有限要素法および切欠き引張試験によるインコネル625系溶加材を用いた CSUS-JN1 極厚鍛造材溶接部の極低温破壊靱性評価

進藤 裕英¹ 真野 恭規^{1,*1} 堀口 勝三¹ 周 郷 智²

¹東北大学大学院工学研究科材料加工プロセス学専攻

²東洋エンジニアリング株式会社

J. Japan Inst. Metals, Vol. 64, No. 1 (2000), pp. 56-61

© 2000 The Japan Institute of Metals

The Use of Finite Element Analysis and Notch Tensile Testing to Determine the Cryogenic Fracture Toughness of Thick Section Weldment in Forged CSUS-JN1 Plate with Inconel 625 Type Filler Metals

Yasuhide Shindo¹, Yasunori Mano^{1,*1}, Katsumi Horiguchi¹ and Tomo Sugo²

¹Department of Materials Processing, Graduate School of Engineering, Tohoku University, Sendai 980-8579

²Toyo Engineering Corporation, Narashino 275-0024

The use of the notch tensile test to estimate the elastic-plastic fracture toughness (J_{IC}) of structural alloys and weldments for superconducting magnets in fusion energy systems was studied. Notch tensile tests were performed with small round bar specimens containing an electro discharge machined (EDM) notch at liquid helium temperature (4 K) using crosshead rates of 3.3×10^{-3} and 20 mm/s. Notch tensile test specimens were 5 mm in diameter with a 30-mm reduced section. In the mid section of the specimen a 1 mm deep EDM notch of 0.2 mm width was machined around the girth, thus maintaining a starting diameter of 3 mm. Correlations between notch tensile strength, failuar energy absorption, and J_{IC} were assessed. A finite element analysis was also performed to compute directly the J -values. Comparisons of the predicted J_{IC} with results obtained from conventional JIS Z 2284 standard tests were made.

(Received October 6, 1999)

Keywords: fracture mechanics, cryomechanics, notch tensile testing, finite element method, austenitic stainless steel, weldment, fracture toughness, J -integral, superconducting magnet, magnetic fusion reactor

1. 緒 言

核融合超伝導マグネット、超伝導発電機等の大型極低温機器の設計・開発のために、超伝導技術や周辺技術が急速に進歩している。また、1993年に通産省工業技術院の「ニューサンシャイン計画」の一環として開始された「WE-NET(水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術)」プロジェクトは、水力、太陽光等の再生可能なエネルギーを利用して水素を製造し、それを液体水素のような輸送・貯蔵に適した水素媒体に変換した後、エネルギー多消費地域へ輸送・利用する技術を開発するもので、大型エネルギー機器に使用される極低温用構造材料の研究・開発が盛んに進められている¹⁾。

核融合超伝導マグネット用構造材料母材および溶接材の極低温破壊靱性評価は、核融合炉構造健全性評価を行う上で重要な基礎研究であり²⁻⁵⁾、WE-NETへも応用可能である。破壊靱性評価に関しては、これまで弾塑性破壊靱性 J_{IC} 試

験⁶⁾および CTOD 試験⁷⁾によるものが大部分であり一般的であった。最近、疲労予き裂を導入したコンパクト(CT)試験片による極低温破壊靱性試験方法が標準化されている⁸⁾。

しかし、試験方法が複雑な上、疲労予き裂を導入した大きな試験片を必要とするため、溶接熱影響部や融合部等の局所の評価には適さず、小型試験片を用いた極低温破壊靱性評価方法開発が望まれている。

Reed ら⁹⁾は、オーステナイト鋼の4 Kにおける切欠き引張試験(ひずみ速度 1.5×10^{-5} mm/s)を行い、切欠き引張強度と平面ひずみ破壊靱性との関係を詳細に検討している。また、Nyilas and Obst¹⁰⁾は、316LN, JN1, 310S, 03Cr20Ni16Mn6N および Ti-6Al-4V の7 Kにおける高速切欠き引張試験(クロスヘッド速度 20 mm/s)を行い、高速破壊エネルギー吸収(Fast Failure Energy Absorption)と4 K平面ひずみ破壊靱性との間に線形関係が成立することを示している。さらに、Nishimura ら¹¹⁾および Nyilas ら¹²⁾は、極低温構造材料の7 Kにおける切欠き引張試験(クロスヘッド速度 3.3×10^{-3} , 8.3×10^{-3} mm/s)を行い、Rice ら¹³⁾が提案した J 積分評価式を用いて J 積分を求めている。

