

# 球状黒鉛鑄鐵の靱性に及ぼす燐の影響に就て

(昭和 27 年 4 月本會講演大會にて發表)

谷村 熙\*・松田 公扶\*\*・金井 俊睦\*\*\*

## EFFECT OF PHOSPHORUS ON THE DUCTILITY OF SPHEROIDAL GRAPHITE CAST IRON

*Hiromu Tanimura, Dr. Eng., Kimio Matsuda, and Toshimitsu Kanai*

### Synopsis:

Influence of phosphorus and silicon on the mechanical properties of spheroidal graphite cast iron was reported. Pure magnesium (0.5% Mg) was introduced to the molten metal which had been prepared from Swedish iron, ferro-silicon and ferro-phosphorus, inoculated with 0.4% Si and poured to the keel block dry sand mould. Tensile and impact tests were carried out in the as-cast condition and the as-annealed condition.

In the as cast condition, the following properties were obtained; tensile strength 55 to 75 kg/mm<sup>2</sup>, elongation 0.4 to 7.4%, Charpy impact strength (without notch) 0.3 to 4.7 mkg. The structure of matrix was substantially pearlitic, where a small amount of ferrite could be observed. The tensile strength gradually decreased with increasing of phosphorus content, but the elongation and Charpy impact strength decreased rapidly.

In the as annealed condition, very good ductility was obtained when both phosphorus and silicon content were low. Generally the tensile strength slightly increased with increasing of phosphorus up to 0.12%. More of this amount of phosphorus caused the phosphide structure to appear, which decreased the tensile strength gradually and impact strength rapidly.

Silicon had also the important effect on toughness of the spheroidal graphite cast iron.

It was shown that 0.15% phosphorus had no appreciable effect on the elongation and impact strength of the spheroidal graphite cast iron with 2.0% Si, but the same amount of phosphorus had embrittling effect in the iron with 3.0% silicon.

## I. 緒 言

普通鑄鐵に於ては黒鉛の形が一般に片状である爲黒鉛先端部に應力が集中して所謂切欠効果を生じその機械的性質は強さも低く靱性も極度に低い。球状黒鉛鑄鐵に於ては黒鉛が球状である爲切欠効果の影響が少くなり強さも靱性も飛躍的に上昇する。しかし一方地鐵の組織や化學成分が機械的性質に及ぼす影響は普通鑄鐵に於けるよりも甚だ敏感になつて來る。中でも燐はその靱性に大きな影響がある事は諸文献に認められているが定量的には未だ一致していない。本研究は燐の舉動を主體として實驗を進め燐の含有量と機械的性質の關係特にその靱性との關係を明白にし、合せてその理由を考察せんとするものである。又珪素含有量が燐の舉動に影響を與えるであろう事を推測し、これについても研究を進めた。球状黒鉛

鑄鐵は愈々實用化の域に到達して居るが、その利用に當り燐の許容される含有量を知る事は重要な問題である。

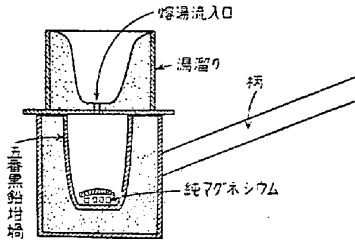
## II. 實 驗 方 法

原料としてスエーデン銑 (C=4.3 Si=1.89 Mn=0.47 P=0.034 S=0.01) を用い、これに軟鋼、珪素鐵 (Si=80%) 燐化鐵 (P=24%) を加えて夫々目標成分に配合せるもの 3kg をクリプトル電氣爐で黒鉛坩堝中で熔解した。Mg の添加は純 Mg を取鍋の底部に置き、取鍋に密着して置かれた湯溜の底部の小穴を通して熔鐵を注入する方式を取つた。(第1圖) Mg の添加量は熔

