

鋼に含まれる珪素に関する研究 (II)

フェライトの材力に及ぼす珪素の影響に就て

(日本鐵鋼協會第 26 回講演大會講演, 昭 16. 10. 東京)

太 田 雞 一*

EFFECT OF SILICON ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF FERRITE

Keiiti Ota

SYNOPSIS:—Effect of silicon on the mechanical properties of ferrite was studied and the result summarized as follows:

(1) Silicon is the very effective element for enhancing both the tensile strength and Izod impact value of ferrite.

(2) The impact value of pure iron rapidly drops when the silicon becomes in excess of 2%. The reason does not lie in that the toughness of ferrite has decreased as the silicon dissolved in ferrite, but in that the grains become extraordinarily greater with the increase of silicon.

(3) Consequently, good toughness may be imparted to the high silicon steel with 2-4% Si, when a grain refinement is devised by adding a third element or by forging operation.

Seeing from the result of the present study, the grain control is essential in using a large quantity of silicon as alloying element in structural steels. For instance, the following alloy steel (C 0.03%, Si 2.5%, Ni 5.0%) was obtained which shows excellent mechanical properties; tensile strength 85 kg/mm², elongation 40%, reduction of area 60% and Izod impact value 90 ft-lbs.

目 次

- I. 緒 言
- II. 試 料
- III. 材力に及ぼす珪素の影響
 - 1. 硬 度
 - 2. 抗張試験成績
 - 3. アイゾット衝撃試験
 - 4. Yensen の研究
- IV. 結晶粒度に及ぼす珪素の影響
 - 1. 組 織
 - 2. フェライト粒度
 - 3. オーステナイト粒度
- V. 高珪素鋼の結晶粒度と靱性との関係
 - 1. 高珪素鋼の脆性
 - 2. 鍛錬による粒度の調整
 - 3. 第三元素の添加による粒度の調整
 - 4. 強靱高珪素鋼の誕生
- VI. 結 言

I. 緒 言

本研究の第 1 報¹⁾に於て、構造用低 Ni 鋼の Si 含有量が靱性特にアイゾット衝撃値に大きな影響を有することを述べ、其原因の一つとして Si が増加するとフェライト靱性が増加すると考へられることを述べた。ところがフェライ

トの材力に及ぼす Si の影響に就ては昔から議論があつて、2% まで靱性の減少なしに抗張力を増加すると云ふ説と、靱性の犠牲に於てのみ抗張力を増加すると云ふ説とが相並んで行はれて居る。研究室で行つた基礎研究の結果は例外なく前説を支持して居るにもかゝらず、Si はフェライトを硬くするがそれだけ脆くすると云ふ考へ方が依然として跡を絶たないし、また事實その方が吾々の経験と良く一致する場合が多い。Bain²⁾は 1939 年に著作した「鋼に含まれる元來の作用」に於て、Si はフェライトに固溶し之を硬化せしむるも靱性を低下す。其作用の強さは P と Mn との中間に位すと明記して居る。

何故に斯様な相反する説が行はれるのであろうか。Si を合金元素として積極的に構造用鋼に利用するには先づ以て此點を解決して置くことが肝要である。筆者は此見解の下にフェライトの材力に及ぼす Si の影響を調べた。

本報告は其結果の概要を述べたもので、Si はフェライトの抗張力を増加すると同時に靱性を増加する極めて有効に合金元素であるが、A₁ 變態を上昇する作用が強く其爲に Si 2% を超すと結晶粒が著しく増大しフェライトの集合體である純鐵の靱性を急激に減少することを述べ、合金元素として Si を積極的に利用するには結晶粒の調整を計ることが要訣であると考へられることを述べる。

* 日本製鋼所室蘭技術研究所

II. 試料

本研究に於ては試料の調製宜しきを得ることが極めて必要で結果の良否は懸つて此點に在ると云つてもよい程である。C 0.14~0.26%, Mn 0.14~0.36% を含む試料を用ひた Hadfield³⁾の研究は論外としても、其後に行はれた研究で現在廣く引用される Baker, Paglianti⁴⁾等の研究もCは0.03~0.05% 程度に下つたが材力及可鍛性に影響を持つ Mn 及 S をそれぞれ 0.04~0.20% 及 0.03~0.04% 含み、結晶粒度に大きな作用を有する Al を 0.01~0.10% 含む試料を用ひて居る。従つて之等の實驗結果も其正確度は餘り高いとは云へない。

フェライトに及ぼす Si の影響を調べた研究で最も純度の高い試料を用ひたのは Yensen⁵⁾で、電解鐵と低炭素フェロシリコンを原料とし真空熔解法によつて試料を調製したから純度の點では申分がない。たゞ熔解で 500~600g しかし熔解出來ないから Yensen の主要目的である状態圖の研究や磁氣に關する性質の測定には充分であるか材力を調査するには量が足らない憾がある。

本研究に於ては此等の事情を考慮し材力に影響を及ぼさない程度の純度を持ち、しかも各種の材料試験を行ふに十分な量を得ることを目標として試料を製造した。

原料には開原産の海绵鐵を鹽基性平爐で所謂ヘツシュ法によつて精製し不純分を出來るだけ除去したものを用ひた。これをクリプトル爐で熔解しメタリツクシリコンを投入して Si 量を加減し約 4kg の金型のインゴツトケースに鑄込んだ。鋼塊の成分は第 1 表に示す通りで Si 量を 0.03~7.74% に亘つて變化せしめた。純度は Si 量によつて多

第 1 表

番 號	化學成分 %					
	C	Si	Mn	P	S	Ni
1	0.24	0.03	0.01	0.007	0.007	—
2	0.24	0.20	0.02	0.008	0.007	—
3	0.26	0.45	0.02	—	—	—
4	0.28	0.61	0.01	0.008	0.009	—
5	0.26	0.82	0.02	0.009	0.008	—
6	0.32	1.44	0.03	0.010	0.008	—
7	0.36	1.96	0.03	—	—	—
8	0.34	2.48	0.03	0.009	0.009	—
9	0.40	3.04	0.03	—	—	—
10	0.38	3.54	0.04	—	—	—
11	0.41	4.56	0.04	0.010	0.010	—
12	0.40	5.58	0.04	0.010	0.009	—
13	0.48	7.74	0.05	0.012	0.010	—
14	0.32	2.50	0.03	—	—	1.02
15	0.34	2.48	0.03	—	—	2.98
16	0.30	2.52	0.02	—	—	5.03

