

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

事業報告書

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. 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	5
2.2.4 全体工程	6
2.3 再利用プロセスの評価	7
2.3.1 全体工程	7
2.3.2 再利用プロセスの評価	7
3. 再利用プロセスの開発	9
3.1 概要	9
3.2 クリアランス金属による内容物の再利用プロセスの開発	10
3.2.1 基礎試験の実施	10
3.2.2 再利用プロセスの開発	57
4. 再利用プロセスの評価	72
4.1 概要	72
4.2 経済的合理性の検討	72
4.2.1 評価の前提条件	73
4.2.2 評価項目の比較	75
4.2.3 作業項目毎の費用試算結果	76
4.2.4 作業項目の他に考慮すべき事項	79
4.2.5 現状のクリアランス処理・処分の課題について	80
4.3 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	81
4.3.1 平成29年度の地元関係者への結果説明	81
4.3.2 社会的受容性向上のための活動実績	81
4.3.3 国民の理解促進や安心感を得るための取組方策	82
参考文献	86

添付資料1 事業報告会実施結果概要（平成29年6月28日開催分）

添付資料2 事業報告会でいただいた主なご質問と回答（平成29年6月28日開催分）

添付資料3 事業報告会実施結果概要（平成30年3月22日開催分）

添付資料4 事業報告会でいただいた主なご質問と回答（平成30年3月22日開催分）

－ 表 目 次 －

表 2.2.4-1	再利用プロセスの開発全体工程	6
表 2.3.1-1	再利用プロセスの評価全体工程	7
表 3.2.1-1	試験体の主要化学成分の狙い値	10
表 3.2.1-2	試験体の Cr 量の狙い値	10
表 3.2.1-3	試験体の化学成分（溶鋼分析値）	12
表 3.2.1-4	引張及び硬さ試験結果	13
表 3.2.1-5	シャルピー衝撃試験結果	16
表 3.2.1-6	供試材の化学組成	18
表 3.2.1-7	溶接条件	19
表 3.2.1-8	試験内容一覧	20
表 3.2.1-9	静的引張試験結果（試験速度：破断まで 3mm/min 一定）	27
表 3.2.1-10	高速引張試験結果	28
表 3.2.1-11	母材及び蓋溶接金属の α と β	29
表 3.2.1-12	-20°C の静的引張試験結果より導出したひずみ硬化係数	30
表 3.2.1-13	解析ケース	36
表 3.2.1-14	溶接未溶着部の K 値解析結果	52
表 3.2.1-15	各ケースの脆性破壊評価	55
表 3.2.2-1	化学成分及び炭素当量	58
表 3.2.2-2	機械的性質	60
表 3.2.2-3	靱性（0°C 以下）に規格がある鋼の要求特性	61
表 3.2.2-4	材料規格案の各種別の限界欠陥サイズ	62
表 3.2.2-5	クリアランス材質別物量	64
表 3.2.2-6	化学成分及び炭素当量	65
表 3.2.2-7	化学成分（SS 材）	65
表 3.2.2-8	化学成分（SM 材）	66
表 3.2.2-9	炭素当量（SM 材）	66
表 3.2.2-10	化学成分（STPT 材）	66
表 3.2.2-11	化学成分及び炭素当量（SCW 材）	67
表 3.2.2-12	化学成分（SF 材）	67
表 3.2.2-13	化学成分（SUS304 及び SUS316）	68
表 3.2.2-14	化学成分（SCS13 及び SCS14）	68
表 3.2.2-15	化学成分（STPA 材）	68
表 3.2.2-16	化学成分（SCMV 材（製品分析値））	69
表 3.2.2-17	化学成分（SUP 材）	69
表 3.2.2-18	回収・分別・保管区分	70
表 4.2.2-1	L3 廃棄物を処分するまでの評価項目	75
表 4.2.2-2	クリアランス（CL）金属を搬出するまでの評価項目	76

表 4.2.3-1	L3 廃棄物収納・砂充填作業費用及びクリアランス (CL) 金属収納作業費用 ..	76
表 4.2.3-2	廃棄物処理設備	77
表 4.2.3-3	廃棄確認作業 (放射能測定作業)	77
表 4.2.3-4	廃棄確認 (放射能測定) 設備費用	77
表 4.2.3-5	輸送作業費用 (建屋内輸送: 解体現場~建屋搬出口まで)	78
表 4.2.3-6	輸送作業費用 (構内輸送: 建屋搬出口~構内一時保管場所まで)	78
表 4.2.3-7	処分費用 (含構外輸送)	78
表 4.2.3-8	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	79
表 4.2.5-1	現状のクリアランス処理・処分の課題	80
表 4.3.2-1	社会的受容性向上のための理解活動実績	82
表 4.3.3-1	一般の方への情報提供方法・方針	83
表 4.3.3-2	情報提供・説明のポイント	84
表 4.3.3-3	検討しておくべき質疑	85
表 4.3.3-4	その他、得られたノウハウ	85

－ 目 次 －

図 3.2.1-1	熱処理シミュレーション条件.....	11
図 3.2.1-2	Cr 含有量と 0.2%耐力、引張強度の関係.....	14
図 3.2.1-3	ミクロ組織観察.....	15
図 3.2.1-4	Cr 含有量と -20℃吸収エネルギーの関係.....	17
図 3.2.1-5	供試材の熱処理条件.....	18
図 3.2.1-6	溶接試験体.....	19
図 3.2.1-7	溶接後の試験体外観写真.....	19
図 3.2.1-8	静的引張試験片.....	20
図 3.2.1-9	高速引張試験片.....	21
図 3.2.1-10	シャルピー試験片採取要領のイメージ.....	22
図 3.2.1-11	母材の破壊靱性試験片.....	23
図 3.2.1-12	蓋溶接未溶着部の破壊靱性試験片.....	24
図 3.2.1-13	蓋溶接及び補修溶接の HAZ と溶接金属の破壊靱性試験片.....	24
図 3.2.1-14	図 3.2.1-13 の試験片の採取要領イメージ.....	24
図 3.2.1-15	静的破壊靱性試験の試験要領.....	25
図 3.2.1-16	動的破壊靱性試験の試験要領（恒温槽で冷却後取り出して速やかに試験）...25	25
図 3.2.1-17	静的破壊靱性試験の試験要領（模式図）.....	26
図 3.2.1-18	動的破壊靱性試験の荷重計測ゲージ.....	26
図 3.2.1-19	静的引張試験での 0.2%耐力の温度依存性.....	27
図 3.2.1-20	0.2%耐力のひずみ速度依存性.....	28
図 3.2.1-21	母材と蓋溶接金属の -20℃での真応力 - 対数塑性ひずみ線図.....	30
図 3.2.1-22	母材、蓋溶接部及び補修溶接部の吸収エネルギーの平均値の比較.....	31
図 3.2.1-23	静的破壊靱性試験結果（B=70mm に統一）.....	32
図 3.2.1-24	動的破壊靱性試験結果（B=70mm に統一）.....	33
図 3.2.1-25	破壊靱性値（B=70mm に統一）と K 値変化速度の関係.....	34
図 3.2.1-26	200mm 厚内容器：ケース 1.....	37
図 3.2.1-27	50mm 厚内容器（角 R 変更）：ケース 2.....	38
図 3.2.1-28	ケース 1 落下解析モデル.....	39
図 3.2.1-29	ケース 2 落下解析モデル.....	40
図 3.2.1-30	ケース 1 K 値解析モデル.....	42
図 3.2.1-31	ケース 2 K 値解析モデル.....	43
図 3.2.1-32	ケース 1 K 値計算用要素再分割イメージ.....	44
図 3.2.1-33	ケース 2 K 値計算用要素再分割イメージ.....	45
図 3.2.1-34	ケース 1 拘束条件.....	46
図 3.2.1-35	ケース 2 拘束条件.....	47
図 3.2.1-36	ケース 1 落下解析結果.....	49
図 3.2.1-37	ケース 2 落下解析結果.....	50

図 3.2.1-38	3つの基本変形モード	51
図 3.2.1-39	混合モード (I+II+III) のき裂先端近傍の応力場.....	52
図 3.2.1-40	衝撃落下解析の応力場による K 値 (ケース 1)	53
図 3.2.1-41	衝撃落下解析の応力場による K 値 (ケース 2)	54
図 3.2.1-42	想定欠陥.....	56
図 3.2.1-43	母材の鑄造欠陥から脆性破壊強度評価	56
図 3.2.2-1	降伏点または耐力と引張強さの関係.....	61
図 4.2.1-1	放射性廃棄物処分の考え方	74
図 4.2.1-2	経済性評価に用いる作業項目のイメージ.....	74
図 4.2.1-3	浜岡 1, 2号機を解体した場合の廃材の発生量.....	75

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、3ヵ年の計画で進める。

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。

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. 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へ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3ヵ年の計画で実施する。

- ① 再利用プロセスの開発
- ② 再利用プロセスの評価

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ことが考えられる。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。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。

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する。

これらの整理は、開発1年目である平成27年度に実施し、予定通り終了した。

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。これらの検討のために、基礎試験を実施し、評価する。

(1) 化学成分範囲の検討

基礎試験では、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複数製作する。製作した試験片は実製品を模擬した熱処理シミュレーションを実施した後、機械的試験を行って材料データを取得する。この評価結果をもとに、金属容器の耐久性（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。

平成27年度には、低レベル放射性廃棄物を収納する金属容器に求められる技術要件を明確にし、そのために必要となる材料特性を基礎試験により評価した。

金属容器に求められる耐久性（靱性）を検討し、金属の靱性値に大きな影響を及ぼすとされる不純物成分として、リン（P）、硫黄（S）、錫（Sn）及び銅（Cu）について、その影響を定量的に把握した。この結果、金属容器に求められる低温衝撃特性は、P及びSの含有量に影響を受けることが分かった。しかし、鋳鋼品の耐久性（靱性）への影響は、各不純性成分が単独で存在した場合と、複数存在した場合には、影響の度合いが異なる場合があると考えられた。

平成28年度は、影響を及ぼすことの分かった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鋳鋼品の耐久性（靱性）への影響を定量的に評価した。

炭素鋼は、Sの含有により耐久性（靱性）を評価する1つの指標である吸収エネルギーは低下し、Pとの複合でさらに低下するが、低合金鋼ではSの含有により低下するのは同様であるが、Pとの複合で炭素鋼よりも急激に低下することが分かった。

また、調査によりクリアランス金属廃棄物に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鋼等も一定量発生することが分かった。用いるスクラップの種類、配合に応じて合金成分も含有される可能性があり、その場合の金属容器の耐久性（靱性）に及ぼす影響を評価する必要があると考えられた。

平成29年度は、合金元素としてCrの影響を明確にする。

(2) 低温衝撃値規格の検討

平成27年度及び平成28年度の評価により、金属容器に最も厳しい衝撃を与えると考えられる落下事象を汎用の解析コードを用いて解析し、金属容器に発生する衝撃値を予想した。さらに、低温靱性が優れていると考えられる低合金鋼の破壊靱性試験を行い、破壊力学評価から検討した耐久性（靱性）の妥当性を評価した。また、耐久性（靱性）の容器形状による影響を評価した。これらの結果、板厚や容器角Rの変更により脆性破壊は生じない設計が可能であることが示された。しかし、炭素鋼の内容容器への適用性を評価するには、その材料物性値の取得が必要であると考えられた。

平成29年度は、炭素鋼の破壊靱性試験により材料物性値を取得し、落下解析により破壊力学評価を行い、炭素鋼の内容容器への適用性を評価する。

2.2.3 再利用プロセスの開発

(1) 内容器の設計

実際のクリアランス金属廃棄物を用いて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。

平成27年度は、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）、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。

平成28年度は、後述する実証試験において、ここで設計を行った内容器について試作した。

(2) 材料規格案の策定

基礎試験の結果によるが、内容器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、内容器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。

各開発結果から、所定の性能を満足するための内容器の材料規格案を策定する。

平成27年度は、基礎試験により材料規格案で規定が必要と考えられる不純物等の検討を行った。

平成28年度は、策定する材料規格案について、規格案の構成項目及びその適用範囲等について、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検討を行った。ここで、材料規格案においては、板厚に応じて種別を決める、等とし、材料規格案を提示した。

平成29年度は、基礎試験の結果を踏まえて、最終的な材料規格案を策定する。

(3) 再利用プロセス

以上の成果より、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）方法等からなる再利用プロセスを検討する。

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	→	→	→
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			→

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①～③の検討を行う。①及び③の経済性評価方法の検討に関しては平成27年度に実施済みであり、②の実証試験の実施に関しては平成28年度に実施済みである。平成29年度は、経済性評価を行うとともに、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た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検討する。

- 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 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 2.3.1-1 に示す。

表 2.3.1-1 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 経済的合理性の検討	————→		
② 経済性評価			————→
③ 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			————→

2.3.2 再利用プロセスの評価

(1) 経済的合理性の検討

平成28年度に実施した実証試験結果から、クリアランス金属廃棄物を用いた金属容器の製作に関する経済性評価を行う。

開発した技術による金属容器の製作について、平成27年度に検討した評価方法を用いて、クリアランス金属廃棄物再利用に関する経済的合理性の検討を行う。

(2) 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する。また、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する。

これらの結果について、国民理解の観点からの検討を行う。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る。

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、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。

これらにより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満足する材料を検討、評価するため、基礎試験を実施し、平成28年度までに金属容器に求められる耐久性（靱性）を検討した。金属の靱性値に大きな影響を及ぼすとされる不純物成分、リン（P）、硫黄（S）、錫（Sn）及び銅（Cu）について、鋳鋼品の耐久性（靱性）への影響を定量的に把握し、主にS及びP濃度が重要であることが分かった。そこで、リン（P）と硫黄（S）の2成分の組合せで不純物含有量による鋳鋼品の耐久性（靱性）への影響を定量的に把握した。

また、金属容器に最も厳しい衝撃を与えると考えられる落下事象を汎用の解析コードを用いて解析し、金属容器に発生する衝撃値を予想した。さらに、低温靱性が優れていると考えられる低合金鋼の破壊靱性試験を行い、破壊力学評価から検討した耐久性（靱性）の妥当性を評価した。この結果、低合金鋼が内容器材料として適用可能であることが分かった。併せて容器形状や使用環境により、炭素鋼も適用できる可能性があることが分かった。

これまでの調査により、クリアランス金属に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。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、その場合に容器の耐久性に問題ないか確認が必要である。平成29年度はCr等の合金元素の影響を明確にし、材料規格案に反映させる。併せて炭素鋼の破壊靱性試験を行うと共に、落下解析により破壊力学評価を行い、炭素鋼の内容器への適用性を評価し、材料規格案に反映させる。

3.2 クリアランス金属による内容物の再利用プロセスの開発

3.2.1 基礎試験の実施

(1) 許容される Cr 含有量の検討

1) 目的

平成28年度までの調査により、クリアランス金属に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。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、平成29年度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する。この評価結果から、金属容器の耐久性 (靱性) の確保、製造条件の整備の観点で、許容される Cr 含有量を検討する。

2) 試験方法

a. 試験体の製作

平成28年度までに検討した表 3.2.1-1 に示す2種類の鋳鋼品を基準に、Cr 濃度が表 3.2.1-2 となるように添加した試験体を作製した。影響評価の対象とする Cr 量は2通りとした。また、Cr を多量に添加した場合、溶接性の低下が懸念されるため、炭素 (C) を減少させることで、炭素当量 (Ceq) を減少させた試験体も作製した。このとき、不純物元素はその影響を小さくするため、添加は最小限とした。鋳鋼品の作製は、市中で入手可能な金属を原料として用いて実験室規模の設備で実施した。試験体は真空誘導溶解炉にて20kg 溶解し、所定の成分となるよう調整した後に鋳造した。

表 3.2.1-1 試験体の主要化学成分の狙い値 (質量%)

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

*炭素鋼の Ni、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 3.2.1-2 試験体の Cr 量の狙い値 (質量%)

試験体		C	Cr	Ceq
炭素鋼	高 Cr	0.15	1.00	0.51
	低 C+高 Cr	0.05	1.00	0.41
低合金鋼	中 Cr	0.12	0.60	0.49
	高 Cr	0.12	1.00	0.57
	低 C+高 Cr	0.05	1.00	0.50

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

b. 熱処理

鑄塊から幅 70×長さ 180×厚さ 30mm の試験体をそれぞれ 2 個ずつ採取し、熱処理シミュレーションを実施した。熱処理シミュレーションとは、実機サイズ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 3.2.1-1 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電対を取り付け、所定の温度条件となるよう制御しながら行った。この基礎試験での熱処理の冷却方法は、平成 27、28 年度の試験結果と比較を行うため、容器の空冷（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。（日本鑄鍛鋼会のデータ集 [1] に収録されている冷却速度速見表、板厚 T=250mm、T/4）。

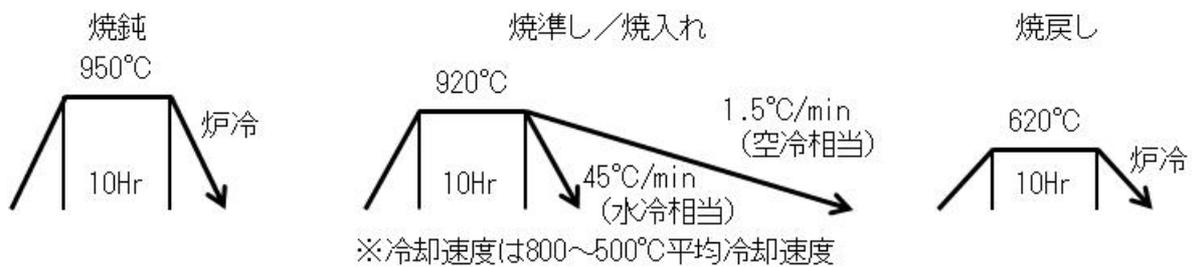


図 3.2.1-1 熱処理シミュレーション条件

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 (Φ6×30GL 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、破面遷移温度 (FATT)
※試験は-20°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 : 代表視野の組織写真撮影

3) 試験結果

a. 溶製結果

表 3.2.1-3 に試験体の化学成分（溶鋼分析値）を示す。

表 3.2.1-3 試験体の化学成分（溶鋼分析値） (質量%)

試験体	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Mo	V	Sn	Al	C	Cr	Ceq	
炭素鋼	低含有*	0.40	0.82	0.010	0.005	0.10	0.11	0.03	<0.01	0.005	0.020	0.15	0.11	0.34
	高 Cr	0.40	0.79	0.011	0.006	0.10	0.09	0.03	<0.01	0.006	0.020	0.14	1.02	0.50
	低 C+ 高 Cr	0.39	0.78	0.010	0.005	0.10	0.09	0.03	<0.01	0.006	0.020	0.04	1.01	0.40
低合金鋼	低含有*	0.40	0.93	0.009	0.006	0.10	2.03	0.16	<0.01	0.005	<0.003	0.12	0.33	0.45
	中 Cr	0.39	0.88	0.011	0.006	0.10	2.04	0.15	<0.01	0.007	<0.005	0.11	0.63	0.49
	高 Cr	0.41	0.90	0.012	0.005	0.10	2.07	0.16	<0.01	0.006	<0.005	0.12	1.02	0.58
	低 C+高 Cr	0.39	0.89	0.010	0.005	0.10	1.99	0.15	<0.01	0.006	<0.005	0.05	1.00	0.50

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

* : 『低含有』 は平成 27 年度に実施した基礎試験結果

b. 引張試験及び硬さ測定結果

表 3.2.1-4 及び図 3.2.1-2 に引張及び硬さ試験の結果を示す。Cr 含有量の増加に伴い、炭素鋼は 0.2%耐力が低下し、低合金鋼は冷却速度 45°C/min.において、0.2%耐力、引張強度の上昇が確認される。

これらの結果について、炭素鋼ではフェライト粒径の粗大化の影響、低合金鋼ではベイナイト量の増加の影響と考えられる。

c. ミクロ試験結果

図 3.2.1-3 にミクロ組織観察結果を示す。炭素鋼はいずれの条件もフェライト - 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、低合金鋼では、冷却速度が 1.5°C/min. (空冷相当) のときはフェライト - ベイナイト組織、冷却速度が 45°C/min. (水冷相当) ではベイナイト主体の組織を呈しており、Cr 含有量の増加に伴い、ベイナイト量が増加している。

また炭素鋼、低合金鋼共に Cr 含有量の増加に伴いフェライトが粗大化している。また低 C 化することでフェライト量が増加している。

d. シャルピー衝撃試験結果

表 3.2.1-5 にシャルピー衝撃試験の結果を示す。-20°Cを含む複数の温度条件下でシャルピー衝撃試験を行い、-20°C吸収エネルギーと FATT を評価した。

図 3.2.1-4 に炭素鋼及び低合金鋼の Cr 含有量と -20°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°C吸収エネルギーは増加する。低合金鋼では

Cr含有量の増加に伴い-20℃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℃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。

表 3.2.1-4 引張及び硬さ試験結果

試験体		冷却速度 (°C/min)	0.2%耐力 (MPa)	引張強度 (MPa)	伸び (%)	絞り (%)	硬さ HV10
炭素鋼	低含有*	1.5	283、292 [288]	452、452 [452]	35、38 [37]	70、70 [70]	123、124、130 [126]
		45	328、297 [313]	466、462 [464]	35、39 [37]	73、74 [73]	128、129、127 [128]
	高Cr	1.5	232、244 [238]	446、453 [450]	33、35 [34]	67、68 [68]	124、121、122 [122]
		45	266、268 [267]	479、484 [482]	35、36 [36]	75、77 [76]	133、134、131 [133]
	低C+ 高Cr	1.5	203、210 [207]	373、374 [374]	40、41 [41]	82、82 [82]	100、96、98 [98]
		45	216、216 [216]	379、381 [380]	40、42 [41]	84、85 [85]	102、106、103 [104]
低合金鋼	低含有*	1.5	360、366 [363]	523、524 [524]	32、35 [33]	69、71 [70]	160、158、156 [158]
		45	430、431 [431]	571、573 [572]	31、29 [30]	74、70 [72]	182、184、180 [182]
	中Cr	1.5	326、334 [330]	499、502 [501]	32、32 [32]	74、73 [74]	147、155、146 [149]
		45	431、443 [437]	568、577 [573]	27、25 [26]	75、72 [74]	188、186、188 [187]
	高Cr	1.5	351、364 [358]	546、558 [552]	27、31 [29]	72、75 [74]	172、174、175 [174]
		45	476、482 [479]	612、618 [615]	26、25 [26]	75、74 [75]	202、203、201 [202]
	低C+ 高Cr	1.5	302、310 [306]	460、460 [460]	36、35 [36]	82、83 [83]	136、140、136 [137]
		45	360、380 [370]	501、512 [507]	30、33 [32]	82、84 [83]	165、165、160 [163]

※引張試験は各条件2本、硬さ試験は各3点実施

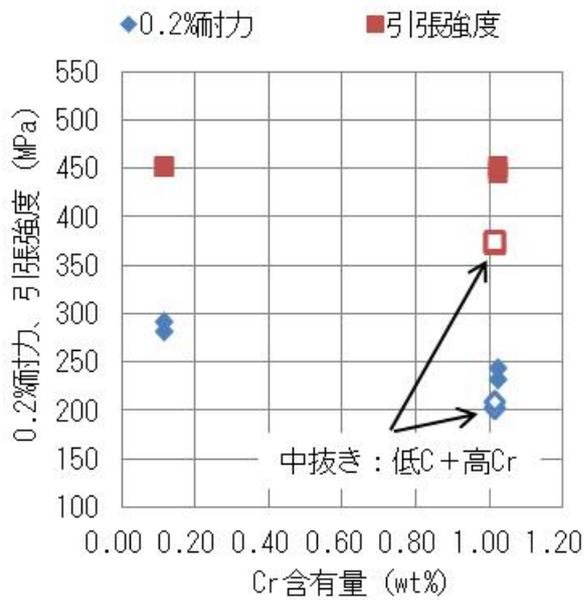
※伸び、絞りは小数点第一位を四捨五入した数値を示す

※表中 [] 内の数値は平均値を示す

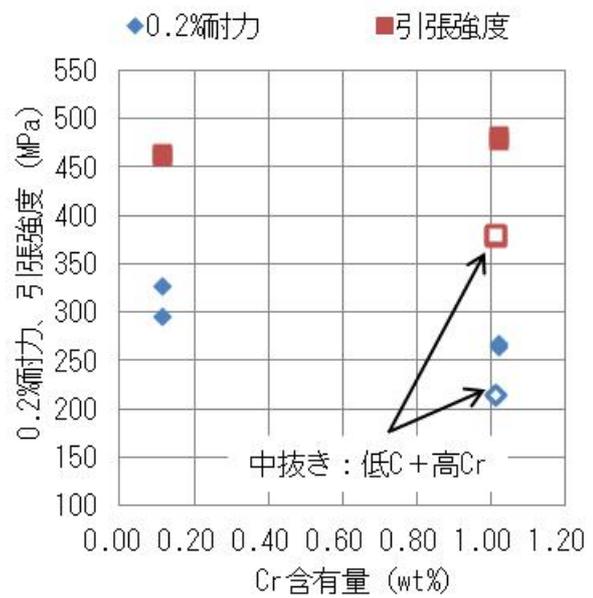
* 『低含有』は平成27年度に実施した基礎試験結果

(A) 炭素鋼

(A - a) 冷却速度：1.5°C/min.

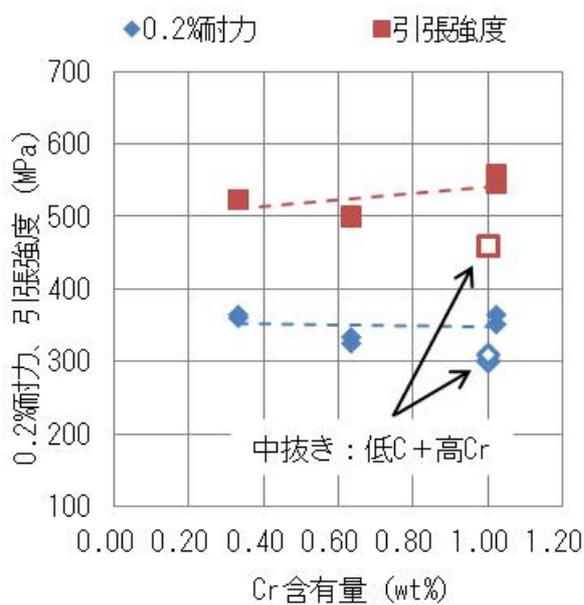


(A - b) 冷却速度：45°C/min.



(B) 低合金鋼

(B - a) 冷却速度：1.5°C/min.



(B - b) 冷却速度：45°C/min.

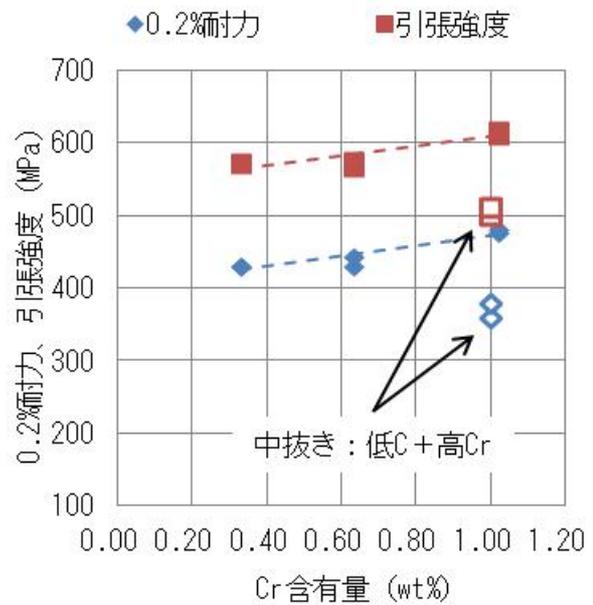


図 3.2.1-2 Cr含有量と0.2%耐力、引張強度の関係

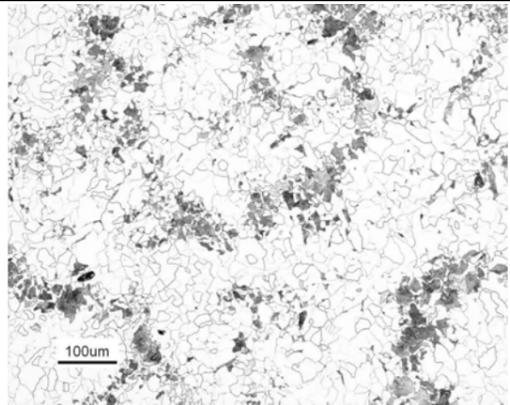
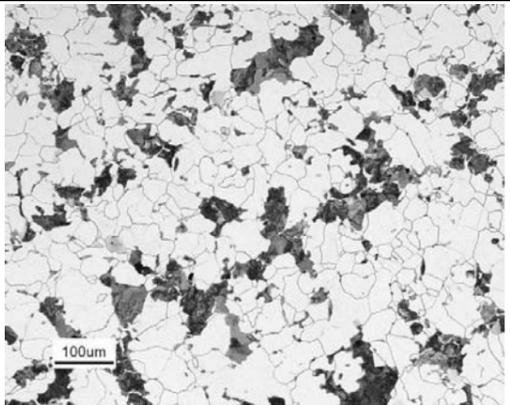
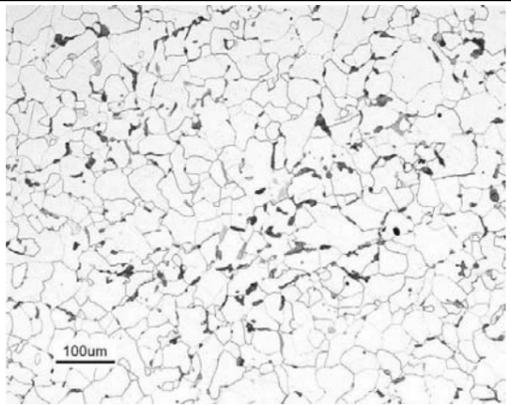
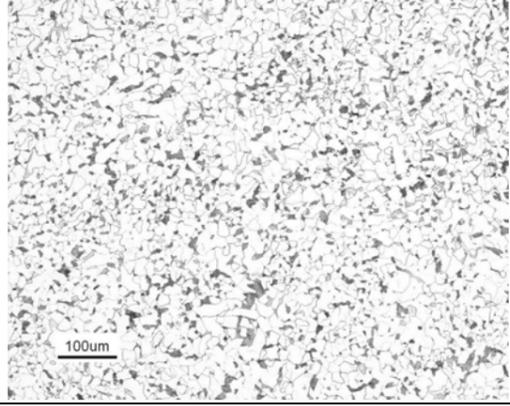
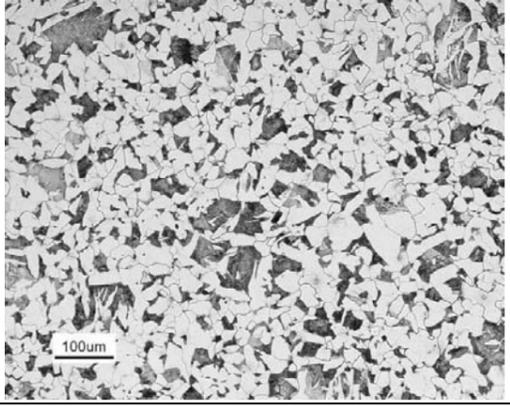
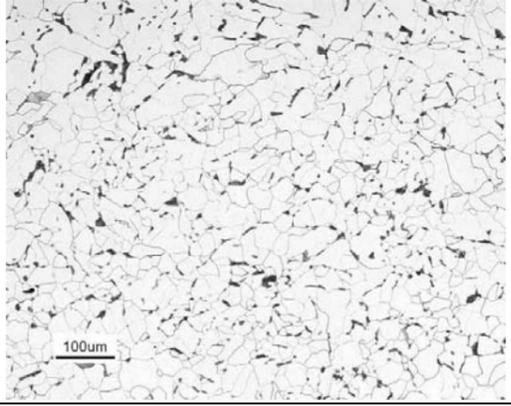
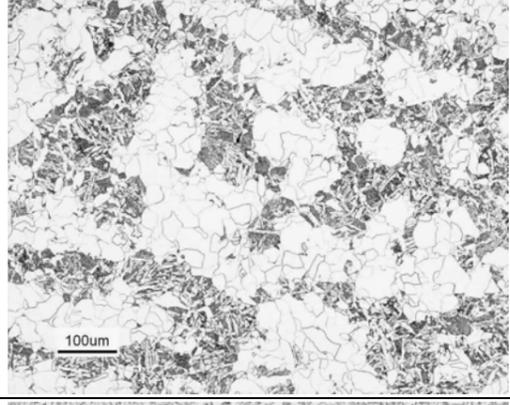
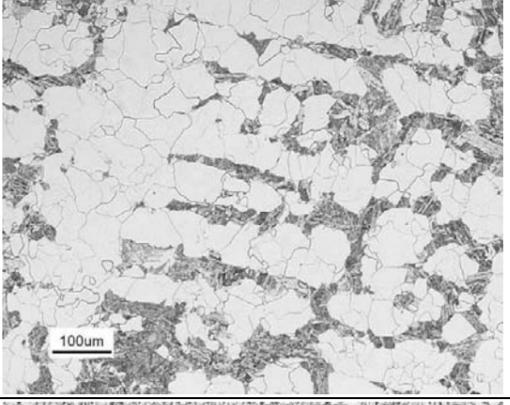
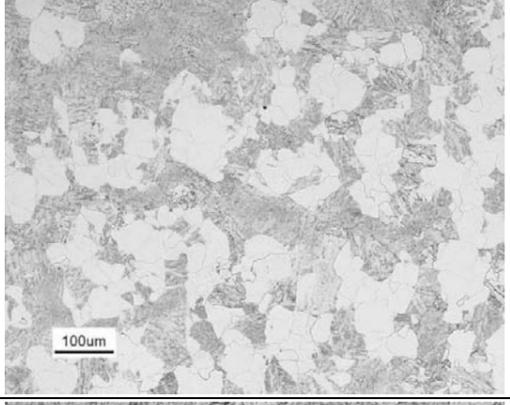
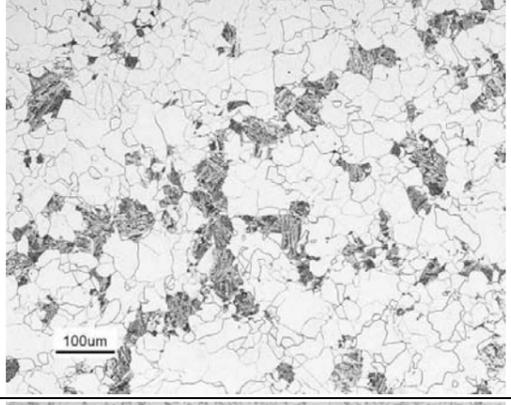
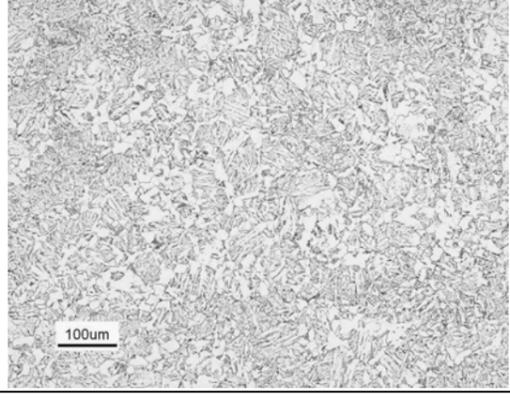
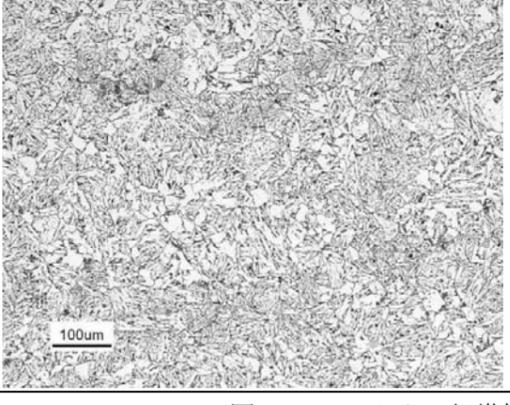
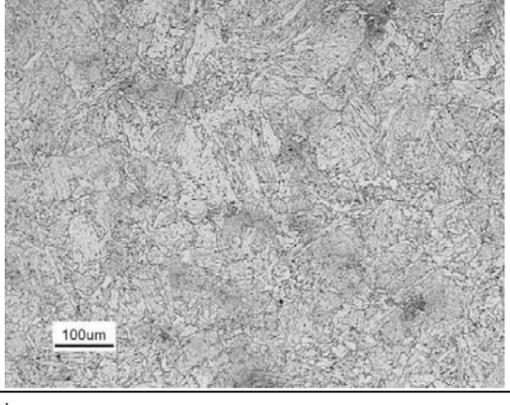
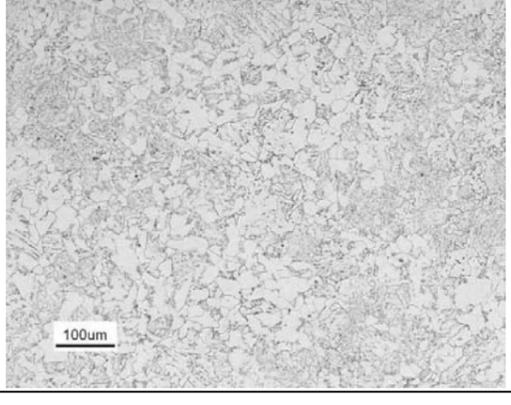
		低含有	中 Cr	高 Cr	低 C+高 Cr
炭素鋼	冷却速度 1.5°C/min		—		
	冷却速度 45°C/min		—		
低合金鋼	冷却速度 1.5°C/min				
	冷却速度 45°C/min				

