

JAERI-Tech
97-038



JP9709036



**低放射化フェライト鋼F82H IEAヒート材の特性
ーIEAラウンドロビン試験中間報告(1)ー**

1997 年 8 月

芝 清之・菱沼章道・遠山 晃*・正村克身*

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公開している研究報告書です。

入手の間合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力公済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1997

編集兼発行	日本原子力研究所
印刷	(株)高野高速印刷

低放射化フェライト鋼F82H IEAヒート材の特性
－IEAラウンドロビン試験中間報告(1)－

日本原子力研究所東海研究所材料研究部
芝 清之・菱沼章道・遠山 晃*・正村克身*

(1997年7月15日受理)

F82H鋼は原研とNKKとで共同開発した低放射化フェライト鋼であり、本研究室では核融合炉原型炉およびそれ以降の核融合炉の材料として、照射前の特性および原研炉（JRR-2, JMTR）や米国ORNLのHFIR炉を用いた中性子照射効果を含めた特性試験を行ってきた。またこの材料は、IEA低放射化フェライト／マルテンサイト鋼ワーキンググループにおけるラウンドロビン試験の標準材料として選定され、現在、日本、EU、アメリカの各研究機関において試験が実施されている。

この報告書は、IEAラウンドロビン試験の日本分担分として実施された試験の結果についての中間報告をまとめたものであり、現在までにミクロ組織、機械的特性、物理的特性などの多くの評価結果を得ている。これらの特性データは、このF82H鋼の核融合炉材料としての適応性の検討や将来の材料改善に必要なデータであり、データの取得に加えて設計に利用可能なデータベースの作成が必要とされている。

**Properties of Low Activation Ferritic Steel F82H IEA Heat
— Interim Report of IEA Round-robin Tests (1) —**

**Kiyoyuki SHIBA, Akimichi HISHINUMA, Akira TOHYAMA*
and Katsumi MASAMURA***

**Department of Materials Science and Engineering
Tokai-Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken**

(Received July 15, 1997)

F82H has been developed by JAERI and NKK Co.Ltd. as a low activation ferritic steel for a nuclear fusion reactor, such as prototype reactor and beyond. We have evaluated the properties of this material including the neutron irradiation effects using JAERI reactors (JRR-2, JMTR) and HFIR at ORNL. F82H also had been chosen as a reference material for the round-robin testing planned by the IEA workshop on the low activation ferritic/martensitic steels. These round-robin tests are conducted by several research groups in Japan, European Union, and the United States.

The results for the Japanese share of IEA round-robin tests have been obtained, and are summarized in this report. Several properties, such as microstructure, mechanical properties, and physical properties have been obtained. The results are important for the estimation of the possible availability as a fusion reactor material and for the improvement of this material. Data accumulation and the preparation of the database are quite important for the reactor design activity.

**Keywords : Low Activation Ferritic Steel, Physical Properties, Mechanical Properties,
IEA Round-Robin Tests, Microstructure, Vacuum Properties,
Corrosion Resistance**

* NKK Co.Ltd. Central Research Center

目 次

1. はじめに	1
2. 素材について (F82H鋼IEAヒート標準熱処理材).....	4
3. 試験方法	8
3.1 金相試験	8
3.2 物理的特性	9
3.3 機械的特性	13
3.4 真空特性	16
3.5 腐食特性	17
4. 試験結果および考察	21
4.1 金相試験	21
4.2 物理的特性	29
4.3 機械的特性	54
4.4 真空特性	73
4.5 腐食特性	85
5. まとめ	94
謝 辞	96
参考文献	96
付録A 引張試験チャート	97
付録B 疲労試験応力歪ヒステリシス曲線	103

Contents

1. Introduction	1
2. Material(F82H IEA Heat Standard Heat Treatment)	4
3. Experimental Procedure	8
3.1 Metallography Test	8
3.2 Physical Properties	9
3.3 Mechanical Properties	13
3.4 Vacuum Properties	16
3.5 Corrosion Resistance	17
4. Results and Discussion	21
4.1 Metallurgical Tests	21
4.2 Physical Properties	29
4.3 Mechanical Properties	54
4.4 Vacuum Properties	73
4.5 Corrosion Resistance	85
5. Summary	94
Acknowledgments	96
References	96
Appendix A Tensile Test Charts	97
Appendix B Fatigue Test Stress-strain Hysteresis Curves	103

1. はじめに

F82H 鋼は原研と NKK とで共同開発した低放射化フェライト鋼であり、本研究室では核融合炉原型炉およびそれ以降の核融合炉の材料として、照射前の特性および原研炉(JRR-2、JMTR)や米国 ORNL の HFIR 炉を用いた中性子照射効果を含めた特性試験を行ってきた。これらの特性試験には基本的な金相試験、熱膨張やヤング率等の物理的特性、高温引張試験やシャルピー衝撃試験等の機械的特性の他に、磁性や真空特性等の核融合炉で特に必要とされるような特性の試験も含まれている。例えば、フェライト鋼は、従来核融合炉の第 1 壁構造材料とされてきた 316 系オーステナイト鋼に比べて熱伝導に優れており、熱応力を生じにくいため、より高温での使用が可能である。そのため、炉設計において熱応力を評価するために、熱的特性や弾性率等のデータが必要とされている。また核融合炉ではプラズマの制御を磁場により行うため、強磁性体であるフェライト鋼の場合、プラズマ制御に問題を生ずる恐れがある。これを回避するためには材料の磁性を考慮した設計が必要である。また真空および冷却水と接するため、材料からのガスの放出特性や、耐食性についても評価しておく必要がある。

Fig. 1 に現在原研において予定している低放射化フェライト鋼に関する研究計画を示す。この図に示すように、材料の研究開発計画は 2030 年に予定されている原型炉建設に間に合うようにスケジュールされている。原型炉建設までに必要な事項としては、工業材料として必要な基本的な特性および核融合炉材料として必要な中性子照射による特性変化の把握、それと耐照射特性を向上させるための組成の最適化である。また以上のような材料の面からの開発に加えて、モジュール製作技術、強磁性材を使用した核融合炉を設計するための技術等の材料を利用するための技術開発も必要とされ、原研の核融合研究部等を中心に研究開発が実施されている。

またこの F82H 鋼は日本の大学開発材(新日鉄との共同開発)である JLF-1 鋼と共に IEA ラウンドロビン試験における標準鋼として使用され、Fig. 2 に示すように、現在日本・EU および米国の多くの研究機関において試験が実施されている。

Time Schedule of F82H Development for Fusion Device

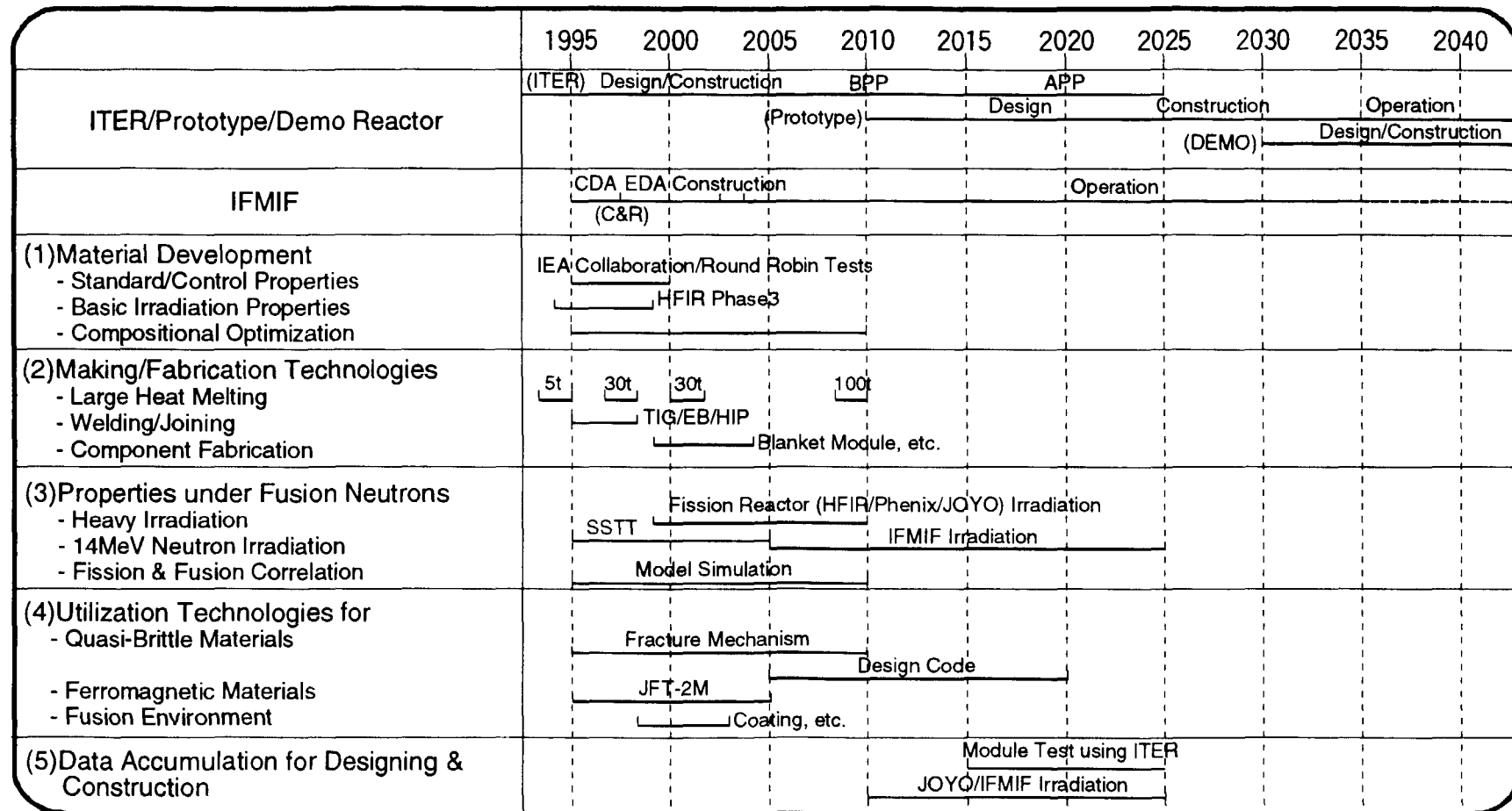


Fig. 1 Time Schedule of F82H development for fusion devices

本報告書はIEAラウンドロビン試験として国内の研究機関により実施された試験結果の現状をまとめたものであり、今後も試験の進行に従い、試験結果については順次まとめていく予定である。またIEAヒート材以前の材料(F82H 鋼 Pre-IEA 材)に関する試験結果については現在レポートを作成中であるが、適宜IEAヒート材との比較のために引用している。またIEAラウンドロビン試験においては、標準熱処理材と共にTIG 溶接材およびEB 溶接材も配布され試験が行われているが、今回は溶接材については割愛する。

本報告書中の結果のうち、金相試験、物理特性および機械的特性については NKK が実施し、真空特性については北海道大学日野研究室が担当した。本報告書をまとめるにおいては、それらの報告書から抜粋を行った[1,2]。腐食特性については原研照射解析研究室で試験を行ったものである。

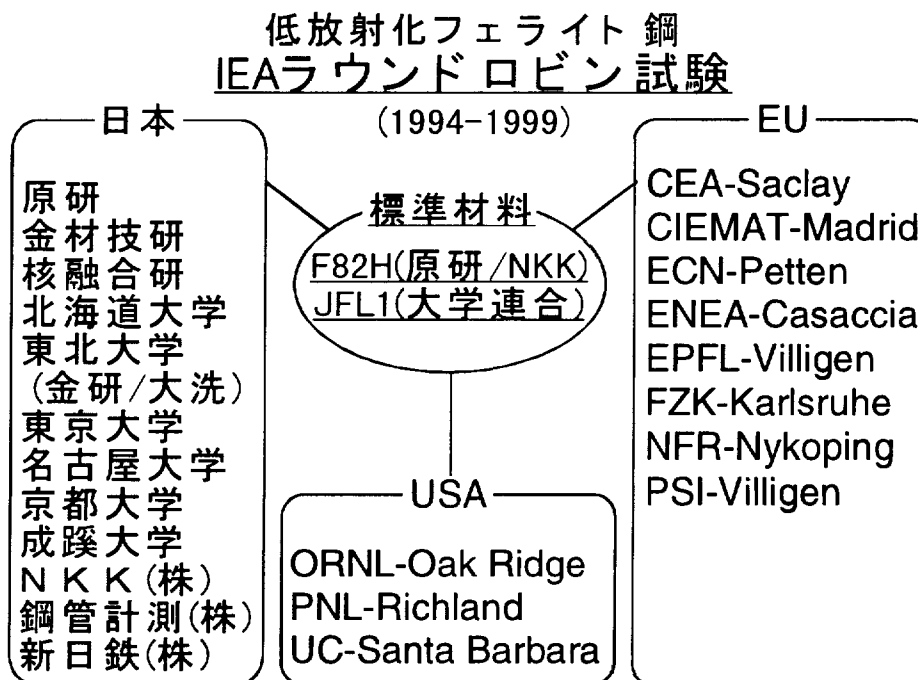


Fig. 2 Participant of IEA round-robin testing on low activation ferritic steels

2. 素材について(F82H 鋼 IEA ヒート標準熱処理材)

IEA ラウンドロビン試験に供された素材は 2 回の 5ton ヒートとして溶製され(ヒート番号 9741、9753)、ヒート番号 9741 のインゴットからは 7.5mm 厚と 15mm 厚の鋼材を、ヒート番号 9753 のインゴットからは 15mm 厚と 25mm 厚の鋼材をそれぞれ製作した。Fig. 3 に鋼材の製作工程を示すが、製作過程では熱間圧延のみを行い、冷間圧延は行っていない。IEA ヒート材として製作された F82H 鋼 IEA ヒート材の化学組成を Table 1 に示す。またそれぞれの鋼材の熱処理条件について Table 2 に示す。このようにして製造された素材を F82H 鋼 IEA ヒート標準熱処理材と呼ぶ。また各インゴットから製作された板材の採取位置を Fig. 4 および Fig. 5 に示す。

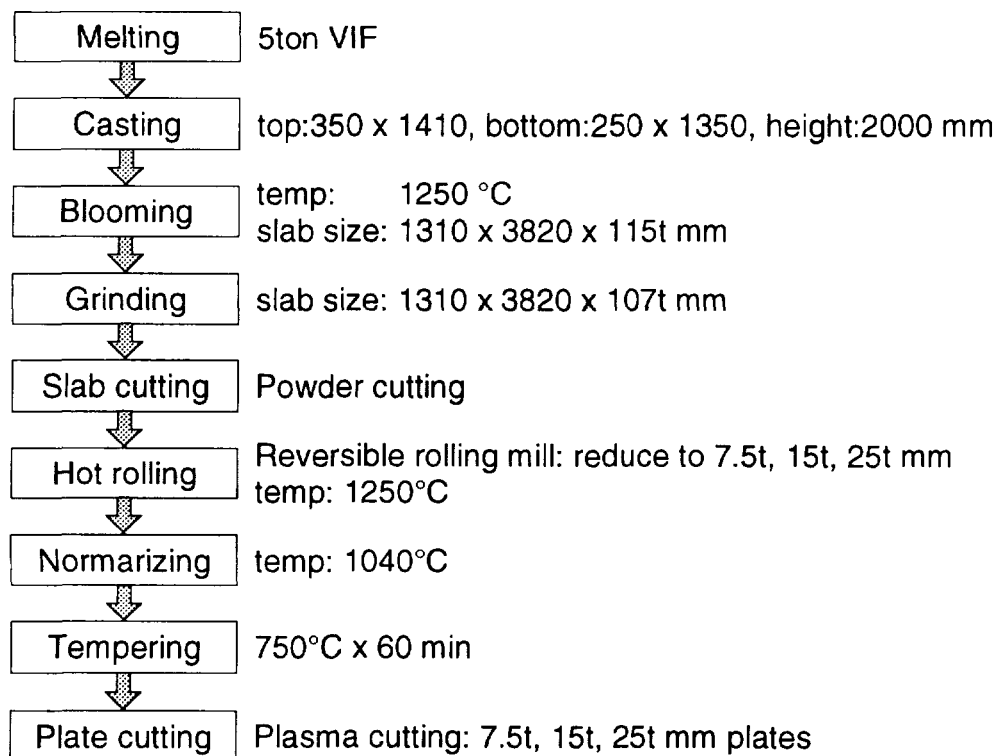


Fig. 3 F82H IEA heat production flow

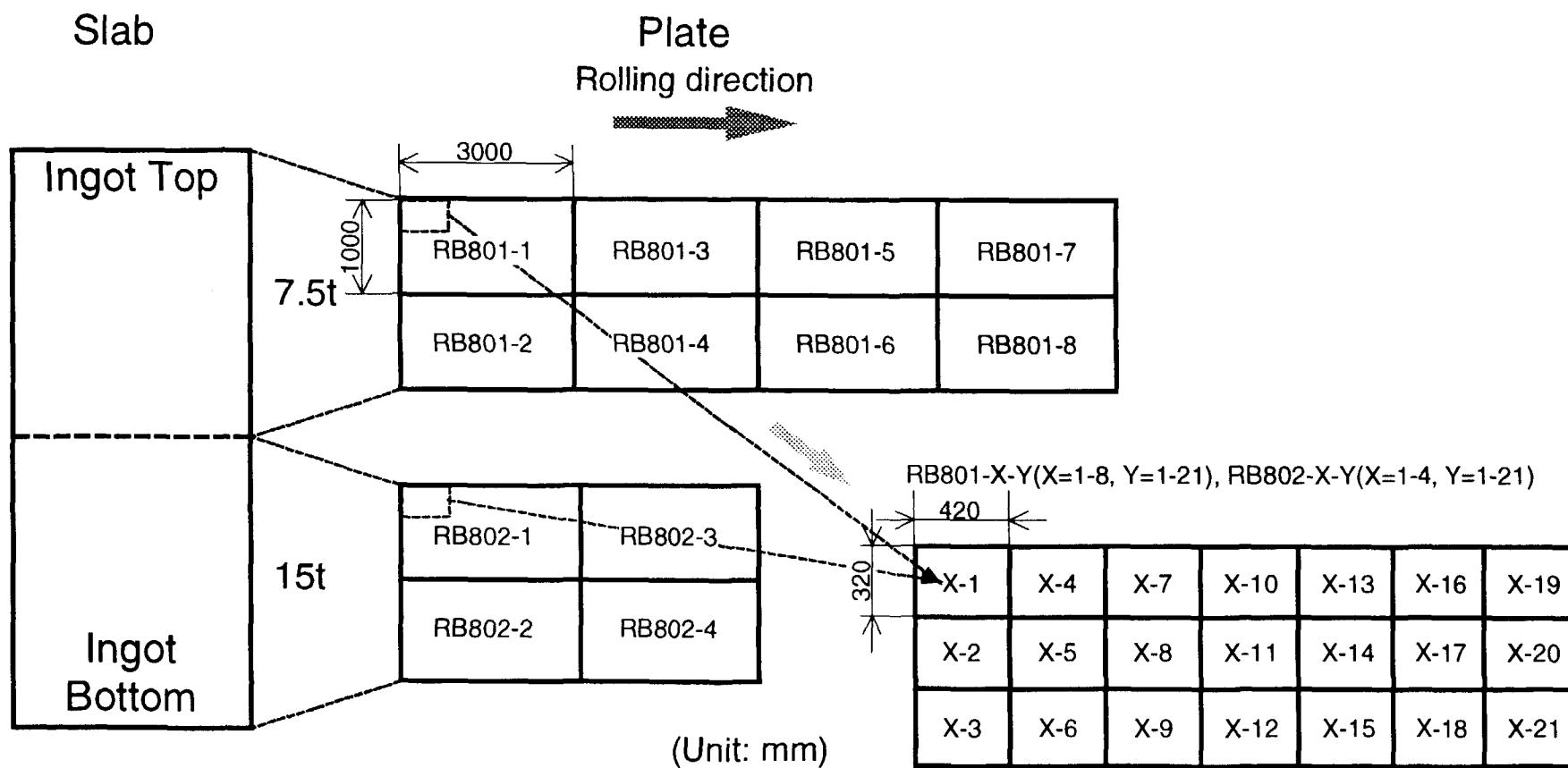


Fig. 4 F82H IEA heat (Heat No. 9741)

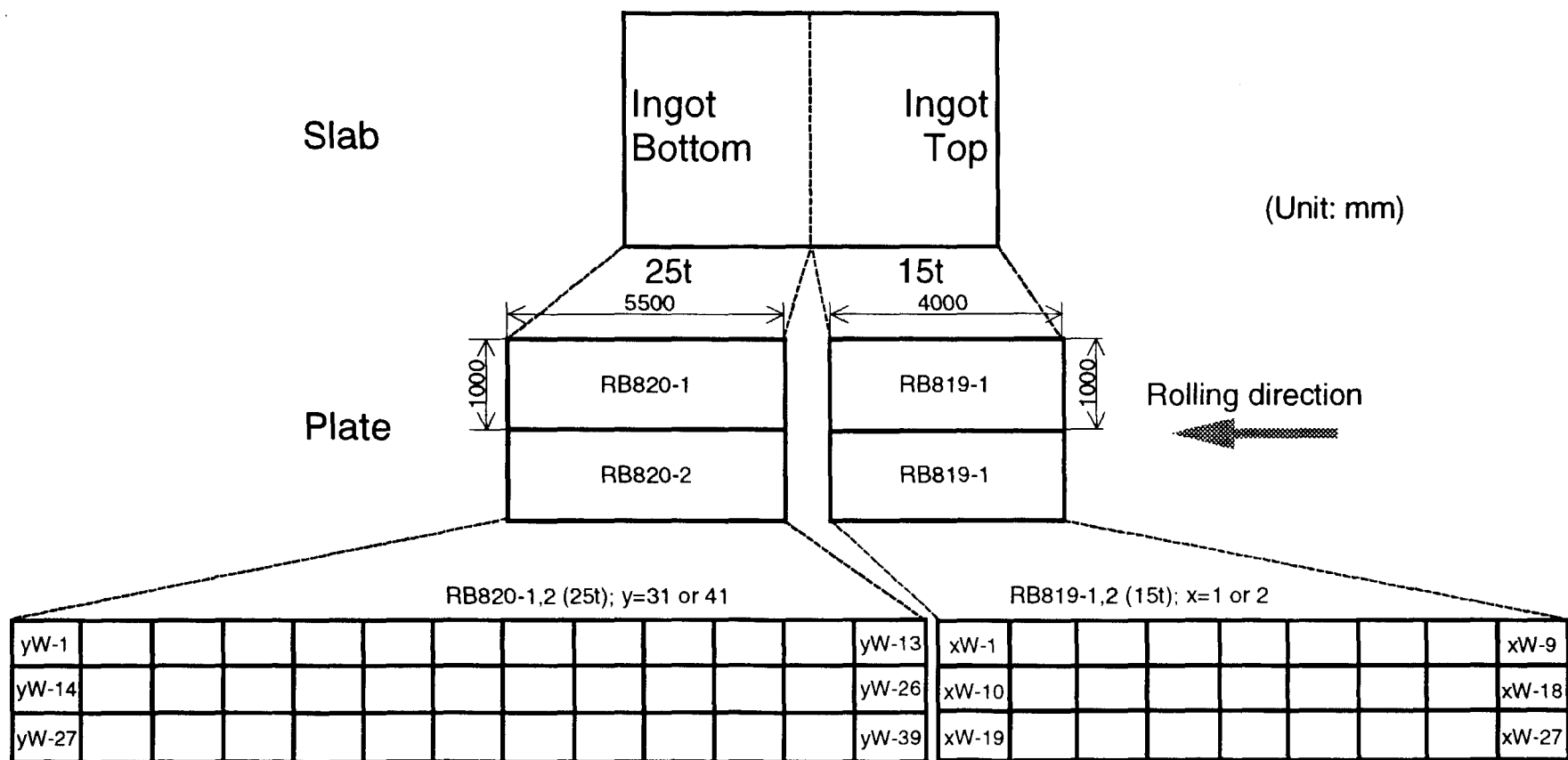


Fig. 5 F82H IEA heat (Heat No. 9753)

Table 1 Chemical compositions of F82H IEA heat (wt%)

Heat No.	Roll No.	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
9741	Ladle	0.09	0.11	0.16	0.002	0.002	<0.01	0.02	7.66	<0.01
	RB801-1	0.09	0.11	0.16	0.002	0.002	0.01	0.02	7.70	0.003
	RB801-8	0.09	0.11	0.16	0.002	0.001	0.01	0.02	7.64	0.003
	RB802-1	0.09	0.11	0.16	0.002	0.002	0.01	0.02	7.71	0.003
	RB801-4	0.09	0.11	0.16	0.002	0.002	0.01	0.02	7.70	0.003
9753	Ladle	0.09	0.08	0.1	0.003	0.001	0.01	0.02	7.89	0.003
	KG819-2	0.09	0.07	0.1	0.003	0.001	0.01	0.02	7.87	0.003
	KG819-1	0.09	0.07	0.1	0.003	0.001	0.01	0.02	7.87	0.003
	KG820-2	0.09	0.07	0.1	0.003	0.001	0.01	0.02	7.84	0.003
	KG820-1	0.09	0.07	0.1	0.003	0.001	0.01	0.02	7.82	0.003
Heat No.	Roll No.	V	Nb	B	To.N	Sol.Al	Co	Ti	Ta	W
9741	Ladle	0.16	<0.01	0.0002	0.005	0.001	<0.01	0.01	0.02	2.00
	RB801-1	0.16	0.0001	0.0002	0.006	0.003	0.005	0.01	0.02	1.94
	RB801-8	0.16	0.0001	0.0002	0.008	0.003	0.005	0.01	0.02	1.97
	RB802-1	0.16	0.0001	0.0002	0.006	0.003	0.005	0.01	0.02	1.95
	RB801-4	0.16	0.0001	0.0002	0.008	0.003	0.005	0.01	0.02	1.95
9753	Ladle	0.19	0.0002	0.0002	0.006	0.001	0.003	0.004	0.02	1.99
	KG819-2	0.19	0.0002	0.0002	0.006	0.001	0.003	0.004	0.04	1.98
	KG819-1	0.19	0.0002	0.0002	0.007	0.001	0.003	0.004	0.03	1.98
	KG820-2	0.19	0.0002	0.0002	0.007	0.001	0.003	0.004	0.04	1.98
	KG820-1	0.19	0.0002	0.0002	0.007	0.001	0.002	0.004	0.04	1.98

Table 2 Heat treatment conditions of F82H IEA heat

Heat No.	Thickness	Normalizing	Tempering
9753	15 mm	1040°C × 38 min	750°C × 60 min
	25 mm	1040°C × 40 min	750°C × 60 min
7941	7.5 mm	1040°C × 37 min	750°C × 60 min
	15 mm	1040°C × 38 min	750°C × 60 min

3. 試験方法

F82H 鋼 IEA ヒート標準材について、以下のような試験が実施された;

金相試験:	マクロ組織観察、非金属介在物調査、ミクロ組織観察、硬さ試験
物理的特性:	密度、比熱、熱膨張、熱伝導率、ヤング率、剛性率、磁性
機械的特性:	高温引張試験、シャルピー衝撃試験、クリープ試験、 低サイクル疲労試験
その他の特性:	腐食試験、真空特性

以上の試験についての試験方法を以下に簡単に述べる。

3. 1. 金相試験

3. 1. 1. マクロ組織観察

板厚 7.5、15、25mm の各鋼板 5-14、2W-23、42W-18 より、 $50 \times 30 \times t$ の試験片をそれぞれ採取し、圧延方向面を研磨し、ピレラ(エタノール 100: 塩酸5: ピクリン酸1)で腐食した後、倍率 5 倍でマクロ組織観察を行った。

3. 1. 2. 非金属介在物調査

マクロ組織観察用試験片(マクロ組織観察前)を用い、圧延方向面を研磨し、JIS G 0555「鋼の非金属介在物の顕微鏡試験方法」および ASTM E45-87「Standard Practice for Determining the Inclusion Content of Steel」の A 法に従って非金属介在物調査を行った。

3. 1. 3. ミクロ組織観察

板厚 7.5、15、25mm の各鋼板 5-16、2W-23、42W-18 より、 $30 \times 10 \times t$ の試験片をそれぞれ採取し、圧延方向面を研磨、ピレラで腐食し、倍率 100 倍および 400 倍でミクロ組織観察を行った。なお、観察位置は板厚中央部とした。

3. 2. 物理的特性

3. 2. 1. 密度

板厚 15mm の鋼板 2W-10 より、 $\phi 16 \times 10$ Lmm の試験片(ヤング率測定用試験片)を採取し、室温においてアルキメデス法により密度の測定を行った。

3. 2. 2. 比熱

板厚 15mm の鋼板 2W-10 より比熱測定用試験片($\phi 14 \times 30$ mm)を採取し、真空理工製 SH-3000 型比熱測定装置を用い、断熱型連続法により室温から 800℃まで 100℃ピッチで比熱の測定を行った。断熱型連続法の原理を Fig. 6 に示す。この図に示すように、試料と断熱容器を等温にし、断熱状態で試料の温度が $\Delta\theta$ 上昇するのに要する時間 Δt を測定し、定圧比熱をデジタル・コンピューターで演算した。

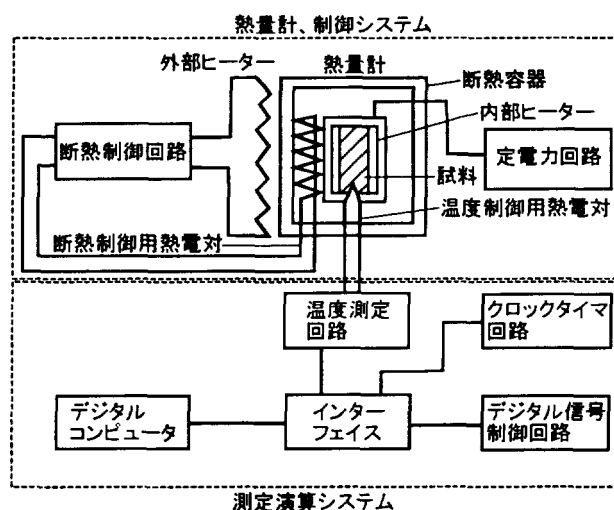


Fig. 6 Specific heat measuring system (isothermal method)

3. 2. 3 熱膨張

板厚 15mm の鋼板 2W-10 より採取した CCT 曲線測定用試験片($\phi 8 \times 12$ L)を 4×12 L に切断し、熱膨張用試験片とした。測定法は押棒式とし、真空理工製 DL-7000 型縦型熱膨張計を用い、室温から 1000℃まで加熱・冷却を行い、熱膨張を測定した。なお、加熱速度および冷却速度は 0.4℃/min とした。

3. 2. 4. 熱伝導率測定

板厚 15mm の鋼板 2W-10 より、熱拡散率測定用試験片($\phi 10 \times 2$ mm)を採取し、レ

レーザーフラッシュ法により、室温から 800℃までを 100℃ピッチで熱拡散率・熱伝導率の測定を行った。測定試験には真空理工製 TC-3000 型熱定数測定装置を使用した。レーザーフラッシュ法の原理を Fig. 7 に示す。この図に示すように、厚さの薄い平板試料の表面に一様に光源を照射すると、試料の裏面温度は上昇する。試料が断熱的に保持されていれば、ハーフ・タイムを測定すると(1)式により熱拡散率 α が求められる。なお、比熱は 3.2.2 で測定した値を用い、また密度は室温での値 $7.89(\text{g}/\text{cm}^3)$ を用いた。

$$\alpha = 1.37 \cdot L^2 / \pi^2 t_{1/2} \quad (1)$$

ここで、 α : 熱拡散率(cm^2/sec)

L : 試料の厚さ(cm)

$t_{1/2}$: 試料の裏面の最高上昇温度 ΔT_m の 1/2 の温度に達するまでの時間 (ハーフ・タイム)

このようにして求められた熱拡散率より、熱伝導率は(2)式のように計算される。

$$(\text{熱伝導率}) = (\text{熱拡散率}) \cdot (\text{比熱}) \cdot (\text{密度}) \quad (2)$$

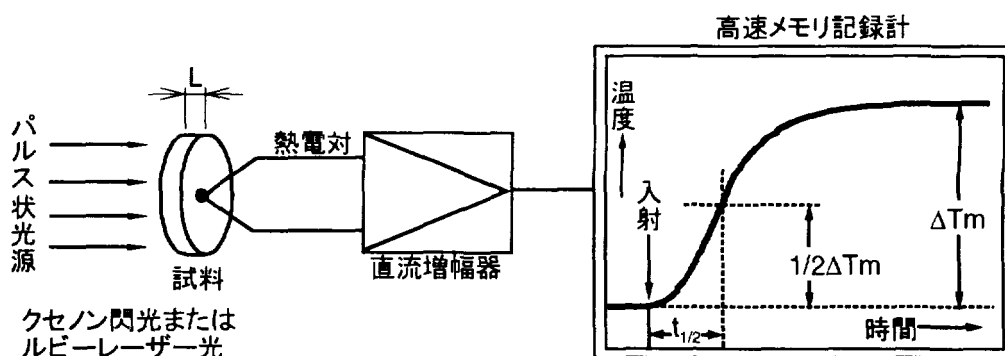
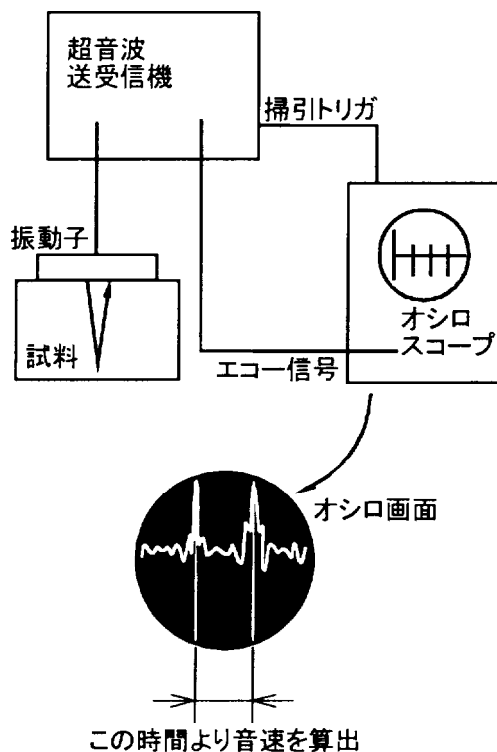


Fig. 7 Schematic diagram of the thermal conductivity measurement

3. 2. 5. ヤング率および剛性率測定

密度測定を行った試験片を用い、室温から 700℃までを 50℃毎に、マテック社製 MBS8000 型超音波音速測定装置を用い、ヤング率および剛性率の測定を超音波法により行った。超音波法の原理を Fig. 8 に示す。この図に示すように、平行平面を持つ試料に接着した振動子をパルスの励振し、試料中で多重反射したエコーの時間間隔と試料長から音速を求める。振動子としては、セラミック系圧電素子を用い、基本周波数はおもに 1～10MHz である。振動子は縦波発生用と横波発生用の2種類を用いる。またヤング率 E 、剛性率 G およびポアソン比 ν はそれぞれ(3)式に示す式により計算した。



$$E = \rho \frac{V_s^2 (3V_c^2 - 4V_s^2)}{V_c^2 - V_s^2}$$

$$G = \rho V_s^2 \quad (3)$$

$$\nu = \left(\frac{E}{2G} \right) - 1$$

E : Young's modulus
 G : Modulus of rigidity
 ν : Poisson ratio
 V_c : Sonic speed of longitudinal wave
 V_s : Sonic speed of transverse wave
 ρ : Density

Fig. 8 Schematic diagram of Young's modulus and modulus of rigidity measurement using super sonic method

3. 2. 6. 磁性測定

板厚 7.5mm の鋼板 5-3 の板厚中央部より、 $\phi 7 \times 0.5t$ の試験片 (2 個) を採取し、室温、200、300、400°C の大気雰囲気中で圧延方向および直角方向の磁化の測定 (それぞれサンプルは別) を行った。測定には DMS 社製振動試料型磁化測定装置 (VSM) を用いた。測定の原理を Fig. 9 に示す。この図のように、磁化した試料を上下に微小振動させ、その生ずる磁界が試料の側においた二次コイルの中で交流的に変化することにより生ずる交流電圧を増幅し、磁気モーメントを測定する。なお、ヒステリシスループの出力は、外部磁場から 3000Oe までおよび 15000Oe までとした。

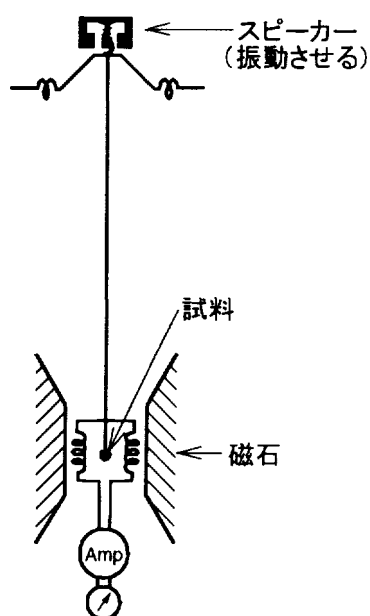


Fig. 9 schematic diagram of the magnetic properties measurement

3. 3. 機械的特性

3. 3. 1. 硬さ

ミクロ組織観察用試験片を用いて、JIS Z 2244「ビッカース硬さ試験方法」に従い、ビッカース硬度計を用いて硬さ測定を行った。試験荷重を 10kgf(9.8N)、測定位置は板厚中央部とした。

3. 3. 2. 高温引張特性

板厚 15mm の鋼板 2W-10 の圧延方向より、高温引張試験片(精密 B 試験片)を採取し、JIS G 0567「鉄鋼材料及び耐熱合金の高温引張試験方法」に従って、高温引張試験を行った。試験には島津社製オートグラフ IS-10T 型を使用し、試験温度は室温、50、100、200、300、400、450、500、550、600、650、700℃の 12 水準とした。高温引張試験に用いた試験片の形状を Fig. 10 に示す。

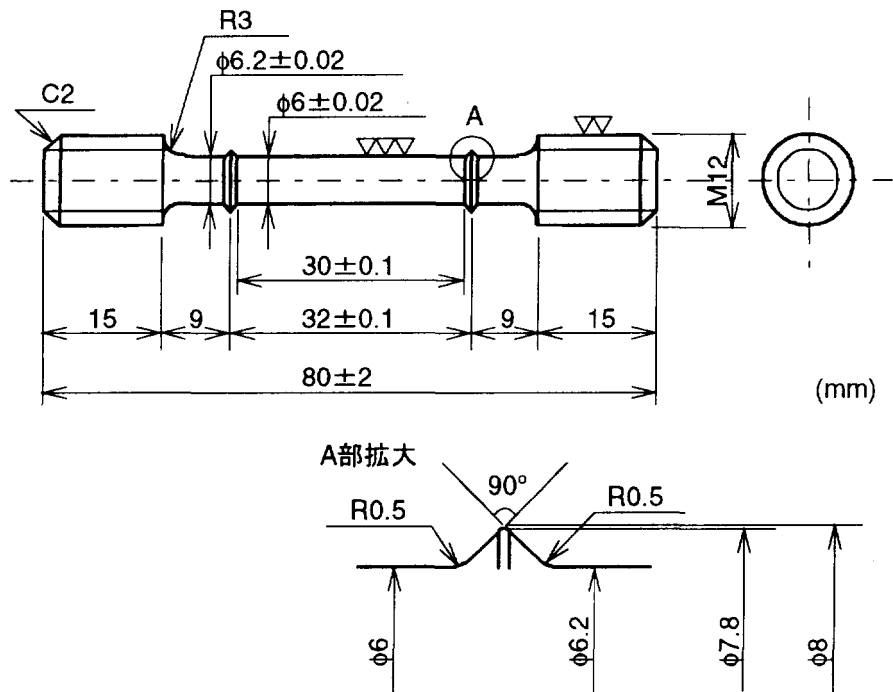


Fig. 10 Dimension of the tensile test specimen

3. 3. 3. シャルピー衝撃特性

板厚 15mm の鋼板 2W-10 より、圧延方向および直角方向からシャルピー衝撃試験片 (JIS Z 2202 4 号試験片 幅 10mm) を採取し、JIS Z 2242 「金属材料衝撃試験方法」に従って、前川試験機社製 M-50-ICA 型シャルピー式衝撃試験機を使用してシャルピー衝撃試験を行った。さらに、-20、-50、-100℃でも試験を行った。試験後の破面は日本電子製 SEM JSM-T330 により倍率 200 倍および 2000 倍において、Fig. 11 に示す位置について SEM 観察を行った。

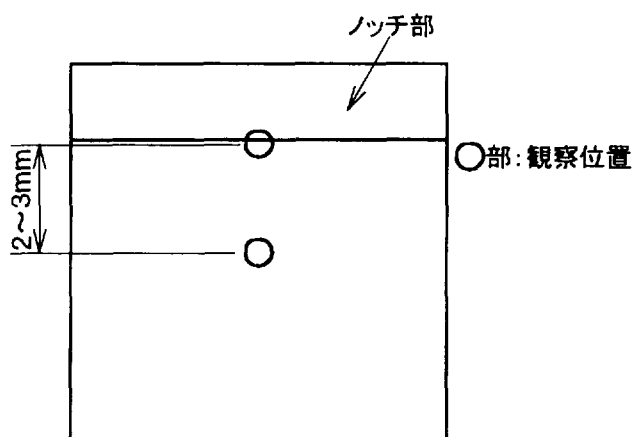


Fig. 11 Positions of the SEM observation of fracture surface after Charpy test

3. 3. 4. クリープ特性

板厚 15mm の鋼板 2W-10 の圧延方向より、クリープ試験片 (精密 B 試験片) を採取し、JIS Z 2271 「金属材料の引張クリープ試験方法」に従って、クリープ試験を行った。試験機には東京衡機製造所製高温クリープラプチャー試験機 (2ton、3ton) を使用し、また伸び測定にはダイヤルゲージを用いた。試験条件を Table 3 に示す。なお、試験片形状は高温引張試験片 (Fig. 10) と同様である。

Table 3 Creep test conditions

ID	Test temp. (°C)	Applied stress (MPa)	Expected rupture time (h)
2W101	600	180	300
2W102	650	120	
2W103	600	160	1000
2W106	650	100	
2W105	600	150	3000
2W104	650	75	

3. 3. 5. 低サイクル疲労特性

板厚 25mm の鋼板 42W-18 の圧延方向より、疲労試験片を採取し、JIS Z 2279「金属材料の高温低サイクル疲労試験方法」に従って、低サイクル疲労試験を行った。試験機には島津製作所製 EMF-EB3 型高温クリープ疲労試験機を使用し、歪波形は完全両振り対称三角波、歪速度は 0.1%/s で歪計(透明石英棒による接触型、差動トランス型)を用い、全歪制御とした。また、試験は大気雰囲気中で行った。試験条件を Table 4 に、試験片形状寸法を Fig. 12 にそれぞれ示す。

Table 4 Fatigue test conditions

ID	Gauge length (mm)	Test temp. (°C)	Total strain range (%)
9	φ7	RT	1.0
7	φ7	RT	0.6

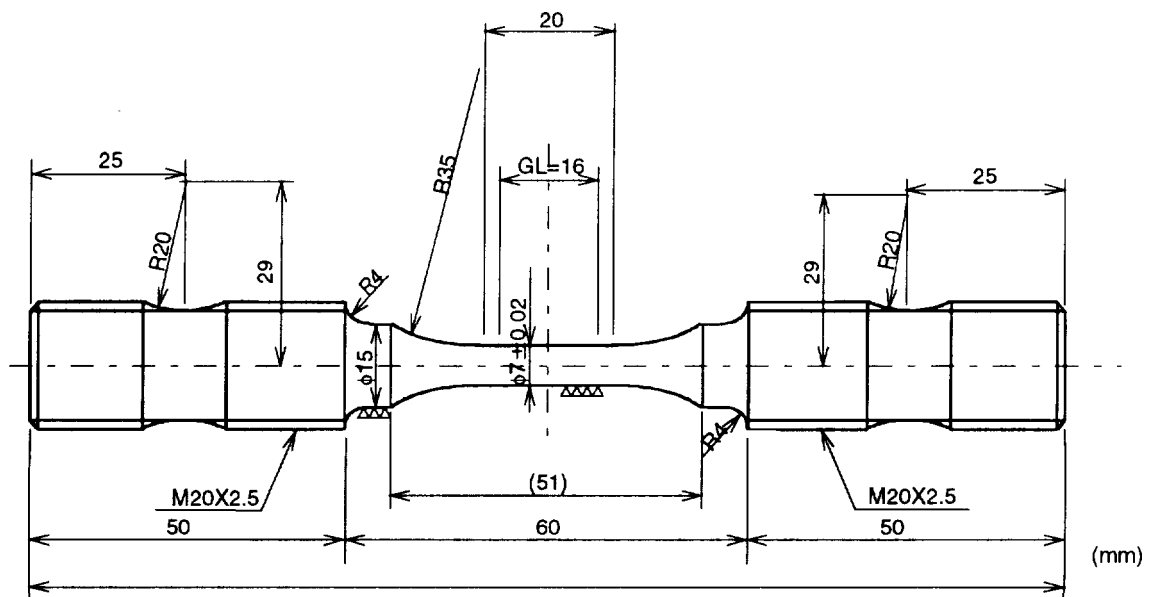


Fig. 12 Dimension of the fatigue test specimen

3. 4. 真空特性

15×15×0.4t mmに切り出し、2000番のエメリー紙で研磨後、0.05μm アルミナでバフ研磨で仕上げ研磨を行った試験片を用いて、昇温脱離分析法(TDS)により脱離気体の分析を行った。脱離気体の分析には日電アネルバ社製 AQA-100MPX 型四重極質量分析計(QMS)を使用した。また測定チャンバーの排気には、セイコー精機社製 Model STP-300 ターボ分子ポンプ(排気速度:0.34 m³/s:N₂)と ULVAC 社製ロータリーポンプ TypeOMT-050(排気速度:0.06 m³/s)、それに補助ポンプとして日電アネルバ社製 Model 929-9119 チタンゲッターポンプを使用し、測定時のチャンバー中の圧力は 12×10^{-5} Pa であった。測定装置の概略図を Fig. 13 に示す。

TDS スペクトルの測定方法は、真空チャンバー中で室温から1000℃まで直線的に加熱後、10 分間 1000℃で保持し、その保持時間中に放出されるガスを QMS で検出した。その後室温まで冷却した後、バックグラウンドデータを取得した。加熱時の昇温速度は 0.08、0.17、0.33、0.55、0.83 deg/s の5種類について測定を行った。また QMS の質量走査範囲は m/e=1~45 とした。

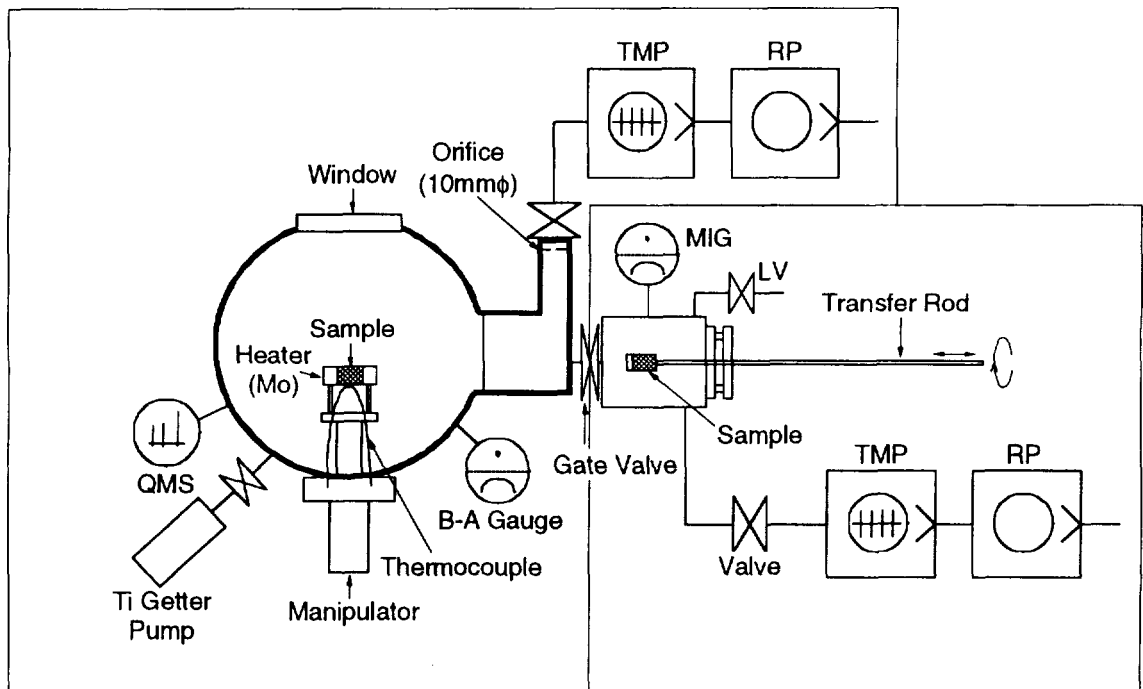


Fig. 13 Schematic diagram of the released gas analysis system (TDS method)