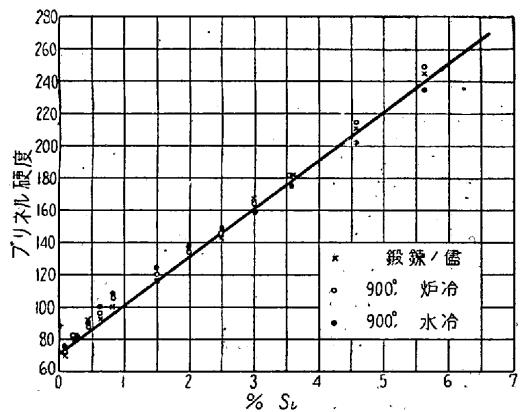
少の違はあるが大體 C 及 Mn 0.04% 以下、P 及 S 0.01% 以下で、材力を調べるには充分と考へられるものが得られた。

鋼塊は底部を約 15 mm 切捨て空氣槌で 13 mm の角棒に鍛延した(鍛造比約 16)。Si 6% 以下のものは樂に鍛鍊が出來たが Si 7.74% を含むものは鍛鍊中に破壊し可鍛性を缺くことを示した。

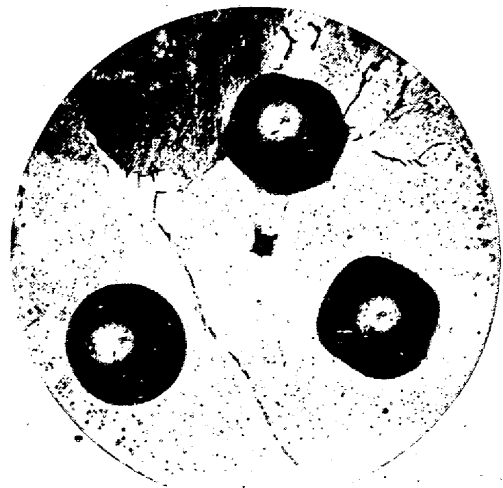
III. 材力に及ぼす珪素の影響

1. 硬 度

硬度の測定は主としてブリネル試験機によつた。試料(1)~(12)に就て硬度を測定した結果は第 1 圖に示す通りで硬度は Si 量に比例して直線的に増加する。後述する様に Si が 2% を超えるとフェライトの結晶粒が異常に大きくなるので硬度の測定が不正確になるのは已むを得ない。第 2 圖に示す様に結晶は軸の方向により硬度に違があり、其爲めにブリネルボールの凹みが著しくいびつになるからである。



第 1 圖



第 2 圖

2. 抗張試験成績

抗張試験の成績は第3圖及第4圖に示す通りである。

抗張力は S_i 量に比例して直線的に増加し兩者の間に次の實驗式が成立する。

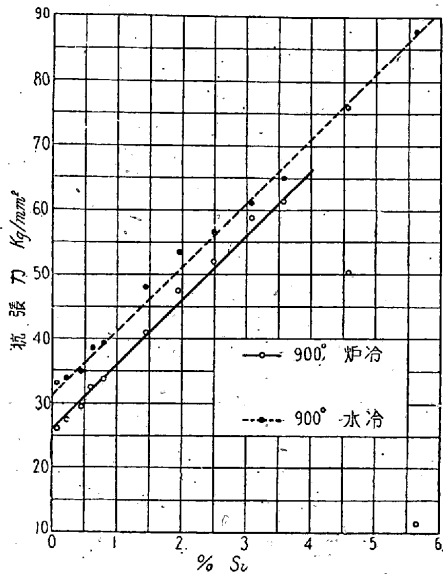
$$R = 26 + 10 S_i \dots\dots\dots (1)$$

$$R = 31 + 10 S_i \dots\dots\dots (2)$$

茲で R - 抗張力 (kg/mm^2)

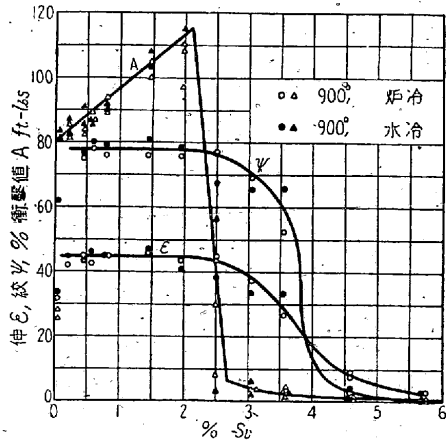
$S_i = S_i$ 量 (%)

但し (1) 式は焼鈍した場合で S_i 約 4% まで, (2) 式は焼入した場合で S_i 約 6% まで適用出来る。



第 3 圖

伸及絞の S_i 量による變化は第 4 圖に示す通りで, S_i 2.5% までは大體伸 45%, 絞 80% に一定して居るがそれ以上 S_i が增加すると次第に減少し 4% 以上では伸絞とも 10% 以下になる。