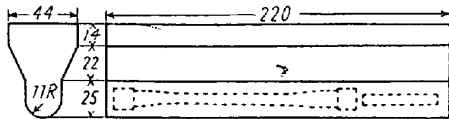
\* 九州大學教授 工博

\*\* 九州大學工學部助教授

\*\*\* 九州大學院特別研究生



第1圖 Mg 添加装置



第2圖 キールブロック寸法

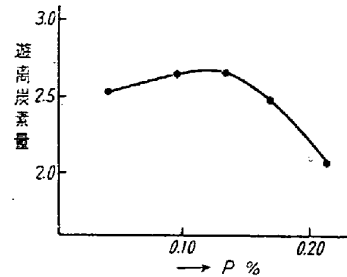
鐵に對し 0.5% で、添加温度は 1450°C とし、添加後は 80% の珪素鐵を 0.4% Si 添加しノキユレイトする。しかして後 1350°C 以上の鑄込温度で第2圖に示すキールブロックの乾燥砂型に鑄込む。試料は各熔解毎に引張試験片とシャルピー衝撃試験片(無溝)を一本づゝ取つた。

尙試料の化學成分は C=3.5%, Mn=0.5%, S<0.01% と一定に保ち、Si を 2.0%, 2.6%, 3.1% と三つの群に分け、各群にわたつてPの含有量を 0.03, 0.08, 0.12, 0.16, 0.20, 0.24% と變化せしめた。各試料は鑄込儘のものとして焼鈍したものについて試験した。焼鈍は 710~720°C に 5~15 時間保ち地鐵を完全にフェライト化せしめた。

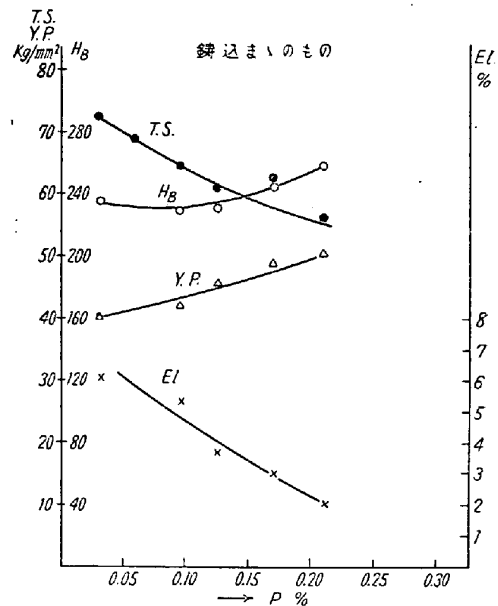
引張試験片は徑 10mm 平行部の長さ 60mm のもので長さ 50mm のエクステンソメーターを使用出来る様にした。引張試験はエクステンソメーター及びカセットメーターを使用し應力—歪曲線を求めた。尙降伏點は荷重の増加無しに歪の増加し初める應力を以て降伏點とした。衝撃試験はシャルピーの 10mkg 容量のものを使用し試験片は 10mm 角 55mm 長さ無溝のものとした。

### III. 實驗結果並びに實驗結果の考察

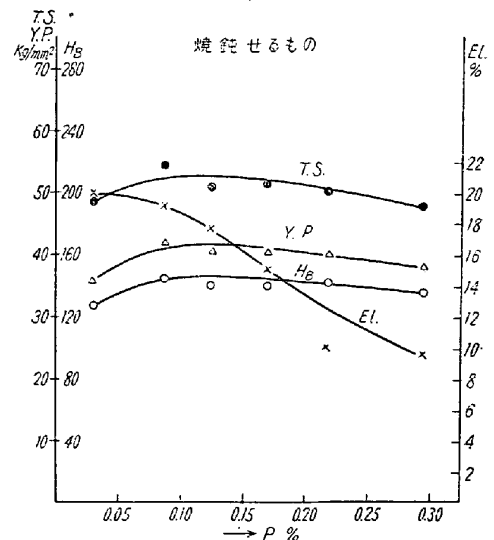
燐は球状黒鉛鑄鐵に於ては黒鉛の球状化に大きな阻害作用はない。鑄造状態の試料につき實驗した結果或量迄の燐の増加は遊離炭素を増すがPが多くなると第3圖の如くかえつて化合炭素の増加を促がす事を認めた。燐の機械的性質に與える影響は Gagnebin<sup>1)</sup> J. E. Rehder<sup>2)</sup> 等により報告されているが、その他<sup>3)</sup>の報告に於ても強さに關するより伸びの低下に影響の大きい事を見出している。本實驗に於ける各試料の試験結果及びその試料の分析値を第1表に示す。



