

雜 錄

製 鋼 用 電 極 に 就 て

林 範 二 *

- I. 緒 言
- II. 電極の原料
- III. 電極の製造工程
- IV. 電極の物理, 化學的特性
- V. 電極のサイズ及び品種の選擇
- VI. 人造黒鉛電極と天然黒鉛電極の使用上の比較
- VII. 熔鋼中に起る電極關係の事故
- VIII. 結 言

I. 緒 言

製鋼用電氣爐と電極は不可分の關係にあつて何れの一つも獨立しては存在し得ない。従つて電氣爐の發達は必然的に電極の發達を促し、延いては電氣製鋼技術の水準を高め來つたものと云ふことが出来る。而して内外に於ける電極發達の徑路は我國は大いに歐米諸國と事情を異にしてゐる。即ち製鋼用電極は歐米に於て最初コークス質の電極が大いに使用せられたが、其後コークス質電極の黒鉛化が Acheson 氏に依り發見せられて以來、人造黒鉛電極の製造が盛に行はれて來た。其等の原料は何れも無晶系炭素質なることに變りない。然るに我朝鮮は世界の五大黒鉛産地たる關係上、先づこの天然黒鉛を主要原料として發達し、本邦獨特の電極が製造せられた。

製鋼用電極の原料は鱗狀黒鉛を主とするもので、歐米の所謂カーボン電極より遙かに優秀なるものである。歐米特にドイツの如き自國に黒鉛産出の尠い國では専ら無煙炭或はレトルトカーボンの如き硬質の原料を以て製造せられ、電極の特性から見れば極めて融通性の少ない所謂カチカチの電極であつて我國の天然黒鉛電極の如き軟質のものは到底考へ及ばざるところであつた。

それ程我國の天然電極は獨特な發達をなしてきたのである。然るに其の後人造黒鉛電極の製造が我國に於ても始められるに至り、其の優秀性は漸次天然黒鉛電極の分野を蝕しこれに代らんとする傾向が著しくなつて來た。

II. 電 極 の 原 料

我國は黒鉛産出の豊富な朝鮮を控へると雖も、其の大部分は土狀黒鉛であつて、製鋼用電極原料たる鱗狀黒鉛は電極の需要増加と相俟つて必ずしも満足なる生産狀況を見てゐない。更に最近は配給統制に依り著しく其の供給量を制限せられつゝある状態である。従つて今後は人造黒鉛電極に比し比較的低廉な天然黒鉛電極の生産は大して増加を期し得ず、然も製鋼方面は時局の要求に應じて専ら膨脹の一途を辿りつゝあるため、これに要する電極は勢ひ人造黒鉛電極を以て補給せざるを得ないことになるであらう。

然るに人造黒鉛電極の原料たるピッチコークスは現下の生産狀勢ではアルミニウム製錬用陽極に非常に多量を要し、製鋼用に振り當てらるべき量は相當窮屈なるを免れない。併し乍ら共榮圈内に於て産出せられる石油コークスが内地にどンドン搬入せられる際は決して悲觀的のものでなくこれに依つてアルミニウム用陽極の原料は大部分賄はれるものと推察せられ、従つて内地産のピッチコークスは殆ど大部分が製鋼用に振り向けられることゝならう。

尙、國內製鐵工場の増産設備は日を追つて完成に近づきつゝあるを以て、ピッチコークスの原料たるピッチの産出は一層増加の傾向を迎ることゝなり、人造黒鉛電極の原料は今後非常に樂になるものと推察される。昭和 15 年度に於ける國內ピッチの産出は適確なる統計はないが、石炭系のもの約 190,000t にして石油系のもの 20,000t と推定せられる。これに對し主なるピッチの需要は

煉 炭 用	66,000 t
鑄物コークス用	21,000 "
電極バインダー用	23,000 "
ピッチコークス用	92,000 "
(人造黒鉛電極用)	78,000 "
(天然黒鉛電極用)	
合 計	202,000 "

實際はこれ以外の用途に、ピッチの需要は相當量に上るものと見られ、需給の不均衡は共榮圏の確立まで漸次其の懸隔の度を高めるものと推定される。

次に電極原料となるべき鱗狀黒鉛は黒鉛業者に於て粒度の上から、所謂 C と稱せられるものであつて、鱗狀結晶の大なる A 及 B は何れも黒鉛ルツボ製造用に供せられる。従來 C 級鱗狀黒鉛は朝鮮産鱗狀黒鉛を主としこれにセイロン、マダガスカル等の外國産鱗狀黒鉛を適宜配合し、電極の特性たる電氣抵抗及び酸化消耗度を適當ならしめて來た。然るにこれ等外國産鱗狀黒鉛は其後入手全く杜絶し、且つ鱗狀黒鉛の需要は増加する一方である所から朝鮮産のもののみでは不足を告げるやうになり、漸次品質も低下して従來の様な土鉛系の見事なものが市場から姿を消すに至り、最近では極めて微結晶の鑽石をも鱗狀黒鉛の原料に當てられ、且硬質の土狀黒鉛を混入して灰分の低下を圖つてゐる向もある。従つてこれ等の原料のみを以て製造せられるならば製鋼用電極は従來品に比し品質の低下を免れぬ。

爰に於て最近では各電極製作者が自家に於て再精錬を行ひ、或は低級原料に特殊の處理を施して鱗狀黒鉛の代用となし、一意電極品質の低下を來さざるやう努力してゐる。製鋼用電極の最も重要な特性は電氣抵抗と酸化消耗の二つであつて、灰分含有量は電氣抵抗に依り制限を受ける、電氣抵抗は使用する鱗狀黒鉛の所謂黒鉛化度の鱗片結晶の大小或は其の形狀に左右されることが多

* 昭和電極株式會社

い、灰分もこの抵抗を増す因子ではあるがさしたる影響はないやうである。酸化消耗度は電氣抵抗の變化と大體に於て一致してゐる。即ち結晶の大なるもの程酸化消耗度は小である、この酸化消耗度は原料の鱗狀黒鉛が良好であつても、これを以て製造した電極が必ずしも良好であるとは限らない。實際に電氣爐に於て使用する際に黒鉛結晶そのものが非常に酸化に對して抵抗性を有してゐても粒子と粒子とを繋ぐコークスの部分が弱點である以上電極全體の消耗は一部分は電極の製造技術に左右せられるものと云ふことが出来る。

