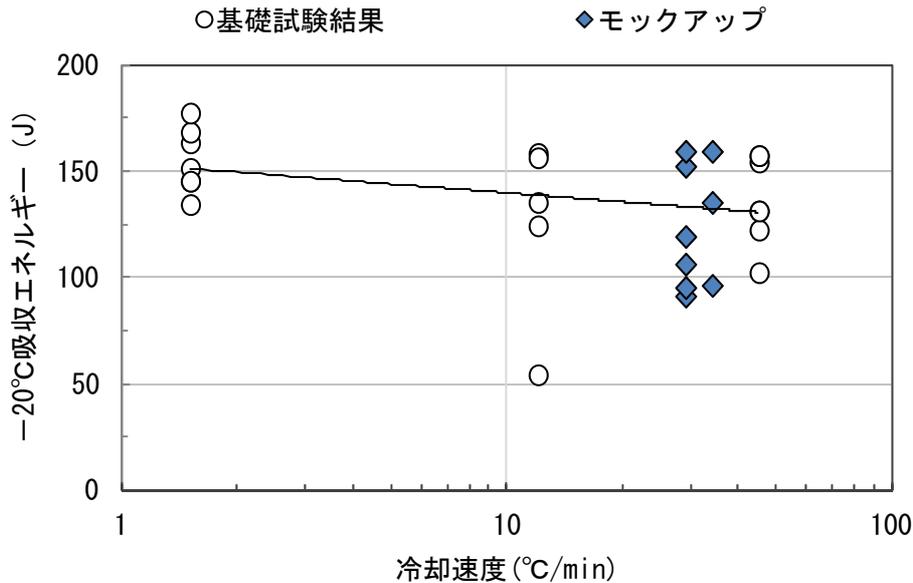


図 2.3.5-3 ラボ試験とモックアップ試験結果の比較  
(焼入れ冷却速度と引張強度、-20°C吸収エネルギーの関係)

#### 5) まとめ

熱処理方法について検討した結果を以下に示す。

- ① 内容物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。
- ② モックアップ試験結果について、冷却速度と低温吸収エネルギーの関係は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た。熱処理シミュレーション試験による評価は妥当と考えられた。

### (2) 補修溶接条件の把握

#### 1) 目的

鋳鋼品は、鋳造欠陥が不可避免的に発生し、特に問題となる欠陥は溶接補修を施す。しかし、溶接条件によっては低温割れを起こす場合があり、溶接前に鋳鋼品を予熱する必要がある。そこで、炭素鋼及び低合金鋼溶接割れ感受性を評価した。

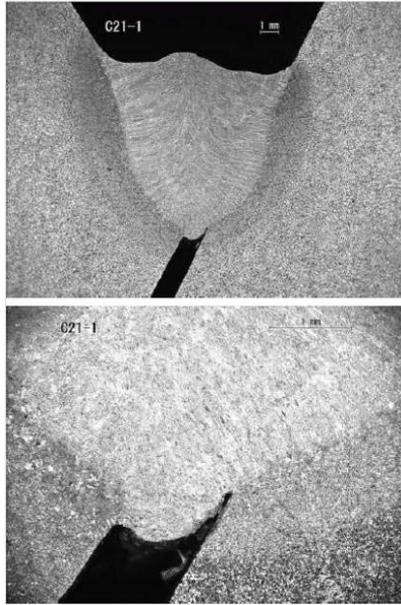
#### 2) 試験方法

炭素鋼及び低合金鋼に対し、熱処理を施した試験体を製作し、y形溶接割れ試験（JIS Z 3158）を実施した。試験温度は0°C、室温、50°C、100°Cとした。

#### 3) 試験結果

試験片のビード部の任意5断面のマクロ観察を行い、断面割れの有無を観察した。一例として、図 2.3.5-4 に断面マクロ観察結果を示すが、割れは認められない。全ての試験条件で同様の観察を行った結果、いずれの条件とも溶接割れは観察されなかった。

(a) 炭素鋼 (試験温度: 0°C)



(b) 低合金鋼 (試験温度: 0°C)

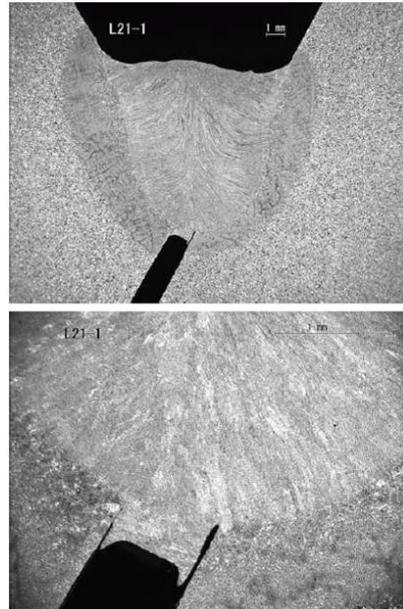


図 2.3.5-4 断面マクロ観察結果

#### 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かった。検討鋼種は良好な溶接性を有しており、予熱なし (0°C) でも割れは生じないと評価された。

## 2.4 材料規格案の策定

### 2.4.1 実施概要

材料規格案の策定にあたり、内容器を収容する外容器、余裕深度処分対象廃棄物の処分容器材料に関して設定されている標準に関して調査した。

余裕深度処分対象廃棄物の処分容器の材料では、学会標準[4]において、JIS G 3106 : 2015 溶接構造用圧延鋼材、種類：SM490 相当と規定されている。そこで、JIS G 3106 : 2015 溶接構造用圧延鋼材にて規定されている内容に準じて項目等を検討するものとした。

