

669.14.018.29: 539.125.5: 539.56: 669.15'74-194.2: 620.178.7: 517.3

討17 電位差法による原子炉圧力容器用鋼材の J_{Ic} , $J-R$ カーブの測定と
中性子照射脆化評価への適用

日本原子力研究所 東海研 ○古平恒夫 松本正勝
中島伸也

1. 緒言 原子炉圧力容器の構造安全性の評価には、中性子照射前後における鋼材の破壊靱性を知る
ことが不可欠である。照射材の破壊靱性試験を実施するには、原子炉内スペース、ホットセル内での操
作性等の制約から小型試験片を用いる必要があり、さらに、簡便な手法で、なるべく少数の試験片で破
壊靱性が求まることが望ましい。著者らは、 J_{Ic} 試験を有望と考へ一連の研究を実施してきた¹⁾。
本報告では、破壊開始点及びき裂進展量 (Δa) の測定手段として直流電位差法を用い、単一試験片に
より J_{Ic} 値及び $J-R$ カーブを求める手法を検討し、さらに、遷移領域から上部棚域 (へき間から延性
破壊) にわたって J_{Ic} の試験片サイズ依存性、シャルピ衝撃性質との相関等、中性子照射脆化を評価す
るための J_{Ic} 試験法の適用性を検討した結果を紹介し、併せて、サーベイランス試験に関する一試案を
提案するものである。

2. 電位差法の理論 Johnson²⁾ は、図1に示す中央切欠きを有する有限板に
おいて、解析的検討を加え以下の解を得た。

$$V(a)/V(a_0) = \cosh^{-1} \{ (\cosh \pi Y/w) (\cos \pi a/w) \} / \cosh^{-1} \{ (\cosh \pi Y/w) (\cos \pi a_0/w) \} \dots (1)$$

ここで、 V は切欠きの両側の距離 Y における2点間の電位差であり、 a_0 は予き裂
長さ、 a は任意のき裂長さ、 w は試験片幅である。この式から、き裂長さとの電位
差の関係は、材料、温度にかかわらず、幾何学的形状、寸法のみ依存するこ
とがわかる。したがって、定量的なき裂長さの測定が電位差変化を知ることに
よって可能となる。

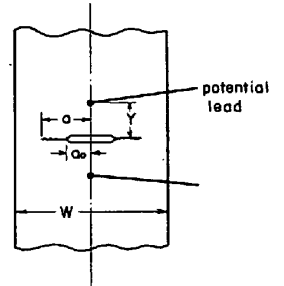


図1 切欠き付有限板

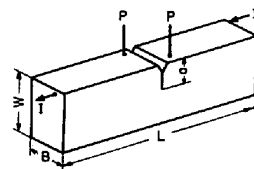
3. 実験方法

表1 供試材の化学成分

3.1 供試材及び試験片 本実験には4種
類の圧力容器用鋼材を使用した。供試材の化
学成分を表1に示す。これらの供試材の $T/4$
部より、シャルピ衝撃試験片、3点曲げ試験
片等采取了。図2に今回用いた3点曲げ
試験片の形状、寸法を示す。さらに、中性子

記号	鋼種	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
A	A533B-1	0.22	0.21	1.35	0.006	0.004	0.66	0.14	0.50	0.03
B	A533B-1	0.18	0.22	1.48	0.007	0.007	0.66	0.20	0.57	0.01
C	A508-3	0.18	0.27	1.35	0.007	0.005	0.76	0.11	0.50	0.04
D	2 $\frac{1}{2}$ Cr-1Mo	0.16	0.29	0.54	0.013	0.007	0.04	2.13	1.01	0.07

照射脆化を模擬するために、A材の $T/4$ 部より角材を切り出し、石英
管に真空封入後、 $900^{\circ}\text{C} \times 1\text{hr}$ 保持、水冷の熱処理を施し、シャルピ
3点曲げ試験片等と同様に採取した。なお、これら試験片の長手方向
は、圧延方向に直角とし、ノッチは板厚方向に加工した。3点曲げ試
験片は、ASTM E399に準拠し、室温にて疲れき裂を導入した。さらに、
3点曲げ試験片には、直流電位差法と適用するため、通電用端子及び
電位差検出用端子をハンダ付けにより図2のI及びPで示す位置にそれぞれ取
り付けたが、とくに電位差
端子間距離については、試験片間で相似な位置になるよう配慮した。



