

高速原型炉構造材料及び溶接金属の照射後試験

第1報 受入材の引張試験

1980年9月

動力炉・核燃料開発事業団

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター

システム開発推進部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor
and Nuclear Fuel Development Corporation 4002, Narita O-arai-machi Higashi-
Ibaraki-gun, Ibaraki, 311-14, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development
Corporation)

高速原型炉構造材料及び溶接金属の照射後試験

第1報 受入材の引張試験

榊 原 瑞 夫* 谷 賢*
蟹 川 昌 也* 加 藤 隆 史*
鈴 木 和 久** 一 海 俊 景*

要 旨

高速原型炉の炉容器候補材としてSUS 304, 40 mm厚板と延性改良を目的として製造された新日鉄及び神鋼製の手溶接及びサブマージアーク溶接材の照射効果を調査するための一連の研究が進められている。

本報はこれら一連の試験中, 最も基本となる受入材の引張試験結果をまとめたものである。試験結果をまとめると次のとおりである。

- 1) SUS 304, 40 mm厚板の550°Cにおける耐力及び引張強さはそれぞれ13.0~14.6 kg/mm²及び38.3~39.2 kg/mm²であった。
- 2) 溶接金属の550°Cにおける耐力及び引張強さはそれぞれ24.9~31.8 kg/mm²及び35.4~37.4 kg/mm²であった。
- 3) 550°Cにおける一様伸びは母材で34.0~35.8%, 溶接金属で16.3~23.5%であった。この溶接金属の一様伸びは「常陽」材及び米国のCRE 308に比べ高い値であった。
- 4) 母材はSUS 304鋼の標準的な組織で, 溶接金属はセル及びセルデンドライト状を呈しており, 細粒の δ フェライトを有する二相組織であった。

* 大洗工学センター, 燃料材料試験部, 照射材料試験室

** 現, 大洗工学センター, 燃料材料試験部

Sept., 1980

Post Irradiation Tests of Structural Material and Weld Metals
for Proto-type Fast Breeder Reactor

1. Tensile Properties of Unirradiated Type 304 Stainless Steel.

Mizuo Sakakibara*, Satoshi Tani*,
Masaya Kanikawa*, Takafumi Kato*,
Kazuhisa Suzuki**, and Toshikage Ikkai*

Abstract

The candidated materials for reactor vessel, 40mm thick plate of SUS304 and weld metals improved the ductility which are fabricated by Nippon Steel Co. and Kobe Steel Ltd., have been investigated on the irradiation effect. For the first step, tensile tests of unirradiated specimens were performed.

The results obtained are summarized as follows.

1) The 0.2% yield stress and tensile strength of base metal at 550°C are 13.1~14.6Kg/mm² and 38.3~39.2Kg/mm². And that of weld metals are 24.9~31.8Kg/mm² and 35.4~37.4Kg/mm².

3) The uniform elongations of the base metal and the weld metals at 550°C are 34.0~35.8% and 16.3~23.5%.

4) The base metal has the standard microstructure for the SUS304. The weld metals have the cell and cell-dendrite structures, and contain fine δ ferrite.

* Material Monitoring Section, Fuel and Material Division, O-arai Engineering Center, PNC.

** Fuel and Material Division, O-arai Engineering Center, PNC.

List of Tables

Table 1. Mill sheet of base metal.....	11
Table 2. Mill sheets of all deposits.....	12
Table 3. Welding procedures.....	13
Table 4. Tensile properties of specimens tested at room temperature.....	14
Table 5. Tensile properties of specimens tested at 550°C.....	15

目 次

1. ま え が き	1
2. 供 試 材	2
3. 試 験 方 法	3
4. 試 験 結 果	4
5. 考 察	6
5.1 強 度 に つ い て	6
5.2 延 性 に つ い て	7
6. あ と が き	8
7. 謝 辞	9
8. 参 考 文 献	10

List of figures

Fig. 1	Profile of specimen.....	16
Fig. 2	Sampling of specimens.....	17
Fig. 3	0.2% yield and tensile strength versus test temperature.....	18
Fig. 4	Uniform and ruptured elongation versus test temperature.....	19
Fig. 5	Reduction of area of specimens ruptured.....	20
Fig. 6.a	Micrographs of specimens before test ($\times 100$).....	21
Fig. 6.b	Micrographs of specimens before test ($\times 400$).....	23
Fig. 7	Micrographs of the cross section of specimen tested at room temperature.....	25
Fig. 8	Micrographs of the cross section of specimen tested at 550°C	27
Fig. 9	Comparison of yield and tensile strength between this work and others.....	29
Fig. 10	Evaluation of tensile properties by the Design criteria for "JOYO".....	30
Fig. 11	Comparison of uniform elongation between this work and others.....	31

1. ま え が き

高速炉用材料の照射効果については、高速実験炉の運転に伴い、国産材のデータが順次蓄積されてきた。^{1)~5)}又高速原型炉の設計、製作が具体化するに伴い、候補材料及び溶接施工法の選定試験が実施されてきており、^{6)~8)}その一環として照射後試験が計画実施されているが、照射効果を明らかにするためには基礎データとして受入材及び熱履歴材のデータを取得する必要がある。本報はその第1報として受入材のSUS304、40mm厚板及び溶接金属4種の引張試験結果をまとめたものである。他の試験については現在進行中であり、逐次照射効果を明らかにし高速原型炉用材料選定及び安全性評価のための基礎データに資する予定である。

2 供 試 材

Table. 1に供試304, 40mm厚板材のミルシートを示す。Table. 2及びTable. 3に供試溶接材料のミルシート及び溶接施工法を示す。溶接材料は新日鉄及び神鋼製で延性を改良するためにそれぞれP+V及びNbが添加されている, 手溶接(以下SMAW)及びサブマーシアーク溶接(以下SAW)は日本溶接協会原子力研究委員会(PFW⁷A)で検討された条件で行った。SMAWは表側に33~40ビード盛り, 裏はつり後裏側に10~12ビード盛った。SAWは表側に17ビード盛り, 裏はつり後裏側に4~5ビード盛った。溶接パス毎に液体浸透探傷試験を行い, 欠陥がないことを確認し次のビードを置いた。又溶接完了後放射線検査を行った。その結果欠陥は認められず, 全てJIS Z 3106の1級を満足していた。

3. 試 験 方 法

Fig. 1 に示す引張試験片を Fig. 2 に示す要領で採取した。母材及び溶接金属の板厚(以下 t) の $\frac{1}{2}$ 及び $\frac{1}{4}$ の部分から母材は圧延方向が、又溶接金属はビードの長手方向が引張軸と一致するように試験片を採取した。引張試験片は平行部径 4 mm ϕ 、平行部長さ 24 mm、標点間距離 20 mm である。引張試験は室温と高速原型炉の設計温度である 550 $^{\circ}$ C の 2 温度で、0.2% 耐力まで 0.1 mm/min (0.4%/min)、それ以後 3.0 mm/min (12.5%/min) の引張速度で行った。又 550 $^{\circ}$ C 試験では設定温度に昇温し、約 30 min 保持後引張った。試片の破断伸びは破断した試験片の破断部を突合せ標点間にマーキングした圧痕間距離を測定することにより求めた。又一様伸びは便宜上破断伸びから引張強さ以降の伸びを差し引くことにより求めた。破断絞りは破断部を突合せた状態で 90 $^{\circ}$ 回転位置の 2 個所の最小径を測定し求めた。

4. 試験結果

Table. 4に室温の、又Table. 5に550℃の引張試験結果を示す。B～C破断した試験片は破断絞りが高いにもかかわらず破断伸びが低い。このため破断伸び及び一様伸びの値は他のA及びB破断したものと比較することが不適當と考えられたので試験結果の検討から除外した。

Fig. 3に耐力及び引張強さを示す。母材及び溶接金属の耐力はASME code case 1592の値を満足していた。母材の $\frac{1}{4}t$ 部の耐力は $\frac{1}{2}t$ 部に比べ室温で約2 kg/mm²、550℃で約1.5 kg/mm²低かった。溶接金属の耐力は母材に比べ室温及び550℃ともに約12～20 kg/mm²高かった。 $\frac{1}{2}t$ 部の耐力はSMAW材とSAW材ではほぼ等しかったが、 $\frac{1}{4}t$ 部の耐力はSAW材が約5 kg/mm²低かった。新日鉄材と神鋼材で耐力に差は認められないようであった。

引張強さは神鋼製SAW材の $\frac{1}{4}t$ 部が室温で低い値を示したが、その他は母材及び溶接金属部ともに $\frac{1}{2}t$ 部と $\frac{1}{4}t$ 部で差は認められなかった。又SMAW材とSAWはほぼ等しい値であったが母材に比べ約2～5 kg/mm²低かった。

