

鐵の磁氣的性質に及ぼす燐の影響に就て

(日本鐵鋼協會第 11 回講演大會講演)

嘉 村 平 八 *

THE EFFECT OF PHOSPHORUS ON THE MAGNETIC PROPERTIES OF IRON.

By Heihachi Kamura.

SYNOPSIS:—The author has been published on the effects of phosphorus as to the mechanical and physical properties of iron on this journal, Vol. XVIII, No. 4. This is the continuation of the previous investigation. It has been known that the magnetic properties of the iron is remarkably effected by small amount of impurities in it and the superior magnetic properties is obtained to eliminate the impurities as lower as possible in its manufacture.

The author incidently discovered, in an occasion of investigation of iron made by the process of hydrogen reduction, that the phosphorus in the iron improves the magnetic properties of iron—that is high permeability and low hysteresis loss.

In this research, the magnetic properties of phosphor iron, containing lower than 1% P was investigated. When the amount of phosphorus in the iron is about 0.7% the maximum permeability reached to 20,000 and the hysteresis loss decreased to less than 1,000 ergs. per sq. cm. per cycle; that is nearly correspond to three times in the maximum permeability and 60% in the hysteresis loss compared with the 3.5% silicon-steel in the market. When the phosphorus content is more than 0.5%, no ageing phenomena was observed. It was recognized that the proper annealing temperature exist by different phosphorus content to obtain best magnetic properties. In [the investigation of the microscopic structure, the higher the phosphorus content in the iron the larger grain size was to be seen as in case of the silicon-steel, but it is not much remarkable when the phosphorus content reaches to more than 0.5%. When the annealing temperature is raised to the recrystallized range which is seen from the constitutional diagram of Fe-P, the deleterious effects on the magnetic properties was observed.

目 次

- | | |
|-------------------------|-------------------|
| 1. 鐵の磁氣的性質 | 6. 磁性と焼鈍溫度 |
| 2. 磁性試験試料 | 7. 鑄造及び加工に依る磁性の變化 |
| 3. 磁性試験 | 8. 磷鐵の顯微鏡組織 |
| 4. 磷鐵の B-H 曲線並にヒステレシス環線 | 9. 結 論 |
| 5. Ageing の試験 | |

1. 鐵の磁氣的性質 不純物の少ない純粹な鐵程其の磁氣的性質が良くなる事は古くから知られて居る、不純物で炭素は最も悪い影響を及ぼし固溶態の状態にて存在するものは其の害最も甚だしく極めて微量の固溶態炭素が著しく磁性を悪くする、此の他微量の O_2 も悪い影響を來し S, Mn 等も有害である、炭素又は不純物の含有少き瑞典木炭鐵、アムコ鐵及び電解鐵の磁性を示せば次の如き例がある。

	最大導磁率	保磁力 oersted	ヒステレシス損 ergs/cm ² /cycle
瑞典木炭鐵	2,600	0.92	2,700
アムコ鐵	7,000	0.72	2,100
電 解 鐵	12,630	0.56	1,631

又 Yensen 氏¹⁾ は電解鐵を vacume furnace 中で熔

解して最大導磁率 $\mu_{max}=19,000$ 、保磁力 $H_c=0.22$ 、ヒステレシス損 $W_h=810 \text{ erg}$ と云ふ様な鐵を得、又同氏は 1928 年同様な方法で $\mu_{max}=61,000$ 、 $H_c=0.09$ 、 $W_h=300 \text{ erg}$ と云ふ様な結果を得た事を發表して居る、最近 Cioffi 氏²⁾ はアムコ鐵を $1,480^\circ C$ にて水素氣流中で長時間加熱して $\mu_{max}=190,000$ 、 $H_c=0.025$ 、 $W_h=190 \text{ erg}$ と云ふ様な記録的の鐵を得た事を發表して居る。斯の如く電解鐵や特別の方法に依て得た鐵が極めて優秀な磁性を有するのは不純物が少ないのと酸素の含有が極めて少ない爲めであつて微量

第 1 表

試 料	C	分析成分%					最大導磁率	ヒステレシス損 ergs/cm ² /cycle	保磁力 oersted
		Si	Mn	P	S	Cu			
桃 沖	0.02	0.047	0.054	0.014	0.010	0.005	9,150	2,141	0.70
同	—	0.012	0.054	0.014	0.012	0.010	9,900	2,180	0.70
鞍山	0.02	0.009	0.054	0.045	0.016	0.003	10,000	2,109	0.69
電解鐵	—	0.009	0.043	0.036	0.007	0.002	10,100	1,631	0.56
スケール	0.027	0.009	0.054	0.018	0.010	0.002	9,000	2,682	0.90
日野 No. 2	0.027	0.009	0.054	0.099	0.007	0.002	10,500	1,838	0.60
日野 No. 3	0.027	0.030	0.076	0.036	0.010	0.002	5,450	2,546	0.79
久慈 No. 1	0.027	0.112	0.076	0.149	0.005	0.007	13,500	1,432	0.47
久慈 No. 2	0.027	0.051	0.054	0.335	0.005	0.005	15,300	1,074	0.33

* 明治専門學校

1) T. D. Yeussen; Magnetic and Other Properties of Fe-Si Alloys Melted in Vacuo, University of Ill. Bulletin No. 83, 1915.

2) Cioffi; Phys. Rev., Vol 39, 1932, p. 363

の不純物や瓦斯が鐵の磁性に著しい影響を及ぼす事が判る
著者は水素瓦斯に依り鐵礦を還元し鐵を製造する研究を行ひ其の熔鐵の性質に関する研究は本會誌昭和6年2月號にを發表した、同方法に依り製造した鐵を鍛鍊して 950°Cにて燒準せる試料に就て其の磁性を研究し第1表の如き結果を得た。

上表の結果に依れば使用した原礦の種類に依て磁性に著しい相違がある、其の理由を考へた處が鑛石の種類に依て製造せる鐵の成分は多少相違して居るが C, Si, Mn, S 等の不純物は何れも極めて微量で大なる相違なく主として P の含有量が異なるのが其の原因ではないかと云ふ様に推定した。

Yensen 氏³⁾ は鐵の磁性に對する色々の不純物の影響を研究して發表して居るが P の及ぼす影響に關しては純鐵の場合に於て P の含有 0.02% 以下の範圍内に於て磁性に悪い影響を與へ履歴損失を増すが 4% 珪素鋼では 0.015% 乃至 0.12% の範圍内に於ける P の含有は寧ろ履歴損失を減少せしむる事を述べて居る、此の他鐵の磁性に關する影響に就て發表された文献は殆ど無いので鐵の磁性に對して如何なる影響を及ぼすかを研究する事とした。

2. 磁性試験試料 任意の P を含有せる無炭素鐵を製造する爲め P の含有 1.125% なる太平赤鐵礦を水素還元法に依り還元する時は還元鐵中の P は約 1.5% となり約 80% の P は還元せられる 此の還元鐵を熔解する時は次の如き P の含有高き鐵が得られる。

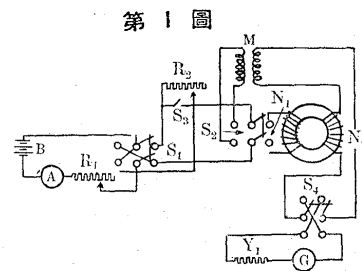
C	Si	Mn	P	S
0.02	0.03	0.069	1.839	0.0124

試料の製造には水素還元法に依て製造した炭素を含有せず不純物の少い鐵に上記の P の含有高き鐵を適當に配合熔融して P の含有約 0.1% 乃至 1.0% なる磷鐵インゴット 1.0~1.5 kg のもの數十種を作り之を約 1,000°C にて適當の形に鍛鍊した。含有磷 1.0% 以下のものに於ては鍛鍊作業に注意すれば龜裂を生ずる様な事は無い、鍛鍊後の試料は外徑 35~40 mm 内徑 25~30 mm 厚さ 5 mm の環狀に削り水素氣中に於て種々の溫度で燒鈍し B-H 曲線並にヒステレシス環線を測定した。

3. 磁性試験

(1) 測定器及び測定法 :— 熔解後鑄型に鑄造した P の含

有量を異にせる各種試料は適當の大きさに鍛鍊し之を環狀に削り彈動電流計法に依て其の磁性を測定した。第1圖は其



の接續圖を示す、電流計 A は可變シヤントを有する Siemens 製 10 オーム計器で標準相互誘導器 M は Siemens の 10 ミリヘンリーのものである。彈動電流

計 G は Leeds & Northrup 社製で内部抵抗 1,520 オーム、感度 0.006 micro-ohm/mm のものである。

環狀試料は大部分外徑 35 mm、内徑 25 mm、厚さ 5 mm で正確な寸法を測つて斷面積 $A(\text{cm}^2)$ 及磁氣回路の平均の長さ $L(\text{cm})$ を求めた。

一次側の捲数を N_1 、二次側の捲数を N_2 とし、磁化電流を $I \text{ amp}$ とすれば磁化力 H は

$$H = 0.4\pi N_1 I / L \text{ oersted}$$

で表はされる、捲数 N_1 を適當に選んで $H = 10 I$ となる様にした。

標準相互誘導器の一次電流を $-i$ から $+i$ に變化せしめた時の彈動電流計の振れを d とし環狀試料の一次電流を I_1 より I_2 に變化せしめた時の彈動電流計の振れを D とすれば試料中の磁束密度の變化 ΔB は

$$\Delta B = 2Mi/d \cdot D/AN_2 \times 10^8 \text{ gauss}$$

之に相當する磁化力の變化 ΔH は

$$\Delta H = 0.4\pi N_1(I_2 - I_1) \text{ oersted}$$

此の原理に依り磁化曲線並に履歴曲線を求め履歴曲線は定點法を用ひた。

(2) 誤差の検討 :— 此の測定法に於て生じ得る誤差は次の三つが考へられる。

1. 測定器の誤差
 2. 試料内部の磁化力の不均一による誤差
 3. 二次捲線の内部が全部鐵で充滿されざる爲の誤差
- 測定器の誤差は電流計及相互誘導器の誤差が第一に考へられるが前者はポテンシオメーター及標準抵抗で更正し、後者は同型の3個と相互に比較して誤差を無視し得る事を確めた。

