

砂層に於て流體の通過する方向に直角の單位斷面に於ける流體通路の總面積を  $S_1$  とすれば

$$S_1 = n\pi r^2 \dots\dots\dots (12)$$

$n$  は單位斷面積に於ける毛細管數である。然らば砂粒の實體によりて占めらるゝ面積  $S_2$  は

$$S_2 = 1 - n\pi r^2 \dots\dots\dots (13)$$

然して  $S_2$  は單位斷面に於ける砂粒實體の斷面積なる故

$$S_2 = n\pi R^2 \dots\dots\dots (14)$$

従つて空隙  $S_1$  と實體  $S_2$  との比は (11) (13) 及び (14)

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{n\pi r^2}{n\pi R^2} = \left\{ (1+f)^2 \sqrt{3} - \frac{\pi}{2} \right\} \frac{1}{\pi} \dots\dots (15)$$

第 13 表

砂の種類 (メッシュ)	$n$	$r$	$S_1 = n\pi r^2$	$S_2 = 1 - n\pi r^2$	$\frac{S_1}{S_2}$	$R^2 = \frac{S_2}{n\pi}$	$R = \sqrt{\frac{S_2}{n\pi}}$	$f$
20~30	1200	0.0102	0.392	0.608	0.644	$161.5 \times 10^{-6}$	$1.272 \times 10^{-2}$	0.44
30~40	2410	0.00724	0.396	0.604	0.656	$79.8 \times "$	$0.893 \times "$	0.45
40~50	4400	0.00552	0.419	0.581	0.709	$42.1 \times "$	$0.649 \times "$	0.48
50~60	7000	0.00443	0.429	0.571	0.751	$27.2 \times "$	$0.522 \times "$	0.51
60~70	9450	0.00383	0.433	0.567	0.764	$19.11 \times "$	$0.438 \times "$	0.51
70~80	12200	0.00332	0.421	0.579	0.737	$15.12 \times "$	$0.389 \times "$	0.50
80~90	15300	0.00302	0.438	0.572	0.766	$11.95 \times "$	$0.346 \times "$	0.52
90~100	18400	0.00278	0.447	0.553	0.808	$9.52 \times "$	$0.309 \times "$	0.54

之を本研究の結果に就きて計算すれば第

13 表に示すが如くである。この結果によれば砂粒群體の如何なる斷面に於ても空隙と砂粒實體との斷面積の比は 0.64~0.87 で平均すれば 0.73 である。又  $f$  は 0.44~0.54 であつて平均すれば 0.49 となる。

## 電熱用鐵・クロム・アルミニウム系合金の基礎的研究

(日本鐵鋼協會第 26 回講演大會講演 昭 16. 10 東京)

三島徳七・川勝一郎・難波雄一\*\*

### FUNDAMENTAL STUDY OF Fe-Cr-Al ALLOY STEELS FOR ELECTRIC HEATING ELEMENT

Tokusiti Misima, Kōgakuhakusi, Iirō Kawakatu & Yūiti Nanba.

**SYNOPSIS:**—The authors investigated some important industrial properties of a series of Fe-Cr-Al alloys containing 5~30% Cr and 1~7% Al, such as hardness, specific resistance, its temperature coefficient, oxidation resistance, specific weight, thermal expansion and magnetic transformation. The authors, again, examined effect of grain growth on mechanical properties, since the alloys have unusual phenomenon of grain growth at high temperatures. The result of experiments was summarised as follows:

In the hardness test, it was found that the most suitable heat treatment for softening these alloys is heating to about 800°C followed by rapid cooling. From the result of measuring the specific resistance, the ternary specific isoresistance curves were completely plotted. In the oxidation test, in case the Al content is in excess of 3%, the 15% Cr addition is sufficient for enhancing high temperature oxidation resistance but further addition yields little improvement. Besides, in Fe-Cr-Al alloys with the high-Cr and high-Al content, a remarkable grain growth is observed by heating to temperatures above 900°C and they become very brittle. Therefore full consideration should be made in annealing or using them at high temperatures.

#### 目 次

- I 緒 言
- II 試料の調製
- III 硬度試験
- IV 電氣抵抗及び溫度係數の測定

- V 耐酸化性試験
- VI 熱膨脹, 磁氣分折, 比重の測定
- VII 結晶粒の成長
- VIII 結 言

#### I. 緒 言

\*東京帝國大學 \* 東邦産業研究所

電熱用 Fe-Cr-Al 系合金はニクロム線の代用として近時

注目されて來たに拘はらず、其の工業的性質に關して之が系統的研究の發表せられたるもの少く、僅かに W. Hessebruch, A. L. Sanford 等により本系に屬する若干の成分の合金が研究せられ又錦織博士により耐酸化性の研究せられたるものがあるに過ぎない。

本研究は *Fe-Cr-Al* 系合金に於て *Cr* 5~35%, *Al* 1~7% の範圍に汎り、硬度、固有抵抗及び溫度係數、耐酸化性、比重、熱膨脹係數、磁氣變態等の電熱線として重要な工學的性質に關し之が系統的研究を行ひたるものである。

尙本系合金は高溫度に於て結晶粒成長を生ずる特異性を有するが、本研究に於ては之が機械的性質其他に及ぼす影響をも併せて研究した。

其の結果を要約すれば硬度試験に於ては、本系合金の軟化焼鈍に當り從來の合金と異り 800°C 附近に加熱後急冷する事により軟化する事を明かにし、又固有抵抗測定の結果 *Fe-Cr-Al* 三元系の等固有抵抗曲線圖を作成した。又耐酸化性試験結果によれば *Al* が 3% 以上あれば *Cr* は 15% 以上加へても耐酸化性の増大には大して影響しない事が解つた。

*Fe-Cr-Al* 系に於て *Cr* 及び *Al* を相當量含む高温用電熱線相當組成のものは 900°C 以上の加熱により結晶粒著しく成長し極めて脆くなるを以て、焼鈍の際又は高溫度使用に方つては充分注意を要する事を知つた。

## II. 試料の調製

試料は各 2kg とし純鐵粒、金屬クロム、純アルミニウムを配合し 35kVA 高周波誘導爐によりマグネシヤ裏付けにて熔解し、之を 30mm 角の鑄塊となした。

第 1 表 原料の分析結果

	C	Mn	Si	Al	Cr	P	S	Fe
純鐵	0.06	0.2	—	—	—	0.02	0.01	殘部
クロム	0.1	—	0.6	0.5	98.2	—	—	0.6
アルミニウム	—	—	0.12	殘部	—	—	—	0.16

かくして得たる計 46 本の鑄塊 (30mm 角 2kg) は電氣爐にて加熱し 1/4 越空氣槌を以て 20mm 角の鍛造棒となし一部は平ロールにて壓延して厚さ 0.8mm、幅 20mm のストリップとなし、其他は溝附ロールにて壓延して 12mm 角及び 7mm 角の棒材となした。然して

壓延板より、耐酸化性試験片及び顯微鏡試料 12mm 角材より、電氣抵抗及び熱膨脹試験片 7mm 角材より、磁氣分析、硬度、比重各試料

を調製した。

試料の番號及び化學分析の結果は第 2 表の如くである。

之等の 46 本の試料は B 306 を除き全部鍛造壓延が出來て高クロム高アルミニウムの合金も何等特別の困難を感じ

第 2 表 *Fe-Cr-Al* 三元合金の分析結果

符號	Cr%	Al%	符號	Cr%	Al%
B 51	4.82	0.29	B 203	18.61	1.82
B 52	5.13	1.58	B 204	20.76	2.80
B 53	5.51	2.18	B 205	21.35	3.99
B 54	4.42	3.79	B 206	20.80	5.48
B 55	4.73	4.61	B 207	21.00	6.40
B 56	4.24	5.51	B 251	26.79	0.11
B 57	4.82	6.54	B 252	24.72	0.28
B 101	9.25	0.64	B 253	24.79	1.54
B 102	10.16	1.19	B 254	26.81	2.73
B 103	9.63	2.76	B 255	26.80	3.60
B 104	10.19	3.23	B 256	24.75	4.83
B 105	10.46	2.89	B 257	26.37	6.26
B 106	10.32	5.69	B 301	31.66	0.03
B 107	10.12	6.03	B 302	31.45	0.50
B 151	15.82	0.09	B 303	30.09	1.34
B 152	15.07	1.05	B 304	32.08	2.00
B 153	14.98	2.26	B 305	27.48	3.00
B 154	14.37	3.10	B 306	—	—
B 155	15.66	3.84	B 307	30.04	5.79
B 156	15.15	5.75	B 351	37.06	0.13
B 157	15.25	5.19	B 352	37.96	0.28
B 201	20.86	0.14	B 353	37.07	0.45
B 202	18.32	0.61	B 354	36.50	2.00

何れも不純物として *Si* 0.07 以下、*Mn* 0.2 以下を含む。

なかつた (B 306 は鍛造がうまく行かなかつたが之も注意すれば可能と思はれる)。

## III. 硬度試験

本系合金は *Cr* 18%, *Al* 0.3% 以下の極く小範圍を除き、一般に熱處理によつて硬化しない。46 試料の中焼入硬化せるものは B 51 と B 151 のみで其他は全部軟化するのみ