次に製鋼用電極原料として電極製造上或は製品品質の上に要求せられる條件を概括すれば次の通りである。

1. ピッチコークス

成可く純度の高いもの程良いが現在では灰分含有量 0.7% 以下のものはアルミニウム用陽極に使用される關係上 1.0% 以上 2.0% 以下のピッチコークスを以て製造せられる。國産のピッチコークスは氣孔性大なるため適切でないが戦時下これが使用も已むを得ない状態である。この種のコークスは相當高温度に於て乾溜されてゐるやうであるが大塊の内部は依然未乾溜の部分を残してゐたり、部分的に夾雜物を混じてゐたりして品質の均等が望まれない。斯様に揮發分を部分的に多量に含んでゐるピッチコークスを此儘使用すれば生電極の焼成又は黒鉛化に於て電極にも龜裂を誘發するから十分焙焼して置くことが必要である。高温度に於て無晶系炭素→黒鉛の轉化を行はしめるために黒鉛化の容易なことも製造上の一條件となる。即ちピッチコークスはこれを製造したる元の炭質或はピッチの乾溜條件の相異に依つて黒鉛化に非常な難易があるらしく、これに依つて人造黒鉛電極の品質が殆ど決定的であると云ふも過言ではない。即ち黒鉛化の不良なピッチコークスを原料とする時は黒鉛化に必要以上の電力を用ひても依然黒鉛化状態は不十分である。

2. 鱗狀黒鉛

電極用の鱗狀黒鉛は先に述べた通り理想として電氣傳導度、酸化消耗度の小なることが條件であるが、これ等に關して絶體的な測定が困難である關係から、市場に於ては不十分ながら固定炭素量を以て品位が決められてゐる。然も其の固定炭素量たる實に大ざつばなもので、本當は灰分、揮發分、水分%を全體から差し引いた量なるべきにも拘らず市場では灰分%のみを差し引いたる殘部を固定炭素としてゐる。

C級鱗狀黒鉛では標準として 80% のものが電極原料に採用される。これも最近では鱗狀黒鉛の産出状態悪しきため或は精鍊用資材の出廻り不十分なるため精鍊を十分に行はずして灰分の可成り多いもの或は鱗片結晶の微細な鱗狀鑽石を粒碎し、ロール掛けしたるまゝのものを原料としてゐる關係上鱗狀黒鉛 C としては灰分低下の手段に比較的灰分少き土狀黒鉛を混入して全體の灰分含量を調整してゐる向きもある。

これ等は鱗狀黒鉛本來の特性を無視して唯純度のみ捉はれたる弊害であつて、斯る鱗狀黒鉛では到底從來の如き良好なる天然黒鉛電極が得られない。

從來酸化消耗度に就ては種々の測定方法が行はれてゐるが、何れも測定條件が微妙に影響する故一般向として採用することが出来ない。この外、電氣抵抗にしても原料撰擇に必要な條件ではあるが未だ一般向きな測定方法が規定されてゐない状態で電極製

作者の方では必要に迫られて、夫々獨特な方法で比較値を測定してゐる。

斯く試験したる結果が鱗狀黒鉛の購入毎に相當の開きがあるので、それに應じて特殊の原料を添加すること、或は特別の處理を施すことに依り、製品の品質を一定にするやうやつてゆかねばならない煩ひがある。

3. ピッチ

製鋼用電極の製造に際して粘結劑として使用せられるピッチ、タール等は成形、焼成の 2 條件を考慮し、更に製品の機械的強度をも適當ならしむるために特性上自ら使用し得る限度と云ふものが出來てくる。先づ成形の方から云へば軟化點が問題になる、一般に製鋼用電極は押出式の成形機で成形せられる關係上、軟化點が極端に高いか、低いかすると成形操作が困難になり、或場合は歪、レアー等を生じ或場合は締りの不均等を來す原因になる。即ち軟化點の餘りに低い物を使用すると成形機のシリンダー内に於て、コンパウンドの均一なる加熱は比較的容易であるが、押出に際してノズルの内壁に一部分へバリ着き、これが新しいコンパウンドを次々に装入してもなかなか取れ難いので、出てくる成形品は何れも其の部分に相當する個所で所謂へばりを生ずる。又軟化點の高過ぎるものではコンパウンドになして外氣中で脱氣するとき冷却して固まり易く成形機シリンダー内の均一な加熱が困難となり、それでなくとも一般に押出式成形法では、中心部程締め難い傾向ある所へ、シリンダー内部のコンパウンドの加熱が十分に行はれないため、適當な粘性が得られず一層締りの悪いものになる。尤もピッチの軟化點の問題は設備や作業方法に依つて決定せらるゝものであるから、一概に論ぜられないが概して 70~80°C の中硬質ピッチが使用される。

電極に於ては一般粘物製品や道路舗裝等と異なり粘結劑が最後まで始めの成分で止まるものでなく、焼成を行ふ關係から完全なる熱分解に依つて生ずる物質即ちピッチコークスの生成状態が製品の形を保つ上へ或は機械的強度に大きな役割を演ずるものである。従つて揮發分、水分%因いては固定炭素量を検討する必要がある。水分、揮發分含量丈なれば一般に粘結性少く、押出式成形に適せぬのみならずコークス化強度も概して低いのが普通である。ピッチの固定炭素量は一般に軟化點に比例するが、この例外が屢々見受けられる。即ち軟化點が比較的低く然も固定炭素量の大なるものであつて、これは石炭の乾溜方式の相異に依つて得られるタール成分の相異に基くものである。ピッチの劈開面を顯微鏡で調べて見ると明らかに其の相異が認められる。電極の粘結劑としてはこの例外品が最も適してゐる様に思はれる。尙ピッチのコークス化強度を高むるために種々な添加劑を用ふる研究も最近行はれ、粘結劑の重要性は一段と高められて來た。

4. タール

タールは電極の成形操作を容易ならしむるために用ひられる補助劑であつて、粘結作用には與らない。タール混入に依つて粘結劑たるピッチの溶解を促進し、軟化點の調節を行ふのが目的であるが、これに依つて成形機ノズルよりコンパウンドの押出を容易ならしめ、且成形壓力の調節をも行ふことが出来る。

併し乍ら、タールの混入量が増加すれば勢ひ粘結性を低下せしむることになるから混入量に自ら限度がある。何れかと云へばタールは使用せずピッチのみで電極を作る方法がよいのであるが

