

甲高第 3 号証

「第15準備書面」における誤った理解（47-53ページの記述）

と J E A C 4 2 0 6 における破壊靭性評価の根本的欠陥

2019年 6月 26日

井野博満 

名古屋地裁高浜1・2号機運転期間延長取消訴訟 意見書

「第15準備書面」における誤った理解（47-53ページの記述）とJEAC4206

における破壊靱性評価の根本的欠陥

井野博満

（東京大学名誉教授、金属材料学）

2019年6月14日作成

（1）高浜1号機原子炉圧力容器30年目および40年目評価における破壊靱性曲線

「高浜1号機高経年化技術評価報告書」（30年目）（関西電力、2003年12月）および「高浜1号機高経年化技術評価報告書」（40年目）（関西電力、2015年4月）における圧力容器の破壊靱性評価は、日本電気協会規格JEAC4201とJEAC4206にもとづいて実施されている。それらの報告書において、破壊靱性曲線は、それぞれ図1および図2のように示されている。それらの図を見ると、運転開始後60年経過後の破壊靱性予測曲線は、図1および図2において大きく異なっている。その違いを視覚的に明示するために同じ図面に描きこんだのが図3である。

JEAC4206-2007の規程においては、破壊靱性曲線は

$$K_{Ic} = 20.16 + 129.9 \exp [0.0161 (T - T_p)]$$

に示す形になると仮定されており、破壊靱性値の測定結果からパラメータ T_p を決めるとしている。図1および図2に示されているように、その値は、それぞれ $T_p=85^\circ\text{C}$ および $T_p=130.9^\circ\text{C}$ と求められている。精度の高い予測であれば、両者はおおむね一致するはずであるが、その違いはあまりにも著しい。

図2のなかの破壊靱性曲線を求めるに当たって、脆性遷移温度の測定データと破壊靱性値の測定データをどのように解析したかを示しているのが表1である。表1の第一欄には資料番号、第二欄には何回目の監視試験で取り出したかを示す番号、第三欄には破壊靱性値の測定温度、第四欄にはシフト後の温度（その意味は後述）、第五欄には測定された破壊靱性値、第六欄にはその破壊靱性値を満たすように決めた K_{Ic} 曲線のパラメータ T_p の値、第七欄にはそのなかの最大値である $T_p=130.9^\circ\text{C}$ を採用することを示すマーク○が記入されている。

第四欄の「シフト後の温度」とは、破壊靱性測定時のデータを、照射脆化で劣化した状態にある60年時点での破壊靱性値の推定に用いるために導入された温度シフト量を、破壊靱性試験を行った温度（測定温度）に加算した温度である。そのシフト量を求めるために脆性遷移温度予測式が用いられる。すなわち、破壊靱性測定時の脆性遷移温度が60年時点で ΔT_{NDT} だけシフト（上昇）したのであれば、破壊靱性値においても同じだけ上昇した温度で同じ破壊靱性値が観測されるだろうという仮定にもとづいて設定されている。 $\Delta T_{K1c} = \Delta T_{NDT}$ という仮定である。この仮定の問題点については後述する。

(2) 上記破壊靱性曲線の違いについての「第15準備書面」における国側の説明
この違いについて国側は次のように主張する。

「イ 第4回監視試験のデータによる照射脆化予測曲線がそれより前のものと比較し約22°C上方へシフトしたことや、破壊靱性予測曲線について、30年目予測より40年目予測の方が余裕が減少していることは、マージンの設定値がより保守的に変更されたからに過ぎず、これがJEAC4201の問題点であるとする原告らの主張には理由がないこと」(p. 52, I. 7-11)

「・・・、JEAC4201は、マージンの設定値がより保守的に変更されていることから、照射脆化予測曲線が以前の評価結果に比して上方にシフトし、破壊靱性予測曲線が以前の評価結果に比して余裕が減少しているというものに過ぎない」(p. 53, I. 13-17)。この主張は次節以下で述べるように間違っている。

同様の主張は、山田知穂原子力規制部長の国会答弁（2016.5.12、衆議院原子力問題調査特別委員会での質問への回答）でもなされている。「30年目と40年目の評価で大きな違いがあるとご指摘をいただきました。・・・この大きな違いが出ている理由としては、評価するために適用しております規格が、30年目の評価の際には、日本電気協会の原子力発電用機器に対する破壊靱性の確認方法JEAC4206というものの2000年版が適用されてございます。一方、40年目の評価におきましては、同規格が改訂されてございまして、最新のものということで、・・・JEAC4206-2007の2013年追補版というものが適用されています。これは技術の進歩、新しい知見を反映してより新しい評価方法を取り入れたということで、この二つの評価方法の違いとしては、2013年追補版という方がより厳しいというか、保守的な評価が出るようにという規格になってございます。」（同委員会議事速報、p. 18）