Fig. 4に一様伸び及び破断伸びを示す。母材の一様伸び及び破断伸びはそれぞれ室温で約61～68%及び約68～78%、又550℃で約34～36%及び約43～45%であった。 $\frac{1}{4}t$ 部に比べ $\frac{1}{2}t$ 部は一様伸び及び破断伸びともに室温で約5～10%低かったが、550℃ではほぼ等しかった。溶接金属は母材に比べ一様伸び及び破断伸びともに著しく低かった。SMAW材の $\frac{1}{4}t$ 部及び $\frac{1}{2}t$ 部の室温及び550℃における一様伸び及び破断伸びはほぼ等しかった。SAW材の $\frac{1}{4}t$ 部の一様伸び及び破断伸びは $\frac{1}{2}t$ 部に比べ室温で約15%又550℃で約10%高かった。SMAW材の一様伸び及び破断伸びはSAW材に比べ室温で約8～15%高いが550℃ではほぼ等しかった。新日鉄製SMAW材は神鋼製SMAW材に比べ一様伸び及び破断伸びともに室温で約5%低かったが、550℃ではほぼ等しかった。SAW材は新日鉄製が神鋼製に比べ室温及び550℃ともに高い伸び値を示した。

Fig. 5に破断絞りを示す。母材の室温の破断絞りは $\frac{1}{4}t$ 部が $\frac{1}{2}t$ 部に比べ約5%高かったが、550℃ではほぼ等しかった。溶接金属の破断絞りは母材に比べ室温及び550℃ともに約10～30%低かった。又ばらつきが大きく確かなことはいえないが、SMAW材はSAW材に比べ室温で高く、550℃ではほぼ等しい絞り値を示しているようである。又 $\frac{1}{4}t$ と $\frac{1}{2}t$ 部では差は認められないようであった。

Fig. 6に受入材の金相写真を示す。A及びBは母材の $\frac{1}{4}t$ 部及び $\frac{1}{2}t$ 部のL断面の組織である。 $\frac{1}{4}t$ 部は $\frac{1}{2}t$ 部に比べ粒界がDeep etchを受けているようであるが、大きな差は認められなく、板厚効果は少ないようである。C及びDは神鋼製SMAW材の $\frac{1}{4}t$ 部及び $\frac{1}{2}t$ 部の組織である。いずれも微細なセル状組織を呈しており、凝固に伴う組織の方向性は認められな

いようである。又 $\frac{1}{4}t$ 部は $\frac{1}{2}t$ 部に比べ組織がわずかに細かいようである。E 及び F は神鋼製 SAW 材の $\frac{1}{4}t$ 部及び $\frac{1}{2}t$ 部の組織である。いずれもセルデンドライト状組織を呈しており、凝固に伴う組織の方向性が認められた。この方向性は溶接による再熱を数多く受けている $\frac{1}{2}t$ 部で少なく $\frac{1}{4}t$ 部では若干多いようであった。又デンドライトの樹枝間上の析出物は $\frac{1}{4}t$ 部では断続状であったが、 $\frac{1}{2}t$ 部では連続状が多かった。G 及び H は新日鉄製の SMAW 及び SAW 材の $\frac{1}{4}t$ 部の組織である。先に述べた神鋼製の組織と異なり、新日鉄製は SMAW 材でセルデンドライト状を呈し組織に方向性が認められたが、SAW 材ではセル状を呈し、方向性は認められなかった又 δ フェライトは新日鉄製 SMAW 及び SAW で FN 3 及び 6 であり、神鋼製でそれぞれ 5 及び 7 であった。しかしフェライトインディケータによる測定では新日鉄材がそれぞれ 3.8 ~ 4.1 及び 7~7.2% で、神鋼材がそれぞれ 6.5 ~ 7.2 及び 12 ~ 13% であった。

Fig. 7 に室温引張試験後の破断部中央断面の組織を示す。A 及び B は母材の $\frac{1}{4}t$ 部の組織である。いずれも典型的な高延性材の破断組織を示しており、塑性変形に伴い結晶粒が長く伸び層状を呈している。特に $\frac{1}{4}t$ 部は $\frac{1}{2}t$ 部に比べその変形の程度が大きい。C 及び D は神鋼製 SMAW 材の、E 及び F は SAW 材のそれぞれ $\frac{1}{4}t$ 及び $\frac{1}{2}t$ 部の組織である。又 G 及び H は新日鉄製の SMAW 及び SAW 材の $\frac{1}{4}t$ 部の組織である。いずれも結晶粒が長く伸び変形しているが母材に比べるとその程度は小さく低い延性で破断したことが認められる。特に F に示した神鋼製 SAW 材 $\frac{1}{2}t$ 部では結晶粒の変形が小さかった。

Fig. 8 に 550°C 引張試験後の破断部中央断面の組織を示す。A 及び B は母材の $\frac{1}{4}t$ 及び $\frac{1}{2}t$ 部の組織である。 $\frac{1}{4}t$ 及び $\frac{1}{2}t$ 部ともに結晶粒の変形に伴うスリップバンドが認められる。先に示した室温引張破断部の組織に比べると粒の変形が小さく、延性が劣っているようであった。C 及び D は神鋼製 SMAW 材の、E 及び F は SAW 材のそれぞれ $\frac{1}{4}t$ 及び $\frac{1}{2}t$ 部の組織を示す。又 G 及び H は新日鉄製の SMAW 及び SAW 材の $\frac{1}{4}t$ 部の組織である。いずれも結晶粒が長く伸び変形しているが母材に比べるとその程度は小さい。特に F に示した神鋼製 SAW 材 $\frac{1}{2}t$ 部では変形が少なく、樹枝状晶間のネットワーク状析出物にそって破断していた。F を除くと先に示した室温引張の溶接金属の破断部組織と大きな差は認められないようである。

5. 考 察

5.1 強度について

Fig. 9に本実験の耐力及び引張強さを高速実験炉サーベイランス及びサーベイランスバックアップ試験の母材¹⁾, 4), 9), 10)及びPFW-Aの継手⁸⁾の結果と比較して示す。又同図に高速原型炉設計基準(暫定値)¹¹⁾を示す。母材の耐力は室温及び550℃ともに比較材のデータバンドの中間に位置しており, 高速原型炉候補材の40mm厚板でも25mm板厚の「常陽」材と変わらない値をもっているといえる。溶接金属の耐力はばらつきはあるが比較材の高目の値とほぼ一致していた。母材の引張強さは室温で比較材のデータバンドの中間に, 又550℃で下側に位置していた。溶接金属の引張強さは室温で比較材とほぼ等しく, 550℃では高目であった。又耐力及び引張強さともに高速原型炉設計基準(暫定値)を満足していた。Fig. 10に高速原型炉材料強度基準等(暫定値)解析¹²⁾に基づき求めた強度と許容応力の関係を示す。母材及び溶接金属の耐力及び引張強さから計算された値は時間に依存しない許容応力値を十分上まわっており, いずれも高速原型炉用材料として選定可能であると考えられた。

溶接金属の耐力はFig. 3に示したように母材に比べ著しく高い。Petch¹³⁾によれば降伏強さは結晶粒径の $^{-1/2}$ 乗に比例して増加する。又Orowan¹⁴⁾によれば析出物間隔に反比例して増加する。本実験材の溶接金属の組織はFig. 6に示したように微細なセル状又はセルデンドライト状を呈しており, 樹枝状晶間の偏析帯には δ フェライト及び溶接多重熱サイクルによる析出物が存在している。一方母材の粒内, 粒界には析出物が認められないことから, 溶接金属では微細なセル状組織の境界が結晶粒界の役目を果し, かつ微細析出物の存在により耐力が母材よりも高いものと考えられる。なお溶接金属内の微細析出物は本報告者ら¹⁵⁾の透過電顕及びX線エネルギー分散分析結果によると δ フェライト, 炭化物及びSiとCrの微細分散した酸化物であった。これらの析出物と強度の関係については別報で詳しく報告する予定である。

5.2 延性について

引張破断伸び及び一様伸びについては特に規定されていないが、高速実験炉では再臨界事故を想定して、20%以上の一様伸びがある材料では安全であるという解析がなされている。高速原型炉では再臨界事故は起こらない設計条件及び運転条件が取られ、延性の必要性は高速実験炉に比べやや緩和されるものと考えられる。しかしFFTF等では溶接部の延性低下が問題視されCRE308が開発されてきた。

本試験材も上記の観点から溶接金属の延性を改良することを目的に新日鉄材ではPとVが、又神鋼材ではNbが添加されている。この結果Fig. 11に高速実験炉サーベイランスバックアップ試験の継手¹⁾、PFW-A⁸⁾の結果及びCRE308溶接金属の一様伸び¹⁶⁾と本実験結果を比較して示したように、550℃では同種材料の試験結果であるPFW-Aと同等の値であったが、高速実験炉の継手及びCRE308と比べ若干高い値を示した。しかし溶接部は一般的にばらつきが多いので真の値を評価するには、系統的な実験を行うとともにデータを蓄積し、データの信頼性をより高めて行く必要がある。特に一様伸びは照射により低下することがわかっており⁴⁾、高速原型炉用として延性改良を目的に製造されたこれら溶接金属及び継手の照射に関する試験データを蓄積して行く必要がある。

