

# 卒業論文

## 小型試験片における マスターカーブ破壊靱性評価法の 適用性に関する研究

p.1~p.51 完

平成19年2月2日提出  
指導教員 酒井信介教授  
機械工学科 50239 藤本淳史

# 目次

第1章 序論 .....	5
1.1 研究背景 .....	6
1.2 研究目的 .....	7
1.3 本論文の構成 .....	7
第2章 基礎的理論 .....	8
2.1 マスターカーブ法 .....	9
第3章 試験方法 .....	13
3.1 供試材 .....	14
3.2 試験片 .....	15
3.3 試験条件 .....	16
3.4 試験手順 .....	16
第4章 結果 .....	19
4.1 破壊靱性 .....	20
4.2 参照温度 .....	23
4.3 ワイブル分布の確認 .....	25
4.4 マスターカーブ .....	27
第5章 考察 .....	29
5.1 参照温度 .....	30
5.2 現行規格との比較 .....	33
第6章 結論 .....	35
6.1 本論文の結論 .....	36
付章 不適合データに関する考察とその取扱い .....	37
7.1 破断面の観察 .....	38
7.2 異常試験片を含めた評価 .....	42
7.3 考察 .....	45

# 表目次

Table 3-1	Chemical Compositions of Tested Materials .....	14
Table 3-2	Tensile Properties of Tested Materials .....	14
Table 3-3	Nil-Ductility Transition Temperature and Reference Temperature of Tested Materials.....	14
Table 3-4	Test Matrix.....	16
Table 4-1	Results of Equivalent Fracture Toughness .....	21
Table 4-2	Reference Temperature, $T_0$ , from the data set of $K_{Jc(1T_{eq})}$ .....	23
Table 4-3	Number of Valid $K_{Jc}$ Test Results Required to Evaluate $T_0$ .....	24
Table 4-4	Weight Factors for Multi-Temperature Analysis .....	24
Table 5-1	Value of $mT_0$ .....	30
Table 7-1	Results of Equivalent Fracture Toughness .....	43

# 目次

Figure 2-1	Schematic of Master Curve .....	9
Figure 3-1	Configurations of Test Specimens .....	15
Figure 3-2	Experimental Setup .....	17
Figure 3-3	0.4T C(T) Specimen and Clip gage .....	18
Figure 3-4	0.4T SE(B) Specimen and Clip gage .....	18
Figure 4-1	Weibull Plots of Test Data (Lines in Figures represent trend lines with gradient of 4) .....	26
Figure 4-2	Comparison of Master Curve and Test Data .....	28
Figure 5-1	Evaluation Results of Reference Temperature, $T_0$ .....	30
Figure 5-2	Comparison of Reference Temperature .....	31
Figure 5-3	Comparison of $T_0$ Values from different Specimen Types .....	32
Figure 5-4	Comparison of Lower Bound of Master Curve with Present K <sub>IC</sub> Curves .....	34
Figure 7-1	Collection Positions of Specimens .....	38
Figure 7-2	Fractograph of PS-0514 .....	39
Figure 7-3	Fractograph of PS-0532 .....	39
Figure 7-4	×500 Fractograph of PS-0532 by SEM .....	40
Figure 7-5	×20 Fractograph of PS-0532 by SEM .....	41
Figure 7-6	Weibull Plots of Test Data (Lines represent trend lines with gradient of 4) .....	42
Figure 7-7	Comparison of Lower Bound of Master Curve with Present $K_{Ic}$ Curves .....	44

# 第1章 序論

本章では、研究背景を概説し、本研究の目的を述べる。

## 1.1 研究背景

原子炉压力容器に用いられる低合金鋼は体心立方晶の金属である。この結晶系の金属は、通常の使用温度で十分粘りを有していても、低温になると脆くなり脆性破壊が生ずる(延性脆性遷移)。压力容器鋼が中性子照射を受けた場合には、延性から脆性へ遷移する温度が高温側に移行すること(照射脆化)が知られている。脆性温度域での脆性破壊に対する強さは、き裂の進展に対する抵抗を示す破壊靱性で表される。実際の原子炉压力容器の健全性を確保する上では、脆性破壊を防止することに厳重な注意が払われており、延性脆性遷移挙動を把握しつつ使用に当たることになる。具体的には、压力容器内に監視試験片を装荷しておき、定期的に取り出して破壊靱性試験を行い、これに基づいて压力容器材の健全性を確認しながらプラントの運転を行っている。しかし、容器内に設置された監視試験片の量には限りがあり、効率良く破壊靱性を評価することが求められている。

また、従来の原子炉压力容器鋼の破壊靱性の評価では、温度に対する静的破壊靱性値  $K_{Ic}$  あるいはき裂伝播停止破壊靱性値  $K_{Ia}$  の下限値を包絡して評価曲線を決めるといった方法が採られている[1-3]。しかしながら、多分に経験的なこの手法は、これまでにこの曲線を下回るデータが得られていないという帰納的な証拠にその妥当性が支えられていること、鋼材によっては過度に安全側の評価になることから、これに替わるより合理的な破壊靱性評価法が求められている。

近年、破壊靱性が本来有する統計分布特性を考慮してその信頼限界を理論的に定める、「マスターカーブ法」が提案された[4,5]。同法は、同一条件下におけるフェライト鋼の破壊靱性のばらつきを最弱リンクモデルに基づくワイブル分布により記述し、かつ分布の平均値の温度依存性を、鋼材によって決まる参照温度を唯一のパラメータとする一本の曲線によって記述する手法であり、破壊靱性の下限値の合理的な設定を可能とするものである。また、破壊靱性の評価に必要な試験片数の低減も期待される。マスターカーブを決定するための試験法は 1990 年代の終わりに米国材料試験協会(American Society for Testing and Materials: ASTM)の規格として制定され[6]、その後も改良が続けられている[7-9]。また、米国機械学会(American Society of Mechanical Engineers: ASME)の Boiler and Pressure Vessel Code においてマスターカーブ法の考え方を部分的に採用したコードケースが定められ[10,11]、さらに、国際原子力機関(International Atomic Energy Agency: IAEA)においてもマスターカーブ法を用いた構造健全性評価のためのガイドライン作成が進められている[12]。

このような状況の中、我が国においてもマスターカーブ法に基づく破壊靱性評価法

の規格への取り組みが検討され始めたのと同時に、国産原子炉压力容器鋼に対するマスターカーブ法の適用の是非が議論されつつある[13-16]。これまでに、国産原子炉压力容器鋼である SFVQ1A 鋼および SQV2A 鋼のコンパクト試験片(Compact Tension specimen, C(T) specimen)を対象に、試験片寸法、試験温度、負荷速度をパラメータとした体系的な破壊靱性試験が行われ、1 インチ厚み以上の同材、同試験片に対しマスターカーブ法が適用可能であることが明らかにされている[15-16]。マスターカーブ法がシャルピー試験片と同じ 0.4 インチ厚みの試験片についても適用可能であることが示されれば、同法によって従来の破壊靱性評価法に比べ非常に効率的な評価を行うことができる。

## 1.2 研究目的

前節で述べた背景を踏まえ、以下の 2 点を本研究の目的とする。

- ・ 代表的な国産原子炉压力容器鋼材である SQV2A 鋼の 0.4 インチ厚みの 2 種類の形状の小型試験片を対象とした破壊靱性試験を行い、試験温度、評価方法、試験片寸法、試験片形状が及ぼす影響を明らかにする。
- ・ また、その結果から本研究の対象とする範囲においてマスターカーブ法の適用可能性を検討する。

## 1.3 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。

第1章 序論 では、研究背景を概説し、本研究の目的を述べる。

第2章 基礎的理論 では、マスターカーブ法の概要を述べる。

第3章 試験方法 では、本研究で採用した試験片、試験条件、試験手順について述べる。

第4章 結果 では、試験結果をもとにした破壊靱性、参照温度、マスターカーブの評価結果を述べる。また、結果からさかのぼってマスターカーブ法の前提条件の妥当性について検証する。

第5章 考察 では、マスターカーブの唯一の指標である参照温度に対し、試験温度、評価方法、試験片寸法、試験片形状がいかに影響したかについて考察する。

第6章 結言 では、本研究により得られた結論を示す。

付章 では、本研究において除外した不適合データについて、除外した根拠を示し、これらのデータを除外しなかった場合について評価を行った。

## 第 2 章 基礎的理論

本章では、マスターカーブ法の概要を述べる。



## 2.1 マスターカーブ法

マスターカーブの模式図を図 2-1 に示す。マスターカーブは破壊靱性と温度の関係を規定する曲線であり、その形状は鋼材によらず一定である。すなわち、鋼材の違いによる破壊靱性の大小は、マスターカーブがその形状を保持したままで温度軸に沿って左右にシフトすることで表現される。破壊靱性の分布の中間値が  $100 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  となるような温度を参照温度  $T_0$  と称し、マスターカーブの位置を特定する指標として用いられる。したがって、マスターカーブを決定するということは、 $T_0$  を求めることに他ならない。ASTM 規格[9]によるマスターカーブ法の評価手順は以下の通りである。なお、同規格には評価の各過程においてデータの有効性(validity)を判定する条件、ならびに有効でないとされたデータ(censored data)の取り扱いについても規定がなされている。

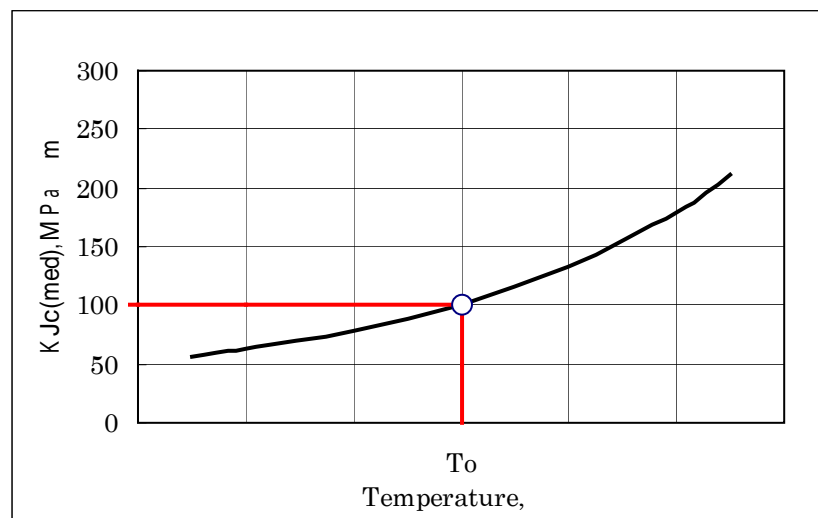


Figure 2-1 Schematic of Master Curve

マスターカーブ法では、複数の破壊靱性試験から脆性破壊開始時の  $J$  積分  $J_c$  を求めることから始まる。 $J_c$  はその弾性成分  $J_e$  と塑性成分  $J_p$  との和として与えられる。

$$J_c = J_e + J_p \quad (2-1)$$

$J_e$  は脆性破壊開始時の応力拡大係数  $K_c$  を介して、

$$J_e = \frac{(1 - \nu^2) K_c^2}{E} \quad (2-2)$$

ここで、 $E$  はヤング率、 $\nu$  はポアソン比である。サイドグループのない C(T) 試験片に対する  $K_c$  は、

$$K_c = \frac{P}{(BW)^{\frac{1}{2}}} f\left(\frac{a_0}{W}\right)$$

$$f\left(\frac{a_0}{W}\right) = \frac{2 + \frac{a_0}{W}}{\left(1 - \frac{a_0}{W}\right)^{\frac{3}{2}}} \left[ 0.886 + 4.64\left(\frac{a_0}{W}\right) - 13.32\left(\frac{a_0}{W}\right)^2 + 14.72\left(\frac{a_0}{W}\right)^3 - 5.6\left(\frac{a_0}{W}\right)^4 \right] \quad (2-3)$$

