UDC 549.322+622.7-1

X線ディフラクトメーターによる磁硫鉄鉱の 化学組成—結晶構造—磁性の研究

—磁硫鉄鉱の特性について(第5報)*—

正 会 員 早 瀬 喜 太 郎**

正 会 員 原 田 種 臣***

Relation between Chemical Composition, Crystal Structure and Magnetism of Pyrrhotite

— Study on the Properties of Pyrrhotite (5) —

Kiterô HAYASE and Taneomi HARADA

In this report the writers describe the results of their X-ray study of Pyrrhotite, investigated with the "Norelco" X-ray diffractometer.

The main results obtained are as follows:

- (1) X-ray profiles:
 - a) Employing the X-ray diffractometer, the writers obtained detailed X-ray diagrams of pyrrhotite which would not be expected by the powder photographic method.
 - b) It was confirmed that the (102) diffraction peak breaks up into two peaks, when the crystal changes into ferromagnetic state from paramagnetic one.
 - c) The specimen with a similar chemical composition to the artificial pyrrhotite showed almost the same α values.
- (2) Relation between chemical composition, crystal structure and magnetism:
 - a) The vacant Fe atoms in pyrrhotite crystal vary the chemical composition and decrease the crystal symmetry too. Consequently the (102) diffraction peak breaks up and the ferromagnetism occurs.
 - b) The point where both (102)_a and (102)_b peaks indicate the same diffraction intensity may be considered as the limit of a single phase of pyrrhotite. At this point pyrrhotite shows the strongest magnetism. If Fe atoms further decrease a new phase of pyrite grows up in pyrrhotite crystal.
 - c) It was proved by measurement of the susceptibility~temperature curves that the specimens showing the break-up of the (102) diffraction peak are magnetically homogeneous each other.

1. 緒 言

本報では、通称“ノレルコ”とよばれる North American Philips 社製の X 線ディフラクトメーター (X-ray diffractometer) によりおこなった天然に産する磁硫鉄鉱の X 線試験の結果について報告する。“ノレル

コ”は戦後最初に完成された X 線ディフラクトメーターで、この装置の出現によつて、従来フィルムを用いた X 線粉末法では得られなかつた結晶構造に関する詳しい数値が得られるようになった。わが国には1952年にはじめて輸入せられ、東京大学理学部に設置されて多くの研究者に利用されており、また現在では、ドイツ品や理学電機、島津製作所などの国産品も混えて X 線ディフラクトメーターは国内各地の研究機関に設置せられつつある。装置の詳しい説明については、すでに久野¹⁾、高野・飯高²⁾らの報告があるのでここでは省略する。

* 昭和32年4月22日受理

本報は昭和29年春季講演会で発表したものをその後補足したものである

** 工博、早稲田大学助教授、第一理工学部 鉱山学教室

*** 早稲田大学助手、第一理工学部 鉱山学教室

さて、磁硫鉄鉱のX線的研究は、従来主として人工試料を対象としてかなり多くの研究者によりなされてきたが、本報では特に化学組成——結晶構造——磁性の関係について詳しく考察したい*。

磁硫鉄鉱の化学組成——結晶構造——磁性の関係について、古くは Hägg ならびに Sucksdorff⁴⁾, Juza ならびに Biltz⁵⁾, Haraldsen⁶⁾, 最近では上田ならびにその共同研究者⁸⁾らは、化学組成の異なる種々の人工試料を合成して実験をおこなってきた。この結果、これらの研究者が一致して指摘する点は、

A-(1) 単相領域内では硫黄原子率 (Atomic % S) の増加にともなうて磁性が増大する。

A-(2) 単相領域内では硫黄原子率の増加にともなうて unit cell の大きさおよび軸率が減少する。

の二主要点で、つぎに掲げるような点については現在もなお問題となつてゐる。すなわち

B-(1) 単相領域から黄鉄鉱との二相領域へ移る正確な境界点

B-(2) 超格子構造と磁性とは直接関係があるか否か

B-(3) 廻折線分裂と磁性とののはつきりした関係

などで、さらにまた、天然に産する磁硫鉄鉱を対象とした上記のような組織的研究は今日までほとんどなされていない。

筆者らは、天然に産する磁硫鉄鉱の中からいくつかの試料を選び、「ノレルコ」X線ディフラクトメーターによりおのおののX線図を得、化学組成——結晶構造——磁性の関係を追求するとともに、上記人工試料によりなされた諸結果とも対比してみた。この結果