B	W	L	a
10	10	55	~5
20	20	110	~10
20	40	200	~20

Unit : mm

図2 3点曲げ試験片形状、寸法

3.2 3点曲げによる J_{Ic} 試験 3点曲げ試験は、電気油圧サーボ式の容量10トンの試験機を使用し、
クロスヘッド速度 $0.5 \sim 1.0 \text{ mm/min}$ で、試験温度は -90°C から $+100^{\circ}\text{C}$ の間、数温度で行った。荷重支点間隔
は試験片幅 W の4倍とし、試験中は試験片中央の荷重点における荷重方向の変位 (以下変位という)
を試験機下部のアクチュエータに取り付けられた変位計により検出し、ロードセル出力と合わせて荷重 -

変位曲線を X-Yレコーダに記録し、以後の解析に供した。
破壊開始点を求めるために、今回は2つの方法を採用した。1つは Rカーブ法であり、他の1つは直流電位差法である。後者においては、図3に示すように、試験片端に一定の直流電流(10A~30A)を流し、き裂近傍に取付けた電位差端子より電位差を検出して X-Yレコーダに入力し、この電位差-時間曲線の傾きの急変する点を破壊開始点とした。J値は、以下の Riceら³⁾による簡便式により求めた。

$$J = 2A/B(W-a) \quad \text{----- (2)}$$

ここで、A:荷重-変位曲線下の面積, B:試験片厚さ, W:試験片幅, a:き裂長さである。

3.3 き裂長さ a, き裂進展量 Δa の測定 3点曲げ試験終了後、試験片を液体窒素に浸漬して取出し、衝撃的に脆性破壊させるか、または疲労により破面に現出させ、き裂長さ a 及びき裂進展量 Δa の測定に 1/1000目盛の工具顕微鏡を用いて行った。き裂長さは ASTM E399 に準拠し、図4に示すように3ヶ所の平均とし、一方 Δa は ASTM の J_{IC} 試験方法案を参考にし、表面から裏面にかけて等間隔に9点の測定を行い、平均値を Δa とした。

4. 実験結果及び考察

4.1 電位差法及び Rカーブ法による J_{IC} 値の測定

3点曲げによる J_{IC}破壊靱性試験時の荷重-変位曲線及び電位差変化曲線の代表例を図5に示す。同図は B材の場合であり、室温に 20A を通電している。電位差はあらかじめ試験片の初期電位差をオフセット回路によりキャンセルし、零からスタートするよう配慮した。電位差変化は全断面降伏時に屈曲点を生じ、以後直線的に増加し、この直線からずれる才2の変化点があり、その後より急勾配で電位差が増加している。著者らの一連の実験²⁾により、この才2の変化点が延性破壊の開始点とみなして差し支えないことが明らかであり、今回もこの点をもって破壊開始点とした。そして、この点を荷重-変位曲線上に読み取り、(2)式により J_{IC} 値と求めた。

A材の 20×40×200mm の試験片の電位差法による J_{IC} 試験結果を表1に示す。いずれも valid J_{IC} 基準を満たしており、平均 350 KJ/m² の J_{IC} 値が得られた。図6は、A材の同じ形状寸法(20×40×200mm)の試験片における Rカーブ法による室温の試験結果を示している。同図から、ASTM 推奨の鈍化直線(2σ_{YS}Δa)は実験点と合わず、電位差法による J_{IC} よりも高めの値を与えることがわかる。

表2 電位差法による J_{IC} 試験結果(KJ/m²)(室温)

371.6	361.2	平均
245.2	423.6	350.4

一方、著者ら(3.7σ_yΔa)¹⁾及び小林ら(52W=95 J/E)の式による J_{IC} 値は、電位差法の結果と良好な一致を示すことが明らかとなった。

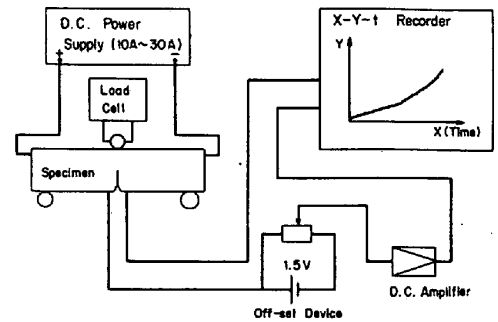


図3 電位差測定回路図

$$a_0 = \frac{a_1 + a_2 + a_3}{3}$$

Δa: average value of nine points from front to back surface.