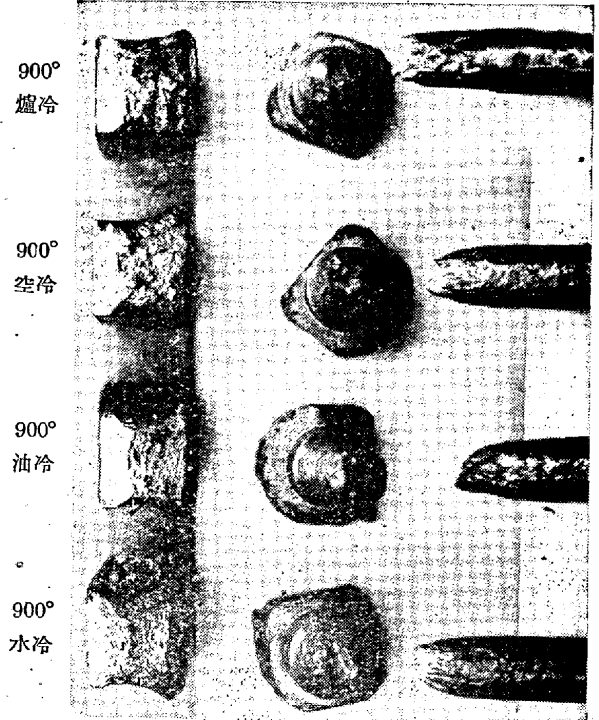


第 4 圖

試験片の破断狀況は第 5 圖 (1)~(5) に示す通りで, S_i 0.3% 以下及 1.5~3.5% のものは三角形に近い著しく不規

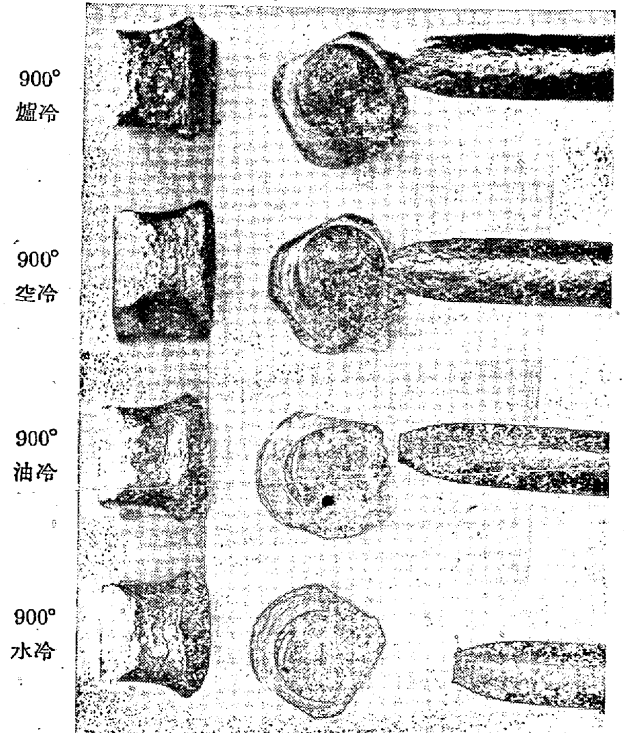
則な形に絞れて破断するから正確な絞の測定は出来ない。
 S_i 0.4~1.0% の範圍では纖維狀の綺麗な破面を呈し, 4% 以上では全々局部絞なしに破断し所謂 G 破面になる。

第 5 圖 (1)



No. 1 S_i 0.03%

第 5 圖 (2)

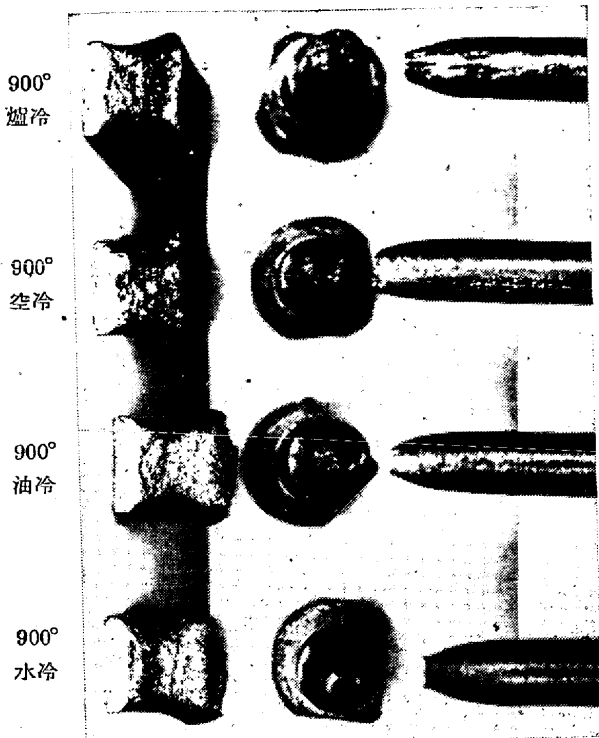


No. 3 S_i 0.45%

3. アイゾット衝撃試験

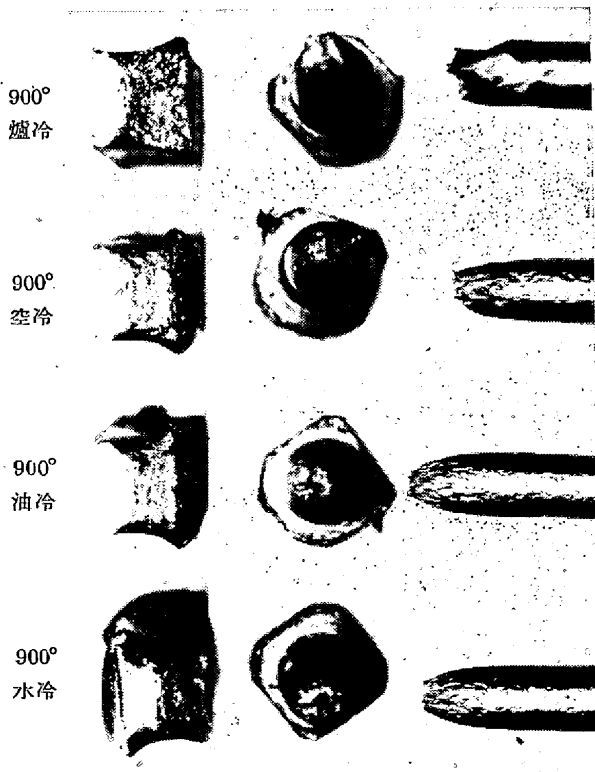
アイゾット衝撃試験の成績は第 4 圖に示す通りである。

第5圖(3)