3. 5. 腐食特性

F82H 鋼の耐食性の評価のために、高温水ループ中腐食試験を行った。供試材としては、F82H 鋼の他に、比較材として HT-9 鋼およびクロマイズ処理(表面の高クロム化処理)を施した F82H 鋼について試験を行った。試験片の大きさは 43w×20L×6t mm であり、試料表面はバフ研磨仕上げとした。Table 5 に HT-9 鋼の化学組成を示す。

Table 5 Chemical composition of HT-9 steel (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Sol.Al	W	Ta	T.O.
0.19	0.22	0.48	0.018	0.001	0.59	12.0	1.00	0.29	<0.0005	0.02	0.51	0.002

試験には Fig. 14 に示すような高温水循環ループ(東伸工業製)を使用し、温度と溶存酸素を一定に保った高温高圧水中に一定時間浸漬した試験片の試験前後の重量変化(腐食減量)を測定した。また腐食減量の時間依存性を取得するために、重量測定後、試験片をオートクレープ内に再装荷し試験を継続した。試験片は Fig. 15 に示すようなジルコニウム製の試料ホルダーにセットして試験を行った。この試料ホルダーには 6 個の試料(TP1~TP6)がジルコニウムのセパレーターを挟んで装荷されるが、オートクレープ内の温度勾配により、装荷位置により試験片の温度は異なる。オートクレープ内の温度は、オートクレープの上側(TC1)と下側(TC2)に設置した熱電対により測定した。今回の試験では図に示すように、オートクレープ内の温度勾配を一次直線で近似し、各試験片のオートクレープ内位置から試験温度を推定した。この温度勾配を利用することにより腐食量の温度依存性が求められる。Table 6 に制御温度を 280℃とした場合の各試料位置での推測温度を示す。

Table 6 Estimated test temperature of each specimen position
(in the case of 280℃ operation)

	Thermocouple (measured)		Test piece (calculated)					
	TC1	TC2	TP1	TP2	TP3	TP4	TP5	TP6
Distance from top (mm)	159	343	139	179	219	259	299	339
Temp (°C)	281	220	290	275	260	250	235	220

溶存酸素量および電気伝導度については腐食試験中継続的に測定を行ったが、測定系が 1 系統しかないため、オートクレーブの入口側あるいは出口側の一方しか測定は出来ない。そのため適宜入口側と出口側とを切り替えて測定を行った。

溶存酸素量の制御には溶存酸素計の読みからフィードバックし、高純度アルゴンガスあるいは酸素の吹き込みにより制御しているが、酸素吹き込み時の溶存酸素の増加にタイムラグが大きく、さらに増加量も著しいため、溶存酸素量が下限以下になった場合には、アルゴンの吹き込みを停止し、溶存酸素量の自然増による復帰を行った。また今回は溶存酸素量は約 1 ppm でのみ試験を行った。今後の試験においては溶存酸素量依存性についても取得していく予定であるが、現在使用している試験装置では 0.8 ppm 程度の溶存酸素量までしか下がらないため、それ以下の溶存酸素量での試験を行うには試験機の改造を行うか、あるいは別の装置を探す必要がある。

(クロマイズ処理について)

900～1000℃において(今回は 920℃)、Cr、Al₂O₃、NH₄Cl の混合粉末中で加熱を行い、試料表面に Cr 富化層を生成する表面処理。クロマイズ層の厚さは約 60 μm であり、試料表面での Cr 濃度はおよそ 40%Cr である。クロマイズ処理においては、以下のようなプロセスで試料表面に Cr リッチ層が形成される;

1. HCl ガスの生成: $\text{NH}_4\text{Cl} \leftrightarrow \text{NH}_3 + \text{HCl}$ ($2\text{NH}_3 \leftrightarrow \text{N}_2 + 3\text{H}_2$)
2. CrCl₂ 蒸気の生成: $\text{Cr} + 2\text{HCl} \rightarrow \text{CrCl}_2 + \text{H}_2$
3. 試料表面での Cr の反応: $\text{CrCl}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{Cr} + 2\text{HCl}$
4. 試料表面の Cr と金属原子との置換: $\text{CrCl}_2 + \text{Me} \rightarrow \text{Cr} + \text{MeCl}_2$
5. 表面の Cr → 試料内に拡散

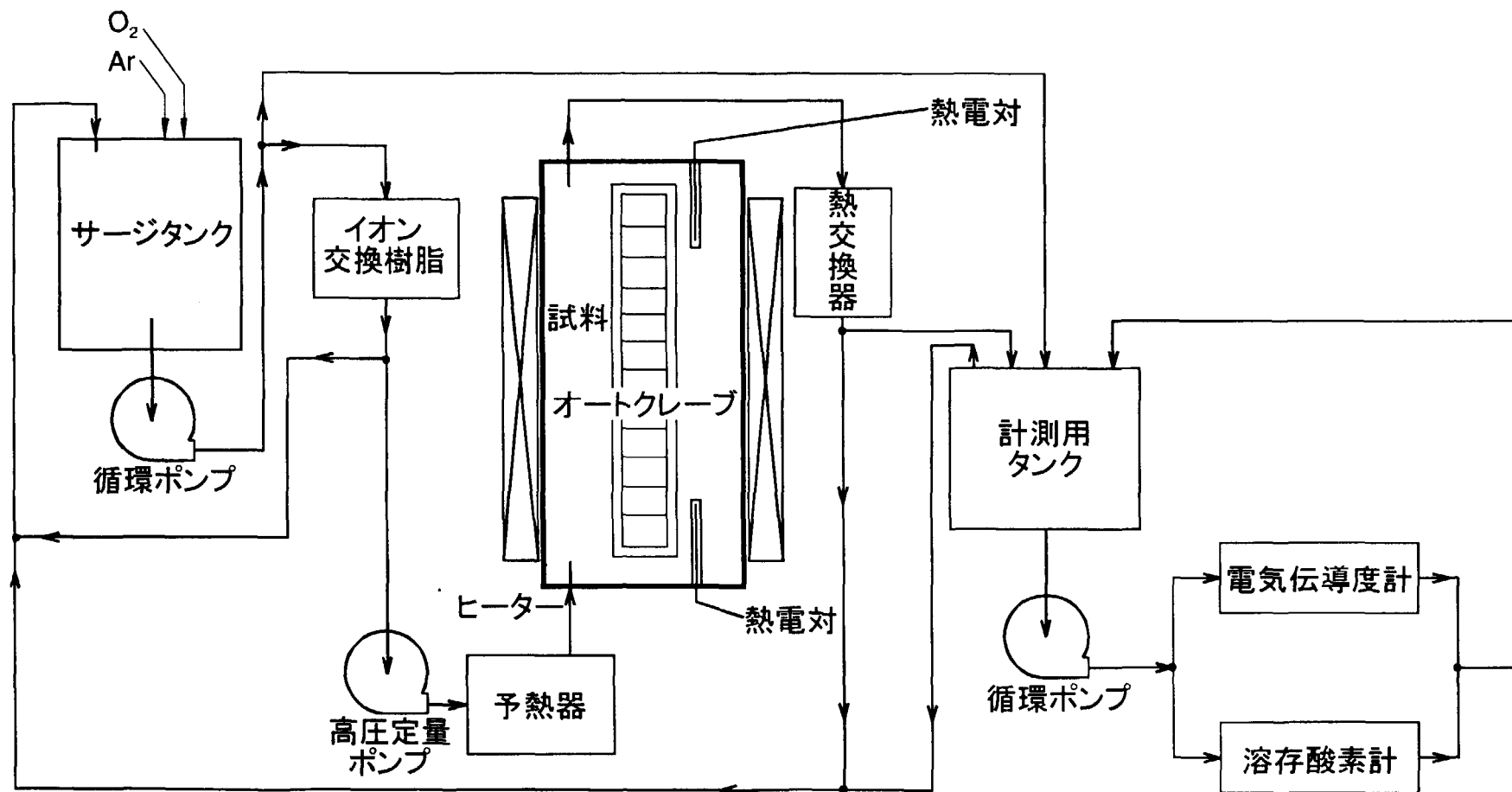


Fig. 14 High-temperature water circulation system for corrosion teset

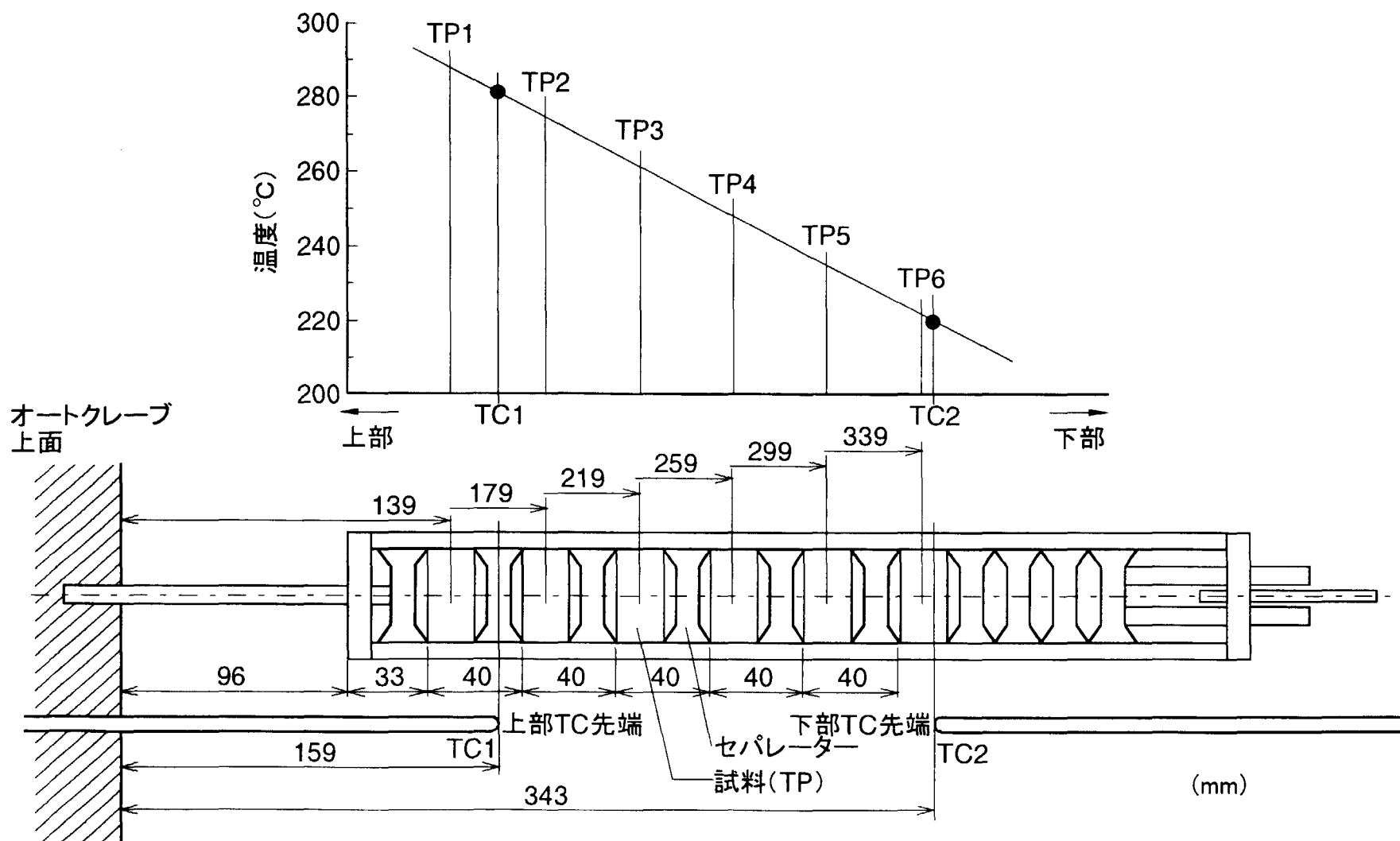


Fig. 15 Alignment of corrosion test pieces and estimated temperature

4. 試験結果および考察

4. 1. 金相試験

4. 1. 1. マクロ組織観察

Photo 1 および Photo 2 にマクロ組織の観察結果を示す。マルテンサイト変態前のオーステナイト粒の結晶粒度は ASTM 番号で 3.0 程度であり、第 1 回目の大型溶解材の ASTM 粒度 7.5 に比べるとかなり粗いようである。オーステナイト粒が粗大化した原因は明らかではないが、析出物の分析を行った結果、炭化物中に Ta が含まれており、マトリクス中の Ta 濃度が低下したためではないかと考えられる[3]。

4. 1. 2. 非金属介在物調査

Table 7 に JIS 法による非金属介在物調査結果を、また Table 8 に ASTM 法による調査結果を示す。また、各種非金属介在物の最も大きな部分を Photo 3 および Photo 4 に示す。試験結果より、この材料の非金属介在物はかなり少なく、清浄な鋼材であると言える。

Table 7 Non-metallic inclusion analysis result of F82H IEA heat(JIS method)

Roll No.	Plate ID	Thickness (mm)	Type of inclusion (%)			
			A type	B type	C type	Total
RB801-5	5-14	7.5	0.004	0.02	0.02	0.05
KG819-2	2W-23	15	0	0	0.02	0.02
KG819-2	42W-18	25	0	0.004	0.04	0.04

Table 8 Non-metallic inclusion analysis result of F82H IEA heat(ASTM method)

Roll No.	Plate ID	Thickness (mm)	Type of inclusion							
			A type		B type		C type		D type	
			T	H	T	H	T	H	T	H
RB801-5	5-14	7.5	1.0	0	1.5	0.5	0	0	1.0	0.5
KG819-2	2W-23	15	0	0	1.0	1.0	0	0	1.5	0.5
KG819-2	42W-18	25	0	0	1.5	0	0	0	1.0	0.5

4. 1. 3. ミクロ組織観察

Photo 5～7 にミクロ組織の観察結果を示す。析出物の分析は現在進行中である。

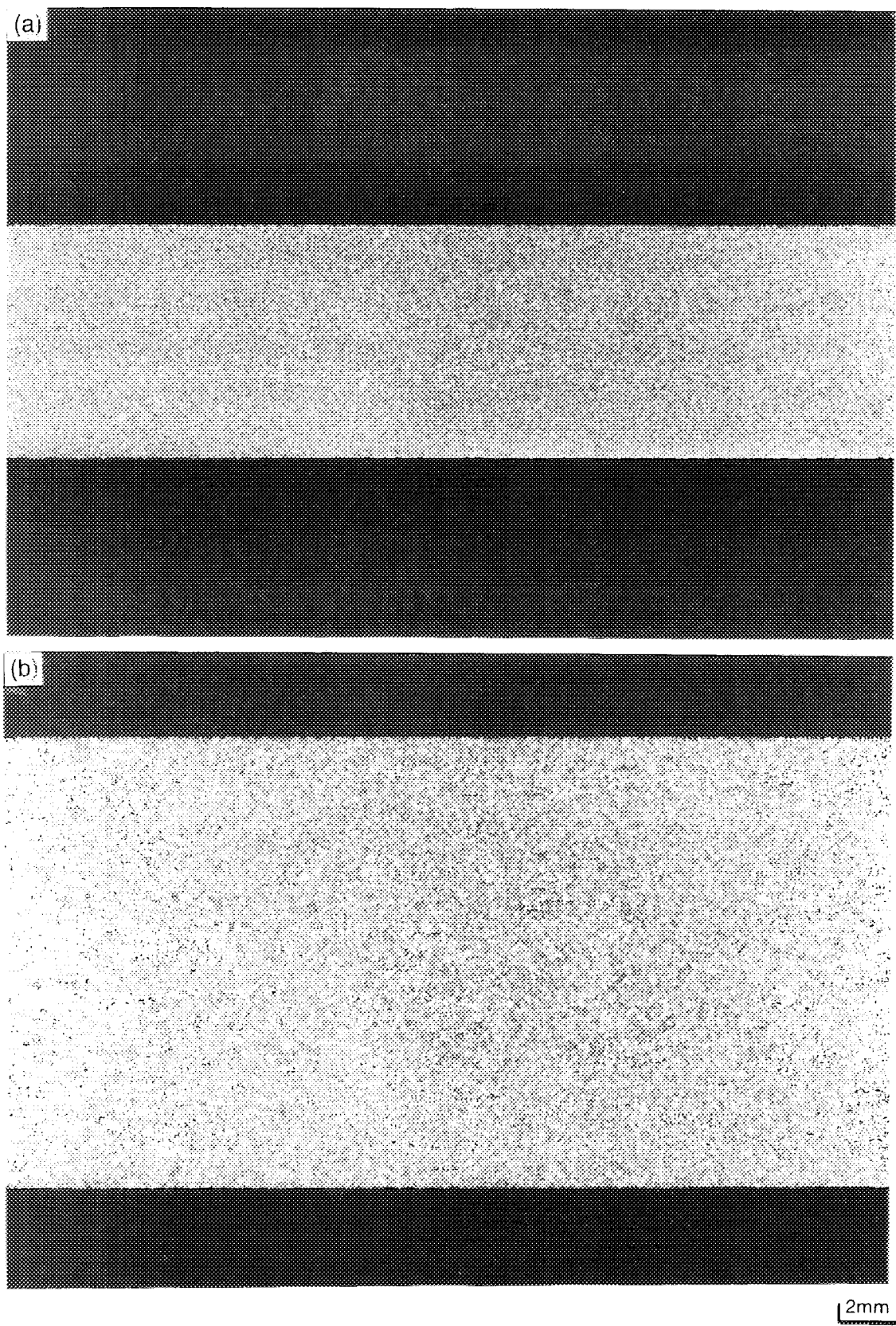


Photo 1 Macroscopic structure of F82H IEA heat (x5); (a) 5-14, (b) 2W-23

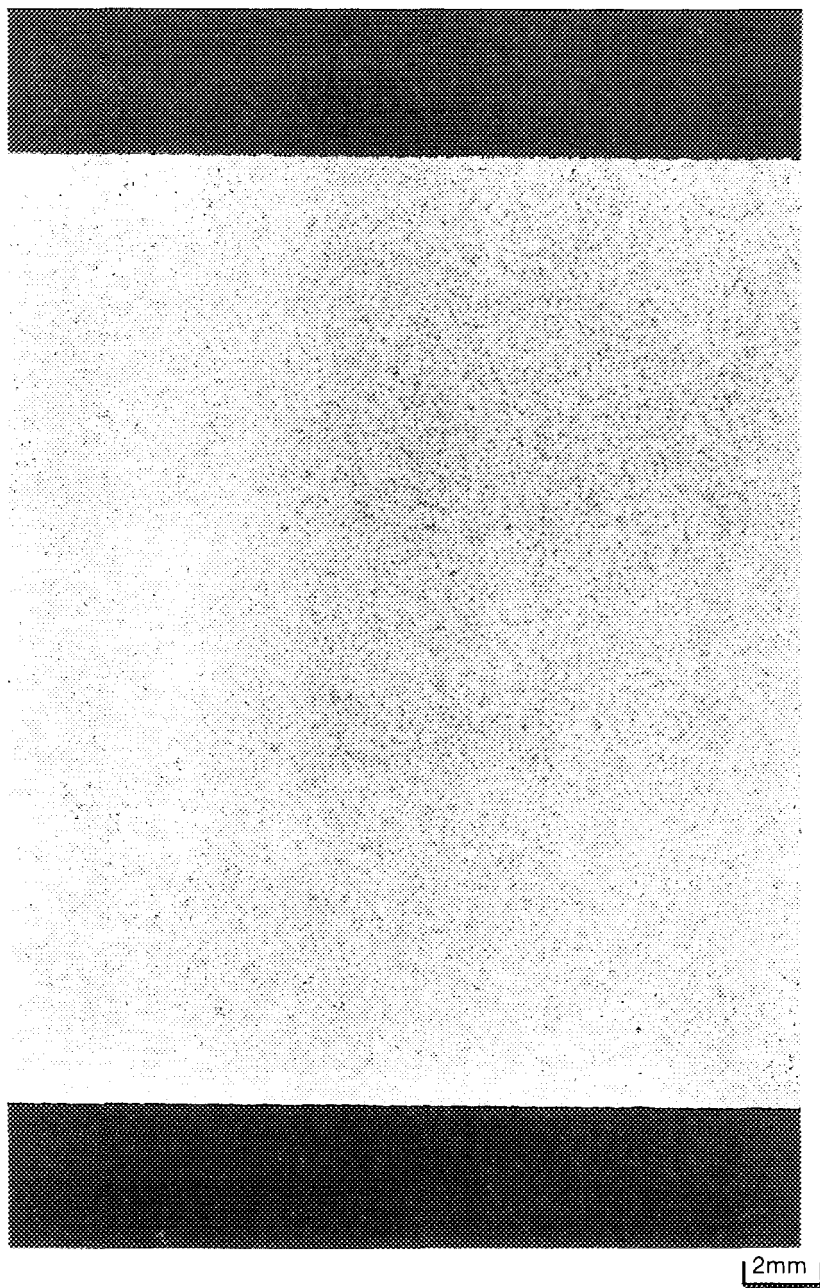


Photo 2 Macroscopic structure of F82H IEA heat (x5); (42W-18)

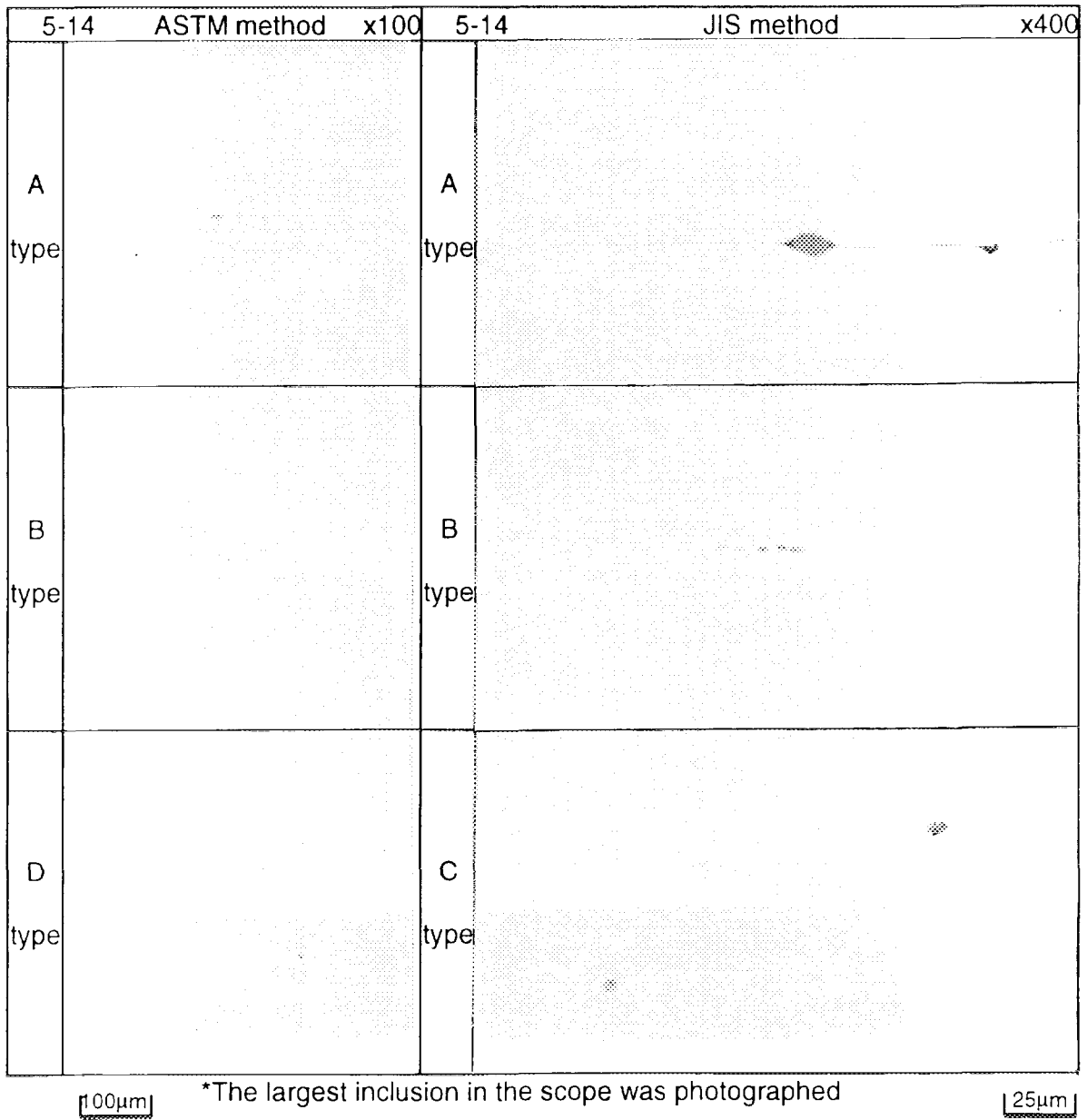


Photo 3 Non-metallic inclusion in F82H IEA heat (5-14)

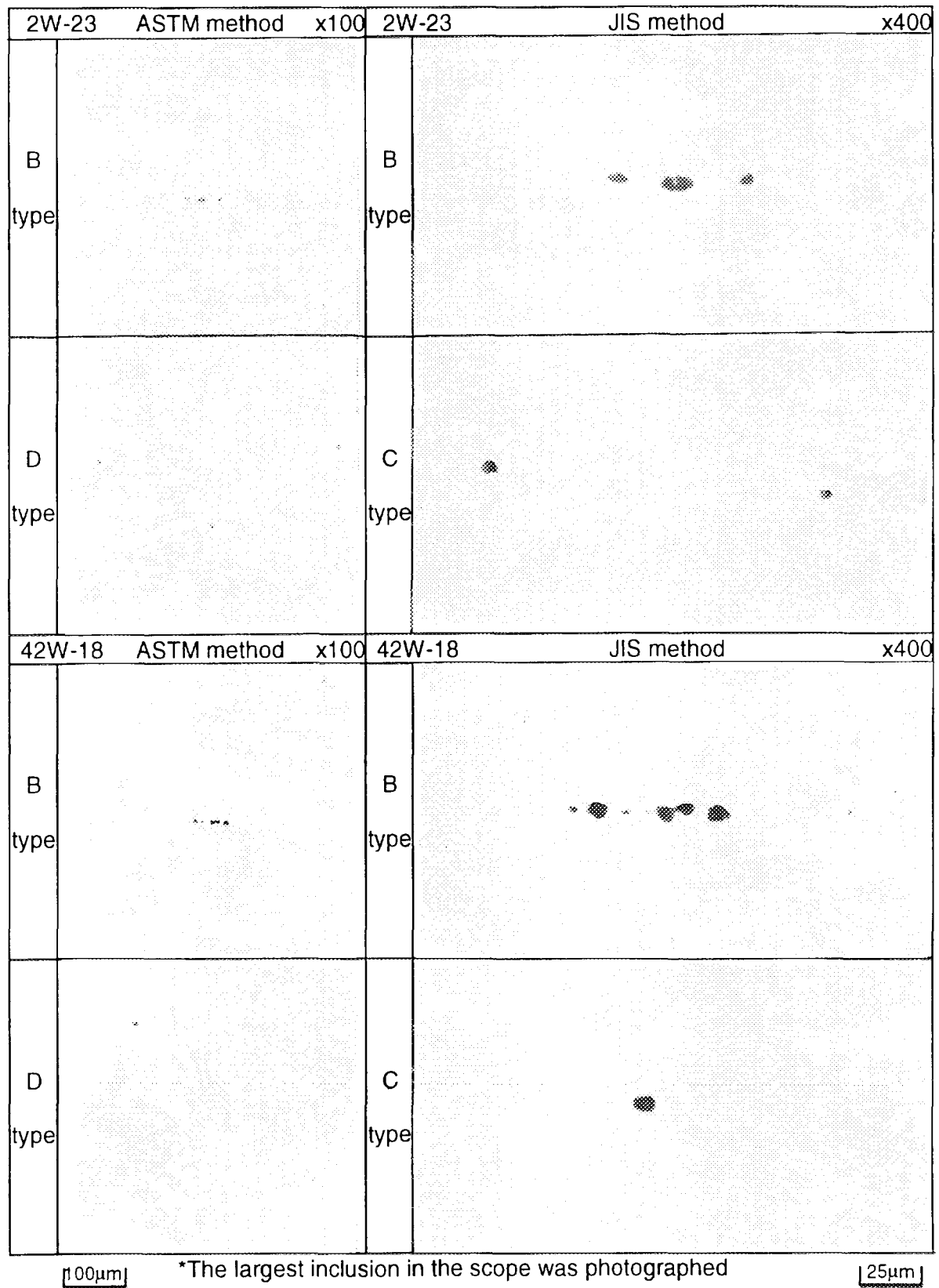


Photo 4 Non-metallic inclusion in F82H IEA heat (2W-23, 42W-18)

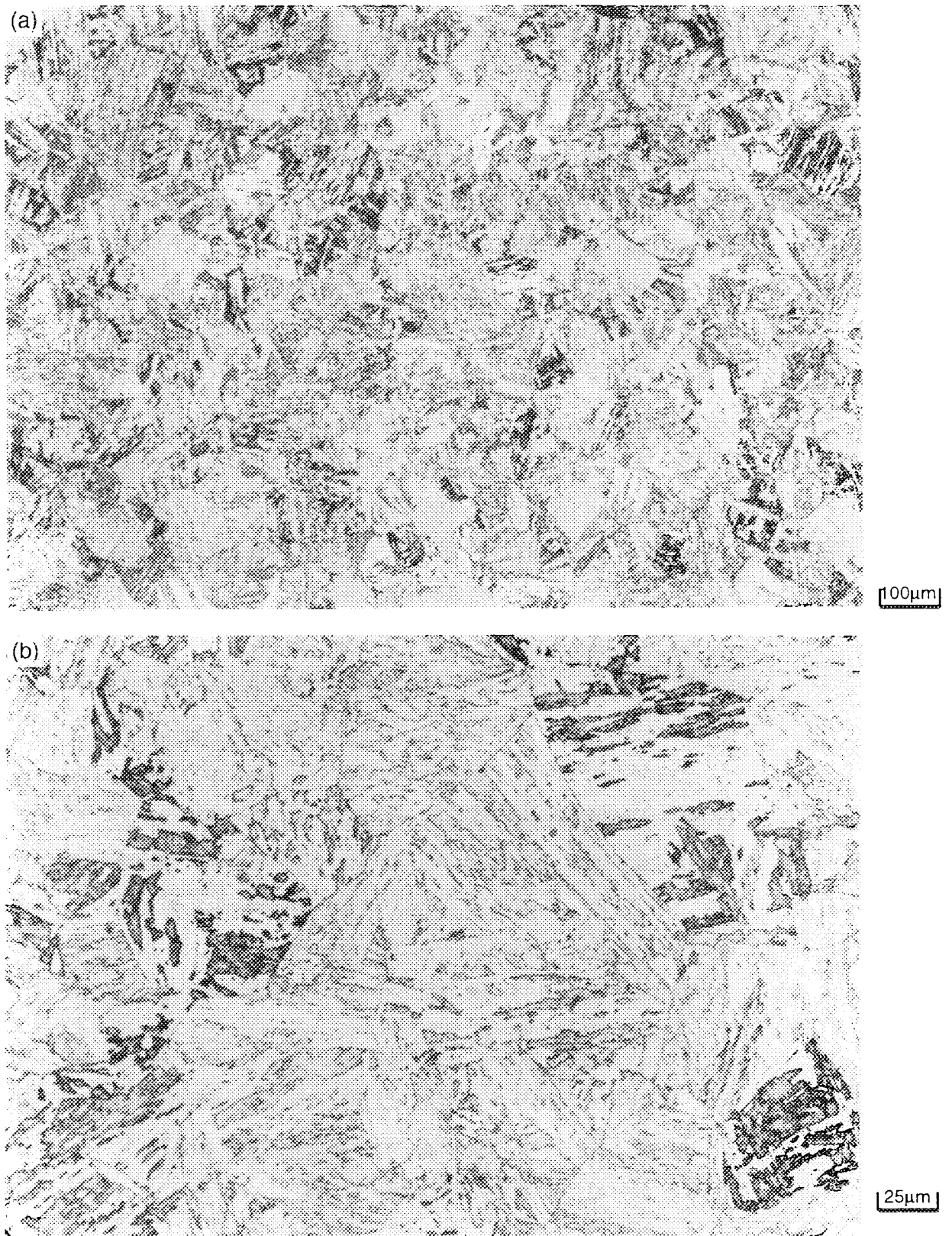


Photo 5 Microstructure of F82H IEA heat (5-16); (a) x100, (b) x400

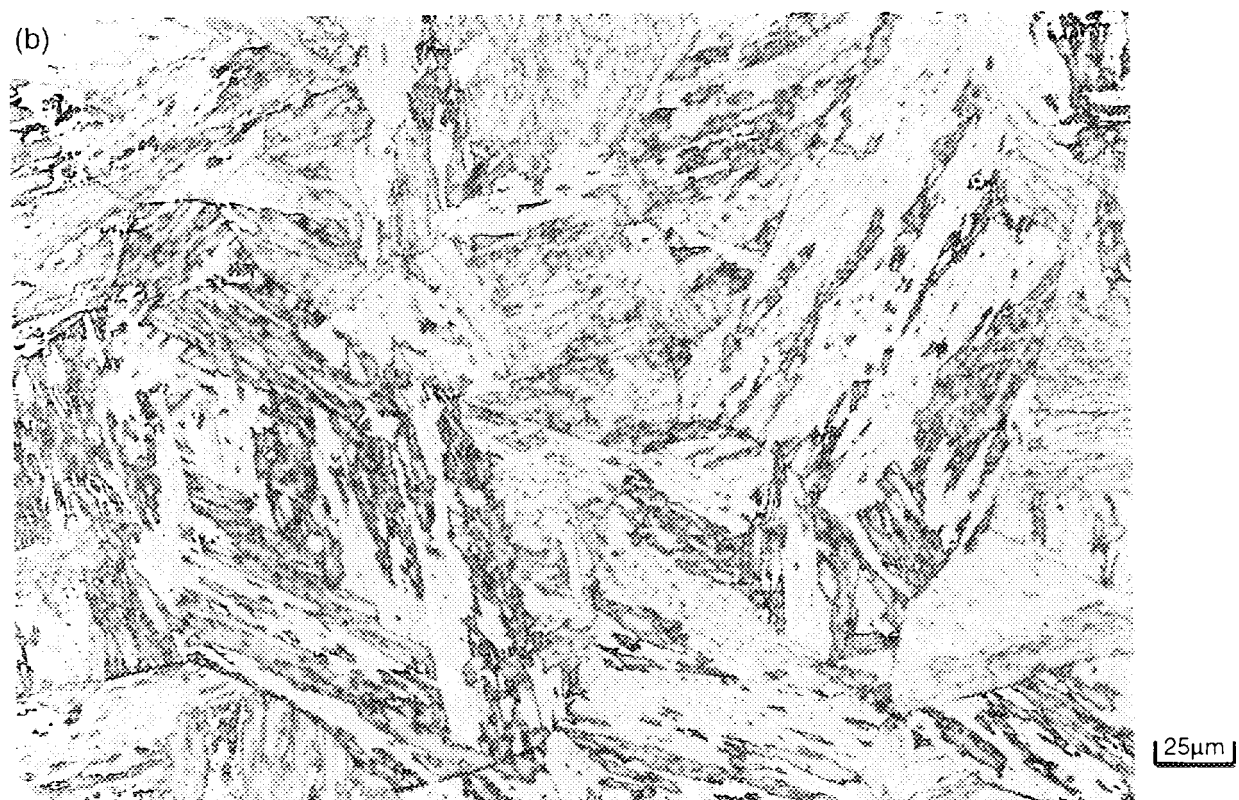


Photo 6 Microstructure of F82H IEA heat (2W-23); (a) x100, (b) x400

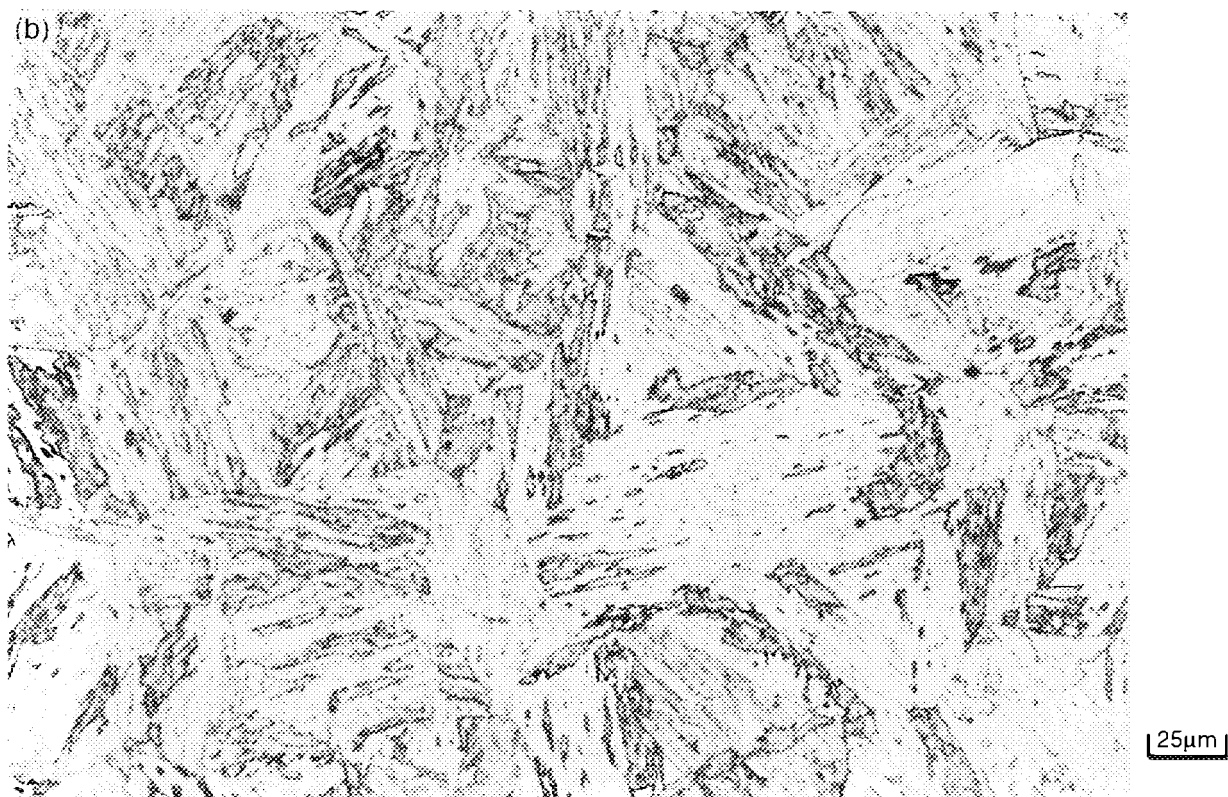


Photo 7 Microstructure of F82H IEA heat (42W-18); (a) x100, (b) x400

4. 2. 物理的特性

4. 2. 1. 密度

アルキメデス法により測定した F82H 鋼の密度は室温(20℃)において、7.87 g/cm³であった。

4. 2. 2. 比熱

比熱の測定結果を Table 9 に示す。また、比熱と温度の関係を第 1 回目の 5 トン溶解材のデータと併せて Fig. 16 に示す。

Table 9 Specific heat of F82H IEA heat

Test temp. (K)	Specific heat (J/kg·K)	Test temp. (K)	Specific heat (J/kg·K)
293	448	723	611
323	460	773	644
373	477	823	682
423	494	873	728
473	510	923	782
523	527	973	866
573	544	1023	1075
623	565	1033	1155
673	586	1073	803

4. 2. 3. 熱膨張

熱膨張の測定結果を Table 10 に示す。加熱時の熱膨張係数と温度の関係を第 1 回目の 5 トン溶解材のデータと併せて Fig. 17 に示す。

比熱・熱膨張率共に、800°C 近辺で大きく変化しているが、これはマルテンサイト相からオーステナイト相への相変態(A_{c1})に伴うものである。Ehrlich らの研究によると、 A_{c1} 変態の開始温度(A_{c1b})および終了温度(A_{c1e})はそれぞれ 820°C と 910°C である [4]。

Table 10 Results of thermal expansion measurement of F82H IEA heat

Test temp. (K)	Thermal expansion (%)		Temp. range (K)	Thermal expansion coefficient (1/K)	
	Heating	Cooling		Heating	Cooling*
293	0	-0.137	293~373	10.8×10^{-6}	11.5×10^{-6}
373	0.086	-0.045	293~473	11.0×10^{-6}	11.9×10^{-6}
473	0.198	0.077	293~573	11.2×10^{-6}	11.9×10^{-6}
573	0.313	0.195	293~673	11.7×10^{-6}	12.0×10^{-6}
673	0.443	0.317	293~773	12.0×10^{-6}	12.1×10^{-6}
773	0.578	0.445	293~873	12.3×10^{-6}	12.5×10^{-6}
873	0.716	0.586	293~973	12.5×10^{-6}	12.8×10^{-6}
973	0.848	0.730	293~1073	12.6×10^{-6}	11.7×10^{-6}
1073	0.984	0.772	293~1173	10.0×10^{-6}	10.8×10^{-6}
1173	0.876	0.813	293~1273	10.7×10^{-6}	12.1×10^{-6}
1273	1.048	1.049	-	-	-

*Coefficient during cooling was calculated with the room temperature after cooling (293K).