### 2.4.2 材料規格の項目案

内容器の材料規格案について、以下の項目を抽出した。

材料規格名：低レベル放射性廃棄物遮へい体及び収納容器の溶接構造用鋳鋼品

1. 適用範囲
2. 化学成分及び炭素当量
3. 機械的性質
4. 製造方法
5. 非破壊検査
6. 試験及び検査

### 2.4.3 材料規格案の各項目の詳細

#### (1) 適用範囲

この材料規格が適用される範囲については、遮へい体に限定せず、多様な用途への適用が可能となるよう以下のような規格案とする。

#### 1. 適用範囲案

この規格は、溶接性と落下時の耐衝撃性に優れた鋳鋼品について規定するものであり、低レベル放射性廃棄物遮へい体及び収納容器に用いられる。

#### (2) 化学成分及び炭素当量

スクラップ金属として活用しやすいよう、機械的性質が低い炭素鋼に対しても合金元素の含有を許容することで、種別に拘わらず成分範囲は共通とした。また鋳鋼品は補修溶接することが前提であり、炭素当量についての規程が必要と考えられるため、以下のような規格案とする。

## 2. 化学成分及び炭素当量案

鋳鋼品の化学成分及び炭素当量は、次による。

(1) 鋳鋼品は 6.1 の試験を行い、溶鋼分析値及び炭素当量は表 2.4.3-1 による。

(2) 炭素当量の計算は 6.1 の溶鋼分析値を用い、次の式による。

計算は、各成分とも 0.01% 単位の分析値を用い、0.001% の単位まで算出し、和において、0.001 の桁を JIS Z 8401 によって丸めた数値とする。

$$\text{炭素当量(\%)} = \text{C} + \frac{\text{Mn}}{6} + \frac{\text{Si}}{24} + \frac{\text{Ni}}{40} + \frac{\text{Cr}}{5} + \frac{\text{Mo}}{4} + \frac{\text{V}}{14}$$

(3) 脱酸あるいは組織の細粒化を目的に Al 等の元素を添加することができる。

(4) 不純物は故意に添加してはならない。ただし、ここで規定していない不純物元素は受渡当事者間の協定によって含有することができる。

表 2.4.3-1 化学成分及び炭素当量 (質量%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Sn	Ceq.
0.22 以下	0.80 以下	1.50 以下	0.025 以下	0.015 以下	0.50 以下	2.50 以下	1.00 以下	0.30 以下	0.20 以下	0.03 以下	0.50 以下

- ・ C、Si、Mn、Ni、Mo、V : 基礎試験にて低合金鋼のベース相当である SCW550 (JIS G 5102) に準じて決定した。
- ・ P、S : 精錬時の一般的な脱 P 能力を考慮して P の上限を定めた上で、後述する機械的性質案における -20℃ の吸収エネルギーの最大値である 27J (3 種) に対する余裕を考慮して S の上限を決定した。
- ・ Cu、Sn : 平成 27 年度の基礎試験結果から -20℃ の吸収エネルギーに与える影響は小さいことがわかった。そのため、基礎試験において評価した最大量を上限とした。
- ・ Cr : 基礎試験の評価範囲では、後述する機械的性質案における -20℃ の吸収エネルギーで最大値である 27J (3 種) に対して余裕があるため、最大量を上限とした。
- ・ Ceq : 鋳鋼品においては、溶接にて鋳造欠陥を補修する。また、内容器においては蓋溶接等の溶接が施されることが考えられる。そのため、平成 27 年度の溶接試験にて割れが発生しなかったことから、当該試験の供試材 Ceq を参考に規定した。

### (3) 機械的性質

機械的性質については、その降伏点または耐力、引張強さ、伸び、絞り、シャルピー吸収エネルギーについての規程が考えられる。低温靱性については、落下時の衝撃によって、容器に破壊が生じないことが必要であり、本来は破壊靱性値を規程に定める必要がある。しかし、破壊靱性試験は煩雑であり、実施に時間を要するため製品の生産には向いていない。そこで、試験の利便性を考慮し、-20℃ におけるシャルピー吸収エネルギーを規定した。以下のような規格案とする。

### 3. 機械的性質案

鋳鋼品は、6.2 の試験を行い、その降伏点または耐力、引張強さ、伸び及びシャルピー吸収エネルギーは表 2.4.3-2 による。

- 1 シャルピー吸収エネルギーは、以下のすべての条件を満足する場合、合格とする。
  - ① 3 個の平均値が表 2.4.3-2 (1) を満足する
  - ② 個別の値が表 2.4.3-2 (2) を満足する
  - ③ 個別の値のうち 2 個が表 2.4.3-2 (1) を満足する

表 2.4.3-2 機械的性質

種別	降伏点 または耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	シャルピー吸収エネルギー		
				温度 (°C)	(1)3 個の平均値 (J)	(2)個別の値 (J)
1 種	235 以上	410 以上	21 以上	-20	18 以上	13 以上
2 種	275 以上	440 以上	20 以上	-20	23 以上	16 以上
3 種	355 以上	500 以上	18 以上	-20	27 以上	19 以上