現在の所、成形操作に適したピッチが一定して多量に得られないために止むを得ず使用してゐると云ふことが出来る。

一般に市販のタールには相當量の水分が混入して居り、これが脱水を十分に行はないと思はざる不結果を招くことがある。

ピッチに於ても同様の事が云はれるが、一度混入せられたる水分は強く抱合せられる傾向があるので、これを完全に除去することは容易な事でないが、これを除去せねば製品に測らざる悪影響を與へる。従つてタール或はピッチの如きは乾溜業者に於てこの點に十二分の注意を拂はれるならば電極製作者側で脱水に要する手間が大いに省けるわけである。要之電極製造上結合劑としてはピッチを用ひずして精製タール中に適確なる配合原料を泳がせる程度の氣持に於てこれを加熱揮散せしめつゝ捏ね、十分ねばりを出さしめたるコンパウンドを造れば電極の強度を増大し得るも斯くては能率的にも經濟的にも許されざるものである。

III. 電極の製造工程

製鋼用電極の製造に當り、人造黒鉛質電極は原料たるピッチコークスの焙焼を十分に行ひ、揮發分 1.0% 以下とする焙焼工程を経て適當の粒度に粉碎、篩分を行ひ、ピッチ及びタールを混じて加熱の下に混捏する。この際天然黒鉛電極は鱗狀黒鉛を主要原料とするだけが異つてゐる。コンパウンドは何れも粒子間の結合を大ならしむるために十分脱氣して豫壓器にかけ一定の塊状にする。

次に押出式成形機にこの豫壓塊團數個を裝入し、外部より加熱し乍ら 2000~4000 lbs/in² の壓力を以て成形機ノズルより押出し、所定の長さに切斷して生電極とする。生電極のサイズはノズルを着け換へることに依り、所定の太さに變化することが出来るが成形機能力に依り自ら制限がある。

即ちカーボンシリンダーの直径と押出すべき生電極の直径との間に一定の關係範圍がある。この範圍を出ると成形操作が困難になるか或は十分なる成形品が得難い。

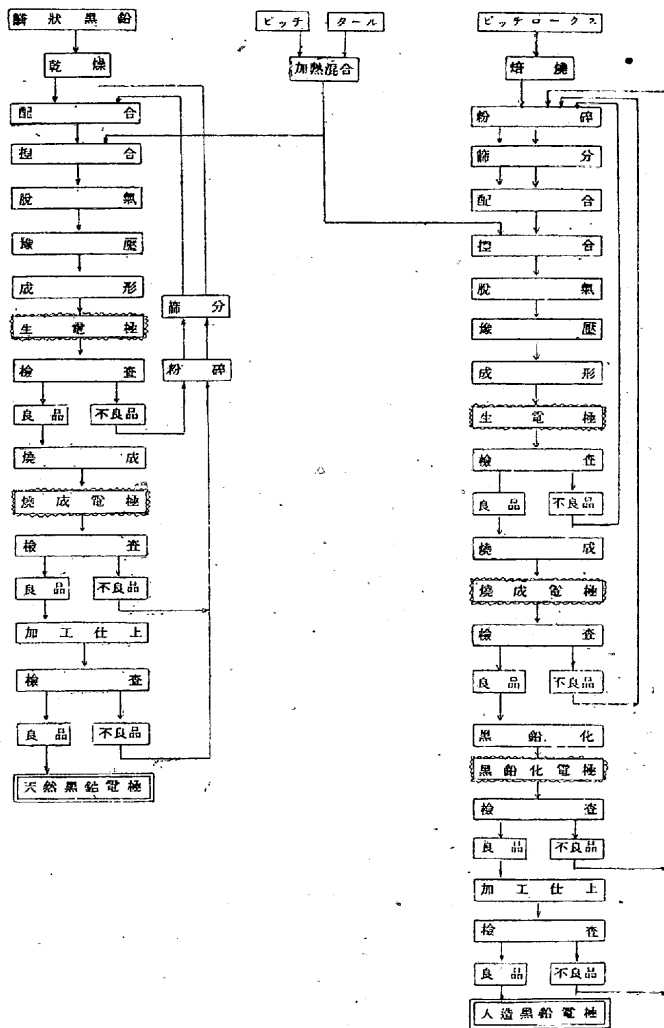
生電極は次に焼成窯に入れて粘結劑を分解炭化せしめる。生電極は焼成中一時流動状態を経過して漸次周縁より固化してゆくのであるが、この際ピッチ及びタールの乾溜或は熱分解に依つてガスの發生が著しいため十分緩かに加熱することが肝要である。

450~500°C 以上になると大體に於て粘性を失ひ、固化するものと見られる。然し乍ら尙高温度に於ても少量の揮發分を含有してゐるため更に加熱を繼續する。乾溜に依つて生成せられるコークス組織の加熱温度の上昇に従ひ漸次成長し(六角板状の分子構造が漸次その數を増加する) 700~800°C に於て物理的性質を急激に變化するものとされてゐる。實際の燒成に於ては 1400°C まで温度を上昇し、この温度に於て十數時間加熱を繼續したる後冷却に移す。斯くして燒成工程を完了したるものは天然黒鉛電極に於ては直ちに加工仕上を施して製品となるのであるが、人造黒鉛電極の場合は燒成品を更に電氣爐に裝入して黒鉛化する。此際燒成電極自體の抵抗とパッキングコークスの抵抗に依り 2300°C 内外まで温度を上昇せしめる。黒鉛化の良否は實際に試験した上でないと確かなことは判明しないが、大體に於て電氣爐の操作中黒鉛化の進行につれて電極自體抵抗が低下し、従つて爐全體の抵抗が漸次低下し終には殆んど一定になるが、果して完全な黒鉛化作業が出来て居るかどうかと云ふ判斷は茲にオプチカルピロメーターを用ひても内部の温度は 2000°C 以上なる爲め其儘測定は極

めて困難でこのエンドポイントを決めるには熟練と老巧なる技術に依るの外はなく、これが人造黒鉛電極の生命である。

以上の諸工程に於て一々嚴密なる音響並に形状外觀検査をなして不良品を除外するのは勿論であるが、成形工程に於て生ずる不良品並に押出成形の通弊として避け得られぬ、繼目部分等は再び粉碎して還元原料とする。この種の還元原料は或程度新原料に混入して生電極の成形を良好ならしめるものである。燒成不良品は破碎して堅緻な粒子原料が得られるからこれも電極の製造上不可缺のものである。