6. あ と が き

本報では、高速原型炉用炉容器候補材としてのSUS304と延性改良を目的として製作された新日鉄及び神鋼製のSMAW及びSAW材の受入材の引張試験結果をまとめた。その結果、母材及び溶接金属の強度は特に問題ないと考えられた。伸びに関しては、溶接金属の550℃での一様伸びは高速実験炉のサーベイランスバックアップ試験の継手及び米国FFTF用CRE308溶接継手のデータより若干高い値を示したが、その最低値は新日鉄材で約21%、神鋼材で約16%であった。又同じ材料を使用して試験されたPFW-Aの結果ではそれぞれ22.7%及び26.3%であった。この値の差はばらつきと考えられるが、炉寿命末期での延性を評価するためにはこれらばらつきを含めた最低値を知る必要があり、現在計画実施中の熱履歴試験及び照射後試験による確性試験が急がれる。

7. 謝 辞

本試験を実施するにあたり、FBR本部厚母栄夫氏、江端誠氏を始め関連各部門において御協力頂いた各氏に厚く謝意を表します。

8. 参 考 文 献

- 1) 鈴木和久, 他: 高速炉用構造材料及び溶接継手の照射後試験
第1報 短時間強度試験, 動燃団報告, SN941 77-139 (1977)
- 2) 鈴木和久, 他: 高速炉用構造材料及び溶接継手の照射後試験
第2報 長時間強度試験, 動燃団報告, SN941 79-04 (1979)
- 3) 鈴木和久, 他: 高速炉用構造材料及び溶接継手の照射後疲れ試験
動燃団報告 SN941 79-10 (1979)
- 4) 鈴木和久, 他: 「常陽」サーベイランスバックアップ試験
第1報 JMTR照射炉容器および溶接継手の短時間強度試験
動燃団報告, SN941 79-06 (1979)
- 5) 榊原瑞夫, 他: 「常陽」サーベイランスバックアップ試験
第2報 JMTR照射 炉容器材及び溶接継手の高温疲れ並びにクリープ破断試験,
動燃団報告, SN941 80-118 (1980)
- 6) 日本溶接協会原子力研究委員会: SUS304, 316および $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼の溶接施工
法選定試験(I)成果報告書, 昭和52年10月(PNC SJ225 77-05)
- 7) 日本溶接協会原子力研究委員会: 高速炉構造材料, 溶接棒および溶接施工法選定試験(II)
成果報告書, 昭和54年2月(PNC SJ225 79-01)
- 8) 日本溶接協会原子力研究委員会: 高速炉構造用材料の評価試験
成果報告書, 昭和55年3月(PNC SJ225 80-02)
- 9) 鈴木和久, 他: 高速炉用構造材料(AISI304, インコネルX-750)および制御棒
材料(B₄C)の照射後試験, 動燃団報告, SN941 78-119 (1978)
- 10) 鈴木和久, 他: 「常陽」サーベイランス確認試験
第1報 炉容器材の短時間強度試験, 動燃団報告, ZN941 76-130 (1976)
- 11) 高速原型炉高温設計基準(暫定値), 動燃団, Mouju-91099(7), 昭和54年7月
- 12) 高速原型炉高温設計基準(暫定値)解説編, 動燃団, 昭和54年10月
- 13) N. J. Petch: Acta Met., 12 (1964), 49
- 14) E. Orowan: Symposium on Internal Stress(1948), 451, Inst. Metals.
- 15) 榊原瑞夫, 他: 発表予定
- 16) A. L. Ward: Irradiation effects on Mechanical Properties of an SMAW
Deposited Type 308 Stainless Steel: Welding Research Supplement,
(1975), pp259-S~264-S

Table 1 Mill sheet of base metal

	Chemical composition (wt%)							Tensile properties*			Hardness (HB)
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	0.2% Y.S. (Kg/mm ²)	U.T.S. (Kg/mm ²)	Elongation (%)	
Spec.	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.040	≤0.030	8.00/10.50	18.00/20.00	≥21	≥53	≥40	≤187
Mill analysis	0.05	0.57	0.98	0.026	0.006	9.20	18.35	29.0	62.0	62.0	138
Check analysis	0.05	0.56	0.98	0.025	0.007	9.30	18.25				

* Transverse

Table 2 Mill sheets of all deposits.

		Chemical composition (wt%)										Tensile properties		
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Nb	V	Co	0.2% Y.S. (Kg/mm ²)	U.T.S. (Kg/mm ²)	Elongation (%)
Kobe Steel Ltd.	Spec.	≤0.08	≤0.90	≤2.50	≤0.040	≤0.030	9.00/ 11.00	18.00/ 21.00	≤0.1	—	—	—	≥56	≥35
	SMAW*	0.069	0.25	1.48	0.029	0.003	9.46	19.27	0.042	—	—	37.8	57.4	48
	SAW**	0.057	0.26	1.73	0.027	0.004	9.24	19.58	0.049	—	—	35.6	59.0	46
Nippon Steel Co.	Spec.	≤0.08	≤0.90	≤2.50	≤0.050	≤0.030	9.00/ 11.00	19.00/ 21.00	—	≤0.15	≤0.25	—	≥56	≥35
	SMAW*	0.06	0.28	2.10	0.033	0.002	10.7	19.7	—	0.08	0.04	—	57.2	44.5
	SAW**	0.06	0.55	1.70	0.034	0.004	9.8	19.5	—	0.07	≤0.01	—	60.8	44.3

* SMAW : Shielded metal arc welding.

** SAW : Submerged arc welding.

Table 3 Welding procedures.

Welding process	Groore shape	Material	Maker	Amperage (A)	Voltage (V)	Speed (mm/min)	Input (KJ/cm)	Inter pass temp. (°C)
SMAW	<p>Diagram showing a V-groove with a 40° angle. The groove is 40 mm deep. The top width is 33-40 mm (labeled '33~40 bead'). The bottom width is 10-12 mm (labeled '10~12 bead'). The bottom radius is 6R. The distance from the back tip to the center of the groove is 6 mm, and the distance from the back tip to the edge is 12 mm. The total width at the bottom is 40 mm.</p>	NC38N (4.0 ϕ)	Kobe Steel Ltd.	~140	22~25	~150	≤15	≤150
		X308A (4.0 ϕ)	Nippon Steel Co.					
SAW	<p>Diagram showing a U-groove with a 30° angle. The groove is 40 mm deep. The top width is 17 mm (labeled '17 bead'). The bottom width is 4-5 mm (labeled '4~5 bead'). The bottom radius is 8R. The distance from the back tip to the center of the groove is 6 mm, and the distance from the back tip to the edge is 10 mm. The total width at the bottom is 40 mm.</p>	US308N(4.0 ϕ) × PFS-1N	Kobe Steel Ltd.	450~550	28~33	350~400	≤30	≤150
		XY308A(4.0 ϕ) × XFA308	Nippon Steel Co.					

Table 4 Tensile properties of specimens tested at room temperature.

Material	Manufacturer	Sampling position of specimen	Specimen No.	Yield strength (Kg/mm ²)	Ultimate tensile strength (Kg/mm ²)	Uniform elongation (%)	Ruptured elongation (%)	Reduction of area (%)	Rupture position
SMAW	Kobe Steel Co.	t/4	AD06	42.6	62.1	45.5	54.0	51	A
			AD07	44.4	63.9	40.9	46.4	56	B~C
		t/2	AE06	44.4	62.5	45.4	49.4	50	B
			AE07	44.6	62.9	46.0	52.0	55	A
	Nippon Steel Co.	t/4	BD06	42.8	60.2	39.8	46.3	55	A
			BD07	43.9	61.7	40.5	47.0	57	A
SAW	Kobe Steel Co.	t/4	CD06	36.5	56.2	38.5	44.4	66	A
			CD07	36.8	60.5	37.9	46.8	60	B
		t/2	CE06	44.1	61.9	32.0	39.9	66	A
			CE07	42.4	61.9	27.5	34.8	56	A
	Nippon Steel Co.	t/4	DD06	37.0	60.5	37.2	43.8	56	A
			DD07	37.4	61.3	41.6	48.0	57	A
Base Metal	Nippon Steel Co.	t/4	ED06	22.9	66.1	64.4	73.2	78	B
			ED07	22.4	65.7	67.7	77.6	78	A
		t/2	EE06	24.7	67.3	63.0	71.0	74	A
			EE07	24.6	66.9	61.1	68.8	72	A

※ 0.2% offset proof stress

Table 5 Tensile properties of specimens tested at 550°C

Material	Manufacturer	Sampling position of specimen	Specimen No.	*Yield strength (Kg/mm ²)	Ultimate tensile strength (Kg/mm ²)	Uniform elongation (%)	Ruptured elongation (%)	Reduction of area (%)	Rupture position
SMAW	Kobe Steel Co.	t/4	AD08	30.4	37.4	21.9	29.2	63	B
			AD09	30.3	37.0	19.3	27.7	62	B
		t/2	AE08	31.8	36.0	15.5	23.5	65	B~C
			AE09	31.4	36.2	21.5	30.0	52	A
	Nippon Steel Co.	t/4	BD08	30.7	36.8	13.8	20.2	65	B~C
			BD09	29.6	36.0	21.1	29.1	59	B
SAW	Kobe Steel Co.	t/4	CD08	26.3	35.4	23.0	30.9	60	B
			CD09	25.5	35.4	23.5	30.4	66	B
		t/2	CE08	29.3	35.4	18.2	27.0	68	A
			CE09	30.0	36.6	16.3	25.1	60	A
	Nippon Steel Co.	t/4	DD08	24.9	35.4	23.5	31.0	60	A
			DD09	25.8	36.9	21.5	29.5	60	A
Base Metal	Nippon Steel Co.	t/4	ED08	13.0	39.2	35.8	44.5	72	A
			ED09	13.0	38.7	34.0	42.9	76	B
		t/2	EE08	14.6	38.3	28.0	35.6	73	B~C
			EE09	14.2	38.4	34.5	42.9	71	B