なお、山田規制部長の発言は、「原子炉構造材の監視試験方法」JEAC4201と「破壊靱性確認方法」JEAC4206とを混同している。正しくは、「原子炉構造材の監視試験方法」JEAC4201-2000とJEAC4201-2007の2013年追補版と書くべきで、その違いが「破壊靱性確認方法」JEAC4206に定められている破壊靱性遷移曲線の違いに反映されたと書くべきところである。ただし、その主張は、国の第15準備書面での主張と同じく、次節以下に述べるように間違っている。

(3) 上記破壊靱性曲線の違いについての筆者らの解析と導かれた結論

国の主張では、30年目評価と40年目評価の違いは、評価が安全側になるように用いる規程をより保守的になるように改訂したためで、JEACの規程に何ら問題があることを示すものではないというのである。

そこで問題をはっきりさせるために、表1のデータをくわしく解析する。表1は、JEAC4201-2007【2013年追補版】にもとづいて ΔT を求めるために作成されたものである。その際、第四回までのすべての監視試験データを用いて最大となる ΔT (=130.9°C)が求められている。表1のプロセスを視覚的に分かりやすくするために図4を作成した。

この図で、白抜きのデータ点が測定時の温度と破壊靱性値を示し、塗りつぶしで示したデータ点が温度シフト後のものである。両者を線でつないで示した。この図の右側の曲線が第

4回監視試験まですべてのデータを使って描いた曲線である。この曲線から分かるように、もっとも低い破壊靱性値を与えるデータは第4回監視試験で測定されたデータである。

ところで、30年目評価で得られた破壊靱性曲線は第2回監視試験までの結果を用いて作成されたものであるという。そこで、表1と同じ解析を第2回までのデータを用いておこなえば、用いた規程は同じ JEAC4201-2007【2013年追補版】であるから、規程を変えたことによる違いは消去されることになる。その結果が図4の左側の曲線で、第2回までのデータ点をすべて下限包絡するような曲線を描いてある。この曲線の ΔT_0 は 106.6°C であり、40年目評価の 130.9°C よりはるかに低い値である。

図4の左側の曲線の ΔT_0 は 106.6°C であり、30年目評価の $\Delta T_0 = 85^\circ\text{C}$ より約 22°C 大きくなっている。これはその後に得られた高照射領域の脆性遷移温度測定データを入れ込んで脆化予測式を改定した（反応速度式の係数を手直しした）効果である。しかし、問題は、40年目評価での破壊靱性予測曲線は、それでは説明できない低い破壊靱性予測曲線だということである。これは予測を超える悪い破壊靱性値が第4回監視試験で得られた結果であり、けっして規程の変更に帰すことはできない差異である。

のことから結論されることは、30年目評価と40年目評価の大きな違いは、30年目評価後に得られた2種類の観測データ、すなわち、予測を超える高い脆性遷移温度および低い破壊靱性値によるものである。JEAC4201 の改訂は、そのうちの脆性遷移温度の新しいデータ（高照射領域のデータ）を取り入れた変更だったが、それでは不十分だったのである。

規程を変えたから30年目と40年目評価に違いが出たのではなく、その逆である。高照射領域で想定外の悪いデータ（=高い脆性遷移温度の観測）が得られたので規程を改訂したのである。だが、それだけでは規程の重大な欠陥を補うことはできなかったのである。

(4) 日本電気協会規程 JEAC4206 における破壊靱性評価の重大な欠陥

規程の重大な欠陥とは、評価を行う際に、 $\Delta T_{K1c} = \Delta T_{NDT}$ という仮定の下で温度シフトをおこなうとしていることである。同じ破壊現象を、破壊に耐える力で見るのが破壊靱性試験であり、エネルギー吸収値で見るのがシャルピー試験である。同じ現象に起因する測定量であるから、その温度シフトが等しいだろうと考えることは妥当に思える。しかし、両者が等しくなるという理論的根拠はなく、実際、相関はあるものの等しくはない。

