

## 1. PTS 評価に用いる破壊靱性遷移曲線に関する技術評価案

### 1. 1 破壊靱性遷移曲線の変更

(1) 変更内容（「別表1 破壊靱性遷移曲線に関する規定内容の変更点」参照）

- ① 日本電気協会電気技術規程「原子力発電所用機器に対する破壊靱性の確認試験方法 JEAC 4206-2007」（以下「破壊靱性確認方法 2007 年版」という。）の「破壊靱性遷移曲線の設定」における  $K_{Ic}$  式を削除
- ② 日本電気協会電気技術規程「原子炉圧力容器に対する供用期間中の破壊靱性の確認方法 JEAC 4206-2016」（以下「破壊靱性確認方法 2016 年版」という。）の「RF-4222 破壊靱性遷移曲線の設定」に2種類の  $K_{Ic}$  式を追加

(2) 日本電気協会による変更の理由

PTS 評価に使用する破壊靱性遷移曲線に関しては、「高経年化技術評価に関する意見聴取会」（平成 23 年 11 月～平成 24 年 6 月、原子力安全・保安院）において、「今後は、下限線が応力拡大係数に近接する場合も考えられるので、保守性や精度向上の観点から試験個数や試験片データのばらつきを考慮した下限線の評価手法などを規定しておくことが必要である。」として、評価手法の改定検討が求められたことから、同意見聴取会での要望を受けて、以下のような破壊靱性に関わる近年の知見を踏まえて、PTS 評価における破壊靱性評価手法の見直しを検討し、破壊靱性確認方法 2016 年版に反映した。

- ・ 国内 PWR 監視試験で照射後の破壊靱性データが多数蓄積された
- ・ 破壊靱性のばらつき等に関する知見が拡充され、国内外でマスターカーブ法の適用性が確認され、海外等で広く用いられるようになった。

(3) 技術評価の結果

① 破壊靱性確認方法 2007 年版の  $K_{Ic}$  式の削除

高経年化技術評価に関する意見聴取会では、玄海 1 号機の原子炉圧力容器の健全性を中心に中性子照射脆化に関する様々な議論があり、PWR<sup>3</sup> プラントを対象とした PTS<sup>4</sup> 評価方法に関しても多くの議論がなされ、「原子炉圧力容器の中性子照射脆化について」（原子力安全・保安院、平成 24 年 8 月）がまとめられた。その中で、「現行の中性子照射脆化に関する規制は、温度圧力制限に関すること、上部棚吸収エネルギーに関すること及び加圧熱衝撃に関することについて規制しており、（中略）我が国の規制項目に過不足は無いと考える」としており、規制の見直しの必要性及び方向性として「加圧熱衝撃の評価には、想定事象、応力拡大係数の評価、判

<sup>1</sup> 静的平面ひずみ破壊靱性 [MPa√m]

<sup>2</sup>  $J_c$ （破壊の開始点の J 積分）より導かれる弾塑性等価応力拡大係数 [MPa√m]

<sup>3</sup> 加圧水型原子炉

<sup>4</sup> 加圧熱衝撃

定基準に関しても世界的にも知見の拡充が行われていること（IAEA TECDOC-1627<sup>5</sup>等）に鑑み、国際的な整合性にも留意しつつ、適宜最新知見を反映することが望ましく、引き続き、学協会の取り組みを期待する」としている。また、破壊靱性測定値のばらつきについては、「今後は、下限線が応力拡大係数に近接する場合も考えられるので、保守性や精度向上の観点から試験個数や試験片データのばらつきを考慮した下限線の評価手法などを規定しておくことが必要」としている。

破壊靱性確認方法 2007 年版の  $K_{Ic}$  式については、現時点においてこれを否定する技術的根拠は見いだされていないことから、今後引き続き使用することは妥当と判断される。

## ② 破壊靱性確認方法 2016 年版に 2 種類の $K_{Jc}$ 式を追加

### (a) マスターカーブ法

従来の PTS 評価は、プラント毎の監視試験で求められた破壊靱性データを包絡するように温度軸を変更した破壊靱性遷移曲線を用いて行っていたが、マスターカーブ法に関する研究の進展に伴い、マスターカーブ法の考え方に基づいて設定した破壊靱性遷移曲線を用いるように変更している。マスターカーブ法については、国際的に活用されつつある式であるといえる<sup>6</sup>。

(参考) マスターカーブ法

ワイブル分布の確率密度関数は次式で与えられる。

$$f(K_{Jc}) = \frac{b}{K_0 - K_{min}} \left( \frac{K_{Jc} - K_{min}}{K_0 - K_{min}} \right)^{b-1} \exp \left[ - \left( \frac{K_{Jc} - K_{min}}{K_0 - K_{min}} \right)^b \right]$$

ここで、 $b$ 、 $K_0$ 及び  $K_{min}$ はそれぞれワイブル分布の指数パラメータ、尺度パラメータ及び位置パラメータである。

特定のフェライト鋼の破壊靱性  $K_{Ic}(K_{Jc}-K_{min})$  の分布が<sup>6</sup>、 $K_{min}$ を  $20\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 、形状パラメータを 4、位置パラメータを  $K_0(K_0-K_{min})$  とする、3パラメータのワイブル分布に従うとする考えである。

$$P_f = 1 - \exp \left[ - \left[ \frac{K_{Jc} - 20}{K_0 - 20} \right]^4 \right]$$

破壊靱性のメディアン値が破壊靱性確認方法 2016 年版では下式で示されている。

$$K_{Jc(\text{med})} = 30 + 70 * \exp\{0.019 * (T - T_0)\}$$

<sup>5</sup> Pressurized Thermal Shock in Nuclear Power Plants: Good Practices for Assessment Deterministic Evaluation for the Integrity of Reactor Pressure Vessel

<sup>6</sup> ASTM E1921 Standard Test Method for Determination of Reference Temperature,  $T_0$ , for Ferritic Steels in the Transition Range, ASME Sec. XI ARTICLE A-4000 Material Properties A-4200 Fracture Toughness

日本電気協会は、破壊靱性確認方法 2007 年版の  $K_{Ic}$  式から破壊靱性確認方法 2016 年版の  $K_{Jc}$  式への変更に伴う実プラントでの値の変化を比較するために、破壊靱性遷移曲線のうち、PTS 状態遷移曲線  $K_I$  に接する付近の  $K_{Jc} = 70 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  での遷移温度  $T_{70}$  を比較した。その結果、大部分のプラントで破壊靱性確認方法 2016 年版による  $T_{70}$  の方が高い値となっており、保守的であることを確認している（図 1-1 参照）。

しかしながら、図 1-1 によれば、5 プラントについては非保守的な評価となっており、必ずしも保守的とはいえない。なお、非保守的になるものは、圧延材、溶接金属及び鍛鋼品それぞれに存在しており、材質によらないといえる。また、保守的であるとしているデータについても、 $K_{Ic}$  式から得られる  $T_{70}$  と  $K_{Jc}$  式から得られる  $T_{70}$  に数十度の開きがあるものがある。

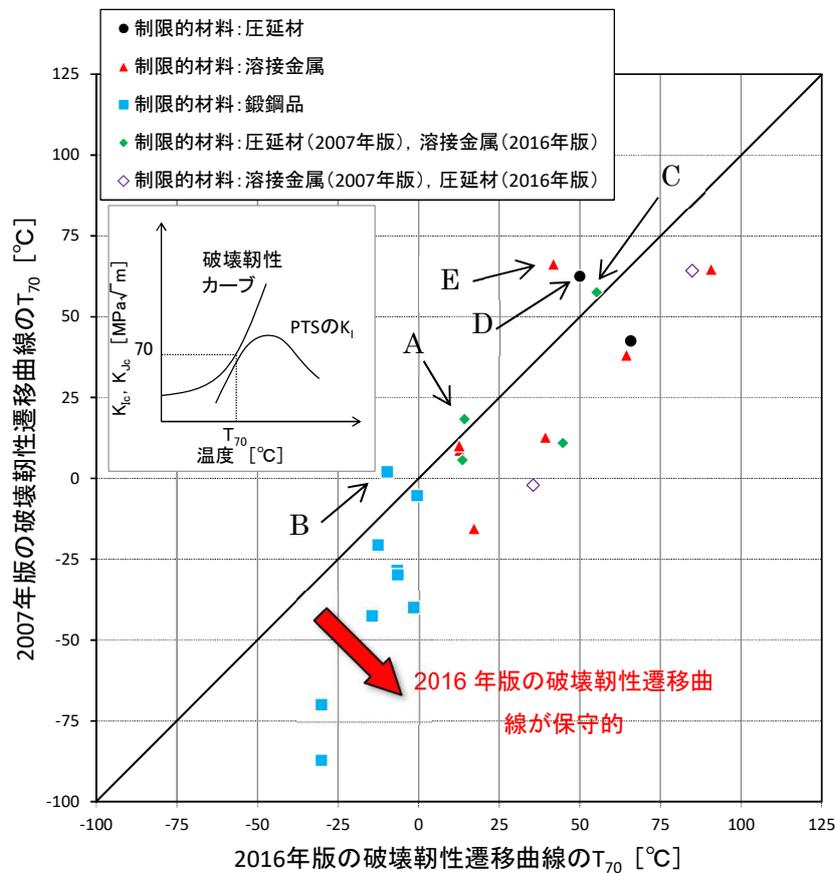


図 1-1 国内 PWR プラントの 32EFY 時点の破壊靱性遷移曲線の遷移温度  $T_{70}$  の比較 [2]<sup>7</sup>

<sup>7</sup> 資料 3-1 図 1-1

これに関し、日本電気協会は、非保守的となる5つのプラントの破壊靱性確認方法2007年版の式と破壊靱性確認方法2016年版の式を比較し、非保守的となる幅はそれほど大きくないとしている(図1-2参照)。