* 0.2% offset proof stress

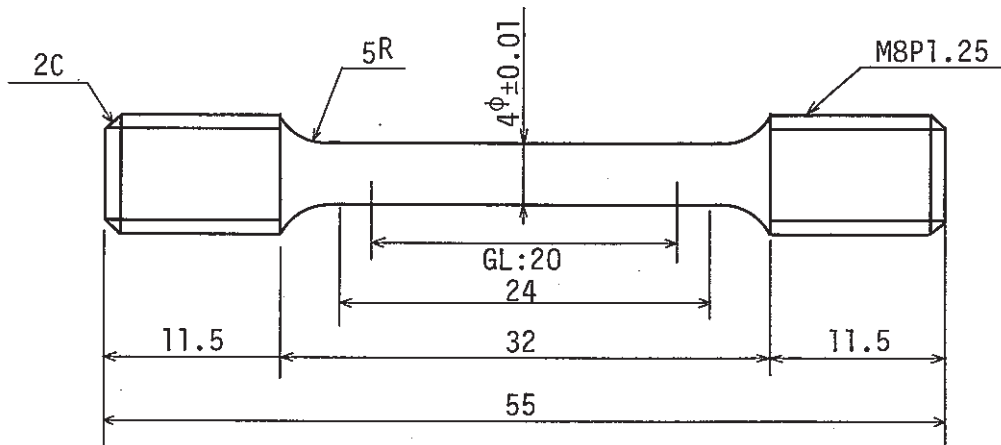
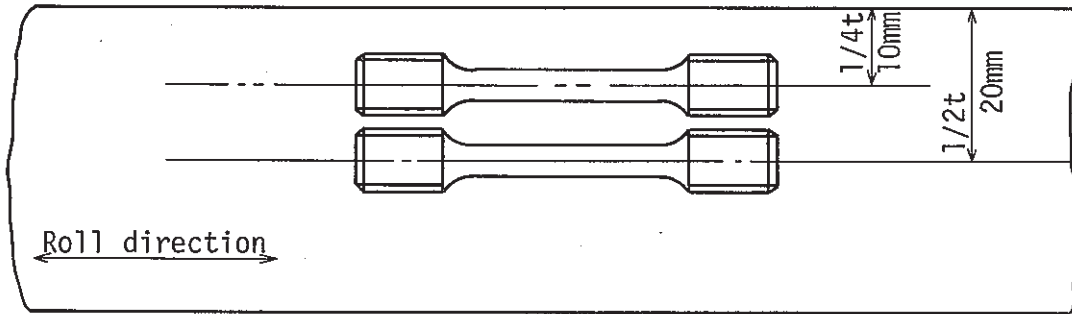
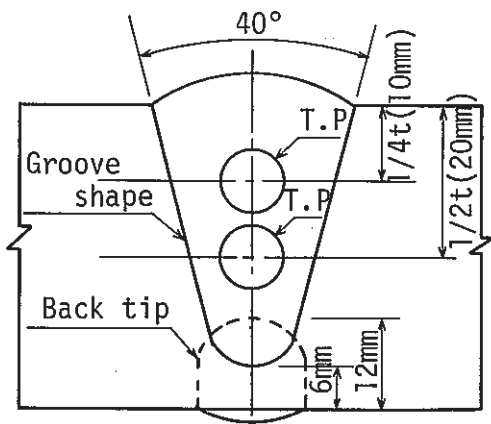


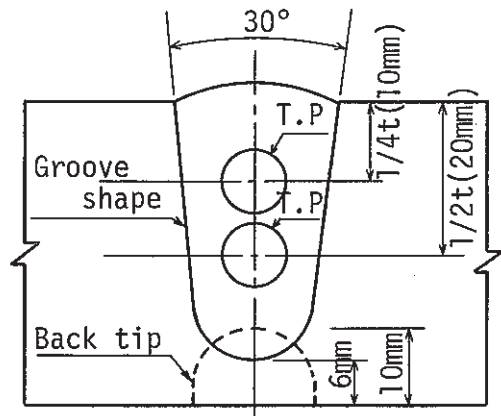
Fig. 1 Profile of specimen.



Base metal



Shielded metal arc welding (SMAW)



Submerge arc welding (SAW)

Fig. 2 Sampling of specimens

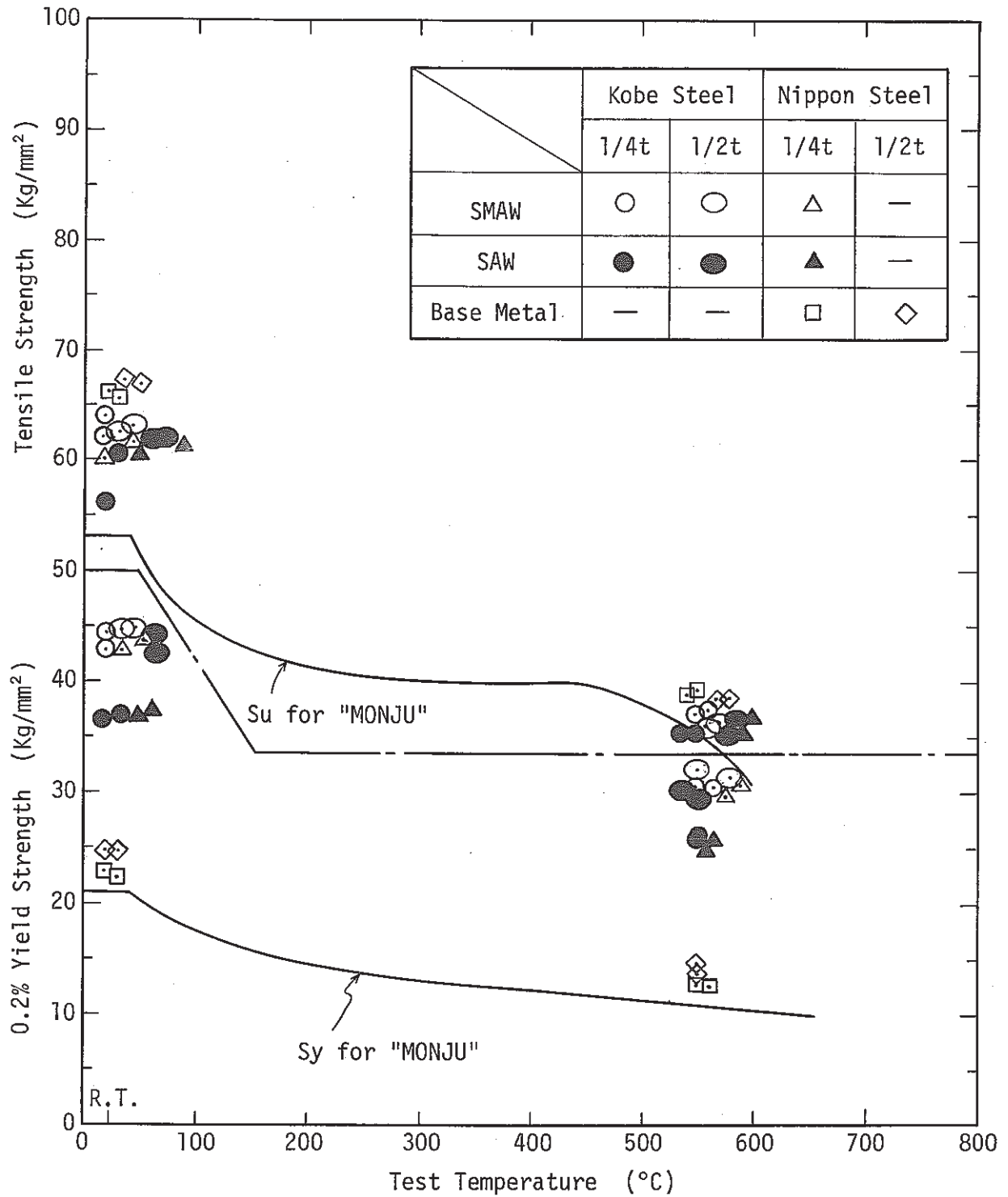


Fig. 3 Proof stress and Tensile strength VS test temperature.

