

「原子炉压力容器に対する供用期間中の破壊靱性の確認方法等の技術評価に関する  
検討チーム 第四回会合における日本電気協会への説明依頼事項」に対する回答

令和元年11月22日  
(一社)日本電気協会  
原子力規格委員会

標記につきましては、以下の通り回答いたします。

○説明依頼事項

1. PTS 評価に用いる破壊靱性評価遷移曲線に関する追加質問

次の(1)～(4)について、説明してください。

- (1) 破壊靱性確認方法 2007 年版の  $K_{Ic}$  式は、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決定論的な破壊靱性遷移曲線であったが、破壊靱性確認方法 2016 年版の  $K_{Ic}$  式は、マスターカーブ法の考え方に基いて設定した確率論的な破壊靱性遷移曲線に変更しています。どのような考えに基いて、確率論を用いた評価へ移行することとしたのかを説明して下さい。説明には、一部に決定論的な破壊靱性遷移曲線を残していることとの整合性も含んで下さい。
- (2) 資料3-1の図1-1について、個々のプラントのデータ点の決定に用いた破壊靱性試験の試験片形状、試験数、試験温度範囲などが分かるように図1-2のようなプロットを示して説明して下さい<sup>1</sup>。
- (3) 照射脆化した国内材にマスターカーブ法が適用できるかに関し、資料3-1の図2-2からワイブル分布の形状母数が4であるとしていることの妥当性について統計的に評価した結果を示して下さい。
- (4) 図3-1の横軸の  $K_{Jc(0.05)}$  を  $K_0$  とした場合の図を示し、鋼種ごとにワイブル分布の形状母数を4、位置母数  $K_{min}$  を  $20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  としていることの妥当性について評価した内容を説明して下さい。

1 (関連するコメント)2007 年版は、T70 に対してどのぐらいの温度レンジのデータがあるのか、個々の温度での試験片の本数等に依存すると考えられる。T70 で評価することは妥当か。PTS 評価は  $K_{Jc}$  と  $K_J$  で評価する必要があるのではないか。データは 1T 換算したものか。

## ○回答

(1) 破壊靱性確認方法 2007 年版の  $K_{Ic}$  式は、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決定論的な破壊靱性遷移曲線であったが、破壊靱性確認方法 2016 年版の  $K_{Ic}$  式は、マスターカーブ法の考え方に基づいて設定した確率論的な破壊靱性遷移曲線に変更しています。どのような考えに基づいて、確率論を用いた評価へ移行することとしたのかを説明して下さい。説明には、一部に決定論的な破壊靱性遷移曲線を残していることとの整合性も含んで下さい。

### 回答(1)

「JEAC4206-2016, JEAC4216-2015 における破壊靱性評価の考え方」を参照ください。

(2) 資料3-1の図1-1について、個々のプラントのデータ点の決定に用いた破壊靱性試験の試験片形状、試験数、試験温度範囲などが分かるように図1-2のようなプロットを示して説明して下さい。

回答(2)

個々のプラント(図 2-1 参照)について、JEAC4201-2007[2013 年追補版]の脆化予測法に基づき 32EFPY 時点まで温度移行した破壊靱性データと 32EFPY 時点の破壊靱性遷移曲線を比較した結果を表 2-1 に示します。比較は、2007 年版に基づく評価と 2016 年版に基づく評価のそれぞれについて行いました。試験片種類をプラント名の欄に併せて示していますが、1/2T-C(T)試験片による破壊靱性データについては、2016 年版に基づく評価ではマスターカーブの考え方に従い、1T 換算した結果を示します。

また、2007 年版と 2016 年版に基づく評価で、破壊靱性遷移曲線の設定に際して考慮するマージンの考え方が異なる(2007 年版は  $2\sigma_{\Delta}$ :18°Cまたは 22°C, 2016 年版は  $M_p$ :3°C)ことから、破壊靱性データを温度移行する際はマージンを考慮せずにプロットし、破壊靱性遷移曲線についてもマージンを考慮しない線を破線で示します。

さらに、2007 年版に基づく評価では、破壊靱性遷移曲線の設定に際して附属書 C C-3220(2)に「ただし、原子炉圧力容器の温度は 0°C未満となることはないので、0°C以上の温度範囲の破壊靱性データを対象とすればよい。」とあることから、温度移行後の破壊靱性データ(マージン考慮)が 0°C未満となる破壊靱性データは下限包絡の対象外としており、対象外となる破壊靱性データについては、「□」で明示しています。

表 2-1 より、2007 年版に基づく評価では、下限包絡の対象となる破壊靱性データの点数やそのばらつき程度に依存して必ずしも遷移温度域の破壊靱性の傾向を表せていない場合があるのに対して、2016 年版に基づく評価では、評価時期の破壊靱性データの点数やばらつき程度に依存せず、一定の保守性を有して設定できていることがわかります。

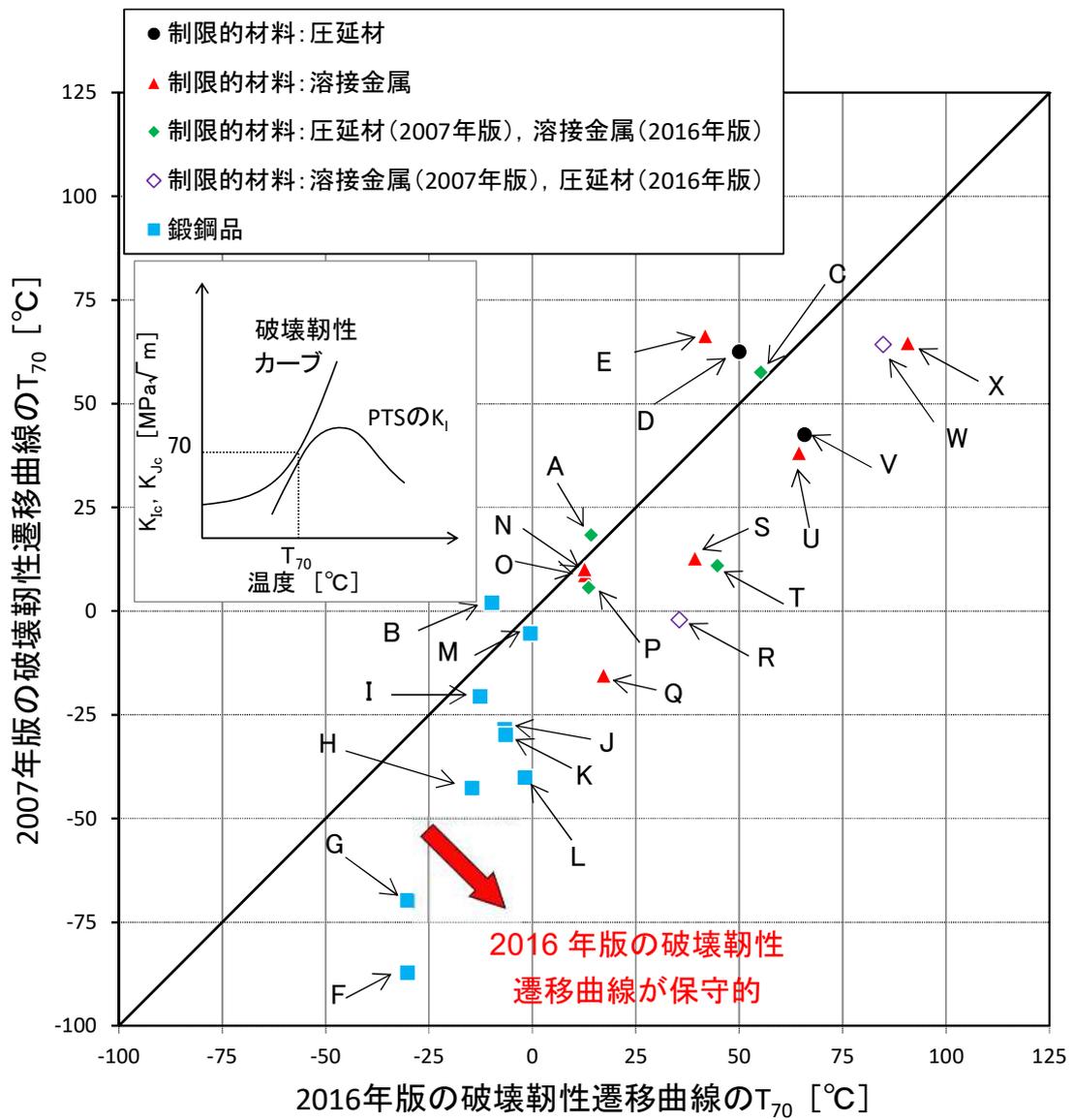
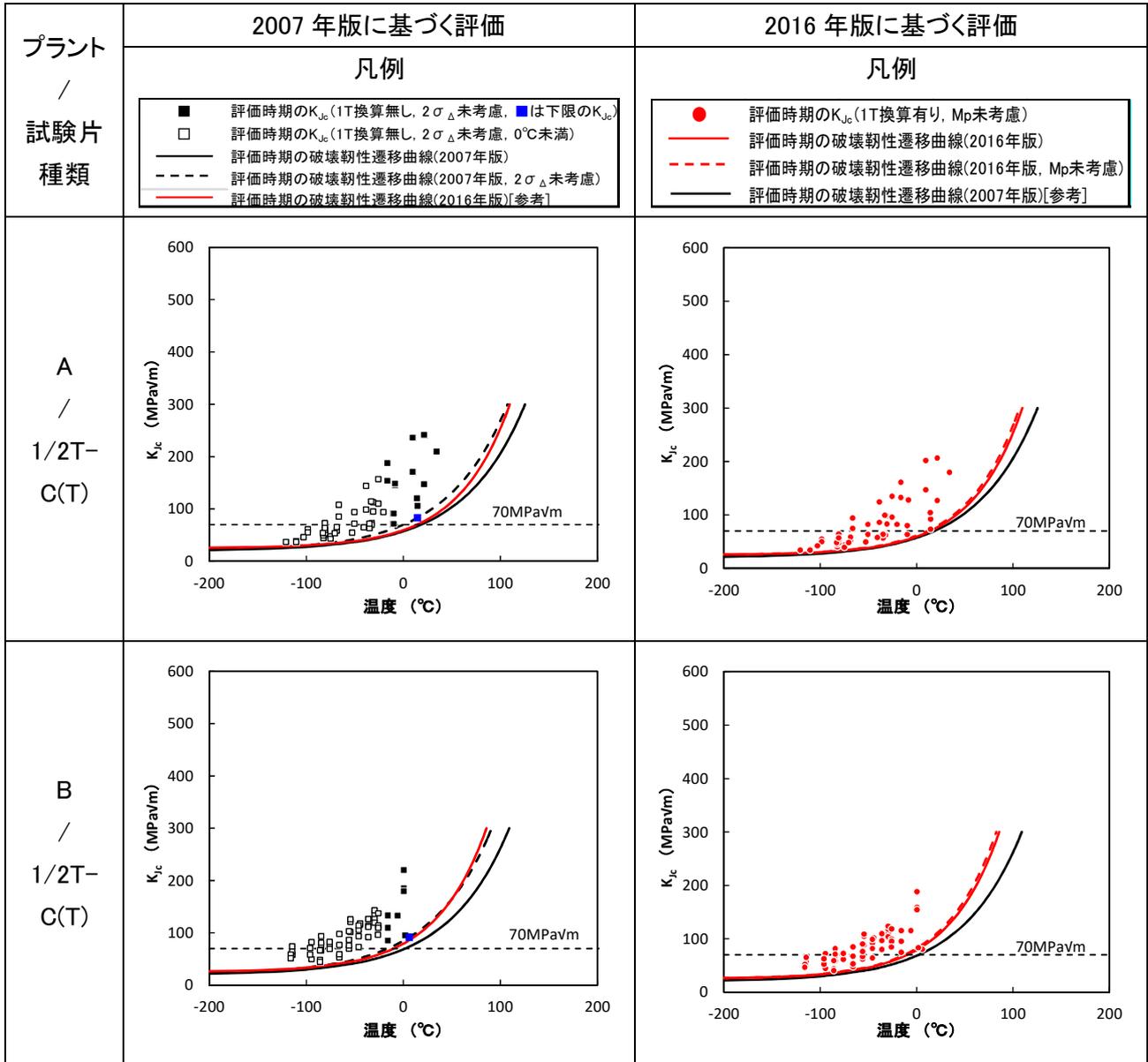