C-(1) 天然に産する磁硫鉄鉱のX線像も、人工試料により得られた結果と同様な傾向を示すこと。

C-(2) X線ディフラクトメーターの使用により、今までの研究者がX線粉末写真で得たX線図よりも精密なX線図が得られ、その結果上記B項についてかなり具体

測定条件: Front Reflection Region
Fek 30kV, 8mA, untiltered,
Slit: 1°-0.006"-1°
Scan. Speed: (a) 2°/min (b) 1/4°/min
Ratemeter: (a) 4-1-4, (b) 4-1-8

第1図 磁硫鉄鉱のノレルコX線図

* 磁硫鉄鉱の結晶構造に関する記載や、一部の文献の内容については、筆者らの“磁硫鉄鉱の特性について(第1報)”³⁾を参照されたい。

的な事実を新たに知ることができた。

2. 試料ならびに実験方法

まず、トロイライト（アメリカ、カリフォルニア産）および化学組成の異なる数種（帯磁率測定済み*）の磁硫鉄鉱（河山鉄鉱山）を選び、これを“ノレルコ”X線ディフラクトメーターにかけ、その自記記録装置によりおのおののX線図を得、これにより①化学組成と格子面間隔、②磁性と格子面間隔との関係を考察し、③つぎに、各鉄鉱山産磁硫鉄鉱を対象として、特定面の廻折線の分裂と磁性との関係を追求した。

3. X線試験

3.1 ノレルコX線図

(1) 実験結果

各試料のノレルコX線図を第1図に示す。第1図で縦軸はX線反射強度（ I ），横軸は反射角（ 2θ ）を示す。図中（b）は（a）図の（102）面を（装置のScanning Speedを遅くし、また、Ratemeterの指度を变化させて）特に拡大したものである。

第2図 磁硫鉄鉱のX線粉末写真（試料符号河山 1G）
〔ノレルコX線図との対比のため、 $2\theta 90^\circ$ 以下の像の(hkl)を記す〕

第3図 上田らによる人工試料のX線図
（粉末写真法背面）

* 帯磁率の測定は“磁硫鉄鉱の特性について（第2報）”⁹⁾で報告した磁力計によった。帯磁率の単位はすべてC.G.S.電磁単位で示す。

(2) 考察

第1図から、つぎのことが考えられる。

a ノレルコを使用することによって、従来の粉末写真（第2図参照）では得ることができなかつた精密なX線図が得られた。

b Hägg ならびに Sucksdorff¹⁰⁾ は硫黄原子率が50%のものに、Haraldsen¹¹⁾ は50~51%のものに、上田ら¹²⁾ は50.2%のものに超格子構造を認めているが（第3図参照）、本実験の試料には超格子構造を示すものが認められなかつた。したがって、超格子構造は常磁性から強磁性に移り変わる直前の常磁性領域内に出現するのか（本実験ではトロイライトと試料符号河山4Iとの中間の硫黄原子率を示すものがこれに相当すると推察される）、あるいは Sidhu ならびに Hicks が述べるように¹³⁾、「超格子は天然または人工の強磁性ならびに常磁性磁硫鉄鉱の両者に現われたり現われなかつたりするものである」のか、第1図からはいずれとも判定しかねる。

c 硫黄原子率あるいは帯磁率の変化にともなつて、格子面間隔に極めて明瞭な変化が認められた。この関係は次節に述べる。

d 常磁性領域から強磁性領域に移ると同時に、(102)面の廻折線が分裂をおこすことがはつきりと認められた。これは従来の粉末写真による研究では知られていなかったことである。

e また、廻折線分裂にともなつて、(102)面の反射強度が大きく変化することを新たに知ることができた。すなわち、分裂にともなつて、反射強度が新たな分裂線の成長とともに二分されることが明らかとなつた。この関係は後節に詳述する。

f 人工試料と近似の化学組成を示すものは、ほとんど一致した格子面間隔を示すことが認められた。

3.2 化学組成と格子面間隔

第1図より計算した(102), (110), (004), (201)各面の格子面間隔と硫黄原子率との関係を第4図に示す。

第4図からつぎの諸点が考察できる。

a 化学組成が異なるものの中には、人工試料と同様格子面間隔（ d ）に明白な差異が認められ、特にa軸方向の d の値には大きな差異はないが、c軸方向の d の値は硫黄原子率の増大にともない顕著な減少を示している。

