

## 資 料

550.4 : 553.2

### 二次変質作用 (Katagenese)

A. I. Perel'man

小 西 善 治 訳

二次変成過程の研究は、常に地球化学の主要な課題の1つである。この研究は、地球化学的探査の広範な発達に関連して重視されるようになってきた。これは、元素の二次変成移動法則が地球化学的探査の理論的基礎をなしているからである。二次変成に対して少なからず関心が高まってきたのは、有用鉱物の巨大な二次鉱床の成因問題である。現在では、二次変成成因の多くの面は、全面的に掘り下げられて研究されている。しかし現代の地球化学の考え方に比較的僅か取り入れられているのは、二次変成輪廻の諸過程である。このような過程、すなわち二次変成作用に関する考え方は、すでにフェルスマンによつて1922年に科学に導入された。1934年にはフェルスマンは次のように述べている。“私は、含水盆地から分離された新沈殿層が出現後に行なわれる岩石類の化学的変成の全体——陸地の表面で行なわれる瞬間までは、大気との境界面でみられる——を、二次変成作用と名付ける”。二次変成作用は、岩石学的・地球化学的に多様な岩石層または層準間の溶液交換と明らかに結び付いている。この場合主要な活動は酸素、炭酸、水、部分的には珪酸、硫酸である。カルシウム華を含む空洞の形成、二次結核の生成、溶解割れ目の生成——カルシウムまたは石英で充填されている——岩石の珪化、白雲石、山コルク等の形成を伴う苦土富化。

二次変成作用過程の主要な作因は、岩石類との接触地帯を比較的僅かな距離の間移動する地下水である。地下水が相当の距離の間移動する場合にも、フェルスマンが二次変成作用と名付けることを提唱している新鉱物集合体が生じる。

フェルスマンによれば、地下水の浸透に基づく二次変成作用と変成作用とは、同一の要因——2つの作用面の境界面を求めることは難しい——によつて生じることを考慮に入れ、二次変成作用という術語を残して、その解釈を拡げることが提案する。すなわちこのようにすれば地下水による二次変成帯の岩石に起こる変化の全体を二次変成作用で明らかにすることができる。

二次変成作用過程は、大きな地球化学的意味をもつ要因である。地質学時代には、地下水は地殻上で大規模な化学的仕事を遂行し、多くの場合、堆積岩を根本的に変えた。このような過程とは、有用鉱床の生成、解体、鉱床周辺にいわゆる汚染帯の形成、地下水の化学的組成の形成および実際上地質学的に重要な他の多くの現象の発生と結び付いている。しかし二次変成作用過程の研究は、充分に行なわれていない。この過程と結び付いている多くの現象は、科学的研究としてほとんどとりあげられていない。

二次変成作用の理解を進めるために大きな意義をもっているのは、この種過程の地球化学的研究である。その基礎はフェルスマンによつて築かれた。本論文では、Ruskii Plate-forme, カザスタン、中央アジアで行なわれたソ連の研究データにより、二次変成作用の若干の一般の問題を検討しよう。

二次変成作用の特徴的特性は、岩石層におけるその作用の著しく不規則な分布を示すこと、一定の層準、地層、構造線の発達地帯にみられることである。二次変成作用は、主として帯水層準および帯水岩石層との接触地帯に発達しているが、帯水層準の中央部では、比較的变化の度合いが低い。したがって、二次変成帯では、著しく変質されている岩石類とともに、“Seal”

A. И. Перельман: Катагенез, Известия академии наук СССР, Серия геологическая №8, p. 10~19, 1959

状不変岩石ブロックまたは低度の変成作用岩石ブロックを明らかにすることが可能である。

二次変成作用のさまざまな現象を研究すると、各現象に対しては、一定の化学的元素で特徴付けられることを確認することが容易である。すなわち、元素の移動は、所与の二次変成型の地質学的特性を形成するからである。この種元素(イオンおよび化学的結合)類を“標式形態元素(typomorphy)”と名付けることを提唱する。

二次変成作用の標式形態元素類、イオン類、化合物類には、遊離酸素、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  およびその他が属する。