図 3.2.1-3 ミクロ組織観察

表 3.2.1-5 シャルピー衝撃試験結果

		熱処理 冷却速度 (°C/min)	-20°C吸収エネルギー (J)	FATT (°C)
炭素鋼	低含有*	1.5	53、53、56、61、 61、27、46 [51]	2
		45	82、71、53、119、 80、43、63 [73]	-6
	高 Cr	1.5	81、44 [63]	21
		45	109、104 [107]	20
	低 C+高 Cr	1.5	317、317 [317]	-32
		45	324、334 [329]	-36
低合金鋼	低含有*	1.5	163、168、177、145、 151、145、134 [155]	-33
		45	131、102、122、154、 157、157、131 [136]	-26
	中 Cr	1.5	127、164 [146]	-14
		45	177、155 [166]	-9
	高 Cr	1.5	127、36 [82]	16
		45	80、92 [86]	11
	低 C+高 Cr	1.5	346、294 [320]	-45
		45	303、320 [312]	-46

※表中 [] 内の数値は平均値を示す

* 『低含有』は平成27年度に実施した基礎試験結果

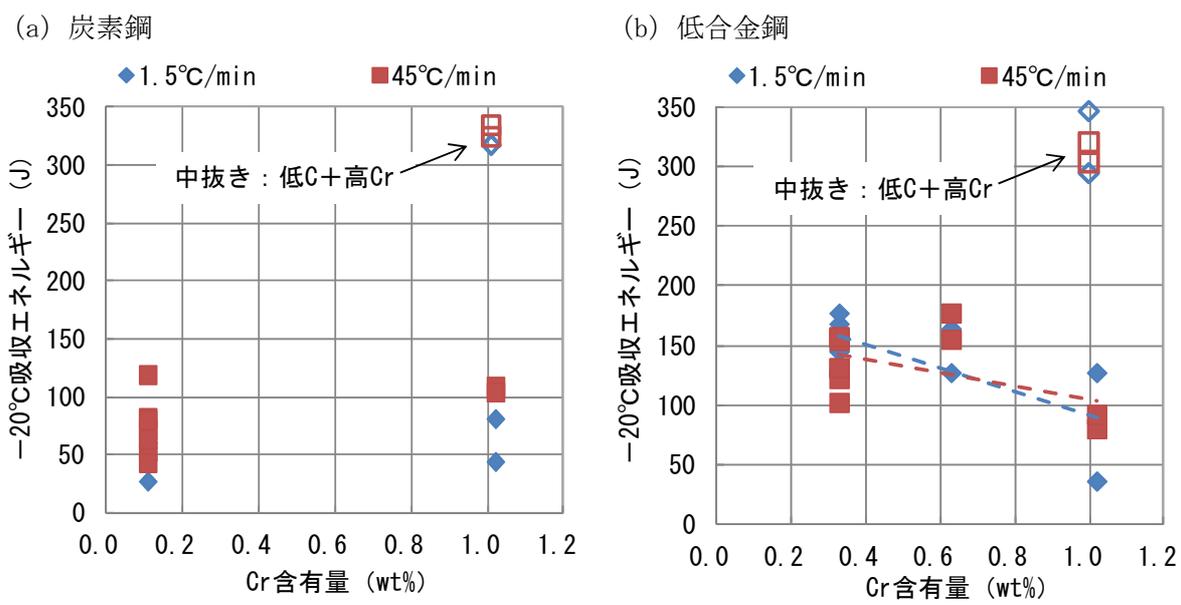


図 3.2.1-4 Cr 含有量と-20°C吸収エネルギーの関係

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器の耐久性評価の結果を踏まえて詳細な検討を行い、Cr 含有上限値を検討する。

(2) 炭素鋼鋳鋼品及び溶接部の機械的特性の評価

1) 目的

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鋳鋼と、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する。なお、鋳鋼の材質は平成28年度には低合金鋼を評価したことから、ここでは炭素鋼について評価する。

2) 試験方法

a. 供試材

供試材は目標の化学組成となるよう調整した後に、板厚 80mm の試験片に鋳造した。その化学組成を表 3.2.1-6 に示す。

表 3.2.1-6 供試材の化学組成 (質量%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
0.18	0.40	0.78	0.006	0.002	0.05	0.10	0.24	0.07

供試材は鋳造後、図 3.2.1-5 に示す熱処理を施した。

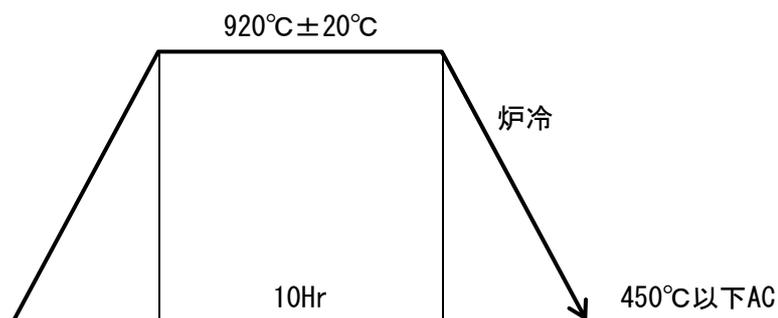


図 3.2.1-5 供試材の熱処理条件

b. 溶接試験体の製作

70mm 厚に機械加工した試験片を溶接し、図 3.2.1-6 のような開先加工を施した溶接試験体を作製した。溶接後の試験体外観を図 3.2.1-7 に示す。またそれぞれの溶接施工条件を表 3.2.1-7 にまとめた。

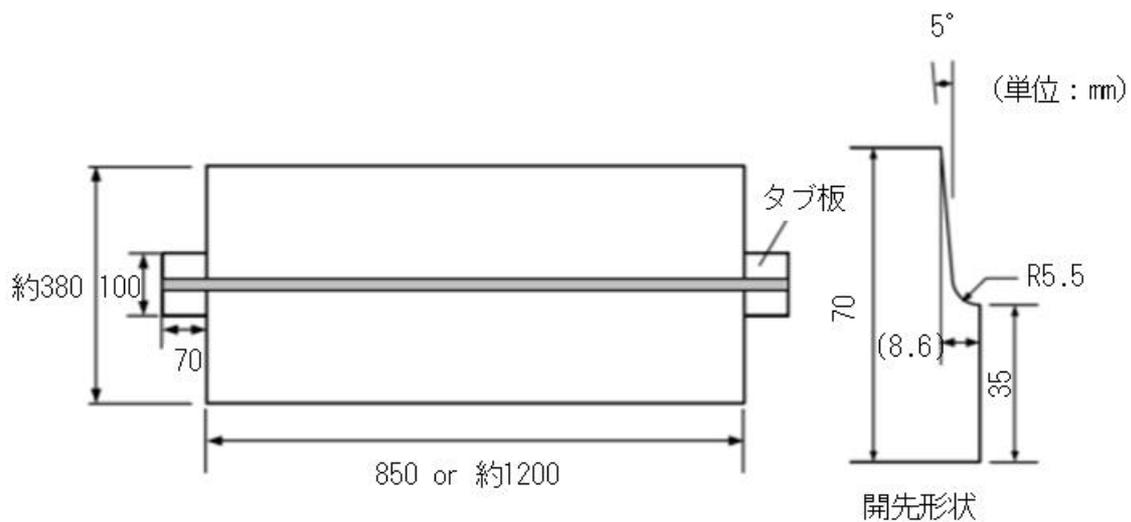


図 3.2.1-6 溶接試験体

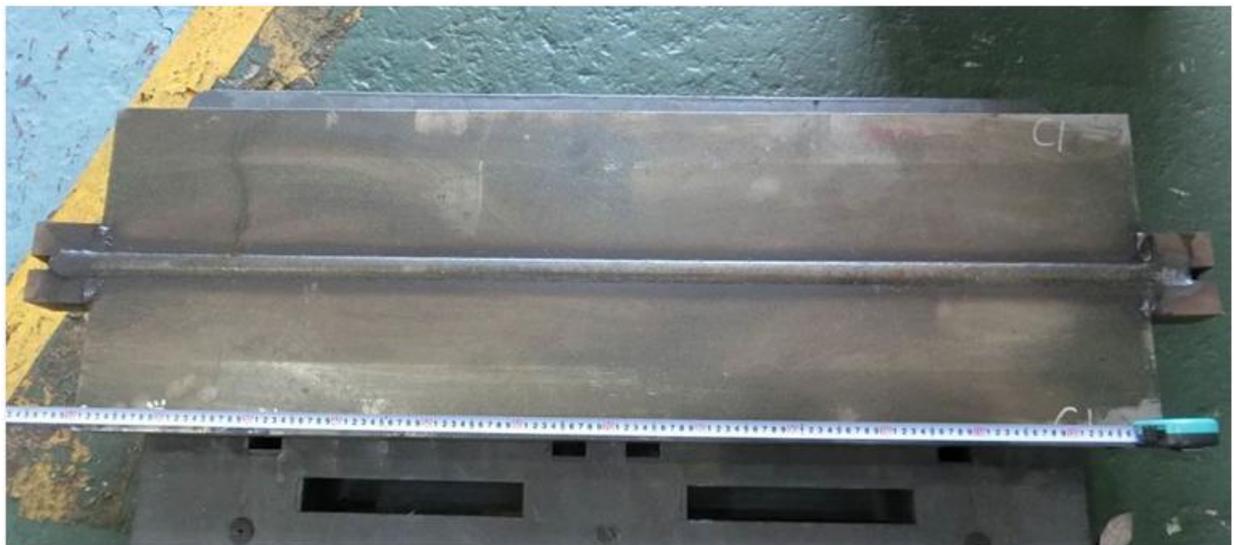


図 3.2.1-7 溶接後の試験体外観写真

表 3.2.1-7 溶接条件

モデル	補修溶接模擬	蓋溶接模擬
溶接方法	GMAW (半自動溶接)	GMAW (ロボット溶接)
ルート間隔 (mm)	0	0
シールドガス [流量]	100%CO ₂ (25 L/min.)	Ar-20%CO ₂ (25 L/min.)
溶接材料 [棒径]	MG-50 (Φ1.6mm)	MG-50 (Φ1.6mm)
溶接姿勢	下向き	下向き
電源極性	DCEP	DCEP
溶接電流 (A)	250~270	340~390
アーク電圧 (V)	26~32	32~35
溶接速度 (cm/min)	24~28	23~30
予熱・パス間温度 (°C)	50~230	250 以下
層数 [パス/層]	8 以上 (1 パス/1 層)	8 以上 (1 パス/1 層)
PWHT	600°C×1.5Hr/F.C.	-

c. 機械的試験

対象の炭素鋼及びその溶接部の機械的試験を実施した。試験項目とその内容を表 3.2.1-8 にまとめて示す。

表 3.2.1-8 試験内容一覧

試験項目		実施内容
引張試験	静的	母材及び溶接金属の引張特性を室温と-20℃で求める。
	高速	母材及び溶接金属の引張特性に及ぼすひずみ速度の影響を室温で求める。
シャルピー衝撃試験		母材及び蓋溶接、補修溶接継手の BOND、HAZ、溶接金属の低温衝撃特性を求める。
破壊靱性試験 (-20℃)	母材	静的 (K 値変化速度 $K \leq 2.75 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}/\text{sec.}$) 及び動的 ($K \geq 10^5 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}/\text{sec.}$) の破壊靱性を-20℃で求める。
	蓋溶接	溶接部を対象に破壊靱性を-20℃で求める。
	補修溶接	溶接部を対象に破壊靱性を-20℃で求める。

引張試験（静的）は以下の通り行った。

- ・対象部位 : 蓋溶接模擬モデルの母材とその溶接金属の 2ヶ所
- ・試験片 : 図 3.2.1-8 に示す通り
- ・試験温度 : 室温、-20℃
- ・試験速度 : 静的（破断まで 3mm/min. 一定で試験）

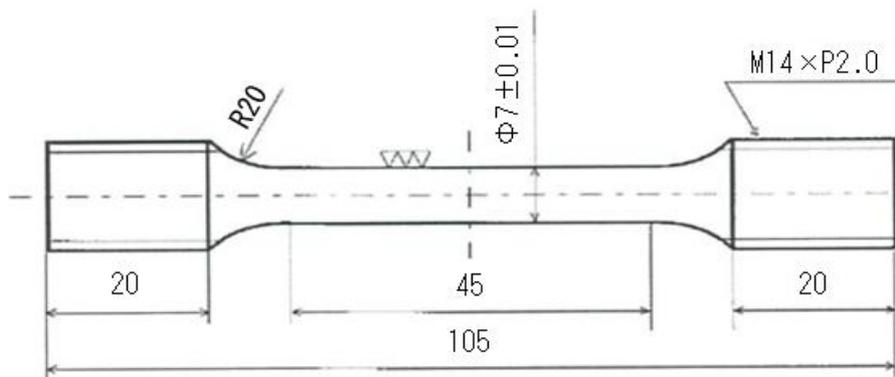


図 3.2.1-8 静的引張試験片

引張試験（高速）は以下の通り行った。

- ・対象部位 : 蓋溶接模擬モデルの母材とその溶接金属の 2ヶ所
- ・試験片 : 図 3.2.1-9 に示す通り
- ・試験温度 : 室温
- ・試験速度 : 3mm/sec.~5m/sec.の中で 3水準

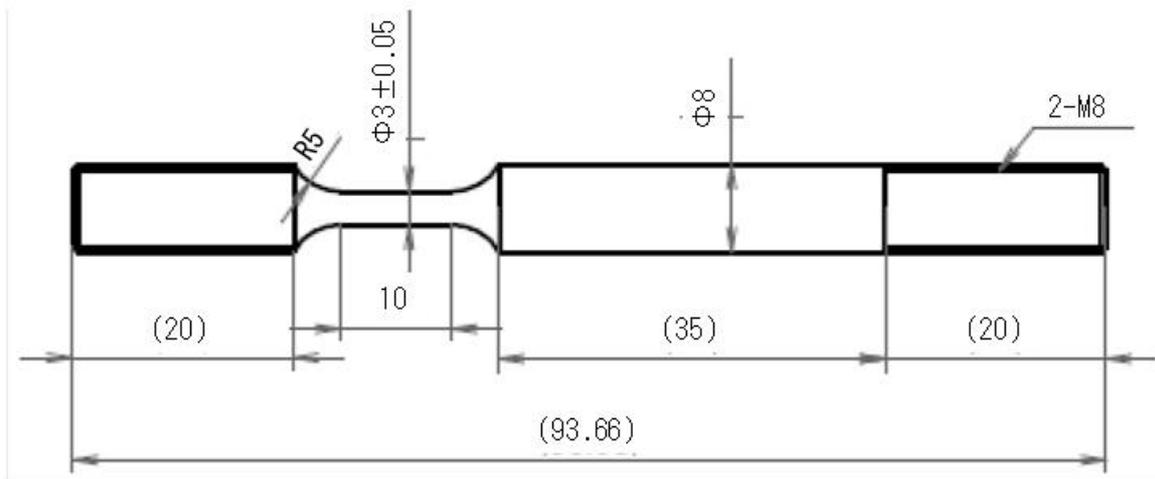
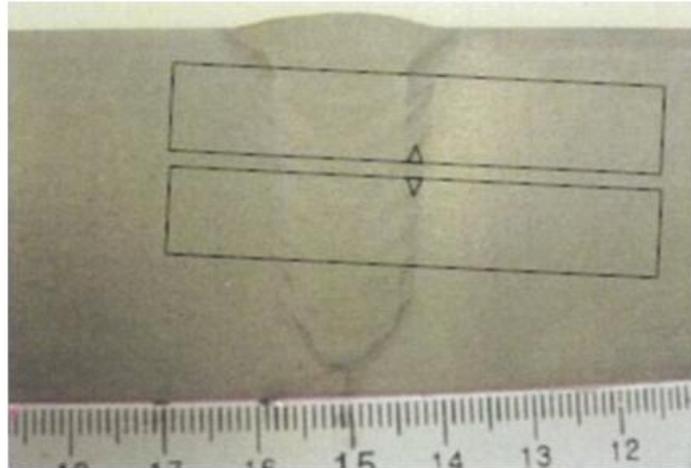


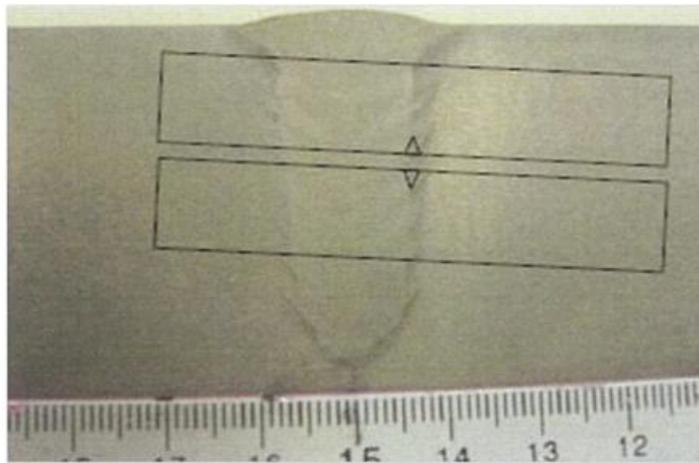
図 3.2.1-9 高速引張試験片

シャルピー衝撃試験は JIS Z 2242 に準拠し以下の通り行った。

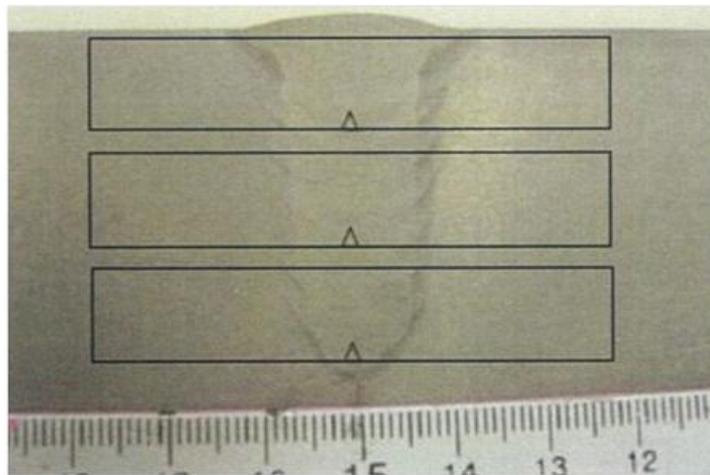
- ・対象部位 : 母材、補修溶接部及び蓋溶接部の 3 ヶ所
- ・試験片 : JIS Z 2202 4 号試験片 (V ノッチ試験片)
- ・ノッチ位置 : 母材、補修溶接部 (BOND 及び HAZ)、蓋溶接部 (BOND、HAZ 及び溶接金属) (図 3.2.1-10 参照)
- ・試験温度 : -40°C 、 -20°C 、 0°C



(a) HAZ



(b) BOND



(c) 溶接金属 (3段取り不可の場合、2段取り)

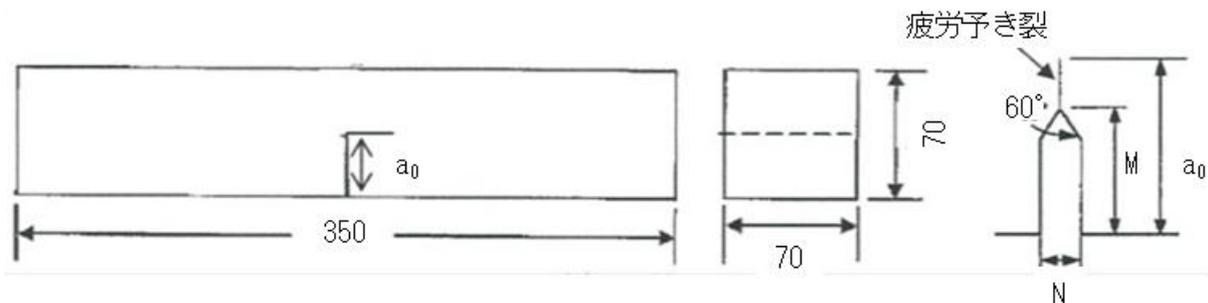
図 3.2.1-10 シャルピー試験片採取要領のイメージ

破壊靱性試験は ASTM E 1820 または ISO 12135 に準拠し、以下の通り行った。

- ・対象部位 : 母材、蓋溶接モデルの未溶着先端 (BOND と溶接金属) 及び HAZ、補修溶接モデルの HAZ
- ・試験片 : 図 3.2.1-11 母材 (ノッチ先端に疲労き裂を導入)
 図 3.2.1-12 蓋溶接未溶着まま (未溶着部をき裂とした)
 図 3.2.1-13 蓋溶接と補修溶接の HAZ と溶接金属 (採取イメージは図 3.2.1-14 参照、ノッチ先端に疲労き裂を導入)
- ・試験温度 : -20°C
- ・試験速度 : 静的 (K 値変化速度 $\dot{K} \leq 2.75 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}/\text{sec.}$)
 動的 (K 値変化速度 $\dot{K} \geq 10^5 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}/\text{sec.}$ (S.T.Rolf ら [2] が示す破壊靱性値の試験速度依存性の下限值に相当する速度))
- ・試験概観 : 図 3.2.1-15 (静的破壊靱性試験/万能試験機)
 図 3.2.1-16 (動的破壊靱性試験/落錘衝撃試験装置)

静的破壊靱性試験について、図 3.2.1-17 に試験の模式図を示す。荷重とノッチ端での開口変位 (COD) 及び荷重線変位 (LLD) を記録するとともに各評価部位について少なくとも 1 本の試験片にはひずみゲージを貼付し、ロードセル荷重とひずみの関係を記録した。

動的破壊靱性試験について、荷重の計測は、各試験片に図 3.2.1-18 に示すようにひずみゲージを貼付し、静的破壊靱性試験時に得られた荷重とひずみの関係を用いて、動的計測時のひずみ値から求めた。



($B=W=70\text{mm}$ 、 $a_0/W \doteq 0.5$ 、 $N=2\text{mm}$)

図 3.2.1-11 母材の破壊靱性試験片

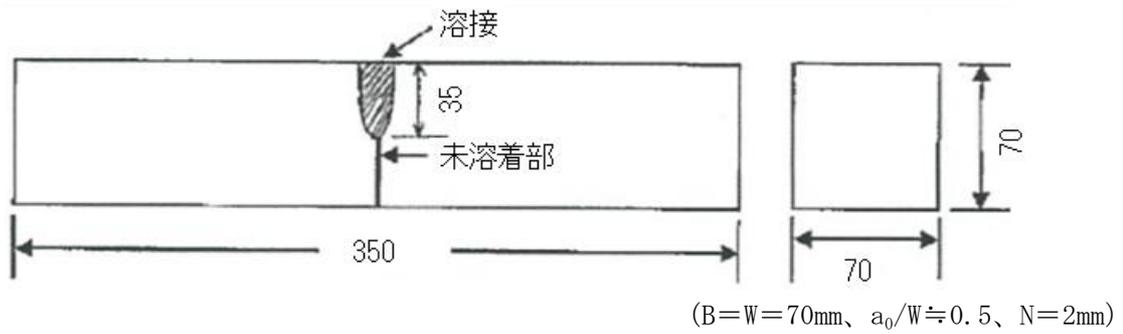


図 3.2.1-12 蓋溶接未溶着部の破壊靱性試験片

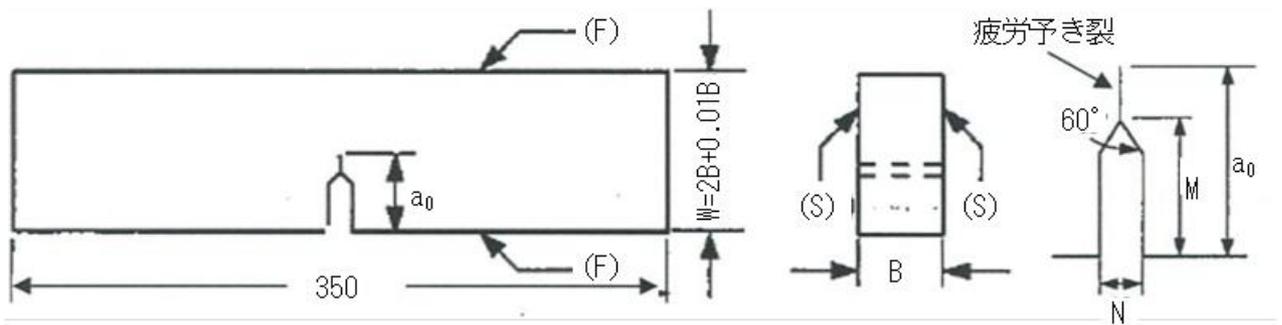


図 3.2.1-13 蓋溶接及び補修溶接のHAZと溶接金属の破壊靱性試験片

($B=35\text{mm}$ 、 $W=70\text{mm}$ 、 $a_0/W \approx 0.5$ 、 $N=2\text{mm}$)

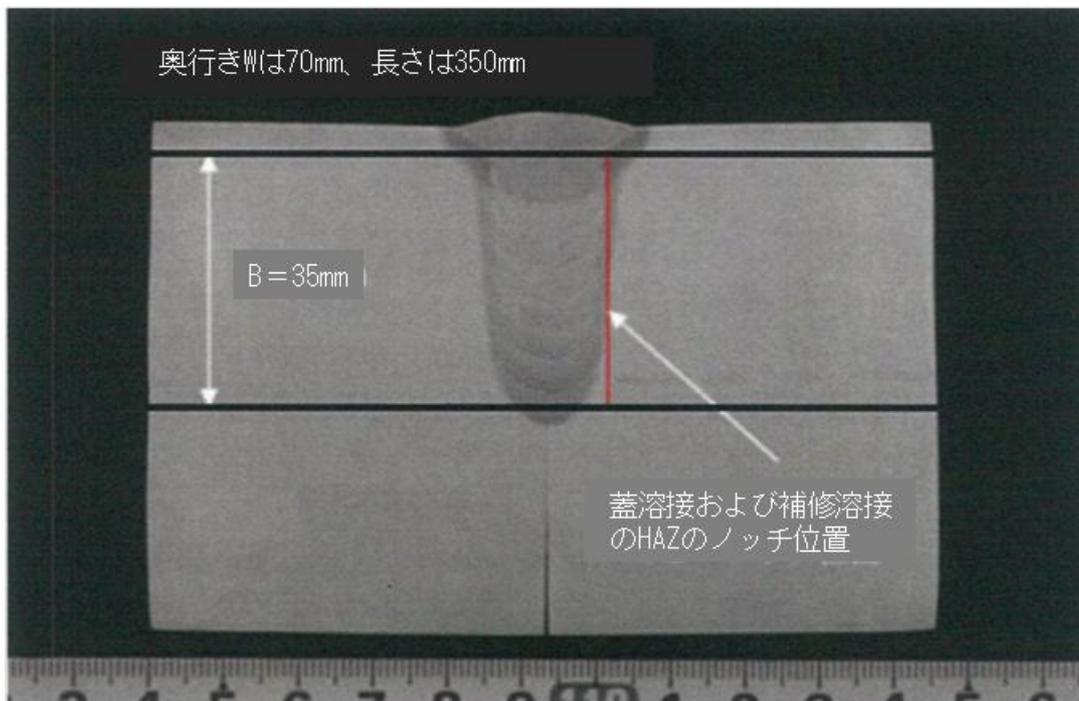


図 3.2.1-14 図 3.2.1-13 の試験片の採取要領イメージ

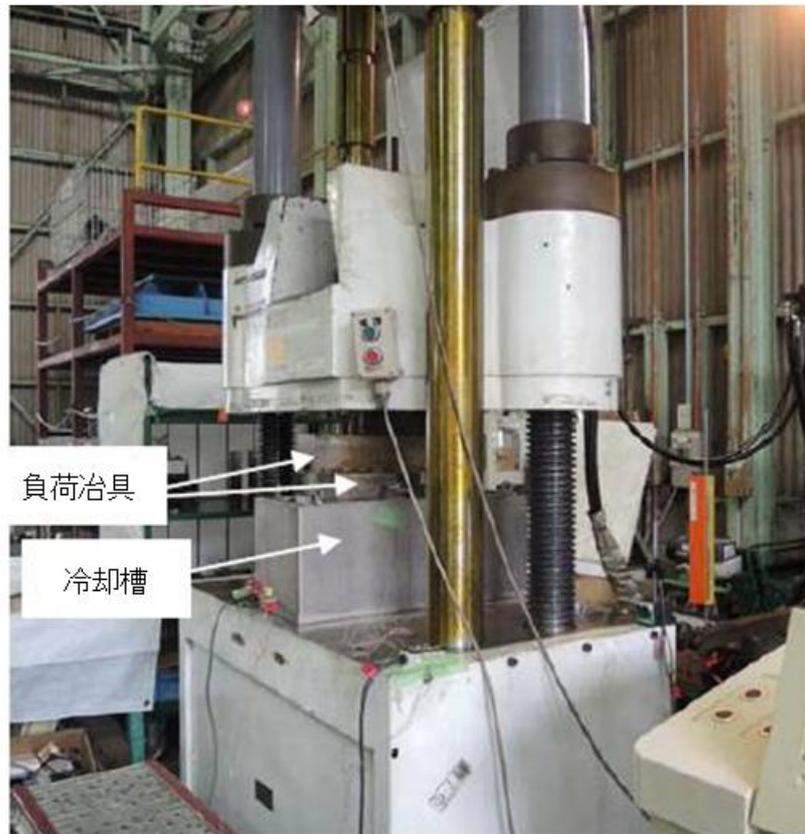


図 3.2.1-15 静的破壊靱性試験の試験要領



図 3.2.1-16 動的破壊靱性試験の試験要領（恒温槽で冷却後取り出して速やかに試験）

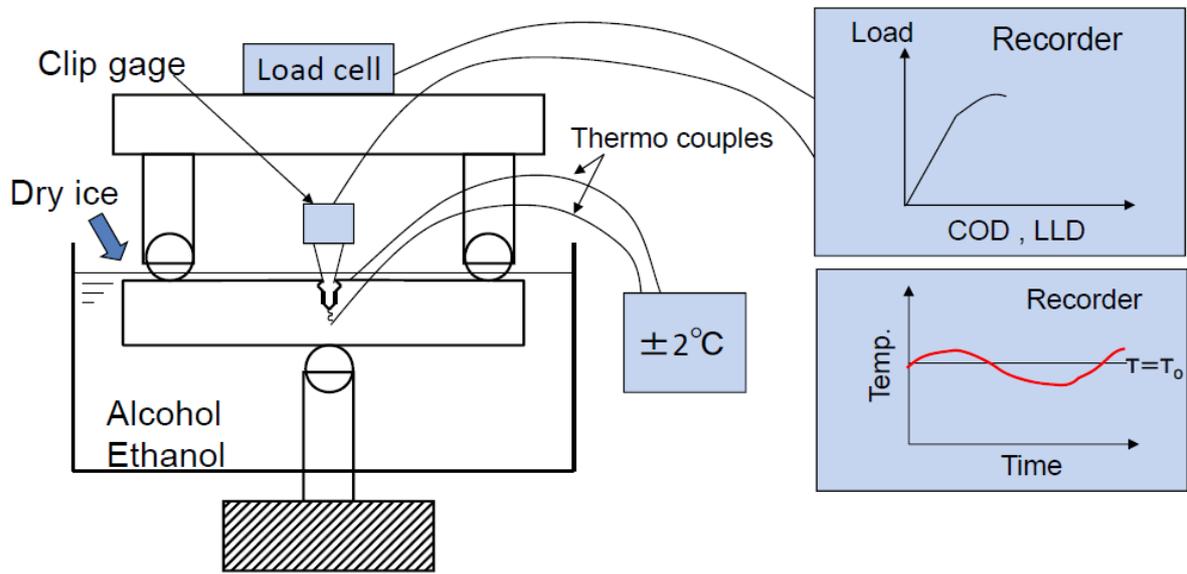


図 3.2.1-17 静的破壊靱性試験の試験要領（模式図）

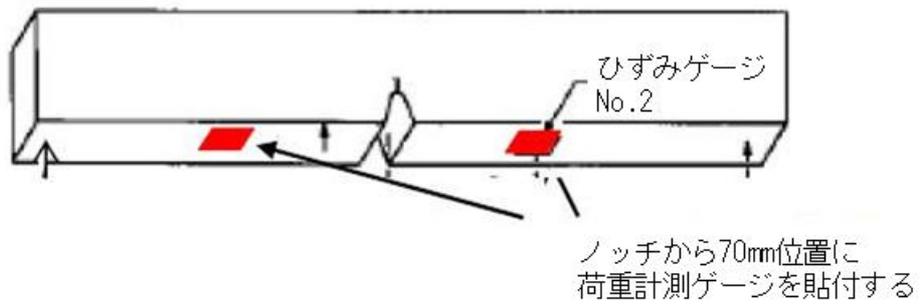


図 3.2.1-18 動的破壊靱性試験の荷重計測ゲージ

3) 試験結果

a. 引張試験結果

静的引張試験結果を表 3.2.1-9 に示す。また、0.2%耐力と試験温度の関係を図 3.2.1-19 に示す。低温になると強度は増加する。溶接部の強度は母材よりも高い。

