

再び珪素鋼板に就て

(主として變壓器用鋼板)

中島道文*

SECOND REPORT ON THE ELECTRICAL SHEET WITH SPECIAL REFERENCE TO TRANSFORMER SHEETS

Michibumi Nakajima.

The common method of manufacturing electrical sheets was dealt with in the Journal, Iron and Steel Institute, Japan, Vol. XX, No. 1. Since then, the electrical sheet has been studied well in Europe and the United States, and they have produced some sheets which were excellent in their electric and magnetic properties. Nowadays when transformers of higher capacity are being in demand, we naturally expect more and more superior electrical sheets with the higher flux density and the less iron loss. The present paper deals with the development and manufacturing methods of the transformer sheet in Europe and the United States as well as the actual practice in Japan together with part of the experiments conducted by the author. Then, the possible and commercial method of manufacturing excellent electrical sheets with least iron loss were also referred to.

1. 緒言

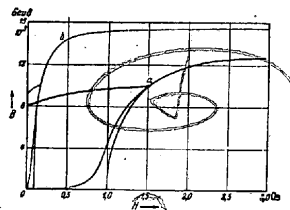
電動機、變壓器其他一般回轉子用珪素鋼板の製造法に就いては既に鐵鋼協會誌第20年第1號に記述した。此の鋼板に就いては各國に於ても既に研究され種々貴重なる論文の發表あり、製品に於ても特に變壓器用鋼板は歐米のもの非常に優秀なるもの製造されつゝあり。翻て本邦の現況を見るに技術も進歩し逐次品質の改良も行はれ成績も向上してゐるも歐米品に比する時未だ遜色あるは甚だ遺憾なり。弊社に於ても製造の傍、絶えず研究に専念し技術的改良發展と製品々質の向上に努力し、如何にして優秀なる鋼板を得るや極力研究中なり。今此處に歐米に於ける發達経路及び現況と本邦製品との比較をなし、更に優秀なる鋼板を得んが爲に製造工程に於て特に考慮すべき二三の要點を記述し御参考に供し御指導を仰がんとす。

2. 歐米に於ける珪素鋼板發達経路

炭素の少き瑞典の木炭鐵は1900年頃迄全般に使用されゐたるが變壓器用鐵心としての唯一の要求たる交流磁化に於ける勢力損失が出来るだけ少い事と出来るだけ最大導磁率の大きい事(即ち出来るだけ抗磁力の小さき事)等の磁氣的性質悪く即抗磁力は約1 oerstedであり、ヒステレンスループの面積は最大1000 gaussのとき3000 erg/cm²なり。(強電用磁性材料の特性を示すのに屢々ループが10,000又は15,000 gaussに達する50~の交流に對する1疋當り

第1圖

純鐵の磁化曲線及び誘導曲線



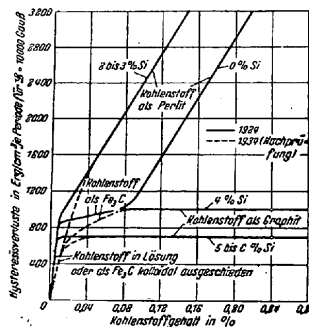
Die Neukurve und die Hystereseschleife bei 10,000 Gauss Aussteuerung für Armee-Lisen mit 0.1 % Verunreinigungen (a), und einer durch Glühen im Vakuum hergestellten Reineisenprobe von P. YESSIER mit 0.01 % Verunreinigungen (b). (Nach P. YESSIER, entnommen aus F. BERTHA: Theory of Ferromagnetism, London u. New York 1927.)

の損失を watt にて示して用ひ此の數値を V_{10} 及び V_{15} にて示す。此の損失の一部は渦流によるものなるが是れは原理的には鐵心を充分薄くすることに依り幾らにても少くし得るも餘り薄き時は占積率低下し且つは生産費も非常に高價にのぼる故一般には厚みは 0.35mm に限

られ居れり。面積 $\phi HdB = 1,000 \text{ erg/cm}^2$ なるヒステレンスループは 50~ に於て 0.64 W/kg (比重 = 7.8 g/cm³ として) のヒステレンス損に相當す。

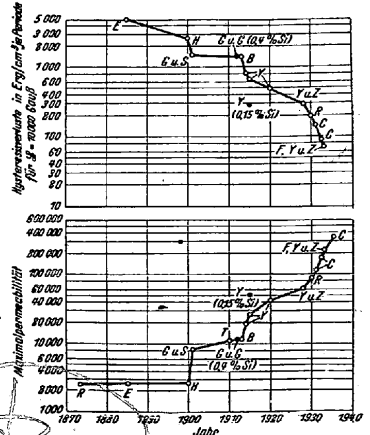
此の磁氣的性質の香しからざるは全く其の不純物の爲なり。鐵中に於ては特に炭素と酸素は有害なり。炭素は 0.01 % 以下にても磁氣的性質に大なる影響を與ふるなり(第1、

第2圖 炭素の珪素鋼の磁氣性質に及ぼす影響



Yensen und N. A. Ziegler: Trans. Amer. Soc. Met., 24 (1932) S. 377.

第3圖 各研究者により發表されたる純鐵の磁氣性質の改善



* 川崎重工業株式会社製鋼工場

2, 3, 圖). 是れは Yensen と其の協力者の長期に亘る實驗と, 又一方 Cioffi の實驗とに依り C 及び O_2 の最後の一萬分の幾何迄除かれたる鐵により確められたり. Yensen は高真空中にて赤熱する時は O_2 と C が結合し CO ガスとなり排出さるゝ様に C の量を加減して加へる方法をとったり. Cioffi は之れに反し充分精製したる H_2 中にて長時間赤熱する方法を採りたり. 斯して得たる現在の記録値は $\mu_{max} = 280,000, 10,000 \text{ gauss}$ に於けるヒステレシス損は 70 erg/cm^3 なり.

Cioffi の試料の最良のものは尙是れを凌駕し抗磁力の最小値として $H_c = 0.025 \text{ oersted}$ を得たるが, 實際製鐵所にて斯かる純度に達し得ざる故意味なし. 更に其他不純物の除去により電気抵抗は非常に減ず. $50 \sim$ に於ける鐵損の内ヒステレシス損は 0.045 W/kg なるが渦流損は 0.35 mm 厚みの鐵板にて約 0.7 W/kg に達するなり. 總鐵損失値は現在既に珪素合金鋼板により著しく低下せしめられたり.

約 30 年前より現在迄變壓器の鐵心として殆んど全部 $Fe-Si$ 合金が使用され來れり. 此の合金に就き詳細なる研究をなしたるは Barret, Brown, Hadfield にて 1900 年に發表したり. 然し是れの交流機器に適するを認め大量

生産の實驗をなしたるは獨逸の Gumlich なり. 1903 年より 1907 年の 4 年間に初期の種々なる困難を打開し一般に使用さるゝに至れり.

Gumlich は初めこの改良は主として高電気抵抗にありと信じたり. 珪素 2.5 % を含む時は抵抗は純鐵の數倍になり (第 4 圖参照) 事實上ヒステレシス損も C の少き通常の鐵よりも少くなるなり.

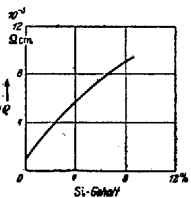
此の改良は二つの原因より生じたものと思はる. 即第一には Si は溶解状態にて O_2 と結合し SiO_2 を作り之れは表面に集りてスラッグとなり取去らる. 第二には Si は鐵中の C を Fe_3C の形になしおかず C を單なるグラフアイトとして析出せしめる. 是れは磁氣的には極めて害の少なきものなり. Si 量の増加につれ脆性を増加する故 4% Si 以上の原料は技術的に使用されず, 又損失係數の餘り問題にならざる處にては Si 4 % 以下のものを主に使用するなり.

第 5 圖は Yensen の報告より採りたるものなるが過去 30 年間に $Fe-Si$ 鐵板の鐵損失減少に對する進歩を示すものなり. (第 6, 7 圖参照)

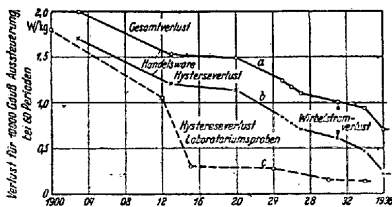
最上の曲線は市場品につき得られたる 60 サイクルに於ける總損失 V_{10} の最少値を示す. 最後の二點は再結晶構造の鐵板の値なり. 是れは最近米國に於て Hipersil の名にて市販化され居れり. 第二曲線は上の總損失中のヒステレシス損失分を表はす. 其の差が渦流損失を表はすなり. 最下の曲線は研究室にて得られたるヒステレシス損の最小値なり. 圖に明かなる如く研究室の結果と市場品との差は近年かなり接近し來りたり.

第 8 圖に北米合衆國の 1900 年より 1940 年の變壓器の容量と全變壓損失及び其損失中の鐵損の部分を示したり.

第 4 圖 $Fe-Si$ 合金の比抵抗

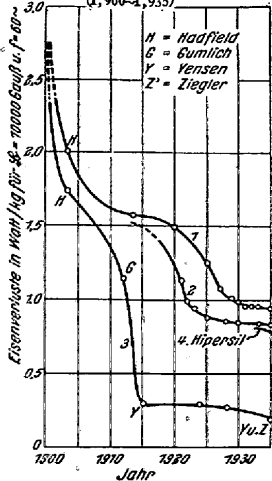


第 5 圖 過去 30 年間の珪素鋼板の改善經過



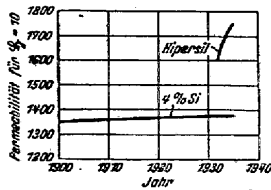
a Die an Handelsware erzielten kleinsten Werte des Gesamtverlustes bei Aussteuerung bis 10,000 Gauss. b Die an Handelsware erzielten kleinsten Werte des Hystereseverlustes. c Die an Laboratoriumsproben erhaltenen kleinsten Werte des Hystereseverlustes.

第 6 圖 過去 30 年間の鐵損の減少 (1,900-1,935)



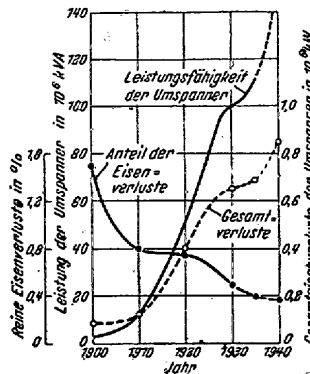
Kurve 1 = Eisenverluste handelsüblicher, warm gewalkter Umspannerbleche von 0.35% Si-Stärke, am der Wa'zrichtung entnommen und geglättet. Kurve 2 = Eisenverluste warm gewalkten, in der Verblechrichtung längsgezogenen Bleches von 0.35% Si-Stärke, in Wasserstoff geglättet. Kurve 3 = Hystereseverlust von Laboratoriumsproben mit 3 bis 4% Si in Form von Ringen und Stäben.

第 7 圖 鐵心中改善の經過 (1,900-1,935)



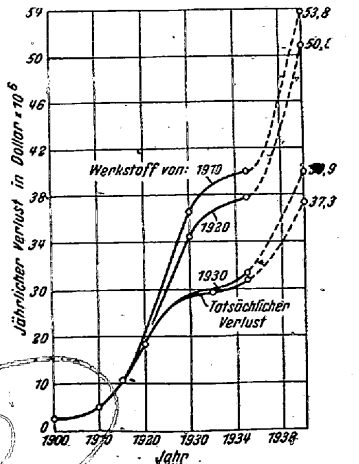
第 8 圖

北米合衆國に於ける變壓器の能力及び損失 (1900-1940年)



第 9 圖

北米合衆國に於ける變壓器による年間の損失金額 (1900-1935年)



第9圖は1kWhを0.5セントとして1ヶ年間のWatt lossを金額で示したものなり。變壓器用鐵板の改善により1935年には1910年に對して約800萬弗が節約されたり。改善の行はれ始めたる1920年以降の合衆國に於ける全節約額は約6,000萬弗に達し年額平均400萬弗になれり。現在米國に於ける電氣機械は特別の磁氣性質の材料150萬噸より成り其れに對し年々15萬噸が新造され居れり。是れは鋼板販賣價格の約5%を占め其の約1/3は變壓器に用ゐらる。合衆國に現存する變壓器の全年間出力は 100×10^{12} kWhに達す。即鐵板の品質の向上改善による節約額は巨額に達す。獨逸にて變壓器用鐵心のみにて大略50萬噸の鐵板が使用され居るが今鐵心の鐵損を10%減じ得たりとせば其の勢力節約額は年當り 10^8 kWhに達するなり。改良されたる結果が如何に小さくとも夫れにより得らるる節約は巨額に達する故に資源節約の折柄是れが改善發達は非常に重大なる意義を有するなり。

