

FBR構造材料の物性値測定

— (その1) 各種圧延鋼板の物性値測定 —



1990年6月

区分変更	
変更後資料番号	PNC TN9410 90-094
決裁年月日	平成 10年 9月 29日

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

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

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

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

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



F B R 構造材料の物性値測定

— (その1) 各種圧延鋼板の物性値測定 —

木村英隆*¹, 菅谷 全*², 吉田英一*¹, 和田雄作*¹

要 旨

F B R (高速増殖炉) 原子炉容器や蒸気発生器, 配管等に用いられる構造材料の各種物性値は、F B R 設計の際に必要となる。そこで、本報告では次期 F B R 構造材料として候補に挙げられている以下の 6 鋼種 ;

S U S 3 0 4

S U S 3 1 6 (従来型)

F B R 構造用 S U S 3 1 6

S U S 3 2 1

2・1/4Cr-1Mo 鋼

Mod. 9Cr-1Mo 鋼 (ASTM A387-91)

の受入ままの実機圧延鋼材 (ミルヒート材) のそれぞれ 6 種の物性値 ;

比重

比熱

熱伝導率

熱膨張率

ヤング率

ポアソン比

を測定した結果をまとめた。なお、2・1/4Cr-1Mo 鋼と Mod. 9Cr-1Mo 鋼では、溶接後に行われる S R 処理 (残留応力除去のための熱処理) を施した試料も用意して各種物性値を測定し、結果を合わせてまとめた。 今後は、本報告と同鋼種の鍛造材、鋼管や溶接金属についても同様に各種物性値を測定し、物性値の設計基準値策定に資する予定である。

〔注意〕本報告は圧延鋼材のみの物性値測定結果をまとめたものであって、設計基準値ではない。

* 1 : 大洗工学センター 機器構造開発部 材料開発室, * 2 : 常陽産業(株)



NOT FOR PUBLICATION
PNCT8N9410 90-094
June, 1990

MEASUREMENTS OF PHYSICAL PROPERTIES OF FBR (FAST BREEDER REACTOR) STRUCTURAL MATERIALS
— <Part 1> Measurements of Physical Properties of the Rolled Steels —

Hidetaka Kimura*¹, Hitoshi Sugaya*², Eiichi Yoshida*¹ and Yusaku Wada*¹

A b s t r a c t

It is needed for FBR design to know physical properties of the structural materials that will be used for FBR-reactor vessels, -steam generators, and -pipes.

In this report, six types of steels that are noted as the structural materials for next steps of FBR are taken up. The six types of steels are as follows ;

SUS 304
SUS 316 (conventional)
FBR grade SUS316
SUS321
2·1/4Cr-1Mo steel
Mod. 9Cr-1Mo steel (ASTM A387-91).

Physical properties of the steels are measured on rolled plates made by mills.
The measured physical properties are as follows ;

Specific gravity
Specific heat
Thermal conductivity
Thermal expansion
Young's modulus
Poisson's ratio.

And also the same kinds of physical properties of S. R. (Stress Relieving) heat treated 2·1/4Cr-1Mo and Mod. 9Cr-1Mo steel plates are measured.

Measurement of the physical properties of forgings, pipes, and weld metals of selected types of steels of them will be also carried out in 1990 and all summarized data that will contain the results of this report will be used to determine the criteria design values of the physical properties for the next steps of FBR.

(Caution) This report only shows the measurement results of the physical properties of the rolled steel plates but doesn't give the design standards of the physical properties for the next steps of FBR.

*1 : Material Development Section, Systems & Components Division, Oarai Engineering Center..

*2 : Joyo Industry Co. Ltd.

目 次

1. まえがき	1
2. 供試材・測定項目	
2-1. 供試材	2
2-2. 測定項目	2
2-3. 試料形状・寸法	2
3. 測定方法	
3-1. 比重	8
3-2. 比熱	8
3-3. 熱伝導率	8
3-4. 熱膨張率	9
3-5. ヤング率	9
3-6. ポアソン比	10
4. 結果・考察	
4-1. 比重	15
4-2. 比熱	15
4-3. 熱伝導率	16
4-4. 熱膨張率	16
4-5. ヤング率	17
4-6. ポアソン比	17
5. まとめ	67
6. 謝辞	68

表 リ ス ト

表2-1. 供試材の化学成分	3
表2-2. 供試鋼受入時の最終熱処理と結晶粒度	3
表2-3. S R 熱処理および試験片採取位置・方向と物性値測定項目	4
表2-4. 各物性値の測定温度範囲（その1）	5
表2-5. 各物性値の測定温度範囲（その2）	6
表2-6. 物性値測定試験片の形状と寸法および測定方法	7
表4-1. 受入材の比重の測定結果（20℃）	18
表4-2. S R 処理後のフェライト鋼の比重測定結果（20℃）	18
表4-3. オーステナイト系ステンレス鋼の比熱の測定結果	20
表4-4. 2・1/4Cr-1Mo鋼の比熱の測定結果	21
表4-5. Mod. 9Cr-1Mo鋼の比熱の測定結果（その1）	22
表4-6. Mod. 9Cr-1Mo鋼の比熱の測定結果（その2）	23
表4-7. オーステナイト系ステンレス鋼の熱伝導率の測定結果	32
表4-8. フェライト鋼の熱伝導率の測定結果	32
表4-9. S R 処理後のフェライト鋼の熱伝導率の測定結果	33
表4-10. 熱膨張率の測定結果（その1）	40
表4-11. 熱膨張率の測定結果（その2）	40
表4-12. S R 処理後のフェライト鋼の熱膨張率の測定結果	41
表4-13. 熱膨張係数の測定結果（その1）	42
表4-14. 熱膨張係数の測定結果（その2）	42
表4-15. S R 処理後のフェライト鋼の熱膨張係数の測定結果	43
表4-16. オーステナイト系ステンレス鋼のヤング率の測定結果（その1）	56
表4-17. オーステナイト系ステンレス鋼のヤング率の測定結果（その2）	56
表4-18. オーステナイト系ステンレス鋼のヤング率の測定結果（その3）	57
表4-19. フェライト鋼のヤング率の測定結果	57
表4-20. S R 処理後のフェライト鋼のヤング率の測定結果	58
表4-21. ポアソン比の測定結果（20℃）	65
表4-22. S R 処理後のフェライト鋼のポアソン比の測定結果（20℃）	65

付表-1. 熱膨張係数のFBR原型炉「もんじゅ」設計基準値	69
付表-2. 熱膨張率のFBR原型炉「もんじゅ」設計基準値（熱膨張係数より算出）	70
付表-3. ヤング率のFBR原型炉「もんじゅ」設計基準値	71

図 リ ス ト

図3-1. 比熱測定用長崎 - 高木断熱熱量計	12
図3-2. 熱伝導率の測定方法	12
図3-3. 熱膨張率測定装置	13
図3-4. ヤング率の測定装置 (横振動法)	13
図3-5. ヤング率の測定装置 (ユース法)	14
図3-6. ストレインゲージによる ε_1 (または ε_2) の測定回路	14
図4-1. 比重の測定結果 (20°C)	19
図4-2. SUS 304 の比熱の測定結果	24
図4-3. SUS 316 の比熱の測定結果	25
図4-4. FBR 構造用 SUS 316 の比熱の測定結果	26
図4-5. SUS 321 の比熱の測定結果	27
図4-6. 2・1/4Cr-1Mo 鋼の比熱の測定結果 (その 1)	28
図4-7. 2・1/4Cr-1Mo 鋼の比熱の測定結果 (その 2)	29
図4-8. Mod. 9Cr-1Mo 鋼の比熱の測定結果 (その 1)	30
図4-9. Mod. 9Cr-1Mo 鋼の比熱の測定結果 (その 2)	31
図4-10. SUS 304 の熱伝導率の測定結果	34
図4-11. SUS 316 の熱伝導率の測定結果	35
図4-12. FBR 構造用 SUS 316 の熱伝導率の測定結果	36
図4-13. SUS 321 の熱伝導率の測定結果	37
図4-14. 2・1/4Cr-1Mo 鋼の熱伝導率の測定結果	38
図4-15. Mod. 9Cr-1Mo 鋼の熱伝導率の測定結果	39
図4-16. SUS 304 の熱膨張率 (%) の測定結果	44
図4-17. SUS 316 の熱膨張率 (%) の測定結果	45
図4-18. FBR 構造用 SUS 316 の熱膨張率 (%) の測定結果	46
図4-19. SUS 321 の熱膨張率 (%) の測定結果	47
図4-20. 2・1/4Cr-1Mo 鋼の熱膨張率 (%) の測定結果	48
図4-21. Mod. 9Cr-1Mo 鋼の熱膨張率 (%) の測定結果	49
図4-22. SUS 304 の熱膨張係数 ($^{\circ}\text{C}^{-1}$) の測定結果	50
図4-23. SUS 316 の熱膨張係数 ($^{\circ}\text{C}^{-1}$) の測定結果	51

図4-24. FBR構造用SUS316の熱膨張係数($^{\circ}\text{C}^{-1}$)の測定結果	52
図4-25. SUS321の熱膨張係数($^{\circ}\text{C}^{-1}$)の測定結果	53
図4-26. 2・1/4Cr-1Mo鋼の熱膨張係数($^{\circ}\text{C}^{-1}$)の測定結果	54
図4-27. Mod.9Cr-1Mo鋼の熱膨張係数($^{\circ}\text{C}^{-1}$)の測定結果	55
図4-28. SUS304のヤング率の測定結果	59
図4-29. SUS316のヤング率の測定結果	60
図4-30. FBR構造用SUS316のヤング率の測定結果	61
図4-31. SUS321のヤング率の測定結果	62
図4-32. 2・1/4Cr-1Mo鋼のヤング率の測定結果	63
図4-33. Mod.9Cr-1Mo鋼のヤング率の測定結果	64
図4-34. ポアソン比の測定結果(20 $^{\circ}\text{C}$)	66

1. まえがき

FBR構造材料の比重、比熱、熱伝導率、熱膨張率、ヤング率、ポアソン比などの物性値はFBR構造体の設計や研究の際に必要となる。(例えば、Na流温度の変化時の構造体の温度分布やそれともなう熱応力分布の解析等には物性値が不可欠である。)現在、次期FBR構造材料としてSUS304、SUS316(従来型)、FBR構造用SUS316、SUS321、2・1/4Cr-1Mo鋼、Mod.9Cr-1Mo鋼が候補に挙がっているが、これら材料の物性値の取得は必ずしも充分に行われていない。そこで、本報告では各鋼種の実機圧延材の受入ままのものと2・1/4Cr-1Mo、Mod.9Cr-1Mo鋼ではSR処理*)を施したのも用意して物性値を測定して結果をまとめた。全鋼種とも1/2-t(板厚中心)、L方向(圧延方向)の物性値を測定したが、SUS304、FBR構造用SUS316、Mod.9Cr-1Mo鋼では1/4-t(板厚1/4の位置)、L方向、C方向(板幅方向)の物性値も測定して採取位置・方向による物性値の差異の有無を確かめた。

なお、今後、本報告と同一鋼種の鍛造材や鋼管、溶接金属の各種物性値も取得して各物性値の設計基準値の策定に資する予定である。

*) フェライト鋼の溶接金属のマルテンサイトまたはベイナイト組織をフェライト+炭化物の金属組織に変えて低温靱性を向上させるとともに、溶接部付近母材の残留応力を除去するために行う溶接後の熱処理のこと。ここでは、740°C8.4h保持後空冷を採用した。なお、本供試材には溶接材は含まれていない。母材にSR処理したものをを用いた。

2. 供試材・測定項目

2-1. 供試材

本報告では表2-1, 2-2に示される実機圧延材6鋼種を用いた。これら6鋼種(SUS304, SUS316, FBR構造用SUS316, SUS321, 2・1/4Cr-1Mo鋼 Mod.9Cr-1Mo鋼)は現在、次期FBR構造材料として候補に挙げられている。

6鋼種とも受入ままのものを物性値測定に供した。すなわち、オーステナイト系ステンレス鋼(SUS304, SUS316, FBR構造用SUS316, SUS321)は溶体化ままで、フェライト系低合金鋼(2・1/4Cr-1Mo鋼 Mod.9Cr-1Mo鋼)は焼入れ+焼戻しままで供した。

また、2・1/4Cr-1Mo鋼およびMod.9Cr-1Mo鋼はSR処理(740℃ 8.4h A.C.)を施したものについても用意し、物性値測定に供した。

2-2. 測定項目

物性値として、比重, 比熱, 熱伝導率, 熱膨張率, ヤング率, ポアソン比の6項目を測定した。表2-3に示されるように各鋼種とも1/2-t, L方向(板厚中心, 圧延方向)の物性値を測定したが、SUS304, FBR構造用SUS316, Mod.9Cr-1Mo鋼では、供試材の採取位置や方向によるばらつきを見るために、1/4-t, L方向(板厚1/4の位置, 圧延方向)および一部の物性値は1/4-t, C方向(板厚1/4の位置, 板幅方向)についても測定を行った。

なお、各物性値の測定温度範囲については表2-4, 2-5に示したように、比熱, 熱伝導率, 熱膨張率は室温~800(1000)℃、ヤング率は室温~600℃、比重, ポアソン比は室温である。

2-3. 試料形状・寸法

各物性値測定試験片の形状と寸法を表2-6に示す。ここで、比熱, 熱膨張率, ヤング率, ポアソン比の測定試験片では長手方向にそれぞれの性質を測定することになるため、各試料はL(試験片長手方向が圧延方向に平行)または、C(試験片長手方向が板幅方向に平行)とそれぞれ採取方向を指定した。

また、板厚位置による性質の違いを調べるために、試験片の長手方向を圧延面と平行に(平板状の試験片では面積の最も大きい面が圧延面と平行に)なるようにして、それぞれ指定した板厚位置から採取した。

表2-1. 供試材の化学成分 Chemical compositions of steels used (wt.%)

No.	Type	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Nb	V	Al	N	O
A7	SUS304	0.05	0.60	0.87	0.026	0.002	8.94	18.59	—	—	0.05	0.015	0.0220	0.0048
B5	SUS316	0.06	0.58	0.86	0.025	0.002	12.40	16.60	2.22	—	—	—	0.0225	0.0036
B7	FBR SUS316	0.012	0.52	0.86	0.024	0.004	10.59	16.58	2.14	—	0.05	0.01	0.0793	0.0039
C7	SUS321	0.07	0.57	1.51	0.028	0.003	10.50	17.30	—	—	0.06	0.030	0.006	0.0018
D7	2-1/4Cr-1Mo	0.15	0.28	0.55	0.011	0.005	0.14	2.38	0.98	—	0.01	0.022	0.0103	0.0019
F10	Mod. 9Cr-1Mo	0.09	0.24	0.44	0.004	0.001	0.04	8.76	0.94	0.08	0.21	0.011	0.0536	—

[* B7 (FBR SUS316) : FBR grade SUS316 ; Low carbon medium nitrogen and phosphorus added type of SUS316 steel.,
C7 (SUS321) : Ti 0.49wt.%, (Mod. 9Cr-1Mo) : ASTM A387-91 steel.]

表2-2. 供試鋼受入時の最終熱処理と結晶粒度 Last heat treatments and JIS grain size numbers of steel sheets used (as received)

No.	Type	Maker	Heat No.	Thickness	Last Heat Treatment	GSN
A7	SUS304	Nippon Steel Corp.	N9482	40 mm	1100°C 48min Water Cooled	4.5
B5	SUS316	Nippon Steel Corp.	D4905	25 mm	1100°C 30min Water Cooled	5.5
B7	FBR SUS316	Nippon Steel Corp.	N9490	50 mm	1050°C 30min Water Cooled	6.0
C7	SUS321	Sumitomo Metal Industries, Ltd.	A242905	12 mm	1130°C 45min Water Cooled	8.5
D7	2-1/4Cr-1Mo	The Japan Steel Works, Ltd.	81C625-3-1/8	30 mm	930°C 205min A.C. + 720°C 325min A.C.	8.0
F10	Mod. 9Cr-1Mo	Nippon Steel Corp.	SJ6003	40 mm	1060°C 60min A.C. + 760°C 60min A.C.	10.0

[* GSN : Grain size number (JIS), A.C. : Air cooled]

表2-3. S R熱処理および試験片採取位置・方向と物性値測定項目
 SR heat treatment and sampling position (and direction) of specimens, and measured physical properties.

鋼種 Type of steel	S R熱処理 S R heat treatment	採取位置・方向 sampling position and direction	比重 Specific gravity	比熱 Specific heat	熱伝導率 Thermal conductivity	熱膨張率 Thermal expansion	ヤング率 Young's modulus	ポアソン比 Poisson's ratio
SUS304	No SR h. t.	1/2-t. L	○	○	○	○	○	○
		1/4-t. L	○	○	○	○	○	○
		1/4-t. C	—	—	—	○	○	○
SUS316	No SR h. t.	1/2-t. L	○	○	○	○	○	○
FBR grade SUS316	No SR h. t.	1/2-t. L	○	○	○	○	○	○
		1/4-t. L	○	○	○	○	○	○
		1/4-t. C	—	—	—	○	○	○
SUS321	No SR h. t.	1/2-t. L	○	○	○	○	○	○
2・¼Cr-1Mo	No SR h. t.	1/2-t. L	○	○	○	○	○	○
	740°C 8.4h AC	1/2-t. L	○	○	○	○	○	○
Mod. 9Cr-1Mo	No SR h. t.	1/2-t. L	○	○	○	○	○	○
		1/4-t. L	○	○	○	○	○	○
		1/4-t. C	—	—	—	○	○	○
	740°C 1h AC	1/2-t. L	○	○	○	○	○	○
		1/2-t. L	○	○	○	○	○	○
	740°C 8.4h AC	1/4-t. L	○	○	○	○	○	○
		1/4-t. C	—	—	—	○	○	○

* L: 圧延方向 Longitudinal direction parallel to rolling direction. C: 板幅方向 Transverse direction

○: Measured, —: Not measured

SR heat treatment: Stress relieving heat treatment; which is done usually for ferritic steels to relieve residual welding stress.

表2-4. 各物性値の測定温度範囲 (その1)
 Temperature range of physical property measurement (Part 1)

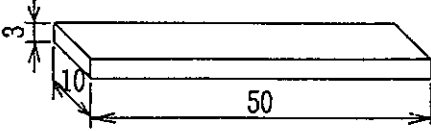
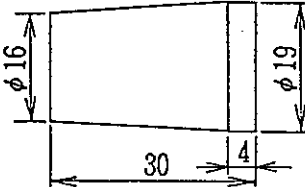
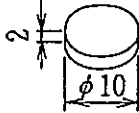
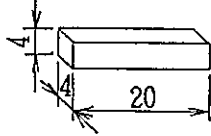
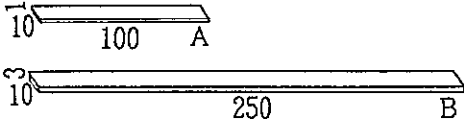
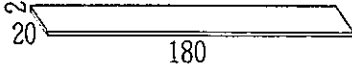
物性 Physical properties	鋼種 Type of steel	As received	740°C 1h AC	740°C 8.4h AC
比重 Specific gravity	SUS304	R. T.	—	—
	SUS316	R. T.	—	—
	FBR SUS316	R. T.	—	—
	SUS321	R. T.	—	—
	2-1/4Cr-1Mo	R. T.	R. T.	—
	Mod. 9Cr-1Mo	R. T.	R. T.	R. T.
比熱 Specific heat	SUS304	R. T. ~ 800°C	—	—
	SUS316	R. T. ~ 800°C	—	—
	FBR SUS316	R. T. ~ 800°C	—	—
	SUS321	R. T. ~ 800°C	—	—
	2-1/4Cr-1Mo	R. T. ~ 865°C	R. T. ~ 865°C	—
	Mod. 9Cr-1Mo	R. T. ~ 875°C	R. T. ~ 875°C	R. T. ~ 875°C
熱伝導率 Thermal conductivity	SUS304	R. T. ~ 800°C	—	—
	SUS316	R. T. ~ 800°C	—	—
	FBR SUS316	R. T. ~ 800°C	—	—
	SUS321	R. T. ~ 800°C	—	—
	2-1/4Cr-1Mo	R. T. ~ 800°C	R. T. ~ 800°C	—
	Mod. 9Cr-1Mo	R. T. ~ 800°C	R. T. ~ 800°C	R. T. ~ 800°C
熱膨張率 Thermal expansion	SUS304	R. T. ~ 800°C	—	—
	SUS316	R. T. ~ 800°C	—	—
	FBR SUS316	R. T. ~ 800°C	—	—
	SUS321	R. T. ~ 800°C	—	—
	2-1/4Cr-1Mo	R. T. ~ 800°C	R. T. ~ 1000°C	—
	Mod. 9Cr-1Mo	R. T. ~ 800°C	R. T. ~ 1000°C	R. T. ~ 1000°C

表2-5. 各物性値の測定温度範囲 (その2)
 Temperature range of physical property measurement (Part 2)

物性 Physical properties	鋼種 Type of steel	As received	740°C 1h AC	740°C 8.4h AC
ヤング率 Young's modulus 振動法 Vibration method	SUS304	R. T. ~ 600°C	—	—
	SUS316	R. T. ~ 600°C	—	—
	FBR SUS316	R. T. ~ 600°C	—	—
	SUS321	R. T. ~ 600°C	—	—
	2・1/4Cr-1Mo	R. T. ~ 600°C	R. T. ~ 600°C	—
	Mod. 9Cr-1Mo	R. T. ~ 600°C	R. T. ~ 600°C	R. T. ~ 600°C
ヤング率 Young's modulus ユーイング法 Ewing method	SUS304	R. T. ~ 300°C	—	—
	SUS316	R. T. ~ 300°C	—	—
	FBR SUS316	R. T. ~ 300°C	—	—
	SUS321	R. T. ~ 300°C	—	—
	2・1/4Cr-1Mo	—	—	—
	Mod. 9Cr-1Mo	—	—	—
ポアソン比 Poisson's ratio	SUS304	R. T.	—	—
	SUS316	R. T.	—	—
	FBR SUS316	R. T.	—	—
	SUS321	R. T.	—	—
	2・1/4Cr-1Mo	R. T.	R. T.	—
	Mod. 9Cr-1Mo	R. T.	R. T.	R. T.