ここで、 $P$  は脆性破壊開始時の荷重、 $B$  は試験片厚さ、 $W$  は試験片幅、 $a_0$  は初期き裂長さである。一方、 $J_p$  は次式により計算される。

$$J_p = \frac{A_p}{Bb_0}, \quad = 2 + 0.522 \frac{b_0}{W}, \quad A_p = A - \frac{1}{2} C_0 P^2 \quad (2-4)$$

ここで、 $b_0$  は初期リガメント長さ ( $= W - a_0$ )、 $A$  は荷重-開口端変位曲線下の面積、 $C_0$  は初期弾性勾配の逆数である。

次に、サイドグループのない SE(B) 試験片に対する  $K_c \cdot J_p$  は、

$$K_c = \frac{PS}{B^{\frac{1}{2}} W^{\frac{3}{2}}} f\left(\frac{a_0}{W}\right)$$

$$f\left(\frac{a_0}{W}\right) = \frac{3\left(\frac{a_0}{W}\right)^{\frac{1}{2}} \left[ 1.99 - \left(\frac{a_0}{W}\right) \left(1 - \frac{a_0}{W}\right) \left[ 2.15 - 3.93\left(\frac{a_0}{W}\right) + 2.7\left(\frac{a_0}{W}\right)^2 \right] \right]}{2 \left[ 1 + 2\left(\frac{a_0}{W}\right) \right] \left(1 - \frac{a_0}{W}\right)^{\frac{3}{2}}} \quad (2-5)$$

$$J_p = \frac{A_p}{Bb_0}, \quad = 1.9, \quad A_p = A - \frac{1}{2} C_0 P^2 \quad (2-6)$$

ここで  $S$  は支持点間距離である。

このように得られた  $J_c$  を介して、弾塑性応力拡大係数(破壊靱性)  $K_{Jc}$  が次の通り計算される。

$$K_{Jc} = \sqrt{J_c \frac{E}{1 - \nu^2}} \quad (2-7)$$

式(2-1)、(2-2)、および(2-7)から明らかなように、脆性破壊開始に至る荷重-開口端変位関係が線形で  $J_p = 0$  の場合は  $K_{Jc} = K_c$  となり、非線形が強まるにつれて、 $K_{Jc}$  の  $K_c$  からの偏差は大きくなる。

ここで、破壊時にき裂前縁が強く拘束された状態が維持されるよう、破壊靱性  $K_{Jc}$  の上限  $K_{Jc(\text{limit})}$  が次のように定められる。

$$K_{Jc(\text{limit})} = \sqrt{\frac{Eb_0 \nu}{30(1 - \nu^2)}} \quad (2-8)$$

ここで、 $\sigma_y$  は材料の降伏強さである。 $K_{Jc}$  が  $K_{Jc(\text{limit})}$  の値を上回る場合には、その破壊靱性データ  $K_{Jc}$  は有効でないものとし、マスターカーブの計算に  $K_{Jc}$  の代わりとして  $K_{Jc(\text{limit})}$  を用いる。

脆性破壊発生時の破壊靱性が3母数のワイブル分布に従うとの仮定[17]の下、 $K_{Jc}$  は厚さ  $B_{1T} (= 25.4\text{mm})$  の標準試験片に対する等価破壊靱性  $K_{Jc(1Teq)}$  に変換することができる。

$$K_{Jc(1Teq)} = K_{\min} + [K_{Jc} - K_{\min}] \left( \frac{B}{B_{1T}} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2-9)$$

ここで、 $K_{\min}$  は破壊靱性がとりうる値の下限であって、試験結果をもとに  $K_{\min} = 20\text{MPa}\sqrt{m}$  と定められている[17]。

$K_{Jc(1Teq)}$  データをもとに  $T_0$  を評価する方法には、単一温度法と複数温度法の二種類がある。

単一温度法においては、同一温度条件下における試験結果  $K_{Jc(1Teq)}$  をもとに、はじめにスケールパラメータ(脆性破壊の63%累積破損確率に相当する値)  $K_0$  を求める。

$$K_0 = \left[ \sum_{i=1}^N \frac{(K_{Jc(1Teq)(i)} - K_{\min})^4}{N} \right]^{\frac{1}{4}} + K_{\min} \quad (2-10)$$

ここで、 $N$  は試験片の個数である。次に、 $K_0$  より  $K_{Jc(1Teq)}$  の中間値(脆性破壊の50%累積破損確率に相当する値)  $K_{Jc(\text{med})}$  を次式により求める。

$$K_{Jc(\text{med})} = K_{\min} + (K_0 - K_{\min}) [\ln(2)]^{\frac{1}{4}} \quad (2-11)$$

$T_0$  は上式で与えられる  $K_{Jc(\text{med})}$  より、

$$T_0 = T - \left( \frac{1}{0.019} \right) \ln \left[ \frac{K_{Jc(\text{med})} - 30}{70} \right] \quad (2-12)$$

によって計算される。ここで、 $T$  は試験温度である。

一方、複数温度法では、異なる温度条件下における試験結果  $K_{Jc(1Teq)}$  をもとに、次式を満たす  $T_0$  を決定する。

$$\sum_{i=1}^N i \frac{\exp[0.019(T_i - T_0)]}{11 + 77 \exp[0.019(T_i - T_0)]} - \sum_{i=1}^N \frac{(K_{Jc(\text{med})(i)} - 20)^4 \exp[0.019(T_i - T_0)]}{\{11 + 77 \exp[0.019(T_i - T_0)]\}^5} = 0 \quad (2-13)$$

ここで、添字  $i$  は第  $i$  番目のデータを表し、 $i$  はデータが有効な場合に 1.0、無効な場合に 0 となる。

以上の通り決定された  $T_0$  をもとに、破壊靱性の中間値  $K_{Jc(\text{med})}$  と試験温度  $T$  との関係、すなわちマスターカーブが次の通り一意に定められる。

$$K_{Jc(med)} = 30 + 70 \exp[0.019(T - T_0)], MPa\sqrt{m} \quad (2-14)$$

また、同曲線を基準として、マスターカーブの信頼限界を与える曲線は次式により与えられる。

$$K_{Jc(0.xx)} = 20 + \left[ \ln \left( \frac{1}{1-0.xx} \right) \right]^{\frac{1}{4}} \times \{11 + 77 \exp[0.019(T - T_0)]\}, MPa\sqrt{m} \quad (2-15)$$

ここで、0.xx は信頼性確率であって、5%および95%信頼限界を与える曲線はそれぞれ以下のようなになる。

$$K_{Jc(0.05)} = 25.2 + 36.6 \exp[0.019(T - T_0)], MPa\sqrt{m} \quad (2-16)$$

$$K_{Jc(0.95)} = 34.5 + 101.3 \exp[0.019(T - T_0)], MPa\sqrt{m} \quad (2-17)$$

さらに、マスターカーブの下限界を設定するにあたり、 $T_0$ の不確定性を保守的に包絡するため、先に述べた5%信頼限界を高温側にシフトしてマージンを確保することがよく行われる。このときの調整量  $T_0$  は次式で与えられる。

$$T_0 = \bar{T} - Z_{85} \frac{\sigma}{\sqrt{r}} \quad (2-18)$$

ここで、 $\sigma$  は温度の標準偏差、 $\bar{T}$  は  $K_{Jc(med)}$  の値に応じて決まるパラメータであって、 $K_{Jc(med)}$  が  $83MPa\sqrt{m}$  以上であるときは  $\bar{T} = 18$ 、 $r$  は  $T_0$  の決定に用いた試験片の個数である。また、 $Z_{85}$  は信頼度を85%とする正規分布の両側検定に対する統計量であって、 $Z_{85} = 1.44$  である。

## 第 3 章 試験方法

本章では、本研究で採用した試験片、試験条件、試験手順について述べる。

### 3.1 供試材

試験には、国産の原子炉圧力容器用材料である SQV2A 鋼[18]を供試した。これは ASTM 規格に定める A533 Gr. B Cl. 1 鋼に相当するが、本試験では破壊靱性が低く抑えられるようリンおよび硫黄の含有量を高めたものを用いた。この供試材の化学組成を表 3-1 に示す。また、引張試験より得られた引張特性を表 3-2 に、落重試験およびシャルピー衝撃試験より得られた無延性遷移温度  $T_{NDT}$  と関連温度  $RT_{NDT}$  を表 3-3 にそれぞれ示す。

Table 3-1 Chemical Compositions of Tested Materials

(wt%)

Material		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
SQV2A	Target Value	~0.25	0.15 ~ 0.30	1.15 ~ 1.50	~0.035	~0.040	0.40 ~ 0.70	-	0.45 ~ 0.60	-
	Product Value	0.22	0.25	1.44	0.021	0.028	0.54	0.08	0.48	0.1

Table 3-2 Tensile Properties of Tested Materials

Material		Temperature	0.2% Yield Stress MPa	Ultimate Strength MPa	Elongation %	Reduction of Area %
SQV2A	Specified	20±5	345 ~	550 ~ 690	16 ~	-
	Test Result	21	477	633	25.6	60.0
			465	614	27.2	62.5

Table 3-3 Nil-Ductility Transition Temperature and Reference Temperature of Tested Materials

Material	$T_{NDT}$	$RT_{NDT}$
SQV2A	-30	-30

## 3.2 試験片

破壊靱性試験に用いた試験片は、公称板厚 0.4 インチの 0.4T C(T)試験片(Compact Tension)、および同じく公称板厚 0.4 インチの 0.4T SE(B)試験片(Single-Edge notched Bend bar)である。各試験片の寸法および形状を図 3-1 に示す。これらの寸法および形状はすべて ASTM 規格[9]に適合するものである。

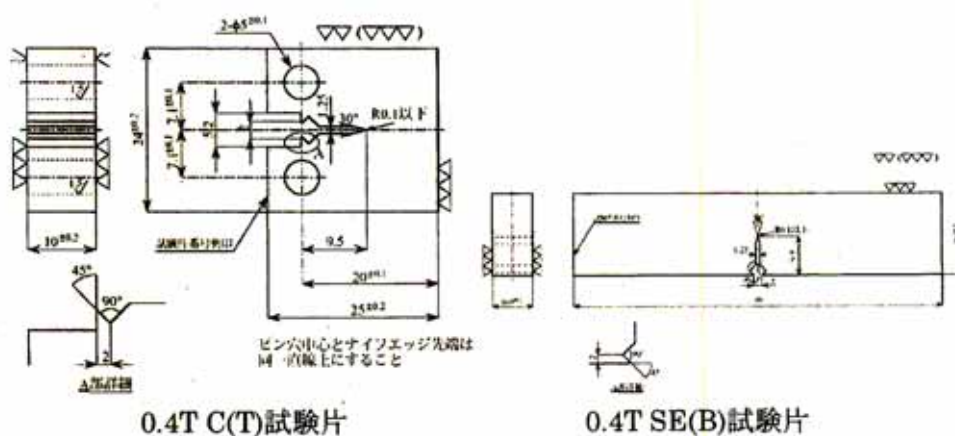


Figure 3-1 Configurations of Test Specimens

すべての試験片には疲労予き裂を導入した。予き裂の導入はASTM規格[9]の規定に倣い、機械切欠きからの疲労き裂の進展のための第一段階、最終き裂先端の先鋭化のための第二段階に分けて行った。公称初期き裂長さ  $a_0$  は公称板幅  $W$  に対して  $0.5W - 0.05W < a_0 < 0.5W + 0.05W$  を満たさねばならないという ASTM 規格の要求に基づき、導入する予き裂の表面における長さの目標値は 1.0mm とした。このとき  $a_0 = 0.525W$  となり、条件を満たしている。

### 3.3 試験条件

試験マトリクスを表 3-4 に示す。試験温度  $T$  については、SQV2A 材の寸法の大きな試験片に対する試験から得られた  $T_0$  をもとに[16]、最小の試験片個数 6 体で有効な破壊靭性が得られるような温度範囲、すなわち  $T_0 - 14$  から  $T_0 - 50$  の範囲に近づくよう設定した。

Table 3-4 Test Matrix

Material	TP Size	Test Temperature			
		-60	-80	-100	-120
SQV2A	0.4T C(T)	12	8	7	8
	0.4T SEB	7	9	7	6

