

第1号発電用原子炉の压力容器用 鋼板の脆性破壊強度について

東京大学 工学部船舶工学科

木 原 博

船舶技術研究所 船体構造部

池田一夫, 岩井宣雄

茨城県東海村に建設された日本原子力発電株式会社の第1号原子炉に使用した原子炉压力容器用鋼板の初期脆性破壊強度を、中型および大型 Robertson 試験によってしらべ、原子炉完成後の Pressure test 時の温度決定の資料を得るとともに、中性子照射による脆化のかわりに高温歪による脆化を、小型試験としてのVノッチシャルピー試験結果から検討し、両者を比較した。

1. 緒 言

1956年英国から最初の原子力発電炉を導入することがきまり、日本原子力発電株式会社が設立され、現在電気出力 166,000KW のコールダー・ホール改良型原子炉が、東海村において建設中である。日本原子力発電株式会社の2号炉は、日本海に面した敦賀地区に建設されることがきまっており、このほか3電力会社の計画をふくめて、ここ数年のうちに日本の原子力発電は、100万KWをこえることが予想される。(1)

このような大型原子炉を建設するためには、設計上いくつかの点について検討しなければならないが、とくに脆性破壊に対する考慮が必要とされる。

完成後に実施される pressure test 時に脆性破壊を生じてはならず、使用中における中性子照射脆化による遷移温度の上昇について、適格な見積もりをすることが極めて重要である。

2. 脆性破壊強度の基準

一般に鋼材の脆性破壊特性として、脆性破壊発生特性および伝播停止特性がしらべられるが、原子炉压力容器

用鋼板の場合には、その安全性確保の意味から後者を pressure test の温度決定の基礎とすることが、日英両国の専門家の間でとりきめられた。

Nichols(2)らもその点を強調しており、常に压力容器を脆性亀裂が伝播しうる最高温度以上に保つことを要求している。

米国において設けられている使用温度を、NRL 落重試験の NDT 温度プラス 60°F 以上に保つべきであるという基準も、同様の考え方によるものである。(3)

この目的にそっていくつかの試験方法が提案されているが、つぎの3試験法が大型試験として最も良くしられている。

3. 亀裂伝播停止試験法

1. Robertson 試験 (温度勾配型および平坦型)
2. 二重引張試験 (同上)
3. ESSO 試験 (同上)

これらはただ亀裂の発生方法が異なるだけで、いずれも応力と亀裂の停止温度の関係をあたえる。さきに著者の1人(4)は、温度勾配型 ESSO 試験をもちいて脆性亀裂の伝播および停止特性をしらべたが、ここでは压力容器のガスダクトの部分で切りとった板厚 92mm の鋼板から、Robertson 試験片を採取して亀裂停止温度を決定した。

すなわち、まず板厚 50mm の厚板について温度勾配および平坦温度型の中型 Robertson 試験をおこなったのち、板厚 80mm のものについて同様に大型 Robertson 試験をおこない、板厚効果などを検討した。

表 1 化学成分および機械的性質

Chemical Compositions (%)				
C	Si	Mn	P	S
0.11/0.12	0.22/0.23	1.22/1.25	0.013 /0.015	0.018 /0.021
Tensile Properties			Notch Ductility	
Y. P. (kg/mm ²)	T. S. (kg/mm ²)	E. L. (%)	E ₋₄₀ (kgm)	^v T _{RS} (°C)
32.9/36.6	47.6/50.1	33.0 /41.0	5.2/8.8	-45

Tensile Properties			Notch Ductility	
Y. P. (kg/mm ²)	T. S. (kg/mm ²)	E. L. (%)	E ₋₄₀ (kgm)	^p T _{RS} (°C)
32.9/36.6	47.6/50.1	33.0 /41.0	5.2/8.8	-25

4. 初期脆性破壊伝播停止特性

4.1 供 試 鋼 材

東海村発電所用の鋼板は、原子炉圧力容器用として要求される諸特性のうち冷却ガスに対する耐蝕性のほか、とくに極厚板の溶接性と低温切欠靱性ができるだけすぐれたものが必要であり、アルミキルド細粒鋼である Colvilles 社製 Coltuf 28 鋼板が採用されたが、材質の点から、その後日本製鋼所製原子炉圧力容器用鋼板 (Coltuf 28同等種) にきりかえられた。これらの鋼板の化学成分

および機械的性質を、表 1 に示す。

実際の使用状態を考慮して、応力緩和処理済みの容器のガスダクトを切りぬいた鋼板から試験片を採取した。したがって実際の板厚は 92mm であるが、曲がりをとるために機械切削し、大型試験片では板厚を 80mm、中型試験片では 50mm とした。

