

「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等の技術評価に関する  
検討チーム 第三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10月18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)～(6)について、できるだけデータやグラフを用いて説明してください。

- (1) 2016年版の式における  $T_{70}$  が2007年版に比べて非保守的となる5点のデータに対してどのように評価しているのか説明してください。
- (2) マスターカーブ法を国内材の中性子照射材に適用することについて検討した内容を、国内材の破壊靱性データを用いて説明してください。説明には、検討に用いたデータの  $T_0$  の範囲、95%上限を上回る確率、国内破壊靱性データでも形状係数を4とした際の検討の内容及び国内材がマスターカーブに従わない可能性について検討した内容を含んでください。
- (3) 照射後の破壊靱性試験データの鋼種毎のワイブルプロット、Wallin の評価法による安全レベル(下回る確率)が母材(圧延材)において ASME  $K_{IC}$  の安全レベル 2.5%よりも高い 4.1%となることを妥当とした根拠及び 2007年版の式を用いて鋼種ごとに安全レベルを評価した結果を示してください。
- (4) 破壊靱性遷移曲線の  $\Delta T_i$  の決定に使用したデータ数が十分であることを、どのように確認したのか説明して下さい。説明には、銅含有量の多いものにも適用できるかについて検討した内容、 $\Delta T_i$  を鋼種毎に設定した際の検討内容(JEAC4201の脆化予測を鋼種別にすれば  $\Delta T_i$  を鋼種毎に決定する必要はないのか等)を含んで下さい。
- (5)  $\Delta T_i$  を中性子照射量が  $3.3 \times 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup> よりも高いデータで算出した結果を示してください。
- (6) マスターカーブの適用範囲に基づいて、遷移領域外の低温側( $T - T_0 < -50^\circ\text{C}$ )のデータ及び  $K_{Jc(limit)}$  を超えるデータを除外することに加えて遷移領域外の高温側( $50^\circ\text{C} < T - T_0$ )のデータを除外して  $\Delta T_i$  を求めた結果を示してください。

## ○回答

(1) 2016年版の式における  $T_{70}$  が2007年版に比べて非保守的となる5点のデータに対してどのように評価しているのか説明してください。

### 回答(1)

2016年版の破壊靱性遷移曲線における  $T_{70}$  が2007年版に比べて非保守的となる5プラント(図1-1参照)について、32EFPY時点の2007年版と2016年版の破壊靱性遷移曲線の比較を図1-2に示します。図中には、設定に用いた32EFPY時点まで温度移行した未照射及び照射後の破壊靱性データ(1T換算無し)を温度移行前のデータと共に示します。なお、図1-1に示した鍛鋼品以外の  $T_{70}$  については、プラントごとに圧延材と溶接金属のいずれか高い方(破壊靱性の低い方)に定まる値であることから、 $T_{70}$  の高い方(破壊靱性の低い方)の鋼種を「制限的材料」として区別してプロットしています。

図1-1より、これら5プラントの制限的材料は、圧延材が1プラント、溶接金属が1プラント、鍛鋼品が1プラント、制限的材料が圧延材から溶接金属に入れ替わるものが2プラントとなっており、特定の鋼種で2007年版のほうが保守的となる傾向は認められません。

また、図1-2より、2016年版の破壊靱性遷移曲線と32EFPY時点まで温度移行した破壊靱性データを比較すると、2016年版の曲線を下回る破壊靱性データは大部分のプラントで比較的低温のデータとなっており、また下回る幅もそれほど大きくないことがわかります。

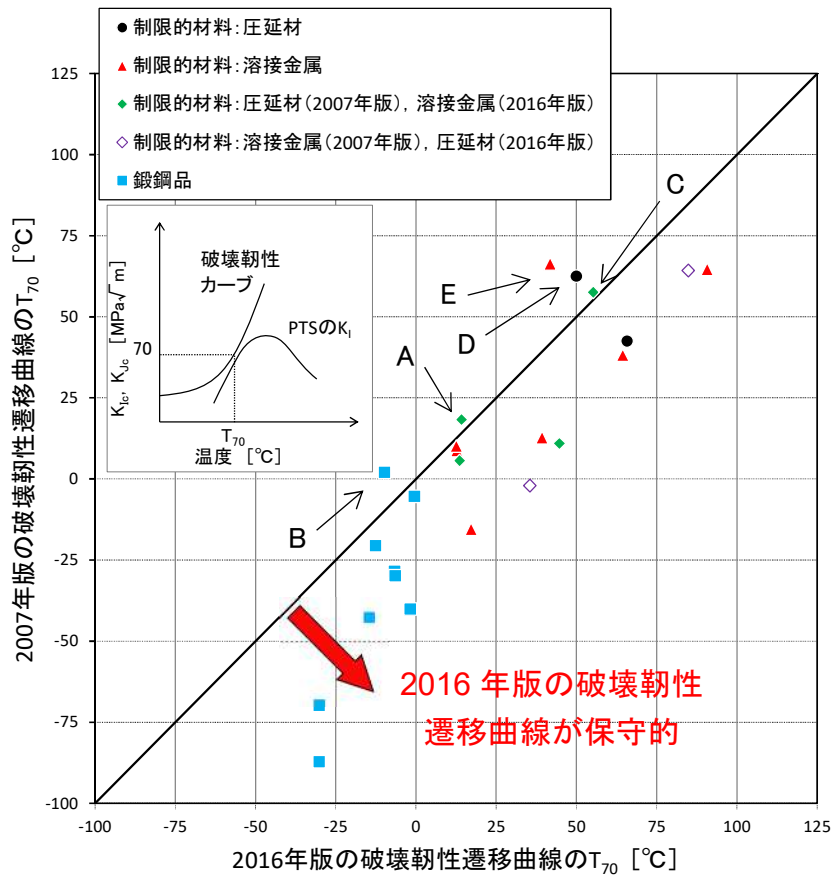
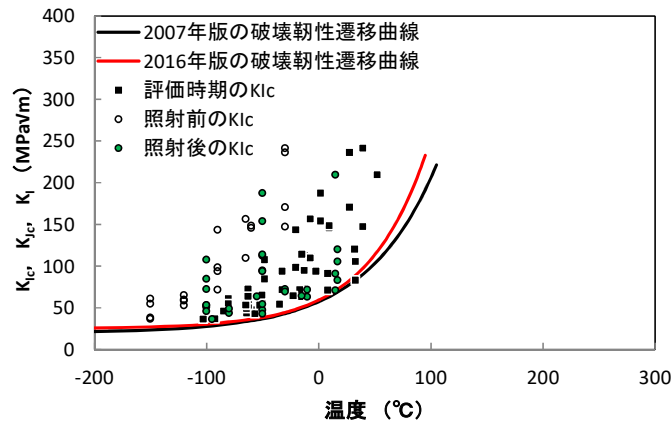
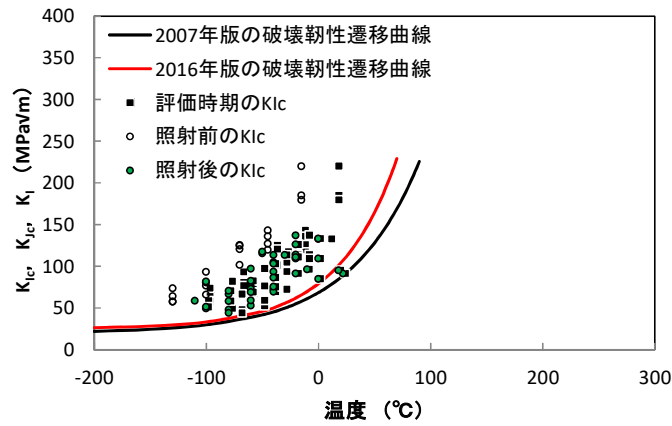


