

### 3.4 ステンレス鋼製機器の健全性評価に係る研究

再循環ポンプ等に用いられているステンレス鋼は、熱時効により材料の組織が変化して靱性が低下する。高経年化技術評価等においては、ステンレス鋼の熱時効による靱性の低下挙動評価は H3T モデルを用いて実施されている。H3T モデルは、主に加速劣化試験等の結果に基づいて主に PWR プラントの環境を考慮して開発され、PWR プラント及び BWR プラントの評価に用いられている。

本研究では、実機材料（対象機器：再循環ポンプ）を用いて組織観察、破壊靱性試験等を実施し、実機環境での H3T モデルによる熱時効による靱性の低下挙動評価手法の保守性を検証する。

令和 6 年度は、事業計画に基づき、本研究で取得した H-1 再循環ポンプの実機材データに関して、ステンレス鋼製機器の米国予測モデル<sup>[3.4-1]</sup>に適用して検討が行えるように、価値の向上を図ることを目的として、以下の項目を実施した。

#### (1) 試験片の製作

熱時効による靱性の低下挙動評価手法の保守性を検証するため、令和 3 年度<sup>[3.4-2]</sup>に策定した対象プラントの再循環ポンプから採取した実機材料による試験マトリックスに基づき、令和 6 年度に計画した試験片（表 3.4-1）を製作した。

#### (2) 試験の実施

令和 3 年度に策定した試験マトリックスに基づき、令和 6 年度計画の試験（表 3.4-1）を実施した。

#### (3) 実機材の輸送

本研究で事業者より貸与を受けた H-1 再循環ポンプ実機材料を、中部電力株式会社浜岡原子力発電所構内の指定場所へ令和 7 年 3 月 3 日から 4 日にかけて輸送し返却した。

#### (4) 事業計画案の見直し

上記(1)の実施状況を総合的に検討し、ステンレス鋼製機器の健全性評価にかかる研究の事業について成果をまとめ、令和 6 年度までの成果で研究の目的を達成できたことから、事業計画の見直しはなく、終了とすることとした。

<参考文献>

[3.4-1] O. K. Chopra. Estimation of fracture toughness of cast stainless steel during thermal aging in LWR system. NUREG/CR-4513, ANL-15/08, Rev. 2, 2016.

[3.4-2] 令和 3 年度原子力施設等防災対策等委託費（実機材料等を活用した経年劣化評価・検証（実機材料を活用した健全性評価に係る研究））事業、令和 4 年 3 月

表 3.4-1 試験マトリックス（年度展開）

| 実施年度    |    | J-R 試験      | 引張試験        | シャルピー試験 | 観察・硬さ・APT  | 化学成分分析                | 輸送(L 型)                       |
|---------|----|-------------|-------------|---------|--|-----------------------|-------------------------------|
| 形状      |    | 1T-C(T)     | JIS 14A 試験片 | フルサイズ   | 10x10x2mm  | 任意(端材)                |                               |
| 全数      | 加工 | 8           | 6           | 24      | 12   | 2                     |                               |
|         | 試験 | 8(288°C、室温) | 6(288°C、室温) | 24      | 金相:12 硬さ:6<br>APT:12<br>( $\alpha$ , $\gamma$ 各 6) | 2                     |                               |
| 令和 4 年度 | 加工 | 6           | 4           | —       | 12   | —                     | 照射後試験施設<br>→電中研               |
|         | 試験 | 4(288°C)    | 4(288°C)    | —       | 金相:12、硬さ:6、<br>APT:6( $\alpha$ 相:6)                | —                     |                               |
| 令和 5 年度 | 加工 | —           | 2           | 12      | —  | 2                     |                               |
|         | 試験 | 2(288°C)    | 2(室温)       | —       | 6(APT: $\gamma$ 相)                                 | 2                     |                               |
| 令和 6 年度 | 加工 | 2           | —           | 12      | —  | —                     | 電中研→NFD<br>NFD→発電所            |
|         | 試験 | 2(室温)       | —           | 24      | —  | —                     |                               |
| 備考      |    | L-C 方向      | L 方向        | L-C 方向  | 令和 6 年度に<br>照射後試験施設<br>に輸送                         | 規格に規定された<br>元素及び N、Nb | R3 年度に発電<br>所から照射後試<br>験施設に輸送 |

### 3.4.1 試験片の製作

#### (1) 試験片の形状及び寸法

令和6年度製作した試験片を以下に示す。

- ・ 1T-C(T)試験片(適用規格：ASTM E1820-21)3個(うち1個は予備試験片)
- ・ シャルピー衝撃試験片(適用規格：JIS Z 2242(2023) 標準試験片(V ノッチ試験片))12個

1T-C(T)試験片の形状及び寸法を図3.4.1(1)-1に、シャルピー衝撃試験片の形状及び寸法を図3.4.1(1)-2に示す。1T-C(T)試験片はASTM E1820-21に準拠した板厚25.4mmの Compact Tension 試験片とした。また、シャルピー衝撃試験片はJIS Z 2242(2023)に準拠した標準試験片(V ノッチ試験片)とした。

各試験片の製作手順を以下に示す。

#### 1. 試験体の粗切断

製作する試験片を含むように試験体をブロック状に切断する。

#### 2. 試験片の加工

ブロック状に切り分けた試験体から試験片を加工する。

#### 3. 試験片の測定

1T-C(T)試験片及びシャルピー衝撃試験片については加工した試験片の寸法を測定し、各寸法が所定の公差内であることを確認する。

試験体の粗切断及び試験片の加工に際しては切断に先立って罫書きを施し、罫書き線に沿って切断することにより誤りが生じないようにした。

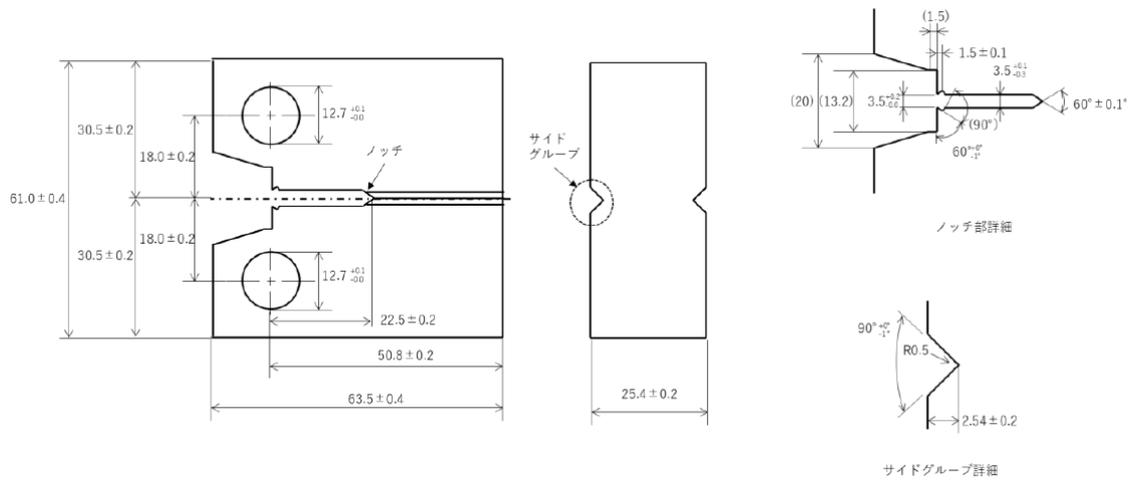


図 3.4.1(1)-1 1T-C(T)試験片の形状及び寸法

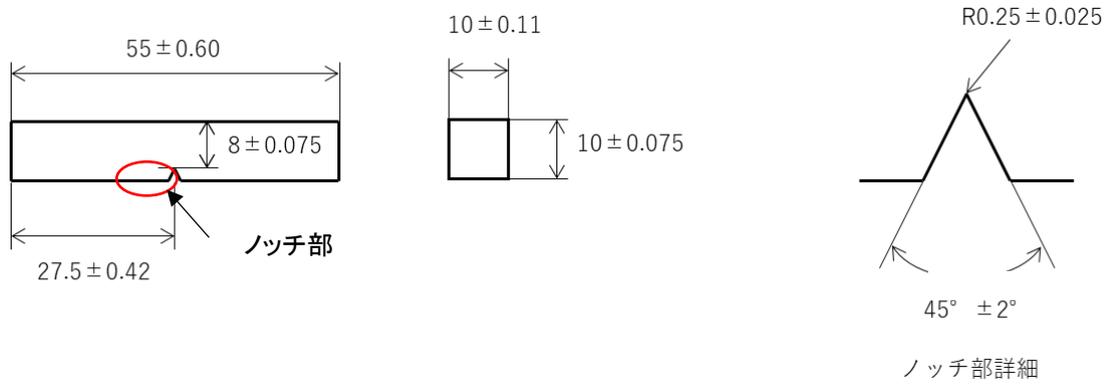


図 3.4.1(1)-2 シャルピー衝撃試験片の形状及び寸法

## (2) 試験体の粗切断

PLR ポンプにおける試験体採取位置及び試験体の配置と ID の関係を図 3.4.1(2)-1 に示す。図 3.4.1(2)-1 の上写真に赤線で示すように PLR ポンプから円筒状に材料を切り出し、図 3.4.1(2)-1 の下写真に示すように 8 個の試験体を切り出した。試験体の外観を図 3.4.1(2)-2 に示す。試験体は円筒形の構造物の概ね 2/3 周の範囲から ID-1 と 6、ID-2 と 5、ID-3 と 4、ID-7 と 8 が対面側となるように 8 体採取した。試験片の方向を元の構造物を基準に示すと、ID-1、2、3、8 と ID-6、5、4、7 はそれぞれ鏡像反転した位置関係となる。このうち、試験片は ID-1～6 の試験体から採取し、ID-7 と 8 は追加試験等で不足が生じたときに使用する予備試験体とした。

令和 6 年度に製作するのは 1T-C(T)試験片 3 個及びシャルピー衝撃試験片 12 個である。1T-C(T)試験片は試験体残材が大きい ID-2、ID-5 及び ID-4 の板厚中央付近から採取することとした。なお、ID-4 から採取した 1T-C(T)試験片を予備試験片とした。シャルピー試験片は ID-1～6 の各試験体から採取することとした。

試験片の採取に用いた試験体 6 個(ID-1～6)の試験片採取位置を図 3.4.1-3～8 に示す。試験体毎に寸法や向きが異なるため、板取図は試験体毎に作成した。図中には粗切断及びワイヤカットによる試験体分割位置も示した。図中に令和 6 年度採取と記した試験片が今年度加工した試験片である。なお、令和 4 年度に粗切断面をエッチングし、試験片に有害な補修溶接や溶接欠陥がないことを確認済である。

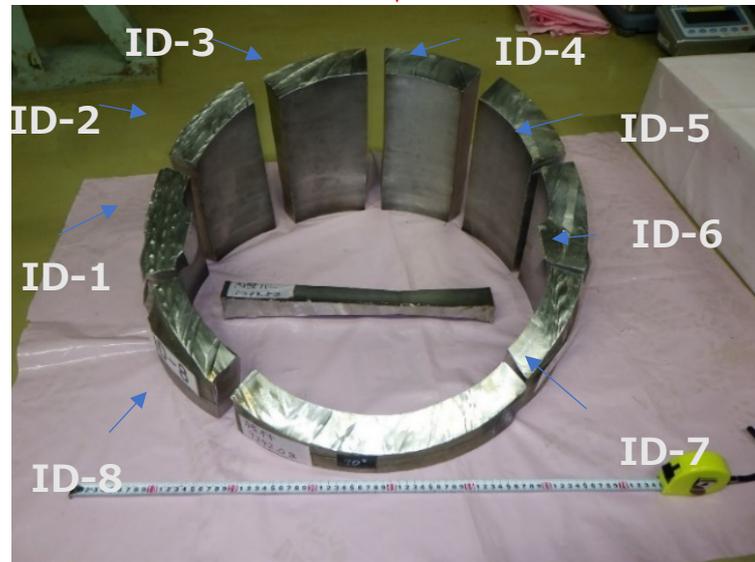


図 3.4.1(2)-1 PLR ポンプにおける試験体採取位置及び試験体の配置と ID の関係



① ID-1、2



② ID-3、4

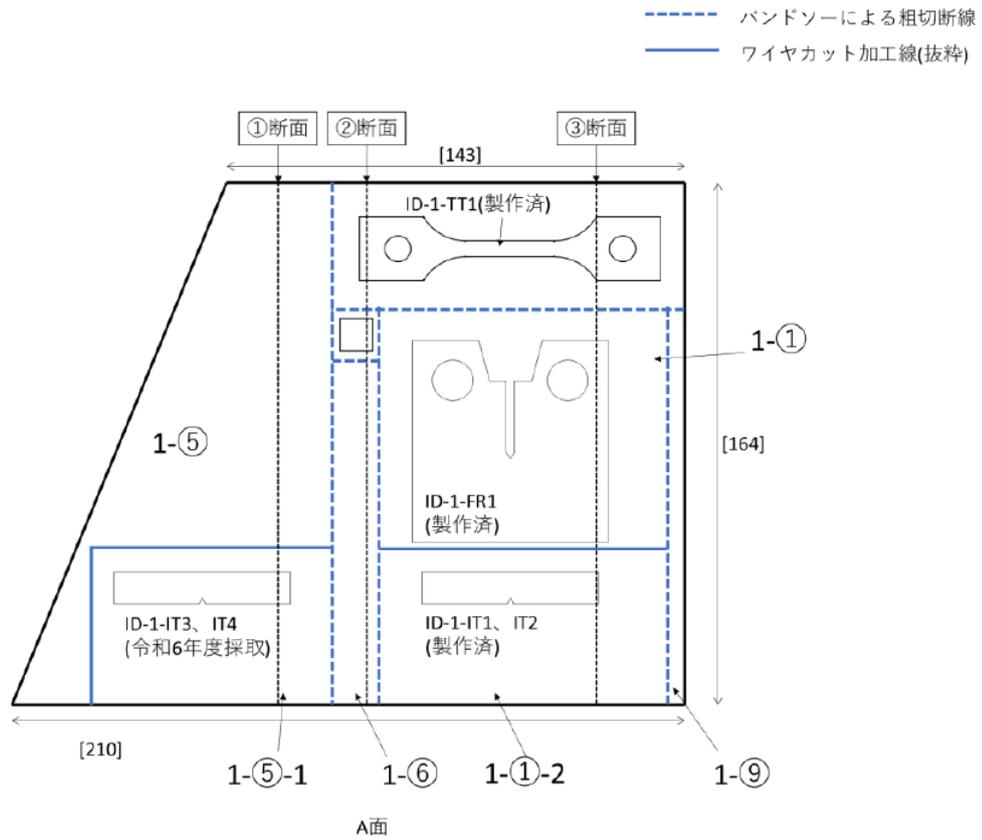


③ ID-5、6

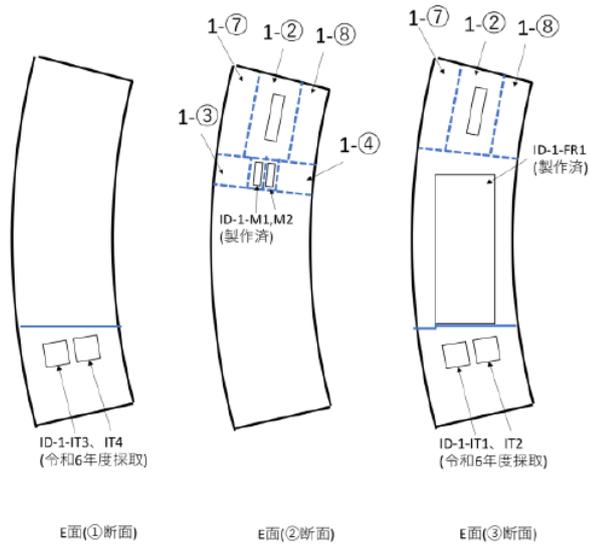


④ ID-7、8

図 3.4.1(2)-2 各試験体の外観

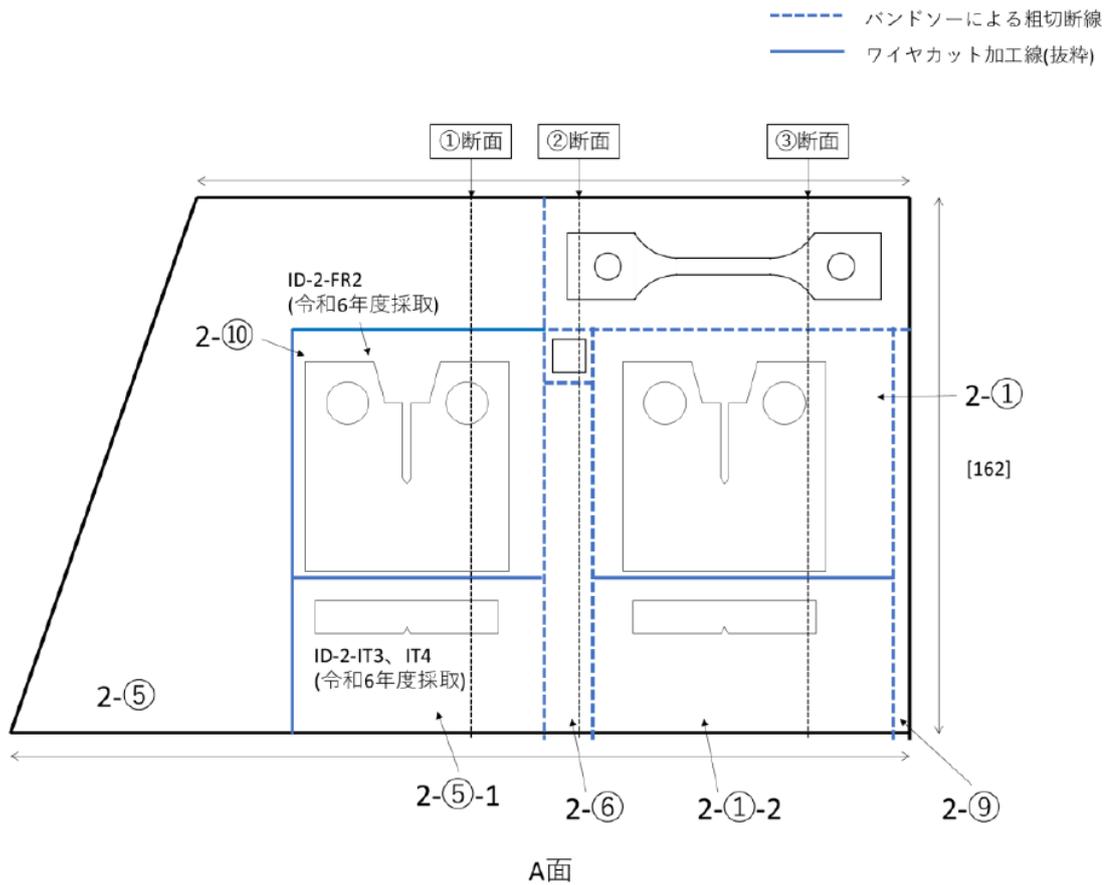


(a) バンドソー及びワイヤカットによる粗切断(A面)

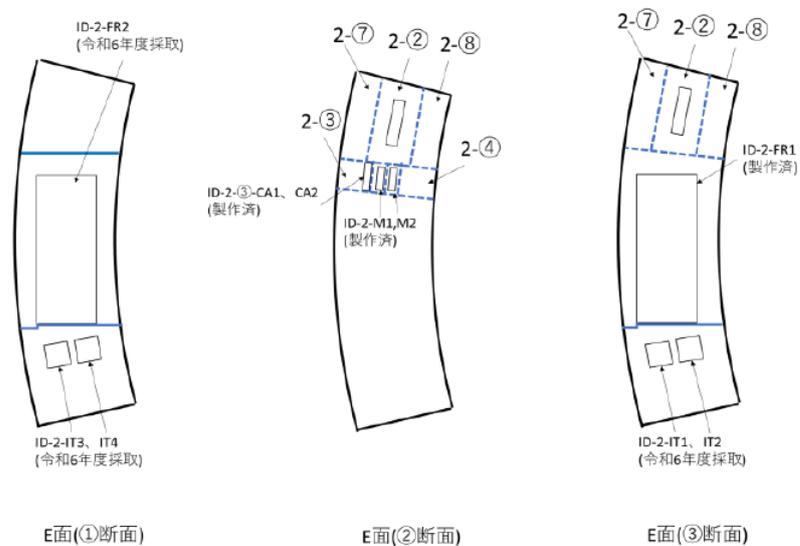


(b) バンドソー及びワイヤカットによる粗切断(E面)

図 3.4.1(2)-3 試験体からの試験片採取位置と粗切断及びワイヤカットによる  
試験体分割位置・試験体管理番号(ID-1) (単位: mm)

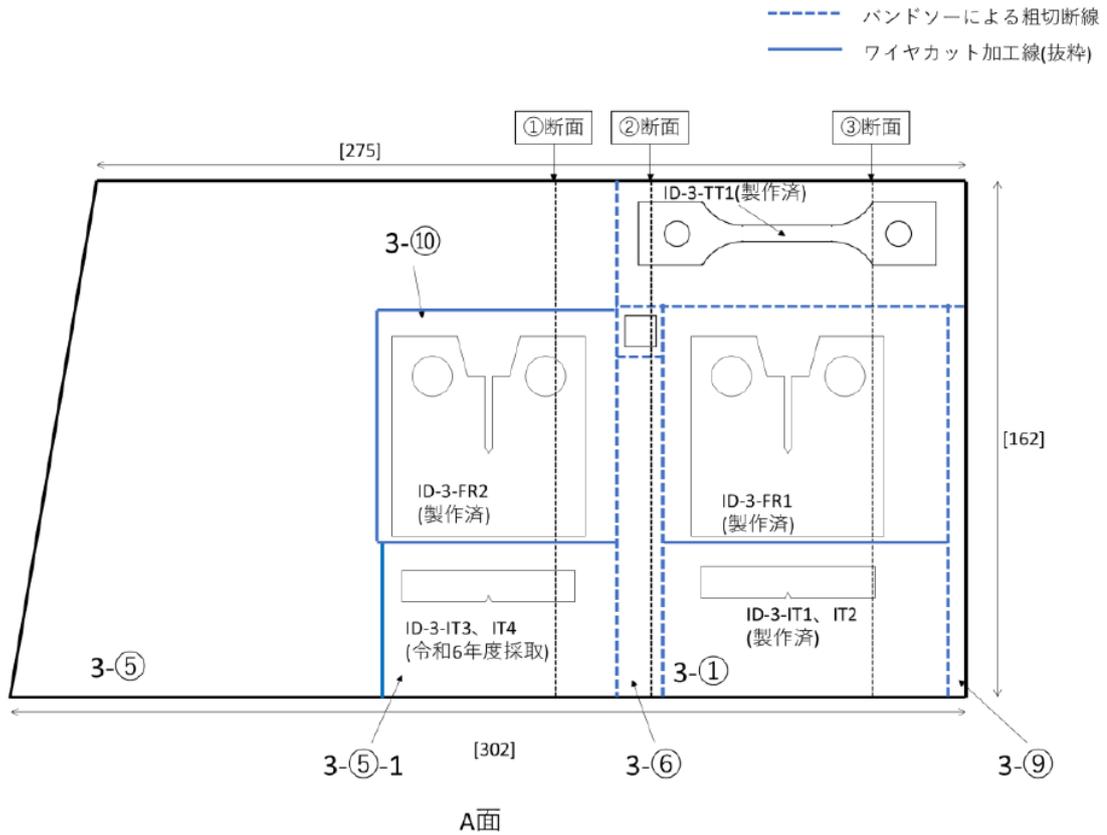


(a) バンドソー及びワイヤカットによる粗切断(A面)

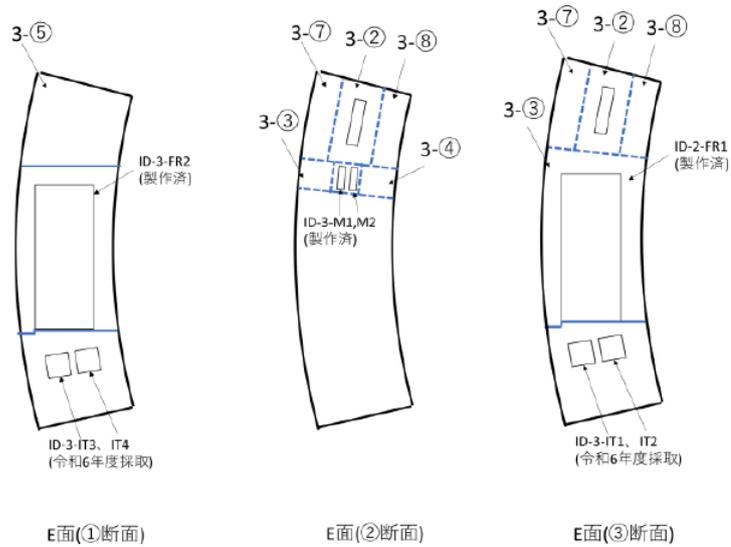


(b) バンドソー及びワイヤカットによる粗切断(E面)

図 3.4.1(2)-4 試験体からの試験片採取位置と粗切断及びワイヤカットによる試験体分割位置・試験体管理番号(ID-2) (単位: mm)

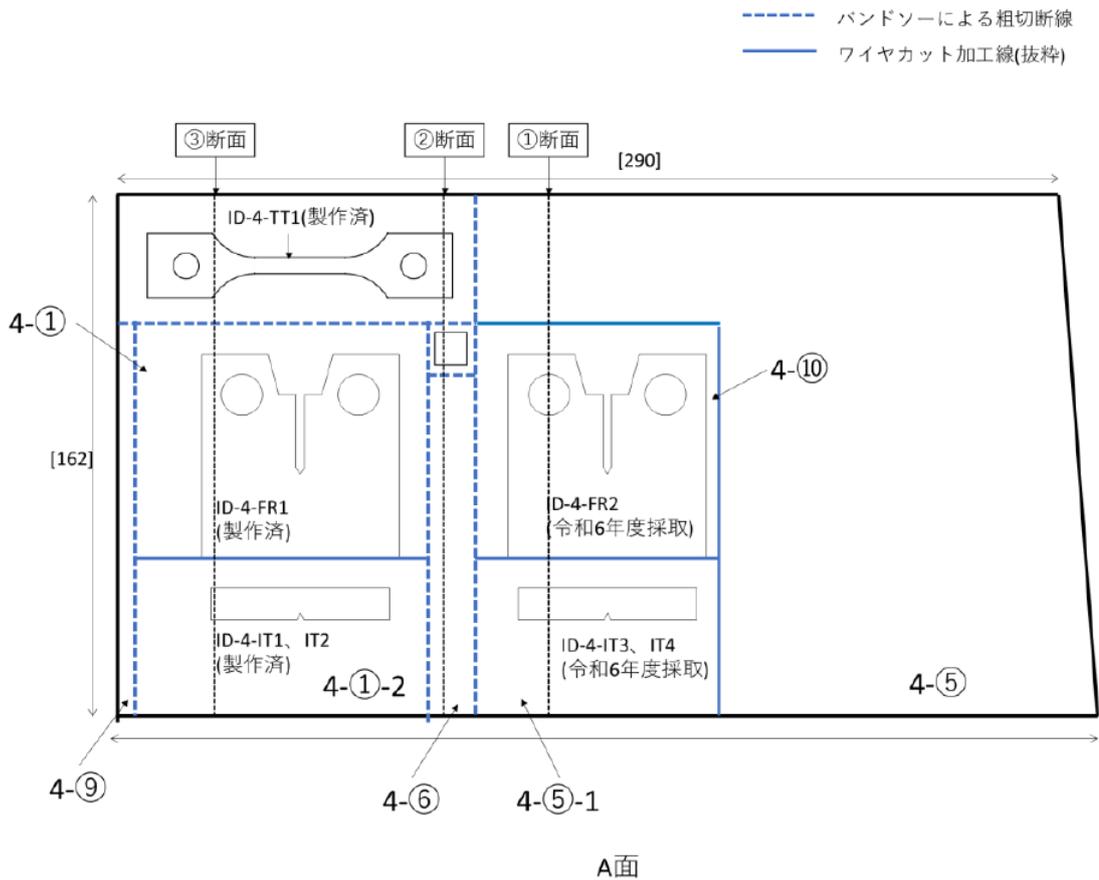


(a) バンドソー及びワイヤカットによる粗切断(A面)

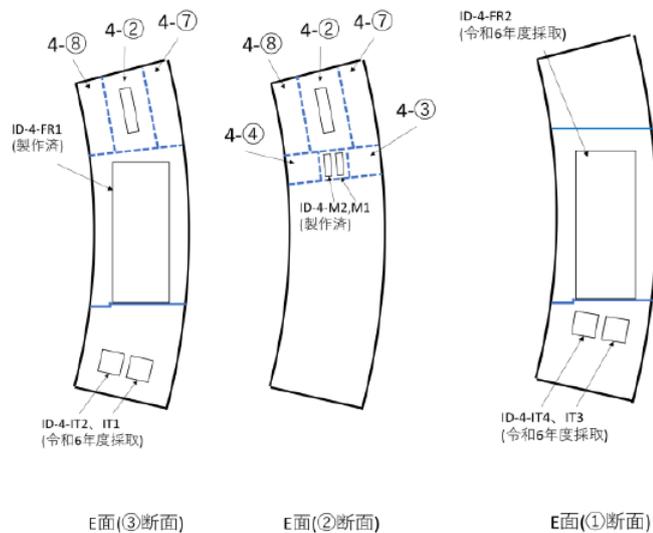


(b) バンドソー及びワイヤカットによる粗切断(E面)

図 3.4.1(2)-5 試験体からの試験片採取位置と粗切断及びワイヤカットによる  
試験体分割位置・試験体管理番号(ID-3) (単位: mm)

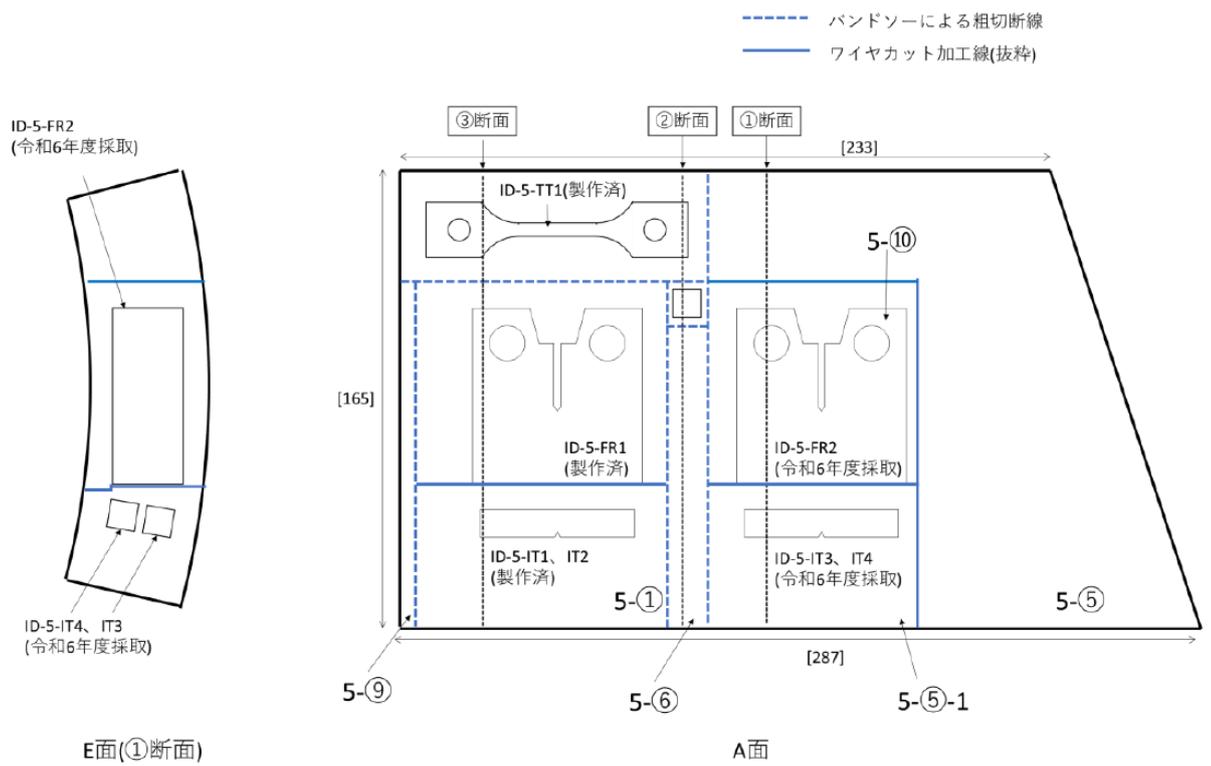


(a) バンドソー及びワイヤカットによる粗切断(A面)

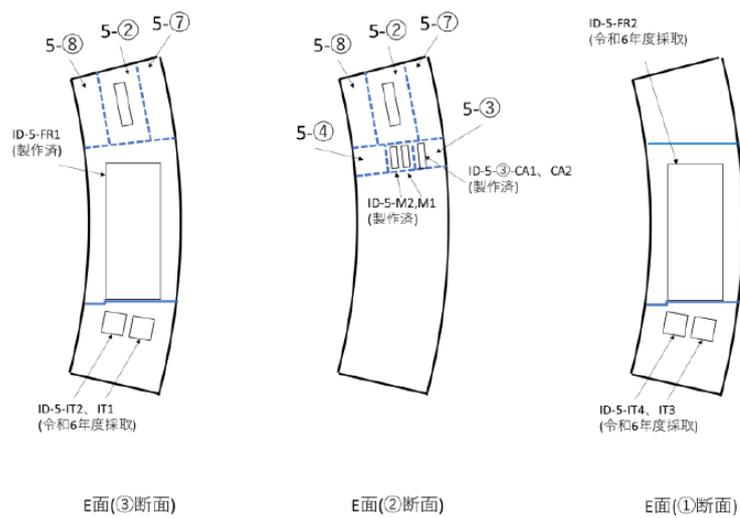


(b) バンドソー及びワイヤカットによる粗切断(E面)

図 3.4.1(2)-6 試験体からの試験片採取位置と粗切断及びワイヤカットによる  
試験体分割位置・試験体管理番号(ID-4) (単位: mm)

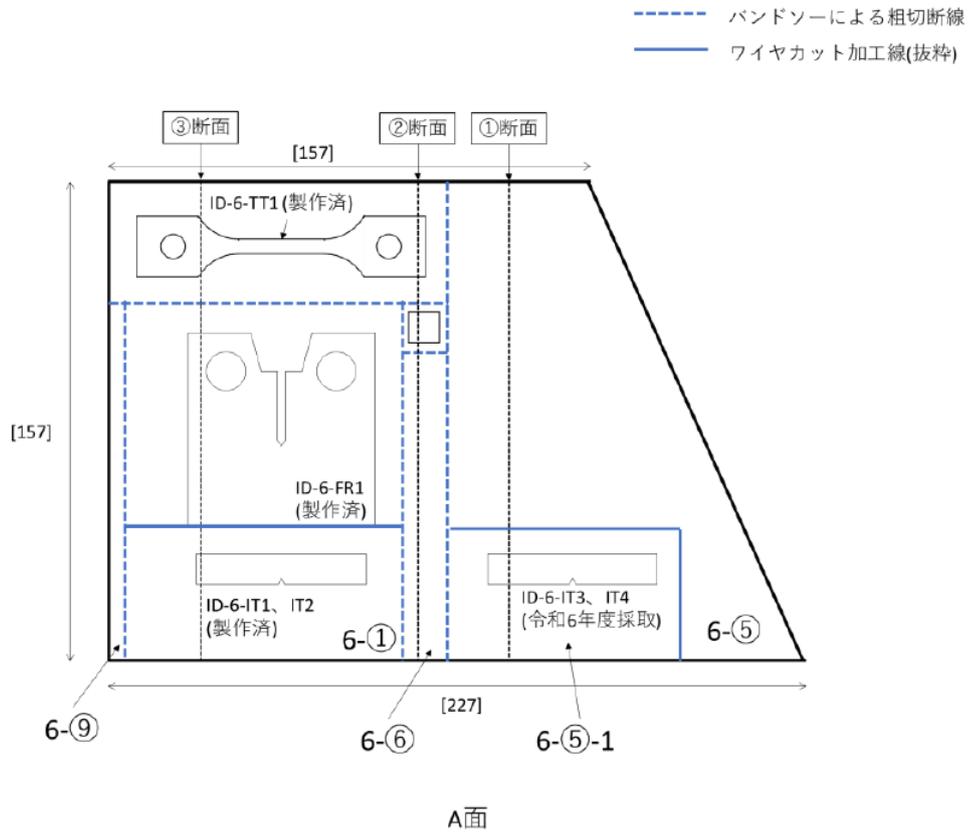


(a) バンドソー及びワイヤカットによる粗切断(A面)

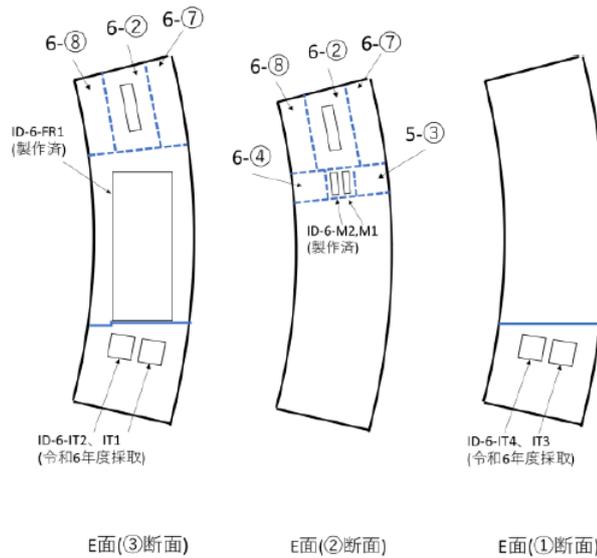


(b) バンドソー及びワイヤカットによる粗切断(E面)

図 3.4.1(2)-7 試験体からの試験片採取位置と粗切断及びワイヤカットによる試験体分割位置・試験体管理番号(ID-5) (単位: mm)



(a) バンドソー及びワイヤカットによる粗切断(A面)



(b) バンドソー及びワイヤカットによる粗切断(E面)

図 3.4.1(2)-8 試験体からの試験片採取位置と粗切断及びワイヤカットによる試験体分割位置・試験体管理番号(ID-6) (単位: mm)

### (3) 試験片の加工

#### 1) 試験体方位の定義

試験片の加工の際には元の構造物と試験片の方向の関係を明確にする必要がある。そのため、図 3.4.1(3)-1 に示すように各試験体の面と方位の関係を定義した。以降、試験体の面は図 3.4.1(3)-1 を基準に示す。