第 3 表 *Fe-Cr-Al* 系合金の硬度に及ぼす冷却速度の影響

試料番號	ロツクウエル B 硬度	
	水中冷却せるもの	爐中冷却せるもの
B 56	82.6	82.6
B 105	78.4	77.6
B 156	90.1	90.3
B 205	85.5	90.2
B 256	95.0	96.9
B 305	90.2	98.9

\* 800°C /h 保持後

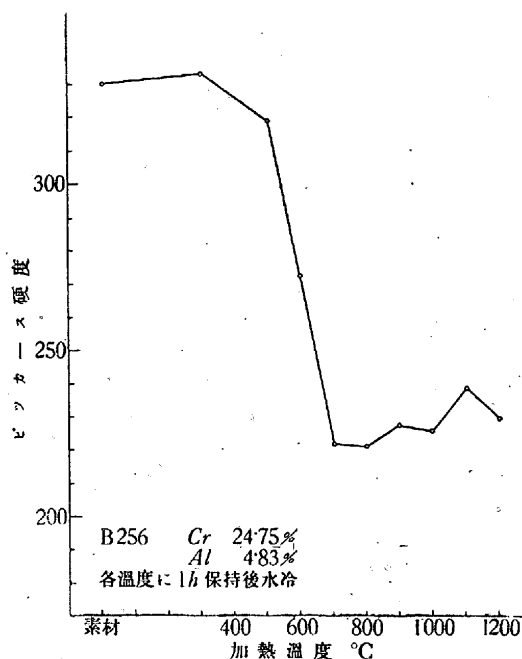
である。今數種の試料に於て硬化に及ぼす冷却速度の影響は第 3 表の如くである。

從つて焼鈍は本系合金に於て *Cr* 20% 以上のものは焼鈍溫度に加熱後急冷するを以て適當とする事が解つた。之は他の合金の焼鈍と著しく趣を異にするもので其の原因に就ては更に考究中である。斯かる熱處理により軟化せんとする場合の適當なる軟化溫度は本系合金の各種類を通じ殆ど

700°Cにて軟化し、夫以上は硬度に左程影響を與へない。従つて800°Cにて加熱すれば完全に軟化せられる。今本系合金の代表的な例としてCr 24.75%, Al 4.83%の合金

第4表 Cr 24.75%, Al 4.83%合金の熱処理による硬度變化, 各温度に1h保持後水中急冷す

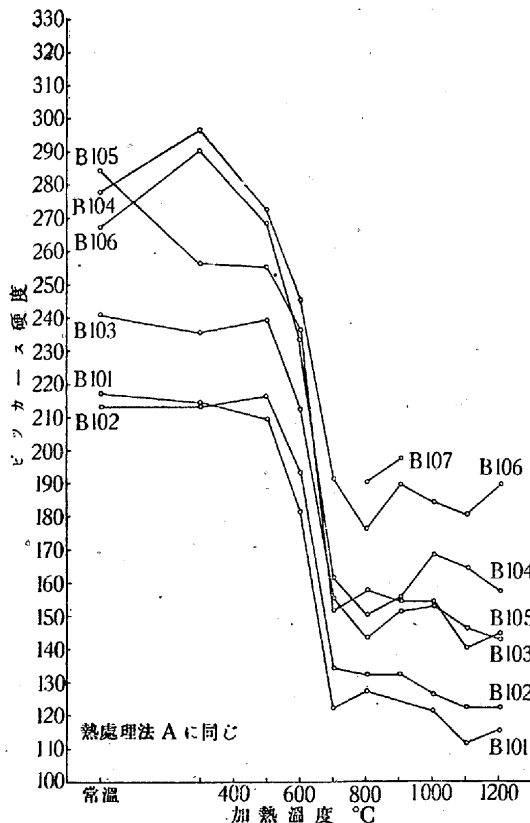
加熱温度 °C	300	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	
ビッカース硬度	330	333	319	273	222	221	228	226	239	230



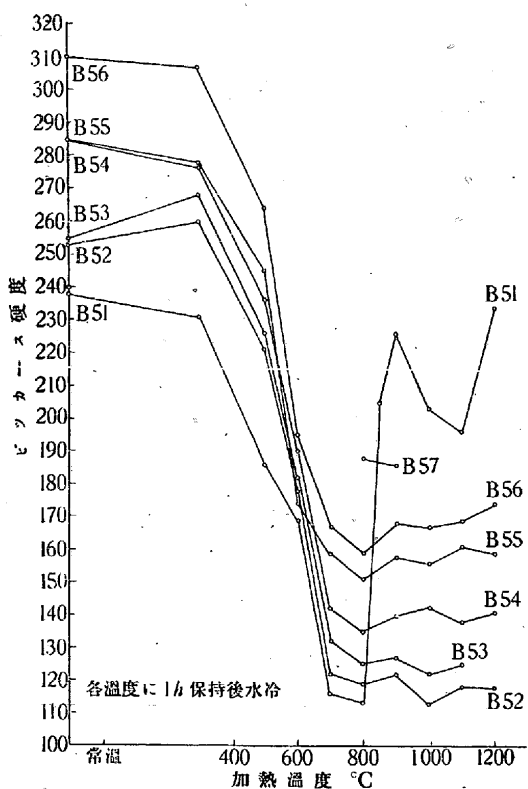
第1圖 Fe-Cr-Al系合金の硬度に及ぼす加熱温度の影響

を各温度より水中急冷せる場合の硬度變化を第4表及び第1圖に示す。

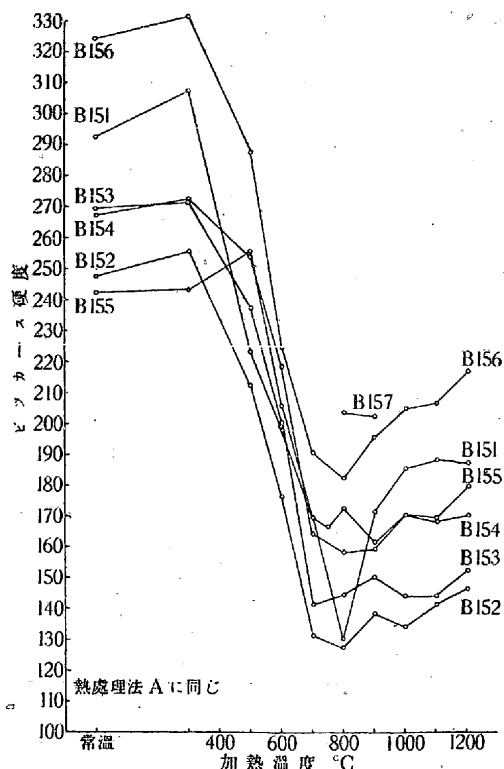
又Cr及びAlの量を種々變じたる場合の軟化曲線を第2圖に示すが何れも大體同様の傾向を示し700°Cで殆ど



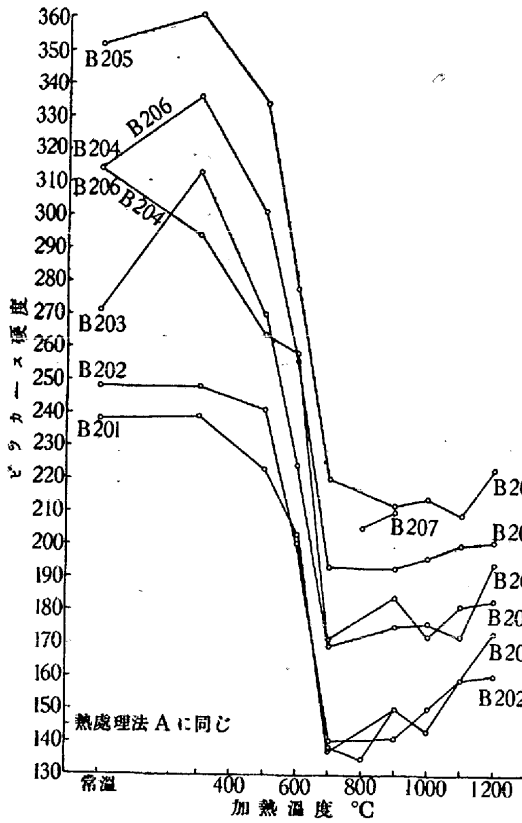
第2圖 B Cr10%, Al 0.2-5.5%合金の硬度に及ぼす加熱温度の影響