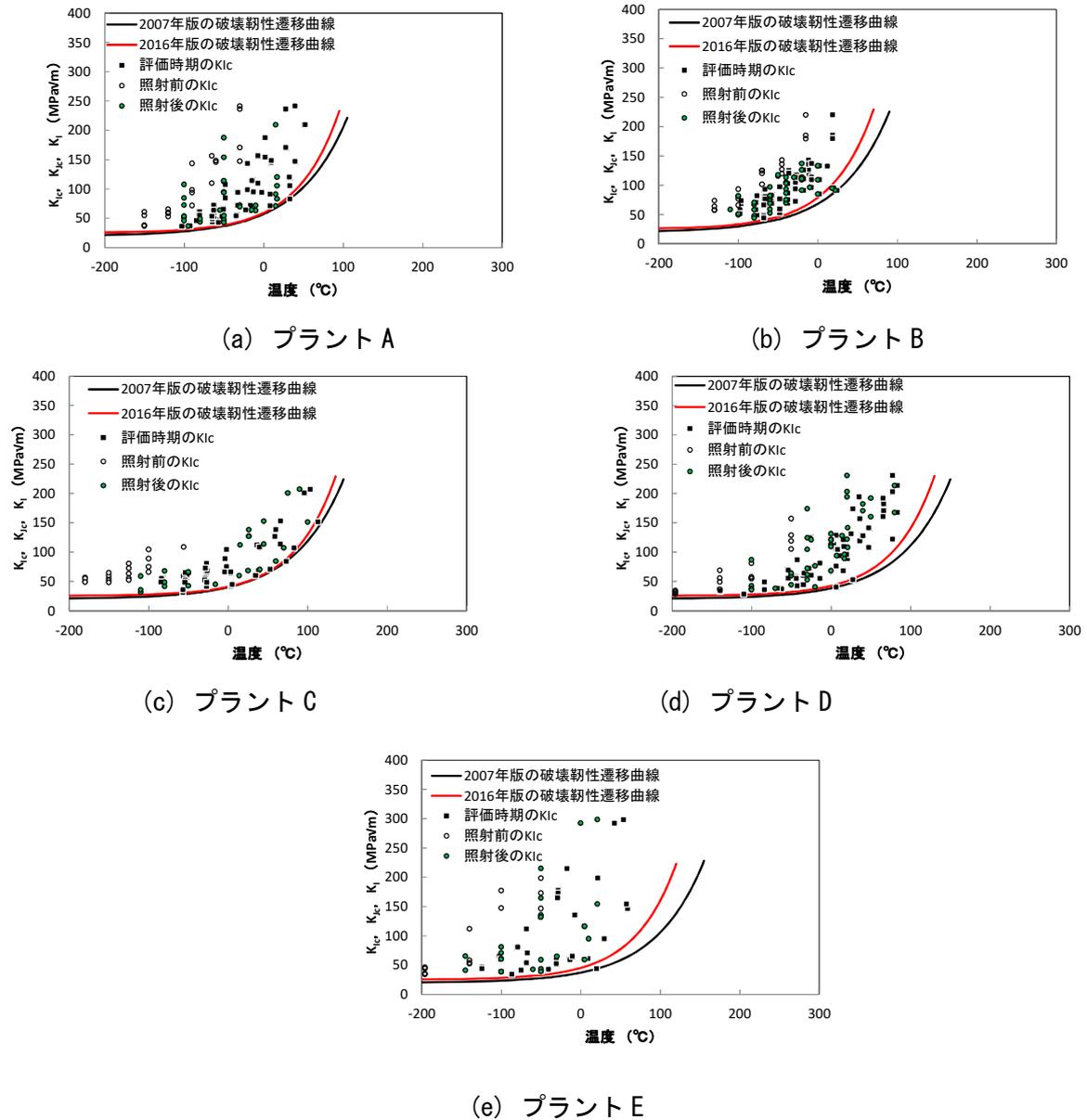


図1-2 破壊靱性確認方法2016年版の式におけるT70が破壊靱性確認方法2007年版に比べて非保守的となるプラントの32EFPY時点のPTS評価結果<sup>8</sup>

<sup>8</sup> 資料3-1 図1-2

また、日本電気協会は、マスターカーブ法が中性子照射された材料についても適用できるかについて、EPRI<sup>9</sup>の文献<sup>10</sup>に基づき、マスターカーブ法の破壊靱性遷移曲線の形状は理論的に中性子照射によって変化しないこと、及び様々な寸法の照射試験片に対し適用できることが実験により確認されているとしている。また、これに関し、米国 NRC による検証<sup>11</sup>が行われているとしている<sup>12</sup>。

しかしながら、米国 NRC による検証としている文献については、NRC が 2002 年に作成したものの最終版ではないものを、2009 年にそのまま公開したものである。マスターカーブ法を規制に適用できるとの記載もなく、当該文献をもってマスターカーブ法が規制に適用できるとの説明は適切ではない。

供用状態 C, D の評価に用いる式として、マスターカーブ法をもとにした式を導入し、供用状態 A, B には導入していない点について、日本電気協会は、供用状態 A, B については、ニーズが低かったことから変更していないとしている。また、今後、供用状態 A, B に関しても、マスターカーブを用いることを継続して検討していきたいとしている。

(b) 照射脆化した材料に対するマスターカーブ法の適用性

日本電気協会は、鍛鋼品のデータを元にマスターカーブの適用性を確認している（表 1-1 参照）とし、 $T_0$ を設定した 11 材料のデータを示し、国内の照射材についても、マスターカーブ法により破壊靱性データの温度依存性やばらつきが適切に評価できているとしている（図 1-3 参照）。

表 1-1 検討に使用した鍛鋼品の照射後破壊靱性データの詳細<sup>13</sup>

| 鋼種                             | 破壊靱性データの総数 | 材料数 ( $T_0$ を設定した数) | 1 材料あたりの $T_0$ 設定に使用したデータ点数 | 照射量 ( $\times 10^{19}$ n/cm <sup>2</sup> ) | Cu (wt. %)        | $T_0$ (°C) | 5%マスターカーブを下回る確率 |
|--------------------------------|------------|---------------------|-----------------------------|--|-------------------|------------|-----------------|
| SA508 Cl. 3<br>SFVQ1A<br>(鍛鋼品) | 220        | 11                  | 16~26                       | 2.3<br>~7.2                                | 0.02<br>~<br>0.04 | -71<br>~14 | 3%<br>(6 個)     |

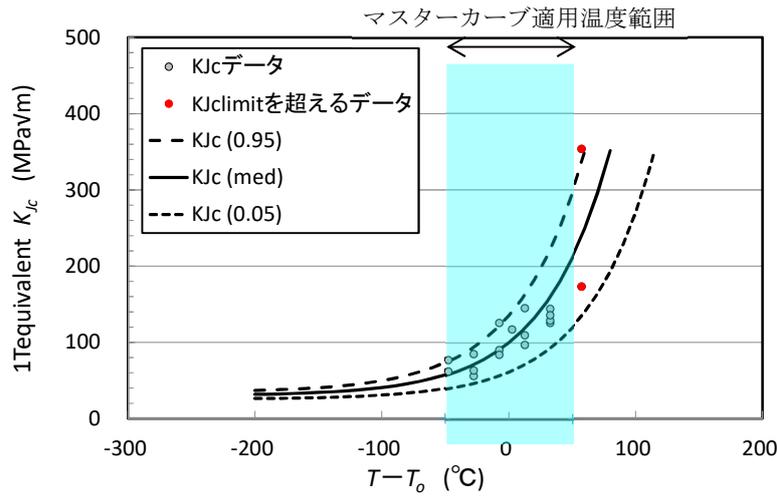
<sup>9</sup> 米国電力研究所

<sup>10</sup> Hardin, T., "Technical Basis for ASME Code Case N-830, Revision 1 (MRP-418): Direct Use of Master Curve Fracture Toughness Curve for Pressure-Retaining Materials of Class 1 Vessels, Section XI." EPRI, Palo Alto, CA: 2017. 3002010332.