図5は、多くの原発における観測から得られた破壊靱性値のシフトと脆性遷移温度シフトとの関係を示したNRCのデータベース（NUREG-1807 “Probabilistic Fracture Mechanics - Models, Parameters, and Uncertainty Treatment Used in FAVOR Version 04.1U.”, p86, NRC）である。縦軸は、破壊靱性値の解析手法のひとつであるマスターカーブ法で求められた ΔT_0 のシフト量であり、 ΔT_{K1c} と同種の量である。 ΔT_0 と ΔT_{NDT} とは大きくばらついているが、比例関係にあるとして解析すると、溶接金属のフィッティング直線の勾配は 0.99 で ΔT_0 と ΔT_{NDT} とがほぼ等しいのに対し、鋼板（plate）や鍛造（forging）でつくられた圧力容器母材では、その勾配は、それぞれ 1.10 と 1.50 であり、 $\Delta T_0 > \Delta T_{NDT}$ の傾向にある。このことから、圧力容器母材の破壊靱性値に関しては、 ΔT_{NDT} に相当するだけシフトさせたのでは ΔT_{K1c} のシフト量として小さすぎ、温度シフト量は 1.1 ないし 1.5 倍でなければならないことになる。この事実が意味

するところは、温度シフトがおこなわれるすべてのデータにおいて、そのシフト量が過小であること、とくに、シフト量が大きい照射初期のデータ点ほどその度合いが大きくなるということである。

図6は、九州電力が高経年化意見聴取会に提出した玄海1号炉の破壊靱性遷移曲線 (K_{IC} 曲線) とその基礎となるデータ点を示したものである(九州電力:第10回高経年化意見聴取会資料6、2012年3月14日)。図6に描かれている曲線は、開示されたデータ点をすべて下限包絡するように決められている。この図のデータ点をよくみると、下限包絡線を決めているのは、最新の第4回のデータ点であり、それら4点は包絡曲線の近くにあることが見て取れよう。図中で温度シフト量がもっとも小さいデータ点が第4回データである。それに比べ、それ以外の多数のデータ点はすべて曲線の左上方にある。実は、この玄海1号炉だけでなく、筆者が知り得た範囲で検討した美浜1号、2号、伊方2号はいずれも照射量の大きい最新のデータ点が、下限包絡線を決めていることがわかった(井野博満:「原発の経年劣化—中性子照射脆化を中心にー」、『金属』Vol. 83 (2013), No. 2-4)。高浜1号炉においても同じく第4回監視試験データが下限包絡曲線を決めていることはすでに見たとおりである。これらの事実は、偶然とは考えにくく、上述したようにシフト量が足りないことが原因だろうと考えられる。

これらの考察から、高浜1号炉について求められた運転開始後60年後の破壊靱性予測曲線は、40年目評価においても、60年後の破壊靱性を正しく評価するものとは言えないと結論される。

(5) JEAC4206-2007 が定める破壊靱性曲線(下限包絡曲線)に対する根本的疑問

ところで、このような温度シフトをおこなわざるを得ない理由はどこにあるのだろうか。それは、ある照射量に対応した破壊靱性値の測定数があまりに少ないからである。高浜1号炉・2号炉においても、監視試験用カプセルに入れられているCT試験片の数は、母材・溶接金属それぞれ2個ずつに過ぎない。

破壊靱性試験は、その値が大きくばらつくことが知られている。測定の信頼度は、俗に「倍・半分」などと言われている。脆性から靱性へと移り変わる遷移温度領域において、そのばらつきは特に大きい。

これは、シャルピー試験によって得られる脆性遷移温度のばらつきとは性質を異にする。シャルピー試験もばらつきが大きい試験法であるが、温度を変えておこなう10点を超える測定データから脆性遷移曲線を決め、その曲線の値が41Jとなる温度を脆性遷移温度とするので、ばらつきによる測定誤差は数°C程度である。(曲線の形が歪んだり、照射量に対する脆性遷移温度測定値が変動するのは、測定誤差以外の要因による。)

さて、下限包絡曲線という概念は、多数の(原理的には無限個の)破壊靱性測定値をすべてその曲線の上方に包み込み、その曲線より下に測定値が来ることはない、として決められる曲線である。そうであるから、き裂先端の応力(Stress Intensity Factor、応力強度因子 K_I) が下限包絡曲線(破壊靱性曲線)より下にあれば、き裂は進展しないと断定されるのである。

ばらつきの大きい破壊靱性値に対して、3つや4つの測定データで、本来、下限包絡曲線

が描けるわけはない。少なくとも 20 点前後のデータが必要であろう。そこで、照射量の異なる状態での破壊靭性測定データを援用するために温度シフトをおこなうこととしているのである。その温度シフトに欠陥があることは前述した。

加えて、高浜 1 号炉については。（公表されている限りにおいて）監視試験のデータ点があまりにも少なく、得られた K_{Ic} 曲線が下限値を与えていたという評価は、二重に無理である。このことに関して以下に事実に注意を喚起する。