彈動電流計の振れは最大 200 mm 附近に調節し 1/10 mm 迄は目分量で讀み得るが故に振れの大きい附近に於ては誤差を考慮する必要無きも振れの非常に低い所では多少の誤

³⁾ T. D. Yeusen; Magnetic and Electrical Properties of Ternary Alloys of Fe-Si-C, J. A. I. E. E. Vol 42, 1924, p. 455

差は許されなければならぬ。

試料は環状で内側と外側とでは磁界の強さが異なるから試料から来る誤差を考へ得る。今試料の幅を b , 平均直径を d_m とし $b/d_m = \sigma$ とする、平均直径に於ける磁化力を H , 平均の磁化力を H' とすれば

$$H' = H \frac{\log_e \frac{1+\sigma}{1-\sigma}}{2\sigma}$$

なる關係を生ずる

$$\frac{\log_e \frac{1+\sigma}{1-\sigma}}{2\sigma} = K$$

とすれば $H' = KH$

此の研究に使用した二種の大きさの試料に就て K の値を求めると次の様になる。

外径 mm	内径 mm	d_m mm	b mm	σ	K
40	30	35	5	1/7	1.0069
35	25	30	5	1/6	1.0094

即ち此の結果から見ると第二の誤差は無視して差支へない

第三の二次捲線の包む空間が鐵で充されてゐない爲の誤差は導磁率の低い所では考慮すべきであるが弾動電流計の讀みの誤差も相當大きくなるから特に考慮を加へない事に

した。

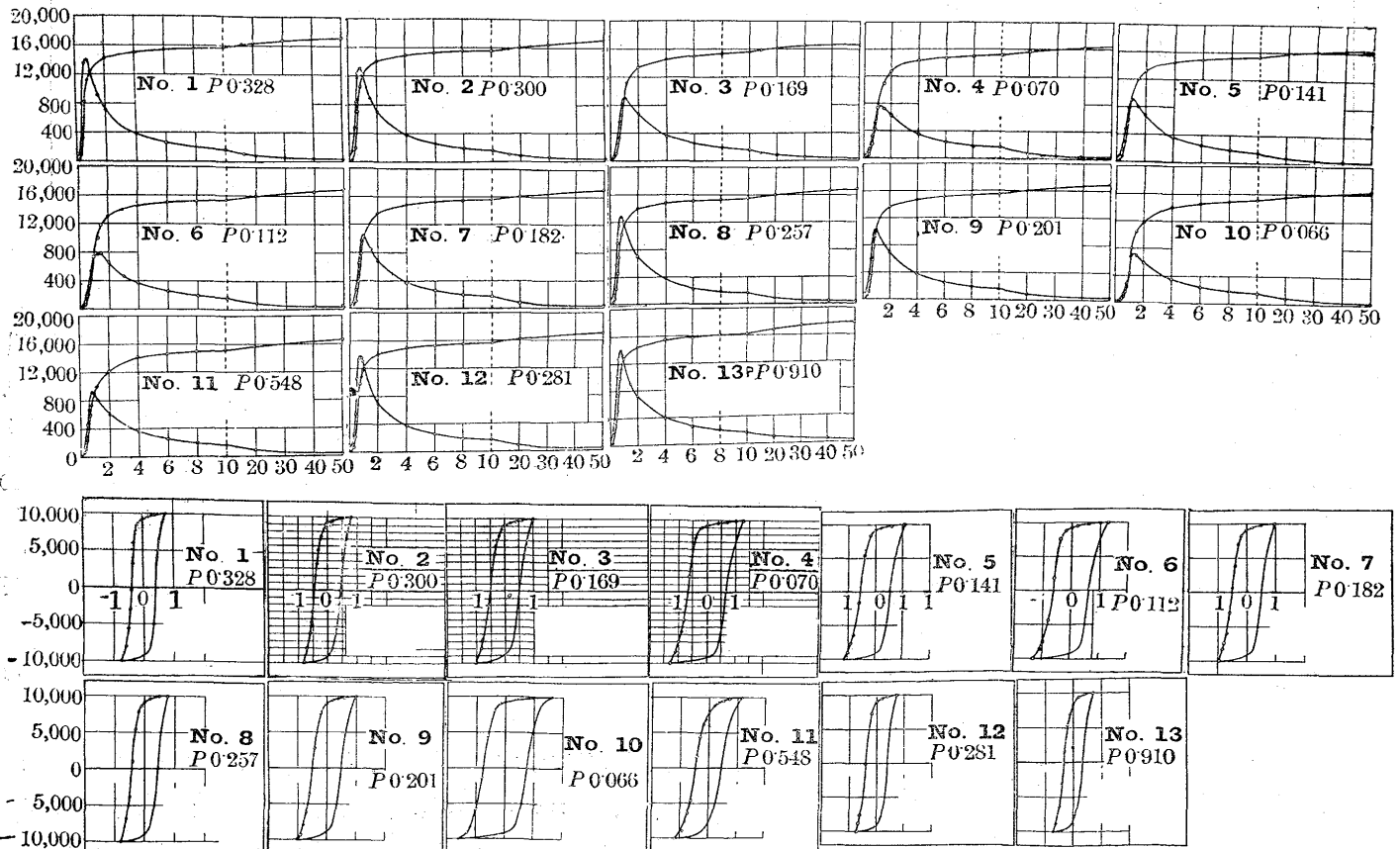
要するに以上の結果を綜合すれば低い磁化力附近以外では誤差は 1% を甚だしく超過しないものと思はれる。

4. 燐鐵の B-H 曲線並にヒステレシス環線 第 2 圖は P の含有量を異にせる 13 種の試料を 950°C で焼鈍したものに就て測定した B-H 曲線並にヒステレシス環線を示すもので第 2 表は各種試料の分析並に測定した磁氣的性質の結果を示すものである B-H 曲線に於て見るに P の含有を増すに連れ弱い磁化力で高い磁束密度が得られ飽和磁束密度の値は純鐵の場合と大差無くヒステレシス環線の特徴とする所は又高い導磁率を有する爲め急峻なヒステレシス環線が得られる。

以下表中 μ_0 は初導磁率、 μ_{\max} は最大導磁率、 W_h はヒステレシス損、 B_r は残留磁束密度、 H_0 は保磁率を示す。

第 2 表の結果に依て明かな様に P の含有 0.1% 以下のものでは最大導磁率 7,000 餘のものが P の含有を増すと共に増加し 0.2% 近くになれば 10,000 以上に増加し 0.3% では 13,000 にも達してゐる、ヒステレシス損に於ては P の含有増加と共に減少し P 0.1% 以下では 2,000 $\text{ergs/cm}^2/\text{cycle}$ のものが 0.2% 近くのものでは 1,500 ergs

第 2 圖 磁性試験 B-H 曲線並にヒステレシス環線



第2表 磁性試験成績

No.	分析成分%					μ_0	μ_{max}	W_h ergs/cm ³ /cycle	B_r gauss	H_c oersted	B
	C	Si	Mn	P	S						
1	0.02	0.0015	0.037	0.328	0.008	750	14,000	1,210	9,200	0.40	11,300
2	0.01	0.0015	0.037	0.300	0.009	900	13,100	1,377	9,100	0.45	10,500
3	0.02	0.007	0.037	0.169	0.009	300	9,000	1,639	9,000	0.50	10,500
4	0.02	0.015	0.037	0.070	0.006	350	7,600	2,021	9,300	0.65	9,600
5	0.02	0.015	0.037	0.141	0.007	600	9,100	1,719	9,200	0.55	10,400
6	0.03	0.007	0.037	0.112	0.007	300	7,800	1,966	9,200	0.62	10,500
7	0.02	0.007	0.037	0.182	0.009	500	10,400	1,592	6,100	0.50	9,500
8	0.01	0.007	0.037	0.257	0.009	900	12,800	1,384	9,100	0.48	9,000
9	0.02	0.007	0.037	0.201	0.011	850	10,300	1,512	8,900	0.50	9,300
10	0.01	0.007	0.037	0.066	0.011	150	7,200	2,451	9,200	0.75	9,800
11	0.005	—	0.006	0.548	0.016	1,000	9,350	1,363	7,800	0.45	8,000
12	0.002	0.058	0.085	0.281	0.012	900	13,850	1,226	9,050	0.40	10,000
13	0.001	—	—	0.900	0.017	900	14,000	1,027	8,200	0.32	11,000

並にヒステレシス損の値に著しき變化を來して居る、又試料を900°Cにて焼鈍せるものと1,050°Cにて焼鈍せるものと著しく其等の値も異にして居る。

次に示す第4表は新に製造した6種の試料を920°C並に1,050°Cで焼鈍したものに對して測定した結果であつて920°C焼鈍のものは同一成分

となり約0.3%になれば1,200~1,300 ergs位に低下してゐる。

第3表は更にDの含有を異にせる7種の試料を900°C並に1,050°Cに焼鈍測定した結果を示すもので第3圖は其の1,050°Cで焼鈍したもの、B-H曲線並にヒステレシス環線を示したものである。