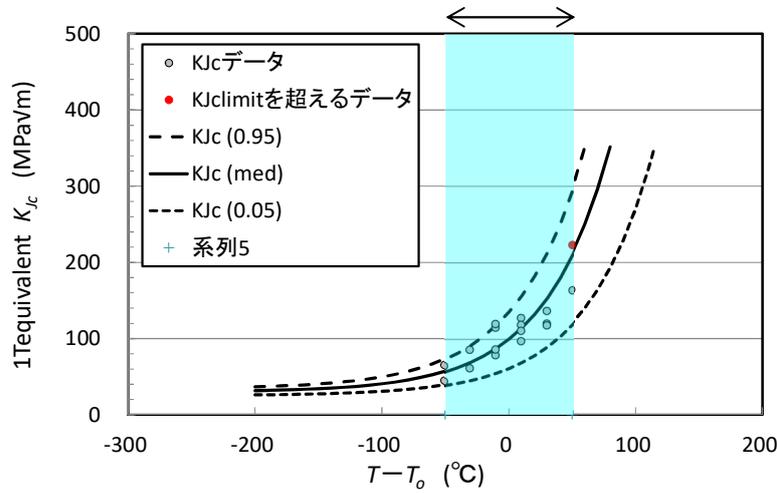
<sup>11</sup> Kirk, M., "The Technical Basis for Application of the Master Curve to the Assessment of Nuclear Reactor Pressure Vessel Integrity," Report No. ADAMS ML093540004. United States Nuclear Regulatory Commission, Washington DC, 2002.

<sup>12</sup> 資料 2-2 5~7p

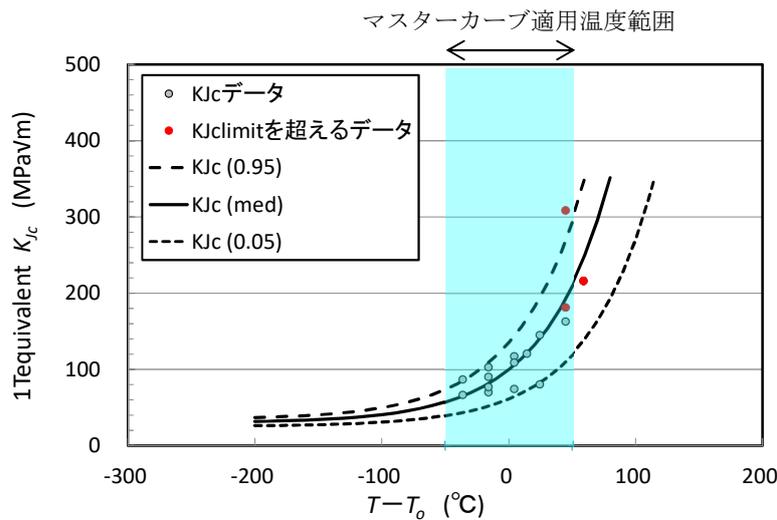
<sup>13</sup> 資料 3-1 表 2-1



(a) 鍛鋼品 No. 1 (照射量  $2.3 \times 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>,  $T_0 = -33^\circ\text{C}$ )

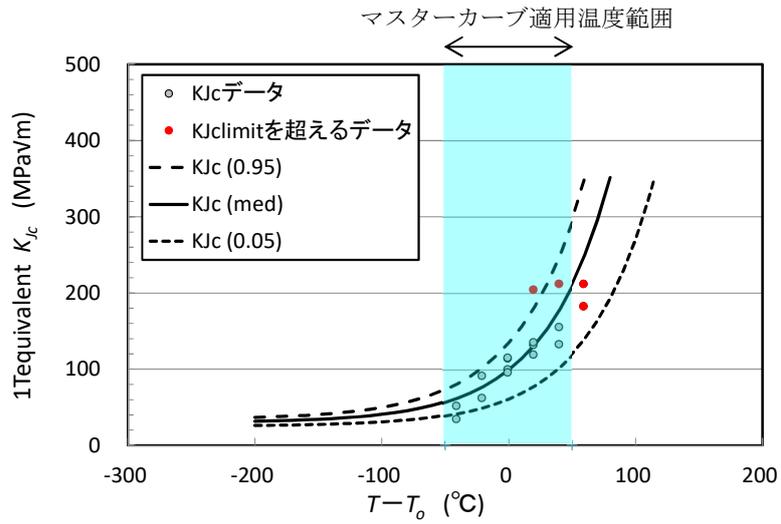


(b) 鍛鋼品 No. 2 (照射量  $2.6 \times 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>,  $T_0 = -49^\circ\text{C}$ )

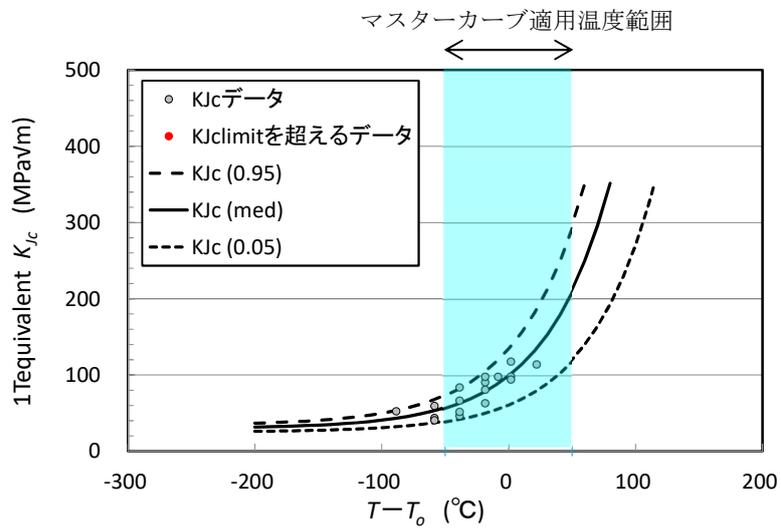


(c) 鍛鋼品 No. 3 (照射量  $2.7 \times 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>,  $T_0 = -64^\circ\text{C}$ )

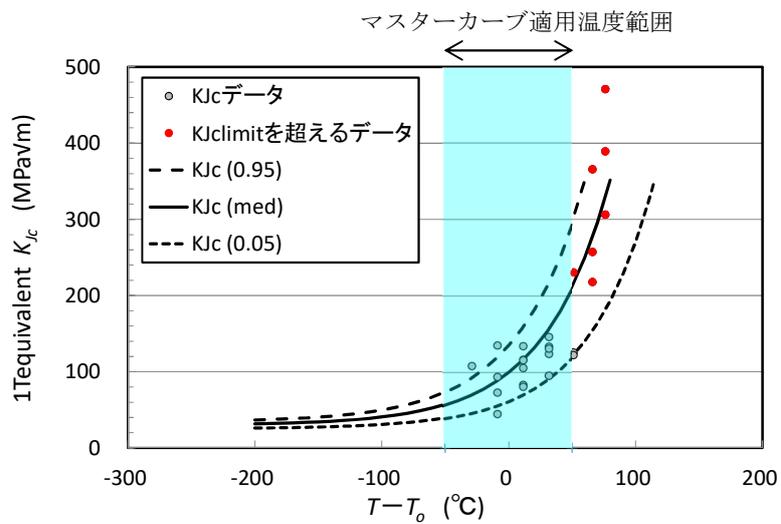
図 1-3(1/4) 鍛鋼品の照射後破壊靱性データのマスターカーブ<sup>14</sup>



(d) 鍛鋼品 No. 4 (照射量  $2.7 \times 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>,  $T_0 = -59^\circ\text{C}$ )

