

ボロン鋳鋼品の製造法に関する二、三の検討

How to Add Boron to Cast Steel

保 坂 信 義* 横 井 和 明*
Nobuyoshi Hosaka Kazuaki Yokoi

要 旨

ボロン鋳鋼の溶製において重要な問題であるボロンの安定添加のためのボロン添加条件と焼入性の関係を調べた。

この結果、溶解過程においてあらかじめ窒素固定剤を添加してからボロン合金 (Fe-Ti-B 合金) でボロンを 0.0035% 添加することによりじゅうぶんなボロンの焼入性効果が得られることを認めた。

これにより、すぐれた焼入性と機械的性質を有し、かつ、経済的なボロン鋳鋼品の実用化が可能となった。

1. 結 言

ボロンは微量の添加で鋼の焼入性を著しく向上させる経済的な合金元素として知られている。特にボロン鋼の特長として焼入状態における機械的性質が一般の炭素鋼に比較して著しく高いことがあげられる⁽¹⁾⁽²⁾。

しかし、ボロンは鋼中組織への固溶度がきわめて低いことと⁽³⁾酸素、窒素との親和力が大きいために安定した添加がむずかしい。これに加えてボロン添加後の鋼中に残留している微量のボロン分析はきわめて煩雑で高い精度を要する分析操作を行なわなければならない⁽⁴⁾⁽⁵⁾。さらに、また微量ボロンの添加効果は溶製後でなければ確認できないなどの状況からわが国において製鋼メーカーによりボロン鋼が実用化されたのは数年前のことである⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

ボロンを普通炭素鋼などに添加することにより低合金鋼と同等の焼入性が得られ、また、モリブデン、ニッケル、クロムなどの高価な合金元素を著しく節減しても、その焼入性ならびに機械的性質を向上させることができるのでボロン鋼の実用化は性能向上、原価低減の面で効果は大きいものと期待される。

このようなことからわれわれはボロン鋼に関する諸性質および溶製方法について研究を行ってきたが、本報告ではボロン鋳鋼の製造で最も重要なボロン鋳鋼溶製条件として、(a) ボロン合金の種類と添加量、(b) 溶湯の前処理、(c) 溶解操業条件に関する実験結果を報告する。

2. ボロン鋼に関する研究と実績の調査

ボロン鋼の開発は 1938 年アメリカにおいて製鋼時ボロン合金を添加したところ鋼の焼入性が著しく向上することが偶然に発見されたことに端を発している。

1948 年に SAE Technical Board からボロン鋼の適用に関する大規模な研究が報告されている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。これらの研究は製鋼メーカーと鉄鋼ユーザーとが精力的に参画し Caterpillar Project Group と Ordnance Project Group を構成してなされている。

Caterpillar Project においては普通炭素鋼 (SAE 1000 シリーズ = 0.2~0.7% C, 0.7~1.0% Mn) と低合金鋼 (SAE 9400 シリーズ = 0.2~0.5% C, 0.8~1.5% Mn, 0.2~0.5% Ni, 0.2~0.4% Cr, 0.1~0.2% Mo) に Grainal 79 (Al-Ti-Zr-Mn 系ボロン合金), Silcaz (Si-Ca-Ti-Al 系ボロン合金), Ferroboration (Fe 系ボロン合金) などのボロン合金によりボロン添加を行ない、その顕微鏡組織、非金属介在物、結晶粒度、精浄度、焼入性、引張強さ、降伏強さ、切欠き靱性(じんせい)を調査するとともに、実製品の試作を行ないすぐれたボロン添加効果を報告している。

Ordnance Project においても低合金鋼 (SAE 1300 シリーズ = 0.40~0.45% C, 1.35~1.65% Mn) に Grainal, 79 Silcaz, Ferroboration, Bortam (Mn-Si-Ti-Al 系ボロン合金), Grainal 11 (Zr-V-Ti 系ボロン合金), Silvaz (Si-Mn-Ca-Zr-Ti 系ボロン合金), Borosil (Si-Fe 系ボロン合金) などのボロン合金によりボロン添加を行ない実験の結果、Caterpillar Project と同様に一応の成果を報告している。

なかでも焼入性は著しく向上し、普通炭素鋼の場合で焼入性倍数は約 1.9 にも達することが示されている。しかし、普通炭素鋼の場合は C 量とボロンの焼入性倍数との間には逆比例的な関係があり、炭素量が 0.7% の場合にはボロンの焼入性倍数は約 1.3 に低下すると述べている。また、引張り強さはかたさが Hrc51 付近で強さ約 180 kg/mm²、伸び約 9%、断面収縮率約 50% で、これらの数値はボロン添加しない同一炭素量の炭素鋼の同一かたさのものに対応させると引張強さにおいて約 40 kg/mm²、伸び率において約 3 倍も高くボロン添加効果が著るしく大きいものであることを報告している。

鋼中に添加された微量ボロンは一部がオーステナイト中に固溶され、残りのほとんどは酸化物、窒化物あるいは炭化物中に固溶される。

オーステナイト中に固溶されたボロンはオーステナイトからの変態を抑制する働きを有するために焼入性に著しく寄与する。これを一般に有効ボロン (Effective Boron) と呼び、化合物となったボロンを非有効ボロン (Ineffective Boron) と呼び区別されている。

また、化合物となったボロンはオーステナイト粒界に凝集し機械的性質に悪影響を及ぼし一般に Boron Constituent⁽¹⁰⁾ と呼ばれている。

鋼の焼入性を最大にする有効ボロン量としては 3~4 ppm が焼入臨界冷却速度を最小とすると言われているが⁽¹¹⁾⁽¹²⁾ 実際には微量ボロンの調整がむずかしいために一般には 10~50 ppm 添加されている。

アメリカにおけるボロン鋼の生産実績は 1953 年に JISI の主催で開催された「アメリカにおけるボロン鋼の生産と消費」に関する委員会報告によると⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾ 第 2 次大戦中に合金元素の節減のために数千トンのボロン鋼が戦車のコイルスプリング、装甲板、銃剣などの軍需品に適用された。終戦となってからはボロン鋼の生産量はアメリカの合金鋼の総生産の約 0.5% までに低下したが、二、三の大企業ではディーゼル機関車用クランクシャフト、トラクター部品にボロン鋼を採用している。

その後、朝鮮戦争の勃発によりボロン鋼の生産は約 2 万 t に急増し、さらに 1951 年に 35 万 t、また 1953 年には 70 万 t となっている。この時点でのボロン鋼の生産はアメリカの合金鋼総生産量の約 8% にも達している。

ボロン鋳鋼品に関する報告は例が少ないが 1957 年に (Caterpillar

* 日立製作所機械研究所

表1 市販ボロン合金の化学成分例

合金名		化学成分 (%)				
		C	Si	Al	Ti	B
Fe-B	1号	<0.1	<2.0	<12	—	19~23
	2号	<0.1	<2.0	<10	—	14~18
Fe-Ti-B		<0.1	<2.0	<15	30~35	3.0~4.0
Al-Ti-B		<0.015	—	残	4.7	1.02

Tractor Co. において自社のクローラ形トラクタ部品であるキャタピラー駆動用スプロケットとして約1万台分を Harrison Steel Casting Co. にボロン鋳鋼にて製造させた例がある⁽¹⁵⁾ も当然当時において5万tものボロン鋼(圧延品)の使用実績を有する Caterpillar 社においてはボロン鋳鋼品の実績としては著しく少ないものであったが、このことは1955年まではボロン鋼が平炉で製造されていたことにも由来すると考えられるが、やはり、溶製においてボロン添加効果に最も重要な固溶ボロン量の迅速確認法がまだ未解決であることによる。

このようにボロン添加効果の確認を溶製後に行なわざるを得ない現状ではボロンの有効添加の方法に100%の確実性が要求される。

この点、ボロン鋼として要求される性質、組成とボロン処理方法とを組合せて考えなければ鋳鋼品への適用に問題が残される。日立製作所においてもボロン鋼に関する多くの研究実績を残しながら実用化が遅れていたことはこのような事情によるものである。

われわれが本研究に着目したのはこの点であり鋳鋼に確実にボロン添加できる溶製、処理方法の確立を目的とした。

3. ボロン添加合金の種類と添加量に関する実験

3.1 試料および実験方法

試料の基本組成としては0.3~0.35% C, 0.8~1.0% Mnを有する中炭素低マンガン鋳鋼材を対象としてボロン添加目標を15~35 ppmとした。

実験用溶解炉として50kg塩基性高周波炉と8t塩基性電弧炉を用いた。

鋼に対するボロン添加合金としてはフェロボロン合金(以下Fe-Bと書く)のほかに鉄系複合金(以下Fe-Ti-Bと書く)とアルミ系複合金(以下Al-Ti-Bと書く)が市販されている。

これらの組成は表1に示すようにいずれも含有アルミ量が高い。本研究ではこのうちAl-Ti-BとFe-Ti-Bを用いた。Fe-Bを用いてボロン添加した場合には結晶粒の粗大化傾向が大きく焼戻脆(ぜい)性が大きくなる例が報告されているため⁽¹⁶⁾ 本研究では実験には供しなかった。

