

JAERI-M

5 5 9 5

J M T R 試用期間照射報告書
第3部 鉄鋼関係

1974年3月

材料試験炉部

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

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

J M T R 試用期間照射報告書・第 3 部(鉄鋼関係)

日本原子力研究所大洗研究所材料試験炉部

(1974年2月4日受理)

J M T R 試用期間の鉄鋼関係照射について、鋼種別に試験目的と照射結果並に検討結果をまとめ第3分冊としたものである。その結果を2~3例示すると、1) フェライト結晶粒度の照射脆化への影響は、微細な程照射感受性は少ないと、2) S M 5 0 A のステンレスクラッド材について、圧延クラッド材は肉盛クラッド材に比し照射脆化感受性は小さいこと、3) A 5 3 3 B 鋼のオーステナイト結晶粒度の照射脆化感受性については文献の結果と異なり感受性は認められなかったこと、4) ステンレス鋼の460~500°C, $10^{20} n/cm^2$ 程度の高温照射では強度・伸びともにあまり変化しないこと、5) P C 鋼線の照射効果については、レラクセーションロス値は照射前に比し低下していることが傾向としていえること、などがあげられる。一般的に言って、今回の照射により、キャブセルの設計・製作・ハンドリング・照射後試験などに習熟し得、照射条件の実現の精度を知り得たことは有用であった。

JAERI-M 5595

Trial Irradiation in JMTR
Part 3 Iron and Steel

Division of JMTR, Oarai, JAERI

(Received February 4, 1974)

The purposes of irradiation of iron and steel performed in the trial JMTR irradiation period, and the results are described. Among the results obtained are; 1. The smaller the grain size of ferritic steel, the less becomes its irradiation sensibility, concerning neutron-irradiation embrittlement. 2. The irradiation sensibility of SM50A stainless-steel cladding is smaller in rolling than in welding. 3. The irradiation sensibility of austenitic A533B steel is not influenced by its grain size, differing from reports in the literature. 4. In high-temperature neutron irradiation ($460-500^{\circ}\text{C}$), the change in mechanical properties of stainless steels by irradiation is not appreciable until the dose about 10^{20}n/cm^2 . 5. The relaxation loss of PC steel wire tends to decrease with irradiation. By irradiations in the trial period, valuable experiences and useful information could be obtained in design, fabrication and handling of irradiation capsules, post-irradiation examination, and neutron-dose measurement.

目 次

1 まえがき	1
2 照射試験検討結果	16
2.1 軟 鋼	16
2.1.1 アルミキルド鋼	16
2.1.2 Ti, Nb 添加パーライトフリー鋼	16
2.1.3 SM41B鋼	17
2.1.4 クラッド材	17
2.2 低合金鋼	30
2.2.1 A302B鋼	30
2.2.2 A543C ℓ 1鋼	30
2.2.3 A542鋼	31
2.2.4 A542 Modify 鋼	31
2.2.5 A533B鋼 — 热履歴の影響	32
2.2.6 A533B鋼 — エレクトロスラグ溶接部	32
2.2.7 A533B鋼 — サブマージドアーク溶接部	33
2.2.8 A533B鋼 — MIG溶接部	34
2.3 ステンレス鋼	57
2.3.1 高速炉用構造部鋼材	57
2.3.2 高速炉用燃料被覆管	58
2.3.3 各種ステンレス鋼管	59
2.3.4 SUS316冷間圧延鋼板	59
2.3.5 コルモノイ溶射SUS304棒	60
2.3.6 炉心部材用合金鋼	61
2.4 その他	81
2.4.1 PC鋼線	81
2.4.2 3.5%Ni鋼, 9%Ni鋼, 18%Niマルエージング鋼	82
2.4.3 ポルト鋼, 超高張力鋼など	83
3 照射キャップセルおよび照射データ	92
3.1 キャップセルおよび試料内訳	92
3.2 キャップセル構造, 試料配置および温度記録	92
3.3 中性子照射量	127
4 あとがき	134
参考文献	136

1 まえがき

J M T R 試用期間の材料照射計画は、J M T R 利用小委員会（小委員長 三島良績）の下部機関である材料グループ（リーダー 長谷川正義）が立案したが、とくに鉄鋼材料については、昭和42年日本鉄鋼協会の中に設けられた材料試験原子炉利用委員会（委員長 長谷川正義）に計画を依嘱した。

材料試験原子炉利用委員会は、鉄鋼メーカー、各大学、研究所の協力を得て、各種の炭素鋼、高張力鋼、低温用鋼、強靱鋼、ステンレス鋼、あるいは溶接材・クラッド材などを用いて、その溶解法、熱処理法などにより冶金的因子を変化させ各々の照射脆化によよぼす因子の解明や確性試験などに関する計画を作成し、各担当機関は試験片の加工および照射前試験を実施した。

これらを材料キャップセルにまとめるに当り、本計画を忠実に実施するには、温度、中性子照射量などのパラメータが多く、相当数のキャップセルを必要とすることがわかった。

このためキャップセルの構造設計面では、シャルピー専用キャップセルの如き多量のシャルピー試片を収容できるキャップセルを考案するなどして、これらの計画を12本のキャップセルにまとめた。

また材料照射ではとくに中性子照射量が問題となることが判ったので、Fe, Al-Co, Niなどのドシメトリー ワイヤを数多く入れた。

当初速中性子束の炉心半径方向の傾斜は大きく、照射中キャップセルを回転させないと一様な照射はできないと考え、回転キャップセルを試作し照射を行なった。

速中性子束の測定結果からみると、全試料を12個のキャップセルにまとめたためと、キャップセル内の速中性子束の傾斜が予期した程は大きくなかったため、委員会が意図したような中性子照射量の幅が出ないものもあった。

とくに中性子照射量については、諸外国における数多くのシャルピー試験結果との対比などから、中性子照射量の実測値を再検討するなどの責重を結果が得られた。

照射試料の形状については、J I S 規格では大きさなどが不適当であることがわかり、引張試片、硬度試片などについてJ M T R の標準規格が生まれたことは収穫であった。またこの標準試片をもとにリーキーキャップセルの標準化が行なわれた。

また外国では熱媒体としてNaまたはNaKをひろく材料キャップセルに用いているが、Alのとき固体の熱媒体で充分設計できることがわかった。

P C 鋼線については、材料試験原子炉利用委員会の下にP C 鋼線小委員会ができ、検討が行なわれた。P C 鋼線は炉冷却水に直接ふれると錆を生じ易く、しかもできるだけ炉冷却水に近い温度での照射の希望があるため、検討の結果メッキを行なってこれをリーキーキャップセルで照射することとし、照射後試験用の装置も利用委員会内部の努力により製作され、有用な照射データを得た。

表1.1に試験目的別の供試材一覧表、表1.2～1.7に鋼種別の供試材一覧表を示す。表1.8には本書で用いている各種記号を示す。

以下に鋼種別に照射試験の目的と検討結果を述べ、参考資料として照射キャップセルと照射データを示す。
尚、供試材毎の照射前後の生データは膨大なため別冊にまとめて付録とした。

表 1.1 照射試験の供試材一覧表

鋼種	試験の目的と意義	目標照射条件, n/cm ² (>1MeV)
アルミニウム	1) 炭素鋼の照射脆化におよぼす金属組織の基本的影響 2) 照射脆化した実用鋼の置換型固溶元素と焼きなましの関係	2~4×10 ¹⁹ , <100°C 1~4×10 ¹⁹ , <100°C
低炭素鋼	1) 固溶炭素、よう素の影響とTi, Nbによる炭化物安定化の効果	2~4×10 ¹⁹ , <100°C
SM 41B鋼	1) 耐照射性におよぼす試料純度の影響	2~4×10 ¹⁹ , <100°C
クラッド材	1) ステンレスクラッド部分の照射による機械的、組織的变化	2~5×10 ¹⁹ , <150°C
ASTM A302B鋼	1) LD転炉製鋼の耐照射性の確認、照射量の影響 2) 電気炉製鋼の確性試験	2.9~3.5×10 ¹⁹ , <100°C
ASTM A543 cl 1鋼	1) 確性試験と焼入冷却速度および応力除去焼鈍の影響 2) 照射脆化した実用鋼の置換型固溶元素と焼きなましの関係 3) 米国製の材料で国外における照射試験結果との比較	2.5~3.5×10 ¹⁹ , <100°C 1~4×10 ¹⁹ , <100°C 3×10 ¹⁹ , <100°C
ASTMA542鋼	1) AIN処理(IN処理)の耐照射脆化におよぼす影響 2) 真空溶解材の溶解およびUM溶接部の比較 3) 照射脆化した実用鋼の置換型固溶元素と焼きなましの関係	2.5×3.5×10 ¹⁹ , <150°C 2.5~3.5×10 ¹⁹ , <100°C 1~4×10 ¹⁹ , <100°C
ASTM A 533B鋼	1) 壓力容器製造過程における熱履歴の照射脆化の影響 2) 板厚170, 250についての溶接条件の影響 3) SM溶接金属の組成を変化させ、その溶接部の耐照射性 4) 超厚板に対する狭間先溶接法の確性試験	2.5~3.5×10 ¹⁹ , <100°C 3~3.5×10 ¹⁹ , 260°C 0.7~5×10 ¹⁹ , <100°C 2~5×10 ¹⁹ , <100°C
SUS 304, 347鋼	1) 炉心および燃料アセンブリ構造部材の予備的照射効果	10 ²⁰ ~10 ²¹ , <100°C 500~300°C
SUS 316鋼	1) 高温照射下における鋼中の微量ボロン量と結晶粒度の影響 2) 高速炉圧力容器用鋼材の確性試験および照射温度の影響 3) 高速炉用燃料被覆管の予備的な確性試験	~10 ²¹ , 600°C 5×10 ²⁰ ~10 ²¹ , <100°C 500~600°C 10 ²⁰ ~10 ²¹ , 600°C
Inconel 600	1) 炉構造、計測部材としての特殊ステンレス鋼の予備的試験	3×10 ²⁰ , <100°C
17-4 PH鋼	1) 炉構造、計測部材としての特殊ステンレス鋼の予備的試験	3×10 ²⁰ , <100°C
PC鋼線	1) 原子炉格納容器としてのpc鋼線の予備的研究	1×10 ¹⁸ ~3×10 ¹⁹ , <100°C
ASTM A350LF3鋼	1) 低温用鋼の照射脆化感受性について	2~4×10 ¹⁹ , <100°C
ASTM A353-64鋼	1) 低温用鋼の照射脆化感受性について	2~4×10 ¹⁹ , <100°C
マレージング鋼	1) 強制鋼の照射脆化感受性について	2~4×10 ¹⁹ , <100°C
ボルト鋼・HST140	1) 高速炉blast shield用鋼材のエネルギー吸収能を知る	1×10 ¹⁹ , <100°C 1×10 ²⁰ , <100°C
DMS 60A, ポンペイ鋼, HJ-Z	1) 国産高張力鋼の予備的な確性試験	1~5×10 ¹⁹ , <100°C

協会No.	I - 1	I - 8				
記号	アルミニウム鋳鋼	Ti, Nb 添加バーライトフリー鋼				
		(Nb材)	(比較材)	(Ti材)	(比較材)	
炉	150t 平炉	150t 平炉	150t 平炉	4Kg 高周波 大気溶解炉		
鋼塊	9500Kg	7600Kg	7600Kg			
	上注	上注	上注			
スラブ寸法	125×1050×2555 (mm)	150×800×2250	150×800×2250			
鋼板寸法	19×1524×6096 (mm)	20×2500×4400	20×2500×4400	12φ		
熱処理	(焼純) 930°C 3hr 炉冷 $G_\alpha = 4.1$	(焼準) 930°C 2hr 空冷 $G_\alpha = 6.7$	(焼入) 920°C 2hr 水焼入 650°C 1hr 空冷 $G_\alpha = 8.3$	900°C 2hr 空冷	950°C 2hr 空冷	930°C 2hr 空冷
C	0.15		0.017	0.015	0.13	0.15
Si	0.27		0.30	0.21	0.17	0.27
Mn	0.79		1.18	1.23	0.24	0.79
P	0.018		0.011	0.011	<0.005	0.018
S	0.017		0.043	0.014	<0.005	0.017
分析値(wt%)	Cu 0.04 Cr 0.05 Mo 0.005 Ni 0.02 Al (sol) 0.040 (in sol) 0.003 N (sol) 0.0064 (in sol) 0.0005 Nb		0.04 0.01 0.003 0.18 (sol) 0.053 (in sol) 0.005 (sol) 0.0042 (in sol) 0.0055 0.085	0.01 0.003 0.0109 (in sol) 0.0005 Tr	0.04 <0.01 0.0064 0.68	
Ti						

II - 2			II - 7			
SM41B 鋼			クラッド材			
普通純度 市販鋼	高純度 大気溶解鋼	高純度 真空溶解鋼	母材 (SM50A)	熱間圧延 クラッド(SUS38)	溶接肉盛クラッド 第1層(D309L)	溶接肉盛クラッド 第2層(D308L)
22t	4 Kg高周波 大気溶解炉 3 Kg 上注	30Kg 真空溶解炉 10 Kg アルゴン中上注				
	12φ	12φ				
	900°C					
	1 hr					
	空冷					
0.13	0.14	0.09	0.15	0.021	0.037	0.036
0.21	0.33	0.20	0.36	0.88	0.55	0.25
0.65	0.69	0.70	1.17	1.70	1.56	1.38
0.015	<0.005	<0.005	0.014	0.03	0.015	0.016
0.013	<0.005	<0.005	0.013	0.012	0.010	0.013
	tr	tr		18.56	24.76	20.57
				11.00	12.80	10.21
	0.02	tr				
	<0.01	<0.003				

供試材一覽表(2)
表1-3供試材一覽表

1/4

協会 No.	19	12-A,B,C		5-A1,B		5-A口		5-Aノ	
		チエック	チエック	チエック	チエック	チエック	チエック	チエック	チエック
	C	0.16	0.19	0.16	0.17	0.24	0.15	0.22	0.23
	Si	0.25	0.24	0.42	0.29	0.25	0.25	0.24	0.24
	Mn	1.30	1.33	0.40	0.38	0.56	0.58	0.55	0.52
	P	0.013	0.023	0.011	0.013	0.015	0.010	0.009	0.002
	S	0.004	0.026	0.009	0.023	0.006	0.008	0.005	0.004
	Cu	0.14	0.10	0.12	—	0.069	0.06	0.046	0.005
	Cr	0.033	0.04	1.70	1.88	2.26	2.17	2.48	2.49
	Mo	0.51	0.55	0.54	0.51	1.03	1.02	1.02	0.95
	Ni	0.034	0.02	3.30	3.65	0.045	0.06	—	—
	V	—	tr	—	—	0.006	0.006	—	—
	Co	0.036	0.006	0.040	0.010	—	—	0.008	0.049
	Sol Al	0.0013	—	—	0.002	—	—	0.011	0.009
	Insol Al	—	—	—	—	—	—	—	—
	T Al	0.037	—	—	0.008	—	—	—	—
	Sol N	—	—	—	0.002	—	—	—	—
	T N	—	8	—	—	—	—	—	—
	オーステンит組織	7.0	—	—	—	—	—	L	—
	引張方向	—	—	—	—	—	—	—	—
	牌状組織	49.2	52.4	54.9	65.2	61.4	59.5	63.2	62.4
	引張速度	62.8	62.6	67.4	78.6	74.4	74.4	75.7	78.8
	伸び	30	29.3	31.4	23.1	24.1	22.3	28.7	32.4
	試験片	—	64	71	78.2	77.7	76.8	76.8	74.0
	ビッカース硬度(10kg)	JIS 4号	JIS4#G=15	5#G=25	5#G=25	5#G=25	5#G=25	5#G=15	245
		204.6	210	264	238	238	238	238	245

表1.5. 供試材一覧表 (4)

供試材製造記録および照射前母材試験結果

鋼協会番号	9AB	17AB	20	住金	神鋼	日金工	316系	日本ステンレス	日金工	住友電工	日本治金	住友電工	
製造会社	八幡	日本治金	八幡	八幡	316N	304-1.41	304-1.61	347-W	316-S.T	316-W	316-B	316粗粒	
供試材略称 記号	316-30t 口	316-24t ■	316N X	316N ●	SUS 27 SUS 27	AISI 316 AISI 316	AISI 347 AISI 316	AISI 316 AISI 316	Inconel 600 SUS 27				
鋼種	AISI 316	AISI 316	AISI 316	AISI 316	AISI 316	AISI 316	AISI 316	AISI 316	AISI 316	AISI 316	AISI 316	コルモ14溶射 棒鋼	Inconel 600 17-4 PH
供試材 寸法 (mm)	30	24	12	12	12.7x1.4	12.7x1.56	12.7x1.3	6.3x0.35	6.3x0.34	4	2	75Φ x 6	
溶解炉 型式	工業式 板厚3.5mm外径4mm	電気炉 性炭炉	電気炉 性炭炉	電気炉 性炭炉	電気炉 性炭炉	電気炉 性炭炉	電気炉 性炭炉	電気炉 性炭炉	電気炉 性炭炉	電気炉 性炭炉	電気炉 性炭炉	真空溶解	
溶解炉 容量 (ton)	30	0.25	0.25	0.25	18	15	8	0.5	0.5	15	15		
上注、下注別	上注	上注	上注	上注	6,000	300	3,000	156Φ x 5,000	15	10	60	15	80
造塊	銅塊重量 (kg)	8,000	2,500	250	250	60x230xL	60x230xL	冷間圧延	熱間押出	熱間押出	熱間引抜	熱間引抜	1040 焼純時効処理
鋼塊またはスラブ寸法 (mm)	237 165x300xL	-	-	-	-	-	-	マネフ溝孔	マネフ溝孔	マネフ溝孔	マネフ溝孔	コルモ14溶射加工 機械研削加工	80 1030°C x 30min
製造工程	熱間圧延	-	-	-	-	-	-	冷間引抜	冷間引抜	冷間引抜	冷間引抜	水冷	水冷
熱処理 条件	保持温度 (°C)	1,100	1,050	1,100	1,040	1,070	1,050	1,100	1,150	1,050	1,100	1,200	1,080 焼純時効処理
冷却 条件	冷却	40	30	20	20	15	15	10	10	60	15	80 1030°C x 30min	16.59 15.52
雾 露 空 气	水冷	水冷	水冷	水冷	水冷	水冷	水冷	急冷	急冷	急冷	急冷	急冷	16.59 15.52
その他	C	0.051	0.07	0.074	0.07	0.07	0.04	0.04	0.06	0.07	0.03	0.05 Fe+Cr+Si	0.103 8
分析値 (%)	Si	0.48	0.73	0.53	0.69	0.48	0.54	0.64	0.60	0.56	0.78	0.62	0.29 0.40
分析値 (%)	Mn	1.74	1.75	1.70	1.86	1.61	1.40	1.68	1.68	1.66	1.65	1.22	0.52 0.54
分析値 (%)	P	0.026	0.037	0.018	0.015	0.024	0.015	0.026	0.024	0.022	0.025	0.33	0.006 0.024
分析値 (%)	S	0.011	0.010										

表1.4 供試材一覧表 (3)

供試材提供者		(株)日本製鋼所三重重工		日立製作所		(株)神戸製鋼所		三重重工							
試験記号	2-I-3		3-I-4			14-II-5		5-II-6							
母材の製造履歴と性質	種類	A533B CL1	A533B CL1	A533B CL1		軟鋼(SM41B)	A533B CL1								
	板寸法	173×4340×7800 ²⁵⁰ ×200 ³⁰⁰	173×4340×7800 ²⁵⁰ ×200 ³⁰⁰	149 ¹ ×3110 ^W ×4920 ^E		30 ¹ ×400 ^W ×1200 ^E	250 ¹ ×1000 ^W ×3000 ^E								
	溶解炉(種別及型式)	エル式低炭素電気炉	低炭素電気炉	—		—	低炭素電気炉								
	鋼塊重量	55ton	26ton	—		—	22.2ton								
		920°C×13h AC	900°C AC	900~930°C×9h AC		—	890°C WC								
	熱処理	680°C×17h AC	660°C AC	650~680°C×12h AC		—	660°C AC								
	その他	真空脱ガス法実施	同左	同左	—	—	真空脱ガス								
	チェック分析値(%)	C Si Mn P S Cu Cr Mo Ni Co Ti Al	0.19 0.27 1.35 0.018 0.009 0.24 0.12 0.56 0.67 — — —	0.20 0.27 1.39 0.013 0.011 — — — — — — 0.028	0.19 0.27 1.25 0.015 0.017 — — — — — — —	≤0.20 ≤0.35 0.6~1.20 ≤0.040 ≤0.040 — — — — — — —	0.19 0.23 1.25 0.011 0.009 — — — — — — —								
	オーステナイト粒度	6.5	—	7.5	—	—	—								
	引張性質	降伏点 Kg/mm ² 引張強さ Kg/mm ² 伸び % 絞り %	— — — —	— — — —	—	≥24 41~52 ≥22	45.7 59.6 28.6 65.1								
	ビックースかたさ 20Kg	—	—	—	—	—	—								
	シャルピー衝撃性質 -12°C (Kg/m/cm ²)	—	—	—	—	≥2.8 (10°C)	7								
溶接施工	溶接法	エレクトロスラグ溶接	エレクトロスラグ溶接	—	—	サブマージアーフ溶接	同左	同左							
	開先形状	—	—	—	—	BL-96 ¹ 3層肉盛	同左	同左							
	溶接芯線	銘柄 直径 (mm)	②1378 3.2	US56	—	—	同左	同左							
	化学成分	C Si Mn P S Cu Ni Cr Mo Ti	0.04 0.07 1.79 0.019 0.013 0.04 0.86 0.04 0.57 —	0.04 0.07 1.79 0.019 0.013 0.04 0.86 0.04 0.57 —	—	—	同左	同左							
	フランクス	銘柄	MF38 MF38 AN22	—	—	—	②US56B 4.0	同左							
	化学成分	SiO ₂ MnO CaO MgO Al ₂ O ₃ その他	39.6 18.6 25.2 4.8 1.8 10.0	39.6 18.6 25.2 4.8 1.8 10.0	—	—	同左	同左							
	溶接条件	電圧 V 電流 A 速度 mm/h	48~50 500~550 1.2~1.4	48~50 500~550 1.2~1.4	44~48 1800~2100 0.7~1.2	—	MF27 30 600 15	同左							
	熱処理条件	焼軋 焼入れ 焼戻し 応力除去焼なまし	930°C×10h AC 890°C×8h WC 650°C×14h WC 625°C×45h FC	— 875°C×4h WC 650°C×4h AC 625°C×4h FC	— 900°C×2h ^{50°C} 650°C×2h ^{50°C} 625°C×30h ^{25°C}	— 900°C×2h ^{50°C} 650°C×2h ^{50°C} 625°C×30h ^{25°C}	1200°C×4h ^{50°C} 900°C×2h ^{50°C} 650°C×4h ^{50°C} 625°C×2h ^{50°C}	— — — —							
	照射前試験性質	試験片採取位置	L方向T/4 L方向T/4 T/4	L方向T/4 L方向T/4 L方向T/4	L方向T/4 L方向T/4 L方向T/4	L方向T/2 L方向T/2 L方向T/2	L方向T/2 L方向T/2 L方向T/2	L方向T/2 L方向T/2 L方向T/2							
	溶接金属子エック分析 (%)	C Si Mn P S Cu Ni Cr Mo Ti	0.10 0.13 1.47 0.011 0.012 0.18 0.69 0.07 0.58	0.10 0.13 1.47 0.011 0.012 0.18 0.69 0.07 0.58	0.17 0.24 1.25 0.013 0.012 — 0.67 0.09 0.53	7G.S.70 7G.S.70 7G.S.70 7G.S.42	0.07 1.02 0.14 0.008 0.007	0.07 0.99 0.14 0.009 0.006							
照射前試験性質	引張性質	母材 溶接金属	0.2%耐力 Kg/mm ² 引張強さ Kg/mm ² 伸び % 絞り %	47.4 61.5 27.7 70.1	43.0 59.1 28.8 71.2	48.9 62.3 27.0 65.5	47.9 58.3 28.4 75.3	44.1 59.6 27.0 74.7	45.0 59.8 26.8 73.7	46.0 — — —	— — — —	— — — —	45.7 59.6 28.6 65.1		
			0.2%耐力 Kg/mm ² 引張強さ Kg/mm ² 伸び % 絞り %	45.7 57.3 27.5 71.0	43.3 56.8 28.7 70.1	45.6 61.2 27.0 65.9	— — — —	— — — —	— — — —	52.5 60.6 33.0 73.0	53.0 62.2 29.0 74.0	53.8 63.1 26.0 74.0	46.8 55.6 33.0 75.0	48.8 58.6 33.0 74.0	66.8 72.9 22.2 61.7
	Vシヤルピー衝撃性質	母材 溶接金属 熱影響部	吸収エネルギー Kg·m V _U 10 Kg J _U 10 Kg	6.8 (-12°C) 5.5 (-12°C) 5.9 (-12°C)	6.9 (-12°C) 5.3 (-12°C) 6.3 (-12°C)	6.9 (-12°C) 6.1 (-12°C) 7.4 (-12°C)	5.4 (-10°C) — —	3.3 (-10°C) — —	3.6 (-10°C) — —	4.6 (-10°C) — —	— — —	— — —	— — —	— — —	7.0 (-12°C) 7.4 (-12°C) 13.7 (-12°C)
	かたさ	母材 溶接金属 熱影響部	H _v 10 Kg	203~213 187~196 194~203	202~207 192~200 194~206	185~188 180~185 180~187	1.99 — —	1.85 — —	1.94 — —	1.91 — —	— — —	— — —	— — —	— — —	188~193 216~228 192~256

表 1.6 供試材一覧表 (5)

P C 鋼 線

試験記号	A	B	C	D	E	F	G	H
鋼種	SWRS-72B	SWRS-75B	SWRS-77B	SWRS-80A	SWRS-80A	SWRS-80B	SAE 9254	SUP-9
原線径 (mm)	9.5	9.0	9.5	8.3	9.5	9.5	11.0	5.5
最終径 (mm)	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
加工度 (%)	72.3	69.2	72.3	68.3	72.3	72.3	79.3	17.2
歪取り焼純条件	370×10	350×6	380×100	350×16	370×30	360×20	420×240 900×240 —620×210	
化学成分(%)	(°C×sec)	(鉛)	(熱風)	(ソルト)			(熱風)	(焼入, 烧戻)
	C	0.73	0.75	0.77	0.80	0.81	0.80	0.53
	Si	0.21	0.26	0.24	0.24	0.20	0.26	1.45
	Mn	0.67	0.75	0.83	0.50	0.50	0.84	0.71
	P	0.011	0.011	0.014	0.009	0.008	0.012	0.016
	S	0.007	0.011	0.015	0.013	0.012	0.028	0.010
	Cu	0.01	0.104	0.04	0.07	0.01	0.06	0.013
	Cr	—	0.146	—	—	0.01	—	0.65
	Ni	—	—	—	0.03	—	—	—
(ニッケル十クロムメッキ後ベーリング処理)								
機械的性質	線径 (mm)	5.00	5.01	5.00	5.02	5.00	4.98	5.01
	引張強さ (Kg/mm ²)	174.0	172.7	179.0	174.5	178.0	183.6	177.2
	" (Kg)	3420	3405	3513	3450	3497	3575	3491
	0.2%耐力 (Kg/mm ²)	153.5	158.1	160.0	157.0	156.1	161.7	174.2
	伸び(%, L=100mm)	6.5	6.3	6.0	5.3	7.3	7.3	4.5
絞り (%)								

表 1.7 供試材一覧表 (6)

鋼種 鋼番		超高張力鋼 VM 1100	ボルト鋼 VM 1099	SS 41 A 39866
溶解炉	種別	エルー式真空溶解炉	エルー式真空溶解炉	平炉
	容量	100 Kg	100 Kg	12,500 Kg
造塊	上注・下注別	上注	上注	上注
	鋼塊重量	100 Kg	100 Kg	12,500 Kg
スラブ寸法		70×200×910mm	70×200×910mm	400×1000×1500mm
成 品 寸 法		20φ×250	20φ×250	20φ×250
熱処理	焼入	1050°C×30 ^{min} →OIL.Q.	880°C×30 ^{min} →OIL.Q.	—
	焼戻	400°C×60 min A.C.	500°C×30 min A.C.	—
	焼鈍	—	—	—
化 学 成 分 (%)	C	0.390	0.310	0.206
	Si	0.199	0.163	0.074
	Mn	0.59	0.54	0.82
	P	0.002	0.004	0.012
	S	0.006	0.005	0.017
	Cr	5.00	1.22	0.025
	Mo	2.10	0.54	0.025
	sol Al	0.025	0.024	0.025
	insol Al	0.008	0.008	0.007
	total N	0.0049	0.0023	0.0045
	V	0.480	0.001	trace
機 械 的 性 質	降伏強さ (Kg/mm ²)	—	—	28.2
	引張強さ (Kg/mm ²)	195.0	138.7	44.3
	伸び率 (%)	13.0	16.3	38.6
	vE+20 (Kg-m)	1.0	7.6	—

表 1.8 各種記号

記 号	記 号 の 意 味
T _r E	衝撃値が最大値の1/2の値となる温度(℃)
T _r 30	衝撃値が30 ft-lb(5.2Kg-m/cm ²)となる温度(℃)
T _r 35	衝撃値が30 ft-lb(6.0Kg-m/cm ²)となる温度(℃)
T _r S	脆性破壊率が50%となる温度(℃)
E _{max}	衝撃値の最大値(Kg-m/cm ²)
σ _S	降伏強さ(Kg/mm ²)
σ _B	引張強さ(Kg/mm ²)
δ	標点距離の伸び率(%)
φ	絞り(%)
H _V	ビッカースかたさ
△(変化量)	照射後の試験値から照射前の試験値を引いたもの
n/cm ²	中性子照射量

2 照射試験検討結果

2.1 軟 鋼

2.1.1 アルミニウムドーム

(1) 試験の目的

炭素鋼の照射脆化に及ぼす顕微鏡組織の基本的影響を知るために照射された試料である。

目標の照射条件は $2 \sim 4 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2 (> 1 \text{ MeV})$ の照射量で照射温度は 100°C 以下であった。これに対して照射結果では照射量は $2.3 \sim 3.4 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2 (> 1 \text{ MeV})$ で照射温度は 70°C 以下であったので照射は目標を充分に満足する結果を得ている。

(2) 試験結果と検討

供試材の分析結果を表 2.1 に示す。また 3 種類の熱処理を表 2.2 に示した。

シャルビ衝撃試験結果をまとめると図 2.1 に示すように粒度と遷移温度の上昇量との関係が得られた。

引張試験結果を表 2.3 および図 2.2 に示した。

以上の結果より

(1) 遷移温度の上昇量と粒度では、微細な程上昇量は低いことが知られた。

(2) 引張試験における Petch の式 $\sigma = \sigma_0 + k d^{-1/2}$ において、照射により k の値は変化しないものと思われるが、2 点での結果であるため確かではない。

2.1.2 Ti, Nb 添加パーライトフリー鋼

(1) 試験の目的

低炭素鋼の照射脆化における固溶の炭素窒素の影響及炭化物安定化の効果についての予備的な知見を得ることを目的としている。

目標の照射条件は $2 \sim 4 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2 (> 1 \text{ MeV})$ の照射量および 100°C 以下の照射温度である。これに対して照射結果では照射量 $1.3 \sim 2.4 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2 (> 1 \text{ MeV})$ 、照射温度は 70°C 以下であった。この結果、照射量は目標のそれとよい一致を見た。また照射温度についても満足すべき照射が行なわれた。

(2) 試験結果と検討

表 2.4 に供試材の分析結果を示した。(1), (2)が Nb, (3), (4)は Ti の各々添加の効果をみたものである。

シャルビ衝撃試験結果については表 2.5 に示した。Nb 添加の効果については、Tr 30, Tr S ともに照射による上昇量は Nb 添加の効果が認められず、Nb 添加材の方が脆化している。また Ti 添加材の場合は比較材(4)と照射量が異なっているためよく分らないが NRL trend band に入れて比較してみた場合には Ti 添加の大きな効果はなかった。比較的組成の近似した他の SM 41 B 鋼の結果と比較する場合も Ti 添加の効果は認められなかった。(図 2.3 参照)

引張試験においても、降伏強さの上昇量については、Nb, Ti 添加の効果はともに認められなかった。引張強さ、伸びについては Ti 材について効果が知られた。(表 2.6 参照)

以上の結果より本試験においては目的を満足する結果は得られなかつたが、Ti 添加の効果

についてはややその効果が認められる傾向にあった。

2.1.3 SM41B鋼

(1) 試験の目的

鋼の耐照射性に及ぼす試料純度の影響を明らかにすることを目的とした照射試験である。

目標の照射条件は $2 \sim 4 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2 (> 1 \text{ MeV})$ の照射量、および 100°C 以下の照射温度を期待している。照射後の測定によると、照射量は $3.2 \sim 4.1 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2 (> 1 \text{ MeV})$ となり、照射温度は 70°C 以下であった。この結果、照射量、照射温度ともに目標を達成する照射が行なわれたものと考えられる。

(2) 試験結果と検討

SM41B鋼をベースとした3種類の溶解方法、すなわち、(1)普通純度市販材、(2)高純度大気溶解材および(3)高純度真空溶解材を供試材とし、その分析結果を表2.7に示した。その結果、(2)の高純度大気溶解材は(1)の市販材に比べてP、Sが低いことが知られる。また、(3)の真空溶解材については、P、Sは(2)の大気溶解材と同程度であるが、AlおよびNが低いことが知られ、(1)、(2)、(3)の各供試材はこの順序で純度が高くなっている。

シャルビ衝撃試験の結果を表2.8に示した。この結果より、Tr3.0およびTrSの照射による上昇量は供試材のSM41B鋼のP、SおよびNの高純度化に伴って、小さくなっていることが知られる。

引張試験結果を表2.9に示した。降伏強さについてはSM41B鋼の純度の影響は認められないが、引張強さの上昇および伸びの減少量は純度が良くなる程大きくなっている。

硬さ試験は照射前後での荷重が異なっているために、硬化量の絶対値を比較することはできないが、3者の間には特に有意差を認めなかった。

2.1.4 クラッド材

(1) 試験の目的

ステンレス・クラッド部分の照射による機械的、冶金学的性質の変化の有無を明らかにすることを目的としている。

目標の照射条件は $2 \sim 5 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2 (> 1 \text{ MeV})$ の照射量および照射温度は 150°C 以下である。これに対して照射結果は照射量が $7.0 \sim 8.2 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2 (> 1 \text{ MeV})$ であり、照射温度は 75°C 以下の測定値が得られた。この結果より照射は目標値よりかなり高照射量となっているが照射温度については満足するものである。

(2) 試験結果と検討

SM50Aを母材とした、熱間圧延および溶接肉盛クラッド(SUS28およびSUS28相当)材の分析値を表2.11に示した。

シャルビ衝撃試験は図2.4に示す3種類の形状のものによって行なわれた。その結果を表2.12にTr3.0について記した。また、引張試験は図2.5に示す形状のクラッド材を用いて比較を行なった。その結果を表2.13に示す。また、本試験では曲げおよび剥離の照射後写真観察を行なっている。(写真2.1、2.2参照)

以上の結果より

- ① 圧延クラッド(3mm)と肉盛クラッド(3mm)の比較においては、シャルビ、引張において後者の方が照射による遷移温度の上昇量、硬化量とともに大きいことが認められた。

② 圧延クラッド材での3mmおよび2mmのクラッド厚の効果は後者の方が遷移温度の上昇量は大きかった。

③ 特殊試験の剥離、曲げにおいても圧延クラッド材の方が溶接肉盛クラッド材より良好であるとの結果が得られた。

表 2.1 アルミニキルド鋼製造記録

溶解炉	150 t 平炉
銅塊	9500 Kg (上注)
スラブ寸法	125×1050×2555 (mm)
鋼板寸法	19×1524×6096 (mm)

チク分析値 (wt %)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo	Ni	A ℓ	N
0.15	0.27	0.79	0.018	0.017	0.04	0.05	0.005	0.02	(sol)	(insol)

表 2.2 アルミニキルド鋼の熱処理

(1)	焼純	930°C × 3 hr ; 水冷	$\alpha = 4.1$
(2)	焼準	930°C × 2 hr ; 空冷	$\alpha = 6.7$
(3)	焼入 焼戻し	920°C × 2 hr ; 水焼入 650°C × 1 hr ; 空冷	$\alpha = 8.3$

表 2.3 アリミキルド鋼の引張および硬さ試験結果

引張試験	降伏強さ Kg/mm ²			引張強さ Kg/mm ²			伸び %		
	照射前	照射後	△	照射前	照射後	△	照射前	照射後	△
(1) 焼 鍋	2 5.5	5 6.1	3 0.6	4 1.0	5 6.6	1 5.6	4 4.5	1 2.0	- 3 2.5
(2) 焼 準	2 9.0	6 0.7	3 1.7	4 5.0	6 0.7	1 5.1	4 2.0	1 0.4	- 3 1.6
(3) 焼入焼戻し	3 4.1	-	-	4 8.0	-	-	4 8.0	-	-

硬さ試験 (HV10)	照射前	照射後	△
(1) 焼 鍋	1 0.9	1 9.9	9 0
(2) 焼 準	1 2.5	2 0.0	7 5
(3) 焼入焼戻し	1 6.1	2 2.7	6 6

表 2.4 Ti, Nb 添加バー ライト フリ - 鋼分析結果及び熱処理

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	A.L.	N	Nb	Ti
(1) Nb 材	0.017	0.30	1.18	0.011	0.013	0.04	0.01	0.003	0.18	0.053	0.005	(sol)
(2) 比較材	0.015	0.21	1.23	0.011	0.014	0.04	0.01	0.003	0.19	0.056	0.005	(sol)
(3) Ti 材	0.13	0.17	0.24	<0.005	<0.005					0.04		<0.01
(4) 比較材	0.15	0.27	0.79	0.018	0.017					0.04		0.0064

(1) Nb 材	900°C × 2 hr ; 空冷
(2) 比較材	900°C × 2 hr ; 空冷
(3) Ti 材	950°C × 2 hr ; 空冷
(4) 比較材	930°C × 2 hr ; 空冷

表 2.5 Ti, Nb 添加ペーライトリード

		TrE ₁ (℃)	TrE ₂ (℃)	Tr30 (℃)	Tr35 (℃)	TrS (℃)	E _{max} (Kg-m)	照射量 (>1MeV) 照射温度
(1) Nb 材	照射前	-100	-100	-100	-	-100	29.0	<70℃
	照射後	68	68	68	-	70	24.4	$1.8 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$
	△	168	168	168	-	170	-4.6	
(2) 比較材	照射前	-87	-87	-87	-	-87	28.9	<70℃
	照射後	28	22	18	-	30	26.5	$1.3 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$
	△	115	109	105	-	117	-2.4	
(3) Ti 材	照射前	33	33	15	-	30	27.7	<70℃
	照射後	160	160	149	-	159	26.6	$2.2 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$
	△	127	127	134	-	129	-1.1	
(4) 比較材	照射前	-34	-40	-46	-	-36	23.5	<70℃
	照射後	120	120	112	-	110	13.1	$2.8 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$
	△	154	160	158	-	146	10.4	

表 2.6 Ti, Nb 添加ベーライトリートリ-鋼引張及び硬さ試験結果

引張試験	降伏強さ Kg./mm ²			引張強さ Kg./mm ²			照射前 △	照射後 △	伸び %	照射条件 (>1 MeV) $2.4 \times 10^{19} n/cm^2$
	照射前	照射後	△	照射前	照射後	△				
(1) Nb材	33.5	59.7	26.2	42.6	59.7	17.1	48.6	22.0	-2.6.6	<70°C $2.4 \times 10^{19} n/cm^2$
(2) 比較材	29.9	55.1	25.2	41.4	55.1	13.7	49.4	20.4	-2.9.0	<70°C $2.3 \times 10^{19} n/cm^2$
(3) Ti材	17.3	48.5	31.2	35.8	48.5	12.7	53.1	24.0	-2.9.1	<70°C $2.4 \times 10^{19} n/cm^2$
(4) 比較材	29.0	60.7	31.7	45.0	60.7	15.1	42.0	10.4	-31.6	<70°C $3.3 \times 10^{19} n/cm^2$

硬さ HV (10)	照射前	照射後	△	照射条件 (>1 MeV) $2.4 \times 10^{19} n/cm^2$
(1) Nb材	124	182	58	<70°C $2.4 \times 10^{19} n/cm^2$
(2) 比較材	143	197	54	<70°C $2.4 \times 10^{19} n/cm^2$
(3) Ti材	97.4	176	78.6	<70°C $2.4 \times 10^{19} n/cm^2$
(4) 比較材	125	200	75	<70°C $3.4 \times 10^{19} n/cm^2$

表 2.7 SM41B 鋼チクタク分析結果 (wt %)

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo	Ni	A ℓ	N
(1) 普通純度市販鋼	0.13	0.21	0.65	0.015	0.013						0.01
(2) 高純度大気溶解鋼	0.14	0.33	0.69	<0.005	<0.005	tr				0.02	<0.01
(3) 高純度真空溶解鋼	0.09	0.20	0.70	<0.005	<0.005	tr				tr	<0.003

表 2.8 SM41B 鋼シャルピ試験結果

	Tr E ₁ (C)	Tr E ₂ (C)	Tr 30 (C)	Tr 35 (C)	Tr S (C)	E _{max} (Kg-mm)	照射条件
(1) 普通純度市販鋼	照射前 7	7	-9	-	2	2.3.5	<70°C
	照射後 18.2	18.4	17.5	-	17.8	14.4	3.8×10^{19} n/cm ² (>1 MeV)
	△ 17.5	17.7	18.4	-	17.6	-9.1	
(2) 高純度大気溶解鋼	照射前 -17	-17	-30	-	-13	24.0	<70°C
	照射後 △		10.3		10.0		3.5×10^{19} n/cm ² (>1 MeV)
			13.3		11.3		
(3) 高純度真空溶解鋼	照射前 -6.0	-6.0	-6.1	-	-6.0	29.0	<70°C
	照射後 △	4.0	4.0	-	4.0	23.0	3.2×10^{19} n/cm ² (>1 MeV)
		10.0	10.1	-	10.0	-6.0	

表 2.9 SMA1B 鋼の引張試験結果

	降伏強さ (kg/mm ²)		引張強さ (kg/mm ²)		伸び (%)		照射条件	
	照射前	照射後	△	照射前	△	照射後	△	
(1) 普通純度市販鋼	2.87	6.24	3.37	4.49	6.24	1.75	4.71	2.36 $< 70^{\circ}\text{C}$ $4.0 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$ (> 1 MeV)
(2) 高純度大気溶解鋼	2.67	6.27	3.60	4.50	6.42	1.92	4.83	2.32 -2.51
(3) 高純度真空溶解鋼	2.90	6.27	3.37	4.23	6.27	2.04	5.27	2.24 -3.03

表 2.10 硬さ試験結果

	照射前		照射後		△
	HV(10)	HV(30)	HV(10)	HV(30)	
(1) 普通純度市販鋼	1.21	2.11	1.21	9.0	
(2) 高純度大気溶解鋼	1.24	2.11	1.24	8.7	
(3) 高純度真空溶解鋼	1.13	2.06	1.13	9.3	

表 2.1.1 クラッド材のチャック分析値 (wt %)

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo	Ni	備考
母材	0.15	0.36	1.17	0.014	0.013					
(1) クラッド SUS 28	0.021	0.88	1.70	0.03	0.012		1.856		11.00	
(2) クラッド (内盛)	第一層	0.037	0.55	1.56	0.015	0.010		2.476		12.80
	第二層	0.036	0.25	1.38	0.016	0.013		2.057	1.021	1.0~1.5% フエライト

表 2.1.2 クラッド材シヤルビ試験結果

	照射前	照射後	△Tr 30	照射条件
(1) 広延 (3mm)	-7.2	3.3	1.05	<75°C 0.70~0.76 $\times 10^{20} \text{n/cm}^2$ (>1 MeV)
(2) 広延 (2mm)	-9.5	1.80	2.75	
(3) 内盛 (3mm)	-4.8	1.25	1.73	

表 2.1.3 クラッド材引張試験結果

	降伏強さ Kg/mm ²			引張強さ Kg/mm ²			伸び%	照射前	照射後	△	照射条件
	照射前	照射後	△	照射前	照射後	△					
圧延クラッド	3.44	6.89	3.45	5.38	6.89	1.51	—	1.64	—	—	<75°C 0.78~0.79×10 ²⁰ $\text{n}/\text{cm}^2 (>1 \text{MeV})$
内盛クラッド	4.96	8.42	3.46	6.38	8.42	2.04	—	7.6	—	—	

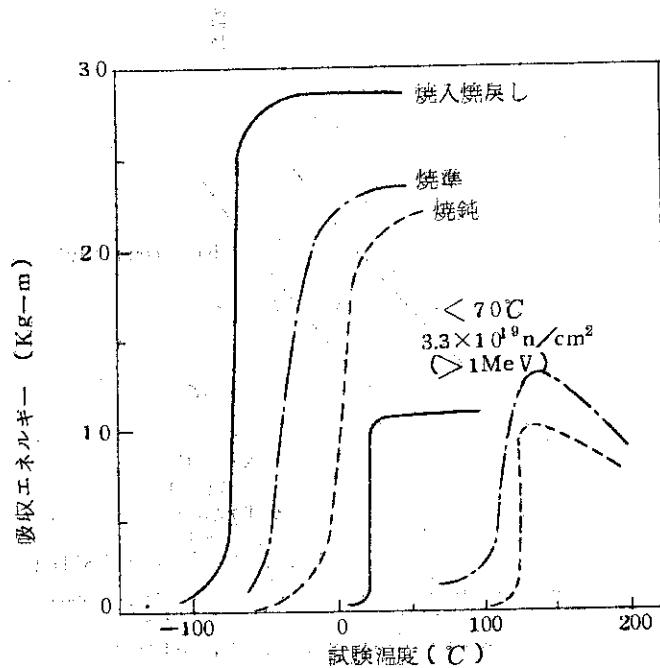


図 2.1 アルミキルド鋼のシャルピー衝撃試験結果

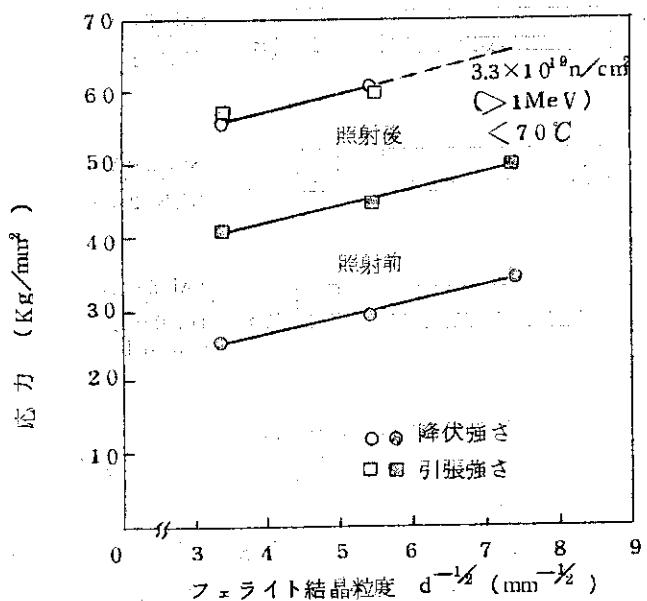


図 2.2 アルミキルド鋼の引張試験結果

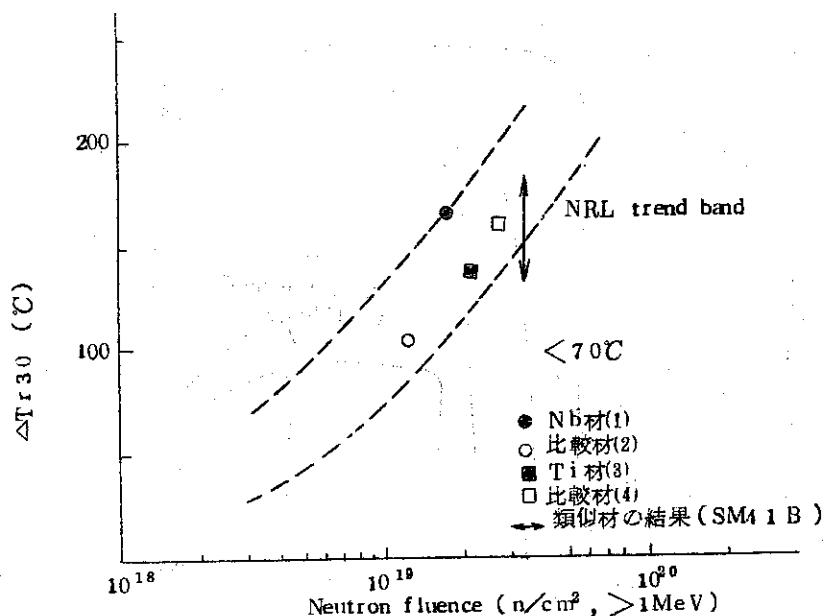


図 2.3 Nb, Ti 添加バーライトフリー鋼の効果

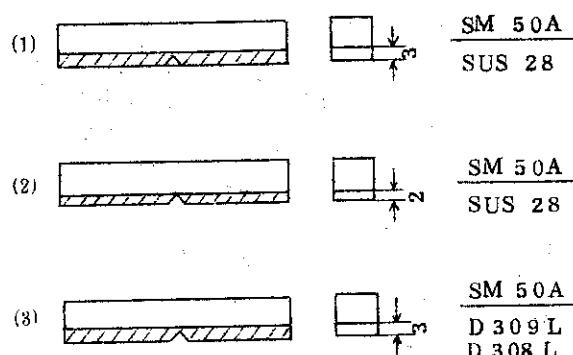


図 2.4 シャルピー試片形状

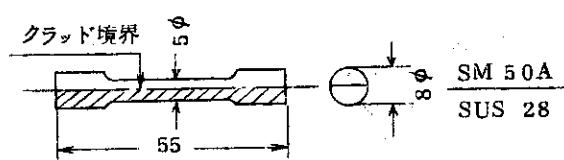
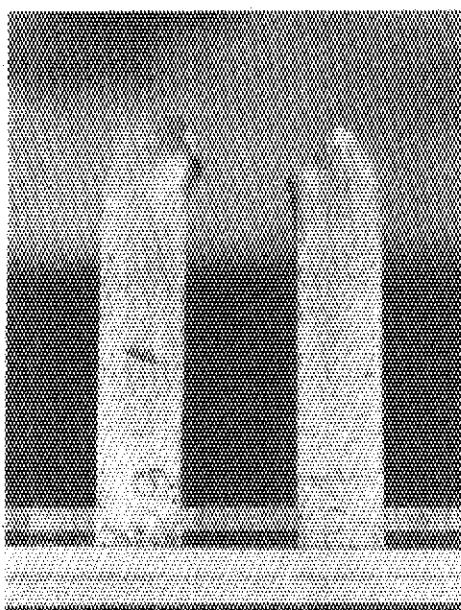
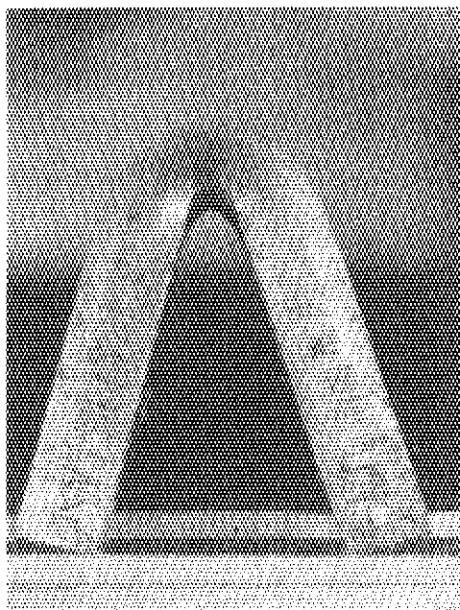