「高浜発電所 1、2 号炉劣化状況評価（原子炉容器の中性子照射脆化）補足説明資料」（平成 28 年 6 月 16 日、関西電力株式会社）において、高浜 1 号炉については 39 ページの表 1.2 に、60 年時点における ΔT 算出結果（深さ 10 mm の想定き裂）が示されており、そこには 9 点の破壊靭性値観測データが示されている。そのうち、5 点が母材、4 点が溶接金属である。一方、高浜 2 号炉については、79-80 ページの表 1.2 に、同じく ΔT の算出結果と 37 点の破壊靭性観測データが示されている。そのうち、23 点が母材、14 点が溶接金属である。

両者を比較して、高浜 1 号炉のデータ点の少なさに驚く。母材について言うと、4 回の監視試験のうち、第 1 回と第 3 回のデータが合わせて 5 点あるのみで、このような少ないデータでまともな破壊靭性評価ができるとは思われない。これがすべてのデータであるのか、それ以外の監視試験はデータが取れなかったのか、事実を公表すべきである。

なお、高浜 1 号炉など各原子炉圧力容器の破壊靭性遷移曲線は、母材と溶接金属の破壊靭性値観測データを合わせて描かれているが、両者は本来それぞれ別個に評価すべきものである。因みに、脆性遷移温度予測曲線はそれぞれ別個に求められている。破壊靭性評価において合算しておこなってよいという根拠は薄弱であり、データ点が少ないとカバーする便法としか思われない。

謝辞 この意見書を作成するに当たり、解析と作図にご協力いただいた青野雄太氏（久留米高専准教授）に感謝する。

高浜1号炉・2号炉運転延長取消訴訟
意見書図表

井野博満

(2019年6月14日作成)