*1 東北大学大学院生(Graduate Student, Tohoku University)

本研究は、核融合超伝導マグネット用構造材料として開発されたオーステナイト系ステンレス鋼 JN1 鍛造材および溶接材⁴⁾の液体ヘリウム温度(4 K)における切欠き引張試験を行ったもので、切欠き引張試験による構造材料の極低温破壊靱性評価方法の確立を目的としている。また、切欠き引張強度および破壊エネルギー吸収と弾塑性破壊靱性の関係に注目し、考察した。さらに、切欠き引張試験に関する有限要素解析を行い、 J 積分を求め、極低温破壊靱性評価に理論的検討を加えた。

2. 実験方法

2.1 供試材および試験片形状

供試材は、核融合超伝導マグネット用構造材料として開発されたオーステナイト系ステンレス鋼 JN1 鍛造材(板厚 250 mm)および JN1 溶接材(板厚 200 mm)である⁴⁾。Table 1 に、供試材および溶加材の化学成分を示す。JN1 溶接材は、板厚 250 mm の JN1 鍛造材を V 開先を有する板厚 200 mm のブロック 2 個に機械加工し、この 2 つのブロックに TIG 溶接(554層)したものである。溶接条件は、溶接電流 250~270 A、アーク電圧 10~11.5 V および走行速度 1.67~2.00 mm/s である。また、溶加材は、高温割れを防止するため、延性が高く、熱膨張率が鉄基ステンレス鋼よりも低いインコネル625系の I625 および極低温における降伏強さ向上を目的に I625 から Nb, Ti を取り去り N を添加した I625M を 1 対 1 の割合で 1 層毎交互に用いた。Table 2 は、供試材板厚中心の 4 K における機械的特性を示したもので、 σ_{YS} は降伏強さ、 σ_{TS} は引張強さ、 $\sigma_Y = (\sigma_{YS} + \sigma_{TS})/2$ は有効降伏強さ、 E は縦弾性係数である。

試験片は、直径 5 mm、平行部長さ 30 mm の棒状試験片であり、放電加工により平行部中央に幅 0.2 mm、深さ 1 mm、切欠き先端半径 0.1 mm の切欠きを付与した。Fig. 1 に、試験片の形状と寸法を示す。鍛造材試験片 NT-1 は、板厚 250 mm の JN1 鍛造材表面から試験片中心まで 125 mm、負荷方向が主鍛造方向に垂直になるように採取した。また、溶接材試験片の採取位置を、Fig. 2 に示す。NT-S は、板厚 200 mm の JN1 溶接材表面より試験片中心まで 15 mm、NT-Q は 50 mm、NT-C は 100 mm、NT-T は 150

Fig. 1 Shape and dimension of specimen.

Fig. 2 Weld joint configuration and specimen locations.

mm, NT-B は 185 mm、負荷方向が溶接方向に垂直になるように採取した。

2.2 極低温切欠き引張試験

極低温切欠き引張試験は、油圧サーボ式 100 kN 材料試験機にクライオスタットを組み込み、試験片を液体ヘリウム中に浸し、4 K まで十分冷却した後に行った。また、引張荷重は、クロスヘッド速度 3.3×10^{-3} および 20 mm/s のストローク制御で与え、クロスヘッド変位および荷重を計測した。

3. 有限要素法による弾塑性解析

切欠き引張試験の有限要素解析を行い、荷重-変位曲線および J 積分を求めた。また、弾塑性解析は、ひずみ増分理論¹⁴⁾に従い、降伏条件として von Mises の条件を採用し、応力-ひずみの関係として次の Ramberg-Osgood の式を仮

Table 1 Chemical composition of base metal and filler metals (mass%).

