評 論 雜 錄

ボーウエン氏の珪質石灰岩及び苦灰岩の順進變成作用論¹⁾(抄譯)

Progressive metamorphism of silicious limestone and
dolomite by N. L. Bowen

理學博士 竹 内 常 彦 (T. Takéuti)

Bowen 教授は昭和十五年の春に石灰質岩石の變成作用が順進するに従ひ、變化する溫度及び壓力の狀態をその礦物成分の組合せの變化から推定せんと試みた。この解析的研究は天然に於て實際に觀察せられる礦物共生關係及び實驗に基礎を置く理論的相平衡關係の双方から推理を進めて一つの體系をたてたのであつて、變成作用に関する研究史上特筆されるべき論文の一つであると考えられる。岩石學を専攻せられつゝある方は既に原文により知悉せられたことと思はれるが、尙原著に接する機會を得られざる多くの會員の爲にその主要部分を次に抄譯し參考に供したいと思ふ。

緒 言

或る狀態の下に石英と方解石は相接して安定な礦物組合せとして晶出する。然し乍ら溫度が上昇すると此等の礦物は相互に反應し、珪灰石と二酸化炭素に變化する。若しこれが平衡の完全に保たれた反應であるなら反應の進行する溫度は外壓により決るものである。Goldschmidt²⁾ は 1912 年に初めてこの反應の熱力學的關係及びそれが岩石の變成作用中に於ける壓力-溫度の狀態を知る指標として重要であることを指摘した。CaO と SiO₂ はメタ珪酸鹽 (CaSiO₃ 珪灰石) の他にも化合物を作り就中オルソ珪酸鹽 (Ca₂SiO₄ ラルナイト) はこの見地より最も重要なものである。Niggli³⁾ は 1926 年に SiO₂ 及び CaO を含むアルカリ炭酸鹽融體の平衡を實驗的に研究し、方解石-オルソ珪酸鹽の組合せは如何なる壓力の下でも方解石-石英

1) Jour. Geol.; **48**, 225~274, 1940.

2) V. M. Goldschmidt, "Die Gesetze der Gesteinsmetamorphose", Vid-Selsk. Skr. I Math.-Naturv. Kl., No. 22, 1912.

3) P. Niggli. Zeit. f. anorg. Chemie, **98**, 305, 1916.

又は方解石-珪灰石組合せよりも高温に於て安定であると結論した。岩石の變成作用にこの関係を適用することは Ca-オルソ珪酸鹽が岩石の中に發見されるまでは明らかにならなかつたが, Tilley¹⁾ により Scawt Hill に於てそれが發見され, この地の變成作用は普通に見られぬ高温度の性質を有することが指摘せられ, Niggli の結果の岩石變成作用に對する應用價值の一指標となつた。

斯くの如くして珪質石灰岩の變成作用の度合を温度に關して或る程度認めることが出来る様になつた。そして珪質苦灰岩の更に複雑な場合にも同様な状態が見られる。この考へに關する初期の發達に就ては Eskola²⁾ により規定せられた西部 Massachusetts の珪質 (或は珪化) マグネシア石灰岩の變成作用に就ての 4 つの段階を想起すれば充分であらう。即ち温度の上昇に従ひ順次に石英-石灰岩, 透角閃石-石灰岩, 透輝石-石灰岩 及び珪灰石-石灰岩の 4 段階であつた。尙この他に Niggli³⁾, Tilley⁴⁾ 其他により Eskola の論じた何れの組合せより高度のマグネシア石灰岩變成作用のものとして, モンテイセライト組合せ (monticellite assemblages) が認められて居る。然し乍らこの種岩石の變成作用の段階に關する全般的知識は, 例へば Goldschmidt の研究の様に或る點に關しては非常に詳細な取扱があるにも拘らず, 變成作用の順進性即ち變成作用の段階 (upon the progressive character of the metamorphism, in other words, upon degree or grade of metamorphism) を強調する問題に對する實驗的研究は未だ充分に行はれて居ない。本論文は斯くの如き組織的研究を満さんとする一つの試みである。

1) C. E. Tilley, Min. Mag., **22**, 86, 1929.

2) P. Eskola, "On contact phenomena between gneiss and limestone in Western Massachusetts", Jour. Geol., **30**, 283, 1922.

3) U. Grubenmann and P. Niggli, Die Gesteinsmetamorphose, I, 383, 1924.