ボロン合金はAl量0.08%で溶湯を最終脱酸したのちに取鍋中で添加することとした。

試験片の採取は図1に示す鋳型で鋳造して丸棒焼入性試験片、ジョミニー一端焼入性試験片、機械試験片を採取し、それぞれ試験を行なうこととした。

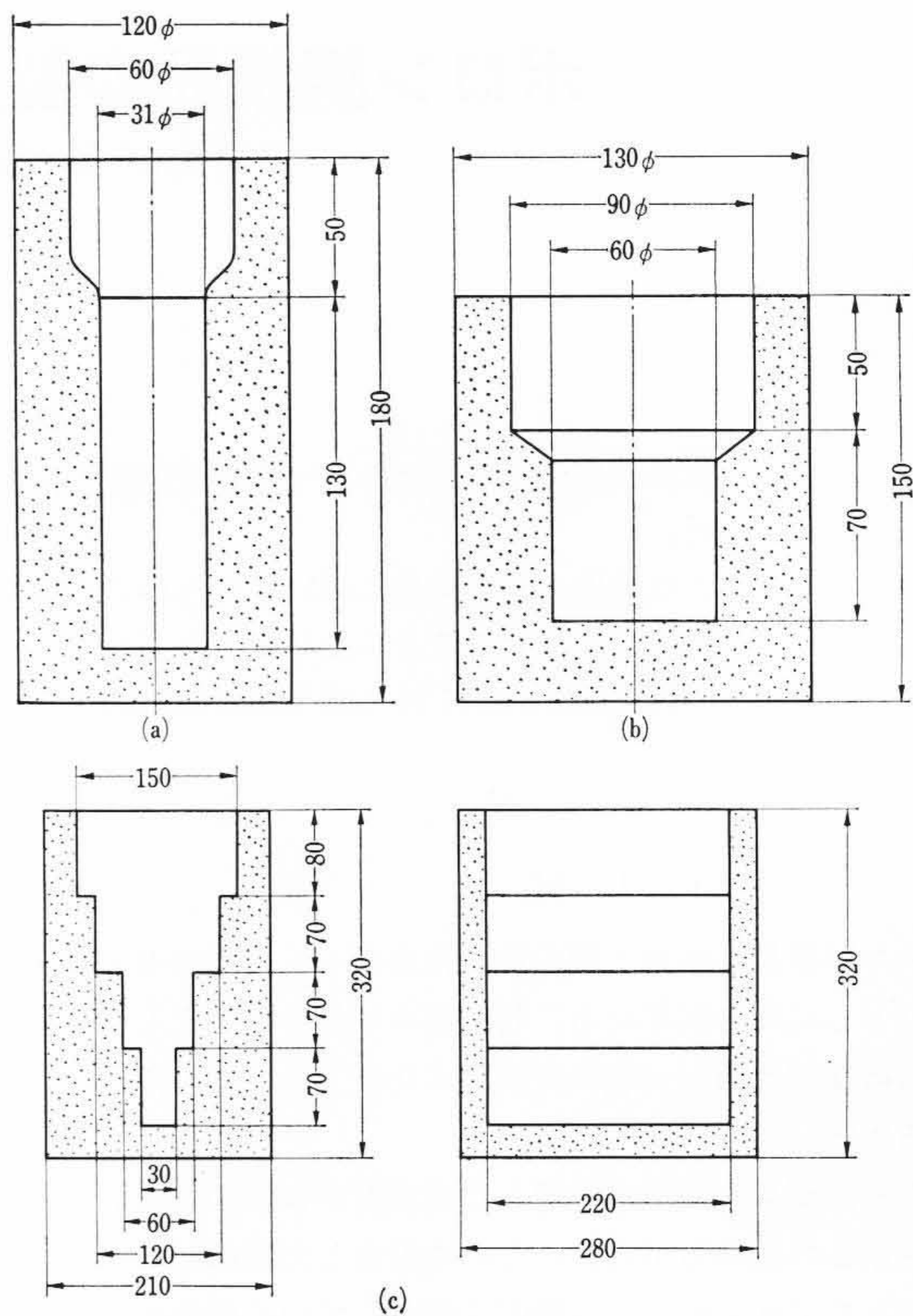
また、ボロンの焼入性向上効果はジョミニー一端焼入性試験と55φ丸棒の焼入硬化深度の測定により検討された。

ジョミニー一端焼入性試験により下記(1)式に示した焼入性倍数を求めた。

$f_B = a/b \dots\dots\dots (1)$

ここで、 f_B : ボロンの焼入性倍数

a : 供試ボロン鋼のジョミニー一端焼入性曲線の焼入かたさと焼入端からの距離から換算された理想臨



(a) ジョミニー試験片鋳型
(b) 丸棒焼入性試験片鋳型
(c) 階段試験片

図1 試験片鋳型の形状

界直径 (inch)

b: 供試ボロン鋼のボロンを除く他の化学組成より計算した理想臨界直径 (inch)

したがって f_B 値が1以上になるとボロンによる焼入性向上効果が認められたことになる。また、 f_B 値の大小によりボロン焼入性向上効果の優劣を比較することが可能である。

また、55φ丸棒焼入性試験片による焼入硬化深度の測定は図2に示した噴水焼入試験装置により表2に示した試験条件で行なわれた。

試験片は焼入後、長さ方向に半割りしてかたさの測定を行なった。また、焼入硬化深度の比較は下記(2)式により行なわれる。

$K_D = D_U / D \dots\dots\dots (2)$

ここで、 K_D : 硬化深度

D_U : 試験片の焼入れ後の焼入されていない直径

D : 試験片の直径

したがって全く焼入されないときは $K_D=1$ となり中心まで焼入されると $K_D \rightarrow 0$ となるので実際の丸棒により、その焼入性の良否が判定される。

また、最終的に微量添加ボロンの分析をメチレンブルー抽出吸光度法⁽⁴⁾⁽⁵⁾により行ない添加ボロンの歩どまりを検討した。

3.2 実験結果とその考察

溶製試料の化学組成は表3に示すとおりである。表より明らかにようにボロン添加の歩どまりは低く、43~60%であり、ボロンの添加量が高くなるほど歩どまりは低下する。歩どまりについてボロン合金の比較をするとAl-Ti-BのほうがFe-Ti-Bよりも高いことが認められる。すなわち、ボロン添加量が25 ppmの場合、Fe-Ti-Bによるボロン添加では全ボロン量は14 ppmとその添加歩どまりは52%であるのに対してAl-Ti-Bでは全ボロン量は18 ppmとなり、そ