表 3.2.1-9 静的引張試験結果（試験速度：破断まで 3mm/min 一定）

試験体	試験温度 (°C)	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (G.L.=35mm) (%)	絞り (%)
母材	23	265、261 [263]	484、486 [485]	30、30 [30]	57、55 [56]
	-20	291、287 [289]	521、520 [521]	27、30 [29]	53、45 [49]
蓋溶接金属	23	461、579 [520]	576、651 [614]	30、26 [28]	73、67 [70]
	-20	502、602 [552]	616、678 [647]	30、28 [29]	69、67 [68]

※表中 [] 内の数値は平均値を示す

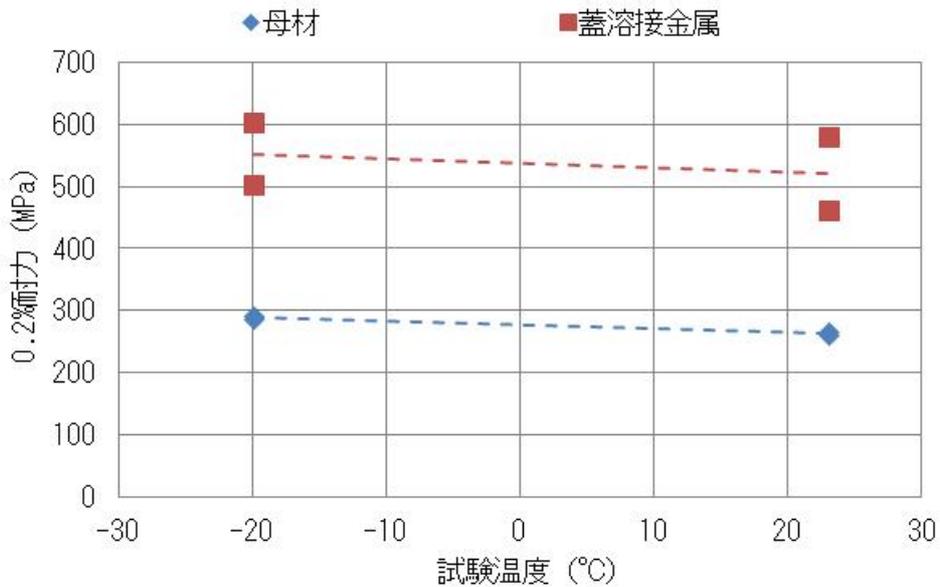


図 3.2.1-19 静的引張試験での 0.2%耐力の温度依存性

高速引張試験結果を表 3.2.1-10 に示す。また、0.2%耐力とひずみ速度の関係を図 3.2.1-20 に示す。ここで、図 3.2.1-20 のプロットには静的引張試験（ひずみ速度 $1.1 \times 10^{-3}/\text{sec.}$ ）の結果も含んでいる。0.2%耐力とひずみ速度の関係にはほぼ直線関係が成り立ち、0.2%耐力はひずみ速度が速くなるに伴い増加する。

表 3.2.1-10 高速引張試験結果

試験体	試験速度		0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (G.L.=8mm) (%)	絞り (%)
	引張速度 (mm/sec.)	ひずみ速度 (/sec)				
母材	3	0.3	319、316 [318]	534、521 [528]	44、35 [40]	56、45 [51]
	2000	200	555、562 [559]	605、599 [602]	54、65 [60]	52、45 [49]
	5000	500	488、524 [506]	624、602 [613]	45、30 [38]	58、29 [44]
蓋溶接金属	3	0.3	486、642 [564]	586、703 [645]	38、33 [36]	72、62 [67]
	2000	200	661、793 [727]	670、793 [732]	44、34 [39]	70、66 [68]
	5000	500	626、794 [710]	715、829 [772]	52、42 [47]	75、70 [73]

※表中 [] 内の数値は平均値を示す

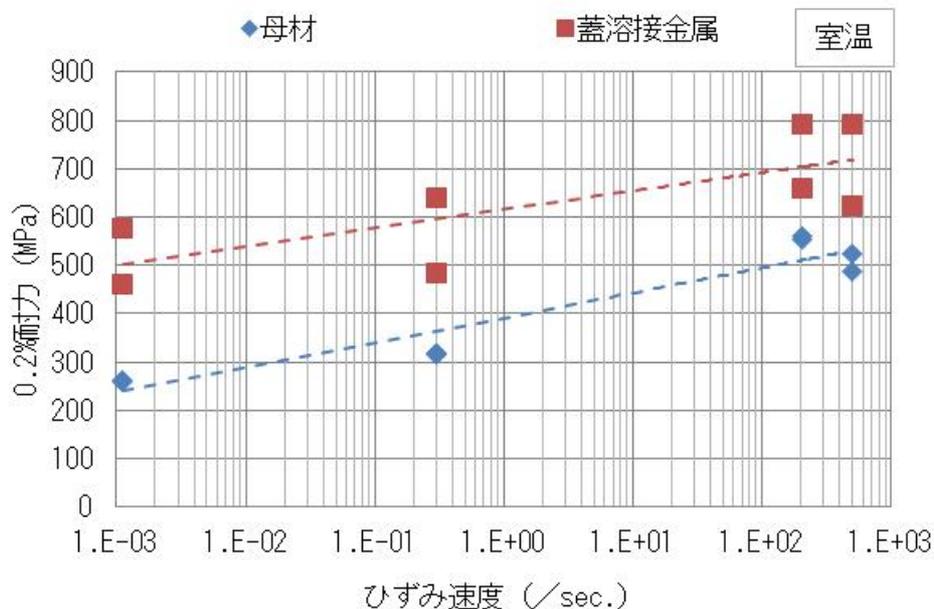


図 3.2.1-20 0.2%耐力のひずみ速度依存性

鋼材の降伏強さ σ_y に及ぼすひずみ速度及び温度の影響は、Bennett ら [3] が活性化エネルギー論的見地より導いた関係に基づき、Strain rate - temperature parameter (R) を用いて(1)及び(2)式のように表わすことができる。

$$\sigma_y = \alpha \exp \frac{\beta}{R} \quad (1)$$

$$R = T \cdot \ln \left(\frac{A}{\dot{\epsilon}} \right) \quad (2)$$

ここで、 α 、 β は定数、 T は絶対温度 (K)、 $\dot{\epsilon}$ はひずみ速度 (1/sec.)、(2)式の A は材料定数で、一般的に $A=10^8$ が用いられる。

上述した母材及び蓋溶接金属の引張試験結果より導出した式の定数 α 及び β を表 3.2.1-11 にまとめて示す。

表 3.2.1-11 母材及び蓋溶接金属の α と β

試験体	α	β
母材	130	5310
蓋溶接金属	373	2471

後藤ら [4] は、ひずみ速度及び温度を考慮した真応力 (σ_a) - 対数ひずみ線図 (ϵ_a) の関係を(3)、(4)及び(5)式で与えている。

$$\sigma_y = F \epsilon_a^n \quad (3)$$

$$F = \sigma_{0.2} / \epsilon_k^n \quad (4)$$

$$\epsilon_k = 0.002 + \sigma_{0.2} / E \quad (5)$$

ここで、 E はヤング率、 n はひずみ硬化係数。

母材及び蓋溶接金属の -20°C の静的引張試験結果より導出した(3)式の n 値を表 3.2.1-12 にまとめて示す。また、表 3.2.1-12 の平均値を用いて(3)式から与えられるひずみ速度をパラメータとした母材及び蓋溶接金属の -20°C における真応力 - 対数ひずみ線図を図 3.2.1-21 に示す。

表 3.2.1-12 -20°Cの静的引張試験結果より導出したひずみ硬化係数

試験体	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	ひずみ硬化係数	
		個別値	平均値
母材	291	0.229	0.230
	287	0.230	
蓋溶接金属	502	0.159	0.141
	602	0.122	

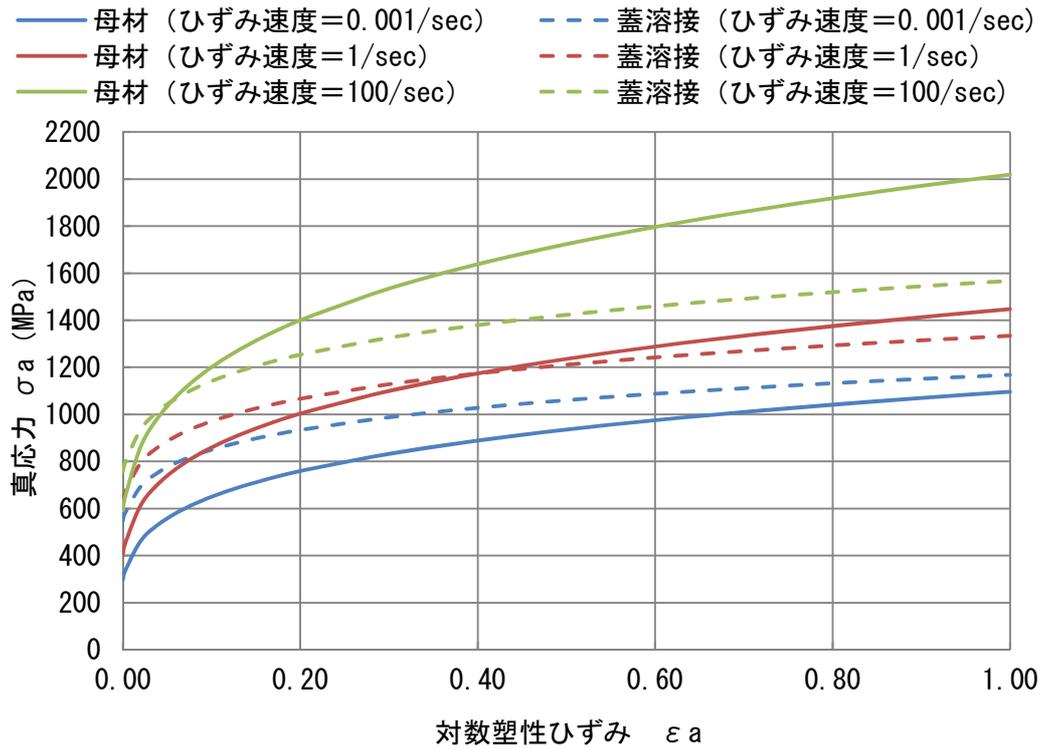


図 3.2.1-21 母材と蓋溶接金属の-20°Cでの真応力 - 対数塑性ひずみ線図

b. シャルピー衝撃試験結果

母材、蓋溶接部及び補修溶接部の各ノッチ位置について、吸収エネルギーの平均値を図 3.2.1-22 に示す。いずれの試験温度でも母材の吸収エネルギーが最も低い。HAZ の吸収エネルギーが高いのは、試験体は多層溶接をしており、HAZ は溶接時の入熱により加熱、冷却を繰り返されたためと考える。

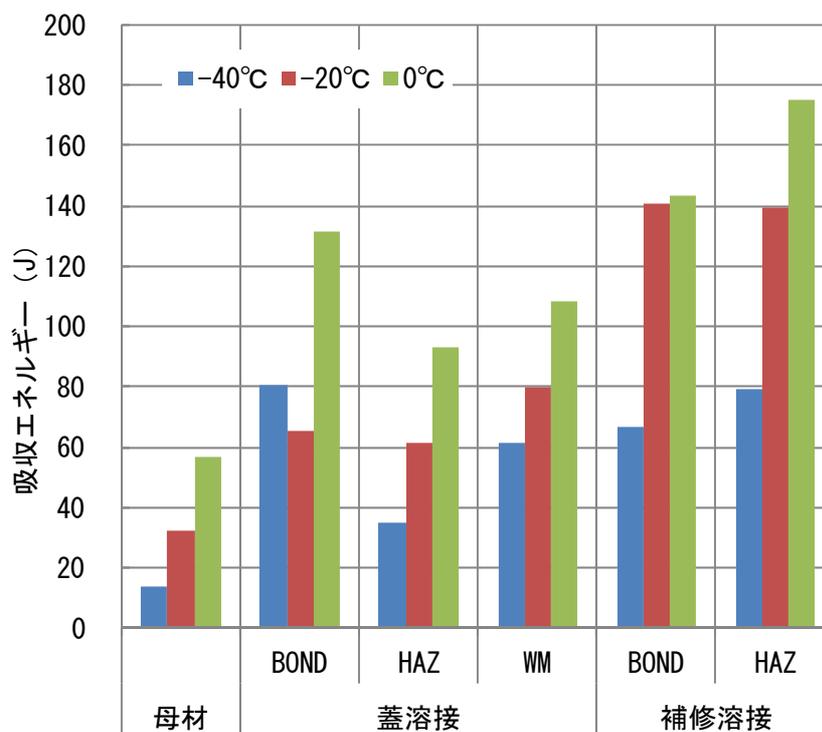


図 3.2.1-22 母材、蓋溶接部及び補修溶接部の吸収エネルギーの平均値の比較

c. 破壊靱性試験結果

−20℃での静的破壊靱性試験結果を図 3.2.1-23 に示す。本試験では、B=W=70mm の正方形断面の 3 点曲げ試験片（母材、蓋溶接未溶着まま、蓋溶接金属）と B=35mm、W=70mm の試験片（蓋溶接 HAZ、補修溶接金属、補修溶接 HAZ）の 2 種類を用いたが、ここでは、ASTM E1921 及び ISO12135 に従い B=35mm の破壊靱性値から、平面ひずみ及び小規模降伏を満足する B=70mm の破壊靱性値へ補正した。

平均値で比較すると、蓋溶接の未溶着部<蓋溶接金属<蓋溶接の HAZ<母材<補修溶接の HAZ の順に高くなる。

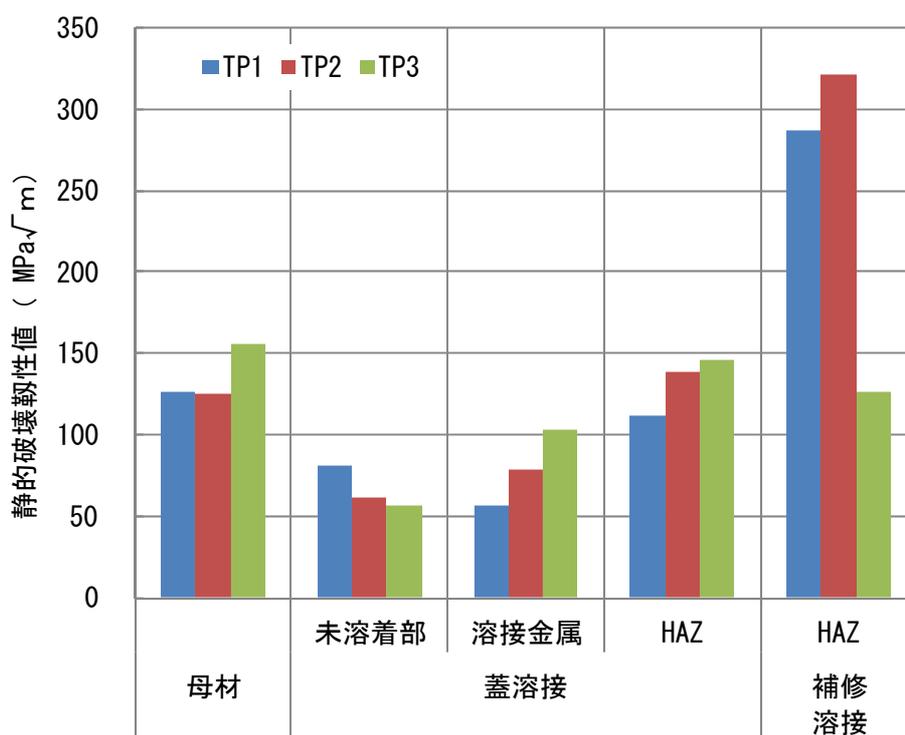


図 3.2.1-23 静的破壊靱性試験結果 (B=70mm に統一)

−20℃での動的破壊靱性試験結果を図 3.2.1-24 に示す。静的破壊靱性試験結果と同様に、試験厚 B=35mm の破壊靱性値は B=70mm の破壊靱性値へ補正した結果を示している。

ノッチ位置に対する動的破壊靱性値の平均値を比較すると、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 の順に高くなる。

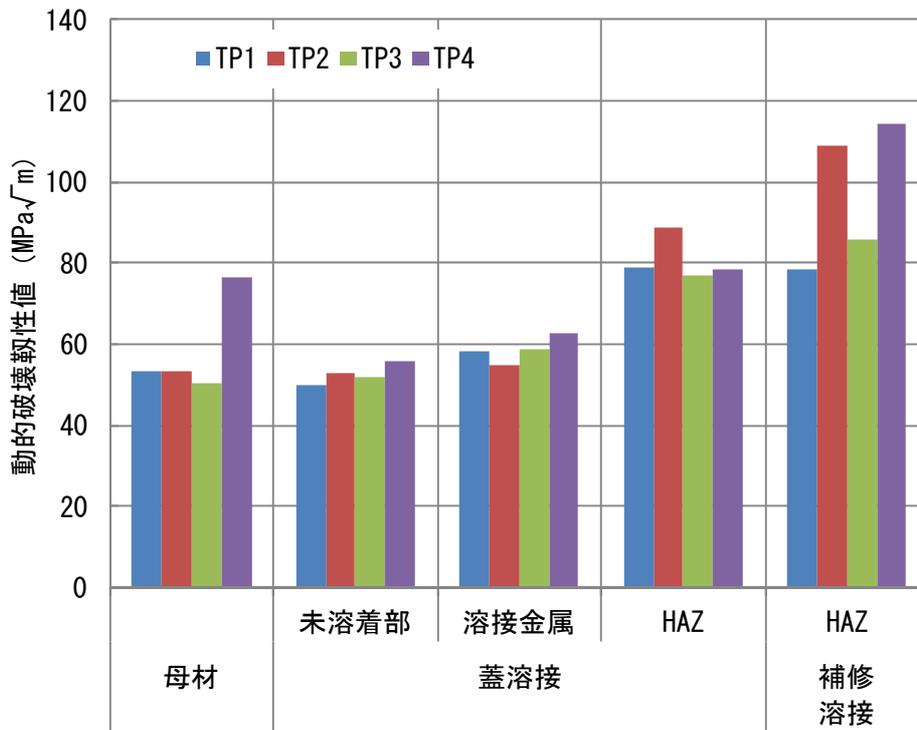


図 3.2.1-24 動的破壊靱性試験結果 (B=70mm に統一)

破壊靱性値と K 値変化速度の関係を図 3.2.1-25 に示す。K 値変化速度が大きくなると破壊靱性値は低下するが、静的破壊靱性値が低い蓋溶接の未溶着及び溶接金属の場合は K 値変化速度の影響は小さい。静的及び動的破壊靱性値の下限値は蓋溶接の未溶着部で生じており、それぞれ 56 及び 50MPa \sqrt{m} となる。

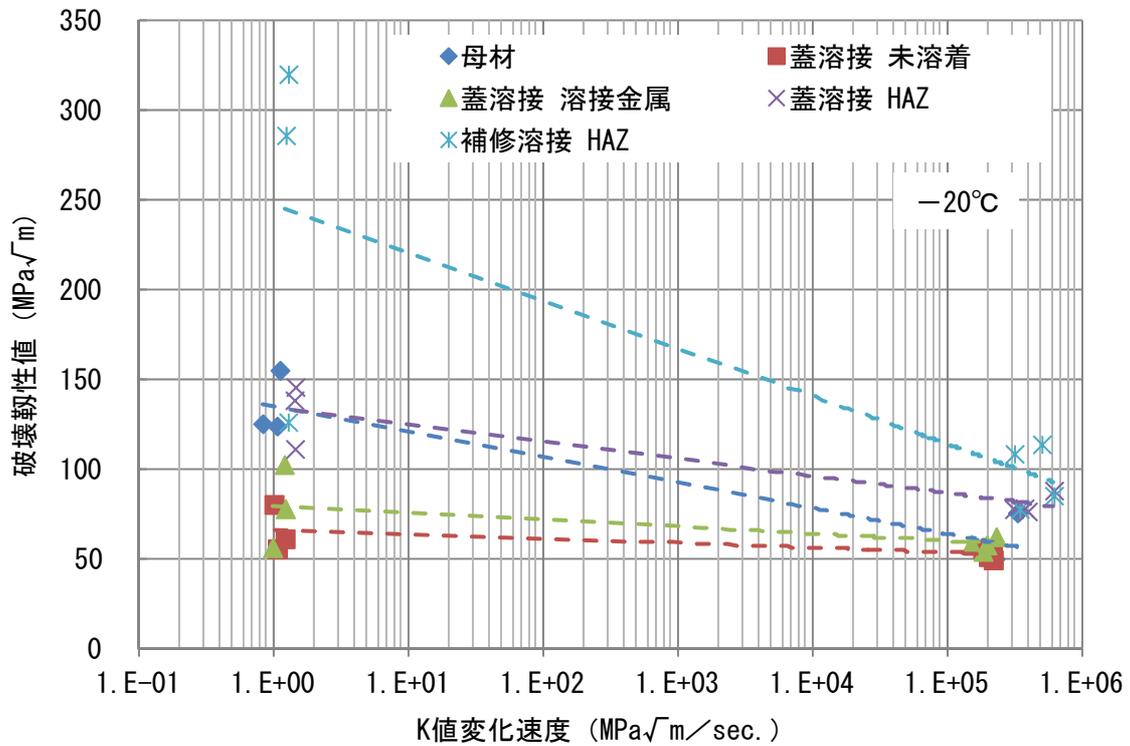


図 3.2.1-25 破壊靱性値 (B=70mm に統一) と K 値変化速度の関係

4) まとめ

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 0.2%耐力とひずみ速度の間にはほぼ直線関係が成り立つことを確認し、母材及び蓋溶接金属の0.2%耐力 ($\sigma_{0.2}$) に及ぼすひずみ速度及び温度の影響を Bennett ら [3] の式を用いて定式化した。
- ② 母材及び蓋溶接金属における、ひずみ速度及び温度の影響を考慮した -20°C での真応力 - 対数ひずみ線図を定式化した。
- ③ 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。
- ④ 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 -20°C での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、静的破壊靱性試験では、最小値 $56\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 、動的破壊靱性試験では最小値 $50\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ を呈した。

低温のシャルピー衝撃試験は遷移温度域では 3 本平均で行うことが多い。しかし、今回は供試材等の兼ね合いから、シャルピー衝撃試験は 2 本で実施していたため、シャルピー衝撃試験のバラつきを確認することは課題と考えられる。

(3) 内容物の耐久性（靱性）の妥当性評価

1) 目的

内容物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。平成27年度は、汎用の解析コードを用いて内容物の使用環境において最も厳しい衝撃を与えると考えられる落下事象を把握し、鋳鋼品の適用の可能性を見出した。平成28年度は、平成27年度に把握した最も厳しい落下条件に対して、実際の内容物を模擬した蓋溶接部を含めた破壊力学評価を低合金鋼鋳鋼に対して行い、耐久性（靱性）を評価した。

平成29年度は炭素鋼を対象として平成28年度と同様に蓋溶接部を含めた破壊力学評価を行い、耐久性（靱性）を評価する。

2) 試験方法

a. 落下解析

平成27年度に把握した落下事象及び平成28年度の低合金鋼鋳鋼に対する破壊力学評価結果より、最も厳しいと考えられる落下条件を検討した。抽出した表 3.2.1-13 に示す落下条件に対して、汎用の解析ソフト LS-DYNA (version : smp s R7.1.2) を用いて応力解析を実施した。内容物の材料物性値は、前項(2)で実施した高速引張試験結果を用いた。

なお、平成28年度の低合金鋼の検討において、50mm厚では厳しい結果のため、角 R 変更を評価し適用の可能性を見出した。しかし、今回、炭素鋼は低合金鋼よりも耐久性（靱性）が低いため、50mm厚角 R 変更のみ検討を実施した。

表 3.2.1-13 解析ケース

ケース	容器	溶接深さ	落下姿勢	落下標的	落下高さ	材質	解析モデル
1	200mm厚容器 (図 3.2.1-26)	35mm	角コーナー	剛床	8m	炭素鋼	図 3.2.1-28
2	50mm厚容器 角 R 変更 (図 3.2.1-27)						図 3.2.1-29

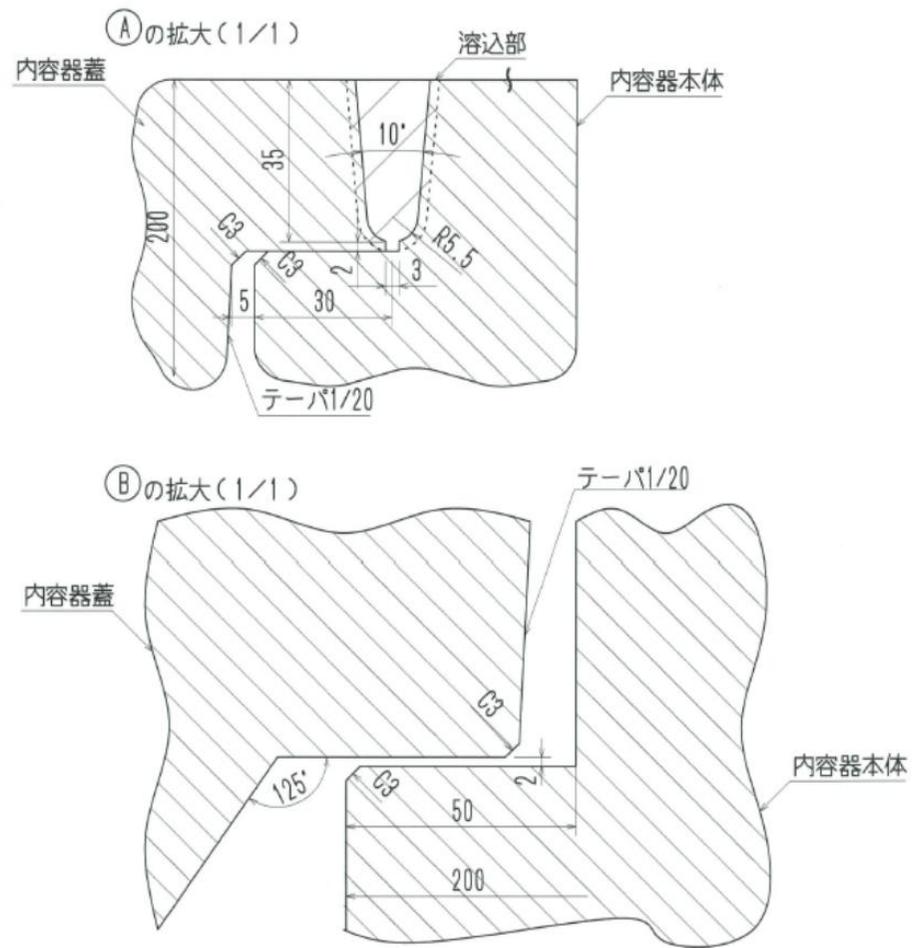
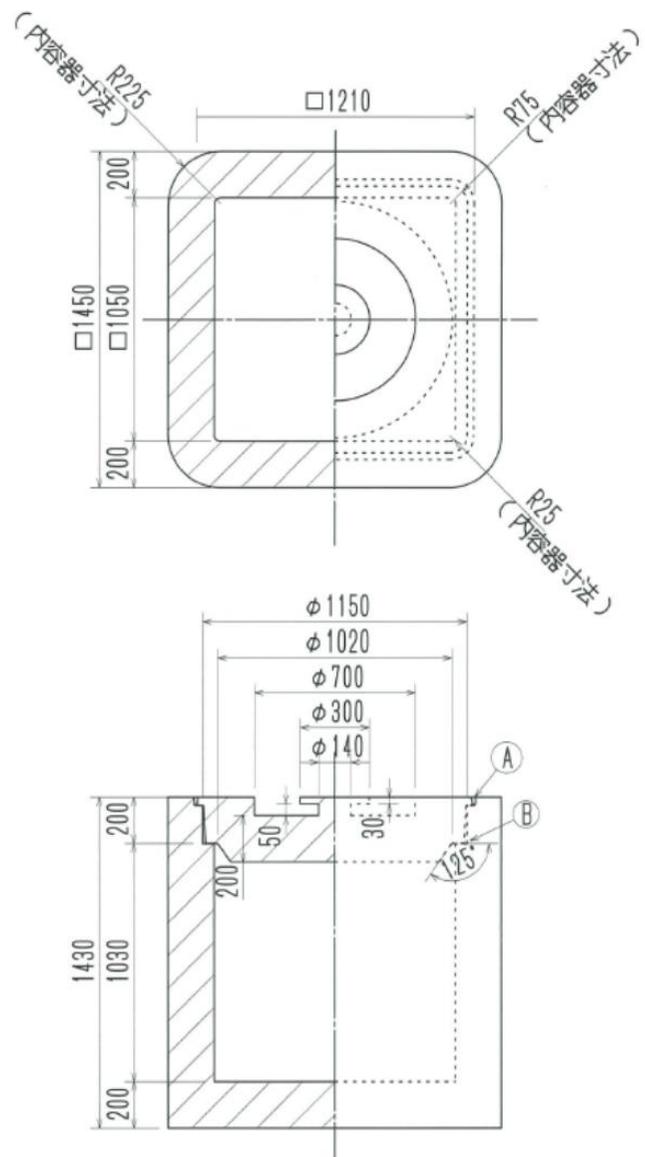