二次変成作用の研究およびこの過程の地球化学的分類の基礎をなすものは、われわれの考え方によれば、標式形態元素類の移動である。

二次変成作用で最も大きな役割をなすのは、所与の条件の下で活発に移動するとともに、ある程度濃集する性質をもつような元素類である。したがって易動度の低い元素、例えばチタンは、クラーク数が高くても、二次変成作用過程の地球化学に大きな影響を及ぼさない。そこで易動性成分の法則をつくらることができる。二次変成作用の地球化学的特性は、この法則により、最も活発に移動するとともに、同時に濃集度の高い元素類——標式形態元素となる——で決められる。

標式形態元素類には、2グループが認められる。第1群には、空中移動の標式形態元素および化合物が属する。二次変成作用過程に及ぼす影響はとくに大きく、多くの場合所与の二次変成作用型の地球化学的特性を決める。Vernadskii は、気体の地球化学的役割を始めて強調し、Ovchinnikov は、Vernadskii の学説をさらに発展させ、地下水の地球化学的分類を行なった。気体は、二次変成作用過程の酸化、還元条件に主として影響を及ぼす。

空中移動については、二次変成作用が行なわれる3主要環境を分けるべきである。

(1) 酸化環境 水は遊離酸素を含む。二次変成作用は、特徴的地球化学的特性をもつ酸化環境条件の下で行なわれる。標式形態元素は酸素である。

(2)  $\text{H}_2\text{S}$  を伴わない還元環境 水は遊離酸素および他の強酸化剤を含まない。しかしそのなかには、多量の  $\text{CO}_2$ 、ときにはメタンおよび他の二酸化炭酸類を含むが、硫化水素は、存在しないか、僅かを含む。このような条件の下では、鉄およびマンガンが  $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$  の形態で移動する。

Scherbakov のデータによると、鉄は、 $\text{H}_2\text{S}$  95~105 mg/l 以下を含む水では移動するが、 $\text{H}_2\text{S}$  の含量が多量になると、すべての鉄は、硫化物の形態で沈殿する。標式形態気体は、 $\text{CO}_2$ 、ときには二酸化炭素類である。

(3) 還元硫化水素環境 水は遊離酸素およびその他の強酸化元素を含まない。そのなかには、多量の硫化水素、ときにはメタンおよび他の二酸化炭素を含む。このような条件の下では、難溶性の硫化物が形成されるので、鉄および他の多くの金属類は、移動しない。標式形態化合物は、硫化水素であつて二酸化炭素もしばしば標式形態気体に属する。

第2、第3環境間の区別は、酸化還元電位の大きさのみで決められないことをとくに強調しておこう。酸化還元電位は、同一の大きさであつても、移動は  $\text{H}_2\text{S}$  の有無によつて著しく異なつてくる。

標式形態元素の他のグループには、真溶液またはコロイド溶液の形態で移動する水を媒介とする移動元素類および化合物が属する。すなわち塩素イオン・炭化水素イオン・カルシウム・マグネシウム・ナトリウム・珪素およびその他等である。この種の移動も、多くの場合その特性を決定し、二次変成作用に大きな影響を及ぼす。

空中移動は、イオンまたは分子形態(例えば  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  での酸素、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$  での炭素)で、水溶液でも移動する。しかしガス状態——そのなかには水に可溶性のガス形態——で移動するのが特徴となつている。水媒介移動では、ガス(気体)状態の運動は、特性ではないが、特性となつている場合が少なくない。

水媒介移動の標式形態元素類は、天然水のアルカリ、酸性条件およびその鉱化作用を著しい

第1表 標準形態元素・イオン・化合物を基礎におく二次変成作用のある種の地球化学的型

アルカリ 酸性条件	標準形態水媒 介移動物質	標準形態空気移動物質		
		O <sub>2</sub> (酸化環境)	H <sub>2</sub> S を伴わない還元環境の CO <sub>2</sub> と ときには CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> S (H <sub>2</sub> S を伴う還元環境)
強酸性	H <sup>+</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ときには Al <sup>3+</sup> , Fe <sup>3+</sup>	1. 硫酸質	—	—
弱酸性	H <sup>+</sup> 有機酸 Ca <sup>2+</sup>	2. 酸性 4. 炭酸カルシウム	3. 酸性 gley 5. 炭酸 gley	—
中性, 弱アルカリ	Cl <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	6. 含塩	—	7. 含塩, 硫化物
強アルカリ	OH <sup>+</sup> , Na <sup>+</sup> , HCO <sub>3</sub> , SiO <sub>2</sub>	8. ナトリウム質	—	9. ナトリウム質, 硫化水素質