* R. T. : Room temperature

表2-6. 物性値測定試験片の形状と寸法および測定方法
 Shapes and sizes of specimens to measure the physical properties and measuring methods

物性 Physical properties	試験片の寸法と大きさ Shape and size of specimen (mm)	測定方法 Measuring method
比重 Specific gravity		アルキメデスの原理 天秤法 Archimedean balance method
比熱 Specific heat		高木-長崎 断熱熱量計法 Takagi-Nagasaki adiabatic calorimeter method
熱伝導率 Thermal conductivity		レーザーフラッシュ法 Laser flush method
熱膨張率 Thermal expansion		石英押棒式変位検出法 Displacement detecting method with quartz push bar
ヤング率 Young's modulus		A : 横振動法 Vibration method B : ユーイング法 Ewing method
ポアソン比 Poisson's ratio		クロスゲージ法 Cross gage method

3. 測定方法

3-1. 比重

アルキメデスの原理を用いて天秤法により測定した。

試料の空気中の重さを M 、 $t^{\circ}\text{C}$ での水中の重さを W 、 $t^{\circ}\text{C}$ の水の比重を ρ_t 、試料の体積を V 、同体積の $t^{\circ}\text{C}$ の水の重さを M' 、求める試料の比重を S とすると、

$$V = M / S = M' / \rho_t, \quad M' = M - W$$

であるから、

$$S \cdot M' = M \cdot \rho_t$$

$$\therefore S = M \rho_t / M' = M \cdot \rho_t / (M - W)$$

ここで、

$$\rho_{20} = 0.9982 \quad (\rho_4 = 1)$$

であるので、 $t = 20^{\circ}\text{C}$ における試料の空気中での重さ M と、水中での重さ W を測定して、 S を求めた。

3-2. 比熱

図3-1 に構造を示した長崎-高木の方法に基づく断熱熱量計を用いて測定した。

試料を試料ホルダー内蔵ヒーターで定電力 W で加熱昇温しつつ、試料とその外側の断熱容器との温度差が零になるように外側の断熱容器側のヒーター電流をコントロールしてゆく。

このような断熱状態で試料温度が $\Delta\theta$ 上昇するのに Δt の時間がかかるとき、質量 M の定圧比熱 C_p は、試料ホルダーの熱容量を $M' \cdot C_p'$ （あらかじめ測定）とすれば、

$$W \cdot \Delta t = (M \cdot C_p + M' \cdot C_p') \cdot \Delta \theta$$

$$\therefore C_p = (W \cdot \Delta t) / (M \cdot \Delta \theta) - M' \cdot C_p' / M$$

と求まる。

3-3. 熱伝導率

レーザー・フラッシュ法熱定数測定装置を用いて測定した。

図3-2 に示すように厚さ L の平板状試料の表面に一様に、レーザー光を照射すると、図示されるように時間とともに試料の裏面温度は上昇する。試料が断熱状態に保たれているとき、熱伝導方程式を解くと、熱拡散率 α は、
$$\alpha = (1.37 \cdot L^2) / (\pi^2 \cdot t^{1/2})$$

と求まる。熱伝導率 K は、熱拡散率 α と別途測定した熱容量 $M \cdot C_p$ を用いて次式から求まる。

$$K = \alpha \cdot M \cdot C_p$$

3-4. 熱膨張率

押棒式の変位検出計を用いて測定した。図3-3 に示すように、温度変化にともなう試料の伸びを石英製の検出棒で差動トランスに伝えて測定した。なお、支持管には検出棒と同じ石英製のものを用い、電気炉の均熱帯内外の検出棒の伸びを相殺した。したがって、差動トランスには試料の熱膨張による伸びと、支持管の試料の同じ長さの部分の熱膨張の伸びの差が検出されることになる。

いま、 t_0 °Cのときの長さが l_0 の試料および検出棒材が温度が t_0 °Cから t °Cに変化したときのそれぞれの伸びを Δl 、 $\Delta l'$ とし、 $t_0 \sim t$ °C間の試料および検出棒材の平均線膨張係数をそれぞれ β 、 β' とすると、

$$\Delta l = l_0 \beta (t - t_0)$$

$$\Delta l' = l_0 \beta' (t - t_0)$$

$t_0 \sim t$ °C間で測定される試料側の全体伸びとリファレンス材側の全体伸びの差 Δl_{obs} は、

$$\begin{aligned} \Delta l_{\text{obs}} &= \Delta l - \Delta l' \\ &= l_0 (\beta - \beta') (t - t_0) \end{aligned}$$

よって、試料の $t_0 \sim t$ °C間の熱膨張率は、

$$\begin{aligned} \Delta l / l_0 &= (\Delta l_{\text{obs}} + \Delta l') / l_0 \\ &= \Delta l_{\text{obs}} / l_0 + \beta' (t - t_0) \end{aligned}$$

また、試料の $t_0 \sim t$ °C間の線膨張係数 β は、

$$\beta = \Delta l_{\text{obs}} / \{l_0 (t - t_0)\} + \beta'$$

ここで、検出棒材（リファレンス材）の石英の線膨張係数 β' は、 5.6×10^{-7} （室温～）であるのに対し、オーステナイト系鋼のそれは $1.5 \sim 2.0 \times 10^{-5}$ （室温～850 °C）、フェライト系鋼のそれは $1.0 \sim 1.5 \times 10^{-5}$ （室温～700 °C）であるので、ここでは試料の熱膨張率、線膨張係数 β ではそれぞれ第二項を無視できる。したがって、

$$\begin{aligned} \Delta l / l_0 &= \Delta l_{\text{obs}} / l_0 \\ \beta &= \Delta l_{\text{obs}} / \{l_0 (t - t_0)\} \end{aligned}$$

と求まる。

3-5. ヤング率

ヤング率については、室温から600 °Cまで横振動法で測定したが、合わせてオーステナイト系鋼の室温から300 °Cまでは静的法であるユースイング法による測定も行った。

(1) 横振動法

図3-4 に示す装置を用い、共振周波数を調べてヤング率を求めた。真空中試験片に200～2000 Hzの強制振動を与え、共振周波数を電氣的に検出した値を f とすると、

$$f = (m^2 / 2 \pi \ell^2) \cdot (E I / S \rho)^{1/2}$$

が成り立つ。ここで、 m ：定数（試験機の支え方，振動の次数による。基準振動の場合は4.730）， ℓ ：試料長さ， E ：ヤング率， I ：横断面の慣性能率 N ， S ：断面積， ρ ：密度
これにより E を求めると、

$$E = 0.96535 \times 10^{-8} (\ell / a)^3 \cdot M f^2 / b$$

ただし、

E ：ヤング率 (kgf/mm²)

ℓ ：試料長さ (cm)

a ：試料厚さ (cm)

b ：試料幅 (cm)

M ：試料質量 (g)

f ：共振周波数 (Hz)

したがって、 ℓ ， a ， b ， M ， f を測定することにより E が求まる。

(2) ユーイング法（静的法）

平板棒状試験片の三点曲げ試験を行って負荷とたわみ量から求めた。

図3-5 に示すように、距離 ℓ をおいてナイフエッジA，Bの上に厚さ d ，幅 b の平板状試料を水平に置き中央に重さ W の錘を吊り下げたとき、ヤング率 E は次式で表される。

$$E = (\ell^3 W) / (4 d^3 b h)$$

ただし、

E ：ヤング率 (kgf/mm²)

ℓ ：試料長さ (mm)

a ：試料厚さ (mm)

b ：試料幅 (mm)

W ：錘の重さ (kgf)

h ：中央の降下量 (mm)

h は差動トランスで検出され、上式により E が求まる。

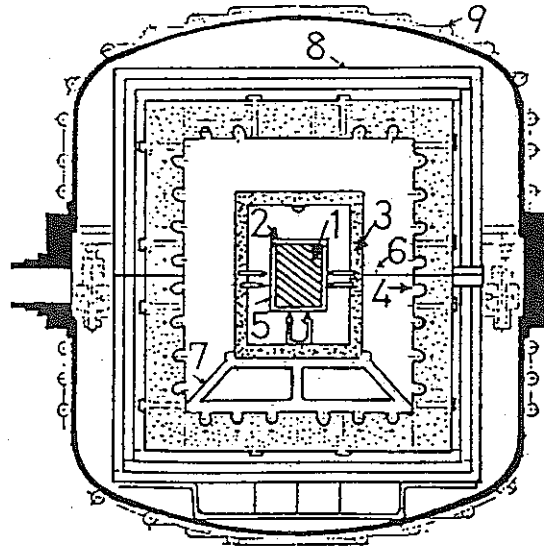
3-6. ポアソン比

平板状引張試験片に cross strain gauge を貼付して引張軸方向と引張軸に垂直な方向の歪を測定し、その結果から算出した。引張軸方向の歪 ε_1 と引張軸に垂直な方向の歪 ε_2 を求めれば、ポアソン比 ν は、

$$\nu = \varepsilon_2 / \varepsilon_1$$

と求まる。なお、図3-6 に示すように試験片の曲がりによる影響を補正するため、試験片の裏

表に cross strain guage を貼付し、引張軸方向および引張軸に垂直な方向の strain guage
どうしをそれぞれ直列に接続した。



- | | |
|--------------------------|---|
| 1. 試料 Specimen | 2. 試料ホルダ Specimen holder |
| 3. 断熱容器 Adiabatic vessel | 4. 外部ヒータ Outer heater |
| 5. 内部ヒータ Inner heater | 6. 断熱制御用熱電対
Thermocouple for adiabatic control |
| 7. スペース Spacer | 8. 遮熱板 Thermal isolator |
| 9. ベルジア Bell jar | |

図3-1. 比熱測定用長崎-高木断熱熱量計
Nagasaki-Takagi adiabatic calorimeter
for specific heat measurement

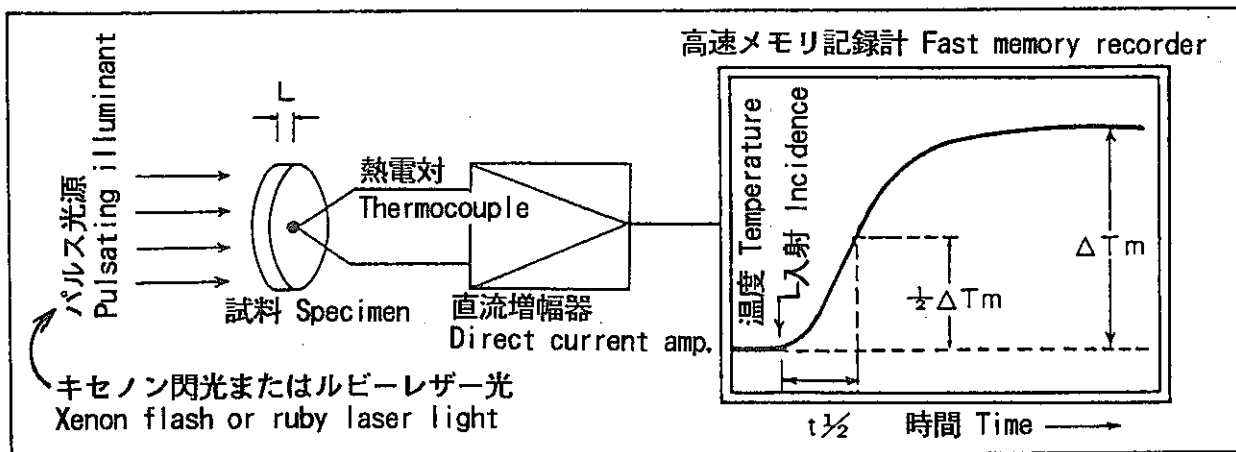
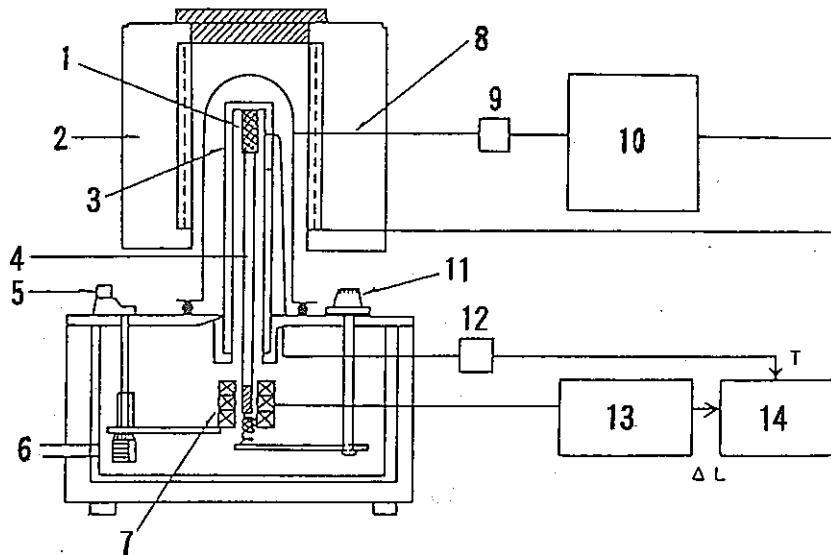
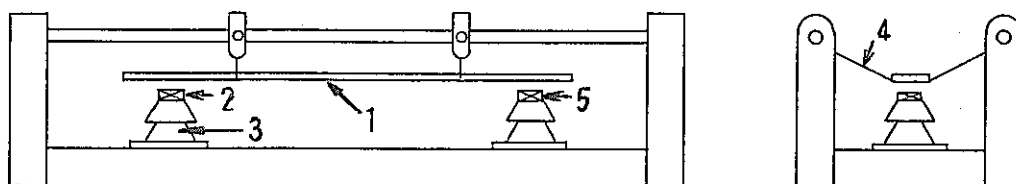


図3-2. 熱伝導率の測定方法
Measuring method of thermal conductivity



- | | |
|--|--|
| 1. 試料 Specimen | 2. 電気炉 Electric furnace |
| 3. 石英製支持管
Support tube made of quartz | 4. 石英製検出棒
Detector bar made of quartz |
| 5. 較正用ダイヤル Calibration dial | 6. 真空引口 Vacuum port |
| 7. 差動変圧器 Differential transformer | 8. 熱電対 Thermocouple |
| 9. 冷接点 Cold junction | 10. プログラム温度制御器
Programed thermal controller |
| 11. 測定圧調整ダイヤル
Pressure control dial of detector bar | 12. 冷接点補償器
Cold junction compensator |
| 13. 熱膨張回路 Thermal expansion circuit | 14. 2ペン記録計
Recorder with two pens |

図3-3. 熱膨張率測定装置 Measuring equipment of thermal expansion



- | | |
|---------------------------------|--|
| 1. 試料 Specimen | 2. 励振電極 Electrode for excitation |
| 3. 検出電極 Electrode for detection | 4. $\phi 50\text{mm}$ 吊り線 50mm dia. string |
| 5. 碍子 Insulator | |

図3-4. ヤング率の測定装置 (横振動法)
Measuring equipment of Young's modulus (Method of vibration)

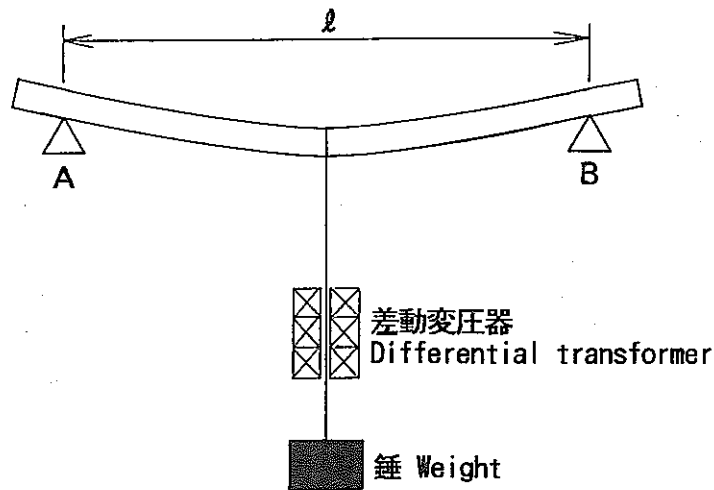
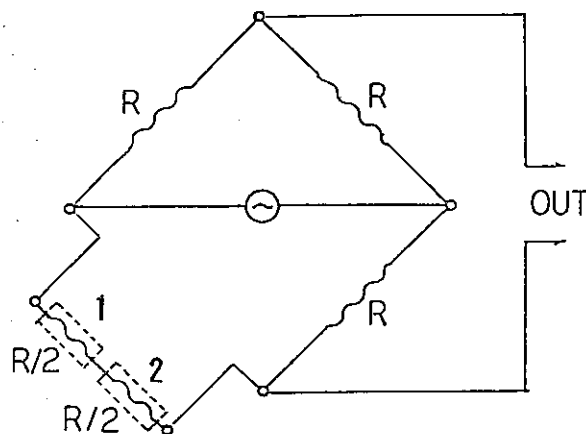


図3-5. ヤング率の測定装置 (ユーイング法)
 Measuring equipment of Young's modulus (Method of Ewing)



1. 試料表のストレインゲージ Strain gauge on one side of specimen
2. 試料裏のストレインゲージ Strain gauge on the opposite side of specimen

図3-6. ストレインゲージによる ϵ_1 (または ϵ_2) の測定回路
 Measuring circuit of ϵ_1 (or ϵ_2) with strain gauges

4. 結果・考察

4-1. 比重

各受入材の比重測定結果（室温）を表4-1 に、S R 処理後のフェライト鋼の比重測定結果（室温）を表4-2 に示す。また、結果をまとめて棒グラフにしたものを図4-1 に示す。

オーステナイト系ステンレス鋼（SUS304, SUS316, FBR SUS316, SUS321）は、フェライト鋼（2・1/4Cr-1Mo鋼, Mod. 9Cr-1Mo鋼）に比べてやや高い比重を持つ。なお、SUS304, FBR構造用 SUS316, Mod. 9Cr-1Mo鋼では採取位置や方向による比重の変化は認められなかった。また、S R 処理前後でフェライト鋼の比重に変化が認められなかった。

4-2. 比熱

オーステナイト鋼の比熱測定結果を表4-3 に、2・1/4Cr-1Mo鋼のS R 処理前後の比熱測定結果を表4-4 に示す。また、Mod. 9Cr-1Mo鋼のS R 処理前後の比熱測定結果を表4-5, 4-6 に示す。さらに、各鋼種ごとに測定結果をグラフ化したものを図4-2 ~4-9 に示す。

オーステナイト鋼では温度上昇とともに、各鋼種とも比熱が0.11~0.14(cal/g・°C)程度の間を比較的ゆるやかに上昇して行くが、500~550°C付近でいったん谷を持つ。このような現象はNi やMo を含むオーステナイトステンレス鋼で観察されることが知られており、その原因はNi やMo などの溶質原子が rich zoneあるいは cluster（析出の前兆的な現象）を生じるためであると考えられている¹⁾。

フェライト鋼では2鋼種とも温度上昇とともに比熱が上昇してゆくが、720~750°C付近でいったんピークを持つ。これは、温度を上昇させていったときに強磁性から常磁性に磁気変態を起こすために（この磁気変態点がキュリー温度）、生じると考えられる。続いて820~850°C付近でさらに大きなピークを生じる。これは、相が $\alpha \rightarrow (\alpha + \gamma) \rightarrow \gamma$ と変態（結晶構造が体心立方構造の α 相から面心立方構造の γ 相へ変態）を起こしてゆくために、C, Nの固溶度が不連続的に大きくなり、炭窒化物が分解してC, Nが母相に固溶してゆく際に生じた比熱ピークであると考えられる。（純鉄では磁気変態による異常比熱すなわち比熱のピークが観測されるが、相変態による比熱のピークは観察されない²⁾。したがって、ここで見られた第二の異常比熱は相変態そのものによるものではなく、相変態にともなう炭化物の溶解に起因すると考えられる。）

〔参考文献〕1)：長谷川正義 監修，「ステンレス鋼便覧」，日刊工業新聞社，(1973)，p.109.

2)：日本物理学会編，「金属の物理的性質」，裳華房，(1968)，p.266.

なお、フェライト鋼で見られた第二の異常比熱が生じる温度域と、4-4項で示されるフェライト鋼の熱膨張率の異常が生じる温度域とは一致しており、両者の原因がともに $\alpha \rightarrow (\alpha + \gamma) \rightarrow \gamma$ 変態によるものであることを示唆している。

SUS304, FBR構造用SUS316, Mod.9Cr-1Mo鋼では採取位置や方向による比熱の変化は認められなかった。また、SR処理前後でフェライト鋼の比熱に変化が認められなかった。

4-3. 熱伝導率

オーステナイト鋼およびフェライト鋼の熱伝導率測定結果をそれぞれ表4-7, 4-8に示す。また、SR処理後のフェライト鋼の測定結果を表4-9に示す。さらに、各鋼種ごとに測定結果をグラフ化したものを図4-10~4-15に示す。

オーステナイト鋼4鋼種は測定した各温度で互いにほぼ同じ値をとり、温度上昇とともに単調に上昇してゆく。一方、フェライト鋼2鋼種の熱伝導率はオーステナイト鋼よりも高い値をとるが、値が最大となる温度(200 ~ 300℃)があり、その温度以上では単調に下降してゆく。その結果、800℃以上ではオーステナイト鋼の方がフェライト鋼よりも熱伝導率が高くなる傾向を示す。

なお、各鋼種とも採取位置やSR処理による変動は小さかった。ただし、Mod.9Cr-1Mo鋼ではSR処理によってやや値が増加する傾向が見られた。

4-4. 熱膨張率

受入材の熱膨張率測定結果を表4-10, 4-11に示す。また、SR処理後のフェライト鋼の測定結果を表4-12に示す。各鋼種ごとに測定結果をグラフ化したものを図4-16~4-21に示す。

さらに、熱膨張率から算出した熱膨張係数を同様に表4-13~4-15に示す。また、グラフ化したものを図4-22~4-27に示す。

なお、比較のために熱膨張係数の「もんじゅ」設計基準値³⁾(SUS304, 316, 321用と2・1/4Cr-1Mo鋼用の2種類)とそれから算出した熱膨張率とを実線でそれぞれ対応するグラフに書き入れた。

オーステナイト鋼4鋼種の熱膨張率は測定した各温度で互いにほぼ同じ値をとり、温度上昇とともに単調に上昇してゆく。一方、フェライト鋼2鋼種の熱膨張率はオーステナイト鋼よりも低い値をとり、800℃までは単調に上昇するが、SR処理を行った試料で1000℃まで測定を続けたところ、820 ~ 860℃付近で急激に試料が収縮し、その温度以上では前よりも急な傾斜で熱膨張してゆくのが見られた。これは、フェライト鋼が820 ~ 860℃付近以上で $\alpha \rightarrow (\alpha + \gamma) \rightarrow \gamma$ の相変態を起こして、結晶構造がBCC(体心立方格子)からより稠密なFCC(面心立方格子)へと変わってゆくために試料の体積が減少したためである。

なお、4-2項で述べたように、フェライト鋼は鋼種ごとに比熱ピーク（大きい方のピーク）と熱膨張率が異常を示す温度域が一致している。

また、採取位置や採取方向、SR処理による変動は認められなかった。

「もんじゅ」設計基準値との比較では、オーステナイトステンレス鋼の熱膨張係数の低温側でやや差が見られるものの、熱膨張率に換算して比較するとその差は非常に小さいことがわかった。

4-5. ヤング率

受入材のヤング率測定結果を表4-16～4-19に示す。また、SR処理後のフェライト鋼の測定結果を表4-20に示す。各鋼種ごとに測定結果をグラフ化したものを図4-28～4-33に示す。

なお、比較のためにヤング率の「もんじゅ」設計基準値³⁾（SUS304, 316, 321用と 2・1/4Cr-1Mo鋼用の2種類）を実線でそれぞれ対応するグラフに書き入れた。

各鋼種とも温度の上昇とともにヤング率は単調に低下する。オーステナイト鋼6鋼種間では大きな差はなく、フェライト鋼2鋼種どうしても差は小さいが、測定温度全域でフェライト鋼の方がオーステナイト鋼よりも大きな値を示す。

なお、採取位置や採取方向、SR処理による変動は小さかったが、SUS316を除いてオーステナイト鋼で用いたユーイング法と振動法から得られた結果にはやや差異が認められた。原因は明らかではない。

また、「もんじゅ」設計基準値との比較では、オーステナイト鋼の振動法による実測値は基準値よりも約5%程小さかったが、原因は明らかではない。

4-6. ポアソン比

受入材の20℃でのポアソン比測定結果を表4-21に、SR処理後のフェライト鋼の20℃測定結果を表4-22に示す。また、まとめて棒グラフにしたものを図4-34に示す。SUS321が他の鋼種よりもやや小さい値を示すが鋼種や採取位置、採取方向、SR処理による変動は小さい。

〔参考文献〕3)：PNC N241 84-08(2)，高速原型炉高温構造設計方針 材料強度基準等，(1984)。

および、PNC SN241 84-14，解説 高速原型炉高温構造設計方針，(1984)。

表4-1. 受入材の比重の測定結果 (20°C)
Measurement results of specific gravity
at 20 °C (as received)

Type of steel	Position & direction	Specific gravity
SUS304	1/2-t, L	7.902
	1/4-t, L	7.903
SUS316	1/2-t, L	7.968
FBR SUS316	1/2-t, L	7.967
	1/4-t, L	7.968
SUS321	1/2-t, L	7.897
2-1/4Cr-1Mo	1/2-t, L	7.841
Mod. 9Cr-1Mo	1/2-t, L	7.777
	1/4-t, L	7.777

L : Longitudinal direction (Rolling direction)
of steel plates

表4-2. S R処理後のフェライト鋼の比重測定結果 (20°C)
Measurement results of specific gravity
of S.R. heat treated ferritic steels at 20°C

Type of steel	Position & direction	S.R. heat treatment	Specific gravity
2-1/4Cr-1Mo	1/2-t, L	740°C 8.4h A.C.	7.843
Mod. 9Cr-1Mo	1/2-t, L	740°C 1h A.C.	7.779
		740°C 8.4h A.C.	7.778
	1/4-t, L	740°C 8.4h A.C.	7.776

S.R. : Stress relieving (S.R. heat treatment is done usually for ferritic steels to relieve residual welding stress and to transform martensite phase of weld metal into ferrite plus carbide phase. In this report, S.R. heat treatments are done on the steel plates but not on weldments to know whether S.R. heat treatments influence physical properties of ferritic steel parent metals or not.)