變壓器の設計及び製作の技術の進歩發達に伴ひ磁束密度を充分高くして材料の節約を圖る事が極度に要求せらるゝ今日、此の鐵板の品質の改良は最も緊要なることにして現在の變壓器に於ては鐵心磁束密度の増加に對する鐵損増加の割合は磁束密度約13k-gauss附近を境にして急に上昇す。一般に磁束密度が是れより高くなれば鐵損増加の割合は激しくなり、Bの約2.5乗前後に比例して増加するものゝ様なり。此の原因は一面變壓器鐵心の設計工作にも關係し鐵板固有の特性のみに基因するものとは斷じ得ざるも然し鐵板自身にも此の傾向あり。材料節約の爲には鐵板は一般に高磁束密度にて使用せらるゝ傾向に向ふものなる故即變壓器はB=14,000前後、回轉機にてはB=18,000以上にて使用せらるゝ今日高磁束密度に於ける鐵損の減少は甚だ重要なことなり。現在の變壓器の設計に於て磁束密度は13~14.5k gauss程度に採りゐるが、之を鐵板の特性向上により假りに5%増加し得たとした場合諸材料及び特性に及ぼす影響を見るに、特性向上の程度は5%の磁束密度増加により勵磁電流の増加及び波形の變歪は實用上支障なく又鐵損は現在の鐵板を用ひたる場合の80%に減少するものと假定す。即ち現在の磁束密度で現在の鐵板を用ひたる場合の鐵損を100%とすれば磁束密度を5%増した場合の鐵損は約113%となり之れが80%に減少すれば $113 \times 0.8 = 90\%$ に減少することゝなるなり。磁束密度を5%増加せしむるには鐵心斷面積を5%減少する方法と巻線の巻回数を5%減少する方法とあるが現今最も節約を必要

とするは銅なる故先づ鐵心斷面積は其まゝとし巻回数を5%減少する方法を採ることゝせば之れにより導線の總延長は95%に減少す。前述の如く鐵損が90%に減少する故其代りに銅損は多少増加するも差支へなしと考へ導線斷面積を3%減少し電流密度を増加せしめれば之れにより銅損は $95 \times 1.03 = 101\%$ となり、總損失の變化は銅損と鐵損の比により異なるが、假りに此の比が1なれば95.5%に減り、2なれば97.3%に減少す。斯様に總損失が減する爲油の溫度は幾分低下し電流密度を3%増加したに拘はらず巻線の溫度上昇は制限を超過することなし。斯くして銅使用量は導線長の減少と斷面積減少により $0.95 \times 1/1.03 = 0.92$ に減少即ち8%の節約となるなり。巻回数を5%減少したるまゝにて電流密度を變化せしめなければ銅損も5%減少し總損失に於て6~7.5%の減少となる故放熱器用材を同程度に節約し得る。即ち銅に於て5%の節約となる外普通鋼材及び油量に於て2~3%の節約となるなり。巻回数を變更せず鐵心斷面積を減少すれば鐵板使用量は5.5~6.5%節約し得。鐵損は85%に減少す。一方鐵心が細くなりたる丈巻線の長さが減り銅使用量も2%程度減少す。此の場合も總損失は5~8%の減少となる故放熱器用材と油の節約は2~3%可能なり。鐵損を金額に評價することは米國等で廣く行はれる所にて最初に述べたるが、假りに1kWに就き300圓と評價すれば1噸當りの鐵損2,050W (B=12,500に於て)が80%に減少したる爲の利得は鐵1噸に對し120圓となり鐵板自身の價格の二十數パーセントに當るなり。

3. 珪素鋼板鐵損保證値

次に各製造所の珪素鋼板鐵損保證値を列挙す。

日本製鐵八幡製品 (B=10,000 50~ W/kg)

級	珪素含有率	厚		
		0.35%	0.43%	0.50%
A	0.8-1.0%	2.60	2.88	3.20
B	1.1-1.4%	2.40	2.62	2.92
C	1.5-1.7%	2.15	2.30	2.46
D	2.5-3.5%	1.95	2.10	2.35
Ds	" "	1.65	1.76	1.88
T	4.0-4.5%	1.45	1.57	—
Ts	" "	1.30	—	—

川崎製鐵工場製品 (B=10,000 50~ W/kg)

級	珪素含有率	厚 U.S.G							最小鐵損保證値				
		30#	29# (0.35%)	28#	27#	26# (0.43%)	0.5%	25#	24#	H25	H27	H30	H300
E B	1-1.4%	2.09	2.20	2.35	2.51	2.60	2.75	2.86	3.30	15,000	16,000	17,000	19,000
E C	2-2.5%	1.85	2.00	2.00	2.07	2.13	2.17	2.20	2.31	14,700	15,700	16,700	18,700
E D	3-3.5%	1.50	1.70	1.70	1.70	1.81	1.85	1.89	1.98	14,300	15,300	16,300	18,300
E Ds	" "		1.53					1.65					
E T	3.9-4.2%	1.375	1.375	1.41	1.50	1.56	1.63	1.65	1.72	14,000	15,000	16,000	18,000
E Ts	" "		1.25										

Armco 製品 (B=10,000 50~ W/kg)

Table with columns for Armco products (Armature, Electric, Special Electric, Int. Transformer, Trancer 1-6) and U.S.G. weights (30#, 29#, 28#, 27#, 0.45%, 26#, 0.50%, 25#, 0.60%, 24#).

(B=10,000 60~ W/kg)

Table with columns for Armco products (Armature, Electric, Special Electric, 1st Transformer, Trancer 1-6) and U.S.G. weights (30#, 29#, 28#, 27#, 26#, 25#, 24#).

U S S 製品 (B=10,000 50~ W/kg)

Table with columns for USS products (Armature, Electrical, Motor, Dynamo, Transformer 136, 127, 115, 103, 96) and U.S.G. weights (30#, 29#, 28#, 27#, 26#, 25#, 24#).

(B=10,000 60~ W/kg)

Table with columns for USS products (Armature, Electrical, Motor, Dynamo, Transformer 136, 127, 115, 103, 96) and U.S.G. weights (30#, 29#, 28#, 27#, 26#, 25#, 24#).

Allegheny 製品 (B=10,000 60~ W/kg)

Table with columns for Allegheny products (Armature, Electrical, Dynamo, Super Dynamo, Dynamo Spec., Radio Trans., Trans "C", "B", "A") and U.S.G. weights (29#, 28#, 27#, 26#, 25#, 24#).

Republic 製品 (B=10,000 50~ W/kg)

Table with columns for Republic products (Armature, Electrical, Special Motor, Dynamo, Republic Trans., Special Trans., Extra Spec. Trans.) and U.S.G. weights (30#, 29#, 28#, 27#, 26#, 25#, 24#).

(B=10,000 60~ W/kg)

Table with columns for Republic products (Armature, Electrical, Spec. Motor, Spec. Dynamo, Trans., Spec. Trans., Extra. Spec. Trans.) and U.S.G. weights (30#, 29#, 28#, 27#, 26#, 25#, 24#).

次に獨逸に於ける DIN の規格を示す (DIN 6400 Werkstoff Handbuch Stahl u. Eisen O-61 より)

Table showing chemical composition for DIN 6400: Normal, Schwach legierte, Mittel stark, Hoch legierte with columns for C, Si, Mn, P, S percentages.

Table showing mechanical properties for DIN 6400: Form, Dicke, Gewicht, Biegezahl, Verlust, Alternanz, Magnetische Induktion with columns for different product types and values.

Si % と特性との関係式

比重 S = 7.874 - 0.0622P P = Si %

抵抗 W²⁰ = 0.099 + 0.12P

Q mm²/m bei 20° P = Si %

飽和値 4πJ_∞ = 21,600 - 480P P = Si % (5%迄)

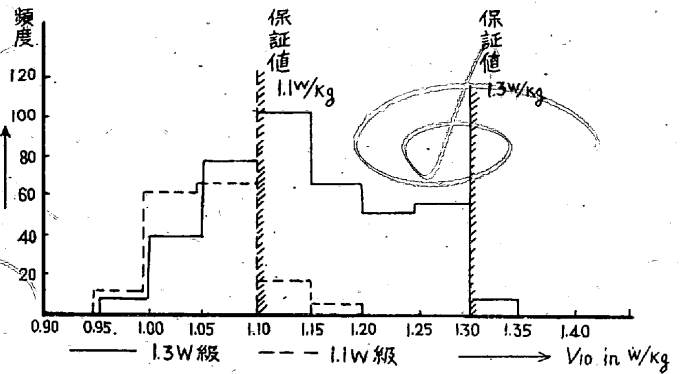
4. 各國鐵板の實際成績

前記は各國の鐵板の保證値を示したるが其の實績は如何なるや判明のもののみ次に掲げ比較す。是れは平均値にて更に良いものもあれば不良なるものもあり。

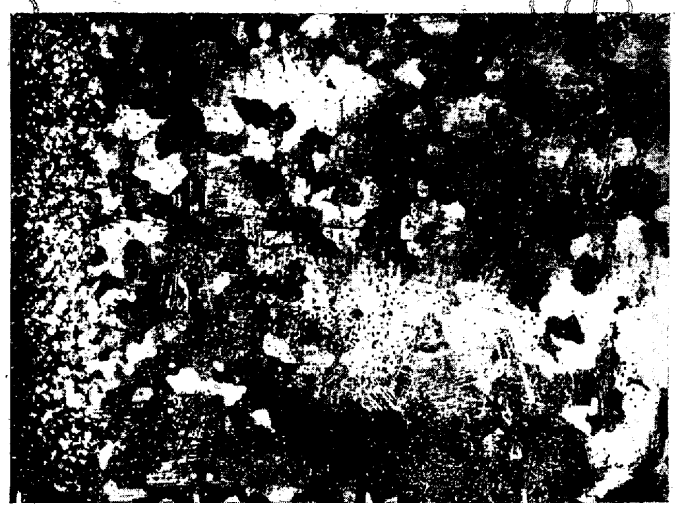
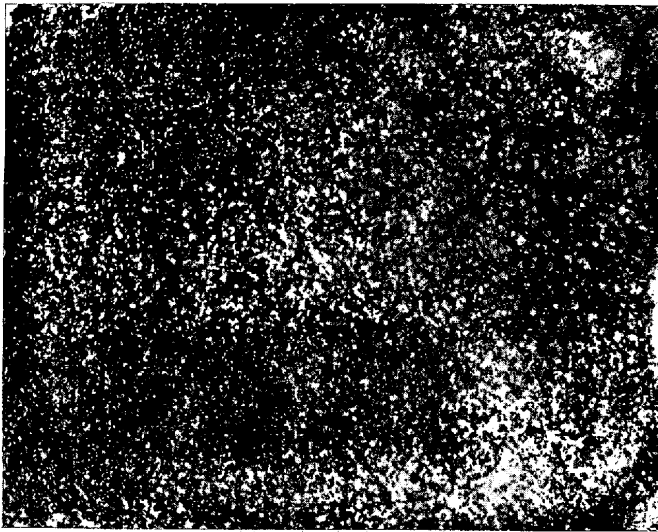
種類	化学分析				
	C	Si	Mn	P	S
Trancoor 号 4	0.02~0.03	3.90~4.18	0.08~0.11	0.014~0.019	0.007~0.010
Trancoor 号 2	0.02~0.03	3.32~3.60	0.30~0.38	0.013~0.017	0.007~0.012
Allegheny T.	0.05	3.90	0.16	0.014~0.017	0.011
Apollo special	0.018	3.85	0.21	0.02	0.011
八幡 T	0.03	3.85~4.15	0.13~0.22	0.013	0.007~0.014
川崎 T	0.02	3.90~4.20	0.08~0.1	0.020	0.007~0.012

種類	磁損 (5000)		磁化力			
	10,000	15,000	H ₂₅	H ₅₀	H ₁₀₀	H ₂₅₀
Trancoor 号 4	0.93	2.26	14300	15250	16400	18650
Trancoor 号 2	1.22	2.81	14670	15450	16750	18900
Allegheny T.	1.29	3.19	14440	15380	16495	18800
Apollo special	1.25	2.78	14530	15400	16530	19000
八幡 T	1.27	3.29	14340	15230	16395	18500
川崎 T	1.27	3.20	14420	15365	16460	18547

第 10 圖 獨逸某工場一年間の V₁₀ の頻度

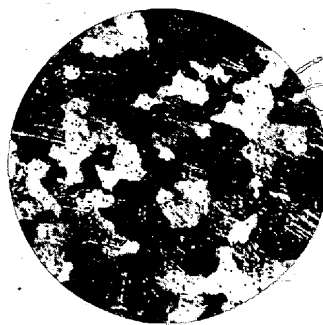
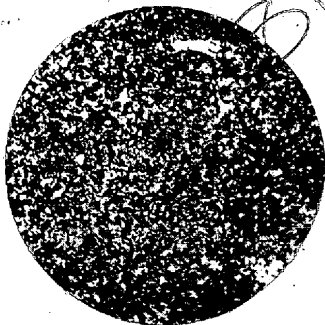


第 11 圖 珪素鋼板の組織に及ぼす冷間圧延の影響 (4% Si)