図1 関西電力「高経年化技術評価報告書（30年目）」（2003年12月）記載の図

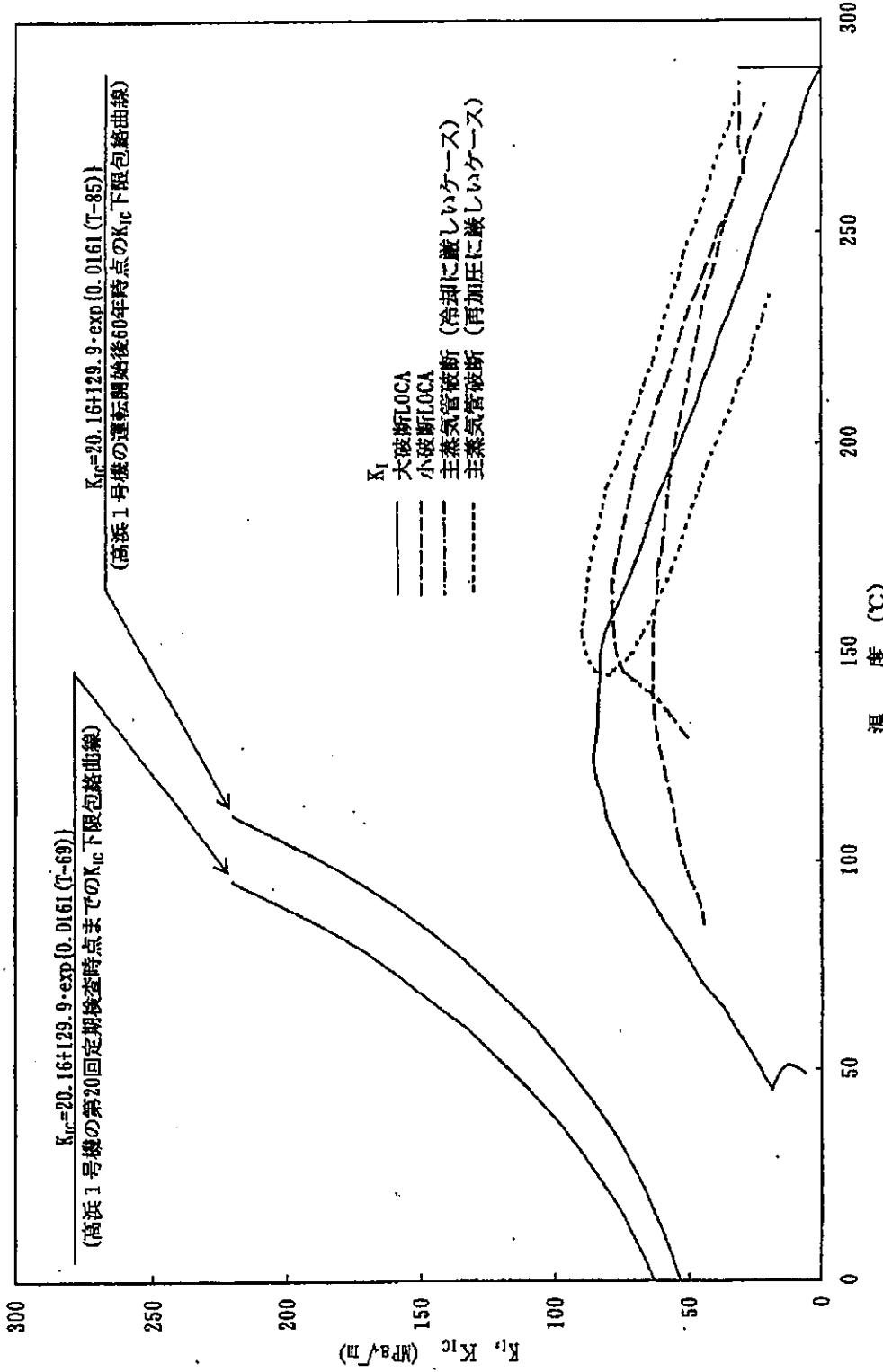


図2 関西電力「高経年化技術評価の記載」(2015年4月)告白書(40年目)

