47.1.28

TJ259
72
01

高速炉構造材料照射に伴う試験研究（その1）

照射前試験の結果

（昭和46年度動力炉・核燃料開発事業団委託研究）

図書室
No.
60.2.22

技術資料コード
開示区分
レポートNo.
TJ259 72 - 01
この資料は 図書室保存資料です
閲覧には技術資料閲覧票が必要です
動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター技術管理室

昭和47年5月31日

区分変更
区分 二
DATE 平成3年7月31日

日本学術振興会
原子炉金属材料第122委員会
ステンレス鋼照射小委員会

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184　茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部　技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

目　　次

1. はしがき …… 1
2. 研究の概要 …… 3
　2.1 研究の目的 …… 3
　2.2 研究の内容 …… 3
　2.3 研究の日程 …… 3
　2.4 委員会の構成 …… 3
3. 試験結果 …… 7
　3.1 照射効果に関する確性試験(1) …… 7
　3.2 熱処理の影響 …… 21
　3.3 加工と照射量の影響 …… 26
　3.4 機械的性質に及ぼすボロンの影響 …… 33
　3.5 照射効果に関する確性試験(2) …… 42
　3.6 溶接部の照射試験 …… 51
　3.7 照射基礎研究 …… 66
　　3.7－A 冶金的因子の影響 …… 66
　　3.7－B 炭化物析出効果 …… 73
　　3.7－C 微細組織の変化と強度的性質 …… 77
　　3.7－D 炭化物とヘリウム気泡の関係 …… 81
4. 試験結果のまとめ …… 91
　4.1 化学成分 …… 91
　4.2 機械的試験 …… 92
　4.3 クリープラプチャー試験 …… 94
5. むすび …… 95
　付　　録 …… 97

1　はしがき

動力炉・核燃料開発事業団では，高速実験炉「常陽」の建設を進めるにあたり，炉容器および炉内構造材料が速中性子照射をうけるため，材料の照射損傷を評価する必要が生じた。これら構造材料の照射試験は高速中性子束の高い炉，すなわち，高速実験炉を用いて実施することが望ましいが，わが国では望むべくもないので，ＪＭＴＲ（日本原子力研究所材料試験炉）のもっとも高速中性子束の高い実験孔を使用して，数次わたる照射試験が立案された。

このような照射試験計画は将来，「常陽」が稼動した場合の，先行試験をも意味している。

動燃団のＪＭＴＲ照射試験を実行するに当り，同団は日本学術振興会に次の項目について研究，委託することになった。

(1)　照射キャプセル収容試験片の編成作業

(a)　研究目的に応じた照射試験片の製作を行ない，キャプセルにおける照射位置を決定する。

(b)　照射試験片は，引張試験片５１本（常温試験片：２５本，高温試験片：２６本），クリープラプチャ試験片２８本，金属組織試験片３コからなるものとする。

(2)　試験片の製作および供試材料試験の実施

供試材料は国産ステンレス鋼ＳＵＳ２７とし，素材および溶接部より試験片を採取して照射試験に供する。非照射試験については照射前試験および熱履歴付与の約４倍の試験片を準備し，照射前試験を実施する。

(3)　国内，国外の照射試験結果の比較検討

照射試験の成果を有効に評価するため，同一条件および類似した条件において実施された国内国外の照射試験結果を集収して検討する。

これらの項目にわたる委託研究を実施するため，日本学術振興会では第１２２委員会（委員長：長谷川正義）のもとにステンレス鋼照射委員会を関係材料会社および中立機関によって構成した。

同小委員会では，ステンレス鋼ＳＵＳ２７を供試材料として選定して，試験計画を審議し，内外の照射研究を調査し，かつ供試材料の照射前試験を実施した。

本報告書は以上の成果を整理しまとめたものである。

昭和４７年５月

ステンレス鋼照射小委員会

主査　藤　村　理　人

2. 研究の概要

2. 研究の概要

2.1 研究の目的

高速実験炉「常陽」等の炉容器，炉心構造物等の構造材料の中性子照射による材質変化に関して，これらの部材の候補材料とされている国産オーステナイト・ステンレス鋼材の基礎的な確性試験を実施する。

2.2 研究の内容

研究の内容をまとめて表1に示す。

2.3 研究の日程

研究の日程を表2に示す。

2.4 委員会の構成

研究委員会の名簿を表3に示す。

表 1　試験内容一覧表

(a) 会社関係

試験機関			川崎製鉄	日本ステンレス	日新製鋼	日本冶金	新日本製鉄	神戸製鋼
研究テーマ			AISI304ステンレス鋼の照射効果に関する確性試験	高速炉用ステンレス鋼の照射試験一熱処理の比較	高速炉構造用ステンレス鋼の機械的性質に及ぼす中性子照射の影響（加工と照射量の影響）	構造用ステンレス鋼の中性子照射前後の機械的性質におよぼすBおよびCの影響	AISI304の照射効果に関する確性試験	304ステンレス鋼溶接部の照射試験
研究目的			溶体化材を用いて，高速炉の運転温度における照射の影響を調べるとともに，加工，成分，溶接などの効果に対する標準データを得る。	溶体化材および鋭敏化材を用いて，熱処理の影響を比較する。	加工の影響および照射量の影響を得る。	比較的C量の高い材料およびB入り304材を用いてCおよびBの影響を明らかにする。	母材および溶接継手についてその照射による影響を比較する。	304鋼溶接部について，機械的性質に及ぼす照射効果を求める。
試験内容	照射前	引張	28本	40本	52本	32本	23本	12本
		クリープ	40本				36本	36本
		その他	光顕	光顕	光顕，電顕，電解抽出	光顕	光顕，硬さ	電顕
	照射後	常温引張	2本	4本	7本	2本	3本	3本
		高温引張	5本	6本	6本	6本	4本	
		クリープ	10本				9本	9本
		その他		電顕	電顕			

(b) 中立機関関係

試験機関			早稲田大	大阪大	東京大	原子力研
研究テーマ			304ステンレス鋼の照射に及ぼす冶金学的因子の影響	304ステンレス鋼の炭化物析出への照射効果	ステンレス鋼の照射による微細組織（電顕直接観察）の変化と強度的性質の変化との関係	炭化物とヘリウム気泡の関係
研究目的			304鋼およびB入り304鋼長時間加熱により，炭化物，ホウ化物の影響を明らかにする。また，浸炭材を用いてCの質量移行をモデル化した試験を行う。	304鋼および高炭素304鋼を用いて，炭化物の析出形態と照射の影響を比較し，腐食などにおける基礎的解明を行う。	転位，析出物および照射欠陥とボイドの関係を調べ，これらの強度に及ぼす影響を調べる	炭化物によるヘリウム気泡の捕獲の影響を調べる。
試験内容	照射前	引張	16本			
		クリープ				
		その他	光顕，電顕，電解抽出	電顕	電顕	電顕
	照射後	常温引張	4本			
		高温引張				
		クリープ				
		その他	光顕　6ケ	電顕	電顕	電顕

表2　研究の日程

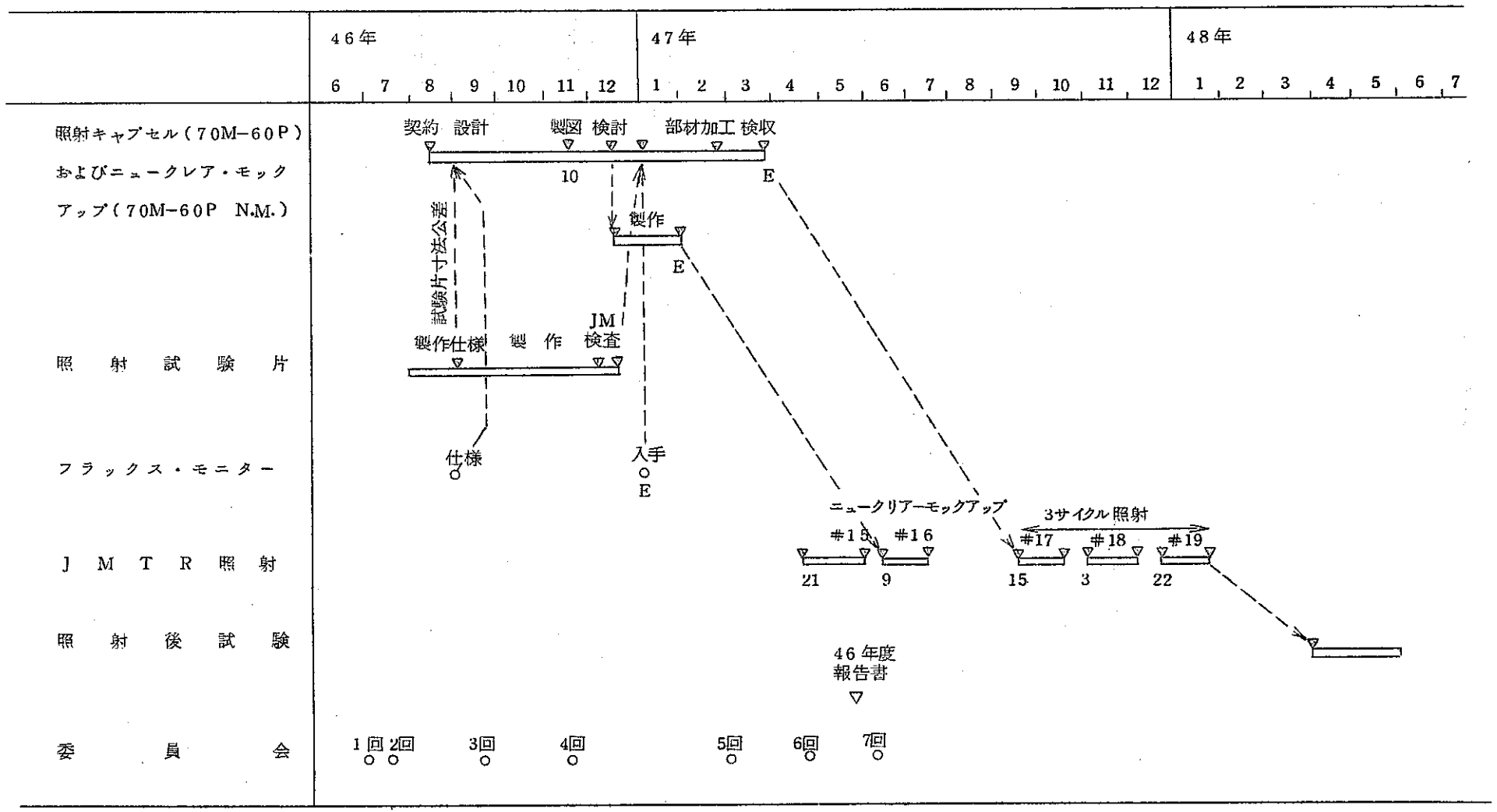

46年
47年
48年
6 7 8 9 10 11 12 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 1 2 3 4 5 6 7
照射キャプセル（70M−60P）
およびニュークレア・モック
アップ（70M−60P N.M.）
契約 設計
製図 検討
部材加工 検収
10
E
製作
E
試験片寸法公差
製作仕様
製作
JM
検査
照射試験片
仕様
入手
E
フラックス・モニター
ニュークリアーモックアップ
3サイクル照射
#15
#16
#17
#18
#19
JMTR照射
21
9
15
3
22
照射後試験
46年度
報告書
委員会
1回 2回 3回 4回 5回 6回 7回

表3　ステンレス鋼照射小委員会委員名簿

委員長	早稲田大学教授	長谷川 正 義	新宿区西大久保4－170 早大理工学部 160 電200－2567 金属工学科
主 査	日本原子力研究所 東海研究所 材料工学研究室長	藤 村 理 人	茨城県那珂郡東海村 同所材料工学研究室 319－11 電02928－2－2211
幹 事	日本原子力研究所 東海研究所 副主任研究員	近 藤 達 男	〃 〃
〃	早稲田大学 大学院学生	中 島 伸 也	新宿区西大久保4－170 早大理工学部 160 電200－2567 長谷川研究室
〃	動燃事業団 FBR開発本部	岡 林 邦 夫	港区赤坂1－9－13 三会堂ビル 107 電582－1241
委 員	東大工学部助教授	井 形 直 弘	文京区本郷7－3－1 東大工学部冶金学教室 113 電812－2111 内6195 教室
〃	大阪大学教授	山 根 寿 己	大阪府吹田市山田上 大阪大工学部冶金学科 565 電068－78－5111 内4403又は4423
〃	日本原子力研究所 大洗研究所 材料試験炉部 照射第1課長	大 内 信 平	茨城県大洗町大貫町 311－13 電029267－4111
〃	動燃事業団FBR 開発本部副本部長	市 野 市 郎	港区赤坂1－9－13 三会堂ビル 107 電582－1241
〃	川崎製鉄 技術研究所	鶴 岡 一 夫	千葉市川崎町1 280 電0472－64－2474
〃	㈱神戸製鋼所 中央研究所 主任研究員	永 井 信 行	神戸市葺合区脇浜町1－36 651 電078－251－1551
〃	新日鉄本社 技術開発部 副部長	木 山 稔	千代田区大手町2－6－3 100 電242－4111
〃	日新製鉄㈱ 周南研究所 課長	前 田 太 郎	山口県新南陽市富田4976 746 電0834－63－0111
〃	日本ステンレス㈱ 技術部 主任技術員	吉 田 幹 夫	新宿区本塩町8－2 160 電357－0121
〃	日本冶金工業 川崎製造所 研究部長	横 田 孝 三	川崎市小島町四番2号 210 電044－28－3531
〃	三菱原子力工業㈱ 開発部 高速炉燃料課長	本 田 裕	埼玉県大宮市北袋町1－297 330 電0486－41－5111

3. 試験結果

3. 試　験　結　果

3.1 照射効果に関する確性試験(1)

3.1.1 研究計画

(1) 研究テーマ： AISI 304ステンレス鋼の照射効果に関する確性試験

(2) 研究責任者： 鶴岡一夫（川崎製鉄・技研・物理研究室長）

担　当　者： 小林邦彦（川崎製鉄・技研・物理研究室）

(3) 研究内容

	照射後試験	照射前試験
常温引張	ε＝0.3％／min；繰り返し2回 〔降伏応力，抗張力，伸び〕 計 2本	◦材料；① 溶体化のまま ② Thermal Control材 ◦くり返し2回 〔降伏応力，抗張力，伸び，時効の効果〕 計 4本
高温引張	ε＝0.3％／min 温度 ① 550℃ 2本 ② 600℃ 2本 ③ 500℃ 1本 〔降伏応力，抗張力，伸び〕 計 5本	◦材料；① 溶体化のまま ② Thermal Control材 ◦温度；100, 200, 300, 400, 500*, 550*, 600*, 700℃ ◦くり返し；*のみ2回，他は1回 降伏応力，抗張力，伸び，時効の効果，試験温度効果 計22本
クリープラプチャー	温度　応力 ①550℃；100, 300, 1000, 3000hrs 破断応力 (29, 25, 21, 18kg／mm²) ②600℃；100, 300, 1000hrs破断応力 (23, 20, 17kg／mm²) ③650℃；同　上 (14, 12, 10kg／mm²) 計10本	◦温度　◦応力 ①550℃；100, 300, 1000, 3000hrs 破断相当応力 ②600℃；同　上 ③650℃；同　上 ◦材料 ①溶体化のまま ②Thermal Control材 計24本

金属組織観察（非照射材について）

① 溶体化後

② 熱履歴後

③ 高温引張破面近傍　（550℃とRT）

④ クリープラプチャー破面近傍（550℃）

* なお，常温引張と高温引張についてはJISに定められた大きさの試験片による測定も行なう予定である。

(4) 期待される成果目標

高速炉の運転温度近傍におけるAISI 304 ステンレス鋼の引張ならびにクリープ

ラプチャー挙動に対する中性子照射の影響を調べるとともに，他の因子（加工，成分，溶接など）の効果を検討するに際しての標準データが得られる。

3.1.2 照射前試験

(1) 素　材

- SUS 27　（AISI 304 Type）
- 板厚　20mm
- 熱処理　　1,050℃ 固溶化処理，水冷

(2) 化学成分

供試材のチェック分析値を以下に示す。

（wt.%）

成分	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
供試材	0.056	0.55	1.54	0.024	0.008	9.45	18.40
規格	≦0.08	≦1.00	≦2.00	≦0.040	≦0.030	8.00～11.00	18.00～20.00

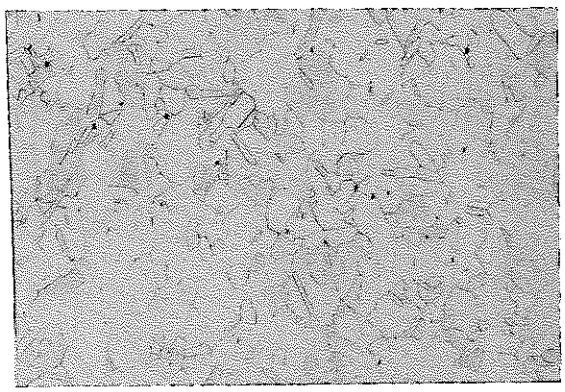
成分	Mo	Cu	Co	Al	Ti	B	Nb
供試材	0.094	0.097	0.24	0.006	0.017	0.0003	0.003

成分	N (total)	O
供試材	0.018	0.0070

(3) 組織観察

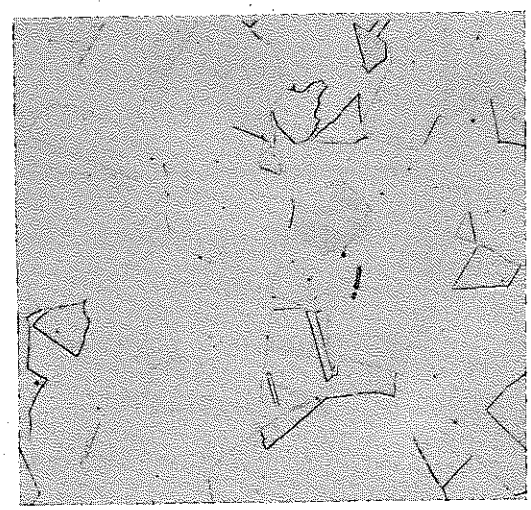
供試材の光学顕微鏡組織および電子顕微鏡組織を以下に示す。（粒度ASTM6）

1－a



×100

1－b



×400

写真1：　光学顕微鏡組織（クロム酸電解エッチ）

1μ　　1μ　　×10.000

2—a：¼ T部　　2—b：中央部

写真2　電子顕微鏡組織

(4) 高温引張試験及び常温引張試験

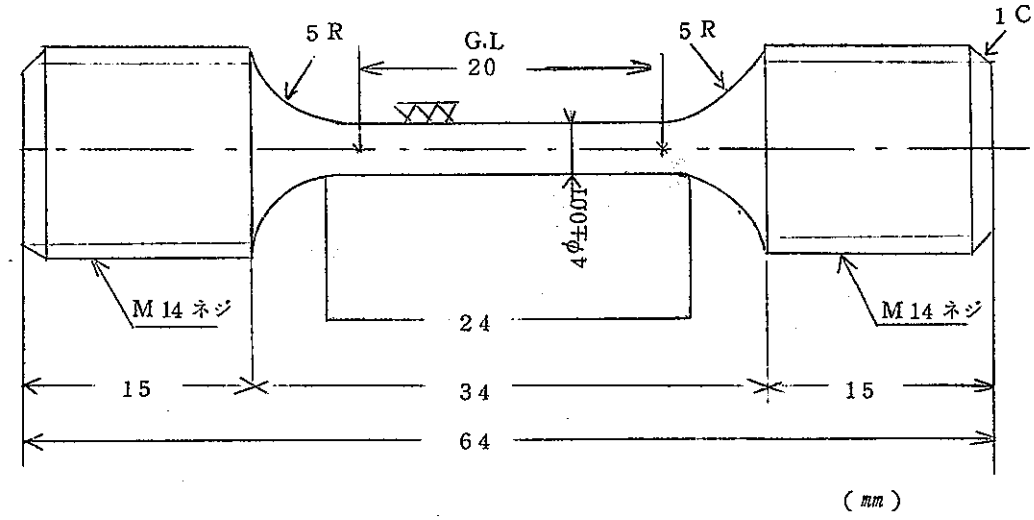
4－1. 試料採取位置

圧延方向直角

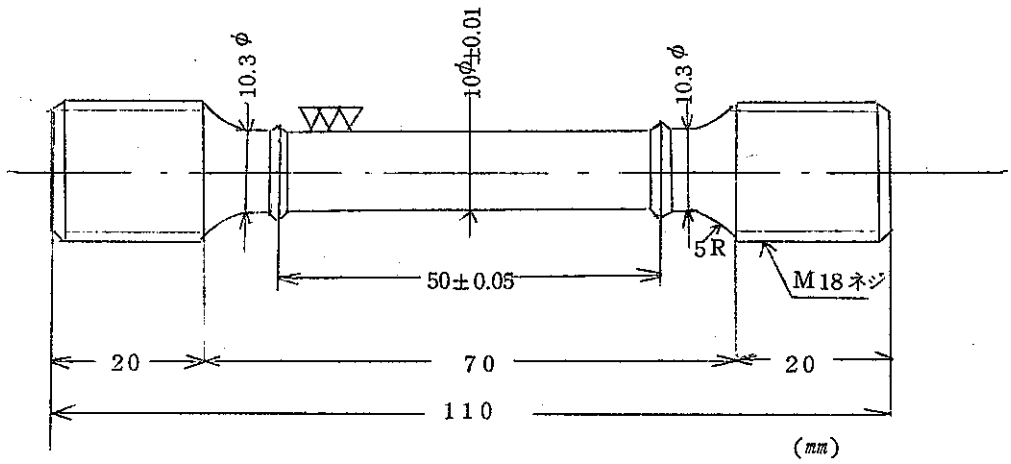
板厚 中央部

4－2. 試験片形状

(1) 4 mmφ 試験片 （No. 4B－1～4B－14）



(2) 10 mmφ 試験片 （No. 5C－1～5C－5）



4－3. 試験条件

試験片径	4 mmφ	10 mmφ
ゲージ長さ	20 mm	50 mm
引張速度	◦クロスヘッド等速 ◦クロスヘッドスピード 0.1 mm／min （約0.5％／min）	◦クロスヘッド等速 ◦クロスヘッドスピード 0.25 mm／min （約0.5％／min）
記　　録	◦荷重 ― 伸び （4φは2.5％まで，10φは2％まで） ◦荷重 ― 時間* （クロスヘッドの変位；破断まで） を同時に記録	
試験温度	RT　2本 100℃　1 200　1 300　1 400　1 500　2 550　2 600　2 700　1	RT　1本 500℃　1 550　1 600　1

使用試験材：島津製作所　IS 10T

＊荷重―時間　曲線より求めた耐力を原研ホットラボでの照射後試験の耐力と比較する。

4－4. 結　果

(1) 引張試験の結果を表1，図1に示す。

表 1　引張り試験の結果

No.	温度 (℃)	径 (mm)	0.2%耐力 (Kg/mm²)	0.2%耐力* (Kg/mm²)	引張り強さ (Kg/mm²)	伸び (%)	歪速度** (%/min)
4B－1	22	4.003	24.5	25.0	65.8	73.5	0.36
4B－13	25	4.006	24.8	26.2	65.9	73.2	0.34
4B－2	100	4.004	20.3	21.3	50.6	67.0	0.34
4B－3	200	4.007	18.5	18.7	44.7	42.2	0.36
4B－4	300	3.997	17.5	18.2	46.8	44.3	0.36
4B－5	400	4.002	16.4	17.3	45.4	39.5	0.36
4B－6	500	4.006	15.3	16.4	43.3	40.5	0.34
4B－8	〃	4.008	15.5	16.0	41.6	41.9	0.36
4B－7	550	4.001	15.3	15.9	39.2	43.6	0.36
4B－14	〃	4.006	14.9	15.6	40.4	41.3	0.32
4B－10	600	4.001	14.3	—	32.2	40.0	0.36
4B－12	〃	4.003	14.2	14.6	32.8	42.8	0.34
4B－11	700	4.004	12.4	13.1	18.4	58.4	0.34
5C－1	25	10.001	22.9	—	64.1	81.7	0.32
5C－5	500	10.003	14.1	—	43.3	42.6	0.34
5C－3	550	9.999	13.8	—	39.2	39.8	0.34
5C－4	600	10.005	13.3	—	31.9	42.4	0.34

4B；G.L.：20mm，cross head speed：0.1mm/min

5C；G.L.：50mm，cross head speed：0.25mm/min

*；0.048mm そ性歪（G.L.；24mmとして0.2%）での耐力

**；0.2%歪付近の歪速度

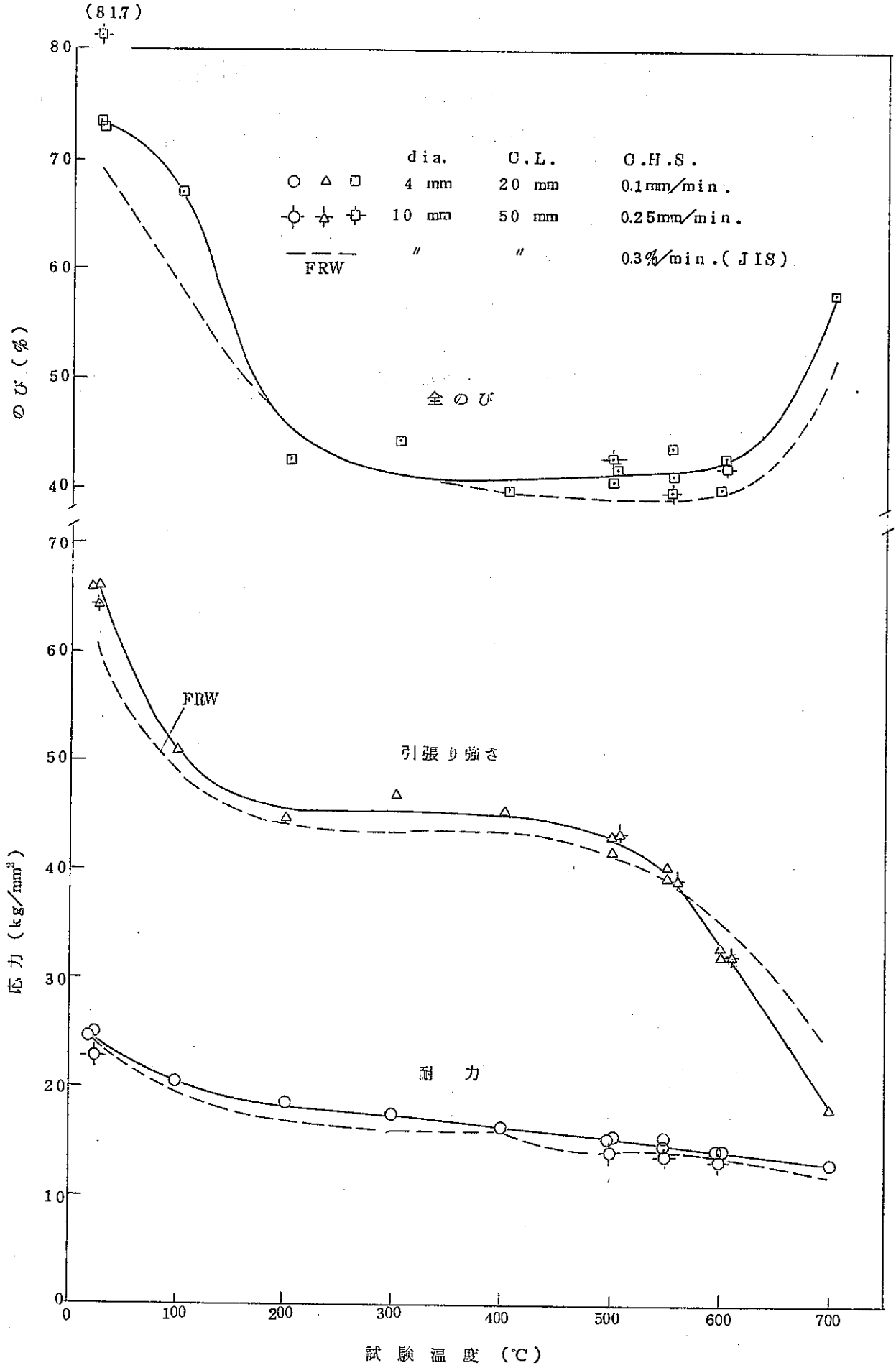

(81.7)
dia.
C.L.
C.H.S.
4 mm
20 mm
0.1mm/min.
10 mm
50 mm
0.25mm/min.
〃
〃
0.3%/min.(JIS)
FRW
のび(%)
全のび
FRW
引張り強さ
耐力
応力(kg/mm²)
試験温度(℃)

図1　引張試験結果

(2) 試料方向の差異の試験結果

試料採取方向がロール方向及びロール直角方向の試料についての引張試験の結果を図2に示す。尚これは日本溶接協会原子力研究委員会FRW小委員会向けの試験結果であり，試験条件は以下の如くである。

試料直径　10 mmφ（突起つき）

引張速度　耐力まで　0.3 %／min

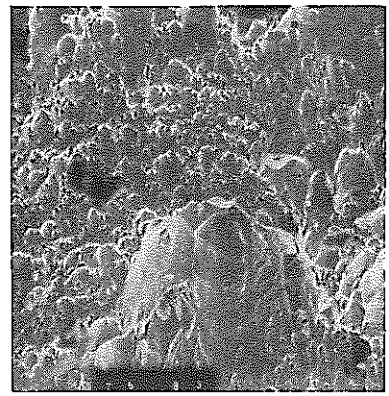
破断まで　5 mm／min

(3) 引張破断面の観察結果

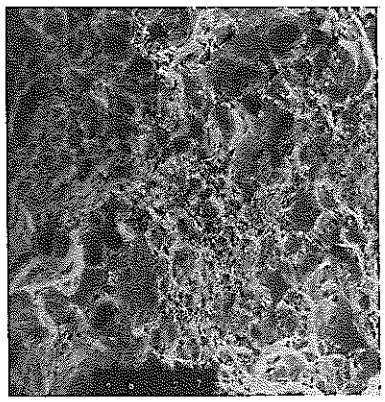
引張試験により破断した試料を走査型電顕により観察した結果を写真1に示す。

室　温

500℃



550℃



600℃

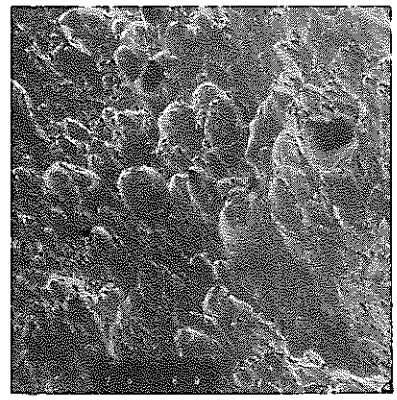


写真1　引張試験材破面×150

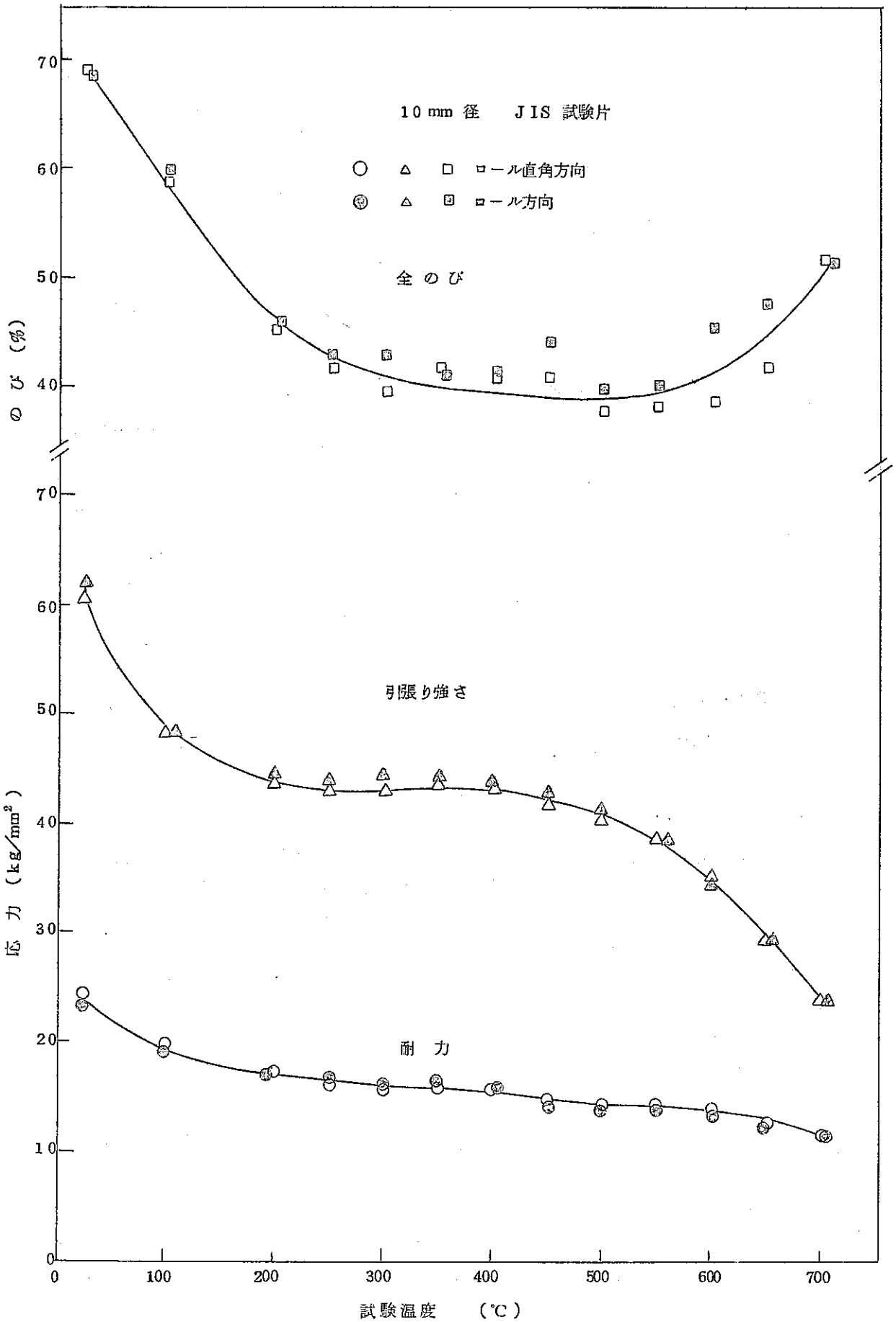


図2　ロール方向およびロール直角方向試料の引張試験結果

4－5 まとめ

室温，500℃，550℃および600℃についてはバラツキの有無を検討するため，繰り返し2回づつの試験を行ったが，表1，図1に見られるように0.2％耐力，引張強さともにきわめてバラツキが小さいことが確認された。