以上の結果に依て見るもPの含有量に應じて最大導磁率

の試料2個に對して測定した處其の値は略ぼ一致した。表に記載したのは其の平均値である。第4圖は1,050°Cで焼鈍せるもの、B-H曲線並にヒステレシス環線である。

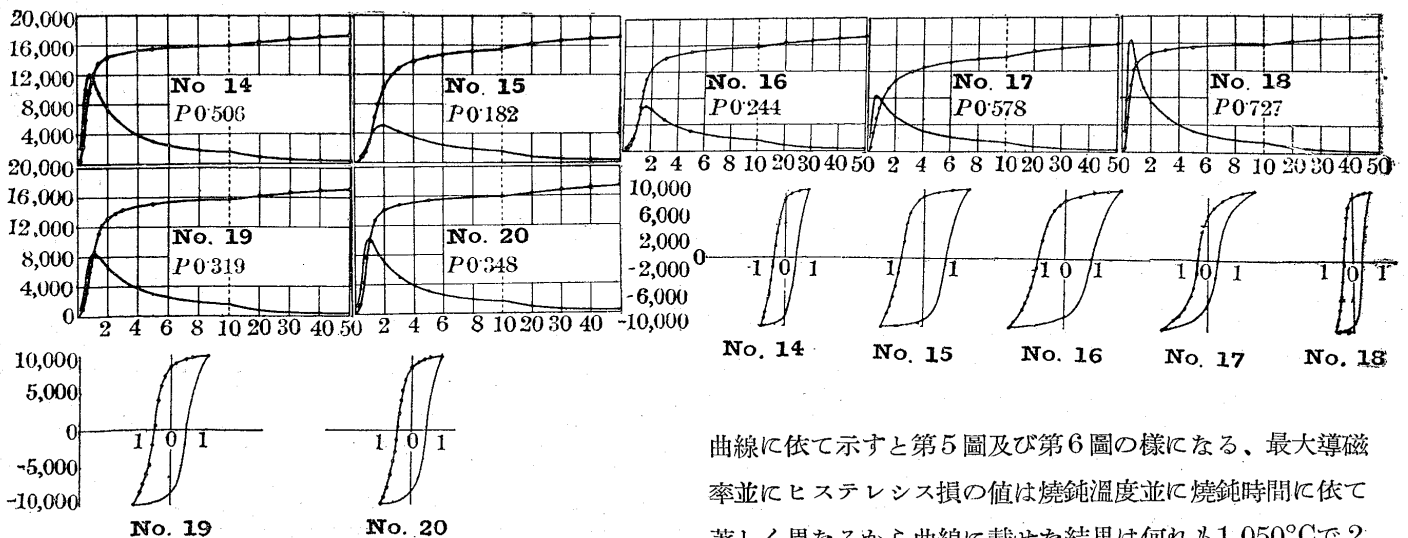
此上の實驗に於ても前の結果と大體に於て一致しPの含有を増すに従ひ最大導磁率を増しヒステレシス損は減少する是等の實驗に依て得た結果に依りPの含有量が鐵の磁氣的性質即ち最大導磁率及びヒステレシス損に及ぼす關係を

第3表 磁性試験成績 No.14-No.20.

No	分析成分%					annealed 1 hr at 900°C				annealed 2 hrs at 1,050°C				B
	C	Si	Mn	P	S	μ_{max}	W_h erg/cm ³ /cycle	B_r gauss	H_c oersted	μ_{max}	W_h erg/cm ³ /cycle	B_r gauss	H_c oersted	
14	0.027	0.007	0.082	0.506	0.007	6,570	2,340	8,400	0.74	12,000	1,249	8,650	0.40	10,000
15	0.014	0.012	0.116	0.182	0.008	3,850	3,024	7,600	1.02	5,100	2,515	9,000	0.80	9,800
16	0.014	0.005	0.082	0.244	0.005	4,200	3,840	8,300	1.24	6,800	2,902	8,400	0.90	10,800
17	0.014	0.035	0.089	0.578	0.008	5,200	2,090	7,400	0.65	8,400	1,106	6,400	0.34	4,800
18	0.014	0.012	0.061	0.727	0.009	7,500	1,974	8,650	0.61	16,400	995	9,100	0.30	10,000
19	0.014	0.010	0.082	0.319	0.007	5,000	2,640	8,100	0.84	8,500	1,671	8,500	0.52	9,300
20	0.014	0.005	0.061	0.348	0.009	5,820	2,354	8,500	0.75	10,150	1,462	8,550	0.48	10,150

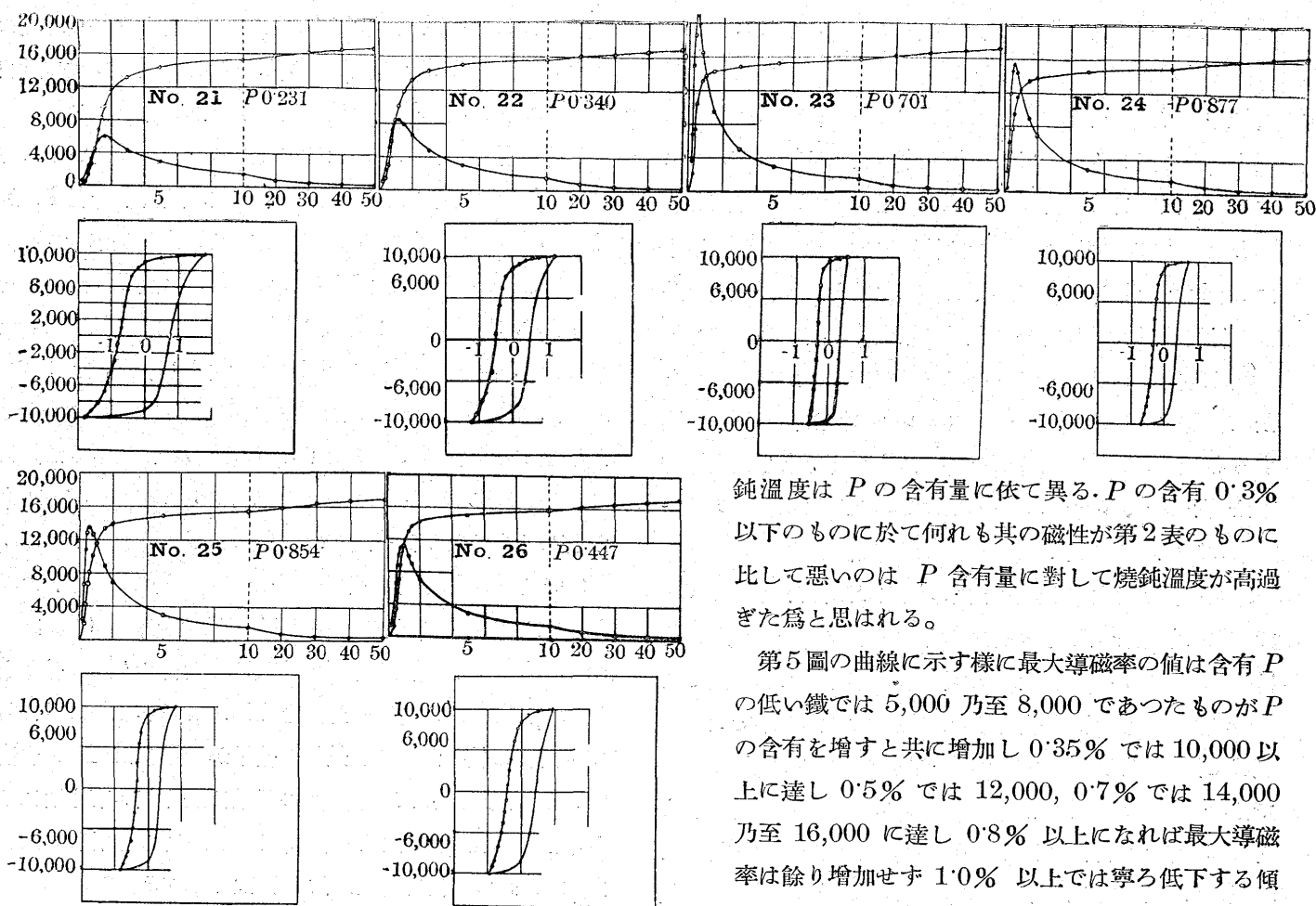
第3圖 磁性試験成績 No.14-No.20.

第4回焼鈍温度1,050°C



曲線に依て示すと第5圖及び第6圖のようになる、最大導磁率並にヒステレシス損の値は焼鈍温度並に焼鈍時間に依て著しく異なるから曲線に載せた結果は何れも1,050°Cで2

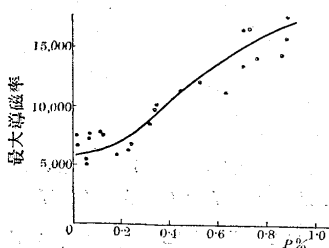
第 4 圖 磁性試験成績 No. 21—No. 26



時間焼鈍したものに就て測定した結果である、後節に述べる様に最大の μ_{max} 及び最小の W_h を得る爲めの適当な焼

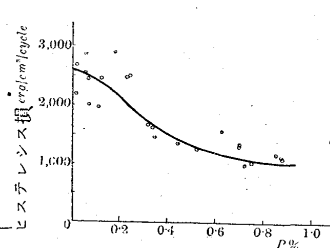
第 5 圖

燐の含有量と最大導磁率



第 6 圖

燐の含有量とヒステリシス損



鈍温度は P の含有量に依て異なる。 P の含有 0.3% 以下のものに於て何れも其の磁性が第 2 表のものに比して悪いのは P 含有量に對して焼鈍温度が高過ぎた爲と思はれる。

第 5 圖の曲線に示す様に最大導磁率の値は含有 P の低い鐵では 5,000 乃至 8,000 であつたものが P の含有を増すと共に増加し 0.35% では 10,000 以上に達し 0.5% では 12,000, 0.7% では 14,000 乃至 16,000 に達し 0.8% 以上になれば最大導磁率は餘り増加せず 1.0% 以上では寧ろ低下する傾向がある。

第 6 圖は P の含有量がヒステリシス損に及ぼす關係を示すもので P の含有増加と共にヒステリシス損は減少し P の含有の低いものでは 2,200 乃至 3,000 $ergs/cm^3/cycle$ であつたものが 0.35% では 1,500 $ergs$, 0.6% では 1,200 $ergs$ 0.7% 以上では約 1,000 $ergs$ に低下し、尙 P が増加して 0.8% 以上に至るも其の値は餘り減少しない。