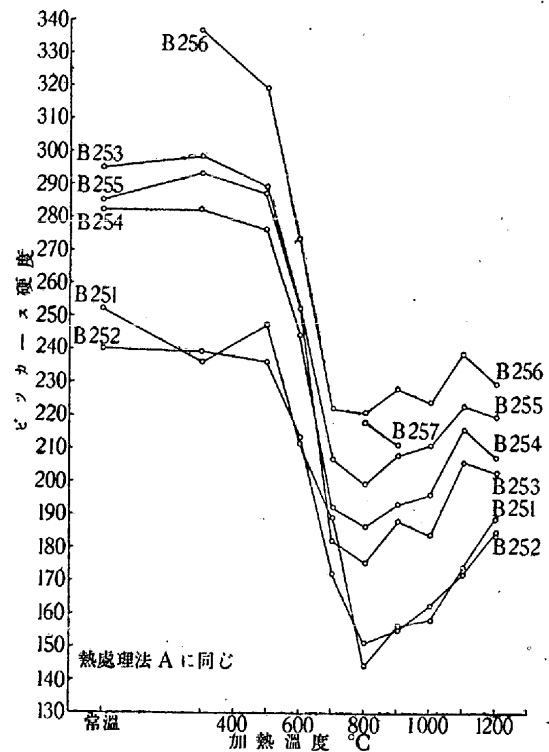
第2圖A Cr 5%, Al 0.5-5.5%合金の硬度に及ぼす加熱温度の影響



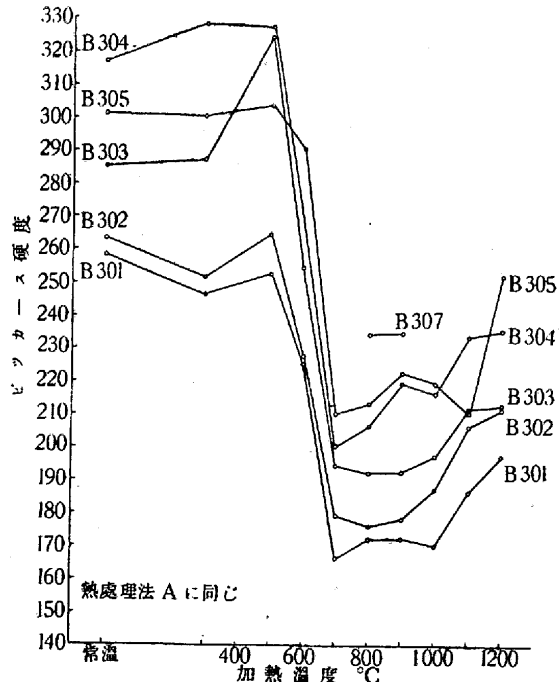
第2圖C Cr 15%, Al 0.5-5.5%合金の硬度に及ぼす加熱温度の影響



第 2 圖 D Cr 20%, Al 0.1~5.5% 合金の硬度に及ぼす加熱温度の影響



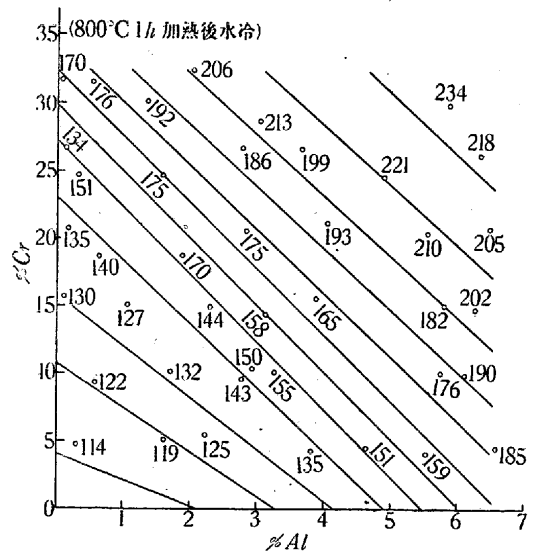
第 2 圖 E Cr 25%, Al 0.05~5.5% 合金の硬度に及ぼす加熱温度の影響



第 2 圖 F Cr 30%, Al 0.01~5.5% 合金の硬度に及ぼす加熱温度の影響

軟化し、800°C で完全に軟化せらる。又試料の全範囲を通じて焼鈍に要する時間は比較的短時間にて良く、例へば 800°C に於ては試片の全體が其温度に上昇すれば既に充分軟化されて居ると考へて宜しい。

第 3 圖は 800°C に加熱後水中急冷せる焼鈍法を行ひた



第 3 圖 Fe-Cr-Al 三元合金の等硬度圖

る場合の Fe-Cr-Al 三元系硬度曲線である。

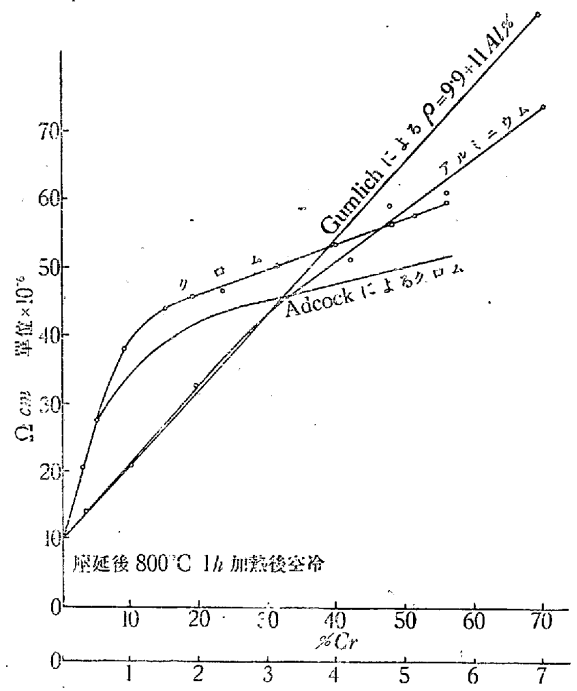
#### IV. 電気抵抗及び温度係數

試料は 12mm 角壓延棒を 800°C 1h 加熱後空冷したも  
のより削り出した 5mm 徑の丸棒を用ひ電位差計によつて  
固有抵抗を測定した。又抵抗の温度係數は 6mm 角壓延棒  
を長さ 20cm とつて試料となし、油恒温槽中に浸漬して温  
度の不均一による誤差を除去しつゝ常溫より 100°C 迄  
10°C 置きの抵抗を測定する事によつて求めた。

第5表 Fe-Cr-Al 三元合金の固有抵抗 (20°C) 及び温度係数 (20~100°C)

試料番號	固有抵抗 × 10 <sup>-6</sup> Ωcm	温度係數 × 10 <sup>-4</sup>	變化傾向	試料番號	固有抵抗 × 10 <sup>-6</sup> Ωcm	温度係數 × 10 <sup>-4</sup>	變化傾向
B 51	47.8	13.93	↗	B 201	52.1	19.30	↗
B 52	67.3	9.23	↗	B 202	86.4		↗
B 53	75.6	7.80	↗	B 203	103.2	3.17	↗
B 54	86.2	6.20	↗	B 204	120.9	0.78	↗
B 55	93.4	3.21	↗	B 205	126.5	0.02	↗
B 56	100.8	2.30	↗	B 206	144.9		↗
B 57	124.5	1.43	↗	B 207	153.5	-0.13	↗
B 101	69.0	9.21	↗	B 251	65.3	16.31	↗
B 102	80.6	6.10	↗	B 252	77.6		↗
B 103	100.5	3.31	↗	B 253	112.8	2.21	↗
B 104	105.2		↗	B 254	125.3		↗
B 105	105.0		↗	B 255	135.0	0.41	↗
B 106	117.5	1.55	↗	B 256	147.0	-0.79	↗
B 107	134.7	0.83	↗	B 257	159.0		↗
B 151	48.7	17.42	↗	B 301	65.3		↗
B 152	84.9	5.62	↗	B 302	92.8	7.28	↗
B 153	100.5		↗	B 303	113.2	3.73	↗
B 154	111.9	1.67	↗	B 304	124.1	1.77	↗
B 155	126.0	0.87	↗	B 305	133.5	1.08	↗
B 156	139.7	0.65	↗	B 306	-		↗
B 157	146.6	0.14	↗	B 307	157.5	-0.31	↗