度合において、決定する。

二次変成作用のおおの地球化学的型は、水中に共存して岩石に共作用を及ぼす空中、水媒介移動元素(化合物)類の一定の組合せで特徴付けられる。二次変成作用の地球化学的分類は、これを基礎において求められるであろう(第1表参照)。第1表では、ある種の二次変成作用型のみが掲げられてあるが、上述の分類原則は、他の型の分類にも、また亜型、種の分類にも適用できるであろう。

第1表に示されてある二次変成作用型は、地層断面に普通よく固定されている。多くの場合、線状に発達した変成帯(古期地下水面)を形成し、それぞれ新期変成物質を含んでいる。この種変成帯は、褐色または赤色地層中における暗藍色および緑色色調により、カルシウム・石膏・塩化物の濃集層準により、また珪化度、鉄化度によりしばしば認められる。多くの場合、古期地下水面は、構造的特性(例えば粘土層中における砂質層準)に基づいて容易に確認される。この種の現象は、こんにちに至るまで、あまり研究されていない。もちろん多くの地域では、堆積岩は地下水によつて著しく変質されている。多くの場合、二次変成作用帯の新形成は、総合連続変質作用階梯および同時性(syngenetic)階梯における堆積物集積の特殊条件の指標とみなされていた。

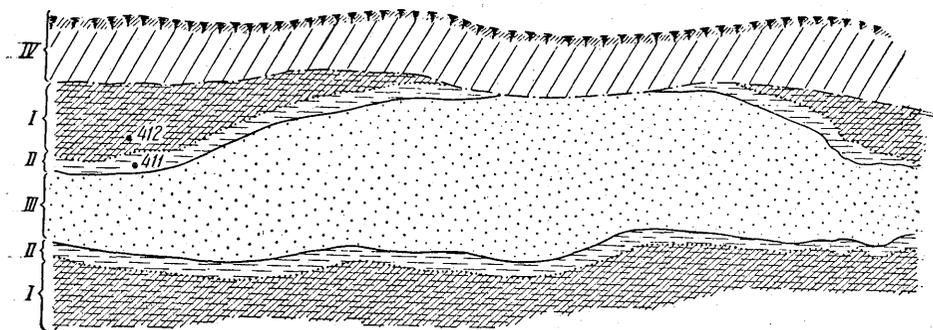
本論文の枠内では、上述の二次変成作用の全地球化学型の特性を掲げることは不可能である。そこでここでは簡単に解明し、第3型、第5型、第8型のみを詳細にとりあげることにする。

“硫酸質二次変成作用型(第1型)は、硫化物または遊離酸素を含む岩石類と酸性の地下水との接触によつて発達する。この場合には、硫酸が形成され、水の pH は3~4、ときには1~2に低下し、他の条件では易動性の低い化学的元素類が強烈に移動する。この場合には、Al<sup>3+</sup> と Fe<sup>3+</sup> は、多数の二次鉱物類、例えば、ジャロン石・明礬土・クエルシー石等が形成される。対応現象は、硫化物鉱床地域で詳細に研究されている。

酸性二次変成作用(第2型)型は、CO<sub>2</sub>、ときには有機酸を含む弱酸性水(pH 4~6)で形成される。この種水は、硫酸質二次変成作用よりも、著しく低度の岩石変質を行なう。この過程の研究は、著しく遅れている。鉄およびアルミニウムは、酸性二次変成作用の下では低度の移度能力をもっている。この型の特徴は、粘土類の形成である(とくに水雲母・高陵土・ハロサイト)。対応過程は、湿潤気候条件で非炭酸塩岩石中で進行する。