以下に各機械的性質の限定理由について示す。

- ・降伏点または耐力、伸び : 1 種は SCW410、2 種は SCW480、そして 3 種は SCW550 に準ずることとした。
- ・引張強さ : 図 2.4.3-1 に基礎試験における降伏点または耐力と引張強さの関係を示す。各鋼種について、降伏点または耐力の規格に対する引張強さの実績を元に設定した。
- ・シャルピー吸収エネルギー : 屋内で生じうる温度 -20°C を基準に、表 2.4.3-3 に示す 0°C での耐衝撃性の規格のある鋼材を参考に決定した。

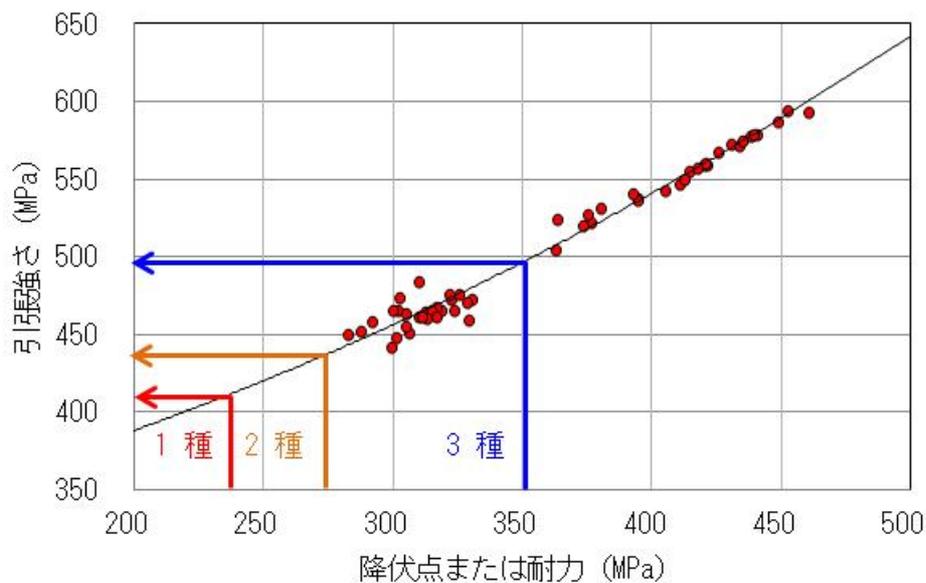


図 2.4.3-1 降伏点または耐力と引張強さの関係

シャルピー吸収エネルギーについて、生じる温度-20℃を基準に、表 2.4.3-3 に示す 0℃での耐衝撃性の規格のある鋼材を参考に決定した。

表 2.4.3-3 靱性 (0℃以下) に規格がある鋼の要求特性

鋼種	降伏点 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	シャルピー衝撃試験		備考
				試験温度 (℃)	吸収エネルギー (J)	
SM400B*1	195 以上*4	400~510	22 以上*4	0	27 以上	溶接構造用圧延鋼材
SCW410*1	235 以上	410 以上	21 以上	0	27 以上	溶接構造用鋳鋼材
SCPL1*1	245 以上	450 以上	21 以上	-45	18 以上	低温高压用鋳鋼品
SM490B*1	275 以上*4	490~610	21 以上*4	0	27 以上	溶接構造用圧延鋼材
SCW550*1	355 以上	550 以上	18 以上	0	27 以上	溶接構造用鋳鋼材
KL5N43*2	420 以上	540~690	19 以上	-110	41 以上	低温圧延鋼材
Code Case 2698*3	670 以上	800 以上	15 以上	-73	65 以上	圧力部材用低温合金 鋼鋳鋼品

\*1 JIS 規格より引用

\*2 NK 規則 (K 編) より引用

\*3 ASME より引用

\*4 板厚  $160 < t \leq 250\text{mm}$  の場合

規格案の各種別において、降伏点または耐力及びシャルピー吸収エネルギーが規格下限となった場合に耐久性 (靱性) が最も低くなる。そこで、脆性破壊に対する各種別の許容欠陥寸法を確認した。各種別の限界欠陥寸法を表 2.4.3-4 にまとめて示す。このとき、シャルピー吸収エネルギーと破壊靱性値の関係については、これまでの基礎試験結果から(1)式で示す推定式を作成した。このとき低合金鋼と炭素鋼で動的破壊靱性試験の落下高さが異なることを考慮し、Rolfe ら [5] が報告している実験式を参考に係数を最適化した。

全ての種別において、限界欠陥寸法は  $2a_{cr} = 15\text{mm}$  以上であるため、非破壊検査で検出できる欠陥寸法より十分に大きく、適切に検査・管理すれば鋳造欠陥から脆性破壊が生じる危険性は低いと考えられる。

$$\left(\frac{K_{I,d}}{\sigma_y}\right)^2 = 0.0169 \left(\frac{vE}{\sigma_y}\right) + 0.0091 \quad (1)$$

表 2.4.3-4 材料規格案の各種別の限界欠陥サイズ

種別	降伏点 または耐力 (MPa)	吸収 エネルギー (J)	推定 破壊靱性値 (MPa√m)	限界欠陥 サイズ $2a_{cr}$ (mm)
1 種	235 以上	13 以上	24	15.8
2 種	275 以上	16 以上	28	15.8
3 種	355 以上	19 以上	36	15.7

#### (4) 製造方法

溶解、鑄造等の製造方法に関わる一般事項は日本工業規格での鑄鋼品に関する規程（JIS G 0307）に準ずる。また鑄造欠陥等の発生により、溶接補修を実施する必要性が生じる可能性があるため、以下のような規格案とする。