No. 5 Si 0.82%

第5圖(4)



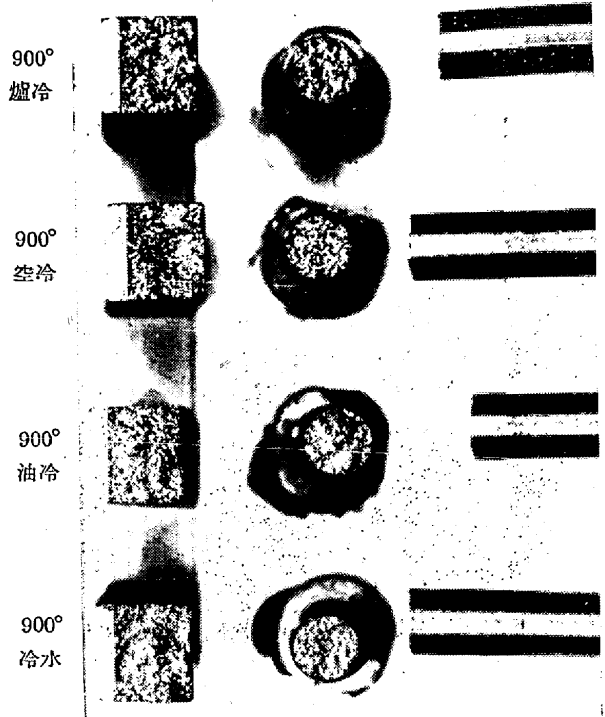
No. 7 Si 1.96%

衝撃値は Si 約 2% までは Si 量に比例して直線的に増加し兩者の間に大體次の實驗式が成立する。

$$I = 80 + 15 Si \dots\dots\dots(3)$$

茲で I=アイゾット衝撃値(呎封度)

第5圖(5)



No. 11 Si 4.56%

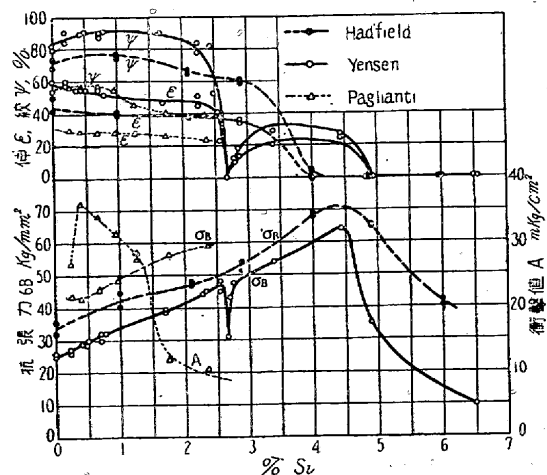
Si=Si 量(%)

Si がそれ以上になると衝撃値は急激に減少し試験片の破面は第5圖(5)に示すやうに粒状になる。

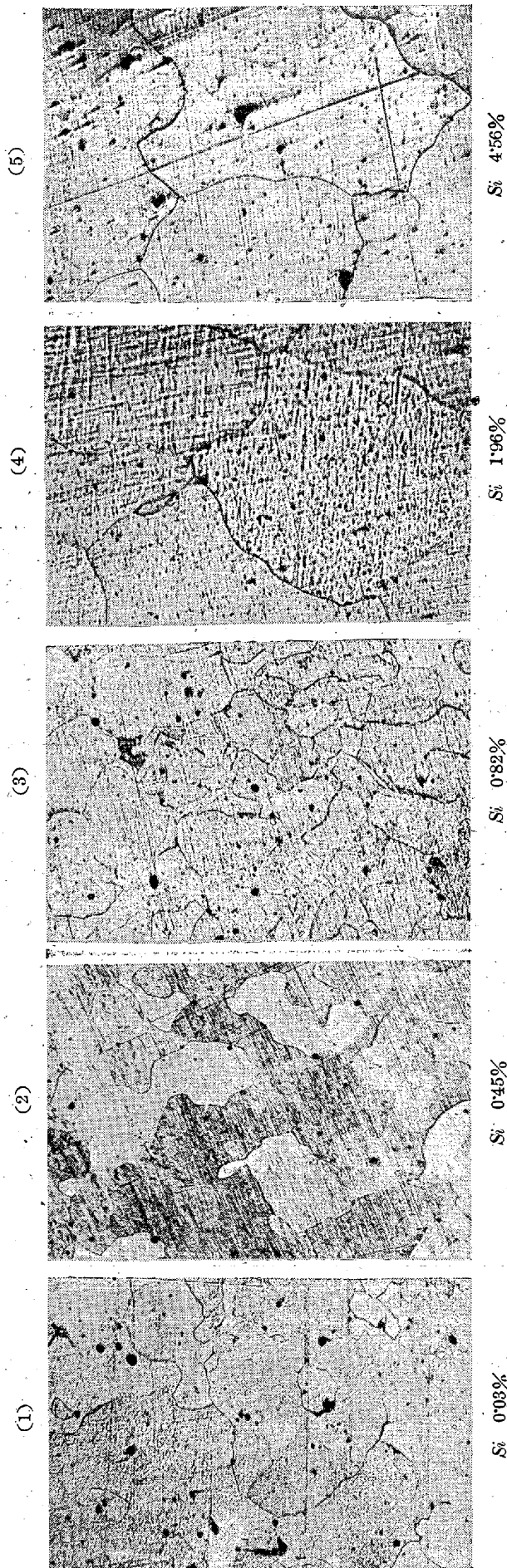
4. Yensen の研究

フェライトに及ぼす Si の影響を調べた文献の中で最も正確度の高いものと信じられて居るものに Yensen⁵⁾ の研究がある。材力に関する測定結果は第6圖に示す通りで、Si 2.6% 附近の非連続點を除けば本研究の結果と大體に於て一致して居る。