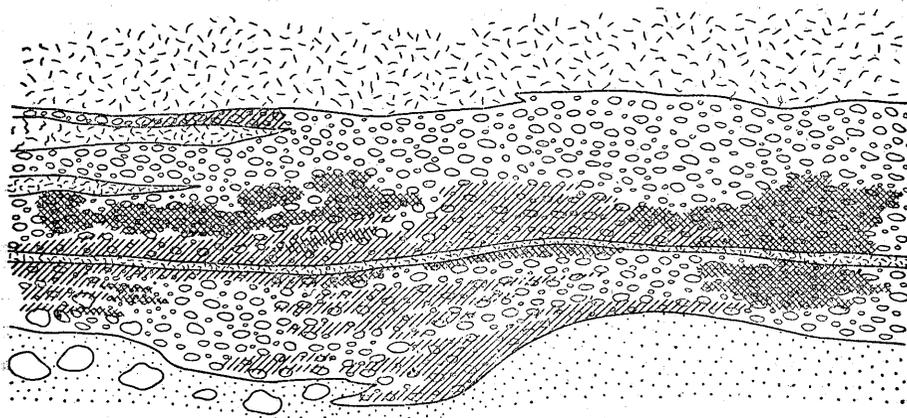
二次変成作用の酸性 Gley 型、および炭酸塩 Gley 型が始めて分類されている。すなわちこの型が広域に分布していることは、中央アジア・カザスタン・Ruskii Plate-forme(沿ウラル地帯、ドンパス)の赤色岩層を研究したさいに確認された。すべてこれらの地域では、赤色岩層の非含水層には、層状地下水の活動で生じた二次変成質変質が発達している。

含水層準は、一層粗粒の岩石類(砂・礫)中に賦存していたが、粘土およびシルト岩は耐水層



I 海成シルト岩 II gley 質緑色シルト岩 III 白色ときには褐色砂岩—古期含水層  
IV 第四紀堆積物 411, 412 は試料採取箇所 分析結果は第 2 表に掲げられてある

第 1 図 シルト岩中にみられる酸性 Gley 二次変質作用 (1:30)



1 loess 2 礫岩—古期含水層 3 砂岩 4 鉄化 5 マンガン化

第 2 図 古第四紀堆積物中にみられる炭酸塩質・Gley 二次変成作用

を形成していた。ときには、粘土およびシルト層中に含まれている割れ目に富む石灰岩が、含水層となつてることがある(第 1 図, 第 2 図)。

赤色岩層の色調は、周知のように、砂粒、塵状物質および粘土粒を取り囲む水酸化物および酸化鉄の被膜によつて生じるものである。鉄の類似の“被膜状賦存形態”は、酸化条件が還元条件に置き換わるさいに、鉄が容易に溶解するための前提を造成する。

還元環境下における鉄の移動は、地球上の湿潤帯(湿潤な熱帯, ツンドラ, タイガー)の現世の湿地にしばしばみられる。周知のように、鉄化湿地帯は、鉄が運び出されるために、暗藍色または、雑色、オカー状暗藍色色調を帯びている。対応現世過程は、相当詳細に研究されているので、Gley 化と呼ばれる。研究結果によれば、Gley 化は、赤色岩石層中にきわめて明白に表われ、現世の湿地帯における主要特性として特色付けられる。しかし赤色岩層中における Gley 化は、地表土壌化過程(湿地化)と関連性がないが、過去の地下水層準または過去の層間地下水層準と結び付いている。Gley 化層の賦存深度は、地質学的データから推定すると、ときには数 100m に達することがある。

二次変成作用性 Gley 化の機構は、おそらく次のような状態であろう。赤色岩層中に含まれている含水層準の水は、明らかに酸素を含まないが、 $\text{CO}_2$  は、 $\text{Fe}^{3+}$  を還元する能力をもっている。この場合、砂・礫およびその他の帯水母岩は、Gley 化作用を蒙り、そのなかの鉄は、 $\text{Fe}^{2+}$

に還元され、 $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$  の形態で運びだされる。このように過去の含水層準は、鉄を含有しているために、その鉄の含量は低下し、地層は、緑色または暗藍色の色調（ときにはオカー状斑点を伴うことがある）を帯びる。したがって、この種の地層は母岩が褐色・赤色・黄色、background を形成しているのできわめて明白に識別される。

耐水岩石類（例えば粘土）の上部および下部層は、毛管作用に基づく吸上げによつて濡れ状態になり、そこに Gley 化が発達し、鉄は還元され、含水砂層に移動し、次いで含水層から運び出される。その結果として粘土および含水岩石類との境界面にある他の耐水岩石類も、暗藍色、藤色または緑色の色調を帯びる。この種舌状帯は、中間雑色帯を経て、新鮮な（色調不変）粘土およびシルト岩石に漸移する。このように、堆積岩中でしばしば出会する厚さ 1 m 以上の類似の斑点状 Gley 帯は、地下水の過去の活動の痕跡である。