以上の研究結果から見れば C 其他の不純物の少ない鐵中に 0.7 乃至 0.8% の P を含有せしむるときは最大導磁率 15,000 以上ヒステリシス損 1,000 $ergs/cm^3/cycle$ 以下の極めて優秀な磁性を有するものが得られる事が明かであ

第 4 表 磁性試験成績 No. 21—No. 26

No.	分析成分%					annealed at 920°C 1hr				annealed at 1,050°C 2hrs				B
	C	Si	Mn	P	S	μ_{max}	W_h $erg/cm^3/cycle$	B_r gauss	H_c oersted	μ_{max}	W_h $erg/cm^3/cycle$	B_r gauss	H_c oersted	
21	0.020	0.020	0.05	0.231	0.006	6,300	2,698	9,200	0.84	6,000	2,467	9,000	0.76	10,000
22	0.018	0.010	—	0.340	0.005	9,675	1,739	9,100	0.55	8,550	1,623	8,500	0.50	9,100
23	0.011	0.006	—	0.701	0.008	14,300	1,353	9,615	0.42	20,900	1,042	9,600	0.32	10,500
24	0.014	0.006	—	0.877	0.007	11,625	1,485	9,200	0.46	15,600	1,122	9,200	0.34	9,350
25	0.015	0.006	—	0.854	0.009	12,810	1,429	9,440	0.43	13,600	1,162	8,900	0.35	5,800
26	0.011	0.007	—	0.447	0.008	13,935	1,413	9,600	0.43	11,300	1,353	8,400	0.42	11,320

る、數年前英吉利の Hadfield 氏⁴⁾の實驗室内で製造された極めて優秀な珪素鋼の最大導磁率 11,000、ヒステレンス損 1,780 $ergs/cm^3/cycle$ に比較すると本研究で製造した最も優秀な磷鐵に於ては最大導磁率 20,900、ヒステレンス損 1,042 $ergs/cm^3/cycle$ で最大導磁率に於ては約 2 倍、ヒステレンス損に於ては約 60% と云ふ結果を示して居る。

5. ageing の試験 鐵又は軟鋼に於ては長時間使用中に ageing を起し磁性が悪くなるのを常とする、一般に是等の材料を 100°C 内外の溫度に保つ時は其のヒステレンス損は時間を経るに従て増加する、此の現象を ageing と云ふ、或種の材料に於てはヒステレンス損が初の 2 倍に達するものがある、又同時に導磁率にも影響を來し最大導磁率は低下する、變壓器の鐵心は高溫度にある爲め此の ageing の現象を起し易い。

ageing を指定するには米國の規定では材料を 100°C で 600 時間保つた後最大磁束密度 10,000 gauss の間に於ける 60 cycle の交流による鐵損の増加率を以てし獨國では 50 cycle に依る鐵損の増加率を以て規定せるが日本では通常獨式に依る、然し此の現象は必ずしも 600 時間で終るものでは無く數週間續くのが普通で溫度も 130°C に於て最も著しい、普通電氣鐵鈹として使用せらるる珪素鋼に於ては ageing の現象は殆んど認められない、ageing の原因に就ては溫度の上昇に伴ふ單なる現象として見られ根本的の原

第 5 表 最大導磁率

No.	P%	as annealed	ageing					増減%
			120 hrs	240	360	480	600	
21	0.231	6,000	5,350	5,000	4,500	4,500	4,550	-24.2
22	0.340	8,550	6,700	6,100	5,600	5,600	5,480	-35.9
23	0.701	20,900	21,800	21,350	20,000	20,900	21,500	+2.9
24	0.877	15,600	16,200	15,650	15,800	15,750	16,150	+3.5
25	0.854	13,600	14,100	13,800	14,250	13,800	13,940	+2.5
26	0.447	11,300	10,620	9,900	9,300	8,680	8,770	-22.4

ヒステレンス損 $ergs/cm^3/cycle$

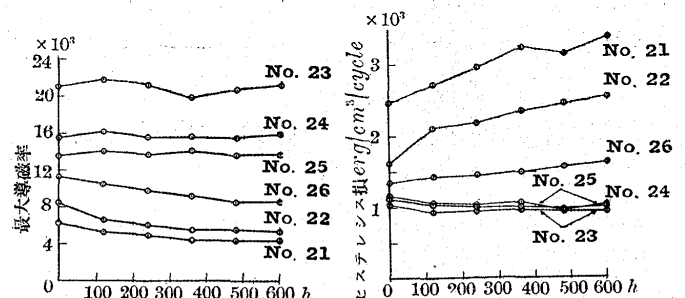
No.	P%	as annealed	ageing					増減%
			120 hrs	240	360	480	600	
21	0.231	2,467	2,722	2,968	3,247	3,159	3,398	+37.7
22	0.340	1,623	2,109	2,196	2,363	2,467	2,571	+58.4
23	0.701	1,042	939	947	955	947	947	-9.1
24	0.877	1,122	1,035	1,011	1,011	979	1,018	-9.3
25	0.854	1,162	1,066	1,042	1,066	955	1,027	-11.6
26	0.447	1,353	1,432	1,456	1,504	1,504	1,647	+21.7

因に至つては今日未だ明瞭にされてゐない、恐らく原子的の變化に依るものと思はれてゐる、又材料に酸素が多く含有される程 ageing の現象が著しく現はれるのを常とする

磷鐵の場合に於て此の ageing の現象が有るや否やを試験する爲め普通電氣鐵鈹の場合に行はれて居る 600 時間の ageing test を No. 21、から No. 26、に至る 6 種の試料に對して行ひ其の結果は第 5 表に示すが如くである。

以上の結果に依て明かな様に P の含有が少ないものでは ageing の現象は極めて著しく 6 種の試料中含有 P の最も低い P 0.231% なる No. 21、では最大導磁率 μ_{max} は 6,300 から 4,550 に減少しヒステレンス損 W_h は 2,467 $ergs$ から 3,398 $ergs$ に増加し P 0.34% なる No. 22、に於ては μ_{max} 8,500 から 5,480 に減少し、 W_h は 1,623 $ergs$ から 2,571 $ergs$ に増加してゐる、而して P の含有量が増加するに従ひ ageing が著しく少なくなる事が認められる、即ち P 0.447% なる No. 26 に於ては其の現象が著しく少くなり尙一層 P の含有高き P 0.701 なる No. 23 では ageing を全く認めず μ_{max} に於て 2.1% の増加を來し又 W_h に於ては 9.1% の減少を來し 600 時間の ageing test 後は却て幾分磁性が改善せられた結果を示してゐる、P の含有一層高き No. 24 及び No. 25 に於ても同様の結果が得られ是等の結果から見れば P の含有 0.7% 附近に至れば ageing の現象は全く無い事も明にする事が出來た、第 7 圖は ageing に依る 6 種の試料の μ_{max} 並に W_h の變化を曲線に依て示したものである。