4. 2. 4. 熱伝導率

熱拡散率および熱伝導率の測定結果を Table 11 に示す。また、第 1 回目の 5 トン溶解材のデータと併せた熱伝導率と温度の関係を Fig. 18 に示す。なお、熱伝導率は熱拡散率と比熱、密度の積で算出しており、密度は室温の値を用いているため、温度の上昇に伴う体積膨張が考慮されていない。そのため、高温になるほど実際の密度より高い値で熱伝導率が算出されていることになる。参考までに誤差を考慮した熱伝導率も Table 11 に示す。

Table 11 Thermal properties of F82H IEA heat

Test temp. (K)	Thermal diffusion coefficient (cm ² /s)	Specific heat (J/kg·K)	Thermal conductivity (W/m·K)	Calibrated thermal conductivity (W/m·K)
293	0.0885	448	31.3	31.3
373	0.0865	477	33.6	32.5
473	0.0822	511	33.1	32.9
573	0.0785	544	33.7	33.4
673	0.0725	586	33.5	33.0
773	0.0656	644	33.3	32.7
873	0.0575	728	33.0	32.3
973	0.0479	866	32.7	31.9
1073	0.0474	804	30.1	29.2

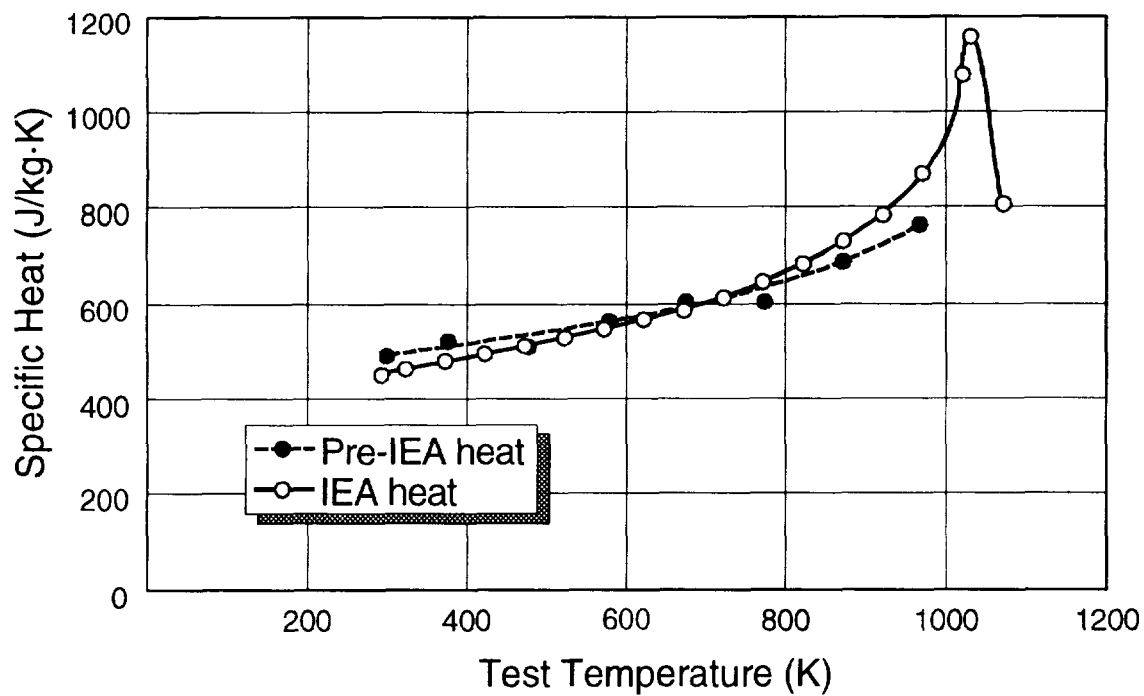


Fig. 16 Specific heat of F82H IEA heat

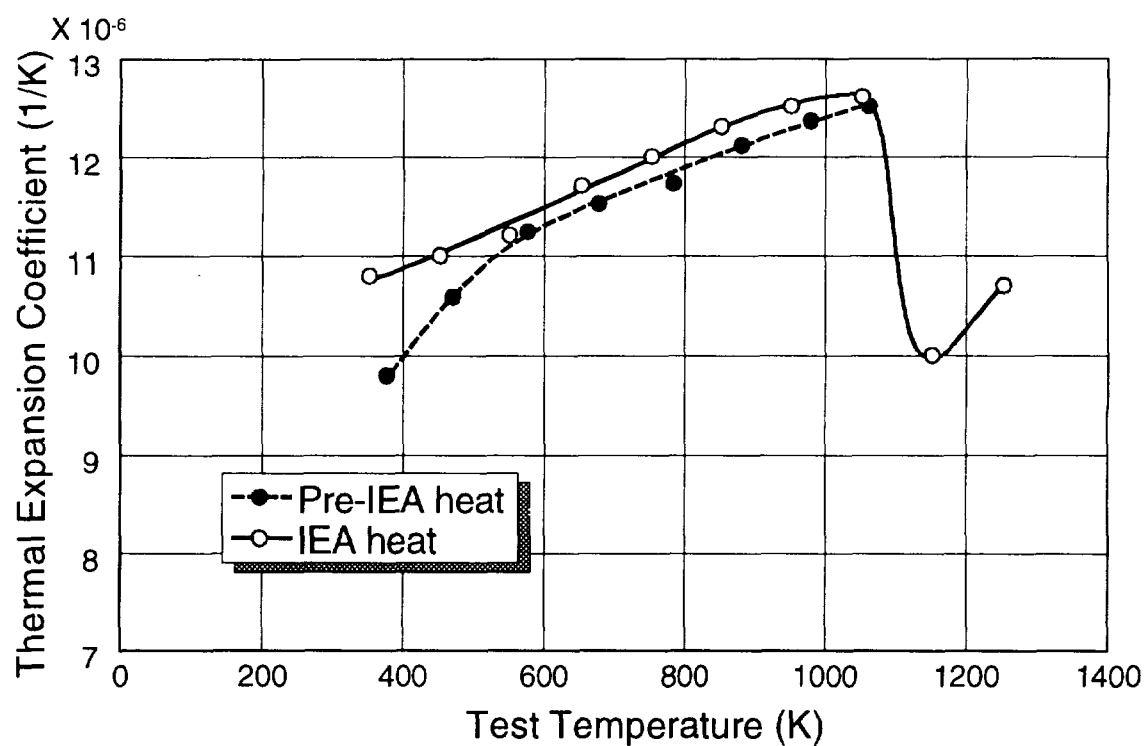


Fig. 17 Thermal expansion coefficient of F82H IEA heat

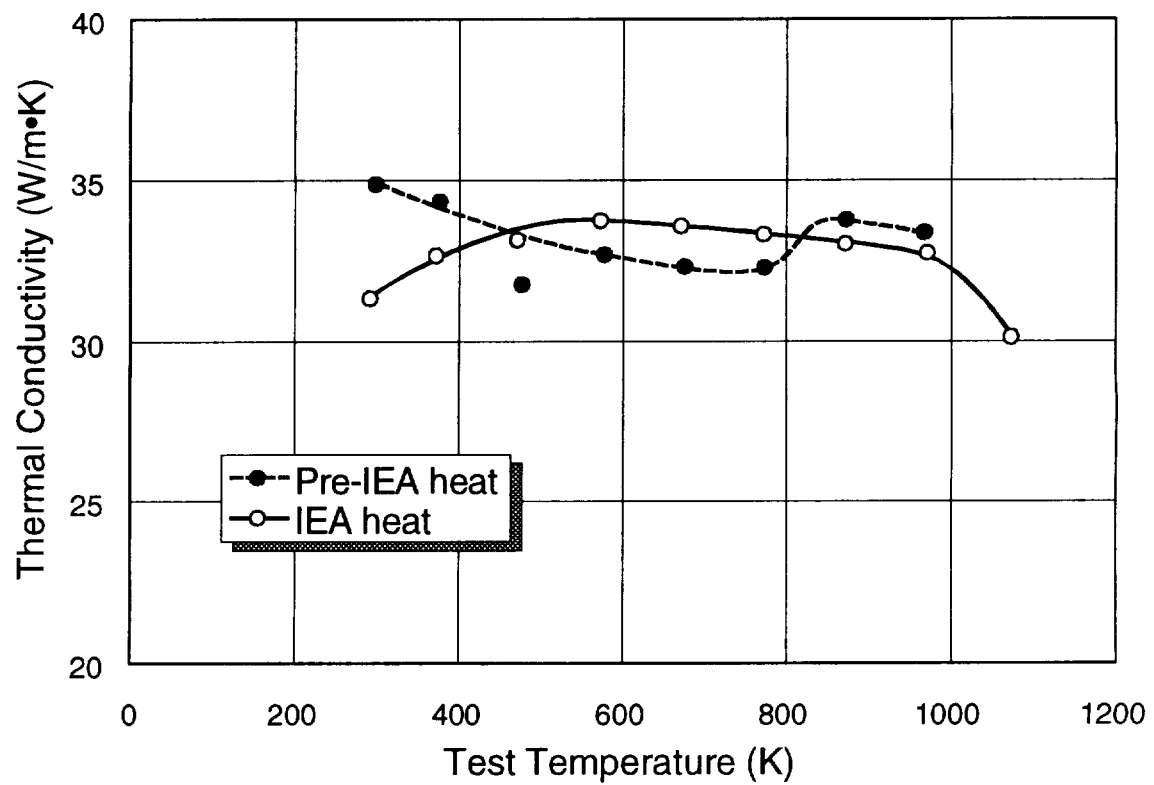


Fig. 18 Thermal conductivity of F82H IEA heat

4. 2. 5. ヤング率および剛性率

ヤング率および剛性率の測定結果を Table 12 に示す。ヤング率および剛性率は(3)式に示すように、密度と縦波音速、横波音速の二乗を用いて算出している。使用している密度は室温の値であるので、熱膨張による誤差が生じるはずである。音速が二乗になっているので、線熱膨張の分だけ小さくなる。誤差を考慮した値を Table 12 の括弧内に示す。またその結果を Fig. 19 に図示する。

Table 12 Elastic modulus and modulus of rigidity of F82H IEA heat

Test temp. (K)	Sonic speed of longitudinal wave (m/s)	Sonic speed of transverse wave (m/s)	Poisson ratio	Modulus of rigidity (GPa)	Elastic modulus (GPa)
293	5980	3270	0.29	84.1	217
323	5960	3250	0.29	83.3 (83.3)	215 (215)
373	5950	3240	0.29	82.4 (82.3)	213 (213)
423	5930	3210	0.29	81.1 (81.0)	210 (210)
473	5880	3190	0.29	80.4 (80.2)	207 (207)
523	5840	3180	0.29	79.6 (79.4)	205 (204)
573	5820	3150	0.29	87.1 (77.8)	202 (201)
623	5790	3130	0.29	77.3 (77.0)	200 (199)
673	5760	3110	0.29	76.1 (75.8)	197 (196)
723	5720	3090	0.29	75.4 (75.0)	195 (194)
773	5640	3050	0.29	73.1 (72.7)	189 (188)
823	5580	2990	0.30	70.5 (70.0)	183 (182)
873	5520	2950	0.30	68.4 (67.9)	178 (177)
923	5440	2870	0.31	64.9 (64.4)	170 (169)
973	5350	2790	0.31	61.4 (60.9)	161 (160)

4. 2. 6. 磁性

磁気特性の測定結果を Table 13～Table 21 示す。Fig. 20 には飽和磁束密度および残留磁気の温度依存性を示す。またヒステリシス曲線を Fig. 21～Fig. 28 に図示する。飽和磁束密度は、室温において約 19500 ガウスで、温度の上昇とともに低下し、400℃では約 17500 ガウスにまで減少する。残留磁気も同様に温度の上昇に伴い減少し、室温での 210 ガウスから 400℃の 170 ガウスにまで減少する。室温での残留磁気は 210 ガウスと比較的高い値であり、この残留磁気のために、溶接時に磁気吹きにより溶接欠陥が導入される恐れがあり、電磁石クレーン等を使用しないようにするとともに、消磁処理施す必要がある。

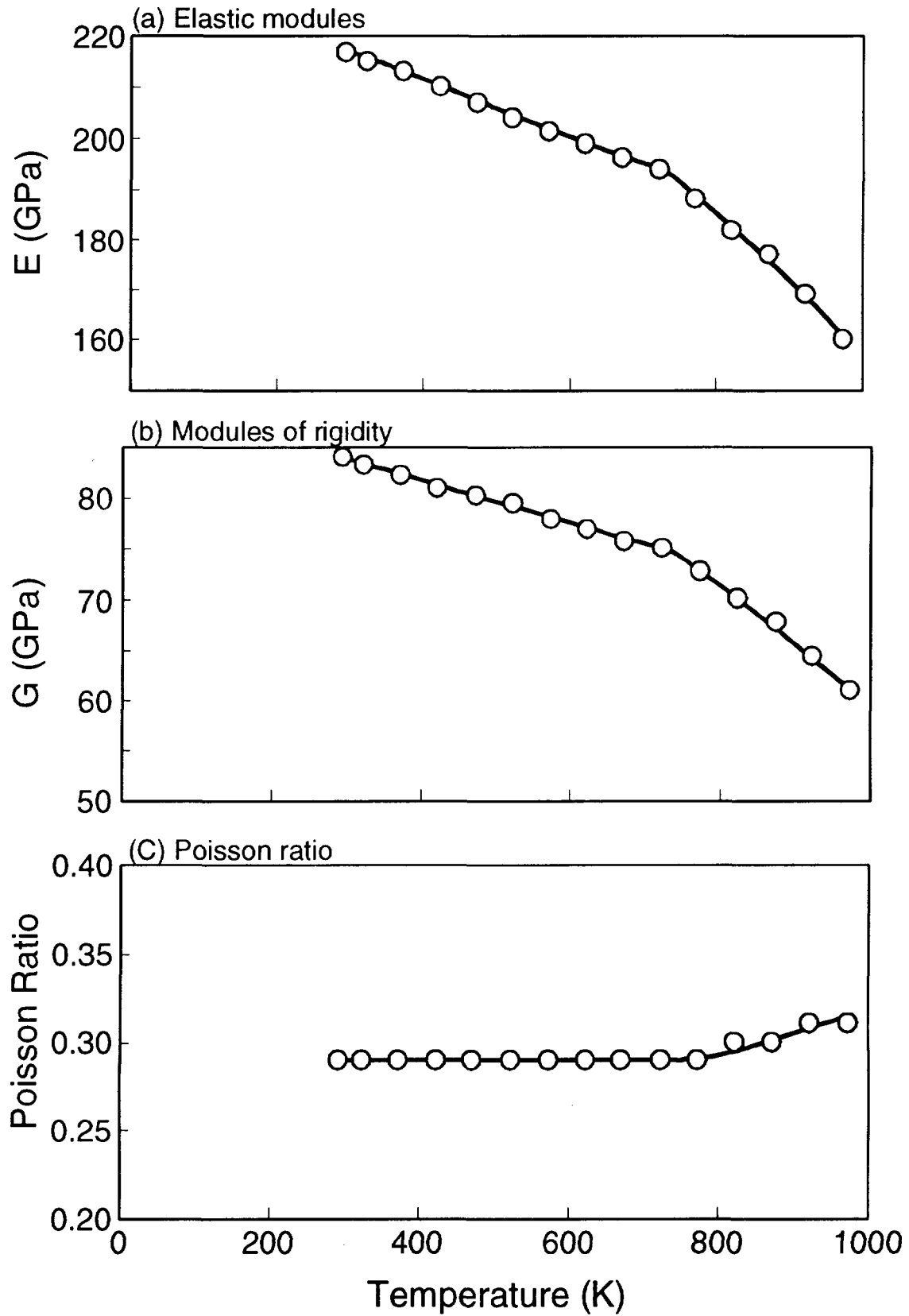


Fig. 19 Elastic modulus, modulus of rigidity and Poisson ratio of F82H IEA heat

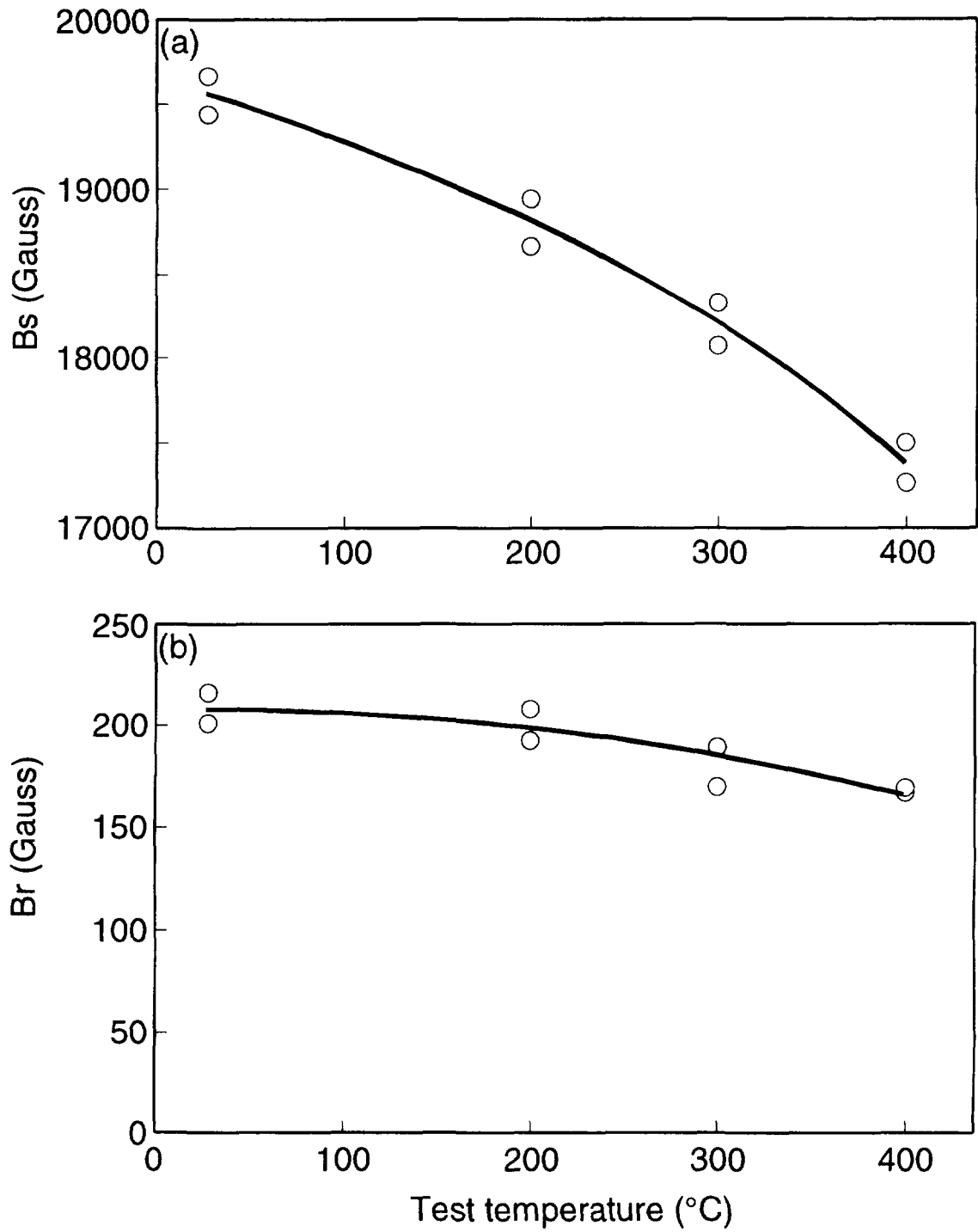


Fig. 20 Temperature dependence of magnetic properties of F82H IEA heat

Table 13 Summary of magnetic properties of F82H IEA heat

Test temp. (K)	File name	Mass (kg)	Sigma (EMU/g)	H _{max} (Oe)	B _s (Gauss)	B _r (Gauss)	S _Q	S*	H _C (Oe)	ΔH (Oe)	S _{Id}
300	RTL	0.161	1.983E+02	1.500E+04	1.967E+04	2.162E+02	1.100E-02	4.496E-02	4.462E+01	2.264E+03	1.549E+02
	RTC	0.170	1.960E+02	1.500E+04	1.943E+04	2.009E+02	1.034E-02	1.659E-02	1.473E+01	2.549E+03	1.731E+02
473	200L	0.161	1.910E+02	1.500E+04	1.894E+04	2.080E+02	1.098E-02	4.067E-02	1.372E+01	2.235E+03	1.629E+02
	200C1	0.170	1.881E+02	1.500E+04	1.866E+04	1.931E+02	1.035E-02	2.941E-02	1.417E+01	2.452E+03	1.731E+02
573	300L	0.161	1.848E+02	1.500E+04	1.833E+04	1.895E+02	1.034E-02	1.672E-02	1.278E+01	2.160E+03	1.691E+02
	300C	0.170	1.822E+02	1.500E+04	1.807E+04	1.697E+02	9.388E-03	3.333E-02	1.250E+01	2.367E+03	1.893E+02
673	400L	0.161	1.765E+02	1.500E+04	1.750E+04	1.668E+02	9.533E-03	6.216E-02	1.115E+01	2.060E+03	1.847E+02
	400C	0.170	1.740E+02	1.500E+04	1.726E+04	1.697E+02	9.830E-03	-1.272E-02	1.214E+01	2.233E+03	1.839E+02

Sigma : 飽和磁化 (EMU/g)
 H_{max} : 最大磁界 (Oersted)
 B_s : 飽和磁束密度 (Gauss)
 B_r : 残留磁束密度 (Gauss)
 H_C : 保磁力 (Oersted)
 S_Q : 角型比
 S* : A/H_C
 A : ベクトルポテンシャル
 S_{Id} : dH/H_C

Table 14 F82H 鋼 IEA ヒート標準熱処理材磁性測定結果(300K, RTL)

Oersted	Gauss	Oersted	Gauss	Oersted	Gauss	Oersted	Gauss
15000	19670	-45	-469.5	-12000	-19670	50	545.7
12000	19670	-50	-545.7	-9000	-19630	55	624
9000	19630	-55	-624	-6000	-19550	60	704.3
6000	19550	-60	-704.3	-3000	-19310	65	784.6
3000	19310	-65	-784.6	-2000	-18870	70	858.8
2000	18870	-70	-858.8	-1900	-18770	75	935
1900	18770	-75	-935	-1800	-18650	80	1015
1800	18650	-80	-1015	-1700	-18500	85	1094
1700	18500	-85	-1094	-1600	-18300	90	1174
1600	18300	-90	-1174	-1500	-18040	95	1254
1500	18040	-95	-1254	-1400	-17690	100	1328
1400	17690	-100	-1328	-1300	-17210	200	2889
1300	17210	-200	-2889	-1200	-16560	300	4436
1200	16560	-300	-4436	-1100	-15750	400	5989
1100	15750	-400	-5989	-1000	-14790	500	7519
1000	14790	-500	-7519	-900	-13670	600	9041
900	13670	-600	-9041	-800	-12390	700	10540
800	12390	-700	-10540	-700	-10980	800	11980
700	10980	-800	-11980	-600	-9512	900	13330
600	9512	-900	-13330	-500	-8003	1000	14510
500	8003	-1000	-14510	-400	-6466	1100	15540
400	6466	-1100	-15540	-300	-4910	1200	16410
300	4910	-1200	-16410	-200	-3349	1300	17100
200	3349	-1300	-17100	-100	-1783	1400	17620
100	1783	-1400	-17620	-10	-376.9	1500	17980
10	376.9	-1500	-17980	-5	-302.7	3000	19320
5	302.7	-3000	-19320	0	-216.2	4500	19500
0	216.2	-4500	-19500	5	-148.3	6000	19580
-5	148.3	-6000	-19580	10	-74.14	7500	19630
-10	74.14	-7500	-19630	15	6.178	9000	19670
-15	-6.178	-9000	-19670	20	80.32	10500	19680
-20	-80.32	-10500	-19680	25	160.6	12000	19690
-25	-160.6	-12000	-19690	30	234.8	13500	19670
-30	-234.8	-13500	-19670	35	315.1	15000	19670
-35	-315.1	-15000	-19670	40	389.2		
-40	-389.2	-15000	-19670	45	469.5		

Table 15 F82H 鋼 IEA ヒート標準熱処理材磁性測定結果(300K, RTC)

Oersted	Gauss	Oersted	Gauss	Oersted	Gauss	Oersted	Gauss
15000	19430	-45	-425.1	-12000	-19440	50	497.3
12000	19440	-50	-497.3	-9000	-19400	55	565.5
9000	19400	-55	-565.5	-6000	-19330	60	637.7
6000	19330	-60	-637.7	-3000	-19040	65	707.9
3000	19040	-65	-707.9	-2000	-18490	70	780
2000	18490	-70	-780	-1900	-18370	75	852.2
1900	18370	-75	-852.2	-1800	-18210	80	922.4
1800	18210	-80	-922.4	-1700	-18030	85	992.6
1700	18030	-85	-992.6	-1600	-17780	90	1063
1600	17780	-90	-1063	-1500	-17450	95	1133
1500	17450	-95	-1133	-1400	-17000	100	1205
1400	17000	-100	-1205	-1300	-16390	200	2623
1300	16390	-200	-2623	-1200	-15630	300	4029
1200	15630	-300	-4029	-1100	-14740	400	5439
1100	14740	-400	-5439	-1000	-13720	500	6839
1000	13720	-500	-6839	-900	-12580	600	8229
900	12580	-600	-8229	-800	-11320	700	9598
800	11320	-700	-9598	-700	-10000	800	10940
700	10000	-800	-10940	-600	-8643	900	12230
600	8643	-900	-12230	-500	-7262	1000	13420
500	7262	-1000	-13420	-400	-5868	1100	14500
400	5868	-1100	-14500	-300	-4456	1200	15440
300	4456	-1200	-15440	-200	-3038	1300	16240
200	3038	-1300	-16240	-100	-1622	1400	16890
100	1622	-1400	-16890	-10	-347.1	1500	17380
10	347.1	-1500	-17380	-5	-275	3000	19040
5	275	-3000	-19040	0	-200.9	4500	19260
0	200.9	-4500	-19260	5	-138.5	6000	19350
-5	138.5	-6000	-19350	10	-68.25	7500	19400
-10	68.25	-7500	-19400	15	3.9	9000	19430
-15	-3.9	-9000	-19430	20	70.2	10500	19450
-20	-70.2	-10500	-19450	25	142.4	12000	19450
-25	-142.4	-12000	-19450	30	214.5	13500	19430
-30	-214.5	-13500	-19430	35	284.7	15000	19430
-35	-284.7	-15000	-19430	40	354.9		
-40	-354.9	-15000	-19430	45	425.1		

Table 16 F82H 鋼 IEA ヒート標準熱処理材磁性測定結果(473K, 200L)

Oersted	Gauss	Oersted	Gauss	Oersted	Gauss	Oersted	Gauss
15000	18940	-45	-490.1	-12000	-18950	50	570.5
12000	18950	-50	-570.5	-9000	-18900	55	644.6
9000	18900	-55	-644.6	-6000	-18830	60	724.9
6000	18830	-60	-724.9	-3000	-18630	65	805.2
3000	18630	-65	-805.2	-2000	-18300	70	881.4
2000	18300	-70	-881.4	-1900	-18230	75	959.7
1900	18230	-75	-959.7	-1800	-18140	80	1040
1800	18140	-80	-1040	-1700	-18020	85	1118
1700	18020	-85	-1118	-1600	-17870	90	1197
1600	17870	-90	-1197	-1500	-17680	95	1277
1500	17680	-95	-1277	-1400	-17410	100	1355
1400	17410	-100	-1355	-1300	-17060	200	2931
1300	17060	-200	-2931	-1200	-16520	300	4494
1200	16520	-300	-4494	-1100	-15770	400	6057
1100	15770	-400	-6057	-1000	-14820	500	7607
1000	14820	-500	-7607	-900	-13710	600	9133
900	13710	-600	-9133	-800	-12430	700	10640
800	12430	-700	-10640	-700	-11040	800	12080
700	11040	-800	-12080	-600	-9568	900	13410
600	9568	-900	-13410	-500	-8048	1000	14590
500	8048	-1000	-14590	-400	-6504	1100	15590
400	6504	-1100	-15590	-300	-4934	1200	16400
300	4934	-1200	-16400	-200	-3365	1300	16970
200	3365	-1300	-16970	-100	-1783	1400	17350
100	1783	-1400	-17350	-10	-362.5	1500	17630
10	362.5	-1500	-17630	-5	-288.3	3000	18670
5	288.3	-3000	-18670	0	-208	4500	18830
0	208	-4500	-18830	5	-133.9	6000	18890
-5	133.9	-6000	-18890	10	-59.72	7500	18930
-10	59.72	-7500	-18930	15	20.59	9000	18950
-15	-20.59	-9000	-18950	20	96.79	10500	18970
-20	-96.79	-10500	-18970	25	175	12000	18960
-25	-175	-12000	-18960	30	255.4	13500	18940
-30	-255.4	-13500	-18940	35	331.6	15000	18940
-35	-331.6	-15000	-18940	40	416		
-40	-416	-15000	-18940	45	490.1		

Table 17 F82H 鋼 IEA ヒート標準熱処理材磁性測定結果(473K, 200C1)

Oersted	Gauss	Oersted	Gauss	Oersted	Gauss	Oersted	Gauss
15000	18660	-45	-438.8	-12000	-18650	50	509
12000	18650	-50	-509	-9000	-18590	55	579.2
9000	18590	-55	-579.2	-6000	-18520	60	649.4
6000	18520	-60	-649.4	-3000	-18310	65	725.4
3000	18310	-65	-725.4	-2000	-17880	70	795.6
2000	17880	-70	-795.6	-1900	-17790	75	865.8
1900	17790	-75	-865.8	-1800	-17680	80	936
1800	17680	-80	-936	-1700	-17530	85	1006
1700	17530	-85	-1006	-1600	-17360	90	1080
1600	17360	-90	-1080	-1500	-17110	95	1153
1500	17110	-95	-1153	-1400	-16770	100	1223
1400	16770	-100	-1223	-1300	-16280	200	2644
1300	16280	-200	-2644	-1200	-15590	300	4062
1200	15590	-300	-4062	-1100	-14720	400	5476
1100	14720	-400	-5476	-1000	-13710	500	6880
1000	13710	-500	-6880	-900	-12570	600	8272
900	12570	-600	-8272	-800	-11330	700	9647
800	11330	-700	-9647	-700	-10020	800	10990
700	10020	-800	-10990	-600	-8653	900	12270
600	8653	-900	-12270	-500	-7278	1000	13450
500	7278	-1000	-13450	-400	-5880	1100	14510
400	5880	-1100	-14510	-300	-4464	1200	15430
300	4464	-1200	-15430	-200	-3042	1300	16170
200	3042	-1300	-16170	-100	-1619	1400	16700
100	1619	-1400	-16700	-10	-339.3	1500	17050
10	339.3	-1500	-17050	-5	-263.3	3000	18340
5	263.3	-3000	-18340	0	-193.1	4500	18530
0	193.1	-4500	-18530	5	-128.7	6000	18600
-5	128.7	-6000	-18600	10	-58.5	7500	18630
-10	58.5	-7500	-18630	15	11.7	9000	18650
-15	-11.7	-9000	-18650	20	81.9	10500	18670
-20	-81.9	-10500	-18670	25	152.1	12000	18670
-25	-152.1	-12000	-18670	30	222.3	13500	18660
-30	-222.3	-13500	-18660	35	292.5	15000	18660
-35	-292.5	-15000	-18660	40	366.6		
-40	-366.6	-15000	-18660	45	438.8		

Table 18 F82H 鋼 IEA ヒート標準熱処理材磁性測定結果(573K, 300L)

Oersted	Gauss	Oersted	Gauss	Oersted	Gauss	Oersted	Gauss
15000	18330	-45	-508.7	-12000	-18320	50	589
12000	18320	-50	-589	-9000	-18280	55	667.2
9000	18280	-55	-667.2	-6000	-18220	60	743.4
6000	18220	-60	-743.4	-3000	-18040	65	825.8
3000	18040	-65	-825.8	-2000	-17750	70	904.1
2000	17750	-70	-904.1	-1900	-17690	75	984.4
1900	17690	-75	-984.4	-1800	-17620	80	1065
1800	17620	-80	-1065	-1700	-17530	85	1141
1700	17530	-85	-1141	-1600	-17400	90	1219
1600	17400	-90	-1219	-1500	-17240	95	1299
1500	17240	-95	-1299	-1400	-17030	100	1380
1400	17030	-100	-1380	-1300	-16750	200	2963
1300	16750	-200	-2963	-1200	-16340	300	4535
1200	16340	-300	-4535	-1100	-15700	400	6102
1100	15700	-400	-6102	-1000	-14800	500	7663
1000	14800	-500	-7663	-900	-13700	600	9195
900	13700	-600	-9195	-800	-12440	700	10710
800	12440	-700	-10710	-700	-11050	800	12140
700	11050	-800	-12140	-600	-9580	900	13460
600	9580	-900	-13460	-500	-8065	1000	14620
500	8065	-1000	-14620	-400	-6514	1100	15570
400	6514	-1100	-15570	-300	-4940	1200	16250
300	4940	-1200	-16250	-200	-3361	1300	16680
200	3361	-1300	-16680	-100	-1777	1400	16980
100	1777	-1400	-16980	-10	-352.2	1500	17200
10	352.2	-1500	-17200	-5	-273.9	3000	18050
5	273.9	-3000	-18050	0	-189.5	4500	18190
0	189.5	-4500	-18190	5	-121.5	6000	18250
-5	121.5	-6000	-18250	10	-41.19	7500	18300
-10	41.19	-7500	-18300	15	32.95	9000	18320
-15	-32.95	-9000	-18320	20	113.3	10500	18350
-20	-113.3	-10500	-18350	25	191.5	12000	18350
-25	-191.5	-12000	-18350	30	269.8	13500	18330
-30	-269.8	-13500	-18330	35	348	15000	18330
-35	-348	-15000	-18330	40	428.4		
-40	-428.4	-15000	-18330	45	508.7		

Table 19 F82H 鋼 IEA ヒート標準熱処理材磁性測定結果(573K, 300C)

Oersted	Gauss	Oersted	Gauss	Oersted	Gauss	Oersted	Gauss
15000	18070	-45	-462.2	-12000	-18060	50	532.4
12000	18060	-50	-532.4	-9000	-17990	55	602.6
9000	17990	-55	-602.6	-6000	-17930	60	676.7
6000	17930	-60	-676.7	-3000	-17730	65	748.8
3000	17730	-65	-748.8	-2000	-17360	70	819
2000	17360	-70	-819	-1900	-17290	75	889.2
1900	17290	-75	-889.2	-1800	-17190	80	963.3
1800	17190	-80	-963.3	-1700	-17080	85	1035
1700	17080	-85	-1035	-1600	-16920	90	1104
1600	16920	-90	-1104	-1500	-16730	95	1176
1500	16730	-95	-1176	-1400	-16470	100	1246
1400	16470	-100	-1246	-1300	-16100	200	2679
1300	16100	-200	-2679	-1200	-15510	300	4101
1200	15510	-300	-4101	-1100	-14700	400	5523
1100	14700	-400	-5523	-1000	-13700	500	6933
1000	13700	-500	-6933	-900	-12570	600	8331
900	12570	-600	-8331	-800	-11330	700	9711
800	11330	-700	-9711	-700	-10020	800	11050
700	10020	-800	-11050	-600	-8664	900	12330
600	8664	-900	-12330	-500	-7280	1000	13500
500	7280	-1000	-13500	-400	-5885	1100	14540
400	5885	-1100	-14540	-300	-4464	1200	15400
300	4464	-1200	-15400	-200	-3038	1300	16020
200	3038	-1300	-16020	-100	-1603	1400	16420
100	1603	-1400	-16420	-10	-315.9	1500	16690
10	315.9	-1500	-16690	-5	-245.7	3000	17740
5	245.7	-3000	-17740	0	-169.7	4500	17910
0	169.7	-4500	-17910	5	-105.3	6000	17980
-5	105.3	-6000	-17980	10	-35.1	7500	18020
-10	35.1	-7500	-18020	15	35.1	9000	18040
-15	-35.1	-9000	-18040	20	105.3	10500	18070
-20	-105.3	-10500	-18070	25	175.5	12000	18080
-25	-175.5	-12000	-18080	30	245.7	13500	18070
-30	-245.7	-13500	-18070	35	315.9	15000	18070
-35	-315.9	-15000	-18070	40	392		
-40	-392	-15000	-18070	45	462.2		

Table 20 F82H 鋼 IEA ヒート標準熱処理材磁性測定結果(673K, 400L)

Oersted	Gauss	Oersted	Gauss	Oersted	Gauss	Oersted	Gauss
15000	17500	-45	-537.5	-12000	-17500	50	613.7
12000	17500	-50	-613.7	-9000	-17470	55	692
9000	17470	-55	-692	-6000	-17410	60	774.3
6000	17410	-60	-774.3	-3000	-17240	65	852.6
3000	17240	-65	-852.6	-2000	-17000	70	935
2000	17000	-70	-935	-1900	-16940	75	1013
1900	16940	-75	-1013	-1800	-16880	80	1096
1800	16880	-80	-1096	-1700	-16800	85	1174
1700	16800	-85	-1174	-1600	-16710	90	1254
1600	16710	-90	-1254	-1500	-16590	95	1330
1500	16590	-95	-1330	-1400	-16420	100	1411
1400	16420	-100	-1411	-1300	-16220	200	3003
1300	16220	-200	-3003	-1200	-15920	300	4582
1200	15920	-300	-4582	-1100	-15470	400	6160
1100	15470	-400	-6160	-1000	-14730	500	7723
1000	14730	-500	-7723	-900	-13680	600	9267
900	13680	-600	-9267	-800	-12430	700	10780
800	12430	-700	-10780	-700	-11050	800	12210
700	11050	-800	-12210	-600	-9574	900	13520
600	9574	-900	-13520	-500	-8063	1000	14620
500	8063	-1000	-14620	-400	-6512	1100	15400
400	6512	-1100	-15400	-300	-4936	1200	15870
300	4936	-1200	-15870	-200	-3351	1300	16170
200	3351	-1300	-16170	-100	-1761	1400	16400
100	1761	-1400	-16400	-10	-327.4	1500	16550
10	327.4	-1500	-16550	-5	-247.1	3000	17230
5	247.1	-3000	-17230	0	-166.8	4500	17350
0	166.8	-4500	-17350	5	-96.79	6000	17410
-5	96.79	-6000	-17410	10	-18.53	7500	17450
-10	18.53	-7500	-17450	15	61.78	9000	17490
-15	-61.78	-9000	-17490	20	138	10500	17520
-20	-138	-10500	-17520	25	216.2	12000	17510
-25	-216.2	-12000	-17510	30	296.6	13500	17500
-30	-296.6	-13500	-17500	35	376.9	15000	17500
-35	-376.9	-15000	-17500	40	457.2		
-40	-457.2	-15000	-17500	45	537.5		

Table 21 F82H 鋼 IEA ヒート標準熱処理材磁性測定結果(673K, 400C)

Oersted	Gauss	Oersted	Gauss	Oersted	Gauss	Oersted	Gauss
15000	17260	-45	-468	-12000	-17260	50	538.2
12000	17260	-50	-538.2	-9000	-17210	55	612.3
9000	17210	-55	-612.3	-6000	-17130	60	684.5
6000	17130	-60	-684.5	-3000	-16930	65	754.7
3000	16930	-65	-754.7	-2000	-16620	70	830.7
2000	16620	-70	-830.7	-1900	-16560	75	900.9
1900	16560	-75	-900.9	-1800	-16470	80	971.1
1800	16470	-80	-971.1	-1700	-16380	85	1041
1700	16380	-85	-1041	-1600	-16260	90	1112
1600	16260	-90	-1112	-1500	-16110	95	1188
1500	16110	-95	-1188	-1400	-15930	100	1258
1400	15930	-100	-1258	-1300	-15660	200	2693
1300	15660	-200	-2693	-1200	-15260	300	4119
1200	15260	-300	-4119	-1100	-14610	400	5552
1100	14610	-400	-5552	-1000	-13680	500	6964
1000	13680	-500	-6964	-900	-12570	600	8366
900	12570	-600	-8366	-800	-11340	700	9747
800	11340	-700	-9747	-700	-10030	800	11090
700	10030	-800	-11090	-600	-8676	900	12360
600	8676	-900	-12360	-500	-7295	1000	13520
500	7295	-1000	-13520	-400	-5887	1100	14500
400	5887	-1100	-14500	-300	-4472	1200	15180
300	4472	-1200	-15180	-200	-3038	1300	15590
200	3038	-1300	-15590	-100	-1603	1400	15870
100	1603	-1400	-15870	-10	-310.1	1500	16070
10	310.1	-1500	-16070	-5	-239.9	3000	16920
5	239.9	-3000	-16920	0	-169.7	4500	17060
0	169.7	-4500	-17060	5	-101.4	6000	17130
-5	101.4	-6000	-17130	10	-29.25	7500	17180
-10	29.25	-7500	-17180	15	39	9000	17210
-15	-39	-9000	-17210	20	111.2	10500	17240
-20	-111.2	-10500	-17240	25	181.4	12000	17260
-25	-181.4	-12000	-17260	30	255.5	13500	17250
-30	-255.5	-13500	-17250	35	327.6	15000	17260
-35	-327.6	-15000	-17260	40	397.8		
-40	-397.8	-15000	-17260	45	468		

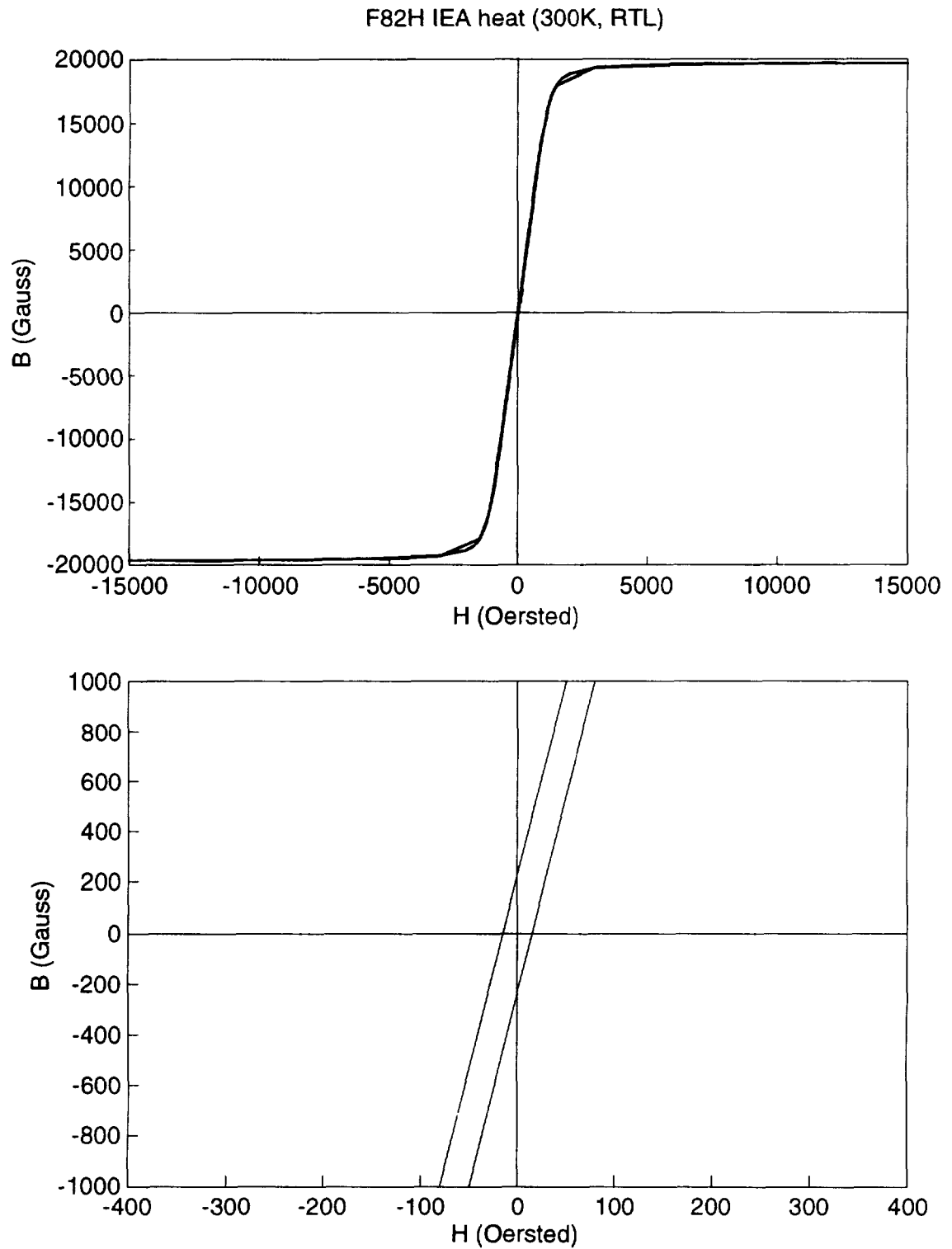


Fig. 21 Hysteresis curve of F82H IEA heat (300K, RTL)

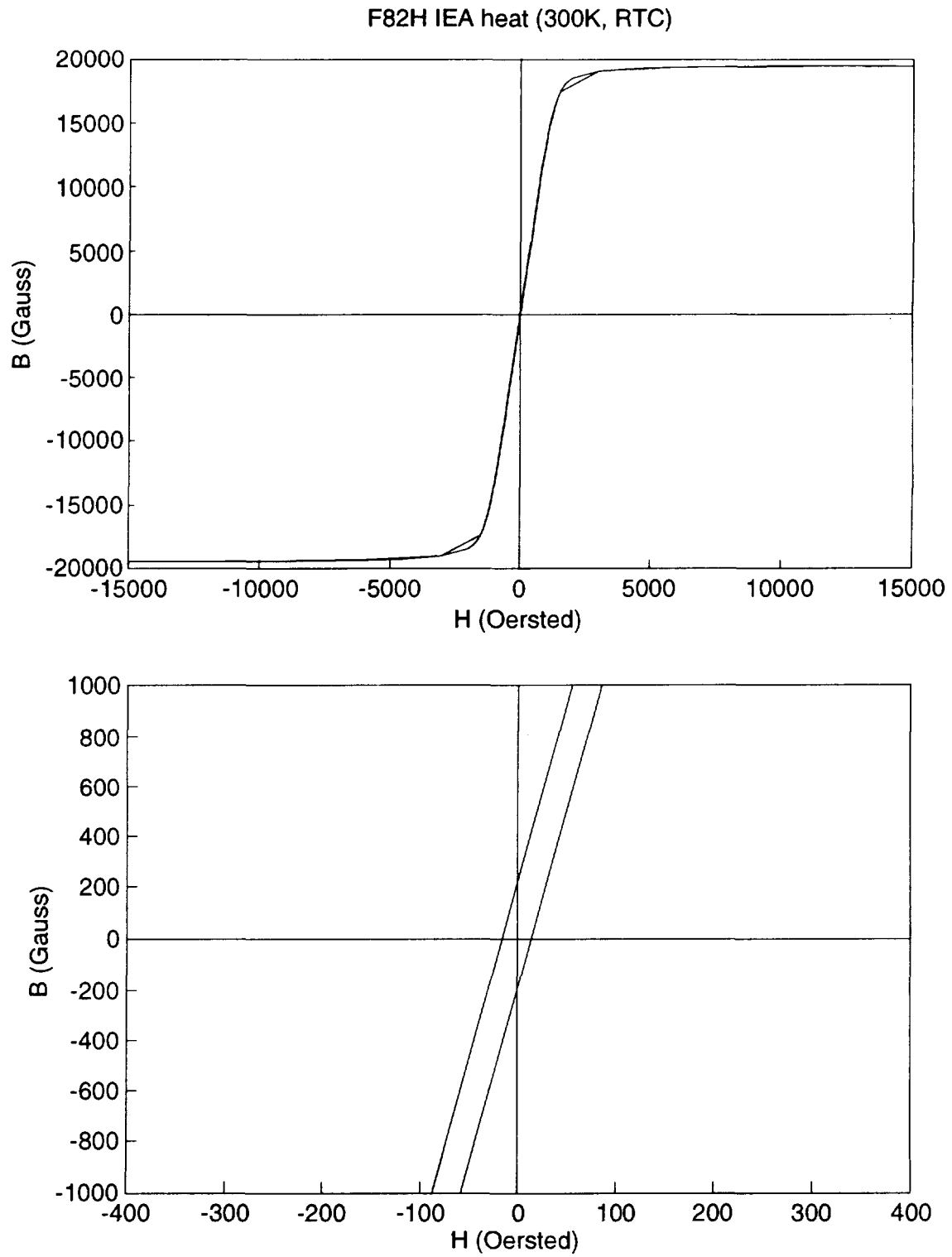


Fig. 22 Hysteresis curve of F82H IEA heat (300K, RTC)

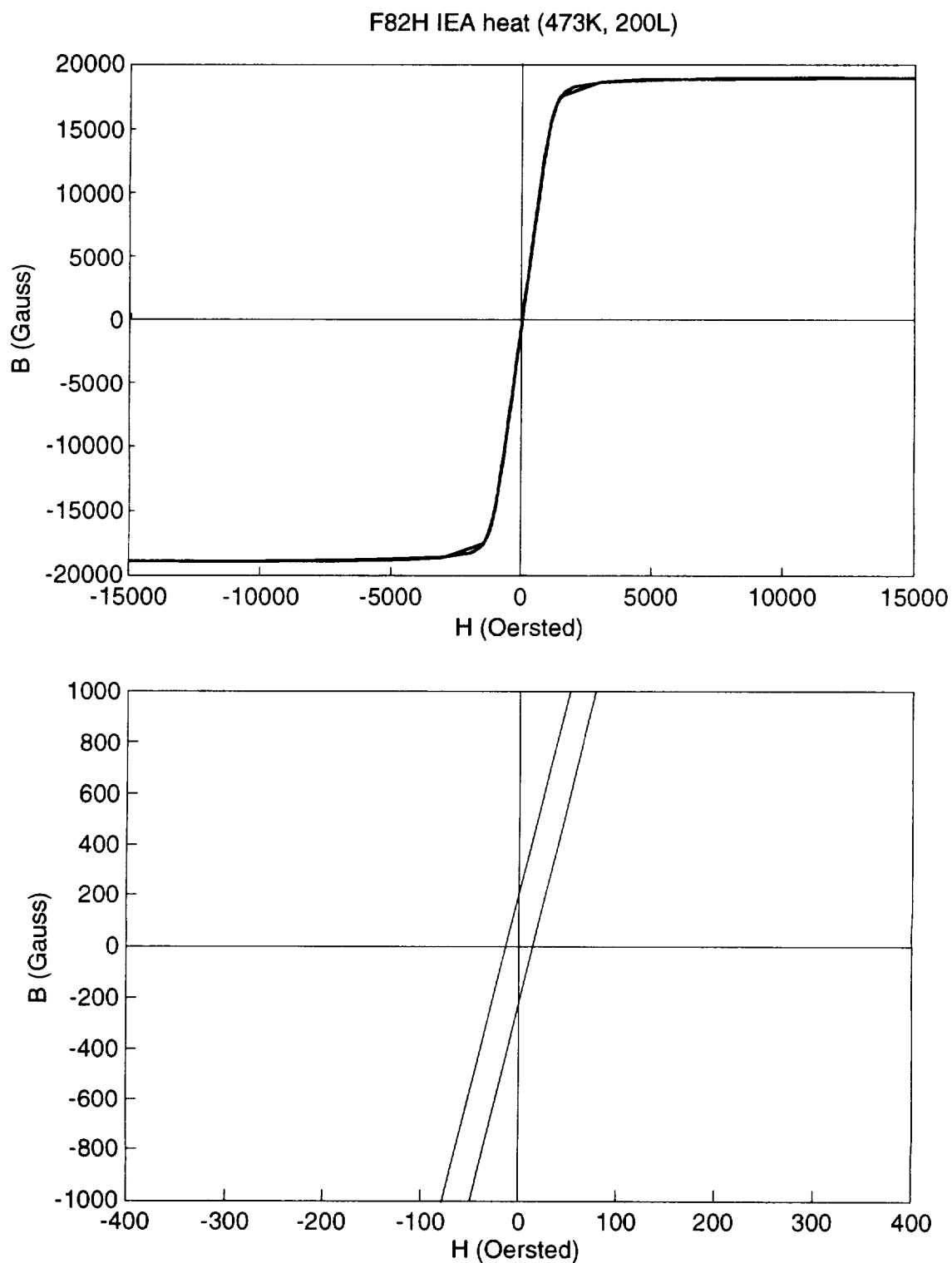


Fig. 23 Hysteresis curve of F82H IEA heat (473K, 200L)

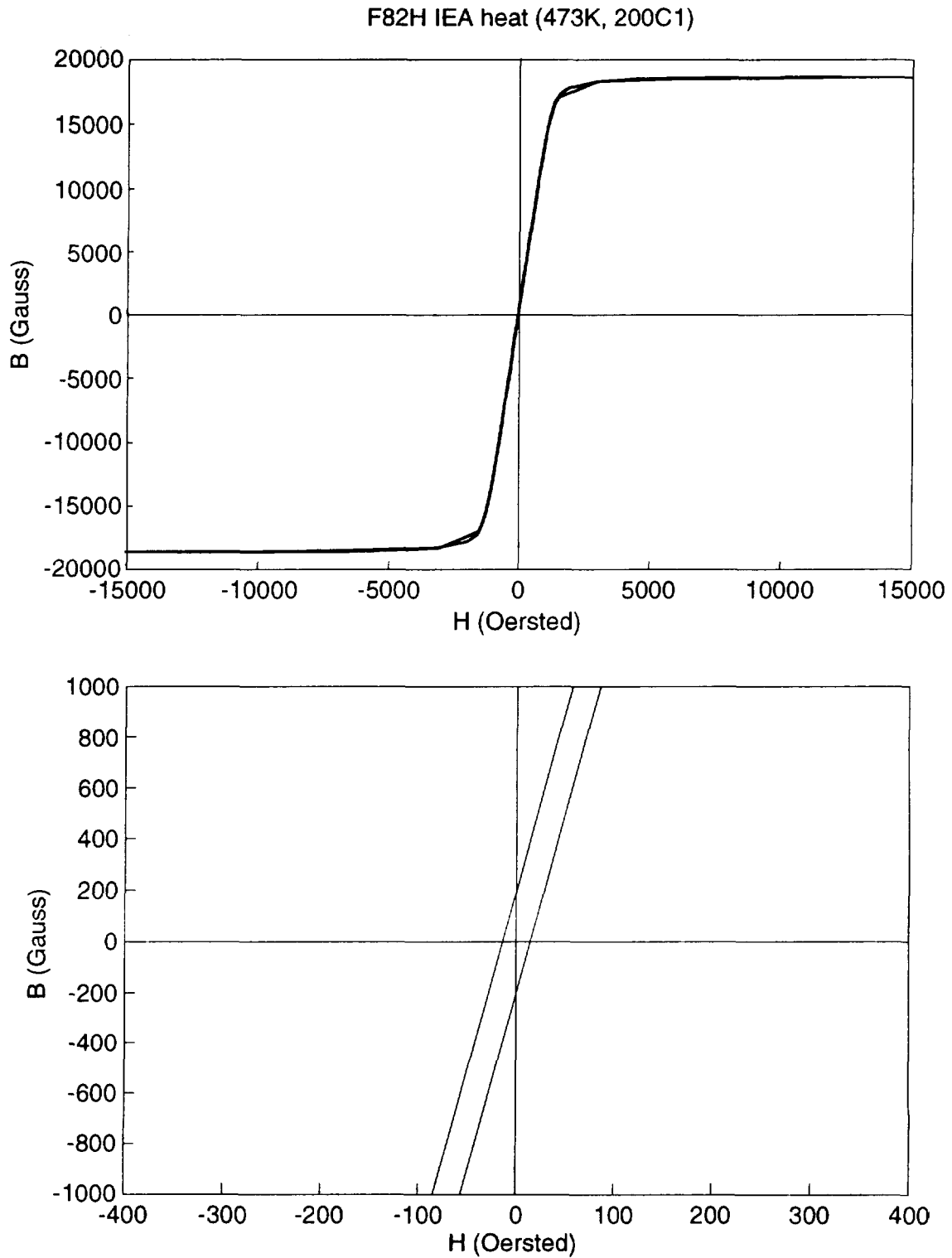


Fig. 24 Hysteresis curve of F82H IEA heat (473K, 200C1)