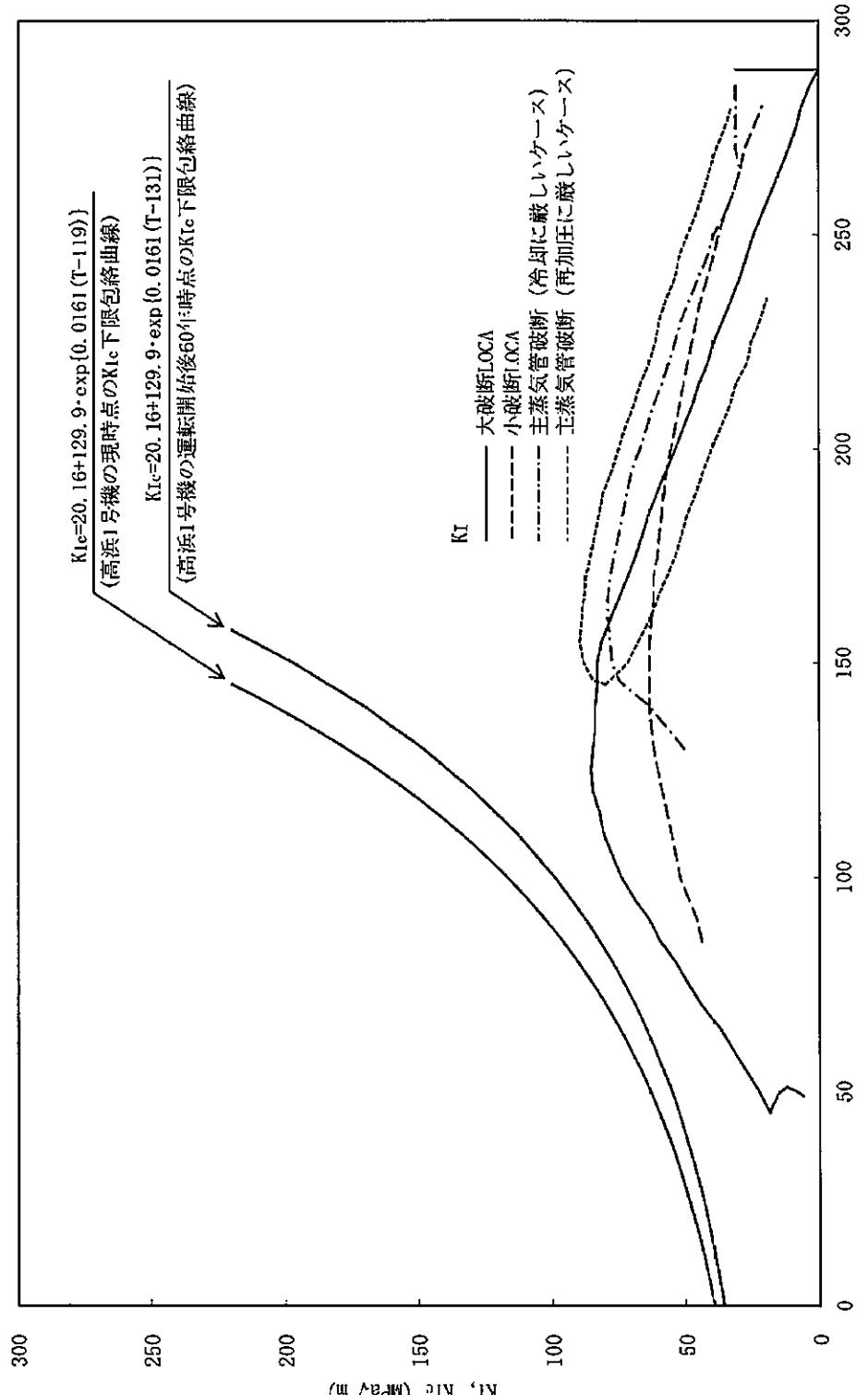


図2.3-4(1/3) 高浜1号炉 原子炉容器胴部(炉心領域部)中性子照射脆化に対するPTS評価結果
〔深さ10mmの想定き裂を用いた評価〕

〔深さ10mmの想定き裂を用いた評価〕

図3 同じ60年後の予測を比較した図

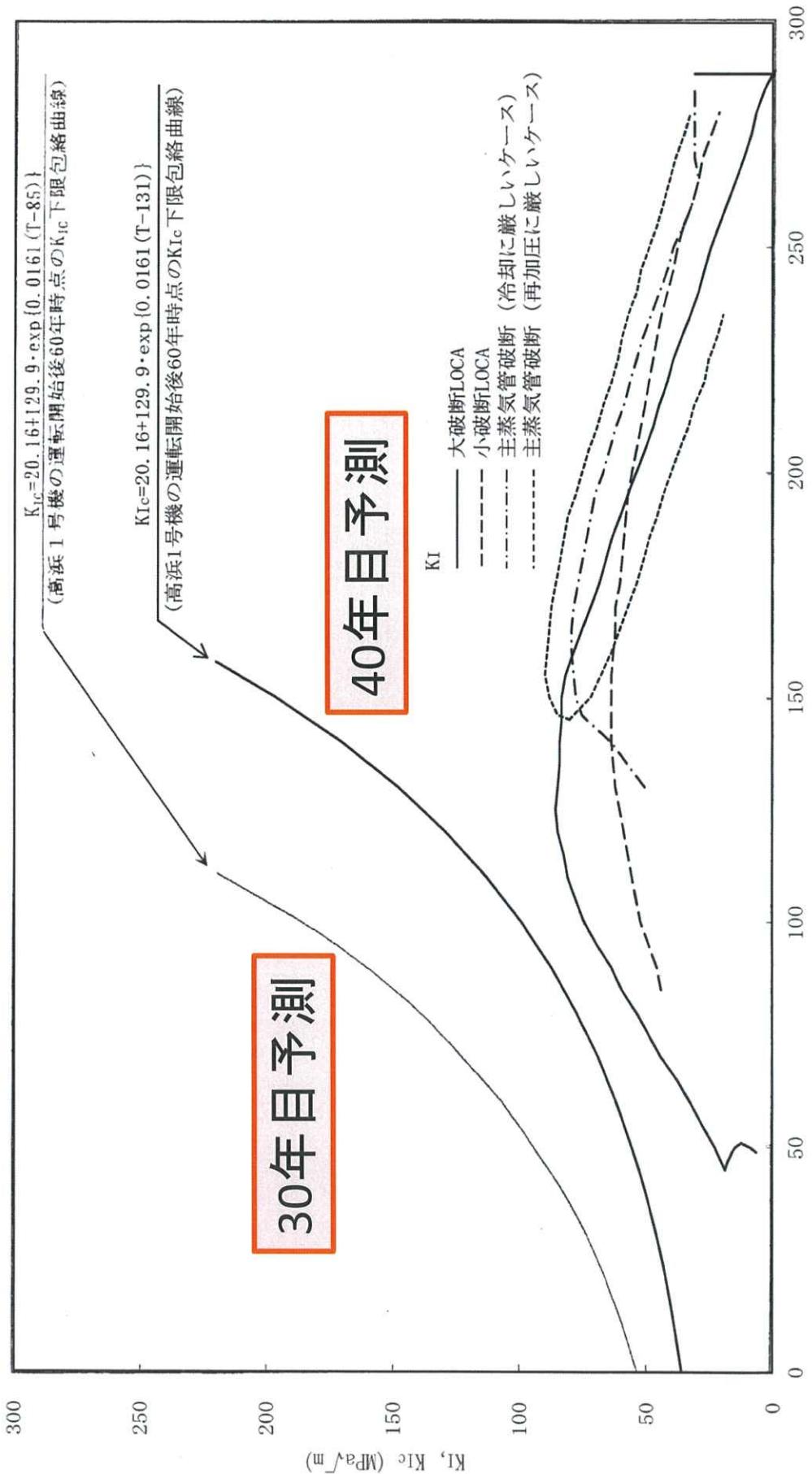