4) C. E. Tilley, "Contact metamorphic assemblage in the system CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂", Geol. Mag., **62**, 366, 1925.

珪質石灰岩の順進變成作用

方解石と石英より珪灰石を生ずる反應は次の式で現すことが出来る。

この化學反應系の相律的關係は次の如くである。

$P = \text{phase (相)} = 4, \quad C = \text{component (成分)} = 3$

$F = \text{degree of freedom (自由度)} = C + 2 - P = 1$ (univariant—變系)

即ち若し壓力 (CO_2 の) が與へられたなら、これ等 4 つの相が平衡を保ちつゝ共存する爲の溫度は一つに決る。それ故壓力と溫度を座標とすれば 4 相が平衡を保つ爲の壓力-溫度曲線を畫くことが出来、第一圖に示される如くその曲線により二變平衡系 (divariant equilibrium) の 2 つの區域に分けることが出来る。方解石と石英は低温の礦物對で珪灰石と CO_2 は高温に於ける礦物對である。そして低温側に於ては方解石と石英と共に珪灰石或は CO_2 の何れか一つの存在が可能で、高温側に於ては珪灰石と CO_2 の他に方解石或は石英の何れか一つが存在し得る。換言すれば上述の 4 つの相より同時に 3 相を擇ぶ 4 種の組合せが可能となり、その中 2 種は低温の組合せで他の 2 種は高温の組合せで、即ち次の如くである。

a) 方解石 + 石英 + 珪灰石	}	低 温
b) 方解石 + 石英 + CO_2		
c) 珪灰石 + CO_2 + 石英	}	高 温
d) 珪灰石 + CO_2 + 方解石		

此等の關係は第壹圖に示される如くである。方解石及び石英が單獨に岩石中にあつて、溫度及び壓力が m 點即ち溫度低く壓力比較的大である場合を考へて見る。若しこの場合壓力が一定で溫度が上昇すれば、變化する状態は水平直線 mn に沿つて移動し、n 點までは相の變化はないが溫度が n に達するとこの反應系に作用する蒸氣壓は外壓と等しくなり、 CO_2 瓦斯が生ずると共に珪灰石が生成される。外壓が一定して居る限りこの 4 相が共存し得る溫度は一定である故に低温礦物組合せの方解石或は石英の一方が

第 一 圖

消失するまでこの温度は n を變化しない。そして低温礦物の何れか一方が消失してこの反應が終了した時、外壓が依然一定であれば、温度は mn 線の方に更に上昇する。一般に CO_2 の全部或は殆んど總てはこの系より逸出する故に生成物は珪灰石のみで、他に源岩石中に含有せられた石英と方解石の中、量の多かつたものが殘存する。

斯くの如き系の化學的關係の或る部分は三成分系を三角座標に示す成分圖の助けに依つて最もよく現はすことが出来る。第二圖は CaO 、 CO_2 及

第 二 圖

び SiO_2 を成分に採つた 2 つの圖である。同圖の左は低温の組合せで圖中 SiO_2 と CaCO_3 及び CaCO_3 と CaSiO_3 を直線で結ぶことにより、低温に於ける上述の 2 種類の三相平衡關係を明瞭に現はすことが出来る。即ち低温に於ては石英と方解石は常に共存し、珪灰石或は CO_2 の一方が存在し得ることは本圖より明らかに説明される。次に既に述べた如く一定の外壓の下に温度が上昇する場合、即ち第一圖の P - T 状態圖の mn 線に沿ふ變化を考察して見よう。その場合温度が n 點に達すれば方解石と石英はも早共存することは出來ず、何れか一方は消失しなればならぬ。即ち第二