図 2.5 引張試験形状

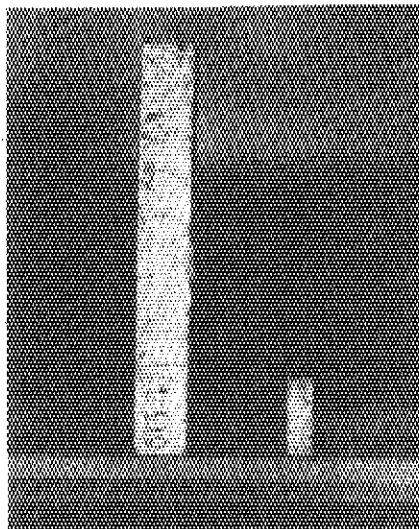


(a) 肉 盛

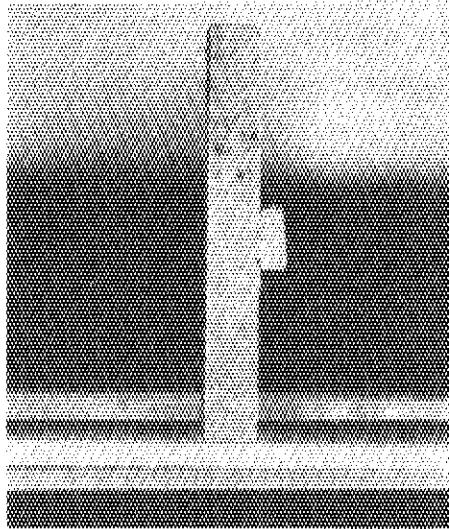


(b) 圧 延

写真 2.1 クラッド材の曲げ試験結果



(a) 肉 盛



(b) 圧 延

写真 2.2 クラッド材の剥離試験結果

2.2 低合金鋼

2.2.1 A 302 B 鋼

(1) 試験の目的

L D 転炉で溶製した A 302 B 鋼の耐照射性の確認、同一鋼材に対する照射量の効果の確認、新日鐵(旧富士鐵)製 A 302 B 鋼の耐照射性の確性および国外照射試験におけるサブササイズ・シャルピーによるデータの比較を目的とした。

(2) 試験結果と検討

表 2.14 に照射による機械的性質の変化を、図 2.6 に照射前後の衝撃遷移曲線の変化を示した。

転炉溶製材は板厚 50 mm であり、同一厚さの電炉材の比較データがないので直接的な比較はできないが、従来の電炉材よりも耐照射性は良好である。図 2.7 に示すように照射による衝撃遷移温度の上昇は、N R L データの良好側、Carpenter のデータのほぼ中央に位置している。⁽¹⁾

引張試験において転炉鋼は、従来の電炉材データに比して照射による σ_B の上昇は少ないが、 σ_s は電炉材と同様の硬化を示している。⁽¹⁾

照射量の効果を見るため、転炉製の材料について照射量を変えている。図 2.7 に示したよう *に*、従来データの範囲内にある。引張り試験においては、照射量が増すにしたがい $\Delta \sigma_s$, $\Delta \sigma_B$ はわずかながら上昇している。

新日鐵製 A 302 B 鋼は、図 2.7 に示すとおり、N R L データ範囲の良好側に外れ、Carpenter データのほぼ中央に位置している。各種 ΔT_r で +103 ~ +112 deg C 脆化し、 ΔE_{max} では 7.8 kg-m 低下している。

国外照射試験におけるサブササイズシャルピーデータとの比較については、図 2.7 に示したようにサブササイズデータの外挿上に位置しており、シャルピーのサイズの効果はほとんどないものと考えられる。

2.2.2 A 543 C₁ 鋼

(1) 試験の目的

A 543 C₁ (板厚 130 mm) 実用鋼板の耐照射性の確性、焼入冷却速度および応力除去焼純の耐照射性への影響、照射温度の影響、国外における照射試験と同一材を用いた比較などを目的とした。

(2) 試験結果と検討

表 2.15 に照射による機械的性質の変化を、図 2.8 には照射前後の衝撃遷移曲線を示す。

焼入れ焼戻しのままの材料は各種の ΔT_r が 81 ~ 114 deg C であり ΔE_{max} も -9.7 kg-m であり、脆化の程度は A 302 B 100 mm 厚材や A 542, 150 mm 厚材と大差はない。そしてこれら鋼種に較べ照射前の非性レベルが T_r で 30 ~ 50 deg C 優れているため、照射により同じ程度脆化しても、絶対値としては優れた非性を残している。

引張り試験では σ_s , σ_B とも 30 Kg/mm² 程度上昇し、硬さも 60 Hv 硬化している。

焼入冷却速度および応力除去焼純(SR)の影響については、図 2.8 に示すごとく、この材料は SR による脆化が大きいことがわかる。SR 材は焼入れ焼戻し材を照射脆化したものと同等の非性レベルとなっており、これが照射を受けると、さらに ΔT_r が 135 ~ 163 deg C も

脆化する。SR材の照射後の靭性は、SR前の焼入れ条件とは無関係であり、焼入れ条件が異なっても、ほぼ同等のレベルを示している。 ΔTr_{30} について国内、国外のA302B鋼ならびにHY-80鋼のデータ⁽²⁾と較べたものが図2.9であるが、SR無し、有りともNRLのデータの良好側、Carpeuterデータのはば中央に位置している。

照射温度の影響は、SR無し材で照射条件を70°C以下 $3.9 \times 10^{19} n/cm^2$ と 240°C $2.9 \times 10^{19} n/cm^2$ と変化させて調査した。図2.8にみるとおり、照射温度が高いと、脆化は大きくなる。脆化巾は ΔTr で161~182 deg Cにも達する。しかし絶対値でみるとSR材の照射後ほどには脆化していない。

国外における照射試験との同一材での比較については、米国製A543C#1材を供試したのであるが、図2.8、図2.9にみるとおり、板厚・熱処理条件に差があるためか、国産材より照射前後とも靭性が劣り、また ΔTr_{30} もNRLデータの不良側に位置している。

2.2.3 A542鋼

(1) 試験の目的

真空処理した実用厚さのA542鋼の溶解法の差による耐照射性の差、ならびにユニオンメルト溶接部の比較確性を目的とした。

(2) 試験結果と検討

表2.16に照射による機械的性質の変化を示す。

溶解法の差は、60ton電炉+環流脱ガス+下注ぎしたものと20ton電炉+流滴脱ガス+上注ぎしたものとの比較をするのであるが、図2.10に示すように、照射前の靭性レベルは流滴脱ガス材がやや優れているが、照射後ではほぼ同等のレベルに脆化している。すなわち溶解法の効果は照射後においては認められない。また環流脱ガス材のSRなし母材の ΔTr_{30} は図2.11に示すとおりA302B鋼のNRLデータのバラツキの良好側に位置しており、他のHY80材との比較においては、バラツキの中心部に位置している。⁽²⁾

ユニオンメルト溶接部についてみると、溶着金属部はSR後においてすでに母材より脆化しているが、照射によりさらに大きく脆化し、各種の ΔTr は140から190 deg Cにも達する。熱影響部は照射前の靭性は母材をみであり、照射後の各種 ΔTr は母材部より小であり、熱影響部の照射脆化は小さいといえる。

2.2.4 A542 Modify鋼

(1) 試験の目的

AlN処理(IN処理)の耐照射脆化に及ぼす効果の確認を目的とした。

(2) 試験結果と検討

この試験に供試したのはIN処理材1種、非IN処理材2種であるが、板厚が他試験材と異なり15mmと薄いため、3種とも照射前の靭性はIN処理ありなしにかかわらず優れている。表2.17に照射による機械的性質の変化を、図2.12に照射による衝撃遷移曲線の変化を示す。照射後も各種 ΔTr は3種とも小であり、図2.13に示すようにA302B鋼あるいはHY-80鋼のNRLないしはCarpeuterデータ⁽²⁾のバラツキの良好側にある。IN処理ありなしによる照射脆化感受性の差はないものと考えられる。

2.2.5 A533B鋼 - 熱履歴の影響

(1) 試験の目的

A 5 3 3 GrB 鋼板で原子炉圧力容器を製作する際、その成形加工過程における熱履歴を想定し、その照射脆化に及ぼす影響の程度を知ることを目的とした。

熱履歴としては、標準熱処理、長時間の溶接後熱処理、焼入冷却速度が遅い場合および過熱によりオーステナイト結晶粒を成長させた場合の 4 条件である。

(2) 試験結果と検討

引張試験、標準 V ノッチシャルピー衝撃試験およびかたさ試験結果を表 2.1.8、図 2.1.4 にそれぞれ示した。以上の結果から次のような検討を行なった。

- (1) 照射後の引張性質は照射前に比べて、降伏強さ、引張強さは増加を伸びは減少を示し、4 種の熱履歴間に有意差がなかった。
- (2) 照射後のかたさは、照射前に比べて高くなるが、4 種の熱履歴間に有意差は認められなかった。
- (3) 衝撃性質の変化を ΔT_{r30} で検討すると次のとおりである。

- a) 標準の焼入れ、焼戻しを行ない、625°C × 30 h の溶接後熱処理をしたもの ΔT_{r30} は 167°C を示し、この種鋼種として従来のもの⁽³⁾ と同程度の脆化度であった。
- b) 焼入れ、焼もどし後 625°C × 200 h の長時間の溶接後熱処理を行なって炭化物が凝集する傾向にあるものは、上記 a) と比べて照射前の遷移温度も高くなる上に、照射による遷移温度の上昇量 (ΔT_{r30}) も大きくなり、鉄鋼照射合同委員会で実施したデータ⁽⁴⁾ と同傾向が示された。
- c) 焼入れ時の冷却速度を a) の標準の場合より遅くすると、照射前の遷移温度は高くなるが、照射による遷移温度の上昇量 (ΔT_{r30}) は a) とほとんど変わらなかった。
- d) 1200°C × 48 h の過熱によりオーステナイト結晶粒を粗大化し、その後標準の焼入れ、焼もどし、溶接後熱処理を行なったものの、照射による遷移温度の上昇量 (ΔT_{r30}) は、a) とほとんど変わらなかった。

Carpenter らは⁽⁵⁾、A 3 0 2 GrB 鋼の組織変化および結晶粒変化により照射敏感性が異なることを明らかにしているが(図 2.1.4 参照)，今回の実験では特にその差が認められなかった。

2.2.6 A 5 3 3 B 鋼 - エレクトロスラグ溶接部

(1) 試験の目的

極厚鋼板に対する溶接法の一つであるエレクトロスラグ溶接部の照射脆化に及ぼす影響を予備的に調査し、今後の参考資料を得ることを目的とした。

(2) 試験結果と検討

標準 V ノッチシャルピー衝撃試験結果を表 2.1.9、図 2.1.5 にかたさ試験結果を図 2.1.6 ~ 2.1.8 にそれぞれ示した。以上の結果から次のような検討を行なった。

- (1) 遷移温度の上昇量 ΔT_{r30} で溶接各部の成績を母材のそれと比較すると次のとおりである。

- 熱影響部：板厚 173 mm 材、250 mm 材とも母材と同等かそれより小さい上昇量であった。これは溶接熱影響による組織変化が影響しているものと考える。

- ～溶接金属：板厚 17.3 mm 材は母材より小さい上昇量であり、板厚 25.0 mm 材は母材より大きい上昇量であった。この原因は明らかでない。
- (b) 溶接金属組織の均一化が期待される熱処理として、焼入れ焼もどし処理前に焼ならし処理を行なったものは、これを行なわないものに比べて照射前の衝撃特性はやや改善されたが、照射後の ΔT_{r30} はより大きく上昇した。この原因は明らかでないが、エレクトロスラグ溶接金属の粗大一次晶と微量不純物元素の微視的偏析について考慮する必要があろう。
- (c) 供試材とした母材およびエレクトロスラグ溶接部の照射脆化 (ΔT_{r30}) は、従来のこの種鋼材のもの⁽³⁾⁽⁴⁾に比べると大きく、図 2.15 に示すように N.R.L のスキャッターバンドの上限あるいはそれを越える値を示した。
- この原因としては、鋼中の微量不純物元素 (Cu, P など)、結晶粒度、(6) 照射炉特性⁽⁷⁾ (中性子束、熱中性子の寄与率) および照射量測定法⁽⁸⁾などの影響が考えられ、これらの因子については今後とも検討を続ける必要がある。
- (d) 母材および溶接各部のかたさは、照射により Hv 100 前後の増加が認められたが、この増加量は、従来のこの種鋼材のもの⁽³⁾⁽⁴⁾に比べて大きい結果であった。
- また、溶接金属の照射によるかたさの変化は、母材および熱影響部のそれに比べて同等か若干大きい結果であった。

2.2.7 A533B 鋼サブマージドアーク溶接部

(1) 試験の目的

Mn-Mo-Ni 系溶接金属の照射脆化に及ぼす Mn, Ni および Ti 含有量の影響を予備的に明らかにし、今後の溶接材料の耐照射性の研究の方向を探究することを目的とした。

(2) 試験結果と検討

引長試験、かたさ試験および標準 V ノッチシャルピー衝撃試験結果を表 2.2.0、図 2.19 にそれぞれ示した。以上の結果から次のことを検討した。

(1) Ni の影響

Ni 量が約 0.9% までは、Ni 量が増すにつれ照射前後の引張強さの差 ($\Delta \sigma_B$) は増加するが、約 0.9% をこえると殆んど変化しない。また、遷移温度の上昇量 (ΔT_{r30}) は、Ni 含有量に対して Peak があり、 ΔT_{r30} が最高となる Ni 含有量は 1.5 ~ 2.0% であった。この ΔT_{r30} の変化の様相は、Hawthorne ら⁽⁹⁾の結果とほぼ同様の傾向である。なお、照射前後のかたさの差 (ΔH_v) については、Ni 含有量の影響は特に認められなかった。

(2) Mn の影響

今回の Mn 含有量の範囲 (Mn 0.81 ~ 1.24%) では、照射前後の引張強さの差 ($\Delta \sigma_B$)、遷移温度の差 (ΔT_{r30}) およびかたさの差 (ΔH_v) と Mn 含有量の関連性は特に認められなかった。

(3) Ti の影響

Ti を添加しないものと Ti を 0.013% 添加したものと照射前後の $\Delta \sigma_B$ 、 ΔT_{r30} および ΔH_v の変化の差は特に認められなかった。

(4) 今回の試験結果のうち、遷移温度の上昇量 ΔT_{r30} について、従来のデータと比較すると、供試材 A, B, C, E は N.R.L⁽⁸⁾ のデータのスキャッターバンドの中に入る結果であり、供

試材 D はこれらと比べて脆化量が少なく良好であった。

2.2.8 A 5 3 3 B 鋼 M I G 溶接部

(1) 試験の目的

A 5 3 3 Gr B 超厚板（板厚 250mm）に対する狭開先 M I G 溶接法の照射脆化に及ぼす影響の予備的データを得ることを目的とした。

(2) 試験結果と検討

標準 V ノッチシャルピー衝撃試験結果とかたさ試験結果を表 2.2.1, 図 2.2.0 ~ 2.2.2 にそれぞれ示した。以上の試験結果から次のことを検討した。

(1) 溶接金属および熱影響部におけるそれらの表面部, T/4 部の ΔT_{r30} は試験片が 3 本宛と少ないため、明確な差違を求めることができないが、バラツキを考慮すると、表面部と T/4 部の ΔT_{r30} は同程度である。

(2) 溶接金属と熱影響部の照射前遷移温度 T_{r30} の絶対値は熱影響部の方が低くて良好であるが、照射による上昇量 ΔT_{r30} は、両者とも約 200°C で同程度であった。

(3) 供試材の照射脆化 (ΔT_{r30}) は、従来のデータ⁽³⁾⁽⁴⁾と比べて同程度であった。

(4) 母材および溶接各部のかたさは、照射により約 Hv 80 ~ 100 位の増加が認められ、この増加量は従来のデータ⁽³⁾⁽⁴⁾と比べて若干大きい結果であった。

表 2.14 照射による機械的性質の変化

特性 値 位	鋼種	A 302B	A 302B	A 302B	A 302B
	溶製法	LD 転炉	LD 転炉	LD 転炉	電炉
	熱処理	N+T	N+T	N+T	N+T
	板厚 (mm)	50	50	50	100
	单造会社	日本钢管	日本钢管	日本钢管	新日铁(旧富士)
衝撃 特性 の 変化	$\triangle TrE_1$	deg C	114	131	141
	$\triangle TrE_2$	deg C	103	120	139
	$\triangle Tr30$	deg C	124	148	152
	$\triangle Tr35$	deg C	125	157	153
	$\triangle TrS$	deg C	106	132	121
	$\triangle E_{max}$	Kg-m	-3.4	-3.3	-3.1
照射 条件	温度	C	<75	<75	<75
	量	n/cm ²	3.6×10^{19}	5.2×10^{19}	7.0×10^{19}
引張 特性 の 変化	前 σ_S	Kg/mm ²	54.9	54.9	54.9
	$\triangle \sigma_S$	Kg/mm ²	31.8	34.4	35.4
	前 σ_B	Kg/mm ²	67.4	67.4	67.4
	$\triangle \sigma_B$	Kg/mm ²	19.3	21.9	22.9
	前 $E\ell$	%	31.4	31.4	31.4
	$\triangle E\ell$	%	-17.8	-18.2	-19.0
硬さ	前 Hv(10)		210	210	210
	$\triangle Hv$		68	66	60
照射 条件	温度	C	<75	<75	<75
	量	n/cm ²	4.6×10^{19}	6.6×10^{19}	8.2×10^{19}

表2.15 照射による機械的性質の変化

性質 特性 値	鋼種 処理 板厚 特性 会社 部位	A543 C ℓ 1	A543 O ℓ 1	A543 C ℓ 1	A543 C ℓ 1	A543 O ℓ 1
		Q+T	Q+T+SR	Q(T+T+SR)	Q+T	Q+T+SR
		120	120	120	120	203
		新日鐵(八幡)	新日鐵	新日鐵	新日鐵	USA
衝撃 特性 の変化	ΔT_{RE_1}	degC	93	138	135	173
	ΔT_{RE_2}	degC	81	138	135	182
	ΔT_{R30}	degC	114	162	—	161
	ΔT_{R35}	degC	112	163	—	177
	ΔT_{RS}	degC	101	162	136	181
	ΔE_{max}	Kg-m	-9.7	-7.4	-3.6	-10.8
照射 条件	温 度	℃	<70	<70	<70	240
	量	n/cm ²	3.9×10^{19}	4.0×10^{19}	3.8×10^{19}	2.9×10^{19}
引張 特性 の変化	前 σ_S	Kg/mm ²	65.2	61.4	59.5	65.2
	$\Delta \sigma_S$	Kg/mm ²	29.2	40.6	42.5	32.2
	前 σ_B	Kg/mm ²	78.6	74.4	74.4	78.6
	$\Delta \sigma_B$	Kg/mm ²	32.6	32.6	32.7	25.5
	前 $E\ell$	%	27.6 23.1	30.2 24.1	26.4 22.3	27.6 23.1
	$\Delta E\ell$	%	-5.6 -1.1	-11.8 -5.7	-7.2 -3.1	-6.0 -1.5
硬さ	前 Hv(10)		264	238	238	264
	ΔHv		60	63	68	66
照射 条件	温 度	℃	<70	<70	<70	170
	量	n/cm ²	3.7×10^{19}	3.7×10^{19}	3.6×10^{19}	1.5×10^{19}
						3.7×10^{19}

表2.16 照射による機械的性質の変化

性質 特 性 値 位 置 理 製 造 会 社	鋼種 卷 製 法 採 取 位 置 処 理 板 厚 (mm)	A 542						
	環流脱ガス	環流脱ガス	流滴脱ガス	環流脱ガス	流滴脱ガス	環流脱ガス	流滴脱ガス	
	母材	SAW後 母材	SAW後 母材	SAW後 溶着鋼	SAW後 溶着鋼	SAW後 HAZ	SAW後 HAZ	
	NT	NT-QT-SR	NQT-SR-SR	NT-QT-SR	NQT-SR-SR	NT-QT-SR	NQT-SR-SR	
	150	150	150	150	150	150	150	
	新日鐵(富士)	新日鐵	川 鉄	新日鐵	川 鉄	新日鐵	川 鉄	
衝撃特性の変化	ΔTrE_1 degC	97	71	90	105	164	63	33
	ΔTrE_2 degC	97	56	86	120	159	50	39
	$\Delta Tr30$ degC	123	115	121	149	189	91	62
	$\Delta Tr35$ degC	140	109	122	147	188	90	58
	ΔTrS degC	97	66	88	143	160	49	39
	ΔE_{max} Kg-m	-9.9	-10.5	-11.3	-6.0	-7.0	-6.0	-9.4
照射条件	温 度 ℃	<70	<70	<70	<70	<70	<70	<70
	量 n/cm²	3.7×10^{19}	4.0×10^{19}	4.1×10^{19}	3.9×10^{19}	3.7×10^{19}	3.3×10^{19}	3.0×10^{19}
引張特性の変化	前 σ_S Kg/mm²	63.2		70.8				
	$\Delta \sigma_S$ Kg/mm²	31.0		28.5				
	前 σ_B Kg/mm²	75.7		83.3				
	$\Delta \sigma_B$ Kg/mm²	27.7		23.7				
	前 E_ε %	28.7		26.6				
	ΔE_ε %	-8.7		-7.5				
硬さ	後HV(10)		290	306	296	319	308	294
	ΔHv							
照射条件	温 度 ℃	<70		<70				
	量 n/cm²	3.5×10^{19}		3.4×10^{19}				

表 2.17 照射による機械的性質の変化

性 質 特 性 値 位	鋼種	A542 Modify	A542 Modify	A542 Modify	
	熱処理	N QT-SR	N QT-SR	N QT-SR	
	I N処理	なし	あり	なし	
	板厚 (mm)	1.5	1.5	1.5	
	製造会社	新日鐵(八幡)	石播重工	石播重工	
衡 録 特 性 の 変 化	$\triangle Tr E_1$	deg C	7.5	2.7	1.4
	$\triangle Tr E_2$	deg C	7.5	2.0	1.4
	$\triangle Tr 30$	deg C	11.5	5.4	1.6
	$\triangle Tr 35$	deg C	10.4	5.3	1.5
	$\triangle Tr S$	deg C	7.7	1.9	2.4
	$\triangle E_{max}$	Kg-m	-6.0	-2.0	-8.0
照射 条件	温 度	C	<70	<70	<70
	量	n/cm ²	3.7×10^{19}	3.4×10^{19}	3.0×10^{19}
引張 特 性 の 変 化	前 σ_S	Kg/mm ²	64.1	61.7	62.4
	$\triangle \sigma_S$	Kg/mm ²	-5.0	37.6	29.3
	前 σ_B	Kg/mm ²	78.8	75.7	76.6
	$\triangle \sigma_B$	Kg/mm ²	23.1	23.6	24.3
	前 $E\ell$	%	32.4	31.1	32.7
	$\triangle E\ell$	%	-6.4	-10.4	-11.0
硬 さ	前 HV(10)		24.4	23.5	23.2
	$\triangle HV$		4.5	6.0	6.7
照射 条件	温 度	C	<70	<70	<70
	量	n/cm ²	3.9×10^{19}	3.8×10^{19}	3.8×10^{19}

表2.1.8 A533GrB鋼各種熱履歴材の照射(℃)による引張、かたさ、衝撃性質の変化

熱処理	変化量	引張性質			かたさ			Vシャルビー衝撃性質		
		σ_S Kg/cm ²	σ_B Kg/cm ²	δ_{10} %	Hv	照射条件	TrE ₁ ℃	TrS ℃	E _{max} Kg-m	照射条件
900°C×2h 50°C/min	照射前	4.79	61.5	2.63	19.9	2.6×10 ¹⁹ n/cm ²	+2	-24	-1	16.0
650°C×4h 50°C/min	照射後	8.98	89.8	1.48	25.7	<70°C	+143	+143	+150	8.5
625°C×30h 25°C/h	変化量	+41.9	+2.83	-11.5	+5.8	<70°C	14.1	16.7	15.1	<70°C
900°C×2h 50°C/min	照射前	4.41	58.3	2.84	18.5	2.6×10 ¹⁹ n/cm ²	+3.3	+5	+2.4	16.0
650°C×4h 50°C/min	照射後	8.62	86.2	1.48	24.0	<70°C	+18.9	+18.8	+18.0	9.0
625°C×20h 25°C/h	変化量	+42.1	+27.9	-13.6	+5.5	<70°C	15.6	18.3	15.6	<70°C
900°C×2h 5°C/min	照射前	4.50	59.6	27.0	19.4	2.6×10 ¹⁹ n/cm ²	+2.4	-3	+2.0	14.4
650°C×4h 50°C/min	照射後	8.67	86.7	1.52	24.3	<70°C	+16.3	+16.2	+17.0	9.5
625°C×30h 25°C/h	変化量	+41.7	+27.1	-11.8	+4.9	<70°C	13.9	16.5	15.0	<70°C
1200°C×48h 5°C/min	照射前	46.0	59.8	26.8	19.1	2.6×10 ¹⁹ n/cm ²	+6	-20	+7	29.0
900°C×2h 50°C/min	照射後	87.0	87.0	15.2	24.9	<70°C	+14.9	+14.5	+14.5	1.6.5
650°C×4h 50°C/min	変化量	+41.0	+27.2	-11.6	+5.8	<70°C	14.3	16.5	13.8	<70°C
625°C×30h 25°C/h	変化量	+41.0	+27.2	-11.6	+5.8	<70°C	14.3	16.5	13.8	-12.5

表2.19 A 533 Gr.B鋼エレクトロスラグ溶接部の照射による衝撃特性、かたさの変化

板厚 (mm)	採取位置	熟處理	変化量	V シャルビー衝撃性質			
				TrE ₁ ℃	Tr ₃₀ ℃	TrS ℃	E _{max} Kg-m
17.3	母材	T/4	照射前	+8	-25	+11	1.97
			照射後	-	(+215)	-	$2.3 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$
			変化量	-	(240)	-	1.30°C
	溶接金属	890°C×8h水冷	照射前	+17	-18	+26	$2.6 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$
			照射後	+187	+186	+186	1.60°C
			変化量	170	204	162	-4.4
	熱影響部	625°C×4.5h炉冷	照射前	+17	-37	+6	$2.9 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$
			照射後	-	+175	-	2.00°C
			変化量	-	212	-	-
	溶接金属	930°C×10h空冷	照射前	+9	-24	+11	1.72
			照射後	+257	+255	+259	9.2
			変化量	248	279	248	-8.0
25.0	母材	T/4	照射前	-3	-31	+2	1.64
			照射後	+204	+195	+205	1.05
			変化量	207	226	203	-5.9
	溶接金属	875°C×4h水冷	照射前	-4	-32	-2	1.28
			照射後	+245	+240	+260	8.5
			変化量	249	272	262	-4.3
	溶接金属	660°C×4h空冷	照射前	-5	-20	+13	1.39
			照射後	+245	+245	+250	8.5
			変化量	250	265	237	-5.4
	熱影響部	615°C×2.4h炉冷	照射前	-17	-53	-10	1.74
			照射後	+173	+170	+185	9.0
			変化量	190	223	195	-8.4
	熱影響部	T/4	照射前	-7	-29	+2	1.65
			照射後	+154	+140	+160	1.10
			変化量	161	169	158	-5.5

備考：() 内は推定値

表2.21 A533GrB 鋼被覆先MIG溶接部の照射によるかたさ、衝撃性質の変化

採取位置	熱処理	変化量	Vシヤルビ一衝撃性質				照射条件
			Tr E ₁ ℃	Tr 30 ℃	Tr S ℃	E _{max} Kg-m	
溶接金属 S	照射前	-2.0	-3.8	-3.0	1.2.0	$4.1 \times 10^{19} n/cm^2$	
	照射後	+1.5.0	+1.6.0	+1.5.5	6.9		<70°C
	変化量	1.7.0	1.9.0	1.8.5	-5.1		
溶接金属 T/4	照射前	-2.2	-4.0	-3.0	1.2.2	$4.0 \times 10^{19} n/cm^2$	
	照射後	+1.5.0	+1.6.0	+1.5.5	6.9		<70°C
	変化量	1.7.2	2.0.0	1.8.5	-5.3		
熱影響部 S	溶接後	照射前	-5.0	-7.6	-3.0	1.7.5	$4.0 \times 10^{19} n/cm^2$
	615°C×20h炉冷	照射後	+1.2.8	+1.3.5	+1.3.5	9.0	
		変化量	1.7.8	2.1.1	1.6.5	-8.5	<70°C
熱影響部 T/4	照射前	-4.0	-7.0	-2.5	1.7.2	$4.1 \times 10^{19} n/cm^2$	
	照射後	+1.2.8	+1.2.5	+1.3.5	9.0		<70°C
		変化量	1.6.8	1.9.5	1.6.0	-8.1	

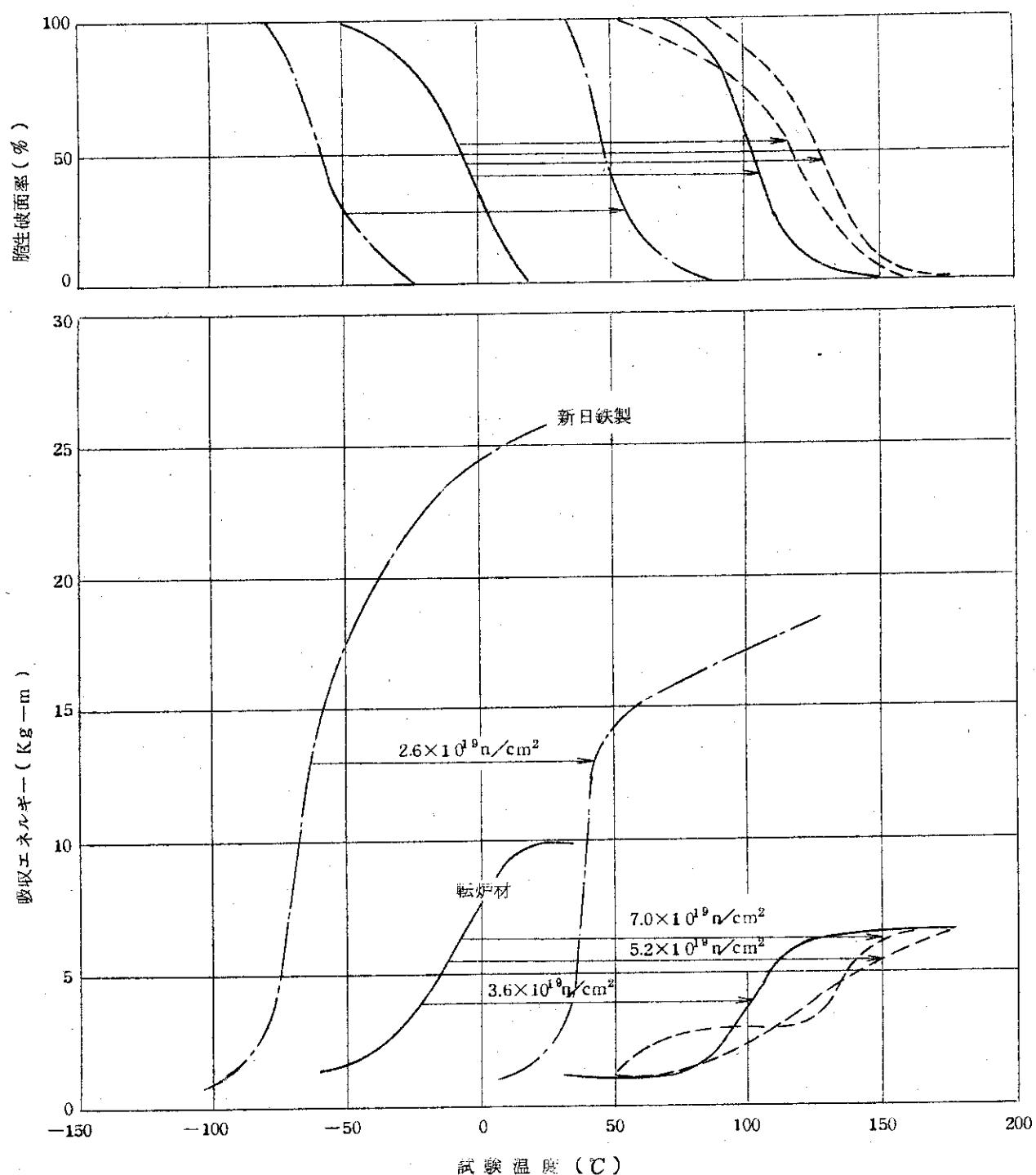
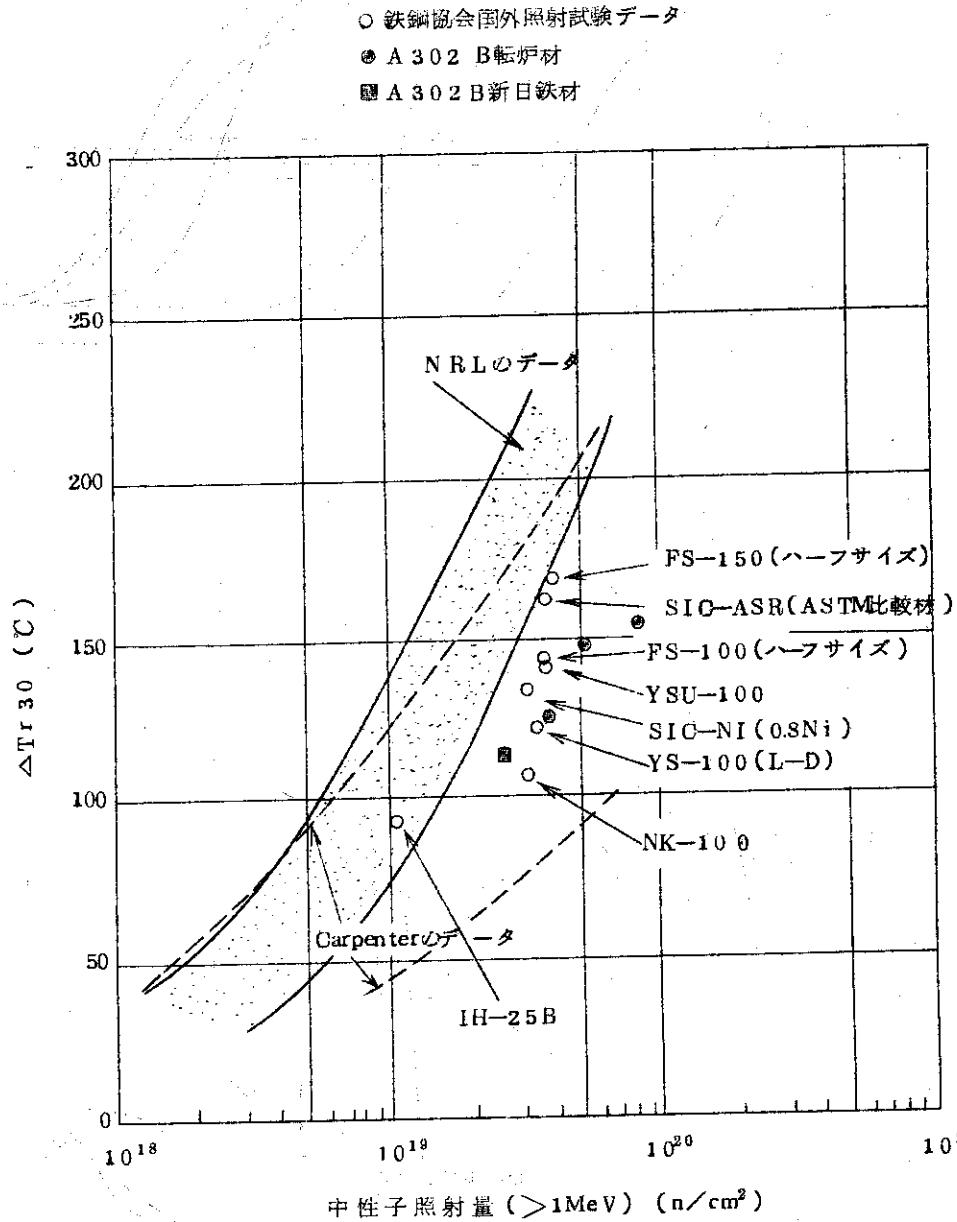


図 2.6 照射による衝撃遷移曲線の変化(A302B鋼)

図 2.7 低温(150°C以下)照射による遷移温度 $T_{\text{r}30}$ の増加(A302B鋼)