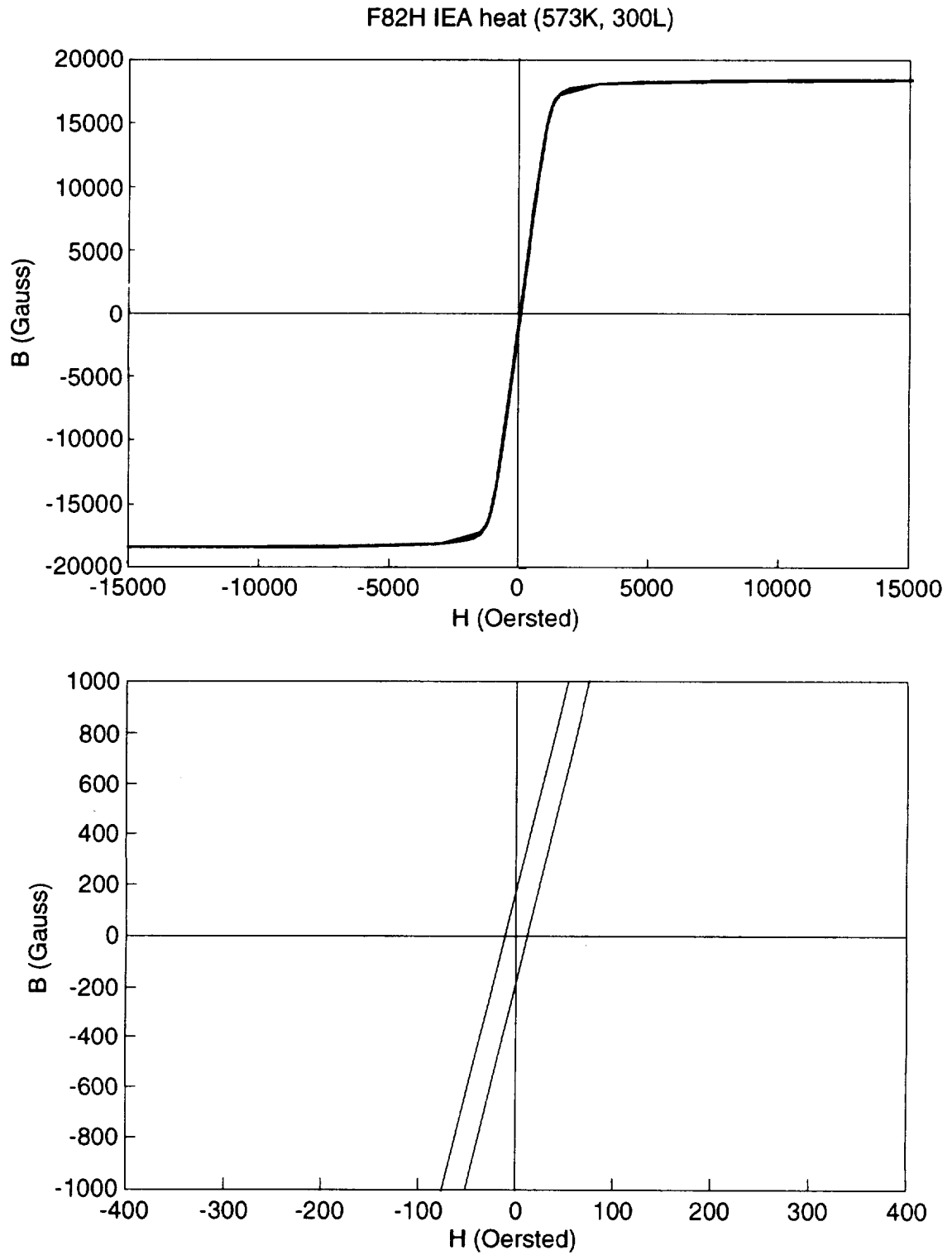


Fig. 25 Hysteresis curve of F82H IEA heat (573K, 300L)

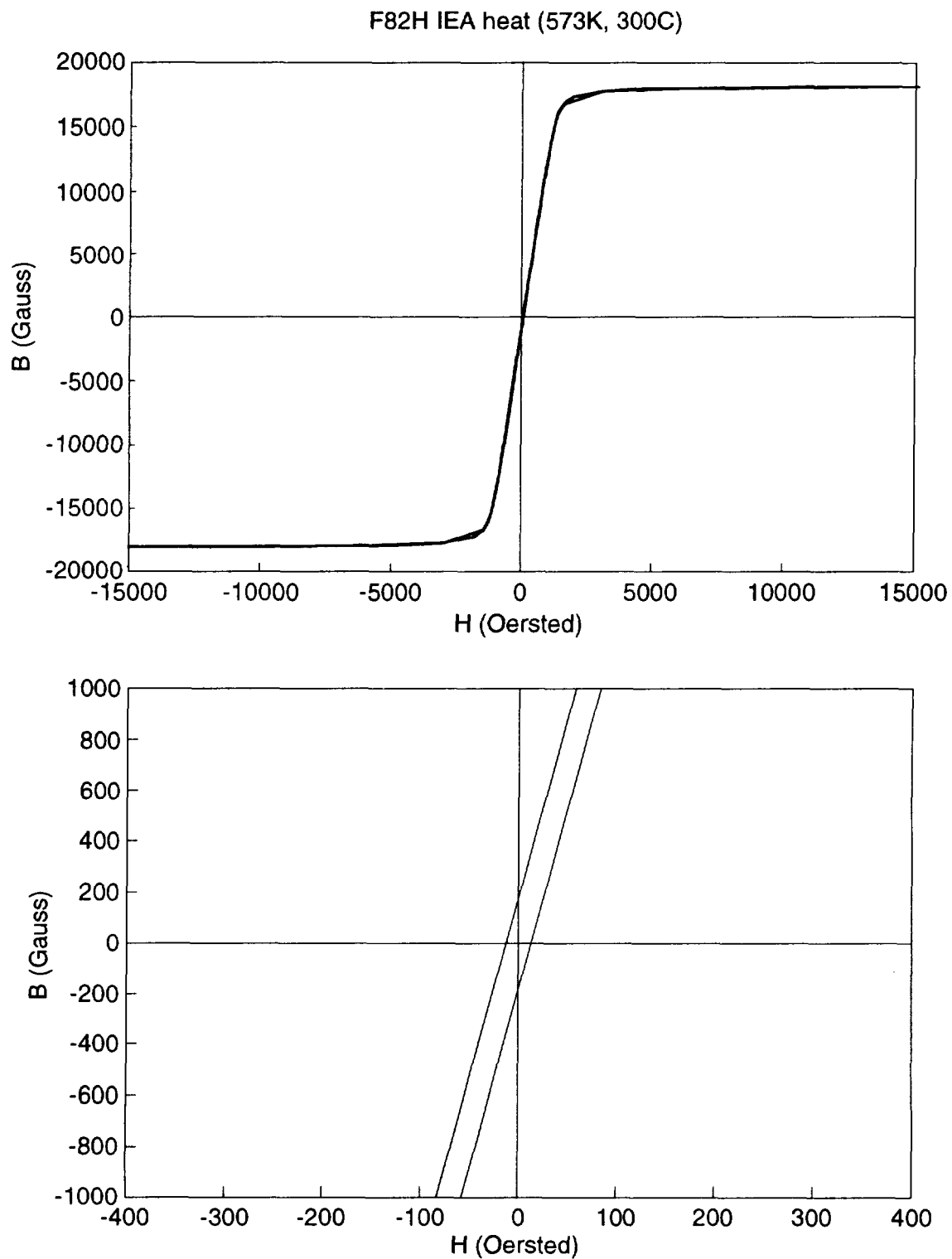


Fig. 26 Hysteresis curve of F82H IEA heat (573K, 300C)

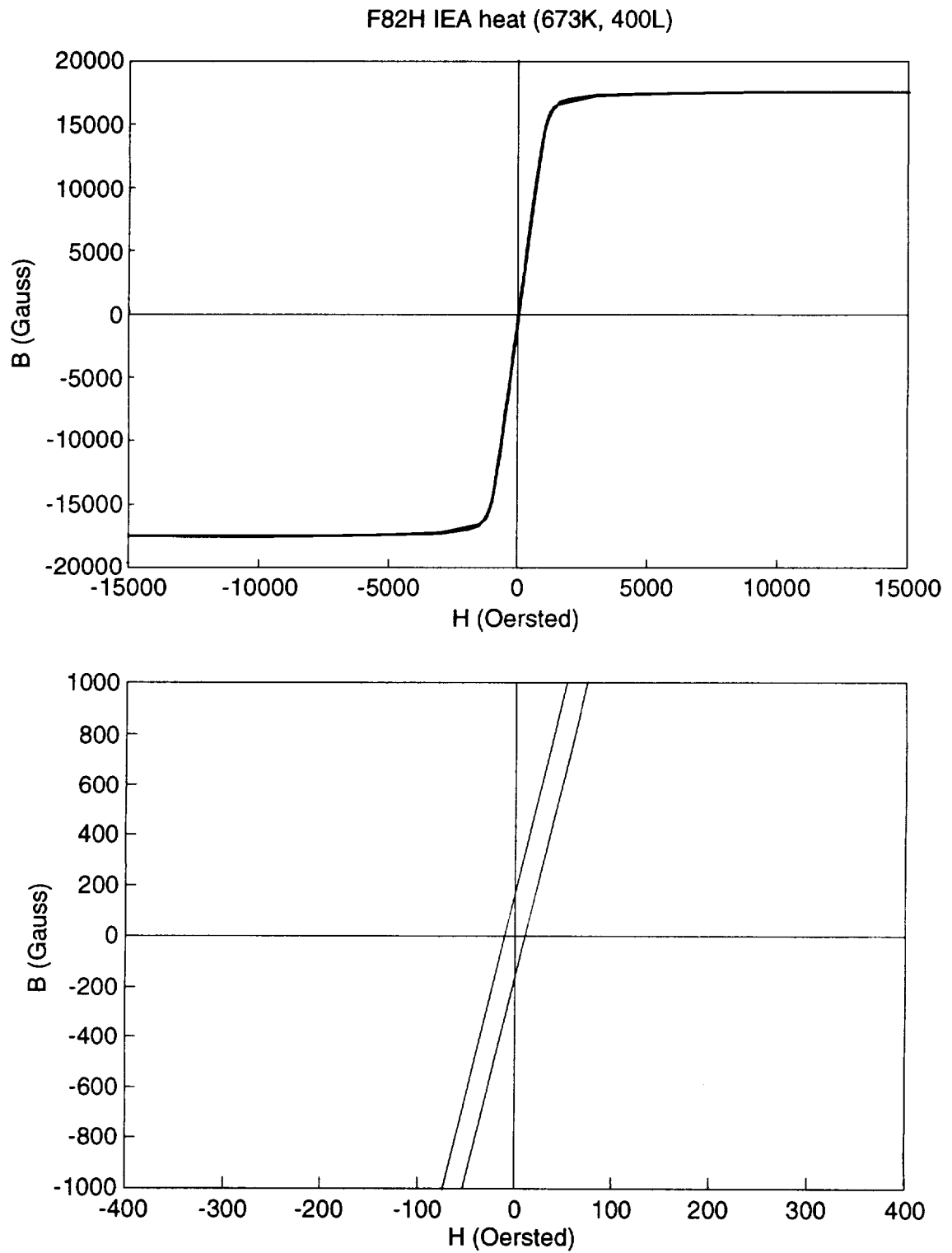


Fig. 27 Hysteresis curve of F82H IEA heat (673K, 400L)

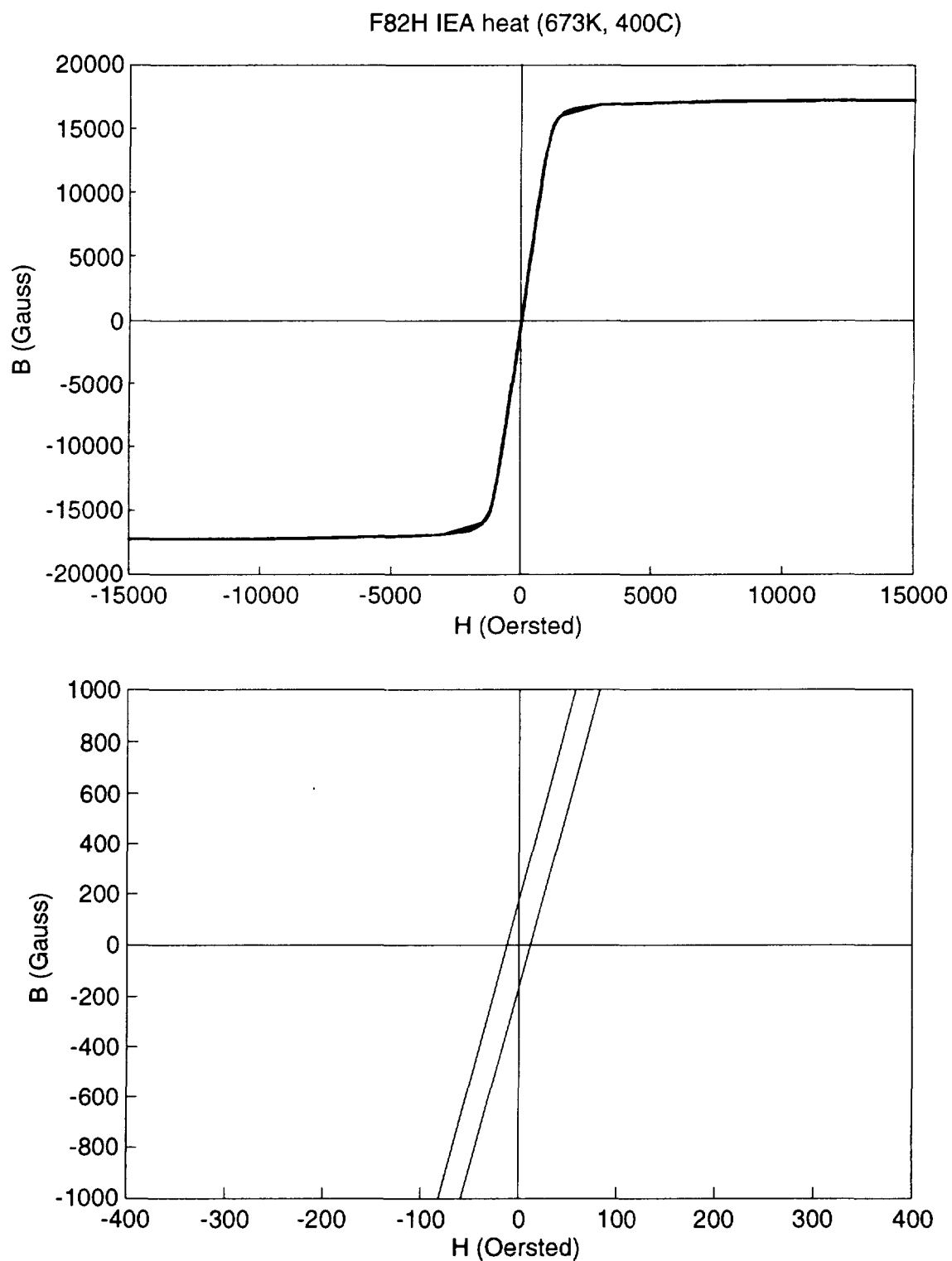


Fig. 28 Hysteresis curve of F82H IEA heat (673K, 400C)

4. 3. 機械的特性

4. 3. 1. 硬さ測定

硬さ測定の結果を Table 22 に示す。測定結果よりビッカース硬さはおよそ Hv213～Hv222 の範囲であり、平均的な硬さは Hv217 程度である。25mm 材で若干硬さが低めではあるが、従来材料の硬さ(Hv220)とほぼ同程度であり、問題となるほどではない。

Table 22 Results of Vickers' hardness measurement of F82H IEA heat

Roll No.	Plate ID	Thickness (mm)	Hardness: HV10			
			1	2	3	Ave.
RB801-5	5-14	7.5	216	222	220	219
KG819-2	2W-23	15	219	215	219	218
KG819-2	42W-18	25	213	218	214	215

4. 3. 2. 高温引張試験

高温引張試験の結果を Table 23 および Fig. 29 に示す。また、Fig. 29 にはこれまでにを行った高温引張試験の結果も示してある。なお、荷重－伸び線図については付録として巻末に収録した。今回の試験結果より、IEA ヒート材の引張特性はほぼ従来材と同等の性能を有しているものと考えられる。また、今回の試験によって得られた降伏応力の結果にオリジナル材の結果を加えてアレニウスプロットしたものを Fig. 30 に示すが、この図に見られるように、この材料では、-100℃から 400℃までの温度範囲で、降伏応力は一本の直線上に乗ることがわかる。450℃以上の試験温度では降伏応力の温度依存性はそれ以下の試験温度よりも温度上昇に伴う降伏応力の低下が大きくなる。これは転位の固着力が 450℃以上で大きく低下することを示している。

伸びについては-100℃から 400℃までの温度範囲では降伏応力と同様の温度依存性を示すが、400℃以上の温度では強度が急激に低下するのに対し、伸びは急激に大きくなる。低温側で伸びが大きくなるのは、均一伸びの増加、すなわち延性の低下によりネッキングが起こりにくくなるためと考えられ、高温での伸びの増加は延性の増加によるものであると考えられる。またもう一つの延性の指標である絞りひずみは、低温では若干ではあるが低下している。

Table 23 Tensile properties of F82H IEA heat

ID	Test temp. Temp (K)	0.2% offset yield stress YS (MPa)	Ultimate tensile stress UTS (MPa)	Total elongation Et (%)	Reduction of area RA (%)	Break position (JIS)
2W-10-1	296	548	669	21.7	78	A
2W-10-2	323	534	645	20.0	79	A
2W-10-3	373	553	624	20.0	80	A
2W-10-4	473	500	579	18.7	82	A
2W-10-5	573	480	548	17.0	81	A
2W-10-6	673	458	517	16.3	81	A
2W-10-7	723	437	493	15.7	79	B
2W-10-8	773	413	463	17.7	82	A
2W-10-9	823	363	420	21.3	88	A
2W-10-10	873	296	368	25.0	90	A
2W-10-11	923	219	307	23.7	91	A
2W-10-12	973	160	243	26.3	92	A

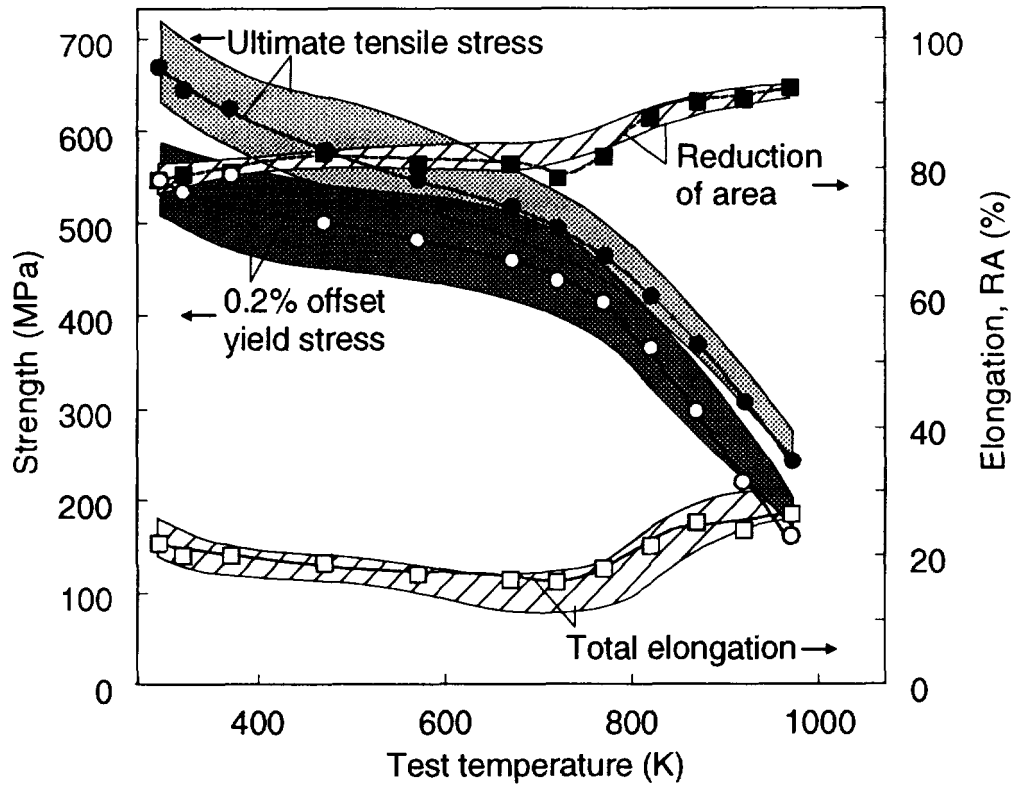


Fig. 29 Tensile properties of F82H IEA heat

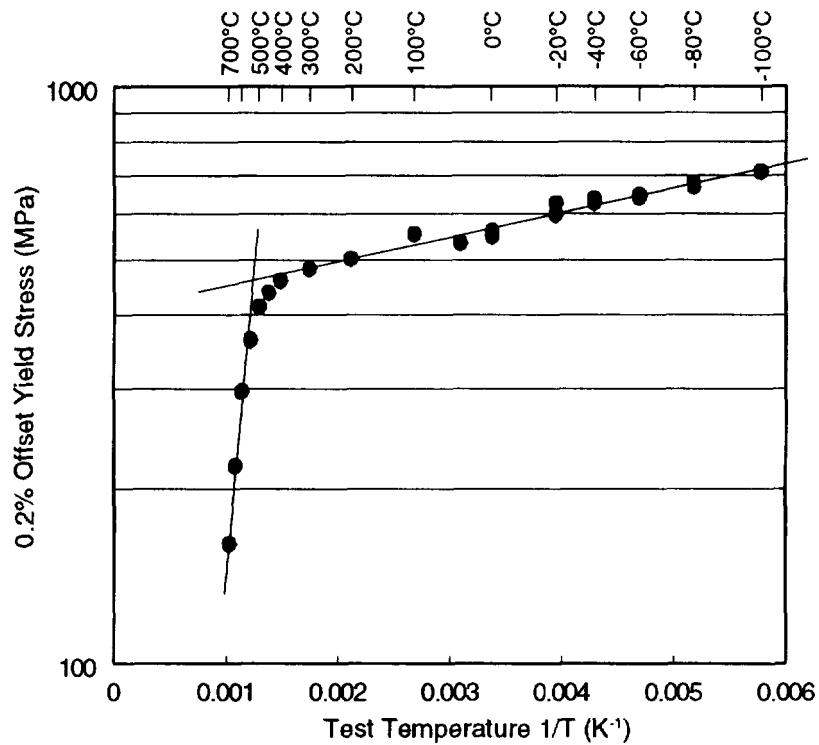


Fig. 30 Temperature dependence of yield stress of F82H

また以上の引張試験の結果および物理的特性の測定結果より、(4)式で表される熱応力因子 η は Fig. 31 のように計算される。

$$\eta = \frac{(1 - \mu)k\sigma_u}{E\alpha} \quad (4)$$

ここで、

η : 熱応力因子 (W/m)

μ : ポアソン比

k : 熱伝導率 (W/mK)

σ_u : 引張強さ (Pa)

E : ヤング率 (Pa)

α : 熱膨張係数 (1/K)

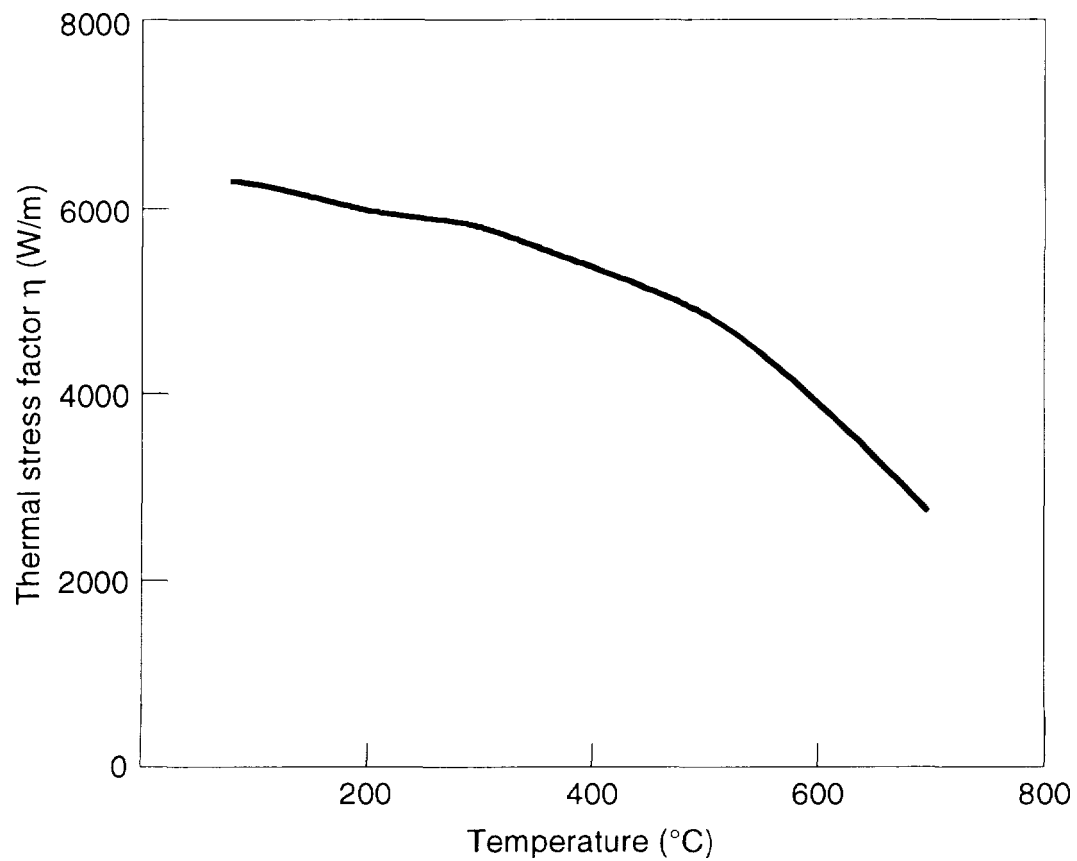


Fig. 31 Thermal stress factor of F82H IEA heat

4. 3. 3. シャルピー衝撃試験

シャルピー衝撃試験の結果を Table 24 に、遷移曲線を Fig. 32 に示す。また、一部の試験片(L1, L5, L6)についての SEM 観察結果を Photo 8～Photo 10 に示す。

Fig. 32 に示すようにシャルピー試験の結果にはばらつきが大きい、DBTT はおおよそ -50°C 程度であると考えられる。金相試験のところで述べたように、IEAヒート材の組織はオリジナル材よりも粗大化しているにもかかわらず、DBTT はほぼ同じ程度である。

Table 24 Charpy impact test results of F82H IEA heat

ID	Test temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Direction	Absorbed energy (J)	Brittle surface area (%)	DBTT (fractured area) $v\text{Tr}_{S_{50}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	DBTT (energy) $v\text{Tr}_E$ ($^{\circ}\text{C}$)
L6	-100	L	6	95	-44	-48
L3	-80		38	85		
L9	-70		58	80		
L2	-60		21	90		
L8	-55		159	50		
L5	-50		186	40		
L7	-45		9	95		
L4	-40		180	40		
L1	-20		258	0		
C12	-100	C	5	95	-39	-39
C9	-80		23	90		
C15	-70		8	95		
C8	-60		85	70		
C14	-55		43	85		
C11	-50		91	65		
C13	-45		9	95		
C10	-40		166	45		
C7	-20		237	0		

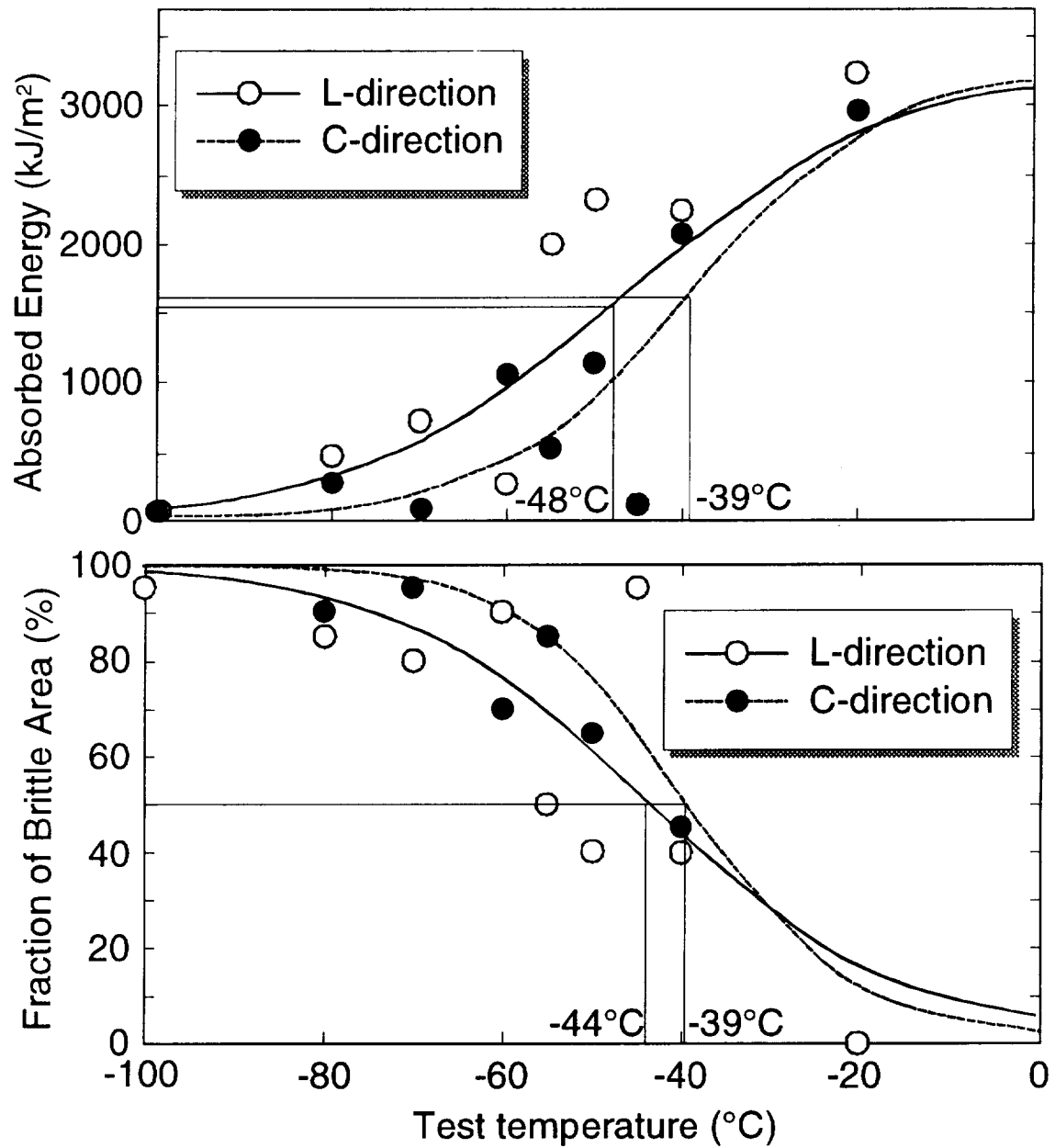
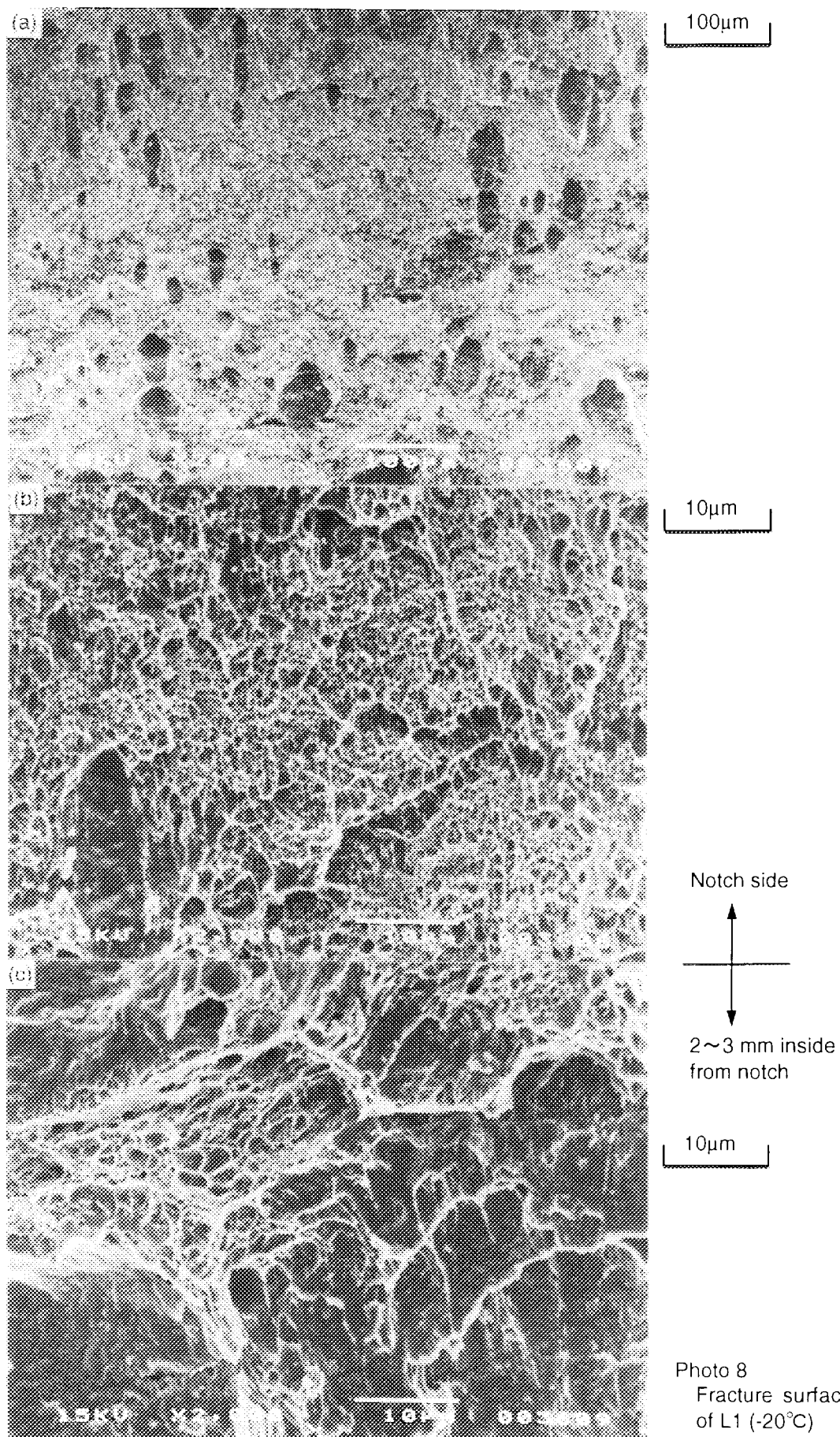
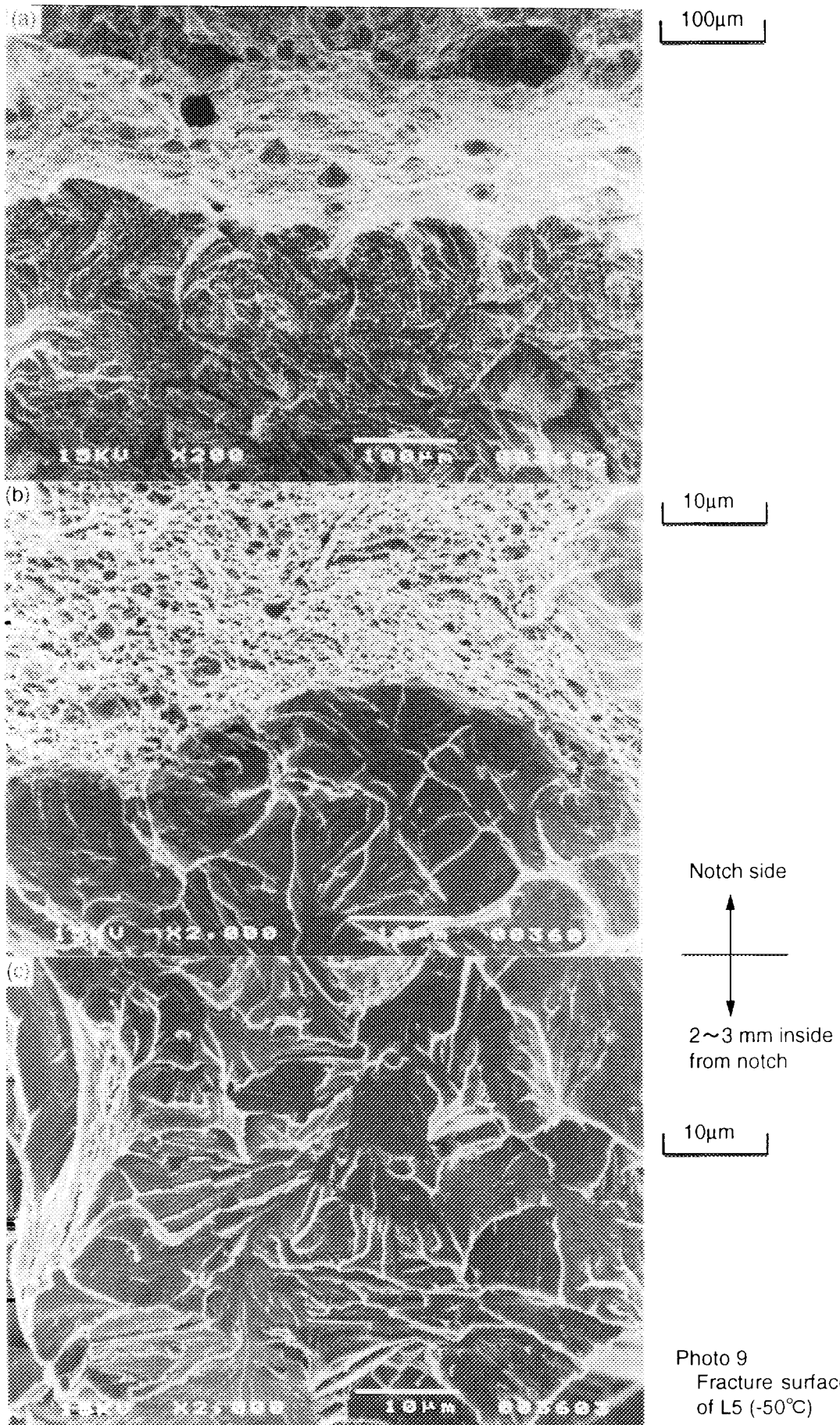
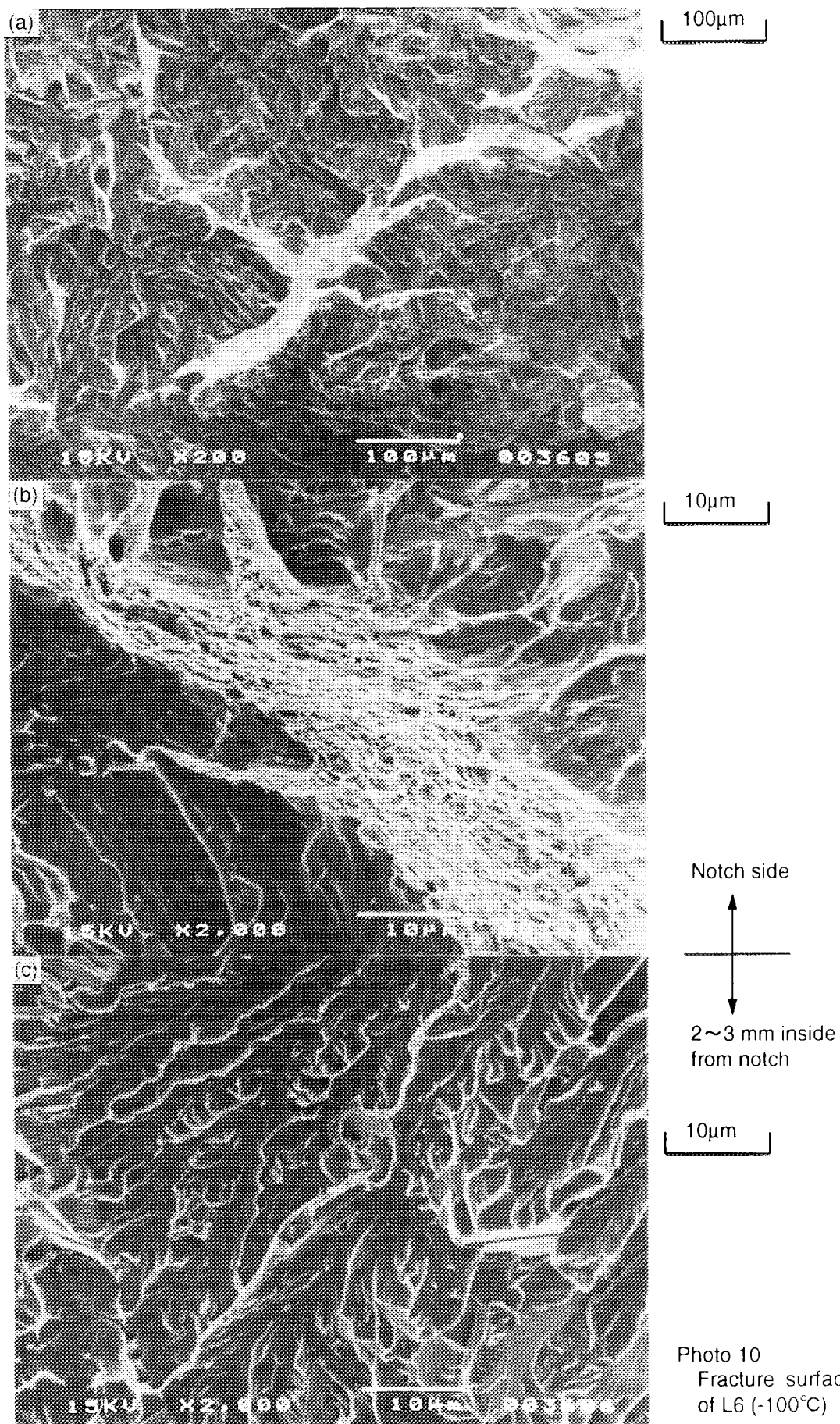


Fig. 32 Charpy impact test results of F82H IEA heat







4. 3. 4. クリープ試験

クリープ試験結果を Table 25 に示す。また、クリープ曲線およびデータを Fig. 33～Fig. 35 に示す。また前回のデータと併せた応力-破断時間曲線を Fig. 36 に示す。現在のところ試験結果は 600℃と 650℃のものが数点しか得られていないが、他の試験条件のものについても試験が行われている。

Fig. 36 に示すように、今回得られた結果から、IEA ヒート材のクリープ特性はオリジナル F82H 材とほぼ同等のクリープ特性を示すものと考えられる。そのためクリープ特性について、オリジナル F82H の結果が参考になると考えられる。Fig. 37 にオリジナル F82H について得られたクリープ破断試験について Larson-Miller パラメータで整理した試験結果を示す。

Table 25 Creep test results of F82H IEA heat

ID	Test temp. (°C)	Applied stress (MPa)	Rupture time (h)	Elongation (%)	RA (%)
2W101	600	180	401.5	36	88
2W102	650	120	239.0	28	90
2W103	600	160	1581.0	29	88
2W106	650	100	929.5	22	87
2W105	600	150	2862.5	18	85
2W104	650	75	4417.5	27	87

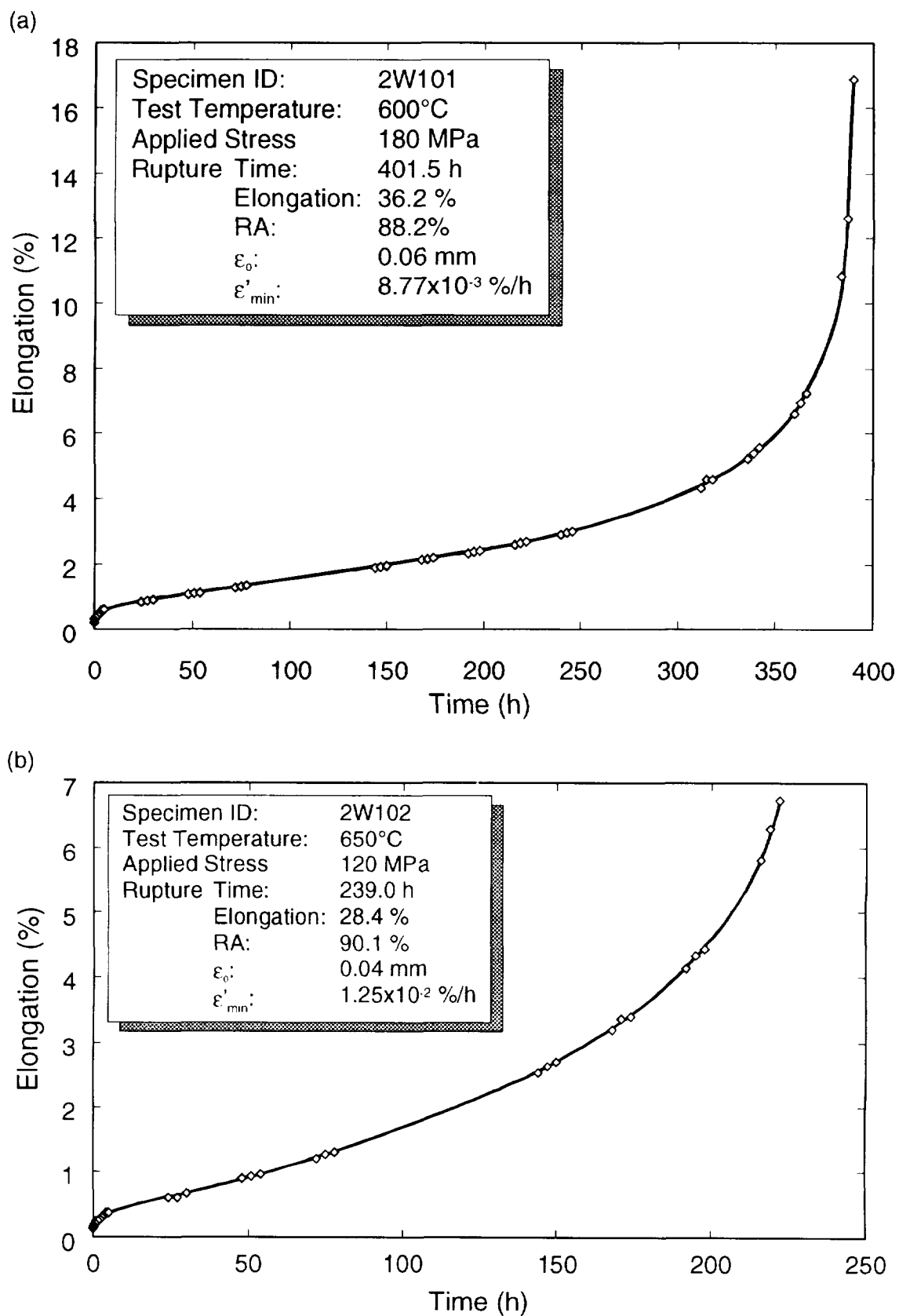


Fig. 33 Creep rupture test result of F82H IEA heat

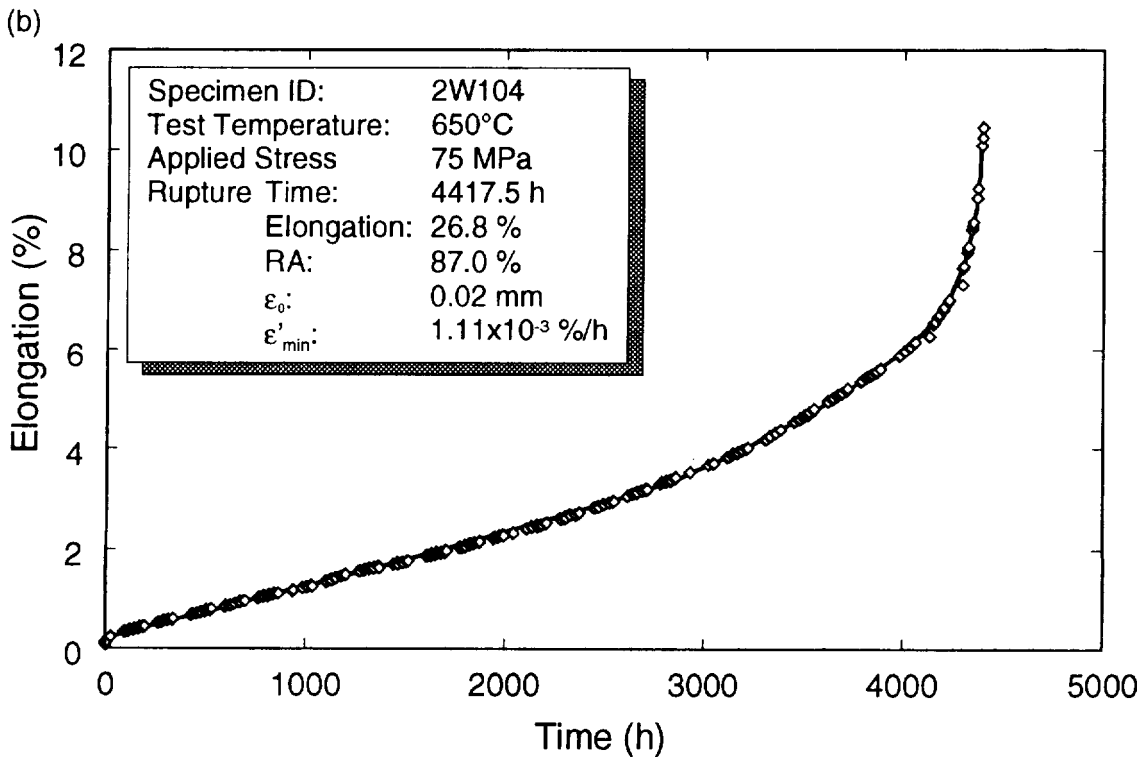
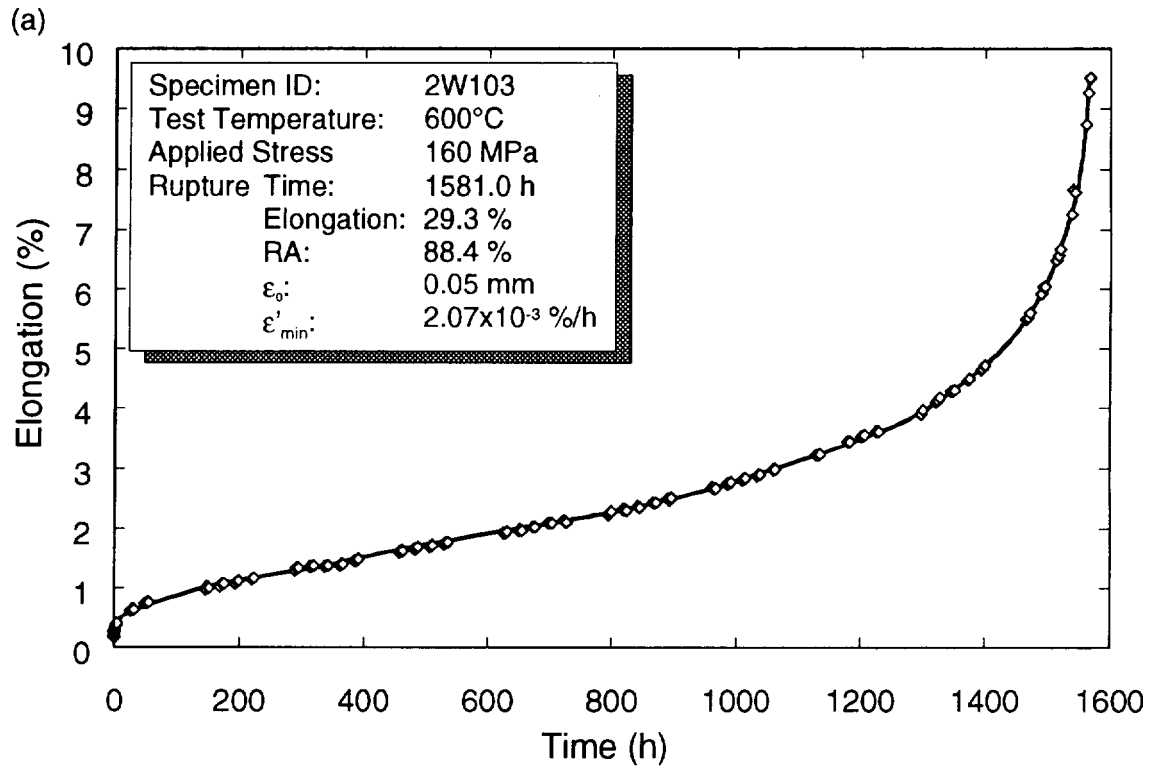