(1) 0.2％耐力

常温では24.5～24.8Kg／mm²，500℃では約15.4Kg/mm²，そして550℃では約15.2Kg／mm² である。この値は10mmφの試験片を用いてJISによって試験した値，又は4 mmφ試験片とほぼ同じ歪速度（0.34％／min）で試験した値より，約1Kg/mm² 程度大き目となる。

今回の如く4 mmφ試験片により求められた耐力はJIS 10mmφ高温引張試験法により求められた耐力よりも1Kg／mm² 程度高目であることに留意する必要があろう。

(2) 引張強さ

常温では65.8Kg／mm² であり，200～400℃では約45Kg/mm²とほぼ一定であるが，500℃で約42Kg/mm²，550℃では40Kg/mm² と低下する。引張強さについてはほぼ同じ歪速度で試験した場合，10 mmφと4 mmφ の寸法効果は見られないが，JISにより求められた値と比較すると常温では約6Kg／mm² 高く，500℃付近でも3Kg／mm² 高く同じ傾向にあるが，600℃以上では逆転して，700℃では約5Kg／mm² 低くなる。引張強さは歪速度にいちじるしく依存し，また試験温度によっても異なる。4 mmφ試験片では歪速度は約0.5％／min，JISの10 mm φ試験片では約10％／minであるから控え目に見積って約7Kg/mm² の差があり，実験結果とほぼ一致する。また700℃では約6Kg／mm² の差が予想されるが，これもよく結果と一致する。

従って今回の試験ではJISと比較した場合，歪速度の差がそのまま引張強さの差となってあらわれていることに注意する必要がある。

(3) 全伸び

伸びの測定は破断後試料をつきあわせて標点間距離を測定することにより求めた。

常温では約73％，200～600℃では40～43％とほぼ一定であり，700℃では58％となる。JISによる結果とは常温と700℃で特に差が大きいが，これも歪速度が小さい方が歪速度の大きい場合より室温，700℃で高目になることから説明される。しかしその差は予想される程（たとえば室温では約20％，700℃では約12％）大きくない。試験片寸法の効果については4 mmφ試験片では突起付10 mmφ試験片よりも10％程度低目になるとされている。歪速度と寸法効果をあ

わせて考慮すると得られた結果とＪＩＳによる結果の差異はほぼ妥当なものとなる。

(4) 試験片の採取方向による差異について

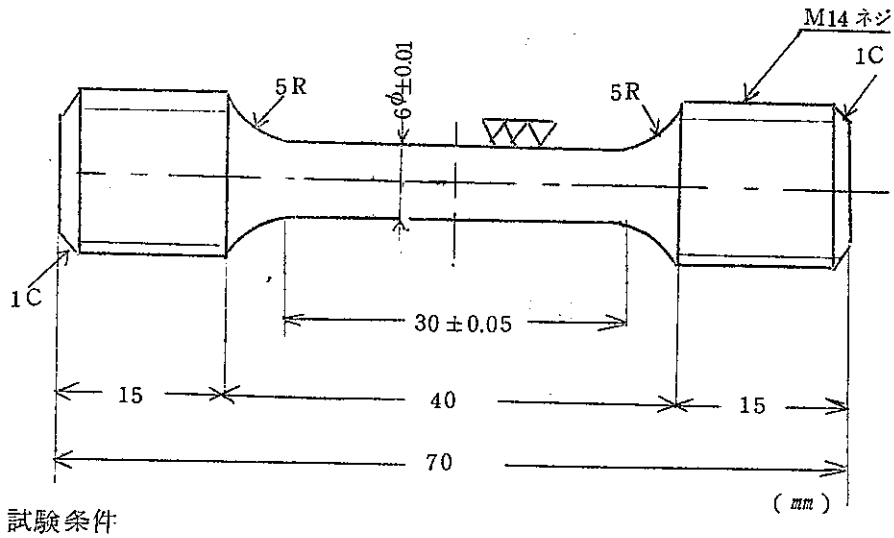
図２は１０ $mm\phi$ 突起付試料をＪＩＳによって試験した結果であるが，耐力，引張強さ，伸びともに試験片の採取方向に依存しないことが明らかである。これは本試料がクロス圧延されていることからも当然予想されることである。

(5) クリープ破断試験

５－1. 試料採取位置

- 圧延方向直角　（比較として圧延方向も一部採取）
- 板厚中央部

５－2. 試験片形状　　（６Ｂ－１～４０，Ｌ－１～Ｌ－２０）



５－3. 試験条件

- 試験温度　　：５００，５５０，６００℃
- 試験時間　　：１００，３００，１,０００，３,０００ hrs.（目標）
- 試験片採取方向：圧延直角方向

　　＊５５０℃のみについては比較のため圧延方向も実施

- 使用試験材　　：1.5 ton 又は 3.0 ton マルチプル型クリープ破断試験材

５－4. 試験進行状況　（表２）

表２　クリープ破断試験進行状況

応力（Kg/mm²）	40	35	32	27	25	22	20	17	15
500℃	⊗191.4	○	◉	○					
550℃			○	⊗485.4	◉	◉	◉		
(L方向)			○	⊗520.7	○	○	○		
600						○	○	⊗1315	○

記号：　○；試験予定　◉；試験中　⊗破断，数字は破断時間（hrs）

破面は室温および500～600℃のいずれもディンプル・パターンを示しており，そのサイズについては若干差が見られる。試験温度が室温の場合ディンプルのサイズは1μ以下程度でありまた，介在物に起因するようなボイドは約20μ程度のものまで存在する。

試験温度が500℃になるとディンプル・サイズは室温の時より大きくなり，しかもその周辺での塑性変形領域が室温での場合よりはるかに大きいのが特徴である。この傾向は550℃，660℃となるにつれていちじるしくなるようである。

5－5. 試験結果

500℃，550℃，600℃におけるクリープ破断試験結果を図3に示す。また図4にはLarson-Miller Parameterで整理した結果を示す。図中には三好行俊ら[1)2)]がSUS27について行ったクリープラプチャー試験の結果も参考に示したがそれらの試験温度は600，650，700℃である。

参考文献

1）三好，行俊：18-8系ステンレス鋼のクリープ破断試験後の組織観察
"住友金属" vol. 19 No. 4 (1967) 503

2）三好，行俊："鉄と鋼" vol. 53 (1967) 570

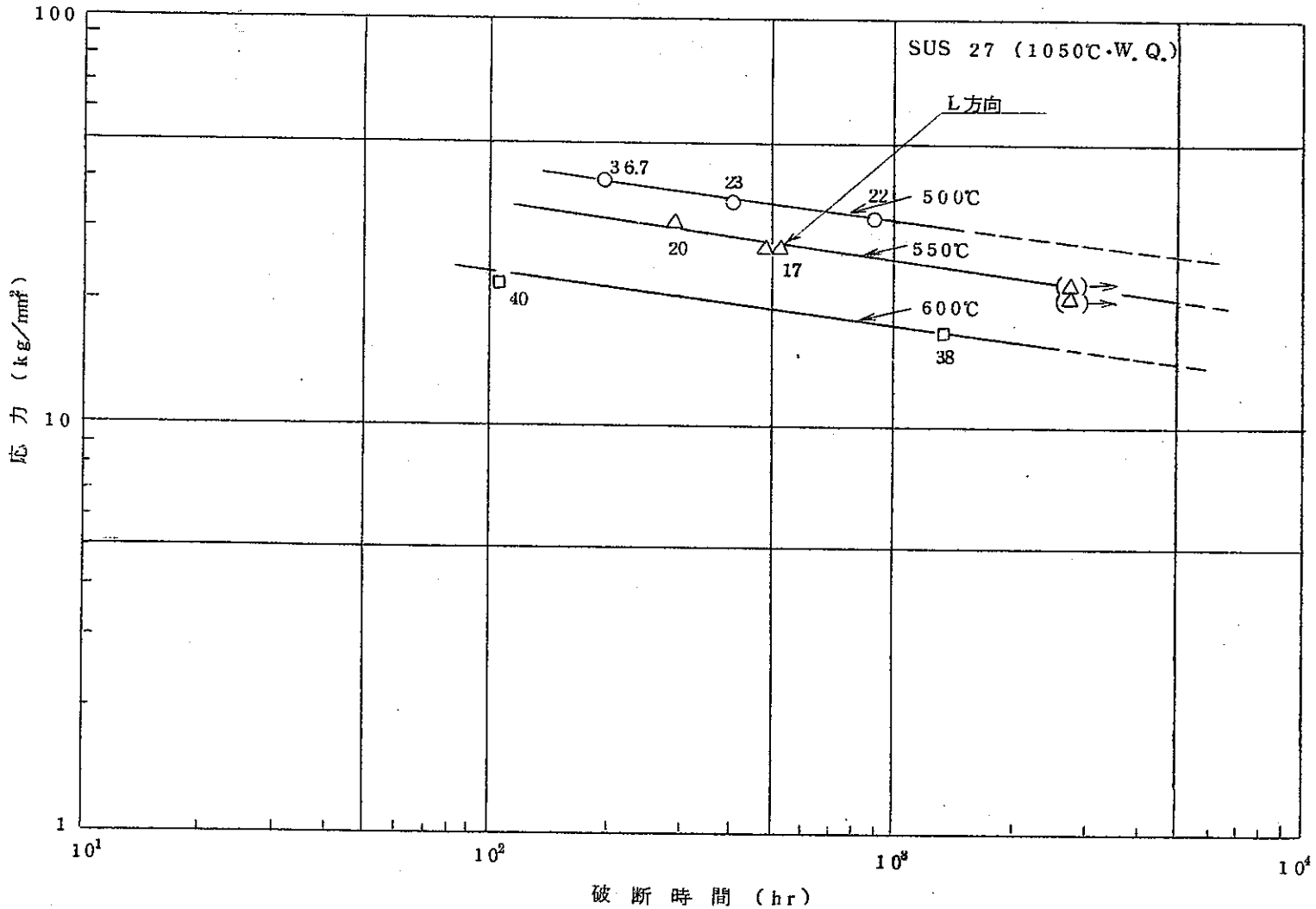

SUS 27 (1050℃・W.Q.)
L方向
500℃
550℃
600℃
36.7
23
22
20
17
40
38
100
10
1
応力 (kg/mm²)
10¹
10²
10³
10⁴
破断時間 (hr)

図 3　　応力－破断時間

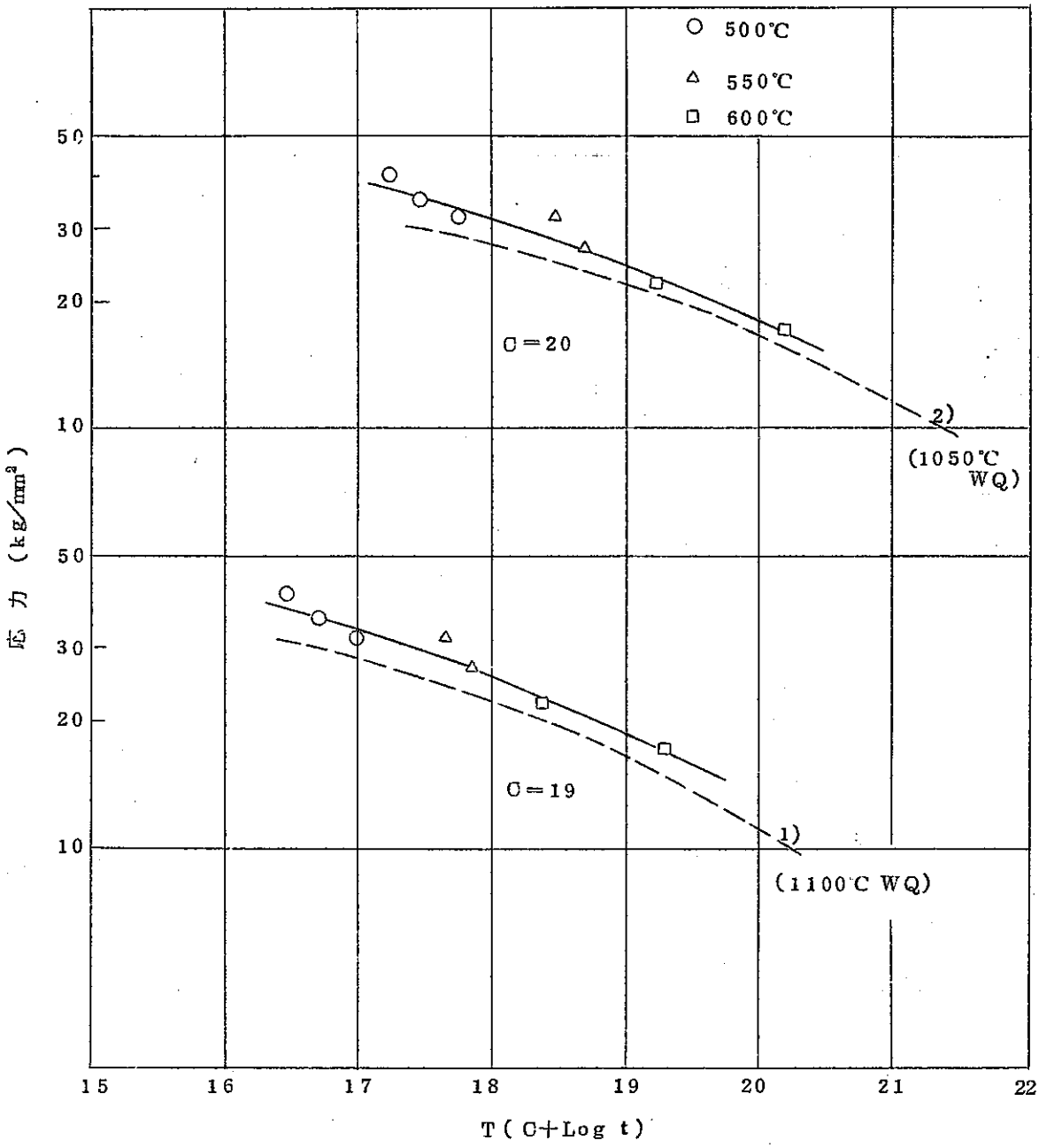

○ 500℃
△ 550℃
□ 600℃
50
30
20
10
C＝20
2)
(1050℃ WQ)
応 力 (kg/mm²)
50
30
20
10
C＝19
1)
(1100℃ WQ)
15
16
17
18
19
20
21
22
T (C＋Log t)

図 4　応 力 － L.M. 値

3.2 熱処理の影響

3.2.1 研究計画

(1) 研究テーマ：高速炉用ステンレス鋼の照射試験－熱処理の比較

(2) 研究責任者：吉 田 幹 夫　　会社所属　日本ステンレス株式会社技術部

担 当 者：　同 上　　会社所属　　同　　上

(3) 研究内容

1）鋼種，寸法　　SUS 27　　No.1　10 mm×1 m×1 m

2）製造履歴調査

3）熱処理条件

(イ) 固溶化　1080℃×22分

(ロ) 鋭敏化　（固溶化熱処理後）　650℃×2 hr

4）照射前試験

化学分析（C，Si，Mn，P，S，Ni，Cr，Cu，B）常温引張試験

高温引張試験　　金属組織（検鏡）

5）照射前試験片の数量

	固溶化	鋭敏化	計
常温引張試験片	2	2	4
高温引張試験片	2	2	4
金属組織試験片	1	1	2

但し，引張試験片は何れも圧延方向に直角

6）照射後試験片の種類と数量

		固溶化	鋭敏化	計
常温引張試験片		2	2	4
高温引張試験片	照射量（高）	1	2	3
	（中）	1	1	2
	（低）		1	1
電子顕微鏡試験片		1	1	2

7）試験の目的と意義

固溶化熱処理と鋭敏化熱処理をした材料を照射して熱処理の影響を比較

(4) 所要材料　SUS 27　ステンレス鋼　10mm×1m×1m　1枚

(5) 期待される成果目標

構造用ステンレス鋼としてSUS 27の中性子照射挙動の中，固溶化熱処理と鋭敏化熱処理の影響を比較調査

3.2.2 照射前試験

(1) 供 試 材

SUS 27

板厚 19 mm

熱処理

固溶化 1,080℃×44分保持 水冷

鋭敏化 同上固溶化熱処理後 650℃×120分保持 空冷

(2) 化学成分

チェック分析結果を表1に示す。

表1 チェック分析値

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N	B	O
0.070	0.79	1.64	0.029	0.009	18.49	8.72	0.11	0.08	0.02	<0.001	107PPM

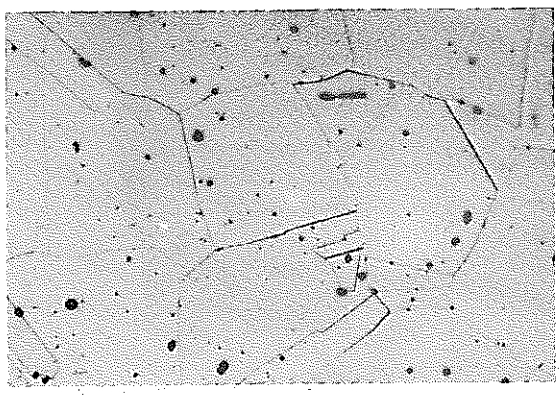
(3) 結晶粒度

固溶化 ASTM No.5～No.5.5

鋭敏化 ASTM No.5～No.5.5

(4) 光学顕微鏡組織

固溶化



×400

鋭敏化

×400

(5) 硬 度

熱 処 理	測 定 値	平均値
固 溶 化	159, 163	161
鋭 敏 化	159, 163	161

ただしブリンネルかたさ

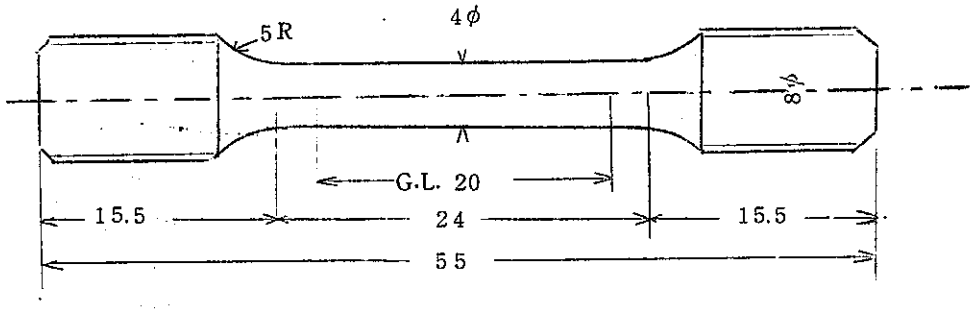
(6) 引張試験

6－1 試験片の採取方向

圧延方向

6－2 試験片の形状　　単位 mm

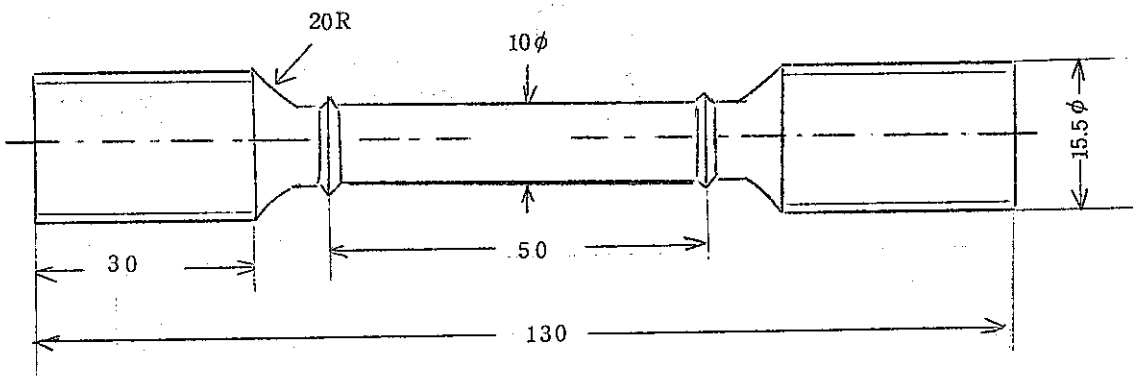
(1) 4 mmφ試験片



(2) JIS 4号試験片

GL；50 mm　　径；14 mm

(3) JIS 高温引張試験片



6－3 引張速度

試験片	ゲージ長さ mm	引張速度
4 mmφ 試験片	20	クロスヘッドスピード0.1 mm/min（約0.5%/min）
JIS 4号試験片	50	0～0.2%耐力まで　1Kg/mm²/sec 0.2%耐力～破断（平行部）40%/min
JIS 高温引張試験片	50	0～0.2%耐力まで　0.2%/min 0.2%耐力～破断（平行部）7.5%/min

6－4 試験結果　（図1）

(1) 4 mmφ試験片

4 mmφ試験片試験結果

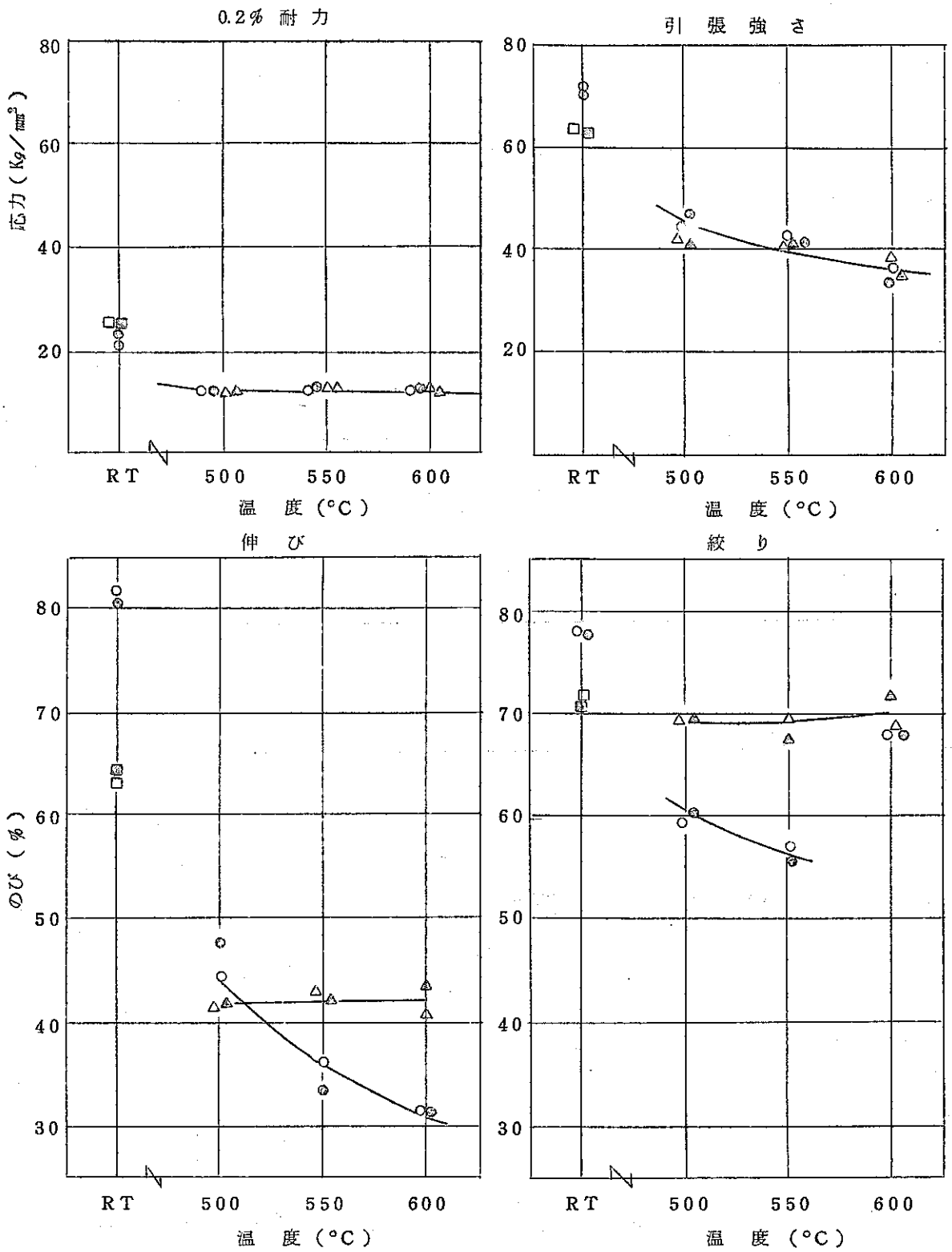
熱処理	試験温度	0.2%耐力Kg/mm²		引張強さKg/mm²		伸び %		絞り %	
	℃	測定値	平均値	測定値	平均値	測定値	平均値	測定値	平均値
固溶化	R.T.	22.4 22.8	22.6	71.3 70.9	71.1	82.7 80.0	81.4	76.9 79.1	78.0
	500	12.7 12.4	12.5	44.6 45.7	45.2	45.0 44.8	44.9	59.6 59.4	59.5
	550	12.2 11.9	12.1	43.0 41.8	42.4	36.5 35.5	36.0	58.6 55.3	56.9
	600	11.9 11.4	11.7	38.2 35.4	36.8	29.5 33.5	31.5	67.7 67.9	67.8
鋭敏化	R.T.	23.2 23.9	23.6	69.6 71.0	70.3	78.5 82.5	80.5	79.6 75.2	77.4
	500	12.7 11.6	12.1	46.9 46.0	46.4	47.2 47.8	47.5	61.0 59.3	60.1
	550	12.7 12.3	12.5	40.2 42.6	41.4	32.0 34.5	33.3	53.0 57.8	55.4
	600	11.9 12.6	12.2	34.6 33.8	34.2	33.0 29.5	31.3	67.5 67.7	67.6

(2) JIS 4号試験片による常温引張試験

熱処理	0.2%耐力Kg/mm²		引張強さKg/mm²		伸び %		絞り %	
	測定値	平均値	測定値	平均値	測定値	平均値	測定値	平均値
固溶化	25.9 25.7	25.8	63.4 63.5	63.5	63.3 63.3	63.3	70.5 72.8	71.7
鋭敏化	24.5 24.9	24.7	62.7 62.3	62.5	64.5 64.2	64.3	70.5 70.5	70.5

(3) JIS高温引張り試験片

熱処理	試験温度 ℃	0.2%耐力 Kg/mm²	引張強さ Kg/mm²	伸び %	絞り %
固溶化	500	14.3	42.5	41.4	69.0
	550	12.8	41.0	43.2	69.7
	600	12.6	39.2	40.6	68.7
鋭敏化	500	12.1	41.2	41.6	69.0
	550	11.8	40.7	42.0	67.5
	600	11.3	35.0	43.6	71.8



	固溶化	鋭敏化
4 mmφ 試 験 片	○	◎
Jis 4 号 試 験 片	□	▣
Jis高温引張試験片	△	▲

3.3 加工と照射量の影響

3.3.1 研究計画

1. 研究テーマ：高速炉構造用ステンレス鋼（AISI 304）の機械的性質に及ぼす中性子照射の影響（加工の影響と照射量の影響）

2. 研究責任者：前 田 太 郎　　日新製鋼(株) 周南研究所課長

   担 当 者　　〃　　〃

3. 研究内容

(1) 照射用試験片

加工は一軸引張歪として付与

加工％；(案)20％（または25.10％等）　$\varepsilon_x^{1)}$　①25％(348)　②18％　at 77 °K(313)③10％(316)

試験片	加工の影響		照射量の影響	試験片小計
	加工	溶体化	溶体化	
常温引張	1	1	5	
高温引張（温度×3）	1	――	3	
電顕	1	――	――	1

(2) 照射外試験

(A) 照射試験対比試験

試験項目	常温引張**		高温引張*		金属組織	
	加工	溶体化	加工	溶体化	加工	溶体化
炉外試験（照射前試験）	2（繰返×3）	2（繰返×2）	6（temp×3+繰返×2）	6（temp×3+繰返×2）	光顕 電顕（二段レプリカ組織，薄膜透過）	光顕，電顕（二段レプリカ組織，薄膜透過，抽出レプリカ観察，抽出レプリカによる析出物電子回析），電解抽出残査（X線回析）（化学分析）
Thermal control test++	2（繰返×2）	2（繰返×3）	6（温度×3 繰返×2）	6（温度×3 繰返×2）	光顕，電顕（二段レプリカ組織，薄膜透過，抽出レプリカ観察，抽出レプリカによる析物物電子回析）電解抽出残査（X線回析，化学分析）	同左
試験片小計	8		24		薄膜4，研磨面4	電顕抽出3

注）1. ＊JIS G 0567～1966〔鉄鋼材料の高温引張試験方法〕を適用し，平行部10㎜φの標準試験片を使用する。

2. ＊＊高温引張試験と同じ条件で行なう。

3. ＋照射後試験と同じ温度

4. ＋＋（照射温度）×（照射時間）に対応する単純時効処理を付与

(B) 照射後試験に含まれていない供試材確性試験（自主研究）

(a) 単純時効試験

対象材：加工，溶体化時効条件：0.10，100，500，1000，照射時間 i，e 約3000？ hr

① Vノッチシャルピ衝撃試験（繰返し3）

試験片数＝（対象2）×（時効処理6）×（繰返し3）＝36

② カタサ試験（衝撃試験後片使用）

③ 金属組織試験（衝撃試験後片使用）

光顕のみ

注）電顕，X線回析および抽出残査の化学分析は(2)(A)項に含まれるもののみを実施

試験片数（研磨面）＝（対象2）×（時効時間 4*）＝8

注）＊0 hr，約3000hrの2条件は2.1項に含まれるので除去

(b) クリープラプチャー

対象材：加工，溶体化

試験条件：照射後試験（川鉄）に同じとする。

（温度×3 σ ×2）ラプチャ試験片数＝（対象2）×（温度3）×（応力2）×（繰返し1）＝12

金属組織試験（クリープ破断片）　熱履歴材と同じ試験項目。ただし電顕抽出は各温度低応力片のみ

金属組織関係試験片数：薄膜12，研磨面12，電解抽出6

4. 所要材料

供試予定材

AISI 304，21.5 t×1219×3049

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
wt−%	0.06	0.53	1.06	0.028	0.006	8.94	18.37

5. 期待される成果目標

弊社分担の"加工の影響"および"照射量の影響"を検討するために有用なデータを得る。

3.3.2 照射前試験

(1) 供試材

日新製鋼㈱周南製鋼所製造　SUS27HP，23 t×1219×3048

（中間焼なまし）

(2) 化学成分

表1　供試材の化学成分（wt－%）

区　分	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	B	N		
										sol	insol	total
取　鍋	0.06	0.53	1.06	0.028	0.006	—	8.94	18.37	—	—	—	—
チェック	0.063	0.53	1.11	0.025	0.005	0.09	8.96	18.53				0.013
規　格（JIS）	0.08 以下	1.00 以下	2.00 以下	0.040 以下	0.030 以下	—	8.00 ～11.00	18.00 ～20.00	—	—	—	—