b すなわち、第4図で、(110)面と(201)面はたいした変化はないが、(102)面と(004)面の d は硫黄原子率の増大にともない大きく減少している。

c 各格子面とも、硫黄原子率52.4%付近から52.7%

第4図 硫黄原子率 (Atomic% S) と格子面間隔(d)との関係

第5図 帯磁率(K)と格子面間隔(d)との関係

第6図 帯磁率(K)と(102)面反射強度(I)との関係

付近にかけての減少が一段といちじるしい。

d 約52.7%以上になると、実験の範囲内では d の減少は止まり、一定の値を示すようになって見受けられる。

e (004)面と(201)面は、(004)面の急激な減少のために52.4%付近で d の値が逆転している。これは上田¹⁴⁾も指摘している現象であるが、これに分裂という言葉を用いるのは適当でないと思う。

f 新たに知った(102)面の分裂は52.7%付近から瞬時に起こり、52.7%以上になると両分裂線[(102)_a, (102)_b]とも d は一定値を示している。

3.3 磁性と格子面間隔

帯磁率と格子面間隔との関係を第5図に示す。

第5図からつぎのことが言える。

a 格子面間隔 d の変化と強磁性の出現とは関係がある。すなわち c 軸方向に関係の深い(102)面と(004)

面の急激な減少にともなつて強磁性が惹起されているように認められる。

b ただし、いつたん強磁性が現われたあとの磁性の増大と d の値とはほとんど関係がないように思われる。

c (102)面の分裂線である(102)_aおよび(102)_bの d の値も、強磁性が出現したあとはほとんど一定値を示している。

3.4 磁性と(102)面の反射強度

(102)面の分裂線(102)_aおよび(102)_bのX線反射強度を縦軸に、帯磁率(−100~+150 mesh, 300 Oersted)を横軸にとると第6図(a)のようになる。(b)図は(102)_b面と(102)_a面の強度比を縦軸に、帯磁率を横軸にして示したものである。

a 第6図(a)は、磁硫鉄鉱の常磁性領域においては(102)面のa面だけしか認められず、このときのX線反射強度は非常に強かつたものが、強磁性の出現、さらに帯磁率の増大にともなつて(102)_b面が新たに成長して反射強度を増し、一方(102)_a面はb面の成長にともなつて強度が減少し、ついに磁性の最高点において両面の反射強度が等しい

値に達することを意味している。

b (b)図は、磁硫鉄鉱の磁性の増大と分裂面の強度は密接な関係があることを意味している。すなわち、 $I(102)_b/I(102)_a$ が増大するとともに帯磁率は直線的に増大することを示している。

3.5 磁硫鉄鉱の強磁性発生原因

Wyckoff¹⁵⁾は「磁硫鉄鉱結晶内の原子配列と、それが有する現在の磁気的性質との間には直接的な関係はなく、両者のX線像には差異が認められることなく、他の強い磁性をもつものよりもSの量がより少なく溶けこんでいることに起因する」と述べている。また Coetier¹⁶⁾によれば、「磁硫鉄鉱が磁性をもつ原因は結晶構造のみによつては説明できず、過剰硫黄の影響すなわちそれによつて(0001)面に異方性が現われ、そして格子の縮みがおこることなどを考慮する必要がある」と述べている。

筆者らの考えによれば、磁硫鉄鉱結晶内の原子配列(格子面間隔)と強磁性の大小とは、現象として一応関

* (102)面の分裂線の名称を仮りに d の値の大きな方を(102)_a、小さな方を(102)_bとする。

係がないと言えるかも知れないが、強磁性の出現と原子配列（格子面間隔）とは、3・3節で考察したように（c軸方向の格子面間隔の大きな変化からみて）密接な関係をもっていると考えなければならないと思う。またX線像に関しては、今回の研究により特に(102)面の分裂と、分裂線のX線反射強度の変化という点で、明白な差異が認められることが明らかとなった。さらに、Wyckoff が、化学組成の変化が磁性の強弱を左右すると述べている点に関しては、硫黄原子率の増大はFe原子の格子欠損により生ずるのであつて、これが結晶の内部構造に影響をおよぼし、(102)面の対称性を低くして廻折線分裂を惹起し（このとき強磁性が出現）、さらに対称性の低下とともに強磁性が増大すると考えるべきではないかと思う。(102)_b面の成長と(102)_a面の衰退、さらに強磁性の最大点に至つて両者のX線反射強度が等しい値を示すようになることは、対称性が低くなりその極限に達したことを立証するものではなからうか。