#### 2) 1T-C(T)試験片

試験体 ID-2、ID-5 及び ID-4 より 1 個ずつ 1T-C(T)試験片を加工した。試験体の ID 及び粗切断後のブロック管理番号と試験片番号の対応を表 3.4.1(3)-1 に示す。加工後の試験片に図 3.4.1(3)-2 に示すように試験片番号をマーキングした。試験片破断後も試験片番号により試験片を管理できるよう、両側のピン穴近傍に試験片番号をマーキングした。

予亀裂は試験片番号をマーキングした後に導入した。予亀裂導入条件は試験の項で示す。予亀裂の導入状況が確認しやすいように、ノッチ先端を研磨した。予亀裂導入後に図 3.4.1(3)-3 に示すようにサイドグループを加工した。

サイドグループ加工後に 1T-C(T)試験片の寸法測定及び外観観察を行った。寸法測定結果を表 3.4.1(3)-2 に示す。1T-C(T)試験片の寸法は全て公差の範囲内であった。サイドグループ加工前後の 1T-C(T)試験片の外観を図 3.4.1(3)-4 及び図 3.4.1(3)-5 に示す。図 3.4.1(3)-4 でノッチ先端に白く見えるのは予亀裂確認のために研磨した部分である。

破壊靱性試験に影響を及ぼすような外観上の傷や欠陥等はなかった。

#### 3) シャルピー衝撃試験片

試験体 ID1~6 より 2 個ずつシャルピー衝撃試験片を加工した。試験体の ID と試験片番号の対応を表 3.4.1(3)-3 に示す。シャルピー衝撃試験片の加工にはワイヤ放電加工機を用いた。図 3.4.1(3)-6 にシャルピー衝撃試験片加工手順を示す。位置決めのために C 面の面だし加工をした後、図中の手順に沿って棒状の試験片を加工した。罫書きに基づきワイヤ移動経路の確認を行った後に長さ方向の寸法出しとノッチ加工を行い、シャルピー衝撃試験片を製作した。

ワイヤ放電加工機による加工後のシャルピー衝撃試験片に試験片番号をマーキングした。マーキング要領を図 3.4.1(3)-7 に示す。試験片破断後も試験片番号により試験片を管理できるよう、試験片の両端部に同じ試験片番号をマーキングした。

ワイヤ放電加工機による加工後にシャルピー衝撃試験片の寸法測定及び外観観察を行った。寸法測定箇所及び結果を表 3.4.1(3)-4 に示す。シャルピー衝撃試験片の寸法は全て公差の範囲内であった。シャルピー衝撃試験片の外観を図 3.4.1(3)-8 に示す。

シャルピー衝撃試験に影響を及ぼすような外観上の傷や欠陥等はなかった。

表 3.4.1(3)-1 試験体と 1T-C(T)試験片番号の対応

| 試験体 ID | ブロック体管理番号 | 試験片番号     |
|--------|-----------|-----------|
| ID-2   | 2-⑩       | ID-2-FR2  |
| ID-4   | 4-⑩       | ID-4-FR2※ |
| ID-5   | 5-⑩       | ID-5-FR2  |

※：予備試験片

表 3.4.1(3)-2 1T-C(T)試験片寸法測定結果 (単位: mm)

| 測定箇所      | W1     | W2       | W3       | W4     | W5     | W6     | W7     | W8          | W9          | D1           | D2           | H1       | H2       | H3       | H4    |
|-----------|--------|----------|----------|--------|--------|--------|--------|-------------|-------------|--------------|--------------|----------|----------|----------|-------|
| 寸法        | 61±0.4 | 30.5±0.2 | 30.5±0.2 | 18±0.2 | 18±0.2 | (20.0) | (13.2) | 3.5+0.2-0.0 | 3.5+0.1-0.3 | 12.7+0.1-0.0 | 12.7+0.1-0.0 | 63.5±0.4 | 50.8±0.2 | 22.5±0.2 | (1.5) |
| ID-2-FR2  | 61.0   | 30.5     | 30.5     | 18.0   | 17.9   | 20.0   | 13.2   | 3.6         | 3.5         | 12.8         | 12.8         | 63.4     | 50.8     | 22.4     | 1.4   |
| ID-5-FR2  | 61.0   | 30.5     | 30.5     | 18.0   | 17.9   | 20.1   | 13.2   | 3.6         | 3.5         | 12.7         | 12.7         | 63.4     | 50.8     | 22.4     | 1.4   |
| ID-4-FR2* | 61.0   | 30.5     | 30.5     | 18.0   | 17.9   | 20.1   | 13.2   | 3.6         | 3.5         | 12.8         | 12.8         | 63.4     | 50.8     | 22.3     | 1.4   |

| 測定箇所      | H5    | H6      | H7      | T1       | T2※      | T3※      | R1          | R2          | R3    | R4    | R5      | R6※         | R7※         | r1※    | r2※    |
|-----------|-------|---------|---------|----------|----------|----------|-------------|-------------|-------|-------|---------|-------------|-------------|--------|--------|
| 寸法        | (1.5) | 1.5±0.1 | 1.5±0.1 | 25.4±0.2 | 2.54±0.1 | 2.54±0.1 | 60° +0° -1° | 60° +0° -1° | (90°) | (90°) | 60° ±1° | 90° +0° -1° | 90° +0° -1° | (R0.5) | (R0.5) |
| ID-2-FR2  | 1.5   | 1.4     | 1.5     | 25.4     | 2.54     | 2.56     | 59°         | 60°         | 93°   | 90°   | 61°     | 90°         | 89°         | R0.5   | R0.5   |
| ID-5-FR2  | 1.5   | 1.4     | 1.5     | 25.4     | 2.50     | 2.52     | 59°         | 59°         | 91°   | 91°   | 60°     | 89°         | 89°         | R0.5   | R0.5   |
| ID-4-FR2* | 1.4   | 1.5     | 1.5     | 25.4     | 2.52     | 2.51     | 59°         | 59°         | 91°   | 91°   | 60°     | 89°         | 89°         | R0.5   | R0.5   |

\* : 予備試験片

※ : サイドグループ加工後に測定

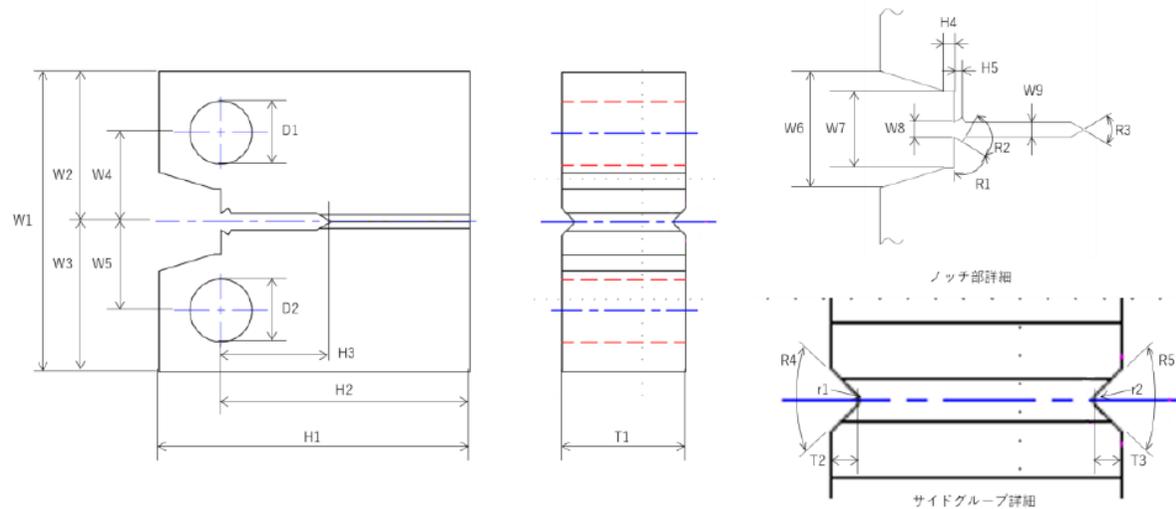
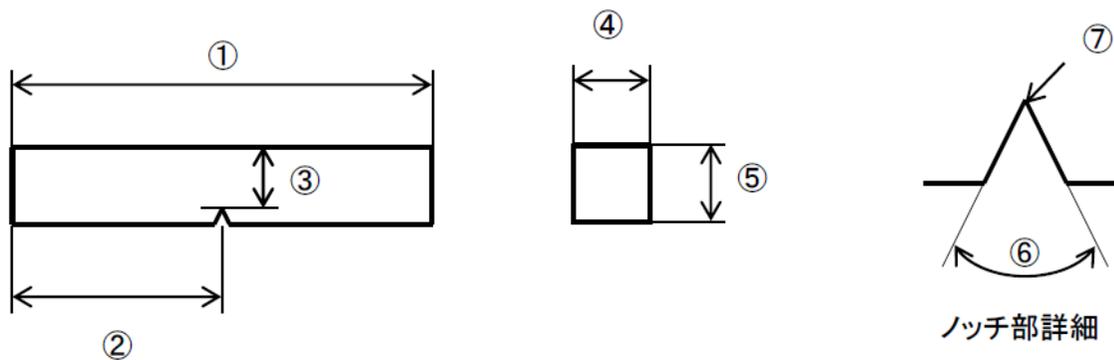


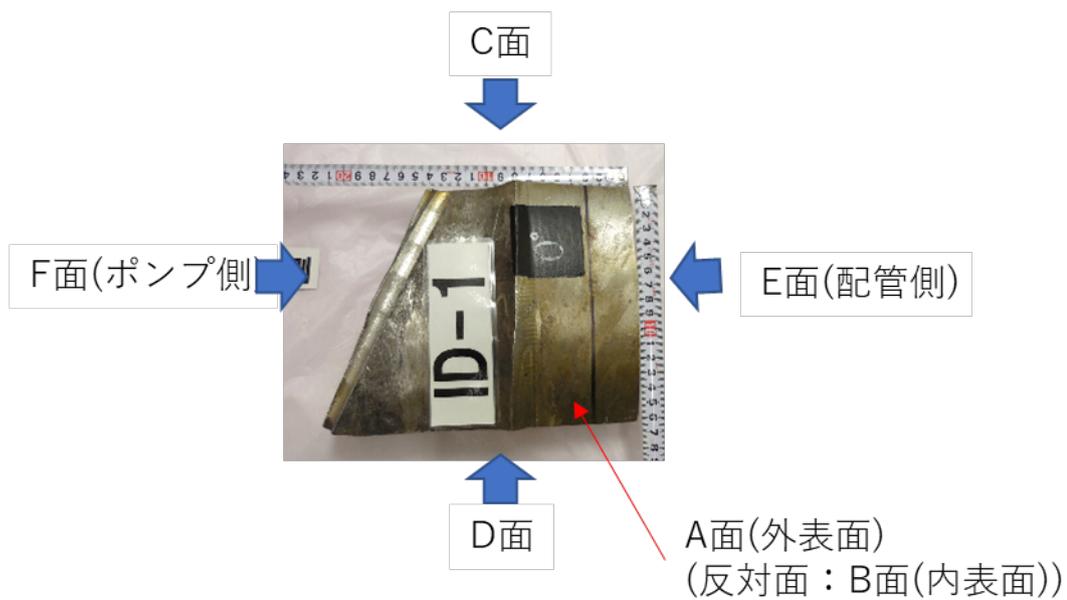
表 3.4.1(3)-3 試験体とシャルピー衝撃試験片番号の対応

| 試験体  | 管理番号  | シャルピー衝撃<br>試験片番号 |
|------|-------|------------------|
| ID-1 | 1-⑤-2 | ID-1-IT3、IT4     |
| ID-2 | 2-⑤-2 | ID-2-IT3、IT4     |
| ID-3 | 3-⑤-2 | ID-3-IT3、IT4     |
| ID-4 | 4-⑤-2 | ID-4-IT3、IT4     |
| ID-5 | 5-⑤-2 | ID-5-IT3、IT4     |
| ID-6 | 6-⑤-2 | ID-6-IT3、IT4     |

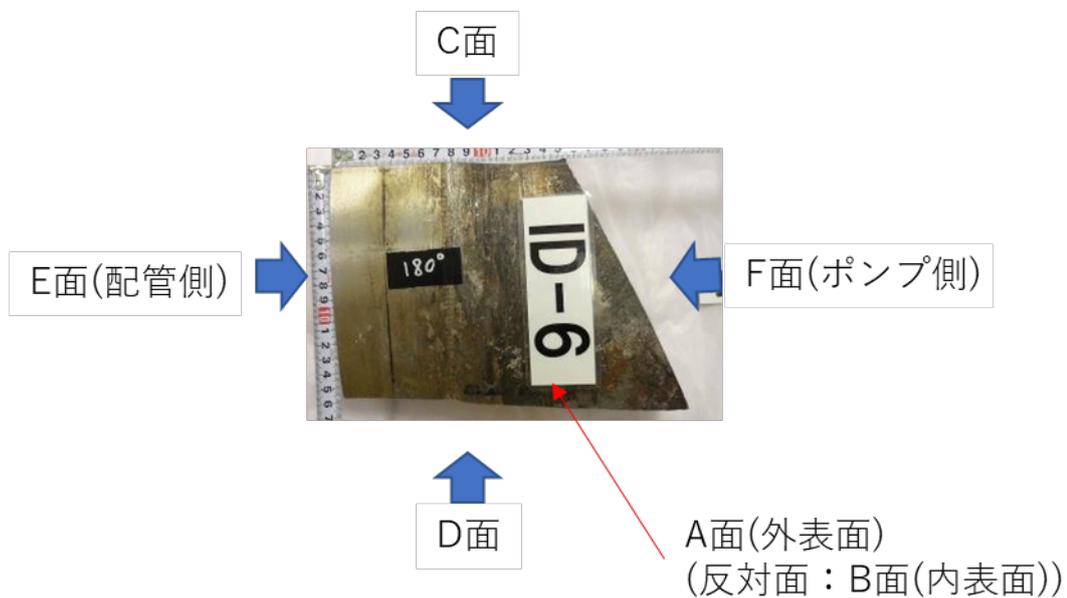
表 3.4.1(3)-4 シャルピー衝撃試験片寸法測定結果(単位: mm)

| 測定箇所     | ①         | ②         | ③         | ④       | ⑤        | ⑥       | ⑦           |
|----------|-----------|-----------|-----------|---------|----------|---------|-------------|
| 寸法       | 55.0±0.60 | 27.5±0.42 | 8.0±0.075 | 10±0.11 | 10±0.075 | 45° ±2° | R0.25±0.025 |
| ID-1-IT3 | 55.09     | 27.52     | 7.985     | 10.03   | 9.961    | 45°     | R0.233      |
| ID-1-IT4 | 55.09     | 27.54     | 7.989     | 10.03   | 9.972    | 45°     | R0.235      |
| ID-2-IT3 | 55.09     | 27.51     | 8.001     | 10.04   | 9.983    | 45°     | R0.261      |
| ID-2-IT4 | 55.09     | 27.57     | 7.977     | 10.03   | 9.958    | 45°     | R0.244      |
| ID-3-IT3 | 55.09     | 27.53     | 7.985     | 10.04   | 9.972    | 44°     | R0.244      |
| ID-3-IT4 | 55.09     | 27.57     | 7.978     | 10.04   | 9.968    | 45°     | R0.244      |
| ID-4-IT3 | 55.09     | 27.53     | 7.985     | 10.05   | 9.985    | 45°     | R0.238      |
| ID-4-IT4 | 55.09     | 27.52     | 7.981     | 10.05   | 9.982    | 44°     | R0.236      |
| ID-5-IT3 | 55.09     | 27.53     | 7.973     | 10.05   | 9.952    | 45°     | R0.234      |
| ID-5-IT4 | 55.10     | 27.56     | 7.974     | 10.06   | 9.989    | 45°     | R0.246      |
| ID-6-IT3 | 55.11     | 27.54     | 8.017     | 10.06   | 10.012   | 45°     | R0.259      |
| ID-6-IT4 | 55.09     | 27.52     | 7.978     | 10.07   | 9.973    | 45°     | R0.245      |





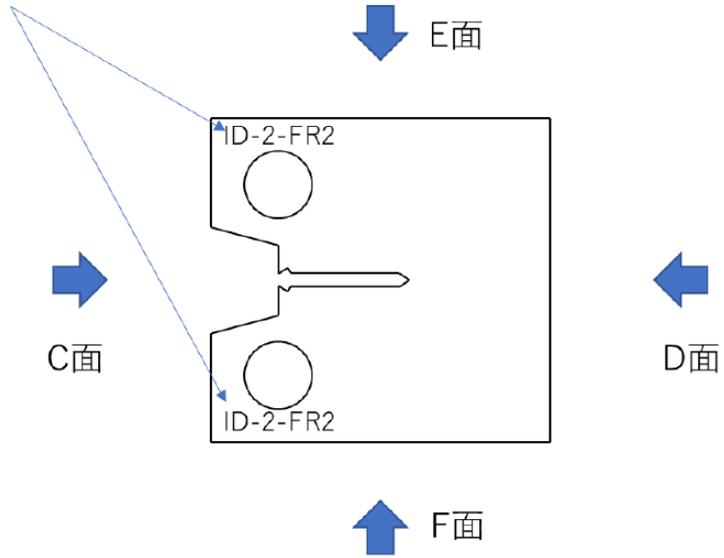
(a) ID-1～ID-3、ID-8(ID-1 を例に示す)



(b) ID-4～ID-7(ID-6 を例に示す)

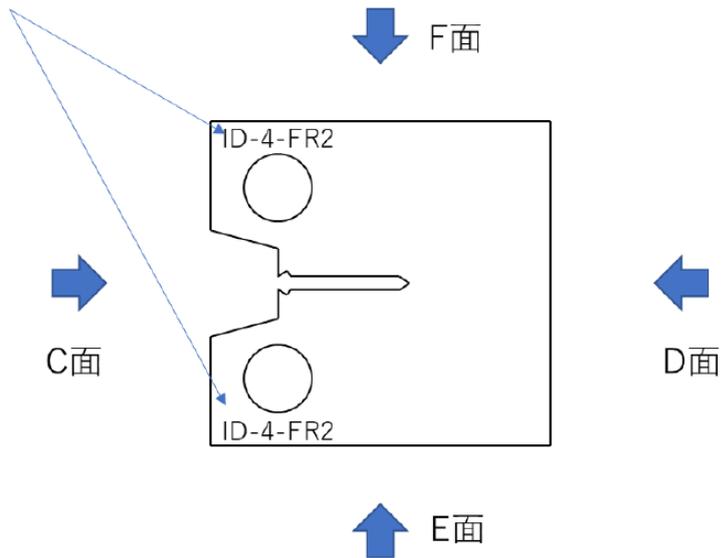
図 3.4.1(3)-1 試験体の面の定義

A面に対して、D面を右にして読める向き  
に試験片番号をマーキング(ID-2-FR2)



(a) ID-2

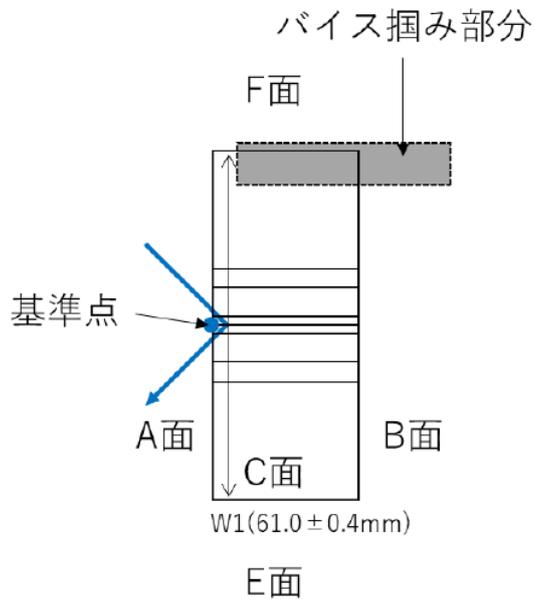
A面に対して、D面を右にして読める向き  
に試験片番号をマーキング(例：ID-4-FR2)



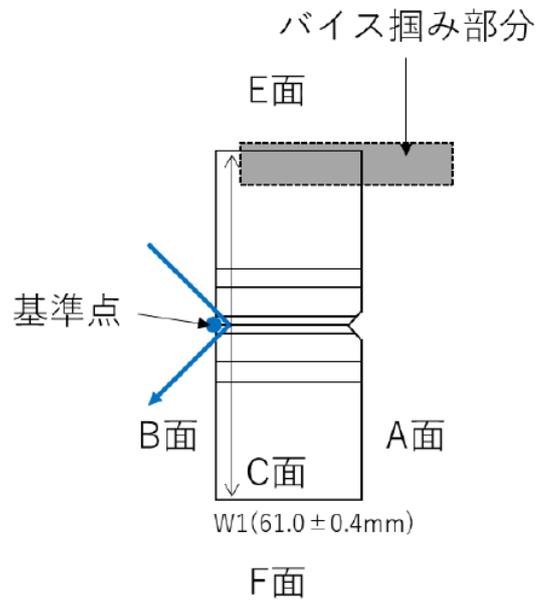
(b) ID-4、ID-5

図 3.4.1(3)-2 1T-C(T) 試験片マーキング要領

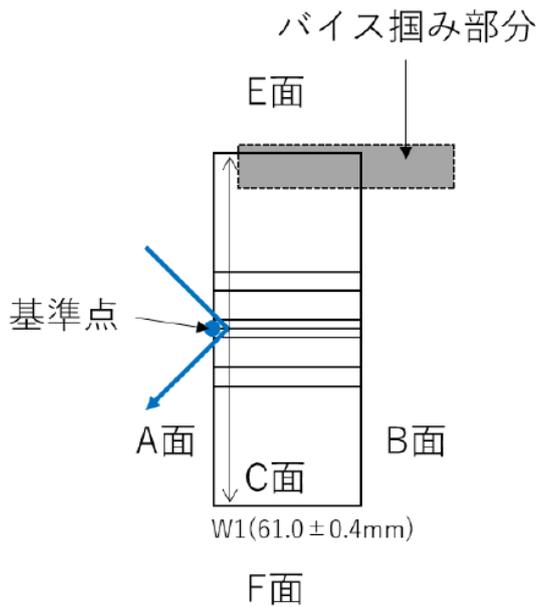
● ワイヤ座標基準点  
 — ワイヤ移動経路



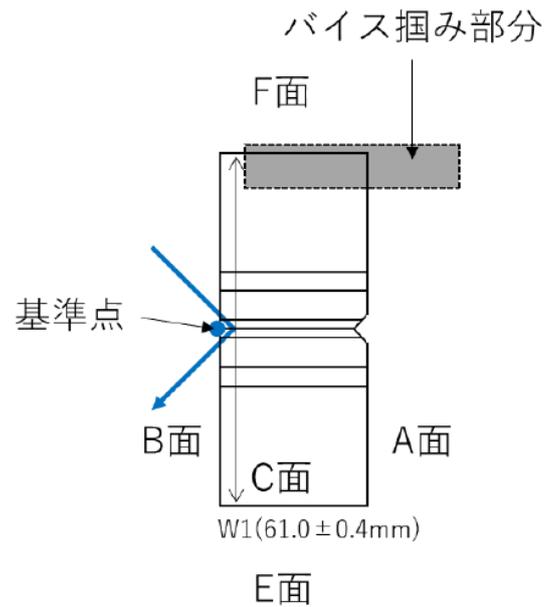
(a) ID-2 A面加工時



(b) ID-2 B面加工時

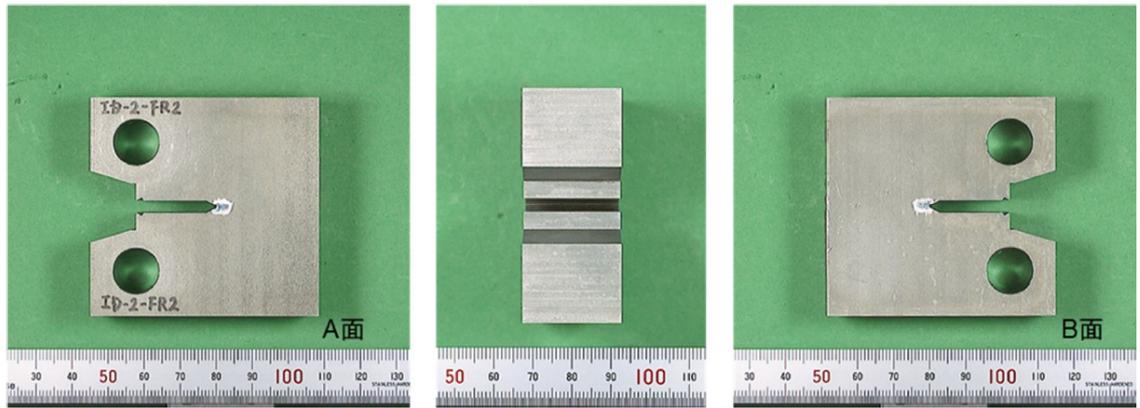


(c) ID-4、ID-5 A面加工時

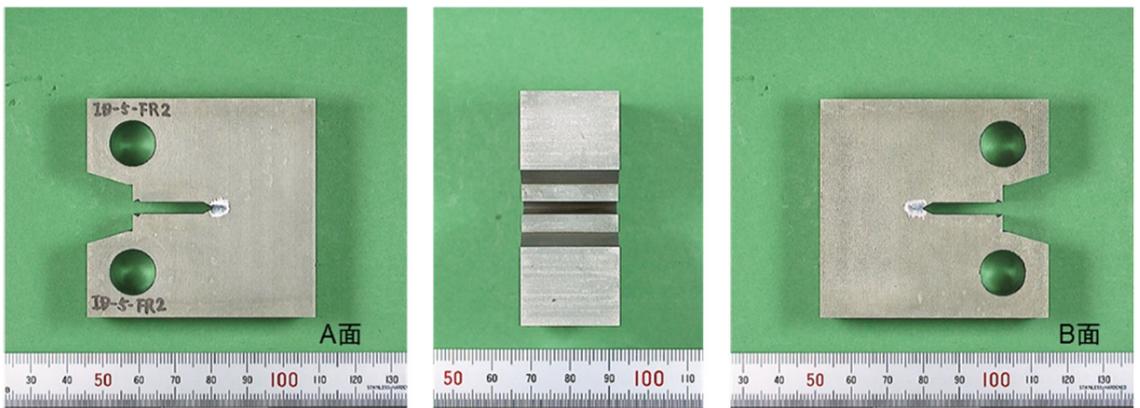


(d) ID-4、ID-5 B面加工時

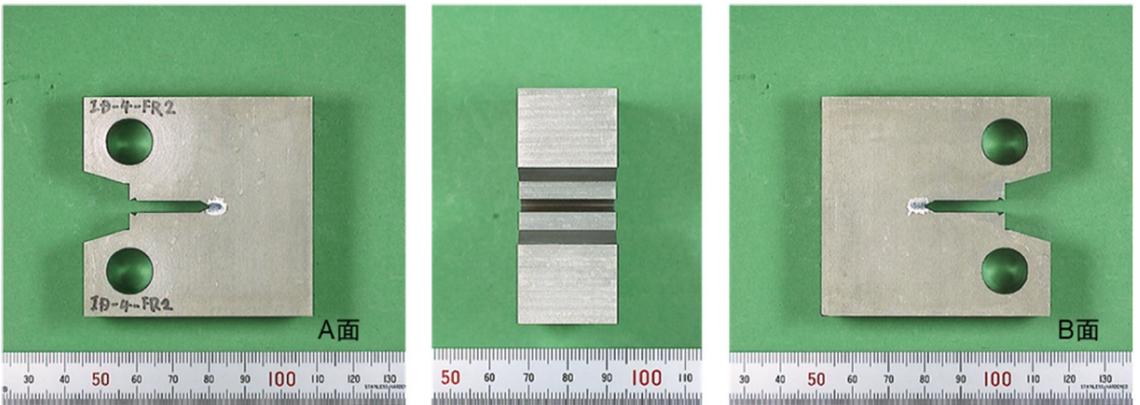
図 3.4.1(3)-3 ワイヤ移動経路(サイドグループ加工時)



(a) ID-2-FR2



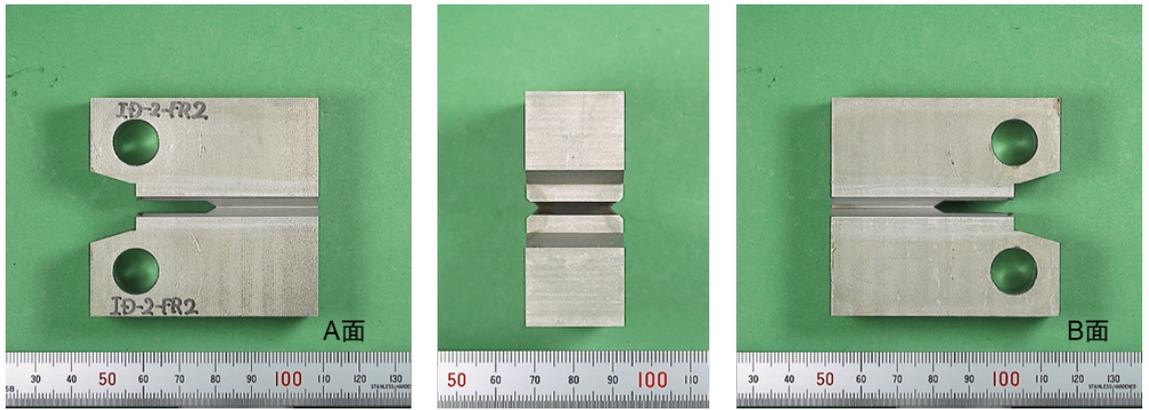
(b) ID-5-FR2



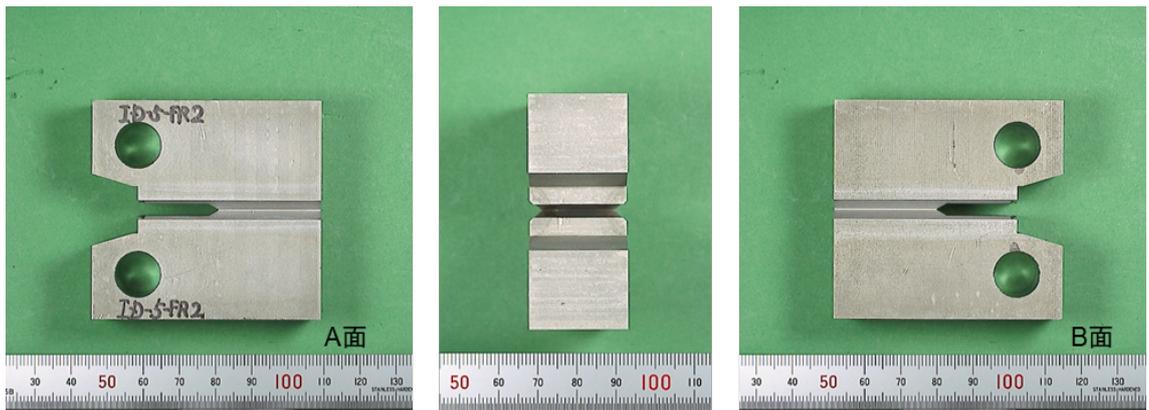
(c) ID-4-FR2 (予備試験片)

備考：ノッチ先端の白色状の光沢部分は研磨箇所

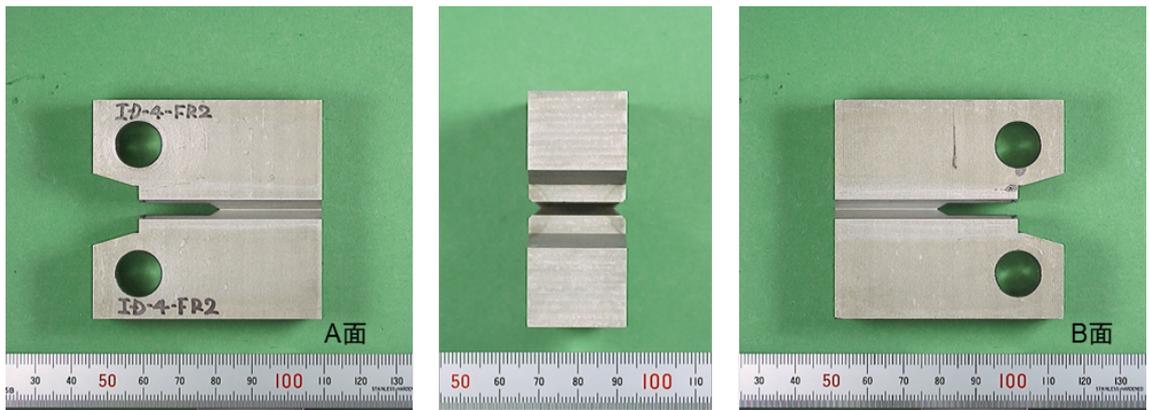
図 3.4.1(3)-4 ノッチ先端研磨後の 1T-C(T) 試験片の外観写真



(a) ID-2-FR2



(b) ID-5-FR2



(c) ID-4-FR2 (予備試験片)

図 3.4.1(3)-5 サイドグループ加工後の 1T-C(T) 試験片の外観写真

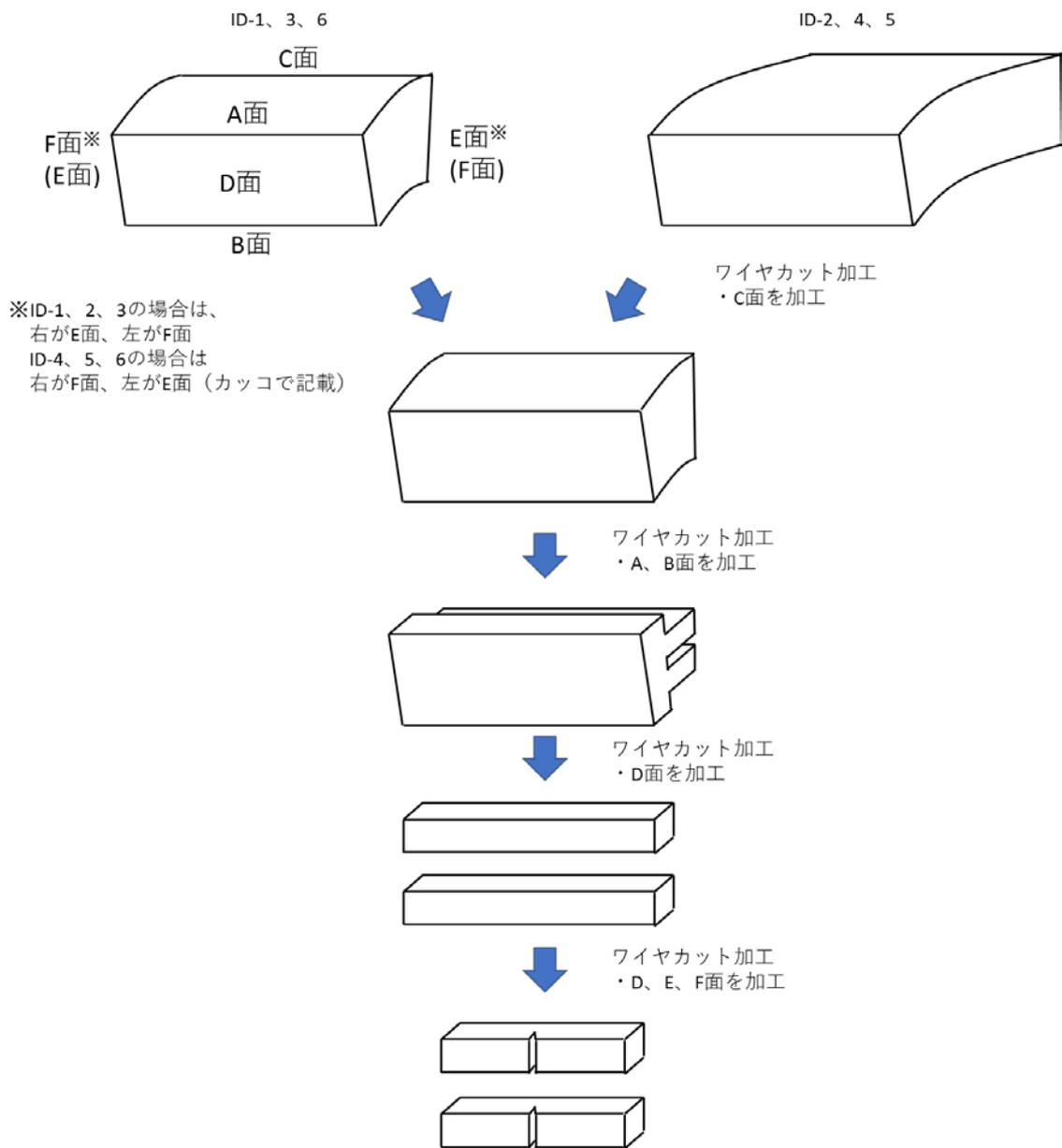
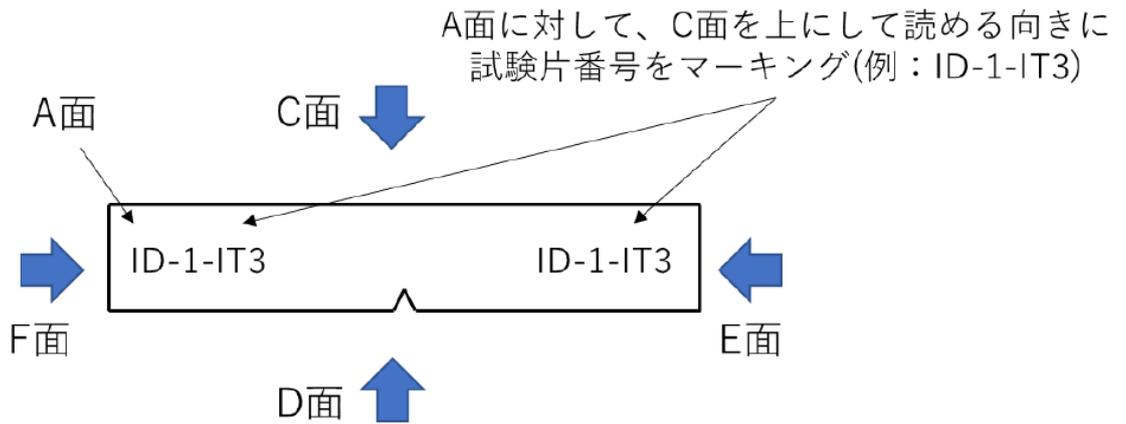
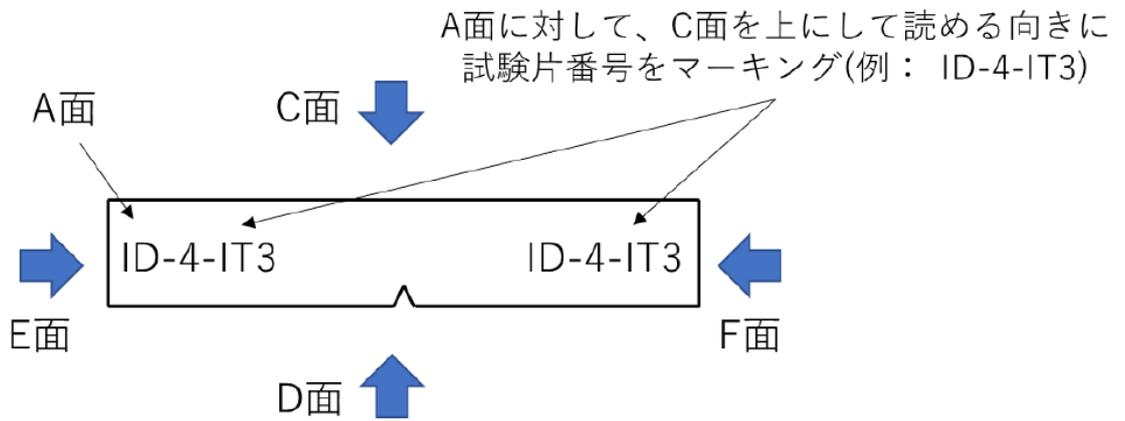