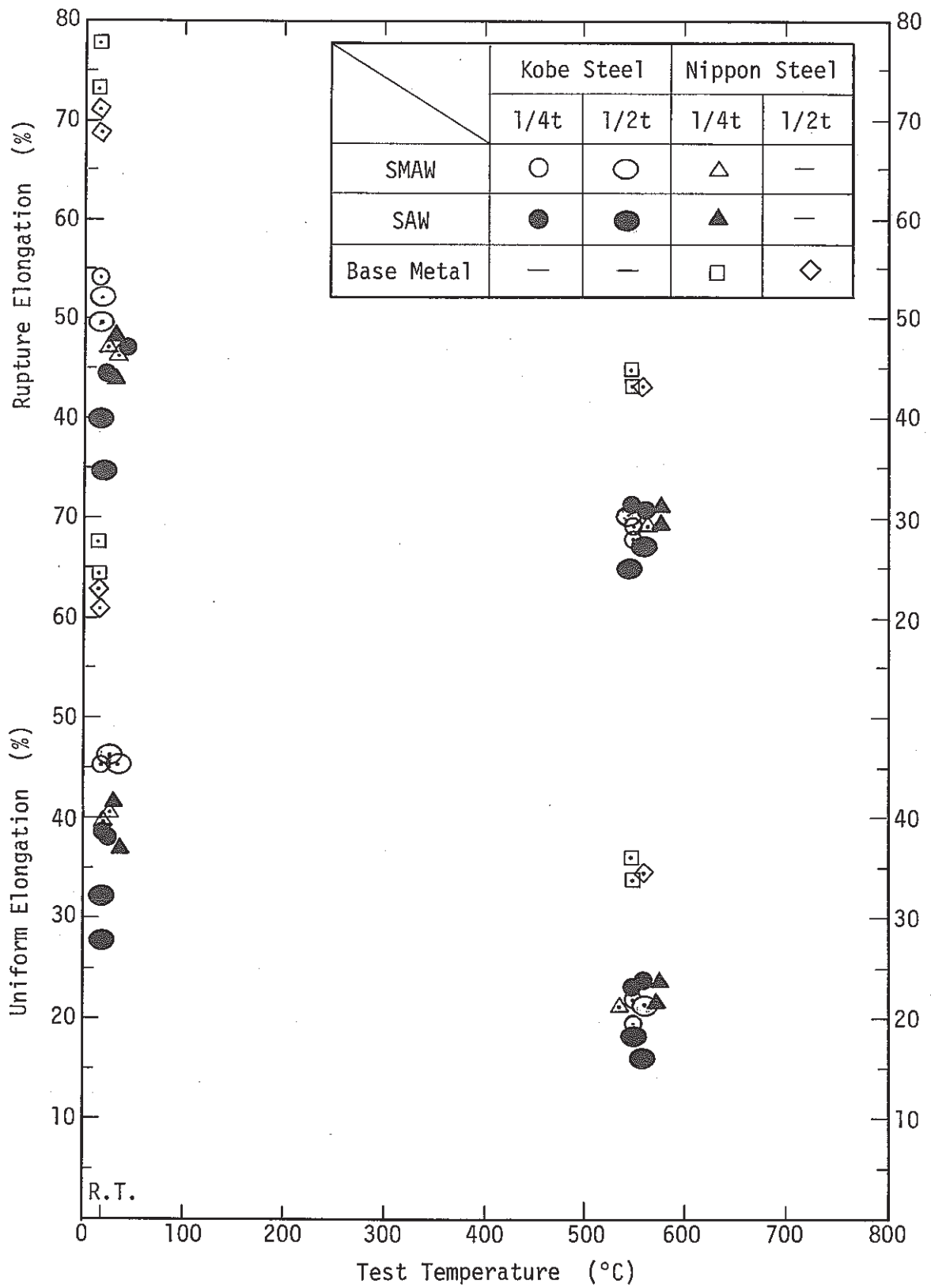


Fig. 4 Uniform and ruptured elongation VS test temperature

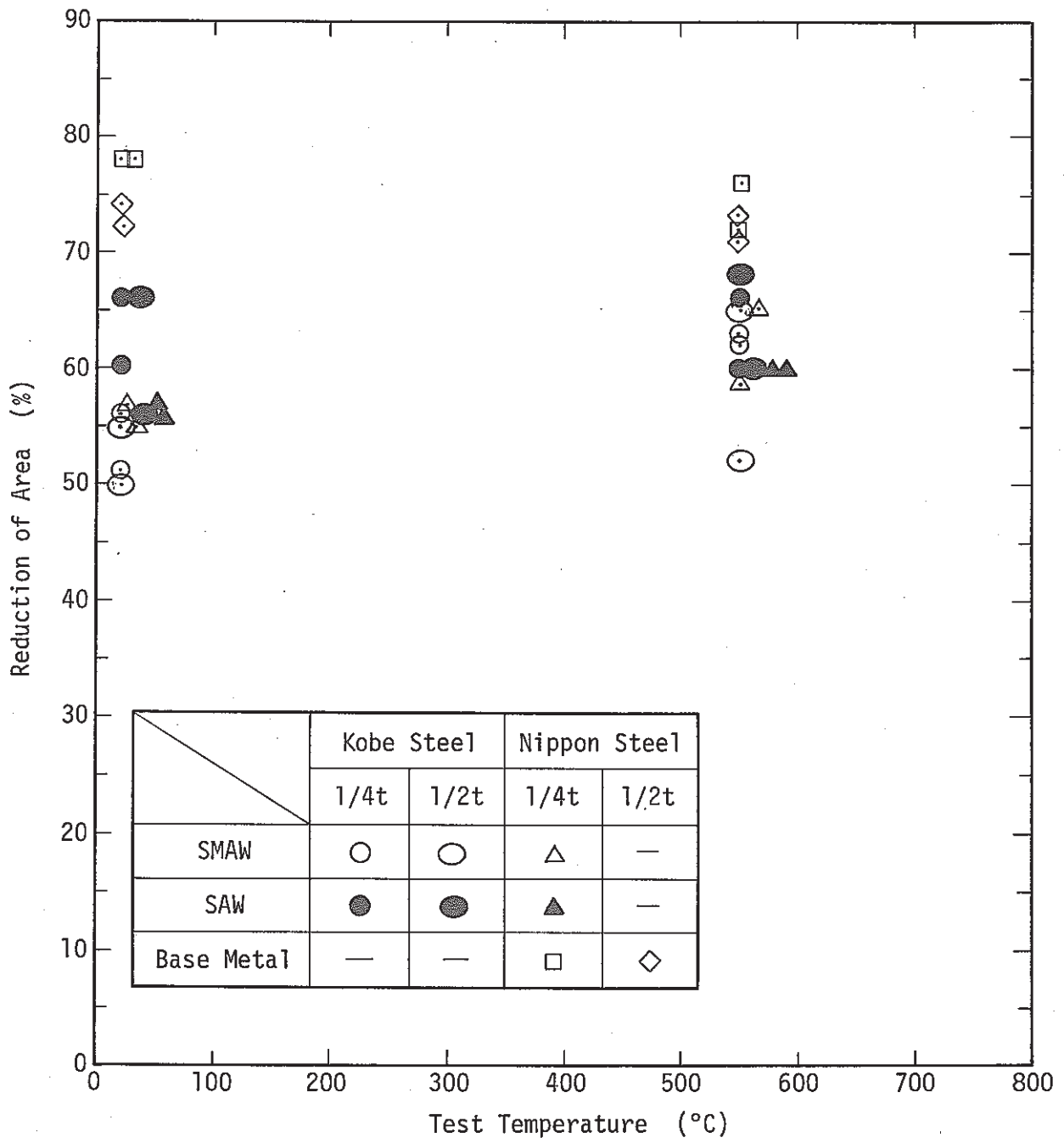
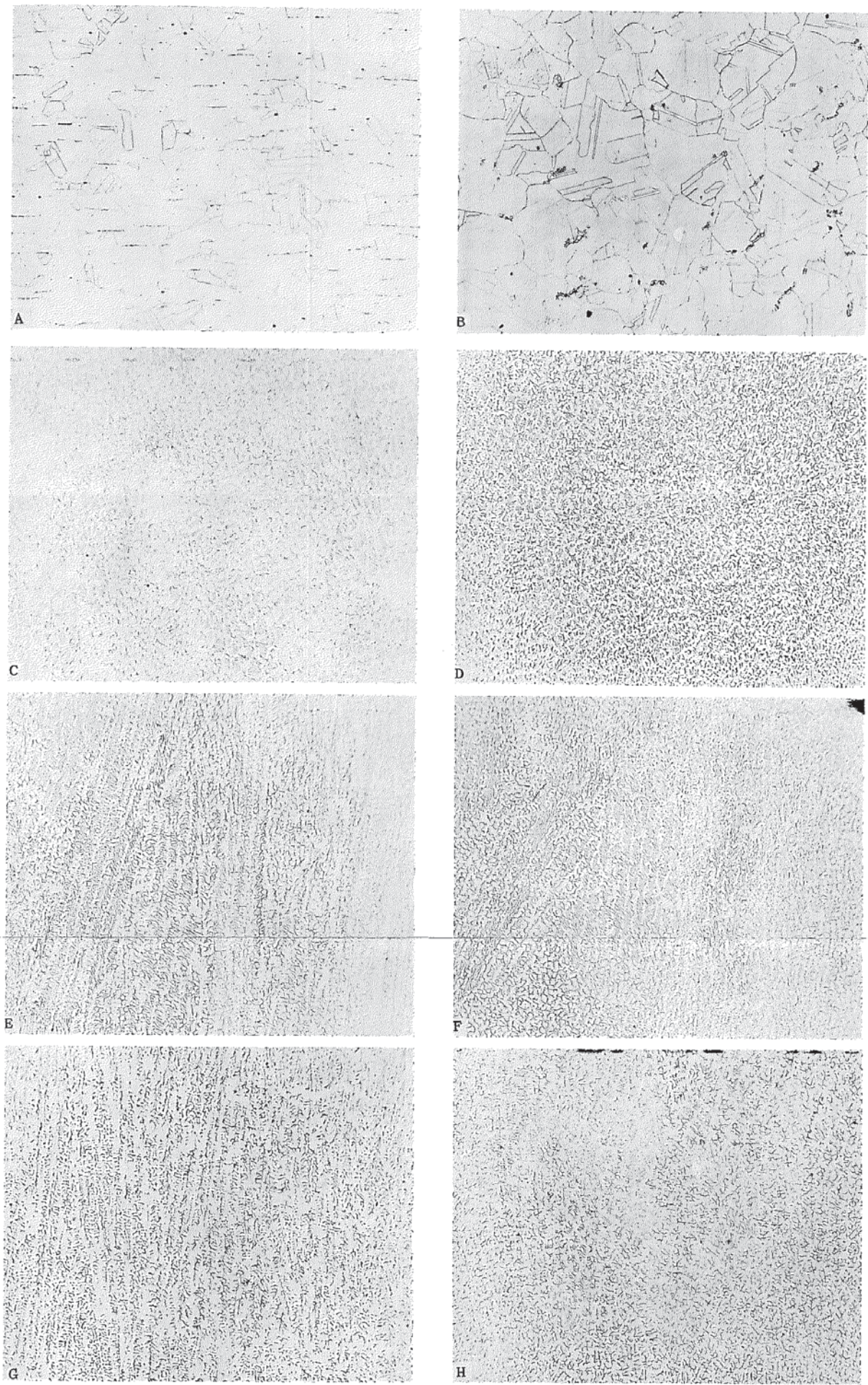