A.C. : Air cooling

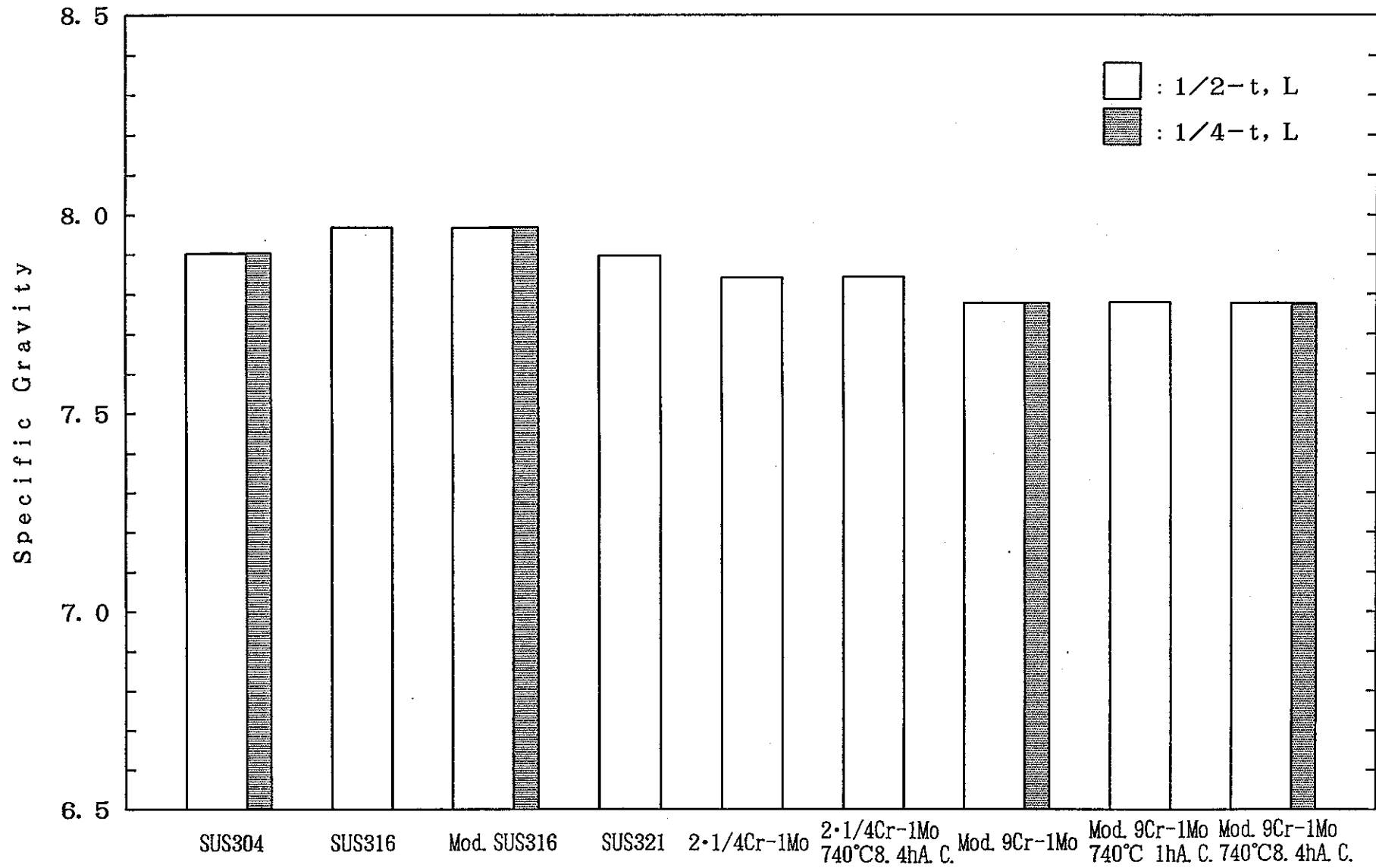


図4-1. 比重の測定結果 (20°C) Measurement results of specific gravity at 20°C

表4-3. オーステナイト系ステンレス鋼の比熱の測定結果
Measurement results of specific heat of austenitic stainless steels

Temp. (°C)	Specific heat (cal/g・°C)					
	SUS304		SUS316	FBR SUS316		SUS321
	1/2-t, L	1/4-t, L	1/2-t, L	1/2-t, L	1/4-t, L	1/2-t, L
20	0.115	0.110	0.110	0.109	0.109	0.109
50	0.117	0.113	0.113	0.111	0.111	0.112
100	0.118	0.117	0.116	0.115	0.115	0.117
150	0.120	0.119	0.118	0.119	0.119	0.120
200	0.122	0.121	0.121	0.121	0.121	0.123
250	0.123	0.124	0.123	0.123	0.123	0.124
300	0.125	0.126	0.125	0.124	0.125	0.125
350	0.126	0.127	0.126	0.126	0.127	0.127
400	0.128	0.129	0.128	0.127	0.129	0.129
450	0.129	0.130	0.129	0.129	0.130	0.130
475	0.129	—	—	0.128	—	—
500	0.127	0.130	0.128	0.127	0.130	0.130
525	0.129	0.129	0.127	0.128	0.129	0.130
550	0.133	0.132	0.130	0.132	0.131	0.135
575	0.136	0.136	0.134	0.135	0.137	0.137
600	0.137	0.137	0.135	0.137	0.139	0.138
650	0.137	0.138	0.136	0.138	0.139	0.138
700	0.137	0.138	0.138	0.139	0.140	0.139
750	0.138	0.139	0.139	0.140	0.141	0.140
800	0.139	0.140	0.139	0.140	0.141	0.140

表4-4. 2・1/4Cr-1Mo鋼の比熱の測定結果
Measurement results of specific heat of 2・1/4Cr-1Mo steel

Temp. (°C)	Specific heat (cal/g・°C)		Temp. (°C)	Specific heat (cal/g・°C)	
	2・1/4Cr-1Mo			2・1/4Cr-1Mo	
	as received	740°C8.4hAC		as received	740°C8.4hAC
	1/2-t, L	1/2-t, L		1/2-t, L	1/2-t, L
20	0.108	0.107	825	0.274	0.270
50	0.110	0.111	835	0.226	0.203
100	0.114	0.116	850	0.181	0.176
150	0.119	0.121	865	0.166	0.156
200	0.123	0.125			
250	0.127	0.128			
300	0.131	0.132			
350	0.135	0.136			
400	0.140	0.141			
450	0.145	0.146			
500	0.152	0.151			
550	0.160	0.158			
600	0.170	0.166			
650	0.185	0.179			
700	0.204	0.198			
725	0.220	0.214			
750	0.247	0.220			
765	—	0.270			
770	0.281	0.264			
775	0.232	0.220			
785	0.212	0.201			
800	0.200	0.192			
805	—	0.189			
810	—	0.321			
815	0.649	0.621			

表4-5. Mod.9Cr-1Mo鋼の比熱の測定結果 (その1)
Measurement results of specific heat of Mod.9Cr-1Mo steel (Part 1)

Temp. (°C)	Specific heat (cal/g·°C)				
	Mod.9Cr-1Mo				
	as received		740°C 1h AC	740°C 8.4h AC	
	1/2-t. L	1/4-t. L	1/2-t. L	1/2-t. L	1/4-t. L
20	0.108	0.108	0.107	0.107	0.107
50	0.111	0.110	0.111	0.110	0.110
100	0.116	0.114	0.116	0.115	0.115
150	0.121	0.118	0.121	0.120	0.120
200	0.126	0.122	0.125	0.124	0.125
250	0.130	0.127	0.130	0.128	0.129
300	0.134	0.131	0.135	0.133	0.133
350	0.140	0.136	0.138	0.137	0.137
400	0.145	0.141	0.144	0.142	0.142
450	0.151	0.148	0.149	0.147	0.147
500	0.159	0.155	0.157	0.158	0.156
550	0.170	0.165	0.166	0.166	0.165
600	0.182	0.176	0.176	0.177	0.176
650	0.197	0.193	0.192	0.192	0.190
700	0.221	0.217	0.215	0.217	0.213
725	0.240	0.235	0.234	0.237	0.232
750	0.282	0.278	0.270	0.275	0.269
760	—	0.216	—	—	—
765	0.228	—	0.207	0.200	0.197
775	0.197	0.194	0.192	0.191	0.187
800	0.183	0.181	0.176	0.177	0.174
825	0.174	0.176	0.170	0.170	0.167
840	0.172	0.180	0.167	0.168	0.166
845	—	0.274	0.224	0.403	0.381
850	0.475	0.486	0.478	0.406	0.388

表4-6. Mod.9Cr-1Mo鋼の比熱の測定結果 (その2)
 Measurement results of specific heat of Mod.9Cr-1Mo steel (Part 2)

Temp. (°C)	Specific heat (cal/g·°C)				
	Mod.9Cr-1Mo				
	as received		740°C 1h AC	740°C 8.4h AC	
	1/2-t, L	1/4-t, L	1/2-t, L	1/2-t, L	1/4-t, L
855	—	0.290	0.292	0.244	0.245
860	0.211	0.225	0.224	0.199	0.198
865	—	0.191	0.190	0.176	0.174
875	0.164	—	0.161	0.155	0.155

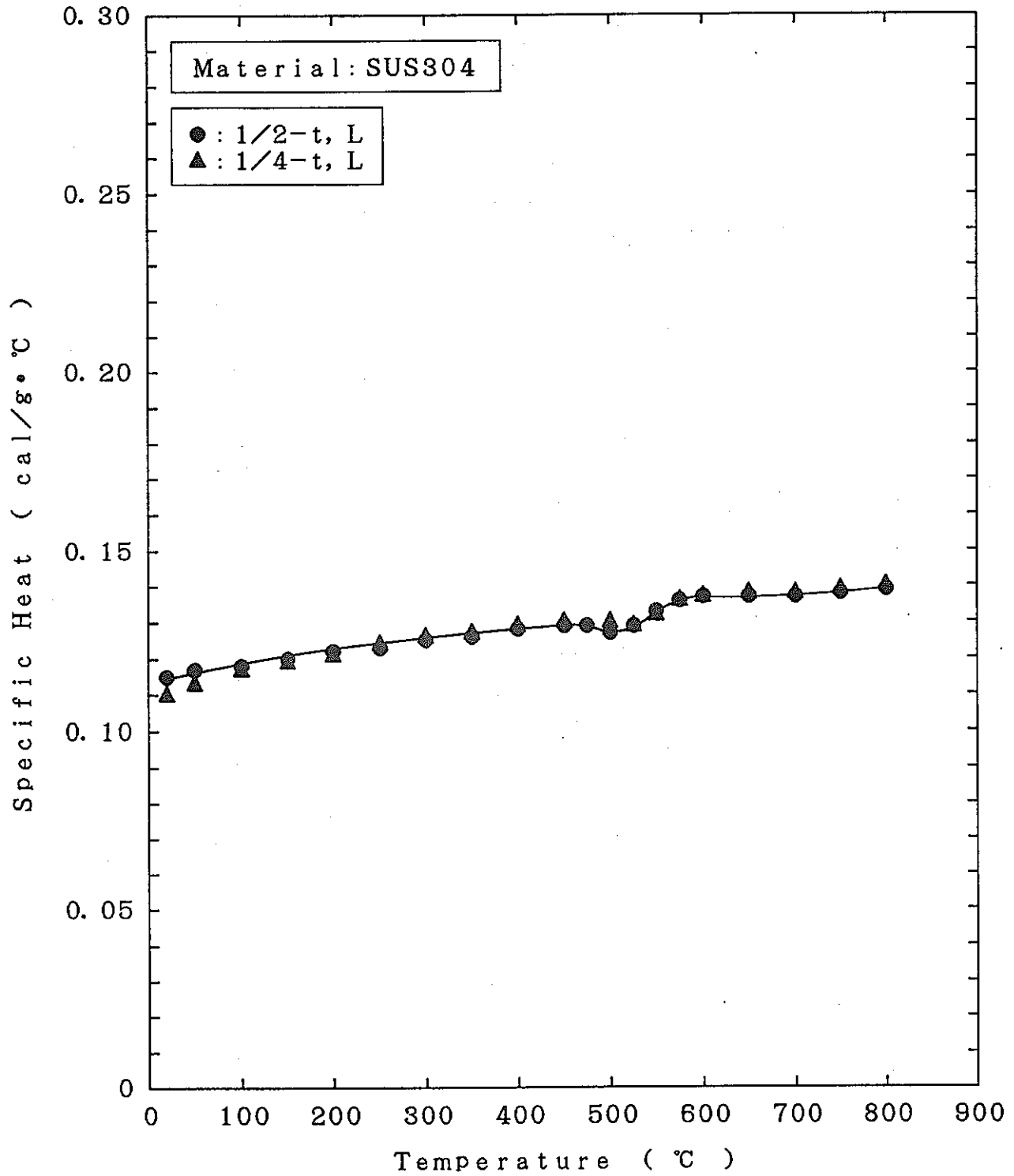


図4-2. SUS304の比熱の測定結果
Measurement results of specific heat of SUS304

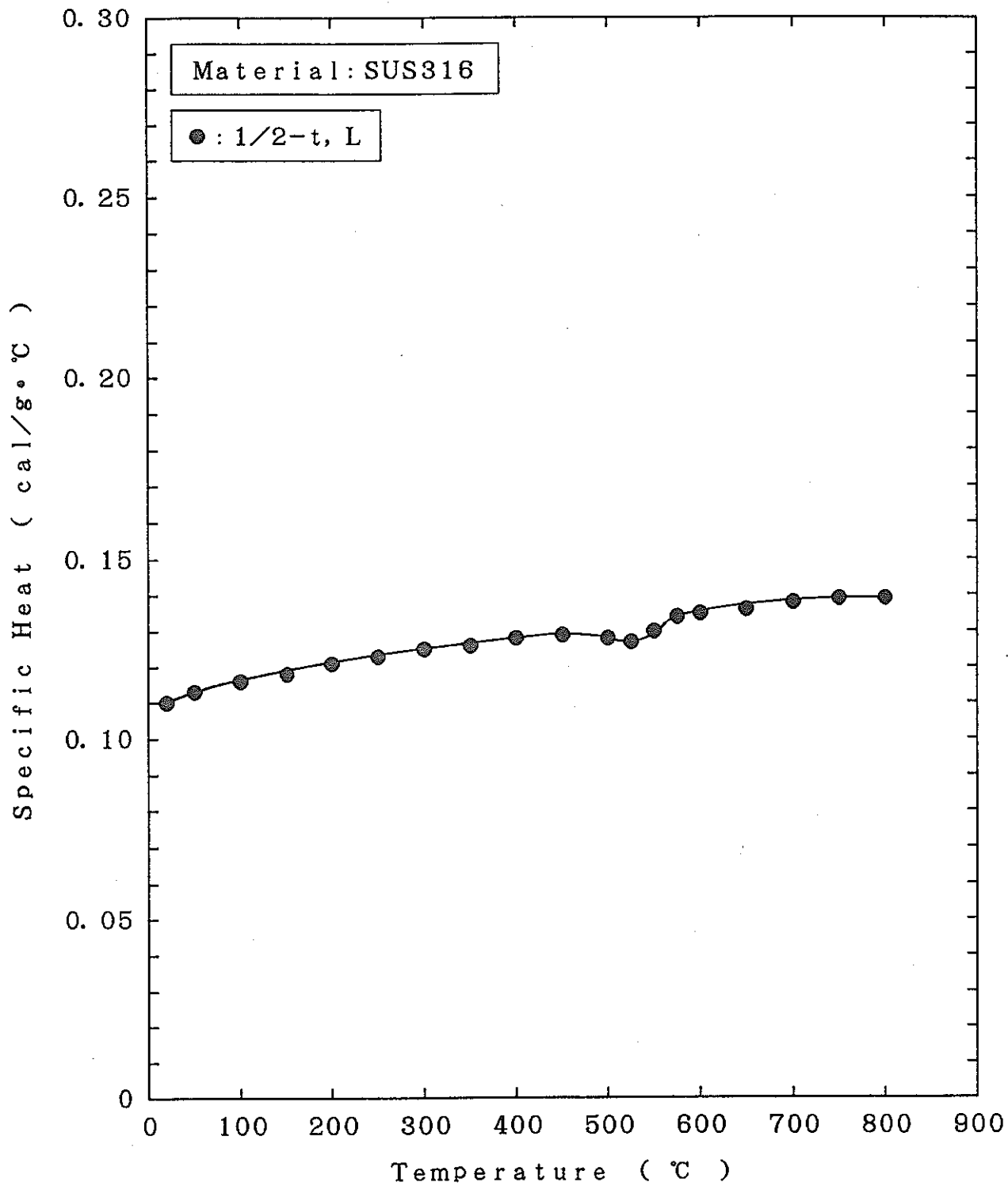


図4-3. SUS316の比熱の測定結果
Measurement results of specific heat of SUS316

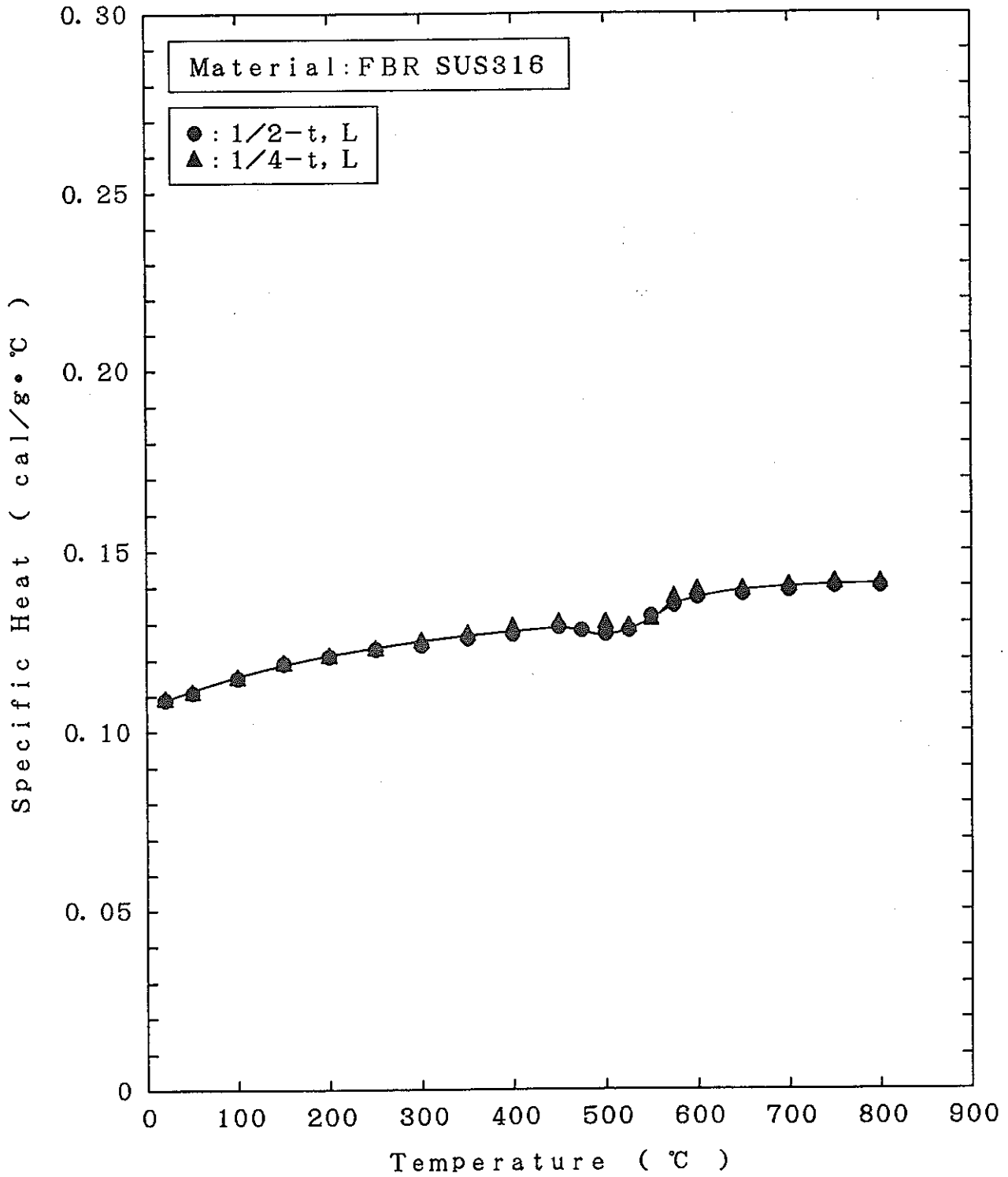


図4-4. FBR構造用SUS316の比熱の測定結果
Measurement results of specific heat of FBR grade SUS316

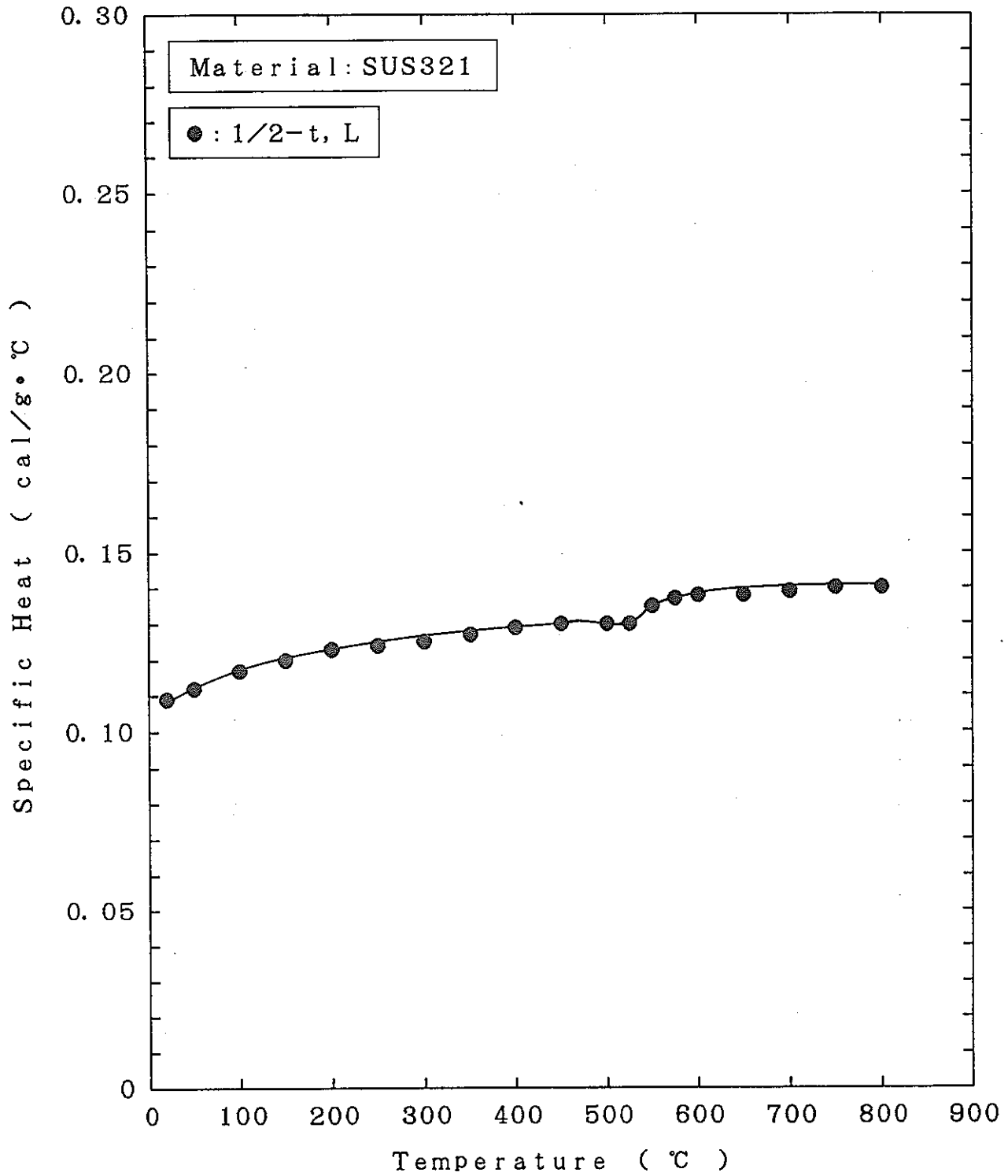


図4-5. SUS321の比熱の測定結果
Measurement results of specific heat of SUS321

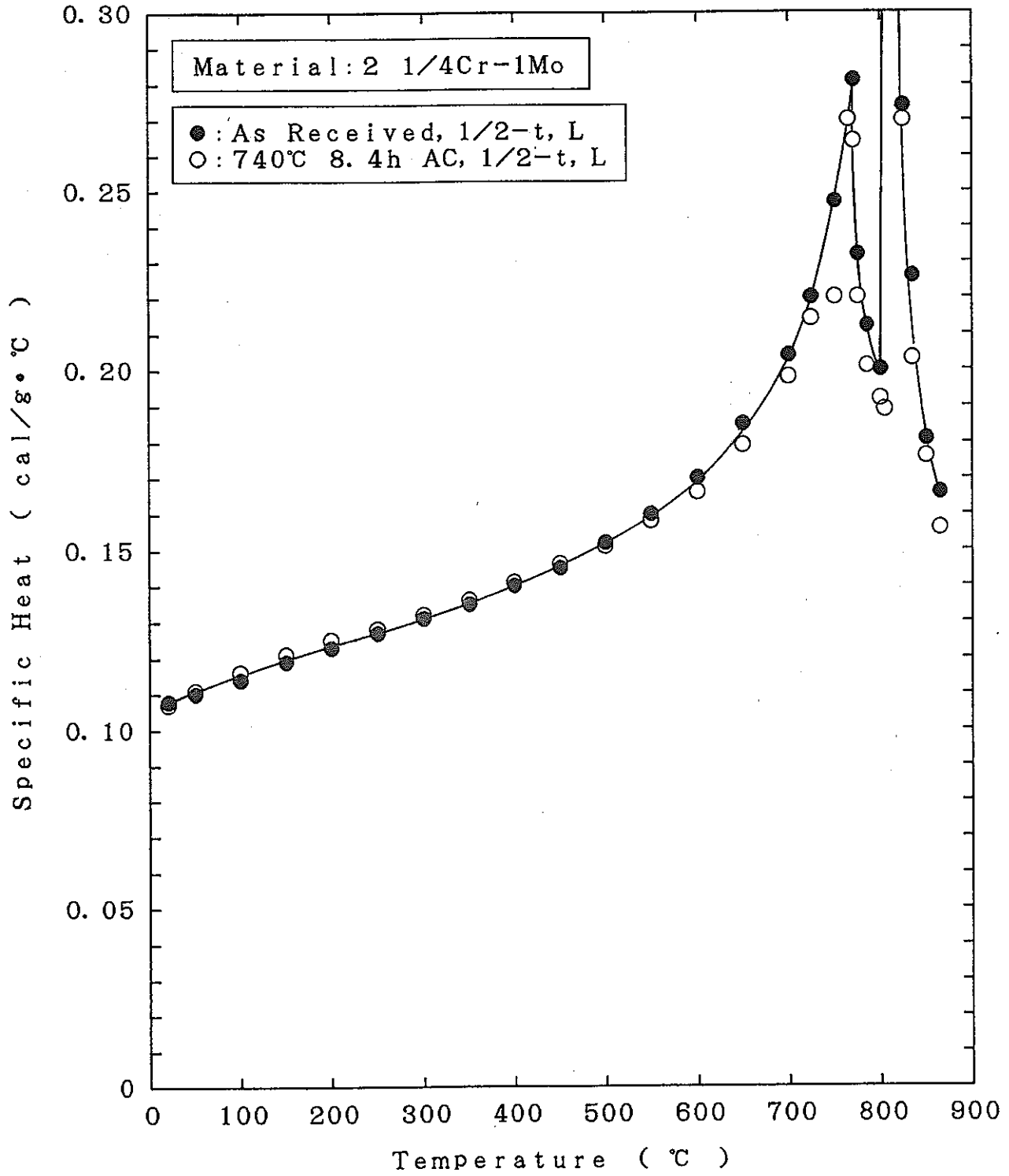


図4-6. 2・1/4Cr-1Mo鋼の比熱の測定結果 (その1)
 Measurement results of specific heat of 2 1/4Cr-1Mo steel (Part 1)

