

技術資料

硼素鋼に關する最近の發達

長谷川 正義*

RECENT PROGRESS IN BORON STEEL

Masayoshi Hasegawa

Synopsis:

Studies in the effect of boron on iron and steel have been made early in this century, but any practical application have been scarcely developed. During the recent war investigations of boron-treated steel were newly advanced, especially in the United States in industrial scale.

The purpose of this treatment was to improve hardenability of steel with small amount of less than 0.005% boron, and to save alloying elements, such as Ni, Cr and Mo. At the present, the tentative specification has already been determined, and put into practice in the United States, while much attention is paid in Europe and U. S. S. R. with interest.

In Japan, there have been basic investigations and a few practical data of some plants, and since a *Boron Steel Research Committee* has recently been installed, this boron-treated steel will be put in practice in some days.

In this article, the result of various studies in the influence of boron upon iron and steel to date is described, especially relating to the recent advancement of boron-treated steel.

I. 緒 言

鐵鋼に及ぼすBの影響に關する研究は、すでに古く今世紀初頭より行われていたが、最近に至るまでその工學的應用はほとんど發展しなかつた。

然るに今次大戰を期として、新しくB處理鋼が發見されたが、これは特に米國に於て工業的スケールで試作、研究されたもので、主として0.005%前後の微量のBを添加して鋼の焼入性を改善し、Ni, Cr, Mo等の合金元素の節約を計ろうとするのがその目的である。現在米國に於てはすでに規格も制定されて、實用に供されているが、最近は歐洲、ソ聯に於ても廣く關心が拂われている様である。翻つてわが國に於ては、數年前よりこれに關する基礎的研究は發表されているが、特に近年に至つて二、三の工場に於ける現場的データも報告される等漸く一般の認識が高まりつゝある。

この處理による利點は、構造用鋼に於ける焼入性を、微量のB添加によつて著しく増大させ得ることにあるので、その他の物理的、化學的或いは機械的性質に對しては

殆んど影響がないものと言うことが出来る。しかし、現在なおこの焼入性増加の原因はほとんど不明であり、その他の諸性質に及ぼす影響も未だ十分に明かにされていないから、なお今後の基礎的研究に俟つ處が多い。

Bの資源はわが國に於ては皆無ではあるが、硼砂、硼酸としてはすでに工業的に廣汎な需要があることでもあり、又本目的の添加量は極めて微量でもあるから、本邦に於てもこのB處理鋼は近く實現普及されるに至るものと期待される。

本稿は以上の如きB處理鋼について、近年に至るまでの主として米國に於ける報文を中心として紹介したものであるが、なお鐵鋼に及ぼすBの影響に關しても若干の解説を附記した。

II. 鐵—硼素系合金

Fe-B系 γ 元状態圖に關する研究は、むしろ古い時代に行われたものゝみで、最近の報告はない。即ち、1909

* 早稻田大學第一理工學部金屬工學科教室、助教授

年 Binet de Jassoneix が本系合金の組織を調べたが、その状態圖は 1914 年 Hannelsen によつて研究されたのが最初で、その後 Tschichewskii-Herdt, Tammann-Vogel 等の研究を経て、現在最も新しいものとして認められているものは 20%B 以下に關する Wever-Müller の研究である。これによれば γ -Fe に對する B の溶解度は最大 1170°C に於て約 0.15%, 915°C に於て約 0.1% であり、 α -Fe に對しては最大 0.1% (915°C) より 0.05% (600°C) に減少するとしているが、600°C 以下の溶解度については明かでなく、何れにしてもかなり微量である。今井(勇)―今井(彦)⁷⁾によれば、0.008%B の添加で、すでにオーステナイト粒界に相當量の Fe_2B を認めるから、Fe に對する B の固溶限はさらに微量であるという。

Fe-C-B 3 元系状態圖に關する研究は、古く炭化物に關する研究と、1922 年 Vogel-Tammann の發表した Fe, Fe-C, Fe-B 3 成分系に關する部分的研究があるのみで、これによればさらに γ -Fe に於ける B の溶解度は大であるが、これは前記 Wever-Müller の研究によつて本質的に更新されたから、もはや實際的價値を失つてゐる。

その他、本系に關しては二、三の部分的な熱分析又は X 線試験を除いては全く公表されたものはないので、微量 B 含有量の範圍について、さらに系統的研究を必要とする譯である。

Fe 合金系に於ける合金元素としての B の作用は、C に近似し、特に原子容が小さく、C と殆んど一致していることから Fe-C 固溶體と同様侵入型をとる様と考えられるが、X 線の研究によれば、 α -Fe とも、又多分 γ -Fe とも置換型固溶體をつくるものゝ如くである。

その他 Heinzl, Wever, Svetshnikov 及び Schlichtweg 等によればは、B は Zr, Ce, S と同型の状態圖をつくる元素であること、電子構造よりの分類に従つても γ -域を縮小する元素群に屬することが明かにされている。又、Kornilov, 著者⁵⁵⁾等によれば B の原子直径は 1.94Å, Fe との差の割合は -23% で、所謂 Size factor は著しく不適であり、溶解度は極めて微量であることは豫想に難くないが、電氣陰性度も大 (2.0) であるから原子直径因子のみで論ずることは早計であらう。

なお、Fe-B 系化合物としては $(\text{Fe}_2\text{B})_x$, $(\text{FeB})_x$ が知られ、これら硼化物の構造に關してはなお異論はあるが、例えば Bjürström-Arnfeld, Hägg 及び Kontorovich 等によれば、前者は、單位胞中に 4 個の Fe_2B を有する體心正方格子であり、又 Hendricks-Kosting に

よれば、後者は斜方晶系に屬し、單位胞中の原子数は 3.75 であるという。その他 Fe_3B_2 , FeB_2 の存在も報告されているが、前者は否定され、後者は不確實である。

Fe-B 2 元合金の性質についてのデータは極めて少くフェライト強化作用、炭化物生成能等についても詳細は不明であるが、一般に少量の B 添加で硬度は急激に上昇するが、焼入によつても硬度は變化しない。その他機械的性質、磁氣的性質に關する研究もあるが、本稿の目的には關係がないので省略する。