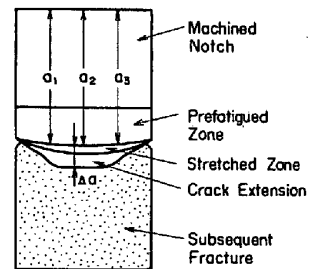


図4 a, Δa の測定位置

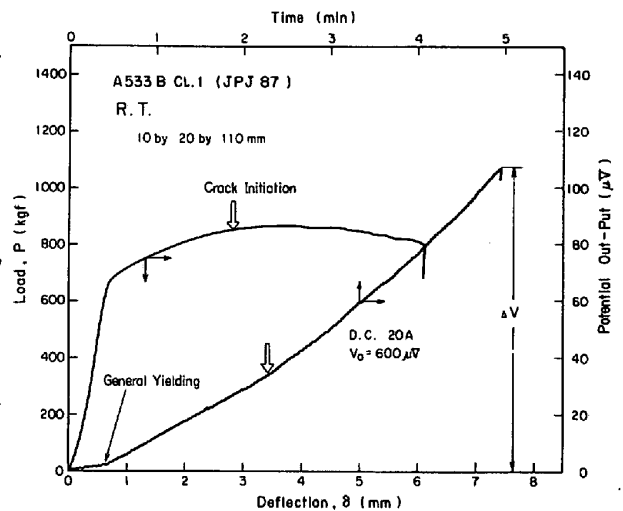


図5 電位差法による3点曲げ試験結果の一例

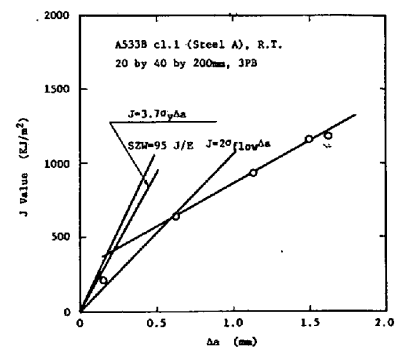


図6 Rカーブ法による J_{IC}

4.2 電位差法によるJ-Rカーブの推定 (1)式から明らか

かなように、3点曲げ試験の場合でも電位差変化より Δa を求めるとは原理的に可能であるが、疲れき裂伝播の場合に比べてき裂先端の塑性域が極端に大きく、この影響を把握しておく必要がある。そこで、 $-60^{\circ}\text{C}\sim+100^{\circ}\text{C}$ の間の数温度において表1に示す4鋼種を用い、直流電位差法を適用して、3点曲げ試験を実施した。試験中は図5のように電位差変化を記録し、電位差変化量としては全変化量 ΔV とした。また Δa は図4に示す要領で測定した。そして、 $(V_0+\Delta V)/V_0$ と $(a_0+\Delta a)/a_0$ の関係プロットすると図7のようになる。

ここで、 V_0 及び a_0 はそれぞれ初期電位差及び予き裂長さである。同図より、電位差端子位置も含めた試験片の平面寸法が相似な場合は、鋼種、試験温度にかかわらずバラツキの少ない一定の傾向が認められる。以後これをマスターカーブと呼ぶ。なおき裂長さ a と電位差変化との関係が1:1ではなく $(V_0+\Delta V)/V_0$ 側にあるのは、疲れき裂伝播試験を実施して検討した結果、塑性域の影響があることが今回明らかとなった。

図8は、このマスターカーブを用いて、単一試験片によりJ- Δa の関係 J を求める手法を示したものである。荷重-変位曲線よりJ値を求め、電位差変化曲線よりマスターカーブを介して Δa を知り、J-Rカーブを推定する方法である。

図9は、上記の電位差法による単一試験片で求めたRカーブと実測データと比較して示す。20x40x200mmのA材を用い、室温の結果である。データ点は、同一形状寸法の多数の試験片を種々の変位まで負荷してJと Δa を求めたものであり、いわゆる Multiple Specimen 法による結果である。電位差法によるRカーブは、最大変位した試験片(図中の黒印)の荷重-変位曲線及び電位差変化曲線より図7のマスターカーブを用いて求めたものである。同図から、 Δa の小さいところではやや合わないが、 Δa が大きくなると予測と実測Rカーブが良好な一致を示し、単一試験片でRカーブを推定することが可能であることが明らかとなった。

4.3 中性子照射脆化評価への適用とサーベイランス試験に関する一試案

前述のように、原子炉圧力容器の健全性を調べるために、炉内に各種試験片を装荷し、定期的に炉外に取出してサーベイランス試験を行っているが、炉内スペース、ホットセル内での操作性等の制約から小型試験片でなければならない。そこで、A材(以下受領のまま材)及び中性子照射脆化を模擬して低靱性の鋼材を得るためにA材を熱処理した熱処理材を用い、遷移領域から上部棚域にわたって小型3点曲げによる J_{IC} 試験法の中性子照射脆化評価への適用性を検討した。