### 3.4 試験手順

試験に使用したマスターカーブデータ計測装置を図 3-2 に示す。また、この装置に設置した 0.4T C(T)試験片および 0.4T SE(B)試験片の様子を図 3-3,図 3-4 にそれぞれ示す。破壊靭性試験は ASTM 規格[9]に準拠して行った。すなわち、試験片に準静的な単調引張(曲げ)荷重を負荷し、試験片に脆性破壊またはポップインを生じるまでの荷重と開口端変位を、それぞれロードセルとクリップゲージにより計測し、2 章に述べた手順に従い破壊靭性を評価した。

試験片温度は、試験片の表面にスポット溶接により取り付けられた熱電対により計測し、試験片温度が所定の値となるよう恒温層内の雰囲気温度を制御した。ASTM 規格には温度制御に関する定量的な条件は規定されていないが、関連する ASTM E1820-01[19]には、試験片厚さ 25mm あたり 1/2 時間、すなわち 0.4T 試験片で 12 分の間、所定の試験片温度に対して  $\pm 3$  の範囲内で均熱を維持すべきと規定されている。これを考慮に入れ、両試験片において 30 分の間、所定の試験片温度に対して  $\pm 3$  の範囲内で均熱を維持した。

試験の終了後、破断した試験片より試験片厚さおよび試験片幅を実測し、破壊靭性の評価に用いた。また、破断後の試験片の破面を観察し、規格に従って初期き裂長さ、安定き裂進展量を実測するとともに、これらの値が規格に定める要件を満たしていることを確認した。



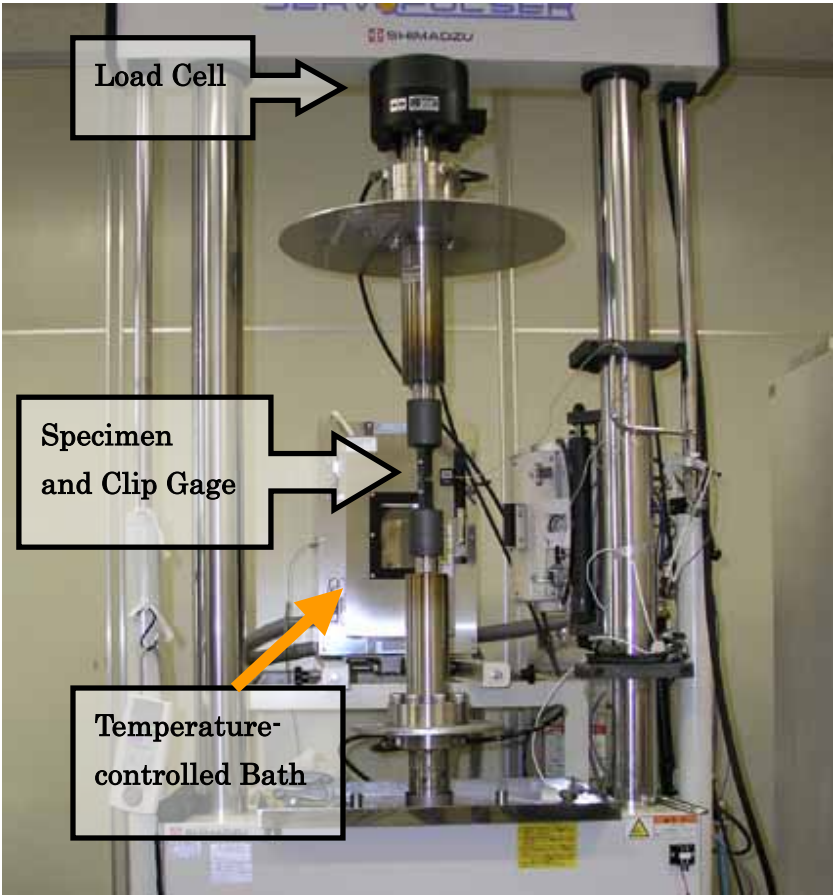


Figure 3-2 Experimental Setup

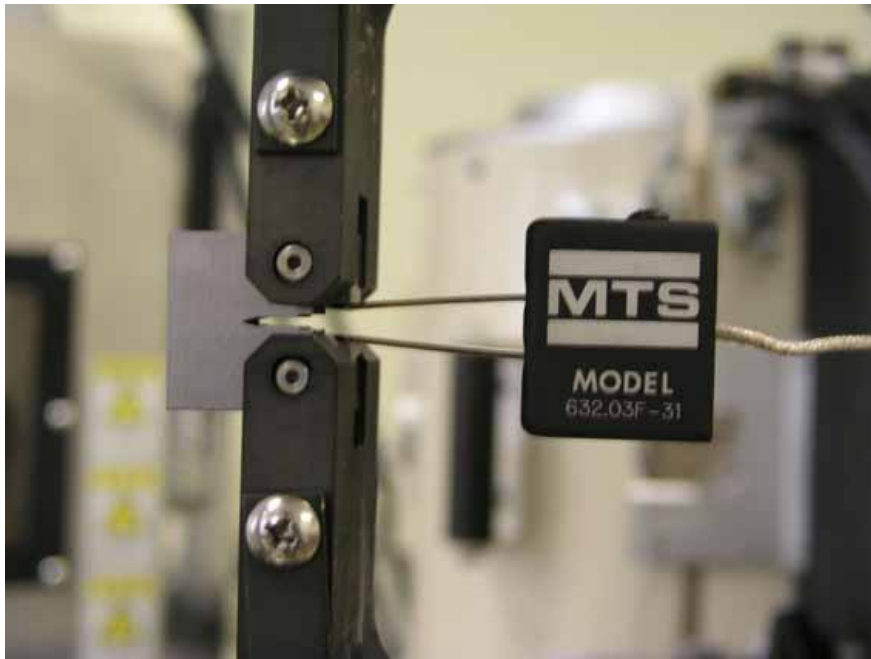


Figure 3-3 0.4T C(T) Specimen and Clip gage



Figure 3-4 0.4T SE(B) Specimen and Clip gage

## 第4章 結果

本章では、試験結果をもとにした破壊靱性、参照温度、マスターカーブの評価結果を述べる。また、結果からさかのぼってマスターカーブ法的前提条件の妥当性について検証する。

## 4.1 破壊靱性

試験の結果得られた等価破壊靱性  $K_{Jc(1Teq)}$  および関連する諸量を、試験片形状ごとにまとめて表 4-1 に示す。同表におけるデータの有効性の判定は、ASTM 規格[8]にある規定に照らして行った。その結果、本試験で得られた個々のデータには一部有効でないものも含まれており、これらのデータの扱いも同規格に基づいて行った。すなわち、有効でないデータについては、マスターカーブの計算の際に  $K_{Jc(1Teq)}$  の代わりに限界等価破壊靱性  $K_{Jc(1Teq)(limit)}$  を用いた。ここで、 $K_{Jc(1Teq)(limit)}$  は式(2-8)から得られる  $K_{Jc(limit)}$  を式(2-9)に代入することによって求められる値である。

Table 4-1 Results of Equivalent Fracture Toughness

Material	TP Size	Specimen No.	T [ ° ]	P [kN]	Je [kN/m]	Jp [kN/m]	Je [kN/m]	KJc [MPa√m]	KJc(1Teq) [MPa√m]	Validity	KJc(limit) (1Teq) [MPa√m]
SQV2A	0.4T C(T)	PH-0101	-60	10.66	34.18	75.05	109.23	158.44	129.26	Valid	-
		PH-0102		10.21	32.24	70.24	102.48	153.49	125.36	Valid	-
		PH-0103		10.39	37.55	127.97	165.52	185.68	150.68	Invalid	137.21
		PH-0104		10.81	33.44	51.16	84.59	138.54	113.79	Valid	-
		PH-0105		10.93	34.88	155.67	190.55	209.20	169.61	Invalid	145.92
		PH-0106		10.48	34.79	135.81	170.60	195.52	158.79	Invalid	142.79
		PH-0307		10.46	32.89	122.17	155.06	180.77	147.48	Invalid	140.41
		PH-0308		9.96	29.24	40.27	69.51	120.72	99.87	Valid	-
		PH-0309		10.03	30.00	52.87	82.87	135.16	111.32	Valid	-
		PH-0601		10.47	32.95	133.10	166.05	191.06	155.65	Invalid	142.94
		PH-0602		9.99	30.22	41.36	71.58	125.78	103.93	Valid	-
		PH-0603		10.26	29.46	93.65	123.11	172.39	140.85	Valid	-
		PH-0107	10.92	35.78	60.17	95.95	145.83	119.57	Valid	-	
		PH-0108	10.07	31.58	33.73	65.32	120.46	99.49	Valid	-	
		PH-0109	11.22	36.70	64.37	101.07	148.45	121.35	Valid	-	
		PH-0201	10.78	35.18	75.92	111.11	159.01	129.92	Valid	-	
		PH-0202	10.48	33.16	41.68	74.84	128.88	106.09	Valid	-	
		PH-0203	10.81	35.17	91.39	126.56	168.72	137.65	Valid	-	
		PH-0604	10.71	34.35	70.89	105.23	152.11	124.82	Valid	-	
		PH-0605	11.22	36.76	136.59	173.35	193.68	157.87	Invalid	142.71	
		PH-0204	8.17	20.58	3.93	24.51	74.17	62.86	Valid	-	
		PH-0205	10.06	30.77	16.40	47.16	102.81	85.51	Valid	-	
		PH-0206	11.27	37.49	47.88	85.37	139.43	114.49	Valid	-	
		PH-0207	9.91	29.93	14.78	44.71	99.54	82.94	Valid	-	
		PH-0208	10.65	35.26	34.89	70.15	125.41	103.49	Valid	-	
		PH-0209	10.34	31.02	15.50	46.52	103.22	85.84	Valid	-	
		PH-0606	11.03	36.09	40.66	76.75	130.84	107.85	Valid	-	
		PH-0301	10.42	32.08	10.66	42.74	97.71	81.45	Valid	-	
		PH-0302	10.07	29.96	8.69	38.65	94.04	78.55	Valid	-	
		PH-0303	8.31	20.54	2.20	22.74	70.25	59.75	Valid	-	
		PH-0304	8.77	23.28	3.28	26.55	77.58	65.53	Valid	-	
		PH-0305	8.44	20.81	3.00	23.81	73.90	62.62	Valid	-	
		PH-0306	10.01	30.23	9.27	39.50	95.35	79.62	Valid	-	
PH-0608	9.74	29.05	7.71	36.76	90.24	75.70	Valid	-			
PH-0609	9.07	24.69	4.71	29.40	81.72	68.97	Valid	-			

Table 4-1 Results of Equivalent Fracture Toughness (Cont'd)