圖左に示した共存する礦物對を示す線(方解石-石英線)は消失し、同圖右に示した様にそれと交叉する珪灰石- CO_2 線が新たに生ずる。此等は方程式 A の 4 つの反應相で、方程式の一邊の 2 つの相を結ぶ線と他の邊の 2 相を結ぶ線は交叉せねばならぬことは斯くの如き一變系の反應 (univariant reaction) に於ては通則である。この反應する相群は“交叉關係 (crossed relation)”を有すると云はれる。第二圖の補足的に掲げた小三角形は石英及び方解石の混合物(實際には多少の珪灰石を含む)が P-T 狀態圖の溫度 n を通過する時の狀態を更に明瞭に説明して居る。 CaCO_3 - SiO_2 を結ぶ破線上で a と SiO_2 の間にある任意の混合物 x は、 CO_2 の逸出により CO_2 頂點と x を結ぶ直線の延長 xx' 線に従つてその成分を變化する。そして變成作用の最終生成物は x' で示される珪灰石と石英の混合體である。一方 a と CaCO_3 の間に存する混合物 y は同様にその成分は y' となり、珪灰石と方解石の混合體となる、又 a 點上で示される石英と方解石の混合體は珪灰石(a')のみに變化することは勿論である。この様に變成生成物の構成は 2 つの三角形の助けにより、成分の變化が CO_2 頂點より離れる方向に進むことを考へれば容易に了解出来る。この 2 つの三角形を便宜上三角圖對 (paired diagrams) と稱する。以上の考察よりこの様な物質の變成作用は主として脱炭酸作用 (decarbonation) により表明することが出来る。又論議が進むにつれて順進變成作用 (progressive metamorphism) は主として順進脱炭酸作用 (progressive decarbonation) であることも順次に明瞭となつて来るであらう。

さて珪質石灰岩の順進變成作用(順進脱炭酸作用)の次の段階に考へを向けよう。第一の段階に於ては CaCO_3 が SiO_2 とこれ以上直接接して存在し得ないことから反應が起つたのであつた。次の段階(同じ壓力にて溫度更に上昇す)に於ては CaCO_3 (方解石) は CaSiO_3 (珪灰石) と相接してはも早不安定となり、次の方程式の如くに反應してスプライト (spurrite, $\text{Ca}_2\text{SiO}_4 \cdot \text{CaCO}_3$) と CO_2 を生ずる。

前の場合の様に 4 種類の三相組合せは次の如くである。

a) 方解石 + 珪灰石 + スプライト	}	低 温
b) 方解石 + 珪灰石 + CO ₂		
c) スプライト + CO ₂ + 方解石	}	高 温
d) スプライト + CO ₂ + 珪灰石		

再び低温及び高温の各々に於て、安定な相の組合せを現はす三角圖對が考へられる。この場合の低温の三角形は前の對圖形(第二圖)の高温の時と同じである。この新しい三角圖對は第三圖に掲げた。同圖左の方解石-珪灰

第 三 圖

石直線は右圖に於ては消失しスプライト-CO₂ 線に代り、この 2 つの直線は前同様交叉關係にある。方解石-珪灰石直線上にある最初の成分は CO₂ を失ふ結果 CO₂ 隅より正反對の方向に變化し、スプライト-珪灰石或はスプライト-方解石の線上に至ることも前の段階の場合に説明したと同様である。

珪質石灰岩の順進變成作用の最後の段階は若し温度が更に上昇した場合(同じ壓力の下に)に達成せられ、次式の如く珪灰石とスプライトが反應してラルナイト (Iarnite Ca₂SiO₄) と CO₂ を生ずる。

4 種の三相組合せは次の如くである。

a) 珪灰石 + スプライト + ラルナイト	} 低 温
b) 珪灰石 + スプライト + CO ₂	
c) ラルナイト + CO ₂ + 珪灰石	} 高 温
d) ラルナイト + CO ₂ + スプライト	

この反應の安定相組合せを示す三角形圖對は第四圖の如くである。珪灰

第 四 圖

石-スプライト線は消失し、それと交叉關係にあるラルナイト-CO₂線がこれに代るもので、この場合も脱炭酸作用が行はれ珪灰石-スプライト線上にある始めの成分は CO₂ 隅より直線的に遠ざかる様に變化し、スプライト-ラルナイト又はラルナイト-珪灰石線上に達するのである。

この變成段階に於ては更に説明を加へる必要がある。この段階に於てはラルナイトと珪灰石の共存が可能となつたのであるが、實驗的研究の結果では Ca₂SiO₄ と CaSiO₃ は高温に於て共生せずには化合して 3CaO·2SiO₂ となることが明らかとなつて居る。然し乍らこの 3:2 の化合物は天然には未だ發見せられて居らず又 Scawt Hill に於て白堊團塊 (chalk nodules) を取巻く變成量 (netamorphic haloes) 中にラル石及び珪灰石の帶が何等介在物なしと一緒に存在して居る。恐らくこの 3:2 の化合物はその存続に最低温度があり、その温度は變成作用の如何なる温度よりも更に高いものであらう。