図 2-1 国内 PWR プラントの 32EFY 時点の破壊靱性遷移曲線の遷移温度  $T_{70}$  の比較

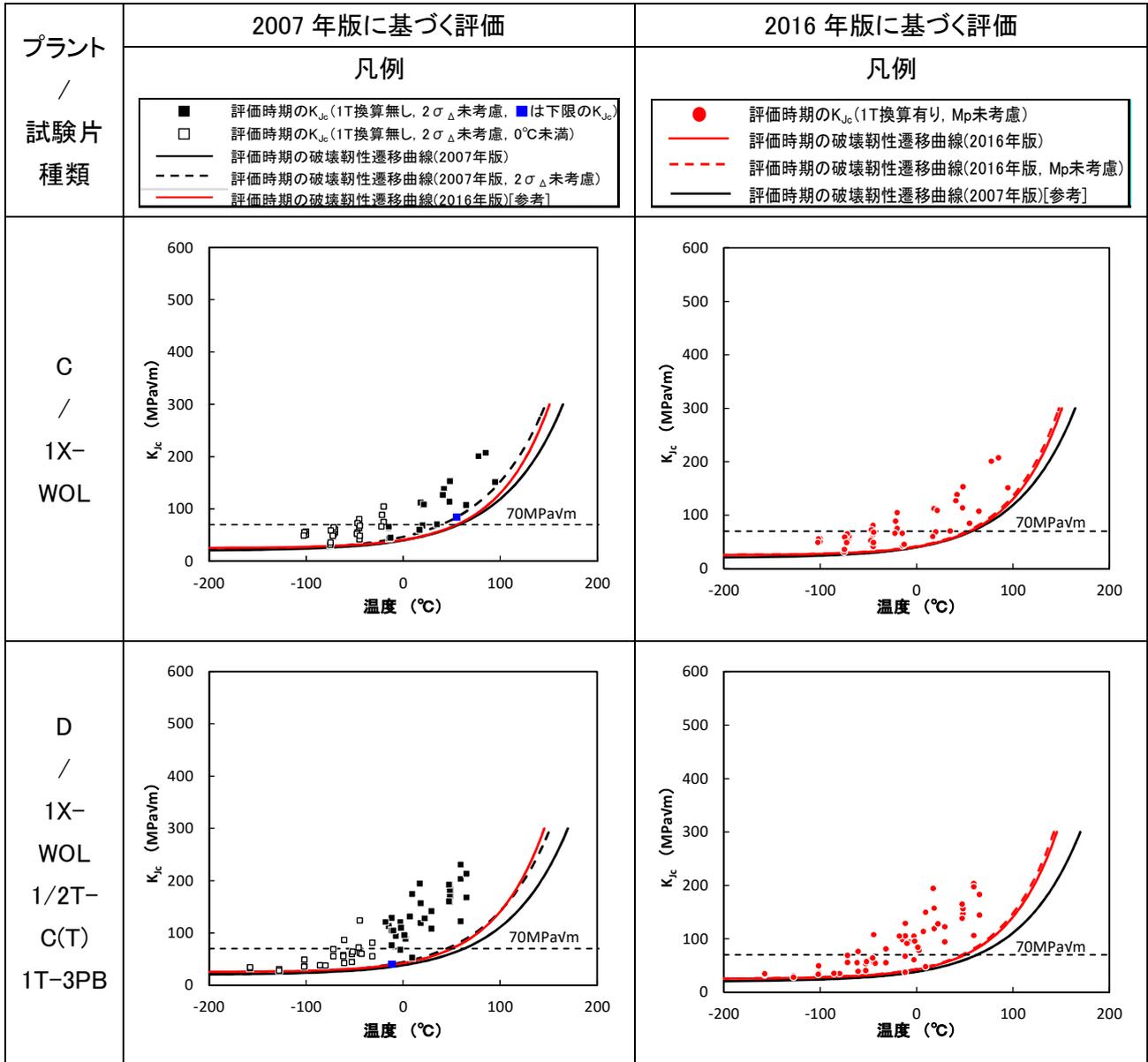
注) 2016 年版の破壊靱性遷移曲線の検討の際のデータベースを用いて電気協会にて分析

表 2-1(1/12) 32EFPY 時点の破壊靱性データと破壊靱性遷移曲線の比較



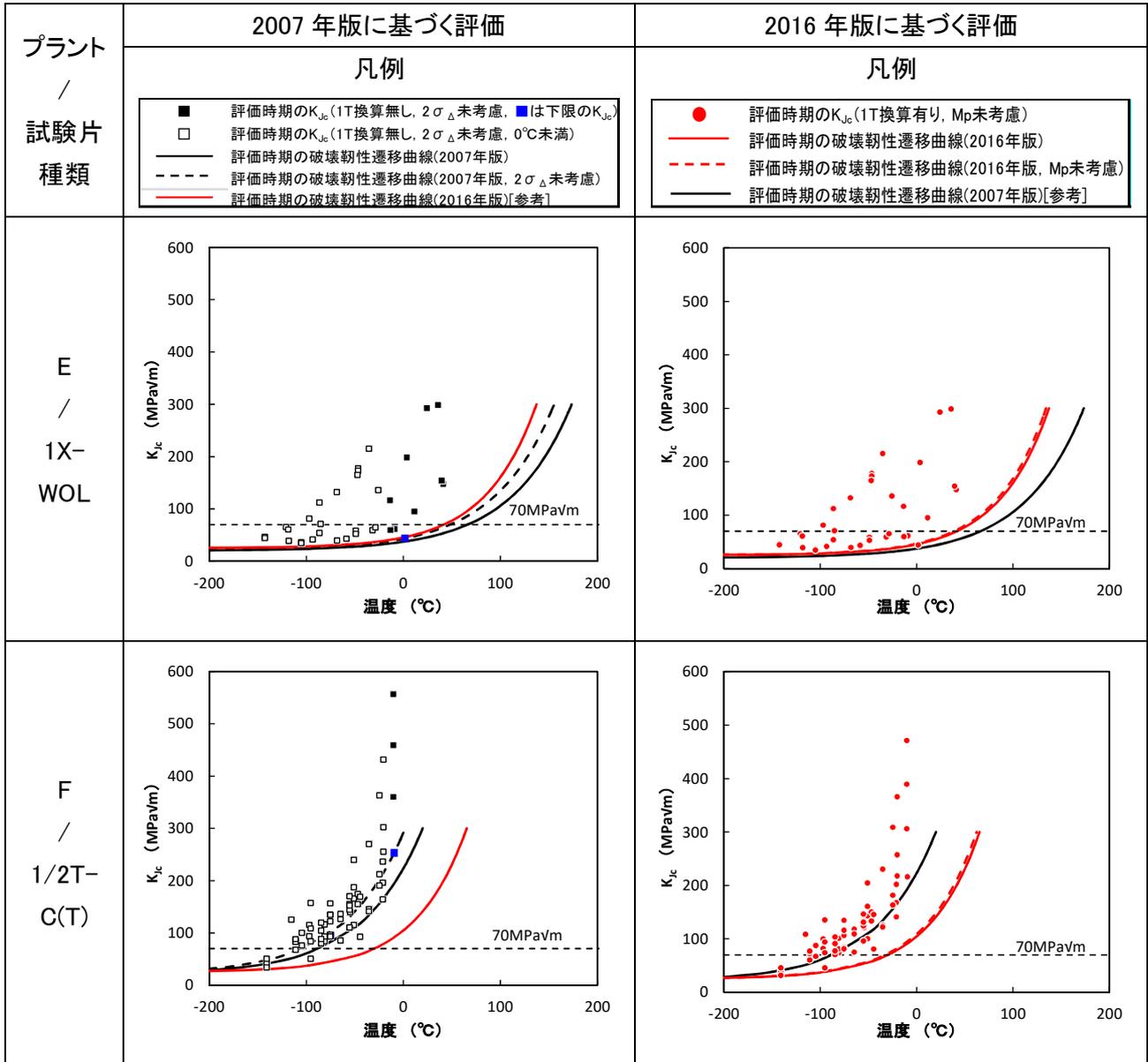
注) 2016 年版の破壊靱性遷移曲線の検討の際のデータベースを用いて電気協会で分析

