

FBR 最適高クロム鋼の開発（第 1 報）
- V・Nb 成分調整材の製作と機械的性質の測定 -
（研究報告）

2004 年 3 月

核燃料サイクル開発機構

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
電話：029-282-1122（代表）
ファックス：029-282-7980
電子メール：jserve@jnc.go.jp

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)
2 0 0 4

FBR 最適高クロム鋼の開発（第 1 報）
- V・Nb 成分調整材の製作と機械的性質の測定 -
（研究報告）

若井隆純*、安藤勝訓*、
青砥紀身*

要旨

高速炉の実用化に向けて、経済性向上の一方策として、高温強度と熱的特性がバランスよく優れる高クロム（Cr）鋼を主要構造材料として採用することが検討されている。火力発電用ボイラ等において多くの実績を有する既存高 Cr 鋼には、多くの元素がそれぞれの目的で添加されているが、それらの効果の高温長時間における有効性および安定性に関しては、これまで必ずしも明らかにされているとはいえない。そこで、本研究では、高速炉最適高 Cr 鋼開発に反映するために、文献調査等に基づいて、バナジウム（V）とニオブ（Nb）を検討対象元素として選定し、これらの量をパラメトリックに調整した成分調整材を試作した。これらの成分調整材に対して、マルテンサイト単相が確保されていることを確認するための組織観察、有害な欠陥が内包されていないことを確認するための超音波探傷および非金属介在物等が無いことを確認するための清浄度測定を実施し、いずれも良好な結果を得た。また、室温における引張試験や衝撃試験、硬さ試験などの機械的試験を実施した。さらに、いくつかの試作材については、熱伝導率、熱膨張係数などの熱的特性や、縦弾性係数の測定を行った。

今後、V および Nb による強化機構の高温長時間における有効性および安定性を評価することを目的として、試作した成分調整材を用いて、長時間クリープ試験や金属組織観察を実施する。

*大洗工学センター 要素技術開発部 新材料研究グループ

**Development of the high chromium ferritic steel FBR grade (1)
Fabrications and mechanical properties of some trial products
controlling V and Nb contents**

T.Wakai^{*}, M.Ando^{*} and
K.Aoto^{*}

Abstract

The high chromium (Cr) ferritic steels have both excellent thermal properties and strength at elevated temperature. Though the conventional high-Cr steels are strengthened by addition of many kinds of elements, the efficiency and/or stability of those elements for long period have not been clarified. In this study, a series of trial products controlling the vanadium (V) and niobium (Nb) contents is produced to investigate the efficiency and/or stability of these elements. These trial products are observed to confirm that the product consists of fully martensitic structure using an optical microscopy. It is also confirmed that there are no harmful defect and non-metallic inclusions in these products. The tensile tests, impact tests and hardness tests are performed to obtain the mechanical properties of the products. For some products, the thermal properties, such as heat conductivity, specific heat, thermal diffusion rate and thermal expansion coefficients, and Young's modulus are measured.

Using the trial products, a series of long term mechanical tests, such as creep and creep-fatigue tests, is planned. The metallurgical examinations and analyses will also be conducted. Based on these test and examination results, it is expected that the long term efficiency and/or stability of the strengthen mechanisms by V and Nb will be clarified.

^{*}Advanced Material Research Group, Advanced Technology Division, O-arai Engineering Center

目 次

1. 緒言	1
2. FBR 最適高 Cr 鋼開発の方向性	2
2.1 開発目標の設定	2
2.2 耐熱過渡強度と Cr 量の関係	3
2.3 強度、延性および靱性に及ぼす V・Nb の影響	4
2.4 検討の方針	5
3. V・Nb 成分調整高 Cr 鋼の試作	13
3.1 化学成分	13
3.2 熱処理条件	15
3.3 化学成分分析	15
3.4 組織観察	15
3.5 超音波探傷	15
3.6 清浄度測定	16
4. 物理的・機械的性質の測定	33
4.1 材料物性値測定	33
4.2 ビッカース硬さ試験	34
4.3 室温における引張試験	35
4.4 シャルピ衝撃試験	36
5. 今後の予定	75
6. 結言	77
7. 謝辞	78
8. 参考文献	79
付録 成分調整試作材と Mod.9Cr-1Mo のミルシート	A.1

List of Tables

Table 2.1	Chemical compositions of the materials	.....	6
Table 2.2	Heat treatment conditions of the materials	.....	6
Table 3.1	Aimed chemical compositions of the trial products	.....	18
Table 3.2	Aimed chemical compositions of the super clean Mod.9Cr-1Mo steel	.....	18
Table 3.3	Shape and dimensions of the trial products and Mopd.9Cr-1Mo steel	.....	19
Table 3.4	Heat treatment conditions for the trial products and Mod.9Cr-1Mo steel	.....	19
Table 3.5	Analyzed chemical compositions of the trial products and Mod.9Cr-1Mo steel	.....	20
Table 3.6	Results of ultrasonic tests	.....	20
Table 3.7	Results of non-metallic inclusion counting	.....	26
Table 3.8	Results of the index cleanliness	.....	27
Table 4.1	Measurement results of density	.....	37
Table 4.2	Measurement results of heat conductivity	.....	37
Table 4.3	Measurement results of thermal expansion coefficients	.....	38
Table 4.4	Measurement results of Young's modulus	.....	40
Table 4.5	Results of Vicker's hardness tests	.....	41
Table 4.6	Results of tensile tests at room temperature	.....	45
Table 4.7	Results of Sharpy impact tests	.....	46

List of Figures

Fig. 2.1	Eventual goal of the development of the high-Cr steel FBR grade	7
	
Fig. 2.2	Relationship between Cr content and heat treatment	7
Fig. 2.3	Relationship between Cr content and thermal expansion coefficient	8
	
Fig. 2.4	Relationship between Cr content and thermal stress	8
Fig. 2.5	Effect of V and Nb addition on the material characteristics	9
Fig. 2.6	Influence of V and Nb content on creep strength of 9Cr steels	10
Fig. 2.7	Influence of V and Nb content on creep ductility of 9Cr steels	11
Fig. 2.8	Creep strength of the ultra high purity Fe-Cr alloy	12
Fig. 3.1	Microstructure observed by an optical microscopy	27
Fig. 4.1	Measurement results of specific heat and heat conductivity	47
Fig. 4.2	Measurement results of specific thermal expansion	48
Fig. 4.3	Measurement results of Young's modulus	49
Fig. 4.4	Results of Vicker's hardness tests	50
Fig. 4.5	Influence of V and Nb on hardness	56
Fig. 4.6	Influence of V and Nb on tensile properties	57
Fig. 4.7	Results of Charpy impact tests	61
Fig. 4.8	Influence of V and Nb on impact properties	73
Fig.5.1	Planned mechanical test programs	76
	

1. 緒言

高速炉の実用化に向けて、高温強度と熱的特性がバランスよく優れる高クロム（Cr）鋼を主要構造材料として採用することにより、配管の短縮化・物量削減を図り、設計自由度や経済性を向上させることが検討されている。火力発電用ボイラ等において多くの実績を有する既存高Cr鋼は、すぐれた高温強度と熱的特性を併せ持つ材料であるものの、高温長時間において延性が低下する傾向があることや靱性が乏しいことなどが問題点として指摘されていることから、これを高速炉構造材料に適用するにあたっては、添加元素や熱処理条件などに関する検討を行って、それらの性質を改善することが望まれる。また、既存高Cr鋼の高温強度は、多くの元素を添加することで得られる強化機構により達成されているが、それらの効果の高温長時間における有効性・安定性に関しては、これまで必ずしも明らかにされていない。耐熱鋼における主要な強化機構としては、固溶強化機構と析出強化機構がある。これらのうち、固溶強化機構に関し、筆者らは、主要な固溶強化元素であるタングステン（W）とモリブデン（Mo）の高温長時間での有効性・安定性に関する研究を別途実施している【1】。これまでの試験・分析の結果、Wを多く含む材料の長時間経過後の靱性が劣ることなどから、既存高クロム鋼よりもW添加量を減じた仕様案を、適用部位を区分して提示した。一方、析出強化機構に関しては、本研究においてバナジウム（V）およびニオブ（Nb）に着目し、これらの強化元素が合金鋼の強度、延性および靱性に及ぼす影響に関する現状の知見を整理したうえで、高速炉構造材料に最適な高Cr鋼開発の方向性を提示するために、これら添加元素の量をパラメトリックに調整した高Cr鋼試作材を製作した。そして、これらの試作材に対する機械的性質および物性値の測定を実施した。

2. FBR 最適高 Cr 鋼開発の方向性

2.1 開発目標の設定

高 Cr 鋼は、火力発電用ボイラにおいて多くの実績を持っているものの、これらにおいて要求される性質と、高速炉構造材料において要求される性質とは、異なるものである。したがって、高速炉の主要構造材料として最適な高 Cr 鋼を開発するためには、このような性質を踏まえて開発目標を設定しなければならない。

火力発電用ボイラでは熱効率向上のための高圧・高温化が志向されてきたのに対し、高速炉では、例えば配管においては冷却材ナトリウムの特徴から加圧する必要がないため圧力は低く、また、炉心燃料温度の制約等から構造材料の使用温度も比較的低い。また、実用化高速炉では経済性向上と廃棄物量削減のため長寿命化が志向され、数十年間無交換での供用が想定されている。さらに、高速炉構造材料に関しては、過渡熱応力繰返しに起因するクリープ疲労破損を防止する観点から延性が適切に確保されていること、および漏えい先行型破損（= Leak Before Break (LBB)）成立性の観点から靱性が適切に確保されていることが要求される。以上で述べた火力発電用ボイラと高速炉のそれぞれの材料開発において重要視される項目を、Table 2.1 に整理して示す。

例として、火力発電用ボイラにおいて使用実績のある SUS410J3 の化学成分を Table 2.2 に示す。この表から分かるとおり SUS410J3 には、Laves 相の微細析出による強化を目的として W および Mo が、MX の微細析出による強化を目的として V および Nb が、また、オースフォーマーとして Ni や Cu が加えられるなど、多くの合金元素が添加されている【2、3】。しかし、このような成分系は、火力発電用ボイラへの適用を目的として最適化が図られたものであり、これが火力発電用ボイラとは Table 2.1 に示すような使用条件や重要視すべき材料特性の異なる高速炉の構造材料に最適な成分であるとは必ずしも言えない。

以上のことから、高速炉構造材料用高 Cr 鋼の開発目標としては、既存の高クロム鋼の持つ耐熱過渡強度を多少犠牲にしてでも、延性および靱性、とくに高

温で長時間経過後のこれらの特性を向上させることを設定することが適切と考えた。以上の設定目標の概念図を、Fig.2.1 に示す。

2.2 耐熱過渡強度と Cr 量の関係

高 Cr 鋼の特徴の一つに、高熱伝導率と低熱膨張率が挙げられる。高速炉構造材料への適用を考えたとき、前者は中間熱交換器 (IHX) や蒸気発生器 (SG) の熱交換面積を小さくできることから機器のコンパクト化が期待できることを意味し、後者は熱過渡により発生する熱応力が小さいことを意味する。

著者らは、 $2^{1/4}\text{Cr-1Mo}$ 鋼等の市販鉄鋼材料から、著者らが東北大学金属材料研究所と協力して実施している高純度鉄基合金の機械的性質に関する研究【4】において使用した超高純度 60%Cr-Fe 合金までを対象に、熱膨張率、熱伝導率および縦弾性係数を測定し、耐熱過渡強度と Cr 量の関係を明らかにした【5】。

Cr 量と熱伝導率の関係を、Fig.2.2 に示す。この図から、Cr 量の増加に伴って熱伝導率は減少することがわかる。経済性の向上、廃棄物量削減等のため、高速炉機器は可能な限り小型化することが望まれるので、熱伝導率は大きい方がよい。Cr 量の増加に伴う熱伝導率の減少傾向は、約 30%Cr 付近でほぼ飽和するものの、Cr 量を大きくすることは、高速炉機器の小型化を阻害する方向に作用することが分かる。

Cr 量と熱膨張係数の関係を、Fig.2.3 に示す。この図から、Cr 量の増加に伴って熱膨張係数は減少することがわかる。一方、著者らは、縦弾性係数の Cr 量依存性が大きくないことを示した【5】。温度変化 T の熱過渡により生じる熱応力 σ_{th} は、次式によって弾性的に計算することができる；

$$\sigma_{th} = E \cdot \alpha \cdot T$$

ここで、 E は縦弾性係数、 α は熱膨張係数である。Cr 量と σ_{th} から α の熱過渡により発生する熱応力の関係を、Fig.2.4 に示す。この図から、熱過渡によ

り発生する熱応力は、Cr 量の増加に伴って減少するものの、20～30%Cr 程度で飽和することがわかる。

以上のことから、高速炉構造材料に高 Cr 鋼を適用する場合の Cr 量は大きければよいというわけではない。したがって、当面の高速炉最適高 Cr 鋼の開発に係る検討は、既存の 12%Cr 鋼レベルの Cr 量の材料をベースに進めることとする。

2.3 強度、延性および靱性に及ぼす V・Nb の影響

高 Cr 鋼の高温強度を向上させる目的で添加される強化元素には、W、Mo、V、Nb などがある。これらのうち、前 2 者の適正な組成については、原電・サイクル機構の共同研究【1】において検討が行われている。後 2 者は、析出強化によるクリープ強度向上を目的として積極的に添加される。これらの元素の働きについて文献調査を実施した結果、概ね以下のことが分かった；

クリープ中の炭化物・窒化物析出による析出強化

焼ならし時の微細分散析出による結晶粒微細化効果

Nb 炭化物を核とした V、Nb 複合析出物を形成し、クリープ強度向上に寄与

Nb(C,N)と V(C,N)の重畳析出により、クリープ強度向上に寄与

また、文献調査の結果得られた V・Nb 添加の効果、およびこれらと結びついて析出強化に寄与する炭素 (C) や窒素 (N) ならびに熱処理条件等との関係を整理して Fig.2.5 に示す。

9Cr 系鋼の 550～600 におけるクリープ強度に及ぼす V・Nb の影響を、Fig.2.6 に示す。この図から、V・Nb とも添加または V のみ添加した材料のクリープ強度は、V・Nb とも無添加または微量添加の材料のそれに比較して大きいことがわかる。つぎに、9Cr 系鋼管の 550～600 におけるクリープ破断伸びに及ぼす V・Nb 添加量の影響を、Fig.2.7 に示す。この図から、V・Nb 添加材のクリープ強度は、無添加材のそれに比較して小さいことがわかる。さらに、高 Cr 燃料被覆管材料 (フェライト - マルテンサイト二相鋼) の衝撃特性に及ぼす V・Nb の影響に関する検討においては、V・Nb 添加量の大きい材料の衝撃特性が、添加

量の小さい材料のそれに比較してやや小さいことが示されている【6】。これらのことから、V・Nbの添加は高Cr鋼の強度の向上には寄与するものの、延性や靱性にはむしろ負の効果を与えている可能性が示唆されたといえる。

一方、筆者らが東北大学金属材料研究所と協力して実施している高純度Fe-Cr合金の機械的性質に関する研究では、超高純度50%Cr-Fe合金の550℃におけるクリープ試験を行ったが、その結果、同合金はW・MoやV・Nbなどの析出強化機構を全く持たないにもかかわらず、Mod.9Cr-1Mo鋼なみのクリープ強度を有していることが分かる（Fig.2.8）。このことは、析出強化機構に依存しなくても、既存の鉄鋼材料に比肩する強度の材料を実現できる可能性があることを示唆していると言える。

2.4 検討の方針

以上のことから、本研究においては、延性および靱性、とくに高温で長時間経過後のこれらの特性を向上させることを主目的に、Cr量に関しては既存の12%Cr鋼のレベルで、VおよびNbによる強化機構の高温長時間での有効性・安定性に基づく高速炉最適高Cr鋼開発について考えることとする。

Table 2.1 Differences of the operating conditions and important characteristics between thermal power plant and FBR

	Thermal power plant	Fast breeder reactor
Operating temperature	High (> 600)	Relatively low (550)
Service period	Relatively short (Replace is supposed to be possible)	Long (Replace won't considered)
Important creep damage	High temperature creep	Long term creep
Other characteristics to be improved	Short term strength	Ductility (for creep-fatigue strength) Toughness (for LBB)

-9-

Table 2.2 Chemical compositions of SUS410J3

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	W	Cu	V	Nb	N	Al	B
0.11	0.27	0.64	0.016	0.002	0.33	10.54	0.34	1.76	1.00	0.19	0.048	0.071	0.001	0.0034

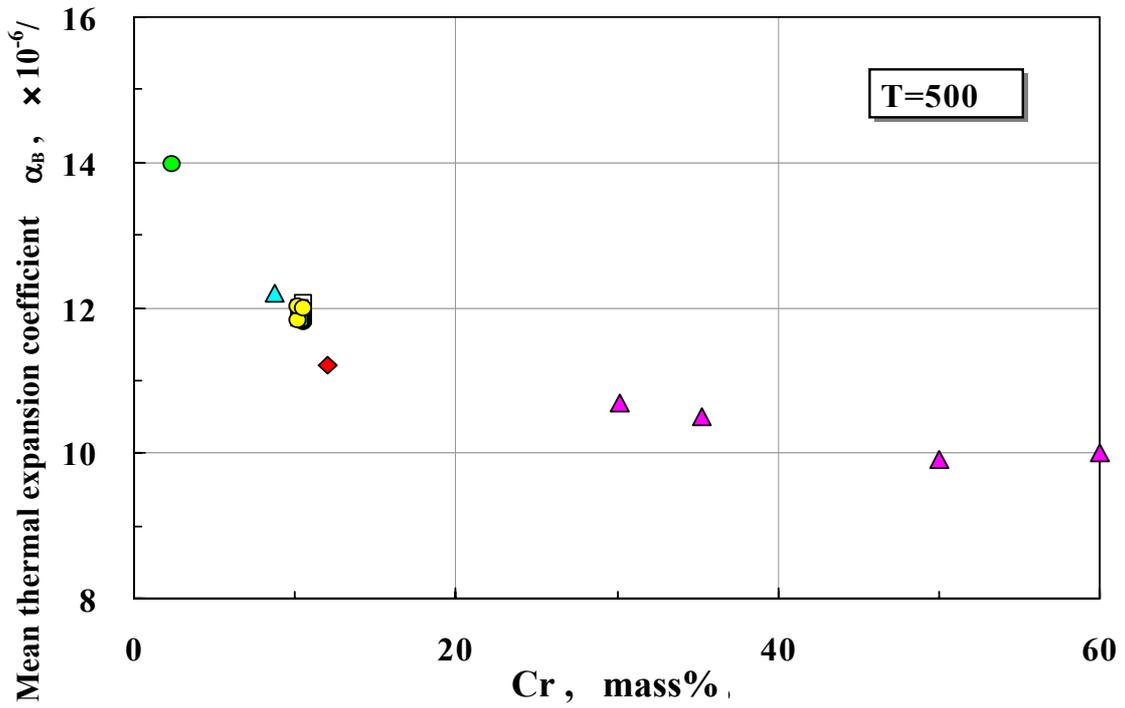


Fig.2.3 Relationship between Cr content and thermal expansion coefficient

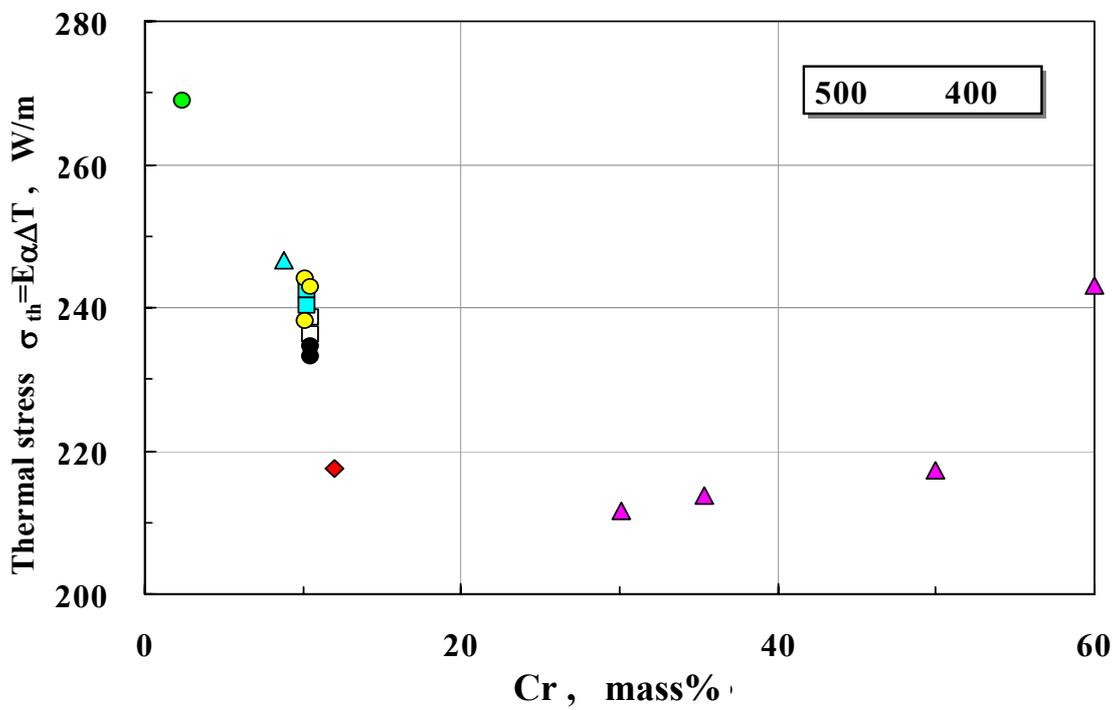


Fig.2.4 Relationship between Cr content and thermal stress

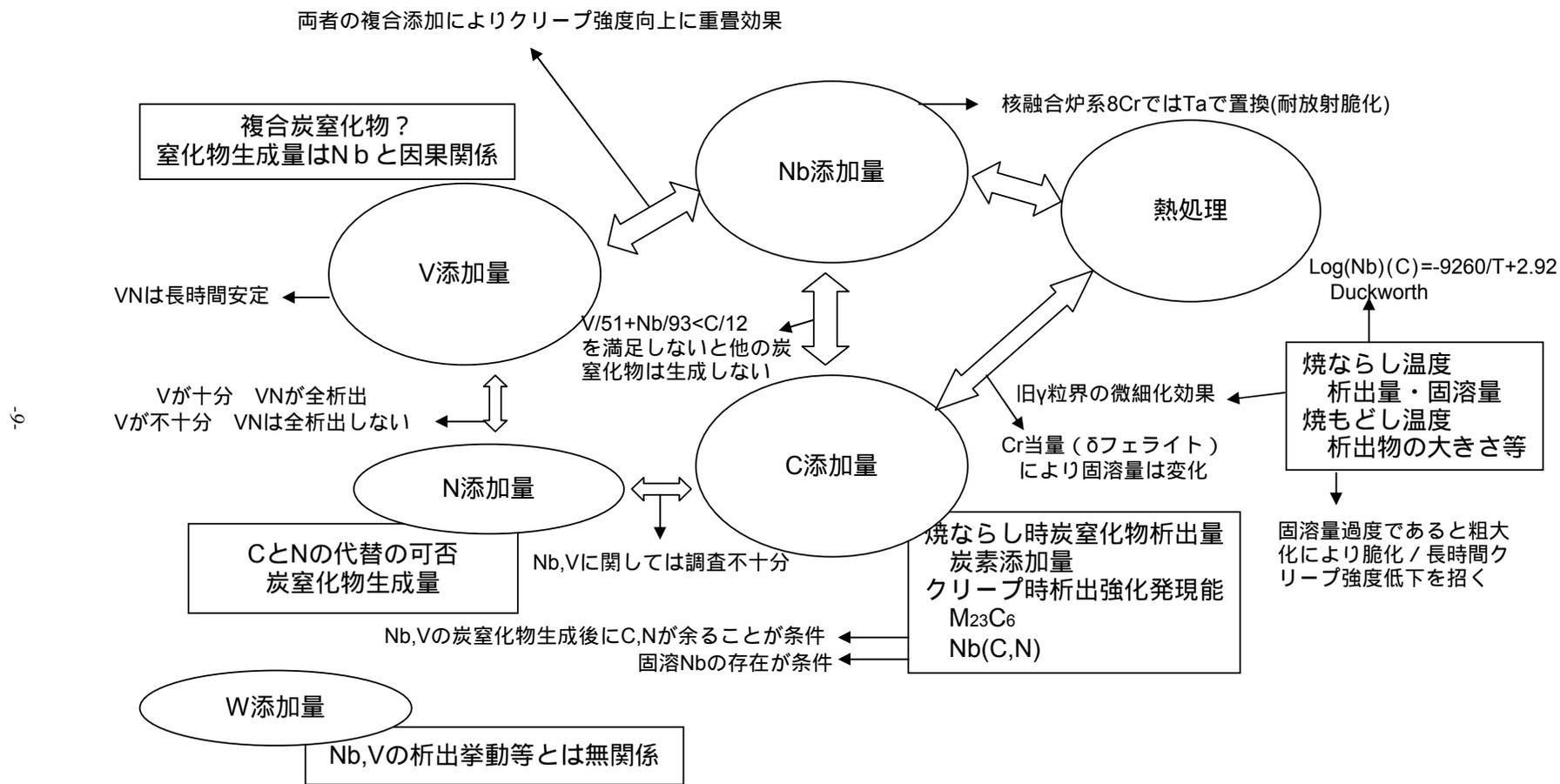
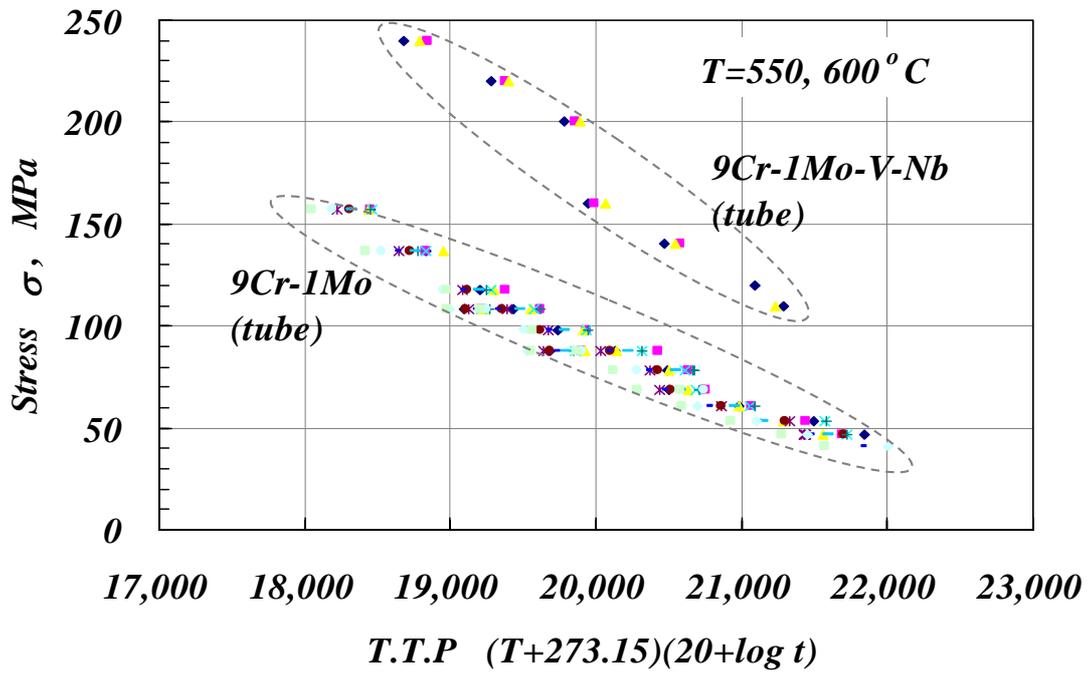
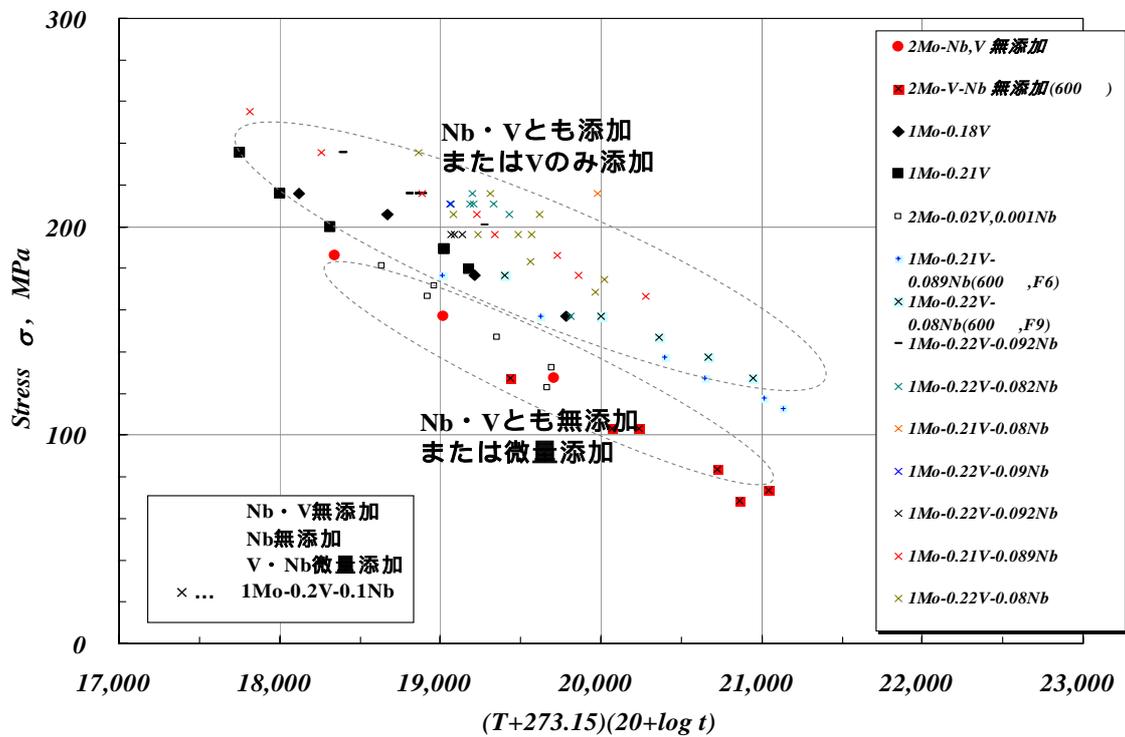


Fig.2.5 Effect of V and Nb addition on the material characteristics

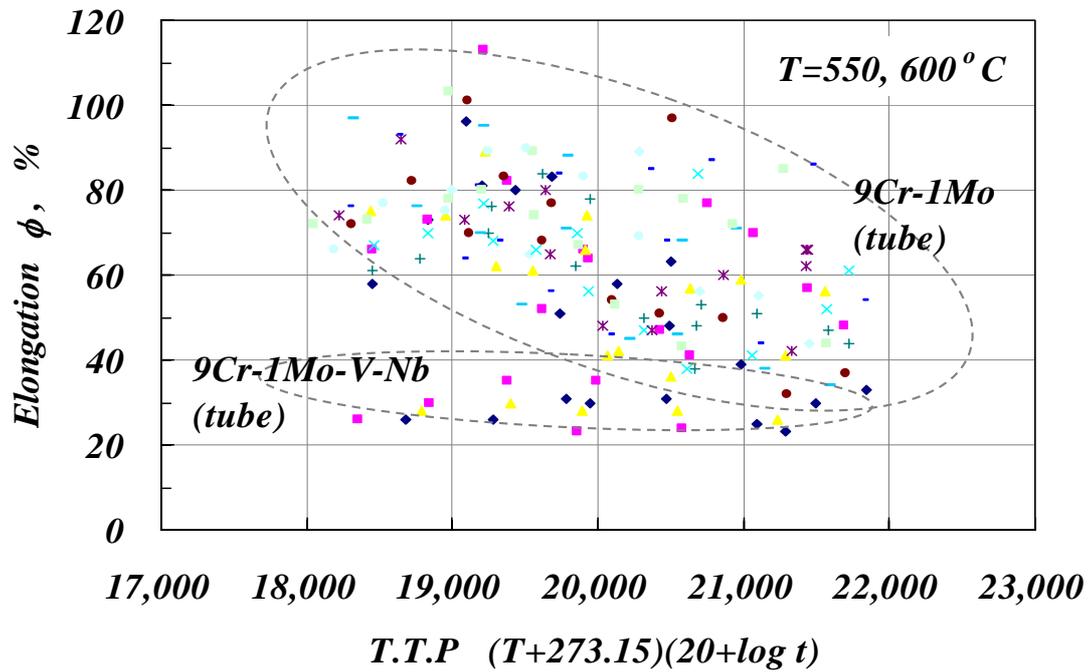


(a) Data from "NRIM creep data sheets"

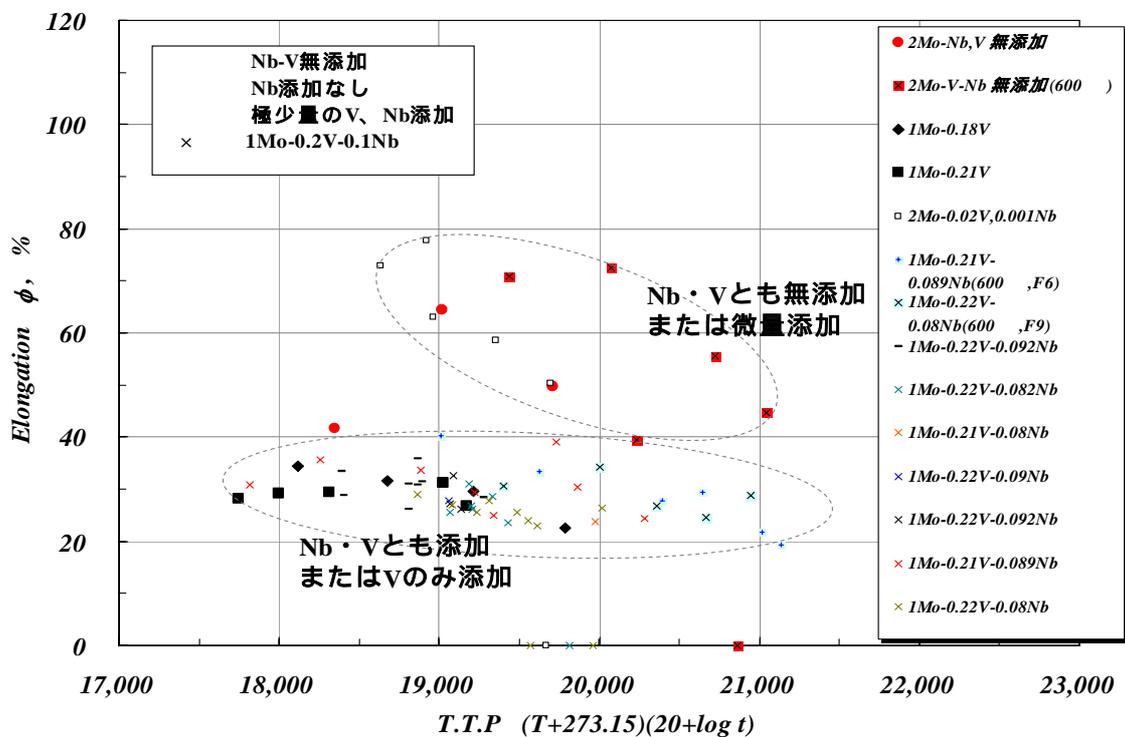


(b) Data from "SMAT"