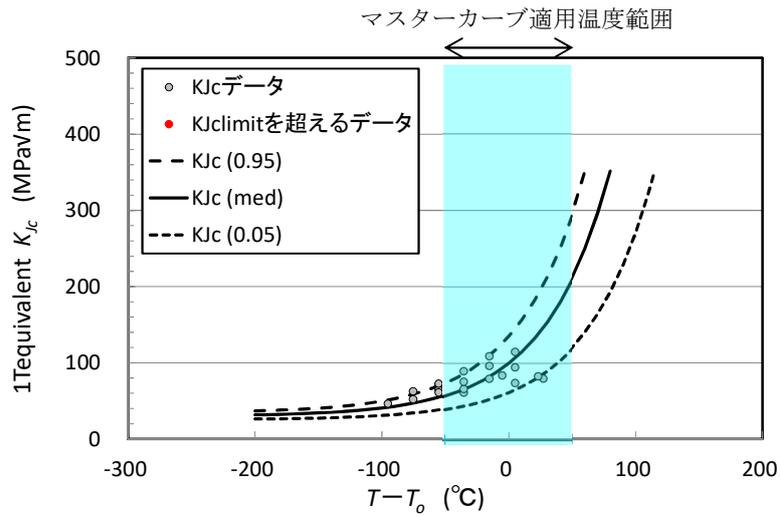


(e) 鍛鋼品 No. 5 (照射量  $3.1 \times 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>,  $T_0 = -22^\circ\text{C}$ )

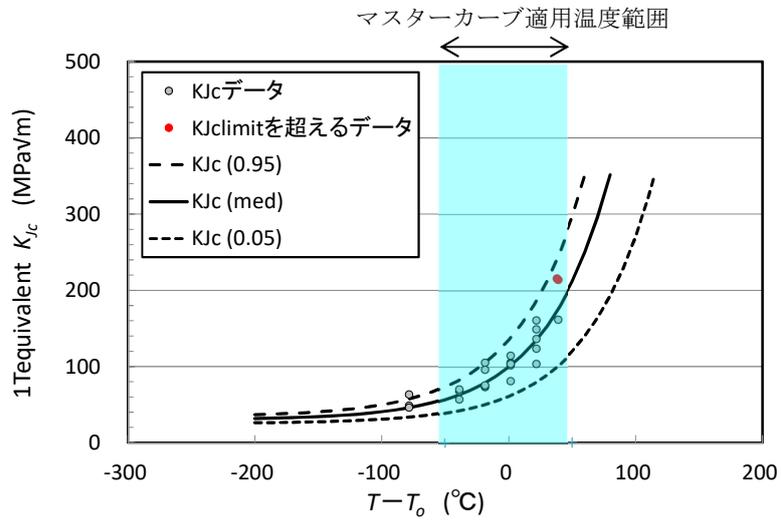


(f) 鍛鋼品 No. 6 (照射量  $4.6 \times 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>,  $T_0 = -71^\circ\text{C}$ )

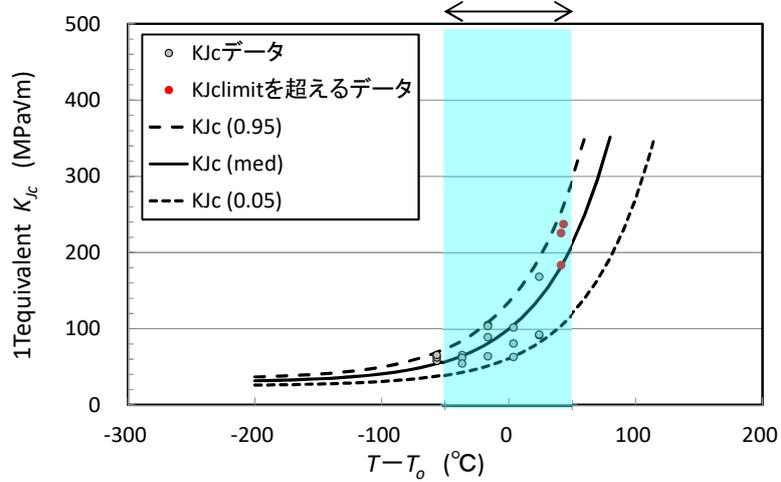
図 1-3(2/4) 鍛鋼品の照射後破壊靱性データのマスターカーブ



(g) 鍛鋼品 No. 7 (照射量  $4.9 \times 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>,  $T_0 = -5^\circ\text{C}$ )

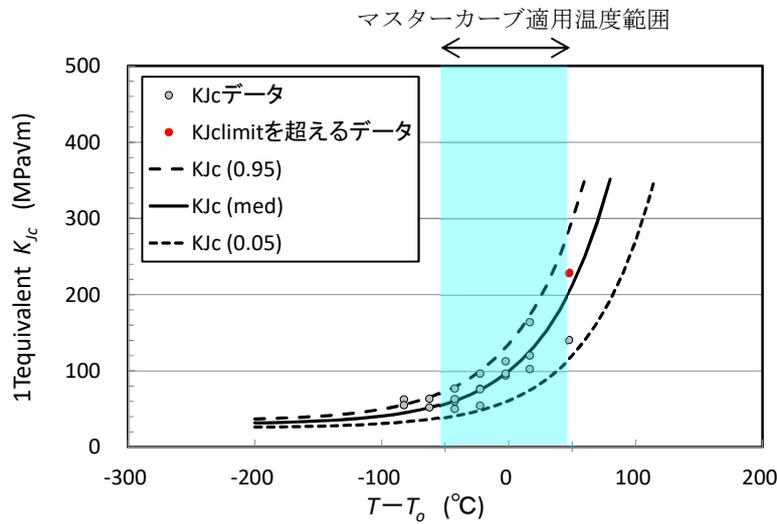


(h) 鍛鋼品 No. 8 (照射量  $5.0 \times 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>,  $T_0 = -22^\circ\text{C}$ )

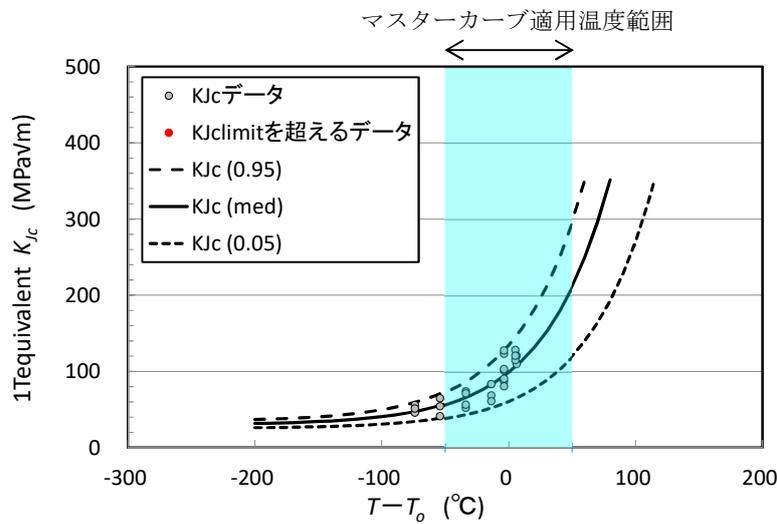


(i) 鍛鋼品 No. 9 (照射量  $5.3 \times 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>,  $T_0 = -24^\circ\text{C}$ )

図 1-3(3/4) 鍛鋼品の照射後破壊靱性データのマスターカーブ



(j) 鍛鋼品 No. 10 (照射量  $5.4 \times 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>, T<sub>0</sub>=2°C)



(k) 鍛鋼品 No. 11 (照射量  $7.2 \times 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>, T<sub>0</sub>=14°C)

**図 1-3(4/4) 鍛鋼品の照射後破壊靱性データのマスターカーブ**

また、破壊靱性確認方法 2016 年版の  $K_{Jc}$  式は、マスターカーブ法のワイブルプロットを元にしており、マスターカーブ法の形状係数が 4 であることから、照射脆化した場合も形状係数は 4 であることが前提となっている。これについて、日本電気協会は、破壊靱性データのワイブルプロットの傾き（ワイブル分布の形状母数）と破壊靱性データ数の関係に、国内材の鍛鋼品のプロットを記載し、鍛鋼品の破壊靱性データについても、概ね参考文献<sup>15</sup>のばらつきの範囲内（5～95%）に入っているとしている（図 1-4 参照）。

<sup>15</sup> Wallin, K., "Statistical Modeling of Fracture in the Ductile-to-Brittle Transition Region," Defect Assessment in Components - Fundamentals and Applications, ESIS/EF9, Blauel, J. G., and Schwalbe K.-H, Eds, pp. 415-445, (1991).