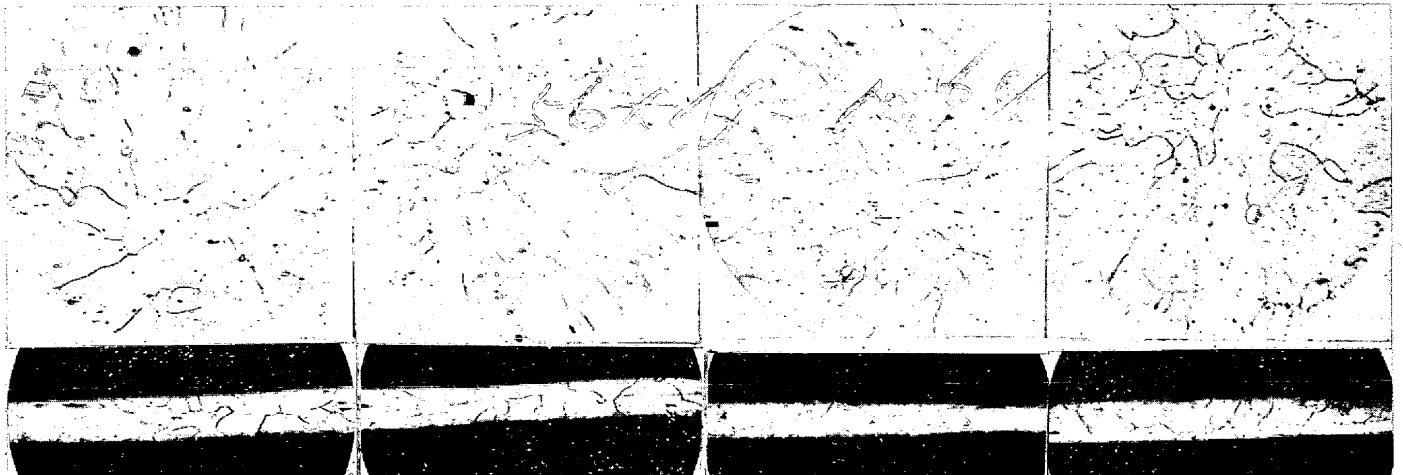
冷間圧延をなさず 840°C に焼鈍せるもの (×約6)

(冷間圧延率) 0% 1.25% 3.3% 6%
 (断面の厚み) 150 耗 1.48 耗 1.45 耗 1.40 耗
 片絞め冷間圧延をなし 840°C に焼鈍せるもの (×約6)



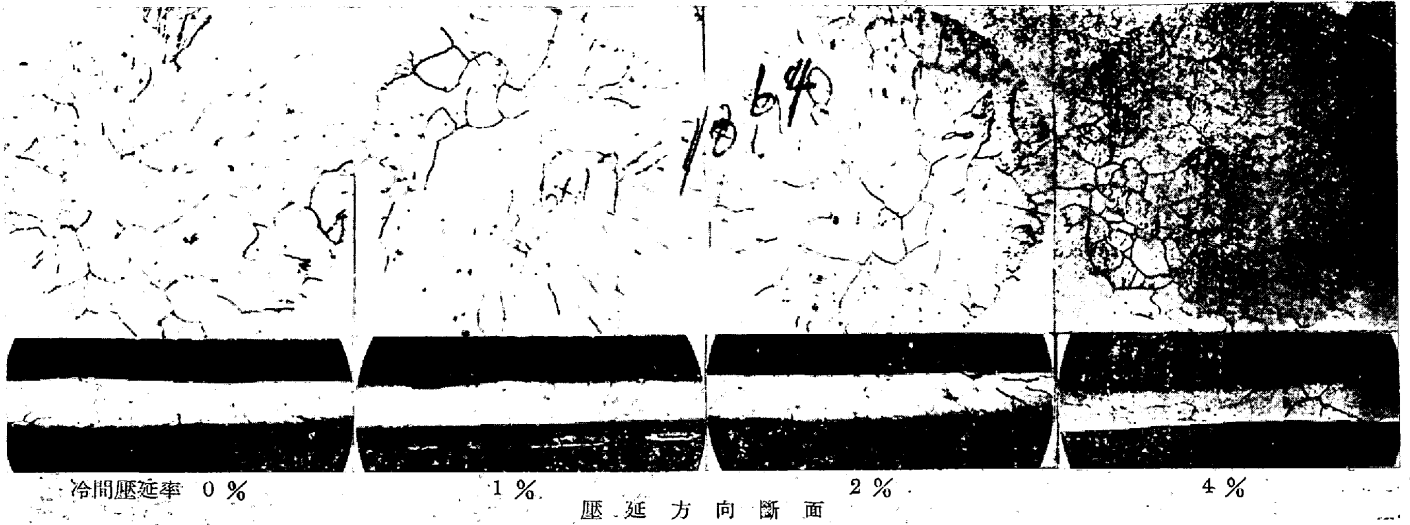
結晶の大きさを比較の爲め一部を掲げたるもの (×約54)

第 12 圖 冷間圧延率と焼鈍組織 (中間焼鈍をなさざるもの, 860°C 8h 焼鈍す) (×約 33)

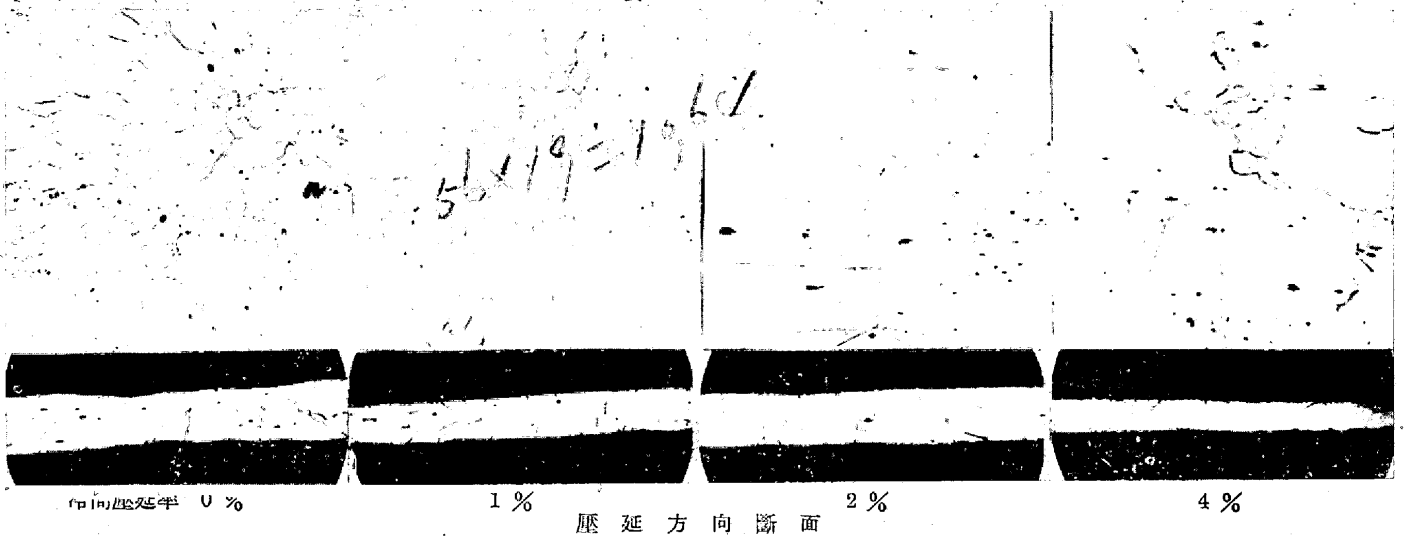


(壓延方向断面) 冷間圧延率 0% 1% 2% 4%

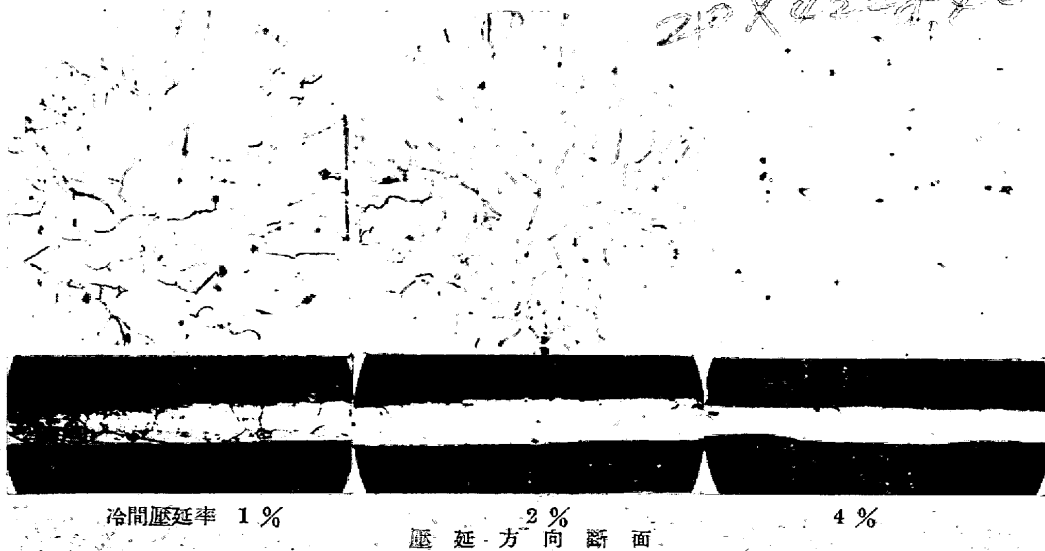
第 13 圖 冷間壓延率と焼鈍組織 (中間焼鈍をなさざるもの, 930°C 2h 焼鈍) (×約 33)
表 面



第 14 圖 冷間壓延と焼鈍組織 (850°C 中間焼鈍せるもの 冷間壓延後 860°C 8h 焼鈍す) (×約 33)
表 面



第 15 圖 冷間壓延率と焼鈍組織 (850°C 中間焼鈍せるもの, 冷間壓延後 930°C 2h 焼鈍す) (×約 33)
表 面



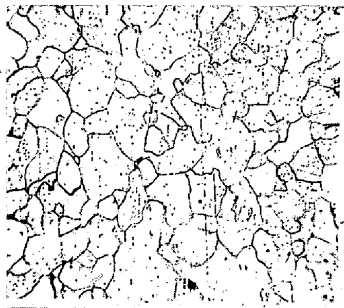
第16圖 冷間壓延率と焼鈍組織

中間焼鈍後冷間壓延せるもの (表面) 850°C 1 1/2h 以上焼鈍せるもの

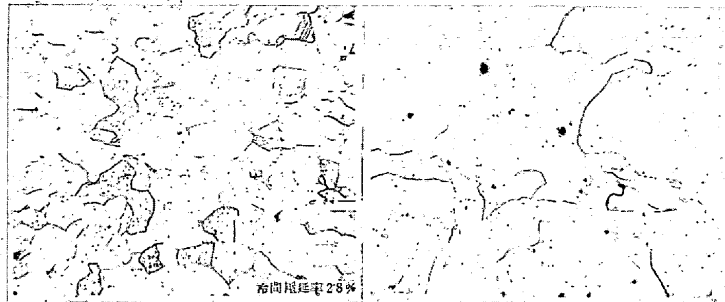
(表面) (×約 22)

(断面) (×約 66)

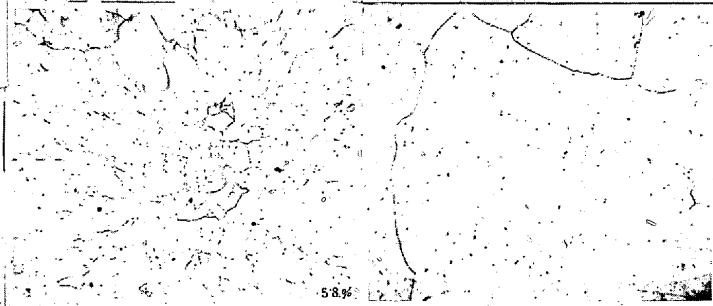
800°C 中間焼鈍せるもの
(表面) (×約 22)



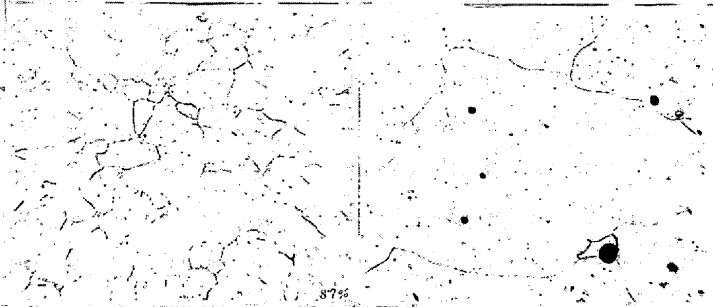
断面 (×約66)