製鋼用電極の製造工程



IV. 電極の物理化學的特性

人造黒鉛電極は電氣爐で黒鉛化して製造せられたものであるから炭素粒子はもとより其等をつなぐ結合コークスも一樣に黒鉛となつて居り、僅かの灰分(1% 以下)を含有してゐるに過ぎないのであるから、等質と見て差支ないやうであるが、矢張り化學的に得られる反應生成物、溶解、或は再結晶等の純粹の生成物でない上に僅かの化學變化と大部分は固形物質の結合と云ふ物理的變化に依つて作られた電極は化學的、物理的性質に於て同種のものでも各個毎に其の性状が異つて居り、一個についても部分的に差異を生ずることは珍しくないから、確實な特徴を得ることが困難である。況んや天然黒鉛電極のやうに天然黒鉛と結合コークスよりなる異質のものに於ては其の差異は一層甚だしきものがある。

従つて電極の實際製鋼に使用する状態に支障を與へない基準を設け、成可く夫れに準じた特性試験がなされる程度である。製鋼用電極に於ては一般に次のやうな試験が行はれる。

化學試驗 水分、揮發分、灰分、固定炭素、酸化消耗度
 物理試驗 眞比重、見掛比重、硬度、抗張力、抗折力、抗壓力
 電氣化抵抗其他必要に應じ、膨脹度、熱傳導度、比熱等も測定される。

一般にこれ等の中二三の項目は尙省略されることがあり、實用試驗として音響、寸度、彎曲度等も検査される。

電極は同一品種でもサイズに依つて機械的強度、比抵抗等に著しい差異があるのはサイズが大になるにつれて製造上炭素粒子配合を幾分粗くしてゐるためと、この外に内部まで十分均質を期し難いためとである。

電氣協會に於て最近決定された製鋼用電極規格に依れば化學試験は上記の項目全部に就て規定されてゐるが、物理試験は眞比重、硬度、抗壓力等の項目を省略してゐる。

1. 化學試験

項 目	人造黒鉛電極	天然黒鉛電極
固定炭素 %	98.0 以上	80.0 以上
灰 分 %	1.0 以下	18.0 以下
揮 發 分 %	0.5 以下	1.0 以下
水 分 %	0.5 以下	1.0 以下
酸化消耗率 %	8.0 以下	10.0 以下

但し酸化消耗率の測定方法は 10×10×80mm の乾燥せる試片を 800°C に加熱せる内徑 30mm、長さ 300mm 水平管狀電氣爐に入れ 30mm 開放状態に於て同温度に保つて試料を取出し室温まで冷却の上、其の全面を羽毛にて軽く拂拭したる後、この減量の原因重量に對する百分比を以て表はす。

2. 物理試験

電 極 又 は ニ ッ プ ル 直 徑 mm	抗 張 力 kg/cm ²	
	人造黒鉛電極	天然黒鉛電極
110-190 (ニップル)	65 以上	45 以上
205-305	60 以上	40 以上
355-455	55 以上	35 以上
510	50 以上	

但し試験はセメント抗張試験片に準じ、切斷部に於ける斷面積は 20×25mm なり。

電 極 又 は ニ ッ プ ル 直 徑 mm	抗 折 力 kg/cm ²	
	人造黒鉛電極	天然黒鉛電極
110-190	140 以上	120 以上
205-305	120 以上	100 以上
355-455	100 以上	85 以上
510	85 以上	

但し抗折試験片は 20×20×80mm とし、荷重用尖端の角度は 60° 曲率半径は上 2mm、下 1.5mm とす。

$$F = \frac{3}{2} \times \frac{PL}{B^3} \quad \text{より計算す。}$$

F = 抗折力 kg/cm²

P = 試片を切斷せし時の壓力 kg

L = 支點間の距離 5cm

B = 試片の厚 2cm

種 別	人造黒鉛電極	天然黒鉛電極
見 掛 比 重	1.5 以上	1.6 以上

但し見掛比重の試験片は 20×20×25mm とし、其の重量及び試験片に少量のワセリンを塗布したる後、水中に於ける重量を測定し次式に依り算出す。

$$\text{見掛比重} = \frac{W - W_1}{W}$$

W = 試片の重量

W₁ = 同試片の水中重量

電 極 直 徑 mm	電 氣 比 抵 抗 ohm/cm ²	
	人造黒鉛電極	天然黒鉛電極
250-305	0.0011 以下	0.0016 以下
355-455	0.0012 以下	0.0018 以下
510	0.0013 以下	

但しケルビン式ダブルブリッジ法に依り電極の中央 500mm の比抵抗を測定するものとす。

3. 形状及び寸法

直徑 205 305mm までは標準の長さを 1200-1500mm とし、直徑 355-510mm までは 1500-1800mm とす。

項 目	寸 法 公 差 %	
	人造黒鉛電極	天然黒鉛電極
電 極 の 直 徑	+ 0 - 1.5 以下	+ 0 - 1.5 以下
曲 り (弦 法)	0.5 以下	0.5 以下
雌 ネ ジ 直 徑	+ 0.3 - 0 以下	+ 0.5 - 0 以下
中 心 偏 位	0.5 以下	0.5 以下
ニ ッ プ ル 外 徑	+ 0 - 0.3 以下	+ 0 - 0.5 以下

V. 電極のサイズ及び品種の選擇

電極を電氣弧光爐に使用する場合、電極の電氣的損失、熱的損失の 2 點に就て所望容量の電氣爐に對する電極の直徑並に長さを或は如何なる品種を選ぶべきかが重要な問題となるのである。

これ等の損失は最良の條件に於て最小になし得ることが先に C. A. Hansen 及び Carl Hering に依り理論的に述べられてゐる。これは實際上の問題にそのまま應用し得ないが、この結果を導き出す過程に就ては幾分参考になる點もあるので爰に其の概略を述ぶることとした。

電極のサイズを良い加減に採用する時は熱損失が増加して最早完全に熔解の目的を果し得ないやうになるのであつて、アークの發生する部分だけが熔解し他の部分は依然固體の形態で止まつてゐる。これは極端な例であるが、兎に角電極のサイズが適當でないといふ電氣爐の經濟的操作が不可能で特に電力代が高價であれば操作費が非常に嵩むことになる。従つて理論上最良の電極太さと云ふものが計算せられ、これに近からしめるならば斯る損失は最小限度に止め得る。

Hansen 氏は黒鉛電極及び無晶系炭素電極を平行的に試験して、次の様な概念を得てゐる。

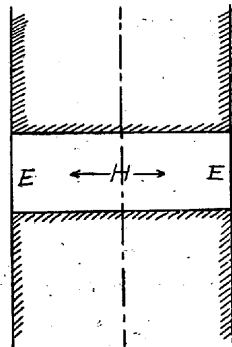
黒鉛電極の効率はその長さ及び電流密度の増加に従つて増加するが、併し或限度以上に電流を通ずる時は、電極は非常に高温度になり、延いては爐天井の煉瓦を破壊するに至る。無晶系炭素電極はこれに反し長さを増すに従つて効率を低下する。即ちジュール効果が傳熱損失より遙かに大となるためである。