表 2-1(2/12) 32EFPY 時点の破壊靱性データと破壊靱性遷移曲線の比較



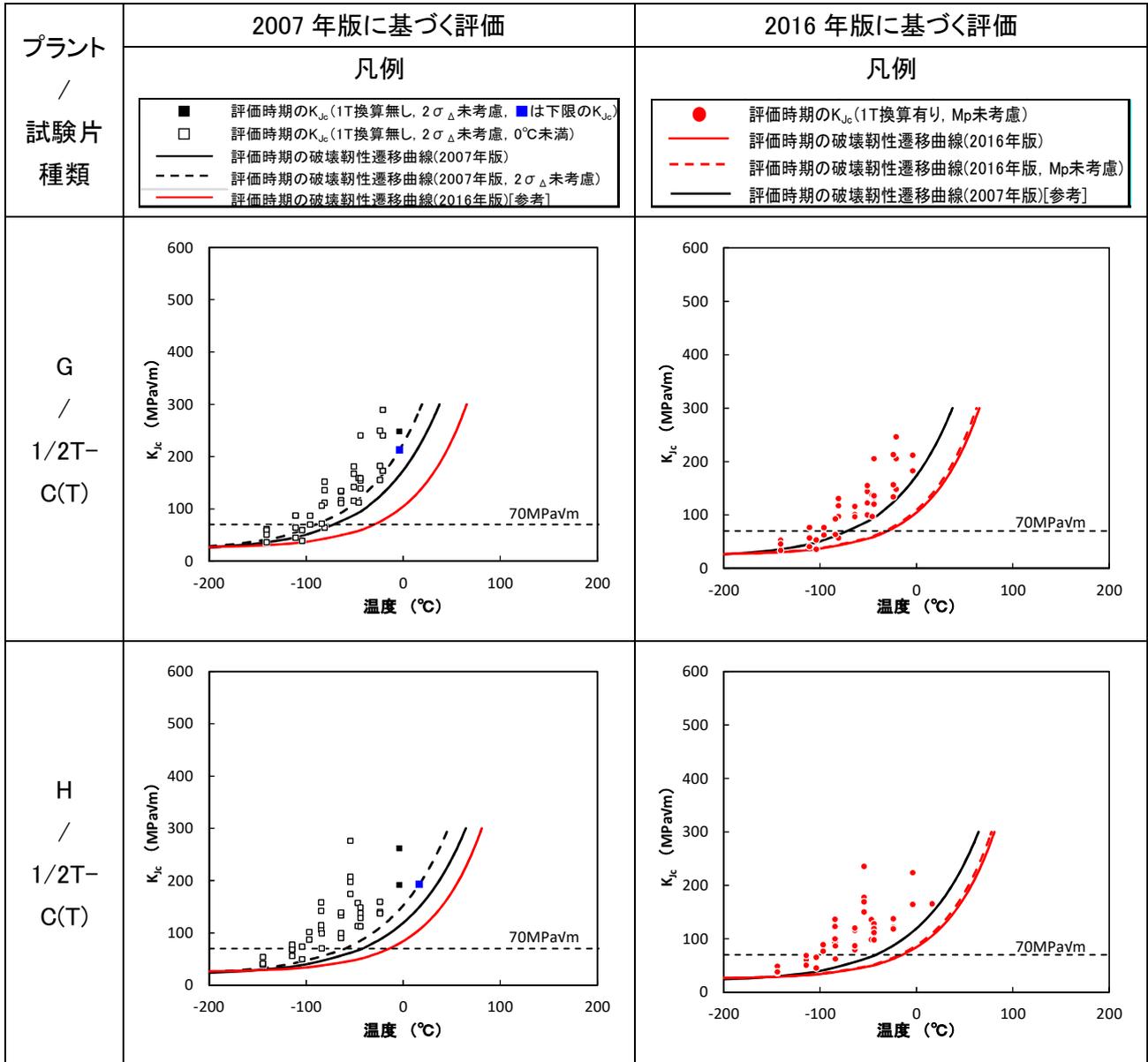
注) 2016 年版の破壊靱性遷移曲線の検討の際のデータベースを用いて電気協会で分析

表 2-1(3/12) 32EFPY 時点の破壊靱性データと破壊靱性遷移曲線の比較



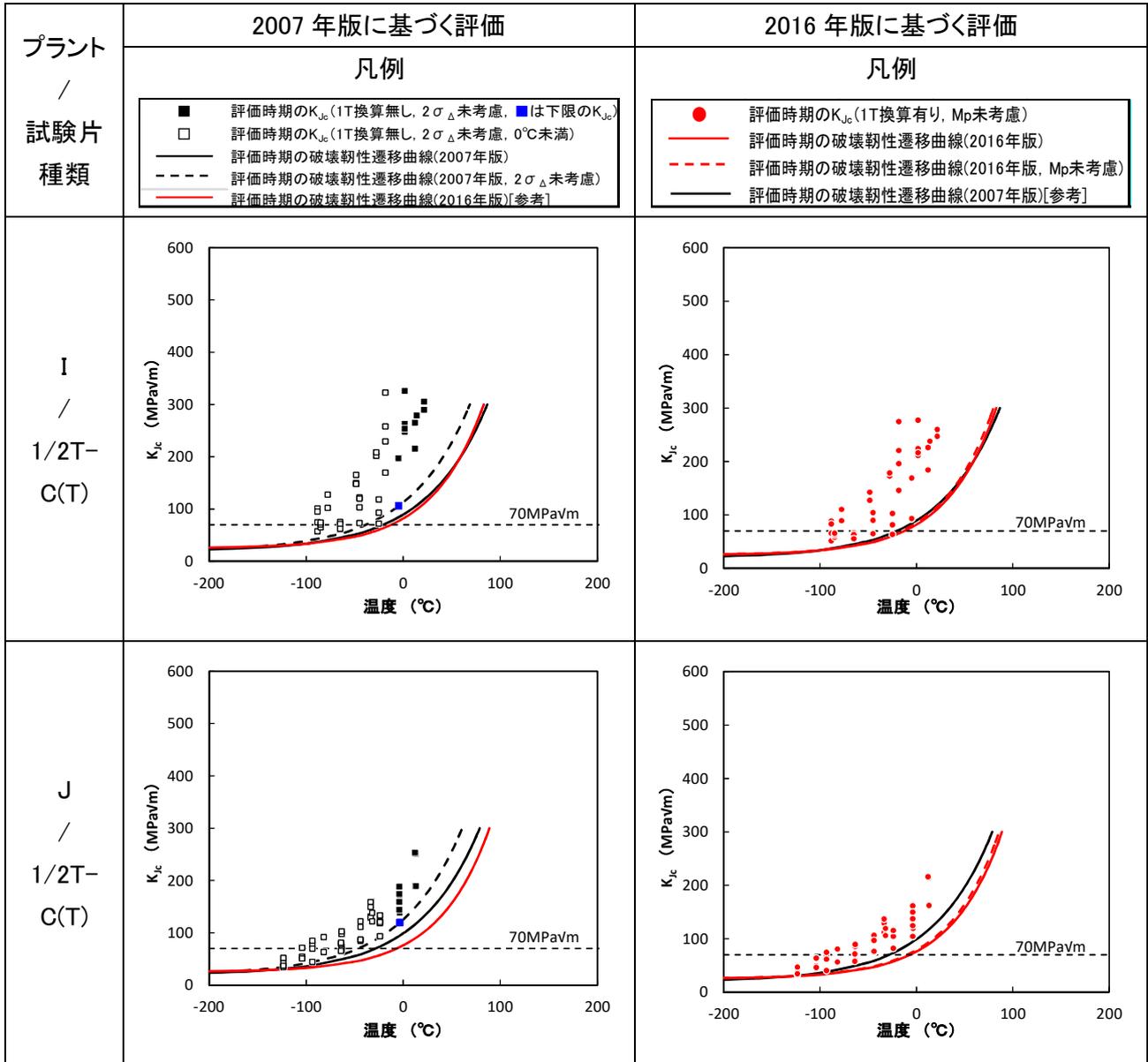
注) 2016 年版の破壊靱性遷移曲線の検討の際のデータベースを用いて電気協会で分析