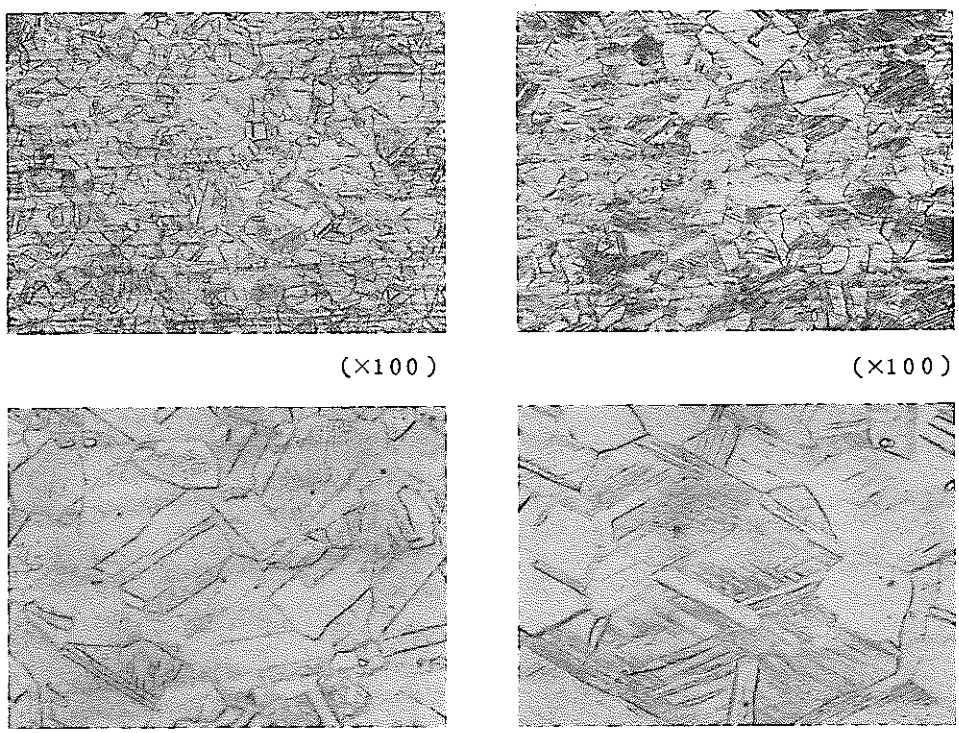
(3) 試料作成要領

ST（溶体化処理材）……中間焼なまし

CW（冷間加工付与材）…供試材熱間圧延方向に23φ×300の素片を切り出し，30 ton アムスラ型万能試験機を使用して，長さ方向の一軸引張り変形により20%の冷間加工を付与

(4) 光学顕微鏡組織

ST　　CW



（×100）　（×100）

（×400）　（×400）

写真1.　照射前の光学顕微鏡組織

ST材の結晶粒度：NO. 5.8（比較法*による）

注）* JIS G0552（1957）に準拠

(5) 非金属介在物

供試材の非金属介在物の光顕試験結果〔JIS G 0555(1956)による〕:

d 60×400 ＝0.033

dA_1 60×400＝0.008

dA_2 60×400＝0.008

dC 60×400＝0.017

×400

写真2 供試材の代表的な非金属介在物の光顕写真

(6) かたさ試験

表2 照射前試料の常温におけるかたさ〔Hv(30)〕

ST	171
CW	270

(7) 常温引張試験および高温引張試験

表3　照射前の常温および高温引張試験結果

試料	試験温度(℃)	加熱時間(分) 昇温	加熱時間(分) 均熱	σB (Kg/mm²) 測定値	σB (Kg/mm²) 平均値	δ (%) 測定値	δ (%) 平均値	φ (%) 測定値	φ (%) 平均値	σ0.2* (Kg/mm²) 測定値	σ0.2* (Kg/mm²) 平均値	σ0.5** (Kg/mm²) 測定値	σ0.5** (Kg/mm²) 平均値	σ1.0*** (Kg/mm²) 測定値	σ1.0*** (Kg/mm²) 平均値
ST	RT	—	—	74.4	74.6	81.6	82.1	80.5	81.4	26.1	26.2	27.8	28.0	29.3	29.4
				74.8		82.6		82.2		26.3		28.3		29.5	
	500	15	15	45.0	45.2	42.8	43.2	70.4	71.0	17.4	17.7	18.7	18.9	20.2	20.3
		15	15	45.3		43.6		71.5		17.9		19.1		20.5	
	550	20	15	40.0	39.7	42.3	42.6	70.4	72.2	17.9	17.5	19.2	18.7	20.3	19.8
		28	15	39.4		42.8		74.0		17.2		18.1		19.3	
	600	20	15	33.2	32.7	51.9	59.2	75.3	75.5	16.8	16.4	17.8	17.5	19.2	18.7
		15	15	32.2		66.4		75.6		16.1		17.2		18.5	
CW	RT	—	—	88.0	87.3	54.0	55.0	78.1	77.9	64.1	63.0	64.9	63.7	65.5	64.7
				86.6		56.0		77.7		61.9		62.6		63.9	
	500	15	15	55.6	55.3	23.4	22.1	67.0	67.7	47.8	48.1	49.2	49.4	50.6	50.7
		20	15	54.9		20.7		68.4		48.5		49.7		50.9	
	550	20	15	48.5	48.7	22.0	25.1	65.5	65.1	44.8	44.2	45.7	45.2	46.4	46.0
		20	15	48.8		28.2		64.7		43.6		44.7		45.6	
	600	15	15	39.6	39.6	32.3	36.0	69.7	70.7	37.0	37.0	38.5	38.5	39.1	39.1
		14	15	39.6		39.7		71.6		37.0		38.5		39.1	

注）試験条件

a．試験機…島津 10 ton オートグラフ

b．試験片…資料No.16 に示された試験片

c．歪速度… 0.5 %/min （破断まで）

クロスヘッド間移動速度　0.1 mm/min

原研近藤達男：照射後試験歪速度の選定，46−12−20 による。

d．試験片採取方向…圧延方向

*　0.048 mm そ性歪における応力（G.L.：24 mm として 0.2 %）

*　0.120 mm そ性歪における応力（G.L.：24 mm として 0.5 %）

*** 0.240 mm そ性歪における応力（G.L.：24 mm として 1.0 %）

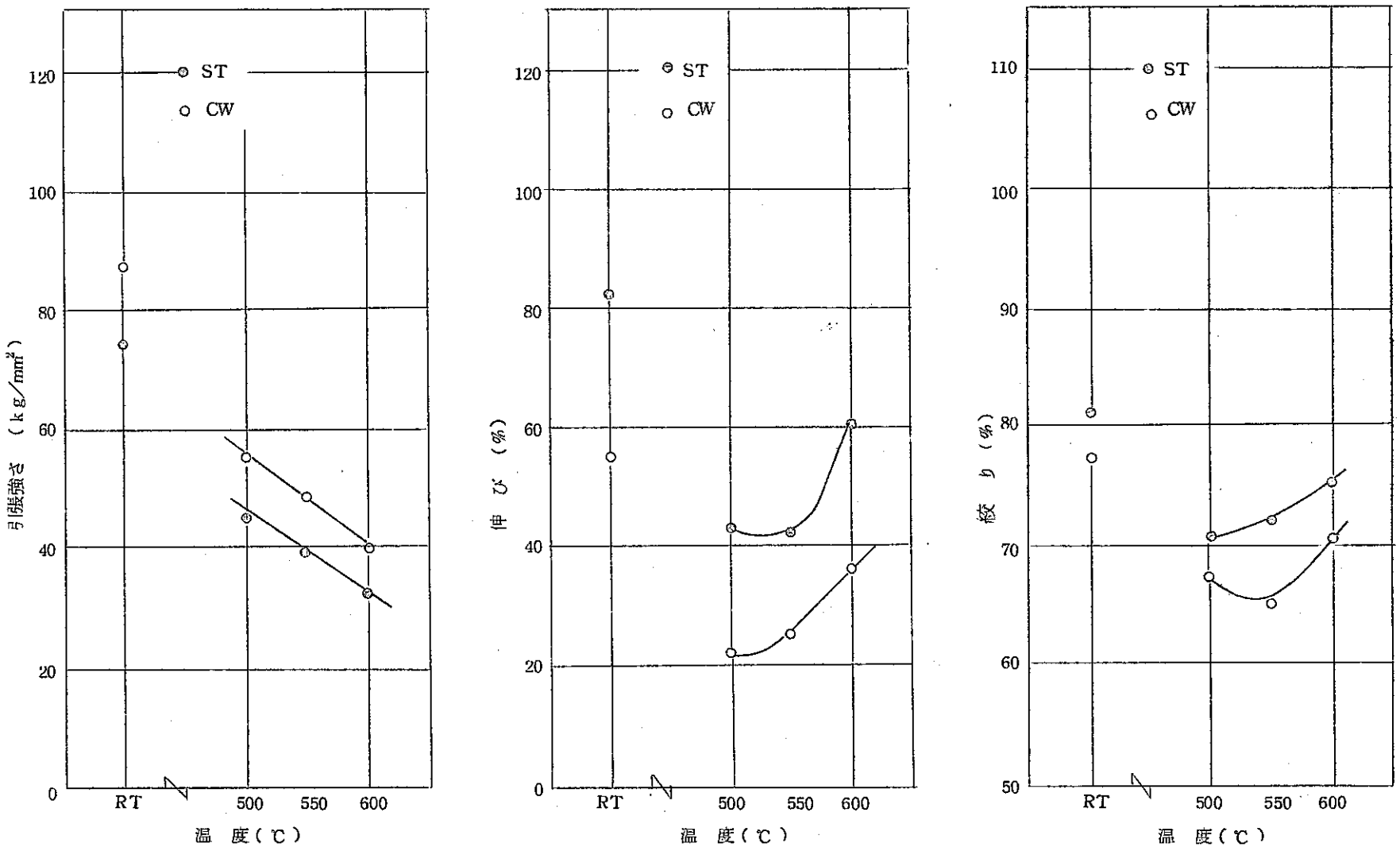


図 1　照射前の常温および高温引張試験結果

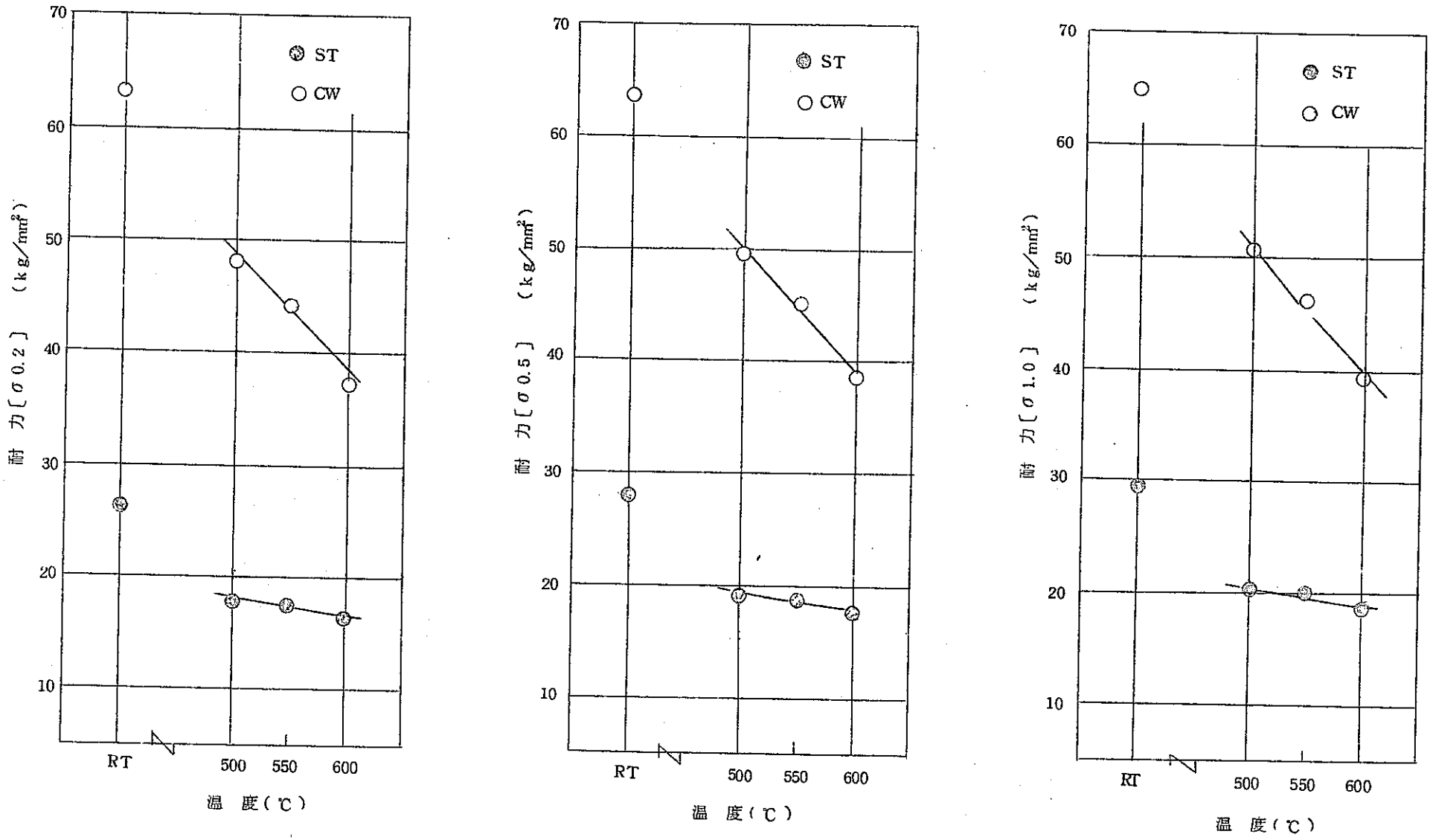


図 2　照射前の常温および高温引張試験における耐力

3.4 機械的性質に及ぼすボロンの影響

3.4.1 研究計画

(1) 研究テーマ：構造用ステンレス鋼の中性子照射前後の機械的性質におよぼすBおよびCの影響

(2) 研究責任者：横　田　孝　三　　日本冶金工業（株）川崎製造所研究部

担　当　者：大久保　延　弘　　〃　　川崎製造所研究部研究室

(3) 研究内容

1）目　的

市販のAISI 304鋼でCが規格値上限に近い材料および実験室溶解B入り304鋼を用い，照射前後および照射材と同様な熱履歴を与えた無照射材，合計3種の試料につき，主として常温および高温短時間引張試験によって劣化に対するBおよびCの影響を調査する。なおCの影響については他社の材料との比較によって，その影響が明らかにされるものと期待する。

2）供試材

A鋼，市販AISI 304，26㎜厚，溶体化処理

B鋼，実験室溶解　B入り　304，20㎜厚，溶体化処理

化学組成　(%)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Co	B
A鋼	0.070	0.77	1.62	0.028	0.005	8.79	18.79	0.08	0.06	~0.22	—
B鋼*	0.07	0.80	1.50	<0.030	≦0.010	9.00	19.00	—	—	—	100PPM

＊目標組成

3）試験項目

	A鋼			B鋼			試験片数
	非照射	非照射熱履歴	照射	非照射	非照射熱履歴	照射	
常温引張	2 1)	2 1)	1	2 1)	2 1)	1	10
高温引張	6 2)	6 2)	6 3)				18
組織	1	1					4
硬さ	1	1					4
チェック分析	C, Si, Mn, P, S, Ni, Cr, Mo, Cu, B, O, H, N, Nb, Ti						

1）繰返し2回　2）3温度繰返し2回　3）照射条件2，3温度繰返し1

(4) 所要材料

市販　AISI 304(NAS8S)　　26㎜×1000×770　1枚

実験室溶解　B入り304鋼　　20㎜×100×1000　1枚

(5) 期待される成果目標

1) 市販の構造用304ステンレス鋼の照射前後の常温機械的性質に対するBの影響を明らかにする。

2) 市販材としてはCレベルが高いので他社の供試材と比較することにより照射前後の常温および高温短時間引張性質に対するCの影響が明らかにされるものと期待する。

3) 照射中の熱履歴を炉外で再現し，非照射材の時効硬化を調べる事によって照射のみによる材料の劣化の程度を正しく把握することが出来る。

3.4.2 照射前試験

(1) 製造履歴

①AISI 304（以下A鋼と称す）

溶解—— 分塊—— 庇取 —— 圧延—— 熱処理 ——表面仕上げ

グラインダー 26mmt 1050℃ 酸洗

②B入り 304（以下B鋼と称す）実験室溶解材

溶解—— 庇取 —— 鍛造 —— 庇取り —— 熱処理

15kg グラインダー 20t×100×ℓ 1100℃ グラインダー 1100℃ 30分

(2) 化学成分

チェック分析結果を表1に示す

表1 分析結果（チェック）

呼称	溶番	板厚mm	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
A 鋼	84712	26	0.071	0.79	1.63	0.030	0.006	8.91	18.13
B 鋼	7565	20	0.069	0.68	1.57	0.024	0.010	8.97	18.77

Mo	Cu	Co	B	Nb	Ti	N	O(ppm)	H(ppm)
0.08	0.06	0.19	<1 ppm	0.003	<0.01	0.029	93	6.0
<0.01	0.01	0.10	0.0101	0.004	<0.01	0.014	116	4.3

(3) 結晶粒度

A鋼 ASTM G.S No. 4

B鋼 ASTM G.S No. 4

(4) 硬 さ

A鋼 Hv_{10} 146

B鋼 Hv_{10} 157

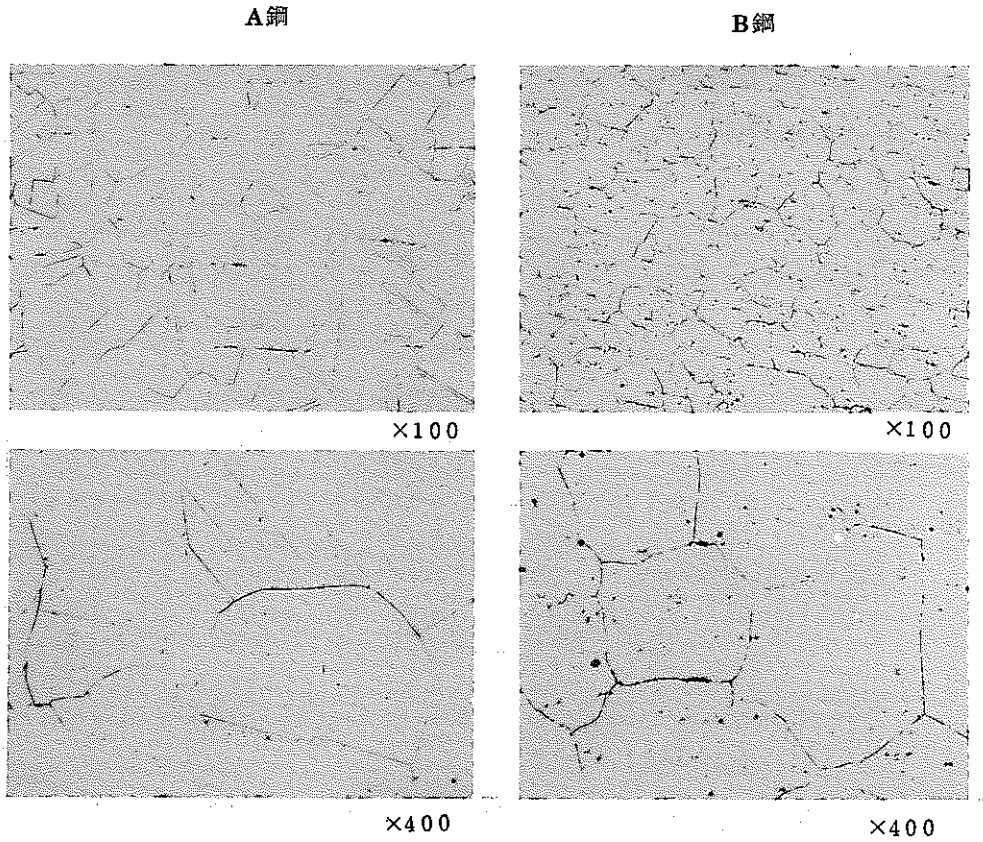
(5) 超音波検査（A鋼のみ実施）

探傷器：UR−1C

周波数：5MHz

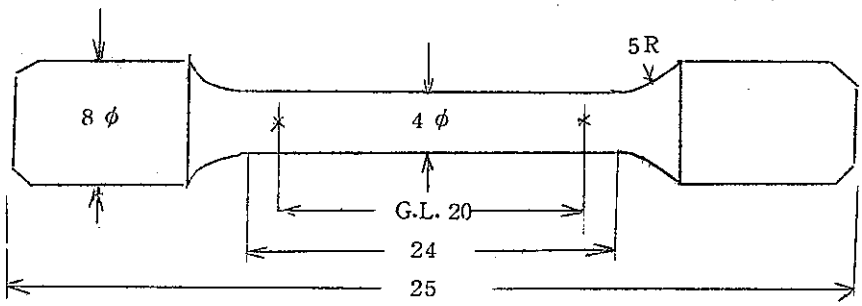
検査成績：欠陥波なし

(6) 顕微鏡組織（10％シュウ酸電解腐食）

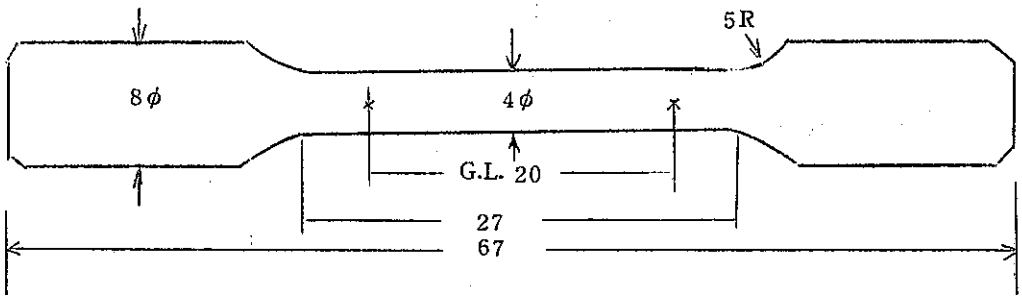


(7) 常温の機械的性質

試験片　照射小委員会常温引張り試験片ならびに同類似試験片



照射小委員会常温引張り試験片



類似常温引張り試験片

表 2　常温引張り試験結果

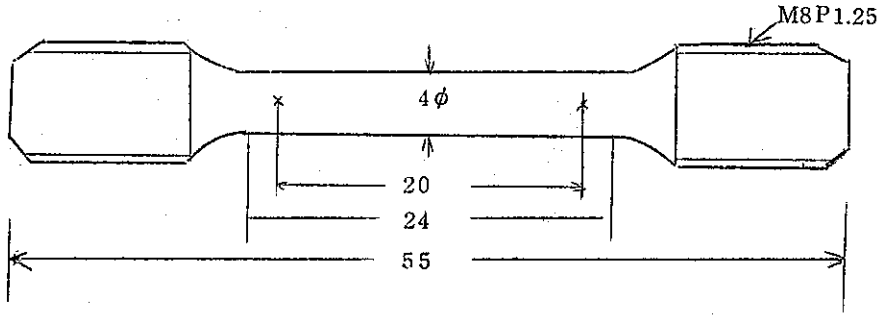
鋼種	試験片	方向	0.2%耐力 (Kg/mm²)	引張り強さ (Kg/mm²)	伸び (%)	絞り (%)
A 鋼	照射委員会用	R方向	—	62.0	65.5	77.6
		〃	—	60.8	67.0	79.9
	※	〃	27.1	76.3	83.5	81.0
	※	〃	28.7	73.9	87.8	78.7
	類似試験片	R方向	25.2	60.7	65.0	77.6
		〃	24.0	60.9	65.0	77.6
		P方向	25.1	61.3	64.5	74.9
			25.6	60.6	63.5	72.4
B 鋼	照射委員会用	R方向	—	61.5	64.5	75.2
		〃	—	62.3	60.5	75.2
	※	〃	27.1	80.0	70.5	68.3
	※	〃	25.5	80.9	79.8	73.9
	類似試験片	R方向	22.5	61.1	63.5	74.9
		〃	24.0	61.1	64.0	75.0
		P方向	23.3	59.8	63.5	69.7
		〃	22.6	59.6	62.5	69.9

(※) 照射小委指定の常温引張り試験片を用いず，高温引張り試験片を用いて常温での引張り試験を行なった。

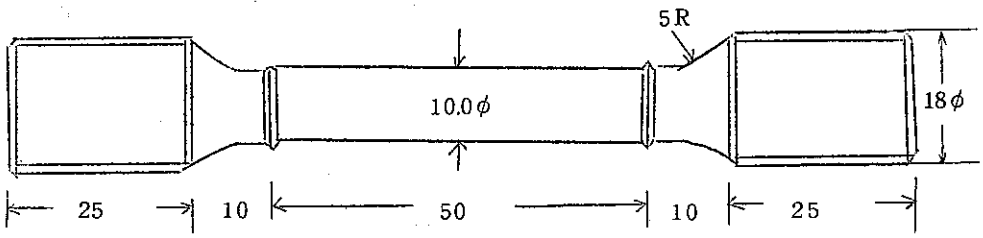
(8)　高温の機械的性質

鋼　種　　A　鋼

試験片　　照射小委員会高温引張り試験片ならびに当社高温引張り用HT8号試験片



照射小委員会高温引張り試験片



高温引張り試験片HT8号

試験温度　400℃
　　500℃
　　550℃
　　600℃
　　650℃
　　700℃

引張り速度　照射小委員会高温引張り試験片　クロスヘッド速度 0.1㎜／min　（破断まで）
　　4.4㎜／min　（破断まで）
　　高温引張り試験片HT8号　歪　速　度　0.5％／min（1％耐力まで）
　　クロスヘッド速度　約0.25㎜／min（破断まで）

表 3　高温引張り試験結果

試験温度	引張り速度	試験片	方向	機械的性質					破断位置
				0.2%耐力	1.0%耐力 (Kg/mm²)	引張り強さ (Kg/mm²)	伸び (%)	絞り (%)	
400℃	0.1 mm/min	照射小委用	R	15.5	—	52.4	49.3	73.9	A
500℃	0.1 mm/min	照射小委用	R	14.7	—	49.5	48.7	71.1	A
				14.3	—	47.6	47.5	72.6	A
	0.5 %/min	HT8号	R	13.7	17.0	49.4	46.5	64.6※	A
			P	13.7	16.8	49.1	48.3	70.8	
	4.4 mm/min	照射小委用	R	—	—	45.7	46.0	73.9	
				—	—	45.4	45.0	76.5	
550℃	0.1 mm/min	照射小委用	R	13.5	—	45.5	47.5	72.4	A
				13.4	—	45.1	47.5	72.4	A
	0.5 %/min	HT8号	R	12.1	15.7	45.5	49.2	66.3	A
			P	12.5	16.0	46.6	50.2	63.8	
	4.4 mm/min		R	—	—	43.7	44.5	76.2	
				—	—	43.9	44.7	75.2	
600℃	0.1 mm/min	照射小委用	R	12.8	—	37.5	43.8	56.1	A
				12.4	—	37.5	45.0	53.2	A
	0.5 %/min	HT8号	R	11.9	15.6	38.3	45.8	56.3	A
			P	11.4	14.6	39.6	45.3	57.0	
	4.4 mm/min	照射小委用	R	—	—	39.9	44.0	76.3	
				—	—	40.1	43.0	76.5	
650℃	0.1 mm/min	照射小委用	R	13.9	—	30.1	48.5	56.3	A
				13.5	—	30.1	49.5	51.4	A
700℃	0.1 mm/min	照射小委用	R	13.9	—	23.3	61.3	65.7	A

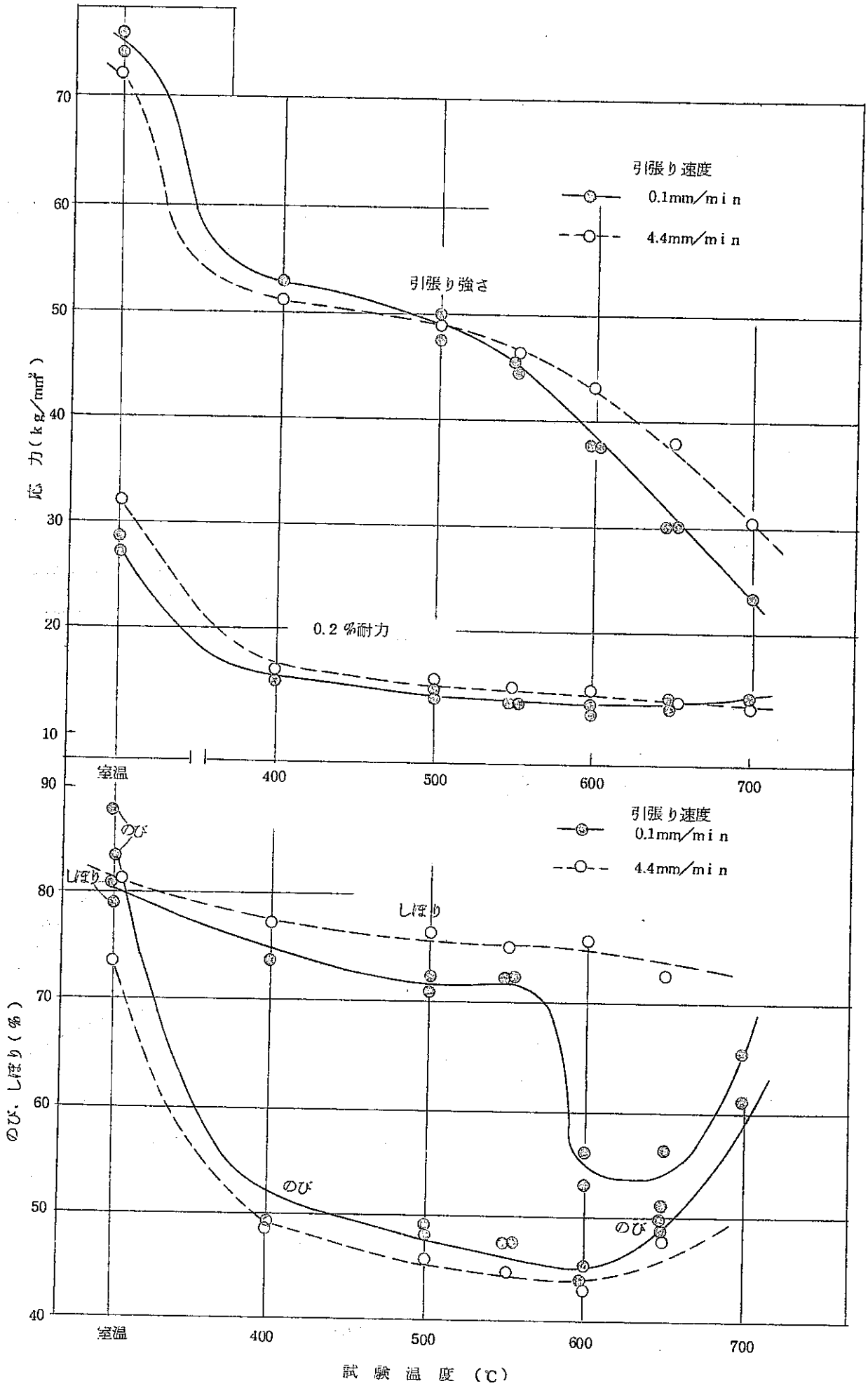

引張り速度
0.1mm/min
4.4mm/min
引張り強さ
0.2%耐力
応力(kg/mm²)
70
60
50
40
30
20
10
室温
400
500
600
700
のび
しぼり
のび、しぼり(%)
90
80
70
60
50
40
試験温度(℃)