茲で黒鉛電極の長さを増加して或る點に達すると損失は最小になる。これより長くなるとジュール効果は急に大となり、傳熱損失は減少するが、全體として損失を増すことになる。同様に電流密度が最良値を越して増加する時は最小損失も増加することになる。

Hering 氏は以上の概念から電極の太さ及び長さの最惠條件を理論的に求めた。併し乍ら電極の太さが増すと原料に關係なく如何なる條件に於ても傳熱損を増加し、電力損を減少するが、電極の長さを増せば傳熱損を減じ電力損を増す。ジュール熱及び傳熱損は共に電力に依り發生せられるものであるから全電力の損失を最小限度に止めることである。

このためには各電極材料の正確なる熱傳導度及び比抵抗を知ることが必要である。幸にもこれ等の値は既に測定されてゐる。併し乍ら電極は製品であり、何れも完全に均一ではあり得ない。従つて熱傳導度、比抵抗等の値は幾分電極の斷面に依つて差異があり、一本の電極でも各斷面に就て變化が認められるが斯様な變化は無視される。

Hering 氏は測定に使用したる電極の兩端面を除く外全部を熱の絶縁物にて被覆し、電極を電氣爐で實際使用する状態に近からしめた、被覆した電極の兩端を水で冷却し、電流を通じて發生したる熱が直接電極の表面より放散することなく兩端の方へ向ふやうにした。次の圖の通りである、



第 1 圖

この圖の E E は電極を示す。この電極に比較的大電流を通すと兩端を冷却してゐるから中央部 H に於て強熱される。ジュール熱が兩端冷却部に運ばれ、中央 H に於ては最早や熱の流れがないやうな状態に達する。斯様な状態に達した場合 H に於て此の電極を切斷したと假定して見る。然らば H は電氣爐内熱端、E は爐外の部分と同様の條件に看做することが出来る。今この電極に通じた電流が實際の電氣爐に於ける場合と同様であるとすれば、此の測定に於ける H 點と同様に電氣爐内部に於て發生した熱は移動しないと見ることが出来る。この條件が實際の場合に得られれば、前の假定から損失を最小ならしめることが出来るのである。

今電極を傳はつて爐外に放散される傳熱損失を Q_1 とし、電極のジュール熱損を Q_2 とすれば

$$Q_1 = 4l^2 k T \frac{q}{l} \quad Q_2 = i^2 Y = i^2 \rho_1 \frac{l}{q}$$

- 爰に k … 電極の平均比熱傳導度
- T … 電極の熱端と冷端との溫度差
- Y … 電極の固有抵抗
- ρ_1 … 溫度差に依つて生ずる比抵抗の平均
- l … 電極の長さ
- q … 電極の斷面積

従つて電極の冷端より放出される熱の全損失 Q は、

$$Q = Q_1 + \frac{Q_2}{2} = 4 \cdot 18 k T \frac{q}{l} + \frac{1}{2} i^2 \rho_1 \frac{l}{q}$$

茲で Q が最小なるためには

$$4 \cdot 18 k T \frac{q}{l} = \frac{1}{2} i^2 \rho_1 \frac{l}{q}$$

$$\text{従つて} \quad \frac{q}{l} = 0 \cdot 345 i \sqrt{\frac{\rho_1}{k T}}$$

これを Q に代入すれば

$$Q_{\min} = 2 \cdot 89 i \sqrt{k T \rho_1}$$

この式は平均比熱傳導度 k と溫度差 T 及び平均比抵抗三つの因子よりなり電極の大きさに關係がない。

$$\text{茲で比電氣傳導度を } x \text{ とすれば} \quad x = \frac{1}{\rho_1}$$

$$\text{上式} \quad Q_{\min} = 2 \cdot 89 i \sqrt{k T \rho_1} = 2 \cdot 89 i \sqrt{\frac{k}{x} T}$$

となる。この式は最小損失の電極材料として比熱傳導度と比電氣傳導度の比が最小なる物質であることが知られる、 k 及び x は物質特有の値である。

$$\text{再び} \quad \frac{q}{l} = 0 \cdot 345 i \sqrt{\frac{\rho_1}{k T}} \quad \text{に就て考察}$$

茲で材質、電流及び溫度差が與へられるならば、電極の損失はサイズが異つても常に斷面積及び長さが一定の比に變化してゆくやうにすれば、常に變りないことを示してゐる。

即ち上式に依つて最小損失の電極材料を節約せんとすれば、電極を出来るだけ短く、斷面積もこれに應じて小さくすることである。一般に電極の長さは始めに爐を操作する上に實際の條件で決められたもので或限度以上に電極を短くすることは出来ず、従つて斷面積は上式に依つて決定されるものである。

併し乍らこの決定方法は最初の假定通り電極の表面を熱絶縁物で被覆したる時に正しいのであつて、この假定の場合の絶縁層を通して現れる熱傾斜が實際の電氣爐の場合と同様であればこの假定は正しいのである。

併し斯うしたことが實際の電氣爐に不可能であれば、電極の長さ按比例して斷面積を増加することは、表面積の増加となり、従つて熱の損失を増加することになる。

$$Q_{\min} = 2 \cdot 89 i \sqrt{k T \rho_1} \quad \text{に就て}$$

$\sqrt{k T \rho_1}$ は電極の材質に依り定まる故に材質が同一であれば電流のみが熱損失を左右することになる。従つて電流を出来るだけ小さくし、電壓を高めればよいと云ふことになる。所が爐の全效率を考慮する時電壓のみを高めることは出来ない。

$$\frac{q}{l} = 0 \cdot 345 i \sqrt{\frac{\rho_1}{k T}} \quad \text{に於て}$$

$$\text{電流密度を } S \text{ とすれば} \quad S = \frac{i}{q}$$

$$\text{従つて} \quad l = 2 \cdot 89 \frac{1}{S} \sqrt{\frac{k T}{\rho_1}} \quad \text{となる。}$$