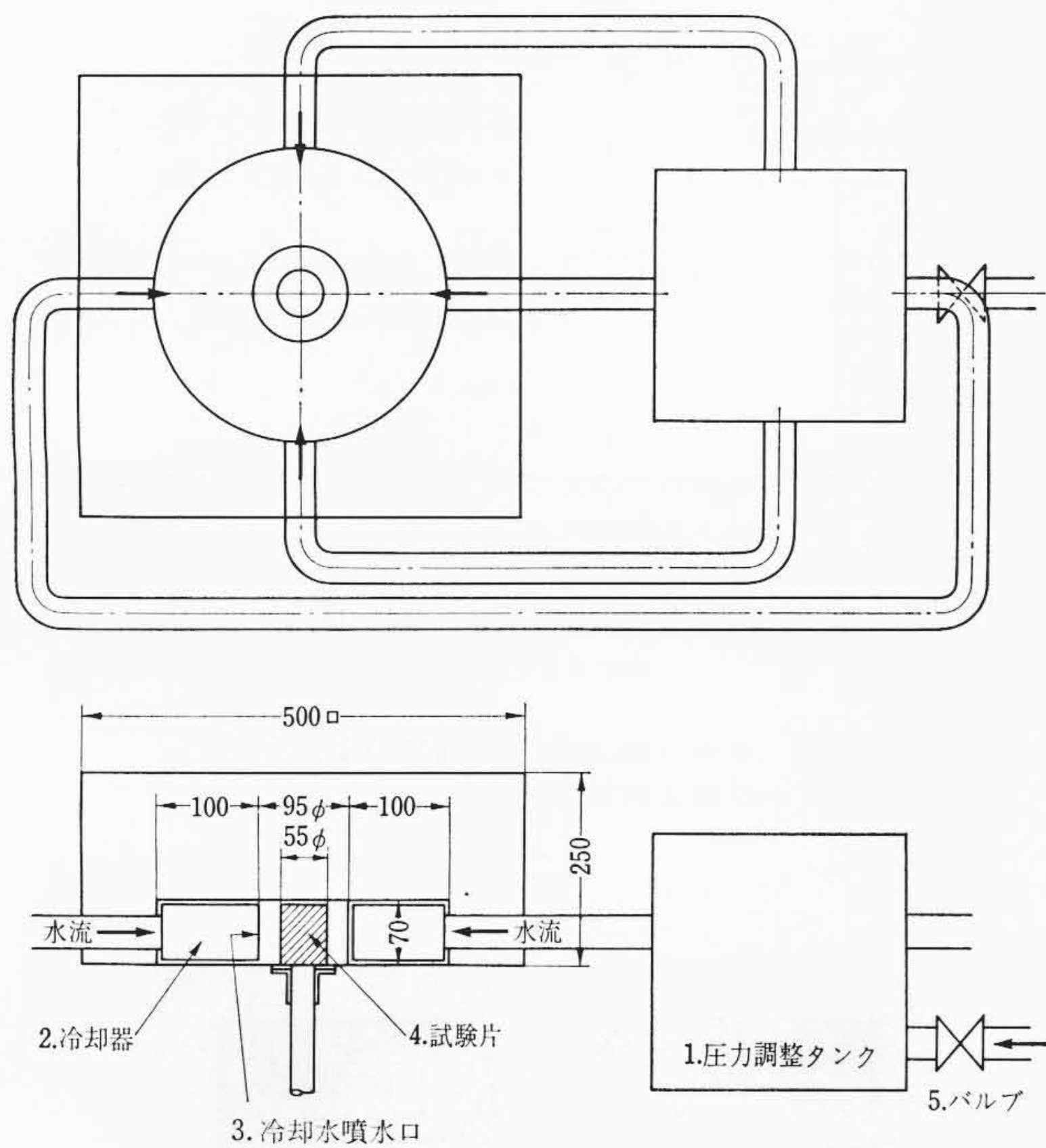


図2 噴水焼入装置

表2 噴水焼入条件

加熱温度および保持時間	870℃×30 min
水 量	100 l/min
噴 射 角	90 度
ノズルと試料表面との距離	20 mm

表3 試料の化学組成

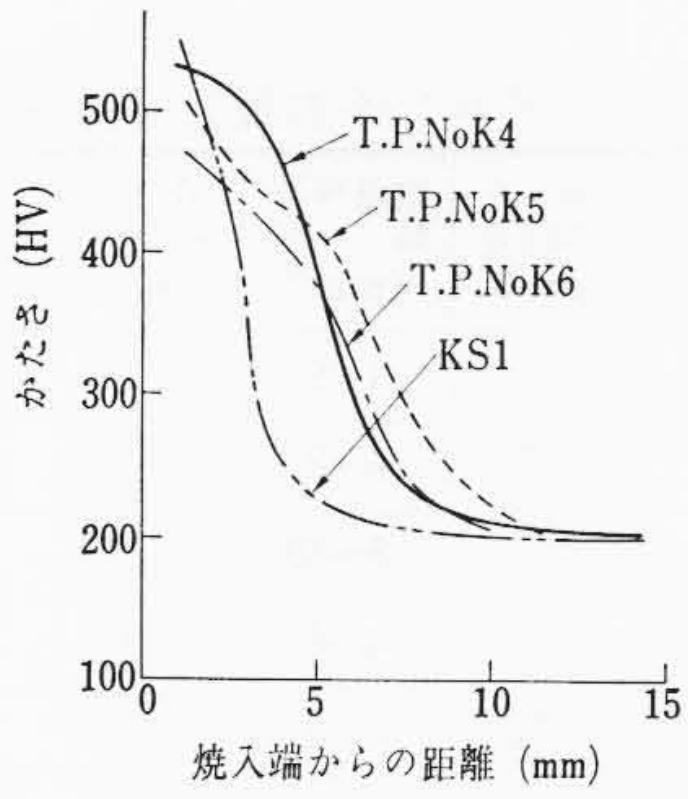
試料記号	溶解炉	ボロン添加合金 (添加目標値)	化 学 組 成 (%)						
			C	Si	Mn	P	S	Cr	B
K 1	50 kg 高周波炉	Fe-Ti-B (15 ppm)	0.28	0.34	0.86	0.027	0.018	—	—
K 2		Fe-Ti-B (25 ppm)	0.26	0.42	0.89	0.026	0.019	—	—
K 3		Fe-Ti-B (35 ppm)	0.26	0.47	0.88	0.025	0.020	—	—
K 4		Al-Ti-B (15 ppm)	0.35	0.38	0.68	0.029	0.021	—	—
K 5		Al-Ti-B (25 ppm)	0.30	0.25	1.12	0.027	0.015	—	—
K 6		Al-Ti-B (35 ppm)	0.25	0.27	0.88	0.026	0.016	—	—
KS 1	50 kg 高周波炉	ボ ロ ン 添 加 せ ず	0.33	0.32	0.67	0.026	0.016	0.12	—
E 1	8 t 塩基性 電 弧 炉	Fe-Ti-B (25 ppm)	0.30	0.46	0.80	0.010	0.006	0.12	0.0014
E 2		Fe-Ti-B (35 ppm)	0.34	0.57	0.86	0.017	0.008	0.23	0.0017
E 3		Al-Ti-B (25 ppm)	0.29	0.45	0.85	0.016	0.008	0.16	0.0018
E 4		Al-Ti-B (35 ppm)	0.28	0.48	0.92	0.016	0.009	0.22	0.0022
S 1		ボ ロ ン 添 加 せ ず	0.30	0.41	0.86	0.018	0.007	0.12	—

注：Bは全ボロン量を表す。

の添加歩どまりは60%とFe-Ti-Bよりも高い。また、ボロン添加量が35 ppmの場合はFe-Ti-Bでは全ボロン量が17 ppmで歩どまりは43%となり、Al-Ti-Bでは全ボロン量は22 ppmで歩どまりは58%になっている。

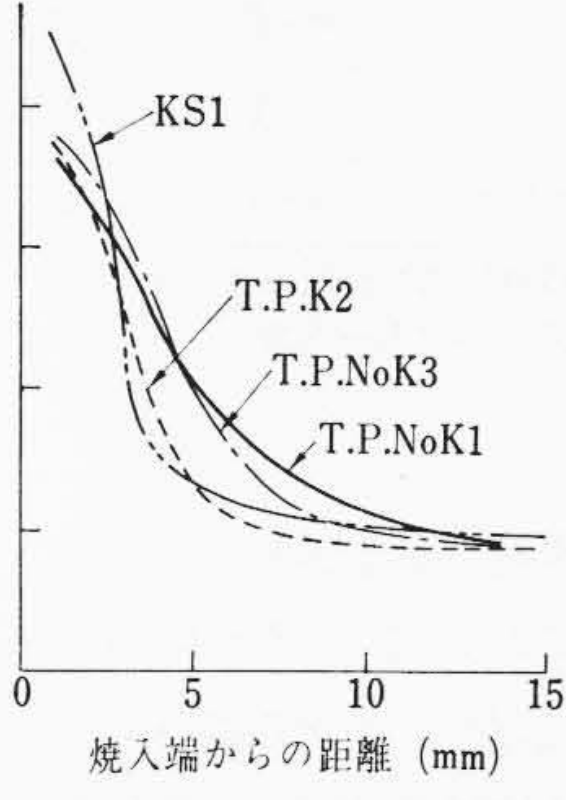
図3、4はこれらボロン鋼のジョミニー一端焼入性曲線（以下ジョミニー曲線と書く）を示したものである。図からジョミニー曲線はAl-Ti-Bによりボロンを添加したもののほうがすぐれた傾向が示されている。さらにボロンの添加効果を明確にするためにボロンの焼入性倍数を求めると表4に示すとおりである。

表よりボロン添加量が15~25 ppmではボロンの焼入性効果は不じゅうぶんであり35 ppmでボロンの焼入性効果が認められる。しかし、Fe-Ti-Bによるボロン添加の場合はばらつきが大きくボロン効果が不安定である。



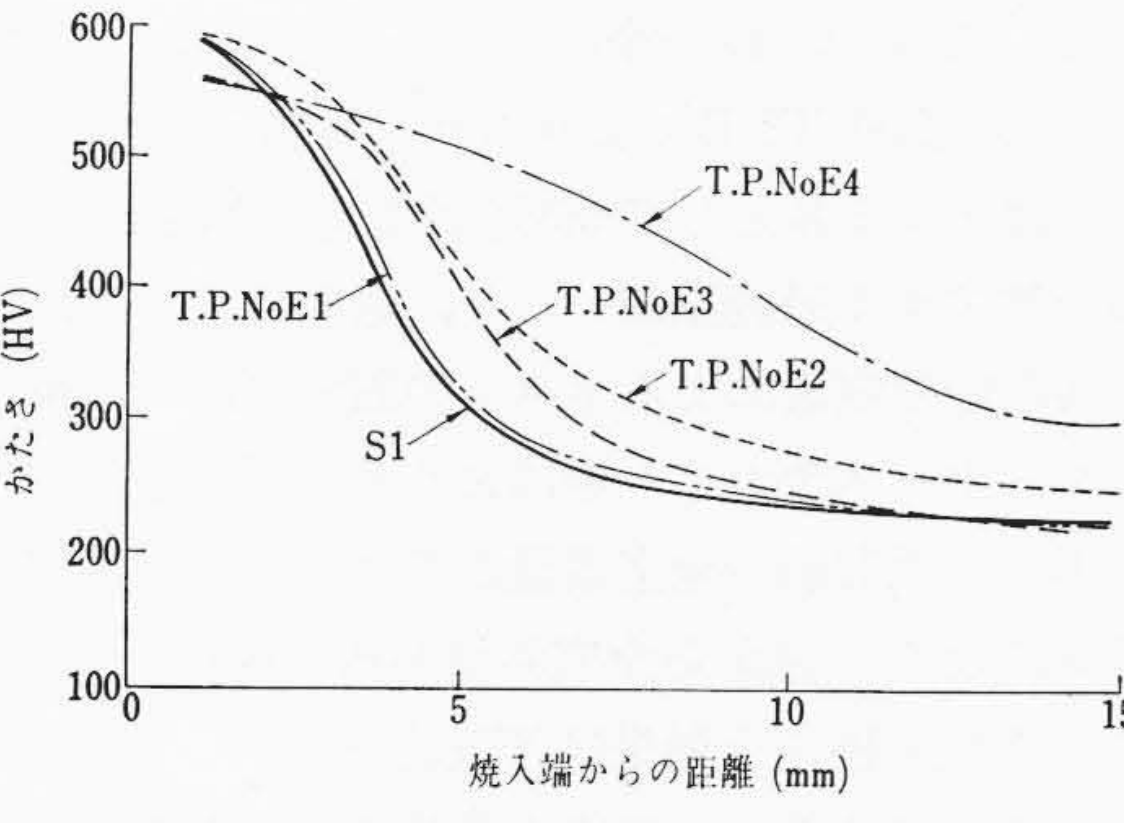
T.P.No K 4 : 0.35% C, 0.68% Mn, 0.0015% B 添加
T.P.No K 5 : 0.30% C, 1.12% Mn, 0.0025% B 添加
T.P.No K 6 : 0.25% C, 0.88% Mn, 0.0035% B 添加
T.P.No KS 1 : 0.33% C, 0.67% Mn