図 1-1 国内 PWR プラントの 32EFY 時点の破壊靱性遷移曲線の遷移温度  $T_{70}$  の比較

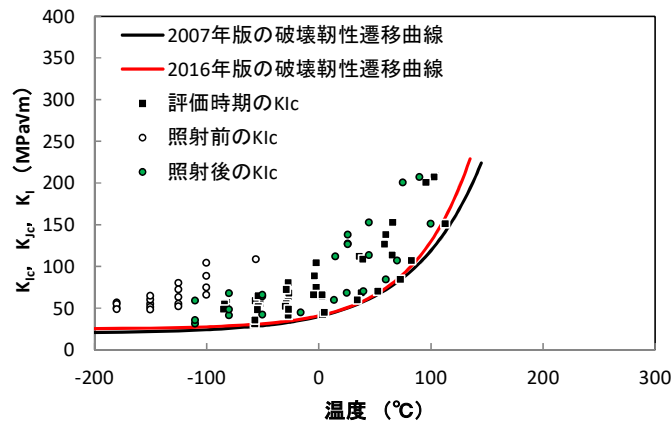
注) 2016 年版の破壊靱性遷移曲線の検討の際のデータベースを用いて電気協会で分析



(a) プラント A



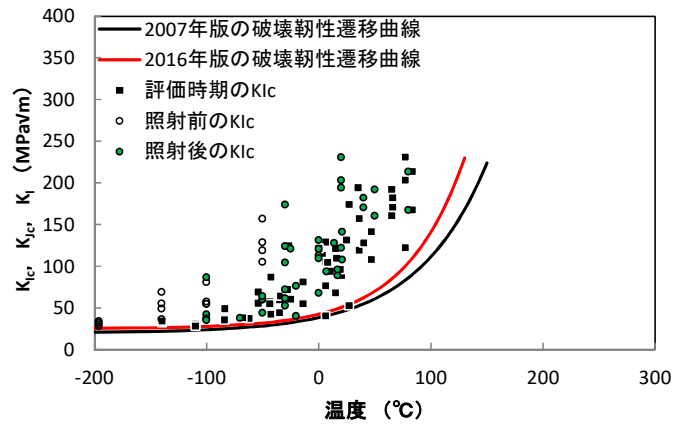
(b) プラント B



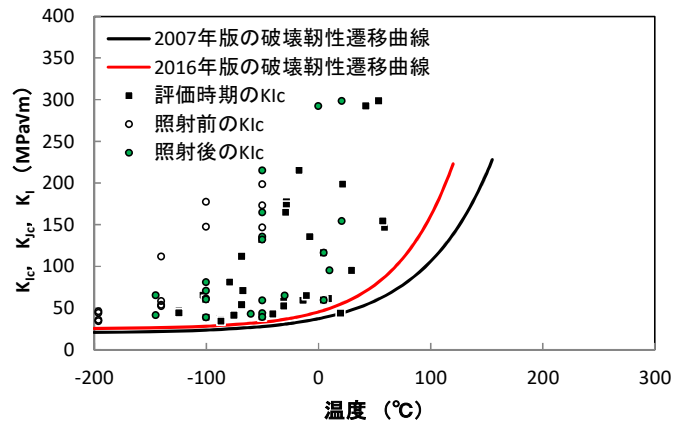
(c) プラント C

図 1-2(1/2) 2016 年版の式における  $T_{70}$  が 2007 年版に比べて非保守的となるプラントの 32EFPY 時点の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にて分析



(d) プラント D



(e) プラント E

図 1-2(2/2) 2016 年版の式における  $T_{70}$  が 2007 年版に比べて非保守的となるプラントの 32EFPY 時点の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

(2) マスターカーブ法を国内材の中性子照射材に適用することについて検討した内容を、国内材の破壊靱性データを用いて説明してください。説明には、検討に用いたデータの  $T_0$  の範囲、95%上限を上回る確率、国内破壊靱性データでも形状係数を4とした際の検討の内容及び国内材がマスターカーブに従わない可能性について検討した内容を含んでください。

回答(2)

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 2-1 に示す  $T_0$  が設定可能な鍛鋼品について、マスターカーブ法の適用性を評価した結果を図 2-1 に示します。図 2-1 より、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ます。

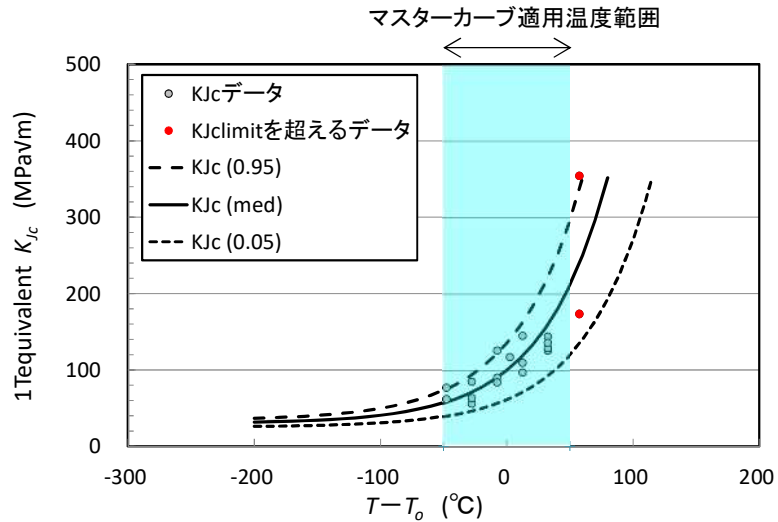
また、図 2-2 に、参考文献[1]に示される破壊靱性データのワイブルプロットの傾き(ワイブル分布の形状母数)と破壊靱性データ数の関係に、これらの鍛鋼品のプロットを追記して示します。図 2-2 より、破壊靱性データ数に応じてワイブルプロットの傾きはばらつきを有しますが、これらの鍛鋼品の破壊靱性データについても、概ね参考文献[1]のばらつきの範囲内(5～95%)に入っていることがわかります。

以上より、国内の照射材に対してマスターカーブ法を適用することに問題はないと考えられます。

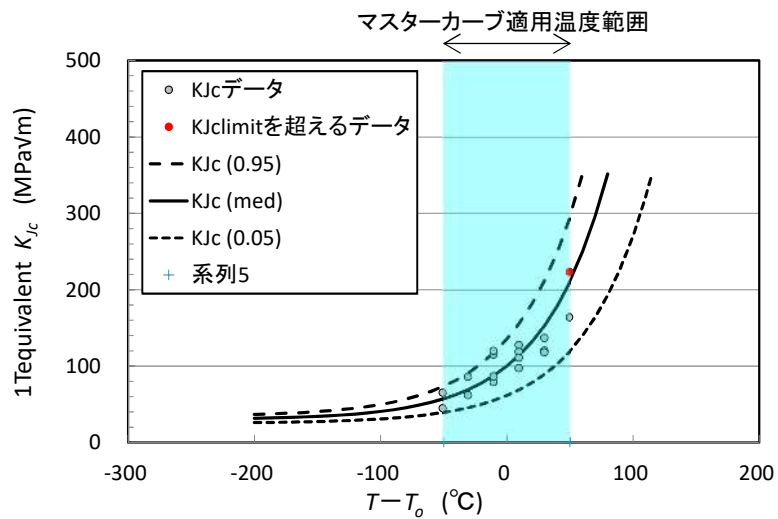
表 2-1 検討に使用した鍛鋼品の照射後破壊靱性データの詳細

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)