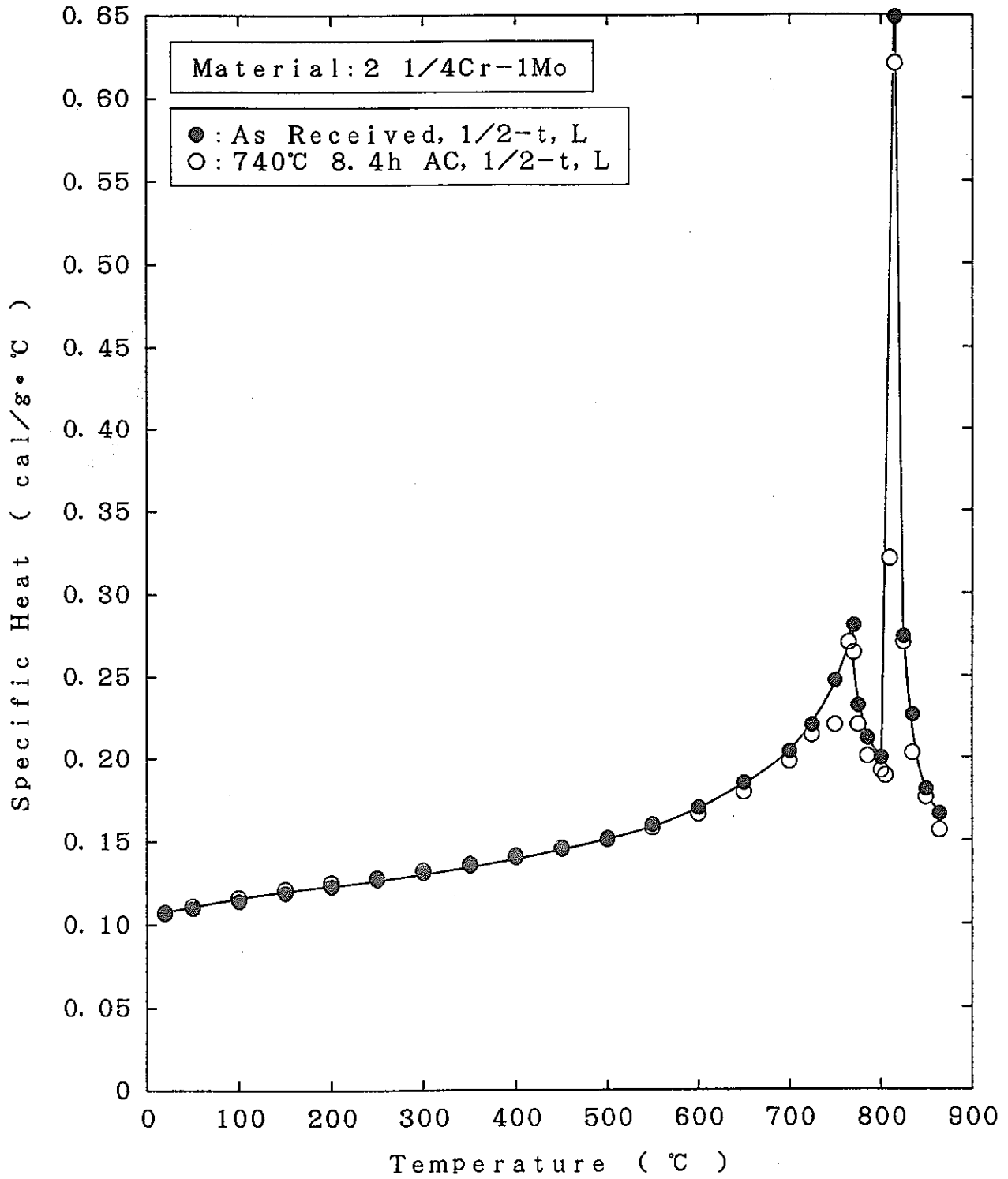


図4-7. 2-1/4Cr-1Mo鋼の比熱の測定結果 (その2)
Measurement results of specific heat of 2 1/4Cr-1Mo steel (Part 2)

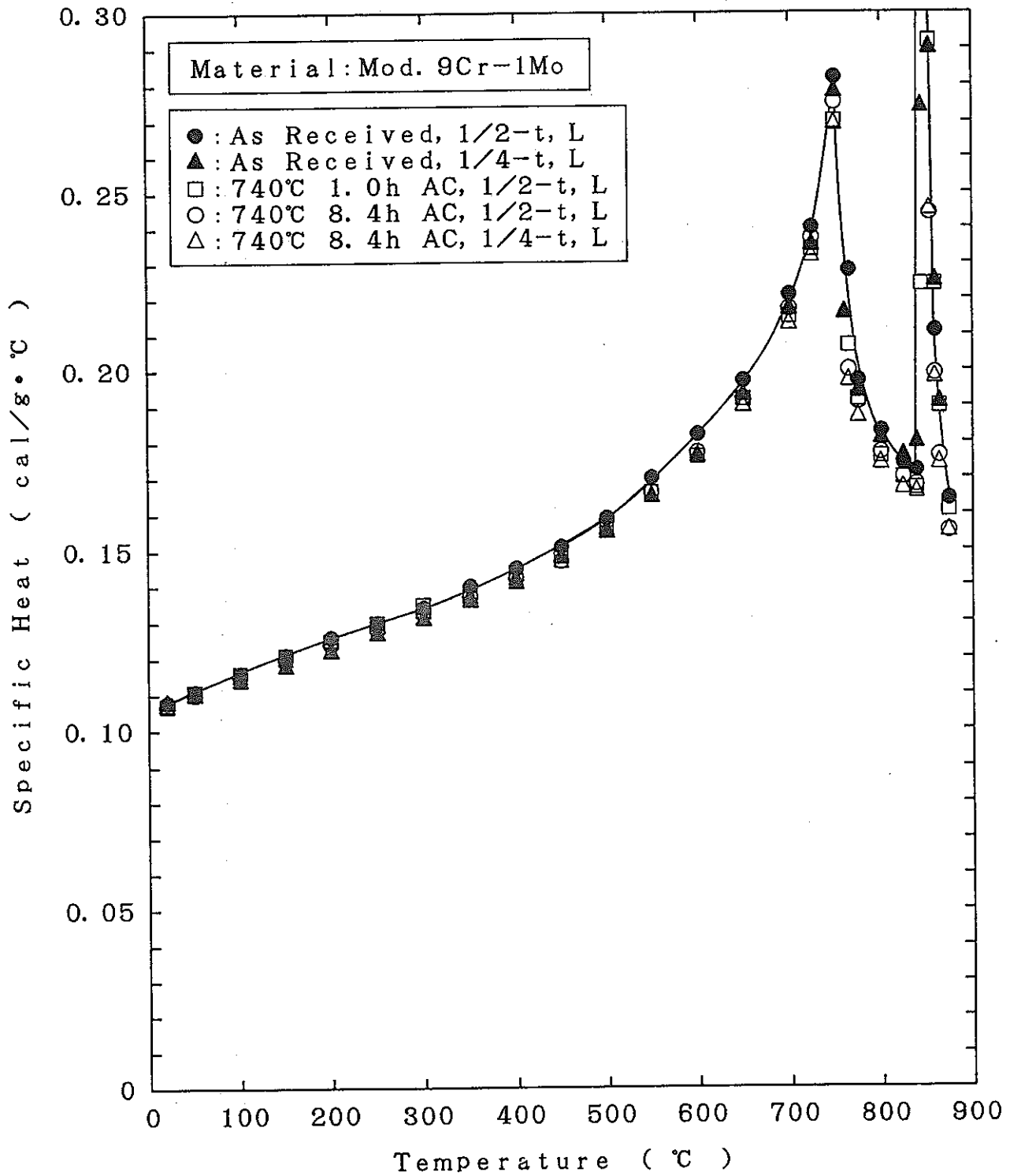


図4-8. Mod.9Cr-1Mo鋼の比熱の測定結果 (その1)
 Measurement results of specific heat of Mod.9Cr-1Mo steel (Part 1)

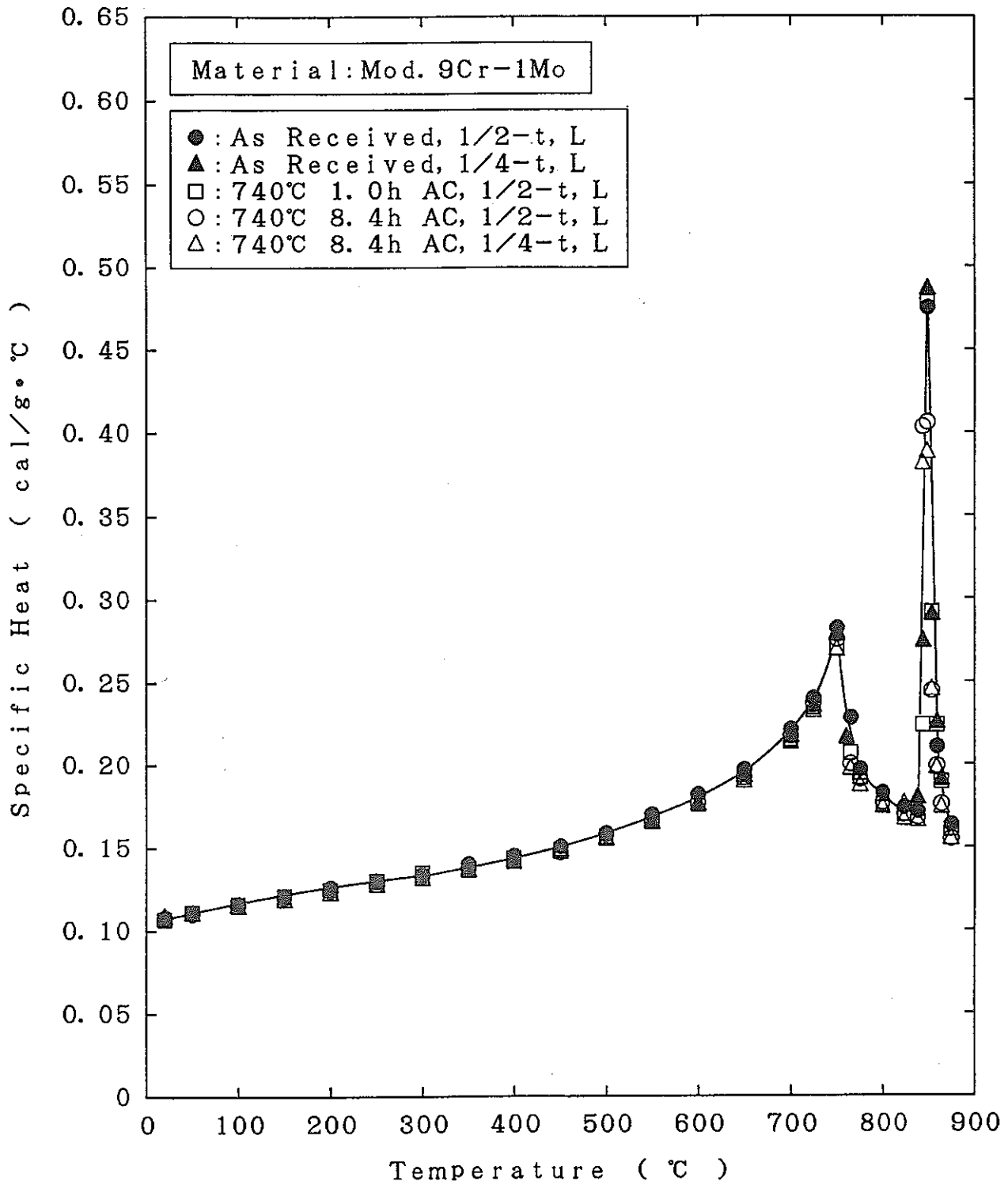


図4-9. Mod. 9Cr-1Mo鋼の比熱の測定結果 (その2)
 Measurement results of specific heat of Mod. 9Cr-1Mo steel (Part 2)

表4-7. オーステナイト系ステンレス鋼の熱伝導率の測定結果
 Measurement results of thermal conductivity of austenitic stainless steels

Temp. (°C)	Thermal conductivity (cal/cm·s·°C)					
	SUS304		SUS316	FBR SUS316		SUS321
	1/2-t, L	1/4-t, L	1/2-t, L	1/2-t, L	1/4-t, L	1/2-t, L
20	0.0343	0.0345	0.0313	0.0307	0.0350	0.0337
100	0.0372	0.0379	0.0356	0.0345	0.0378	0.0370
200	0.0398	0.0405	0.0395	0.0391	0.0413	0.0407
300	0.0430	0.0449	0.0437	0.0436	0.0451	0.0435
400	0.0474	0.0477	0.0466	0.0470	0.0484	0.0462
500	0.0484	0.0513	0.0492	0.0494	0.0519	0.0492
600	0.0547	0.0554	0.0545	0.0548	0.0581	0.0547
700	0.0569	0.0592	0.0582	0.0595	0.0612	0.0584
800	0.0596	0.0626	0.0610	0.0616	0.0627	0.0597

表4-8. フェライト鋼の熱伝導率の測定結果
 Measurement results of thermal conductivity of ferritic steels

Temp. (°C)	Thermal conductivity (cal/cm·s·°C)		
	2·1/4Cr-1Mo	Mod. 9Cr-1Mo	
	1/2-t, L	1/2-t, L	1/4-t, L
20	0.0932	0.0702	0.0680
100	0.0948	0.0676	0.0662
200	0.0957	0.0696	0.0682
300	0.0936	0.0696	0.0692
400	0.0895	0.0678	0.0680
500	0.0838	0.0685	0.0663
600	0.0780	0.0685	0.0657
700	0.0749	0.0669	0.0638
800	0.0660	0.0660	0.0614

表4-9. S R処理後のフェライト鋼の熱伝導率の測定結果
 Measurement results of thermal conductivity
 of S.R. heat treated ferritic steels

Temp. (°C)	Thermal conductivity (cal/cm·s·°C)			
	2·1/4Cr-1Mo	Mod. 9Cr-1Mo		
	740°C 8.4h AC	740°C 1h AC	740°C 8.4h AC	
	1/2-t, L	1/2-t, L	1/2-t, L	1/4-t, L
20	0.0932	0.0690	0.0712	0.0689
100	0.0946	0.0725	0.0712	0.0701
200	0.0951	0.0742	0.0729	0.0716
300	0.0927	0.0748	0.0720	0.0702
400	0.0878	0.0738	0.0708	0.0687
500	0.0833	0.0711	0.0729	0.0699
600	0.0776	0.0704	0.0692	0.0690
700	0.0749	0.0689	0.0706	0.0669
800	0.0526	0.0589	0.0621	0.0564

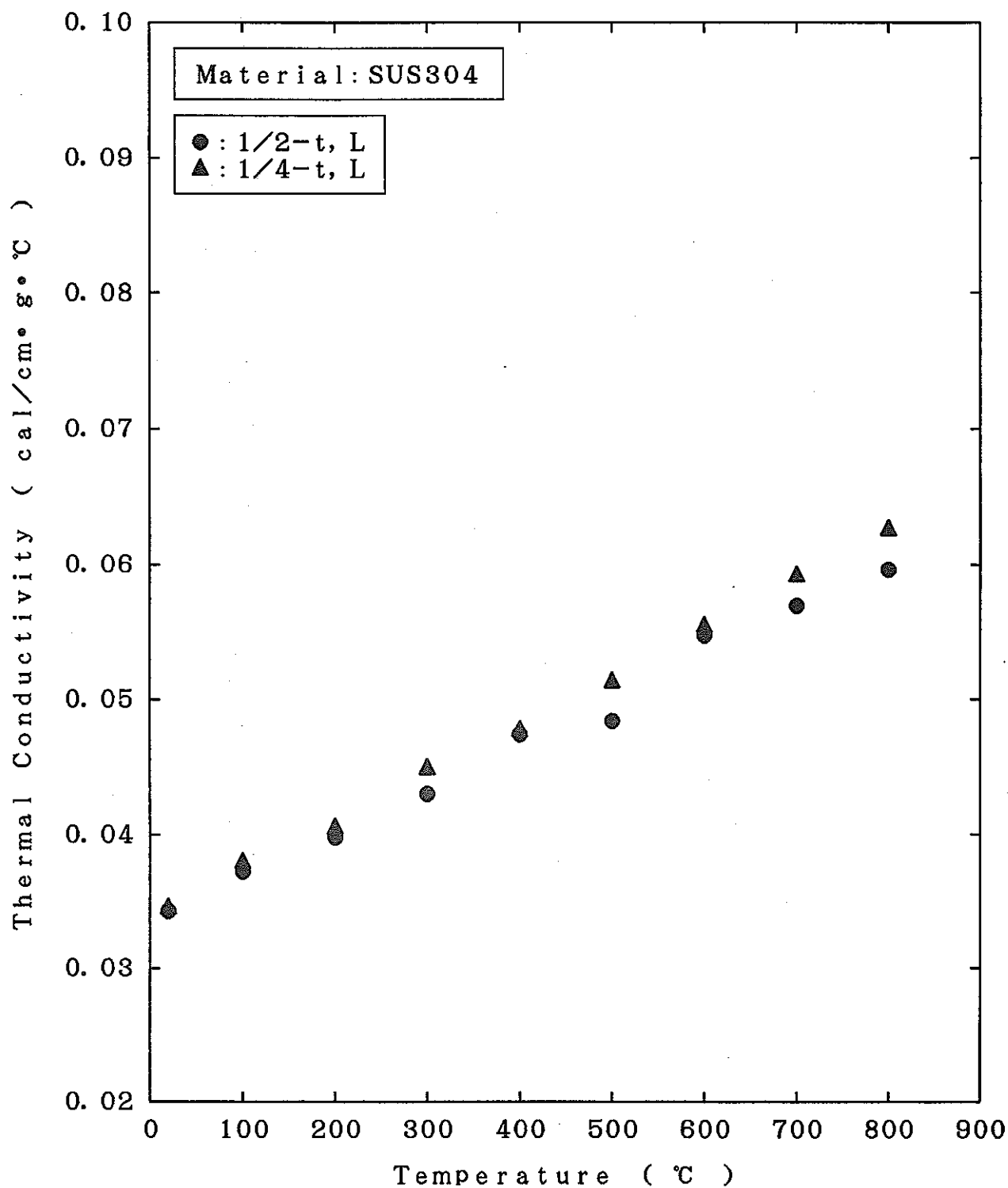


図4-10. SUS304の熱伝導率の測定結果
Measurement results of thermal conductivity of SUS304

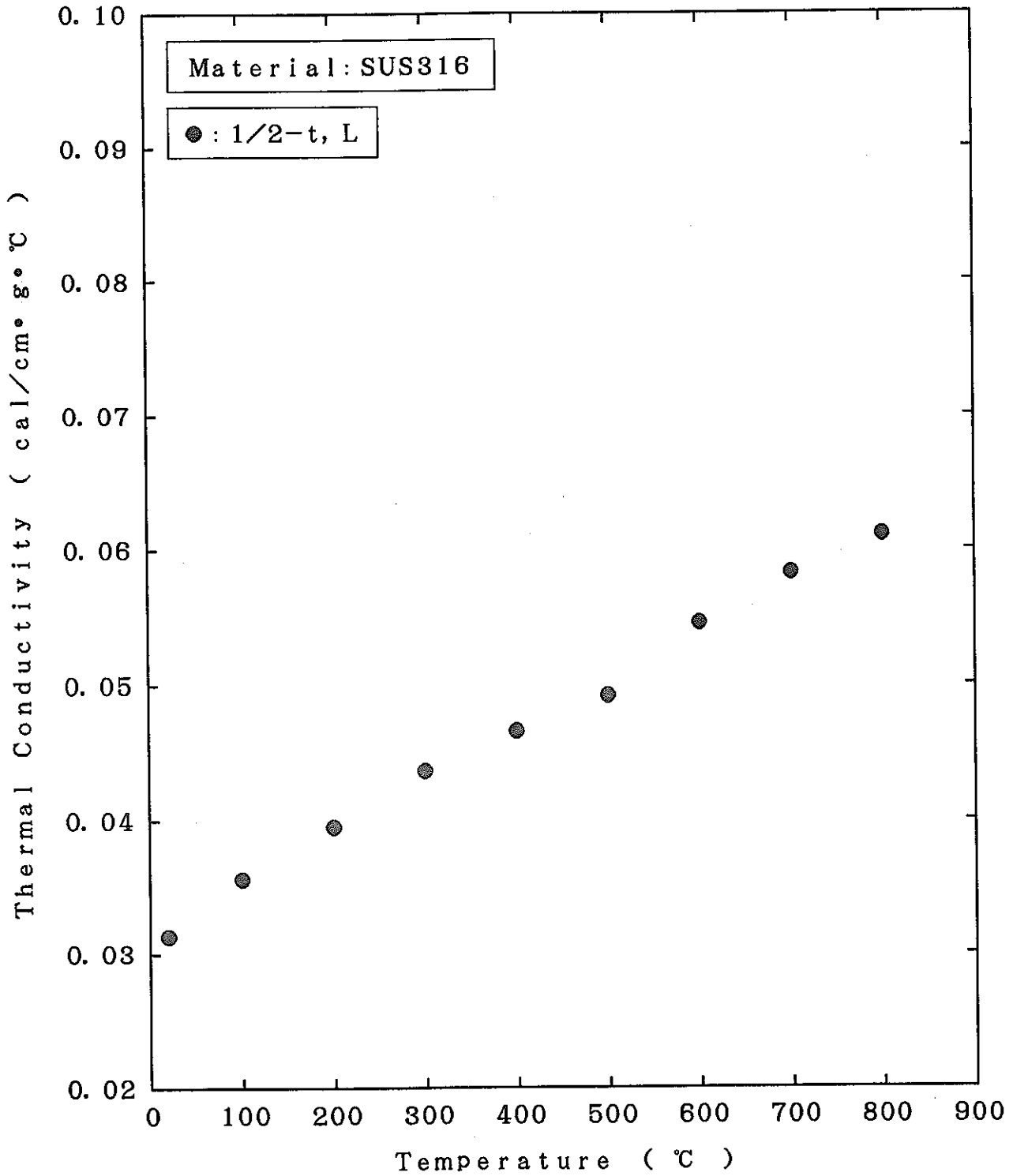


図4-11. SUS316の熱伝導率の測定結果
Measurement results of thermal conductivity of SUS316

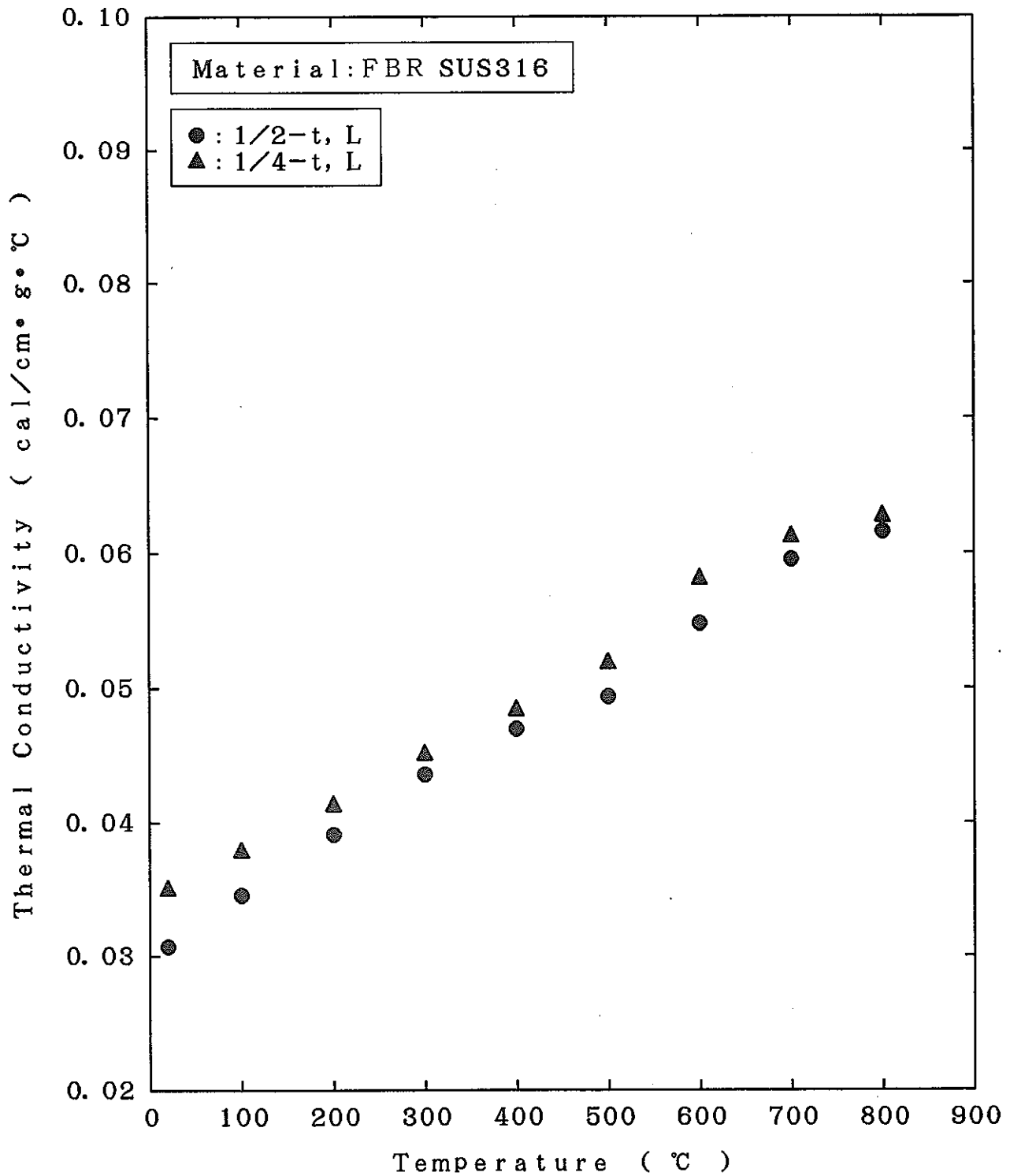


図4-12. FBR構造用SUS316の熱伝導率の測定結果
 Measurement results of thermal conductivity of FBR grade SUS316