#### 4. 製造方法案

##### 4.1 一般事項

製造方法の一般事項は、JIS G 0307 の 5.（製造方法）による。

##### 4.2 熱処理

鑄鋼品は、焼なまし、焼ならし、焼ならし焼戻し、焼入れ焼戻しのいずれかの熱処理を行う。

##### 4.3 溶接補修

- 1 溶接補修する場合には、溶接要領を受渡当事者間で協定しなければならない。
- 2 溶接補修部は、受渡当事者間で定めた非破壊検査を行わなければならない。ただし、合否判定基準は、受渡当事者間の協定による。

#### (5) 非破壊検査

材料中に粗大な鑄造欠陥が存在した場合、鑄鋼品の耐久性（靱性）を低下させてしまう。そのため、以下のような規格案とする。

#### 5. 非破壊検査案

6.3 の非破壊検査を行わなければならない。

検査内容及び合否判定基準は、受渡当事者間の協定による。

## (6) 試験及び検査

試験及び検査について、以下のような規格案とする。

### 6. 試験及び検査案

#### 6.1 分析試験

##### -1 一般事項

分析試験の一般事項は、JIS G 0307 の 6.2.2.5（化学成分）による

##### -2 分析方法

分析方法は、次のいずれかによる

JIS G 1211 (C)、JIS G 1212 (Si)、JIS G 1213 (Mn)、JIS G 1214 (P)、  
JIS G 1215 (S)、JIS G 1216 (Ni)、JIS G 1217 (Cr)、JIS G 1218 (Mo)、  
JIS G 1219 (Cu)、JIS G 1221 (V)、JIS G 1226 (Sn)、  
JIS G 1253（スパーク放電発光分光分析）、JIS G 1256（蛍光 X 線分析方法）、  
JIS G 1257（原子吸光分析方法）、JIS G 1258（ICP 発光分光分析方法）

#### 6.2 機械的試験

機械試験は、JIS G 0307 の 6.2.2.3（機械試験）による。ただし、供試材は JIS G 0307 の 6.2.2.2（供試材）により、付帯若しくは一体化して鑄込む。供試材の形状や寸法、位置は受渡当事者間で取り決める。

#### 6.3 鋳鋼品の検査、外観及び寸法に関する要求事項

JIS G 0307 の 6.2.3（鋳鋼品の外観、非破壊試験及び寸法に関する要求事項）による。

## (7) まとめ

検討した材料規格案における、その項目案について、これまでの基礎試験結果及び実証試験結果等をもとに具体的な数値範囲を検討した。

## 2.5 再利用プロセスの開発

### 2.5.1 実施概要

クリアランス金属廃棄物の内容容器への再利用のためのプロセスの検討を行う。

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、内容容器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整理した。

### 2.5.2 発生するクリアランス金属廃棄物

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の調査結果を、表 2.5.2-1 に示す。

表 2.5.2-1 クリアランス材質別物量

区分		材質	重量 (ton)	
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>	283,689	
	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>	17,490
		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 等添加物を含むもの	20,057
	鍛鋼、 鋳鋼、 鋳鉄	鋳鉄	<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>	37,446
		鍛鋼	<ul style="list-style-type: none"> <li>・SF 材 (炭素鋼鍛鋼)</li> </ul>	65,732
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、チタン等の鉄以外の金属)	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) 等の金属でないもの、材料が不明なもの	91,682	
合計			559,000	

### 2.5.3 クリアランス金属廃棄物の回収・分別・保管方法

前項に示したクリアランス金属廃棄物を適切に回収・分別・保管する方法を整理した。材料規格案の化学成分は表 2.4.3-1 に示したとおりである。

クリアランス金属廃棄物のうち、内容物として使用できない非金属及び非鉄は分別し回収する。なお、非鉄の内、アルミニウム (Al)、鉛 (Pb) 及びチタン (Ti) は、内容物材料の性状への影響が小さいことから少量の混入は問題ない。しかし、銅 (Cu) は、多量に含有すると内容物材料の性状への影響があり、トランプエレメントとして後の精錬でも除去することが難しいことから、表 2.4.3-1 に示した化学成分の範囲内となるように分別が必要となる。

普通鋼及び鍛鋼、鋳鉄はそのまますべて使用することが可能であると考えられる。特殊鋼において、SUS 材及び SCS 材においては、Ni、Cr 及び Mo を含み、精錬での調整も難しいことから、分別することが望ましい。一部、Ni 源として炭素鋼と配合して使用することも考えられるが、Cr や炭素当量の考慮が必要である。

以上より、クリアランス金属廃棄物は、表 2.5.3-1 の通り回収・分別・保管することが望ましいと考えられた。

表 2.5.3-1 回収・分別・保管区分

区分		材質
内容器として使用	普通鋼 鋳鍛鋼 鋳鉄	<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> <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> <li>・ SF 材（炭素鋼鍛鋼）</li> </ul>
	特殊鋼	<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 等添加物を含むもの
その他	特殊鋼	<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>
	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、チタン等の鉄以外の金属）
	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）等の金属でないもの、材料が不明なもの

