

岩石学的過程における物理化学的問題*

D. S. Korzhinskii

黒田 吉 益 訳

訳者前がき：ちかく、ソビエトでは実験岩石学研究所という名前の、主として物理化学的岩石学を進歩させる実験を行なう研究所が建設されるらしい。これは、コルジンスキーが長となつて、かなり大規模な研究所らしい。訳者の聞いた噂では、100人以上の所員をもつたものとならう、ということであつた。現在、コルジンスキーは、ИГЕМ（イゲム）といわれる鉱床学・岩石学・鉱物学・地球化学研究所に属しているが、その研究所の所長はアカデミー准会員のチュフロフ（チュコロフ）という粘土鉱物学者である。もちろん、コルジンスキーはアカデミー正会員であり、多くの地質学者の尊敬をうけており、指導も行なっているが、彼の指導していた理論的な岩石学は、どちらかといえば、広域地質学におされ勝ちであつた。それが、最近になつて、いろいろな形で反省され、新しい研究所の建設ということになつたのであろう。この論文は、その研究所の構想を、概括的に述べたものであるが、コルジンスキーの岩石学の概要を知るにも好適な論文であらう。

鉱物・岩石・鉱石の生成過程は、地質学的な、歴史的なできごととして、その生成条件や方向がきまつているわけではあるが、その基礎には物理化学的過程がある。地質学的現象の物理化学的側面を理解することは、地球内部の資源を予測するうえにも、かくべからざることである。岩石や鉱床の成因論は、その基礎に、はっきりとした物理化学的基準があるときに、はじめて認められるものである。火成作用、交代作用などの物理化学的法則や特徴が確立されないうちは、あるものの成因を火成作用、または交代作用、あるいはその他の作用に結びつけても、それは勝手な解釈であつて、確認することはできなかつたし、すぐ論破されてしまうようなものであつた。

最近まで、鉱業としては、地表に露出しているか、または地球物理学的方法で簡単に発見できるかする鉱床だけで充分であつた。その間は、鉱物の成因という問題は実用的な大きな意義をもっていなかつた。深いところにかくれている鉱床の探査が必要になつてきたとき、鉱物生成の仮説が大きな実用的な意義をもつてきた。それを軽視することは、不合理な探査をして、不必要に莫大な経費をむだにつかうことになるのである。

残念ながら、物理化学的岩石学や鉱物学の発達はゆっくりして、実用や岩石・鉱物の記載データの集積にたちおけている。このような状態は、結局、物理化学的岩石学が、ごく最近まで、実用的意義を示すことができなかつたことに原因がある。このことは、地質学の学生への物理化学教育の軽視や、実験岩石学のたちおくれとなつて現われている。

鉱物生成の物理化学的仮説を発達させるためには、いろいろの研究がある。すなわち、1) 天然の生成過程の解析、2) 実験室における実験的研究、3) 熱力学的計算と構成。

物理化学的岩石学の基本的な方法は、結局は、天然のものの解析である。天然の過程はきわ

* Д. С. Коржинский: Проблемы физико-химической теории петрологических процессов, Известия АН, No. 1, p. 10~25, 1962

めて独得な物理化学的条件で行なわれる。その研究には、しばしば、物理化学の専門家にとって意外な物理化学的問題がおこり、独得の研究や新しい概念や提案が必要となってくる。物理化学的岩石学の課題としては、よく知られた物理化学的法則や実験結果を岩石学へ適用するというばかりでなく、解析された岩石学的素材から、物理化学的法則を抽出するというのもあるのである。

岩石や鉱物の生成条件を研究するには、なによりも前に、その鉱物組成を基礎にしなければならない。個々の鉱物の polymorphism の状態、崩壊、成分、混合物などの研究が大きな意義をもってくる。鉱物の詳細な地球化学的研究も大きな意義がある。岩石学者にとっては、mineral paragenesis の解析が大きな意義をもっている。これらの関係は、外的条件の影響を敏感に反映するので、これらの関係や変化は大量に観察されなければならない。mineral paragenesis はたんに温度・圧力によるばかりでなく、鉱物が形成されるときに存在していた solution の濃度や状態にもよるのである。

Mineral paragenesis の解析は V. M. Goldschmidt によって始められた。彼は若干の変成岩中の mineral association の化学平衡と、それへの Gibbs の “phase rule” の適用とを確立した。P. Eskola は変成岩・火成岩の “mineral facies” という概念を進歩させた。paragenesis の解析の独得な発達は、わが国においてもおこっている。岩石の化学成分の differential movement という考えや、complete mobil components をもった thermodynamic system とか、その thermodynamic potential とかの考えは、化学平衡や、開放系で生じる metasomatism などの解析に適用される可能性をもっている。これは mineral paragenesis の解析の適用範囲を広げ、その意義をましたものである。

また、わが国では多成分系の解析に独得な方法が発達している。現在、わが国の多くの地質学の中心機関では、mineral paragenesis の解析を研究している岩石学者のグループがある。mineral paragenesis の解析の指導書は、最初ソビエトで出たが、その後、英語、フランス語、日本語でも紹介されている。