図 3.4.1(3)-6 シャルピー衝撃試験片加工手順

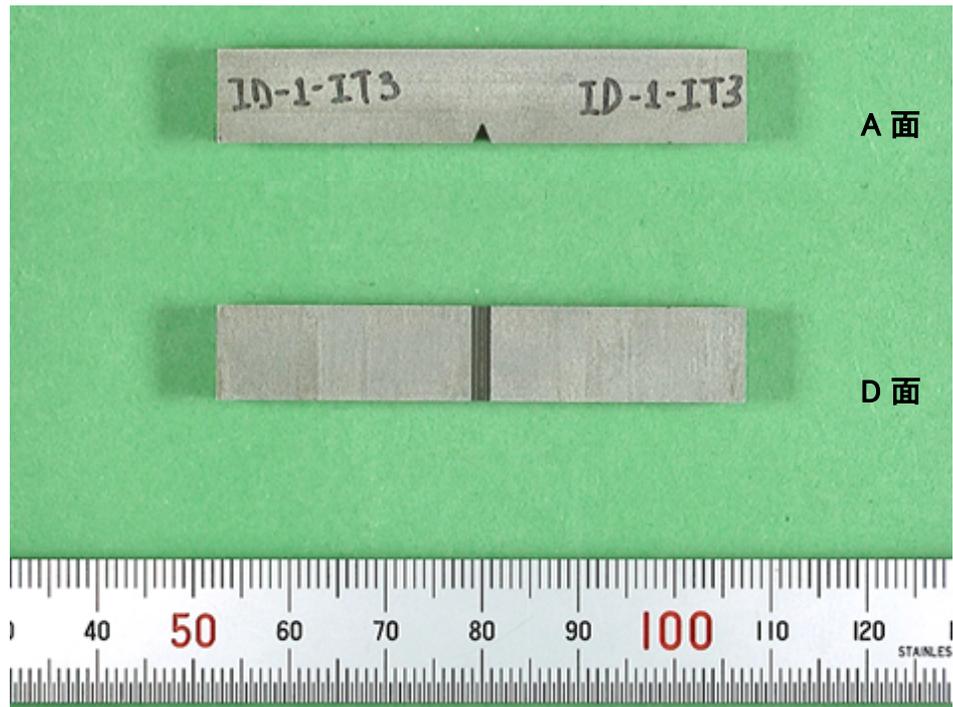


(a) ID-1、ID-2 及び ID-3(例：ID-1-IT3)

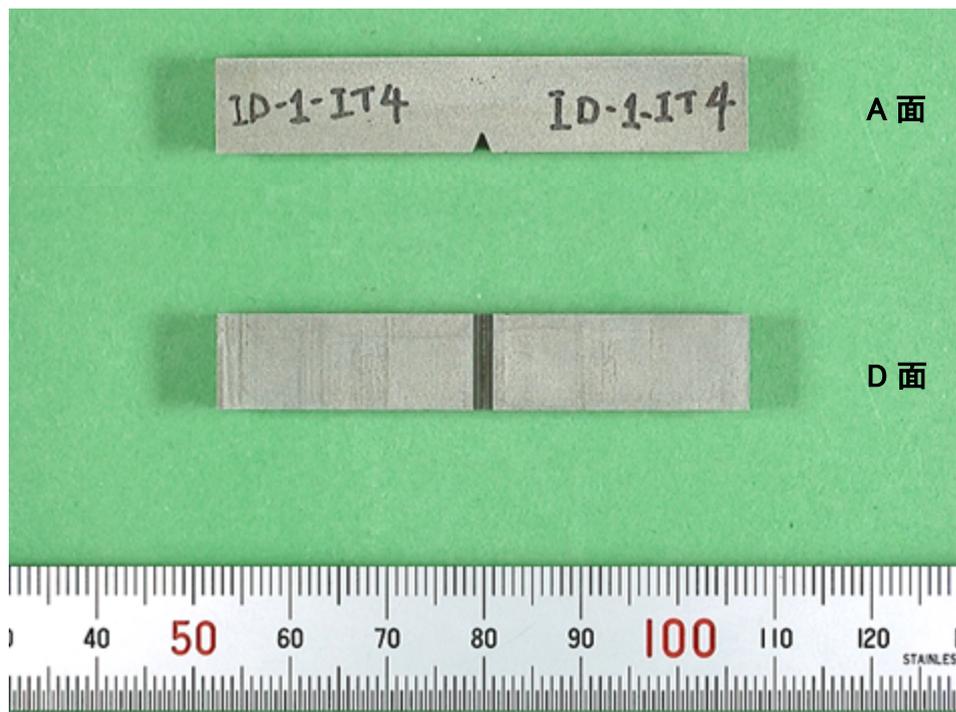


(b) ID-4、ID-5 及び ID-6(例：ID-4-IT3)

図 3.4.1(3)-7 シャルピー衝撃試験片マーキング要領

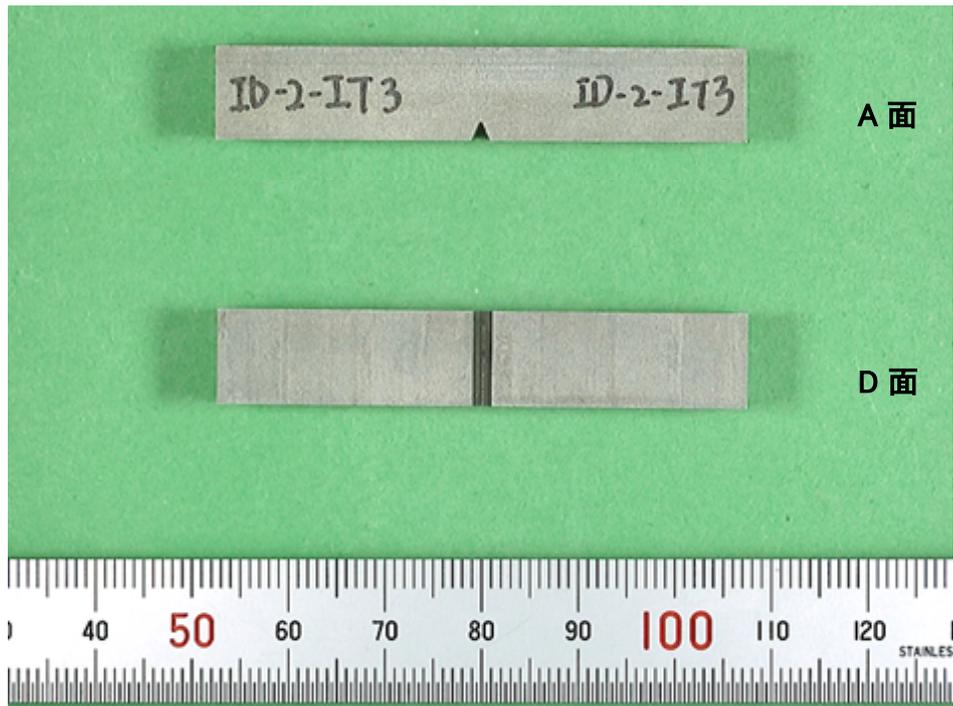


(a) ID-1-IT3

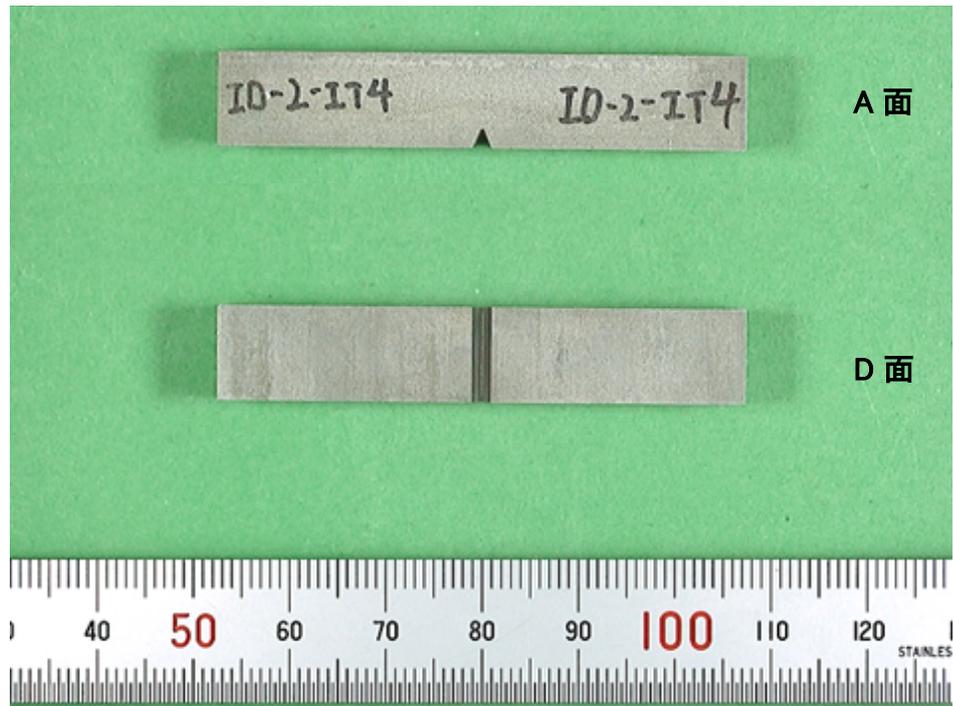


(b) ID-1-IT4

図 3.4.1(3)-8 (1/6) シャルピー衝撃試験片の外観写真

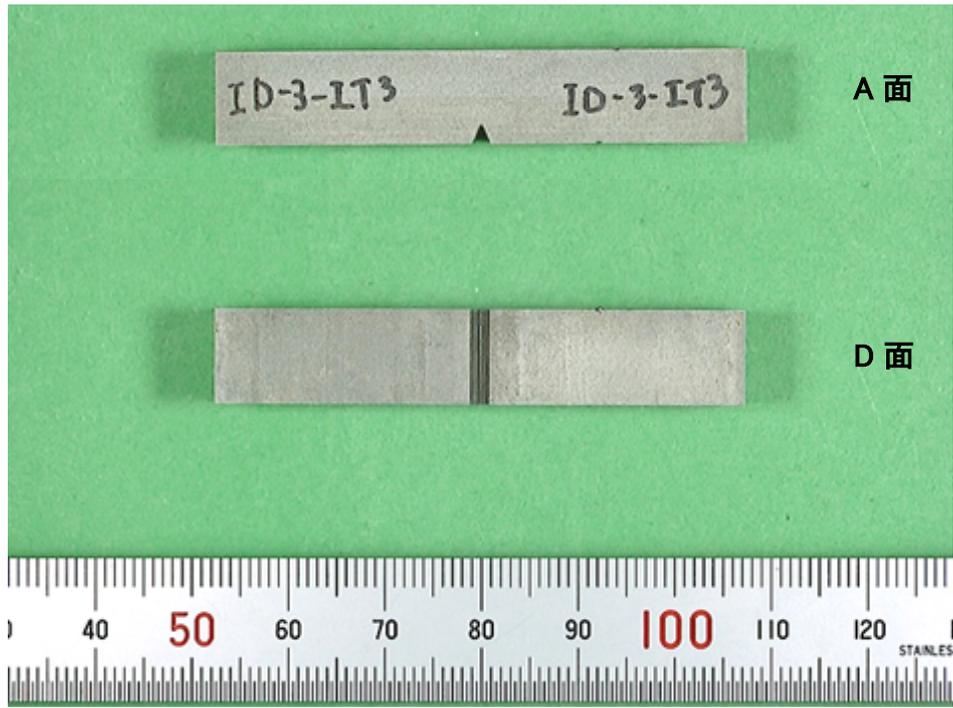


(c) ID-2-IT3

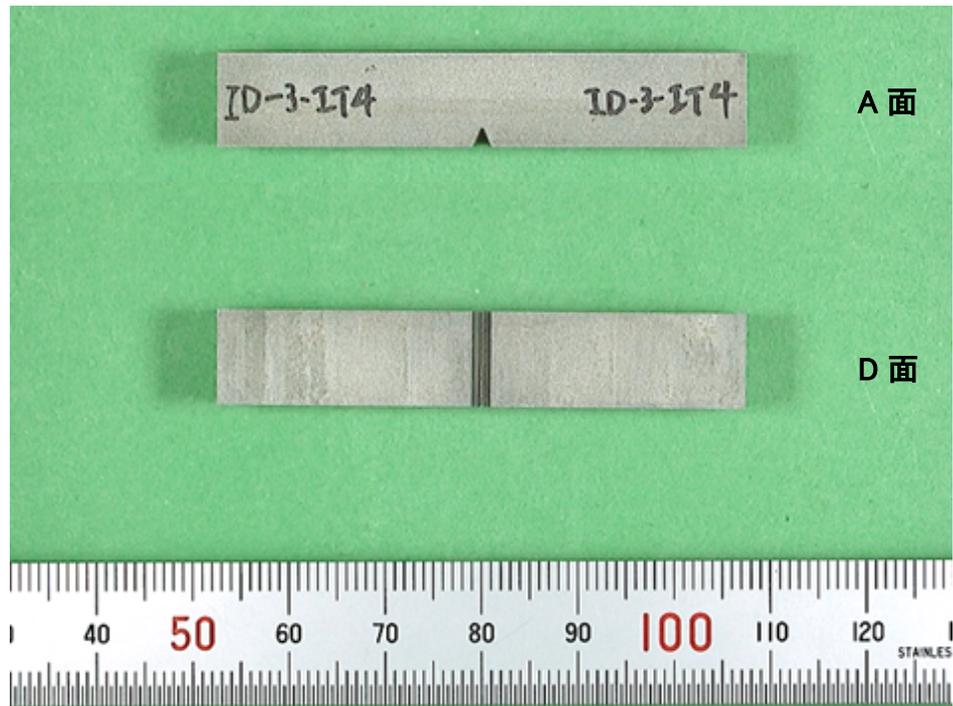


(d) ID-2-IT4

図 3.4.1(3)-8 (2/6) シャルピー衝撃試験片の外観写真

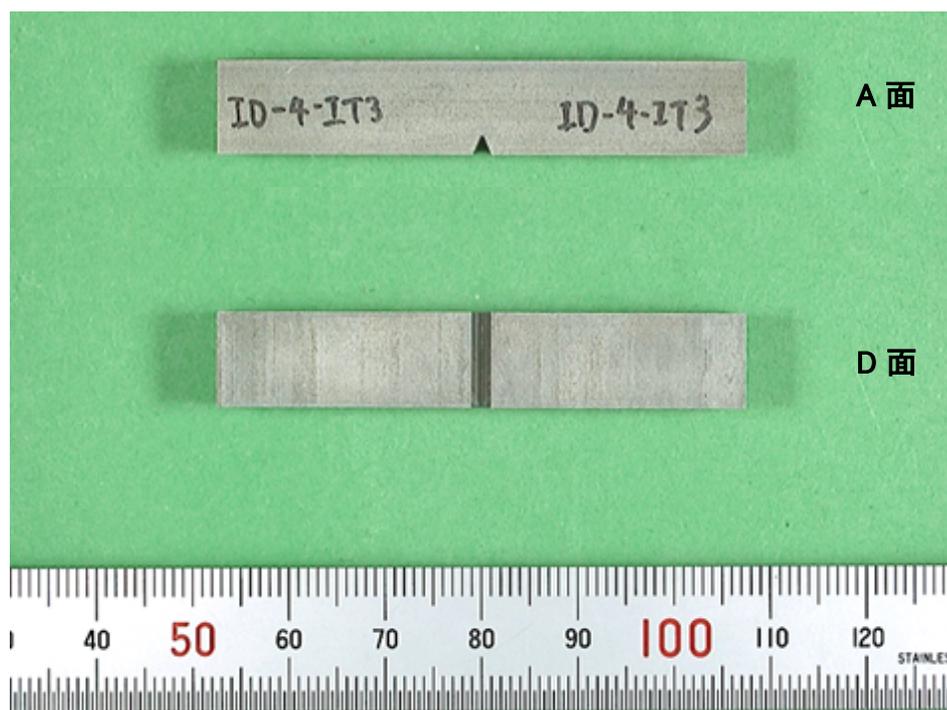


(e) ID-3-IT3

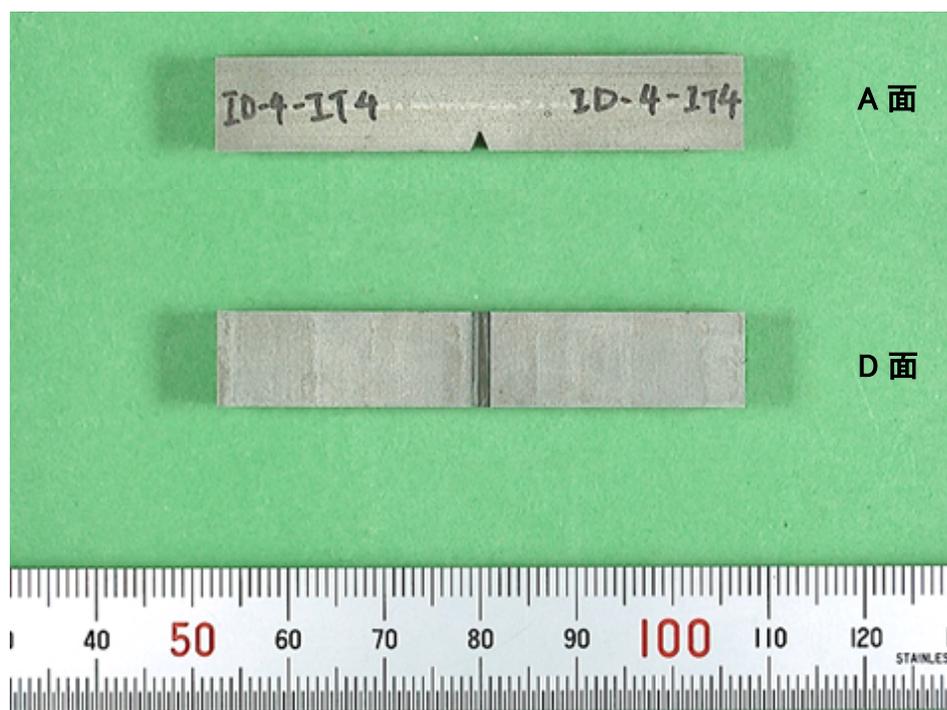


(f) ID-3-IT4

図 3.4.1(3)-8 (3/6) シャルピー衝撃試験片の外観写真

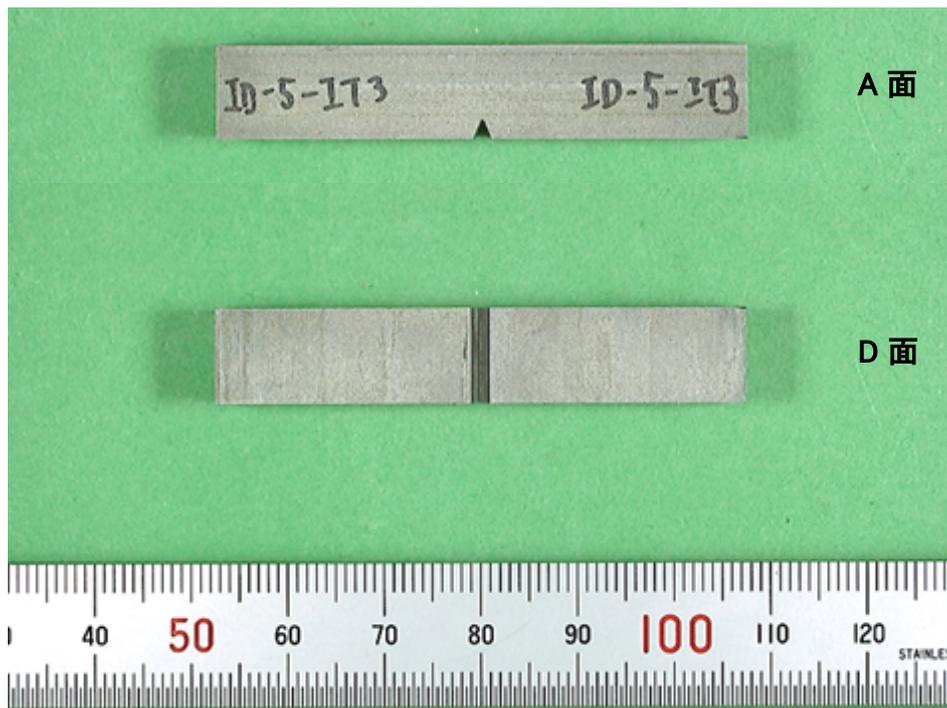


(g) ID-4-IT3

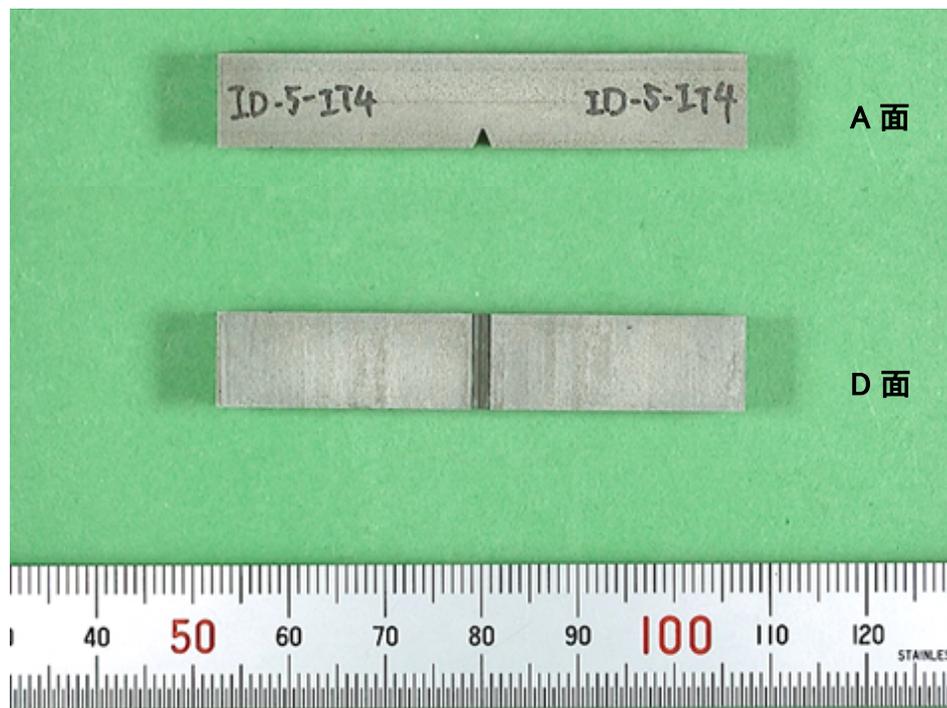


(h) ID-4-IT4

図 3.4.1(3)-8 (4/6) シャルピー衝撃試験片の外観写真

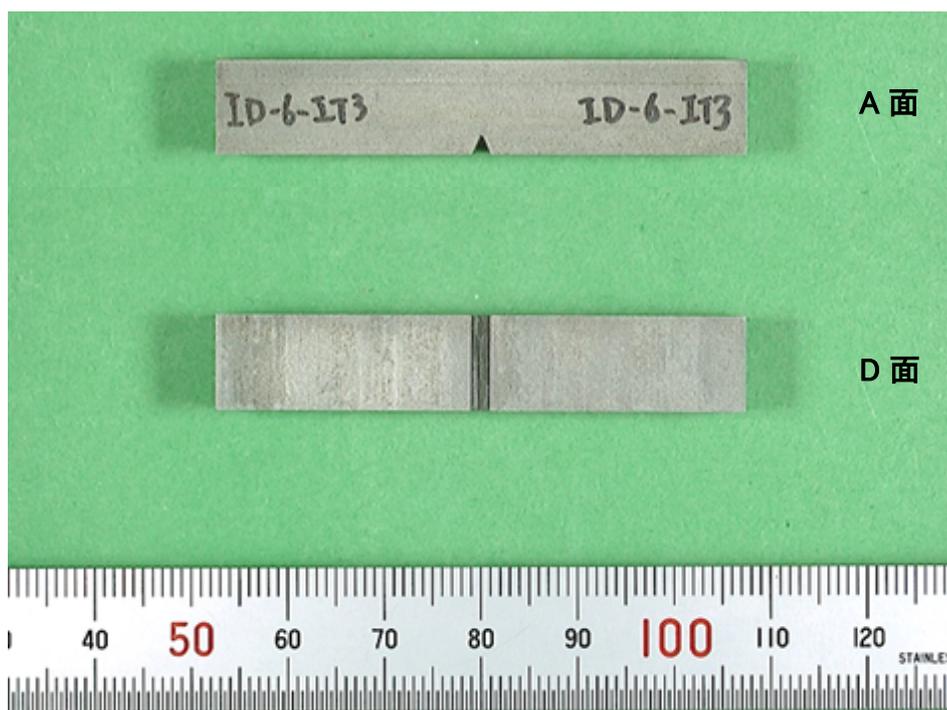


(i) ID-5-IT3

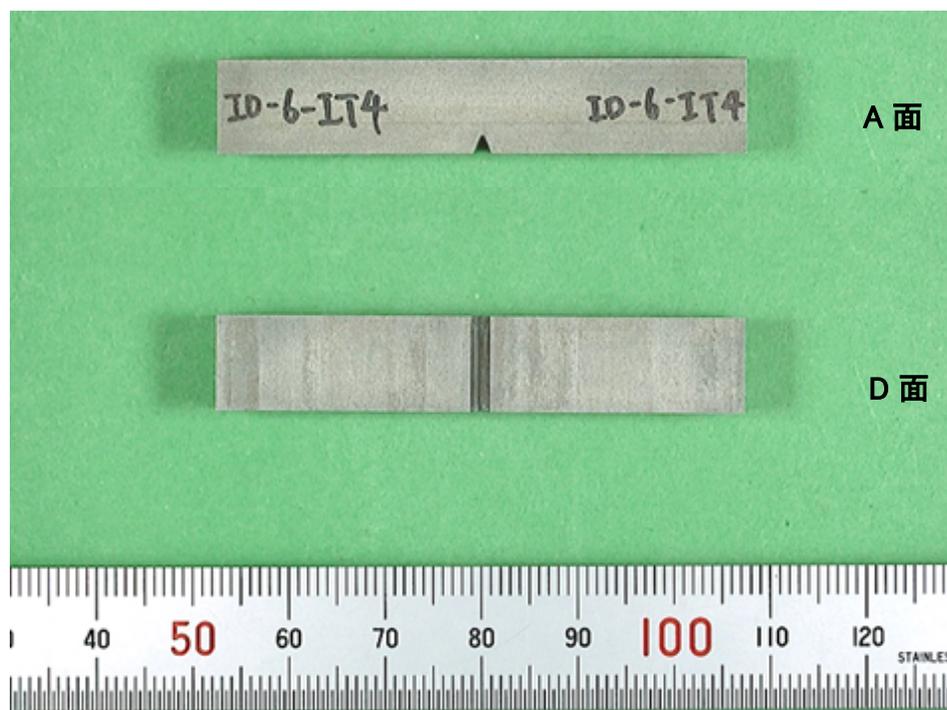


(j) ID-5-IT4

図 3.4.1(3)-8 (5/6) シャルピー衝撃試験片の外観写真



(k) ID-6-IT3



(l) ID-6-IT4

図 3.4.1(3)-8 (6/6) シャルピー衝撃試験片の外観写真

### 3.4.2 試験の実施

令和6年度の試験マトリックスを表 3.4.2-1 に示す。前節 3.4.1「試験片の製作」で製作した試験片及び令和5年度に製作した試験片を用いて破壊靱性試験及びシャルピー衝撃試験を実施した。

表 3.4.2-1 令和6年度の試験マトリックス

|       | 破壊靱性試験                                | シャルピー衝撃試験  |
|-------|---------------------------------------|--|
| 試験片形状 | ASTM E1820-21<br>1T-C(T)              | JIS Z 2242(2023)<br>フルサイズ  |
| 試験数   | 2                                     | 24   |
| 試験温度  | 室温                                    | 後述する 3.4.2(2)項に従い<br>-150℃、-120℃、-80℃、<br>-40℃、0℃、室温、80℃、<br>120℃  |
| 試験片番号 | ID-2-FR2、ID-5-FR2<br>ID-4-FR2 (予備試験片) | ID-1-IT1、ID-1-IT2<br>ID-1-IT3、ID-1-IT4<br>ID-2-IT1、ID-2-IT2<br>ID-2-IT3、ID-2-IT4<br>ID-3-IT1、ID-3-IT2<br>ID-3-IT3、ID-3-IT4<br>ID-4-IT1、ID-4-IT2<br>ID-4-IT3、ID-4-IT4<br>ID-5-IT1、ID-5-IT2<br>ID-5-IT3、ID-5-IT4<br>ID-6-IT1、ID-6-IT2<br>ID-6-IT3、ID-6-IT4 |

## (1) 破壊靱性試験

### 1) 試験方法

製作した 1T-C(T)試験を用いて ASTM E1820-21<sup>[3.4.2(1)-2]</sup>に準拠して除荷コンプライアンス法により破壊靱性試験を実施した。試験機は JIS B 7721(2018)<sup>[3.4.2(1)-1]</sup>に準拠して検証された株式会社島津製作所製サーボパルサ(EHF-EM 100kN)を用いた。使用する 1T-C(T)試験片の寸法を図 3.4.2(1)-1 に、1T-C(T)試験片マーキング要領及び試験体からの採取方位を図 3.4.2(1)-2 に示す。環境条件は室温、大気中とし、繰り返し数 2(試験片番号：ID-2-FR2、ID-5-FR2)とした。試験前に室温、大気中にて初期  $K_{max} : 17 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 、最終  $K_{max} : 12 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  の条件で疲労予亀裂を導入した。応力比は 0.1、繰り返し速度は 5 Hz、目標亀裂進展量は 3 mm 以上とし、クリップゲージ測定値で疲労予亀裂が 1.5 mm 進展した時点で  $K_{max}$  の値を最終  $K_{max} : 12 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  に変更した。疲労予亀裂導入中は亀裂が過度に偏向しないように、また両側面で亀裂が進展しているかデジタルスコープを用いて試験片側面の亀裂を監視した。疲労予亀裂導入前の 1T-C(T)試験片外観写真を図 3.4.2(1)-3 に示す。疲労予亀裂導入後、前述した 3.4.1(3)項試験片の加工の 2) 1T-C(T)試験片に従ってサイドグループ加工を施した。破壊靱性試験に使用した 1T-C(T)試験片の外観写真を図 3.4.2(1)-4 に示す。

破壊靱性試験条件を表 3.4.2(1)-1 に示す。

ASTM E1820-21<sup>[3.4.2(1)-2]</sup> A15. “NORMALIZATION DATA REDUCTION TECHNIQUE” 記載の方法によって破壊靱性評価を行う際は  $\Delta a \leq 0.15 b_0$  ( $b_0$  : 初期リガメント長さ)を満たす必要がある。令和 5 年度までの実績では  $0.15 b_0$  は 3.58~3.73 mm であったことを踏まえて、破面観察による  $\Delta a$  が 3.5 mm 程度となるよう試験終了条件を設定した。令和 5 年度以降に実施した破壊靱性試験の試験終了時の亀裂進展量  $\Delta a$  と試験後の破面観察によって求めた  $\Delta a$  の差は最大 0.48 mm であった。また、1 回の除荷/負荷での  $\Delta a$  の増加量は、 $\Delta a$  が 1.5 mm を超える試験後半において最大 0.32 mm であった。

以上より、令和 6 年度の試験では  $J-R$  曲線評価に用いるデータの取得数を増やすことを目的として、破面観察による  $\Delta a$  が 3.5 mm 程度となるように、除荷コンプライアンス法と破面観察による  $\Delta a$  の差 0.48 mm と 1 回の除荷/負荷での  $\Delta a$  増加量 0.32 mm を考慮して、試験中の除荷コンプライアンス法による  $\Delta a$  が 2.7mm を超えた時点で試験を終了した。

また、負荷 1 回目を荷重制御、負荷 2 回目以降は変位制御にて試験を行った。なお、令和 5 年度の試験では、 $J-R$  曲線評価に用いるデータの取得数を増やすために最大荷重到達後に 1 回の負荷時の変位増分を 0.15 mm から 0.10 mm に変更したが、試験終了条件とする  $\Delta a$  の変更によってデータ取得数を増やすため、令和 6 年度の試験では試験終了まで変位増分を 0.15 mm で試験を行った。 $J-R$  曲線評価には、負荷 2 回目以降の変位制御による試験データを用いた。

破壊靱性試験に使用したクリップゲージ形状及び寸法を図 3.4.2(1)-5 に示す。令和 6 年度の試験では、試験終了条件とする亀裂進展量  $\Delta a$  の変更に伴い適用範囲が広いクリップゲージ UB-15SAH004 を使用した。

試験後、破面観察における試験時の亀裂の視認性を向上させることを目的に、試験片を 288 °C にて 2 時間保持した後に空冷した。試験片を疲労破断し、デジタルマイクロスコープを用いて試験片外観観察および破面観察を実施した。ASTM E1820-21 A15. “NORMALIZATION DATA REDUCTION TECHNIQUE” による評価として  $J$ - $R$  曲線及び  $J_Q$  値を求め、下記①②に示す有効性(Validity)判定を行い、条件を満足する場合  $J_Q$  値を  $J_{Ic}$  値とした。参考に、除荷コンプライアンス法による評価として各除荷時の  $J$  と  $\Delta a$  を算出し、 $J$ - $R$  曲線を求め、鈍化直線と平行な 0.2mm オフセットラインとの交点から  $J_Q$  値を求めた。下記に示す有効性(Validity)判定を行い、すべての条件を満足する場合  $J_Q$  値を  $J_{Ic}$  値とした。

$$\textcircled{1} B > 10J_Q / \sigma_f$$

$$\textcircled{2} b_0 > 10J_Q / \sigma_f$$

$$\textcircled{3} |a_{i,ave} - a_i| > 0.05B$$

$$\textcircled{4} |a_{f,ave} - a_f| > 0.05B$$

ここで、 $B$ ：試験片厚さ、 $\sigma_f$ ：流動応力(0.2%耐力と引張強さの平均値)、 $b_0$ ：初期リガメント長さ、 $a_i$ ：個々の測定位置の初期亀裂長さ、 $a_{i,ave}$ ： $a_i$ の平均値、 $a_f$ ：個々の測定位置の最終亀裂長さ、 $a_{f,ave}$ ： $a_f$ の平均値である。

破面観察後にフェライトスコープを用いて試験片表面及び破面のフェライト量測定を実施した。図 3.4.2(1)-6 にフェライト量測定箇所を示す。なお、破面のフェライト量は参考値とした。

## 2) 試験結果

### a) Normalization Data Reduction Technique による $J$ - $R$ 曲線の評価

前項の試験方法に基づき、試験片 ID-2-FR2 及び ID-5-FR2 を用いて室温大気中での弾塑性破壊靱性試験を実施した。弾塑性破壊靱性試験では、荷重－荷重線変位関係を取得した。各試験片の荷重－荷重線変位関係を図 3.4.2(1)-7 に、破面開放後の破面マクロ写真を図 3.4.2(1)-8 に、破面上での亀裂長さ測定結果を表 3.4.2(1)-2 に示す。

破壊抵抗曲線 ( $J$ - $R$  曲線) を評価した。 $J$ - $R$  曲線の評価には、ASTM E1820-21<sup>[3.4.2(2)-2]</sup> A15. に規定されている Normalization Data Reduction Technique (以下、NDR 法と記載する) を適用した。NDR 法は荷重－荷重線変位関係、初期亀裂長さ及び最終亀裂長さから延性亀裂進展量を推定し  $J$ - $R$  曲線を求める手法であり、高負荷速度での試験や高温での試験、過酷環境中での試験など、除荷コンプライアンス法の適用が難しい場合に有用な  $J$ - $R$  曲線の評価法である。NDR 法による  $J$ - $R$  曲線の評価手順は、ASTM E1820-21 A15. に準拠した。鈍化直線の傾きは流動応力の 2 倍とした。流動応力は、令和 5 年度に実施した室温大気中での引張試験結果から求められる流動応力 (0.2 %耐

力と引張強さの平均値)の平均値 476.5 MPa とした。

NDR 法によって求めた  $J$ - $R$  曲線を図 3.4.2(1)-9 及び表 3.4.2(1)-3 に示す。

ID-5-FR2 においては  $J_Q$  が大きい値であったため(破壊靱性が高かったため)、 $J_{Ic}$  としての判定は Invalid であった。その他の試験片においては Valid であり  $J_Q = J_{Ic}$  と判定された。ID-4-FR2 の  $J$ - $R$  曲線において、フィッティング範囲ではないものの  $J\Delta a$  関係に不連続な挙動が見られた。これは荷重-荷重線変位関係における若干の不連続な挙動によるものと考えられる。

ASTM E1820-21 に基づいた Validity 判定結果を表 3.4.2(1)-4 にまとめた。

判定項目 2 及び 3 は ASTM E1820-21 A9.10 に基づく  $J_Q$  の  $J_{Ic}$  としての判定であり、表 3.4.2(1)-3 に載せた判定と同じである。ID-5-FR2 において  $J_Q$  が大きい値であったため(破壊靱性が高かったため) Invalid であった。亀裂形状に関する判定は判定項目 11 及び 12 である。初期亀裂形状に関する判定項目 11 は Valid であったが、最終亀裂形状に関する判定項目 12 については ID-4-FR2 のみ Invalid であった。判定項目 18 は NDR 法適用時に必要となる判定である。NDR 法は延性亀裂進展量が大きい試験には適用できないとされており、4 mm 及び 0.15  $b_0$  の小さい方の値が延性亀裂進展量の上限となる。いずれの試験も Valid であった。

令和 4～6 年度に行った計 8 個の破壊靱性試験の NDR 法による  $J$ - $R$  曲線を比較した。 $J$ - $R$  曲線の比較結果を図 3.4.2(1)-10 に示す。ID-2-FR2、ID-5-FR2 及び ID-4-FR2 の室温での  $J$ - $R$  曲線は概ね同等であり、試験温度 288°C の  $J$ - $R$  曲線よりも大きい値であった。