又、0.01% 以上の稍々多量の B 添加が鋼に及ぼす影響についても多くの報告があるが、既に著者の輯録⁴⁷⁾⁵⁵⁾があるのでこゝには再録しなかつた。

III. 硼素添加用母合金

鐵鋼に對する添加用合金としては、古くから種々のものが研究されたが、歴史的な文献の詳細については、Escard, Dannel の著書に詳しい。現在の工業的製法は (1) 石炭、コークスによる炭素還元法と、(2) テルミットによる Al 還元法が主なものであるが、實驗室的方法としては、(1) フェロ・シリコンを熔融し、これに B_2O_3 及び CaO を添加する方法、(2) 灰硼石を直接高温で Si を用い還元する方法、或は (3) B_2O_3 の熔融鹽電解法等が知られている。又 Walter によれば、鋼への B の少量添加は Na, Ca の硼酸鹽より直接合金させることが出来るという。これは硼砂被覆の下で鑄鐵を熔解すれば、B が還元されて鐵中に熔解することによつても知られ、又著者の鋼に對する實驗室的熔解によつても確認された。

從來の市販フェロ・ボロンの組成は B 10~30% の高品位のものであつたが、最近米國に於て B 添加用として市販されているものの内、B 處理鋼の製造を目的としたものは、何れも比較的少量の B を含む多元母合金で、脱酸、脱窒及び清淨、粒度調整作用を兼ねて使用することを目的としている (第 1 表)。最近本邦に於てもこの目的のフェロ・アロイはすでに試作、市販されているが、使用状態に適合した組成についてはなお研究改良の餘地がある。

これら母合金の種類、組成は、直接、間接にそれを使用した鋼の性質を左右することが多いから、この點については豫め十分な検討を必要とする。

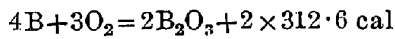
IV. 硼素鋼の熔解

B 處理鋼の熔解についてのデータは多く發表されていないが、平爐及び電氣爐熔解何れの場合も、前記添加用合

第1表 米國市販B添加母合金の組成²⁷⁾³⁶⁾

名稱	B	Ti	Fe	Zr	Al	Si	Mn	C	その他	製造工場
Mn-B Ni-B	15~20 15~18		<5 <3			Bal	>1.5 >1.5	<3 <0.5	Ni Bal	Electro-Metallurgical Co.
Grainal No.1 " No.6 " No.79	0.2 0.2 0.2	15 20 20	Bal " "		10 12 13				V 25 V 13	Vanadium Corp. of America
Silvaz No.3 Silcaz No.3	0.55~0.75 0.55~0.75	9~11 9~11	" "	5~7 3~5	5~7 5~7	35~40 35~40			V 9~11 Ca 9~11	Electro-Metallurgical Co.
Bortan Carbortan	1.5 ~ 1.9 0.90~1.15	16~18 15~17	" "		13~15 1~2	20~22 2.5~3.0	21~24 0.1~0.2	1 6.5~7.5	Cr 0.1~0.2	Titanium Alloy Mfg. Co.
Borosil	3~4		"			40				Ohio Ferroalloy Mfg Co.
Ferroboron	10~14		" "			4		<3		Molybdenum Corp. of America
Boron carbide	80							Bal.	(B ₄ C)	Norton Co.

金の適量を取鍋内に投入する方法が一般の様である。Bの酸化物(B₂O₃)の生成熱はかなり大であり、



従つて、熔解時のBの添加は、酸化による歩留減少が著しいから、このために Si, Al 等で豫め十分脱酸処理を行う可きであり、又後にのべる理由によつてB処理以前の窒素含有量の調整と、オーステナイト粒度の微細化を計る必要があるので、Al, Ti の併用は必ず実行する様提唱されている。

最近、B処理鋼の發達に伴い、熔鋼中の B-O 平衡、Bの脱酸力等について 2, 3 の研究が行われた。即ち Gurry⁵⁾ は平爐に於ける B-O の平衡を熱力學的に求め Derge¹⁴⁾ は直接法により、これを測定した。我が國でも柳橋一河野³⁹⁾ は同じく間接法によつてこれの測定を行い Derge の結果と殆んど一致する値を得たが、これらによれば、Bの脱酸能力は Al より劣り Si のそれに近似する程度である。

この場合一般にBの添加量は 0.0008~0.003% であり、その目的に使用する前記母合金の使用量は第2表を標準とする⁶⁵⁾。しかし、電弧爐熔解、或は平爐熔解でも低炭素鋼の場合にはこの表より 50% 以上餘分に使用すべきである。

Bの添加量はこの様に微量であるから、その成分調整はかなり困難であり、且つB添加前の精鍊過程の操作にも十分な研究と熟鍊が望まれる。Si で十分脱酸、鎮静し、低炭素フェロ・ボロンを添加した場合のBの歩留は 60~70% であるという⁵³⁾。

その他鋼中に酸化物、窒化物の形で存在するBは焼入

第2表 B添加用合金使用量の標準 (中炭素鋼について)⁶⁵⁾

添加合金	合金中の B, %	合金添加量 lb./T	鋼へのB添加量, %
Grainal No. 1	0.2	4	0.0004
" No. 6	0.2	4	0.0004
" No.79	0.5	4	0.0010
Silvaz	0.6	4	0.0012
Silcaz	0.6	4	0.0012
Carbortan	1.5	3	0.0023
Bortan	1.7	3	0.0026
Borosil	3.5	2	0.0035
Ferroboron	12.	0.8	0.0048
Manganese-boron	17.	0.4	0.0034

性に對しては効果のないことが知られているからリムド鋼への添加は無効である。²⁰⁾²⁷⁾

又、一般にBの効果は、電弧爐及び高周波爐熔解では餘り顯著でないことが經驗的に知られているが、これは主として後にのべる窒素含有量の關係に依るものである。

Bの脱硫能については古く Halvorsen の研究もあるが、詳細は不明であり、S含有量との關係を明かにした最近の文献もない。

V. 硼素處理鋼の組織

前項にのべた通りBの Fe に対する固溶度は僅少であるから、少量の添加でもすでに Fe₂B を析出する⁵³⁾。Digges-Reinhart³⁴⁾ の實驗によれば、0.01% 以上のBの含有は熱處理溫度に於ける粒度を微細化するが、これは Fe₂B の核作用に基くものであるという。又、α-Fe

