

# これまでの委員からの質問への回答 (第8回分科会時の質問)

2023年1月30日



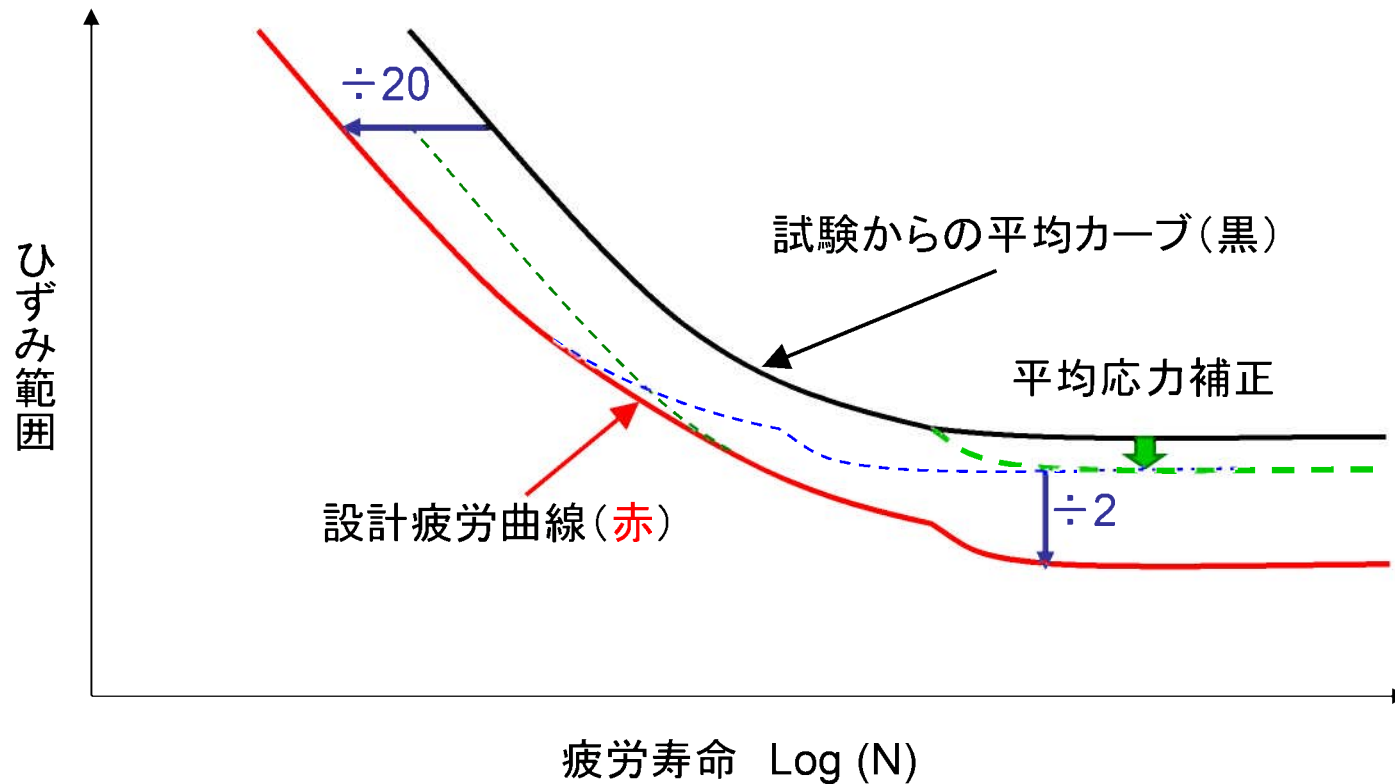
| No. | 資料   | 質問事項   | 質問者          | 頁     |
|-----|--|--|--------------|-------|
| 8-1 | 【資料1】<br>劣化状況評価<br>結果について<br>(低サイクル<br>疲労につい<br>て)           | 疲労累積係数の許容値の考え方について別途資料を作成し説明すること。                            | 佐藤委員<br>大畑委員 | 2~4   |
| 8-2 |  | 低サイクル疲労評価において、溶接残留応力は考慮されているか次回説明すること。                       | 後藤委員         | 5     |
| 8-3 | 【資料2】<br>劣化状況評価<br>結果について<br>(原子炉容器<br>の中性子照射<br>脆化につい<br>て) | 今回提示の資料の写真では破面が見にくく、破面率がわかりにくいため、電子データなど、拡大した写真及び破面率を提示すること。 | 渡邊委員         | 6~41  |
| 8-4 |  | RCS耐圧漏えい試験の方法について、漏えいを検知できるか疑問に感じているため、再度説明すること。             | 佐藤委員         | 42~45 |
| 8-5 |  | 照射試験片の評価結果について、ばらつきの考え方を整理すること。                              | 渡邊委員         | 46~49 |
| 8-6 | 【資料3-1<br>No. 6-11】<br>第6回分科会<br>における質問                      | RVサポート（炭素鋼）の脆化のメカニズムを示すこと。                                   | 渡邊委員         | 50    |
| 8-7 | 【資料3-2<br>No. 追4-7（質<br>問2）】<br>第4回分科会<br>資料資料4に<br>対する質問    | 原子炉格納容器鋼板と貫通部の隙間について、過酷事故を踏まえて縦の変位についても問題ないか説明すること。          | 後藤委員         | 51~53 |

1. 質問事項

疲労累積係数の許容値の考え方について別途資料を作成し説明すること。

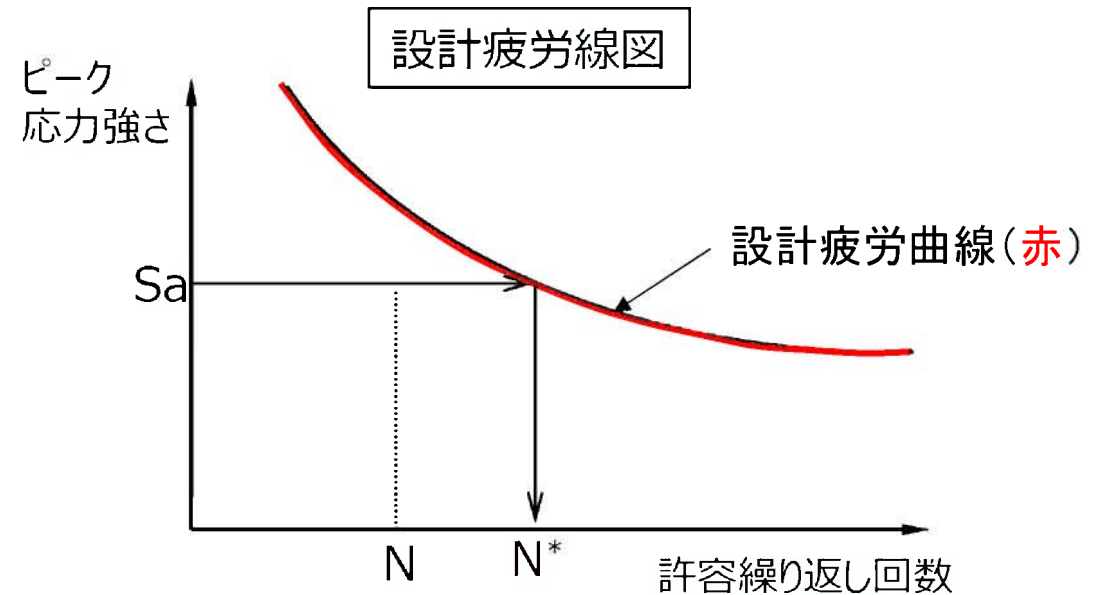
2. 回 答

○試験から得られた平均カーブに平均応力補正を行い、さらに回数で1/20、ひずみで1/2の安全率を考慮した下限曲線を設計疲労曲線（S-N線図）として設定している。



○疲労係数は、許容繰り返し回数 ( $N^*$ ) と実際の繰り返し回数 ( $N$ ) の比である。なお、設計疲労線図より、ピーク応力強さ ( $S_a$ ) に対する許容繰り返し回数 ( $N^*$ ) を求める。

○疲労累積係数 ( $UF$ ) は、過渡の組合せ毎に求めた疲労係数の総和であり、1を超えないことを確認している。



$$UF = \frac{N_1}{N_1^*} + \frac{N_2}{N_2^*} + \frac{N_3}{N_3^*} + \dots + \frac{N_n}{N_n^*} < 1$$

## 【参考】

- 日本機械学会設計・建設規格の設計疲労線図は、米国機械学会（ASME）規格SectionⅢを引用しており、平均応力補正を行い、ひずみで1/2、繰返し数に対して1/20の安全率（データのばらつき効果、表面粗さ効果等を考慮）を設定して作成されている。溶接残留応力は日本機械学会設計・建設規格の設計疲労線図において、平均応力補正する際の平均応力として考慮されている。
- ASME規格の解説であるCompanion Guideでは、安全率は小型平滑試験片で得られた疲労試験データを、大型機器の疲労評価に適用することを考慮した工学的判断に基づく数値で、これまでの研究の結果から安全率は保守的な設定としている。