Fig.2.6 Influence of V and Nb contents on creep strength of 9Cr steels



(a) Data from "NRIM creep data sheets"



(b) Data from "SMAT"

Fig.2.7 Influence of V and Nb contents on creep ductility of 9Cr steels

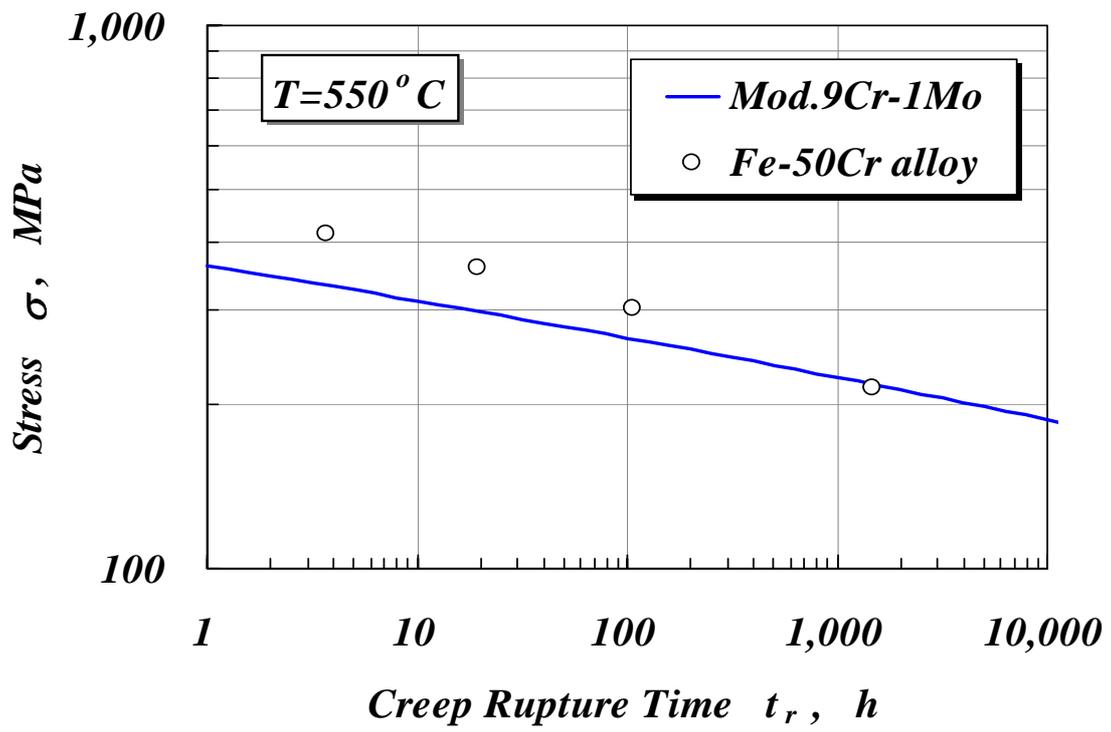


Fig.2.8 Creep strength of the ultra high purity Fe-Cr alloy

3. V・Nb 成分調整高 Cr 鋼の試作

前章で設定した目的のため、V・Nb 成分を調整した高 Cr 鋼を試作した。

また、これらの高 Cr 鋼との比較検討のため、これらと同じ製作条件で、Mod.9Cr-1Mo 鋼をあわせて製作した。これらの鋼材のミルシートは、付録 2 にまとめた。

3.1 化学成分

試作材の製作において目標とした化学成分を Table 3.1 に示す。化学成分の設定に当たっては、およそ以下のように考えた；

(1) Cr

Cr 量に関しては、前章における検討で、熱的特性の観点などから、既存の 12Cr 鋼のレベルとする方向性を定めた。ここでは、さらに高速炉における使用条件を考慮して設定を行った。すなわち、高速炉においては低内圧などにより 1 次応力が小さい反面、経済性向上のため長時間の供用が想定されていることから、低応力長時間における強度特性を、高応力短時間におけるそれよりも重要視した合金設計とすることが適切であると考えた。橋詰らによる高 Cr 鋼の 650 におけるクリープ破断時間に及ぼす Cr 量の影響に関する検討によれば、高応力短時間クリープ強度を重要視するならば Cr 量は大きめに、低応力長時間のクリープ強度を重要視するならば Cr 量は小さめに設定することが適当とする知見が得られている【7】。このことと Mod.9Cr-1Mo 鋼との差別化を図ることを考慮して、ここでは Cr 量を 10.0% に設定した。

(2) W と Mo

W と Mo は、いずれも高温強度の改善を意図して添加される元素であり、クリープ強度の観点からこれらの添加量は、Mo 当量 ($= Mo + W / 2$) で 1.5% 程度とすることが、最適とされている【8】。ただ、これらの元素は、Laves 相として析出し強化に寄与する反面、長時間で粗大化して延性・韌性の低下を招く懸念があるとされている【9】。

また、一般的に W は比較的高温に、Mo は比較的低温に有効であるとされている【8】。高速炉における使用温度が炉容器出口温度でも 550 程度であるこ

とを考慮すれば、W よりも Mo が有効と考えることが適当である。以上のことを勘案して、ここでは W は無添加とし、Mo 量を 1.20% に設定した。

(3) V・Nb

V と Nb は、いずれも炭化物あるいは窒化物を形成して結晶粒の微細化に寄与する。また、これらの炭化物・窒化物は、微細に析出してクリープ変形に対し析出強化として寄与する。これらの元素は炭素・窒素を取り合うため、その働きは互いに独立ではないため、これらの最適な組み合わせに関する研究が複数ある。藤田は、10Cr-2Mo-0.05C 鋼の $600 \times 10,000\text{h}$ クリープ強度の観点から最適な V および Nb の添加量に関する検討を行い、これらの元素の最適な添加量は、それぞれおよそ 0.10% と 0.05% であるとしている【8】。一方、伊勢田らは、12Cr-1Mo-1W-0.1C 鋼について同様の検討を行い、これらの元素の最適な添加量は、それぞれおよそ 0.25% と 0.05% であるとしている【10】。ただし、伊勢田らは、 $600 \times 10,000\text{h}$ において最大のクリープ強度（応力 = $15.5\text{kgf}/\text{mm}^2$ (= 152MPa)) を得たのは V0.25% / Nb0.05% の組成であるが、V0.21% / Nb 無添加の組成でも、これとほとんど同等の 1 万時間クリープ強度 = $15.4\text{kgf}/\text{mm}^2$ (= 151MPa) を得ている。また、前章における検討で、V および Nb は、高 Cr 鋼のクリープ延性を低下させる可能性を指摘した。そこで本研究では、V および Nb の添加量を、これらに既往研究で述べられている最適値よりも小さめにパラメトリックに設定した。すなわち、

V	:	無添加	~	0.06%	~	0.12%	~	0.18%
Nb	:	無添加	~	0.01%	~	0.03%	~	0.05%

を選択した。

なお、Table 3.1 に示した試作材に加え、多くの試験データが入手可能な Mod.9Cr-1Mo 鋼を、これらの試作材と同様の真空溶解条件で製作して、試作材等との強度・延性・靱性における比較を行うこととした。目標とした化学成分を Table 3.2 に示す。

V・Nb 成分調整高 Cr 鋼および Mod.9Cr-1Mo 鋼の製品形状を Table 3.3 に示す。

3.2 熱処理条件

試作材の熱処理条件を Table 3.4 に示す。本熱処理条件は、V・Nb 成分調整高 Cr 鋼および Mod.9Cr-1Mo 鋼に共通であり、焼戻し状態で 100% マルテンサイト組織となることを想定して設定した。

3.3 化学成分分析

V・Nb 成分調整高 Cr 鋼および Mod.9Cr-1Mo 鋼試作材が目標とした化学成分どおりに製作されたことを確認するため、JIS G 0321 (1966) 【11】に従って、溶鋼分析（とりべ分析）および成分分析を行った。その結果得られた試作材の化学成分を、Table 3.5 に示す。いずれの試作材においても、各成分元素の量は、Table 3.1 あるいは Table 3.2 に掲げた目標値に対して、それぞれの表に示された許容変動範囲内の成分となっていることが分かる。

3.4 組織観察

V・Nb 成分調整高 Cr 鋼および Mod.9Cr-1Mo 鋼試作材に対しては、100% 焼戻しマルテンサイトとすることにより、長時間組織安定性を確保しようと考えた。このことから、 δ -フェライト生成の無いことを確認するために、板厚の 1/4 および 1/2 の位置について、光学顕微鏡による組織観察を実施した。観察に先立ち、エメリー紙による機械研磨により鏡面を得た後、室温にて塩酸：硝酸：蒸留水 = 1：3：2 の混合液での化学エッチングを行った。各試作材の組織写真を、Fig.3.1 に示す。いずれにおいても、 δ -フェライトは観察されなかった。

3.5 超音波探傷

V・Nb 成分調整高 Cr 鋼および Mod.9Cr-1Mo 鋼試作材に、有害な欠陥が内在していないことを確認するため、JIS G 0801 (1993) 【12】に従って、超音波探傷試験を行った。その結果を Table 3.6 に示す。いずれにおいても、有害な欠陥指示はなかった。

3.6 清浄度測定

V・Nb 成分調整高 Cr 鋼および Mod.9Cr-1Mo 鋼試作材に、有害な量の非金属介在物が無いことを確認するため、JIS G 0555 (1998) 【13】に従って、清浄度の確認（非金属介在物の顕微鏡試験）を行った。観察は 60 視野実施し、各視野内を $20 \times 20 (= 400)$ 個の格子に分けた。各視野において介在物によって占められた格子点数を Table 3.7 に、各試作材の清浄度を Table 3.8 にそれぞれ示す。これらの表から分かるとおり、いずれの試作材においても、A 系（硫化物、珪酸塩など）・B 系（アルミナなど）・C 系（粒状酸化物など）非金属介在物はいずれも 0.1% 未満であることが確認され、材料の機械的性質に影響を及ぼす水準ではないと考えられる。

Table 3.1 Aimed chemical compositions of the trial products (wt.%)

No.	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	W	sol.Al	N	V	Nb
1	0.12	<0.01	0.70	0.010	0.005	<0.01	10.0	1.20	0.00	<0.0010	0.05	0.00	0.00
2	0.12	<0.01	0.70	0.010	0.005	<0.01	10.0	1.20	0.00	<0.0010	0.05	0.00	0.01
3	0.12	<0.01	0.70	0.010	0.005	<0.01	10.0	1.20	0.00	<0.0010	0.05	0.00	0.03
4	0.12	<0.01	0.70	0.010	0.005	<0.01	10.0	1.20	0.00	<0.0010	0.05	0.00	0.05
5	0.12	<0.01	0.70	0.010	0.005	<0.01	10.0	1.20	0.00	<0.0010	0.05	0.06	0.00
6	0.12	<0.01	0.70	0.010	0.005	<0.01	10.0	1.20	0.00	<0.0010	0.05	0.06	0.01
7	0.12	<0.01	0.70	0.010	0.005	<0.01	10.0	1.20	0.00	<0.0010	0.05	0.06	0.03
8	0.12	<0.01	0.70	0.010	0.005	<0.01	10.0	1.20	0.00	<0.0010	0.05	0.12	0.00
9	0.12	<0.01	0.70	0.010	0.005	<0.01	10.0	1.20	0.00	<0.0010	0.05	0.12	0.01
10	0.12	<0.01	0.70	0.010	0.005	<0.01	10.0	1.20	0.00	<0.0010	0.05	0.12	0.03
11	0.12	<0.01	0.70	0.010	0.005	<0.01	10.0	1.20	0.00	<0.0010	0.05	0.18	0.00
(Tolerance)	±0.02	±0.03 Not added	±0.03	<0.010 Not added	<0.0010 Not added	<0.01 Not added	±0.3	±0.03	<0.01 Not added	T-Al <0.030	±0.01	±0.02	±0.01

Table 3.2 Aimed chemical compositions of the super clean Mod.9Cr-1Mo steel (wt.%)

No.	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	W	sol.Al	N	V	Nb
12	0.10	0.25	0.43	0.006	0.001	<0.01	8.8	0.95	0.00	<0.0010	0.06	0.22	0.08
(Tolerance)	±0.02	±0.03	±0.03	<0.010 Not added	<0.001 Not added	<0.01 Not added	±0.3	±0.03	<0.01 Not added	T-Al <0.030	±0.01 (<0.0700)	±0.02	±0.01

Table 3.3 Shape and dimensions of the trial products and Mod.9Cr-1Mo steel

Shape	Hot rolled plate
Length	600 mm
Width	180 mm
Thickness	30 mm
Number of products	3

Table 3.4 Heat treatment conditions for the trial products and Mod.9Cr-1Mo steel

	Temperature	Tolerance	Time	Cooling
Normalizing	1,060	±10	60 min.	AC
Tempering	760	+ 0 - 10	60 min.	AC

Table 3.5 Analyzed chemical compositions of the trial products and Mod.9Cr-1Mo steel

No.		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	W	sol.Al	T-AL	N	V	Nb	O
1	Ladle	0.110	<0.002	0.69	<0.002	0.0022	<0.002	10.21	1.20	<0.01	<0.002		0.049	<0.002	<0.002	---
	Check	0.106	<0.002	0.69	0.002	0.0022	<0.002	10.19	1.21	<0.002	<0.002	<0.002	0.050	<0.002	0.003	0.0054
2	Ladle	0.110	<0.002	0.70	<0.002	0.0022	<0.002	10.20	1.15	<0.01	<0.002		0.052	<0.002	0.012	---
	Check	0.109	<0.002	0.68	0.002	0.0023	<0.002	10.15	1.16	<0.002	<0.002	<0.002	0.052	<0.002	0.012	0.0028
3	Ladle	0.110	0.004	0.69	<0.002	0.0022	<0.002	10.19	1.18	<0.01	<0.002		0.048	<0.002	0.030	---
	Check	0.108	0.003	0.68	0.002	0.0023	<0.002	10.11	1.18	<0.002	<0.002	0.00	0.048	<0.002	0.031	0.0058
4	Ladle	0.110	0.003	0.69	<0.002	0.0022	<0.002	10.20	1.18	<0.01	<0.002		0.048	<0.002	0.050	---
	Check	0.108	0.003	0.68	0.002	0.0023	<0.002	10.16	1.18	<0.002	<0.002	<0.002	0.049	<0.002	0.051	0.0052
5	Ladle	0.110	<0.002	0.69	<0.002	0.0022	<0.002	10.23	1.20	<0.01	<0.002		0.049	0.06	<0.002	---
	Check	0.108	<0.002	0.68	0.002	0.0023	<0.002	10.18	1.21	<0.002	<0.002	0.00	0.051	0.06	0.003	0.0047
6	Ladle	0.110	<0.002	0.70	<0.002	0.0023	<0.002	10.14	1.19	<0.01	<0.002		0.048	0.06	0.010	---
	Check	0.107	<0.002	0.69	0.002	0.0022	<0.002	10.21	1.20	<0.002	<0.002	<0.002	0.048	0.06	0.012	0.0051
7	Ladle	0.110	<0.002	0.71	<0.002	0.0023	<0.002	10.24	1.20	<0.01	<0.002		0.048	0.06	0.030	---
	Check	0.107	<0.002	0.69	0.002	0.0022	<0.002	10.18	1.20	<0.002	<0.002	<0.002	0.049	0.06	0.031	0.0045
8	Ladle	0.110	<0.002	0.69	<0.002	0.0019	<0.002	10.12	1.17	<0.01	<0.002		0.048	0.12	<0.002	---
	Check	0.108	<0.002	0.69	0.002	0.0019	<0.002	10.19	1.19	<0.002	<0.002	<0.002	0.049	0.12	0.003	0.0045
9	Ladle	0.110	<0.002	0.70	0.003	0.0024	<0.01	10.06	1.18	<0.01	<0.002		0.048	0.12	0.010	---
	Check	0.106	<0.002	0.69	0.002	0.0022	<0.002	10.12	1.20	<0.002	<0.002	<0.002	0.048	0.12	0.012	0.0046
10	Ladle	0.011	<0.002	0.70	0.003	0.0023	<0.010	10.03	1.18	<0.01	<0.002		0.048	0.12	0.030	---
	Check	0.105	<0.002	0.69	0.002	0.0023	<0.002	10.10	1.21	<0.002	<0.002	<0.002	0.047	0.12	0.032	0.0041
11	Ladle	0.094	0.250	0.43	0.003	0.0007	<0.01	8.83	0.93		<0.002		0.063	0.22	0.081	
	Check	0.091	0.240	0.43	0.002	0.0006	<0.002	8.90	0.94	<0.002	<0.002	<0.002	0.062	0.22	0.082	0.0024
12 (Mod.9Cr-1Mo)	Ladle	0.110	<0.002	0.70	<0.002	0.0020	<0.002	10.20	1.18	<0.01	<0.002		0.048	0.18	<0.002	---
	Check	0.108	<0.002	0.69	0.002	0.0019	<0.002	10.16	1.20	<0.002	<0.002	<0.002	0.049	0.18	0.003	0.0047

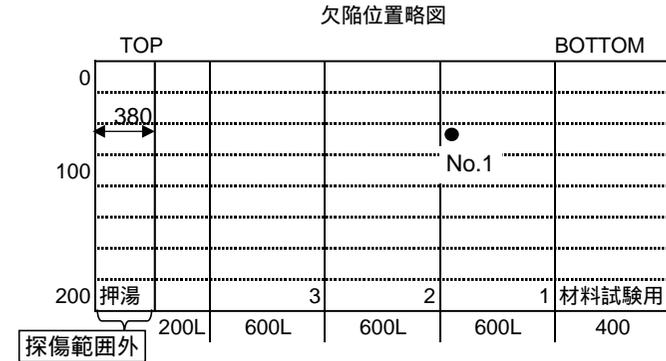
Table 3.6 Results of ultrasonic tests

試験日	H15.10.6	UST基準	JIS G 0801
製品番号	No.1 ~ No.12	使用探傷器	UFD 360
寸法(mm)	30x200x2,400 + 押湯	探触子	TOKIMEC 5Z6x25N
		探傷感度	RB-E、50%+12dB
		判定レベル	L検出レベル
		その他	エコー高さ5%以上を記録

		エコー高さ
欠陥区分	x	> 100%
		> 50%
		> 25%
	-	25%

No.1 (30tx220wx2400L)

欠陥明細								
No.	I1-高さ (%)	評価	幅位置 (mm)	長さ位置		寸法(mm) 幅×長	深さ (mm)	備考
				基点	距離(mm)			
1	35		65	B	950	2×5	3	ㇿ 疵



No.2 (30tx215wx2420L)

欠陥明細								
No.	I1-高さ (%)	評価	幅位置 (mm)	長さ位置		寸法(mm) 幅×長	深さ (mm)	備考
				基点	距離(mm)			
1	12	-	80	T	50	3×10	6	ㇿ 疵
2	38		95	T	75	3×5	16.5	

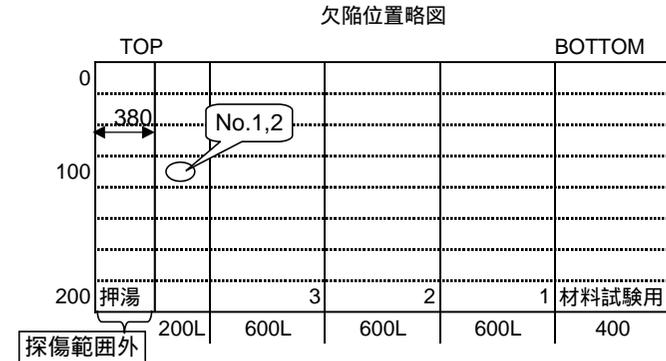


Table 3.6 (contd.) Results of ultrasonic test

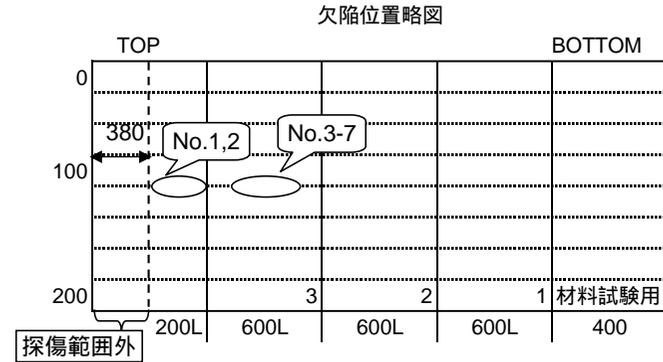
No.3 (30x215wx2420L)

欠陥明細								
No.	I-I-高さ (%)	評価	幅位置 (mm)	長さ位置		寸法(mm) 幅×長	深さ (mm)	備考
				基点	距離(mm)			
No defect								
表面凹み多い								



No.4 (30x215wx2400L)

欠陥明細								
No.	I-I-高さ (%)	評価	幅位置 (mm)	長さ位置		寸法(mm) 幅×長	深さ (mm)	備考
				基点	距離(mm)			
1	51		95	T	10	2×30	14.5	
2	25		97	T	75	2×20	15.5	
3	5	-	105	T	175	2×18	14.5	
4	8	-	100	T	270	2×25	15	
5	9	-	105	T	305	2×21	15.5	
6	5	-	105	T	470	2×21	15.5	
7	5	-	105	T	735	2×20	16	
参考								



No.5 (30x215wx2450L)

欠陥明細								
No.	I-I-高さ (%)	評価	幅位置 (mm)	長さ位置		寸法(mm) 幅×長	深さ (mm)	備考
				基点	距離(mm)			
1	12	-	110	T	50	2×23	14.5	
2	5	-	105	T	1000	2×15	15.5	

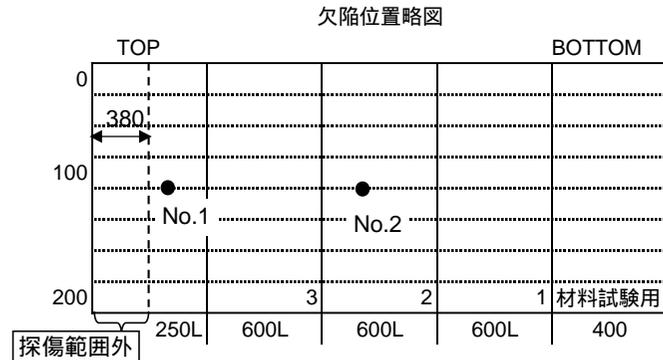
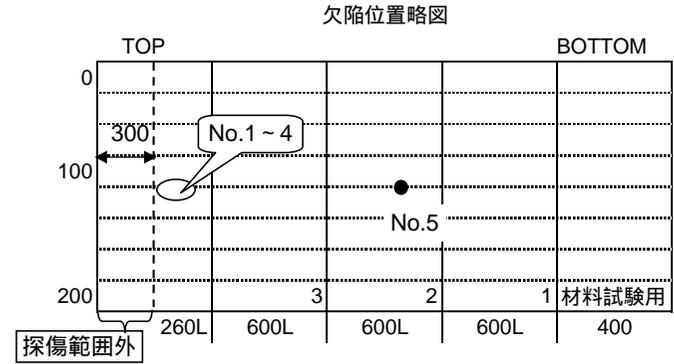


Table 3.6 (contd.) Results of ultrasonic test

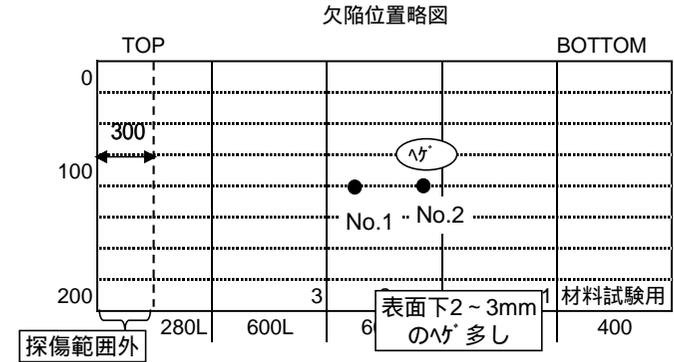
No.6 (30t×220w×2460L)

No.	I1-高さ (%)	評価	幅位置 (mm)	長さ位置		寸法(mm) 幅×長	深さ (mm)	備考
				基点	距離(mm)			
				1	9	-	100		T	50	2×20	15.5
2	20	-	115	T	90	2×50	15	
3	15	-	110	T	165	2×16	15	
4	17	-	108	T	185	2×25	14.5	
5	5	-	105	T	1340	2×25	15	



No.7 (30t×215w×2530L)

No.	I1-高さ (%)	評価	幅位置 (mm)	長さ位置		寸法(mm) 幅×長	深さ (mm)	備考
				基点	距離(mm)			
				1	5	-	110		T	1040	2×20	15
2	70	-	105	T	1430	2×30	2	∧が50Lの部分は削除



No.8 (30t×215w×2465L)

No.	I1-高さ (%)	評価	幅位置 (mm)	長さ位置		寸法(mm) 幅×長	深さ (mm)	備考
				基点	距離(mm)			
				1	7	-	108		T	130	2×2	15
2	10	-	100	T	163	2×2	14	
3	16	-	100	T	210	2×20	15	
4	10	-	110	T	250	2×110	15	
5	6	-	98	T	445	2×20	15	

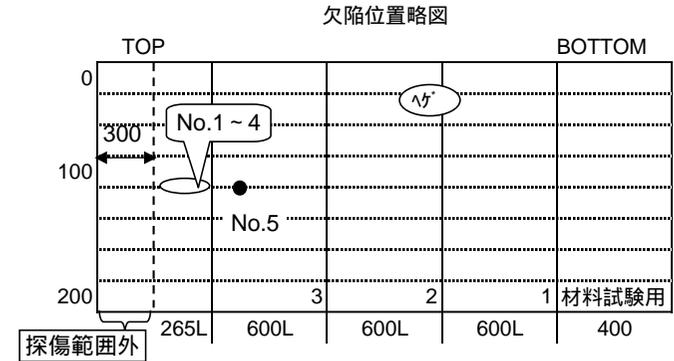
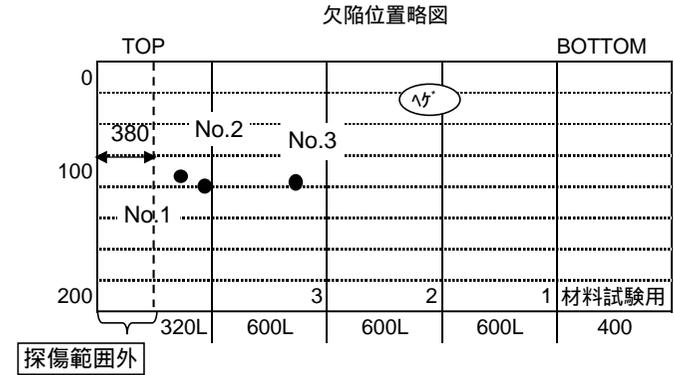


Table 3.6 (contd.) Results of ultrasonic test

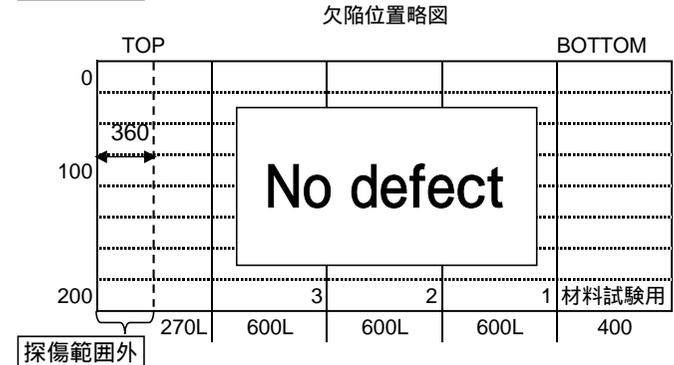
No.9 (30t×210w×2520L)

欠陥明細								
No.	I-I-高さ (%)	評価	幅位置 (mm)	長さ位置		寸法(mm) 幅×長	深さ (mm)	備考
				基点	距離(mm)			
1	7	-	136	T	345	2×2	16	
2	7	-	94	T	455	2×2	15	
3	12	-	105	T	590	3×4	15	



No.10 (30t×210w×2470L)

欠陥明細								
No.	I-I-高さ (%)	評価	幅位置 (mm)	長さ位置		寸法(mm) 幅×長	深さ (mm)	備考
				基点	距離(mm)			
No defect								



No.11 (30t×210w×2300L)

欠陥明細								
No.	I-I-高さ (%)	評価	幅位置 (mm)	長さ位置		寸法(mm) 幅×長	深さ (mm)	備考
				基点	距離(mm)			
1	46		105	T	20	3×8	15.5	
2	6	-	105	T	185	2×25	14.5	
3	35		115	T	330	2×20	2.5	ㄨ

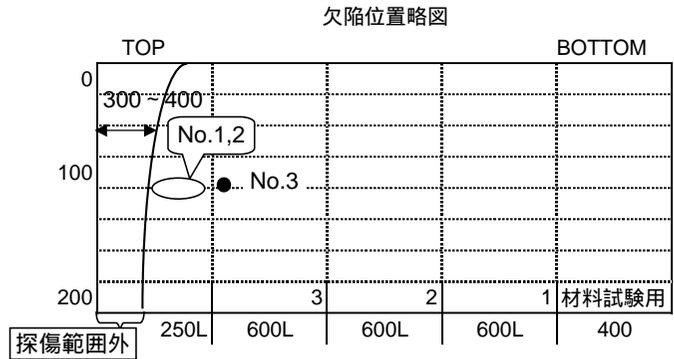


Table 3.6 (contd.) Results of ultrasonic test

No.12 (30t×200W×2400L)

No.	I口高さ (%)	評価	幅位置 (mm)	長さ位置		寸法(mm) 幅×長	深さ (mm)	備考	
				基点	距離(mm)				
				1	12.5	-	80		B
2	5	-	100	T	1250	5×30	17		

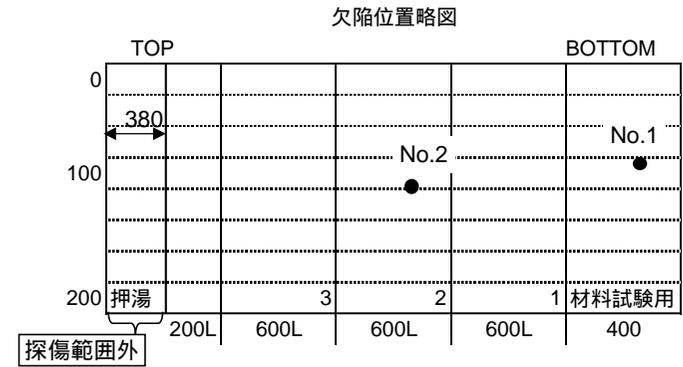


Table 3.8 Results of the index of cleanliness (d%)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

The index of cleanliness of the test steel(d%) was shown as follows,

$d = n / (p * f) * 100(\%)$ where, n:number of grating points occupied by the conclusions through the visual fields numbering f.

p:Total number of grating points on the glass plate in the visual field.

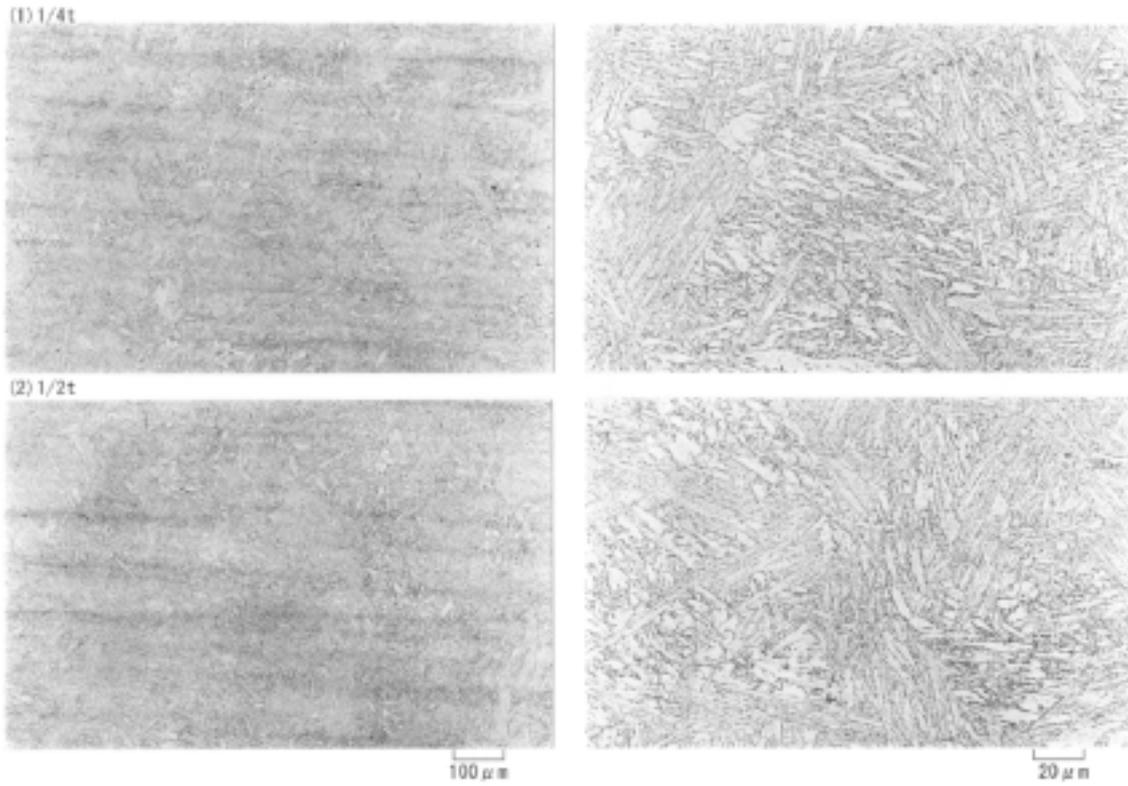
f:Number of the visual fields.

A Type inclusion:Inclusion formed by viscous deformation during hot working.

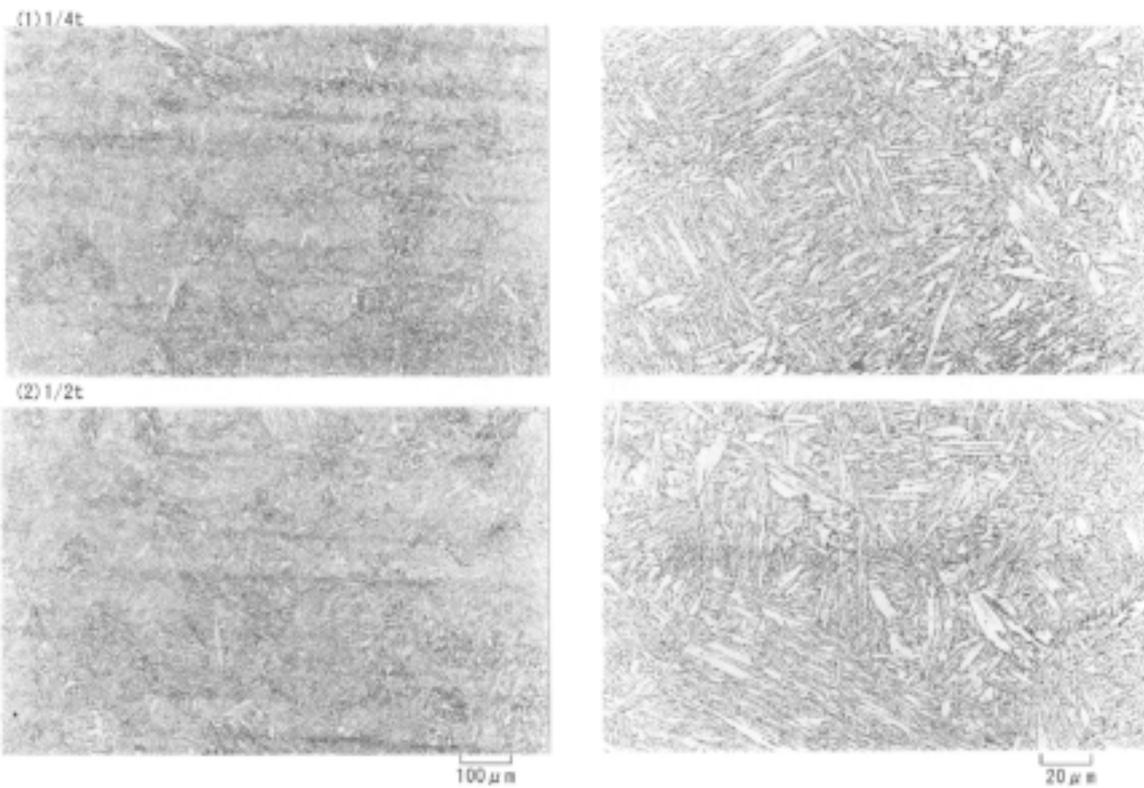
(A1:sulphides, A2:silicates, etc.)