破面開放後の 1T-C(T)試験片を対象に、フェライトスコープを用いてフェライト量測定した。フェライト量測定結果を表 3.4.2(1)-5 に示す。フェライトスコープによるフェライト量(試験片側面①～④)の平均値は 22.5 %～23.1%であり、令和 3 年度に報告した Schaeffler 線図による予測値より大きな値であった。また、表中に同じ供試体から採取した観察用試験片 2 枚を対象としたフェライトスコープによるフェライト量測定結果(平均値)を比較参照値として示す。1T-C(T)試験片を対象とした測定値の方が観察用試験片よりやや大きい値であった。

#### b) 除荷コンプライアンス法による $J$ - $R$ 曲線の評価

各除荷線のコンプライアンスより延性亀裂進展量  $\Delta a$  を算出し、荷重-荷重線変位関係から求まる  $J$  積分との対応より  $J$ - $R$  曲線を求めた。除荷コンプライアンス法による  $J$ - $R$  曲線を図 3.4.2(1)-11 に示す。鈍化直線の傾きは流動応力の 2 倍とした。流動応力は、令和 5 年度に実施した室温大気中での引張試験結果から求められる流動応力(0.2%耐力と引張強さの平均値)の平均値 476.5 MPa とした。弾塑性破壊靱性試験結果を表 3.4.2(1)-6 にまとめる。除荷コンプライアンス法評価においては、ASTM E1820-21<sup>[3.4.2(1)-2]</sup>の A9.10 に基づく  $J_Q$  の  $J_{Ic}$  としての判定はいずれの試験片も Valid であったが、亀裂形状に関する判定のうち最終亀裂形状に関する判定項目が ID-4-FR2 のみ

Invalid であり、ID-2-FR2 及び ID-5-FR2 が  $J_Q = J_{Ic}$  と判定された。

<参考文献>

- [3.4.2(1)-1] “引張試験機・圧縮試験機一力計測系の校正方法及び検証方法”，  
JIS B 7721, 日本産業規格, 2018] “引張試験機・圧縮試験機一力  
計測系の校正方法及び検証方法”，JIS B 7721, 日本産業規格, 2018
- [3.4.2(1)-2] “Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness,”  
ASTM E1820-21, ASTM international ,2021

表 3.4.2(1)-1 破壊靱性試験条件

|   |                      |               |
|---|----------------------|---------------|
| 予備負荷  | 最大荷重                 | 6 kN          |
|   | 最小荷重                 | 3 kN          |
|   | 繰り返し数                | 3 回以上         |
| 試験  | 初期荷重                 | 6 kN          |
|   | 荷重負荷速度               | 0.15 kN/sec   |
|   | 変位増分                 | 0.15 mm       |
|   | 変位負荷速度               | 0.0025 mm/sec |
|   | 応力緩和時間               | 30 s          |
|   | コンプライアンス算出範囲         | 20 %~80 %     |
|   | 最小除荷荷重               | 3 kN          |
|   | 除荷時間                 | 20 s          |
|   | 試験終了条件( $\Delta a$ ) | 2.7 mm        |
| 備考  |                      |               |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 1 回目の負荷のみ荷重制御、2 回目以降の負荷は変位制御で行った。</li> <li>・ 試験中は<math>\Delta a</math> 及び <math>J</math> を監視し、最大荷重に到達しており、且つ<math>\Delta a</math> が試験終了条件の値を超えたデータ点が得られた時点で試験を終了した。</li> </ul> |                      |               |

表 3.4.2(1)-2 破面上での亀裂長さ測定結果

| 試験片番号                 | 初期亀裂長さ<br>$a_0$ (mm) | 最終亀裂長さ<br>$a_p$ (mm) | 延性亀裂進展量<br>$\Delta a$ (mm) |
|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------------|
| ID-2-FR2              | 26.84                | 29.52                | 2.68                       |
| ID-5-FR2              | 27.43                | 30.04                | 2.61                       |
| ID-4-FR2 <sup>※</sup> | 27.57                | 30.09                | 2.52                       |

※：予備試験片

表 3.4.2(1)-3 NDR 法によって求めた  $J$ - $R$  曲線

| 試験片<br>番号             | 試験<br>温度<br>(°C) | 流動<br>応力<br>$\sigma_f$<br>(MPa) | $J_Q$<br>(kJ/m <sup>2</sup> ) | $J = C(\Delta a)^m$ |      | $J_{Ic}$ としての<br>Validity |                          |
|-----------------------|------------------|---------------------------------|-------------------------------|---------------------|------|---------------------------|--------------------------|
|                       |                  |                                 |                               | C                   | m    | $B > 10J_Q / \sigma_f$    | $b_0 > 10J_Q / \sigma_f$ |
| ID-2-FR2              | 室温               | 476.5                           | 1003                          | 885                 | 0.55 | Valid                     | Valid                    |
| ID-5-FR2              |                  |                                 | 1232                          | 1038                | 0.43 | Invalid                   | Invalid                  |
| ID-4-FR2 <sup>※</sup> |                  |                                 | 943                           | 867                 | 0.49 | Valid                     | Valid                    |

※：予備試験片

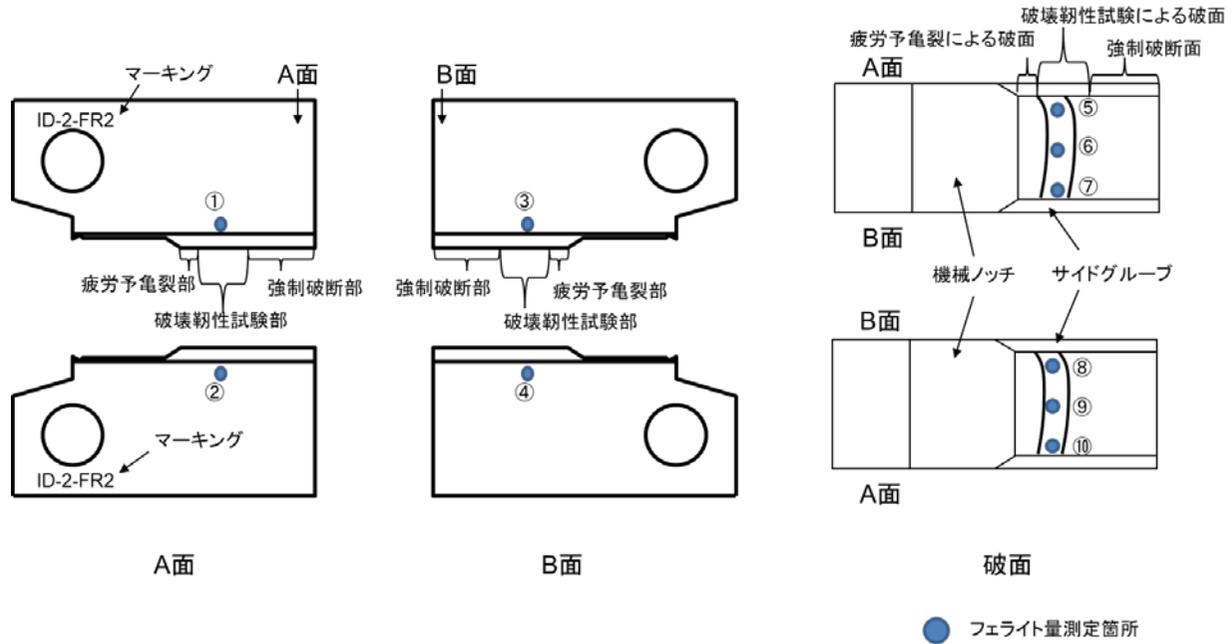
表 3.4.2(1)-4 Validity 判定結果のまとめ (NDR 法評価)

| 判定項目 |  | ID-2-FR2          | ID-5-FR2          | ID-4-FR2 <sup>※</sup>                     |
|------|--|-------------------|-------------------|---|
| 1    | $2 \leq W/B \leq 4$  | Valid             | Valid             | Valid                                     |
| 2    | $B > 10J_Q / \sigma_f$   | Valid             | Invalid           | Valid                                     |
| 3    | $b_0 > 10J_Q / \sigma_f$   | Valid             | Invalid           | Valid                                     |
| 4    | $P_{\max} < P_m$   | Valid             | Valid             | Valid                                     |
| 5    | $K_{f\max} \leq K_{\max}$  | Valid             | Valid             | Valid                                     |
| 6    | 試験速度 $0.1 \text{ min} \leq P_m \text{ 到達時間} \leq 3 \text{ min}$                            | Valid             | Valid             | Valid                                     |
| 7    | 予備負荷 $ a_{\text{ave}} - a_i  \leq 0.002W$ (i=1~3)  | Invalid<br>(0.80) | Invalid<br>(0.74) | Invalid<br>(0.42)                         |
| 8    | $0.45 \leq a_0/W \leq 0.7$   | Valid             | Valid             | Valid                                     |
| 9    | ノッチ先端長さ+ $a_0 \geq 2h$   | Valid             | Valid             | Valid                                     |
| 10   | $ \Delta a_p - \Delta a_{\text{predicted}}  < 0.15\Delta a_p$ ( $\Delta a_p < 0.2b_0$ の場合) | Valid             | Valid             | Valid                                     |
|      | $ \Delta a_p - \Delta a_{\text{predicted}}  < 0.03b_0$ ( $\Delta a_p \geq 0.2b_0$ の場合)     | —                 | —                 | —   |
| 11   | $ a_{0i} - a_0  \leq 0.05B$ (i=1~9)  | Valid             | Valid             | Valid                                     |
| 12   | $ a_{pi} - a_p  \leq 0.05B$ (i=1~9)  | Valid             | Valid             | Invalid<br>( $0.05B = 1.27$ に対して $1.94$ ) |
| 13   | 有効データ 5 点以上  | Valid             | Valid             | Valid                                     |
| 14   | 最大試験力までにデータ 8 点以上  | Valid             | Valid             | Valid                                     |
| 15   | 0.15 mm オフセット線と 0.5 mm オフセット線の間に有効データ 1 点以上  | Valid             | Valid             | Valid                                     |
| 16   | 0.5 mm オフセット線と 1.5 mm オフセット線の間に有効データ 1 点以上   | Valid             | Valid             | Valid                                     |
| 17   | $0.4J_Q \sim J_Q$ の間にデータ 3 点以上   | Valid             | Valid             | Valid                                     |
| 18   | $\Delta a_p \leq \text{Min}(4 \text{ mm}, 0.15b_0)$  | Valid             | Valid             | Valid                                     |

※：予備試験片

W：試験片幅，B：試験片厚さ，h：ノッチ高さ， $b_0$ ：初期リガメント長さ， $a_0$ ：初期亀裂長さ(平均値)， $\sigma_f$ ：流動応力， $P_{\max}$ ：疲労予亀裂導入時の最終荷重， $P_m = 0.4Bb_0 \cdot 2\sigma_y / (2W + a_0)$ ， $K_{f\max}$ ：疲労予亀裂導入時の最終  $K$  値， $K_{\max}$ ：判定基準  $K$  値， $a_{\text{ave}}$ ：予備負荷時の亀裂長さ(平均値)， $a_i$ ：予備負荷時の亀裂長さ(i=1~3)， $\Delta a_0$ ：疲労亀裂進展量， $\Delta a_p$ ：延性亀裂進展量(実測値)， $\Delta a_{\text{predicted}}$ ：延性亀裂進展量(計算値)， $a_{0i}$ ：初期亀裂長さ(i=1~9)， $a_{pi}$ ：最終亀裂長さ(i=1~9)， $a_p$ ：最終亀裂長さ(平均値)

表 3.4.2(1)-5 フェライト量測定結果 (%)



| 試験片<br>番号 | 試験片側面 |      |      |      |      | 比較<br>参照値*2 | 破面 (参考値) *1 |      |      |      |      |      |  |
|-----------|-------|------|------|------|------|-------------|-------------|------|------|------|------|------|--|
|           |       |      |      |      | 平均値  |             |             |      |      |      |      |      |  |
| ID-2-FR2  | 22.3  | 21.4 | 23.2 | 25.3 | 23.1 | 18.9        | 19.9        | 18.1 | 16.6 | 18.1 | 16.5 | 14.4 |  |
| ID-5-FR2  | 21.2  | 23.9 | 21.7 | 23.2 | 22.5 | 19.3        | 16.8        | 18.9 | 17.8 | 15.8 | 17.4 | 16.1 |  |
| ID-4-FR2※ | 23.4  | 20.5 | 24.1 | 23.6 | 22.9 | 20.1        | 17.1        | 20.4 | 16.0 | 18.4 | 17.2 | 17.8 |  |

※: 予備試験片

\*1: 破面の凹凸によりフェライト量が小さめに測定される可能性が考えられることから参考値とする。

\*2: 同じ供試体から採取した観察用試験片 2 枚のフェライト量測定結果 (平均値) を示す。

表 3.4.2(1)-6 弾塑性破壊靱性試験結果のまとめ (除荷コンプライアンス法評価)

| 試験片<br>番号 | 試験<br>温度<br>(°C) | 流動<br>応力<br>$\sigma_f$ (MPa) | $J_Q$<br>(kJ/m <sup>2</sup> ) | $J = C(\Delta a)^m$ |      | $J_{Ic}$ としての Validity      |                               |   |   |
|-----------|------------------|------------------------------|-------------------------------|---------------------|------|-----------------------------|-------------------------------|---|---|
|           |                  |                              |                               | C                   | m    | $B >$<br>$10J_Q / \sigma_f$ | $b_0 >$<br>$10J_Q / \sigma_f$ | $ a_{0i} - a_0 $<br>$\leq 0.05B$<br>(i=1~9) | $ a_{pi} - a_p $<br>$\leq 0.05B$<br>(i=1~9) |
| ID-2-FR2  | 室温               | 476.5                        | 1088                          | 968                 | 0.40 | Valid                       | Valid                         | Valid                                       | Valid                                       |
| ID-5-FR2  |                  |                              | 1087                          | 984                 | 0.34 | Valid                       | Valid                         | Valid                                       | Valid                                       |
| ID-4-FR2* |                  |                              | 800                           | 785                 | 0.49 | Valid                       | Valid                         | Valid                                       | Invalid                                     |

※：予備試験片

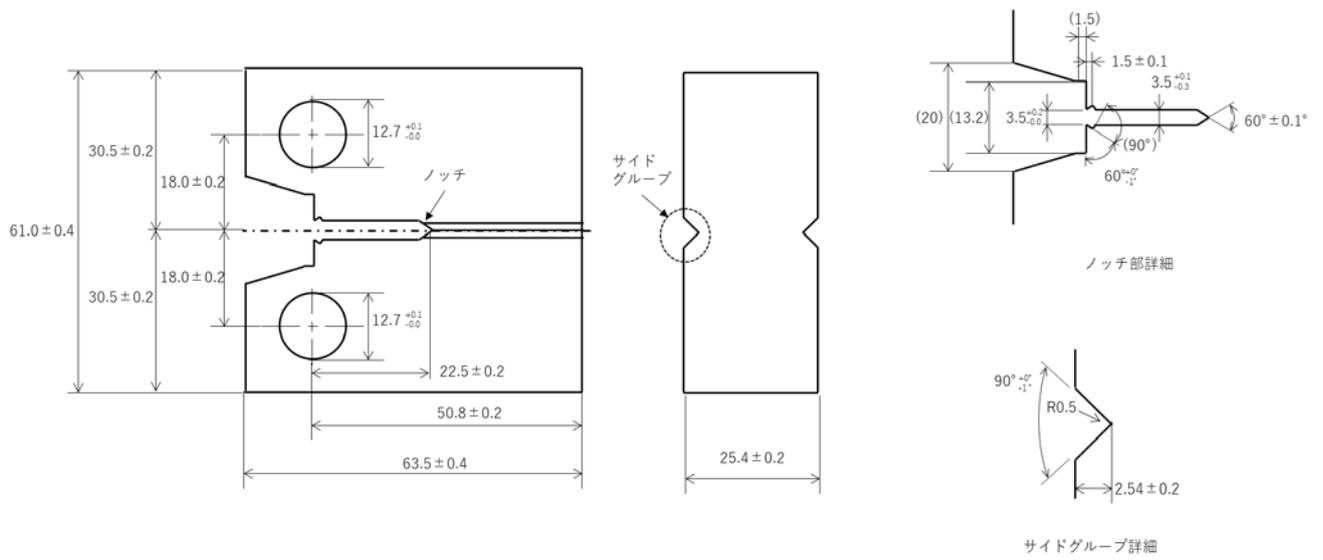
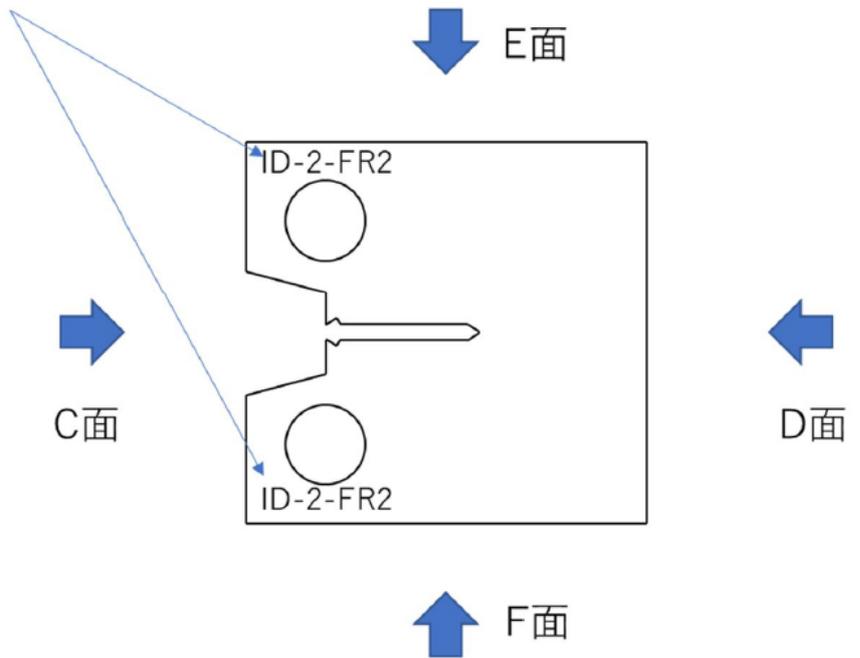


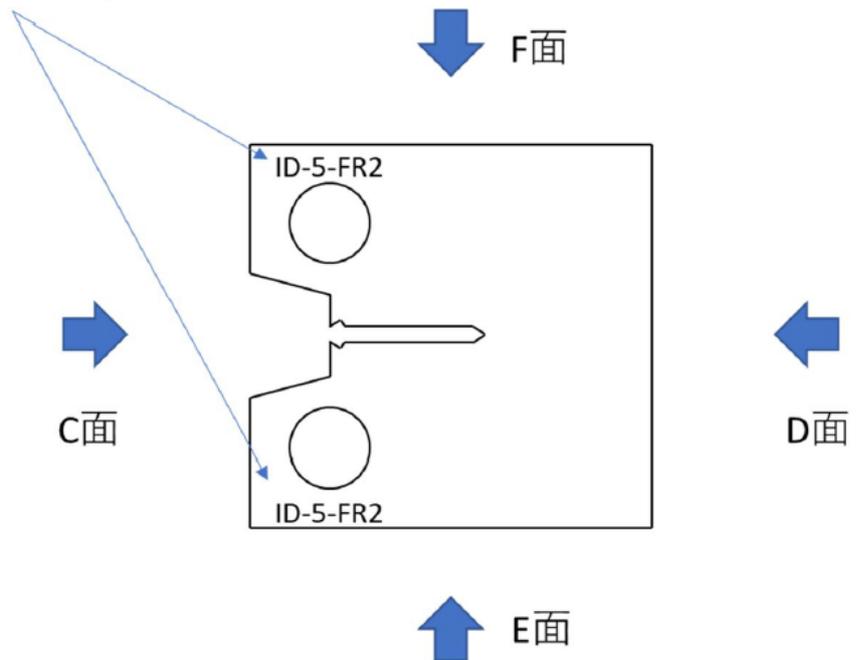
図 3.4.2(1)-1 1T-C(T)試験片の寸法 (単位：mm)

A面に対して、D面を右にして読める向き  
に試験片番号をマーキング(ID-2-FR2)



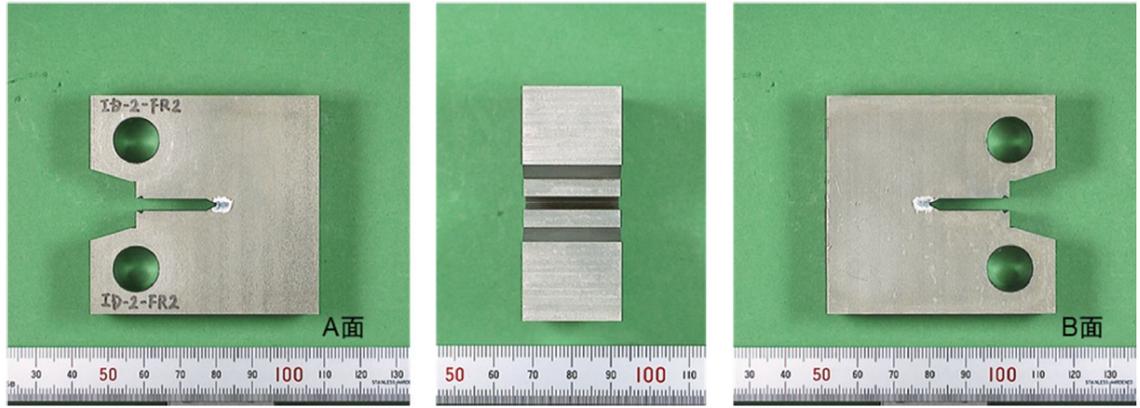
(a) ID-2-FR2

A面に対して、D面を右にして読める向き  
に試験片番号をマーキング(例：ID-5-FR2)

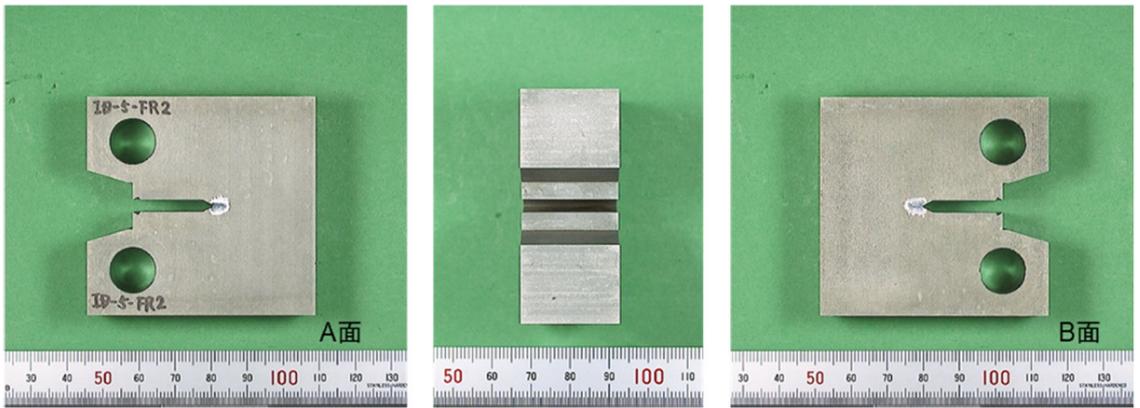


(b) ID-4-FR2 及び ID-5-FR2

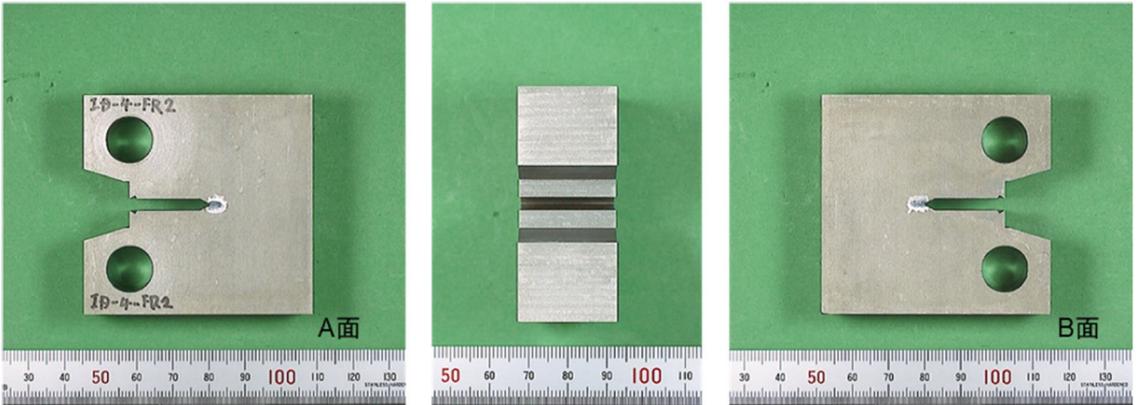
図 3.4.2(1)-2 1T-C(T)試験片マーキング要領及び試験体からの採取方位



(a) ID-2-FR2



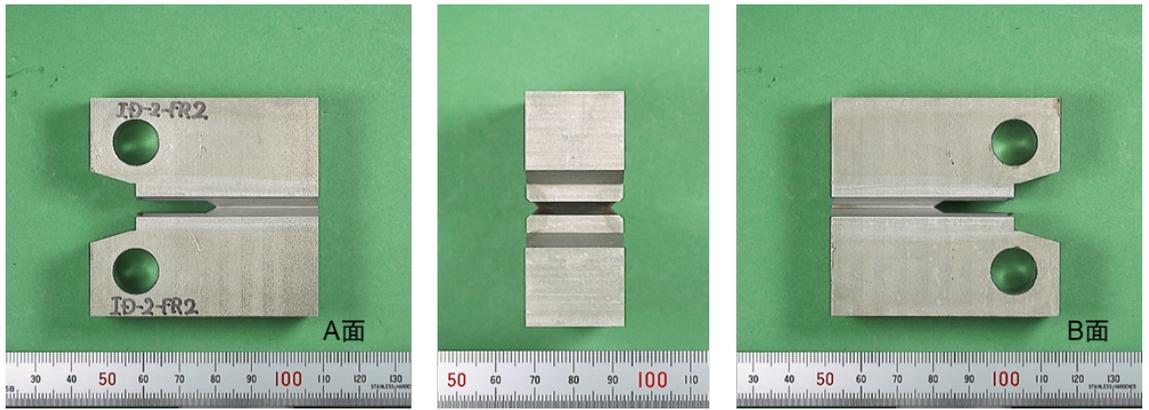
(b) ID-5-FR2



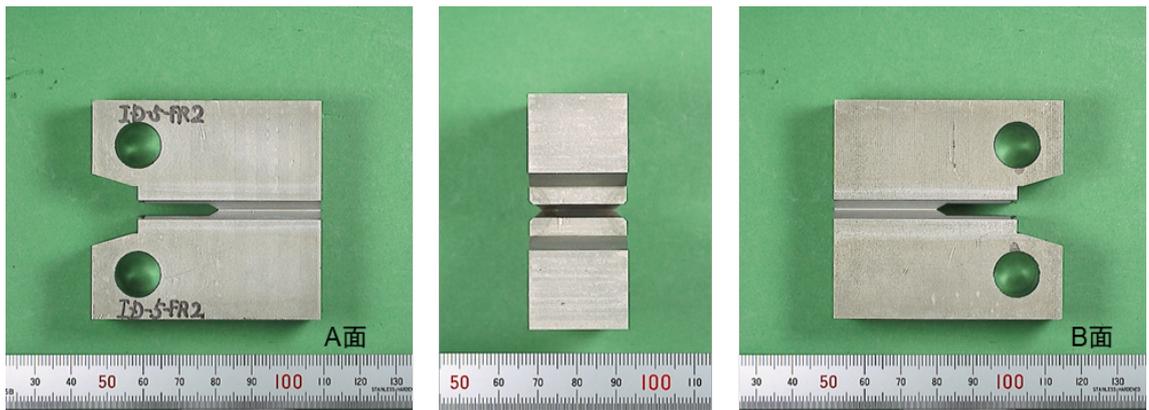
(c) ID-4-FR2 (予備試験片)

備考：ノッチ先端の白色状の光沢部分は研磨箇所

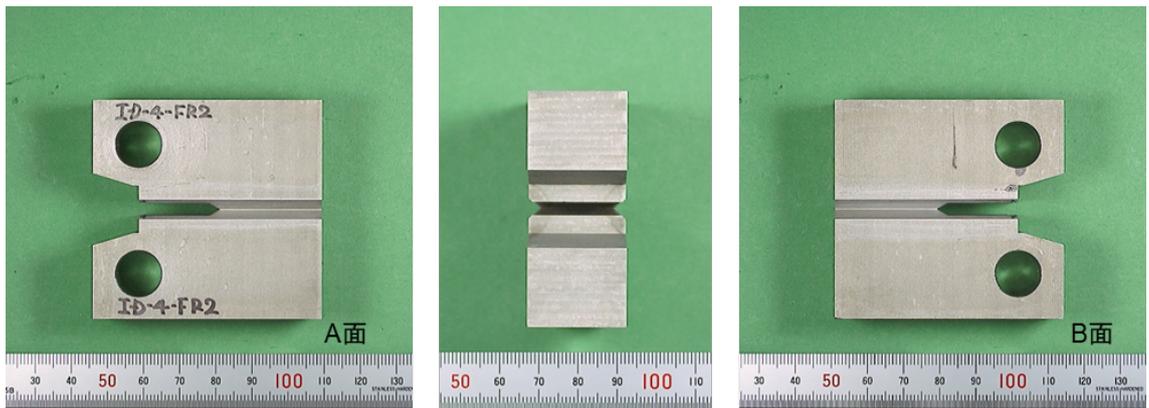
図 3.4.2(1)-3 疲労予亀裂導入前の 1T-C(T) 試験片外観



(a) ID-2-FR2



(b) ID-5-FR2



(c) ID-4-FR2 (予備試験片)

図 3.4.2(1)-4 破壊靱性試験に使用した 1T-C(T) 試験片の外観写真

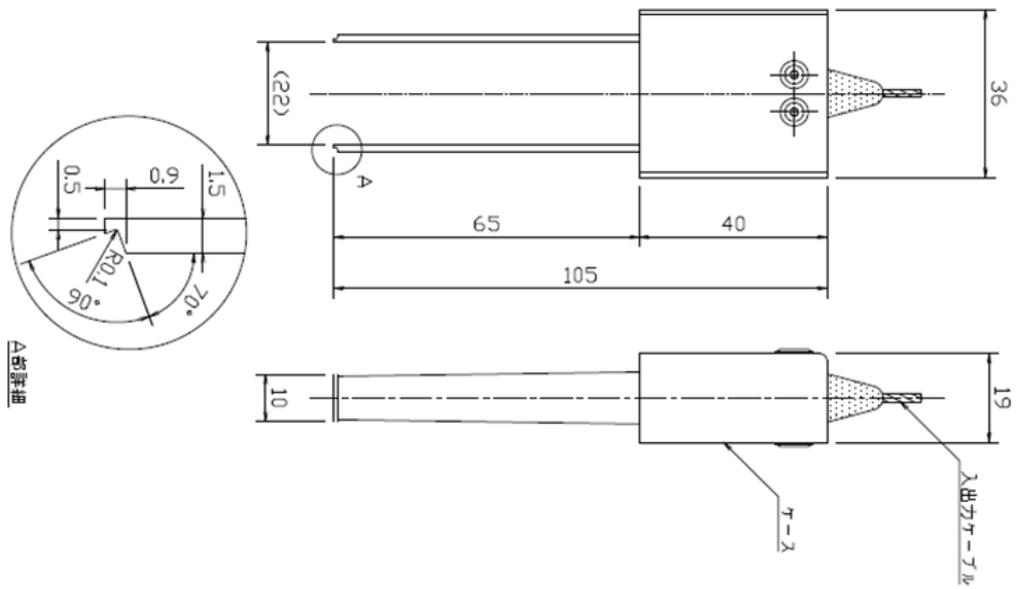
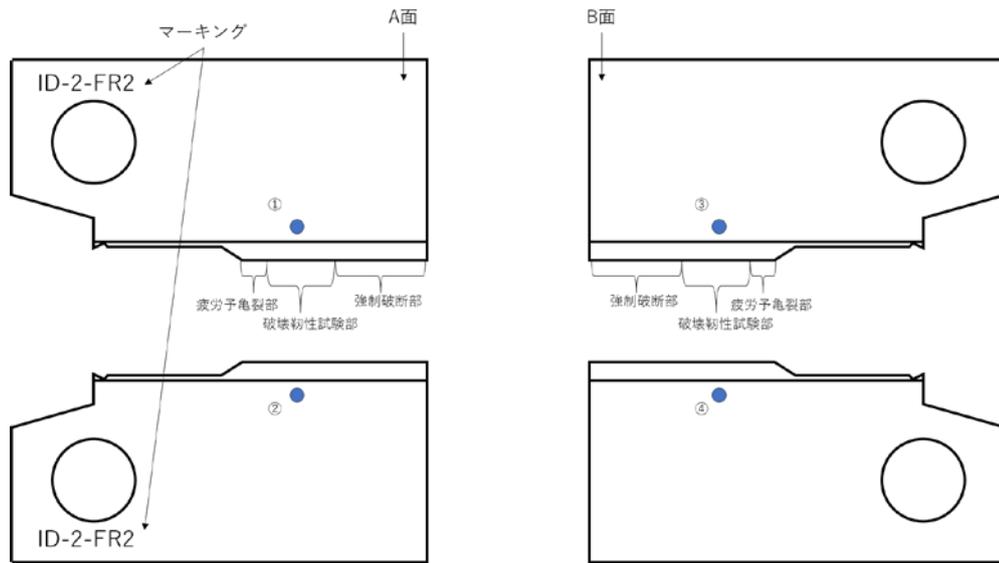
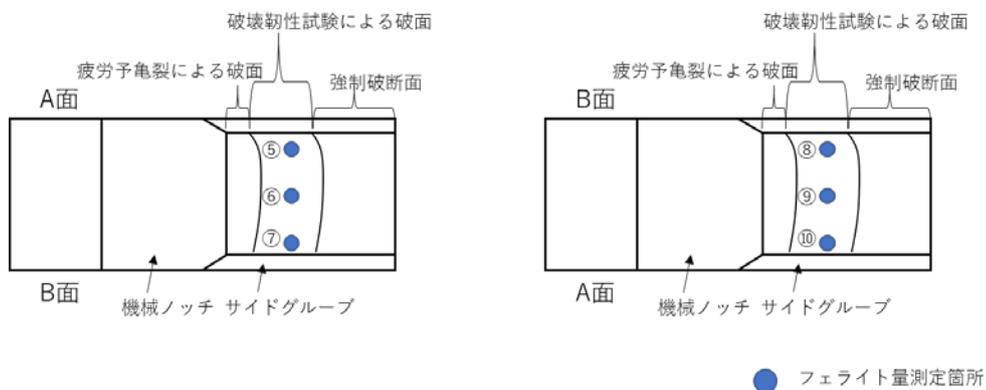


図 3.4.2(1)-5 クリップゲージ形状 (UB-15SAH004、適用範囲 : 3.0~18.0 mm) 及び寸法  
(単位 : mm)

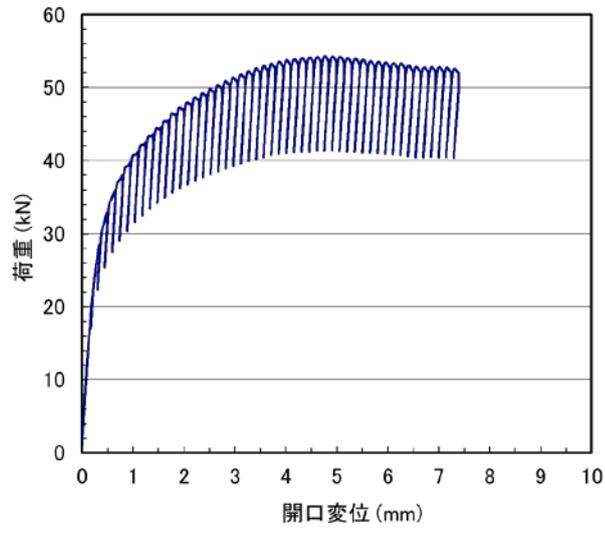


(a) 試験片表面(マーキング例：ID-2-FR2)

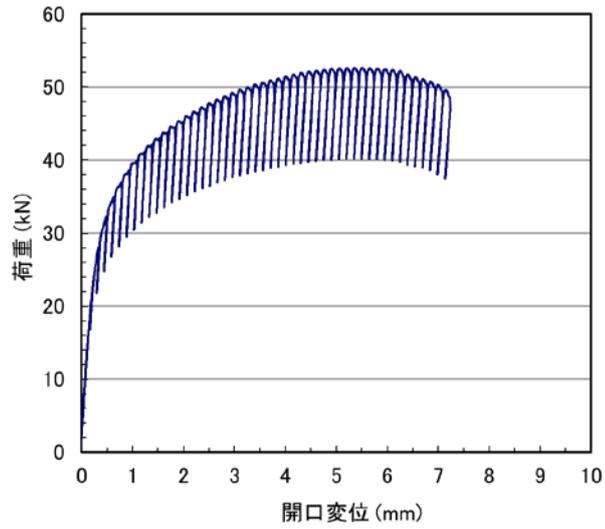


(b) 試験片破面

図 3.4.2(1)-6 フェライト量測定箇所

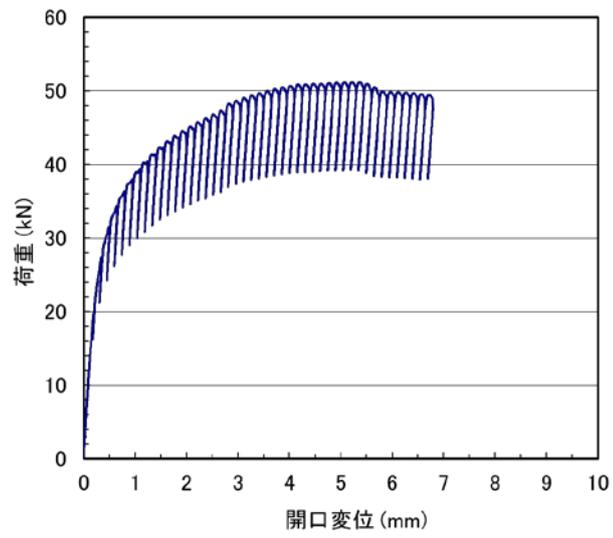


(a) ID-2-FR2



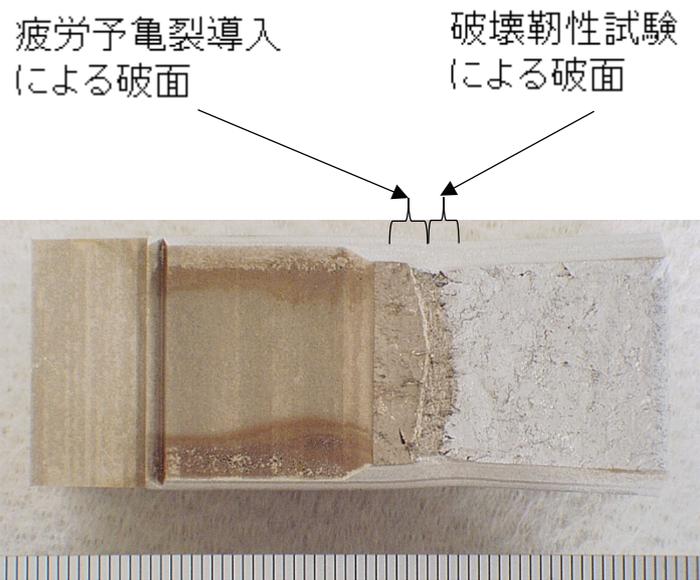
(b) ID-5-FR2

図 3.4.2(1)-7 (1/2) 弾塑性破壊靱性試験における荷重-荷重線変位関係

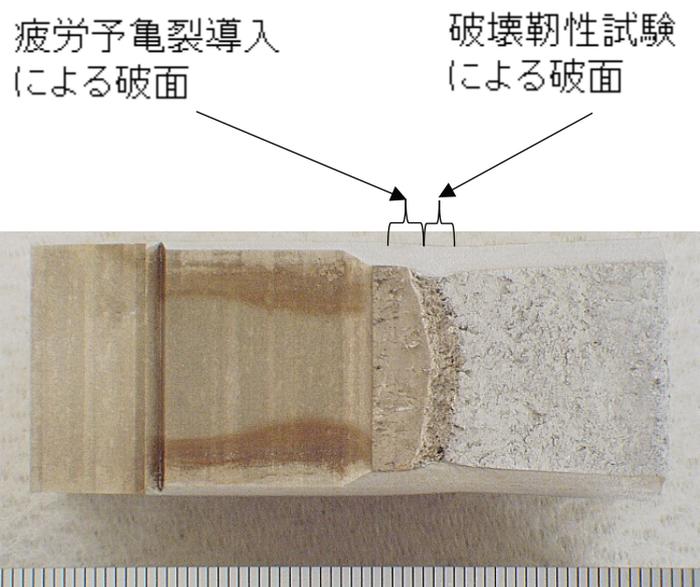


(c) ID-4-FR2 (予備試験片)