Yensen によると Si 2.6% に特異點があつて、其附近では可鍛性乏しく、伸 絞のみならず抗張力も低いとのこ



第6圖



とであるが、其後 Ruder, Corson⁽⁶⁾ 等によつて施行された調査の結果は何れも斯様な非連続点の存在を認めて居ない。

Si 2.6% に於ける特異点の存在するかどうかは別問題として、少くとも Si 2% までは事實上伸及絞の減少なしに抗張力を増加することは總ての基礎研究の一致するところで疑問の餘地はないものと考え。但し衝撃値に就ては第 6 圖に示した Paglianti の研究の様に Si の増加と共に減少することを報告したものが多し。之は後述する様に C の作用に禍されたもので、C の含有量の極めて少い Yensen の試料に就て測定すれば本研究結果と同様少くとも 2% までは Si と共に衝撃値が増加する結果が得られると考へる。

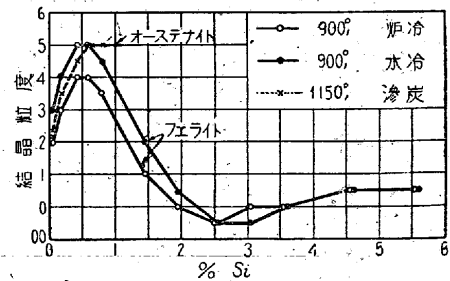
IV. 結晶粒度に及ぼす珪素の影響

1. 組織

衝撃試験片の破片を檢鏡した結果は第 7 圖(1)~(5)に示す通りで、組織は何れもフェライトで Si 量の相違はフェライトの結晶粒の大きさに現はれるに過ぎない*

2. フェライト粒度

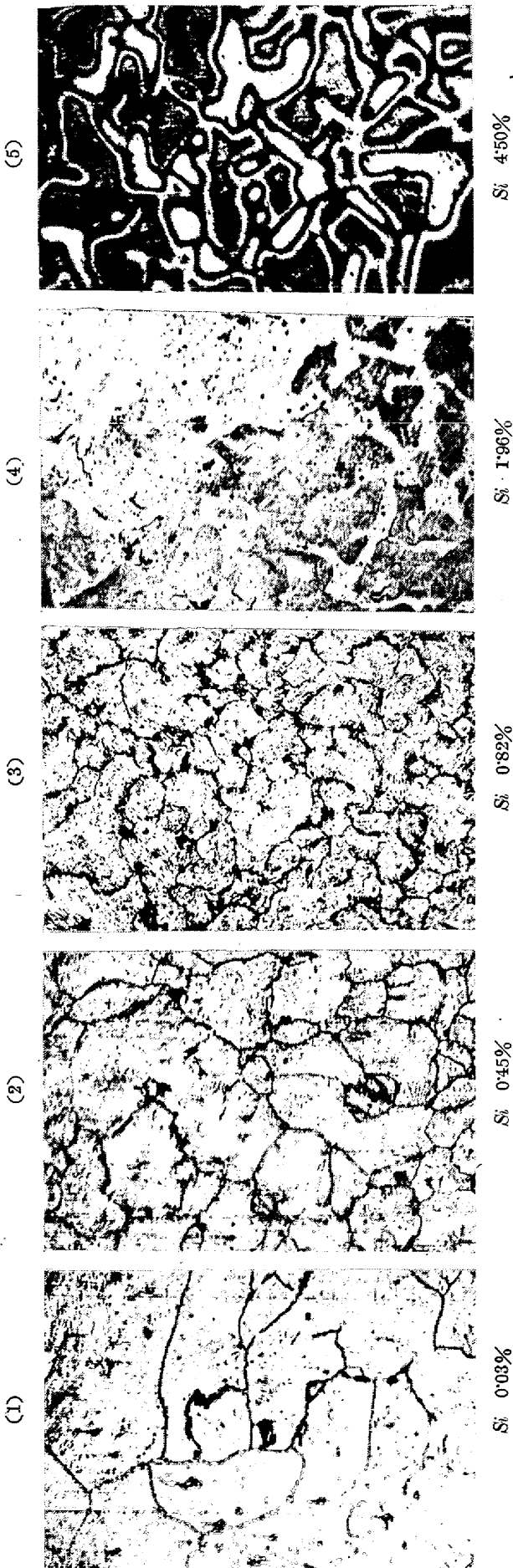
フェライトの結晶粒度は第 7 圖に一例を示す通りで、粒度と Si 量との關係を求めると第 8 圖の様になる。Si 0.4% 以下では Si が增加するに従つて粒度は次第に増加し(結晶粒が細くなることを意味す) 0.6% の邊で最大になり尙 Si が增加すると減少し始め Si 2~4% では 0~00 になる。それ以上 Si が增加すると粒度は僅かに増加する傾向を示すが大した變化はない。



第 8 圖

Si が增加するとフェライトの結晶粒が異状に大きくなることは電氣鐵板用の高珪素鋼に於て良く研究せられてゐるところで、一般工業常識としては Si は結晶粒度を減少する最も有力な元素と考へられて居る。本研究に於ても Si がフェライトの粒度を減少する強力な作用を有することは

* 顯微鏡寫眞は全部 100 倍の倍率で撮影した。



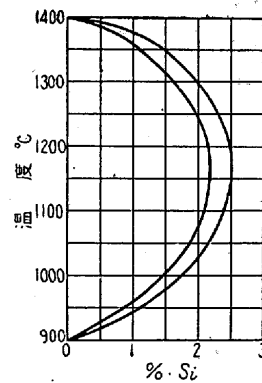
明瞭に現はれて居るが、 Si 0.6% 以下では Si が増加するに従つて粒度が増加することは注意すべき點で、前回の報告¹⁾ に於て構造用低 Ni 鋼の粒度が Si 量によつて異り、 Si 0.3 のものは 0.2% のものに比べて結晶粒が格段的に細かく粒度に於て約 3 號の違があることを述べた事實と軌を一にするものである。

3. オーステナイト粒度

滲炭法によつて $1,150^\circ$ に於けるオーステナイトの粒度を測定した結果は第 9 圖(1)~(5) に示す通りで、粒度と Si 量との關係を求めると第 8 圖に點線で示す様になる。