この式は電極の斷面積と長さ、これに適する電流密度との間の最良の條件を示すものである。

Hansen 氏は常溫より 3000°C までの ρ_1 及び k に對し、次のやうな値を與へてゐる。

	ρ_1	k		ρ_1	k
黒鉛	0.000812	0.16	炭素	0.00183	0.016

即ち黒鉛と炭素の平均比抵抗の比は 2.25 : 1 で、平均比熱傳導度の比は 10 : 1 である。

上記の値を $\frac{q}{l} = 0 \cdot 345 i \sqrt{\frac{\rho_1}{k T}}$ に代入すれば爰で電流を 2000 amp 熱端、冷端の溫度差を 3000°C とすれば、

$$\text{黒鉛の場合} \quad \frac{q}{l} = 0 \cdot 345 \times 2000 \sqrt{\frac{0 \cdot 000812}{0 \cdot 16 \times 3000}} = 9 \cdot 0$$

$$\text{炭素の場合} \quad \frac{q}{l} = 42 \cdot 57$$

即ち同一の爐に要求される同一の長さの電極に對して炭素電極の斷面積は黒鉛電極の $\frac{42 \cdot 57}{9} = 4 \cdot 73$ 倍でなければならない。

$\frac{q}{l}$ の關係が與へられた後は所要の電極の長さが爐の實際上の要求に應じて與へられるものと假定し、然る後許容電流密度に關し電極の斷面を決定することが出来る。

[Hansen 氏は電流密度に關して、黒鉛は 150 amp/in² (23 25 amp/cm²) とし、炭素に對しては 50 amp/in² (7.75 amp/cm²) で安全であるとした]

例へば 20000 amp に對して

$$\text{黒鉛電極の場合} \quad \frac{20000}{23 \cdot 25} = 860 \text{ cm}^2 = 133 \text{ in}^2$$

$$\text{この際} \quad \frac{q}{l} = 9 \text{ なる故、} l = 95 \text{ cm} = 37.4 \text{ in}$$

上の電極の長さが電氣爐の操作上満足出来るものとすればこれと同じ長さのものが炭素電極の場合にも必要である。

従つて炭素電極の場合

$$\frac{q}{l} = 42.57 \text{ より } q = 40.4 \text{ cm}^2 = 1591 \text{ in}^2$$

之より 20000 amp に對しての電極密度は

$$\Delta = \frac{20000}{40.44} = 4.9 \text{ amp/cm}^2 = 12.5 \text{ amp/in}^2$$

又、 $Q_{min} = 2.89i \sqrt{kT\rho_1}$ の式に黒鉛及び炭素の夫々の値を代入して、

$$\text{黒鉛の場合} \quad Q_{min} = 36 \text{ kW}$$

$$\text{炭素の場合} \quad Q_{min} = 17 \text{ kW}$$

即ちこの計算よりすると最小損失は黒鉛電極は炭素電極の約 2 倍になる。併し乍らこの事は先に述べた通り電極の周圍を絶縁した場合に當て嵌るのであつて、實際の場合は異つて来る。

先に炭素電極に付き算出したる電流密度 7.75 amp/cm² といふ數字は實際の場合に較べて非常に大き過ぎる。即ち計算から出る電極の長さは實際の電氣爐の構造から見る時、非常に短か過ぎるので、斯る大きな電流密度になつたので、この數字を實際には其のまま推奨出来ないわけである。

VI. 人造黒鉛電極と天然黒鉛電極の使用上の比較

1t 以下の小型爐 10t 以上の大型爐にありては、どうしても人造黒鉛電極でなければならぬ。それにしても夫れ以外中間の爐にありては天然、人造何れを得策とするかの問題が生ずるのである。

現在の所、經濟問題、原料關係に於ける我國の特殊な立場を考慮せられ、相當複雑な問題となつてゐる様である。

人造黒鉛電極と天然黒鉛電極との利害損失を少しく述べるならば、鋼の生産應當りの電極消費の點は人造黒鉛は高價であるが消耗量が遙かに小である。現今我國に於て大略同等の電極費用を以て人造黒鉛又は天然黒鉛電極が用ひられると云ひ得る。従つてその何れを選ぶかは、

第一 電極自體の性能上の比較及び附隨する關係事項の比較と

第二 各種操業の場合の特殊事情に依る主として冶金的な比較と

を行ふべきである。

1. 電極の構成成分

人造黒鉛電極は結合劑も一樣に純度の高い黒鉛である。天然黒鉛電極は天然黒鉛粒子 (15~20% の灰分を含む) と結合コークス

とよりなる。

2. 通電量の大きること

人造黒鉛電極は電氣抵抗が低く、接續が完全であるから通電量が大きく、小直徑のもので足りる。

3. 折損のないこと

折損は主としてニップル及びニップル接續部の電極に起る。雌ネジ及びニップル共材質部が強靱にて加工し易く、カッターを使用し得る故、接續が密に出来る。又電氣抵抗低きために温度上昇が少ない。従つてニップル接續部分よりの折損事故はない。

4. 純度高きこと

人造黒鉛電極では 90% 以上の純度があるが、天然黒鉛電極では 80% 位である。

5. 消耗量少なきこと

人造黒鉛電極は 600°C 以上にて始めて酸化されるが、天然黒鉛電極は結合コークスの部分が 500°C 以下で酸化し黒鉛粒子を脱落せしめることになる。

冶金的條件と品質

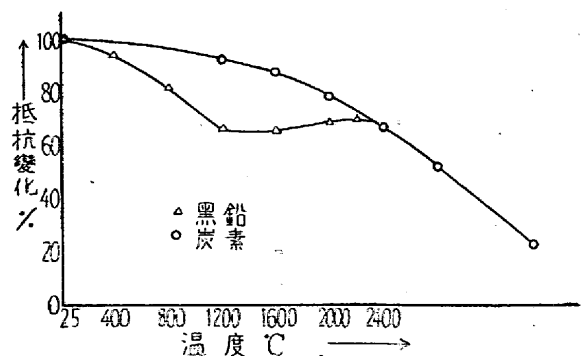
人造黒鉛電極を用ふると爐内の雰囲気は還元性であるが天然黒鉛電極では強還元性になり易い、従つて低炭素鋼には人造黒鉛電極を用ひ、普通炭素鋼には天然黒鉛電極を用ひる。他方操作電壓、電流の關係を見るに低炭素特殊鋼には電壓高く、電流密度小なるが良く、普通鋼にては低電壓大電流密度が有利の様である。