Material	TP Size	Specimen No.	T [ ° ]	P [kN]	Je [kN/m]	Jp [kN/m]	Je [kN/m]	KJc [MPa√m]	KJc(1Teq) [MPa√m]	Validity	KJc(limit) (1Teq) [MPa√m]
SQV2A	0.4T SE(B)	PS-0501	-60	10.18	31.85	226.42	258.27	248.25	151.12	Invalid	151.12
		PS-0502		9.42	44.26	181.21	225.47	187.82	121.98	Invalid	121.98
		PS-0503		9.34	27.80	163.07	190.87	207.51	147.18	Invalid	147.18
		PS-0504		9.70	36.64	201.27	237.91	224.78	140.33	Invalid	140.33
		PS-0505		9.31	31.16	109.27	140.43	184.28	148.19	Invalid	148.19
		PS-0506		9.06	29.48	130.90	160.38	190.33	144.97	Invalid	144.97
		PS-0525	8.81	23.65	74.47	98.12	149.65	123.14	Valid	-	
		PS-0507	9.27	26.05	30.45	56.50	120.22	99.48	Valid	-	
		PS-0509	9.22	27.07	81.90	108.97	165.90	135.85	Valid	-	
		PS-0510	9.06	26.05	50.82	76.87	138.62	114.18	Valid	-	
		PS-0512	8.32	23.84	23.22	47.06	107.00	89.07	Valid	-	
		PS-0527	9.49	27.46	80.61	108.07	165.37	135.28	Valid	-	
		PS-0528	9.33	26.82	43.60	70.42	132.78	109.41	Valid	-	
		PS-0529	9.04	25.74	62.34	88.08	145.89	120.05	Valid	-	
		PS-0530	9.13	26.67	67.83	94.50	152.48	125.00	Valid	-	
		PS-0531	7.95	23.85	38.02	61.87	124.98	103.29	Valid	-	
		PS-0513	9.10	26.50	20.08	46.58	107.96	89.84	Valid	-	
		PS-0515	9.66	29.52	45.39	74.91	138.17	113.81	Valid	-	
		PS-0516	9.73	30.85	58.36	89.22	148.76	122.33	Valid	-	
		PS-0517	9.52	28.29	31.77	60.06	123.25	101.98	Valid	-	
		PS-0518	7.41	17.49	3.94	21.43	74.79	63.50	Valid	-	
		PS-0533	9.49	26.58	27.31	53.89	117.27	97.39	Valid	-	
		PS-0534	9.20	25.27	16.34	41.61	102.60	85.75	Valid	-	
		PS-0519	7.60	19.66	3.58	23.24	77.34	65.47	Valid	-	
		PS-0521	9.81	29.21	24.06	53.26	118.67	98.33	Valid	-	
		PS-0522	10.00	34.09	20.43	54.53	112.33	93.21	Valid	-	
		PS-0524	7.87	19.26	3.72	22.98	76.90	65.17	Valid	-	
		PS-0535	8.50	22.24	5.64	27.88	83.76	70.56	Valid	-	
		PS-0536	10.26	30.68	33.52	64.20	130.17	107.36	Valid	-	

## 4.2 参照温度

上述の通り得られた破壊靱性データをもとに、2章に記した手順に沿って参照温度 $T_0$ を評価した。 $T_0$ の評価結果をまとめて表4-2に示す。ただし、 $T_0$ のうち、次頁より示す検討から参考値としたものについては括弧を付して表記した。

Table 4-2 Reference Temperature,  $T_0$ , from the data set of  $K_{Jc(1Teq)}$

Material	TP Size	Temperature	Evaluation Method	No. of Data (Valid)	Median Toughness $K_{Jc(med)}$ $MPa\sqrt{m}$	Weighting Value of $\sum r_i n_i$	Reference Temperature $T_0$
SQV2A	0.4T C(T)	-60	Single-Temp.	12(7)	135.9	-	(-74.0)
		-80		8(7)	119.3	-	-90.9
		-100		7(7)	90.1	-	-92.0
		-120		8(8)	68.5	-	-88.6
		-60,-80,-100,-120	Multi-Temp.	35(29)	-	5.64	-89.0
	0.4T SE(B)	-60	Single-Temp.	7(1)	199.6		(-79.0)
		-80		9(9)	109.5	-	-86.7
		-100		7(7)	94.7	-	-95.8
		-120		6(6)	83.4		(-105.7)
		-60,-80,-100,-120	Multi-Temp.	29(23)	-	4.69	-96.7

得られた $T_0$ の有効性について、評価法ごとに検討する。

単一温度法においては、 $T_0$ を基準とした試験温度 $T$ と $K_{Jc(med)}$ の範囲に応じて必要な試験片数が表 4-3 の通り定められている。

・0.4T C(T)試験片：-60、-80 および-100 でのデータセットについては、 $T$ は $T_0 + 50$  から $T_0 - 14$  の範囲にあり、 $K_{Jc(med)}$ が $212 \sim 84 MPa\sqrt{m}$ の範囲にあることから、試験片数は最小の6体で十分である。得られた有効試験片数はいずれの試験温度でも7体であったから、この制約は満足されている。しかし、このうち-60 のデータセットでは、有効でない試験が許容本数の3本を越える5本にいたったため、有効な $T_0$ を得ることができなかった。また、-120 のデータセットについては、 $T$ は $T_0 - 15$  から $T_0 - 35$  の範囲にあり、 $K_{Jc(med)}$ が $83 \sim 66 MPa\sqrt{m}$ の範囲にあることから、必要な試験片数は7体となる。-120 での有効試験片数は8体であることから、上記の制約は満足されている。

・0.4T SE(B)試験片：-80 及び-100 のデータセットについては、 $T$ は $T_0 + 50$  から $T_0 - 14$  の範囲にあり、 $K_{Jc(med)}$ が $212 \sim 84 MPa\sqrt{m}$ の範囲にあることから、試験片数は最小の6体で十分である。-80 および-100 での試験片数はそれぞれ9体、7体あることから、上記の制約は満足されている。なお、試験温度-60 での0.4T SE(B)試験については7体の試験を行ったが、有効なデータが得られた試験片数は1体のみであり、有効な $T_0$ を得ることができなかった。また、-120 での0.4T SE(B)試験については6体の試験を行い全て有効であったが、 $T$ が $T_0 - 15$  から $T_0 - 35$  の範囲にあり、 $K_{Jc(med)}$ が $83 \sim 66 MPa\sqrt{m}$ の範囲にあることから、必要な試験片数は7体となり、こちらも有効な $T_0$ を得ることができなかった。

Table 4-3 Number of Valid  $K_{Jc}$  Test Results Required to Evaluate  $T_0$

$T - T_0$ range	$K_{Jc(med)}$ range $MPa\sqrt{m}$	Number of valid $K_{Jc}$ required	Possible number of invalid tests
50 to -14	212 to 84	6	3
-15 to -35	83 to 66	7	1
-36 to -50	65 to 58	8	0

Table 4-4 Weight Factors for Multi-Temperature Analysis

$T - T_0$ range	1T $K_{Jc(med)}$ range $MPa\sqrt{m}$	Weight Factor $n_i$
50 to -14	212 to 84	1/6
-15 to -35	83 to 66	1/7
-36 to -50	65 to 58	1/8



一方、複数温度法においては、 $T$  の  $T_0$  からの差に応じて表 4-4 に示す重みをつけた試験片数の総和によって  $T_0$  の有効性が再帰的に判定される。

$$\sum_{i=1}^3 r_i n_i \geq 1 \quad (4-1)$$

ここで、 $r_i$  は表 4-4 に示す各温度レンジにある有効な試験片数、 $n_i$  はその温度レンジに対応する重み係数である。表 4-2 に示した複数温度法に対するデータセットはこれを満たしており、表中の  $T_0$  は有効なものである。

### 4.3 ワイブル分布の確認

ASTM 規格[8]に定める  $T_0$  の評価法は、同一温度条件下における破壊靱性の分布がワイブル指数を 4 とするワイブル分布に従うことを前提としている。この前提条件の妥当性を確認するため、有効な破壊靱性値を与える各データセットをワイブルプロットした結果を図 4-2 に示す。累積破損確率には次式で与えられるメディアンランク  $p$  を用いた。

$$p = \frac{i - 0.3}{N + 0.4} \quad (4-2)$$

ここで、 $i$  はランク、 $N$  は試験片個数である。図によれば、試験温度、試験片形状の違いによらず、ワイブルプロットされたデータは傾きが 4 に近い直線となる様子が見えてくる。このことから、本試験の範囲においては、一義的には破壊靱性の分布がワイブル指数を 4 とするワイブル分布に従うことが分かる。

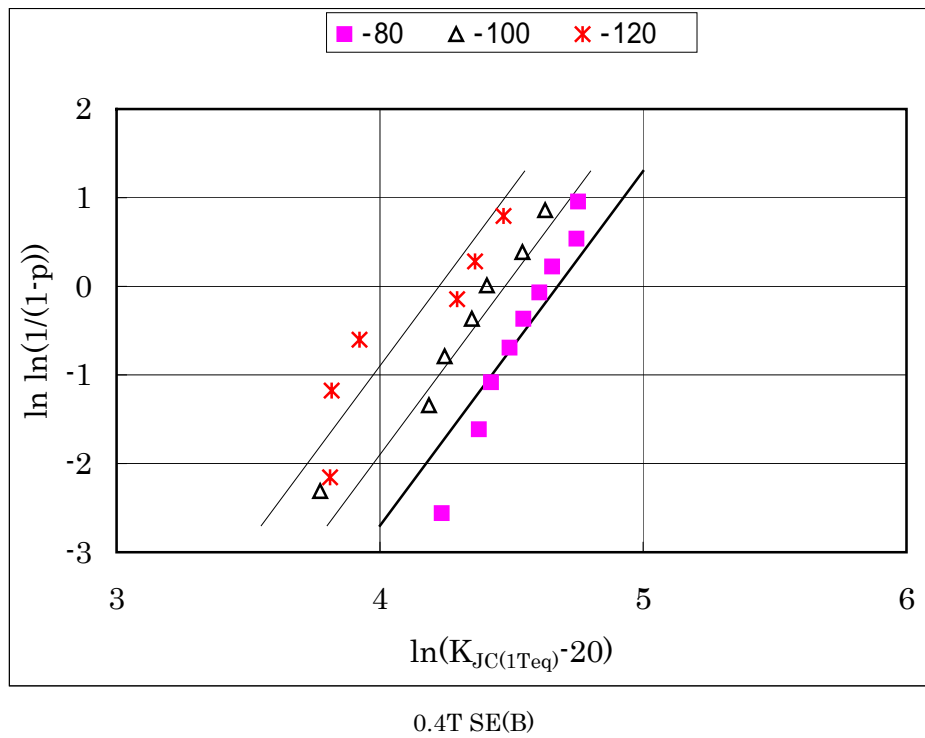
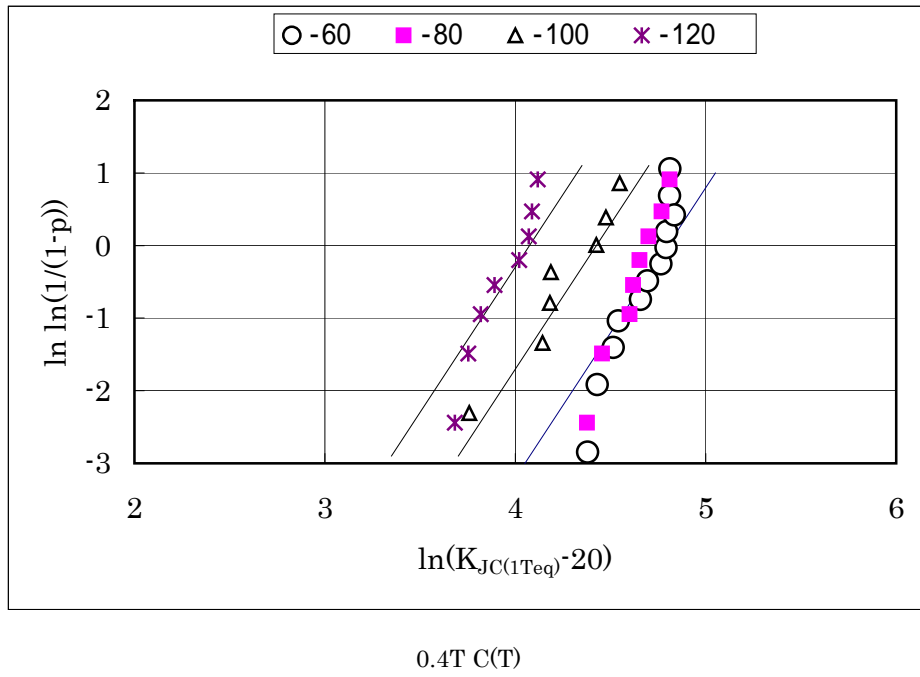


Figure 4-1 Weibull Plots of Test Data (Lines in Figures represent trend lines with gradient of 4)