### 1. 質問事項

低サイクル疲労評価において、溶接残留応力は考慮されているか次回説明すること。

### 2. 回 答

○「資料3－1 No. 8－1」に記載のとおり、設計疲労線図を作成する際に溶接残留応力を考慮している。

1. 質問事項

今回提示の資料の写真では破面が見にくく、破面率がわかりにくいため、電子データなど、拡大した写真及び破面率を提示すること。

2. 回 答

○次頁以降にシャルピー衝撃試験結果を示す。

## 川内1号 照射前 母材のシャルピー衝撃試験結果

| 試験温度<br>(°C) | 吸収エネルギー<br>(J) | 延性破面率<br>(%) |
|--------------|----------------|--------------|
| 125          | 198            | 100          |
|              | 191            | 100          |
|              | 188            | 100          |
| 100          | 208            | 100          |
|              | 193            | 100          |
|              | 186            | 100          |
| 70           | 206            | 100          |
|              | 202            | 100          |
|              | 193            | 100          |
| 50           | 206            | 100          |
|              | 190            | 100          |
|              | 174            | 100          |
| 30           | 156            | 82           |
|              | 155            | 82           |
|              | 146            | 74           |

| 試験温度<br>(°C) | 吸収エネルギー<br>(J) | 延性破面率<br>(%) |
|--------------|----------------|--------------|
| 10           | 136            | 60           |
|              | 134            | 65           |
|              | 118            | 65           |
| -12          | 136            | 55           |
|              | 108            | 38           |
|              | 108            | 49           |
| -30          | 63             | 19           |
|              | 53             | 17           |
|              | 49             | 23           |
| -50          | 59             | 12           |
|              | 27             | 6            |
|              | 11             | 0            |
| -70          | 22             | 0            |
|              | 16             | 0            |
|              | 16             | 0            |



## 川内1号 照射前 溶接金属のシャルピー衝撃試験結果

| 試験温度<br>(°C) | 吸収エネルギー<br>(J) | 延性破面率<br>(%) |
|--------------|----------------|--------------|
| 125          | 237            | 100          |
|              | 222            | 100          |
|              | 215            | 100          |
| 100          | 227            | 100          |
|              | 223            | 100          |
|              | 217            | 100          |
| 70           | 222            | 100          |
|              | 221            | 100          |
|              | 199            | 100          |
| 50           | 223            | 100          |
|              | 208            | 100          |
|              | 196            | 100          |
| 30           | 199            | 100          |
|              | 185            | 100          |
|              | 174            | 89           |

| 試験温度<br>(°C) | 吸収エネルギー<br>(J) | 延性破面率<br>(%) |
|--------------|----------------|--------------|
| 10           | 172            | 83           |
|              | 169            | 100          |
|              | 157            | 100          |
| -12          | 130            | 74           |
|              | 119            | 61           |
|              | 106            | 61           |
| -30          | 84             | 47           |
|              | 82             | 42           |
|              | 76             | 42           |
| -50          | 46             | 27           |
|              | 36             | 27           |
|              | 16             | 16           |
| -70          | 14             | 6            |
|              | 11             | 6            |
|              | 9              | 5            |

## 川内1号 照射前 熱影響部のシャルピー衝撃試験結果

| 試験温度<br>(°C) | 吸収エネルギー<br>(J) | 延性破面率<br>(%) |
|--------------|----------------|--------------|
| 50           | 230            | 100          |
|              | 222            | 100          |
|              | 220            | 100          |
| 21           | 225            | 100          |
|              | 223            | 100          |
|              | 184            | 100          |
| -12          | 200            | 100          |
|              | 199            | 100          |
|              | 187            | 100          |
| -30          | 151            | 67           |
|              | 151            | 81           |
|              | 145            | 65           |
| -50          | 130            | 49           |
|              | 127            | 60           |
|              | 118            | 55           |

| 試験温度<br>(°C) | 吸収エネルギー<br>(J) | 延性破面率<br>(%) |
|--------------|----------------|--------------|
| -70          | 104            | 49           |
|              | 76             | 33           |
|              | 73             | 23           |
|              | 43             | 33           |
| -90          | 82             | 25           |
|              | 76             | 25           |
|              | 54             | 12           |
| -110         | 32             | 6            |
|              | 29             | 6            |
|              | 29             | 6            |
| -130         | 21             | 0            |
|              | 12             | 0            |
|              | 7              | 0            |

## 川内1号 第1回監視試験 母材のシャルピー衝撃試験結果

| 試験温度<br>(°C) | 吸収エネルギー<br>(J) | 延性破面率<br>(%) |
|--------------|----------------|--------------|
| 110          | 170            | 100          |
|              | 163            | 100          |
|              | 159            | 100          |
| 80           | 174            | 100          |
|              | 169            | 100          |
|              | 164            | 100          |
| 50           | 178            | 100          |
|              | 168            | 100          |
|              | 159            | 100          |
| 19           | 116            | 60           |
| 18           | 124            | 65           |
|              | 117            | 60           |
| -5           | 86             | 38           |
|              | 83             | 38           |
|              | 78             | 33           |
| -30          | 46             | 12           |
|              | 22             | 11           |
|              | 20             | 11           |

## 川内1号 第1回監視試験 溶接金属のシャルピー衝撃試験結果

| 試験温度<br>(°C) | 吸収エネルギー<br>(J) | 延性破面率<br>(%) |
|--------------|----------------|--------------|
| 110          | 220            | 100          |
|              | 216            | 100          |
| 80           | 208            | 100          |
|              | 191            | 100          |
| 50           | 186            | 100          |
|              | 173            | 92           |
| 19           | 181            | 90           |
| 18           | 138            | 81           |
| -5           | 113            | 59           |
|              | 111            | 66           |
|              | 95             | 63           |
| -30          | 56             | 39           |
|              | 55             | 44           |
|              | 54             | 40           |
| -55          | 26             | 21           |
|              | 22             | 16           |
|              | 15             | 20           |

## 川内1号 第1回監視試験 熱影響部のシャルピー衝撃試験結果

| 試験温度<br>(°C) | 吸収エネルギー<br>(J) | 延性破面率<br>(%) |
|--------------|----------------|--------------|
| 50           | 207            | 100          |
|              | 202            | 100          |
|              | 194            | 100          |
| 19           | 194            | 100          |
| 18           | 188            | 100          |
| -15          | 161            | 85           |
|              | 146            | 80           |
| -50          | 125            | 61           |
|              | 89             | 27           |
|              | 101            | 44           |
| -80          | 50             | 12           |
|              | 49             | 6            |
|              | 30             | 6            |
| -110         | 32             | 6            |
|              | 32             | 6            |
|              | 27             | 6            |

## 川内1号 第2回監視試験 母材のシャルピー衝撃試験結果

| 試験温度<br>(°C) | 吸収エネルギー<br>(J) | 延性破面率<br>(%) |
|--------------|----------------|--------------|
| 130          | 178            | 100          |
|              | 171            | 100          |
| 100          | 185            | 100          |
|              | 179            | 100          |
|              | 178            | 100          |
| 60           | 168            | 100          |
|              | 156            | 94           |
| 25           | 118            | 55           |
| 22           | 98             | 47           |
| -5           | 64             | 23           |
|              | 59             | 27           |
|              | 53             | 17           |
| -20          | 42             | 11           |
|              | 41             | 17           |
|              | 25             | 10           |
| -40          | 14             | 0            |
|              | 13             | 6            |
|              | 12             | 0            |

## 川内1号 第2回監視試験 溶接金属のシャルピー衝撃試験結果

| 試験温度<br>(°C) | 吸収エネルギー<br>(J) | 延性破面率<br>(%) |
|--------------|----------------|--------------|
| 120          | 203            | 100          |
|              | 197            | 100          |
| 90           | 210            | 100          |
|              | 206            | 100          |
|              | 192            | 100          |
| 60           | 190            | 95           |
|              | 185            | 97           |
| 25           | 146            | 80           |
| 22           | 142            | 76           |
| -5           | 94             | 53           |
|              | 67             | 47           |
|              | 57             | 43           |
| -25          | 48             | 35           |
|              | 44             | 30           |
|              | 29             | 26           |
| -45          | 20             | 11           |
|              | 17             | 16           |
|              | 15             | 16           |

## 川内1号 第2回監視試験 熱影響部のシャルピー衝撃試験結果

| 試験温度<br>(°C) | 吸収エネルギー<br>(J) | 延性破面率<br>(%) |
|--------------|----------------|--------------|
| 80           | 208            | 100          |
|              | 202            | 100          |
| 50           | 200            | 100          |
|              | 195            | 100          |
|              | 191            | 100          |
| 22           | 184            | 96           |
|              | 171            | 100          |
| -15          | 118            | 62           |
|              | 85             | 56           |
| -50          | 63             | 29           |
|              | 47             | 21           |
|              | 41             | 17           |
| -75          | 43             | 17           |
|              | 35             | 11           |
|              | 31             | 11           |
| -100         | 21             | 6            |
|              | 20             | 5            |
|              | 12             | 0            |