4.2 試 験 片

鋼板の脆性破壊伝播停止特性をしらべる試験法として技術導入先の英国で広くもちいられている、Robertson 試験が採用された。

大型試験片は図 1 に示すように切欠としてプレスノッチをもちい、250°C×1 時間の歪み時効をおこなって脆性亀裂の発生を容易にした。中型試験片は図 2 に示すように ESSO 試験片と同じ切欠で、とくに切欠底部を局部的に焼入れして脆化させて、小さい打撃エネルギーで脆性亀裂の発生を可能にした。これらは英国でもちいられている切欠とは異なっているが、脆性亀裂の伝播停止特性をしらべる場合には、亀裂発生部の切欠形状や亀裂発生法は影響しないので上記の切欠をもちいた。これらの試験片は、いずれも Robertson 試験の特徴である試験片端部の溶接残留応力を除去するために塑性変形させる薄板を溶接しているので、Robertson 試験片と称する

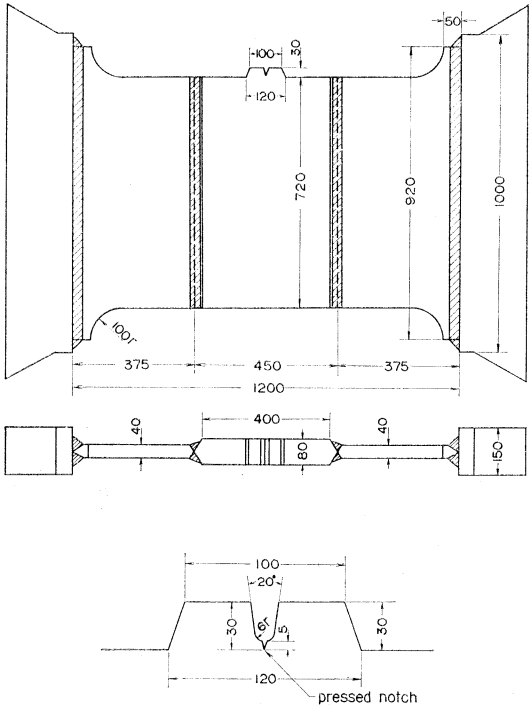


図 1 大型試験片

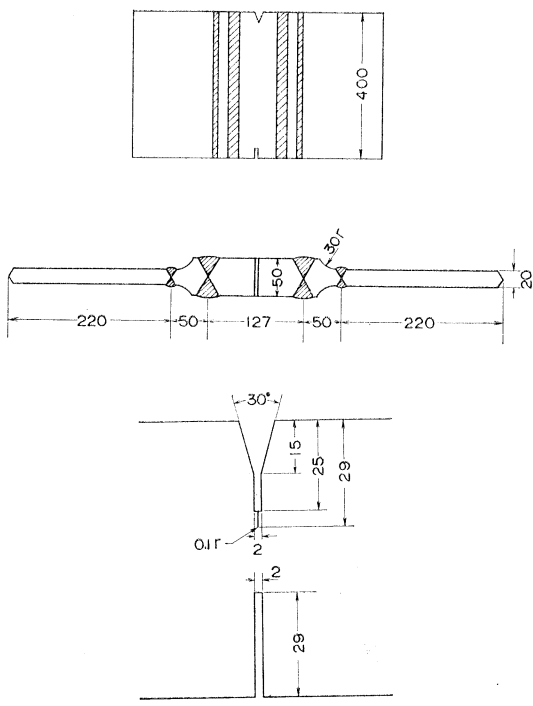


図 2 中型試験片

ことができよう。

4.3 試 験 方 法

中型試験の場合、運輸省船舶技術研究所 船体構造部の 300ton 構造物試験機をもちい、大型試験の場合、同所 溶接工作部の 4000ton テストリグをもちいた。

いずれの場合も試験片の亀裂伝播線上に12点鉄-コンスタンタン熱電対をパーカッションにより溶接して温度分布を計測した。

脆性亀裂の発生装置として、中型試験の場合は窒素ガス圧をもちいる高压打撃装置を使用して100kgmの打撃エネルギーをあたえ、大型試験の場合は落重装置により120kgmの打撃エネルギーをあたえることによって亀裂を発生させた。

原子炉の Pressure test 時の、鋼材の応力 15kg/mm^2 の場合の脆性亀裂停止温度をもとめるためには、原厚に近い板厚 80mm の大型 Robertson 試験での停止温度をしらべる必要がある。しかし供試材の大きさおよび数量に制限があるので、まず板厚 50mm の中型 Robertson 試験をおこなった。すなわち、温度勾配型の試験を平均応力 12.8 および 8.5kg/mm^2 でおこない、停止亀裂長さとし試験片の幅の比により応力値を修正して、応力-停止温度曲線をもとめた。

つぎにこれによって、平坦温度型の中型 Robertson 試験の平均応力 12.8kg/mm^2 の場合の停止温度を推定し、その温度をはさむ上下の温度で平坦型の試験をおこなって停止温度をもとめた。

この中型試験による板厚 50mm の場合の平坦型の停止温度を参考にして、板厚 80mm の平坦温度型大型 Robertson 試験をおこなって、平均応力が 15kg/mm^2 の場合の停止温度をもとめた。なお、参考のために温度勾配型大型試験を1枚追加した。