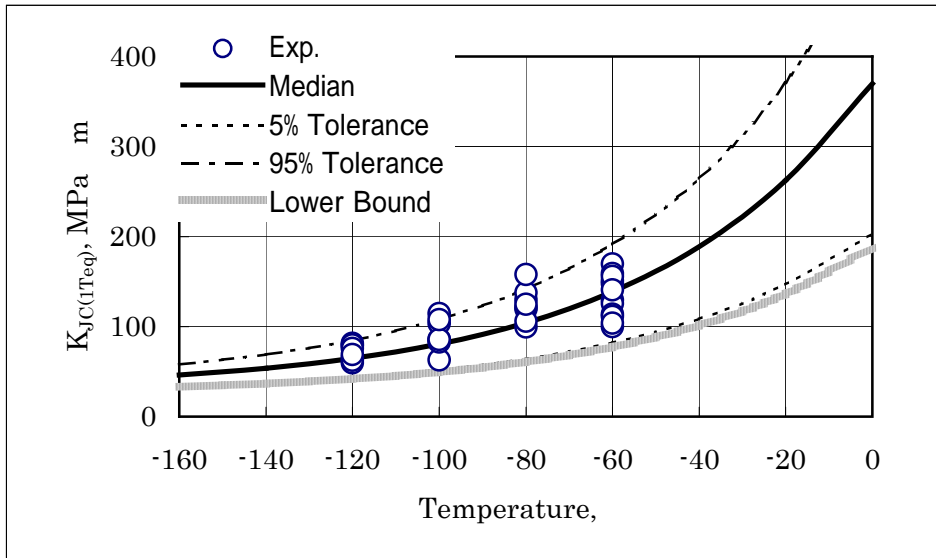
## 4.4 マスターカーブ

前節で得られた $T_0$ をもとに決定されるマスターカーブ、その5%信頼限界、95%信頼限界、および下限界曲線を試験結果と併せて図 4-3(a)(b)に示す。 $T_0$ としては複数温度法から得られた値を採用した。それぞれの曲線の導出は 2 章に示した方法で行った。0.4T C(T)試験では  $T_0 = 6.5$ 、0.4T SE(B)試験では  $T_0 = 5.4$  であった。

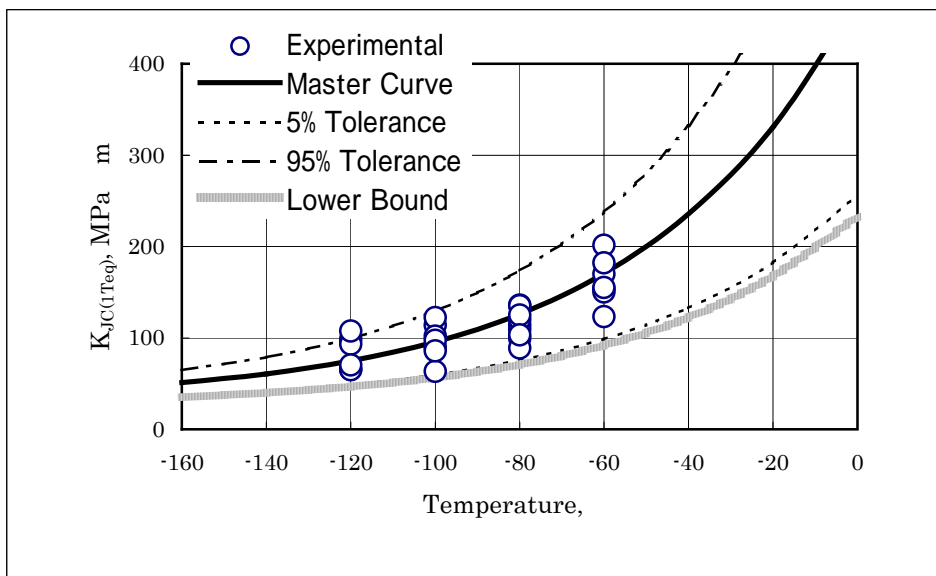
(a)図によれば、ほぼすべての点はマスターカーブを中心に分布しており、ただ 2 点を除き 5%信頼限界曲線と 95%信頼限界曲線の間に入っている。

(b)図によれば、ほぼすべての点はマスターカーブを中心に分布しており、ただ 1 点を除き 5%信頼限界曲線と 95%信頼限界曲線の間に入っている。

また、両図においてすべてのデータは下限界曲線の上側に位置しており、同曲線によって  $K_{Jc(1Teq)}$  を保守的に評価できている。これは 0.4T C(T)試験と 0.4T SE(B)試験の両方において、マスターカーブ法が適用可能であることを示している。



(a) 0.4T C(T)



(b) 0.4T SE(B)

Figure 4-2 Comparison of Master Curve and Test Data

## 第5章 考察

本章では、マスターカーブの唯一の指標である参照温度に対し、試験温度、評価方法、試験片寸法、試験片形状がいかに関与したかについて考察する。

## 5.1 参照温度

試験により得られた有効な  $T_0$  を試験片形状ごとに図 5-1 に示す。図中の “-60” ~ “-120” は単一温度法を、“ mlt.” は複数温度法をそれぞれ示している。単一温度法により得られた参照温度にはエラーバーを付した。このエラーバーの範囲は次のようにして算出した。

まず、破壊靱性試験の結果から  $K_{Jc(med)}$  の標準偏差  $s$  を求め、これを用いて  $K_{Jc(med)}$  の標準誤差  $m = \frac{s}{\sqrt{N}}$  を求める。試験温度が  $\pm 3$  以内の精度であることを踏まえ、式 (2-12) から誤差の伝播の評価により  $T_0$  の誤差  $m_{T_0}$  を求め、 $\pm m_{T_0}$  のエラーバーを付した。試験温度ごとの  $m_{T_0}$  の値を表 5-1 に示す。

Table 5-1 Value of  $m_{T_0}$

	試験温度	$m_{T_0}$
0.4T CT	-80	4.1
	-100	6.6
	-120	5.0
0.4T SEB	-80	4.6
	-100	6.7

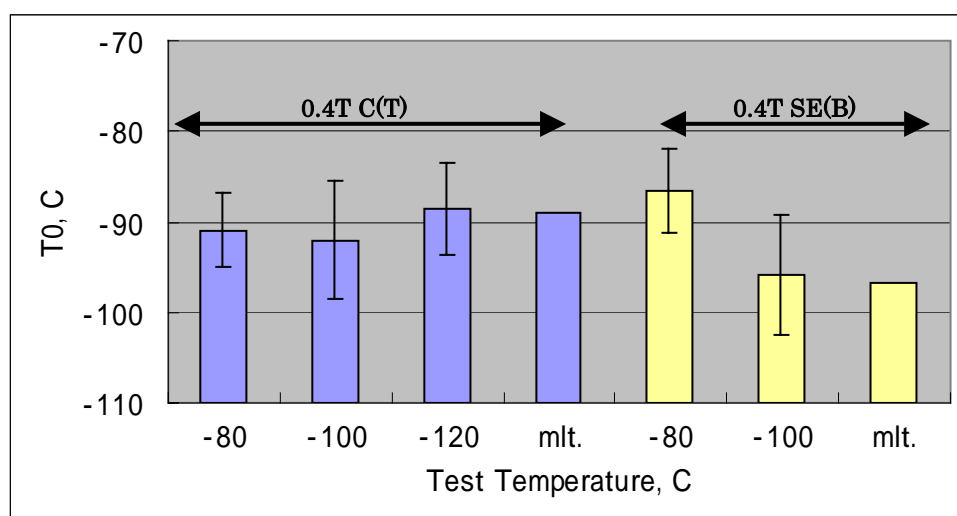


Figure 5-1 Evaluation Results of Reference Temperature,  $T_0$

図 5-1 より得られる知見は以下のようになる。

試験温度の影響：0.4T C(T)試験で単一温度法により $T_0$ を比較すると、3つ全ての試験温度においてエラーバーの重なりがあり、0.4T SE(B)試験で同様に $T_0$ を比較すると、やはりエラーバーの重なりがある。よって得られた $T_0$ の試験温度依存性は小さいと言える。

評価方法の影響：0.4T C(T)試験において複数温度法による $T_0$ は単一温度法による $T_0$ の平均的な値となっている。このことから、 $T_0$ を予め推定できない場合であっても、試験結果を逐次参考として次の試験温度を決定できる複数温度法を採用することにより、単数温度法と同程度の精度をもって $T_0$ の評価が可能であるといえる。これは、同材の4T,2T,1T C(T)試験片についての報告[16]にも一致している。一方0.4T SE(B)試験では、複数温度法による $T_0$ は単一温度法による $T_0$ よりもやや低い値をとっている。これは、単一温度法では有効な $T_0$ が得られなかった-60 および-120 のデータにおいても、個別の有効なデータに関しては複数温度法による $T_0$ の計算に用いているのであるが、これらがやや高い破壊靱性値を与える傾向にあったためであると考えられる。表 4-2 に示した参照温度の参考値もあわせて見れば、複数温度法による $T_0$ はやはり単一温度法による $T_0$ の平均的な値となっている。

試験片寸法の影響：試験温度の依存性を包絡すると考えられる複数温度法の結果をもとに試験片寸法の影響を見ると、本研究で得られた参照温度と過去[16]に得られていた参照温度との差は最大でも 3.9 と小さく、試験片寸法と参照温度の間には有意な相関は認められない。また、1T, 2T, 4T のデータを全て用いて得られた参照温度と今回の参照温度との差は 0.8 と極めて小さく、寸法依存性の小ささがうかがえる。

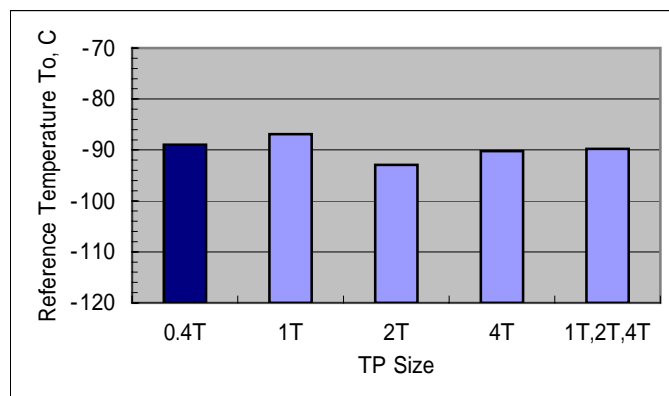


Figure 5-2 Comparison of Reference Temperature

試験片形状の影響：厚み 0.4 インチの試験片について、得られた参照温度を試験片形状ごとに図 5-3 に示す。0.4T SE(B)の参照温度は、0.4T C(T)の参照温度よりも約 7.7 低い値が得られた。

原因としては、き裂面に垂直な方向に長いSE(B)試験片のほうが、試験に伴う試験片の変形に対する拘束が弱く、試験機により与えられたエネルギーが変形に使われるため、破壊靱性が高く、すなわち参照温度が低くなったと考えられる。

ちなみに、先行研究の結果によれば、本試験と同じく厚み 0.4 インチの試験片について、0.4T SE(B)の参照温度は 0.4T C(T)の参照温度よりも HSST Plate 02 材において約 14 、A 533B Plate 材において約 10 [20]、JRQ 材において約 10~20 低くなっており[21]、本研究の結果はこれら先行研究の結果にも反しない。

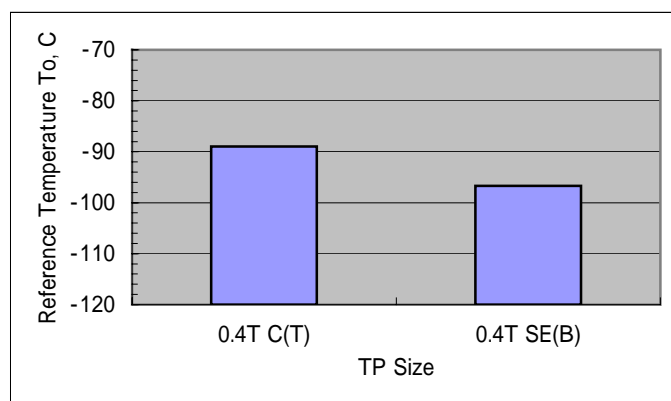


Figure 5-3 Comparison of To Values from different Specimen Types



## 5.2 現行規格との比較

マスターカーブと比較しうる現行規格の  $K_{Ic}$  曲線として、日本電気協会規格 JEAC 4206[22,23]、ならびに ASME Code Case N-629 & N-631[10,11]などが挙げられる。前者は次式で与えられる。

$$K_{Ic} = 36.48 + 22.78 \exp[0.036(T - RT_{NDT})] \quad (5-1)$$

ここで、 $RT_{NDT}$  はシャルピー衝撃試験および落重試験の結果から定められる関連温度であり、その値は表 3-3 に示した通りである。一方後者は  $RT_{NDT}$  の代わりに参照温度  $T_0$  から換算した関連温度  $RT_{T_0}$  を用いる点に違いがあり、

