

## 鉱物の高周波誘電分離\*

地質科学研究所地質鉱産研究所\*

岸本文男\*\*訳

近年, 地質・冶金関係のかなりの研究機関と多くの大学・専門学校が鉱物の高周波誘電分離の研究を進め, その方法はすでに多くの鉱物研究者の注目をあび, 次第に広く使われるようになってきた。そこで, 我々の初歩的研究の結果について簡単に紹介し, それによってすばらしい研究成果が生れることを切望する次第である。

### 1. 鉱物の分離に影響する主な要素

鉱物の高周波誘電分離に影響する要素は比較的多く, 電場の周波数, 電圧, 電力, 電極の形状, 誘電液の調合比, 電極・シャーシ間の電気容量の大小, 出力端子の絶縁の程度, さらに鉱物の粒の大小, 温度, 湿度などがそうである。しかし, ここでは, 電場の周波数・電圧・電力の選択結果が鉱物の分離に及ぼす影響についてだけ述べることにする。

鉱物の分極作用とそれが存在する電場の周波数との間には関係があり, その誘電率 $\epsilon$ , 媒質の損失角の正接関数 $\tan \delta$ は周波数を変化させるにつれて規則的に変化する。誘電率 $\epsilon$ は, 大きくみれば, 分極作用を左右する。こまかくみれば, 分極過程には一般に3種のタイプがある。すなわち, (1)電場の作用のもとで原子核をとりまく電子雲に変形・転位が生じ, 電子の転位による分極が生じる。このタイプの分極作用は周波数が0から可視スペクトルの範囲内で生じる。(2)原子が結晶格子中で運動して, プラスとマイナスのイオンが互いに反対方向に転位, すなわち, イオン転位による分極が生じる。このタイプの分極作用の周波数範囲は赤外線領域ないし准赤外線領域までである。(3)分子そのものが固有の双極子モーメントを備えている場合, その双極子が電場の作用のもとで電場の方向に配列し, そのために固有の双極子モーメントによる配向分極が生じる。この分極作用は無線電

信の周波数範囲(低周波, 高周波, 超高周波を包括)まで生じ, 比較的重要な分極作用である。

誘電率 $\epsilon$ は, 次の式であらわすことができる。

$$\epsilon - 1 = 4\pi N(\alpha_e + \alpha_a + \alpha_d)$$

$\alpha_e$ —電子転位分極率

$\alpha_a$ —イオン転位分極率

$\alpha_d$ —双極子モーメントの配向分極率

N—単位体積中の分子数

鉱物に作用する電場の周波数が光に近ければ近いほど,  $\alpha_e$ だけが得られるようになり,  $\epsilon$ は小さくなる。電場の変化がきわめてゆるやかなときには,  $\alpha_e, \alpha_a, \alpha_d$ は等しくなり,  $\epsilon$ は大きくなる。一般的には, 電場の周波数が小から大に変われば, 誘電率 $\epsilon$ はそれよりさらに幅広い範囲でもって大から小に変わる(第1図)。

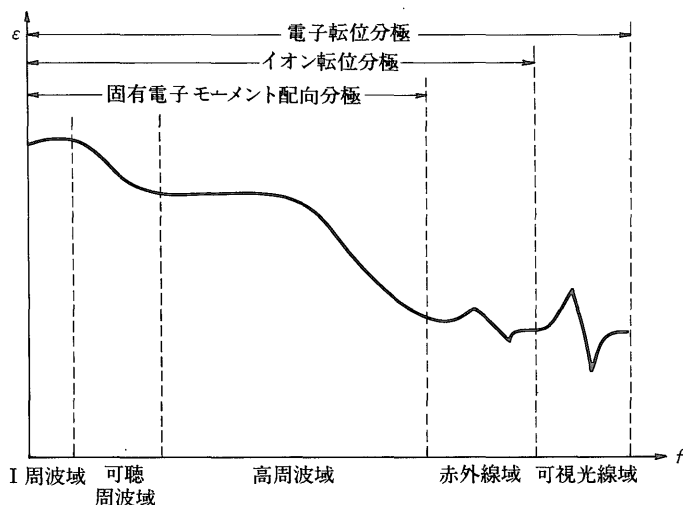
鉱物の高周波誘電分離法は, 誘電率 $\epsilon$ が周波数にしたがって変化するという特徴を利用したもので(第2図), 誘電率の差の小さい鉱物組合せの試料では低周波電場(50サイクル)が用いられることもあるが, 高周波電場では誘電率の差が大きい鉱物組合せの試料に適し, その差が大きいほど分離しやすい。