## 川内1号 第3回監視試験 母材のシャルピー衝撃試験結果

| 試験温度<br>(°C) | 吸収エネルギー<br>(J) | 延性破面率<br>(%) |
|--------------|----------------|--------------|
| 110          | 170            | 100          |
|              | 163            | 100          |
|              | 160            | 100          |
| 80           | 165            | 100          |
|              | 162            | 100          |
|              | 149            | 90           |
| 50           | 108            | 62           |
|              | 98             | 61           |
|              | 94             | 51           |
| 20           | 71             | 33           |
|              | 67             | 27           |
|              | 61             | 33           |
| 0            | 55             | 23           |
|              | 36             | 12           |
|              | 33             | 17           |
| -20          | 32             | 11           |
|              | 18             | 6            |
|              | 15             | 5            |

## 川内1号 第3回監視試験 溶接金属のシャルピー衝撃試験結果

| 試験温度<br>(°C) | 吸収エネルギー<br>(J) | 延性破面率<br>(%) |
|--------------|----------------|--------------|
| 110          | 189            | 100          |
|              | 181            | 100          |
|              | 178            | 100          |
| 80           | 185            | 100          |
|              | 181            | 100          |
|              | 163            | 93           |
| 50           | 153            | 81           |
|              | 148            | 78           |
|              | 147            | 78           |
| 20           | 88             | 55           |
|              | 85             | 55           |
|              | 79             | 52           |
| 0            | 59             | 35           |
|              | 55             | 35           |
|              | 52             | 35           |
| -20          | 26             | 20           |
|              | 21             | 16           |
|              | 18             | 16           |

## 川内1号 第3回監視試験 熱影響部のシャルピー衝撃試験結果

| 試験温度<br>(°C) | 吸収エネルギー<br>(J) | 延性破面率<br>(%) |
|--------------|----------------|--------------|
| 90           | 184            | 100          |
|              | 182            | 100          |
| 60           | 172            | 100          |
|              | 172            | 100          |
|              | 171            | 100          |
| 30           | 152            | 90           |
|              | 140            | 85           |
| 0            | 100            | 63           |
|              | 93             | 58           |
| -25          | 60             | 40           |
|              | 59             | 36           |
|              | 55             | 33           |
| -50          | 36             | 17           |
|              | 27             | 17           |
|              | 25             | 11           |
| -75          | 24             | 11           |
|              | 22             | 11           |
|              | 18             | 6            |

## 川内1号 第4回監視試験 母材のシャルピー衝撃試験結果

| 試験温度<br>(°C) | 吸収エネルギー<br>(J) | 延性破面率<br>(%) |
|--------------|----------------|--------------|
| 130          | 174            | 100          |
|              | 172            | 100          |
|              | 169            | 100          |
| 100          | 150            | 92           |
|              | 145            | 91           |
|              | 137            | 81           |
| 70           | 137            | 67           |
|              | 100            | 45           |
|              | 98             | 56           |
| 40           | 87             | 33           |
|              | 71             | 31           |
|              | 57             | 27           |
| 19           | 41             | 21           |
| 17           | 39             | 21           |
|              | 35             | 17           |
| -10          | 29             | 6            |
|              | 26             | 6            |
|              | 14             | 6            |

## 川内1号 第4回監視試験 溶接金属のシャルピー衝撃試験結果

| 試験温度<br>(°C) | 吸収エネルギー<br>(J) | 延性破面率<br>(%) |
|--------------|----------------|--------------|
| 130          | 200            | 100          |
|              | 185            | 100          |
|              | 180            | 100          |
| 90           | 176            | 94           |
|              | 160            | 88           |
|              | 149            | 90           |
| 60           | 132            | 78           |
|              | 102            | 69           |
|              | 81             | 62           |
| 35           | 87             | 52           |
|              | 83             | 52           |
|              | 67             | 43           |
| 19           | 38             | 34           |
| 17           | 42             | 31           |
|              | 32             | 30           |
| -10          | 17             | 21           |
|              | 14             | 21           |
|              | 13             | 21           |

## 川内1号 第4回監視試験 熱影響部のシャルピー衝撃試験結果

| 試験温度<br>(°C) | 吸収エネルギー<br>(J) | 延性破面率<br>(%) |
|--------------|----------------|--------------|
| 110          | 178            | 100          |
|              | 178            | 100          |
|              | 161            | 100          |
| 80           | 163            | 88           |
|              | 159            | 100          |
| 50           | 163            | 84           |
|              | 150            | 81           |
| 25           | 129            | 72           |
| 17           | 89             | 58           |
|              | 87             | 58           |
| 0            | 99             | 60           |
|              | 75             | 47           |
|              | 48             | 40           |
| -20          | 42             | 27           |
|              | 38             | 27           |
|              | 38             | 21           |
| -50          | 35             | 17           |
|              | 26             | 11           |

## 川内1号 第5回監視試験 母材のシャルピー衝撃試験結果

| 試験温度<br>(°C) | 吸収エネルギー<br>(J) | 延性破面率<br>(%) |
|--------------|----------------|--------------|
| 170          | 158            | 100          |
|              | 148            | 100          |
|              | 145            | 100          |
| 110          | 138            | 88           |
|              | 136            | 80           |
|              | 122            | 67           |
| 80           | 82             | 44           |
|              | 81             | 44           |
|              | 74             | 40           |
| 50           | 69             | 31           |
|              | 61             | 31           |
|              | 58             | 27           |
| 27           | 37             | 21           |
|              | 30             | 17           |
| 24           | 17             | 10           |
| 0            | 18             | 11           |
|              | 16             | 11           |
|              | 9              | 5            |

## 川内1号 第5回監視試験 溶接金属のシャルピー衝撃試験結果

| 試験温度<br>(°C) | 吸収エネルギー<br>(J) | 延性破面率<br>(%) |
|--------------|----------------|--------------|
| 160          | 173            | 100          |
|              | 169            | 100          |
|              | 163            | 100          |
| 140          | 175            | 100          |
|              | 171            | 100          |
|              | 159            | 98           |
| 100          | 149            | 89           |
|              | 130            | 83           |
| 75           | 99             | 66           |
|              | 93             | 55           |
| 50           | 68             | 44           |
|              | 64             | 39           |
|              | 49             | 35           |
| 24           | 37             | 30           |
|              | 32             | 26           |
|              | 27             | 26           |
| 0            | 20             | 20           |
|              | 12             | 16           |



## 川内1号 第5回監視試験 熱影響部のシャルピー衝撃試験結果

| 試験温度<br>(°C) | 吸収エネルギー<br>(J) | 延性破面率<br>(%) |
|--------------|----------------|--------------|
| 130          | 161            | 100          |
|              | 156            | 100          |
|              | 155            | 100          |
| 90           | 158            | 100          |
|              | 151            | 100          |
|              | 139            | 98           |
| 50           | 96             | 61           |
|              | 91             | 52           |
|              | 73             | 40           |
| 24           | 83             | 45           |
|              | 42             | 31           |
|              | 37             | 31           |
| 0            | 30             | 21           |
|              | 35             | 17           |
|              | 34             | 16           |
| -30          | 31             | 11           |
|              | 22             | 11           |
|              | 20             | 11           |

## 川内2号 照射前 母材のシャルピー衝撃試験結果

| 試験温度<br>(°C) | 吸収エネルギー<br>(J) | 延性破面率<br>(%) |
|--------------|----------------|--------------|
| 100          | 239            | 100          |
|              | 223            | 100          |
|              | 215            | 100          |
| 75           | 251            | 100          |
|              | 234            | 100          |
|              | 232            | 100          |
| 50           | 228            | 100          |
|              | 228            | 100          |
|              | 217            | 100          |
| 21           | 187            | 76           |
|              | 182            | 67           |
|              | 177            | 74           |
| 3            | 151            | 57           |
|              | 141            | 52           |
|              | 106            | 58           |

| 試験温度<br>(°C) | 吸収エネルギー<br>(J) | 延性破面率<br>(%) |
|--------------|----------------|--------------|
| -12          | 119            | 47           |
|              | 105            | 42           |
|              | 88             | 36           |
| -30          | 79             | 27           |
|              | 70             | 21           |
|              | 65             | 21           |
| -50          | 53             | 17           |
|              | 28             | 6            |
|              | 24             | 11           |
|              | 22             | 6            |
| -70          | 24             | 0            |
|              | 12             | 0            |
|              | 10             | 0            |
| -90          | 10             | 0            |
|              | 9              | 0            |
|              | 8              | 0            |