図1　引張り試験結果

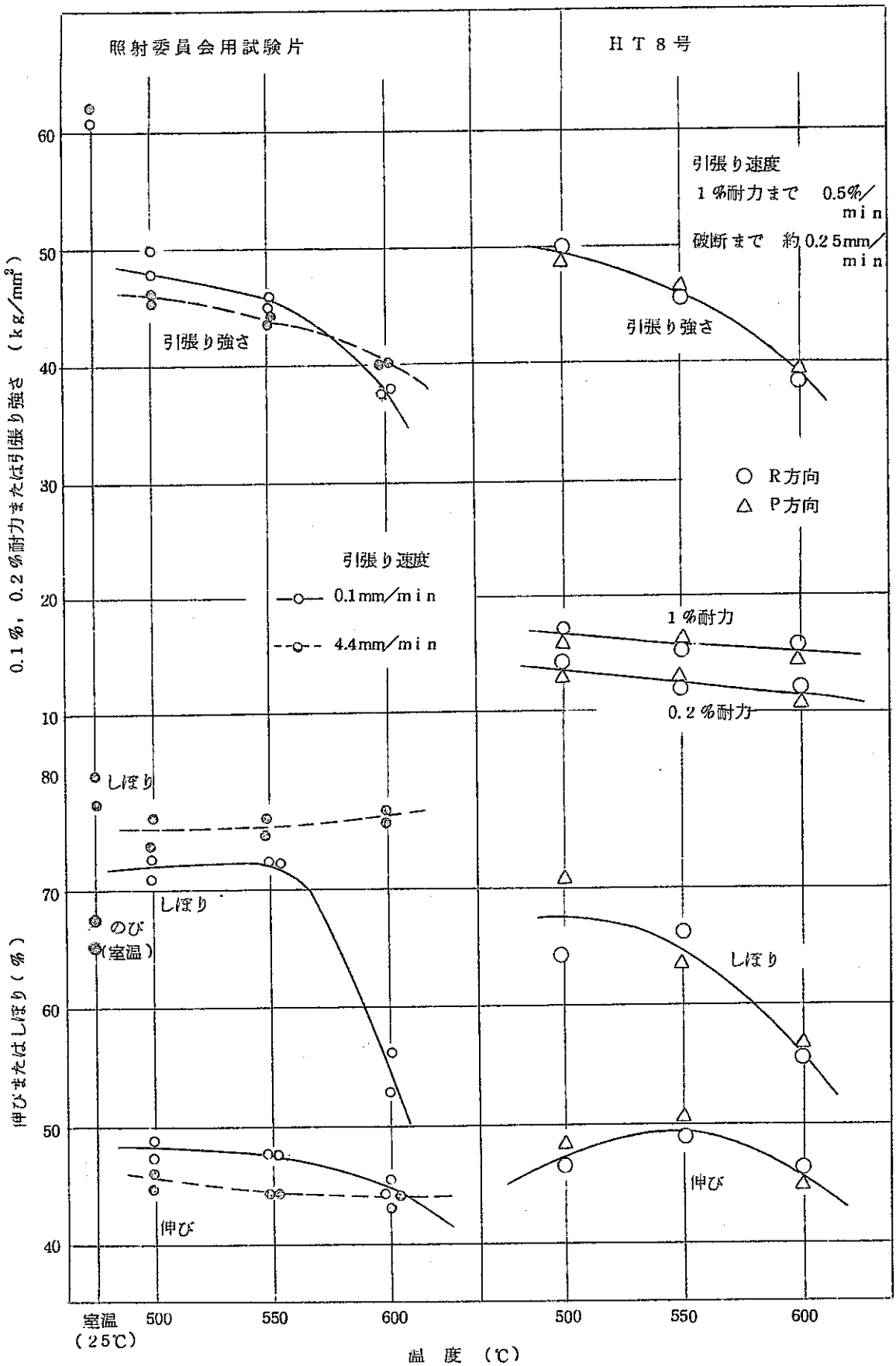
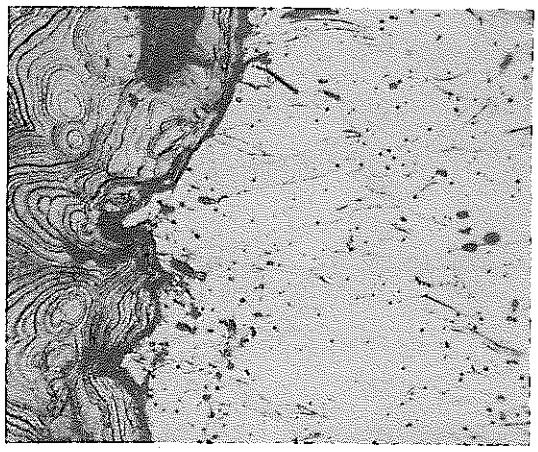
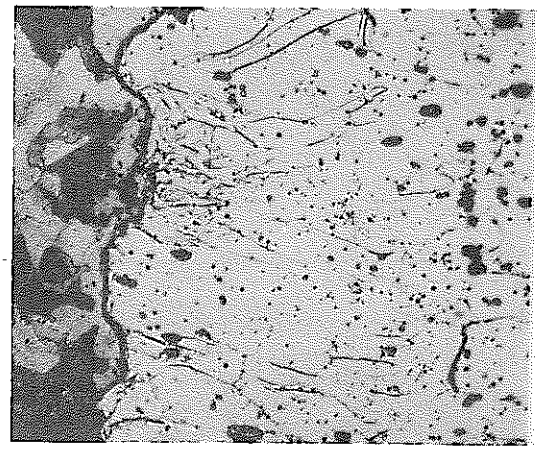


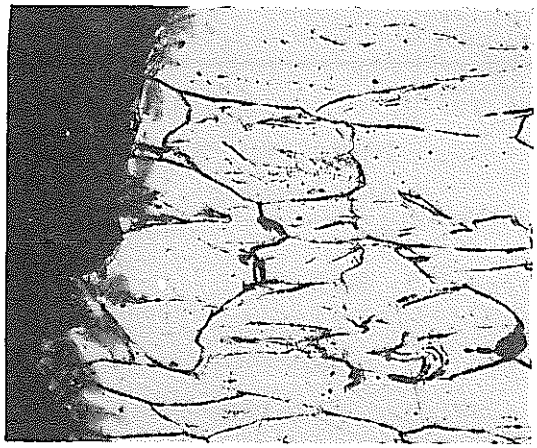
図 2　　高温引張り試験結果



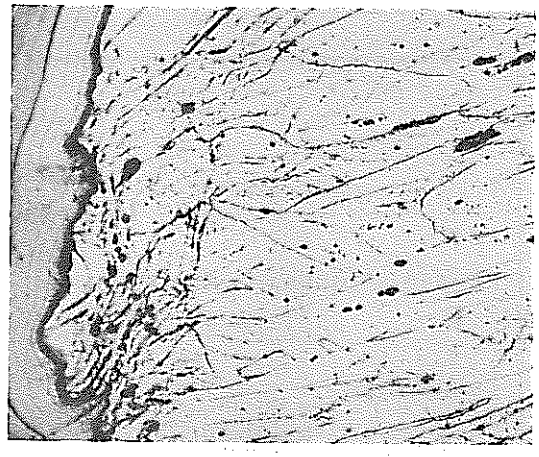
1) 500℃ 0.1 mm/min (×200)



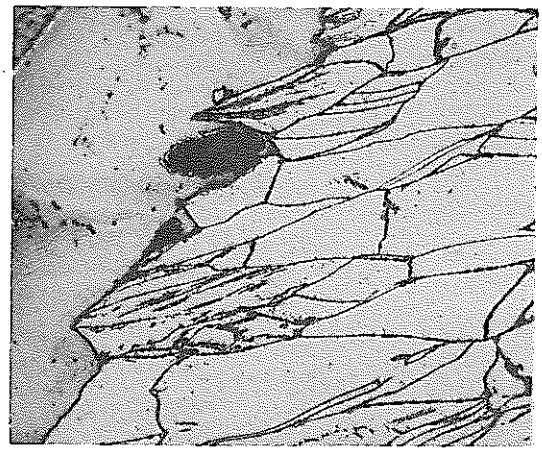
2) 500℃ 4.4 mm/min (×200)



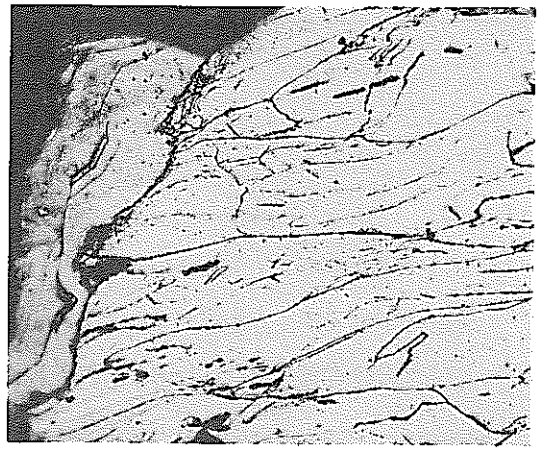
3) 600℃ 0.1 mm/min (×200)



4) 600℃ 4.4 mm/min (×200)



5) 700℃ 0.1 mm/min (×200)



6) 700℃ 4.4 mm/min (×200)

図3 破 面 観 察

3.5 照射効果に関する確性試験(2)

3.5.1 研究計画

(1) 研究テーマ：AISI 304の照射効果に関する確性試験

(2) 研究責任者：牟田　徹　　新日鉄(株)八幡技術研究所

担当者：安保秀雄　　同　上　(鋼材研究室)

(3) 研究内容

照射前用	照射用	熱履歴付与用
常温引張 母材 1×2(n) 継手 1×2(n) 4本 引張強さ，伸び(耐力)	母材 1×1(n) 継手 2×1(n) 3本	母材 1×2(n) 継手 2×2(n) 6本／計13本
高温引張 継手 500℃×2(n) 550℃×2(n) 600℃×2(n) 6本 引張強さ，伸び(耐力) 破断部の組織観察	継手 温度3水準×1(n) 3本	継手 温度3水準×2(n) 6本／計15本 引張強さ，伸び(耐力) 破断部の組織観察
クリープラプチャー 母材 500℃一応力(2)×n 550℃一応力(2)×n 600℃一応力(2)×n 6本 (註) 原則としてFRW委(S44度)のデータを用いるが本試料にて比較チェックする。	母材 9本	母材 温度3水準 ×応力3水準 ×2(n) 18本／計33本

その他　母材・溶接部の組織観察　硬度分布測定を行う。

(4) 供試材

1) 母材

SUS 27 HP　　25mm t

鋼番　D7542　　製造番号　90−9021−01

(注) 溶接協会FRW委(S44度)，FNA委に使用した同一材料

化学成分

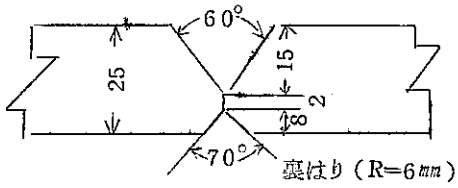
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
0.04	0.60	0.99	0.023	0.007	9.60	18.64	0.11	0.09
Co	N	B	Ta+Nb	Total Aℓ				
0.24	0.029	0.0005	0.002	0.004				

2) 溶接材料（市販手溶接棒）

D308R　　4.0φ

(5) 溶接方法

1) 開先形状



2) 溶接条件

電　流　　150Amp

電　圧　　22～25Volt

速　度　　150㎜／min

層間温度　100℃以下

3) 溶接後熱処理

な　し

(6) 試験片採取位置

1) 溶接部硬度分布測定用（½t，¼t表面下3㎜）

2) 常温引張，高温引張，クリープラプチャ用（½t部より採取）

(7) 所要材料

鋼　　種

304（母　材）　　25t×100×700㎜　　14Kg

308（溶接棒）　　4φ　　5Kg

3.5.2 照射前試験

(1) 供試材料

1) 鋼　種；SUS27（昭和44年度溶接協会FRW母材試験材と同一材）

2) 鋼　番；D7542（製造番号；90－9021－01）

3) 板　厚；25㎜

4) 供試材の化学成分

化学成分(%)（チェック分析値）								
成分	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
供試材	0.04	0.60	0.99	0.023	0.007	9.60	18.64	0.11
規格	≦0.08	≦1.00	≦2.00	≦0.040	≦0.030	8.00～11.00	18.00～20.00	—
成分	Cu	Al total	Co	B	N	Nb+Ta	Fe	
供試材	0.09	0.004	0.24	0.0005	0.029	0.002	残	
規格	—	—	—	—	—	—	残	

5) 製造履歴

溶製	エルー式塩基性弧光炉 公称容量：30 ton／チャージ 鋼塊：8 ton
↓	
分塊	熱間圧延（スラブ厚さ250mm）
↓	
手入れ	グラインダ
↓	
圧延	四重逆転式熱間圧延機
↓	
熱処理 （溶体化処理）	昇温時間：常温から1050℃まで 26min 保持時間：1050℃×13min 冷却方法：水冷 （燃料：コークス炉ガス）
↓	
表面仕上げ	酸洗→#80バフ研磨→酸洗

超音波探傷試験

探傷器	USF−5C
周波数	5MHz
検査成績	欠陥波なし

(2) 試験項目

1) 母材試験

(a) 組織観察（光顕）

(b) 常温～高温引張試験

(c) クリープラプチャー試験

2) 溶接継手部試験

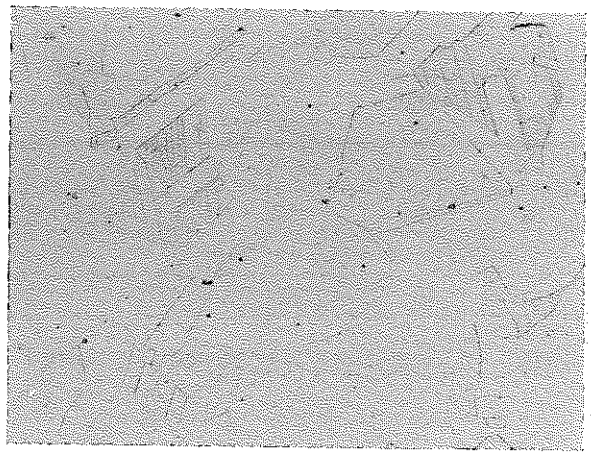
(a) 組織観察（光顕）

(b) 継手高温引張試験

(3) 試験結果

1) 母材試験

(a) 光顕組織観察



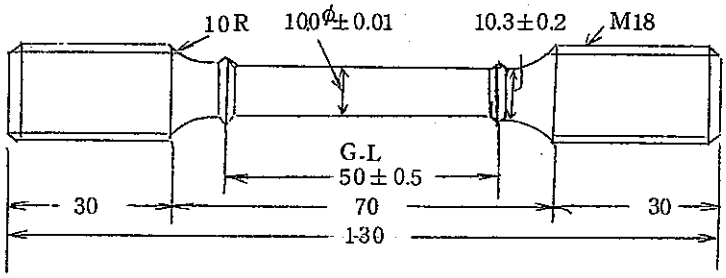
結晶粒度　4.2　×200

(b) 常温～高温引張試験（SUS27母材）

試験機：島津　オートグラフIS10T

試験温度	採取方向	引張速度*1 耐力まで 0.15mm/min 耐力の破断 5 mm/min				引張速度*2 破断まで 0.10mm/min			
		0.2%耐力	引張強さ	伸び	絞り	0.2%耐力	引張強さ	伸び	絞り
		Kg/mm²	Kg/mm²	%	%	Kg/mm²	Kg/mm²	%	%
R. T	L	29.2	64.4	74.6	80.2	27.73	59.77	74.0	78.6
	C	26.1	66.0	71.7	74.8				
350℃	L	14.3	44.8	46.9	73.1				
	C	15.2	44.3	46.9	69.0				
400℃	L	14.8	44.5	48.3	71.4				
	C	14.6	43.8	48.6	70.0				
450℃	L	14.7	43.6	47.5	71.2				
	C	13.7	42.9	46.9	68.7				
500℃	L	12.9	40.8	48.3	72.4				
	C	12.9	40.9	46.9	70.2				
550℃	L	13.0	38.5	46.3	74.8				
	C	12.9	38.8	46.3	69.8				
600℃	L	13.3	35.4	45.6	72.9				
	C	11.9	34.8	48.2	70.5				
650℃	L	—	31.3	50.4	68.0				
	C	12.5	30.5	53.7	66.1				

*1　試験片形状　　*2　試験片形状　資料No.16の試験片



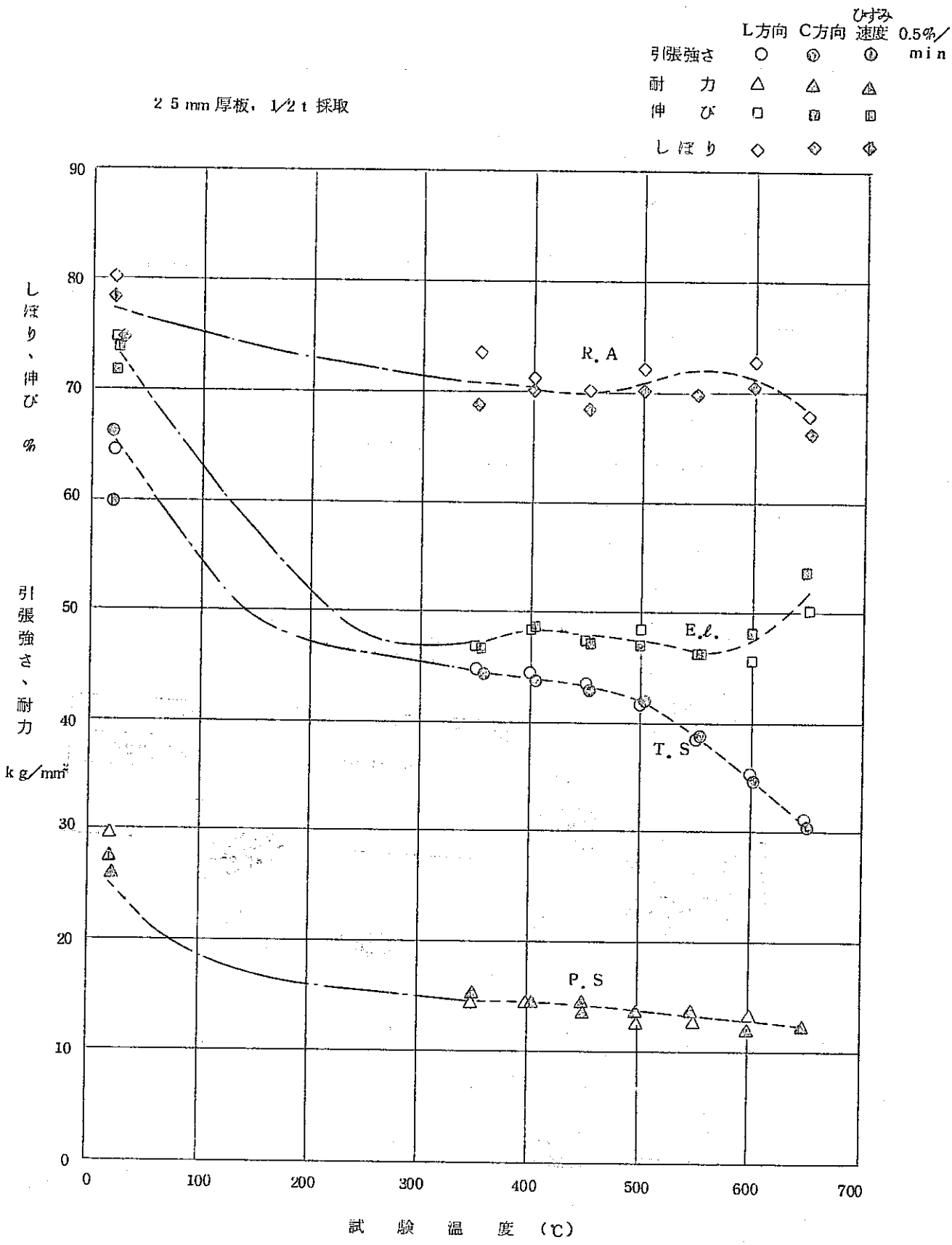


図1　SUS27母材の常温～高温引張試験結果

引張速度 { 耐力まで；0.15mm/min
耐力～破断；5mm/min

2) 溶接継手部試験

〔溶接要領〕

○開先形状

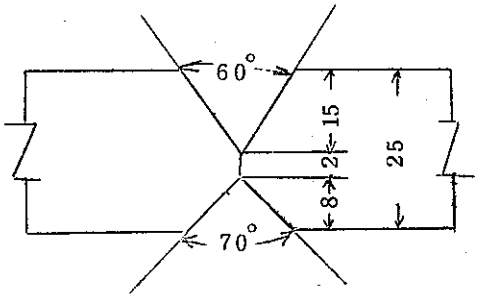


表8層
裏9層（R＝6㎜で裏はつり後）

○溶接条件

溶接棒；D308（日鉄溶接工業製 308R）……4φ

電　流；150Amp

電　圧；24Volt

速　度；150㎜/cm

層間温度；100℃以下

予熱，後熱なし

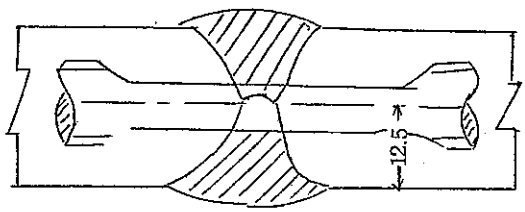
○溶着金属分析結果

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Co
SUS27−D308	0.050	0.46	1.47	0.024	0.008	9.85	20.36	0.05	0.26

Cu	Nb+Ta	Ti	Al total	B	N	δ−フェライト量%（フェライトインジケーターによる）
0.054		0.026	0.002		0.0204	7.5〜10%

空欄は未結果

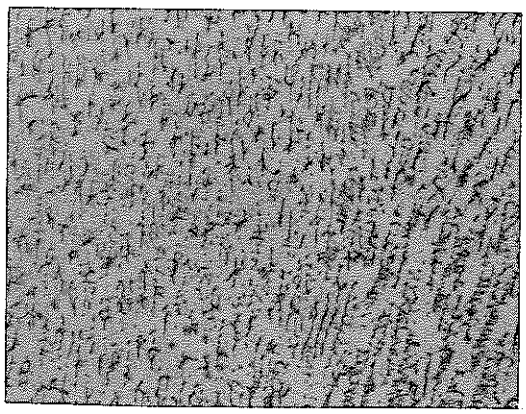
○試験片採取要領



½ t 部より採取

（a） 溶接継手部光顕観察

王水エッチング



溶着金属 ×200

ボンド部 ×200

H.A.Z. 1mm ×200

H.A.Z. 2mm ×200

H.A.Z. 3mm

H.A.Z. 4mm ×200

(b) 溶接継手部常温高温引張試験

試験温度	機械的性質				ひずみ速度		
	0.2%耐力	引張強さ	伸び	絞り	破断までの所要時間	ひずみ速度	
	Kg/mm²	Kg/mm²	%	%		%/min	
R.T	41.85	63.22	35.0	39.7	96′45″	0.36	
500℃	31.64	54.31	30.0	69.5	65′36″	0.46	(セレイション)
550℃	34.65	42.52	30.0	66.7	77′18″	0.39	(セレイション)
600℃	27.12	31.91	21.0	50.9	60′23″	0.35	

試験条件

試 験 機；島津オートグラフ　IS10T

試 験 片；資料No.16の試験片（4φ, C.L 20mm）

引張速度；0.1mm/min（クロスヘッドスピード）

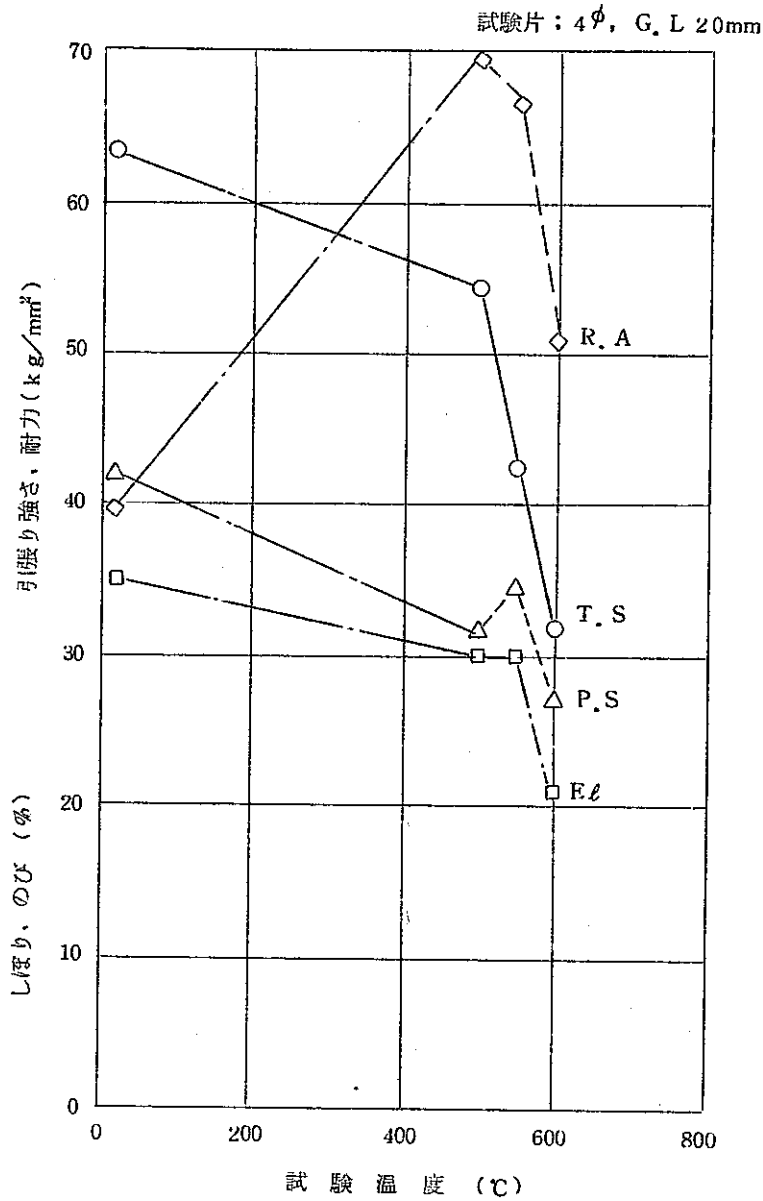


図2　SUS27−D308溶接継手部の高温引張試験

3.6 溶接部の照射試験

3.6.1 研究計画

(1) 研究テーマ：高速炉構造材料照射に伴なう試験研究
304ステンレス鋼溶接部の照射試験

(2) 研究担当者：永　井　信　行　　㈱ 神戸製鋼所中央研究所

(3) 研究の内容：

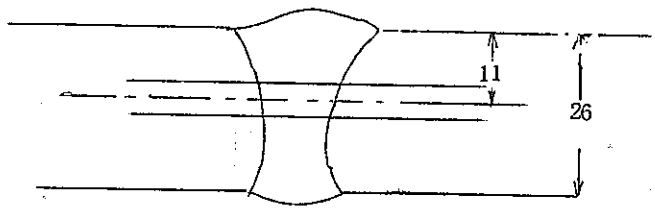
試験項目	照射後試験	炉外試験
継手部 ◎常温引張	∘ 抗張力・耐力・伸び 〔繰返し－2回〕 試料数　2本	∘ 抗張力・耐力・伸び 試料－　溶接のまま 長時間加熱材 繰返し－2回 試料数　4本
◎高温引張		∘ 抗張力・耐力・伸び 試料－長時間加熱材 温度－500, 600℃ 繰返し－2回 試料数　4本 （他に自主研究として溶接材　4本使用）
◎クリープラプチャ	∘ 1,000hr 破断応力 温度－500, 550, 600℃ 応力－2 Level 繰返し－1回 試料数　6本 予備　1本	∘ 100, 300, 1,000 ＞1,000hr 破断応力 試料－　溶接のまま 長時間加熱材 温度－500, 550, 600℃ （650℃） 応力－4 Level 繰返し－1回 試料数　24本 ＋8本
母　材 ◎常温引張	∘ 抗張力・耐力・伸び 〔繰返し－1回〕 試料数　1本	∘ 抗張力・耐力・伸び 試料－　受入材 長時間加熱材 繰返し－2回 試料数　4本
◎クリープラプチャ	∘ 1,000hr 破断応力 温度－550℃ 応力－2 Level 繰返し－1回 試料数　2本	∘ 1,000hr 破断応力 試料－　受入材 長時間加熱材 温度－550℃ 応力－2 Level 繰返し－1回 試料数　4本
◎金相試験		∘ 母材・熱影響部・溶着部につき （受入材 長時間加熱材 ∘ 高温引張試験破断部近傍 ∘ クリープラプチャ試験破断部近傍
◎硬度分布		∘ 受入材・長時間加熱材

(4) 期待される成果目標：

304ステンレス鋼溶接部および母材について供試材，高温照射材および高温長時間加熱材の常温引張，クリープラプチャに関するデータを得ることにより，中性子照射効果を求めることができる。

(5) 照射試験片の詳細

1) 試験片採取要領



○母材表面より11㎜を中心に溶接方向と直角に試験片を採取する。

○試験片平行部には溶着金属，熱影響部，母材の三者が含まれるようにする。。

（溶接試験片）

2) 試験片の番号・種別など

No.	試験片の種別	採取位置	試験の条件	外径	備考
G－1	引張試験片	溶接部	常温引張	4.012㎜	
G－2	同上	同上	同上	4.015	
G－3	同上	母材	同上	4.010	
G－4	クリープラプチャ試験片	溶接部	クリープラプチャ 500℃	5.997	1,000 hr 破断応力
G－5	同上	同上	同上	6.012	同上
G－6	同上	同上	クリープラプチャ 550℃	6.011	同上
G－7	同上	同上	同上	6.015	同上
G－8	同上	同上	クリープラプチャ 600℃	6.016	同上
G－9	同上	同上	同上	6.031	同上
G－10	同上	母材	クリープラプチャ 550℃	6.026	同上
G－11	同上	同上	同上	6.026	同上
G－12	同上	溶接部		6.015	予備

3.6.2　照射前試験

(1)　供試材料

1－1）素　材

材　質　　SUS27

母　材　　日本冶金工業(株)製　　Ch　№ 84712

溶接材料　ワイヤ　US－308（4.0φ）　(株)神戸製鋼所製

フラックス　PFS－1

1－2）溶接方法

母材を溶接した

a）開先形状

図1に示す

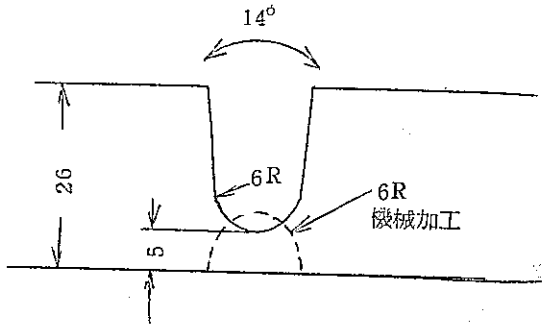


図1　開先形状

b）溶接条件

図2に溶接準位を，表1に溶接条件を示す。

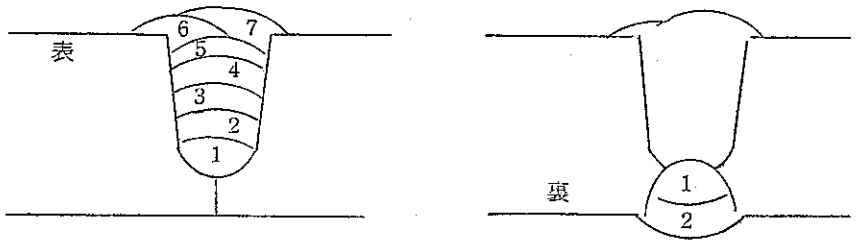


図2　溶接準位

表1　溶接条件

	パス	電流×電圧×速度	備　考
表	1	400A× 30V× 30 cpm	予熱なし
	2～6	450 × 32 × 32	
	7	450 × 32 × 35	パス間温度
裏	1	450 × 32 × 30	150℃以下
	2	450 × 35 × 35	

1－3） 供試材寸法

溶 接 材　　図3に示す。供試材は溶接のまま

交換母材　　26 t×15 w×130 l mm （4本）

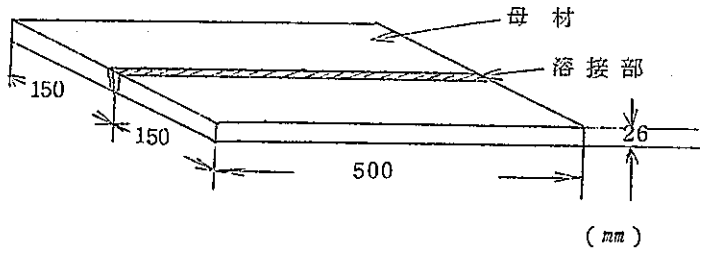
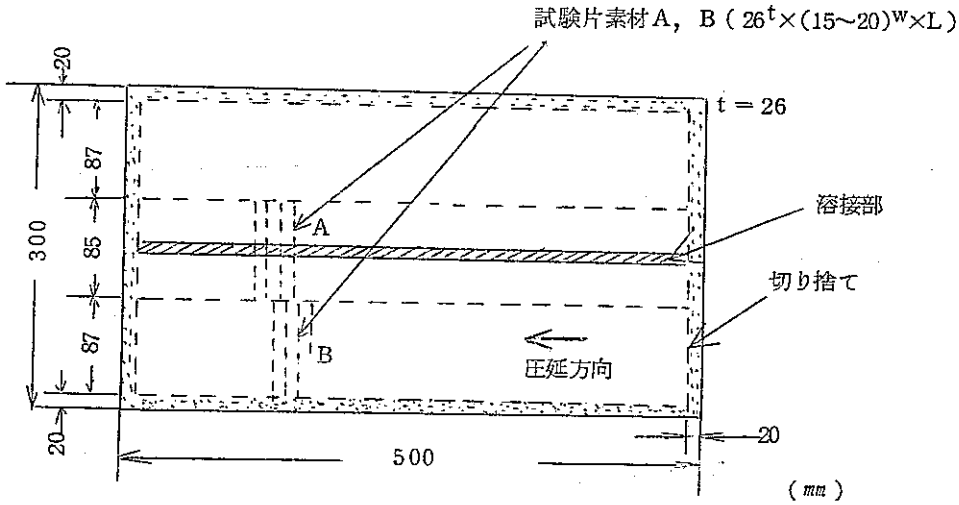