Bailey 及び Ridgway は電極をニップルで接續しこれに電流を通じて、電極自體がジュール熱に依り加熱せられ、表面温度が 500°C に達したる時の電極並に接續部の抵抗、最大電流、電流密度、電力損失等に就き測定を行つてゐる。測定に使用されたる電極品種は人造黒鉛質並に無晶系炭素質に就てであるが、無晶系炭素質電極は抵抗値より見て我國の天然黒鉛質 2~3 級品に相當す

第 1 表

直徑 (吋)	品 種	熱時 (表面 500°C) 比抵抗 Ω/cm^2			表面温度 500°C なる時の最大電流	電極密度 A/in^2	電極電力損失 kW
		電極	接續部	平均			
7	人造黒鉛質	0.0007	0.0009	0.0008	5500 A	143	2.9 kW
8	天然黒鉛質 2 級品	0.0020	0.0026	0.0021	3600 "	72	2.6 "
10	"	0.0023	0.0033	0.0025	5100 "	65	4.2 "
10	"	0.0026	0.0036	0.0028	5100 "	65	4.2 "
12	普 通	0.0026	0.0043	0.0030	5500 "	49	3.7 "
12	カーボン	0.0025	0.0036	0.0027	5500 "	49	3.7 "
12	"	0.0028	0.0044	0.0031	5500 "	49	3.7 "
12	"	0.0026	0.0038	0.0028	5500 "	49	3.7 "

(Bailey & Ridgway; Electro Chem. Soc)



第 2 圖 黒鉛及び炭素の電氣抵抗の温度に依る變化

る。従つて第一級品の天然黒鉛質のものと比較にはなつてゐないがこれを以て大體の傾向を知ることが出来る。

其の結果は第 1 表の通りである。

VII. 熔鋼中に於ける電極關係の事故

電極を實際に電氣爐に取付けて製鋼を行ふに際し、電氣爐装置の適否、電氣爐の操作方法、電極の取扱ひ、或は電極の品質如何により不測の事故を惹き起すことがある。斯る場合、製鋼能率は著しく低下し、電極の消費状態も遙かに大なるものとなる。概して電極の事故は單に電極其物の缺陷に起因する場合よりも上記の諸條件が重複して起つてゐる場合が多い。最もよくある例として熔鋼中に起るニップル接續部の折損に就いて考へて見やう。

先づ新しい電極を継ぎ足す場合にその接續に關する電極の取扱が十分であつたかどうか。

電極の把持装置その他の装置が使用中に狂ひを生じてゐなかつたか、どうか、製鋼材料の過裝入に對する給電方法に無理がなかつたか、或はニップルと電極雌ネジとの加工上の缺點、加熱時に於ける膨脹度、其他本質的な差異等、其の原因を仔細に検討すれば悉々其の確かに因つて來る點を掴むことが困難となる。

爰に於て筆者は斯る事故を未然に防止するため電極使用者各位に細心の御注意を喚起し度い。もとより電極製作者の方も不斷の研究に依り電極品質方面に於て事故絶滅に必死の努力を續けてゐる。

爰に電極關係の事故の主なる原因に付き電氣爐装置、電極の取扱ひ、電極の品質に分けて以下に列挙することとした。併し乍らこれ等が原因の全部でなく單に數例を擧げて注意を喚起したるに過ぎないのであるから其の點御諒察願ひ度い。

1. 電氣爐装置の不完全に依るもの

- 電氣爐天井の電極挿入孔の中心と電極ホルダーの中心が一致してゐない場合ニップルの折損が多い。
- 電極調節装置上下運動が不圓滑なる場合、接續部が弛み易く、従つてニップルの折損が多い。
- 電極とホルダーとの接觸不完全なる場合、電流密度の不平均を來たし、一方に過剰電流を通して電導ケーブルに不均等電流が通る様になり、給電設備の故障を惹起す。又ホルダーの接觸不完全なる部分に於て電極との間にアークを飛ばし、ホルダーを損傷せしめることになる。
- エヌノマイザーの作用が不完全又は爐蓋の電極挿入孔の歪又は過大のため電極周囲より吹かせると爐外に出てゐる部分で電極の酸化に依るくびれが甚だしい。熱のために電極とホルダーとの接觸を悪くし、爐天井で電流のリークを來たし、電力の損失を來すのみならず、爐天井の壽命をも短縮することになる。

2. 電極の取扱ひの亂暴又は不注意に依るもの

- ニップル接續に際して電極雌ネジ部分及びニップルのネジ部分を十分清掃し置き、ニップルをねじこむ際は、ニップルの長さの 1/2 を正確にねじ込み、然る後接續すべき電極を十分にねじ込むこと。この際接續部分に塵埃が介在する時はそのために抵抗を増加し、温度の上昇を來すことは勿論であるが、元來ニップルは電極の雌ネジを附してある底部との間に幾分の餘裕を附してある關係上、ニップルが一方の電極の雌ネジ部分に深くねじ込みすぎると、他方ではねじのかかりが少くなり従つて機械的強度を減

ずると共に使用中屢々ニップルの弛みを來す。従つてニップル或は電極端部よりの折損をまねくこととなる。

- 電極の運送中或は貯藏宜しきを得ざるため元來吸濕性なる電極は雨水其他の原因に依り甚しく吸濕することがある。斯る電極を豫め乾燥することなく使用する時は、電極の龜裂損を招く。

- 電極接續に際しては電極を必ず垂直の状態に保つべし。若し傾斜せる位置にある時はニップル或は電極雌ねじ部分を折損することある。

- 電氣爐公稱容量に對して最近は繁忙のために 2 倍以上の裝入をなしてゐることもある。或は又最近屑鐵少きため殆んで鉄鐵のみで製鋼を行ふこともある。斯様な場合には何れも製鋼に長時間を要し、且つ過負荷を免れぬ。従つて電極は必要以上の電流に耐へ得るやう高級な人造黒鉛質のものを選ぶことが肝要である。

- 電極は一般に細いもの程均質で通電密度も大であるが、太い物になると製造上如何にしても不均質を免れないため、通電密度も遙に小となる。従つて通電量は電極斷面積に正比例しないのが普通である。斯様な點より太物の電極を使用する際餘裕を見込んで置かないと失敗することがある。

- 使用電壓が高すぎる時は電極の消費量が多くなるから、適正な電壓を選ぶことが必要である。

- 小型熔鑄爐或は特殊の製鋼爐のやうなスタッサノ型の電氣爐では電極を傾斜したる状態で使用する關係上、電極懸吊装置或はホルダー等の設計が十分になされてないと使用中電極或はニップルの折損が非常に多いことがある。従つて斯様な爐に使用する電極は特別に折損に耐へ得ることが必要であるが、特にニップル接續部は特殊な補強をなすことも考へられてゐる。即ち普通の製鋼用電極を普通の觀念で使用する時は測り得ざる失敗をまねくものである。