#### 2.5.4 内容器製造工場における原料配合方法、精錬方法

内容器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）方法を整理した。

クリアランス金属廃棄物等の原料配合方法には、以下の考慮が必要と考えられる。

- ・ 低合金鋼をベースとする場合、Ni 源として特殊鋼を用いることが可能である。ただし、STPA 材及び SCMV 材を用いる場合は、Cr 量との関係により普通鋼等との配合を考慮する。
- ・ 必要な化学成分により、純鉄等を添加して成分調整することは可能であるが、その場合クリアランス金属廃棄物の使用量が低下する。
- ・ 製鋼プロセスとして、電気炉での溶解、脱炭、脱リン、Ni 等の合金成分の添加を行い、取鍋による二次精錬（LF）で、加熱、脱ガス、脱硫を行う。

#### 2.5.5 まとめ

クリアランス金属廃棄物の内容器への再利用のためのプロセスの検討を行った。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、内容器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した。

クリアランス金属廃棄物の内容器への再利用のためのプロセスは、以下の通り考えられた。

- ① 内容器に収納する放射性廃棄物の放射エネルギーから必要な肉厚を設定

- ② 設定した肉厚から、必要な種別を決定
- ③ 材料規格案から必要となる種別の材料特性を満足する化学成分を決定
- ④ クリアランス金属廃棄物の鋼種から、配合方法を設定
- ⑤ 配合後の溶鋼分析結果より、必要な精錬処理を実施
- ⑥ 内容器として鋳造

### 3. 再利用プロセスの評価

#### 3.1 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の計画を平成27年度に行い、実際に実証試験を平成28年度に行った。

実証試験にあたっては、クリアランス金属の再利用における製品、工場設備、発生物（産業廃棄物）への放射能の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の成果を踏まえ、本事業に係る専門家・有識者等で構成される委員会で検討した。併せて、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った。

#### 3.2 実証試験結果のまとめ

実証試験の実施内容と実施結果を以下の表 3.2-1 にまとめる。

表 3.2-1 実証試験の実施内容及び実施結果

実施内容	実施結果
クリアランス金属受け入れ	クリアランス金属を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した。輸送前後での船内及びクリアランス金属輸送容器を線量測定し、受け入れの際にもマスコミや地元関係者にお立ち会いいただき、放射能の影響が無いことを確認いただいた。
クリアランス金属の再利用プロセス実施可否確認	実証試験では設計した 50 mm 及び 200 mm の内容器が実際に製造可能であることを確認し、製作した内容器の放射線遮へい能力、耐久性等について確認し、再利用プロセスは問題無く実施可能であることを確認した。
工場設備等への影響調査	工場設備等への影響調査の結果、クリアランス金属使用後の設備、製品由来地金、発生物の線量当量率は、使用前の平常時と変化は無かった。また、試作品からの放射能は検出限界以下で、クリアランスレベル以下を満足していた。
クリアランス金属を用いた試作品公開	クリアランス金属を用いた試作品を完成時にマスコミや地元関係者に公開し、蓋閉め作業を見学いただいた後、放射能の影響が無いことを確認していただいた。

### 3.3 経済的合理性の検討

#### 3.3.1 経済的合理性の検討方法

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を行った。

経済性評価に用いる作業項目のイメージを図 3.3.1-1 に示す。評価対象範囲は下記点線で囲った範囲とする。

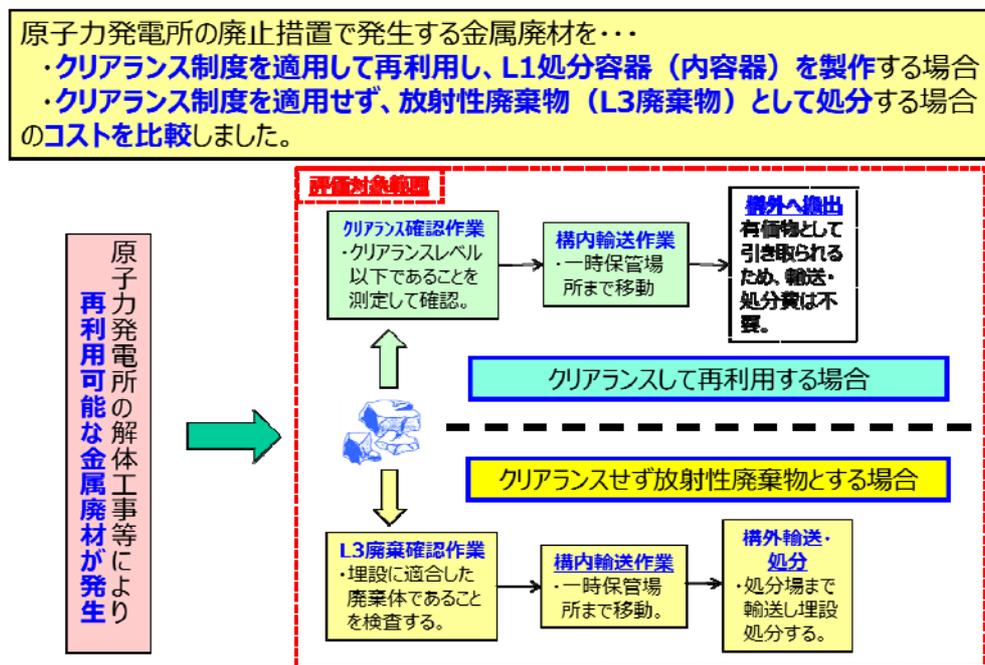


図 3.3.1-1 経済性評価に用いる作業項目のイメージ

経済性評価に用いるクリアランス物量は、浜岡原子力発電所1・2号機を解体した際に発生が見込まれるクリアランス物量（＝約8万トン）を用いた。図 3.3.1-2 参照。ここではコンクリート等も含まれているが、評価ではすべてスクラップ金属であると仮定している。