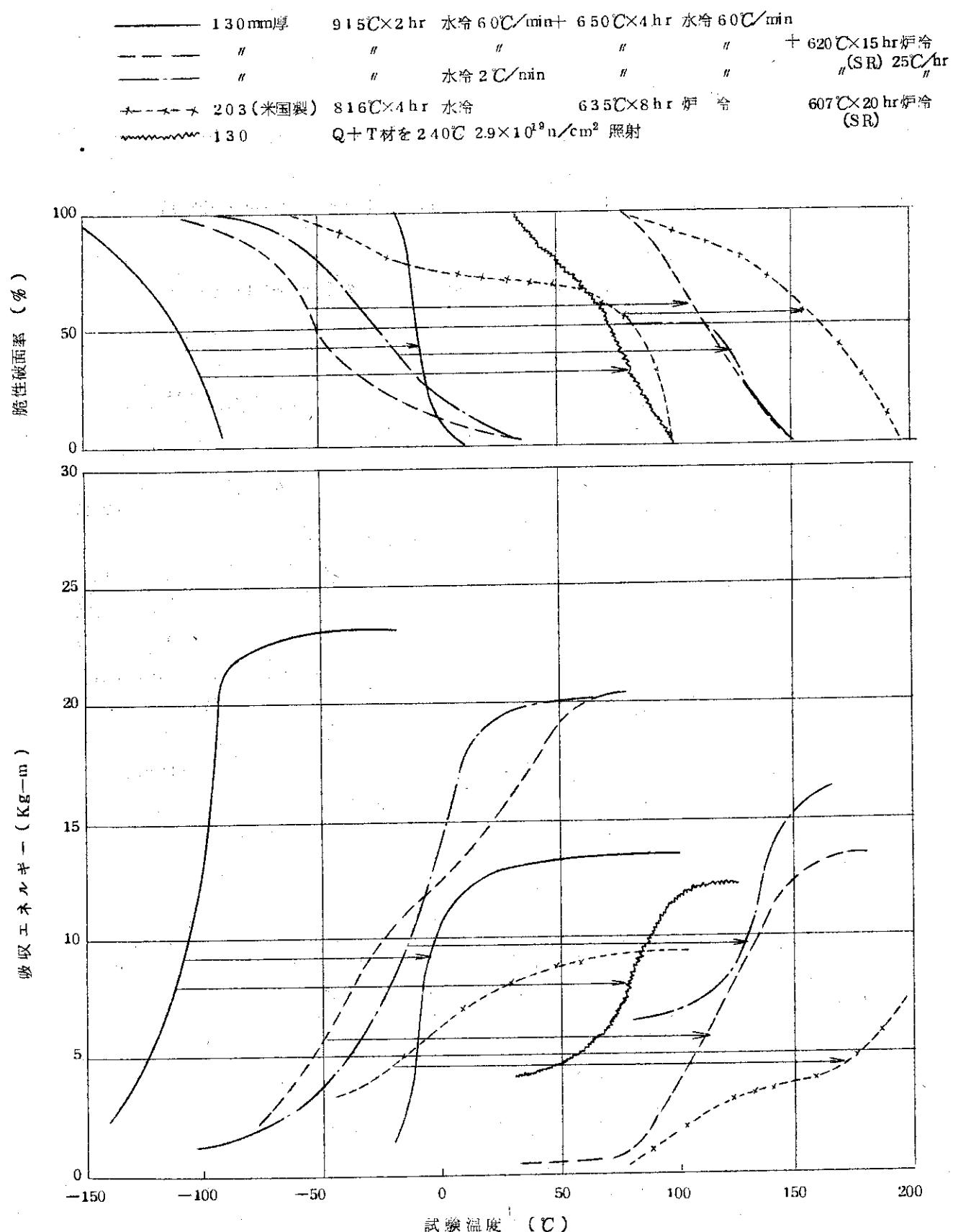


図 2.8 A543CL1鋼の照射前後の遷移曲線

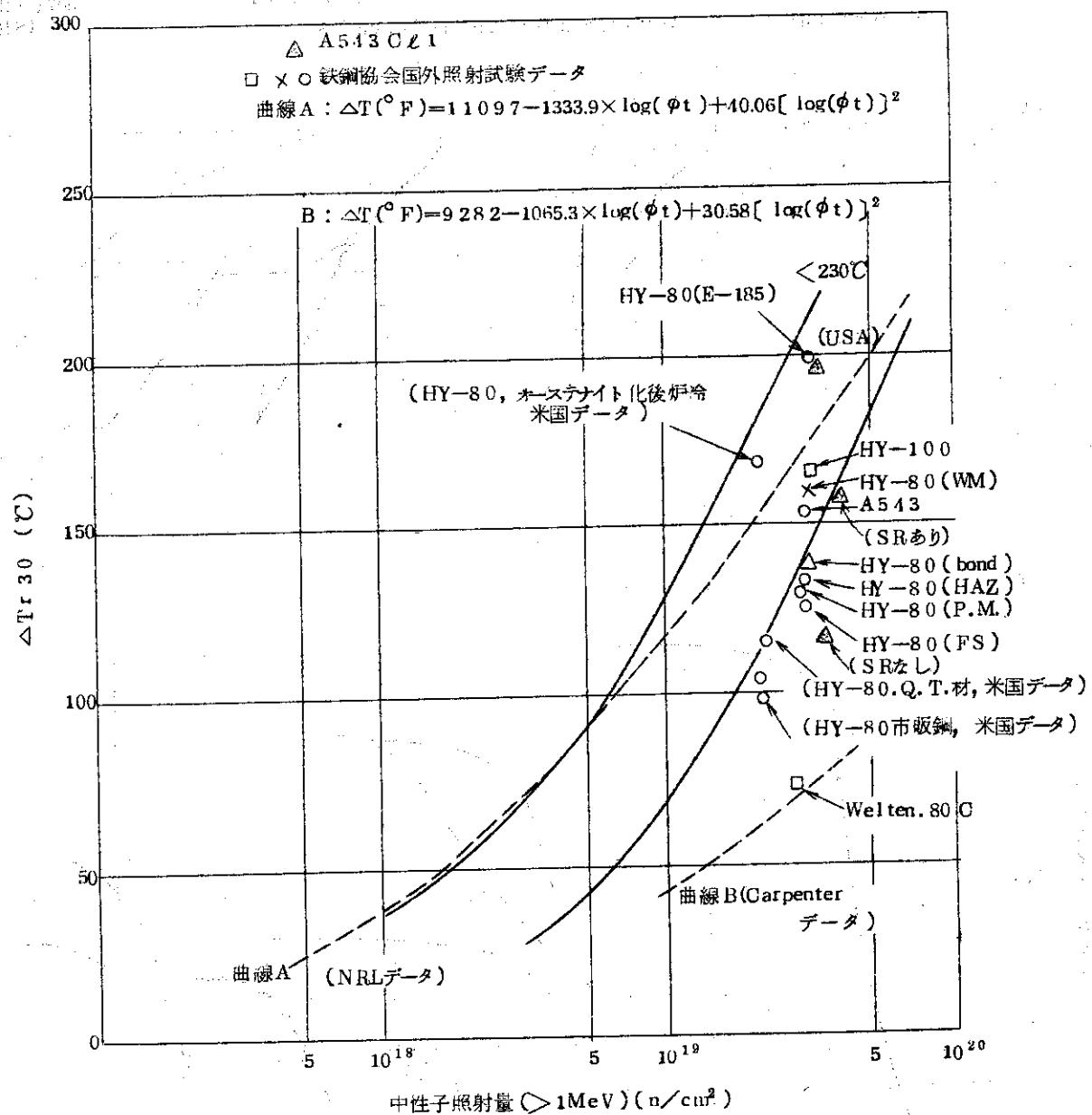


図2.9 中性子照射による衝撃遷移温度の上昇

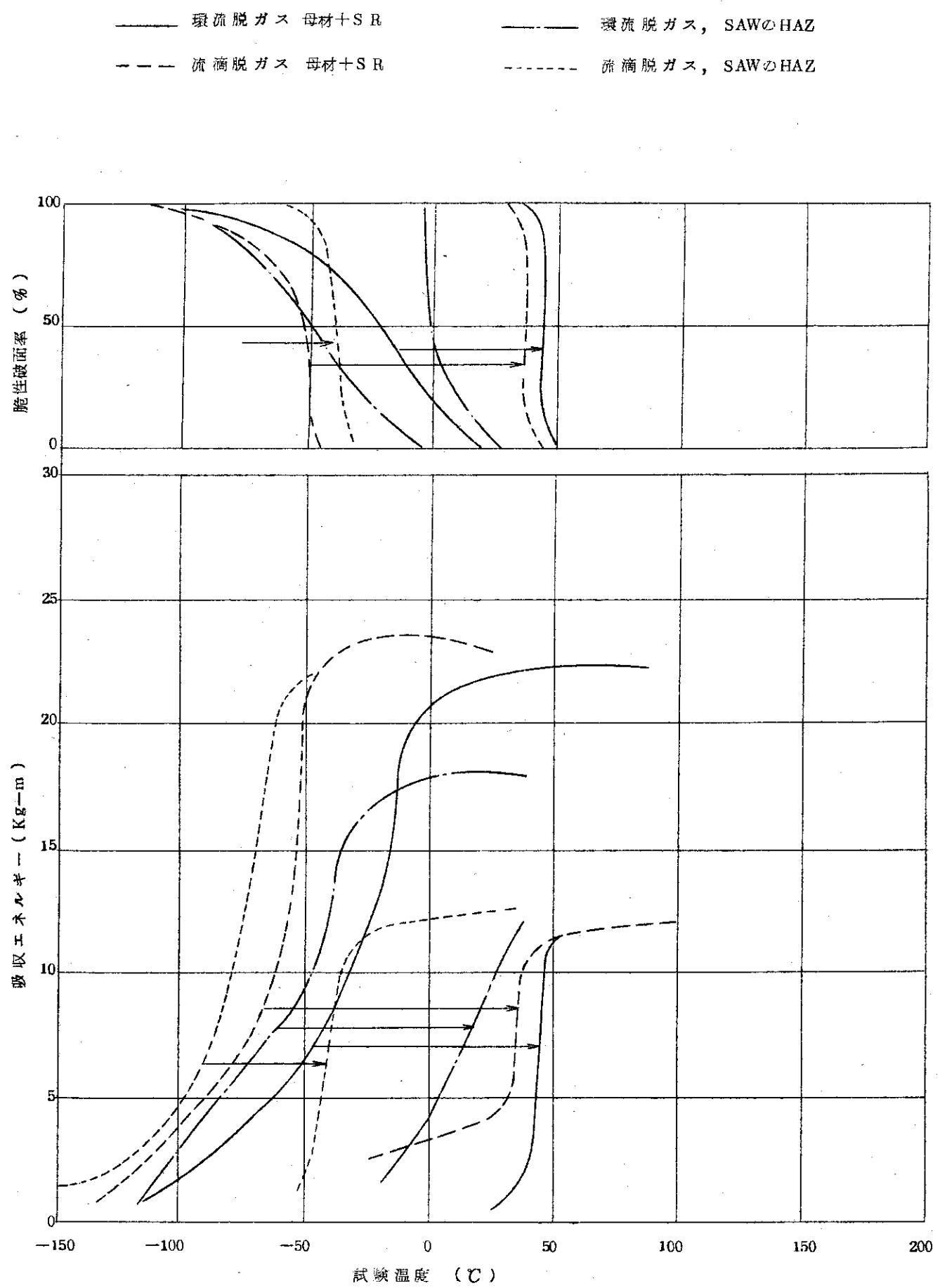


図2.10 A542鋼照射前後の衝撃遷移曲線

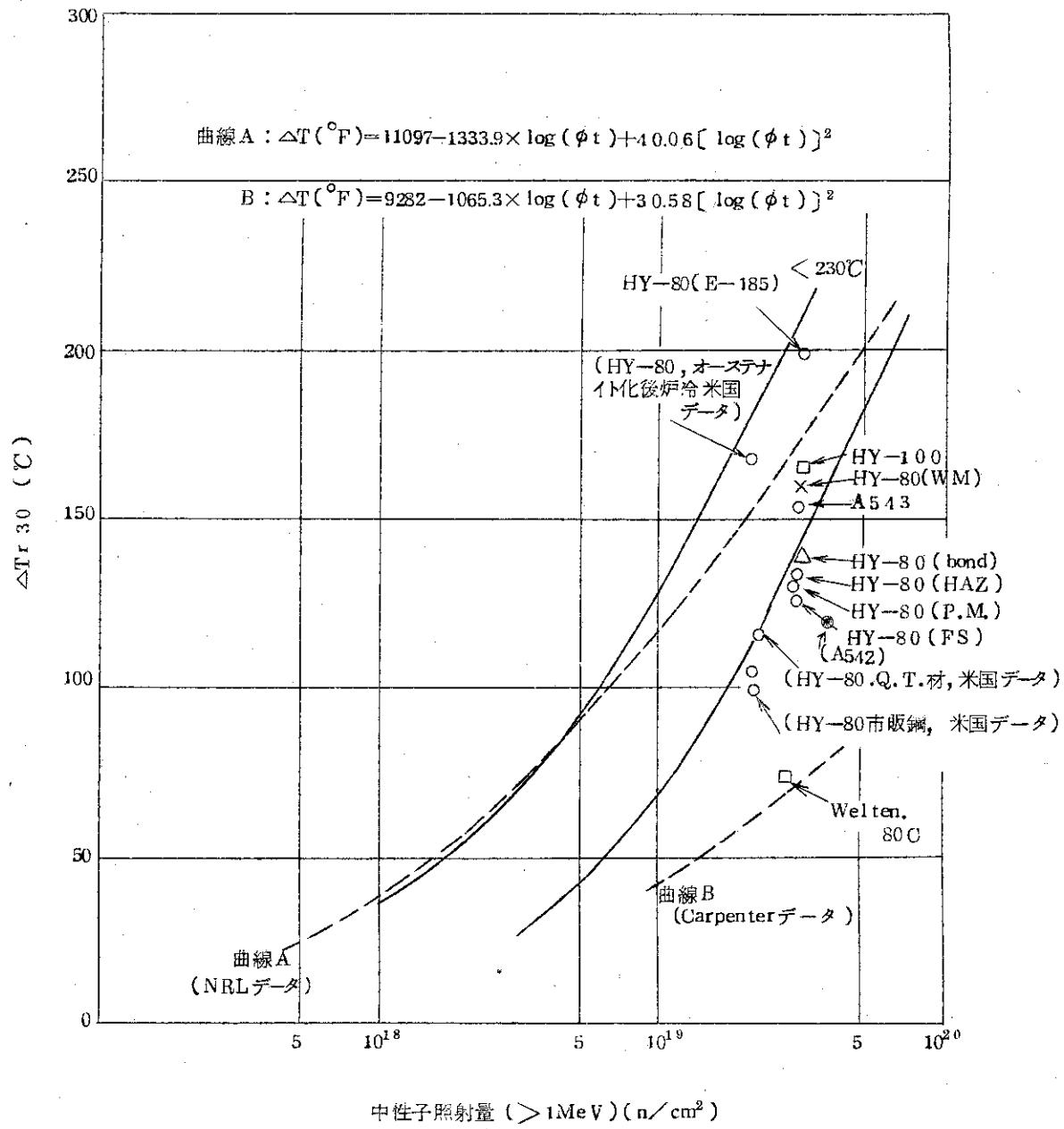


図2.11 中性子照射による衝撃遷移温度の上昇

新日鉄材 INなし
 石播材 IN処理
 石播材 INなし

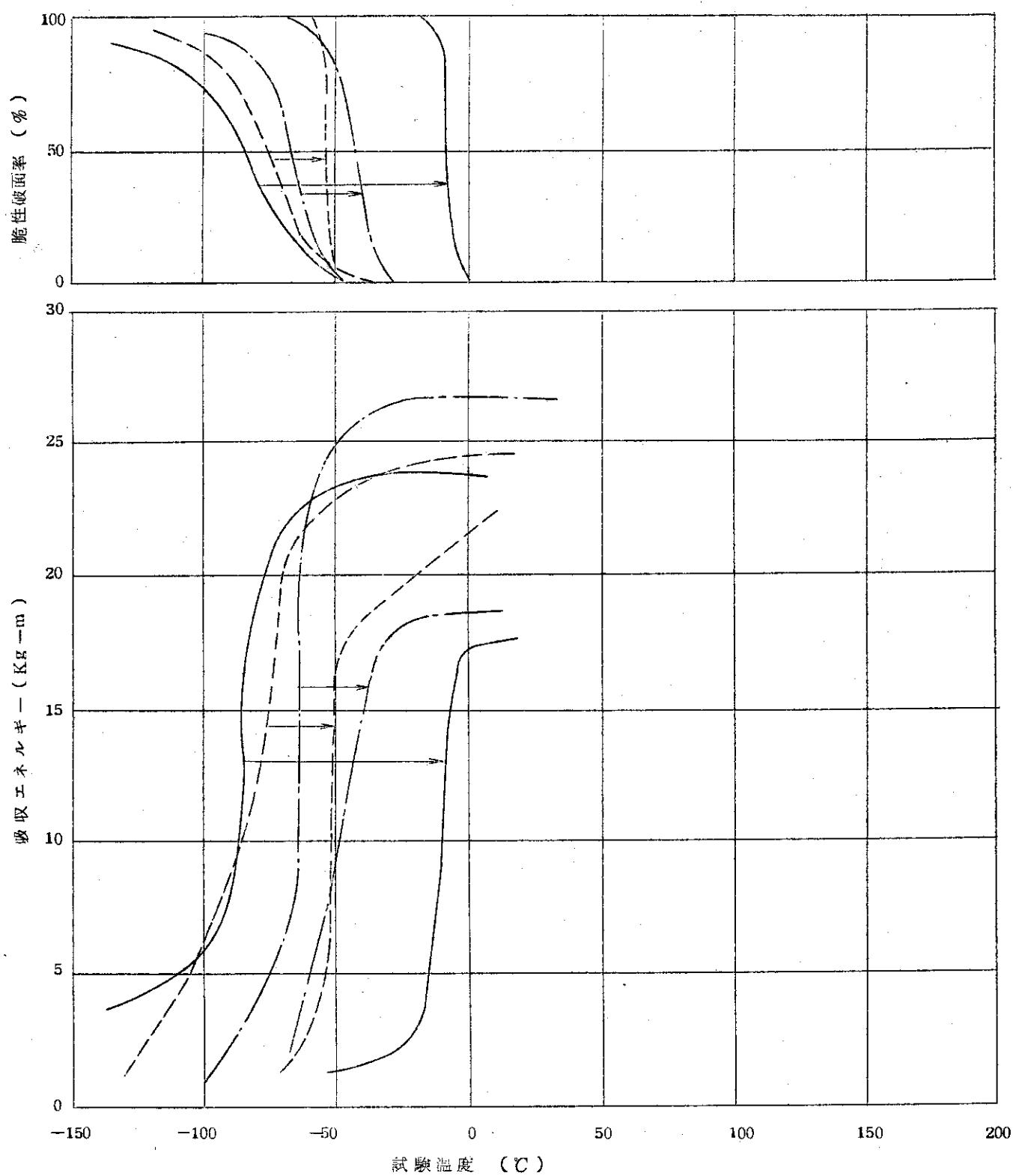


図2.1.2 照射前後の衝撃遷移曲線 (A542 Modity 鋼)

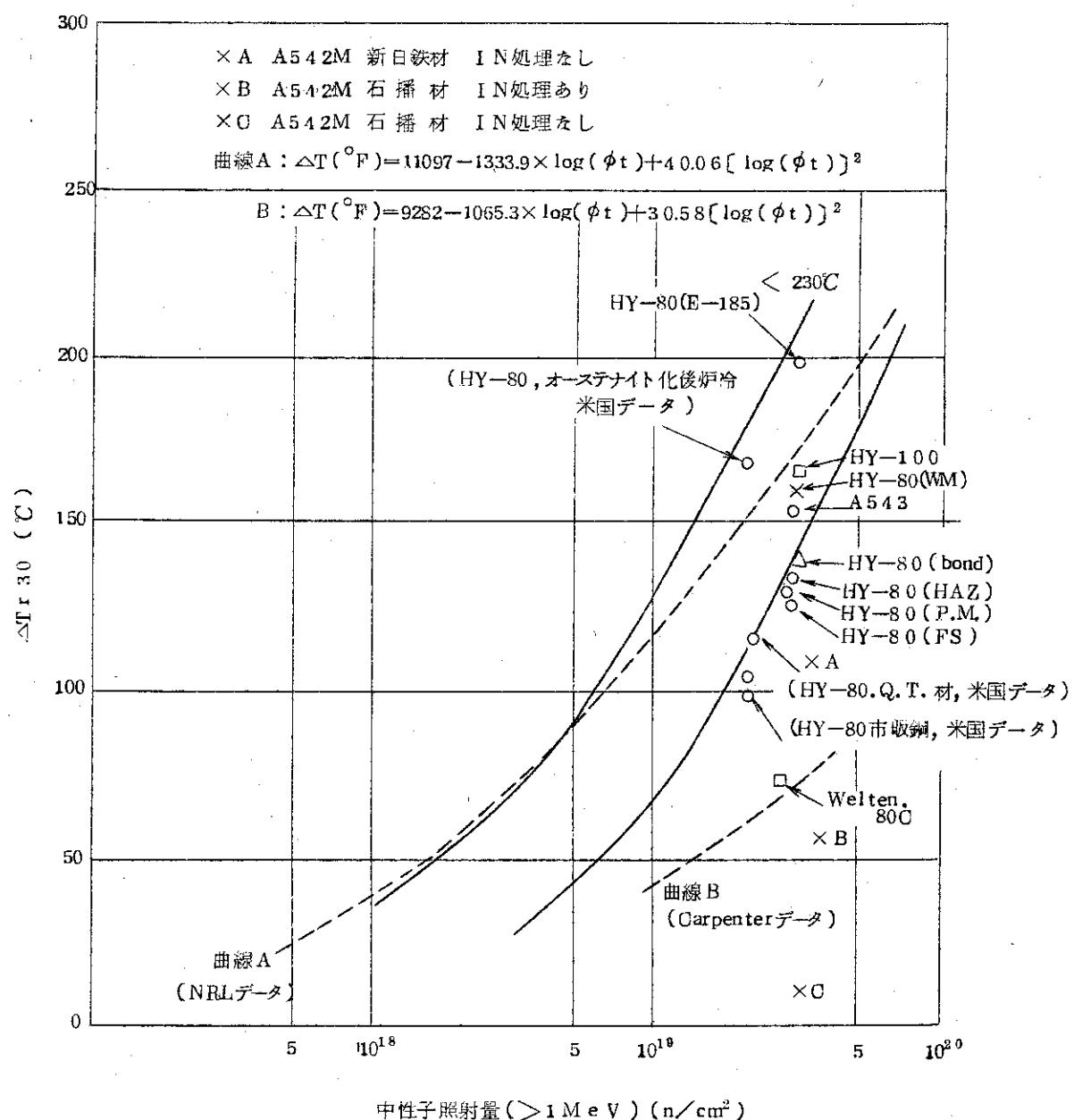
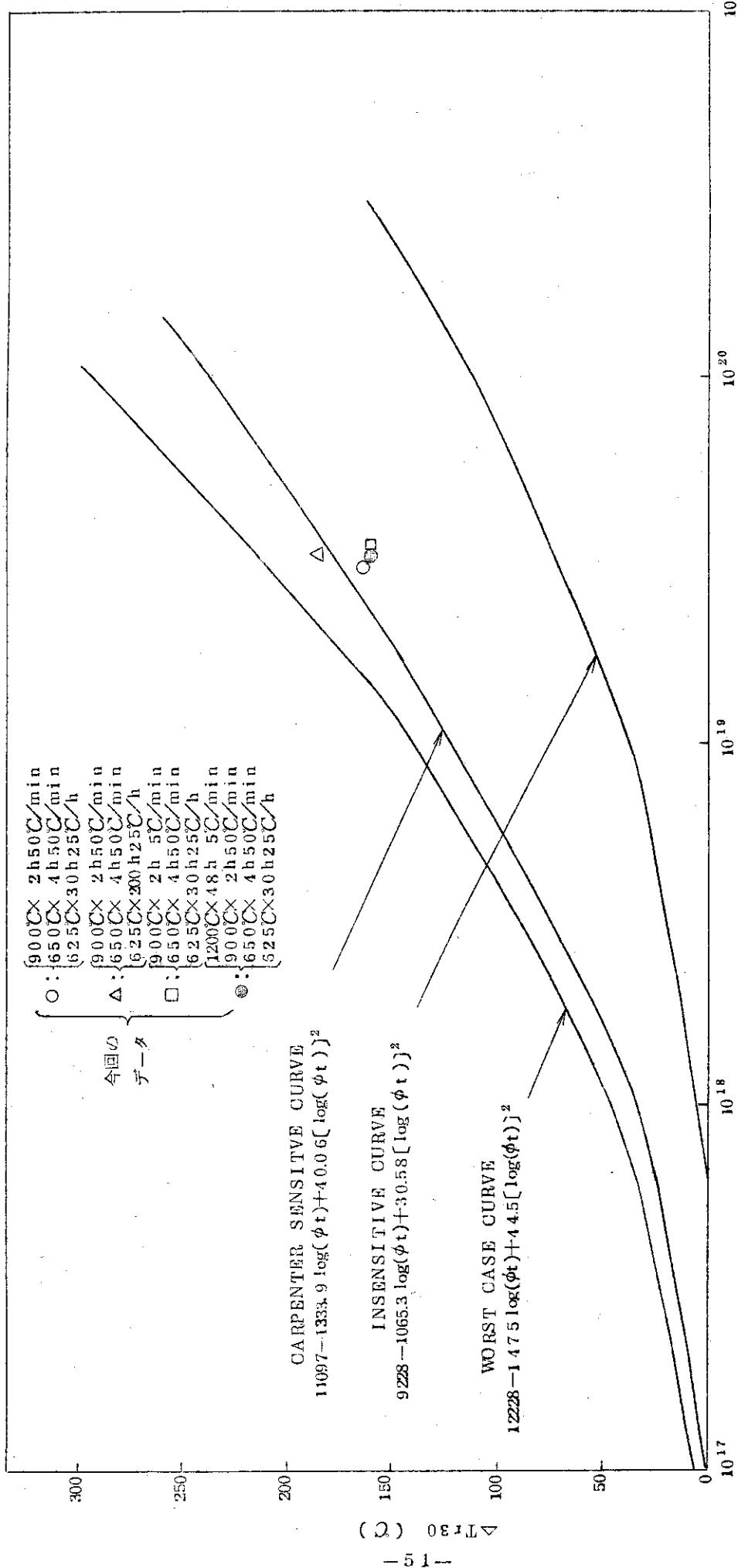
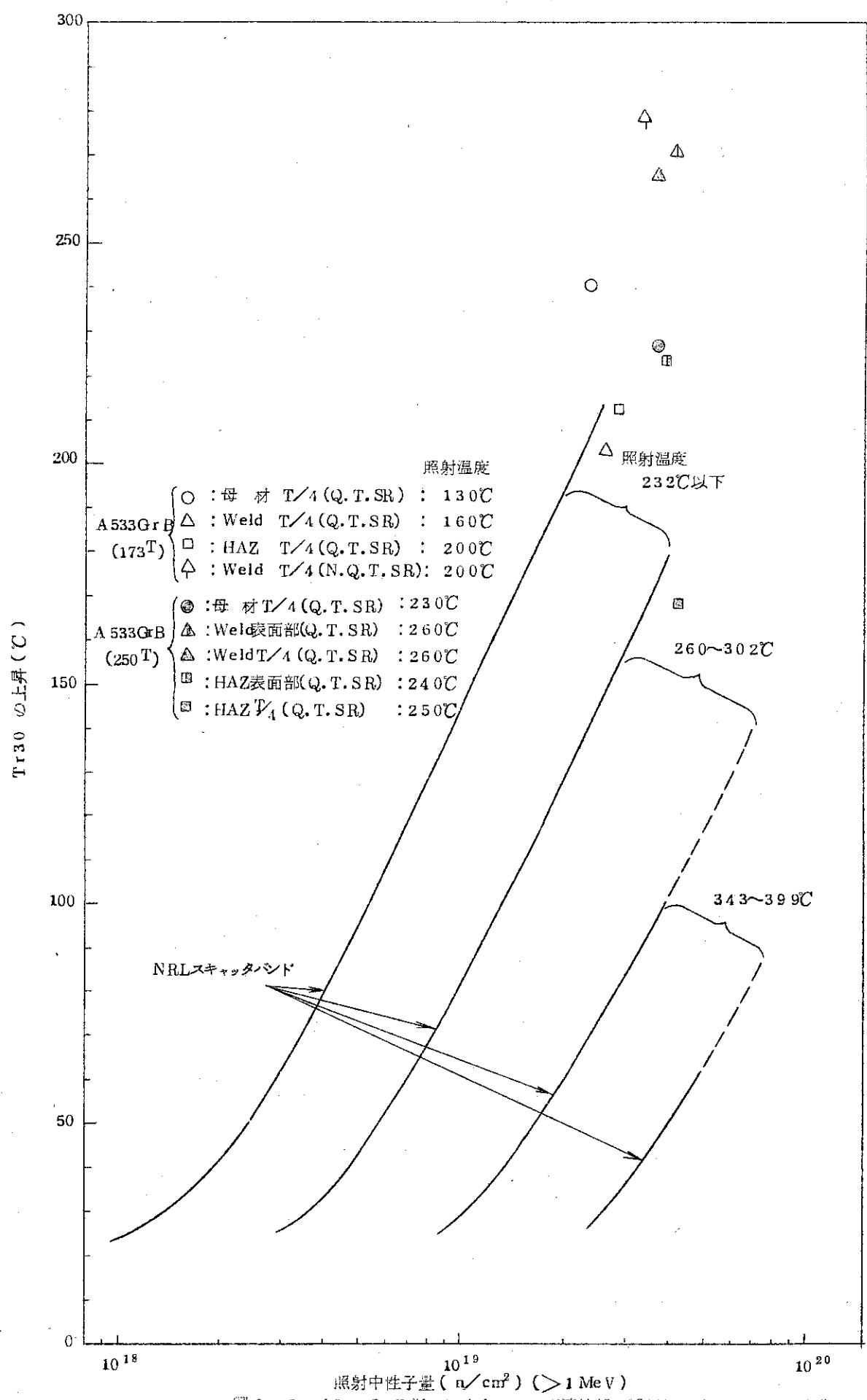


図2.13 中性子照射による衝撃遷移温度の上昇

図2.14 A533 Gr. B鋼各種熱履歴材の照射による ΔT_{r30} の変化

図 2.1.5 A533GrB 鋼エレクトロスラグ溶接部の照射による $\triangle T_{r30}$ の変化

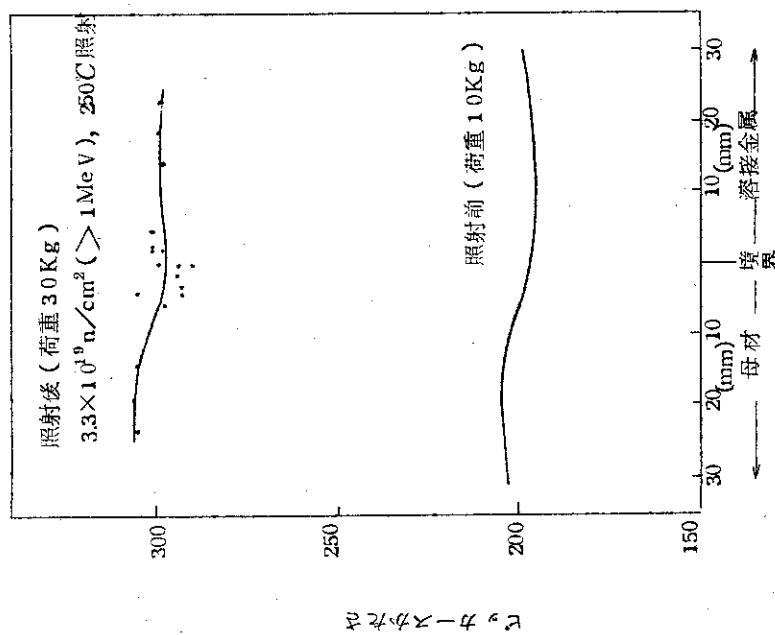


図2.16 A533 GrB鋼エレクトロスラグ溶接部の
照射によるかたさの変化
(板厚 17.5 mm, 熱処理N-Q-T-SR)

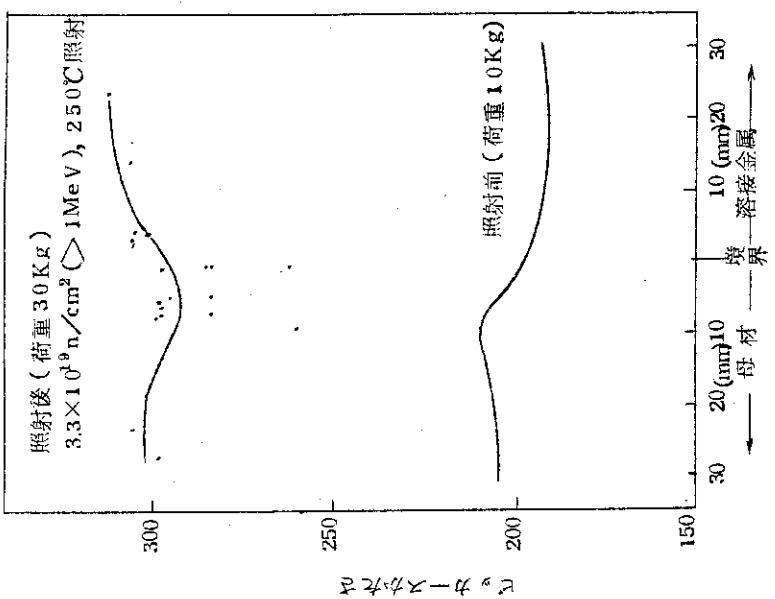


図2.17 A533 GrB鋼エレクトロスラグ溶接部の
照射によるかたさの変化
(板厚 17.5 mm, 熱処理N-Q-T-SR)

	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Ti
A	0.07	1.02	0.14	0.008	0.007	0.90	0.05	0.55	0.013
B	0.07	0.99	0.14	0.009	0.006	1.90	0.08	0.54	0.010
C	0.06	0.81	0.13	0.008	0.007	2.46	0.04	0.54	0.013
D	0.07	0.85	0.15	0.008	0.007	0.05	0.14	0.55	0.010
E	0.07	1.24	0.21	0.013	0.011	0.86	0.04	0.54	t _r

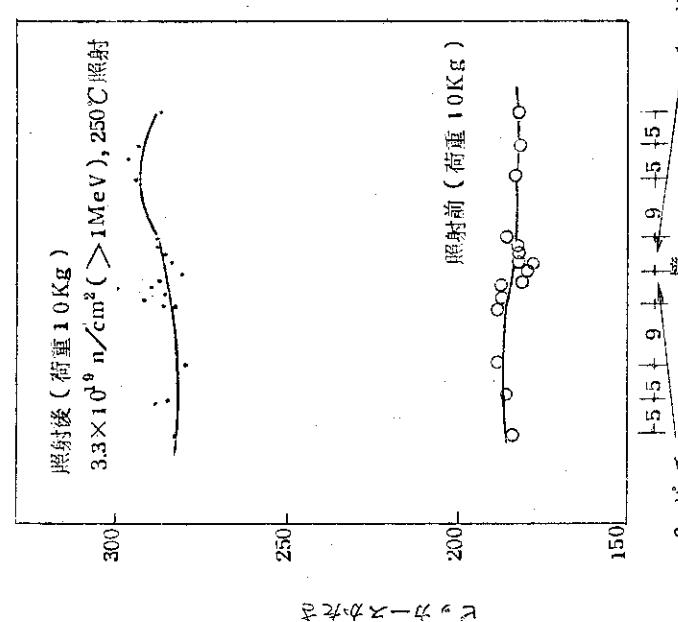


図 2.18 A533 Gr. B 鋼エレクトロスラグ溶接部の
照射によるかたさの変化
(板厚 2.50mm: 热处理 Q-T-SR)

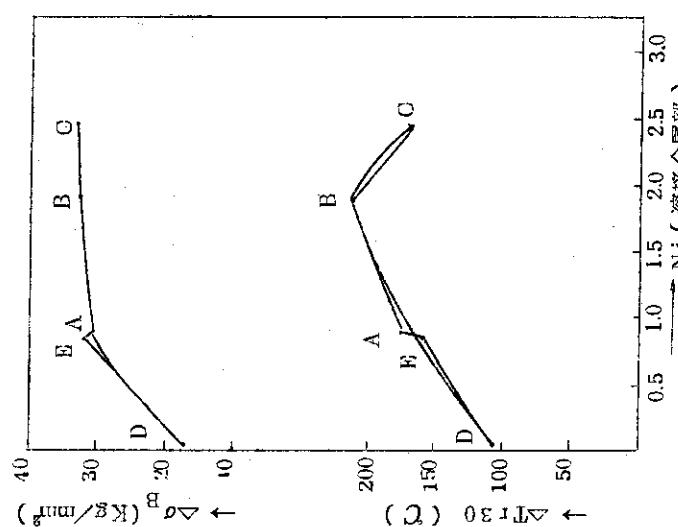


図 2.19 照射前の引張強度差 ($\Delta\sigma_B$) 及び
Tr30 の差 ($\Delta Tr30$) (C 及ばず溶
接金属中の Ni の影響
($1.2 \sim 2.3 \times 10^{19} n/cm^2, < 70^\circ C$)

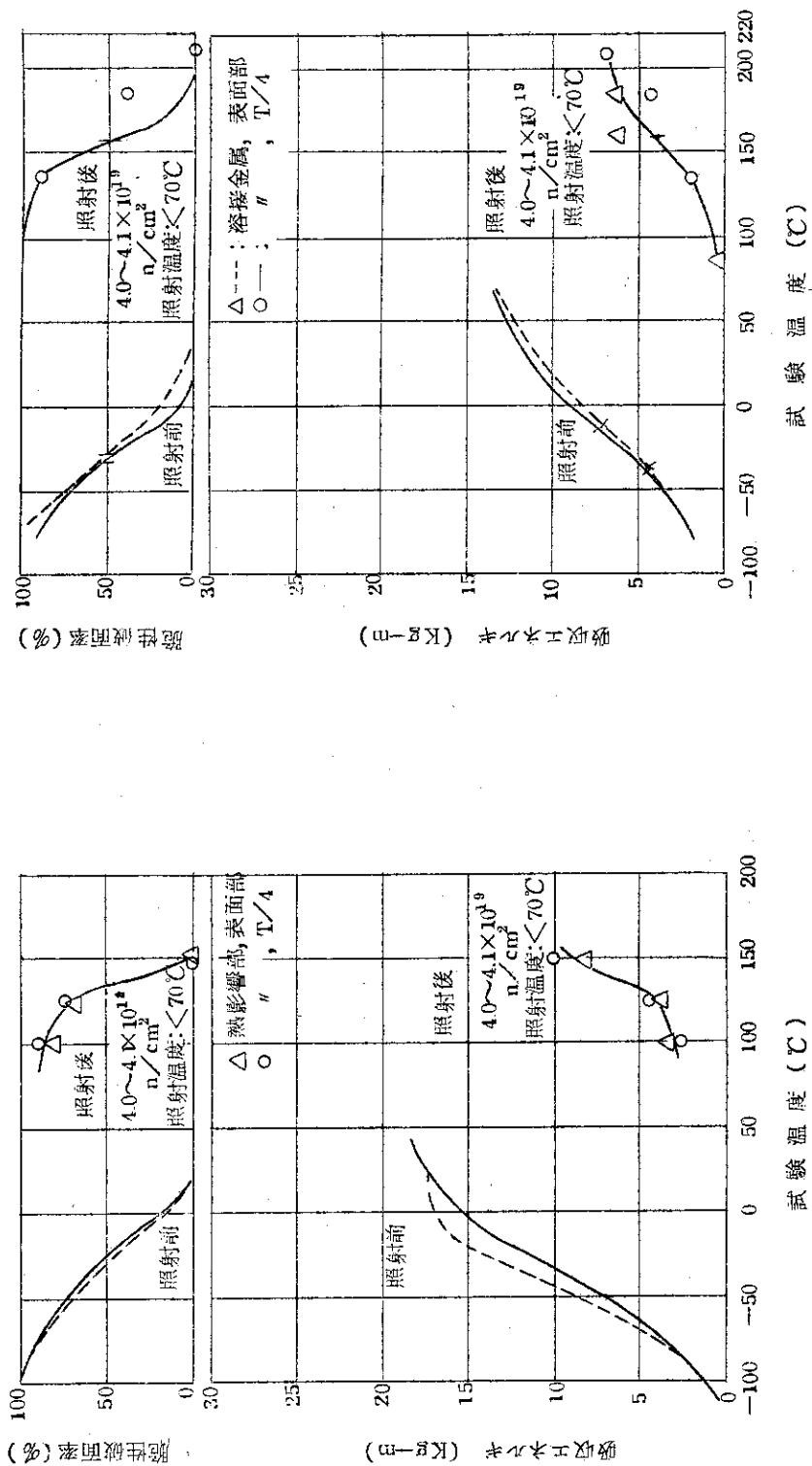


図 2.20 A533 Gr B 狹開先 MIG 溶接熱影響部の
照射による衝撃性質の変化

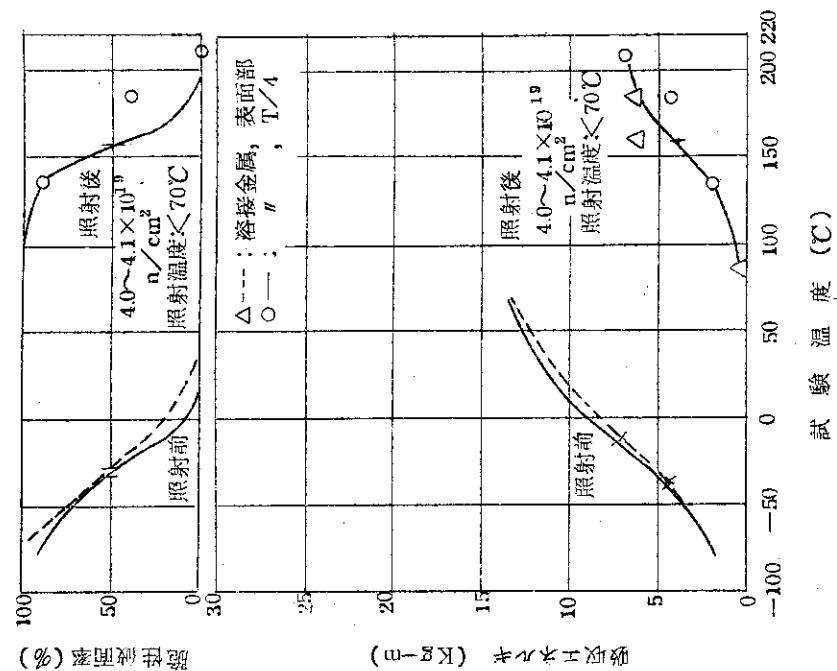


図 2.21 A533 Gr B 狹開先 MIG 溶接熱影響部の
照射による衝撃性質の変化

ビッカースかたさ

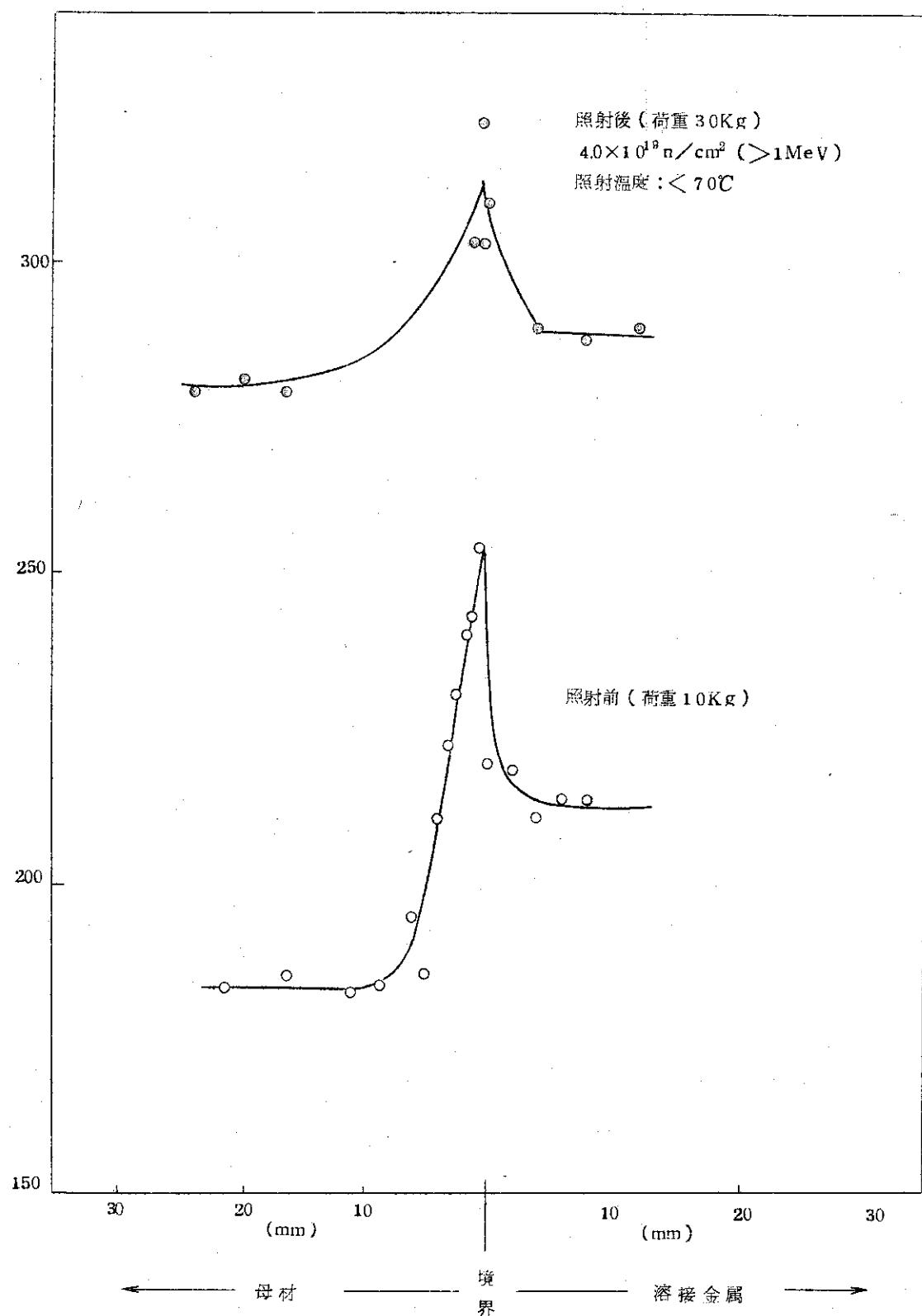


図 2.2.2 A533GrB銅被覆先MIG溶接部の照射によるかたさの変化
 (板厚 25.0mm)

2.3 ステンレス鋼

2.3.1 高速炉構造部鋼材

(1) 試験の目的

本試験は、高速炉構造部鋼材の候補材料であるSUS316鋼熱間圧延鋼板の照射確性試験を主たる目的とし、同時に、オーステナイト系ステンレス鋼の照射感受性におよぼすNまたはNbの影響ならびに照射温度の影響を確かめることとした。

(2) 試験の結果と検討

図2.2.3に常温引張性質ならびに常温かたさに関する照射試験結果を、また図2.2.4には、高温引張性質に関する照射試験結果を示す。写真2.3に照射後の光学顕微鏡組織を示す。

図2.2.3には、いずれの供試材も低温照射によって、硬化と脆化が生起することが示されている。照射硬化は、耐力に顕著に現われ、その変化量は30～40 kg/mm²におよぶ。照射による引張強さの増加量とかたさ増加量との対応は、図2.2.5に示されるように良好である。本結果とオーステナイト系ステンレス鋼に関する従来のデータとの比較を、図2.2.6に示すが、耐力の増加量ならびに伸びの減少量とともに、従来のscatter bandに入っている。460°Cで照射した316-30t材は、照射によって耐力・引張強さは、若干増加するが、かたさは低下し、さらに伸びは顕著に増加するという結果を示した。316-N材および316-Nb材については、引張性質のデータがないので、かたさのみから見る限りでは、特にNあるいはNb処理の影響が現出しているとは考えられない。

図2.2.4の低温照射→高温引張の試験結果を見ると、一般に引張試験温度が高くなると、照射による硬化が認められなくなるが、脆化（伸びの減少）は、すべての引張試験温度にわたって認められる。すなわち、600°C以上の引張試験温度では、非照射材と照射材との耐力の差はなくなり、引張強さは照射材の方が低値を示すようになる。後者は、伸びの低下にともなう現象であろう。伸びは、600°Cから700°Cにかけて、非照射材が若干回復の傾向を示すのに対し、照射材ではこの温度域で最低値を示す。供試材間の比較では、Nb処理の316-Nb材が、600°C引張で他よりも高い強度を示す点が注目される。ただし伸びは他と同程度である。

図2.2.7は、低温照射→高温引張の文献値をプロットしたものであるが、本結果はこれと定性的には一致している。しかし文献値の方が、600°C以上の引張試験温度域において、照射後の伸びが高く、これにともなって引張強さも高くなっている。

図2.2.8は、316-30t材の高温照射→高温引張試験結果を、文献値と比較して示す。高温照射の場合、高温引張性質にはほとんど照射の影響が認められず、数値の上では、照射によってわずかに強度低下と伸びの増加が生起するというのが、本結果であるが、これは410°C、 $2.8 \times 10^{21} n/cm^2$ 、照射材（文献値）にかなり近い挙動である。

照射温度の影響を確かめることは、本試験項目の1つの目的であるが、本項目のみでは高温照射のデータ数が少ないので、全ステンレス鋼供試材のデータをまとめ、照射温度別に図2.2.9に示す。図2.2.9の比較からわかるように、低温照射→常温引張では、例外なく強度の上昇と伸びの低下が生じるが、460～500°Cの高温照射→常温引張では、強度・伸びともあまり変化せず、伸びは上昇することもある。この照射温度の影響は、すでに述べたように高温引張の場合にもあてはまるようである。

Nbの影響については、安定な炭化物の粒界析出による粒界の強化という思想が提案されており⁽¹⁴⁾ SUS316にNb添加した場合、850°C×3hの析出処理材では、Nb処理の優位性が認められている。⁽¹⁵⁾

本試験結果(図2.24)も、照射量を考慮すれば、Nb処理材の方が、照射に対して抵抗性を有することを暗示するものと受取ることができ、Nb処理材における析出処理や照射条件・引張試験条件の影響は、さらに詳細に検討するに値しよう。

2.3.2 高速炉用燃料被覆管

(1) 試験の目的

高速炉用燃料被覆管としては、高温強度・液体Naに対する耐食性・加工性および経済性等の点からSUS316(18-8Mo鋼)が現時点では有力な候補材である。ここでは、SUS316薄肉管の予備的な照射確性試験をおこなうとともに、燃料被覆管が寸法精度あるいは、耐スエリング性に対する要求から冷間加工仕上されることにかんがみ、冷間加工の影響を明らかにすることを目的とした。

(2) 試験結果と検討

図2.30に常温引張性質ならびに常温かたさに関する照射試験結果を、また表2.22に扁平試験結果を示す。目標照射条件は、500°C, 10^{20} n/cm² (>1MeV)であるが、実際の照射量は目標を若干下まわっている。

図2.30では、316強加工材は高温照射によって、耐力・引張強さ・かたさは低下し、伸びは増加している。316低加工材・316-S.T材・316-W材では、耐力・引張強さ・伸びには顕著な照射の影響が認められないが、かたさは低下している。引張試験において適度な伸びを示す場合は、引張強さとかたさの間に比較的良好な相関が存在すると考えられるので、上述した引張試験とかたさ試験における挙動の相異は、矛盾した現象である。(図2.25参照)肉厚の薄い被覆管においては、かたさ測定時の荷重は低く、10kg以下の低荷重におけるかたさの測定精度に問題なしとしない現状では、引張試験における挙動を信頼することが妥当であろう。

扁平試験においては、いずれの供試材も割れ発生を認めることなく密着扁平が可能であり、引張試験における伸びに対応して、高温照射後も良好な延性を保持していることが認められた。

照射効果における冷間加工の影響については、SUS316では、600~700°C高温引張において、17%加工材の方が、溶体化処理材よりも、 σ_s , σ_b が高く、伸びは低くなっている⁽²¹⁾。また316L焼純材と25%加工材を、250°C照射において比較すると、すべての引張試験温度で、加工材の方が σ_s , σ_b とも高く、伸びが低いが、加工材はもともと伸びが低いので、照射による伸びの減少量は、加工材の方が少ない⁽²²⁾。SUS348で照射量を増した場合、25%加工材・焼純材とも常温引張で強度増加と伸びの減少を示すが、やはり加工材の方がもともと強度が高く、伸びが低いので、照射による変化量は小さく、照射量の増加とともに、引張性質の差が少なくなる⁽²³⁾。

今回の実験は、照射硬化・脆化の比較的少ない500°C温度域における照射であって、溶体化処理材の316-S.T材が照射後伸び増加という挙動を示しているが、全体的傾向は、照射によって加工の影響が少なくなる方向に向うものと見ることができる。

なお、SUS316強加工材における照射後強度の顕著な低下は、格子欠陥の回復によるものであろう。すなわち、照射効果のうち格子欠陥の生成による硬化現象は、500°C付近の焼純で回復することが知られているが²⁴⁾、加工による格子欠陥が、500°C照射中に回復した可能性が強い。

2.3.3 各種ステンレス鋼管

(1) 試験の目的

本試験は、炉心および燃料アセンブリー構造部材の予備的照射効果の判定を目的とした。鋼種としては、SUS304とSUS347を選び、同時に継目無管と溶接管の比較をおこなうこととも意図した。

(2) 試験結果と検討

図2.3.1に常温引張性質ならびに常温かたさに関する照射試験結果を、また表2.2.3に、扁平試験結果を示す。写真1-2.4に照射後の光学顕微鏡組織を示す。低温照射では目標照射量に達したが、高温照射は温度・照射量ともに目標の低めとなつた。

図2.3.1では、いずれの供試材も、低温照射によって、耐力・引張強さ・かたさの増加を示し、引張強さとかたさの対応は図2.2.5に見るととく良好である。照射による耐力の増加を文献値と比較すると、図2.2.6に示したように、今回のデータは、従来オーステナイト系ステンレス鋼に対して与えられたscatter band内に入っている。伸びは、304-1.6t材は従来のデータと比較して同程度の低下量を示しているが、304-1.4t材および347-W材では、ほとんど低下を示さず、当然従来のscatter band下限を大きく下まわる結果となっている。高温照射のデータは、かたさ試験の結果のみであるが、前項におけると同様、500°Cの高温照射では、硬化の度合が少ない。

なお、扁平試験においては、供試材・照射条件を問わず、すべて割れ発生を認めることなく密着扁平が可能であり、照射後も良好な延性を保持しているものと解される。

引張伸びの挙動には、従来のデータとの比較では若干の検討の余地はあるが、本結果から判断する限り、SUS304とSUS347との間、ならびに継目無管と溶接管との間に、有意な差があるとは考えられない。

図2.3.2は、304-1.4t材の高温照射→高温引張試験結果を、文献値と対比して示したものである。本実験は600°Cで高温引張を行なつたものであるが、照射後耐力は、非照射材と同程度であり、照射後引張強さならびに伸びは、これより低くなつておらず、脆化が生じていることがわかる。また本データを文献値と比較すると、伸びはほぼ同じであり、耐力ならびに引張強さは文献値より低い。しかしこの差異は照射条件の違いあるいは、素材強度の差によって説明しうる程度である。なおここで述べたSUS304鋼の高温照射→高温引張における挙動は、前の項目で述べたSUS316鋼のそれと全く軌を一にするものである。

写真2.4の照射後光学組織には、非照射材にくらべて何らかの差異を認めることはできない。

2.3.4 SUS316冷間圧延鋼板

(1) 試験の目的

本試験は、高照射下におけるステンレス鋼の材質変化によよぼす、微量ボロンおよび結晶粒度の影響を調査することを目的とし、SUS316冷間圧延鋼板をベースとした。

(2) 試験結果と検討

図 2.3 3 に常温引張性質ならびに常温かたさに関する照射試験結果を、また写真 2.5 に照射後の光学顕微鏡組織を示す。照射条件は当初 600°C, $10^{21} \text{n}/\text{cm}^2$ 以上 ($>1 \text{MeV}$) を目標としたが、他の試験との調整上低温照射となつた。照射量は目標値のやや低めとなつた。

図 2.3 3 によれば、いずれの供試材も低温照射によって強度上昇ならびに延性低下を生じてゐる。すなわち、約 $10^{21} \text{n}/\text{cm}^2$ ($>1 \text{MeV}$) 照射による耐力の増加は、316 低 B 材で $18 \text{kg}/\text{mm}^2$ 、316 高 B 材・316 粗粒材・316 細粒材では $40 \text{kg}/\text{mm}^2$ 前後である。引張強さの増加は、いずれの供試材も大差なく、 $20 \text{kg}/\text{mm}^2$ 前後である。伸びの低下は、316 低 B 材・316 高 B 材・316 粗粒材ではほとんど差がなく、20% 前後であるが、316 粗粒材はやや大きく 34% となっている。ビッカースかたさの増加は、316 粗粒材以外の 3 供試材は大差なく Hv 100 前後であるが、316 粗粒材は照射によって軟化するという結果を与えてゐる。このかたさデータは、ここにかけた他のデータやオーステナイト系ステンレス鋼の低温照射による一般的挙動に照らして明らかに異常であり、以下の記述ではこのデータを除外する。

以上の結果から、まず B の影響について考察する。316 低 B および高 B 材を比較すると、B 量による差が現われているのは、耐力のみであつて、低 B 材の方が照射による耐力増加が少ないとの結果となっている。ところで 316 細粒材は、316 低 B および高 B 材と比較しうる粒度を有しており、かつ意識的には B を添加していない鋼種であるので、これも含めて考えると、B 量と照射による耐力増加量との間に系統的な関係があるとはいえない。また 316 低 B 材の照射による強度増加は、耐力で $18 \text{kg}/\text{mm}^2$ 、引張強さで $23 \text{kg}/\text{mm}^2$ と後者の方が大きくなっていることも、照射硬化は耐力においてより顕著に現われるという一般的傾向とは異なる。したがって、316 低 B 材の照射後耐力が比較的低い値を示したのは、パラツキ範囲の低目にデータかでたものと解することも可能である。したがって本実験の範囲では、微量 B の有意な影響は認められない。

本実験では、熱中性子束は $1.5 \times 10^{21} \text{n}/\text{cm}^2$ と推定され、これによる He 生成量は、316 低 B 材で 1.4 ppm、316 高 B 材で 3.6 ppm 程度と推定される⁽²⁵⁾。この量の He は、ステンレス鋼の引張性質に影響するはずであるが、⁽²⁶⁾ He による脆化は、照射温度が高くなるほど、また試験温度が高くなるほど著しくなるものであり⁽²⁷⁾、今回の照射ならびに引張試験条件では、0.00X% オーダの B の影響は、検出できないものと考えられる。

結晶粒度の影響については、SUS 316 において、粒度による照射後伸びに、ほとんど差がないというデータ⁽²⁸⁾ と、SUS 304 では照射後伸びが、粗粒化とともに減少するというデータ⁽²⁹⁾ があり、はつきりしないが、今回のデータは、照射脆化に対する細粒鋼の有利性を裏付ける側面でた。

照射後の光学組織には、特に指摘すべき変化は認められない。

2.3.5 コルモノイ溶射 SUS 304 棒

(1) 試験の目的

炉構造、計測部材としての特殊ステンレス合金の予備的照射試験の一環として、本試験をおこなつた。

(2) 試験結果と考察

表 2.2.4 に試験結果を示す。照射前の引張性質としては、引張強さのみが与えられているが、照射後引張強さは、これより 4 kg/mm^2 だけ低下している。しかしながら、かたさ試験の結果では、コルモノイドはバラツキはあるものの明らかに照射硬化を示しており、SUS 304 もこの照射条件では硬化を示すものと予想されるので、上記引張強さの低下は、照射脆化（伸びの減少）にともなう現象と解するのが妥当であろう。この種の複合材料の試験においては、外層と内部の挙動差も考えられ、引張破断に到る過程の観察も重要である。

2.3.6 爐心部材用合金鋼

(1) 試験の目的

Inconel 600, 17-4 PH ステンレス鋼の炉心部材の適性を知るために、照射脆化の予備的検討を目的とした。

(2) 試験結果と検討

Inconel 600, 17-4 PH ステンレス鋼の照射後の引張性質およびかたさ試験結果を表 2.2.5, 図 2.3.4 ~ 2.3.7 にそれぞれ示した。以上の結果から次のことを検討した。

(1) Inconel 600

Inconel 600 は、低温照射により耐力、引張強さが増加し、伸びが減少した。特に降伏比の増加は顕著である。図 2.3.4 に Olandson⁽¹⁾, Böhm⁽¹⁰⁾による Inconel 600 のデータを示すが、今回の供試材の成績と比較的良好く一致していると云える。また図 2.3.4 中には本試験の Inconel 600 と同じく低温照射を行なった 2 ~ 3 の Ni 基合金の結果も同時に示した。これによると Inconel 600, Inconel 625, Inconel X750, Hastelloy N などは照射により耐力、引張強さは、同程度か増加を、伸び、絞りは低下を示した。