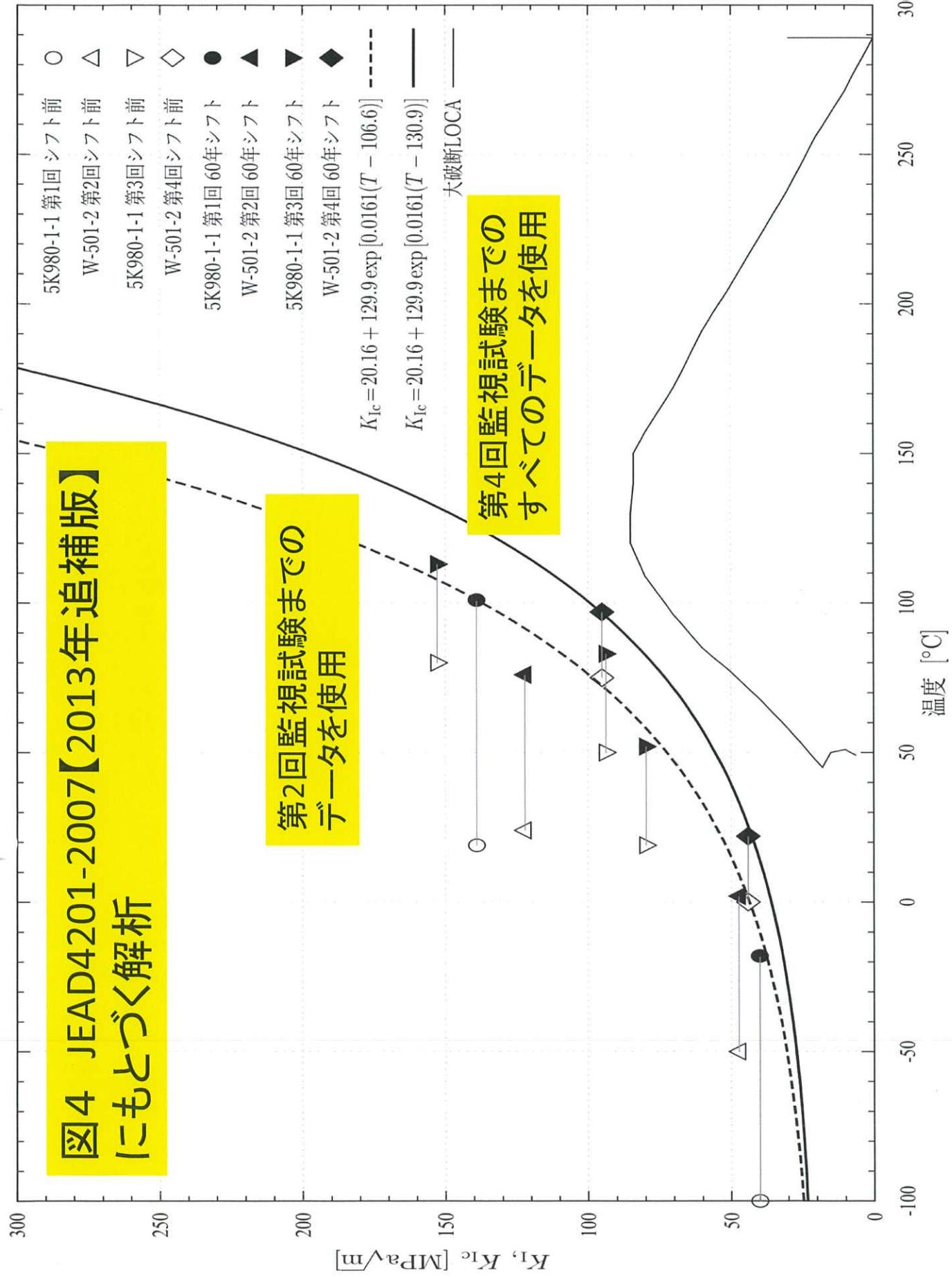


図2.3-4(1/3) 高浜 1号炉 原子炉容器胴部(炉心領域部) 中性子照射脆化に対する PTS 評価結果
〔深さ10mmの想定き裂を用いた評価〕

表1 高浜1号炉下限包絡曲線決定プロセス(高経年化技術報告書40年目に記載)

表1.2 高浜1号機の60年時点におけるTp算出結果
(深さ10mmの想定き裂を用いた評価)