表 2-1(4/12) 32EFPY 時点の破壊靱性データと破壊靱性遷移曲線の比較



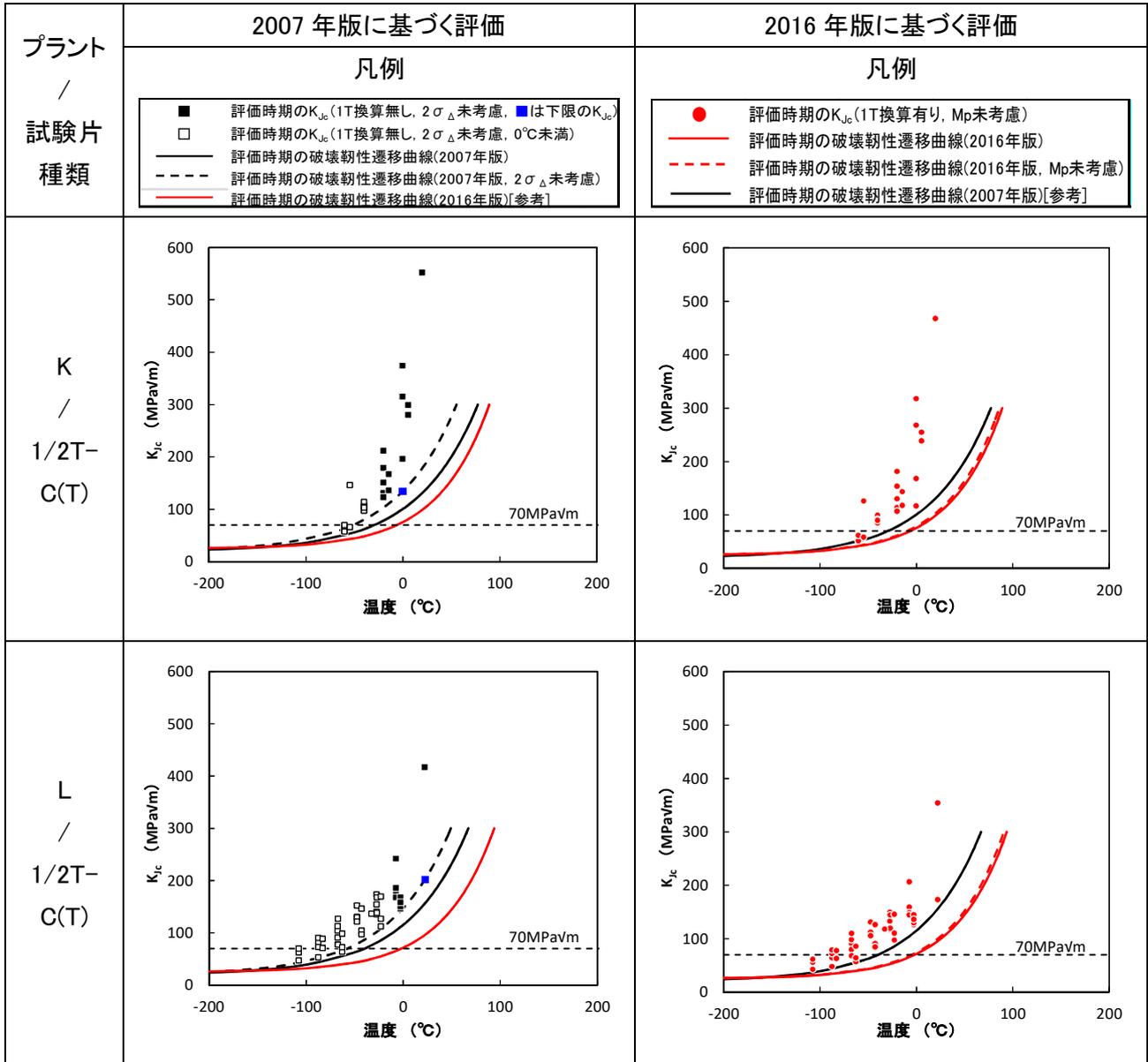
注) 2016 年版の破壊靱性遷移曲線の検討の際のデータベースを用いて電気協会で分析

表 2-1(5/12) 32EFPY 時点の破壊靱性データと破壊靱性遷移曲線の比較



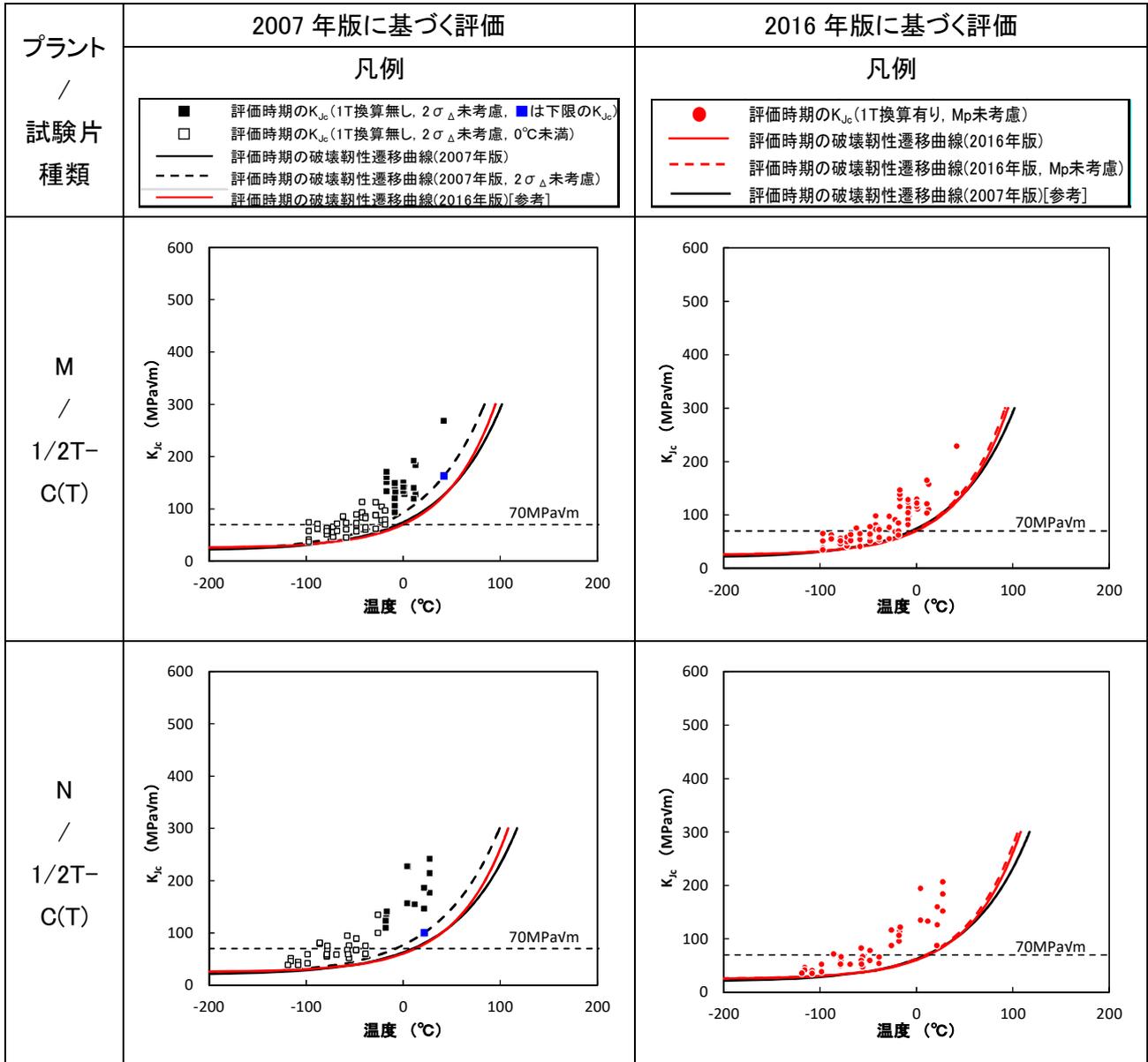
注) 2016 年版の破壊靱性遷移曲線の検討の際のデータベースを用いて電気協会で分析

表 2-1(6/12) 32EFPY 時点の破壊靱性データと破壊靱性遷移曲線の比較



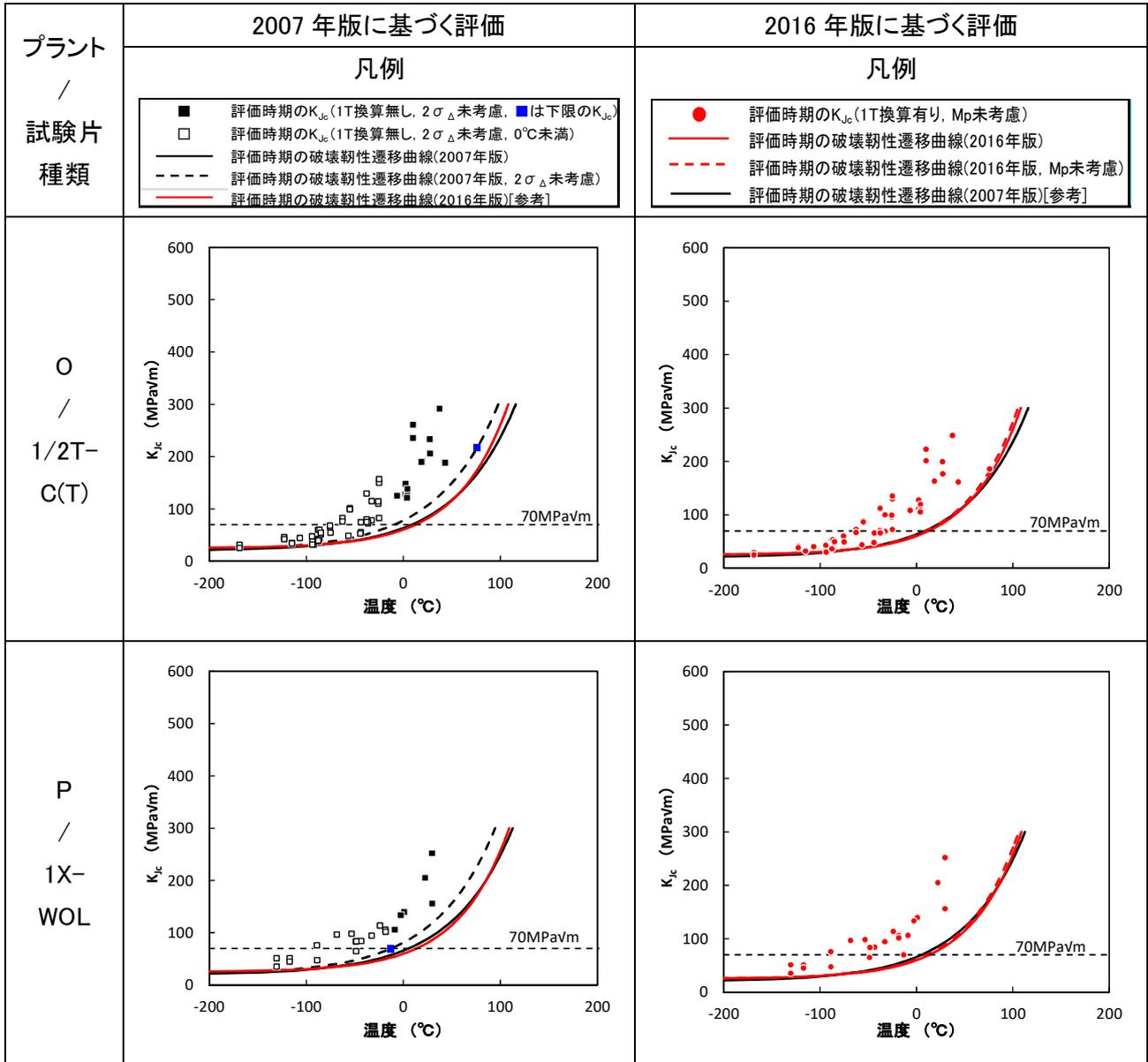
注) 2016 年版の破壊靱性遷移曲線の検討の際のデータベースを用いて電気協会で分析