B type inclusion:Inclusion formed by granular inclusions discontinuously and collectively disposed in the working direction.(alumina, etc.)

C type inclusion:Inclusion formed by irregular dispersion without viscous deformation, (granular oxide, etc)

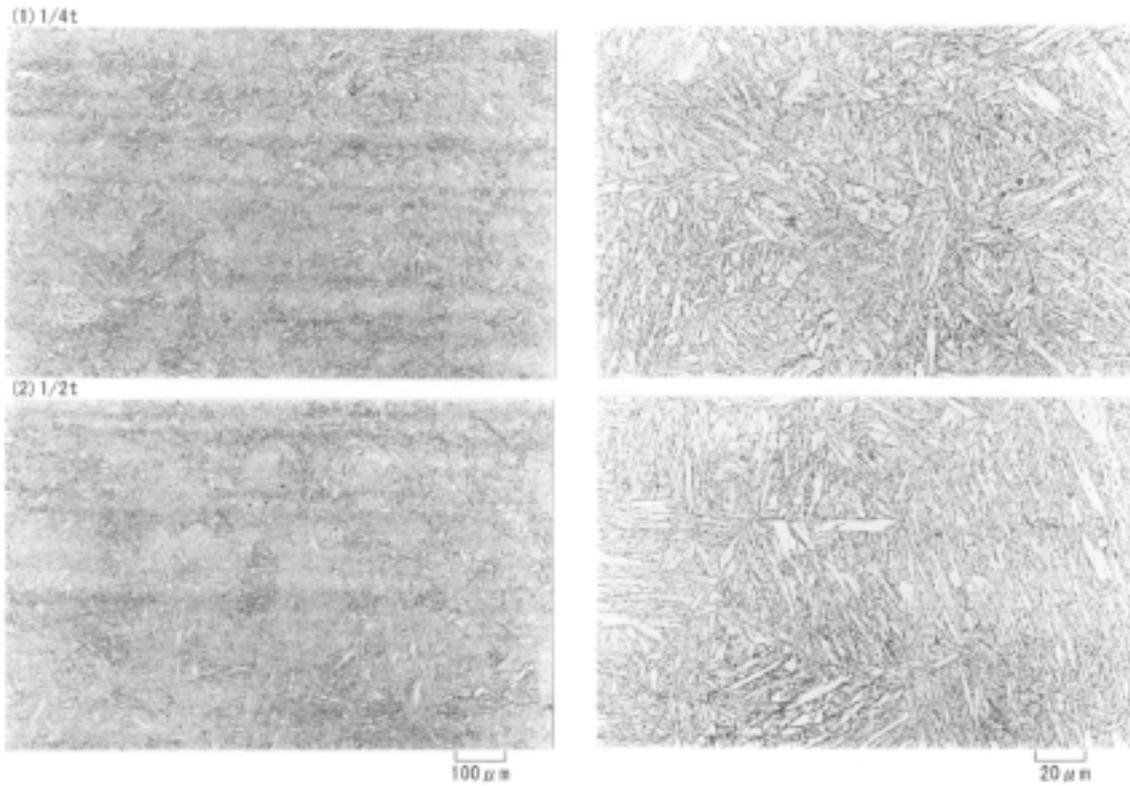


(a) Trial product No.1 (V0.00%/Nb0.00%)

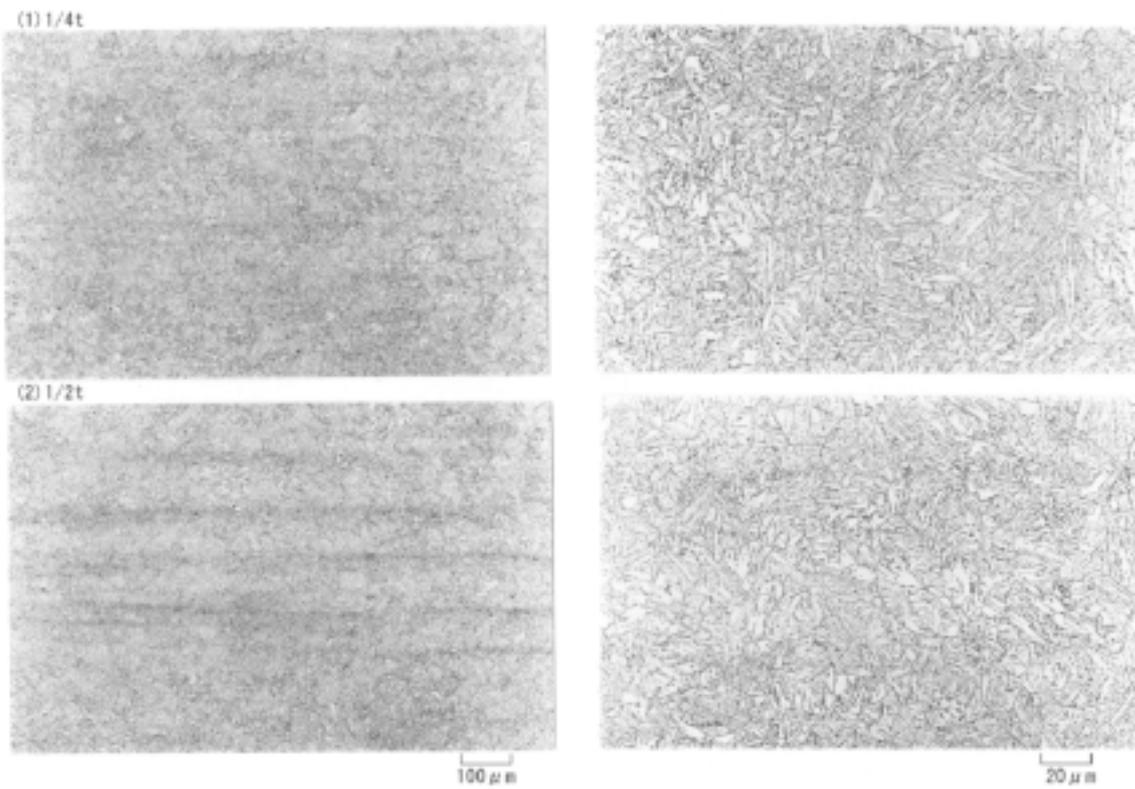


(b) Trial product No.2 (V0.00%/Nb0.01%)

Fig.3.1 Microstructure observed by an optical microscopy

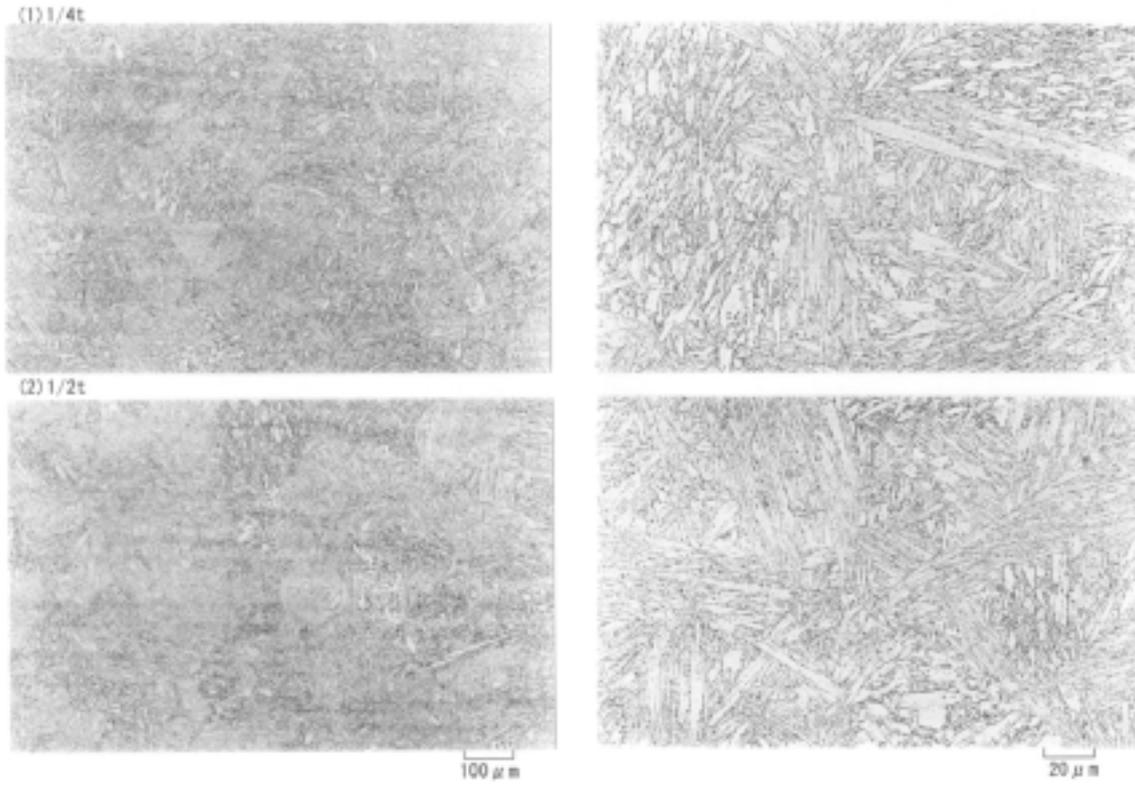


(c) Trial product No.3 (V0.00%/Nb0.03%)

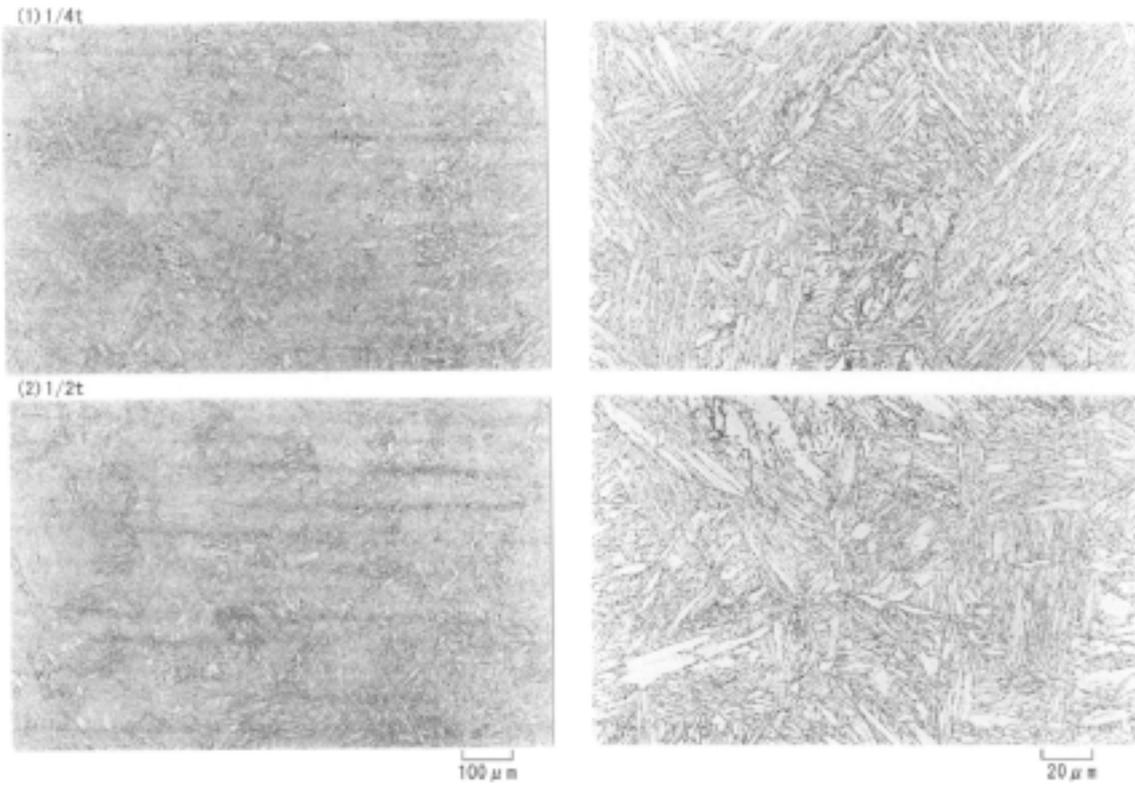


(d) Trial product No.4 (V0.00%/Nb0.05%)

Fig.3.1 (contd.) Microstructure observed by an optical microscopy

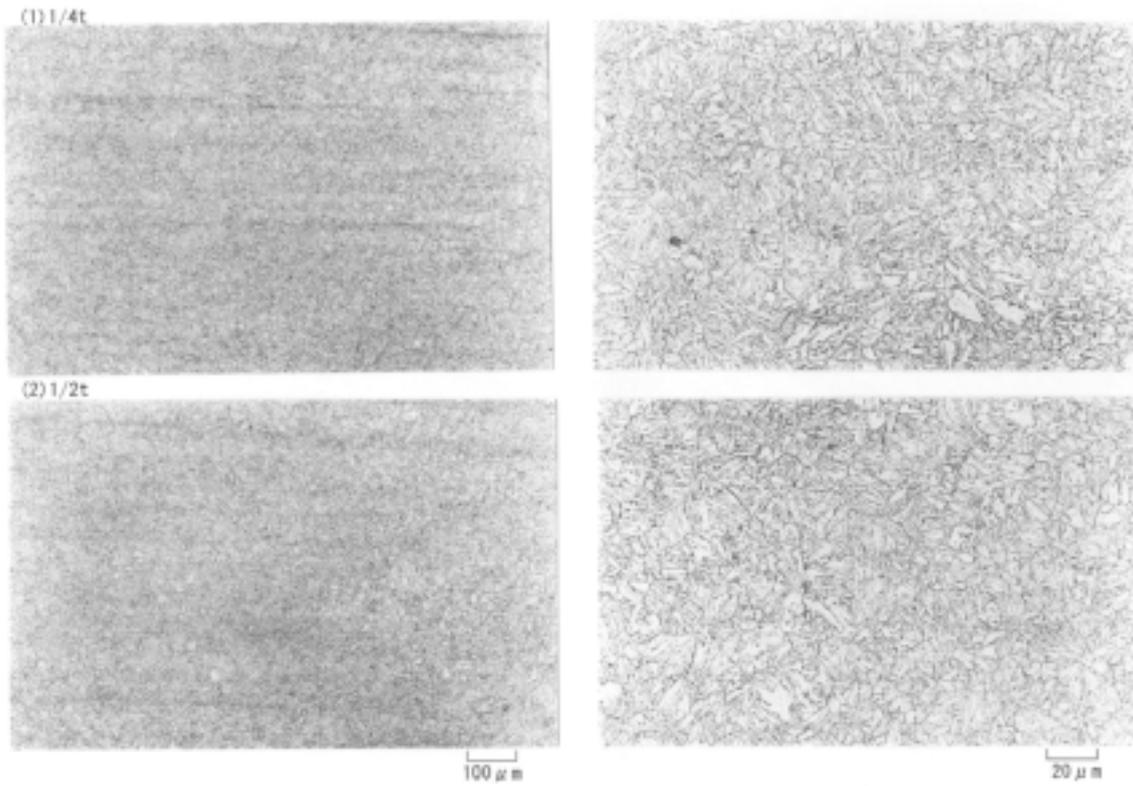


(e) Trial product No.5 (V0.06%/Nb0.00%)

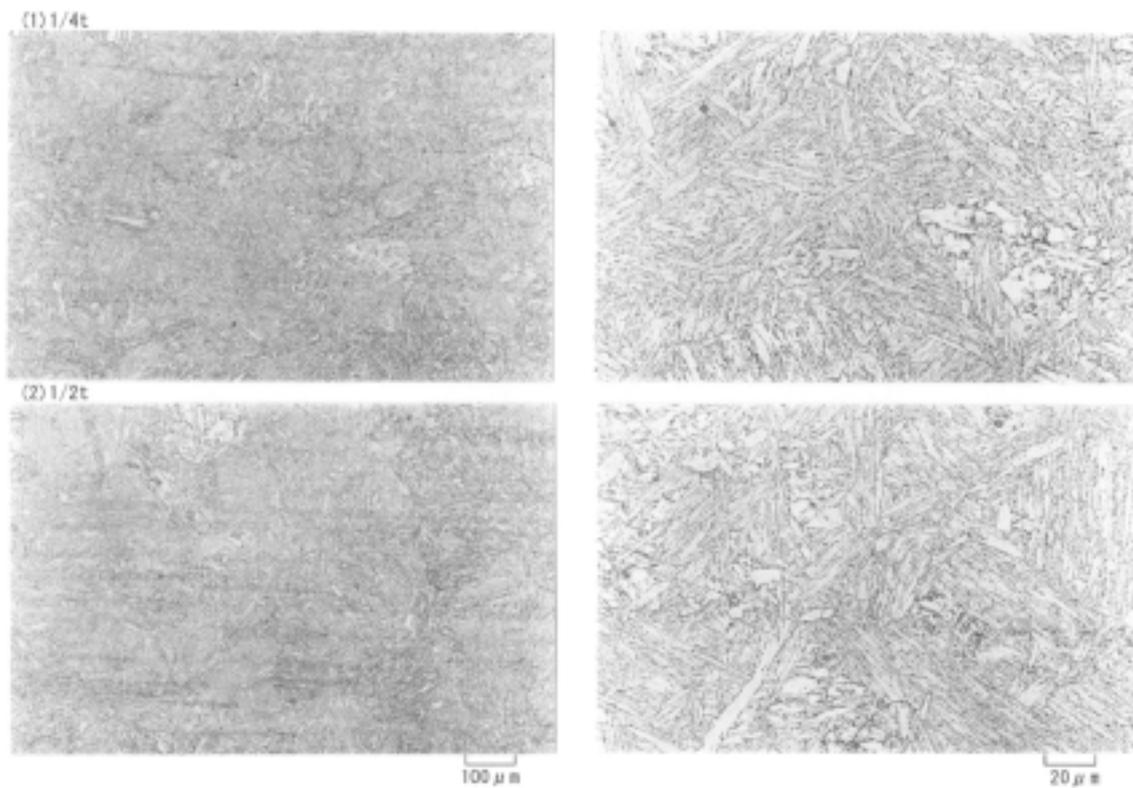


(f) Trial product No.6 (V0.06%/Nb0.01%)

Fig.3.1 (contd.) Microstructure observed by an optical microscopy

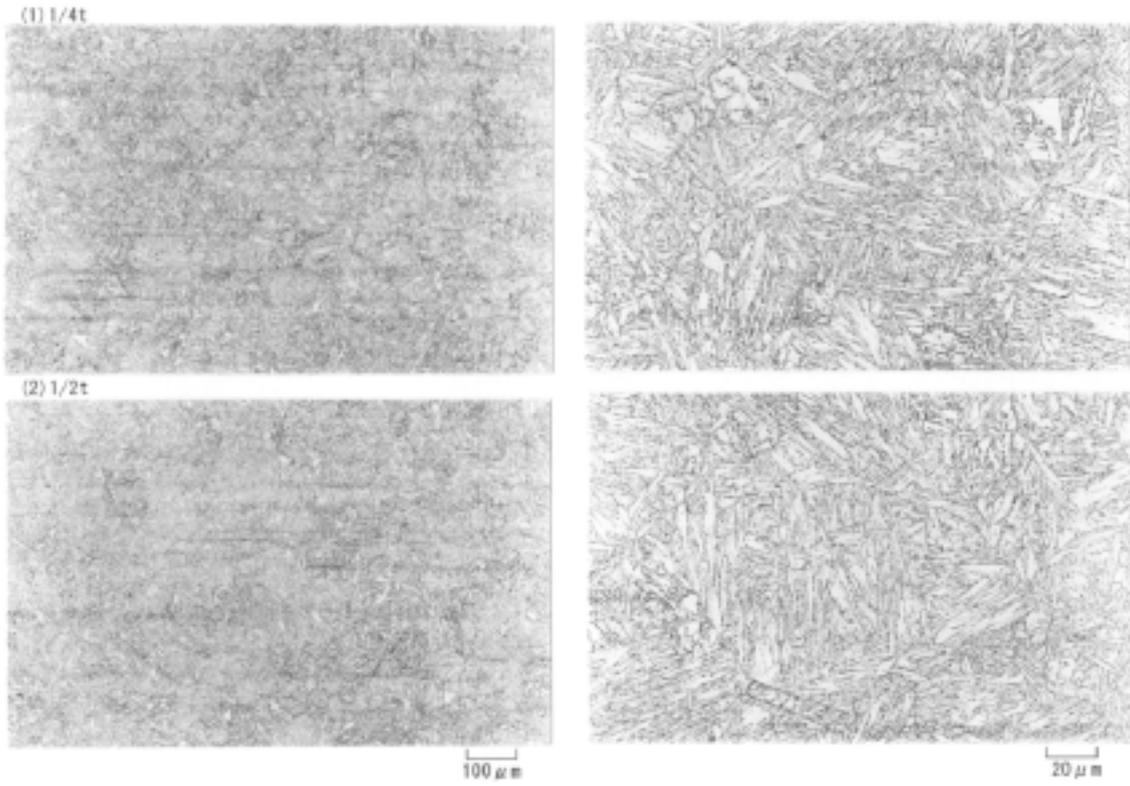


(g) Trial product No.7 (V0.06%/Nb0.03%)

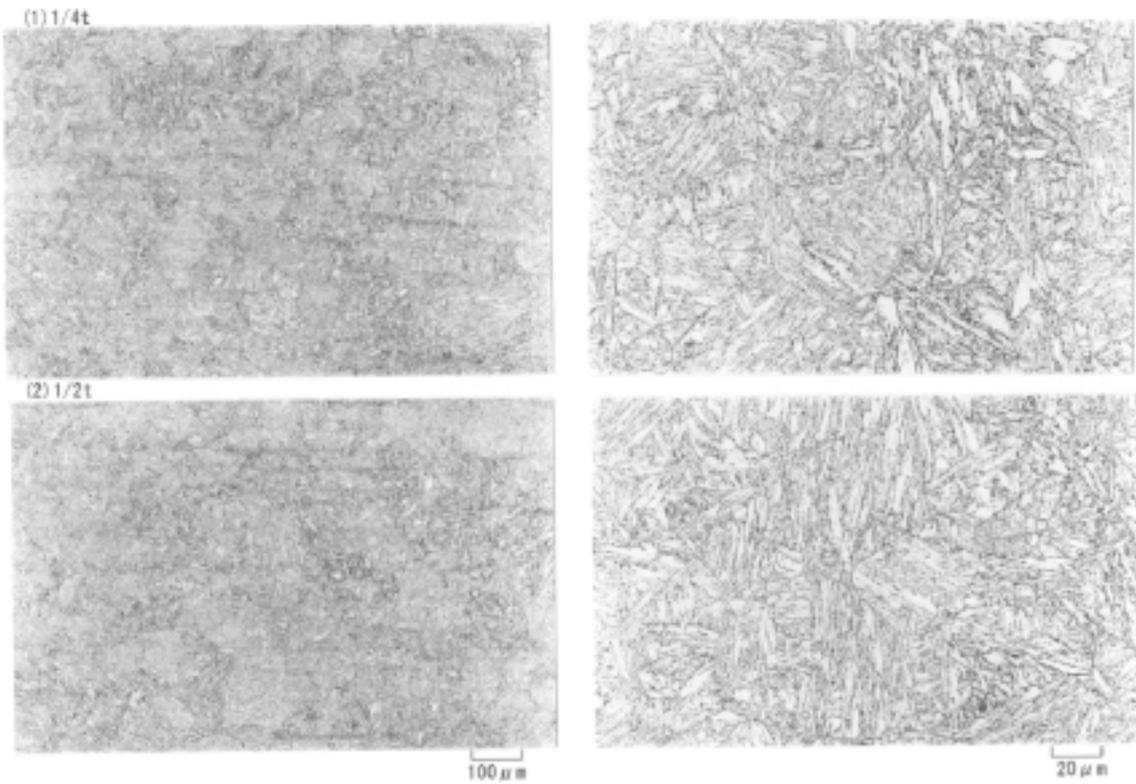


(h) Trial product No.8 (V0.12%/Nb0.00%)

Fig.3.1 (contd.) Microstructure observed by an optical microscopy

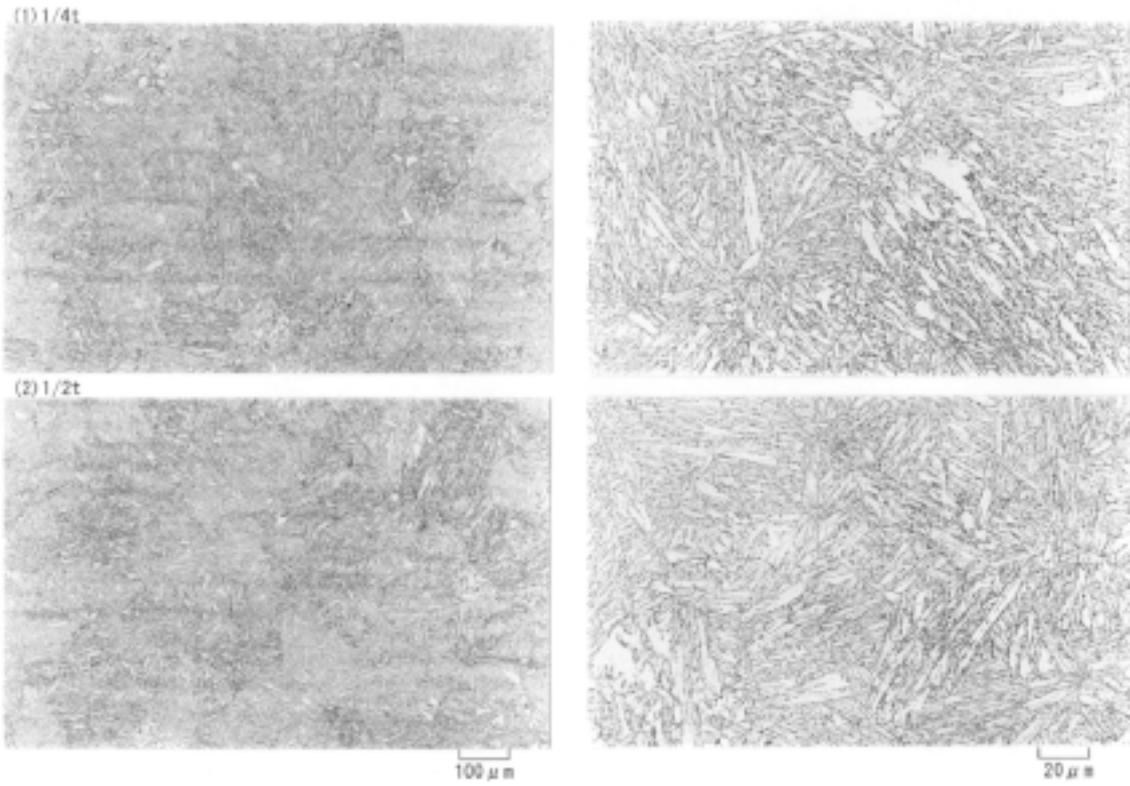


(i) Trial product No.9 (V0.12%/Nb0.01%)

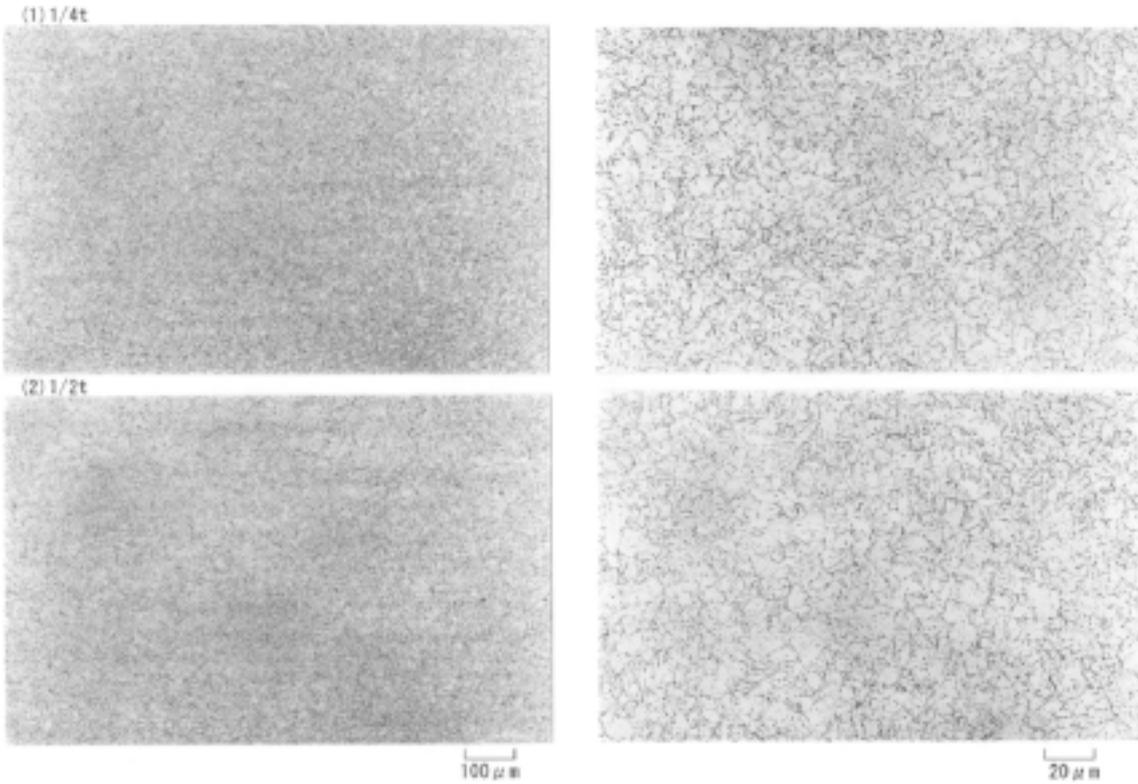


(j) Trial product No.10 (V0.12%/Nb0.03%)

Fig.3.1 (contd.) Microstructure observed by an optical microscopy



(k) Trial product No.11 (V0.18%/Nb0.00%)



(l) Mod.9Cr-1Mo steel

Fig.3.1 (contd.) Microstructure observed by an optical microscopy

4. 物理的・機械的性質の測定

製作した各試作材 (Mod.9Cr-1Mo 鋼を含む) の物理的性質および機械的性質を把握することを目的に、材料物性値測定、ビッカース硬さ試験、室温における引張試験およびシャルピ衝撃試験を、それぞれ JIS に基づいて実施した。

4.1 材料物性値測定

製作した試作材のうち No.1 (V0.00% / Nb0.00%) および No.10 (V0.12% / Nb0.03%) の 2 鋼種について、物理的性質を把握することを目的に、材料物性値 (密度、熱伝導率、比熱、熱拡散率、熱膨張係数および縦弾性係数) を測定した。各物性値の測定方法は、安藤らによって高速炉構造材料の材料物性値を取得する方法として適切とされている方法【5】に従った。

(1) 密度

密度は、JIS K 0061 (2001) に従い、一辺 15mm の立方体試験片を用いて測定する。測定は、室温において 3 回行い、それらの平均をとる。

これらの測定結果を Table 4.1 に示す。

(2) 熱伝導率、比熱および熱拡散率

熱伝導率、比熱および熱拡散率は、JIS R 1611 (1997) (=レーザーフラッシュ法) に従い、室温から 650 の範囲において、直径 10mm×厚さ 2mm の円盤状試験片を用いて、真空中にて測定した。測定は、各温度において 5 回行い、最大値と最小値を除く中央 3 回の平均を測定結果とした。温度は、設定温度に対し ± 3 以内に制御した。

これらの測定結果を Table 4.2 および Fig.4.1 に示す。測定された比熱は、安藤らによって示されている値【5】にほぼ一致していることがわかる。一方、熱伝導率は、特に低温領域において安藤らの値【5】との乖離が大きくなっており、Fig.4.1 に破線で示した安藤らが測定した 12Cr 系鋼 5 ヒートの 99% データバンド【5】から外れていることがわかる。比熱に関しては一致していることから、熱

伝導率の乖離は、熱拡散率の測定で生じた違いを反映したものとかが得ることができる。ただし、原因は不明である。

(3) 熱膨張係数

熱膨張率は、JIS R 1618 (2002) に従い、室温から 650 の範囲において、直径 4mm × 長さ 20mm の円柱状試験片を用いて、真空中にて測定した。温度は、設定温度に対し ± 1 以内に制御した。

瞬時熱膨張係数 α_A は、当該温度における瞬間の熱膨張を与える数値であり、100 を超える温度で測定された熱膨張率を温度に関する 4 次式でフィッティングし、その式を温度で 1 回微分することによって求めた。ここで、100 以下で測定された熱膨張率をフィッティングから除外したのは、熱膨張量が小さく、測定誤差が大きいことによる【5】。平均熱膨張係数は α_B 、室温から当該温度までの平均の熱膨張を与える数値であり、当該温度における熱膨張率を室温との温度差で除して求めた。

熱膨張率の測定結果および瞬時ならびに平均熱膨張係数の計算結果を Table 4.3 および Fig.4.2 に示す。瞬時熱膨張係数、平均熱膨張係数は、250 以下の熱膨張の絶対量が小さい領域を除けば、安藤らによって示されている値【5】にほぼ一致していることがわかる。250 以下の領域においても、安藤らが測定した 12Cr 系鋼 5 ヒートの 99% データバンド【5】の中に入っていることがわかる。

(4) 縦弾性係数

縦弾性係数は、JIS Z 2280 (1993) に従い、室温から 650 の範囲において、幅 10mm × 長さ 60mm × 厚さ 2mm の平板状試験片を用いて、自由共振法により真空中にて測定した。測定は、各温度において 5 回行い、最大値と最小値を除く中央 3 回の平均を測定結果とした。

これらの測定結果を Table 4.4 および Fig.4.3 に示す。縦弾性係数は、安藤らによって示されている値【5】にほぼ一致していることがわかる。

4.2 ビッカース硬さ試験

JIS Z 2244(2003)に基づいて、Mod.9Cr-1Mo 鋼を含む各試作材に対するビッカース硬さ試験を実施した。試験は、板幅（約 180mm）の中心部と両端からそれぞれ 5mm の位置の計 3 ラインに沿って、それぞれ片側の表面から 1mm の点から板厚方向に 1mm ピッチで 29 点実施した。重錘の重量は、10kg とした。

