

高温・高圧のはなし (鉱物合成の歴史と最近の地球科学の知識)

⑪

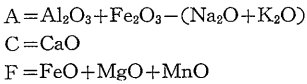
針 谷 有

いろいろな変成相の温度や圧力については 現在までの岩石学的方法によって かなりよくわかってきつつある。いままでのべてきたように 1950年以後の高圧実験によって 変成鉱物の安定関係が実験的に研究され変成作用における温度や圧力など数値として与えることが可能になった。このことは変成作用全体の温度 圧力 化学ポテンシャル等について かなり正確な見通しができるようになったといっても過言ではないであろう。いままでにあげられた個々の鉱物のデータを参考にしていただければよいが 紙面のゆるすかぎり変成相について実験のデータを基礎にして少しながめてみよう。前号でいろいろな変成相の分類をしめしておいたが 圧力の低い変成相からみていこう。

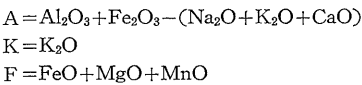
A ホルンフェルス相

鉱物相を特徴づける目的のために ACF 図表や AKF 図表をもちいる。くわしくは他の本を参照してもらうとして 下にしめす成分をモル比率であらわし 三角図表としてしめたものである。

ACF 図



AKF 図

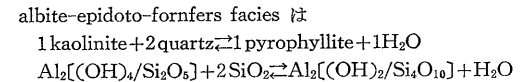


これらの図表は変成岩の鉱物共生の研究にはきわめて有

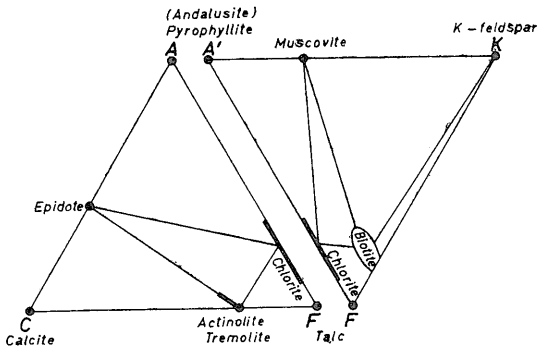
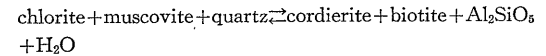
用である。

最も低温・低圧の変成相は Albite-epidote-hornfels facies である。第1図にこの相の ACF AKF 図をしめす。名のしめすように この相の特徴は Albite+epidote の共存である。Actinolite が出現することから緑色片岩層の亜相ともみられる。いづれにしても低圧部分の変成相は まだ十分解明されていないようである。epidote を含む相はさらに高温になると epidote は消滅して斜長石は An 成分に富むようになる。このような相を Hornblende-hornfels facies として その ACF AKF 図を第2図にしめしておいた。鉱物の共生関係はこれらの図によって十分理解されると思う。さらに高温になると白雲母や角閃石が不安定になり そのかわりに正長石や斜方輝石やカルシウム輝石を生ずる。圧力が低いためアルマンディンやパイロープのようなガーネットは生じないで 紅柱石や堇青石が広く出現する。このような相を pyroxene-hornfels facies とよんでいる。第3図にこの相の ACF AKF 図をしめす。

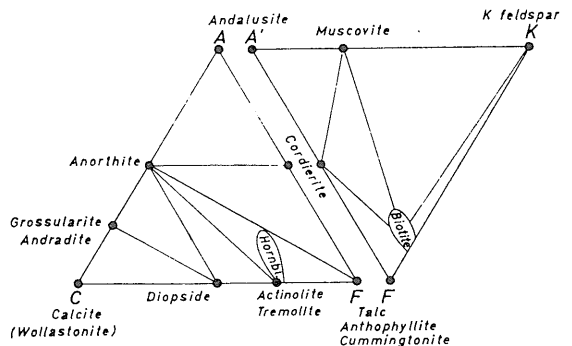
さてこれらの hornfels 相で 圧力が低く温度が次第に高くなって行くとのべたが どの位の温度・圧力を意味するのであろうか? 第4図はホルンフェルス相の温度・圧力領域をしめたものである。