図 3.4.2(1)-7 (2/2) 弾塑性破壊靱性試験における荷重－荷重線変位関係



(a) ID-2-FR2

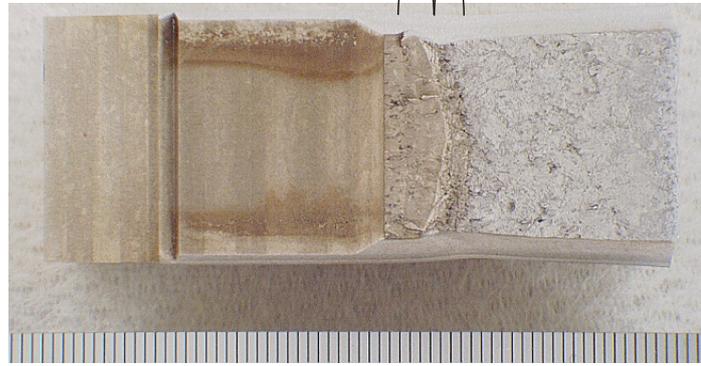


(b) ID-5-FR2

図 3.4.2(1)-8 (1/2) 弾塑性破壊靱性試験後の破面マクロ写真

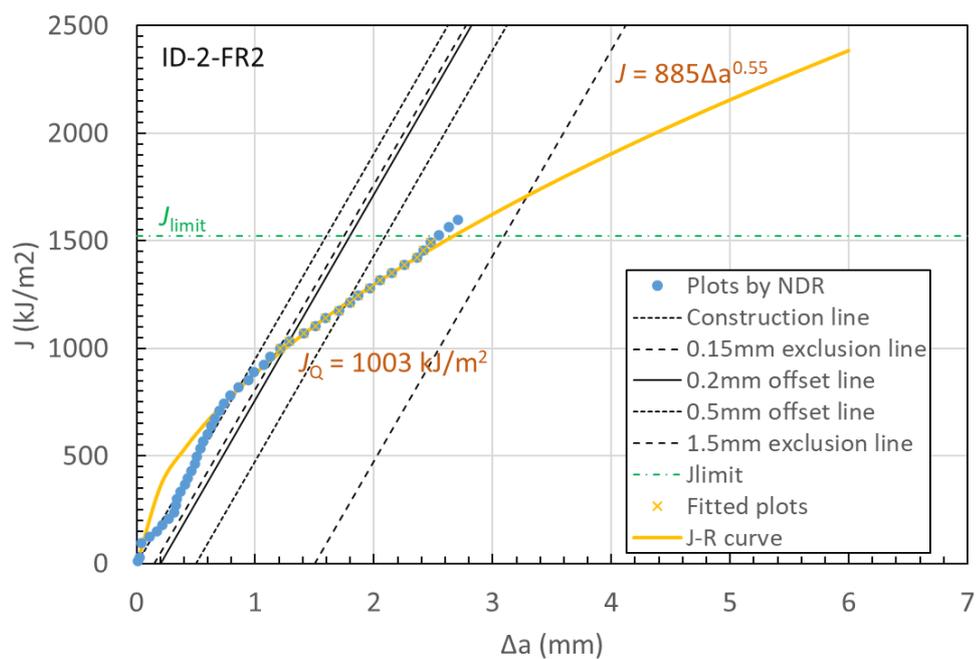
疲労予亀裂導入  
による破面

破壊靱性試験  
による破面

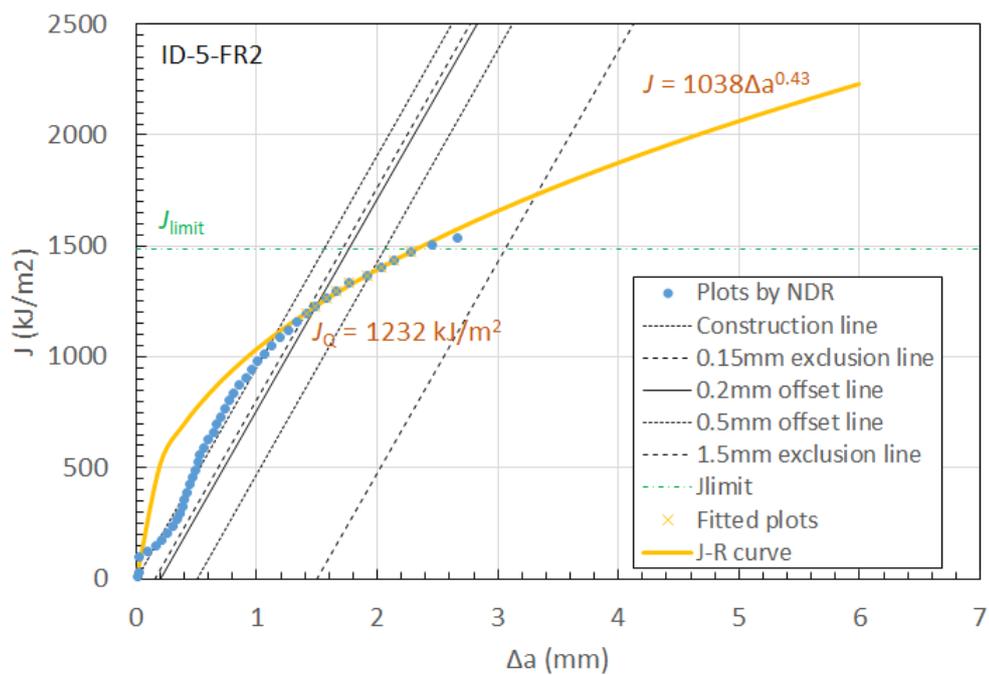


(c) ID-4-FR2 (予備試験片)

図 3.4.2(1)-8 (2/2) 弾塑性破壊靱性試験後の破面マクロ写真

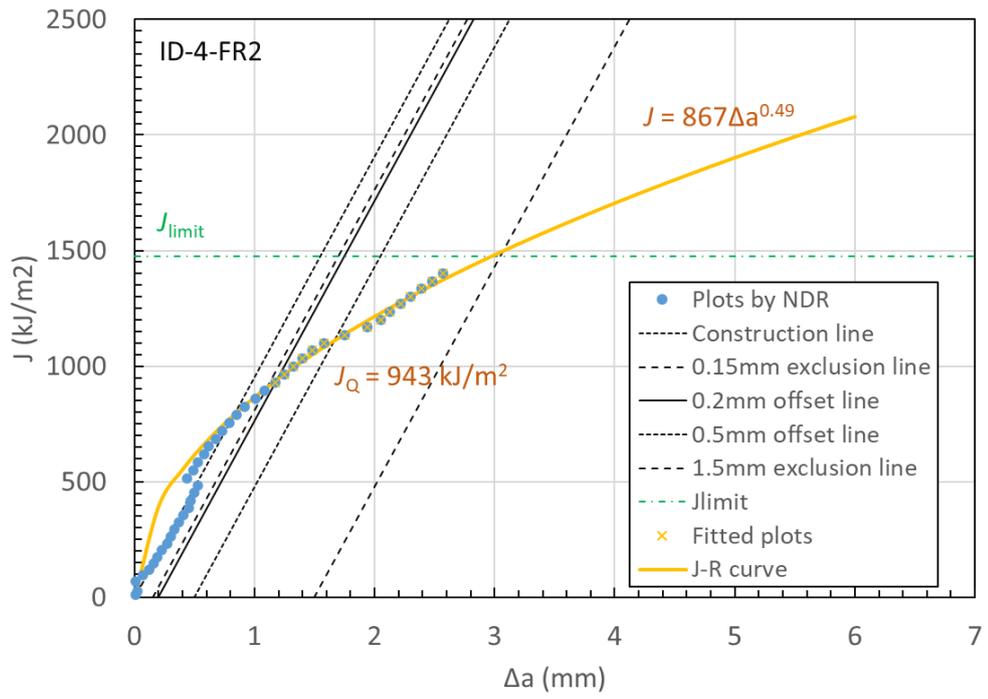


(a) ID-2-FR2



(b) ID-5-FR2

図 3.4.2(1)-9 (1/2) NDR 法による  $J$ - $R$  曲線



(c) ID-4-FR2 (予備試験片)  
 図 3.4.2(1)-9 (2/2) NDR 法による  $J$ - $R$  曲線

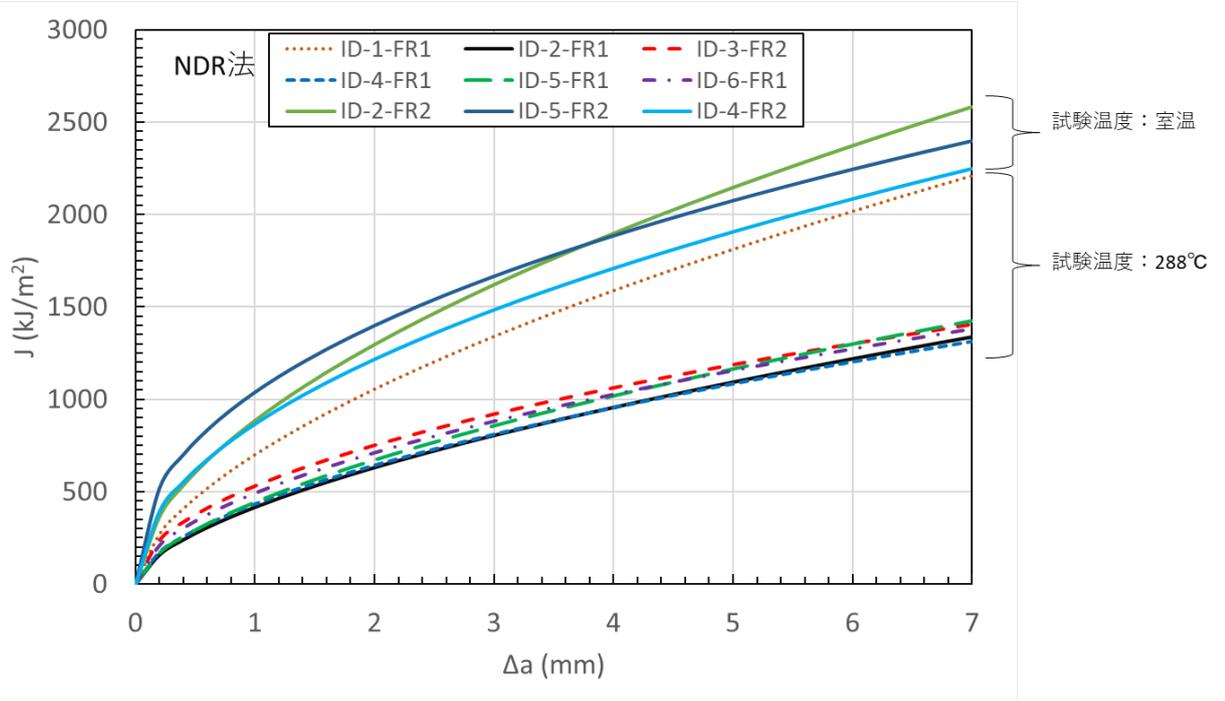
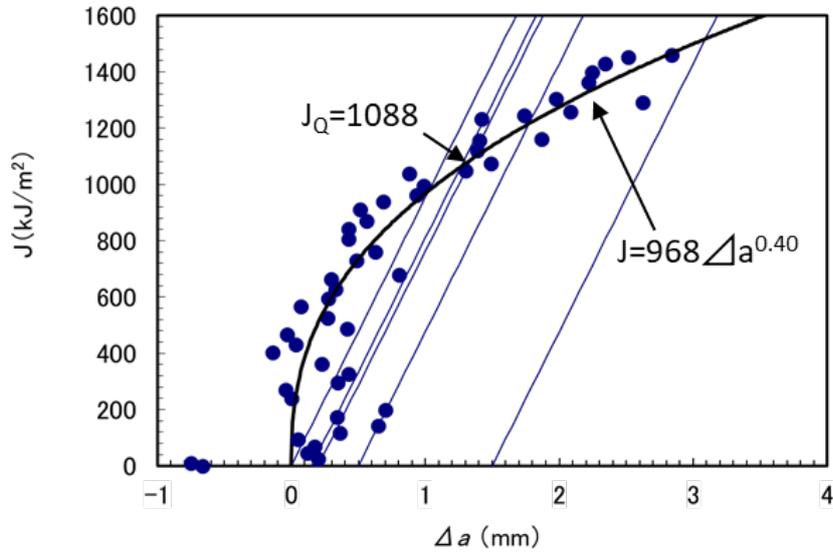
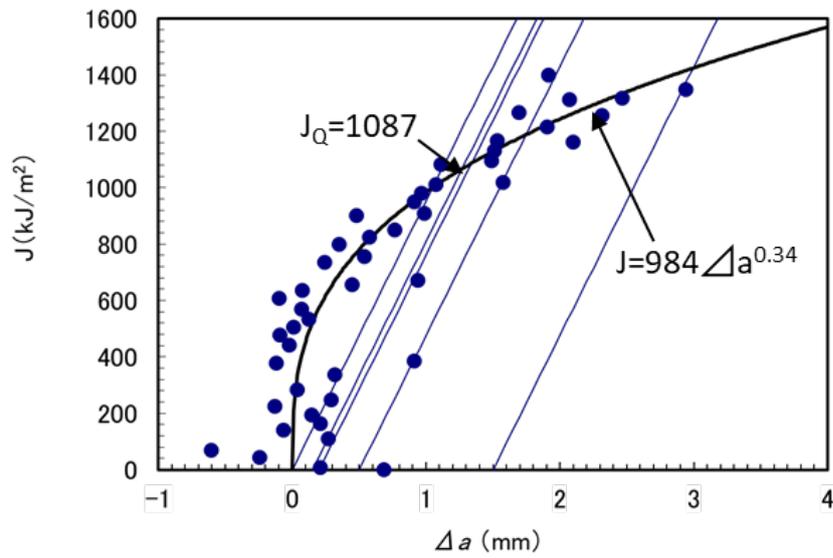


図 3.4.2(1)-10 NDR 法による J-R 曲線の比較

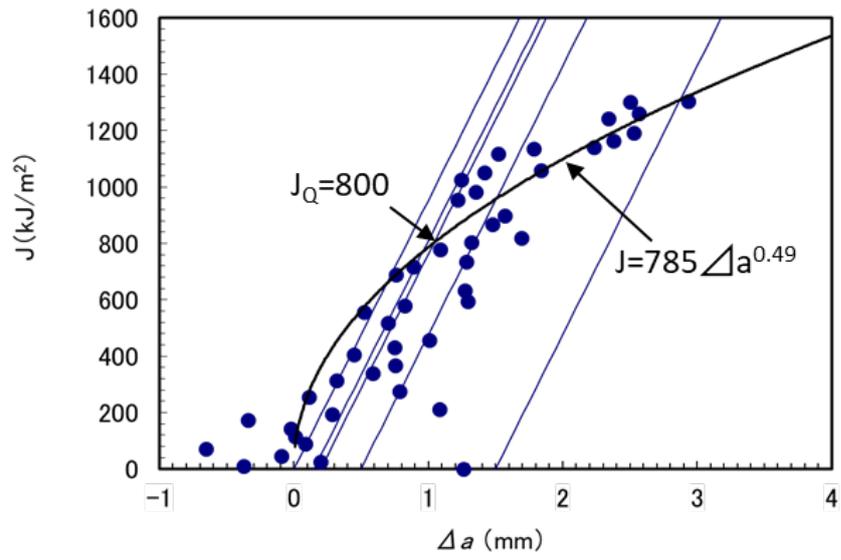


(a) ID-2-FR2



(b) ID-5-FR2

図 3.4.2(1)-11 (1/2) 除荷コンプライアンス法による  $J$ - $R$  曲線



(e) ID-4-FR2 (予備試験片)

図 3.4.2(1)-11 (2/2) 除荷コンプライアンス法による  $J$ - $R$  曲線

## (2) シャルピー衝撃試験

### 1) 試験方法

令和5年度に製作した試験片12個及び3.4.1(3)項 試験片の加工の3) シャルピー衝撃試験片で製作した試験片12個の合計24個の試験片を用いて JIS Z 2242(2023)<sup>[3.4.2(2)-1]</sup>に準拠してシャルピー衝撃試験を実施した。試験機は JIS B 7722(2018)<sup>[3.4.2(2)-2]</sup>に準拠して検証された株式会社東京衡機製造所製試験機(ICA-400J)を用いた。なお、試験機の定格容量は390Jである。シャルピー衝撃試験片の寸法を図3.4.2(2)-1に、シャルピー衝撃試験片マーキング要領及び試験体からの採取方位を図3.4.2(2)-2に示す。シャルピー衝撃試験片外観写真の例を図3.4.2(2)-3に示す。

シャルピー衝撃試験温度、試験片番号を表3.4.2(2)-1に示す。-150℃～120℃の8温度にて、3個ずつ試験を実施した。試験機の試験温度の制限(±150℃)内で、温度依存の有無及び低温側・高温側の飽和挙動を確認する試験として温度条件を設定した。試験片を恒温槽に装荷して表3.4.2(2)-1に示す温度で30分以上保持した後に試験を実施した(室温を除く)。室温については、試験時の温度を報告することとして30℃であった。低温側の温度から各試験温度で3回ずつ試験を実施した。各温度の試験に用いる試験片は、PLRポンプケーシングにおける採取位置の影響の有無を確認できる組み合わせとした。

試験後は試験片の外観写真及び破面写真を撮影し、吸収エネルギー、横膨出量及び延性破面率を評価した。なお、試験により試験片が破断しなかった場合は外観写真撮影、横膨出量測定後に試験片を強制破断し、破面写真撮影を行った。

### 2) 試験結果

試験後の試験片外観写真及び破面写真を図3.4.2(2)-4～図3.4.2(2)-11に、シャルピー衝撃試験結果を表3.4.2(2)-2に示す。図3.4.2(2)-12に吸収エネルギーと温度の関係を示す。図3.4.2(2)-12には、80℃及び120℃の吸収エネルギー平均値を上限、-150℃の吸収エネルギー平均値を下限に設定して評価した遷移曲線を併せて示す。遷移曲線から試験温度の上昇に伴い吸収エネルギーも上昇する傾向が確認された。また、吸収エネルギーを試験片ノッチ部の断面積で除した衝撃値(J/cm<sup>2</sup>)と温度の関係を図3.4.2(2)-13に示す。図3.4.2(2)-14に横膨出量と温度の関係を示す。図3.4.2(2)-14には、-150℃の横膨出量平均値を下限に設定して評価した遷移曲線を併せて示す。試験温度の上昇に伴い横膨出量も上昇する傾向が確認された。図3.4.2(2)-15に延性破面率と温度の関係を示す。延性破面率は温度に依らず常に100%であった。

吸収エネルギー、衝撃値及び横膨出量の遷移曲線は式3.4.2(2)-1、式3.4.2(2)-2で評価される。

$$X = A + B \times \tanh(T - T_0/C) \quad (3.4.2(2)-1)$$

$$A + B = Y \quad (\text{上部棚吸収エネルギー・衝撃値のみ}) \quad (3.4.2(2)-2)$$

式中の X は吸収エネルギー、衝撃値及び横膨出量、T は温度、A、B、C 及び  $T_0$  は係数、Y は吸収エネルギー、衝撃値における 80℃及び 120℃の試験結果の平均値である。それぞれの値について各温度の試験結果と式による計算値の差が最小となるように最小二乗法で係数 A、B、C 及び  $T_0$  を回帰計算により評価した。評価した係数を表 3.4.2(2)-3 に示す。室温(30℃)における衝撃値は 216J/cm<sup>2</sup>であった。NUREG/CR-4513 Rev.2 “Estimation of Fracture Toughness of Cast Stainless Steels during Thermal Aging in LWR Systems”に基づく、熱時効を受けた本試験体の室温のシャルピー衝撃値の推定値は 119J/cm<sup>2</sup>であった。

#### 参考文献

- [3.4.2(2)-1] “金属材料のシャルピー衝撃試験方法”，JIS Z 2242，日本産業規格，2023
- [3.4.2(2)-2] “金属材料のシャルピー衝撃試験—試験機の検証”，JIS B 7722，日本産業規格，2018

表 3.4.2(2)-1 シャルピー衝撃試験温度、試験片番号

| 試験温度  | 試験片番号※                      |
|-------|-----------------------------|
| -150℃ | ID-1-IT1、ID-3-IT2 、ID-5-IT1 |
| -120℃ | ID-2-IT1、ID-4-IT2 、ID-6-IT1 |
| -80℃  | ID-1-IT2、ID-3-IT1 、ID-5-IT2 |
| -40℃  | ID-2-IT2、ID-4-IT1 、ID-6-IT2 |
| 0℃    | ID-1-IT3、ID-3-IT4 、ID-5-IT3 |
| 室温    | ID-2-IT3、ID-4-IT4 、ID-6-IT3 |
| 80℃   | ID-1-IT4、ID-3-IT3 、ID-5-IT4 |
| 120℃  | ID-2-IT4、ID-4-IT3 、ID-6-IT4 |

※試験片番号と試験片採取位置の関係（例：ID-X-ITY）について  
 Xは試験体のID番号（ID-1～ID-6）を示し、Yは1及び3が  
 PLRポンプケーシングの外表面側、2及び4が内表面側から採  
 取した試験片であることを示す。

表 3.4.2(2)-2 シャルピー衝撃試験結果

| 試験片番号    | 試験温度<br>(°C) | 吸収エネルギー<br>(J) | 横膨出量<br>(mm) | 延性破面率<br>(%) |
|----------|--------------|----------------|--------------|--------------|
| ID-1-IT1 | -150         | 49.6           | 0.56         | 100          |
| ID-3-IT2 |              | 51.4           | 0.74         | 100          |
| ID-5-IT1 |              | 59.1           | 0.68         | 100          |
| ID-2-IT1 | -120         | 73.0           | 0.84         | 100          |
| ID-4-IT2 |              | 51.6           | 0.83         | 100          |
| ID-6-IT1 |              | 70.1           | 0.85         | 100          |
| ID-1-IT2 | -80          | 84.6           | 1.09         | 100          |
| ID-3-IT1 |              | 105.2          | 1.62         | 100          |
| ID-5-IT2 |              | 57.2           | 0.76         | 100          |
| ID-2-IT2 | -40          | 82.3           | 1.16         | 100          |
| ID-4-IT1 |              | 153.3          | 1.77         | 100          |
| ID-6-IT2 |              | 144.5          | 1.80         | 100          |
| ID-1-IT3 | 0            | 159.2          | 2.25         | 100          |
| ID-3-IT4 |              | 150.7          | 1.94         | 100          |
| ID-5-IT3 |              | 171.9          | 2.33         | 100          |
| ID-2-IT3 | 30 (室温)      | 155.5          | 1.89         | 100          |
| ID-4-IT4 |              | 173.7          | 2.19         | 100          |
| ID-6-IT3 |              | 187.5          | 2.21         | 100          |
| ID-1-IT4 | 80           | 198.2          | 2.59         | 100          |
| ID-3-IT3 |              | 183.8          | 2.36         | 100          |
| ID-5-IT4 |              | 184.9          | 2.54         | 100          |
| ID-2-IT4 | 120          | 177.8          | 2.20         | 100          |
| ID-4-IT3 |              | 178.2          | 2.28         | 100          |
| ID-6-IT4 |              | 171.1          | 1.95         | 100          |

表 3.4.2(2)-3 遷移曲線の係数

| X       | A      | B     | C     | T <sub>0</sub> | Y      |
|---------|--------|-------|-------|----------------|--------|
| 吸収エネルギー | 116.95 | 65.38 | 59.20 | -47.56         | 182.33 |
| 衝撃値     | 145.65 | 81.75 | 59.21 | -47.49         | 227.39 |
| 横膨出量    | 1.47   | 0.84  | 61.61 | -53.50         |        |

$$X = A + B \times \tanh((T - T_0)/C)$$

$$A + B = Y$$

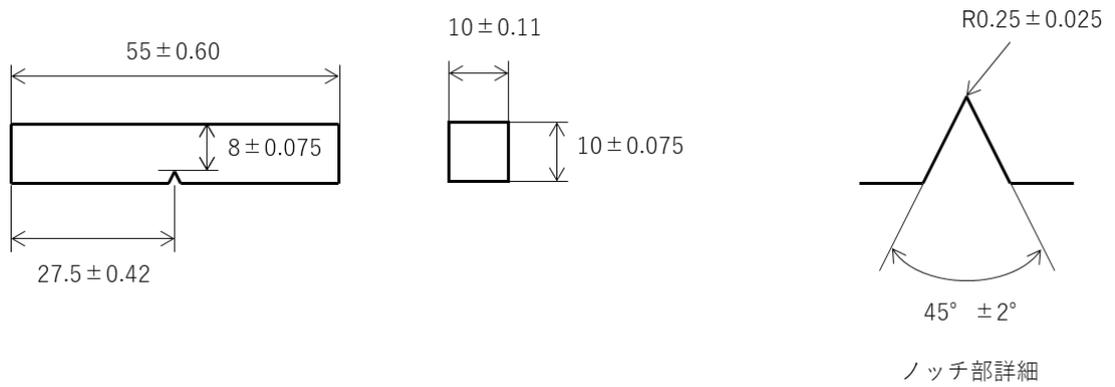


図 3.4.2(2)-1 シャルピー衝撃試験片の寸法 (単位: mm)

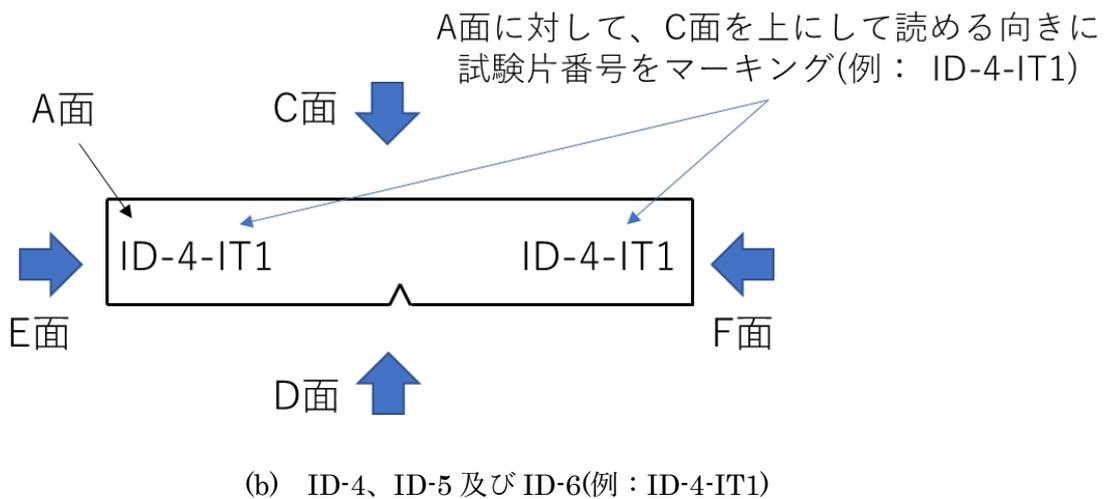
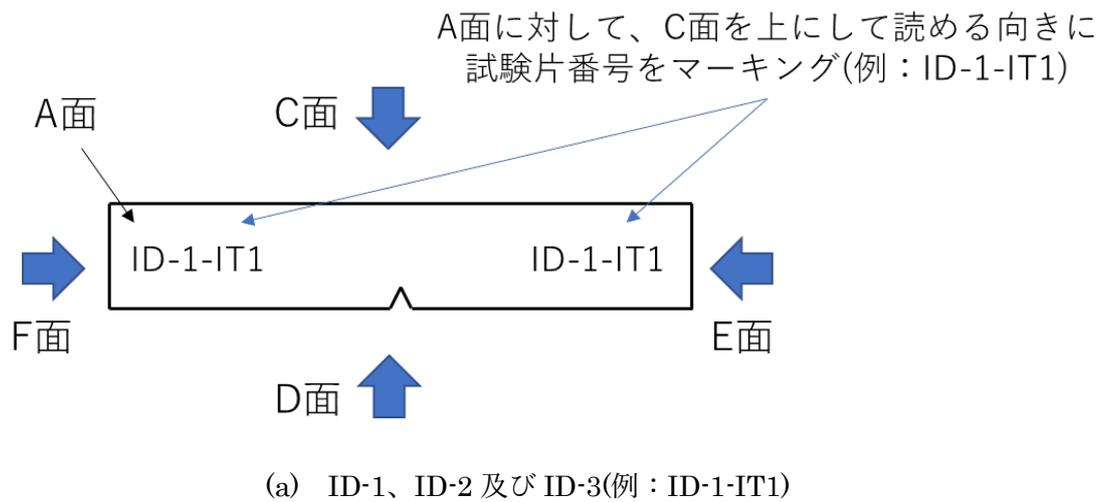


図 3.4.2(2)-2 シャルピー衝撃試験片マーキング要領及び試験体からの採取方位

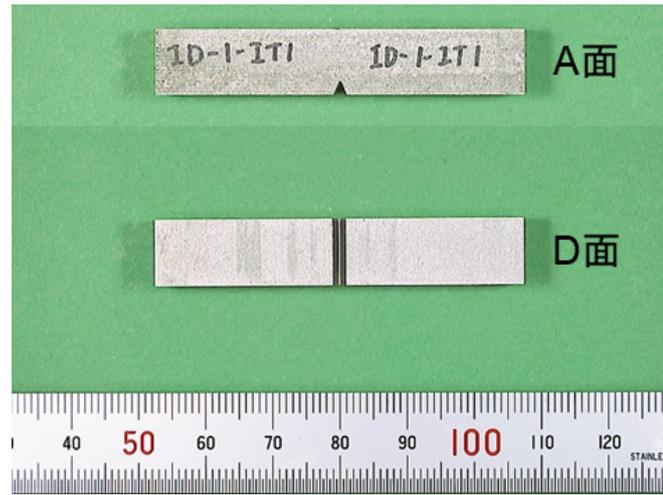
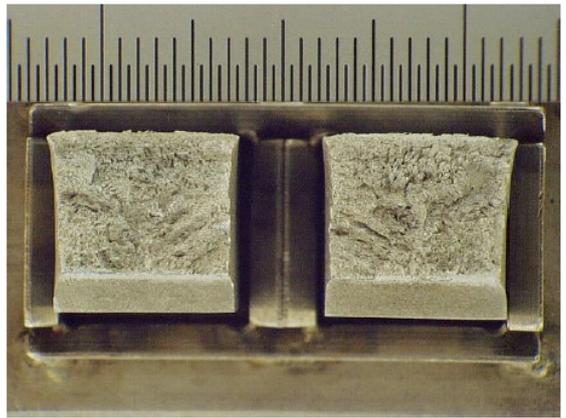
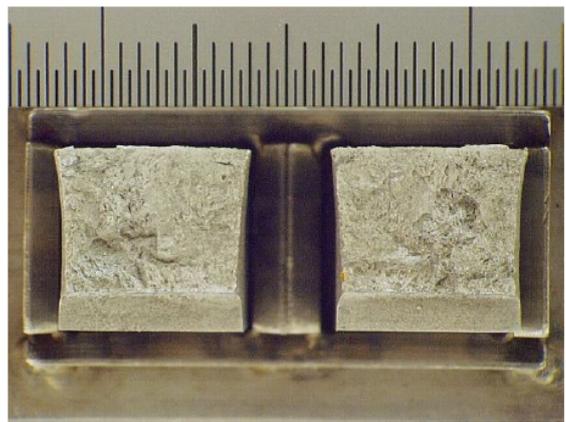


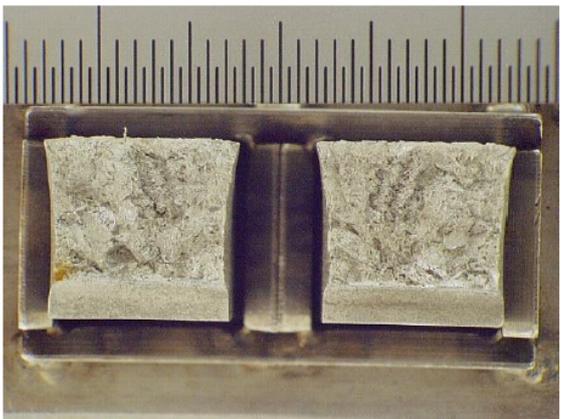
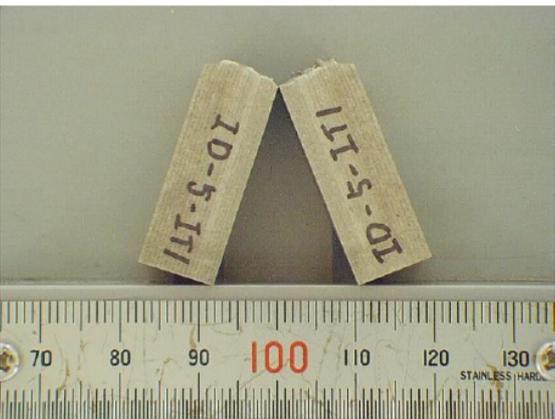
図 3.4.2(2)-3 シャルピー衝撃試験片外観写真(例：ID-1-IT1)



(a) ID-1-IT1

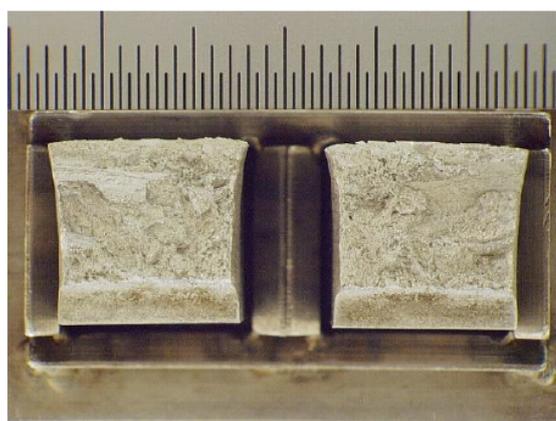


(b) ID-3-IT2

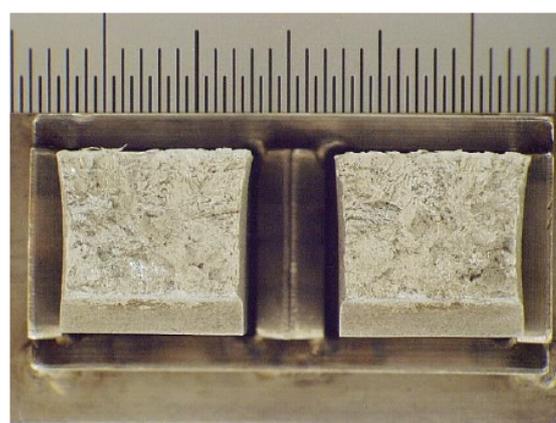


(c) ID-5-IT1

図 3.4.2(2)-4 試験後の試験片外観写真及び破面写真(試験温度-150℃)