第3圖 含P量と遊離炭素の関係



第4圖 Si=2.6% の群に於ける含燐量と機械的性質の関係



第5圖 Si=2.6% の群に於ける含燐量と機械的性質の関係

#### 1) Si=2.6% の群

Si=2.5% が球状黒鉛鑄鐵の最適成分とされているので以下この群を規準として考察を進める。第4圖は鑄込儘のもの第5圖は 720°C に 10 時間保持し基地をフェ

第 1 表

群	試料	抗張力 kg/mm <sup>2</sup>	降伏點 kg/mm <sup>2</sup>	延伸率 %	ブリネル 硬度數	シャルピ ー衝撃値 mkg	熱處理	化 學 成 分					
								T.C.	G.C.	Si	Mn	P	S
MC	M03	72.5	40.7	6.1	241	2.68	鑄 込 ま ゝ	3.47	2.60	2.55	0.52	0.041	0.007
	M08	64.6	43.3	5.8	211	2.24		3.51	2.65	2.66		0.096	
	M12	61.0	43.3	3.7	223	1.20		3.42	2.66	2.49		0.134	
	M16	63.1	43.2	3.1	245	0.66		3.44	2.49	2.71		0.172	
	M20	55.8	50.8	1.4	259	0.43		3.42	2.07	2.79	0.74	0.216	0.004
	M30	43.2			239	0.37		3.39	—	2.78		0.287	
MA	M03A	48.4	35.6	19.9	158	破斷せず	焼	3.56		2.71	0.50	0.035	
	M08A	54.4	42.1	19.1	182	8.48		3.44			0.73	0.089	0.006
	M12A	51.4	40.7	17.7	176	破斷せず	鈍 (710°C 10時間)	3.53		2.78		0.131	0.007
	M16A	51.6	40.7	15.6	175	6.61		3.34		2.89		0.173	0.006
	M20A	50.1	40.7	9.9	177	3.69		3.42		2.79	0.74	0.216	0.004
	M30A	48.4	38.2	8.5	170	3.36		3.33		2.59	0.68	0.282	0.004
LC	L03	74.2	40.7	7.4	235	4.67	鑄 込 ま ゝ	3.60	2.44	2.06		0.033	0.005
	L08	77.3	45.7	5.8	255	2.45		3.59	2.48	2.05		0.071	
	L12	74.6	43.2	3.7	265	1.47		3.83	2.69	2.01	0.60	0.114	0.006
	L16	73.6	45.7	3.0	265	1.20		3.54	2.62	1.96		0.158	
	L24	67.0	45.7	2.0	268	0.80		3.52	2.10	2.05		0.243	
LA	L03A	43.1	27.9	23.6	146	破斷せず	焼	3.79		1.97		0.034	
	L08A	45.6	30.5	24.8	151	破斷せず		3.71		2.03	0.69	0.085	
	L16A	46.0	31.8	22.4	161	8.25	鈍 (710°C 15時間)	3.54		2.05		0.162	0.005
	L24A	47.9	35.9	11.4	170	9.51		3.55		2.15		0.246	
HC	H06	54.3	38.2	4.4	219	1.36	鑄 込 ま ゝ	3.56	3.10	3.17		0.066	
	H12	61.3	45.8	6.0	222	1.34		3.58	2.89	3.13	0.52	0.115	
	H16	61.8	45.8	3.7	234	0.89		3.54	2.98	3.13		0.168	0.007
HA	H03A	47.0	33.1	22.0	165	破斷せず	焼	3.57		2.69		0.035	
	H06A	53.5	39.4	15.7	189			3.58		3.22	0.58	0.067	0.006
	H07A	53.8	40.1	14.8	184	7.28		3.48		3.18		0.071	
	H09A	52.2	38.1	19.3	180		鈍	3.49		3.40		0.098	
	H12A	53.8	40.7	19.6	189	4.61		3.55		3.18		0.121	
	H16A	54.6	41.9	15.1	192	1.80	鈍 (710°C 5時間)	3.56		3.12		0.165	
	H20A	55.3	42.9	11.9	207	2.40		3.33		3.27	0.55	0.203	0.007
	H30A	53.2	42.0	7.4	196	0.51		3.43		3.13		0.293	
HH	HH03	62.2	53.5	3.7	223	0.80	鑄 込 ま ゝ	3.20		4.12		0.032	
	HH16	64.8	54.7	2.9	235	0.49		3.18		4.16		0.160	