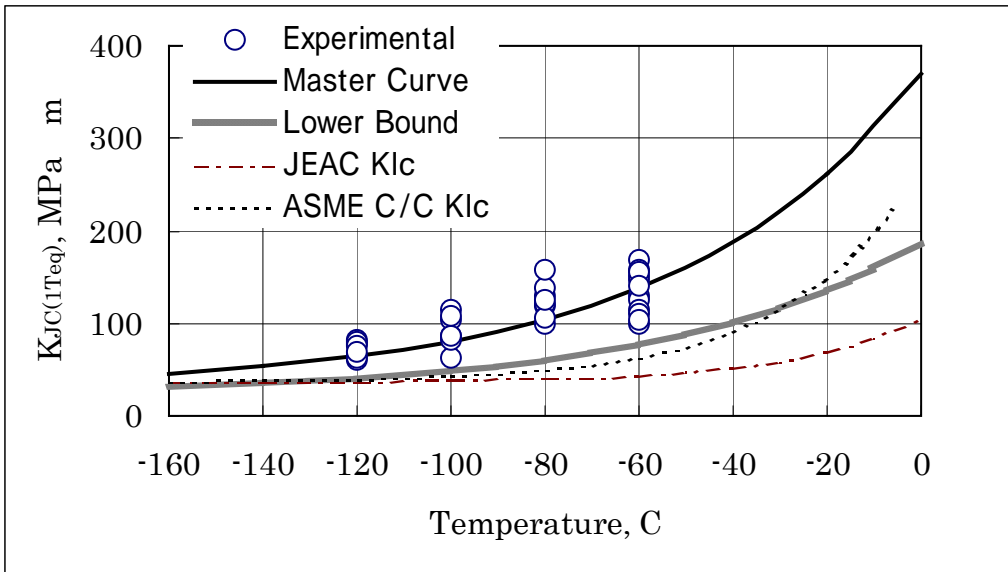
$$\begin{aligned} K_{Ic} &= 36.48 + 22.78 \exp[0.036(T - RT_{T_0})] \\ RT_{T_0} &= T_0 + 19.4 \end{aligned} \quad (5-2)$$

なる式で与えられる。

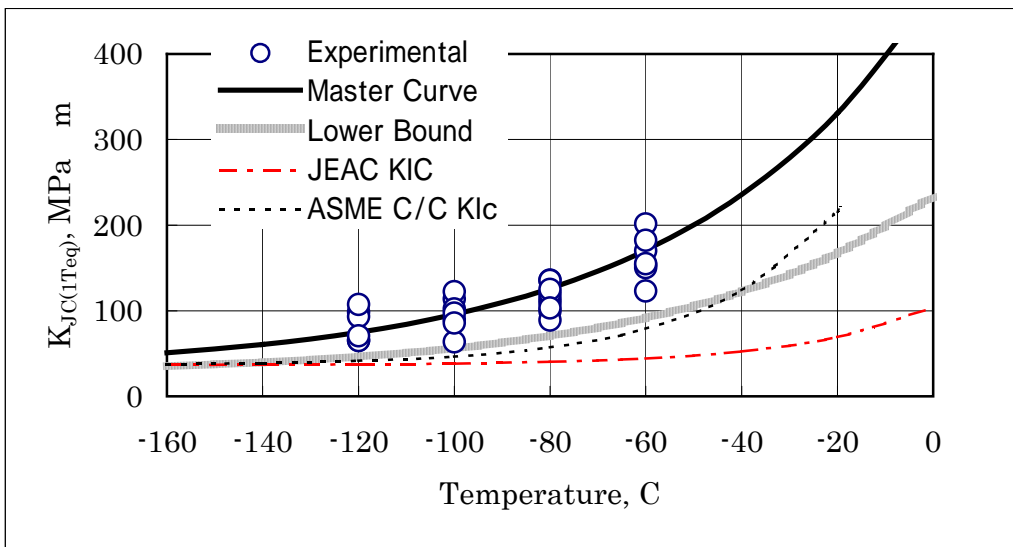
マスターカーブの下限界曲線を式(5-1)で与えられる JEAC の  $K_{Ic}$  曲線、および式(5-2)で与えられる ASME Code Case の  $K_{Ic}$  曲線と比較して図 5-1 に示す。 $T_0$  には表 4-2 の複数温度法に対応する値を採用した。

マスターカーブ下限界曲線、2本の  $K_{Ic}$  曲線のいずれもすべての試験データを安全側に包絡できている。

式(4-2)で与えられる ASME Code Case の  $K_{Ic}$  曲線は  $T$  が -30 ないし -40 以下の温度領域でマスターカーブ下限界曲線よりやや小さめの破壊靱性を与えており、それより高い温度では大きめの破壊靱性を与えている。しかし、両曲線とも材料の試験データの分布に応じてその位置をシフトしており、同一破壊靱性レベルにおける試験データと曲線の温度差が相対的に小さくなるような調整機能が働いている。一方、式(5-1)で与えられる JEAC の  $K_{Ic}$  曲線は他の2曲線に比べはるかに高温側に位置しており、試験データに比べて保守的である。また、JEAC の  $K_{Ic}$  曲線と試験データとの温度差は試験片形状によって異なっており、必ずしも一定の保守性が確保されているとはいえない。



0.4T C(T)



0.4T SE(B)

Figure 5-4 Comparison of Lower Bound of Master Curve with Present K<sub>IC</sub> Curves

## 第 6 章 結論

本章では、本研究により得られた結論を示す。

## 6.1 本論文の結論

本研究では代表的な国産原子炉圧力容器鋼である SQV2A 鋼の 0.4T C(T)および SE(B)試験片について破壊靱性試験を行い、マスターカーブを評価した。

その結果、ASTM 規格に規定されたマスターカーブ法の評価手順に従い、試験片形状ごとに有効なマスターカーブを決定することができた。試験温度の違い、評価方法の違い、試験片寸法の違いによるマスターカーブ差は小さく、それらの依存性は認められなかった。試験片形状の違いによって、マスターカーブには $T_0$ にして約 7.7 の差が生じた。しかしその安全性に支障をきたすことはなかった。

以上から SQV2A 鋼の小型試験片に対し C(T)試験、SE(B)試験の両方でマスターカーブ法が適用可能であることを明らかにした。

また、わが国の現行規格が保守的であることを示し、マスターカーブ法を用いることでより合理的な安全性が確保できることを確認した。

## 付章 不適合データに関する考察とその取扱い

本章では、本研究において除外した不適合データについて、除外した根拠を示すとともに、これらのデータを除外しなかった場合について評価を行った。

## 7.1 破断面の観察

PS-0501	PS-0507	PS-0513	PS-0519	PS-0525	PS-0531
PS-0502	PS-0508	<u>PS-0514</u>	<u>PS-0520</u>	<u>PS-0526</u>	<del>PS-0532</del>
PS-0503	PS-0509	PS-0515	PS-0521	PS-0527	PS-0533
PS-0504	PS-0510	PS-0516	PS-0522	PS-0528	PS-0534
PS-0505	PS-0511	PS-0517	PS-0523	PS-0529	PS-0535
PS-0506	PS-0512	PS-0518	PS-0524	PS-0530	PS-0536

Figure 7-1 Collection Positions of Specimens

図 7-1 は、今回用いた 0.4T SE(B)試験片の採取位置を模式的に示したものである。このうち、図中で隣り合う PS-0514, PS-0520, PS-0526, PS-0532 の 4 本について、破断面に他の部分と色の異なる筋状の跡が観察された。この筋状の跡を図中に示すとともに、そのうち特に明確であった試験片番号 PS-0514 および PS-0532 の破断面を図 7-2,7-3 に示す。図 7-2,7-3 から、2 つの矢印を結ぶ筋状の跡が観察される。この筋は、脆性破面のみならず疲労予き裂部、機械加工き裂部にまで及んでいる。よって、この跡は本試験によって発生したのではなく、材料に元々存在していたものと考えられる。