4.4 中型 Robertson 試験結果

機械切削により板厚を 50mm に減厚した試験片による試験結果は、つぎの通りである。

(a) 温度勾配型 Robertson 試験

応力が 12.8kg/mm^2 の場合の温度勾配型 Robertson 試験の温度分布を、図3(b)に示す。図中に shear lip の幅が増加しはじめた位置までの亀裂長さ (l_s) と温度、亀裂停止位置と温度を示す。図より停止亀裂長さによる修正応力が 17kg/mm^2 の場合の、脆性亀裂停止温度 T_{AG}

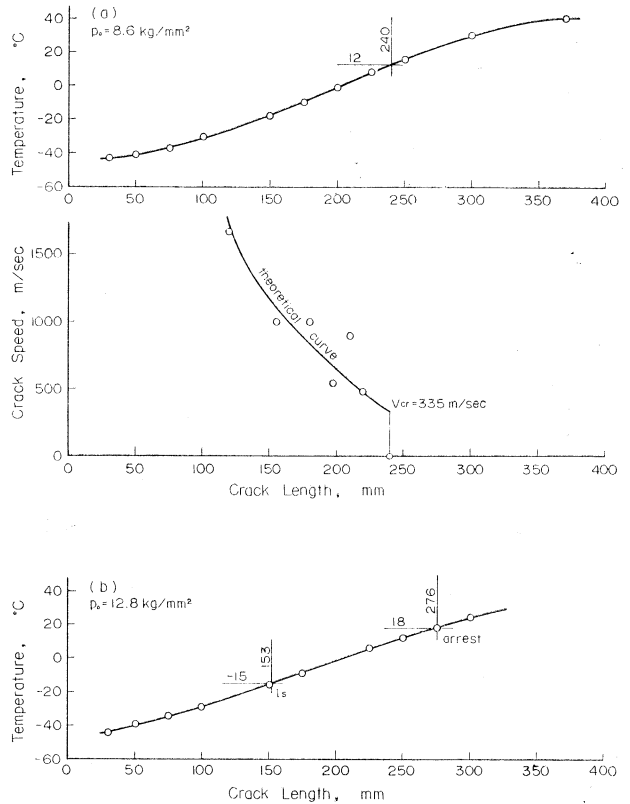


図3 中型試験(勾配型)の温度分布および亀裂伝播速度と亀裂長さの関係

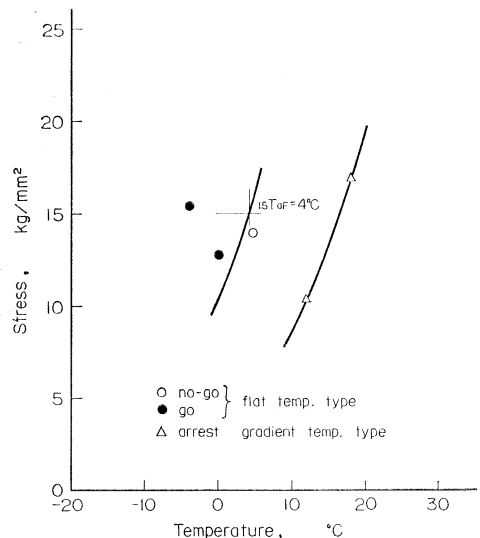


図4 中型試験(勾配型および平坦型)の応力-停止温度曲線

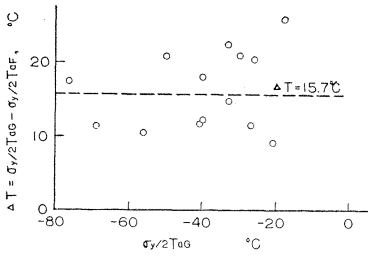


図5 勾配型（日本の定義）および平坦型二重引張試験の停止温度 T_{aF} , T_{aG} 間の差(5)

は 18°C である。

つぎに応力が 8.6kg/mm^2 の場合について温度勾配型の試験をおこなったが、図3(a)に示すように停止温度は 13°C 、亀裂長さが 240mm であるので、修正応力は 10.4kg/mm^2 となる。これらより温度勾配型の応力—停止温度曲線は、図4のようになる。図より応力 15kg/mm^2 における停止温度 T_{aG} は 17°C になる。