ライト化したものゝ引張試験の結果である。第4圖に見る通りPの増加に従い基地はフェライトの量が減少して居るに拘らず抗張力を減じている。伸びも急速に低下し硬度や降伏點は反つて上昇する。一方焼鈍したものに於てはPが0.1% 近くになると抗張力、降伏點、硬度がわずかに上昇して居る。この事はPの固溶限内に於てPの増加と共に一般に合金の通性である強度の増加が此の場合にも現れたものと解される。これ以上Pが増加するとステダイトが現れ焼鈍に依つても700°C 前後に於ては分解は殆ど起つて居ない。ステダイトは角張つた形をしているからこの爲切欠効果が發生し、しかも鑄込儘のものでは地鐵がパーライトである爲にり能力が小さいので抗張力が減退する。焼鈍したものでは基地がり易いフェライトなる爲、分離破斷が比較的高い應力迄耐え得る

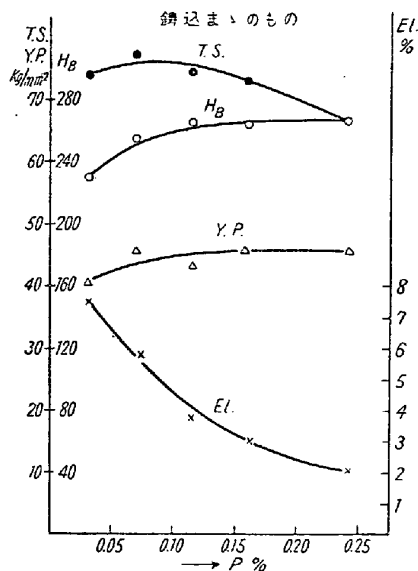
と考えれば、焼鈍した場合にPが増加しても抗張力の低下が殆んど無い事が説明出来る。焼鈍したものではPの増加と共に靱性の低下が第5圖の様に見られるが原料がスエーデン鉄の様に不純物の少いものではPを0.3%近く含有してもなほ10% 近くの伸びがある。第4圖に見られる様に鑄込儘のものに於ては降伏點が抗張力の低下とは逆に上昇して居る。これは Rehder によつてもかかる事實が認められて居るが、著者の實驗に於て他のSi量のものについては認められなかつた。

Fe-P 系におけるPのFeに対する固溶限は Stead やその他によれば1.7% (常溫) であるが、Cの増加と共にこの固溶限は減少し、Fe-C-P の三元共晶ステダイトを生ずる様になる。又これにSiが球状黒鉛鑄鐵に於ける様に多いと更に固溶限が減少してPの低いものでもス

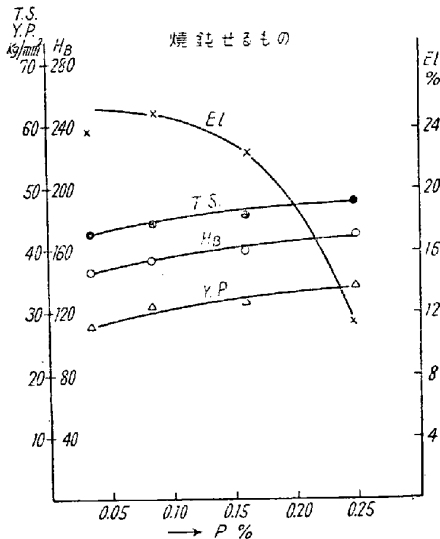
テダイトを生じ、これが切欠として働く。又 Si 濃度が高くなるにつれシリコフェライトの脆性が表われて来てこの2つの複合した働きに依つてPの靱性に對する影響が大きくなる。かゝる觀點から Si 量を變化せしめたものにつきPの影響を試験した。