Fig. 34 Creep rupture test result of F82H IEA heat

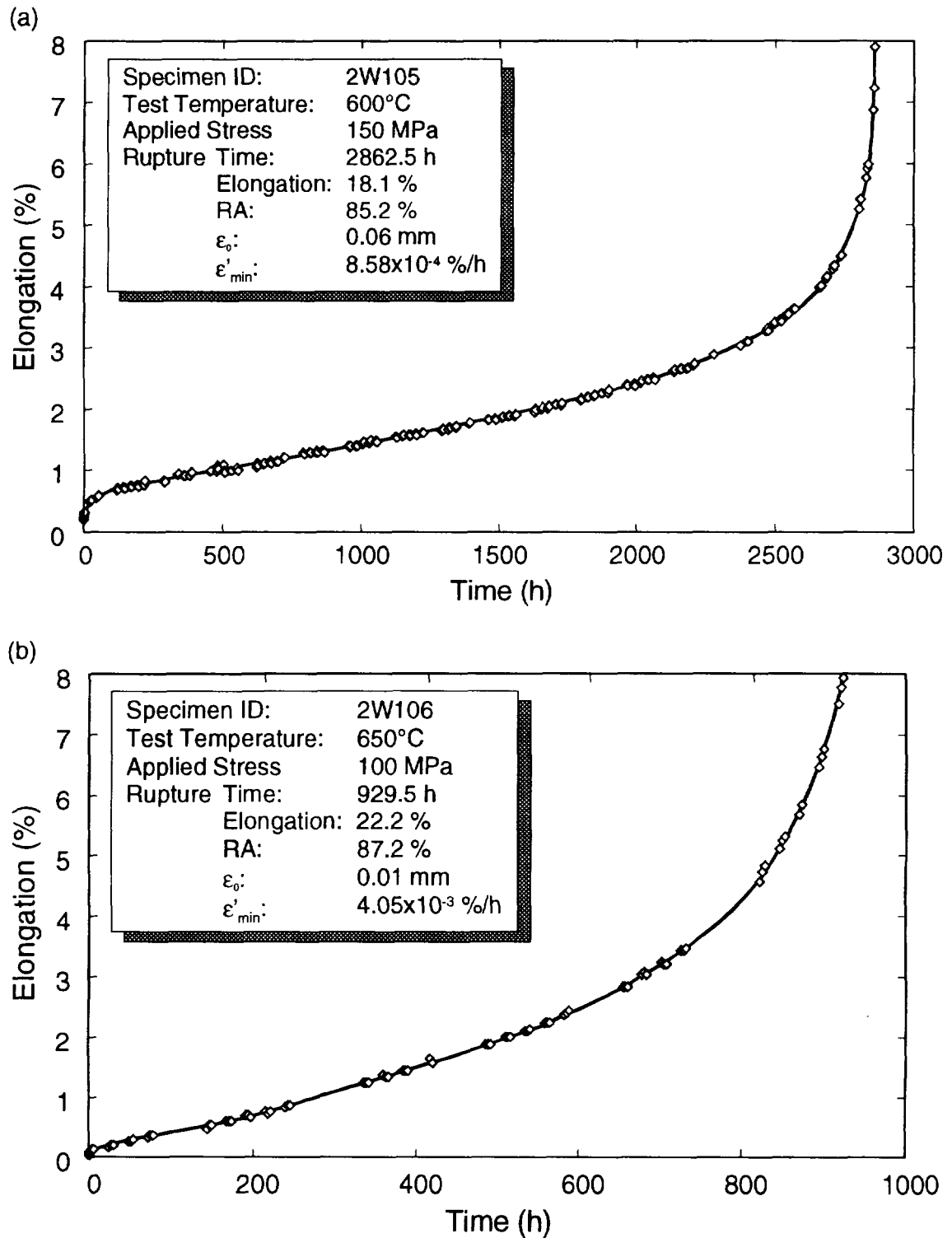


Fig. 35 Creep rupture test result of F82H IEA heat

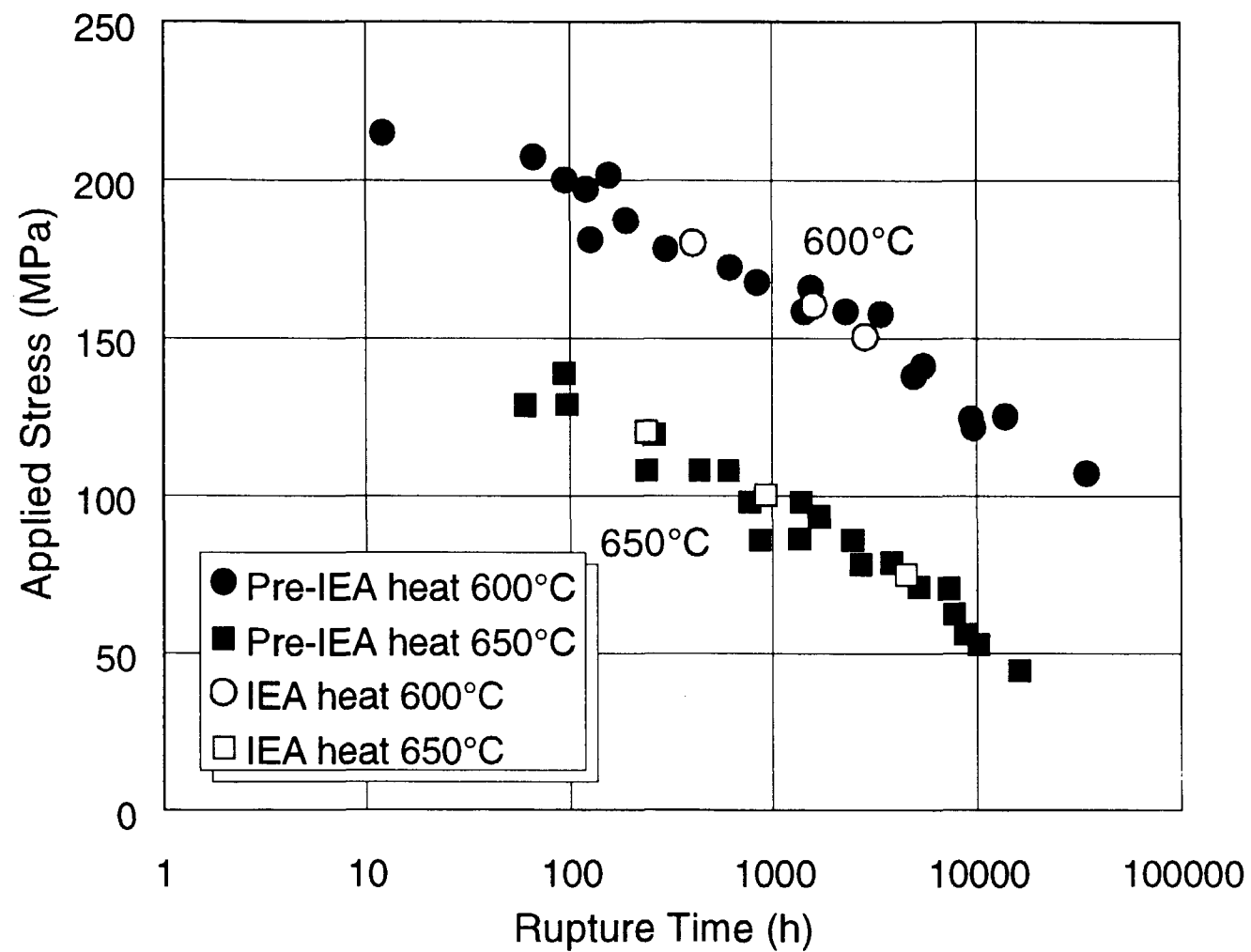


Fig. 36 Creep rupture test result of F82H

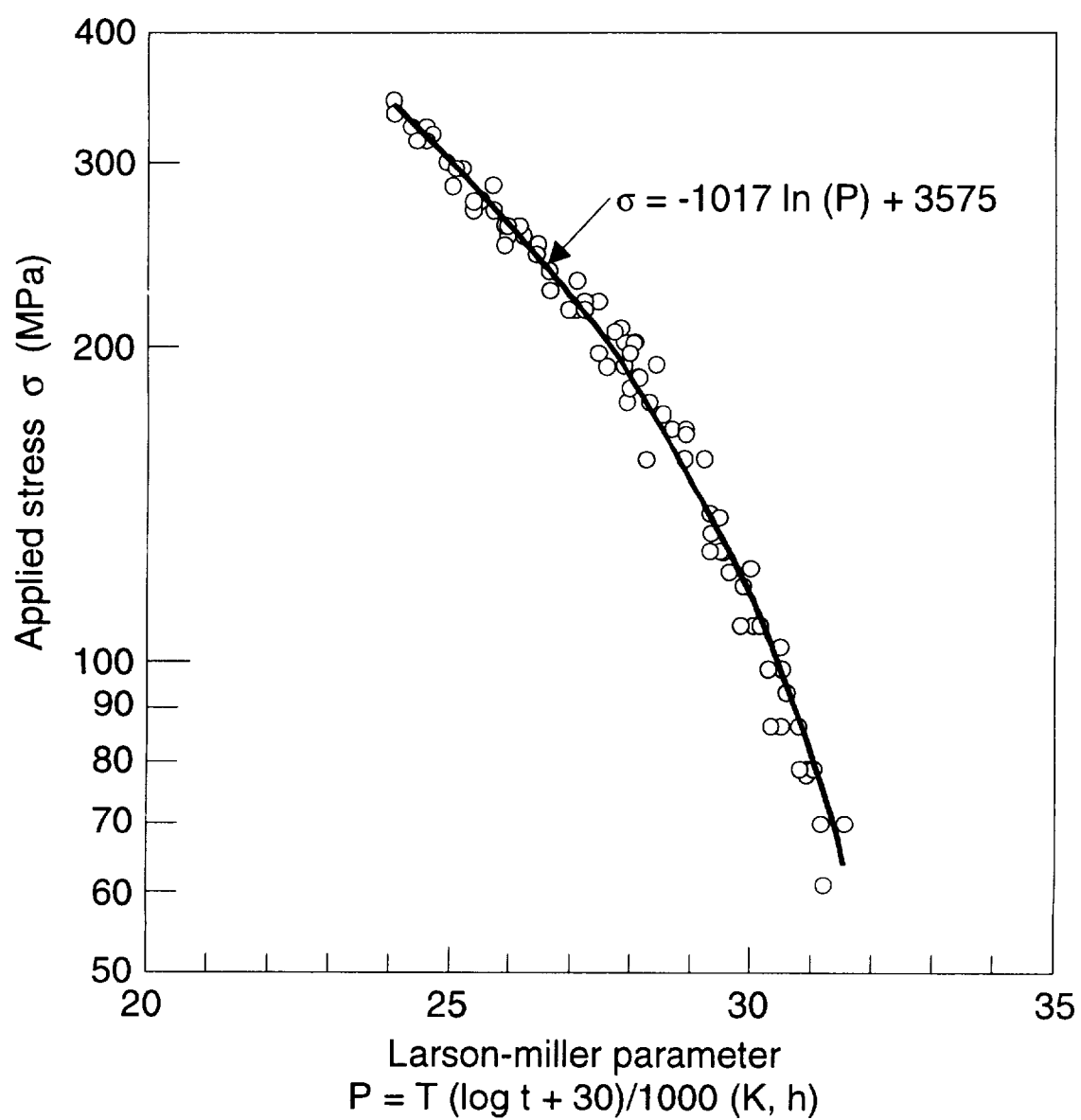


Fig. 37 Creep rupture test results of pre-IEA F82H

4. 3. 5. 低サイクル疲労特性

低サイクル疲労試験の結果を Table 26 に示す。また、ヒステリシスループを付録として巻末に収録した。全歪範囲と破損繰返し数の関係を Fig. 38 に、応力振幅と繰返し数の関係を Fig. 39 に、また非弾性歪範囲と繰返し数の関係を Fig. 40 に示す。

今回の試験では、室温での 2 条件のみであり、試験数量が限られているが、同様の試験条件で試験を行った高速炉用フェライト鋼 MANET I の試験結果[5]と比較すると、Fig. 41 のようになり、両者はほぼ同じような結果を示しており、今回行った低サイクル疲労試験の結果について、妥当な結果が得られているものと考えられる。

Table 26 Low cycle fatigue test results of F82H IEA heat

ID	Gauge dia. (mm)	Test temp. (°C)	Total strain range (%)	Cycles to rupture (rupture position)	# of cycle	Elastic strain range (%)	Plastic strain range (%)	Stress range (MPa)	Peak tensile stress (MPa)	Peak compressive stress (MPa)
9	φ7	RT	1.0	3028 (B)	1	0.54	0.46	1147	573	-574
					10	0.57	0.43	1115	559	-556
					20	0.56	0.44	1086	544	-542
					30	0.55	0.45	1064	535	-529
					50	0.54	0.46	1037	521	-516
					100	0.53	0.47	996	499	-497
					500	0.50	0.50	917	462	-455
					1000	0.50	0.50	886	443	-443
7	φ7	RT	0.6	10504 (B)	1	0.45	0.15	1068	533	-535
					10	0.46	0.14	1039	519	-519
					20	0.46	0.14	1027	510	-517
					30	0.46	0.14	1020	506	-515
					50	0.45	0.15	1005	498	-507
					100	0.44	0.16	980	487	-493
					500	0.42	0.18	912	462	-451
					1000	0.40	0.20	889	449	-440
					7000	0.37	0.23	821	415	-407
					9700	0.36	0.24	805	400	-405

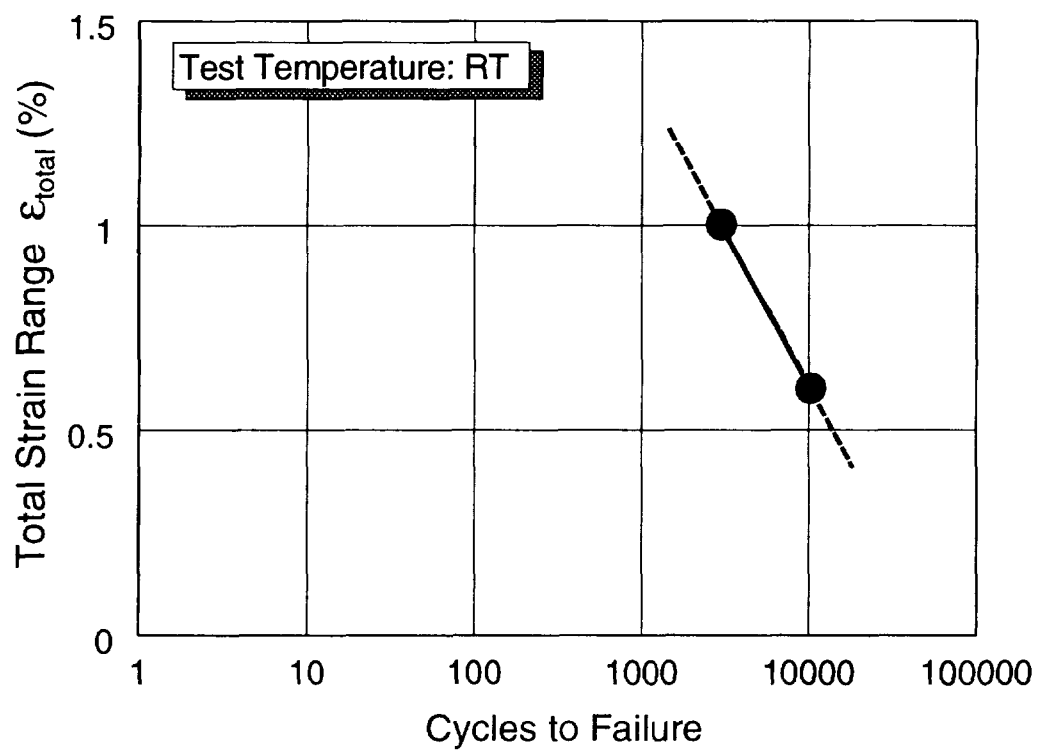


Fig. 38 Low cycle fatigue test results of F82H IEA heat

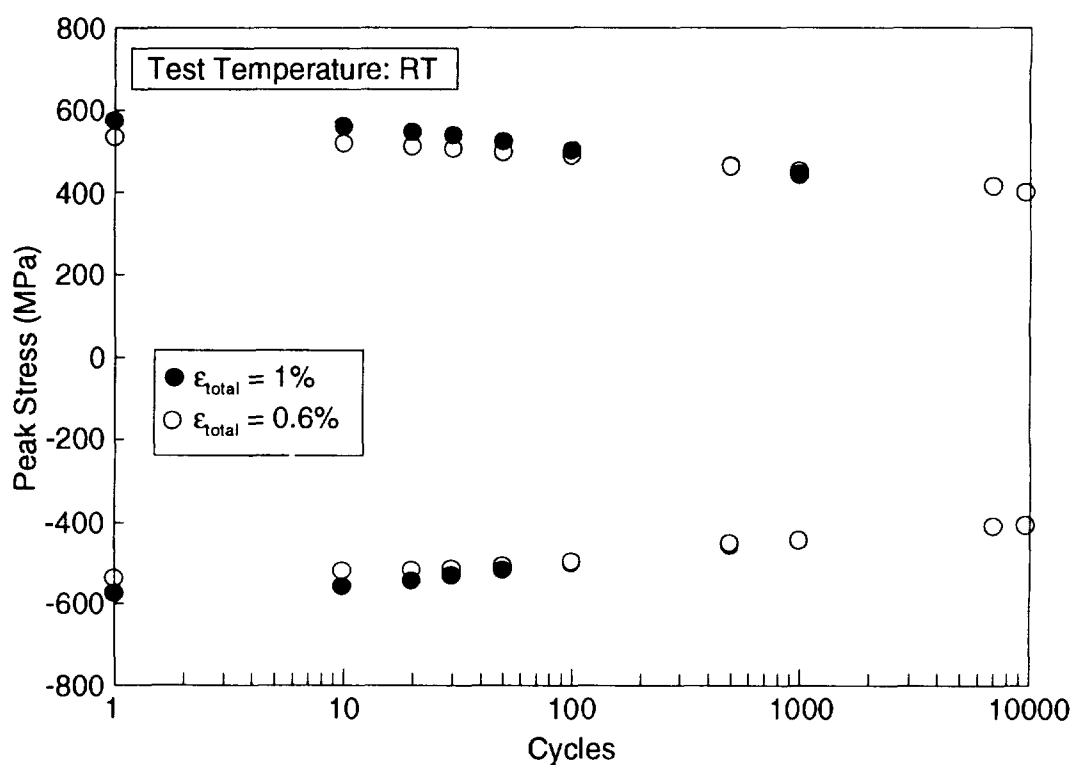


Fig. 39 Low cycle fatigue test results of F82H IEA heat

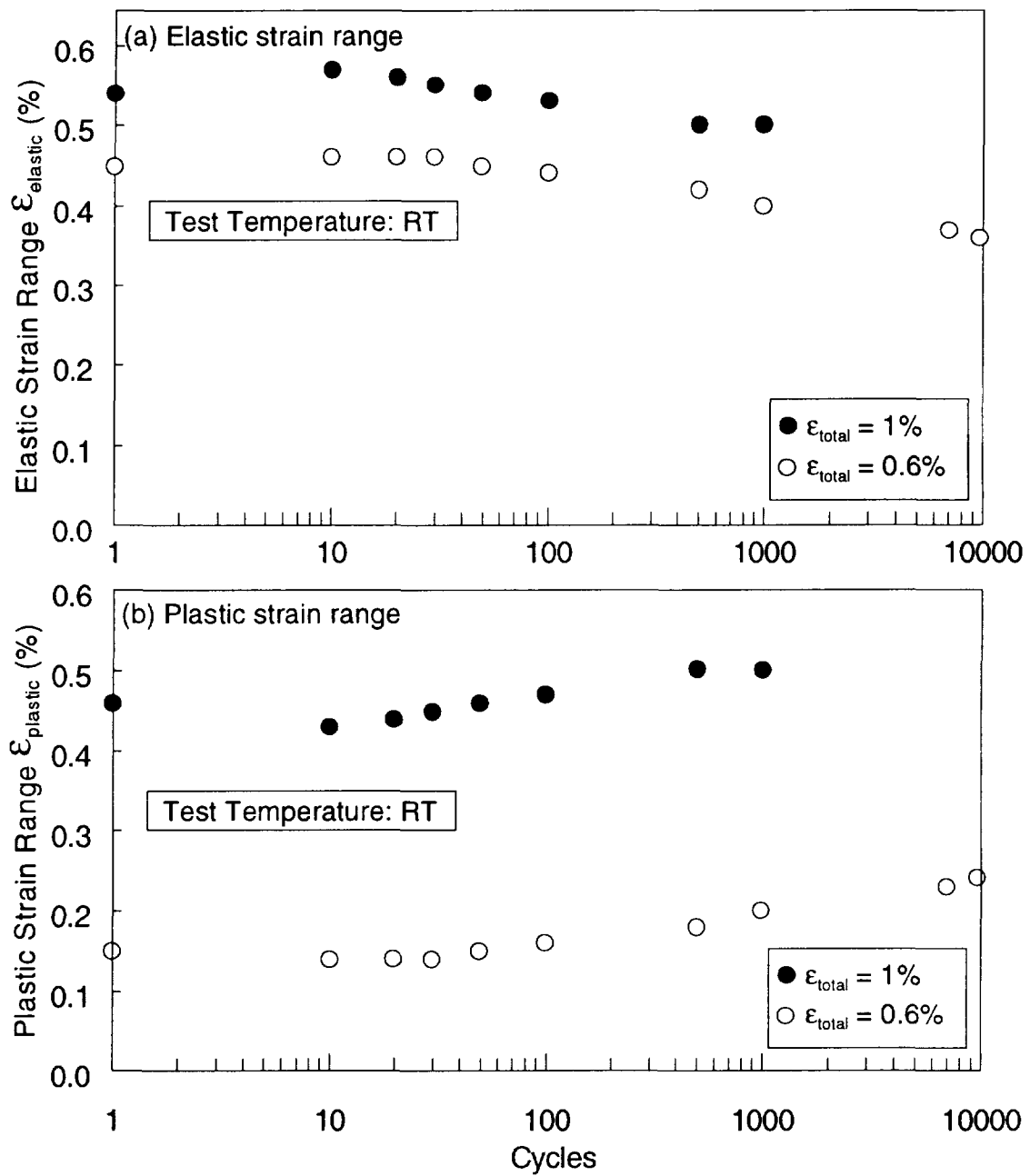


Fig. 40 Low cycle fatigue test results of F82H IEA heat

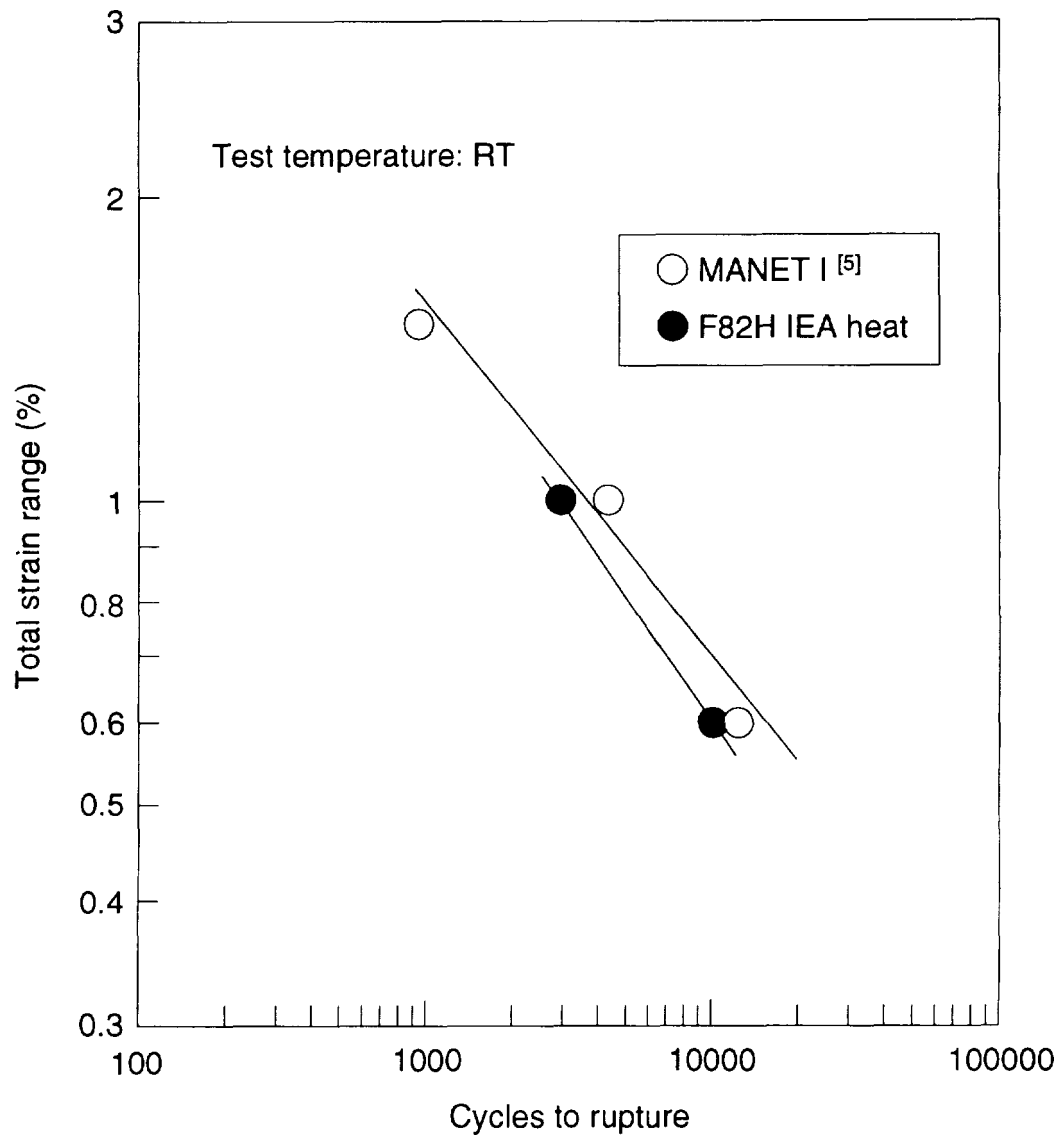


Fig. 41 Low cycle fatigue test results of F82H IEA heat and MANET I at room temperature.

4. 4. 真空特性

Fig. 42 に F82H 鋼について測定した TDS スペクトルの例を示す。主に放出される気体は H_2 、 H_2O 、 CO 、 CO_2 、 CH_4 等である。またそれぞれの気体について整理したものを Fig. 43 から Fig. 47 に示す。また Fig. 43～Fig. 47 には比較として SUS316L 鋼について測定した結果も示している。これらの結果より、F82H 鋼における各気体の脱離開始温度は、 H_2O が約 400K、 H_2 、 CO 、および CO_2 が約 550K であった。また各気体のスペクトルにはそれぞれ2つから3つの脱離ピークが認められる。各脱離ピークの温度を Table 27 に示す。また各気体の脱離量をヒーター温度 1000°Cまで積算した値を総脱離量として Table 28 に示す。

Table 27 Temperatures of desorption peak

Gas	Desorption peak	Peak temperature (K)	
		F82H	316L
H_2	1st peak	~650	~600
	2nd peak	~720	~800
	3rd peak	~800	-
H_2O	1st peak	~460	-
	2nd peak	~630	-
CO	1st peak	~640	~1120
	2nd peak	~800	-
CO_2	1st peak	~610	~580
	2nd peak	~660	~800
CH_4	1st peak	~530	~580
	2nd peak	~620	~1000
	3rd peak	~690	-

Table 28 Total amount of desorption gases

Gas	F82H		316L	
	Amount of desorption (10^{20} molec./ m^2)	Flux in total desorption (%)	Amount of desorption (10^{20} molec./ m^2)	Flux in total desorption (%)
H_2	2.4	16	14.5	88
H_2O	5.0	36	0.97	6
CO	5.4	38	0.62	4
CO_2	1.2	8	0.34	2
CH_4	0.14	1	0.086	0.5
Total	14.03	100	16.5	100

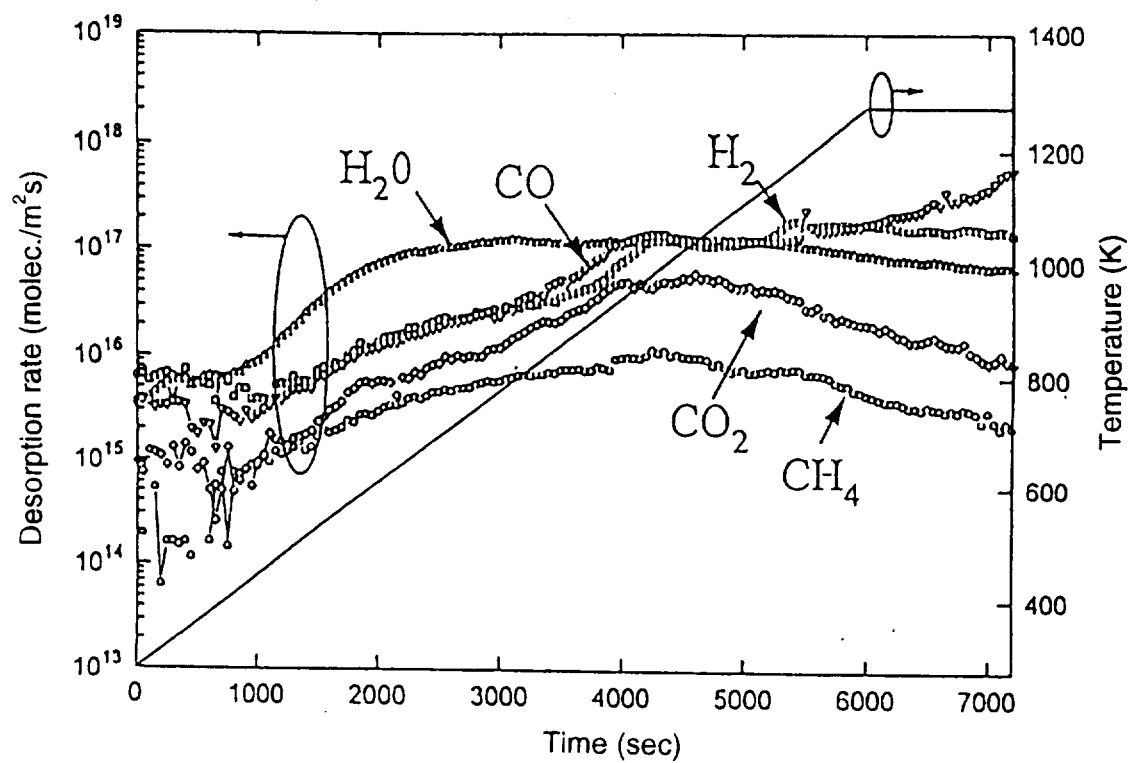


Fig. 42 TDS spectrum of F82H IEA heat ($\beta = 0.17 \text{ K/s}$)

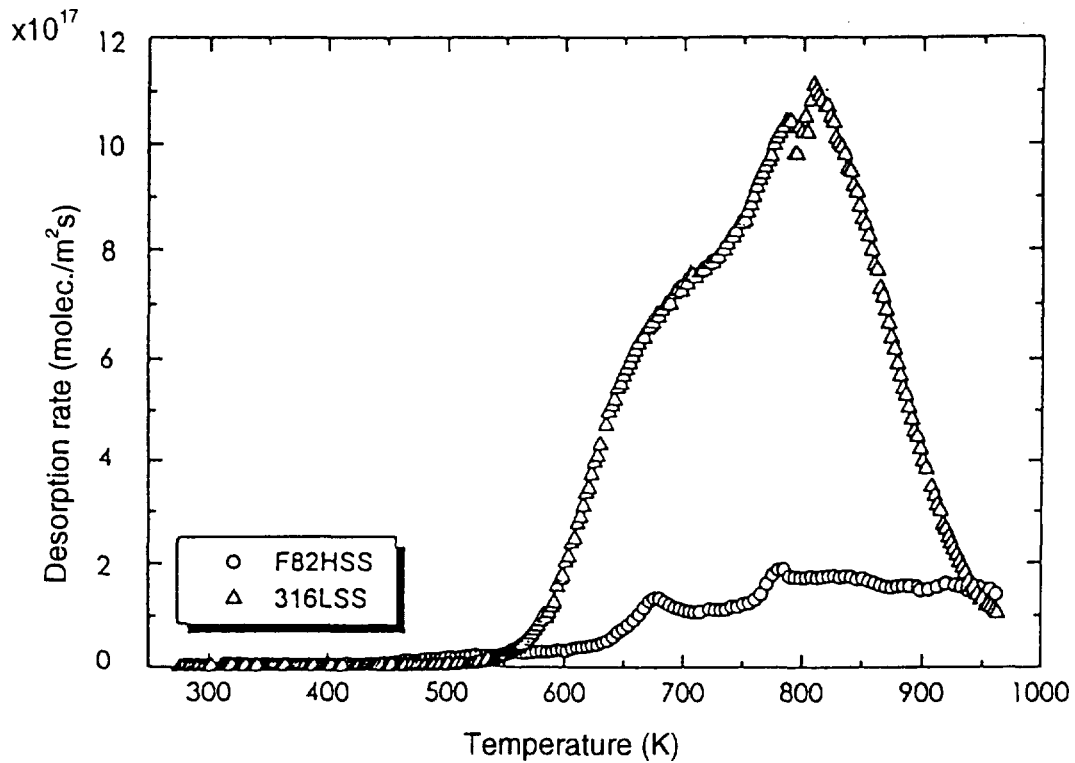


Fig. 43 TDS spectrum of H_2 gas from F82H IEA heat ($\beta = 0.17 \text{ K/s}$)

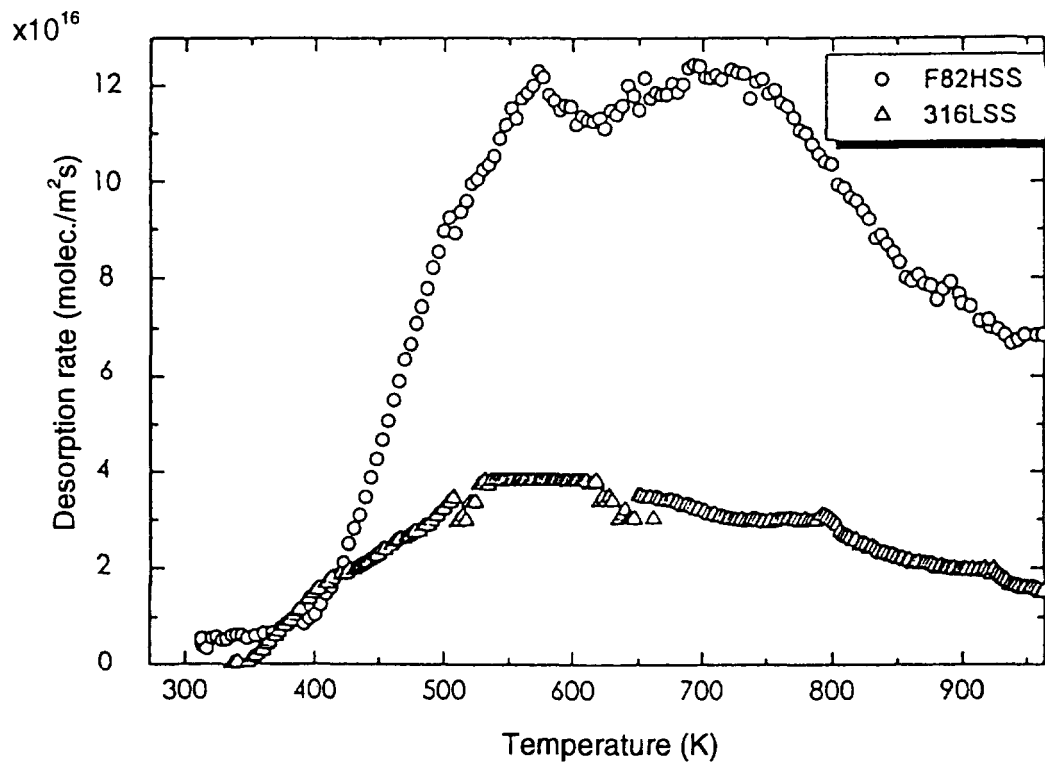


Fig. 44 TDS spectrum of H_2O gas from F82H IEA heat ($\beta = 0.17 \text{ K/s}$)

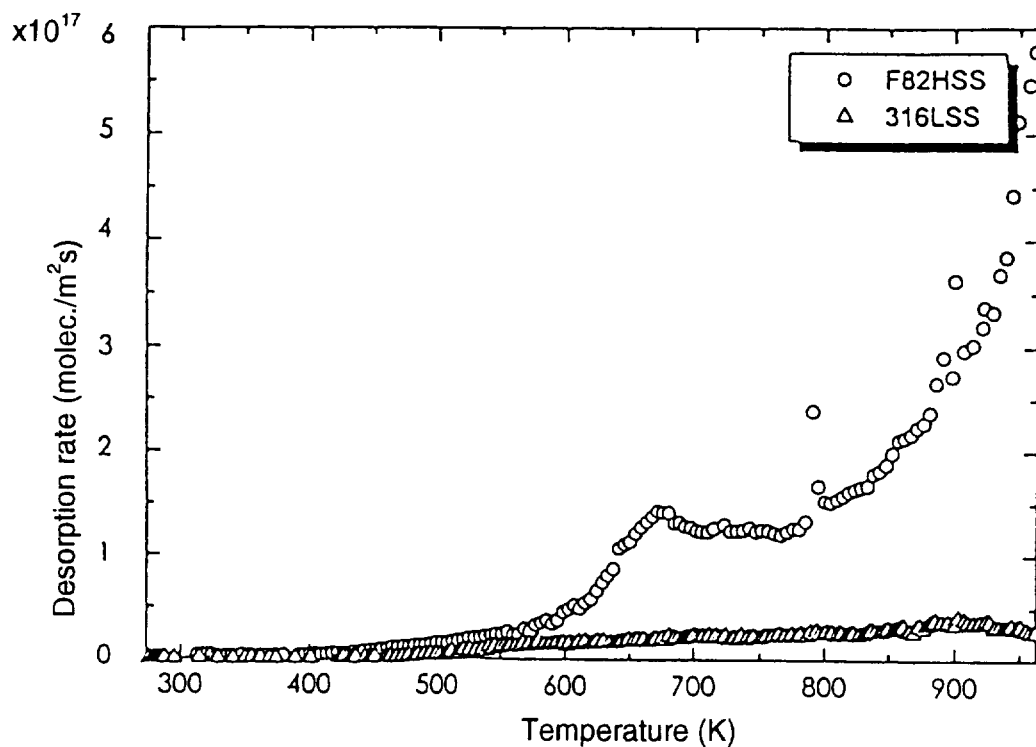


Fig. 45 TDS spectrum of CO gas from F82H IEA heat ($\beta = 0.17$ K/s)

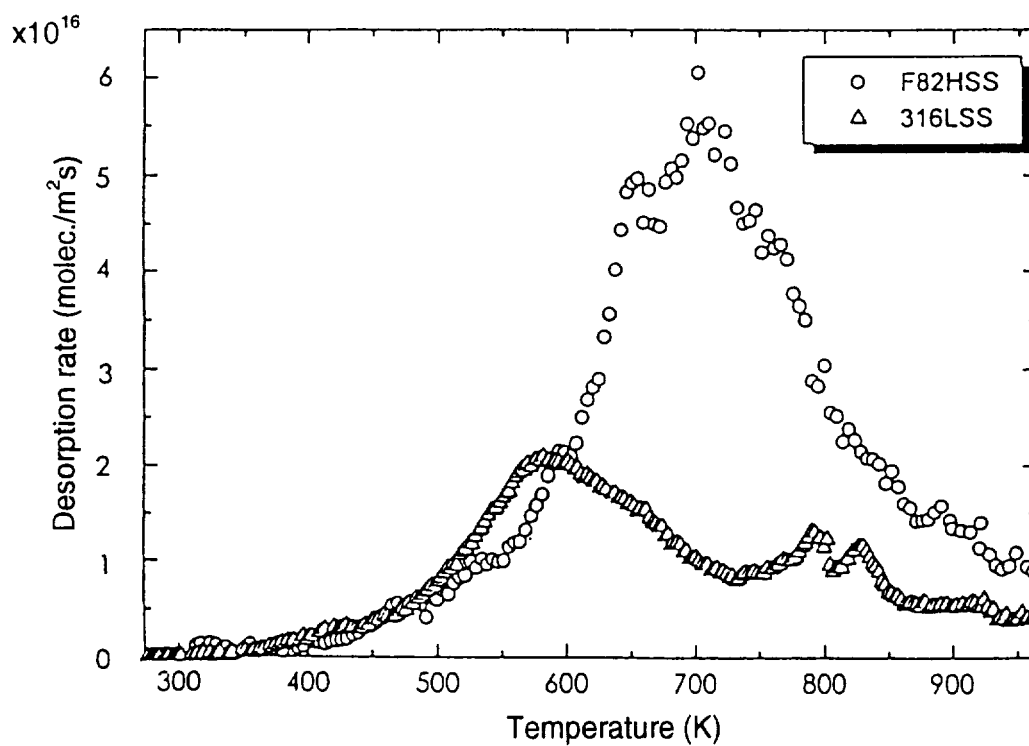


Fig. 46 TDS spectrum of CO₂ gas from F82H IEA heat ($\beta = 0.17$ K/s)

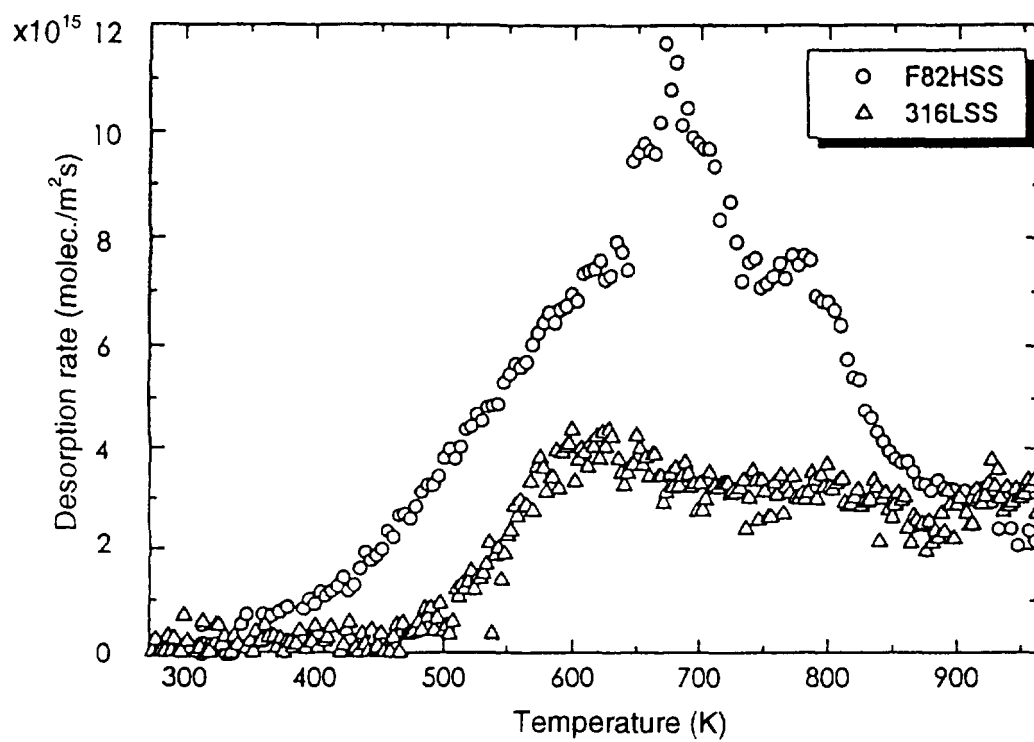
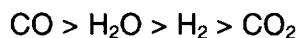


Fig. 47 TDS spectrum of CH_4 gas from F82H IEA heat ($\beta = 0.17 \text{ K/s}$)

以上の結果より、F82H 鋼における主な放出ガスの脱離量は多い順に、



となる。また H_2O と CO とがそれぞれ全体の 30%以上を占めている。

昇温速度を変化させた場合の TDS スペクトルを Fig. 48 から Fig. 52 に示す。これらの図でわかるように、昇温速度の増大に伴い、脱離ピークの温度が高温側へシフトする。