Si 0.6% までは Si が増加するに従つて粒度が増加し 0.6~0.8% で最大になる。 Si が 1% を超えると第 9 圖(4) に示す様にセメンタイトは切れ切れになつて完全なネットを作らないから粒度の測定が出来ない。第 10 圖に示す状態圖からわかる様に Si 2.5% 以上ではオーステナイトが存在しないから滲炭しても全々セメンタイトが現はれないことは勿論で、ピクリン酸ソーダ液で煮沸すると第 9 圖(5) に示す様に濃淡の縞模様が現はれる。

本研究の結果より見て、オーステナイトの粒度は Si が増加するに従つて増加するものと考へる。



第 10 圖

V. 高珪素鋼の結晶粒度と靱性との關係

1. 高珪素鋼の脆性

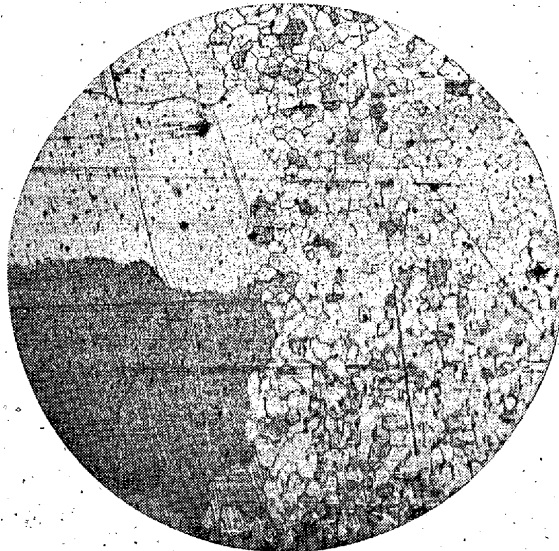
結晶粒度と靱性とは密接な關係があつて細粒のものは粗粒のものに比べて靱性が大きいこと、而して此粒度の影響は伸、絞より衝撃値特にノッチの角度の鋭い試験片を用ふるアイソット衝撃試験に於て著しく現はれることは良く知られて居るところである⁷⁾。

第 4 圖に於て衝撃値の減少が伸、絞に比べて約 15% 低い Si 量に於て始まること、此附近ではフェライトの結晶粒が異常に大きいことから見て、 Si 2~4% を含む高珪素鋼の衝撃値不良には結晶粒度が大きな作用を有することが想像出来る。因つて結晶粒の調整を行ひ、夫によつてどの程度に靱性が回復するかを調べた。

2. 鍛錬による粒度の調整

第 10 圖に示した状態圖からわかる様に Si 2.5% 以上

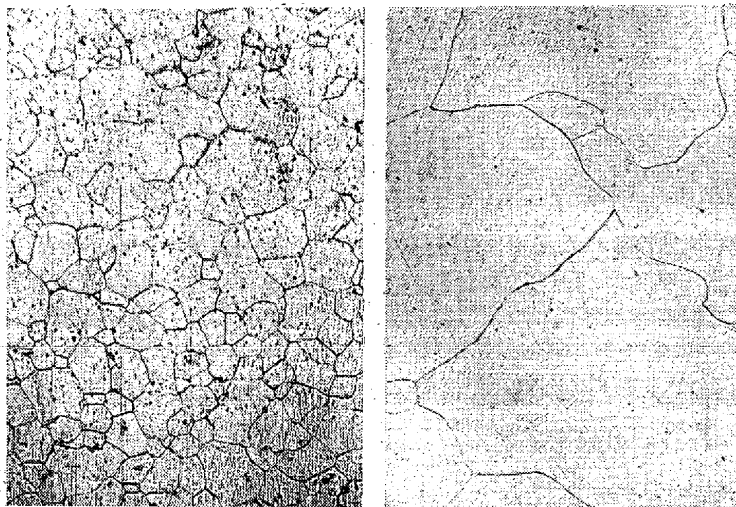
では A_3 變態が存在しないから熱処理によつてフェライトの結晶粒の微細化を行ふことは不可能で機械的に行ふより方法はない。鍛造比を大きくとり且つ鍛錬終了温度を下げれば結晶粒を微細化し得ること、之を高温で焼鈍すれば結晶は成長し焼鈍温度に相當する粒度をとることは公知である(第 11 圖)は Si 及 Ni 各 1% を含む純鐵を延壓により表面に近い結晶粒を微細化した例なり。



第 11 圖

Si 3.54% を含む試料の鍛錬のままの組織は第 12 圖 (1) に示す通りで 900° から焼入した (2) と同様にフェライトであるが結晶が著しく細かく粒度に於て約 5 號の違がある。

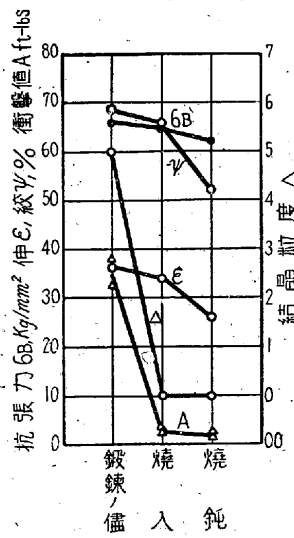
第 12 圖



鍛錬のまま

900° 焼入

鍛錬のままの状態に於て材力を測定した結果は第 13 圖に示す通りで、抗張力、伸及絞は鍛錬後 900° で焼入したものと大した違がないが衝撃値は著しく異り。鍛錬のままの