ビッカース硬さ試験の結果を Table 4.5 および Fig.4.4 に示す。これらの図から、板幅の中央部と両端部のそれぞれの硬さに有意な差はないことがわかる。板幅の中央では見られないが、板の両端部の両端、つまり圧延方向に垂直な断面の四隅では、硬さが小さくなっている試作材がある（たとえば No.2、3、8、11）。また、板厚方向の硬さ分布に関しては、近接する点の硬さに比べて大きく異なる点も何点か存在するが、それらはいずれも単独で存在し、周囲と硬さの異なる領域が存在するというようなことはないことがわかる。

Fig.4.5 に、V/Nb 添加量とビッカース硬さの関係を示す。この図から、V 添加量が大きくなるほど硬さは大きくなることがわかる。一方、Nb に関しては、V 添加量が大きい材料（V=0.12wt.%）については、添加量の増加に伴って硬さが増大する傾向が見られるが、V 添加量が小さい材料（V=0～0.06wt.%）については、Nb=0.01wt.%で最大値を示す結果となった。

4.3 室温における引張試験

JIS Z 2241(1998)に基づいて、Mod.9Cr-1Mo 鋼を含む各試作材に対して、室温における引張試験を実施した。試験は、JIS 4 号試験片（評点部直径 14mm、評点部長さ 50mm）を用いて、2 本ずつ実施した。試験装置は、島津製作所製オートグラフ AG-50（容量 500kN）を用いた。

室温における引張試験の結果を Table 4.6 に示す。

Fig.4.6 に、V/Nb 添加量と 0.2%耐力、引張強さ、伸びおよび絞りの関係を示す。同図(a)および(b)より、V 添加量が大きくなるほど 0.2%耐力および引張強さは大きくなることがわかる。一方、Nb に関しては、V 添加量が大きい材料（V=0.12wt.%）については、添加量の増加に伴って 0.2%耐力および引張強さが

増大する傾向が見られるが、V 添加量が小さい材料 (V=0 ~ 0.06wt.%) については、Nb=0.01wt.%で最大値を示す結果となった。これは、前節で述べた硬さ試験の結果と一致する傾向である。また、Fig.4.6(c)および(d)より、V 添加量が大きくなるほど伸びおよび絞り小さくなることわかる。一方、Nb に関しては、V 添加量が大きい材料 (V=0.12wt.%) については、添加量の増加に伴って伸びおよび絞りが減少する傾向が見られるものの、V 添加量が小さい材料 (V=0 ~ 0.06wt.%) については、Nb=0.01wt.%において最小値を示す結果となった。

4.4 シャルピ衝撃試験

JIS Z 2242(1998)に基づいて、Mod.9Cr-1Mo 鋼を含む各試作材に対して、シャルピ衝撃試験を実施した。試験は、JIS 4号 V ノッチ試験片 (10mm 正方形断面、長さ 55mm) を用いて、8 温度レベルについて各温度 2 本ずつ実施した。試験装置は、島津製作所製 JIS シャルピ式衝撃試験装置 (容量 490 J) を使用した。温度は、まず -50、0 および 50 を実施し、それらの結果を踏まえて、上部棚吸収エネルギーと延性 - 脆性遷移温度が取得できるように順次設定した。

シャルピ衝撃試験の結果を Table 4.7 および Fig.4.7 に示す。

Fig.4.8 に、V/Nb 添加量と上部棚吸収エネルギーおよび延性 / 脆性遷移温度の関係を示す。これらの図から、衝撃特性の V/Nb 添加量依存性はかなり複雑な傾向を示していることがわかる。すなわち、V に関しては、Nb 無添加の場合は V 添加量の増加に伴って衝撃特性が低下する傾向が見られるが、Nb=0.01wt.%の場合には、V=0.06wt.%での衝撃特性が最も劣る結果となり、Nb=0.03wt.%の場合には、V=0.06wt.%での衝撃特性が逆に最も優れる結果となる。Nb に関しては、V 無添加と V 高添加の材料が良好な衝撃特性を示し、その中間の V 量の材料の衝撃特性が劣る結果となる。衝撃特性において、このように複雑な V/Nb 添加量依存性を示した原因については、V/Nb の炭窒化物 (MX) 微細析出による結晶粒成長抑制効果などが考えられるが、今後、電子顕微鏡を用いた詳細な組織観察を行って考察する必要がある。

Table 4.1 Measurement results of density (g / cm³)

No.	1	2	3	Ave.
1	7.85	7.85	7.82	7.84
10	7.85	7.85	7.85	7.85
Nominal value[13]	-	-	-	7.80

Table 4.2 Measurement results of heat conductivity (g / cm³)

	Weight (g)	Diameter (mm)	Thickness (mm)	Density (g/cm ³)
1	1.2411	10.05	2.01	7.788
10	1.2407	10.06	2.01	7.770

No.	Temp. ()	Thermal diffusion rate (cm ² /sec.)	Specific heat (J/ ·g)		Heat conductivity (W/m·K)	
			Measured	Nominal[13]	Measured	Nominal[13]
1	R.T.	0.0907	0.488	0.450	34.5	23.64
	101	0.0848	0.528	0.485	34.8	25.06
	201	0.0784	0.566	0.530	34.5	26.30
	300	0.0725	0.619	0.577	34.9	27.30
	401	0.0665	0.669	0.634	34.6	28.24
	450	0.0632	0.704	0.669	34.7	28.67
	499	0.0599	0.737	0.710	34.4	29.04
	549	0.0563	0.783	0.761	34.3	29.31
	600	0.0519	0.835	0.824	33.8	29.41
	650	0.0476	0.906	0.901	33.6	29.26
10	R.T.	0.0903	0.476	0.450	33.4	23.64
	101	0.0848	0.509	0.485	33.6	25.06
	200	0.0787	0.552	0.530	33.7	26.30
	301	0.0726	0.607	0.577	34.2	27.30
	400	0.0666	0.656	0.634	34.0	28.24
	450	0.0632	0.681	0.669	33.5	28.67
	499	0.0601	0.716	0.710	33.4	29.04
	549	0.0565	0.762	0.761	33.5	29.31
	601	0.0527	0.812	0.824	33.2	29.41
	650	0.0477	0.883	0.901	32.7	29.26

Table 4.3 Measurement results of Thermal expansion coefficients

(a) Trial product No.1 (V0.00%/Nb0.00%)

Temp.	Thermal expansion rate (%)	Mean thermal expansion coefficient ($10^{-6} / $)		Instantaneous thermal expansion coefficient ($10^{-6} / $)	
		Measured	Nominal[13]	Measured	Nominal[13]
25	0.000	-	-	11.65	9.92
50	0.027	10.80	10.08	11.47	10.25
75	0.056	11.20	10.28	11.34	10.52
100	0.084	11.20	10.45	11.28	10.77
125	0.112	11.20	10.61	11.26	11.00
150	0.140	11.20	10.74	11.28	11.22
175	0.169	11.27	10.87	11.35	11.43
200	0.199	11.37	10.98	11.45	11.63
225	0.227	11.35	11.08	11.58	11.81
250	0.256	11.38	11.17	11.74	11.99
275	0.285	11.40	11.26	11.92	12.15
300	0.315	11.45	11.34	12.12	12.31
325	0.346	11.53	11.42	12.33	12.45
350	0.376	11.57	11.50	12.54	12.59
375	0.408	11.66	11.58	12.76	12.73
400	0.442	11.79	11.65	12.98	12.85
425	0.472	11.80	11.73	13.19	12.97
450	0.507	11.93	11.81	13.39	13.09
475	0.538	11.96	11.89	13.58	13.20
500	0.573	12.06	11.96	13.74	13.31
525	0.609	12.18	12.04	13.88	13.41
550	0.646	12.30	12.12	13.99	13.52
575	0.679	12.35	12.19	14.06	13.62
600	0.714	12.42	12.26	14.10	13.72
625	0.750	12.50	12.33	14.09	13.82
650	0.783	12.53	12.39	14.03	13.92

(Initial length)	20.11
------------------	-------

Table 4.3 (contd.) Measurement results of Thermal expansion coefficients

(a) Trial product No.1 (V0.00%/Nb0.00%)

Temp.	Thermal expansion rate (%)	Mean thermal expansion coefficient ($10^{-6} / $)		Instantaneous thermal expansion coefficient ($10^{-6} / $)	
		Measured	Nominal[13]	Measured	Nominal[13]
25	0.000	-	-	11.45	9.92
50	0.026	10.40	10.08	11.39	10.25
75	0.056	11.20	10.28	11.37	10.52
100	0.084	11.20	10.45	11.38	10.77
125	0.112	11.20	10.61	11.42	11.00
150	0.141	11.28	10.74	11.48	11.22
175	0.171	11.40	10.87	11.57	11.43
200	0.200	11.43	10.98	11.68	11.63
225	0.230	11.50	11.08	11.81	11.81
250	0.259	11.51	11.17	11.96	11.99
275	0.287	11.48	11.26	12.12	12.15
300	0.319	11.60	11.34	12.29	12.31
325	0.348	11.60	11.42	12.46	12.45
350	0.381	11.72	11.50	12.64	12.59
375	0.413	11.80	11.58	12.82	12.73
400	0.445	11.87	11.65	13.00	12.85
425	0.479	11.98	11.73	13.17	12.97
450	0.512	12.05	11.81	13.34	13.09
475	0.544	12.09	11.89	13.50	13.20
500	0.578	12.17	11.96	13.64	13.31
525	0.613	12.26	12.04	13.77	13.41
550	0.648	12.34	12.12	13.88	13.52
575	0.683	12.42	12.19	13.97	13.62
600	0.716	12.45	12.26	14.03	13.72
625	0.752	12.53	12.33	14.07	13.82
650	0.788	12.61	12.39	14.08	13.92

(Initial length)	20.00
------------------	-------

Table 4.4 Measurement results of Young's modulus
(N/mm²)

Temp. \ No.	1	10	Nominal[13]
25	215,600	214,700	214,000
100	212,300	211,600	211,000
200	206,500	206,400	205,000
300	199,900	199,000	198,000
400	191,300	190,800	190,000
450	185,200	185,200	185,000
500	179,600	179,400	180,000
550	173,300	173,100	174,000
600	165,400	165,000	168,000
650	155,900	155,400	161,000
Length (mm)	60.003	59.907	-
Width (mm)	10.009	10.006	-
Thickness (mm)	2.001	2.002	-

Table 4.5 Results of Vicker's hardness tests

(a) Trial product No.1

	L-5mm	1/2w	R-5mm
1	192	192	193
2	197	197	195
3	198	198	194
4	198	198	197
5	200	200	194
6	197	197	196
7	196	196	196
8	194	194	194
9	197	197	194
10	194	194	196
11	195	195	193
12	194	194	196
13	191	191	195
14	190	190	200
15	197	197	195
16	193	193	196
17	200	199	194
18	196	194	196
19	193	195	196
20	195	197	196
21	196	196	196
22	197	197	193
23	195	200	195
24	197	196	194
25	194	195	195
26	197	197	195
27	195	198	198
28	196	197	197
29	194	195	190
ave.	195.4	195.8	195.1
	195.5		

(b) Trial product No.2

	L-5mm	1/2w	R-5mm
1	214	218	206
2	221	217	214
3	223	221	215
4	220	217	217
5	218	216	217
6	221	217	215
7	221	218	216
8	217	222	216
9	222	215	217
10	221	207	220
11	221	213	215
12	220	213	213
13	220	214	213
14	221	217	214
15	223	214	216
16	219	212	217
17	220	215	219
18	221	221	216
19	219	219	218
20	217	217	218
21	218	219	216
22	217	220	217
23	216	220	220
24	220	217	222
25	220	219	218
26	219	219	220
27	218	217	215
28	220	216	214
29	214	214	211
ave.	219.3	216.7	216.0
	217.4		

(c) Trial product No.3

	L-5mm	1/2w	R-5mm
1	206	215	196
2	211	214	212
3	212	219	209
4	211	213	213
5	214	213	214
6	214	215	213
7	211	215	214
8	211	215	214
9	212	214	214
10	213	213	215
11	213	212	215
12	214	211	214
13	209	218	216
14	214	214	211
15	213	214	215
16	213	211	215
17	216	213	217
18	215	215	215
19	216	214	215
20	214	214	214
21	214	212	216
22	215	215	216
23	213	214	214
24	214	214	214
25	214	215	213
26	215	214	213
27	216	217	214
28	214	215	214
29	214	214	211
ave.	213.1	214.2	213.3
	213.6		

Table 4.5 (contd.) Results of Vicker's hardness tests

(d) Trial product No.4

	L-5mm	1/2w	R-5mm
1	209	213	208
2	213	214	210
3	213	214	212
4	213	213	211
5	211	213	215
6	214	214	211
7	214	213	197
8	214	215	212
9	212	213	212
10	210	213	211
11	213	209	213
12	202	209	212
13	213	212	210
14	212	210	211
15	213	210	210
16	213	209	212
17	213	210	211
18	214	213	214
19	214	214	215
20	213	212	210
21	211	214	213
22	212	214	215
23	214	214	210
24	214	213	213
25	214	216	211
26	212	212	211
27	212	213	213
28	213	211	211
29	213	209	208
ave.	212.3	212.4	211.1
	211.9		

(e) Trial product No.5

	L-5mm	1/2w	R-5mm
1	196	200	197
2	203	202	201
3	203	201	204
4	202	205	205
5	203	203	203
6	204	204	203
7		205	207
8	201	206	202
9	202	202	203
10	203	202	205
11	203	202	205
12	202	200	207
13	203	200	205
14	202	187	205
15	204	197	205
16	206	200	204
17	203	199	203
18	204	202	203
19	204	201	205
20	199	209	202
21	203	204	203
22	204	199	208
23	205	206	206
24	204	207	203
25	200	204	202
26	204	204	205
27	206	202	204
28	206	201	203
29	204	201	198
ave.	203.0	201.9	203.7
	202.8		

(f) Trial product No.6

	L-5mm	1/2w	R-5mm
1	223	229	222
2	229	229	229
3	229	232	227
4	223	231	229
5	220	229	227
6	225	226	223
7	227	230	224
8	226	232	226
9	223	229	224
10	224	224	229
11	226	229	229
12	227	230	226
13	230	230	227
14	227	226	226
15	226	225	230
16	228	226	227
17	226	229	226
18	228	222	227
19	224	226	226
20	227	226	233
21	231	229	231
22	229	232	226
23	228	232	229
24	222	230	230
25	228	229	224
26	229	229	229
27	229	226	228
28	230	229	224
29	227	227	224
ave.	226.6	228.4	227.0
	227.3		

Table 4.5 (contd.) Results of Vicker's hardness tests

(g) Trial product No.7

	L-5mm	1/2w	R-5mm
1	220	228	229
2	225	227	228
3	225	228	228
4	223	231	230
5	226	226	230
6	224	230	227
7	226	230	230
8	224	229	227
9	223	227	230
10	223	226	230
11	225	228	230
12	224	227	227
13	224	224	230
14	226	224	229
15	226	222	227
16	225	221	230
17	223	222	230
18	226	227	230
19	226	226	228
20	221	227	230
21	226	229	231
22	226	231	230
23	226	227	229
24	226	227	230
25	225	229	230
26	224	229	229
27	225	228	229
28	227	227	230
29	226	229	226
ave.	224.7	227.1	229.1
	227.0		

(h) Trial product No.8

	L-5mm	1/2w	R-5mm
1	209	210	202
2	216	210	209
3	212	213	215
4	216	220	212
5	215	215	211
6	214	214	210
7	213	213	210
8	210	214	212
9	212	212	211
10	216	214	213
11	214	209	210
12	217	213	209
13	216	211	212
14	216	210	213
15	218	212	211
16	214	215	212
17	216	213	215
18	213	211	214
19	216	214	211
20	216	213	213
21	217	214	212
22	214	212	212
23	215	213	212
24	214	213	214
25	221	212	209
26	213	211	212
27	214	205	213
28	212	208	210
29	207		209
ave.	214.3	212.3	211.3
	212.6		

(i) Trial product No.9

	L-5mm	1/2w	R-5mm
1	233	238	237
2	234	237	235
3	240	238	237
4	236	238	237
5	239	240	238
6	240	236	239
7	237	235	237
8	240	242	242
9	235	236	240
10	237	238	238
11	235	239	237
12	237	235	240
13	239	234	240
14	240	230	238
15	243	237	238
16	237	235	239
17	242	233	239
18	238	239	238
19	237	233	237
20	240	237	240
21	237	233	236
22	236	238	238
23	240	236	240
24	237	240	235
25	238	238	238
26	238	237	236
27	236	238	238
28	238	236	238
29	240	237	236
ave.	237.9	236.7	238.0
	237.5		

Table 4.5 (contd.) Results of Vicker's hardness tests

(j) Trial product No.10

	L-5mm	1/2w	R-5mm
1	250	252	253
2	254	253	251
3	254	249	250
4	252	253	249
5	254	254	254
6	255	256	254
7	257	256	255
8	255	254	254
9	256	253	251
10	253	249	252
11	256	254	254
12	253	249	254
13	255	248	253
14	257	249	252
15	251	255	254
16	253	251	254
17	259	254	255
18	252	257	254
19	252	252	249
20	254	252	254
21	253	256	254
22	254	256	252
23	252	255	254
24	254	254	252
25	252	252	254
26	254	256	249
27	248	253	248
28	252	253	253
29	254	254	252
ave.	253.6	253.1	252.6
	253.1		

(k) Trial product No.11

	L-5mm	1/2w	R-5mm
1	217	226	221
2	225	227	226
3	223	225	224
4	226	227	224
5	226	223	228
6	227	230	229
7	225	230	226
8	226	230	228
9	227	224	224
10	227	226	226
11	224	226	227
12	230	224	225
13	223	226	226
14	226	227	227
15	227	227	226
16	227	226	227
17	222	230	227
18	224	229	226
19	223	226	224
20	230	231	228
21	225	226	225
22	227	226	227
23	222	227	226
24	224	227	224
25	222	225	226
26	224	225	222
27	226	226	226
28	228	224	226
29	222		216
ave.	225.0	226.6	225.4
	225.7		

(l) Mod.9Cr-1Mo steel (No.12)

	L-5mm	1/2w	R-5mm
1	223	218	208
2	224	220	220
3	225	221	221
4	224	220	222
5	223	222	222
6	223	218	223
7	222	222	223
8	223	219	221
9	224	221	221
10	223	221	223
11	223	221	221
12	223	221	222
13	223	220	220
14	223	219	221
15	222	221	222
16	226	222	220
17	225	221	223
18	223	217	223
19	223	223	223
20	222	221	222
21	222	221	223
22	225	223	222
23	225	223	222
24	224	223	222
25	223	224	223
26	224	221	222
27	224	224	221
28	225	222	222
29	222	220	233
ave.	223.5	221.0	221.8
	222.1		

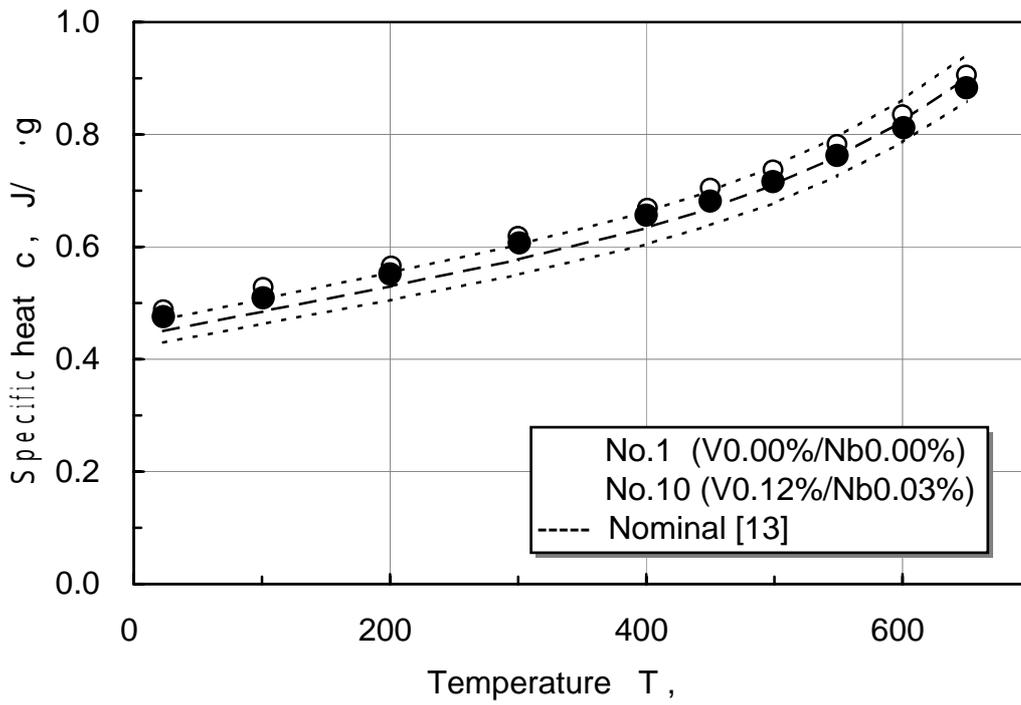
Table 4.6 Results of tensile tests at room temperature

No.	TP-No.	Dimension			0.2% proof stress		Ultimate tensile strength		Yield Ratio (%)	Elongation T-EI(%)	Reduction of Area		Location of Fracture
		Dia.	Area	Gauge Length	Load	Stress	Load	stress			d(mm)	(%)	
		D(mm)	A(mm ²)	GL(mm)	(N)	(MPa)	(N)	(MPa)					
1	1-1	14.00	153.94	50.00	67950	441.4	98400	639.2	69.1	29.0	6.860	76.0	A
	1-2	14.00	153.94	50.00	67800	440.4	98100	637.3	69.1	29.0	6.940	75.4	A
	average	-	-	-	-	440.9	-	638.2	69.1	29.0	-	75.7	
2	2-1	14.00	153.94	50.00	79500	516.4	105750	687.0	75.2	26.0	7.360	72.4	A
	2-2	14.01	154.16	50.00	79950	518.6	106050	687.9	75.4	26.0	7.290	72.9	A
	average	-	-	-	-	517.5	-	687.4	75.3	26.0	-	72.7	
3	3-1	14.01	154.16	50.00	78000	506.0	104850	680.1	74.4	26.0	7.190	73.7	A
	3-2	14.00	153.94	50.00	78000	506.7	104100	676.2	74.9	27.0	7.090	74.4	A
	average	-	-	-	-	506.3	-	678.2	74.7	26.5	-	74.1	
4	4-1	14.00	153.94	50.00	77400	502.8	104700	680.1	73.9	27.0	7.000	75.0	A
	4-2	14.00	153.94	50.00	77700	504.7	105300	684.0	73.8	27.0	6.960	75.3	A
	average	-	-	-	-	503.8	-	682.1	73.9	27.0	-	75.2	
5	5-1	14.00	153.94	50.00	70950	460.9	100500	652.9	70.6	29.0	6.960	74.2	A
	5-2	14.00	153.94	50.00	70800	459.9	100050	649.9	70.8	29.0	7.040	74.7	A
	average	-	-	-	-	460.4	-	651.4	70.7	29.0	-	74.5	
6	6-1	14.00	153.94	50.00	83250	540.8	108450	704.5	76.8	24.5	7.060	74.6	A
	6-2	14.01	154.16	50.00	83850	543.9	109050	707.4	76.9	25.0	7.490	71.4	A
	average	-	-	-	-	542.4	-	705.9	76.8	24.8	-	73.0	
7	7-1	14.00	153.94	50.00	81750	531.1	108450	704.5	75.4	26.0	6.910	75.6	A
	7-2	14.00	153.94	50.00	81300	528.1	108750	706.5	74.8	25.0	6.990	75.1	A
	average	-	-	-	-	529.6	-	705.5	75.1	25.5	-	75.4	
8	8-1	14.00	153.94	50.00	76500	497.0	103050	669.4	74.2	27.5	7.080	74.4	A
	8-2	14.01	154.16	50.00	76350	495.3	102600	665.6	74.4	28.0	7.150	74.0	A
	average	-	-	-	-	496.1	-	667.5	74.3	27.8	-	74.2	
9	9-1	14.01	154.16	50.00	89700	581.9	113550	736.6	79.0	23.0	7.430	71.9	A
	9-2	14.01	154.16	50.00	89700	581.9	119850	777.4	74.8	23.0	7.440	71.8	A
	average	-	-	-	-	581.9	-	757.0	76.9	23.0	-	71.9	
10	10-1	14.01	154.16	50.00	86900	563.7	119850	777.4	72.5	23.0	7.500	71.3	A
	10-2	14.01	154.16	50.00	95850	621.8	120000	778.4	79.9	23.0	7.690	69.9	A
	average	-	-	-	-	592.7	-	777.9	76.2	23.0	-	70.6	
11	11-1	14.01	154.16	50.00	84750	549.8	108900	706.4	77.8	25.5	7.200	73.6	A
	11-2	14.00	153.94	50.00	83850	544.7	109350	710.4	76.7	24.5	7.360	72.4	A
	average	-	-	-	-	547.2	-	708.4	77.3	25.0	-	73.0	
12	12-1	14.01	154.16	50.00	85050	551.7	110400	716.1	77.0	28.0	6.700	77.1	A
	12-2	14.01	154.16	50.00	86400	560.5	111450	723.0	77.5	27.5	6.760	76.7	A
	average	-	-	-	-	556.1	-	719.6	77.3	27.8	-	76.9	

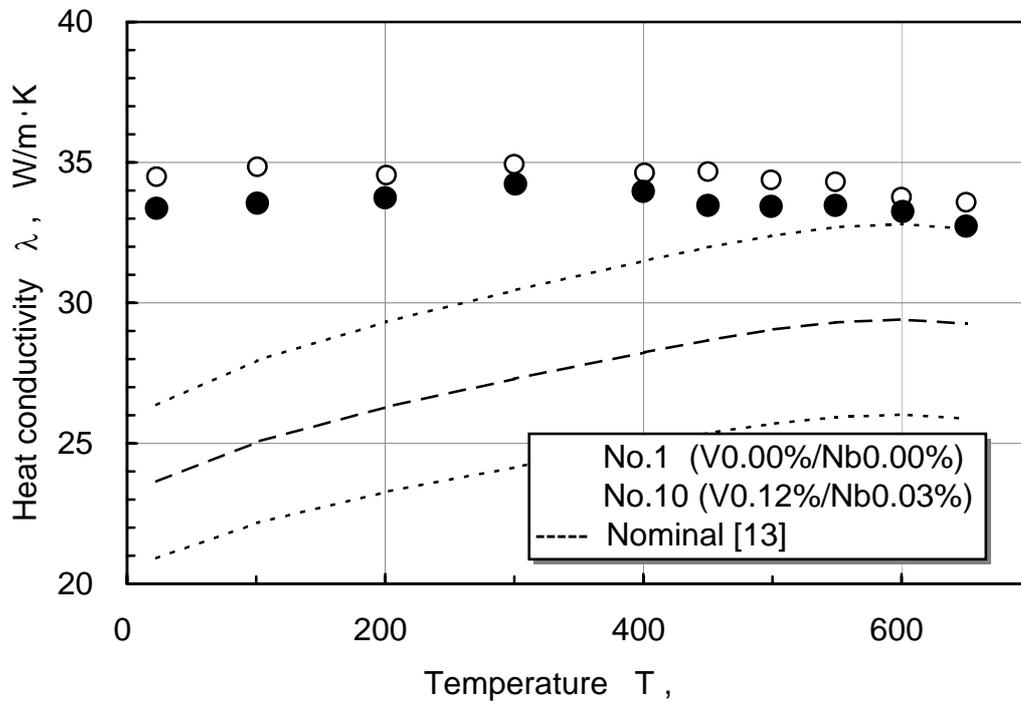
Mod.9Cr-1Mo

Table 4.7 Results of Charpy impact tests

Temp. ()	-150			-100			-75			-50			-25			0			RT			50			75			100			
	No.	Test No.	Absorbed Energy (J)	Percent ductile fracture (%)	Lateral Expansion (mm)	Absorbed Energy (J)	Percent ductile fracture (%)	Lateral Expansion (mm)	Absorbed Energy (J)	Percent ductile fracture (%)	Lateral Expansion (mm)	Absorbed Energy (J)	Percent ductile fracture (%)	Lateral Expansion (mm)	Absorbed Energy (J)	Percent ductile fracture (%)	Lateral Expansion (mm)	Absorbed Energy (J)	Percent ductile fracture (%)	Lateral Expansion (mm)	Absorbed Energy (J)	Percent ductile fracture (%)	Lateral Expansion (mm)	Absorbed Energy (J)	Percent ductile fracture (%)	Lateral Expansion (mm)	Absorbed Energy (J)	Percent ductile fracture (%)	Lateral Expansion (mm)		
	1	1			4	0	0.00	8	0	0.00	100	25	1.31	183	65	2.24	198	85	2.31	228	100	2.18	241	100	2.40				229	100	2.36
		2			4	0	0.00	7	0	0.01	122	35	1.47	177	60	2.19	198	85	2.23	242	100	2.42	244	100	2.37				229	100	2.42
		ave.			4.0	0.0	0.00	7.5	0.0	0.01	111.0	30.0	1.39	180.0	62.5	2.22	198.0	85.0	2.27	235.0	100.0	2.30	242.5	100.0	2.39				229.0	100.0	2.39
	2	1						6	0	0.00	10	0	0.04	20	10	0.18	140	60	1.73	166	80	2.04	233	100	2.43	224	100	2.13	223	100	2.41
		2						7	0	0.00	11	0	0.05	21	10	0.17	187	80	2.10	184	85	2.20	239	100	2.52	222	100	2.16	219	100	2.37
		ave.						6.5	0.0	0.00	10.5	0.0	0.05	20.5	10.0	0.18	163.5	70.0	1.92	175.0	82.5	2.12	236.0	100.0	2.48	223.0	100.0	2.15	221.0	100.0	2.39
	3	1						6	0	0.00	14	0	0.20	55	25	0.73	154	60	1.79	183	85	2.18	234	100	2.26	227	100	2.37	213	100	2.64
		2						6	0	0.00	12	0	0.12	36	20	0.40	142	60	1.64	184	85	2.21	222	100	2.32	219	100	2.32	213	100	2.41
		ave.						6.0	0.0	0.00	13.0	0.0	0.16	45.5	22.5	0.57	148.0	60.0	1.72	183.5	85.0	2.20	228.0	100.0	2.29	223.0	100.0	2.35	213.0	100.0	2.53
	4	1			4	0	0.00	7	0	0.00	23	5	0.27	115	50	1.33	221	100	2.11	233	100	2.37	245	100	2.37				218	100	2.87
		2			5	0	0.00	7	0	0.00	27	5	0.35	155	65	1.86	214	90	2.26	234	100	2.10	241	100	2.29				223	100	2.26
		ave.			4.5	0.0	0.00	7.0	0.0	0.00	25.0	5.0	0.31	135.0	57.5	1.60	217.5	95.0	2.19	233.5	100.0	2.24	243.0	100.0	2.33				220.5	100.0	2.57
	5	1			4	0	0.00	8	0	0.00	38	10	0.44	140	60	1.64	192	75	2.11	217	80	2.04	248	100	2.51				230	100	2.44
		2			4	0	0.00	7	0	0.00	10	5	0.09	64	25	0.70	185	70	2.06	206	75	2.17	246	100	2.24				232	100	2.22
		ave.			4.0	0.0	0.00	7.5	0.0	0.00	24.0	7.5	0.27	102.0	42.5	1.17	188.5	72.5	2.09	211.5	77.5	2.11	247.0	100.0	2.38				231.0	100.0	2.33
	6	1						7	0	0.00	9	0	0.02	79	35	0.95	151	65	1.78	176	80	2.10	201	100	2.07	208	100	2.73	204	100	2.25
		2						7	0	0.00	8	0	0.08	19	10	0.18	106	55	1.28	175	85	2.05	211	100	2.10	216	100	2.32	205	100	2.59
		ave.						7.0	0.0	0.00	8.5	0.0	0.05	49.0	22.5	0.57	128.5	60.0	1.53	175.5	82.5	2.08	206.0	100.0	2.09	212.0	100.0	2.53	204.5	100.0	2.42
	7	1	6	0	0.02	20	5	0.07	37	10	0.32	111	40	1.32	193	75	2.02	221	100	2.15				233	100	2.43					
		2	6	0	0.00	8	0	0.02	11	0	0.01	106	35	1.26	172	65	1.87	233	100	2.21				234	100	2.25					
		ave.	6.0	0.0	0.01	14.0	2.5	0.05	24.0	5.0	0.17	108.5	37.5	1.29	182.5	70.0	1.95	227.0	100.0	2.18				233.5	100.0	2.34					
		3										56	20	0.63																	
		4										146	55	1.74																	
ave.										101.0	37.5	1.19																			
	8	1						6	0	0.00	14	0	0.12	69	35	0.63	148	60	1.62	204	85	2.28	223	100	2.12	221	100	2.17	219	100	2.38
		2						6	0	0.00	13	0	0.05	42	20	0.18	193	80	2.10	224	100	2.28	228	100	2.13	236	100	2.26	215	100	2.44
		ave.						6.0	0.0	0.00	13.5	0.0	0.09	55.5	27.5	0.41	170.5	70.0	1.86	214.0	92.5	2.28	225.5	100.0	2.13	228.5	100.0	2.22	217.0	100.0	2.41
	9	1						6	0	0.00	11	0	0.05	13	5	0.02	113	40	1.24	176	85	2.06	212	100	2.27	205	100	2.04	209	100	2.09
		2						5	0	0.00	11	0	0.00	18	10	0.14	108	40	1.25	174	80	2.01	216	95	2.37	208	100	2.08	208	100	2.30
		ave.						5.5	0.0	0.00	11.0	0.0	0.03	15.5	7.5	0.08	110.5	40.0	1.25	175.0	82.5	2.04	214.0	97.5	2.32	206.5	100.0	2.06	208.5	100.0	2.20
	10	1						5	0	0.00	7	0	0.00	40	20	0.41	96	40	1.19	162	80	1.89	207	100	2.26	212	100	2.00	212	100	2.28
		2						5	0	0.00	7	0	0.02	16	5	0.11	82	40	0.93	174	80	1.84	199	90	2.15	206	100	2.03	210	100	2.50
		ave.						5.0	0.0	0.00	7.0	0.0	0.01	28.0	12.5	0.26	89.0	40.0	1.06	168.0	80.0	1.87	203.0	95.0	2.21	209.0	100.0	2.02	211.0	100.0	2.39
	11	1						5	0	0.00	12	0	0.07	48	20	0.54	112	40	1.41	174	85	2.26	222	100	2.13	226	100	2.24	212	100	2.32
		2						5	0	0.00	7	0	0.01	14	10	0.08	169	70	1.89	182	80	2.18	229	100	2.29	217	100	2.42	217	100	2.32
		ave.						5.0	0.0	0.00	9.5	0.0	0.04	31.0	15.0	0.31	140.5	55.0	1.65	178.0	82.5	2.22	225.5	100.0	2.21	221.5	100.0	2.33	214.5	100.0	2.32
Mod. 9Cr- 1Mo	12	1	7	0	0.01	14	0	0.18	32	0	0.30	218	85	2.23	241	80	2.34	271	100	2.43				276	100	2.64					
		2	8	0	0.03	8	0	0.00	101	30	1.05	205	75	2.12	274	100	2.49	266	100	2.21				278	100	2.50					
		ave.	7.5	0.0	0.02	11.0	0.0	0.09	66.5	15.0	0.68	211.5	80.0	2.18	257.5	90.0	2.42	268.5	100.0	2.32				277.0	100.0	2.57					
		3										186	60	2.12																	
		4										203	65	2.15																	
ave.										194.5	62.5	2.14																			

