

## 製鐵所に於ける珪素鋼板製造に就て

(昭和二年十一月日本鐵鋼協會第三回講演大會講演)

平 世 將 一

## On the manufacturing of Silicon Steel Sheets at the Imperial Steel Works,

M. Hirase:—This paper is a brief sketch of the practical working at our steel works supplying the general idea of the so-called esoteric secret of Rolling the Silicon Steel Sheets.

Some fundamental properties of Electrical Sheets are recollected and the standard specifications of our sheets are given comparing with those of foreign sheets, emphasizing the non-sense of the nomenclature of these sheets.

In the practical working the essential parts are Rolling, Annealing and Epstein testing. Neglecting others, these parts are described rather in details. The Rolling is manipulated by hand, relying on the skillful workmen, and they are apt to be disturbed by their hardwork giving unequal thickness to the sheets. The annealing gives an astonishing effect to the Silicon Steel Sheet resulting in high permeability and low watt-loss, and the controlling of annealing in practice is also a difficult thing owing to the sensibility of sheet to heat. Hence there appeared recently a process called "Gas pickling or bright annealing" which is the pioneer that rescue the weak points of Silicon Steel sheets. The Epstein tests are so honest that there are no means to disguise the fault on the sheets.

In conclusion, the future progress of Electrical sheets is briefly presumed.

## I 緒 言

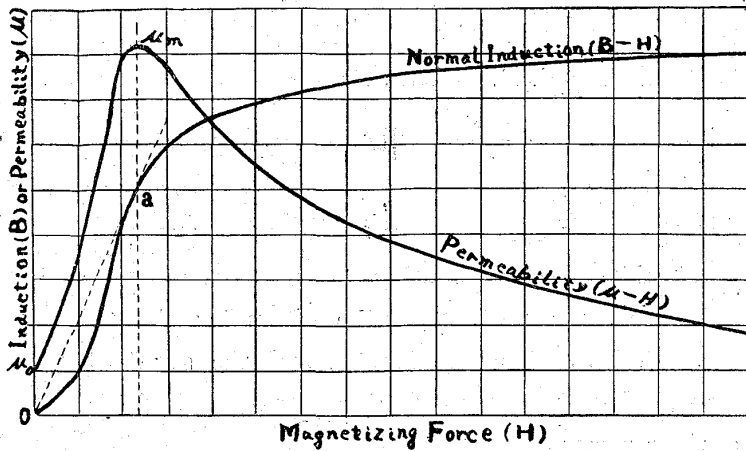
珪素鋼板は世界大戰中種々製造を計畫されたけれども充分に製品を出すに到らずして中止の貌であつた。其を製鐵所に於て大正 13 年 11 月より製造を開始するに到り需要も漸次増加し本年度は 2,000 噸以上を生産する豫定である。

抑々近時に於ける電氣機器類の異數の進歩は實に珪素鋼板の發見と其の製造技術の發達とに依ると云ふも敢て過言ではない。而して其の高遠なる電磁氣學的の理論に就ては著者の淺學非才到底よく説明する處でないから二三の緊要事項を列擧するに留める事とし此の 3 年間に經驗せる實地作業のみに就きて述べる事とする。

## II 珪素鋼板に必要な電磁氣性質

(1) 磁化曲線及導磁率:—電氣用鐵板類の性質を最も善く示すものは磁化曲線 (Magnetization Curve) 又は B—H 曲線、誘導曲線 (Induction Curve) である。此の曲線は第 1 圖の如くその誘導 (Induction) B と磁化力 (Magnetizing force) H との關係を示して居る。此の曲線を見るに H が大となれば水平に近づき B の増加は H と同率に進まず換言すれば鐵分子の磁化が飽和する事を示し従つて此の曲線を飽和曲線 (Saturation Curve) とも呼ぶのである而して此の誘導 B は其の鐵板の

第1圖 標準磁化曲線圖



係を示せば次表の如くなる。

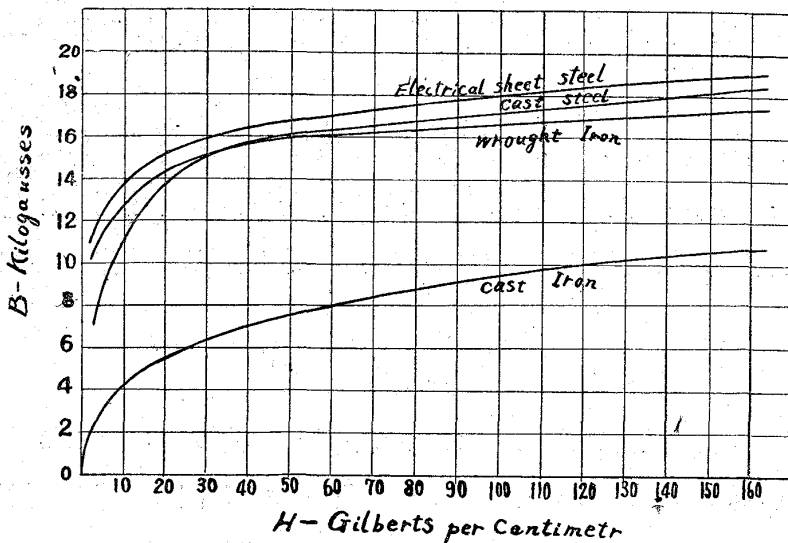
第1表 磁化力の單位

	Gilbert/cm	Gauss	Amp. Turn per cm	A.T./in
1 Gilbert per cm	1	1	0.796	2.02
1 Gauss	1	1	0.796	2.02
1 Ampere-Turn per cm	1.257	1.257	1	2.54
1 Amp-Turn per in	0.495	0.495	0.394	1

(注意、Gauss を磁化力單位としても使用せらるるは空氣中には誘導も磁化力も C. G. S. 單位の數値は等しい爲であらう)。

次に重要な性質に導磁率  $\mu = \frac{B}{H}$  の關係がある即ち  $\text{Permeability} = \frac{\text{Gausses}}{\text{Gilberts per cm}}$  となる。導磁率と磁化力との關係は第1圖に示す  $\mu-H$  曲線にて知らるる如く Max. permeability は O を通

第2圖 各種鐵材の磁化曲線

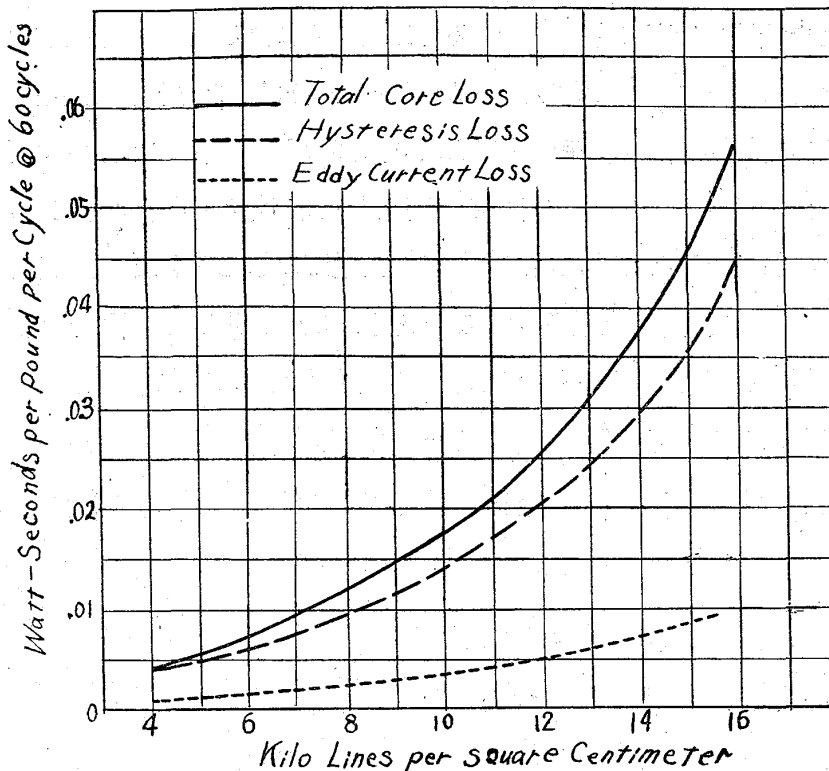


り磁化曲線に切線を引く事に依り得られる導磁率の高き事は珪素鋼板には重大なる條件にして珪素鋼板現時の改良は如何にして此の導磁率を高むるかに存するのである今各種鐵材の磁化曲線の一例を示せば第2圖の如きものである。

(2) 鐵損失：—此は鐵板を交番に磁化する時に起る電力の浪費にして鐵心中に生ずるヒステリシス (hysteresis) 及び渦電流 (eddy

Current) の兩損失を併せたるものにして又 Power loss, Watt loss, Core loss 等と稱せられて居る。Hysteresis loss は hysteresis loop の包含する面積となり電流の方向を逆にする度に磁氣誘導が磁化

第3圖 鐵損失分解比較圖  
厚 .014" 珪素含有量 2.2-2.8%



電流より遅れる事より生ずるものにして鐵の分子を熱するのみにして電力の損失となり磁化力が交番に迅速に變化する如き場合に起り易く發電機の發電子、交流用變壓器の如きものが最も多く此の作用を受ける。渦電流損失も鐵心に起る普通の現象にして此も亦鐵の分子を熱するのみに其エネルギーは浪費されるのであつて此の渦電流損失は全鐵損の 15 乃至 25 % である、此の兩者の比較曲線は第 3 圖の如きものである。而して此の

鐵損失は次の如き條件に支配される。即ち厚み、磁束密度、周波數と共に増加し且又溫度の上昇と共に増加し機械的歪を加ふれば増加し波形率の影響も受くるのである。依て此の損失の規準を定めるには此等の條件を包含するを要し萬國的に決定して居るのは各厚みに就きて 25°C に於て材料 1kg が 50 サイクルの周波數にて 10,000 ガウスの磁束密度中にて消費せるワット數を規準として居る。米國は 60 サイクルを用ふるが製鐵所に於ては 50 サイクルにて發表し又參考として 15,000 ガウスの場合も添付する事がある。符號には W<sub>10/50</sub> 又は V<sub>10</sub> 等を用ふる。

(3) 時效 (aging): 一變壓器鐵心又は發電子等の如く鐵板を絶えず使用して長期間に及ぶ時は磁氣的の疲勞即ち時效といふ特性を表はすのである。此は導磁率を低下し hysteresis を増大し従つて鐵損失の増加を來すものにして現在の珪素鋼板の出現迄は此の増加が 100 % にも及ぶ事ありしも現在は 2 乃至 3% の範圍に止まり實用上此の影響は無視して可なる域に進歩して居る。

(4) 總括: 一依て珪素鋼板に必須なる電磁氣的性質を列擧すれば、

1. 導磁率高き事
  2. Hysteresis loss 及び eddy current loss 低き事
  3. 保磁力 (coercive force) の少なき事
  4. 保磁性 (Retentivity) の少なき事
  5. 固有抵抗 (Resistivity) の大なる事 (eddy current loss の低下となる爲)
- } hysteresis loss を低下する事となる爲

以上の 5 性質なれど此を總括し且物理的性質も加味すれば次の 7 項目となる。即ち

1. 鐵損失少なき事 2. 導磁率高き事 3. 時効なきか又は少なき事 4. 厚み均等なる事  
5. 板面平滑なる事 6. スケール薄き事 7. 適宜の柔軟性ある事

等にして第4項以下の理由は能率よき機械を低廉に作らんとする時は與へられたる空間を出來得るだけ多量に有用の鋼板にて充填する事を必要とするのである、然るに厚み不同にして平滑ならず且電磁氣的に效果少なきスケール厚き時は空間を不經濟に使用する事となり鐵其のものの容積は充すべき全容積の何%かに低下する此の率を Space factor と稱し重要な一要素をなし Space factor 悪き時は積み重ねたる板を締付くる時は所々に凹凸を生じ無駄な空所を作りて渦電流の原因ともなり、又凹凸ある時は締付の壓力にも板の部分により差異を來し絶縁を害する事ともなるのである。柔軟性は加工の爲に必要とするものにして以上の7項目を完備するものを優秀な珪素鋼板として居る。

### III 製鐵所珪素鋼板標準規格及外國品との比較

然らば製鐵所に於ては如何なる規準に據るかといふに大體に於て外國の各種規準を參考として第2表の如くに定めて居る。

第2表 製鐵所珪素鋼板標準規格

厚さ		磁束密度 ガウス	鐵 損 50~ワット/kg					磁 化 力	誘 導 ライン/平方糎				
耗	ミル		A	B	C	D	T		A	B	C	D	T
0.35	0.014"	10,000	3.00	2.46	2.26	1.95	1.50	25 A. T. 每糎	15,200	15,000	14,500	14,500	14,500
0.43	0.017"	10,000	3.30	2.73	2.44	2.10	1.62	50 A. T. 每糎	16,200	16,100	15,500	15,500	15,500
0.50	0.018"	10,000	3.60	3.00	2.60	2.35		100 A. T. 每糎	17,300	17,200	17,000	16,800	16,500
								300 A. T. 每糎	19,800	19,500	19,000	18,800	18,500