第 13 圖

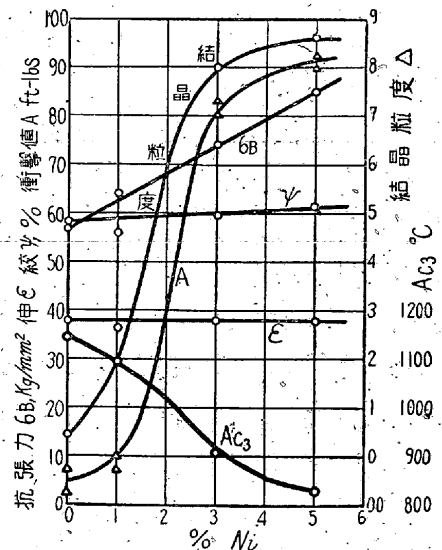
ものは 900° に 2h 加熱したもの比べて十倍以上に達して居る。

筆者は此結果から見て、2% 以上 Si を含む高珪素鋼の靱性特にアイゾット衝撃値が極めて低い原因は Si の増加により結晶粒が異常に大きくなった爲めで Si が固溶してフェライトの靱性が低下したのではないと考へる。

3. 第三元素の添加による粒度の調整

高珪素鋼は第三元素の添加により γ 領域を擴大し得ることは良く知られて居る。前述の様に Si が増加するとフェライトの結晶が異常に大きくなる理由は、第 10 圖の狀態圖に示す様に Si 1.5% 附近から A_3 變態が急に上昇し、2.5% 以上では變態が消失する爲である。従つて適當な第三元素を添加し γ 領域を擴大すれば Si 2.5% 以上に於ても A_3 變態を利用し熱処理によつて結晶粒を微細化し得る理である。而して此目的には γ 領域の擴大すると同時に A_3 變態を低下する元素が望ましい。C, Mn, Ni, N 等は何れも此條件を満足するが多量に使用しても C を増加する心配のない Ni に就て實驗した結果を述べる。

Si 2.5% を含む高珪素鋼に Ni 1~5% を加へ第 1 表 (14)~(16) に示す様に Ni 量を異にする三種の鋼塊を製造した。 900° に 2h 加熱後水冷した試料に就て材力、



第 14 圖

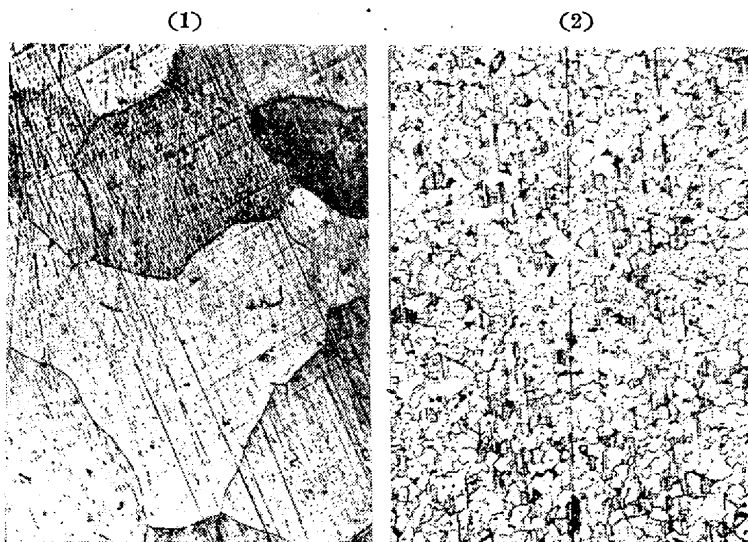
變態點及組織を調べた結果を Ni を含まない試料 (8) の成績と一緒に示すと第 14 圖の様になる。

抗張力は Ni 量に比例して直線的に増加するが、伸及絞には殆ど違ひがない。アイゾット衝撃値は Ni 1% 以下では 5~10 呎封度に過ぎないが Ni 3% を含むものは約 70 呎封度に激増する。併し之以上 Ni が増加しても衝撃値の増加は餘り顯著ではない。

變態點 (Ac_3) は Ni が増加するに従つて低下し Ni 5% を含むものは約 320° 下つて 830° に於て AC_3 が現はれる。

組織は Ni 量に関係なく何れもフェライトで唯粒度が異なるに過ぎない。 Ni が増加すると粒度は増加するが増加の割合は直線的でなく 2% 附近に於ける増加が特に著しく其前後は大して變らない。第 15 圖 (1) 及 (2) に示す様に Ni 1% を含むものは程度 2 號であるが 3% を含むものは 8 號で此間に 6 號の違ひがある。

第 15 圖



Si 25% Ni 1%

Si 25% Ni 5%

Ni 量による衝撃値の變化は上述の通りであるが、筆者は其原因を結晶粒度に在りと考へるものである。之は合金元素としての Ni 含有量の差を無視したことになるが。

(イ) 衝撃値の變化と粒度の變化が極めて良く一致する

(ロ) 抗張力は Ni 量に比例して直線的に増加し、伸、絞は Ni 量に関係なく殆ど一定であるにもかかわらず衝撃値のみ Ni 1% と 3% との間で激しく變化することから見て結晶程度の影響が歴倒的に大きいものと考へる。而して結晶粒度が Ni 2% 附近で斯様に激しい變化をする理由は A_3 變態の高さとフェライトの成長開始温度との相對的關係によるもので、 Ni を 3% 加へると變態點が

此限界温度以下に下るが 1% では尙限界温度以上に止る爲であると考へる。

4. 強靱高珪素鋼の誕生

第 15 圖からわかる様に Si 2.5% を含む高珪素鋼に Ni 5% を添加すると抗張力 85 kg/mm^2 、伸 40%、絞 60%、アハゾット衝撃値 90 呎封度の材力を有する強靱鋼が得られる。此事實は構造用鋼に合金元素として Si を多量に使用し得ることを示すと同時に、 C によつて強さを得て居る從來の合金鋼と行き方を異にする合金鋼の存在する可能性のあることを示すものとして興味あるものと考へる。此種の強靱高珪素鋼に就ては熔解方面に於て研究を要する點が有るが、質量効果を有せざる點、析出硬化によりブリネル 500 以上の硬度が焼鈍状態に於て得られる點等從來の合金鋼の眞似の出來ない特性があるから完成の暁には相當廣範圍の用途を開拓し得るのではないかと考へる*。