高周波誘電分離法は一つの電極を用いて鉱物を選択分離するので, 低周波電場で使われる2電極が金属鉱物の短絡を作り, それによって生じる, 黄銅鉱や閃亜鉛鉱の分離不能, 黄鉄鉱の純粋抽出の場合のような困難は避けられる。低周波電場の中では, 誘電分離は進まず, 周波数を変えてはじめて非常にすぐれた分離効果が得られる。

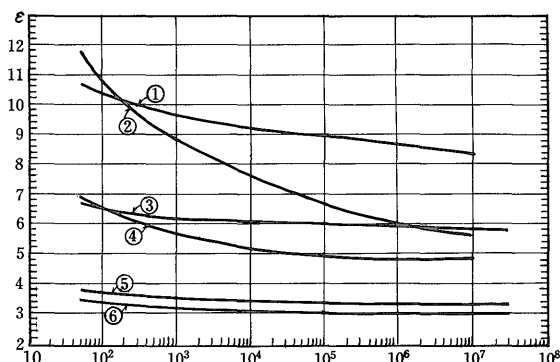
地質鉱産研究所, 広東省地質局実験室, 上海地質機器廠の共同研究によるGJF-1型鉱物高周波誘電分離機の使用周波数は1メガヘルツと30キロヘルツである。鉱物と誘電液の誘電率の幅が比較的広くなるように(2.24-81)十分保証し, 分離機がインピーダンス整合を常に実現し, それによって負荷の変化に適応しなくてはならないという要求に答えるために, 実際に用いられる周波数

\* 地質科学研究所地質鉱産研究所(1974): 鉱物的高周波誘電分離: 地質学報, 第2期, 193-201頁

\*\* 鉱床部



第1図 誘電率  $\epsilon$  と周波数  $f$  の関係



第2図 2・3の鉱物の  $\epsilon$  と  $f$  (サイクル/秒) の関係 (B. F. Howell, P. H. Licastro による)

- ① リシア輝石      ② 微斜長石
- ③ パーサイト      ④ 滑石
- ⑤ パーサイト      ⑥ 正長石

は1メガヘルツと30キロヘルツの付近にせまい周波数帯、すなわち30キロヘルツ $\pm$ 15%、1メガヘルツ $\pm$ 10%の幅がある。製作された分離機には、周波数が250キロヘルツと6メガヘルツのものもある。鉱物・誘電液の誘電率と電場の周波数の関係は比較的複雑な曲線を描くので、実験の中では、さまざまな周波数の場合の鉱物と誘電液の誘電率を随時正確に測定する必要がある。

実験室の単鉱物純粋分離の要求は強いが、その分離純度は主として選別試料中の鉱物の誘電率の差の大小及び誘電液の調整の適・不適によって決まる。そして、得られる鉱物の量と電場の電圧との間には密接な関係がある。

すなわち、電場に供給された鉱物が受ける作用力  $F_d$  は電場の強さ  $E$  の一次微分  $dE/dx$  に正比例する。すなわち、電圧  $V = dE/dx$  に正比例し、電極の鉱物吸着能力の大小は主として  $F_d$  値の大小で表わすことができ、したがって電圧は上記吸着能力の主要要素である。中国製 GJF-1型鉱物高周波誘電分離機は、3万ヘルツの場合に電圧が4,500ボルト、1メガヘルツの場合に電圧が2,000ボルト以上になるように製作され、電圧が異なれば、鉱物吸着能力も異なる。30キロヘルツで、三塩化カリアルキルを誘電液とし、金紅石を試料として行った実験の結果は、次の通りである。