英米國の品は此の誘導には何等の規定を設けないのである。製鐵所に於ては安全を期する爲めに獨逸の規格を参照して誘導にも保證を與へて居る、而して此の鐵損は各 A. B. C. D. T. 等の規格に於ける其の品の Max. Watt Loss にして誘導の方は各品の Min. Induction を保證して居るものである。今各規格別に其の使用個所の概念を述べる事としよう。

A, は Pole の鐵心に特に適し、又連続的に運轉せざる電動機或は發電機用としても可又高磁束密度を要求する機械等に使用される。

B, C, は主として電動機、發電機の Armature 或は誘導電動機の廻轉子用。

D, は特に誘導電動機の固定子用鐵心として適し或種の變壓器にも用ふ。又 C と共に高能率の電動機或は發電機の Armature に使用される。

T, は變壓器用のものである。

外國品は此の A. B. C. D. T. に各種の名稱を與へて種別多きが如く使用者を欺きて混亂に陥らしめて居る。之等は電氣試験の結果に従ひて分割し珪素含有量は一つの連鎖となすのみである、今内地市場に表はるる珪素鋼板の名稱別及び 1926 年に與へし各社の保證鐵損を推定珪素量に従つて表示すれば次の如きものとなる。

第 3 表

推定珪素含有量	名 稱	W <sup>10/50</sup>			製鐵所規格にて示せば
		厚さ 0.35mm	0.43mm	0.5mm	
1%以下	Allegheny Armature	2.90	3.10	3.78	A
	Armco Armature.	2.90	3.12	3.66	A
	Lohys.	3.02	3.32	3.92	Aより悪し
	American Armature.	2.91	3.12	3.82	A
	Newport Armature.	2.91	3.09	3.79	A
	Surahama Dynamo.	2.93	3.25	3.98	A
	Uloy Armature.	2.97	3.59	4.40	A
1%附近	Allegh. Electrical.	2.39	2.64	3.10	B
	Armco Electric.	2.40	2.64	3.08	B
	Special Lohys.	2.21	2.48	2.95	(最近改正せるもの)C
	U. S. Elrctrical.	2.44	2.64	3.15	B
	Newport Elec. "A"	2.45	2.72	3.20	B
	Sur. Special Dynamo.	2.48	2.74	3.33	A
	Uloy Elec.	2.53	2.77	3.30	A
1.5%附近	Medium Resistance	1.97	2.15	2.48	(最近改正せるもの)C
2%附近	Motor Spec. Elec.	2.13	2.25	2.47	C
	Newport Elec. "B"	2.14	2.30	2.50	C
	Uloy Spec. Elec.	2.09	2.27	2.53	C
2.5%附近	Allegh. Dynamo.	1.95	2.09	2.25	D
	Armco Spec. Elec.	1.96	2.10	2.36	D
	Sur. Med. Alloyed.	1.94	2.14	2.57	D
3%附近	Allegh. Dynamo Spec.	1.75	1.88	2.03	D
	Armco Intermediate Transf.	1.67	1.78	1.96	D
	Dyn. Spec. Elec.	1.71	1.84	2.00	D
	Newport Elec. "C"	1.72	1.85	2.01	D
	Uloy Dynamo.	1.74	1.90	2.05	D
3.5%附近	Allegh. Transformer	1.52	—	—	T
	Allegh. Transf. Spec.	1.42	1.58	1.76	T
	Armco Transf. Spec.	1.43	1.52	1.72	T
	Stalloy	1.51	1.62	1.82	T
	Apollo Spec. Elec.	1.46	1.60	1.80	T
	Newport Transf.	1.46	1.63	1.81	T
	Sur. Transf.	1.51	1.65	1.83	T
Uloy Transf.	1.57	1.70	1.83	D	

4%以上	Arceo Transf. Extra Spec.	1.35	—	—	T
	Extra Apollo Spec.	1.37	—	—	T
	Uloy Trans. Extra Spec.	1.45	—	—	T

以上の例により各會社の名稱及保證鐵損失は知らるゝも現品に就きて試験せる結果を示せば次の如きものである。

第 4 表

製造所	名 稱	化 學 分 析							厚 鉄損 50~10,000 ワット/kg ガウス	誘 導 lines./cm <sup>2</sup>				
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Al		23A.T.	50A.T.	100A.T.	300A.T.	
Sankey	Stalloy	.07	3.49	.19	.01	.01	.06	.14	0.36	1.75	14,400	15,410	16,620	18,930
"	"	.09	3.68	.17	.01	.02	.05	.16	0.55	1.75	13,030	16,000	17,260	19,520
"	"	.09	3.25	.14	.06	.02	.03	.15	1.75	5.86	15,200	16,410	17,720	20,160
"	Special Lohys	.06	0.70	.31	.03	.01	.03	.14	0.34	2.46	15,580	16,570	17,770	20,390
"	Lohys	.08	1.04	.22	.05	.02	.02	.14	0.51	2.75	15,390	16,250	17,370	19,890
"	"	.09	1.58	.24	.06	.02	.04	.12	1.59	8.34	14,890	16,230	17,540	20,140
Allegheny	Transformer.	.08	3.73	.08	.01	.01	0.3	.25	0.36	1.54	14,770	15,830	17,060	19,340
"	Dynamo	.05	1.31	.22	.02	.02	.05	.12	0.35	2.63	15,250	16,290	17,490	19,970
U. S.	Apollo Special	.07	4.28	.14	.02	.02	.03	.16	0.37	1.54	15,220	16,140	17,460	19,410
"	"	.07	4.04	.14	.01	.02	.05	.14	0.54	1.89	14,890	15,840	17,050	19,280
"	"	.06	3.92	.13	.01	.01	.04	.16	0.37	1.69	14,936	16,040	17,290	19,420
"	Dynamo Spec.	.05	3.59	.15	.02	.01	.03	.13	0.36	1.92	14,940	15,980	17,190	19,460
"	"	.06	2.90	.14	.06	.02	.04	.14	0.51	2.05	15,170	16,190	17,360	19,610
"	Electrical	.08	0.86	.24	.07	.03	.03	.13	0.37	2.59	15,920	16,840	17,970	20,350
製 鐵 所	T 一 例	.04	3.80	.12	.004	.017	—	—	0.35	1.398	15,150	16,200	17,470	19,820
"	T 一 例	.04	4.02	.15	.007	.007	—	—	0.35	1.245	14,580	15,620	16,890	18,940
"	D "	.06	1.79	.29	.024	.03	.251	—	0.36	1.915	14,980	16,140	17,380	19,830
"	C "	.06	1.44	.14	.012	.022	.20	0.53	0.35	1.99	15,180	16,260	17,480	19,980
"	B "	.06	1.23	.27	.021	.035	.068	—	0.35	2.33	15,630	16,750	17,950	20,350
"	A "	.04	0.608	.43	.067	.039	.078	—	0.35	2.58	15,540	16,890	17,860	20,740

上表に依ても知らるゝ如く、珪素含有量の少なくて優良の成績を示すものあり、此に反するものもありて決して特別に各名稱のものを製造せるに非ずして終局は電気試験の結果に従つて分割し名稱を附したるものである。

#### IV 製鐵所に於ける製造工程

實際作業を述ぶる前に珪素鋼板に及ぼす化學成分の影響に就きて記す事とせう。

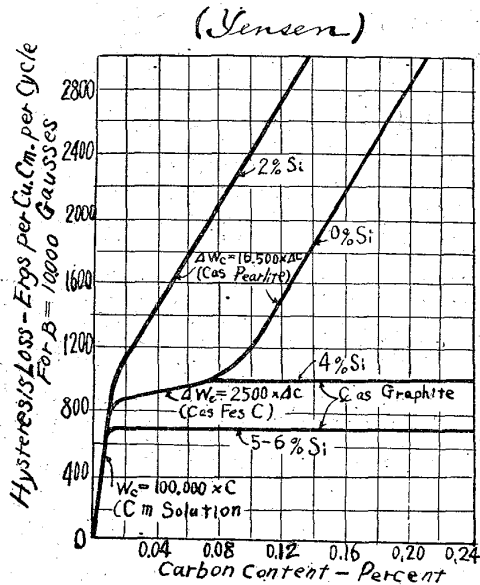
(1) 成分の影響:—Hadfield の發見以後系統的に珪素鋼の成分と磁性質との關係を研究し有益なる結果を吾人に發表せるは Yensen (University of Illinois, Bull. No. 72, 1914, No. 83 1915, Jour. A. I. E. E. May, June, 1924 等) 及び Gumlich (Elektrotechnische Zeitschrift Juni, Juli 1919等) 兩氏である。今此等の結果を抜粹して見やう。

炭素:—炭素は微量にても磁性には非常なる影響を與へる。在來の分析方法にては分明せざる程の

炭素 (新分析方法 Trans. Am. Electrochem. Soc. Vol. 37, 1920) も其影響を表はして居る。即ち resistivity は増加するも導磁率を著しく低下し飽和點を降下せしめ且保磁力及び残留磁氣を増加する爲 hysteresis loop の面積が廣くなり従つて hysteresis loss の増大を來すのである。其の一例は第

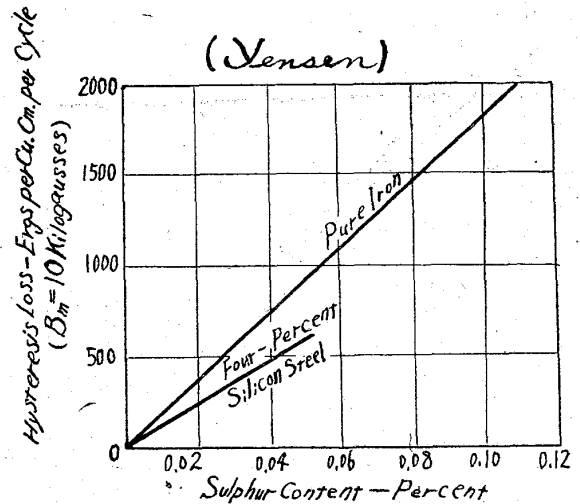
第 4 圖

ヒステリシス ロスに及ぼす炭素の影響  
〔鐵-珪素系合金〕



第 5 圖

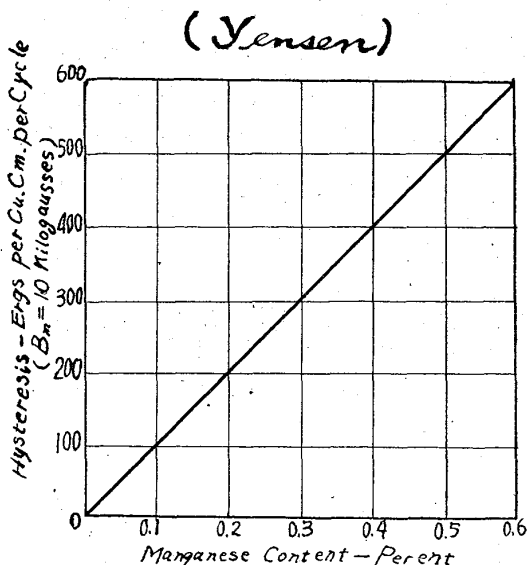
ヒステリシス ロスに及ぼす硫黄の影響  
〔4%珪素鋼〕



4 圖の如きもので  $\Delta C$  は C の百分比の増加である。Wc は C による hysteresis loss の意味である。C の増加に比し hysteresis loss の増加率は低珪素量に於ては著しく大きく珪素含有量が増加すれば炭素は黒鉛として析出され loss の増加率は緩和され Si=5% 以上になれば炭素の増加は影響が

第 6 圖

ヒステリシス ロスに及ぼす滿俺の影響  
〔4%珪素鋼〕



僅少である。

硫黄：一炭素に次ぎて磁性を害する成分は硫黄である。第 5 圖は 4% 珪素鋼の hysteresis loss の一例を示す。

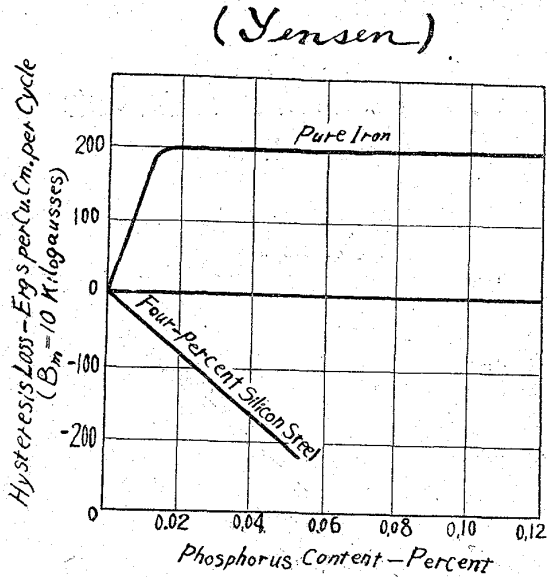
磷及び滿俺：一此の兩者の影響は比較的僅少にして少量は目立つたる害は表はさない、第 6 圖は滿俺、第 7 圖は磷の hysteresis loss に及ぼす影響を示したのである。