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Nb	Ti	N
JN1	0.035	0.95	3.80	0.019	0.001	15.1	24.3	—	—	—	0.317
I625	0.035	0.14	0.05	0.008	0.001	Bal.	21.6	9.0	3.5	0.16	0.03
I625M	0.011	0.12	0.17	0.001	<0.001	Bal.	21.8	8.8	—	—	0.14

Table 2 Mechanical properties of JN1 base metal and weld metal at 4 K.

	Yield strength, σ_{YS} /MPa	Ultimate tensile strength, σ_{TS} /MPa	Effective yield strength, σ_Y /MPa	Modulus of longitudinal elasticity, E /GPa
Base metal	1363	1752	1558	202
Weld metal	855	1280	1068	216

Fig. 3 Finite element model of the notch tensile test.

定した.

$$\sigma = E\varepsilon \text{ for } \varepsilon < \varepsilon_{YS} \quad (1)$$

$$\sigma = \sigma_{YS} \text{ for } \varepsilon = \varepsilon_{YS} \quad (2)$$

$$\sigma = D(\varepsilon - \varepsilon_{el})^n \text{ for } \varepsilon \geq \varepsilon_{YS} + \varepsilon_{pl} \quad (3)$$

ここに、 σ は応力、 ε は弾性ひずみ($\varepsilon_{el} = \sigma/E$)と塑性ひずみ(ε_{pl})の和、 $\varepsilon_{YS} = \sigma_{YS}/E$ は降伏点ひずみ、 D は強度係数、 n は加工硬化指数である。溶接材試験片の有限要素解析は、供試材板厚中心の機械的特性を用いて行っているが、有効降伏強さおよび縦弾性係数は、試験片採取位置にほとんど依存しないようである⁴⁾。Fig. 3に、解析モデルおよび境界条件を示す。6節点アイソパラメトリック要素を用いた軸対称有限要素解析は、問題の対称性を考慮して試験片の2分の1領域について実施し、総節点数は7474、総要素数は3615である。

J 積分の経路独立性は、弾性体および全ひずみ論塑性体に対して証明されている。また、ひずみ増分理論に従って計算された J 積分の経路独立性も、近似的に成立することが示されている¹⁴⁾。 J 積分は、 J 積分定義式およびRiceら¹³⁾が提案した J 積分評価式を用いて求め、両者を比較・検討した。

4. 実験結果および考察

4.1 荷重-変位曲線

Fig. 4は、各試験片の荷重(P)-変位(δ)曲線を示したもので、(a)はクロスヘッド速度 3.3×10^{-3} mm/s、(b)はクロスヘッド速度 20 mm/s の場合である。クロスヘッド速度 3.3×10^{-3} mm/s の場合、荷重-変位曲線上にセレーションが観察されたが、クロスヘッド 20 mm/s の場合は、セレーションが観察されなかった。また、クロスヘッド速度 3.3×10^{-3} mm/s の場合は、クロスヘッド速度 20 mm/s の場合に比べ

Fig. 4 Load-displacement curves for NT-1, NT-S, NT-Q, NT-C, NT-T, NT-B. (a) 3.3×10^{-3} mm/s, (b) 20 mm/s.

最大荷重および変位が減少している。これは、極低温におけるオーステナイト系ステンレス鋼の比熱が極めて小さいため、高速変形による発熱によって温度上昇が生じ、強度が低下したことが原因と考えられる。

4.2 破面観察

試験後、走査電子顕微鏡(SEM)を用いて破壊形態・破面の観察を行った。Fig. 5は、クロスヘッド速度 3.3×10^{-3} mm/s における溶接材試験片 NT-C の SEM による破壊形態および破面の観察結果であり、(a)は破壊形態、(b)は破面である。最終破断は、ネッキングを伴わずに生じており、破面は、典型的なディンプルを呈している。また、クロスヘッド速度 3.3×10^{-3} mm/s の場合における鍛造材試験片 NT-1 および溶接材試験片 NT-S, NT-Q, NT-T, NT-B の破壊形態・破面も、NT-C と同様であった。