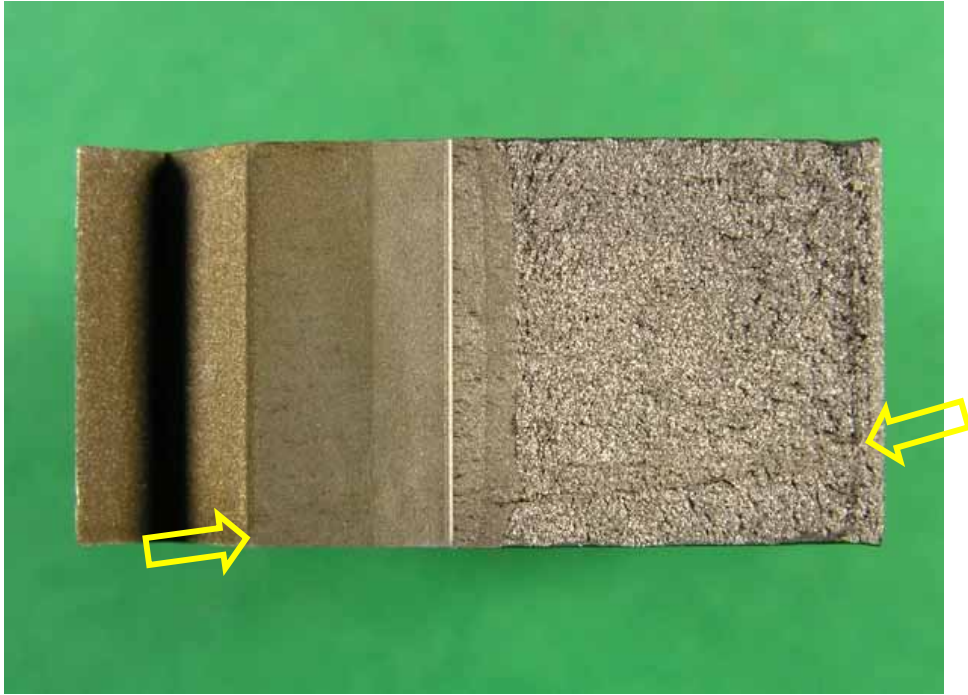


Figure 7-2 Fractograph of PS-0514

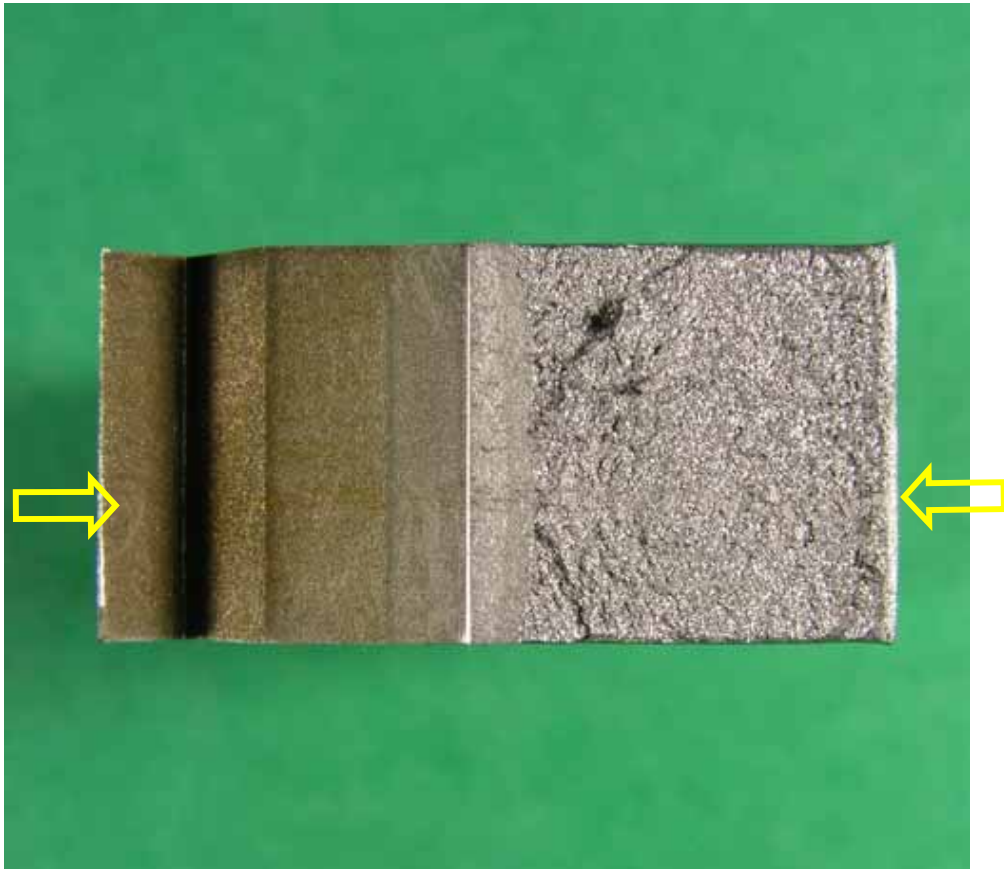


Figure 7-3 Fractograph of PS-0532

これらを含めた試験片について、走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて破断面の詳細な観察を行った。SEMによるPS-0532試験片の画像を、倍率別に図7-4,7-5に示す。同図中の丸印で囲まれた部分は脆性破壊の起点を示している。その結果、筋状の跡が観察された部分には、微小なき裂にも見える欠陥らしきもの、あるいは周辺部と色が異なる介在物らしきものの存在が観察された。また、筋状の跡とき裂前縁部との交わる部位を起点として脆性破壊が発生していた。PS-0514, PS-0520, PS-0526についても同様であった。これは、上述の欠陥あるいは介在物らしきものの一つが脆性破壊の起点となっていると考えられる。

また、他の試験片についても観察した結果、PS-0508, PS-0511, PS-0523には、筋状ではないが多数の欠陥と思しきものが存在し、脆性破壊の起点もそれらのうちのき裂前縁付近のものであった。

よって、この局所的な領域は一般部より破壊靱性が低下していると考えられる。

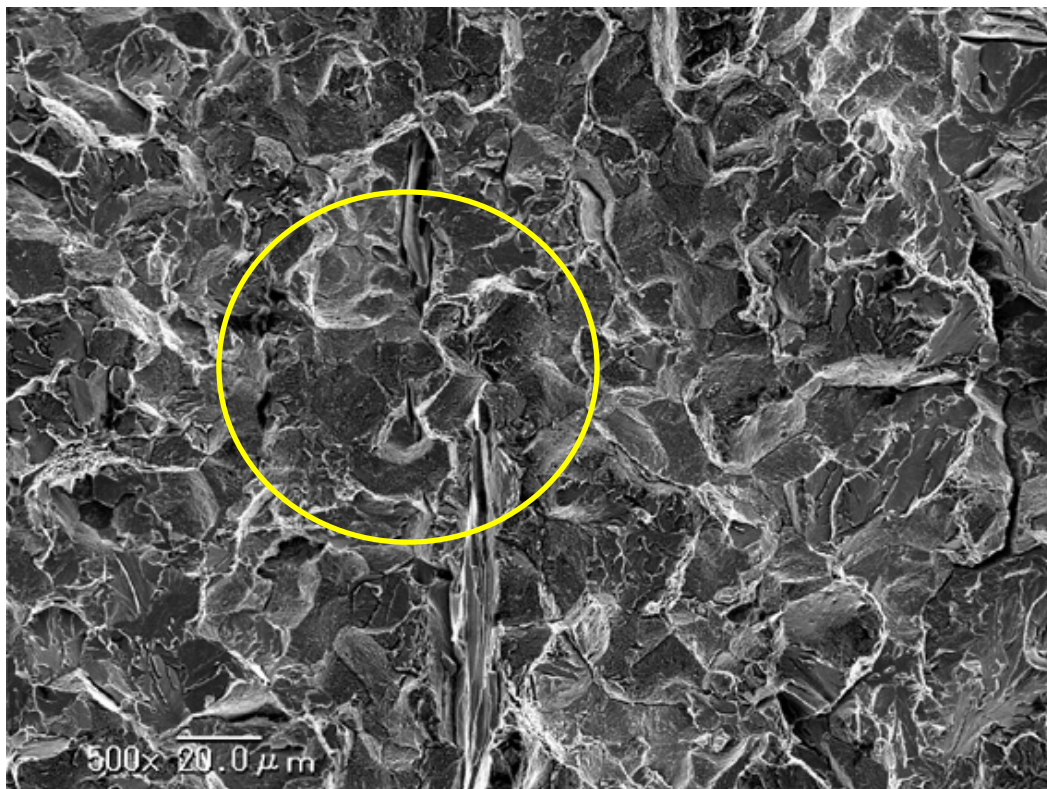


Figure 7-4 ×500 Fractograph of PS-0532 by SEM



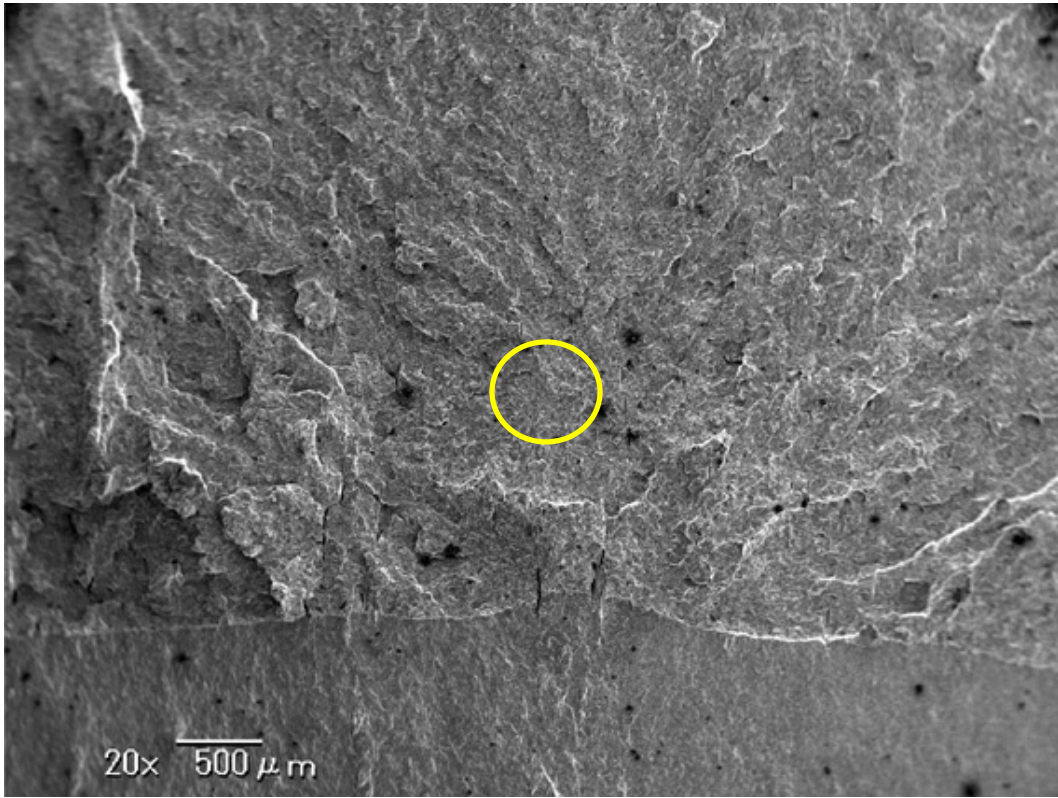


Figure 7-5 × 20 Fractograph of PS-0532 by SEM

## 7.2 異常試験片を含めた評価

これらを含む 0.4T SE(B)試験全データについて、所定の評価を行ってみる。全データから得られた破壊靱性値を改めて表 7-1 に示しておく。うち、破面に異常が見られたデータにはアンダーラインを付した。破面に異常が見られたデータは同一温度の他のデータよりも破壊靱性値が低い傾向にあることがわかる。

また、そのデータから描かれるワイブルプロットを図 7-6 に示す。同図によれば、傾き 4 の傾向線から外れるデータが散見される。よって、マスターカーブ法の前提が満たされていないことがわかる。これは、ワイブル分布の基となる最弱リンクモデルが、部材が元々有している欠陥が部材全体に分布していることを仮定しているのに対して、今回のデータには欠陥が部材の特定の部位に固まった試験片が含まれているからだと考えられる。

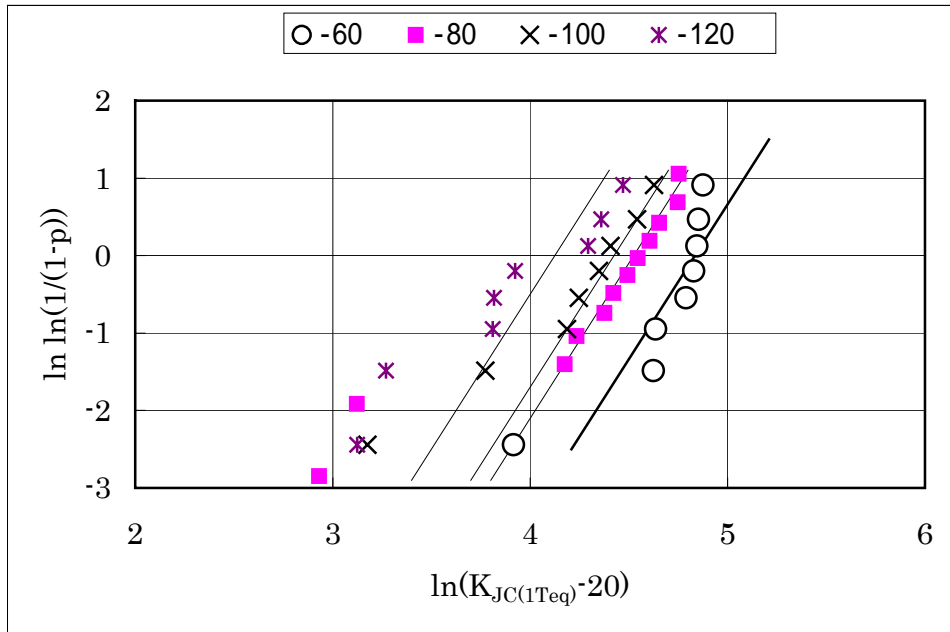


Figure 7-6 Weibull Plots of Test Data(Lines represent trend lines with gradient of 4)