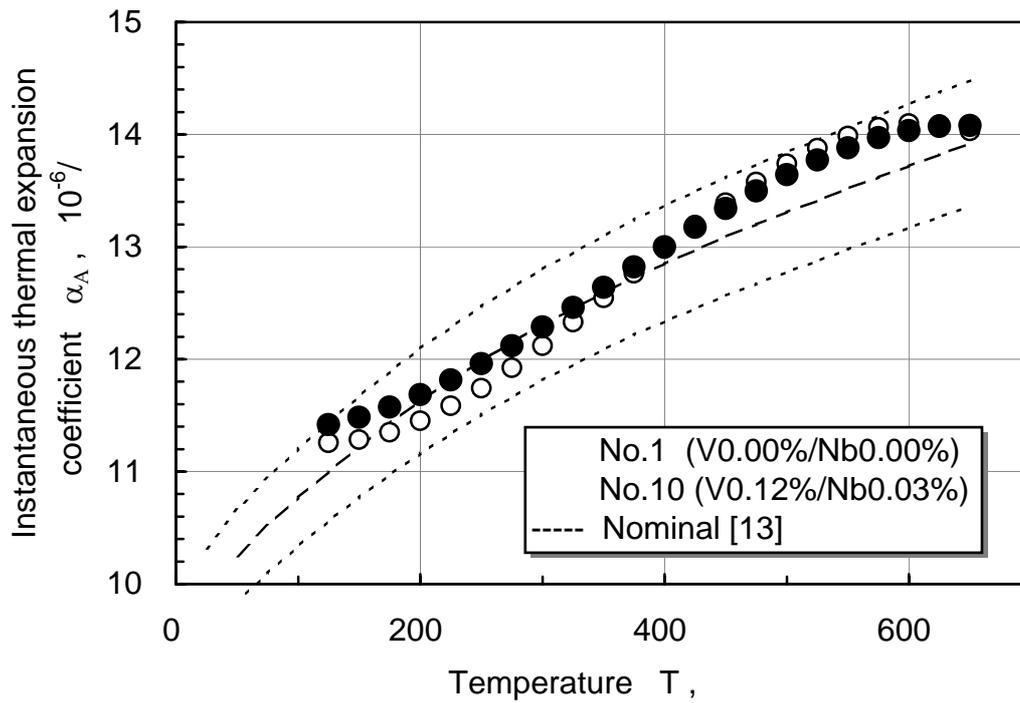


(a) Specific heat

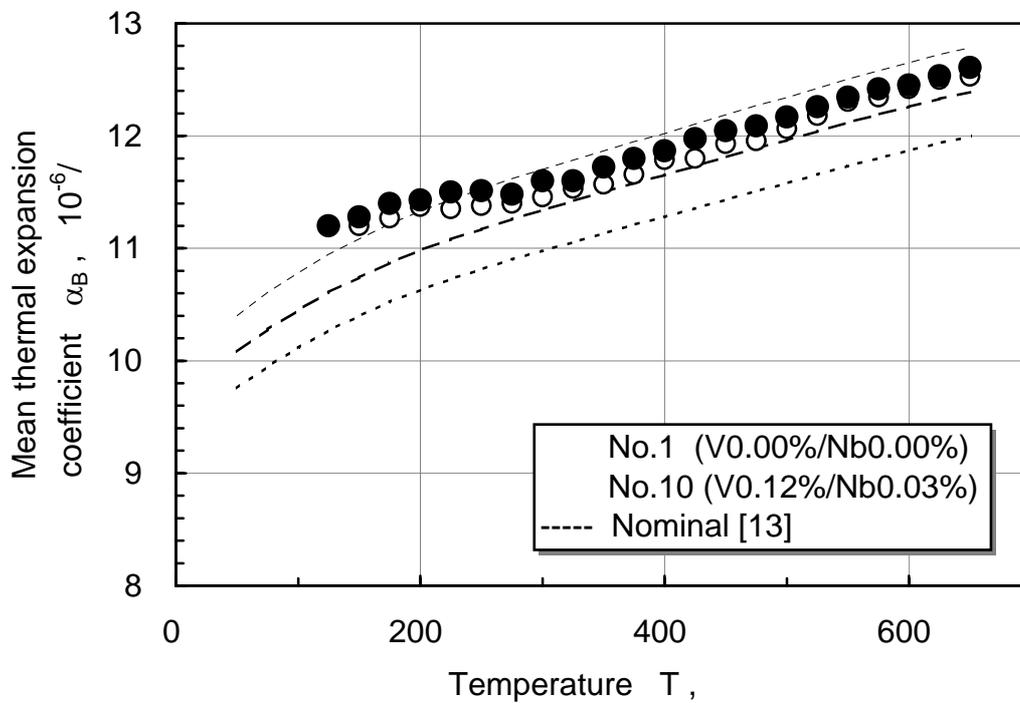


(b) Heat conductivity

Fig.4.1 Measurement results of specific heat and heat conductivity



(a) Instantaneous thermal expansion coefficient



(b) Mean

Fig.4.2 Measurement results of specific thermal expansion

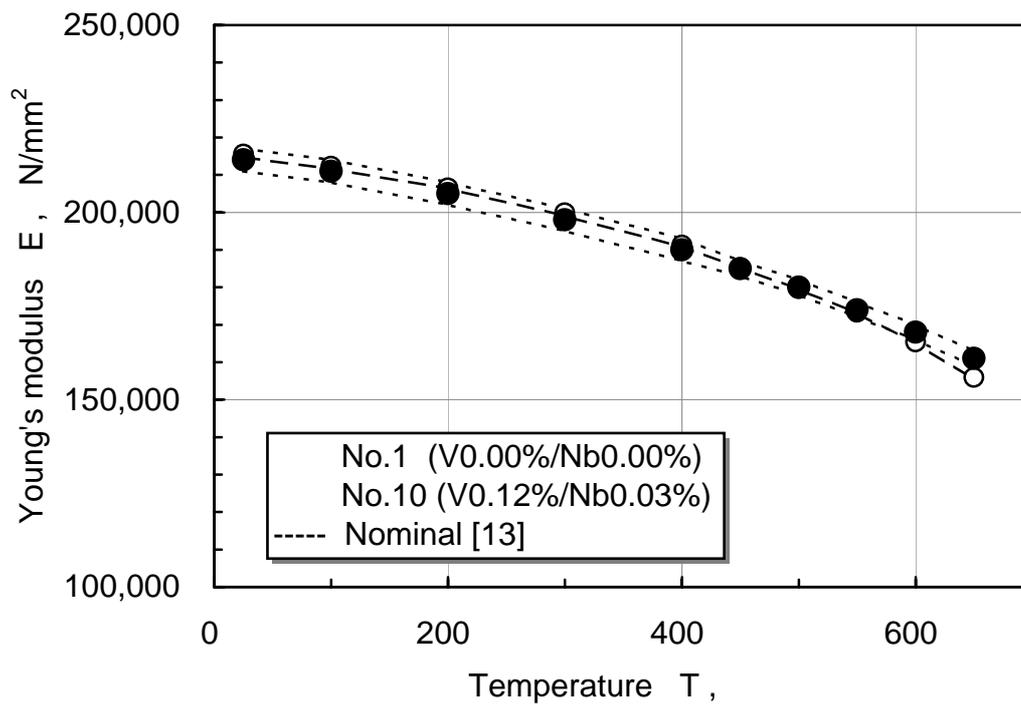
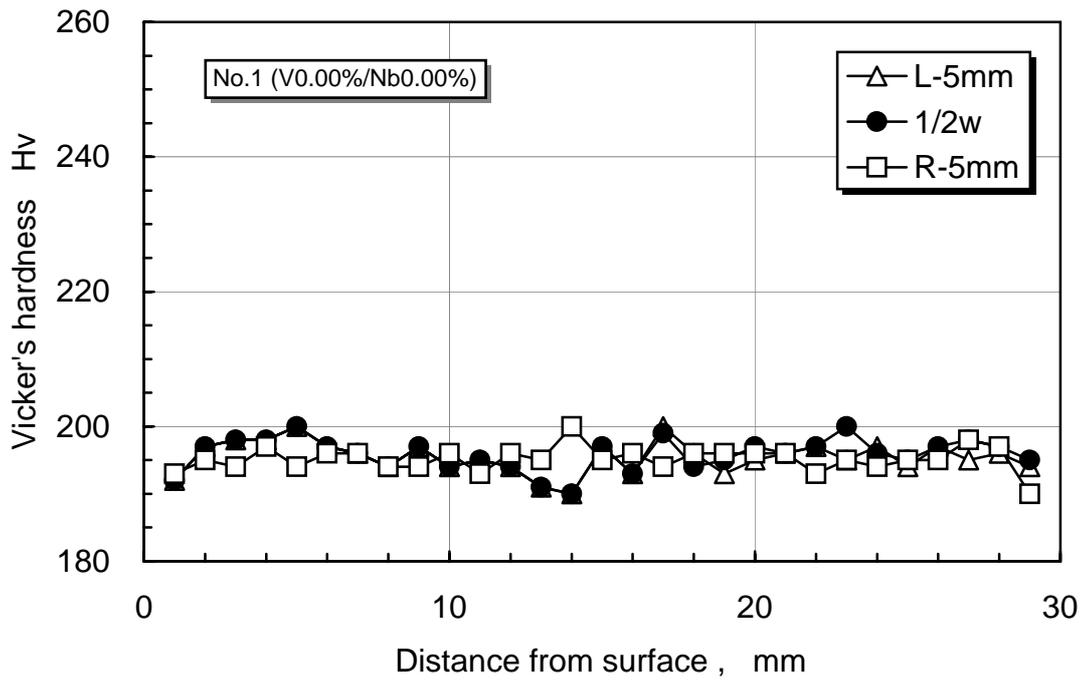
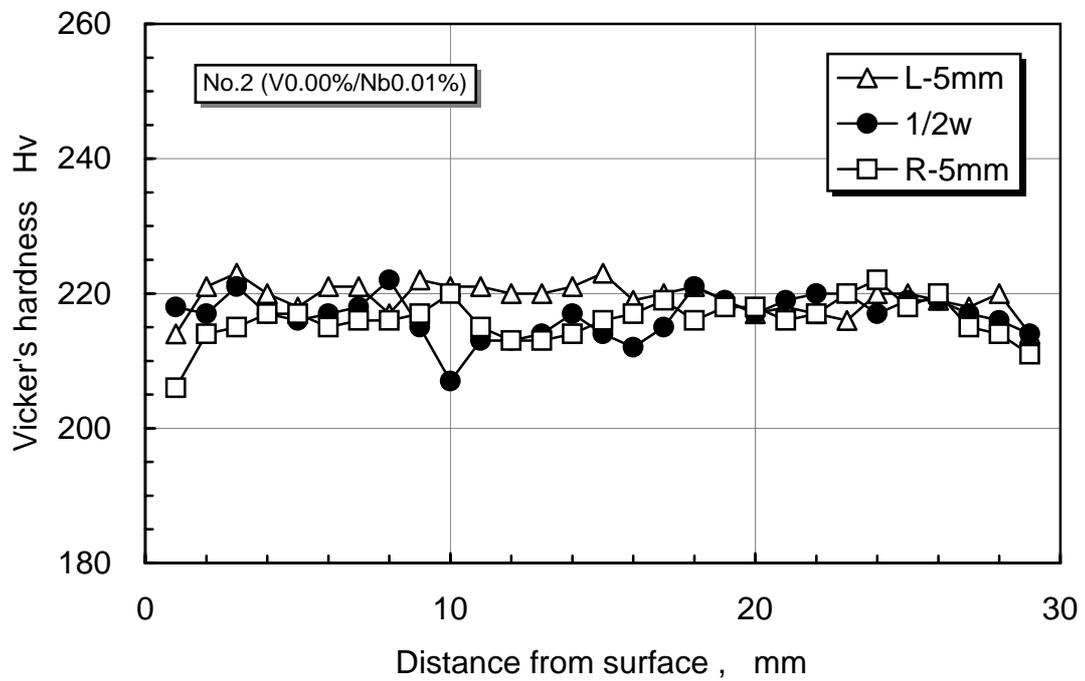


Fig.4.3 Measurement results of Young's modulus

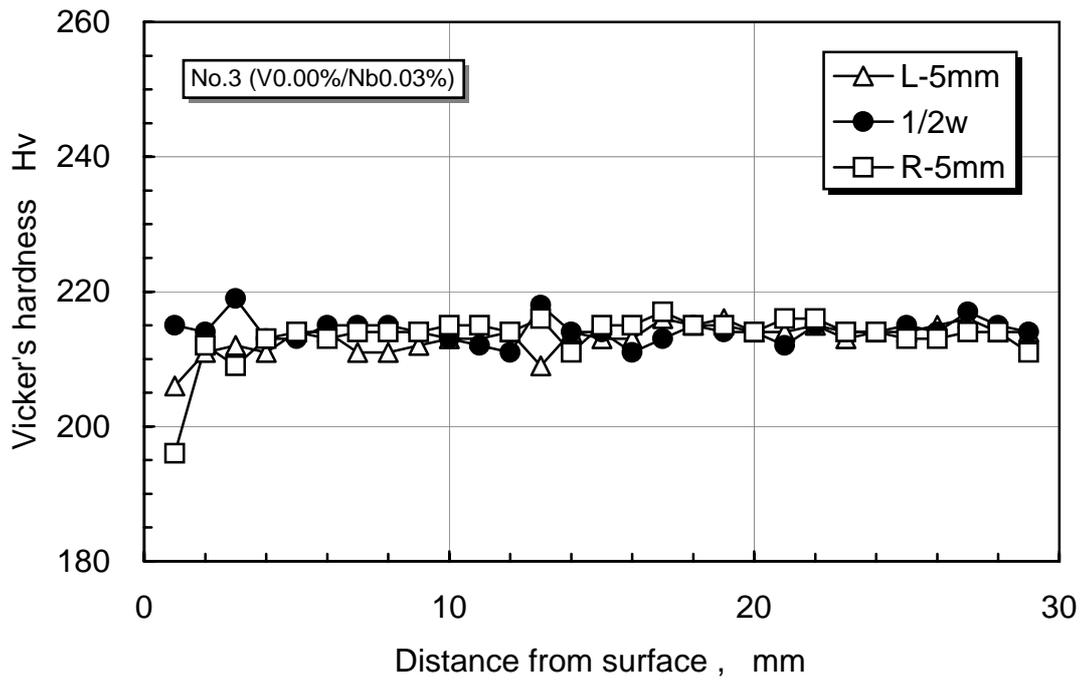


(a) Trial product No.1 (V0.00%/Nb0.00%)

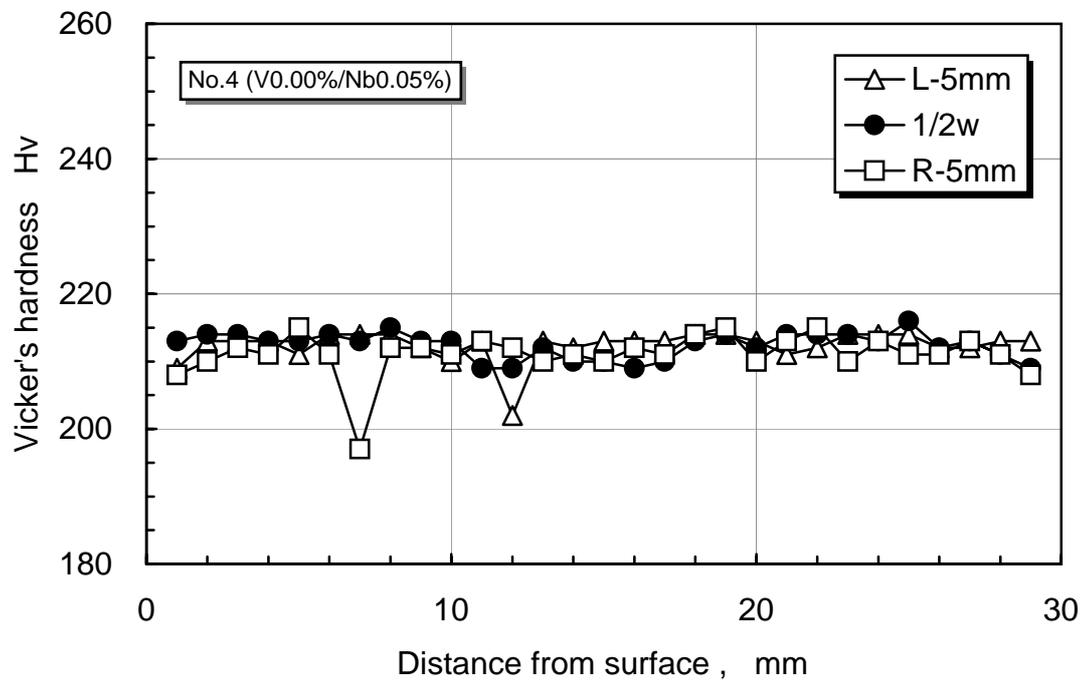


(b) Trial product No.2 (V0.00%/Nb0.01%)

Fig.4.4 Results of Vicker's hardness tests

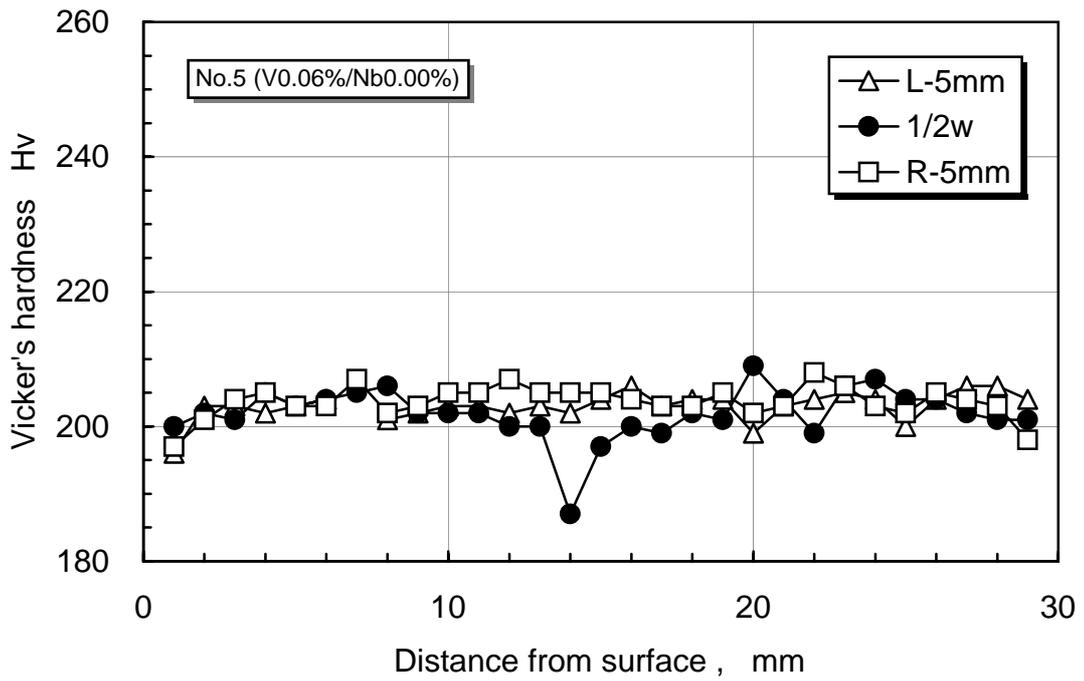


(c) Trial product No.3 (V0.00%/Nb0.03%)

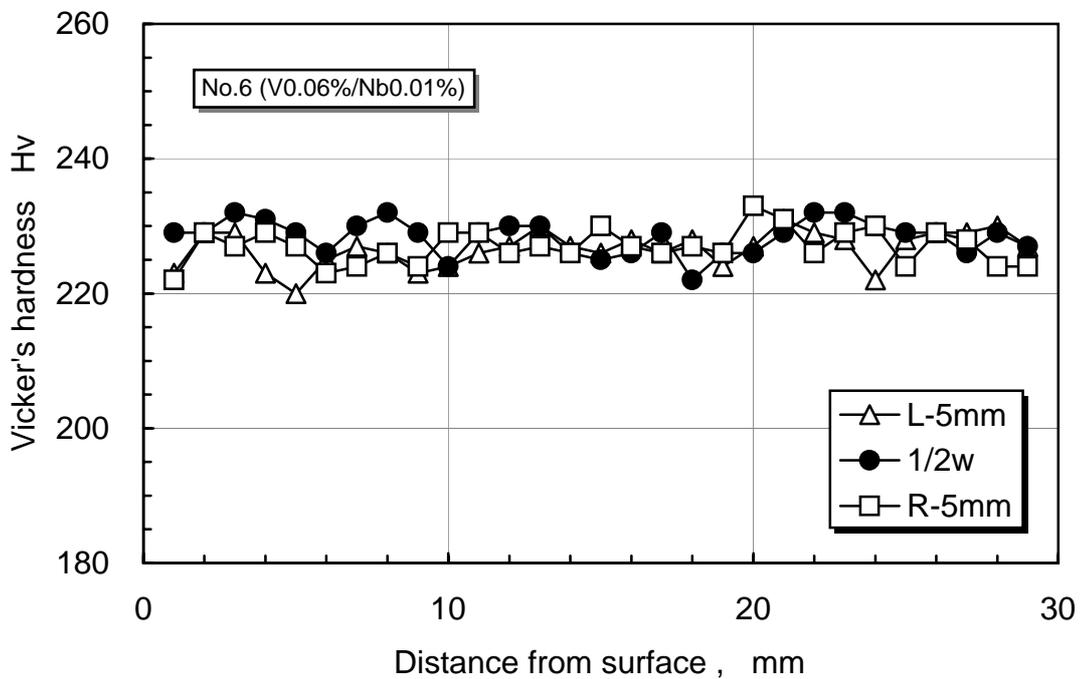


(d) Trial product No.4 (V0.00%/Nb0.05%)

Fig.4.4(contd.) Results of Vicker's hardness tests

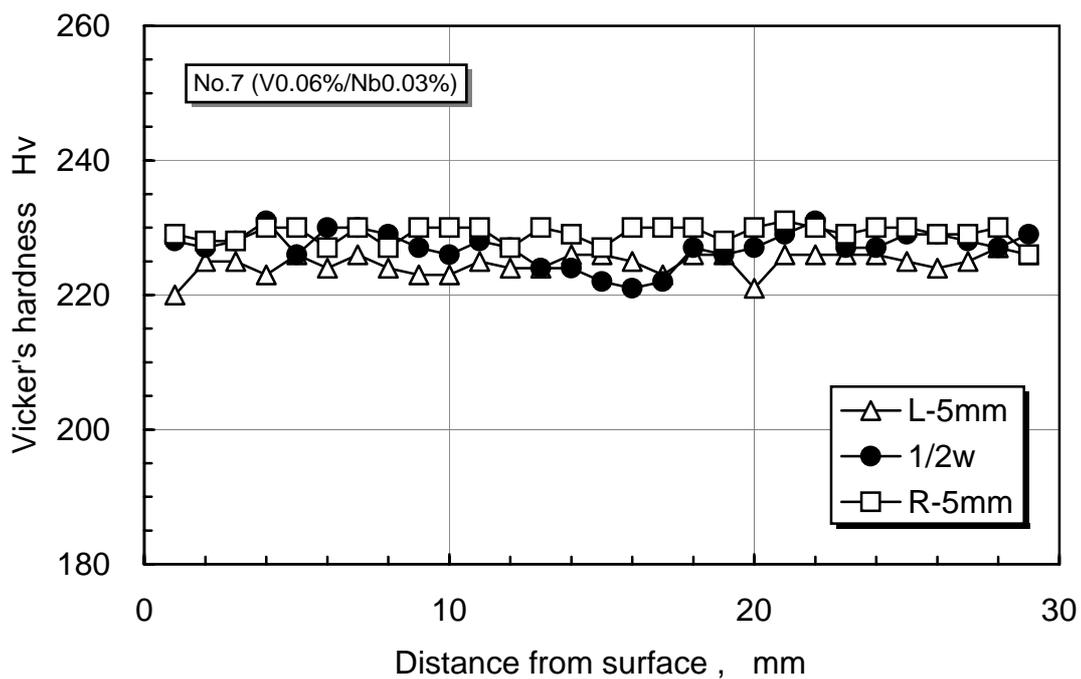


(e) Trial product No.5 (V0.06%/Nb0.00%)

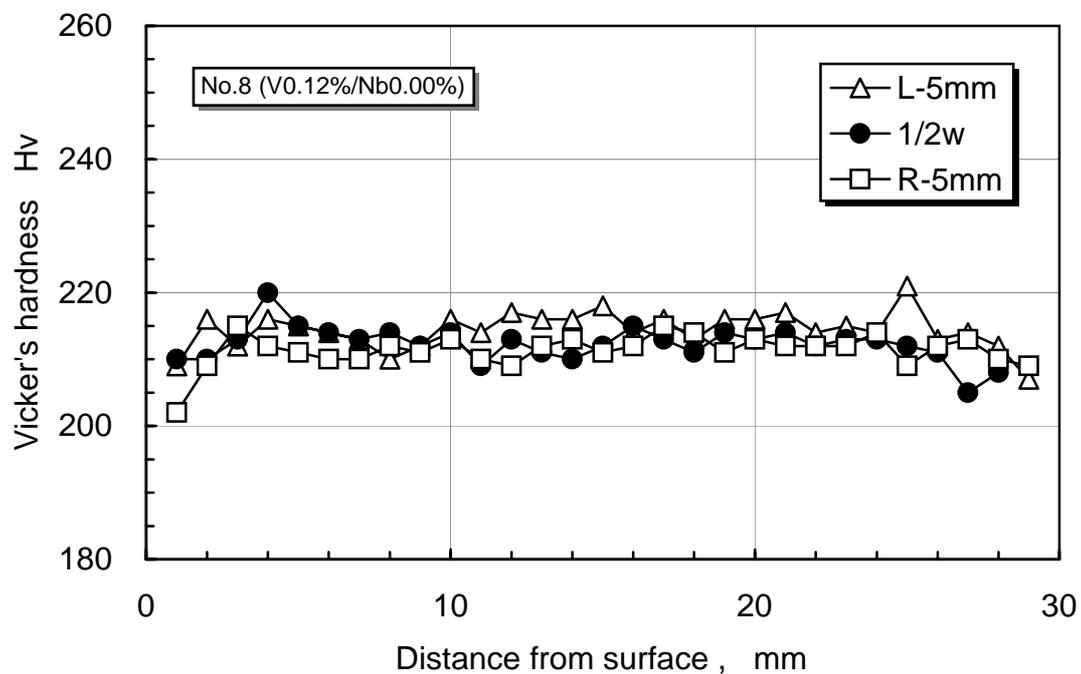


(f) Trial product No.6 (V0.06%/Nb0.01%)

Fig.4.4(contd.) Results of Vicker's hardness tests

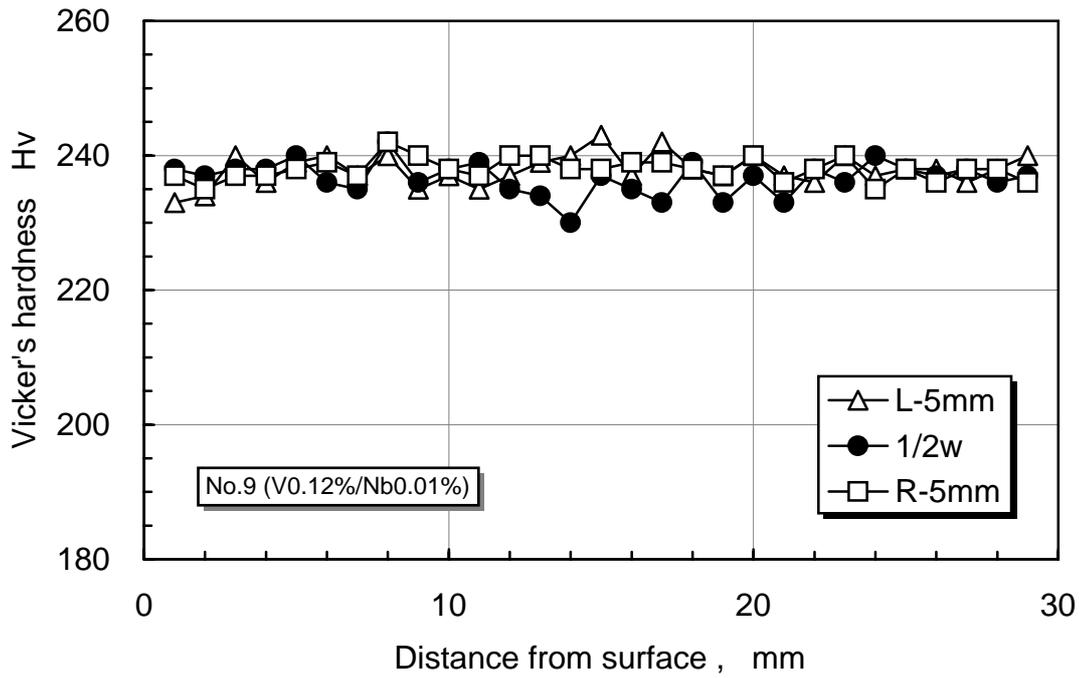


(g) Trial product No.7 (V0.06%/Nb0.03%)

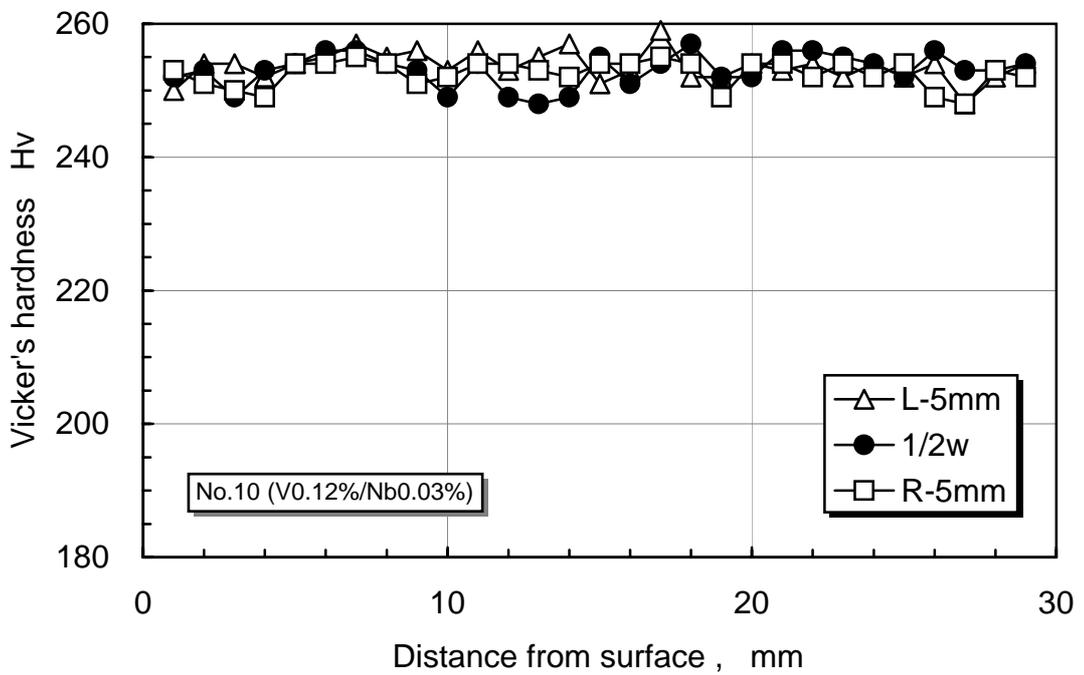


(h) Trial product No.8 (V0.12%/Nb0.00%)

Fig.4.4(contd.) Results of Vicker's hardness tests

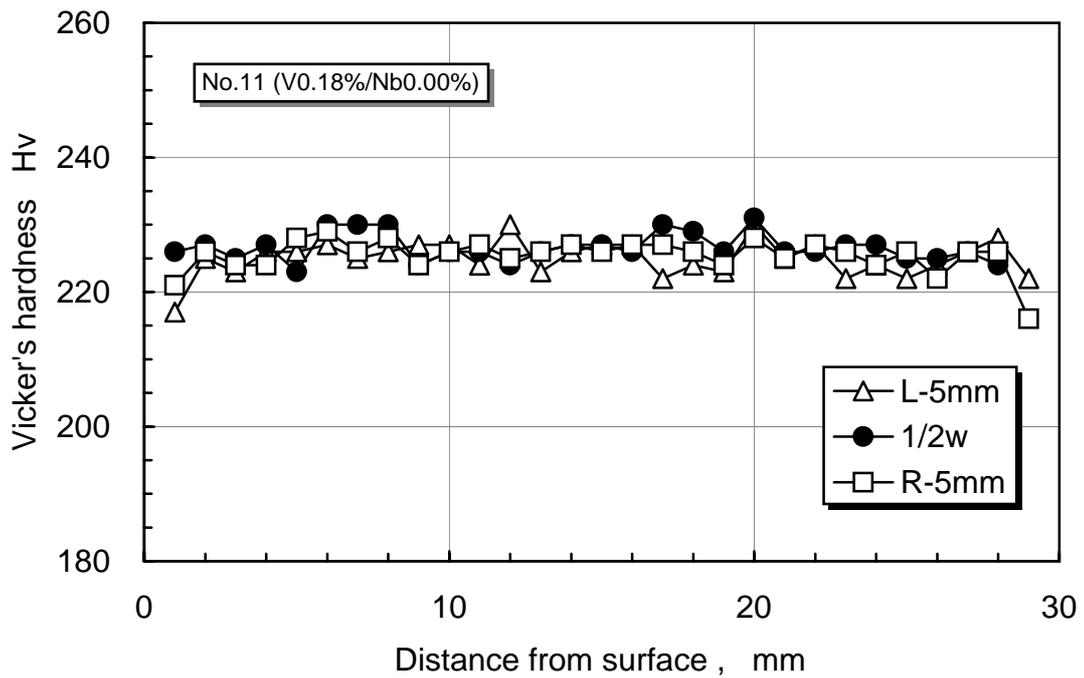


(i) Trial product No.9 (V0.12%/Nb0.01%)

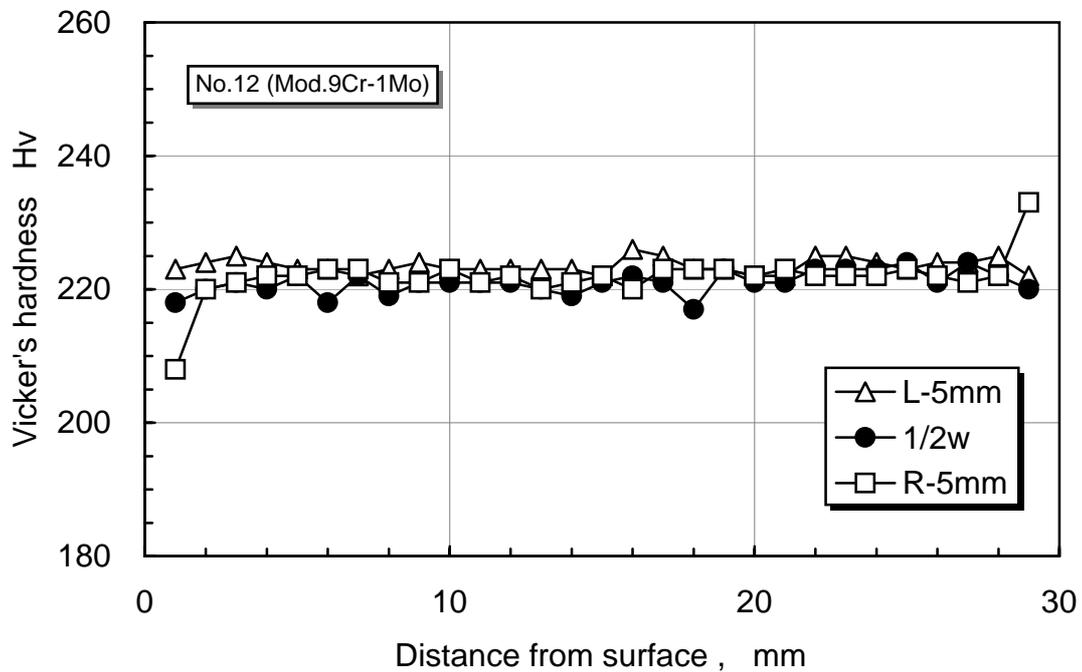


(j) Trial product No.10 (V0.12%/Nb0.03%)