知識が進步するに従ひ石灰岩の順進變成作用の三段階に關する上述の論議はやがて修正を必要とするかも知れない。然しこれは現在の知識を表現して居る様であり又變成作用の原理を説明するのに都合よく思はれる。如

何なる壓力の下でも或る溫度以下に於ては方解石と石英は平衡を保ち共存することが出来る, 方解石と珪灰石はそれより稍々高温に至るまで共存することが出来, スプライトと珪灰石は更に高温まで共存が可能で, これよりも尙高温に於ては此等の礦物對は何れも存続し得ない。斯くて此等の礦物對は變成作用或は變成溫度の程度又は段階を知る指針となるものである。變成作用の各段階は脱炭酸作用の順進階程であり, CaO , SiO_2 及び CO_2 を頂點とする三角形圖を畫き共存し得る礦物對を結べば, 其等の直線が CO_2 隅より順次に遠ざかることから幾何學的に變成作用(脱炭酸作用)の順進段階を完全に導出することが出来る。

さて次に上述の考へを應用して更に複雑な珪質マグネシア石灰岩の變成作用に考察を進めよう。

珪質苦灰岩の順進變成作用

珪質苦灰岩或は苦灰質石灰岩の變成作用を研究する爲には CaO-MgO-

第 五 圖

WO : 珪灰石

EN : 頑火石

ME : メルウキナイト

SP : スプライト

DOL : 苦灰石

DI : 透輝石

AK : オケルマナイト

MO : モンテイセライト

Cal : 方解石

TR : 透角閃石

LA : ラルナイト

FO : 苦土橄欖石

Mag : マグネサイト

SiO_2 を底面とし CO_2 を頂點とする四面體を用ひるのが便利である。第五圖はその四面體の側面を底面の平面にまで擴げた場合である。その底面にはこゝに考究しつゝある種類の變成岩中に知られて居る總ての Ca-Mg 珪酸鹽の成分を示す點を記入し、スプライト、苦灰石及び方解石に就てはそれ等に相當した位置に記點した。この四面體中に於て方解石と苦灰石（或は MgO ）の 2 點と底面にある種々の珪酸鹽相により作られる種々の平面の關係位置を考へることにより、珪質苦灰岩の變成作用（脫炭酸作用）の段階は、珪酸鹽礦物の可能な組合せの知識により補足することが必要ではあるが、幾何學的關係より大部分は導出することが出来る。

前に述べた珪質石灰岩の變成作用の場合には 2 つの礦物相と CO_2 が各段階に於て生成せられ、三角形圖の CO_2 隅よりの線は各段階に於て生成された礦物對を結ぶ線と順次に遭遇した。こゝに述べんとする場合に於ては 3 つの礦物相と CO_2 が各變成段階に於て形成せられ、四面體の CO_2 頂點よりの直線は前の場合と同様に變成作用（脫炭酸作用）の順進段階に於て形成せられる 3 つの礦物相により規定される平面（三角形）と順次に遭遇する。此等の三角形平面は四面體中に存在するもので、この關係を平面圖上に現はすことは出来ないが、 CO_2 頂點を投影中心（center of projection）として底面に投影することにより此等の關係を最もよく表現することが出来る。斯くすることにより各圖形は等邊三角形となり、 CaCO_3 を示す點は CaO と一致し、 MgCO_3 は MgO と一致し、苦灰石を示す點は兩者の中間に位することになる。

この四面體中に存在する各平面の中最も高位即ち CO_2 頂點に最も接近する平面は未だ脫炭酸作用の行はれないものを現はし、第六圖左に掲げた方解石、苦灰石及び石英により決定される平面である。即ち低温に於ては方解石、苦灰石及び石英は互に平衡を保ちつゝ共存し得ることを示すものである。若し溫度が上昇すれば（與へられた壓力の下に）三者は互に反應し最初に生成せられるのは透角閃石（trmolite）である。然し遺憾乍ら透角閃

石は主要成分として水を含有して居り、嚴密に四面體中に記點することは出来ない。これを記點する爲には水の含有を除外することが必要で、昔の教科書に屢々見られる $\text{CaMg}_3(\text{SiO}_3)_4$ を以て透角閃石點とした。斯くの如くして得た透角閃石を一隅とする三角平面は四面體中に於て、 CO_2 頂點より遠ざかる場合、方解石-苦灰石-石英平面に續いて最初に遭遇する平面である。即ち透角閃石は珪質苦灰岩の變成作用による最初の生成物である。その平面は2種類即ち透角閃石-石英-方解石-平面及び透角閃石-苦灰石-方解石-平面で、兩者は四面體中に於ては同一平面上にはないが前述の方法により投影を行へば第六圖右の如く示される。斯くて第六圖は最初の變成