4.3 切欠き引張強度および破壊エネルギー吸収による破壊靱性評価

切欠き引張試験より得られる切欠き引張強度 σ_{NTS} および破壊エネルギー吸収 E_{NT} と弾塑性破壊靱性 J_{IC} 試験より得られる J_{IC} の関係を求め、検討を加えた。Table 3は、 σ_{NTS} 、 E_{NT} および J_{IC} を示したもので、 σ_{NTS} は切欠き引張試験の最大荷重を切欠き部の断面積で除した値、 E_{NT} は荷重-変位曲線下の面積を切欠き部の断面積で除した値、 J_{IC} は JIS Z

Fig. 5 Fracture appearance and fractograph of NT-C (3.3×10^{-3} mm/s). (a) fracture morphology, (b) fracture surface.

Table 3 Summary of σ_{NTS} , E_{NT} and J_{IC} of test materials at 4 K.

	Notch tensile strength, σ_{NTS}/MPa		Failure energy absorption, $E_{NT}/\text{kJ m}^{-2}$		Elastic-plastic fracture toughness, $J_{IC}/\text{kJ m}^{-2}$
	3.3×10^{-3} mm/s	20 mm/s	3.3×10^{-3} mm/s	20 mm/s	
NT-1	2560	2153	1314	1012	341.8
NT-S	1899	1545	1032	825	585.0
NT-Q	1754	—	994	—	498.1
NT-C	1817	1588	1048	747	461.1
NT-T	1922	—	794	—	437.1
NT-B	1864	1595	708	599	($J_Q=298.9$) ^a

^a $J_Q \neq J_{IC}$ because $|\Delta a_{pre} - \Delta a_{ave}| > 0.15 \Delta a_{ave}$ (Δa_{pre} : crack extension predicted by elastic compliance, Δa_{ave} : average crack extension)

2284 規格⁸⁾に準拠して得られた 1TCT 試験片 (20% 深さのサイドグループを付与) の値⁴⁾である。溶接材ルート部近傍から採取した試験片の場合、き裂が斜めに進展し、き裂進展量およびき裂長さに対する制限を満足しなかったため、 J_{IC} が得られず、 J_{IC} の暫定値 J_Q を示している。また、クロスヘッド速度 20 mm/s の場合は、クロスヘッド速度 3.3×10^{-3} mm/s の場合に比べ最大荷重および変位が減少したため、 σ_{NTS} および E_{NT} は小さな値を示している。

Fig. 6 に、 σ_{NTS}/J_{IC} と J_{IC} の関係を示す。溶接材試験片の σ_{NTS}/J_{IC} と J_{IC} の間には、良い相関が認められ、溶接材試験

Fig. 6 Ratio of notch tensile strength to fracture toughness plotted against fracture toughness.

Fig. 7 Failure energy absorption versus fracture toughness.

片の J_{IC} と σ_{NTS} の関係は、次のように表される。

$$\sigma_{NTS} = -1.04 \times 10^{-2} J_{IC}^2 + 8.8 J_{IC} \quad (4)$$

Fig. 7 は、 E_{NT} と J_{IC} の関係を示したもので、溶接材試験片の E_{NT} と J_{IC} の関係は、クロスヘッド速度により異なっているが、相関は比較的良好である。溶接材試験片の J_{IC} と E_{NT} の関係は、次のように表される。

$$E_{NT} = 1.22 J_{IC} + 360.3 (3.3 \times 10^{-3} \text{ mm/s}) \quad (5)$$

$$E_{NT} = 0.78 J_{IC} + 374.0 (20 \text{ mm/s}) \quad (6)$$

4.4 有限要素法による破壊靱性評価

切欠き引張試験と有限要素法を用いて J_{IC} を評価するため、切欠き引張試験の有限要素解析を行い、荷重-変位曲線および J 積分を求めた。Fig. 8 は、溶接材試験片 NT-C の切欠き引張試験で得られた荷重-変位曲線および有限要素解析結果を示したもので、クロスヘッド速度 3.3×10^{-3} mm/s、強度係数 $D=1330$ MPa、加工硬化指数 $n=0.08$ の場合

Fig. 8 Comparison between prediction and experiment on load-displacement curves.