Fig.4.4(contd.) Results of Vicker's hardness tests

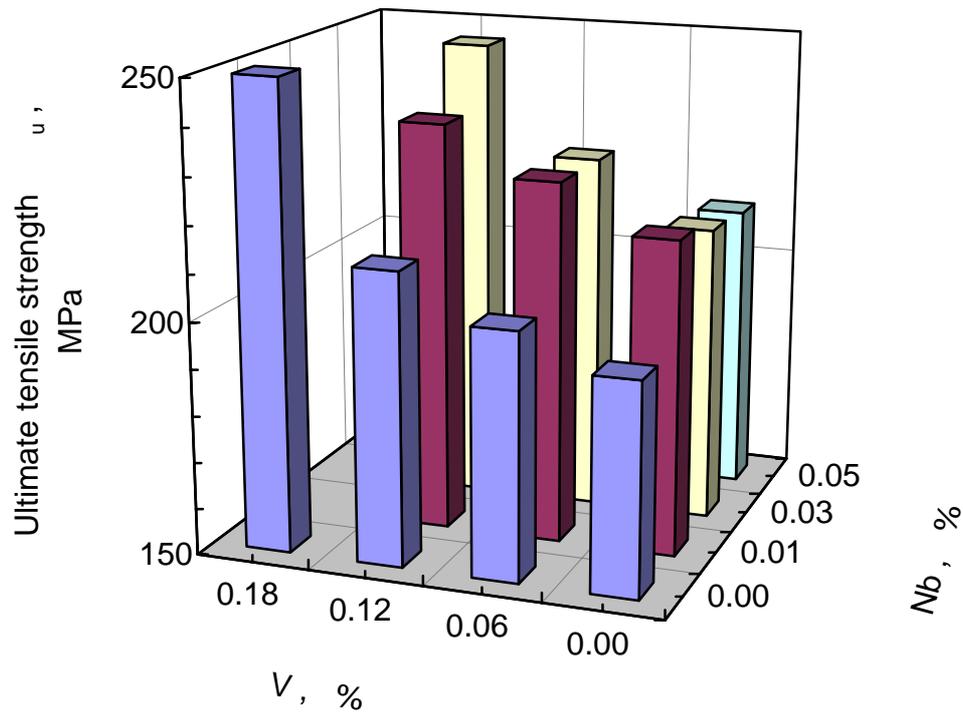


(k) Trial product No.11 (V0.18%/Nb0.00%)



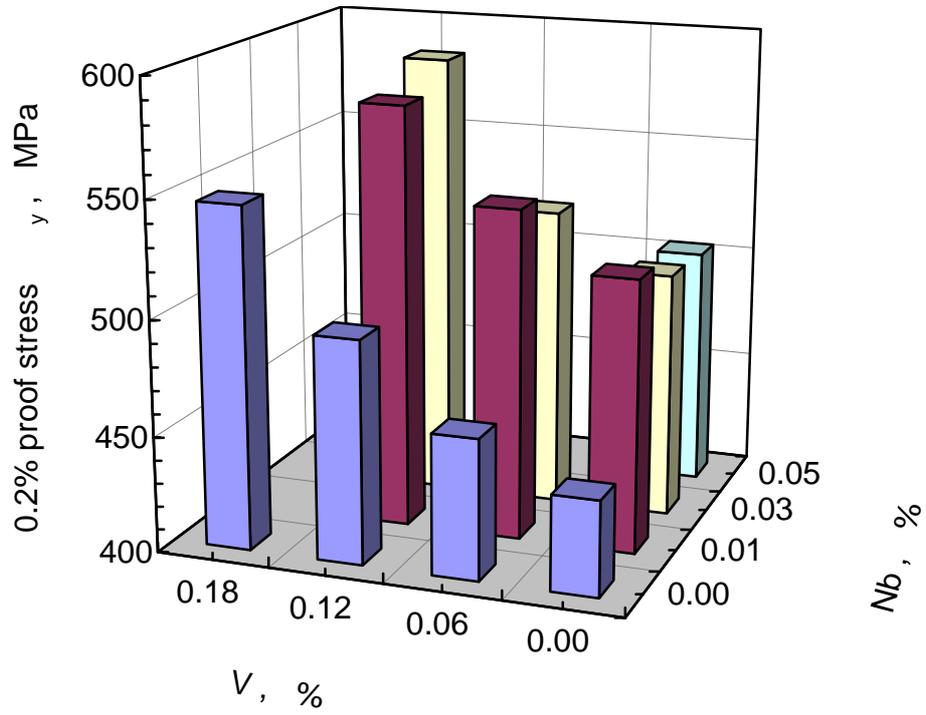
(l) Mod.9Cr-1Mo steel (No.12)

Fig.4.4(contd.) Results of Vicker's hardness tests



Nb \ V	V			
	0.00	0.06	0.12	0.18
0.00	195.5	202.8	212.6	351.2
0.01	217.4	227.3	237.5	
0.03	213.6	227.0	253.1	
0.05	211.9			

Fig.4.5 Influence of V and Nb on hardness

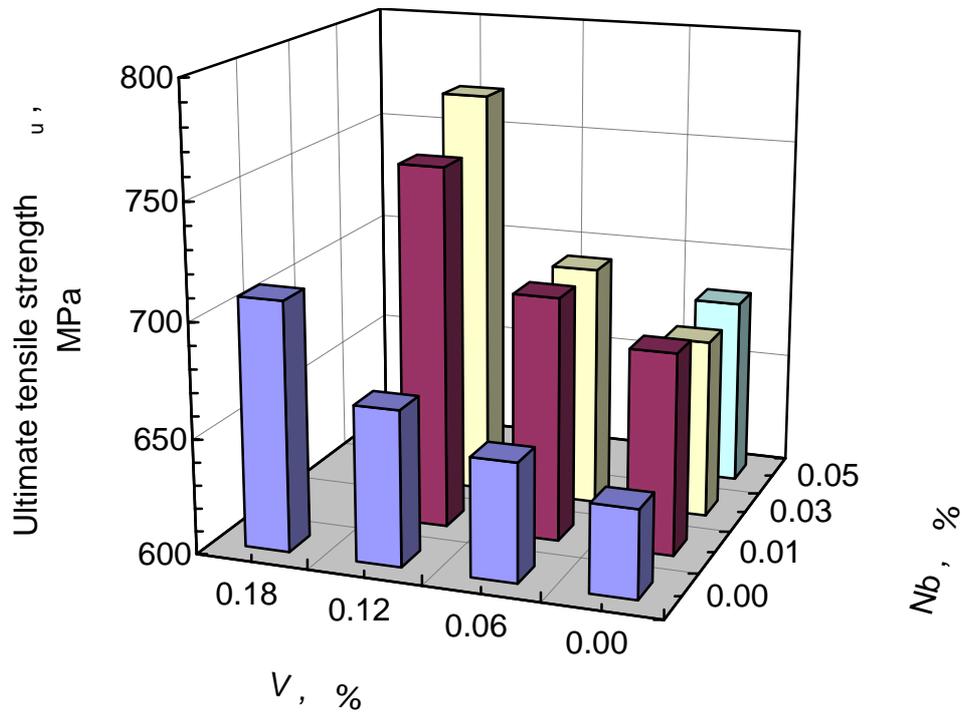


Nb \ V	0.00	0.06	0.12	0.18
0.00	440.9	460.4	496.1	547.2
0.01	517.5	542.4	581.9	
0.03	506.3	529.6	592.7	
0.05	503.8			

(MPa)

(a) 0.2% proof stress

Fig.4.6 Influence of V and Nb on tensile properties

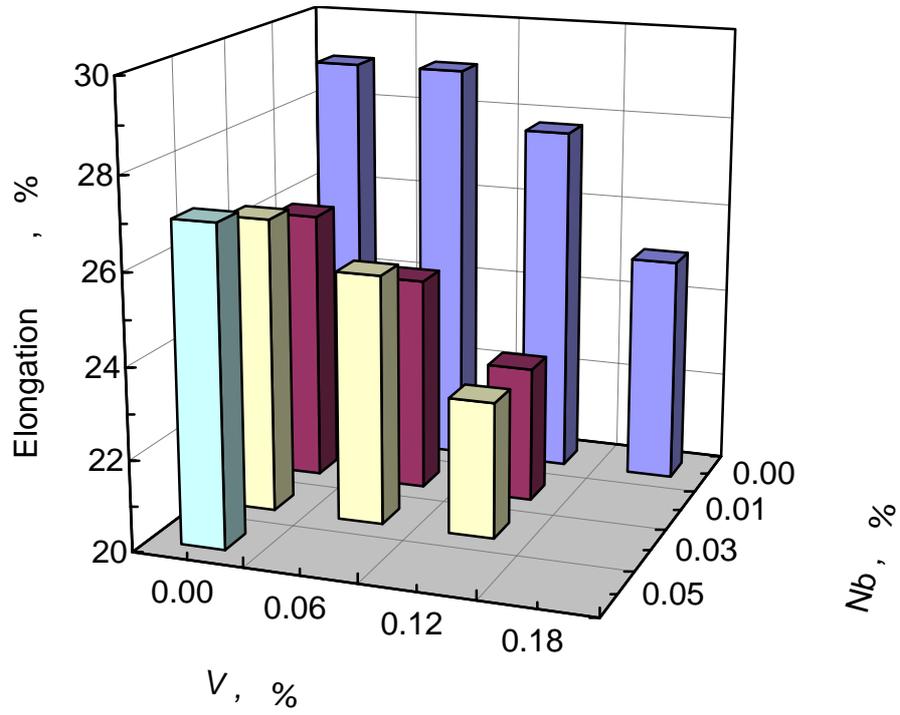


Nb \ V	0.00	0.06	0.12	0.18
0.00	638.2	651.4	667.5	708.4
0.01	687.4	705.9	757.0	
0.03	678.2	705.5	777.9	
0.05	682.1			

(MPa)

(b) Ultimate tensile strength

Fig.4.6 (contd.) Influence of V and Nb on tensile properties

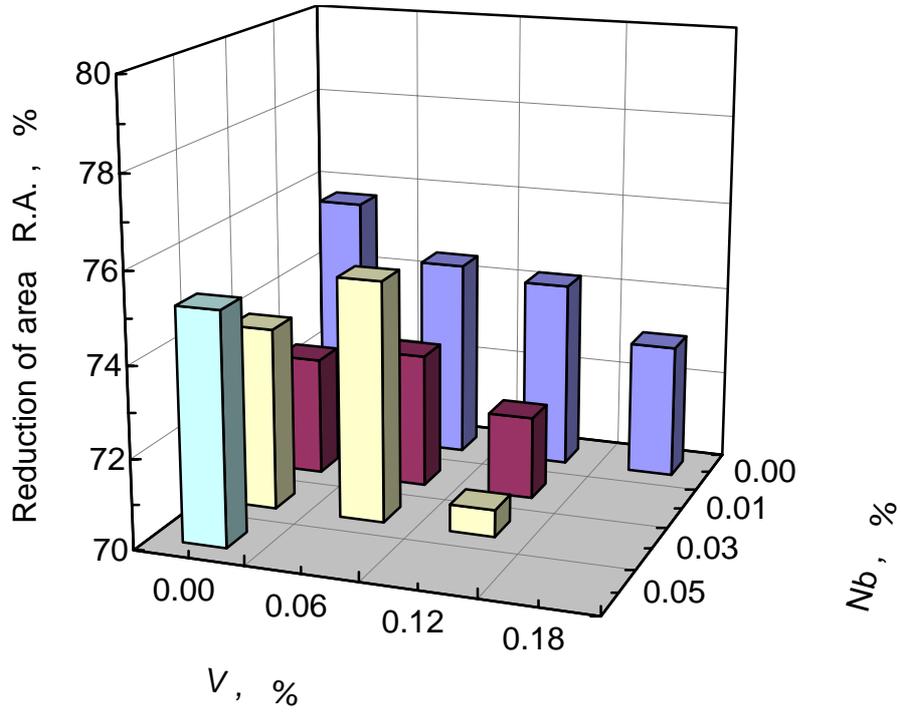


Nb \ V	0.00	0.06	0.12	0.18
0.00	29.0	29.0	27.8	25.0
0.01	26.0	24.8	23.0	
0.03	26.5	25.5	23.0	
0.05	27.0			

(%)

(c) Elongation

Fig.4.6 (contd.) Influence of V and Nb on tensile properties

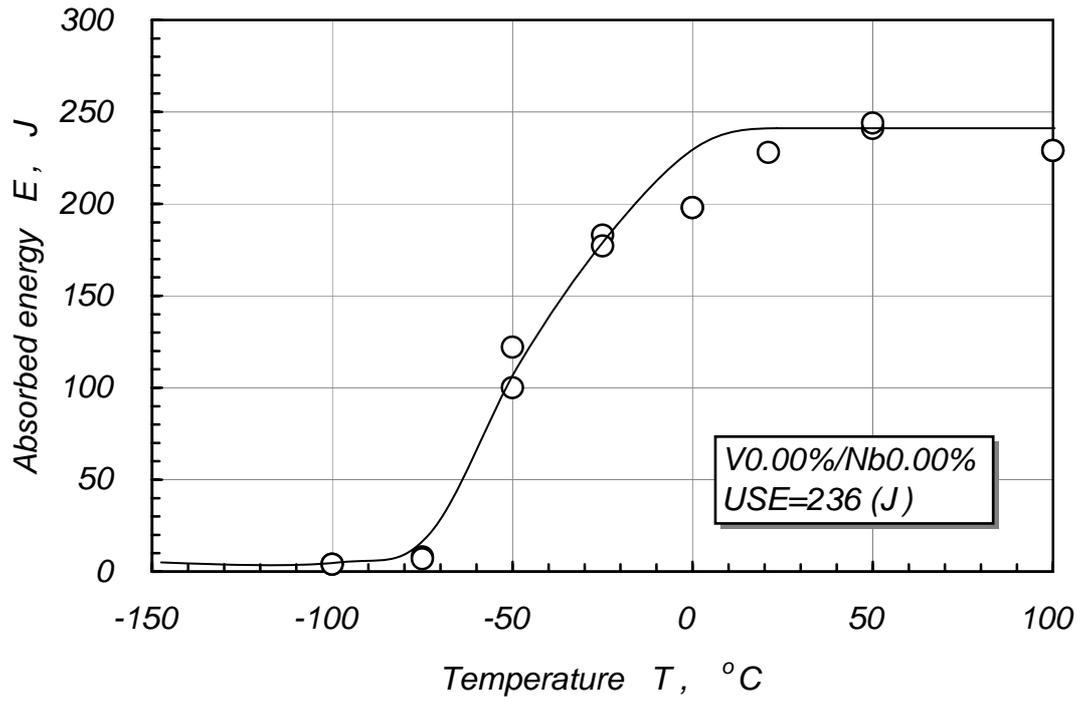


Nb \ V	0.00	0.06	0.12	0.18
0.00	75.7	74.5	74.2	73.0
0.01	72.7	73.0	71.9	
0.03	74.1	75.4	70.6	
0.05	75.2			

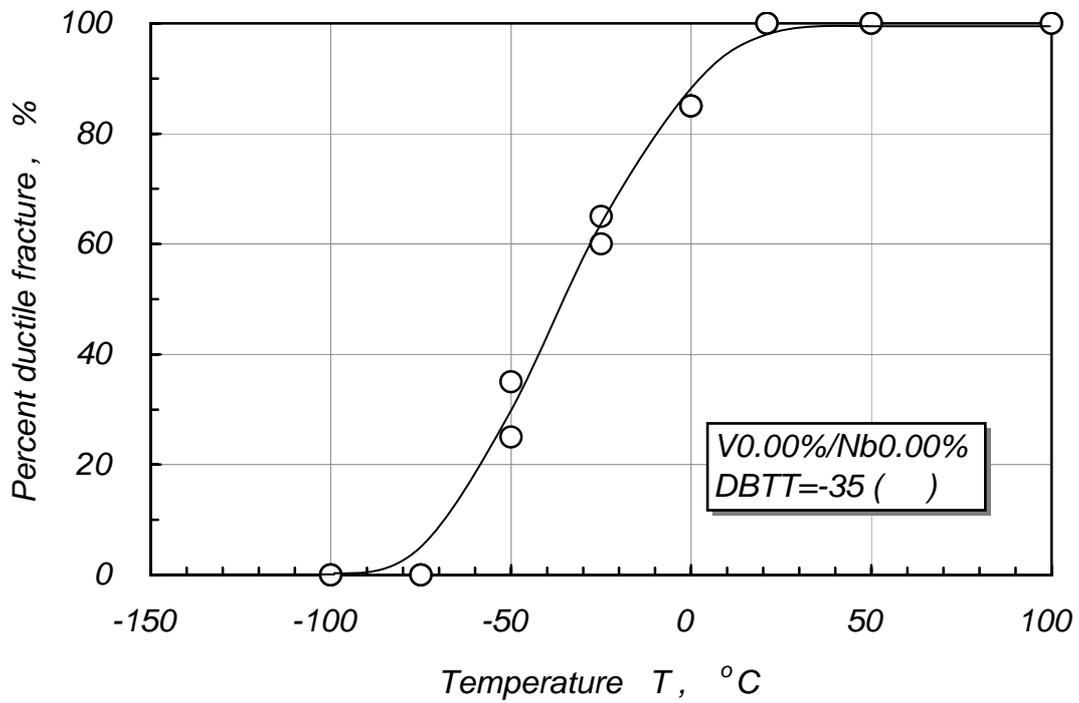
(%)

(d) Reduction of area

Fig.4.6 (contd.) Influence of V and Nb on tensile properties

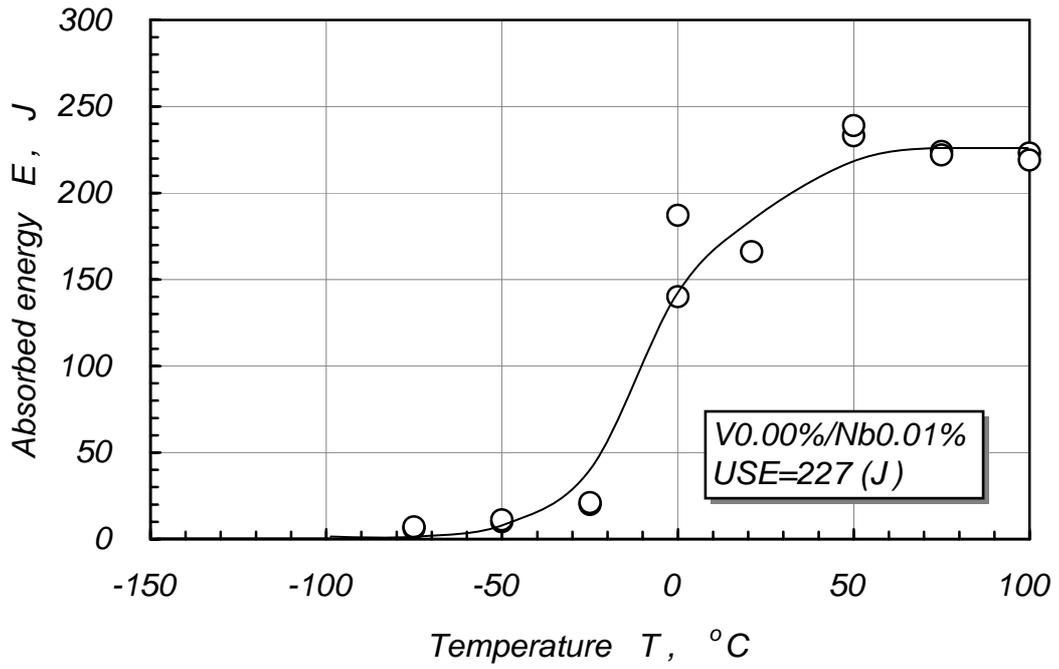


(a-1) Absorbed energy (V0.00%/Nb0.00%)

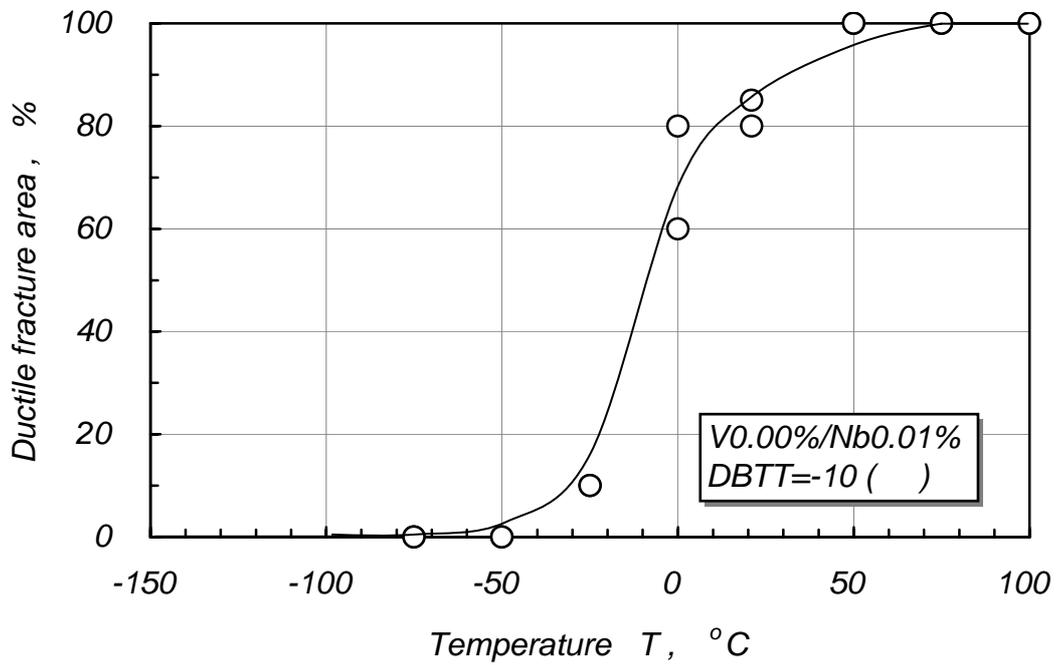


(a-2) Percent ductile fracture (V0.00%/Nb0.00%)

Fig.4.7 Results of Charpy impact tests

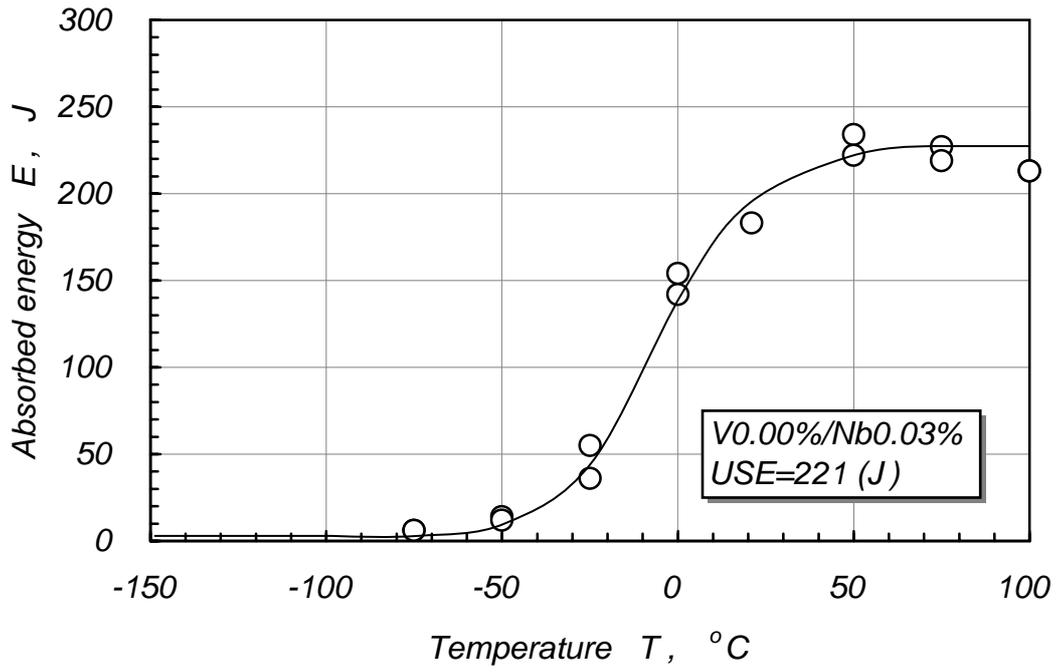


(b-1) Absorbed energy (V0.00%/Nb0.01%)

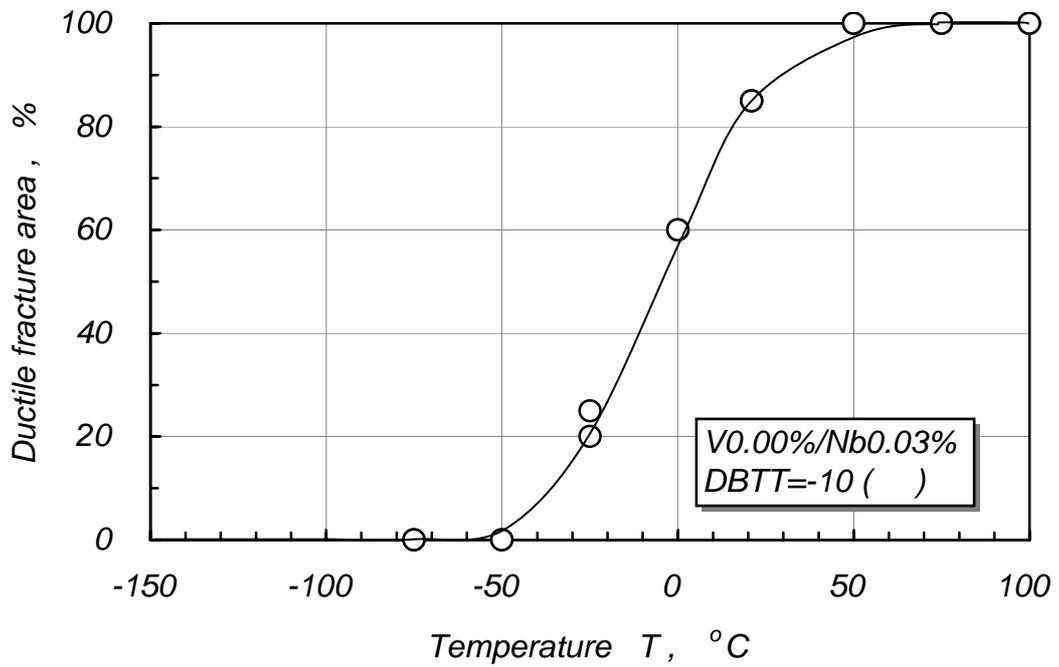


(b-2) Percent ductile fracture (V0.00%/Nb0.01%)

Fig.4.7 (contd.) Results of Sharpy impact tests

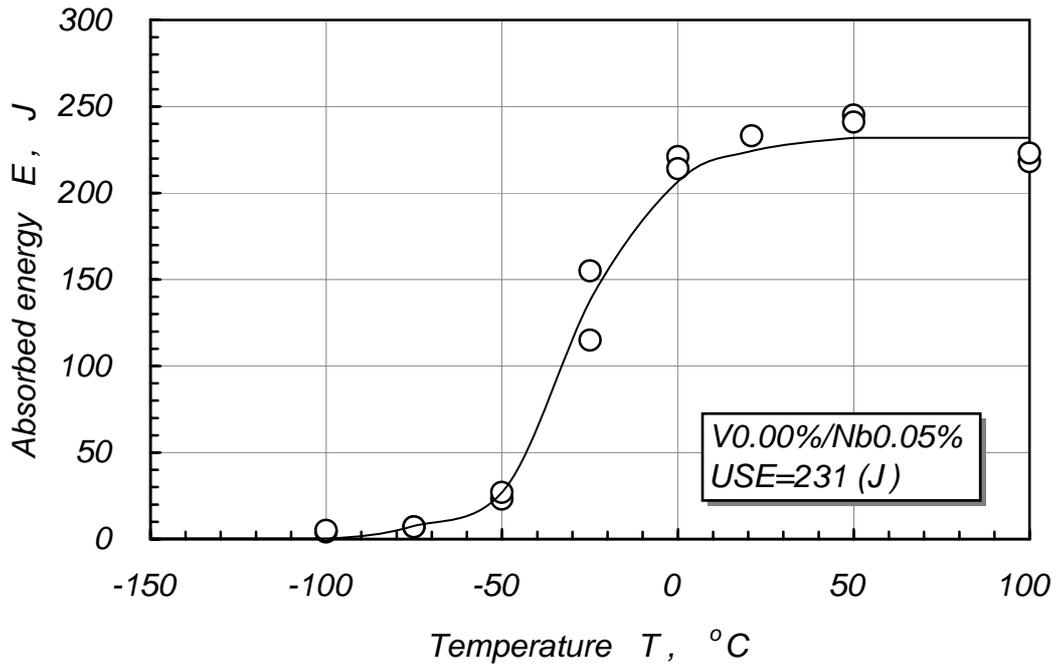


(c-1) Absorbed energy (V0.00%/Nb0.03%)

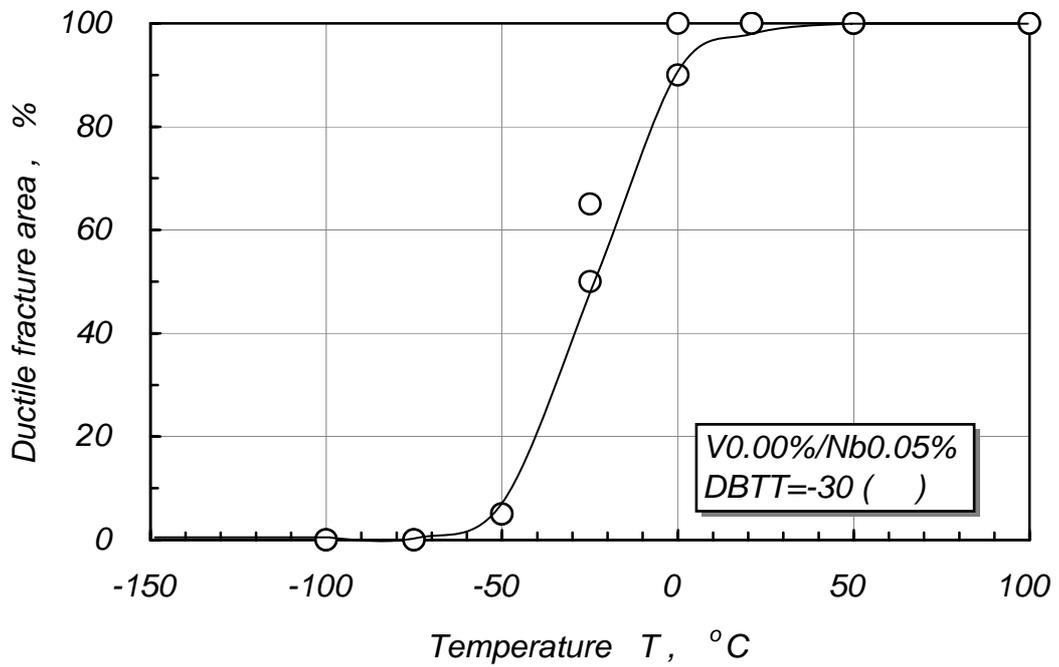


(c-2) Percent ductile fracture (V0.00%/Nb0.03%)

Fig.4.7 (contd.) Results of Sharpy impact tests

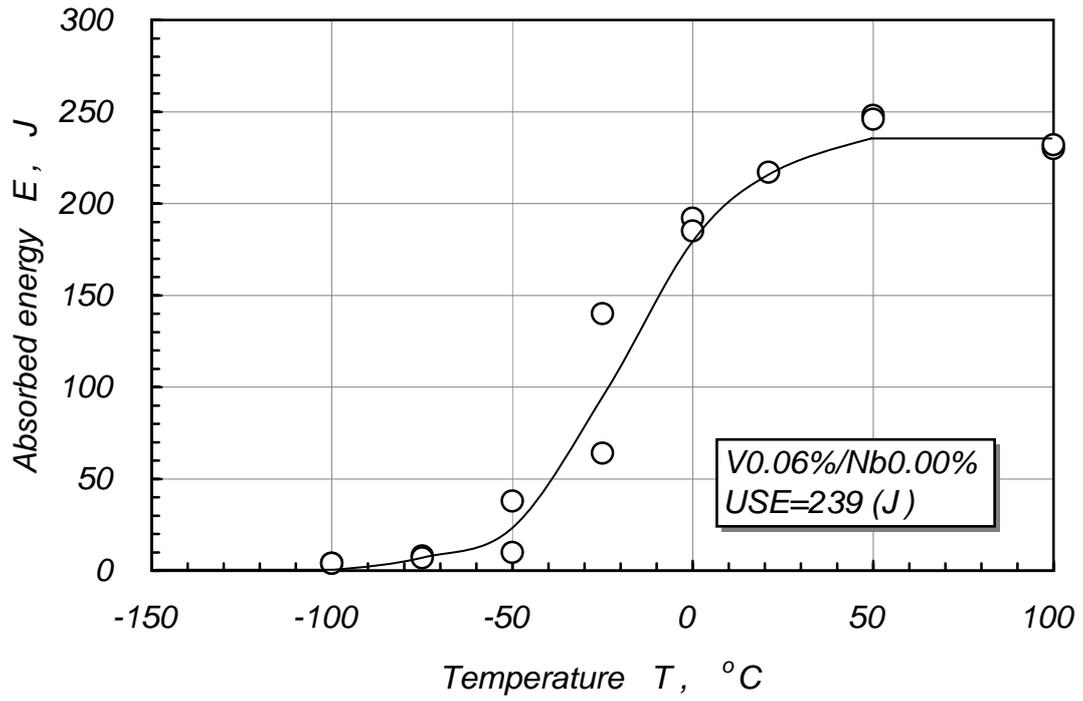


(d-1) Absorbed energy (V0.00%/Nb0.05%)