脱離ピーク温度 T_p と昇温速度 β の関係から、脱離の活性化エネルギー E_d は次式により求められる：

$$\ln\left(\frac{T_p^2}{\beta}\right) = \frac{E_d}{\kappa T_p} + \ln\left(\frac{E_d \beta}{\kappa v_2 \sigma_0}\right) \quad (5)$$

ここで、 κ : ボルツマン定数

v_2 : 2次脱離反応定数

σ_0 : 初期表面濃度

各脱離気体について横軸を $1/T_p$ 、縦軸を $\ln(T_p^2/\beta)$ としてアレニウスプロットしたものを Fig. 53 から Fig. 57 に示す。これらの図の直線の傾きから求めた脱離の活性化エネルギーを Table 29 に示す。

Table 29 Activation energy of desorption

Gas	Desorption peak	Activation energy (eV)	
		F82H	316L
H_2	1st peak	0.56 ± 0.18	0.84 ± 0.07
	2nd peak	0.67 ± 0.34	0.62 ± 0.08
	3rd peak	0.70 ± 0.07	
H_2O	1st peak	0.17 ± 0.05	
	2 nd peak	0.48 ± 0.12	
CO	1 st peak	0.50 ± 0.58	3.47
	2nd peak	0.38 ± 0.13	
	3rd peak	0.40 ± 0.10	
CO_2	1st peak	0.24 ± 0.25	1.23
	2nd peak	0.50 ± 0.24	1.17
CH_4	1st peak	0.18 ± 0.28	
	2nd peak	0.44 ± 0.10	
	3rd peak	0.51 ± 0.20	

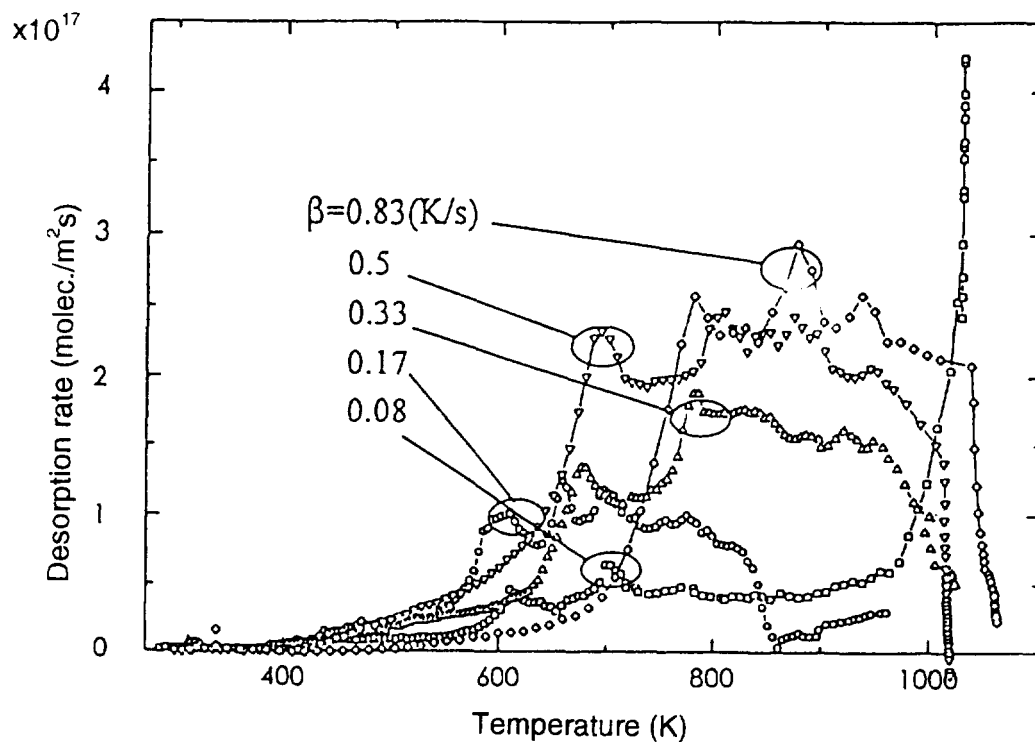


Fig. 48 TDS spectrum of H_2 gas from F82H IEA heat with heating rate variation ($\beta = 0.17 \sim 0.83$ K/s)

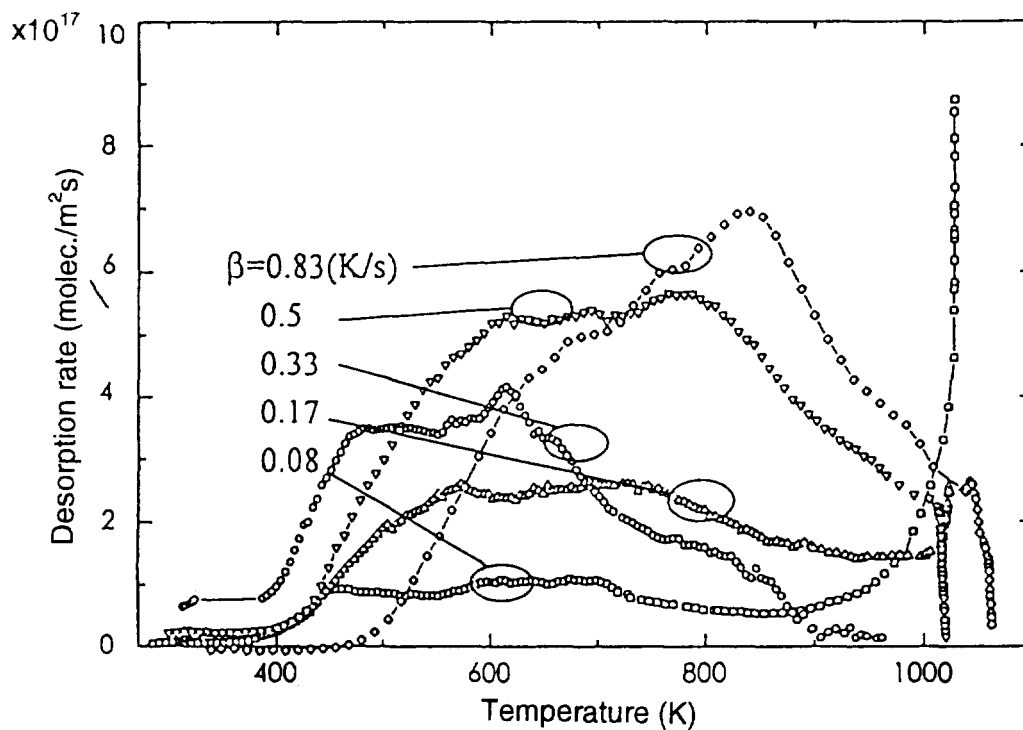


Fig. 49 TDS spectrum of H_2O gas from F82H IEA heat with heating rate variation ($\beta = 0.17 \sim 0.83$ K/s)

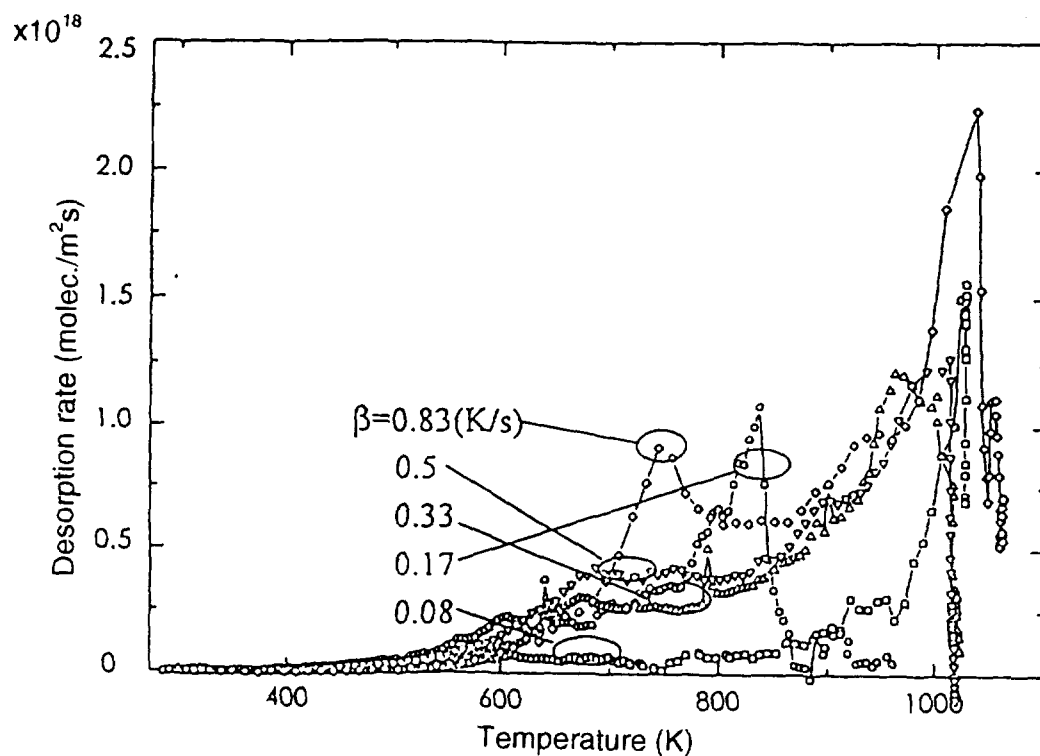


Fig. 50 TDS spectrum of CO gas from F82H IEA heat with heating rate variation ($\beta = 0.17 \sim 0.83$ K/s)

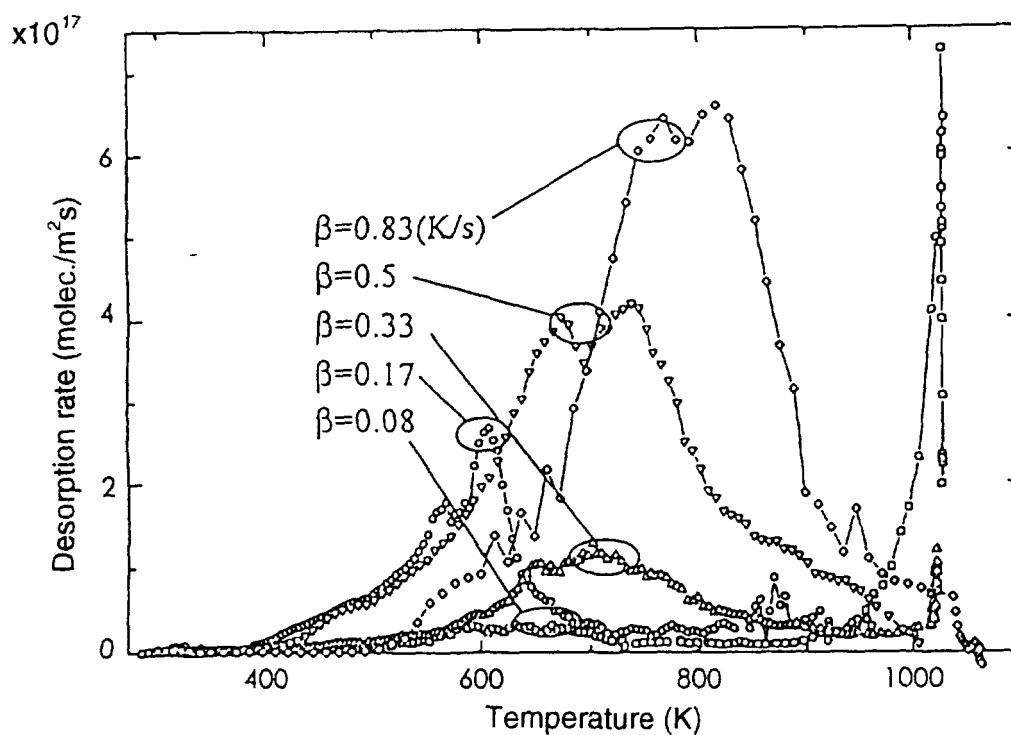


Fig. 51 TDS spectrum of CO₂ gas from F82H IEA heat with heating rate variation ($\beta = 0.17 \sim 0.83$ K/s)

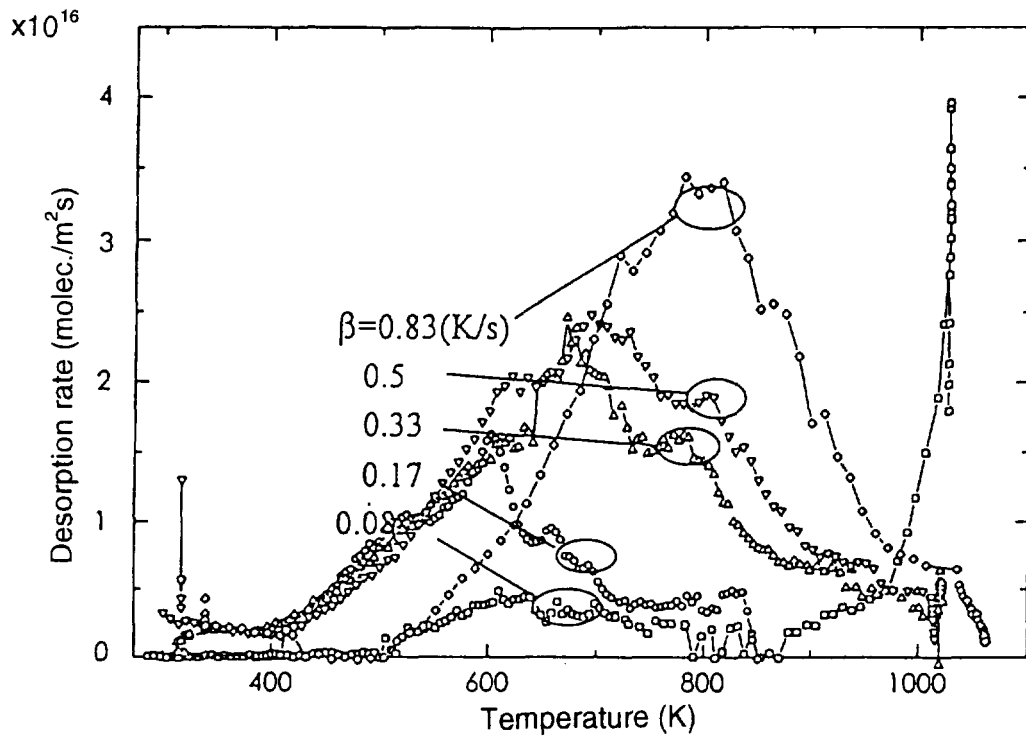


Fig. 52 TDS spectrum of CH₄ gas from F82H IEA heat with heating rate variation ($\beta = 0.17 \sim 0.83$ K/s)

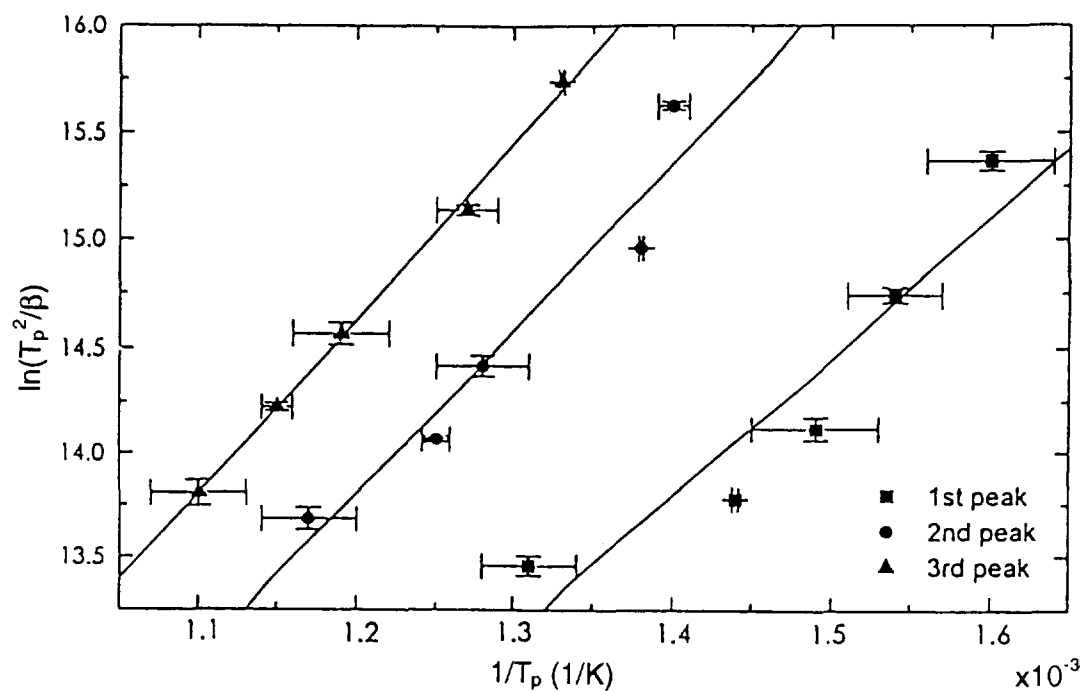


Fig. 53 The relationship between desorption peak temperature of H_2 and heating rate β .

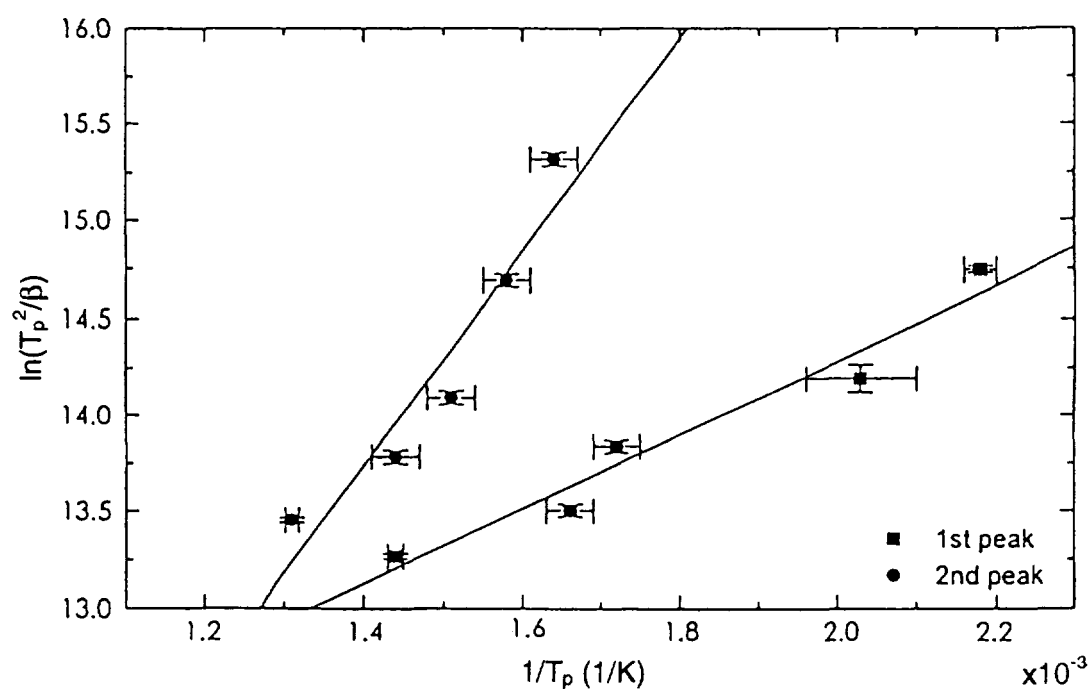


Fig. 54 The relationship between desorption peak temperature of H_2O and heating rate β .

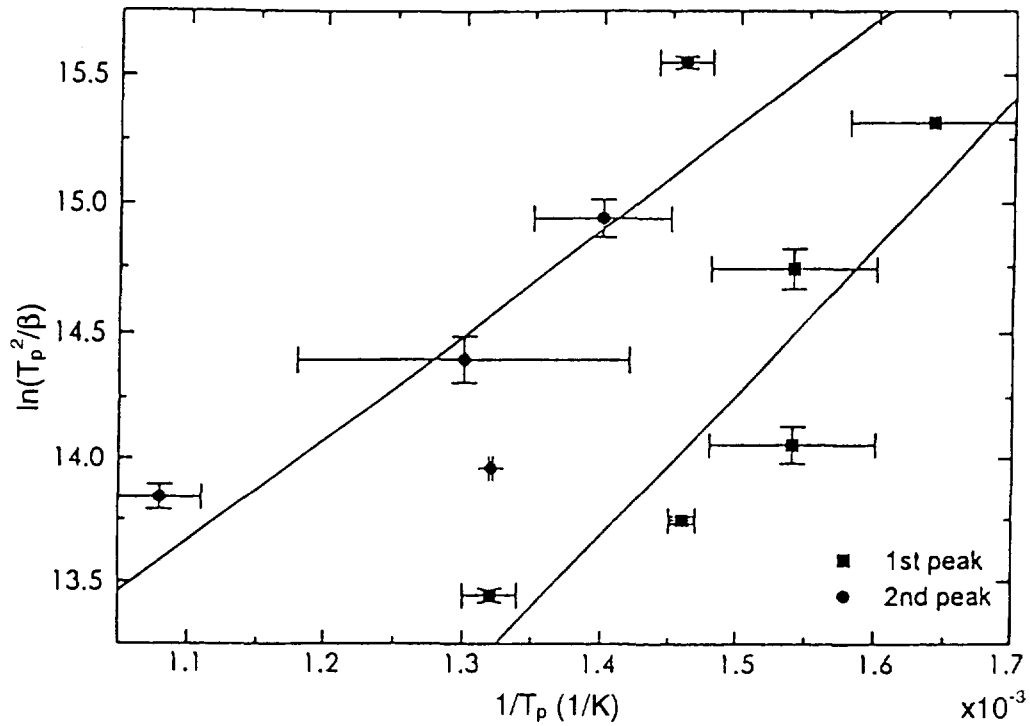


Fig. 55 The relationship between desorption peak temperature of CO and heating rate β .

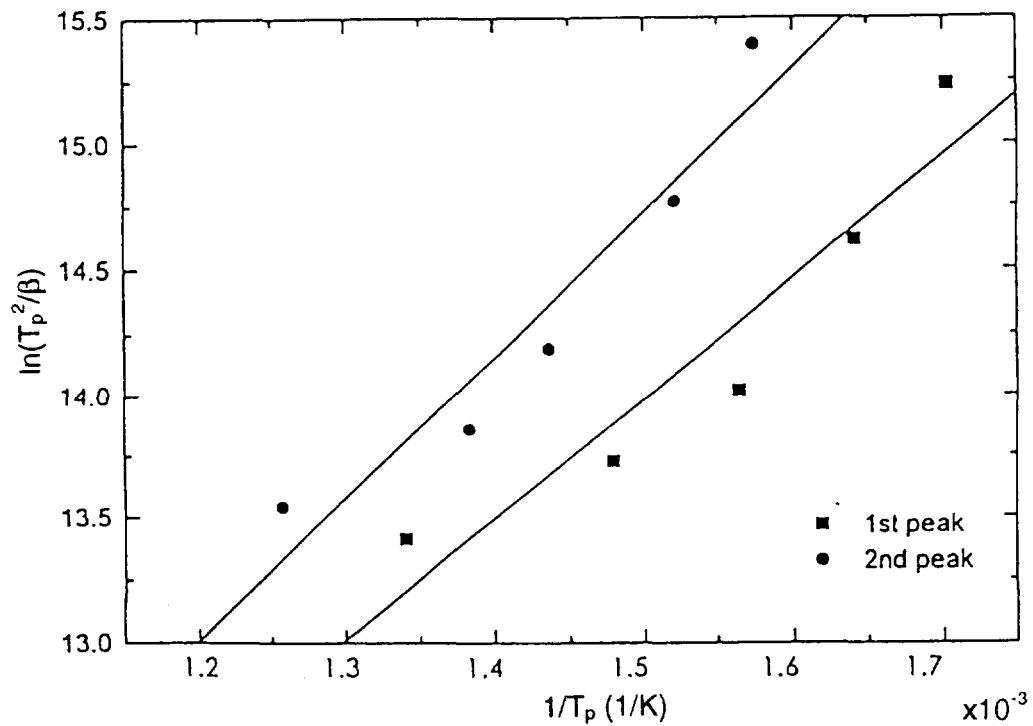


Fig. 56 The relationship between desorption peak temperature of CO₂ and heating rate β .

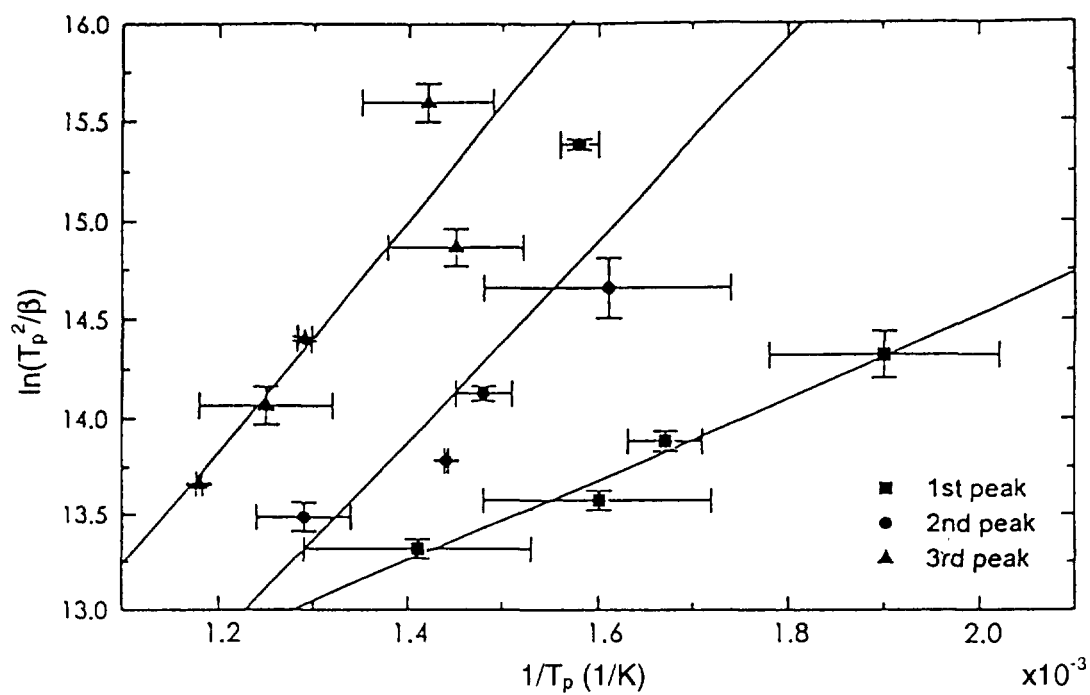


Fig. 57 The relationship between desorption peak temperature of CH_4 and heating rate β .

4. 5. 腐食特性

高温水中腐食試験は2回のシリーズについて試験を行い、それぞれ途中で2回ずつ取り出して重量測定を行い、重量変化の時間依存性を取得した。試験温度は220℃～290℃で、溶存酸素量は約1 ppmである。高温水中腐食試験の結果をTable 30およびTable 31に示す。またこれらの結果をそれぞれ図示したものがFig. 58とFig. 59である。Fig. 58とFig. 59には腐食による重量の変化と腐食速度を示しており、Fig. 58は1回目の測定について、またFig. 59には2回目の測定について示している。

F82H 鋼および HT9 鋼については、260℃以上の試験温度では約2 Ms までの試験後において、重量の増加が認められた。これは試料表面に生成した酸化皮膜によるものと考えられる。一方、それ以下の試験温度では重量の減少が認められ、今回試験を行った中で最も低い温度である220℃において最も腐食量が大きかった。クロマイズ処理を施した F82H 鋼では重量にほとんど変化はなく、また試験後も依然として金属色を有していた。このクロマイズ鋼では高温(260℃)および低温(220℃)の試験において共に変化がなく、優れた耐食性を示している。

F82H 鋼および HT9 鋼についてそれぞれの結果を試験時間に対してプロットしたものをそれぞれ Fig. 60 および Fig. 61 に示す。腐食速度の時間依存性から、およそ1 Ms 以上の試験では腐食速度は一定になっているようである。また腐食速度は低温ほど大きくなる傾向を示している。定常的な腐食が進行していると考えられる1.5 Ms 後の腐食減量および腐食速度をFig. 60 および Fig. 61 から推測し、試験温度に対してプロットしたものがFig. 62である。この図に示されているように、250℃以下の試験温度では、腐食量、腐食速度ともに試験温度にほぼ比例して増加しているようである。また腐食量について8%CrであるF82H 鋼と12%CrであるHT9 鋼にはほとんど差はないようである。260℃以上の試験温度では重量に増加が認められるが、これは試料表面に生成した酸化皮膜による重量の増加であると考えられる。酸化皮膜の厚さについてはまだ測定は行っていない。

F82H 鋼の高温水中での腐食試験については、以前にNKKで行った結果が報告されている[6]。NKKの試験では、試験温度が250℃、試験期間が0.9 Msで、溶存酸素は0.2 ppmであったが、その腐食量は今回の試験結果に比べ5倍ほど大きかった。NKKの試

験と今回の試験との違いは溶存酸素量(NKKの試験では今回の1/5の溶存酸素量)のみと考えられるため、溶存酸素量の腐食に及ぼす影響についても検討する必要があると考えられる。また今回得られた温度依存性からも酸化皮膜の安定性が耐食性に影響を与えるものと考えられるため、溶存酸素量の影響は大きなものであると推測される。

以上のように今回行った腐食試験の結果、腐食による重量低下は今回試験を行った中で最も低い温度である220℃で最も顕著であり、試験温度の上昇に伴い腐食量は減少するという結果が得られた。またクロマイズ処理を施したもの(表面で約40%Cr)では全く腐食は起こらなかった。これからの試験では、さらに低温側での試験を行い、腐食速度の極大となる温度を見出すとともに、溶存酸素依存性についても検討を行う予定である。

Table 30 F82H IEA heat corrosion test in high temperature water (1st batch)

Test run	Alloy	ID	Surface area (cm ²)	Volume (cm ³)	Test temp (°C)	DO (ppm)	Each run					Total		
							Test period (Ms)	Initial weight (g)	Weight after test (g)	Weight change (mg)	Corrosion rate (g/cm ² s)	Test period (Ms)	Weight change (mg)	Corrosion rate (g/cm ² s)
1st Run	F82H	F82H-2	24.62	5.118	290	0.8	0.659	40.3944	40.3958	1.4	8.632E-11	0.659	1.4	8.632E-11
	HT9	HT-9-2	24.68	5.109	275	0.8	0.659	39.5460	39.5476	1.6	9.843E-11	0.659	1.6	9.843E-11
	Chromized F82H	Crnz02	24.34	5.000	260	0.8	0.659	39.0551	39.0552	0.1	6.237E-12	0.659	0.1	6.237E-12
	F82H	F82H-1	24.61	5.117	250	0.8	0.659	40.3733	40.3728	-0.5	-3.084E-11	0.659	-0.5	-3.084E-11
	HT9	HT-9-1	24.55	5.066	235	0.8	0.659	39.4329	39.4321	-0.8	-4.946E-11	0.659	-0.8	-4.946E-11
	Chromized F82H	Crnz01	24.32	4.991	220	0.8	0.659	39.0386	39.0387	0.1	6.241E-12	0.659	0.1	6.241E-12
2nd Run	F82H	F82H-2	24.62	5.118	290	1.0	0.639	40.3957	40.3958	0.1	6.357E-12	1.298	1.5	4.695E-11
	HT9	HT-9-2	24.68	5.109	275	1.0	0.639	39.5477	39.5482	0.5	3.171E-11	1.298	2.1	6.558E-11
	Chromized F82H	Crnz02	24.34	5.000	260	1.0	0.639	39.0555	39.0556	0.1	6.431E-12	1.298	0.2	6.333E-12
	F82H	F82H-1	24.61	5.117	250	1.0	0.639	40.3730	40.3723	-0.7	-4.451E-11	1.298	-1.2	-3.757E-11
	HT9	HT-9-1	24.55	5.066	235	1.0	0.639	39.4324	39.4315	-0.9	-5.737E-11	1.298	-1.7	-5.335E-11
	Chromized F82H	Crnz01	24.32	4.991	220	1.0	0.639	39.0388	39.0391	0.3	1.930E-11	1.298	0.4	1.267E-11
3rd Run	F82H	F82H-2	24.62	5.118	290	1.1	0.688	40.3958	40.3952	-0.6	-3.541E-11	1.986	0.9	1.841E-11
	HT9	HT-9-2	24.68	5.109	275	1.1	0.688	39.5482	39.5486	0.4	2.356E-11	1.986	2.5	5.102E-11
	Chromized F82H	Crnz02	24.34	5.000	260	1.1	0.688	39.0556	39.0561	0.5	2.985E-11	1.986	0.7	1.448E-11
	F82H	F82H-1	24.61	5.117	250	1.1	0.688	40.3723	40.3718	-0.5	-2.952E-11	1.986	-1.7	-3.478E-11
	HT9	HT-9-1	24.55	5.066	235	1.1	0.688	39.4315	39.4310	-0.5	-2.959E-11	1.986	-2.2	-4.512E-11
	Chromized F82H	Crnz01	24.32	4.991	220	1.1	0.688	39.0391	39.0391	0.0	0.000E+00	1.986	0.4	8.281E-12

Table 31 F82H IEA heat corrosion test in high temperature water (2nd batch)

Test run	Alloy	ID	Surface area (cm ²)	Volume (cm ³)	Test temp (°C)	DO (ppm)	Each run					Total		
							Test period (Ms)	Initial weight (g)	Weight after test (g)	Weight change (mg)	Corrosion rate (g/cm ² s)	Test period (Ms)	Weight change (mg)	Corrosion rate (g/cm ² s)
1st Run	F82H	F82H-3	24.63	5.122	290	1.0	0.397	40.4729	40.4745	1.6	1.639E-10	0.397	1.6	1.638E-10
	HT9	HT-9-3	24.68	5.112	275	1.0	0.397	39.6261	39.6279	1.8	1.844E-10	0.397	1.8	1.839E-10
	F82H	F82H-4	24.62	5.117	260	1.0	0.397	40.3432	40.3450	1.8	1.849E-10	0.397	1.8	1.843E-10
	F82H	F82H-5	24.63	5.124	250	1.0	0.397	40.4193	40.4198	0.5	5.109E-11	0.397	0.5	5.119E-11
	HT9	HT-9-4	24.58	5.087	235	1.0	0.397	39.3739	39.3733	-0.6	-6.220E-11	0.397	-0.6	-6.155E-11
	F82H	F82H-6	24.61	5.110	220	1.0	0.397	40.3856	40.3850	-0.6	-6.217E-11	0.397	-0.6	-6.148E-11
2nd Run	F82H	F82H-3	24.63	5.122	290	1.0	0.654	40.4745	40.4743	-0.2	-1.242E-11	1.051	1.4	5.408E-11
	HT9	HT-9-3	24.68	5.112	275	1.0	0.654	39.6279	39.6279	0.0	0.000E+00	1.051	1.8	6.941E-11
	F82H	F82H-4	24.62	5.117	260	1.0	0.654	40.3450	40.3435	-1.5	-9.337E-11	1.051	0.3	1.159E-11
	F82H	F82H-5	24.63	5.124	250	1.0	0.654	40.4198	40.4187	-1.1	-6.813E-11	1.051	-0.6	-2.318E-11
	HT9	HT-9-4	24.58	5.087	235	1.0	0.654	39.3733	39.3720	-1.3	-8.169E-11	1.051	-1.9	-7.356E-11
	F82H	F82H-6	24.61	5.110	220	1.0	0.654	40.3850	40.3829	-2.1	-1.319E-10	1.051	-2.7	-1.044E-10
3rd Run	F82H	F82H-3	24.63	5.122	290	1.0	0.650	40.4743	40.4740	-0.3	-1.876E-11	1.701	1.1	2.626E-11
	HT9	HT-9-3	24.68	5.112	275	1.0	0.650	39.6279	39.6284	0.5	3.126E-11	1.701	2.3	5.481E-11
	F82H	F82H-4	24.62	5.117	260	1.0	0.650	40.3435	40.3434	-0.1	-6.268E-12	1.701	0.2	4.776E-12
	F82H	F82H-5	24.63	5.124	250	1.0	0.650	40.4187	40.4176	-1.1	-6.860E-11	1.701	-1.7	-4.058E-11
	HT9	HT-9-4	24.58	5.087	235	1.0	0.650	39.3720	39.3711	-0.9	-5.694E-11	1.701	-2.8	-6.698E-11
	F82H	F82H-6	24.61	5.110	220	1.0	0.650	40.3829	40.3808	-2.1	-1.328E-10	1.701	-4.8	-1.147E-10

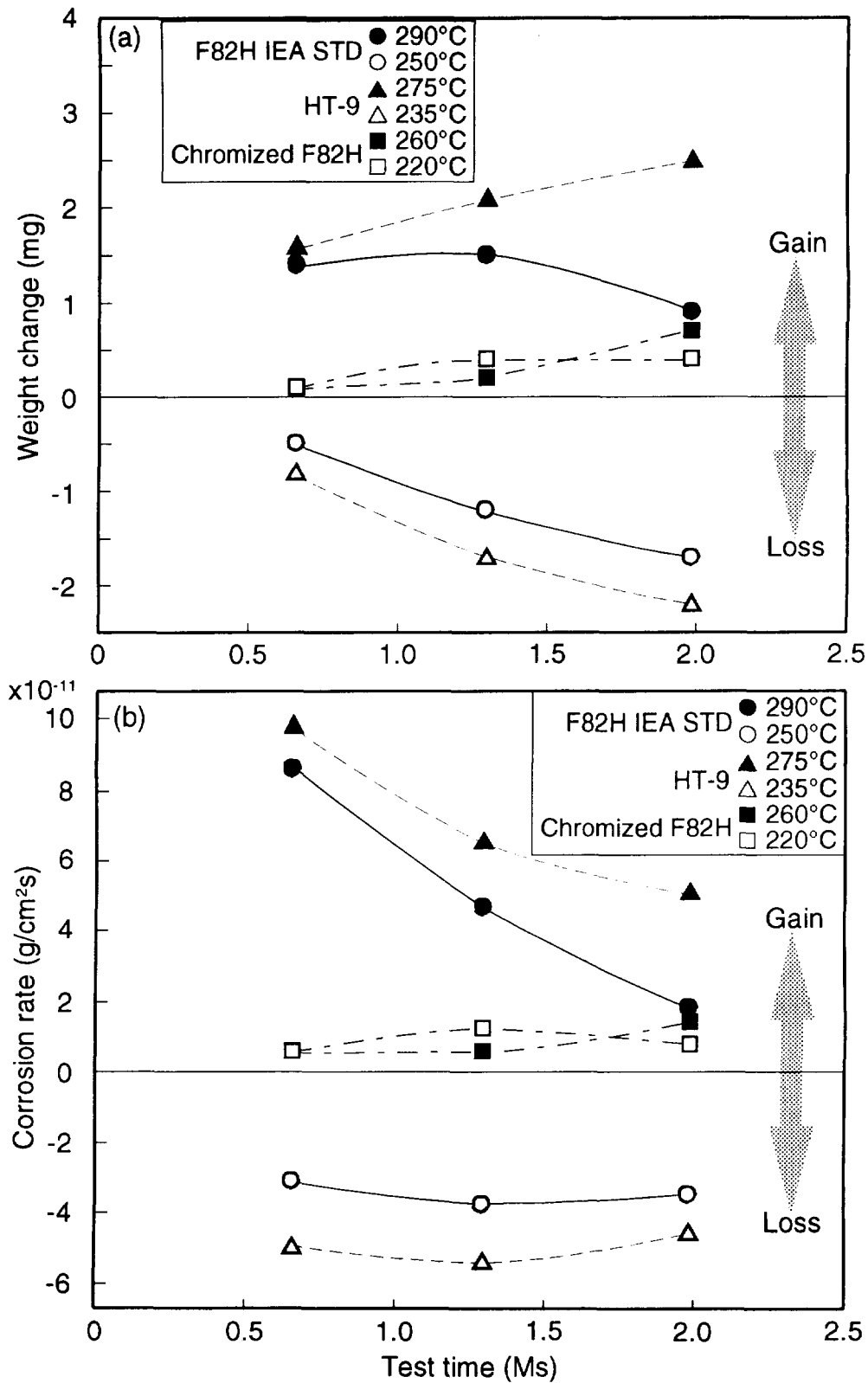


Fig. 58 Corrosion test results (1st batch)

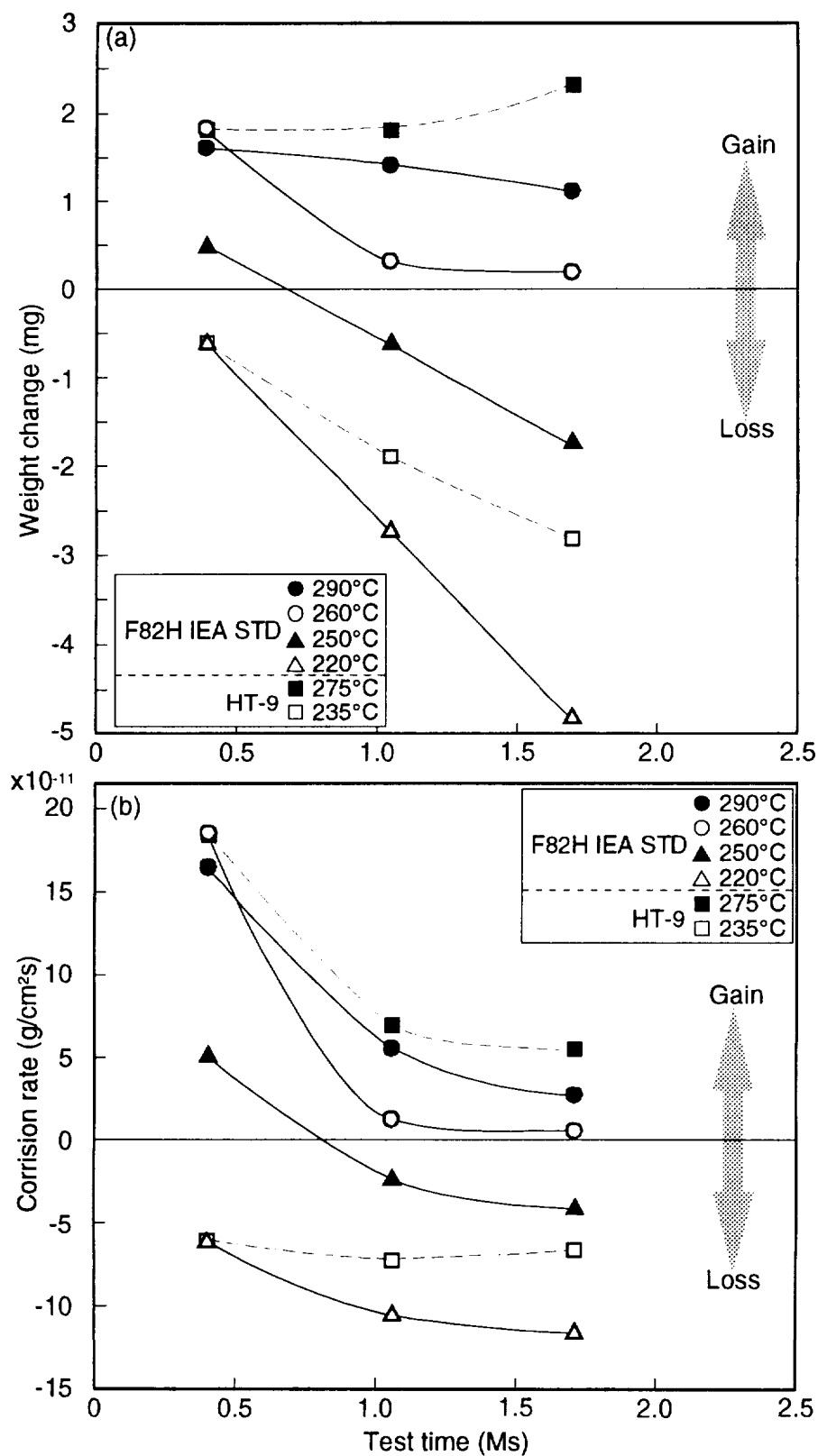


Fig. 59 Corrosion test results (2nd batch)

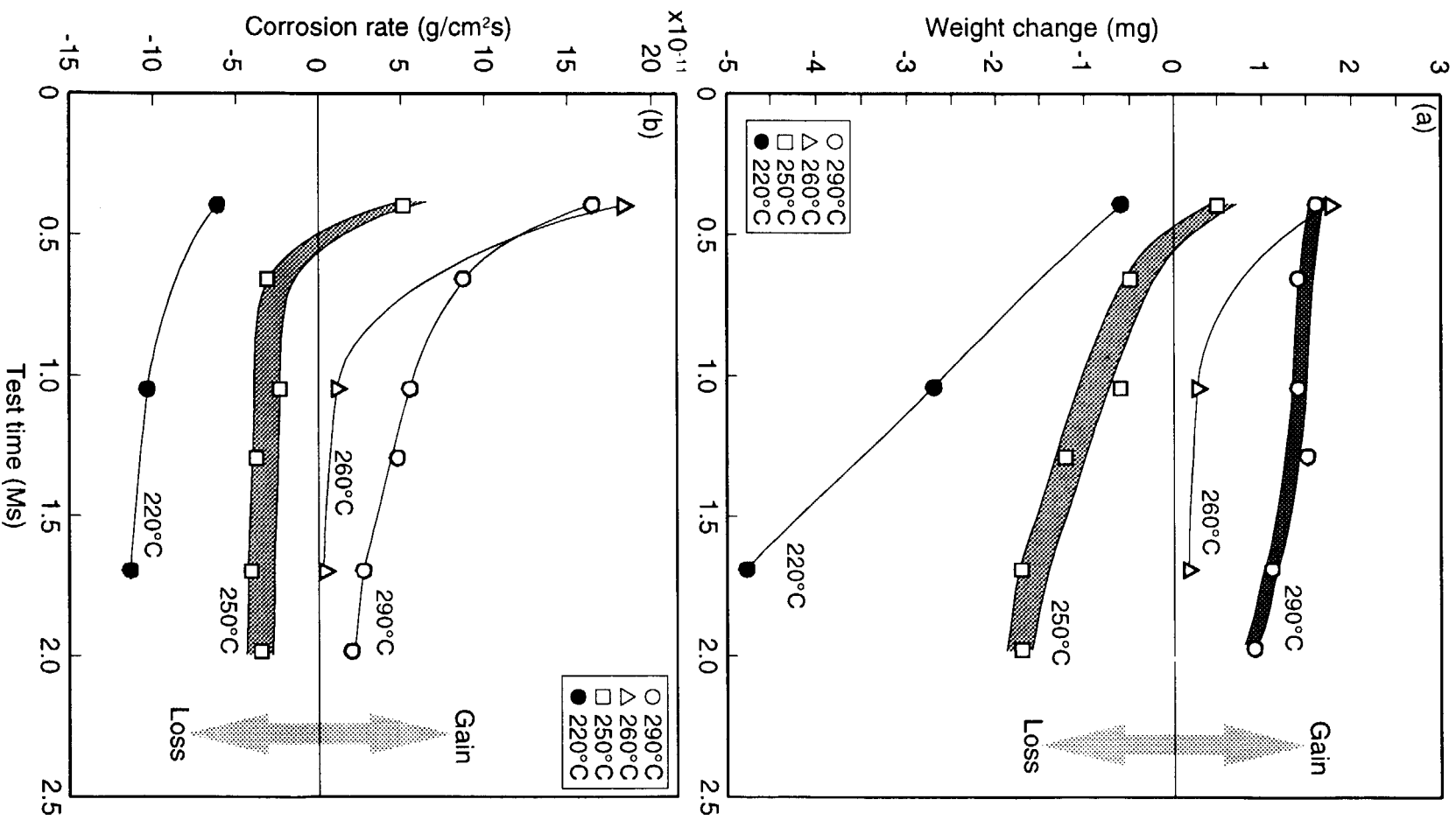


Fig. 60 Corrosion test results (F82H IEA heat)