2) Si=2.0% の群

これは球状黒鉛鑄鐵でも Si の低い範圍のものである。第6圖は鑄込儘のものゝ性質を示す。Si が低い爲



第6圖 Si=2.0% の群に於ける含燐量と機械的性質の關係



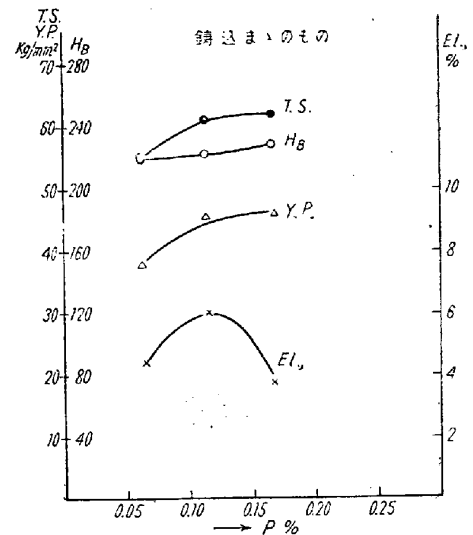
第7圖 Si=2.0% の群に於ける含燐量と機械的性質の關係

パーライトの量が増加しその爲抗張力も 70kg/mm<sup>2</sup> を超える。又 Si=2.6% の規準のものに比し Si が低い爲Pによる第4圖の様な急激な變化は見られない。又伸びもパーライトの量が Si 2.6% のものよりも多めに拘

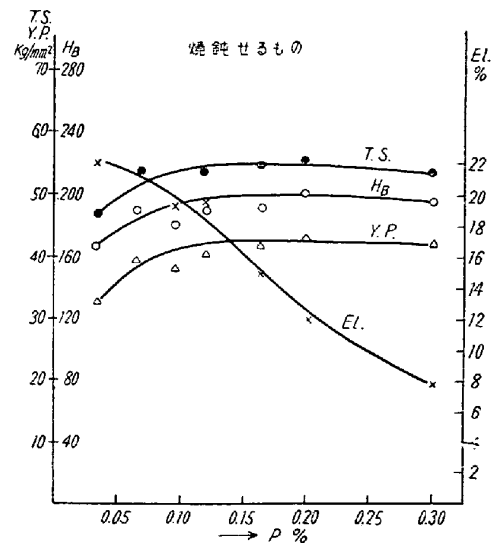
らず僅か高目である。第7圖は 710~720°C に 15 時間焼鈍したものゝ機械的性質を示す。これを Si=2.6% の第5圖に比べると抗張力、降伏點、硬度が低いのはフェライトに固溶する Si 量が少い爲である。一方伸びはPが 0.15% 附近を超える頃より低下が初まるが、それ迄は 20% 前後の高い値を示して居る。即ち Si 濃度が低い程Pによる靱性の低下が少い事を示す。

3) Si=3.1% の群

この群の試料は規準のものより Si の高いものであるが、鑄込儘のものを第8圖に又 710~720°C に5時間保持し焼鈍したものを第9圖に示す。Si が高い爲鑄込儘のものでも地鐵にフェライト量が多い。しかしこのフェライトは Si が高いために、低 Si のフェライトに



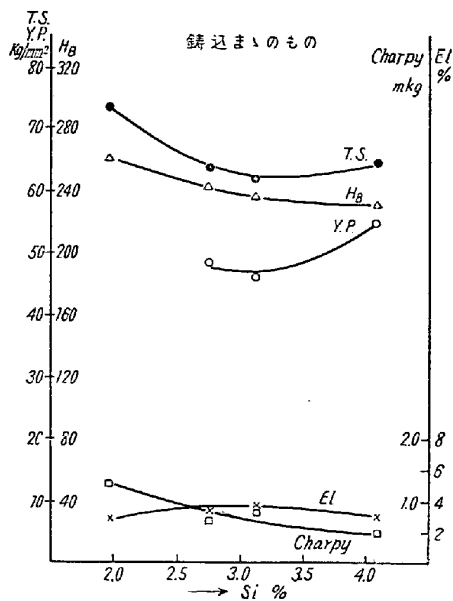
第8圖 Si=3.1% の群に於ける含燐量と機械的性質の關係



第9圖 Si=3.1% の群に於ける含燐量と機械的性質の關係

比して硬くて強いが延性が少いと考えられる。事實第8圖では強さは相當保持されて居て伸びは高くない。第8圖の鑄込儘のものでは試料数が少く残念ながらPの影響を詳しく觀察されない。第9圖の焼鈍したものに於てはPの影響はSi=2.6%の場合と同一傾向をとり、且これに比べてSiの高い爲に全體として抗張力、降伏點、硬度がわずか高目であるが伸びはSi=2.6%のものよりわずか低目である。