上記の諸点は、磁硫鉄鉱の強磁性発生の原因を現象論的に考察したものであるが、さらに理論的には広根・津屋ら¹⁷⁾によつて Néel の Ferrimagnetism の理論¹⁸⁾を応用した説明が最近なされている。

4. 補足実験 I

筆者らは第1報¹⁹⁾において、磁硫鉄鉱の硫黄原子率52.8%以上のものは、Juza らの考へ²⁰⁾にしたがつて、磁硫鉄鉱の単相領域の中に黄鉄鉱が混入して二相領域が形づくられるものであると考察した。しかし、その際のX線粉末写真では黄鉄鉱の像を認めることができなかった。それは、X線粉末写真では、他相が混入してもその混入度がかなり多量にならないと、明白な像として現われないことがあると考えられたためであつた。

また、さらに第2報²¹⁾で磁力計による帯磁率の測定結果により、52.8%から53.5%付近までが最も強い磁性を示す範囲であると認められた。しかし、52.8%より53.5%付近までの間が、黄鉄鉱を含まない単相であるかどうかは上記と同様の理由でX線粉末写真法では確かめることができなかった。

今回、X線ディフラクトメーターの使用によりこの点を確かめてみるため、硫黄原子率が53.5%になるように

第7図 黄鉄鉱人工混入試料と同一化学組成を示す磁硫鉄鉱のX線回折による対比

52.8%の磁硫鉄鉱に黄鉄鉱を人工的に混入（約5%）した試料と、もともと53.5%の値を示す磁硫鉄鉱とのX線図をえがいて両者を対比してみた。この結果を第7図に示す。測定条件は3・1節の Scan. Speed 2°/min の場合と同様である。

第7図よりつぎのことが言える。

- 52.8%の磁硫鉄鉱に黄鉄鉱を混入して53.5%にした試料には黄鉄鉱の(200)面が明らかに現われている。
- もともと53.5%を示す磁硫鉄鉱には黄鉄鉱の像が認められない。
- 上記より、磁硫鉄鉱の単相領域は53.5%付近までは続くことが確かめられた。
- 第2報でおこなつた帯磁率の測定では53.57%のものと53.66%のものはほとんど同一の値を示した。また、本報3・4節で考察した“最も強い磁性を示し、分裂格子の(102)_a面と(102)_b面とのX線反射強度が等しい値で、結晶の対称性が最も低くなつている”試料の硫黄原子率は53.66%である。このことから、磁硫鉄鉱単相領域の限界点は53.5%ないし53.7%付近にあり、それよりさらに硫黄原子率が増大するとFe原子の過剰欠損いかえればS原子の過飽和状態となつて、黄鉄鉱の相が結晶内部に新たに成長してくるものと推察される。

5. 補足実験 II

磁硫鉄鉱の磁性～温度曲線の研究は最近 Kiskyras²²⁾ 斎藤²³⁾らによりおこなわれ、また、人工試料に対しては Haraldsen の研究²⁴⁾がある。人工試料の結果に対する 広根・津屋らの考察²⁵⁾によれば「FeS_xにおける $x=1.10$ (硫黄原子率=52.4%) の磁性～温度曲線はピーク型 (A 型) を示すが、 $x=1.11$ (硫黄原子率=52.6%) の曲線はピーク型をともなつたワイス型の性質を示し、これは正常ワイス型 ($x=1.12$, 硫黄原子率=52.8%) とピーク型の二相の混合物である」と述べている。斎藤は天然産磁硫鉄鉱でピーク型とワイス型の性質を同時に示す試料を分別して、それぞれ一方の型の曲線を得たことを報告している。

筆者らは3章において、(102)面の廻折線が分裂をおこしている強磁性磁硫鉄鉱の格子面間隔はほとんど一定値をもち、その磁性の増大は分裂面である (102)_b面の新たな成長と深い関係があることを考察したが、これは確かに分裂であつて、分裂面のどちらか一方のピークを示す試料相互の混合物から得られた結果でないことは下記の帯磁率～温度曲線の結果から証明できる。すなわち、第8図はノレルコにかけた河山鉱山産各試料についての帯磁率～温度曲線で、測定装置として磁気天秤をもち、測定条件は試料の粒度 -100～+150mesh・磁場の強さ 300 Oersted とした際に得られた結果である。