に對する溶解度が温度の降下に共に減少することから、3次 Fe₂B の析出も考えられるが、これは微量で殆んど顯微的には檢出出来ない。

B鋼の燒準組織は、3元状態圖の不備のため詳しくは不明であるが、少量のBを含む鋼では、Bを飽和したフェライト、パーライト、及び恐らく Fe-B 炭化物と考えられる相が認められる筈である。¹⁾

Grange¹⁰⁾ は微量のBを含む鋼を 1100°C より A₁ 點直下に冷却し、こゝに1時間保持した後空冷したが、亞共析鋼ではフェライトが元のオーステナイトの粒界に析出し、Bは Fe₂B・Fe₃C 又は BN₂ としてこの粒界フェライトの中央に析出するが、B含有量がやゝ多くなると析出物はフィルム状に連続して現れることを認めた。Tisdale¹⁾ によれば Fe₂B はかなり微量でも顯微鏡的に檢出し得るといふ、又、前記今井博士等⁵⁹⁾ は新しく Fe₂B と Fe₃C との顯微鏡的判別法を提唱した。即ち、腐蝕劑としては粉末 Na₂O₂ を使用し、温水を加えて加水分解によつて生ずる發生期の酸素によつて Fe₂B の表面に選擇的に酸化被膜を生成させるもので、これによつて Fe₂B は茶褐色に着色され、Fe₃C は全く着色しないといふ。

なお、B處理は鋼中の窒化物の析出に影響を與えることが知られているが⁵⁹⁾⁵⁷⁾、これに就ては後述する。

微量Bが鋼の組織に及ぼす影響の中、特に著しいのはオーステナイト粒の粗大化作用で、單獨のB處理はすべての場合鋼のオーステナイト粒度の粗大化温度を低下させることが知られている。⁴⁾¹⁾¹²⁾³⁰⁾ 従つて、B處理以前に Al, Ti 等の少量添加によつて豫め微細化處理を行うことが必要で、この前處理を行つてもBの燒入性に對する効果は特に減少しない。

又、B鋼の清淨度、非金属介在物には特に異常はない。²³⁾

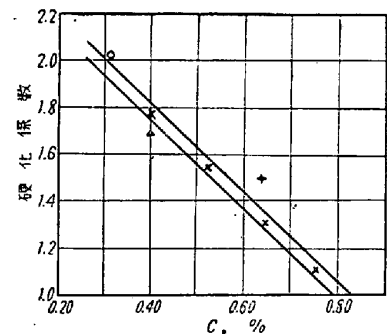
VI. 燒入性に及ぼす硼素の影響

緒言にも觸れた通り、現用のB添加の最大にして且つほとんど唯一の目的は、鋼の燒入性の増進にある。この極めて少量のBが構造用鋼の燒入性の改善に顯著な効果を示すことを發見した端緒は詳でないが、第2次大戦直前に研究され、直ちに國防省の指揮下に Nat. Acad. Sci., Nat. Res. Council. 及び SAE, AISI 等の協同によつて國內各工場でその試験熔解が行われ、戦時中すでに兵器材料として多量にこのB鋼が實用されたといふ。

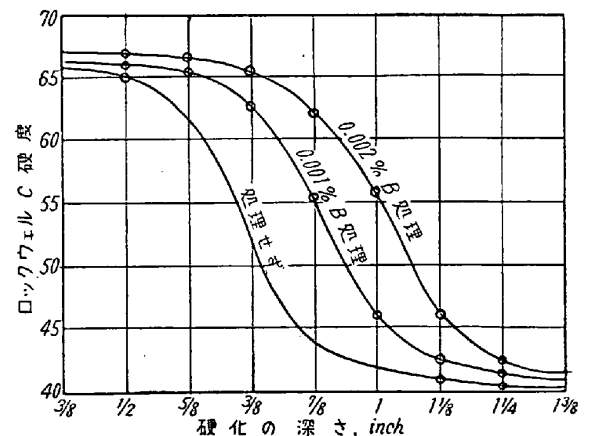
さてこの燒入性に關して最近の研究結果を綜合すれば次の如くである。

(1) 微量(約0.01%以下)のBは鋼の燒入性を著しく向上するが、その添加量は 0.001~0.003% が最も効果が大きであり、0.01% 以上ではむしろ減少する。この最大の燒入性を得るためのB含有量に關しては多くの報告があり、例えば Grossman²⁷⁾ は 0.0025%, Craft-Lamont⁹⁾ は 0.001%, Corbett-Williams¹¹⁾ は 0.002%, Udy-Rosenthal¹²⁾ は 0.0015~0.002% と報告しているが、その他、依、Tisdale¹⁾、今井—今井⁵⁷⁾ 等の實驗もある。

(2) Grange-Garvey¹⁰⁾ は C 0.40~0.75% 炭素鋼に B 0.004~0.0025% を添加した試料について試験した結果、適量のBの添加は燒入性を増加するが、Cの増すと共にその効果を減じ、過共析鋼では全く効果が認められなかつた。即ち、Grossman による燒入性表示法に従えば、Cが 0.2 より 0.8% に増加するに伴つて第1圖の如く 2.0 より 1.0 に直線的に低下する。この効果は多くの研究者によつて確認されている²¹⁾²³⁾。なお、高温の加熱はBの効果を減退させることも Grange 等によつて報告されている。