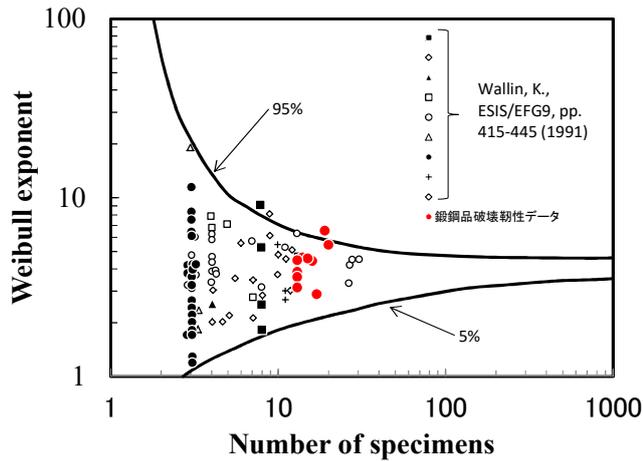


図 1-4 破壊靱性データのワイブル分布の形状母数<sup>16</sup>

これに関し、日本電気協会は、破壊靱性値と累積確率の指数を示し、鋼種毎のワイブルプロットからも、現時点で破壊靱性確認方法 2016 年版の破壊靱性遷移曲線を下回っているデータは、特段適用性に疑義を呈するようなデータではないと評価している (図 1-5 参照)。

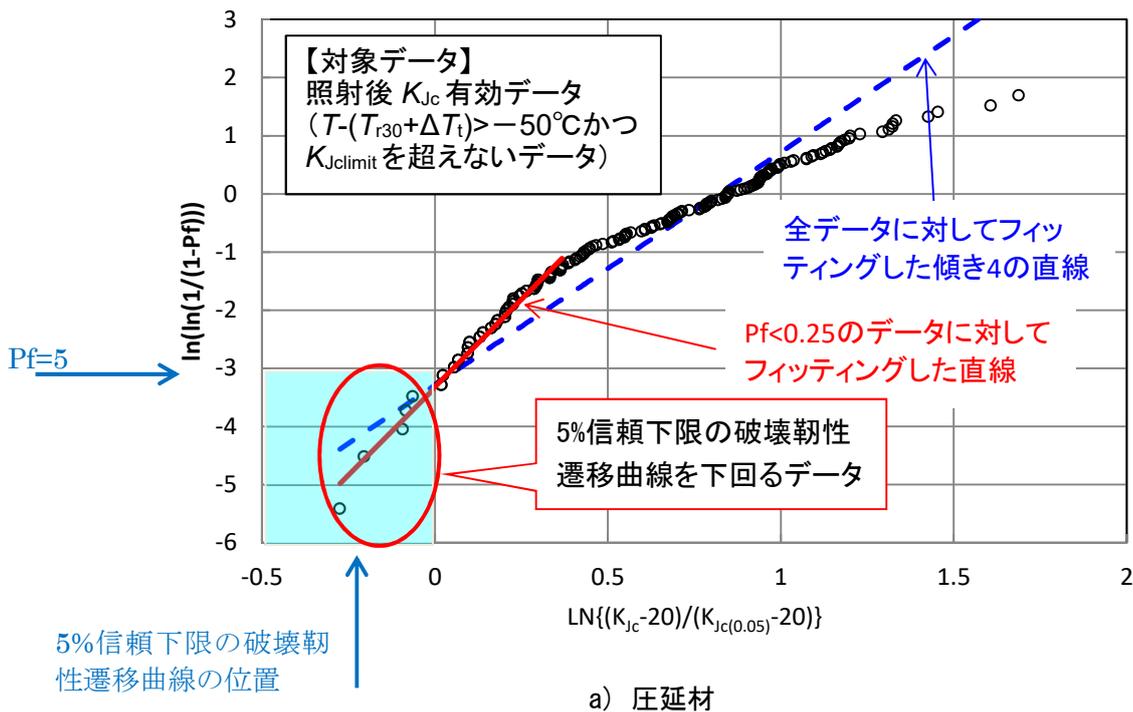


図 1-5 (1/2) 照射後破壊靱性データ (圧延材、鍛鋼品、溶接金属) のワイブルプロット<sup>17</sup>

<sup>16</sup> 資料 3-1 図 2-2

<sup>17</sup> 資料 3-1 図 3-1

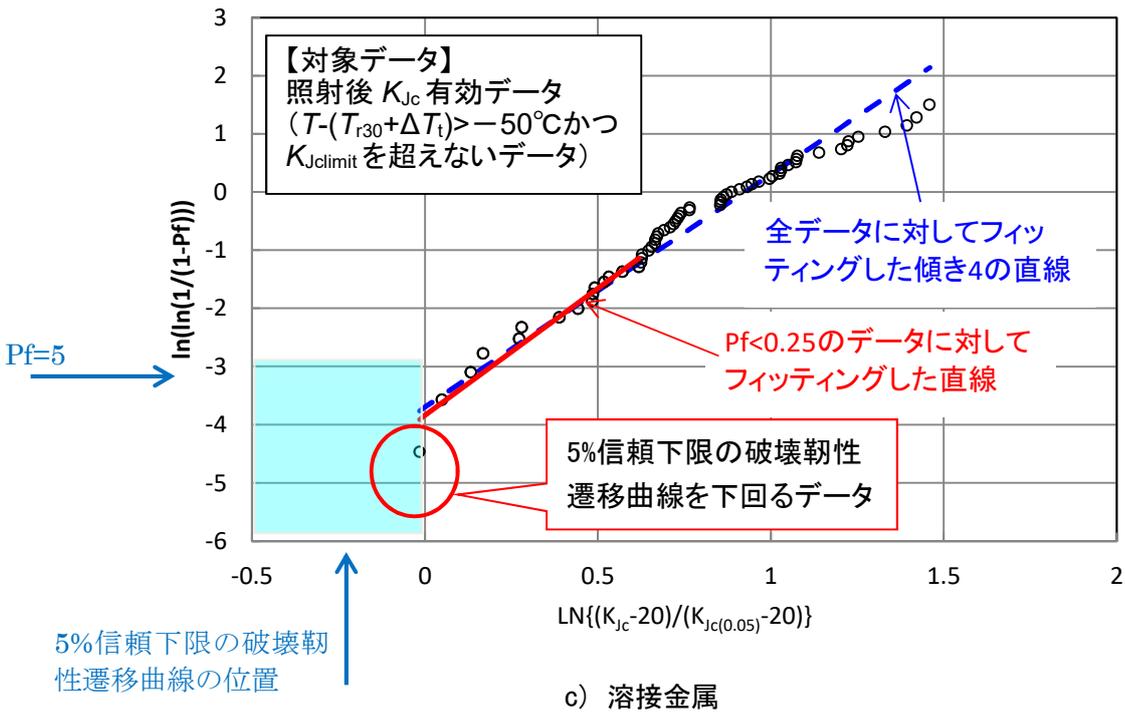
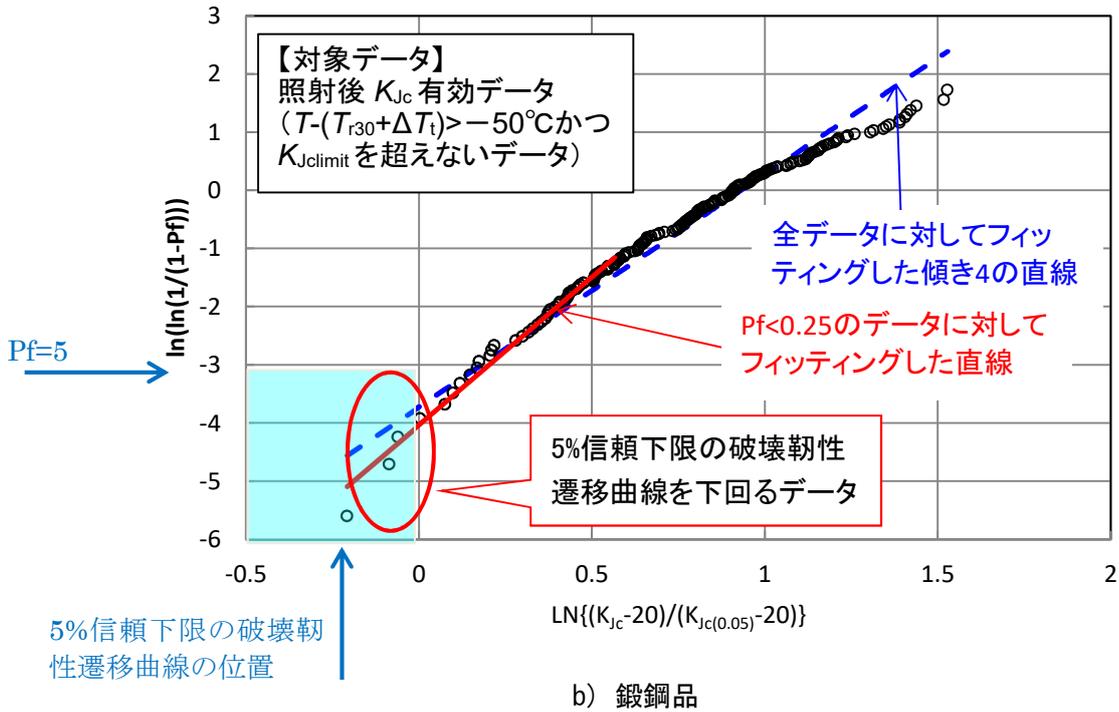