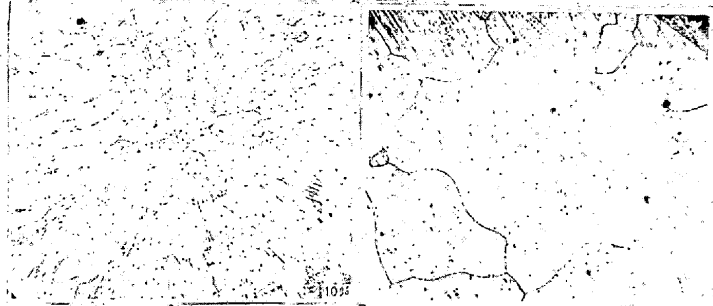
冷間圧延率 28%



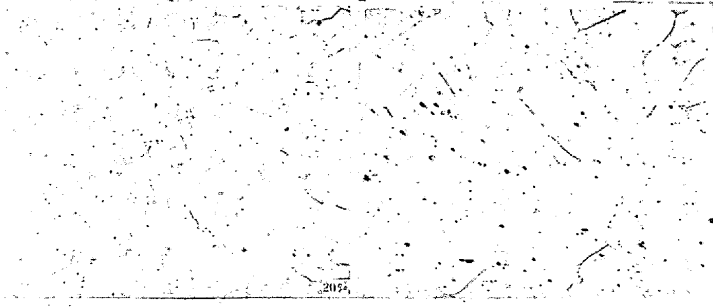
58%



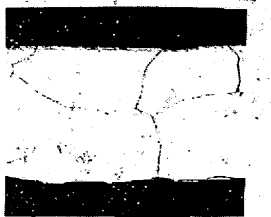
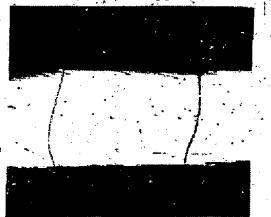
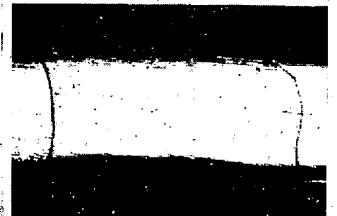
87%



105%



205%



56x 62 = 38,72

前述せる獨逸の規格 DIN VDE 6400 は 1926 年 10 月に發行されたるものにて、其後鐵板の品質は逐次改良され向上しゐるにかゝらず規格は矢張り舊のまゝにて是れでは更に飛躍は望まれず、依りて Adolf Heitmeier は最近 2ヶ年間の獨逸の某大變壓器工場に納入されたる數千噸の鐵板に就き鐵損を測定し頻度曲線を畫き此の質績より見て DIN 6400 は更に改訂を要する事を稱へたり。第 10 圖は其の頻度曲線にて保證値より遙かに優秀なり。擬翻て本邦の現状は規格保證値より見るも遺憾ながら歐米より遙り頻度曲線を調査するも現保證値を改訂すべき質績に達し居らず。是非とも速かに少くとも歐米の水準迄持來さざるべからず。然らば如何にすれば更に優秀なる鐵板を得るや鐵板製造に當り重要な二三の要點を述べんとす。

5. 冷間壓延作業

過去 30 年間に於ける鐵-珪素鋼板の性質の改良は本質的に其の純度を高めること及び熱處理の改良に由來したり。熱間壓延の技術のみが支配的にて、冷間壓延作業は熱間壓延を終りたる鐵板の皺の矯正と或程度の光澤を與へる位の目的としか考へられざりしが、種々研究の結果獨り珪素鋼板のみならず其他鐵板に於ても其の使用目的に應じ夫々重要な意義を有し特に此の鐵板に於て品質を左右するものは一つにこの作業にありと稱するも過言にあらず。

純鐵の格子變態點は 900°C なるが Si 2.5% 以上加はれば消失し 4% 鋼に於ては均一 α 相にて變態なく變態點を目標にして粒の成長を圖るは不可能なり。4% Si 鋼の場合は 950°C 以上の焼鈍の場合、初めて粒の成長を起し 1,000°C 以上に於て成長程度甚しくなるが現在の鐵板を 1,100°C に於て數時間加熱するも大粒には達し得ず、冷間に於て一定の加工を施し内部歪を起さしめ是れを加熱して再結晶を行ふことにより粒の成長を起し得る。即適當なる冷間作業を行ひ 750~900°C にて長時間焼鈍し徐冷すれば再結晶の爲に大なる結晶を有する鐵板を得るなり。此の大結晶を有するものは小結晶のものに比し磁氣的に優秀なる性質を有す。此の原因に關しては種々意見ありて結晶粒の境界面の直接ヒステリシス損に悪影響を及ぼすと假定したるもの或は再結晶の時に不純物、殊に除かれずに残りたる SiO₂ が結晶粒界に押しやられ結晶の内部は純な且、歪力の無き状態になるとの見解を有するものもあり。

冷間壓延の有する作業には種々あるも殊に重大なる意味を有するは次の二作用なり。

(I) 微量の冷間壓延率を與へて結晶の粗大を圖る(但し結晶の配列は第一義にあらず)。

(II) 非常に大なる冷間壓延率を與へ結晶の粗大より配列を重視し方向性を與ふ。

鐵板の製造に當り兩者何れを得策とするやは實際現場に於て行ふ際夫々技術的困難を伴ふ故簡単に判斷は出來ざるも (II) の方は相當の設備と多大の費用とを要し且高珪素鋼の如き硬く脆きものに對しては餘程困難なる事にして此の點 (I) の方容易なり。

今 (I) に就いて詳述せんに従來の經驗よりすれば粗大なる結晶は一般に低損失を與ふるものなれば磁氣的性質を良好ならしむる爲には粒の成長を圖る要あり。熱間壓延後直ちに冷間壓延を爲すよりは一度中間焼鈍後適當なる冷間壓延率を與ふる方が結晶の粗大化は容易なり。如何程の壓延率を適當とするや厚み 1.5mm の 4% Si 鐵板を中間焼鈍後楔型の厚みに冷間壓延したる後 840°C に焼鈍せるに添付寫眞(第 11 圖)の如く適當なる冷間壓延を受けたる處は結晶甚だ大きく全々壓延の影響を受けざる所に比すれば數倍なり。壓延率は 20% 以上になれば組織は又小くなるなり。

Wimmer & Werthbach は 1.9% Si のものは 3~4% の壓延率を、2.5% Si のものは 2~3% の壓延率を與へ 850~900°C で焼鈍し 4% Si のものは 1~2% の壓延減厚後 900~950°C に焼鈍する事により大なる結晶を得ると述べたり。

珪素 4% の變壓器鐵板を中間焼鈍をせるものとせざるものにつき 1~4% の冷間壓延率を與へたものゝ仕上焼鈍後の磁氣的性質及び顯微鏡組織を調査せるに次の如し。

A. 中間焼鈍をなさざるもの (第 12, 13 圖)

(B=10,000 50~ W/kg)

壓延率	鐵 損 失								
	冷間壓延後		860°C 燒鈍			930°C 燒鈍			V ₁₅ /V ₁₀
	V ₁₀	V ₁₅	V ₁₀	V ₁₅	V ₁₅ /V ₁₀	V ₁₀	V ₁₅		
1%	2.79	4.78	1.36	3.20	2.35	1.30	3.00	2.30	
2%	2.96	5.03	1.24	2.99	2.40	1.26	2.90	2.30	
4%	3.12	5.36	1.17	2.94	2.52	1.24	2.96	2.39	

B. 850°C にて中間焼鈍をなせるもの (第 14, 15 圖)

(B=10,000 50~ W/kg)

壓延率	鐵 損 失								
	冷間壓延後		860°C 燒鈍			930°C 燒鈍			V ₁₅ /V ₁₀
	V ₁₀	V ₁₅	V ₁₀	V ₁₅	V ₁₅ /V ₁₀	V ₁₀	V ₁₅		
0%	2.54	5.23	1.18	2.88	2.51	1.13	2.72	2.41	
1%	3.90	6.42	1.16	2.80	2.42	1.14	2.73	2.39	
2%	4.30	6.95	1.11	2.70	2.42	1.07	2.57	2.39	
4%	4.43	7.24	1.13	2.78	2.45	1.08	2.60	2.40	

組織寫眞を見るに(B)のものには結晶大なるものあり、次に最も適當に冷間壓延をなされたる組織は如何に大きくなるや、此處に参考の爲に結晶組織を第16圖に示す。即ち板の厚みは殆ど單結晶なり。現在舶來品にてアームコの或種のものと同様の組織を呈せり。結晶の大きさは略々7~10mm位の長さあり。

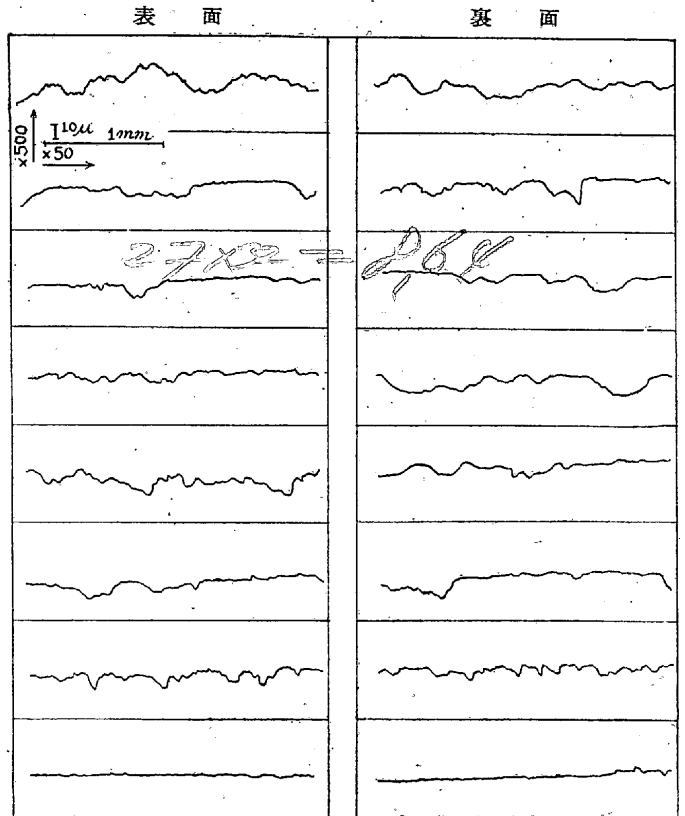
然し實作業に當りて2~4%程度の壓延を行ふは餘程技術者が良く監督をなしロールの型狀に注意して調整をなさざれば不可能なり。特に熱間壓延に於ても殆ど厚みの異なる鉄板を得ること困難なり。熱間ロールは鼓型をなしゐる爲に壓延されたる板は丁度魚の尾の如く中央部は凹んでおり夫れだけ長さの短きことは中央部の厚き事を示すなり。是れに反し冷間ロールは中央部は太鼓型に膨んでゐる爲に熱間壓延にて生じたる中央部の過厚のものを壓延し調整するものなるが餘りに此の差甚しき時は前記の2~4%程度の冷間壓延率の範圍外に出る故に結晶粒の成長は期待し得ず且つ部分的に不均一なる組織を呈し、ひいては電磁氣的性質も不均一性を現すなり。故に熱間、冷間ロール共に調整に留意し其作業には特に注意を要するなり。上記の如く極く微量の冷間壓延率を與ふことは實作業に當りて一々測定するは困難にして、且つ甚だ生産的なり。依りて豫め適當回數ロールをパスすることにより大略何%位の減厚に匹敵するやを測定しおきて行ふ。今此の冷間壓延回

數を増す事によりて如何に電磁氣的性質が改善さるや測定せるに次の如し。(本頁左下端の表参照)

是等の結果よりパス回數の多きもの程表面非常に滑かとなり、從て占積率も良く鐵損値も良好なり。熱間壓延のまゝ仕上げたるもの及び冷間作業をなしたるもの又途中にて酸洗したるもの等の表面の仕上り程度を表面仕上り精度器により測定し第17圖に示す。是れよりも明瞭なる如く

第17圖 製作工程の相違による珪素鋼板面精度比較圖(冷間壓延及び酸洗の影響)

1. 熱間壓延のまゝのもの
2. 熱間壓延後冷間壓延2回パスのもの(2%減厚)
3. 熱間壓延後冷間壓延10回パスのもの(6%減厚)
4. 熱間壓延後酸洗し2回冷間壓延のもの
5. 熱間壓延後2回冷間壓延し酸洗せるもの
6. 1回冷間壓延後電氣爐にて焼鈍せるもの
7. 1回冷間壓延後瓦斯爐にて焼鈍せるもの
8. 1.5%より冷間壓延せるもの(77%減厚)



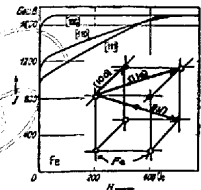
冷間壓延により相當表面は滑かになるなり。曲線より凹凸の面積を計算し占積率(眞の占積率にあらず)を算出し比較す。英國の規格によれば占積率は92%以上と規定しあり。計算の基礎に多少の相違あるも大略是れにより判定し得。熱間壓延のまゝのもの最も悪く次いで冷間壓延後酸洗せるものなり。是れは冷間壓延の爲に熱間壓延に於て生じたるスケールを板の面に押し込みたるものを酸洗せる故に表面非常に凸凹となる爲なり。