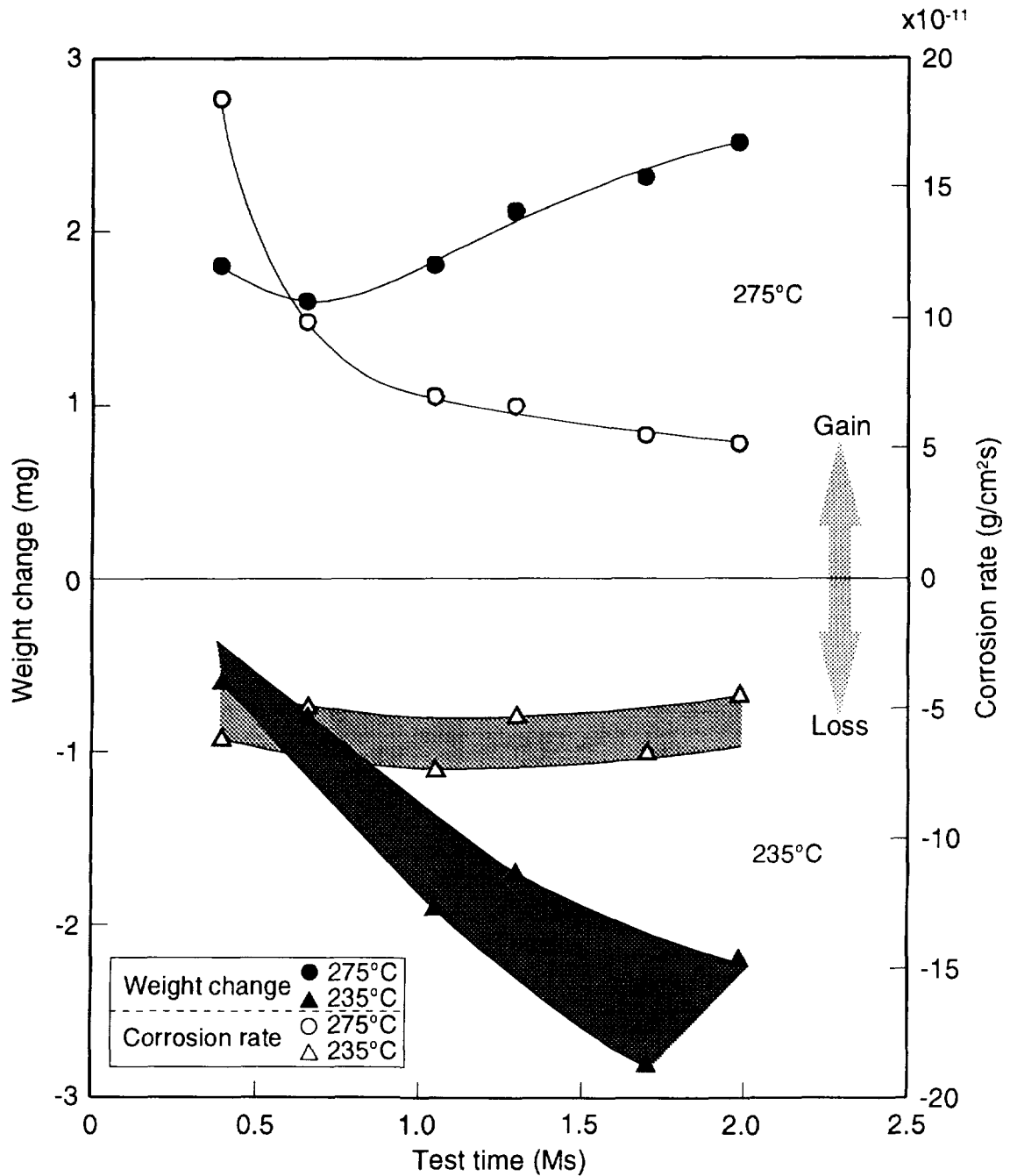


Fig. 61 Corrosion test results (HT-9)

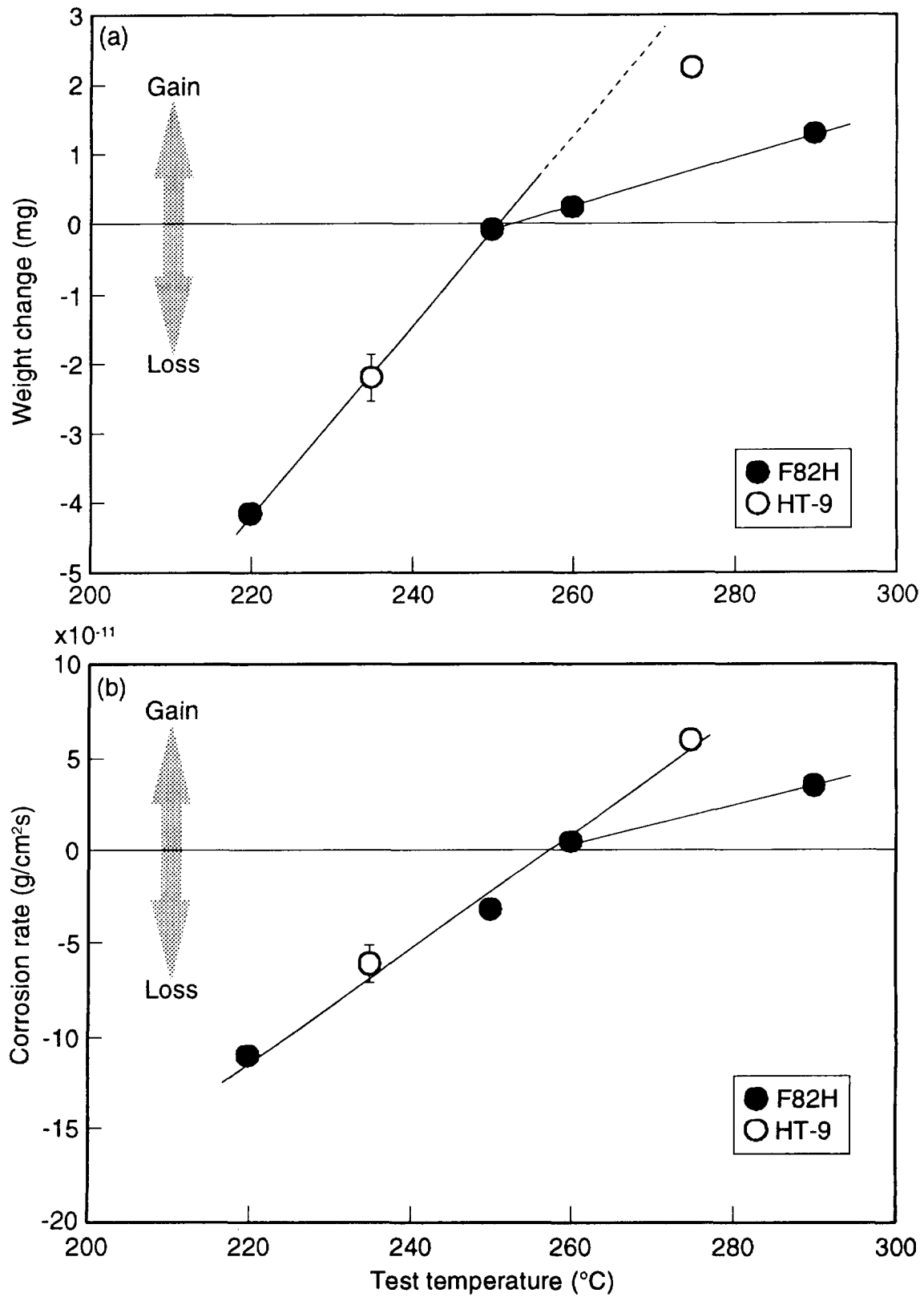


Fig. 62 Weight change and corrosion rate after 1.5 Ms (temperature dependency)

5. まとめ

F82H 鋼 IEA ヒート材に関するラウンドロビン試験の結果、以下のような特性データが得られた。

ミクロ組織、硬さ

結晶粒度が Pre-IEA ヒート材よりも粗かったが、硬さはほぼ同じ程度であった。またヒート間、板厚間の違いもほとんどなかった。

熱的特性(比熱、熱伝導度、熱膨張率)

比熱、熱伝導度、熱膨張率について、室温から 800℃までのデータが得られた。比熱、熱伝導度、熱膨張率ともに 800℃近辺で変化を示した。これはマルテンサイト相からオーステナイト相への相変態開始温度(A_{c1b} : 約 820℃)に対応しており、結晶構造の変化によるものである。

弾性率、剛性率、ポアソン比

室温から 700℃までのデータが得られた。弾性率および剛性率は温度の上昇に比例して低下するが、500℃を境にそれ以上の温度では温度上昇に対する低下の割合が 500℃以下に比べて大きい。ポアソン比は 500℃以下では 0.29 で一定であるが、それ以上の温度では、温度上昇に従い大きくなる。

磁気特性

室温から 400℃までのデータが得られた。飽和磁束密度は、室温において約 19500 ガウスで、温度の上昇とともに低下し、400℃では約 17500 ガウスにまで減少する。残留磁気も同様に温度の上昇に伴い減少し、室温での 210 ガウスから 400℃の 170 ガウスにまで減少する。

引張特性

室温から 700℃までのデータが得られた。引張特性(降伏応力、引張強さ、破断伸びおよび絞り)は、概ね Pre-IEA ヒート材で得られているバンド内に収まっており、従来材と同等の性能を有している。

シャルピー衝撃特性

吸収エネルギーから求められた DBTT はおよそ-45℃であり、Pre-IEA ヒート材の約-50℃に対して若干高い傾向があるが、上棚エネルギーは同じ程度であり、Pre-IEA ヒート材との違いは大きくはなかった。

クリープ特性

600℃と 650℃においてそれぞれ 3 応力条件でのクリープ破断試験を行った結果、Pre-IEA ヒート材と同等のクリープ特性を有しているものと考えられる。なお、Pre-IEA ヒート材のクリープ破断曲線(Lason-Miller plot)は次式で与えられる：

$$\sigma = 11017 \ln P + 3575 \quad (6)$$

σ : 応力 (MPa)

P: Lason-Miller parameter, $P = T(\log t + 30) / 1000$ (K, h)

T: 温度 (K)

t: 破断時間 (h)

疲労特性

まだ室温での 2 条件の試験しか行っていないが、概ね良好な結果が得られているものと考えられる。

ガス放出特性

300℃～500℃の温度範囲での水分の放出が多く認められた。また 400℃以上で観察された顕著な炭酸ガスの放出により、脱炭が発生する恐れがある。

腐食特性

220℃から 290℃の温度範囲での F82H 鋼の高温水中での腐食減量を測定した。溶存酸素量 1ppm では、260℃以下の試験温度では高温水中に浸漬することにより重量減少が認められたが、それ以上の試験温度では逆に酸化物の生成により重量増加が認められ、比較材として用いた HT-9 との差はほとんど認められなかった。また今回試験を行った温度条件では、最も低い試験温度である 220℃で、最も大きな重量減少が生じた。

謝辞

本ラウンドロビン試験に参加頂いております方々にこの場を借りましてお礼申し上げます。母材および溶接材の試験を実施して頂きました鋼管計測(株)の石沢嘉一、天満千絵両氏、また現在は防衛大学へ移られた田村学博士、真空特性試験を行って頂きました北海道大学日野友明教授ならびに鈴木薫氏に改めて感謝の意を表します。

参考文献

- [1] NKK 平成 7 年度ラウンドロビン試験報告書.
- [2] 鈴木 薫, 「核融合炉用低放射化フェライト鋼のガス放出特性」北海道大学卒業論文, 1996.
- [3] K. shiba, et.al., to be published.
- [4] K. Ehrlich, et.al., Proceedings of IEA Low Activation Ferrite/Martensite Steels Workshop Meeting (Barden), 1995.
- [5] R. Gersinska, et.al., Proceedings of IEA Low Activation Ferrite/Martensite Steels Workshop Meeting (Tokyo), 1993.
- [6] N. Yamanouchi, J . Nucl. Mater. 191-194, 1992, p822-826.

付録 A 引張試験チャート

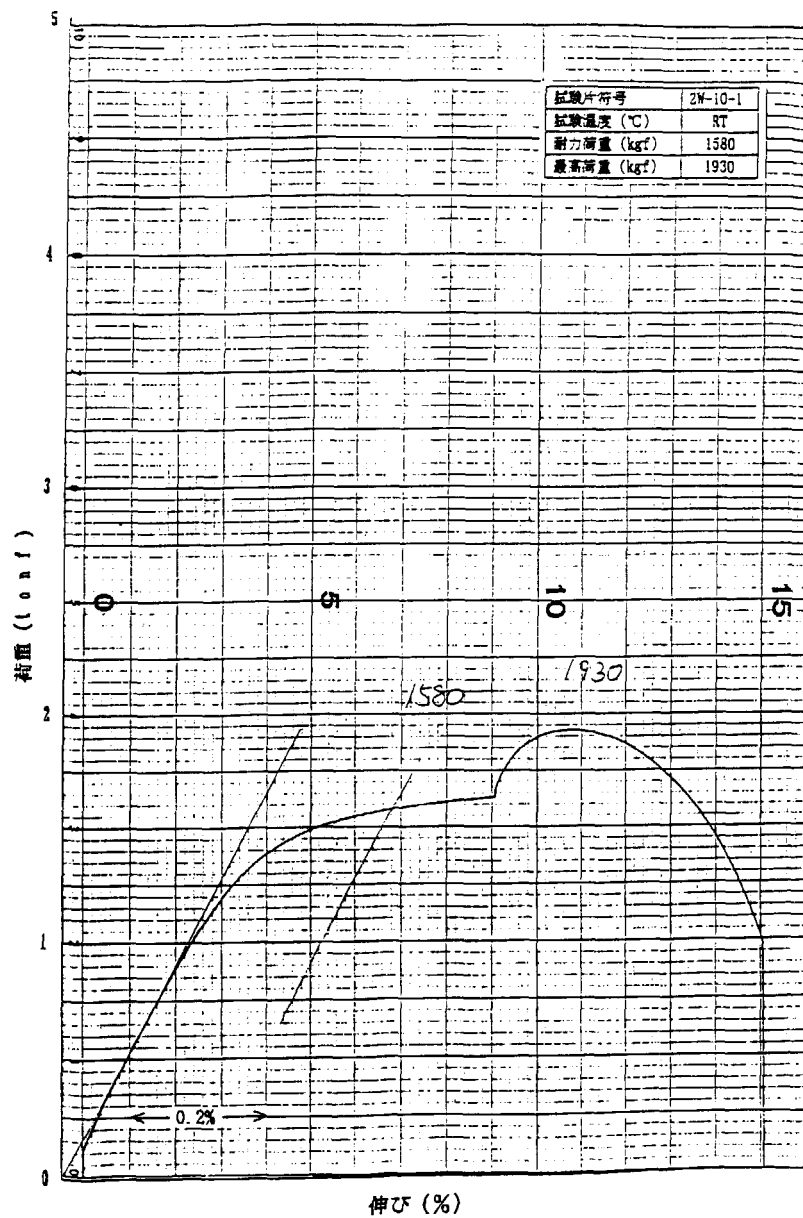


Fig. A-1 Load-Displacement diagram of tensile test at room temperature (2W-10-1)

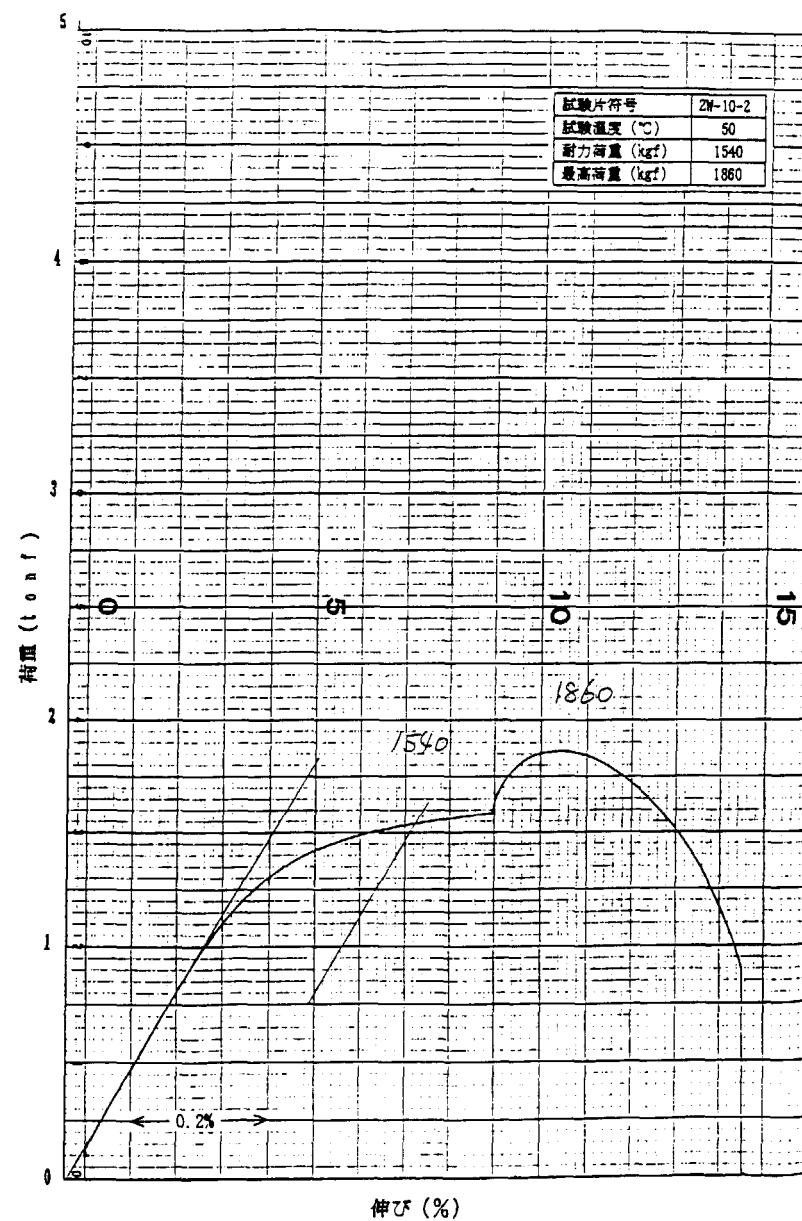


Fig. A-2 Load-Displacement diagram of tensile test at 50°C (2W-10-2)

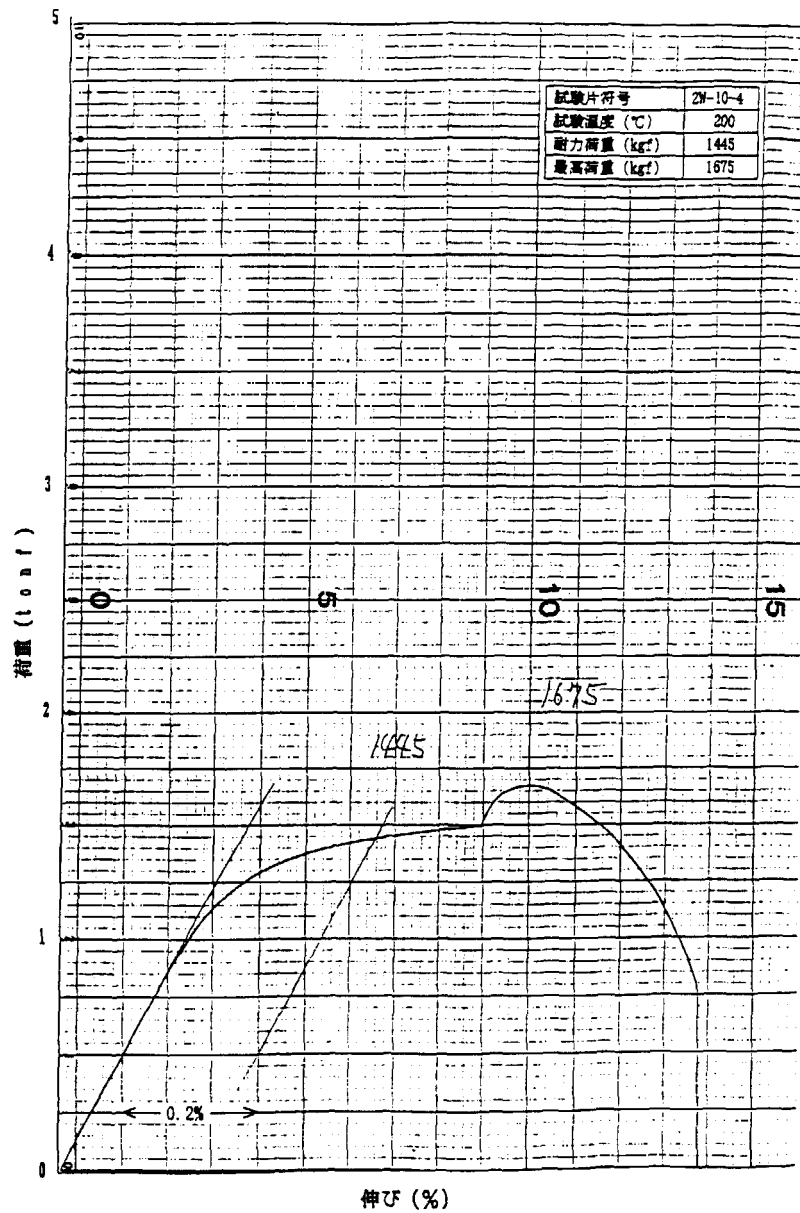


Fig. A-3 Load-Displacement diagram of tensile test at 200°C (2W-10-4)

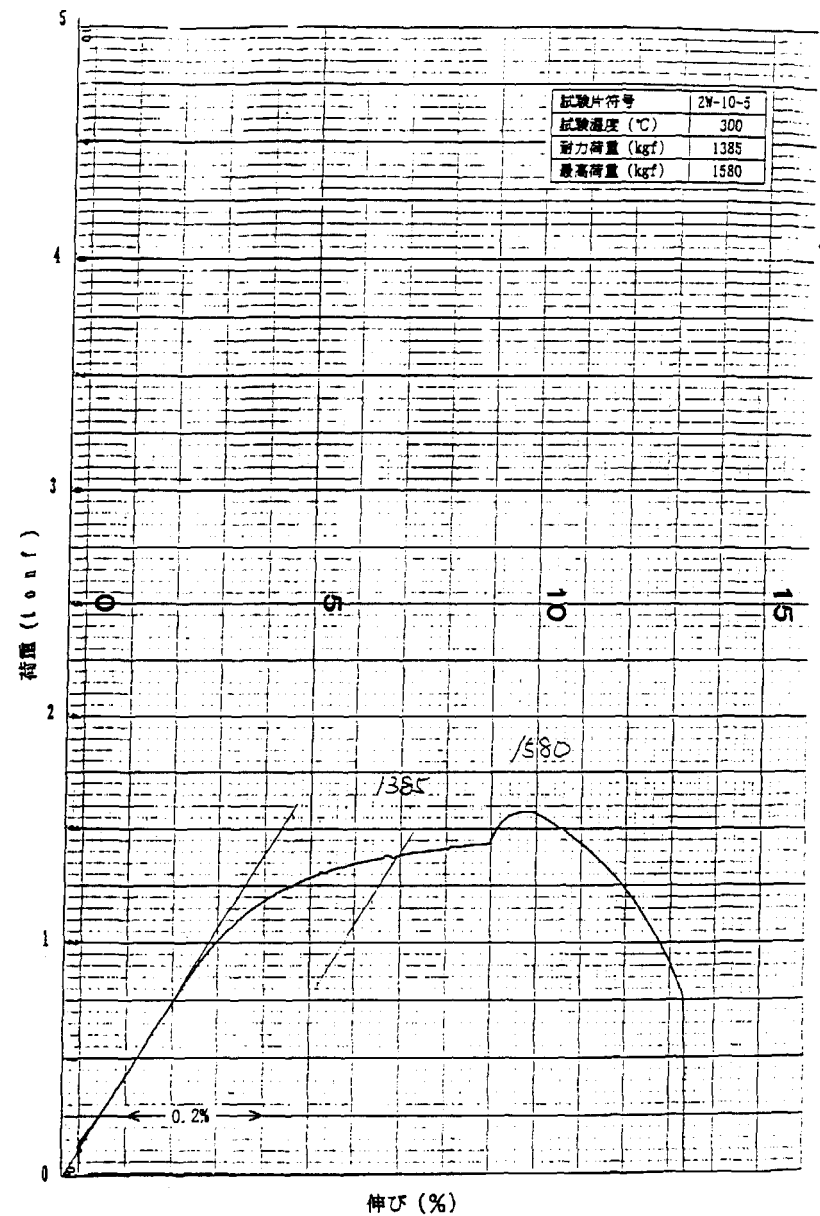


Fig. A-4 Load-Displacement diagram of tensile test at 300°C (2W-10-5)

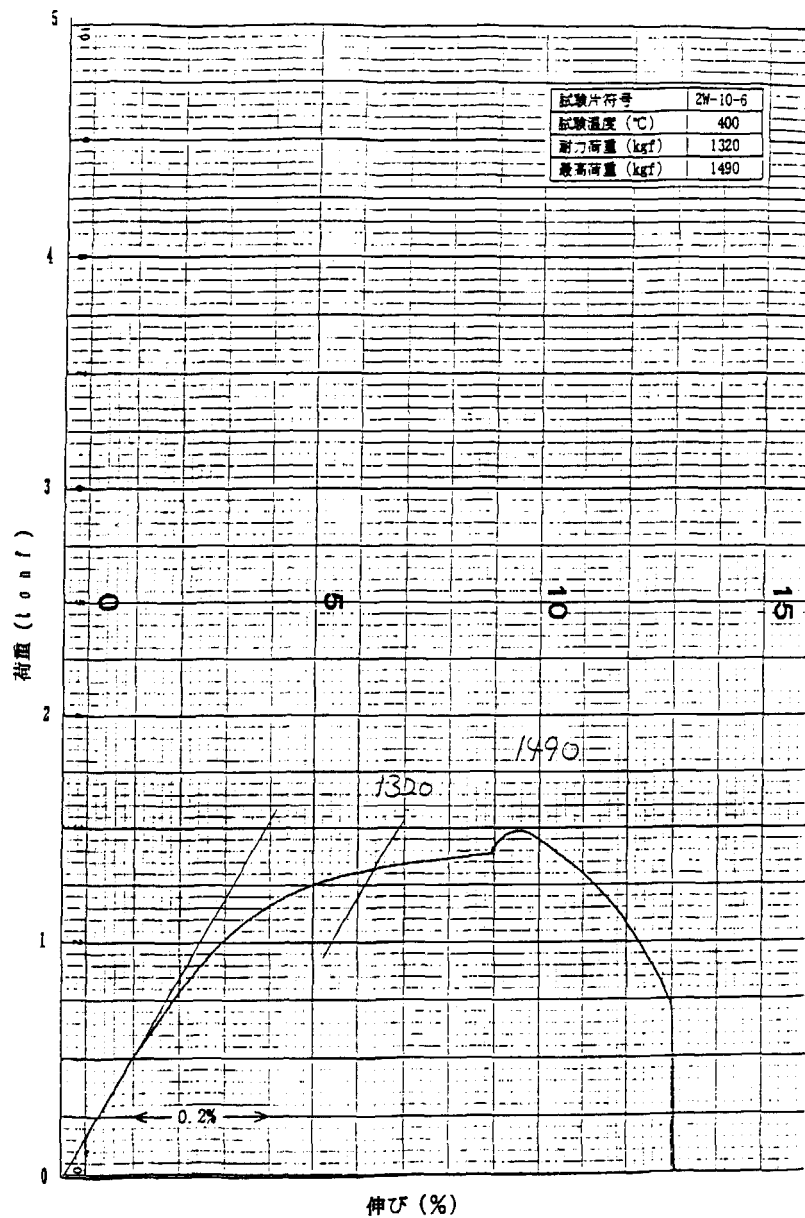


Fig. A-5 Load-Displacement diagram of tensile test at 400°C (2W-10-6)

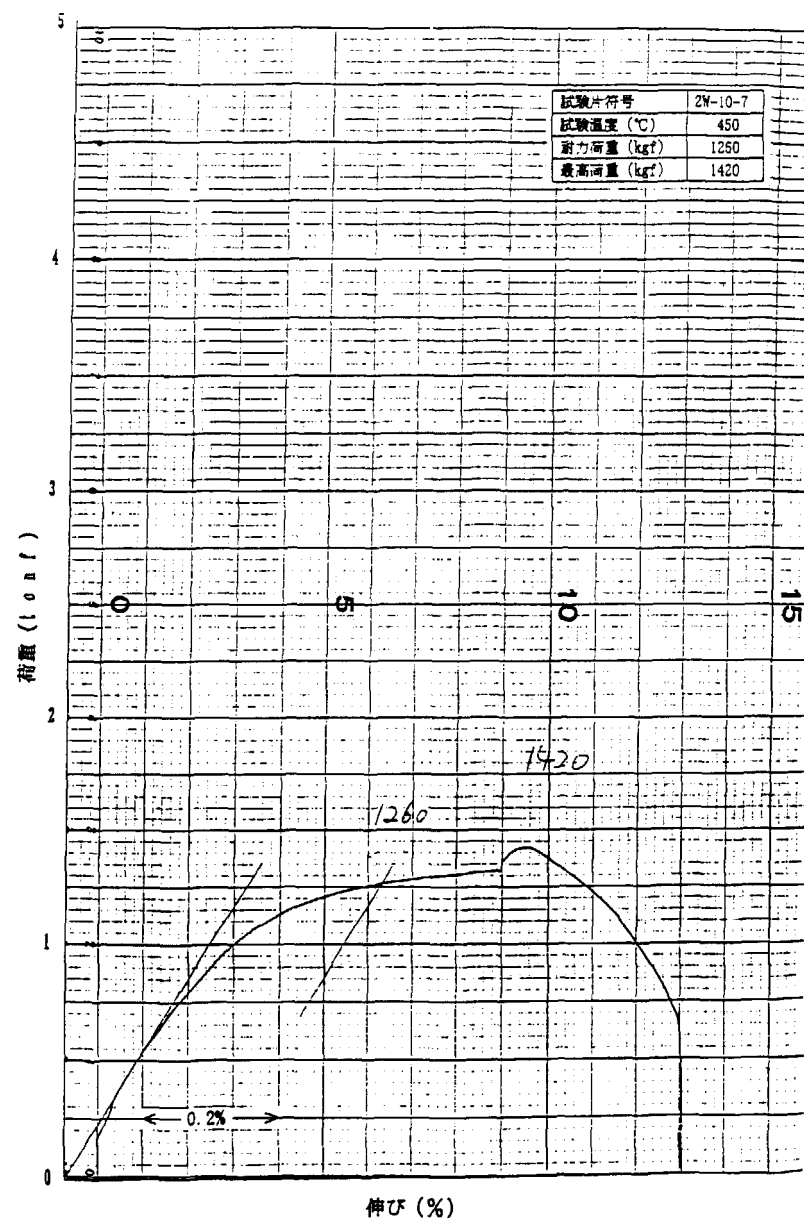


Fig. A-6 Load-Displacement diagram of tensile test at 450°C (2W-10-7)

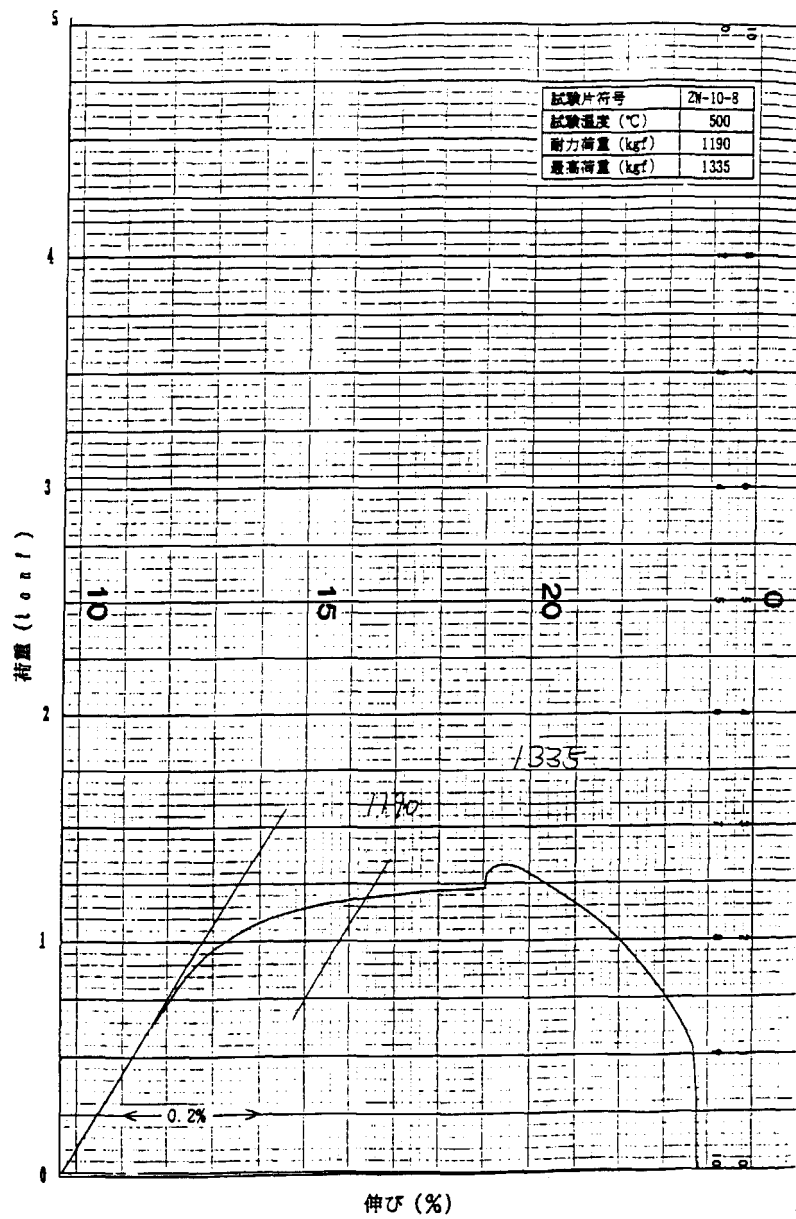


Fig. A-7 Load-Displacement diagram of tensile test at 500°C (2W-10-8)

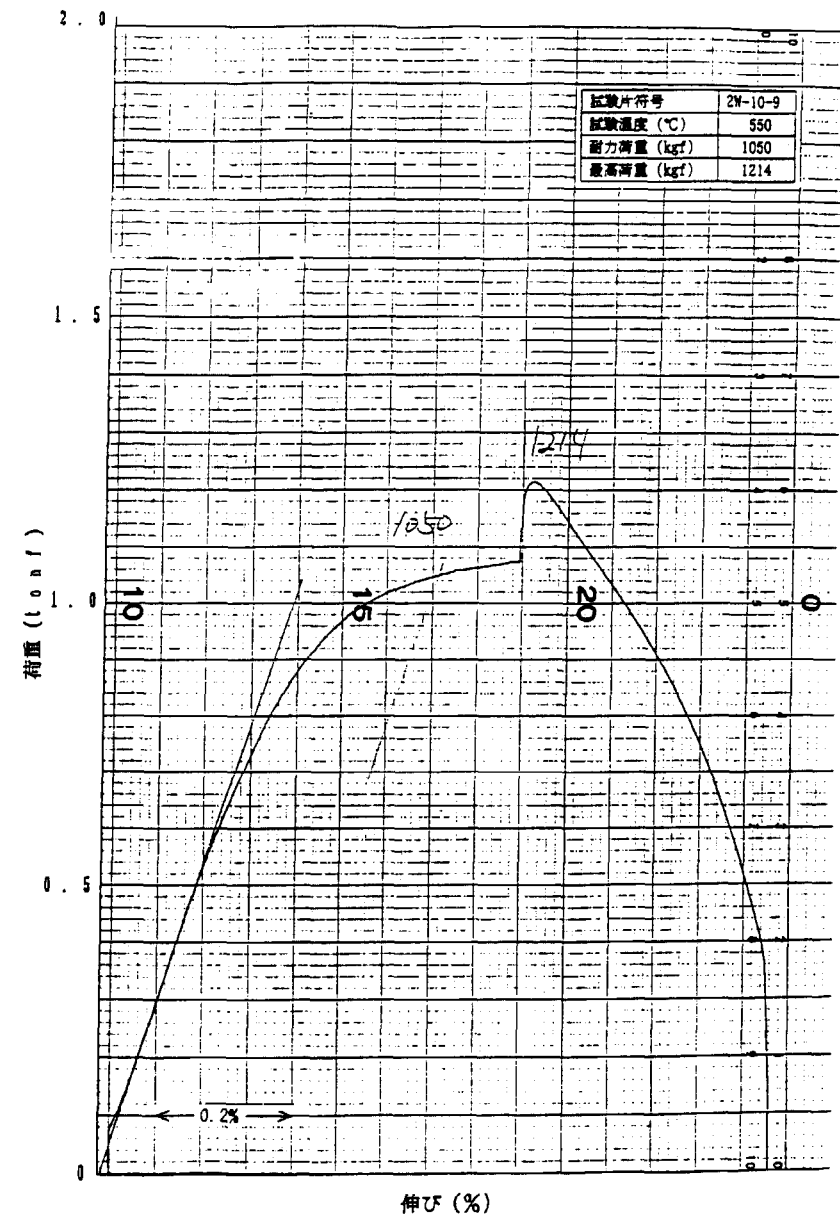


Fig. A-8 Load-Displacement diagram of tensile test at 550°C (2W-10-9)

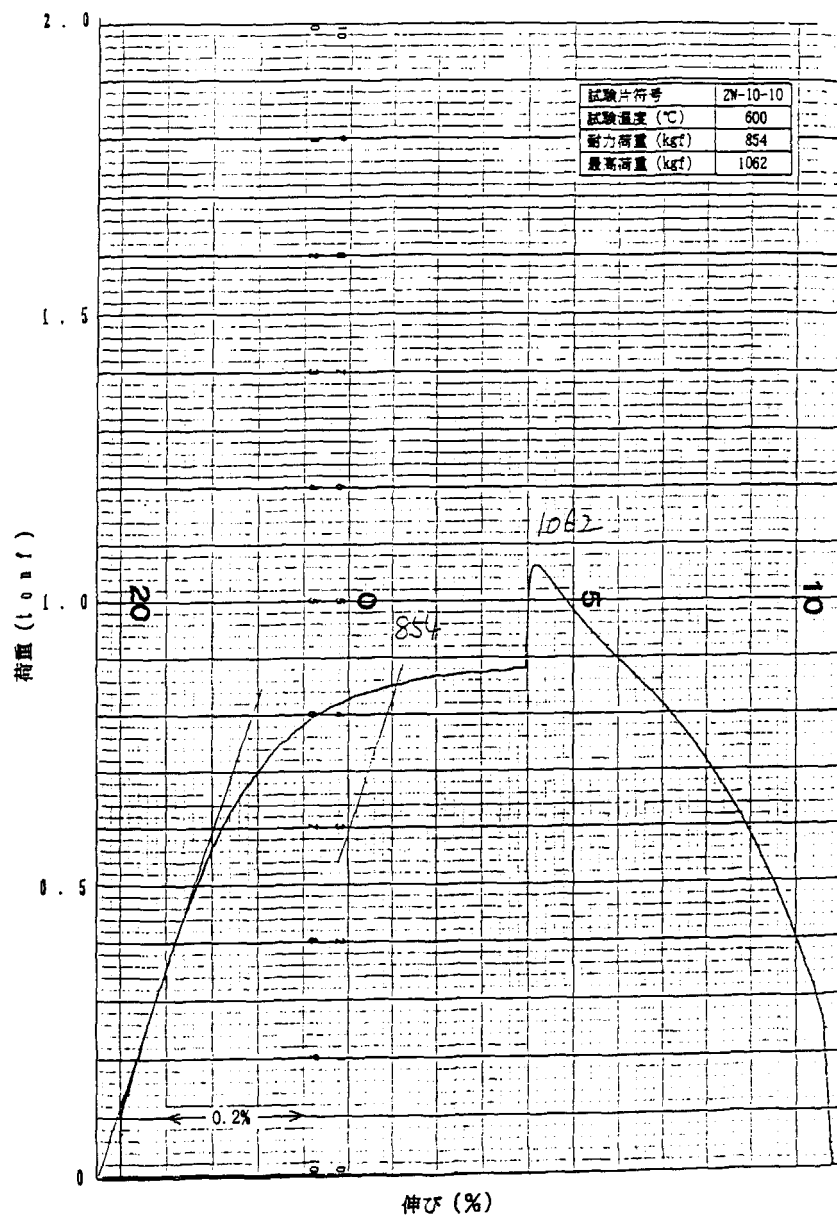


Fig. A-9 Load-Displacement diagram of tensile test at 600°C (2W-10-10)

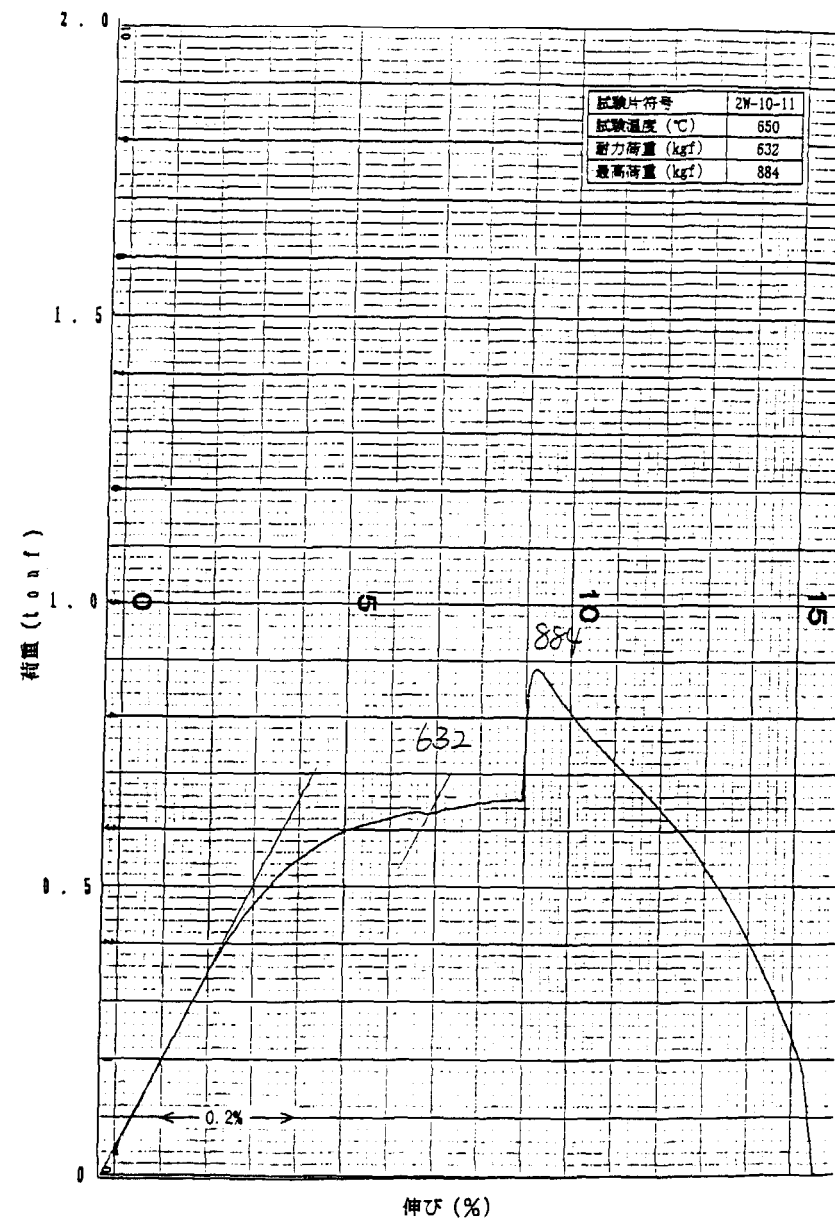


Fig. A-10 Load-Displacement diagram of tensile test at 650°C (2W-10-11)

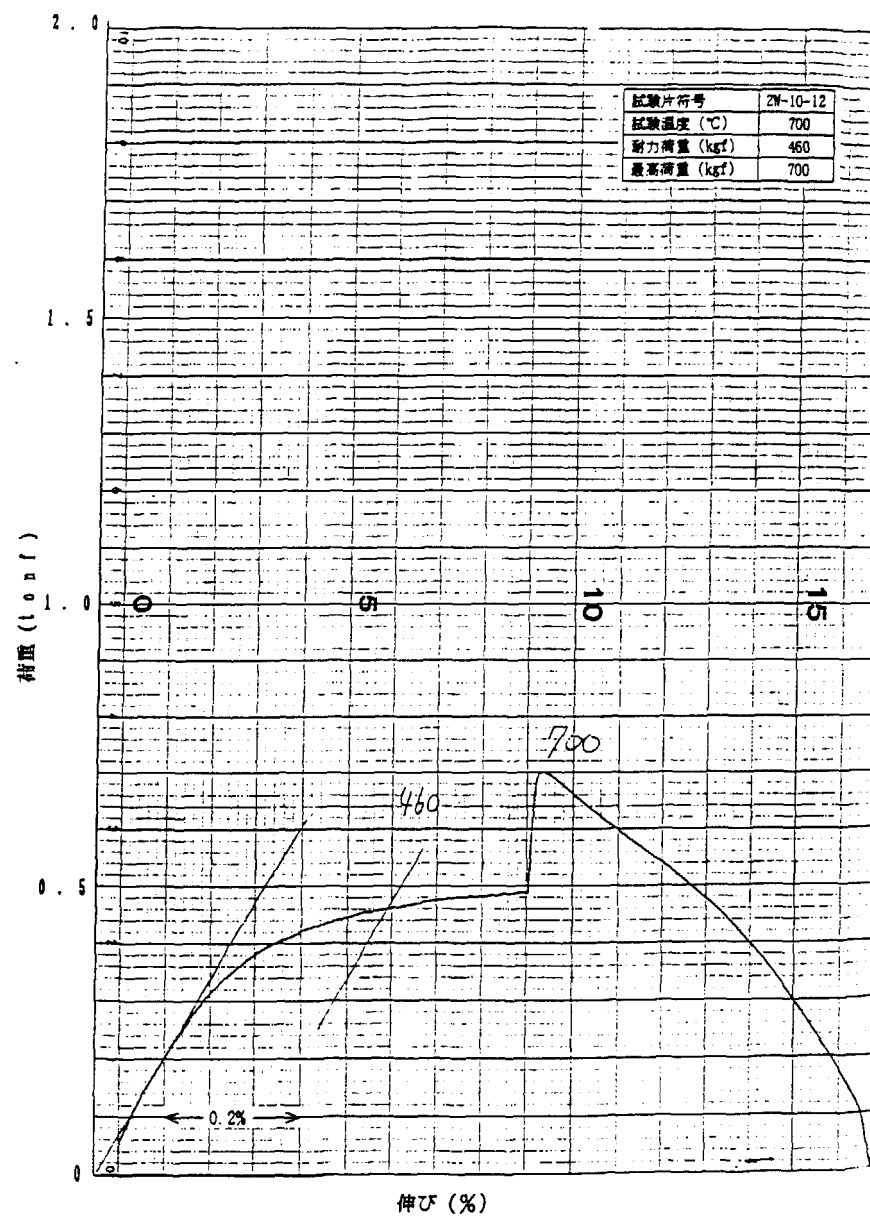


Fig. A-11 Load-Displacement diagram of tensile test at 700°C (2W-10-12)

付録 B 疲労試験応力歪ヒステリシス曲線

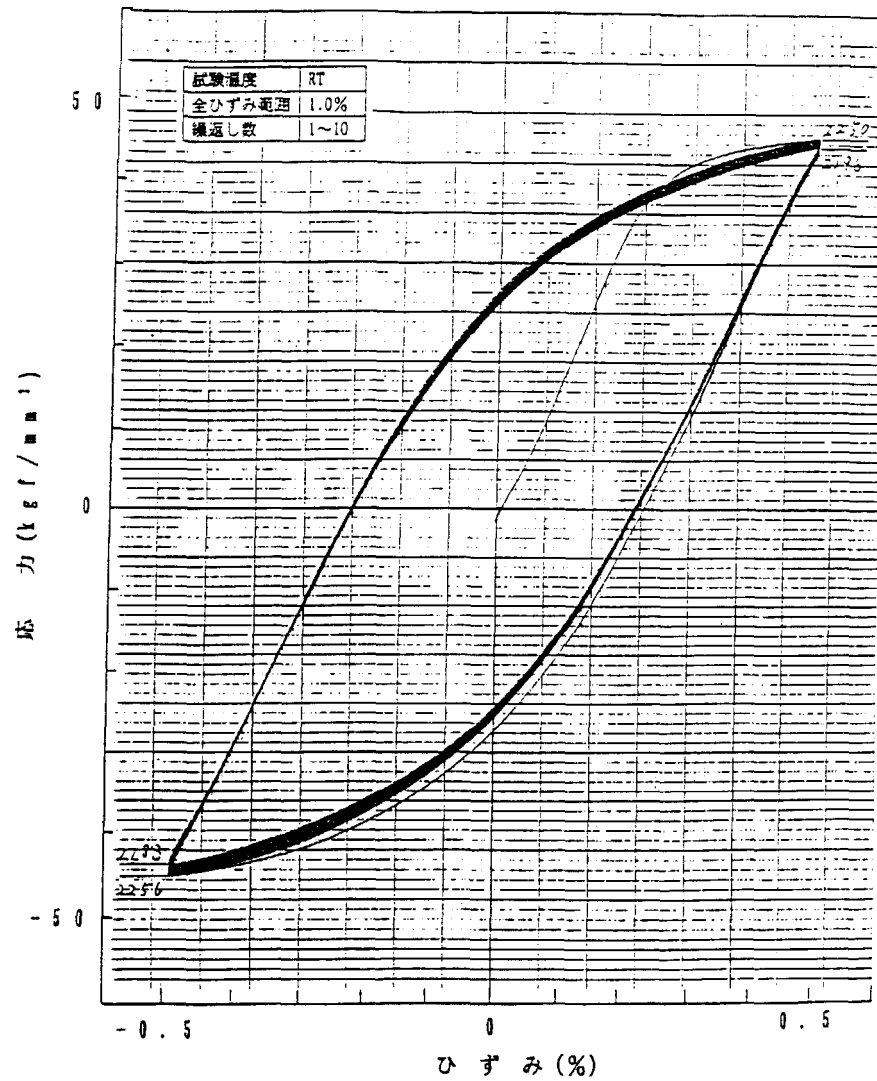


Fig. B-1 Stress-Strain hysteresis diagram of fatigue test at room temperature (Specimen ID:6, Total strain range: 1.0%, Cycle number: 1-10)