銅：一嘗つては導磁率を高め保磁力を減ずる良影響あるものと考へられしが現今は全然此等の説に反すると云はれて居る。

珪素：一hysteresis 及び eddy の兩損失を減ずるものである。又少量の珪素の添加も時効を非常に輕減する性質を有する、而して最も都合悪き事は導磁率を低下せし

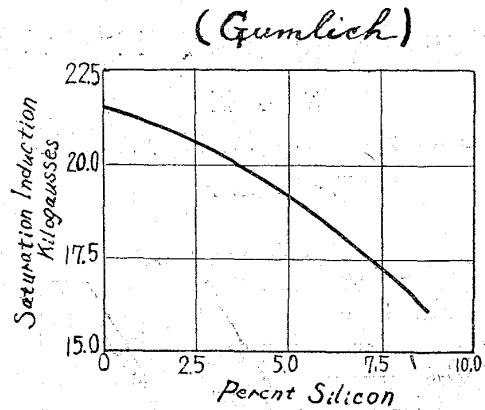
第 7 圖

ヒステリシ スロスに及ぼす燐の影響  
〔4% 珪素鋼〕



第 8 圖

鐵-珪素系合金の誘導



むる事である、第8圖には誘導の降下する状態が伺はれる。珪素鋼板の改良進歩は如何にして此の導磁率を高むるかに存して居る。又珪素含有量4%附近を超過すれば著しく材質は脆弱となり剪断機にて

切りし縁端は鋸齒状を示す程である、肉眼にてもよくその結晶は認められ第9圖は Si=4.23% シートバー破面の肉眼的組織である。

化學成分の外に重要な一要素は結晶粒の太さ (Grain size) といふ事である。Ruder 氏の研究に據れば炭素含有量 0.02% 以上の時は  $Wh = 3 \times N$  なる式で表はされる N は  $1\text{mm}^2$  當りの結晶粒の數である。炭素 0.006% 以下のものは  $Wh = 65\sqrt{N}$  で表はされるといふ、何れにしても結晶粒の小なるものは hysteresis loss 大である。珪素は粒の成長を助成し珪素鋼板の鐵損を優秀ならしむる一理由をなすのである (Ruder:—Trans. A.I.M.E. Oct. 1913 Daeves:—St.U.E. 44, 1924) 且又珪素の混入は含有炭素を graphite として析出し Pearlite として出さず第4圖に其 hysteresis に及ぼす影響が表はしてある。略言すれば含有炭素の影響を 100 とせば Pearlite. として存在する炭素は  $16.5 \text{ Fe}_3\text{C}$  として存在する炭素は 2.25, Graphite として存在する炭素は 0 の影響を有するのである。而して此の結晶粒も粒の不均等なる太さが鐵損失に影響するのであると Ruder 氏 (year-book Am. Ir. St. Inst. 15, 1925) は發表して居る。Auwers 氏 (Z. Techn. Physik 6, Nr. 11, 1925) は含有さるゝ瓦斯が粒の太さ並びに磁氣性質に影響すると申して居る。

此等の結果を總括する爲に Yensen 氏の發表せる式の代表的なものを引用して見よう。

Carbon in Solution (Low Carbon)

0~2% Si

$$Wh = 65\sqrt{N} + 100,000C + 18,000S + 1,000Mn + 13,000P$$

upper limit C=0.006 S=0.10 Mn=0.60 P=0.015



Precipitated Carbon ( $Fe_3C$ , Pearlite, Graphite)

2 % Si

$$Wh = 3N + 800 + 16,500(C - 0.008) + 18,000S + 1,000Mn + 13,000P$$

upper limit  $C = 0.50$   $S = 0.10$   $Mn = 0.60$   $P = 0.015$

Wh = hysteresis loss in ergs per cub. cm per cycle,

N = No. of grains per  $mm^2$

Other symbols represents the percentages of the chemical elements.

之等の式よりして各成分の影響の概念は認めらるゝであらう。

(2) 材料:—上述の事項より知らるゝ如く珪素以外の成分は可及的少なきを好み珪素含有量は各規格によりて異つて居る。大體に於て次の如きものである。

規格	Si	C	Mn	S	P	大別せる場合 の名稱
A	0.8~1.0	0.09以下	0.35以下	0.04以下	0.04以下	電機用
B	1.1~1.3	"	"	"	"	
C	1.4~1.6	"	"	"	"	
D	2.0~3.0	0.08以下	"	"	"	
T	3.5~4.3	0.06"	0.20以下	0.03以下	0.012以下	變壓器用

之の成分は絶對的のものに非ずして規格 A. B. C. D. T は電氣試験の結果を俟つて始めて決定せらるゝものにして分析に A. B. C. D. T の區別はないのである。熱処理法の如何によりて珪素は 1%位のものも規格 C 又は D に合格する電氣試験結果を示す事がある。上の表は普通の結果としての規準を表はしたのみである。斯くの如く珪素含有量多く炭素量少なく極度に鋼を精鍊する製鋼作業には非常な苦心を要し屢々鋼塊に大なる收縮管を生じ時には鋼塊の角に縦割が入る事もある。製鐵所に於ては T 以外は鹽基性平爐にて下注ぎを用ひ、頭 205×155mm 高さ 1,220mm 底 220×170mm 全重量 260kg の鋼塊を造り T は原則として電氣爐を用ひて居る。外國に於ては炭素を極度に低下し且つ不純分を除去する爲 Induction furnace を高級の珪素鋼塊製造に使用して居る。此の鋼塊は直ちに平鋼工場の Universal Mill にて所定のシートバーに壓延剪斷されるのである、目下使用して居るシートバーの寸法は

製品寸法 厚 幅 長	シートバー		變壓器用 特別注文
	厚	長	
0.3 × 3' × 6'	12.6	210 × 960	19kg
0.35 × 3' × 6'	13.3	225 × 950	21.9
0.35 × 33" × 6'	13.3	225 × 835	20.4
0.43 × 3' × 6'	15.5	225 × 950	25.5
0.50 × 3' × 6'	9.8	210 × 945	14.9
0.80 × 3' × 6'	14.8	225 × 945	24.2

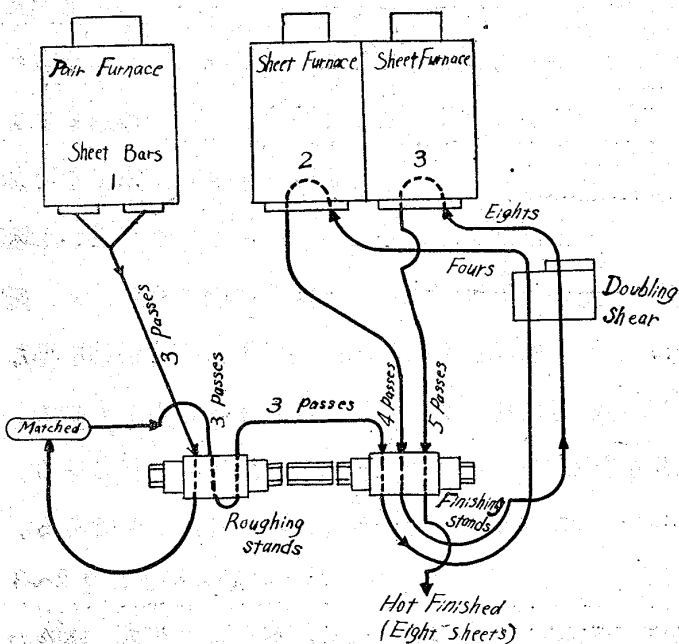
長さは珪素含有量多きものは耳破れの危険がある爲長く採つて居る。本所現在の設備は 3'×6' を最大寸法となすにより以下の種類に止まつて居る。

シートバーに見出さるゝ缺點の主なるものは耳割れ、煉瓦の混入、収縮管、蓋肌、スケール等である。各製品につきて行ふ電気試験の結果及び形状検査の爲此等僅少の缺點も糊塗すべき何等の方法なく、總て不合格になるのである。

(3) 壓延作業：一壓延作業様式は板の大小の差を有するのみにて大體鉄力板原板の製作と同様の手順(小原春孝氏：一鐵と鋼第 11 年 9 號)を採つて居る、目下の作業は市場にて通稱せらるゝ 13 枚物(厚さ 0.29 耗)黑板(black sheet)を主として作り珪素鋼板の方は副業的に生産し漸次従業員の訓練と上達と共に増産する事になつて居るのである。現在は二聯のロール機を用ひ、一聯は荒ロール機(roughing roll stands) 1 臺と仕上ロール機(finishing roll stand) 1 臺とよりなり、何れも two high roll pull over type にして所謂ゆる Double mill, 3 part System に従ひて作業し、壓下調節は全部手加減で行はれる、薄板作業の熟練を要するは一つは此の點にある。鉄力板に於ては此の荒ロール機は存在しない、板が 3'×6' の大きさになれば荒ロール機を用ひて豫めシートバーを薄くして仕上ロール機に通すのである。

先づ材料なるシートバーは荒爐(材料加熱爐)に装入し 40 分乃至 50 分にて 950°C 位(變壓器用は 1100°C 位)に加熱し、2 枚宛取り出して荒ロール機に運び最初は 1 枚宛ロールに 2~3 回通して次に此れを 2 枚重ねて 3 回通し、約 1 米突位の長さとし之を其のまゝ仕上ロール機に運び更に 2~3 回ロールを通過し約 2 米突位に延ばし此れを剥ぎ折り疊みて端を揃へ折疊機(Doubling shear)にて充分に疊み尾部を切斷し、4 枚重ねとして 4 枚爐に装入する。此を 850°C 乃至 900°C 位に加熱して仕上ロール機を 3~4 回通過すれば 2 米突位に延び再び此の 4 枚を各枚毎に剝離し折疊機に掛けて充分に折り疊み尾端を揃へて切る、此が 8 枚重ねとなり、仕上爐に装入され約 850°C 位に注意して

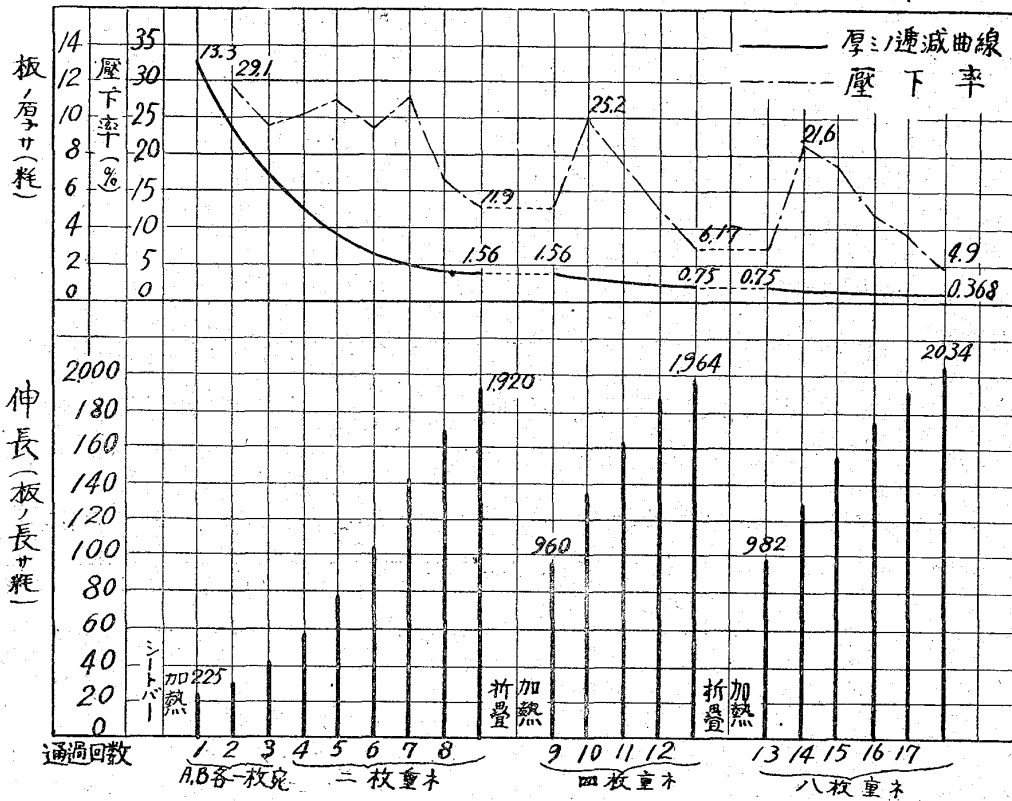
第 10 圖 Double Mill, 3-Part System



均等に加熱せられ、三度仕上ロール機を 4~5 回通過すれば約 2 米突の長さとなり 3'×6' の板を切り取るべき原板が出来上る。厚さ 13.3 耗のシートバーより上述の行程を経て 0.35 耗の厚さとなるのである。0.5 耗より厚手のものは 4 枚重ねのまま仕上て居る。珪素鋼板の最大需要量は此の 0.35 耗即ち 14 mil のもので此より薄きものは餘り作つて居ない。その理由とする處は極く薄き板は渦電流損失は低下するも Space factor 劣り hysteresis loss に増加を來し、且又種々の熱處理を施す間に板面は薄きスケールにて被はれ然も其のスケール