チャージ名	監視試験回次	シフト前温度(°C)	シフト後温度(°C)	K _{IC} (MPa√m)	T _p (°C)	評価
5K980-1-1	1	19	101	139.0	106.6	
5K980-1-1	1	-100	-18	40.0	98.8	
5K980-1-1	3	80	113	153.0	112.0	
5K980-1-1	3	50	83	94.0	118.5	
5K980-1-1	3	19	52	80.0	100.5	
W-501-2	2	24	76	122.0	91.5	
W-501-2	2	-50	2	47.0	100.3	
W-501-2	4	75	97	95.0	130.9	○
W-501-2	4	0	22	44.0	127.0	



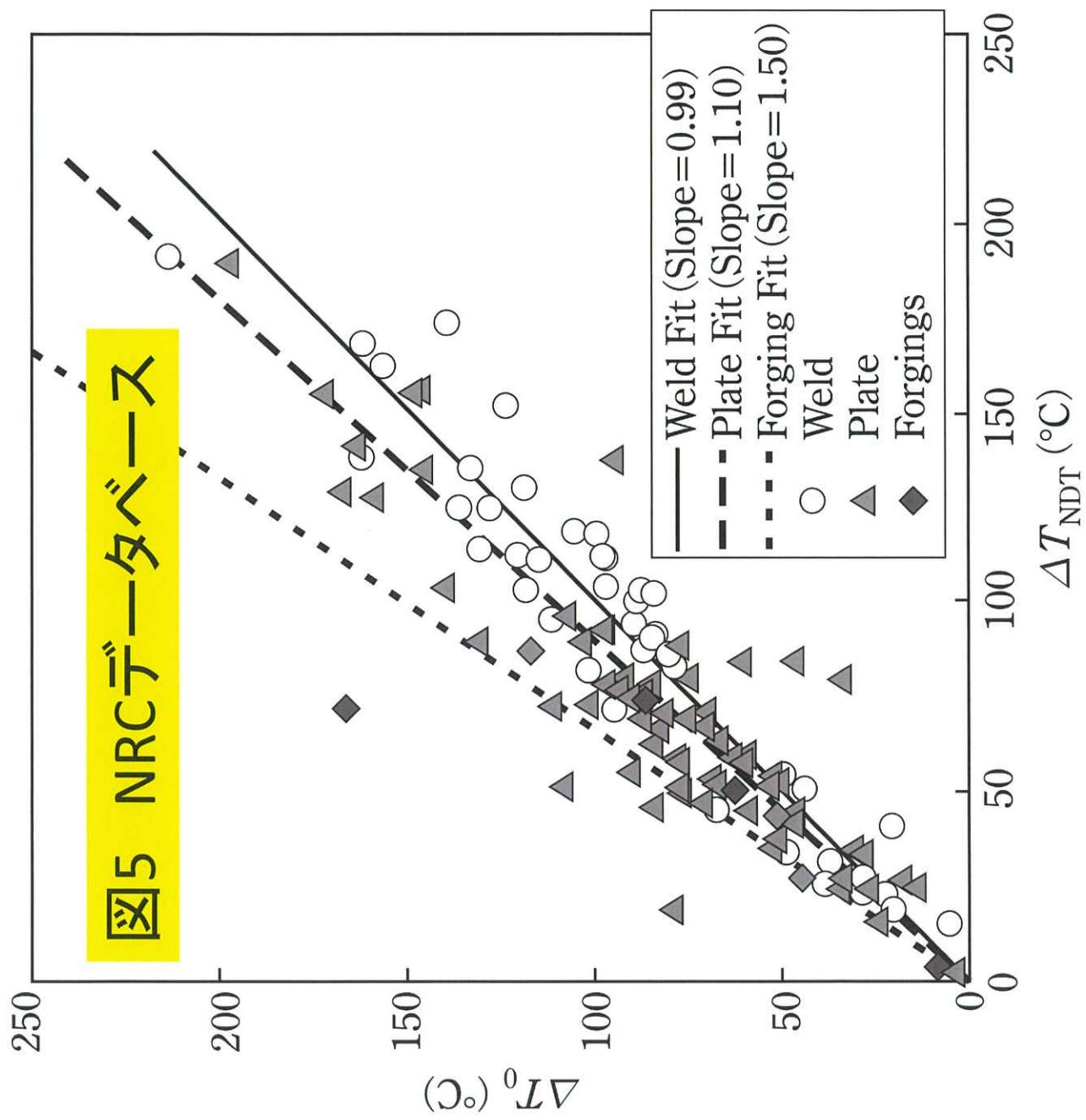


図6 玄海1号炉破壊靭性曲線解析プロセス

- 60年時点の予測値（評価対象データ）
- 60年時点の予測値（0°C未満で対象外）
- ◆ シフト前のデータ