浜岡1,2号機を解体した場合に約8万トンのクリアランス物が発生することから仮に8万トンの金属を再利用する場合と処分する場合の費用を試算しました。

(浜岡1, 2号機を解体した場合の廃材の発生量)

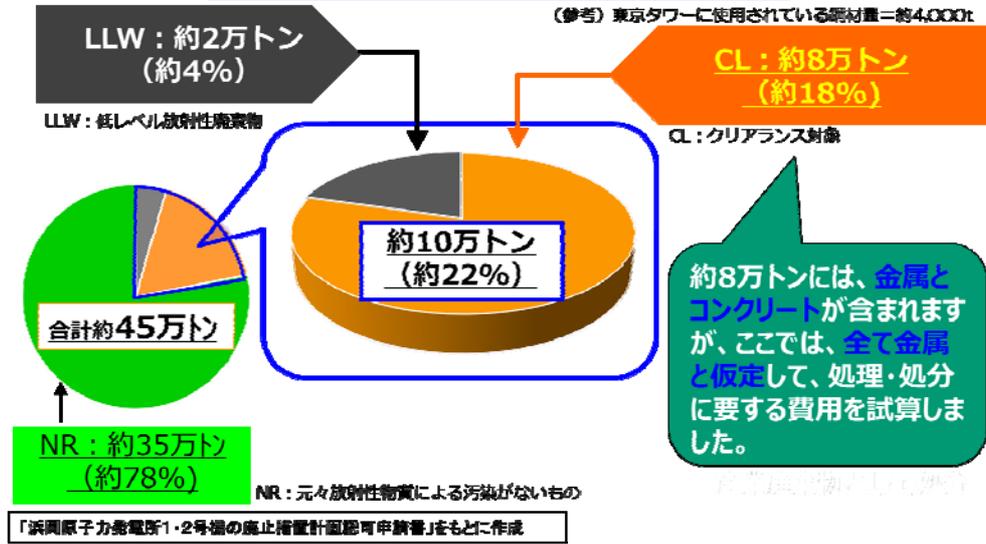


図 3.3.1-2 浜岡1, 2号機を解体した場合の廃材の発生量

L3 廃棄物を処分するまでの評価項目を表 3.3.1-1 に示し、クリアランス (CL) 金属を搬出するまでの評価項目を表 3.3.1-2 に示す。下線部はそれぞれ L3 またはクリアランス処理を行う場合に差異がある作業項目を示す。

表 3.3.1-1 L3 廃棄物を処分するまでの評価項目

L3 廃棄物確認作業	輸送作業	処分
<p>(1) 収納 L3 廃棄物 (金属) を測定容器 (鉄箱) に収納する。1 容器あたり、1.29 t を想定。</p> <p>(2) 放射線等の濃度測定 構内輸送等のため、廃棄物を収納した容器の表面線量率等の測定を行う。</p> <p>(3) 砂充填 <u>L3 廃棄物が収納された容器に砂を充填し、L3 廃棄体とする。</u></p> <p>(4) 放射能濃度測定 測定装置で 1 容器ずつ、L3 廃棄物の放射能濃度を測定する。</p>	<p>(1) 埋設処分地までの運搬 砂を充填した容器をトラックに積載し、埋設処分地まで運搬する。</p>	<p>(1) 定置 <u>L3 廃棄物が収納された容器をクレーンにより吊上げ、トレンチ内に定置する。</u></p> <p>(2) 覆土 <u>トレンチ内に容器を定置した後、覆土する。</u></p>

表 3.3.1-2 クリアランス (CL) 金属を搬出するまでの評価項目

クリアランス確認作業	輸送作業	搬出
(1)収納 CL 金属を測定容器 (鉄箱) に収納する。 (2)放射線等の濃度測定 構内輸送等のため、廃棄物を収納した容器の表面線量率等の測定を行う。 (3)放射能濃度測定 測定装置で 1 容器ずつ、CL 金属の放射能濃度を測定する。	(1)一時保管所までの運搬 CL 金属収納容器をトラックに積載し、一時保管場所まで運搬する。	(1)売却・搬出 加工業者等へ売却し、有価物として発電所から搬出。

作業を行うに当たってのその他として、収納容器費用、砂充填装置費用及び廃棄物確認設備費用を評価項目とする。

### 3.3.2 経済的合理性の検討結果

作業項目毎の費用試算をまとめた結果を表 3.3.2-1 に示す。

表 3.3.2-1 解体除染作業後から構外輸送・処分までの費用試算まとめ

	作業・設備項目	L3 [百万円]	CL [百万円]	L3-CL [百万円]
作業費用	廃棄物処理作業	4,465	1,920	+2,545
	廃棄確認作業	4,242	1,500	+2,742
	建屋内輸送作業	744	800	-56
	構内内輸送作業	1,023	1,320	-297
	計	10,474	5,540	+4,934
設備等費用	砂充填装置	380	0	+380
	容器	6,202	8,000	-1,798
	廃棄物確認検査装置	700	141	+559
	計	7,282	8,141	-859
処分費用	構外輸送・処分	18,605	160	+18,445
合計		36,361	13,841	+22,520