図 3.2.1-26 200mm 厚内容器：ケース 1

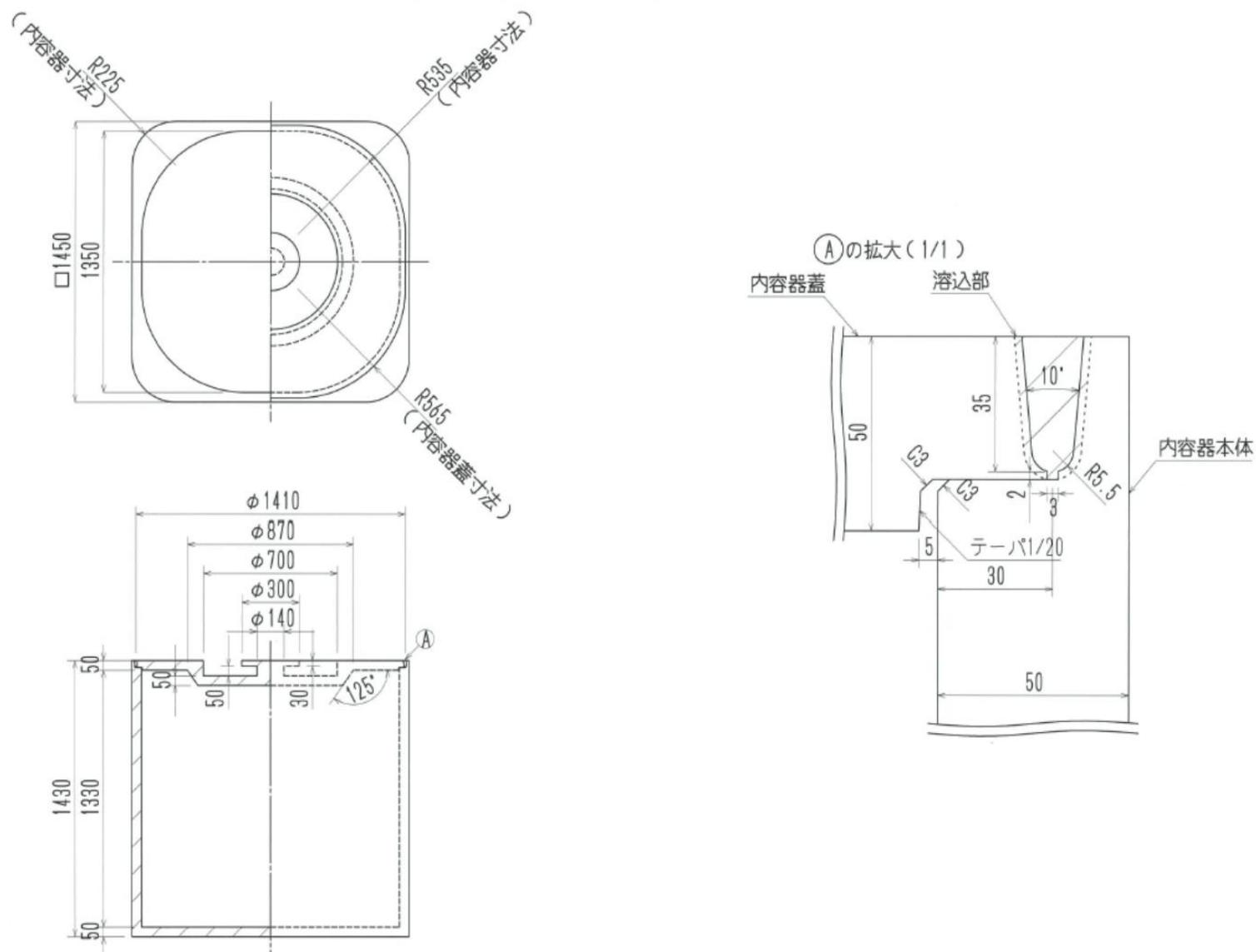
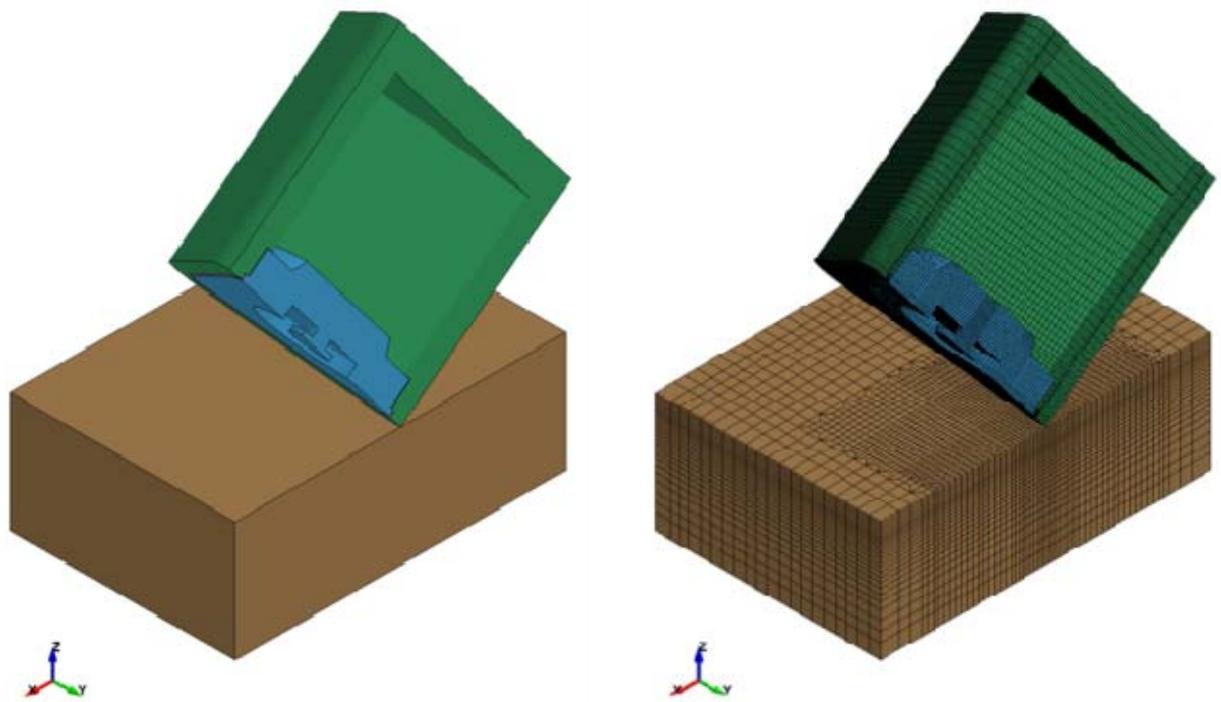
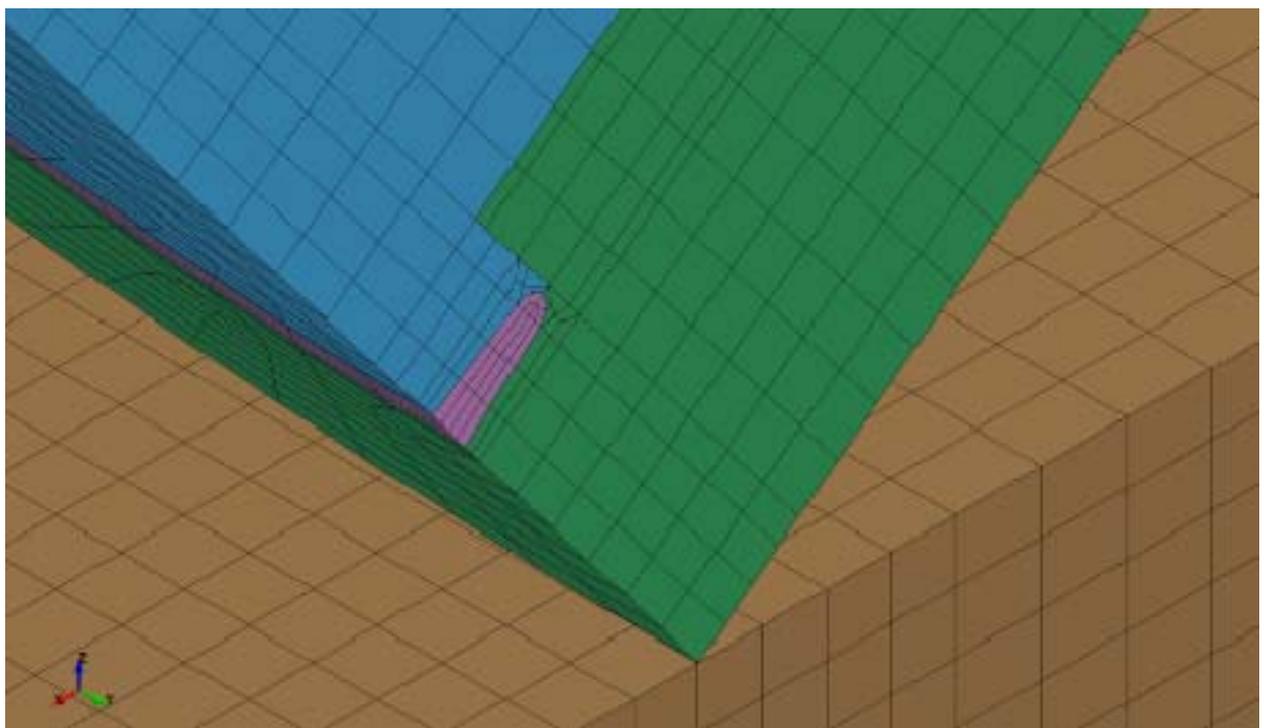


図 3.2.1-27 50mm 厚内容器 (角 R 変更) : ケース 2

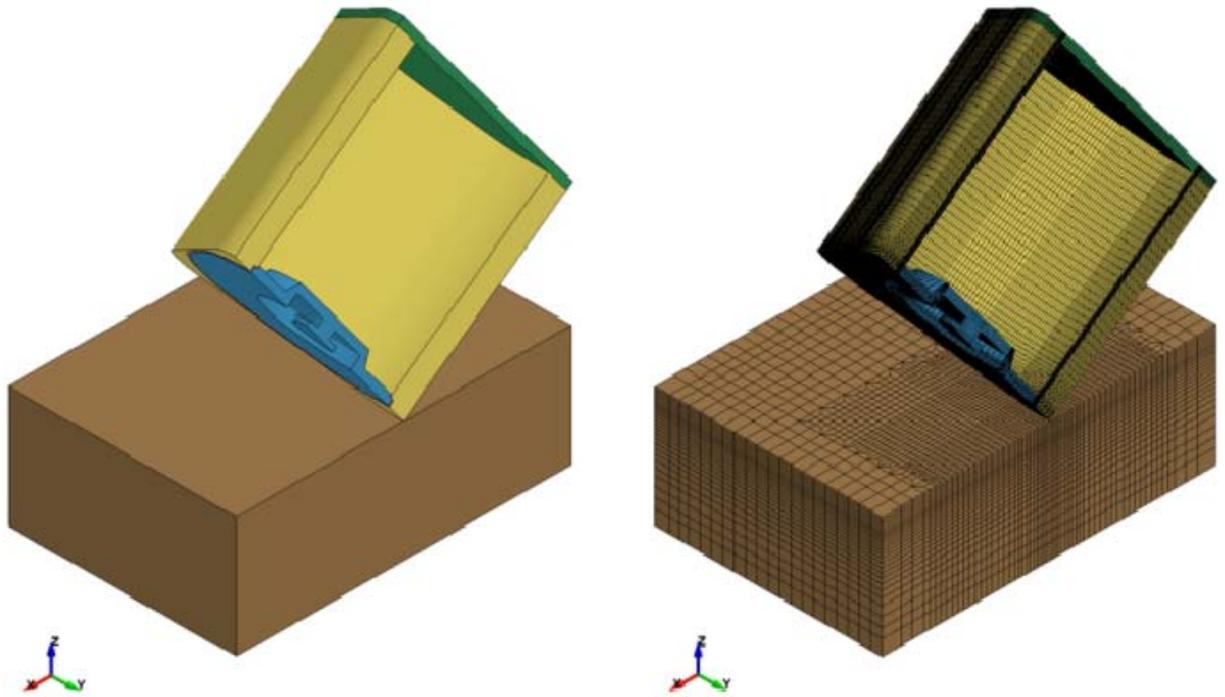


(モデル全体 要素分割非表示/表示)

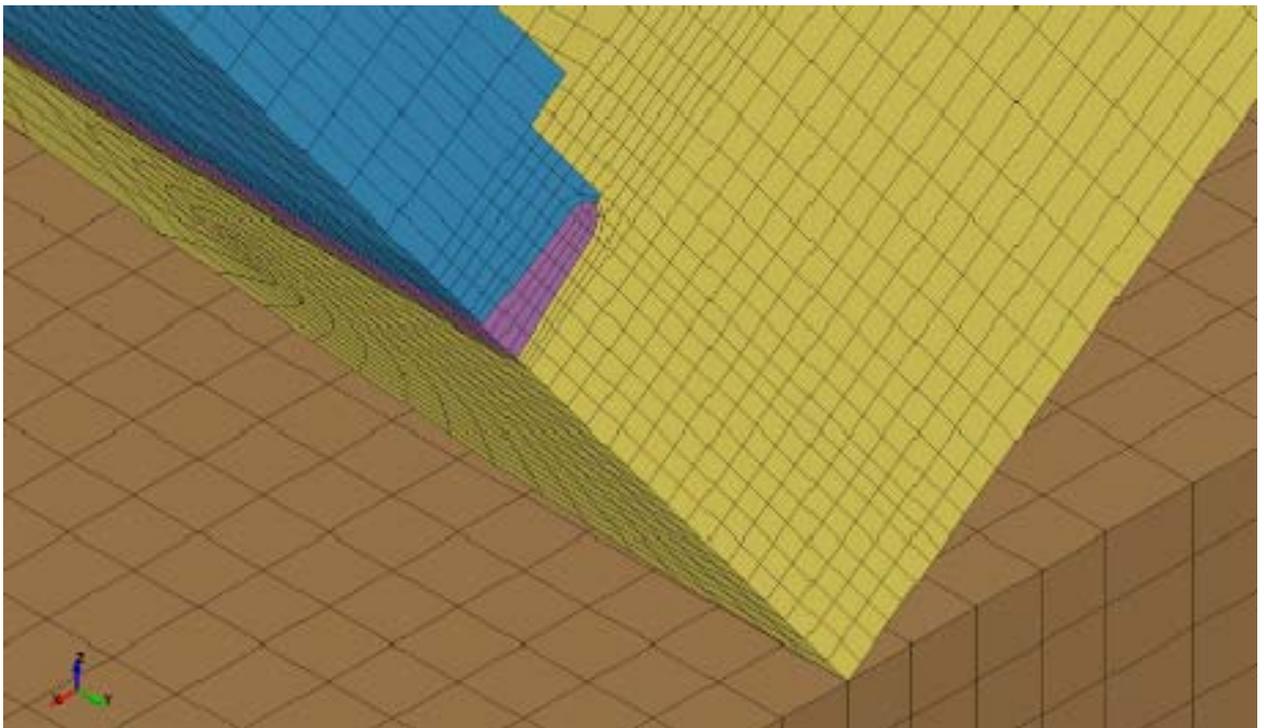


(衝突部詳細)

図 3.2.1-28 ケース 1 落下解析モデル



(モデル全体 要素分割非表示/表示)



(衝突部詳細)

図 3.2.1-29 ケース 2 落下解析モデル

b. K 値解析

内容器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を検討するため、未溶着部の応力拡大係数 K （以下、『 K 値』という。）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。前述 a. の落下解析に使用された LS-DYNA による解析モデルの容器蓋側の上部を切出し、未溶着部の K 値算出用に要素を再分割した。ケース 1 及び 2 の K 値解析用モデルをそれぞれ図 3.2.1-30 及び図 3.2.1-31 に示す。

K 値解析では、 K 値算出用に要素を再分割したモデルの端面と落下解析で用いられた解析モデルの一部を、ABAQUS の結合接触機能（TIE：不連続な要素分割面を互いに結合する機能）により解析的に結合させた。なお、使用した要素の種類は、低減積分要素（C3D8R）である。

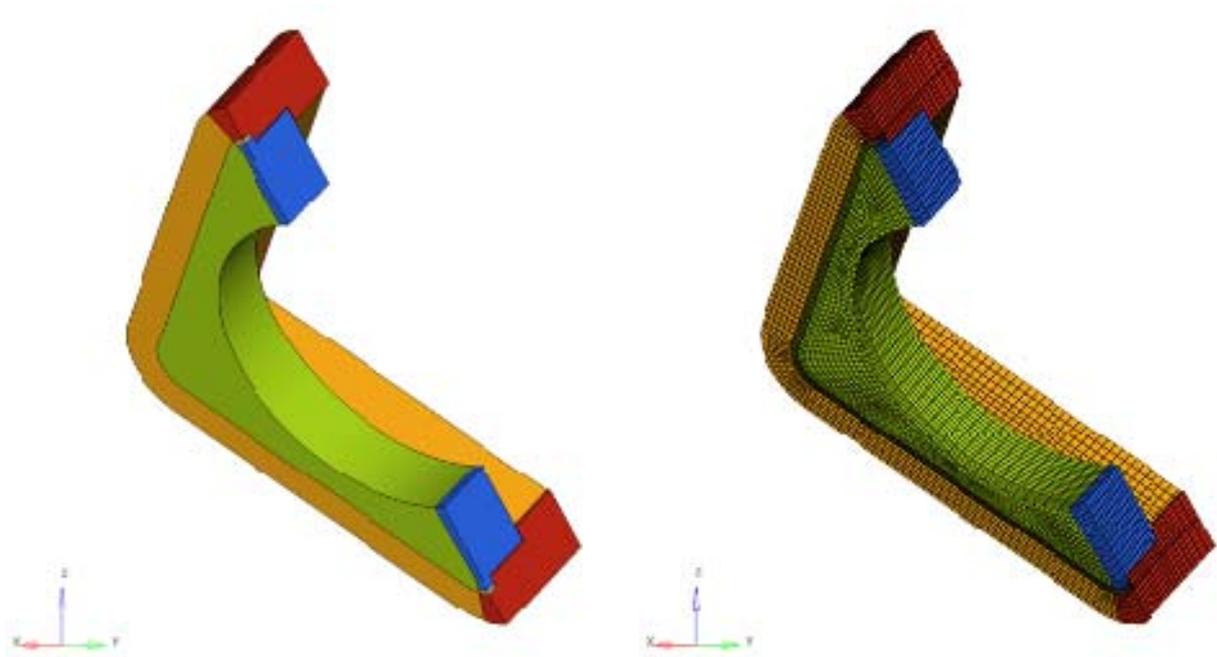
K 値解析モデルでは、図 3.2.1-32 及び図 3.2.1-33 に示すように未溶着部先端に要素を集中させており、 K 値計算用にき裂先端を中心とした周積分経路を設けた。ちなみに、き裂先端近傍の面内最小要素寸法は、 $0.02\text{mm} \times 0.02\text{mm}$ である。

解析概要を以下に示す。

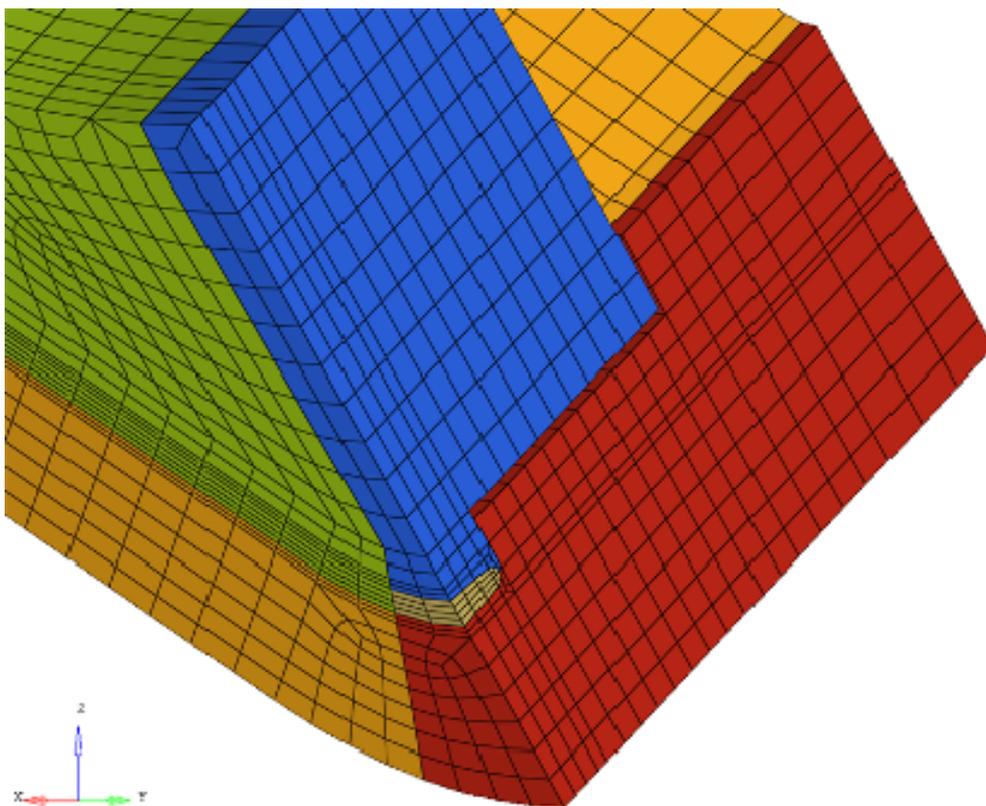
- ・解析方法 : 静的弾性解析
- ・使用材料 : 一般鋼材（ヤング率 206GPa、ポアソン比 0.3）
- ・拘束条件 : K 値モデル抽出面に落下解析での各並進方向変位を付与（図 3.2.1-34、図 3.2.1-35 参照）

c. 脆性破壊強度評価

鋳鋼及び補修溶接部に想定し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間関係を求めた。蓋溶接部の未溶着部からの脆性破壊強度は、3 次元数値解析で求めた K 値と前項 (2) の機械的試験で求めた破壊靱性値を用いて評価した。

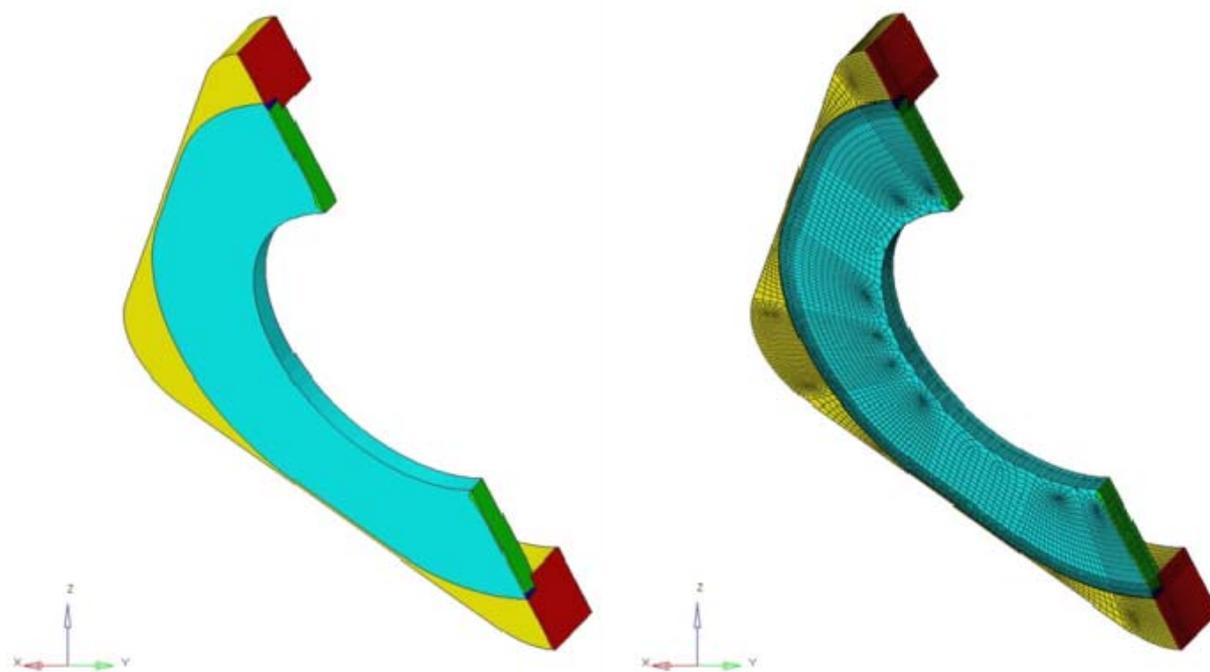


(モデル抽出部 要素分割非表示/表示)

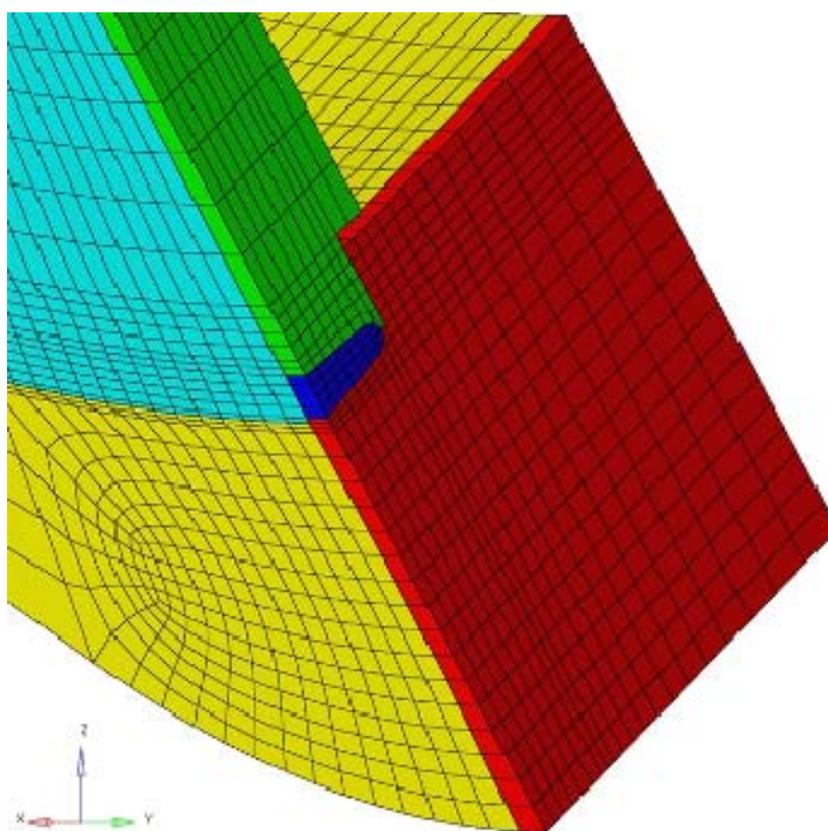


(衝突部近傍)

図 3.2.1-30 ケース 1 K 値解析モデル

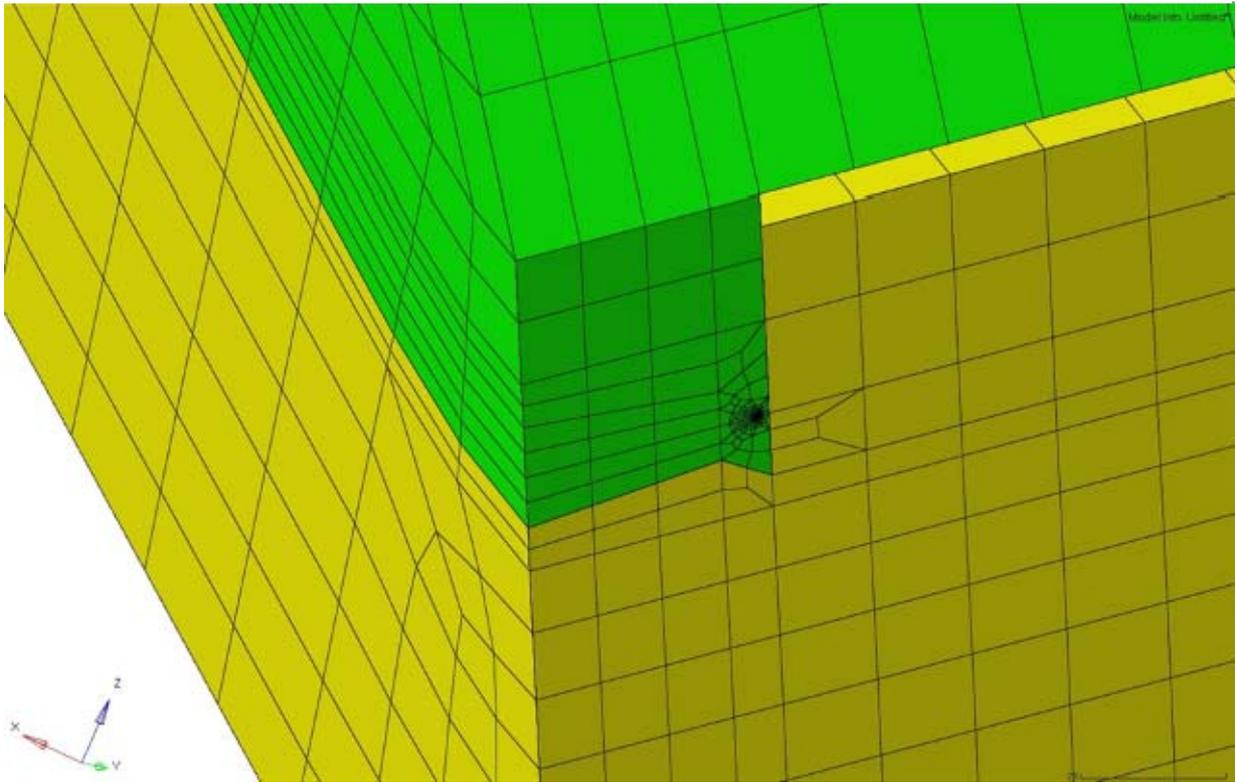


(モデル抽出部 要素分割非表示/表示)

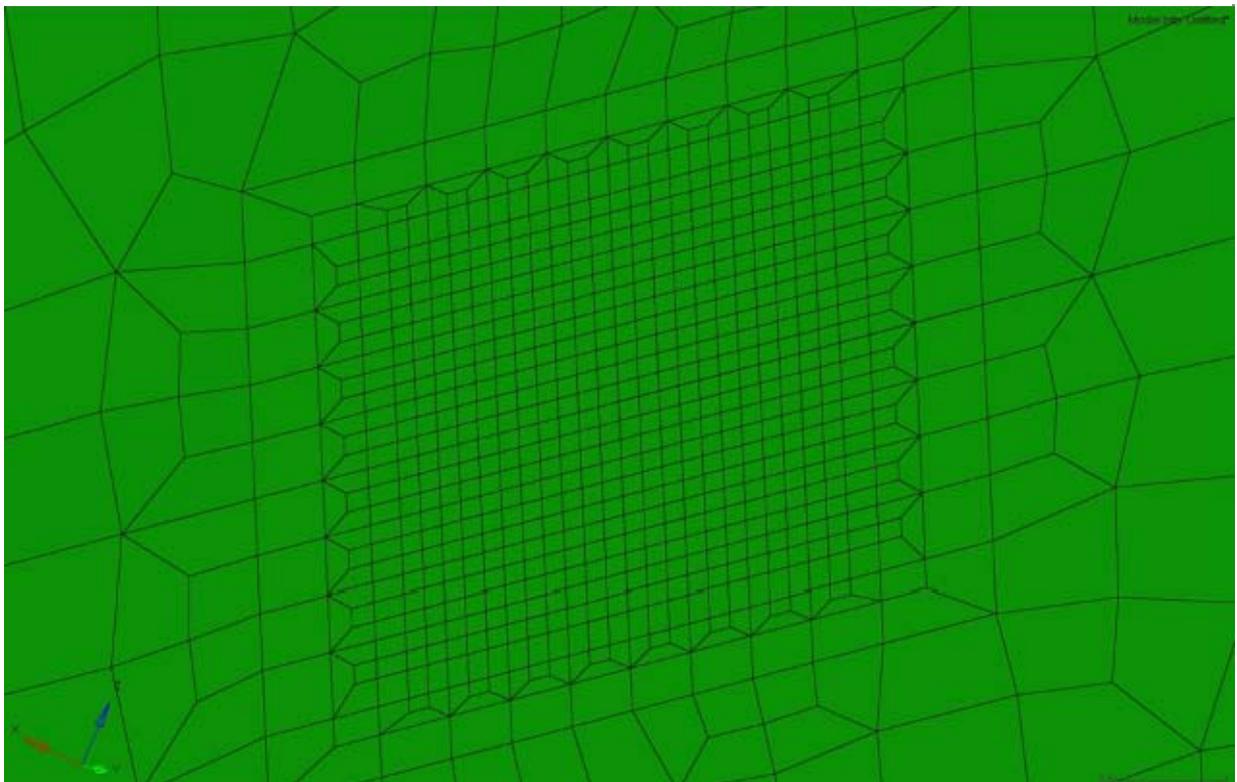


(衝突部近傍)

図 3.2.1-31 ケース 2 K 値解析モデル

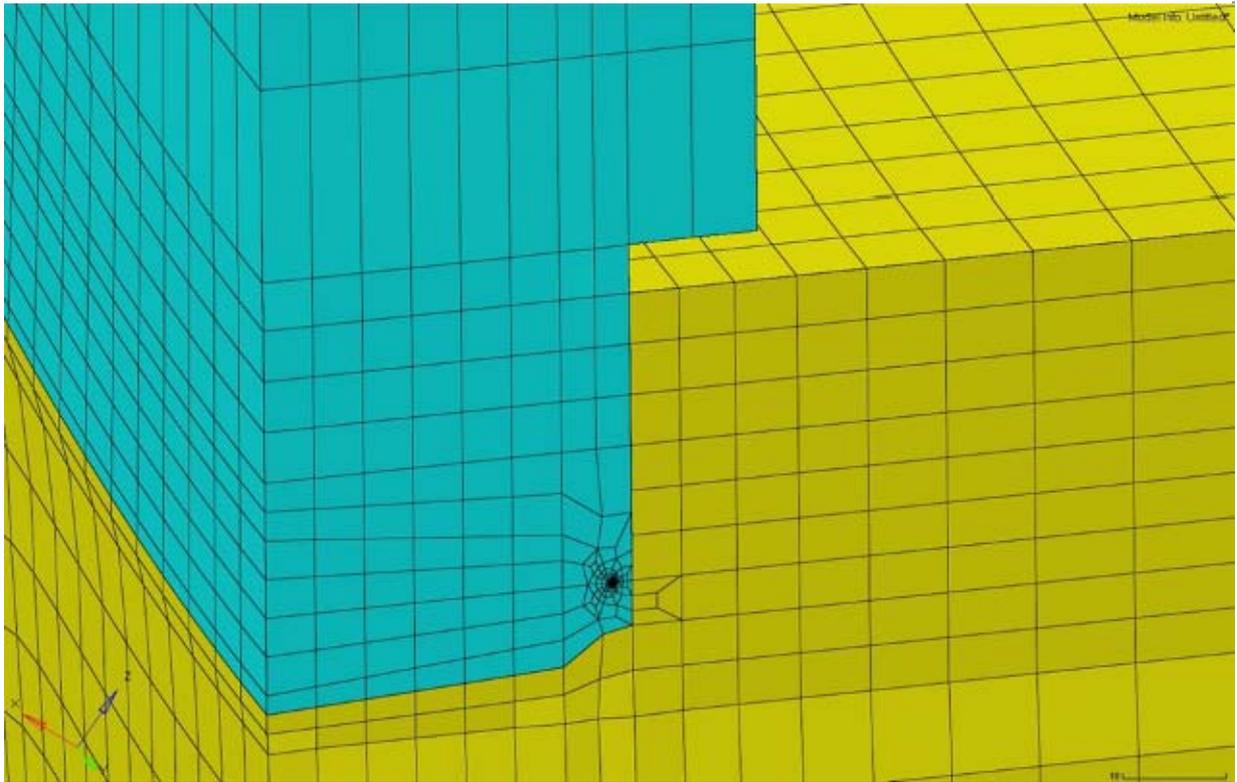


(全域)