## 川内2号 照射前 溶接金属のシャルピー衝撃試験結果

| 試験温度<br>(°C) | 吸収エネルギー<br>(J) | 延性破面率<br>(%) |
|--------------|----------------|--------------|
| 100          | 289            | 100          |
|              | 280            | 100          |
|              | 248            | 100          |
| 75           | 250            | 100          |
|              | 247            | 100          |
|              | 225            | 100          |
| 50           | 232            | 100          |
|              | 227            | 100          |
|              | 224            | 100          |
| 21           | 214            | 95           |
|              | 192            | 88           |
|              | 184            | 88           |
| -12          | 177            | 80           |
|              | 154            | 72           |
|              | 145            | 65           |
| -27          | 128            | 58           |
|              | 124            | 58           |
|              | 119            | 58           |

| 試験温度<br>(°C) | 吸収エネルギー<br>(J) | 延性破面率<br>(%) |
|--------------|----------------|--------------|
| -50          | 76             | 39           |
|              | 56             | 35           |
|              | 48             | 39           |
|              | 27             | 34           |
| -70          | 25             | 30           |
|              | 25             | 30           |
|              | 25             | 26           |
| -90          | 16             | 10           |
|              | 15             | 10           |
|              | 11             | 10           |

## 川内2号 照射前 熱影響部のシャルピー衝撃試験結果

| 試験温度<br>(°C) | 吸収エネルギー<br>(J) | 延性破面率<br>(%) |
|--------------|----------------|--------------|
| 50           | 243            | 100          |
|              | 229            | 100          |
|              | 228            | 100          |
| 21           | 247            | 100          |
|              | 245            | 100          |
|              | 235            | 100          |
| 0            | 234            | 100          |
|              | 213            | 100          |
|              | 212            | 100          |
| -22          | 193            | 80           |
|              | 176            | 69           |
|              | 168            | 72           |
| -40          | 151            | 67           |
|              | 131            | 65           |
|              | 130            | 62           |
| -65          | 163            | 60           |
|              | 150            | 55           |
|              | 143            | 65           |
|              | 76             | 36           |
|              | 49             | 31           |

| 試験温度<br>(°C) | 吸収エネルギー<br>(J) | 延性破面率<br>(%) |
|--------------|----------------|--------------|
| -90          | 122            | 35           |
|              | 76             | 27           |
|              | 61             | 17           |
|              | 47             | 16           |
| -110         | 44             | 11           |
|              | 31             | 11           |
|              | 19             | 11           |
| -125         | 32             | 11           |
|              | 23             | 0            |
|              | 17             | 11           |
| -140         | 23             | 6            |
|              | 15             | 0            |
|              | 14             | 0            |

## 川内2号 第1回監視試験 母材のシャルピー衝撃試験結果

| 試験温度<br>(°C) | 吸収エネルギー<br>(J) | 延性破面率<br>(%) |
|--------------|----------------|--------------|
| 110          | 217            | 100          |
|              | 214            | 100          |
|              | 213            | 100          |
| 80           | 207            | 100          |
|              | 206            | 100          |
|              | 206            | 100          |
| 50           | 188            | 88           |
|              | 188            | 89           |
|              | 178            | 86           |
| 14           | 155            | 62           |
|              | 150            | 65           |
|              | 138            | 65           |
| -20          | 76             | 27           |
|              | 69             | 27           |
|              | 48             | 17           |
| -50          | 24             | 5            |
|              | 23             | 5            |
|              | 14             | 0            |

## 川内2号 第1回監視試験 溶接金属のシャルピー衝撃試験結果

| 試験温度<br>(°C) | 吸収エネルギー<br>(J) | 延性破面率<br>(%) |
|--------------|----------------|--------------|
| 110          | 199            | 100          |
|              | 191            | 100          |
|              | 188            | 100          |
| 80           | 203            | 100          |
|              | 195            | 100          |
|              | 194            | 100          |
| 50           | 193            | 99           |
|              | 181            | 100          |
|              | 178            | 96           |
| 14           | 147            | 83           |
|              | 128            | 72           |
|              | 124            | 70           |
| -20          | 67             | 40           |
|              | 61             | 40           |
|              | 55             | 39           |
| -50          | 37             | 26           |
|              | 25             | 26           |
|              | 24             | 20           |

## 川内2号 第1回監視試験 熱影響部のシャルピー衝撃試験結果

| 試験温度<br>(°C) | 吸収エネルギー<br>(J) | 延性破面率<br>(%) |
|--------------|----------------|--------------|
| 50           | 220            | 100          |
|              | 216            | 100          |
|              | 212            | 100          |
| 14           | 220            | 100          |
|              | 213            | 100          |
|              | 210            | 100          |
| -20          | 208            | 100          |
|              | 181            | 85           |
| -60          | 111            | 38           |
|              | 99             | 42           |
|              | 96             | 42           |
| -90          | 44             | 11           |
|              | 36             | 11           |
|              | 33             | 11           |
| -120         | 24             | 6            |
|              | 21             | 0            |
|              | 18             | 0            |

## 川内2号 第2回監視試験 母材のシャルピー衝撃試験結果

| 試験温度<br>(°C) | 吸収エネルギー<br>(J) | 延性破面率<br>(%) |
|--------------|----------------|--------------|
| 110          | 206            | 100          |
|              | 203            | 100          |
|              | 200            | 100          |
| 75           | 208            | 100          |
|              | 197            | 100          |
| 45           | 149            | 72           |
|              | 139            | 67           |
| 20           | 103            | 45           |
| 17           | 82             | 40           |
|              | 69             | 35           |
| -5           | 52             | 26           |
|              | 46             | 21           |
|              | 35             | 16           |
| -25          | 26             | 11           |
|              | 20             | 11           |
|              | 12             | 5            |
| -45          | 9              | 0            |
|              | 6              | 0            |



## 川内2号 第2回監視試験 溶接金属のシャルピー衝撃試験結果

| 試験温度<br>(°C) | 吸収エネルギー<br>(J) | 延性破面率<br>(%) |
|--------------|----------------|--------------|
| 100          | 200            | 100          |
|              | 197            | 100          |
|              | 197            | 100          |
| 50           | 194            | 95           |
|              | 190            | 96           |
|              | 180            | 93           |
| 24           | 139            | 74           |
| 17           | 135            | 74           |
|              | 122            | 67           |
| -5           | 96             | 59           |
|              | 89             | 56           |
|              | 80             | 48           |
| -25          | 41             | 31           |
|              | 37             | 30           |
|              | 27             | 20           |
| -50          | 17             | 20           |
|              | 15             | 16           |
|              | 11             | 16           |

## 川内2号 第2回監視試験 熱影響部のシャルピー衝撃試験結果

| 試験温度<br>(°C) | 吸収エネルギー<br>(J) | 延性破面率<br>(%) |
|--------------|----------------|--------------|
| 50           | 220            | 100          |
|              | 215            | 100          |
|              | 211            | 100          |
| 0            | 192            | 100          |
|              | 144            | 76           |
| -20          | 133            | 61           |
|              | 133            | 58           |
| -40          | 113            | 50           |
|              | 90             | 40           |
|              | 89             | 42           |
| -60          | 61             | 26           |
|              | 43             | 16           |
|              | 43             | 16           |
| -80          | 30             | 11           |
|              | 29             | 11           |
|              | 25             | 5            |
| -100         | 5              | 5            |
|              | 3              | 0            |

## 川内2号 第3回監視試験 母材のシャルピー衝撃試験結果

| 試験温度<br>(°C) | 吸収エネルギー<br>(J) | 延性破面率<br>(%) |
|--------------|----------------|--------------|
| 150          | 210            | 100          |
|              | 207            | 100          |
|              | 199            | 100          |
| 110          | 199            | 100          |
|              | 189            | 100          |
|              | 187            | 95           |
| 80           | 163            | 74           |
|              | 161            | 79           |
|              | 160            | 76           |
| 40           | 76             | 40           |
|              | 74             | 40           |
|              | 71             | 40           |
| 17           | 49             | 26           |
| 14           | 54             | 31           |
|              | 41             | 26           |
| 0            | 25             | 16           |
|              | 22             | 16           |
|              | 20             | 11           |

## 川内2号 第3回監視試験 溶接金属のシャルピー衝撃試験結果

| 試験温度<br>(°C) | 吸収エネルギー<br>(J) | 延性破面率<br>(%) |
|--------------|----------------|--------------|
| 150          | 206            | 100          |
|              | 192            | 100          |
|              | 190            | 100          |
| 110          | 200            | 100          |
|              | 194            | 100          |
|              | 185            | 100          |
| 80           | 197            | 94           |
|              | 172            | 89           |
|              | 170            | 88           |
| 50           | 116            | 66           |
|              | 103            | 62           |
|              | 84             | 59           |
| 17           | 51             | 39           |
| 14           | 59             | 44           |
|              | 36             | 30           |
| 0            | 27             | 26           |
|              | 26             | 21           |
|              | 23             | 26           |

## 川内2号 第3回監視試験 熱影響部のシャルピー衝撃試験結果

| 試験温度<br>(°C) | 吸収エネルギー<br>(J) | 延性破面率<br>(%) |
|--------------|----------------|--------------|
| 100          | 209            | 100          |
|              | 205            | 100          |
|              | 198            | 100          |
| 60           | 184            | 100          |
|              | 181            | 100          |
|              | 170            | 100          |
| 16           | 146            | 69           |
|              | 143            | 62           |
|              | 133            | 62           |
| -10          | 86             | 40           |
|              | 76             | 36           |
|              | 73             | 36           |
| -30          | 47             | 21           |
|              | 45             | 21           |
|              | 43             | 21           |
| -50          | 34             | 17           |
|              | 11             | 11           |
|              | 9              | 11           |