図 3　溶接材寸法

(2) 試験項目および試験片採取要領

溶接材を図4に示すように切断した。



破線位置切断

図 4　切 断 位 置

2－1） 分　析

溶接ワイヤ，母材および溶接金属を分析した。

第4図に示す試験片素材Aより図5に示す要領で分析試験片を採取した。

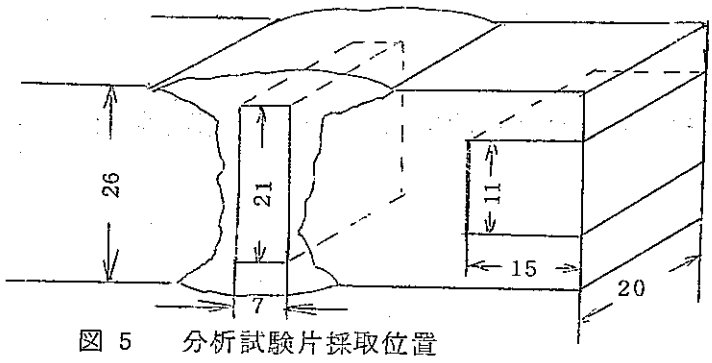


図 5　分析試験片採取位置

2－2） 硬さ分布測定

図４に示す試験片素材Ａについて硬さ分布を測定した。明石製ＡＶＫ型ビッカース硬度計（荷重１０kg）を使用した。

2－3） 金属組織

第４図に示す試験片素材Ａより金属組織試験片を採取し，金属組織を調べた。被検面は溶接方向と直角な断面であり，母材表面より深さ約１１㎜付近である。腐食液は蓚酸である（電解エッチ）

2－4） 引張試験

母材表面より深さ１１㎜を中心として，溶接方向と直角に試験片を採取した（第４図，試験片素材Ａ，Ｂ）。溶接継手部については，溶接部全体が試験片平行部に含まれ，また，中心より２～３㎜ずらして，熱影響部が多く平行部に含まれるようにした。試験片寸法を図６に示す。

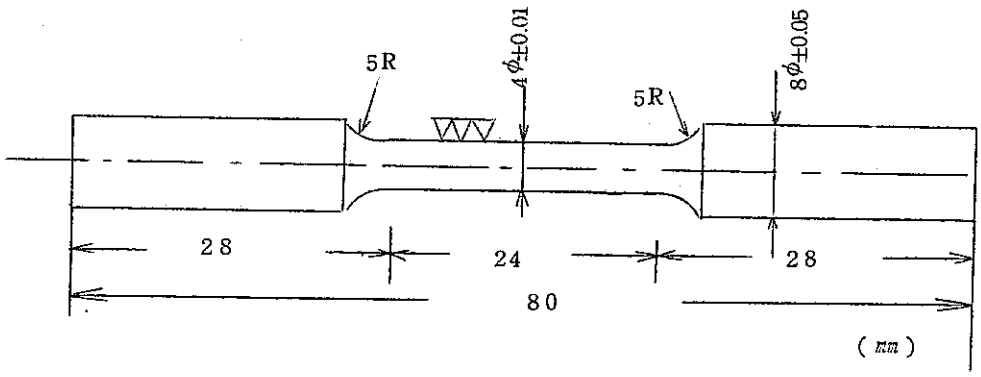


図６　引張試験片寸法

交換母材については，交換材４本のうち２本を，図７のように切断して引張試験片素材とした。試験片寸法は第５図の通りである。尚，圧延方向は不明である。引張試験には，島津製作所製５トンオートグラフを使用した。

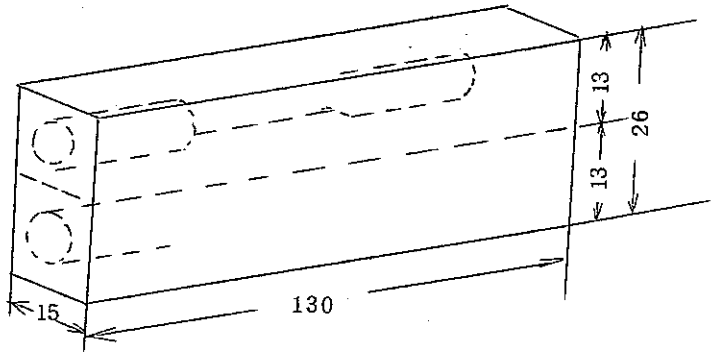


図７　交換母材引張試験片素材採取要領

2－5）　クリープ破断試験

試験片採取要領は引張試験片素材採取要領と同じである。試験片寸法を図８に示す。

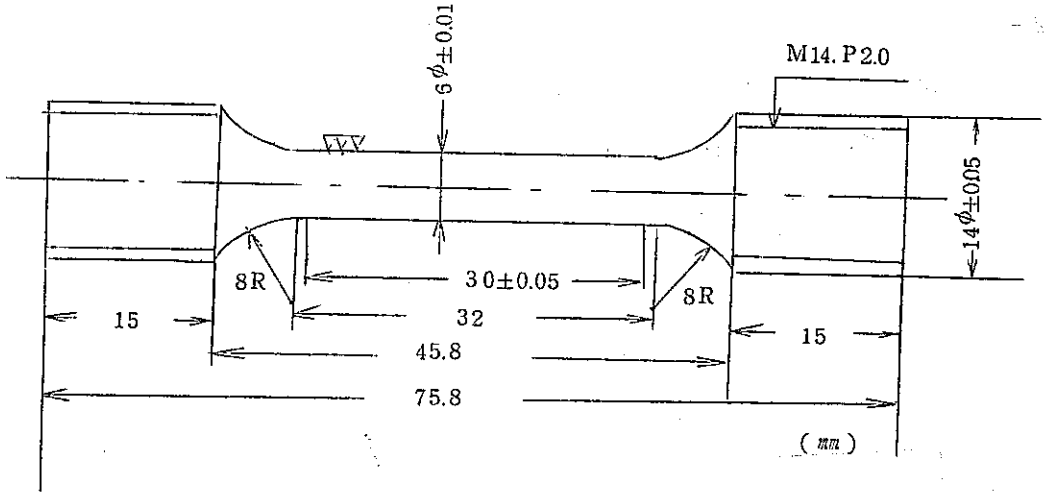


図８　クリープ破断試験片寸法

(3)　試験結果および考察

3－1）　分　析

分析結果を表２に示す。

レードル分析値は，日本冶金工業（株）分析値の引用である。

表２　分析結果

		C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Co	Al	B	Nppm	Oppm
母　材	レードル分析	0.070	1.62	0.77	0.028	0.005	8.79	18.12	0.08	0.06	—	—	—	—	—
	チェック分析	0.074	1.64	0.84	0.032	0.006	9.15	18.06	0.086	0.060	0.165	0.003	0.0001	287	96
溶接金属	チェック分析	0.051	1.74	0.71	0.025	0.015	9.81	19.67	0.12	0.088	0.177	0.004	0.0005	479	925
US・308ワイヤ	チェック分析	0.04	1.82	0.35	0.016	0.016	10.15	20.12	—	—	—		—	—	—

3－2） 硬さ分布測定

測定結果を図９に示す。

図から，溶接部から約２５㎜程度まで熱影響が生じていることが分る。

3－3） 金属組織検査（写真１）

写真１に，１００倍および４００倍の顕微鏡写真を示す。写真から，溶接金属にはδフェライトが，母材には炭化物が析出していることが分る。炭化物析出は，溶接部から２～３㎜の位置で最も著るしかった。

3－4） 引張試験

引張試験条件を表３に示す。

表３　引張試験条件

	試験温度（℃）	ゲージ長さ（㎜）	引張速度（破断まで）
母材および溶接継手	R.T　500 550，600	22	0.125㎜／min （0.5％／min）
交換母材	550，600	20	0.1㎜／min

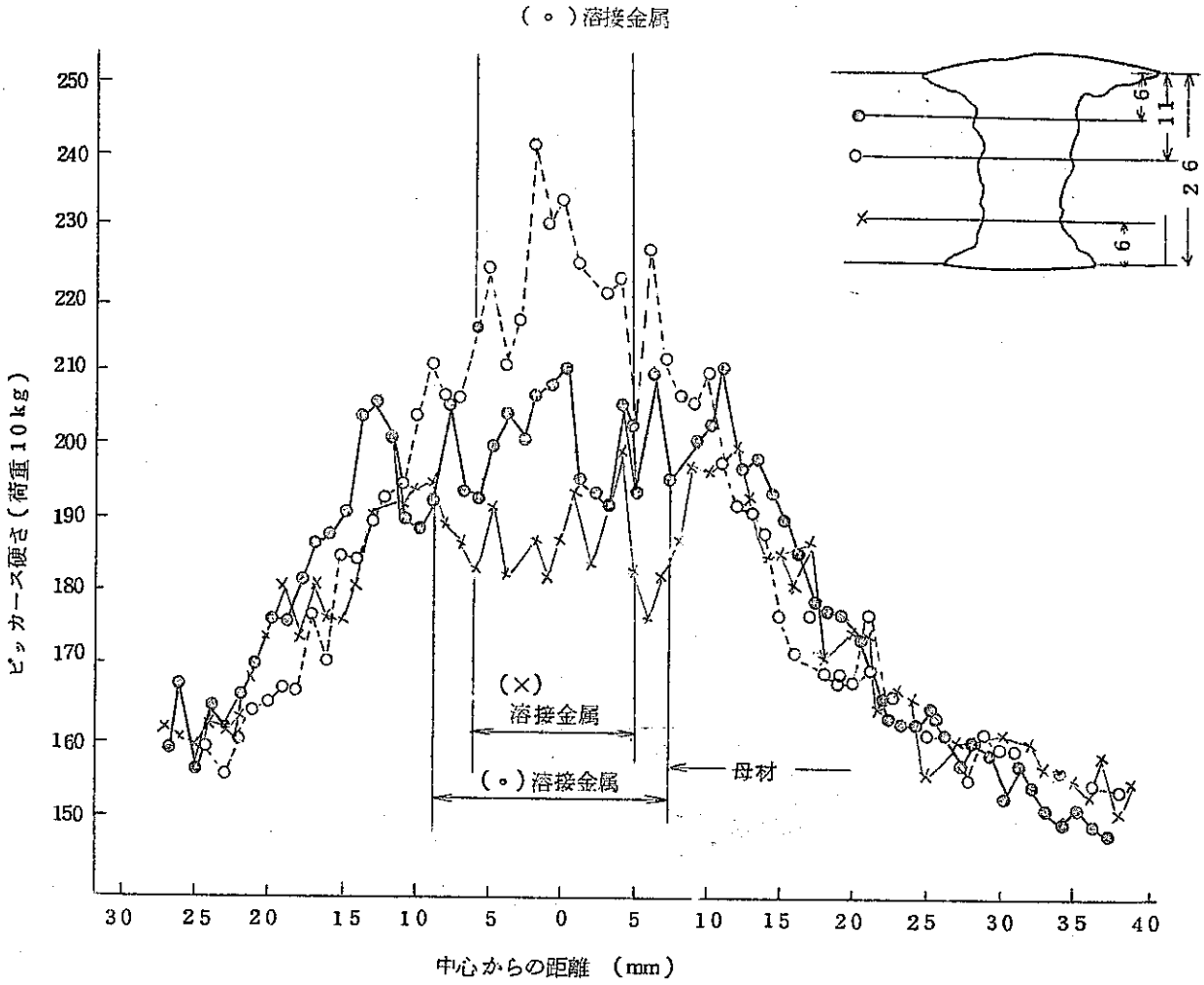
保持時間　10分

引張試験結果を，表４および図１０，１１に示す。耐力および引張強さは荷重－変位曲線から求めた。高温引張では，母材；溶接継手ともにセレーションが見られた。

溶接継手は全て溶接部から破断した。

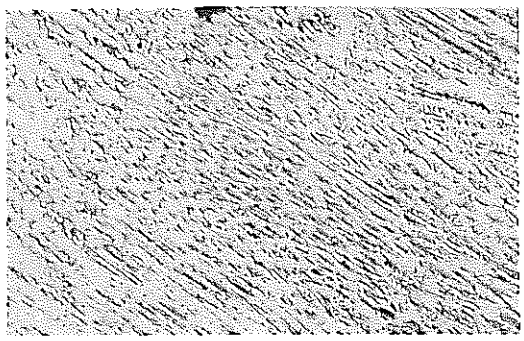
表４　引張試験結果

	試験温度（℃）	0.2％耐力（Kg／㎟）	引張強さ（Kg／㎟）	伸び（％）	絞り（％）
神鋼母材	R.T	26.1	67.6	81.7	72.7
		26.8	70.3	73.8	69.2
	500	15.3	46.9	44.1	63.2
		17.2	47.5	41.1	64.4
	550	16.5	43.7	50.0	67.2
		14.5	43.4	30.0	62.8
	600	14.3	37.7	49.1	55.3
		15.6	38.6	46.6	57.3
溶接継手	R.T	43.1	65.2	38.6	55.2
		43.0	64.2	31.8	59.3
	500	26.6	44.0	17.7	48.4
		—	44.6	22.8	51.1
		28.4	44.3	19.9	54.9
		29.6	42.4	20.4	42.7
	550	28.6	39.5	21.5	44.5
		28.2	40.6	21.7	43.2
	600	25.4	34.4	14.6	39.8
		27.8	36.0	17.2	48.4

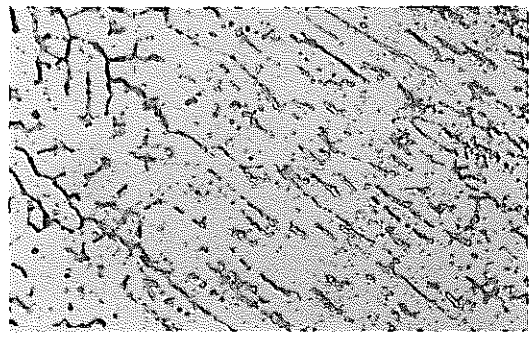


母材の硬さは溶接境界から約100mm(深さ11mm)の位置で，ビッカース硬さ(10kg荷重)|5|である。

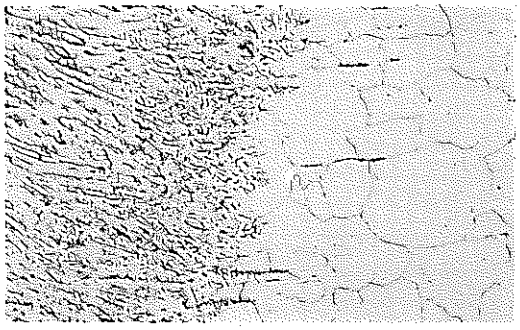
図9 硬さ分布測定結果



溶接部　(×100)

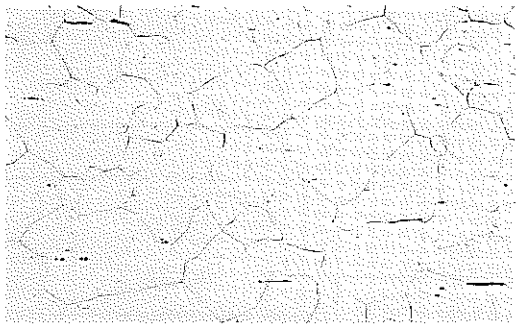


同　左　(×400)

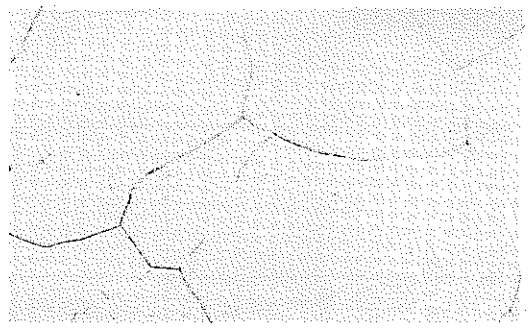


境　界　(×100)

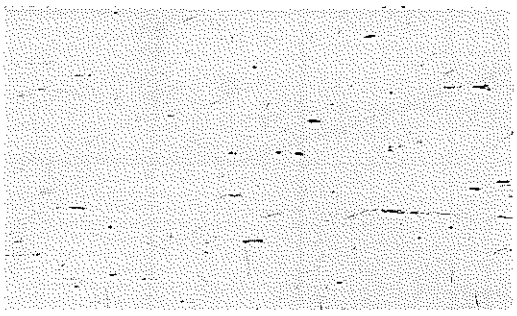
同　左　(×400)



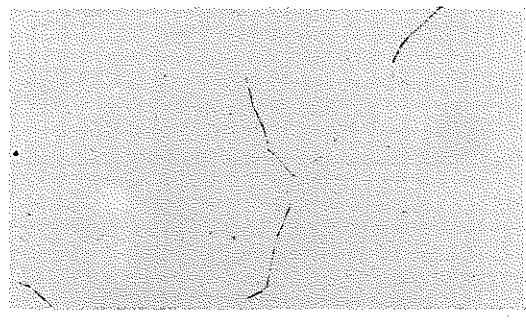
母材（溶接部より2～3 mm）(×100)



同　左　(×400)



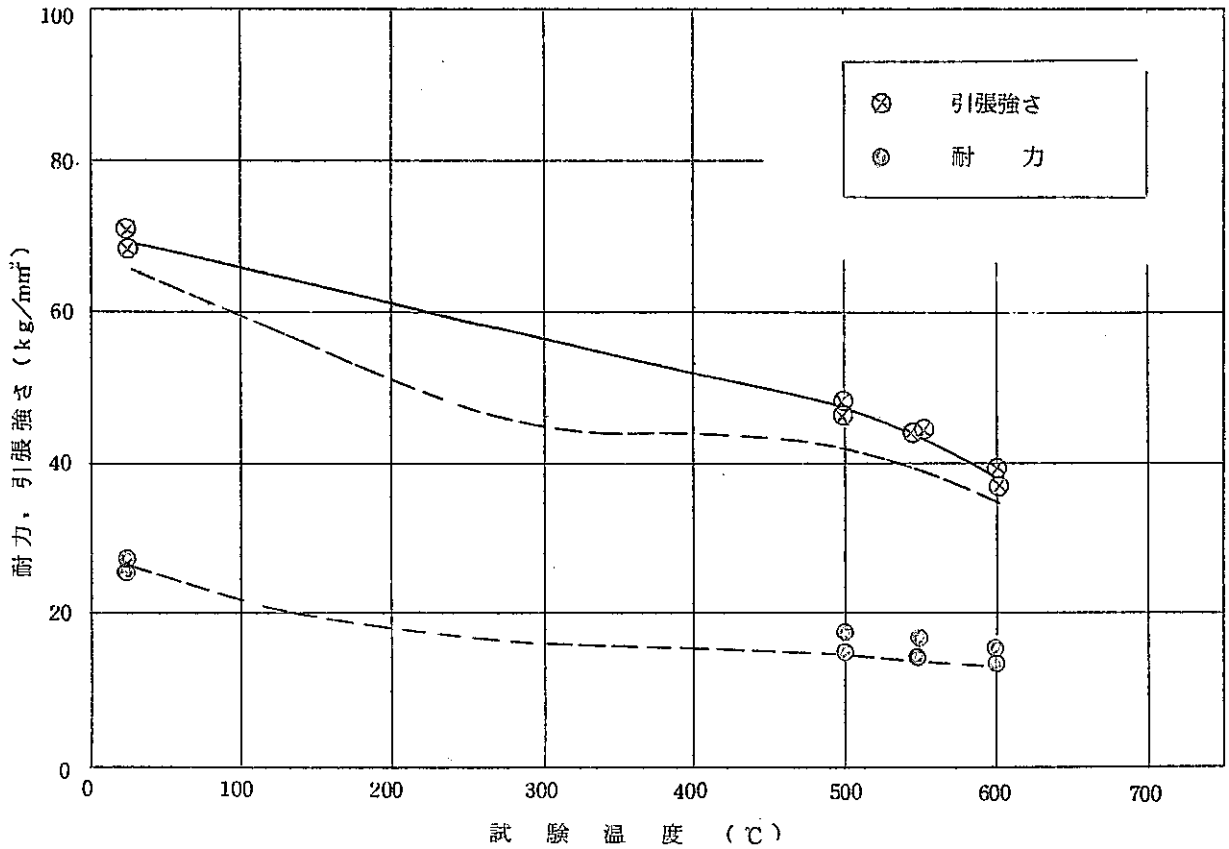
母材（溶接部より9～10mm）(×100)



同　左　(×400)

写真1　金属組織顕微鏡写真（10％蓚酸電解）

破線は日本溶接協会ＦＲＷ小委員会データ



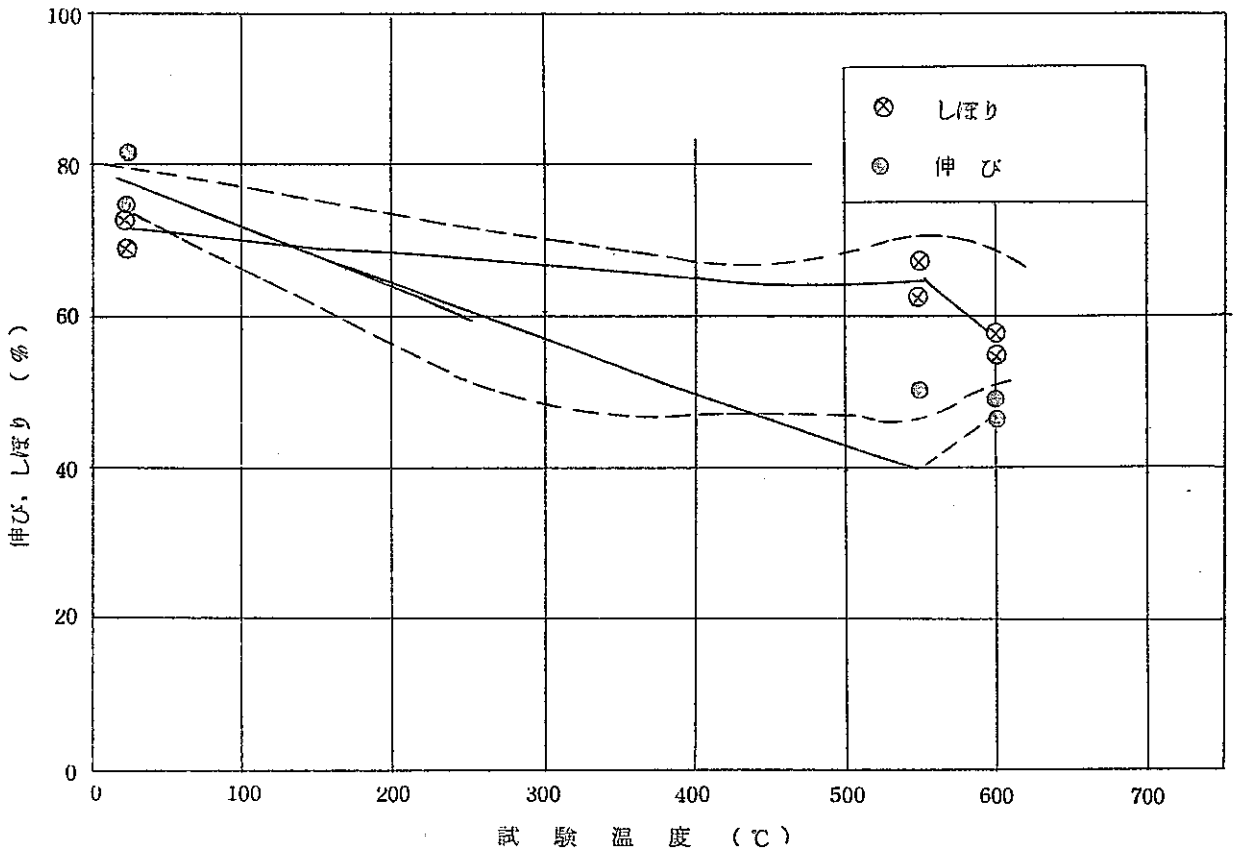
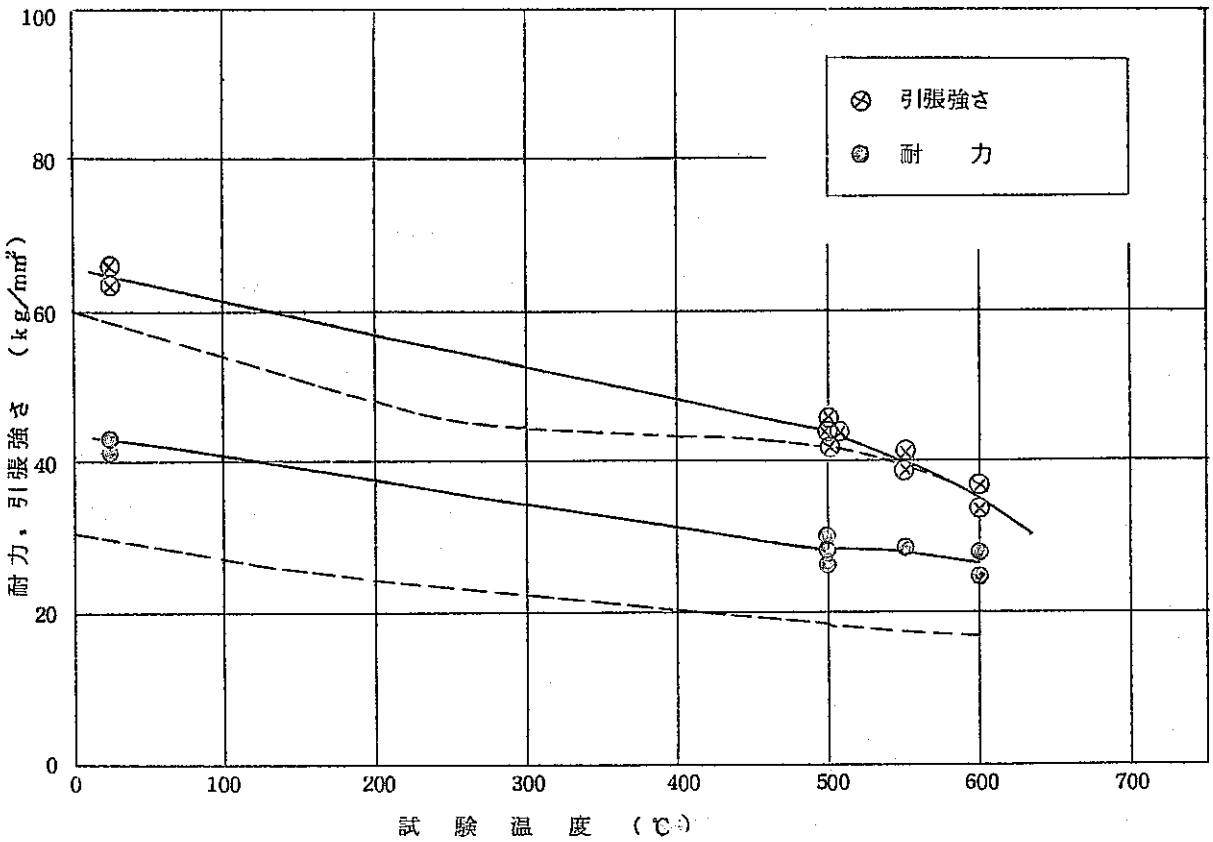


図１０　母材引張試験結果

破線は日本溶接協会ＦＲＷ小委員会データ



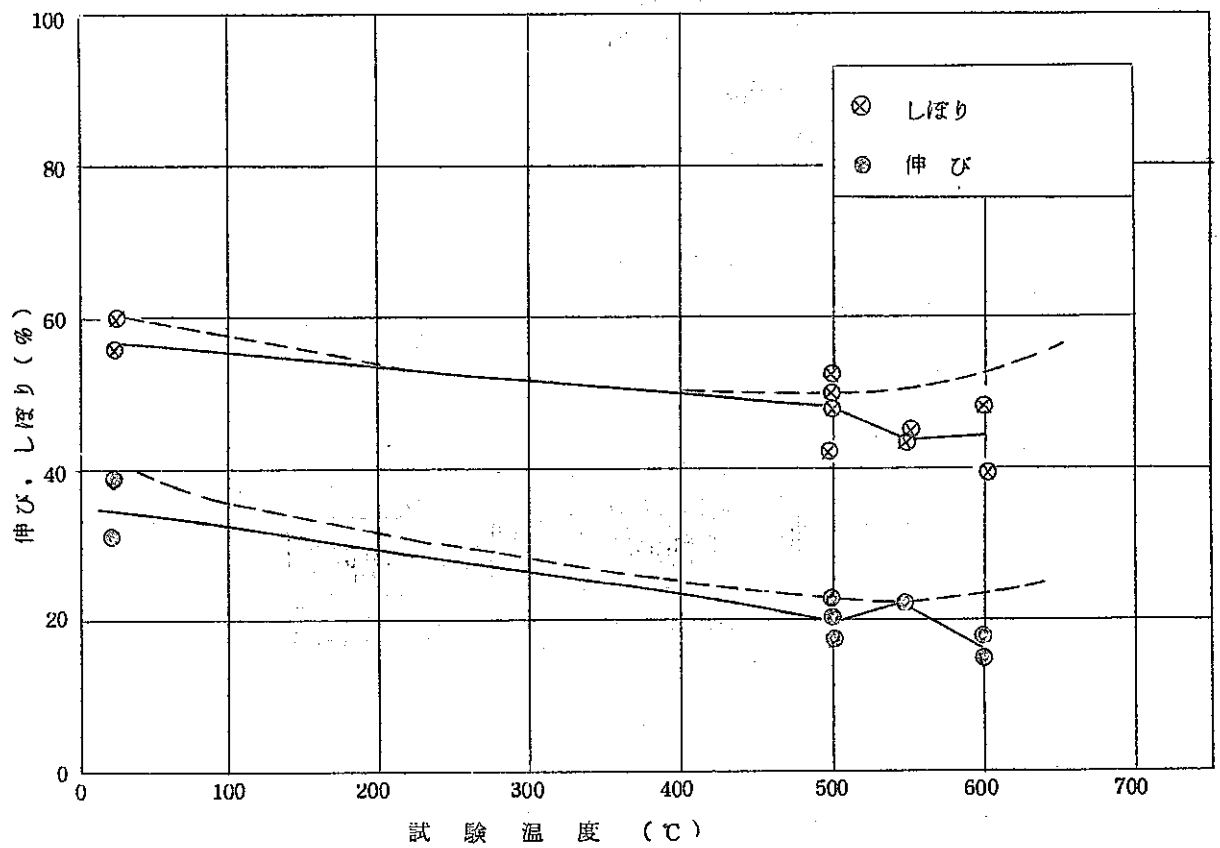


図１１　　溶接継手部引張試験結果

(イ) 強度について

試験温度が高くなると，母材，溶接継手いずれも強度が低下する。各温度における母材の耐力は溶接継手よりも小さいが，引張強さは逆に母材の方が大きい。

引張強さの差は，各温度で約5Kg／mm²であり，耐力の差は約10Kg／mm²程度である。（RTでは約15Kg／mm²）

(ロ) 延性について

試験温度が高くなると，母材，溶接継手ともに延性が低下する傾向がある。ただ母材は500℃で伸びの最小値を示した。また母材の伸びは500℃までに急激に低下している。母材と溶接継手を比較すると，母材の延性は各試験温度で溶接継手よりも大きい。

3－5） クリープ破断試験

試験結果を表5および図12, 13, 14に示す。

溶接継手はすべて溶接部から破断した。550℃における母材破断応力は溶接部破断応力よりも大きい。伸びおよび絞りについては，試験値のバラツキが大きく，また3,000時間破断試験の結果が得られていないので，傾向は求め難いが，溶接継手に関しては500℃における伸びは破断時間（応力）によらずほぼ一定であり，絞りが破断時間の増加により若干減少する。550℃，600℃では500℃の場合よりも破断時間増加による伸び，絞りの減少が著るしい。

表5　SUS27クリープ破断試験結果

	試験温度（℃）	応力（Kg／mm²）	破断寿命（h）	伸び（%）	絞り（%）
母材	550	34	99.0	28.3	31.7
		29	558.0	21.7	23.3
		28	試験中（6月中旬）		
		24	試験中（6月中旬）		
溶接継手	500	39	69.3	18.0	38.9
		35	283.0	16.3	31.3
		31	1184.2	11.0	29.1
		29	試験中（8月末）		
	550	28	114.2	17.1	50.0
		25	600.0	9.3	23.4
		22	980.6	5.0	14.8
		19	試験中（8月末）		
	600	21	92.0	11.7	34.9
		18	227.0	6.0	17.2
		14	1201.0	2.7	3.3
		12	試験中（9月末）		