第 7 圖 ageing 試験成績

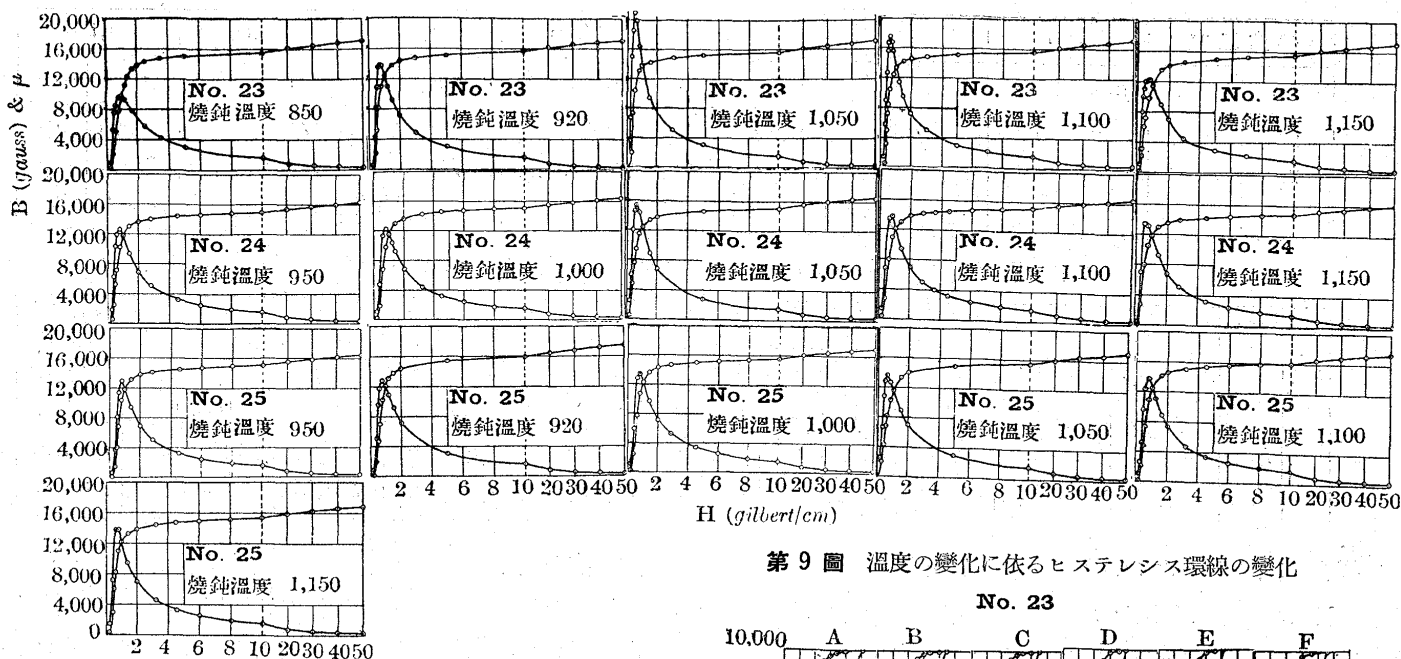


No.	21	22	23	24	25	26
P	0.231	0.340	0.701	0.877	0.854	0.447

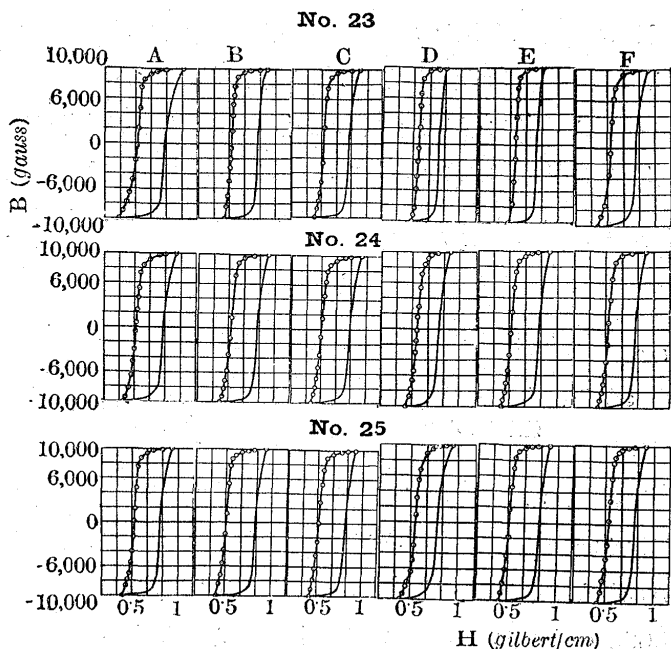
6. 磁性と焼鈍溫度 第 3 表試料 No. 14-No. 19、の磁性試験の結果は焼鈍溫度 900°C で 1 時間並に 1,050°C で 2 時間焼鈍したもの、二つの結果を示して居るが此の二つの焼鈍溫度の相違に依て最大導磁率並にヒステレンス損に著しい變化がある、此の變化は焼鈍溫度のみならず焼鈍時間にも關係する事は勿論である、此の二つの焼鈍溫度に於て 1,050°C の方が 900°C に比し概して磁性が良くなり含有 P の最も低い 0.182% なる No. 15 で 900°C 焼鈍の際に μ_{max} 3,850、 W_h 3,024 $ergs$ のものが 1,050°C

4) R. Hadfield; Metallurgy and Its Influence on Modern Progress. 1927. p. 104

第 8 圖 温度の變化に依る B-H 曲線の變化



第 9 圖 温度の變化に依るヒステレシス環線の變化



No.	焼鈍温度					
	A	B	C	D	E	F
23	850	920	950	1,050	1,100	1,150
24	920	950	1,000	1,050	1,100	1,150
25	920	950	1,000	1,050	1,100	1,150

に於ては μ_{max} 5,100, W_h 2,902 ergs に變化し含有 P の高いものでは其の變化が一層甚だしく No. 18 P 0.727% のものに於ては 900°C 焼鈍で μ_{max} 7,500, W_h 1,974 ergs のものが 1,050°C 焼鈍のものでは μ_{max} 16,400, W_h 995 ergs となつて居る、又第 5 表 No. 21-No. 26 は 920°C で 1 時間焼鈍したもの並に 1,050°C で 2 時間焼鈍した試料に就て測定した結果を示すものであるが前と同じく焼鈍温度の相違に依て磁性に夫々變化を來し 6 種の試料中 P の低い No. 21, No. 22, No. 26 の結果では二つの焼鈍温度で μ_{max} の變化は少く高温の 1,050°C で稍低下し W_h は 1,050°C の方が減少してゐる、然るに P の含有高き試料では焼鈍温度の高い方が磁性が良くなつてゐる。

是等の結果から推定する時は含有磷の量によつて適當な焼鈍温度の存在する事が考へられる、以上の様に焼鈍温度に依て磁性に著しい變化の有る事は珪素鋼の場合に於ても認められて居る。

良好な磁性を有する鐵を餘り高温に於て焼鈍する時は悪い影響を來す、 A_3 即ち 900°C より少し高い温度で焼鈍した場合が磁性は最も良く焼鈍温度が 1,000°C にもなれば却て悪くなる、是は通常過焼鈍現象 (Überglühvorgang) として知られて居る、鐵は A_1 點以下に長く熱する時は鐵中の cementite は分解して graphite になる性質があり此の現象は Si の含有が多い程著しい、graphite は磁氣的に中性で cementite の様に悪い影響を及ぼさないから cementite が分解した結果は鐵の磁性を良くする、

此の様に鐵を一度 A_3 點以上に上げると graphite は再び固溶態として溶け込み之を冷却して α 鐵に歸る時は再び有害な cementite となつて悪影響を來す、之が過焼鈍現象の原因と見做されて居る。

此の研究に使用した磷鐵の場合に於ては C の含有は殆ど無いから同様な理由で説明出来るか否かは不明であるが P の含有量の變化に應じて良好な磁性を得る爲に適當な焼鈍温度の存在する事は實驗の結果からして否定出来ない。故に一定の P を含有する試料に就て焼鈍温度を種々變へた

第 6 表 焼鈍温度 (°C) と最大導磁率の變化 (μ)

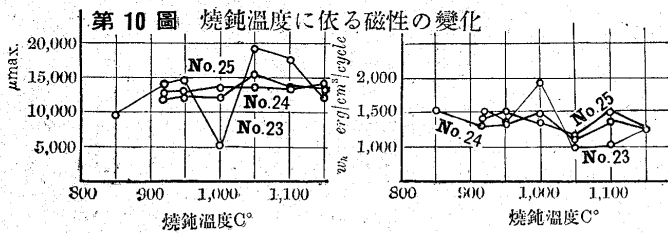
焼鈍温度		850		920		950		1,000		1,050		1,100		1,150	
No.	P%	μ_{max}	B	μ_{max}	B	μ_{max}	B	μ_{max}	B	μ_{max}	B	μ_{max}	B	μ_{max}	B
23	0.701	9,680	9,700	14,100	9,800	14,800	—	5,260	—	20,900	10,500	17,500	10,500	12,300	9,500
24	0.877	—	—	12,100	9,800	12,740	10,200	12,200	9,750	15,580	9,350	13,800	10,200	13,450	9,400
25	0.854	—	—	12,800	10,500	12,900	10,200	13,500	10,200	13,600	11,000	13,680	11,000	13,900	9,700

第 7 表 焼鈍温度 (°C) とヒステレシス損の變化 ($ergs/cm^2/cycle$)

焼鈍温度		850			920			950			1,000			1,050			1,100			1,150		
No.	P%	W_h	B_r	H_c	W_h	B_r	H_c	W_h	B_r	H_c	W_h	B_r	H_c	W_h	B_r	H_c	W_h	B_r	H_c	W_h	B_r	H_c
23	0.701	1,544	9,300	0.46	1,353	9,600	0.42	1,353	9,580	0.42	1,942	—	—	1,042	9,620	0.32	1,042	9,700	0.33	1,257	9,320	0.400
24	0.877	—	—	—	1,473	9,200	0.45	1,360	9,500	0.435	1,494	9,460	0.48	1,122	9,200	0.35	1,380	9,460	0.44	1,308	9,450	0.415
25	0.854	—	—	—	1,417	9,420	0.42	1,528	9,620	0.47	1,415	9,520	0.455	1,162	8,900	0.35	1,507	9,600	0.475	1,284	9,520	0.405

場合の磁性の變化を測定する事とした、

No. 23, No. 24 及び No. 25 を 850°C 乃至 1,150°C の間の種々の温度に於て焼鈍を行ひ磁性を測定した結果は第 6 表及び第 7 表に示すが如くで第 8 圖及び第 9 圖は各温度に於ける B-N 曲線並にヒステレシス環線を示すものである。



第 6 表及び第 7 表の結果を曲線に表はすと第 10 圖に示すが如くで No. 23 P 0.701% の試料では焼鈍温度が 850°C から漸次高くなるに従ひ μ_{max} の値は高くなり 850°C で 9,680 のものが 950°C では 14,800 となり 1,000°C では急激に低下して 5,260 となり 1,050°C では 20,900 に達し更に温度が高くなるに従ひ漸次低下する傾向を示してゐる、又 W_h の値は 850°C で 1,544 $ergs$ のものが 950°C で 1,353 $ergs$ に低下し 1,000°C では増加して 1,942 $ergs$ となり 1,050°C 並に 1,100°C では最低の 1,042 $ergs$ となり 1,150°C では幾分増加して居る No. 24. P 0.877% のものでは同じく焼鈍温度の高くなるに従ひ μ_{max} は増大し 1,050°C で最大となり更に温度が高くなれば幾分減少し W_h の値は 1,050°C で最低を示して居る、又 No. 25 P 0.854% のものでは μ_{max} は温度の上昇に伴ひ増大し W_h は 1,050°C で最低である、故に P 0.7% 乃至 0.8% 附近のものでは焼鈍温度は 1,050°C 附近の場合が最も良い磁性が得られる事を是等の結果から

知る事が出来る。

No. 23, P 0.701% の試料で焼鈍温度 1,000°C のものが特に磁性が悪いのは此の組成のものが 1,000°C 附近の温度で再結晶の現象を起し結晶粒が破壊の状態になる爲め其の磁性に變化を來すのではないかと考へられる、此の現象に就ては後に顯微鏡組織の項に詳述する。

P の含有量と焼鈍温度の關係を更に研究する爲め次の 5 種の試料に對し研究を進めた、試料は水素還元法に依て製造した還元鐵を高周波電氣爐で熔解し約 100 mm 角の鑄型に注ぎ重量約 50 乃至 100 kg の鐵塊を製造して之から採つたものである。