第1表

電圧 (ボルト)	1,500	2,000	2,500	3,000	3,500	4,000	4,600
一次鉱物吸着量 (グラム)	0.271	0.594	0.649	0.854	1.034	1.403	2.424

一般に、誘電率が比較的低い非金属鉱物(モナズ石、長石など)に対しては、電場を比較的高くし、電圧を比較的高くすることが必要であり、金属鉱物に対しては、電圧を少し下げ、負荷を少し重くして効率を上げる必要がある。実際上、各種の鉱物ごとの電極吸着状態には、それぞれ適した電圧値がある。

鉱物の高周波誘電分離を行うときには、分離機の給電効率が鉱物分離時における高圧電極上の送出効率、高周波効率の高いトランジスタシステムの電極の消耗率、高周波電極の高周波発生作用低下量などに対する要求が満たされていないとてはならない。電圧と仕事率との関係を正確に調整することは、鉱物分離効果を高める重要

第2表

番号	鉱物組合せ	粒 径 (mm)	誘 電 液		吸 着 部 分		残 留 部 分		周波数 (ヘルツ)	註
			エチルアルコ ールと四塩化 炭素の体積比	$\epsilon$	鉱 物	分離 純度	鉱 物	分離 純度		
1	黄銅鉱, 閃亜鉛鉱	0.07-0.10	エチルアルコ ールに少量の水		黄銅鉱	95%	閃亜鉛鉱	95%	30キロ, 1メガ	用いたエチルアルコールは 純エチルアルコール 黄銅鉱の吸着状態は第1図 の通り(長く伸びた線状部 分の鉱物が黄銅鉱)
2	含Crパイロープ, 尖晶石	0.07-0.10	3.6:10.2	7.8	パイロープ	95%	尖晶石	80%	1メガ	
3	ジルコン, 細晶石*	0.10-0.15	2.8:5	11	細晶石*	90%	ジルコン	80%	30キロ	
4	閃亜鉛鉱, 螢石	0.10-0.15	エチルアルコ ール		閃亜鉛鉱	95%	螢石	90%	30キロ, 1メガ	
5	錫石, 細晶石*	0.10-0.15	エチルアルコ ール		錫石	95%	細晶石*	95%	30キロ, 1メガ	
6	マンガンタングライト, マンガン コロンバイト	0.10-0.15	2.5:6	9.5	マンガンコロン バイト	95%	マンガンタンタ ライト	95%	30キロ	
7	エシナイト, フェルグソナイト	0.10-0.15	エチルアルコ ール		エシナイト	95%	フェルグソナイ ト	95%	1メガ	
8	モナズ石, フェルグソナイト	0.10-0.15	6:9	12	フェルグソナイ ト	95%	モナズ石	95%	30キロ	
9	岩塩, 硼砂	0.10-0.15	4.3:17	7.2	硼砂	95%	岩塩	95%	30キロ	
10	電気石, 錫石	0.10-0.15	4.5:10	9.9	錫石	95%	電気石	95%	30キロ	
11	錫石, 黄玉	0.10-0.15	4:10	9.3	錫石	95%	黄玉	95%	30キロ	
12	カリ石膏, 石灰芒硝	0.07-0.10	4.1:17	—	カリ石膏	95%	石灰芒硝	90%	30キロ	
13	岩塩, ブレード石	0.07-0.10	3:15	—	岩塩	95%	ブレード石	90%	30キロ	
14	ユークセナイト, イットリウムパ リサイト	0.07-0.10	5:12.1	—	ユークセナイト	95%	イットリウムパ リサイト	95%	30キロ	
15	人工ダイヤモンド, 黒鉛	0.05以下	エチルアルコ ール		黒鉛	95%	人工ダイヤモン ド	95%	30キロ, 1メガ	
16	透輝石, アクチノ閃石	0.32-0.5	4:8	—	透輝石	95%	アクチノ閃石	95%	30キロ	
17	コロンバイト, 尖晶石	0.10	1:4	—	コロンバイト	90%	尖晶石	90%	20メガ	