鉱物生成のいろいろの過程で生じている mineral paragenesis を解析すると、その中には基本的な経験的法則があるが、それを基礎にして、その過程の物理化学的仮説を構成することができる。これらの仮説は、法則的な結論ではなくて、継続している研究の必要な一部分である。すなわち、発達している仮説は、将来の研究方向を示すもので、その方向こそが、その仮説を完成させるものである。あとで、いろいろの岩石学的過程の仮説の発達の段階と方向をみてみよう。

物理化学的岩石学のかくべからざる側面として、実験的研究がある。それは、なによりも前に、いろいろの熱力学的コンスタントを与えるが、天然の条件の結論をくだす場合に、かくべからざるものである。すなわち、melting temperature (または pressure), polymorphic transition の温度、鉱物の崩壊温度、いろいろの鉱物間の反応の平衡温度・圧力などである。反応の熱力学的計算に必要な鉱物の thermal constant も加えることができる。他にも、鉱物生成に意義のある実験的研究も必要であろう。

前世紀の末、今世紀の始めにおけるロシアの岩石学者 (I. Lemberg, K. Kharshev, F. U. Lebinson-Lessing など) の実験的研究は、指導的な意義はあったけれども、その後、実用的課題という圧力のもとで、そのような研究への理解は弱められていった。最近、岩石学の問題を実験的に解明しようという興味が増大してきて、わが国の地質学機関でも実験が行なわれ始めている。しかし、残念ながら、このような実験的研究は、質的にも量的にも充分なものではない。とくに、平衡状態の達成が、正または逆の反応を実現するための方法であるという理解がたりない。最近、むつかしい問題と関連して、いままでの機械も次第に改良されたものが必要となってきている。そのために、地質学機関には特殊な工場が必要となっている。現在地質学機関の実験者は、平衡状態に達しきれない定性的な研究しかできなくて、そのために実験結果の価値が低くなっている。われわれの岩石・鉱物生成についての基礎的な実験研究の組織に

は、断乎たる処置と投資が必要である。根本的な実験的な検討なしには、岩石学的観察からえられた多くの結論も、疑わしいままのこされて、将来の発展をとげることはできない。

伝統的な実験とともに、若干の完全にオリジナルな実験が行なわれるべきである。一例としては、私の filtration effect の研究がある。つまり、solution の各成分が、フィルターをとおして浸透するときは、differential (違った速度をもった) current が生じる。そのような effect は、いままで、有機物質の solution か、あるいは有機物質のフィルターをとおした非有機 solution の filtration についてのみ知られていた。非有機物質の solution とフィルターについての filtration effect は、L.N. Obchinnikob と A.S. Shur の仕事が最初である。

現在では、filtration effect はよりすぐれた方法で IFEM (イゲム) において、V.A. Zhari-kov の指導のもとに研究されている。そして、“acidic filtration effect”，すなわち、浸透して出てくる solution の最初の部分には酸性成分が多いということが確認されている。面白いことに、非有機媒質に filtration effect があるという予測は、物理化学者は否定的であったが、地質学的観察から考えられたものである。したがって、filtration effect の実験的研究が地質学機関でのみ行なわれているということは当然なことである。地質学的過程において、filtration effect は、疑いもなく大きな意義をもっている。すなわち、地殻中では、aqueous solution は岩石の孔隙やとじた割れ目をとおして浸透するものであり、決して自由に流れているものではないことは明らかである。このような実験は完全にオリジナルで、外国では、まだ行なわれていない。

鉱物の thermal constant による熱力学的計算は、鉱物生成の反応と、温度・圧力および存在する liquid phase または gas phase 中の成分の activity との関係を与える。最初の熱力学的計算は V.M. Goldschmidt によってなされた。彼は calcite と quartz から wollastonite が生成される反応を Nernst の式によって計算した。その後、ソビエトの岩石学者も、外国の岩石学者と同様に、いろんな例に、熱力学的計算を利用した。そのような計算のテクニックは物理化学の本によく紹介されている。しかし、thermal constant はかぎられた鉱物(とくに珪酸塩は少ない)だけにしか知られていないので、その地質学における意義もかぎられている。残念ながら、わが国では、鉱物の熱的研究を系統的にやっている機関は一つもない。外国にはそのような研究がある。最近、アメリカ合衆国ではたいへん興味ある研究が行なわれている。その中で、鉱石とそれに伴なわれる鉱物の生成のさいの反応の熱力学的計算が系統的に行なわれている。外部の条件によるいろいろの鉱物の安定フィールドのダイアグラムを作ったり、ore-forming solution の成分との関係を論じる可能性を与えている。

実験的、理論的な研究は、地質学者によってなされねばならない。それは地質学の仕事にとって重荷になるものではない。そのような地質学者や地球化学者は、わが国では、以前は多くなかったけれども、いまはその数もふえている。近い将来、わが国で、実験的研究、熱力学的研究その他物理化学的理論による研究がさかんになることは疑いもないところである。