Gley 帯は、非炭酸塩質帯赤色岩層（酸性 Gley 化二次変成作用型）および炭酸塩質帯赤色岩層中に分布している。第 1 の場合には、マンガン・カルシウム・鉄・磷およびその他の元素類<sup>註1)</sup>（第 2 表を参照）が盛んに運び出される。炭酸塩岩石類の下での Gley 化二次変成作用の場合には、元素類の移動は弱い、このような炭酸塩環境の下では鉄・磷・マンガンおよび他の元素の搬出が認められている（第 3 表参照）。Gley 化岩層から侵出された鉄およびマンガンは、同一古期含水層の賦存範囲内の隣接地帯に集積していることがある（第 2 図）。

最も盛んな Gley 化現象は、粘土またはシルト岩と砂岩および礫岩との薄層（数 m 以下）が互層をなす岩層中でみられる。砂岩・礫岩および粘土の均一な厚層（10~100m）中では、Gley 化は、普通認められないかまたは低度である。Gley 化現象は、周知のように赤色岩層中に賦存する含銅砂岩型鉄床に特有なものである。

沿ウラル、ドンパス、中央アジア含銅砂岩鉄床およびソ連の大規模銅鉄床——Dzhekazgan——の鉄床は、赤色岩層の Gley 化層中に賦存していることが確認されている。Gley 化がこの種鉄床における銅の濃集に、どのような役割を果たしたかについては、現在のところ充分明らかにはされていない。Gley 化は、赤色岩層中に賦存する他の有用鉄床に対しても、特徴的な現象である。

炭酸カルシウム性二次変成作用（第 4 型）は、炭酸塩岩石中で発達する。その例としては石灰岩中における帯色化過程があげられる。含塩（第 6 型または含塩、硫化物型）は、遊離酸を含むかまたは含まないような強硬化地下水の循環によつて形成される。この過程は、乾燥気候地域にとくに分布している。この種の現象の指標としては、岩石の塩汚染化と石膏化とがあげられる。

ナトリウム二次変成作用（第 8 型）下では、アルカリ（ナトリウム質）地下水の影響下で進行する堆積岩の変化過程がとりあげられる。この場合には、pH は、普通 8~8.5、ときには 10 に達するが、11 を示すことがある。この水の硬化度は、普通高くなく、1 g/l を超えない。この種水の形成は、天然ではさまざまな条件下で発生する。例えば、花崗岩質砂岩の風化過程で起こる。この場合の必要条件としては、堆積岩中に石膏を含んでいないことである。このような場合——石膏が含まれている場合——に、多量のナトリウムが存在すると二次変成作用が行なわれないからである。

ナトリウム水の特徴的特性としては、この環境下では、他の条件下で易動度の低い多数の元素が高移動能力を獲得することである。このことは、可溶性炭酸塩質錯塩の生成と密接な関連性をもっている。例えばナトリウム環境下では、ウランは  $\text{Na}_4 [\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]$  型の可溶性錯塩を生成し、この型で相当の距離を移動する。銅の主炭酸塩類は、孔雀石・藍銅鉱の形態をとるので、難溶性である。しかし Sherbina, Ignatova が指摘しているように、ナトリウム溶液中では、銅はウランと類似の可溶性の物質系を形成する。さらにナトリウム環境下では、稀土

註1) Al が Gley 化行程で運び出されない点を考慮に入れて、各酸化物の相対的搬出度を算出した。SO<sub>3</sub> およびその他の酸化物の正の値は Gley 化の場合には、侵出以外に元素の搬入が起こることを立証している。

類(イットリウム・ハロゲン・その他)のジルコン・スカンジウム・イットリウムグループのような移動度の低い元素類も、類似の可溶性の錯塩を生成する。反対に稀土類のセリウムグループは、低移動能力をもっている。炭酸塩ナトリウムを伴う可溶性錯塩化合物は、ベリリウムおよび鋳に対して生成される。ナトリウム環境下では、バナジウムおよびモリブテンも、容易に移動し、珪素の可溶度も上昇する。アルカリ条件下では、アルミニウムの移動も可能となり可溶性のアルミ酸塩ナトリウムが生成される。