(2) 17-4 PH ステンレス鋼

17-4 PH 鋼は、低温照射により耐力、引張強さおよびかたさは増加を、伸びは減少を示した。

図 2.3.5, 2.3.6 に各種オーステナイト系ステンレス鋼の照射量と耐力の増加量 ($\Delta\sigma_s$)、伸びの減少量 ($\Delta\delta_{\ell_0}$) の関係⁽¹²⁾を示すが、供試材の $\Delta\sigma_s$, $\Delta\delta_{\ell_0}$ は、他のオーステナイト系ステンレス鋼に比べて小さい結果であった。

また、かたさは図 2.3.7 に R. E. Schreiber⁽¹³⁾のデータと比較（本実験結果をロックウェル A スケールに換算）して示すが、析出硬化材のデータとよく一致している。

表 2.2.2 SUS316 燃料被覆管の扁平試験結果

供試材 略 称	試験片寸法 (外径×肉厚×長さ mm)	照射条件		扁平試験結果	
		照射温度 (℃)	照射量 (n/cm ²)	照射前	照射後
316 強加工	6.3×0.35×50	470	7.1×10^{19}	密着扁平にて割れ発生を認めず	密着扁平にて割れ発生を認めず
316 低加工	6.3×0.35×50	470	7.1×10^{19}	"	"
316-S.T	6.3×0.35×50	470	7.1×10^{19}	"	"
316-W	6.32×0.34×50	470	7.1×10^{19}	"	"

表 2.2.3 SUS304 鋼管の扁平試験結果

供試材 略 称	試験片寸法 (外径×肉厚×長さ mm)	照射条件		扁平試験結果	
		照射温度 (℃)	照射量 (n/cm ²)	照射前	照射後
304-1.4t管	12.7×1.4×50	50以下	6.8×10^{20}	密着扁平にて割れ発生を認めず	密着扁平にて割れ発生を認めず
304-1.4t管	12.7×1.4×50	500	8.8×10^{19}	"	"
304-1.6t管	12.7×1.56×50	50以下	6.8×10^{20}	"	"
304-1.6t管	12.7×1.56×50	50以下	7.3×10^{20}	"	"

表 2.2.4 コルモノイ溶射 SUS304 棒の照射試験結果

試験項目	機械的性質	照射温度 照射量	照射前	照射後
常温引張	耐力 (kg/mm ²)	70℃以下 $4.0 \times 10^{19} n/cm^2$	-	42.0
	引張強さ (kg/mm ²)		46.0	42.0
	伸び (%)		-	16.0
常温かたさ	ピッカースかたさ	70℃以下	711(0.3)	735(30)
	(荷重: kg)	$4.1 \times 10^{19} n/cm^2$	565(0.3)	668(30)

表 2.2.5 Inconel 600, 17-4PH 鋼の照射による引張性質およびかたさの変化

鋼種	板厚	採取位置	熱処理	変化量	引張性質			かたさ
					σ_s kg/mm ²	σ_b kg/mm ²	δ_{lo} %	
Inconel 600	7.5φ	母材	1040°C×1.3h 水冷	照射前	31.7	6.98	38.7	163
				照射後	71.2	8.09	25.4	0.78×10^{20} n/cm ² <75°C 245
				変化量	+39.5	+1.11	-1.33	+8.2
17-4PH	-	母材	1030°C×0.5h 水冷 500°C×4h 空冷	照射前	108.8	11.97	15.1	404, 391
				照射後	131.2	14.45	9.6	1.0×10^{20} n/cm ² <75°C 442, 436
				変化量	+22.4	+24.8	-5.5	+38, +45

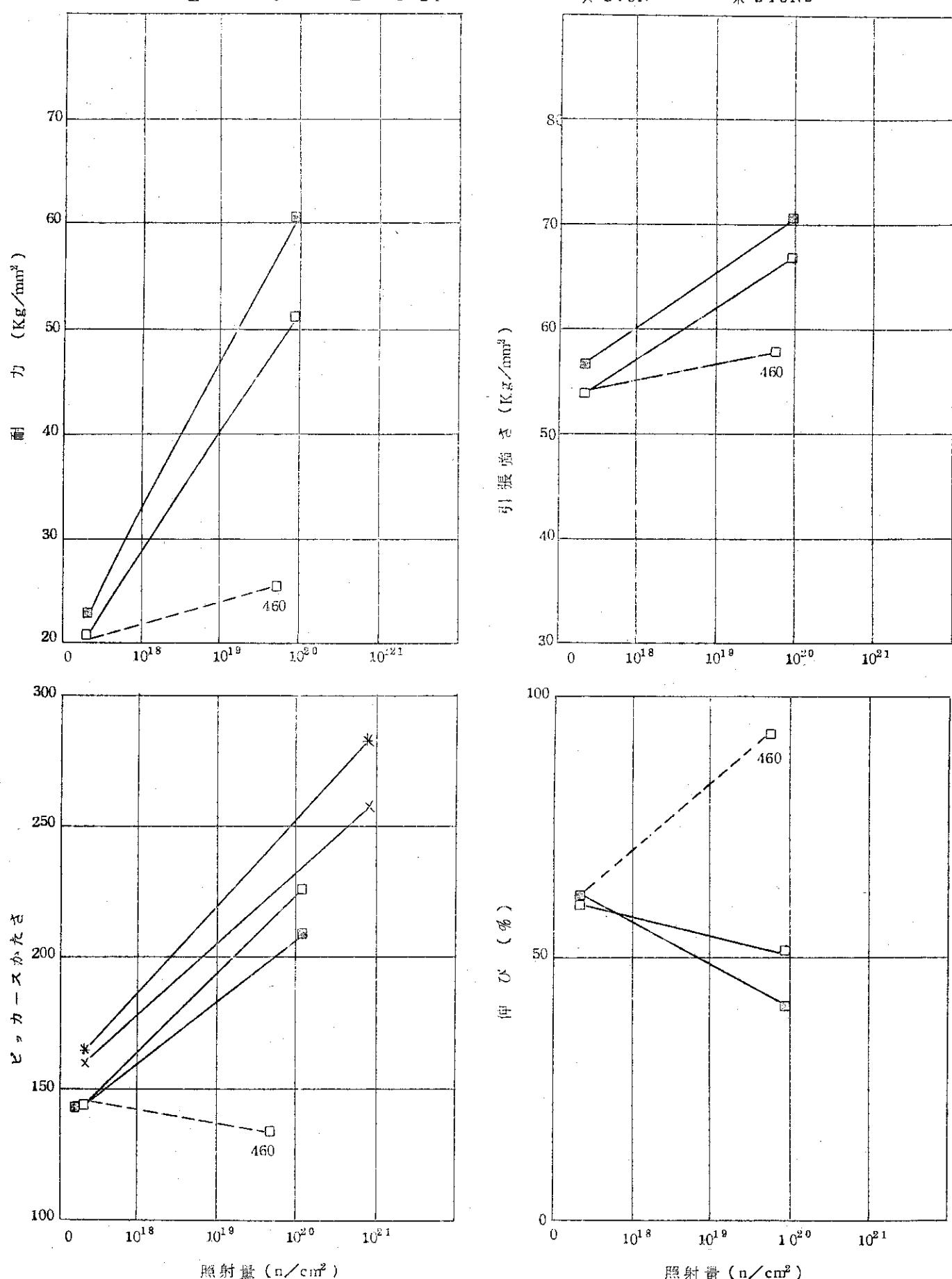


図 2.2.3 SUS 316熱間圧延鋼板の引張性質ならびにかたさにおよぼす照射の影響
(数字添字は照射温度(℃)を示す。添字なきものは低温照射)

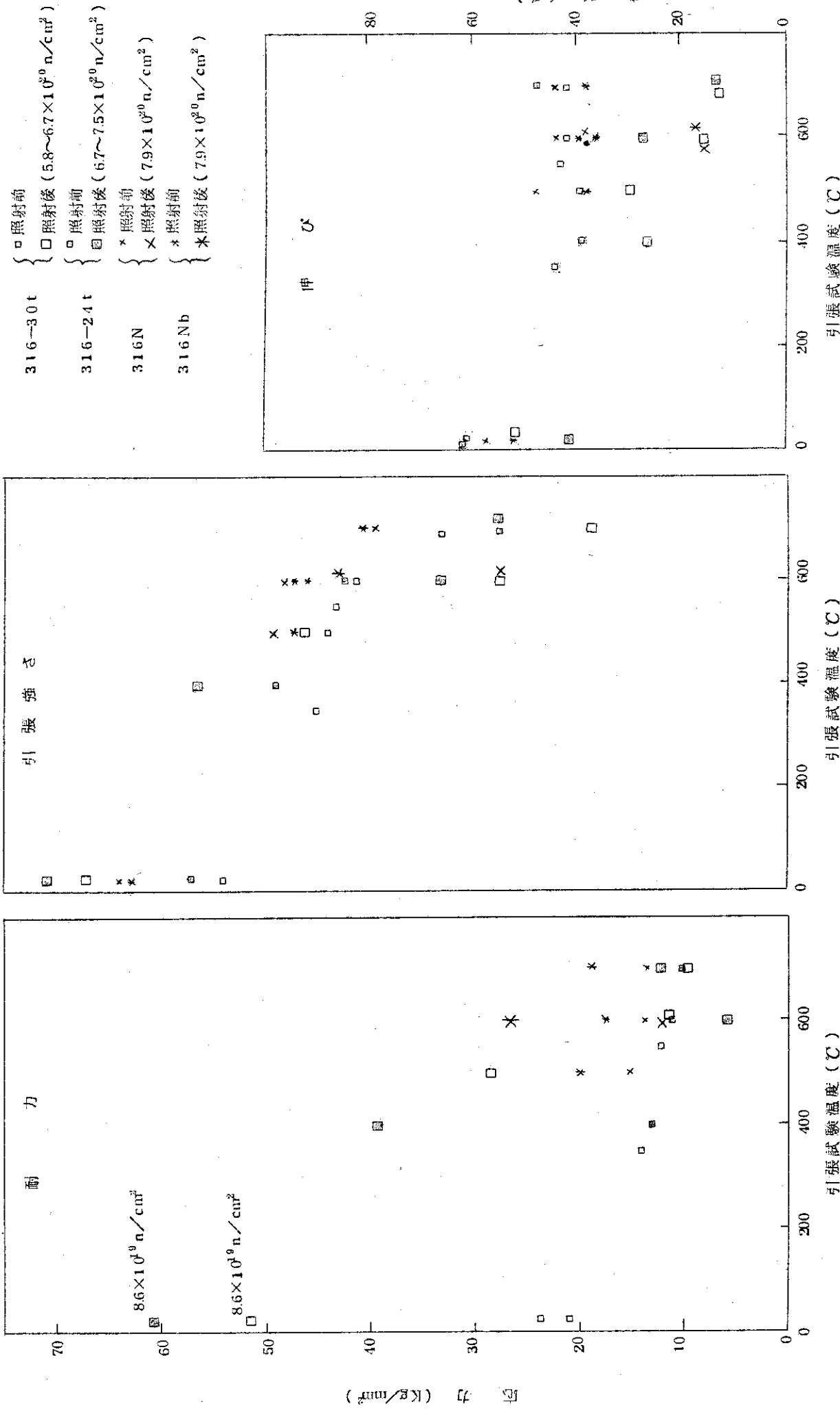


図 2.2.4 SUS 316 熱処理延鉄板の低温照射→高温引張試験結果

引張試験温度 (°C)

引張試験温度 (°C)

引張試験温度 (°C)

□ 316-30t	○ 304-1.4t管	△ 316強加工	■ 316低B
■ 316-24t	◎ 304-1.6t管	△ 316低加工	■ 316高B
	◎ 347-W管	△ 316-S.T.	□ 316粗粒
		▽ 316-W	▣ 316細粒

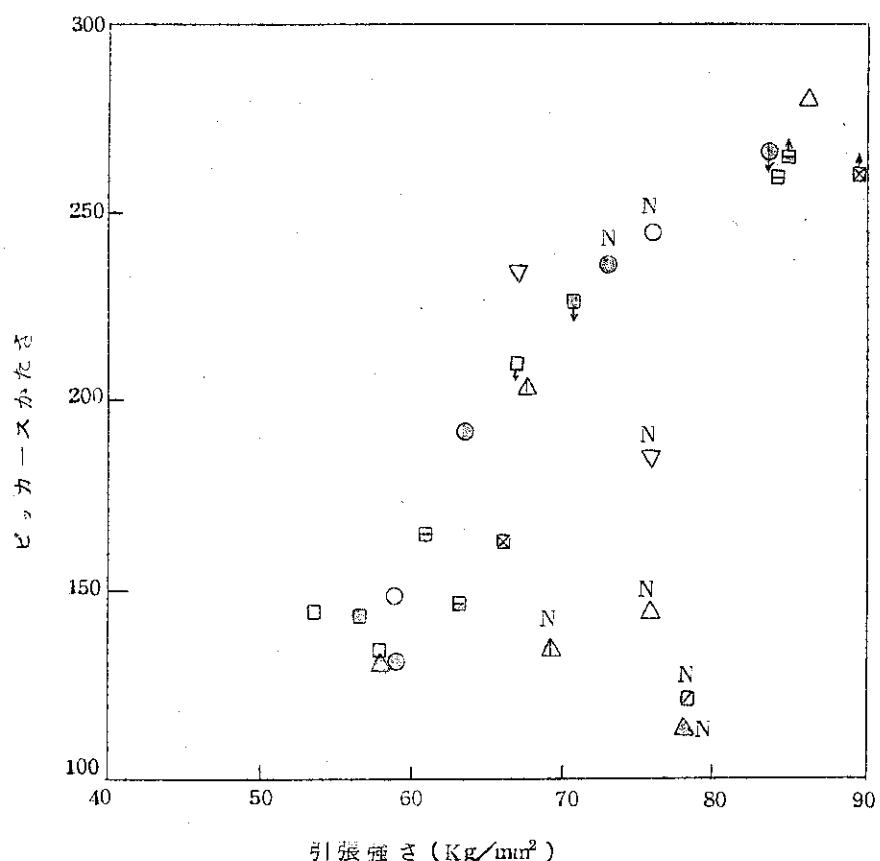


図 2.2.5 引張強さとビッカースかたさの対応
(N字付または印付は照射後データ
である。矢印の向きは、引張試験とか
たさ試験を同一照射量としたときプロ
ットの移動する方向を示す)

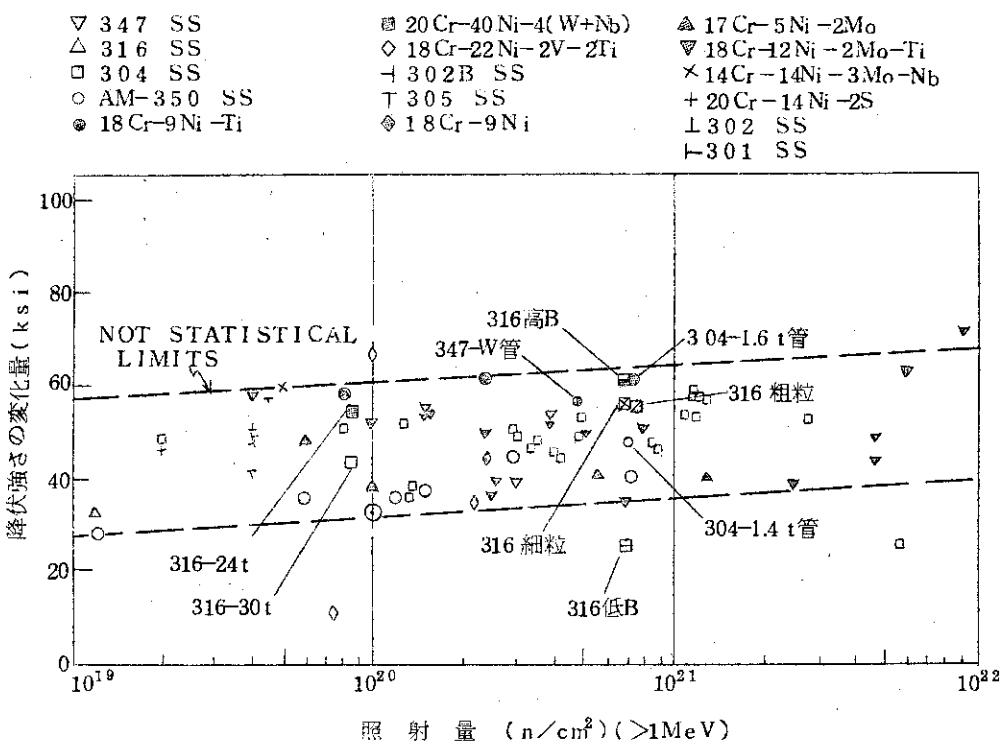


図 2.2.6 (A) 200°C以下で照射されたオーステナイト系ステンレス鋼の室温での降伏強さに対する照射量の影響

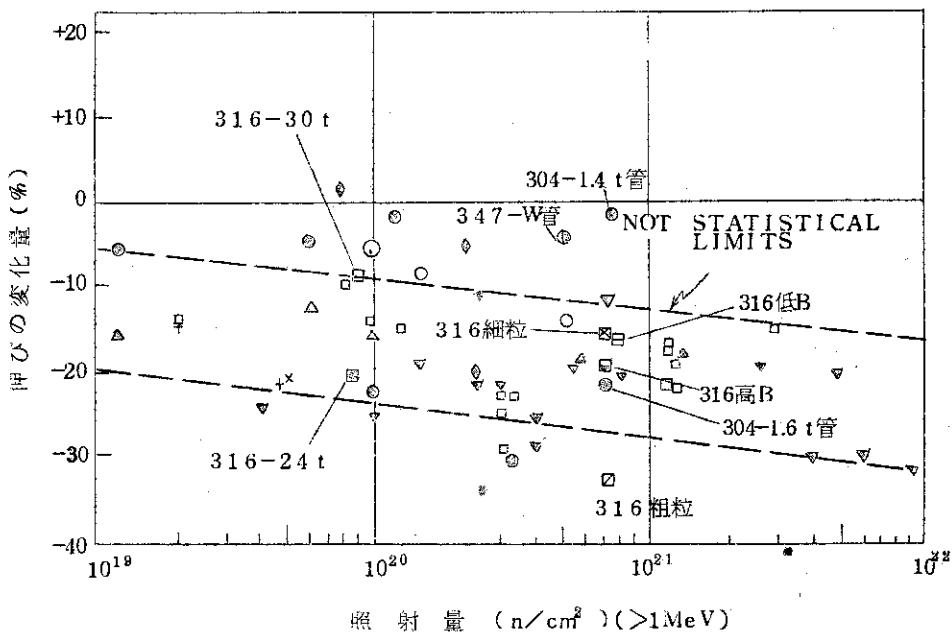


図 2.2.6 (B) 200°C以下で照射されたオーステナイト系ステンレス鋼の室温での伸びに対する照射量の影響

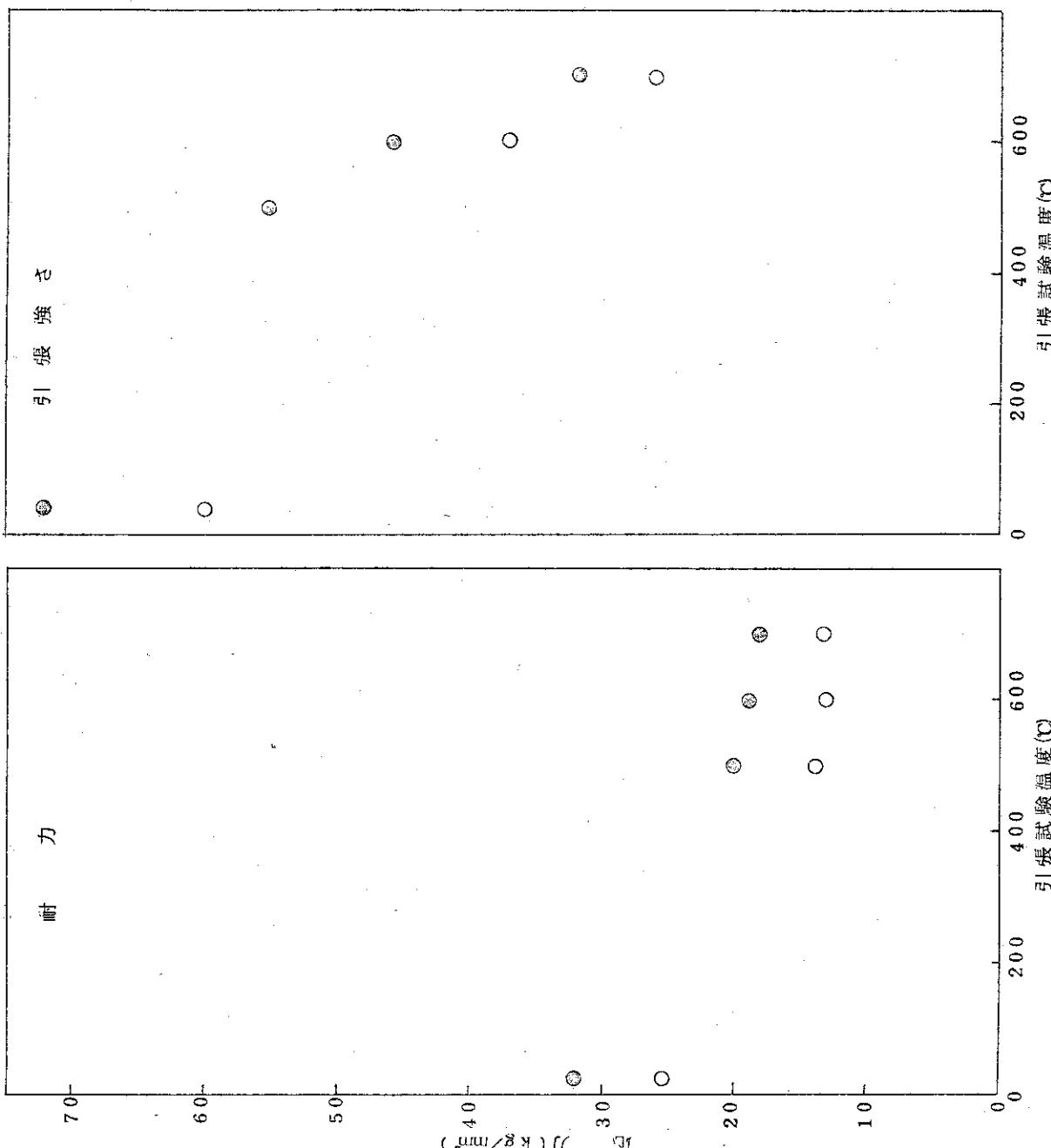


図 2.27 SUS 316 鋼 低温照射→高温引張試験結果 (文献値)

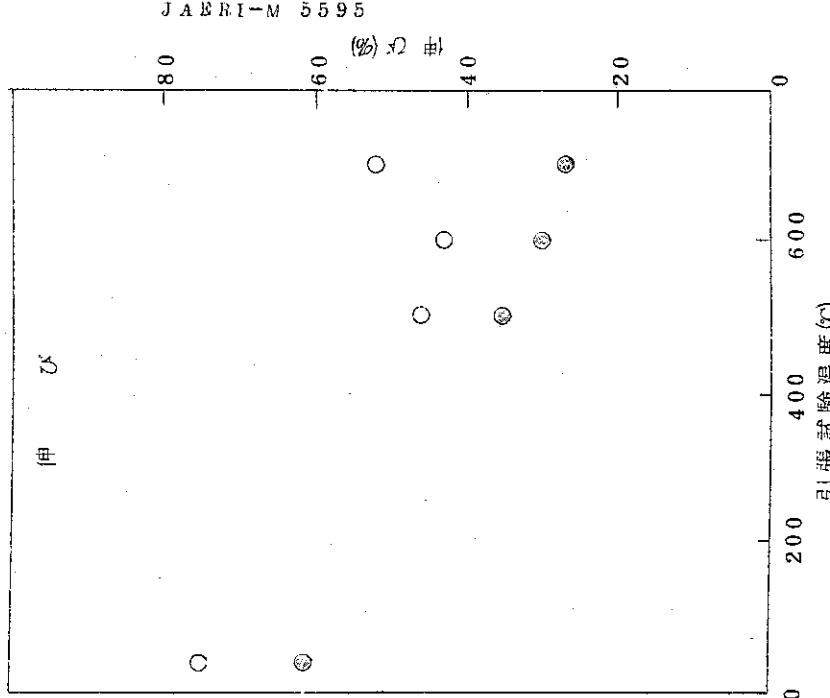


図 2.27 SUS 316 鋼 引張試験結果 (文献値)

○ Thermal Control Date } 3)
 ◎ 650°C 10^{21} n/cm²(>1MeV)照射

△ Thermal Control Date } 4)
 ▲ 700°C, 10^{21} n/cm²(f) 照射

□ 非照射
 ■ $410^{\circ}\text{C}, 2.8 \times 10^{21}$ n/cm²(total) 照射 } 5)
 ▨ $470^{\circ}\text{C}, 8.6 \times 10^{21}$ n/cm²(total) 照射

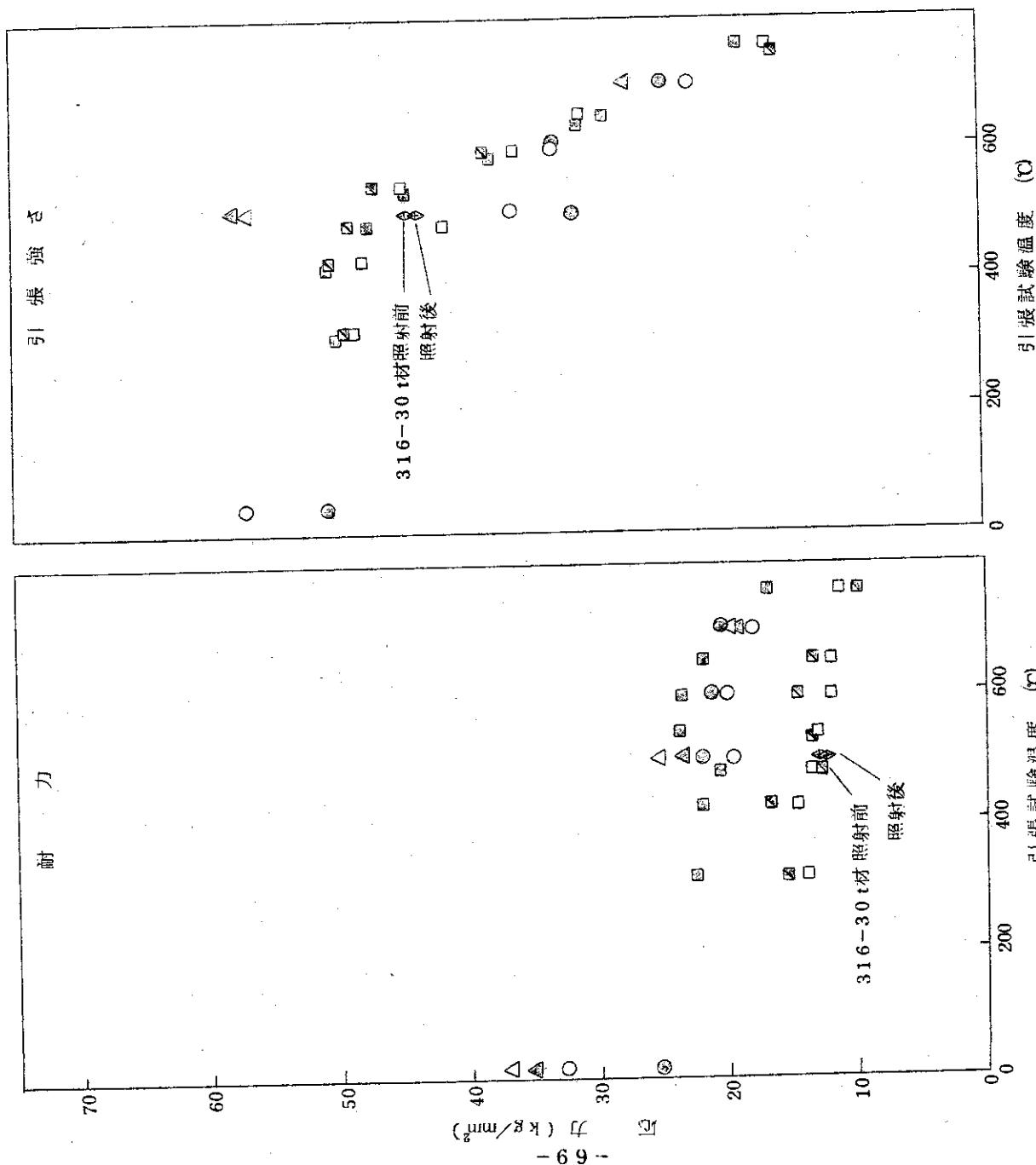
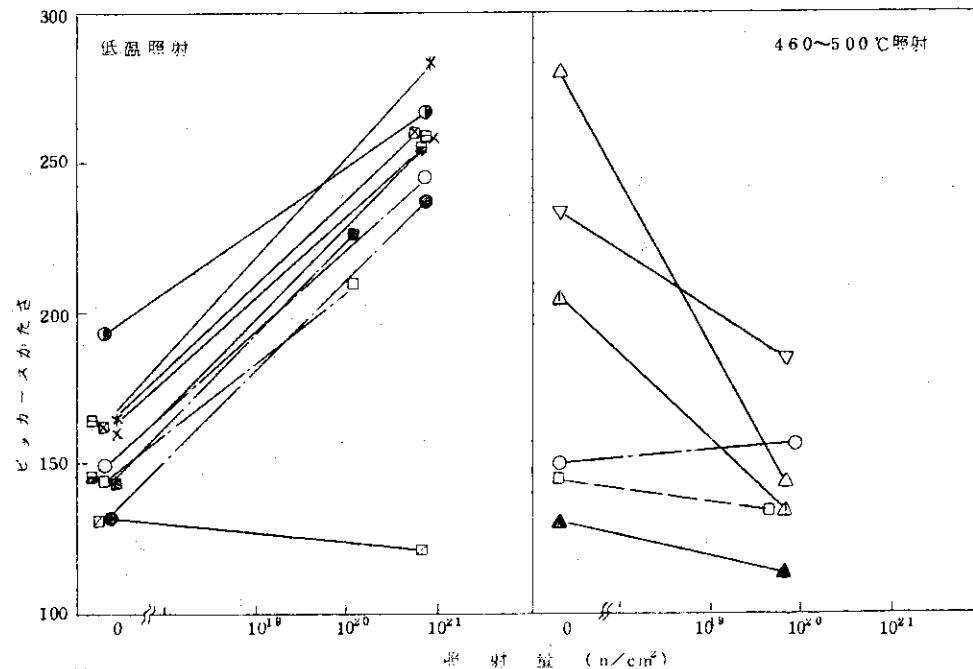
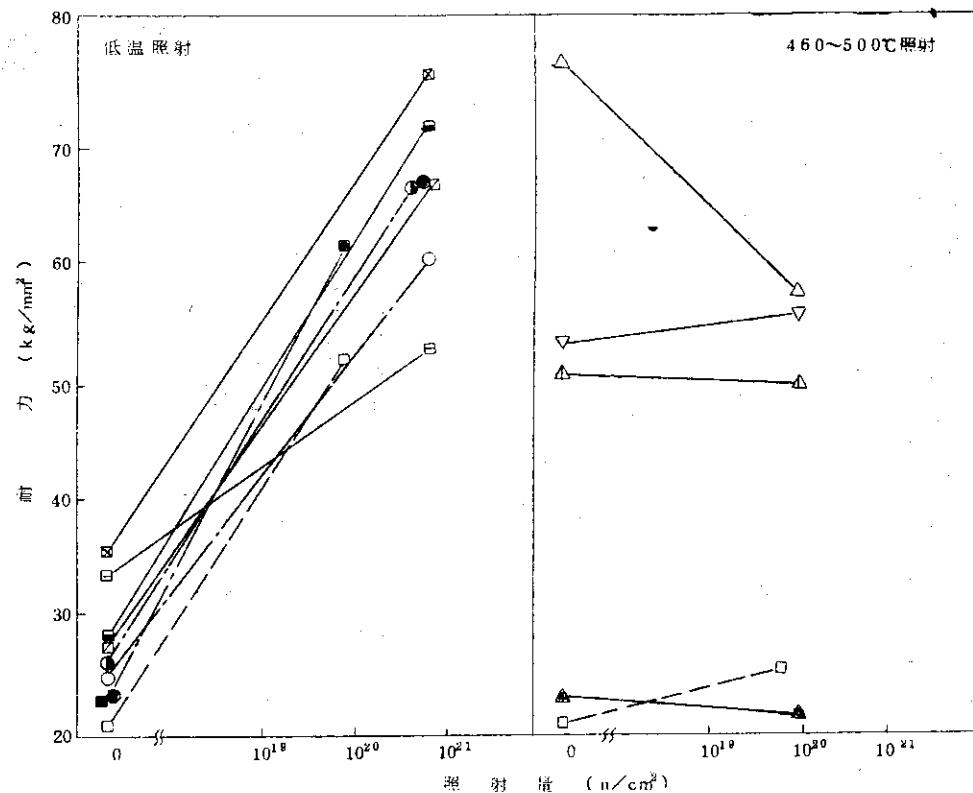


図 2.28 SUS 316 の高温照射→高温引張試験結果 (316-30 t 材と文献値との比較)



□ : 316 - 30 t ■ : 316 - 24 t × : 316 N * : 316 Nb
 ○ : 304 - 1.4 t 管 ● : 304 - 1.6 t 管 ○ : 347 - W 管 △ : 316 強加工

図 2.29 照射温度の影響 (その1)

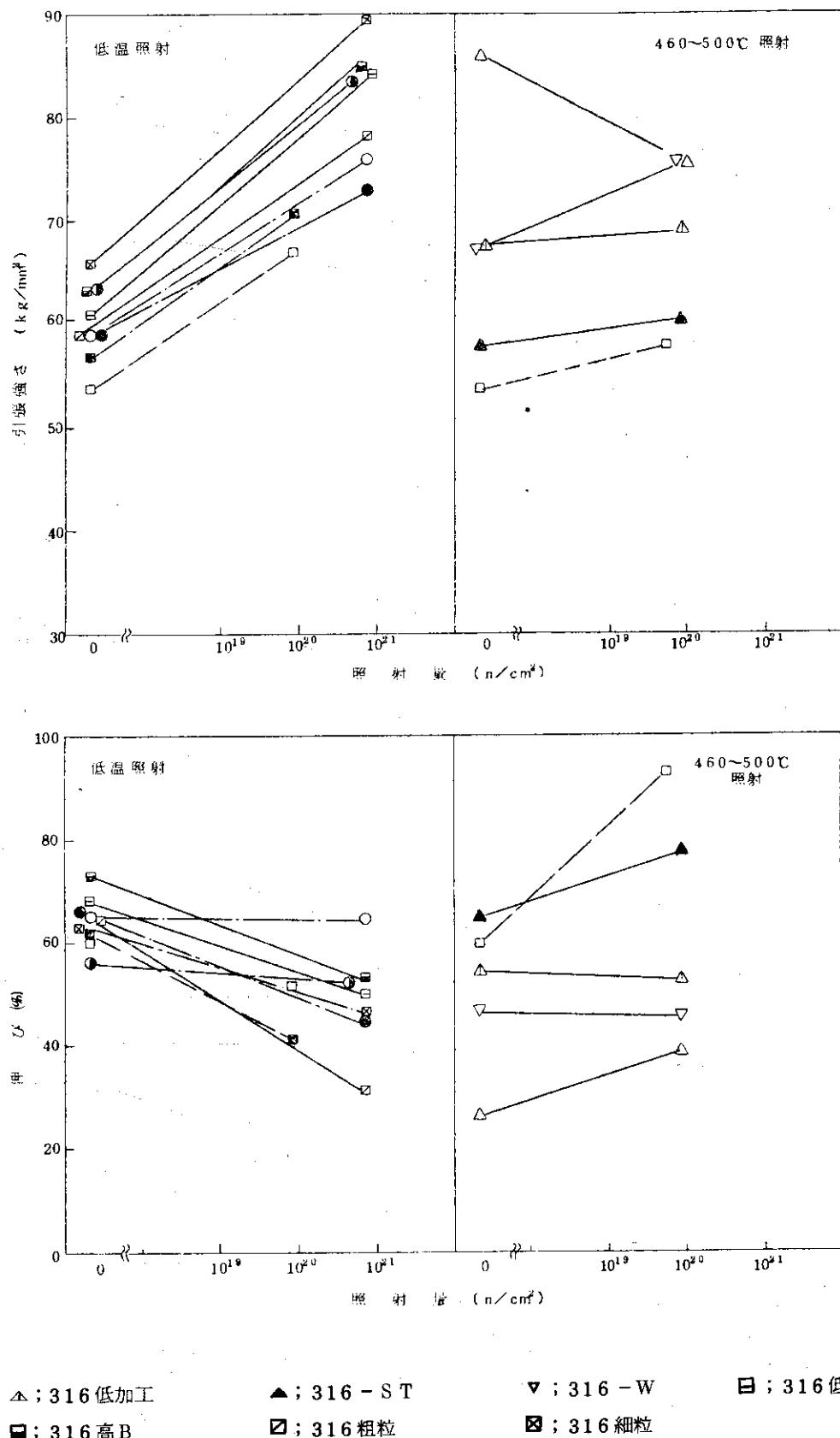


図 2.29 照射温度の影響 (その2)

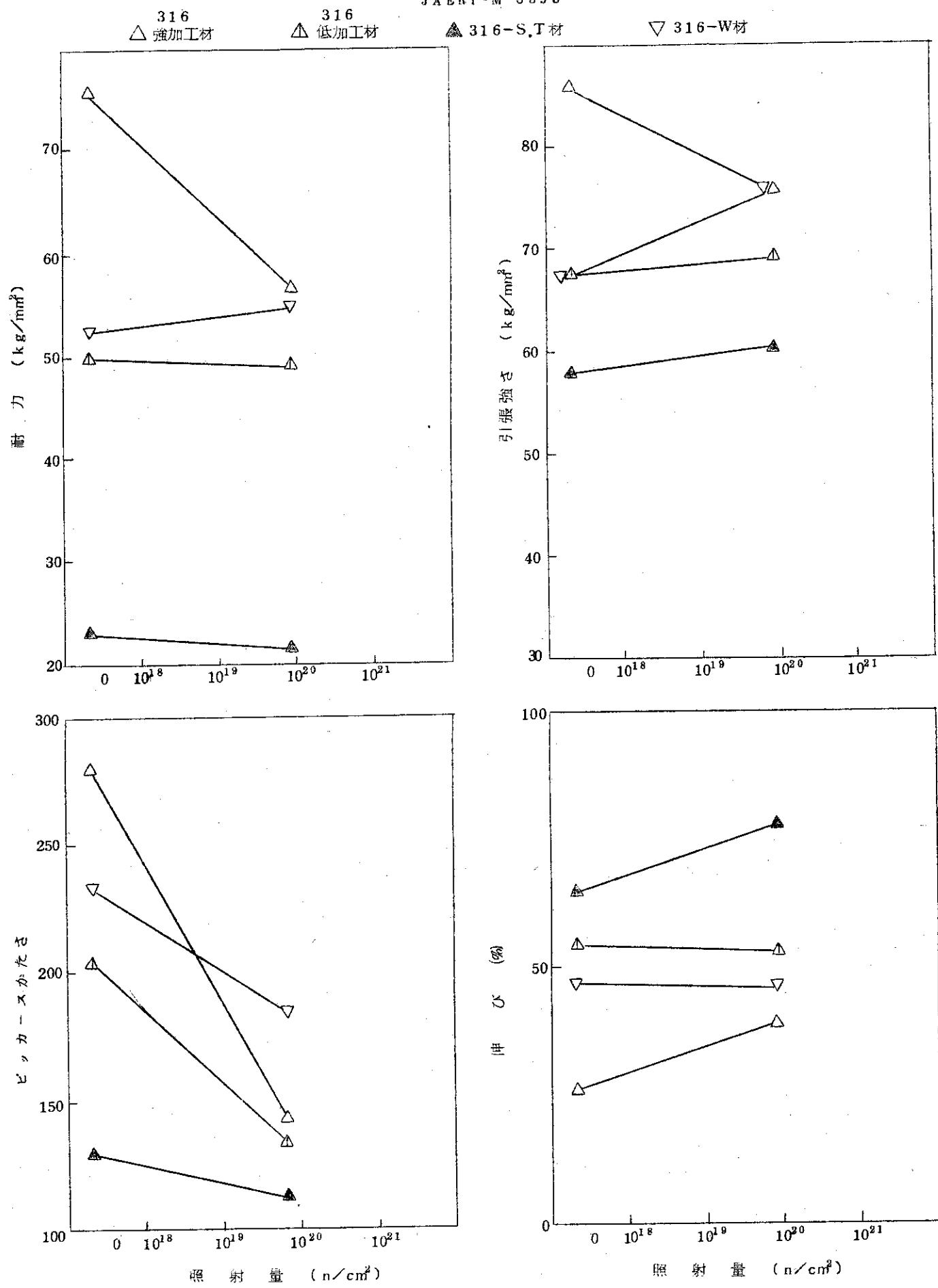


図2.30 SUS 316 薄肉管の引張性質(500℃照射)ならびにかたさ(470℃照射)
におよぼす照射の影響

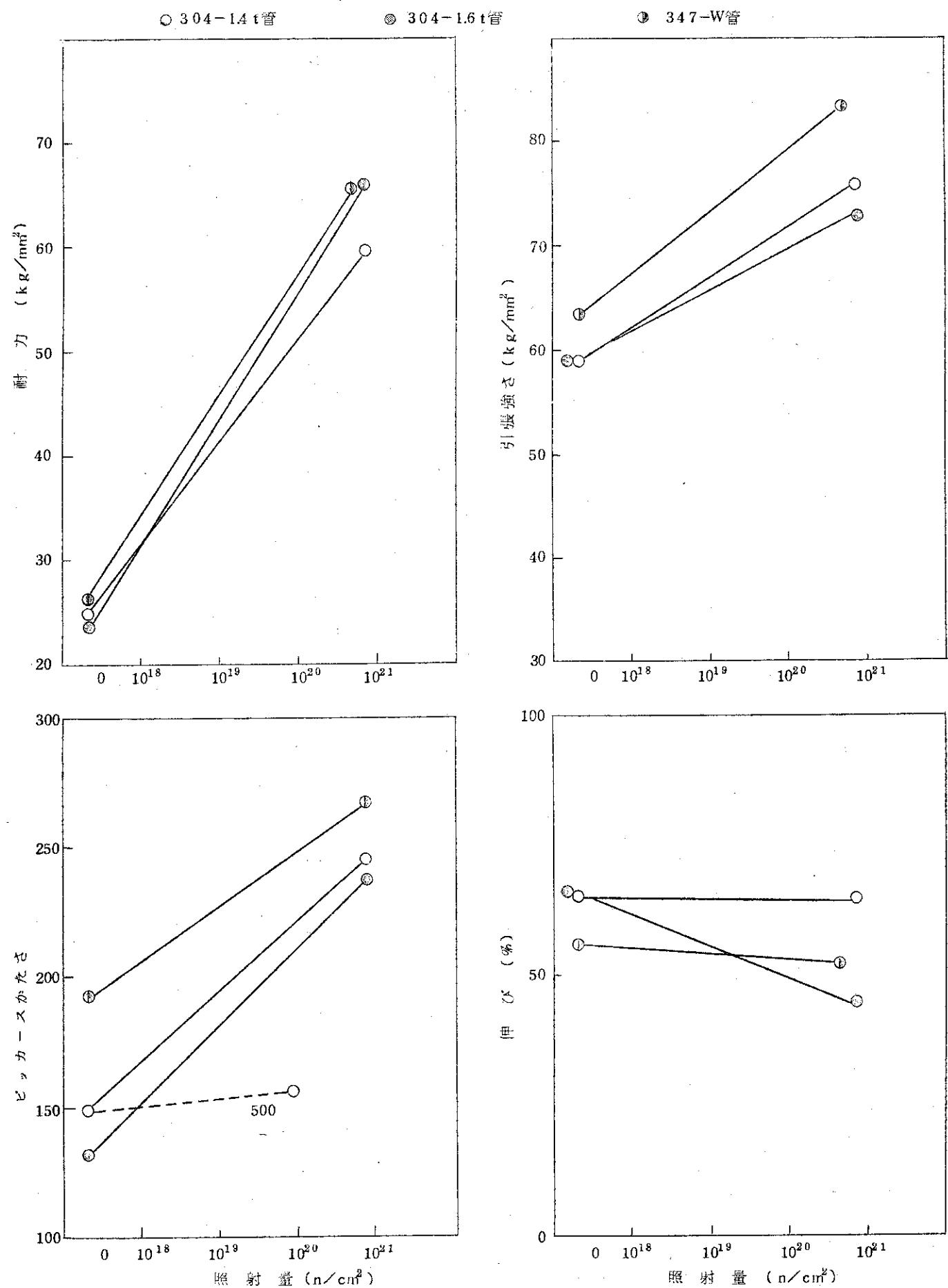


図 2.3.1 SUS 304 および 347 鋼管の引張性質ならびにかたさにおよぼす
照射の影響 (数字添字は照射温度(℃)を示す。添字なきものは低温照射)

○ Control
 ○ N4 63°C. 4~10×10²¹n/cm² 薄射 } 6)

② 非照射
 ③ N540°C, 1.1×10²²n/cm²(>0.1MeV)照射 } 7)
 { 7) ASTM DS5S2 mean value
 (非照射)

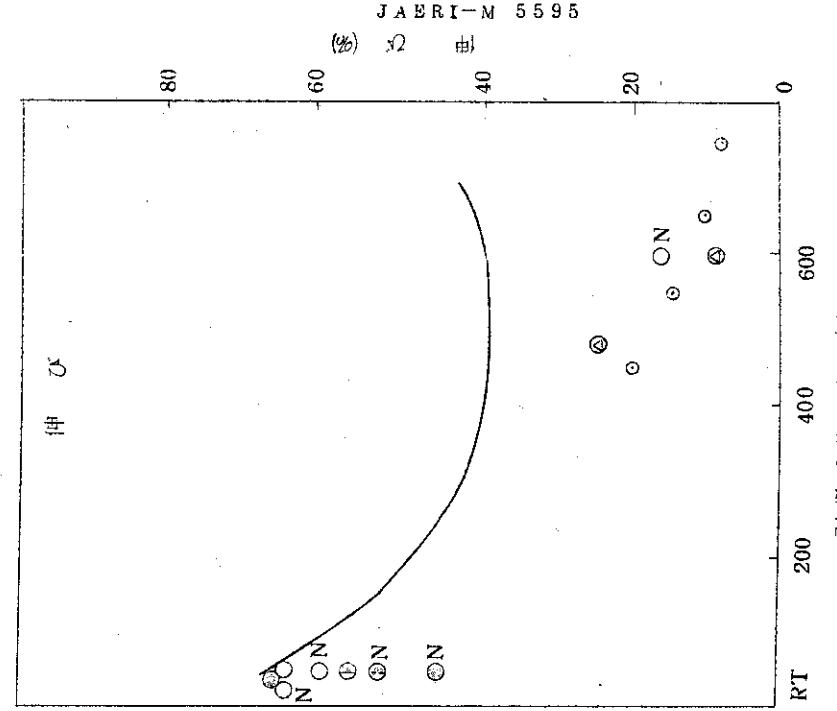
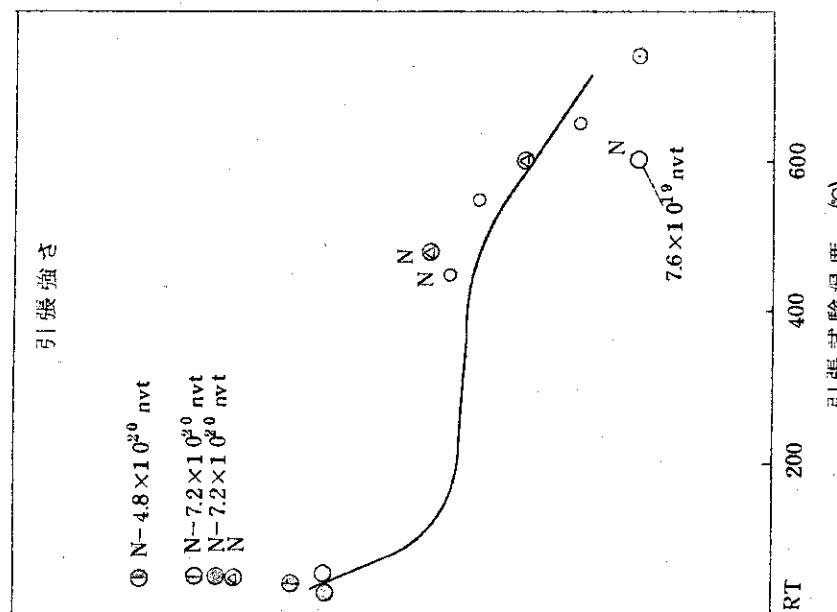
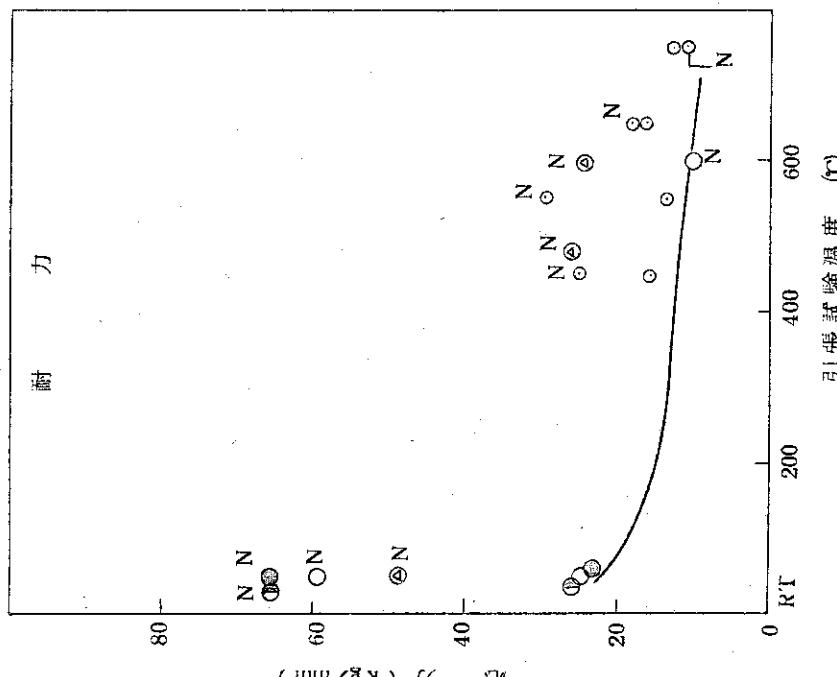