\* 原文のまま 中国語以外での鉱物名が不詳

鉱物の高周波誘電分離(岸本文明記)

なポイントである。給電効率は、負荷が比較的重い場合に、高電圧を大きく下げないよう保証するものでなくてはならない。GJF-1型分離機は、1メガヘルツで作動している場合の給電電力が100ワット、30キロヘルツの場合が約60ワットとなる。

そのほか、鉍物及び誘電液の誘電率と温度との関係から、高周波誘電分離に際しては室温を30℃以下におさなくてはならない。

高圧電極は微動つまみによって調節し、電極を誘電液に挿入してから高圧を与えるだけであるが、そのとき、電極を空気に触れさせず、そのことによって燃えやすい誘電液の発火という問題をうまく解決した。鉍物が電場の中央部で受ける作用と鉍物の粒度は関係があるので、分離する鉍物の粒径は0.05-0.5 mmとする必要がある。

## 2. 実 例

今までに GJF-1 型高周波誘電分離機を用い、27種の鉍物組合せ試料について行った分離試験の結果を表と文章であらわせば、以下の通りである(1号-17号の鉍物組合せ試料に関しては、第2表を見られたい)。

### 18. 金紅石、ジルコン、黄鉄鉍、磷灰石の分離

試料の粒径は0.1-0.15 mm.

エチルアルコールを誘電液、周波数を30キロヘルツと1メガヘルツにして黄鉄鉍を吸着し、95%を越える分離純度が得られ、ついでエチルアルコールと四塩化炭素を体積比7:10に調整した誘電液(誘電率はおよそ12.3)を用い、30キロヘルツの周波数のもとで分離純度95%以上の金紅石が吸着し、最後にエチルアルコールと四塩化炭素の体積比を5.5:12.1に調整した誘電液(誘電率ほぼ10)を用い、30キロヘルツの周波数のもとで分離純度95%以上のジルコンが吸着し、分離純度95%以上の磷灰石が残留した。写真2は、この場合の金紅石の吸着状況を示す。

### 19. チタン鉄鉍、輝石、かんらん石の分離

試料の粒径は0.10-0.15 mm.

エチルアルコールを誘電液とし、3万ヘルツ及び1メガヘルツの周波数のもとで分離純度95%以上のチタン鉄鉍が吸着し、ついでエチルアルコールと四塩化炭素を体積比3:8で調合して誘電液(誘電率ほぼ9)とし、3万ヘルツの周波数のもとで分離純度95%の輝石が吸着し、分離純度95%のかんらん石が残留した。

### 20. 鉄金紅石、ジルコン、尖晶石の分離

試料の粒径は0.10-0.15 mm.