Table 7-1 Results of Equivalent Fracture Toughness

Material	TP Size	Specimen No.	T [°]	P [kN]	Je [kN/m]	Jp [kN/m]	Jc [kN/m]	KJc [MPa√m]	KJc(1Teq) [MPa√m]	Validity	KJc(limit) (1Teq) [MPa√m]
SQV2A	0.4T SE(B)	PS-0501	-60	10.18	31.85	226.42	258.27	248.25	151.12	Invalid	151.12
		PS-0502		9.42	44.26	181.21	225.47	187.82	121.98	Invalid	121.98
		PS-0503		9.34	27.80	163.07	190.87	207.51	147.18	Invalid	147.18
		PS-0504		9.70	36.64	201.27	237.91	224.78	140.33	Invalid	140.33
		PS-0505		9.31	31.16	109.27	140.43	184.28	148.19	Invalid	148.19
		PS-0506		9.06	29.48	130.90	160.38	190.33	144.97	Invalid	144.97
		PS-0525		8.81	23.65	74.47	98.12	149.65	123.14	Valid	-
		<b>PS-0526</b>		<b>7.06</b>	<b>18.41</b>	<b>10.13</b>	<b>28.54</b>	<b>83.22</b>	<b>70.19</b>	<b>Valid</b>	-
		PS-0507	9.27	26.05	30.45	56.50	120.22	99.48	Valid	-	
		<b>PS-0508</b>	<b>5.27</b>	<b>8.60</b>	<b>0.58</b>	<b>9.18</b>	<b>48.57</b>	<b>42.69</b>	<b>Valid</b>	-	
		PS-0509	9.22	27.07	81.90	108.97	165.90	135.85	Valid	-	
		PS-0510	9.06	26.05	50.82	76.87	138.62	114.18	Valid	-	
		<b>PS-0511</b>	<b>4.81</b>	<b>7.31</b>	<b>0.39</b>	<b>7.70</b>	<b>43.66</b>	<b>38.76</b>	<b>Valid</b>	-	
		PS-0512	8.32	23.84	23.22	47.06	107.00	89.07	Valid	-	
		PS-0527	9.49	27.46	80.61	108.07	165.37	135.28	Valid	-	
		PS-0528	9.33	26.82	43.60	70.42	132.78	109.41	Valid	-	
		PS-0529	9.04	25.74	62.34	88.08	145.89	120.05	Valid	-	
		PS-0530	9.13	26.67	67.83	94.50	152.48	125.00	Valid	-	
		PS-0531	7.95	23.85	38.02	61.87	124.98	103.29	Valid	-	
		<b>PS-0532</b>	<b>8.44</b>	<b>22.10</b>	<b>18.25</b>	<b>40.36</b>	<b>102.07</b>	<b>85.10</b>	<b>Valid</b>	-	
		PS-0513	9.10	26.50	20.08	46.58	107.96	89.84	Valid	-	
		<b>PS-0514</b>	<b>5.33</b>	<b>9.20</b>	<b>0.76</b>	<b>9.96</b>	<b>50.19</b>	<b>43.97</b>	<b>Valid</b>	-	
		PS-0515	9.66	29.52	45.39	74.91	138.17	113.81	Valid	-	
		PS-0516	9.73	30.85	58.36	89.22	148.76	122.33	Valid	-	
		PS-0517	9.52	28.29	31.77	60.06	123.25	101.98	Valid	-	
		PS-0518	7.41	17.49	3.94	21.43	74.79	63.50	Valid	-	
		PS-0533	9.49	26.58	27.31	53.89	117.27	97.39	Valid	-	
		PS-0534	9.20	25.27	16.34	41.61	102.60	85.75	Valid	-	
		PS-0519	7.60	19.66	3.58	23.24	77.34	65.47	Valid	-	
		<b>PS-0520</b>	<b>5.63</b>	<b>9.91</b>	<b>0.71</b>	<b>10.63</b>	<b>53.14</b>	<b>46.30</b>	<b>Valid</b>	-	
		PS-0521	9.81	29.21	24.06	53.26	118.67	98.33	Valid	-	
		PS-0522	10.00	34.09	20.43	54.53	112.33	93.21	Valid	-	
		<b>PS-0523</b>	<b>5.42</b>	<b>9.15</b>	<b>0.28</b>	<b>9.42</b>	<b>48.66</b>	<b>42.75</b>	<b>Valid</b>	-	
		PS-0524	7.87	19.26	3.72	22.98	76.90	65.17	Valid	-	
		PS-0535	8.50	22.24	5.64	27.88	83.76	70.56	Valid	-	
		PS-0536	10.26	30.68	33.52	64.20	130.17	107.36	Valid	-	

次に、マスターカーブの前提が成り立たないことを無視してマスターカーブを描き、現行規格による評価も含めて図 7-7 に示す。同図によれば、ある程度多くの点はマスターカーブを中心に分布しているが、破壊靱性値が相対的に低い点が散見され、下限界曲線の下方に 5 つものデータが見られる。すなわち、この曲線で  $K_{Jc(1Teq)}$  が保守的に評価できているとは言えない。

また、ASME Code Case の曲線の下方には 4 点、JEAC の曲線の下方にも 1 点のデータが存在しており、いずれの規格によっても保守的な評価ができていない。これは、今回のように局所的な欠陥のようなものを有する試験片が、破壊靱性評価に適さないことを示唆している。

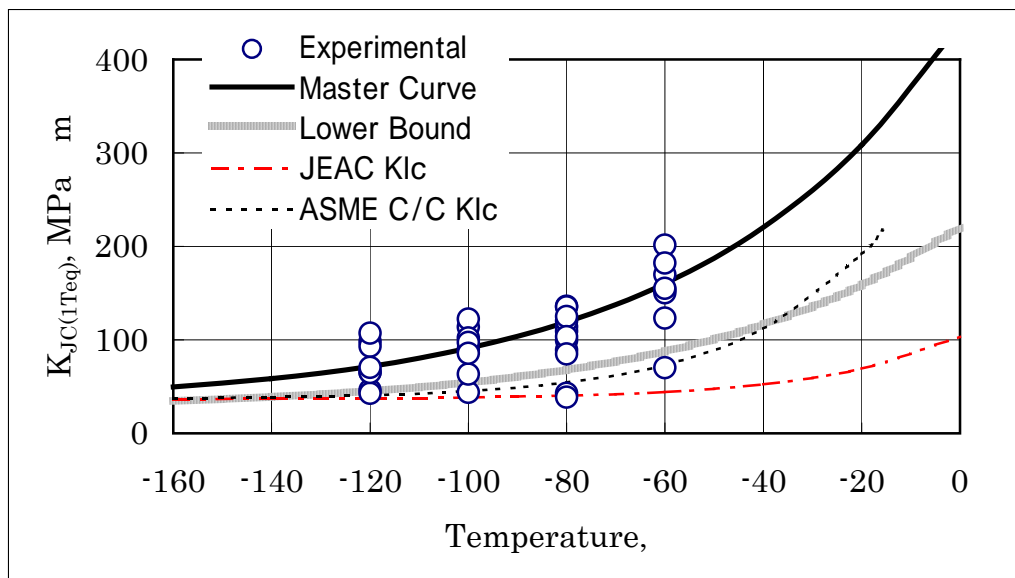


Figure 7-7 Comparison of Lower Bound of Master Curve with Present  $K_{Ic}$  Curves

## 7.3 考察

考えられる原因としては、破壊靱性値を下げるために供試材の P, S の含有量を意図的に増やしたことが、材料に何らかの影響を及ぼしたことが考えられる。こういった局所的な欠陥が存在する場合の破壊靱性値の取扱いに関しては現在のところ基準となる方法はない。しかし、実機相当の仕様では P, S の含有量が低く抑えられ、局所的な欠陥の発生はないと考えられる。よって、マスターカーブ法の適用性を論じるにあたって、これらのデータを除外して差し支えないと考えられる。

以上のことを考慮に入れ、本研究において当該データは除外した。

## 参考文献

- [1] (社)日本電気協会、“原子力発電所用機器に対する破壊靱性の確認試験方法”、JEAC4206-2004、(2004)。
- [2] American Society of Mechanical Engineers, “Boiler and Pressure Vessel Code Section , Rules for Construction of Nuclear Facility Components,” (2001).
- [3] American Society of Mechanical Engineers, “Boiler and Pressure Vessel Code Section , Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Component,” (2004).
- [4] Wallin, K., ”The Scatter in  $K_{Ic}$  Results,” Engineering Fracture Mechanics, 19, (1984), pp.1085-1093.
- [5] Wallin, K., Saario, T., and Torronen, K., ”Statistical Model for Carbide Induced Brittle Fracture in Steel,” Metal Science, 18, (1984), pp.13-16.
- [6] American Standard for Testing and Materials, ”Standard Test Method for Determination of Reference Temperature,  $T_0$ , for Ferritic Steels in the Transition Range,” ASTM E1921-97,(1998).
- [7] American Standard for Testing and Materials, ”Standard Test Method for Determination of Reference Temperature,  $T_0$ , for Ferritic Steels in the Transition Range,” ASTM E1921-02,(2002).
- [8] American Standard for Testing and Materials, ”Standard Test Method for Determination of Reference Temperature,  $T_0$ , for Ferritic Steels in the Transition Range,” ASTM E1921-03,(2003).
- [9] American Standard for Testing and Materials, ”Standard Test Method for Determination of Reference Temperature,  $T_0$ , for Ferritic Steels in the Transition Range,” ASTM E1921-05,(2005).
- [10] American Society of Mechanical Engineers, “Use of Fracture Toughness Test Data to Establish Reference Temperature for Pressure Retaining Materials Section , Division 1,” ASME Code Case N-629,(1999).
- [11] American Society of Mechanical Engineers, “Use of Fracture Toughness Test Data to Establish Reference Temperature for Pressure Retaining Materials Other Than Bolting for Class 1 Vessels Section , Division 1,” ASME Code Case N-631,(1999).
- [12] International Atomic Energy Agency, “Guidelines for Application of the Master Curve Approach to Reactor Pressure Vessel Integrity in Nuclear Power Plants,” IAEA-TRS-429, (2005).
- [13] Miura, N., Soneda, N., and Hiranuma, N., “Application of Master Curve Method to Japanese Reactor Pressure Vessel Steels-Effect of Specimen Size on Master Curve,” Proceedings of the 30<sup>th</sup> MPA Seminar in Conjunction with the 9<sup>th</sup> German-Japanese Seminar, pp. 1.1-1.11, (2003).

- [14] Funakoshi, H., Kanazawa, Y., Hirano, T., Kojima, N., Matsumoto, K., Soneda, N., and Miura, N., "Application of the Master Curve Method to the Japanese RPV Materials," ASME PVP2005-71629, (2005).
- [15] 三浦、曾根田、新井、土肥、"国産原子炉压力容器鋼 SFVQ1A に対するマスターカーブ法の適用性検討"、電中研研究報告、Q04020、(2005)。
- [16] 三浦、曾根田、新井、土肥、"マスターカーブ法による国産原子炉压力容器鋼の破壊靱性評価"、電中研研究報告、Q05022、(2006)。
- [17] Wallin, K., "Statistical Modeling of Fracture in the Ductile to Brittle Transition Region," Defect Assessment in Components – Fundamentals and Applications, ESIS/EF9, Blauel, J. B. and Schwalbe, K. –H., Eds., pp.415-445, (1991).
- [18] 日本工業規格、"压力容器用調質型マンガンモリブデン鋼及びマンガンモリブデンニッケル鋼鋼板"、JIS G 3120-2003, (2003).
- [19] American Standard for Testing and Materials, "Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness", ASTM E1820-01, (2001).
- [20] Sokolov, M. A., Nanstad, R. K., " On Bias in  $T_0$  Values Derived with Compact and PCVN Specimens", ASME PVP2004-2306, (2004).
- [21] International Atomic Energy Agency, "Application of surveillance programme results to reactor pressure vessel integrity assessment", IAEA-TECDOC-1435.
- [22] (社)日本電気協会原子力専門部会、"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 4206-2000、(2000)。
- [23] (社)日本電気協会、"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 4206-2000 追補版、(2005)。



# 謝辭

本研究は電力中央研究所との共同研究として進めて参りましたが、電力中央研究所の上席研究員の三浦直樹さんには1年間通して大変お世話になりました。それまで破壊力学の理解が乏しかった私に対してもさじを投げることなく、極めて初歩的な質問から丁寧に答えていただきました。おかげさまで卒業研究をやり抜くことができ、破壊力学という分野に少なからず興味も芽ばえました。本当にありがとうございました。

また、一連の破壊靱性試験の実施にあたり、電力テクノシステムズの鈴木義一さんに大変お世話になりました。試験機の使い方からき裂長さの計測方法に至るまで、手取り足取り教えていただきました。また、ひ弱な私に代わってクリップゲージを試験片に取り付けていただくなど、何から何まで面倒を見てくださって本当にありがとうございました。

そして、指導教員の酒井教授、研究室の泉助教授からは、研究内容のみならず、研究の進め方から論文の書き方に至るまで数限りない助言を頂きました。こうして論文が完成したのもそのおかげだと確信しています。本当にありがとうございました。

はなはだ簡単ではありますが、以上をもって謝辞とさせていただきます。

以上。

p.1~p.51 完  
卒業論文

平成 19 年 2 月 2 日提出  
機械工学科 50239 藤本淳史