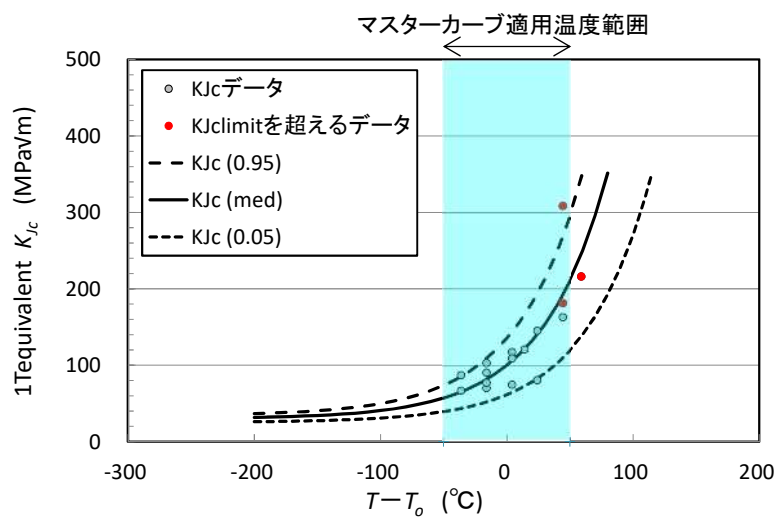
注) 2016 年版の破壊靱性遷移曲線の検討の際のデータベースを用いて電気協会で分析



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



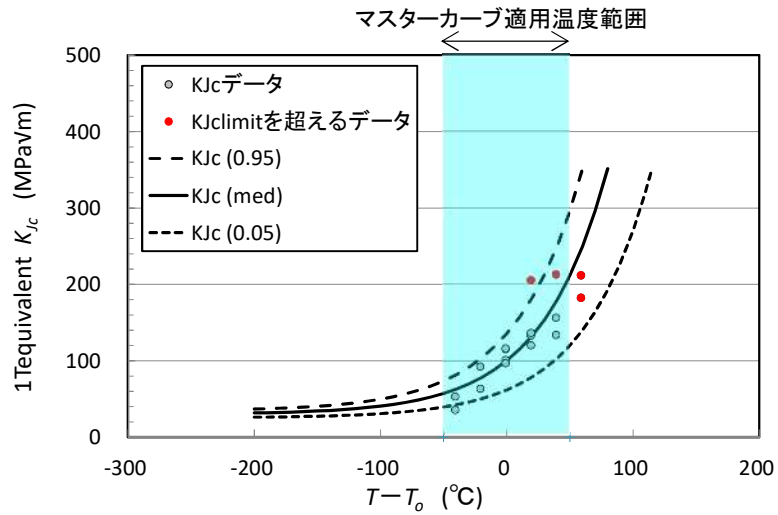
(b) 鍛鋼品 No.2 (照射量  $2.6 \times 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>,  $T_o = -49^\circ\text{C}$ )



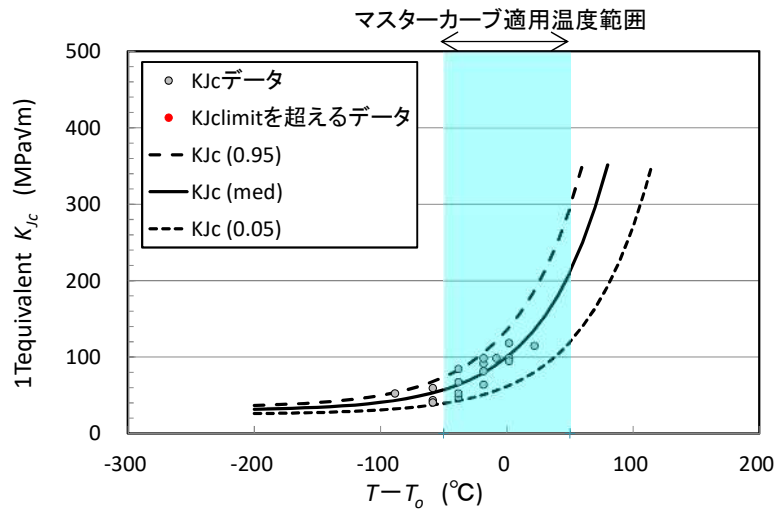
(c) 鍛鋼品 No.3 (照射量  $2.7 \times 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>,  $T_o = -64^\circ\text{C}$ )

図 2-1(1/4) 鍛鋼品の照射後破壊靱性データのマスターカーブ

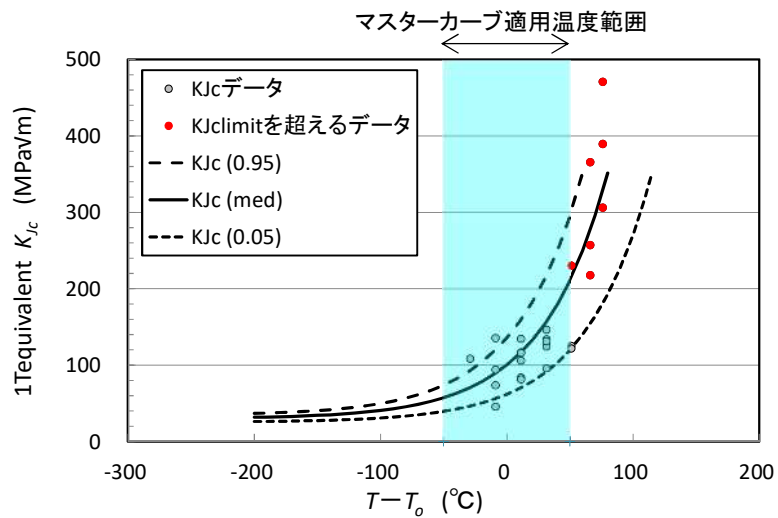
注) 2016年版の破壊靱性遷移曲線の検討の際のデータベースを用いて電気協会で分析



(d) 鍛鋼品 No.4 (照射量  $2.7 \times 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>, T<sub>0</sub>=-59°C)



(e) 鍛鋼品 No.5 (照射量  $3.1 \times 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>, T<sub>0</sub>=-22°C)

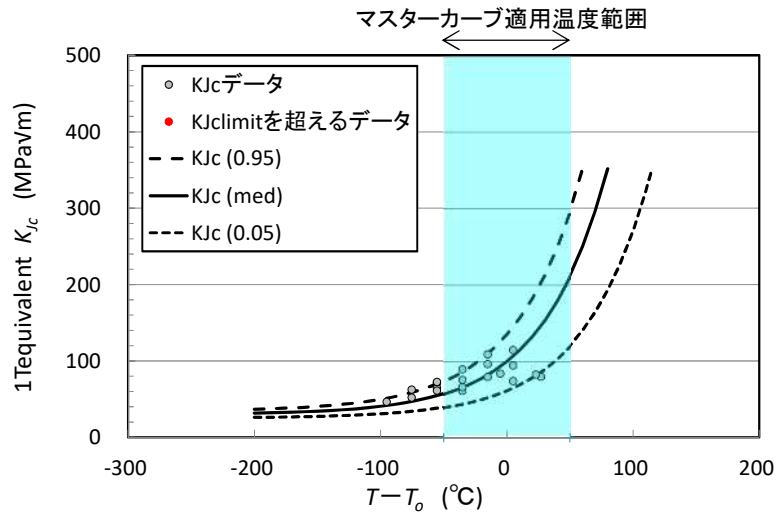


(f) 鍛鋼品 No.6 (照射量  $4.6 \times 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>, T<sub>0</sub>=-71°C)