図3(a) Al-Ti-B合金によるボロン添加



T.P.No K 1 : 0.28% C, 0.86% Mn, 0.0015% B 添加
T.P.No K 2 : 0.26% C, 0.89% Mn, 0.0025% B 添加
T.P.No K 3 : 0.26% C, 0.88% Mn, 0.0035% B 添加

図3(b) Fe-Ti-B合金によるボロン添加



T.P.No E 1 : 0.30% C, 0.8% Mn, 0.0014% B
T.P.No E 2 : 0.34% C, 0.86% Mn, 0.0017% B
T.P.No E 3 : 0.29% C, 0.85% Mn, 0.0018% B
T.P.No E 4 : 0.28% C, 0.92% Mn, 0.0022% B
T.P.No S 1 : 0.30% C, 0.86% Mn

図4 試料の一端焼入性曲線（8t 焼塩基性電弧炉溶製）

表4 ボロン添加量と f_B との関係

試料 記号	溶 解 炉	ボロン添加合金	添 加 量 (ppm)	f_B 値	KD値
K 1	50 kg 高 周 波 炉	Fe-Ti-B	15	1.38	0.781
K 2			25	1.02	0.811
K 3			35	1.37	0.782
K 4		Al-Ti-B	15	1.97	0.825
K 5			25	1.56	0
K 6			35	1.76	0.738
E 1	8 t 塩 基 性 電 弧 炉	Fe-Ti-B	25	1.16	0.818
E 2			35	1.08	0.763
E 3		Al-Ti-B	25	1.35	0.745
E 4			35	1.70	0.593
S 1		ボ ロ ン 添 加 せ ず	—	—	0.821

表5 ボロン添加量と機械的性質の関係

試料 記号	ボロン合金	ボロン 添加量 (ppm)	溶湯保持 時間 (min)	引張強さ	伸 び	絞 り	衝 撃 値
				kg/mm ²	%	%	kg・m/cm ²
K 2	Fe-Ti-B	25	4~6	180	3.7	4.9	4.1
			6~8	178	5.3	7.3	3.9
			8~10	172	3.7	4.2	3.3
K 3		35	4~6	178	2.0	3.9	2.5
			6~8	150	1.6	1.1	3.0
			8~10	170	2.2	1.4	2.7
K 5	Al-Ti-B	25	4~6	184	2.9	4.0	3.7
			6~8	183	4.5	4.0	3.7
			8~10	175	3.5	2.5	3.6
K 6		35	4~6	175	3.8	5.0	3.5
			6~8	173	4.8	6.7	3.5
			8~10	178	4.6	6.3	3.7
KS 1	ボロン添加せず	—	—	144	1.1	0.9	2.3

注：試料条件 {850℃×30 min→水冷}
 {180℃×2 h→水冷}

表4は50φ丸棒焼入性試験による焼入硬化深度、 K_D 値を示したもので、この結果においてもボロンの焼入性倍数と同じようにAl-Ti-Bのほうが安定したボロンの焼入性効果を示すことが認められた。さらにまた機械的性質においても表5に示すようにボロンを添加した場合は無添加の場合より著しく高く、引張強さは約180 kg-m/mm²、伸び率約6%、絞り率約7%、衝撃強さ約4 kg-m/cm²にも達することが認められる。とくにAl-Ti-Bの場合は安定してすぐれた性質が認められた。

このことはAl-Ti-B合金中の含有アルミ量が95%にも達するために、たとえばAl-Ti-Bによりボロン添加すると添加目標が35ppmの場合にはアルミ量として0.3%以上も添加される計算となる。そのため当然アルミ過剰添加となり、過剰のアルミは窒素と結びつくために溶湯中の窒素によるボロンの固定の確率は少なくなると同時にボロンはオーステナイト中により多く固溶されやすくなる。

次にボロン添加前の全窒素量とボロンの焼入性倍数との関係を示すと図5になる。図から全窒素量が約60 ppm以上となるとボロン添加による焼入性向上効果は不安定となり、とくにFe-Ti-Bによるボロン添加ではボロンの焼入性効果はほとんど認められない。

しかし、Al-Ti-Bによりボロン添加を行なうと図6に示すようにRockcandy fractureが認められる。これは一般に過剰のアルミがAlNなどになりオーステナイト結晶粒界に凝集する結果生起すると言われている⁽¹⁷⁾。したがって鋳鋼の性質改善のためにはアルミ

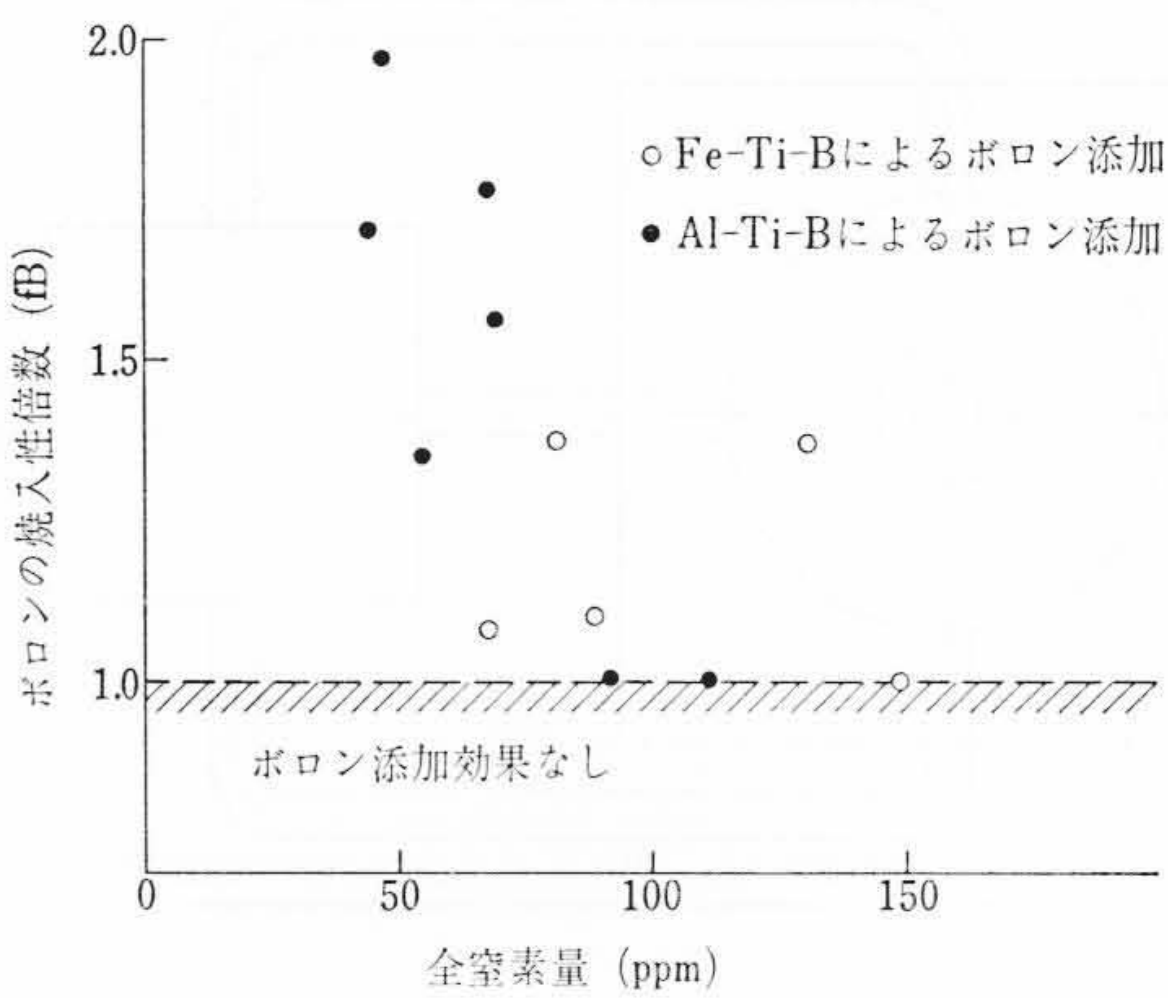
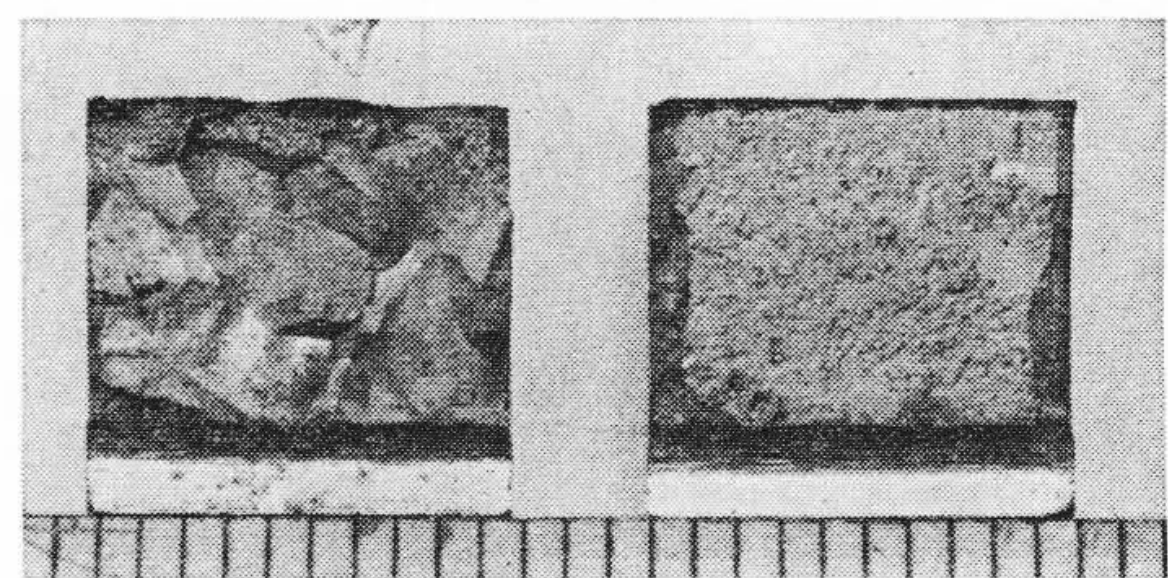