次に鉱物生成のいろいろの過程における理論の状態をみてみよう。

火成作用

Eutectic についての物理化学的原理は、火成岩岩石学者 I. Vogt によって導入された。incongruent melting の原理 (“reaction principal”) や結晶分化作用の原理は、N.L. Bowen によって 1922 年にたてられた。liquation の原理は F. U. Lebinson-Lessing (1910) によって発表された。マグマの成分に近い silicate melt の liquation の可能性は、個々のものについて、D. P. Grigoriev その他によって実験的に示された。しかし、地質学的データからは、岩石の成因に liquation が大きな役割をはたしたとは認められない。火成岩のいろいろのタイプの間には、liquation によって形成されるようなはっきりした境はなく、移りかわりがあるのである。liquation の支持者が引用するように、いろいろの火山ガラスが、とくに早く冷却するような場合、その混合が早く行なわれずに、fluidal magma が縞となってまじりあっている

現象は、他のことから簡単に説明できる。本当は gravitational magmatic differentiation が大きな意義をもっているのである。すなわち、マグマ溜りの下の部分に、重力によって重いものがだんだんに多くなる。A. N. Zavaritskii は、火山の噴火の順序を例に、その分化の意義を注意した。

最近まで、マグマの結晶作用は closed system の過程とみなされていた (揮発成分の放散、結晶の沈降、残りのマグマのしぼり出され、または wall rocks との assimilation などの可能性を考えなかった)。しかし、そのような観点では wall rocks がその成分を変えて、花崗岩 (または他の岩石) に交代されてゆく花崗岩化作用を説明することができない。

この replacement (ある鉱物が他の鉱物によっておきかえられる) は交代作用と似ていて、ある成分の除去とある成分の添加を伴なう。あらゆる花崗岩は intrusive-magmatic origin であるという古典的な考え方に対して、交代説、とくに地殻中のイオンの拡散を考える見解がある (“transformist”)。

物理化学的観点からは、この仮説はぐあいが悪い。たとえば、その鉱物組成が一定で、実験的にえられた eutectic な成分に近い、ということの説明することができない。

P. Termier の仮説ははなはだ興味深い。彼は活動的な solution の上昇によって、地角斜における変成作用、花崗岩化作用を説明している (“columnar filtration”)。その solution は岩石の組成を変化させ、eutectic な花崗岩質マグマにとかしてしまふ。この説は、私によって、深部において juvenile に生じた “through-magmatic solution” の参加による “magmatic replacement” という考えに発展させられた。

Magmatic replacement は深いところばかりでなく、浅い subvolcanic な条件でも生じる。花崗岩化作用が一番多いけれども、その他閃長岩化作用、はんれい岩化作用、モンゾニ岩化作用などもある。ただ、超塩基性マグマに replacement があるか、どうか、ということは未解決のままである。

Magmatic replacement や through-magmatic solution の仮説には、アルカリ金属の研究が大きな意義をもっている。まず、最初に、マグマの結晶作用のさいに、Na と K が完全に mobil であるということが、私によって確かめられた。そして花崗岩の鉱物組合せには、Na と K の化学ポテンシャルが関係することもわかった。その後、私は、マグマの eutectic や cotectic な成分は、through-magmatic solution のアルカリ度によることを示した。through-magmatic solution のアルカリ度 (その中の K_2O と Na_2O の濃度) は深いところの条件による。したがって、1つの tectonic zone では一定であるが、tectonic zone がちがうと、ちがってくる。through-magmatic solution の深いところのアルカリ度が一定であるということから、tectonic zone における花崗岩化作用によって生じた花崗岩の組成や mineral paragenesis が一定であることの説明がつく。tectonic zone がちがいの、時代がちがうと、これらのものもちがってくることの説明も可能である。

Through-magmatic solution の流れが、filtration (拡散ではない) であることは、塩基性の岩石の花崗岩化作用のさいに、Na と K の化学ポテンシャルが上昇して、定着することから証明できる。このような現象の原因は、火成作用でも後火成作用でも大きな意義をもっている solution 中の塩基の活動である。すなわち、solution 中の強い塩基の 1つの濃度が上昇すると、solution の塩基度が上昇し、あらゆる塩基、とくに、より活動的なものの coefficientcy をあげる。炭酸塩岩の花崗岩化作用のさいに、花崗岩のふちにそって、霞石閃長岩などのアルカリ縁辺相が生じる。塩基性な wall rocks とマグマの “assimilation” の拡散では、マグマのアルカリ度を上げることはできない。through-magmatic solution の流れが浸透するときは、垂直方向へ累帯性が生じる。すなわち、上部から、変成作用、交代作用、ミグマタイトで現わされる magmatic replacement のゾーン、それから火成岩である。ミグマタイトの組織が不均質なのは、それから火成岩へ移行するとき、きたない物質を下へ拡散させることによって生じるのではなくて、through-magmatic solution がミグマタイトの super-eutectic な物質を上へ運び出

し、洗浄することによって生じる。このことから (through-magmatic solution が infiltrate するので)、ある場合には、マグマの中でさえ、不均質性を示すようになると考えられる。火成岩中の小さな不均質性は、液体マグマを通して気泡が移動するからではないであろう。