## 川内2号 第4回監視試験 母材のシャルピー衝撃試験結果

| 試験温度<br>(°C) | 吸収エネルギー<br>(J) | 延性破面率<br>(%) |
|--------------|----------------|--------------|
| 170          | 184            | 100          |
|              | 182            | 100          |
|              | 173            | 100          |
| 110          | 189            | 100          |
|              | 170            | 100          |
|              | 148            | 96           |
| 70           | 157            | 81           |
|              | 106            | 63           |
|              | 106            | 56           |
| 40           | 47             | 35           |
|              | 61             | 31           |
|              | 56             | 31           |
| 20           | 43             | 27           |
|              | 26             | 16           |
|              | 22             | 16           |
| 0            | 17             | 11           |
|              | 14             | 11           |
|              | 7              | 10           |

## 川内2号 第4回監視試験 溶接金属のシャルピー衝撃試験結果

| 試験温度<br>(°C) | 吸収エネルギー<br>(J) | 延性破面率<br>(%) |
|--------------|----------------|--------------|
| 160          | 185            | 100          |
|              | 182            | 100          |
|              | 181            | 100          |
| 110          | 168            | 100          |
|              | 164            | 94           |
|              | 161            | 94           |
| 60           | 108            | 75           |
|              | 117            | 70           |
|              | 76             | 62           |
| 40           | 66             | 55           |
|              | 54             | 44           |
|              | 38             | 44           |
| 20           | 49             | 55           |
|              | 48             | 47           |
|              | 22             | 34           |
| 0            | 33             | 39           |
|              | 21             | 26           |
|              | 17             | 26           |

## 川内2号 第4回監視試験 熱影響部のシャルピー衝撃試験結果

| 試験温度<br>(°C) | 吸収エネルギー<br>(J) | 延性破面率<br>(%) |
|--------------|----------------|--------------|
| 120          | 172            | 100          |
|              | 171            | 100          |
|              | 170            | 100          |
| 60           | 154            | 100          |
|              | 146            | 100          |
|              | 149            | 92           |
| 20           | 100            | 62           |
|              | 93             | 56           |
|              | 99             | 53           |
| -10          | 58             | 36           |
|              | 49             | 31           |
|              | 46             | 26           |
| -30          | 36             | 21           |
|              | 26             | 21           |
|              | 23             | 21           |
| -50          | 11             | 11           |
|              | 7              | 11           |
|              | 4              | 5            |



○延性破面率の測定要領を以下に示す。

○シャルピー衝撃試験片断面より脆性破面の寸法 $A'$ 及び $B'$ を計測し、ASTM規格（米国の規格設定機関が定める規格）に従い、寸法 $A$ 及び $B$ に丸める。なお、この際に寸法 $A$ 及び $B$ がゼロとなる場合は100%延性破面と見なす。

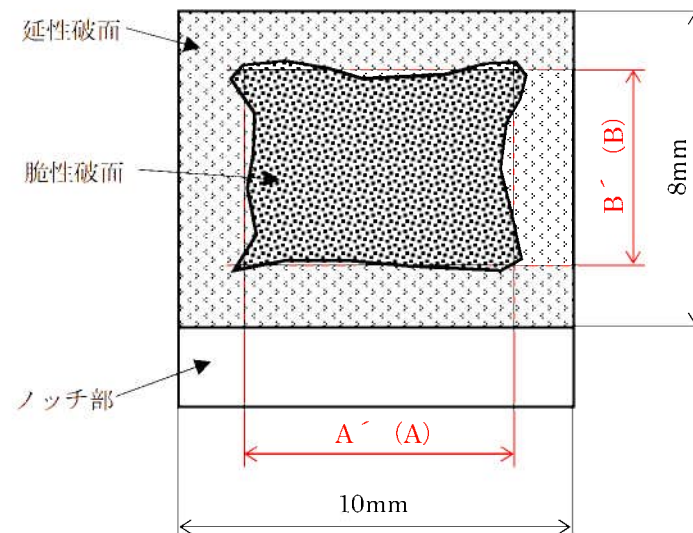
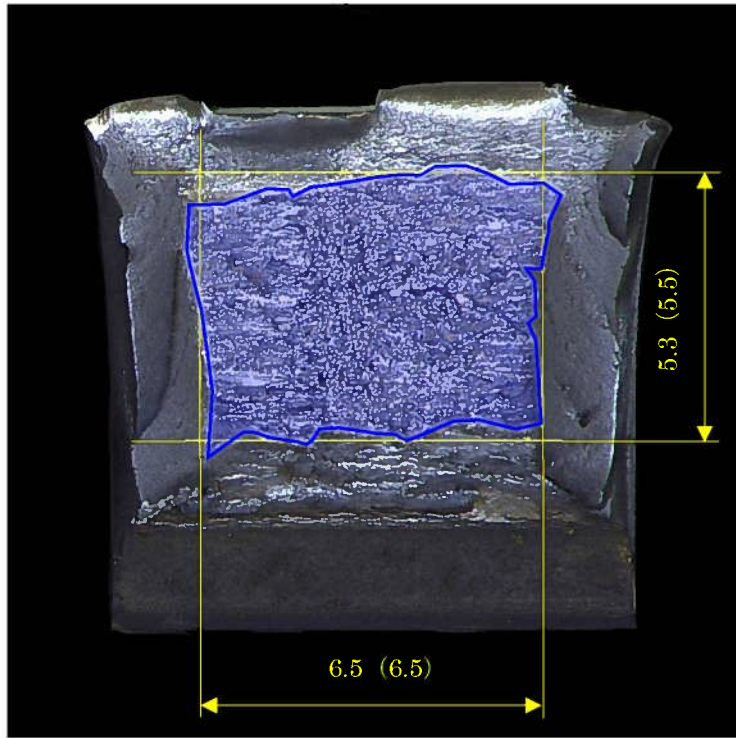
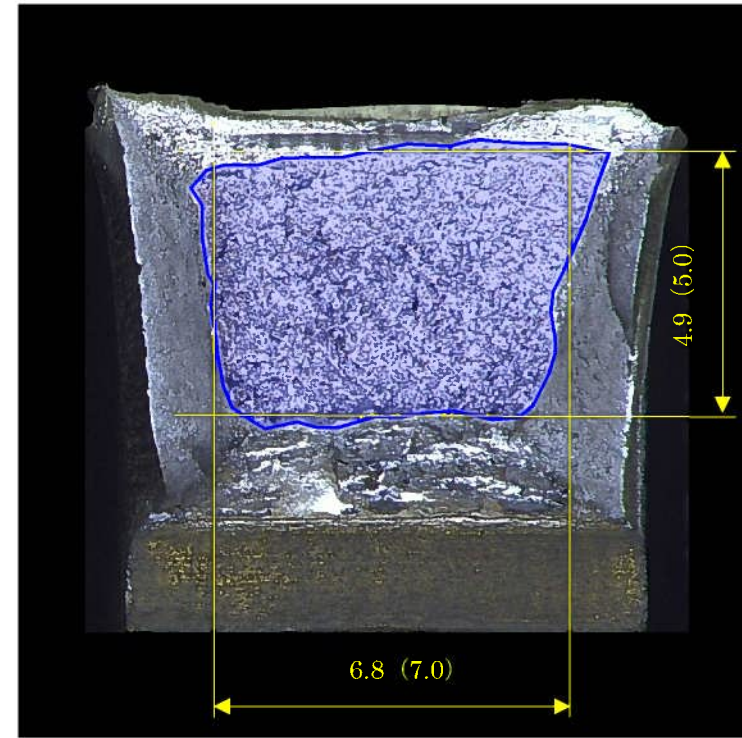


図1 シャルピー衝撃試験片断面模式図

○延性破面率が50%近傍の各部材のシャルピー衝撃試験片の断面写真について、次頁に示す。



単位：mm  
( )内は丸め値



単位：mm  
( )内は丸め値

図2 川内1号第5回溶接金属のシャルピー衝撃試験片  
[試験温度 (75°C), 延性破面率 (55%)]

図3 川内2号第4回母材のシャルピー衝撃試験片  
[試験温度 (70°C), 延性破面率 (56%)]