図10は、受領のまま材及び熱処理材のシャルピ衝撃試験結果を示している。同図から、熱処理を施したことにより、遷移温度が上昇し、上部棚エネルギーが低下していることが明らかである。この傾向は、

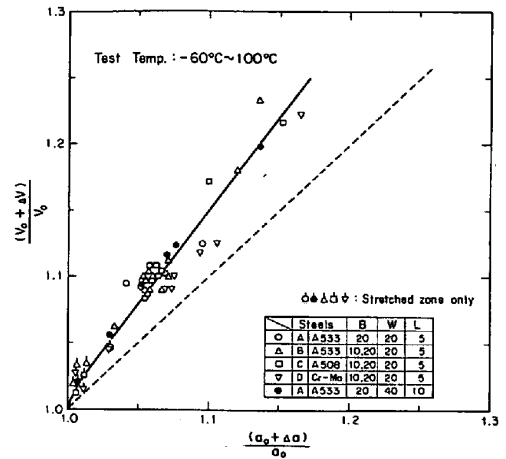


図7 き裂長さ a と電位差変化との関係(マスターカーブ)

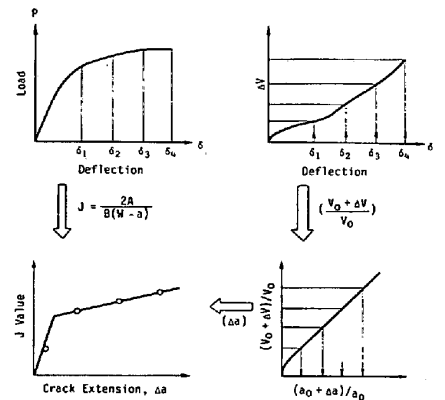


図8 マスターカーブを用いたJ-Rカーブの推定方法

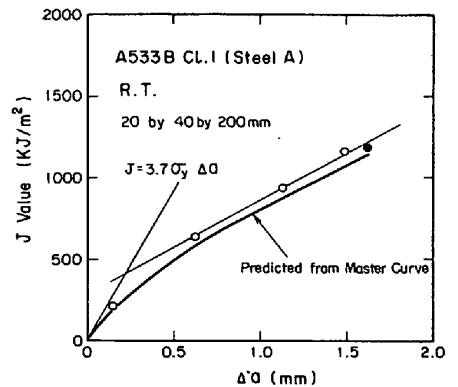


図9 電位差法によるRカーブと実測データとの比較

中性子照射脆化挙動と全く一致しており、熱処理が成
功裡に行われたことがわかる。今回の結果を、従来か
ら中性子照射脆化の評価に用いられている41J⁴⁾で
遷移温度の上昇を求めると70°Cとなる。一方、上部
棚エネルギー低下率は約30%である。

図11は3点曲げによるJ_{IC}試験結果を示す。試験片
は主に10⁰及び20⁰の2種類を用いており、傾向をそ
れぞれ破線及び実線で示す。なお、J値よりK値への
変換は $K = \sqrt{JE/(1-\nu^2)}$ により行った。遷移領域では、
ほぼすべてへき開破壊であり、受領のまま及び熱処理
材ともにデータはvalid J_{IC}基準を満たすのにJ_{IC}に試
験片サイズ依存性が認められる。しかし、遷移温度の
上昇を100MPa√mのレベルと比較すると、

シフトは試験片サイズにかかわらずほぼ
同一で、なおかつ、図10のシャルピの遷移
温度の上昇と良く一致するという重要な知
見が得られた。上部棚域においては、破壊
モードはデンプルであり、受領のまま材
では口印(20×40×200mm)がJ_{IC}となるが、
他の2種類はvalid J_{IC}基準を満たさない。
一方、熱処理材では10⁰, 20⁰ともにJ_{IC}が
得られている。受領のままと熱処理材との
間で破壊靱性の低下率を比較すると、試験
片によりその率は異なり、大型から順番に45%
、39%、34%となり、10⁰のシャルピ上部棚エ
ネルギーの低下率と同等になることがわかる。