第1圖 適量のBを添加した炭素鋼の硬化係数とC量との關係¹⁰⁾



第2圖 0.65%C 炭素鋼の燒入滲透度に及ぼすB處理の効果¹⁾

(3) Rahrer-Armstrong³¹⁾⁶⁰⁾ は Carnegie Illinois Steel Corp. に於ける 53 熔解のB處理鋼についで、

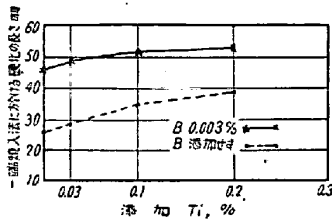
その焼入性を検討したが、0.0045~0.0006%Bの範囲では、硬化係数 F_B は次の如く表わされるという。

$$F_B = 1 + 1.5(0.9 - [C]) \quad [C]: \text{炭素含有量, \%}$$

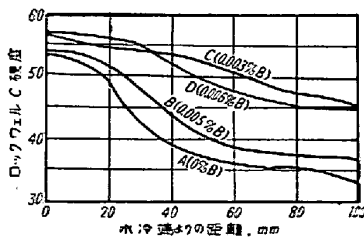
(4) 炭素鋼に對する焼入性増加の一例を Jominy 試験法によつて表示すれば第2圖の如くであるが¹⁾、さらに Mo 等の合金元素の添加はBの効果を増大すること⁵²⁾、P, Cu 等はこれを妨害することも報告されている¹⁹⁾⁷⁵⁾。

(5) 焼入性に及ぼすBの効果は、B処理以前に Al 等によつて十分な豫備的脱酸を行つた場合、最も大きく現われることは、多くの研究に於て一致して認められている¹⁰⁾²⁰⁾³⁴⁾この原因は、すでに述べた通りのBの酸化消耗による効果の減退に由るものであるが、更に次の窒素含有量も亦大きな因子である。

(6) 即ち、鋼中の窒素含有量が、約 0.01% 以上の場合にはBの効果は急に少くなるが、Ti 又は Zr の如き窒素との親和力の大きな元素を併用すれば、この難點は緩和されることが以前から知られていたが⁴⁾³⁴⁾ 近年今井博士⁵⁶⁾等はさらに定量的にこの關係を求め、例えば Ti 添加量に關して第3圖の如き結果を得た。即ち、B添加に先行して Ti による脱酸、脱窒を行えばBの焼入性への効果は増大し、この場合 Ti 添加量は 0.03% ですでに明瞭である。Al に關しても同様の効果が確認された。



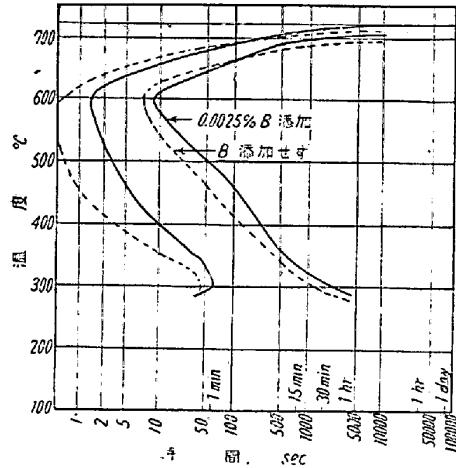
第3圖 0.3% C 鋼に於ける「硬化の長さ」(50%マルテンサイトの位置まで)に及ぼす Ti 添加量の影響⁵⁷⁾



第4圖 B処理 Cr-Mo 鋼の焼入性に及ぼす Al, Ti 添加の影響⁷⁴⁾
A, B: Al 0.05%, Ti 添加せず
C, D: Al 0.21%, Ti 0.24% 添加

又第4圖は佳友金屬, 河井一井上一小川⁷⁴⁾による Cr-

Mo 鋼についての試験結果であるが、Ti 添加がB鋼の焼入性に及ぼす影響を明かに示している適例と考える。しかし、一方V等のやゝ多量(0.5%以上)を添加すれば、鋼中の熔解窒素量を極端に減少するから、却つてBの効果は消失することも報告されている⁶⁰⁾。



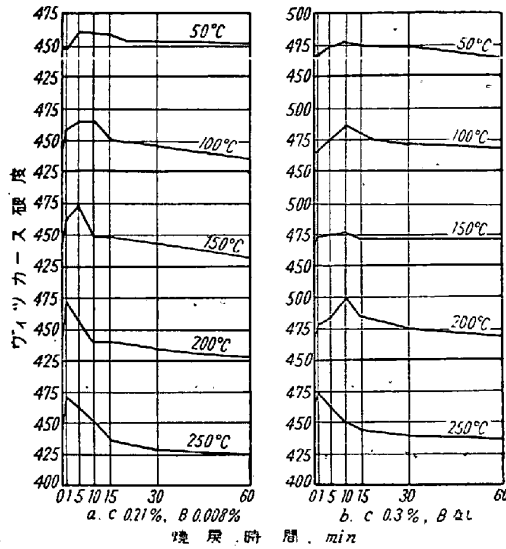
第5圖 0.63% C, 0.87% Mn 鋼のS曲線の形態に及ぼすB処理の影響 [U.S.S.; Atlas of Isothermal Transformation Diagrams]

(7) 焼入性に關連してB鋼の等温變態の舉動も多くの實驗者によつて研究された¹¹⁾¹⁵⁾²⁷⁾。第5圖は U. S. Steel Corp. の等温變態圖集より引用した 0.63% C, 0.87% Mn を含む炭素鋼に關するS曲線であるが、微量のB処理はパーライト及びベイナイトの生成速度を遅滞させ、S曲線の鼻を右方に移動させるが、その温度には變化がなく、又高温側にも影響はないが、低温側では變態線(特に變態開始線)を右方にずらせる作用がある。しかし、さらに低温側のマルテンサイト變態範囲には變化を與えない。他の合金鋼のS曲線に於てもこの傾向は何れも同様である。このことはB鋼が焼割れの危険なく焼入性を増加することを示している。

(8) 微量Bのかゝる焼入性増加の機構或は原因については、種々の推察、意見が發表されているが、未だ満足すべき説明はなく、實驗的にも全く證明されていないから、この原因の究明は今後に残された課題である。従來提唱された意見としては、(a) Bがオーステナイトに固溶し、これが變態速度を遅らせるとするもの、(b) Bが鋼中の他の元素の状態を變化させること、特に脱酸と密接な關係があるとするもの等がある³³⁾。しかし、Chandler-Bredig²⁷⁾はBの効果は斯る單純なものではなく又B窒化物の生成によるものでもなく、共存する Si, Al, Ti, Zr等の元素の窒化物を極めて微細な状態に分