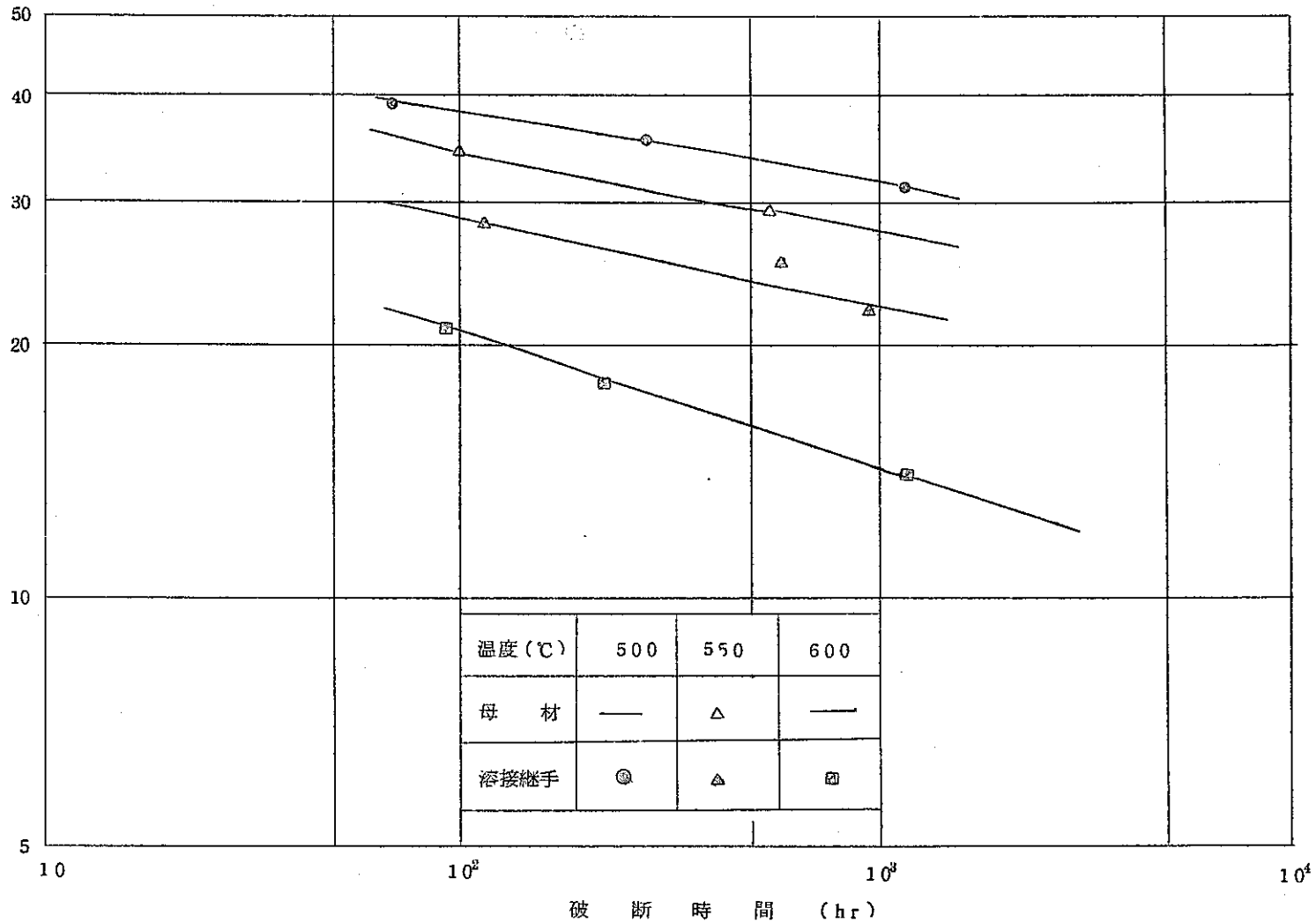


図12　クリープ破断試験結果

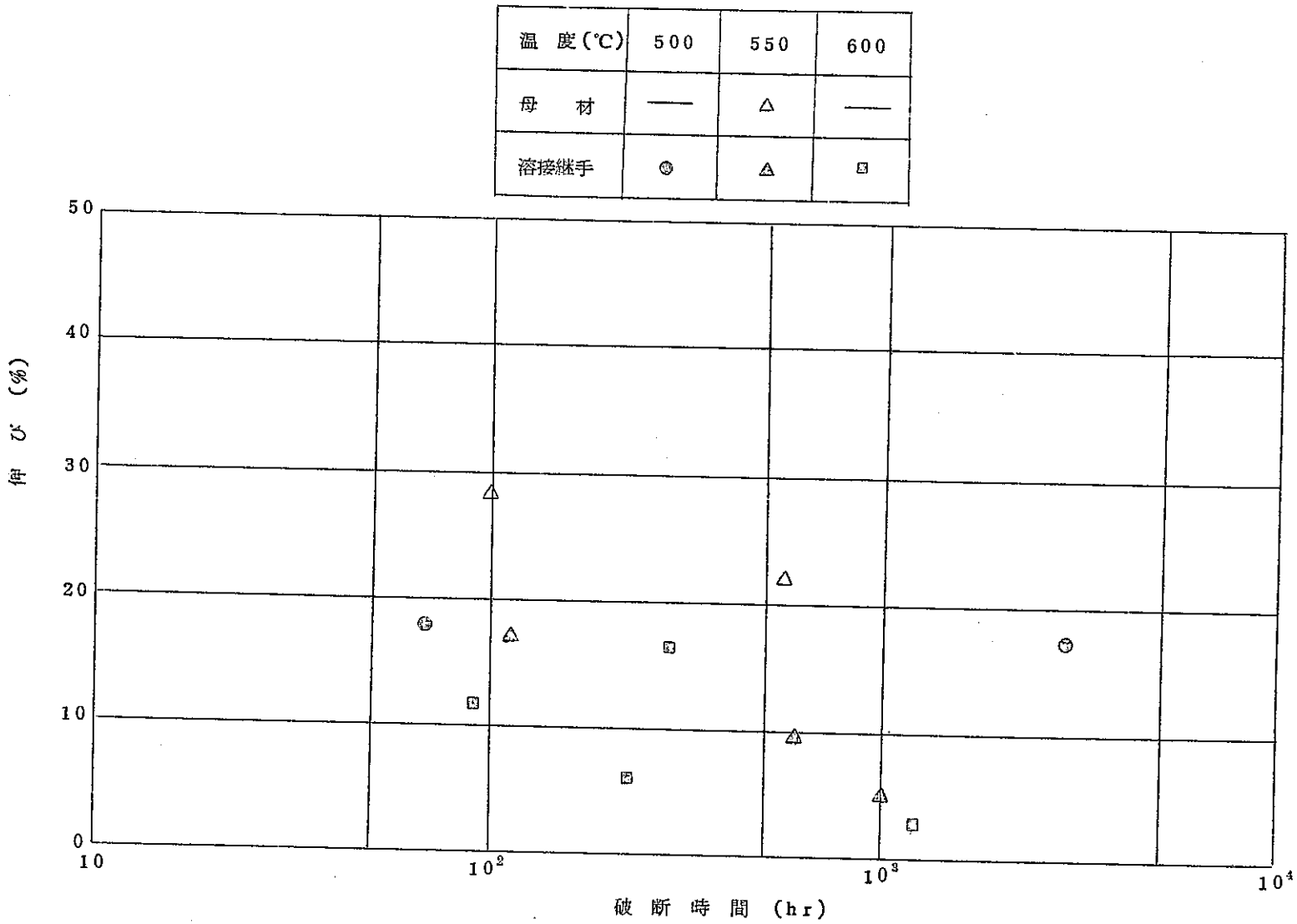


図13 クリープ破断伸び

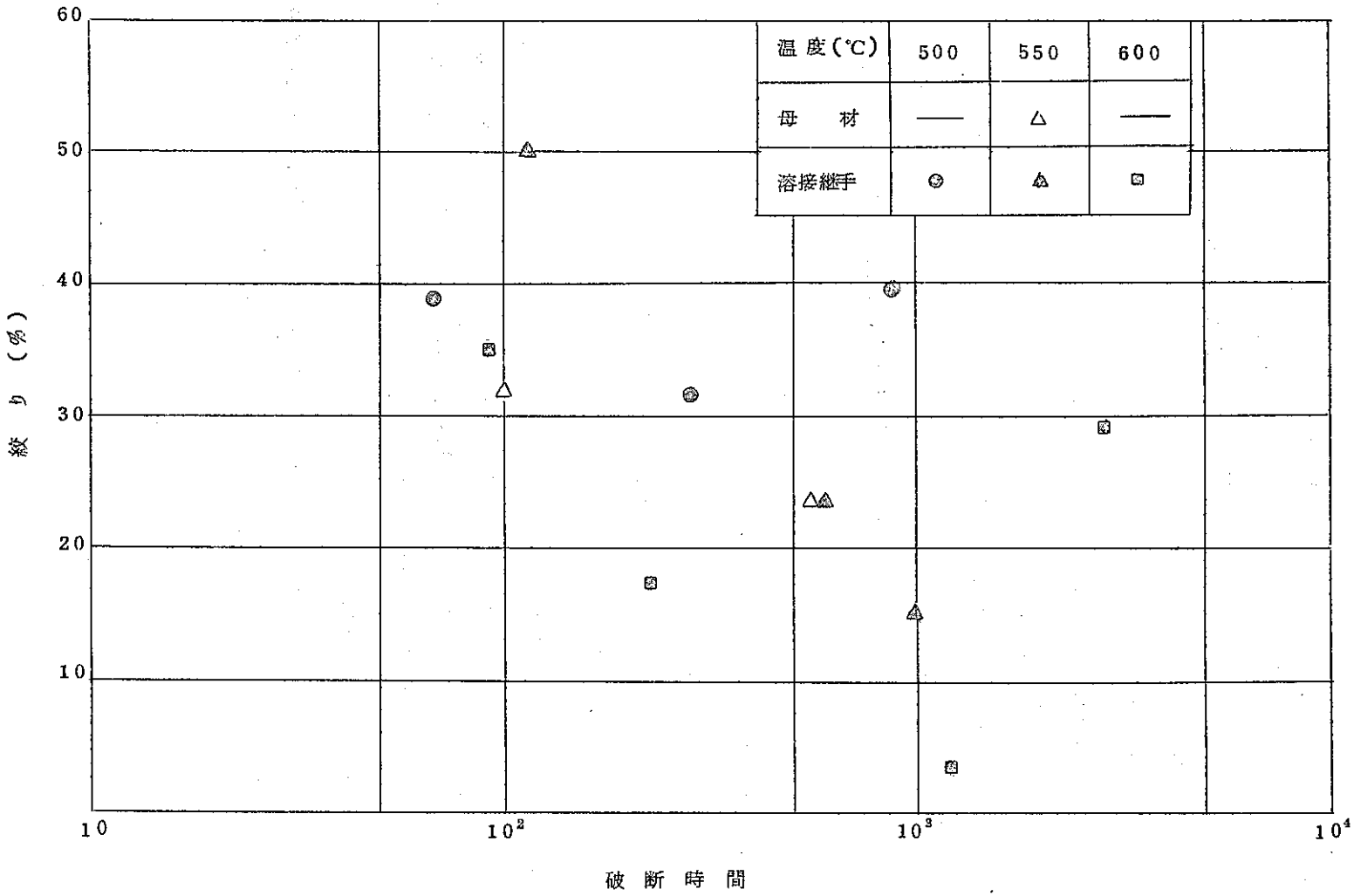


図14 クリープ破断絞り

3.7　照射基礎研究

3.7－A　冶金学的因子の影響

3.7.1　研究計画

(1)　研究テーマ：３０４ＳＳの照射に及ぼす冶金的因子の影響

(2)　研究責任者：長谷川　正　義　　早稲田大学

　　担　当　者：中　島　伸　也　　早稲田大学大学院

(3)　研究内容

1)　長時間加熱の照射に及ぼす影響

　３０４およびＢ添加３０４の長時間加熱材を low fluence，常温引張

2)　浸炭の照射に及ぼす影響

　３０４の表面浸炭，およびその均一化処理材を low fluence，常温引張

3)　金属組織観察

　上記４種を low fluence および３０４，Ｂ添加３０４の溶体化材を Righ fluence

以上の照射試験に伴う炉外試験を同時に行なう。

(4)　所要材料

３０４素材	２５×３００×１００
Ｂ添加３０４素材	２０×１５０×１００

熱処理，浸炭用材

(5)　期待される成果目標

1)　長時間加熱による炭化物，ホウ化物の析出に及ぼす照射の影響を知り得る。

2)　ナトリウム冷却材による炭素の素質移行による浸炭をモデル化して行なうもので，炭素の濃度分布に及ぼす照射の影響を知り得る。

3)　標準処理材との比較

以上の照射試験と炉外試験により，冶金学的に興味ある問題に対して指針を得られるものと思われる。

3.7.2 照射前試験

表1　照射試験一覧表

Steel	処　理	常・引	金　相	番　号*	装入位置**	***
304	長時間加熱	1	1	E－1 E－2	01 M－1	650℃×1,100hr
	浸　炭	1	1	E－3 E－4	10 M－3	1,000℃×6hr 固体浸炭
	浸炭後 熱処理	1	1	E－5 E－6	20 M－3	浸炭後 1,050℃×30min
	溶体化のみ		1	E－7	M－2	
304B	長時間加熱	1	1	E－8 E－9	11 M－1	800℃×1,100hr
	溶体化のみ		1	E－10	M－2	
計		4	6			

*　試験片納入時の番号

**　試料№7による装入位置

***　溶体化処理は304　：1050℃×30min，W.Q.

304B：1,100℃×30min，W.Q.

表2　チェック分析値（wt %）

Steel	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Co	N
304	0.071	0.79	1.63	0.030	0.006	8.91	18.13	0.08	0.06	0.19	0.029
304B	0.069	0.68	1.57	0.024	0.010	8.97	18.77	tr	0.01	0.10	0.014

304；26^{t}×100×300

304B；20^{t}×100×150

の長手方向より試験片採取

N	B
290 ppm	tr
140 ppm	101ppm

表 3　　常温照射前引張り結果

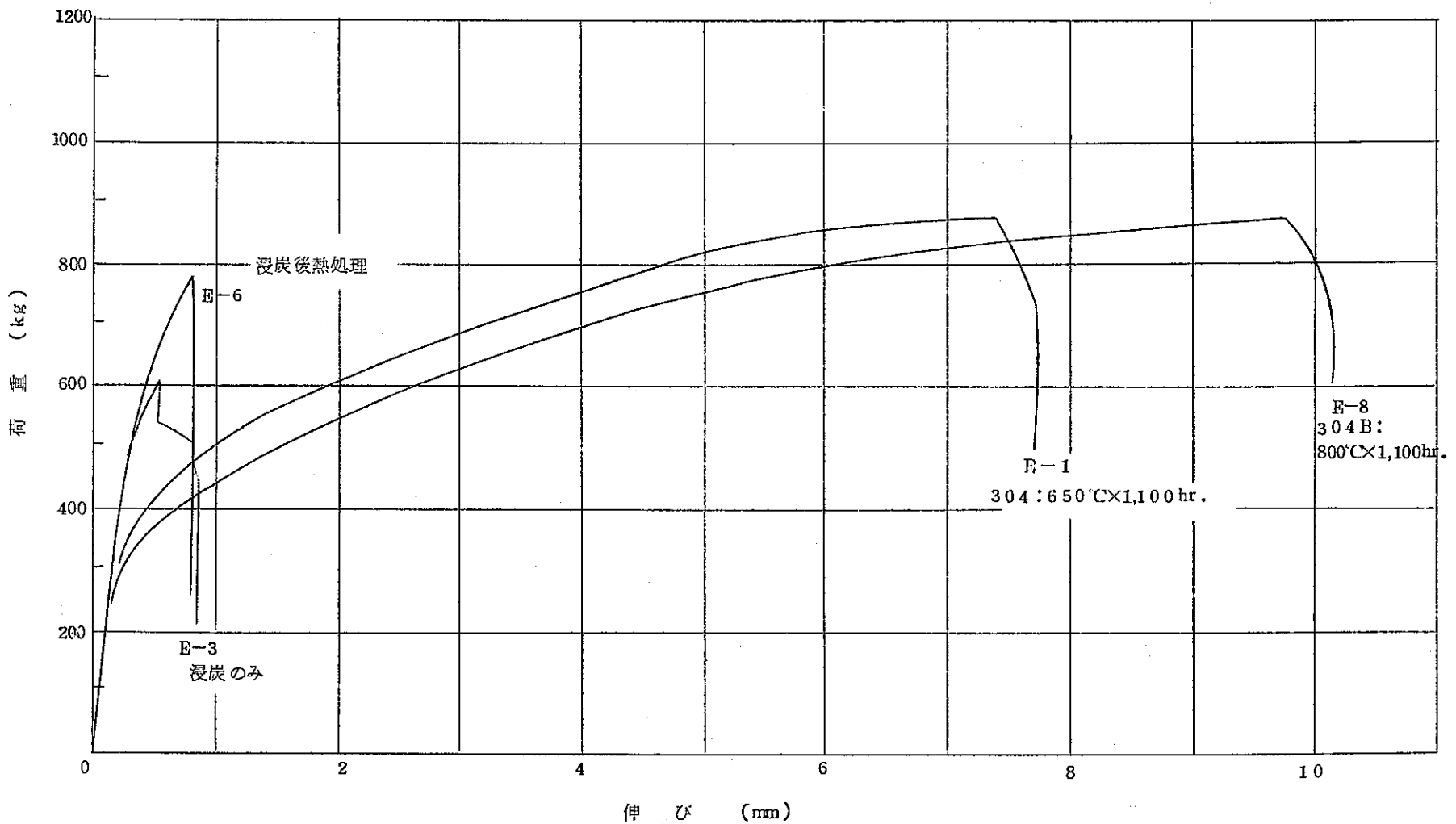
		耐　力 kg/mm²	引張り強さ kg/mm²	破断強さ kg/mm²	伸　び %	クロスヘッド mm/min
304長時間加熱（E－1）	1	23.4	71.3	59.7	60.5	0.5
	2	23.5	70.8	60.5	62.5	0.5
	平均	23.5	71.1	60.1	61.5	
304B長時間加熱（E－8）	1	20.7	70.3	56.2	78.7	0.5
	2	20.9	70.1	56.6	77.2	0.5
	平均	20.8	70.2	56.4	78.0	
304に浸炭処理（E－3）	1	37.8	62.8	40.2	4.7	0.5
	2	38.3	63.5	41.1	4.9	0.5
	平均	38.1	63.2	40.7	4.8	
304に浸炭後熱処理（E－5）	1	31.0	48.6	33.4	12.4	0.5
	2	32.6	50.4	30.3	10.6	0.5
	平均	31.8	49.5	31.9	11.5	

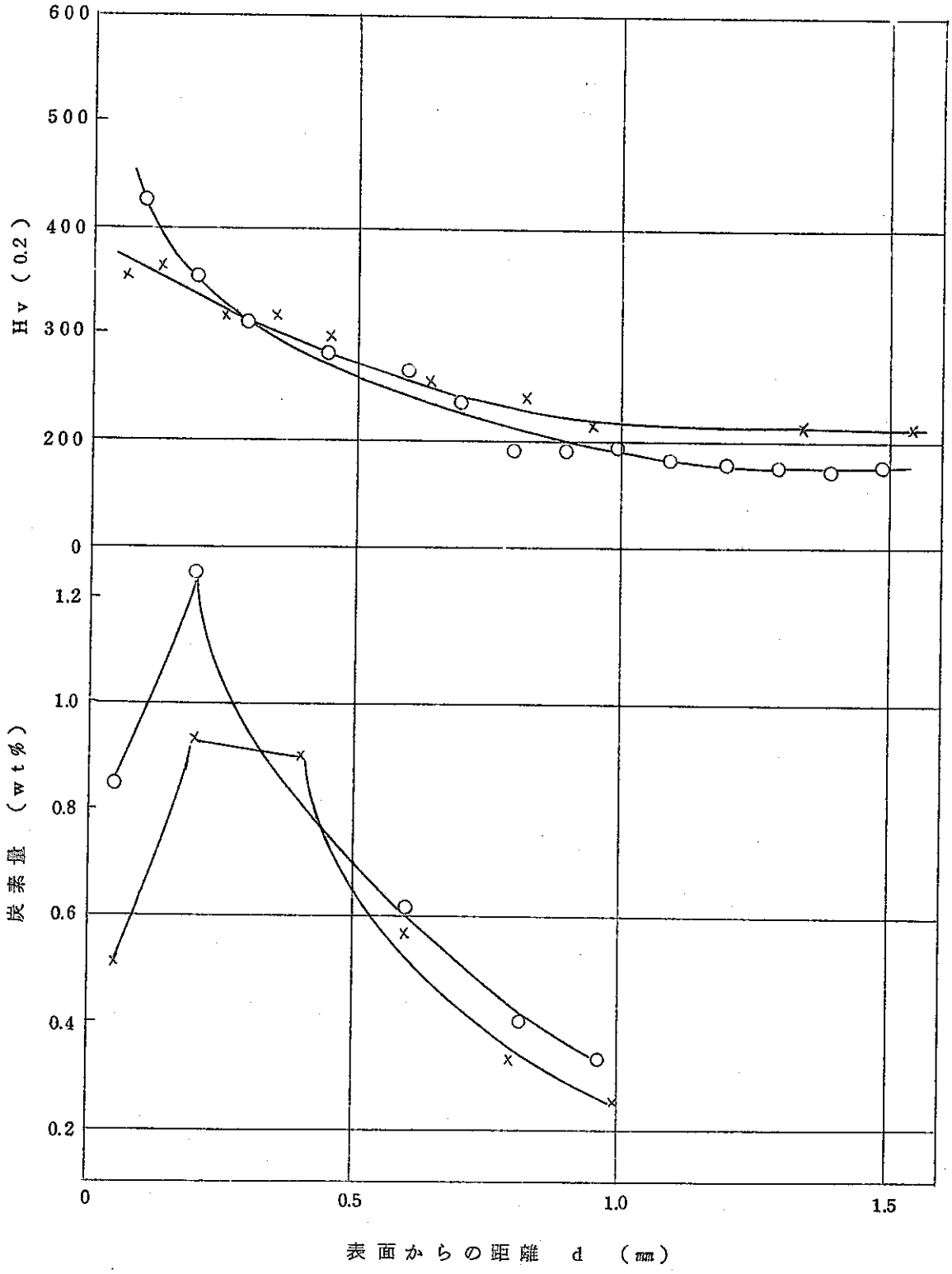
なお，浸炭材の炭素分析は，

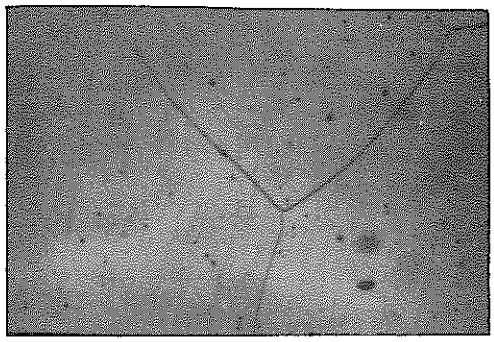
E－3；37.0×37.0×25.5

E－5；34.7×37.5×25.6（mm）

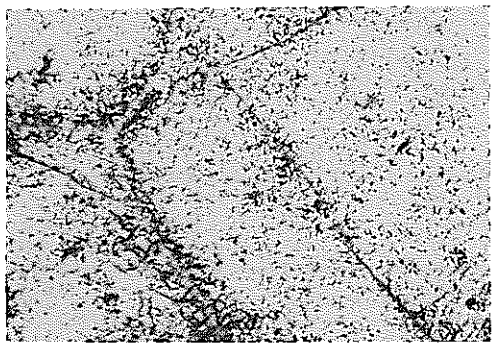
を同一の処理を行なって，分析用試料を採取した。


1200
1000
800
600
400
200
0
2
4
6
8
10
荷 重 (kg)
伸 び (mm)
浸炭後熱処理
E−6
E−3
浸炭のみ
E−1
304:650℃×1,100hr.
E−8
304B:
800℃×1,100hr.

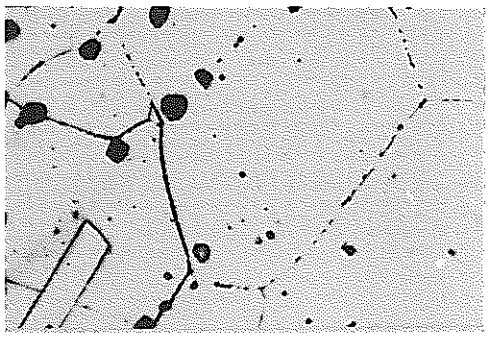

600
500
400
300
200
0
Hv (0.2)
1.2
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
炭素量 (wt%)
0
0.5
1.0
1.5
表面からの距離 d (mm)



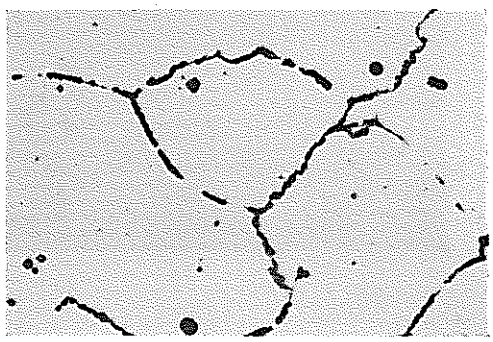
３０４　溶体化（Ｅ－７）×４００



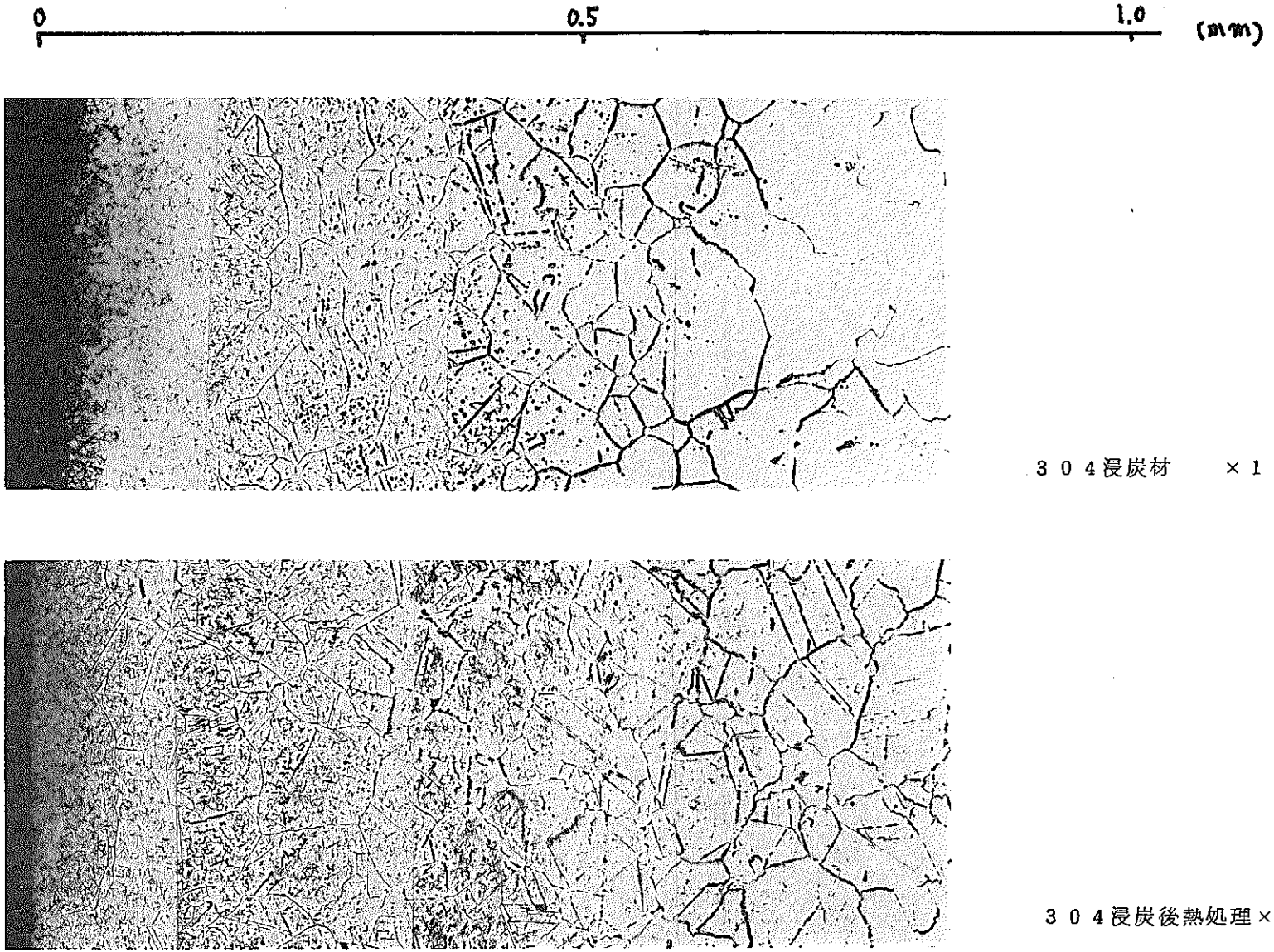
３０４長時間加熱（Ｅ－２）×４００



３０４Ｂ溶体化（Ｅ－１０）×４００



３０４Ｂ長時間加熱（Ｅ－９）×４００



３０４浸炭材　　×１００

３０４浸炭後熱処理×１００

3.7－B　炭化物析出効果

3.8.1　研究計画

(1)　研究テーマ　304ステンレス鋼の炭化物析出への照射効果

(2)　研究責任者　山　根　寿　己　　大阪大学工学部冶金学教室

担　当　者　高　橋　純　造　　同　　上

(3)　研究内容

1）目　的

溶体化処理をして単に析出温度に加熱して炭化物析出を行なわせ照射をした場合と，溶体化処理後析出温度で析出させながら照射を行なった場合の析出炭化物の形態を透過電子顕微鏡で観察する。

かくすることにより，304系ステンレス鋼の耐食性に害のある析出物の析出挙動を明らかにする。

2）実験方法

熱処理は　(1)　溶体化処理のまま

(2)　溶体化処理後析出処理

をした試料に中性子照射を行なったもの及び未照射試料の上記(1)，(2)の処理を行ないそれに照射中と同じ熱履歴を与えた試料の透過電子顕微鏡組織観察を行ない析出挙動を知る。

(4)　所要材料

304ステンレス鋼　高炭素（規格値以上）
普通炭素（規格値内）　を含有するもの

(5)　期待される成果目標

炭化物の析出形態が照射によりどのような影響を受けるかを明らかにすることが出来る。

かくすることにより，304系ステンレスの実用上問題になる腐食等に悪影響のある析出の基礎的解明の一助になしうる。

3.8.2　照射前試験

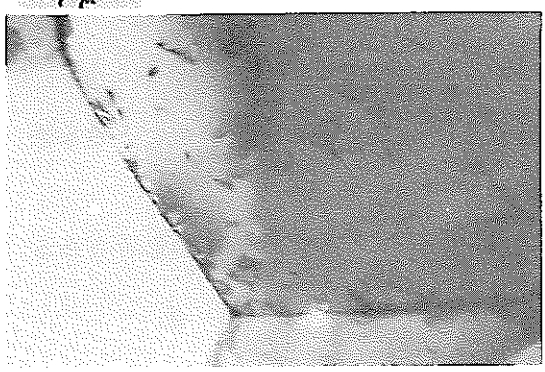
透過電子顕微鏡（日立Hu－11型100KV）写真

・試料，高炭素304鋼（日本冶金）

highc　304　1100℃×5min W.Q.（溶体化処理）

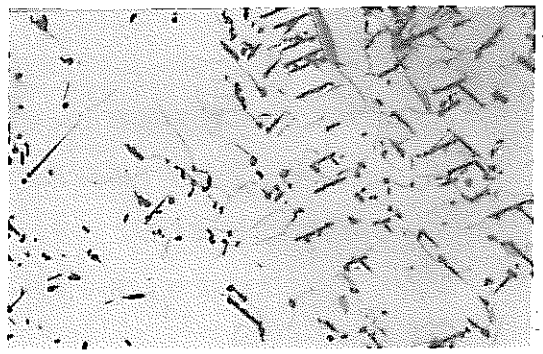
1μ

1μ

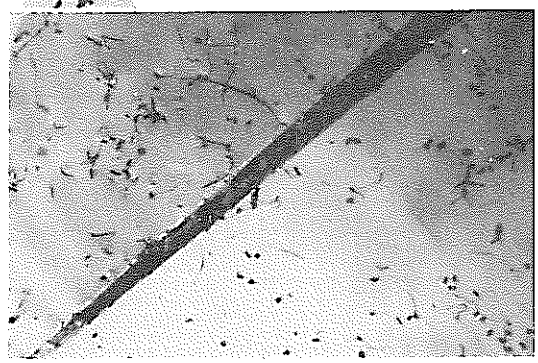


1μ

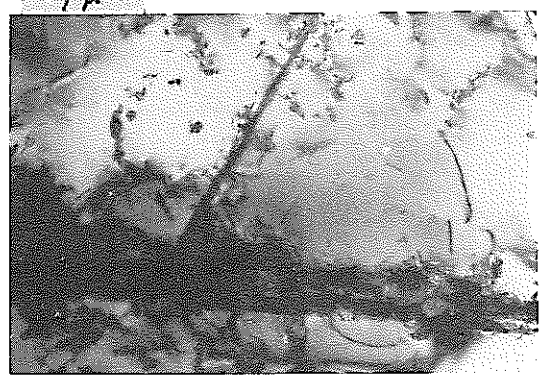
high C 304　1100℃×5min W.Q.（鋭敏化処理）



1μ



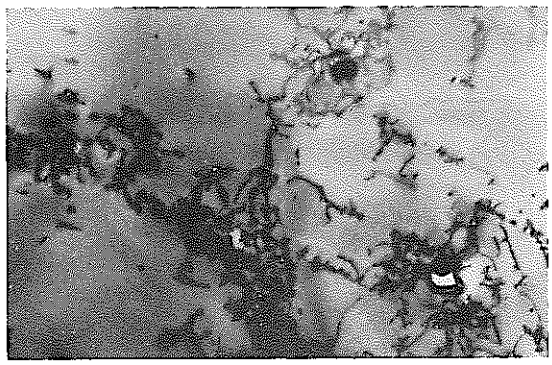
1μ



1μ

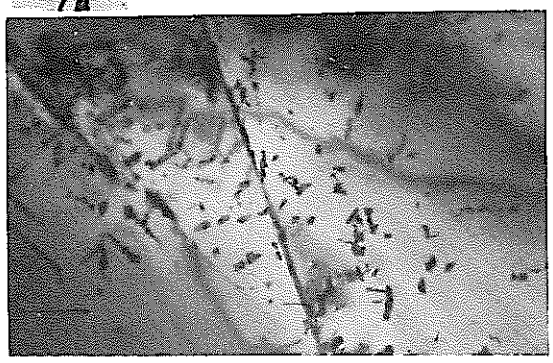
（鋭敏化処理）

high C 304　1100℃×5 min W.Q.＋700℃48hr W.Q.