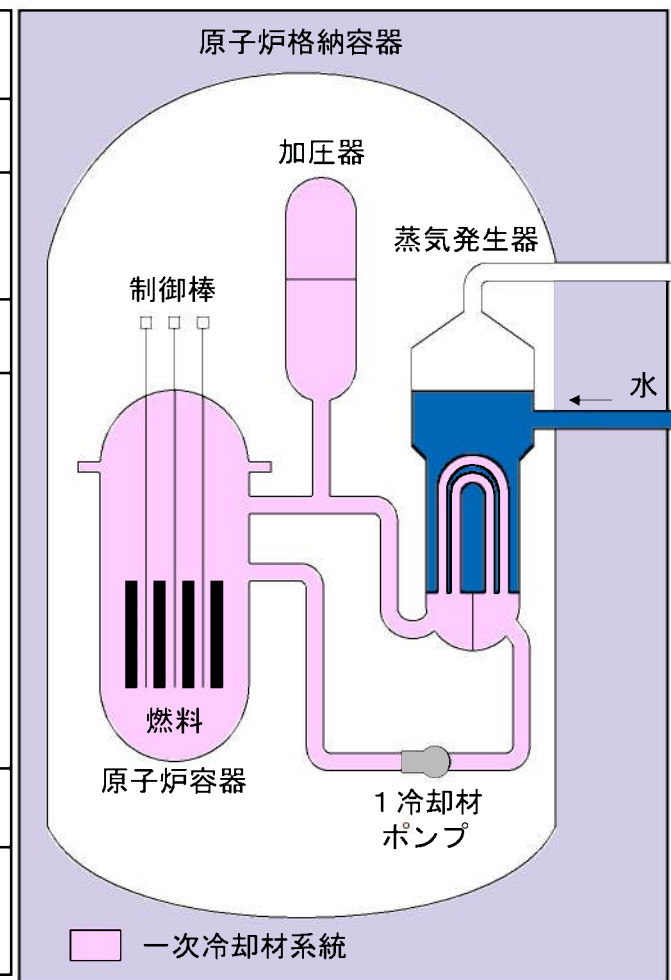
1. 質問事項

RCS耐圧漏えい試験の方法について、漏えいを検知できるか疑問に感じているため、再度説明すること。

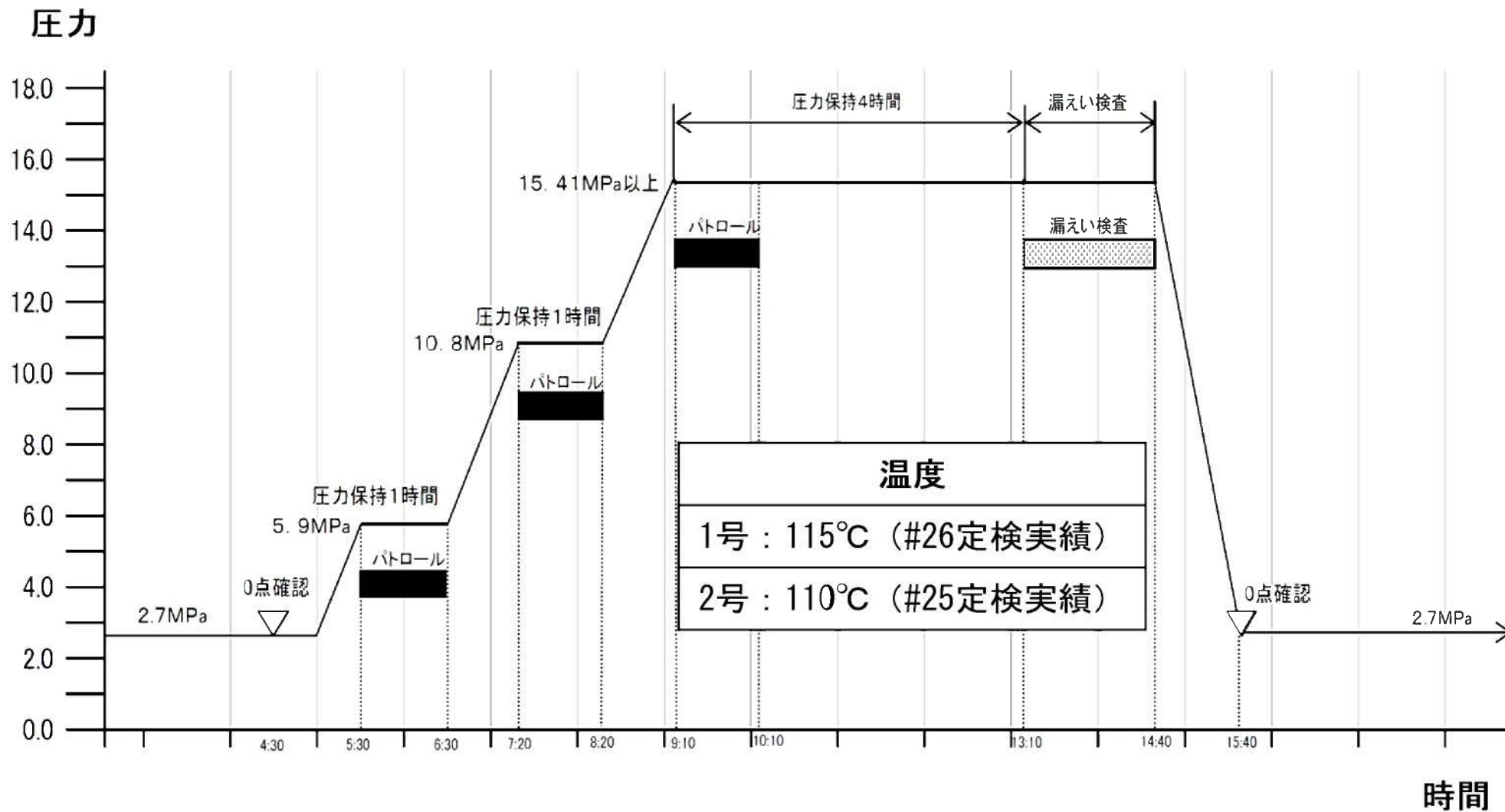
2. 回 答

○1次冷却材系統（以下「RCS」という。）耐圧漏えい試験の概要、漏えい検知手法等に関して、以下に示す。

| 項 目     | 内 容  |
|---------|--|
| 目的      | RCS圧力バウンダリからの漏えいがないことを確認する。  |
| 検査時期    | 毎定期検査時の原子炉起動準備段階<br>(水張完了、RCS昇温昇圧前)  |
| 検査範囲    | 右図中ピンク部の範囲を確認する。   |
| 検査条件    | 以下の条件下にて、RCSの各部より漏えいがないことを確認する。<br>検査工程、現場確認のタイミングなどについては、次頁に示す。<br>・ 圧力(通常運転圧力以上) : 15.41MPa以上(1/2号共通)<br>・ 温度(監視試験結果から算出) : 115°C(1号#26定検実績)<br>110°C(2号#25定検実績) |
| 判定基準    | 著しい漏えいがないこと。   |
| 漏えい検知手法 | 次頁以降にて示す。  |



RCS漏えい検査工程



（続き）

○漏えい検知方法

- ・ 通常運転圧力以上の圧力を4時間以上ほぼ一定に保持後、維持規格のVT-2に従い、目視にて確認する。
- ・ 確認にあたっては、確認範囲ごとでチームを組んで確認を実施する。  
（1チーム4名以上×3チーム（総員 約15名以上））
- ・ 漏えいの有無については、保温材の外表面及び継手等からの漏えいの有無を確認するとともに、検査圧力が安定していることも確認している。
- ・ 機器、構造物からの漏えいの有無はその直下の床、外表面の水滴、漏れ等の有無により確認する。
- ・ 目視は照度を確保し、フランジ部、継手部などの特に漏えいが発生する可能性が高い場所については、試験温度が沸点以上であることを考慮し、手鏡等を当てた際の漏えい蒸気によるくもりの有無、フランジ部、継手部からのにじみ、下部の水滴などに注意する。
- ・ また、保温材に覆われている箇所について漏えいがあった場合は、4時間以上の圧力保持中に保温材中に染みだした漏えい水がにじんでくることを考慮し、保温材の表面・継目、直下の床などについても確認を行う。
- ・ 特に以下の重要な部位については、入念な確認を実施する。

| 機 器      | 具体的な箇所（例）          |
|----------|--------------------|
| 原子炉容器    | 蓋フランジ部、上蓋炉内温度計装管台部 |
| 加圧器      | 加圧器ヒータスリーブ貫通部      |
| 蒸気発生器    | マンホールフランジ部         |
| 1次冷却材ポンプ | シール水ノズル部等の配管フランジ部  |
| 弁        | フランジ部              |

【参考】（VT-2関連記載 維持規格抜粋）

IA-2522 VT-2試験

- （1）VT-2試験は、系の漏えい試験の場合に、耐圧機器からの漏えいを検出するために行う試験とする。
- （2）VT-2試験は、IA-3000の規定に従って行わなければならない。直接目視試験における眼から試験対象部位の表面までの距離は1,800mm以内としなければならない。
- （3）遠隔目視試験におけるカメラ等の光学装置から試験対象部の表面までの距離は、IA-2520(1)b.の規定が満足できる範囲以内としなければならない。