第 六 圖

反應を示す三角圖對を表すものである。同圖左に於ける苦灰石-石英線は消失して透角閃石-方解石の線が之に代り、兩者はこの場合に於ても交叉關係にある¹⁾。

若し透角閃石の化學成分を簡單に無水物とすれば、變成作用の第一階程に於て行はれる反應は次の式で表すことが出来る。

上式に見る様にこの系は5個の反應相と4個の成分より成るもので、一變平衡系 (univariant equilibrium) である。この場合に於ても前に述べた

1) この投影図上に於ける兩直線の交叉關係は四面體中に於ける2平面の交叉關係が投射されたものである。二つの平面とは方解石-苦灰石-石英平面及び方解石-透角閃石- CO_2 平面である。

場合と全く同様に、如何なる壓力の下に於ても 5 個の相が共存し得る溫度は一定で、この溫度に達した時反應が起り、初めの岩石の成分如何により苦灰石或は石英の一方が消失するまで繼續するのである。

又若し上式がこの反應を的確に表すものとすれば、與へられた壓力の下で反應の溫度の上下に於て存在し得る 5 種の 4 相組合せは次の如く考へることが出来る。

a) 苦灰石 + 石英 + 透角閃石 + 方解石	} 低 溫
b) 苦灰石 + 石英 + 透角閃石 + CO ₂	
c) 苦灰石 + 石英 + 方解石 + CO ₂	
d) 透角閃石 + 方解石 + CO ₂ + 苦灰石	} 高 溫
e) 透角閃石 + 方解石 + CO ₂ + 石英	

さて既に述べた様に透角閃石の實際の化學式は $\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{H}_2(\text{SiO}_3)_8$ である故この場合の理論的状態は斯くの如く簡單ではなく、水もこの反應系の一成分として加はり正しく云へば次の反應式が行はれるのである。

水の存在はこの系の成分數を一つ増加して 5 とするが、 H_2O は CO_2 と共に一個の氣相となるもの故相の數は増加せず依然 5 である。即ちこの系は一變系 (univariant) ではなく二變系 (divariant) である故に、理論的に云へば或る壓力の下に苦灰石と石英(多少の水と共に)が變成作用を受けても或る一定の溫度に達して透角閃石と CO_2 の生成が始まりその溫度に於て反應が終了するものではなく、反應の起る溫度には範圍があり、透角閃石の他に別の變成礦物が生成する迄は一變系の状態とはならない。實際には變成作用の初期(低溫)に於ては透角閃石及び方解石以外の礦物相は現はれぬのが普通で、一般に見られる關係は上述の理論より簡單である。それは一つの可能性を除外して居たからであつて、若し四つの固相と一つの氣相と共に液相が存在するとすれば、6 種の共存相は一變系を構成する筈であ

る。實際にこの變成作用の第一階程の溫度-壓力狀態では液相の存在が可能なことは疑ひなく、然りとすれば一變系の關係は不變である。それ故に透角閃石を無水物として取扱ひ又作圖しても、この點より考へその基本理論より離れることなく又その便宜法も正當なものである。

變成作用の次の段階は四面體中に於て CO_2 頂點から下した直線が次に遭遇する三角形平面により示される。その平面は第七圖右に示されたもの

第 七 圖

で、この階程は透角閃石と苦灰石が反應して苦土橄欖石及び方解石が (CO_2 と共に) 生ずることに基いて居る。その反應は次式に示される。

相の組合せは

a) 透角閃石 + 苦灰石 + 方解石 + 苦土橄欖石	}	低 溫
b) 透角閃石 + 苦灰石 + 方解石 + CO_2		
c) 透角閃石 + 苦灰石 + 苦土橄欖石 + CO_2		
d) 方解石 + 苦土橄欖石 + CO_2 + 透角閃石	}	高 溫
e) 方解石 + 苦土橄欖石 + CO_2 + 苦灰石		