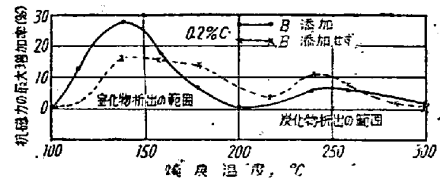
散させることに由ると考えている。

(9) この窒化物或は窒素との関係については、さきに引用した東北大今井(勇)一今井(彦)の詳細な研究⁵³⁾があり、Bの挙動を解明する重要な端緒が得られた如く考えられる。即ち、Bの硬化作用を極めて微細な窒化物の析出動作に基因するものと考え、焼戻、恒温処理時に於けるこれら窒化物析出の状態を硬度變化、抗磁力變化等によつて追究した。例えば第6圖の如くB鋼に於ける窒



第6圖 低温焼戻に際して現れる窒化物析出による硬度増加に及ぼすB添加の影響⁵³⁾

化物の析出の最大點は、焼戻温度の上昇と共に短時間側に移動し、200°C附近で特に速であるが、Bを含まない試料では250°C附近より初めて短時間側に移行する。即ち、Bの添加は焼戻に際して窒化物の析出を容易にするものと思われるが、さらに抗磁力變化を測定した結果(第7圖)は、この關係を一層明瞭に現わしている。又、この事實は恒温処理に於ても認められ、B處理は窒化物の析出開始を促進し、これに反して炭化物の析出開始を遅滞させることを知つた。



第7圖 低温焼戻に際して現れる窒化物及び炭化物析出による抗磁力變化に及ぼすB添加の影響⁵³⁾

VII. 硼素處理鋼の熱處理と性質

この様に焼入性増大を目的とした微量のB處理が、その鋼の加工性、機械的性質、化學的性質に如何なる影響を及ぼすかに就て、すでに若干の實驗室的試験と多くの工業的經驗が報告されているが、現在までの結果は、大體に於てBの影響は無いものとされているが、不明の點も多い。

即ち、鍛造、歴延等の加工性²²⁾⁵¹⁾、同一熱處理に於ける機械的性質²²⁾、強度—靱性の關係⁶⁵⁾、耐磨耗性²⁶⁾、クリーブ抵抗⁵⁶⁾、耐熱性、低温衝擊抵抗¹²⁾²²⁾等或は切削性²⁶⁾⁵¹⁾、熔接性²²⁾等にも見るべき影響はなく、又、スケール抵抗、脱炭の程度、耐蝕性²⁶⁾等の化學的性質にも認められる程の差異を示さないものと結論された。結局焼入性を目的とするための適量添加では、B含有量は極めて微量であるから、これら性質には殆んど無影響である如く思われる。しかし、オーステナイト粒度はこの程度の微量ですでに粗大化することは、さきに述べた通りであり、又Bの小過剰(約0.005%以上)は衝擊値の低下、及び焼戻脆性の増大を招來することが知られている¹⁹⁾。

但し、實用鋼に關しては、B處理は中炭素鋼の微粒組織を示し熱間加工性を改善するとの報告もあり¹¹⁾、同一強度の低合金鋼に對し、Mo添加に比して靱性を改良したとのデータもある⁴⁾。(第3表)

しかし、B處理鋼の目的は、焼入性の附與によつて従

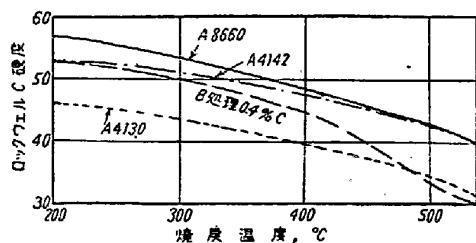
第3表 0.5% Ni, 0.5% Cr 鋼の機械的性質に及ぼす Mo 添加及びB添加の影響⁴⁾

試料番	化學成分, %				B 添加合金	焼戻温度 °C	σ_s (kg/mm ²)	σ_B (kg/mm ²)	ζ (Z', %)	ψ (%)	HRC	Kb, (Izod), (ft.lb)
	C	Mn	Si	Mo								
1	0.46	0.89	0.26	0.24	—	235	173.6	178.6	8.5	35.7	50.5	12.7
2	0.47	0.87	0.25	—	Carbortan	235	175.2	191.2	8.5	31.8	51.0	12.0
3	0.46	0.95	0.27	—	Bortan	235	138.0	173.8	11.0	41.7	49.5	15.7
4	0.42	0.93	0.29	—	B-Zr 合金	235	161.0	175.1	8.0	27.9	50.5	16.7
1	同	同	同	同	同上	485	110.0	119.3	13.5	45.1	38	26.0
2	同	同	同	同	同上	485	94.0	103.5	14.5	45.6	32	38.0
3	同	同	同	同	同上	485	94.7	101.7	15.0	49.6	34	31.7
4	同	同	同	同	同上	485	93.5	101.7	14.0	45.3	34	24.3

來の合金鋼に代替することにあるから、その性質の比較も同一焼入性を示す他種の合金鋼のそれと對比させることが實用上は意義があるので、この觀點からするB鋼の評価が廣く行われている。

即ち、鍛造加工に際しては、B鋼のスケールは相當する従來鋼より合金元素量が少いため剝離し易い利點があり⁵¹⁾⁵⁵⁾、型鍛造に際しても同様の比較を行えばダイスの壽命が60~70%増大するという⁵¹⁾。又、鍛造品の切削加工に於ても、同様の意味で焼鈍硬度はB鋼の方が、従來鋼より低く従つて切削速度を著しく増大し得ることはRobbins-Lawless⁵¹⁾等の強調する通りであるが、さらに焼鈍作業も相當する従來の合金鋼より容易であることは勿論で²⁵⁾⁶⁵⁾、この點も現場的には重視し得る利點である。