なお、試験片での停止亀裂長さによる修正応力係数はつぎのようになる。すなわち、一様応力 p_0 に対して有

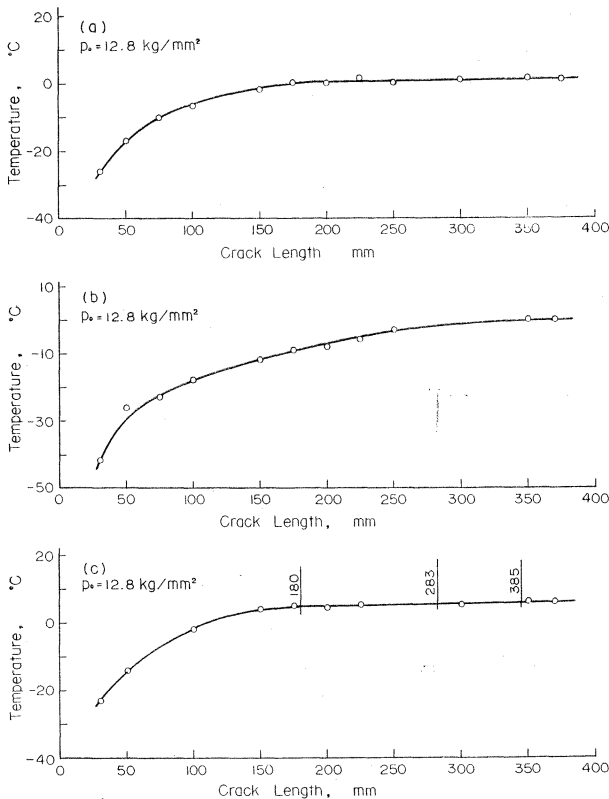


図7 中型試験の平坦型温度分布

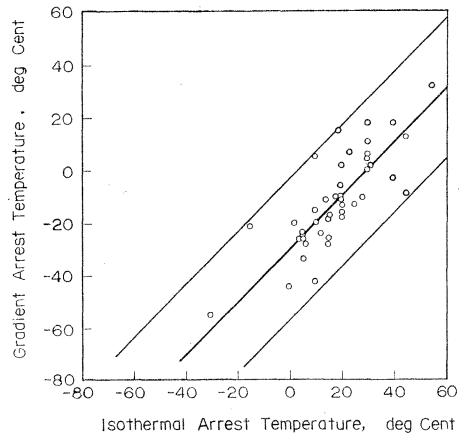


図6 勾配型（英国の定義）および平坦型 Robertson 試験の停止温度 T_{aG} , T_{aF} の関係(2)

限幅の場合は亀裂先端において応力集中度が高くなり、一様応力が P の場合に相当する応力を生じる。この比 p/p_0 は亀裂長さ l と全幅 B の比 $\gamma = l/B$ の関数 $f(\gamma)$ であるが $f(\gamma)$ は次のようになる。

$$p = p_0 f(\gamma) \quad \left. \begin{aligned} f(\gamma) &= \sqrt{\frac{2}{\pi\gamma} \tan \frac{\pi\gamma}{2}} \end{aligned} \right\} (1)$$

通常、日本でもちいられている定義、すなわち脆性亀裂停止位置からとめた勾配型停止温度 (T_{aG}) を基準にして、平坦型の停止温度 (T_{aF}) をもとめるために、日本溶接協会 鉄鋼研究委員会の資料(5) をもちいた。両温度間の差は図5より次式であらわされる。

$$T_{aF} = T_{aG} - 16 (^{\circ}\text{C}) \quad (2)$$

したがって、 T_{aF} の推定値は 1°C である。

一方、英国でもちいられている定義、すなわち shear lip の幅が増加しはじめた位置からとめた勾配型停止温度 (T_{aG}) を基準とする場合には、Nichols ら(2) による図6 をもちいた。この場合には次の関係がある。

$$T_{aF} = T_{aG} + 20 (^{\circ}\text{C}) \quad (3)$$

したがって、この場合の T_{aF} の推定値は 5°C である。これらにより T_{aF} は $1 \sim 5^{\circ}\text{C}$ であると推定される。

(b) 平坦温度型 Robertson 試験

つぎに、実際に平坦温度型 Robertson 試験をおこなって停止温度 T_{aF} をとめた。図7に平坦型の温度分布を示す。応力はいずれも 12.8kg/mm^2 である。

同(b)図の場合は十分良好な平坦型の温度分布を示していないが、試験片の幅の60%で温度が

-4°Cであったので、これを有限幅の影響をいれて修正すると、図4に示すように応力 15.5kg/mm²、温度-4°Cで G₀ というデータになる。

図7(a)は平坦温度が 0°C で伝播した場合の温度分布を示す。図7(c)は亀裂が3段階で止まったもので、最初に 180mm の位置で停止したことが、写真1からわかる。図7(c)に亀裂が停止した位置を、それぞれ示す。

これらのデータを応力と温度で示すと、図4のようになる。同図から応力が 15kg/mm² での平坦温度型の停止温度は 4°C であって、前述の勾配型からもとめた推定値によく合うことがわかる。

4.5 大型 Robertson 試験結果

大型試験片をもちいた Robertson 試験では、応力はいずれの場合も pressure test の応力 15kg/mm² をもちいた。

板厚 50mm の中型 Robertson 試験の結果、応力 15kg/mm² の場合の勾配型停止温度 $_{15}T_{AG}$ は 17°C であったので、これから板厚効果を考慮して、板厚が 80mm の場合の温度勾配型の停止温度を推定しなければならぬ。これまでわが国でおこなわれた板厚効果の研究としては、日本造船研究協会第37研究部会⁽⁶⁾ および日本溶接協会鉄鋼研究委員会⁽⁵⁾ の温度勾配型二重引張試験による研究があるが、これらはそれぞれ最大板厚が 50mm および 45mm で、図8に示すような板厚の影響がしられている。