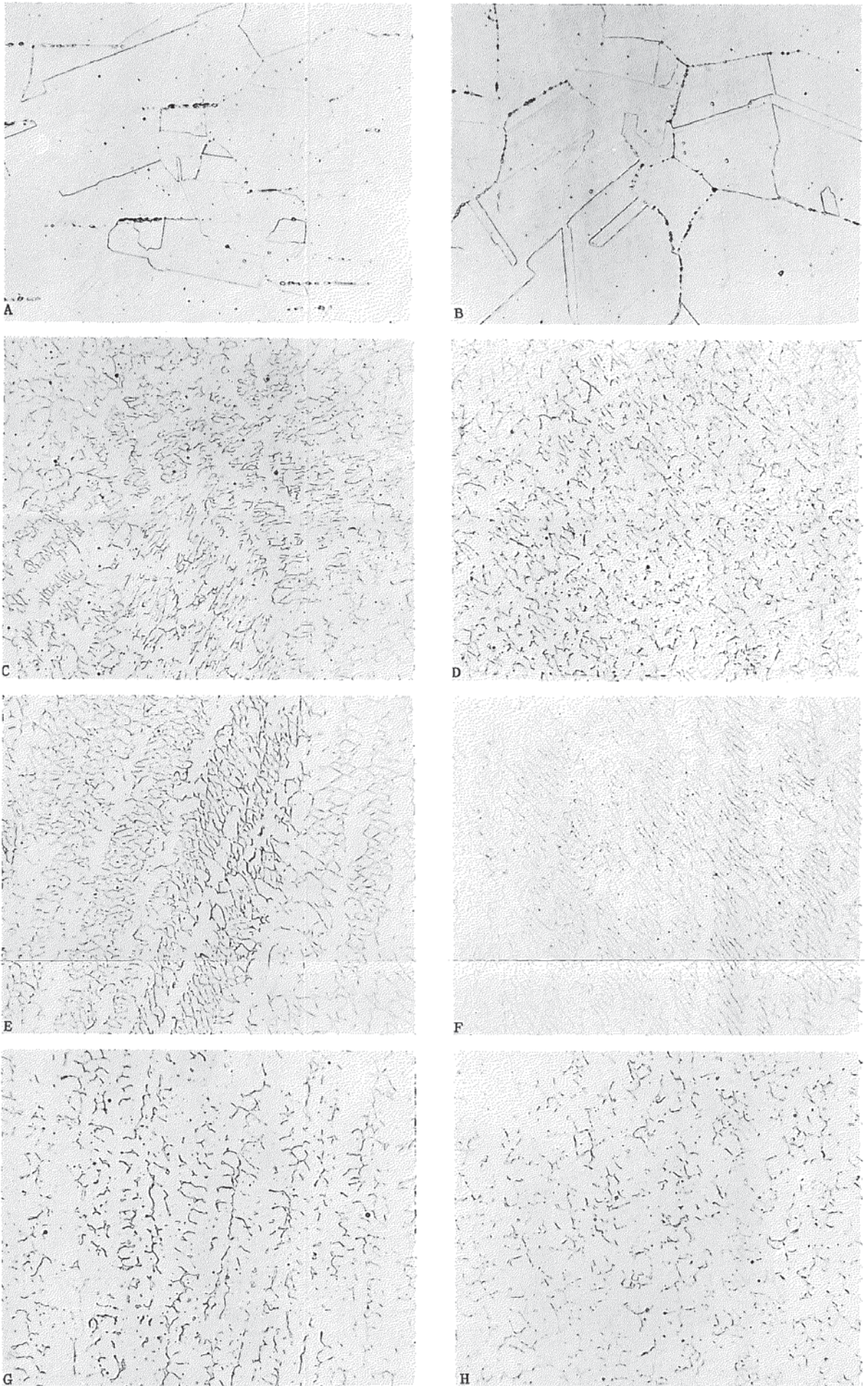
Fig. 5 Reduction of area of specimen ruptured



A : Base metal (Nippon Steel, 1/4t) B : Base metal (Nippon Steel, 1/2t)
 C : Weld metal (Kobe Steel, SMA, 1/4t) D : Weld metal (Kobe Steel, SMA, 1/2t)
 E : Weld metal (Kobe Steel, SAW, 1/4t) F : Weld metal (Kobe Steel, SAW, 1/2t)
 G : Weld metal (Nippon Steel, SMAW, 1/4t) H : Weld metal (Nippon Steel, SAW, 1/4t)

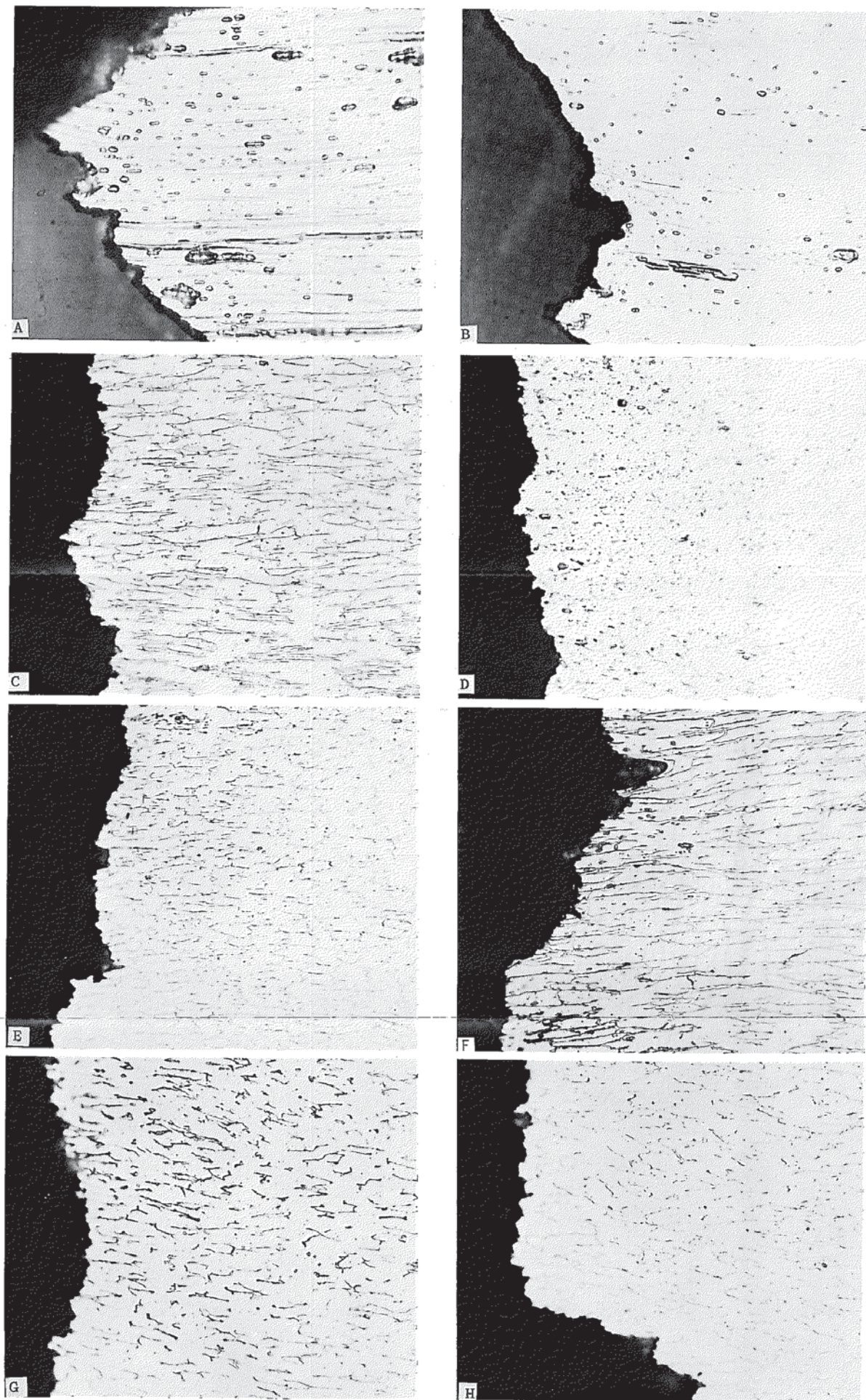
100μ

Fig. 6-a Micrographs of specimens before test. (×100)