差があるのは処分費であり、L3 廃棄物の処分費用が多額である。次に廃棄物処理・確認作業である。これらの結果からクリアランス金属を再利用した方が、L3 廃棄物として処理するより安価であることが数値的に明らかとなった。

### 3.4 国民の理解促進や安心感を得るための取り組み方策の検討

実証試験を通して取得した放射線データ等から、クリアランス金属廃棄物の利用の安全性の確認結果を整理し、実証試験の結果公表等のために行った事業報告会等の結果を整理した。

これらの結果について、本事業に係る専門家・有識者等で構成される委員会にて国民理解の観点からの検討を行い、この検討結果について整理し、国民の理解促進や安心感を得るための取組方策をまとめた。

#### 3.4.1 社会的受容性向上のための活動実績

クリアランス金属廃棄物の再利用に係る理解活動として、委託事業期間内（H27.8～H30.3）に表 3.4.1-1 に示す活動を行い、その前後において、本委託事業で設置した外部有識者による委員会にて検討いただき、コメント、アドバイスを吸い上げ、社会的受容性向上のためのノウハウ等の蓄積を実施した。理解活動においてはいずれもマスコミを活用したパブリック・コミュニケーションを行った。

表 3.4.1-1 社会的受容性向上のための理解活動実績

件名	実施日	対象	実施内容
住民説明会	H27.11.27 H27.11.28	一般市民 (自由参加)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・スライドによる説明</li> <li>・質疑対応</li> <li>・ポスター展示</li> </ul>
H27 年度事業報告 H28 年度事業計画	H28.6.28	一般市民 (自由参加)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・スライドによる説明</li> <li>・質疑対応</li> <li>・ポスター展示</li> </ul>
クリアランス金属搬入立会	H28.7.7	地元ステークホルダー	<ul style="list-style-type: none"> <li>・CL 金属搬入立会</li> <li>・ゲートモニター通過立会</li> <li>・保管場所の空間線量率確認</li> <li>・CL 金属の表面線量率確認</li> </ul>
処分容器（試作品） 見学会	H29.2.16	地元ステークホルダー	<ul style="list-style-type: none"> <li>・処分容器(試作品)見学</li> <li>・蓋の嵌め合い確認見学</li> <li>・試作品の表面線量率確認</li> </ul>
H28 年度事業報告 H29 年度事業計画	H29.6.28	一般市民 (自由参加)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・スライドによる説明</li> <li>・質疑対応</li> <li>・ポスター展示</li> </ul>
H29 年度事業報告	H30.3.22	一般市民 (自由参加)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・測定体験、関連資料の展示</li> <li>・一般金属のリサイクルに係る講演の実施</li> <li>・スライドによる説明</li> <li>・質疑対応</li> <li>・ポスター展示</li> </ul>

### 3.4.2 国民の理解促進や安心感を得るための取組方策

クリアランスに係る理解活動を実施しようとする場合に想定される情報提供プロセスは、これまでの実績より、表 3.4.2-1 に示す方法・方針が考えられる。

表 3.4.2-1 一般の方への情報提供方法・方針

実施事項	実施内容	留意点
資料に基づく説明	パワーポイント等を使用して、講義形式で説明を実施する。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・専門用語は避ける、または丁寧な解説を付けて使用する。</li> <li>・説明する内容は、一般市民のニーズに合わせたものとする。</li> </ul>
測定体験	放射線計測器を用いて、クリアランス物と身近な自然放射線を発生するサンプルを測定・比較し、安全性を体験してもらう。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・測定体験は一般人の興味を引き、また理解促進に非常に有効。</li> <li>・測定サンプルは、地元生活環境や地場産業等に配慮して選定。</li> </ul>
グループディスカッション	参加者をいくつかのグループに分けて、少人数での説明・議論を行う。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・大勢の前では質問できないような方の意見も聞くことができる。</li> <li>・逆に参加に対するハードルが高くなることも考えられるため、実施要否は事前に議論する必要がある。</li> </ul>
ポスター掲示	学会のポスターセッションの様に、説明したい内容を掲示し、ご覧になっている方に横から説明する。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・専門用語は避ける、または丁寧な解説を付けて使用する。</li> <li>・説明する内容は、一般市民のニーズに合わせたものとする。</li> </ul>
質疑応答	他の実施事項に付随して発生する質問事項に回答する。	
アンケート	参加者に対してアンケートを実施して、参加者の傾向（男女、年齢、出身等）を把握する。また、参加者の認知度、意識（の変化）、考え方等を把握する。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・継続的な活動においてアンケートを実施した際は、アンケート集約結果が偏向してくることがあるため、集約結果の評価にあたっては留意を要する。</li> </ul>

これまでの社会的受容性向上のための取組みから、一般市民の関心事は主に以下の表 3.4.2-2 に示す通りに分類されることから、これに対して的確に情報提供することがポイントとなる。