エチルアルコールと四塩化炭素を体積比8:10に調合して誘電液(誘電率およそ13.1)とし、1メガヘルツの

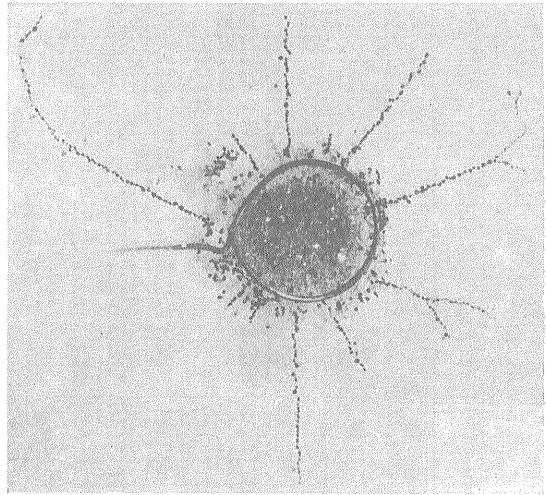


写真1

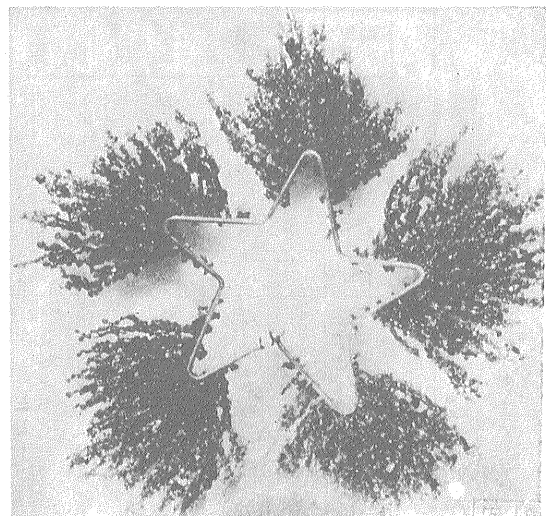


写真2

周波数で鉄金紅石が吸着し(分離純度95%以上)、ついでエチルアルコールと四塩化炭素を体積比8:15.5に調合した誘電液(誘電率およそ10.6)を用い、1メガヘルツの周波数でジルコンが吸着し、尖晶石が残留したが、いずれも分離純度は95%をこえた。

### 21. 輝水鉛鉍、鉄マンガン重石、灰重石の分離

試料の粒径は0.10-0.15 mm.

エチルアルコールを誘電液とし、30キロヘルツで輝水鉛鉍が吸着し(分離純度95%以上)、残留した鉄マンガン重石と灰重石は誘電率が非常に近いため、分離困難であった。

**22. 細晶石\*, スティビオタンタライト, チタンベタ  
ファイトの分類**

試料の粒径は 0.10-0.15 mm.

エチルアルコールと四塩化炭素を 13.3 : 16 の体積比で調合して誘電液 (誘電率 13.38) とし, 30 キロヘルツの周波数のもとで, スティビオタンタライトと淡色細晶石\* の大部分が吸着され, 残留したのが主として濃色細晶石\* とチタンベタファイトで, スティビオタンタライトとチタンベタファイトは完全に分離することができる。

**23. 金紅石, エシュキナイト, モナズ石, ざくろ石の  
分離**

試料の粒度は 0.10-0.15 mm.

エチルアルコールを誘電液とし, 30 キロヘルツのもとで分離純度 95% 以上の金紅石が吸着し, さらに適量の四塩化炭素を加えれば, エシュキナイト (分離純度 90% 以上) が吸着し, ついでエチルアルコールと四塩化炭素を体積比 8.5 : 9.5 で調合した誘電液 (誘電率 13.83), 3 万ヘルツの周波数のもとでモナズ石が吸着し (分離純度 90% 以上), 分離純度 80% 以上のざくろ石が残留する。

**24. 焼結鉄鉱の分離**

試料の粒度は 0.05 mm 以下.

無水エチルアルコールを誘電液とし, 30 キロヘルツと 1 メガヘルツの周波数のもとで, いずれも FeO がとり出され,  $\text{CaFeSiO}_4$ ,  $\text{CaSiO}_4$ , CaO などが残留し, FeO の分離純度は 90% をこえる。

**25. モナズ石, 鉄金紅石, ユークセナイト, ポリクレ  
ースの分離**

試料の粒径は 0.10 mm.

メチルアルコールを誘電液とし, 5 メガヘルツ以上の周波数の場合にユークセナイト-ポリクレースが分離純度 95% 以上で吸着され, さらに四塩化炭素とメチルアルコールを 9 : 3 の体積比で調合した誘電液を用いて分離純度 95% 以上の鉄金紅石が吸着され, 分離純度 95% 以上のモナズ石が残留する。

**26. 錫石, 細晶石\*, ジルコンの分離**

試料の粒径は 0.10 mm.

メチルアルコールを誘電液とし, 5 メガヘルツ以上の周波数の場合に錫石が分離純度 90% 以上でもって吸着され, ついで四塩化炭素とエチルアルコールを体積比 1 : 1 で調合した誘電液によって分離純度 90% 以上の細晶石が吸着され, 分離純度 90% 以上のジルコンが残留する。

**27. 黄銅鉱, クーペライト, イリドスミン, 輝石, 長  
石の分離**

試料の粒径は 0.15 mm.