次に(II)の結晶の粗大よりは配列を重視する方法に關して述ぶるに最近注目すべきは相當大なる冷間壓延率を與ふることにより特定の結晶方向を與へたる構造をつくることなり。厚みの少くとも15%以上の冷間壓延を行ひたる後1,100°Cにて焼鈍すれば一つの構造を得るが[100]方向が壓延の方向と平行なものが非常に多くなるなり。優秀なる結晶配列は冷間壓延と中間焼鈍との結合により得ら

		V ₁₀	V ₁₅	V ₁₅ /V ₁₀	H ₁₀	H ₂₅	H ₅₀	H ₁₀₀	H ₃₀₀
冷間壓延回數の異なるもの	850°C 3時間焼鈍	1.20	2.84	2.36	13410	14440	15250	16390	18680
	900°C 2時間焼鈍	1.15	2.80	2.34	13140	14140	14900	16080	18390
	1000°C 2時間焼鈍	1.18	2.68	2.27	13170	14290	15250	16420	18600

		V ₁₀	V ₁₅	V ₁₅ /V ₁₀	H ₁₀	H ₂₅	H ₅₀	H ₁₀₀	H ₃₀₀
冷間2回以上の回數のもの	850°C 3時間焼鈍	1.12	2.79	2.49	13750	14580	15470	16600	18820
	900°C 2時間焼鈍	1.07	2.84	2.64	13620	14520	15380	16460	18760
	1000°C 2時間焼鈍	1.25	2.90	2.32	13090	14310	15160	16300	18520
冷間10回以上の回數のもの	850°C 3時間焼鈍	1.08	2.69	2.49	13660	14440	15330	16460	18740
	900°C 2時間焼鈍	1.08	2.70	2.50	13540	14480	15340	16380	18500
	1000°C 2時間焼鈍	1.19	2.91	2.45	13090	14220	15140	16350	18630

第 18 圖 鐵の單結晶の磁化曲線

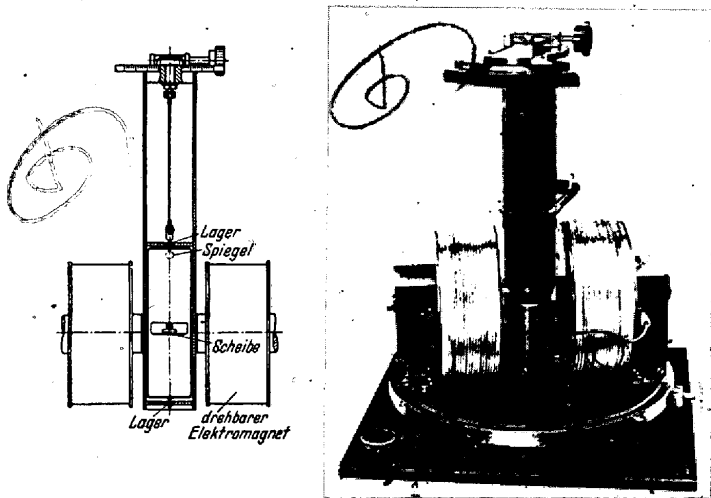


Magnetisierungskurven von Eiseinkristallen mit der Würfelfläche (oben), Flächendiagonalen (Mitte) und Raumdiagonalen (unten) parallel zur Feldrichtung. (Nach Honda und Kaye)

(110) の面は壓延面に平行にて [100] 軸は壓延方向に平行なりと故に熱間壓延をなせる板の方向性は (100) 面と [110] 軸の方向にて冷間壓延せるものは (100) 面と [100] 軸の方向にあることなり。

珪素鋼の單結晶の代りに鐵の單結晶に就いて見るに鐵の單結晶を構成する格子は體心立方なり。I=1,000 (B~12,000 gauss) 迄は結晶の總ての方向に對して磁化曲線は殆ど一致す。

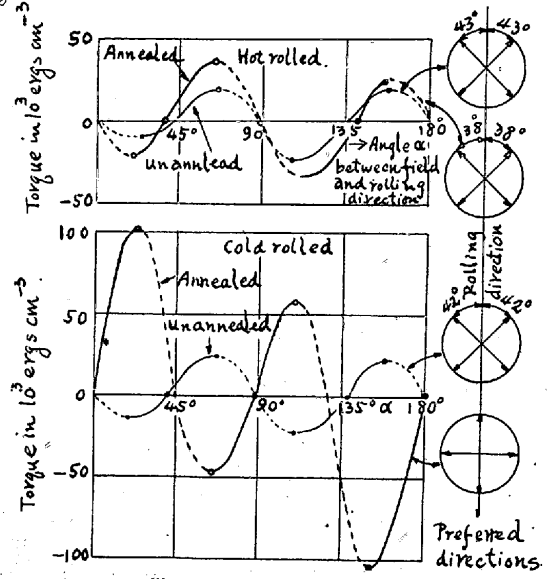
第 19 圖 磁氣異方性測定器 (Nach Dahl. und Sixtus.)



夫れ以上になれば磁場Hを作用させる方向により磁化曲線は異てくるなり。[100] 軸の方向には極めて僅かの磁場で飽和し [110] 軸の方向は飽和し難く [111] 軸の方向には最も飽和し難し。單結晶の板は方向により導磁率を異にする故 I>1,000 の如き磁場に入れる時は其の向きを變じ様とする Torque を受くるなり。單結晶のみでなく多結晶のものにても特別の方向を有するもの (微晶が全く勝手な方向に向てゐるもの) にては充分に大きい磁場の中にて Torque を受く。

Sixtus は珪素鋼板の壓延の方向と磁場の方向との間の角を種々に變じて Torque を測定し第 20 圖の如き曲線を得たり。

第 20 圖



Torque 曲線 H=9000e

Torque curves at high fields.

- a. gives the curves for a hot rolled sheet.
- b. for a cold rolled sheet, both before and after anneal. H=900 oersteds.

(第 19 圖には最近の Torquemeter を示す)

熱間壓延のものと 85% 冷間壓延を爲したるものを 1,100°C に焼鈍するに熱間壓延のものは焼鈍前後に於て其の特定方向は壓延方向に對して略々 ±45° なるが、冷間壓延せるものは壓延状態にては熱間壓延のものと大差なきも焼鈍後は全く方向性は變はり其の特定方向は壓延方向に平行と直角の二方向になるなり。

又彼は光學的腐蝕孔像法に依り熱間壓延と冷間壓延のものに就き數百の結晶を顯微鏡を覗きつゝ廻轉し明暗により其の方向性を決定、次の如く纏めたり。(第 21, 22 圖) 是れによれば冷間壓延せるものは電磁氣的に磁化し易き

第 21 圖

第 22 圖

熱間壓延後焼鈍せるもの、[100] 軸の分布

冷間壓延後焼鈍せるもの、[100] 軸の分布

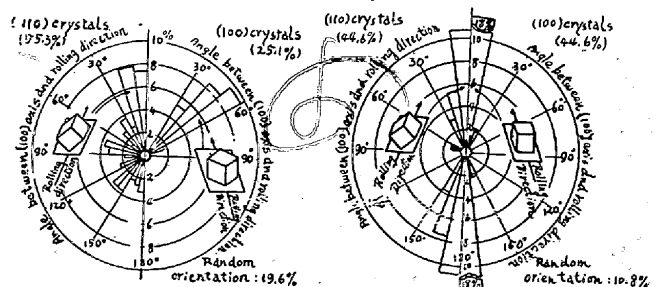
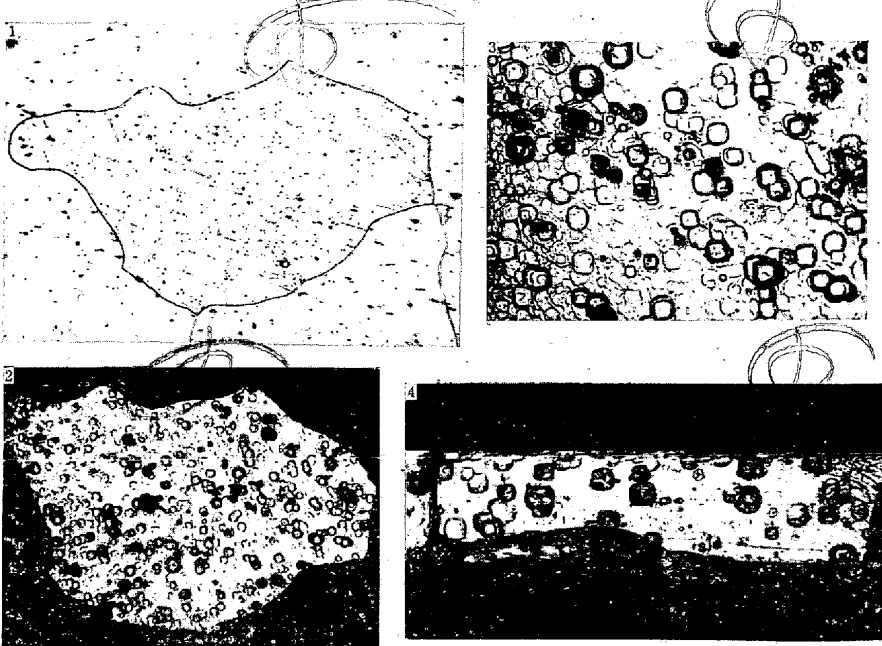


Fig 21 The distribution of (100) axes in (100) crystals (right) and in (110) crystals (left) on the hot rolled, annealed sample of Fig 20. a. The radius of each 10° sector gives the percentage of crystals having a (100) axis within these 10°. The inserts show the preferred orientations.
Fig 22 The distribution of (100) axes in (100) and (110) crystals on the cold rolled, annealed sample of Fig 20. b.

方向 (100) の結晶は 44.6% なるに反し熱間壓延のものにては 25.1% なり。

第 23 圖 4% 珪素鋼板単結晶中の微晶

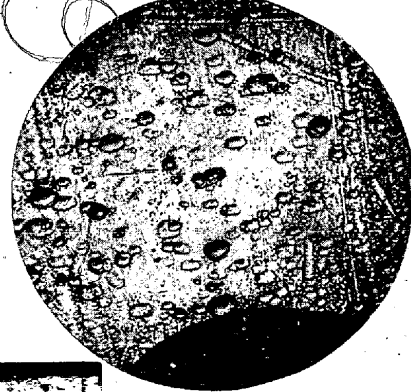
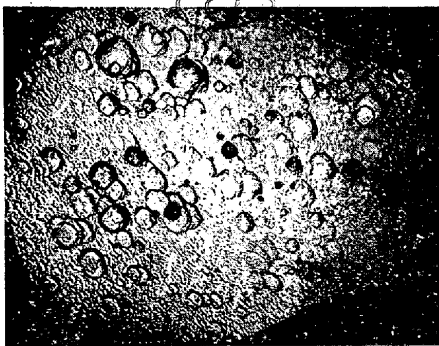


- (1) 適當なる冷間法により製造されたる粗大結晶 (表面, \times 約 75)
- (2) 上部單結晶中の微晶 (100) を示す (\times 約 350)
- (3) (2) の微晶を約 250 倍に擴大したるもの
- (4) (3) の結晶の斷面の微晶を示す (\times 約 75)

第 25 圖 アームコ鐵板の微晶配列狀態 (\times 約 75)

表面

表面

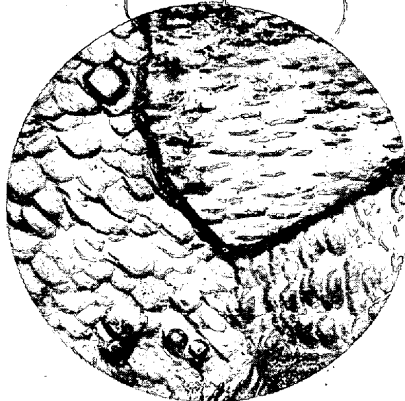


斷面

第 24 圖 4% 珪素鋼板微晶配列狀態 (1,000°C 燒鈍)



(\times 約 75)



(\times 約 250)

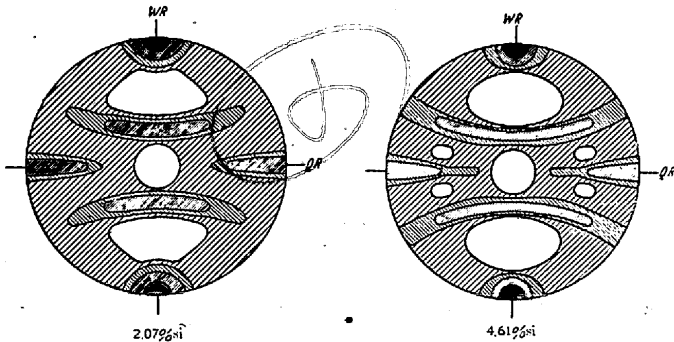
Frey and Bitter は冷間加工に續く再結晶を繰返へす毎に壓延面内に (110) 面を有し, 壓延方向に [001] 軸を有する結晶の割合を増加せしめ壓延面内に (100) 面を, 壓延方向に [011] 軸を有する結晶の割合を減少せしめることを述べおれり.