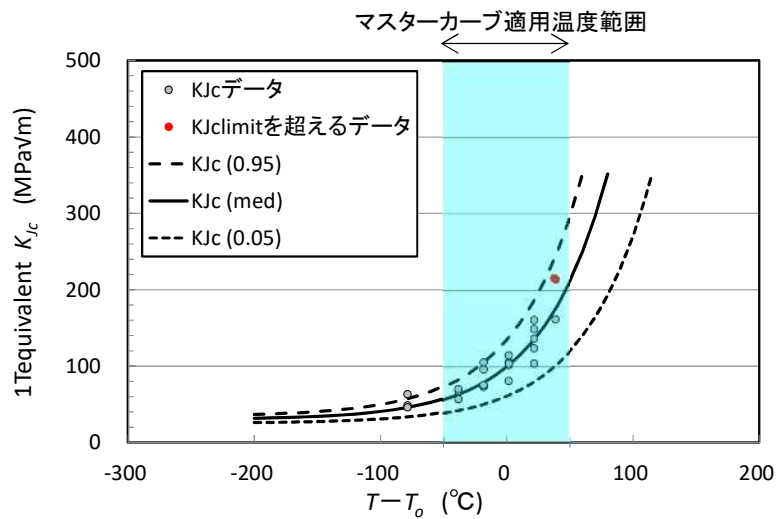
図 2-1(2/4) 鍛鋼品の照射後破壊靱性データのマスターカーブ

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

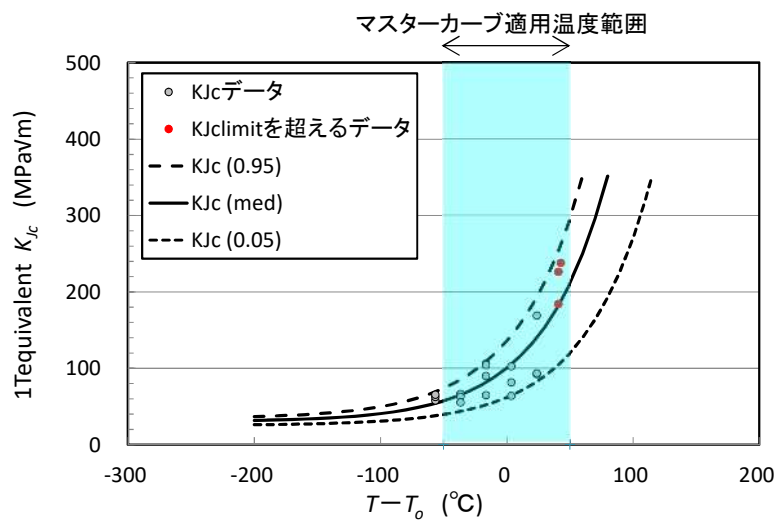




(g) 鍛鋼品 No.7 (照射量  $4.9 \times 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>, T<sub>0</sub> = -5°C)



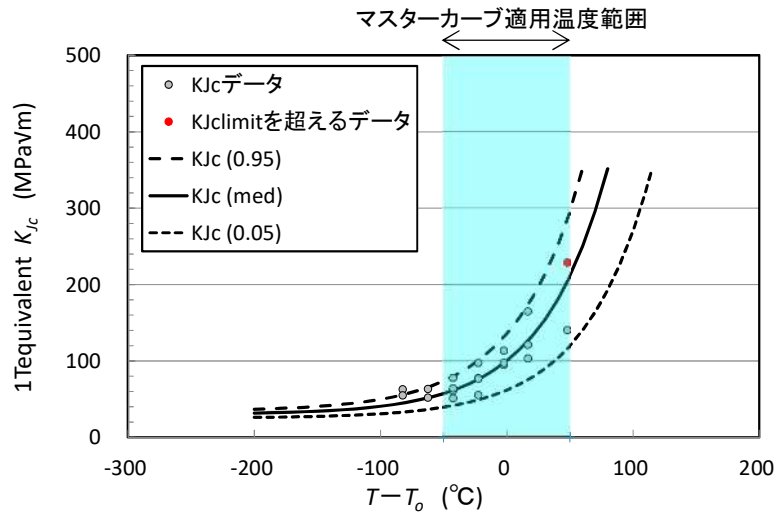
(h) 鍛鋼品 No.8 (照射量  $5.0 \times 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>, T<sub>0</sub> = -22°C)



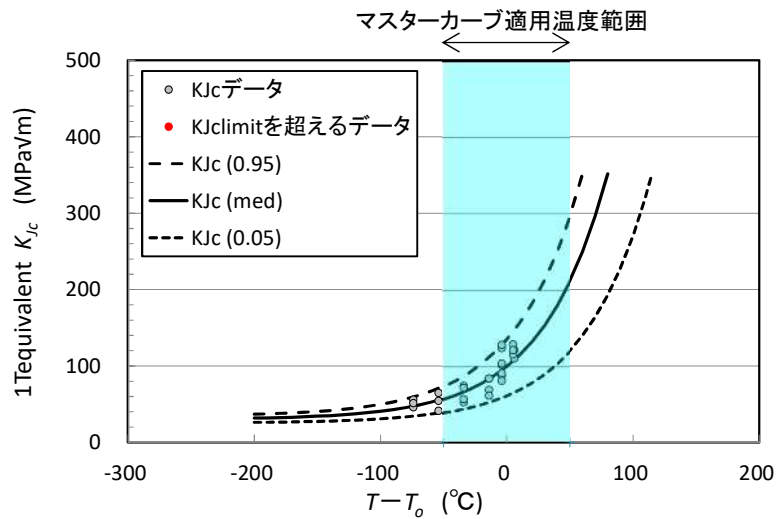
(i) 鍛鋼品 No.9 (照射量  $5.3 \times 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>, T<sub>0</sub> = -24°C)

図 2-1(3/4) 鍛鋼品の照射後破壊靱性データのマスターカーブ

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



(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 2-1(4/4) 鍛鋼品の照射後破壊靱性データのマスターカーブ