(a) ID-2-IT1

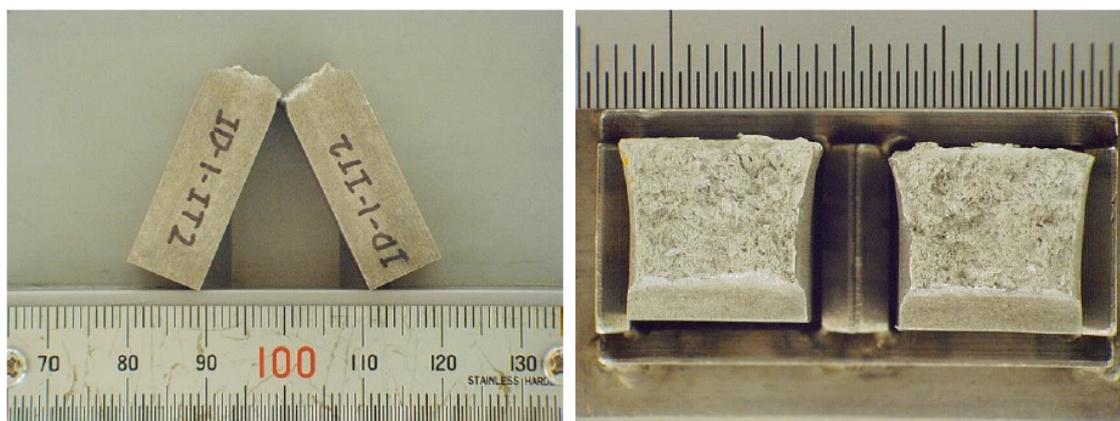


(b) ID-4-IT2

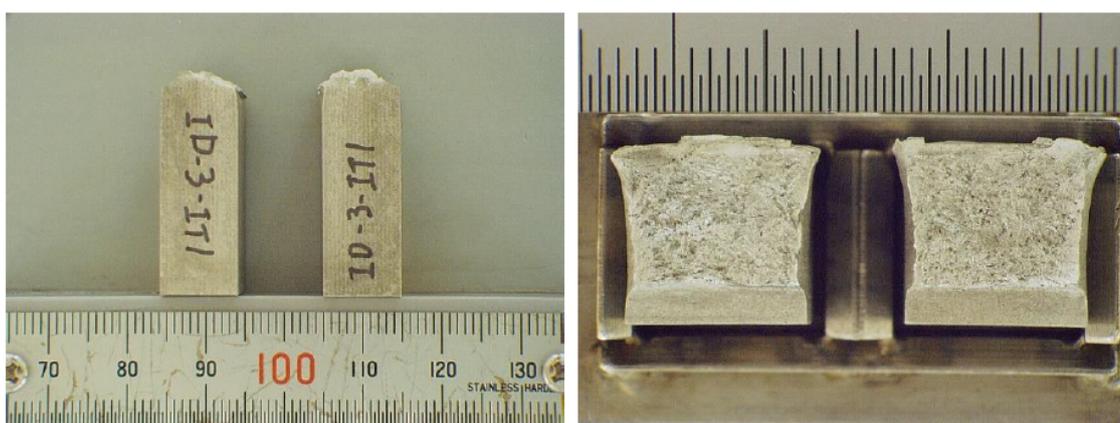


(c) ID-6-IT1

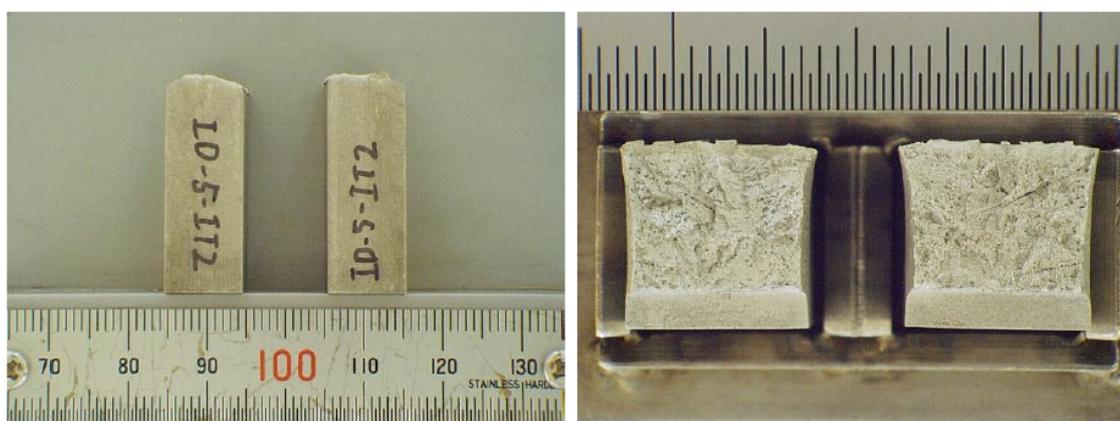
図 3.4.2(2)-5 試験後試験片外観写真及び破面写真(試験温度-120°C)



(a) ID-1-IT2

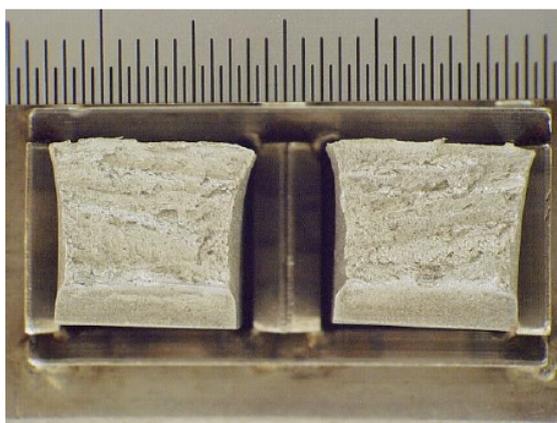


(b) ID-3-IT1

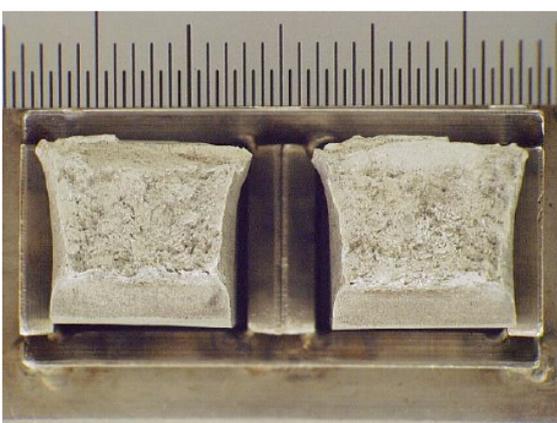


(c) ID-5-IT2

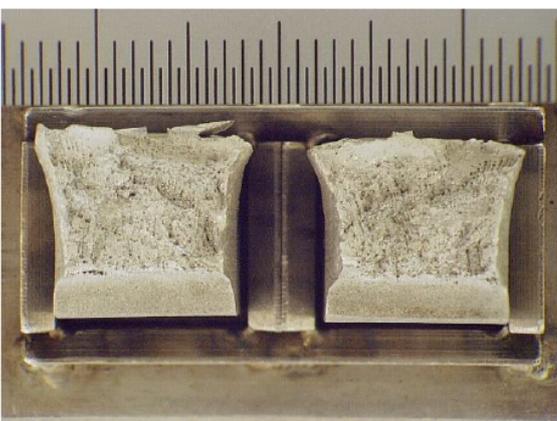
図 3.4.2(2)-6 試験後試験片外観写真及び破面写真(試験温度 $-80^{\circ}\text{C}$ )



(a) ID-2-IT2

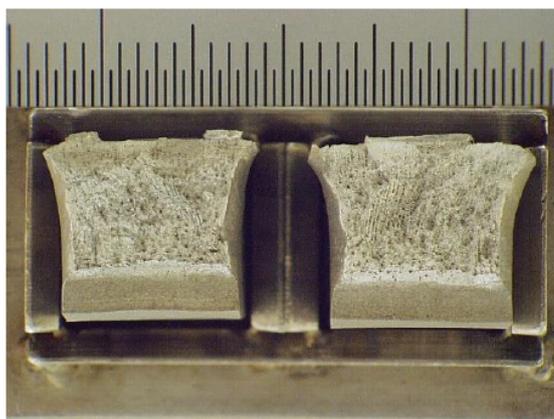


(b) ID-4-IT1

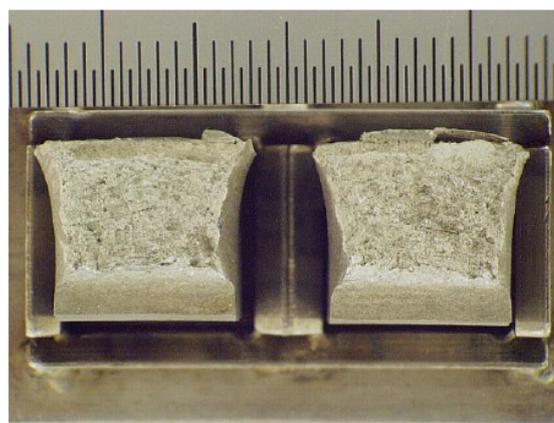


(c) ID-6-IT2

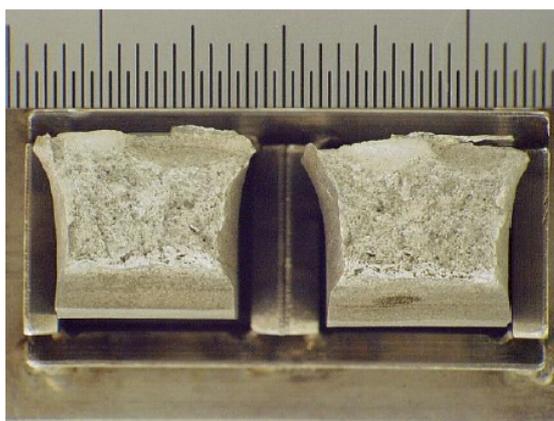
図 3.4.2(2)-7 試験後試験片外観写真及び破面写真(試験温度 $-40^{\circ}\text{C}$ )



(a) ID-1-IT3



(b) ID-3-IT4

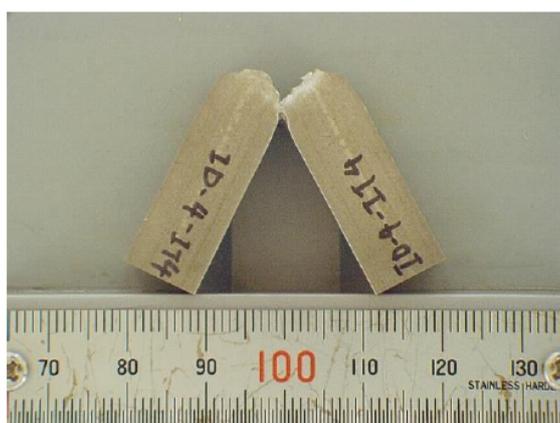


(c) ID-5-IT3

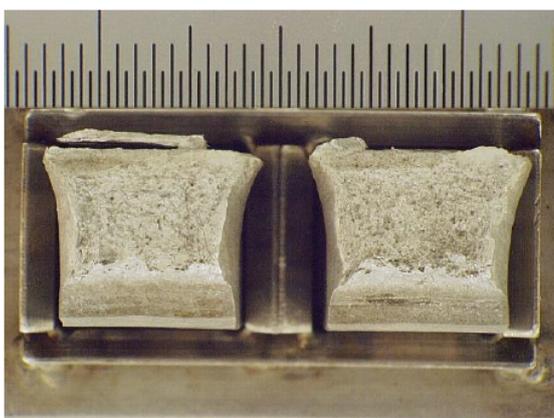
図 3.4.2(2)-8 試験後試験片外観写真及び破面写真(試験温度 0°C)



(a) ID-2-IT3



(b) ID-4-IT4



(c) ID-6-IT3

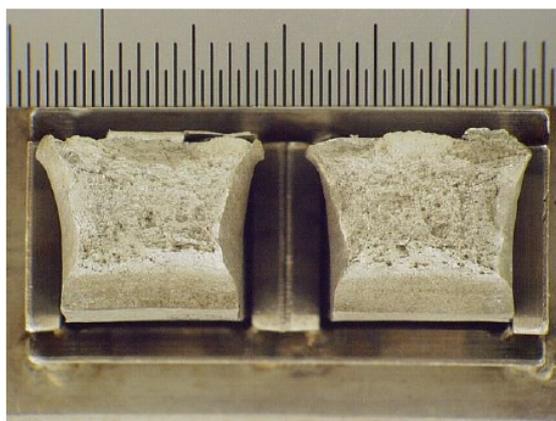
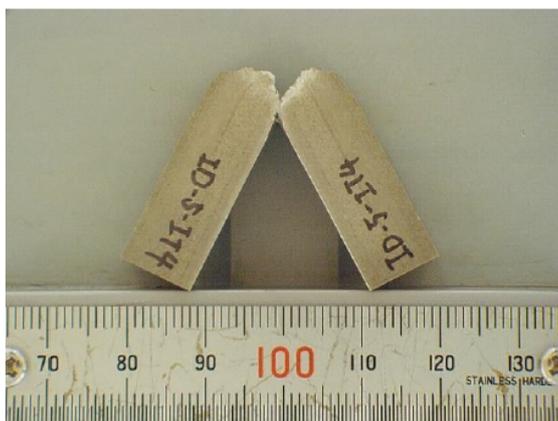
図 3.4.2(2)-9 試験後試験片外観写真及び破面写真(試験温度 30°C (室温))



(a) ID-1-IT4

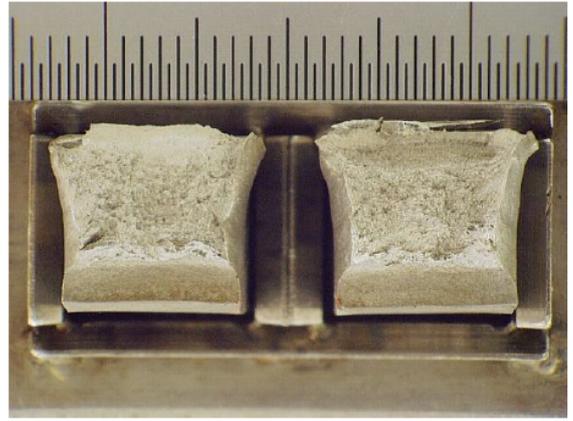
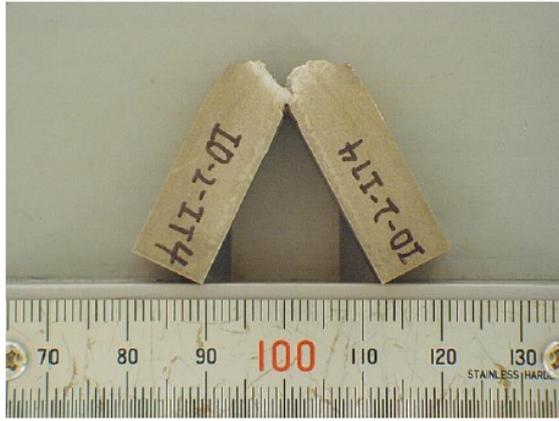


(b) ID-3-IT3

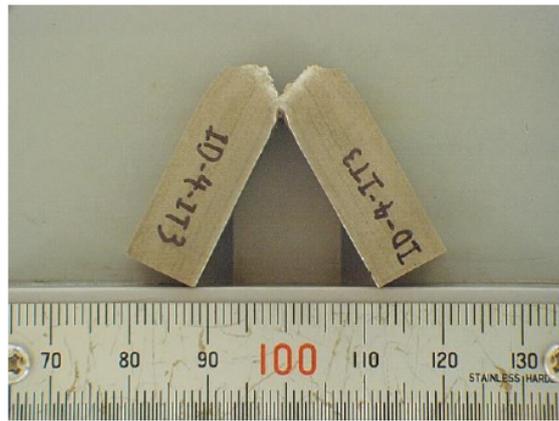


(c) ID-5-IT4

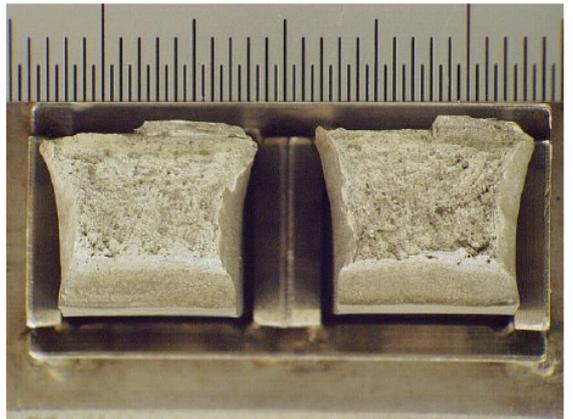
図 3.4.2(2)-10 試験後試験片外観写真及び破面写真(試験温度 80°C)



(a) ID-2-IT4



(b) ID-4-IT3



(c) ID-6-IT4

図 3.4.2(2)-11 試験後試験片外観写真及び破面写真(試験温度 120°C)

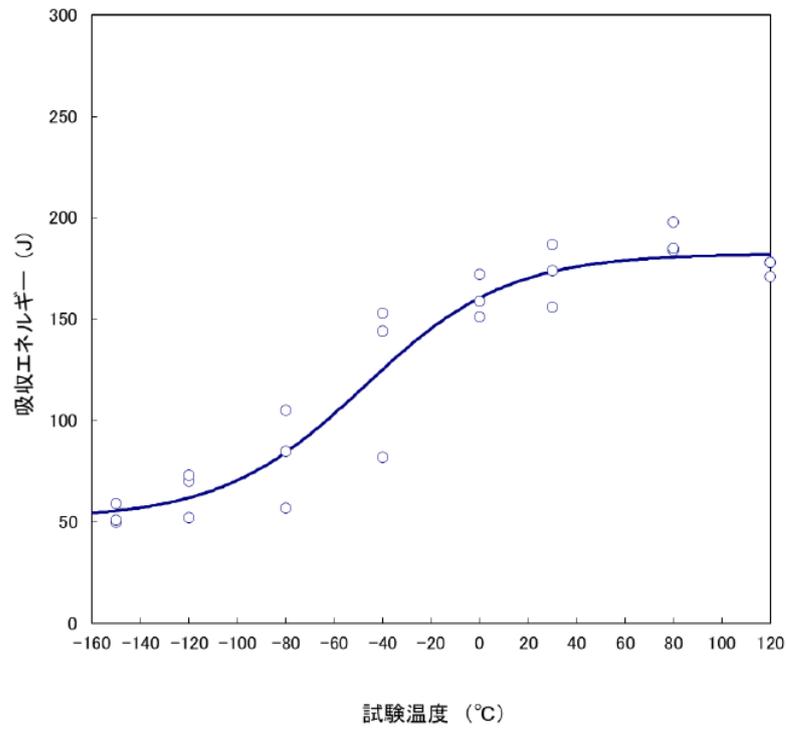


図 3.4.2(2)-12 吸収エネルギーと温度の関係

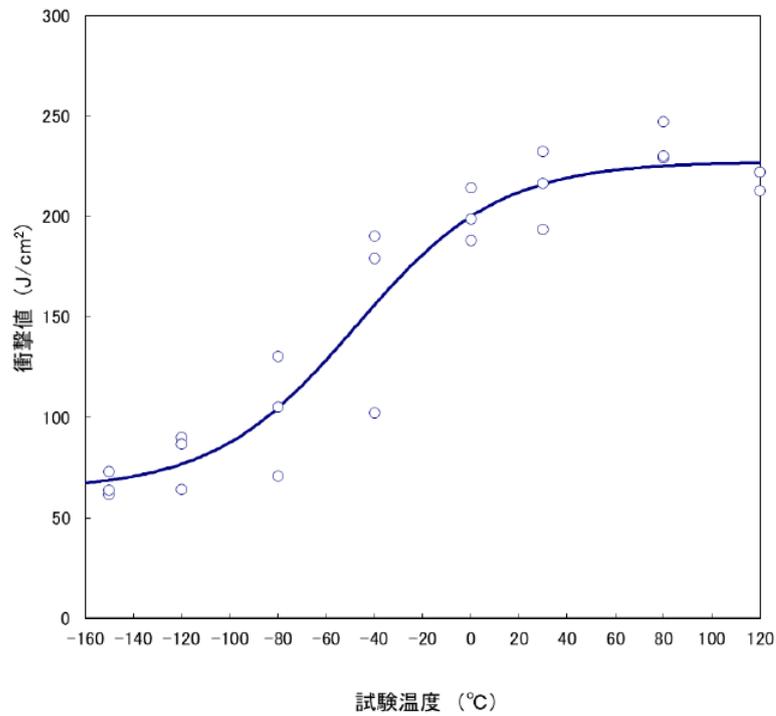


図 3.4.2(2)-13 衝撃値(J/cm²)と温度の関係

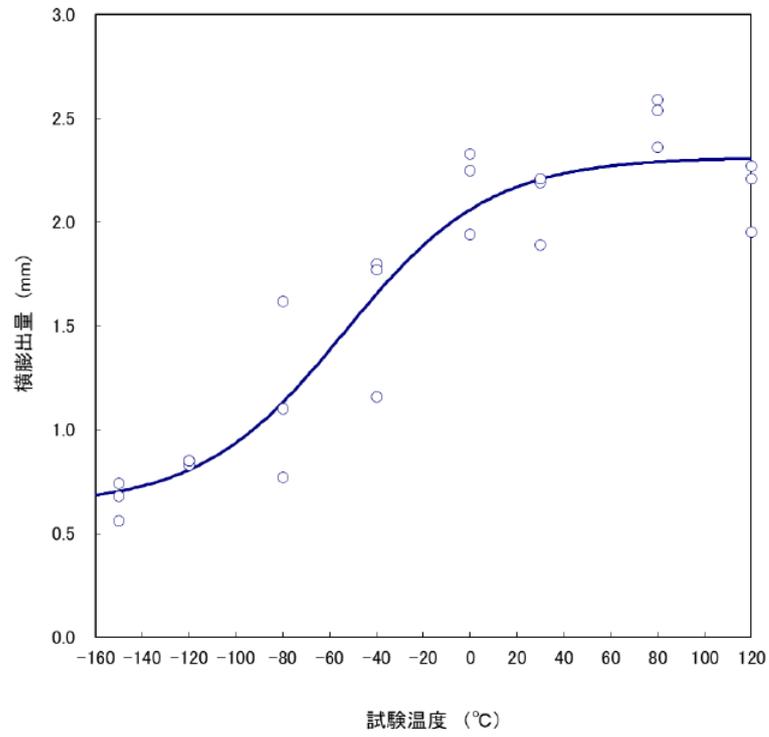


図 3.4.2(2)-14 横膨出量と温度の関係

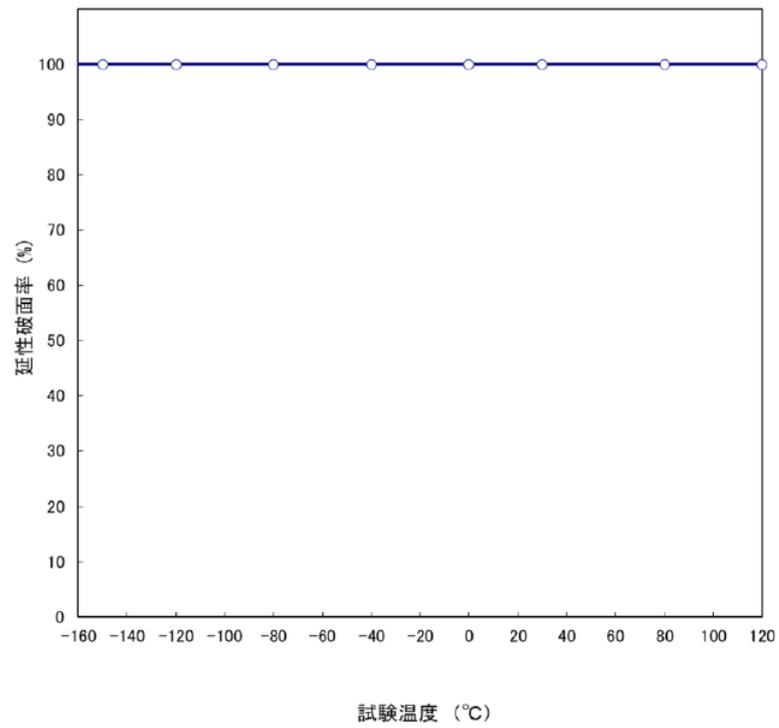


図 3.4.2(2)-15 延性破面率と温度の関係

### 3.4.3 ステンレス鋼製機器の熱時効脆化予測手法の保守性

本事業で取得した実機材（H-1 再循環ポンプ材）データについて、国内外のステンレス鋼製実機材のデータとの比較、評価式と本事業で取得したデータを比較により、BWR プラント材の熱時効挙動を既存の評価式で評価することの保守性を確認した。

#### (1) 化学成分

表 3.4.3-1 に H-1 再循環ポンプ材のフェライト量測定値と化学成分を公開文献<sup>[3.4.3-1,2,3]</sup>における値と比較して示す。

熱時効にはフェライト量の寄与が大きいのが、H-1 再循環ポンプ材は 20.2%であり、この値は公開文献に示される実機材の測定値の範疇に含まれる。また、フェライト量に影響を及ぼす化学成分に Cr、Ni、Nb、N がある。Nb 及び N については記載のない文献があり、Cr 及び Ni について比較した。

図 3.4.3-1 に公開文献の Cr 化学成分の頻度分布、図 3.4.3-2 に公開文献の Ni 化学成分の頻度分布を示す。図中には H-1 再循環ポンプ材の化学成分も示した。

公開文献に示される実機材の Cr が 18.9~20.96 wt%、Ni が 8.03~10.77 wt%であるのに対して、H-1 再循環ポンプ材は Cr が 19.68 wt%、Ni が 9.475 wt%となっており、これらも公開文献の範疇である。他の化学成分についても突出した値はなく、評価式との比較として妥当な材料であると考えられる。

#### (2) 弾塑性破壊靱性

H-1 再循環ポンプ材の弾塑性破壊靱性試験結果を H3T モデル評価値<sup>[3.4.3-4]</sup>と比較し、モデルの保守性を検討した<sup>[3.4.3-5]</sup>。

図 3.4.3-3 に J-R 曲線を比較した結果を示す。図中に赤線で示した H3T モデル評価値に対して H-1 再循環ポンプ材の J-R 曲線は高靱性側にある。図 3.4.3-4 に弾塑性破壊靱性値について、両者を比較して示す。図中に示した赤線は BWR 運転温度 280℃での弾塑性破壊靱性値の時効温度依存性を H3T モデルで評価したものである。

H-1 再循環ポンプ材の弾塑性破壊靱性値は、いずれも図中に赤線で示した H3T モデル評価値に対して高靱性側にある。これらの結果より、H-1 再循環ポンプ材は H3T モデル評価値に対して高い靱性を有していることが示された。

#### (3) H3T モデルの保守性

破壊靱性試験において、H-1 再循環ポンプ材は H3T モデル評価値と比較して高靱性を有していることが確認された。本来、H3T モデルは PWR 運転温度での熱時効を想定して構築されたものであり、BWR 実機材データと H3T モデルとの比較において、H3T モデルは BWR 運転温度における熱時効を過大に評価している可能性がある。ただし、それは実力値に対し弾塑性破壊靱性を安全側に見積もっているということであり、H3T モデルで BWR プラントの熱時効を評価することの保守性が確認できたと考える。

参考文献

- [3.4.3-1] O. K. Chopra. Estimation of fracture toughness of cast stainless steel during thermal aging in LWR system. NUREG/CR-4513, ANL-15/08, Rev. 2, 2016
- [3.4.3-2] 田中ら、「BWR環境におけるステンレス鋳鋼の熱時効評価」、日本保全学会第11回学術講演会要旨集（2014年7月）
- [3.4.3-3] Nogiwa et al., Influence of thermal aging on cast stainless steels used in JAEA's nuclear reactor Fugen, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 50, No. 9, p. 883-890, 2013.
- [3.4.3-4] S. Kawaguchi et.al. “PREDICTION METHOD OF TENSILE PROPERTIES AND FRACTURE TOUGHNESS OF THERMALLY AGED CAST DUPLEX STAINLESS STEEL PIPING”, Proceedings of PVP2005.
- [3.4.3-5] 原子力施設等防災対策等委託費(実機材料等を活用した経年劣化評価・検証(実機材料を活用した健全性評価に係る研究))令和5年度原子力規制庁委託成果報告書、2024年4月.

表 3.4.3-1 公開文献における実機材情報（化学成分（wt%）） [3.4.3-1, 2, 3]

| 温度  | 時効<br>時間 | 部位                                      | 鋼種   | フェライト<br>量(%)* | C     | Si   | Mn    | Cr    | Ni    | Mo   | Nb(+Ta) | N     | P     | S      |
|-----|----------|---|------|----------------|-------|------|-------|-------|-------|------|---------|-------|-------|--------|
| 280 | 144569   | H-1 再循環ポンプ材_分析値                         | CF8M | 20.2           | 0.05  | 0.93 | 0.66  | 19.68 | 9.475 | 2.26 | 0.01    | 0.02  | 0.039 | 0.0065 |
| 264 | 113900   | Shippingport cold leg check valve       | CF8  | 10.9           | 0.056 | 1.45 | 1.1   | 20.26 | 8.84  | 0.01 | —       | 0.041 | 0.018 | 0.009  |
| 264 | 113900   | Shippingport cold leg check valve       | CF8  | 10.0           | 0.058 | 1.43 | 1.09  | 20.22 | 8.72  | 0.01 | —       | 0.041 | 0.018 | 0.009  |
| 264 | 113900   | Shippingport cold leg check valve       | CF8  | 3.2            | 0.052 | 1.36 | 1.07  | 19.12 | 8.85  | 0.02 | —       | 0.053 | 0.018 | 0.011  |
| 281 | 113900   | Shippingport Hot leg main shutoff valve | CF8  | 9.5            | 0.052 | 0.22 | 0.72  | 20.74 | 10.5  | 0.24 | —       | 0.049 | 0.039 | 0.013  |
| 281 | 113900   | Shippingport Hot leg main shutoff valve | CF8  | 1.9            | 0.042 | 0.51 | 0.72  | 19.74 | 10.77 | 0.19 | —       | 0.073 | 0.043 | 0.017  |
| 264 | 113900   | Shippingport cold leg pump volute       | CF8  | 13.0           | 0.108 | 0.89 | 1.11  | 19.83 | 9.3   | 0.38 | —       | 0.027 | 0.032 | 0.008  |
| 284 | 68000    | KRB pump cover plate                    | CF8  | 34.0           | 0.062 | 1.17 | 0.31  | 21.99 | 8.03  | 0.17 | —       | 0.038 | —     | —      |
| 325 | 78650    | Ringhals reactor elbow hot leg          | CF8M | 20.1           | 0.037 | 1.03 | 0.77  | 20    | 10.6  | 2.09 | —       | 0.044 | 0.022 | 0.008  |
| 291 | 79760    | Ringhals reactor elbow Xover leg        | CF8M | 19.8           | 0.039 | 1.11 | 0.82  | 19.6  | 10.5  | 2.08 | —       | 0.037 | 0.02  | 0.012  |
| 277 | 138313   | プラント A 弁体                               | CF8M | 16.1           | 0.06  | 0.9  | 0.96  | 19.53 | 10.41 | 2.28 | —       | —     | 0.03  | 0.011  |
| 277 | 228696   | プラント B 弁体                               | CF8M | 15.6           | 0.04  | 0.82 | 0.95  | 19.34 | 10.33 | 2.27 | —       | —     | 0.015 | 0.01   |
| 276 | 157372   | プラント C 弁箱                               | CF8  | 13.9           | 0.05  | 1.18 | 0.97  | 19.81 | 8.97  | 0.39 | 0.01    | 0.03  | 0.037 | 0.008  |
| 276 | 235930   | プラント D ポンプケーシングカバー                      | CF8M | 22.1           | 0.07  | 1.06 | 0.716 | 20.96 | 9.42  | 2.51 | 0.009   | 0.06  | 0.037 | 0.01   |
| 275 | 138000   | ふげん再循環ポンプケーシング                          | CF8  | 12.1           | 0.05  | 0.81 | 0.94  | 19.69 | 8.4   | 0    | —       | —     | 0.027 | 0.008  |
| 275 | 138000   | ふげん弁体                                   | CF8  | 4.2            | 0.07  | 1.43 | 1.82  | 18.9  | 9.88  | 0    | —       | —     | 0.023 | 0.015  |

※ : フェライトスコープ測定値

文献[3.4.3-1]

文献[3.4.3-2]

文献[3.4.3-3]

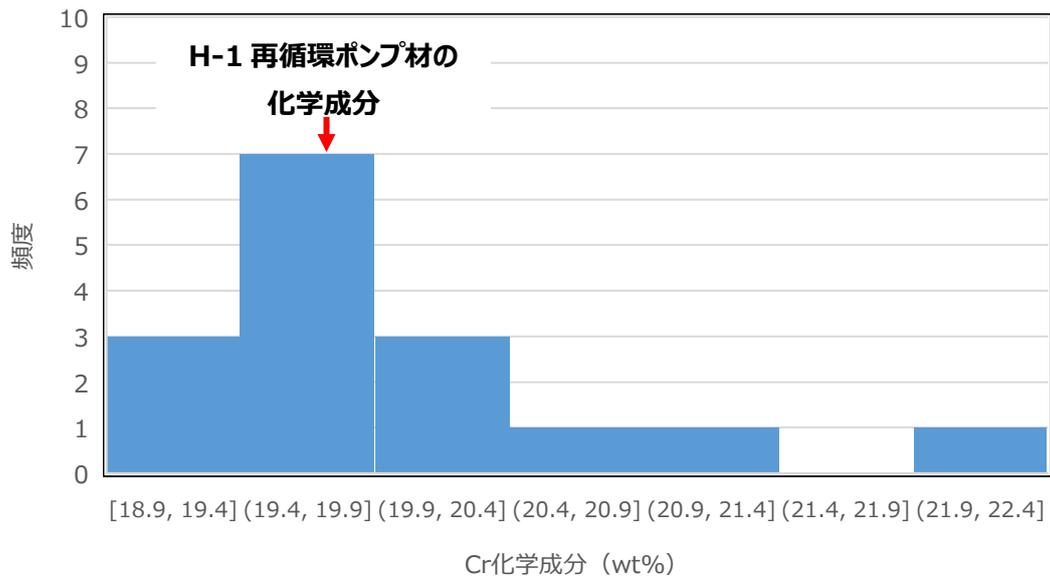


図 3.4.3-1 公開文献<sup>[3.4.3-1, 2, 3]</sup>の Cr 化学成分の頻度分布

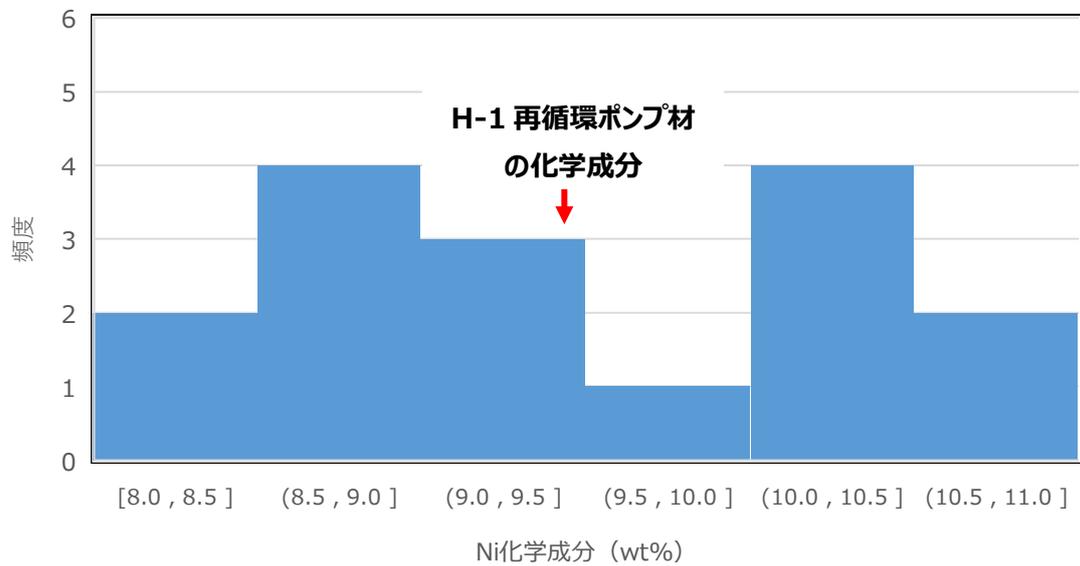


図 3.4.3-2 公開文献<sup>[3.4.3-1, 2, 3]</sup>の Ni 化学成分の頻度分布

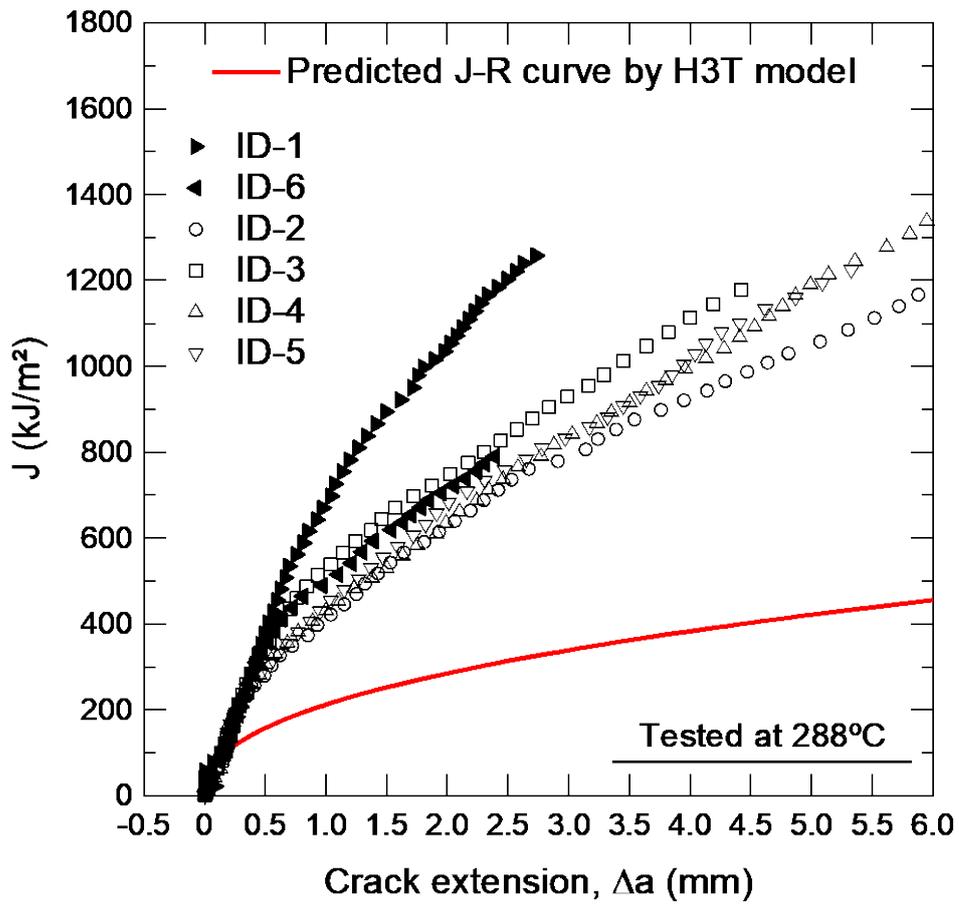


図 3.4.3-3 H3T モデル評価値<sup>[3.4.3-4]</sup>と H-1 再循環ポンプ材の  $J$ - $R$  曲線

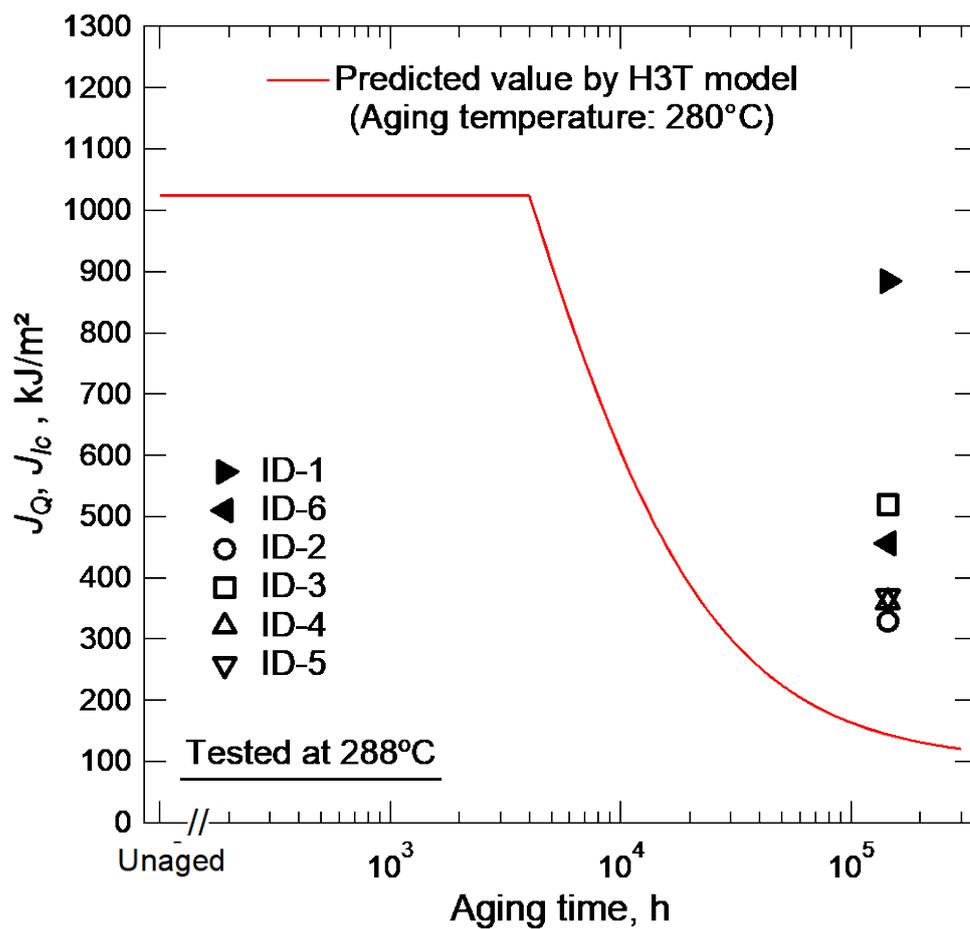


図 3.4.3-4 H3T モデル評価値<sup>[3.4.3-4]</sup>と H-1 再循環ポンプ材の破壊靱性値

#### 3.4.4 輸送の実施

令和4年度に電力中央研究所横須賀地区に輸送した試験体を、日本核燃料開発に輸送した。また、令和6年度の試験マトリックスに基づく全試験を実施後、全数を中部電力株式会社浜岡原子力発電所に輸送し、発電所内の指定場所に返却した。