の厚みは同成分の板にて同一の熱処理を受くるとせば板の厚薄に關せず略々同等である爲薄き板に及すスケールの影響が厚き板に比して大なる爲である。特に製作すれば 0.076 耗 (3mil) 位の品迄は作る事も出来る、以上の工程を圖解すれば第 10 圖の如くになり各通過に於ける板の延び加減及び壓下

第 11 圖 板の伸長程度及壓下率



率は第 11 圖の如く此は實際作業にて 10 例を採りて平均したる値を示したのである。此等の工程は約 1 時間で終り同様な順序を一交代 8 時間に 7 乃至 8 回繰返して居る。此の珪素鋼板の壓延作業たるや 1,000°C 近くも加熱したる 50kg (シートバー 2 枚) 餘の重量の

板を火箸を用ひ眼前 1 米突位の處に支へてなす仕事にして、ロール調整の熟練と相俟つて非常に従業員の訓練には困難を感ずるのである。然も此の珪素鋼板たるや一度仕事を開始すれば間斷なく作業を繼續するものにして 10 分間の休憩もロールの冷却を來し製品は造り難くなるのである。作業工程にて重要な事はロールの Concave をよく調節し且つロール温度を餘り下降さぬ事である。實際作業の浅き経験による事にて斷言は出來ぬがロール温度の下降又は仕上板を 500°C 以下にて通過せるもの又はロール通過回数多きに過ぎたる板は後に到りて焼鈍を適當になすも電氣試験結果は鐵損を増加し成績不良の様に思はれる又板の温度餘りに高きものも結果は思はしくない。尙厚みの不同といふ困難な問題がある、シートバーの厚薄、材料鋼質及び加熱の不均等、ロール温度及膨脹の程度、板の延び加減、切斷切捨量、壓下の不同、等諸種の原因によりて製品に厚薄の不同を來すものは止むを得ないので、或範圍迄は許さるべきものである。如何なる製品に於ても之の不同は見受けらるゝものにして、外國の例を参照して現在は各 1 枚毎の板の厚みを測定し 1 枚の不同  $\pm 10\%$  以内として居る、重量はその鐵板の廣さ及び厚さに對する公稱重量に比し  $\pm 2.5\%$  以上の公差は許されないのである。従つて比等に適合する様に厚みの均等を保つ爲には 1 週中にもロールの狀況の最も好ましき 2~3 日の短期間を見計つて作業し得るのみにして全週珪素鋼板のみを壓延する事は不可能である。殘餘の

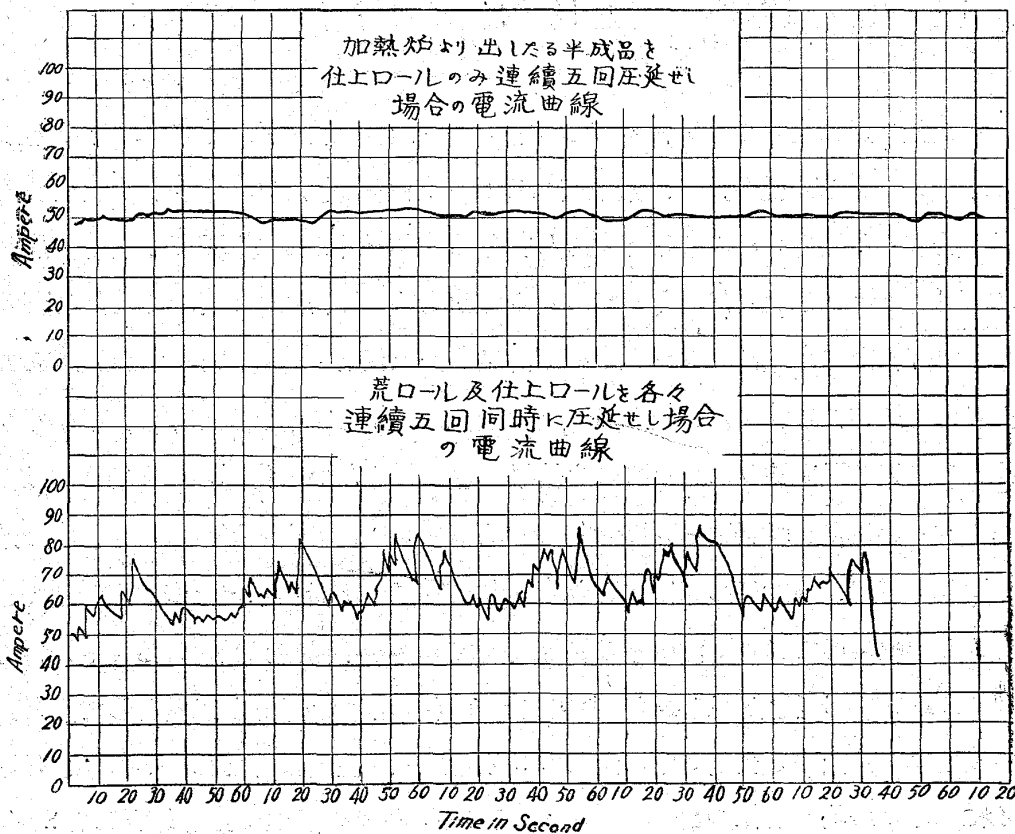
日は黑板壓延をなして居る。目下は漸次珪素鋼板の壓延を増量して居る。創業以來の生産高は次の如きものである。

年度別	使用材料重量 噸	壓延一級 噸	販賣數量 噸	注 意
大正 13 年度	81.771	71.226	0	試験時代にて市場に出さず
" 14	486.505	364.339	72.291	市場に見本品を出す、電気試験のみにて厚みの検査をなさざる爲め電氣的に優秀なるも厚さの不同多しと云ふ
" 15	962.804	755.557	784.862	
昭和 2 年 4 月	269.318	215.884	99.639	監理部検定課に於て厚薄の検定を開始す
" 5 月	152.870	122.199	143.852	
" 6 月	297.936	233.654	140.962	
" 7 月	333.315	268.605	199.644	

現在は功程拂（請負）制度にて作業をなし冬期なれば壓延一交代によく行けば、7~6 噸の一級製品を出し夏期は 5~6 噸に下降し且つ製品の缺點も増加する傾向がある。故に珪素鋼板は暑熱の候は中止し黑板のみを壓延するが従業員の保健上又作業能率上よりも得策である。

ロールは仕上ロールにはチルド ロール、荒ロールはセミ チルド ロールを用ひて居る。ロールの材質成分等は谷口光平氏(鐵と鋼第 12 年 10 號)の研究に譲る事とする。荒ロールにセミチルドロールを使用せるは珪素鋼板工場を最初とし適當の名稱なき爲獨逸の“halbgehärt”を直譯して Semi

第 12 圖



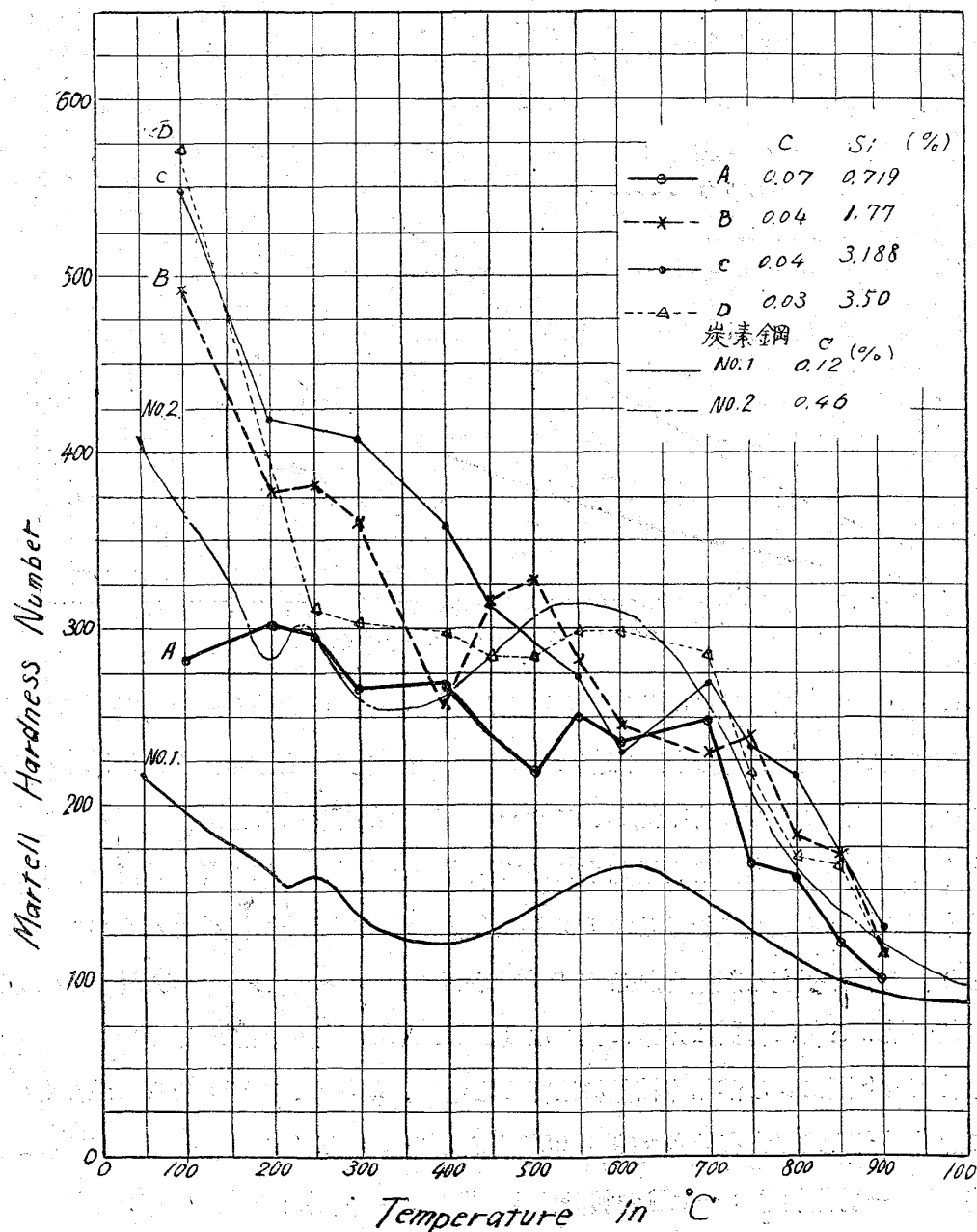
Chilled としたるものにして其の組織を見るに普通ロールに比し Pearlite が細密に斑なく發達して粘り強く荒ロールとしては良好の結果を示した。チルドロール表面はブリネル硬度 400 もあるにセミチルドロールの胴部はブリネル硬度 240 (2 噸荷重) 位にして、サンドロールよりは

稍々高き位置にある。鍛造ロール (forged roll) を荒ロールとして使用し居るも膨脹不整にして調節に困難を來し充分なる成果を示さない。

ロールの曲率はロール膨脹の程度及製品の厚薄等によりても加減せらるべきものなれど大體に於て荒ロールは半径にて 0.2 耗位、仕上ロールは半径にて 0.35 乃至 0.4 耗位の Concave を與へロールの旋削は獨逸 Naxos-Union 製のロール研磨旋盤 (Schleifmaschine) を使用して居る。

作業中のロール温度は一交代7廻以上も製品を出さんとせば400°C前後には上昇するものなれど餘りに上昇して450°Cを越へればロール折損の危険が多くなる。創業當時はロール折損多く困難を感じたが熟練と共に漸次減少して折損せるロールの最高壓延廻数は仕上ロール1,330.577 廻、荒ロール 1,785.896