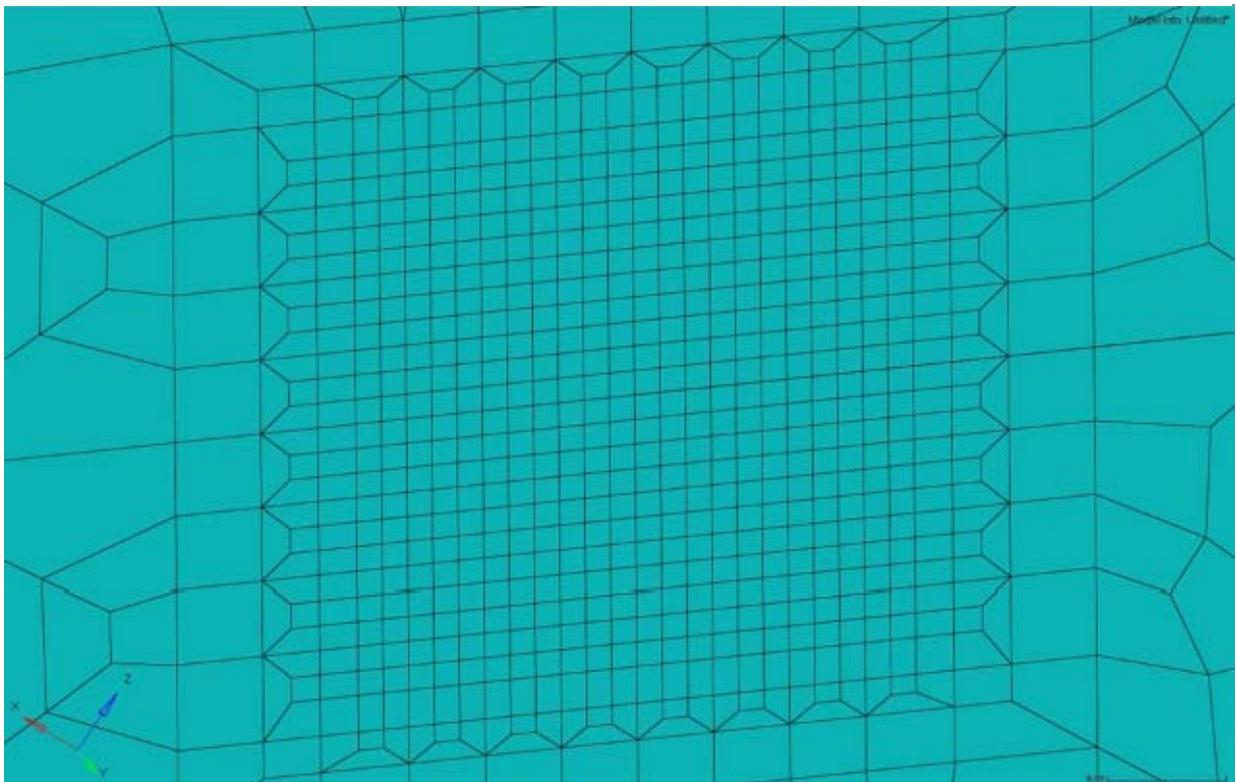


(き裂先端近傍)

図 3.2.1-32 ケース 1 K 値計算用要素再分割イメージ



(全域)



(き裂先端近傍)

図 3.2.1-33 ケース 2 K 値計算用要素再分割イメージ

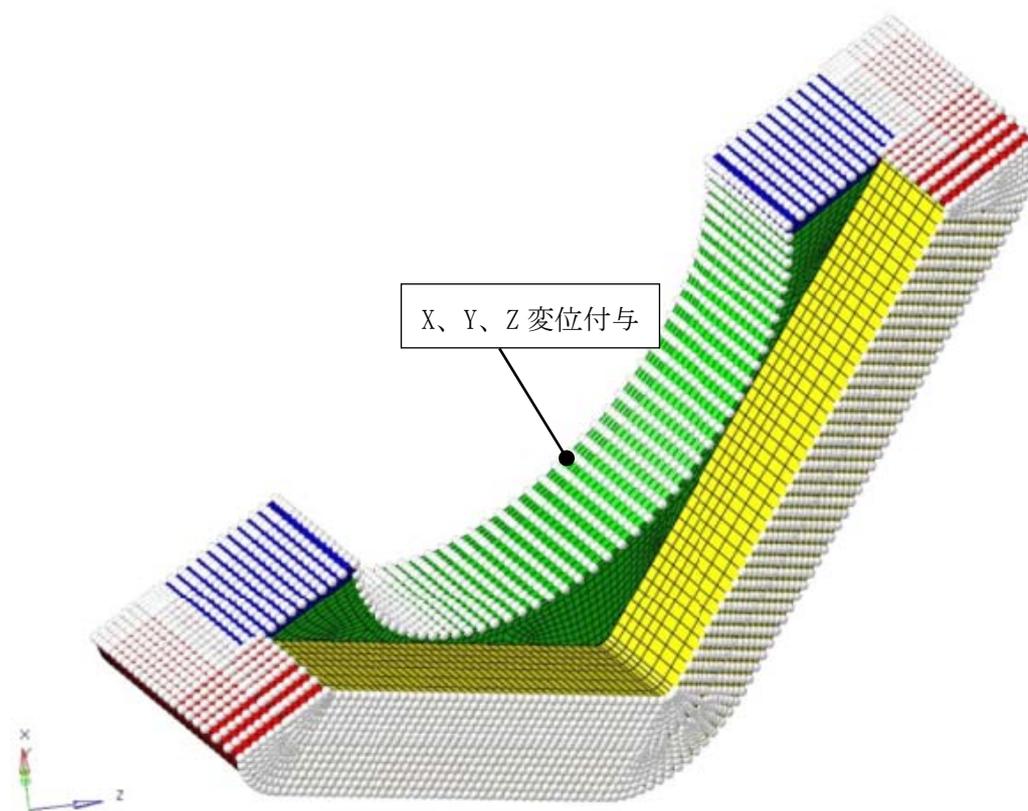
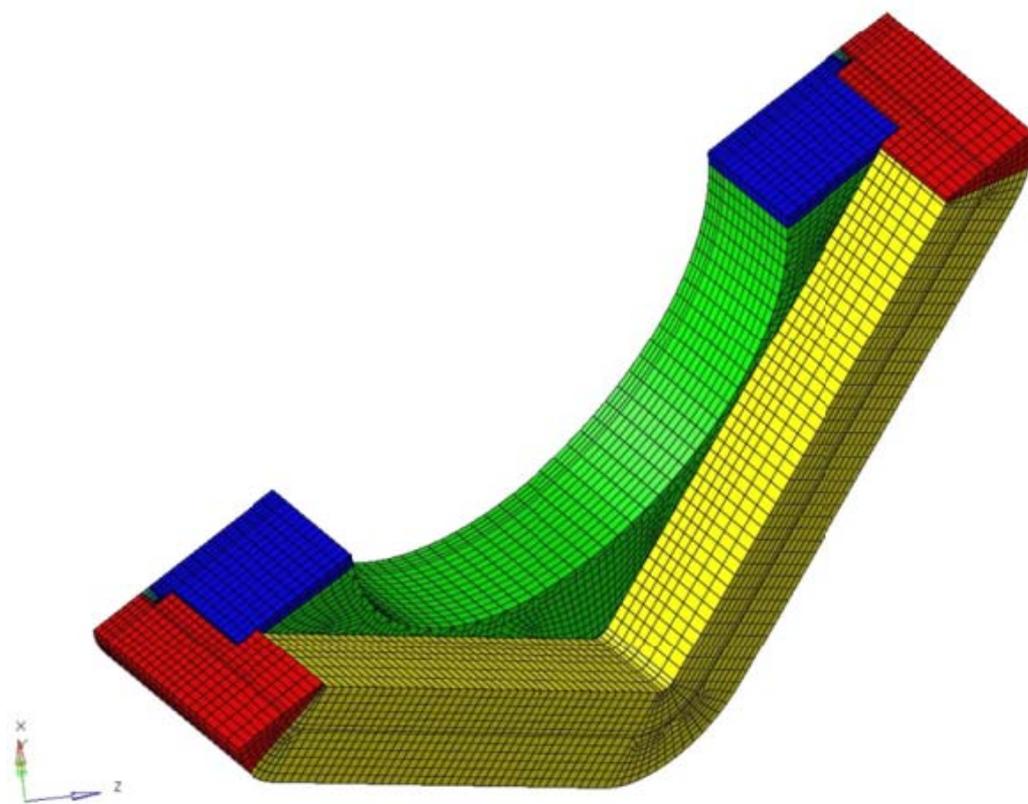


図 3.2.1-34 ケース 1 拘束条件

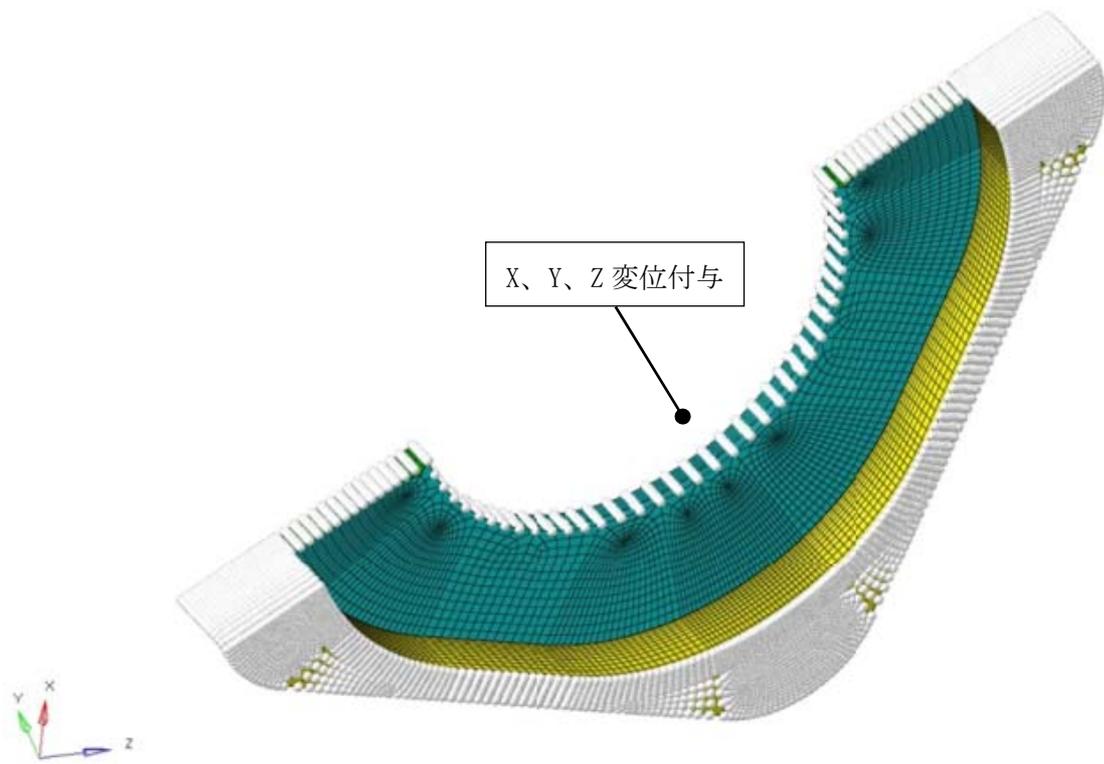
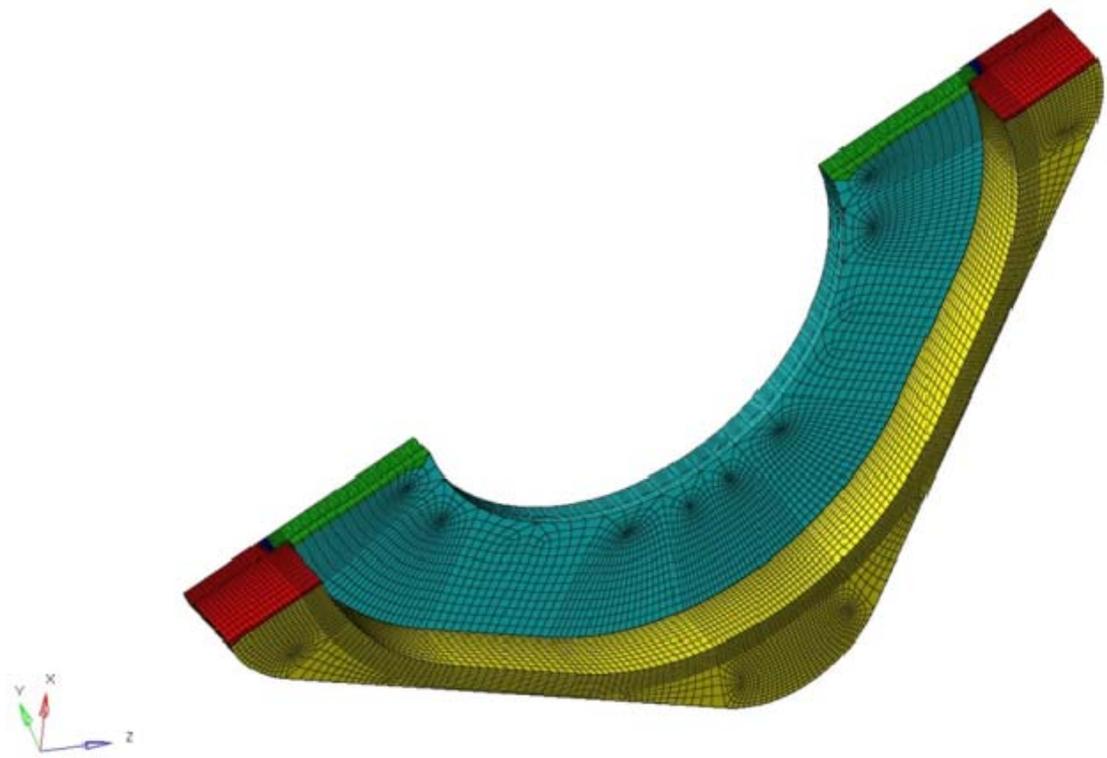
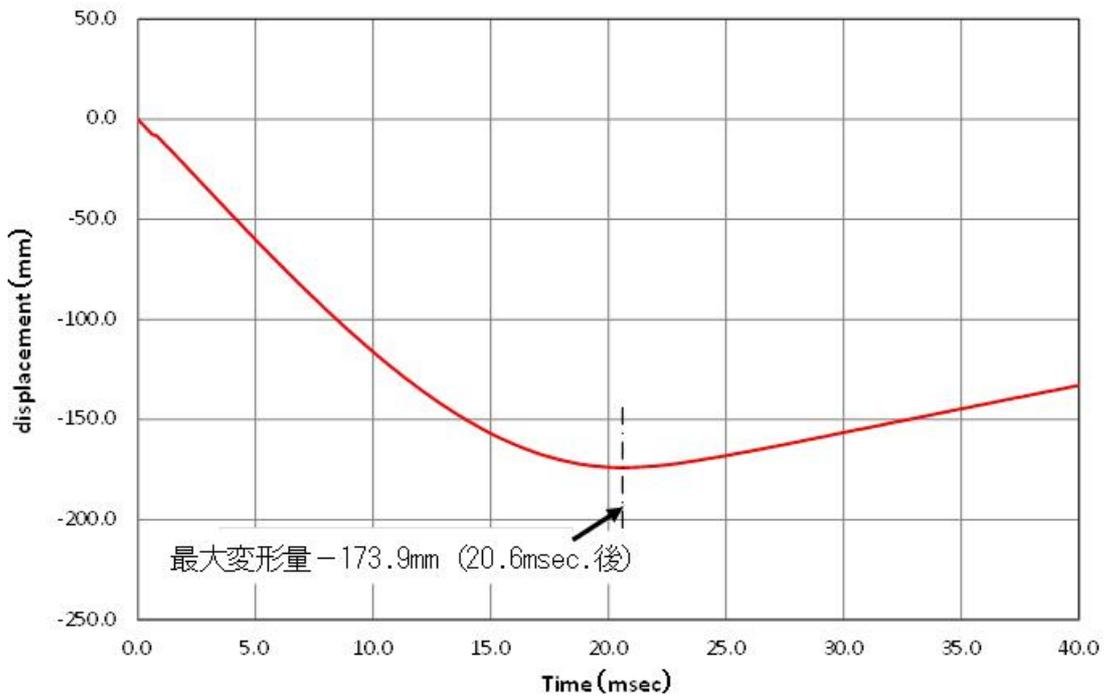


図 3.2.1-35 ケース 2 拘束条件

3) 試験結果

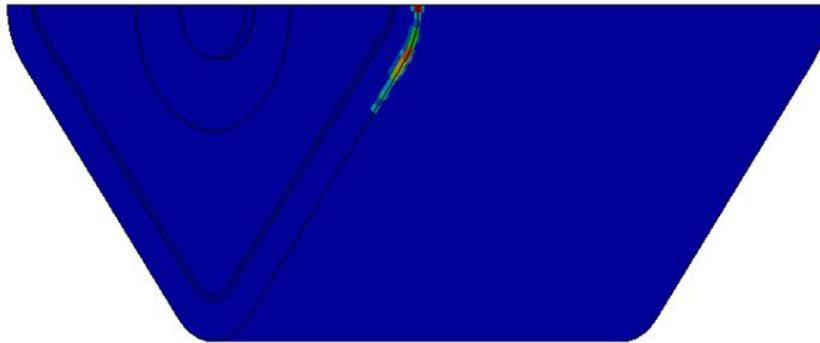
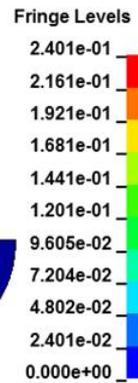
a. 落下解析結果

ケース 1 及び 2 の落下解析結果として、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コンター図を図 3.2.1-36 及び図 3.2.1-37 に示す。最大塑性ひずみは内容器の角部近傍に発生しており、ケース 2 がケース 1 よりも大きい。



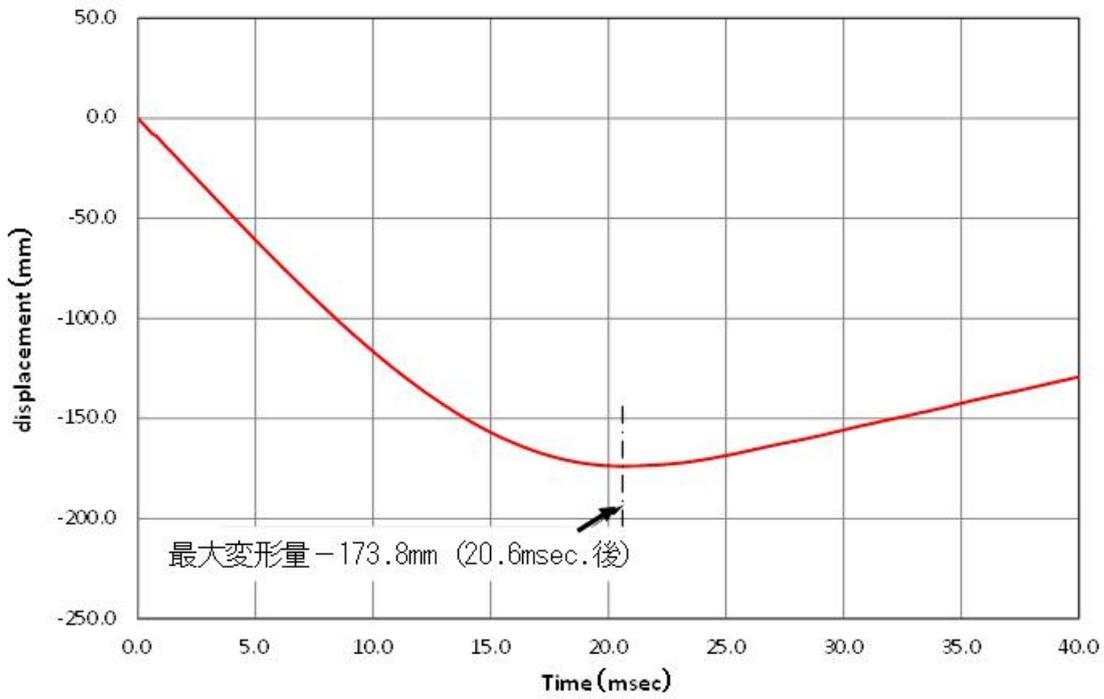
(蓋未溶着部先端における変位時刻歴)

case03_t200_Rstd_rigid_Top_CarbonSteel_Rev02
 Time = 0.04
 Contours of Effective Plastic Strain
 max IP. value
 min=0, at elem# 61617
 max=0.240125, at elem# 58896



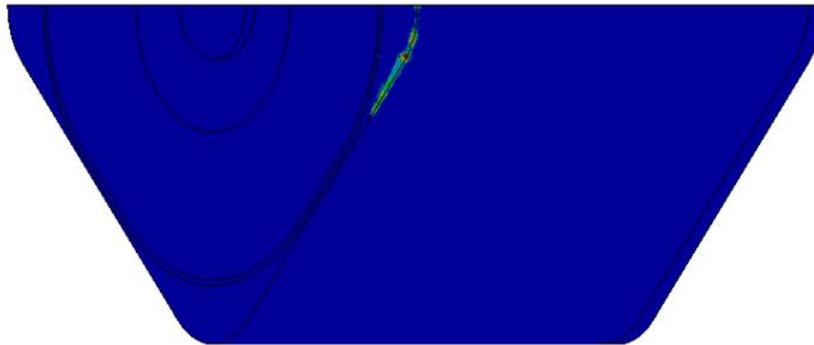
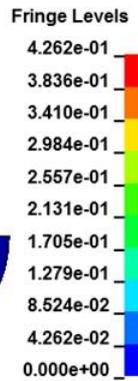
(解析終了時刻に容器に発生した相当塑性ひずみコンター図 (40msec.))

図 3.2.1-36 ケース 1 落下解析結果



(蓋未溶着部先端における変位時刻歴)

case05_t50_R225_2016_rigid_Top_CarbonSteel_Rev03
 Time = 0.04
 Contours of Effective Plastic Strain
 max IP. value
 min=0, at elem# 200001
 max=0.426218, at elem# 390501



(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 (40msec.))

図 3.2.1-37 ケース 2 落下解析結果

b. K 値解析結果

前項 a. の落下解析結果における溶接未溶着部の開口が最も大きくなる時点の 3 方向並進変位を、K 値解析モデルの抽出面に付与して求めた応力場で、容器の縁に沿った未溶着部について K 値を算出した。ただし、K 値解析モデルで強制変位を付与した端面近傍については、落下解析の要素をそのまま活用するため、K 値を算出できない。未溶着部先端における発生応力は図 3.2.1-38 に示すモード I、モード II 及びモード III の基本変形様式が混合する混合モードとなる。

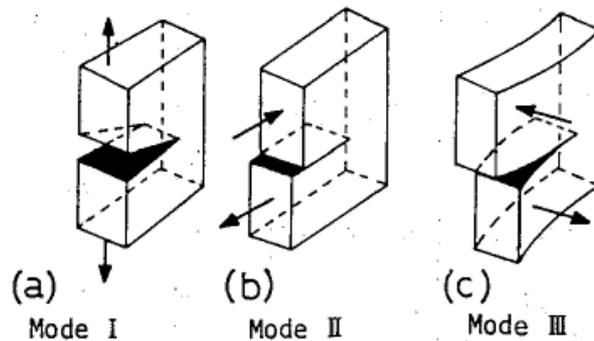


図 3.2.1-38 3つの基本変形モード

モード (I + II + III) の混合モード下での脆性破壊基準は、(6)式で示される $K_{\sigma_{max}}$ が破壊靱性値に達すると脆性破壊が発生するとの考えが一般的である [5]。

$$\begin{aligned}
 K_{\sigma_{max}} = & \frac{1}{2} \left\{ K_I \cos \frac{\theta}{2} \left(\cos^2 \frac{\theta}{2} + 2\nu \right) - K_{II} \sin \frac{\theta}{2} \left(3 \cos^2 \frac{\theta}{2} + 2\nu \right) \right\} \\
 & + \frac{1}{2} \left[\left\{ K_I \cos \frac{\theta}{2} \left(\cos^2 \frac{\theta}{2} - 2\nu \right) - K_{II} \sin \frac{\theta}{2} \left(3 \cos^2 \frac{\theta}{2} - 2\nu \right) \right\}^2 + 4K_{II}^2 \cos^2 \frac{\theta}{2} \right]^{1/2}
 \end{aligned} \tag{6}$$

ここで、 θ_0 は予き裂前縁で最大引張応力が作用する面 (図 3.2.1-39 の塗潰した面) と x 軸との角度であり、予き裂前縁での最大引張応力が脆性破壊に対する限界応力に達すると脆性破壊が生じるとする考え方である。

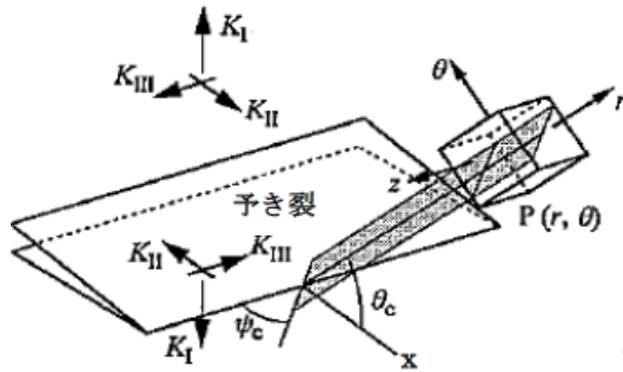


図 3.2.1-39 混合モード (I+II+III) のき裂先端近傍の応力場

衝撃落下時の応力場から算出した K 値分布を、ケース 1 及びケース 2 について、それぞれ図 3.2.1-40 及び図 3.2.1-41 に示す。図中には、 K_I 、 K_{II} 、 K_{III} と共に $K_{o,max}$ も記載した。なお、 $K_{o,max}$ 算定の際、 K_I が負となったものは $K_I=0$ とした。各図の横軸は容器中心からの角度 α であり、衝突側を 0° とした。縦軸は K 値であり、要素を再分割した全領域に対して溶接線方向の分布を取った。各ケースの結果を以下に示す。

また、各ケースの K_I 、 K_{II} 、 K_{III} 、 $K_{o,max}$ のピーク値及び θ_c をまとめて表 3.2.1-14 に示す。

- ケース 1 (200mm 厚容器)
 - $\alpha = 175^\circ$ 付近で $K_{o,max}$ は最大となっており、その値は $18.3 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ である。
- ケース 2 (50mm 厚容器 R 変更)
 - $\alpha = 36^\circ$ 付近で $K_{o,max}$ は最大となっており、その値は $24.6 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ である。

表 3.2.1-14 溶接未溶着部の K 値解析結果

ケース	K_I ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)	K_{II} ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)	K_{III} ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)	$K_{o,max}$ ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)	き裂進展方向 θ_c ($^\circ$)
1	7.2	-6.5	9.7	18.3	51.4
2	17.8	-7.9	-6.2	24.6	37.7

$0^\circ < \theta_c < 180^\circ$ は容器胴部の外面方向

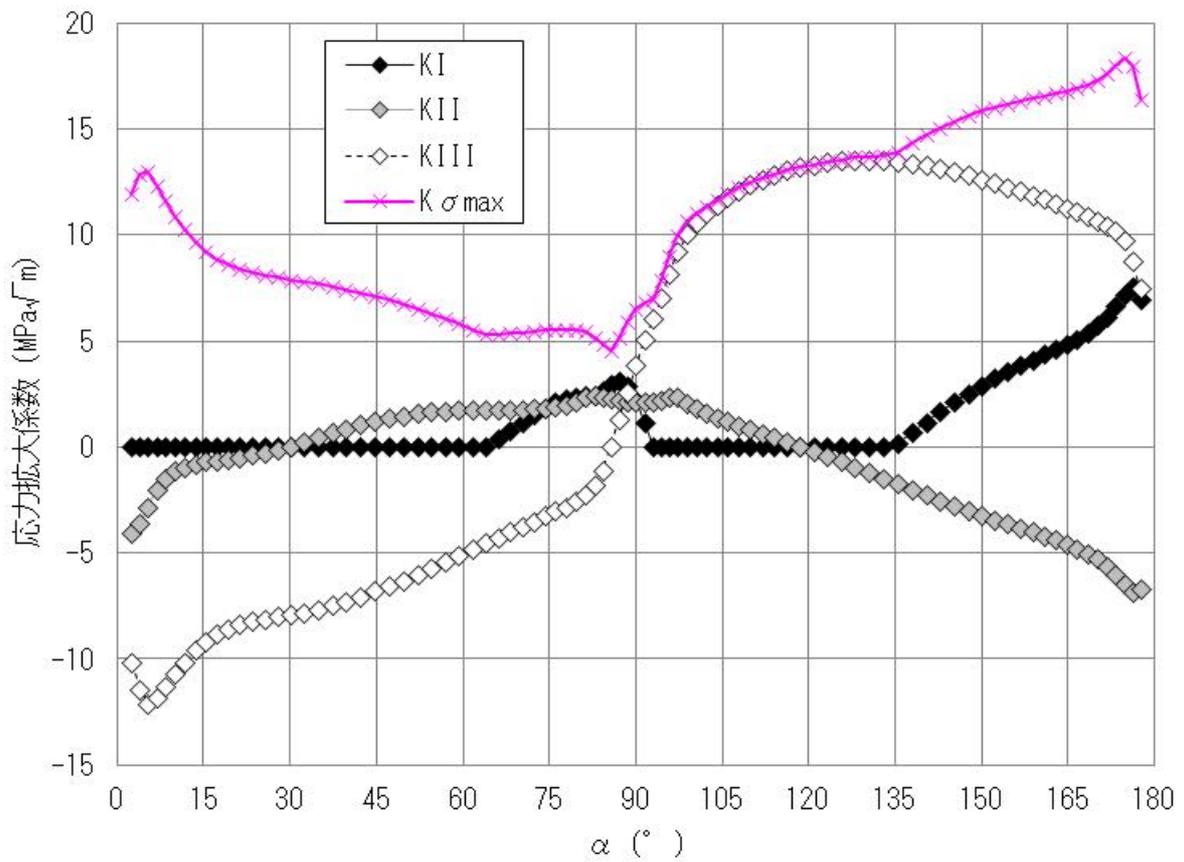
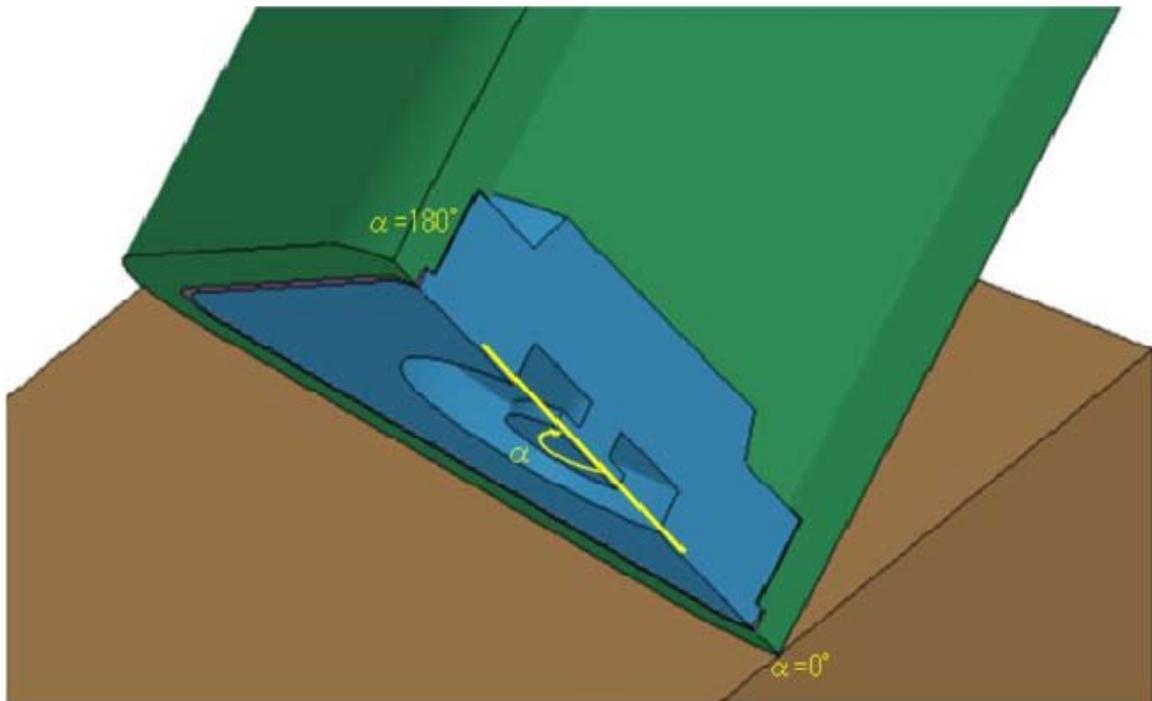


図 3.2.1-40 衝撃落下解析の応力場による K 値 (ケース 1)

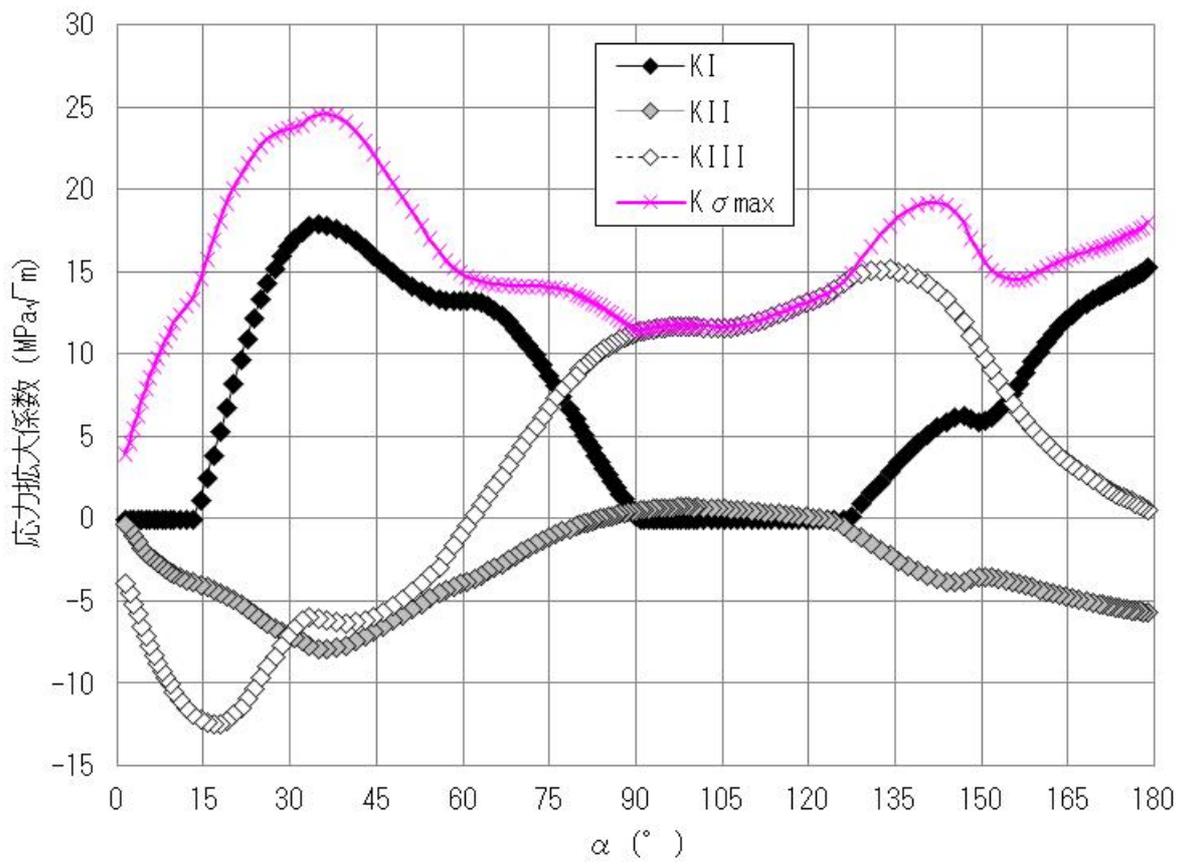
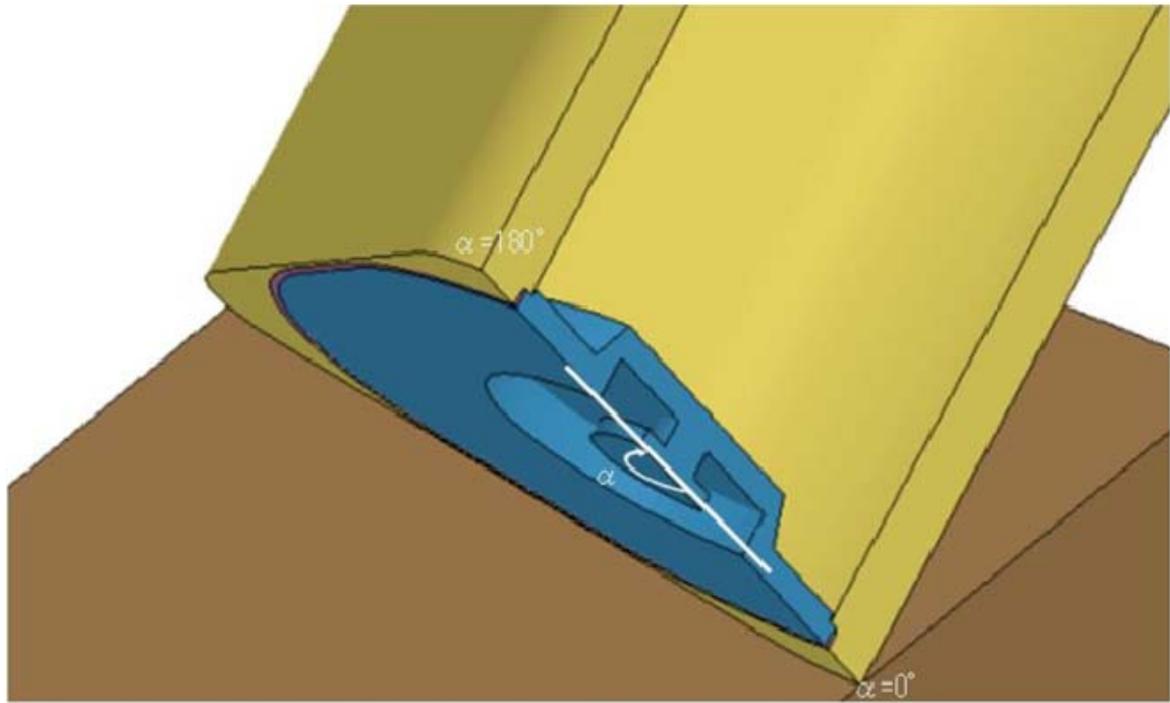