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

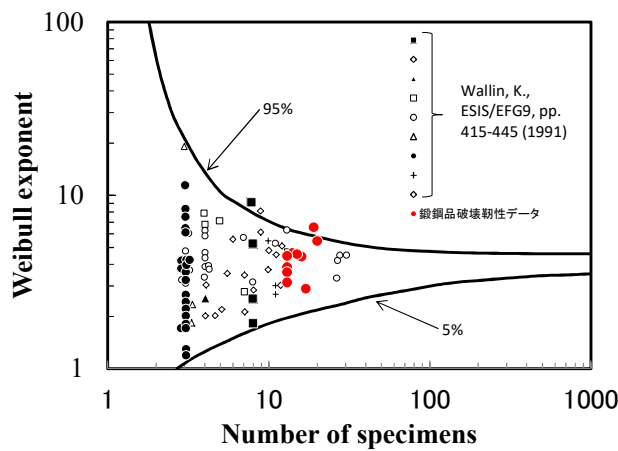


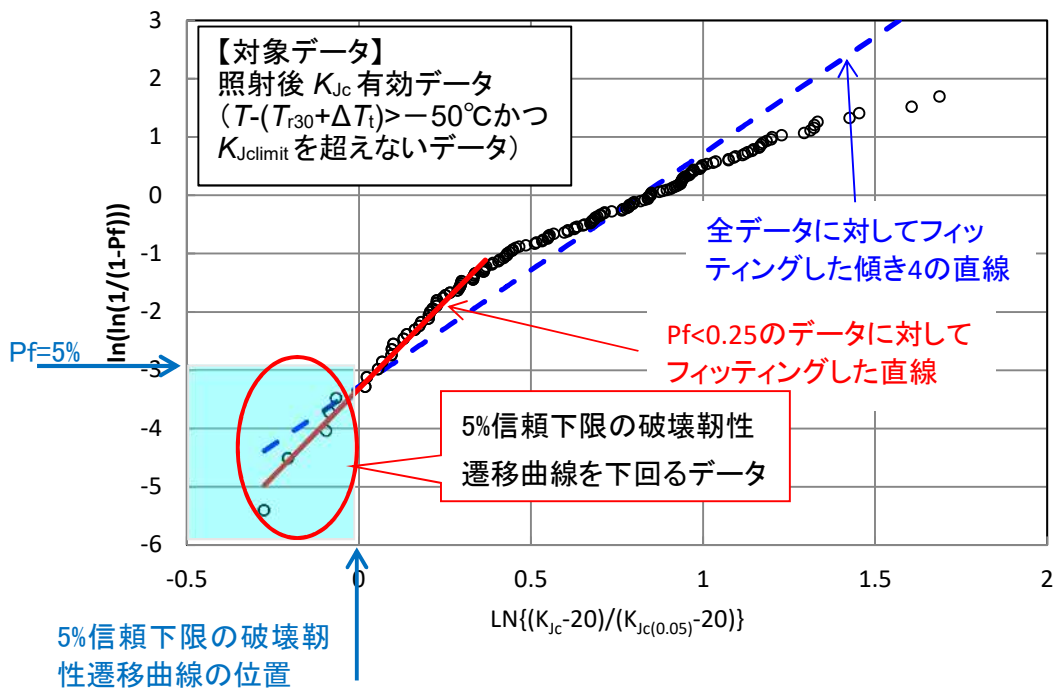
図 2-2 破壊靱性データのワイブル分布の形状母数

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

(3) 照射後の破壊靱性試験データの鋼種毎のワイブルプロット、Wallin の評価法による安全レベル(下回る確率)が母材(圧延材)において ASME  $K_{Jc}$  の安全レベル 2.5%よりも高い 4.1%となることを妥当とした根拠及び 2007 年版の式を用いて鋼種ごとに安全レベルを評価した結果を示してください。

回答(3)

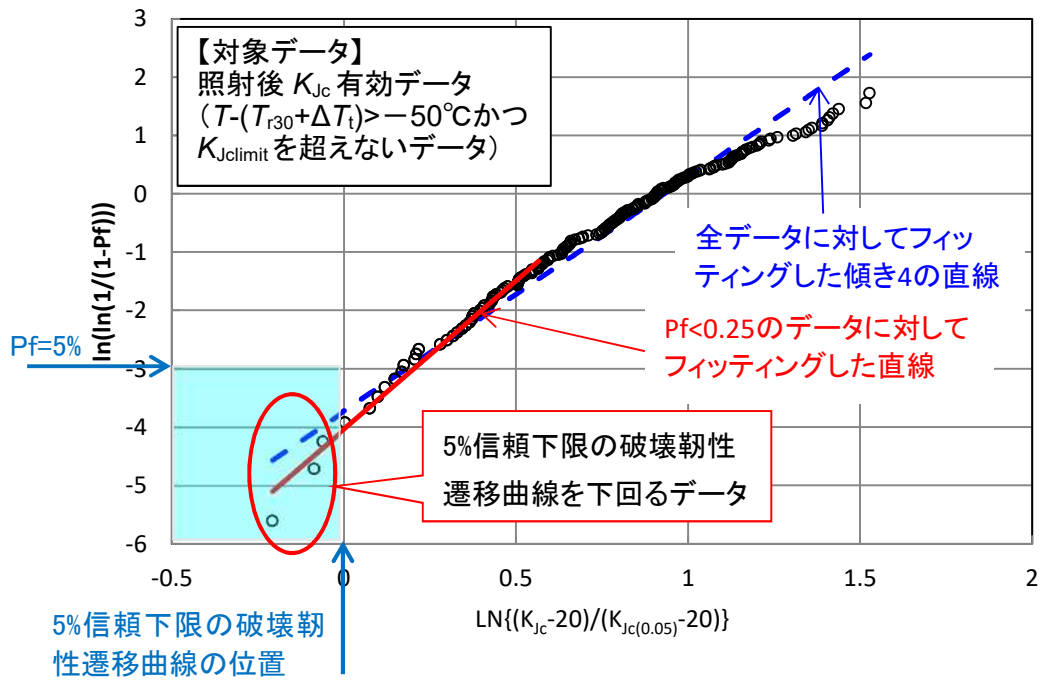
照射後の破壊靱性データ( $K_{Jc\text{limit}}$  を超えるデータ及び  $T-T_0$  が  $50^\circ\text{C}$ 未滿のデータを除く)の鋼種毎のワイブルプロットを図 3-1 に示します。図 3-1 より、全鋼種で整理した第 2 回検討チーム会合資料 2-2 の回答(3)と同様に、鋼種毎のワイブルプロットからも、現時点で 2016 年版の破壊靱性遷移曲線を下回っているデータは、特段適用性に疑義を呈するようなデータではないと評価されます。