本段階の變成作用後に於ても亦三礦物相の共存のみが可能で三角形圖はこの礦物組合せを正しく描寫して居る。第七圖はこの反應の三角形圖對で、苦灰石-透角閃石線は消失し方解石-苦土橄欖石線がこれに代り、互に交叉關係を示して居る。本段階の主要な點は透角閃石と苦灰石はこれより低度の變成段階では共存し得るが高度に於ては共存し得ないことである。

次の段階は第八圖右に現はれた透輝石の生成に係るもので、次の化學式及び相組合せで示される。

第 八 圖

透角閃石 方解石 石 英 透輝石

a) 透角閃石 + 方解石 + 石英 + 透輝石	} 低 温
b) 透角閃石 + 方解石 + 石英 + CO ₂	
c) 透輝石 + CO ₂ + 透角閃石 + 方解石	} 高 温
d) 透輝石 + CO ₂ + 透角閃石 + 石英	
e) 透輝石 + CO ₂ + 方解石 + 石英	

方解石-苦土橄欖石-苦灰石及び方解石-苦土橄欖石-透角閃石の組合せは本段階に於てはそのまま残存する。本段階は既述の段階に比し次の點で趣を異にして居る。即ちこの反應を示す三角形圖對(第八圖)は三礦物の反應により一礦物を生ずることを示し、三種の反應礦物(方解石, 透角閃石, 石英)の成分點は三角形をなして生成礦物(透輝石)の點はその三角形の内部に存在し、従前の二礦物の反應により他の二礦物を生じ兩礦物群が互に交叉關係をなす場合と異つて居る。この變成段階の特徴はこれより低温に於て共存した三礦物——方解石, 透角閃石及び石英——は高温に於て共存し得ないことである。第八圖右に於て石英-透角閃石線が破線としたのは問題を珪質苦灰岩の變成作用に限定し苦土を多量に含有するものを除外して考察を進めつゝある故に、源岩石が苦灰岩より更に苦土に富まざる限り透輝石の共存の下に透角閃石は石英と共に存在し得ないことを示して居る。

作圖上の脱炭酸作用を考へる時次の段階を示す三角形圖は第九圖に掲げた如くで、同圖左に示す方解石-透角閃石線の消失と同圖右に示す透輝石-苦土橄欖石の出現である。その反應式及び相組合せは次の如くである。

第 九 圖

a) 方解石 + 透角閃石 + 透輝石 + 苦土橄欖石	}	低 温
b) 方解石 + 透角閃石 + 透輝石 + CO ₂		
c) 方解石 + 透角閃石 + 苦土橄欖石 + CO ₂		
d) 透輝石 + 苦土橄欖石 + CO ₂ + 方解石	}	高 温
e) 透輝石 + 苦土橄欖石 + CO ₂ + 透角閃石		

この段階の基礎となるものは方解石と透角閃石の共存が低温に於ては可能で高温に於て不可能となることである。若し石英が存在するならば透角閃石と方解石は本段階に達しない以前に於て既に共存し得なくなることは前段階に於て述べたが、斯くの如く透角閃石の不安定状態となることに二つの場合があることは充分注意して區別しなければならない。又透角閃石は苦土に富む岩石中に於ては、更に高い變成度に於ても存在し得るものであるが此種の岩石の變成作用に關しては本論文の範圍外である。

次に來る變成段階はCaO-MgO-CO₂系の反應に關するもので、本段階に於て苦灰石は不安定状態に達して方解石とペリクレーズ (periclase MgO) を生成しCO₂を逸出する。但し透角閃石と共存する時には苦灰石は更に低温に於ても不安定となり、兩者は反應して方解石と苦土橄欖石を生ずる

ことは既に述べた。本段階に於ける反應は次の如くである。

即ち三成分系の四相反應で單變系である。相の組合せは

a) 苦灰石 + 方解石 + ペリクレス	}	低 温
b) 苦灰石 + 方解石 + CO ₂		
c) 苦灰石 + ペリクレス + CO ₂		
d) 方解石 + ペリクレス + CO ₂		
- } 高 温

本段階に於て苦灰石が消失する結果第十圖に示す様に苦灰石-苦土橄欖石線は消失し、又方解石-苦灰石-苦土橄欖石平面は方解石-ペリクレス-苦

第 十 圖

土橄欖石に代り、自今 MgO 隅まで實線を以て表すことが必要となつて来る。他の組合せ即ち方解石-苦土橄欖石-透輝石及び方解石-苦土橄欖石-石英は變化なくそのまゝ残存する。(未完)