このような考えのデータという面では、まだ不十分で、今後の実験的研究が必要である。

Magmatic replacement の消滅やマグマの固化とともに、through-magmatic solution の流れも、post-magmatic solution の流れとうつりかわり、消滅する。したがって、magmatic replacement とそれにひきつづく post-magmatic な鉱床形成の間には関係がある。実際、多くの鉱床地域は、はげしい magmatic replacement の行なわれた地域である。また、ある面からみると、magmatic replacement なしに、シャープにコンタクトする侵入岩のマッシュは鉱床をもつてこない。鉱床探査にとって、このような相互関係を研究することは、大いに意義のあることであるし、かくべからざることである。

将来も、火成岩の mineral paragenesis の系統的な研究や、eutectic, cotectic な成分と、もっとも移動しやすい成分、とくに Na_2O , K_2O の activity との関係などを研究することが必要である。そのような研究を基礎にして、eutectic rocks と結晶分化作用によって生じた岩石との区別が可能になるだろう。たとえば、灰長石岩 (アノルソサイト) は多くの岩石学者によって、ノーマルなはんれい岩マグマの結晶分化作用の産物と考えられている。しかし、solution 中の成分の酸一塩基の相互関係の原理からは、他の成因を考えることができる。すなわち、アノルソサイトは、マグマのアルカリ度の上昇、すなわち、アルカリ金属の activity の上昇により、cotectic line が輝石の方から長石の方へかわることのために生じる。このことは、アノルソサイトが閃長岩やカーノカイト、すなわち、アルカリ度の高い岩石と共存することと一致している。

火成岩の生成には、まだ、多くの未解決の問題がのこされている。その一つは超塩基性岩の成因である。monomineralic な超塩基性岩の成分に近いマグマが存在することは、物理化学的観点からは可能性が大きい。また、もし、そのようなマグマが存在するとしたら、まわりの岩石に高温の影響を興えるはずであるが、それがまったくみられない。その他の超塩基性岩の成因、たとえば、結晶分化作用によるものであるとか、固相状態での rheomorphic な侵入であるとか、交代作用によるものであるとか、なども満足ゆくものではない。この問題の概観は、Turner and Verhoogen の本に、よく述べられている。

他の大きな問題は、火成作用と後火成作用との境の問題である。大きな火成岩体では、この境ははっきりみわけられる。すなわち、マグマの残りが eutectic に結晶作用をしたり、後火成作用をおこすフリーの揮発成分と incongruent な鉱物の反応があったりする。残りのマグマが少ないときは、その結晶作用につれて、アルカリ度をかえ、eutectic を関係もかえる揮発成分の濃集がおこり、その結果、eutectic が止まる。かくて、eutectic な花崗岩マグマは、アプライト、ペグマタイト、ある種のアラスカ岩のような "apoeutectic subacidic magma" にかわる。それは、eutectic なマグマでは期待できないような、有色鉱物をまったく含まない優白質岩石をつくる。subacidic な残りのマグマは、はんれい岩にいたるまでの、より塩基性のものの方に特徴的で、その成分に応じたアプライト、ペグマタイトをつくる。

ペグマタイトの結晶作用は、しばしば、大規模な autometasomatism を伴うので、火成作用と後火成作用を区別することは困難である。この問題については、一般的に討論されている論文があるので、ここでは不必要であろう。

塩基性～超塩基性岩の残りの ore-magma や、liquation した ore-magma についての討論は少ない。最近、そのようなマグマの存在について、かなり意見がのべられている。Ti-磁鉄鉱や硫化物の生成が後火成作用であるという意見が強いようである。N. A. Eliseev とその一派の研究によれば、コラ半島の塩基性～超塩基性岩中の Cu-, Pb-硫化物が後火成作用によるという信頼すべき証拠があげられている。

地表に近い噴出岩の場合には、火成作用と後火成作用の間の境は、深い岩石よりも、はっき

りしている。しかし、この場合にもかなりむづかしい問題はある。たとえば、スピライトの問題である。これは、緑れん石をふくんだ緑泥石-曹長石という成分で、プロピライト化作用とにた変成過程である。スピライトは輝緑岩質の岩石が変成されたものであり、プロピライトは安山岩質の岩石に典型的におこるものである。また、スピライトは海底噴出物であり、その中の曹長石は初生的なものであるという考えもある。しかし、第四紀の千島列島の火山では、海水の下で固結した熔岩があるが、それは緑色岩化作用をうけていない。また、ヴィチャージ号が太平洋やインド洋の底から採取した火山岩を、A. T. Suslov, P. F. Andrushenko, 私などが調べたところでも、5~7 km の底の玄武岩も普通の玄武岩で、なんの変化もなく、陸上の普通の玄武岩と区別できなかった。かくて、Szadecky-Kardoss, E. (1960) のいうように、まわりの水の多い岩石から、水を吸って、低温で結晶するような水にとんだマグマから生成されるという説は疑わしい。

このように、いろいろのタイプの岩石についてふくざつな問題があり、それについて、私達は、一般的な地質学的方法だけで解釈する段階に止まっていることはできない。

変成作用の理論

変成作用は、地殻の内的過程にさいして行なわれる岩石・鉱物の再構成作用である。地向斜地域の火成作用、とくに、tectono-magmatic process は常に変成作用を伴う。多くの場合、変成作用により形成されたものは、循環地表水の影響下でおこる風化帯の産物とは区別できる。このちがいは、変成作用は深部の高温のところで行なわれるからであるが、もっとも大きなちがいは、変成作用により生じる mineralization solution のちがひによる。