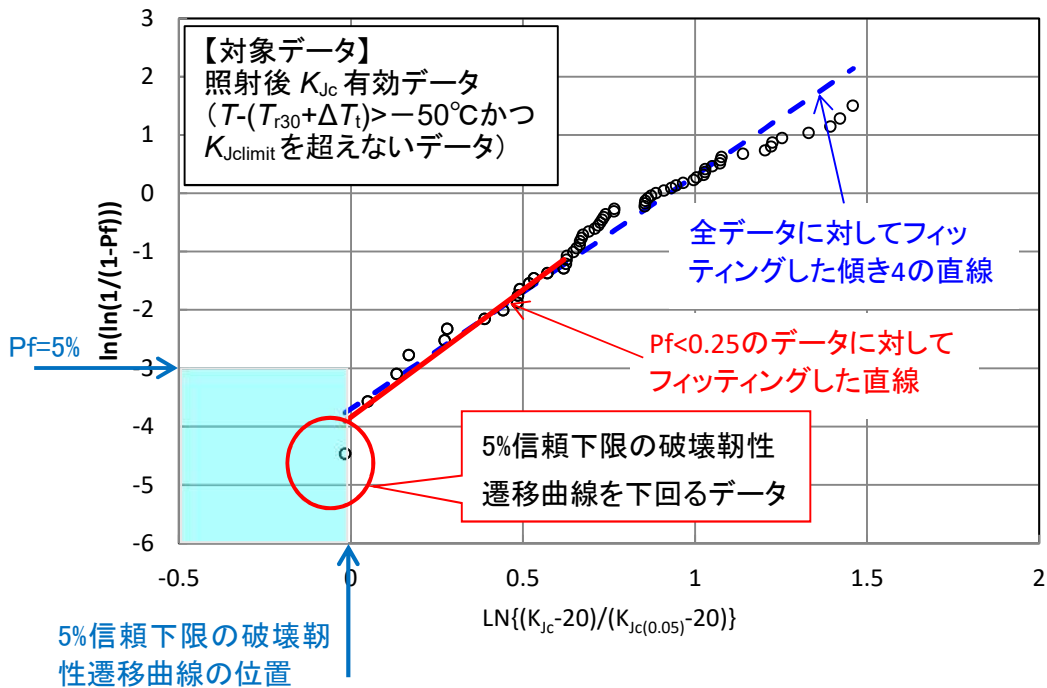
a) 圧延材

図 3-1(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にて分析



b) 鍛鋼品



c) 溶接金属

図 3-1(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

2007年版の破壊靱性遷移曲線について、第2回検討チーム会合資料2-1のP14と同様のWallinの評価法[2]により安全レベル(破損確率)を評価した結果を表3-1に示します。表3-1より、圧延材については、2007年版の破損確率の方が小さくなりますが、鍛鋼品及び溶接金属については、2007年版の方が大きくなり、特に鍛鋼品では5%を上回るようになります。

参考文献[2]では、ASME  $K_{Ic}$  カーブの安全レベル(破損確率)は2.5%と評価されているのに対して、2016年版の圧延材の破壊靱性遷移曲線は4.1%とそれより高めとなっていますが、設定した信頼下限5%より低いことから、問題ないと考えています。

表 3-1 破壊靱性遷移曲線の Wallin の評価法による破損確率

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) 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

注) 評価方法は以下のとおりです。

- 1) JEAC4206 に従い、32EFPPY 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  $\sigma_d$  は考慮しない))との温度差を求める。
- 3) 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。

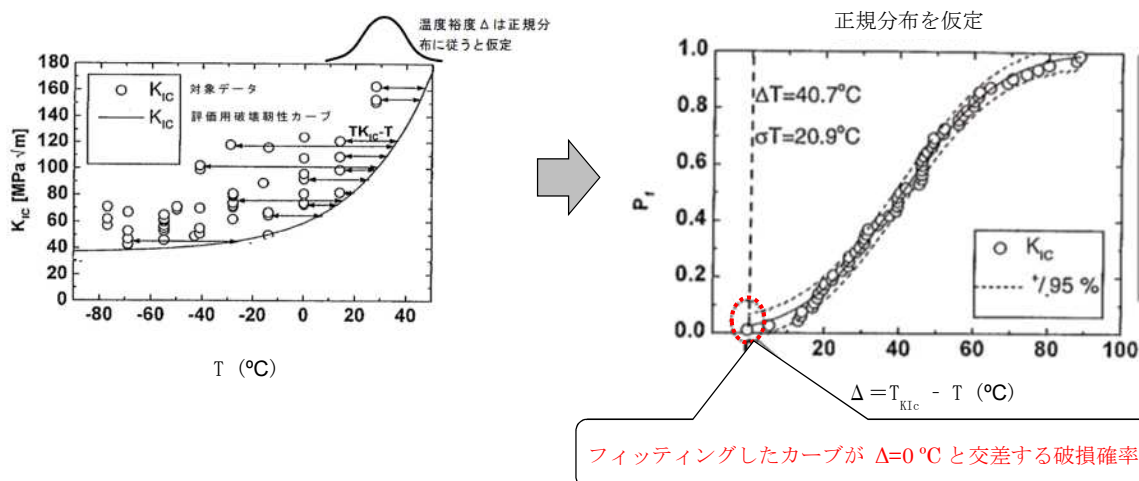


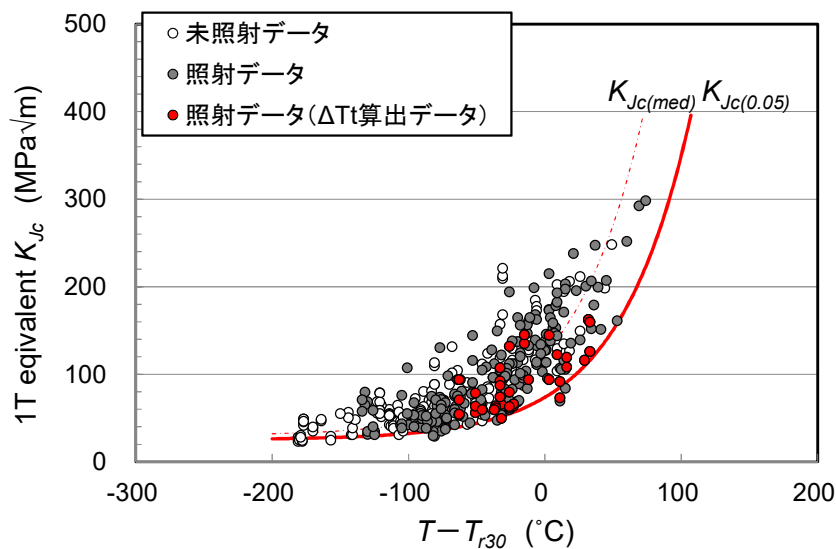
図 3-2 Wallin の評価方法による破壊靱性カーブの信頼性評価の概要

(4) 破壊靱性遷移曲線の  $\Delta T_i$  の決定に使用したデータ数が十分であることを、どのように確認したのか説明して下さい。説明には、銅含有量の多いものにも適用できるかについて検討した内容、 $\Delta T_i$  を鋼種毎に設定した際の検討内容 (JEAC4201 の脆化予測を鋼種別にすれば  $\Delta T_i$  を鋼種毎に決定する必要はないのか等) を含んで下さい。

回答(4)

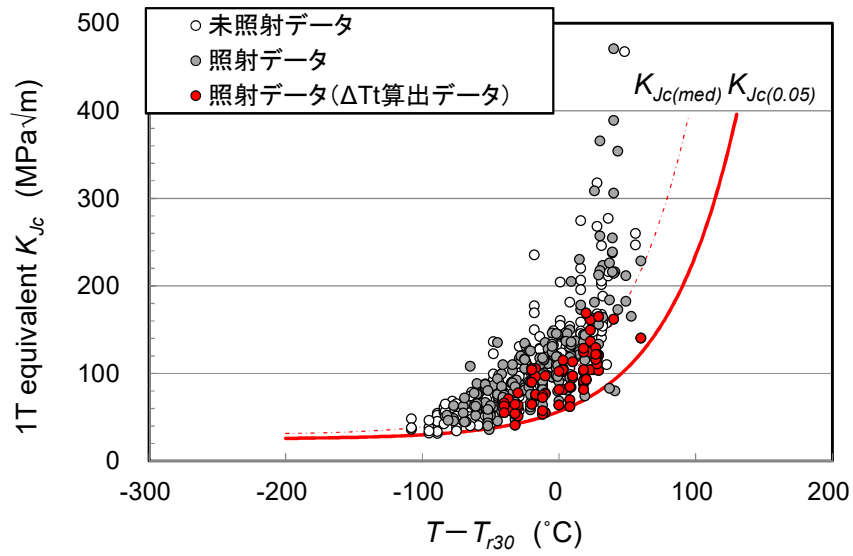
図 4-1 に分析対象とした未照射及び照射データとともに、 $\Delta T_i$  決定に用いた照射量が  $5 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$  以上のデータを明示して示します。 $\Delta T_i$  決定に用いたデータは、破壊靱性データの傾向分析等に基づき、保守的に決定できるよう選定したものであり、分析対象とした全破壊靱性データ中で低めに分布しています。したがって、 $\Delta T_i$  決定に用いたデータは必ずしも多くありませんが、保守的に  $\Delta T_i$  が設定されており、PTS 評価への適用性に問題はないと考えます。