線圖を用ひれば現今の市販鐵クロム抵抗線の全部を網羅する事が出来る。其の際成分と抵抗との關係を直ちに知る上

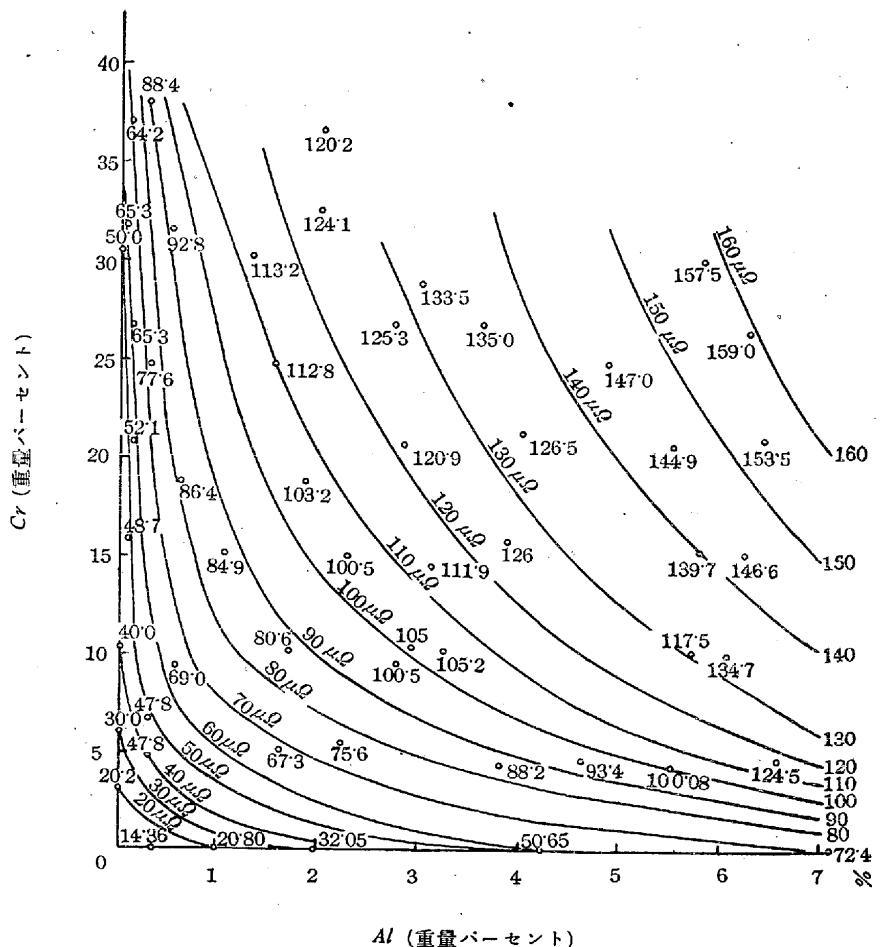


第4圖 Fe-Cr 及び Fe-Al 二元合金の固有抵抗

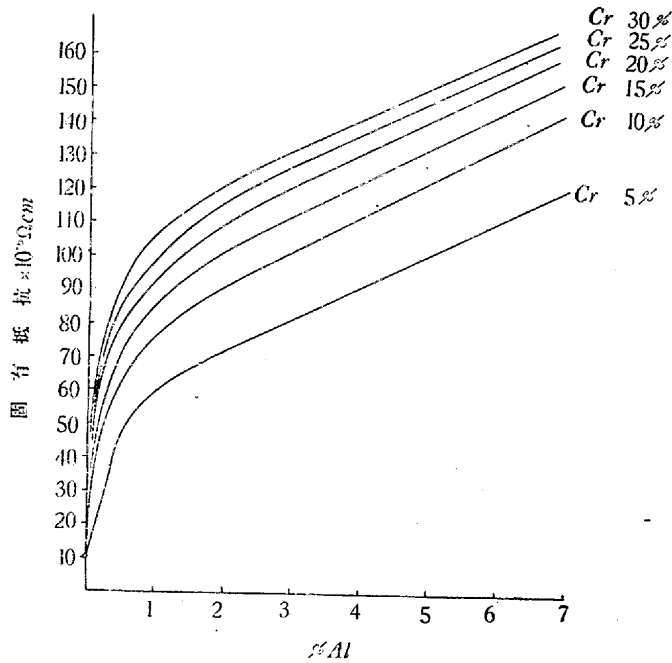
Fe-Cr-Al 三元系合金の固有抵抗を求むるに先立ち先づ Fe-Cr 及び Fe-Al の各二元系合金に就て抵抗-濃度曲線を求めたる結果は第4圖の如くである。尙本圖には参考のため、Fe-Cr 系に於ては Adcock, Fe-Al 系にては Gumlich の夫々測定値を併記してある。之によれば Fe-Al 系に於ては大體一致して居るが Fe-Cr 系では當所の値が幾分高く出て居る。之は金屬クロムの純度の相違、並に熱處理等により異なるものと思はれる。

第5表は供試合金の固有抵抗及び 20~100°C の抵抗温度係數を一括せるものである。本表に於て右側に記せる記號は水平線を基準とした温度と抵抗の變化傾向を表す。之により、Al 量の多いものには 20~100°C で温度係數が負の値を示すものがある。之は此の部分に於て固溶體が規則→不規則變化を行ふに非ずやと推測されるが其の點は今後の研究に俟たねばならぬ。

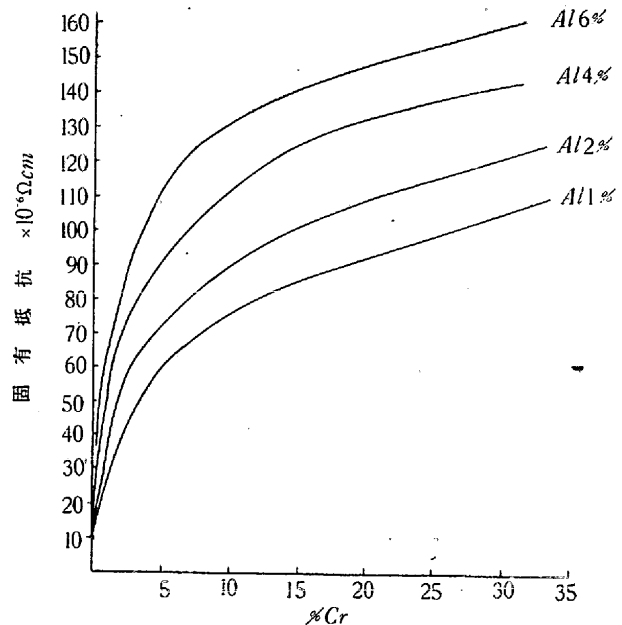
第5圖は Fe-Cr-Al 三元系合金の常温に於ける等固有抵抗曲線圖である。この曲



第5圖 Fe-Cr-Al 三元合金の等固有抵抗曲線圖



第6圖 Fe-Cr 二元合金の固有抵抗に及ぼすアルミニウムの影響

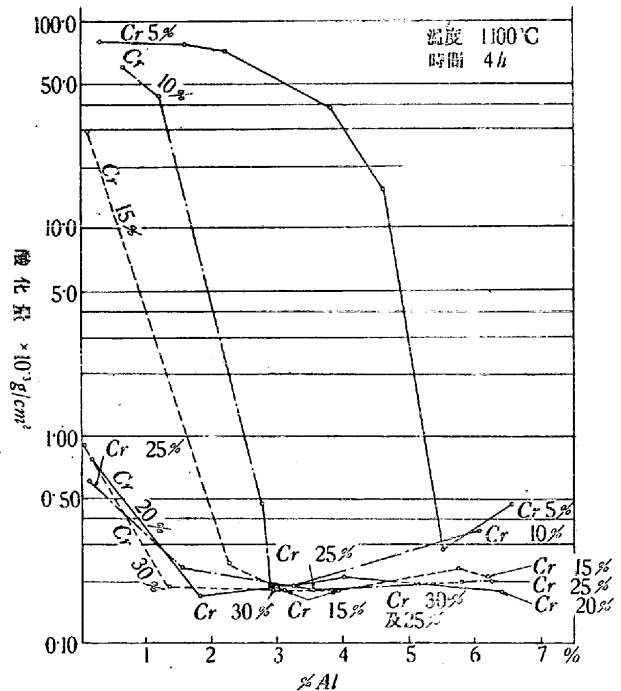


第7圖 Fe-Al 二元合金の固有抵抗に及ぼすクロムの影響

に於て本圖は相當參考となるであらう。但實際の使用溫度たる高温に於ては夫々の溫度係數を考慮に入れねばならぬ故本圖とは又かなり相違するものと見なければならぬ。

Fe-Cr-Al 三元系合金の固有抵抗は Cr 及び Al の添加によつて著しく増加し特に Al に於て甚しい。之は本系合金の抵抗線として大なる特徴を賦與するもので Cr 20%, Al 5% のものは既に  $140 \mu\Omega\text{cm}$  に達しニクロム線1號の  $105 \mu\Omega\text{cm}$  を遙に凌いで居る。但 Al による變化が極めて大であり、且 Al の添加歩留が稍もすれば不規則となる結果製品の抵抗値を揃へる事が難しいのは致し方がない。抵抗の溫度係數は一般に固有抵抗大なるもの程小さく従つて高温では常溫に於ける如く著しき抵抗の差はない。