である。D および n は、JN1 溶接材板厚中心から採取した試験片 (JIS Z 2201 規格¹⁵⁾ の 14A 号、直径 7 mm) を用い、JIS Z 2277 規格¹⁶⁾ に準拠して得られた 4 K の値である。実験結果にはセレーションが観察されているが、実験結果と解析結果は良く一致している。

Fig. 9 は、クロスヘッド速度 3.3×10^{-3} mm/s の場合の J_{FEM} および J_{Rice} と J_{IC} の関係を示したもので、 J_{FEM} は J 積分定義式を用いて求めた最大変位に対応する J 積分、 J_{Rice} は Rice ら¹³⁾ が提案した J 積分評価式を用いて求めた同様な J 積分である。 J_{FEM} は、切欠き先端を中心とした 6 本の等間隔な経路に沿って積分した値の平均値であり、各経路における J 積分値と平均値との差異は 5% 以内であった。Rice らによる J 積分評価式は、深い円周切欠きを有する丸棒に適用され、次のように表される¹³⁾。

$$J = \frac{1}{2\pi r^2} \left(3 \int_0^{\delta_c} P d\delta_c - P\delta_c \right) \quad (7)$$

ここに、 r は切欠き部の半径、 P は引張荷重である。また、 δ_c はき裂または切欠きの存在によって生じる変位であり、次のように表される。

$$\delta_c = \delta - \delta_{nc} \quad (8)$$

δ は荷重点変位、 δ_{nc} はき裂または切欠きが無い場合の変位で、弾性変位 δ_{el} によって与えられ、次式で仮定される。

$$\delta_{nc} = \delta_{el} = \frac{PL}{\pi R^2 E} \quad (9)$$

ここに、 L は標点間距離、 R は丸棒の半径である。 J_{FEM} は J_{IC} に比べ低い値を示し、 J_{Rice} は J_{IC} に比べ高い値を示しているが、ほぼ $\pm 25\%$ の範囲内に収まっており、良い相関が認められる。

Nyilas ら¹²⁾ は Incoloy 908 時効材の深い切欠きを有する試験片を用い、切欠き引張試験 (試験片直径 6.0 mm、切欠き部直径 1.9 mm、試験温度 7 K、クロスヘッド速度 8.3×10^{-3} mm/s、標点間距離 8 mm、最大変位 0.11 mm) を行ったが、この場合についても同様な有限要素解析を行い、検討

Fig. 9 Notch tensile test-based prediction of J_{FEM} and J_{Rice} against fracture toughness.

Fig. 10 Load and J -integral versus displacement curves for aged Incoloy 908 at 7 K.

を加える。Incoloy 908 は ITER 用超伝導マグネットのジャケット材料として開発されたものである¹⁷⁾。Fig. 10 は、荷重-変位曲線および J 積分 (J) の有限要素解析結果を示したもので、最大変位 (0.11 mm) における J 積分は、 $J_{FEM} = 178.8$ kJ/m²、 $J_{Rice} = 187.5$ kJ/m² である。荷重-変位曲線の有限要素解析結果は、実験結果と良く一致し、深い切欠きを有する試験片の J_{FEM} と J_{Rice} の差異は 4.9% である。

5. 結 言

オーステナイト系ステンレス鋼 JN1 鍛造材および溶接材を対象に、4 K における切欠き引張試験を行った。また、切欠き引張試験の有限要素解析を行い、理論的検討を加えた。以下に、得られた結果の要約を示す。

(1) 溶接材試験片の弾塑性破壊靱性 J_{IC} と切欠き引張強度 σ_{NTS} の関係式 $\sigma_{NTS} = -1.04 \times 10^{-2} J_{IC}^2 + 8.8 J_{IC}$ を求め、切欠