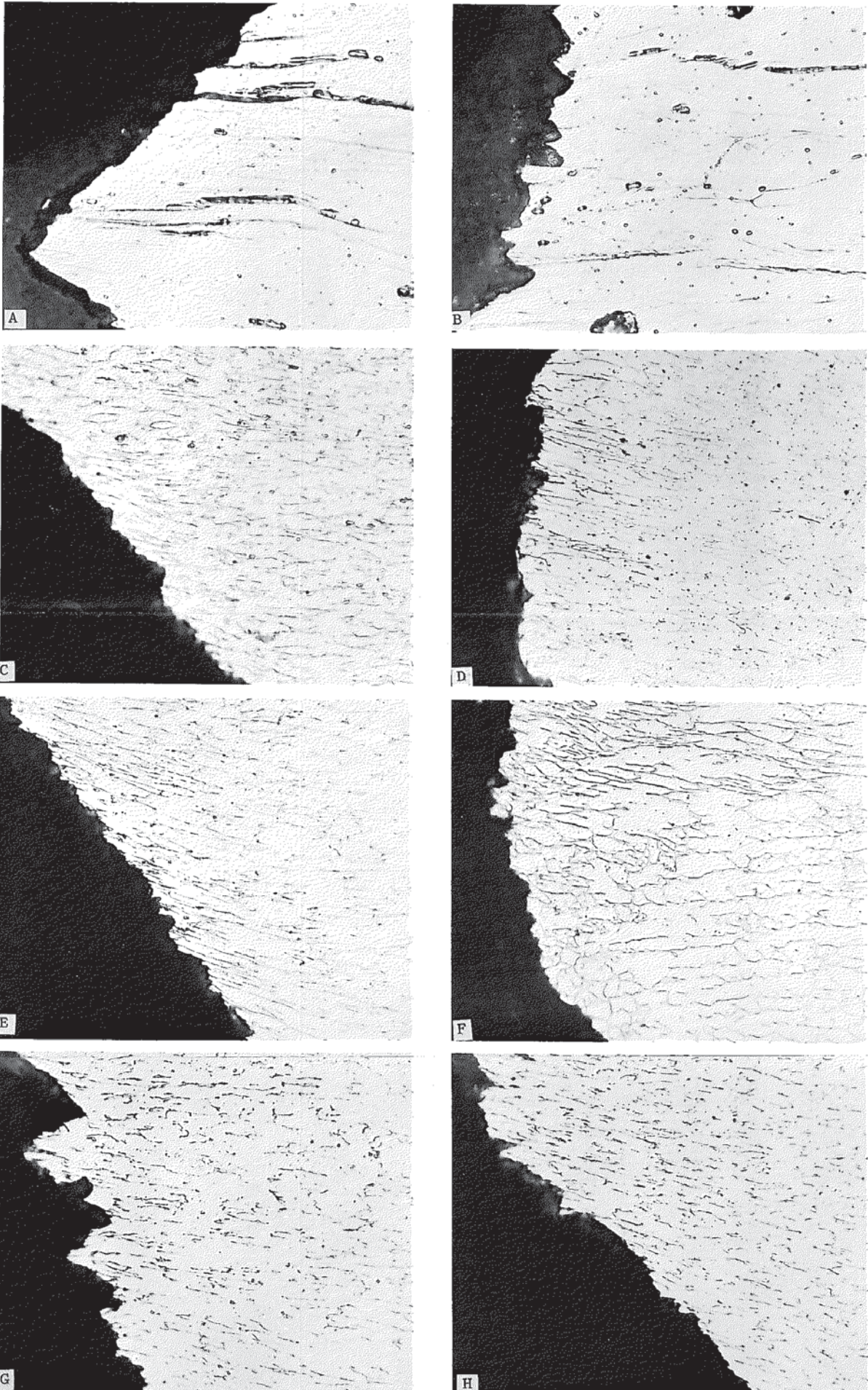
A : Base metal (Nippon Steel, 1/4t)	B : Base metal (Nippon Steel, 1/2t)
C : Weld metal (Kobe Steel, SMAW, 1/4t)	D : Weld metal (Kobe Steel, SMAW, 1/2t)
E : Weld metal (Kobe Steel, SAW, 1/4t)	F : Weld metal (Kobe Steel, SAW, 1/2t)
G : Weld metal (Nippon Steel, SMAW, 1/4t)	H : Weld metal (Nippon Steel, SAW, 1/4t)

Fig. 6-b Micrographs of specimens before test. (x400)



A : Base metal (Nippon Steel, 1/4t) B : Base metal (Nippon Steel, 1/2t)
 C : Weld metal (Kobe Steel, SMAW, 1/4t) D : Weld metal (Kobe Steel, SMAW, 1/2t)
 E : Weld metal (Kobe Steel, SAW, 1/4t) F : Weld metal (Kobe Steel, SAW, 1/2t)
 G : Weld metal (Nippon Steel, SMAW, 1/4t) H : Weld metal (Nippon Steel, SAW, 1/4t)

Fig. 7 Micrographs of the cross section of specimen tested at room temperature.



A : Base metal (Nippon Steel, 1/4t)
 C : Weld metal (Kobe Steel, SMAW, 1/4t)
 E : Weld metal (Kobe Steel, SAW, 1/4t)
 G : Weld metal (Nippon Steel, SMAW, 1/4t)

B : Base metal (Nippon Steel, 1/2t)
 D : Weld metal (Kobe Steel, SMAW, 1/2t)
 F : Weld metal (Kobe Steel, SAW, 1/2t)
 H : Weld metal (Nippon Steel, SAW, 1/4t)

25μ

Fig. 8 Micrographs of the cross section of specimen tested at 550°C.