第6圖及び第7圖は第5圖より構成したる抵抗-濃度曲線で夫々 Cr 及び Al を一定とした時の固有抵抗變化を示すものである。

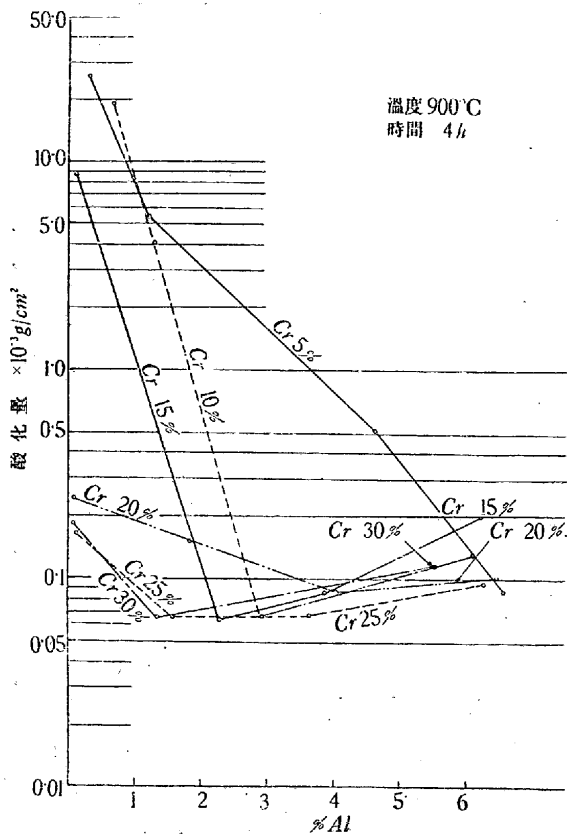


第8圖 Fe-Cr-Al 三元合金耐酸化性試験

V. 耐酸化性試験

Fe-Cr-Al 三元系の全範圍に汎り重量増加法に依つて酸化量を測定した。試片の大きさは幅 3mm, 長さ 100mm, 厚さ 0.8mm で研磨紙の 40 迄研磨し王水にて酸洗の上アルミナポットに乗せ管狀抵抗爐中にて加熱し加熱前後に於ける重量増加を測定した。然して酸化量は重量増加を最初の表面積にて除したる値を以て示される。尙試験溫度は 1,100° 及び 900°C の2種で保持時間は各 4h とし夫々高温用及び低温用としての性能を知らんとした。その結果は第8圖

及び第9圖の如くである。即ち Cr と Al は何れも鐵の耐酸化性を著しく増加せしめるが單獨では Cr 30% 以上又は Al 8% 以上にならなければ充分な耐酸化性を有しない。然るに Fe に Cr 及び Al を同時に添加せる三元合金は極めて大なる耐酸化性を示す。其の理由としては本系合金の耐酸化性を賦與する保護酸化皮膜は主として  $Al_2O_3$  であつて之は Scheil & Schulz の研究に依れば Fe-Al 二元系にては Al 9% に達せねば生ぜぬが Cr が相當量(例へば 15% 以



第 9 圖 Fe-Cr-Al 三元合金耐酸化性試験

上)含有せられたる三元系では Al4~5% 位でも既に  $Al_2O_3$  の皮膜を生ずると云ふ事に依つて説明されるものである。

1,100°C に於ける試験結果に就て云へば Cr は 10% でも Al が 3% 添加されると酸化量は  $0.2mg/cm^2$  に減少し、充

第 6 表 Fe-Cr-Al 三元合金の耐酸化性試験による酸化皮膜の表面状況

試料	表面状況	試料	表面状況	試料	表面状況
B 51	×	B 151	⊗	B 251	⊗
B 52	×	B 152	○	B 252	○
B 53	×	B 153	○	B 253	○
B 54	⊗	B 154	○	B 254	○
B 55	⊗	B 155	○	B 255	○
B 56	○	B 156	○	B 256	○
B 57	○	B 157	○	B 257	○
B 101	×	B 201	⊗	B 301	⊗
B 102	×	B 202	○	B 302	○
B 103	⊗	B 203	○	B 303	○
B 104	○	B 204	○	B 304	○
B 105	○	B 205	○	B 305	○
B 106	○	B 206	○	B 306	○
B 107	○	B 207	○	B 307	○

- 註
- × ----- 厚く内部迄酸化物となりたるもの
  - ⊗ ----- 局部的に厚き酸化物を形成せるもの
  - ⊗ ----- 表面黒色の薄き酸化物で被はれしもの
  - ----- 表面灰色又は白色の極めて薄き酸化物を被る

分なる耐酸化性を示す。一般に Al を或程度含有した合金は Cr を多量添加すると熔解及び加工困難となり従つて高價となる故之等の點を考慮すれば 1,100°C 程度では Cr 1.5~20%, Al 4~5% の成分が適當であると考へる。其以上 Cr を添加しても左程耐酸化性を増大し得ず寧ろ製造上の困難の方が著しくなる。1,100°C にて耐酸化性試験を行ひたる試料に就て表面状況を觀察すれば鋼材の如く厚く内部迄スケール化するものは Cr 5% のものに在りては Al 3% 迄、Cr 10% のものでは Al 1.5%, Cr 15% では Al 1% 迄である。其の表面状況の觀察結果は第 6 表の如くである。

酸化膜の色澤は○印のものに有つては Cr 量同一ならば Al の多いもの程白色となり耐酸化性向上し  $Al_2O_3$  を多量に含有する事を推察出来るが一方耐酸化性試験の結果は Al が 6% 以上にもなると却つて酸化量を幾分増大して居る傾向がある。かゝる  $Al_2O_3$  の多いと考へられる酸化膜は飛散的傾向を有し、爲に新しい表面が出て酸化量を増すに非ずやと考へる。Cr 量による酸化皮膜の變化を見るに Cr を増すと多少灰色を呈するが皮膜の別離傾向は少ない。

以上の事實より考察するに Fe-Cr-Al 系合金の耐酸化性大なる所以はそれ自身耐酸化性優秀なる  $Al_2O_3$  と耐酸化性に於ては  $Al_2O_3$  に及ばずとも緻密にして附着力大なる  $Cr_2O_3$  の共存する事に基因すると考へて宜しからう。

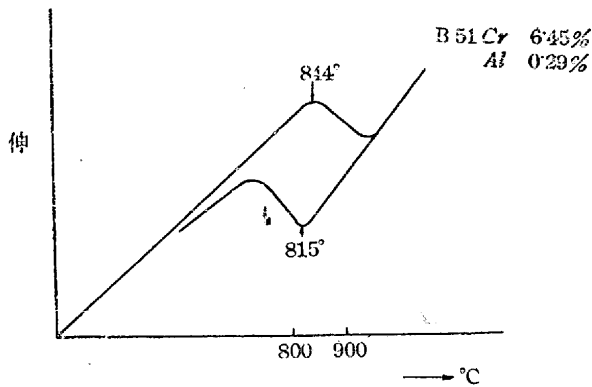
尙本耐酸化試験は酸化増量測定による静的試験であるが實際の發熱體用抵抗線としては A.S.T.M. の方法を改良せる遞信省電氣試験所の強制壽命試験方法によるのをより妥當とし目下此の設備による實驗に着手して居る。

## VI. 熱膨脹, 磁氣分析, 比重

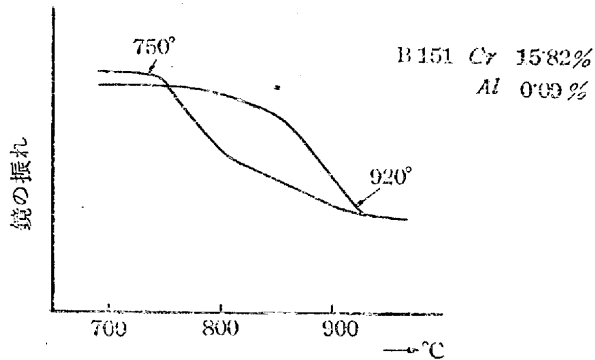
### 1. 熱膨脹

本多式熱膨脹計を使用 1/1,000mm 以下の眞空で試料の熱膨脹測定を行つた。其の結果變態點を有するものは B 51 及び B 151 の 2 試料のみで單調な膨脹及び收縮を行ふのみである。此の事實は此の 2 試料のみ硬度試験に於て焼入により硬化する事と全く一致するし實驗の結果を確實ならしめる。第 10 圖は B 51 の全膨脹曲線、第 11 圖は B 151 の示差熱膨脹曲線を示す。

Fe-Cr-Al 3 元系合金に就て 20°~500°C に於ける線膨脹係數測定の結果は第 8 表及び第 12 圖の如くである。尙参考の爲に第 7 表に Fe-Cr 2 元合金の熱膨脹係數の當所測定結果と他の文献とを比較した。



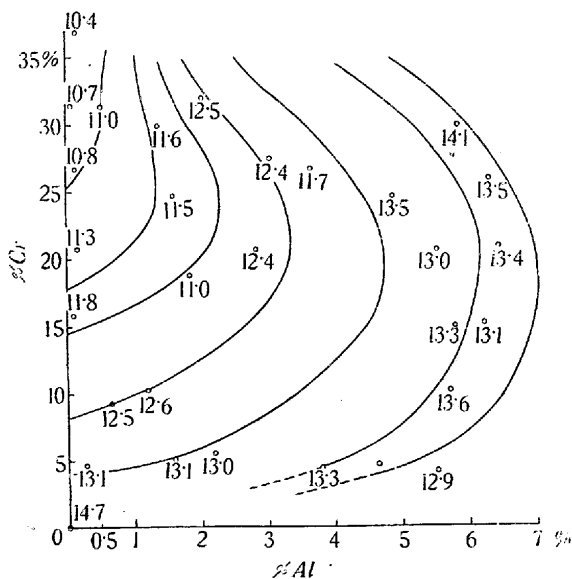
第10圖 B 51 試料の熱膨脹曲線



第11圖 B 151 試料の示差熱膨脹曲線

第7表 Fe-Cr 二元合金の熱膨脹係數

試料	當所測定	Overhoffer $\alpha$ (0-700°C)	Cheve- nard's	Jones of Heselwood
純鐵	$14.7 \times 10^{-6}$	$14.9 \times 10^{-6}$	$16.2 \times 10^{-6}$	
10% Cr-Fe 合金	12.5 "	12.9 "	13.9 "	$12.0 \times 10^{-6}$
20% Cr-Fe 合金	11.0 "	12.0 "	12.9 "	11.3 "