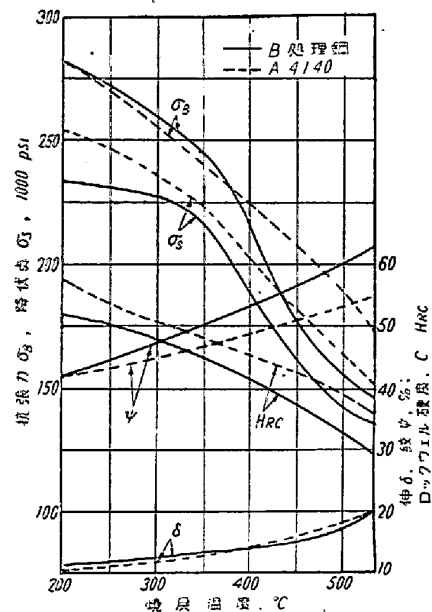
第8圖⁵¹⁾及び第9圖⁵¹⁾はB處理炭素鋼と、低合金鋼との焼戻性能曲線の比較であるが、Bは焼入性以外の効果に関しては、他のNi, Mn, Cr, W, Mo等の合金元素の作用を代行し得ないから、耐焼戻性は當然低く、従つて同一強度を得る爲の焼戻温度を低く定めることが必要で、例えば、AISI 9440鋼に對するB處理 1045鋼では100~150°F、4145鋼に對するB處理 1345鋼では150~200°F 焼戻温度を低くすべきである⁶⁵⁾。



第8圖 B鋼と他の合金鋼との焼戻硬度に於ける比較⁵¹⁾

B處理肌焼鋼の特性についても研究されたが、上と同様の意味の比較に於ては、焼入性の増大の他に、残留オーステナイト及び不溶炭化物の減少が期待されるが、他面高炭素組織に於てはBの効果が消滅することによつて知られる通り²¹⁾ 滲炭層の炭素量の高いことは不利であり、さらに前記の如く高温處理はBの効果を増少させることも知られているから¹⁰⁾、肌焼鋼の熱處理については、この2點を考慮する必要がある⁶⁵⁾。

又、Bの合金元素としての作用は、W, Mo, V等の炭化物生成元素とは異なるから、高温強度、クリープ、耐熱性等の特性は改善し得ないし、又Ni, Cu等の固溶性元素とも異なるから、低温衝撃抵抗等についても前者に代る効果は期待し得ない理である。



第9圖 B處理0.45% C鋼とCr-Mo (C 0.4, Mn 0.85, Cr 1.0, Mo 0.2%)鋼との焼戻性能曲線の比較⁵¹⁾

VIII. 硼素處理鋼の工業的應用

以上列挙した通り、微量のBによる鋼の處理は、その焼入性の増加が唯一の目的であつて、その他の特性に對してはほとんど改善効果はない。従つて應用の範圍にも自ら限度があることは當然であるが、3元又は4元合金鋼として、他の所要性質を附與することも可能である。現在までの米國に於ける實用鋼も、かゝる見地から規定されている如くであるが、一般にB處理鋼は主として構造用強靱鋼及び肌焼鋼として利用され、普通炭素鋼と従來の高合金鋼との中間の系統の鋼種に充てることに主眼を置いている⁵¹⁾⁶⁵⁾。米國に於ては現在耐熱鋼、兵器構造用鋼等にNi, Cr, Mo, Nbその他の合金元素が多量に消費されるため、一般構造用鋼に使用する合金元素はかなり窮迫しているので、大戦中に使用されたこのB處理鋼が再び新しく認識されるに至つたという。

焼入性のみの觀點よりすれば、同一炭素鋼では0.003% B處理によつて1.58倍の焼入性が得られ、これはSi 0.87%, Ni 0.79%, Cr及びMo 0.27%, Mn 0.12%に相當するといわれ¹¹⁾、或はNE 9440及びSAE 4640鋼に於て0.003~0.004% Bは、0.6% Cr, 1.2% Ni, 又は0.25% Moと置換し得ると言う⁷⁾。さらに、Udy-Rosenthal¹²⁾は、焼入性のみに對しては現用のNi-Cr-Mo、又はMn-Mo鋼のMoはすべてBで代替することも可能であると稱している。

B處理はすでに各種の炭素鋼^{13) 21) 25) 56)}、鋳鋼⁵⁷⁾、

Ni-Cr⁴⁾のNi-Cr-Mo¹²⁾, Mn-Mo⁴⁾, Cr-Mo 鋼⁷⁴⁾等その他多くの鋼種に對して研究されたが、現在 AISI の規格には中炭素鋼 (14BXX), Cr 鋼 (50BXX), Ni-Cr-Mo 鋼 (80BXX, 81BXX) その他若干の鋼種が含まれ何れも従來鋼より Ni, Cr, Mo の相當量が減少している。例えば、80BXX 鋼は同一C量の 8600 と同程度の焼入性を有し、約 Ni 0.3, Cr 0.25, Mo 0.12% を含有し、又 81BXX 鋼は従來の 4100 に代用し得る様考慮されている⁶⁷⁾⁷²⁾⁷³⁾。

現在米國に於ける B 鋼の應用範圍はすでにかなり多岐に涉つてゐるが、例えば、肌焼鋼 (41B18), 齒車 (50B20), ボルト (40B40), 車軸 (50B47) 及び發條用 (50B60) 等は何れも満足な成績を示し、又、中炭素鋼ではボルト、道具類に廣い應用面があり、さらに高應力シャフト (86B45), 普通シャフト (81B45) 等も實用されてゐる⁶⁶⁾⁵¹⁾。

IX. 結 言

約 10 年以前より米國に於て新しく發展した B 處理鋼について、近年に至るまでの諸外國及び本邦の研究の經過と、その主要な結果を要約した。この新しい特殊鋼は發見後すでに短年月の間に工業的に多量に製造されるに至つたが、その理由は資源的には米國に於ても有利な金屬ではないに拘らず、使用量の微量であることと、従來の合金元素の節約に極めて有効であることによるもので今後いよいよ本鋼の需要は増大するものと思われる。

Ni, Cr, Mo 等の合金元素の不足は世界的な現象であり、殊にわが國では今後に豫想される特殊鋼の需要の増加に伴う合金元素の入手難が必至と見られるので、この鋼の實用化は洵に重要な課題であるが、この觀點に立脚して、すでに東北六今井博士等の基礎的研究を始め、住友金屬、日産自動車等に於ても實用化試験が行われているが、最近三島博士を委員長とする官廳、學會、研究機關、特殊鋼メーカ綜合の「ボロン鋼研究懇談會」が成立發足したから、本邦に於ける本鋼の理論的、工業的發展も期して俟つ可きものがある。