第 13 圖 珪素鋼及び炭素鋼熱間硬度

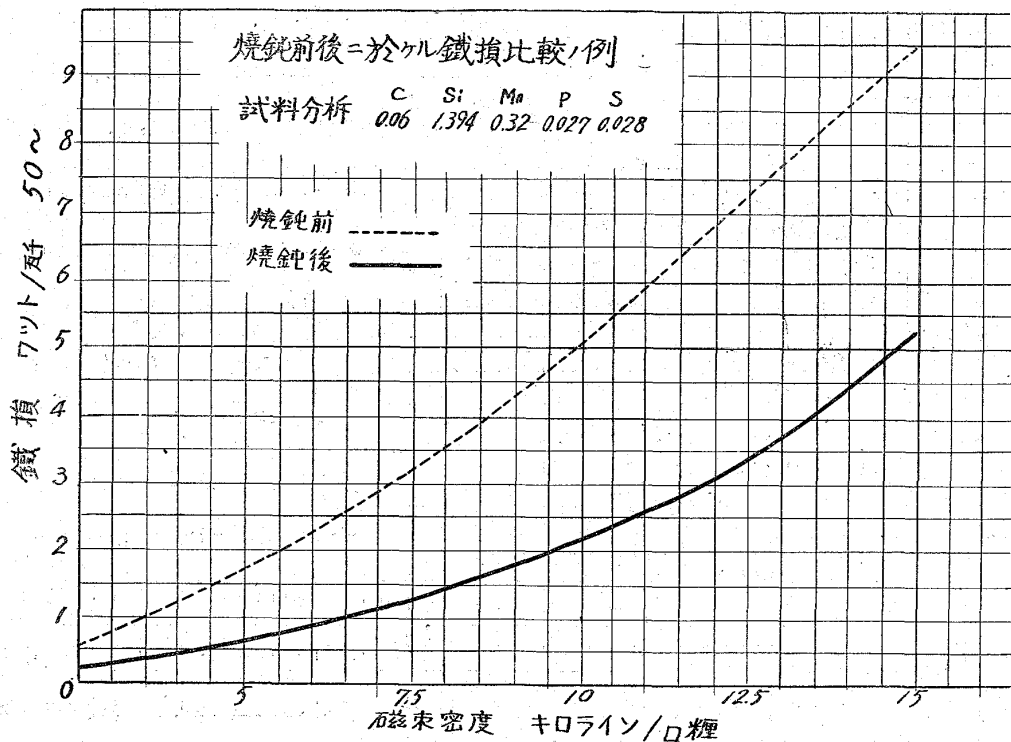


廻となつて居る。此の壓延に要する原動機は 600 HP 誘動電動機 2 臺を使用しローププーレーに依つて 375 回轉を減速してロールは毎分 30 回轉位となつて居る。此の設備にて作業中の電流變化曲線は第 12 圖の如きものである。電力消費量は製品應當り實驗的に測定すれば、壓延のみは 130 K. W.

H. 位になつて居るが實際は全工場にて次の如き結果を示す。

年 度 別	製品應當り消費電量
大正 13 年度	267 K. W. H.
大正 14 年度	208 K. W. H.
大正 15 年度	249 K. W. H.

第 20 圖



加熱爐はシートバー爐、4 枚爐、8 枚爐と各別となつて居る。發生爐瓦斯を燃料として用ひ何等特殊な設計を用ひてない。而し珪素鋼板の加熱には充分の注意を必要とする。之れは珪素鋼板は珪素含有量の増加に比例して酸化の度合も増進し、スケールも起き易く従つて還元焔は必須條件となり且珪素鋼は珪素含有量と共に其の堅さを増加するので温度も 950°C 以上に上昇するの必要が生ずる爲である。今各種珪素鋼の種々の温度に於けるマルテル硬度數を示せば第 13 圖の如きものである。炭素鋼との比較もあり、大體の硬度は想像されるが 950°C 以上になれば何れも大なる差異は認められない。然し珪素含有量の増加と共に材質は非常に脆くなり、加工には一層の困難を來すのである。4% 以上の珪素鋼となれば第 9 圖に見るが如く結晶粒は粗大となり、加熱も、壓延も非常に注意を要するのである。従つて加熱温度は珪素含有量多き時は 950°C よりも高く 1,100°C 附近に昇す事となる。

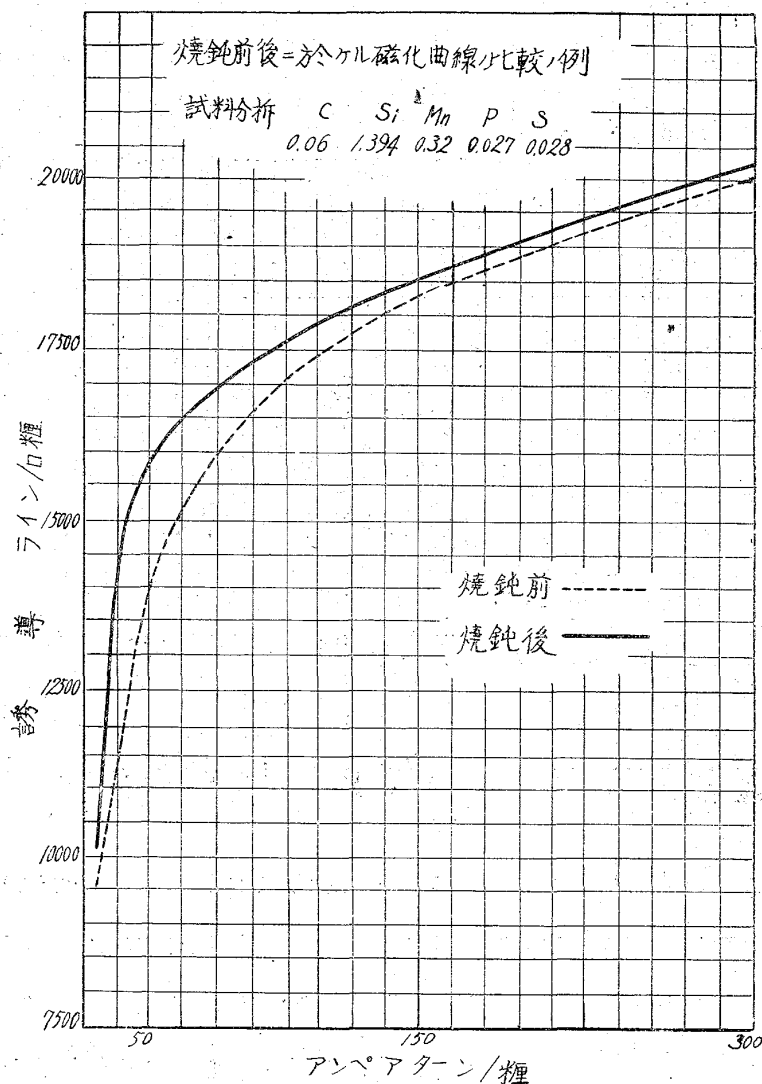
(4) 精整作業：一剪斷剝離：一上述の製品は 1 日間冷却の後所定の寸法に剪斷し板の端を少しく屈曲し剝げ口を作りて 8 枚重ねとなれるものを製がす。殊に變壓器用珪素鋼にありては特に注意して

端を急角度に曲ぐるは製品に不都合を來すので嚴禁されて居る。

粗矯正：剪斷剝離を終つた板はコールドロールを通過して粗矯正を行ふ、此處に於て大なる皺を取り去り且つ表面を平滑ならしめて Space factor を良好ならしむるのである。現在は1臺のみで充分此の機能を發揮せしむる餘力がないので早晚増設する事にならう。

(5) 焼鈍作業：—上述の加工より板は非常な内部歪を受けて硬くなり粒狀も不齊になつて居る。此

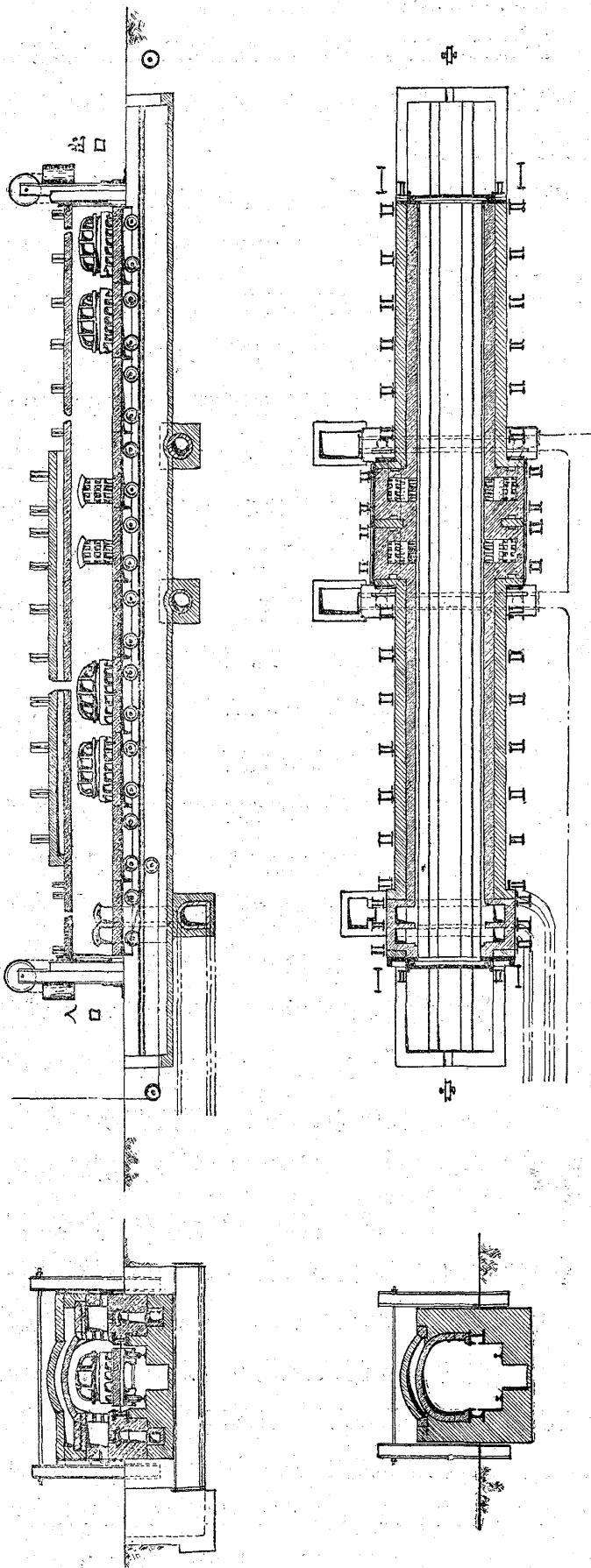
第 21 圖



を焼鈍すれば内部歪は除去され硬度を減じ延性を増して加工を易からしめ又粒の不齊を均整にするのである。従つて珪素鋼板電氣試験の良否は實に此の焼鈍の如何に據るのである。今壓延各工程に於ける顯微鏡組織の變化を示せば第14圖乃至第19圖の如きものであつて何れも其の變化の程度の甚しきに驚く程である。本試料の成分は C. 06, Si. 1.23, Mn. 27, P. 021, S. 035, Cu. 068 であつて全部同一の材料より試片を採りては殘部を壓延したのである。此の組織により粒の太さに及ぼす焼鈍の効果は明瞭に分明するであらう。而して此の粒の太さが如何に電氣試験の成績に影響するかは既に述べた如きものである。其の焼鈍による効果の程度は何程になるか、一例を掲げて見るに、第20圖の鐵損比較及び第21圖の磁化曲線の比較の如きものである。同一

の板に付きて實際作業に用ふる焼鈍爐にて試験せる結果にして實驗爐にて行へば尙一層優越なる結果を示して居る。又同一試料にて試みに Erichsen sheet metall tester に依て Erichsen value を比較したる一例を示せば珪素 1.31% 厚み 0.35 耗の板にて燒鈍前 4.62 耗、燒鈍後 6.27 耗となり、充分改良され、且つ此の Erichsen value は略々 tenacity を表はして此の値の大なる程加工は容易である。然るに珪素鋼板は型を打抜きて平面のまま使用する爲、餘りに軟きは打抜の際マクレを生ずる恐れありとして好まれぬ。現在製鐵所の珪素鋼板は軟かすぎるとの批評を受けるので同一程度の鐵損を有する外國品の Erichsen value を試験するに厚さ 0.35 耗の板にて 5.8~6.2 耗を示し製鐵所にありて 50 例

第 22 圖 連續式燒鈍爐



の平均を採るに同等の厚さにて燒鈍前 4.5 ~ 5.8 耗を示し燒鈍後 5.9 ~ 6.7 耗となり、燒鈍前に於て早や燒鈍せる外國品に近き Erichsen value を示し鋼質そのものよりして軟き特性を有して居る様に思はれる、其原因は何處にあるやは識者の研究を希ふのである。此の重要な燒鈍は連續式燒鈍爐 (Continuous annealing furnace) にて行つて居る。此の燒鈍爐は本邦に於ける最初のものにして第 22 圖の如く、全長 30 m に及び 10 臺の燒鈍臺車及其の上に乗つて 10 臺の燒鈍臺及び函が入る。一方より 1 臺装入すれば他方より 1 臺押し出さるゝ如くなり、燃料は發生爐瓦斯にして、瓦斯は第 6 臺目の所に噴出燃焼し押入口の方より煙突に導かる。臺車上の燒鈍臺函は装入せらるゝや燃焼瓦斯によりて豫熱せられ順次進みて 6 臺目となりて噴出口前に達し其の後は漸次爐内を通りて自然に冷却して爐外に出るのである。