1. 質問事項

照射試験片の評価結果について、ばらつきの考え方を整理すること。

2. 回 答

○次頁以降に整理した結果を示す。

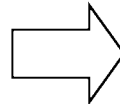
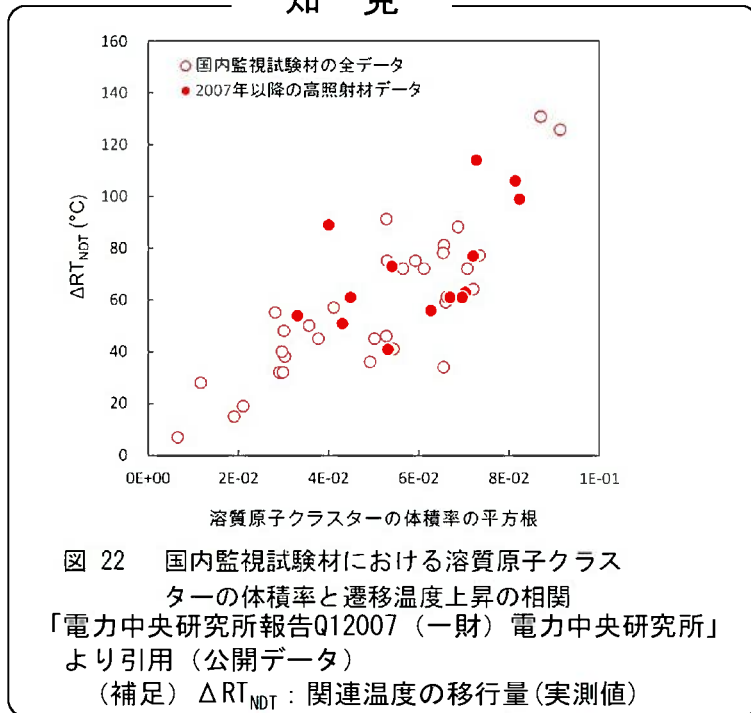
脆化予測モデル（関連温度予測モデル）と川内1,2号炉の関連温度予測グラフの関係について

脆化予測モデル(関連温度予測モデル)の開発【電力中央研究所】

関連温度の移行量（実測値）と溶質原子クラスターの体積率の平方根（実測値）に相関があるという知見が得られ、現行の脆化予測モデル（関連温度予測モデル）が開発された。なお、図22には川内1,2号炉の過去※のアトムプローブ測定結果も含まれている。

※川内1号炉：第3回、第4回監視試験 川内2号炉：第3回監視試験

知見



関連温度予測モデル

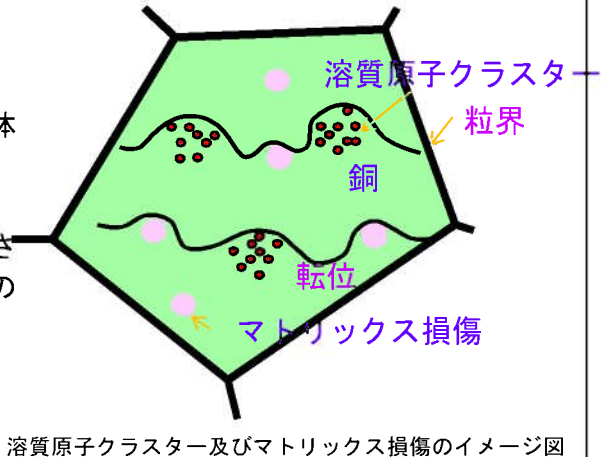
$$\text{関連温度の上昇量} = \left( (\Delta T_{SC})^2 + (\Delta T_{MD})^2 \right)^{1/2}$$

$$\Delta T_{SC} = \zeta a \times (\text{溶質原子クラスター体積率})^{1/2}$$

$$\Delta T_{MD} = \zeta b \times (\text{マトリックス損傷数密度})^{1/2}$$

$\zeta a$ 、 $\zeta b$ ：監視試験データに基づいて決定する係数

- 溶質原子クラスター  
中性子照射によって析出する銅、ニッケル、マンガン、シリコンを主体とする微小な集合体
  - マトリックス損傷  
中性子照射によって鋼材中に形成される格子間原子などからなる点欠陥の微小な集合体等
- なお、マトリックス損傷の寄与は、溶質原子クラスターの寄与より小さいことが知られている。



規格の発刊【日本電気協会】

開発された予測モデルから、関連温度移行量の予測式の算出方法がJEAC4201-2007/2013年追補版として策定。(規制のエンドース済)



JEAC4201-2007/2013年追補版を用いて、川内1,2号炉の関連温度予測グラフを算出している。図22は、関連温度予測モデル開発時の知見であり、ばらつきが川内1,2号炉の原子炉容器の健全性評価において問題となることはない。(このグラフのばらつきの要因については、後述)



図22の当社データにおいて、同程度の溶質原子クラスター体積率の平方根における関連温度の移行量の差（ばらつき）として考えられる主な要因は、以下のとおりである。

【横軸】

○溶質原子クラスターの体積率の平方根（実測値）のばらつき

鋼材はJIS等を満足するように化学組成が調整されているが、鋼材の化学組成はミクロ単位で揺らぎがある。アトムプローブ測定領域は化学組成の揺らぎより小さく、試験片の採取位置によって、この影響を受けると考えられており、ばらつきが生じる。なお、複数回の測定を行い、平均をとることでばらつきを減少させるよう努めている。

【縦軸】

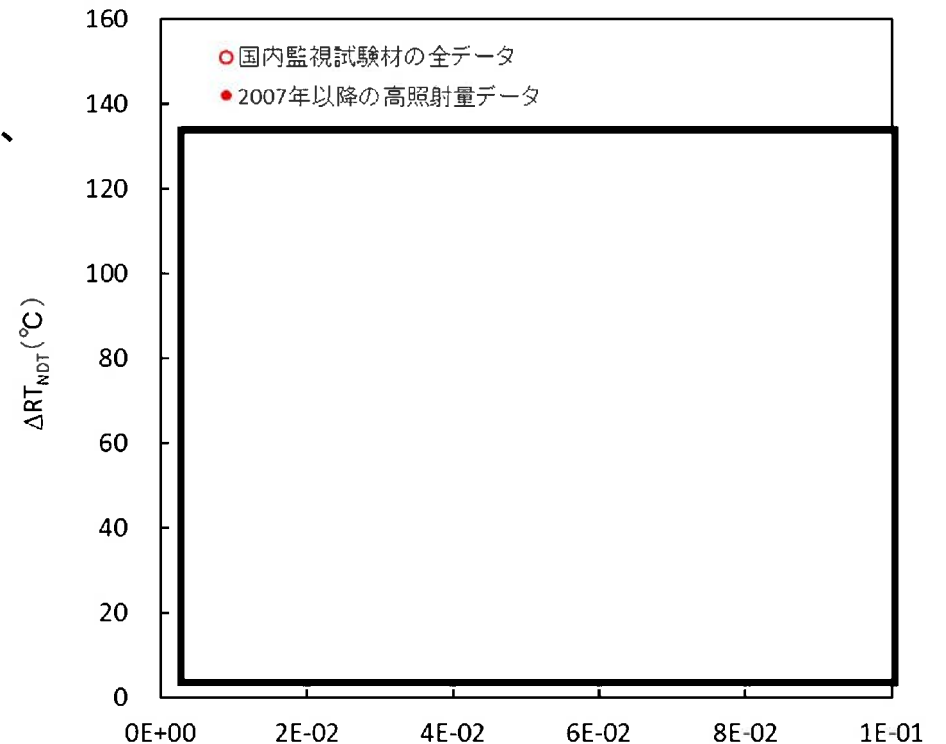
○関連温度の移行量： $\Delta RT_{NDT}$ （実測値）のばらつき

$\Delta RT_{NDT}$ （実測値）は、シャルピー衝撃試験から求められる。シャルピー衝撃試験では、同一鋼材においてもある程度のばらつきが生じることが知られている。

○マトリックス損傷による影響

$\Delta RT_{NDT}$ へのマトリックス損傷の寄与は少ないことが知られているが、

$$\Delta RT_{NDT} = \left( (\Delta TSC)^2 + (\Delta TMD)^2 \right)^{1/2}$$
 の関係より、マトリックス損傷の影響も考えられる。