また、第 2 回検討チーム会合において示した破壊靱性データの照射量に対する依存性 (第 2 回検討チーム会合資料 2-1 の P8) と同様に、図 4-2 に破壊靱性データの銅 (Cu) 濃度に対する依存性を示します。図 4-2 から、圧延材及び溶接金属については Cu 濃度に対する依存性は認められず、 $\Delta T_i$  決定に用いたデータが Cu 濃度の観点で非保守的に設定されていることはないと考えます。一方、鍛鋼品については、Cu 濃度が高いほど破壊靱性遷移曲線に対して低い破壊靱性を示す傾向が認められますが、 $\Delta T_i$  決定に用いたデータ中に国内 PWR プラントの鍛鋼品の Cu 濃度の上限である 0.05% のデータが含まれていることから、PTS 評価への適用性に問題はないと考えられます。

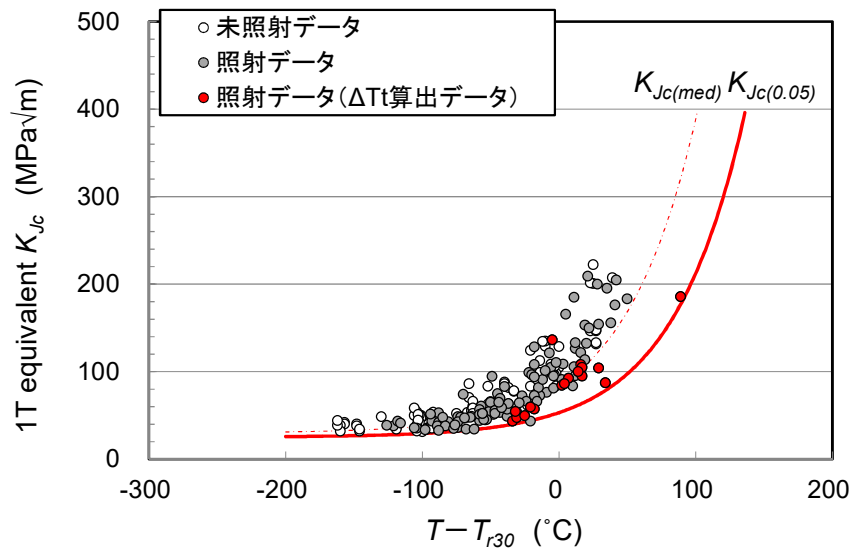


(a) 圧延材

図 4-1(1/2) 分析対象とした破壊靱性データ及び  $\Delta T_i$  決定に使用した破壊靱性データ  
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



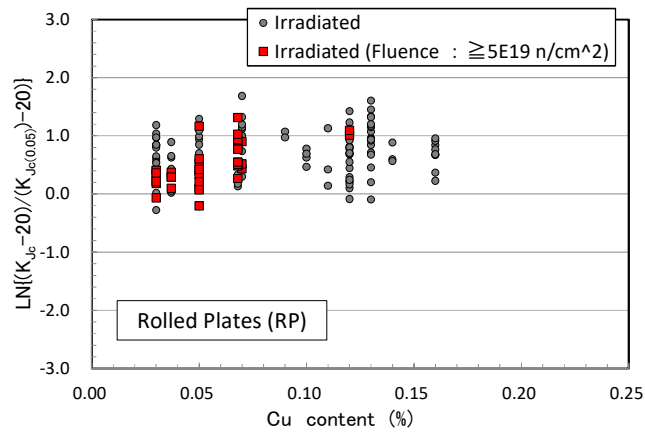
(b) 鍛鋼品



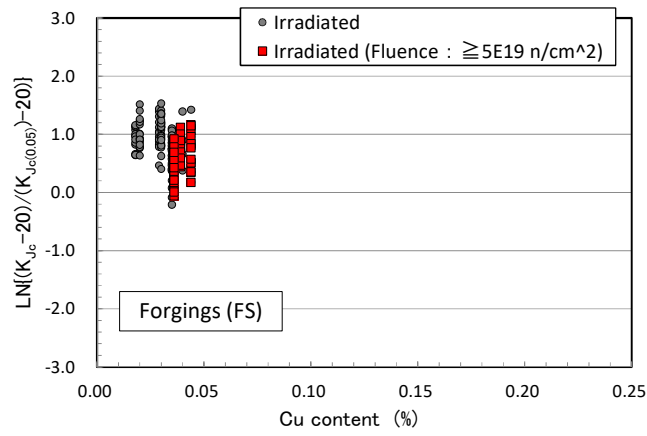
(c) 溶接金属

図 4-1(2/2) 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

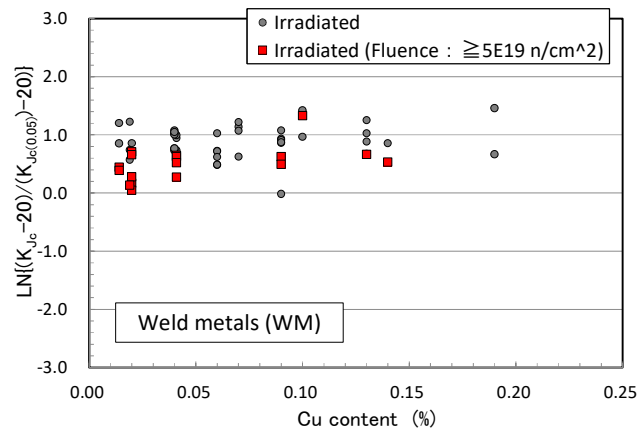
注) 2016 年版の破壊靱性遷移曲線の検討の際のデータベースを用いて電気協会にて分析



(a) 圧延材



(b) 鍛鋼品



(c) 溶接金属

図 4-2 破壊靱性データの銅(Cu)濃度に対する依存性[3]



(5)  $\Delta T_i$  を中性子照射量が  $3.3 \times 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup> よりも高いデータで算出した結果を示してください。

回答(5)

$\Delta T_i$  決定に使用する破壊靱性データの照射量の下限を変化させた場合の  $\Delta T_i$  算出結果を表 5-1 に示します。表 5-1 より、照射量の下限を小さくすることで、対象データ数が増え、Cu 濃度等の範囲も拡大しますが、算出される  $\Delta T_i$  は低くなり、 $5 \times 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup> を下限とする場合よりも非保守側の破壊靱性遷移曲線となります。一方、照射量の下限を  $5 \times 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup> よりも高くすると、圧延材については  $\Delta T_i$  値に飽和の傾向が認められますが、鍛鋼品及び溶接金属では  $\Delta T_i$  値は上昇します。しかしながら、鍛鋼品及び溶接金属では、 $5 \times 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup> を下限としても破壊靱性遷移曲線を下回る確率や Wallin の評価法による破損確率は十分小さく、 $5 \times 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup> を下限とすることで問題ないと判断しています。