図 1-5(2/2) 照射後破壊靱性データ（圧延材、鍛鋼品、溶接金属）のワイブルプロット

しかし、母集団がワイブル分布に従う場合、データは直線状に分布するが、図 1-6 の a) 圧延材のデータは、必ずしも直線上に分布していない。また、データの位置が a) 圧延材と b) 鍛鋼品及び c) 溶接金属では、縦軸で 1 程度のずれがある。これは、ワイブル分布の位置パラメータ等に補正されるべき値が存在することを示唆していると考えられる。

- 検討の対象は鍛鋼品のみであり、このデータをもって圧延材及び溶接金属についても適用に問題がないとはいえないのではないか。
- 圧延材のデータは、鍛鋼品及び溶接金属と異なる傾向があるのではないか。

(c) 破壊靱性曲線の下限の考え方

$K_{Ic}$  式は、データの下限包絡線であり、 $K_{Jc}$  式は確率分布の信頼下限 5%である。これに関し、日本電気協会は、破壊靱性確認方法 2007 年版の式の基になった ASME の  $K_{Ic}$  曲線と 5%信頼下限マスターカーブについて、ASME  $K_{Ic}$  曲線開発時のオリジナルデータを対象として破壊靱性カーブに対する各破壊靱性データの温度裕度と破壊靱性曲線を下回る確率の評価が実施されており、両者は同等と評価されている<sup>18</sup>としている（表 1-3 参照）。

表 1-2 ASME  $K_{Ic}$  カーブと 5%信頼下限のマスターカーブの安全レベルの比較<sup>19</sup>

|                  | 温度裕度の平均     | 下回る確率 |
|------------------|-------------|-------|
| ASME $K_{Ic}$ 曲線 | $2\sigma$   | 2.5%  |
| 5%マスターカーブ        | $2.2\sigma$ | 1.5%  |

しかし、照射後破壊靱性データを使用した Wallin<sup>11</sup> の評価方法を用いた評価結果では、破壊靱性確認方法 2007 年版の圧延材の破損確率(下回る確率)は 2.7%<sup>20</sup>であるのに対し、破壊靱性確認方法 2016 年版は 4.1%と高くなっている。

表 1-3 破壊靱性遷移曲線の Wallin の評価法による破損確率<sup>21</sup>

| 鋼種   | 2007 年版     |               |      | (参考) 2016 年版 |               |      |
|------|-------------|---------------|------|--------------|---------------|------|
|      | 温度差の平均 (°C) | 温度差の標準偏差 (°C) | 破損確率 | 温度差の平均 (°C)  | 温度差の標準偏差 (°C) | 破損確率 |
| 圧延材  | 45.6        | 23.6          | 2.7  | 47.1         | 27.0          | 4.1  |
| 鍛鋼品  | 34.7        | 22.8          | 6.4  | 55.7         | 23.6          | 0.9  |
| 溶接金属 | 30.9        | 18.6          | 4.9  | 58.2         | 24.8          | 0.9  |

注) 評価方法は以下のとおりです。

- 1) JEAC4206 に従い、32EFPY 時点の国内 PWR プラントに対する PTS 評価用破壊靱性遷移曲線を鋼種毎に設定する。
- 2) 破壊靱性遷移曲線とそのプラントの評価時期の 1T 換算後の  $K_{Ic}$  データ（照射材で脆化予測によるシフト後（ただし、マージン  $M_c$  及び  $\sigma_{\Delta}$  は考慮しない））との温度差を求める。  
鋼種毎に集計した 2) の温度差の Lower Tail データ ( $P_f < 0.5$ ) を対象に、温度差が正規分布に従うと仮定し、破壊靱性遷移曲線の破損確率を求める。

- 圧延材は、鍛鋼品及び溶接金属と傾向が異なるのではないか。

<sup>18</sup> Wallin et al., "Statistical re-evaluation of the ASME K<sub>IC</sub> and K<sub>IR</sub> fracture toughness reference curves", Nuclear Engineering and Design 193 (1999) 317-326

<sup>19</sup> 資料 2-2 表 3-1

<sup>20</sup> 資料 2-1 添付 3

<sup>21</sup> 資料 3-1 表 3-1

(d) 検討に用いたデータ

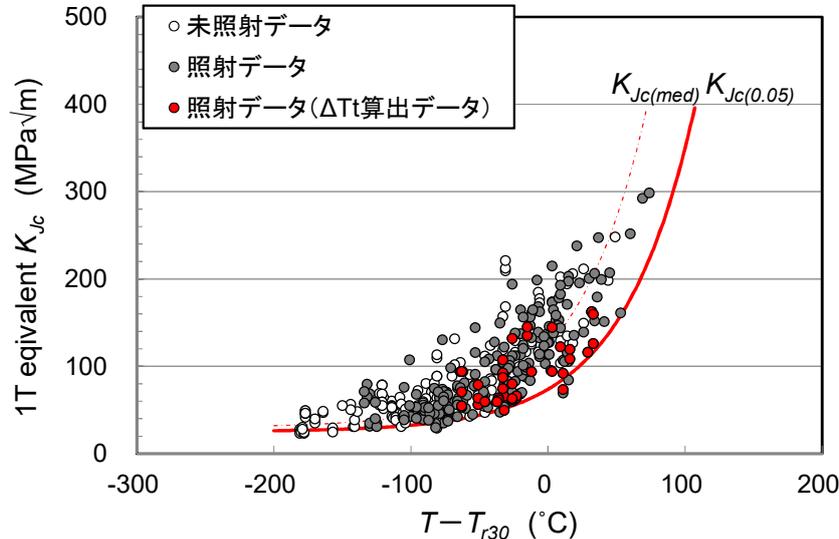
日本電気協会は、破壊靱性遷移曲線の設定に用いる破壊靱性データは、2013年までに国内 PWR プラントの監視試験で得られたデータを対象としたとしている<sup>22</sup>。また、マスターカーブの適用範囲に基づき、遷移領域外の低温側 ( $T-T_0 < -50$  °C) のデータ及び拘束が弱い  $K_{Jc}$  が  $K_{Jc(limit)}$  を超えるデータはカーブの設定対象から除外したとしている<sup>23</sup>。

表 1-4 破壊靱性遷移曲線のデータベース<sup>24</sup>

| 材料   | 未照射データ数 | 照射後データ数     | Cu の範囲 (wt%)             | 最大照射量 ( $\times 10^{19}n/cm^2$ E>1MeV) | $T_{r30}$ の範囲 (°C) |
|------|---------|-------------|--------------------------|--|--------------------|
| 圧延材  | 147     | 230<br>(38) | 0.03~0.16<br>(0.03~0.12) | 10.0<br>(5.0~10.0)                     | -94~95<br>(-24~95) |
| 鍛鋼品  | 175     | 259<br>(70) | 0.02~0.04<br>(0.04)      | 7.2<br>(5.0~7.2)                       | -68~-8<br>(-23~-8) |
| 溶接金属 | 92      | 117<br>(17) | 0.01~0.19<br>(0.01~0.14) | 10.0<br>(5.0~10.0)                     | -77~59<br>(-16~58) |

注：( ) 内の値は  $\Delta T_t$  の算出にあたり最終的に使用したデータを示す。

また、 $\Delta T_t$  の決定に使用したデータ数は、17~70 と少ないが、分析対象とした全破壊靱性データ中で低めに分布しており、問題ないとしている (図 1-6 参照)。



(a) 圧延材

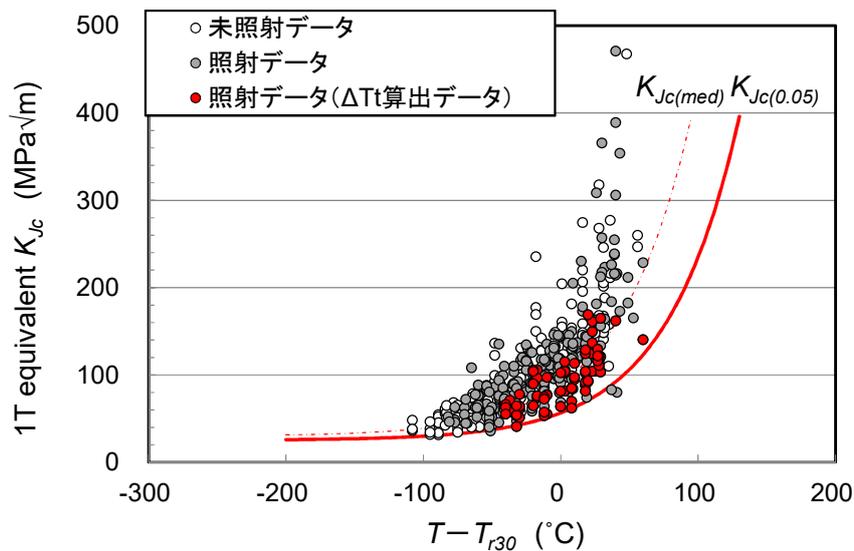
図 1-6(1/2) 分析対象とした破壊靱性データ及び  $\Delta T_t$  決定に使用した破壊靱性データ<sup>25</sup>