VI. 結 言

以上述べたところを要約すると次の様になる。

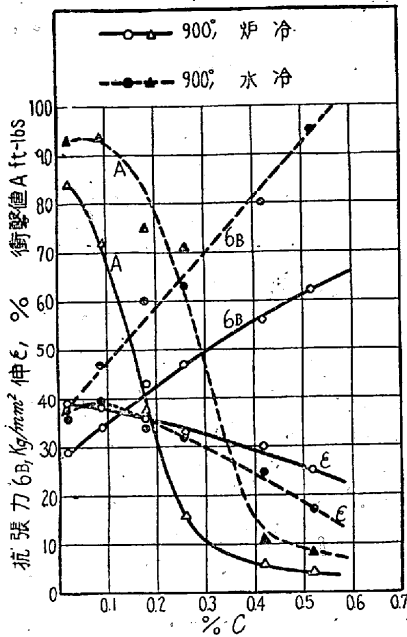
- (イ) Si はフェライトの抗張力を増加すると同時にアイゾット衝撃値を増加する極めて有効な合金元素である。
- (ロ) Si が 2% を超すと衝撃値が急に減少するのはフェライトに Si が固溶した爲めに靱性が減少したのではなく、 Si の増加により結晶粒が異常に大きくなつた爲めである。
- (ハ) 従つて鍛錬又は第三元素の添加により結晶粒の微細化を行へば Si 2~4% を含む高珪素鋼に豊富な靱性を賦へることが出来る。

之を要するに Si は少くとも 4% まではフェライトの靱性を損ふことなく抗張力を増加する極めて有効な合金元素であるが、結晶粒の粗大化によりフェライトの集合體である純鐵の靱性は Si が 2% を超すと急に減少する。従つて構造用鋼に合金元素として Si を多量に使用するには結晶粒の調整を行ふことが缺くべからざる要項である。

尙茲で注意すべきものに C の影響がある。第 16 圖は Si 0.4% を含むフェライトに及ぼす C の影響を調べた結果で、 C は靱性の減少に於てのみ抗張力を増加し、 C 0.25% で既に衝撃値が著しく減少することを示して居る。此事實は構造用鋼として Si を多量に使用する場合に極力 C の

* 強靱珪素鋼に就ては次回に報告する豫定である

低減を計る必要があることを示すと同時に、 Si はフェラ



第 16 圖

イトの靱性の犠牲に於てのみ抗張力を増加すると云ふ説が今日尙一部に於て行はれ、吾々の経験とも良く一致する場合が起る理由を説明するものと考へる。

終りに臨み本研究の遂行に當り懇篤なる指導鞭撻を賜つた顧問水谷彦氏、室蘭技術研究所長前川清氏に

厚く感謝の意を表す。

引用文献

- 1) 太田雞一: 鐵と鋼 27 (昭 16) 441
- 2) Bain, E. C.: "The Functions of the Alloying Elements in Steel" (1939) A. S. for Metal.
- 3) Hadfield, R. A.: Jour. Iron & Steel Inst. (1889) II 161
- 4) Taker, T.: Jour. Iron & Steel Inst. (1903) II 312
P. Paglianti: Metallurgie (1912) 217
A. Pomp: K. W. Inst. f. Eisenforschung, v. 7 (1925) 105
- 5) Yensen, T. D.: Bullentin No. 83 Univ. of Illinois (1915)
- 6) Ruder, W. E.: Year Book A. Iron & Steel Inst. (1925)
Corson, H. G.; Trans. A. Inst. M. & M. Eng., v. 80 (1928) 249
Stoughton, B. & E. S. Greiner: Trans. A. Inst. M. & M. Eng., v. 90 (1930) 155
- 7) McQuaid, H. W.: Trans. A. S. for Metal (1934) 1017
Swinden, T. & G. R. Bolsover: Jour. Iron & Steel Inst. (1936) II 457
Houndremont, E. & H. Schrader: Arch. Eisenhüttenw. (1939) 393

酸性電氣爐操業中擴散脫酸してクロムを還元する方法、ザポロツスタール法

Y. Shulte, Stal, 8 (1939) 18-22

$C < 0.25$, $Cr < 1.6\%$ の $Cr-Ni$ 又は $Cr-Mo$ 構造用鋼屑を主とする装入物の再熔解の理論と實際を述べてゐる、主要な特徴は沸騰後 SiO_2 58~65%, CaO 20~25% の特殊鋼滓の下に擴散脫酸を行ふ點である。石灰の添加は重金屬酸化物、特に FeO 量を減少せしめる。尙アルミナ 3~5% を添加すれば更に減少を認める。次に上記鋼滓上にフェロ・シリコン及び炭素を添加する、この結果、鋼滓中の遊離 FeO を減じ、之に應じて鋼浴中の FeO を減少する。仕上鋼滓中の FeO , Cr_2O_3 は夫々 2.5% 及び 1.0% となり、熔滓量は装入物重量の 2.0~2.6% に相當する。最終脫酸剤には Al を使用する。或る研究者は $Cr-Ni$ 構造用鋼に Al 添加は有害であると考えてゐるが、著者は或る条件下では有害でないと考えてゐる。この條件としては (1) Al 添加前の脫酸。この Zaporozhstal 法では特殊な脫酸性鋼滓を使用してゐる。(2) 鋼浴中の FeO の脫酸所要量より少過剰の Al の加入である。他方最終脫酸剤の添加を行はず、低温出鋼を行へば延性大なる鋼を得る事は可能である。但この方法は實際には推奨し難い。(製鐵技術總覽 第 2 號 25 頁)

爐内温度及びガス流速の測定

(A. H. Leckie, Fuel in Science and Practice, 19 (1940) 22-23)

Iron and Steel Industrial Research Council に設置された Open-Hearth Committee の研究として著者は吸氣式高温計及び水冷却ピトー管を案出し、これに依り 1550°C の爐内ガス温度と流速を測定し得る如くし、平爐排氣口の温度及びガス流速に就ての結果を示して居る。この結果に依るとチェッカー下の煙道中の餘熱温度は裸の熱電對で大なる誤なく測定出来るが空氣噴出口の測定には不適當であるを認めた。(製鐵技術總覽 第 2 號 67 頁)