図 2.3.2 SUS304 の高温照射→高温引張試験結果 (304-1.4t 普材と文献値との比較)
 (N字付は照射後データ)

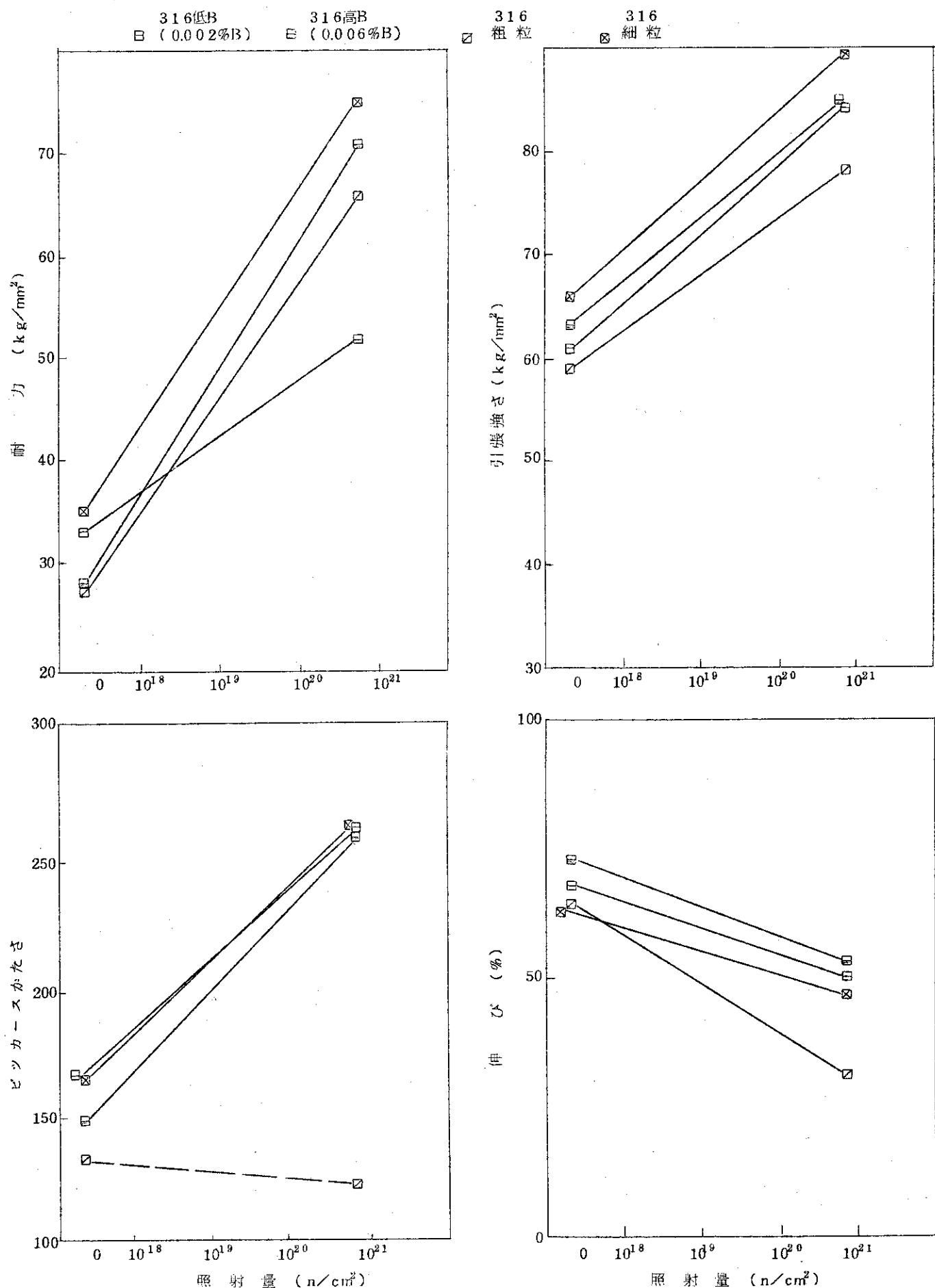


図 2.3.3 SUS316冷間圧延鋼板の引張性質ならびにかたさにおよぼす低温照射の影響

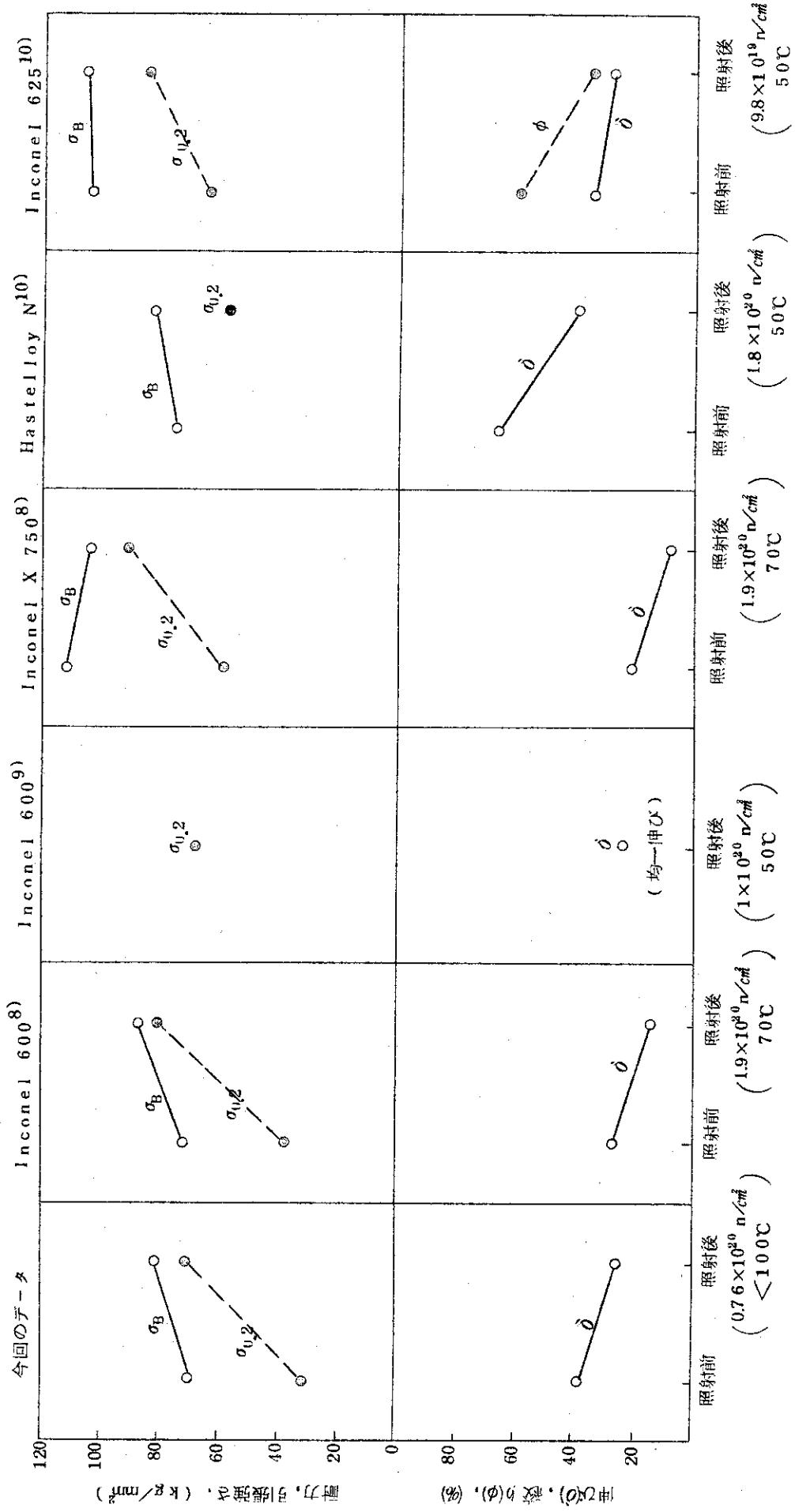


図 2.34 Inconel 600 およびその他の Ni 基合金の照射による引張性質の変化

▽ 347 SS □ 20Cr-40Ni-4(W+Nb) ▲ 17Cr-5Ni-2Mo
 △ 316 SS ◇ 18Cr-22Ni-2V-2Ti ▽ 18Cr-12Ni-2Mo-Ti
 □ 304 SS □ 302B SS × 14Cr-14Ni-3Mo-Nb
 ○ AM-350 SS T 305 SS + 20Cr-14Ni-2S
 ◉ 18Cr-9Ni-Ti ◆ 18Cr-9Ni ⊕ 302 SS
 ■ 301 SS

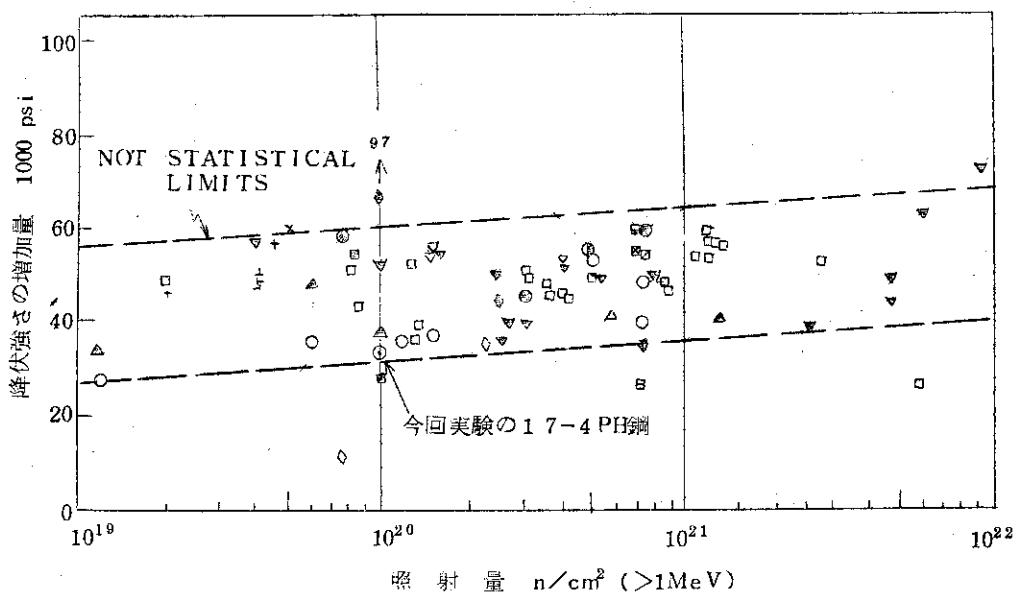


図2.3.5 200°C以下で照射されたオーステナイト系ステンレス鋼の室温での降伏強さに対する照射量の影響

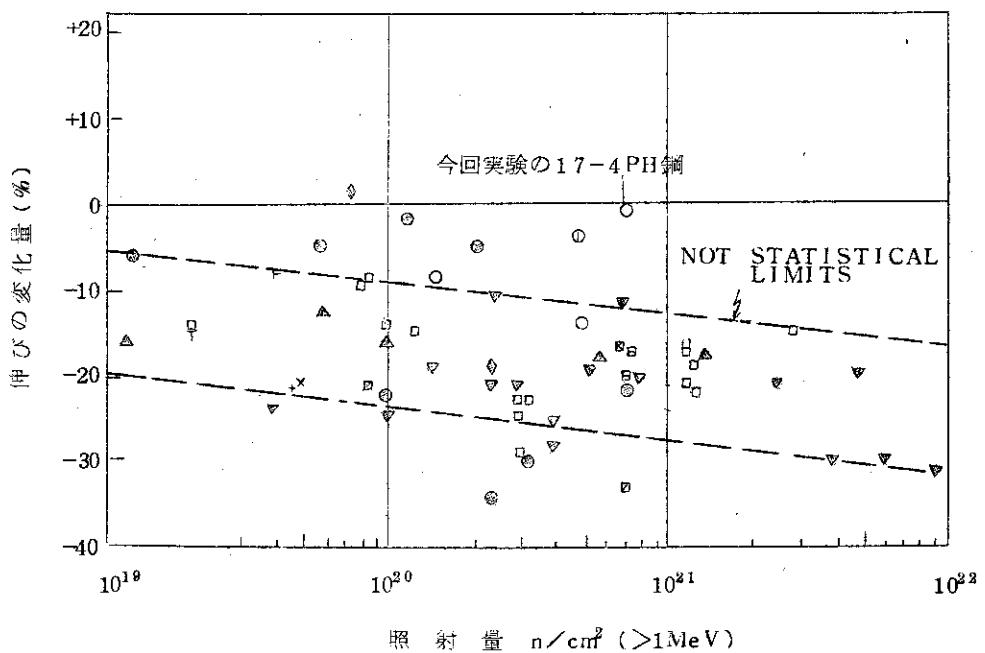
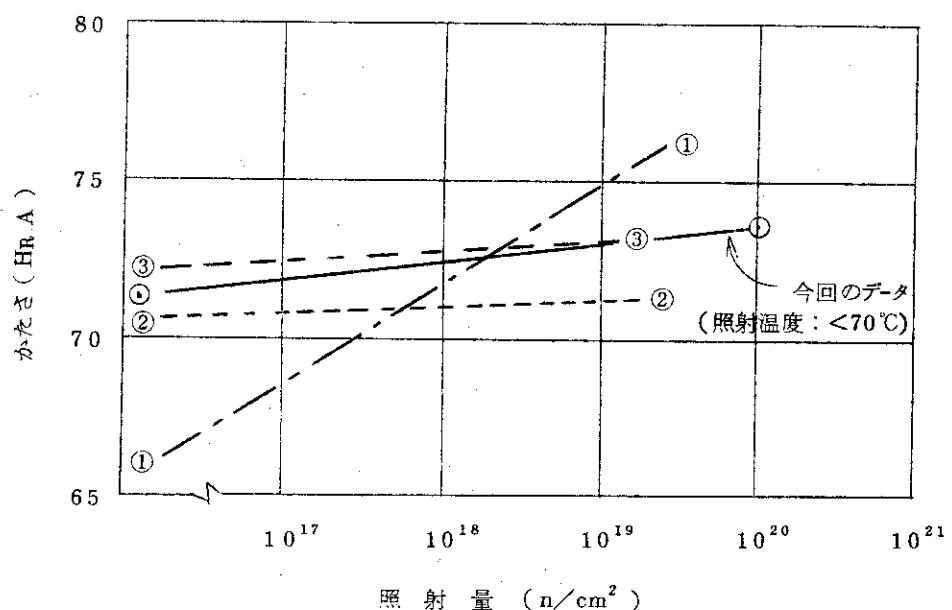


図2.3.6 200°C以下で照射されたオーステナイト系ステンレス鋼の室温での伸びに対する照射量の影響



データ点	出典	試料条件	照射温度
①	R. E. Schreiber (11)	annealed	280°C
②	"	hardened	"
③	"	"	"

図 2.37 17-4 PH ステンレス鋼の照射によるかたさの変化

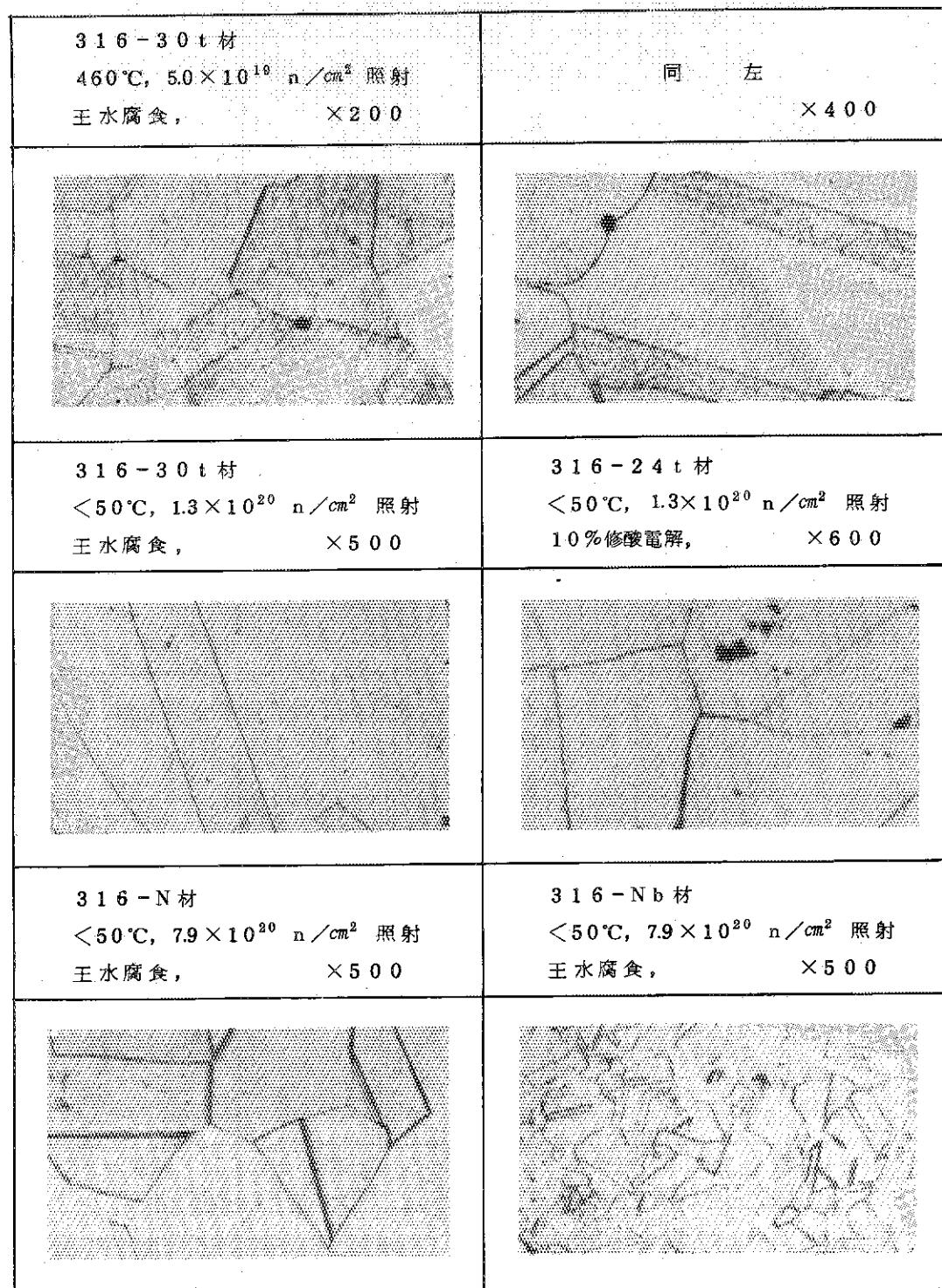


写真2.3 SUS316および類似鋼種熱間圧延鋼板の照射後光学組織

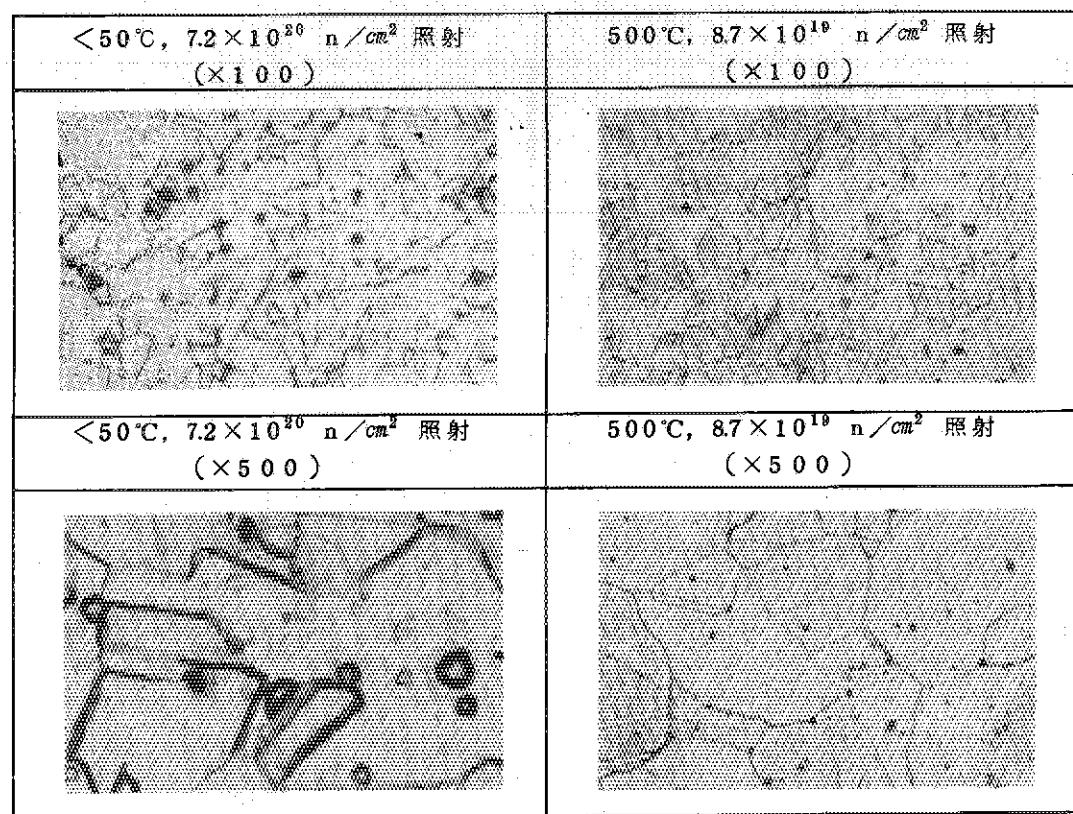


写真 2.4 SUS 304 冷間仕上継目無管の照射後光学組織
(クロム酸電解腐食)

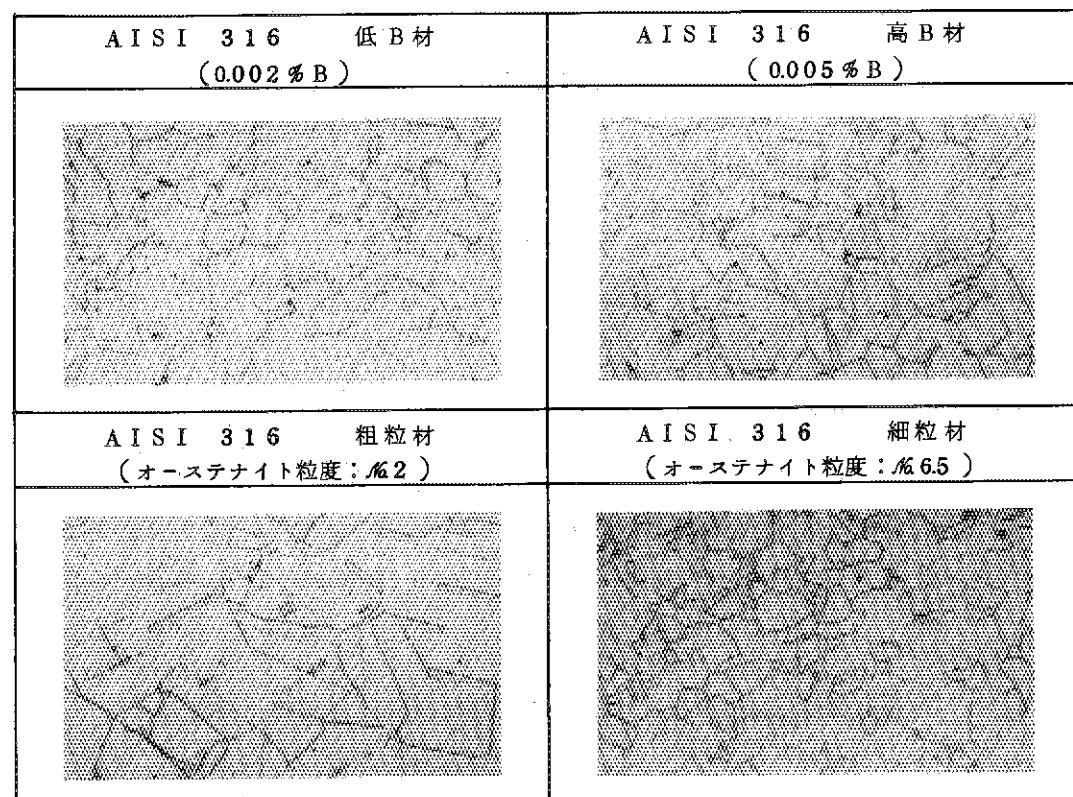


写真 2.5 SUS 316 冷間圧延鋼板の照射後光学組織
($<50^{\circ}\text{C}, 6.0 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ 照射,
硝酸2:水1電解腐食, $\times 100$)

2.4 その他

2.4.1 PC鋼線⁽³⁰⁾

(1) 目的

PC鋼線は鉄鋼材料における構造用鋼の中でも特殊な使用方法であるため、取扱いを別にしてPC鋼線小委員会を設置し、PC鋼線およびPC鋼材メーカー7社すなわち川崎製鉄、神戸製鉄、新日鐵（発足当時は富士製鉄および八幡製鉄）、神鋼鋼線、住友電工、鈴木金属、東京製鉄が参加し、PC鋼線の中性子照射による特性試験、とくにレラクセーションに対する照射効果を試験することを目的とした。これは原子力発電の大型化あるいは多目的高温ガス炉の建設に、安全性、施工技術および価格面など総体的にみて有利な点があるといわれるプレストレストコンクリート構造の採用を考慮した場合に、鋼材として使用されるPC鋼線の中性子照射による特性変化を知つておく必要があるためである。しかしこの分野での研究はその数も少く初期段階にあると思われるので、とくにこの目的のために開発したレラクセーション試験機をホットラボ室で操作するという特殊な試験方法を確立することも目標の一つに加えた。

(2) レラクセーション試験機の開発当初振動法あるいは圧電素子を利用して照射中にレラクセーションを測定することを検討したが、レラクセーションに対する温度の影響がシビヤーであり温度と照射による影響の判別が困難であるためこれを放棄して照射後に測定することとし、ホットラボ室内でマニュブレーターにより容易に操作出来るロードセルタイプのレラクセーション試験機を開発した。試験機の装置全体および試片取付部を写真2.6、2.7に、概略寸法を図2.38に示す。試片の温度を一定に保つため試片取付部全体に恒温槽を設置し、循環水冷およびヒーターにより常時20±2°C以内に温度制御を行った。荷重検出用ロードセルは容量5トンで精度は±0.5%のものを使用した。本試験機によるレラクセーション試験の1例を図2.39に示すが十分に使用できることがわかつた。

(3) 試験材料

中性子照射用試験片は線径5.0mmの鋼線を両端冷間ヘッディングした後ニッケル+クロムメッキを施したもので供試材の化学成分を表2.26に示す。試験片の有効長さは250mm、ヘッディング首下部のRを0.2mm目標に加工した。試験片の伸線加工度および歪取焼鈍条件（一部焼入焼戻し条件）を表2.27に示す。ニッケル+クロムメッキ後ベーリング処理したレラクセーション測定用試片について引張り試験を行った結果を表2.28に示す。

(4) キャプセル

キャプセルはリーキー型を採用した。その断面図を図2.40、装荷図を図2.41に示す。またブラックスマニターワイヤーはNi-Co-Al合金、Feを使用した。

(5) 照射条件

JMTR M-1, 2に挿入された試験片は509時間の照射を受けたが照射量測定値は図2.42に示す通りである。

(6) 照射後試験結果

レラクセーション試験はメッキ後試片により照射前後について各25hr測定を行った。初荷重は破断荷重の70%または降伏荷重の80%を目標にしたが、各鋼種について個々の値を採用した関係上一定比率とはなっていない。図2.43に照射前後の試片について破断荷重と初期荷重

の比率および 25 hr 後のレラクセーション測定値を示し、図 2.4.4 に測定カーブの 1 例を示した。図 2.4.3 にみられるように試片記号 G を除いて照射後のレラクセーションロス値は照射前に比して低下していることが傾向として認められるが定量的な把握はこの試料数では困難である。G は他の試片とは異った結果を得たが、これが成分系の影響か他の因子によるものか、あるいは測定誤差なのかはこの段階では判然とはしない。しかし改良点を残しているとはいえるこの試験方法を用いて中性子照射のレラクセーションにおよぼす影響を調査することが可能であるとの確信を得た。

また試片記号 A および B について引張試験を行った。照射前後試片のうち照射後試片はレラクセーション測定後のものを使用したことにより多少問題はあるが表 2.2.9 のように中性子照射による脆化がみられる。

この試験は J M T R の試用期間にくり入れられた膨大な試験のごく一部を構成するものであり、いろいろの事情で僅かに 8 本の試験片が照射されたにすぎない。したがって多くの試験結果をのぞむことは出来ないが P C 鋼線のレラクセーションに対する中性子照射の影響を調査する 1 つの手段を確立したこと、および中性子照射がレラクセーションに影響を与えることが明らかになったが、その定量的な把握、成分系の影響、製造条件の影響などについてはこの試験方法を活用した今後の研究にまたねばならない。

2.4.2 3.5% Ni 鋼、9% Ni 鋼、18% Ni マルエージング鋼

(1) 試験の目的

低温用鋼、高韌性鋼の照射試験を目的としている。

目標の照射条件は照射量 $2 \sim 4 \times 10^{19} n/cm^2$ ($> 1 MeV$)、照射温度は 100°C 以下である。照射後の測定により $1.5 \sim 2.5 \times 10^{19} n/cm^2$ ($> 1 MeV$) の照射量および 70°C 以下の照射温度の結果が得られた。この結果照射条件に関しては照射温度は目標値を満足しているが、照射量は目標の下限又はそれ以下であった。

(2) 試験結果と検討

本試験に供試した 3 種の鋼材についての分析値を表 2.3.0 に示した。

シャルビ試験結果について表 2.3.1 に示す。 $3\frac{1}{2}$ Ni 鋼については Tr 3.0 および Tr S の増加量は各々 18.4°C、17.5°C となっている。この値は同種鋼材の従来のものと比較して大きい値となっている。9 Ni や 18 Ni マルエージング鋼は、この種の脆化基準が -19.6°C 以下あるいは 100°C 以上となっているため評価することはできない。なお $3\frac{1}{2}$ 鋼および 9 Ni 鋼は、遷移温度の上昇あるいは上部だなエネルギーの低下など脆化現象が認められるが、18 Ni マルエージング鋼については上部だなエネルギーの上昇という結果が得られているが、データ自体が著しくバラついているので明らかな効果は認めがたい。

引張試験結果についての結果を表 2.3.2 に示した。また図 2.4.5 に $3\frac{1}{2}$ Ni 鋼、9 Ni 鋼についての L.P. Trudeau の結果とともに示した。18 Ni マルエージング鋼については照射により 0.2 耐力、引張強さの低下および伸びの増加が認められた。

以上の結果より、特に記することはマルエージング鋼の結果であるが、L.E. Steele らのマルエージング鋼 (12 Ni - 5 Co) などの結果では、やはり遷移温度、耐力および引張強さの上昇、伸びの低下が認められていることから、本実験での結果は問題を残す。 $3\frac{1}{2}$ Ni 鋼、

9 Ni 鋼についてはほぼ Trudeau の結果と同様と思われる。

2.4.3 ポルト鋼、超高張力鋼など

(1) 試験の目的

高速炉 blast shield 用鋼材のエネルギー吸収能を知ることを目的とし、実験炉設計、解析のバックデータとなるものである。

目標の照射条件は 1×10^{19} および $1 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2 (>1 \text{ MeV})$ の照射量、 100°C 以下の照射量を目標値としていた。照射後の測定によると、 $3.1 \sim 5.0 \times 10^{19}$ および $0.9 \sim 1.3 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2 (>1 \text{ MeV})$ の照射量であり、照射温度は 10°C 台が 100°C 以下、 10^{20} 台が 250°C 以下となり、 10^{19} 台の照射量が約 3～5 倍となっている。

(2) 試験結果と検討

3 鋼種についてのシャルビ衝撃試験結果は照射前、後ともに室温で行なっているため遷移温度の上昇などの比較はできない。

各供試材の分析値を表 2.3.3 に示した。

引張試験の結果を図 2.4.6 に示した。

表 2.2.6 化 学 成 分

試片 記号	鋼種	化 学 成 分 (%)						
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr
A	SWRS-72B	0.73	0.21	0.67	0.011	0.007	0.01	—
B	SWRS-75B	0.75	0.26	0.75	0.011	0.011	0.104	0.146
C	SWRS-77B	0.77	0.21	0.83	0.014	0.015	0.04	—
D	SWRS-80A	0.80	0.24	0.50	0.009	0.013	0.07	—
E	SWRS-80A	0.81	0.20	0.50	0.008	0.012	0.01	0.01
F	SWRS-80B	0.80	0.26	0.84	0.012	0.028	0.06	—
G	SAE 9254	0.53	1.45	0.71	0.016	0.010	0.06	0.65
H	SUP-9	0.50	0.26	0.78	0.015	0.011	0.013	0.79

表 2.2.7 試験材料の概要履歴

試片 記号	原線径 mm	最終径 mm	加工度 %	歪取り焼鈍条件 °C × sec
A	9.5	5.0	72.3	370×10
B	9.0	5.0	69.2	350×6(船)
C	9.5	5.0	72.3	380×100(熱風)
D	8.3	5.0	63.8	350×16(ソルト)
E	9.5	5.0	72.3	370×30
F	9.5	5.0	72.3	360×20
G	11.0	5.0	79.3	420×240(熱風)
H*	5.5	5.0	17.2	900×240-620×210

* 焼入、焼戻し処理

表 2.2.8 機械的性質

試片 記号	線径 mm	引張強さ kg/mm ² (kg)	0.2%耐力 kg/mm ²	伸び % <i>l</i> =100 mm	絞り %
A	5.00	174.0 (3 420)	153.5	6.5	48.5
B	5.01	172.7 (3 405)	158.1	6.3	38.3
C	5.00	179.0 (3 513)	160.0	6.0	—
D	5.02	174.5 (3 450)	157.0	5.3	44.7
E	5.00	178.0 (3 497)	156.1	7.3	45.6
F	4.98	183.6 (3 575)	161.7	7.3	37.5
G	5.01	177.2 (3 491)	174.2	4.5	—
H	5.02	122.5 (2 423)	110.9	8.4	48.5

2.2.9 引張試験結果

試片 記号	引張強さ kg/mm ²	0.2%耐力 kg/mm ²	破断強さ kg/mm ²	伸び %	標点距離 mm
照射前	A	210.5	168.4	155.6	5.7
	B	197.8	168.4	163.3	4.2
照射後	A	215.3	178.6	158.2	4.3
	B	214.3	176.0	183.7	3.7

表 2.3.0 チューブ分析結果 (wt %)

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mn	Ni	Co	A ℓ	N	Ti	Zr	B
(1) 3 1/2 Ni 鋼*	0.07	0.20	0.50	0.010	0.008	—	—	—	3.46	—	—	—	—	—	—
(2) 9 Ni 鋼	0.06	0.23	0.41	0.007	0.006	0.06	0.11	0.06	8.92	—	(sol) 0.024 (total) 0.0095	—	—	—	—
(3) 18 Ni マルエーシング鋼	0.02	0.07	0.05	0.003	0.003	—	—	4.56	18.42	9.36	0.08	—	0.45	0.005	0.003

* ルードル分析値

表 2.3.1 シャルビ試験結果

	TrE ₁ (°C)	TrE ₂ (°C)	TrE ₃₀ (°C)	Tr35 (°C)	TrS (°C)	E _{max} (Kg-m)	照射条件
(1) 3 1/2 Ni 鋼	照射前	—	—	—	—	—	—
	照射後	—	—	9.6	—	9.5	—
	△	—	—	18.4	—	17.5	—
(2) 9 Ni 鋼	照射前	<-19.6	<-19.6	<-19.6	<-19.6	2.4.6	<70 °C
	照射後	<-10.0	<-10.0	<-10.0	<-10.0	14.7	2.4 × 10 ¹⁹ n/cm ² (>1MeV)
	△	—	—	—	—	-9.9	—
(3) 18 Ni マルエーシング鋼	照射前		>100	>100	>100	—	<70 °C
	照射後						2.0 × 10 ¹⁹ n/cm ² (>1MeV)
	△						—

表 2.3.2 引張試験及び硬さ試験結果

引張試験	降伏強さ (Kg/mm ²)		引張強さ (Kg/mm ²)		伸び (%)		照射条件 n/cm ² (>1MeV)			
	照射前	照射後	△	照射前	照射後	△				
(1) 31/2Ni 鋼	43.0	75.0	32.0	52.8	75.0	22.2	45.2	16.4	-2.8.8	<70°C 1.7 × 10 ¹⁹
(2) 9 Ni 鋼	67.1	103.1	36.0	74.4	103.1	28.7	33.6	17.6	-21.0	<70°C 1.6 × 10 ¹⁹
(3) 18Ni マルエーリング鋼	190.1	163.3	-27.3	194.1	182.1	-12.0	12.5	15.5	3.1	<70°C 1.6 × 10 ¹⁹

硬さ試験	照射前 HV(10)	照射後 HV(30)	△	照射条件	
				照射前 HV(10)	照射後 HV(30)
(1) 31/2Ni 鋼	152	243	91	<70°C	
(2) 9 Ni 鋼	241	289	48	1.5 × 10 ¹⁹ n/cm ² (>1MeV)	
(3) 18Ni マルエーリング鋼	54.9	52.3	-2.6		

表 2.3.3 チェコク分析値 (wt%)

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo	Al		N (total)	V
									(sol)	(insol)		
(1) デルト鋼	0.310	0.163	0.54	0.004	0.005		1.22	0.54	0.024	0.008	0.0023	0.001
(2) HST	0.390	0.199	0.59	0.002	0.006		5.00	2.10	0.025	0.008	0.0049	0.480
(3) SS41	0.206	0.074	0.82	0.012	0.017		0.025	0.025	0.025	0.007	0.0045	tr

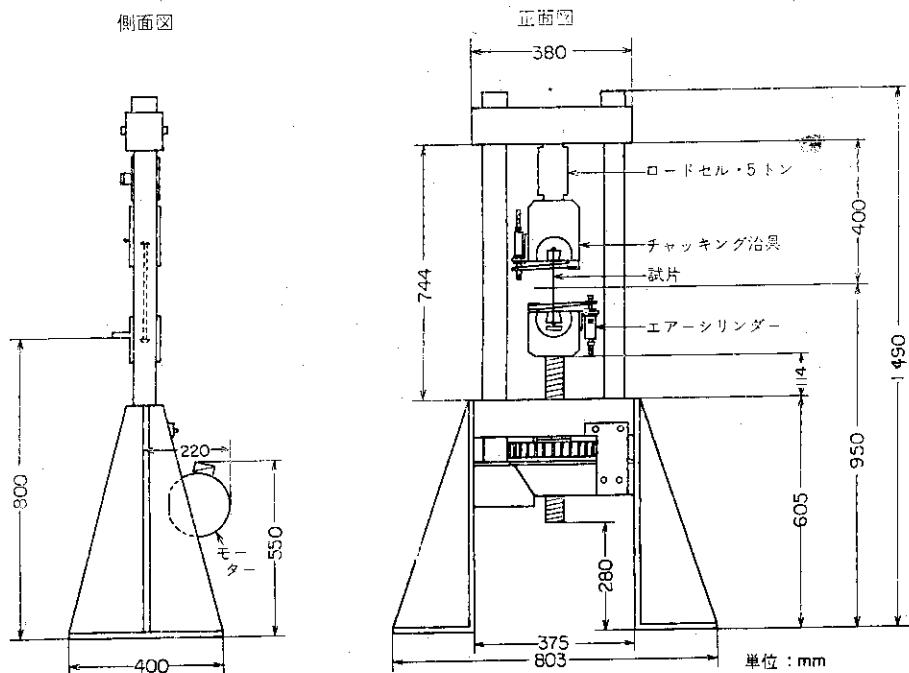


図 2.38 概略寸法図

線径 5.0 mm
初期荷重 $6 \times 0.7 = 2640 \text{ kg}$
保持時間ナシ
送り速度 : 25mm/hr (記録紙)

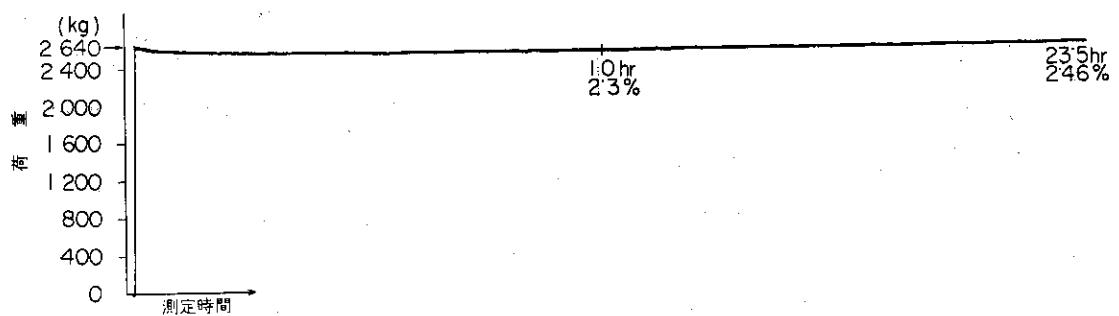


図 2.39 レラクセーション測定例

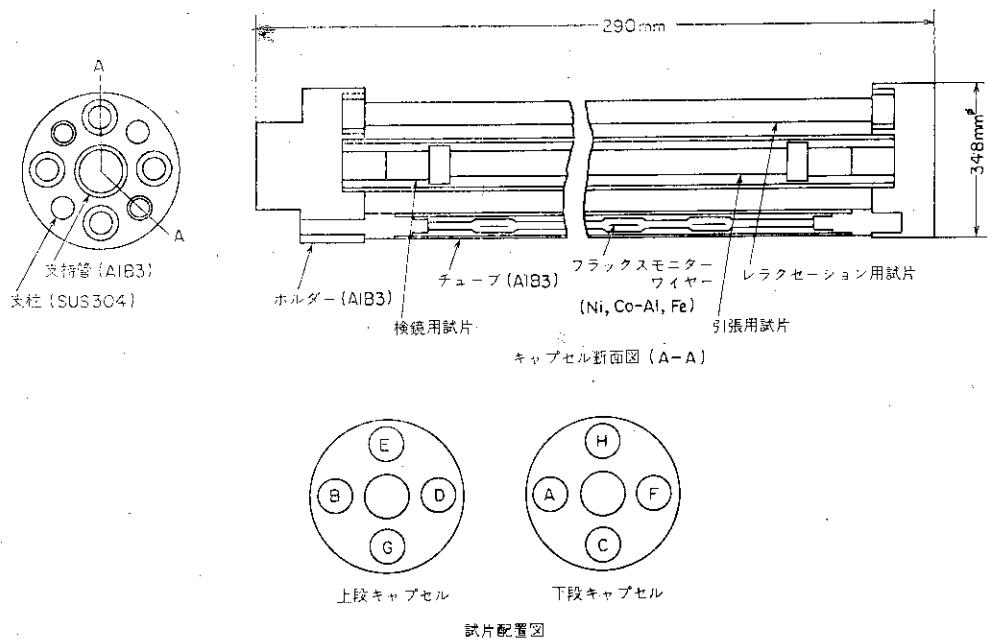


図 2.40 キャップセル断面図

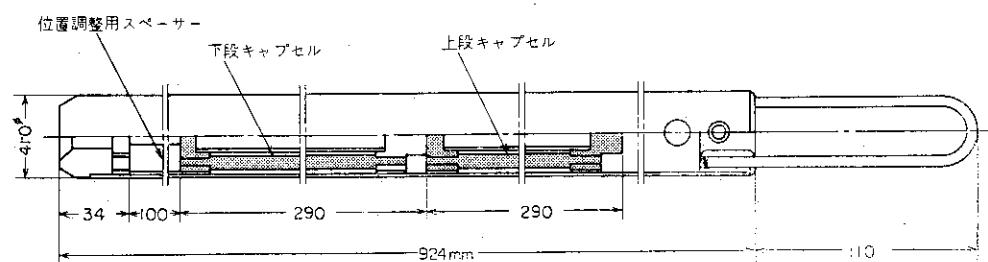


図 2.41 キャップセル装荷図

Flux Monitor 炉内縫方向位置

キャブセル名	67M-34G
照 射 孔	M-12
照射サイクル	6
モ ニ タ	F e ワイア
照 射 温 度	38°C

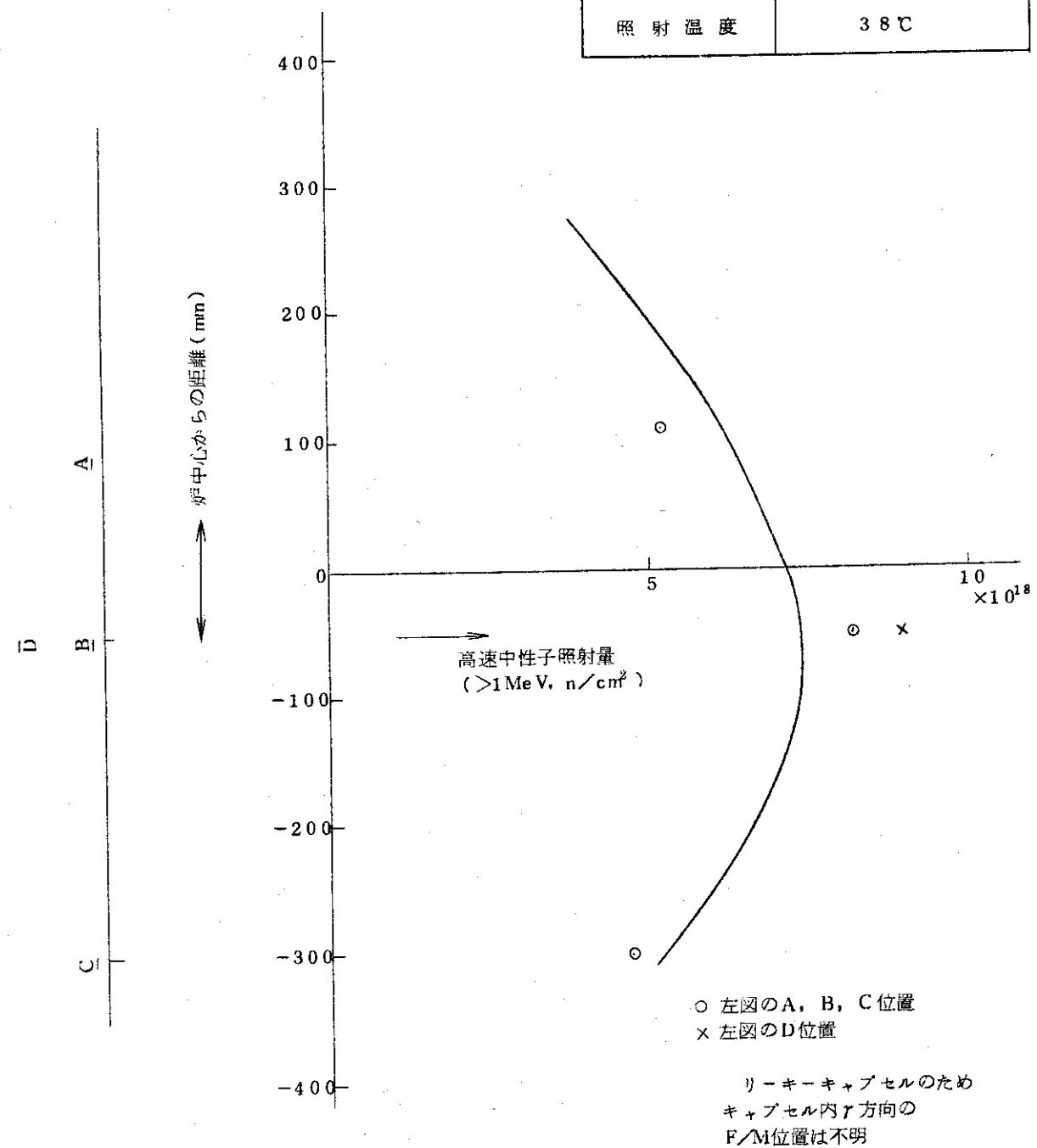


図 2.4.2 照射量分布

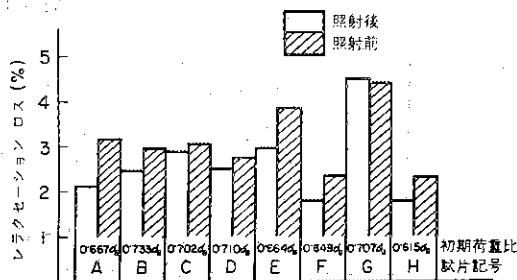


図 2.43 レラクセーション
測定結果 (25 hr)