図 3.2.1-41 衝撃落下解析の応力場による K 値 (ケース 2)

c. 脆性破壊強度評価

解析で求めた $K_{\sigma \max}$ と材料試験にて評価した破壊靱性値（図 3.2.1-24）を用いて、蓋溶接未溶着部からの脆性破壊の有無を評価した。蓋溶接の未溶着部からの脆性破壊を検討する際の評価対象は、溶接未溶着部と蓋溶接金属（溶け込み不良や溶接時の未溶着先端での割れを想定）であり、各部位の破壊靱性値の下限（ $\min.K_{I d}$ ）は、図 3.2.1-24 で示した破壊靱性試験結果から以下のようになる。

蓋溶接未溶着部 : $50\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$
 蓋溶接金属 : $55\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$

表 3.2.1-14 の $K_{\sigma \max}$ を上記の破壊靱性値で除した K_r をケース 1 及びケース 2 それぞれについてまとめ、表 3.2.1-15 に示す。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発生しない。

表 3.2.1-15 各ケースの脆性破壊評価

	ケース 1 (200mm 厚容器)		ケース 2 (50mm 厚容器 (角 R 変更))	
	未溶着	溶接金属	未溶着	溶接金属
$K_{\sigma \max}$ ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)	18.3		24.6	
$\min.K_{I d}$ ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)	50	55	50	55
K_r = $K_{\sigma \max}/\min.K_{I d}$	0.37	0.33	0.49	0.45

表 3.2.1-15 によると、ケース 1 及びケース 2 ともに $K_r < 1$ となり、脆性破壊は生じない。また 50mm 厚容器でも角 R を大きくしたケース 2 では落下衝撃が緩和され、 $K_r < 1$ を満足することが確認できる。

鑄造欠陥を直径 $2a$ の penny shaped crack として、作用応力 σ と脆性破壊に対する限界寸法 $2a_{cr}$ の関係を計算する。図 3.2.1-42 に示す penny shaped crack に引張応力 σ が作用する場合の K 値は(7)式で、脆性破壊の発生基準は(8)式で与えられる。

$$\text{penny shaped crack の } K \text{ 値 : } K = (2/\pi) \sigma \sqrt{\pi a} \quad (7)$$

$$\text{脆性破壊基準 : } K = K_{I d} \quad (8)$$

破壊靱性値として図 3.2.1-24 で示した母材の下限値である $51\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ を用い、(7)式と(8)式から σ と $2a_{cr}$ の関係を計算すると、図 3.2.1-43 のように表される。

母材の降伏応力 $\sigma_{0.2}$ は、上述した Bennett ら [3] の式から、 -20°C における、ひずみ速度 100/sec.での値を計算し、 $\sigma_{0.2} = 593\text{MPa}$ とした。 $\sigma_{0.2} > 593\text{MPa}$ は降伏するので、 $\sigma = 593\text{MPa}$ が上限となる。 $\sigma = 593\text{MPa}$ が作用する場合、その限界欠陥寸法は $2a_{cr} =$

11.4mm 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、鑄造欠陥から脆性破壊が生じる危険性は低いと思われる。平成 28 年度の破壊靱性試験片を採取した肉厚 200mm の鑄鋼容器（低合金鋼）に対する超音波探傷試験（UT）ではΦ2.0mm 以上の鑄造欠陥を検出し、かつ最大鑄造欠陥はΦ3.1mm だった。

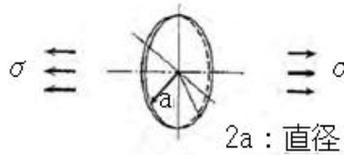


図 3.2.1-42 想定欠陥

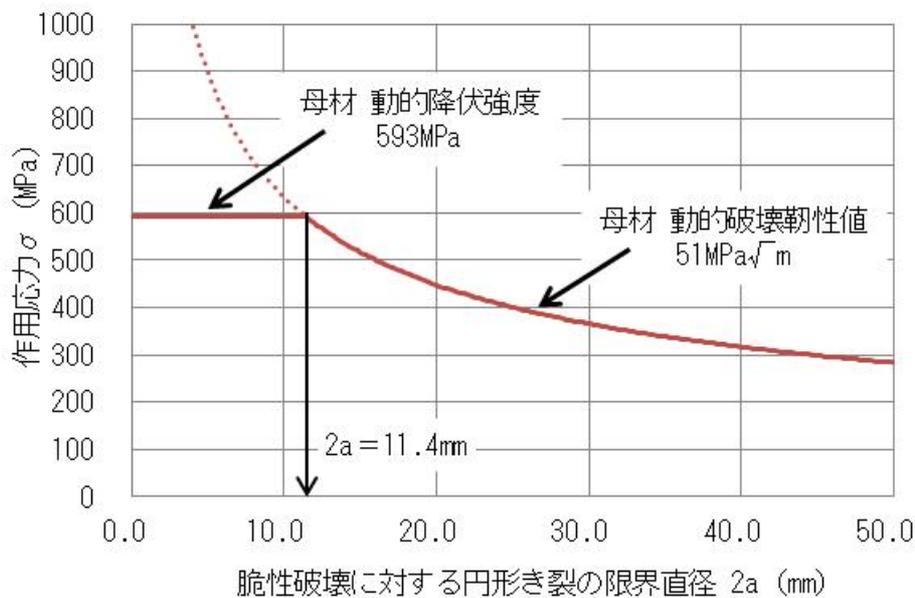


図 3.2.1-43 母材の鑄造欠陥から脆性破壊強度評価

4) まとめ

200mm 厚及び 50mm 厚（角 R 変更）の炭素鋼鑄鋼製容器に対して、溶接部の脆性破壊発生の有無を破壊力学にて評価した。以下に結果の概要を示す。

- ・ 200mm 厚容器、50mm 厚容器（角 R 変更）ともに十分な安全裕度を有しており、蓋溶接部から脆性破壊は生じない。
- ・ 脆性破壊に対する母材の許容欠陥寸法は、11.4mm と推定された。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、鑄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。

上述した容器落下時の耐久性評価から、炭素鋼でも内容器に設計によっては適用可能であることが分かった。また、今回は動的解析を行い容器落下時の安全性評価を行ったが、容器の諸元を決定するにあたっては、安全率を含めた設計指針の検討が別途必要であると考えられる。

3.2.2 再利用プロセスの開発

(1) 目的

再利用プロセスの開発では、内容物の設計、材料規格案の策定、及び再利用プロセスの開発を行う。平成27年度には内容物の設計を行った。

ここでは、基礎試験の結果からクリアランス金属廃棄物から内容物を製作するための材料規格案の策定を行う。また、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の開発を行う。

(2) 材料規格案の策定

1) 概要

材料規格案の策定にあたり、内容物を収容する外容器、余裕深度処分対象廃棄物の処分容器材料に関する標準について調査した。

その結果、余裕深度処分対象廃棄物の処分容器では、原子力学会標準[6]において、容器材料として 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) 材料規格の項目案

内容物の材料規格案について、平成28年度に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

3) 材料規格案の各項目の詳細

抽出した材料規格の各項目案について、その詳細について検討した。

<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の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。また鋳鋼品は溶接することを前提としており、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 3.2.2-1 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。

$$\text{炭素当量(\%)} = \text{C} + \frac{\text{Mn}}{8} + \frac{\text{Si}}{24} + \frac{\text{Ni}}{40} + \frac{\text{Cr}}{5} + \frac{\text{Mo}}{4} + \frac{\text{V}}{14}$$

(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 3.2.2-1 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	0.80	1.50	0.025	0.015	0.50	2.50	1.00	0.30	0.20	0.03	0.50
以下	以下	以下	以下	以下	以下	以下	以下	以下	以下	以下	以下

以下に各元素の限定理由について示す。

- ・ 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°C 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°C の吸収エネルギーに与える影響は小さいことが分かった。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 : 図 3.2.1-4 より、Cr 量の増加に伴い低合金鋼 -20°C の吸収エネルギーは減少しているが、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°C 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、破壊靱性試験は試験が煩雑であり、試験実施に時間を要する。その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°C 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 3.2.2-2 による。

-1 シャルピー吸収エネルギーは、以下の全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 3.2.2-2 (1) を満足する
- ② 個別の値が表 3.2.2-2 (2) を満足する
- ③ 個別の値のうち 2 個が表 3.2.2-2 (1) を満足する

表 3.2.2-2 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 3.2.2-1 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。各種別について、降伏点または耐力の規格に対する降伏比をもとに決定した。
- ・シャルピー吸収エネルギー : 生じうる温度 -20°C を基準に、表 3.2.2-3 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。

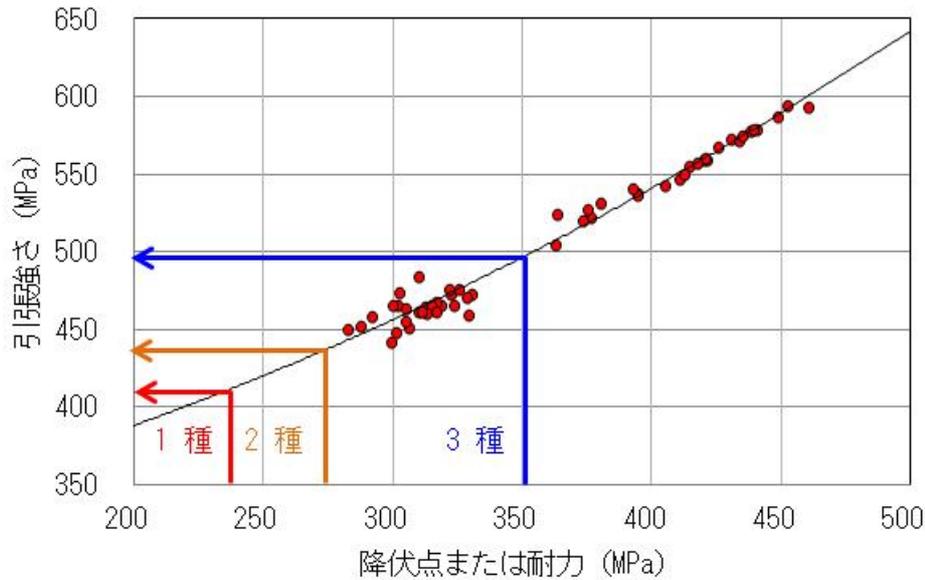


図 3.2.2-1 降伏点または耐力と引張強さの関係

表 3.2.2-3 靱性 (0°C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 (°C)	吸収エネルギー (J)	
SM400B ^{*1}	195 以上 ^{*4}	400~510	24 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	低温高圧用鋳鋼品
SM490B ^{*1}	275 以上 ^{*4}	490~610	23 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 $160 < t \leq 200\text{mm}$ 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 3.2.2-4 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(9)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[7]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、鋳造欠陥から脆性破壊が生じる危険性はないと思われる。

$$\left(\frac{K_{I,d}}{\sigma_y}\right)^2 = 0.0189 \left(\frac{vE}{\sigma_y}\right) + 0.0091 \quad (9)$$

表 3.2.2-4 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>

製造方法については、一般的な鋳鋼品と大きく変化させる必要はないと考えられ、日本工業規格（JIS）での鋳鋼品に関する規程（JIS G 0307）によることが想定される。また鋳造欠陥等の発生により、溶接補修を実施する必要が生じる可能性があるため、以下のような規定案とする。

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

鋳鋼品は、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>

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

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、以下のような規定案とする。

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方法）、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鋳込む。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。

4) まとめ

平成 28 年度に検討した材料規格案における項目案について、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等を検討した。

(3) 再利用プロセス

1) 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する。

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 3.2.2-5 に示す。

表 3.2.2-5 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"> ・ SS 材（一般構造用圧延鋼材） ・ SM 材（溶接構造用圧延鋼材） ・ STPT 材（高温配管用炭素鋼管） 	283,689	
	特殊鋼	SUS	<ul style="list-style-type: none"> ・ SUS 材（ステンレス鋼） ・ SCS 材（ステンレス鋼鋳鋼） 	17,490
		その他	<ul style="list-style-type: none"> ・ STPA 材（配管用合金鋼鋼管） ・ SCMV 材（ボイラ及び圧力容器用クロムモリブデン鋼鋼板） ・ SUP 材（ばね鋼鋼材） 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"> ・ SCW 材（溶接構造用鋳鋼） ・ FC 材（ねずみ鋳鉄） ・ FCD 材（球状黒鉛鋳鉄） 	37,446
		鍛鋼	<ul style="list-style-type: none"> ・ SF 材（炭素鋼鍛鋼） 	65,732
非鉄		<ul style="list-style-type: none"> ・ AC 材（アルミ鋳物） ・ C 材（伸銅材） （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	

これらの内容容器への再利用プロセスについて検討する。

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する。

表 3.2.2-6 に先に報告した材料規格案の化学成分を示す。

表 3.2.2-6 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

ここで、炭素当量 (Ceq) = [C] + [Si]/24 + [Mn]/6 + [Ni]/40 + [Cr]/5 + [Mo]/4 + [V]/14

クリアランス金属廃棄物のうち、内容器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、内容器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、多量の銅 (Cu) の混入は、内容器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 3.2.2-6 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。残る鉄類に関する分類について検討する。

a. 普通鋼について

普通鋼について、表 3.2.2-7 に SS 材 (JIS G 3101) の化学成分、表 3.2.2-8 及び表 3.2.2-9 に SM 材 (JIS G 3106) の化学成分及び炭素当量、表 3.2.2-10 に STPT 材 (JIS G 3456) の化学成分を示す。

表 3.2.2-7 化学成分 (SS 材) (質量%)

種類の記号	C	Mn	P	S
SS330	-	-	0.050 以下	0.050 以下
SS400				
SS490				
SS540	0.30 以下	1.60 以下	0.040 以下	0.040 以下
必要に応じて、この表以外の合金元素を添加してもよい。				

表 3.2.2-8 化学成分 (SM 材)

(質量%)

種類の記号	厚さ	C	Si	Mn	P	S
SM400A	50mm 以下	0.23 以下	-	2.5×C 以上 ^{b)}	0.035 以下	0.035 以下
	50mm を超え 200mm 以下	0.25 以下				
SM400B	50mm 以下	0.20 以下	0.35 以下	0.60～1.50	0.035 以下	0.035 以下
	50mm を超え 200mm 以下	0.22 以下				
SM400C	100mm 以下	0.18 以下	0.35 以下	0.60～1.50	0.035 以下	0.035 以下
SM490A	50mm 以下	0.20 以下	0.55 以下	1.65 以下	0.035 以下	0.035 以下
	50mm を超え 200mm 以下	0.22 以下				
SM490B	50mm 以下	0.18 以下	0.55 以下	1.65 以下	0.035 以下	0.035 以下
	50mm を超え 200mm 以下	0.20 以下				
SM490C	100mm 以下	0.18 以下	0.55 以下	1.65 以下	0.035 以下	0.035 以下
SM490YA	100mm 以下	0.20 以下	0.55 以下	1.65 以下	0.035 以下	0.035 以下
SM490YB						
SM520B	100mm 以下	0.20 以下	0.55 以下	1.65 以下	0.035 以下	0.035 以下
SM520C						
SM570	100mm 以下	0.18 以下	0.55 以下	1.70 以下	0.035 以下	0.035 以下

注^{a)} 必要に応じて、この表以外の合金元素を添加してもよい。
^{b)} C の値は、溶鋼分析値を適用する。

表 3.2.2-9 炭素当量 (SM 材)

厚さ mm	50 以下	50 を超え 100 以下	100 を超えるもの
炭素当量 %	0.44 以下	0.47 以下	受渡当事者間の協定による。

表 3.2.2-10 化学成分 (STPT 材)

(質量%)

種類の記号	C	Si	Mn	P	S
STPT370	0.25 以下	0.10～0.35	0.30～0.90	0.035 以下	0.035 以下
STPT410	0.30 以下	0.10～0.35	0.30～1.00	0.035 以下	0.035 以下
STPT480	0.33 以下	0.10～0.35	0.30～1.00	0.035 以下	0.035 以下

内容器材料は、表 3.2.2-6 に示した化学成分を満足する必要がある。

ここで、普通鋼 (SS 材、SM 材及び STPT 材) に含まれる化学成分において、C、P 及び S は後の精錬で調整されることから問題となる化学成分はない。よって、普通鋼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。

b. 鑄鍛鋼、鑄鉄について

表 3.2.2-11 に SCW 材 (JIS G 5102) の化学成分及び炭素当量を示す。

表 3.2.2-11 化学成分及び炭素当量 (SCW 材) (質量%)

種類の記号	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Ceq
SCW410	0.22 以下	0.80 以下	1.50 以下	0.040 以下	0.040 以下	-	-	-	-	0.40 以下
SCW450	0.22 以下	0.80 以下	1.50 以下	0.040 以下	0.040 以下	-	-	-	-	0.43 以下
SCW480	0.22 以下	0.80 以下	1.50 以下	0.040 以下	0.040 以下	0.50 以下	0.50 以下	-	-	0.45 以下
SCW550	0.22 以下	0.80 以下	1.50 以下	0.040 以下	0.040 以下	2.50 以下	0.50 以下	0.30 以下	0.20 以下	0.48 以下
SCW620	0.22 以下	0.80 以下	1.50 以下	0.040 以下	0.040 以下	2.50 以下	0.50 以下	0.30 以下	0.20 以下	0.50 以下

FC 材 (JIS G 5501) では、特に必要がある場合は分析試験を行い、その化学成分は受渡当事者間の協定による、と規定されている。例えば、ねずみ鑄鉄品のうち別鑄込み供試材の引張強さが 100MPa 以上と規定された普通鑄鉄品である FC100 は、C が 3.2%～3.8%程度、Si が 1.4%～2.5%程度であるとされている。

FCD 材 (JIS G 5502) でも、特に必要がある場合は分析試験を行い、その化学成分は、受渡当事者間の協定による、と規定されている。

表 3.2.2-12 に SF 材 (JIS G 3201) の化学成分を示す。

表 3.2.2-12 化学成分 (SF 材) (質量%)

C	Si	Mn	P	S
0.60 以下	0.15～0.50	0.30～1.20	0.030 以下	0.035 以下

ここで、鑄鍛鋼及び鑄鉄 (SCW 材、FC 材、FCD 材及び SF 材) に含まれる化学成分において、C、Si、P 及び S は後の精錬で調整されることから問題とはならない。また、Mg、Ca 及び Ce も精錬で調整は可能である。よって、鑄鍛鋼及び鑄鉄も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。

c. 特殊鋼について

SUS材について、表 3.2.2-13 にステンレス鋼棒（JIS G 4303）のうち主要な SUS304 及び SUS316 の化学成分を示す。

表 3.2.2-13 化学成分（SUS304 及び SUS316）（質量%）

種類の記号	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N
SUS304	0.08 以下	1.00 以下	2.00 以下	0.045 以下	0.030 以下	8.00～ 10.50	18.00～ 20.00	-	-	-
SUS316	0.08 以下	1.00 以下	2.00 以下	0.045 以下	0.030 以下	10.00～ 14.00	16.00～ 18.00	2.00～ 3.00	-	-

表 3.2.2-14 に SCS 材（JIS G 5121）のうち SUS304 相当の SCS13 及び SUS316 相当の SCS14 の化学成分を示す。

表 3.2.2-14 化学成分（SCS13 及び SCS14）（質量%）

種類の記号	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N
SCS13	0.08 以下	2.00 以下	2.00 以下	0.040 以下	0.040 以下	8.00～ 11.00	18.00 ^(a) ～21.00	-	-	-
SCS14	0.08 以下	2.00 以下	2.00 以下	0.040 以下	0.040 以下	10.00～ 14.00	17.00 ^(a) ～20.00	2.00～ 3.00	-	-

注^(a) SCS13, SCS13A, SCS14 及び SCS14A で低温に使用する場合，Cr の上限を 23.00%としてもよい。

表 3.2.2-15 に STPA 材（JIS G 3458）の化学成分を示す。

表 3.2.2-15 化学成分（STPA 材）（質量%）

種類の記号	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
STPA12	0.10～0.20	0.10～0.50	0.30～0.80	0.035 以下	0.035 以下	-	0.45～0.65
STPA20	0.10～0.20	0.10～0.50	0.30～0.60	0.035 以下	0.035 以下	0.50～0.80	0.40～0.65
STPA22	0.15 以下	0.50 以下	0.30～0.60	0.035 以下	0.035 以下	0.80～1.25	0.45～0.65
STPA23	0.15 以下	0.50～1.00	0.30～0.60	0.030 以下	0.030 以下	1.00～1.50	0.45～0.65
STPA24	0.15 以下	0.50 以下	0.30～0.60	0.030 以下	0.030 以下	1.90～2.60	0.87～1.13
STPA25	0.15 以下	0.50 以下	0.30～0.60	0.030 以下	0.030 以下	4.00～6.00	0.45～0.65
STPA26	0.15 以下	0.25～1.00	0.30～0.60	0.030 以下	0.030 以下	8.00～ 10.00	0.90～1.10

表 3.2.2-16 に SCMV 材 (JIS G 4109) の化学成分 (製品分析値) を示す。

表 3.2.2-16 化学成分 (SCMV 材 (製品分析値)) (質量%)

種類の記号	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
SCMV1	0.21 以下	0.45 以下	0.51~0.84	0.020 以下	0.020 以下	0.46~0.85	0.40~0.65
SCMV2	0.17 以下	0.45 以下	0.36~0.69	0.020 以下	0.020 以下	0.74~1.21	0.40~0.65
SCMV3	0.17 以下	0.44~0.86	0.36~0.69	0.020 以下	0.020 以下	0.94~1.56	0.40~0.70
SCMV4	0.17 以下	0.50 以下	0.27~0.63	0.020 以下	0.020 以下	1.88~2.62	0.85~1.15
SCMV5	0.17 以下	0.50 以下	0.27~0.63	0.020 以下	0.020 以下	2.63~3.37	0.85~1.15
SCMV6	0.15 以下	0.55 以下	0.27~0.63	0.020 以下	0.020 以下	3.90~6.10	0.40~0.70

表 3.2.2-17 に SUP 材 (JIS G 4801) の化学成分を示す。

表 3.2.2-17 化学成分 (SUP 材) (質量%)

種類の記号	C	Si	Mn	Pa ^{a)}	Sa ^{a)}	Cu	Cr	Mo	V	B
SUP6	0.56~ 0.64	1.50~ 1.80	0.70~ 1.00	0.030 以下	0.030 以下	0.30 以下	-	-	-	-
SUP7	0.56~ 0.64	1.80~ 2.20	0.70~ 1.00	0.030 以下	0.030 以下	0.30 以下	-	-	-	-
SUP9	0.52~ 0.60	0.15~ 0.35	0.65~ 0.95	0.030 以下	0.030 以下	0.30 以下	0.65~ 0.95	-	-	-
SUP9A	0.56~ 0.64	0.15~ 0.35	0.70~ 1.00	0.030 以下	0.030 以下	0.30 以下	0.70~ 1.00	-	-	-
SUP10	0.47~ 0.55	0.15~ 0.35	0.65~ 0.95	0.030 以下	0.030 以下	0.30 以下	0.80~ 1.10	-	0.15~ 0.25	-
SUP11A	0.56~ 0.64	0.15~ 0.35	0.70~ 1.00	0.030 以下	0.030 以下	0.30 以下	0.70~ 1.00	-	-	0.0005 以上
SUP12	0.51~ 0.59	1.20~ 1.60	0.60~ 0.90	0.030 以下	0.030 以下	0.30 以下	0.60~ 0.90	-	-	-
SUP13	0.56~ 0.64	0.15~ 0.35	0.70~ 1.00	0.030 以下	0.030 以下	0.30 以下	0.70~ 0.90	0.25~ 0.35	-	-

この表に規定のない元素は、溶鋼を仕上げる目的以外に意図的に添加してはならない。
注^{a)} P 及び S の値は、受渡当事者間の協定によってそれぞれ 0.035% 以下にしてもよい。

特殊鋼において、SUS 材及び SCS 材においては、Ni、Cr 及び Mo が規定値を超えており、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。これらを Ni 源として考え、炭素鋼と配合して使用することも考えられるが、Cr の許容量と大きく異なることから、管理が難しいと考えられる。

STPA 材、SCMV 材及び SUP 材においては、Cr が一定量含まれるが、これらのみを使用せず、一定量の炭素鋼と配合すれば使用は可能と考えられる。

以上より、クリアランス金属廃棄物は、表 3.2.2-18 の通り回収・分別・保管することが望ましいと考えられる。

表 3.2.2-18 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"> ・ SS 材（一般構造用圧延鋼材） ・ SM 材（溶接構造用圧延鋼材） ・ STPT 材（高温配管用炭素鋼管） ・ SCW 材（溶接構造用鋳鋼） ・ FC 材（ねずみ鋳鉄） ・ FCD 材（球状黒鉛鋳鉄） ・ SF 材（炭素鋼鍛鋼）
	特殊鋼	<ul style="list-style-type: none"> ・ STPA 材（配管用合金鋼鋼管） ・ SCMV 材（ボイラ及び圧力容器用クロムモリブデン鋼鋼板） ・ SUP 材（ばね鋼鋼材） 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"> ・ SUS 材（ステンレス鋼） ・ SCS 材（ステンレス鋼鋳鋼）
	非鉄	<ul style="list-style-type: none"> ・ AC 材（アルミ鋳物） ・ C 材（伸銅材） （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

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原料配合方法、精錬（原料を溶解した後不純物を除去する）方法を整理する。

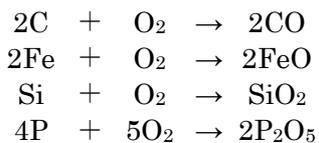
クリアランス金属廃棄物等の原料配合方法については、以下の考慮が必要と考えられる。

- ・ 低合金鋼をベースとする場合、Ni 源として SUS 材及び SCS 材以外の特殊鋼を用いることが可能である。ただし、STPA 材及び SCMV 材を用いる場合にも、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。

また、製鋼プロセスとして以下が考えられる。

<電気炉>

- ・ Ni 等の合金成分の添加
- ・ 主な反応



<二次精錬>

- ・取鍋加熱 (LF)
- ・脱ガス



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は、以下の通りと考えられる。

- 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する。
- ② 設定した肉厚から、必要な種別を決定する。
- 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する。
- ④ クリアランス金属廃棄物の鋼種から、配合方法を設定する。
- ⑤ 原料配合、溶解後の溶鋼分析結果より、必要な精錬処理を実施する。
- ⑥ 内容器として鋳造する。

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。

4.2 経済的合理性の検討

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平成27年度に行った。その内容を以下にレビューする。

—————以下、平成27年度検討内容（一部省略）—————

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（L3（浅地中にトレンチ型）として処分）について検討した。

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 4.2-1 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 4.2-1 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※1	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※1	①CL測定費※2
(3) 構内輸送費※1	必要	不要（解体引当金ではみていない）
(4) 構外輸送・ 処分費※1	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

—以上—

平成28年度に実施した実証試験結果から、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の不純物濃度程度であれば、クリアランス金属廃棄物を用いた金属容器の製作コストは精錬時間が通常レベルであったことから、一般スクラップ材料を用いた場合と変わらないことが判明した。したがって、今年度の経済性評価の対象項目は(1)～(4)となる。

さらに、クリアランス金属の構内輸送費及び構外輸送費についても評価の前提条件に含めて、クリアランス金属廃棄物再利用に関する経済的合理性の検討を行った。以下の内容及び表の数値は、電気事業連合会からの情報に依る。

4.2.1 評価の前提条件

評価の前提条件としては、原子炉の廃止措置で発生する金属廃材を以下のケースでコスト評価し、比較する。

- ・クリアランス制度を適用して再利用し、L1処分容器（内容器）を製作する場合
- ・クリアランス制度を適用せず、放射性廃棄物（L3廃棄物）として処分する場合

L3廃棄物の定義を図4.2.1-1に示す。

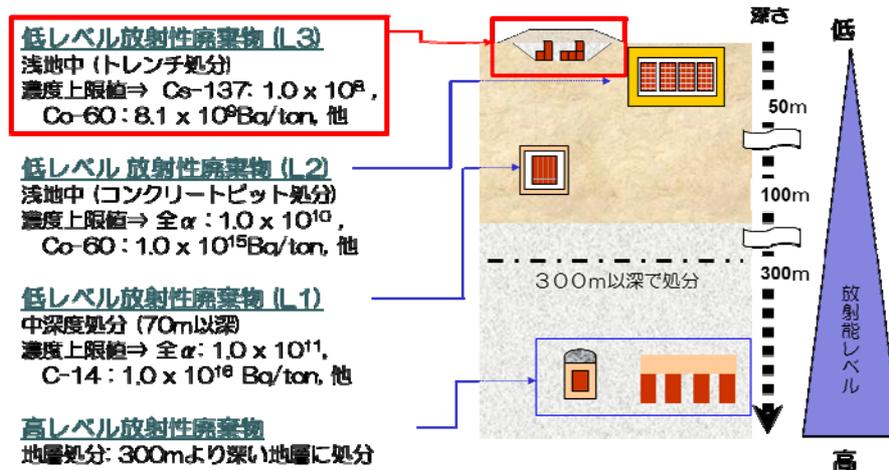


図 4.2.1-1 放射性廃棄物処分の考え方

経済性評価に用いる作業項目のイメージを図 4.2.1-2 に示す。評価対象範囲は下記点線で囲った範囲とする。

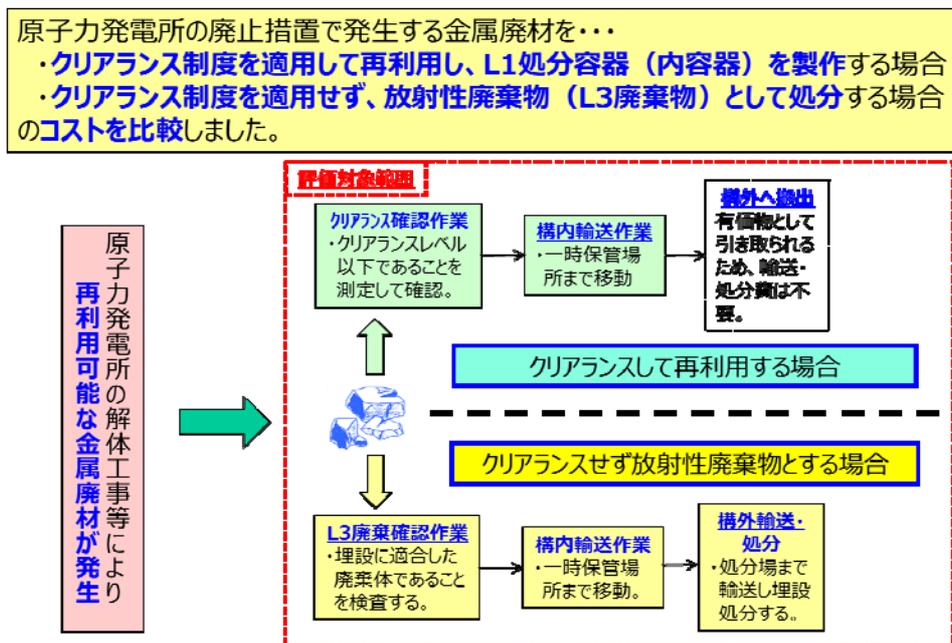


図 4.2.1-2 経済性評価に用いる作業項目のイメージ

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 4.2.1-3 参照。ここではコンクリート等も含まれているが、評価では全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)