第12圖 Fe-Cr-Al 三元合金の熱膨脹係數  $\alpha$  (20°-500°)

之等を見れば Cr は單獨で Fe の熱膨脹係數を減少せしめる効果があるが Al が相當入ると必ずしもさうではない。

第8表 Fe-Cr-Al 三元合金の熱膨脹係數

試料	熱膨脹係數 $\times 10^{-6}$	試料	熱膨脹係數 $\times 10^{-6}$	試料	熱膨脹係數 $\times 10^{-6}$
B 51	13.1	B 151	11.8	B 255	11.7
B 52	—	B 156	13.3	B 256	13.5
B 53	13.1	B 157	13.1	B 257	13.5
B 54	13.3	B 201	11.3	B 301	10.7
B 55	13.1	B 203	11.0	B 302	11.0
B 56	13.0	B 204	12.4	B 303	11.6
B 57	12.3	B 206	13.0	B 304	12.5
B 101	12.5	B 207	13.4	B 305	12.4
B 102	12.6	B 251	10.8	B 307	14.1
B 106	13.6	B 253	11.5	B 351	10.4

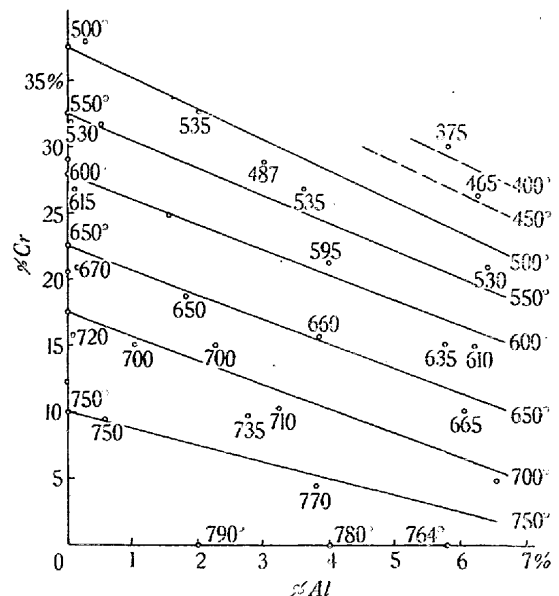
Fe-Cr 合金に Al を添加すると熱膨脹係數を増加する傾向がある。斯くして電熱線として實用範圍のものは大體  $13 \times 10^{-6}$  程度であるからニクロムに比して同程度の膨脹をなすものと云ふべく特に高温に於て緩みが大きいと云ふ心配はない。但應力が存在する場合は本系合金はクリープ限界著しく低きためニクロムに比して著しく伸びる。之は電熱線としての壽命試験に於て殊に留意すべき事である。

2. 磁氣變態點

電熱用 Fe-Cr-Al 系合金が 80/20 ニクロム電熱線と著しく異なる點は強磁性を有する事である。本研究に於ては全試料の約 1/2 に汎つて本多式磁氣分析装置により磁氣

第9表 Fe-Cr-Al 三元合金の磁氣變態點

試料	磁氣變態點 °C	試料	磁氣變態點 °C	試料	磁氣變態點 °C
57	695	156	635	257	465
107	660	157	610	301	530
157	610	201	670	305	485
207	530	203	650	307	375
257	465	204	—	101	750
307	375	205	495	103	735
151	720	207	530	104	710
152	700	251	615	107	665
153	700	253	580		
155	660	255	535		



第13圖 Fe-Cr-Al 三元合金の磁氣變態點  $A_c_2$  點



分析を行ひ A<sub>2</sub> 點を求め第 9 表及び第 13 圖に示す如き結果を得た。之によれば何れも其の磁氣變態は次第に降下するが其の變化は Al6% 迄は主として Cr の含有量により影響され Al の含有量には左程影響されない。かくして本系合金の電熱線として實用範圍のものは其の磁氣變態點を大體 550°~600°C と見れば良い。

Fe-Cr-Al 系電熱線をコイル状に巻いた場合自身の磁性のため電熱線自體が振動を起す事がある。然し其の不都合な現象は電熱線が磁氣變態點を越えれば直ちに消失するものなので高温使用の場合は障害とならず、これは調節用抵抗線として用ひる場合注意すべきである。

### 3. 比重

歴延後 800°C 焼鈍(空冷)の状態に於て比重を測定せる結果は第 10 表に示す如くである。

第 10 表 Fe-Cr-Al 三元合金の比重

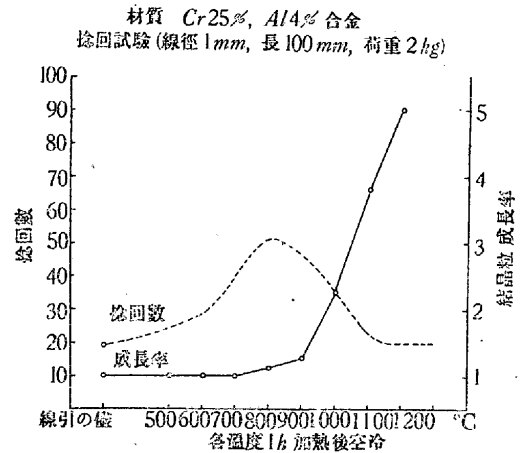
試料	比重	試料	比重
低 Al のもの		高 Al のもの	
B 101	7.642	B 57	7.099
B 151	7.672	B 107	7.081
B 201	7.636	B 157	7.050
B 251	7.565	B 207	7.018
B 301	7.620	B 257	6.989
		B 307	6.923

この表より Cr と Al が増せば比重は下り特に Al の影響が著しい。實用電熱線成分範圍では、大體 7.1~7.25 の比重を有し、従つて、ニクロム線の 8.4 に比し可成小である。

## VII. 結晶粒の成長

Fe-Cr-Al を主成分とする合金は電熱線として製造可能で然も本研究の v に示せる如く、耐酸化性に於ては相當優秀な結果を示して居る。然し本系合金は往々にして使用後結晶粒の成長によつて材質が脆弱と化し使用上著しき不都合を招來するとの弱點を指摘されて居る。本研究に於ては其の真相を確認せん爲、Fe-Cr-Al 系合金の電熱線用としての代表的成分 Cr 25%, Al 4% 合金を基礎として、之の結晶粒成長並に其の脆化に及ぼす影響を觀察し、更に本成分に第四元素を添加して其の結晶粒成長に及ぼす影響を検討した。但本研究に於て第四元素の影響に關しては尙不充分の點があり更に研究續行中なる故此處には大體明かとなりたる一部分を紹介する程度に止め度いと思ふ。

先づ Cr 25%, Al 4% 合金を 500°C より 1,200°C 迄 100°C 置きに各温度 1h 加熱せるものの結晶粒の成長率は

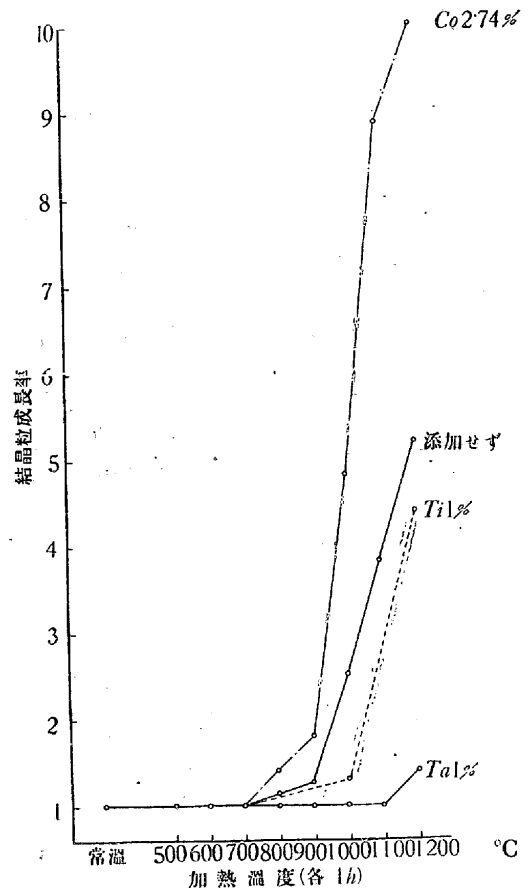


第 14 圖 Fe-Cr-Al 合金の結晶粒成長と脆化との關係

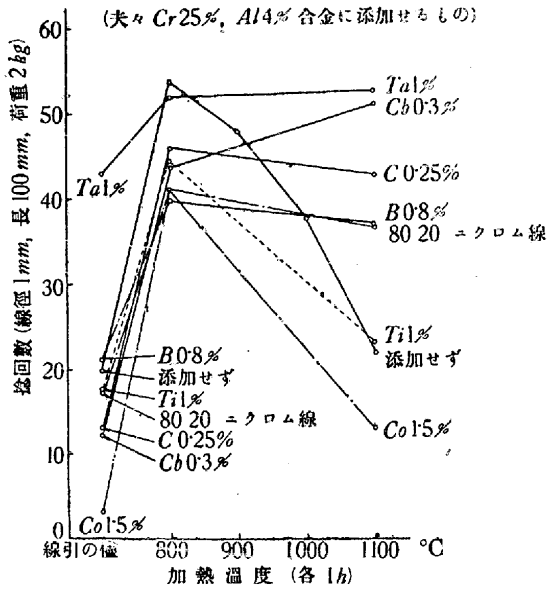
第 14 圖に示す如くである。結晶粒の大きさは A. S. T. M. の粒度表により、其の加熱後の結晶粒の大きさと加熱前のものとの比を以て結晶粒成長率と定めた。之による時は、結晶粒は 700°C 以上に加熱する事により多少成長し 900°C を越える時は極めて著しく成長する。