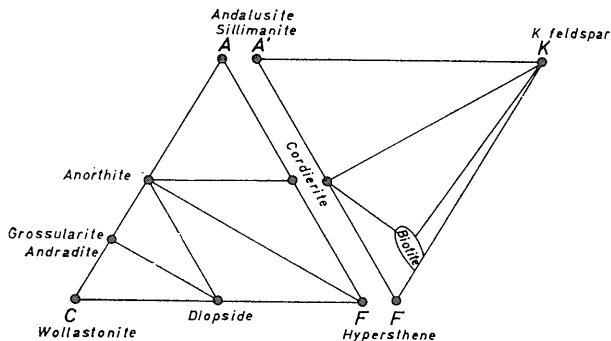
の平衡曲線と



第1図 albite-epidote-hornfels facies この相の温度の高いところでは Andalusite が出現する

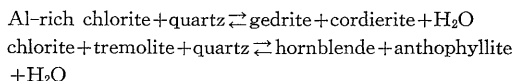


第2図 hornblende-hornfels facies 高温の部分では wollastonite が出現する

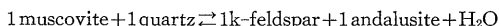


第3図 pyroxene-hornfels facies

の平衡曲線の間であり 高圧実験の結果から前者の反応は $390 \pm 10^\circ\text{C}$ $P_{\text{H}_2\text{O}}=2,000\text{bars}$ であり 後者のそれは $525 \pm 10^\circ\text{C}$ $P_{\text{H}_2\text{O}}=2,000\text{bars}$ とたしかめられているので この温度範囲にある。この facies で温度の高いところでは4図にみられるように andalusite が表れることもあろう。hornblende-fornefels facies は cordierite の表われる曲線以上 時には図 de の曲線でしめされた



の反応による orthoamphibole の出現以上の温度で始まる。



の反応でしめされる曲線の温度 圧力で hornblende-hornfels facies は終わり これより温度の高いところでは pyroxene-hornfels facies とよばれている。最後の反応の曲線は図にみられるように やや急カーブであり アルサス等 (E. ALTHAUS) によると

- 580 \pm 10 $^\circ\text{C}$ at $P_{\text{H}_2\text{O}}=500\text{bars}$
- 600 \pm 10 $^\circ\text{C}$ at $P_{\text{H}_2\text{O}}=1,000\text{bars}$
- 630 \pm 10 $^\circ\text{C}$ at $P_{\text{H}_2\text{O}}=2,000\text{bars}$
- 690 \pm 10 $^\circ\text{C}$ at $P_{\text{H}_2\text{O}}=4,000\text{bars}$

のような温度 圧力値が与えられている。

温度が高く 圧力が非常に低い facies を Sanidinite facies とよび この facies では pyroxene-hornfels facies のなかの orthopyroxene, cordierite, diopside はまた安定に存在し grossular は wollastonite+

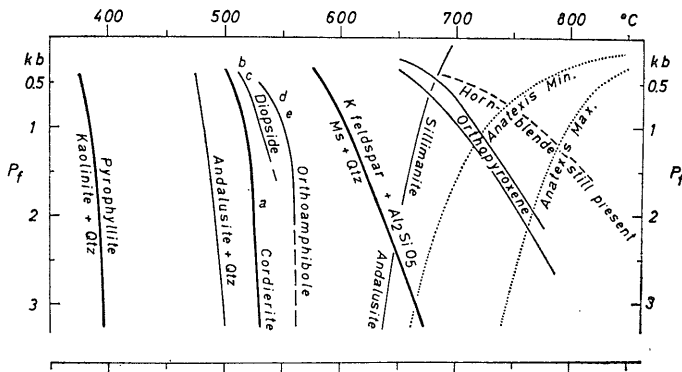
anorthite に分解する。一般に Ca と Ca-Mg Silicate で特徴づけられる鉱物共生をしめす。低圧変成相である4つの facies の P-T 図をターナー (F. J. TURNER) の図からしめたものが第5図である。そして代表的な変成帯の温度 圧力範囲もしめしてある。