<sup>22</sup> 資料 2-2

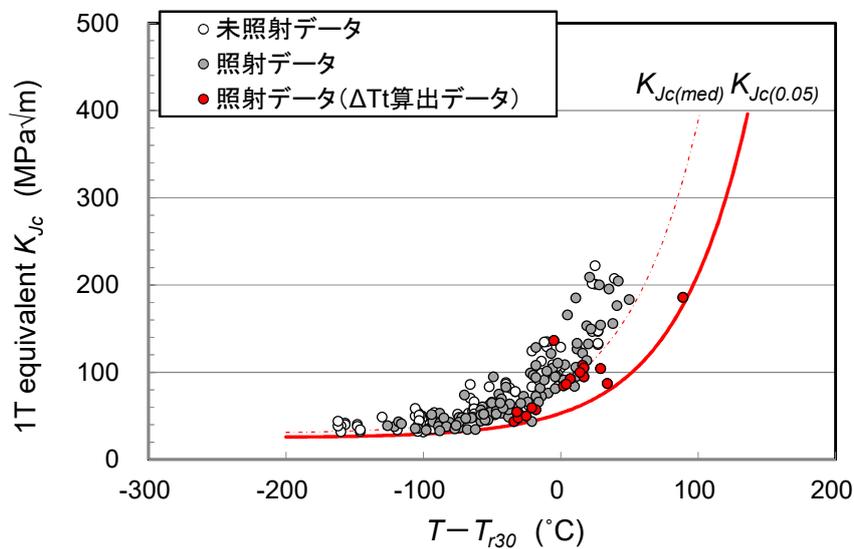
<sup>23</sup> 資料 2-1

<sup>24</sup> 資料 2-2 表 4-1

<sup>25</sup> 資料 3-1 図 4-1



(b) 鍛鋼品



(c) 溶接金属

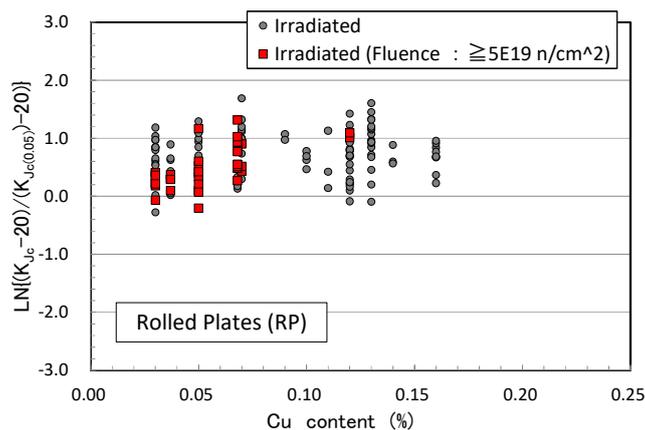
図 1-6(2/2) 分析対象とした破壊靱性データ及び  $\Delta Tt$  決定に使用した破壊靱性データ

また、 $\Delta Tt$ の決定に使用するデータについて照射量の下限を低くした場合、データ数は多くなるものの、算出される  $\Delta Tt$ の値は低くなることから、保守的な値として  $5 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$  以上のデータを採用したとしている (表 1-5 参照)。

表 1-5  $\Delta T_t$  決定対象データの照射量加減を変化させた場合の  $\Delta T_t$  算出結果<sup>26</sup>

| 鋼種   | $\Delta T_t$ 決定対象データの照射量下限             | $\Delta T_t$ (°C) | 対象データ数 | Cu 濃度範囲 (wt. %) | 照射量範囲 ( $\times 10^{19}$ n/cm <sup>2</sup> ) | $T_{r30}$ 実測値範囲 (°C) |
|------|--|-------------------|--------|-----------------|--|----------------------|
| 圧延材  | $2.4 \times 10^{19}$ n/cm <sup>2</sup> | -27               | 102    | 0.03~0.16       | 2.5~10.0                                     | -39~95               |
|      | $3.3 \times 10^{19}$ n/cm <sup>2</sup> | -21               | 71     | 0.03~0.16       | 3.4~10.0                                     | -39~95               |
|      | $4 \times 10^{19}$ n/cm <sup>2</sup>   | -16               | 54     | 0.03~0.13       | 4.0~10.0                                     | -24~95               |
|      | $5 \times 10^{19}$ n/cm <sup>2</sup>   | -15               | 38     | 0.03~0.12       | 5.0~10.0                                     | -24~95               |
|      | $6 \times 10^{19}$ n/cm <sup>2</sup>   | -15               | 30     | 0.03~0.12       | 6.3~10.0                                     | -24~95               |
|      | $7 \times 10^{19}$ n/cm <sup>2</sup>   | -17               | 20     | 0.03~0.07       | 7.5~10.0                                     | -24~41               |
| 鍛鋼品  | $2.4 \times 10^{19}$ n/cm <sup>2</sup> | -4                | 148    | 0.02~0.04       | 2.6~7.2                                      | -49~-8               |
|      | $3.3 \times 10^{19}$ n/cm <sup>2</sup> | 0                 | 101    | 0.03~0.04       | 4.6~7.2                                      | -35~-8               |
|      | $4 \times 10^{19}$ n/cm <sup>2</sup>   | 0                 | 101    | 0.03~0.04       | 4.6~7.2                                      | -35~-8               |
|      | $5 \times 10^{19}$ n/cm <sup>2</sup>   | 8                 | 70     | 0.04~0.04       | 5.0~7.2                                      | -23~-8               |
|      | $6 \times 10^{19}$ n/cm <sup>2</sup>   | 22                | 23     | 0.04~0.04       | 7.2  | -8                   |
|      | $7 \times 10^{19}$ n/cm <sup>2</sup>   | 22                | 23     | 0.04~0.04       | 7.2  | -8                   |
| 溶接金属 | $2.4 \times 10^{19}$ n/cm <sup>2</sup> | 2                 | 36     | 0.01~0.19       | 2.5~10.0                                     | -28~59               |
|      | $3.3 \times 10^{19}$ n/cm <sup>2</sup> | 8                 | 26     | 0.01~0.14       | 3.5~10.0                                     | -24~58               |
|      | $4 \times 10^{19}$ n/cm <sup>2</sup>   | 13                | 22     | 0.01~0.14       | 4.0~10.0                                     | -24~58               |
|      | $5 \times 10^{19}$ n/cm <sup>2</sup>   | 14                | 17     | 0.01~0.14       | 5.0~10.0                                     | -16~58               |
|      | $6 \times 10^{19}$ n/cm <sup>2</sup>   | 29                | 12     | 0.01~0.13       | 6.3~10.0                                     | -16~43               |
|      | $7 \times 10^{19}$ n/cm <sup>2</sup>   | 32                | 8      | 0.01~0.09       | 7.5~10.0                                     | 3~26                 |

さらに、銅含有量の多いものについても、圧延材及び溶接金属については、銅濃度に対する依存性は認められず、鍛鋼品については、上限となるデータが含まれることから問題はないとしている（図 1-7 参照）。