其と共に機械的性質も粒の成長に伴ひ著しく脆くなり僅かの屈曲にも耐へなくなる事が觀察される。其處で之を定量的に確める爲に同じ成分の合金を 1mm の線に引抜き、

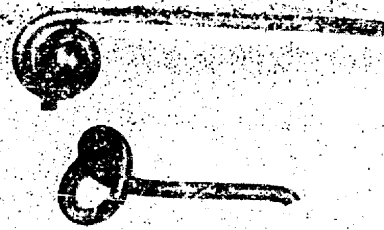
(夫々 Cr 25%, Al 4% 合金に添加せるもの)



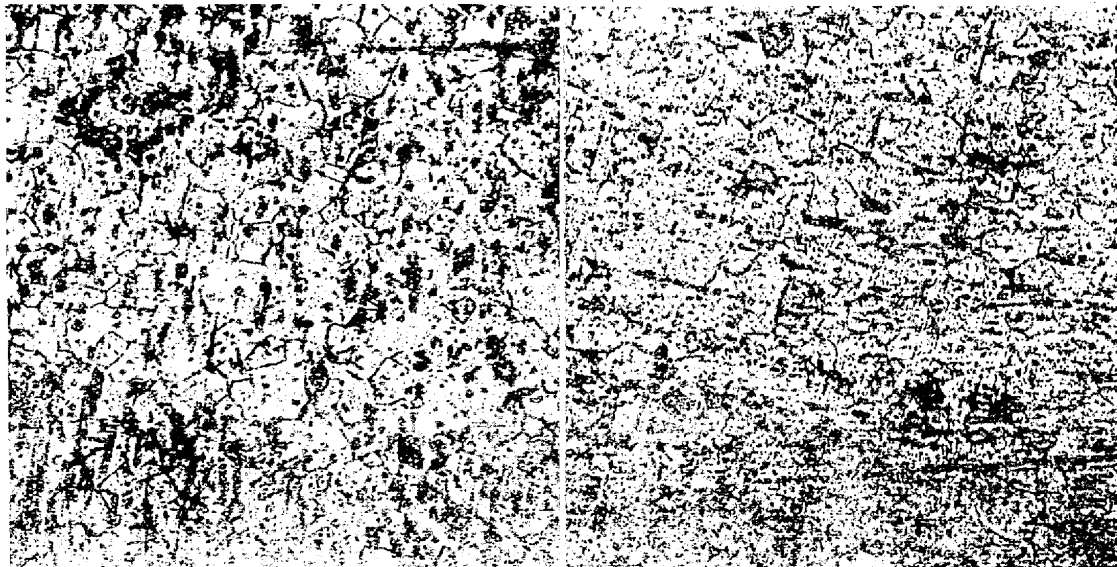
第 15 圖 Fe-Cr-Al 合金の結晶粒成長と添加元素の影響



第16圖 Fe-Cr-Al合金の脆化と添加元素の影響

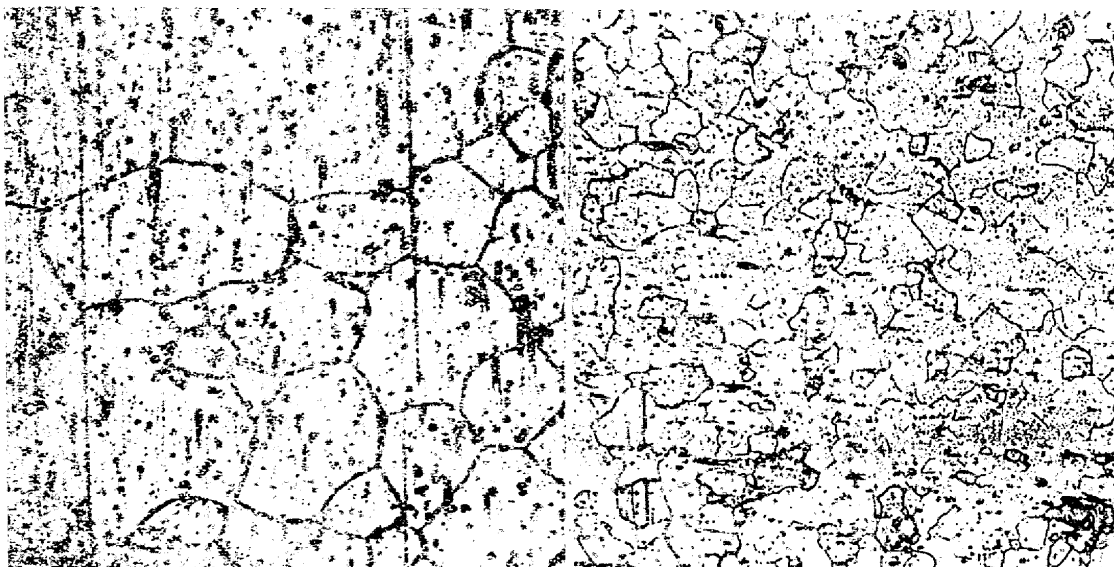


第18圖 Fe-Cr-Al合金の加熱後に於ける屈曲性の變化  
 上 Cr 25%, Al 4%, Ta 1% 合金  
 下 Cr 25%, Al 4% 合金  
 共に 1,100°C 8h 加熱後屈曲せるもの



× 80 Cr 24.75%, Al 4.20% 合金の加熱前の組織

× 80 Cr 25%, Al 4%, Ta 1% 合金の加熱前の組織



× 80 上記合金を 1,100°C 1h 加熱後の組織

× 80 上記合金を 1,100°C 1h 加熱後の組織

第17圖 Fe-Cr-Al合金の加熱前後に於ける顕微鏡組織の變化

之を前と同様の熱処理後捻回試験を行つた。其の模様も第 14 圖に同時に示してある。之を見れば捻回数には加熱温度と共に漸次上昇し 800°C に於て極大を示し材質の充分軟化せられたる事を示す。更に加熱温度を上昇すれば捻回数は次第に減少し線引状態の如く脆くなる。此の捻回数と結晶粒成長率の二曲線を比較対照する時は全く良く合致し、結晶粒の成長が脆化現象の重大因子なる事を示して居る。こゝに於て Cr 25%, Al 4% 合金に第四元素を添加して其の結晶粒成長に及ぼす影響を調査した。

第四元素としては普通 Fe-Cr-Al 合金に不純物として入る Si, Mn 等は結晶粒成長に殆ど影響なく、之を防止する効果なき爲、一般に結晶粒微細化の効果ある Ti 1%, カンタル線として著名な Fe-Cr-Al 合金に含まれる Co を 2.74%, 稀有金属として Ta 1% 等を添加した數種の試料を調製した。之等の各温度に 1h 加熱せる結果は第 15 圖の如くである。Ti は幾分結晶粒の成長を防止するも大した効果はない。Co は成長を著しく促進する。之はカンタル線が加熱後著しく結晶粒成長し脆化する事と符合する。

然るに Ta は殆ど結晶粒成長を生じない。従つて高温加熱後の脆化も生ぜざる筈である。之を更に検討する目的を以て、上記試料の他 Cb 0.3%, C 0.25%, B 0.8%, 80/20 = クロム線等の試料をも加へ之を 1mm の線に引抜き各温度加熱前後の捻回数を測定した。

其の結果は第 16 圖に示す如く結晶粒成長を生ずる Co, Ti 等を添加せるものは、添加せざるものと同様或は其以上著しい脆化を示す。之に對し Ta, Cb, C, B 等を添加せるものは 80/20 = クロム線に劣らず高温加熱後靱性を失はない。就中 Ta 及び Cb を添加せるものは成績優秀である。

尙参考のため Cr 25%, Al 4% 合金及び之に Ta を含めるものの加熱前後に於ける顯微鏡組織の變化を第 17 圖に示す。1,100°C 1h の加熱により、Cr 25%, Al 4% 合金は結晶粒著しく成長するが、之に Ta を含む合金は殆ど變化しない。