##### (1) 電力中央研究所横須賀地区から日本核燃料開発への輸送

###### 1) 輸送計画

電力中央研究所横須賀地区から日本核燃料開発（以下、「NFD」という）への観察用試験片の輸送について輸送計画書を作成した。組織観察・分析のために令和4年度にNFDから電力中央研究所横須賀地区に輸送して組織観察及びマイクロ分析に供した試験片12個を、ステンレス鋼製の輸送容器に収納してL型輸送物として輸送する。

電力中央研究所にて観察用試験片を輸送容器に収納し、輸送車両に輸送容器を搭載して、NFDまで陸路で輸送する計画とした。

###### 2) 輸送の実施

前項の計画通り、観察用試験片を電力中央研究所横須賀地区からNFDに陸路にてL型輸送物として輸送した。輸送日の実績を以下に示す。

輸送容器搬出（電力中央研究所横須賀地区）：2024年11月6日

輸送容器搬入（日本核燃料開発）：2024年11月6日

NFDにて観察用試験片を収納した輸送容器を輸送車両に固定して容器搬出を行った。輸送車両はほぼ予定通りの時刻に電力中央研究所横須賀地区を出発して、NFDに到着した。

###### 3) 輸送物の確認

NFDに到着した後に輸送容器を開封して、計画通り試験片が12個収納されていることを確認した。搬入された試験片は後述の浜岡原子力発電所への輸送までNFDで保管した。

##### (2) 日本核燃料開発から浜岡原子力発電所への輸送

###### 1) 輸送計画

NFDから浜岡原子力発電所への試験体の輸送について輸送計画書を作成した。令和3年度に浜岡原子力発電所からNFDに輸送し、本事業で実施した材料試験に供した試験体8体をステンレス鋼製の小分け容器14体に収納した後に、小分け容器を輸送容器に収納し、L型輸送物として輸送する。

輸送する試験体は材料試験のために切断・加工されているが、端材や切粉を含めて可能な範囲で全てを回収して輸送する。また、2024年11月6日に電力中央研究所からNFDに輸送した試験片12体も輸送する試験体に含める。

###### 2) 輸送物の作製

令和3年度に浜岡原子力発電所からNFDに輸送した8体の試験体はID-1～ID-8の試

験体番号を付して管理した。そのうち ID-1～ID-6 は材料試験に供するために令和 4 年度から令和 6 年度にかけて試験片に加工した。試験体 ID-1～ ID-6 については加工した試験片、残材及び、試験片加工によって発生した切粉を切断図に基づきリスト化し、輸送容器に全数が含まれることを確認した。ID-7 及び ID-8 は予備試験体として未加工のまま保管されていた。また、切粉は試験体毎の分類はせず、まとめて 4 つの袋に分けて保管した。これらに対して以下の手順により、ID-1～ID-8 の全量を含むように輸送物を作製した。

#### ① 試験体のリスト化

各試験体から加工した試験片及び加工により生じた残材と切粉の全数を切断図及び保管している試験片の外観に基づきリスト化した。その結果を表 3.4.4-1 から表 3.4.4-7 に示す。表 3.4.4-7 に示すように、ID-7 及び ID-8 は未加工のため試験体番号のまま、切粉は ID ごとの分類はせず、一括して小分け容器で管理した。表中に試験片及び残材の管理番号ごとに収納する小分け容器の識別番号を示した。

#### ② 輸送物の作製要領の検討

使用した輸送容器の外観を図 3.4.4-1 に示す。浜岡原子力発電所への輸送にあたり、すべての試験片、残材、切粉および未使用試験体（以降、これらをまとめて返却材という）について、表面汚染、表面線量率を測定した。

また、浜岡原子力発電所では複数のステンレス製の小分け容器の形で保管するため、返却材を収納した後の小分け容器についても表面汚染、表面線量率を測定し、小分け容器を輸送容器に収納することとした。小分け容器は 21cm 角及び 14cm 角の二種類があり、いずれもステンレス鋼製である。小分け容器の外観を図 3.4.4-2 に示す。

返却材の収納にあたって、21cm 角の容器 6 個、15cm 角 8 個の計 14 個の小分け容器を用いた。小分け容器の一覧を表 3.4.4-8 に示す。

各小分け容器の内容物を表 3.4.4-9～表 3.4.4-22 に示す。小分け容器への収納にあたり、返却材の取り違えなどが生じないようにチェックシートを用いて複数人による確認を行った。また、表面汚染、表面線量率測定後に再汚染しないよう、養生等の汚染防止を行った。輸送中、輸送容器内部での小分け容器の転倒を防止するため、小分け容器は緩衝材・すのことともに収納した。これらの運用は要領として取り決めた。

#### ③ 放射線測定

表面汚染および表面線量率の測定は、サーベイメータおよび線量率計測器を用いた。放射線測定の作業状況を図 3.4.4-3 に示す。表面線量測定は物品に検出器を直接近づけて計数率を測定する直接法にて行った。試験片は直接測定した後、試験片をチャック付きポロ袋であるユニパックに封入し、ユニパック表面を再度測定した。また、切粉、粉状の ID-2 試験片(ID-2-③-CA1、ID-2-③-CA2)および ID-5 試験片(ID-5-③-CA1、ID-5-③-CA2)は、収納しているユニパック表面を測定した。線量率測定は同様に直接法で実施した。

測定後の汚染を防止するために、測定後の返却材を未使用のビニールシートまたはユニパック等で養生して小分け容器への収納までの間保管した。

#### ④ 小分け容器への収納

表 3.4.4-9 から表 3.4.4-22 に示すように、返却材を各小分け容器に収納した。

試験片および切粉はユニパック 1 袋ごと、残材および未使用試験体は 1 個ごとに小分け容器と返材の写真を撮影し、小分け容器に収納した。

返却材収納後、小分け容器の蓋を閉じ、小分け容器の表面汚染測定、表面線量率測定および重量測定を行った。汚染測定は、小分け容器表面に遊離性の汚染がないことの確認を目的に、ろ紙で小分け容器表面をふき取り、ろ紙の計数率を測定するスマヤ法にて行い、小分け容器表面に汚染が無いこと確認した。線量率測定は検出器を小分け容器に近づける直接法にて測定した。

測定後、小分け容器と蓋に対して 2 箇所封印用紙を貼り付け、吊上げのため綿紐で小分け容器を縛った後に小分け容器外観を写真撮影した。収納後は返却材収納後に小分け容器が開封されていないことを確認できるように容器の蓋に対して封印を施した。返却材を収納した小分け容器の汚染を防止するために、小分け容器を未使用のビニールシートで養生して輸送容器収納までの間保管した。

#### ⑤ 輸送容器への収納

返却材を収納した小分け容器 14 個を緩衝材とともに輸送容器に収納した。輸送容器への収納状況を図 3.4.4-4 に示す。

全ての小分け容器を収納した後、輸送容器の蓋を閉じ、輸送容器の表面汚染・線量率を測定した。表面汚染測定はスマヤ法で実施し、輸送容器表面に汚染が無いことを確認した。線量率測定は輸送容器表面および輸送容器表面から 1m の位置で測定し、輸送に係る法定基準値以下であることを確認した。

### 3) 輸送の実施

積載前に輸送容器の線量率測定を実施し型輸送物の要件を満足することを確認した後に、輸送容器を輸送車両に積載、固定し、前項の計画通り、返却材一式を NFD から浜岡原子力発電所に陸路にて L 型輸送物として輸送した。輸送容器の搬出状況を図 3.4.4-5 に示す。また、輸送日の実績を以下に示す。

輸送容器搬出 (NFD) : 2025 年 3 月 3 日

輸送容器搬入 (浜岡原子力発電所) : 2025 年 3 月 4 日

NFD にて観察用試験片を収納した輸送容器を輸送車両に固定して容器搬出を行った。輸送車両は予定通りの時刻に NFD を出発し、浜岡原子力発電所に到着した。

### 4) 浜岡原子力発電所への返却

輸送車両が浜岡原子力発電所に到着後、輸送容器を輸送車両から搬出した。輸送容器から小分け容器を取出し、小分け容器 No.1~No.14 があること、小分け容器の封印が開封されていないことを確認した。

発電所の受け入れ検査後に小分け容器 14 個を発電所内の中部電力指定の位置に移動して設置し、試験体の浜岡原子力発電所への返却を完了した。

表 3.4.4-1 試験片及び残材リスト (ID-1)

| 分類    | 管理番号     | 個数            | 小分け<br>容器 | 分類 | 管理番号     | 個数 | 小分け<br>容器 |
|-------|----------|---------------|-----------|----|----------|----|-----------|
| 試験片   | ID-1-FR1 | 2             | No.7      | 残材 | 1-②-2    | 1  | No.7      |
|       | ID-1-IT1 | 2             |           |    | 1-②-3    | 1  |           |
|       | ID-1-IT2 | 2             |           |    | 1-②-4    | 1  |           |
|       | ID-1-IT3 | 2             |           |    | 1-②-5    | 1  |           |
|       | ID-1-IT4 | 2             |           |    | 1-②-6    | 1  |           |
|       | ID-1-M1  | 1             |           |    | 1-③      | 1  |           |
|       | ID-1-M2  | 1             |           |    | 1-④      | 1  |           |
|       | ID-1-TT1 | 2             |           |    | 1-⑤-1-1  | 1  |           |
| 残材    | 1-①-1    | 1             |           |    | 1-⑤-1-2  | 1  |           |
|       | 1-①-2-1  | 1             |           |    | 1-⑤-1-3  | 1  |           |
|       | 1-①-2-2  | 1             |           |    | 1-⑤-1-4  | 1  |           |
|       | 1-①-2-3  | 1             |           |    | 1-⑤-1-5  | 1  |           |
|       | 1-①-2-4  | 1             |           |    | 1-⑤-1-6  | 1  |           |
|       | 1-①-2-5  | 1             |           |    | 1-⑤-1-7  | 1  |           |
|       | 1-①-2-6  | 1             |           |    | 1-⑤-1-8  | 1  |           |
|       | 1-①-2-7  | 1             |           |    | 1-⑤-1-9  | 1  |           |
|       | 1-①-2-8  | 1             |           |    | 1-⑤-1-10 | 1  |           |
|       | 1-①-2-9  | 1             |           |    | 1-⑤-2    | 1  | No.1      |
|       | 1-①-2-10 | 1             |           |    | 1-⑥      | 1  | No.7      |
|       | 1-①-2-11 | 1             |           |    | 1-⑦      | 1  |           |
|       | 1-①-3    | 1             |           |    | 1-⑧      | 1  |           |
|       | 1-①-4    | 1             |           |    | 1-⑨      | 1  |           |
| 1-①-5 | 1        | 1-⑩           | 1         |    |          |    |           |
| 1-①-6 | 1        | ID-1-FR1-ST-1 | 1         |    |          |    |           |
| 1-②-1 | 1        | ID-1-FR1-ST-2 | 1         |    |          |    |           |

表 3.4.4-2 試験片及び残材リスト (ID-2)

| 分類  | 管理番号       | 個数 | 小分け<br>容器 | 分類            | 管理番号    | 個数   | 小分け<br>容器 |
|-----|------------|----|-----------|---------------|---------|------|-----------|
| 試験片 | ID-2-FR1   | 2  | No.8      | 残材            | 2-③     | 1    | No.8      |
|     | ID-2-FR2   | 2  |           |               | 2-④     | 1    |           |
|     | ID-2-IT1   | 2  |           |               | 2-⑤-1-1 | 1    |           |
|     | ID-2-IT2   | 2  |           |               | 2-⑤-1-2 | 1    |           |
|     | ID-2-IT3   | 2  |           |               | 2-⑤-1-3 | 1    |           |
|     | ID-2-IT4   | 2  |           |               | 2-⑤-1-4 | 1    |           |
|     | ID-2-M1    | 1  |           |               | 2-⑤-1-5 | 1    |           |
|     | ID-2-M2    | 1  |           |               | 2-⑤-1-6 | 1    |           |
|     | ID-2-TT1   | 2  |           |               | 2-⑤-1-7 | 1    |           |
|     | ID-2-③-CA1 | 1  |           |               | 2-⑤-1-8 | 1    |           |
|     | ID-2-③-CA2 | 1  | 2-⑤-1-9   |               | 1       |      |           |
| 残材  | 2-①-1      | 1  | No.8      | 2-⑤-1-10      | 1       | No.1 |           |
|     | 2-①-2-1    | 1  |           | 2-⑤-2         | 1       |      |           |
|     | 2-①-2-2    | 1  |           | 2-⑥           | 1       | No.8 |           |
|     | 2-①-2-3    | 1  |           | 2-⑦           | 1       |      |           |
|     | 2-①-2-4    | 1  |           | 2-⑧           | 1       |      |           |
|     | 2-①-2-5    | 1  |           | 2-⑨           | 1       |      |           |
|     | 2-①-2-6    | 1  |           | 2-⑩-1         | 1       |      |           |
|     | 2-①-2-7    | 1  |           | 2-⑩-2         | 1       |      |           |
|     | 2-①-2-8    | 1  |           | 2-⑩-3         | 1       |      |           |
|     | 2-①-2-9    | 1  |           | 2-⑩-4         | 1       |      |           |
|     | 2-①-2-10   | 1  |           | 2-⑩-5         | 1       |      |           |
|     | 2-①-2-11   | 1  |           | 2-⑩-6         | 1       |      |           |
|     | 2-①-3      | 1  |           | ID-2-FR1-ST-1 | 1       |      |           |
|     | 2-①-4      | 1  |           | ID-2-FR1-ST-2 | 1       |      |           |
|     | 2-①-5      | 1  |           | ID-2-FR2-ST-1 | 1       |      |           |
|     | 2-①-6      | 1  |           | ID-2-FR2-ST-2 | 1       |      |           |

※2-②は試験片製作により切粉となったため欠番

表 3.4.4-3 試験片及び残材リスト (ID-3)

| 分類  | 管理番号     | 個数 | 小分け<br>容器     | 分類 | 管理番号     | 個数 | 小分け<br>容器 |
|-----|----------|----|---------------|----|----------|----|-----------|
| 試験片 | ID-3-FR1 | 1  | No.9          | 残材 | 3-④      | 1  | No.9      |
|     | ID-3-FR2 | 2  |               |    | 3-⑤-1-1  | 1  |           |
|     | ID-3-IT1 | 2  |               |    | 3-⑤-1-2  | 1  |           |
|     | ID-3-IT2 | 2  |               |    | 3-⑤-1-3  | 1  |           |
|     | ID-3-IT3 | 2  |               |    | 3-⑤-1-4  | 1  |           |
|     | ID-3-IT4 | 2  |               |    | 3-⑤-1-5  | 1  |           |
|     | ID-3-M1  | 1  |               |    | 3-⑤-1-6  | 1  |           |
|     | ID-3-M2  | 1  |               |    | 3-⑤-1-7  | 1  |           |
|     | ID-3-TT1 | 2  |               |    | 3-⑤-1-8  | 1  |           |
| 残材  | 3-①-1    | 1  |               |    | 3-⑤-1-9  | 1  |           |
|     | 3-①-2-1  | 1  |               |    | 3-⑤-1-10 | 1  |           |
|     | 3-①-2-2  | 1  |               |    | 3-⑤-2    | 1  | No.2      |
|     | 3-①-2-3  | 1  |               |    | 3-⑥      | 1  | No.9      |
|     | 3-①-2-4  | 1  |               |    | 3-⑦      | 1  |           |
|     | 3-①-2-5  | 1  |               |    | 3-⑧      | 1  |           |
|     | 3-①-2-6  | 1  |               |    | 3-⑨      | 1  |           |
|     | 3-①-2-7  | 1  |               |    | 3-⑩-1    | 1  |           |
|     | 3-①-2-8  | 1  |               |    | 3-⑩-2    | 1  |           |
|     | 3-①-2-9  | 1  |               |    | 3-⑩-3    | 1  |           |
|     | 3-①-2-10 | 1  |               |    | 3-⑩-4    | 1  |           |
|     | 3-①-2-11 | 1  |               |    | 3-⑩-5    | 1  |           |
|     | 3-①-3    | 1  |               |    | 3-⑩-6    | 1  |           |
|     | 3-①-4    | 1  |               |    | 3-⑪      | 1  |           |
|     | 3-①-5    | 1  | ID-3-FR2-ST-1 | 1  |          |    |           |
|     | 3-①-6    | 1  | ID-3-FR2-ST-2 | 1  |          |    |           |
|     | 3-③      | 1  |               |    |          |    |           |

※3-②は試験片製作により切粉となったため欠番

表 3.4.4-4 試験片及び残材リスト (ID-4)

| 分類    | 管理番号     | 個数            | 小分け<br>容器 | 分類 | 管理番号          | 個数 | 小分け<br>容器 |
|-------|----------|---------------|-----------|----|---------------|----|-----------|
| 試験片   | ID-4-FR1 | 2             | No.10     | 残材 | 4-④           | 1  | No.10     |
|       | ID-4-FR2 | 2             |           |    | 4-⑤-1-1       | 1  |           |
|       | ID-4-IT1 | 2             |           |    | 4-⑤-1-2       | 1  |           |
|       | ID-4-IT2 | 2             |           |    | 4-⑤-1-3       | 1  |           |
|       | ID-4-IT3 | 2             |           |    | 4-⑤-1-4       | 1  |           |
|       | ID-4-IT4 | 2             |           |    | 4-⑤-1-5       | 1  |           |
|       | ID-4-M1  | 1             |           |    | 4-⑤-1-6       | 1  |           |
|       | ID-4-M2  | 1             |           |    | 4-⑤-1-7       | 1  |           |
|       | ID-4-TT1 | 2             |           |    | 4-⑤-1-8       | 1  |           |
| 残材    | 4-①-1    | 1             |           |    | 4-⑤-1-9       | 1  |           |
|       | 4-①-2-1  | 1             |           |    | 4-⑤-1-10      | 1  |           |
|       | 4-①-2-2  | 1             |           |    | 4-⑤-2         | 1  | No.2      |
|       | 4-①-2-3  | 1             |           |    | 4-⑥           | 1  | No.10     |
|       | 4-①-2-4  | 1             |           |    | 4-⑦           | 1  |           |
|       | 4-①-2-5  | 1             |           |    | 4-⑧           | 1  |           |
|       | 4-①-2-6  | 1             |           |    | 4-⑨           | 1  |           |
|       | 4-①-2-7  | 1             |           |    | 4-⑩-1         | 1  |           |
|       | 4-①-2-8  | 1             |           |    | 4-⑩-2         | 1  |           |
|       | 4-①-2-9  | 1             |           |    | 4-⑩-3         | 1  |           |
|       | 4-①-2-10 | 1             |           |    | 4-⑩-4         | 1  |           |
|       | 4-①-2-11 | 1             |           |    | 4-⑩-5         | 1  |           |
|       | 4-①-3    | 1             |           |    | 4-⑩-6         | 1  |           |
|       | 4-①-4    | 1             |           |    | ID-4-FR1-ST-1 | 1  |           |
|       | 4-①-5    | 1             |           |    | ID-4-FR1-ST-2 | 1  |           |
| 4-①-6 | 1        | ID-4-FR2-ST-1 | 1         |    |               |    |           |
| 4-③   | 1        | ID-4-FR2-ST-2 | 1         |    |               |    |           |

※4-②は試験片製作により切粉となったため欠番

表 3.4.4-5 試験片及び残材リスト (ID-5)

| 分類  | 管理番号       | 個数 | 小分け<br>容器 | 分類            | 管理番号    | 個数    | 小分け<br>容器 |
|-----|------------|----|-----------|---------------|---------|-------|-----------|
| 試験片 | ID-5-FR1   | 2  | No.11     | 残材            | 5-③     | 1     | No.11     |
|     | ID-5-FR2   | 2  |           |               | 5-④     | 1     |           |
|     | ID-5-IT1   | 2  |           |               | 5-⑤-1-1 | 1     |           |
|     | ID-5-IT2   | 2  |           |               | 5-⑤-1-2 | 1     |           |
|     | ID-5-IT3   | 2  |           |               | 5-⑤-1-3 | 1     |           |
|     | ID-5-IT4   | 2  |           |               | 5-⑤-1-4 | 1     |           |
|     | ID-5-M1    | 1  |           |               | 5-⑤-1-5 | 1     |           |
|     | ID-5-M2    | 1  |           |               | 5-⑤-1-6 | 1     |           |
|     | ID-5-TT1   | 2  |           |               | 5-⑤-1-7 | 1     |           |
|     | ID-5-③-CA1 | 1  |           |               | 5-⑤-1-8 | 1     |           |
|     | ID-5-③-CA2 | 1  | 5-⑤-1-9   |               | 1       |       |           |
| 残材  | 5-①-1      | 1  | No.11     | 5-⑤-1-10      | 1       | No.3  |           |
|     | 5-①-2-1    | 1  |           | 5-⑤-2         | 1       |       |           |
|     | 5-①-2-2    | 1  |           | 5-⑥           | 1       | No.11 |           |
|     | 5-①-2-3    | 1  |           | 5-⑦           | 1       |       |           |
|     | 5-①-2-4    | 1  |           | 5-⑧           | 1       |       |           |
|     | 5-①-2-5    | 1  |           | 5-⑨           | 1       |       |           |
|     | 5-①-2-6    | 1  |           | 5-⑩-1         | 1       |       |           |
|     | 5-①-2-7    | 1  |           | 5-⑩-2         | 1       |       |           |
|     | 5-①-2-8    | 1  |           | 5-⑩-3         | 1       |       |           |
|     | 5-①-2-9    | 1  |           | 5-⑩-4         | 1       |       |           |
|     | 5-①-2-10   | 1  |           | 5-⑩-5         | 1       |       |           |
|     | 5-①-2-11   | 1  |           | 5-⑩-6         | 1       |       |           |
|     | 5-①-3      | 1  |           | ID-5-FR1-ST-1 | 1       |       |           |
|     | 5-①-4      | 1  |           | ID-5-FR1-ST-2 | 1       |       |           |
|     | 5-①-5      | 1  |           | ID-5-FR2-ST-1 | 1       |       |           |
|     | 5-①-6      | 1  |           | ID-5-FR2-ST-2 | 1       |       |           |

※5-②は試験片製作により切粉となったため欠番

表 3.4.4-6 試験片及び残材リスト (ID-6)

| 分類    | 管理番号     | 個数            | 小分け<br>容器 | 分類 | 管理番号     | 個数 | 小分け<br>容器 |
|-------|----------|---------------|-----------|----|----------|----|-----------|
| 試験片   | ID-6-FR1 | 2             | No.12     | 残材 | 6-②-2    | 1  | No.12     |
|       | ID-6-IT1 | 2             |           |    | 6-②-3    | 1  |           |
|       | ID-6-IT2 | 2             |           |    | 6-②-4    | 1  |           |
|       | ID-6-IT3 | 2             |           |    | 6-②-5    | 1  |           |
|       | ID-6-IT4 | 2             |           |    | 6-②-6    | 1  |           |
|       | ID-6-M1  | 1             |           |    | 6-③      | 1  |           |
|       | ID-6-M2  | 1             |           |    | 6-④      | 1  |           |
|       | ID-6-TT1 | 2             |           |    | 6-⑤-1-1  | 1  |           |
| 残材    | 6-①-1    | 1             |           |    | 6-⑤-1-2  | 1  |           |
|       | 6-①-2-1  | 1             |           |    | 6-⑤-1-3  | 1  |           |
|       | 6-①-2-2  | 1             |           |    | 6-⑤-1-4  | 1  |           |
|       | 6-①-2-3  | 1             |           |    | 6-⑤-1-5  | 1  |           |
|       | 6-①-2-4  | 1             |           |    | 6-⑤-1-6  | 1  |           |
|       | 6-①-2-5  | 1             |           |    | 6-⑤-1-7  | 1  |           |
|       | 6-①-2-6  | 1             |           |    | 6-⑤-1-8  | 1  |           |
|       | 6-①-2-7  | 1             |           |    | 6-⑤-1-9  | 1  |           |
|       | 6-①-2-8  | 1             |           |    | 6-⑤-1-10 | 1  |           |
|       | 6-①-2-9  | 1             |           |    | 6-⑤-2    | 1  | No.3      |
|       | 6-①-2-10 | 1             |           |    | 6-⑥      | 1  | No.12     |
|       | 6-①-2-11 | 1             |           |    | 6-⑦      | 1  |           |
|       | 6-①-3    | 1             |           |    | 6-⑧      | 1  |           |
|       | 6-①-4    | 1             |           |    | 6-⑨      | 1  |           |
|       | 6-①-5    | 1             |           |    | 6-⑩      | 1  |           |
| 6-①-6 | 1        | ID-6-FR1-ST-1 | 1         |    |          |    |           |
| 6-②-1 | 1        | ID-6-FR1-ST-2 | 1         |    |          |    |           |

表 3.4.4-7 試験片及び残材リスト (ID-7、8、切粉)

| 分類         | 管理番号 | 個数 | 小分け<br>容器 |
|------------|------|----|-----------|
| 未使用<br>試験体 | ID-7 | 1  | No.4      |
|            | ID-8 | 1  |           |
| 切粉         | 切粉①  | 1  | No.5      |
|            | 切粉②  | 1  | No.6      |
|            | 切粉③  | 1  | No.13     |
|            | 切粉④  | 1  | No.14     |

表 3.4.4-8 小分け容器と収納した返却材の一覧

| No. | 小分け容器サイズ | 収納した試験体概要   |
|-----|----------|---|
| 1   | 21cm 角   | ID-1 残材(1-⑤-2)、<br>ID-2 残材(2-⑤-2)   |
| 2   | 21cm 角   | ID-3 残材(3-⑤-2)、<br>ID-4 残材(4-⑤-2)   |
| 3   | 21cm 角   | ID-5 残材(5-⑤-2)、<br>ID-6 残材(6-⑤-2)   |
| 4   | 21cm 角   | ID-7、ID-8 未使用試験体  |
| 5   | 21cm 角   | 切粉①・<br>ID-2 試験片(ID-2-③-CA1、ID-2-③-CA2)、<br>ID-5 試験片(ID-5-③-CA1、ID-5-③-CA2) |
| 6   | 21cm 角   | 切粉②   |
| 7   | 15cm 角   | ID-1 試験片・残材(1-⑤-2 以外の残材)  |
| 8   | 15cm 角   | ID-2 試験片(ID-2-③-CA1、ID-2-③-CA2<br>以外の試験片)・残材(2-⑤-2 以外の残材)                   |
| 9   | 15cm 角   | ID-3 試験片・残材(3-⑤-2 以外の残材)  |
| 10  | 15cm 角   | ID-4 試験片・残材(4-⑤-2 以外の残材)  |
| 11  | 15cm 角   | ID-5 試験片(ID-5-③-CA1、ID-5-③-CA2<br>以外の試験片)・残材(5-⑤-2 以外の残材)                   |
| 12  | 15cm 角   | ID-6 試験片・残材(6-⑤-2 以外の残材)  |
| 13  | 15cm 角   | 切粉③   |
| 14  | 15cm 角   | 切粉④   |

表 3.4.4-9 小分け容器 No. 1 に収納した返却材

| 分類 | 管理番号  | 個数 |
|----|-------|----|
| 残材 | 1-⑤-2 | 1  |
|    | 2-⑤-2 | 1  |

表 3.4.4-10 小分け容器 No. 2 に収納した返却材

| 分類 | 管理番号  | 個数 |
|----|-------|----|
| 残材 | 3-⑤-2 | 1  |
|    | 4-⑤-2 | 1  |

表 3.4.4-11 小分け容器 No. 3 に収納した返却材

| 分類 | 管理番号  | 個数 |
|----|-------|----|
| 残材 | 5-⑤-2 | 1  |
|    | 6-⑤-2 | 1  |

表 3.4.4-12 小分け容器 No. 4 に収納した返却材

| 分類         | 管理番号 | 個数 |
|------------|------|----|
| 未使用<br>試験体 | ID-7 | 1  |
|            | ID-8 | 1  |

表 3.4.4-13 小分け容器 No. 5 に収納した返却材

| 分類 | 管理番号       | 個数 |
|----|------------|----|
| 切粉 | 切粉①        | 1  |
|    | ID-2-③-CA1 | 1  |
|    | ID-2-③-CA2 | 1  |
|    | ID-5-③-CA1 | 1  |
|    | ID-5-③-CA2 | 1  |

表 3.4.4-14 小分け容器 No. 6 に収納した返却材

| 分類 | 管理番号 | 個数 |
|----|------|----|
| 切粉 | 切粉②  | 1  |

表 3.4.4-15 小分け容器 No.7 に収納した返却材

| 分類  | 管理番号     | 個数 | 分類 | 管理番号          | 個数 |
|-----|----------|----|----|---------------|----|
| 試験片 | ID-1-FR1 | 2  | 残材 | 1-②-2         | 1  |
|     | ID-1-IT1 | 2  |    | 1-②-3         | 1  |
|     | ID-1-IT2 | 2  |    | 1-②-4         | 1  |
|     | ID-1-IT3 | 2  |    | 1-②-5         | 1  |
|     | ID-1-IT4 | 2  |    | 1-②-6         | 1  |
|     | ID-1-M1  | 1  |    | 1-③           | 1  |
|     | ID-1-M2  | 1  |    | 1-④           | 1  |
|     | ID-1-TT1 | 2  |    | 1-⑤-1-1       | 1  |
| 残材  | 1-①-1    | 1  |    | 1-⑤-1-2       | 1  |
|     | 1-①-2-1  | 1  |    | 1-⑤-1-3       | 1  |
|     | 1-①-2-2  | 1  |    | 1-⑤-1-4       | 1  |
|     | 1-①-2-3  | 1  |    | 1-⑤-1-5       | 1  |
|     | 1-①-2-4  | 1  |    | 1-⑤-1-6       | 1  |
|     | 1-①-2-5  | 1  |    | 1-⑤-1-7       | 1  |
|     | 1-①-2-6  | 1  |    | 1-⑤-1-8       | 1  |
|     | 1-①-2-7  | 1  |    | 1-⑤-1-9       | 1  |
|     | 1-①-2-8  | 1  |    | 1-⑤-1-10      | 1  |
|     | 1-①-2-9  | 1  |    | 1-⑥           | 1  |
|     | 1-①-2-10 | 1  |    | 1-⑦           | 1  |
|     | 1-①-2-11 | 1  |    | 1-⑧           | 1  |
|     | 1-①-3    | 1  |    | 1-⑨           | 1  |
|     | 1-①-4    | 1  |    | 1-⑩           | 1  |
|     | 1-①-5    | 1  |    | ID-1-FR1-ST-1 | 1  |
|     | 1-①-6    | 1  |    | ID-1-FR1-ST-2 | 1  |
|     | 1-②-1    | 1  |    |               |    |

表 3.4.4-16 小分け容器 No. 8 に収納した返却材

| 分類  | 管理番号     | 個数 | 分類            | 管理番号     | 個数 |
|-----|----------|----|---------------|----------|----|
| 試験片 | ID-2-FR1 | 2  | 残材            | 2-④      | 1  |
|     | ID-2-FR2 | 2  |               | 2-⑤-1-1  | 1  |
|     | ID-2-IT1 | 2  |               | 2-⑤-1-2  | 1  |
|     | ID-2-IT2 | 2  |               | 2-⑤-1-3  | 1  |
|     | ID-2-IT3 | 2  |               | 2-⑤-1-4  | 1  |
|     | ID-2-IT4 | 2  |               | 2-⑤-1-5  | 1  |
|     | ID-2-M1  | 1  |               | 2-⑤-1-6  | 1  |
|     | ID-2-M2  | 1  |               | 2-⑤-1-7  | 1  |
|     | ID-2-TT1 | 2  |               | 2-⑤-1-8  | 1  |
| 残材  | 2-①-1    | 1  |               | 2-⑤-1-9  | 1  |
|     | 2-①-2-1  | 1  |               | 2-⑤-1-10 | 1  |
|     | 2-①-2-2  | 1  |               | 2-⑥      | 1  |
|     | 2-①-2-3  | 1  |               | 2-⑦      | 1  |
|     | 2-①-2-4  | 1  |               | 2-⑧      | 1  |
|     | 2-①-2-5  | 1  |               | 2-⑨      | 1  |
|     | 2-①-2-6  | 1  |               | 2-⑩-1    | 1  |
|     | 2-①-2-7  | 1  |               | 2-⑩-2    | 1  |
|     | 2-①-2-8  | 1  |               | 2-⑩-3    | 1  |
|     | 2-①-2-9  | 1  |               | 2-⑩-4    | 1  |
|     | 2-①-2-10 | 1  |               | 2-⑩-5    | 1  |
|     | 2-①-2-11 | 1  |               | 2-⑩-6    | 1  |
|     | 2-①-3    | 1  | ID-2-FR1-ST-1 | 1        |    |
|     | 2-①-4    | 1  | ID-2-FR1-ST-2 | 1        |    |
|     | 2-①-5    | 1  | ID-2-FR2-ST-1 | 1        |    |
|     | 2-①-6    | 1  | ID-2-FR2-ST-2 | 1        |    |
|     | 2-③      | 1  |               |          |    |

※2-②は試験片製作により切粉となったため欠番

表 3.4.4-17 小分け容器 No. 9 に収納した返却材

| 分類  | 管理番号     | 個数 | 分類            | 管理番号     | 個数 |
|-----|----------|----|---------------|----------|----|
| 試験片 | ID-3-FR1 | 1  | 残材            | 3-③      | 1  |
|     | ID-3-FR2 | 2  |               | 3-④      | 1  |
|     | ID-3-IT1 | 2  |               | 3-⑤-1-1  | 1  |
|     | ID-3-IT2 | 2  |               | 3-⑤-1-2  | 1  |
|     | ID-3-IT3 | 2  |               | 3-⑤-1-3  | 1  |
|     | ID-3-IT4 | 2  |               | 3-⑤-1-4  | 1  |
|     | ID-3-M1  | 1  |               | 3-⑤-1-5  | 1  |
|     | ID-3-M2  | 1  |               | 3-⑤-1-6  | 1  |
|     | ID-3-TT1 | 2  |               | 3-⑤-1-7  | 1  |
| 残材  | 3-①-1    | 1  |               | 3-⑤-1-8  | 1  |
|     | 3-①-2-1  | 1  |               | 3-⑤-1-9  | 1  |
|     | 3-①-2-2  | 1  |               | 3-⑤-1-10 | 1  |
|     | 3-①-2-3  | 1  |               | 3-⑥      | 1  |
|     | 3-①-2-4  | 1  |               | 3-⑦      | 1  |
|     | 3-①-2-5  | 1  |               | 3-⑧      | 1  |
|     | 3-①-2-6  | 1  |               | 3-⑨      | 1  |
|     | 3-①-2-7  | 1  |               | 3-⑩-1    | 1  |
|     | 3-①-2-8  | 1  |               | 3-⑩-2    | 1  |
|     | 3-①-2-9  | 1  |               | 3-⑩-3    | 1  |
|     | 3-①-2-10 | 1  |               | 3-⑩-4    | 1  |
|     | 3-①-2-11 | 1  |               | 3-⑩-5    | 1  |
|     | 3-①-3    | 1  | 3-⑩-6         | 1        |    |
|     | 3-①-4    | 1  | 3-⑪           | 1        |    |
|     | 3-①-5    | 1  | ID-3-FR2-ST-1 | 1        |    |
|     | 3-①-6    | 1  | ID-3-FR2-ST-2 | 1        |    |

※3-②は試験片製作により切粉となったため欠番

表 3.4.4-18 小分け容器 No. 10 に収納した返却材

| 分類  | 管理番号     | 個数 | 分類            | 管理番号          | 個数 |
|-----|----------|----|---------------|---------------|----|
| 試験片 | ID-4-FR1 | 2  | 残材            | 4-④           | 1  |
|     | ID-4-FR2 | 2  |               | 4-⑤-1-1       | 1  |
|     | ID-4-IT1 | 2  |               | 4-⑤-1-2       | 1  |
|     | ID-4-IT2 | 2  |               | 4-⑤-1-3       | 1  |
|     | ID-4-IT3 | 2  |               | 4-⑤-1-4       | 1  |
|     | ID-4-IT4 | 2  |               | 4-⑤-1-5       | 1  |
|     | ID-4-M1  | 1  |               | 4-⑤-1-6       | 1  |
|     | ID-4-M2  | 1  |               | 4-⑤-1-7       | 1  |
|     | ID-4-TT1 | 2  |               | 4-⑤-1-8       | 1  |
| 残材  | 4-①-1    | 1  |               | 4-⑤-1-9       | 1  |
|     | 4-①-2-1  | 1  |               | 4-⑤-1-10      | 1  |
|     | 4-①-2-2  | 1  |               | 4-⑥           | 1  |
|     | 4-①-2-3  | 1  |               | 4-⑦           | 1  |
|     | 4-①-2-4  | 1  |               | 4-⑧           | 1  |
|     | 4-①-2-5  | 1  |               | 4-⑨           | 1  |
|     | 4-①-2-6  | 1  |               | 4-⑩-1         | 1  |
|     | 4-①-2-7  | 1  |               | 4-⑩-2         | 1  |
|     | 4-①-2-8  | 1  |               | 4-⑩-3         | 1  |
|     | 4-①-2-9  | 1  |               | 4-⑩-4         | 1  |
|     | 4-①-2-10 | 1  |               | 4-⑩-5         | 1  |
|     | 4-①-2-11 | 1  |               | 4-⑩-6         | 1  |
|     | 4-①-3    | 1  |               | ID-4-FR1-ST-1 | 1  |
|     | 4-①-4    | 1  |               | ID-4-FR1-ST-2 | 1  |
|     | 4-①-5    | 1  | ID-4-FR2-ST-1 | 1             |    |
|     | 4-①-6    | 1  | ID-4-FR2-ST-2 | 1             |    |
|     | 4-③      | 1  |               |               |    |