第8図よりつぎのことがいえる。

a 各試料は、それぞれその磁性を示すほとんど均質な試料であつて、強弱相互の混合物 (二相) ではないと考えられる。

第8図 帯磁率 (K)～温度 ($^{\circ}\text{C}$) 曲線

b 試料符号 1G, 4G はワイス型に属し、187, 7G, 4I はそれぞれピーク型に属する。

c 各試料の磁性の転移点は前記各研究者による結果とほぼ一致する。

6. 結 言

本研究により得られた結果の概要を列記すればつぎの通りである。

(1) X線像について

a “ノレルコ” X線ディフラクトメーターを使用することによつて、磁硫鉄鉱に関し、従来の粉末写真では得ることができなかった精密なX線図が得られた。

b 常磁性領域から強磁性領域に移ると (102)面が分裂をおこすことがはつきりと認められた。

c すなわち、磁硫鉄鉱の常磁性領域においては (102)面のa面だけしか認められず、このときのX線反射強度は非常に強かつたものが、強磁性の出現、さらに帯磁率の増大にともなつて (102)_b面が新たに成長して反射強度を増し、一方 (102)_a面はb面の成長にともなつて強度が減少し、ついに磁性の最高点において両面の反射強度が等しい値に達することが明らかに認められた。

d 人工試料と近似の化学組成を示すものは、ほとんど一致した格子面間隔を示すことが認められた。

(2) 化学組成——結晶構造——磁性の関係について

a Fe 原子の格子欠損は、磁硫鉄鉱の化学組成に変化をあたえる (硫黄原子率を増加させる) とともに、内部構造に影響をおよぼして結晶の対称性を低下せしめると考えられる。

b この結果、(102)面は対称性の低下とともに分裂をおこし (このとき強磁性が出現)、さらに対称性の低下とともに強磁性が増大するものと考えられる。

c 対称性低下の極限 [このとき分裂線 (102)_a面と (102)_b面とのX線反射強度が等しくなり、磁性は最高値を示す] に達する点の硫黄原子率は 53.5 ないし 53.7 %付近で、この点は磁硫鉄鉱単相領域の限界点と推察できる。

d Fe 原子が限界点以上に欠損すると、Fe 原子の過剰欠損いかえればS原子の過飽和状態となつて、黄鉄鉱の相が結晶内部に新たに成長してくるものと推察される。したがつて、それからは磁性は直線的に減少してゆくものと考えられる。

e (102)面の廻折線分裂を示す試料は、それぞれの磁性を示す試料として均質なものであることは、帯磁率～温度曲線の測定から裏づけられた。

付 記

本報で示した化学組成 (硫黄原子率) と人工試料でた

された結果との間に見出される硫黄原子率のわずかなズレ ($\leq 0.2\%$) については、天然産試料の純度の点から考えて有意義なものとは思っていない。

謝 辞

おわりに、“ノレルコ” X線ディフラクトメーター使用の御便宜を賜った東京大学渡辺武男教授、トロイライト試料を御恵与賜った桜井欽一博士、磁気～温度曲線の測定に協力下さった当教室大学院学生鞠子正の諸氏に深甚なる謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 久野久：科学，24巻，5号，昭和29年5月，223～229頁
- 2) 高野幸雄・飯高洋一：鉱物学雑誌，2巻，3号，昭和30年5月，214～228頁
- 3) 早瀬・原田：日本鉱業会誌，67巻，754号，昭和26年3月，94～101頁
- 4) G. Hägg u. I. Sucksdorff: Zeit. f. phys. Chem., B22 (1933) 444
- 5) R. Juza u. W. Biltz: Zeit. f. anorg. u. allg. Chem., 205 (1932) 273
- 6) H. Haraldsen: Zeit. f. electro Chem., 45 (1939) 375
- 7) H. Haraldsen: Zeit. f. anorg. u. allg. Chem., 231 (1937) 78; 264 (1941) 169; 264 (1941) 195
- 8) 上田隆三・市ノ川竹男・光井武夫：物性論研究，33号，昭和25年12月，55～69頁