B グリーンシスト相

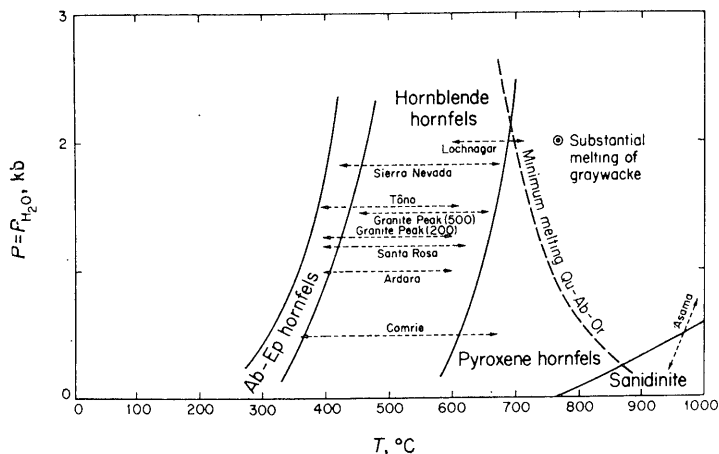
グリーンシスト相は 低温の広域変成地域にしばしば広く発達している。この相は緑泥石 緑簾石やアルバイトを主成分鉱物とし アクチノ閃石をかなりふくんでいることもある。また方解石やドロマイト マグネサイトなどの炭酸塩が広くみられることが一つの特徴である。グリーンシスト相にだけ出現する critical な鉱物または鉱物の集合をあげることは困難である。そこでこの相の温度 圧力条件をしるためにも この相にあらわれない鉱物の安定領域から推定することも可能であろう。沸石やブドウ石 パンペリ石が出現しないことから 沸石相やブドウ石—パンペリ石変成グレイワック相から区別される。そこでこれらの鉱物の安定領域の上限が グリーンシスト相の安定域の下限をしめすことになる。これらの温度はおおよそ 380°C ~ 400°C 位の範囲にある。高温側の領域は はっきりしない。しかし第6図にみられるように 550°C 近辺に角閃岩相との境界を考えている人が多い。

C 角閃岩相

第6図にみられるようにさらに高温では角閃岩相となる。角閃岩相はおそらく世界的に最も多量の変成岩をふくんでいる相である。エスコラ (P. ESKOLA, 1939) は 緑簾石が消滅して斜長石の組成が An に富むようになったところを角閃岩相としている。一般に低温の変成条件のもとでは An 成分の少ない斜長石と緑簾石との集合になる(第7図)。累進変成作用の研究によれば

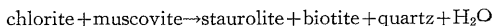


第4図 hornfels facies の P-T と主要な鉱物の平衡曲線



第5図 低圧変成相の4つの facies の P-T 図

温度の上昇にともなう An 成分の増加は An が 30% に達するまでゆるやかであるが それをこえると大変急になる。この点からいうと緑簾石と平衡する斜長石の組成が An 30% になるところがしばしば鉱物相の境にされていることに意味がある。さて十字石の出現も角閃岩相のはじまる温度 圧力を推定する手がかりになる。1967年ホスチェック (HOSCHECK) によれば pelitic rock の progressive metamorphism の間の反応は

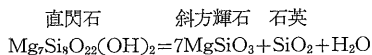
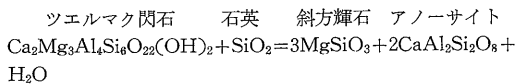
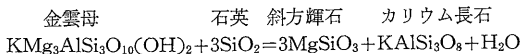


のような反応は普遍的におこっており この反応の熱水実験による平衡曲線は $540 \pm 15^\circ\text{C}$ で 4,000bars $560 \pm 15^\circ\text{C}$ で 7,000bars (H_2O 圧) がある。そこで角閃岩相の出現温度は $540 \sim 570^\circ\text{C}$ であるとして考えられる。6図にみられるように 藍晶石 珪線石 紅柱石の3つの Al_2SiO_5 鉱物の間の3重点の温度 圧力は 角閃岩相