第 8 表 試料分析成分%

No.	C	Si	Mn	P	S	Cu
32	0.03	0.009	0.10	0.421	0.012	—
33	0.01	0.007	0.10	0.012	0.007	—
34	0.019	tr.	0.015	0.360	0.013	0.08
35	0.011	tr.	0.005	0.460	0.016	0.09
36	0.014	tr.	0.016	0.424	0.014	0.06

第 9 表 焼鈍温度と最大導磁率の變化

No.	P%	as forged	焼鈍温度 °C									
			800	850	900	950	1,000	1,050	1,100	1,150		
32	0.421	2,520	8,685	12,950	16,710	17,270	11,800	11,650	12,200	—	—	—
33	0.012	2,215	4,050	4,750	4,770	4,685	4,660	—	—	—	—	—
34	0.360	2,120	6,420	6,400	6,880	6,570	6,075	5,810	5,800	5,850	—	—
35	0.460	2,370	6,500	7,320	6,840	6,750	6,380	6,730	6,055	6,430	—	—
36	0.424	2,255	5,520	6,700	6,140	6,180	5,875	6,040	5,930	5,950	—	—

第 10 表 焼鈍温度とヒステレシス損の變化 $erg/cm^2/cycle$

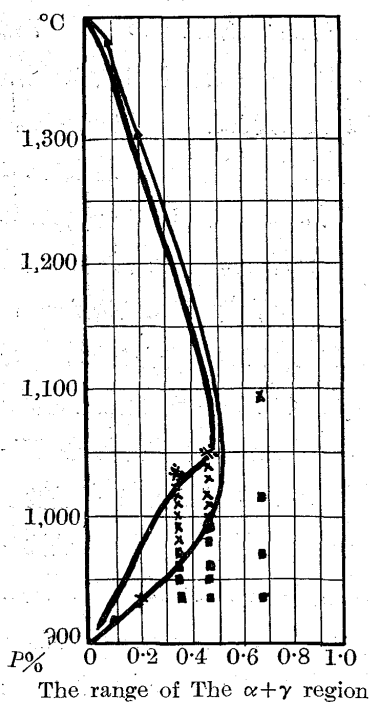
No.	P%	as forged	焼鈍温度 °C									
			800	850	900	950	1,000	1,050	1,100	1,150		
32	0.421	4,400	1,685	1,174	1,038	1,007	1,174	1,146	1,214	—	—	—
33	0.012	5,976	4,305	3,820	3,677	3,629	3,653	—	—	—	—	—
34	0.360	4,200	2,570	2,570	2,320	2,355	2,391	2,423	2,411	2,272	—	—
35	0.460	3,772	2,387	2,411	2,487	2,324	2,208	2,161	2,077	1,997	—	—
36	0.424	3,931	2,554	2,109	2,240	2,065	2,081	1,982	1,890	1,711	—	—

以上の實驗に供した試料は何れも 50 kg 以上のインゴットを工業的に製造したものから採つたもので前の實驗試料の様に研究室に於て 1.5 kg 内外を熔解せしめたもので無いから熔解作業に於ても實驗室内の様に丁寧に行はれないので稍々酸化の現象が起るのは免れ難いが是等の磁性試験の結果は少し劣るのみで大なる相違を認めない。

5種の試料中 No.33 は P を含有しないもので前に記載した同様な水素還元法に依て製造した還元鐵を實驗室内で熔解して製造した試料に比べると其の分析成分に於ては殆んど變化無くして磁性に於て劣つて居るのは熔解作業中に於ける酸化の現象の相違に依るものなるべく、又他の磷含有の増加したものに於て大なる相違が無いのは P が熔浴の酸化を防止する爲であらう。

鍛鍊した儘の試料の磁性を測定した結果は P の含有量に關係なく最大導磁率は 2,100~2,500 で餘り變化無くヒステリシス損に於ては No. 33 の純鐵は P を含むものに比し稍々高く之を焼鈍した No. 34, No. 35, No. 36 の P 0.36~0.46% を含有せるものでは著しく低下し No. 32 の P 0.421% のものでは W_h の値は實驗室で製造した少量の試料と略ぼ同様な結果が得られて居る。

第 11 圖 磷-鐵狀態圖



焼鈍温度に依る磁性の變化を見るに No.33 の純鐵では 850°C~900°C に於て μ_{max} は最大で W_h は減少し 900°C 以上の温度で焼鈍しても殆んど變化は無い、P の含有 0.5% 以下なる No. 34, No. 35, No. 36 では μ_{max} は 850°C~900°C で最高を示してゐるが W_h は 900°C 以上の温度で焼鈍温度が高くなるに従ひ稍々減少して居る含有磷の高い No. 32 では μ_{max} は 800°C から 950°C に昇るに従ひ漸次良くなり

1,000°C に於て急に悪くなり W_h も 1,000°C に於て高

くなつて居る。

是等の結果に依て考へると P を殆んど含まない純鐵では再結晶を起す A_3 點より少し低い 850°C~900°C の温度で焼鈍するのが最も良い磁性が得られるが P の含有量が増加するに従ひ焼鈍温度を高むの方が磁性を良好ならしむる事が出来る、0.6% 以上のものでは 1,000°C 以上の温度で焼鈍する方が宜しい、此の理由は P と Fe α の状態圖(Esser u. Oberhoffer; Eisenhutten-l., Werkstoff. -Ber. 69, 1925 Houghton and Hanson. J. of Iron & Steel 1927) に依て説明する事が出来る。

即ち第 11 圖の P-Fe 状態圖に示される様に鐵中に P の量が増加するに連れ A_3 點が上昇し A_4 點とループを作るループの右端は 0.6% 餘の P に相當するから之以上の P を含有するものでは全然 A_3 點が認められぬ、即ち P の含有が増すに従ひ全結晶の起る温度が昇り P 0.6% 以上を含有する鐵では結晶形の變化を全然受けない。

此の關係から P の含有 0.6% 餘に相當する迄のものでは再結晶の起る温度即ち A_3 點がループに沿ふて高くなる爲め P の含有量が増加する程焼鈍温度を高くする必要が生じて来る、P の含有 0.6% 以上のものでは再結晶は起らないが鍛鍊加工によつて微細化された結晶は高い温度で焼鈍を行ふ時は漸次結晶の再生作用が行はるゝ、此の温度は實驗の結果に依れば 1,050°C 位が最も適當な温度の様である。

7. 鑄造及び加工に依る磁性の變化

鑄造せる儘の試料並に之を加工せるもの、加工後焼鈍せるもの、磁性の變化を研究する爲め次の様な 5 種の試料を製造した。

第 11 表

No.	C	Si	Mn	P	S	Cu
27	0.03	0.006	0.02	0.88	0.014	0.02
28	0.02	0.006	0.01	0.64	0.008	0.03
29	0.04	0.005	tr.	1.08	0.009	0.03
30	0.03	0.006	0.01	0.703	0.008	0.02
31	0.02	0.037	0.069	1.71	0.012	—

各試料は内徑 50 mm の金型に鑄込めるものから外徑 35 mm, 内徑 25 mm, 厚さ 30 mm の試片を製作し 1,000°C, 1,050°C で焼鈍したものに對し磁性試験を行ひ、更に同一の各鑄込後の試料を約徑 40 mm の大きさのものに鍛鍊加工したものから前と同様の試片を作り鍛鍊の儘のもの並に是等を 1,000°C, 1,050°C で鈍焼したものに就て磁性の測定を行つた。

第 12 表 鑄造試料の磁性

No.	P%	annealed 2hrs at 1,000°C					annealed 2hrs at 1,050°C				
		μ_{\max}	B at μ_{\max} gauss	W_h ergs/cm ³ /cycle	Br gauss	H _c oersted	μ_{\max}	B at μ_{\max} gauss	W_h ergs/cm ³ /cycle	Br gauss	H _c oersted
27	0.88	7,940	6,500	1,432	7,160	0.50	—	—	—	—	—
28	0.64	9,800	9,800	1,337	8,100	0.47	12,400	9,950	1,480	9,120	0.49
29	1.08	3,400	3,300	1,257	3,000	0.48	—	—	—	—	—
30	0.793	12,900	10,000	1,106	8,250	0.38	16,800	11,000	1,100	9,180	0.36
31	1.71	6,920	7,700	2,160	9,000	0.70	—	—	—	—	—
31	as cast	3,120	5,300	2,626	5,550	0.84	—	—	—	—	—

第 13 表 鍛鍊試料の磁性

No.	P%	μ_{\max}	B at μ_{\max} gauss	W_h erg/cm ³ /cycle	Br gauss	H _c oersted
27	0.88	2,230	4,480	4,100	5,800	1.20
28	0.64	3,000	5,100	3,100	5,740	0.97
29	1.08	2,365	4,730	3,560	5,250	1.03
30	0.703	3,170	4,980	2,620	5,220	0.76

第 14 表 鍛鍛試料を焼鈍後の磁性

No.	P%	annealed 2hrs at 1,000°C					annealed 2hrs at 1,050°C				
		μ_{\max}	B at μ_{\max} gauss	W_h erg/cm ³ /cycle	Br gauss	H _c oersted	μ_{\max}	B at μ_{\max} gauss	W_h erg/cm ³ /cycle	Br gauss	H _c oersted
27	0.88	8,480	10,510	2,270	9,580	0.72	17,400	10,450	1,094	9,500	0.34
28	0.64	10,110	9,510	1,955	9,610	0.59	11,130	11,130	1,564	9,280	0.50
29	1.08	8,480	7,970	2,075	9,410	0.635	11,120	9,460	1,405	9,100	0.45
30	0.703	13,000	11,000	1,625	9,500	0.50	13,300	9,200	1,344	9,400	0.43

鑄造試料から製作した試料 No. 31. の焼鈍を行はないうのに就て測定した結果は第 12 表の最後に記載した様に焼鈍したものに比し著しく劣つて居る、1,000°C に於て 2 時間焼鈍した結果は著しく磁性が改善せられ鑄造後のものに比し No. 31. に於て μ_{\max} は 2.2 倍となり W_h の値は 82.2% に低下して居る。