第 23 圖は中間燒鈍法により得たる粗大結晶中の微晶の (100) 面の壓延面に平行なるものを示す. 第 24 圖は壓延面に平行なる各異なりたる面を有する微晶の配列狀況を示す. 第 25 圖はアームコ鐵板の表面及斷面の微晶配列の一例を示す.

次に X 線廻折法を用ひて材料の結晶配列を研究せるに Wever の Pole figure あり. 體心立方體の壓延組織に及ぼす珪素の影響に就ては Barret, Ansel and Mehl の研究あり. 第 26 圖は 2.07% Si 及び 4.61% Si の板を 95% 冷間壓延したるもの (110) 面に對する Pole figure なり. 珪素量の多少により壓延方向に對する結晶の變位密度に差がありて低珪素にては 40~45°, 高珪素にては 55~60° に達す. 第 27 圖は前者の鐵板を 580°C にて再結晶したる (110) 面の Pole figure を示し, 第 28 圖に 4.61% の板を 590°C に燒鈍したるものを第 29 圖には同じ板の 860°C にて再結晶したる組織の Pole figure を示す. 再結晶の配列は第 26 圖の壓延したるもの

とは異なり、本質的には板の Normal に對し約 17° 回轉したと同様の結果になるなり。

第 26 圖

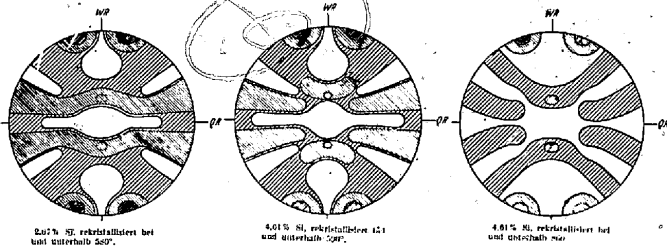


Polfiguren der Dodekaederflächen von kaltgewalzten Eisenblechen mit verschiedenem Siliziumgehalt, Walzgrad 95%. (Nach Barrett, Ansel und Mehl.)

第 27 圖

第 28 圖

第 29 圖



扱是等の結晶配列法を應用し製作したるものに Goss 法 Yensen 法, Kreuzwalzen 法等あり。

1. Goss 法 米國にて珪素鋼板の再結晶法を試みたるは Goss なり。此法は冷間壓延と焼鈍を交互に繰返へすものなり、1~4% Si 鐵板に行ひ得るが主として 3~3.5% Si に應用さる。方法は 2.5~1.3mm の鐵板を壓延し 760°~930°C にて焼鈍す、大體の目標は 870°C なり。焼鈍は出来るだけ早く加熱し最少時間(數分間)保ち出来るだけ早く冷却するものにして、次いで 50% 冷間壓延をなし 0.6~1.3mm になす、2 回目の焼鈍温度は 815~890°C にて目標は 930°C 迄なり。焼鈍時間は再結晶に必要な最短時間を保ち冷却して 0.25~0.35mm の仕上冷間壓延をなし 3 回目の焼鈍は 1,010~1,150°C にて目標は 1,100°C なる。

り。焼鈍時間は出来るだけ必要な最短時間を保つために連続式加熱爐を使用し速度を變じ得る様に設備しあり。冷間壓延もかゝる脆く且つ硬き材料なればステツケル法にて壓延をなす。Goss 法により製せられたる板は非常に結晶は小さく、從て機械的性質特に屈曲性は良好なり。Bozorth によれば Goss 法による板の結晶状態は (110) の面はロール面に [100] 軸は壓延方向に平行にして [110] 軸は壓延直角方向に平行なりと、然して結晶の變位密度は本體的に壓延方向に 15°, 直角方向に 8° の回轉したものと同様に考へ得らる。

壓延方向に平行にとりたる試料の電氣的性質は次の如し。

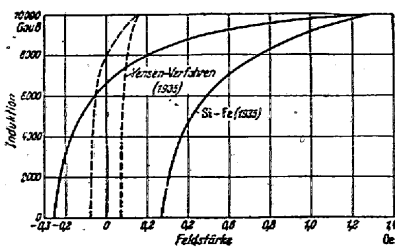
Goss 法による鋼板の磁氣的性質			
Goss によるもの	最大導磁率 in Gauss/oersted	導磁率 16,000 in Gauss/oersted	鐵損 10,000 ガウス 60 サイクル
	22,000	2,200	1.01 watt/kg
市販品	8,000	500	1.59 "

表の如く高導磁率、低損失を有してゐるが是れは研究室の成績なることに注意すべきなり。Goss のものは壓延方向には良好なるが直角方向には悪し。75~90% の結晶が特定の方向に配列しおれり。

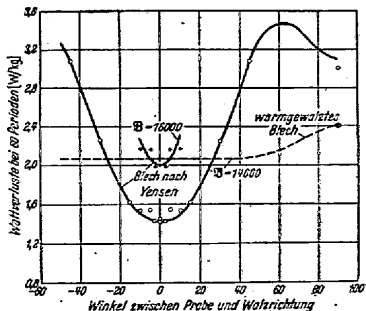
2. Yensen 法 Goss と異り殆ど同時に Yensen は磁氣的に異方性の變壓器鐵板を作りたり。清淨焼鈍の應用により彼は特に高き導磁率を有する板を作りたり。詳細は不明なるも只冷間壓延と長時間の焼鈍を繰返へすものと思はる。第 30~32 圖に Yensen 法により製せられたる鐵板の性質を示す。試料に方向性甚しき點より相當冷間壓延をなしたるものゝ如し。

3. Kreuzwalzen 法 是れは Bitter の發明したる十字形壓延法なり。1 回ロールをパスする毎に 90° づゝ回轉する方法にして、主として體心立方の材料に應用さる。體心立方の格子の理想的なる壓延状態は立方體の面が壓延の面に平行にて表面の對角線が壓延方向に向き、第 2 の對

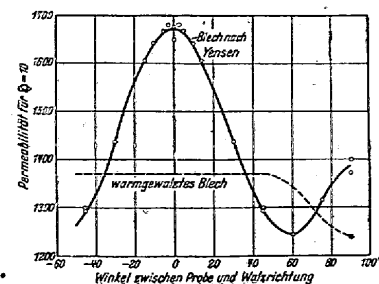
第 30 圖 Yensen 法によるもの市販品の珪素鋼板の誘導曲線 (Yensen)



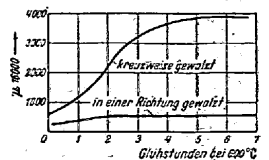
第 31 圖 壓延の方向に對する試料の位置と鐵損との關係 (Yensen)



第 32 圖 壓延の方向に對する試料の位置と導磁率との關係 (Yensen)



第 33 圖 普通壓延法によるものと十字形壓延法により製せられたる珪素鋼板の焼鈍による導磁率比較 (Bitter)



57 x 12 = 6,84

角線は直角方向に向き居ることなり。即立方體の面はロール面にあり、[110]軸は兩方の壓延方向に平行にある様な配列になすことなり。此法は熱間に於ても應用さる。適當なる温度は700°Cなるが最高1,000°C迄なり。磁氣的に容易なる[100]方向は此の十字形壓延法によれば壓延方向に對し45°になりおれり。第33圖は4% Si 鐵板の普通の法と此の方法とにより製せられたるものを600°Cにて焼鈍したるものゝ導磁率の比較を示すものにて此の方法によるもの遙かに大なるを知る。600°Cなる焼鈍温度は導磁率には適當なるもヒステレシス損を低下せしむるには餘り低く過ぎにて適當にあらざ。大抵1,000°C位を適當とす。夫れにより μ 16,000は1,200も下るも60~にて1,000 gaussにてヒステレシス損は0.60 W/kgに達す。

焼鈍温度、導磁率及びヒステレシス損との關係は次の表に示す。

十字形壓延法による4%珪素鋼板の焼鈍温度と磁氣的性質

焼鈍温度 C°	導磁率			60サイクル、1000ガウスに於けるヒステレシス損 watt/kg
	5 エルステット	20 G	100 G	
600	2723	835	185	2.90
700	2162	855	186	2.10
800	2233	663	185	1.50
900	3027	815	181	0.90
1000	3013	813	182	0.66
1100	2963	800	181	0.48
1200	2963	803	183	0.35
1300	2882	785	180	0.35

此の法により製造されたる板は再結晶後の結晶の方向性は好いが交互に壓延方向を變ずる故板の大きさは兩方向に擴がる故にロールの幅の廣きものを必要とする缺點あり。

珪素鋼板鐵損値は縦目、横目を組合して測定せるもの故

	V ₁₀	V ₁₅	$\frac{V_{15}}{V_{10}}$	H ₁₀	H ₂₅	H ₅₀	H ₁₀₀	H ₃₀₀
縦板組合	0.94	2.33	2.48	13950	14760	15540	16670	18940
縦目のみ	0.92	2.23	2.42	14150	14910	15790	16520	18780
横目のみ	1.02	2.52	2.47	13960	14580	15350	16460	18710

	V ₁₀	V ₁₅	$\frac{V_{15}}{V_{10}}$	H ₁₀	H ₂₅	H ₅₀	H ₁₀₀	H ₃₀₀
熱間壓延の まゝ焼鈍す	1.30	3.08	2.36	13560	14690	15600	16750	19740
縦目に1回 冷間壓延	1.22	3.13	2.60	13590	14460	15220	16400	18740
横目に1回 冷間壓延	1.13	3.03	2.69	13120	14120	15090	16310	18770
縦目1回、横目 2回冷間壓延	1.18	3.11	2.64	13230	14140	15090	16270	18630

此の平均値と考へらるべく縦目、横目別個に測定する時は次の如く縦目の方常に良好にして今冷間壓延を横目になす時は更に普通の場合に比し成績は良好になるも、現在に於てはロール幅狭き爲に制限されかくする爲には板を半切せざるべからず。(上表参照)

6. 焼鈍作業

如何に原料に於て良質のものを得、精鍊、熱間、冷間壓延作業共に宜敷を得るとも焼鈍作業を忽にする時は優秀なる鐵板は得難し。

特に珪素鋼板に對する焼鈍作業は、

1. 徐熱、徐冷をなすこと。
2. 均一なる焼鈍をなすこと。
3. 酸化皮膜の出来る限り薄きこと。

等は最も緊要なる條件にて特に此の鋼板は高珪素の爲に熱の傳導悪く急激に加熱、冷却する時は割れる懼れあり。均一なる焼鈍を施す爲には勢ひ電氣焼鈍爐を使用せざるべからず。ガス焼鈍爐にては部分的燃焼の爲に不均一となり電磁氣的性質悪し。裝入量に於ても多量を一時に焼鈍することは不均一の因にて絶対に避くべく1回の焼鈍量は1~3tを適量とす。時間的にも却て其の方經濟的なり。既に述べたる如く高珪素鋼は變態點なき故適當なる温度を物色し其れを目標に焼鈍するものなり。以下焼鈍温度と鐵損との關係を表に示すに、(4% Si 鋼)

焼鈍温度及時間	鐵損 V ₁₀ watt/kg		
	焼鈍前	焼鈍後	鐵損減少率 %
650°C 30分	3.81	2.05	46
700°C "	3.81	1.46	62
750°C "	3.84	1.12	71
800°C "	3.84	0.96	75
850°C "	3.65	0.98	75
650°C 2時間	3.55	1.97	49
700°C "	3.86	1.25	67.5
750°C "	3.83	1.07	72.5
800°C "	3.88	0.96	75
850°C "	3.89	0.98	75
650°C 5時間	3.90	1.21	69
700°C "	3.90	1.08	72
750°C "	3.91	0.98	75
800°C "	3.91	0.97	75.5
850°C "	3.94	1.01	75

是等の結果より適當なる焼鈍温度は800°C~850°Cなり。是等は實驗室に於ける結果にして實際に現場に於て製造せるものは種々なる條件のため5%位鐵損多し。

次に酸化皮膜なるが是れは電磁氣的に鐵板に悪影響を及ぼす。如何にして此の酸化皮膜を防止するや、實驗室的には真空焼鈍、或は水素氣流中に於ける焼鈍により好結果を得るも工業的に大規模には困難を伴ふ故に特別の還元ガスを發生し絶えず焼鈍中注入して空氣を排除するなり。當所に於ては從來は市販のガス及び窒素ガスを注入したるも結果良好ならざる故特別にガス發生機を外國より購入し特種ガスを發生し注入しつゝあり。此のガスは成分を變化することにより磨鋼板等に注入する時は全く冷間壓延による光澤の儘の板を焼鈍後も保持し得らるなり。

酸化皮膜厚きものは切斷作業，ワニス處理，加熱作業等により，剝脱し絶縁上困却す，殊に厚きものは 0.04mm. 以上もあり斯くては有效面積を減じ高磁束密度に於ける鐵損値を増大ならしめ磁束飽和値を減少せしむる原因となる。