第 18 圖は Cr 25%, Al 4% 合金及び之に Ta を含む合金を矢張り 1,100°C 1h 加熱せる後彎曲せしめ、前者は折損せるも後者は彎曲可能なる事を示すものである。

## VIII. 結 言

電熱用 Fe-Cr-Al 系合金に於て Cr 5~35%, Al 1~7% の試料に就き、硬度、電氣抵抗及び温度係數、耐酸化性、熱膨脹、磁氣變態、比重等の工業上重要な基礎的性質に

關して系統的研究を行ひ、其の夫々に就て三元系の性能曲線圖を完成した。試料の加工に際しては豫想される如く、Cr 及び Al の増加と共に加工困難となるが、Cr 35%, Al 5% の如く高 Cr 高 Al の合金も尙普通の加工法にて加工可能なる事が判つた。

加工後の試験片に就ての研究結果を要約すれば次の如くである。

(1) 硬度試験の結果は Cr 18% 以下又は Al 0.3% 以下の試料を除き、一般に加熱後緩冷せるものより急冷せるものの方が軟かく、軟化に際しては約 800°C に加熱後急冷する熱処理法が適當である。且 Al が 0.3% 入れば Cr 5% で既に  $\gamma$  区域は消失する事が判つた。

Fe に Cr 及び Al を加ふれば夫々の濃度に比例して漸次硬度を増加するが、實用成分範圍 (Cr 20~25%, Al 3~5%) のものは軟化状態でブリネル硬度 200~220 を示し、ニクロムの 150~180 に比し幾分硬い。

(2) 固有抵抗を測定し Fe-Cr-Al 系三元等固有抵抗曲線圖を完成した。之に依れば固有抵抗は Cr より Al の添加によつて著しく増加し Cr 20%, Al 5% のものは固有抵抗 140  $\mu\Omega\text{cm}$ , 更に Cr 25%, Al 6% のものは 160  $\mu\Omega\text{cm}$  の如くニクロムの 105~115  $\mu\Omega\text{cm}$  に比し著しく大なるものが得られる。

又温度係數測定の結果は一般の固溶體合金と同様固有抵抗大なるもの程温度係數は小さい。従つて高温に於ては常温に於ける程の固有抵抗の差はない。高 Cr 高 Al の合金の抵抗温度特性は低 Cr 低 Al の合金の如く單調増加を示さず途中にて若干負となるものがある。之は恐らく固溶體に於て規則→不規則變化を生ずるに非ずやと考へるが詳細は更に充分の研究結果に俟たねばならぬ。

(3) 耐酸化性試験の結果 Al 量が少い時は Cr 量の多いもの程耐酸化性大で、Cr 量が充分に多ければ比較的少量の Al で耐酸化性良好となる。

一般に Cr 量を一定にとれば Al 量と共に耐酸化性増大し殊に Al 3% 以上のものが良い。Al 3% 以上の場合は Cr 5% より 10%, 15% と漸次耐酸化性を増すが Cr 15% 以上、20%, 25%, 30% と増しても耐酸化性増加の傾向は餘りない。

(4) 熱膨脹係數は Cr を一定とすれば Al の添加により其の値を幾分増加する。Cr は Al 少量の時は其値を減少せしめるが Al が多くなると其値を多少増加する傾向がある。

實用成分範圍のものは  $13 \times 10^{-6}$  程度の熱膨脹係数を有しニクロムと大差ない。

(5) 電熱用 *Fe-Cr-Al* 系合金は 80/20 ニクロムと異り強磁性を有し、其の磁氣變態點は *Cr* 及び *Al* の濃度に伴ひ漸次増加するが、*Al* は供試成分範圍に於ては左程影響はない。實用成分範圍に於ける磁氣變態點は  $550 \sim 600^\circ\text{C}$  である。

(6) 比重は *Cr* 及び *Al* の濃度に従ひ減少するが、特に *Al* に依る影響が著しい。實用成分範圍のものは  $7.10 \sim 7.25$  の値を有しニクロムの 8.4 に比し小である。

(7) 電熱用 *Fe-Cr-Al* 系合金の代表的成分として *Cr* 25%、*Al* 4% の合金に就て結晶粒の成長を試験せる結果、本合金は  $900^\circ\text{C}$  以上に於て著しく粒の成長を起し、温度と共に成長度を増して、遂に高温度に保持すれば線の直徑に等しき粒となるに至る。其の結果機械的に極めて脆弱となる事が観察される。之を更に定量的に調べるため *Cr* 25%、

*Al* 4% の試料竝に之に第四元素を添加して得たる數種の試料を何れも直徑 1mm の丸線に線引し、之を捻回試験を行つた處極めて明確に其の影響を知る事が出來た。即ち捻回数は試料を加熱する事により漸次増加するが、 $800^\circ\text{C}$  に於て一般に極大を示し之以上になる時は急激に減少する。之は全く結晶粒の成長に基因するもので、加工、熱處理又は使用の際には充分注意を要する所である。

此の現象はカンタル線の如く *Co* を含有する電熱線に在りては特に著しく、之等の使用に際しては特に注意する必要がある。尙此の現象は *B*, *C*, *Ta*, *Cb* 等の特殊元素を添加する事によつて相當程度防止出来る事が判つた。

終りに臨み本研究の發表を許可せられたる東邦産業研究所理事長松永安左衛門氏、東京試験所長松繩信太博士にお禮申上げると共に、研究遂行に當り内外より協力せられたる各位に對し深甚なる謝意を表するものである。

#### 印度産コークス用炭の特質に関する研究 (抄録)

(R. K. Dutta Roy, Records of the Geological Survey of India, Professional Paper 3 號, 75 卷, 1940 年 5 月) 印度に於ては鐵鑛製鍊用の良質コークス用炭は一定期間しか利用し得ないことが確認されてゐる。本報告は著者が印度政廳の設立した採炭委員會の依頼に依り、印度産コークス用炭の (1) 粘結率 (2) 膨脹性 (3) 分解及び軟化點 (4) 配合等に關する研究結果である。此の報告より、印度産コークス用炭の利用に對し重要な節約を期待し得ることが明らかにされた。(製鐵技總 2 (昭 17) No. 4. 354)

#### 壓延に超遞減の應用 (抄録)

(S. A. Kushakevich, Metallurg, 10~11 號, 1939 年, 頁 123~140) 壓延に於ける超遞減とは Kirchberg の計算法に依り、1 回の壓延に於ける延伸係数が 2 以上、即ち 50% 以上の減厚を言ふ。1 回の壓延に於ける材料の長さの増加は、引拔類似の經過を採らず、寧ろ 3 軸壓縮の結果であるから、50% 以上の減厚は材料を破壊せしめると言ふ古い理論は誤である。著者は數種の鋼材及び非鐵合金の壓延結果を以て示してゐる。超遞減法は鋼塊及び半壓延材何れの熱間壓延に於ても組織及び機械的性質を害する事なく實施し得る事が判明した。最後にロールに對する壓力、壓延に際し超遞減に依る壓延材料のロールへの轉合、此の壓延法が壓延機の能力に及ぼす影響、壓延中の熱損失の減少に依り再熱回数を減じ燃料を節約した成績等を數字的に考察してゐる。エネルギー消費量の増加は、超遞減法に對する著しい障壁である。(製鐵技總 2 (昭 17) No. 4. 371)

#### 彈性變形を考慮に入れての修正及び其の實驗的研究

(Yu. M. Faynberg, Metallurg, 10~11 號, 1939 年, 頁 141~148) ロールの彈性變形を測定する方法を研究した結果である。ロールの間隔を定める際に、すべての彈性變形を考慮に入れる事の必要性並に此の正確なることは特に連続壓延の場合に著しく重要な事を指摘してゐる。計算に依つてロール及び支臺の全彈性變形を推定する事は困難であり、又見込でやつて修正する方法の厄介なのに鑑み、著者はロールが相互に壓迫される際に螺閉用電動機に消費される動力の變化をオッシログラフで記録せしめ、之より間接に變形量を測定する新方法を案出した。電動機の動力損失並に壓延の際ロールに及ぼす鋼材の壓力は勿論考慮されてゐる。(製鐵技總 2 (昭 17) No. 4. 371) (抄録)

#### ソ聯に於ける壓延工場の専門化と新形鋼 (抄録)

(V. Volobney, Stal, 10~11 號, 1939 年, 頁 30~37) ソ聯に於ける特殊な壓延形鋼の需要を論じてゐる。又種々の工業に要求される種々の形鋼は何等重複無く満足せしめる必要があると指摘してゐる。著者は 31 個所の消費者宛に所要形鋼の種類を照會し返答を得た。此の中には鐵道敷設用、鐵道車輛用、自動車及び牽引車構造用、工作機械用、建築用、鑛業及び化學工業設備用、電氣及び動力用其の他の用途に對する多數の新形鋼がある。是等の形鋼を用ひた場合の利益並に特徴、製造を論じてゐる。(製鐵技總 2 (昭 17) No. 4. 371)