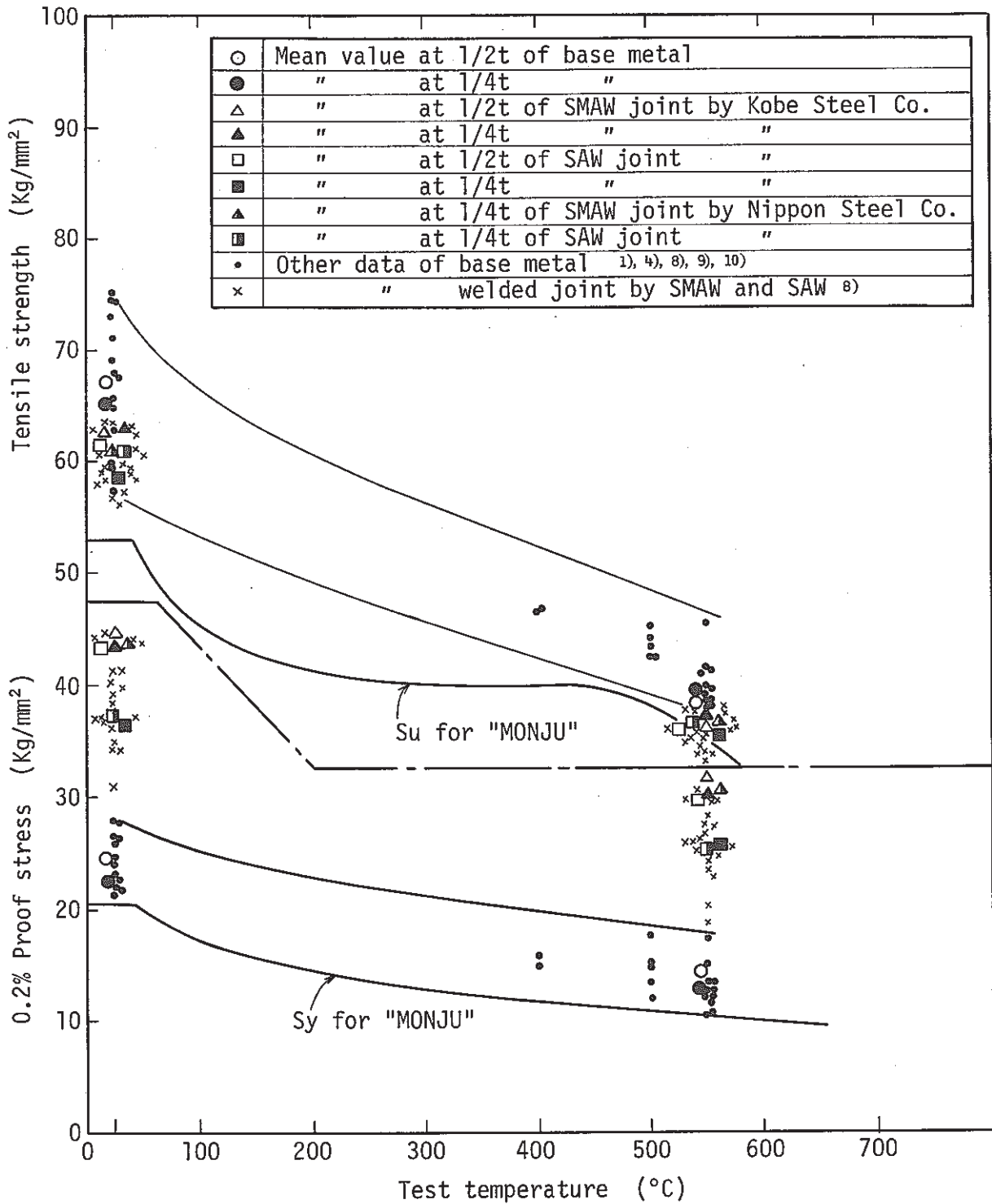


Fig. 9 Comparison of yield and tensile strength between this work and others

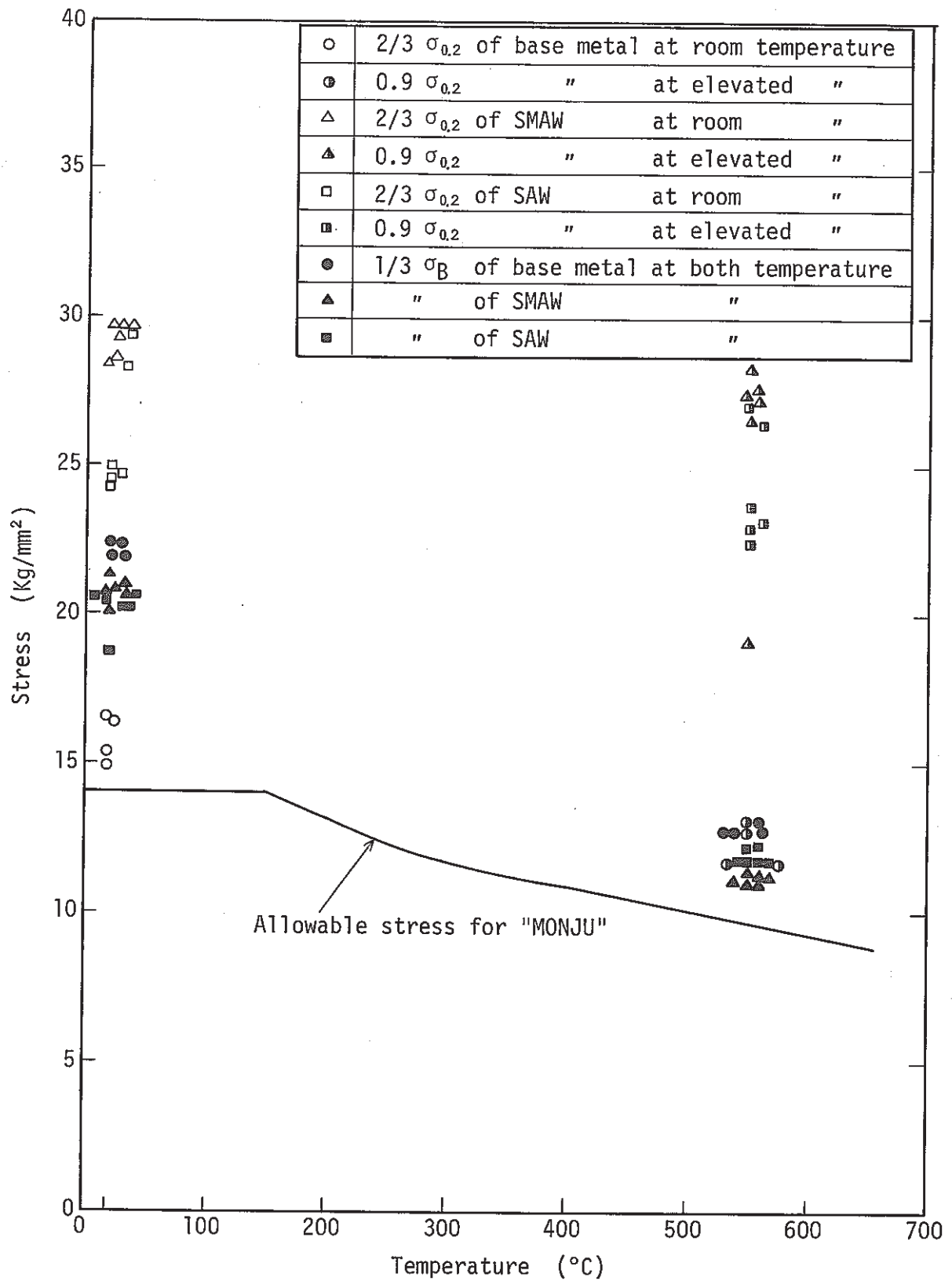


Fig. 10 Evaluation of tensile properties by the Design criteria for "MONJU"

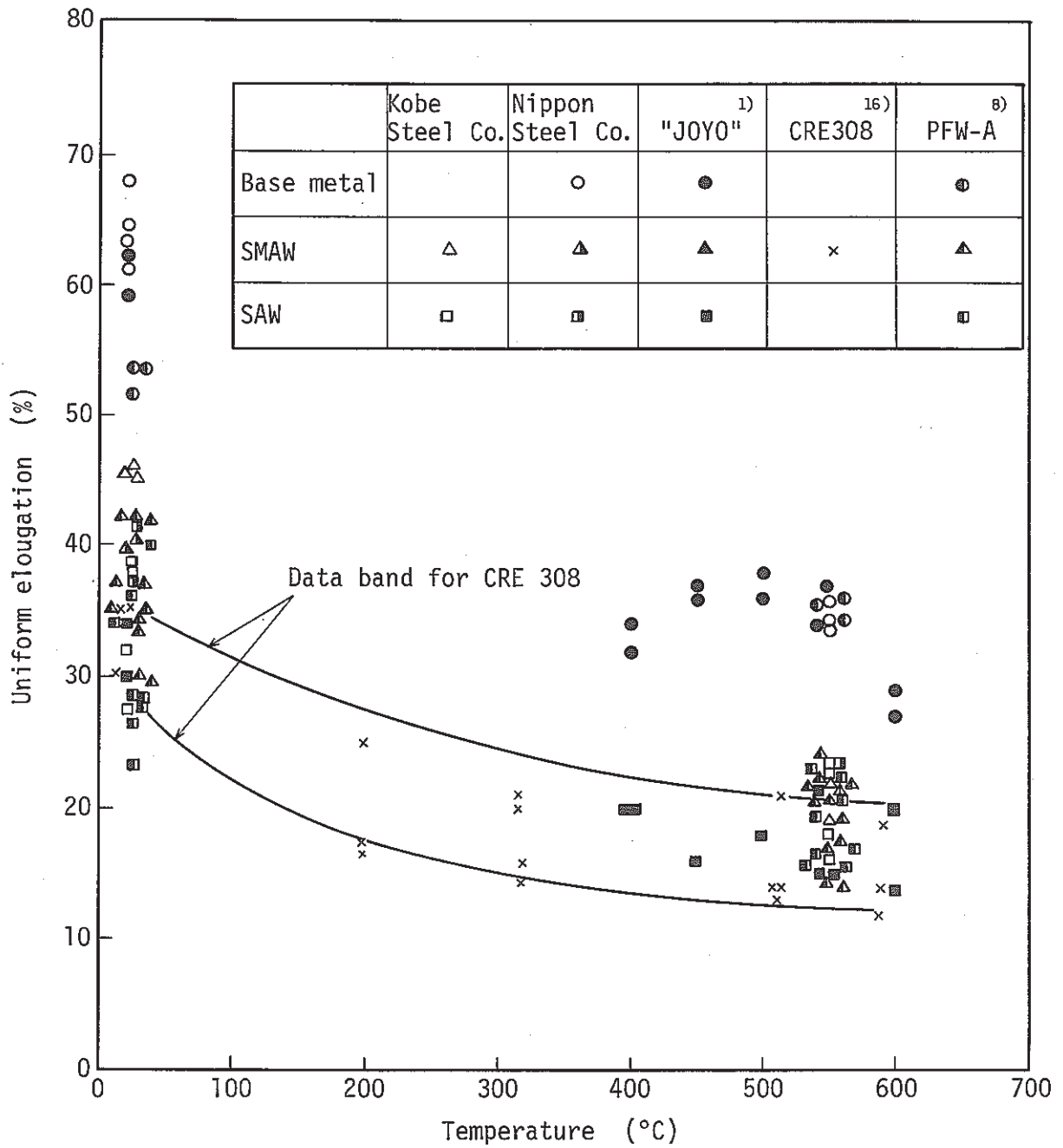


Fig. 11 Comparison of uniform elongation between this work and others.