1 μ

1 μ

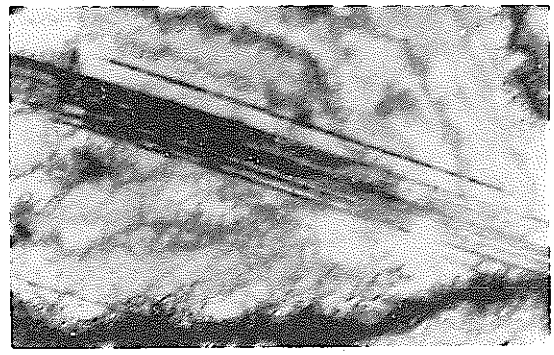


1 μ

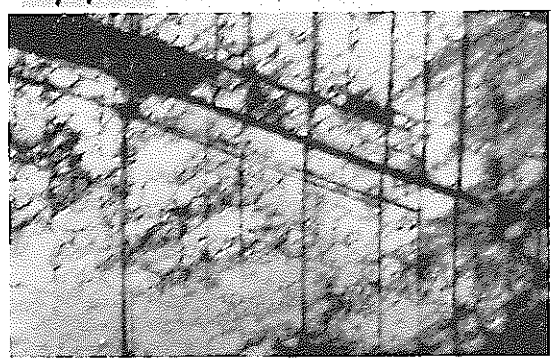
（溶体化後加工）

high C 304　1100℃×5 min W.Q.　cold worked

1 μ



1 μ



1 μ

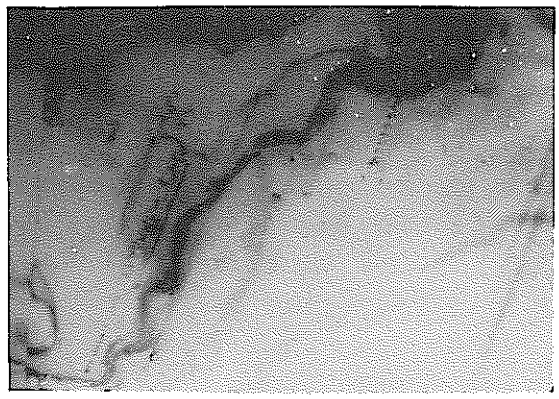
高炭素（0.124%C）304鋼について ① 1100℃×5min W.Q.
② ①＋700℃ 48hr W.Q.
の結果を報告

大阪大学工学部 山根寿己
高橋紳造

（SUS27 分析値 C：0.07，S_i：0.77 P：0.028，S：0.005，B：－
N_i：8.75，C_r：18.12，M_o：0.08，C_u：0.06，C_o：0.22）

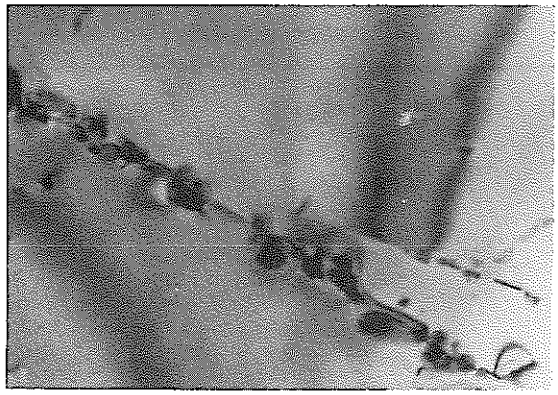
1μ

SUS27 1100℃×5min W.Q.
転位がみられるだけである。



1μ

SUS27 1100℃×5min W.Q.
左端の粒界，粒内ともに析出物はみられない。
転位のスリップ・トレースがみられる，少し加工が入ったらしい。

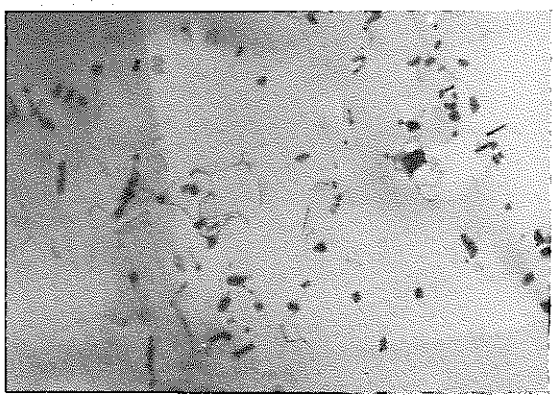


1μ

SUS27 1100℃×5min W.Q.
＋700℃×48hr W.Q.
粒界析出が主にみられる。

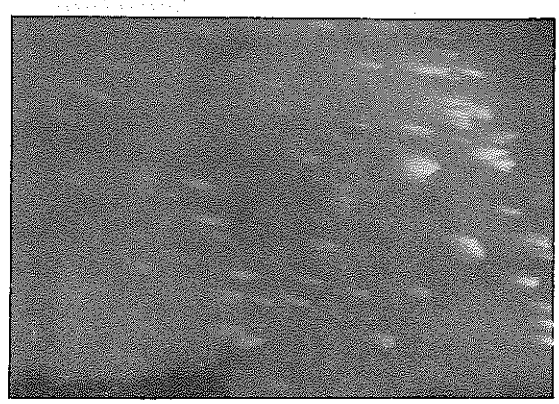
1μ

SUS27 1100℃×5min W.Q.
＋700℃×48hr W.Q.
粒界析出と粒内析出がみられる。
粒内析出物の大きさは小さい。



1μ

高炭素304鋼 1100℃×5min W.Q.
＋700℃×48hr W.Q.
粒内析出物がかなり大きく成長している。
析出物は$M_{23}C_6$と思われる。



1μ

高炭素304鋼 1100℃×5min W.Q.
＋700℃×48hr W.Q.
左の写真の暗視野像
析出物が反転している。

3.7－C　微細組織の変化と強度的性質

3.9.1　研究計画

(1)　研究テーマ　ステンレス鋼の照射による微細組織（電顕直接観察）の変化と強度的性質の変化との関係

(2)　研究責任者　井形直弘　東京大学工学部冶金学科

担当者　佐東信司　同　上

(3)　研究内容

304ステンレス鋼の電顕観察を行ない，次の諸要因について微細組織を調べると共にその機械的性質との関連を調べ，特に伸びた影響する本質的因子を調べる。

要因	観察事項
熱処理の影響	粒界及び粒内の微細析出相
加工の影響	転位の分布の様相
熱処理部を含む溶接部	微細析出相及び内部歪の実態観察

(4)　所要材料

材料（製造元）	処理	非照射数	照射数
川鉄	－	2	2
日本ステンレス	熱処理2条件	2×2	2×2
日新製鋼	加工2条件	2×2	2×2
	照射量	2	2
神戸製鋼	溶接部	2	2
	熱影響部	2	2

合計 18×2 ＝36本

(5)　期待される成果目標

ステンレス鋼の伸びを支配する要因として照射欠陥以外にどのようなものが存在するかをしらべる。

例えば転位，粒内析出物，粒界析出物次にこれらに照射欠陥が加わりボイドを発生する場合どのようなsiteがボイドの析出核となるかを調べる。

次にこれらがどのように強度に延びの影響を与えるかを調べる。

3.9.2　照射前試験

(1)　試料　AISI 304ステンレス鋼（SUS 27）

試料番号	最終処理
KA	1050℃
NI 1	固溶化　1080℃×22分
NI 2	鋭敏化　650℃×2hr
NS 1	C.W. 20%
NS 2	固溶化
KO 1	溶接部
KO 2	熱影響部

(2)　実験方法　0.5～0.1 mm厚のサンプルより電解研磨を行なった。

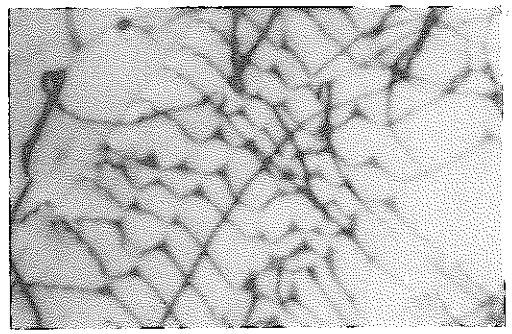
電解研磨液　氷酢酸85%　過塩素酸15%　温度は20～30℃

＊一部は試料提供会社にて行なわれた。

(3) 実験結果　各社提供の試料につき各１０～２０枚づつ
撮影を行なったがここでは代表的写真を示す。

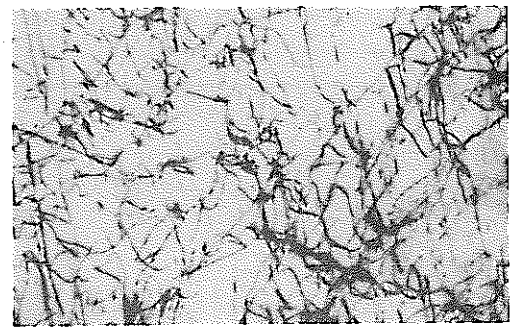
KA （×20000）

KA （×50000）

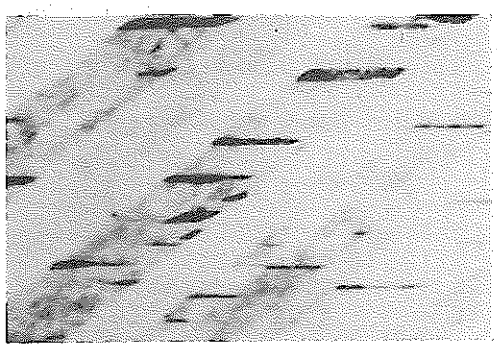


NI－1 （×20000）

NI－2 （×20000）

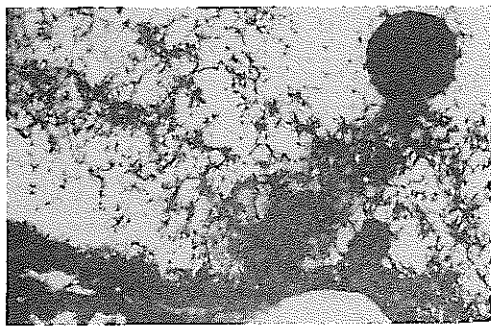


NS－1 （×50000）

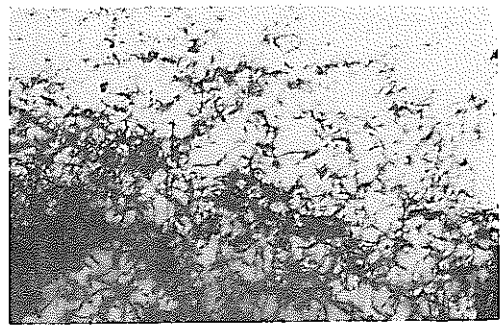


NS－2 （×20000）

KO－1 （×20000）



KO－2 （×20000）



(4) 結果の検討

1) 転位密度を決めるには通常１０枚以上の写真を必要とするが，ここではここに添付した写真における転位密度を仮の値として示す。

且し膜厚を３０００Åと仮定した。

試料番号	転位密度
ＫＡ	$1.9\times10^{9}/cm^{2}$
ＮＩ－１	2.0×10^{9}
ＮＩ－２	3.6×10^{9}
ＮＳ－１	(1.0×10^{10})
ＮＳ－２	1.0×10^{9}
ＫＯ－１	7.5×10^{9}
ＫＯ－２	5.8×10^{9}

以上の転位密度は結晶粒度及び粒の変形度に依存すると考えられ，粒が変形する以前ではαＦｅの場合次の関係が成立している。

$$\rho d = 1.5\times10^{7}\,cm^{-1}$$

2) 積層欠陥エネルギー

積層欠陥エネルギーは３重点及び転位の巾から求められる。３重点の場合には

$$\gamma = \frac{\mu b^{2}}{2R}$$

$\mu = 8\times10^{11}\,dyne/cm^{2}$，$b = 2.5\times10^{-8}\,cm$，$R = 10^{-5}\,cm$，$\gamma = 25\,erg/cm^{2}$

これまでの報告では１３ery/cm^{2}であり，これに比べて大きくなっている。

3.7－D　炭化物とヘリウム気泡の関係

3.10.1　研究計画

(1)　研究テーマ　炭化物とヘリウム気泡の関係

研究責任者　　近　藤　達　男

担　当　者　　中　島　　甫

(2)　目　　的　304およびTiによって安定化された321鋼の炭化物によるヘリウム気泡の捕獲が，炭化物の析出状態によりどのようなような影響をうけるかを知る。耐照射脆化の最大となる熱処理条件と脆化条件とについて電顕組織を比較することによる。

(3)　研究内容　試料の加工熱リレキは次のようにする。

1)　304A溶体化処理（s.a.）→850℃，50hr 加熱

2)　304B s.a →30％冷延（C.R）850°min → 920℃×　min加熱

3)　321A　　s.a →　850℃×48hr 加熱

4)　321B s.a →50％C.R→ 850℃×48hrs 加熱

照射後（場合により700℃にて焼純）薄膜とし，電顕観察し他に実施した引張試験データを参照して考察する。

ここで，熱処理Aは脆化促進条件，Bは脆化軽減条件である。

(4)　予想される成果

炭化物の分散が照射後脆化を軽減する機構として考えられているヘリウムの捕獲作用が炭化物の析出状態によって異るものかどうかたしかめられる。

3.10.2　照射前試験

(1)　試料の製作

試料の化学組成および加工熱処理に先だって与えた溶体化熱処理条件を（表1）に示す。また，本実験で与えた加工熱処理は（表2）に示す。ここで与えた加工とは二似冷間圧延機による圧延を意味し，厚み減少率をもって冷間加工率としたものである。

熱処理はすべて透明石英アンプルに封入し，スポンジZrゲッターによって真空度を高めた状態で行なった。真空は10^{-6} mmHg以下に保たれることを確認した。薄板の仕上り厚は0.1 mmである。

(2)　試　験

(a)　光学顕微鏡観察

電解研磨後，10％クロム酸中で電解エッチング後検鏡を行ない，主として結晶粒構造に着目した。

(b)　電顕による抽出レプリカ観察

表1　供試材の化学組成（w/o）

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Gr	Mo	Ti	B	N
AISI 304	0.05	0.62	1.50	0.024	0.008	0.06	9.20	18.80	0.06		0.0007	0.034
AISI 321	0.03	0.80	1.57	0.029	0.008		10.54	17.68		0.56	※1	

※1　Boronの化学分析は後日実施の予定です。

※2　溶体化処理条件

AISI　304鋼　　1100℃×10min

AISI　321鋼　　1150℃×30min

表2　供試材の熱処理

(1) AISI304	Solution＋850℃×50hr
(2) AISI304	Solution＋30%C. R.＋850℃×1hr＋900℃×30min
(3) AISI321	Solution＋850℃×48hr
(4) AISI321	Solution＋50%C. R.＋850℃×48hr

ビレラ液を用いてエッチングをしたのちに炭素を蒸着（蒸着角３０度），再びビレラ液によってはくり，抽出した。主として炭化物の形態，分布に注目した。

(c) 電顕による透過観察

炭化物，結晶粒界，その他の欠陥構造の相対関係をしらべる残存転位の状態から再結晶の完了の確認をした。

(3) 結　果

a　光顕および抽出レプリカ観察

a－1　試料１の状態（３０４，溶体化のまま加熱）

結晶粒界に粗大化した炭化物が選択析出している。（Fig. 1）通常の３０４材は多かれ少なかれこのような状態で照射をうける。本実験の場合は８５０℃で加熱してあるので，Bの偏析を加速してあるが，破壊の開始点である粒界と炭化物の析出位置が一致している点に注目する。（レプリケーションのときに炭化物の脱落があるので，充分抽出されていない）。結晶粒度　ASTM No. 5～6

a－2　試料２の状態（３０４，歪時効後再結晶）

炭化物が微細に粒内に分散し，結晶粒界と炭化物析出位置の相関性はない。結晶粒は微細化している。炭化物は

$M_{23}C_6$（Fig. 2）　　結晶粒度　ASTM No. 9～10

この場合，最後の再結晶熱処理を炭化物の溶解しない範囲のなるべく高い温度として９００℃を選び，Bの偏析を防いでいる。

a－3　試料３の状態（３２１，溶体化のまま加熱）

結晶粒は比較的大きく，かつTi炭化物の糸状析出がみられる。（Fig. 3）糸状炭化物はクリープ試験時にみられるものと同じもので，強波，延性共に低下する原因となる。結晶粒度　ASTM No. 3～4

a－4　試料４の状態（３２１，予歪を与えてのち，時効，再結晶）

Ti炭化物の析出が粒状となり，微細に分散する。又結晶粒は著るしく微細化する。（Fig. 4）結晶粒度　ASTM No. 10～11

このような組織のものは本来，６５０℃附近では延性，強度共に高い価を示す。

b　透過電顕観察

試料１～４のうち，照射後性質の改善を期待して加工熱処理を与えたNo. 2および４についての結果をそれぞれ（Fig. 5）および（Fig. 6，7）に示す。試料No. 2についてみると歪のほぼ完全に解放された基地に微細なCr炭化物が分散した状態でほとんど再結晶を完了，ごく一部に歪の未解放部分が残留している状態であった。試料No. 4については再結晶は１００％完了しており，Ti炭化物の析出が確認された。結果をまとめて（表３）に示す。

(4) まとめ

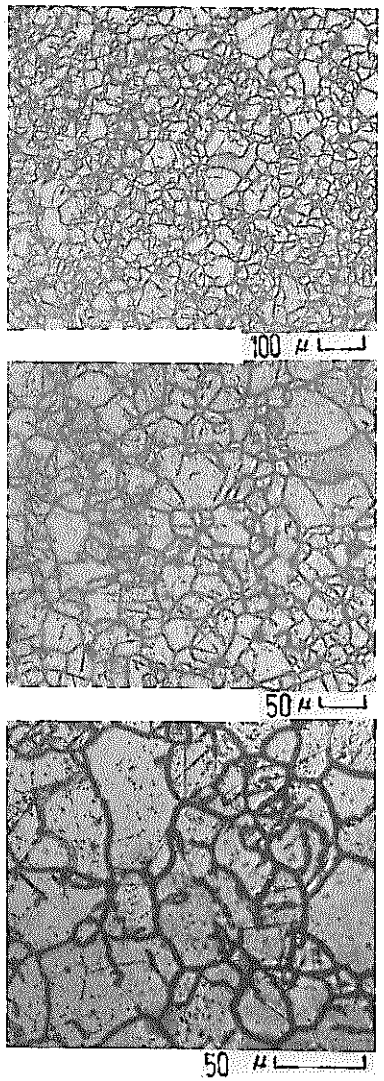
ほぼ目的通りの組織が得られたことを確認した。試料No. 2の再結晶状態が100%完了ではなかった点が若干目標を外れているが，目的に支障はない。

表3　各試料の金属組織の特長

試料 No.	結晶粒度 ASTM No.	析出物の大きさ，形状，分布等	予想される Boronの偏析
1	5～6	粒界に粗大なGr－炭化物	○
2	9～10	微細均一なGr－炭化物	×
3	3～4	粗大な糸状および微細な粒状Ti炭窒化物	○
4	10～11	微細均一な粒状Ti炭窒化物	×

AISI-304 HIS.

SOL. → 850°C50Hr.



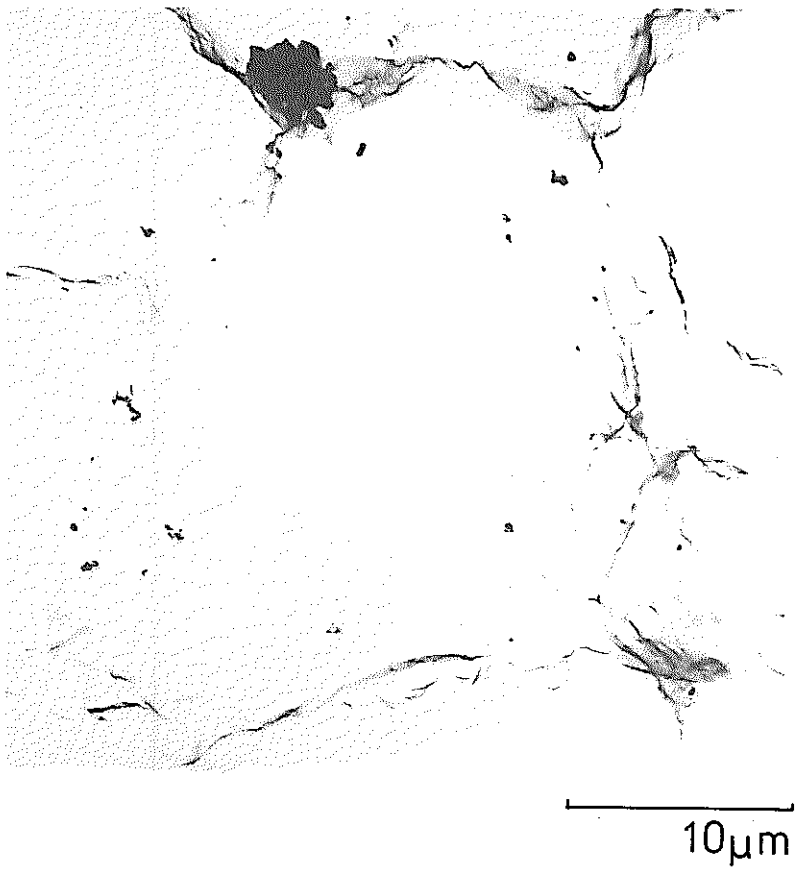
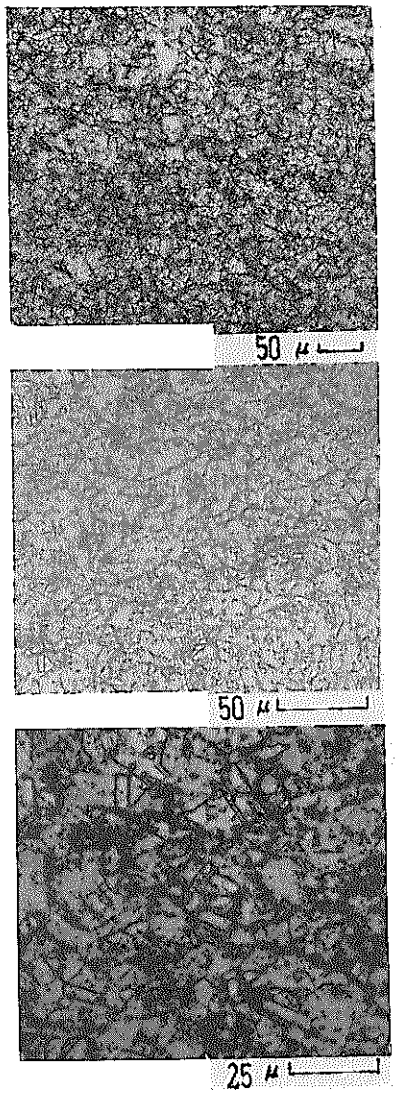


Fig.1

AISI-304 HIS. 50l. → 30%CR. → 850°C60Min → 900°C30Min



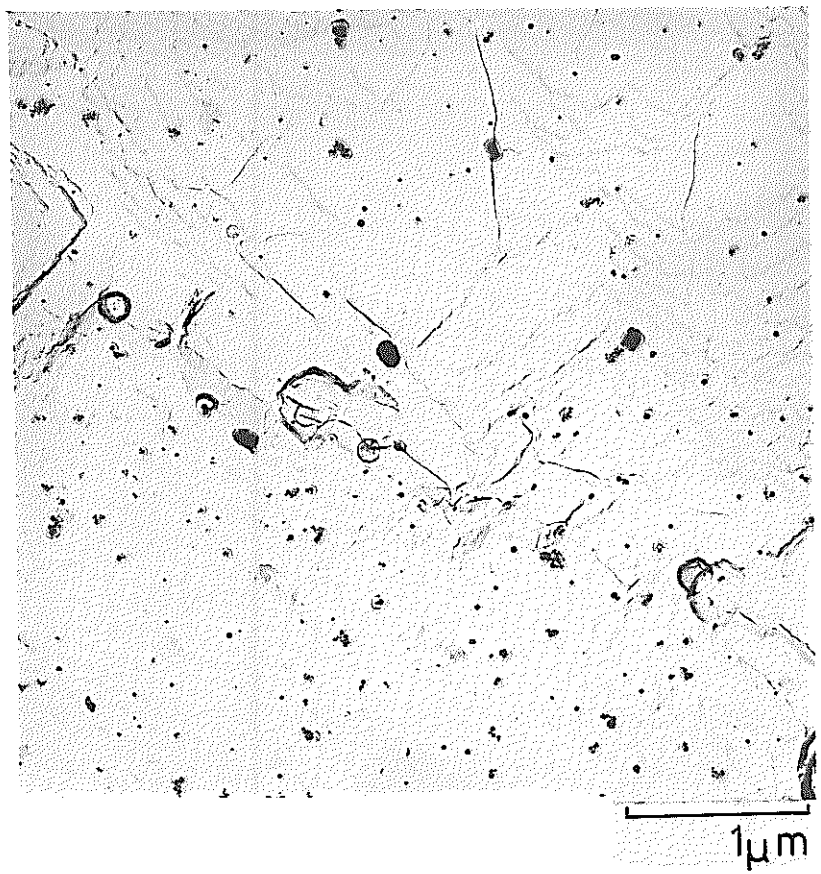
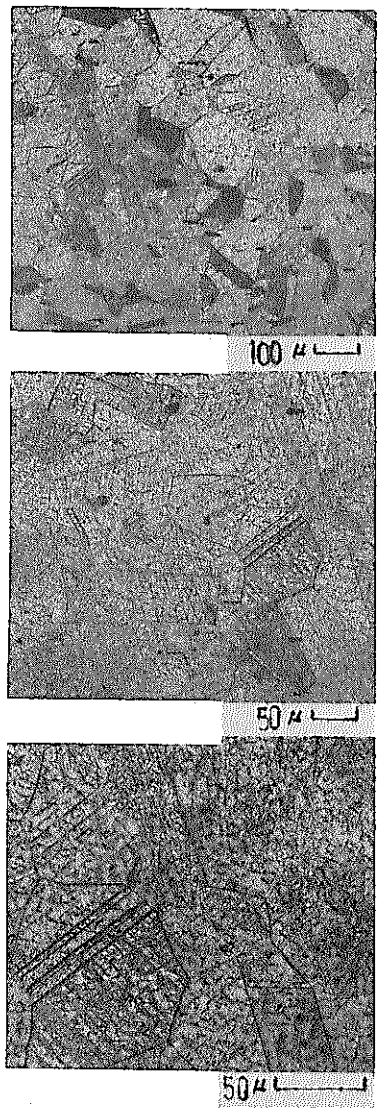


Fig.2

AISI-321 HIS. Sol. → 850℃48Hr



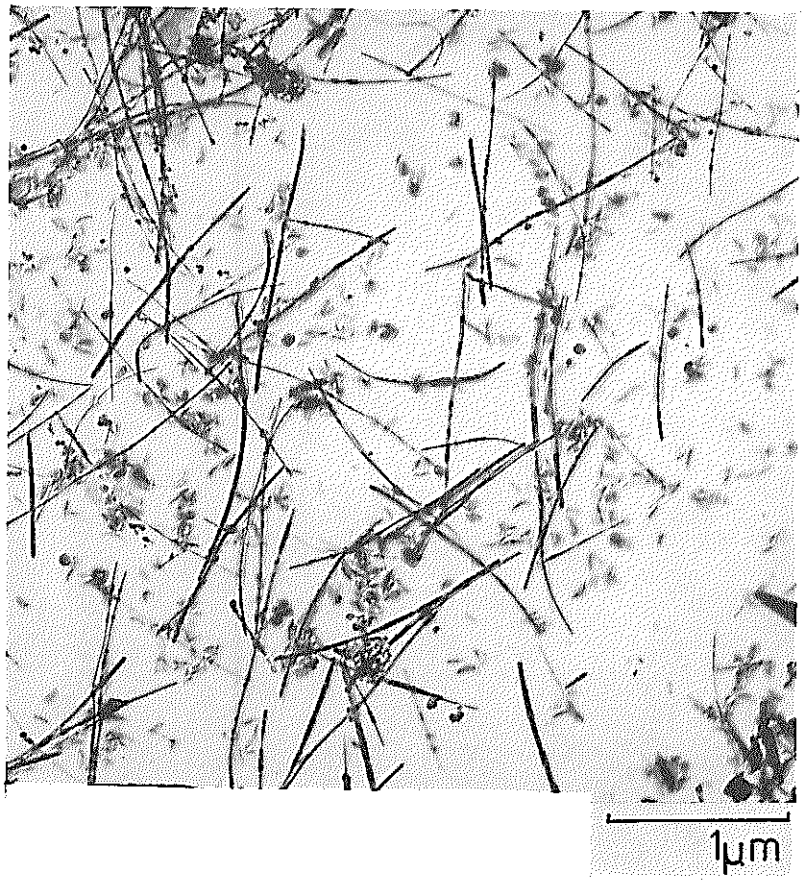
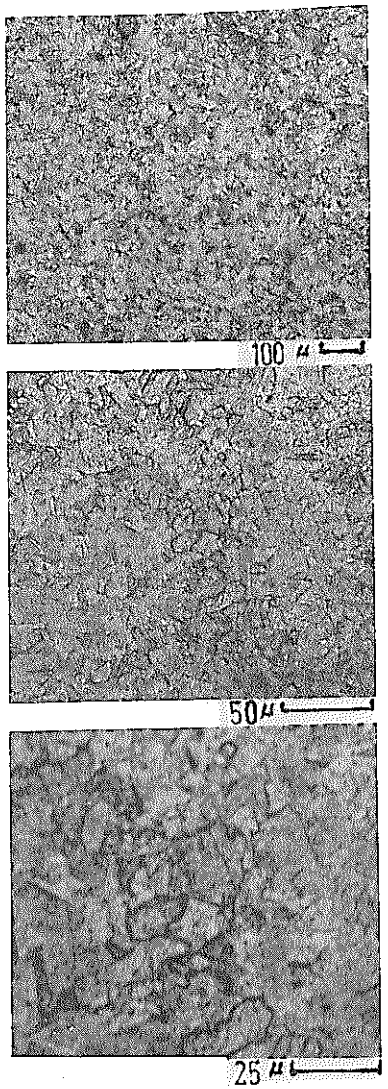


Fig.3

AISI-321 HIS. Sol. → 50 %C.R. → 850℃48H.