なお、鋼中微量 B の分析法については多くの問題があり、本邦に於ても種々研究されているが、この點に關しては紙數の都合ですべて割愛したことをお詫びする。

X. 鐵鋼に及ぼす硼素の影響に關する文献

最近 10 ヶ年 (1948 年以降) に於ける B 處理鋼及びその他若干の B の影響に關する文献を輯録した。本稿中に引用したものは肩番號によつて検索し得るが、1942 年

以前の引用文献については省略したので、これらは既刊の拙稿及び輯録⁴⁷⁾⁵⁵⁾を参照して頂きたい。

- 1) 有利な B 鋼
N. F. Tisdale; *Iron Age*, Feb. 4 (1943): *Iron and Steel*, **16**, June (1944), 443
- 2) 種々の調質合金鋼の窒素硬化に對する傾向
H. Cornelius, W. Trossen; *Arch. Eisenhüttenw.*, **17** (1943/44), 77
- 3) 構造用炭素鋼の改善
A. P. Gulyaev, Halperin; *Stal*, **3** (1943), 49
- 4) B+Ti 熱處理鋼
G. F. Comstock; *Metals and alloys*, May (1943): *Iron and Steel*, **16**, Sep. (1944), 545
- 5) B を含む特殊添加合金
Iron and Steel, **17**, Apr. (1944), 312
- 6) 鋼に對する B の影響
R. B. Dorbett; Thesis for Ph. D. Degree, Univ. Pittsburgh, June (1944)
- 7) NE 9440 及び SAE 4640 鋼に對する B 添加
G. F. Comstock; *Iron Age*, **154**, July 13 (1944) 48
- 8) 鋼中の B
R. W. Gurry; *Iron and Steel*, **17**, Sept. (1944) 601
- 9) 鋼の焼入性に及ぼす合金元素の影響
W. Craft; *Tr. A. I. M. E.*, **158** (1944), 157
- 10) B 處理鋼の焼入性に及ぼす諸因子
R. A. Grange, T. M. Garvey; *Tr. A. S. M.*, Prep. 10 (1945), 39 pp: *Steel*, **118**, June (1946) 98: *Ind. Heat.*, **13** (1946) 1442
- 11) 鋼に及ぼす B の影響
R. B. Corbett, A. J. Williams; U.S. Bur. Mines, Rep. of Invest. No. 3816, June (1945): *Iron Age*, **156**, Oct. 11 (1945), 54
- 12) 數種の合金鋼中の B
M. C. Udy, P. C. Rosenthal; *A.I.M.E., Met. Tech.* **13**, T. P. No. 2085, (1946), 29
- 13) B を添加した構造用炭素鋼
S. Zh. automobil'naya Prom., No. 7/8 (1946) 18
- 14) 熔鐵中に於ける B—O 平衡
G. Derge; *A.I.M.E., Met. Tech.* **13**, T. P. No. 2004, (1946), 15 pp
- 15) B 鋼の製造

- Ordnance Dept.'s Res. & Developm. Board;*
R. A. D. Publ. 1448, Aug. (1946)
- 16) 鐵及び鋼に於ける B.
R. S. Dean, B. Silks; Bur. Mines., Inform. Circle. 7363, Sept. (1946), 56
- 17) 鋼中の B
R. S. Archer; Metal Progr., 50 (1946), 815
- 18) オーステナイト恒溫變態の動力學に對する B, V の影響
S. D. Brick, V. E. Neimark, R. I. Entin; Stal, 6 (1946), 661
- 19) 微粒鋼の纖維狀組織生成に對する B の作用
S. I. Sakhin, N. N. Rodionov, N. G. Vergazov, A. D. Gasarov; Stal, 6 (1946), 666
- 20) B 鋼の焼入性に及ぼす脱酸の効果
G. H. Boss; Metal Progr., 51 (1947), 265
- 21) B 鋼の焼入性に對する C 含有量の影響
G. H. Rähler, C. D. Armstrong; J. Res. Natl. Stand., 39 (1947), 67
- 22) 實驗的及び工業的に熔製した B 鋼の諸性質
J. G. Digges, F. M. Reinhart; J. Res. Natl. Bur. Stand., 39 (1947), 67
- 23) 鋼の合金元素としての B
D. E. R. Hughes; Engg Mat., 5, Feb-Apr. (1947), 14
- 24) 鋼の性質改善に對して低廉な B 添加
S. A. E. Jour., 55, apr. (1947), 65
- 25) 含 B 鋼の評価
W. F. Toerge; Stal, 121, No. 23, (1947), 93
- 26) 中炭素鋼中の B. 一機械的性質, 耐蝕性及び焼入性について
G. P. Contractor, J. S. Vatchagandbly; Met. Treatmt., 14, 49 (1947), 3
- 27) 鋼中の B
M. C. Udy; Metal Progr., 52, Aug (1947), 257
- 28) 鋼の焼戻性 (Temperability) に及ぼす B の影響
G. Joly; Fonderei, No. 21, Sept. (1947), 812
- 29) 鋼の焼入性に對する Al 及び B の影響
B. E. Somin; Stal, 1 (1947), 630
- 30) B 鋼のオーステナイト結晶粒の成長に對する動力學
S. M. Vinarov; Compt. rend., 55, No. 9 (1947) 809
- 31) “B 處理鋼に關する報告”
S. A. E. Inc., New York, N.Y. (1947), 72
- 32) B 處理鋼
Bl. Furn. St. Plant, 36 May (1948), 345
- 33) 高純度鋼及び市販鋼の焼入性に對する B の影響
T. G. Digges, C. R. Irish, N. Carville; J. Res. Natl. Bur. Std., 41, Dec (1948), 545
- 34) B 處理鋼の焼入性及び切欠靱性に及ぼす N₂ の影響
T. G. Digges, F. M. Reinhart; Tr. A. S. M., 40 (1948), 1124
- 35) テルミット法の研究 I (フェロ・ボロンの製造について)
岡本. 依田; 金屬學會誌, 12 No. 7~12 (1948) 27
- 36) フェロ・ボロン
G. K. Herzog; A. S. M. Metals Handbook, (1948 Ed), 240
- 37) 含 B 鋼の研究について (I)
今井(勇)—今井(彦); 金屬學會誌, 12, (4), 講演概要 (1948), 29
- 38) 含 B 鋼の研究について (II)
今井(勇)—今井(彦); 同上, 13, (2), 講演概要 (1949), 38
- 39) 特殊鋼熔製に關する基礎的研究 I —熔鐵中に於ける O と B の平衡
柳橋, 河野; 同上, 35
- 40) 熱間加工用 B 鋼
G. F. Comstock; Steel, 124, Apr. 25 (1949), 95
- 41) 鋼の焼入性に及ぼす B
Steel, ib., 105
- 42) 新しい高温用低合金鋼
G. F. Comstock; Metal Progr., 56, July (1949) 67
- 43) 硼素鋼 (I), (II), (III)
長谷川; 金屬, 19, No. 8 (1949), 8: No. 9 (1949), 11: No. 10 (1949), 33
- 44) 鋼に對する B 及びその類似元素添加の影響
R. A. Grange, W. B. Seens, W. S. Holt, T. M. Garvey; Bl. Furn. St. Plant, 37, Nov. (1949), 2: Tr. A. S. M., Prep No. 5, (1949); 31 pp
- 45) 鋼の硬化に對する B の作用
L. D. Gruberg; Can. Met. Metallurg. Inst., 12, No. 20-1 (1949), 34
- 46) B を含む低合金低炭素鋼の機械的性質
W. E. Bardgett, L. Reev; J. Iron. St el Inst. London), 163 (1949), 277: Rev de Met., 47