図5 ボロン添加時の溶湯中の窒素量とボロン焼入性倍数の関係



(a) Al-Ti-B合金によるボロン添加 (b) Fe-Ti-B合金によるボロン添加

図6 シャルピー衝撃試験片の破断面

過剰の原因となるAl-Ti-Bなどの多量添加は問題が残される。こうした点で不安定要素を解消してFe-Ti-Bなどによるボロン添加を考えなければならない。

3.3 小 括

- (1) ボロンの焼入性向上効果は残留全ボロン量が約20 ppm以上で現われる。
- (2) ボロン添加合金としてはAl-Ti-BのほうがFe-Ti-Bよりもボロンの焼入性向上効果の安定性が大きく、また、ボロン添加歩どまりが大きい。
- (3) ボロン添加により機械的性質は引張強さにおいて約30 kg/mm²、伸び、絞り率において約4倍、衝撃強さにおいて約2倍高くなることが認められた。
- (4) ボロン添加時の溶湯の窒素量が多くなるとボロンの焼入性効果は漸次減少し、全窒素量が50~60 ppm以上となるとボロンの焼入性効果は不安定となる。
- (5) Al-Ti-Bによりボロンを添加する場合には衝撃試験片破面にRockcandy fractureが生起しやすい。

4. 溶湯の前処理に関する実験

ボロンは金相学的に鋼中に固溶されがたく、また酸素、窒素との親和力が著るしく大きいため微量ボロンの添加は溶湯の脱酸、脱窒を良くしておかなければならない。

脱窒処理を行なう実用的な方法としては、(1) 窒素との親和力の大きい元素を添加して窒素を安定な窒化物として固定する方法。(2) アルゴンガスなど不活性ガスを吹き込み溶湯の沸騰を行ない脱ガスを容易とする。(3) 真空装置による取鍋脱ガスなどが考えられる。

4.1 実 験 方 法

本実験においては(1)の方法による脱窒効果を検討することとし

表6 脱窒剤の化学組成

添加合金	化 学 組 成 (%)							
	C	Si	Mn	P	S	Al	Ti	V
Fe-Ti	0.06	0.02	0.03	0.003	0.003	0.09	72.7	—
Fe-V	<0.2	<2.0	—	<0.1	<0.1	<4.0	—	45~55

表7 脱窒処理を加えた試料の溶製条件

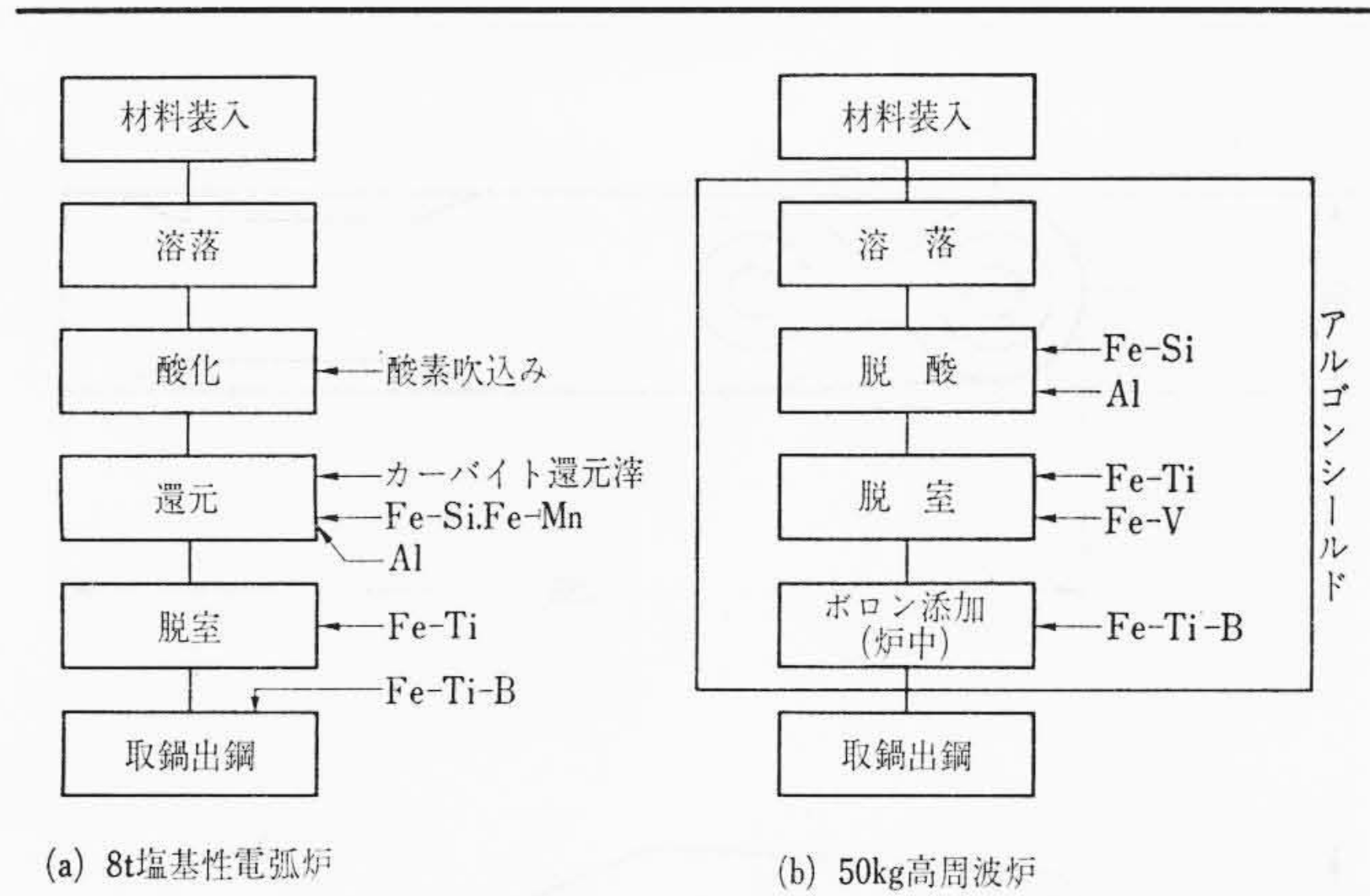


表8 試料の化学組成

試料 記号	溶 解 炉	脱 窒 剤	化 学 組 成 (%)					
		(添加量)	C	Si	Mn	Cr	Mo	B
								添加量
K 7	高周波炉	Fe-V (0.2% V)	0.42	0.50	1.10	0.06	Tr	0.0035
K 8		Fe-V (0.4% V)	0.42	0.49	1.07	0.09	Tr	0.0035
K 9		Fe-Ti (0.1% Ti)	0.36	0.35	1.12	0.26	Tr	0.0035
K10								
K11			0.38	0.42	0.93	0.12	Tr	0.0035
K12			0.41	0.46	0.89	0.15	Tr	0.0035
K13		Fe-Ti (0.2% Ti)	0.44	0.47	1.13	0.04	Tr	0.0035
K14		Fe-Ti (0.40%Ti)	0.45	0.47	1.02	0.08	Tr	0.0035
KS 1	ボ ロ ン 添 加 せ ず	0.31	0.19	0.66	0.04	Tr	—	
E 5	塩 基 性	Fe-Ti (0.4% Ti)	0.32	0.51	0.87	0.14	—	0.0035
ES 1	電 弧 炉	ボ ロ ン 添 加 せ ず	0.28	0.39	0.93	0.16	0.11	—

た。脱窒剤としては表6に示す化学組成を有するFe-Ti、Fe-V合金を選定し、Ti、Vをそれぞれ0.1~0.4%を脱酸後に添加してからボロン添加した。ボロン添加合金としてはFe-Ti-Bを用い、試験片採取とそれらの試験方法は3.1で述べた方法に準じて行なわれた。