したがって今回のように板厚が 50mm をこえる場合の、日本での実験データは皆無である。機械切削の場合の板厚効果を示す図8からみて板厚が 30mm をこえると、板厚の影響がなくなることが考えられる。

また英国での板厚が 25~75mm の場合の実験結果では、板厚増加にともなう停止温度 T_{AG} の上昇は 0.4°C/mm であるという報告と、上昇しないという報告がある

したがって、板厚 80mm の大型 Robertson 試験の温度勾配型停止温度 T_{AG} を推定する際、これらのうち、どのデータをもとにすべきか問題になったが、一番安全側にとって停止温度が 0.4°C/mm の上昇率を示すものと考え、応力が 15kg/mm² の場合の温度勾配型停止温度 $_{15}T_{AG}$ は 29°C と推定される。したがって平坦温度の場合の、停止温度 $_{15}T_{AF}$ の推定値は 13°C となる。

実際におこなった平坦温度型試験の結果を図9に示す。図から pressure test 時の応力における平坦型停止温度 $_{15}T_{AF}$ は、6°C とみなされる。したがって、前述の中型試験結果と、英国でのべられている温度上昇率 0.4°C/mm をもとにして推定した値よりも 6°C 低い。

その後、もう1枚の試験片をもちいて、温度勾配型

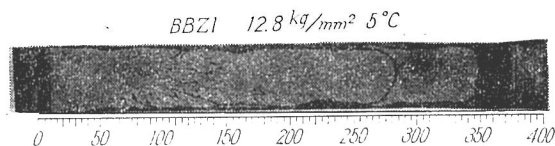


写真1 中型試験の平坦型試験片の破面

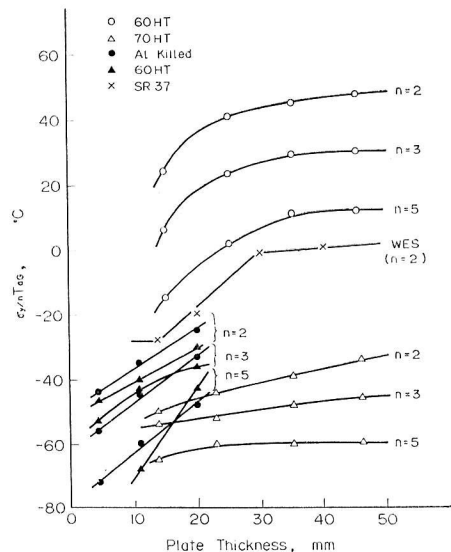


図8 勾配型停止温度と板厚の関係 (機械切削の場合)⁽⁵⁾

Robertson 試験をおこなった結果、停止温度は 19°C であり、亀裂長さは 408mm であるので、修正応力は 17.5 kg/mm² になる。この停止温度は前述の中型試験結果からもとめた推定値よりも約 10°C 低くなっており、板厚増加による遷移温度上昇率が 0.4°C/mm ではなく、30mm 以上の板厚ではほとんど遷移温度は変化しないと

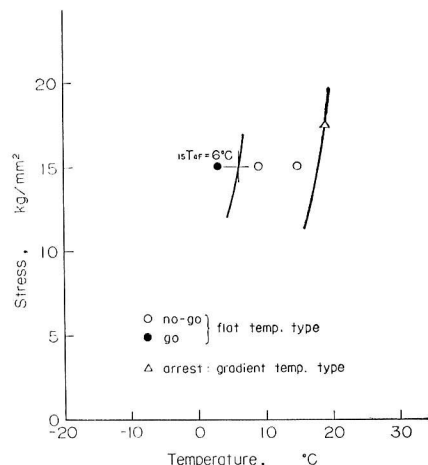


図9 大型試験 (勾配型および平坦型) の応力-停止温度曲線

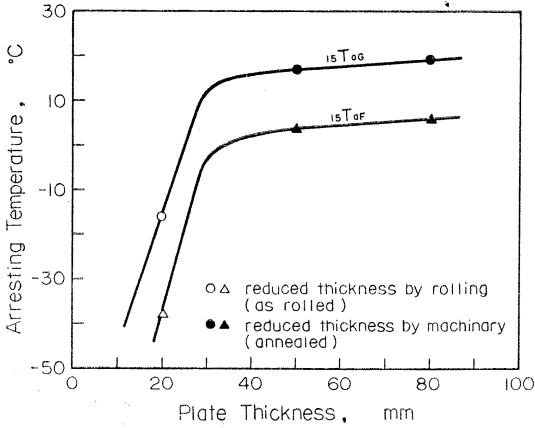


図10 勾配型および平坦型の停止温度と板厚の関係

いうデータの方がよいことがわかる。

4.6 遷 移 温 度

さきに、日本原子力発電AT委員会での試験で供試材と同種の鋼材を再圧延して、板厚 20mm とした試験片について温度勾配型および平坦型の ESSO 試験がおこなわれた。(7) ただし、大型および中型試験にもちいた