したがって、上部棚域ではシャルピ吸収エネルギーからの破壊靱性の
低下率の推定は危険側にあり、J_{IC}試験を適用しなければならぬ。

図12は、以上の結果をもとに、サーベイランス試験に対する一試
案を示したものである。すなわち、照射前に遷移領域から上部棚域
にかけてシャルピ遷移曲線及び破壊靱性の温度依存性を求めておく。
そして、遷移領域では、サーベイランス試験としてシャルピで41J
におけるシフト(ΔT_{Cv})を求め、それから破壊靱性を100MPa√mのレ
ベルでこの分だけずらせるシャルピ主体の方法を採用する。一方、上
部棚域では、サーベイランス試験片としてJ_{IC}試験片を組み込み、
照射前後ともにJ_{IC}試験を実施して評価する方法である。

参考文献

1) 古平, 中島, 松平, 鉄と鋼, 64 (1978), 7, 877-890, 2) H.H. Thomson,
Mat. Res. and Standards, 5 (1965), 442-445, 3) J.R. Rice et al,
ASTM-STP-536 (1973), 4) 日本電気協会 JEAC #201 (1980)

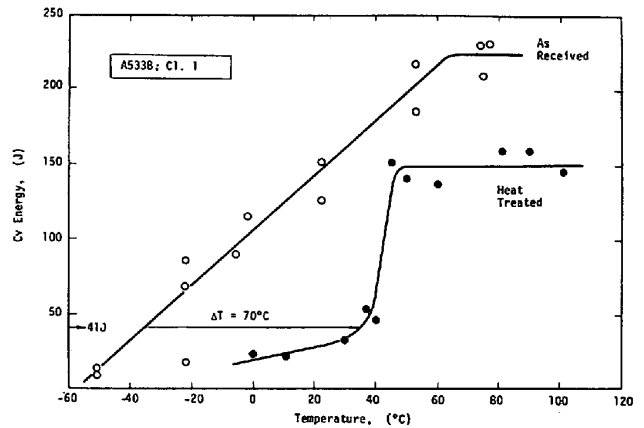


図10 シャルピ衝撃試験結果

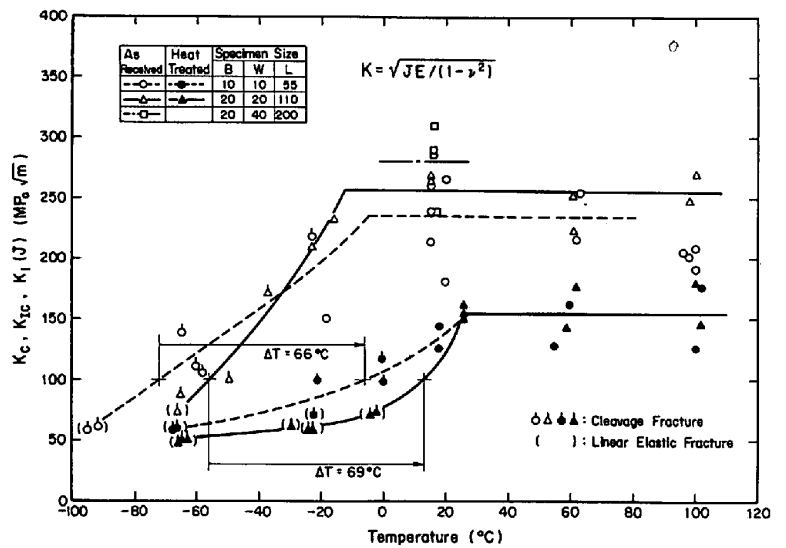


図11 供試材の破壊靱性の温度依存性

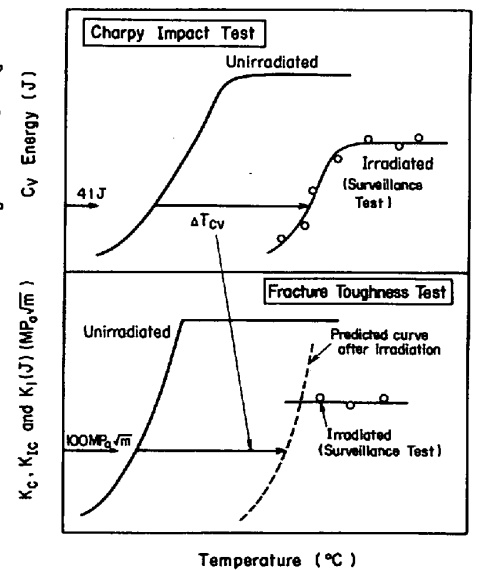


図12 サーベイランス試験に関する一試案