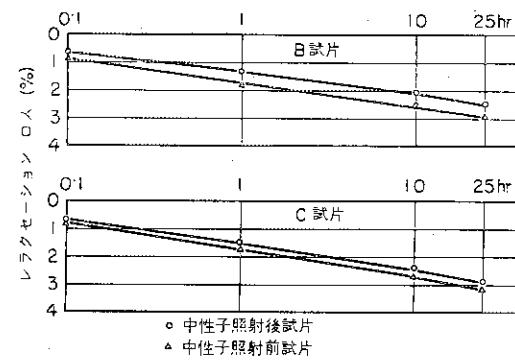


図 2.44 レラクセーションカープ

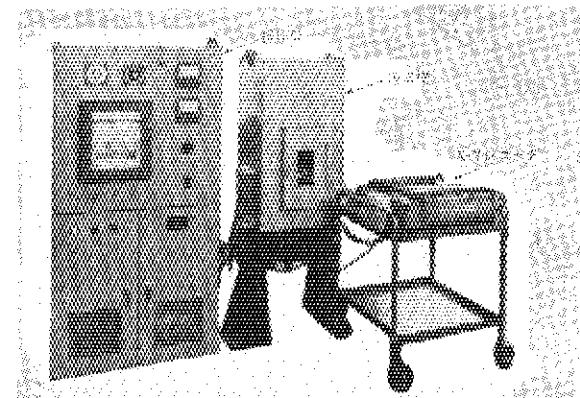


写真 2.6 レラクセーション試験機全体図

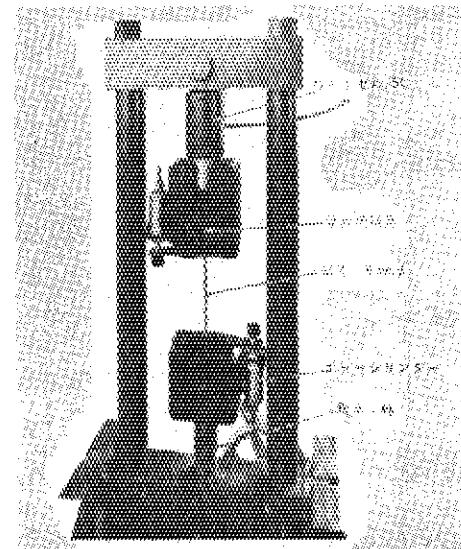


写真 2.7 試片取付部

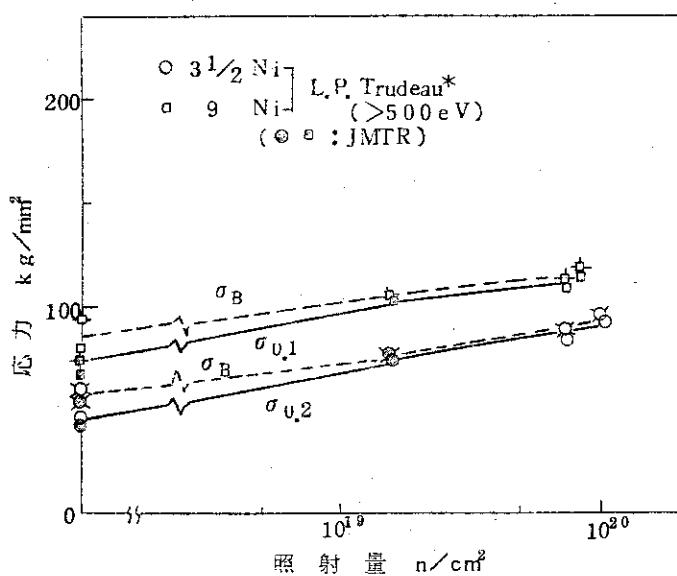


図 2.4.5 3 1/2 Ni, 9 Ni 鋼の引張試験結果
* ASTM STP 276

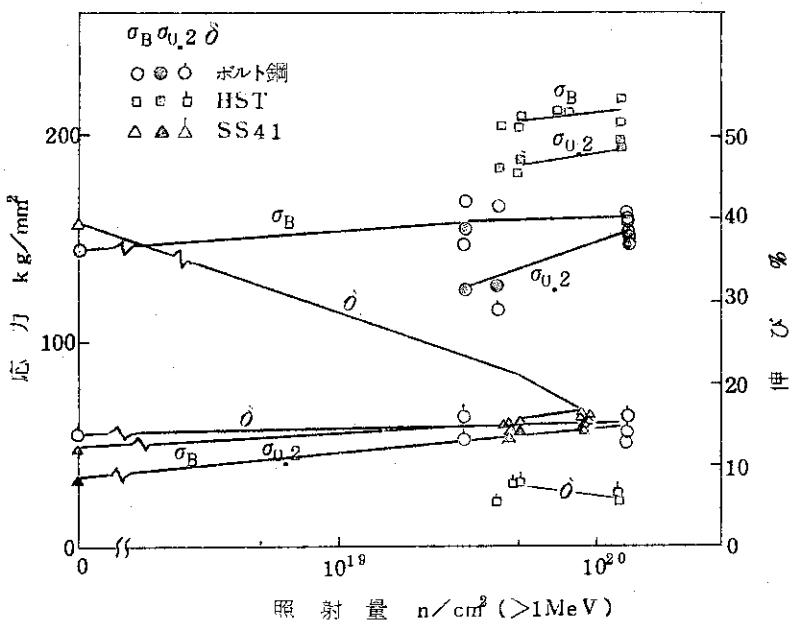


図 2.4.6 ボルト鋼, HST, SS41 の引張試験に及ぼす照射量の影響

3. 照射キャップセルおよび照射データ

3.1 キャップセルおよび試料内訳

表 3.1 にキャップセル別の照射孔、照射サイクル、照射量・照射温度のねらいと実績を示す。

表 3.2 にキャップセル別の試料内訳表を示す。「まとめ」の欄の会社名は本書の執筆分担を示す。

3.2 キャップセル構造、試料配置および温度記録

図 3.1 ~ 3.2 8 にキャップセル別の構造、試料配置および温度記録を示す。表 3.3 はその目次である。

試料配置図がないものはキャップセル構造図の中に試料配置を示してある。温度記録のないものは無計測キャップセルであり、試片温度はキャップセル構造によるが、リーキーキャップセルではほぼ冷却水入口温度(<50°C)、その他でも200°C以下と思われる。

表 3.1 鉄鋼関係試用照射キャップセル一覧表

M6	キャップセルM6	キャップセル型式	照射孔	照射サ イ クル ねらひ	照射量 実績(ピーッ)	照射温 度 常温 めいじゅ	照射温 度 <70°C めいじゅ	H. L. M6	備 考
1	67M-2G	温度計測付反射体型	H-4	2~4(3)	3×10 ¹⁹	3.4×10 ¹⁹	<70°C	5103	A,B,Cは炉心に並行
2	67M-3G	温度計測付反射体型	L-11	5~6(2)	3.1,0.3×10 ²⁰	1,0.8,0.6 ×10 ²⁰	<75°C	5109	A,B,Cは炉心に直角
3	67M-4G	真空温度計測 SPD付回転型	D-9	4~6(3)	3×10 ¹⁹	4.2×10 ¹⁹	260°C	130~ 260°C	5110
4	67M-8G	バスケット, リーキ型	H-9-4	2~5(4)	8×10 ²⁰	7.5×10 ²⁰	常温 <50°C	597	
5	67M-9G	バスケット, リーキ型	H-9-4	6~9(4)	8×10 ²⁰	8.0×10 ²⁰	常温 <50°C	642	
6	67M-11G	バスケット, 密閉型	I-9	3(1)	1×10 ¹⁹	1.7×10 ¹⁹	<100°C	<100°C	PIEなし
7	67M-25G	混合ガス温度制御型	M-7	4~5(2)	1×10 ²⁰	0.9×10 ²⁰	500°C	460~ 500°C	5102
8	67M-26G	バスケット, リーキ, 密閉型	M-7	2~3(2)	1×10 ²⁰	1.3×10 ²⁰	<100°C	<50°C	595
9	67M-29G	無計測反射体型	H-4	5~7(3)	3×10 ¹⁹	4.32, 2.5 ×10 ¹⁹	常温 <70°C	<70°C	A,B,Cは炉心に直角
10	67M-30G	無計測反射体型	H-4	8~11(4)	3×10 ¹⁹	4.1×10 ¹⁹	常温 <70°C	<70°C	607
11	67M-32G	温度計測型	D-9	7~9(3)	1.5×10 ¹⁹	5.0×10 ¹⁹	<100°C	<100°C	645
12	67M-34G	バスケット, リーキ型	M-12	6(1)	4×10 ¹⁸	7.4×10 ¹⁸	<100°C	<50°C	602

表 3.2 鉄鋼関係試用照射キヤセル別試料内訳表

/No.	キヤセル/No.	まとめ	協会/No.	試片提供者	供試材	種類	数量<試片/No. >	備考
1	6 7 M-2 G	M	3(前)	協会	日鋼 A 5 3 3 B	C h T s H M	2 6<2 2~4 7> 4 < 4~7> 4 < 4~7> 4 < 8~11>	
	S 19(前)	富士			A 3 0 2 B	C h	7<3 7 4~3 8 0>	
	W 1(前)	協会		アルミキルド鋼		C h T s H	2 1< 1~2 1> 3 < 1~ 3> 3 < 1~ 3>	63 粉失
	- 18(前)	神鋼 鋼管, 富士	DMS60A, ポンベ鋼, H1-Z			C h T s H	2 1<3 1 7~3 3 7> 3 <1 1 7~1 1 9> 3 <1 0 9~1 1 1>	e項(PIEなし) e項(PIEなし) e項(PIEなし)
2	6 7 M-3 G	S 1 2 C	鋼 管	A 3 0 2 B		C h T s II	7 <2 2 7~2 3 3> 1 <5 0> 1 <4 6>	
	W 28-2	原研(八幡)	ボルト鋼, HST140, SS41			C h	9<3 6 5~3 7 3>	
	- 8B	協会(富士)	A 5 4 2			大型曲げ	9< 29~ 37>	PIE中止
	- 29	協会	純銅			ラバ のまま	3<2 8 5~2 8 7>	東北大震反則
S 1 2 B	鋼 管	A 3 0 2 B			C h	7<2 3 4~2 4 0>		
					T s	1 <5 1>		

M	キヤブセルM	まどめ	協会M	試片提供者	供試材	種類	数量<試片/M>	備考
	W	16	協会(製鋼)	SMS00-SUS28		H	1 <4.7>	
						C _h	6<311~316>	
						T _s	2 <6.1~ 6.2>	
						H	2 <5.8~ 5.9>	
						M	2 <6.0~ 6.1>	M60, 61 粉失
						曲げ	2 <6.3~6.4>	
						ハクリ	4 <6.2~6.5>	
M	26-1		冶金	インコネル600		T _s	2<11.1~11.2>	
						H	2<10.3~10.4>	M10.3粉失
-	27		協会	純鉄、合金		クラック のまま	1 <ケース>	東北大IC返却
S	12A		钢管	A302B		C _h	7<24.1~24.7>	
						T _s	1 <5.2>	
						H	1 <4.8>	
-	24		協会(各社)	アルミニカルド鋼, A533他		クラック のまま	3 <6.5~6.7>	阪大IC返却
M	26-2		住電	17-4 PH		T _s	2<11.3~11.4>	
						H	2<10.5~10.6>	
W	28-1		原研(八幡)	ボルト鋼 HST140, SS41		C _h	9<3.56~3.64>	
3	67M-4G	S	5B	HYアループ	A543	C _h	6<1.82~1.87>	
						T _s	1 <1.6>	
						H	1 <3.0>	

/6	キャラセル/6	まとめ	湯会/6	試片提供者	供試材	種類	数量<試片/6>	備考
4	67M-8G	K	17A(前)	住金、鋼管	A533B	Ch H Ts	40<142~181> 3<27~29> 2<98~99>	
		K	17B ₁ (前)	住金、鋼管、日金工	SUS27, SUS43	H M T _s 1 HT _s 3	1 <92> 1 <93> 1 <100> 4<104~107> 2 <96~97> 1 <98> 2<108~109>	e頂(PIE左L)
5	67M-9G	K	9AB	協会	AISI316	HTs H M	8 <90~97> 2 <88~89> 2 <90~91>	
6	67M-11G	-	8A(前)	協会	A542	板Ts H M+HeO 容量分析	4<131~134> 4<119~122> 4<123~126> 2<127~128>	一様曲げ PIE中止
7	67M-25G	K	9A(前)	協会	AISI 316	T _s 1 HT _s 1 H	12<17~28> 2<38~39> 1 <31>	PIE中止

M&	キヤブセルM&	まとめ	試片提供者	供試材	種類	数量<試片M&>	備考
	K	17A ₂ (前)	住金, 鋼管, 日金工	SUS27, SUS43	M (EM) Ts 1 HTs 1 H	1 <32> 2 <101~102> 1 <94> 1 <95>	レブリカは中止
-	17B ₂ (前)	住金, 鋼管, 日金工	SUS27, SUS43		M 扁 平	1 <103>	
K	20(後)	神鋼, 住金, 三菱原	AISI 316	H	2 <99~100>	e項(PIEなし)	
				M 扁 平	2 <101~102> 1 <110>	e項(PIEなし)	
				H	4 <115~118>	e項(PIEなし)	
K	9B(前)	協会	AISI 316	Ts H M (EM)	4 <123~126> 4 <127~130>		
W	28-2	原研	ボルト鋼, HST140, SS41	Ts	4 <40~43>		
				H	2 <33~34>		
				M (EM)	2 <35~36>		
W	28-2	原研	ボルト鋼, HST140, SS41	Ts	9 <144~152>	M&1 4 7粉失	
9	67M-29G	S 5A HYクリーブ	A543-Cℓ 1	Ch Ts H M (EM)	21 <94~114> 3 <10~12> 3 <14~16> 3 <17~19>		
	S 6	三菱原子力	USA製 A543	Ch	6 <115~120>		

M6	キヤブセルM6	まとも	協会M6	試片提供者	供 試 材	種 類	数量<試片/M6>	備 考
-	22	神鋼		A533, 溶接	C h T s H	1 18<338~355> 3<120~122> 3<112~114>	<20>	e項(PIEなし) e項(PIEなし) e項(PIEなし)
M	14	協会		A533B, 溶接	C h T s H	30<269~298> 5<56~60> 5<52~56>		
W	7	協会(早大, 原研)		低炭素鋼(バーライトアリ...)	C h T s H M	21<121~141> 3<13~15> 3<21~23> 3<24~26>		
W	13	協会(早大, 原研)		A350, A533, 鋼-シグマ鋼	C h T s H	21<248~268> 3<53~55> 3<49~51>		
10	67M-30G	S	4	I FK グループ	A542 C h T s H (分布)	46<48~93> 2<8~9> 2<12~13>		
	-	30		八幡, 川鉄, 富士	A542 C h H (分布)	45<381~425> 3<129~131>	e項(PIEなし) e項(PIEなし)	

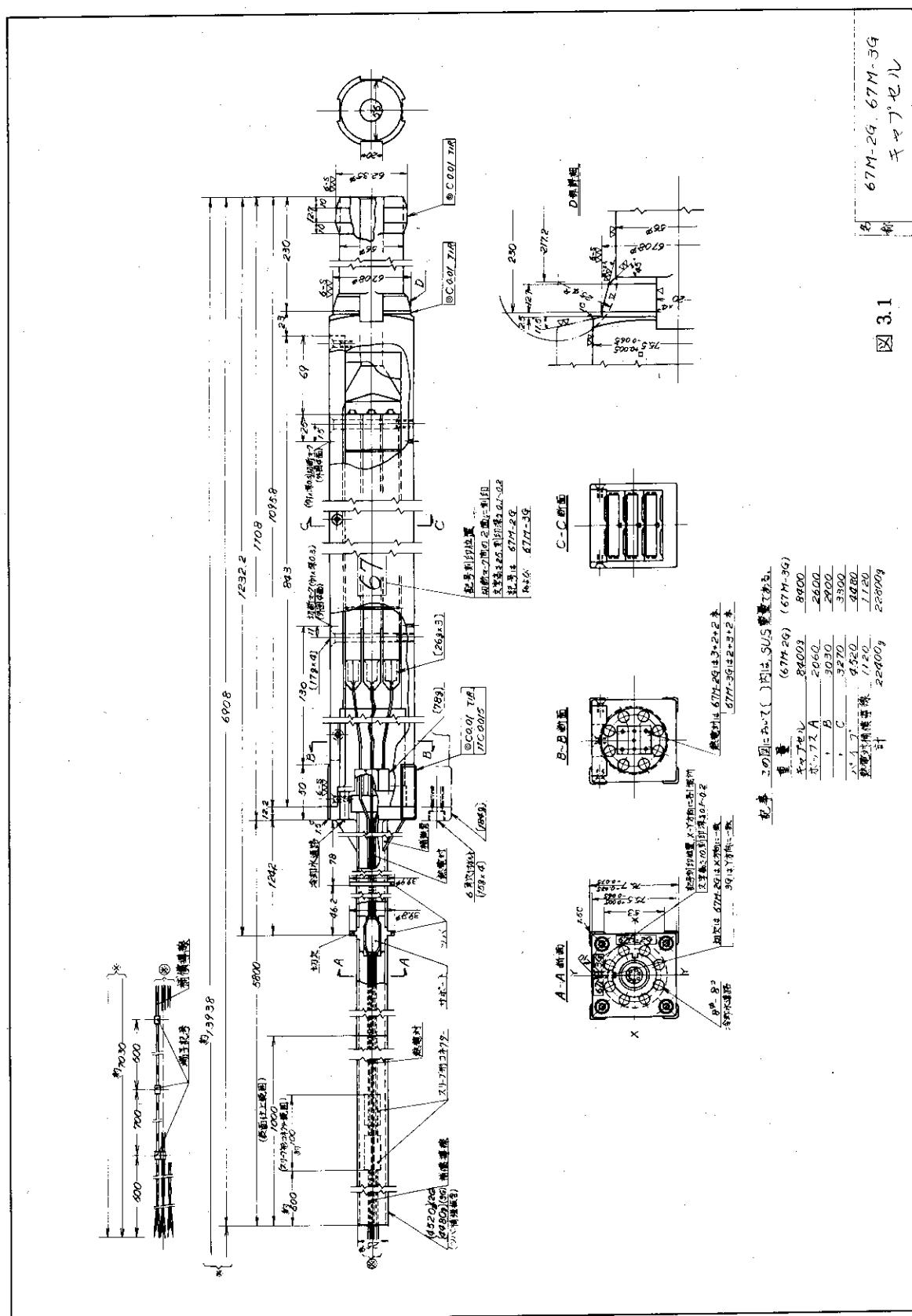
No.	実験番号	実験機関	実験機会	試片提供者	供試材	種類	数量<試片No. >	備考
10	S	10	協会	A 5 4 2	Ch	18<1 88~20 5>		
15	M	15	三菱重工	A 5 3 3 B	Ts	3<4 4~4 6>		
11	W	11	協会	鞍鋼 (SM41B)	H	3<3 7~3 9>		
26-3	K	26-3	住電	SUS27	M	3<4 0~4 2>		
67M-32G	11	67M-32G	W	28-1	原研	Ch (分布)	12<2 99~31 0>	
67M-34G	12	67M-34G	◎	25A	協会(各社)	Ts	1 <5 7>	
	-	-	25B	協会(各社)	PC鋼線	Ts	21<2 06~2 26>	
				PC鋼線	H	3<4 7~4 9>		
					Ts	3<4 3~4 5>		
					H	2<1 15~1 16>		
					Ts	2<1 07~1 08>		
					H	9<1 35~1 43>		
					リラクゼーション	8<7 6~8 3>		
					Ts	4<3 98~4 01>	e項(PIEなし)	
					H	8<2 88~2 95>	e項(PIEなし)	

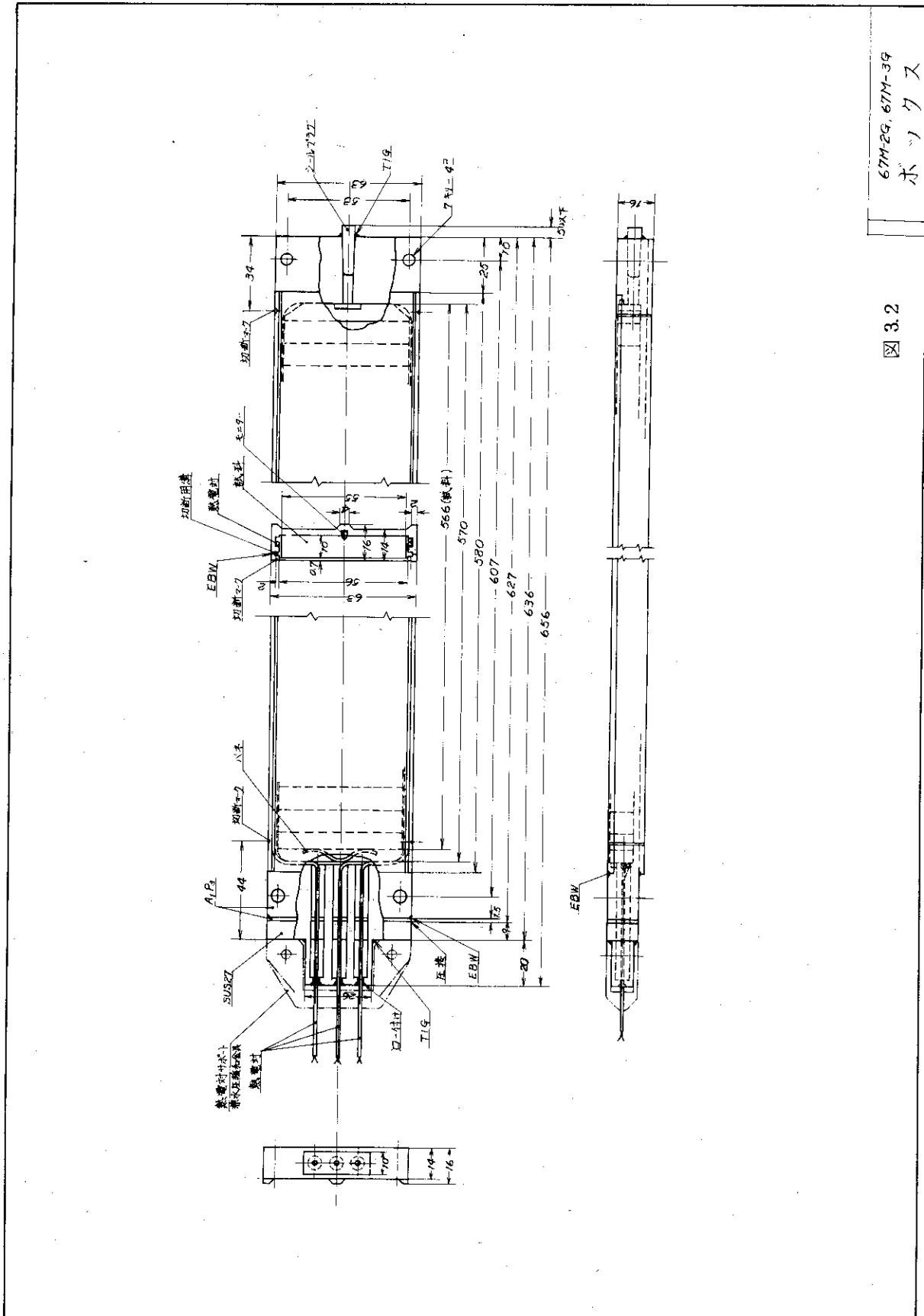
◎ : PC鋼線小委員会
 W : 早大
 S : 新日鐵
 M : 三菱重工
 K : 伸戸製鋼

Ch : 衝撃試験片
 Ts : 引張試験片 (H は高温)
 H : 硬度試験片
 M : 金相試験片 (含電通試験片)

表 3.3 図 3.1 ~ 3.28 の目次

図 番	標 領
図 3.1	67M-2G, 67M-3G キャブセル構造図
図 3.2	67M-2G, 67M-3G 部品(ボックス)図
図 3.3	67M-2G 試片配置図
図 3.4	67M-2G 温度記録図(第3サイクル)
図 3.5	" " (第4サイクル)
図 3.6	67M-3G 試片配置図
図 3.7	67M-3G 温度記録図(第5サイクル)
図 3.8	" " (第6サイクル)
図 3.9	67M-4G キャブセル構造図
図 3.10	67M-4G 温度記録図(第4サイクル)
図 3.11	" " (第5サイクル)
図 3.12	" " (第6サイクル)
図 3.13	67M-8G キャブセル構造図
図 3.14	67M-9G キャブセル構造図
図 3.15	67M-11G キャブセル構造図
図 3.16	67M-25G キャブセル構造図
図 3.17	67M-25G 温度記録図(第4サイクル)
図 3.18	" " (第5サイクル)
図 3.19	67M-26G キャブセル構造図
図 3.20	67M-29G キャブセル構造図
図 3.21	67M-29G 試片配置図
図 3.22	67M-30G キャブセル構造図
図 3.23	67M-30G 試片配置図
図 3.24	67M-32G キャブセル構造図
図 3.25	67M-32G 温度記録図(第7サイクル)
図 3.26	" " (第8サイクル)
図 3.27	" " (第9サイクル)
図 3.28	67M-34G キャブセル構造図





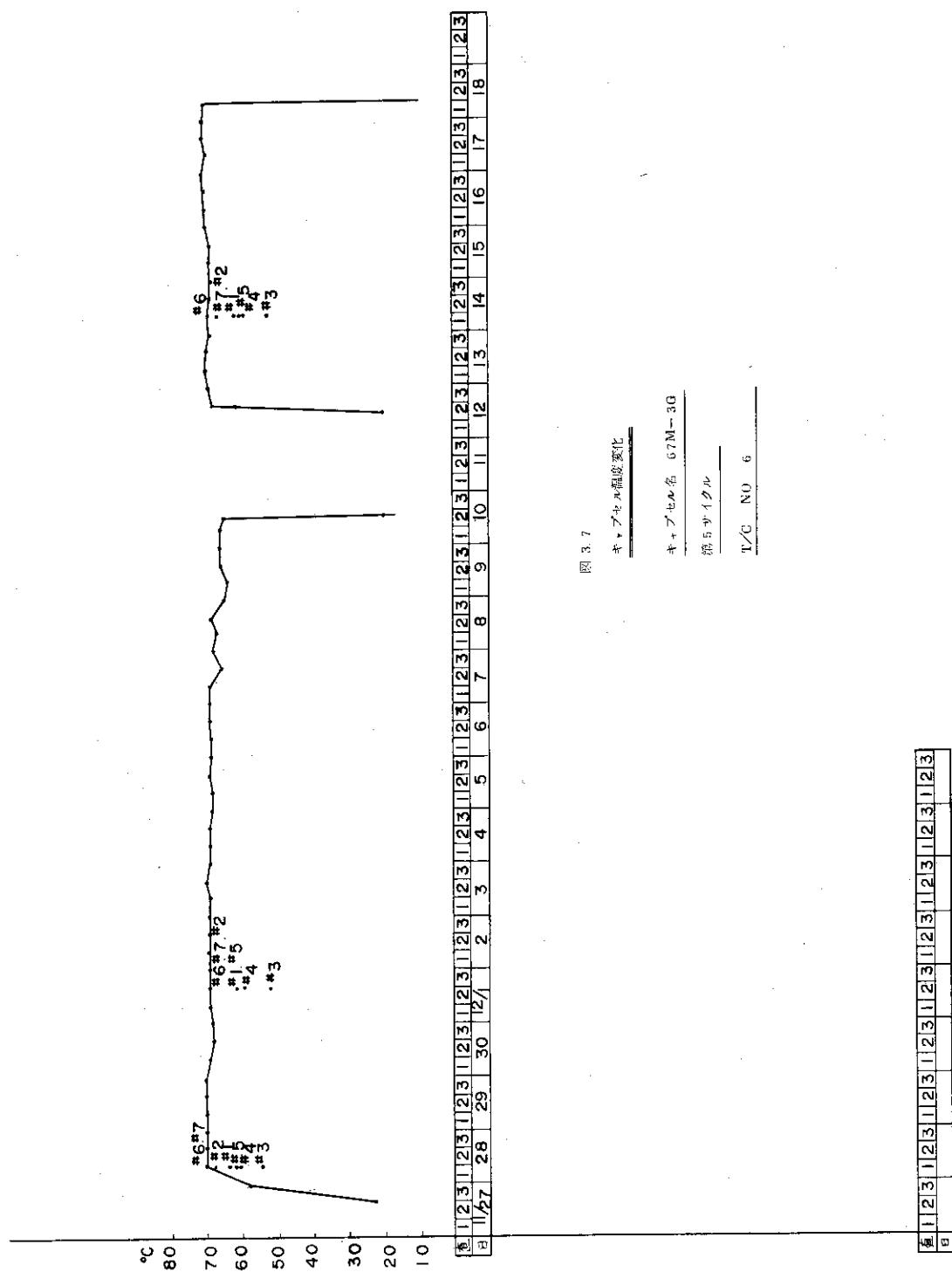
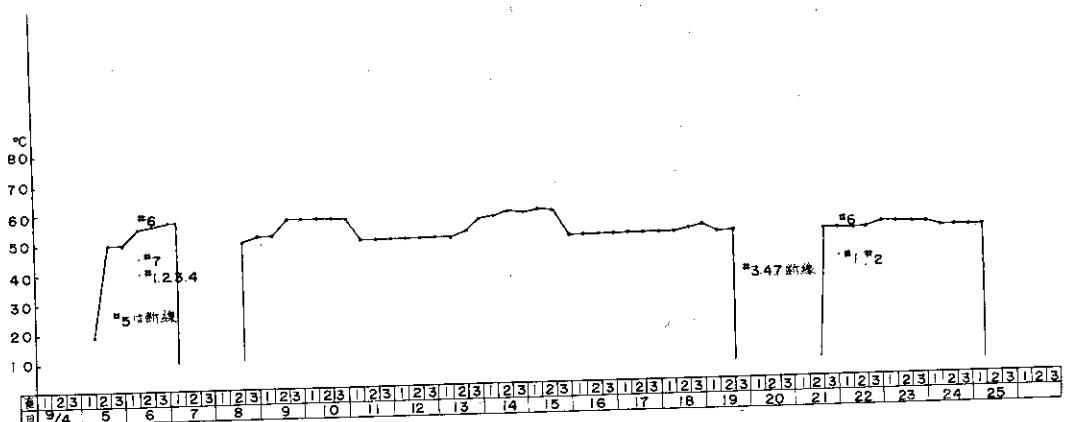


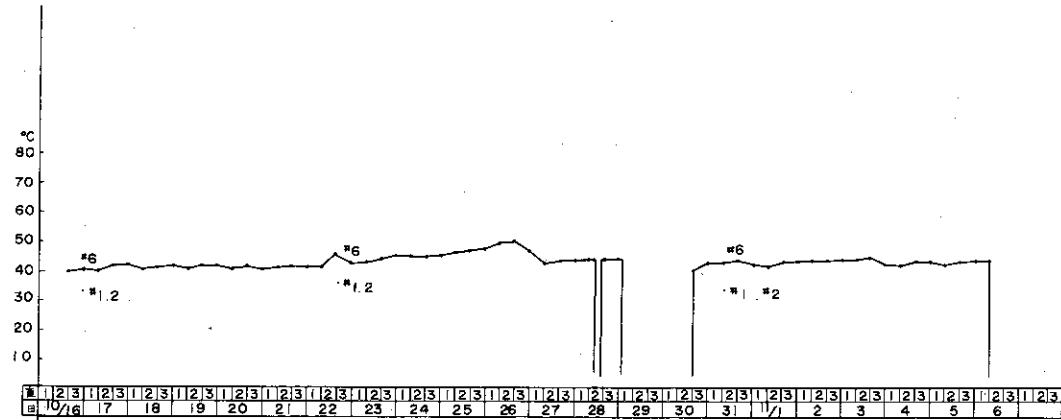
図 3.7

* プセス履歴変化
+ プセル名 67M-3G
#5 34イクル
T/C NO 6

1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	



1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
6																										



1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
6																										

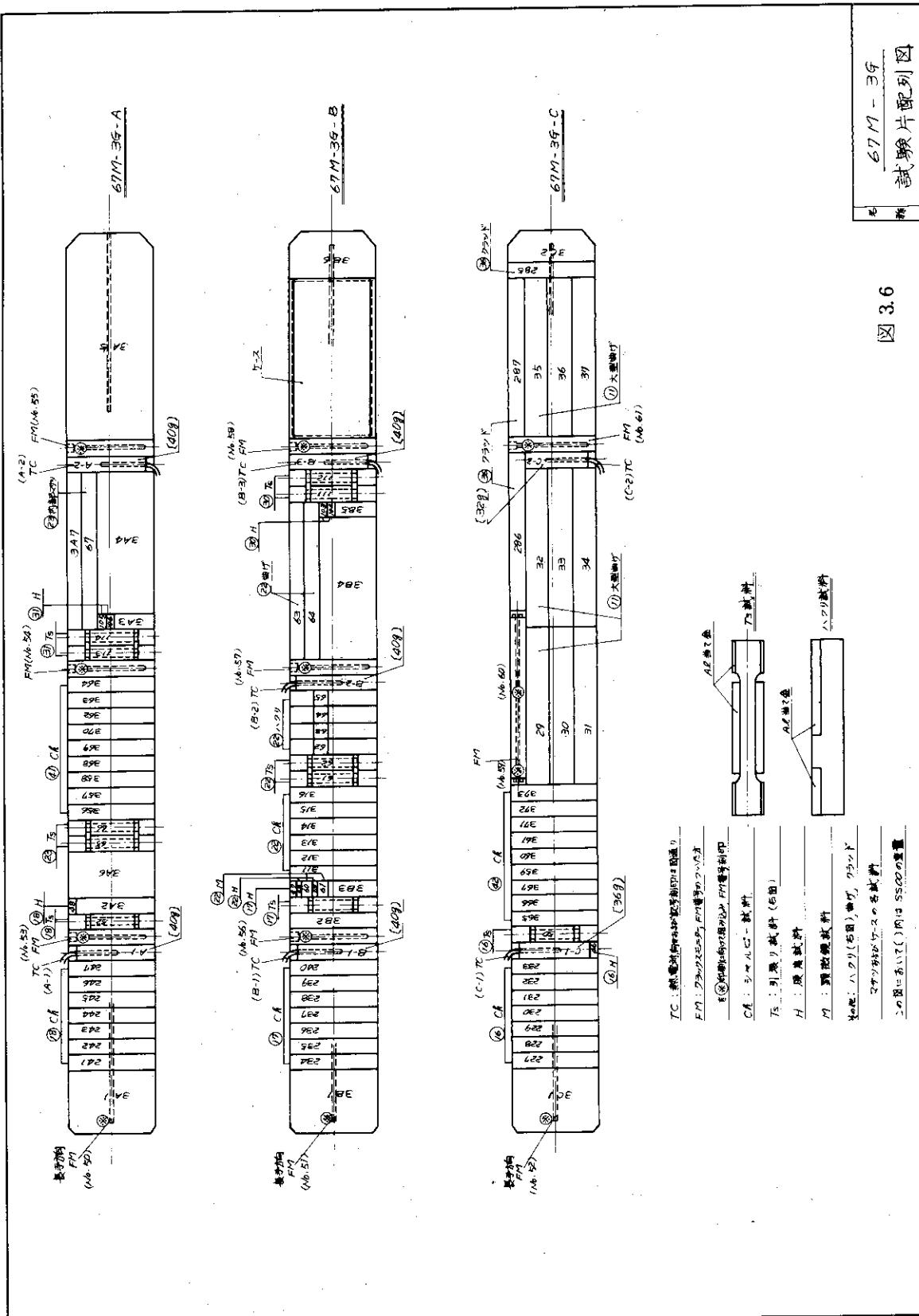
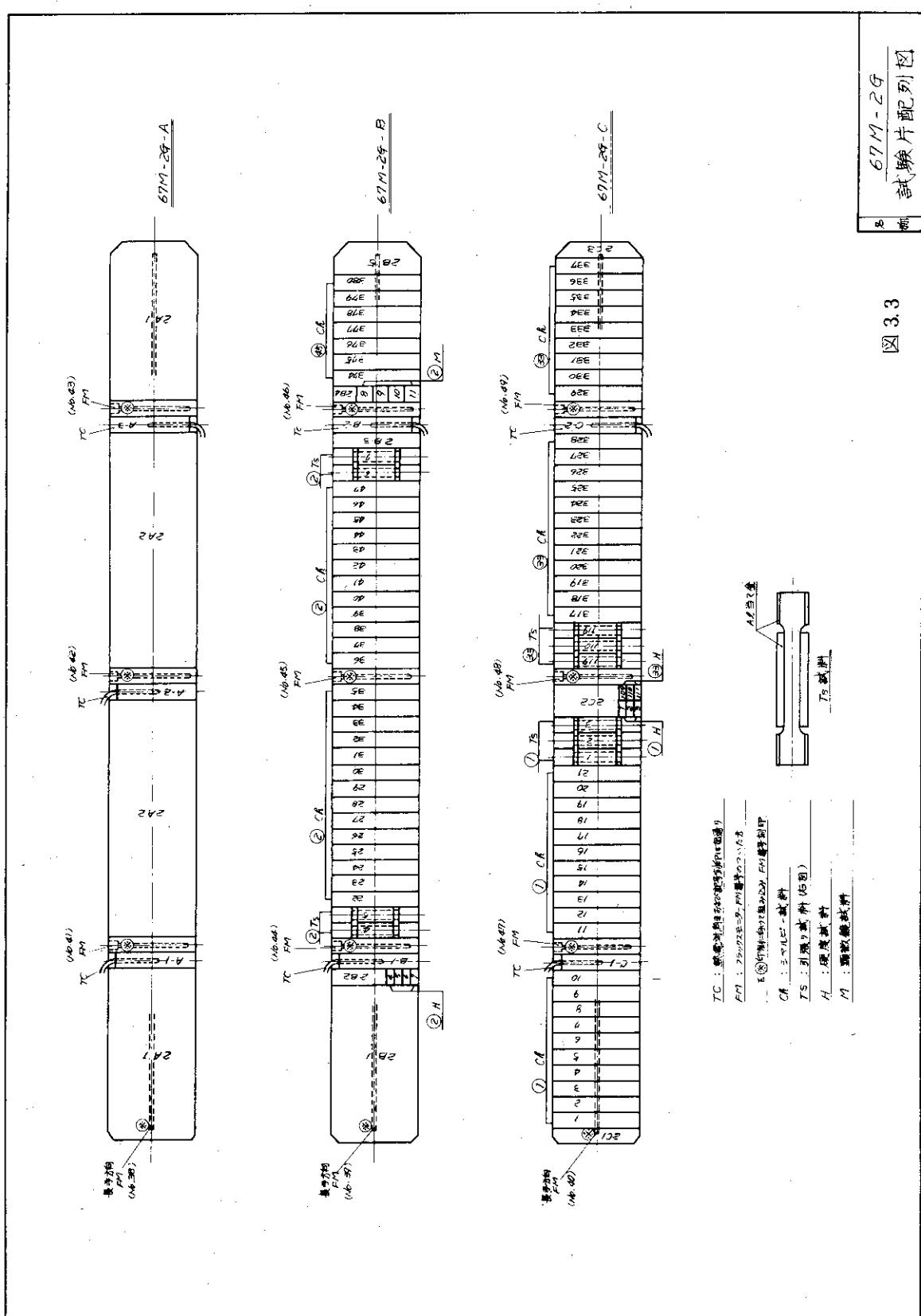


図 3.6



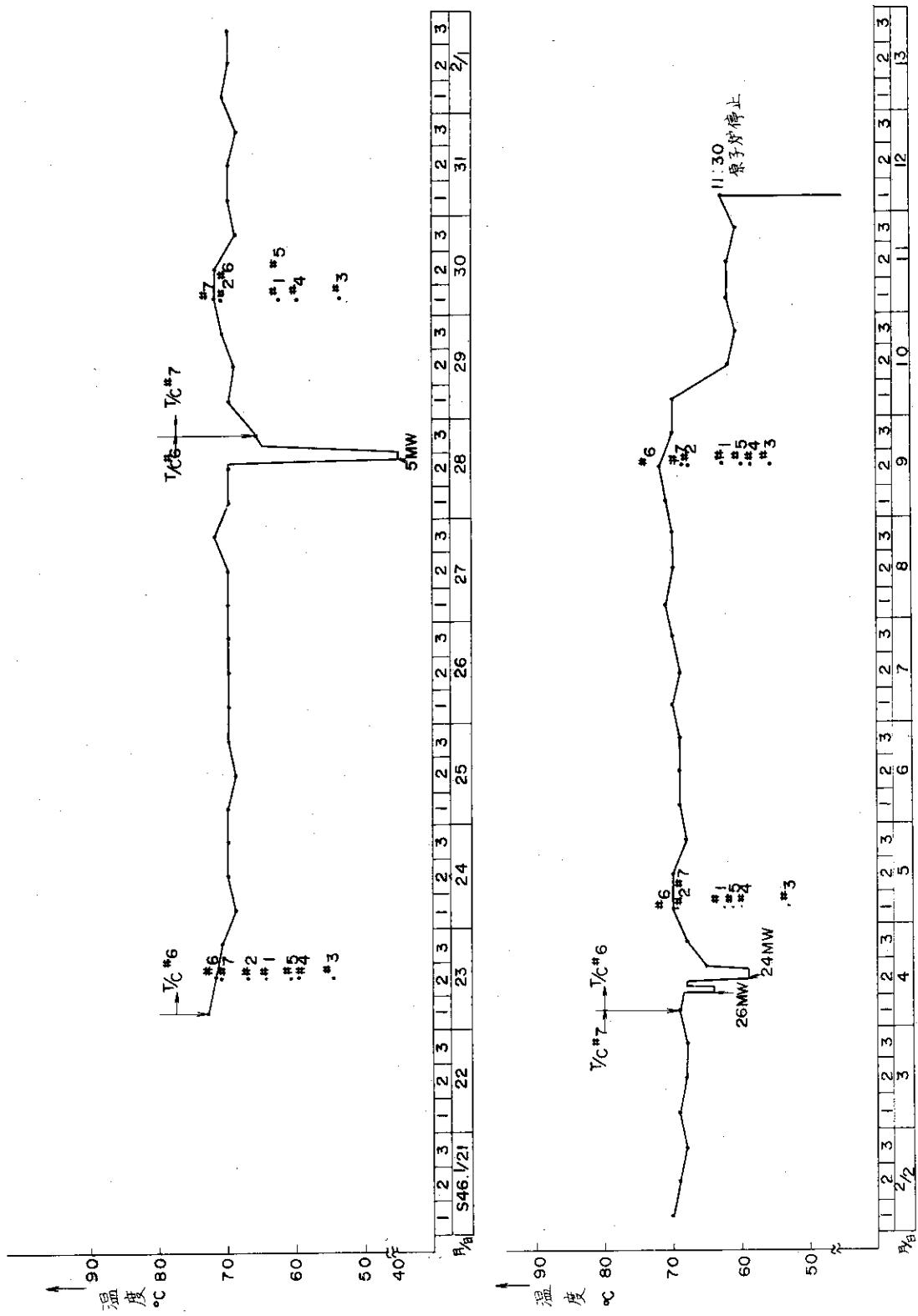
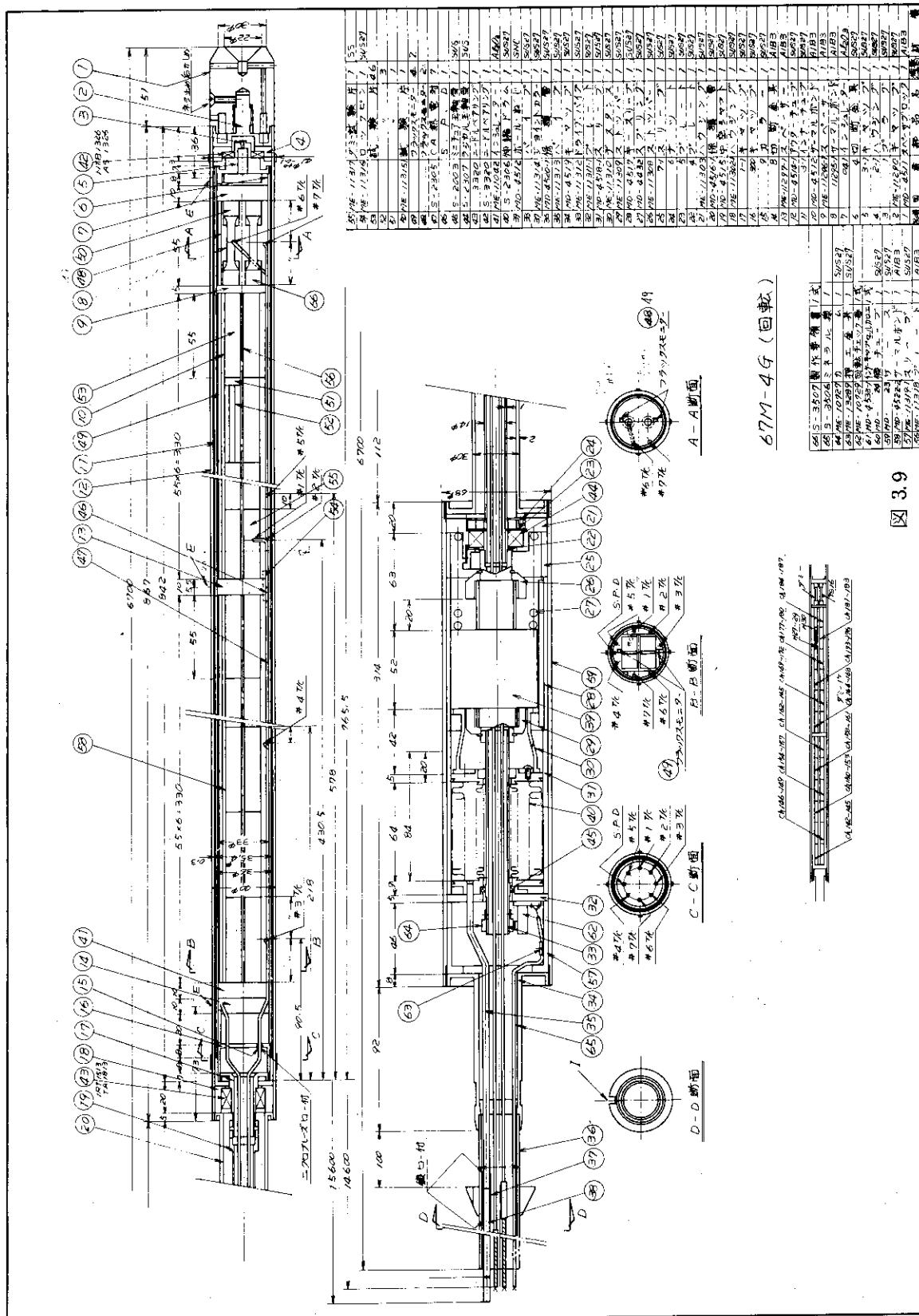
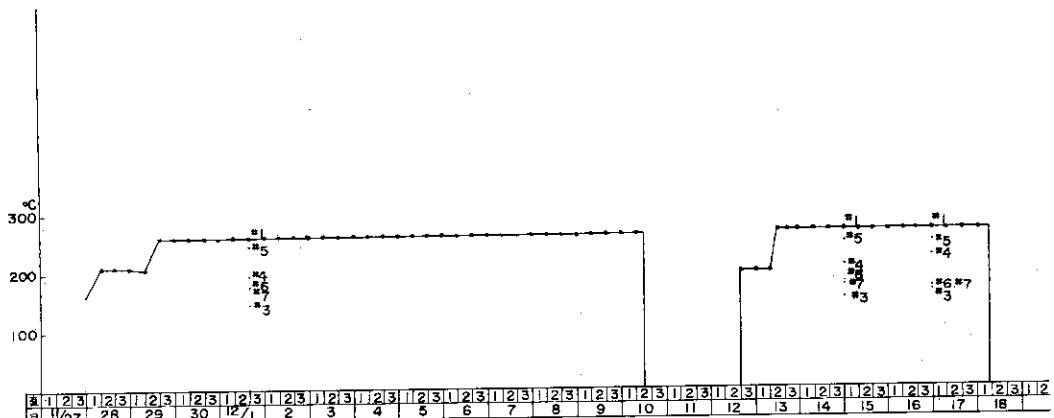


图 3.8 67M-3G 第6サ1タル照射要

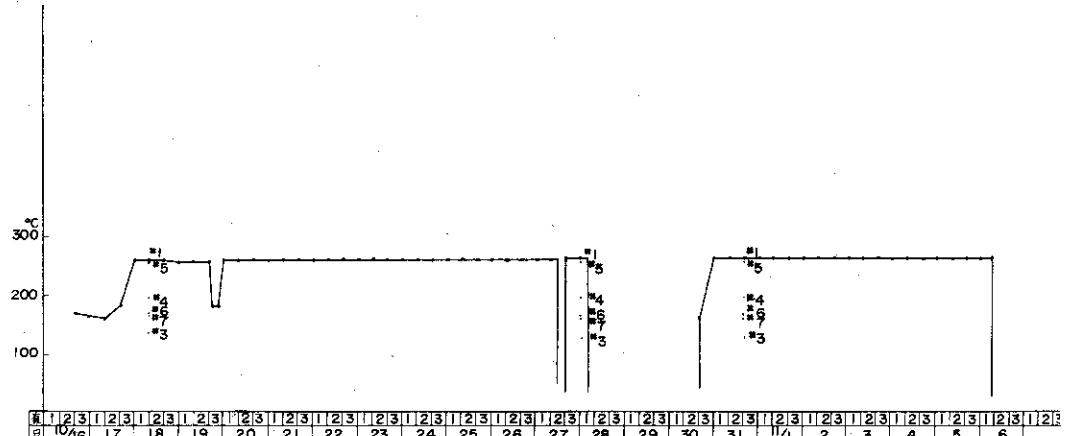


67M-4G (回転)