電動機用及發電機用鋼板の國產品は成績は良好にして外國品に遜らざるも變壓器用鋼板に於て $B=10,000$ gauss 前後に於ては大差なきも $B=15,000$ 前後となるや外國品に比し著しく鐵損増加す。殊に高磁束密度に於て使用せらるゝ今日此の 15,000 に於ける高鐵損は不可なり。

即磁束密度は 15,000 gauss, 50% に於ける鐵損の 10,000 gauss の夫れに對する比の小きことを望むなり。其の爲には酸化皮膜を出来る限り薄くす。然る時は此の比は小くなるなり。即高磁束密度に於て急激に鐵損の増すは酸化皮膜の爲にして是れに就いては Ball の參考論文あり。Steinmetz の Hysteresis Loss の方程式と Kennelly の Reluctivity 方程式は

Hysteresis Loss $h = \eta B^{1.6}$ Reluctivity $\rho = \alpha + \zeta H$
 にて是等の $\log h - \log B$, 及び $\rho - H$ 曲線は夫々直線とならねばならぬに珪素鋼板にては何れの曲線も下の方にては略々直線なるが上の方にては直線より離れ恰も材質の變りたるが如き觀を呈す。是れ酸化皮膜の影響にして珪素鋼板は珪素鋼と酸化皮膜との組合よりなる不均質材料にて H の小なる間は酸化皮膜は磁性を示すこと僅少なるも H の大となるにより相當磁性を示す結果と想像さる。此の磁性の急に現はるゝ點にて直線との分離が生ずる。電氣比抵抗は酸化皮膜は 25°C に於て $107 \sim 157 \mu\Omega\text{cm}$, 比重は 5.54 に

て 4% 珪素鋼自體は $55 \mu\Omega\text{cm}$, 比重 7.55 で著しき差なきも磁性には格段の差あり。

珪素鋼板のヒステレシス損の對數曲線を第 34 圖に示す。酸化皮膜なければ點線の如くなる筈なり。第 37 圖は酸化皮膜の厚さ 10% 及び 20% の場合のヒステレシス損を計算より求めた結果の對數曲線なり。(第 35 及第 36 圖にスケールの鐵損曲線を示す)。

酸化皮膜の厚みは普通のもの 0.03~0.04mm にて略鐵板の厚みの 10% 前後なり。珪素 4% 鋼に出来たるものを分析せるに次の如し。

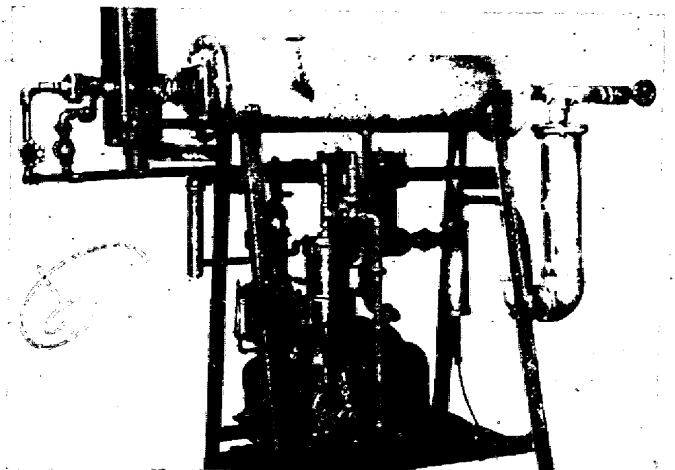
	SiO ₂	Si	FeO	Fe ₂ O ₃	Fe ₃ O ₄	Mn	P	S
スケール分析	10.03	trace	2.376	84.74	1.751	0.57	0.065	0.015

7. 酸洗滌とスケール除去作業

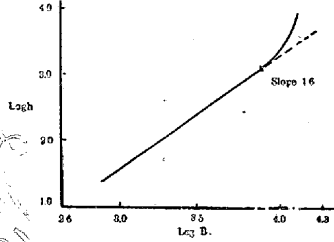
電磁氣的性質に有害なる酸化皮膜(スケール)を防止する方法として特種ガスを發生注入する發生機を利用する方法と更に積極的なものとして硫酸等により酸洗滌をなし酸化皮膜を取去る方法とあり。製造工程中の何處に於て酸洗滌をなすかは重要な問題にして且つ酸の濃度，溫度等適當ならざれば地肌を冒し水素ガスを包含し電磁氣的性質は却つて悪くなり製品も取扱ひに注意せざる時は非常に錆易し。特に高珪素鋼板の酸洗は餘程入念に作業をなさざる限り優秀なる成績は得られず，酸洗されたる鋼板の 15,000 gauss に於ける鐵損は著しく減少し $V_{15} : V_{10}$ の比は 2.5 以下になり，即高磁束密度に於ける鐵損曲線は減少する方向に傾き且つ導磁率も良好になるなり。

防酸ガス發生機は第 38 圖に示す如き装置にして市販ガスを燃焼室に於て適當なる空氣量と混合し燃焼し主として CO 10%, CO₂ 4% 前後なるガスとして爐筐内に注入す。

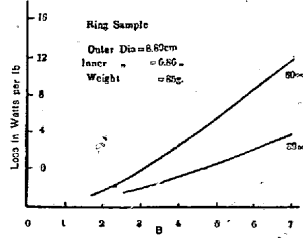
第 38 圖 防酸ガス發生機 (combustion type)



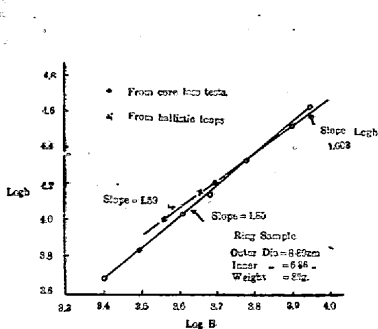
第 34 圖 珪素鋼板ヒステレシス損對數曲線



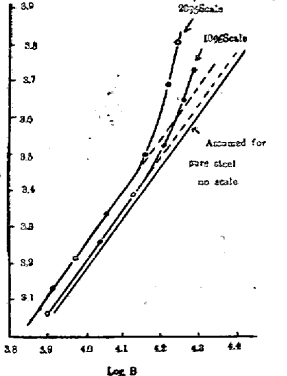
第 35 圖 珪素鋼板スケールA鐵損曲線



第 36 圖 珪素鋼板スケールヒステレシス損對數曲線

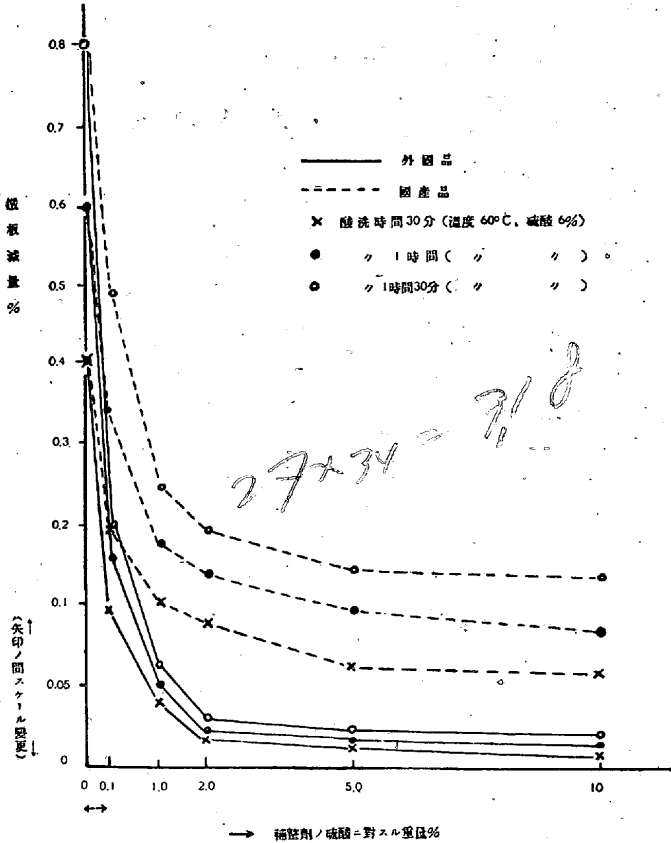


第 37 圖 珪素鋼板ヒステレシス損對數曲線



硫酸による酸洗滌作業は温度約50~70°C, 10%前後の濃度に於て行ふを普通とするも特に此の鐵板に對しては表面地肌の荒れを嫌ふ故(占積率の低下を懼る)に防止策として各種の補整劑を混合し使用する。第39圖は之を曲線に纏めたるものなり。

第39圖 補整劑の酸洗侵蝕量に及ぼす影響



以下に示すは補整劑使用有無による鐵板の侵蝕程度と國產品と外國品の補整劑の效力比較なり。

補整劑の有無による侵蝕程度(減量%)

外 國 品	時間	補整劑重量%					
		0	0.1	1	2	5	10
外 國 品	30分	0.41%	0.092%	0.033%	0.013%	0.011%	0.0105%
	1時間	0.60%	0.154%	0.050%	0.021%	0.018%	0.017%
	1時間30分	0.80%	0.20%	0.068%	0.028%	0.024%	0.023%
内 國 品	30分	—	0.205%	0.100%	0.081%	0.06%	0.057%
	1時間	—	0.345%	0.178%	0.136%	0.092%	0.078%
	1時間30分	—	0.485%	0.245%	0.195%	0.142%	0.137%

備考 補整劑重量%は使用硫酸に對してなり

扱酸化皮膜が實際に如何に鐵損に悪影響を與へるやを調ぶる爲に各種方法により、スケールを出来る限り除去し電磁氣的性質を測定したり。即その除去方法として次の四つを採用せり。

- 1) 薄板製造工程中に於て酸洗せるもの
 - 2) 焼鈍仕上後酸洗せるもの
 - 3) 防酸ガスを注入せるもの
 - 4) 機械的に除去せるもの
- 次に其の實績を記すに、

1) 薄板製造工程中に於て酸洗せるもの。是れは冷間壓延を行ふ前に酸洗す

		V ₁₀	V ₁₅	V ₁₅ /V ₁₀	H ₁₀	H ₂₅	H ₅₀	H ₁₀₀	H ₃₀₀
未 洗 滌	H(900°C 2時間焼鈍)	1.15	2.80	2.34	13140	14140	14900	16080	18390
	I(" ")	1.07	2.84	2.64	13620	14520	15380	16460	18760
	J(" ")	1.13	2.53	2.24	13500	14520	15530	16570	18650
	K(" ")	1.08	2.70	2.50	13540	14480	15340	16380	18500
酸 洗 滌 す	H'(" ")	1.10	2.63	2.40	13270	14340	15270	16430	18730
	I'(" ")	1.05	2.53	2.41	13850	14740	15570	16720	19020
	J'(" ")	1.15	2.58	2.24	13650	14690	15600	16810	19210
	K'(" ")	1.13	2.75	2.43	13590	14530	15260	16510	18970

2) 焼鈍仕上後酸洗せるもの。

		V ₁₀	V ₁₅	V ₁₅ /V ₁₀	H ₁₀	H ₂₅	H ₅₀	H ₁₀₀	H ₃₀₀
未 洗 滌	D(850°C 3時間焼鈍)	1.20	2.84	2.37	13410	14440	15250	16390	18680
	E(" ")	1.12	2.79	2.49	13750	14580	15470	16600	18820
	F(" ")	1.25	2.65	2.12	13660	14460	15350	16450	18660
	G(" ")	1.08	2.69	2.49	13660	14440	15330	16460	18740
酸 洗 滌 す	D'(" ")	1.15	2.75	2.49	13080	14450	15430	16640	18910
	E'(" ")	1.10	2.68	2.43	13690	14450	15480	16500	18980
	F'(" ")	1.15	2.49	2.16	13520	14630	15500	16570	19040
	G'(" ")	1.02	2.47	2.42	13720	14700	15570	16670	18900

酸洗滌後低温度(600°C 4h)にて焼鈍す

		V ₁₀	V ₁₅	V ₁₅ /V ₁₀	H ₁₀	H ₂₅	H ₅₀	H ₁₀₀	H ₃₀₀
酸 洗 滌 後 600°C 焼 鈍 す	D(850°C 3時間焼鈍後600°C 4h焼鈍)	1.05	2.48	2.36	13720	14580	15350	16470	18740
	E(" ")	0.97	2.33	2.40	13630	14470	15380	16580	18860
	F(" ")	1.19	2.59	2.18	13610	14590	15420	16590	18850
	G(" ")	0.93	2.35	2.52	13710	14680	15480	16570	18910