- 9) 早瀬・原田：日本鉱業会誌，68巻，769号，昭和27年7月，296頁
- 10) 上記 4)
- 11) 上記 6)
- 12) 上記 8)
- 13) S. Sidhu and V. Hicks: Phys. Review, 52 (1937) 667; 53 (1938) 207
- 14) 上記 8)
- 15) R. Wyckoff: The structure of crystals (Amer. Chem. Soc. Monogr. 6 series), New York (1924)
- 16) Doelter: Handbuch der Mineralchemie, 4, 1, Leipzig (1926)
- 17) T. Hirone and N. Tsuya: Phys. Review, 83 (1951) 1063～1064
津屋昇：日本物理学会誌，8巻，4号，昭和28年7～8月，275～277頁
- 18) L. Néel: Ann. d. Phys., 3 (1948) 137
- 19) 上記 3)
- 20) 上記 5)
- 21) 上記 9)
- 22) D. A. Kiskyras: Neues Jb. Min. Geol. u. Paläo., Bd. 80 Heft 3 (1950)
- 23) 齊藤友三郎：地質調査所月報，7巻，3号(1956)39～46頁
- 24) 上記 7)
- 25) 上記 17)

訂 正

67巻 754 号「磁硫鉄鉱の特性について(1)」	早瀬喜太郎 原田 種臣 正
頁 段 行	
101 右 14～15	ものでさへ僅かに 黄鉄鉱が 4.8% ものでも黄鉄鉱が 約16%

通産省 工業技術院

最近における試験研究所の研究実績

(資源技術試験所)

石炭を直接原料とする炭素構造材の製造に関する研究

従来、炭素材(炭素成型品および黒鉛成型品などをいう)は、天然黒鉛、無煙炭、油煙、コークス類あるいは一度黒鉛化したものなどを原料として、まず1000°C前後の温度で仮焼した後、タール、ピッチ等を結合剤として混合し、練合せ、成型、これを1,000°C前後の温度まで焼成して炭素成型品とする。さらにこの炭素質成型品を2,000°C以上の温度に加熱して黒鉛化し、人造黒鉛成型品とすることにより製造される。

これに対し粘結炭がそれ自身粘結性を有し、しかも比較的黑鉛化性が良い炭素原料であることに着目し、本研究を開始した。

この方法は原料粘結炭を平均20μ程度に微粉化し、結合剤を用いることなく、そのまま300～2,000kg/cm²の加圧下に成型し、これを800～1,200°Cまで加熱焼成して炭素質成型品を作る。この際、石炭が分解を

おこすとともに軟化、熔融、膨脹性を示す、300～500°Cの温度範囲で、加熱速度を5～20°C/hr程度に調節して石炭の分解速度と軟化、熔融、膨脹性とを適当に制御して、膨脹、変形などを妨げれば、真比重1.9、かさ比重1.6、気孔率17%、電気抵抗0.0045Ωcm、抗圧力1,700kg/cm²、抗折力400kg/cm²、ショアー硬度90、灰分3%程度の緻密、均質な機械的硬度の大きい炭素質成型品が得られる。

さらにこの炭素質成型品を2,000°C以上に加熱黒鉛化すれば、真比重2.0、かさ比重1.7、気孔率18%、電気抵抗0.0020Ωcm、抗圧力990kg/cm²、抗折力300kg/cm²、ショアー硬度75、灰分0.2%程度の緻密、均質な、機械的強度のすぐれた黒鉛質成型品が得られる。

本邦産粘結炭を大別すれば、強粘結炭、粘着炭、弱粘結炭の3種となるが、このうち強粘結炭は揮発分少

なく、軟化熔融性も小さいため、きわめて容易に良好な炭素材をうることができる。粘着炭は揮発分多く、軟化、熔融、膨脹性大なるため、焼成速度大なるときは、膨脹変形を起しやすい。また成型圧力の影きよう少なく、必ずしも大きい成型圧力が必要としない特徴がある。弱粘結炭は揮発分多くまた収縮性が大きいため、加熱速度の調節が比較的困難で加熱速度が早すぎても、おそすぎても良好な結果がえがたく、炭種により、それぞれ特有、適当な加熱速度がある。

このようにして得た石炭を直接原料とする炭素材は従来の炭素材に比しまさるとも劣らない性質を有し、特に機械的強度がすぐれ、また均質緻密である。これらの性状は構造材料用炭素材としてすぐれたものであるとともに、これらの炭素材は、電解板電刷子などの炭素製品としても期待できる性状を有し、石炭より直接炭素材を製造する方法を確立した。