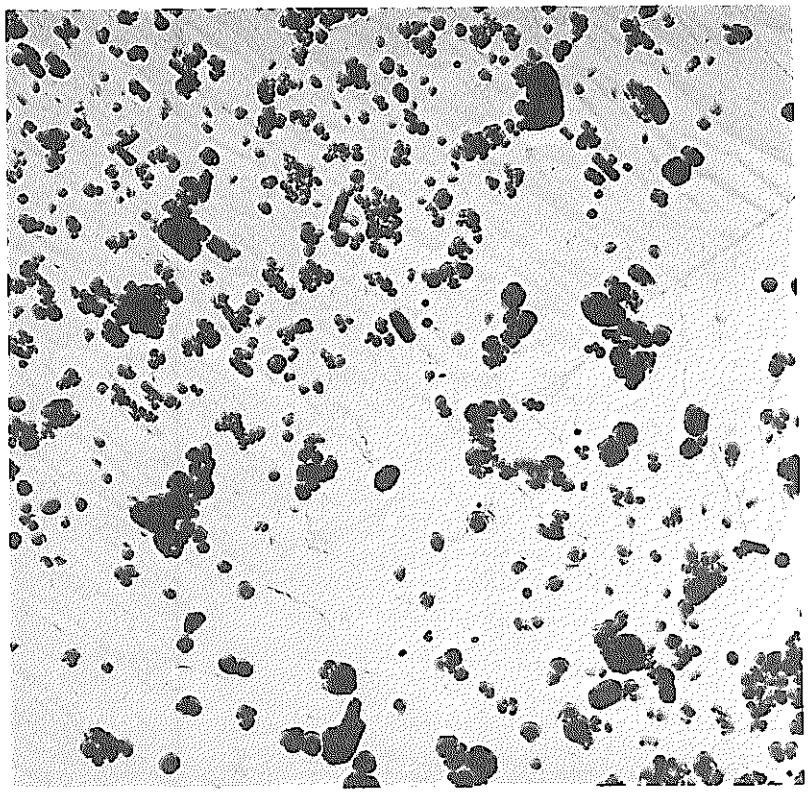


Fig. 4

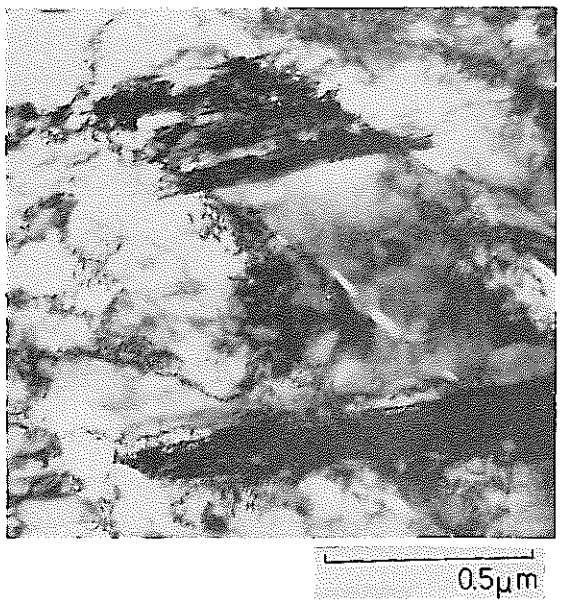


Fig. 5

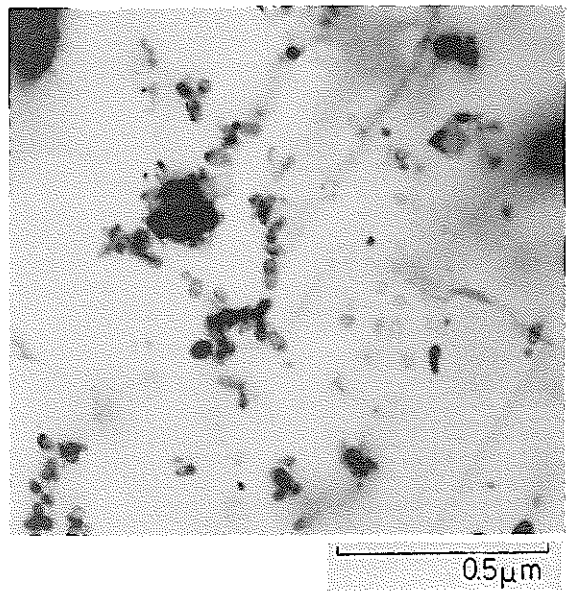


Fig. 6

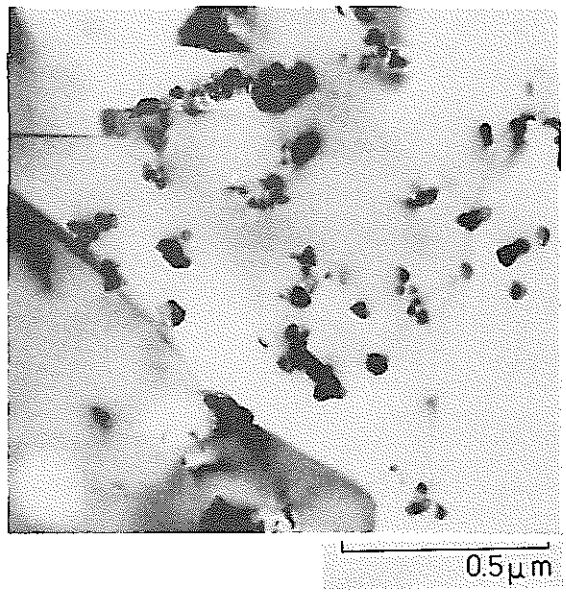


Fig. 7

4. 試験結果のまとめ

4. 試験結果のまとめ

4.1　化学成分について　（表１）

4.2　機械的試験　（図１，２）

4.3　クリープ・ラプチャー試験　（図３）

表 1　　供試材料の化学成分　（%）

会社＼成分	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	Co	Nb	Ti	N	B	O	その他
川崎製鉄	.056	.55	1.54	.024	.008	9.45	18.40	.10	.09	.24	.003	.017	.018	3PPm	70PPm	Aℓ .006
日本ステンレス	.070	.79	1.64	.029	.009	8.71	18.49	.08	.11	–	–	–	.02	<10PPm	107PPm	–
日新製鋼	.063	.53	1.11	.025	.005	8.96	18.53	.09	–	–	–	–	.013	–	–	–
日本冶金A	.071	.79	1.63	.030	.006	8.91	18.13	.06	.08	.19	.003	<.01	.029	<1PPm	93PPm	H 6.0PPm
〃 B	.069	.68	1.57	.024	.010	8.97	18.77	0.01	<01	.10	.004	<.01	.014	101PPm	116PPm	H 4.3PPm
新日鉄（母材）	.040	.60	.99	.023	.007	9.60	18.64	0.09	.11	.24	Nb+Ta .002	–	.029	5PPm	–	Aℓ .004
〃（溶着金属）	.050	.46	1.47	.024	.008	9.85	20.30	0.05	.05	.26	–	.026	.020	–	–	Aℓ .004
神戸製鋼（母材）	日本冶金A材を使用															
〃（溶着金属）	.051	.71	1.74	.025	0.015	9.81	19.67	0.09	.12	.18	–	–	.048	5PPm	925PPm	Aℓ .004

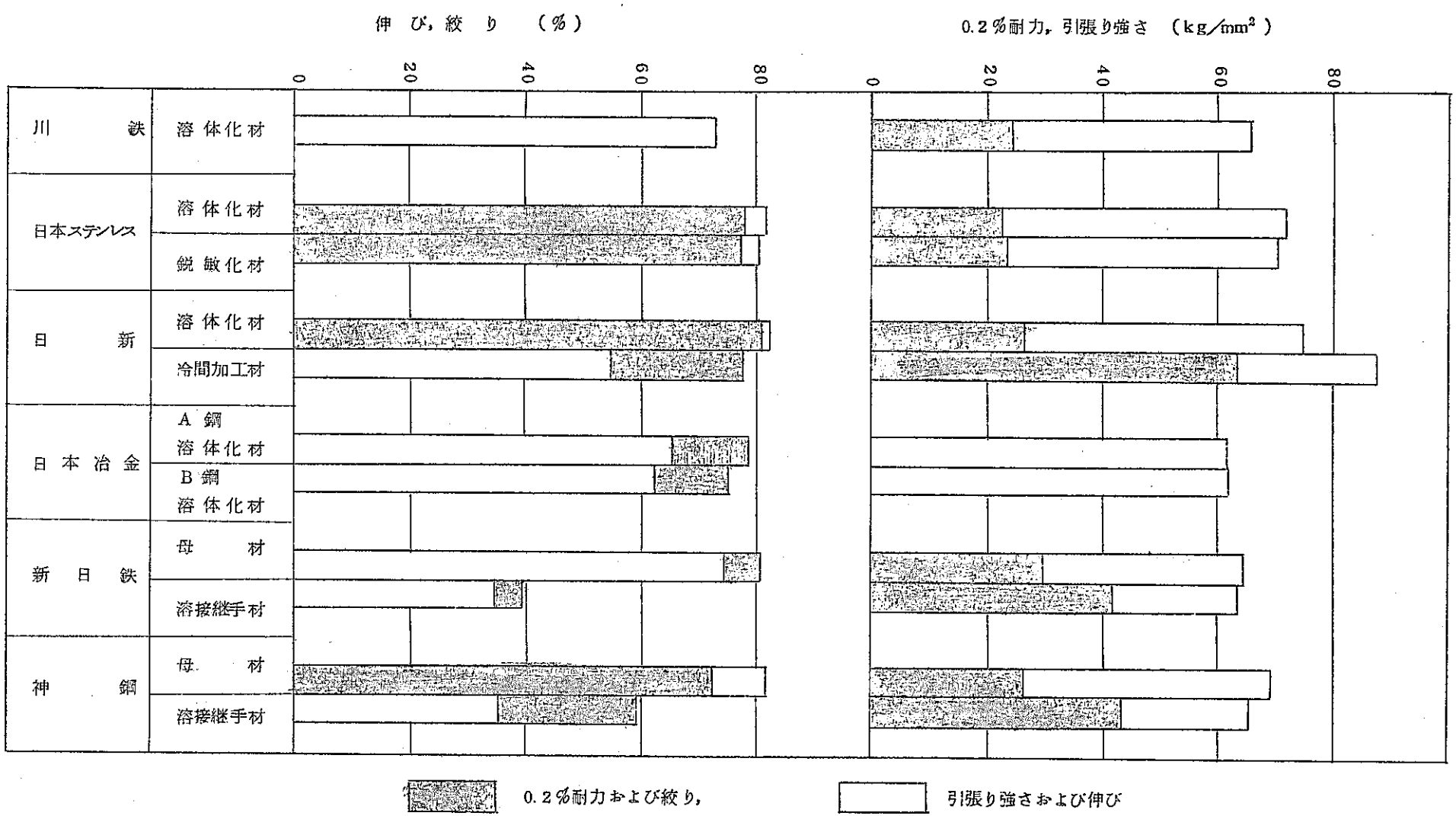


図1　室温における機械的試験結果まとめ

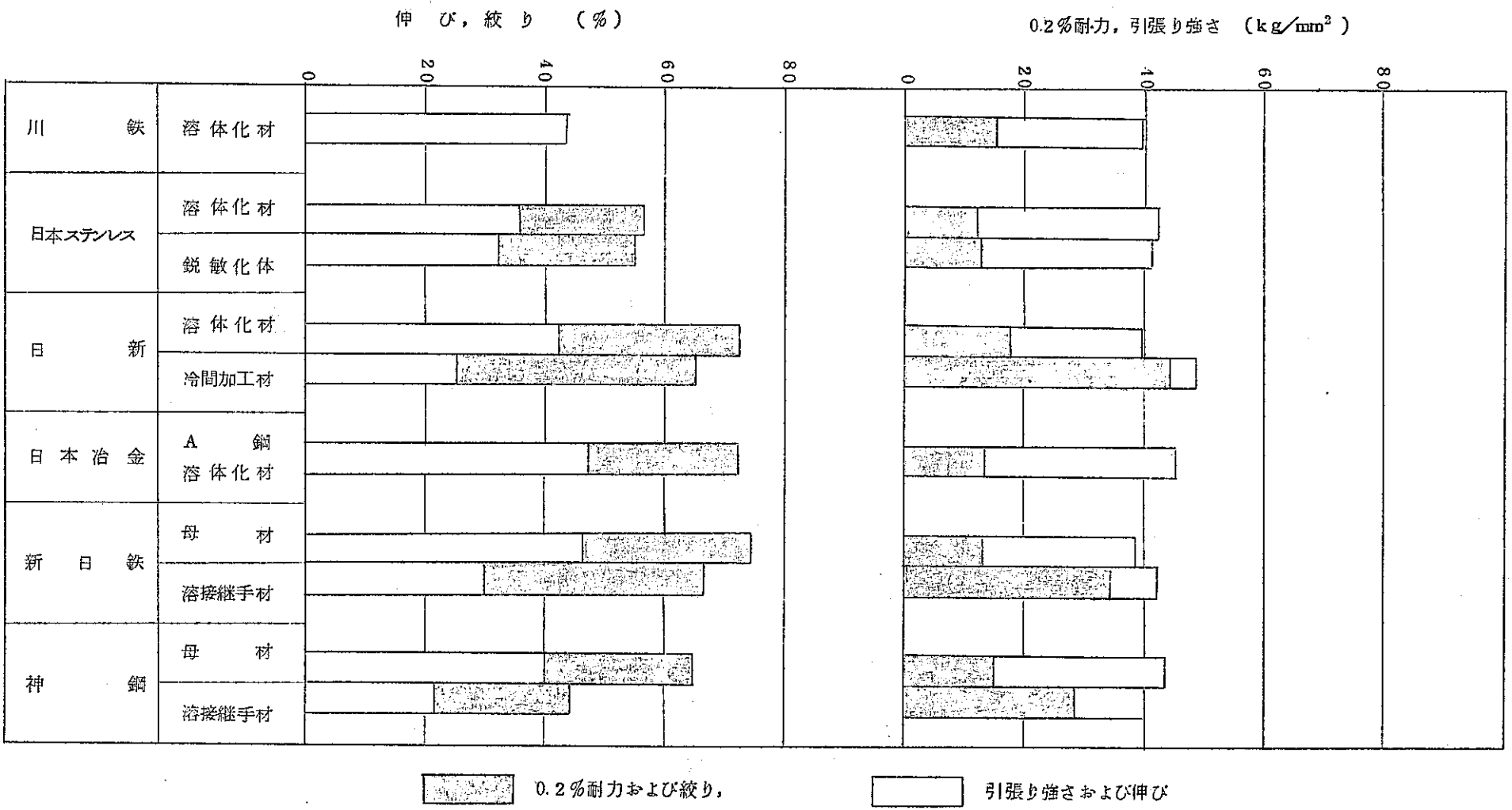


図2　550℃における機械的試験結果のまとめ

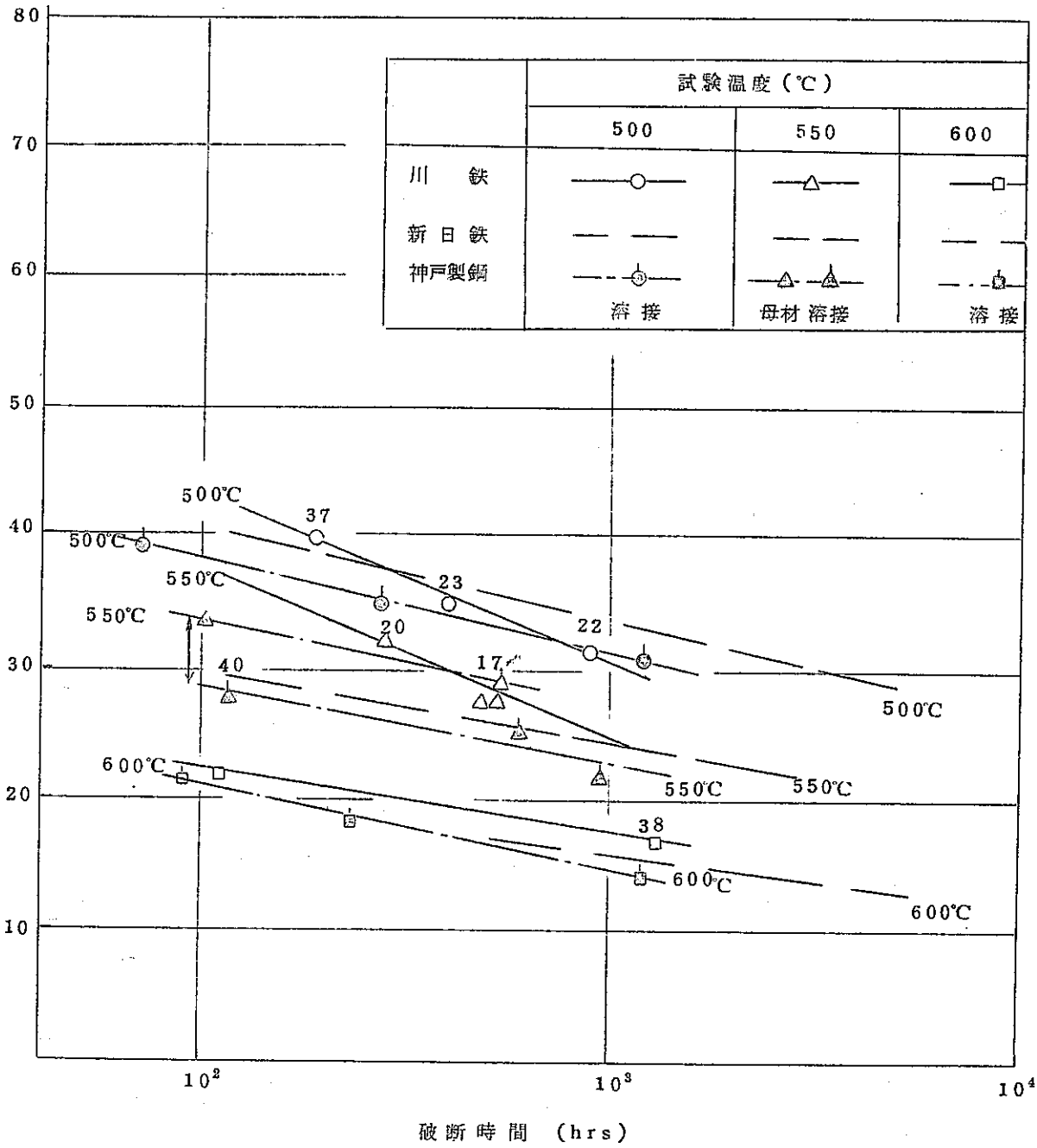


図3　クリープ破断曲線の比較

5. む す び

本照射試験はステンレス鋼構造材料のわが国における，最初の高照射量の試験となる。この照射試験によって得られる成果は，将来，〃常陽〃が稼動したときにおいて，原子炉容器の健全性を判断するために，その基礎的データとしてきわめて有用になるであろう。さらに，〃常陽〃を利用した構造材料の照射試験が進展するときは，比較照射試験データとして有用になろう。

本報告書は照射前における詳細な試験データの集積されたものであり，照射後試験の結果が得られたときには，合体されて高く評価されるであろう。

付　　録

1. 照射試験条件
2. ７０Ｍ－６０Ｐカプセル照射試験片配列図
3. 照射試験片測定
4. 照射試験片一覧表
5. 照射カプセル図面

1. 照射試験条件

動燃事業団より原研ＪＭＴＲへ提示された照射試験条件は下記のとおりである。

(1) ＪＭＴＲ№17，18，19サイクルの3サイクル運転期間に渡って照射する。

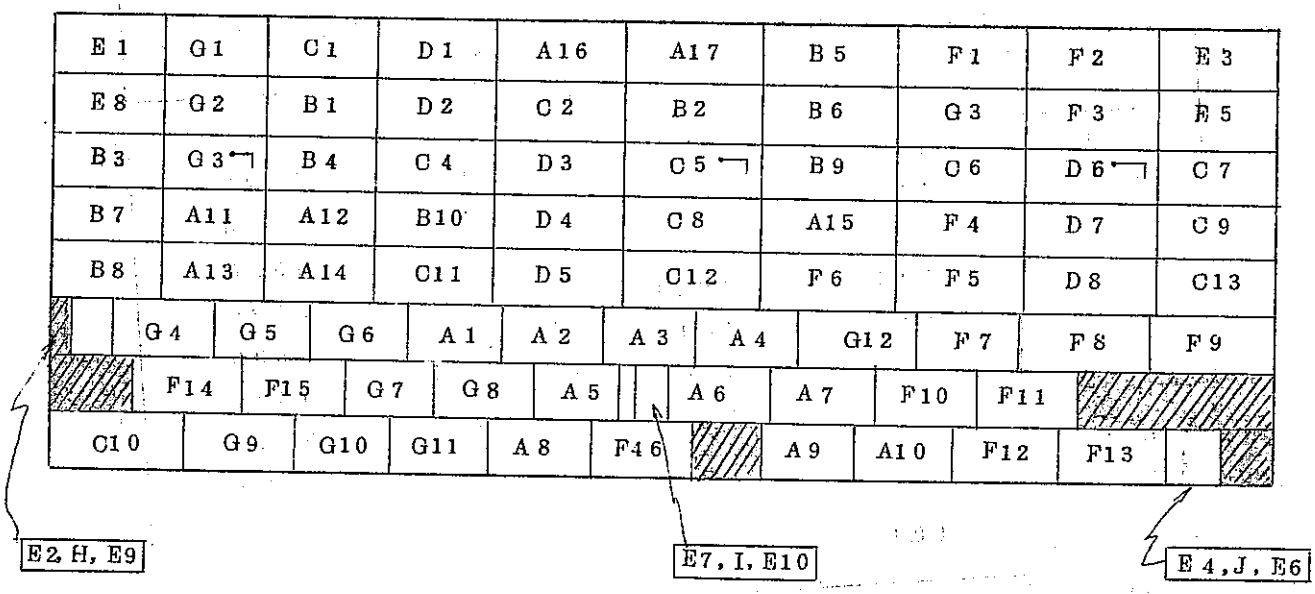
(2) 照射位置は炉心42φ照射孔とする。

(3) 1MeV以上の中性子のトータル フルーエンスは最大値が1×10^{21} n／cm^{2}を上廻るものとし，この件を照射後モニターワイヤにより確認する。（モニターワイヤ3個の指示のうち最大値をもって 照射量の最大値とする）

(4) 照射温度は3サイクル全体を通して550℃±50℃に制御することを目標とし，450℃を下廻ることおよび650℃を上廻ることはない。照射温度は，キャプセル内熱電対3個の連続記録により確認する。

2. 70M－60Pカプセル

試験片記号　A：川崎製鉄，B：日本ステンレス，C：日新製鋼，D：日本冶金，E：早大，F：新日鉄，G：神戸製鋼，H：阪大，I：東大，J：原研



（注1）┐印はモニターワイヤーの位置を示す。

（注2）▨はダミーを示す。

3. 照射試験片測定

川崎製鉄	重さ g	ゲージ φ mm	つかみ φ mm	長さ mm
A 1	22.3	5.996	14.00	48.15
A 2	22.3	6.001	13.95	48.20
A 3	22.6	6.005	14.05	48.10
A 4	22.3	6.001	14.00	48.10
A 5	22.4	6.010	14.00	48.15
A 6	22.3	6.005	14.00	48.15
A 7	22.4	6.001	14.00	48.15
A 8	22.3	6.007	14.00	48.10
A 9	22.3	6.005	14.00	48.15
A10	22.4	6.001	14.00	48.15
A11	10.5	3.998	7.80	55.20
A12	10.2	4.005	7.60	55.10
A13	10.3	4.004	7.60	55.20
A14	10.3	4.000	7.70	55.15
A15	10.3	4.004	7.70	55.15
A16	12.7	4.005	8.00	55.20
A17	12.7	3.998	8.00	55.15
日本ステンレス				
B 1	12.7	4.011	8.10	55.25
B 2	12.7	4.020	8.10	55.20
B 3	10.4	3.998	8.00	55.30
B 4	10.4	4.011	8.00	55.20
B 5	12.7	4.010	8.10	55.00
B 6	13.0	4.000	8.10	55.00
B 7	10.4	4.015	8.00	55.50
B 8	10.3	3.989	8.00	55.25
B 9	10.4	4.009	8.00	55.35
B10	10.4	3.980	8.10	55.20
日新製鋼				
C 1	13.0	4.002	8.15	55.20
C 2	13.0	4.002	8.15	55.05
C 3	13.0	3.987	8.10	55.10
C 4	12.7	3.980	8.10	55.15
C 5	12.8	4.007	8.10	55.10
C 6	12.7	4.002	8.10	55.15
C 7	12.8	4.005	8.10	55.00

	重　さg	ゲージφmm	つかみφmm	長　さmm
C　8	10.8	4.008	8.00	55.20
C　9	10.7	4.003	8.00	55.15
C10	10.4	4.001	7.95	55.10
C11	10.7	3.998	8.10	55.15
C12	10.7	4.015	8.10	55.15
C13	10.6	3.992	8.00	55.15
日本冶金工業				
D　1	12.8	3.980	8.10	55.10
D　2	12.9	4.034	8.10	55.05
D　3	10.7	3.995	8.00	55.15
D　4	10.7	3.997	8.00	55.20
D　5	10.7	3.979	8.00	55.20
D　6	10.7	3.995	8.00	55.20
D　7	10.7	3.987	8.00	55.10
D　8	10.7	3.980	8.00	55.15
早稲田大学				
E　1	12.8	4.002	8.10	55.15
E　2	2.4	—	8.10	高さ6.352
E　3	12.8	4.040	8.15	55.25
E　4	2.7	—	8.10	高さ6.830
E　5	12.8	4.016	8.10	55.30
E　6	2.7	—	8.10	高さ6.825
E　7	3.5	—	8.05	9.000
E　8	12.9	4.003	8.10	55.15
E　9	2.0	—	8.05	高さ5.190
E10	2.4	—	8.10	〃　6.211

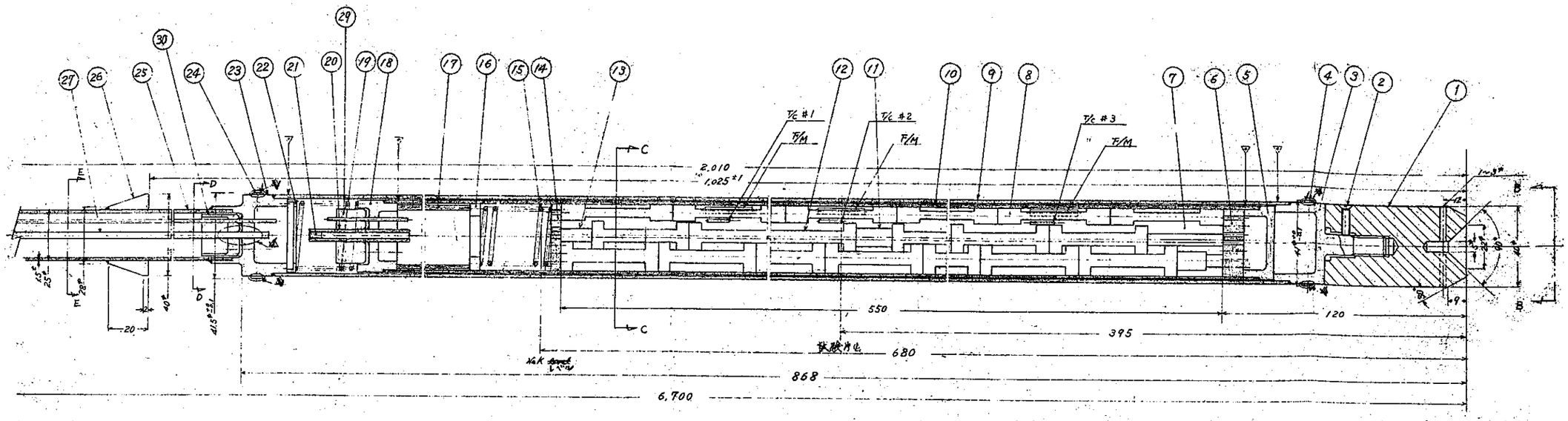
新日本製鉄	重　さ g	ゲージφ mm	つかみφ mm	長　さ mm
F　1	12.7	4.000	8.00	55.10
F　2	12.6	4.010	8.00	55.15
F　3	12.7	4.003	7.95	55.20
F　4	11.0	3.998	8.10	55.20
F　5	10.9	4.003	8.15	55.25
F　6	10.9	4.005	8.20	55.20
F　7	23.5	6.008	14.15	48.20
F　8	23.4	6.015	14.10	48.20
F　9	23.5	6.010	14.20	48.30
F10	23.4	6.007	14.25	48.10
F11	23.3	6.001	14.25	48.15
F12	23.3	5.998	14.10	48.00
F13	23.4	6.005	14.15	48.15
F14	23.3	5.997	14.15	48.15
F15	23.4	6.005	14.05	48.20
F16	10.7	3.990	8.00	55.00
神戸製鋼所				
G　1	13.5	4.005	8.00	55.00
G　2	13.4	4.014	8.05	55.00
G　3	13.2	4.010	8.05	55.00
G　4	23.3	6.006	14.05	48.15
G　5	23.0	5.994	14.05	48.10
G　6	23.2	5.995	14.05	48.10
G　7	23.2	6.005	14.05	48.10
G　8	23.2	6.000	14.05	48.25
G　9	23.3	6.002	14.05	48.10
G10	23.0	6.000	14.05	48.20
G11	23.0	6.004	14.05	48.00
G12	23.0	5.995	14.05	48.15

4. 照射試験片一覧表

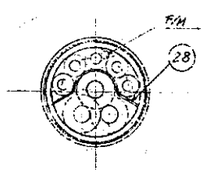
試験番号	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	C.R.	T.R. 溶体化	T.R.	T.R. A鋼	T.R. 304長 熱	T.R. 母材	T.R.W	E.P	E.P	E.P.
2	C.R.	T.R. 〃	T.R.	T.R. B鋼	M.P 〃	T.R.W	T.R.W	E.P.	E.P.	E.P
3	C.R.	T.H. 〃	T.R.	T.H. A鋼	T.R. 304 浸 炭	T.R.W	T.R. 母材		E.P.	E.P.
4	C.R.	T.H. 〃	T.R.	T.H. 〃	M.P. 〃	T.H.W	C.R.W		E.P.	E.P.
5	C.R.	T.R. 鋭敏化	T.R.	T.H. 〃	T.R. 〃＋H.T.	T.H.W	C.R.W			
6	C.R.	T.R. 〃	T.R.	T.H. 〃	M.P. 〃 〃	T.H.W	C.R.W			
7	C.R.	T.H. 〃	T.R.	T.H. 〃	M.P. 304 溶体化	C.R. 母材	C.R.W			
8	C.R.	T.H. 〃	T.H.	T.H. 〃	T.R. 304B長 熱	C.R. 〃	C.R.W			
9	C.R.	T.H. 〃	T.H.		M.P. 〃	C.R. 〃	C.R.W			
10	C.R.	T.H. 〃	T.H.		M.P. 304B溶体化	C.R. 〃	C.R. 母材			
11	T.H.	E.P.	T.H.			C.R. 〃	C.R. 母材			
12	T.H.	E.P.	T.H.			C.R. 〃	C.R.W			
13	T.H.		T.H.			C.R. 〃				
14	T.H.		E.P.			C.R. 〃				
15	T.H.					C.R. 〃				
16	T.R.					22.TH 〃				
17	T.R.									
	川鉄	日本ステンレス	日新製鋼	日本冶金	早稲田大	新日本製鉄	神戸製鋼	大阪大	東京大	原研

T.R.：常温引張り試験片，　T.H.：高温引張り試験片，　C.R.：クリープ試験片，　M.P.：光学顕微鏡試験片

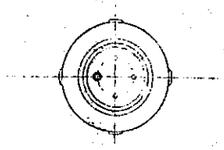
E.P.：薄膜試験片，　—W.：溶接部試験片



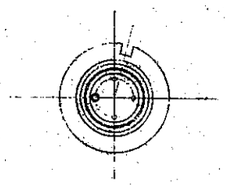
A～A 矢視



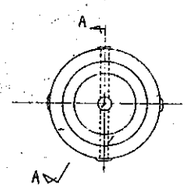
C～C 矢視



D～D 矢視



E～E 矢視



B～B 矢視

番号 PTNO		図番 DRAWING NO	品名 NAME	材質 MATERIAL
30			外周用スペーサ	〃
29			内周用スペーサ	〃
28			ろうきり板	〃
27			測温ガス管	〃
26			ツバ	〃
25			保護管	〃
24			上部パット	〃
23			上部蒲鉾	〃
22			スプリング側板	SUS-27
21			Na.K封入栓	〃
20			Na.K封入管	SUS-32
19			スプリング	SUS-27
18			内筒上部蒲鉾	SUS-32
17			スプール	〃
16			内筒スプリング押え板	SUS-27
15			内筒スプリング	[illegible]
14			押え板	SUS-27
13			ダミー試験片	SUS-27
12			クリープ試験片	
11			金相試験片	
10			内筒	SUS-32
9			外筒	SUS-27
8			引張試験片	
7			熱媒体	Na.K
6			試験片受け板	SUS-27
5			内筒下部蒲鉾	SUS-32
4			固定部パット	〃
3			下部蒲鉾	〃
2			サラシホルダー	SUS-27
1			下部アダプター	Al B3