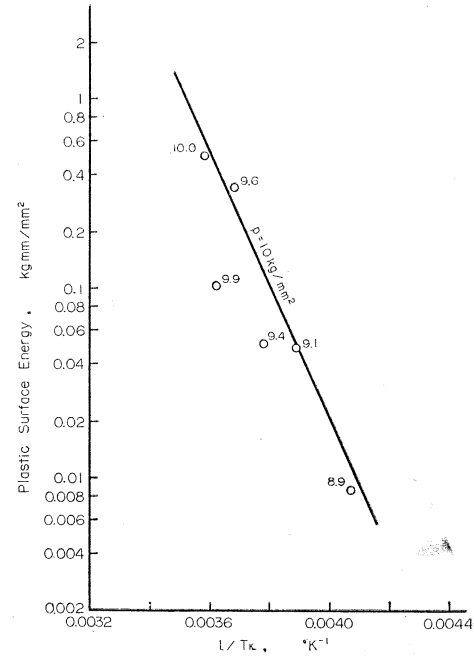


図11 塑性表面エネルギーと絶対温度の逆数の関係(板厚50mmの場合)

供試材のような焼なましはおこなわれていない。この場合の勾配型および平坦型停止温度は、それぞれ -16°C および -35°C である。

圧延により板厚を減少させると、機械切削による場合よりも細粒化されて切欠靱性は良くなる。日本造船研究協会第37研究部会(6)の研究によると、板厚を減少させるのに、機械切削による場合、板厚 30mm 以下では約 $1.5^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ の割合で温度勾配型停止遷移温度が直線的に低下するが、圧延による場合は平均変化率が $3^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ の割合で遷移温度が低下する。

AT委員会での板厚 20mm および著者らの板厚 50mm 0mm の温度勾配型および平坦温度型の停止温度 T_{Ag} , T_{AF} を図10に示す。図より、板厚が 20mm から 50mm に増加した場合、 T_{Ag} は -16°C から 17°C に上昇している。

前述のように板厚 30mm 以下で圧延により減厚した場合の変化率が $3^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ であることから、板厚 30mm では 14°C と推定され、30mm, 50mm および 80mm の遷移温度から、板厚 30mm 以上での遷移温度上昇率は約 $0.1^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ になる。

温度勾配型停止温度 T_{Ag} と平坦型 T_{AF} の差は AT 委員会の板厚 20mm の場合 18°C であり、著者らの板厚 50mm および 80mm の場合、それぞれ 14°C および 13°C となっており、前述の日本溶接協会鉄鋼研究委員会の板厚 20mm の場合の結果は平均 16°C となっている。したがって T_{Ag} と T_{AF} との差は板厚にかかわらず、ほぼ一定とみなしてよいであろう。

4.7 塑性表面エネルギー

鋼材の材質の優劣を示すものとして塑性表面エネルギー、すなわち新しい破面を形成するに要するエネルギーの大きさが重要な意味をもっている。高速で伝播中の脆性亀裂の場合の塑性表面エネルギーを亀裂伝播速度の計測値からもとめる方法が、さきに著者の 1 人(8)により提案された。脆性亀裂伝播速度の計測には、箔歪みゲージを亀裂線上に貼付し、亀裂の進行につれての動的歪み-時間曲線から歪みゲージ間の経過時間をもとめ、歪みゲージ間の距離から平均速度をもとめた。

亀裂伝播速度が V のときに運動エネルギーを考慮した動的エネルギー条件の実験式を、一様温度型の ESSO 試験での計測値からもとめると次式のようになる。

$$\frac{\pi p^2 l}{E(1+m\alpha^2)^2} = 2S \tag{4}$$

ただし、 p =応力、 l =亀裂長さ、 E =ヤング率、 S =塑性表面エネルギー、 $\alpha=V/c$ 、 c =平面縦波伝播速度、 m =定数で 100 としよ。

板厚が 50mm の試験片において平均応力 8.5kg/mm² の場合 (停止位置における修正応力値は 10.4kg/mm²) の温度分布および亀裂伝播速度の計測結果を図 3(a) に示す。

図より、亀裂伝播速度は高温側に亀裂がすすむにつれて低下し、限界速度に達すると急激に停止することがわかる。この速度以下では脆性亀裂が伝播できないという限界亀裂伝播速度は 330m/sec で、板厚 20mm の場合には 360m/sec であった。