このように、ナトリウム水では、上述の元素(U, Cu, Ag, Mo, V, Si, Al, Y, Sc, Zr, Be)類の多くの錯塩が共移動し、母岩(country rock)から抽出される。したがってナトリウム水の循環地域では、水の組成が、何かある理由で変わると、これらの錯塩は、それぞれ共沈する可能性がある。

堆積岩および鉱床中におけるナトリウム二次変成作用の指標としては、まず第一にさまざまな新生成物(砂岩の膠結物、結核)中にみられる共生会合元素である。しかし上述の諸元素が常に存在しないことは明らかである。このことは、これらの元素が母岩中に、また一般にはナトリウム水の循環地帯中に、適切な形態で多量に常に存在しないからである。反対に、上述の諸元素の一部でも共存していると、ナトリウム性二次変成作用の可能性が考えられる。例えばウラニウム・ジルコン・バナジウム・モリブテン・イットリウムグループの稀土類があげられる。岩石中におけるナトリウム二次変成作用の他の指標としては、岩石の珪化現象(二次石英化・蛋白石化・玉髓化・珪化木)ならびに検鏡下で容易にみられる石英粒および長石類の溶食現象があげられる。珪素およびアルミニウムが共移動をすると、フェルスマンが二次変成作用の特徴とみなしている山コルク型の珪酸アルミニウムが生成される。岩石の二次曹長石化作用はこれらの現象に、関連性があるであろう。さらにまた強アルカリ溶液から沈殿する水滑石の生成も可能である。

堆積岩および鉱床中にみられる二次変成作用のこの種指標は、検鏡および肉眼調査により確認できるであろう。ナトリウム性二次変成作用は、水成鉱床の後生鉱体の生成において重要な役割をなすことが考えられる。例えば、含銅砂岩型のある種の鉱床の生成には、この過程(二次変成作用過程)の関与の確率度がきわめて高い。

二次変成作用の各型は、地層層序中では、特異な色調と二次鉱物系とを伴う固有の“断面”で特徴付けられる。上述の諸現象過程は、有用鉱物鉱床(銅・ウラン・硫黄・ニッケル等)の生成に関連性をもっている。類似鉱床の含鉱石層は、さまざまな透水性層の互層で特徴付けられる。そのうえ鉱体は、透水性岩石類、または以前透水性であつた岩石類中に賦存している。このような岩石としては、礫岩・礫・砂・砂岩・割れ目の発達している石灰岩があげられる。透水層を分かつ不透水性岩石類には、粘土・塊状粘土質石灰岩・シルト岩等であつて、普通鉱石を含んでいない。

鉱床生成に最も好ましい条件は、不透水性岩石と透水性岩石とが互層をなしている場合である。そのうえ各地層の厚さは、1 m か 10 m 程度でなければならないようである。現在のデータによれば、透水層の厚さが100 m 以上に達すると、多くの場合、類似鉱床の生成に不都合となる。このような鉱床地区の鉱体は、含水層中で、物理・化学的条件が著しく変わる地帯に普通賦存している。この地帯は、多様な化学的組成の地下水の循環地域か、または岩石類が急変移する箇所造成される。造岩鉱物および鉱石の組成は、界面特性および鉱石濃集要因の回春を促進する。例えば酸化条件または弱アルカリ条件で特色付けられる含金属水は、循環運動過程で、硫化水素に出会す(有機物質の腐敗によつて  $H_2S$  を含むガスの遊離、含硫化水素水)。この場合には、金属が沈殿し、不可溶性硫化物、およびある種の鉱物類が形成される。含水層における過去の  $H_2S$  出現指標としては、後生硫化物の存在があげられる。

現在地質調査ならびに鉱床探査にあつても、また特殊の岩石学的研究を行なう場合でも、堆積岩中における二次変成作用に留意するのが必要である。

過去の地質時代の地下水の化学的特性を復元することは、理論的にも、実際的にも大きな意

第2表 ウヅベックのセノマニヤン海成シルト岩(サンプル数 412)およびその Gley 化産物—緑色シルト岩(サンプル数 411)の化学的組成(%)

サンプル	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cl	SO <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	CO <sub>2</sub>	統計
412	73.67	12.01	3.57	なし	0.02	0.70	0.25	0.78	1.47	0.03	0.35	0.19	1.07	4.89	0.48	99.51
411	73.04	13.37	1.72	//	tr.	0.86	0.01	0.85	1.40	0.02	0.25	0.62	1.64	4.32	0.60	99.01
相対的搬出係数	-10.76	0.00	-56.86	//	≈100	+10.0	-96.4	-2.56	-14.28	-40.0	-37.14	+194.73	—	—	—	—