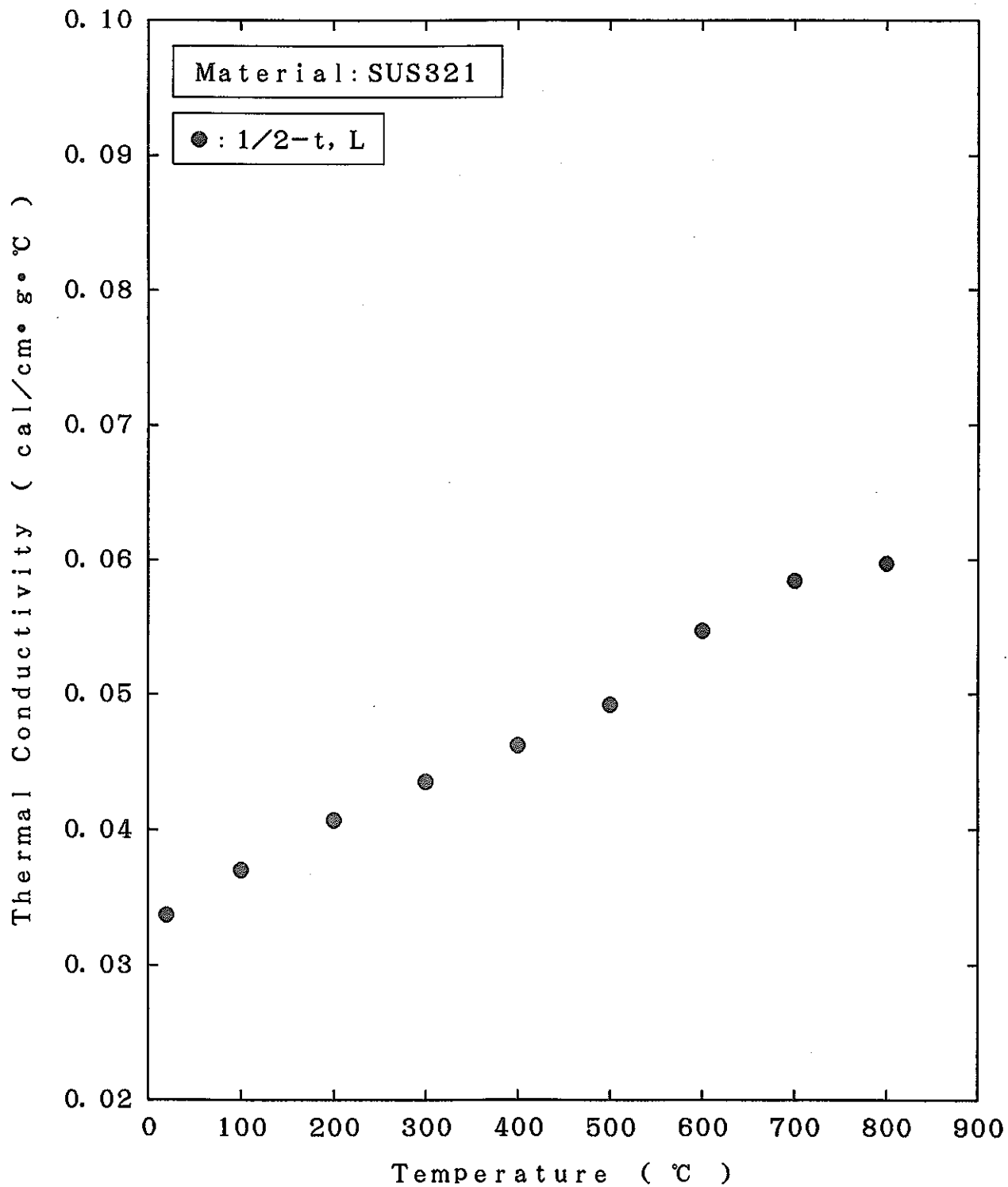


図4-13. SUS321の熱伝導率の測定結果
Measurement results of thermal conductivity of SUS321

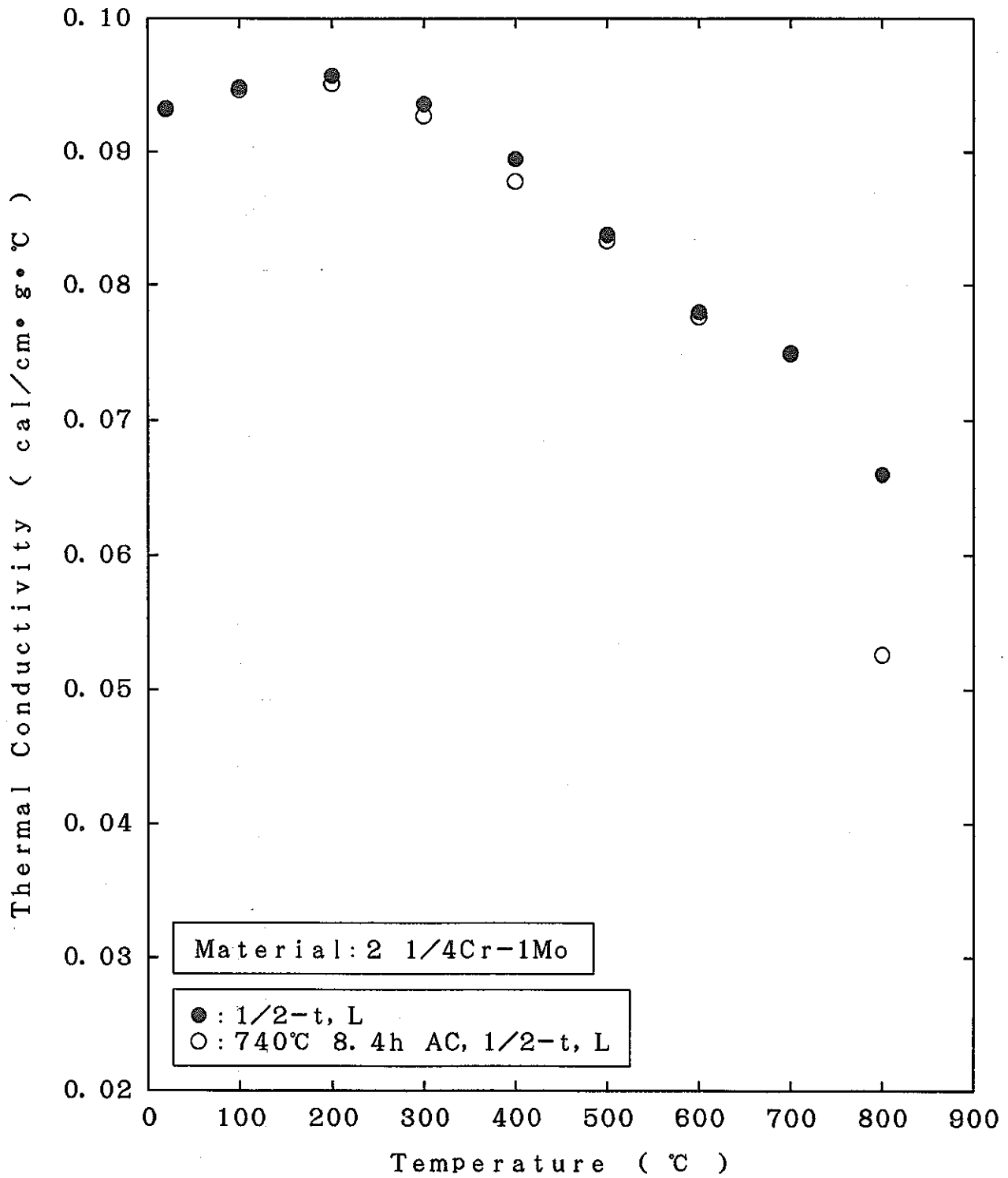


図4-14. 2-1/4Cr-1Mo鋼の熱伝導率の測定結果
Measurement results of thermal conductivity of 2 1/4Cr-1Mo steel

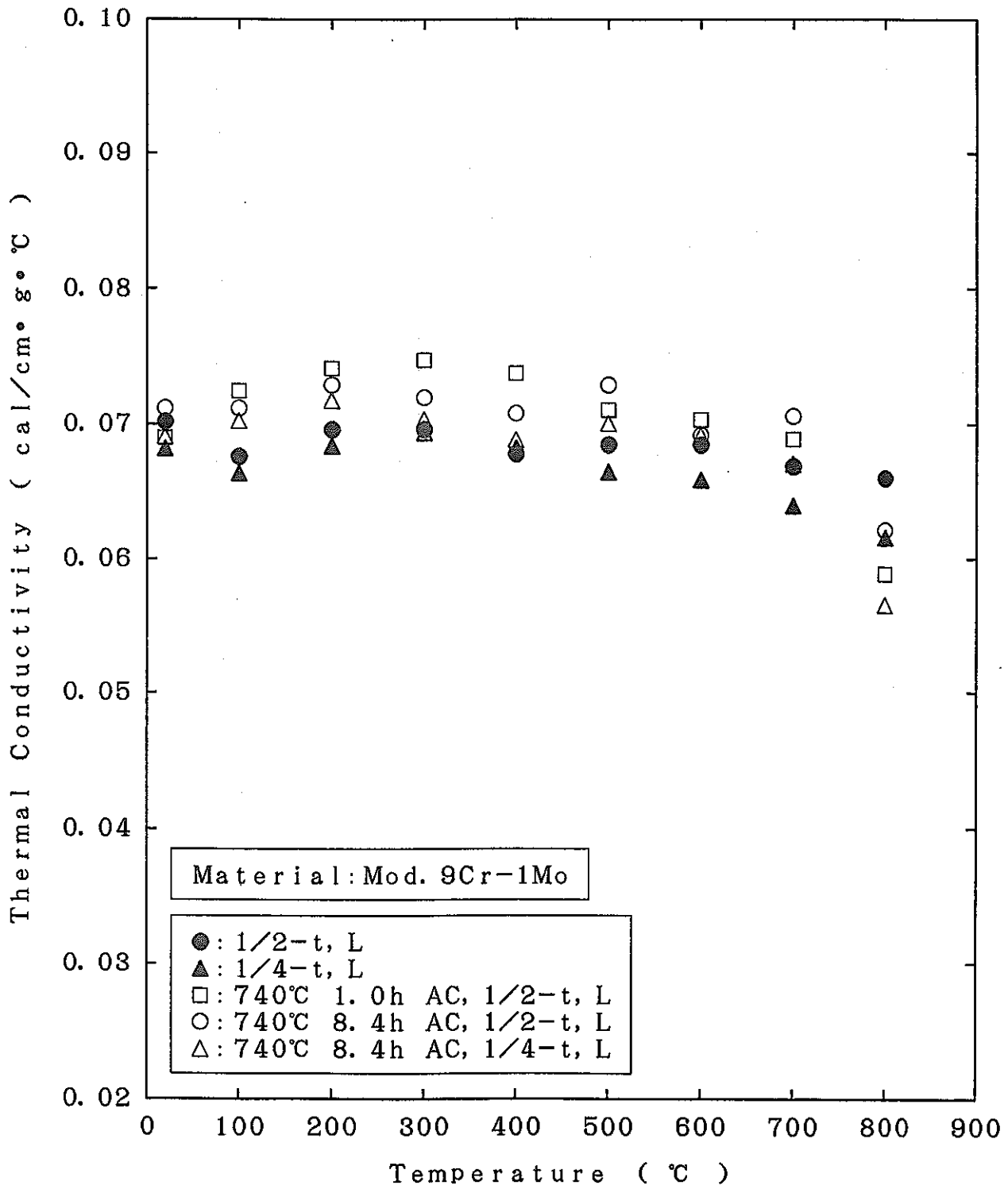


図4-15. Mod. 9Cr-1Mo鋼の熱伝導率の測定結果
Measurement results of thermal conductivity (%) of Mod. 9Cr-1Mo steel

表4-10. 熱膨張率の測定結果 (その1) Measurement results of thermal expansion (Part 1)

Temp. (°C)	Thermal expansion coefficient (%)					
	SUS304			SUS316	FBR SUS316	
	1/2-t, L	1/4-t, L	1/4-t, C	1/2-t, L	1/2-t, L	1/4-t, L
20	0	0	0	0	0	0
100	0.134	0.135	0.135	0.138	0.135	0.138
200	0.313	0.314	0.313	0.319	0.313	0.318
300	0.496	0.497	0.495	0.502	0.491	0.500
400	0.689	0.690	0.687	0.697	0.682	0.692
500	0.884	0.884	0.879	0.891	0.874	0.885
600	1.090	1.088	1.080	1.094	1.080	1.090
700	1.295	1.290	1.282	1.311	1.288	1.295
800	1.509	1.502	1.493	1.534	1.513	1.508

表4-11. 熱膨張率の測定結果 (その2) Measurement results of thermal expansion (Part 2)

Temp. (°C)	Thermal expansion coefficient (%)					
	FBR SUS316	SUS321	2-1/4Cr-1Mo	Mod. 9Cr-1Mo		
	1/4-t, C	1/2-t, L	1/2-t, L	1/2-t, L	1/4-t, L	1/4-t, C
20	0	0	0	0	0	0
100	0.137	0.141	0.097	0.085	0.089	0.089
200	0.319	0.325	0.229	0.202	0.208	0.206
300	0.503	0.513	0.364	0.322	0.330	0.326
400	0.696	0.711	0.511	0.451	0.459	0.456
500	0.890	0.911	0.658	0.583	0.591	0.591
600	1.102	1.122	0.810	0.718	0.732	0.733
700	1.306	1.337	0.958	0.852	0.868	0.869
800	1.527	1.560	1.103	0.991	1.009	1.008

L : Longitudinal direction (Rolling direction), C : Transverse direction

表4-12. S R処理後のフェライト鋼の熱膨張率の測定結果
Measurement results of thermal expansion of S.R. heat treated ferrite steels

Temp. (°C)	Thermal expansion coefficient (%)				
	2·1/4Cr-1Mo	Mod. 9Cr-1Mo			
	740°C 8.4h AC	740°C 1h AC	740°C 8.4h AC		
	1/2-t, L	1/2-t, L	1/2-t, L	1/4-t, L	1/4-t, C
20	0	0	0	0	0
100	0.097	0.090	0.087	0.087	0.091
200	0.225	0.208	0.201	0.202	0.211
300	0.359	0.335	0.320	0.319	0.337
400	0.505	0.469	0.450	0.447	0.476
500	0.653	0.605	0.584	0.580	0.611
600	0.809	0.749	0.725	0.720	0.725
700	0.959	0.899	0.864	0.857	0.856
800	1.111	1.033	1.005	0.994	0.983
820	1.025	1.065	1.034	1.020	1.010
840	0.934	1.050	1.065	1.054	0.991
860	0.933	0.915	0.902	0.883	0.833
880	0.972	0.928	0.895	0.870	0.849
900	1.019	0.960	0.928	0.904	0.884
920	—	1.000	0.972	0.946	0.926
1000	1.237	1.182	1.155	1.120	1.118

L : Longitudinal direction (Rolling direction), C : Transverse direction

表4-13. 熱膨張係数の測定結果 (その1) Measurement results of coefficient of thermal expansion (Part 1)

Temp. (°C)	Coefficient of thermal expansion, $\times 10^{-6}$ ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)					
	SUS304			SUS316	FBR SUS316	
	1/2-t, L	1/4-t, L	1/4-t, C	1/2-t, L	1/2-t, L	1/4-t, L
20~100	16.8	16.9	16.9	17.3	16.9	17.3
20~200	17.4	17.4	17.4	17.7	17.4	17.7
20~300	17.7	17.8	17.7	17.9	17.5	17.9
20~400	18.1	18.2	18.1	18.3	17.9	18.2
20~500	18.4	18.4	18.3	18.6	18.2	18.4
20~600	18.8	18.8	18.6	18.9	18.6	18.8
20~700	19.0	19.0	18.9	19.3	18.9	19.0
20~800	19.3	19.3	19.1	19.7	19.4	19.3

表4-14. 熱膨張係数の測定結果 (その2) Measurement results of coefficient of thermal expansion (Part 2)

Temp. (°C)	Coefficient of thermal expansion, $\times 10^{-6}$ ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)					
	FBR SUS316	SUS321	2-1/4Cr-1Mo	Mod. 9Cr-1Mo		
	1/4-t, C	1/2-t, L	1/2-t, L	1/2-t, L	1/4-t, L	1/4-t, C
20~100	17.1	17.6	12.1	10.6	11.1	11.1
20~200	17.7	18.1	12.7	11.2	11.6	11.4
20~300	18.0	18.3	13.0	11.5	11.8	11.6
20~400	18.3	18.7	13.4	11.9	12.1	12.0
20~500	18.5	19.0	13.7	12.1	12.3	12.3
20~600	19.0	19.3	14.0	12.4	12.6	12.6
20~700	19.2	19.7	14.1	12.5	12.8	12.8
20~800	19.6	20.0	14.1	12.7	12.9	12.9

表4-15. S R処理後のフェライト鋼の熱膨張係数の測定結果 Measurement results of coefficient of thermal expansion of S.R. heat treated ferritic steels

Temp. (°C)	Coefficient of thermal expansion, $\times 10^{-6}$ ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)				
	2-1/4Cr-1Mo	Mod. 9Cr-1Mo			
	740°C 8.4h AC	740°C 1h AC	740°C 8.4h AC		
	1/2-t, L	1/2-t, L	1/2-t, L	1/4-t, L	1/4-t, C
20~100	12.1	11.3	10.9	10.9	11.4
20~200	12.5	11.6	11.2	11.2	11.7
20~300	12.8	12.0	11.4	11.4	12.0
20~400	13.3	12.3	11.8	11.8	12.5
20~500	13.6	12.6	12.2	12.1	12.7
20~600	13.9	12.9	12.5	12.4	12.5
20~700	14.1	13.2	12.7	12.6	12.6
20~800	14.2	13.2	12.9	12.7	12.6
20~820	12.8	13.3	12.9	12.8	12.6
20~840	11.4	12.8	13.0	12.9	12.1
20~860	11.1	10.9	10.7	10.5	9.9
20~880	11.3	10.8	10.4	10.1	9.9
20~900	11.6	10.9	10.5	10.3	10.0
20~920	—	11.1	10.8	10.5	10.3
20~1000	12.6	12.1	11.8	11.4	11.4

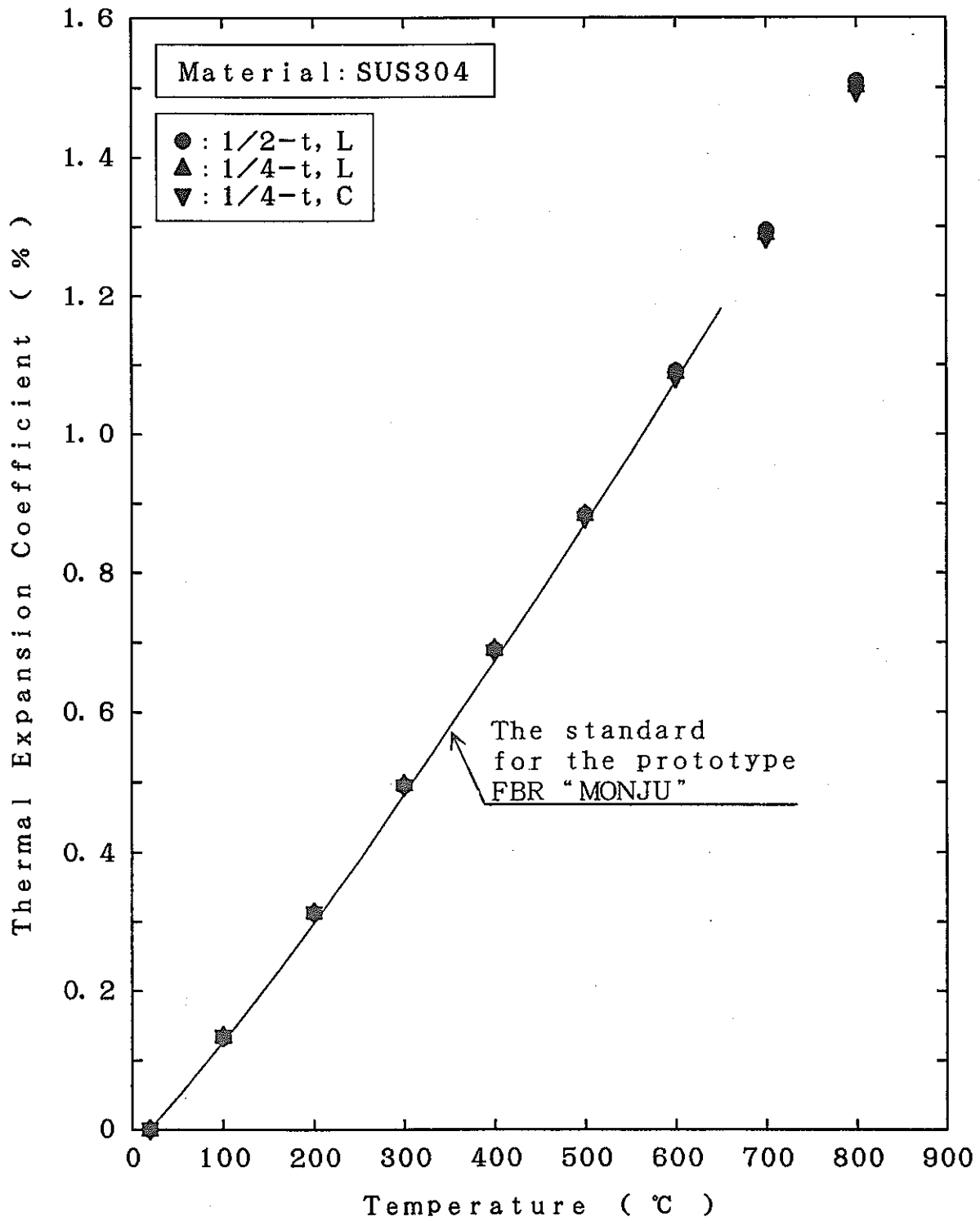


図4-16. SUS304の熱膨張率(%)の測定結果
Measurement results of thermal expansion coefficient (%) of SUS304

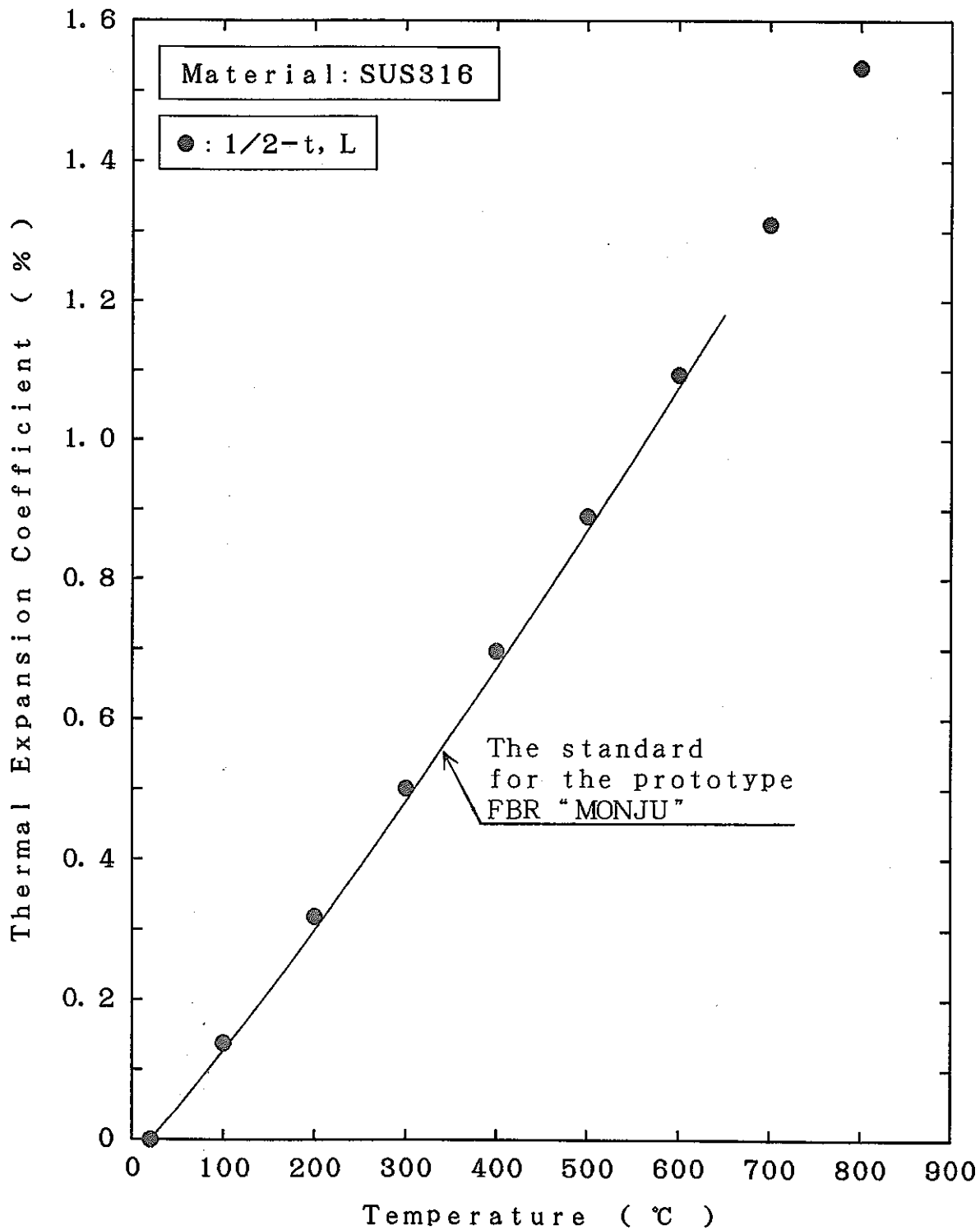


図4-17. SUS316の熱膨張率(%)の測定結果
 Measurement results of thermal expansion coefficient (%) of SUS316