(4)式をもちいて各亀裂長ささと亀裂伝播速度の関係から塑性表面エネルギーをもとめ、その対数と、亀裂長さ位置に対応する絶対温度の逆数の関係をもとめ図11に示す。図より両者の間に直線関係があり、次式によりあらわされる。

$$S = S_0 e^{-\frac{k}{T_K}} \quad (5)$$

ただし、材料定数 S_0 および k の値は表 2 に示されている。なお、前述の限界亀裂伝播速度から、(4)式によって停止位置の限界塑性表面エネルギーをもとめると 1.0 kgmm/mm² となる。

4.8 Pressure test 時の温度

日本原子力発電の第 1 号発電用原子炉圧力容器用鋼板の脆性破壊伝播停止温度は、6°C と推定された。これをもとにして、日本原子力発電は安全を期して最低 20°C の温度で pressure test をおこなうことを決定した。

pressure test は昭和 39 年 1 月下旬におこなわれ、ブースターによって内圧を 25 気圧まで加圧した。200 カ所に貼付した歪みゲージによって平均 15kg/mm²、最大 24kg/mm² の応力が記録されたが、dye check によっても微小亀裂も見出されなかった。すなわち pressure test は成功裡に終了した。

5. 中性子照射と高温 予歪脆化

原子炉圧力容器は操業中に中性子の照射を受けるので、設計の際にその影響を見積もらなければならない。

実際の原子炉の脆性破壊特性をしらべるには、大型試験をもちいるのがのぞましい。しかし、中性子照射をうけた鋼板に関する大型試験は多額の費用と時間、大型試験機などを要するので工業的試験として、ある

表 2 塑性表面エネルギーの材料定数 S_0, k
(板厚 50mm の場合)

t (mm)	p (kg/mm ²)	S_0 (kgmm/mm ²)	k (°K)
20	15	7.66×10^9	5.56×10^3
50	10	1.91×10^{12}	8.06×10^3

いは原子炉のモニターとして脆化をチェックするためには V ノッチシャルピー試験片を使用することがのぞましい。

さきに日本原子力発電 A T 委員会で中性子照射による脆化のかわりに、高温予歪による脆化を V ノッチシャルピー試験によりしらべたので、これらを英国および米国において中性子照射による脆化をしらべた試験結果と比較検討した。

Cottrell⁽⁹⁾ は、遷移温度の上昇 ΔT と中性子線量 ϕt (10^{18} neutrons/cm² を単位にする) の関係を次式であたえた。

$$\Delta T = 17.5 (\phi t)^{1/3} \quad (6)$$

しかし最近の実験によれば、 ΔT は $(\phi t)^{1/2}$ に比例する結果が出ている。

Nichols ら⁽²⁾ によると、コールグーホールの原子炉でのアルミキルド細粒鋼に関する照射実験でも図12に示すように、V ノッチシャルピー遷移温度の上昇が、 $(\phi t)^{1/2}$ に比例することがみとめられている。

米国においても Pellini ら⁽³⁾ により、中性子照射による V ノッチシャルピー遷移温度上昇の実験がおこなわれている。このうち Nichols らの実験と比較的鋼種および照射条件の似ているもの (A201, A212-B) を、図12にあわせてプロットした。同図から大体 5×10^{18}