表 2-1(7/12) 32EFPY 時点の破壊靱性データと破壊靱性遷移曲線の比較



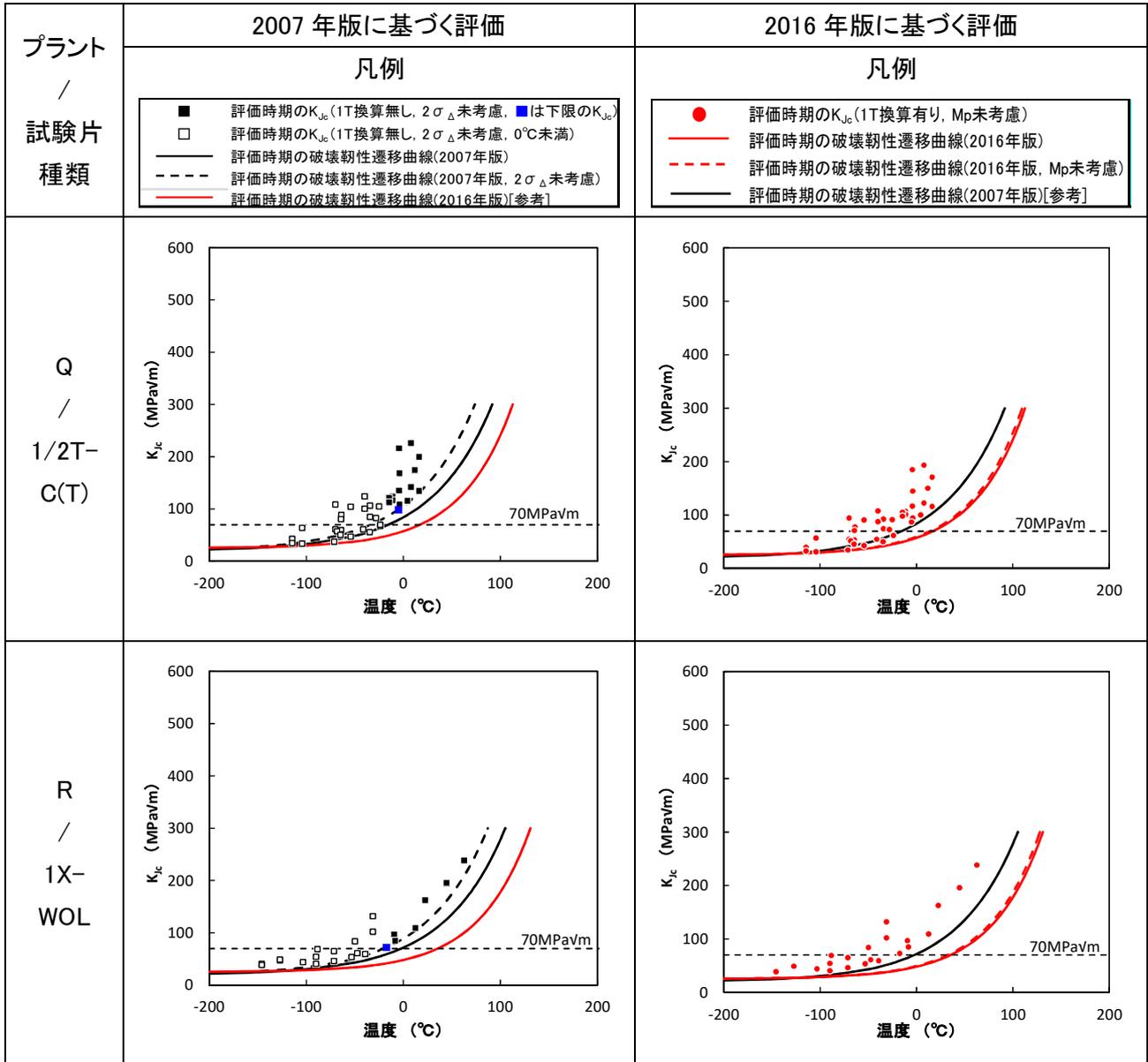
注) 2016 年版の破壊靱性遷移曲線の検討の際のデータベースを用いて電気協会で分析

表 2-1(8/12) 32EFPY 時点の破壊靱性データと破壊靱性遷移曲線の比較



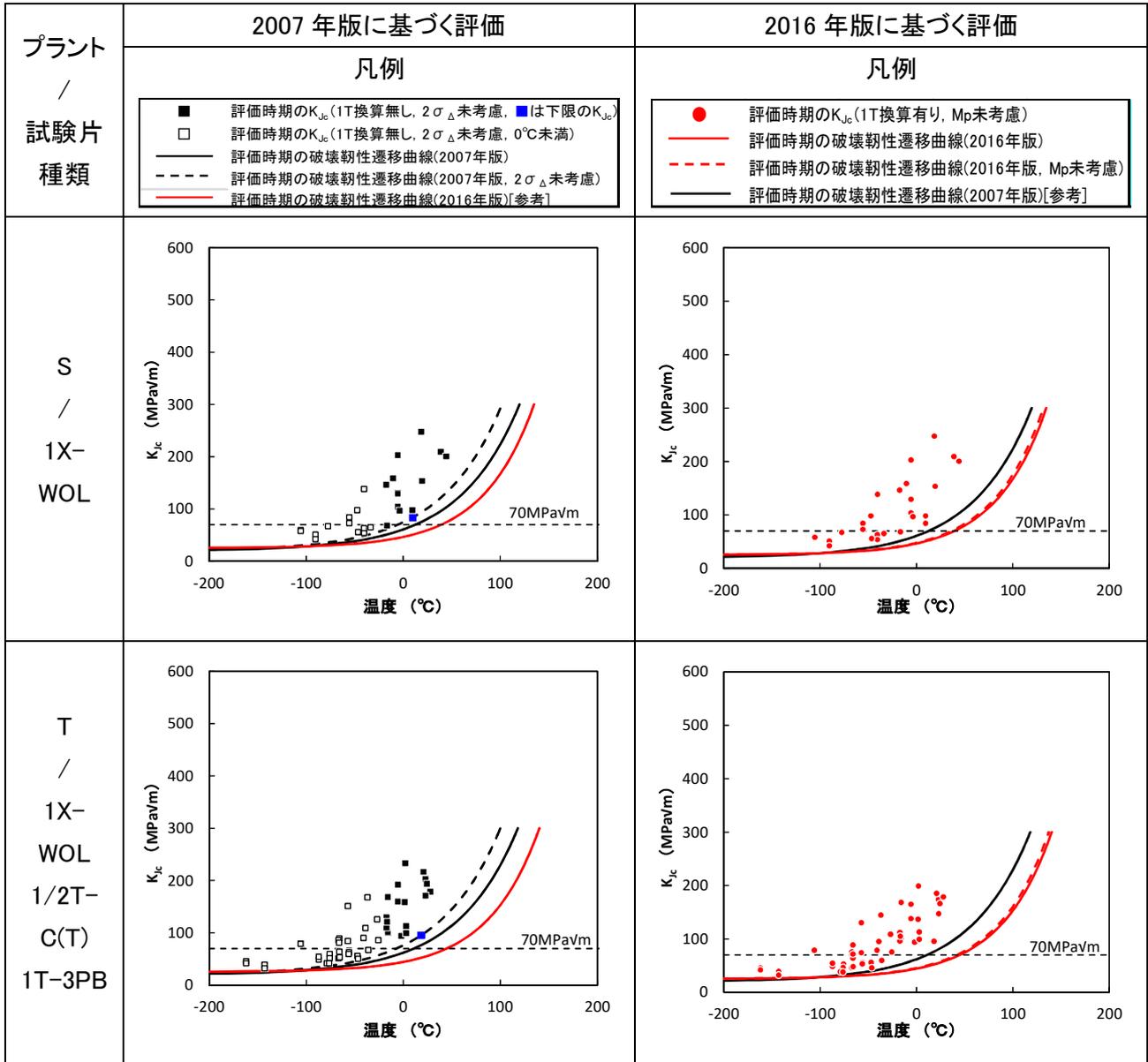
注) 2016 年版の破壊靱性遷移曲線の検討の際のデータベースを用いて電気協会で分析