なお、本章での溶解条件は表7に示すとおりである。

4.2 実験結果とその考察

溶製試料の化学組成は表8に示すとおりである。これらの試料のジョミニー曲線から換算したボロンの焼入性倍数と脱窒処理前の溶湯中の全窒素量の関係は図7に示すように溶湯を予備脱窒することによりFe-Ti-Bによるボロン添加でもじゅうぶんなボロンの焼入性効果が安定して得られることがわかった。

なお本図で示した窒素量は真空抽出による全窒素量である。したがって、この量はTi窒化物として固定されたものが包含され、また、それが大きい割合となってボロン添加が有効に行なわれたものと考えられる。また、窒素固定元素であるTi、V量は0.1%でもじゅうぶん効果を発揮することが可能であり、これらの効果はボロン添加時の全窒素量が110ppmに達しても失われない。さらに窒素の

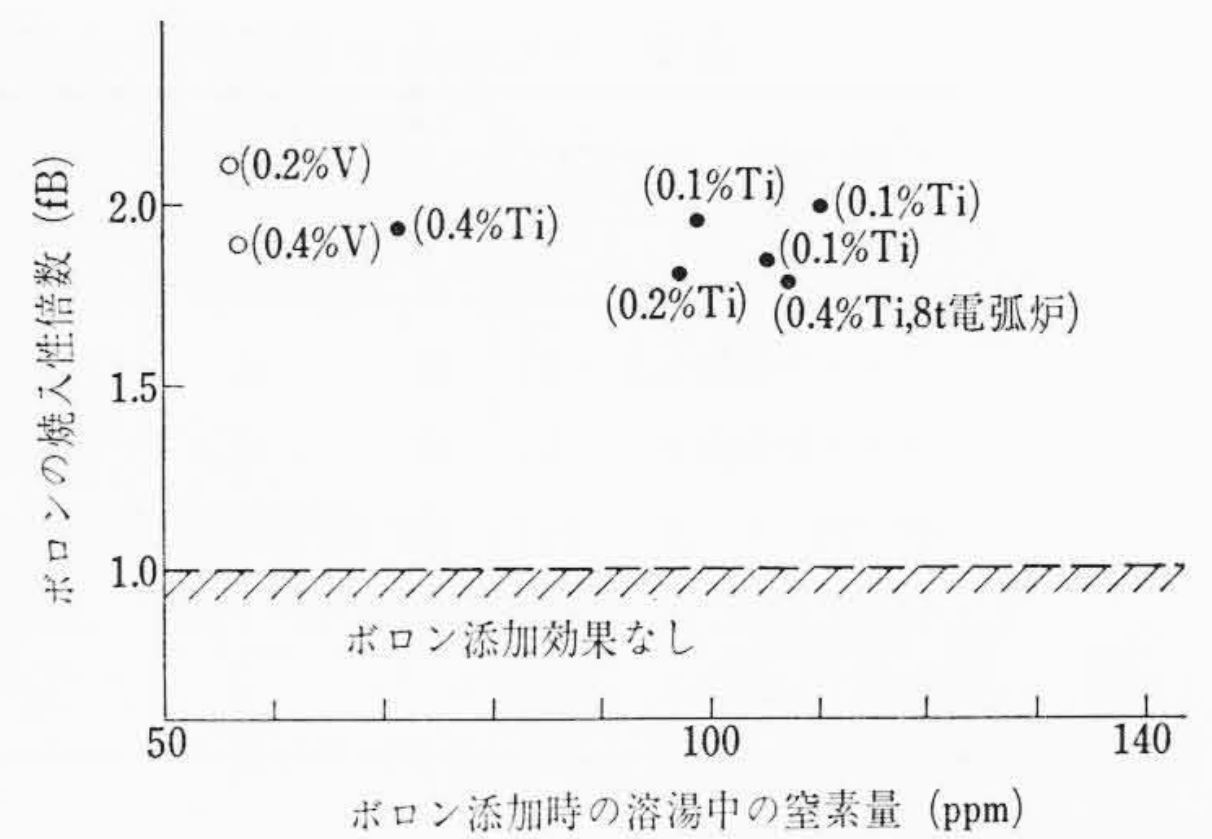


図7 脱窒処理後のボロン添加で得られた f_B 値とボロン添加時の窒素量との関係

固定による効果はFe-TiのほうがFe-Vよりも大きく、経済的でもある。

4.3 小 括

- (1) Fe-TiあるいはFe-Vによる予備脱窒の結果、Fe-Ti-Bによるボロン添加でもじゅうぶんなボロン添加効果を安定して得られる。
- (2) 予備脱窒のTi、V量としては、0.1%でじゅうぶんである。
- (3) 脱窒剤としてはFe-TiのほうがFe-Vよりも経済的で添加量としても、Ti量として0.1%でじゅうぶんであり、それ以上の添加は不経済となるほか、窒化物が増加することとなり好ましくない。
- (4) 溶湯の予備脱窒の結果、ボロン添加時の溶湯中の全窒素量が110ppmに達してもボロンの焼入性向上効果はじゅうぶん期待できる。

5. 窒素量の変動に及ぼす溶解条件の検討

ボロン鋼の溶解において、ボロン添加時の溶湯がじゅうぶん脱酸されていても脱窒状態が悪い場合にはボロンは窒化物となりやすく有効ボロンを得ることはむずかしい。

このようなことに対して溶解操業条件と窒素量の変動状態を知ることは溶湯の窒素量の上昇を抑え、脱窒処理の簡略化あるいはボロンの安定添加の面で重要であろう。

5.1 実験方法

ここでは8t塩基性電弧炉による中炭素鋼(0.28~0.34% C, 0.44~0.97% Mn)の溶解過程における窒素量を真空溶融ガス抽出装置によりガス分析を行ない、これらと表9に示す各種溶解条件との関係を段階式重回帰分析によって追求した。

調査した溶湯は計30チャージである。ガス分析試料は溶解過程の各操業期に湯くみにより取湯し、アルミ脱酸後、スポイトを連結したシリカチューブにて試料採取して、直ちに急冷保持したものを真空溶融ガス抽出装置にて1,800℃で真空抽出した。

5.2 実験結果とその考察

各溶解期の窒素量の変動は図8に示すとおりである。図から溶解過程での窒素量は溶落時に最も大きく、95%の信頼限界内では87~108ppmでばらつき範囲内では最高140ppmに達することもある。

また、窒素量の最低は酸化末期で40~80ppmとなり還元期から取鍋にかけて漸時増加している。

重回帰分析の結果、窒素量変動と溶解条件との間に相関が認められたものを(3)~(5)式に示した。

(3)式は酸化期の脱窒素量、(4)式は出鋼直前の窒素量、(5)式は取鍋中窒素量に関するものである。

$$\Delta N_D = 0.99 D_c - 0.011 T_m + 0.40 L_m - 0.825 M_i + 2.63 O_i + 115.99 \dots (3)$$

表9 8t塩基性電弧炉の溶解作業における溶湯ガス含有量検討にとりあげた要因

装 入 材 料	精 練 時 間 (min)	消 費 電 力 量 (kWH)	窒 素 (ppm) 量	溶 鋼 中 炭 素 量 (%)
プレス材配合比 (%)	溶 解 期	溶 解 期	溶 落 時	溶 落 時
リターン材配合比 (%)	酸 化 期	還 元 期	酸 化 末 期	酸 化 末 期
ドライ粉配合比 (%)	還 元 期	全 消 費 電 力 量	還 元 末 期	取 鍋 中
全 装 入 量 (kg)	(酸 化 期+還 元 期)	$\left(\frac{\text{溶解消費電力量(kWH)}}{\text{溶解重量 (t)}} \right)$	取 鍋 中	(溶 落)-(酸 化 末 期)
全 石 灰 石 量 (kg)	酸 素 吹 練		(溶 落)-(酸 化 末 期)	
予備石灰石量 (kg)			(取 鍋)-(還 元 末 期)	