此處に注意すべきは F, F', F'' の V₁₅/V₁₀ が甚だ低きことなり。是れは冷間壓延作業前に一度酸洗滌せるものを引續き試験せるものなり。

		V ₁₀	V ₁₅	V ₁₅ /V ₁₀	H ₁₀	H ₂₅	H ₅₀	H ₁₀₀	H ₃₀₀
未 洗 滌	A(850°C 3時間焼鈍)	1.12	2.79	2.49	13750	14580	15470	16600	18820
	B(900°C 2時間 ")	1.07	2.84	2.64	13620	14520	15380	16460	18760
	C(1000°C 2時間 ")	1.25	2.90	2.32	13090	14310	15160	16300	18520
酸 洗 滌 す	A'(" ")	1.25	2.65	2.12	13660	14460	15350	16450	18660
	B'(" ")	1.13	2.53	2.24	13500	14520	15530	16570	18650
	C'(" ")	1.25	2.84	2.26	13390	14540	15460	16670	18940

酸洗滌後 600°C にて 4h 焼鈍す。

		V ₁₀	V ₁₅	V ₁₅ /V ₁₀	H ₁₀	H ₂₅	H ₅₀	H ₁₀₀	H ₃₀₀
酸 洗 滌 後 600°C 焼 鈍 す	H''(900°C 2時間焼鈍)	1.03	2.43	2.36	13800	14340	15150	6310	18580
	I''(" ")	0.98	2.38	2.43	13750	14620	15430	16600	18560
	J''(" ")	1.07	2.46	2.30	13780	14600	15510	16710	18880
	K''(" ")	1.09	2.61	2.40	13590	14560	15380	16450	18850

更に E'', I'' を 800°C 1.5h 焼鈍せるに次の如き成績を得たり。

		V ₁₀	V ₁₅	V ₁₅ /V ₁₀	H ₁₀	H ₂₅	H ₅₀	H ₁₀₀	H ₃₀₀
800°C 1.5h 焼 鈍 す	E'''(酸洗滌後600°C焼鈍後800°C 1.5h焼鈍)	0.91	2.30	2.52	13820	14670	15420	16610	18850
	I'''(" ")	0.94	2.30	2.48	13950	14760	15540	16670	18940

3) 防酸ガス注入せるもの

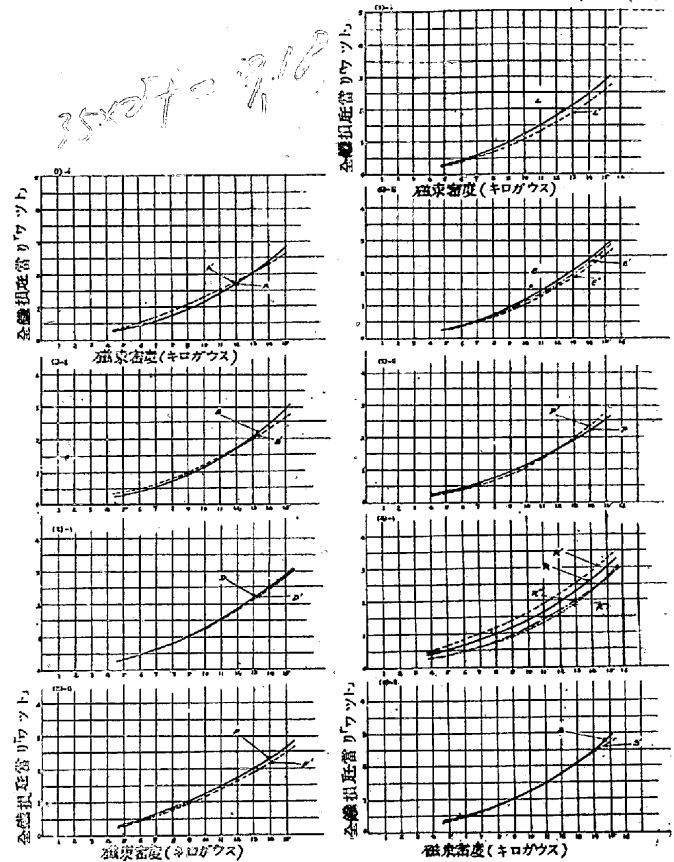
	V ₁₅	V ₁₅	V ₁₅ /V ₁₀	H ₁₀	H ₁₅	H ₂₀	H ₁₀₀	H ₃₀₀
防注 酸入 せ る 新 ま の	L (850°C 3時間 焼鈍せるもの)	1.20	2.64	2.37	13470	14440	15250	16390
	M (")	1.12	2.79	2.49	13730	14530	15470	16500
	N (")	1.25	2.65	2.12	13660	14460	15350	16450
	O (")	1.08	2.69	2.49	13650	14440	15330	16460
	P (900°C 2時間 焼鈍せるもの)	1.13	2.53	2.24	13500	14520	15530	16570
Q (")	1.07	2.84	2.65	13620	14520	15350	16460	
防注 酸入 せ る 新 ま の	L' (")	1.03	2.57	2.50	13610	14420	15230	16390
	M' (")	1.12	2.81	2.50	13190	14200	15220	16130
	N' (")	1.11	2.74	2.46	13170	14430	15400	16570
	O' (")	1.13	2.73	2.42	13370	14310	15150	16320
	P' (")	1.03	2.74	2.66	13360	14430	15340	16570
Q' (")	1.18	2.82	2.39	13530	14430	15290	16410	

4) 機械的に除去せるもの

	V ₁₅	V ₁₅	V ₁₅ /V ₁₀	H ₁₀	H ₁₅	H ₂₀	H ₁₀₀	H ₃₀₀
R (800°C 3時間 焼鈍せるもの)	1.31	3.09	2.35	13040	14220	15110	16290	18480
R' (スケールをグライン ダーにて削り落とす)	1.61	3.26	2.02	12230	14150	15290	16650	19100
R'' (スケールを除去せる 後600°C 4時間焼鈍す)	1.13	2.66	2.36	13770	14600	15470	16600	18890
R''' (更に 850°C 1時間 焼)	1.07	2.68	2.50	13770	14490	15440	16600	18920
S (1000°C 2時間 焼鈍せるもの)	1.25	2.90	2.32	13090	14310	15160	16300	18520
S' (ピンセットにて スケールを取除く)	1.25	2.73	2.19	13190	14320	15180	16380	18680

是等の結果より見て冷間延前酸洗したるものは鐵損値は少しく高きも V₁₅/V₁₀ の値は非常に良くなり焼鈍仕上後最後に酸洗滌せるものは鐵損値、誘導共に良好になり、更に此の酸洗滌後低温度にて焼鈍する時は鐵損値更に良好になるなり。防酸ガスを注入せるものは V₁₀ の鐵損値は良好なるも未だ酸洗により全くスケールを除去せるものに比し密着したる薄きスケールの爲に V₁₅/V₁₀ は餘り良好ならず。是等の内最も成績の良好なるは焼鈍仕上後酸洗滌をなしたるものなるが、實際作業に當りて幅廣の大なる板を酸洗することは餘程困難なり。且酸洗作業に當り餘程注意せざる時は地肌を荒され水素をも含有し機械的性質低下の懼れあり。若し酸洗によらずして簡単にスケールを除去し得れば是に勝る事なし。依りて(4)の如くグラインダーペーパーにて軽く削り取りたるに、V₁₀ の値は機械的歪の爲に増すも V₁₅/V₁₀ は著しく減少し是れを低温度にて焼鈍し機械歪を取る時は著しく良好になるなり。高温にて焼鈍する時は V₁₀ の値は更に減少するもスケールを再び生ずる爲に V₁₅/V₁₀ は増加す。S 試料の如くスケールの非常に浮きたるものをピンセットにて取り去りたるに是れには全然機械的歪の加はべきる爲 V₁₀ の値

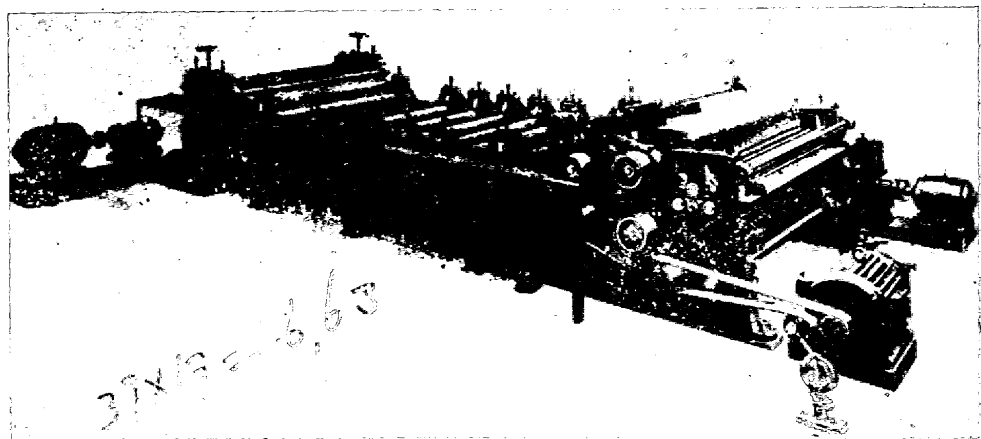
第 40 圖 珪素鋼板スケール除去前後に於ける鐵損曲線
(各曲線の符號により鐵損値を参照されし)



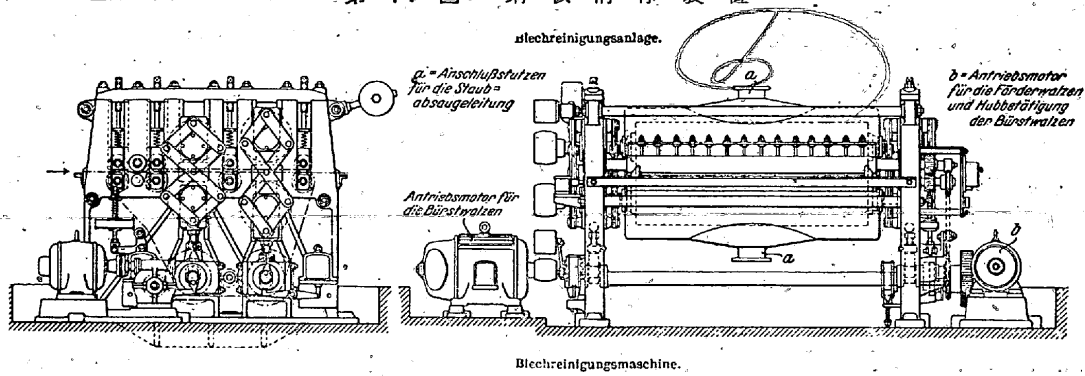
は變はらざるも V₁₅ の値及 V₁₅/V₁₀ は良好になりたり。且誘導値も増加せり。即機械的歪を與ふることなく除去し得ば好結果を得るなり。今此處に前記成績の二、三を曲線に畫きスケール除去の影響を示す。(第 40 圖)獨逸に於ては第 41 圖の如き装置によりスケールを除去しおるもの如し。

酸化皮膜を取り去る方法は種々あるも何れにせよ將來珪素鋼板に於て酸化皮膜皆無のもの製造し得れば電磁氣的性質に於ても且つは變壓器に於て優秀なる成績を得るなり。

第 41 圖 鋼板清淨装置



第 41 圖 鋼板清淨装置



(注意) 本論文に報告せる実験成績は總て珪素含有 4% の同一鋼番のものに就きて行へるものなり。

8. 結 言

近時高磁束密度にて使用さるゝ容量大なる變壓器の設計製作に従ひ是れに使用さる珪素鋼板も高磁束密度にて鐵損の低きものを要求さる。此の要求を満たす爲には

1. 冷間壓延法により適當なる減厚をなす
2. 相當大なる減厚をなして結晶の配列を整備す
3. 焼鈍は總て電氣燒鈍爐を使用す
4. 工程の途中又は終りに酸洗滌或は他の方法により酸化皮膜を除去し皆無とす

等の方法を巧に組合すことにより特に冷間壓延には最新式冷間壓延機の進歩と共に是れが利用と結晶配列法の研究益々旺となり是れに配するにX線研究の發展とをもつてすれば更に優秀なる珪素鋼板を製造し得るは近きにありと信ず。

終りに臨み終始御指導を賜り且つ發表を許可せられたる西山所長に深甚なる謝意を表す。又本研究遂行に當り電氣試験に御盡力下されし多川氏及び熱心に御助力下されし關係各位に深謝す。

文 獻

1. R. Becker-W. Döring : Ferromagnetismus Berlin 1939.
2. G. Wassermann : Texturen metallischer Werkstoff Berlin. 1939.
3. N. P. Goss. : Trans, Amer. Soc. Met. Vol 23. (1935)
4. Adolf Heitmeier : V. D. E. Fachberichte. Bd. 8. (1936)
5. John. D. Ball : G. E. Review 1916.
6. Armco Elect. Sheet Steel 1939.
7. Werkstoff Handbuch Stahl und Eisen. 1937.
8. J. T. Burwell : Metals Technology Vol. 7. (1940)
9. T. D. Yensen : Stahl und Eisen Heft. 52. 1936.
11. A. Wimmer und P. Werthebach : Stahl und Eisen Heft. 16. 1934.
12. W. Eilender und W. Oertel : Stahl und Eisen Heft. 17. 1934.
13. K. J. Sixtus : Physics Vol. 6. 1935.
14. Spooner. : Properties and Testing of Magnetic Materials.