表 2-1(9/12) 32EFPY 時点の破壊靱性データと破壊靱性遷移曲線の比較



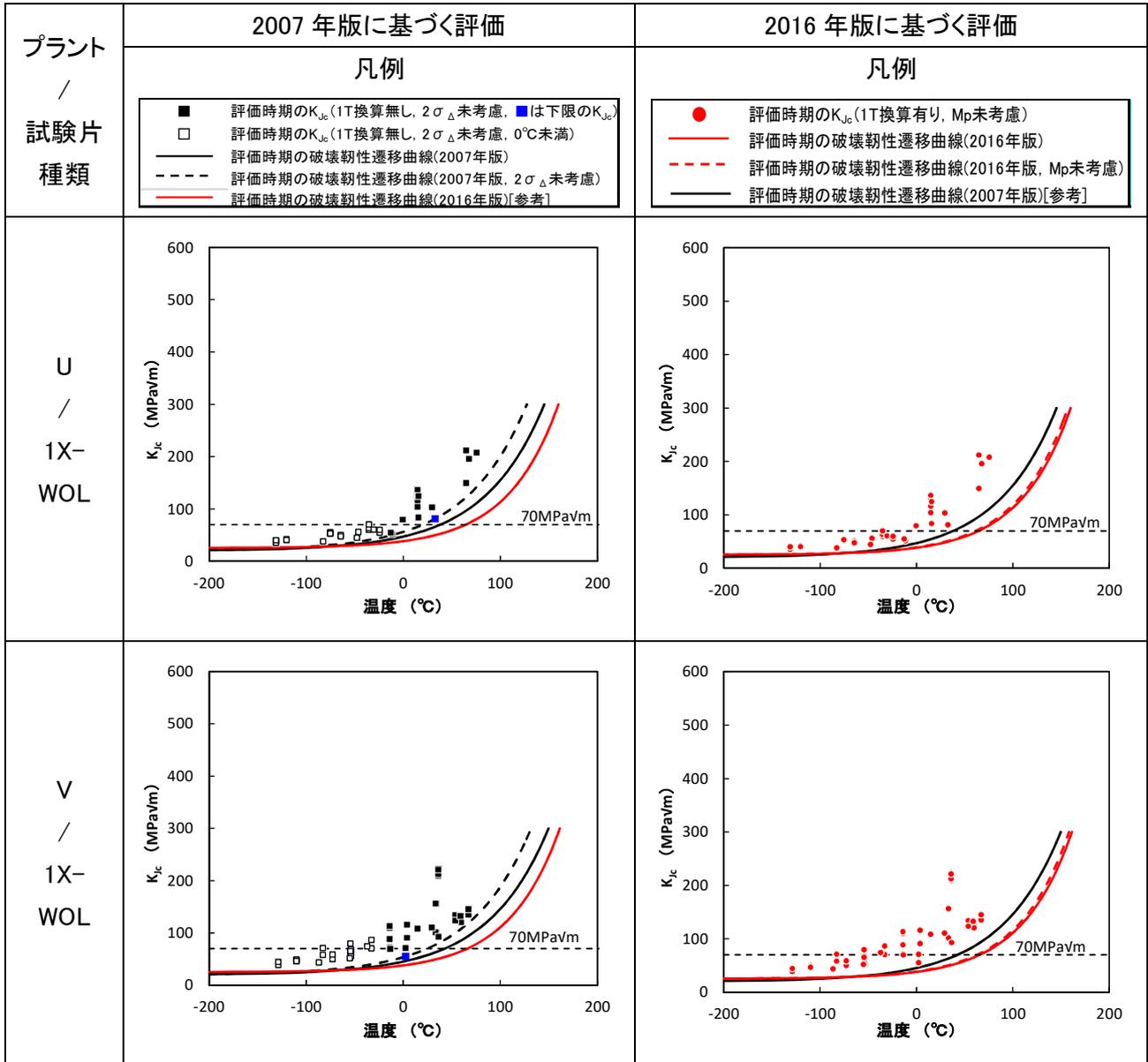
注) 2016 年版の破壊靱性遷移曲線の検討の際のデータベースを用いて電気協会で分析

表 2-1(10/12) 32EPY 時点の破壊靱性データと破壊靱性遷移曲線の比較



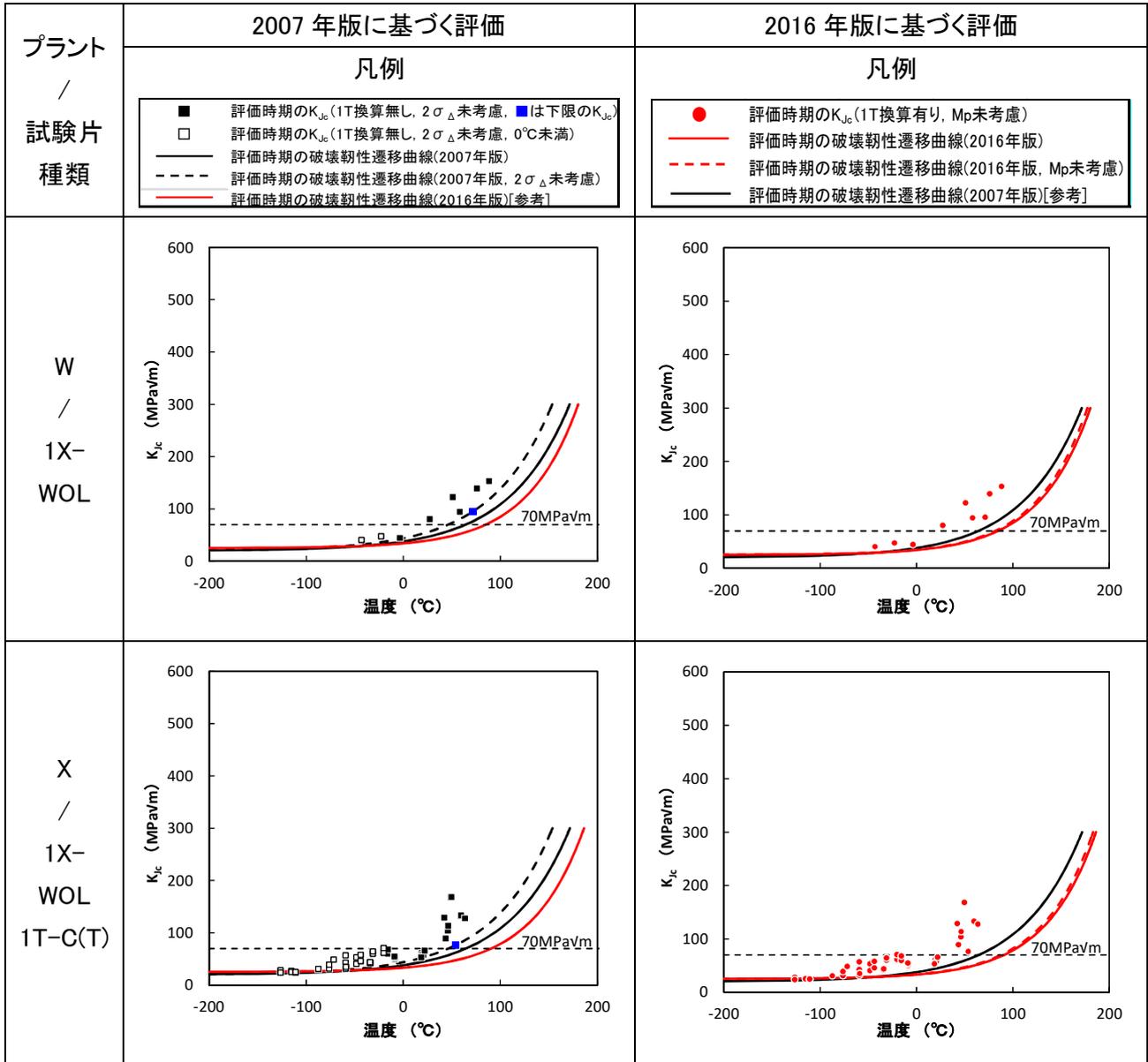
注) 2016 年版の破壊靱性遷移曲線の検討の際のデータベースを用いて電気協会で分析

表 2-1(11/12) 32EPY 時点の破壊靱性データと破壊靱性遷移曲線の比較



注) 2016年版の破壊靱性遷移曲線の検討の際のデータベースを用いて電気協会で分析

表 2-1(12/12) 32EPFY 時点の破壊靱性データと破壊靱性遷移曲線の比較



注) 2016 年版の破壊靱性遷移曲線の検討の際のデータベースを用いて電気協会で分析

(3) 照射脆化した国内材にマスターカーブ法が適用できるかに関し、資料3-1の図2-2からワイブル分布の形状母数が4であるとしていることの妥当性について統計的に評価した結果を示して下さい。

回答(3)

国内 PWR プラント 監視試験で取得した照射後の破壊靱性データの内、表 3-1 に示す  $T_0$  が設定可能な鍛鋼品(第3回検討チーム会合資料 3-1 の回答(2)と同じ材料)について、それぞれの材料に対するワイブルプロットを図 3-1 に示します。図 3-1 より、いずれの材料についても、マスターカーブ法に基づく形状母数 4 の直線に沿って分布しており、形状母数を 4 とすることは妥当と考えられます。

また、図 3-2 に全材料に対するワイブルプロットを示します。ワイブルプロットの近似直線の傾きは約 4.5 でマスターカーブ法に基づく形状母数 4 よりも高く、相関係数も高い結果が得られていることから、表 3-1 に示す照射後鍛鋼品の全体的な傾向としては、マスターカーブよりもばらつきが小さいと評価されます。

表 3-1 検討に使用した鍛鋼品の照射後破壊靱性データの詳細

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 SFVQ1A (鍛鋼品)	220	11	16~26	2.3 ~7.2	0.02 ~0.04	-71 ~14	3% (6 個)