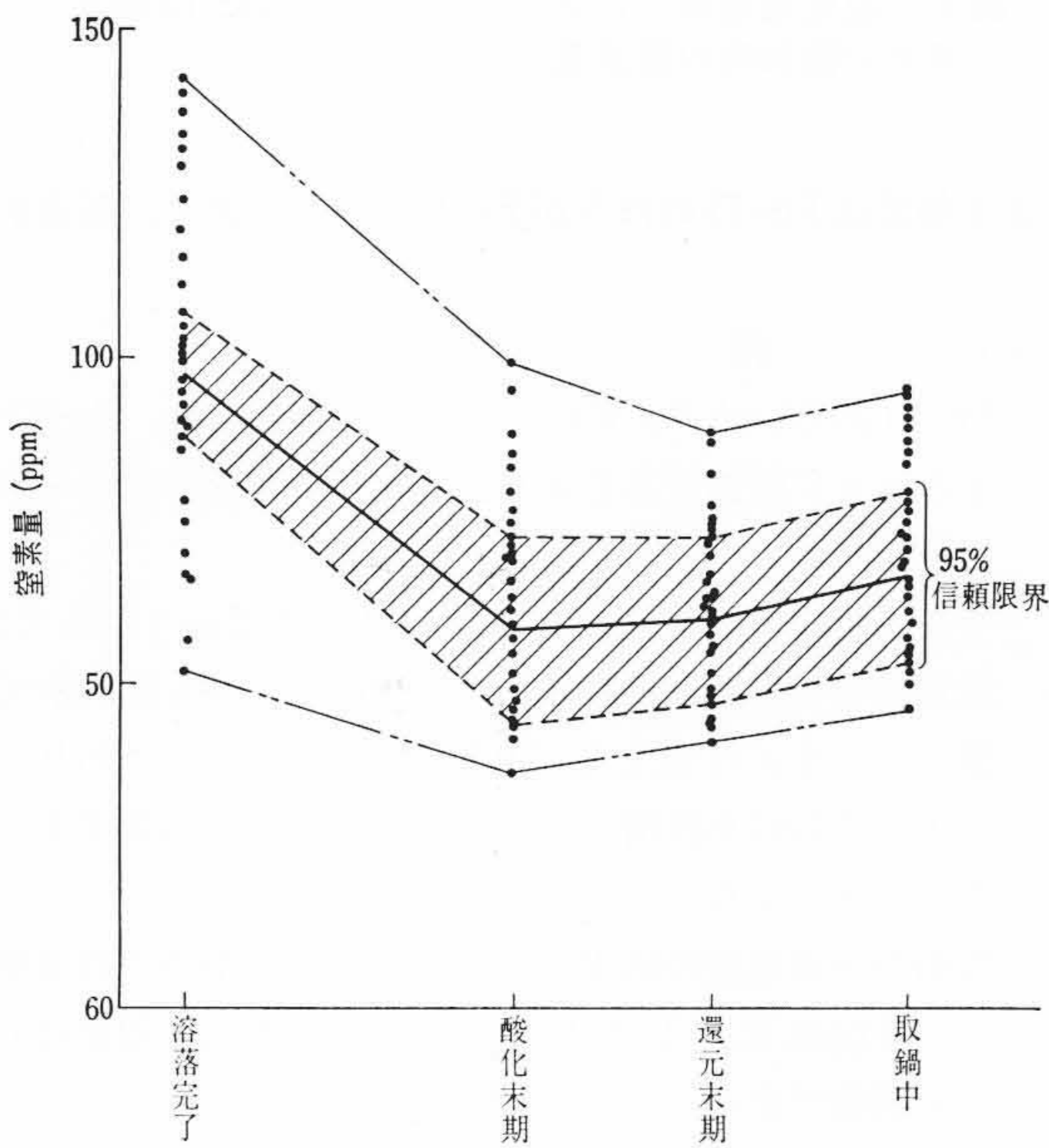


図8 8tエルー炉における操作過程の窒素量の変動(中炭素鋼溶製時)

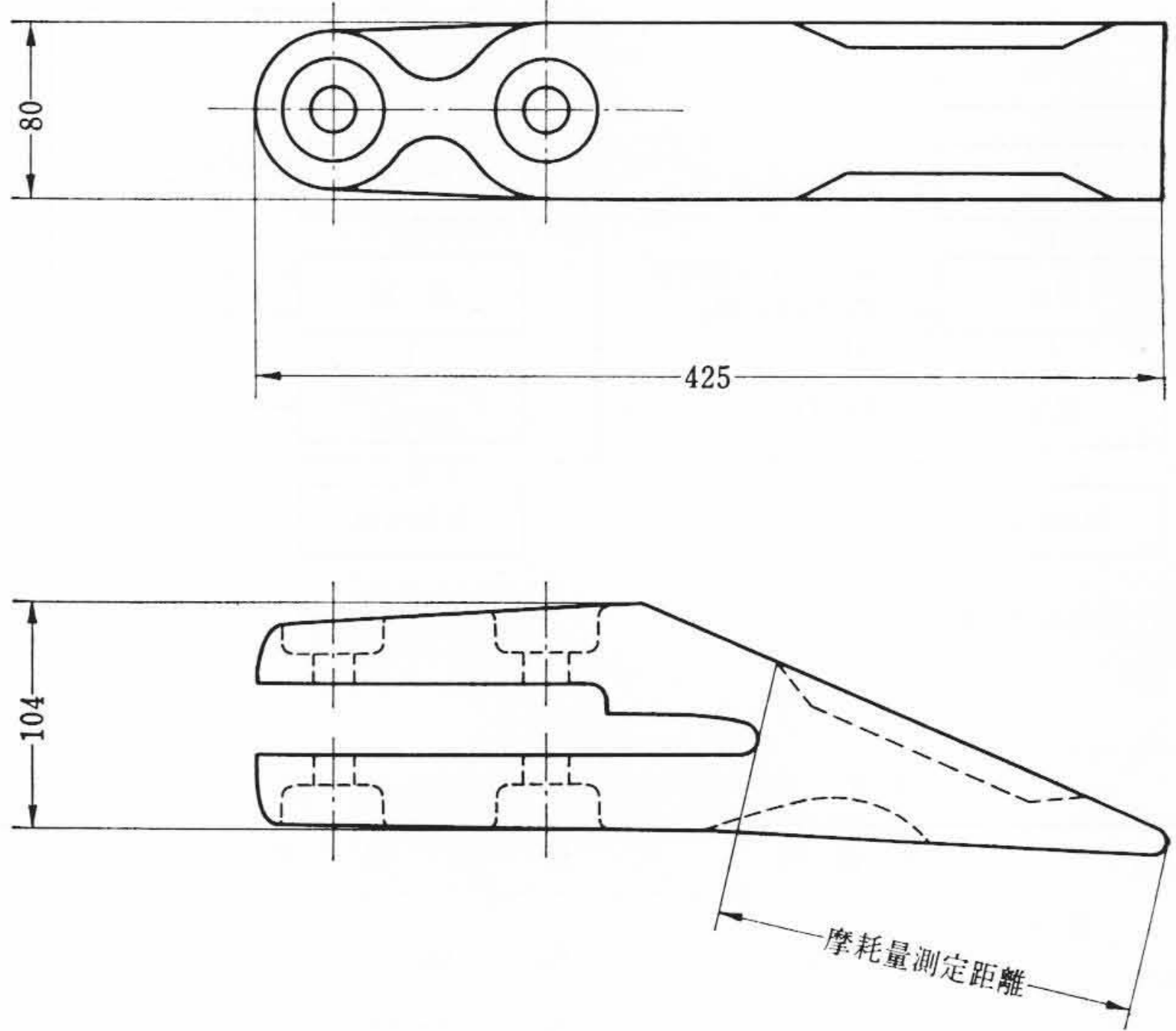


図9 実験に供したトラクタ用バケットツメの形状

ここで、 $4N_D$: 酸化期の脱窒素量 (ppm)
 D_c : ドライ粉配合率 (%)
 T_m : 全 装 入 量 (kg)
 L_m : 酸化期までの石灰石の予備投入量 (kg)
 M_t : 溶解期時間 (min)
 O_t : 酸化期時間 (min)

また、
$$N_s = 110.92 - 0.52 D_t - 147.04 O_c \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 N_s : 還元期の窒素量 (ppm)
 D_t : 還元期時間 (min)
 O_c : 酸化末期の炭素量 (%)

また、
$$N_L = 121.58 - 0.528 S_t - 99.26 O_c \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 N_L : 取鍋中窒素量 (ppm)
 S_t : 酸化期+還元期時間 (min)

窒素量の低減が最大となる酸化期における脱窒素量に効果の大きい操作条件として、(3)式に示されたようにドライ粉の配合率があげられたことはドライ粉の配合により溶落度炭素量が高くなり、炭素量調整のための酸素吹錬、酸化期時間が長くなるためと考えられる。

予備投入石灰石量が有効な結果として表わされたことは溶湯中の窒素が炭素の酸化で生じた炭酸ガスに吸着されて逸散すると言われていることと、石灰石が炭酸ガスの発生に寄与することに関係があるものと考えられる。

また、溶解期時間が長くなると脱窒素量に逆効果となることは約3,000°Kにも達するアーク域で大気中の窒素が解離されて原子状窒素となり溶鉄に吸収されることに由来する。

5.3 小 括

電弧炉による溶解過程での窒素量変動を溶解操作条件と関連させて統計的に調べた。この結果、溶湯の窒素量を低く押えるための指針が得られた。

- (1) 溶解材料としては溶落炭素量が目標値よりもじゅうぶん高くなる高炭素配合とする。
- (2) 炉床保護などで予備投入する石灰石量は窒素量増加を抑えるうえで効果があるため、炉内散布においても均一散布する。
- (3) 溶解期に窒素量が最大となるためには溶解期はできるかぎり短いほうがよい。また、酸化期にはじゅうぶんの時間をかける。

6. 建設機械用鋳鋼部品によるボロン効果の確認

前記のボロン鋳鋼の実用化を目標として当面適用が考えられる比較的生産量の多い建設機械用掘削部品としてバケット・つめを試作しその性質を検討することとした。

6.1 供試試料および実験方法

供試試料としては0.35% C, 0.80% [Mn]の普通炭素鋼にボロンを35 ppm 添加して図9に示すトラクタ用バケット、つめを試作した。別に0.43% C, 1.2% Mnを有する低合金鋳鋼(低Mn-Mo鋳鋼)で同一のつめを試作して実機に装着して耐久性試験を行なった。