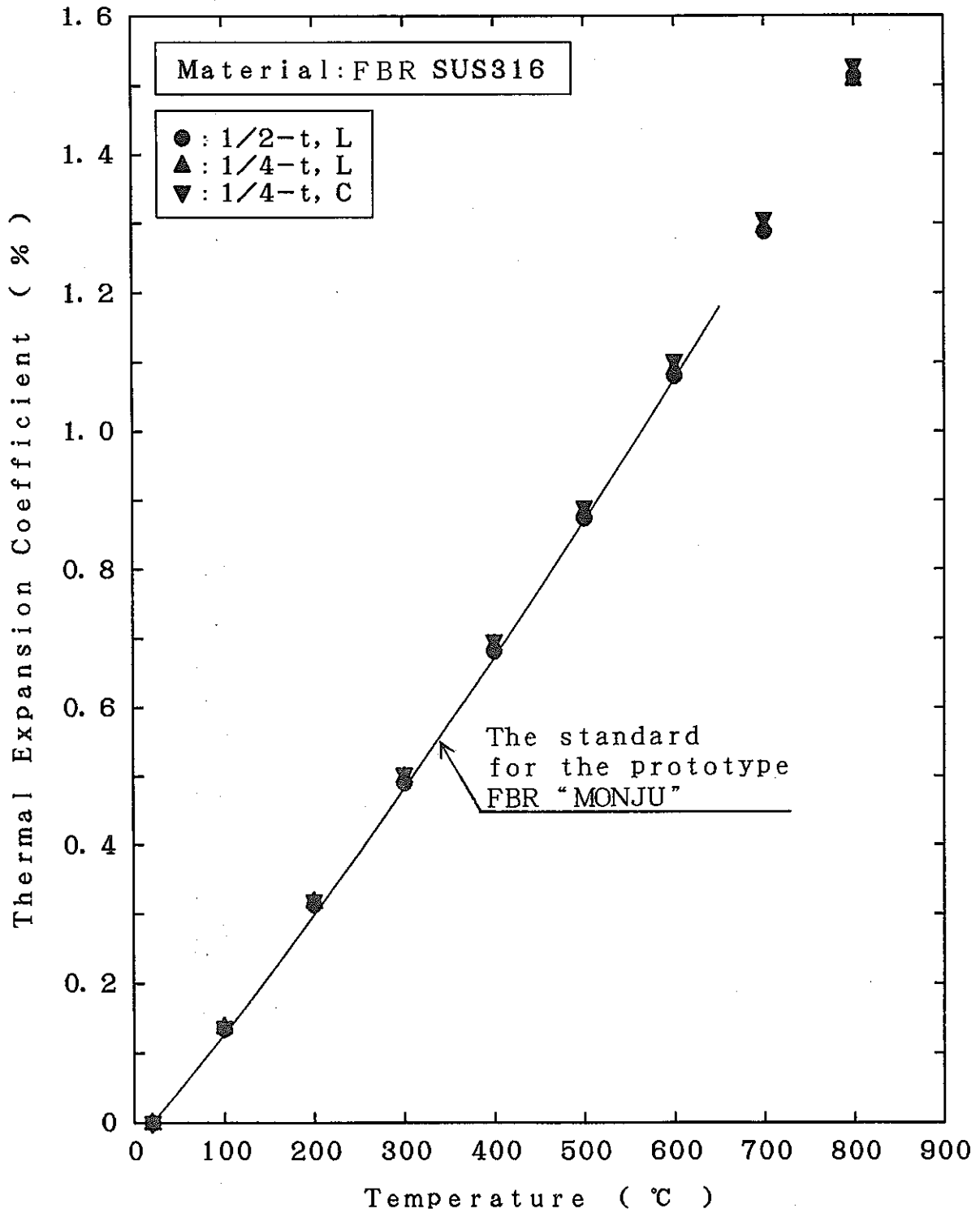


図4-18. FBR構造用SUS316の熱膨張率(%)の測定結果
 Measurement results of thermal expansion coefficient (%) of FBR grade SUS316

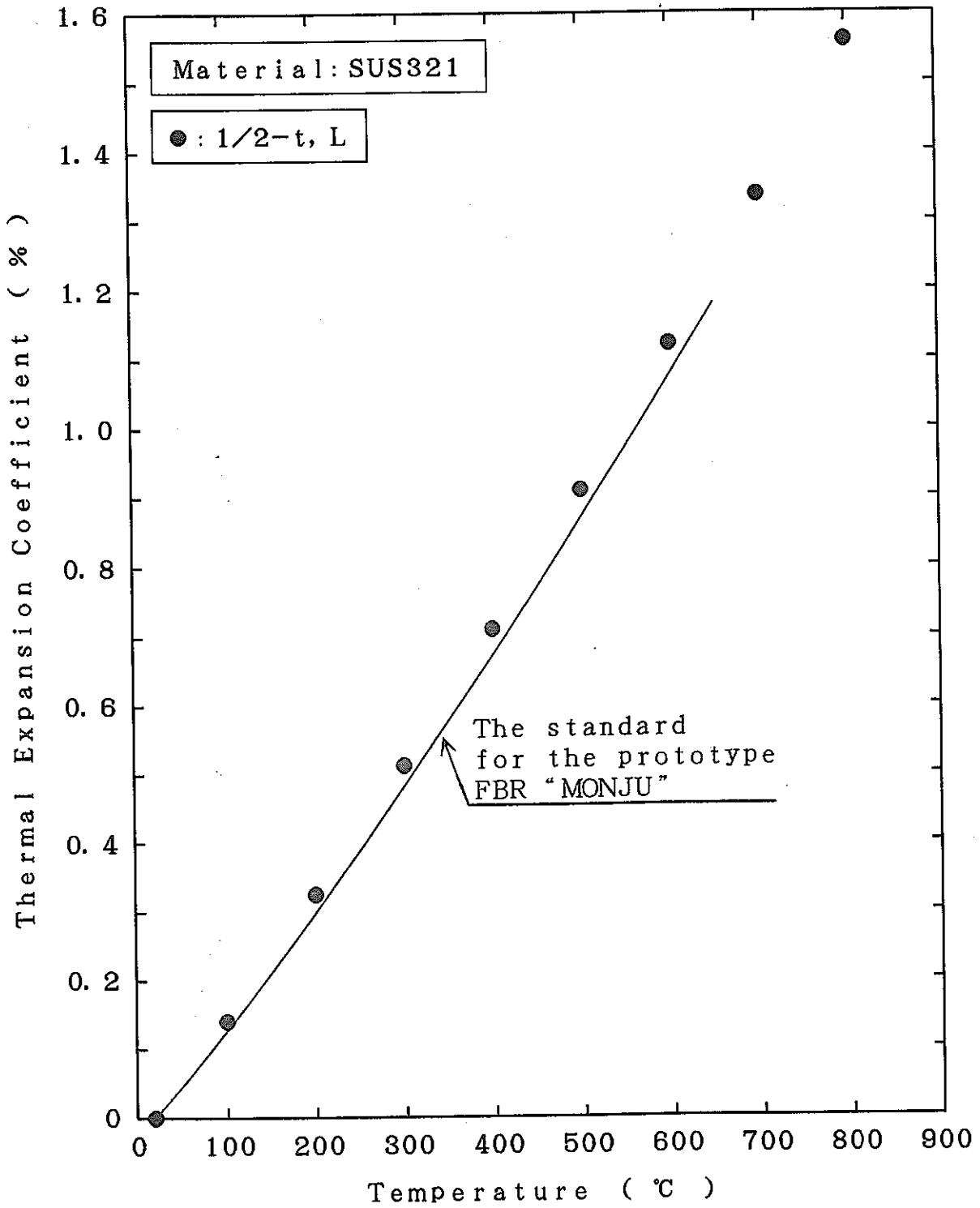


図4-19. SUS321の熱膨張率(%)の測定結果
Measurement results of thermal expansion coefficient (%) of SUS321

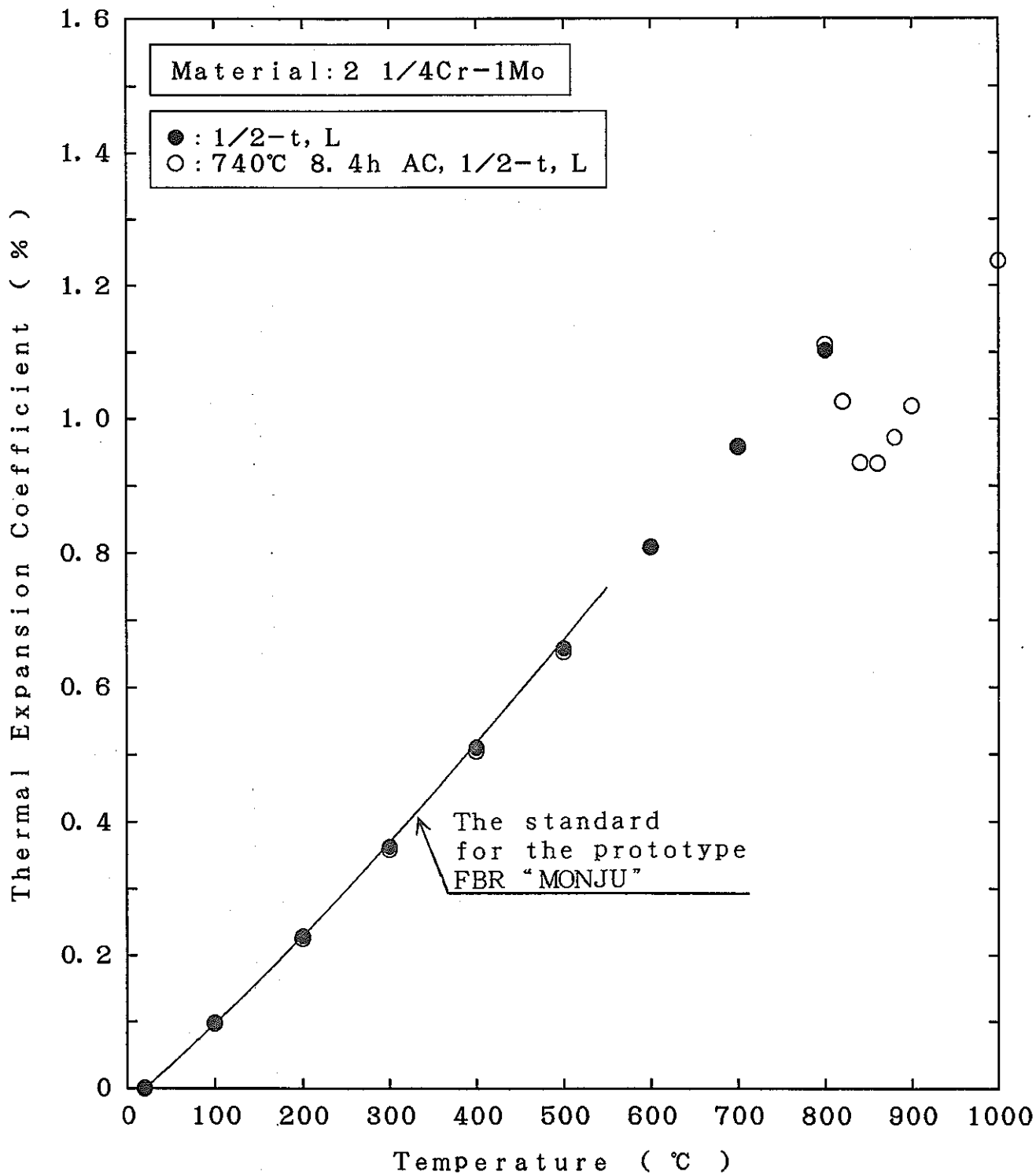


図4-20. 2-1/4Cr-1Mo鋼の熱膨張率(%)の測定結果
Measurement results of thermal expansion coefficient (%) of 2 1/4Cr-1Mo steel

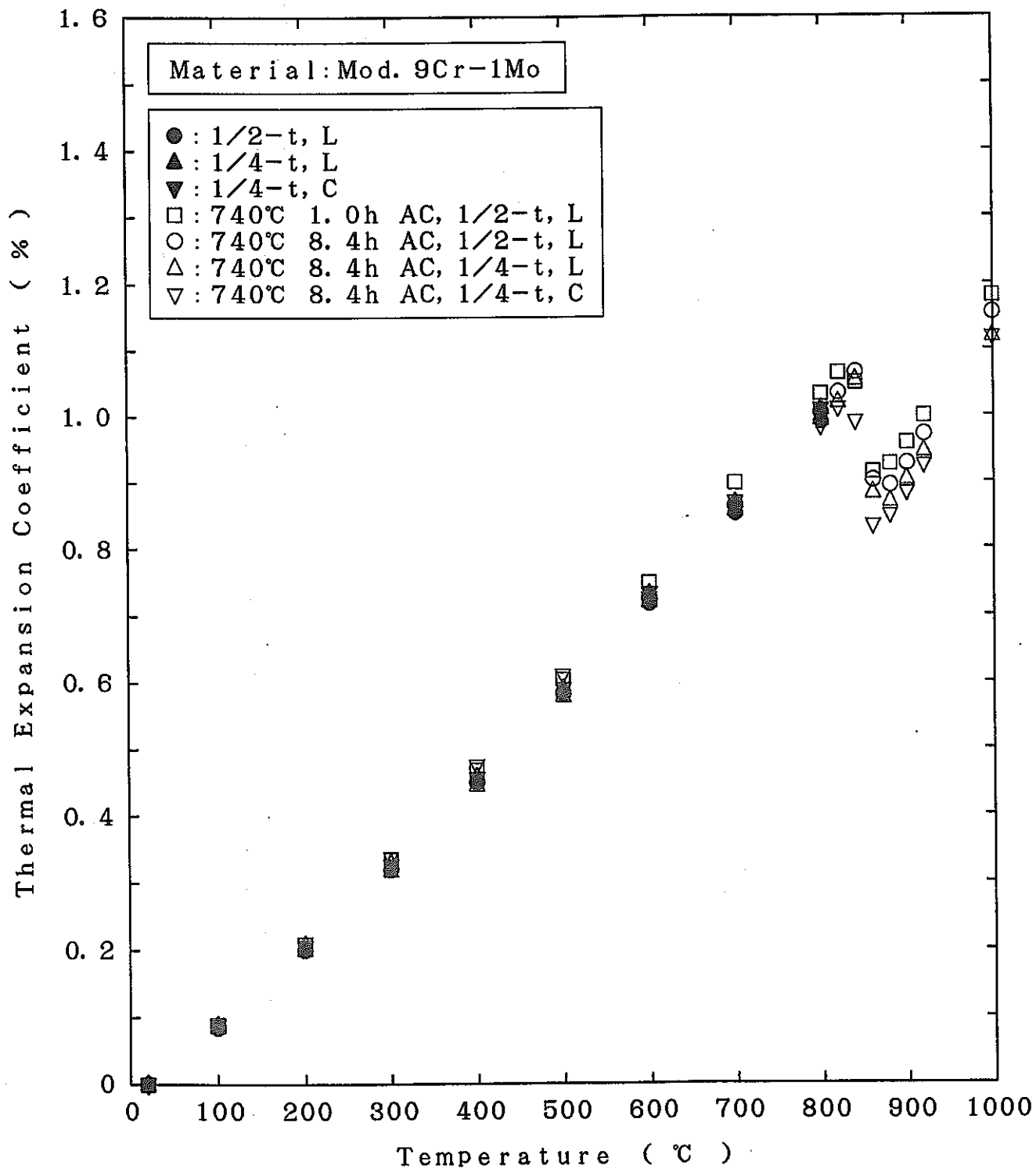


図4-21. Mod. 9Cr-1Mo鋼の熱膨張率 (%) の測定結果
 Measurement results of thermal expansion coefficient (%) of Mod. 9Cr-1Mo steel

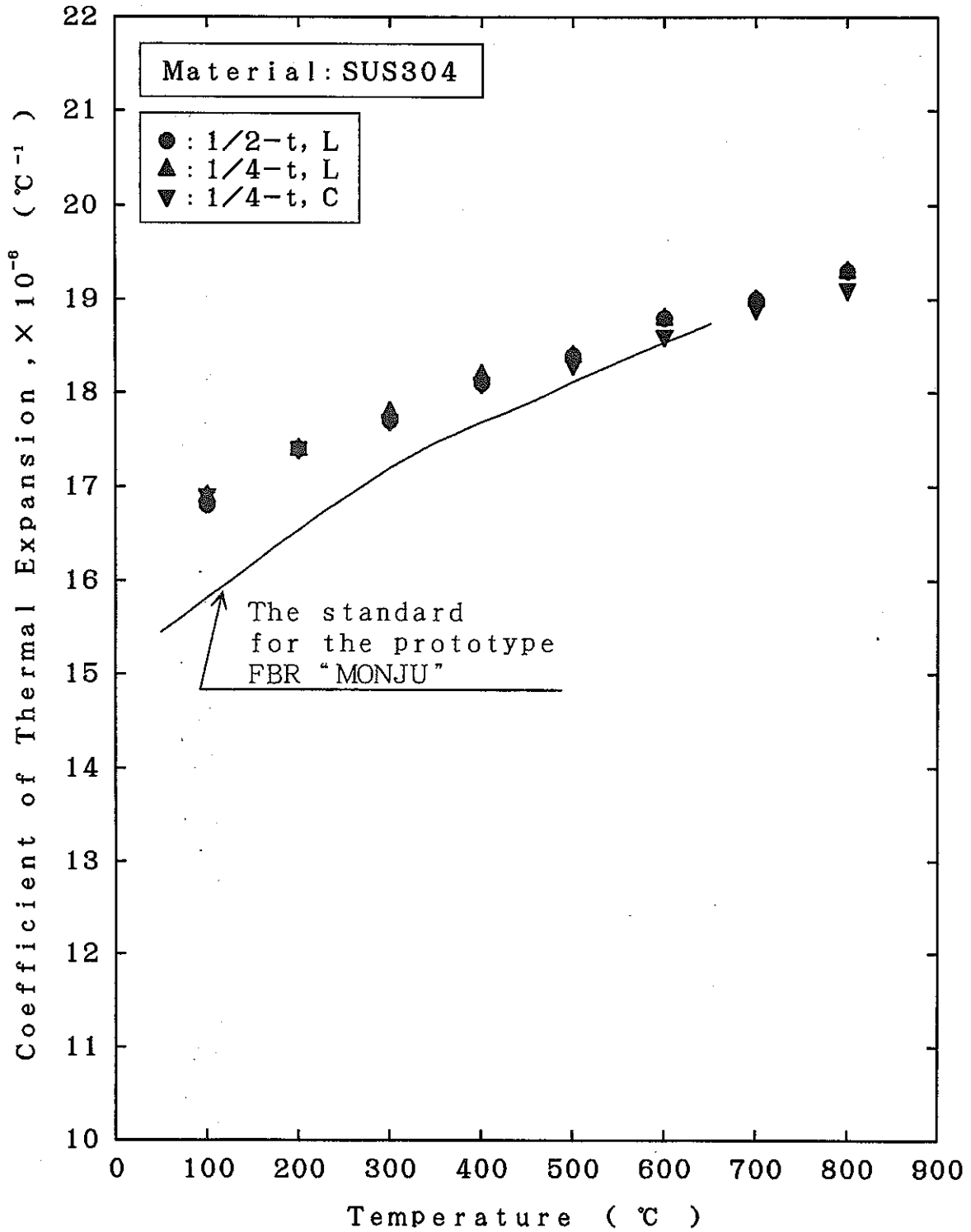


図4-22. SUS304の熱膨張係数(°C⁻¹)の測定結果
Coefficient of thermal expansion (°C⁻¹) measurement results of SUS304

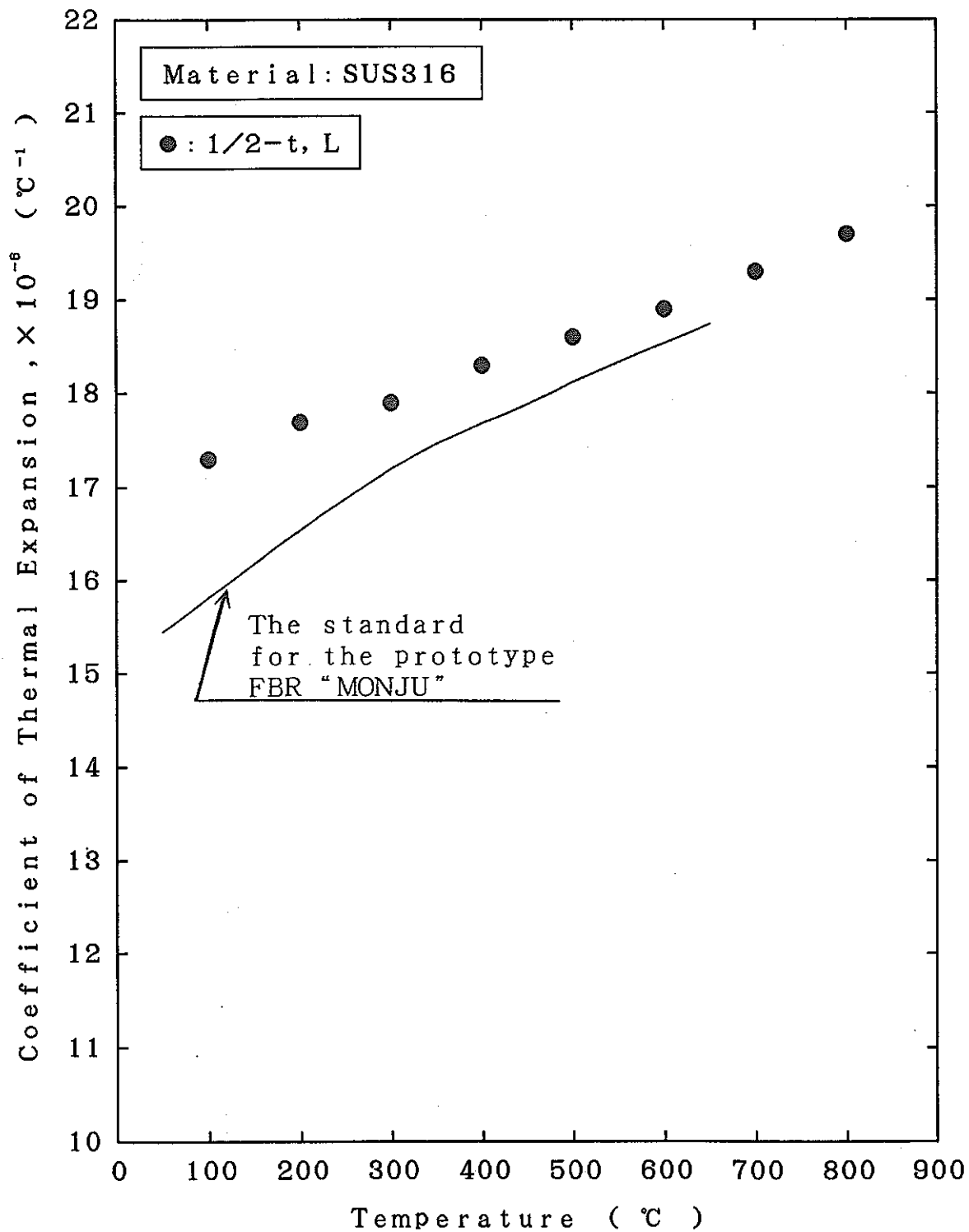


図4-23. SUS316の熱膨張係数(°C⁻¹)の測定結果
 Coefficient of thermal expansion (°C⁻¹) measurement results of SUS316