- 電氣爐の操業中これに裝入する製鋼用材料が荒すぎるか、或は一時に多量を吸入する時、これ等が電極に衝撃を與へ折損せしむることがある。

- 電氣爐に鋼材料を裝入する場合、充填方法に十分なる注意を拂はないと、最初の通電で裝入物の膨脹により電極を破損することがある。従つてインゴット屑等は爐底に裝入し長物等が一部の溶解により電極に倒れ懸ることとなり、且つ電極に接觸する部分には比較的電流のよく通る鋼ダライ層を用ふべきで、斯くすれば嵩高のため裝入物の膨脹力を打消すのみならず電極自動昇降装置の爐に於ては電極を保護する効果がある。

3. 電極の製造不完全に依るもの

- 燒成の不完全なる電極は電氣爐に使用して電極自體のジュール熱に依つて急激に加熱せらるる故屢々龜裂を生ずることがある。

- 押出式成形法に於てはこの成形方法が不適當であれば、所謂レーヤを生ずることがある。斯る電極は音響検査に依り容易に識別し得られるものであるが、偶々斯様な電極を實際に使用すれば操業中電極表面より黒鉛片の脱落多く、鋼中の炭素含有量を増加する故、更に鑛石を加へて脱炭を行はねばならない手間がかかる。

- 一般に天然黒鉛電極に於て粒子部分たる天然黒鉛は人造黒鉛に比して酸化に對する抵抗性も大であるが、粘結劑の熱分解に

依つて出來た結合コークスは酸化に對する抵抗性はるかに小である。従つて粘結劑を多量に使用し低い壓力で成形した天然黒鉛電極は黒鉛粒子の脱落が多い。一般に電極に生じた横の龜裂は使用中折損を恐れあるものとして避くべきであるが、縦の龜裂は製造に際して上述の酸化を少くせしむるため少量の粘結劑を使用した時、或は成形壓力の過大なりし時に生ずるもので（其他原料粒子の大きさ、揮發分含量にも依るが）あるから斯様に縦劑のある電極は外觀こそ悪いがむしろ實際の使用に際して良結果を得る事もある。

d) 電極の仕上げ加工は製造工程中最も重要なものの一つである。折角優良なる電極素材が出來ても加工特に外徑仕上、螺子切り、端面仕上げ等が不正確であれば、實際の使用に當つて其の性能を著しく低下するものである。人造黒鉛電極は均質にして硬度低きため精密なカッター仕上げをなし得る點で殆んど間違ひないが、天然黒鉛電極は、結合コークスを含むためバイト仕上げによる外なく、従つて充分精密なる仕上げは不可能である。ニップル及び電極雌ねじ部分は單に電極の機械的接續に役立つのみで電流は相接する二つの電極端面を流すやうに設計せられてゐる故、兩端面の接觸が不完全であつたり、ニップルが使用中弛るむやうな甘い仕上げをしてあると螺子の部分が發熱し酸化が一層促進せられてニップルの折損或は電極雌ねじ部分の破損は當然起るものである。

第2表 製鋼に要する電力消費量 (1 噸當り)

鐵 鑛 石	→ 鐵	鐵	2000 KWH
鐵 鑛 石	→ 鋼		3000 KWH
冷 銑 鐵	→ 鋼		1500 KWH
熔 銑 鐵	→ 鋼		1000-1200 KWH
冷銑鐵及冷屑鐵	→ 鋼		900-1300 KWH
熔低炭素鋼	→ 純 鋼		200-300 KWH
熔低炭素鋼	→ 普通電氣鋼 (レール)		120 KWH
銑 鐵	→ 鑄 鐵		50 KWH

第3表 製鋼1噸當り電極及電力消費量

鋼の種類	電極の種類	電極消費量 (kg)
鑄 鐵	人造黒鉛質	2-5
	天然黒鉛質	4-10
鑄 鋼	人造黒鉛質	2-7
	天然黒鉛質	4-15
鋼インゴット	人造黒鉛質	4-10
	天然黒鉛質	8-18
特殊鋼	人造黒鉛質	5-14

第4表 エル式電氣爐容量と使用電極寸法

公稱容量 t	變壓器容量 KVA	電極直徑	
		人造黒鉛 電極 in	天然黒鉛 電極 in
0.25	(單) 290	3-4	-
0.5	(單) 420	4-5	-
1 2	600-900	6-7	7-8
3-3.5	1100-1350	8	9-10
5	1800	10	12
6-7	2100-2500	12	14-16
10-12	3000-3900	14	16-18
15	4500	16	-
20	5500	16	-
30	10000	18	-

又電極の外徑に於ける歪はホルダーとの接觸を不完全ならしめ、その部分に電弧を誘導しホルダーを傷めたりエコノマイザーの性能を低下することもある。

VIII. 結 言

以上は製鋼用電極の製造並に實地使用に關する事項に就て概説した。この中電極の製造に關する基礎的條件に就ては、詳細に互つて、山本榮治氏 (化工時報 601-611 號) の著述に盡されてゐるから、この方は特に重要事項のみに止まることにし、電極の實地使用方面を不満足ながら特に強調して來た積りである。實際の製鋼に際しては種々なる事情に拘束せられ、以上述べたる處に沿ひ得ない點もあろうし、或は實地作業に於て第三者的な説明が當て嵌らないと云ふ點も多々あることと推察せられる。この點諸賢の御寛恕を乞ふと共に電極の使用に際して一應顧る機會を得られるならば筆者の幸甚とするところである。

今や大東亞共榮圏は大稜威の下陸海將兵の必死の努力と國民の總力に依り着々建設せられつつあるの秋、輕金屬の製造と共に製鋼はこの雄大なる建設に直接間接に大なる貢獻をなしつつあることは今更論ずるまでもない。従つてこれ等工業に必須の副原料たる電極の使命は愈々重且つ大なるを痛感する。この秋に當り電極の圓滑なる供給はこれ等工業上、恰も蒸氣機關に於ける石炭のやうに活潑なる活動力を附與し、延いては共榮圏建設の活力根幹をなすものと看做すことが出来る。仍て電極の經濟的なる運用と電極主原料たるピッチョース、黒鉛、ピッチ、タール並に副原料たる石炭の充足確保は國家百年の建設大計に基き最も急を要する問題と斷じて敢て過言ではなからう。