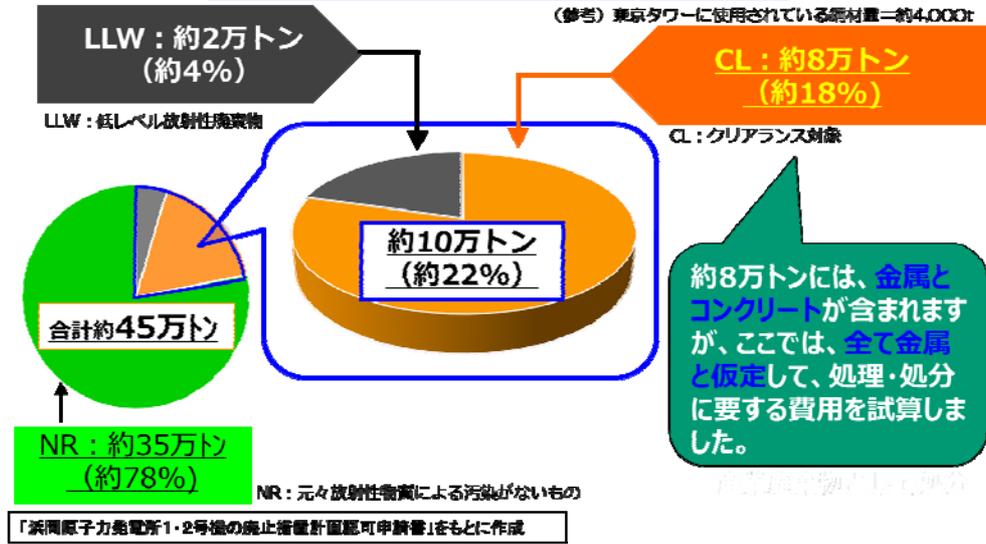


図 4.2.1-3 浜岡1, 2号機を解体した場合の廃材の発生量

4.2.2 評価項目の比較

L3 廃棄物を処分するまでの評価項目を表 4.2.2-1 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 4.2.2-2 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 4.2.2-1 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 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。</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 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。</p> <p>(2)覆土 トレンチ内に容器を定置した後、覆土する。</p>

表 4.2.2-2 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する。

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。

4.2.3 作業項目毎の費用試算結果

L3 廃棄物収納・砂充填作業費用及びクリアランス (CL) 金属収納作業費用を表 4.2.3-1 に示す。CL について、クリアランス確認を受けるまでは放射性廃棄物としての管理が必要であり、廃棄物収納時の放射能測定は必要であることから、③～⑤は CL も評価項目となる。

L3 廃棄物は、埋設時の陥没防止のために処分容器内の隙間に砂を充填する事例があることから、本試算においては砂充填を行うことを前提とした。したがって、L3 廃棄物の処理には砂充填装置費用も別途掛かる。表 4.2.3-2 に砂充填装置費用を示す。

表 4.2.3-1 L3 廃棄物収納・砂充填作業費用及びクリアランス (CL) 金属収納作業費用

作業項目等	L3	CL	備考
①廃棄物収納量[トン/体]	1.29	1	クリアランスは 1 トン毎測定のため、1 体あたり収納量を 1 トンと設定。
②廃棄体数量[体]	62,016	80,000	8 万トン÷①
③放射能測定[h/体]	1	1	
④放射能測定員[人]	4	4	
⑤放射能測定工数[人工]	49,616	64,000	②×③÷5h/日×④
⑥砂充填処理[h/体]	2	-	
⑦充填処理運転員[人]	4	-	
⑧砂充填作業工数[人工]	99,226	-	②×⑥÷5h/日×⑦
廃棄物処理作業費用[百万円]	4,465	1,920	(⑤+⑧) × 30 千円*/人工

※人工単価は、原子力発電施設解体総見積額の算定に倣い、政府統計に示される各種データを基に算出した。

表 4.2.3-2 廃棄物処理設備

作業項目等	L3	CL	備考
砂充填装置費用[百万円]	380	-	L3 廃棄物は、埋設時の陥没防止のため、処分容器に砂を充填する。

L3 廃棄物の放射能測定作業及びクリアランス金属のクリアランス認定用放射能測定作業を表 4.2.3-3 に示し、それに必要な設備費用を表 4.2.3-4 に示す。

表 4.2.3-3 廃棄確認作業（放射能測定作業）

作業項目等	L3	CL	備考
①廃棄体数量[体]	62,016	80,000	
②廃棄確認処理能力[h/体]	3.8	0.625	L3 測定項目：外観、表面汚染、放射能、表面線量率、上部空隙、重量、強度、ラベリング CL 測定項目：放射能、重量
③廃棄確認時間[日]	47,133	10,000	①×②÷5h/日
④運転員[人]	3	5	
⑤廃棄確認作業工数[人工]	141,399	50,000	③×④
廃棄確認作業費用[百万円]	4,242	1,500	⑤×30 千円/人工

表 4.2.3-4 廃棄確認（放射能測定）設備費用

作業項目等	L3	CL	備考
①廃棄体数量[体]	62,016	80,000	
②容器単価[百万円/体]	0.1	0.1	
容器費用[百万円]	6,202	8,000	①×②
廃棄物確認検査装置費用[百万円]	700	141	検査項目が異なるため、費用に差が生じている

解体現場～建屋搬出口までの建屋内輸送作業費用を表 4.2.3-5 に示し、建屋搬出口～構内一時保管場所までの構内輸送作業費用を表 4.2.3-6 に示す。

表 4.2.3-5 輸送作業費用（建屋内輸送：解体現場～建屋搬出口まで）

作業項目等	L3	CL	備考
① 廃棄体数量[体]	62,016	80,000	
② 台車への積載体数[体]	1	1	
③ 輸送時間[分/体]	12	10	
④ 輸送日数[日]	2,481	2,667	①÷②×③÷60min./h÷5h/日
⑤ 作業員[人]	10	10	
⑥ 建屋内輸送作業工数[人工]	24,810	26,670	④×⑤
建屋内輸送作業費用[百万円]	744	800	⑦ ×30 千円/人工

表 4.2.3-6 輸送作業費用（構内輸送：建屋搬出口～構内一時保管場所まで）

作業項目等	L3	CL	備考
① 廃棄体数量[体]	62,016	80,000	
② トラックへの積載体数[体/台]	2	2	
③ トラック使用台数[台/日]	2	2	
④ 1日あたり輸送回数[回/日]	5	5	
⑤ 輸送日数[日]	3,101	4,000	①÷②÷③÷④
⑥ 作業員[人]	11	11	
⑦ 構内輸送作業工数[人工]	34,111	44,000	⑤×⑥
構内内輸送作業費用[百万円]	1,023	1,320	⑧ ×30 千円/人工

構外輸送費用を含む処分費用を表 4.2.3-7 に示す。ここで使用する処分単価は、解体引当金省令に基づき経済産業省より提示される L3 廃棄物の処分単価及びクリアランス処理に係る単価である。

表 4.2.3-7 処分費用（含構外輸送）

作業項目等	L3	CL	備考
① 廃棄体数量[体=m ³]	62,016	80,000	廃棄体の外容積で計算、1 体 = 1m ³ 。
② 処分単価[千円/m ³]	300	2	L3:構外輸送費、処分地の建設費及び管理費 CL:構外輸送費
構外輸送・処分費用 [百万円]	18,605	160	① ②÷1,000

表 4.2.3-1～表 4.2.3-7 をまとめた結果を表 4.2.3-8 に示す。

表 4.2.3-8 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。

4.2.4 作業項目の他に考慮すべき事項

現場作業及び現場設備費用等の他に、放射性廃棄物とせず、有価物（本評価では L1 処分容器（内容器））として再利用することから、以下のようなメリットも生じることとなる。

- 有価な金属スクラップとして使用することで、その分の金属をリサイクルし有効活用することができる。
 - ・金属をリサイクルすることで、社会全体として金属スクラップを節約したこととなる。
 - ・本評価においては、約 8 万トンの金属を節約したこととなることから、仮に金属スクラップの単価を 3 万円/トンとした場合は、

$$8 \text{ 万トン} \times 3 \text{ 万円/トン} = 24 \text{ 億円}$$
 のコストメリットが生じたこととなる。
- 廃棄物埋設処分場が不要となり、土地を有効活用できる。
 - ・仮に、日本原子力発電㈱にて検討している L3 埋設施設と同等の土地を有効活用できると想定した場合、100m × 80m の土地を有効活用できることとなる。

4.2.5 現状のクリアランス処理・処分の課題について

実際のクリアランスにおいて、現状では表 4.2.5-1 に示すような追加的管理を行っており、これが現状のコストアップの要因となっている。

これらの課題をクリアし、クリアランスが合理的に処理・搬出可能となれば、本評価結果のようなコストメリットが出てくるものと考えられる。

表 4.2.5-1 現状のクリアランス処理・処分の課題

追加的管理項目	実施事項	合理化に向けての課題
(原電の例) クリアランス確認測定の前に、クリアランス対象物をトレイに並べて測定 →放射能測定作業費用の増加	・クリアランス確認測定の前に、偏在汚染に係る確認を行うため、クリアランス対象物をトレイに並べ、「前モニタ」にて事前に測定を行っている。	・偏在汚染の合理的な測定・評価方法を検討する。 (例:偏在汚染が問題とならないほど低いレベルの明確化、熔融後に CL 測定を行う、等)。
物品搬出測定 →構内輸送費用の増加	・クリアランス確認測定により放射能がほとんど存在しないことが確認されているにもかかわらず、管理区域からの搬出測定も行う必要がある。	・クリアランス測定～物品搬出測定を合理化する。
ゲートモニター測定 →放射線測定費用、ゲートモニター管理費用増加	・発電所から搬出する直前に、ゲートモニターにより放射性物質が含まれないことを自主的に確認。	CL 測定実績を増やし、念のため測定/ゲートモニター測定を実施しなくてもよいようにする。 →社会的受容性の向上 フリーリリースの実現

4.3 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。

4.3.1 平成29年度の地元関係者への結果説明

昨年度に引き続き、実証試験を行った室蘭地元住民への安心・理解活動のため、平成29年6月28日に事業報告会を実施した。

平成29年6月28日に実施した事業報告会の説明者は、日本製鋼所、神戸製鋼所及び電気事業連合会であり、「本事業の必要性と目的」及び「平成28年度事業結果及び平成29年度事業計画の概要」について、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された。

事業報告会の事前のお知らせは、新聞広告（北海道新聞及び室蘭民報：平成29年6月14日及び6月21日の朝刊にて）により行った。

平成30年3月22日には、本事業の事業報告会を開催した。事業報告会の開催をより多くの地元住民にお知らせするため、新聞広告に加え、室蘭市の広報誌やチラシ配布を実施した。

平成29年6月28日に開催した事業報告会では、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、昨年度の評価（回答者の約7割の方から満足できたとの評価）に対して約4割まで減少し、再利用に関しても肯定的な意見が約半分に減少した。これは、本事業やクリアランスの再利用について不安を持つ参加者が相対的に多かったことに加え、このような方からの質問に対してわかりやすい回答がなされなかったためと考えられた。

このため、平成30年3月22日の事業報告会では、平成29年6月28日の事業報告会で質疑が多かった点について重点的に説明するとともに、本委託事業の成果を活かした今後の取組みについても説明したところ、満足度や理解度が向上するようなアンケート結果が得られた。

この事業報告会の概要、参加者の皆様からのご質問やアンケート結果等の事業報告会の概要、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を巻末に添付する。

4.3.2 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（平成27年8月～平成30年3月）に表4.3.2-1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 4.3.2-1 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"> ・スライドによる説明 ・質疑対応 ・ポスター展示
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"> ・スライドによる説明 ・質疑対応 ・ポスター展示
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"> ・CL金属搬入立会 ・ゲートモニター通過立会 ・保管場所の空間線量率確認 ・CL金属の表面線量率確認
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"> ・処分容器(試作品)見学 ・蓋の嵌め合い確認見学 ・試作品の表面線量率確認
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"> ・スライドによる説明 ・質疑対応 ・ポスター展示
H29年度事業報告	H30.3.22	一般市民 (自由参加)	<ul style="list-style-type: none"> ・測定体験、関連資料の展示 ・一般金属のリサイクルに係る講演の実施 ・スライドによる説明 ・質疑対応 ・ポスター展示

4.3.3 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 4.3.3-1 に示す方法・方針が考えられる。

表 4.3.3-1 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"> ・専門用語は避ける、または丁寧な解説を付けて使用する。 ・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。
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"> ・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。 ・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。
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"> ・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。 ・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。
ポスター展示	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"> ・専門用語は避ける、または丁寧な解説を付けて使用する。 ・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。
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"> ・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。

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 4.3.3-2 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 4.3.3-2 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"> ○資料はシンプル・簡素にする。 ○専門用語は避ける。または必ず解説を付ける。 ○言いたいことのポイントを絞り、情報量は最小限にする。 ○問題点を整理し明確にする。
廃棄物の種別・分類に関するもの	<ul style="list-style-type: none"> ○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。 ○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）。
再利用に関するもの	<ul style="list-style-type: none"> ○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。 ○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。 ○電力会社としての再利用の目的、必要性を明示する。 ○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。
放射線・放射能に関するもの	<ul style="list-style-type: none"> ○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。 ○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。 ○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。 ○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、どういふ影響を及ぼすのか。 ○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。
クリアランスという名称に関するもの	<ul style="list-style-type: none"> ○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。
情報発信に関するもの	<ul style="list-style-type: none"> ○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。 ○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。
国の関与、法律に関するもの	<ul style="list-style-type: none"> ○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。 ○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。
海外の実績に関するもの	<ul style="list-style-type: none"> ○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。 ○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。
サーベイ体験・測定に関するもの	<ul style="list-style-type: none"> ○理解活動にあたって、サーベイ体験は非常に有効である。

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 4.3.3-3 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 4.3.3-3 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"> ・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。 ・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。
<p>搬入前後のクリアランス金属の放射能量の差を教えてほしい。 (搬入前＝クリアランス確認申請データ)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・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。 ・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。 ・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。
<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"> ・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。 ・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。

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ほか、以下のようなノウハウ・マテリアルを構築することができた。

表 4.3.3-4 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&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、P.51
- [2] S.T.Rolf and J.H.Barsom : Fracture and Fatigue Control in Structures-Applications of Fracture Mechanics, 197 by Prentice-Hall, Inc.
- [3] P.E.Bennett, G.M.Sinclair : ASME paper, 65-MET-11 (1965) .
- [4] 後藤浩二、平澤宏章、豊貞雅宏 : 日本造船学会論文集、176 (1994)、pp.501-507
- [5] 東郷敬一郎著、材料強度学、内田老鶴圃
- [6] 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
- [7] S.T.Rolfe and S.R.Novak. ASTM STP 463 (1970) ,P124.

添付資料

1. 事業報告会実施結果概要（平成29年6月28日開催分）
2. 事業報告会でいただいた主なご質問と回答（平成29年6月28日開催分）
3. 事業報告会実施結果概要（平成30年3月22日開催分）
4. 事業報告会でいただいた主なご質問と回答（平成30年3月22日開催分）

経済産業省委託事業 「原子力発電所等金属廃棄物利用技術開発」

事業報告会実施結果概要 来場者アンケート実施結果 (平成29年6月28日開催分)

平成29年6月28日に行いました事業報告会において、その結果の概要と、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)

事業報告会の実施結果

1

- 開催日：6月28日（水） 18:00～20:30
- 開催場所：室蘭市市民会館 中・小会議室
- 参加者：**23名**
- 主催者：日本製鋼所、神戸製鋼所、電気事業連合会
- 主な説明事項：①本事業の目的と必要性
②平成28年度事業結果概要
③平成29年度事業計画概要

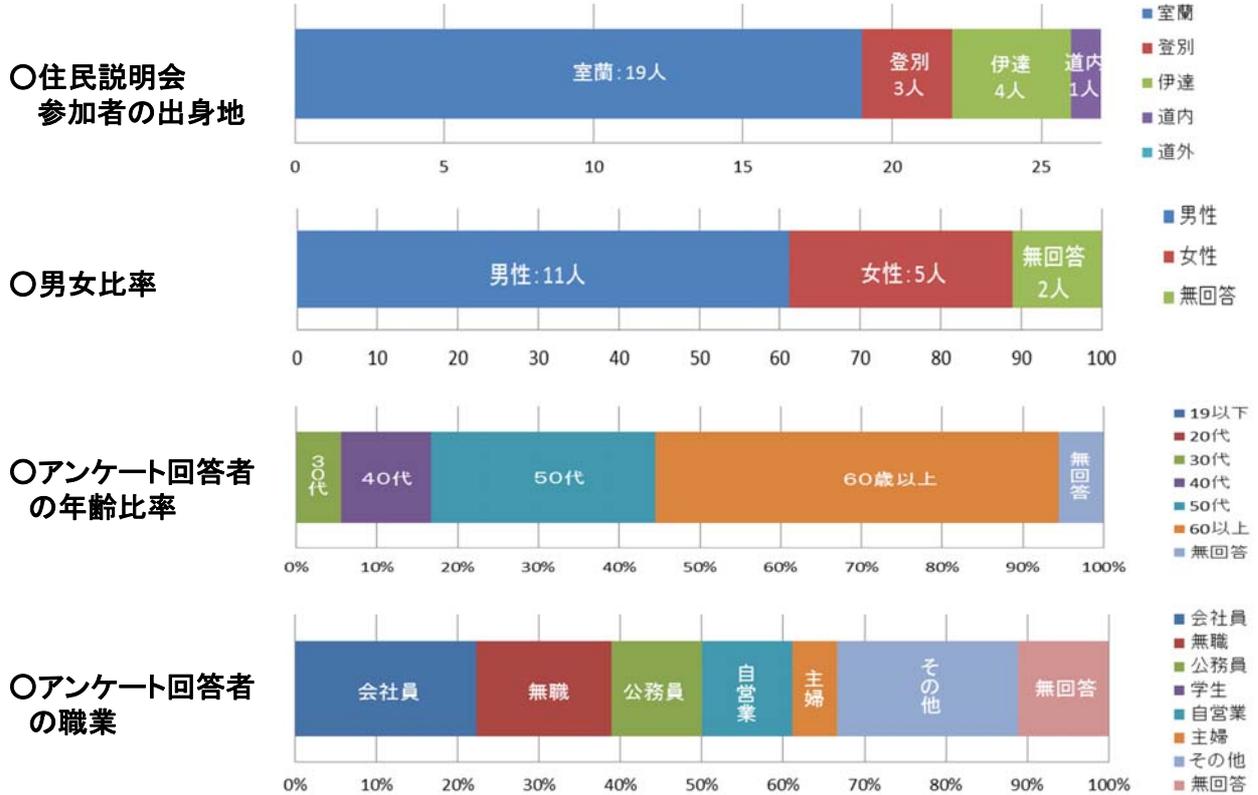
時間	実施事項	実施内容
18:00～19:00	事業報告	上記「主な説明事項」について、事業者より報告させていただきました。
19:00～20:30	質疑応答	事業者からの説明に対する質問にお答えしたり、参加者からご意見をいただきました。

○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）

アンケート結果

2

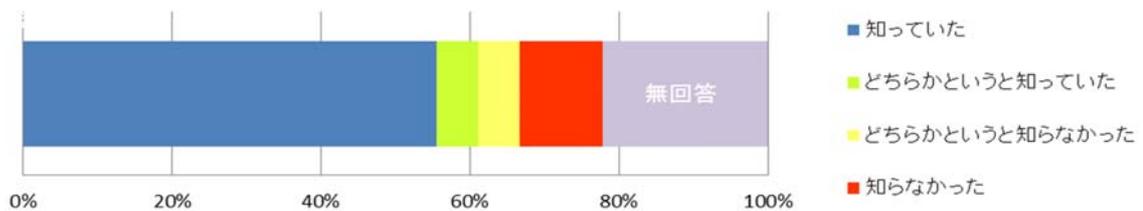
➤ アンケート回答率は78%（18人／23人）であった。



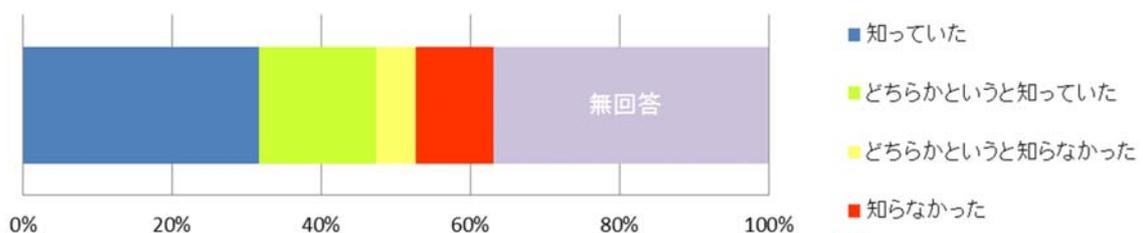
アンケート結果

3

○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。



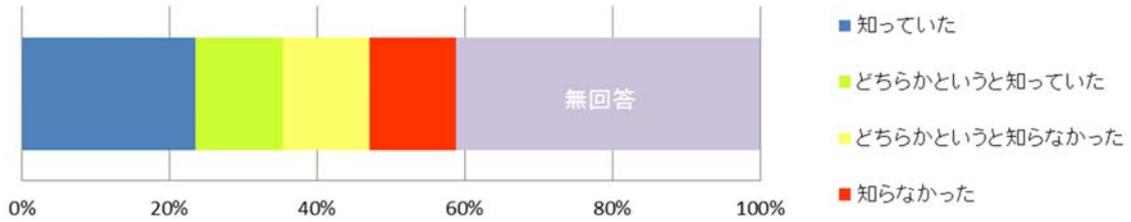
○放射能が基準値以下の金属は放射性廃棄物ではないことが、IAEA(国際原子力機関)や日本の法令でも示されていることをご存知でしたか。



アンケート結果

4

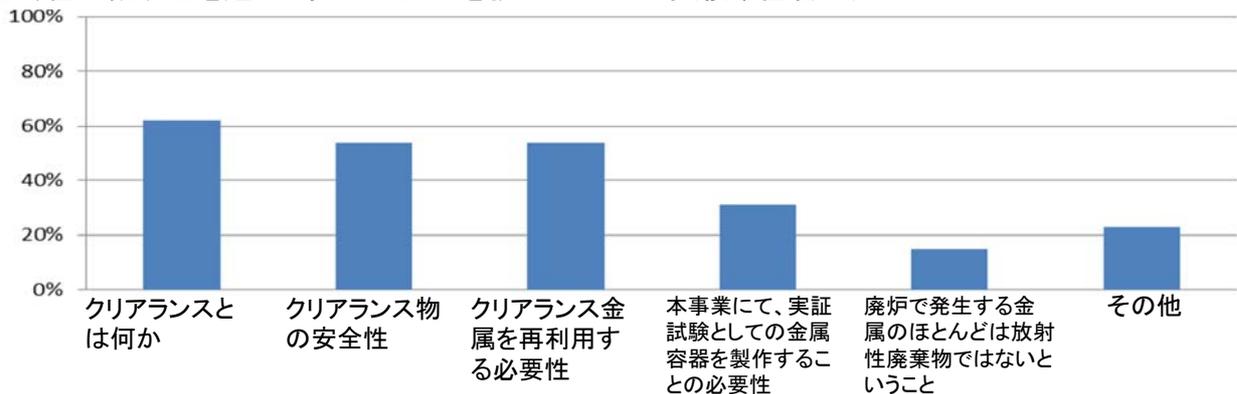
○原子力発電所の廃止措置に伴い大量の金属類が出てきますが、大部分は放射性廃棄物でないことをご存知でしたか。



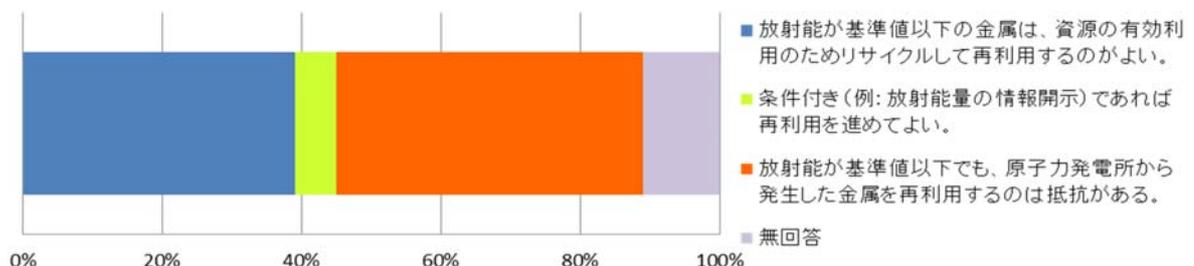
アンケート結果

5

○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)



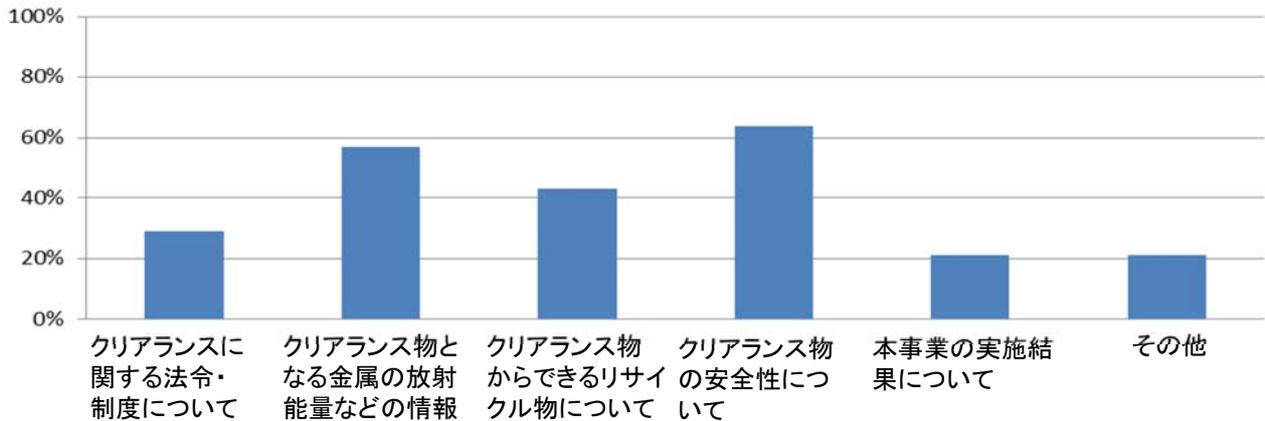
○資源の有効利用として原子力発電所の金属をリサイクルすること(クリアランス制度の活用)について、どのようにお考えですか。



アンケート結果

6

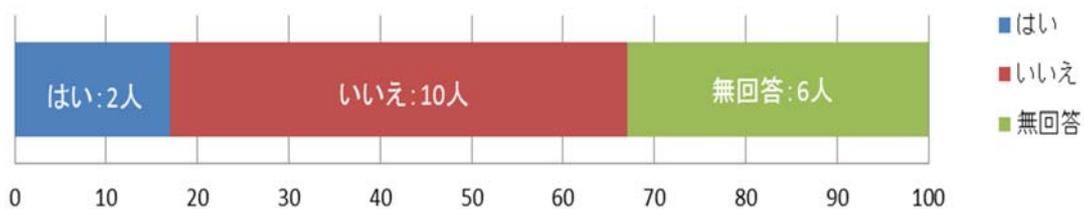
○今後、原子力発電所の金属のリサイクルを進める(クリアランス制度の活用)には、どのような情報の提供が重要と考えますか。(複数回答可)



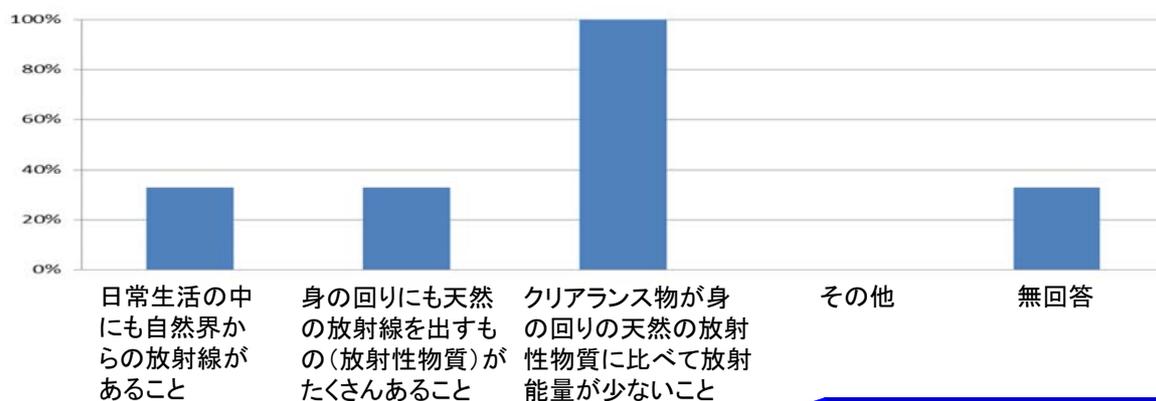
アンケート結果

7

○放射線測定体験にはご参加されましたか。



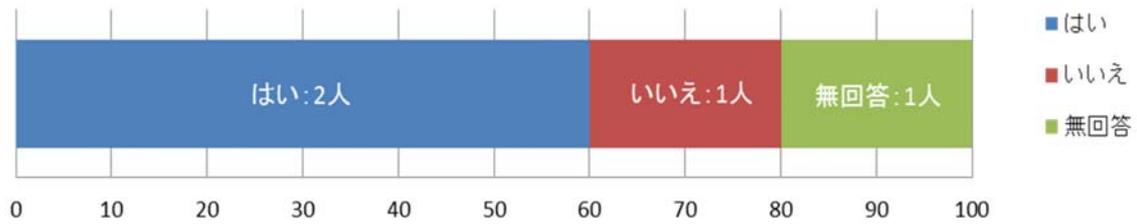
○「1 はい」と答えた方に質問です。実際に放射線測定器を使ってみて実感できたことがあれば教えてください。



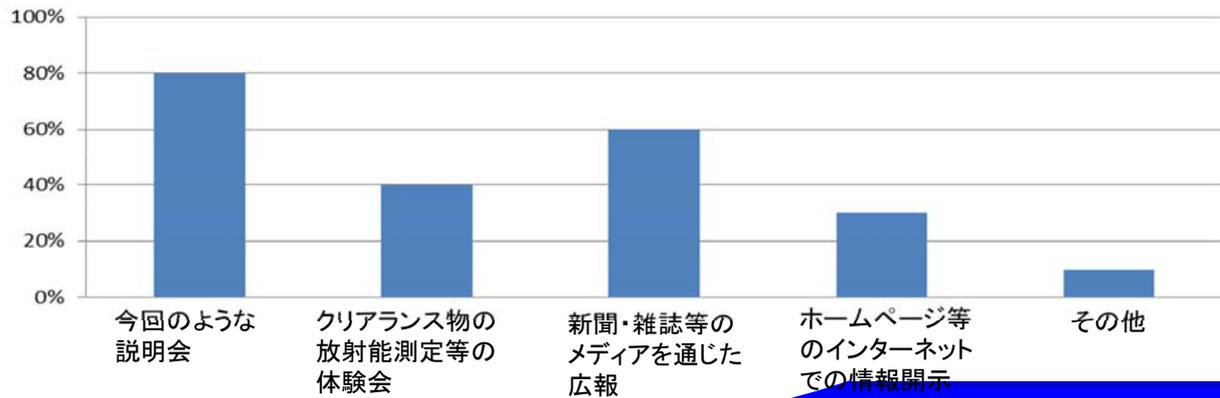
アンケート結果

8

○「1 はい」と答えた方に質問です。放射線測定体験はクリアランス物の安全性を理解していただく上で有効な説明方法だと思いますか。



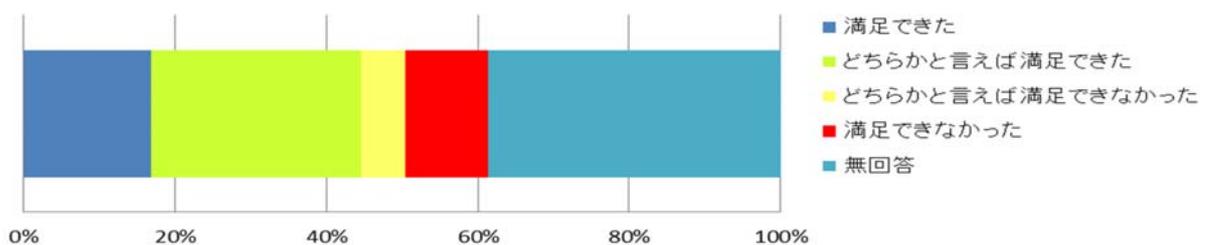
○今後、原子力発電所の金属のリサイクルを進める(クリアランス制度の活用)には、どのような活動を行うことが有効と考えますか。(複数回答可)



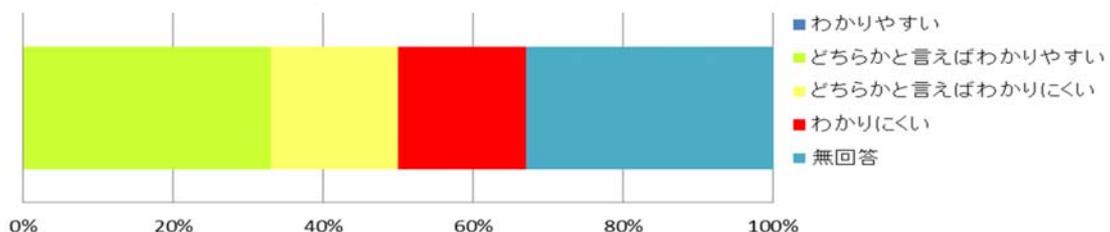
アンケート結果

9

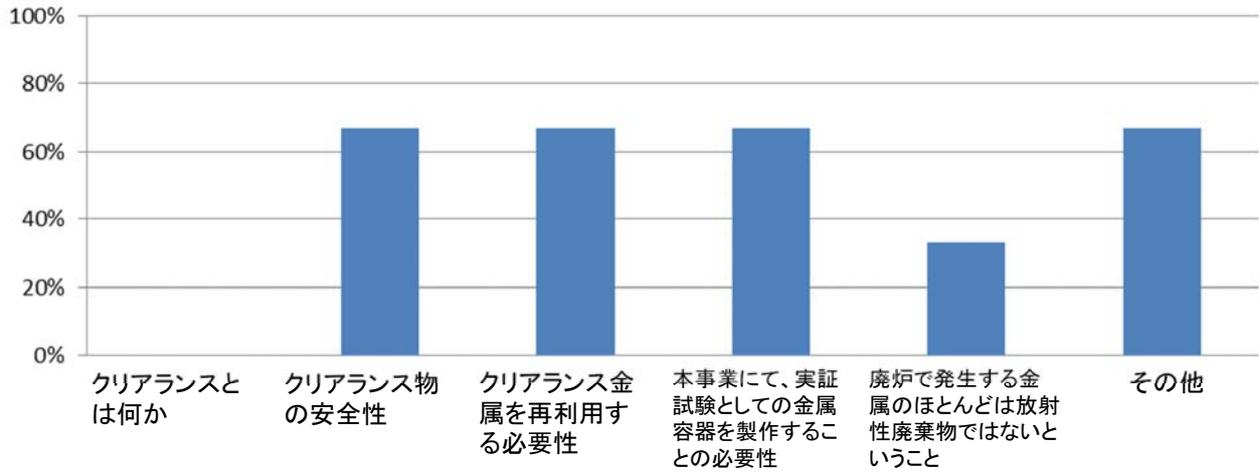
○本日の説明会について満足いただけましたか。(○印は1つだけ)