き引張強度による局所の極低温破壊靱性評価を可能にした。

(2) 溶接材試験片の J_{IC} と破壊エネルギー吸収 E_{NT} の間には、クロスヘッド速度により異なる相関関係が認められた。

(3) ひずみ増分理論に従って荷重-変位曲線の弾塑性解析を行い、実験結果と一致する良好な結果を得た。

(4) クロスヘッド速度 3.3×10^{-3} mm/s の場合、最大変位に対応する J 積分定義式を用いて求めた J 積分 (J_{FEM}) および Rice らが提案した J 積分評価式を用いて求めた J 積分 (J_{Rice}) は、 J_{IC} と比べてほぼ $\pm 25\%$ の範囲内に収まっており、切欠き引張試験による破壊靱性評価の妥当性を示した。

(5) 有限要素解析による、深い切欠きを有する試験片の J_{FEM} および J_{Rice} はほぼ一致した。

本研究の一部は、通産省工業技術院から(財)大阪科学技術センター附属ニューマテリアルセンターへの委託による「石油代替電源用新素材の試験・評価方法の標準化に関する調査研究」極低温材料分科会(平成3年~10年、主査:進藤裕英)において実施されたものである。また、同時に、日本原子力研究所那珂研究所超電導磁石研究室との共同研究で実施されたものであり、辻 博史、中嶋秀夫両氏を始め関係各位に深謝する。

文 献

- 1) T. Horiya: Journal of JWS, **66**(1997), 95-99.
- 2) T. Kobori, K. Horiguchi, Y. Shindo, H. Nakajima and H. Tsuji: Cryogenic Engineering, **29**(1994), 396-403.
- 3) Y. Shindo, T. Kobori, K. Horiguchi, E. Yamada, H. Nakajima and H. Tsuji: J. Japan Inst. Metals, **59**(1995), 793-798.
- 4) K. Horiguchi, Y. Shindo, T. Kobori and T. Takahashi: Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., **64**, A(1998), 904-911.
- 5) Y. Shindo, T. Takahashi, K. Horiguchi, T. Kobori and K. Sanada: Quarterly Journal of JWS, **15**(1997), 370-375.
- 6) Designation: E 813-89, Standard Test Method for J_{IC} , A Measure of Fracture Toughness, 1996 Annual Book of ASTM Standards, **03.01**(1996), 633-647.
- 7) Designation: E 1290-93, Standard Test Method for Crack-Tip Opening Displacement (CTOD) Fracture Toughness Measurement, 1996 Annual Book of ASTM Standards, **03.01**(1996), 853-862.
- 8) JIS Z 2284-1998: Method of Elastic-Plastic Fracture Toughness J_{IC} Testing for Metallic Materials in Liquid Helium.
- 9) R. P. Reed, D. T. Read and R. L. Tobler: Advances in Cryogenic Engineering, **32**(1986), 361-368.
- 10) A. Nyilas and B. Obst: Advances in Cryogenic Engineering, **42**(1996), 353-360.
- 11) A. Nishimura, J. Yamamoto and A. Nyilas: Advances in Cryogenic Engineering, **44**(1998), 145-152.
- 12) A. Nyilas, B. Obst and A. Nishimura: Advances in Cryogenic Engineering, **44**(1998), 153-160.
- 13) J. R. Rice, P. C. Paris and J. G. Merkle: ASTM STP, **536**(1973), 231-245.
- 14) T. Miyoshi, M. Shiratori, M. Zako and S. Sakata: *Finite Element Method*, Jikkyo Shuppan, Tokyo, (1976), pp. 12-53.
- 15) JIS Z 2201-1998: Test Pieces for Tensile Test for Metallic Materials.
- 16) JIS Z 2277-1990: Tensile Testing Method for Metallic Materials in Liquid Helium.
- 17) I. S. Hwang, R. G. Ballinger, M. M. Morra and M. M. Steeves: Advances in Cryogenic Engineering, **38**(1991), 1-10.