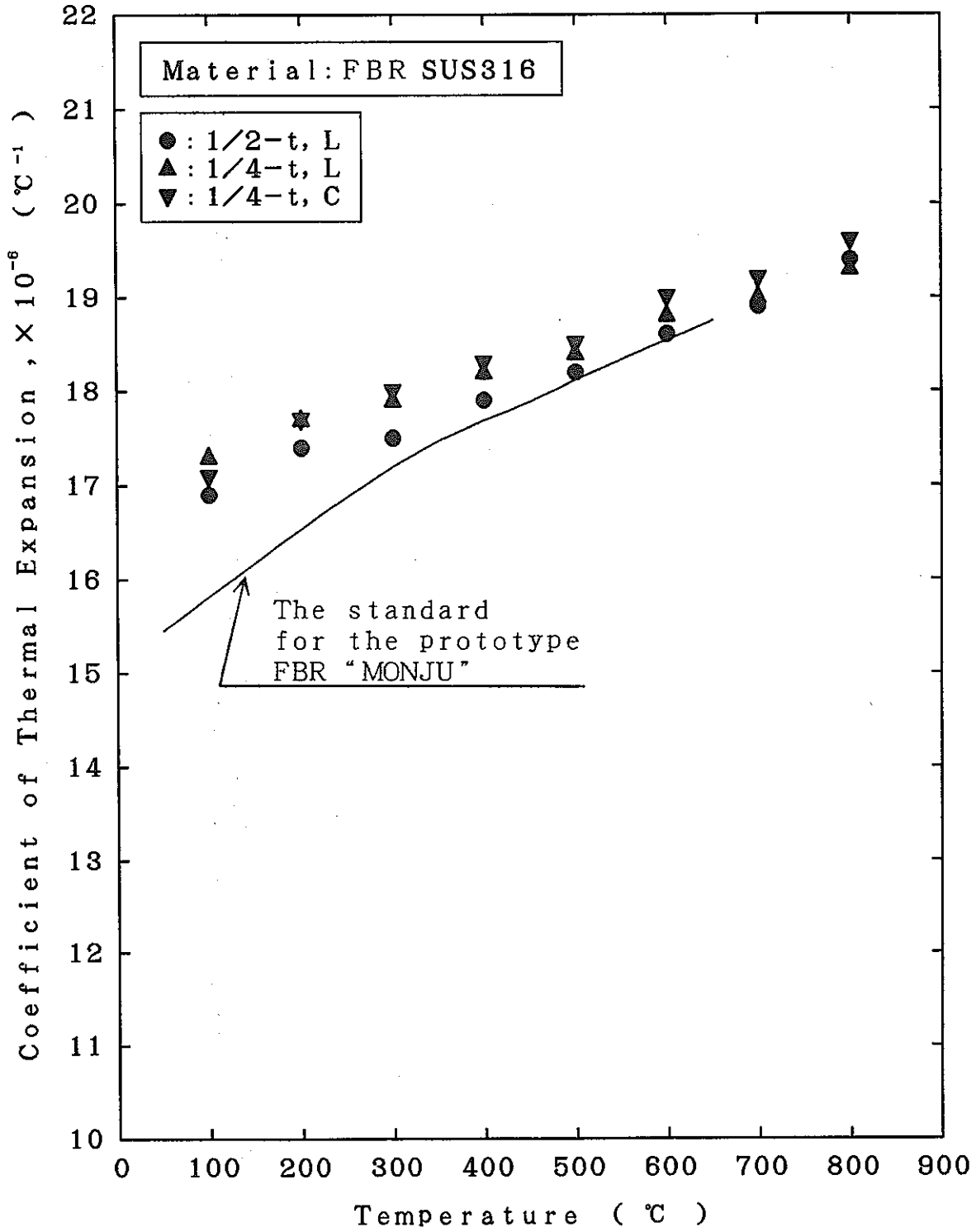


図4-24. FBR構造用SUS316の熱膨張係数(°C⁻¹)の測定結果
 Coefficient of thermal expansion (°C⁻¹) measurement results of FBR grade SUS316

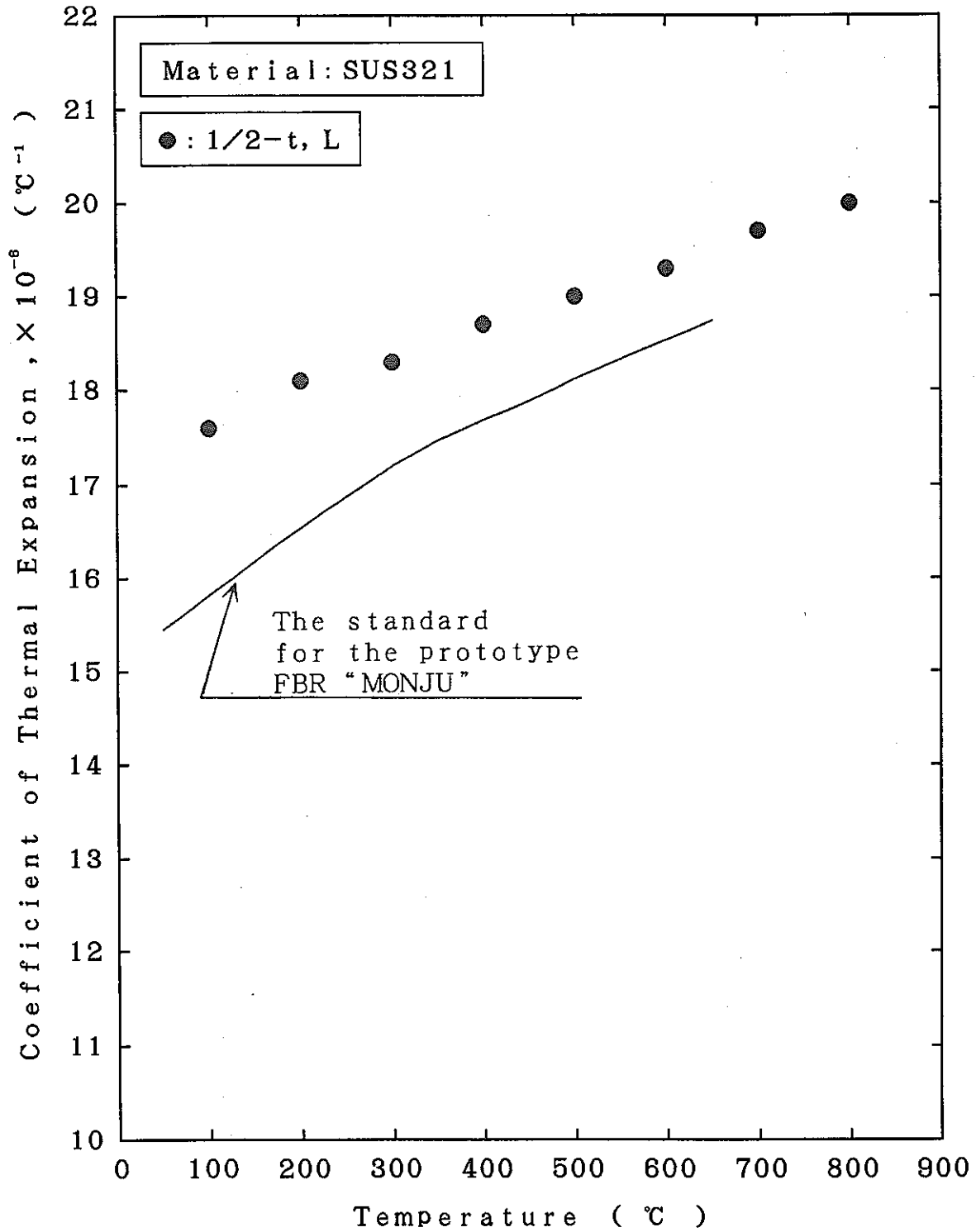


図4-25. SUS321の熱膨張係数(°C⁻¹)の測定結果
 Coefficient of thermal expansion (°C⁻¹) measurement results of SUS321

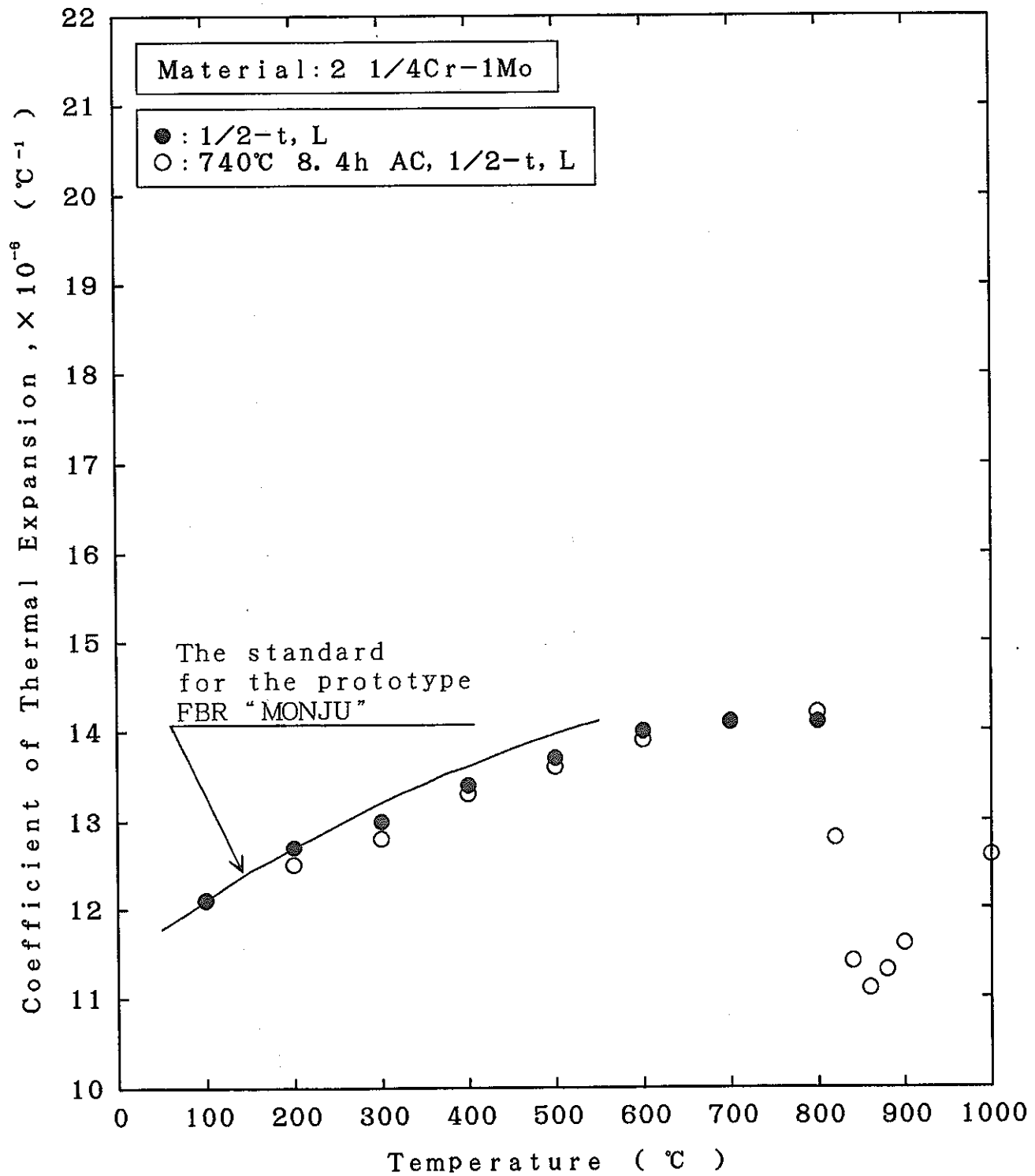


図4-26. 2・1/4Cr-1Mo鋼の熱膨張係数 (°C⁻¹) の測定結果
Coefficient of thermal expansion (°C⁻¹) measurement results of 2¼Cr-1Mo steel

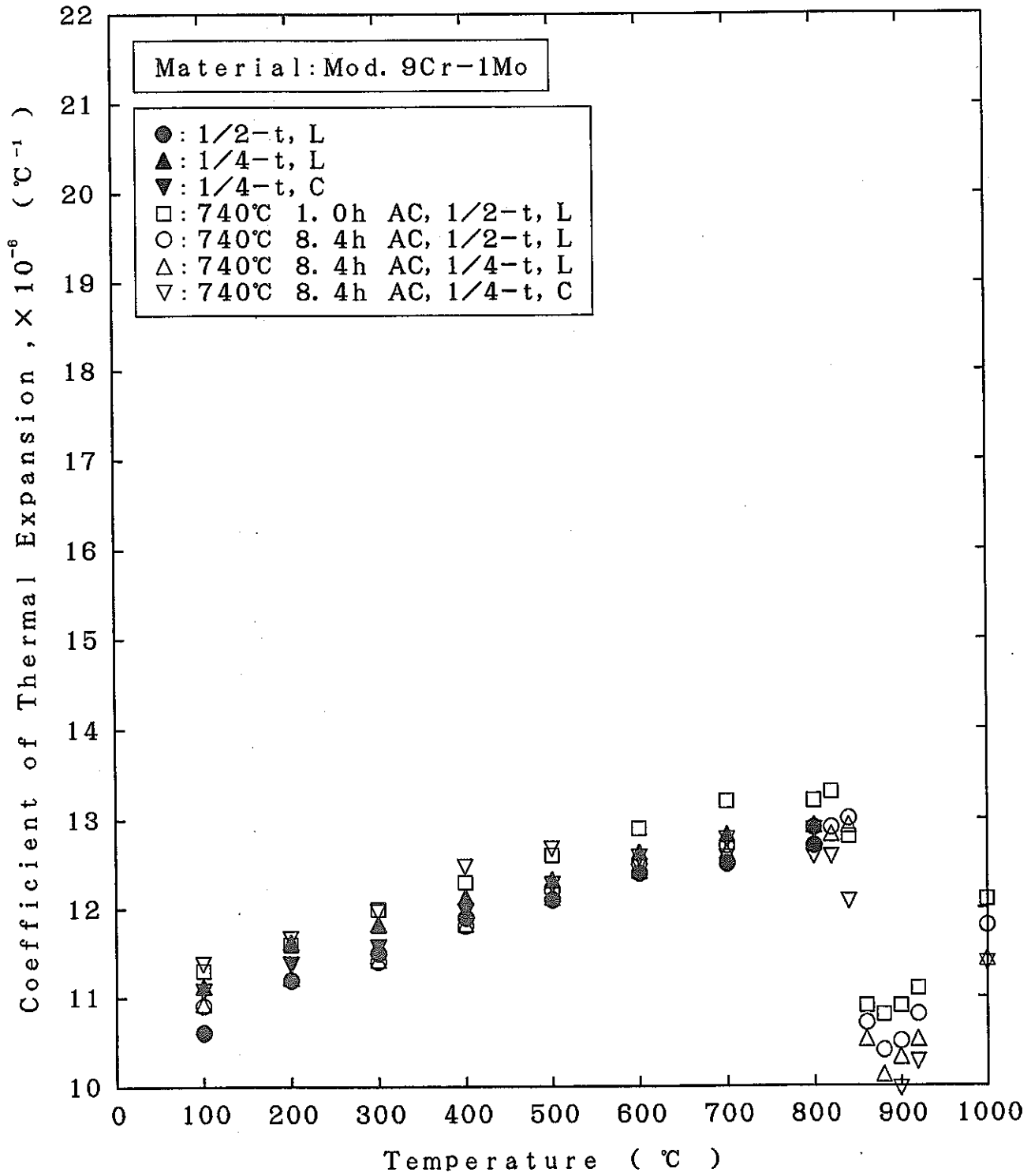


図4-27. Mod.9Cr-1Mo鋼の熱膨張係数 (°C⁻¹) の測定結果
 Coefficient of thermal expansion (°C⁻¹) measurement results of Mod.9Cr-1Mo steel

表4-16. オーステナイト系ステンレス鋼のヤング率 (縦弾性係数) の測定結果 (その1)
Measurement results of Young's modulus of austenitic stainless steels (Part 1)

Temp. (°C)	Young's modulus, $\times 10^3$ (kgf/mm ²)					
	SUS304					
	1/2-t, L		1/4-t, L		1/4-t, C	
	Vibration m.	Ewing method	Vibration m.	Ewing method	Vibration m.	Ewing method
25	19.5	19.9	19.1	19.6	19.6	19.0
100	19.2	19.1	18.8	19.0	19.2	18.2
200	18.2	18.4	17.9	18.2	18.5	17.3
300	17.3	17.6	17.0	17.6	17.6	16.8
400	16.4	—	16.0	—	16.6	—
500	15.6	—	15.2	—	15.8	—
600	14.8	—	14.4	—	15.0	—

m. : method

表4-17. オーステナイト系ステンレス鋼のヤング率 (縦弾性係数) の測定結果 (その2)
Measurement results of Young's modulus of austenitic stainless steels (Part 2)

Temp. (°C)	Young's modulus, $\times 10^3$ (kgf/mm ²)					
	SUS316		FBR SUS316			
	1/2-t, L		1/2-t, L		1/4-t, L	
	Vibration m.	Ewing method	Vibration m.	Ewing method	Vibration m.	Ewing method
25	19.5	19.8	19.3	20.7	18.9	20.5
100	19.1	19.1	19.0	20.1	18.5	19.9
200	18.2	18.2	18.1	19.2	17.5	18.7
300	17.3	17.4	17.1	18.5	16.7	18.2
400	16.5	—	16.3	—	15.9	—
500	15.7	—	15.5	—	15.2	—
600	15.0	—	14.7	—	14.3	—

表4-18. オーステナイト系ステンレス鋼のヤング率（縦弾性係数）の測定結果（その3）
Measurement results of Young's modulus of austenitic stainless steels (Part 3)

Temp. (°C)	Young's modulus, $\times 10^3$ (kgf/mm ²)			
	FBR SUS316		SUS321	
	1/4-t, C		1/2-t, L	
	Vibration m.	Ewing method	Vibration m.	Ewing method
25	19.1	20.2	19.8	19.4
100	18.7	19.6	19.4	18.5
200	17.8	18.6	18.5	17.6
300	16.9	18.1	17.6	16.8
400	16.1	—	16.7	—
500	15.3	—	15.9	—
600	14.6	—	15.0	—

表4-19. フェライト鋼のヤング率（縦弾性係数）の測定結果
Measurement results of Young's modulus of ferritic steels

Temp. (°C)	Young's modulus, $\times 10^3$ (kgf/mm ²)			
	2·1/4Cr-1Mo	Mod. 9Cr-1Mo		
	1/2-t, L	1/2-t, L	1/4-t, L	1/4-t, C
	Vibration m.	Vibration m.	Vibration m.	Vibration m.
25	20.9	21.6	21.2	21.4
100	20.8	21.4	21.1	21.3
200	20.3	20.8	20.5	20.7
300	19.4	20.0	19.8	19.9
400	18.6	19.1	18.9	19.0
500	17.3	18.1	17.9	18.0
600	16.5	16.8	16.7	16.8

表4-20. S R処理後のフェライト鋼のヤング率（縦弾性係数）の測定結果
 Measurement results of Young's modulus of S.R. heat treated ferrite steels

Temp. (°C)	Young's modulus, $\times 10^3$ (kgf/mm ²)				
	2-1/4Cr-1Mo	Mod. 9Cr-1Mo			
	740°C 8.4h AC	740°C 1h AC	740°C 8.4h AC		
	1/2-t, L	1/2-t, L	1/2-t, L	1/4-t, L	1/4-t, C
	Vibration m.	Vibration m.	Vibration m.	Vibration m.	Vibration m.
25	21.4	21.7	21.6	21.5	21.6
100	21.3	21.6	21.4	21.2	21.4
200	20.6	20.9	20.7	20.6	20.7
300	19.8	20.1	20.0	19.8	19.9
400	19.0	19.3	19.2	19.0	19.1
500	18.1	18.3	18.1	18.1	18.2
600	17.0	17.1	17.0	16.9	17.0