- 2 (1950), 47
- 47) B鋼研究委員會 (Irsid) 報告
A. Kohn; Rev. de Mét., 46, 12 (1949), 859
- 48) 含B鋼の研究 (Ⅲ)
今井(勇)一今井(彦); 金屬學會講演概要 (1949) 11月, 12
- 49) 含B鋼の研究 (Ⅳ)
同上, 同, (1950), 4月, 7
- 50) 半硬鋼に對するBの影響
R. Potaszkin; Rev. de Mét., 47, Jan. (1950), 55
- 51) B鋼の工業的用途
F. J. Robbins, J. J. Lawless; Metal Progr., 57, Jan (1950), 81
- 52) B-Mo 鋼
Circulaire d' Inform. Tech., 7 [3~5] (1950), 190
- 53) 含硼素鋼の研究 (第1報), (第2報)
今井(勇)一今井(彦); 金屬學會誌, B 14, [3], (1950) 52; 同前, 57
- 54) 鋼のオーステナイト變態の動力學に及ぼすBの影響
N. T. Gudtsov, T. N. Nazarova; Izvest. Akad. Nauk. SSSR, Otdel Tekh. Nauk (1950), 386
- 55) “鐵鋼に及ぼす特殊元素の影響”
長谷川; (1950) 10月, 500 pp
- 56) B鋼のクリープに關する研究
G. Delbart, M. Ravery; Compt. rend., 231, Dec (1950), 1498
- 57) 含B鋼の研究 (第3報)
今井(勇)一今井(彦); 金屬學會誌, B 15 [1] (1951), 44
- 58) Cr-Ti-B 鋼の研究 (Ⅰ)
佐藤, 矢島; 金屬學會講演概要, (1951), 4月, 11.
- 59) 含B鋼の研究 (Ⅴ)
今井(勇)一今井(彦); 同上, 10
- 60) 含B鋼の研究 (Ⅶ)
同上; 同, (1951), 10月, 74
- 61) 合金元素節約のためのB處理鋼
W. Patton; Iron Age, 167, May 1 (1951), 127
- 62) B鋼に關する研究
R. Potaszkin, M. Japart; Rev. de Mét., 48, may (1951), 379
- 63) 時局下のB鋼
P. R. Wray; Steel, 129, July (1951), 78
- 64) 現時局下に於けるB鋼の役割
P. R. Wray; Mat. & Methods, 34 (1951), 57
- 65) 構造用及び滲炭用B鋼
P. R. Wray; Metal Progr., 60, July (1951), 52
- 66) B鋼 (Ⅰ)~(Ⅴ)
D. I. Brown; Iron Age, 168, (1951), [1], 79:[2] 85:[3] 102:[6] 75
- 67) B鋼と代用鋼
Metal Progr., [Data Sheet], 60, Aug. (1951) 80 B
- 68) B鋼
Metallurgical Advisory Board; ib. 81
- 69) 工業用B鋼
C. M. Parker; Steel, 129, Oct 15 (1951), 76
- 70) Ti-B 鋼
H. R. Ogden, R. I. Joffe; J. Metals, 3, Trans. 191 (1951), 335
- 71) 鋼に對する合金元素としての窒素 (輯録) Ⅲ
今井(勇)一石崎; 金屬學會誌, A 15, [10], (1951), 347
- 72) B鋼の代表的焼入性曲線
Metal Progr., [Data Sheet, 61, Feb. (1952), 80 B: Mat. & Methods, Mar. (1952), 123
- 73) B鋼の用途とその理由
H. B. Knowlton; Steel, 130, Mar. 24 (1952) 84
- 74) 含B強靱鋼に關する研究Ⅰ. (Cr-Mo 鋼の焼入性及び強靱性に及ぼすB添加の影響)
河井, 井上, 小川; 鐵鋼協會, 講演大要録; (1932), 4月, 99
- 75) 含B鋼の研究 (Ⅶ)
今井(勇)一今井(彦); 金屬學會講演概要, (1952) 4月, 57
- 76) 英國に於けるB處理低合金鋼
W. E. Bardgett; Iron Age, 169, No. 2 (1952), 81
- 77) “Boron Steel”, ASM, (1951)
- 78) “Boron-Treated Steels in Commercial Heats”, SAE, (1952)