No. 28 及び No. 30. は更に他の試片を取り 1,050°C で 2 時間焼鈍を行つた後其の磁性を測定した結果は 1,000°C で焼鈍したものに比し μ_{\max} の値は No. 28, No. 30 に於て夫々 26.5% 並に 30.2% の増加を來し又 W_h の値は No. 28 に於ては 11% の増加を示して居るが No. 30 に於ては略ぼ等しい結果が得られる。

第 13 表及び第 14 表は前記 4 種の試料を鍛鍊して作つた試料の磁性を測定した結果であるが鍛鍊後のものは何れも磁性悪く μ_{\max} の値は 2,620 乃至 3,170 で W_h の値は 2,620 乃至 4,100 ergs/cm³/cycle で P の含有に應じて一定の關係を示さないのは各試片に於ける加工度其他の條件が一定しない爲めであらう。珪素鋼又は其他の試料に於ても明かな様に磁氣的性質は其の組織の結晶粒の大きさに關係を有する事は既に知られて居る、加工試料に於て磁性が悪くなるのは加工の際に結晶粒が微細化された當然の結果で

ある。

次に鍛鍊したものを 1,000°C に於て焼鈍したものでは磁性は非常に良くなり μ_{\max} は 3.38 乃至 4.2 倍に増加し W_h は 55.4 乃至 63% に減少して居る。又 1,050°C で焼鈍したものでは更に著しく改善せられ μ_{\max} の値は

3.7 乃至 7.8 倍に増加し W_h は 26.7 乃至 51.3% に減少して居る、此の測定に使用した試料は何れも P 0.6% 以上を含み前に述べた實驗の結果に依れば P の含有 0.7% 以上のものでは焼鈍温度が 1,000°C よりも稍々高い温度の場合が最良の磁性が得られた事實とよく一致して居る。

8. 磷鐵の顯微鏡組織 前に述べた P-Fe の状態圖に依て明かな様に P は約 1% 迄鐵中に固溶態として含まれ夫れ以上 P が含有されると Fe_3P なる化合物を生成する、故に本研究に使用した P 1% 附近迄の磷鐵に於ては皆 ferrite 組織から成る、鐵の中に P が入れば C の場合と異り P 含有量の増すに従ひ結晶粒が大きくなり此の現象は珪素鋼の場合と類似して居る、又極めて良好な磁性を有する Ni-Fe 系合金の或る組成のものでは著しく大なる結晶粒を有して居る、是等の現象を一面から見れば磁性と結晶粒の間には必然的の關係が有る様にも見做され Yensen 氏は鐵の結晶粒の大きさとヒステリシス損の間に一定の關係が有る事を述べて居る。然し乍ら見地を換へれば結晶粒の成長を助成する原因は磁性を良くする原因と同一と見做しても差支へない、換言すれば結晶粒が大なる爲に磁性が良くなるのではなくて結晶粒を大ならしむる様な原因が磁性を良好にするとも見做される、即ち結晶粒の大なる事と磁性の

良好なる事とは同一の原因から出た獨立的の現象と云つても差支へない。

寫眞第 12 圖は次に於て示す様な 3 種の磷鐵試料を鑄造した儘のもの、破面を示したもので一見鑄鐵の様な結晶粒の大なる破面を示して居る。

第 12 圖 磷鐵鑄造インゴットの破面 (×0.73)

No.36 P0.605 No.37 P0.876 No.38 P1.023 No.38 P1.023

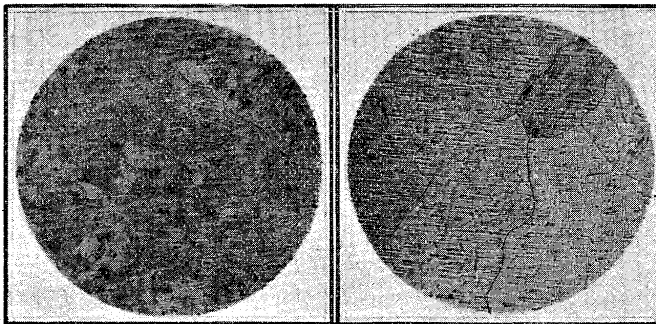


第 13 圖 鍛鍊後 ×30

P 0.538%

第 14 圖 950°C 焼鈍 ×30

P 0.538%



第 13 圖の顯微鏡寫眞は P 0.538% なる試料を鍛鍊後のもの第 14 圖は同一試料を 950°C で焼鈍したもので焼鈍の結果鍛鍊に依て微細化された結晶粒が著しく大きくな

つた事が判る。

第 15 圖 磷鐵インゴット成分

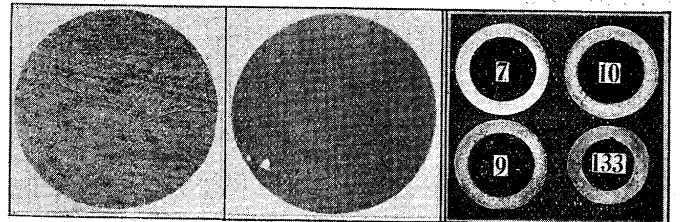
No.	C	Si	Mn	P	S	Cu
36	0.03	0.006	0.033	0.605	0.008	0.04
37	0.06	0.013	0.058	0.876	0.013	0.07
38	0.06	0.009	0.084	1.023	0.009	0.08

第 15 圖から第 16 圖に至る顯微鏡寫眞は P の含有を異にせる各種の試料を 950°C で焼鈍したもので P の含有 0.2% 餘に至れば著しく結晶粒が粗大となり尙 P の含有が増加するに連れて其の大きさを増し結晶粒の大きさは肉眼的にも明瞭になる、然し其の大きくなる現象は焼鈍温度に依ても異なり一定の焼鈍温度では結晶粒の増大は必ずしも P の含有量と一定の關係有りとは思はれぬ。

第 17 圖は磁性試験に供した環狀試料を研磨し N.P.L 溶液 (SnCl₂ 0.2g, CuCl₂ 0.4g, FeCl₃ 12.0g, HCl 16.8cc in 200cc water) で腐蝕したもので寫眞で結晶粒の大きさは 1.5mm 以上に及べるものが有る、

第 16 圖 磷鐵 950°C 焼鈍腐蝕液 HNO₃ 5% Sol. ×20

第 17 圖 磁性試験 ×1/2 環狀試料



No. 7 P 0.070%
No. 9 P 0.149%
No. 10 P 0.257%
No. 133 P 0.758%

第 15 圖 磷鐵 950°C 焼鈍 (腐蝕液 N.P.L. Sol.)

Ring No. 1. P 0.328 ×14.5

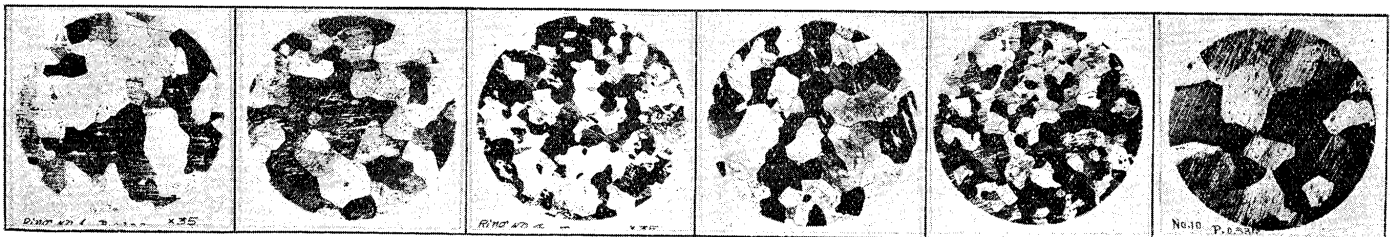
Ring No. 2. P 0.300 ×14.5

Ring No. 4. P 0.070 ×14.5

Ring No. 7. P 0.232 ×14.5

Ring No. 8. P 0.257 ×14.5

Ring No. 10. ×15



第 18 圖 磷鐵 1,050°C 焼鈍 (腐蝕液 HNO₃ 5% Sol. ×20)

No. 21 P 0.231%

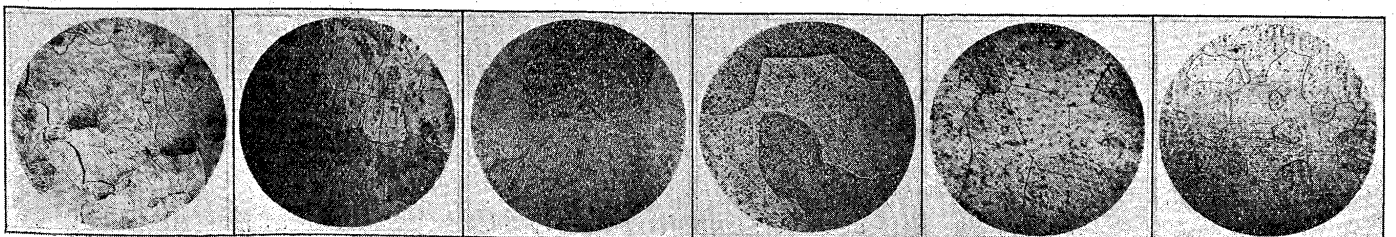
No. 22 P 0.340%

No. 23 P 0.701%

No. 24 P 0.877%

No. 25 P 0.854%

No. 26 P 0.447%



第 18 圖は第 9 表に示した 1,050°C にて焼鈍せる磷鐵の磁性試験に供せしものを HNO_3 5% 溶液にて腐蝕せしもの、顯微鏡寫眞で P の含有の多いもの程結晶粒が大きい。