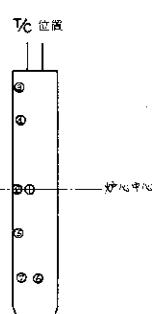
3.9



1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
日																					



1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
日																					



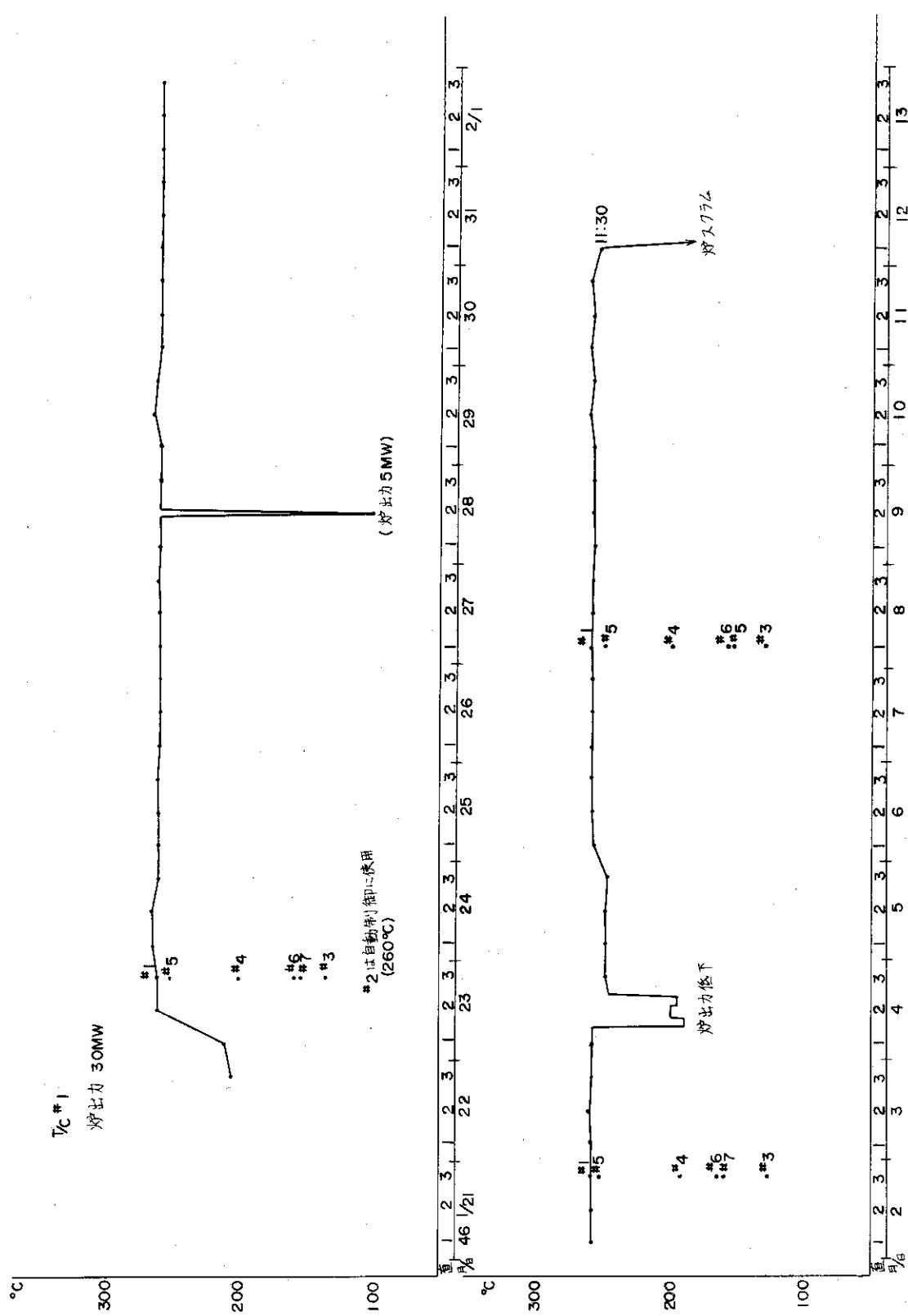


図 3.1.2 67M-4G キヤブセル温度変化(第6サクル)

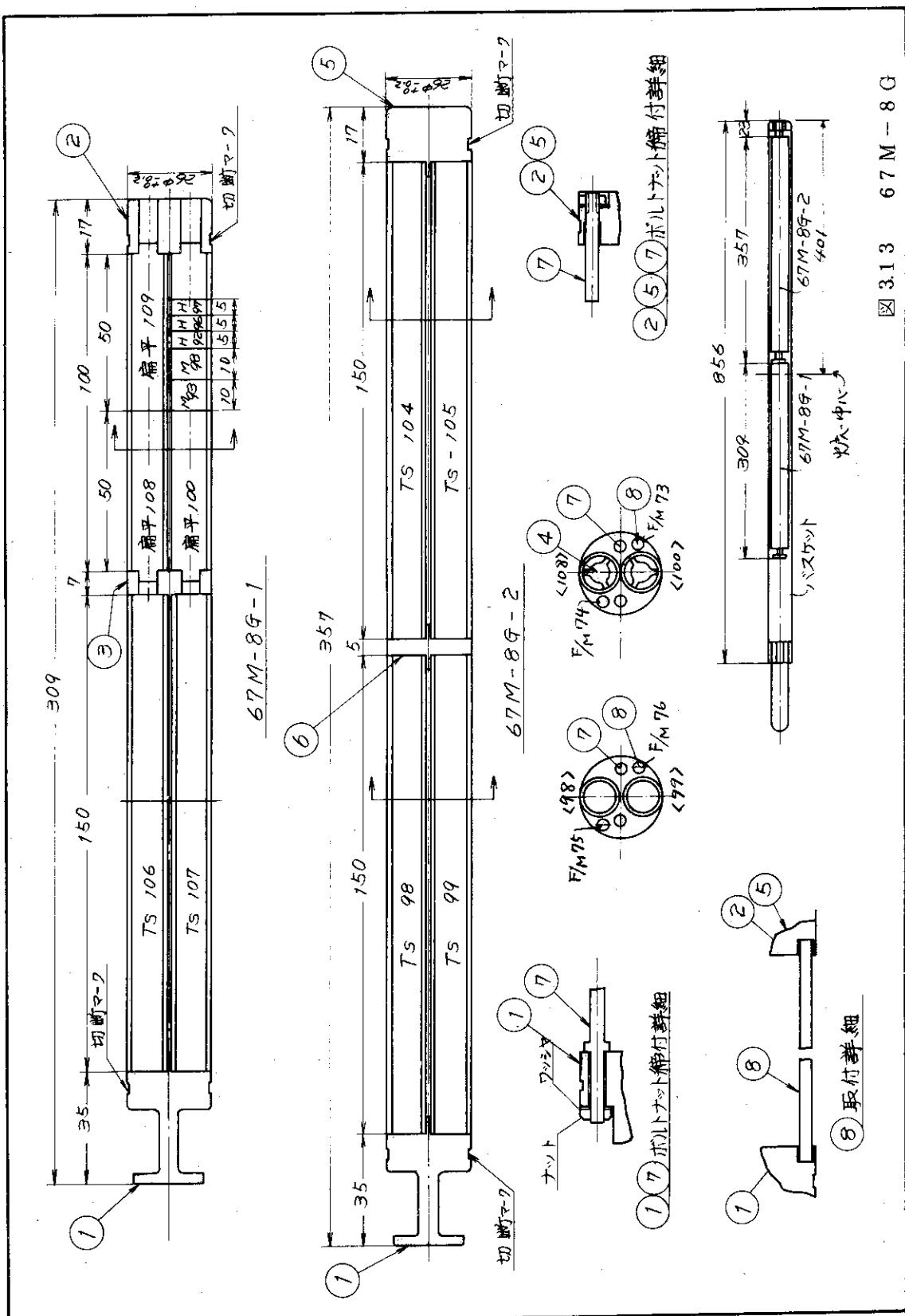
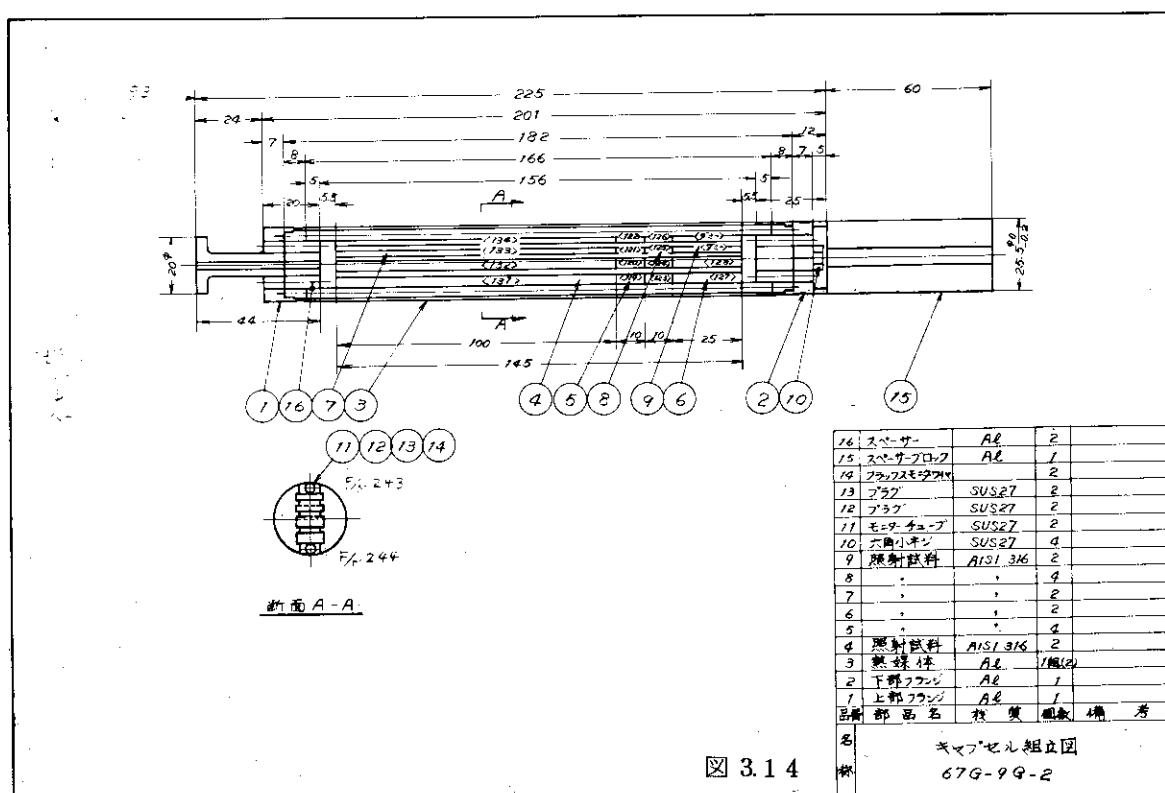
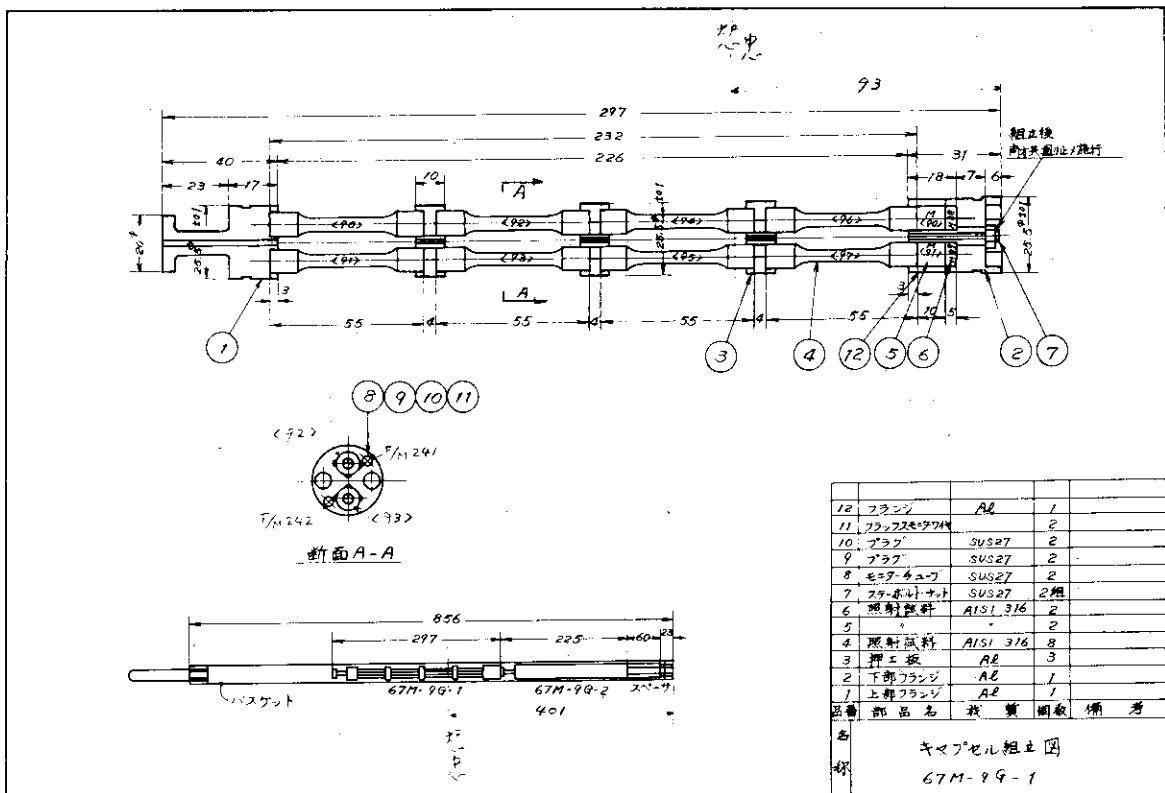
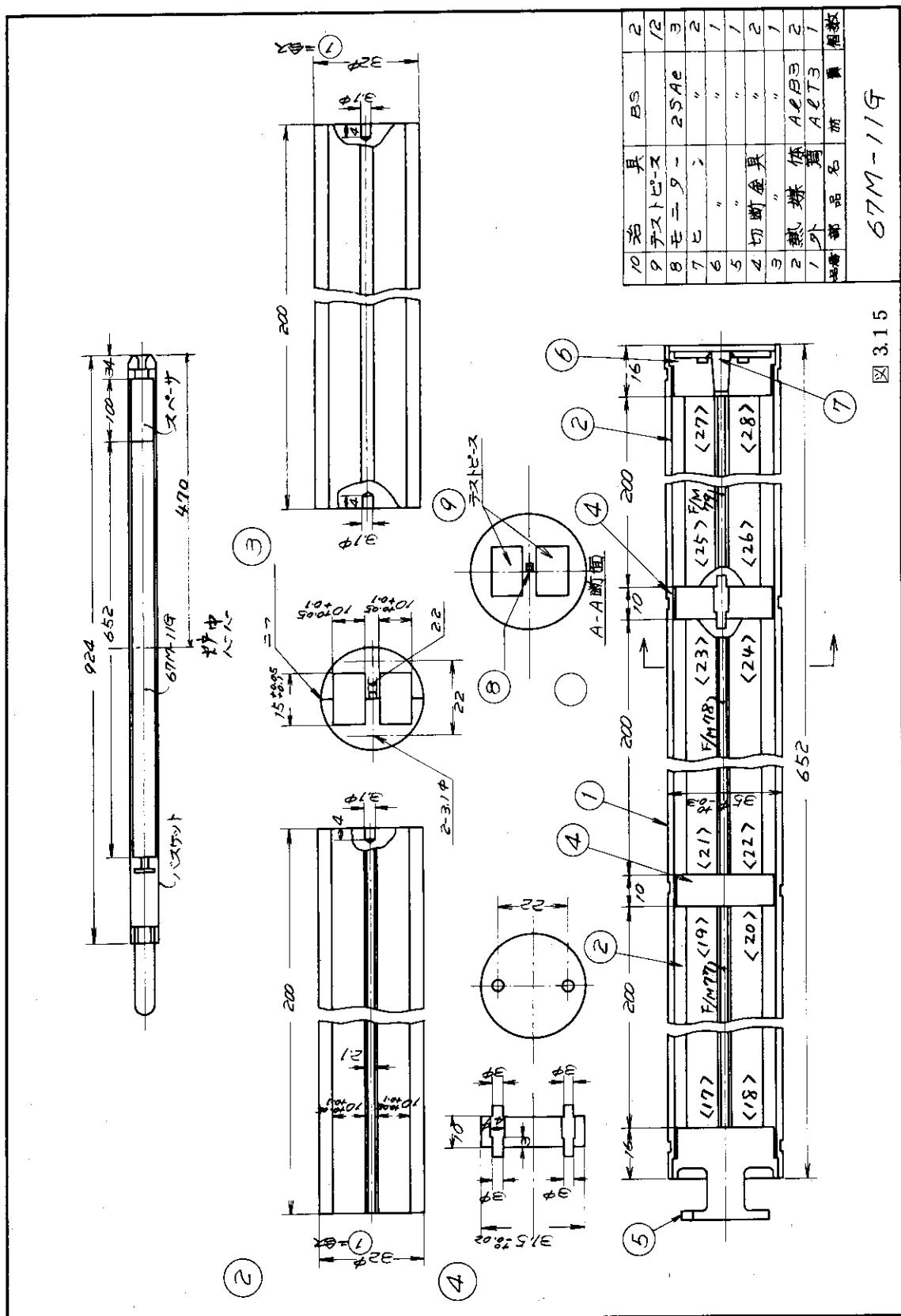


図 3.1.3 67M-8G



☒ 3.1 4



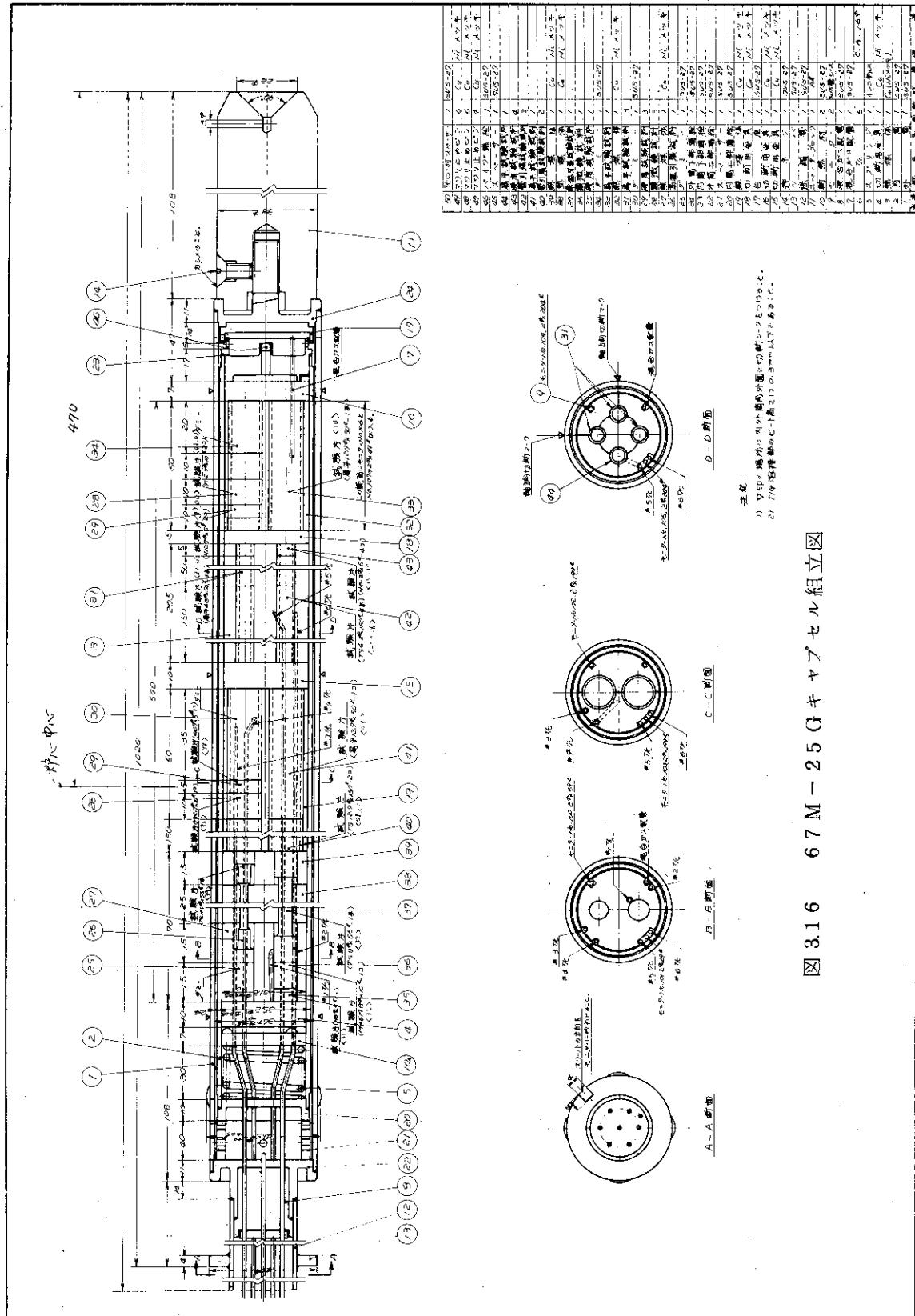


図 3.16 67M-25G YAPセル組立図

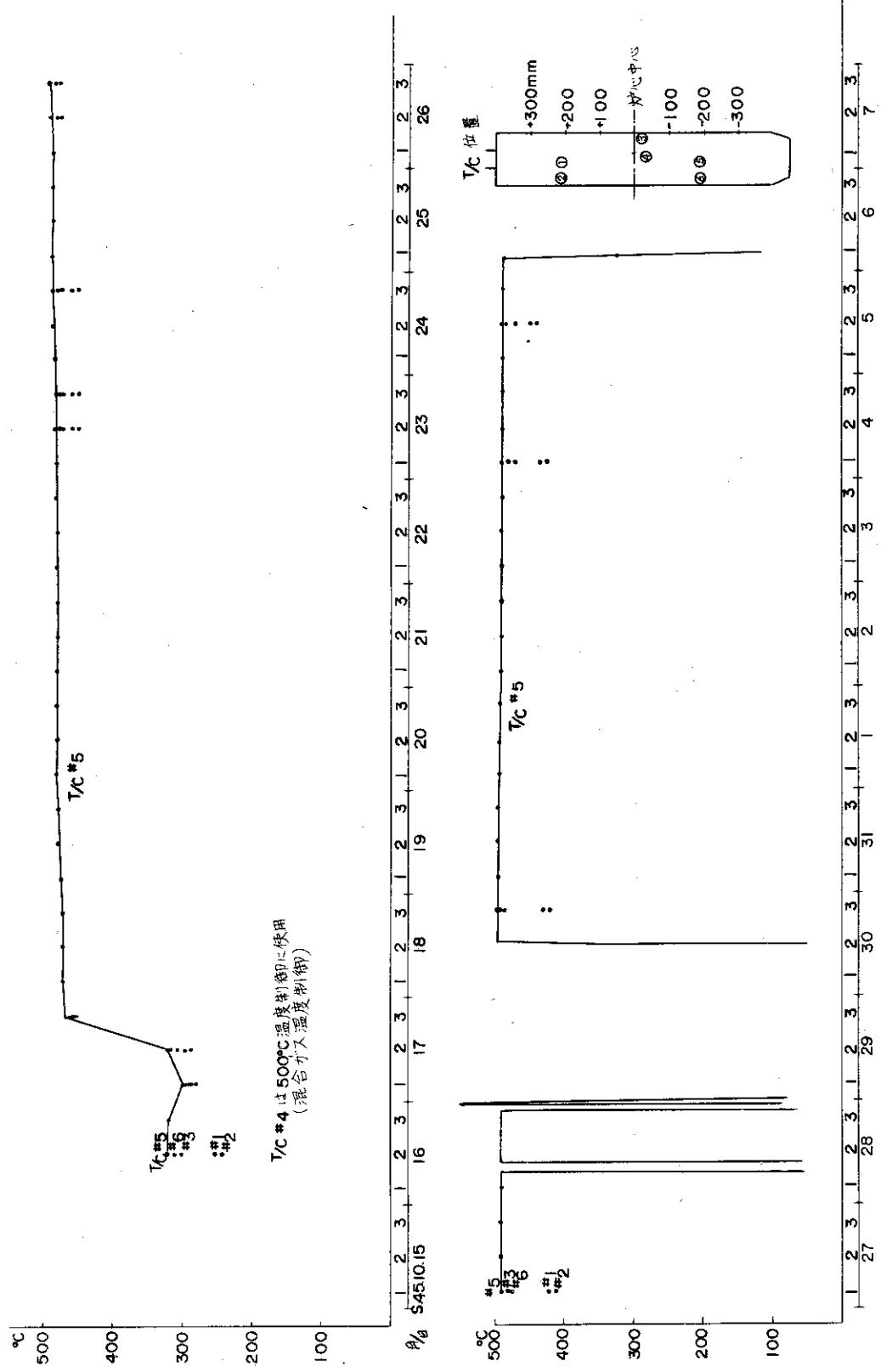


図3.17 67M-25G (第4世代)

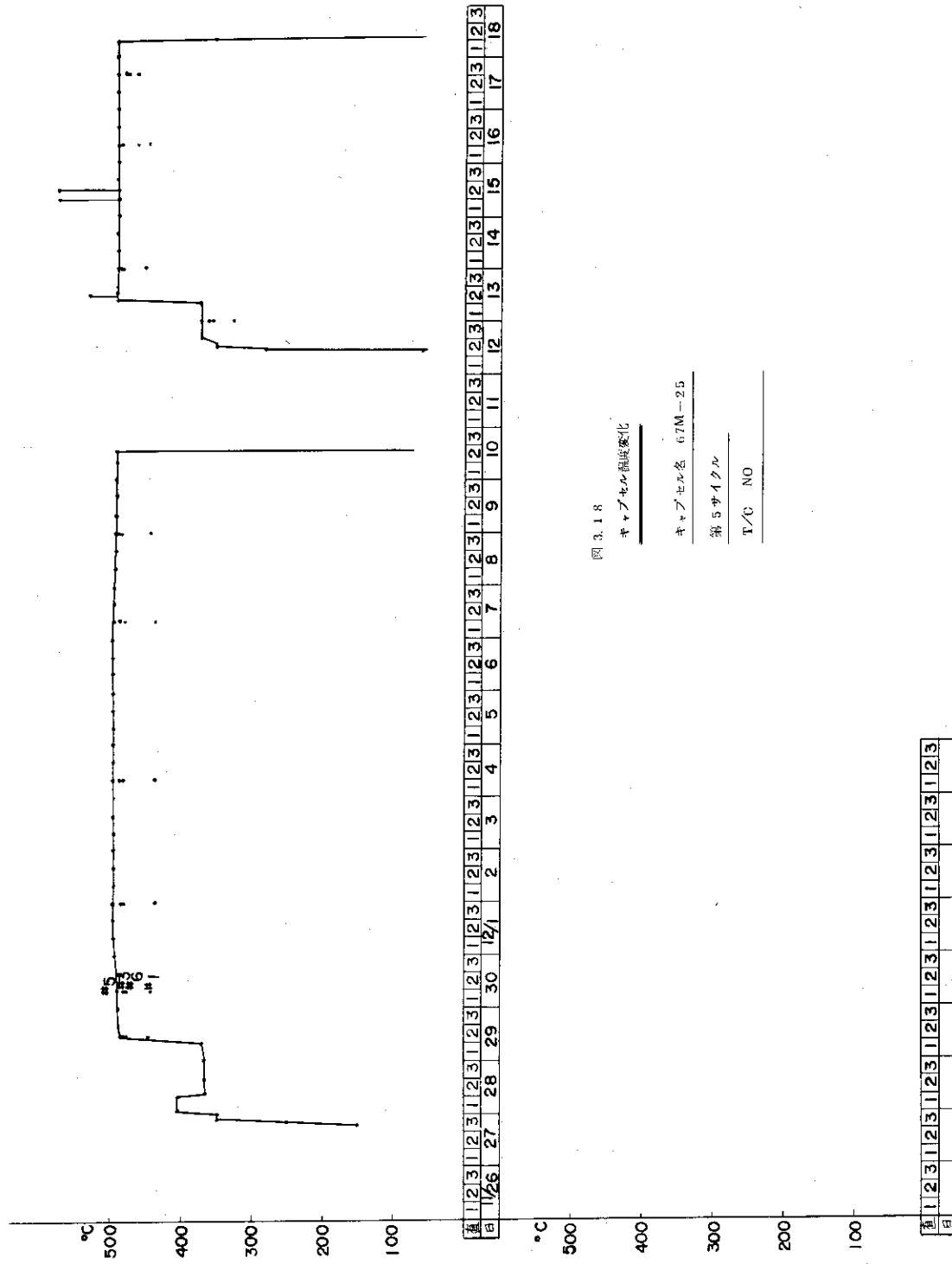
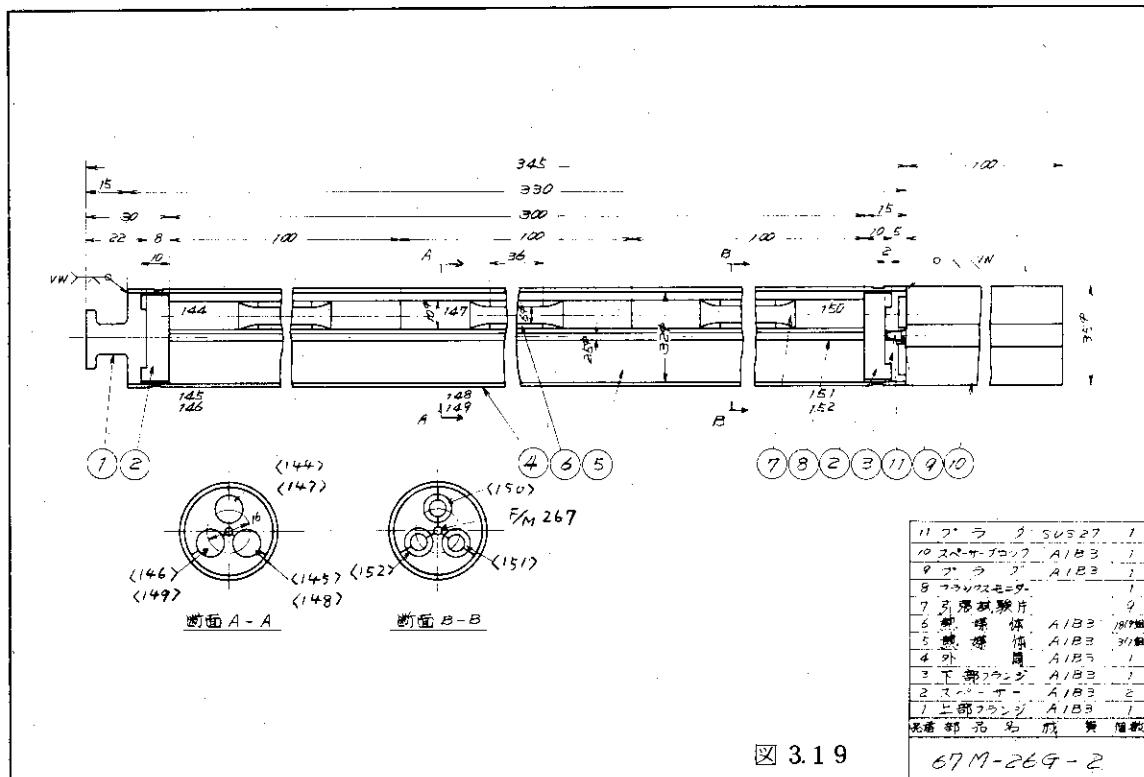
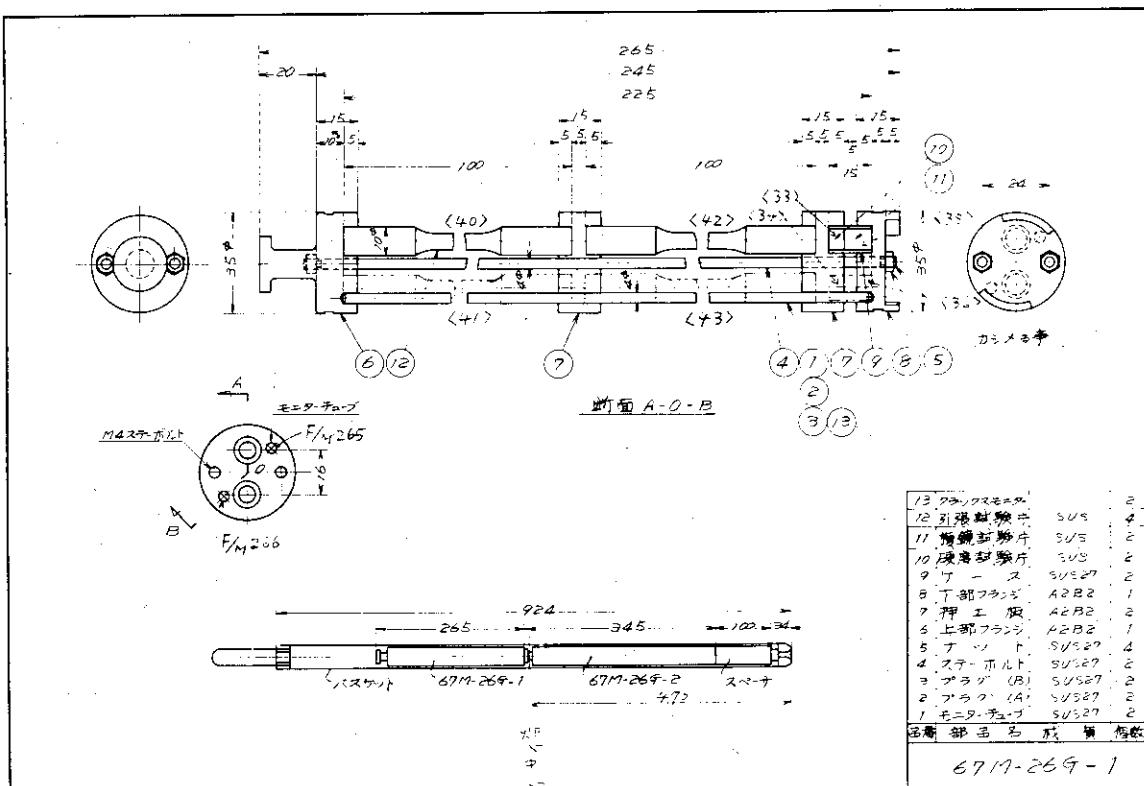


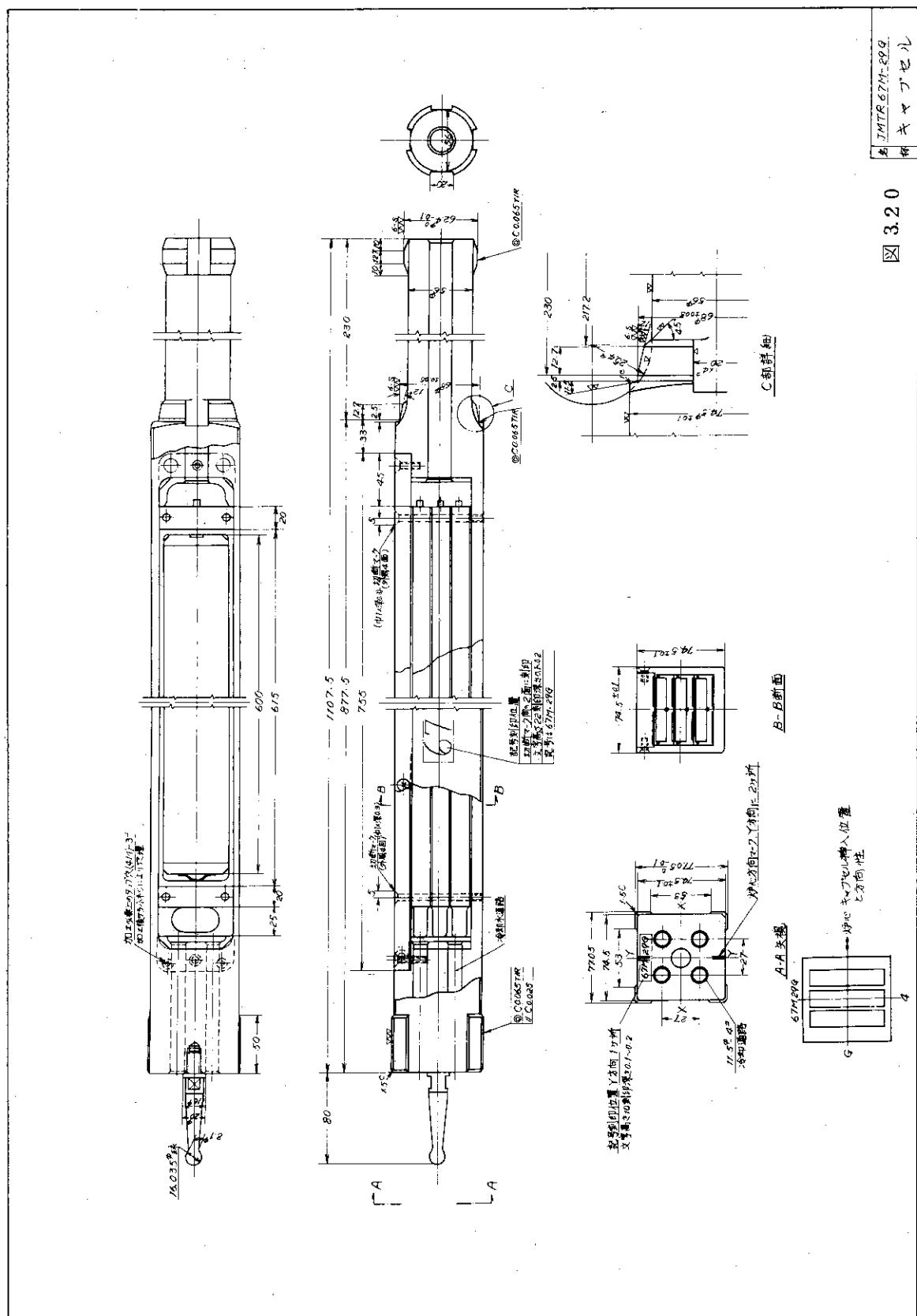
図 3.18
チャップセル温度変化

チャップセル名 67M-25

第 5 サイクル

T/C NO





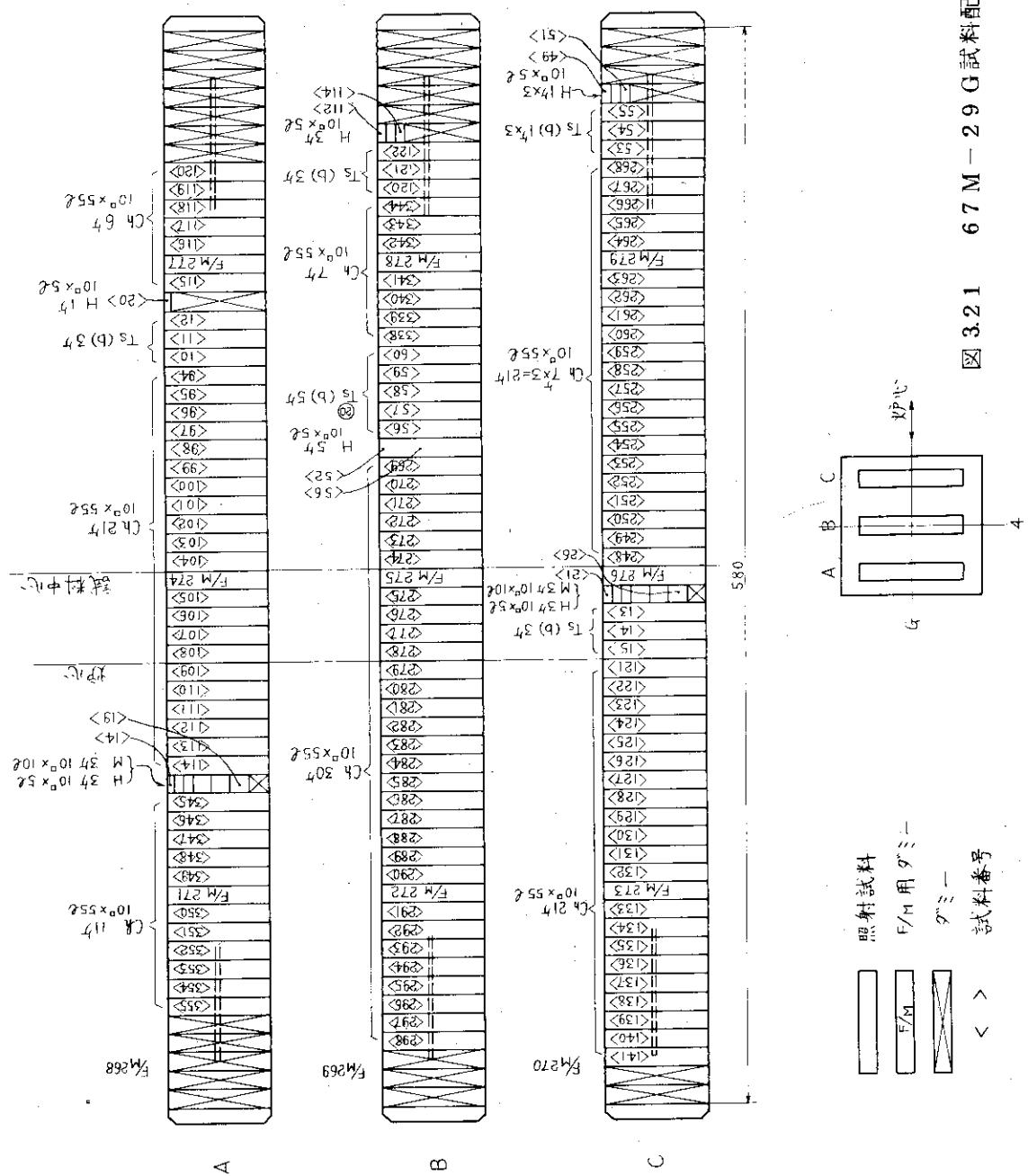
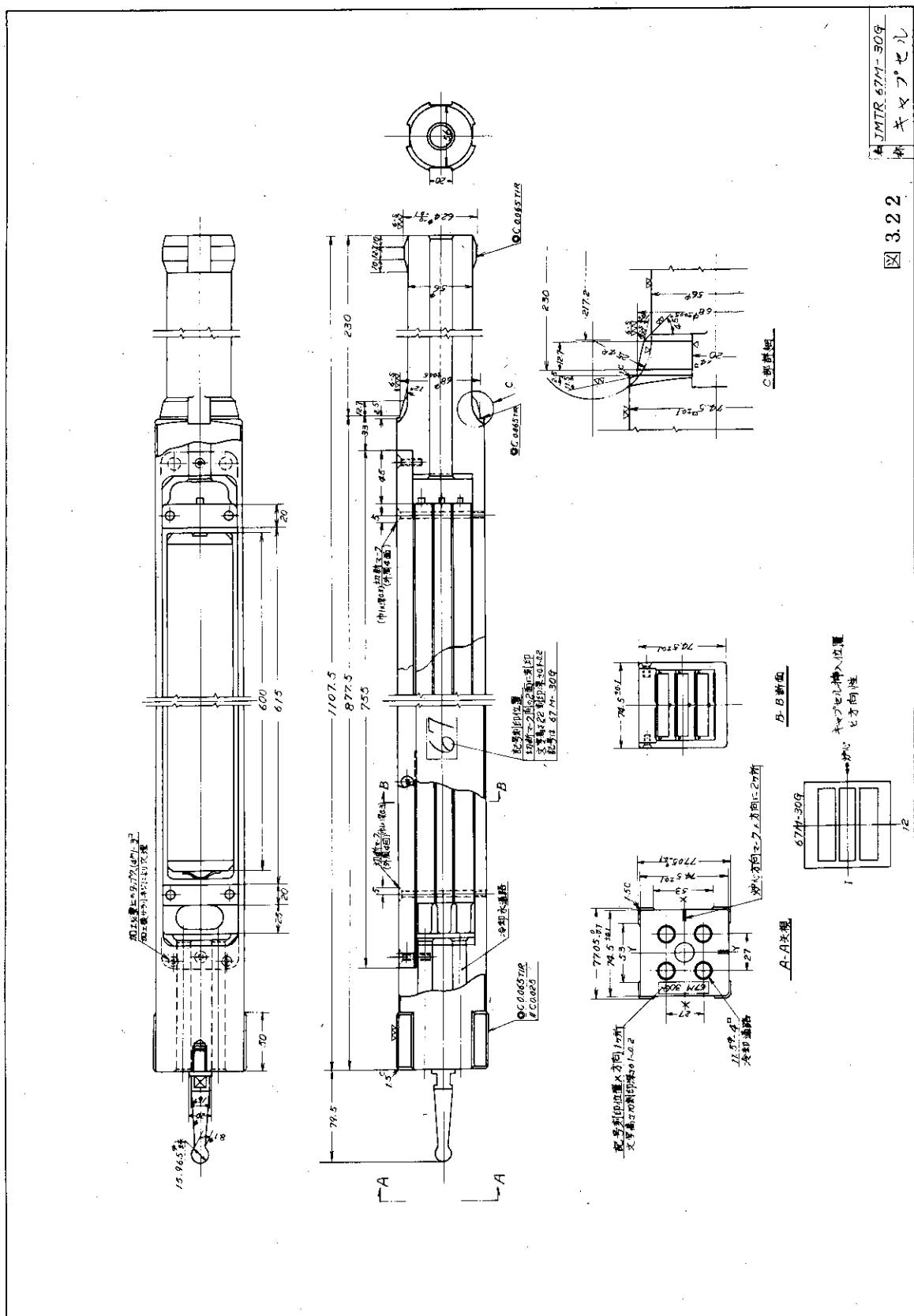


図 3.21 67 M - 29 G 試料配置図



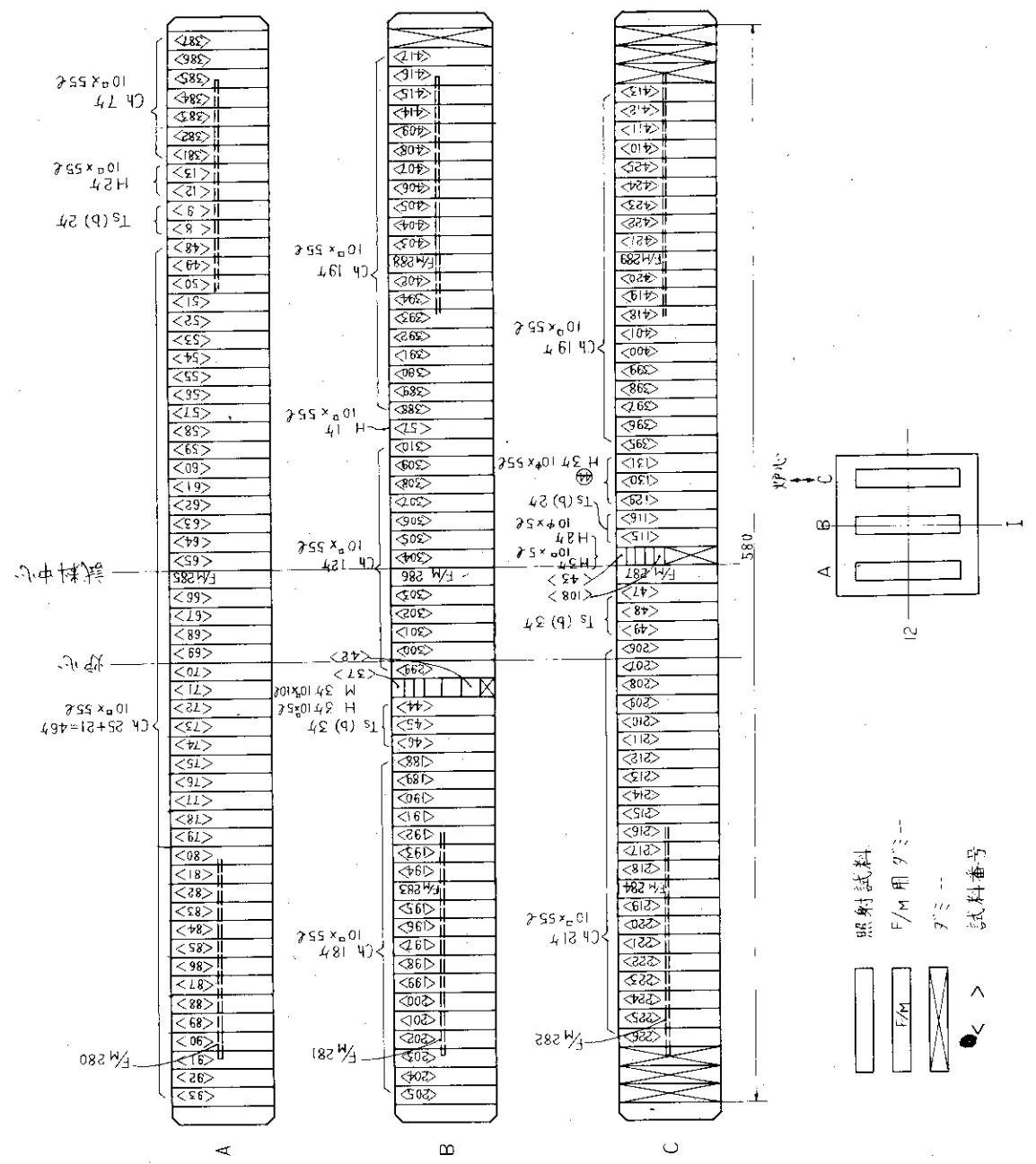
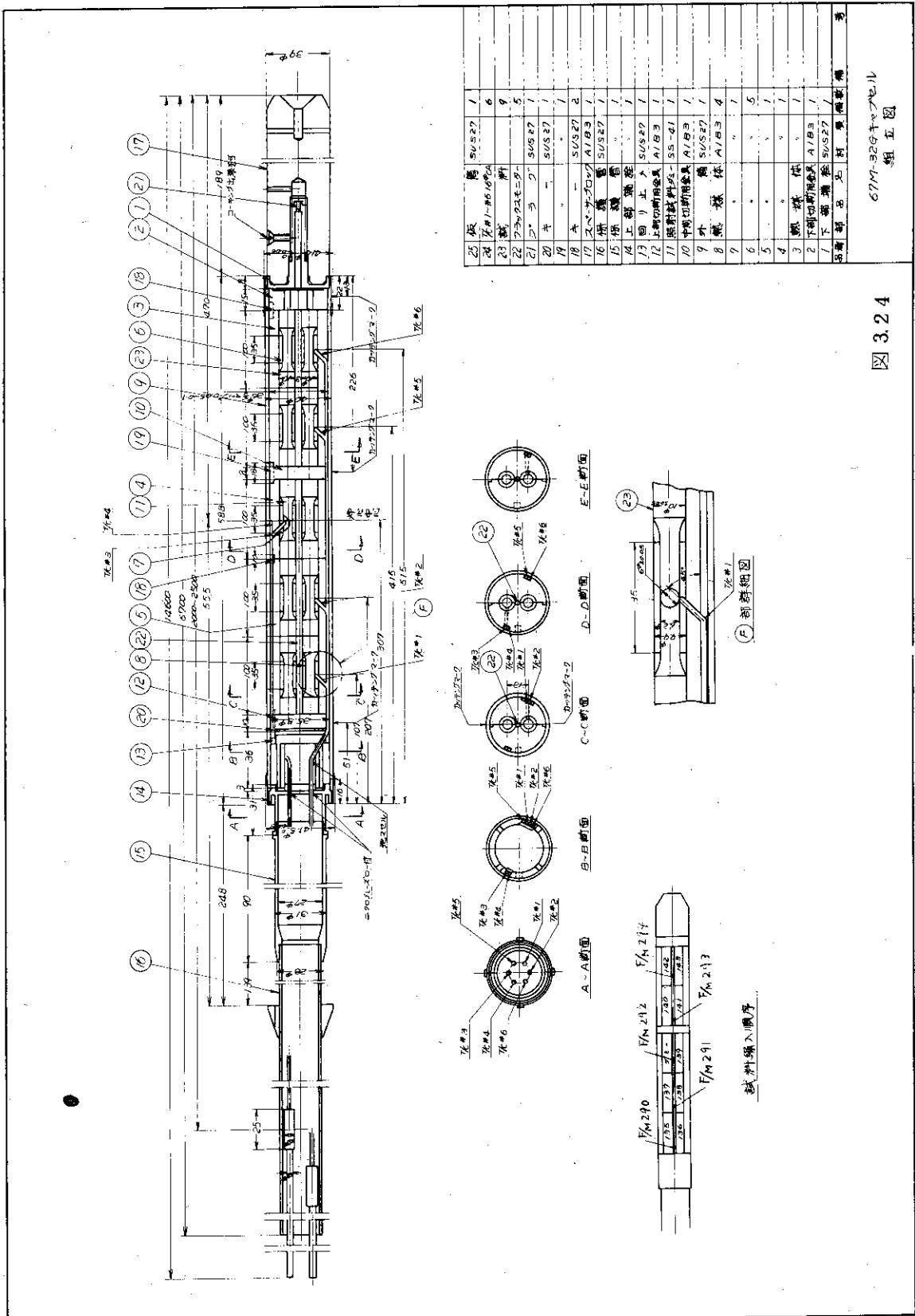