燒鈍溫度は 750°C 乃至 900°C を選び 950°C を超過すれば却て惡結果を表はす。變壓器用硅素鋼板にありては 750°C 乃至 850°C となし、大體の原則としては硅素含有量少なきものは高く、多きものは低く、且つ冷却速度の遅き方 hysteresis loss を減じ permeability を増加する様であり、又炭素の量比較的多き時は一層此の影響が大なる様に思はれる。燒鈍時間は製品種別又は量により異なるが現在は 3 ~ 4 時間に 1 臺づゝ装入して進み爐外にも同時間に一臺づゝ出て



居るが、餘り長時間焼鈍するのも結果が思はしくない。over annealしたる製品は磁化力の増加に比較して Watt loss の増加率が非常に増大する様である、又種々の方法により、其磁氣性質を改善せんと試みては居るが一度 over anneal したるものは回復が困難である。960°C にて5時間 over anneal せる一例は次の如き悪結果を示してゐる。

C	Si	Mn	P	S		
0.06	1.547	0.25	0.012	0.025		
	50~		誘導	lines/cm <sup>2</sup>		
厚み7耗	W 10	W 15	25A.T./cm	50A.T./cm	100A.T./cm	30A.T./cm
0.35	3.004	7.756	14.920	16.170	17.450	19.820

一般に 500°C を超へれば hysteresis loss は減少し導磁率も増加し始める様であるが、上記の温度が實際作業にては良好の様に思はれる。

珪素鋼板は非常にスケールを生じ易く、寧ろ避け難く其の厚みも頗る不均等にして、大體鐵板の厚さの7~20%に及ぶ事もあり。而も珪素含有量多き程スケールも厚く生じ易し、スケールの磁氣的性質は著しく鐵に劣りスケールある鐵板は導磁率を低下せしむ、尤も比抵抗は約 130 Micro-ohm/cm 程度にして鐵に數倍するを以て薄鐵板間の絶縁に必要なり、との説ありて昔は或程度の厚きスケールを付けてゐたのであるが、最近は極力スケールは薄く一樣になす傾向となり種々の方法で施されて居る此の方が電氣試験の結果導磁率を高め飽和點も高める如き甚だ優秀な成績を表はすのである。要するに空氣は珪素鋼板の焼鈍には最大禁物である。依つて現在の作業にては鑄鋼製の焼鈍臺上に約6匁の製品を規則正しく積み鑄鋼製の焼鈍函を以て蓋ひ臺及び函の空隙には砂を充填して空氣及び火焰の流入を妨げ、酸化を防ぐのである。且臺上に積める製品の上部及下部にて加熱温度及速度の差大なる時は上部及下部に於て磁氣性質を異にする爲、焼鈍臺及び函は低きものを用ふる事として居る、第22圖には爐内に於ける状態が見られる。現在は高さ約600耗であるがその上、中、下3個所に於ても電氣試験を行へば同一材料にても相當の差異を示して居る。一例を示せば――

C	Si	Mn	P	S	厚み	50~		誘導 lines/cm				
						W <sub>10</sub>	W <sub>15</sub>	25A.T.	50A.T.	100A.T.	300A.T.	
0.06	1.286	0.33	0.02	0.024	0.35	上	2,176	5,677	15,570	16,600	17,780	20,200
						中	2,477	6,088	15,220	16,290	17,450	19,890
						下	2,315	5,736	15,450	16,500	17,670	20,250

上部は温度先づ適當 C規格に合格するものなれど下部は少しく不足にして B規格に合格し、中央部は未だ充分ならざるを示す、中央部を充分とせば上部は over anneal される傾向を有すべく、僅かに600耗の高さに於てさへ此の差を生じ工業的に行ふには此の加熱の制御は中々困難なのである。殊に連続式焼鈍爐にあつては温度計は爐壁の温度を測定するのみで函内の製品温度は豫想するのみで瓦斯の加減、空氣量、燃燒狀況、焼鈍臺及函の新舊、鐵板の厚薄及重量等種々の要素の爲常に一定温度を函中の製品に與ふるは一層困難なのである。殊に珪素含有量多き變壓器用珪素鋼板は紙の如きスケールが起きるのである、依てかゝる高級品は上述の box annealing にても尙不充分にして空氣を完全

に遮断するか、又は除去して焼鈍せねばならぬ。普通の電機用珪素鋼板にても空気を遮断して焼鈍すれば優良なる結果を表はす。

C	Si	Mn	P	S	Cu	厚み	誘導					
							W <sub>10</sub>	W <sub>15</sub>	25A.T.	50A.T.	100A.T.	300A.T.
0.06	1.108	0.29	0.019	0.036	0.074	0.35 <sup>(1)</sup>	2,012	5,032	15,810	16,930	18,110	20,610
						0.35 <sup>(2)</sup>	2,367	5,883	15,580	16,670	17,840	20,310

(2)の方は普通の作業にて焼鈍せるもの、(1)の方は実験用の焼鈍函を鐵板にて作り空所には旋盤屑を充填し蓋は銲接して空気を遮断し、(2)と同時に焼鈍したもので製品は白色を呈し麗しきものである。

斯くの如く空気が大禁物であるが如何にして經濟的に空気を遮断し焼鈍するかは緊要にして且頗る困難な問題である。上述の加熱温度及此のスケールの問題並びに表面を平滑にして Space factor を良好ならしめ磁性を益々改良せんが爲外國に於ては gas pickling といつて特殊な pickling を伴ふ焼鈍を行つて居る。又表面は白色を呈するを以て bright annealing の名稱も與へられてをる。それは natural gas 又は CO gas の如き還元瓦斯か inert gas を焼鈍函中に絶えず吸入せしめつゝ、之の瓦斯にて製品を包みたる状態にて電氣爐を用ひて焼鈍するのである。その結果は温度の加減は自由にしてスケールらしきものは認められず且つ表面は pickling されたる如く淨化されて平滑となり製品も灰白色を呈して磁氣性質は非常に改善され電氣試験に優秀なる結果を表はすのである。變壓器用珪素鋼板は此の gas pickling を行ふ焼鈍に非ざれば到底外國品の如き優秀なる品は出來ぬのである。依つて本所に於ても gas pickling を行ふ電氣焼鈍爐を計畫中である。以上の焼鈍を終つた品は出來るだけ緩速度にて冷却して居る、冷却速度遅きものは hysteresis loss を減じ導磁率を好くするものである。

焼鈍費用にて最大のものは焼鈍臺及び函の消耗費である、目下は普通の鑄鋼を使用して居るが最高 100 回位の使用回數であり 50 乃至 60 回にて龜裂の入るものが屢々ある。如何にして此が耐久力を増加せしむるかに苦しんで居る、耐熱鑄鋼の研究の盛大ならん事を望むのである。

(6) 酸洗作業：—普通の box anneal に於ては或程度のスケールは薄膜となりて全面を被ふのである、殊に珪素含有量の増加に比例して此の薄膜の厚さは著しく厚くなり高級の珪素鋼板にあつては酸洗して清淨にして居る。此の珪素鋼板のスケールは非常に酸洗し難く酸の強度を増せば鐵の地肌を侵す危険があり、且つ over pickled されたるものは Nascent Hydrogen の影響の爲め脆くして電氣試験の結果が不良である。今此のスケールの一例を示すに珪素含有量 4.02% の板を普通の box, anneal したる時に生じたるスケール(厚さ 0.02 耗あつた)のみを分析したる結果は次の様である。

Fe	M.Fe	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Mn	Al
86.626	80.634	7.328	0.423	9.787	0.41	0.38 trace (dust ならん)

SiO<sub>2</sub> の一部は Si の形にて存在する事を Br 又は Cl<sub>2</sub>CuK の陶礬酸液に溶かして推定するに

不溶 SiO<sub>2</sub> 8.19 可溶 Si 0.75 斯くの如くスケールを附着せしめて後除去する如きは幾分鐵損は

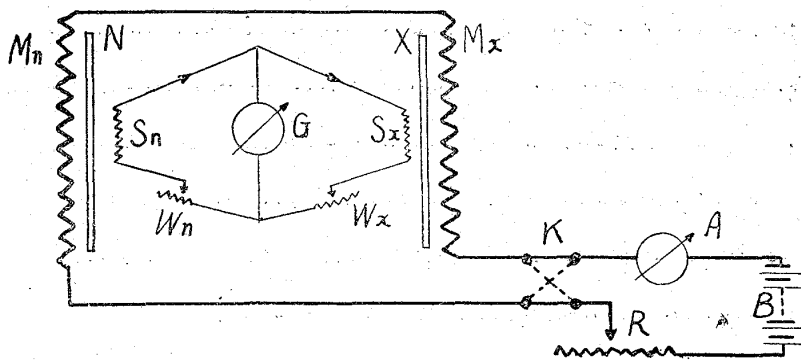
良好となるも尙不充分であつて gas pickling により積極的にスケールを附着せざるものには遙かに及ばず、高級の珪素鋼板にありては gas pickling を行ふに非ざれば如何に酸洗するも良結果は得られ難し。

(7) 仕上矯正作業：一焼鈍を終り電氣試験を行ふ前に矯正機に掛けて一層表面の平滑を期して居る。獨逸 Karl Fr. Ungerer 製の仕上矯正機にて板に無理を與へぬ程度に矯正するのである。コールドロールの如く板を強壓せぬので靱性強度にはさしたる變化を表はして居ない。

(8) 電氣試験作業：一珪素鋼にあつては電氣試験が核心をなすもので大體に於て American Society for Testing Materials Specification "A 34~24" (A. S. T. M.) に準據して行つて居る。本所に於ては Siemens & Halske 社製の新様式のエツプスタイン装置 (Epstein Apparatus) に依て特に入念に試験して居る。此の装置は試験材の導磁率を測定し並びに鐵損失をも測定せられ従來の Ballistic Method に依る鐵板の磁氣性質の測定や或ひは單なる電力計法に依る鐵損失の測定に比し測定は非常に簡單にして且其測定結果は正確度が大きく實用上取扱が便利である。詳細の説明は「富士電機時報」第 2 卷第 6 及 7 號に掲載されて居るので今はその測定法の理論だけを掲げる事としよう。

此の測定法は Maxwell 氏に依つて説かれた二つの相互誘導を比較する時の差働結線法に端を發して居る。第 23 圖は此の新試験装置の結線圖を示し N は標準材料で此の試料は他の法に依て其磁化曲

第 23 圖



線が前以て決定されて居るのである。X は試験せんとする試料である。此の 2 個の試材は互に相等しい寸法の磁化捲線の中に挿入されるのであるが、かくて時々電流の強さと共に各々に相互に相等しい強さの磁界が発生する。二次捲線は第 23 圖の

如く檢流計と調整抵抗とを以て一つの回路を形成して居る。先づ第一に一次電流を種々に變更すると一般にそれに應じて檢流計の振れを伴ふけれども次に抵抗  $W_n$  と  $W_x$  との關係を適當に變更して遂に磁化電流の變化が檢流計の振れを伴はないまでに到らしめる。今兩試材の磁束密度を夫々  $B_n$  及び  $B_x$  とし兩試材の斷面積を夫々  $Q_n$   $Q_x$  とせば此の場合誘起せられた積算電壓は誘起せられた磁束に比例し、且つ試験捲線の捲数は相互に等しと考へらるゝより、次の如き算式を得る。即ち

$$B_n \cdot Q_n : B_x \cdot Q_x = W_n : W_x$$

$$\therefore B_x = \frac{B_n \cdot W_x}{W_n} \cdot \frac{Q_n}{Q_x} \dots \dots \dots (1)$$

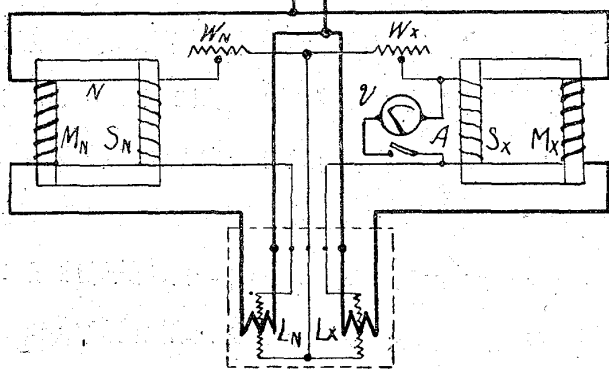
更に兩試材の斷面積が相互に等しとせば

$$B_x = \frac{B_n \cdot W_x}{W_n} \dots\dots\dots(2)$$

兩試材及び兩捲線が相互に相等しい寸法になつて居る事から更に電流計 A の讀みをして兩試材の磁界の強さを A.T./cm で表はす様にする事が出来る。更に又調整抵抗は之の各値をして其讀みを標準試材に就いて既知の適當な磁束密度  $B_n$  の値に等しくさせる事が出来る(即ち  $W_n = B_n$ )。斯くして第一次捲線の電流を變化しても檢流計が振れを生じない迄に試験さるゝ試材の第二次回路の調整抵抗を調整すれば、その抵抗の値はその試材に誘起せられた未知の磁束密度に等しくなる(即ち  $W_x = B_x$ )。尙第二次捲線の抵抗の影響は抵抗  $W_x$  及び  $W_n$  に對して微かなものであつて何等考に入れる必要のない程である。茲に於て該測定の場合に計算したり、或は測定の結果に補正を施したりする事なく簡単に直接讀みを取る事が出来る様に作られて此種測定技術をして容易に達成せしめて居る。