注) 2016 年版の破壊靱性遷移曲線の検討の際のデータベースを用いて電気協会で分析

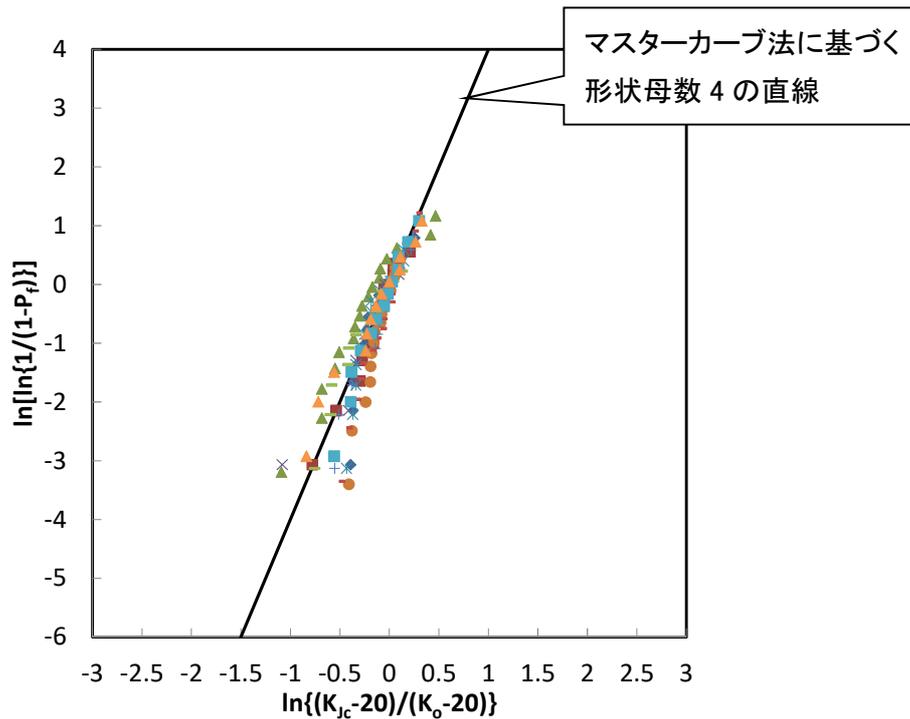


図 3-1 鍛鋼品の照射後破壊靱性データのワイブルプロット(材料毎)

注) 2016年版の破壊靱性遷移曲線の検討の際のデータベースを用いて電気協会で分析

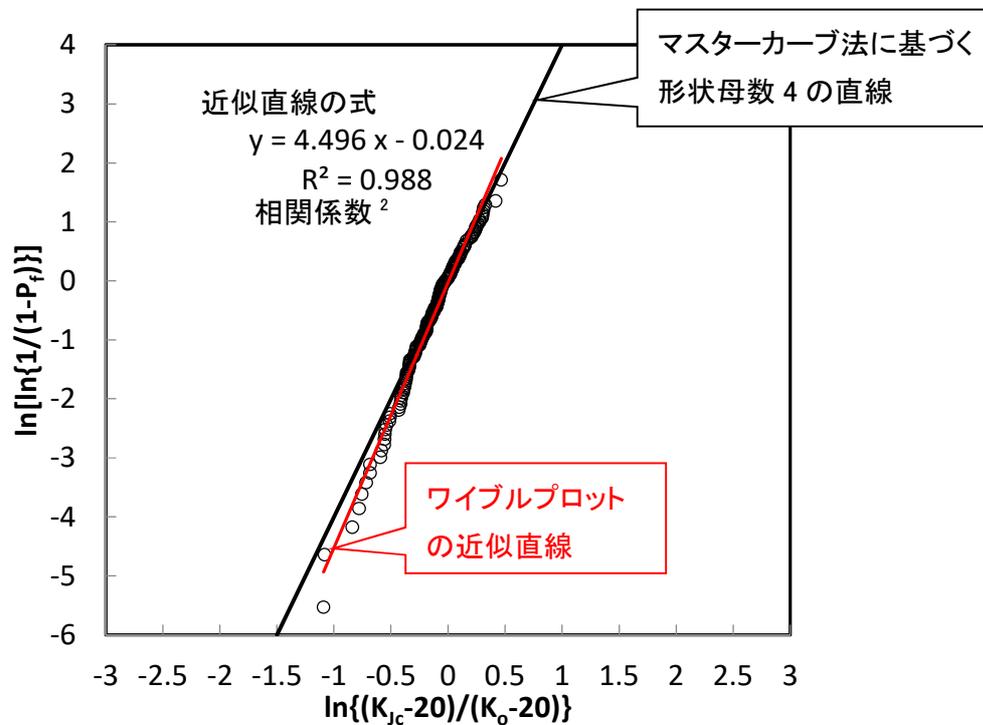


図 3-2 鍛鋼品の照射後破壊靱性データのワイブルプロット(全材料)

注) 2016年版の破壊靱性遷移曲線の検討の際のデータベースを用いて電気協会で分析

(4) 図3-1の横軸の  $K_{Jc(0.05)}$  を  $K_0$  とした場合の図を示し、鋼種ごとにワイブル分布の形状母数を4、位置母数  $K_{min}$  を 20 MPa $\sqrt{m}$  としていることの妥当性について評価した内容を説明して下さい。

回答(4)

照射後の破壊靱性データ( $K_{Jclimit}$  を超えるデータ及び  $T - (T_{r30} + \Delta T_t)$  が  $-50^\circ\text{C}$  未満のデータを除く)の鋼種毎のワイブルプロットを図 4-1 に示します。ここで示すワイブルプロットは、複数の材料・照射条件かつ複数の試験温度( $T$ )の破壊靱性データが含まれることから、試験で得られた破壊靱性データ( $K_{Jc}$ )に対して  $T_{r30}$  実測値を鋼種毎の  $\Delta T_t$  で補正したマスターカーブ法に基づく以下の式による  $K_0$  で規格化して  $\ln \{(K_{Jc} - 20)/(K_0 - 20)\}$  を横軸として示しています。

$$K_0 = K_{min} + \left[ 11 + 77 \exp\{0.019\{T - (T_{r30} \text{実測値} + \Delta T_t)\}\} \right]$$

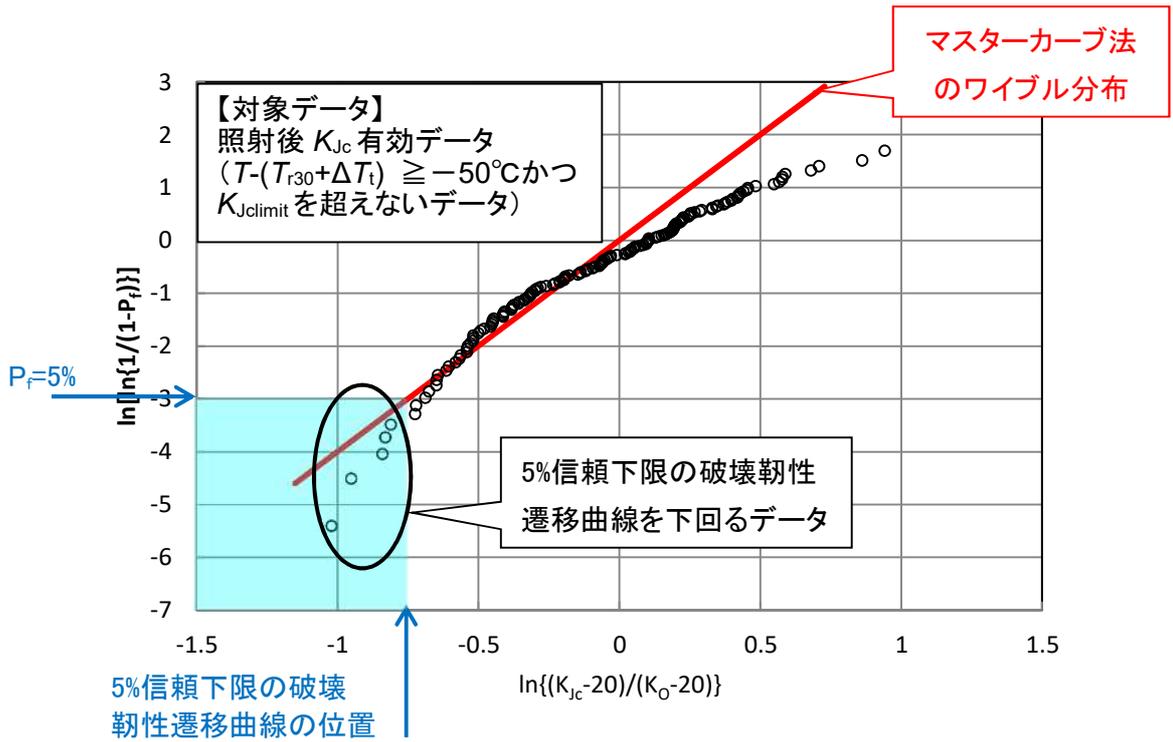
なお、 $K_0$  は 62.3%信頼下限の  $K_{Jc}$  を表し、マスターカーブ法のワイブル分布では、累積破損確率  $P_f$  は以下の式で表されることから、図 4-1 のワイブルプロット上では傾き 4 の直線(同図中の赤の直線)で表されます。

$$P_f = 1 - \exp \left\{ - \left( \frac{K_{Jc} - K_{min}}{K_0 - K_{min}} \right)^4 \right\}$$