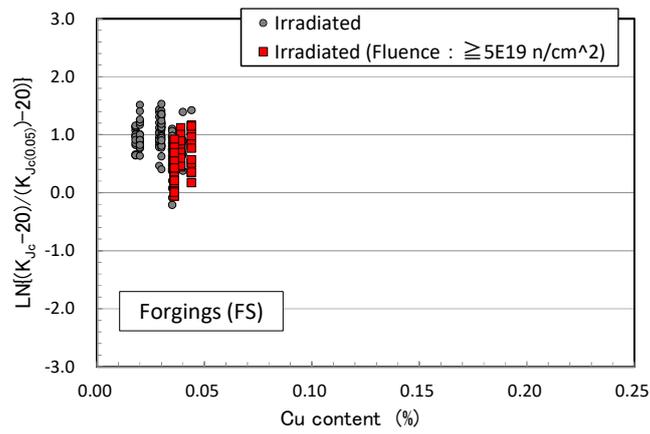


(a) 圧延材

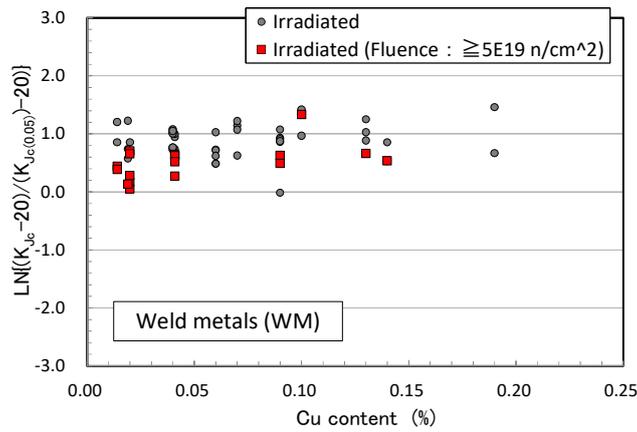
図 1-7(1/2) 破壊靱性データの銅濃度に対する依存性<sup>27</sup>

<sup>26</sup> 資料 3-1 表 5-1

<sup>27</sup> 資料 3-1 図 4-2



(b) 鍛鋼品



(c) 溶接金属

図 1-7(2/2) 破壊靱性データの銅濃度に対する依存性

- $\Delta Tt$  決定に使用した破壊靱性データの照射量の下限を低くすると  $\Delta Tt$  が小さくなるということは、 $\Delta Tt$  に照射量依存性があるということであり、将来予測に用いるのは適切とはいえず、 $T_{r30}$  の式は再検討する必要があるのではないか。

別表1 破壊靱性遷移曲線に関する規定内容の変更点

| 破壊靱性確認方法 2016 年版 | 破壊靱性確認方法 2007 年版  |
|------------------|---|
| (削除)             | <p>C-3220 破壊靱性遷移曲線の設定</p> <p>(1) 対象とする原子炉圧力容器の炉心領域材料について、評価時期における破壊靱性遷移曲線を設定する。</p> <p>(2) 対象とする原子炉圧力容器炉心領域材料の破壊靱性データ（照射前後の <math>K_{IC}</math> 実測値等）を、附属書図 C-3220-1 等に示すように温度軸に対して平行に移行させ、プラント評価時期における中性子照射による破壊靱性低下量を予測し、これらのデータを下限包絡する(8)式を設定する。ただし、原子炉圧力容器の温度は <math>0^{\circ}\text{C}</math> 未満となることはないので、<math>0^{\circ}\text{C}</math> 以上の温度範囲の破壊靱性データを対象とすればよい。これが破壊靱性遷移曲線となる。</p> $K_{IC} = 20.16 + 129.9 \exp[0.0161(T - T_p)] \quad (8)$ <p>なお、破壊靱性 (<math>K_{IC}</math>) データの移行量 (<math>\Delta T_{K_{IC}}</math>) は C-3230 及び C-3240 に示す手順で求める。</p> <p>C-3230 破壊靱性 (<math>K_{IC}</math>) の実測値がある場合</p> <p>(1) 監視試験の回数が 1 回以下の場合</p> <p>(a) 未照射材の <math>K_{IC}</math> データ（附属書図 C-3230-1 参照）</p> $\Delta T_{K_{IC}} = \Delta RT_{NDT} \text{ 計算値 } (f_e) + 2\sigma_{\Delta} \quad (9)$ <p>(b) 照射材の <math>K_{IC}</math> データ（附属書図 C-3230-2 参照）</p> $\Delta T_{K_{IC}} = \Delta RT_{NDT} \text{ 計算値 } (f_e) - \Delta RT_{NDT} \text{ 計算値 } (f_m) + 2\sigma_{\Delta} \quad (10)$ <p>(2) 監視試験の回数が 2 回以上の場合</p> <p>(a) 未照射材の <math>K_{IC}</math> データ（附属書図 C-3230-3 参照）</p> $\Delta T_{K_{IC}} = \Delta RT_{NDT} \text{ 計算値 } (f_e) + M_c + \sigma_{\Delta} \quad (11)$ <p>(b) 照射材の <math>K_{IC}</math> データ（附属書図 C-3230-4 参照）</p> $\Delta T_{K_{IC}} = \Delta RT_{NDT} \text{ 計算値 } (f_e) - \Delta RT_{NDT} \text{ 計算値 } (f_m) + \sigma_{\Delta} \quad (12)$ <p>C-3240 破壊靱性 (<math>K_{IC}</math>) の実測値がない場合</p> <p>破壊靱性 (<math>K_{IC}</math>) の実測値がない場合は、その材料を代表する <math>K_{IC}</math> 曲</p> |

|  |  |
|--|--|
|  | <p>線により破壊靱性遷移曲線を設定する。<br/>       例えば、附属書 A の A-3222 に与えられた <math>K_{IC}</math> 曲線を用いる場合、<br/>       下記に示す手順でプラント評価時期の <math>RT_{NDT}</math> を求めて破壊靱性遷移<br/>       曲線を設定することができる。</p> $RT_{NDT} = \text{初期 } RT_{NDT} + \Delta RT_{NDT} \text{ 計算値 } (f_e) + 2\sigma_{\Delta} \quad (13)$ |
| <p>RF-4222 破壊靱性遷移曲線の設定<br/>       原子炉圧力容器の炉心領域材料について、中性子照射の影響を考慮し、<br/>       評価時期における破壊靱性遷移曲線を設定する。</p> <p>(1) <math>T_{r30}</math> に基づく破壊靱性遷移曲線の設定<br/>       以下の式により評価時期における破壊靱性遷移曲線を設定する。<br/> <math display="block">K_{Jc} = 25.2 + 36.6 \exp[0.019 \{T - (T_{r30} + \Delta T_t)\}] \quad (8)</math> <math display="block">T_{r30} = T_{r30} \text{ 初期値} + \Delta RT_{NDT} \text{ 計算値} + M_c + M_p \quad (9)</math>       ここで、<math>\Delta T_t</math> は母材(圧延材)で <math>-15^\circ\text{C}</math>、母材(鍛鋼品)で <math>8^\circ\text{C}</math>、溶接金属<br/>       で <math>14^\circ\text{C}</math>、<math>M_p</math> は <math>3^\circ\text{C}</math> とする。<br/> <math>\Delta RT_{NDT}</math> 計算値及び <math>M_c</math> は、評価時期における最大仮想欠陥最深部の照<br/>       射条件における値とし、JEAC 4201 の附属書 B により求める。ただし、<br/>       2 個以上の監視試験による <math>\Delta RT_{NDT}</math> の実測値がない場合には、<math>M_c</math> を 0 と<br/>       する。</p> <p>(2) <math>T_o</math> に基づく破壊靱性遷移曲線の設定<br/>       JEAC 4216 に準拠した <math>T_o</math> が取得されている場合には、以下の式によ<br/>       り破壊靱性遷移曲線を設定してもよい。複数の照射条件について <math>T_o</math> が<br/>       取得されている場合には、高い照射量の <math>T_o</math> を使用すること。<br/> <math display="block">K_{Jc} = 25.2 + 36.6 \exp[0.019 \{T - (T_o + \Delta RT_{NDT} \text{ 計算値 } (d) + M_k)\}] \quad (10)</math> <math display="block">\Delta RT_{NDT} \text{ 計算値 } (d) = \Delta RT_{NDT} \text{ 計算値 } (e) - \Delta RT_{NDT} \text{ 計算値 } (m) \quad (11)</math> <math display="block">M_k = 1.65 \times \{(\sigma_M^2 + \sigma_{T_o}^2 + \sigma^2)^{1/2} - \sigma_M\} \quad (12)</math>       ここで、(10) 式の <math>\{ \Delta RT_{NDT} \text{ 計算値 } (d) + M_k \}</math> は <math>T_o</math> に基づく破壊靱性</p> | <p>(新設)</p>  |

遷移曲線の中性子照射による温度移行量であり、この温度移行量の求め方を図-RF-4222-1～図-RF-4222-3に示す。また、 $\sigma_M$ は24°C、 $\sigma$ は9.5°C、 $\sigma_{T_0}$ は(2)式に従って求める。(2)式の $K_{Jc(med)}$ は、JEAC 4216の単一試験温度法の場合、JEAC 4216のMCT-5123で算出される値とし、複数試験温度法による場合、(3)式により等価な $K_{Jc(med)}^{eq}$ を算出すること。

$T_0$ 決定に使用した試験片が受けた照射量以下の照射量に対して評価する場合には、 $\Delta RT_{NDT}$ 計算値(d)及び $\sigma$ は0としてもよい。」