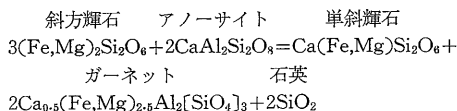
のなかの低温の部分か または角閃岩相と緑簾石角閃岩相との境界付近にある。そこで角閃岩相を藍晶石を生ずる亜相 紅柱石を生ずる亜相と 珪線石を生ずる亜相に3分する人もある。これらの P-T 条件はそれぞれ低温・高圧 低温・低圧 高温・中圧というふうに考えられよう。

D グラニユライト相

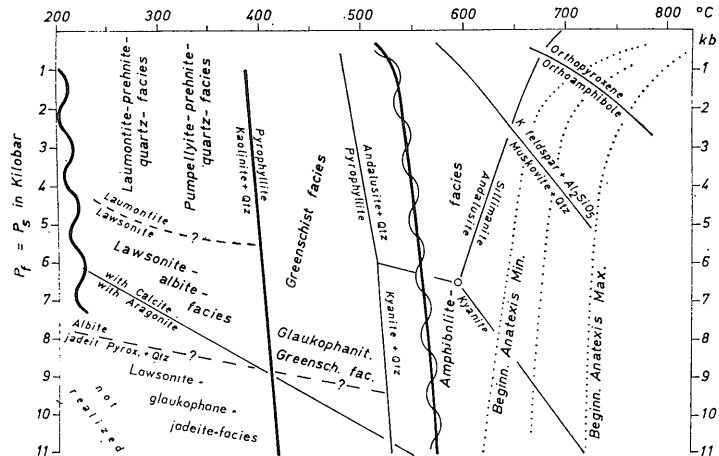
狭義には高温の条件で生成した変成岩をいう。典型的なグラニユライト相においては 黒雲母も角閃石も安定でない。たとえば



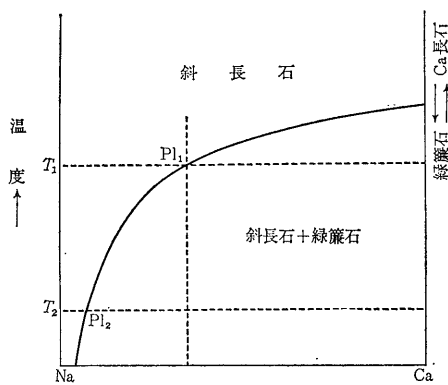
のような反応で石英 長石 輝石は



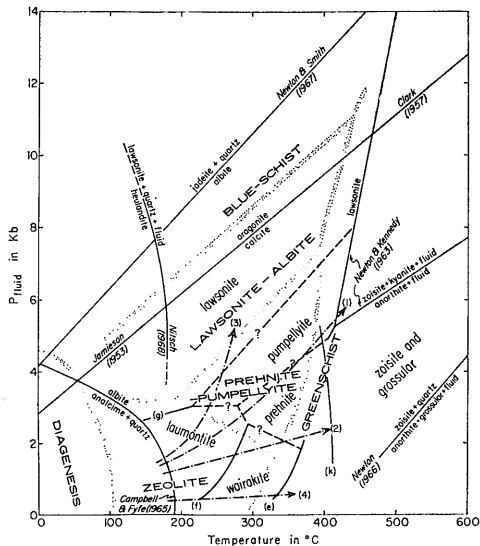
のような反応でガーネットが生成される。そこで多くの場合 普通の中性または塩基



第6図 変成相の P-T 図



第7図 低温の変成岩における斜長石と緑簾石の平衡



第8図 低温 低圧 変成相の P-T 図

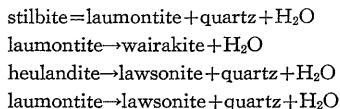
性組成の岩石に 角閃石が減少して斜方輝石が出現しはじめるところをもって グラニュライト相のはじまりとしている。この温度は 角閃石族の平衡図を参照していただくとわかるが 700~800°C の間にあると考えられる。温度が高いので Al_2SiO_5 の鉱物が出現するときは それは珪線石であるのが一般的である。