表 3.4.2-2 情報提供・説明のポイント

関心事	留意すべき事項
説明方法、説明資料に関するもの	<ul style="list-style-type: none"> <li>○資料はシンプル・簡素にする。</li> <li>○専門用語は避ける。または必ず解説を付ける。</li> <li>○言いたいことのポイントを絞り、情報量は最小限にする。</li> <li>○問題点を整理し明確にする。</li> </ul>
廃棄物の種別・分類に関するもの	<ul style="list-style-type: none"> <li>○放射性廃棄物全体の中で、クリアランスの位置づけを説明する。</li> <li>○放射性廃棄物レベル区分は、数値を用いて明確に説明（L1～NRまで）。</li> </ul>
再利用に関するもの	<ul style="list-style-type: none"> <li>○再利用が社会全体においてどう位置付けられるのかを明確にする。</li> <li>○再利用のメリット・デメリットを明示する。 →自分に対するお得感（インセンティブ）、必要性、付加価値等。</li> <li>○電力会社としての再利用の目的、必要性を明示する。</li> <li>○クリアランスされたものは安全であることを、一般目線で受け入れられるように伝える。</li> </ul>
放射線・放射能に関するもの	<ul style="list-style-type: none"> <li>○クリアランスの説明と放射線・放射能の説明は、必ずセットで行う。</li> <li>○クリアランスレベルが[Bq/g]、安全であることの説明は[mSv]で行っているため、これらの関連が分かりやすく説明できる必要がある。</li> <li>○被ばく量[mSv]と人体への影響の関係をわかりやすく整理する。</li> <li>○クリアランスの加工により、放射性核種がどのように挙動し、どういう影響を及ぼすのか。</li> <li>○総量規制ではなく濃度規制であることのシンプルな説明が必要。</li> </ul>
クリアランスという名称に関するもの	<ul style="list-style-type: none"> <li>○クリアランスを日本語として受け入れてもらえるような工夫が必要。</li> </ul>
情報発信に関するもの	<ul style="list-style-type: none"> <li>○クリアランスを再利用（特に加工等）する際の放射能による周辺環境や人体への影響を懸念する声が多いため、これに係る情報を発信する。</li> <li>○ただし、クリアランスは放射性物質として取り扱う必要がないものであるため、情報発信の方法等については、地元等のニーズを踏まえて決定する。</li> </ul>
国の関与、法律に関するもの	<ul style="list-style-type: none"> <li>○国の関与、事業者の役割を整理する。ただし、制度や国の確認を前提とした説明は押しつけ感があり、注意が必要。</li> <li>○放射性廃棄物全般に係る取組みと、クリアランスの位置づけを整理し明示する。</li> </ul>
海外の実績に関するもの	<ul style="list-style-type: none"> <li>○海外の実績や理解活動の状況、実績を調査・整理する必要がある。</li> <li>○海外ではクリアランス再利用が進んでいる理由も説明できるようにする。</li> </ul>
サーベイ体験・測定に関するもの	<ul style="list-style-type: none"> <li>○理解活動にあたって、サーベイ体験は非常に有効である。</li> </ul>

賛成の意見を持つ方／慎重な意見を持つ方の双方からよく聞かれる以下の表 3.4.2-3 に示す質問については、予め丁寧で明快な回答を用意しておく必要がある。

表 3.4.2-3 検討しておくべき質疑

質問事項	回答にあたってのポイント
<p>金属の溶鋼や精錬により、揮発性の放射性物質（H-3、C-14、Cs-137 等）は周辺環境へ放出される。これらは管理しなくていいのか。</p> <p>また、放射性物質は蓄積されるので、濃度規制ではなく総量規制すべきではないか。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・クリアランスレベルは、周辺への影響や、再利用した際の被ばく線量が0.01mSv/年となるよう設定されたものであることを説明する。</li> <li>・放射性物質に限らず、排出される物質は原則的には拡散することから、濃度規制を行っている。</li> </ul>
<p>搬入前後のクリアランス金属の放射エネルギーの差を教えてください。 (搬入前＝クリアランス確認申請データ)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・確認申請データは、国に確認を受けた測定・評価方法により、保守性を持たせた評価値であること。</li> <li>・このことから、確認申請データと実物を測定したデータは、原則的には比較できないものであること。</li> <li>・その上で、仮にクリアランス金属に放射能が含まれると仮定したとしても、人体や環境への影響が極めて小さいといえること。</li> </ul>
<p>関係者内での再利用で循環できるのであれば、無理にフリーリリースしなくてもいいのではないか。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・電力会社では、L1 処分容器を始め、可能な限りクリアランス金属を利用していくことを考えているが、廃止措置が進んできた場合には、これだけでは全量を使いきれず、フリーリリースが必要である。</li> <li>・国が標榜する「循環型社会形成」の一助として、再利用可能な資源は出来るだけ再利用していきたい。</li> </ul>

社会的受容性向上のための取組みにおいて、これまで紹介した知見の他、表 3.4.2-4 に示すようなノウハウ・マテリアルを構築することができた。

表 3.4.2-4 その他、得られたノウハウ

実施事項	実施内容
説明資料	<p>説明用パワーポイント及び補足説明資料</p> <p>説明対応用 Q &amp; A</p> <p>測定体験対応マニュアル</p> <p>ポスター展示用資料</p>
説明に資するデータ	<p>クリアランス再利用物の放射線・放射能データ</p> <p>クリアランス輸送時の周辺環境放射線データ（港、船等）</p> <p>クリアランス処理設備の放射線データ</p> <p>クリアランス処理時の周辺 M/P 空間線量率データ</p>
今後の社会的受容性向上活動に資するデータ	<p>説明会・講演会等で実施したアンケート結果</p>

参考文献

- [1]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
- [2]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
- [3]P.E.Bennett, G.M.Sinclair : ASME paper, 65-MET-11 (1965)
- [4]日本原子力学会、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
- [5]S.T.Rolfe and S.R.Novak. ASTM STP 463 (1970) ,P124.