上にのせられた岩石の荷重と、循環する地下水によりおこる堆積層の epigenetic な変化と、本当の変成作用を区別することは困難である。ここで、私達は、metamorphic water や magmatic water の起源という大きな問題に近づくわけである。極端な "neputunic" な観点は Van-Hise (1904) である。彼は、広域変成作用は meteoric な循環する地下水によって生じると考えた。このように変成作用を理解すれば、epigenesis や風化作用も変成作用に含めねばならないし、それらと広域変成作用のちがひは、深さや温度だけということになる。その観点からすれば、マグマの水は堆積岩から吸いあげられるか、meteoric なものである。

"plutonic" な観点によれば、火成作用、変成作用のさいには、深部、つまり地殻の下からの "juvenile" な水が意義をもってくる。そのような考えからは、マグマの中の水の量は、まわりの岩石中の水の量には関係がない。たとえば、古い片麻岩や花崗岩の中に貫入した火成岩も、未変成の堆積岩の中に貫入した火成岩も、後火成作用の強さには区別がつけられない。堆積岩でも結晶質岩石でも、もし、through-magmatic aqueous solution の上昇する流れがなかったならば、花崗岩化作用は不可能であろう。最近、地質学者の中に、極端な "neputunist" がいて、深部からの水ではなくて、台地の堆積岩中に塩水が形成されるという仮説を出していることは興味深い (V.F. Derpgolits, 1961)。

地表に近い条件では、上昇する solution 中に meteoric な水が加わることも疑いが無い。これは火山地域の温泉に明らかに認められる。ここでの低温のプロピライト化作用や珪化作用などの母岩の変質は、meteoric な噴水によっておこされる。しかし、その強さは、その中で行動する火山ガスによってきまってくる。meteoric な水の役割は、深さとともに早急に減少する。

この関係から、中位の深さに特徴的なグライゼン化作用と、若干浸食された火山岩層中の二次的珪岩とを比較することは興味深い。グライゼン化帯の幅は、数 m をこえることはなく、その帯の中にも、あまり変化していないレリクトの部分がある。二次的珪岩では、かなりはげしい変質が、100m にもわたって均質にある。そして、その中にはレリクト様の部分はない。まわりの岩石も数 100m または数 1,000m にわたってプロピライト化作用をうけている。中位の深さのものでは、火成岩体や脈のコンタクトから遠ざかるにつれて、変成作用は急速に減少する (ここでは結晶片岩はない)。このようなちがひは、おそらく、2km ぐらいまでの深さ

の火山岩層では、meteoric な水の供給をうけているためであろう。その水は、magmatic solution やガスの添加によって活動量を強められる。より深いところでは、上昇する magmatic solution のみが働くからであろう。

変成作用のさいの水と炭酸ガスの行動は、きわめて大切である。しかし、実験データや一般の考察が不十分で、mineral paragenesis の解析データのみが、その意義をとく状態である。その解析から、変成反応のさいに、水蒸気の弾性は深さ（一般的な圧力）と明らかな関係を示さないが、CO₂ の弾性は明らかに関係があることがわかる。これから、変成作用は liquid aqueous solution の存在するところのみおこるといふ仮説を説明することができる。その solution は、普通 CO₂ が飽和しており、その余剰は気相となっている（D. S. Korzhinskii, 1940）。浅いところでは、低い圧力のために、温度が上昇したとき、liquid aqueous phase の存在は不可能である。したがって、浅いところでは、中温の変成作用はないはずである。実際、浸食されていないか、または、少ししか浸食されていない（1 km のオーダーの深さ）火山岩層では、中温の変成作用、たとえば、中温の（緑れん石をもった）プロピライト化作用、後火成作用的なスカルン化作用がない。高温の火成作用の段階から、直接低温の後火成作用に変わる。

もちろん、水や CO₂、とくに CO₂ を否定する意見もある。H. S. Yoder によれば、変成岩中の水の量は、変成作用の温度によるのではなく、変成作用の時存在していた水の量による。すなわち、dry とか wet とかの条件による。この見解によれば、変成反応のさいの水は、岩石中に存在する他の酸化物と同じことになる。

岩石の孔隙中の solution には、いろいろの成分がかなり含まれているので、その水蒸気の弾性は、純粋な水蒸気の弾性と較べて、たいへん低い。したがって、pore-solution の存在下での hydration-dehydration の反応の平衡温度は、純粋な水の liquid phase または gas phase の存在下よりも低いはずである。残念なことに、実験データを利用するさいの解釈に、このことが考えられていない。このために、加水鉱物の生成温度を高く考えすぎている。実験データによれば、水蒸気の圧力のもとで、滑石は 800°C まで安定である。しかしながら、天然の条件では、滑石は低温鉱物であり、おそらく 400°C 以上では安定ではないであろう。かくて、Geophysical Laboratory で始められた、中性のガス、アルゴンをまじえた実験は大きな意義をもっている。水蒸気の圧力は一般的な圧力の一部を構成するだけである。私達もそのような実験を行なわねばならない。