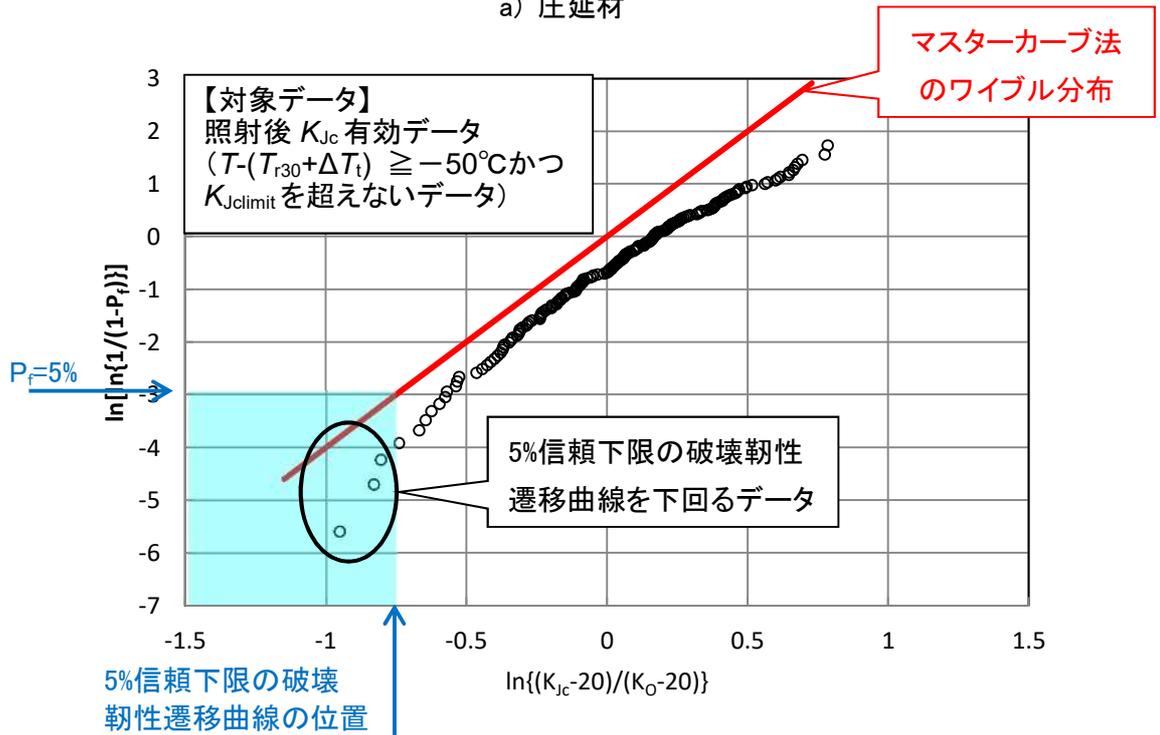
↓ 式を展開すると

$$\ln \left[ \ln \left\{ 1 / (1 - P_f) \right\} \right] = 4 \times \ln \left( \frac{K_{Jc} - K_{min}}{K_0 - K_{min}} \right)$$

図 4-1 より、圧延材の破壊靱性データに変曲点が認められるものの、いずれの鋼種についても概ねワイブルプロットの傾きは 4 に近いと考えられます。また、 $K_{min}$  についてもマスターカーブ法の位置パラメータである 20MPa $\sqrt{m}$  を使用することとしています。5%信頼下限の破壊靱性遷移曲線を下回るデータは、全て累積破損確率  $P_f$  が 5%以下となっており、PTS 評価を行う上では問題ないものと判断しています。



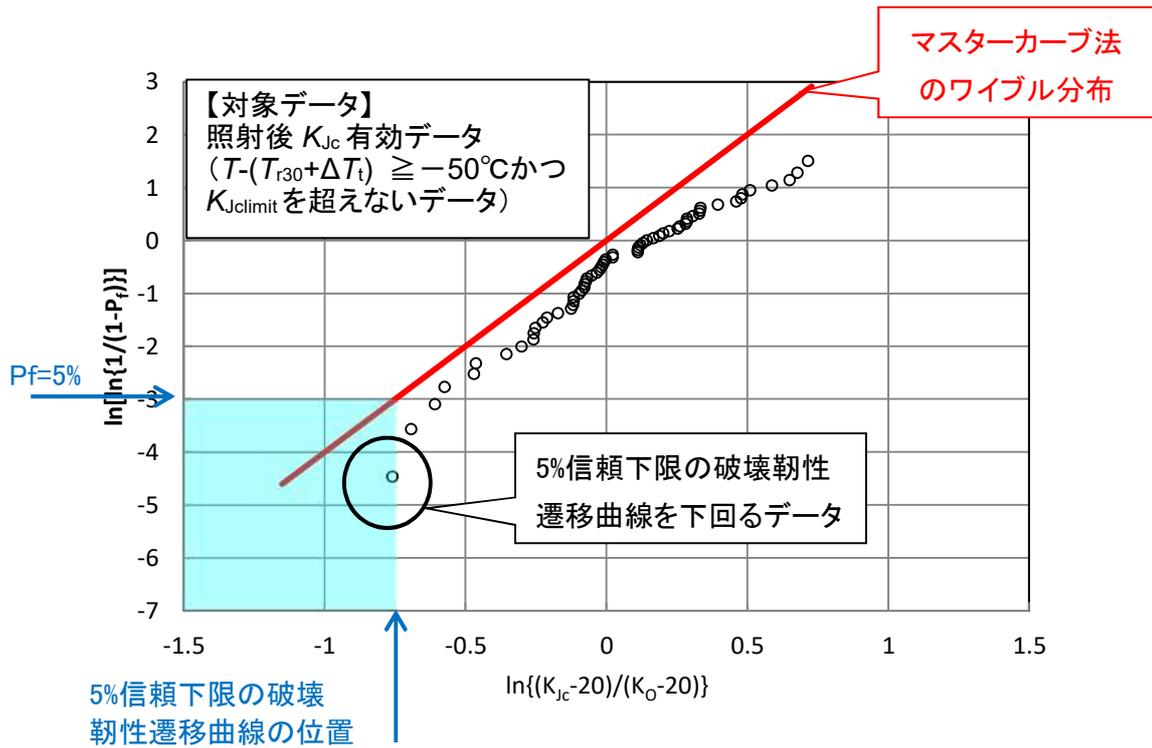
a) 圧延材



b) 鍛鋼品

図 4-1(1/2) 照射後破壊靱性データのワイブルプロット

注) 2016年版の破壊靱性遷移曲線の検討の際のデータベースを用いて電気協会で行った分析



c) 溶接金属

図 4-1(2/2) 照射後破壊靱性データのワイブルプロット

注) 2016年版の破壊靱性遷移曲線の検討の際のデータベースを用いて電気協会で分析

### ○参考:関連するコメント

(参考1) 2007年版は、 $T_{70}$ に対してどのぐらいの温度レンジのデータがあるのか、個々の温度での試験片の本数等に依存すると考えられる。

回答(参考1)

回答(2)に示した表 2-1 中の個々のプラントのグラフを参照ください。

(参考2)  $T_{70}$ で評価することは妥当か。

回答(参考2)

図-参考 2-1(第2回検討チーム会合資料 2-1 の P15 と同じ図)に、2007年版と2016年版の破壊靱性遷移曲線を、PTS状態遷移曲線と共に比較して示します。図-参考 2-1 に示す通り、 $100\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 以下の領域では、2007年版と2016年版の破壊靱性遷移曲線はほぼ一致していますので、PTS評価における破壊靱性遷移曲線の違いの影響を比較する上でPTS状態遷移曲線と近接する $T_{70}$ を指標として用いても問題ないと考えられます。

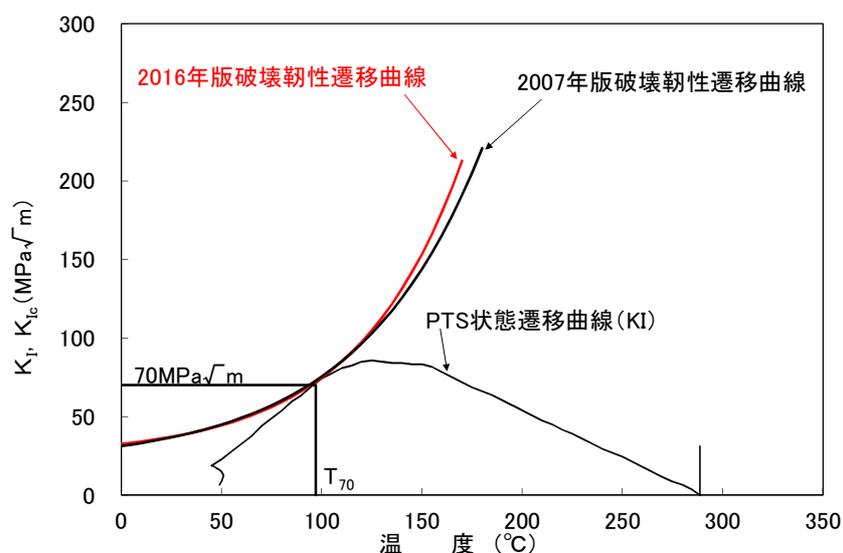


図-参考 2-1 2007年版と2016年版の破壊靱性遷移曲線の比較

(参考3) PTS 評価は  $K_{Jc}$  と  $K_J$  で評価する必要があるのではないか。

回答(参考3)

2016 年版では、PTS 状態遷移曲線(応力拡大係数)の設定方法として、弾性解析による応力分布から  $K_I$  式により算出する方法と、最大仮想欠陥をモデル化した有限要素法(FEM)解析により算出する方法を規定しています。前者の  $K_I$  式については、弾塑性 FEM 解析の J 積分から換算した  $K_I$  を定式化したもの[1]であり、また、後者も弾塑性解析により求めた J 積分から換算した  $K_I$  を算出することになるため、規格では  $K_I$  と表記されていますが、実際には塑性域の影響も考慮された  $K_I$  で評価されることとなります。

(参考4) データは 1T 換算したものか。

回答(参考4)

2016 年版の破壊靱性遷移曲線は、マスターカーブ法に従い破壊靱性データを 1T 換算して設定していますが、2007 年版の破壊靱性遷移曲線の設定に際しては 1T 換算を行っておりません。第3回検討チーム会合資料 3-1 の図 1-2 では、破壊靱性データが直接的に破壊靱性遷移曲線の設定に用いられる 2007 年版の取り扱いに従い、1T 換算無しの破壊靱性データを示していましたが、回答(2)の表 2-1 では、1T 換算無しの 2007 年版に基づく評価と 1T 換算有りの 2016 年版に基づく評価の 2 種類を示しています。

**【文献】**

- [1] Marie, S., "Plastic Amplification  $\beta$  of the Stress Intensity Factor for Underclad Defect in a Vessel Submitted to a Pressurized Thermal Shock, " Proceedings of ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference (2011), paper no. 57362.