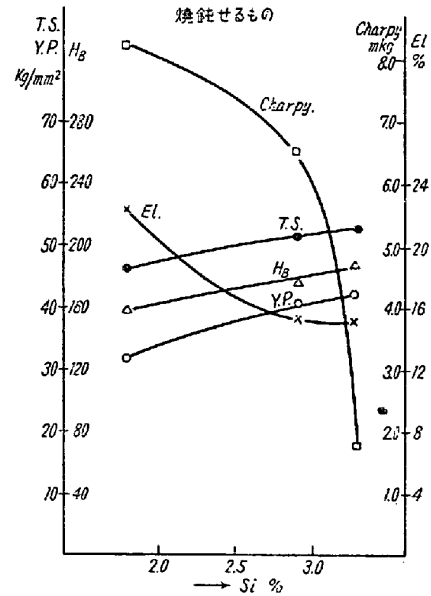
以上Si含有量の異なる3群について静的試験に於けるPの影響を示したが、更にPを0.16%に一定した試料につきSi量と機械的性質の關係を第10圖と第11圖に示した。同様のことをP 0.03%一定のものについて



第10圖 P=0.16%の群に於けるSiと機械的性質の關係

も調査したがSi量の變化による機械的性質の變化はSiが2.0~3.0%の範圍に於ては顯著でない。しかし丁度Pがその許容限附近にある場合第10圖と第11圖のデータに於てSi量の變化による靱性の低下を調べるとSiとPの複合した影響が判然とする。第10圖は鑄込儘のもの第11圖は焼鈍したもので、前者に於ては強さの點ではSiの増加は餘り影響がないが、靱性はわずかに低下して居る。第11圖に依るとSiが増加すると抗張力、降伏點、硬度は鋼の場合と同様に増加する。しかし伸びは、2.6%Siになると2.0%Siのものより可なり低下する。一方シャルピーの衝撃値は更にこの事實を顯著に表明して居る。

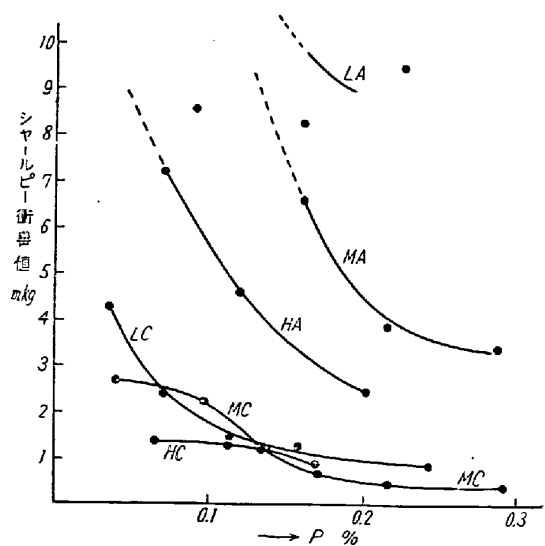
以上は静的試験による機械的性質に就いて述べたが動的試験即ちシャルピー衝撃試験による靱性のPによる變化を同じくSiの三群の値のものについて記す。



第11圖 P=0.16%の群に於けるSiと機械的性質の關係

4) シャルピー衝撃試験

第12圖にその結果を示す。先づ鑄込儘のものについて述べるとPの含有量が低い範圍に於てはSiの低いものの方が地鐵にパーライトが多いにも拘らず靱性は高い。Pが増加し0.15%を超えるときは何れの試料も靱性が低くその差異は實驗誤差以内の範圍に入り、それ以上Pが増加しても靱性の低下が著しくない。この程度の脆さの試料になると衝撃試験値の變動が激しくて圓滑な實驗曲線が得難い。次に焼鈍したものに就ては、Pの含有量が低いものは10mkg以上の衝撃値を有し第12圖の點線の部分は何れも10mkgの容量の試験機によつて破断しなかつたものである。この試料中2.0%Siの