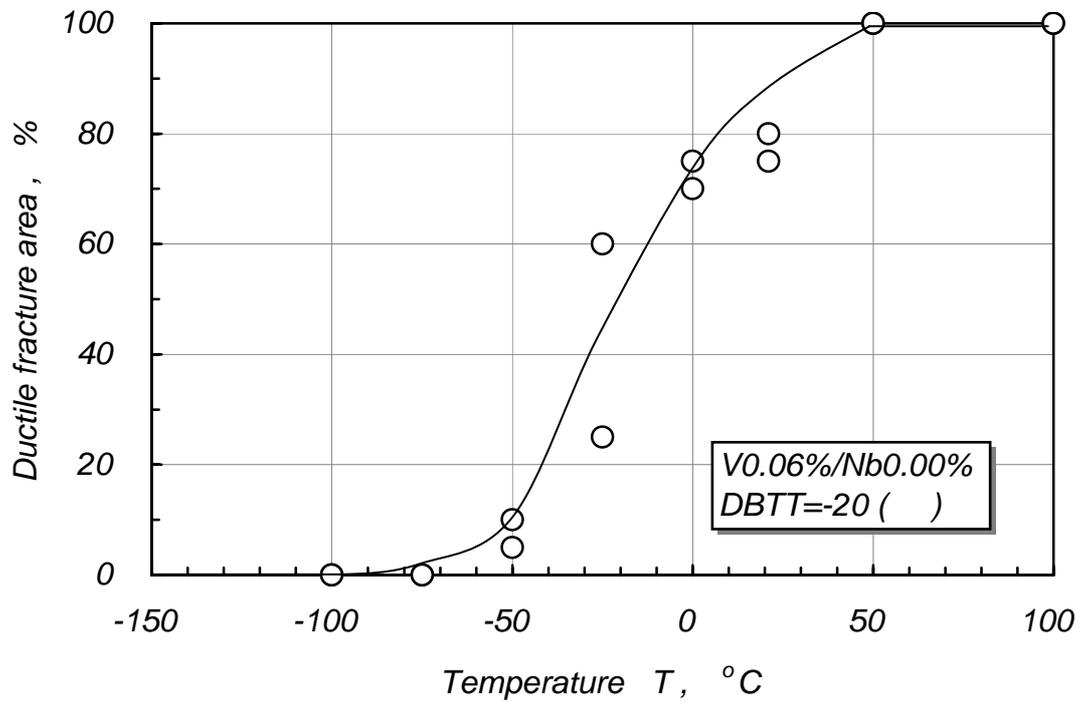


(d-2) Percent ductile fracture (V0.00%/Nb0.05%)

Fig.4.7 (contd.) Results of Charpy impact tests

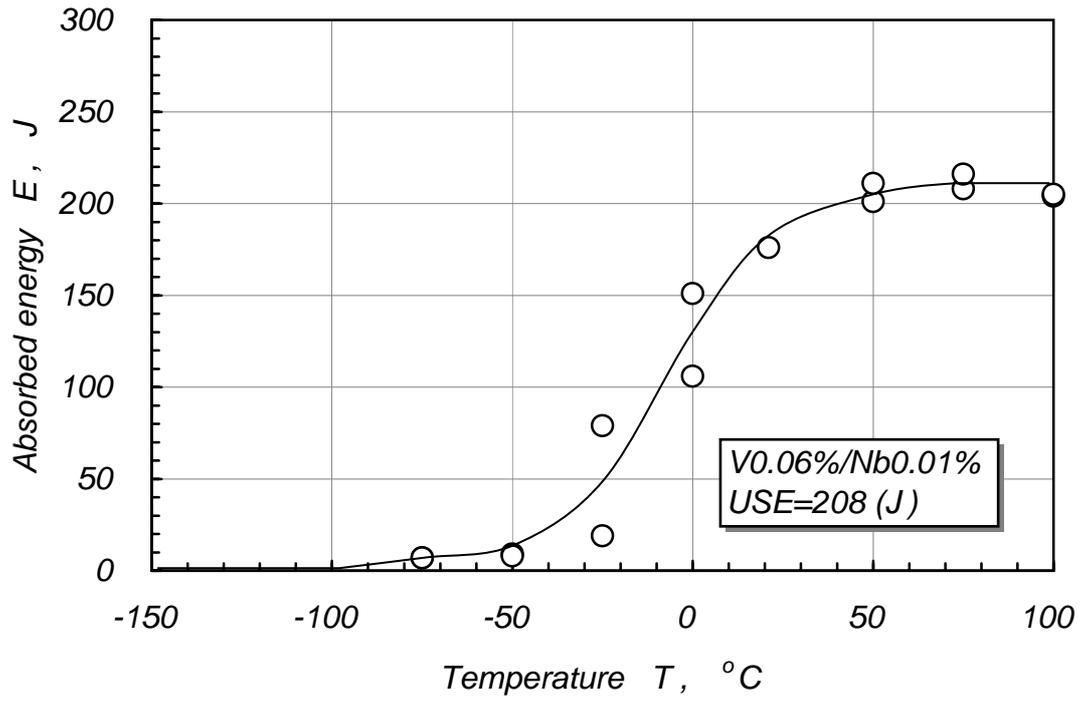


(e-1) Absorbed energy (V0.06%/Nb0.00%)

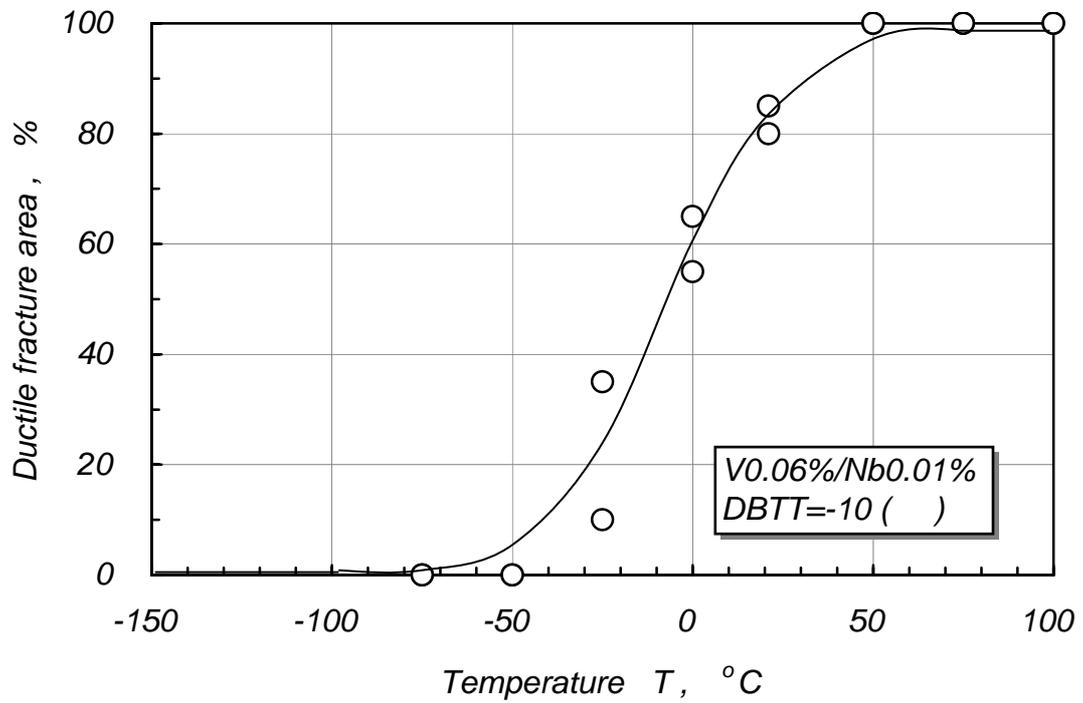


(e-2) Percent ductile fracture (V0.06%/Nb0.00%)

Fig.4.7 (contd.) Results of Charpy impact tests

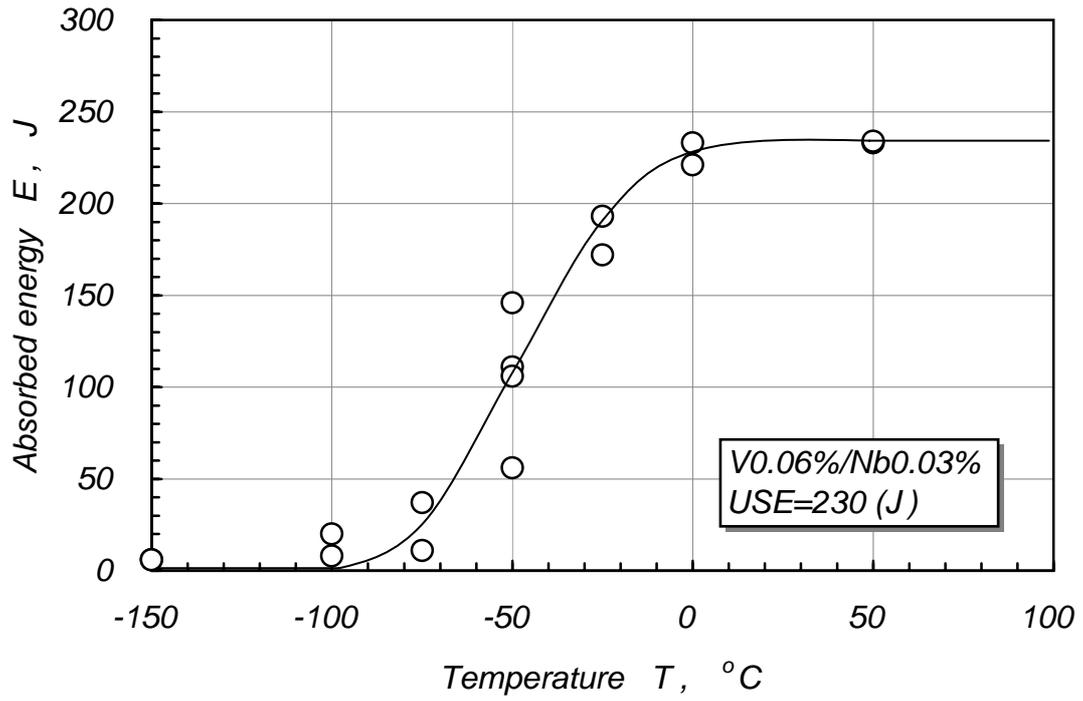


(f-1) Absorbed energy (V0.06%/Nb0.01%)

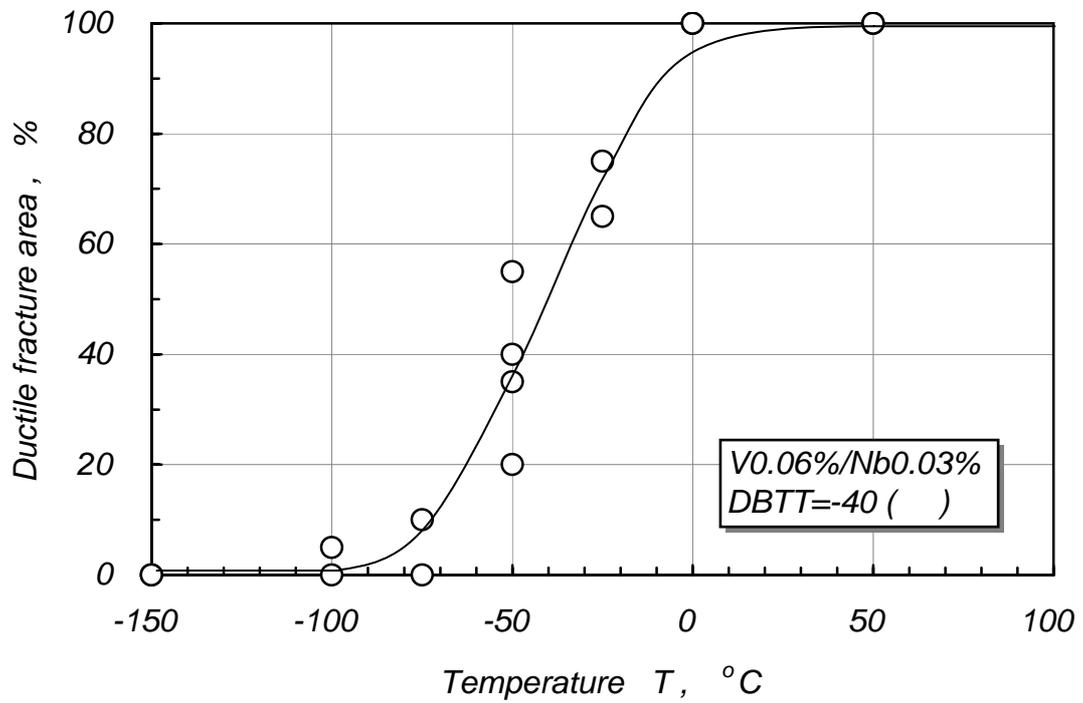


(f-2) Percent Ductile fracture (V0.06%/Nb0.01%)

Fig.4.7 (contd.) Results of Charpy impact tests

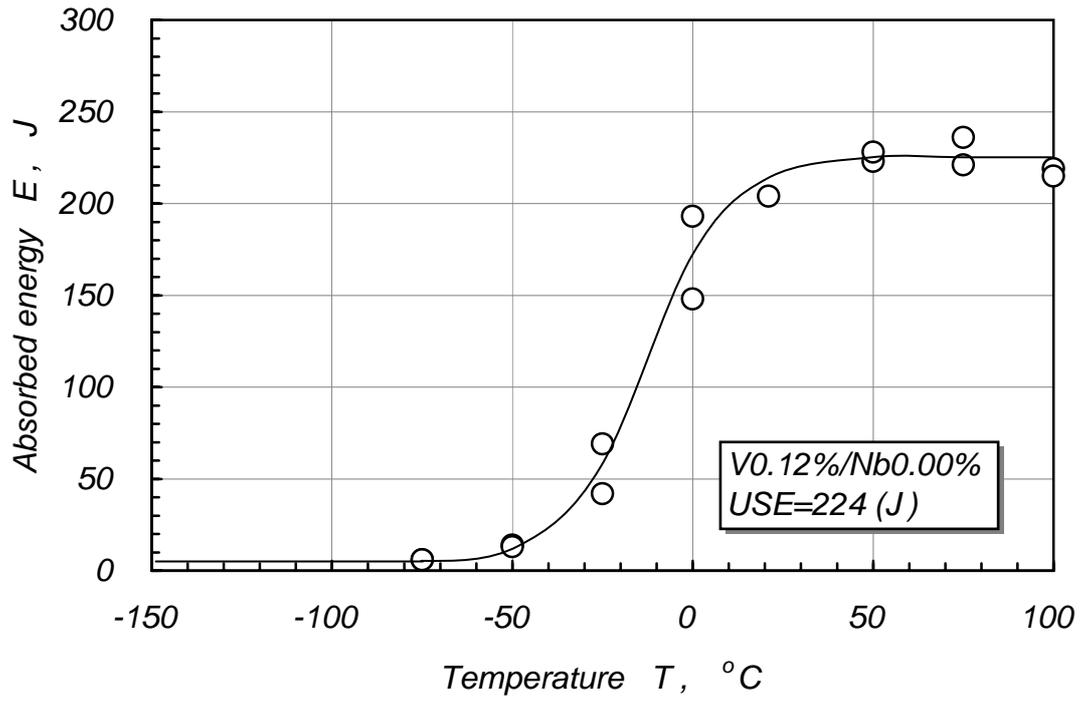


(g-1) Absorbed energy (V0.06%/Nb0.03%)

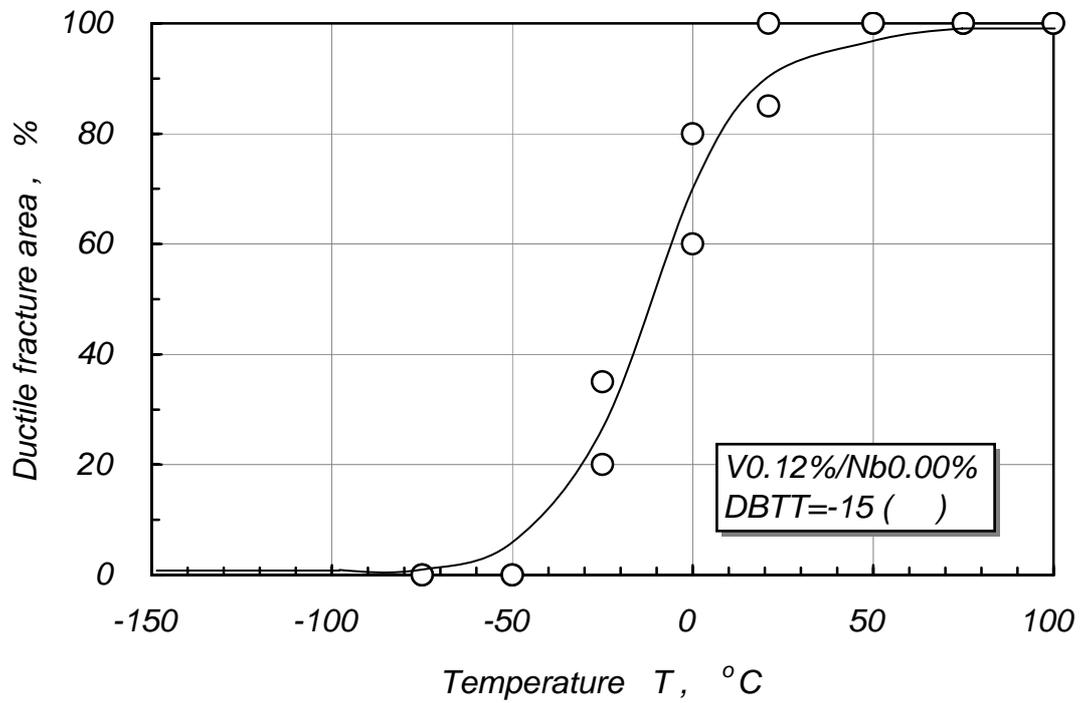


(g-2) Percent Ductile fracture (V0.06%/Nb0.03%)

Fig.4.7 (contd.) Results of Charpy impact tests

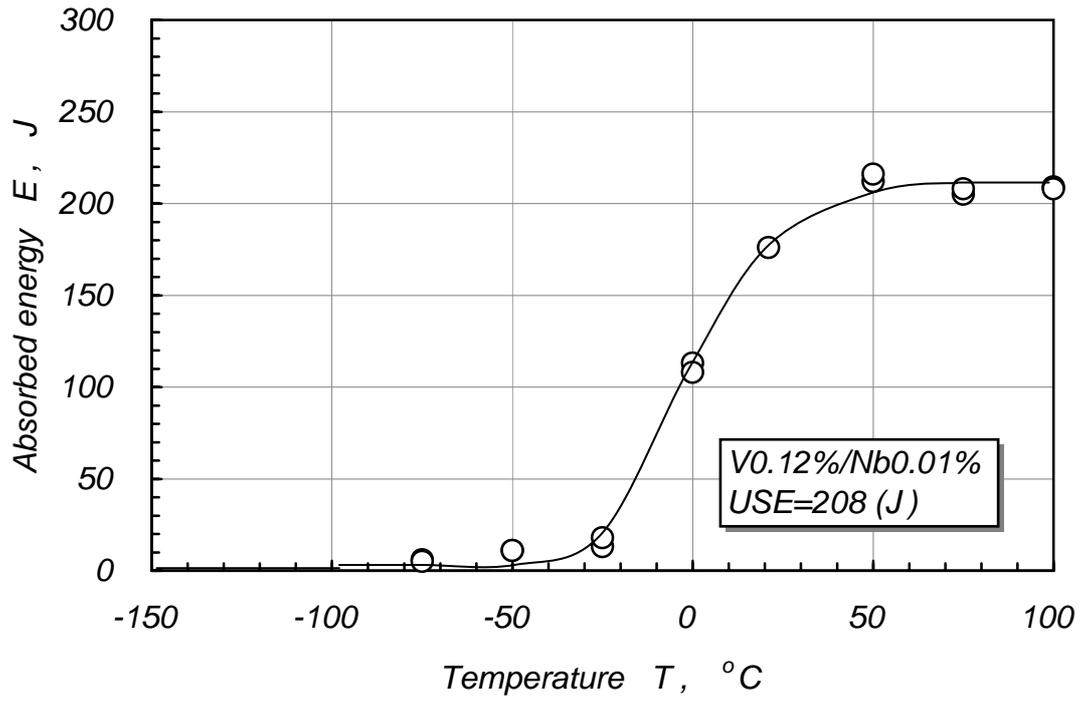


(h-1) Absorbed energy (V0.12%/Nb0.00%)

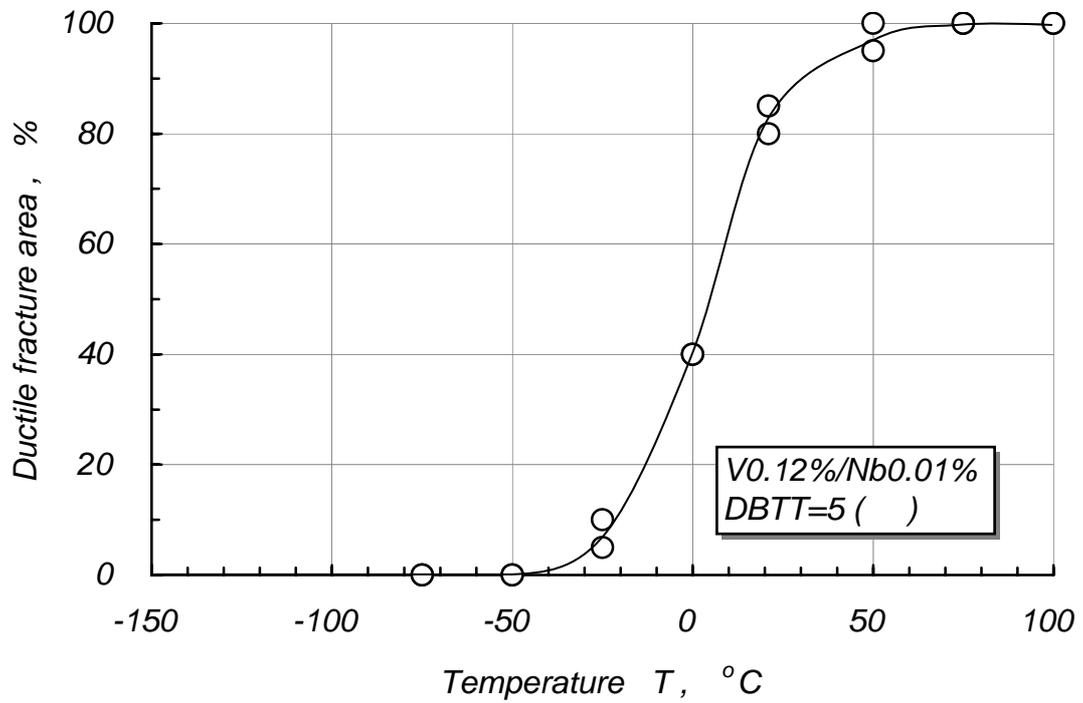


(h-2) Percent Ductile fracture (V0.12%/Nb0.00%)

Fig.4.7 (contd.) Results of Charpy impact tests

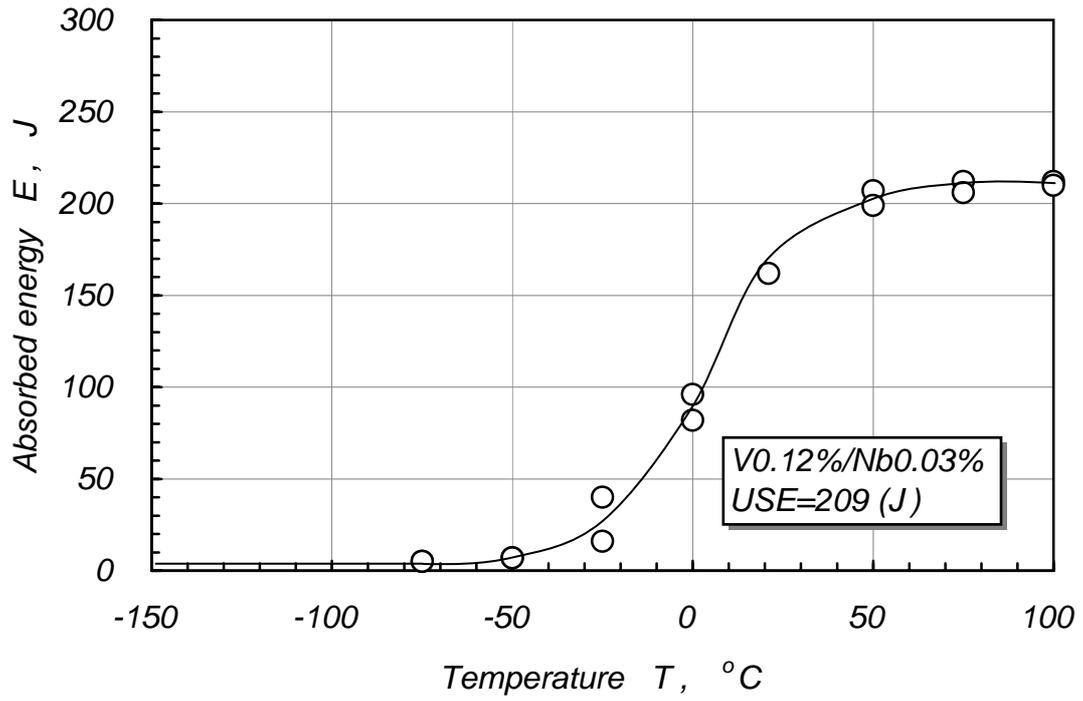


(i-1) Absorbed energy (V0.12%/Nb0.01%)

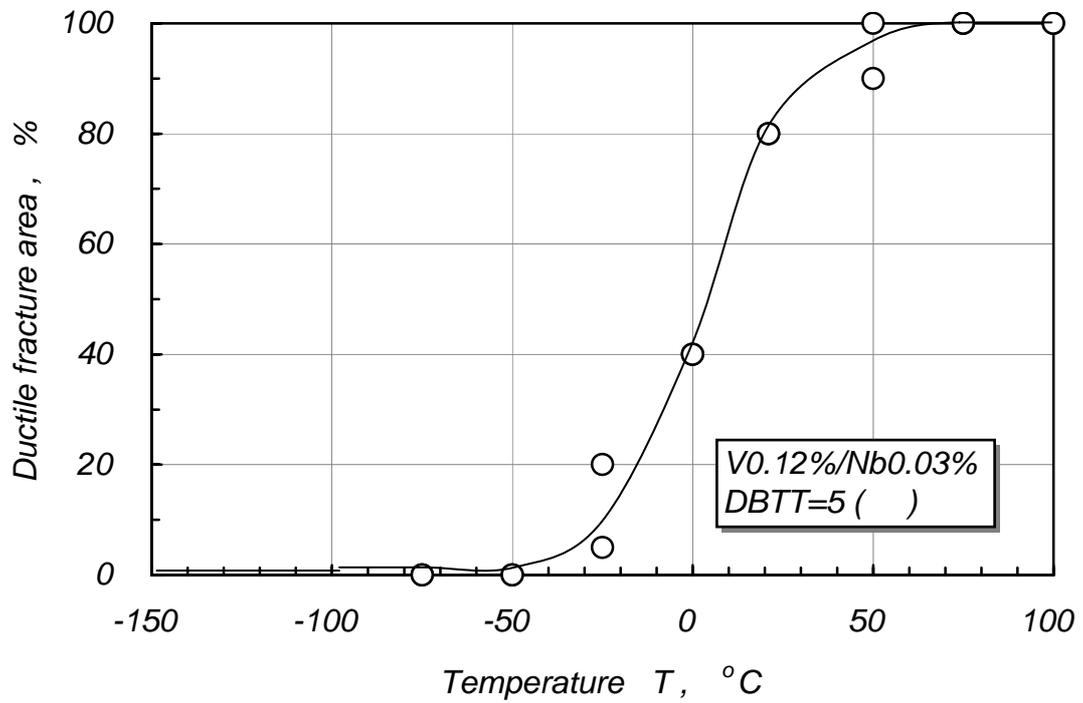


(i-2) Percent Ductile fracture (V0.12%/Nb0.01%)

Fig.4.7 (contd.) Results of Charpy impact tests

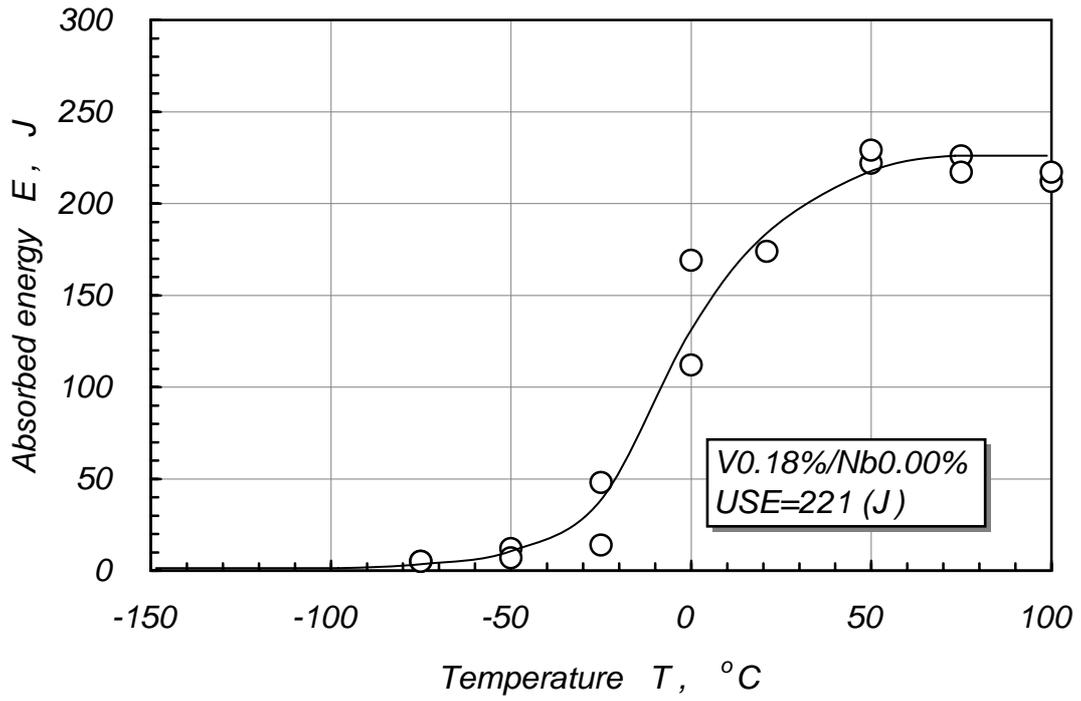


(j-1) Absorbed energy (V0.12%/Nb0.3%)

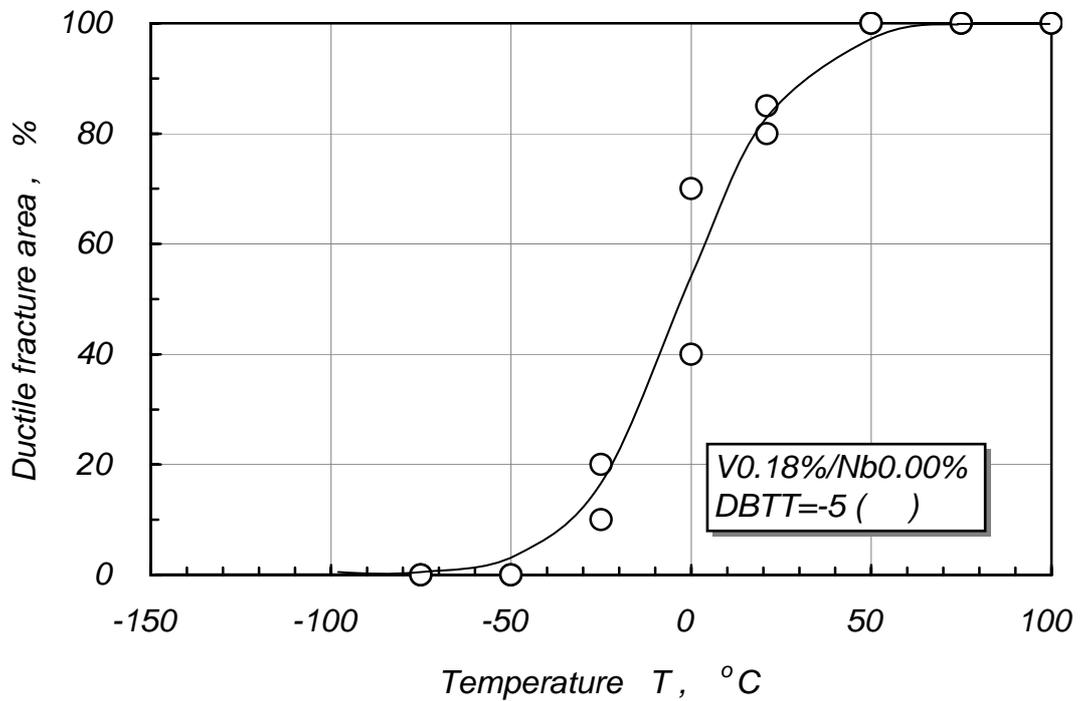


(j-2) Percent Ductile fracture (V0.12%/Nb0.03%)

Fig.4.7 (contd.) Results of Charpy impact tests

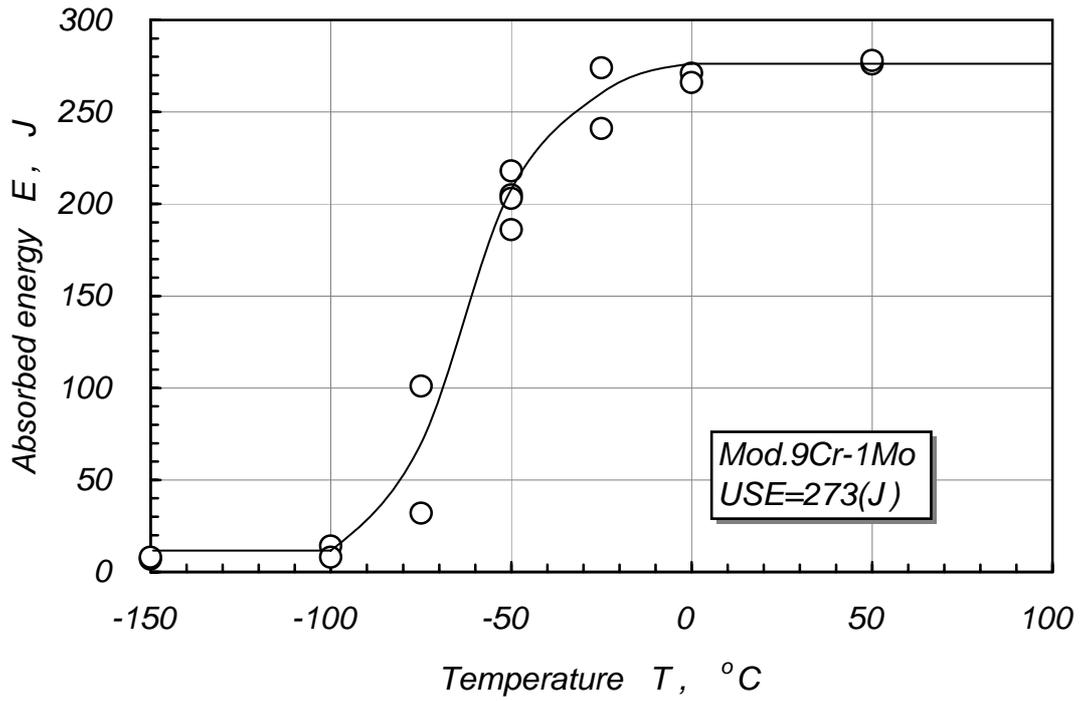


(k-1) Absorbed energy (V0.18%/Nb0.00%)