揮発成分をもっていない鉱物間の反応の実験的研究は、その温度・圧力が大きな意味をもっており、そのデータは天然の鉱物の形成条件に直接使うことができる。液相または気相の参加しない鉱物の反応は圧力によるということは、現在では疑いのないところである。変成作用の温度・圧力条件は、実験のデータを基礎にして、多くの学者、たとえば、V. S. Sovolev などによって考えられている。この問題では、ワシントンの Geophysical Laboratory の実験的研究が、独占的に大きな価値をもっている。ここでは、若干の広く分布している鉱物の形成反応が、意外に高圧であることを指摘するにとどめる。たとえば、中位の温度の結晶片岩に普通に分布する藍晶石の生成には、1 万気圧以上の圧力が必要である。ひすい石についても同じである。

Mg-ざくろ石 (pyrope) にも、同じく高圧が必要とされている。もし、圧力が上に荷重されている岩石で形成されるとすると、多くの広域変成作用の深さは、この実験データからは、40 km あるいはそれ以上ということになるが、それはいままでの地質学者の考えをはるかにこえている（大陸の下では、モホロヴィッチの深さは、普通 35 km）。そのような高圧は、荷重ではなくて、tectonic な圧縮によるという説もある（H. G. Backlund, V. S. Sobolev）。しかし、tectonic な圧縮が、広域変成作用に典型的な数 100 または数 1,000 km にわたって、一様に生成されるかどうか、明らかではない。ごく最近、金属の polymorphism の研究において、超高压実験の圧力が系統的に再研究された。

したがって、変成作用の深さという大切な、一般的な地質学的問題は、まだ確定したものでなく、予報的なデータと仮定にしかすぎない。

実験的研究と天然の mineral paragenesis の解析をむすびつけるために、変成作用と他の内因的過程の条件の間における、温度・圧力と pore-solution の成分との関係を区別することは大切である。そのようにして、はじめて、しばしば実験学者がするように、地質学的結論に間違いをしないですむのである。また、mineral paragenesis の解析を、より有効にし、質的な結論に支えを与えることができるのである。

はげしい変成作用のゾーンでは、水と炭酸ガスの関係のみでなく、他の成分についても、組成の変化が生じる。すなわち“ノーマル”な変成作用は、交代変成作用に移りかわる。とくに、 Na_2O と K_2O の移動性は特徴的で、広くみられる。特別の温度・圧力条件で生じると考えられているある種の鉱物相が、solution のアルカリ度にむすびついていることは、明らかである。そのような facies としては、hypersthene-gneiss (“granulite”) と glaucophane-schist がある。

紫蘇輝石とカリ長石または酸性斜長石の組合わせである hypersthene-gneiss (“カーノカイト”) の形成には、温度の上昇のほかに、pore-solution 中の K と Na の activity の上昇、すなわち、アルカリ度の上昇が必要である。したがって、カーノカイト片麻岩は、古い始生代の花崗片麻岩類に典型的な K-アラスカ岩タイプのアルカリ度の高い花崗岩と伴なう。それと同時に、カーノカイトは塩基性岩、たとえば変輝緑岩などの花崗岩化作用、交代変成作用の産物として、始生代、またはそれより若い岩石中にも形成される。アルカリ度が上昇すると、アルカリはより酸性のものから、より塩基性のものへと infiltrate する。それは solution 中の塩基の相互強化の原理による。カーノカイトや藍閃石片岩の問題は将来の研究テーマである。

藍閃石片岩の問題には、多くの文献がある。それは、しばしばエクロジャイトと伴ない、その輝石はひすい石分子を多く含んでいる。その形成を、多くの地質学者達は high tectonic pressure のゾーンとむすびつけている。藍閃石片岩はアルカリの多い単斜輝石や角閃石からなっており、その典型的なものは鈍輝石・ひすい石・リーベッカイト(これは普通優白質層におおい)である。藍閃石片岩は塩基性の岩石(輝緑岩など)中に生じたり、超塩基性岩のコンタクトに生じたりする。このことは、藍閃石片岩相がアルカリ度の高い相である可能性を示すものである。アルカリ度が高いと、塩基性岩の中をノーマルなアルカリ度の solution が流れるさいに、その中のアルカリ金属(この場合 Na)の activity を上昇させる。変成作用のさいのアルカリ度の役割は N.P. Semenenko も強調している。

広域変成作用のはげしいゾーンでは、アルカリ金属の添加または除去という移動性が現われる。mineral paragenesis の解析が示すように、塩基性岩の交代作用のさいには、Na と K の activity が上昇する。これは、広域変成作用のさいにも、infiltration の特徴があることを示すものである。この infiltration は aqueous solution が上昇して、岩石を通して浸透するからである。かくて、solution の成分の acidic-basic interaction の説は、変成作用の特徴(それは transformist たちのいうように、変成岩が拡散によって生成されるという考えもふくめて)を、一義的に解決する可能性を与えるものである。