さらに鋳鋼品の実体強さを調べるためにの0.36~0.41% C, 0.89~1.12% Mnの普通炭素鋼組成の溶湯に予備脱窒後、ボロンを添加し

表 10 ボロン鋳鋼品の機械的性質

つめ No.	化学成分 (%)			機 械 的 性 質					Bの焼入性 倍 数 f _B
	C	Si	Mn	引張強さ	伸 び	絞 り	衝撃値	かたさ	
				kg/ mm ²	%	%	kg・m /cm ²	HRC	
1	0.36	0.35	1.12	173	7.3	8.9	3.8	48.4	1.83
2	0.38	0.42	0.93	174	8.0	11.8	4.2	48.8	1.99
3	0.41	0.46	0.89	188	8.3	12.6	3.0	50.0	1.97

注：試料条件 { 850℃×30 min→水冷
180℃×2 h→水冷

て同一つめを溶製し、このつめより機械試験片を採取し 880℃ で焼入後、180℃ で焼戻してから試験した。

6.2 実験結果とその考察

表 10 はボロン鋳鋼の焼入れ焼もどし後の機械的性質を示したものである。表よりボロン鋳鋼の機械的性質は焼入れ、低温焼もどし状態にもかかわらずボロンを含まない普通鋳鋼に比較してきめわて強靱な性質である。

この理由としてはオーステナイト中に固溶されたボロンが変態に際し結晶粒界に熱拡散し粒界付近に生起する空孔などの格子欠陥部に優先的に固定され粒界が安定化するため、これが変態を抑止する効果となるためオーステナイトからの変態開始時間が長くなると言われている⁽¹⁸⁾。

また、耐久性試験の結果は図 10 に示すようにその耐摩耗性は 0.43 % C, 1.20 % Mn を含む低合金鋳鋼（低 Mn-Mo 鋳鋼）と比較して遜色のないことが認められた。

6.3 小 括

- (1) ボロン添加直前に脱室処理を施したボロン鋳鋼(0.36~0.41 % C, 0.89~1.12 % Mn, ボロン添加 35 ppm)の焼入れ、低温焼もどし状態(かたさ H_RC 48~50)の機械的性質は引張強さ：173~188 kg/mm²、絞り率：8.9~12.6%、伸び率：7.3~8.3%、衝撃強さ：3.0~4.2 kg-m/cm²、f_B 値：1.8~2.0 である。
- (2) 対土砂摩耗試験の結果、ボロン鋳鋼の耐摩耗性は 0.43 % C, 1.20 % Mn を含む低合金鋳鋼（低 Mn-Mo 鋳鋼）と同等であることが認められた。

7. 結 言

ボロン鋳鋼の製造において、ボロンを定常的に安定添加することがむずかしく、この点について検討を行なった結果、中炭素鋼にボロン添加するための溶解操業条件、ボロン添加方法についての指針を見いだした。

7.1 溶解操業条件について

- (1) 溶解材料は溶落炭素量がじゅうぶん高くなるように高炭素配合割合とする。
- (2) 予備投入石灰石量を定常操業より多くして炉床に均一散布する。
- (3) 溶解期をできるかぎり短縮し、酸化期を長くする操業条件が望ましい。

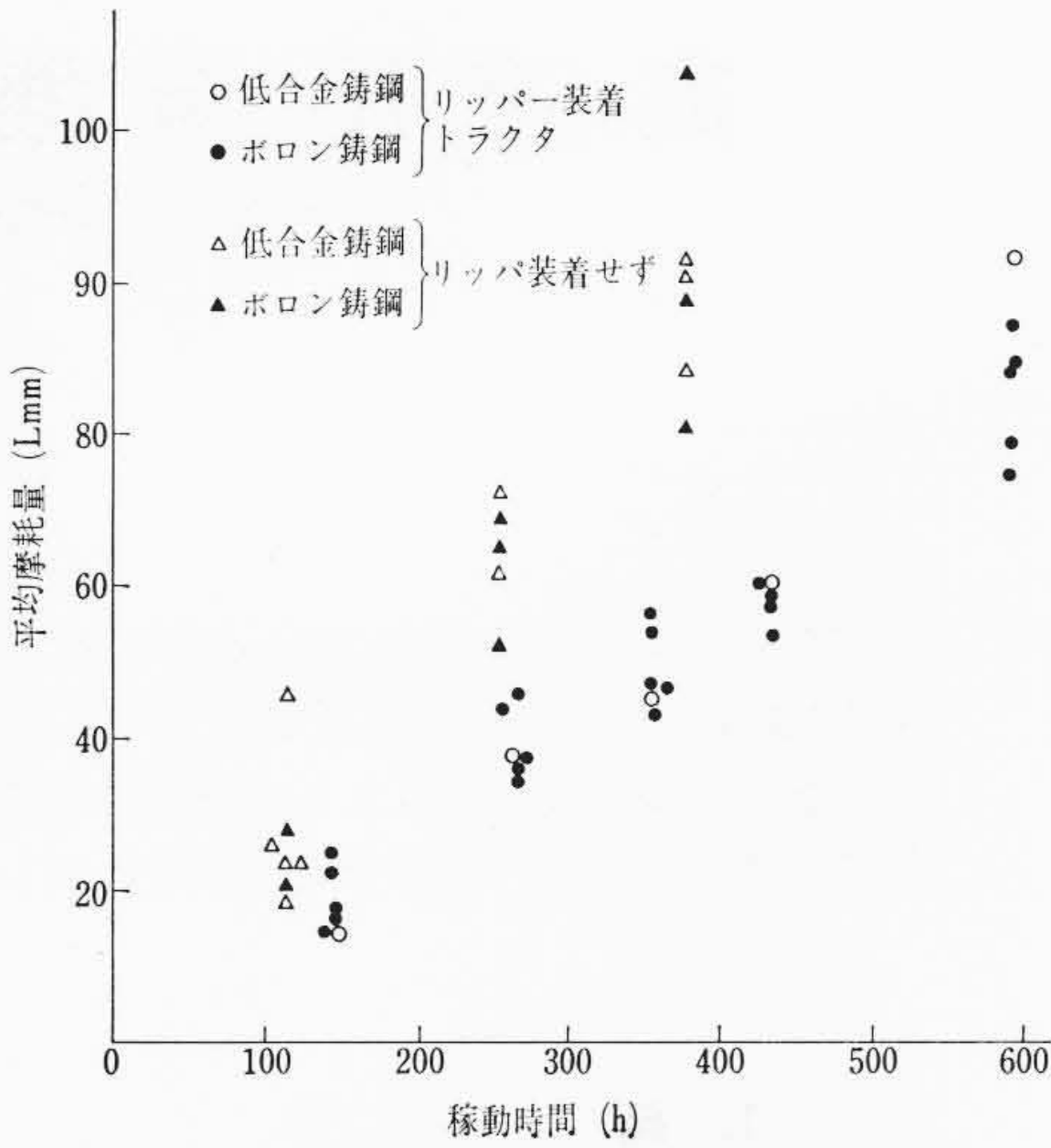


図 10 ボロン鋳鋼製および低合金鋳鋼製ツメの耐久性試験結果

7.2 ボロン添加条件

ボロン添加のための溶湯は強制脱酸後、0.1 % Ti 相当の Fe-Ti で予備脱室を行なってから 0.0035 % 相当のボロンを Fe-Ti-B により取鍋中で添加する。

以上のようにして溶製されたボロン鋳鋼品の焼入れ、低温焼もどし状態における機械的性質は同一炭素量の普通炭素鋳鋼よりも引張強さにおいて約 30 kg/mm²、伸び、絞り率において約 4 倍、衝撃強さにおいて約 2 倍以上高く、低コストで高性能の鋳物が得られる。

終わりに、研究にご協力いただいた日立金属株式会社安来工場冶金研究所、勝田工場検査部、亀有工場原料部の関係者各位に感謝する。

参 考 文 献

- (1) 保坂、横井： 鋳物 Vol. 42 (1970), No. 4 p. 73
- (2) 佐藤、保坂： 鋳物 Vol. 42 (1970), No. 9 p. 140
- (3) M. E. Nicholason: Trans. A. I. M. E. 200 (1954) p. 185
- (4) JIS G 1227-1968・23
- (5) 学振 19 委資料： 19 委 8750
- (6) 保田、荒木： 特殊鋼 15 (1966) No. 2 p. 68
- (7) 山田： 三菱製鋼技報 2 (1968) No. 1 p. 32
- (8) SAE Technical Board: SAE Special Pub. No. 10 (1948) "Report on investigation of Boron treated Steels" Caterpillar project
- (9) SAE Technical Board: SAE Spec. Pub. No. 18 (1948) "Report on investigation of Boron treated Steels" Ordnance project
- (10) R. A. Grange, J. B. Mitchell: Trans. A. S. M. 38 (1946) p. 211
- (11) B. M. Kapada, R. M. Brown: Trans. Metallurgical Society of A. I. M. E. 242 (1968) p. 1689
- (12) J. C. Shyne, E. R. Morgan: Trans. A. S. M. 48 (1965) p. 265
- (13) L. J. Rohl: J. I. S. I. Vol. 177, Feb. (1954) p. 173
- (14) H. B. Knowlton: J. I. S. I. Vol. 177 Feb. (1954) p. 187
- (15) Caterpillar Tractor Co.: Foundry 85 (1957) p. 140
- (16) R. A. Grange, W. B. Seens: Trans. A. S. M. 42 (1950) p. 75
- (17) B. C. Woodfine, A. G. Quarell: J. I. S. I. Aug. (1960) p. 409
- (18) R. A. Grange, J. B. Mitchell: Trans. A. S. M. 53 (1961) p. 157