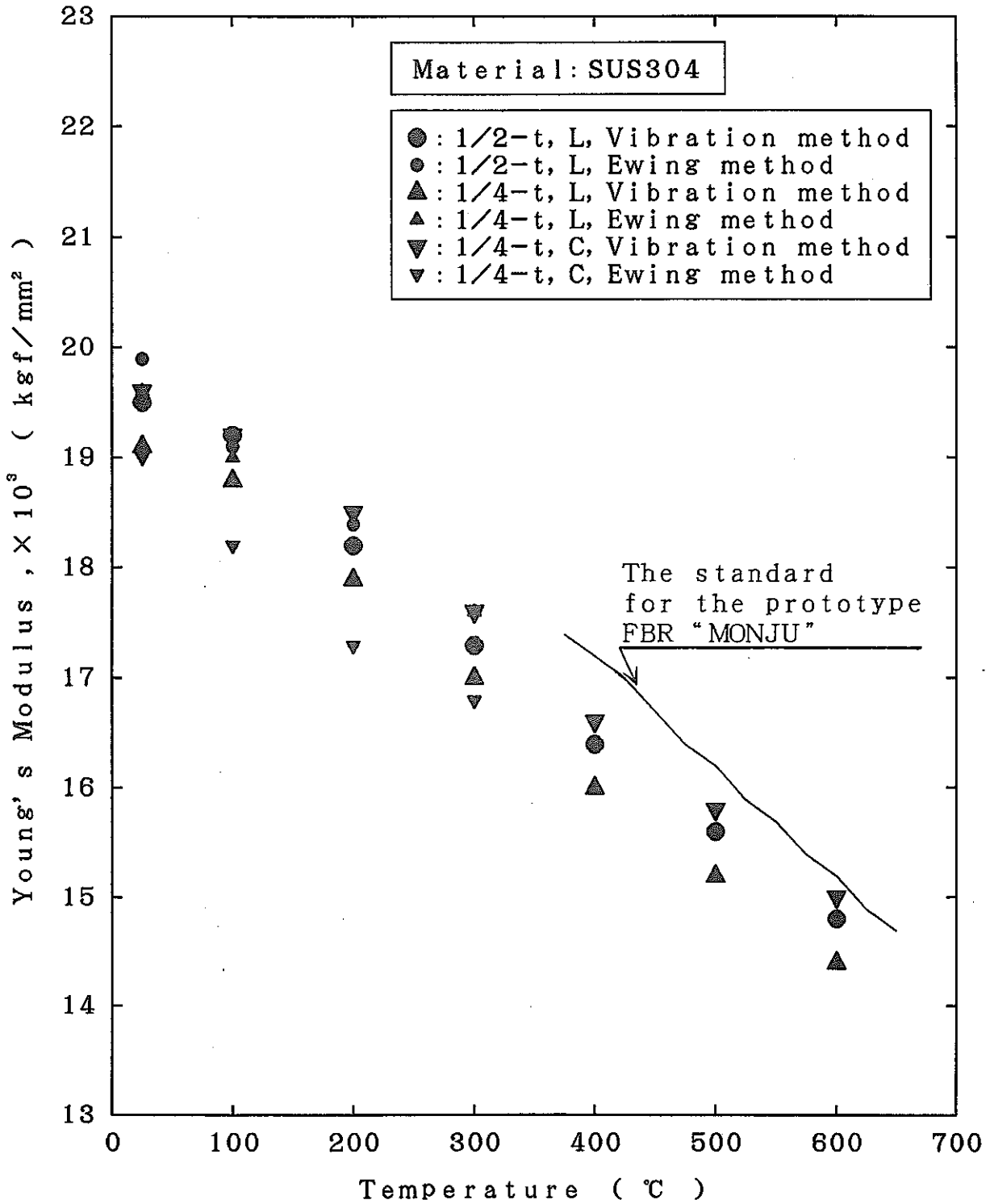


図4-28. SUS304のヤング率の測定結果
Measurement results of Young's modulus of SUS304

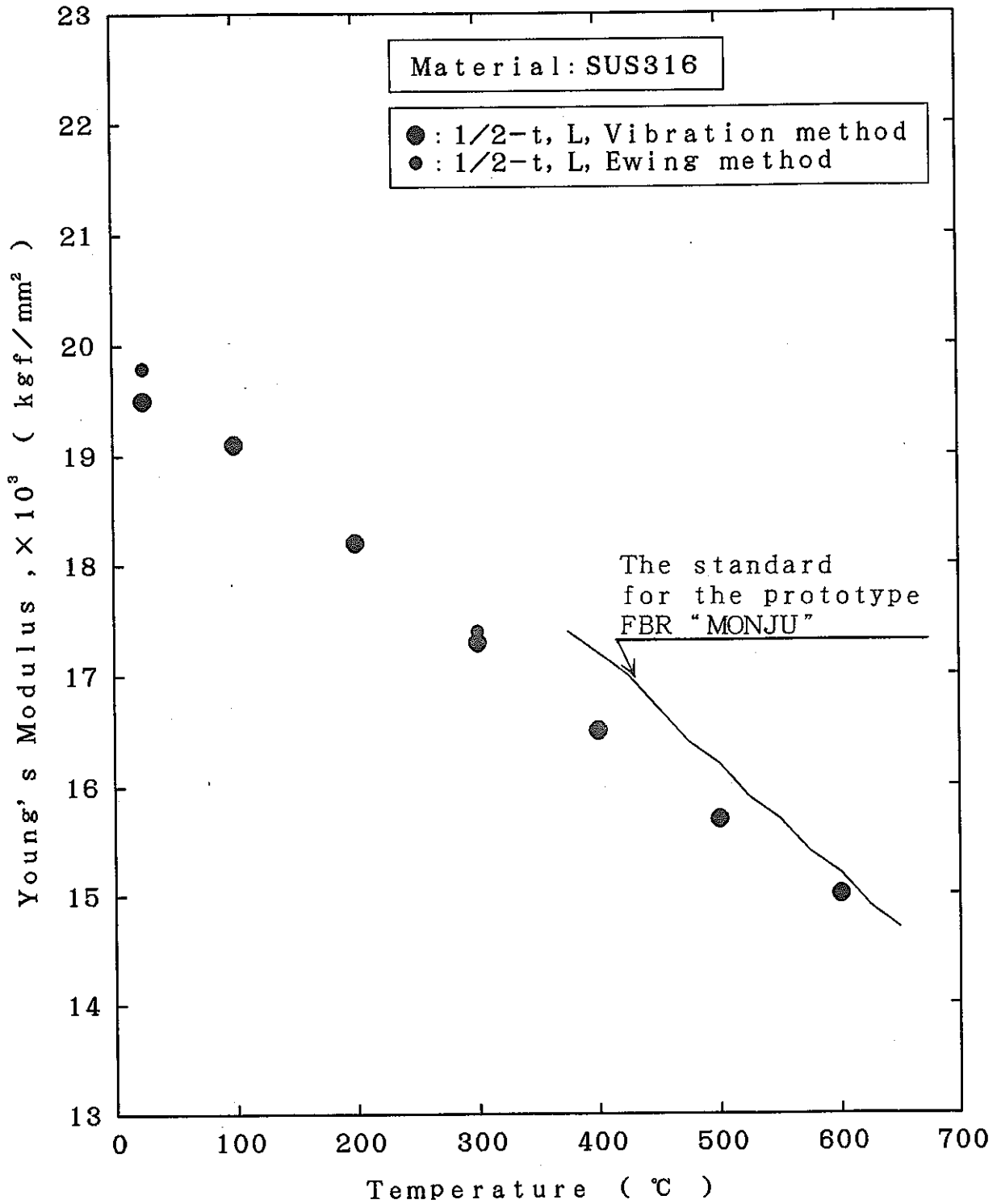


図4-29. SUS316のヤング率の測定結果
Measurement results of Young's modulus of SUS316

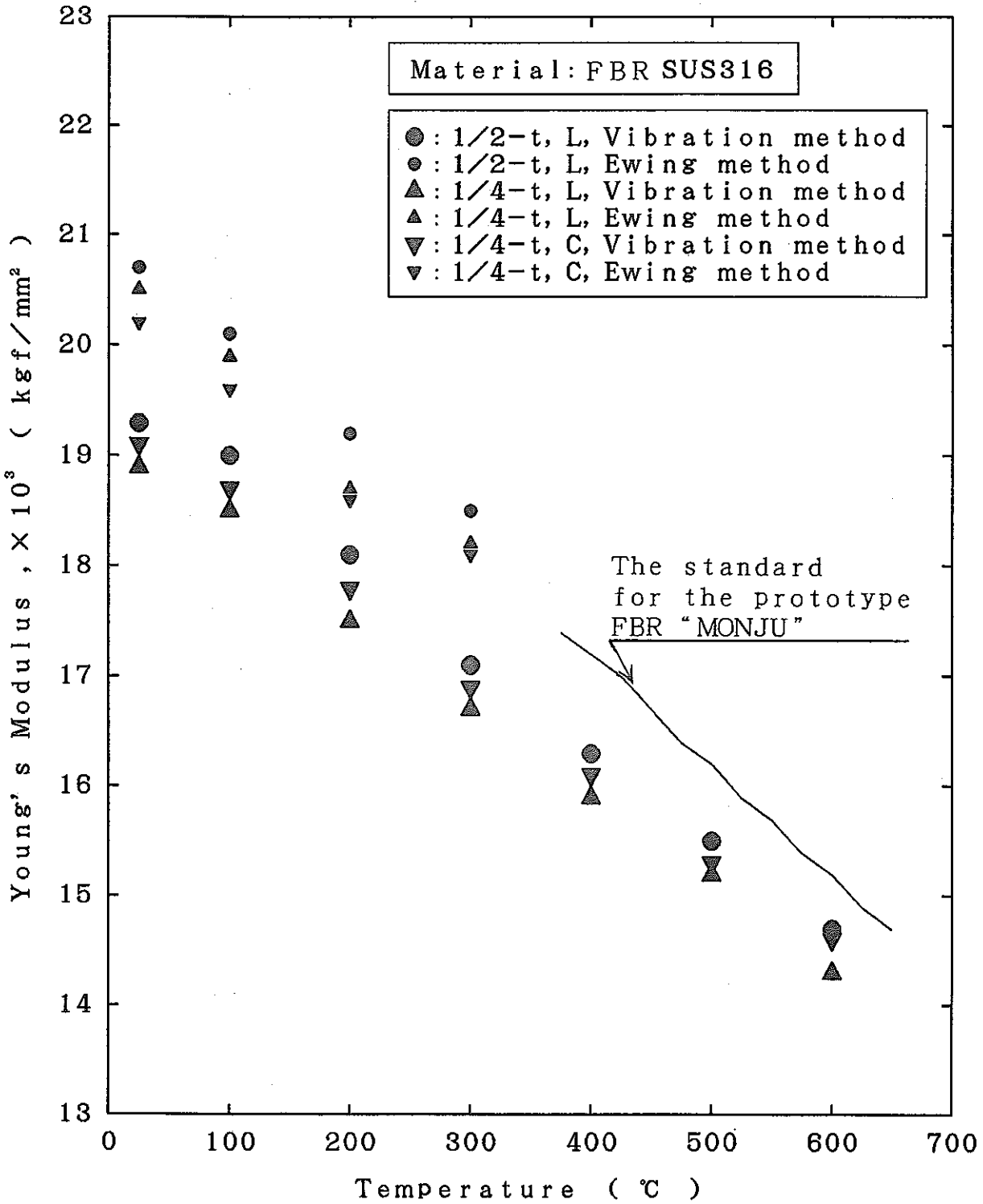


図4-30. FBR構造用SUS316のヤング率の測定結果
Measurement results of Young's modulus of FBR grade SUS316

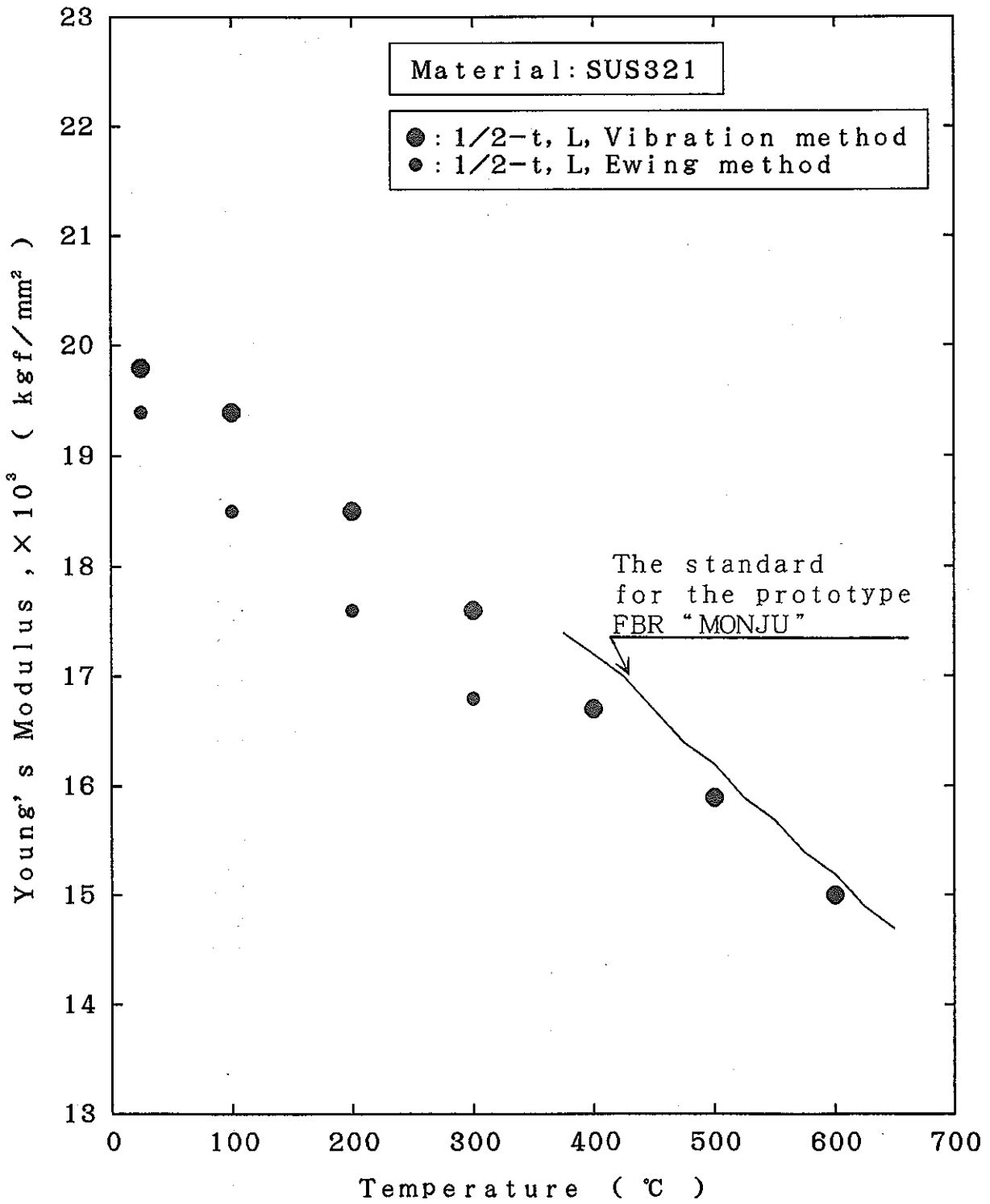


図4-31. SUS321のヤング率の測定結果
Measurement results of Young's modulus of SUS321

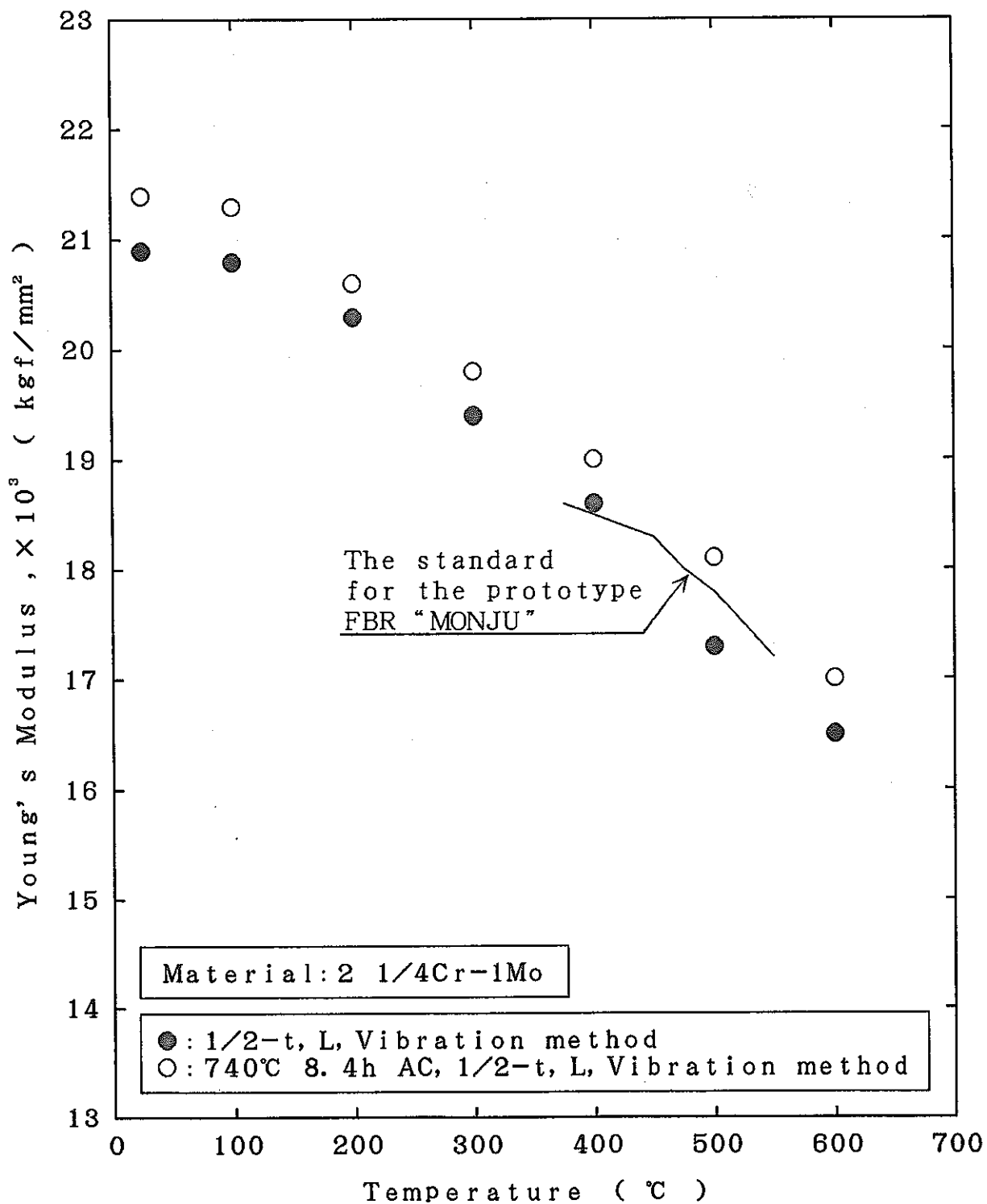


図4-32. 2-1/4Cr-1Mo鋼のヤング率の測定結果
Measurement results of Young's modulus of 2 1/4Cr-1Mo steel

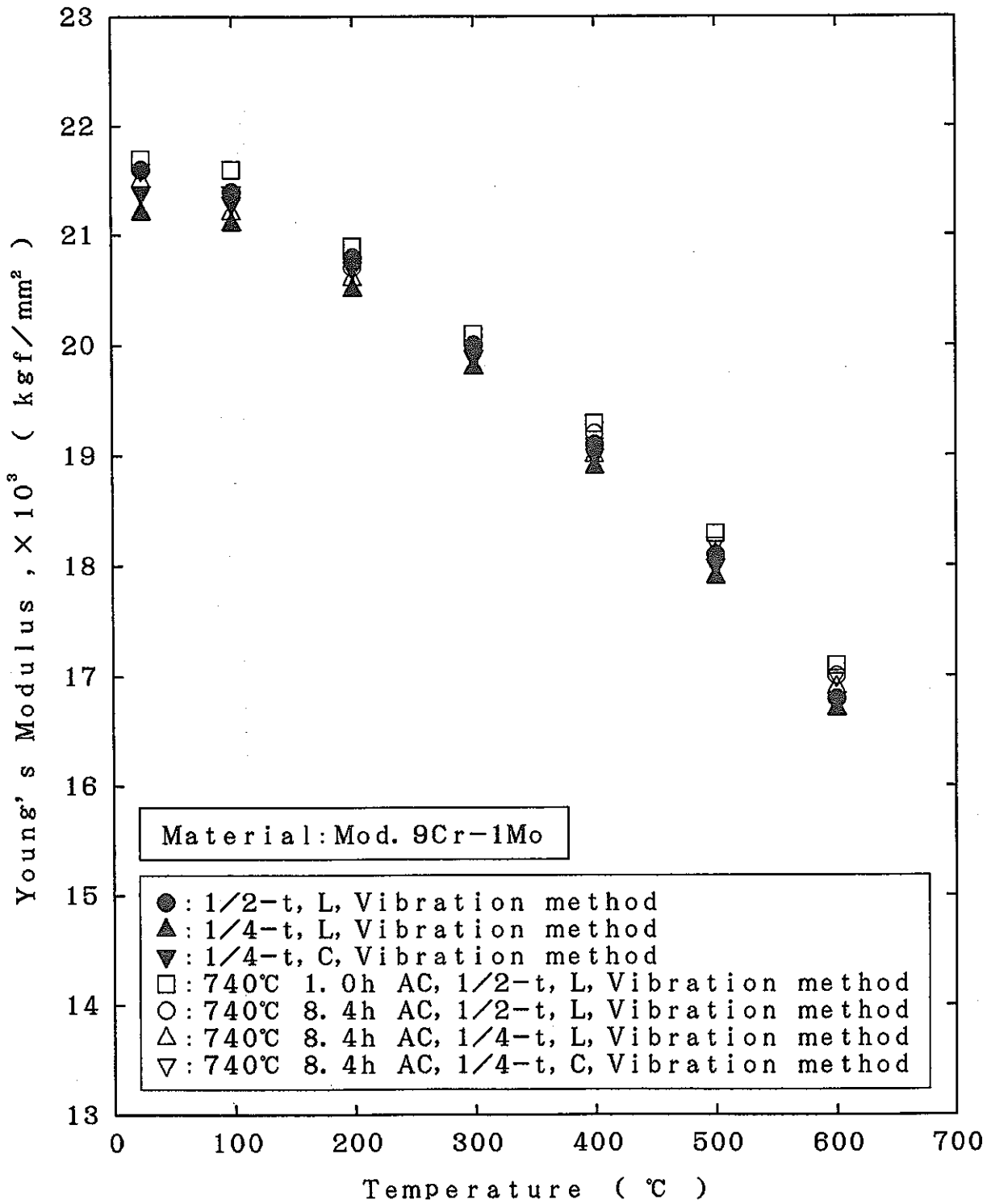


図4-33. Mod. 9Cr-1Mo鋼のヤング率の測定結果
Measurement results of Young's modulus of Mod. 9Cr-1Mo steel

表4-21. ポアソン比の測定結果 (20°C)
Measurement results of Poisson's ratio at 20°C

Type of steel	Position & direction	Poisson's ratio
SUS304	1/2-t, L	0.271
	1/4-t, L	0.255
	1/4-t, C	0.268
SUS316	1/2-t, L	0.275
FBR SUS316	1/2-t, L	0.265
	1/4-t, L	0.262
	1/4-t, C	0.260
SUS321	1/2-t, L	0.252
2·1/4Cr-1Mo	1/2-t, L	0.286
Mod. 9Cr-1Mo	1/2-t, L	0.270
	1/4-t, L	0.281
	1/4-t, C	0.270

表4-22. S R処理後のフェライト鋼のポアソン比の測定結果 (20°C)
Measurement results of Poisson's ratio of S.R. heat treated ferritic steels at 20 °C

Type of steel	S.R. heat treatment	Position & direction	Poisson's ratio
2·1/4Cr-1Mo	740°C 8.4h AC	1/2-t, L	0.274
Mod. 9Cr-1Mo	740°C 1h AC	1/2-t, L	0.272
		1/2-t, L	0.274
	740°C 8.4h AC	1/4-t, L	0.269
		1/4-t, C	0.272

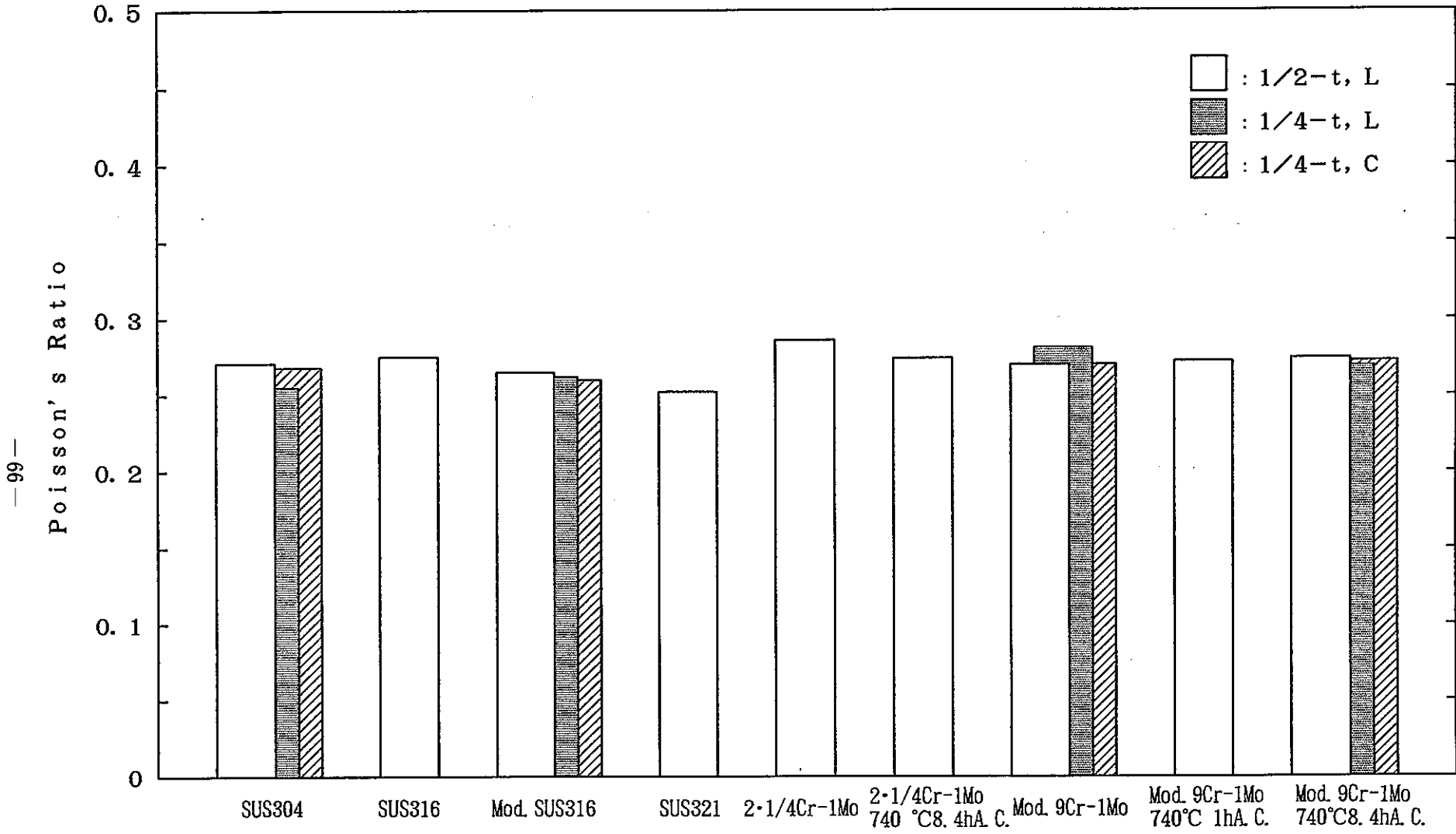


図4-34. ポアソン比の測定結果 (20°C)
Measurement results of Poisson's ratio at 20°C

5. まとめ

SUS304, SUS316, FBR SUS316, SUS321のオーステナイトステンレス鋼および2・1/4Cr-1Mo, Mod. 9Cr-1Mo のフェライト鋼の実機圧延材受入れままの素材と、フェライト鋼の受入れままの素材にSR処理を行ったものの各種物性値（比重，比熱，熱伝導率，熱膨張率，ヤング率，ポアソン比）を測定した。

原則的に板厚中心部圧延方向を基準に測定を行ったが、熱膨張率，ヤング率，ポアソン比など性質に方向依存性があることが予想されたため、一部鋼種では板厚 1/4の部位より圧延方向と板幅方向に試験片を採取し試験に供した。また、一部で「もんじゅ」設計基準値との比較も行った。

この結果、各物性値において採取位置や方向による差異はともに小さく、各供試材とも等方的であることが判明した。また、フェライト鋼におけるSR熱処理が各物性値にあたる影響は小さくあまり問題とならない程度であることが判明した。なお、ヤング率の測定では測定方法間や「もんじゅ」設計基準値との間で一部で約5%程度の差異が認められたが原因は不明であった。

フェライト鋼では、比熱の測定において2つの異常比熱がそれぞれ観測され、低温側の異常比熱は磁気変態に、高温側の異常比熱は相変態に起因すると考えられた。高温側の異常比熱の温度域は熱膨張率の測定において観察された膨張率の急変温度域と良く対応しており、相変態によるものであることが裏付けられた。なお、純鉄では相変態にともなう異常比熱は観察されないため、ここで観測された高温側の異常比熱は相変態そのものではなく、相変態にともなう炭化物の溶解に対応していると考えられた。

今回取得した圧延材の物性値データは、今後取得する鍛造材や鋼管等の物性値データと合わせて、各鋼種ごとに設計基準値の策定に用いられる予定である。

6. 謝 辞

本報のデータは(株)日鐵テクノリサーチに依頼して測定したものであり、実験方法の説明やデータの解釈等では(株)日鐵テクノリサーチ 部長代理 松村 理氏に有意義な御助言・御意見をいただきました。ここに感謝の意を表します。

付表-1. 熱膨張係数のFBR原型炉「もんじゅ」設計基準値
 The standard of coefficient of thermal expansion
 of structural materials for the prototype FBR "MONJU"

Temp. (°C)	Coefficient of thermal expansion ×10 ⁻⁶ (°C ⁻¹)	
	for SUS304, 316, 321	for 2+1/4Cr-1Mo
20~ 50	15.45	11.78
20~ 75	15.63	11.94
20~100	15.82	12.10
20~125	16.00	12.27
20~150	16.18	12.43
20~175	16.37	12.56
20~200	16.54	12.70
20~225	16.72	12.83
20~250	16.88	12.96
20~275	17.04	13.09
20~300	17.20	13.21
20~325	17.34	13.32
20~350	17.47	13.42
20~375	17.58	13.53
20~400	17.69	13.61
20~425	17.78	13.71
20~450	17.89	13.81
20~475	18.00	13.89
20~500	18.12	13.97
20~525	18.23	14.05
20~550	18.33	14.11
20~575	18.44	—
20~600	18.54	—
20~625	18.64	—
20~650	18.74	—

付表-2. 熱膨張率のFBR原型炉「もんじゅ」設計基準値（熱膨張係数の設計基準値より算出）
 The standard of thermal expansion coefficient of structural materials
 for the prototype FBR "MONJU" (calculated from the standard of
 coefficient of thermal expansion)

Temp. (°C)	Thermal expansion coefficient (%)	
	for SUS304, 316, 321	for 2·1/4Cr-1Mo
20	0	0
50	0.046	0.035
75	0.086	0.066
100	0.127	0.097
125	0.168	0.129
150	0.210	0.162
175	0.254	0.195
200	0.298	0.229
225	0.343	0.263
250	0.388	0.298
275	0.435	0.334
300	0.482	0.370
325	0.529	0.406
350	0.577	0.443
375	0.624	0.480
400	0.672	0.517
425	0.720	0.555
450	0.769	0.594
475	0.819	0.632
500	0.870	0.671
525	0.921	0.710
550	0.971	0.748
575	1.023	—
600	1.075	—
625	1.128	—
650	1.181	—

付表-3. ヤング率のFBR原型炉「もんじゅ」設計基準値
 The standard of Young's modulus of structural materials
 for the prototype FBR "MONJU"

Temp. (°C)	Young's modulus, $\times 10^3$ (kgf/mm ²)	
	for SUS304, 316, 321	for 2-1/4Cr-1Mo
375	17.4	18.6
400	17.2	18.5
425	17.0	18.4
450	16.7	18.3
475	16.4	18.0
500	16.2	17.8
525	15.9	17.5
550	15.7	17.2
575	15.4	—
600	15.2	—
625	14.9	—
650	14.7	—