E 沸石相

変成岩相のなかで 最も低い温度と圧力に相当するものは緑色片岩相であると考えられて来た。1954年クームス (D. S. COOMBS) は ニュージーランド南島の南部の三疊紀堆積物を研究して 広域的なスケールで沸石が生成していることを発見し 温度と圧力に応じて沸石やその他の鉱物の種類が規則正しく変化していることがわかった。そこで沸石相という言葉ができ 当然この相は変成相のなかで最も低い温度と圧力に相当する。変成相が出現する最低の温度・圧力は 第8図にしめすとおりであるが クームス (D. S. COOMBS) の観察した沸石鉱物の変化は

ヒュランダ沸石→ローモンタイト→パンペリ石→ブドウ石→緑簾石

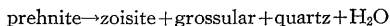
という順序で温度の上昇にともなって H_2O の減少を示すものである。このような観点から沸石の安定領域は非常に興味があり 多くの研究者によっていろいろな沸石の平衡関係の検討がなされてきた。第8図はそれをまとめてしめたもので リュー (J. G. LIU) によって変成相を構成する沸石の安定関係が詳しくしらべられている。



のような反応の安定関係がよくわかるであろう。

F ブドウ石→パンペリ石変成グレイワッケ相

前述のニュージーランドの沸石相の堆積層の最下部は沸石類がほとんどなくなって パンペリ石やブドウ石が出現しはじめる。この変成相は 沸石相と緑色片岩相との間の中間をしめる変成相をあらわすものと考えられる。1971年リュー (J. G. LIU) は



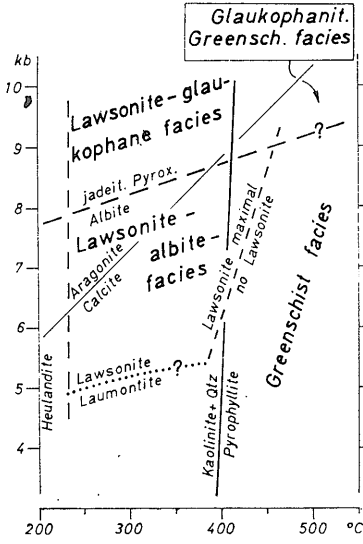
の平衡関係を研究し おおよそ 400°C で prehnite が分解することを見出した(第8図)。この辺が緑色片岩相との境界になるものと推定されよう。

3kb以上では laumontiteは lawsonite+quartz の共生に分解し 一方 analcime+quartzの共生は 3kb 150°C 以上で albite が生成されることは 同じくリュー (J. G. LIU) によって最近たしかめられた。おおよそ 3kb 以上では lawsonite-albite の共生が安定となり これらの出現する変成相を lawsonite-albite facies とよぶ。第8図にそれらの安定関係もしめしてある。