次に差働結線法に依つて鐵損失を測定する方法は先づ N は標準試材であつて其  $B_{max} = 10,000$  及び

第 24 圖  
50



15,000 Gauss に對する鐵損失は既に知られて居るものとし、次に x は試験さるゝ試材であつて、其斷面積及び重さは前者と等しい値を有するものとする。而して兩試材は相互に相等しく作られた第一次捲線  $M_n$  及び  $M_x$  並びに第二次捲線  $S_n$  及び  $S_x$  を備へ、各試材の第一次捲線は各々等しく作られた電力計  $L_n$  及び  $L_x$  に依て第 24 圖の如く直列に結線されて主電流に直結せられ、又第二次捲線は二つの調整抵抗(インダクション及び

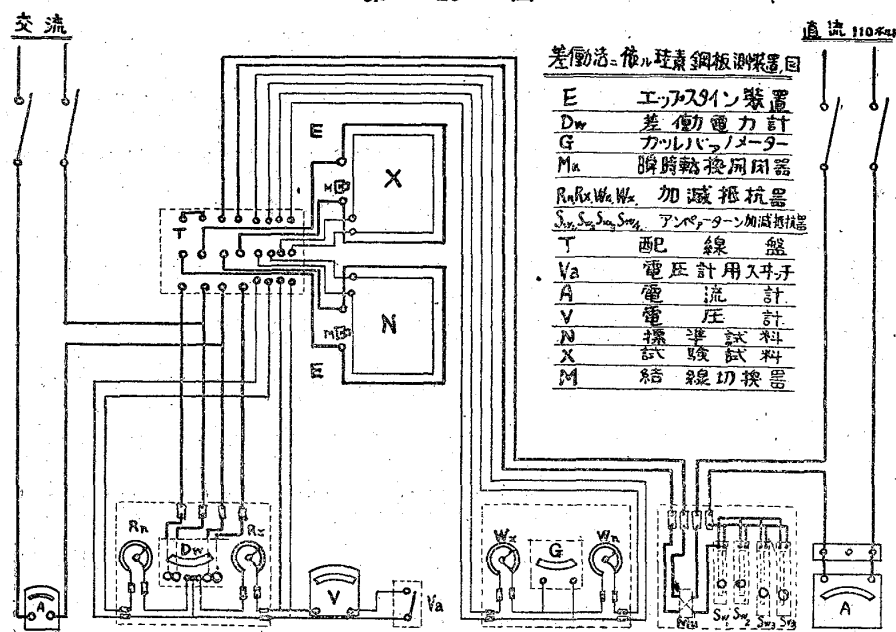
コンデンサーを有せざるもの)  $W_n$  及び  $W_x$  を以て電力計の電壓回路により相互に結線せられたならば此の結線に依つて兩電力計に與へられた電力の値は其の損失  $V_n$  及び  $V_x$  の値に比例し抵抗  $W_n$  及び  $W_x$  の値に逆比例する。更に電力計の二次回路に於ける電力の消費に至つては全く微かなものである。斯くて今先づ兩試材に於ける電力損失が互に相等しとせば抵抗  $W_x$  及び  $W_n$  が相等しい時には兩電力計に起つた指針の振れは互に相等しいのである。此の二つの電力計を組合せて差働結線式の電力計を作り、乃ち 1 本の軸に此の二つの電力計を結びつけて、其の目盛は兩電力計の各振れが相等しかつた時に零點を指示する様に致すのである。それで兩試材の損失が互に相等しからずして、圖に於て右の方の試材の其の値が他のものゝ 2 倍も大きいものであれば、右方の電力計は他の 2 倍の振れを生ずる。此の振れは、抵抗  $W_x$  の値を他の 2 倍の大きさに調整した時に於て以前の半分に戻る、同様に損失が 3 倍も大きいものであれば、其の調整抵抗も亦 3 倍の大きさに至らしめねばならぬ。即ち

$$V_n : V_x = V_n : W_x$$

$$\therefore V_x = \frac{V_n \cdot W_x}{W_n} \quad V_x = W_x$$

上式より見れば差働結線式電力計が零點を指示した時には、兩試材に於ける損失は各々其の時の抵抗の讀みに等しいと云ふ事が解る。即ち此の測定法は前述の磁化曲線測定の場合と全く同様に標準試材の既知の  $V_n$  に等しく抵抗を計算してをく事に依つて簡単に完成せらるゝのであつて、抵抗  $W_x$  の讀みは即ち試材の未知の損失  $V_x$  に等しいのであるが、之は上式に依つて明瞭である。斯くて未知

第 25 圖



の損失は一寸抵抗を調整するだけで何等計算の煩もなく簡単に直接其の値を得る事が出来るのである。此の測定法は上述の如く殆んど機械的であつて、且つ如何なる場合にも計算の手数なく何等経験なき素人にも簡単に成就せらるゝのである。周波數や波形率の影響も比較的少なく測定結果の正確度もよい。目下使用中

の装置全般の結線圖は第 25 圖の如きものである。

次に時効の試験をするには鐵板の酸化を防ぎて 100°C にて 600 時間保熱し、その前後の鐵損失を測定して Watt loss の増加を百分比で表はすのである。此の時効の問題は現今の珪素鋼板にては實用上問題を來す程鐵損失の増加はなく、珪素含有量増加すれば殆んど現はれない、依つて時効の測定は各試料に就きてはなさず、唯隨時に行ひ、何等時効の記載なきものは實用上無時効 (practical non-aging) と見做して好いのである。珪素量少なき品にても aging は 2~3% に止まつて居る。今その一例を示せば次の如きものである。

厚さ 0.35	C = 0.06	Si = 1.103	Mn = 0.47	P = 0.021	S = 0.029	Cu = 0.114
	50~		誘導			ライン/cm <sup>2</sup>
	W10	W15	25 A.T.	50 A.T.	100 A.T.	300 A.T.
燒鈍後	2,312	6,286	15,410	16,490	17,680	20,150
100°C 600 時間の後	2,319	6,310	15,390	16,510	17,690	20,190

斯く嚴密なる試験を行ふ爲、珪素鋼板は燒鈍臺上に積む際に上下には黑鋼板を積み其の間に挿みて燒鈍し自然冷却の後最上部より 4 枚、中央部より 4 枚、最下部より 4 枚と都合 12 枚の製品を採りて各部分別々に鐵損失及び誘導を測定して居る。試材は 50 × 3 c.m のものを壓延の方向及横の方向に同一の鐵板より半半に切り採り、1 束 25 疋のもの 4 束、合計 10 疋の試材に依つて試験する。珪素含

有量多(4% 前後)く抵抗が 2.6 ohms per meter gram 以上の品は比重を 7.5 と假定し、珪素量少なく(電機用) 2.6 ohms per meter gram 以下の品は比重を 7.7 と假定し其の重量よりして斷面積を出すのである。故に測定用試材は剪斷に當りても鋭角の刃先を用ひマクレの出來ざる様になし、Space factor の影響を出來得るだけ減少し、前述のエフプスタイン装置にて試験せる結果が上、中、下各部の試料共同一の規格に合格する時は此の焼鈍臺全部は其の測定結果の規格品として發賣するのである。例へば今中部、下部、兩試材の結果は「C」規格にして、上部は「B」規格なりしとすれば更に試材を上部と中部との中間より採りて測定したる結果が「C」規格とすれば此の後に採りし試材以下は「C」規格とし、其以上は「B」規格なりとして發賣するのである。試験結果に差異あれば漸次小區劃に分けて何れの規格に適合するやを選別し、其の區間は其の測定せる規格にて代表するのである。それ故に發賣せる製品に附せる試験成績書は、其の Max. watt loss と Min. Induction とを代表するものであつて板が成績書の結果と全然同一である事は望み難く唯其の保證せる規格の範圍は超過しないものなのである。例へば W10/50 が 2.27~2.46 Watt per kg の間は「B」規格を以て表はし W10/50 が 2.26 より 1.96 迄は「C」規格として發賣して居るのであつて此の範圍は超過しない事を保證するものにして鐵板が變れば假令同材質同時に焼鈍せるものにて測定せる結果は幾分の差異は免かれぬのである。外國に於ても全然同一の方法に依つて居るのであつて。U. S. 等は 10,000 LBS に就き一試験を行ふのであるが本所は 500 kg に一試験を行ふ位になつて居る。

(9) 檢定包裝作業：— 以上の工程を経たる製品は電氣試験結果に従つて、各規格別、鋼番及び厚さ別に分けて各板を一枚一枚に付き檢定が行はれる。檢定は厚さを一枚毎にマイクロメーターにて測定し且つ表面疵の有無、寸法等をも檢定して居る。

製鐵所に於ては製品検査をなす爲めに、獨立せる監理部檢定課と云ふ課がある。

此の形狀検査及び電氣試験は工場にて行はずして嚴正を保持する爲に、此の檢定課にて行ふのである。厚さの公差は一枚の板に付き  $\pm 10\%$  以下幅及び長さの公差  $-0+6$  mm とし荷造り 1 函分の重量(250 kg) はその鐵板の廣さ及び厚さに對する公稱重量に比し  $\pm 2.5\%$  以上の公差は許されぬ。斯くの如き嚴重なる検査を受くる爲形狀不合格になるものが、相當多量にあるのみである、之の形狀不合格のものは疵の箇所を切斷して短尺を作つて居る。此の短尺は電氣的には何等不都合なきもので皆電氣試験には合格したものであつて、疵は皆取除かれ唯寸法が不足するのみである。小型の打抜用には充分に使用に耐へ得るものにして大型以外には打抜の手數を要するも、此の短尺の安價なるのを使用せば手數は償ひて餘りあるものである、目下の短尺寸法は次の如きものである。

厚さ 0.43 mm (0.017")

3' x 5'  
3' x 4'  
3' x 3'  
30" x 6'

厚さ 0.35 mm (0.014")

3' x 5'      33" x 5'  
3' x 4'      33" x 4'  
3' x 3'      33" x 3'  
30" x 6'



昭和 年 月 日

磁素鋼板試驗成績通知票

磁素鋼板掛

約定		注文者				注文吨數			
製第	號	期限	記號	等級	カード番號				
箱番號	寸 法	枚 數	正味重量	全 重 量	鋼 番	ワットロス	燒鈍月日	燒鈍箱	

### V 本邦の需要狀況

大戦中は事業界の好況に刺激せられ、此の電気鐵板事業も勃興するに到りしも、未完成のまゝであつた。輸入量は漸次増加し電気時代の到來と共に現今に於ては電気鐵板輸入の近狀を下掲輸入統計を以て概觀し得る(單位佛吨)。

輸入月	輸出國	英 國	獨 逸	埃 太 利	瑞 典	合 衆 國	合 計
大正 15 年 11 月		107	51	—	—	575	733
同 12 月		268	100	—	—	584	952
昭和 2 年 1 月		35	51	—	28	645	759
同 2 月		96	224	—	144	685	1,149
同 3 月		622	—	2	84	851	1,559
同 4 月		315	204	—	38	576	1,133
同 5 月		447	168	—	—	650	1,265
同 6 月		127	32	—	11	423	593

2月3月の瑞典製品の輸入増加は昨年の英國炭坑罷業の影響により、英國品代用として低廉なる瑞典製品に着眼した結果である。然し品質の劣等なものと注文獲得によつて漸次値上をなした爲、其後殆んど我市場より顧みられない。獨逸品はチツセン、ピスマルク等の工場を主とし、輸入値段はモーター 24-5 磅、トランスホーマー 35 磅見當で、モーターシートの如きは低廉な爲多少の注文は行はれてゐるが、我國の加工業者が英米製品の使用に熟練し、一、二の技術上獨逸系の會社を除いては一般に獨逸品を歓迎せず、従つて我市場に占むる地位は未だ重要なりと云ひ得ぬ。

英米獨の各製品の輸入値段は一般鋼材の如く激烈な變動なく、近時は殆んど一定し、専ら爲替相場によつて輸入値段の變化を見る。現在は爲替安の結果相當高値である。最近の輸入値段左の通り。



Transformer sheet. 14 mils × 3' × 6'

U.S.	Allegeny	Armco	Lohys
\$ 172(¥336)	\$ 163(377)	\$ 171(¥333)	£ 34-15s(¥380)

Motor sheet. 14 mils × 3' × 6'