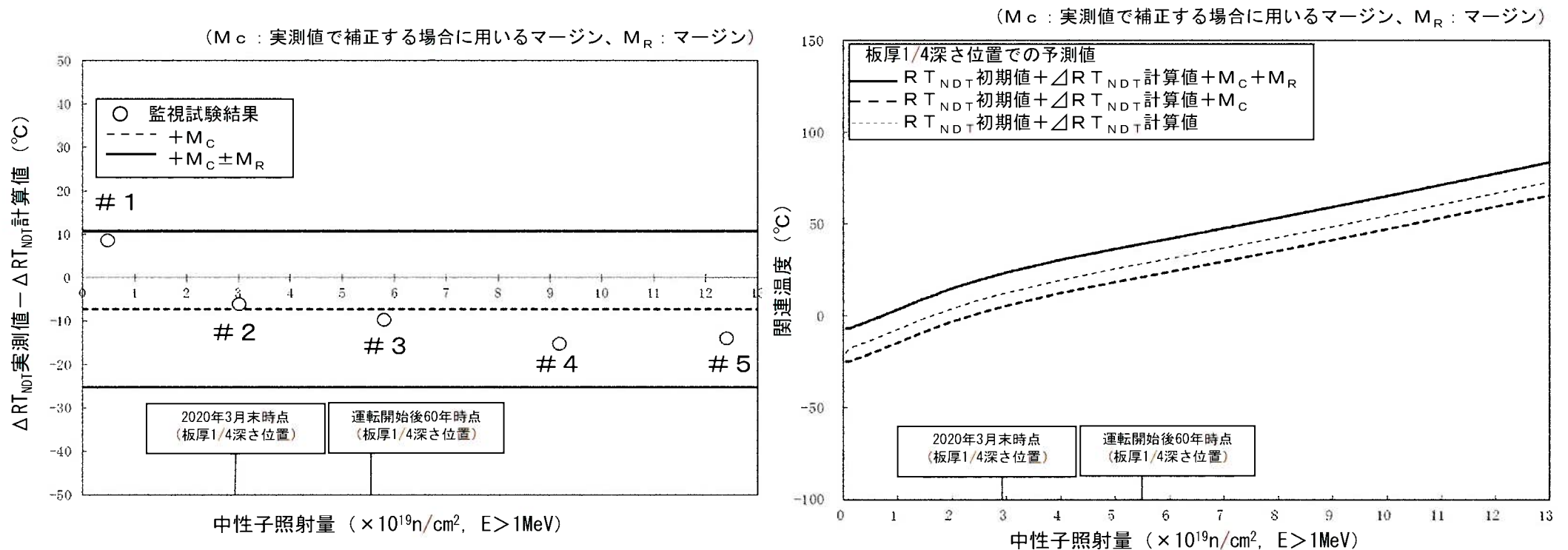
溶質原子クラスターの体積率の平方根

(補足)  $\Delta RT_{NDT}$ ：関連温度の移行量(実測値)

□内は機密に係る事項であるため公開できません。

監視試験（関連温度の実測値）のばらつきを考慮したマージン（ $M_R=18^\circ\text{C}$ ）を踏まえて、関連温度予測グラフを算出するよう、JEAC4201-2007/2013年追補版に規定されている。

川内1, 2号炉の原子炉容器の関連温度予測グラフの算出過程でマージンが加わることから、ばらつきを考慮した評価を行っている。



川内1号炉 中性子照射脆化に対する関連温度の国内脆化予測式による予測と監視試験結果(母材)

## 1. 質問事項

R Vサポート（炭素鋼）の脆化のメカニズムを示すこと。

## 2. 回 答

金属材料の延性は、原子の転位運動によるものであり、中性子照射を受けることで欠陥が発生し、この欠陥が原子の転位運動を阻害することによって延性が低下、硬化し、降伏応力が大きくなる。これによって、中性子照射を受けていない場合と比較して、より高い温度で脆性的な破壊挙動を示すことになる（延性脆性遷移温度の上昇）。

R Vサポートの材料である炭素鋼（溶接構造用圧延鋼材）は、結晶構造が体心立方構造であり、低温域で降伏応力が高い傾向にある。従って、延性脆性遷移温度以下では、降伏して延性破壊が生じる前に、へき開破壊が生じ、脆性的な破壊挙動を示す。

なお、最低使用温度（21℃）において、応力拡大係数が破壊靱性値を下回っており、R Vサポートが脆性破壊を起こさないことを確認している。（第6回分科会 資料4-1 No. 5-9にて回答）

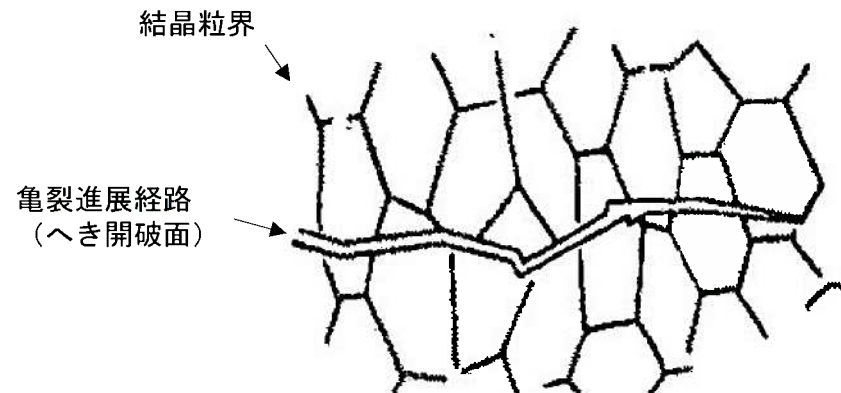


図 へき開破壊の概念図

出典：飯田、破壊の原因をさぐるフラクトグラフィ（破面解析）、金属材料、1972

1. 質問事項

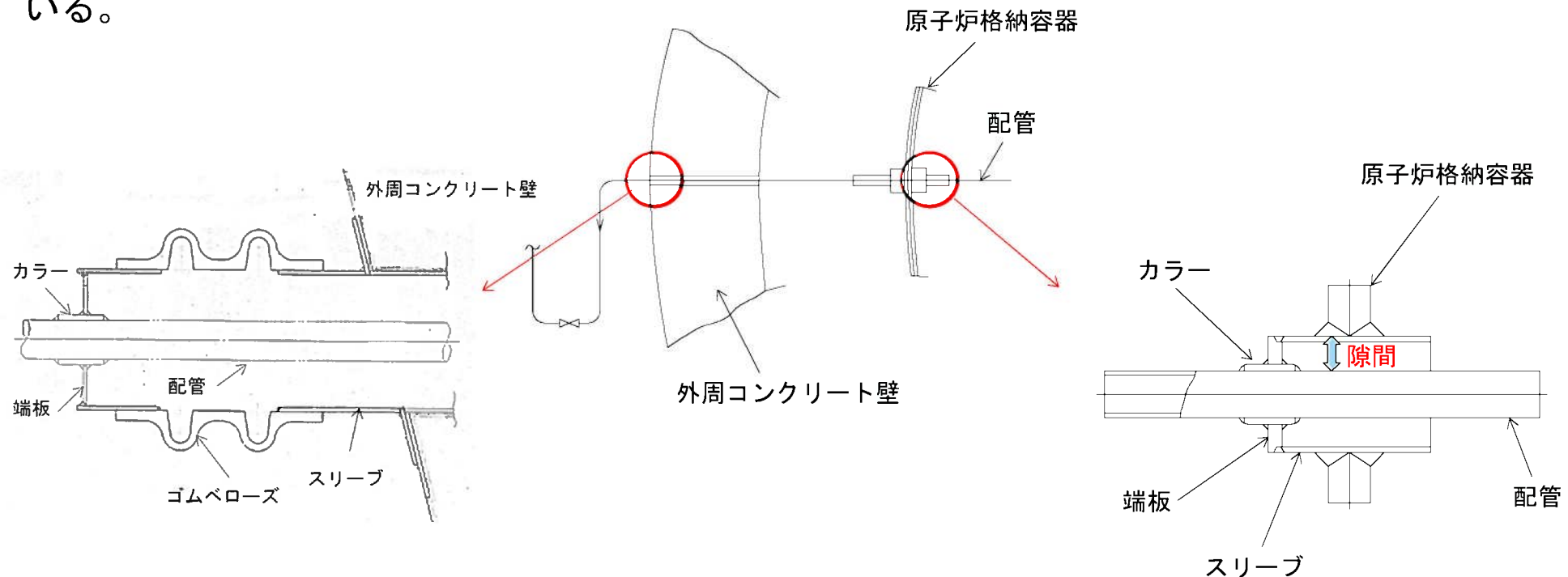
原子炉格納容器鋼板と貫通部の隙間について、過酷事故を踏まえて縦の変位についても問題ないか説明すること。

2. 回 答

原子炉格納容器の貫通部においては、過酷事故を踏まえても縦（鉛直）方向の変位により原子炉格納容器鋼板へ影響がない構造としている。固定式貫通部と伸縮式貫通部の例を以下に示す。

【固定式貫通部】

固定式貫通部については、貫通配管にカラー・端板・スリーブを取り付けており、また、貫通配管とスリーブは十分な隙間を有する設計としていることから、過酷事故を踏まえ縦方向の変位を考慮しても、貫通配管とスリーブが接触することはなく、原子炉格納容器鋼板へ影響がない構造としている。



## 【伸縮式貫通部】

伸縮式貫通部については、貫通配管に端板、ベローズ・スリーブを取り付けており、また、貫通配管と格納容器鋼板は十分な隙間を有する設計としている。過酷事故時を考慮しても縦（鉛直）方向の変位は数十mmであり、貫通配管とスリーブの隙間に比べて非常に小さいことから、縦方向の変位を考慮しても、貫通配管とスリーブが接触することはなく、原子炉格納容器鋼板へ影響がない構造としている。