搬出強度系列: Mn>Ca>Fe>P>Cl>K>Si>Na>Al(O)

第3表 白堊紀前期の赤色白雲岩化シルト岩(サンプル数 122)と Gley 化緑色シルト岩の化学的組成

サンプル	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +FeO, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	Cl	CO <sub>2</sub>	Ig. loss	統計
122	34.44	2.51	1.30	3.94	0.11	9.44	12.90	12.85	2.22	0.57	0.11	0.20	0.02	19.08	22.88	99.35
120	43.50	3.10	0.50	3.65	0.08	12.07	8.14	9.95	2.65	1.35	0.14	0.85	0.47	12.16	16.92	97.87
相対的搬出係数	-1.16	—	—	-21.9	-45.4	0.00	-50.7	-39.6	-7.20	+84.1	-9.9	+230	+1700	—	—	—

搬出強度系列: Ca>Mn>Mg>Fe>P>K>Si>Al(O)

味をもっている。この種の特性が復元されると、古期の鉱床生成過程が明らかにされるとともに、その特性を新鉱床探査方法に利用することが可能となる。しかしこんにちに至るまで、古水理地質学 (paleohydrogeology) の研究は比較的進んでいない。過去の時代の水理地質学および水理化学的 (hydrochemistry) 特性は、多くの場合間接データに基づいて推定している。例えば塩および石膏は、乾燥気候の下で、強硬化水を媒介として生成されたものであるが、鉄・鋳・ボーキサイト石炭は、湿潤な気候と弱硬化水を媒介として生成されたものであると考えられている。このような間接データによれば、一般的な結論のみが得られるが、過去の地質時代に存在していた個々の含水水準の地球化学的的特性を明らかにすることは不可能である。

それとともに、古期含水水準の新时期生成物——とくにその化学的組成——を研究すると、所与の含水層中を循環したような層状水の化学的的特性を復元することが可能となる。さらに元素の移動および沈殿条件とを知れば、それぞれの信頼度をもって水——移動し、それからこれらの元素類が沈殿した——の物理化学的条件を復元することも可能である。とくに興味があるのは、マンガン水酸化物の化学的分析である。この種のマンガンは、高吸着力をもっているので、銅・ニッケル・コバルト・鉛・亜鉛等のような金属を水から吸着することが可能である。したがってマンガン水酸化物の被膜におけるこの種金属の含有量を決定すると、古期水の所与金属の含有量を知ることができるであろう。さらにこの種データによると、各探査地域の一般的な鉱床生成特性を知ることができるであろう。

水理化学的鉱床探査が、潜頭を明らかにするのにとくに有効な方法であることはよく知られている。残念なことには、水理化学的探査の使用は、現存の含水層および地表水に限られている。現在無水地域では、現代の改良された水理学的探査は利用できないであろう。しかし現在の無水地域でも、過去の地下水の循環地域であつたことが考えられる。したがって二次変成産物の化学的組成を研究すると、古期水の化学的組成が復元できるから、有用鉱床の探査が可能となる。換言すれば、この方法によれば、鉱床の古期鉱染 halo——水を媒介として生成された——が復元することが可能であり、それによつて鉱床自体も推定できる。古期含水層の鉱物研究を基盤とする有用鉱物の探査方法に対して、古水理地質学的方法 (paleohydrogeological method) と名付けることを提唱する。本論文は、この方法の原則的基礎のみをとりあげたものである。

二次変成作用過程の空間的配置は、さまざまな縮尺——概観図から大梯尺——で編算される“二次変成型図”にまとめあげることができるであろう。この種の図の理論的価値についてはいうまでもない。この図によれば、過去の地質時代の地球化学的条件、とくに地下水の特性が復元できる。二次変成過程の各型と稼行価値のある多くの鉱床の生成とは関連性があるから、水理化学図は、鉱床の予知にも利用できるであろう。

40 年前にフェルスマンによつて発展された二次変成過程 (katagenese) の地球化学的意味は、このようにして裏付けられた。

岩石の多様な二次変成現象の詳細な研究は地球化学の当面課題の 1 つとなつている。