\$ 138(¥311)	\$ 134(303)	\$ 136(¥303)	£ 27-15s(¥305)
--------------	-------------	--------------	----------------

Exchange rate 47 1/8 1-11 1/4

而して過去2ヶ年の輸入概況は次表の如くである。

年度別	本所販賣量	輸入量	合計
大正14年度	72 <sup>T</sup>	9,124 <sup>T</sup>	9,196 <sup>T</sup>
大正15年度	993	10,727	11,720

(14年度輸入は4月より12月迄の輸入数量により1年分を推定、本所生産會計年度、輸入は暦年)

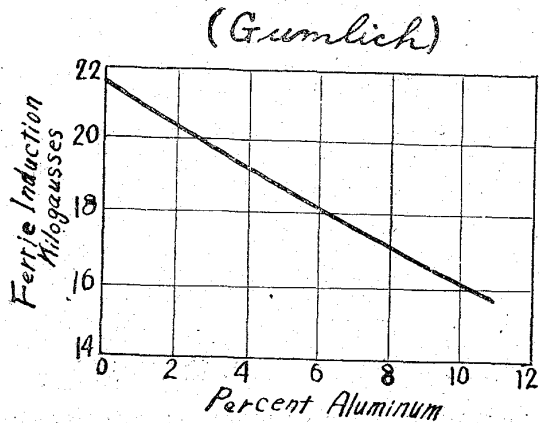
先づ12,000 匁と考ふるが妥當であらう。品種は電動機用及び變壓器用、略々同數量位ならんと推定せらる。今電動機用1匁300圓、變壓器用350圓と假定すれば此の價額は約400萬圓となるのである。既往は試験時代なりし爲、本所生産量は僅少なりしが、本年度よりは芝浦、日立兩製作所と定期契約を結び三菱電機株式會社にも時々供給し年間2,000匁を製造する豫定である。技術及び設備の完成と共に漸次増産する計畫である。

## VI 將來發達の推測

現今電氣機器製作に缺くべからざる珪素鋼は1899年にHadfieldの發見せるに始まり、其の後の研究に據つて漸次改良せられ、現今使用せらるゝものはHadfield發見時代のものに比し鐵損失は約1/2最大導磁率は2倍以上になつて居る。然し此の進歩も主に1910年以前に行はれたもので其後の進歩は實に遅々たるものである。最近に到り又進歩の勢を見せ殊にgas picklingの發達には見るべきものが多い。既に述べたるが如く珪素鋼板は鐵損失を下降し時効を防ぐ効果は大なるも導磁率が餘り高くないので、此を殖やす事が出来れば一層理想的になるわけで各製造者は競争して珪素含有低くして、しかも鐵損失を増加せずして導磁率を高める傾向があつて、此の方面の研究よりしてgas picklingの發達となつたのである。唯此のgas picklingも目下の状態にては相當經費を要する爲高級の珪素鋼板にしか使用されない。今後は此の方面に向ひ一層經濟的作業法が研究され、熱源の考究、廢棄瓦斯の利用、豫熱の利用、保温装置等種々進歩すべき道程が窺はれるのである。數年を出でずして此の方法は廉價に遂行せられて、特殊の鋼板にも其の應用が擴張せらるゝであらう。従つて此の方法の發達は板の表面スケールは非常に薄くして認識し難く嘗ては絶縁の効果ありとの説も今は重きをなさぬ状態なのである。現今は自動打抜機械(Automatic Stamping Machine)の利用盛んならんとし、且つ大容量變壓器の出現多き現状よりして長尺物の要求漸次増加の傾向がある。本所は燒鈍函等の關係より最長6呎迄の製作設備なるが外國は9呎物を造り、技術さへ進歩すれば此以上のものを出すに到るやも知れない。

次に考ふべき事はアルミニウム鋼の事である、即ちAlをSiの代用とするものであつてAlは

第 26 圖  
鐵アルミニウム系合金の誘導



電磁氣性質には Si と同様の影響を表はして居る。第 26 圖を第 8 圖と比較せば誘導の一例は知られる。Yensen 及び Gatward の兩氏の材料を真空中に熔解して種々研究 (University of Ill. Eng. Experiment Station Bull. No. 95, 1917) したる結果によれば次の様である。Al は Si よりも有力な脱酸劑にして酸化物が全部消失する迄は鐵と結合せず、且つ Al は鐵と Solid Solution を作る範圍が廣い、Al 含有量 0.4% にして 1,100°C にて焼鈍せるものは最も優秀なる電磁氣性質を示し、Al 量の増加は Si とは反對に此の性質を悪化する。Si の多き鋼は脆く Al の多き鋼は脆くない、且つ此の Al 鋼は残留磁氣が少ない爲、此の特性を重要視する電氣機器、又は測定器等に用ふるに適して居る。唯此の Al 鋼は Segregation を起し易い缺點がある。將來今一層此の方面の研究にして進歩し Al の原價の低落を見るに至らば或は此の珪素鋼板はアルミニウム鋼板に変更する時代の出現するかも知れないのである。

尙高級品として特殊合金に Permalloy, Heasler's alloy 等があるが價額の點で未だ珪素鋼板を驅逐するに到らぬ。次に考慮すべきは、電解鐵の事にして多數有力な研究もあるが此處には省略する。

要するに現在は電磁氣性質に於ては珪素鋼板に優るものはあれど經濟的理由により未だその代用となるに到らず珪素鋼板を種々改良して其の弱點を償はんとする趨勢である。

最後に著者は本稿の發表を許されし野田技監に衷心より深謝し又發表の機會と指導とを賜つた永田部長、井村課長、水谷課長の御厚意を感謝する次第であります。且つ八幡にては書物も思ふ様に手に入らず種々参考文献の複寫を御援助下さつた東京帝國大學冶金學教室に在る畏友、工學士谷山熊雄君に深く御禮申し上げます。

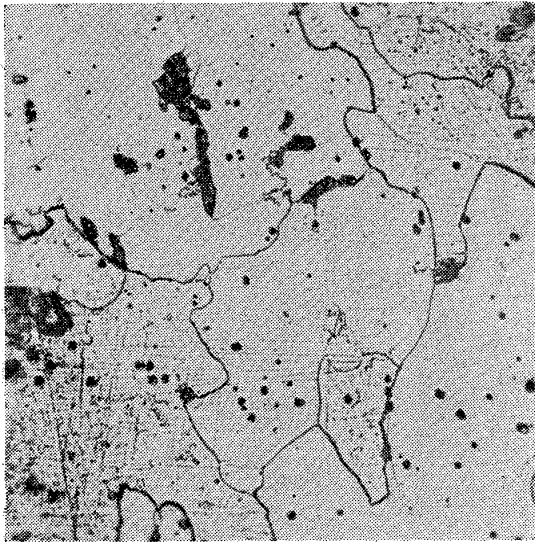
第 9 圖

Si=4.23% Sheet bar の破面 × 3 Macrostructure



第 14 圖

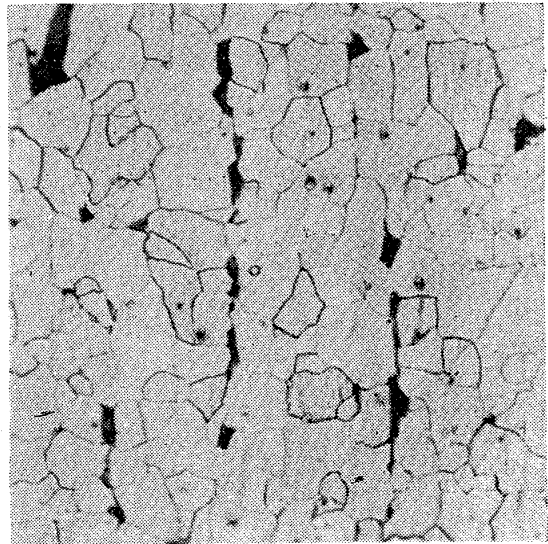
珪素鋼塊 × 100



腐蝕液 硝酸 Ingot のまゝ Si=1.23%  
Silico ferrite + Silico Pearlite

第 15 圖

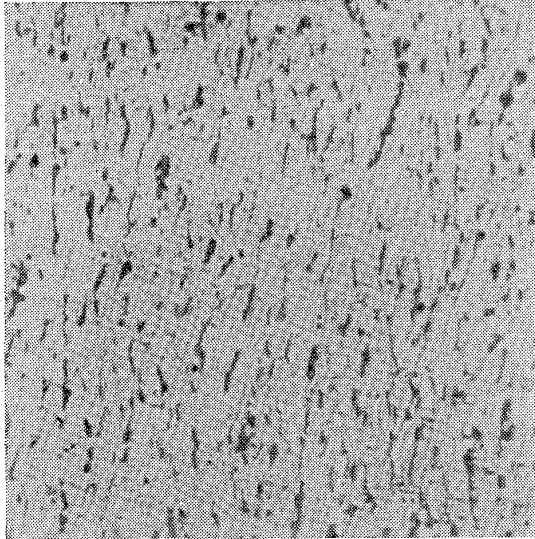
珪素鋼板用シートバー × 150



腐蝕液 硝酸 Si=1.23  
Silico ferrite + Silico Pearlite

第 16 圖

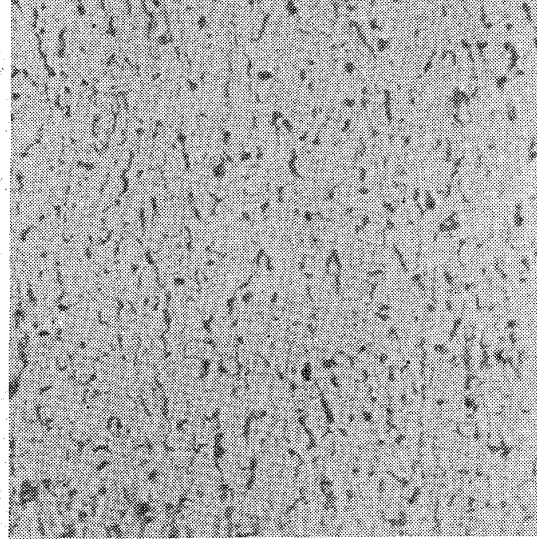
荒ロールにて延ばしたるもの (2枚重)



腐蝕液 ヒクリン酸 ×300  
grain 小 壓延方向に延ばさる Si=1.23 %  
Silico ferrite + Silico Pearlite

第 17 圖

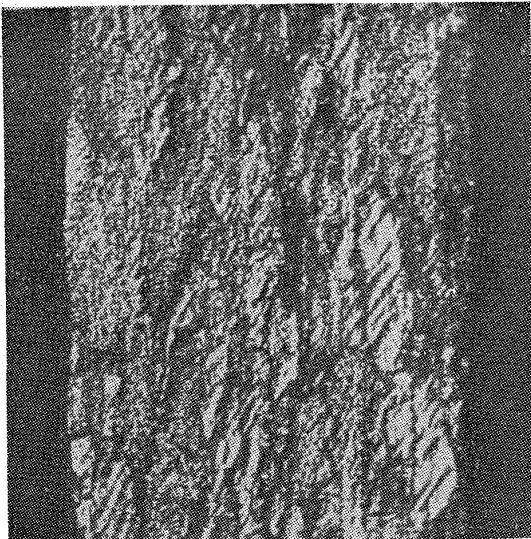
4枚重ねを延ばしたるもの



腐蝕液 ヒクリン酸 ×300  
grain 更に小 壓延方向に延ばさる Si=1.23 %  
Silico ferrite + Silico Pearlite

第 18 圖

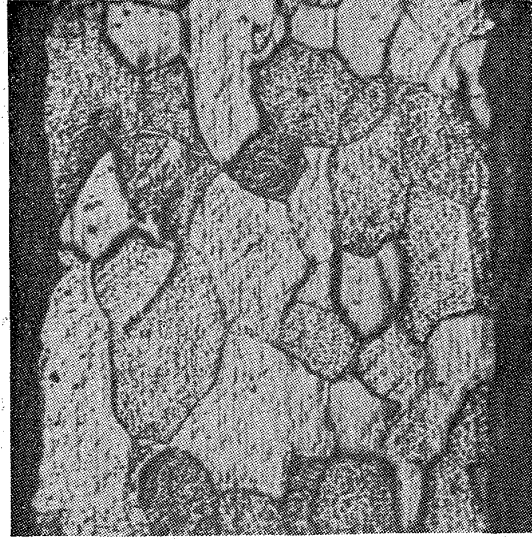
8枚重ねを仕上げたるもの



腐蝕液 硝酸 ×150  
grain 稍大となるも 壓延方向に延ばさる  
Si=1.23 % Silico ferrete のみ  
Silico Pearlite は分解消失す

第 19 圖

仕上げたるものを焼鈍せる時の組織



腐蝕液 硝酸 ×150  
ferrite のみを認め grain 大にして  
Polygonal Structure をなす Si=1.23 %  
Silico Pearlite は消失す