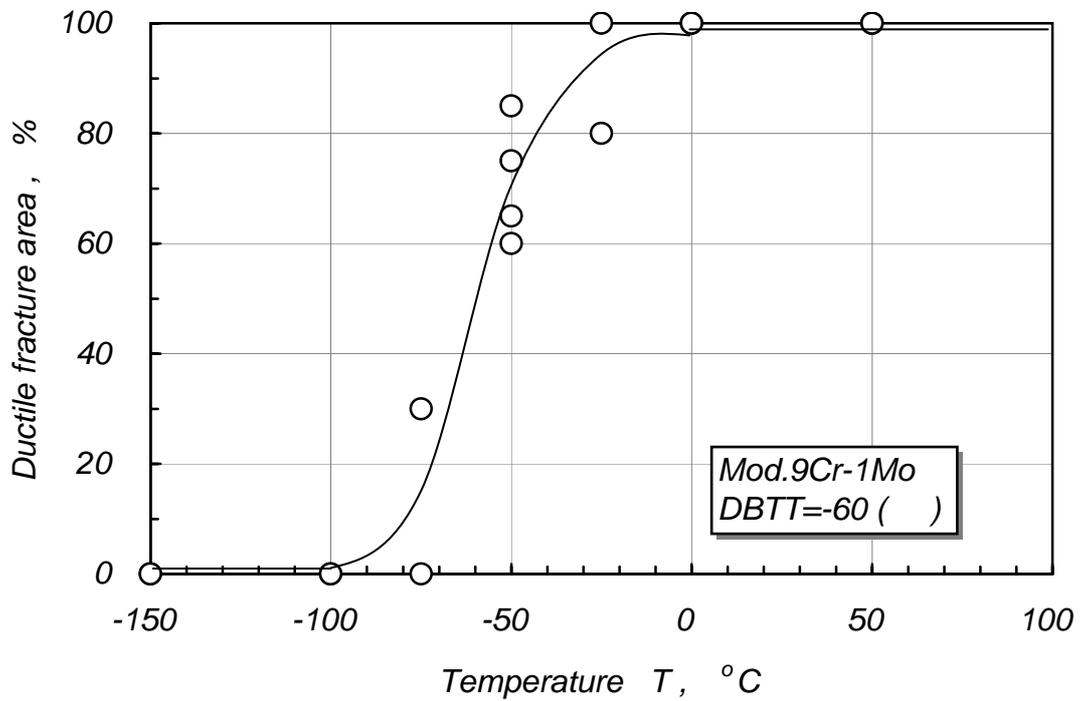


(k-2) Percent Ductile fracture (V0.18%/Nb0.00%)

Fig.4.7 (contd.) Results of Sharpy impact tests

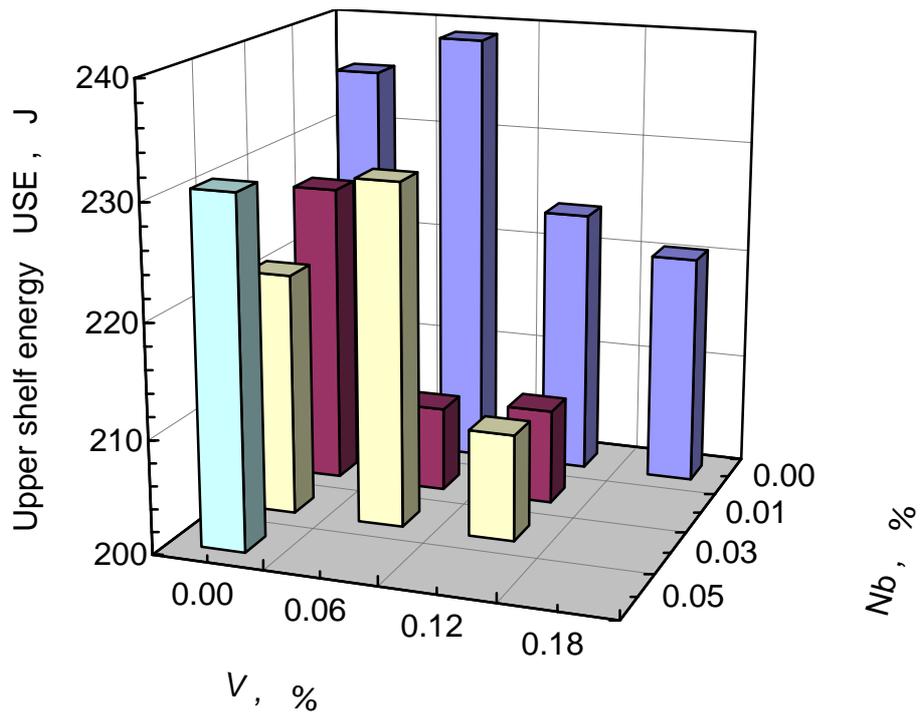


(I-1) Absorbed energy (Mod.9Cr-1Mo)



(I-2) Percent Ductile fracture (Mod.9Cr-1Mo)

Fig.4.7 (contd.) Results of Sharpy impact tests

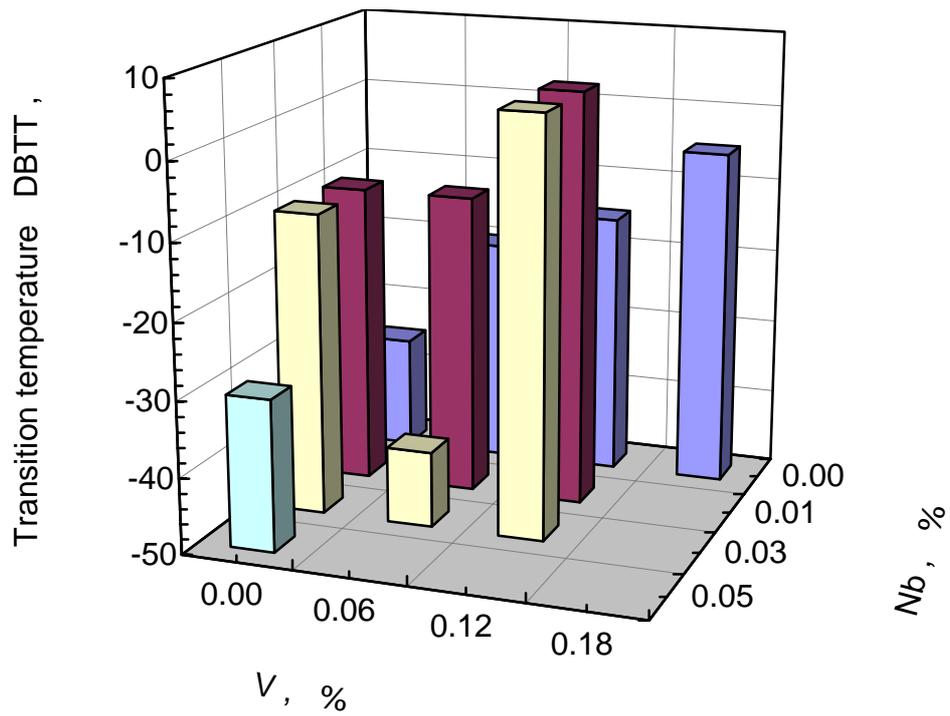


Nb \ V	V			
	0.00	0.06	0.12	0.18
0.00	235.5	239.0	223.7	220.5
0.01	226.7	207.5	208.4	
0.03	221.3	230.3	209.4	
0.05	230.7			

(J / cm²)

(a) Upper shelf energy

Fig.4.8 Influence of V and Nb on impact properties



Nb \ V	0.00	0.06	0.12	0.18
0.00	-35	-20	-15	-5
0.01	-10	-10	5	
0.03	-10	-40	5	
0.05	-30			

()

(b) Ductile/brittle transition temperature

Fig.4.8 (contd.) Influence of V and Nb on impact properties

5. 今後の予定

前章までに述べたとおり、製作した V・Nb 成分調整材について、短時間の機械的性質を取得し、結果をまとめた。今後の予定としては、高速炉構造材料としてより重要な性質である高温および長時間におけるこれらの成分調整材の材料特性を把握するとともに、金属組織観察をあわせて実施し、V および Nb による析出強化機構の高温長時間安定性について考察する。具体的には、以下に掲げる各試験を実施する予定である。

- a) 高温における引張試験
- b) 高温破壊靱性試験
- c) 長時間クリープ試験
- d) クリープ疲労試験
- e) 熱時効処理後の引張試験
- f) " 衝撃試験
- g) " 高温破壊靱性試験

試験、観察・分析に係る工程表を Fig.5.1 に示す。

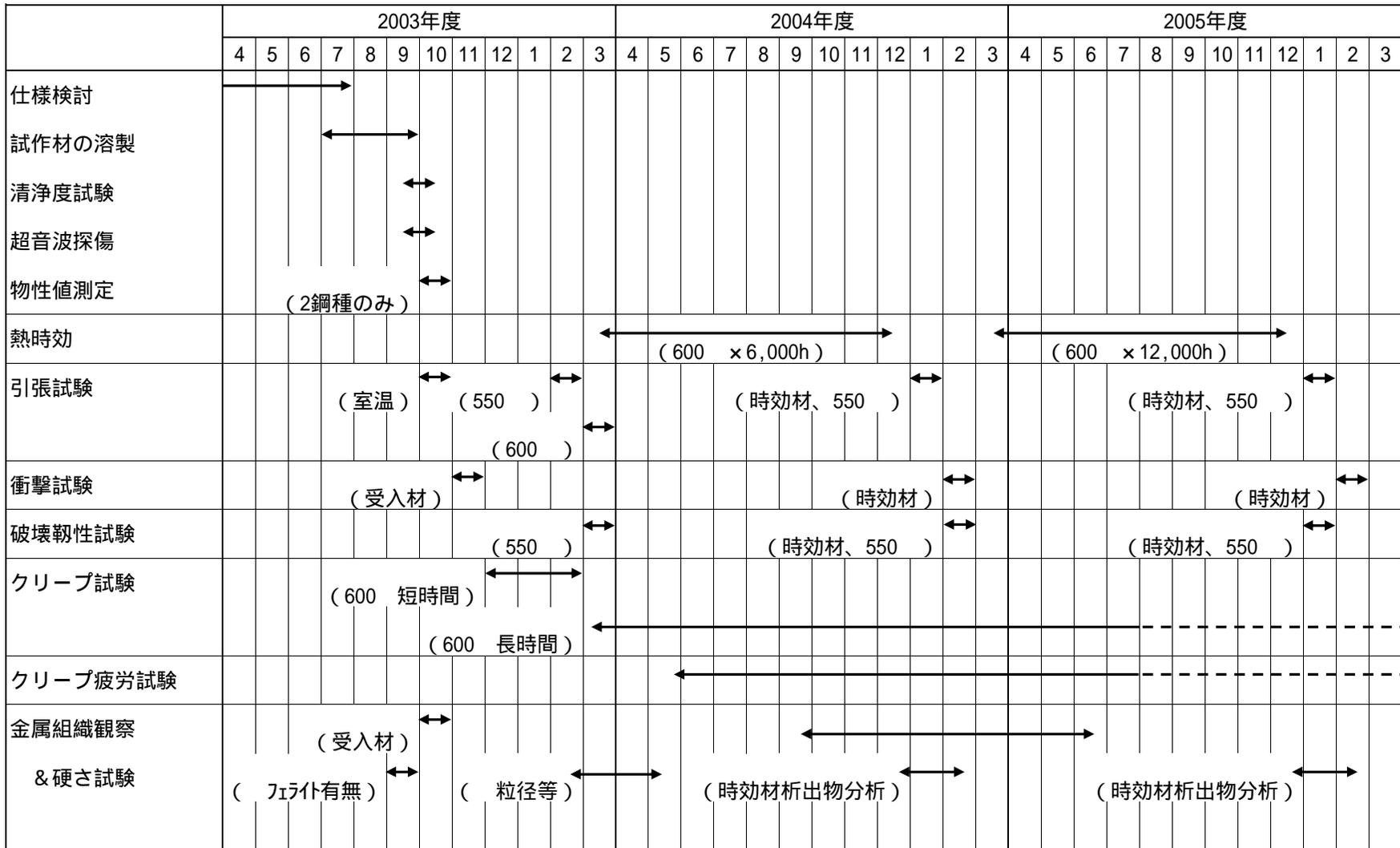


Fig . 5.1 Planned mechanical test programs

6. 結言

- (1) 高速炉最適高 Cr 鋼開発に反映するために、主要な強化元素であるバナジウム V と Nb に着目し、これらの量をパラメトリックに変化させた成分調整材を試作した。
- (2) 上記の成分調整材に対して、マルテンサイト単相が確保されていることを確認するための組織観察、欠陥が内包されていないことを確認するための超音波探傷および非金属介在物等が無いことを確認するための清浄度測定を実施し、いずれも良好な結果を得た。
- (3) 室温における引張試験や衝撃試験、硬さ試験などの機械的試験を実施した。さらに、試作材のうち 2 鋼種については、熱伝導率、熱膨張係数などの熱的特性や、縦弾性係数の測定を行った。
- (4) 今後、V および Nb による強化機構の高温長時間における有効性および安定性を評価することを目的として、試作した成分調整材を用いて、長時間クリープ試験や金属組織観察を実施する予定である。

7. 謝辞

本研究を実施するにあたり、東京大学名誉教授・藤田利夫先生から、有益なご助言をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。また、九州工業大学大学院教授・増山不二光先生と、群馬大学工学部教授・中澤崇徳先生からも、ご指導を賜りました。ありがとうございました。

8. 参考文献

- 【1】森下正樹ほか、“高温構造設計高度化研究[平成14年度共同研究報告書]”、JNC TY 9400 2003-001 (2003) .
- 【2】藤田利夫、“発電プラント用高クロムフェライト系耐熱鋼の開発”、火力原子力発電、Vol.42、No.11、pp.1485 (1991) .
- 【3】榎木義淳、五十嵐正晃ほか、“12%Cr系ボイラ用鋼管(HCM12A)の開発(第1報)”、住友金属技報、Vol.47、No.4、pp.29 (1995) .
- 【4】安彦兼次、高木清一ほか、“高純度鉄基合金開発に関する研究(2) 高純度鉄基合金材料の作成・極微量分析・特性試験 「先行基礎工学分野に関する報告書」(研究報告)”、JNC TN9400 2003-034 (2003) .
- 【5】安藤勝訓、若井隆純、青砥紀身、“高クロムフェライト系鋼の材料物性に及ぼすCr量の影響(研究報告)”、JNC TN9400 2003-022 (2003) .
- 【6】上平明弘、鶴飼重治、“高強度フェライト/マルテンサイト鋼(PNC-FMS)の衝撃特性の評価”、PNC TN9400 2000-035 (2000) .
- 【7】橋詰良吉、三木一宏ほか、“高Crフェライト系耐熱鋼における長時間クリープ強度に着目したCr含有量の最適化”、鉄と鋼、Vol.88、No.11、pp.793 (2002) .
- 【8】T.Fujita、K.Asakura et al.、“Creep rupture strength and microstructure of low C-10Cr-2Mo heat-resistant steels with ”、Metallurgical Transactions A、Vol.12A (1981) .
- 【9】たとえば角屋好邦、馬越龍太郎ほか、“10%Cr-3%Co鋼の長時間クリープ強度に及ぼすMoおよびWの組成バランスの影響”、日本金属学会誌、Vo.66、No.10、pp.1014-1021 (2002) .
- 【10】伊勢田敦朗、寺西洋志ほか、“ボイラ用高強度12Cr-1Mo-1W-V-Nb鋼管の開発”、火力原子力発電、Vol.39、No.8 (1988) .
- 【11】JIS G 0321、“鋼材の製品分析方法及びその許容変動値”(1966) .
- 【12】JIS G 0801、“圧力容器用鋼板の超音波探傷検査方法”(1993) .
- 【13】JIS G 0555、“鋼の非金属介在物の顕微鏡試験方法”(1998) .

【14】安藤勝訓、若井隆純、青砥紀身、“12Cr系鋼の材料物性値”、JNC TN9400
2003-084 (2003年6月)。

付録

成分調整試作材と Mod.9Cr-1Mo のミルシート

成分調整材のミルシート (No.1)

No.1の化学組成 (mass%)

鋼No.		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	W	sol.Al	T-AL	N	V	Nb	O
1	Aim	0.12	<0.01	0.7	0.010	0.005	<0.01	10.0	1.2	0.00	<0.0010		0.05	0.00	0.00	<0.0020
	Tolerance	±0.02	±0.03 無添加	±0.03	<0.010 無添加	<0.0010 無添加	<0.01 無添加	±0.3	±0.03	<0.01 無添加	T-Al<0.030		±0.01	±0.02 無添加	±0.01 無添加	
	Ladle analysis	0.11	<0.002	0.69	<0.002	0.0022	<0.002	10.21	1.20	<0.01	<0.002		0.049	<0.002	<0.002	---
	Check analysis	0.106	<0.002	0.69	0.002	0.0022	<0.002	10.2	1.21	<0.002	<0.002	<0.002	0.0497	<0.002	0.003	0.0054

注1)真空溶解：150kg鋼塊を溶製

注2)分析限界：P<0.002, sol-Al<0.002, V<0.01, Nb<0.01, O<0.002

No.1の熱間圧延条件

鋼No.	加熱			熱間圧延		寸法(mm)	形状等	割れ等
	温度	時間		開始温度	終了温度			
1	aim	1250	1h	1100	1000 ±25	30t×約200w×約2400L	フラット	なし
	実績	1250	1h	1100	988	30t×約200w×約2400L	ほぼフラット	なし

No.1の熱処理条件

鋼No.	処理条件	(1)焼きならし			(2)焼き戻し		
		温度	時間	冷却条件	温度	時間	冷却条件
1	aim	1060±10	1h	空冷	760+0, -10	1h	空冷
	実績	1060	1h	空冷	755	1h	空冷

成分調整材のミルシート (No.2)

No.2の化学組成 (mass%)

鋼No.		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	W	sol.Al	T-AL	N	V	Nb	O
2	Aim	0.12	<0.01	0.7	0.010	0.005	<0.01	10.0	1.2	0.00	<0.0010		0.05	0.00	0.01	<0.0020
	Tolerance	±0.02	±0.03 無添加	±0.03	<0.010 無添加	<0.0010 無添加	<0.01 無添加	±0.3	±0.03	<0.01 無添加	T-Al<0.030		±0.01	±0.02 無添加	±0.01	
	Ladle analysis	0.11	<0.002	0.70	<0.002	0.0022	<0.002	10.20	1.15	<0.01	<0.002		0.052	<0.002	0.012	---
	Check analysis	0.109	<0.002	0.68	0.002	0.0023	<0.002	10.15	1.16	<0.002	<0.002	<0.002	0.0517	<0.002	0.01	0.0028

注1)真空溶解：150kg鋼塊を溶製

注2)分析限界：P<0.002, sol-Al<0.002, V<0.01, Nb<0.01, O<0.002

No.2の熱間圧延条件

鋼No	加熱			熱間圧延		寸法(mm)	形状等	割れ等
	温度	時間		開始温度	終了温度			
2	aim	1250	1h	1100	1000 ±25	30t × 約200w × 約2400L	フラット	なし
	実績	1250	1h	1100	986	30t × 約200w × 約2420L	ほぼフラット	なし

No.2の熱処理条件

鋼No.	処理条件	(1)焼きならし			(2)焼き戻し		
		温度	時間	冷却条件	温度	時間	冷却条件
2	aim	1060 ± 10	1h	空冷	760+0, -10	1h	空冷
	実績	1060	1h	空冷	755	1h	空冷

成分調整材のミルシート (No.3)

No.3の化学組成 (mass%)

鋼No.		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	W	sol.Al	T-AL	N	V	Nb	O
3	Aim	0.12	<0.01	0.7	0.010	0.005	<0.01	10.0	1.2	0.00	<0.0010		0.05	0.00	0.03	<0.0020
	Tolerance	±0.02	±0.03 無添加	±0.03	<0.010 無添加	<0.0010 無添加	<0.01 無添加	±0.3	±0.03	<0.01 無添加	T-Al<0.030		±0.01	±0.02 無添加	±0.01	
	Ladle analysis	0.11	0.004	0.69	<0.002	0.0022	<0.002	10.19	1.18	<0.01	<0.002		0.048	<0.002	0.030	---
	Check analysis	0.108	0.003	0.68	0.002	0.0023	<0.002	10.11	1.18	<0.002	<0.002	0.003	0.0481	<0.002	0.031	0.0058

注1)真空溶解：150kg鋼塊を溶製

注2)分析限界：P<0.002, sol-Al<0.002, V<0.01, Nb<0.01, O<0.002

No.3の熱間圧延条件

鋼No.	加熱		熱間圧延		寸法(mm)	形状等	割れ等	
	温度	時間	開始温度	終了温度				
3	aim	1250	1h	1100	1000 ±25	30t × 約200w × 約2400L	フラット	なし
	実績	1250	1h	1100	996	30t × 約200w × 約2420L	ほぼフラット	なし

No.3の熱処理条件

鋼No.	処理条件	(1)焼きならし			(2)焼き戻し		
		温度	時間	冷却条件	温度	時間	冷却条件
3	aim	1060 ± 10	1h	空冷	760+0, -10	1h	空冷
	実績	1060	1h	空冷	755	1h	空冷

成分調整材のミルシート (No.4)

No.4の化学組成 (mass%)

鋼No.		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	W	sol.Al	T-AL	N	V	Nb	O
4	Aim	0.12	<0.01	0.7	0.010	0.005	<0.01	10.0	1.2	0.00	<0.0010		0.05	0.00	0.05	<0.0020
	Tolerance	±0.02	±0.03 無添加	±0.03	<0.010 無添加	<0.0010 無添加	<0.01 無添加	±0.3	±0.03	<0.01 無添加	T-Al<0.030		±0.01	±0.02 無添加	±0.01	
	Ladle analysis	0.11	0.003	0.69	<0.002	0.0022	<0.002	10.20	1.18	<0.01	<0.002		0.048	<0.002	0.050	---
	Check analysis	0.108	0.003	0.68	0.002	0.0023	<0.002	10.16	1.18	<0.002	<0.002	<0.002	0.0493	<0.002	0.051	0.0052

注1)真空溶解：150kg鋼塊を溶製

注2)分析限界：P<0.002, sol-Al<0.002, V<0.01, Nb<0.01, O<0.002

No.4の熱間圧延条件

鋼No	加熱		熱間圧延		寸法(mm)	形状等	割れ等	
	温度	時間	開始温度	終了温度				
4	aim	1250	1h	1100	1000 ±25	30t × 約200w × 約2400L	フラット	なし
	実績	1250	1h	1090	993	30t × 約200w × 約2400L	ほぼフラット	なし

No.4の熱処理条件

鋼No.	処理条件	(1)焼きならし			(2)焼き戻し		
		温度	時間	冷却条件	温度	時間	冷却条件
4	aim	1060 ± 10	1h	空冷	760+0, -10	1h	空冷
	実績	1060	1h	空冷	755	1h	空冷

成分調整材のミルシート (No.5)

No.5の化学組成 (mass%)

鋼No.		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	W	sol.Al	T-AL	N	V	Nb	O
5	Aim	0.12	<0.01	0.7	0.010	0.005	<0.01	10.0	1.2	0.00	<0.0010		0.05	0.06	0.00	<0.0020
	Tolerance	±0.02	±0.03 無添加	±0.03	<0.010 無添加	<0.0010 無添加	<0.01 無添加	±0.3	±0.03	<0.01 無添加	T-AL<0.030		±0.01	±0.02	±0.01 無添加	
	Ladle analysis	0.11	<0.002	0.69	<0.002	0.0022	<0.002	10.23	1.20	<0.01	<0.002		0.049	0.061	<0.002	---
	Check analysis	0.108	<0.002	0.68	0.002	0.0023	<0.002	10.18	1.21	<0.002	>0.002	0.004	0.0506	0.059	0.003	0.0047

注1)真空溶解：150kg鋼塊を溶製

注2)分析限界：P<0.002, sol-Al<0.002, V<0.01, Nb<0.01, O<0.002

No.5の熱間圧延条件

鋼No.	加熱		熱間圧延		寸法(mm)	形状等	割れ等	
	温度	時間	開始温度	終了温度				
5	aim	1250	1h	1100	1000 ±25	30t×約200w×約2400L	フラット	なし
	実績	1250	1h	1075	993	30t×約200w×約2450L	ほぼフラット	なし

No.5の熱処理条件

鋼No.	処理条件	(1)焼きならし			(2)焼き戻し		
		温度	時間	冷却条件	温度	時間	冷却条件
5	aim	1060±10	1h	空冷	760+0, -10	1h	空冷
	実績	1060	1h	空冷	755	1h	空冷

成分調整材のミルシート (No.6)

No.6の化学組成 (mass%)

鋼No.		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	W	sol.Al	T-AL	N	V	Nb	O
6	Aim	0.12	<0.01	0.7	0.010	0.005	<0.01	10.0	1.2	0.00	<0.0010		0.05	0.06	0.01	<0.0020
	Tolerance	±0.02	±0.03 無添加	±0.03	<0.010 無添加	<0.0010 無添加	<0.01 無添加	±0.3	±0.03	<0.01 無添加	T-Al<0.030		±0.01	±0.02	±0.01	
	Ladle analysis	0.11	<0.002	0.70	<0.002	0.0023	<0.002	10.1	1.19	<0.01	<0.002		0.048	0.062	0.010	---
	Check analysis	0.107	<0.002	0.69	0.002	0.0022	<0.002	10.21	1.20	<0.002	<0.002	<0.002	0.0479	0.060	0.012	0.0051

注1)真空溶解：150kg鋼塊を溶製

注2)分析限界：P<0.002, sol-Al<0.002, V<0.01, Nb<0.01, O<0.002

No.6の熱間圧延条件

鋼No	加熱		熱間圧延		寸法(mm)	形状等	割れ等	
	温度	時間	開始温度	終了温度				
6	aim	1250	1h	1100	1000 ±25	30t × 約200w × 約2400L	フラット	なし
	実績	1250	1h	1080	994	30t × 約200w × 約2460L	ほぼフラット	なし

No.6の熱処理条件

鋼No.	処理条件	(1)焼きならし			(2)焼き戻し		
		温度	時間	冷却条件	温度	時間	冷却条件
6	aim	1060 ± 10	1h	空冷	760+0, -10	1h	空冷
	実績	1060	1h	空冷	755	1h	空冷

成分調整材のミルシート (No.7)

No.7の化学組成 (mass%)

鋼No.		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	W	sol.Al	T-AL	N	V	Nb	O
7	Aim	0.12	<0.01	0.7	0.010	0.005	<0.01	10.0	1.2	0.00	<0.0010		0.05	0.06	0.03	<0.0020
	Tolerance	±0.02	±0.03 無添加	±0.03	<0.010 無添加	<0.0010 無添加	<0.01 無添加	±0.3	±0.03	<0.01 無添加	T-Al<0.030		±0.01	±0.02	±0.01	
	Ladle analysis	0.11	<0.002	0.71	<0.002	0.0023	<0.002	10.2	1.20	<0.01	<0.002		0.048	0.063	0.030	---
	Check analysis	0.107	<0.002	0.69	0.002	0.0022	<0.002	10.18	1.20	<0.002	<0.002	<0.002	0.0485	0.060	0.031	0.0045

注1)真空溶解：150kg鋼塊を溶製

注2)分析限界：P<0.002, sol-Al<0.002, V<0.01, Nb<0.01, O<0.002

No.7の熱間圧延条件

鋼No.	加熱		熱間圧延		寸法(mm)	形状等	割れ等	
	温度	時間	開始温度	終了温度				
7	aim	1250	1h	1100	1000 ±25	30t×約200w×約2400L	フラット	なし
	実績	1250	1h	1100	996	30t×約200w×約2530L	ほぼフラット	なし

No.7の熱処理条件

鋼No.	処理条件	(1)焼きならし			(2)焼き戻し		
		温度	時間	冷却条件	温度	時間	冷却条件
7	aim	1060±10	1h	空冷	760+0, -10	1h	空冷
	実績	1060	1h	空冷	755	1h	空冷

成分調整材のミルシート (No.8)

No.8の化学組成 (mass%)

鋼No.		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	W	sol.Al	T-AL	N	V	Nb	O
8	Aim	0.12	<0.01	0.7	0.010	0.005	<0.01	10.0	1.2	0.00	<0.0010		0.05	0.12	0.00	<0.0020
	Tolerance	±0.02	±0.03 無添加	±0.03	<0.010 無添加	<0.0010 無添加	<0.01 無添加	±0.3	±0.03	<0.01 無添加	T-Al<0.030		±0.01	±0.02	±0.01 無添加	
	Ladle analysis	0.11	<0.002	0.69	<0.002	0.0019	<0.002	10.1	1.17	<0.01	<0.002		0.048	0.120	<0.002	---
	Check analysis	0.108	<0.002	0.69	0.002	0.0019	<0.002	10.19	1.19	<0.002	<0.002	<0.002	0.0492	0.120	0.003	0.0045

注1)真空溶解：150kg鋼塊を溶製

注2)分析限界：P<0.002, sol-Al<0.002, V<0.01, Nb<0.01, O<0.002

No.8の熱間圧延条件

鋼No	加熱		熱間圧延		寸法(mm)	形状等	割れ等	
	温度	時間	開始温度	終了温度				
8	aim	1250	1h	1100	1000 ±25	30t×約200w×約2400L	フラット	なし
	実績	1250	1h	1100	995	30t×約200w×約2465L	ほぼフラット	なし

No.8の熱処理条件

鋼No.	処理条件	(1)焼きならし			(2)焼き戻し		
		温度	時間	冷却条件	温度	時間	冷却条件
8	aim	1060±10	1h	空冷	760+0, -10	1h	空冷
	実績	1060	1h	空冷	755	1h	空冷

成分調整材のミルシート (No.9)

No.9の化学組成 (mass%)

鋼No.		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	W	sol.Al	T-AL	N	V	Nb	O
9	Aim	0.12	<0.01	0.7	0.010	0.005	<0.01	10.0	1.2	0.00	<0.0010		0.05	0.12	0.01	<0.0020
	Tolerance	±0.02	±0.03 無添加	±0.03	<0.010 無添加	<0.0010 無添加	<0.01 無添加	±0.3	±0.03	<0.01 無添加	T-Al<0.030		±0.01	±0.02	±0.01	
	Ladle analysis	0.11	<0.002	0.70	0.003	0.0024	<0.01	10.06	1.18	<0.01	<0.002		0.048	0.12	0.010	---
	Check analysis	0.106	<0.002	0.69	0.002	0.0022	<0.002	10.12	1.20	<0.002	<0.002	<0.002	0.0480	0.12	0.012	0.0046

注1)真空溶解：150kg鋼塊を溶製

注2)分析限界：P<0.002, sol-Al<0.002, V<0.01, Nb<0.01, O<0.002

No.9の熱間圧延条件

鋼No.	加熱		熱間圧延		寸法(mm)	形状等	割れ等	
	温度	時間	開始温度	終了温度				
9	aim	1250	1h	1100	1000 ±25	30t×約200w×約2400L	フラット	なし
	実績	1250	1h	1100	993	30t×約200w×約2520L	ほぼフラット	なし

No.9の熱処理条件

鋼No.	処理条件	(1)焼きならし			(2)焼き戻し		
		温度	時間	冷却条件	温度	時間	冷却条件
9	aim	1060±10	1h	空冷	760+0, -10	1h	空冷
	実績	1060	1h	空冷	755	1h	空冷

成分調整材のミルシート(No.10)

No.10の化学組成 (mass%)

鋼No.		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	W	sol.Al	T-AL	N	V	Nb	O
10	Aim	0.12	<0.01	0.7	0.010	0.005	<0.01	10.0	1.2	0.00	<0.0010		0.05	0.12	0.03	<0.0020
	Tolerance	±0.02	±0.03 無添加	±0.03	<0.010 無添加	<0.0010 無添加	<0.01 無添加	±0.3	±0.03	<0.01 無添加	T-Al<0.030		±0.01	±0.02	±0.01	
	Ladle analysis	0.011	<0.002	0.70	0.003	0.0023	<0.010	10.03	1.18	<0.01	<0.002		0.048	0.120	0.03	---
	Check analysis	0.105	<0.002	0.69	0.002	0.0023	<0.002	10.10	1.21	<0.002	<0.002	<0.002	0.0474	0.120	0.032	0.0041

注1)真空溶解：150kg鋼塊を溶製

注2)分析限界：P<0.002, sol-Al<0.002, V<0.01, Nb<0.01, O<0.002

No.10の熱間圧延条件

鋼No	加熱			熱間圧延		寸法(mm)	形状等	割れ等
	温度	時間		開始温度	終了温度			
10	aim	1250	1h	1100	1000 ±25	30t×約200w×約2400L	フラット	なし
	実績	1250	1h	1090	993	30t×約200w×約2470L	ほぼフラット	なし

No.10の熱処理条件

鋼No.	処理条件	(1)焼きならし			(2)焼き戻し		
		温度	時間	冷却条件	温度	時間	冷却条件
10	aim	1060±10	1h	空冷	760+0, -10	1h	空冷
	実績	1060	1h	空冷	755	1h	空冷

成分調整材のミルシート(No.11)

No.11の化学組成 (mass%)

鋼No.		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	W	sol.Al	T-AL	N	V	Nb	O
11	Aim	0.12	<0.01	0.7	0.010	0.005	<0.01	10.0	1.2	0.00	<0.0010		0.05	0.18	0.00	<0.0020
	Tolerance	±0.02	±0.03 無添加	±0.03	<0.010 無添加	<0.0010 無添加	<0.01 無添加	±0.3	±0.03	<0.01 無添加	T-AL<0.030		±0.01	±0.02	±0.01 無添加	
	Ladle analysis	0.11	<0.002	0.70	<0.002	0.0020	<0.002	10.20	1.18	<0.01	<0.002	---	0.048	0.180	<0.002	---
	Check analysis	0.108	<0.002	0.69	0.002	0.0019	<0.002	10.16	1.20	<0.002	<0.002	<0.002	0.0492	0.180	0.003	0.0047

注1)真空溶解：150kg鋼塊を溶製

注2)分析限界：P<0.002, sol-Al<0.002, V<0.01, Nb<0.01, O<0.002

No.11の熱間圧延条件

鋼No.	加熱		熱間圧延		寸法(mm)	形状等	割れ等	
	温度	時間	開始温度	終了温度				
11	aim	1250	1h	1100	1000 ±25	30t×約200w×約2400L	フラット	なし
	実績	1250	1h	1100	994	30t×約200w×約2300L	ほぼフラット	なし

No.11の熱処理条件

鋼No.	処理条件	(1)焼きならし			(2)焼き戻し		
		温度	時間	冷却条件	温度	時間	冷却条件
11	aim	1060±10	1h	空冷	760+0, -10	1h	空冷
	実績	1060	1h	空冷	755	1h	空冷

成分調整材のミルシート(No.12)

No.12の化学組成 (mass%)

鋼No.		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	W	sol.Al	T-AL	N	V	Nb	O
12	Aim	0.10	0.25	0.43	0.006	0.001	<0.01	8.8	0.95	0.00	<0.0010		0.06	0.22	0.08	<0.0020
	Tolerance	±0.02	±0.03	±0.03	<0.010 無添加	<0.001 無添加	<0.01 無添加	±0.3	±0.03	<0.01 無添加	T-AL<0.030		±0.01 (<0.0700)	±0.02	±0.01	
	Ladle analysis	0.094	0.25	0.43	0.003	0.0007	<0.01	8.83	0.93		<0.002		0.063	0.22	0.081	
	Check analysis	0.091	0.24	0.43	0.002	0.0006	<0.002	8.90	0.94	<0.002	<0.002	<0.002	0.0621	0.22	0.082	0.0024

注1)真空溶解：150kg鋼塊を溶製

注2)分析限界：P<0.002, sol-Al<0.002, V<0.01, Nb<0.01, O<0.002

No.12の熱間圧延条件

鋼No.	加熱		熱間圧延		寸法(mm)	形状等	割れ等	
	温度	時間	開始温度	終了温度				
12	aim	1250	1h	1100	1000 ±25	30t×約200w×約2400L	フラット	なし
	実績	1250	1h	1100	990	30t×約200w×約2400L	ほぼフラット	なし

No.12の熱処理条件

鋼No.	処理条件	(1)焼きならし			(2)焼き戻し		
		温度	時間	冷却条件	温度	時間	冷却条件
12	aim	1060±10	1h	空冷	760+0, -10	1h	空冷
	実績	1060	1h	空冷	755	1h	空冷