第 19 圖は第 6 表及び第 7 表に於て示した磁性試験に供した No. 23, P 0.701% なる環狀試料を磨いて顯微鏡寫眞を撮つたもので 850°C, 1,000°C, 1,050°C, 1,100°C, 1,150°C の各溫度に於て焼鈍し爐中冷却を行つたものであるが 850°C, 1,050°C, 1,100°C, 1,150°C 焼鈍のものでは ferrite 組織の結晶粒が現はれ 850°C で焼鈍したものに比し他の高溫度で焼鈍したものでは結晶粒の大きさが著しく増大して居るのを視る事が出来る。

前の磁性試験の結果と比較して焼鈍溫度が或る程度高くなるに従ひ著しく磁性が良くなつて居るのは此の顯微鏡組織の研究に依り結晶粒の擴大と相伴ふものなる事を明瞭に肯定する事が出来る。

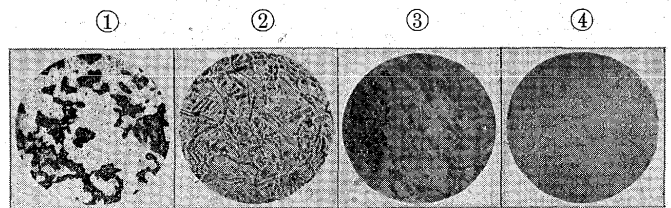
又 1,000°C に於て焼鈍を行つたもの、顯微鏡組織を見ると HNO_3 で腐蝕したものでも亦 N.P.L. 溶液で腐蝕したものでも他の四つの組織と異なり明かに結晶粒の境界面が破壊されて居る有様が見へる、之は Haughton 氏の研究に依る $Fe-P$ の状態圖 (第 11 圖) で明らかな様に純鐵中に P が入ると鈍鐵の變態點 A_4 は下降し A_3 は上昇し是等の二つの點が相會してループを形成しループの内面では γ -鐵が存在し境界線の或る範圍内では α 及び γ 鐵が共存する、即ち此の境界では加熱の際には α 鐵が γ 鐵に再結晶を起す、此のループの右端は Haughton 氏の研究では約 P 0.55% に相當して居る、試料 No. 23 は P 0.701% を含有するから Haughton 氏の状態圖では再結晶は起らないが他の P 0.6~0.7% の試料に就て此の再結晶の現象の有無を研究した結果は約 0.7% 迄は再結晶の現象が有るが故にループの右端は P 0.7% 位に相當し此の範圍内の P の含有量のものでは顯微鏡検査に依り明かに再結

晶の現象が有る様に考へらるゝ、故に 1,000°C に焼鈍した試料では焼鈍溫度が此の再結晶を起す溫度の範圍内に及ぶる爲め他の組織と全く異つた組織が現はれたものと考へる事が出来る、而して磁性試験を行つた結果 1,000°C に於て焼鈍したものが他の焼鈍溫度のものに比し著しく導磁率に於て低く又ヒステレシス損が多いのは全く焼鈍溫度を再結晶の起る範圍迄上げた爲めと考へらるゝ、又 No. 24, No. 25 の試料で此の現象が起らないのは何れも P の含有量が 0.8% 以上で状態圖から見たループの範圍外にある爲めである。

此の事實から考へて再結晶を起す範圍内の P を含有するものでは再結晶の起る溫度よりも高い溫度が或は寧ろ低い溫度で焼鈍を行ふ方が其の磁性を損ぜざる事になる。

第 20 圖に示した顯微鏡寫眞は夫々 P の含有 0.538%,

第 20 圖 急冷試料の顯微鏡組織 $\times 50/3$



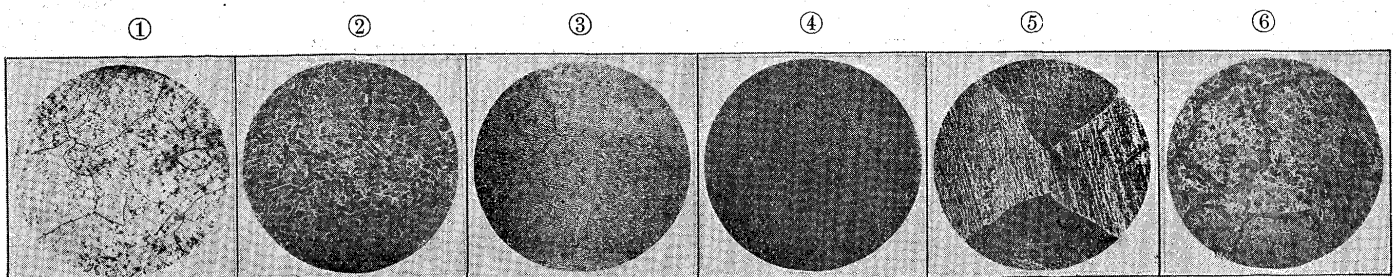
- ① P 0.605%, Quenched at 1,000°C, N.P.L. Sol.
- ② P 0.538%, Quenched at 1,000°C, HNO_3 5% Sol.
- ③ P 0.605%, Quenched at 1,050°C, N.P.L. Sol.
- ④ P 0.605%, Quenched at 1,100°C, HNO_3 5% Sol.

0.605% の試料を 1,000°C 並に 1,050°C で 30 分間焼鈍を行ひ急冷したもので明に α 及び γ の二相が現はれて居るのは是等の試料が再結晶の起る溫度迄加熱せられ其の溫度から急冷した爲め二つの相が常溫迄保持せられたのに外ならないのである P 0.605% のものでは 1,000°C から急冷したものに比し高溫度の 1,050°C から急冷したものが α から γ への變化の度合が著しい。

前に磁氣試験を行つた No. 23 の 1,000°C に於て焼鈍

第 19 圖 焼鈍溫度の相違に依る組織の變化 No. 23. P 0.701%

$\times 50 \times 0.233$



- ① annealed at 850°C HNO_3 5% Sol.
- ② annealed at 1,000°C HNO_3 5% Sol.
- ③ annealed at 1,050°C HNO_3 5% Sol.
- ④ annealed at 1,100°C HNO_3 5% Sol.
- ⑤ annealed at 1,150°C HNO_3 5% Sol.
- ⑥ annealed at 1,000°C N.P.L. 5% Sol.

したものでは爐内冷却を行つた爲め常溫に γ 相を保持する事は不可能であるが再結晶の出現した溫度から冷却した爲め第19圖顯微鏡寫眞で明かな様に結晶粒の境界が他の溫度から冷却したものに比べて異なり明瞭を缺いて居る、此の事實が其の磁性に著しい影響を來す様に考へらるる。

9. 結論 以上述べた含有 P 1% 以内の燐鐵の磁性に關する研究の結果を綜合すれば次の様な結論に達する事が出来る。

1. 純鐵に P を加ふる時は其の磁氣的性質が著しく良くなり含有 P 1% 以内に於ては P の含有量を増加するに従ひ最大導磁率は増加しヒステレシス損は低下し P 0.7% 乃至 0.8% に於て最大導磁率の値は最高となり尙 P が増加すれば幾分低下する傾向があり、又ヒステレシス損の値は P 0.7% 乃至 0.8% に於て最低となり尙 P が増加しても最大導磁率の値には餘り變化を來さない、研究の結果に依て得た最良の磁性を有する燐鐵では最大導磁率に於て市場にある珪素鋼の約3倍、ヒステレシス損に於て約60%と云ふ値が得られた。

2. ageing の試験を行つた結果は P の含有の低い0.5% 以下のものでは鐵又は鋼と同じく ageing の現象があり P の含有の少ないもの程著しい、然し乍ら0.5% 以上のものでは殆んど此の現象が無くなり P の含有の高いものでは ageing 試験の結果却て磁性が幾分良くなつて居る。

3. 焼鈍溫度の變化に依て磁性に著しい影響が有る事が認められ P の含有量に依て夫々最良の磁性が得られる適當な溫度が有る、 P の含有の低いものでは 900°C 乃至 950°C を適當とし P の含有量の増すに従ひ焼鈍溫度も高くする必要を生じ $Fe-P$ の状態圖で示された再結晶が始る以下の成る可く高い溫度で行ふのが宜しく P 0.7% 以上

のものでは焼鈍溫度は $1,050^{\circ}\text{C}$ 附近で行ふのが最も良い磁性が得らるる。

4. 1% 以下の P を含有する鐵の顯微鏡組織の研究を行つた結果は鐵の中に P が加はれば其の結晶粒が著しく粗大になり其の現象は珪素鋼の場合と良く似て居る。焼鈍試料に於ては P の含有が0.2% 餘になれば純鐵に比し結晶粒は著しく大きくなり更に P の増加するに従ひ結晶が漸次擴大せられ 950°C にて焼鈍せるものでは P 0.5% 以上に至れば結晶粒の大きくなる割合は P 含有が増しても餘り變化は無く、之は一定の P の含有量に對し最大の結晶粒が得らるる一定の溫度がある、結晶粒の大きさは 1.5mm 以上に及び明かに肉眼的に見る事が出来る、又 P 0.7% 以内のものでは A_3 及び A_4 の變態點を結合せる線に相當する溫度から急冷する時は顯微鏡検査の結果再結晶の現象を保持する事が出来 α 及び γ の二相を見る事が出来る。

5. P の含有0.7% 以下の試料に於ては A_3 及び A_4 の變態點を結合せる線に依て表はさるゝ溫度で α -iron から γ -iron への變態が有り P の含有量に應じ或る範圍の溫度で再結晶の現象の起る事は文獻並に本研究に於ける顯微鏡検査に依て明かに肯定する事が出来る、此の再結晶を起す範圍内に屬する溫度で焼鈍したものは著しく磁性が悪くなる事が研究の結果明かにせられた、其の理由は焼鈍溫度を變態點迄上げる時は再結晶の現象の爲に結晶の破壊作用を起し其の溫度から徐冷するも完全なる結晶の再生が行はれざる爲めに起因するものと思惟する事が出来る。

終に本研究に關し多大の援助を與へられし、實藤教授並に分析、測定等に對し助力せられたる松原 隆、成富重造、本村一成の諸君に深甚の謝意を表す。