交代作用と後火成作用

岩石の metasomatic replacement や、脈の中の鉱物・鉱石の沈殿は、aqueous solution の流れのもとで生じる。流れと、そのまわりとの相互作用は、最近研究され始めたばかりのふくざつな kinetic の法則に従っている。交代作用や後火成作用を説明するとき、いままでは、きわめて単純化した表現を用いていた。

たとえば、metasomatic zoning をみてみよう。solution の filtration, または diffusion により、古い鉱物が新しい鉱物で replace されたり、または、solution 自身の replacement が生じたりする。このような現象の説明や予測のためには、天然の現象から抽出した物理化学法則をた

て必要がある。mineral paragenesis の解析データを基礎にして、そのような抽出をするさいには、岩石と pore-solution の間には“モザイック”または“local”な平衡があると仮定している。この仮定から、infiltration や diffusion-metasomatic zoning の説が構成される。すなわち、filtration や diffusion の流れにそって、若干の metasomatic zones が生じるわけである。ゾーンの境はシャープであり、各ゾーンのフロントでは、前のゾーンの鉱物の1つが完全に replace される。infiltration と diffusion を区別するには、明らかな基準がある。すなわち、diffusion による zoning の場合には、1つのゾーンの中で、鉱物組成の変化があるが、infiltration の場合には、そのようなことはない。

以前は、metasomatic replacement は、交代される鉱物が徐々に減少し、交代する方の鉱物が徐々にふえる、というようにして進行すると考えられていた。したがって、replacement のフロントがシャープな場合は、solution がかわり、交代作用の条件がちがった証拠とされていた。すなわち1つの solution の流れと母岩との、1つの相互作用という考えではなくて、solution のいろいろの部分によってひきおこされる、互いに重なり合った過程というわけである。その solution 中では、それがマグマ溜りをはなれる瞬間に、ことなつた性質の部分が生じたと考えているので、このような交代作用の過程には、多くの stage、多くの phase があるということになるのである。

Post-magmatic solution には、性質のちがった部分 (portion) がたくさんある、という説は、素直で論理的に正しいので、いまでも命脈をたもっている。また、ふくざつた交代作用の現象の説明に、各場合により、“スカルン化をおこす”、“グライゼン化をおこす”、“珪化作用をおこす”、“硫化物の”、“緑泥石化をおこす”……といった独得の solution を考えているが、これは、きわめて単純な考え方である。このような態度は不十分なものであるということは明らかである。すなわち、特別な“スカルン化をおこす” solution というようなものは存在せず、任意の火成源の solution が、珪酸塩をもった炭酸塩岩にあって、高温の条件では“スカルン化をおこす” solution になるということが明らかにされている。

後火成作用において、現在、支配的な“脈動説”によれば、冷却し、結晶するマグマから、solution が分れるときの fractionation が意味をもっている。それは時代とともに組成が変わるものである。post-magmatic solution をみちびく構造的割れ目が、とじたり開いたりすることにより、その過程が中断し、いろいろの成分の solution が脈動的に上昇するようになる。かくて、ある学者は、wall rock と反応して、acidic solution がだんだん中性化するような、solution の進化があると考えている。

脈動説は、P. Niggli, A.N. Zavaritsukii, V.A. Nikolaev などによつてのべられているように、揮発成分を含む珪酸塩系の結晶作用の物理化学を基礎にしている。この説によれば、珪酸塩 melt の結晶作用の時は、melt 中に含まれている揮発成分の fractional distillation が生じるはずである。残念ながら、この法則はせまい範囲にしか適用できないので、温度勾配を無視できるということ、いままで誰も注意しなかった。これは differential effect であつて、全マグマ溜りに integrate することはできない。というのは、マグマや珪酸塩鉱物は、熱伝導度が小さいので、その結晶作用の時には、著しい温度勾配が生じるはずである。実際、後火成作用は、マグマのマス縁部が、すでに結晶し、冷却したところ始まるのである。したがって、深いマグマ溜りで分れた、高温の昇華物は、結晶しつつあるマグマをとって上昇してゆくうちに、だんだんに温度が下がり、高温から低温までの、すべての полон のスペクトル^{注1)}があることになる。かくて、あらゆる полон のスペクトル^{注1)}の混合がおこり、fractionation はおこらない。あらゆる場合、地質学者は、fractional distillation について、アイデアから指導されるべきでなく、観察された関係の解析に基礎をおくべきである。

後火成作用において観察される多くの法則は、脈動説で充分満足できるほど説明されるわけではない。とくに、岩石中の塩基をアルカリ化することと、そのアルカリ化された岩石の割れ

注1) 原語のまま、意味不明。

目に、その塩基の沈殿をおこす現象が連続的に起こっていることは説明できない。これは、後火成作用の solution 中の“酸性成分の波”という新しい仮説をたてる基礎となっている。

酸性成分の波という仮説は、若干の原因に基づいている：1) through-magmatic solution は、結晶しつつあるマグマをとおってゆくとき、酸性成分にとむようになり、後火成作用につづく。2) 気相が濃集しているとき、液相の温度が下がると、solution の酸性度が上昇する。solution の酸性度が最大になるのは、それが分離した場所から若干の距離のところである。3) 酸性成分は、“acidic filtration effect”によって、塩基性のものや溶媒（水）よりも早く、岩石やとじた割れ目をとおして浸透する。filtration や acidic-filtration effect の存在は、L.N. Ovchinnikov, A.S. Shur, V.A. Zharikov の研究によって示されている。