※4-②は試験片製作により切粉となったため欠番

表 3.4.4-19 小分け容器 No. 11 に収納した返却材

| 分類  | 管理番号     | 個数 | 分類            | 管理番号          | 個数 |
|-----|----------|----|---------------|---------------|----|
| 試験片 | ID-5-FR1 | 2  | 残材            | 5-④           | 1  |
|     | ID-5-FR2 | 2  |               | 5-⑤-1-1       | 1  |
|     | ID-5-IT1 | 2  |               | 5-⑤-1-2       | 1  |
|     | ID-5-IT2 | 2  |               | 5-⑤-1-3       | 1  |
|     | ID-5-IT3 | 2  |               | 5-⑤-1-4       | 1  |
|     | ID-5-IT4 | 2  |               | 5-⑤-1-5       | 1  |
|     | ID-5-M1  | 1  |               | 5-⑤-1-6       | 1  |
|     | ID-5-M2  | 1  |               | 5-⑤-1-7       | 1  |
|     | ID-5-TT1 | 2  |               | 5-⑤-1-8       | 1  |
| 残材  | 5-①-1    | 1  |               | 5-⑤-1-9       | 1  |
|     | 5-①-2-1  | 1  |               | 5-⑤-1-10      | 1  |
|     | 5-①-2-2  | 1  |               | 5-⑥           | 1  |
|     | 5-①-2-3  | 1  |               | 5-⑦           | 1  |
|     | 5-①-2-4  | 1  |               | 5-⑧           | 1  |
|     | 5-①-2-5  | 1  |               | 5-⑨           | 1  |
|     | 5-①-2-6  | 1  |               | 5-⑩-1         | 1  |
|     | 5-①-2-7  | 1  |               | 5-⑩-2         | 1  |
|     | 5-①-2-8  | 1  |               | 5-⑩-3         | 1  |
|     | 5-①-2-9  | 1  |               | 5-⑩-4         | 1  |
|     | 5-①-2-10 | 1  |               | 5-⑩-5         | 1  |
|     | 5-①-2-11 | 1  |               | 5-⑩-6         | 1  |
|     | 5-①-3    | 1  |               | ID-5-FR1-ST-1 | 1  |
|     | 5-①-4    | 1  |               | ID-5-FR1-ST-2 | 1  |
|     | 5-①-5    | 1  | ID-5-FR2-ST-1 | 1             |    |
|     | 5-①-6    | 1  | ID-5-FR2-ST-2 | 1             |    |
|     | 5-③      | 1  |               |               |    |

※5-②は試験片製作により切粉となったため欠番

表 3.4.4-20 小分け容器 No. 12 に収納した返却材

| 分類  | 管理番号     | 個数 | 分類            | 管理番号     | 個数 |
|-----|----------|----|---------------|----------|----|
| 試験片 | ID-6-FR1 | 2  | 残材            | 6-②-2    | 1  |
|     | ID-6-IT1 | 2  |               | 6-②-3    | 1  |
|     | ID-6-IT2 | 2  |               | 6-②-4    | 1  |
|     | ID-6-IT3 | 2  |               | 6-②-5    | 1  |
|     | ID-6-IT4 | 2  |               | 6-②-6    | 1  |
|     | ID-6-M1  | 1  |               | 6-③      | 1  |
|     | ID-6-M2  | 1  |               | 6-④      | 1  |
|     | ID-6-TT1 | 2  |               | 6-⑤-1-1  | 1  |
| 残材  | 6-①-1    | 1  |               | 6-⑤-1-2  | 1  |
|     | 6-①-2-1  | 1  |               | 6-⑤-1-3  | 1  |
|     | 6-①-2-2  | 1  |               | 6-⑤-1-4  | 1  |
|     | 6-①-2-3  | 1  |               | 6-⑤-1-5  | 1  |
|     | 6-①-2-4  | 1  |               | 6-⑤-1-6  | 1  |
|     | 6-①-2-5  | 1  |               | 6-⑤-1-7  | 1  |
|     | 6-①-2-6  | 1  |               | 6-⑤-1-8  | 1  |
|     | 6-①-2-7  | 1  |               | 6-⑤-1-9  | 1  |
|     | 6-①-2-8  | 1  |               | 6-⑤-1-10 | 1  |
|     | 6-①-2-9  | 1  |               | 6-⑥      | 1  |
|     | 6-①-2-10 | 1  |               | 6-⑦      | 1  |
|     | 6-①-2-11 | 1  |               | 6-⑧      | 1  |
|     | 6-①-3    | 1  | 6-⑨           | 1        |    |
|     | 6-①-4    | 1  | 6-⑩           | 1        |    |
|     | 6-①-5    | 1  | ID-6-FR1-ST-1 | 1        |    |
|     | 6-①-6    | 1  | ID-6-FR1-ST-2 | 1        |    |
|     | 6-②-1    | 1  |               |          |    |

表 3.4.4-21 小分け容器 No. 13 に収納した返却材

| 分類 | 管理番号 | 個数 |
|----|------|----|
| 切粉 | 切粉③  | 1  |

表 3.4.4-22 小分け容器 No. 14 に収納した返却材

| 分類 | 管理番号 | 個数 |
|----|------|----|
| 切粉 | 切粉④  | 1  |



図 3.4.4-1 輸送容器の外観  
(ドラム缶；直径約 620mmφ × 高さ約 890mm)



図 3.4.4-2 小分け容器の外観  
(ステンレス鋼製容器；左：21cm サイズ(約 21cm × 約 21cm × 約 21cm)、  
右：15cm サイズ(約 15cm × 約 15cm × 約 15cm))



(a) 放射線測定 作業エリア全体

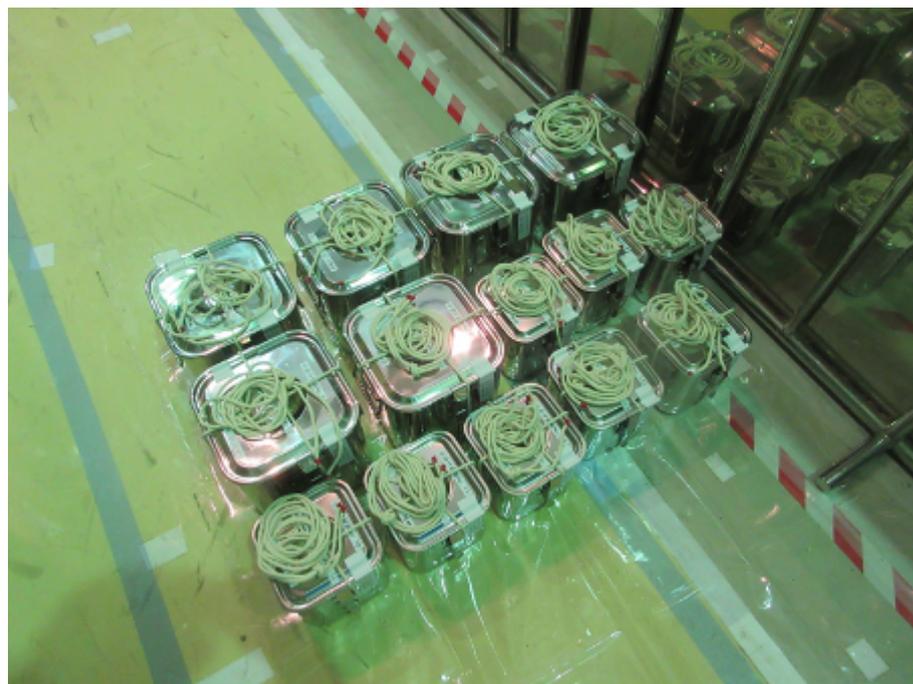


(b) 放射線測定 測定エリア

図 3.4.4-3 放射線測定の作業状況



(a) 輸送容器外観(小分け容器収納前)



(b) 小分け容器外観

図 3.4.4-4 (1/2) 輸送容器への収納状況



(c) 小分け容器収納作業



(d) 輸送容器外観(小分け容器収納後)

図 3.4.4-4 (2/2) 輸送容器への収納状況



(a) 輸送容器の表面汚染測定作業



(b) 輸送容器の線量率測定作業(輸送容器表面から1m位置)

図 3.4.4-5(1/3) 輸送容器の搬出状況



(c) 輸送トラックへの積載作業



(d) 輸送容器外観(輸送トラックに固定後)

図 3.4.4-5 (2/3) 輸送容器の搬出状況



(e) 先導車および輸送車両の日本核燃料開発出発

図 3.4.4-5 (3/3) 輸送容器の搬出状況

### 3.4.5 今後の事業計画について

本研究は、高経年化評価において BWR プラント運転環境におけるステンレス鋼製機器の熱時効脆化予測手法として用いられている H3T モデルの保守性検証を目的として実施した。また、本事業成果の更なる付加価値向上のために、令和 6 年度は国際的知名度の高い米国の熱時効後の機械特性予測手法との比較するデータを拡充した。

#### (1) ステンレス鋼製機器の熱時効脆化予測手法の保守性

3.4.3 項に示すように、実機より採取したステンレス鋼鋳鋼（再循環ポンプ材）の位置づけと破壊靱性値の実測値とモデル式の比較により、H3T モデルで BWR プラントステンレス鋼鋳鋼の熱時効による靱性低下を評価することの保守性について検討した。本事業で BWR 実機より採取したステンレス鋼鋳鋼の化学成分は公開文献における実機材の範囲内であり、H3T モデル式の保守性を評価するためのデータを得る材料として妥当と考える。また、BWR 実機より採取したステンレス鋼鋳鋼の破壊靱性値は H3T モデルの評価値と比較して高い値であることが確認された。H3T モデルは PWR 運転温度での熱時効を想定して構築されたものであり、BWR 実機材データと H3T モデルとの比較において、H3T モデルは BWR 運転温度における熱時効を過大に評価している可能性がある。ただし、それは実力値に対して弾塑性破壊靱性を安全側に見積もっていることであり、H3T モデルで BWR プラントの熱時効を評価することの保守性が確認できたと考える。

#### (2) 本事業成果の更なる付加価値向上のためのデータ取得

米国の熱時効後の機械特性予測手法との比較は室温でのデータを用いるため、令和 3 年度に策定した試験計画に基づき、試験片を製作し、室温での破壊靱性試験及びシャルピー衝撃試験を実施した。試験マトリックス通り、2 点の破壊靱性値及び 24 個の試験片による吸収エネルギー衝撃値、横膨出量及び脆性破面率の温度依存性データ一式を取得した。

#### (3) 今後の事業計画について

(1)及び(2)に示したように、本研究では令和 6 年度までに、当初計画していた成果を得ることができたことから、事業計画の通り終了する。

## 4. 実機材料を活用した安全研究検討委員会等の開催実績

事業において収集した情報、研究計画(安全研究マップ含む)、試験方法及び採取したデータの透明性及び客観性を高めるために、電中研及び電中研以外の専門家による「実機材料を活用した安全研究検討委員会」を設置・運営し、有識者からの意見を参考とするとともに技術的側面からのレビューを受けた。

また、原子力規制庁に対し定期的な進捗報告を実施した。本章ではそれぞれの開催実績をまとめた。

- 実機材料を活用した安全研究検討委員会
- 本事業に関する原子力規制庁に対する実績報告

### 4.1 実機材料を活用した安全研究検討委員会

#### 4.1.1 検討委員会の設置

本事業の成果に対し電中研及び電中研以外の専門家による「実機材料を活用した安全研究検討委員会」を設置・運営した。

##### (1) 名称

令和6年6月17日(月)の原子力規制庁と電中研との第一回打合せにて、本研究で設置する検討委員会名称を、昨年度と同様に「実機材料を活用した安全研究検討委員会」とする計画について原子力規制庁の了解を得た。

##### (2) 体制

令和6年6月17日(月)の原子力規制庁と電中研との第一回打合せにて、本検討委員会の体制は、有識者・学識経験者については、令和5年度の検討委員会を踏襲することを提案し、原子力規制庁の了解を得た。委員構成を表4.1.1-1に示す。なお、オブザーバ参画機関についても、令和5年度の検討委員会を踏襲として、第一回委員会開催前に電中研事務局より参画機関に個別に打診し確定した。

##### (3) 運営

###### 1) 事務局

令和6年6月17日(月)の原子力規制庁と電中研との第一回打合せにて、本検討委員会の事務局は令和5年度と同様に電中研とすることで了解を得た。

###### 2) 運営要項等

本事業について、有識者から技術的な側面からのレビューを受けることにより、収集した情報、研究計画(安全研究マップ含む)、試験方法及び取得したデータの透明性及び客観性を高めるため、「実機材料を活用した安全研究検討委員会運営要項」を令和5年度から内容を引き継ぐこととした。また、本検討委員会で得た情報の扱いに関し、秘密保持情報の使用及び開示、その他秘密情報に係る不正行為を防止するため、秘密情報の保持に関する必要事項を定めた「秘密保持誓約」についても令和5年度から内容

を引き継ぐこととした。これらの運営要領は、令和6年度 第一回実機材料を活用した安全研究検討委員会(令和6年8月6日)にて承認された。

表 4.1.1-1 実機材料を活用した安全研究検討委員会 委員の構成

|             | 所属機関                 | 所属部署       |
|-------------|----------------------|------------|
| 委員<br>(主査)  | 東京大学                 | 大学院工学系研究科  |
| 委員<br>(副主査) | 大阪大学                 | 工学研究科      |
| 委員          | 福井大学                 | 学術研究院工学系部門 |
| 委員          | 東北大学                 | 大学院工学研究科   |
| 委員          | 株式会社<br>原子力安全システム研究所 | 技術システム研究所  |
| 委員          | 原子力規制庁               | 技術基盤 G     |
| 委員          | 原子力規制庁               | 技術基盤 G     |
| 委員          | (一財)電力中央研究所          |            |

備考：

【事務局】 電力中央研究所

【オブザーバ】

原子力規制庁

電気事業者

- ・ 電気事業連合会／原子力エネルギー協議会(ATENA)
- ・ 北海道電力株式会社    ・ 東北電力株式会社    ・ 東京電力ホールディングス株式会社
- ・ 中部電力株式会社    ・ 北陸電力株式会社    ・ 関西電力株式会社
- ・ 中国電力株式会社    ・ 四国電力株式会社    ・ 九州電力株式会社
- ・ 電源開発株式会社    ・ 日本原子力発電株式会社

原子力プラントメーカー

- ・ 東芝エネルギーシステムズ株式会社
- ・ 日立 GE ニュークリア・エナジー株式会社
- ・ 三菱重工業株式会社

国内研究機関等

- ・ 日本核燃料開発株式会社
- ・ 株式会社 原子力安全システム研究所
- ・ 日本原子力研究開発機構
- ・ 電力中央研究所

#### 4.1.2 開催実績

実機材料を活用した安全研究検討委員会は4回実施した。実績を以下に示す。

##### (1) 令和6年度 第一回 実機材料を活用した安全研究検討委員会

日 時：2024年8月6日(火) 13:30-16:00

場 所：Web EXによる会議

出席者：(出席委員 ○)

|         | 所属機関            | 出欠 |
|---------|-----------------|----|
| 委員(主査)  | 東京大学            | ○  |
| 委員(副主査) | 大阪大学            | —  |
| 委員      | 福井大学            | ○  |
| 委員      | 東北大学            | ○  |
| 委員      | (株)原子力安全システム研究所 | ○  |
| 委員      | 原子力規制庁          | ○  |
| 委員      | 原子力規制庁          | ○  |
| 委員      | (一財)電力中央研究所     | —  |

議事概要：委員会の運営に関する承認を行うとともに、実施計画を中心に説明した。

- 第一回検討委員会の実施にあたり、運営、役員を選出、本年度研究の概要に関する説明があった。
- 事務局より、運営規約、守秘義務誓約について説明し、運営規約・守秘義務誓約に従い進めることが了承された。
- 運営規約・種に義務誓約に基づき、議事録に出席者及び欠席者を記載することで守秘義務誓約とする運用が了承された。
- 運営規約に基づき、東京大学委員を主査に選出し、主査より大阪大学委員を副主査に選任した。
- 電中研より、本年度の研究計画概要について説明し、大幅な計画変更を伴うコメント等はなかった。

なお、欠席の大阪大学委員には、別途個別説明を2024年8月9日(金)13:00-15:00にWeb会議で実施した。

(2) 令和6年度 第二回 実機材料を活用した安全研究検討委員会

日 時：2024年11月20日(水) 13:30-15:30

場 所：Web EXによる会議

出席者：(出席委員 ○)

|         | 所属機関            | 出欠 |
|---------|-----------------|----|
| 委員(主査)  | 東京大学            | ○  |
| 委員(副主査) | 大阪大学            | ○  |
| 委員      | 福井大学            | —  |
| 委員      | 東北大学            | ○  |
| 委員      | (株)原子力安全システム研究所 | ○  |
| 委員      | 原子力規制庁          | ○  |
| 委員      | 原子力規制庁          | —  |
| 委員      | (一財)電力中央研究所     | —  |

議事概要：中間報告(その1)として、研究の進捗状況を中心に報告した。

- 靱性低下に係る研究

放射能測定による試験体照射量評価手法の検証に関する進捗について報告し、これまでの成果や委員コメント等を勘案した実機材による照射量評価の計画変更を説明した。

- 予防保全対策技術の保守性に係る研究

実機構造模擬試験の試験計画詳細の検討として、BWRを対象とした切断影響確認試験の応力測定結果(速報)及びBWRプラント廃炉時の除染の影響確認試験結果を報告した。

なお、欠席の福井大学委員には、別途個別説明を2024年11月26日(火)13:15-16:00にWeb会議で実施した。

### (3) 令和6年度 第三回 実機材料を活用した安全研究検討委員会

日 時：2024年12月19日(木) 13:30-16:00

場 所：Web EXによる会議

出席者：(出席委員 ○)

|         | 所属機関            | 出欠 |
|---------|-----------------|----|
| 委員(主査)  | 東京大学            | ○  |
| 委員(副主査) | 大阪大学            | ○  |
| 委員      | 福井大学            | ○  |
| 委員      | 東北大学            | ○  |
| 委員      | (株)原子力安全システム研究所 | ○  |
| 委員      | 原子力規制庁          | ○  |
| 委員      | 原子力規制庁          | —  |
| 委員      | (一財)電力中央研究所     | —  |

議事概要：中間報告(その2)として、研究の進捗状況を中心に報告した。

- 靱性低下に係る研究  
試験体採取工法の成立性検討として、廃炉工事開始前の事前サンプリング工法(上部格子板)と、廃炉解体時の同調サンプリング工法(炉心シュラウド)の検討状況を報告した。
- 予防保全対策技術の保守性に係る研究  
実機構造模擬試験の試験計画詳細の検討として、BWRを対象とした切断影響確認試験の応力測定結果と、その試験の解析による再現解析結果について報告した。また、第二回委員会で質問のあった、残留応力測定方法について説明した。
- ステンレス鋼製機器の健全性評価に係る研究  
試験片の製作、並びに試験の実施(進捗)として破壊靱性試験及びシャルピー衝撃試験の結果を報告した。

#### (4) 令和6年度 第四回 実機材料を活用した安全研究検討委員会

日 時：2025年2月3日(月) 13:10-17:20

場 所：対面(大手町ビルディング 737 会議室)及び Web EX による会議

出席者：(委員及び原子力規制庁：対面 オブザーバ：Web)

|         | 所属機関            | 出欠 |
|---------|-----------------|----|
| 委員(主査)  | 東京大学            | ○  |
| 委員(副主査) | 大阪大学            | ○  |
| 委員      | 福井大学            | ○  |
| 委員      | 東北大学            | ○  |
| 委員      | (株)原子力安全システム研究所 | ○  |
| 委員      | 原子力規制庁          | ○  |
| 委員      | 原子力規制庁          | ○  |
| 委員      | (一財)電力中央研究所     | —  |

議事概要：令和6年度の成果報告として、研究の成果（見込みを含む）を中心に報告した。

- 靱性低下に係る研究  
廃炉工事開始前の事前サンプリング工法の切断工法の確認試験結果を踏まえ、EDM が上部格子板の試験体採取に適用できる見込みを得たことを報告した。また、放射能測定による試験体照射量評価手法の検証について、実測による照射量評価の測定及び解析結果について報告した。令和6年度の成果を踏まえ、廃炉工事に同調したサンプリング（炉心シュラウド）は事業計画案の一部見直しを報告した。
- 予防保全対策技術の保守性に係る研究  
PWR プラント実機応力測定の成立性検討として、PWR SG 管台を対象としたその場応力測定に関する検討結果を報告した。また、BWR 炉心シュラウドを対象とした実機構造模擬試験計画案を報告した。なお、令和6年度の成果を踏まえた事業計画案の一部見直しがないことを報告した。
- ステンレス鋼製機器の健全性評価に係る研究  
本年度実施した試験結果と、本事業で取得したデータと国内外データとの比較・検討結果について報告した。また、実機材の浜岡原子力発電所への返送が3月見込みで完了見込みであることを説明した。なお、令和6年度の成果を踏まえ、本研究で当初計画した成果を得ることができ、令和6年度で研究を完了することを報告した。
- 実機材を活用した安全研究マップの見直し  
国内外の廃炉材研究、材料健全性に関する研究動向、国際会議、国内の学協

会の公開文献の調査結果、安全研究マップのインプットとなる課題整理表の更新について説明し、安全研究マップにその更新を反映し、照射脆化 1 件を追加する見直し案を報告した。

## 4.2 原子力規制庁への進捗報告

原子力規制庁に対する定期的な進捗報告の実績を以下に示す。

### (1) 電中研－原子力規制庁 第一回打合せ

日 時：2024年6月17日 13:15～16:00

場 所：Web 会議（Webex）

参加者：原子力規制庁 5名、電力中央研究所 4名

議事概要：

令和6年度 実機材料を活用した健全性評価に係る研究について、令和6年度仕様書に基づく個別研究の実施基本計画案(委員会運営、体制等を含む)、並びに研究マスタースケジュールについて説明し、令和6年度仕様書に対する委託報告書目次による成果のまとめの方針について説明した。なお、令和5年度の安全研究マップの内容等について引継ぎを受けるとともに、今回の説明内容について、大幅な変更を伴うコメント等はなかった。

### (2) 電中研－原子力規制庁 第二回打合せ

日 時：2024年7月30日 10:00～12:00

場 所：Web 会議

参加者：原子力規制庁 5名、電力中央研究所 4名

議事概要：

8月6日に開催する第一回安全研究検討委員会の議事次第、並びに報告内容について説明した。実機材による照射量評価は、これまでの成果や委員コメント等を勘案した計画変更を提案し了承された。なお、第一回委員会の報告内容について、大幅な変更を伴うコメント等はなかった。

### (3) 電中研－原子力規制庁 第三回打合せ

日 時：2024年11月11日 13:00～15:00

場 所：Web 会議

参加者：原子力規制庁 5名、電力中央研究所 4名

議事概要：

11月20日に開催する第二回安全研究検討委員会の議事次第、並びに報告内容について説明し、大幅な変更を伴うコメント等はなかった。

### (4) 電中研－原子力規制庁 第四回打合せ

日 時：2024年12月16日 15:00～17:00

場 所：Web 会議

参加者：原子力規制庁 5名、電力中央研究所 4名

議事概要：

12月19日に開催する第三回安全研究検討委員会の議事次第、並びに報告内容について説明し、大幅な変更を伴うコメント等はなかった。

**(5) 電中研－原子力規制庁 第五回打合せ**

日 時：2025 年 1 月 27 日 10:00～12:00

場 所：Web 会議

参加者：原子力規制庁 5 名、電力中央研究所 4 名

議事概要：

2 月 3 日に開催する第四（最終回）安全研究検討委員会の議事次第、並びに報告内容について説明した。各テーマについて所定の成果が得られたこと、並びに実機材の浜岡発電所への返却輸送を 3 月初旬に予定していることを説明した。第四回委員会の報告内容、並びに輸送時期について、大幅な変更を伴うコメント等は無かった。

## 5. まとめ

令和6年度 原子力施設等防災対策等委託費(実機材料等を活用した経年劣化評価・検証(実機材料を活用した健全性評価に係る研究))事業について、本年度実施計画範囲について研究を完了した。概要を以下にまとめた。

### 5.1 実機材料を活用した安全研究マップの定期的な見直し

令和6年度は、安全研究マップの定期的な見直しとして、そのインプットとなる「実機材料を活用した研究課題整理表」について、実機材料を活用した材料健全性研究に関する国内外の計画や実施状況を調査した。調査時期は令和5年度調査を踏まえ、令和6年1月から12月末に調査可能な期間までとした。その結果に基づき「実機材料を活用した安全研究マップ」の反映の可否を検討した。

#### (1) 実機材料を活用した材料健全性研究に関する計画・実施状況の調査

原子力発電所の構造物と考慮すべき材料の経年劣化事象の関係に基づき、国内外の実機材料を活用した材料健全性研究、学協会規格動向等の最新知見について、研究動向や国際会議発表の公開文献を調査した。

##### 海外プロジェクト

- ・ 米国 DOE LWRS プロジェクト
- ・ フィンランド VTT BRUTE プロジェクト
- ・ スペイン Zorita プロジェクト
- ・ スウェーデン SMILE プロジェクト
- ・ フランス EDF/MAI プロジェクト

##### 国際会議

- ・ ASME PVP 2024 : The American Society of Mechanical Engineers Pressure Vessels & Piping Conference
- ・ SMiRT27 : 27th International Conference of Structural Mechanics in Reactor Technology
- ・ ICON31 : 32st International Conference on Nuclear Engineering
- ・ ASME PVP 2024 Pressure Vessels & Piping Conference

##### 国内の研究動向

- ・ 日本原子力学会 2024年春の年会
- ・ 日本原子力学会 2024年秋の大会
- ・ 日本保全学会 第20回学術講演会
- ・ 日本金属学会 : 2024年秋期講演 (第175回)
- ・ 腐食防食学会 : 第71回 材料と環境討論会
- ・ 原子力規制庁、並びに資源エネルギー省受託事業等

## (2) 安全研究マップの見直し

令和5年度に策定した安全研究マップに対し、前項の実機材料を用いた材料健全性研究に関する国内外の計画や実施状況の調査結果を踏まえ、以下のステップで見直した。

1. 課題整理表の更新
2. 安全研究マップへの反映
3. 安全研究マップへの定期的な見直し

課題整理表の更新では、課題「破壊靱性評価：関連温度移行量と破壊靱性値移行量の関係（PTS評価）」を「R6-1」として1件追加した。なお、この課題は、令和5年度に課題管理表：スコーピング段階に追加した「R5-S1」の課題管理表：経年劣化への移行となる。

安全研究マップへ反映は、更新した課題整理表を、課題解決に対する実機材料活用の有効性、規制方が主体となるべき安全規制研究の観点で「安全研究マップ」としてスクリーニングした。その結果、課題管理表を更新して追加した課題「R6-1：中性子照射脆化（関連温度移行量と破壊靱性値移行量の関係）」は、安全規制の観点で、実機材（廃炉材を含む）の活用が課題の解決に廃炉材が決定的な役割を果たす課題として、スクリーニング後の安全研究マップで追加となった。

## 5.2 靱性低下に係る研究

本研究では実機から採取した材料に対する破壊靱性試験を行うことにより、実機条件における破壊靱性に関する知見を取得し、維持規格に規定されている破壊靱性低下に係る評価式の保守性の確認を目的とし、令和6年度は、計画に基づき以下の項目を実施した。

### (1) 試験体採取工法の成立性検討

令和6年度は、令和5年度に検討した工事基本実施計画案に基づき、試験体採取時期を廃炉のための解体工事開始前（事前）に想定して、対象プラントの炉内機器より試験体を採取するための工法

- 廃炉工事開始前の事前サンプリング工法（上部格子板）

の成立性を検討し、2026年度にサンプリング採取を計画したロードマップに基づき、切断工法のコンセプトを検討し、切断工法をEDMに選定するとともに、切断試験により工法の成立性を確認した。

また、令和5年度に実施した研究成果から抽出された課題に基づき、令和6年度に実施すべきとする項目として、以下を実施した。成果の概要を合わせて示す。

- 廃炉工事に同調したサンプリング工法（炉心シュラウド）

最速2027年度のサンプリング採取を想定し、準備すべき機材等ののうち、工事準備がクリティカルとなる機材等の詳細を検討するとともに、主要機材・装置類のコンセ

プトを検討した。

- 放射能測定による試験体照射量評価手法の検証

評価手法の検証は、昨年度成果の検証及び  $^{60}\text{Co}$  放射能測定の適用性を検討した。

- ・ 昨年度実施した放射能測定及び解析プロセスを検証し、有意な誤りがないことを確認した。また、カプセル材とハンドル材の相違点として、放射能測定におけるトレーサ添加の有無を確認した。
- ・  $^{60}\text{Co}$  放射能測定の適用性検討のために熱中性子束解析及び  $^{60}\text{Co}$  放射能測定を実施した。 $^{60}\text{Co}$  放射能は熱中性子の関与が大きい  $^{59}\text{Co}$  起源が支配的であり、C/M は約 3 であった。熱中性子の減衰には局所的な構造が影響している可能性があり、将来実機より採取した試験体の放射能濃度を評価する際は採取位置に応じ、対象を踏まえた検討が望ましい。
- ・ 熱中性子解析を昨年度の放射能評価の Mo 起源と Nb 起源のうち、前者に適用したところ、 $^{93}\text{Mo}$  の C/M が 1 に近づき、放射能測定値と解析値がより近い値となった。

## (2) 事業計画案の見直し

上記(1)の成果を総合的に検討し、本研究では、廃炉工事開始前の事前サンプリング工法(上部格子板)を優先することから、サンプリング材からの試験片製作及びその照射材による機械試験と評価を平準化する観点も踏まえ、廃炉工事に同調したサンプリング工法(炉心シュラウド)のロードマップを見直して事業計画に反映した。

## 5.3 予防保全対策技術の保守性に係る研究

本研究ではピーニングによる応力改善工法施工部位に対する残留応力評価を行い、事業者が実施した予防保全対策施工箇所に対する亀裂の解釈の考え方の保守性を検証する。

なお、予防保全対策部の残留応力評価を行う一つの方法として、施工部位を切断採取し、試験研究施設において残留応力を測定する方法が考えられるが、これを行うためには、採取により施工部の残留応力が変化しないことや試験研究施設に輸送可能であり、かつ、放射線環境下で残留応力測定が可能であることが必要となる。

また、除染による金属表面に対する深さの影響も含め、実際に施工部応力測定の実施例はなく影響の確認が必要である。令和6年度は、計画に基づき、以下の項目について実施した。

### (1) 実機構造模擬試験の試験計画詳細の検討

令和3年度の実機構造模擬(モックアップ)試験の試験計画と、令和5年度に検討した要素試験を再現する有限要素法による解析手法により、実機構造模擬試験体と同一な解析モデルでの FEM 解析を実施し、実機供試体の採取位置及び寸法の検討に資するとともに、実機構造模擬試験の試験計画詳細の検討として以下を実施した。

- 実機構造模擬試験計画の検討

炉心シュラウド等の水中環境、かつ高線量で直接応力測定ができない予防保全対策（ピーニング）施工部位に対しては、試験片を切り出して照射後試験施設に輸送し、応力を測定することが現実的である。ただし、試験片を切断するには残留応力の開放が懸念される。そのため、切断によるピーニング施工部位の応力への影響評価を目的として、実機構造模擬試験の試験計画詳細を検討した。実機構造模擬試験には構造物全体を模擬したフルスケールモックアップと評価対象部の溶接構造等を局部的に再現した部分モックアップを候補とし、部分モックアップは模擬性の説明に労力や費用を要する可能性が高いことから、フルスケールモックアップを実機構造模擬試験として選定した。フルスケールモックアップは炉心シュラウドの中間胴の構造（単純円筒）を再現した上で、試験体模擬範囲は応力測定のために試験体を切り出す部位に、試験体の製造や模擬範囲が影響を及ぼさない範囲でモックアップ試験体を製作する仕様とした。また、対象部から離れた位置は安価な炭素鋼を使用する等も今後の合理化検討の選択肢として考えられる。なお、炉心シュラウド中間胴からのピーニング施工部位の実機材料の採取は、靱性低下に係る検討の「廃炉工事に同調したサンプリング工法（炉心シュラウド）」と同調して確保する方針としたことから、その採取時期は令和 11 年度（2029 年度）以降となることから、実際にフルモックアップ体を製作するかは検討を継続する。

なお、令和 5 年度に実施した研究成果から抽出された課題に基づき、令和 6 年度に実施すべきとする項目として、以下を実施した。成果概要を合わせて示す。

- 切断影響の確認(複合的因子に対する影響確認)

令和 5 年度に実施した要素試験体からの試験体切り出しを想定した最終切断後(100mm×100mm×板厚)の試験片を、更に 50mm×50mm、30mm×30mm まで切断し、ショットピーニング施工部位表層部の残留応力が圧縮となっていることを確認した。また、この切断を模擬した解析モデルを作成し、要素試験体の切断過程におけるショットピーニング施工部位の表層残留応力の測定結果との比較した結果、その定結果の傾向を模擬できていることを確認した。以上より、炉心シュラウド中間胴ピーニング施工部位の切り出しを想定した試験体切断仕様案を 100mm×100mm×板厚とした。この試験体寸法は A 型輸送が可能な寸法である。

- PWR 実機予防保全施工部位応力測定の成立性検討

PWR プラント SG 管台ピーニング施工部を想定して、その場応力測定を検討した。令和 5 年度までに実施した検討を踏まえ、応力測定検証工事の要求、課題、検証項目を整理し、早期に検証すべき課題等の優先順位を評価し、実機での応力測定検証工事に向けたロードマップを策定した。当該ロードマップは応力測定検証工事を実施する年度を N 年度とし、当該工事前の検証期間を 3 年として策定した。実工事にあたっては、本工法で使用する SG-ISI 機材（主にマニピュレータ）が、国内 PWR

検査工事時期で使用されていることから、実施可否、実施する場合はその時期等事業者との調整が必要となる。

## (2) 試験の実施

残留応力分布に影響を与える要因の確認試験として、令和5年度に引き続き、BWRの廃炉段階の除染による影響確認試験を実施した。試験ではピーニング施工した後に実機模擬条件で酸化皮膜を付与した試験片を用いて、除染条件を模擬した腐食試験を行い、残留応力測定及び外観・断面観察等によりピーニング施工部の残留応力に対する除染の影響を評価した。断面観察において酸化皮膜は概ね除去されており、除染模擬試験の妥当性を確認した。一方で、残留応力測定において除染の有意な影響は確認されず、廃炉措置時の除染がピーニング施工部位の応力測定に影響しないことを確認した。

## (3) 事業計画案の見直し

上記、(1)～(2)の成果を総合的に検討し、令和7年度以降の予防保全対策技術の保守性に係る事業計画に見直しはなかった。なお、令和6年度期初の事業計画では、令和7年度(2027年度)までにモックアップ試験を実施し、試験体採取仕様を決定するとした事業計画であったが、(1)の通り、本研究の応力測定用試験体の採取も2029年度以降となったことから、モックアップ試験準備の着手が後ろ倒しとなったことから、実機構造模擬試験の実施可否の判断は継続して検討する事業計画とした。

## 5.4 ステンレス鋼製機器の健全性評価に係る研究

令和5年度までの検討により、BWR運転温度におけるH3Tモデルの保守性を確認した。今年度は、令和3年度に策定した試験計画に基づき、熱時効に関する米国の脆化予測モデルとの比較等を可能とするため、事業成果の価値向上を目的として室温での靱性データを拡充した。

### (1) 試験片の製作

令和6年度は以下の試験片を製作した。

- ・ 1T-C(T)試験片：2体(加えて、1体の予備試験片も製作)
- ・ シャルピー衝撃試験片：12体

### (2) 試験の実施

令和6年度計画の以下の試験を実施した。

#### ■ シャルピー衝撃試験

令和5年度に製作した12体を加え、上記(1)の試験片と合わせて24体のシャルピー衝撃試験片を用いて8温度で試験を実施し、吸収エネルギー、衝撃値、横膨出量及び、延性破面率の温度依存性のデータを拡充した。

#### ■ 破壊靱性試験

2体の1T-C(T)試験片を用いて室温で破壊靱性試験を実施し、データを拡充した。拡

充したデータは、NDR 法で評価した J-R 曲線において高い延性亀裂進展抵抗を示し、BWR プラント再循環ポンプから採取した材料は脆化していないステンレス鋼の特徴を有することを確認した。

### (3) 実機材の輸送

令和3年度より本研究のために事業者より貸与を受けた再循環ポンプ実機材料を、浜岡原子力発電所の事業者指定場所へ令和7年3月3日から3月4日にかけて輸送し、返却を完了した。

### (4) 事業計画案の見直し

BWR プラント再循環ポンプ材は H3T モデル評価値に対して高い破壊靱性値を示し、H3T モデルを用いて評価することの保守性を確認した。また、本事業で用いた再循環ポンプ材の化学成分は公開された実機材化学成分の範疇であることを確認し、本事業における保守性評価の妥当性を確認した。また、事業成果の価値向上を目的として、米国の脆化予測モデルと比較するために室温における靱性データを取得した。

本研究では令和6年度までの成果で研究の目的を達成できたことから、事業計画の見直しはなく、終了とすることとした。

## 5.5 研究実施体制及び実施方法(実機材料を活用した安全研究検討委員会)

### (1) 実機材料を活用した安全研究検討委員会

本事業において収集した情報、研究計画(安全研究戦略マップ含む)、試験方法及び採取したデータの透明性及び客観性を高めるとともに、専門家の意見を広く評価に反映するために、電中研及び電中研以外の専門家による「実機材料を活用した安全研究検討委員会」を設置・運営し、有識者からの意見を参考とするとともに技術的側面からのレビューを受けた。検討委員会は、令和6年度計画のレビューとして第一回を、進捗報告及び検討結果のレビューとして中間報告会の第二回及び第三回を、最終成果報告会として第四回の、計4回の委員会を開催した。

### (2) 原子力規制庁への進捗報告

原子力規制庁に対して、事業開始時点における計画説明及び、各委員会の開催1週間前程度をめどに事業の進捗及び委員会説明内容を報告した。報告におけるコメント等は事業の実施内容に反映した。

## 5.6 まとめ

電中研は、原子力規制庁より、令和6年度原子力施設等防災対策等委託費(実機材料等を活用した経年劣化評価・検証(実機材料を活用した健全性評価に係る研究))事業を受託し、本年度実施計画範囲の研究を完了し、委託報告書としてまとめた。