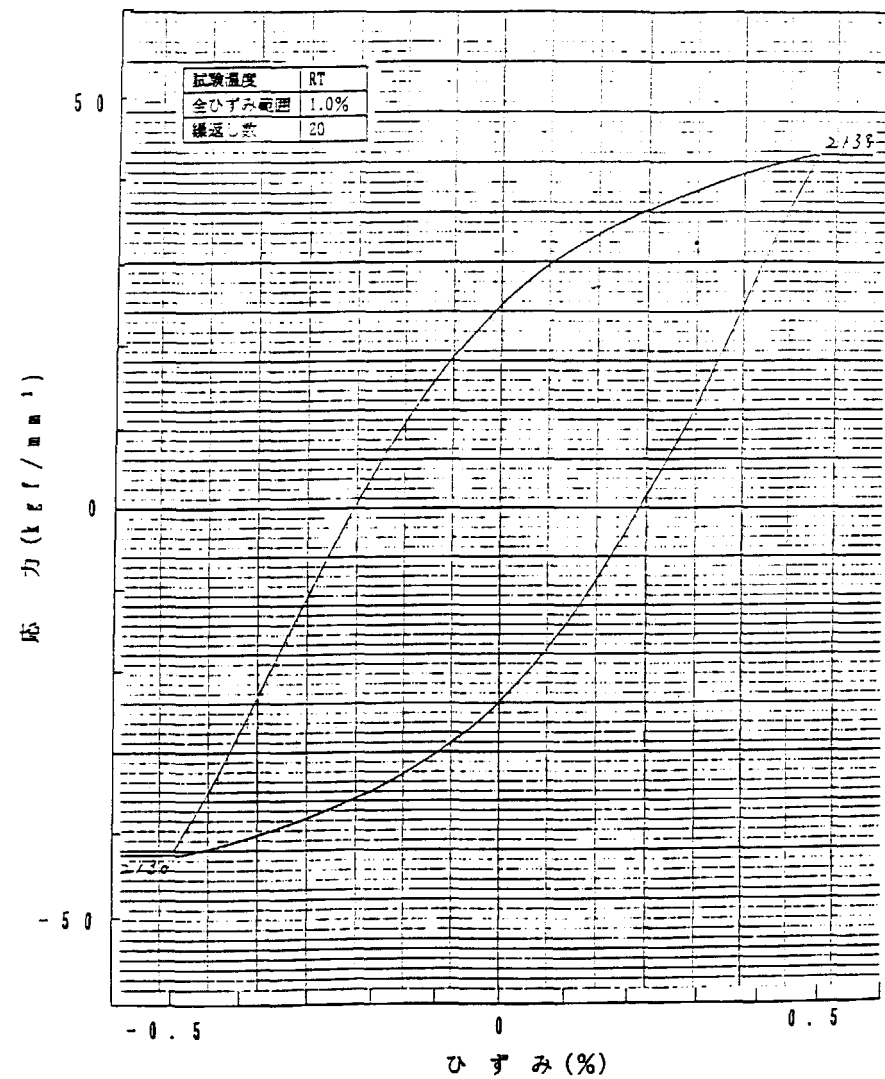


Fig. B-2 Stress-Strain hysteresis diagram of fatigue test at room temperature (Specimen ID:6, Total strain range: 1.0%, Cycle number: 20)

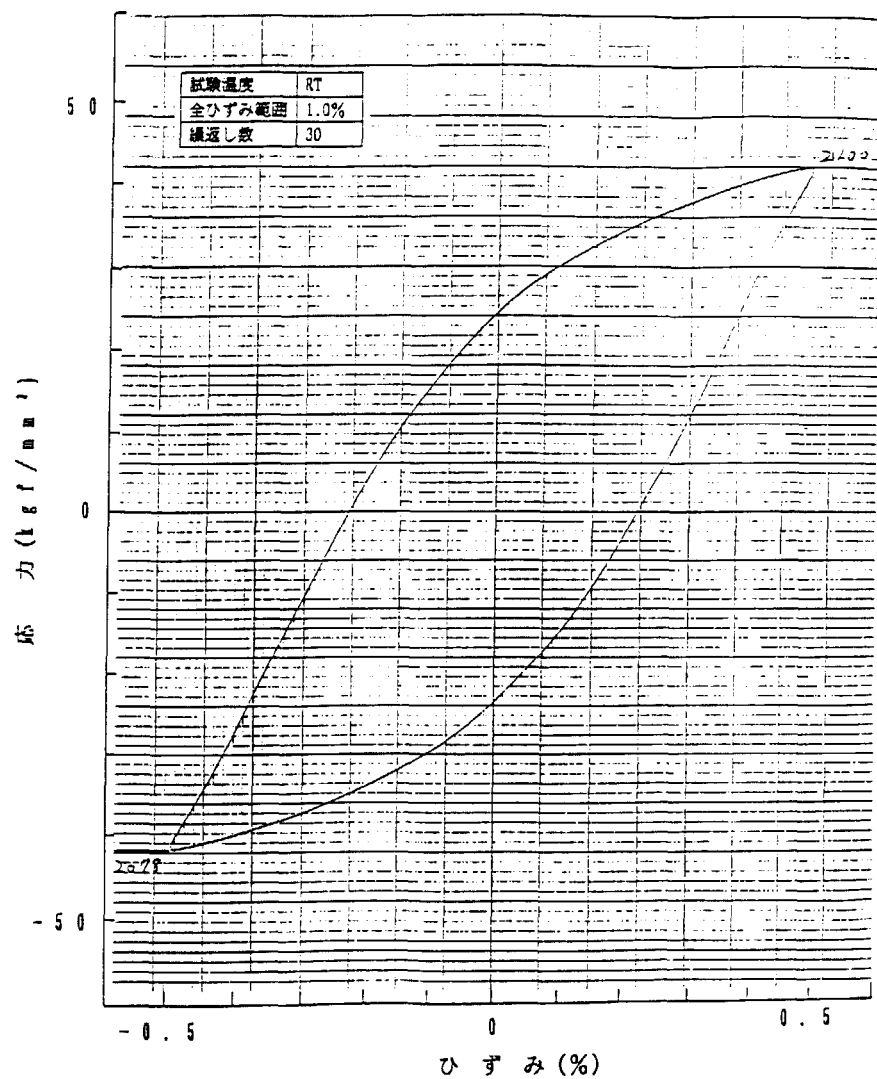


Fig. B-3 Stress-Strain hysteresis diagram of fatigue test at room temperature (Specimen ID:6, Total strain range: 1.0%, Cycle number: 30)

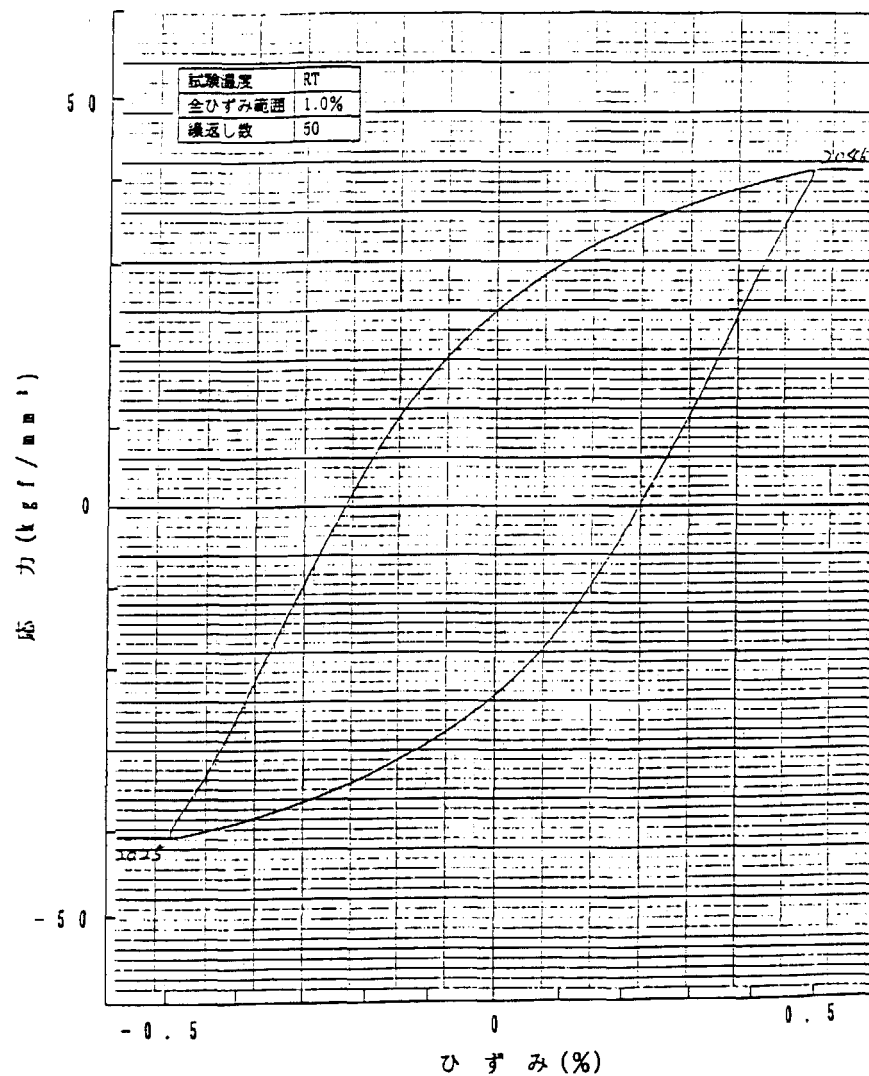


Fig. B-4 Stress-Strain hysteresis diagram of fatigue test at room temperature (Specimen ID:6, Total strain range: 1.0%, Cycle number: 50)

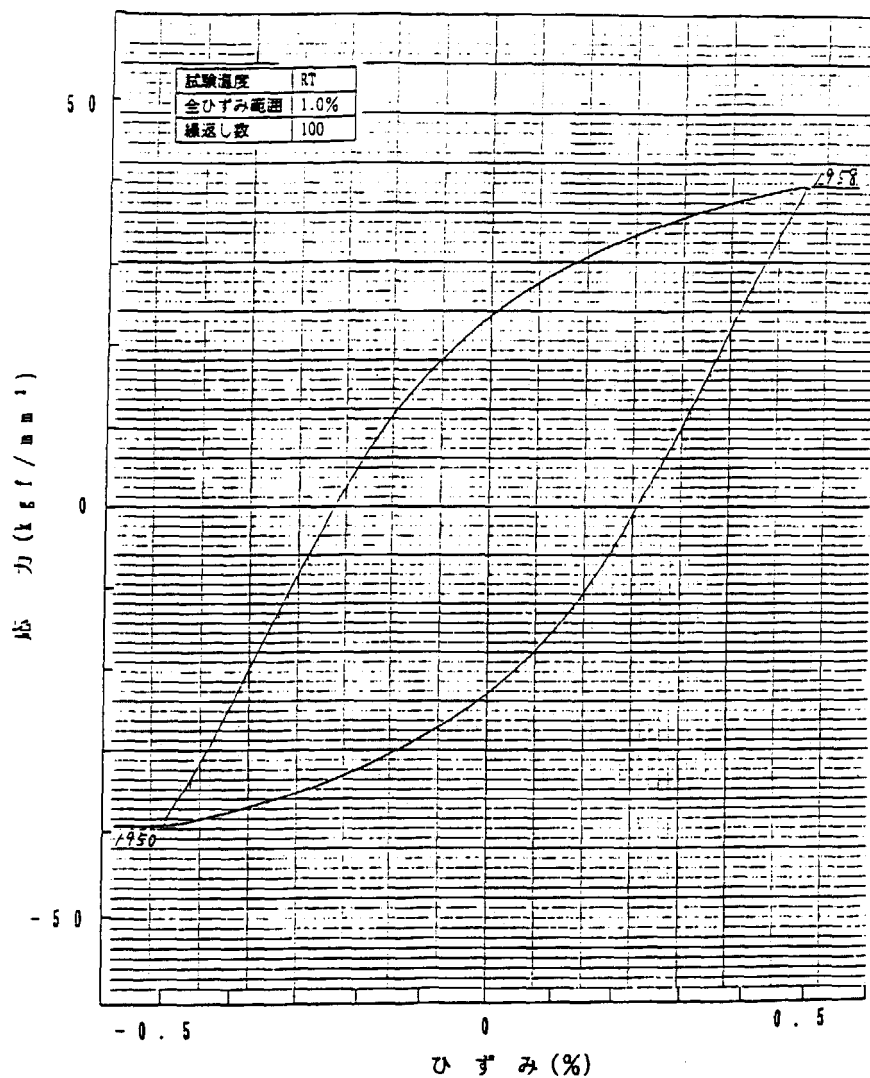


Fig. B-5 Stress-Strain hysteresis diagram of fatigue test at room temperature (Specimen ID:6, Total strain range: 1.0%, Cycle number: 100)

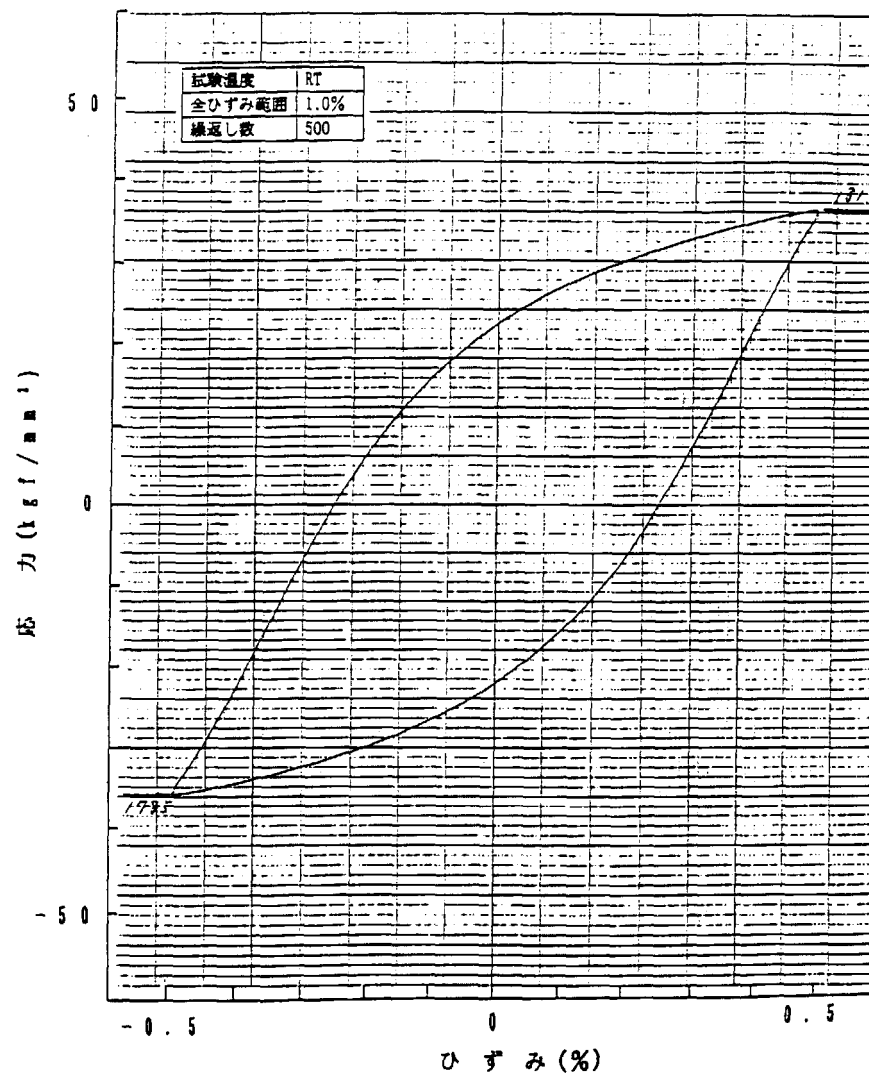


Fig. B-6 Stress-Strain hysteresis diagram of fatigue test at room temperature (Specimen ID:6, Total strain range: 1.0%, Cycle number: 500)

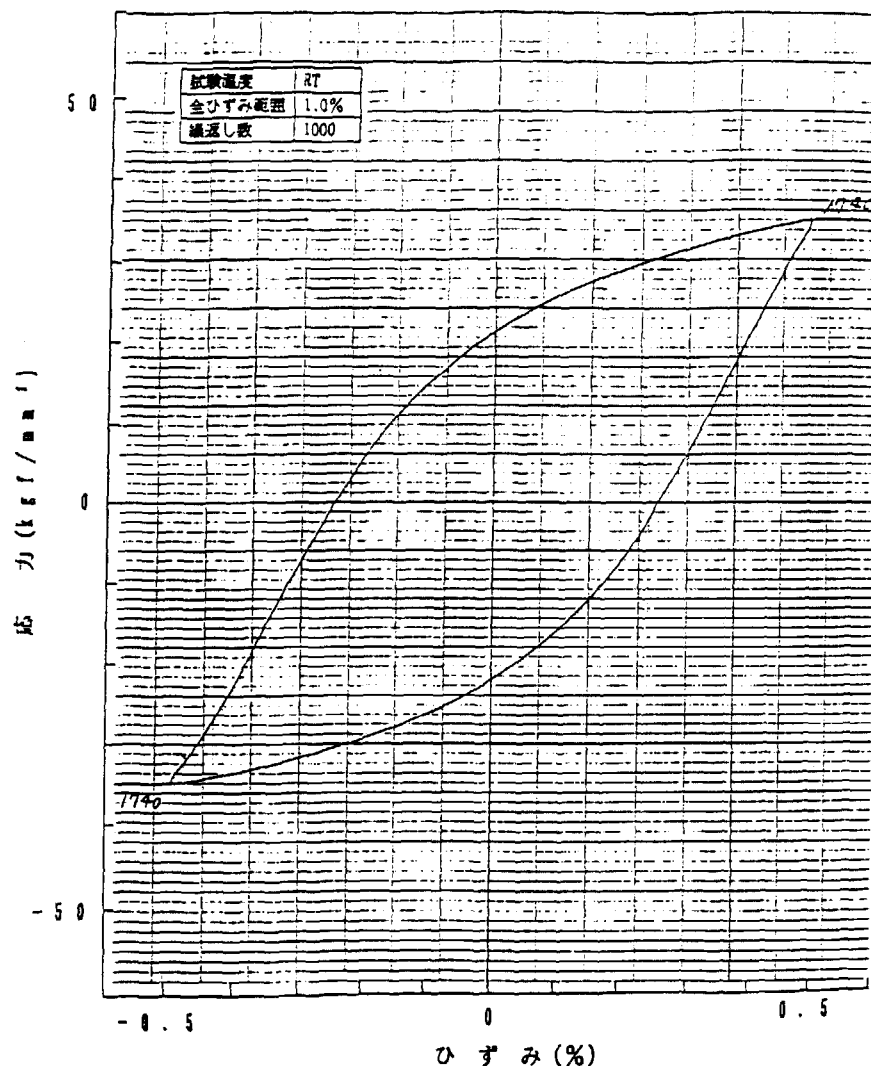


Fig. B-7 Stress-Strain hysteresis diagram of fatigue test at room temperature (Specimen ID:6, Total strain range: 1.0%, Cycle number: 1000)

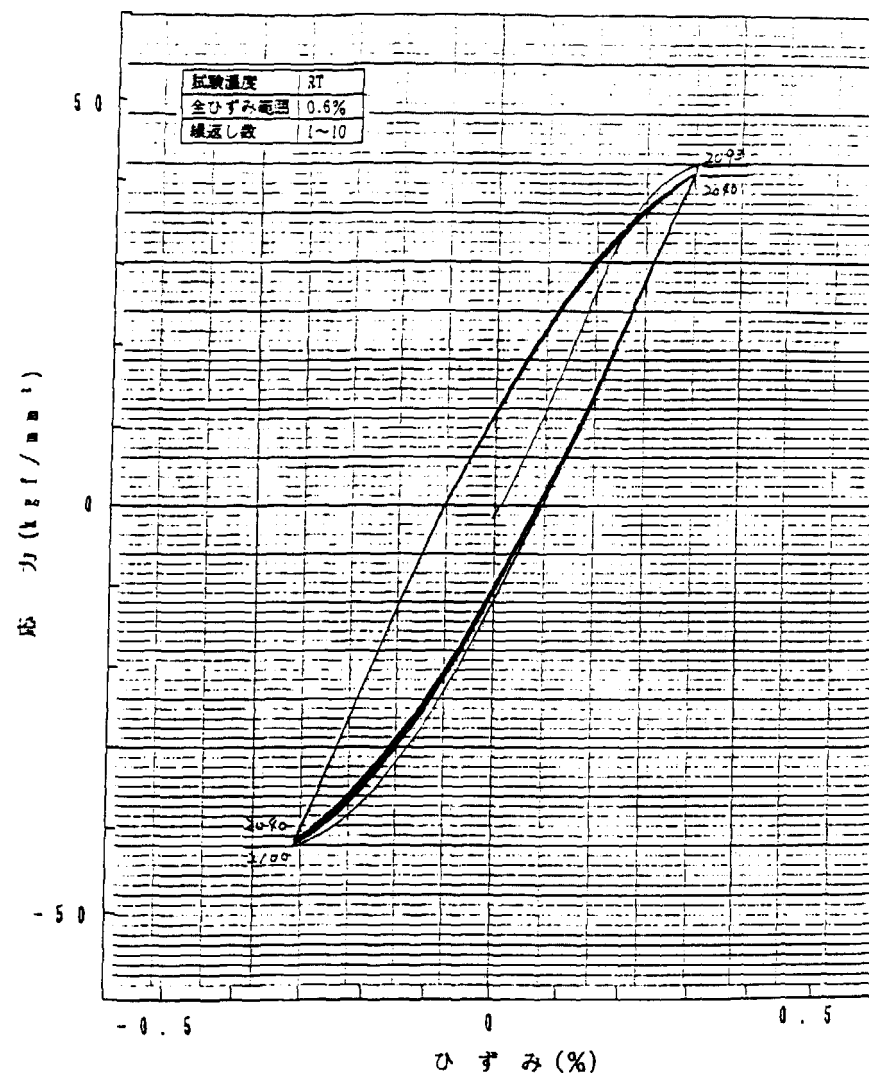


Fig. B-8 Stress-Strain hysteresis diagram of fatigue test at room temperature (Specimen ID:7, Total strain range: 0.6%, Cycle number: 1-10)

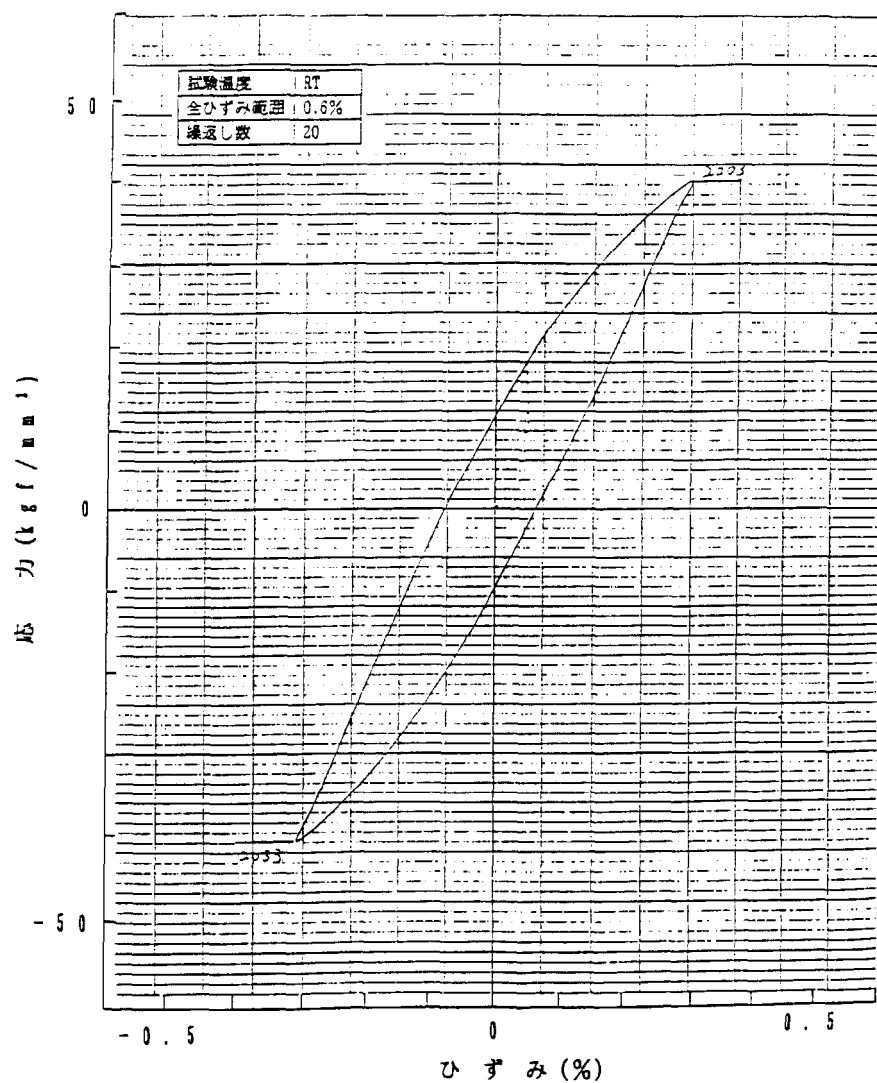


Fig. B-9 Stress-Strain hysteresis diagram of fatigue test at room temperature (Specimen ID:7, Total strain range: 0.6%, Cycle number: 20)

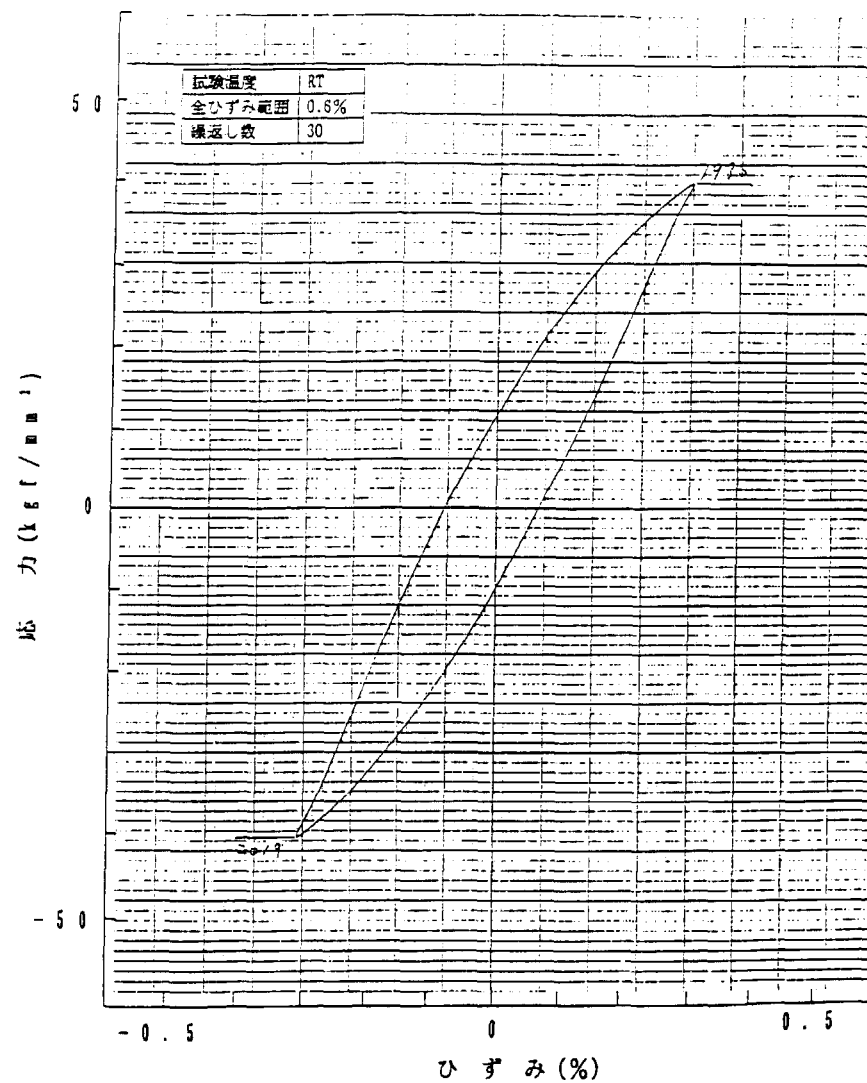


Fig. B-10 Stress-Strain hysteresis diagram of fatigue test at room temperature (Specimen ID:7, Total strain range: 0.6%, Cycle number: 30)

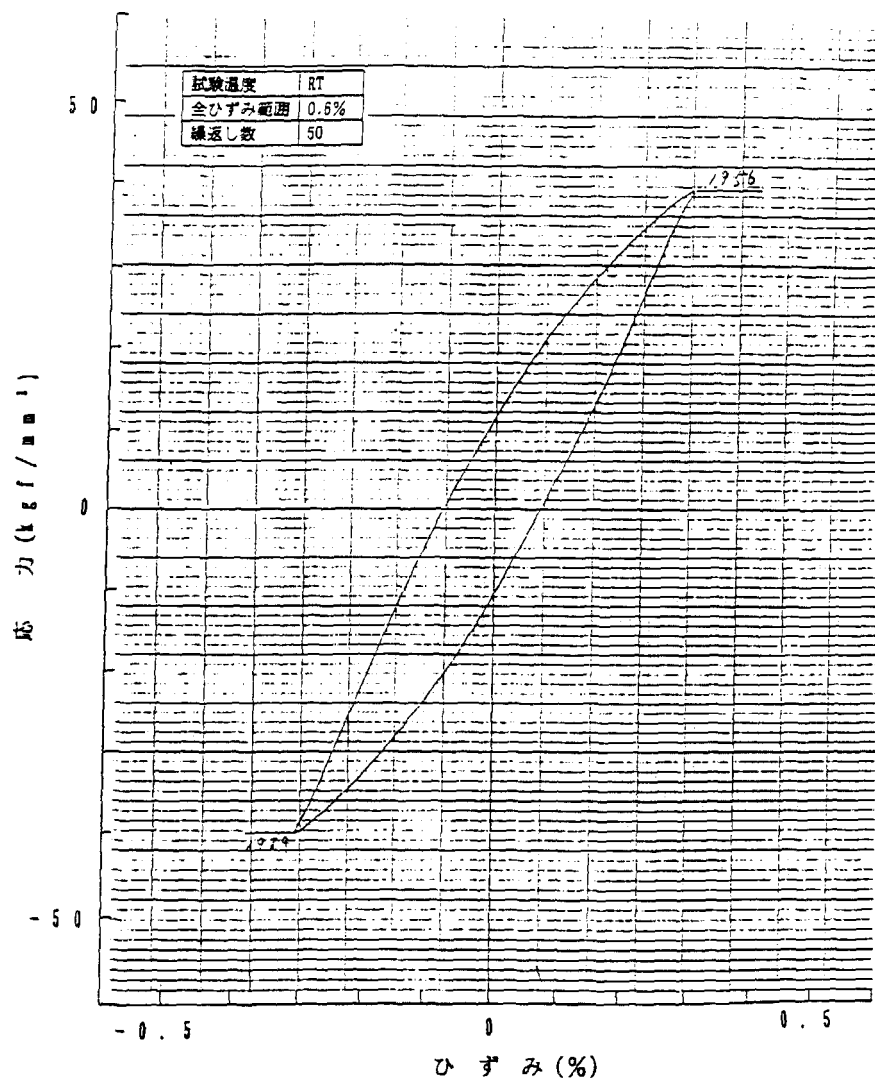


Fig. B-11 Stress-Strain hysteresis diagram of fatigue test at room temperature (Specimen ID:7, Total strain range: 0.6%, Cycle number: 50)

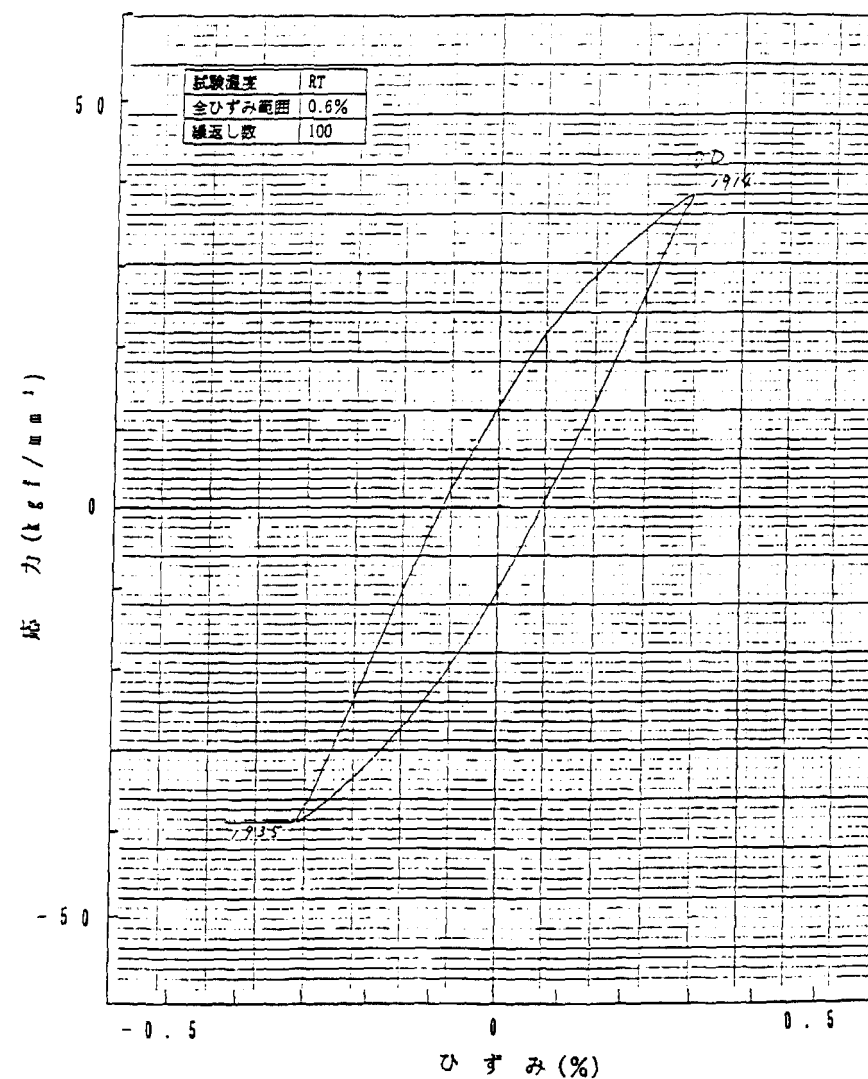


Fig. B-12 Stress-Strain hysteresis diagram of fatigue test at room temperature (Specimen ID:7, Total strain range: 0.6%, Cycle number: 100)

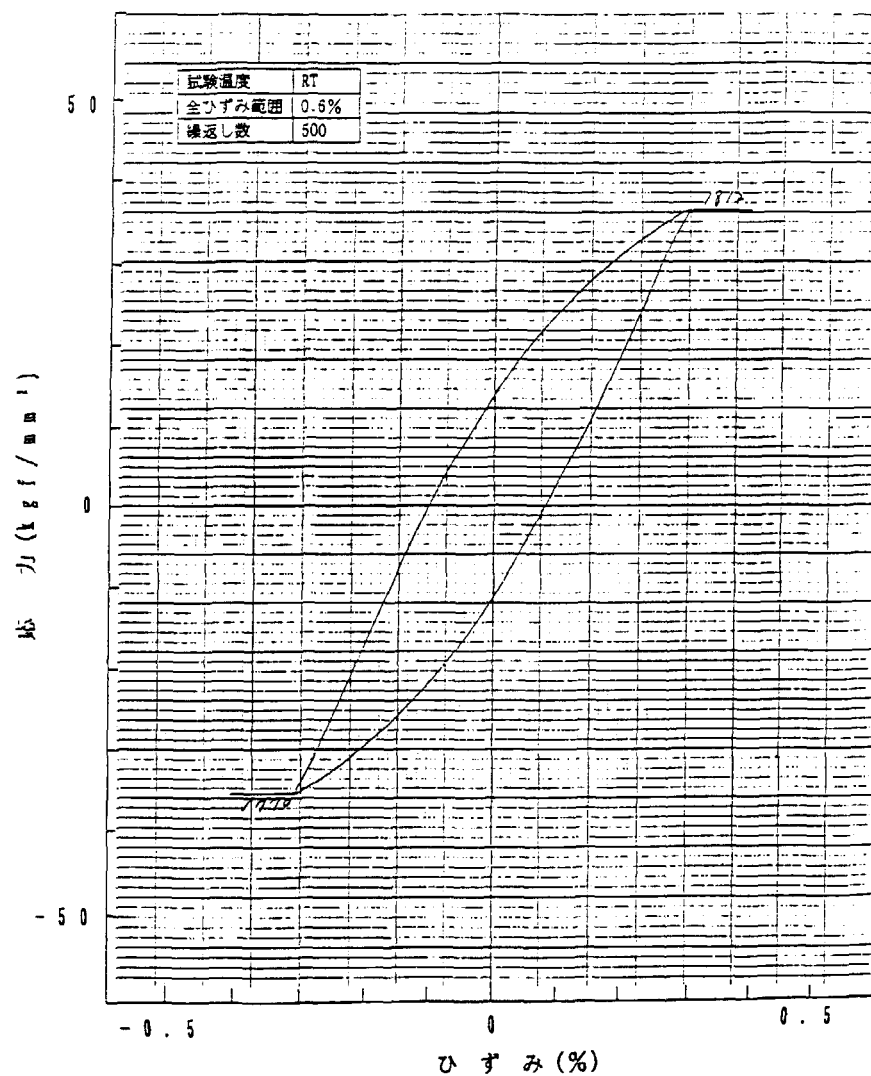


Fig. B-13 Stress-Strain hysteresis diagram of fatigue test at room temperature (Specimen ID:7, Total strain range: 0.6%, Cycle number: 500)

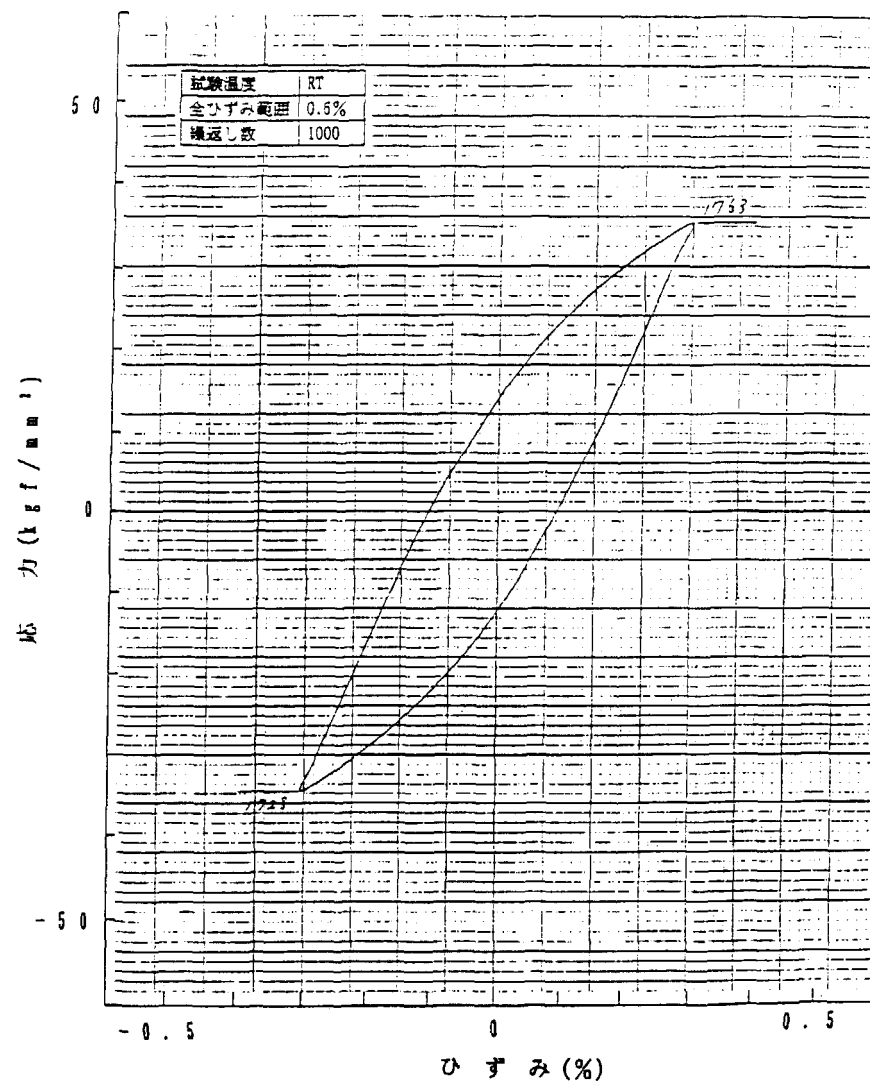


Fig. B-14 Stress-Strain hysteresis diagram of fatigue test at room temperature (Specimen ID:7, Total strain range: 0.6%, Cycle number: 1000)

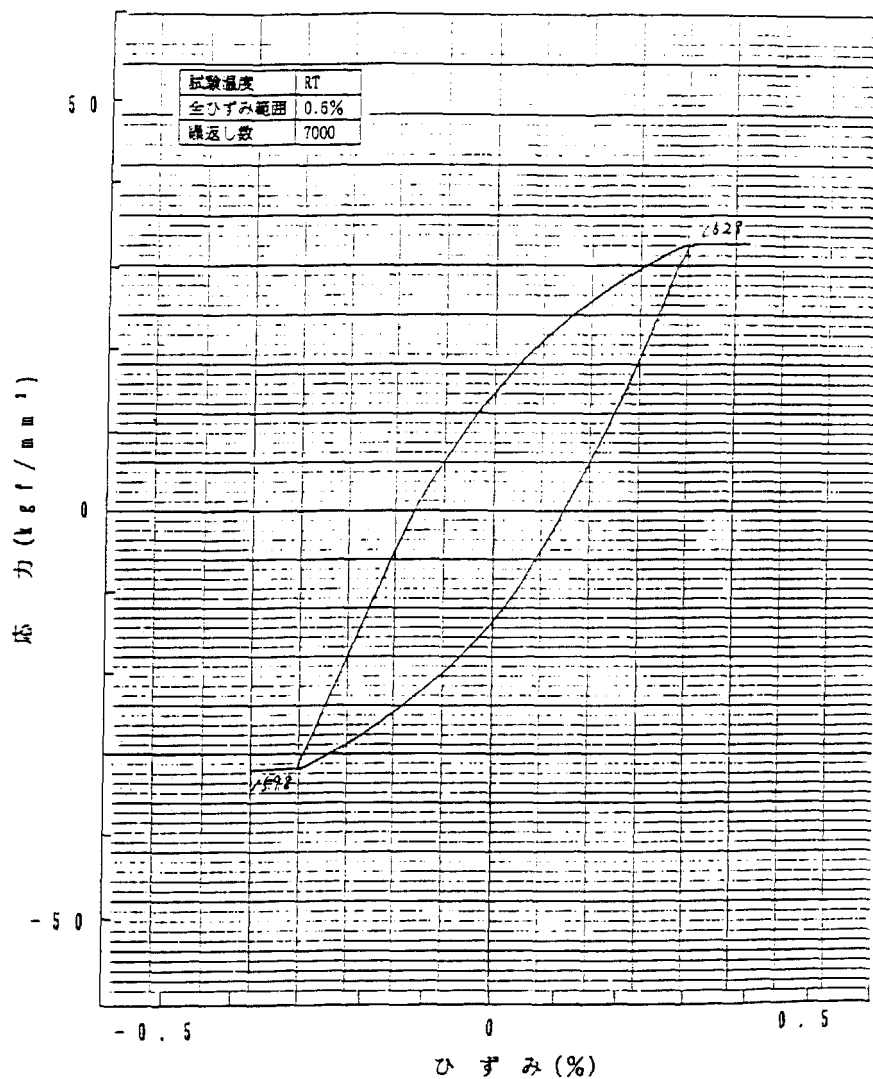


Fig. B-15 Stress-Strain hysteresis diagram of fatigue test at room temperature (Specimen ID:7, Total strain range: 0.6%, Cycle number: 7000)

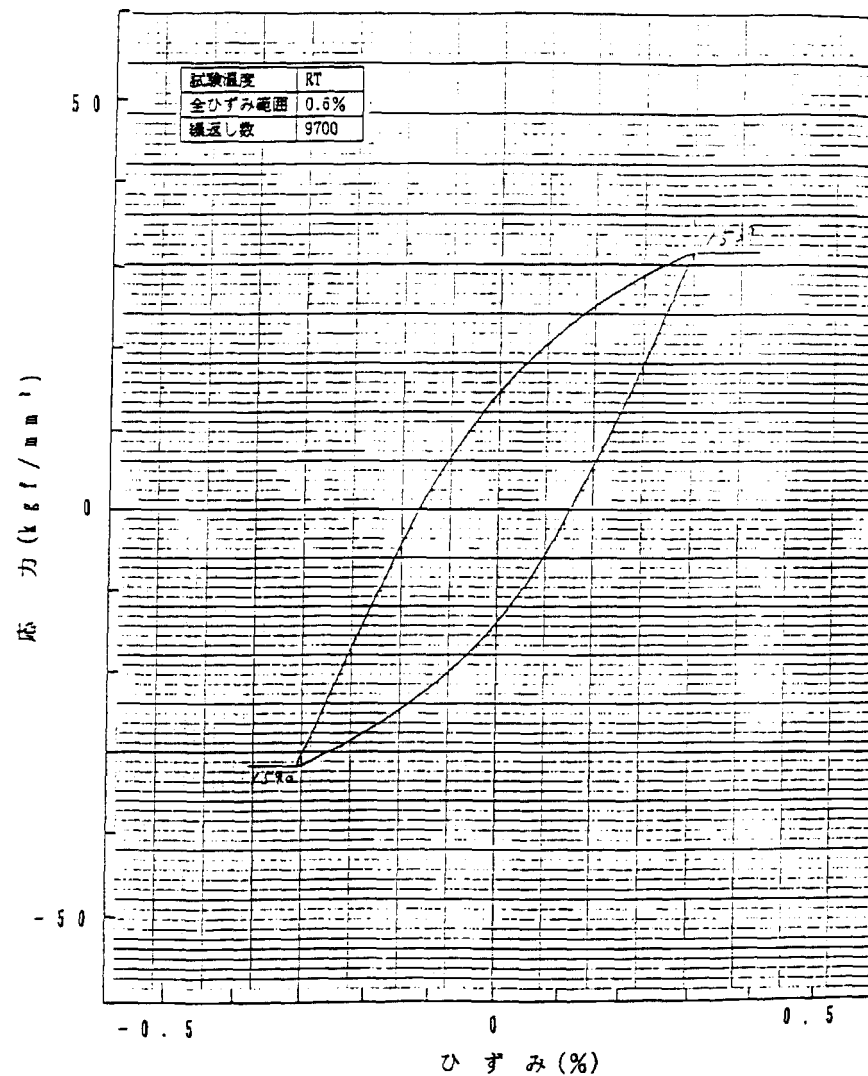


Fig. B-16 Stress-Strain hysteresis diagram of fatigue test at room temperature (Specimen ID:7, Total strain range: 0.6%, Cycle number: 9700)

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位 による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
工率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バ	b
バール	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$$1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm} = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局 1985年刊行による。ただし、1 eV および 1 uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクトールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC 閣僚理事会指令では bar, barn および「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N (=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa} \cdot \text{s} (\text{N} \cdot \text{s/m}^2) = 10 \text{ P (ポアズ)} (\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St (ストークス)} (\text{cm}^2/\text{s})$$

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg (Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV	1 cal = 4.18605 J (計量法)
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸	= 4.184 J (熱化学)
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹	= 4.1855 J (15 °C)
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵	= 4.1868 J (国際蒸気表)
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹	仕事率 1 PS (仏馬力)
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹	= 75 kgf·m/s
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸	= 735.499 W
	1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁸	1	

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