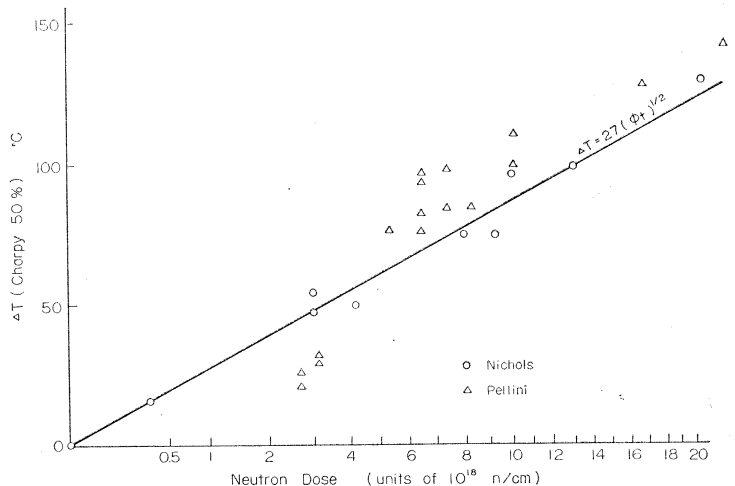


図12 V シャルピー破面遷移温度上昇量と中性子線量の関係⁽²⁾⁽³⁾

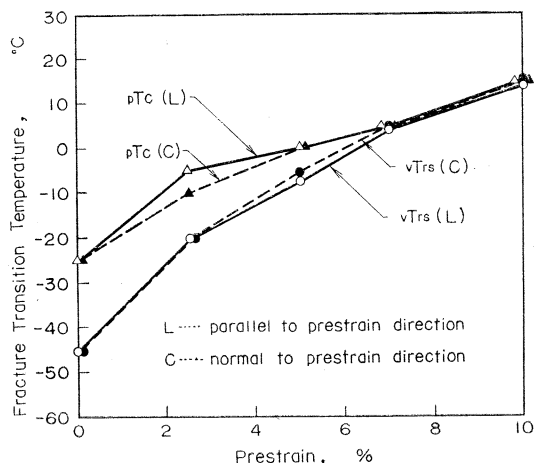
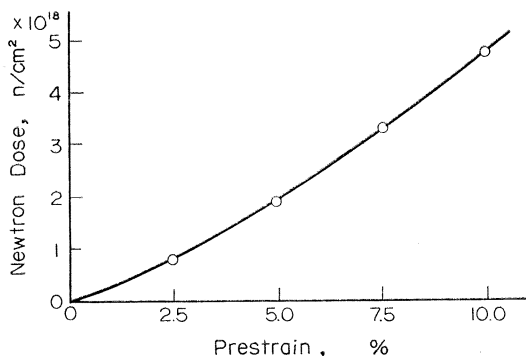


図13 230°Cでの予歪量と破面遷移温度の関係

図14 230°Cでの予歪量と中性子線量の関係
(同一遷移温度上昇量)

neutrons/cm² 以上の中性子線量に対しては、 $\Delta T_{\infty}(\phi t)^{1/2}$ の関係が成り立つようであるが、 3×10^{18} neutrons/cm² 前後のデータはそれよりも小さい。

寺沢、大谷ら⁽¹⁰⁾ は高温予歪が最も鋼材を脆化させるのは、200~300°C での予歪であることを示した。AT 委員会⁽⁷⁾ では第1号発電用原子炉の使用温度が230°Cであることを考慮して、原子炉にもちいられたアルミキルド細粒鋼について230°Cにおいて2.5~10%の塑性歪みをあたえたのち脆性試験をおこなった。それによると図13に示すように、塑性歪みの増加につれて遷移温度は直線的に上昇する。

同じ遷移温度上昇量に対応する予歪量と、中性子照射量の関係を図14に示す。10%の高温予歪による遷移温度の上昇は150°Cで、 4.8×10^{18} neutrons/cm² の中性子照射による値と等しくなっている。

6. 結 論

日本原子力発電の第1号原子炉压力容器用鋼板について、中型および大型 Robertson 試験をおこなって脆性

破壊伝播停止特性と板厚効果をしらべた結果、板厚92mの原厚の場合の pressure test 時における応力での平坦温度型停止温度は6°Cと推定され、最低20°Cで pressure test が実施され成功裡に終了した。

またアルミキルド鋼の場合10%の予歪による遷移温度の上昇は150°Cで、 4.8×10^{18} neutrons/cm² の中性子照射による値に等しい。

本試験研究の一部は日本原子力発電株式会社の依頼によるものであり、本報告の発表およびAT委員会における資料の引用を許可されたことに対し、深く感謝する次第である。

なお、実験を実施するにあたっては、船舶技術研究所船体構造部 中島、北村、高橋各技官、村上、浜野両君および溶接工作部小倉部長、大熊、三好両技官の協力を得たことを記し、感謝の意を表する。

本研究の一部は東京大学船舶工学科学生岡林邦夫君の卒業論文の一部としておこなわれた。

参 考 文 献

- (1) U. Hashimoto, H. Kihara and Y. Ando, Welding Problems Associated with Construction of Nuclear Power Station in Japan (未発表)
- (2) R. W. Nichols and D. R. Harries, Brittle Fracture and Irradiation Effects in Ferritic Pressure Vessel Steels, ASTM 1962
- (3) W. S. Pellini, L. E. Steele and J. R. Hawthorne, Analysis of Engineering and Basic Research Aspects of Neutron Embrittlement of Steels, Welding Journal, Oct. 1962, p 455 s
- (4) 秋田好雄、池田一夫、脆性亀裂の伝播と停止に関する研究-とくに温度勾配つき ESSO 試験について、造船協会論文集 第112号 昭和38年6月
- (5) 日本溶接協会鉄鋼研究委員会、溶接構造物のぜい性破壊防止のための鋼材の材質判定基準の確立に関する研究、昭和37年
- (6) 日本造船研究協会 第37研究部会、超大型船の建造に際しての厚板の切欠脆性に関する研究、日本造船研究協会報告 第30号 昭和35年10月
- (7) The Committee of Arresting Temperature of Crack Propagation in the Japan Atomic Power Company, Studies of Crack Arresting Temperature for Tokai Reactor Pressure Vessel Steel, I. I. W. Document No. IX-367-63,
- (8) 池田一夫、脆性破壊伝播に関する研究(第4報) 脆性破壊伝播速度および動的応力の計測、造船協会論文集, 第106号, 昭和35年1月
- (9) A. H. Cottrell, U. K. A. E. A. Conference on Brittle Fracture in Metals, (1957), U. K. A. E. A. Report I. G. 145 (RD/C), May 1959
- (10) 寺沢一雄、大谷碧、吉田俊夫、寺井清、高温予歪が鋼の切欠靱性におよぼす影響、造船協会論文集, 第109号, 昭和36年6月