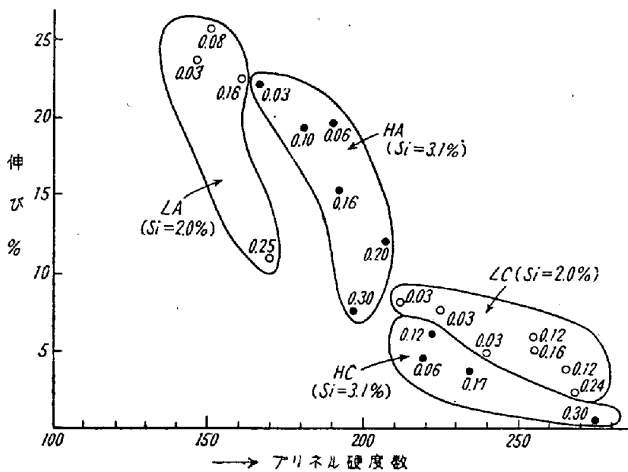


第12圖 Pと衝撃値の關係

群ではPが0.16%の所でも尙8mkg位の衝撃値を得ているが3.1%Siの群ではPがこの程度になると2mkg程度の低い値しか示さない。2.6%Siの規準のもはその中間に在る。この圖で知られる事はSi=3.1%のものでPが0.2%を超えるとたとえこれをよく焼鈍してもSi=2.0%Pの0.03%の試料の鑄込儘のものゝ衝撃値にも及ばないことである。これ等衝撃試験結果によつて、静的試験にあまり表われなかつたSiの増加によるフェライトの脆化を明瞭に見る事が出来る。

#### 5) 硬度

第13圖に各試料の硬度と伸びの関係を示した。鑄込儘(LC及HC)のものを比較すると同じ硬度を示すものでもSiの低い群の方が高い伸びを示す。又焼鈍したものに就て見るとSi量の高い試料が一般に伸びが低く硬度は高い範圍に存在する事を示している。又同じSi量の群に於て鑄込儘のものも焼鈍したものも共にPの含有量の高い方が伸びが低く硬度が高い區域に存在する事を示している。たゞし焼鈍したものに於ては硬度の變化が少なく、Pの含有量と伸びの関係の方が明瞭に圖示されている。



第13圖 硬度と伸びの関係

以上はブリネルの硬度計に依つたものであるが、微小硬度計に依つて焼鈍したものゝ地鐵のフェライトの硬度を測定すると、Pの増加によつてフェライト自體の硬度は上昇せず、フェライトのSi濃度の増加に依つて上昇

することを知つた。この事實からPの増加による伸び又は衝撃値の低下は出現するステダイトの切欠作用の増加によつて急激に靱性を減じた事に結論付けられる。

## IV. 結 論

以上の實驗結果に依つて次の事が言える。

1) 球状黒鉛鑄鐵に於てはPの増加は特に靱性の低下に著しい影響がある。抗張力は鑄込儘のものに於てはPの増加と共に低くなるが、焼鈍したものに於てはPが幾分増加すると上昇し以後は幾分低下の傾向があるだけである。伸びは鑄込儘のものに於ても焼鈍したものに於ても急激に減少する。然しスエーデス銑の様に不純物の少ない原料であれば焼鈍したものに於てPが0.2%程度含まれて居ても15%位の伸びは達成される。

2) 珪素量は其の値が2.0%程度であると、Pが比較的高く含有されて居ても靱性の低下が少いが、Siが3.0%近くなるとPの含有量が可なり低い所で靱性の低下が現われる。この事は特に衝撃試験に敏感に現われて来る。

3) 鑄込儘のものにおいては珪素量が低く2.0%程度でPも出来るだけ低いものゝ方が強さも靱性も高く、焼鈍したものに於てはSi=2.6%以上のものでPが低い程強く靱性も相當高い。若しPの含有量が高い原料であればSiを低目にすればPのため靱性の低下する割合が少くなる。

4) Pの増加により靱性が低下するのは出現するステダイトの切欠効果の爲であり、又Siは3.0%以上含有する事はフェライトを脆化せしめる事になる。

(昭和27年7月寄稿)

#### 文 献

- 1) A. P. Gagnebin: Iron Age, 1949 Feb. 17
- 2) J. E. Rehder: A.F.S. Annual Meeting Preprint, 1951 No. 51~43
- 3) C. K. Donoho: The Foundry, June 1950.
- 4) A. B. Everest: Foundry Trade Journal, vol. 89 July 20 & 27 1951.
- 5) 丹治, 菊池, 小山: 鑄物, 1951, vol. 23, Aug.