メチルアルコールを誘電液とし, 30 キロヘルツの周波数のもとで黄銅鉱をとり出し, それからメチルアルコールと四塩化炭素を体積比 1 : 1 で調合した誘電液を用いてクーペライトをとり出し, さらにメチルアルコールと四塩化炭素を適当な体積比に調合してイリドスミンをとり出す。

指摘しておかねばならないのは, この誘電分離法が比重選鉱, 磁力選鉱, 電磁選鉱などほかの分離法と結合して用いられれば, 単鉱物の濃集が一定程度の選鉱を経て進行し, 一層効果を上げるということである。例をあげて, 重鉱物砂鉱から単鉱物を分離する工程を説明しよう。

陝西省の或るユークセナイト・ポリクレース鉱石は, その粉碎試料中に磁鉄鉱, チタン鉄鉱, 褐鉄鉱 (褐鉄鉱化黄鉄鉱), ユークセナイト, ポリクレース, 黄鉄鉱, 黒雲母, 金紅石, 燐灰石, チタン石, 長石, 石英などの鉱物を含んでいる。

その分離順序と結果は, 図の通りである。

**3. 考 察**

1. 鉱物の誘電率はその化学組成や結晶構造の違いによって差があり, このことが実際の作業に当って特に注意しなくてはならない点で, 前述の第 4 例のように, 閃亜鉛鉱と螢石を分離する場合, 実際の作業過程にまずエチルアルコールを用いて誘電液を作り, 閃亜鉛鉱を吸着させ, ついでエチルアルコールと四塩化炭素を 8 : 12 の体積比で誘電液 (誘電率およそ 12) として再度閃亜鉛鉱を吸着させ, 螢石を残す。明らかに, 前後 2 回の吸着閃亜鉛鉱は誘電率を異にする。分析の結果によると, 両者の化学組成は異なり, 誘電率の大きいエチルアルコール (26.8) の閃亜鉛鉱 A と誘電率およそ 12 の誘電液を用いた場合の閃亜鉛鉱 B の化学組成を比較すると, 第 3 表のようになる。

上記の陝西省の実例では, 褐鉄鉱が一連の異なる誘電率をもっているため, その実際の分離に当っては, 地区ごとの鉱物組合せの特徴にもとづいて適当な分離条件 (周波数, 誘電液など) を選ぶことが必要である。

2. 上述の実例で明らかのように, 高周波誘電分離法は幾種かの鉱物組合せにおける単鉱物の分離には確かに効果的である。一般的には, 鉱物の誘電率の差が 2 より大きくさえあれば, 比較的よい分離結果が得られ, その誘電率の差が大きければ大きいほど効果があるが, 正長石-斜長石, 鉄マンガン重石-灰重石, 黄玉-電気石といった誘電率が似かよった鉱物組合せの場合は分離しにく

\* 原文のまま



第3表 閃亜鉛鉱の半定量分光分析

試料 \ 元素	Si	Al	Mg	Mn	Ca	Co	Sb	Pb	Sn	Nb	Bi
閃亜鉛鉱 A	0.03	0.003	0.003	0.01	0.05	0.03	0.03	0.005	0.05	0.03	0.003
閃亜鉛鉱 B	0.003	<0.001	0.001	<0.001	0.003	0.005	—	—	—	—	—

く、また、磁硫鉄鉱-磁鉄鉱、黄銅鉱-黄鉄鉱のような、誘電率がいずれも81 (蒸留水の誘電率) より大きい鉱物組合せでは、今のところ、好適な誘電液がなく、分離困難である。

3. 誘電分離に使用する誘電液はエチルアルコール、メチルアルコール、四塩化炭素、クロロホルムなど揮発性の液体であり、かつ、多くは吸水性が比較的強く、分離時間が長いと、誘電液そのものの誘電率が変化しやす

い。そのため、温度、湿度などに対する条件が厳格でなくてはならず、通気条件も良好に保たれなくてはならない。

参 考 文 献

B. F. Howell, P. H. Licastro: Dielectric behavior of rocks and minerals: Amer. Min., vol. 46, p. 277