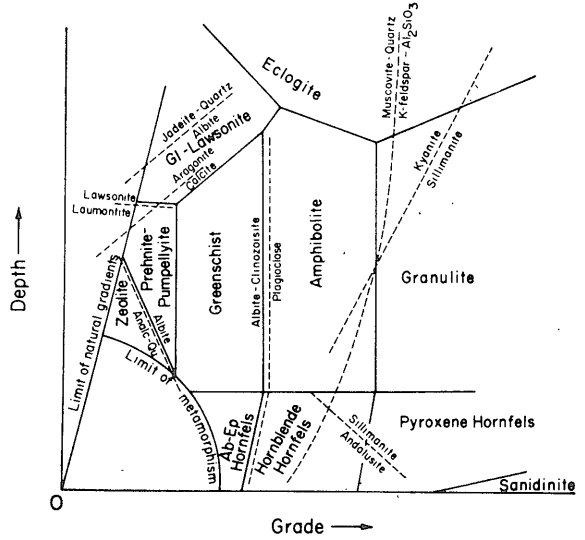
G 藍閃石片岩相

1929年エスコラ (P. ESKOLA) は 藍閃石片岩相を提案した。この岩相のなかにヒスイ輝石と石英が生成していることは多くの研究者によって見出されている。前述のヒスイ輝石の安定領域の図にみられるように かなり高い圧力のもとでのみ安定である。またアラゴナイトも出現するが この鉱物も高い圧力のもとで安定である。藍閃石片岩相の地域は しばしば不変成の地域に移過するところからみると この相は比較的低い温度をあらわすと考えられる。いま温度を 200°C と仮定すると ヒスイ輝石+石英が安定であるためには 10kb 以上の圧力を またアラゴナイトや藍晶石が安定であるためには 8kb~7kb の圧力が必要となる。1961年アーンスト (W. G. EARNS) は 適当な化学的条件のもとでは 藍閃石は低い圧力でも容易に合成できることをしめた(角閃石の平衡図を参照)。そこで藍閃石が出現するということのみから その生成圧力が高いときめることはできない。しかし一般には第9図にみられるように低温でやや高圧の相と考えられる。

H エクロジャイト

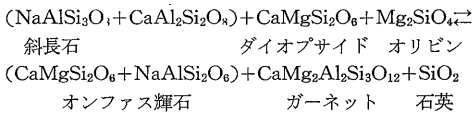


第9図
lawsonite - albite
facies blue schist
facies



第10図
各種変成相の変成
grade と深さの関
係

エクロジャイトは 昔から高温高压のもとで生成する岩石と考えられてきた。それはこの岩石の密度が大きいため 高压と解釈される理由である。すでに玄武岩→エクロジャイト転移のところで その安定領域をしめしておいたので参照されたい。以前はエクロジャイトは火成岩であると考えられていた。しかし近年の調査によると ある種のエクロジャイトは広域変成作用でできた変成岩であることがわかってきた。



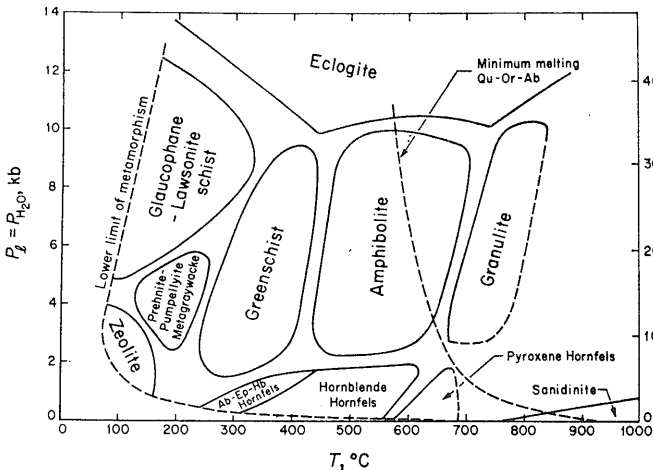
の反応でしめされるように ガーネットやオンファス輝石がその主要構成鉱物である。第10図にエクロジャイト相の安定領域がしめされている。今までのべた各種

変成相の P-T 関係をまとめて 第11図に示しておく。

あとがき

ながながと高压下の平衡図をながめてきた。こうして原稿を書いている間にも 多くの高压のデータがつかずからつぎに発表されている。そして地球に関する新しい知識が どんどん積みあげられて行っている。最近の高压平衡図も簡単な組成のものから次第に複雑な組成 端成分から固溶体へと 天然の環境に近づく努力がかさねられ より精密なデータが発表されてきつつある。高压研究初期の頃にくらべ データの豊富さとその精度は近年一段と向上し 珪酸塩鉱物の平衡論も定量的な段階に達してきつつある。また世界各地の大学 研究機関で 高压研究がはじめられるようになってきたので これらのデータをまとめておくことは早急に必要となってきた。世界的には Brigham Young University の High pressure data Center があり また本邦でも日本材料学会の高压力データセンターがあって 近年の高压関係のデータを集めている。珪酸塩鉱物にだけ限っても 最近その量はぼう大なものになりつつある。そこで何とか今までのデータを集めてみようと思ひこの報文を書き始めた。筆者の浅学の故にずいぶんぬけているものもあるかも知れない。これをもといにしまたデータをたしながら完全なものに行きたいと願っている。興味をおもちになる方の少しでも参考になれば幸である。

(筆者は北海道大学理学部地質学鉱物学教室)



第11図 各種 変 成 相 の P-T 図