图 3.2.3 67M-30G 試料配置図



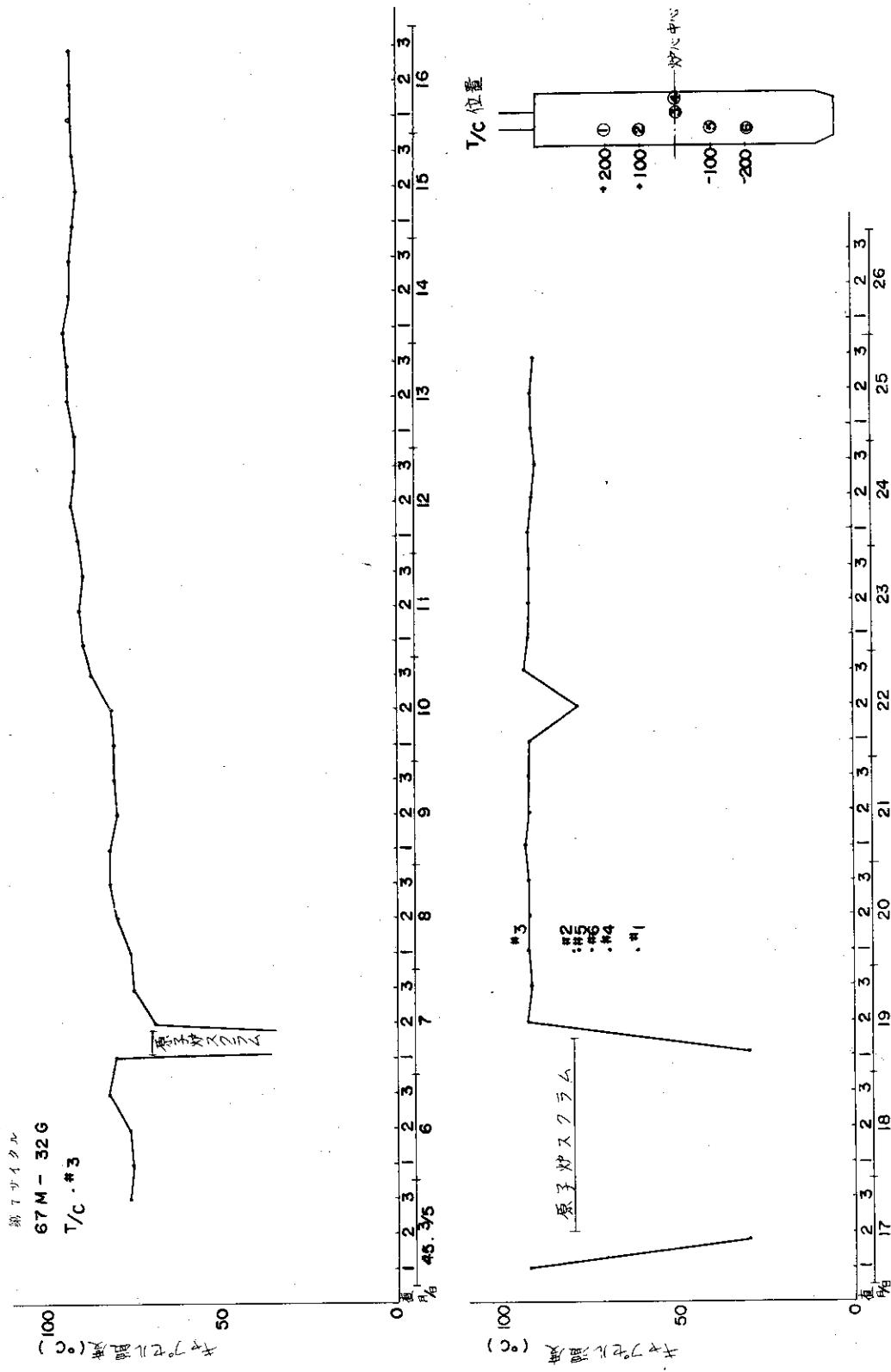


図 3.25 * プセル 温度変化

5.46.5.7.3 班

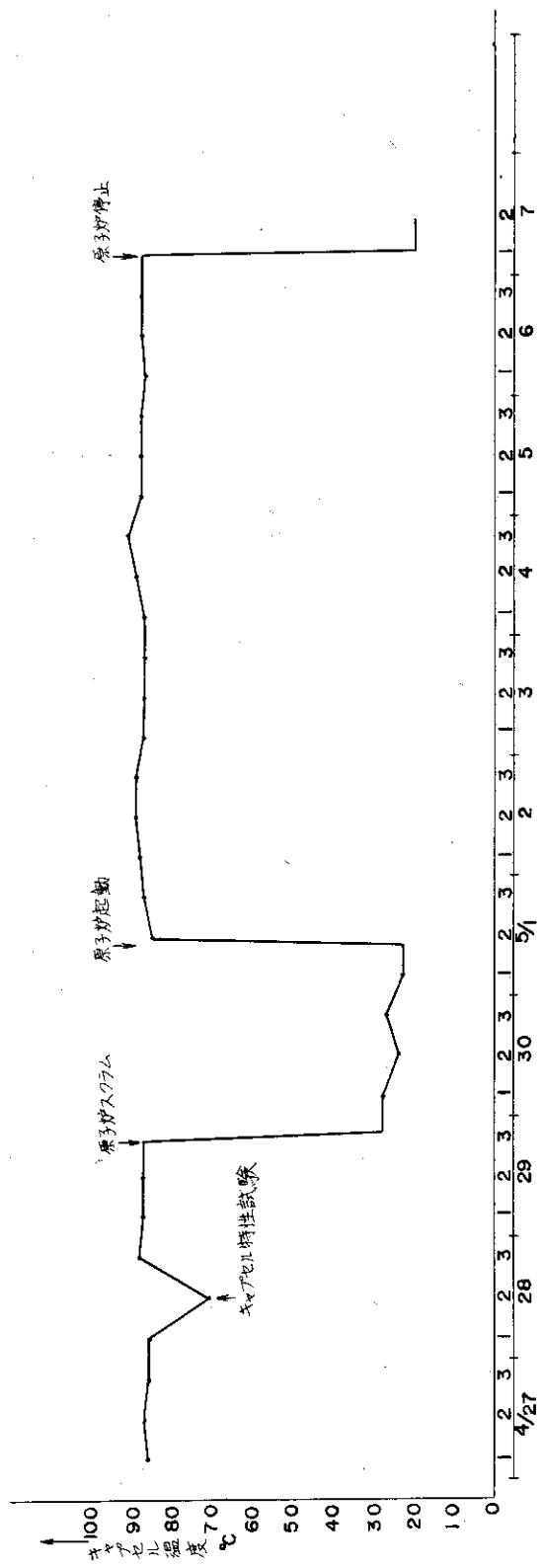
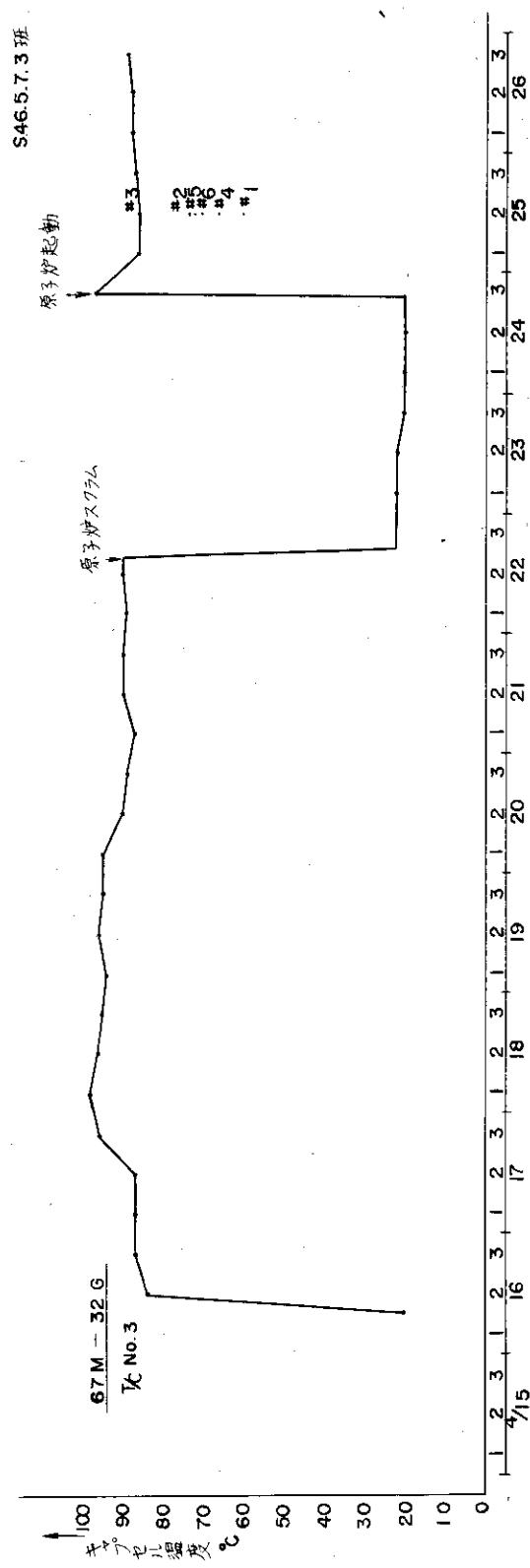


图 3.26 第 8 号卫星云层温度变化

S46.6.21.3 班

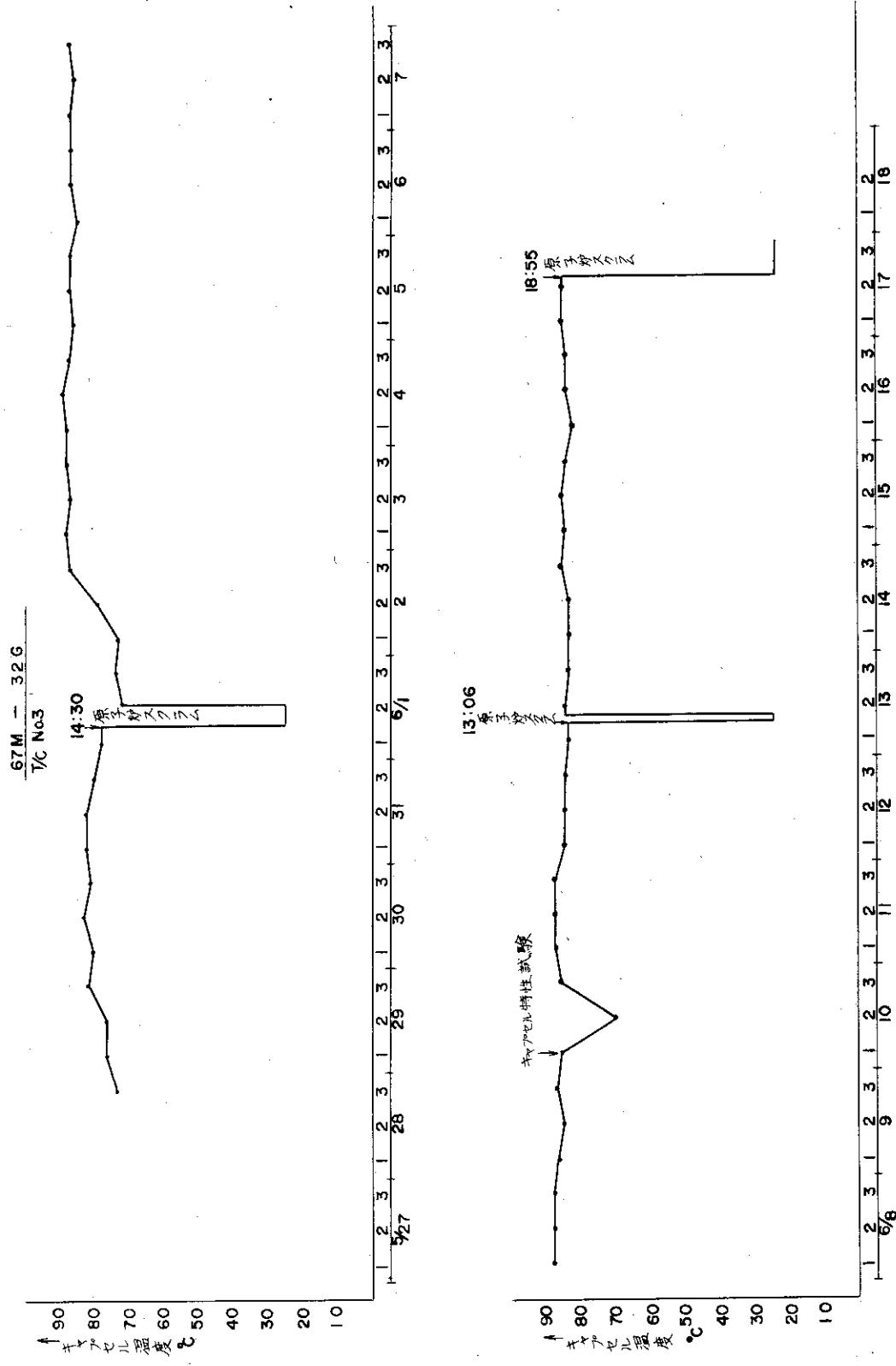
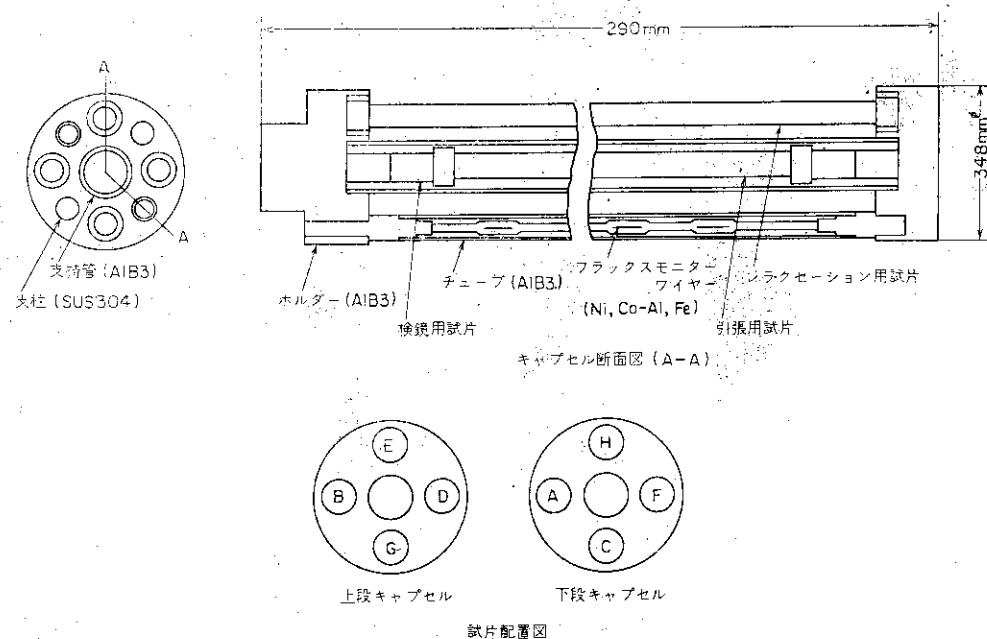
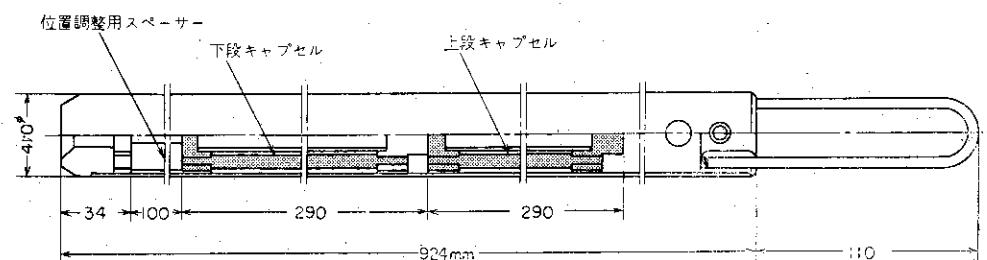


図 3.27 第 9 サイクルキヤウセル温度変化



キャップセル断面図



キャップセル装荷図

図 3.28 67M-34G キャップセル構造図

3.3 中性子照射量

(1) 測定方法

鉄ワイヤをモニタとして用い、 $^{54}\text{Fe}(\text{n}, \text{p})^{54}\text{Mn}$ 反応で生ずる ^{54}Mn （半減期 313 日）の生成量をゲルマニウムカウンタによるγ線分析により定量し、その結果を中性子照射線量に換算する。

(2) 照射量の評価

1) $^{54}\text{Fe}(\text{n}, \text{p})^{54}\text{Mn}$ 反応の微分断面積

Fabry により評価された微分断面積データ (INDC(NDS)) より採用した。

2) 中性子スペクトル

計算コードは ANISN を用い、JMT-R 廉心を 1 次元円筒として取扱い、燃料領域内照射孔、ベリリウム反射体第一層、ベリリウム反射体第二層およびアルミニウム反射体第一層におけるスペクトルを計算した。

3)* 1 MeV 以上の中性子に対する $^{54}\text{Fe}(\text{n}, \text{p})^{54}\text{Mn}$ 反応の実効断面積

本キャップセルは、照射位置であるので、スペクトルを考慮した実効断面積を求めるところとなる。なお、キャップセル装荷によるスペクトル変化は考慮されていない。

(3) 図 3.2 9 ~ 3.4 0 の概略説明

1) キャップセル内フラックスモニタ位置を図の左側に示す。

2) 縦軸は、炉中心を "0" として縦方向位置を mm で示す。

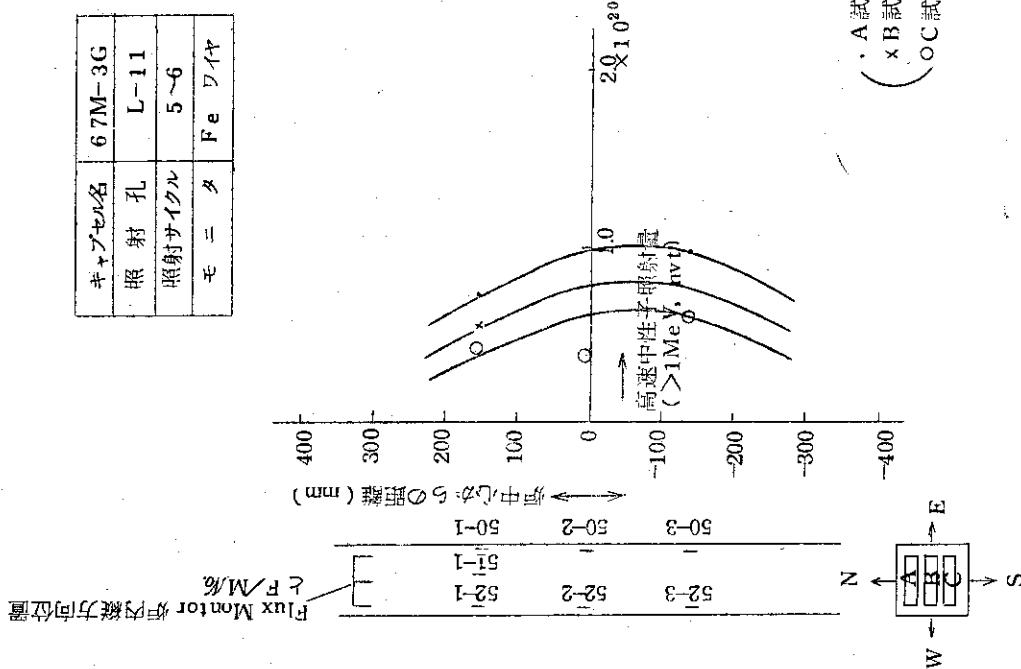
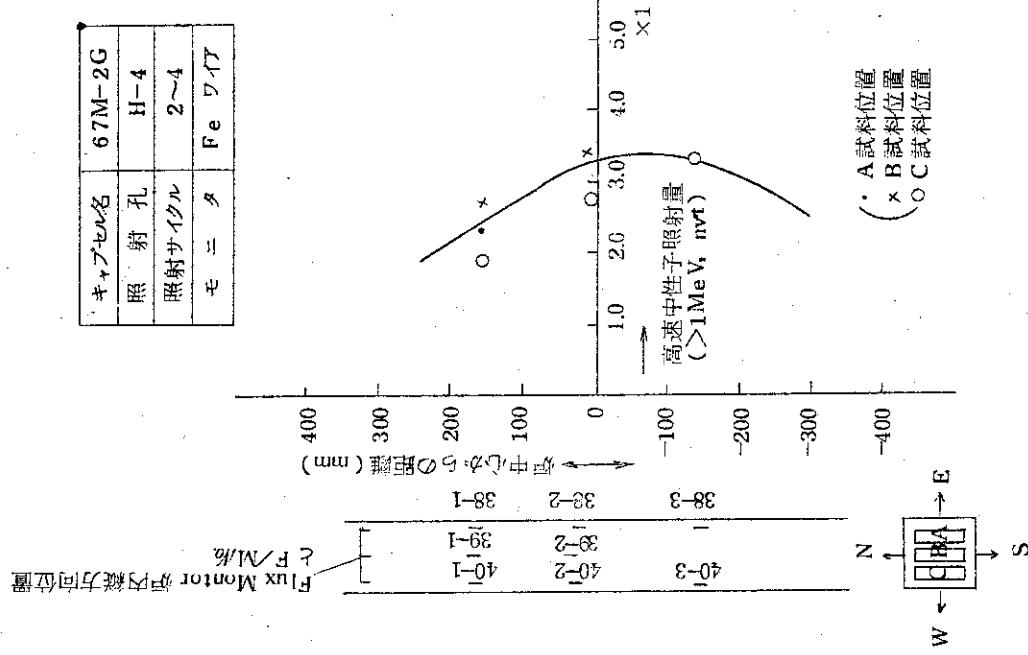
3) 横軸は、フラックスモニタ位置での 1 MeV 以上の高速中性子照射量 (nvt) を示す。

*については、表 3.4 を参照されたい。

表 3.4 キャップセル照射位置と $^{54}\text{Fe}(\text{n}, \text{p})^{54}\text{Mn}$ 反応の実効断面積 ($> 1 \text{ MeV}$)

キャップセル名	照射位置	実効断面積 $\sigma_i (> 1 \text{ MeV})$	備考
67M-2G	H-4	64.5 mb	JMT-R時報 2~4サイクル参照
3G	L-11	73.0	" 5~6 "
4G	D-9	64.5	" 4~6 "
8G	H-9-4	- *	" 2~5 "
9G	H-9-4	- *	" 6~9 "
11G	D-9	64.5	" 3 "
25G	M-7	73.0	" 4~5 "
26G	M-7	- *	" 2~3 "
29G	H-4	64.5	" 5~7 "
30G	H-4	64.5	" 8~11 "
32G	D-9	64.5	" 7~9 "
34G	M-12	64.5	" 6 "

* 推定により nvt を求めているため σ_i は使用していない。



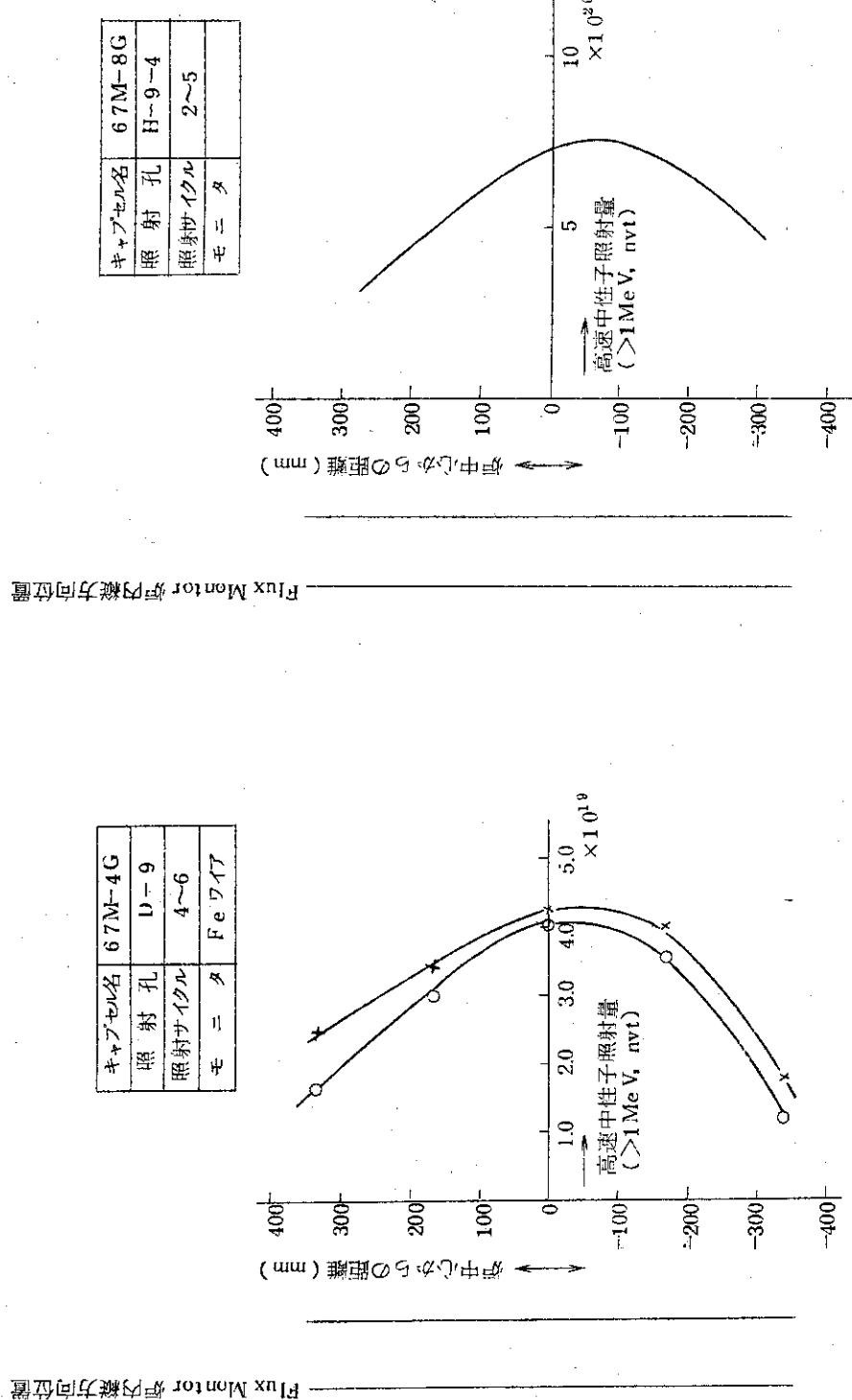
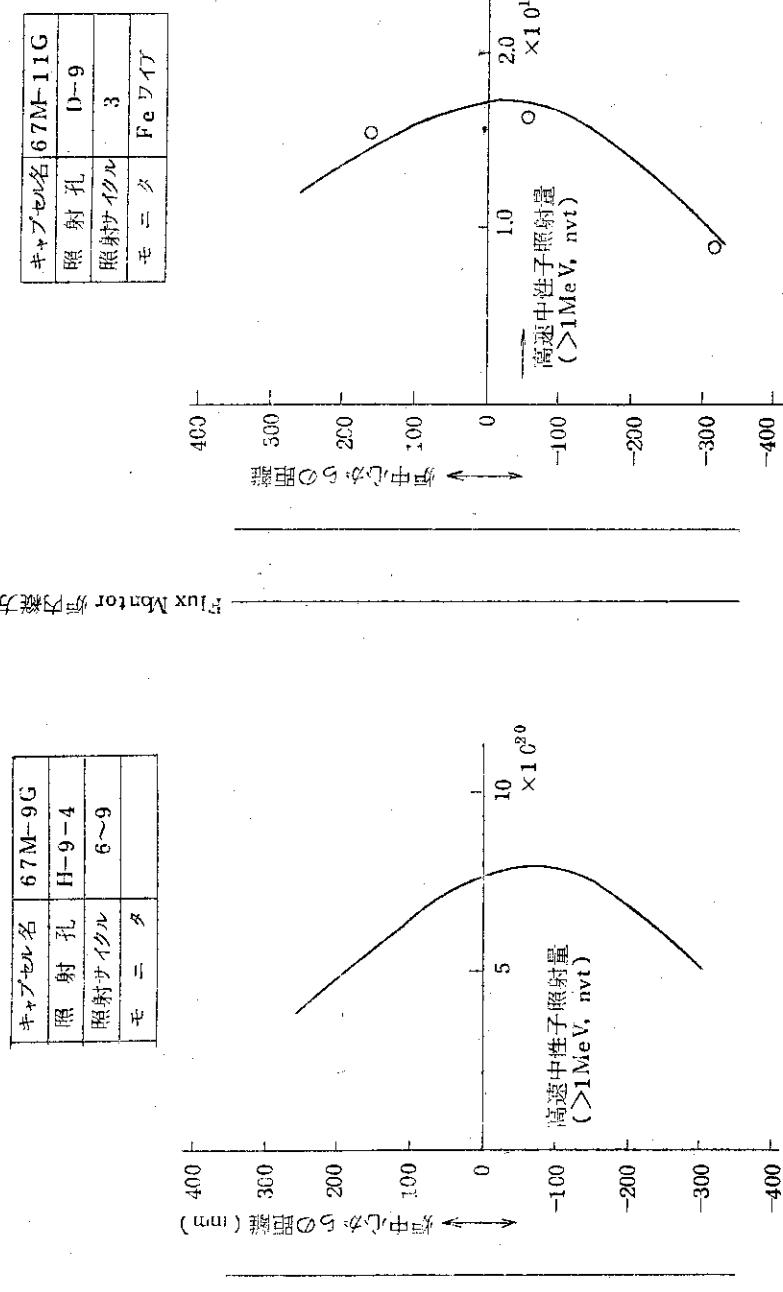


図 3.3.1

図 3.3.2



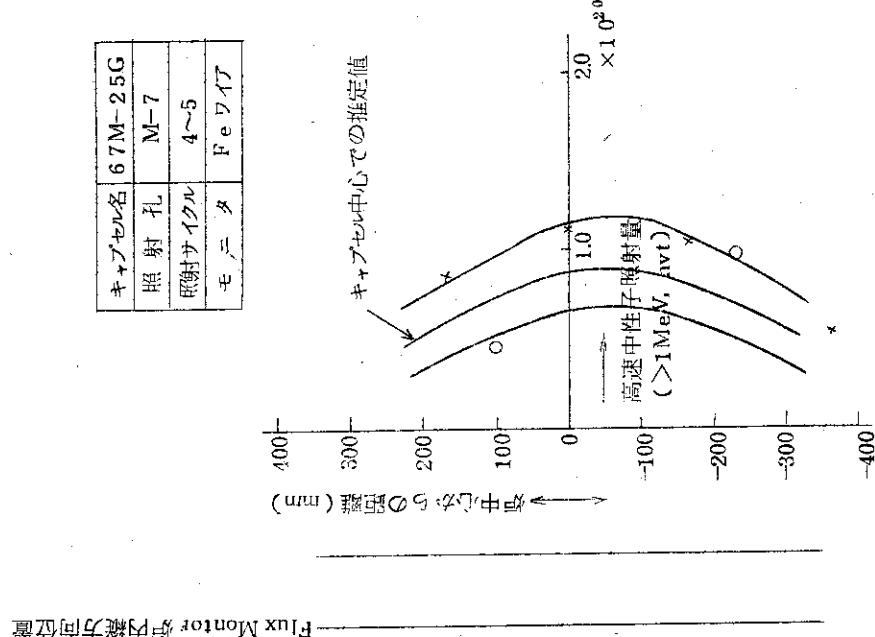


図 3.3.5

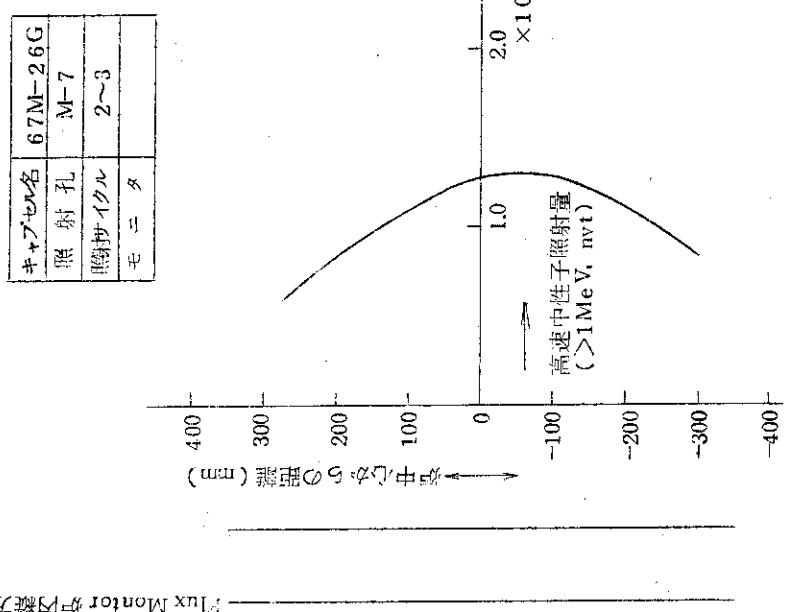
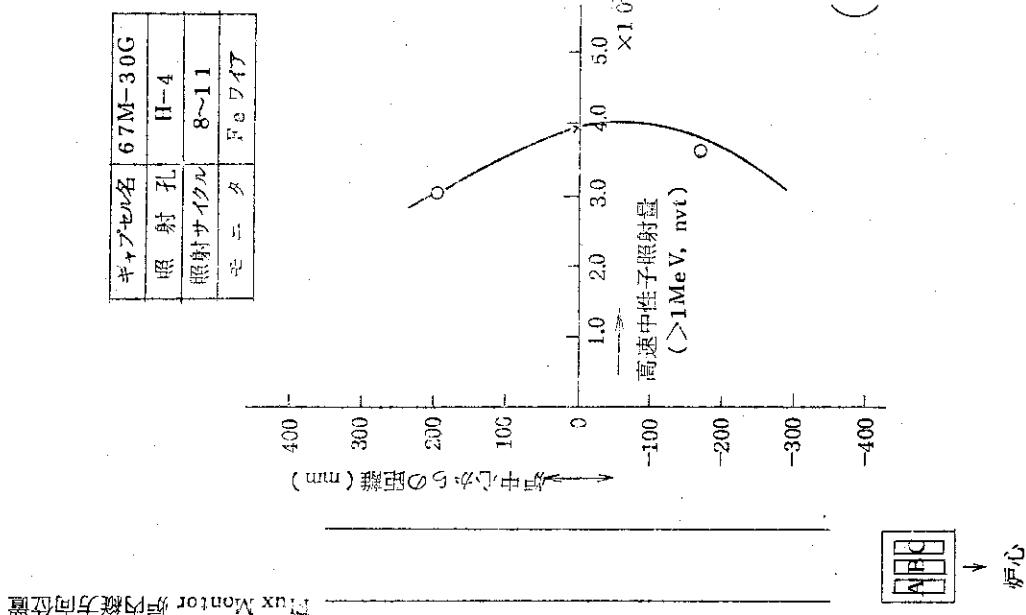
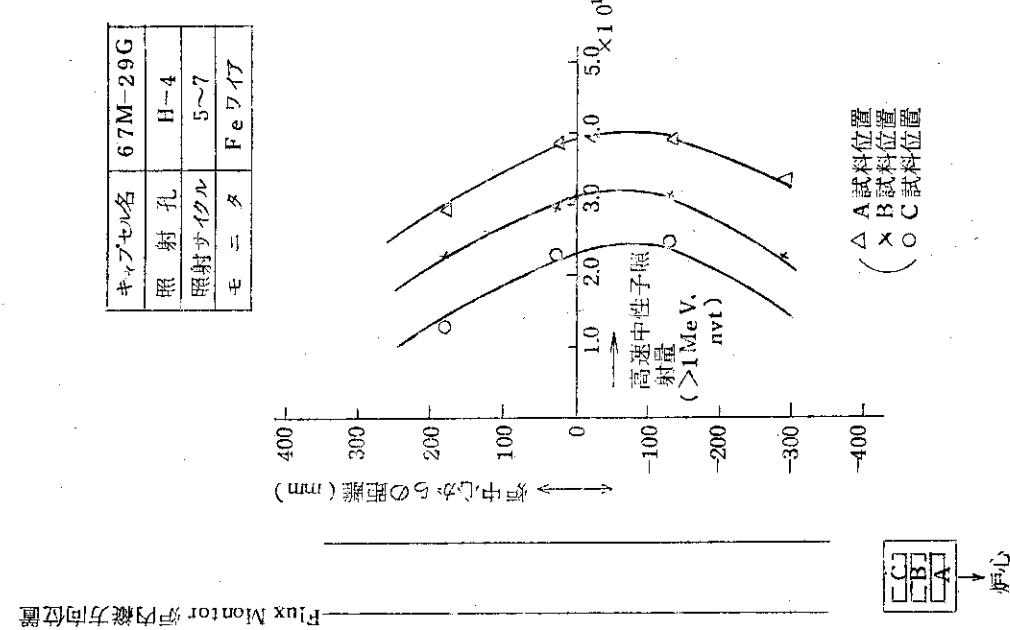


図 3.3.6



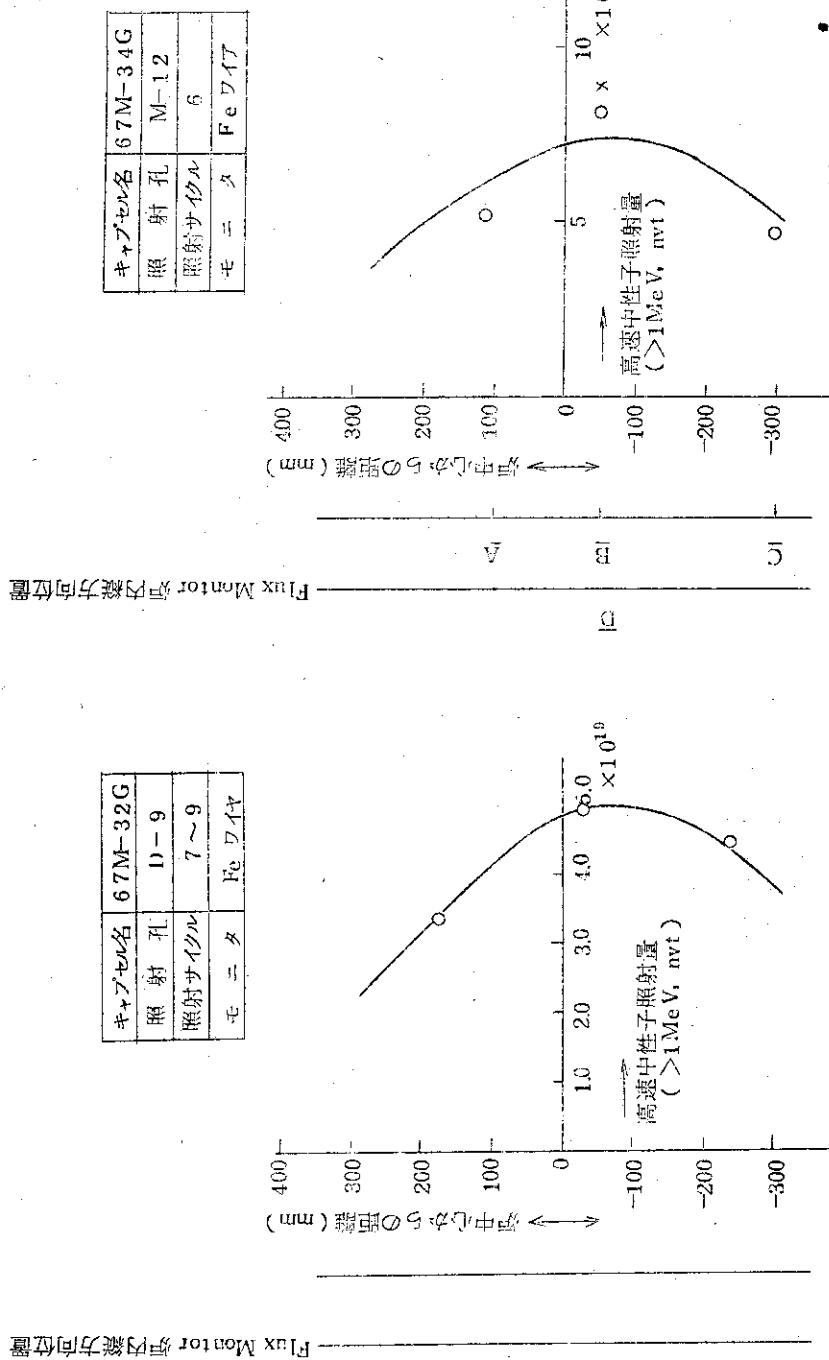


図 3.3.9

図 3.4.0

リーキー・キヤブセルのため
 キヤブセル内ア方向のF/M
 位置は不明

4. あとがき

試用期間の目的は、照射に習熟することと、有用なデータを得ることであった。鉄鋼関係については、各種の鉄鋼材料について各種の試験を計画・実施したことにより、キャブセルの設計・製作、ハンドリング、照射後試験などに習熟したものと思われる。とくに常温照射と高温照射について、その方法・精度などが明らかとなり、今後の見通しを得たといえる。

試験結果については、中性子照射量が比較材と合わなかったため比較ができなかつたり、実験点が少なくて充分判断ができなかつた面もあるが、一般的にいって外国の照射例などと比較すると、良く合っているか、良い側に結果が出ているものが多いようである。外国との比較の際、照射量の測定値が問題となるが、例えば低合金鋼の照射結果などからみると、略妥当な中性子照射量と考えてよいように思える。

また試験結果より、今後の検討を要する事項なども判り、全体として有用なデータを得たものといえる。

これらは、鉄鋼協会関係者の長期に亘る協力の賜であり、心から感謝の意を表する次第である。また最後に、まとめを行なつて下さった下記の方々には、御多用中のところ検討・執筆下さり、有終の美を飾つていただいたものであることを付記して謝意を表する次第である。

執筆者名簿（敬称略、順不同）

長谷川正義	早稲田大学	中島 伸也	早稲田大学
薄田 寛	三菱重工業株式会社	安藤 智純	三菱重工業株式会社
佐納 次郎	"	下川 敏治	新日本製鐵株式会社
河野 誠治	新日本製鐵株式会社	寺沢 健	"
奥田 哲也	株式会社神戸製鋼所	梶 晴男	株式会社神戸製鋼所
本間 俊二	日本原子力研究所	渡辺 勝利	日本原子力研究所
野村 未雄	"	大内 信平	"
武田 純	"		

〔参考〕 日本鉄鋼協会内材料試験炉利用委員会名簿

(敬称略、順不同、所属は昭和43年当時)

沢田 進	日本鉄鋼協会	長谷川正義	早稲田大学
佐野 正之	早稲田大学	中島 伸也	"
大内 信平	日本原子力研究所	林 喬雄	日本原子力研究所
本間 傑二	"	藤村 理人	"
安藤 良夫	東京大学	井形 直弘	東京大学
美馬源次郎	大阪大学	幸田 成康	東北大大学
余田 陽一	八幡製鐵K.K	関 義良	三菱原子力工業K.K
水田三千雄	三菱原子力工業K.K	小林 猛	K.K 日本製鋼所
松本 浩樹	K.K 日本製鋼所	中川 昭	鈴木金属工業K.K
原田 憲二	日本金属工業K.K	深瀬 幸重	日本冶金工業K.K
正岡 功	K.K 日立製作所	小平 一丸	富士製鐵K.K
柿本頴太郎	富士製鐵K.K	応和 俊雄	神戸製鋼所
高寺 美慈	神戸製鋼所	林 忠雄	川崎製鐵K.K
松本 圭司	石川島播磨重工業	高橋 厚生	石川島播磨重工業
薄田 寛	三菱重工業K.K	富岡 敬之	神鋼鋼線鋼索K.K
田中 義人	神鋼鋼線鋼索K.K	近藤 豊	住友金属工業K.K
児玉 達朗	住友金属工業K.K	太田 幹二	日本钢管K.K
堀 二郎	日本ステンレスK.K	永井 信行	K.K 神戸製鋼所
奥田 哲也	K.K 神戸製鋼所	岩田 斎	住友電気工業K.K
笠松 利夫	住友電気工業K.K	藤井 健也	東京製鋼K.K
市毛 博	東京製鋼K.K		

参考文献

- (1) 鉄鋼の照射合同委員会編「原子炉圧力容器用ASTM A302B鋼の中性子照射に関する試験研究(昭和43年6月)」
- (2) 鉄鋼の照射合同委員会編「原子炉圧力容器用高張力鋼の中性子照射に関する試験研究(昭和43年6月)」
- (3) W.S.Pellini et al ; NRL Report 5780 (1962-4)
- (4) 鉄鋼照射試験研究合同委員会; 原子炉用 ASTM A302B鋼溶接部の中性子照射に関する研究(1968-6.)
- (5) F.A.Smidt, Jr., & L.E.Steele ; NRL Report 7310 (1971-1)
- (6) G.F.Carpenter et al ; Nuclear Science and Engineering (1964)
- (7) C.Z.Serpan, Jr. ; NRL 7405 (1972-7)
- (8) 日本原子力研究所; JAERI-memo 第2946号 (1967-12)
- (9) J.R.Hawthorne et al ; Welding Journal (1970-10)
- (10) H.Böhm et al ; Journal of Nuclear Materials Vol. 18, №3 (1966)
- (11) T.T.Claudson ; ASTM S.T. P. 426 (1967)
- (12) 日本溶接協会; 高速炉用ステンレス鋼に関する調査(第1報) 1969-8
- (13) R.E.Schreiber ; USAEC Report DP-579 (1961-9)
- (14) 日本溶接協会 原子力研究委員会; 高速炉ステンレス鋼に関する調査(1969-8), P. 94
- (15) 長谷川正義; 高速炉ステンレス鋼に関する調査 第Ⅱ報(1970-5) P. 84
- (16) 同上 P. 22
- (17) 同上 P. 32
- (18) 同上 第Ⅲ報(1972-12) P. 45
- (19) 同上 第Ⅳ報 P. 22
- (20) 同上 P. 25
- (21) 日本溶接協会 原子力研究委員会; 高速炉ステンレス鋼に関する調査(1969-8) P. 79
- (22) 同上, P. 82
- (23) 長谷川正義; 高速炉ステンレス鋼に関する調査 第Ⅴ報(1970-5), P. 34
- (24) 日本溶接協会 原子力研究委員会; 高速炉ステンレス鋼に関する調査(1969-8), P. 34
- (25) M.Kangilaski et al ; ASTM STP 457 (1969), P. 67
- (26) 日本溶接協会 原子力研究委員会; 高速炉ステンレス鋼に関する調査(1969-8), P. 40~45
- (27) 同上, P. 42

- (28) 長谷川正義；高速炉ステンレス鋼に関する調査 第Ⅱ報(1970-5), P. 32
- (29) 日本溶接協会 原子力研究委員会；高速炉ステンレス鋼に関する調査(1969-8),
P. 94
- (30) 鉄と鋼 59(1973) 2, P. 335