JEAG4206-2016 で採用された破壊靱性遷移曲線では、破壊靱性データが破壊靱性遷移曲線を下回る確率や Wallin の評価法による破損確率に加え、評価対象となる原子炉圧力容器の 60 年時点の照射量の範囲なども総合的に勘案して照射量の下限を  $5 \times 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup> に設定しています。

表 5-1  $\Delta T_t$  決定対象データの照射量下限を変化させた場合の  $\Delta T_t$  算出結果

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

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

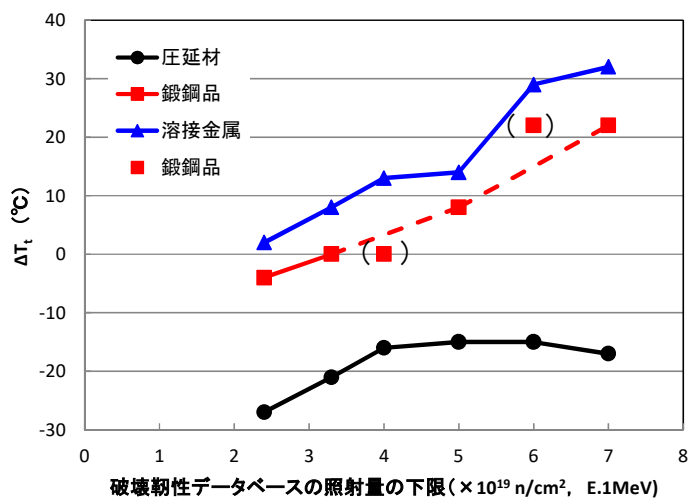


図 5-1 破壊靱性データベースの照射量下限と算出される  $\Delta T_t$  の関係

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

(6) マスターカーブの適用範囲に基づいて、遷移領域外の低温側( $T-T_0 < -50^{\circ}\text{C}$ )のデータ及び  $K_{Jc(limit)}$  を超えるデータを除外することに加えて遷移領域外の高温側( $50^{\circ}\text{C} < T-T_0$ )のデータを除外して  $\Delta T_i$  を求めた結果を示してください。

回答(6)

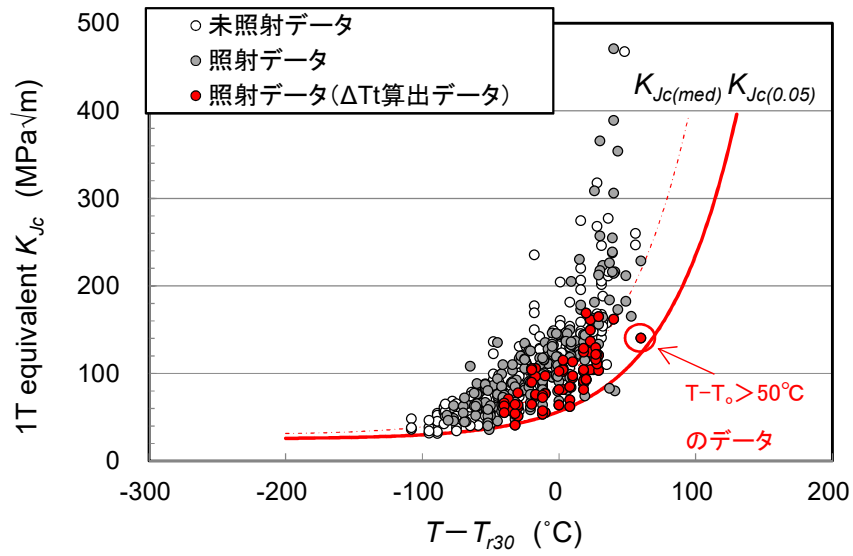
$\Delta T_i$  決定に用いた破壊靱性データのうち、圧延材については、マスターカーブの適用温度範囲の高温側( $T-T_0 > 50^{\circ}\text{C}$ )にはデータはありません。一方、鍛鋼品及び溶接金属については、高温側にデータがそれぞれ1点ずつあります(図6-1参照)。

鍛鋼品及び溶接金属について  $T-T_0 > 50^{\circ}\text{C}$  の破壊靱性データを除外した場合の  $\Delta T_i$  の算出結果を表6-1に示します。 $T-T_0 > 50^{\circ}\text{C}$  の破壊靱性データは1点しかないため、これを除外しても溶接金属の  $\Delta T_i$  が  $1^{\circ}\text{C}$  下がるのみで、 $\Delta T_i$  はほとんど変化しません。

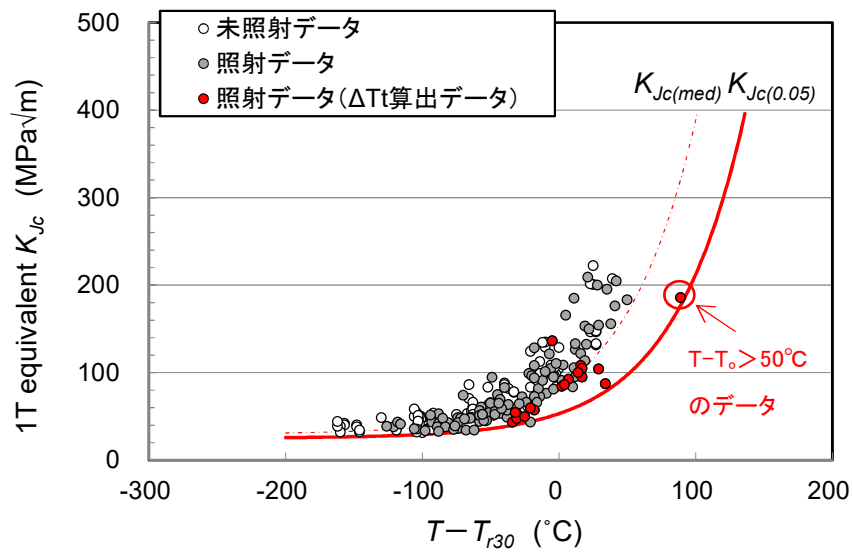
表6-1 マスターカーブの適用温度範囲の高温側( $T-T_0 > 50^{\circ}\text{C}$ )データの  $\Delta T_i$  に対する影響

鋼種	$T-T_0 > 50^{\circ}\text{C}$ のデータを含めた場合		$T-T_0 > 50^{\circ}\text{C}$ のデータを除外した場合	
	データ数	$\Delta T_i (^{\circ}\text{C})$	データ数	$\Delta T_i (^{\circ}\text{C})$
鍛鋼品	70	8	69	8
溶接金属	17	14	16	13

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分析



(a) 鍛鋼品



(b) 溶接金属

図 6-1  $T - T_0 > 50^\circ\text{C}$ にある破壊靱性データ

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

【文献】

- [1] Wallin, K., "Statistical Modeling of Fracture in the Ductile-to-Brittle Transition Region," Defect Assessment in Components – Fundamentals and Applications, ESIS/EFG9, Blauel, J. G., and Schwalbe K.-H, Eds, pp. 415–445, (1991).
- [2] Wallin, K., "Statistical re-evaluation of ASME  $K_{Ic}$  and  $K_{IR}$  fracture toughness reference curves", Nuclear Engineering and Design, 193, pp. 317–326, (1999).
- [3] Yoshimoto, K, et. al., "Applicability of Fracture Toughness Curves Developed for Japanese Pressure Vessel Steels to Structural Integrity Evaluation," ASME PVP2015–45275, (2015).