このような前提から考えて、上昇する post-magmatic solution の流れでは、酸性成分の濃集する波が生じるはずである。この結果、solution の流れがとおってゆくところでは、その酸性度がだんだん増加し、岩石中の塩基をアルカリ化し、塩基度を下げる。酸性成分の波が通過してしまると、酸性成分が退去し、酸性度がだんだん下がる転化が生じる。かくて、solution はふたたび塩基度をまし、塩基を沈殿させるようになる。酸性度が増加するときは、塩基のアルカリ化は広いフロントにひろがり、酸性度が下がるときは、割れ目にそって塩基の沈殿をおこす。

酸性成分波の説からは、後火成作用が、上に向って、アルカリ度とともに沈殿が強くなるような、垂直方向の zoning があるということになる。これは、塩基性岩（炭酸塩岩・輝緑岩など）をとおってゆく post-magmatic solution の流れが、上部にある酸性岩さえも珪化させるほど、アルカリ化の能力をたもっていることを、よく説明できる。脈動説では、そのような場合をよく説明できない。酸性成分波の説は、また、火山地域の岩石の変成のさい、magmatic solution と浅い水との結合した作用もよく説明できる。酸性成分の波は、juvenile water から meteoric water と移動することができ、後者をとおして上昇しながら、典型的な熱水現象をひきおこす。meteoric water が、たんにうすめたというだけでは、そのような攻撃的な solution はえられないであろう。

酸性成分波の説は、はなはだ schematic なもので、多くの問題があり、多くの研究をしなければならぬ。たとえば、実験や計算によって、鉱物やその成分の、相対的な塩基度を決定しなければならない。acidic-filtration effect や filtration effect の実際的な研究も始まったばかりで、将来の問題である。

これと同時に、この説は鉱物生成の問題にも近づきうるものである。たとえば、酸性成分の波の通過によっておこる岩石成分の hydrothermal acidic-alkalic differentiation は、まわりの岩石から脈の中への金属の濃集をうながす。これは、古い lateral-segregation を新しいレベルで復活させたものといえる。くわしい解析のもとで、いろいろのタイプの鉱床の生成における hydrothermal differentiation の役割を評価することが必要である。

花崗質岩石でない他の岩石中で、post-magmatic solution の differential な流れがおこるといふことは、問題にならないであろうか？ 花崗質～中性のアルカリ岩（霞石閃長岩タイプの岩石をふくむ）では、後火成作用のさいに、酸性成分の波は、明らかに生じるが、はんれい岩やノーマルな超塩基性岩では、そのような現象は明らかでないし、また、そのような観点から研究されていない。carbonatite を伴うアルカリ超塩基性岩の現象はたいへん面白い。この場合は、ペグマタイト過程では、最初に酸性度が上昇せずに、アルカリ度が増加する。そして、それは珪酸塩岩を carbonatite、最初は方解石、ついでドロマイトにかえる。ついでアルカリ度が下がり、方解石・ドロマイトが珪酸塩（斜長石や単斜輝石など）によっておきかえられたり、鉄の炭酸塩がおきかえられたりする。断片的な印象（ノルウェーの carbonatite の巡検）から、ここでは、酸性でなくアルカリ成分の波があると推測できる。

酸性成分の濃集、または、その activity coefficient の増加は、鉄の酸化物を硫化物に変える。そして、酸性の波の通過のあとで、部分的に逆におきかえられる。また、酸性度の上昇

は、酸素の分圧を若干さげ、逆に、solution の酸性度が低下すると、酸素の分圧が上がるということに興味深い。

Solution の酸性度の変化、成分の activity の変化は、交代性鉱物の isomorphic components やその中の混合成分においても、影響がおこるのであろう。かくて、ペグマタイトや熱水鉱物のくわしい地球化学的研究は、とくに面白いのである。

いままでのべた変成岩・交代岩の mineral paragenesis の解析からは、変成作用は aqueous solution によってのみひきおこされる、という結論がみちびかれる。これは、結局後火成作用の過程であり、それは、現在多くの地質学者により注意されている鉱物生成の“気成 (pneumatolytic)” 段階の存在の証拠の1つでもある。

結 論

多くの、そして急速にふえつつある岩石や鉱物の記載データを利用し、一般化することは、岩石学的・鉱床学的過程の物理化学的理論の発達なしでは不可能である。現在、わが国では、この方向での基礎的な実験的研究がたちおけている。このような不十分さは、早急にとりのぞく必要がある。また、学生や地質学者への物理化学・地球化学の教育をすることも必要である。

それと同時に、実験的研究は、地質学的研究と密接な関係をもって行なわれねばならないし、地質学的研究に生じた問題に答えねばならない。そうでないと、実験的研究は、その伝統的な方向のみにかざられて、地質学者にはあまり興味のないコンスタントを集めるだけのものになってしまうであろう。