○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。(○印は1つだけ)



○「3 どちらかといえばわかりにくい」「4 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)



事業報告会でいただいた主なご質問とご回答

平成 29 年 6 月 28 日に開催いたしました事業報告会において、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：モニタリングポストは 1 箇所だけか。風向きによっては影響（線量上昇）が出ないことが考えられる。風向きも示してほしい。

A1：室蘭を代表するモニタリングポストは、胆振振興局に設置された 1 か所だけです。なお、風向きについては、資料中の図中に記載しております。

Q2：製鋼所の煙突にはフィルターは、つけないのか。

A2：粉塵を取る濾布状のフィルターは設置していますが、フィルターでは気体状のものは捕捉出来ないものと考えられます。なお、製鋼所の煙突に、HEPA フィルタは設置しておりません。

Q3：検出限界値が高すぎる。市民測定所ではもっと検出限界は低い。Bq/g⇒Bq/kg になると 1000 倍になる。検出限界を下げて発表すると市民として安心できる。

A3：どのくらいが常識的か、については専門家によりますが、本委託事業では、クリアランスレベルと比べて十分低い値を検出できるよう、検出限界値を設定しました。

Q4：金属のベクレルは、どのように測定するのか。

A4：試作した容器から発生した金属片を切り粉の状態にして測定しております。これについては、資源エネルギー庁ホームページに掲載している、平成 28 年度報告書に写真を掲載しております。

Q5：切り粉は今どうなっているのか。東海発電所に戻さないのか。

A5：日本製鋼所室蘭製作所のスクラップヤードに保管しております。現在（注：平成 29 年 6 月 29 当時）の所有権は国にあり、再加工後に電力向けの製品として売ることを考えています。

Q6：高い汚染は無く、クリアランス製品を作っていく上で何ら問題はないということか。

A6：その通りです。

Q7：クリアランスレベル付近のわずかな差で、放射性廃棄物としてドラム缶保存となるが、鍋とか食器になって一般に流通する可能性もある。

A7：クリアランスレベルは、一般の制限値である $1000 \mu\text{Sv}/\text{y}$ の $1/100$ 程度とされており、少しでも超えたら危険というものではなく、人体や環境への影響が無視できるレベルのものであります。これを超えたら即座に危険か危険ではないか、という値ではありません。

Q8：CTスキャンや胃のX線は毎日しているわけではなく、人生全くゼロの人も居ることから、そのような説明図は使うべきではない。自然放射線は人類が体験してきて処理できる能力がある。比較対象が違う。ピンポイント（局所被ばく）と全身とでは影響が違うので、この説明図は錯覚させてしまう可能性が高い。

A8：解りやすく実感のできる説明をと思い、説明図を使っております。もっと適切なものがあれば改良してゆきます。

Q9：作業員は、毎日、製品を作る際に被ばくするので、基準値をもっと低く設定して欲しい。

A9：クリアランスの国際基準を作る時には、工場働く人たちの被ばくについても、当然考慮して設定している。

Q10：国の基準は曖昧で不十分。自らより安全な基準を策定し、これを国に働きかけるべき。

A10：国の基準は、色々な再利用や処分のケースを想定し、その中で一番厳しいケースを考えても $10 \mu\text{Sv}$ となるよう作られております。製作側としても基準ギリギリの物を単純に受入るものではなく、安全を確認してから作業を行っている。

Q11：トリチウムについて、溶解の際や製品からトリチウムは検出されたのか。

A11：本事業ではトリチウムの測定は行っていないが、東海発電所では測定しており、その測定値は最高値で $0.52\text{Bq}/\text{g}$ です。なお、クリアランスレベルは $100\text{Bq}/\text{g}$ です。

Q12：トリチウムは溶解の際に100%大気中又は水に拡散する。持込んだ金属のBq量でいえば97%がトリチウムであり、相当量のトリチウムを何故測定や捕捉しないのか。

A12：平成28年度に測定した4核種（マンガン54、コバルト60、セシウム134、セシウム137）が、放射線による影響度の殆どを占めており、この4核種を測定していれば問題ないとの外部専門家の意見を伺っております。トリチウム基準値はCo-60に対して1,000倍高く、それだけ影響が少ないということです。

Q13：トリチウムは拡散して地域住民が最も影響を受ける。γ線を出さないので問題ないという理屈は通らない。

A13：γ線のみではなく、β線等による人体への影響も考慮しております。例えば、Co-60の影響の程度は、クリアランスレベルに対して0.45、トリチウムは0.005です。

Q14：格納容器の外のクリアランス材なのにCo-60はどうしてこんなに高いのか。一昨年の説明会のデータで検出されたCo-60が今回の測定で検出されなかったのは何故か。また、C-14は何処に行ったのか。

A14：今回のクリアランス金属は、格納容器の外であるが、放射性物質が存在している、いわゆる発電所の管理区域内の設備のものです。格納容器のみに放射性物質があるわけではなく、管理区域の中に存在していたので検出されております。

平成27年の説明会でのデータは、搬出時の値は検出限界相当の値があったと仮定して記載しており、実際に測定を行った際には検出されないこともあります。

Q15：有害物質を測るときは前後データを比較するもの。前後のデータを知らせて欲しい。また、説明において「…放射性物質がほとんど含まれておらず…」というのは、すなわち含まれているということの意味している。また、「…わずかに付着しているがふき取ればほとんどなくなってしまう…」とあり、雑巾等でふき取るのは非科学的と思う。放射性物質というと科学的に最先端と気がするが、非常に曖昧な表現。JAEA 東海の件もあり原子力に関する信用が無くなっている。隠していると思われたい様、前後データの比較をお願いしたい。

A15：決して隠すつもりはなく、説明の仕方に不十分な点もあったと思います。十分に気を付けます。前後データについては、測定を行った4核種（マンガン54、コバルト60、セシウム134、セシウム137）に対する東海での測定データとの比較を行い、経済産業省に提出する報告書に記載します。

Q16：トリチウムが拡散されているのであれば、もう移っているかもしれない。モニタリングポストを市内に増やしてほしい。

A16：事業者の立場から言うとそれは難しいものと考えます。事業として大々的に行うのであれば構内には設置する可能性はありますが、事業所の外は基本的に困難と考えています。

Q17：全国から室蘭に全部運んでくるのではなく、原発の近くで製品化するプロジェクトを進めてほしい。低濃度にしても累積されればこの地域は汚染されてくる。また、プロなのだから主体的に、地域が汚染されないような基準を国に求める気概はあるか。

A17：全国のクリアランス金属を日本製鋼所室蘭製作所に全部持込むつもりはありません。全国の工場で使っていただけのように、社会的受容性について検討することが本事業の目的にもなっております。

また、基準以下なら汚染されていても良いというつもりは全くございません。環境負荷をかけないためにも、出来るだけの除染を行い搬出するよう取組んで行きたい。

クリアランスの基準は、IAEAの安全指針に則ったものであり、ヨーロッパでも使っており、既に「フリーリリース」として通常のスクラップと同じような扱いでクリアランス物が使われております。健康に影響があるものを持込んでいないことを改めて申し上げさせていただきます。

Q18：昨年の説明では、日本製鋼所はテストケースとして試作するとのことであったが、先ほど説明にて所有権は国にあると言うことは、国が再使用先を指示しているのか。

A18：本日の説明にありましたように、試作した容器はスクラップ化し、電力向けの製品の材料に再利用する予定です。

Q19：去年の説明では1回きりなのかと思ったが、この事業はいつまで搬入し続けるのか。また、アンケートの『放射性廃棄物でなくなる…』というが、放射性廃棄物でなくなるには何百年もかかる。誤解のないような記載として欲しい。

A19：本事業は当初から3年度の計画としており、平成29年度で終了いたします。

また、ご指摘のとおり放射性廃棄物でなくなるのではなく、放射性廃棄物としての管理が要らなくなるのがこの制度であり、言葉の使い方は改めたい。

Q20：報告会の開催について、室蘭民報に掲載していると言うが、積極的に広報しているとは言い難い。もっと早く知らせたい。また、今後の報告会の予定はいつ計

画されているのか。

A20: 次回報告会は、来年の3月を計画している。開催案内の広報については改善したい。

<その他いただいたご意見>

- 一般人としてそんなに知識はないが、自然界にある放射線と比較してもクリアランスレベルは低い数値である。周囲の人達は説明を聞いて良く解ったと言っている。搬入立会や試作品を見て周囲の人達に説明して、皆安心している。これからも説明と情報を公開しながら行うことにより、安心して信頼して、今後の推移を見ていきたい。
- クリアランスレベルは自然放射線に比べて低いから安全というが、人類は自然放射線に対しては耐性ができているが、クリアランス金属からの放射線は初めてのものであり、どう影響があるかは未知数。是非解ってほしい。
- トリチウムは、泊や伊方でも大量に排出しており、今回の量はそれに比べれば低いと言うのは分かる。泊での放出量は分かるが、ハッキリと溶解前後データやトリチウム放出量を知らせるべき。また、気体や水として排出されない装置をつけるなど国に要求して欲しい。

以 上

経済産業省委託事業 「原子力発電所等金属廃棄物利用技術開発」

事業報告会実施結果概要 来場者アンケート実施結果 (平成30年3月22日開催分)

平成30年3月22日に行いました事業報告会において、その結果の概要と、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)

事業報告会の実施結果

1

- 開催日：3月22日（木） 17:00～20:15
- 開催場所：胆振地方男女平等参画センター ミンクール 大研修室 A・B
- 参加者：**44名**
- 主催者：日本製鋼所、神戸製鋼所、電気事業連合会
(資源エネルギー庁同席)
- 主な説明事項：①本事業の成果
②本事業における補足説明
③今後の取組み

※事業報告会の事前のお知らせは、
①「広報むろらん」への広告掲載
②新聞広告(北海道新聞及び室蘭民報：
3/8と3/15の朝刊にて)
③市内主要箇所にチラシ設置により行いました。

時間	実施事項	実施内容
17:00～18:00	資料展示 測定体験	クリアランス関連資料の展示や測定体験を行えるコーナーを設置し、クリアランスに対する理解を深めていただきました。
18:00～19:05	一般講演	室蘭工業大学・清水先生より、金属リサイクルについてご講演いただきました。
19:05～19:40	事業報告	上記「主な説明事項」について、事業者より報告させていただきました。
19:40～20:15	全体質疑応答	事業者からの説明に対する質問にお答えしたり、参加者からご意見をいただきました。

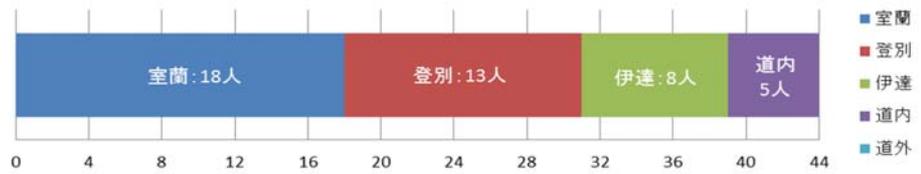
○説明の方法：スクリーン資料に基づく説明（資料は当日紙でも配布）

アンケート結果

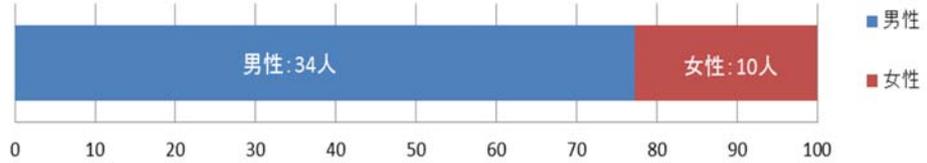
2

➤ アンケート回答率 : 55% (24人/44人)

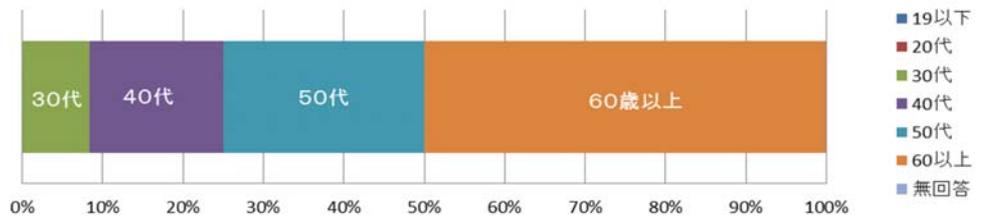
○事業報告会
参加者の出身地



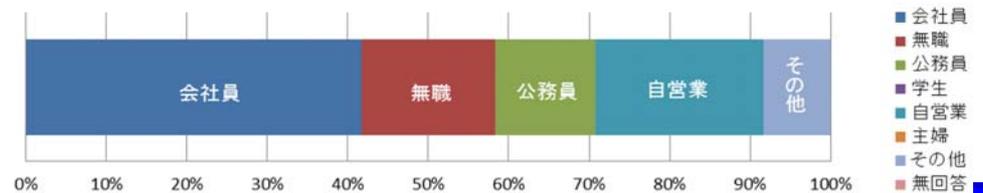
○男女比率



○アンケート回答者
の年齢比率



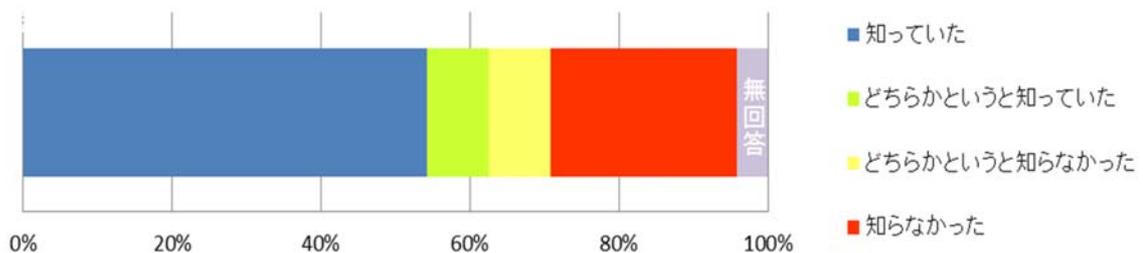
○アンケート回答者
の職業



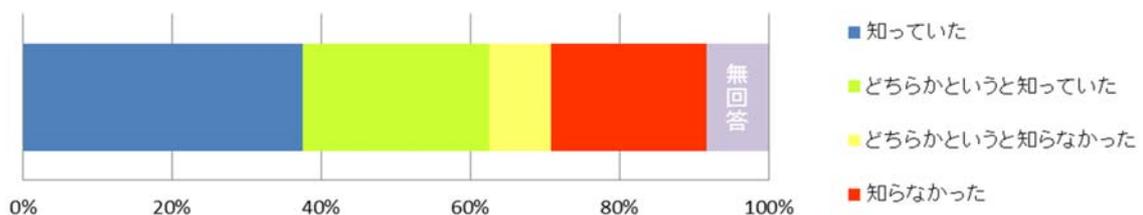
アンケート結果

3

○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。



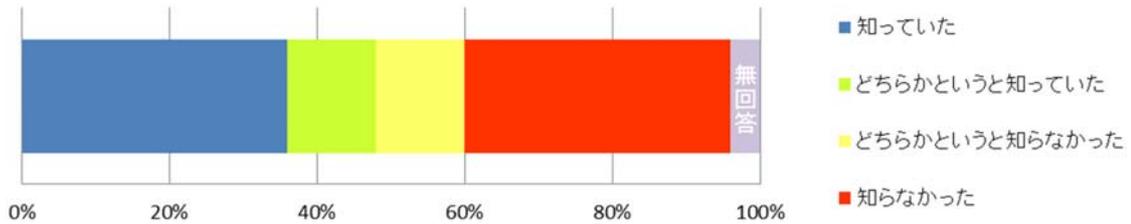
○放射能が基準値以下の金属は放射性廃棄物ではないことが、IAEA(国際原子力機関)や日本の法令でも示されていることをご存知でしたか。



アンケート結果

4

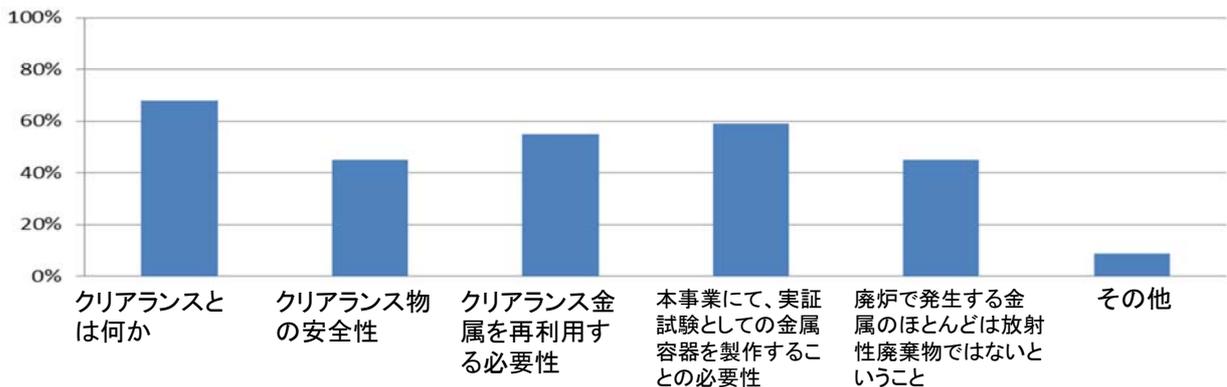
○原子力発電所の廃止措置に伴い大量の金属類が出てきますが、大部分は放射性廃棄物でないことをご存知でしたか。



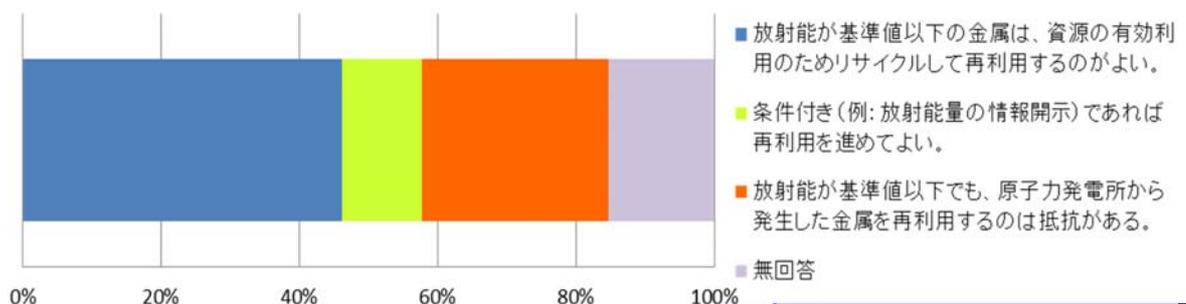
アンケート結果

5

○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)



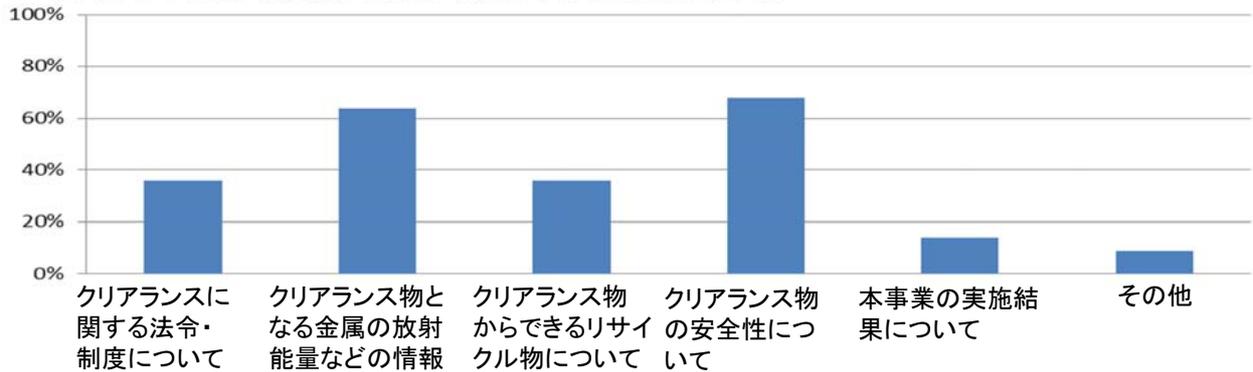
○資源の有効利用として原子力発電所の金属をリサイクルすること(クリアランス制度の活用)について、どのようにお考えですか。



アンケート結果

6

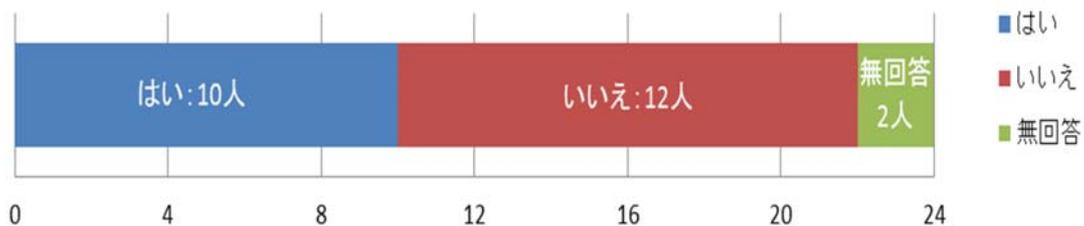
○今後、原子力発電所の金属のリサイクルを進める(クリアランス制度の活用)には、どのような情報の提供が重要と考えますか。(複数回答可)



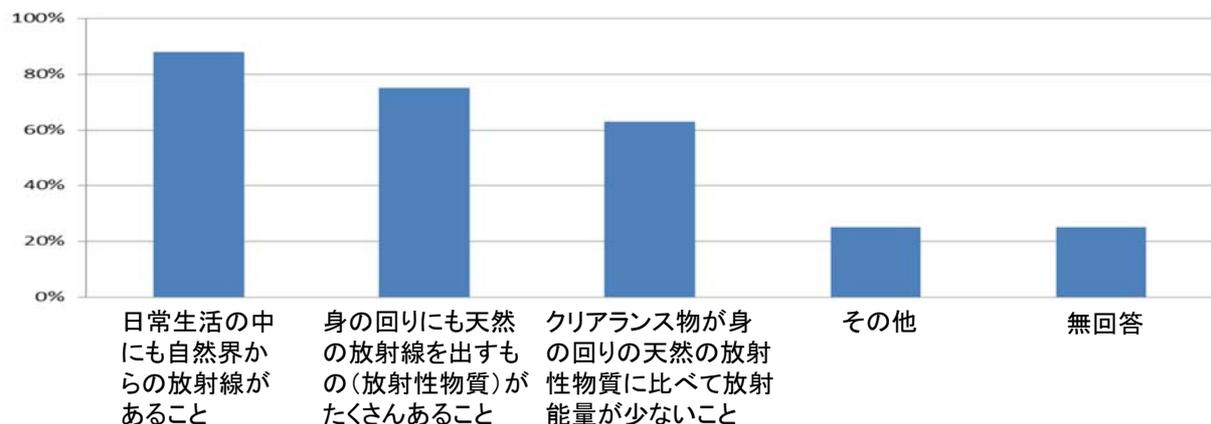
アンケート結果

7

○放射線測定体験にはご参加されましたか。



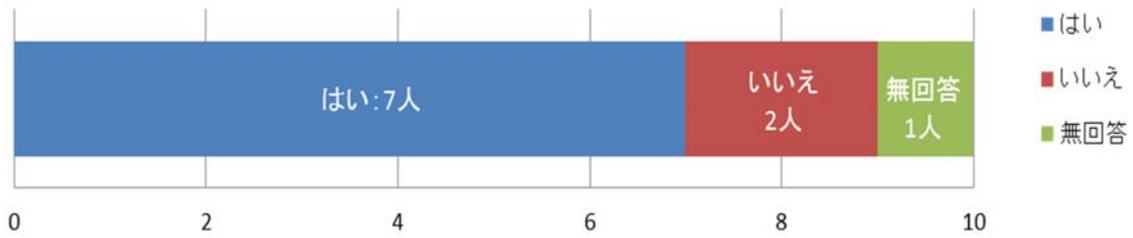
○「はい」と答えた方に質問です。実際に放射線測定器を使ってみて実感できたことがあれば教えてください。



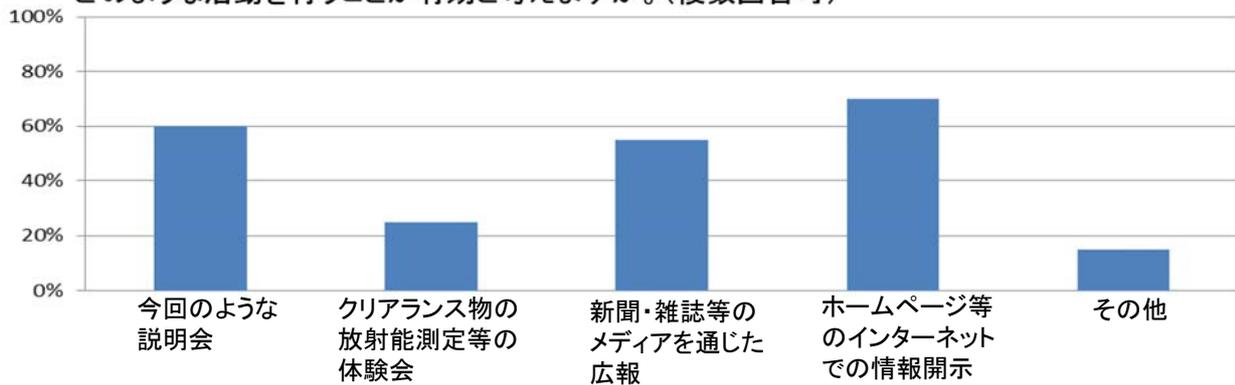
アンケート結果

8

○:「1 はい」と答えた方に質問です。放射線測定体験はクリアランス物の安全性を理解していただく上で有効な説明方法だと思いますか。



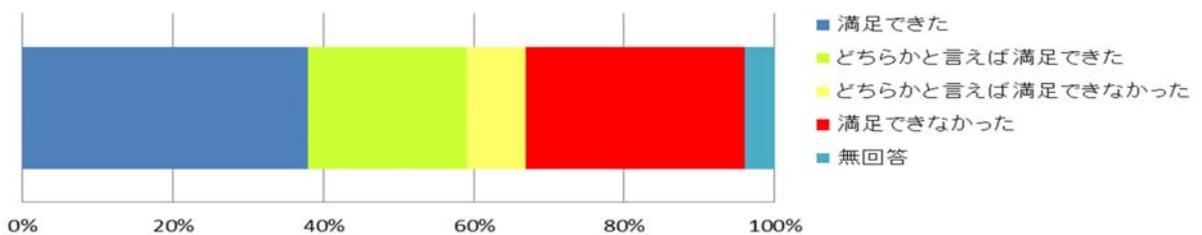
○今後、原子力発電所の金属のリサイクルを進める(クリアランス制度の活用)には、どのような活動を行うことが有効と考えますか。(複数回答可)



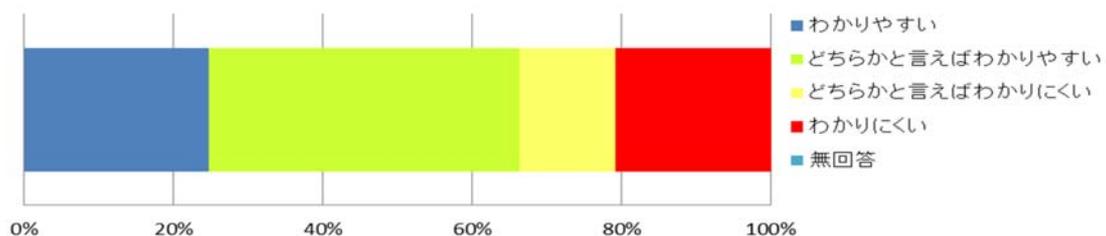
アンケート結果

9

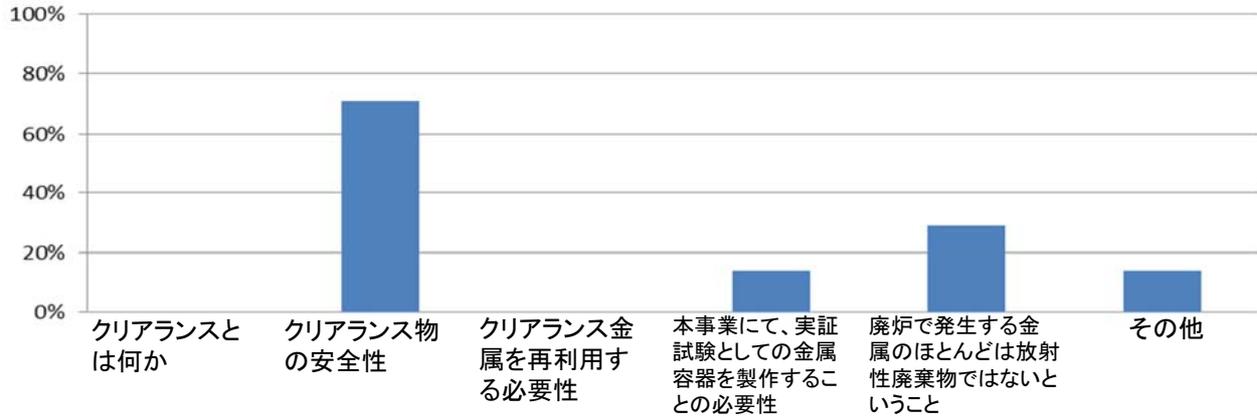
○本日の説明会について満足いただけましたか。(○印は1つだけ)



○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。(○印は1つだけ)



○「3 どちらかといえばわかりにくい」「4 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)



事業報告会でいただいた主なご質問とご回答

平成30年3月22日に開催いたしました事業報告会において、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：説明を受けてすぐに理解するのは難しいので、後から分かるように、住民側にも写真撮影や録音等を認めるべき。資源エネルギー庁にも見解を聞きたい。原子力規制庁はネットでライブ配信をしている。参考にされたし。

A1：事業者は、説明会の記録のために後方から撮影させていただいております。一般の方々については、撮影等を嫌われる方もいると思われるため、お断りしている次第ですのでご了承ください。

ネット配信については、ご意見として頂戴いたします。なお、説明会等の結果については全て公開していることはご理解いただきたい。また、情報公開については、経済産業省のルールに沿って実施しております。

Q2：今後、疑問が生じた場合の窓口はどこなのか。

A2：日本製鋼所室蘭製作所総務課にて承ります。

Q3：地元への周知について、伊達や登別にも実施しているのか。また、室蘭市民は、本事業について分かっているのか？

A3：「広報むろらん」や室蘭民報、北海道新聞に、事業報告会開催の広告を掲載してお知らせしております。また、広報のぼりべつにも同様の広告を掲載しております。伊達市については、市役所には案内しましたが、具体的な周知方法については承知しておりません。また室蘭市内については、公共施設等にチラシを置かせていただきました。

Q4：クリアランスについて、影響がないと言うが、福島の後始末も終わっていないのに心配。情報を小出しにしてくることについても心配。国民が置き去りにされている。国がしっかりと方針を示すべきでは。

A4：国民に隠してやっている訳ではございません。年度末には報告書を公開しております。また、成果等については電事連HPでも公開しております。方針については、原子力小委員会で廃棄物全体の議論について、情報公開しつつ進めております。

Q5：作業者の危険性（健康）について、どう考えている？

A5：健康影響がないことが全ての前提と考えております。クリアランス金属は人体への影響が無視できるほど小さいため、通常の仕事と変わらない状況で作業等しております。このことは、作業者にも説明しております。特別の健康診断まではやっておりませんが、業務の一環として適切にやっています。

Q6：1,920万Bqはクリアランス金属中のトリチウムの量。1.3×10¹⁸Bqは全地球上の大気中に含まれるトリチウムの量。両者を比べるのは適切ではないのではないか。資料から削除すべきではないか。

A6：大気中にもトリチウムがあるということをご説明したかったものです。678億分の1という数値自体に大きな意味がある訳ではございません。比較対象として良くなかったと考えております。

Q7：説明中にあった、製作工場周辺の年間ひばく線量の試算は、どういう評価、計算を行ったのか。

A7：時間経過による減衰補正を行ったトリチウム濃度0.32Bq/gが、水蒸気となって全て出たものと想定し、その空気を吸ったものとして試算したものです。試算対象となる人間の、周辺の放射能濃度、呼吸による空気吸入量、対象者の居住時間、放射線の種類による線量換算係数等を用いて、体内に取り込むものとして保守的に評価しています。

Q8：経済性の話もあったが、室蘭市で続けていくとなると、フィルターも何もなし。全部室蘭になると、地域全体の自然破壊になる。室蘭での鑄造事業の活性化の動きと原子力での被ばくは除去できるのか？ 両立するのか？

A8：経済性評価では、フリーリリースを前提としており、クリアランスは、輸送コストがさほどかからない発生場所の近くで再利用することを想定している。クリアランス金属全てを日本製鋼所で処理するという訳ではない。数ある製作メーカーの一つと考えている。

Q9：日本製鋼所は儲かるかも知れないが、登別は観光で食べている。風評被害がある。日本製鋼所は企業倫理を考えてもらいたい。

A9：風評被害を防ぐために説明会をやっている。今後も適切に対応していきたい。

＜その他いただいたご意見＞

- 3年間無事に終了し、ごくろうさまでした。クリアランス金属搬入時、町会から10名程度参加していた。しかし、これまでの説明や立会い等で、心配がなくなったので、今回は私1人の参加となった。専門的すぎる説明では困るが、平成28年7月7日のクリアランス金属搬入時の見学もしてきたし、測定も見てきて、安心感が得られている。今後も情報提供願いたい。

以 上

