

ウィットウォーターズランド盆地の 地質および金・ウラン鉱床

小林孝男¹⁾

1. はじめに

南アフリカ共和国最大の都市ヨハネスブルグといえ、金鉱山で栄えた町として有名である。1886年にヨハネスブルグの近郊で初めて含金礫岩鉱石が発見されて以来、ウィットウォーターズランド(Witwatersrand)盆地は世界最大の金鉱床地帯として栄え、わずか一世紀の間にこの町は南アフリカを代表する大都市へと発展した。なにしろ、ウィットウォーターズランド盆地がこれまでに産した金は約4万tに達し、これは有史以来の全世界総産出量の約50%に相当するから驚きである。1992年に本地域は29鉱山から約610tの金を産し、これは世界の約1/3の生産量にあたる。金の埋蔵量は残り約2万tと推定されており、黒人労働者の人件費上昇などによるいくつかの不安定要素はあるものの、今後とも本地域が世界の主要な金産地であり続けることはまちがいないと考えられる。本地域の鉱床が金と共にウランを産することも忘れてはならない。ウランの確認資源量は約40万t(U)と算出されており、これもまた国別で世界第3位の地位を占める。南アの地質鉱床巡検で、この歴史的な金・ウラン鉱山のひとつHartbeestfontein金鉱山を見学できたことは非常に幸運であった。

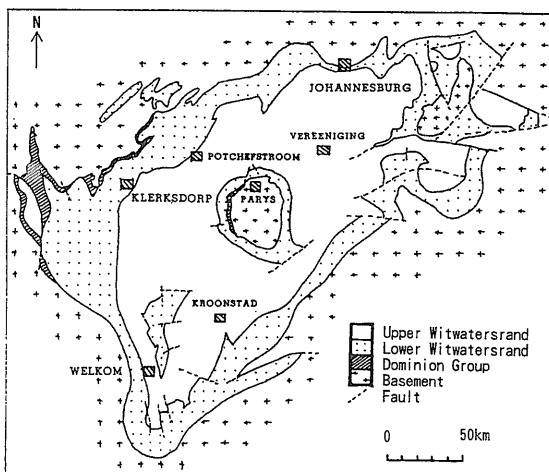
ウィットウォーターズランド盆地の金・ウラン鉱床はまた、地質学的に極めて特異な特徴を有することにおいて有名である。それはこの鉱床が、無酸素(現在の 10^{-3} レベル)大気の始生代後期に形成された大規模漂砂鉱床の化石とされている点である。鉱床は、金やウラン鉱物などの重鉱物に富む黄鉄鉱質礫岩からなる。この礫岩層は通称“reef”または“banket”の名で呼ばれている。このタイプの鉱床

はウィットウォーターズランド盆地の他に、カナダのElliot Lakeウラン鉱床地域、ガーナのTarkwaの金鉱床地域およびブラジルのJacobina金鉱床地域などでも知られており、これらは石英中礫岩型鉱床として区分されている(Pretorius, 1981)。

ここでは、まずこの興味深い鉱床の地質学的特徴を紹介し、続いて、実際に見学を通じて得た事実や感じたことを述べることにしたい。

2. ウィットウォーターズランド盆地の地質概要

ウィットウォーターズランド盆地は南アフリカ共和国のトランスバール州とオレンジフリー州にかけて北東から南西方向にやや細長く分布している。現在の盆地の大きさは、幅約180km、長さ約480kmである(第1図)が、もともとは幅250km、長さ



第1図 被覆層を取り除いたウィットウォーターズランド盆地の地質(Feather and Glatthaar, 1987)

1) 動力炉・核燃料開発事業団 国際部：
〒107 港区赤坂1丁目9-13(三会堂ビル)

キーワード：ウィットウォーターズランド盆地, 含金礫岩, 金・ウラン鉱床, 漂砂鉱床, 石英中礫岩型鉱床

| Group | | Rock Facies | Mineralized Main Reef | Maximum Thickness | Age Dating | |
|---------------------------|--------------------|---|---|---|----------------|--------------------------|
| Karoo Sequence | | Sandstone Shale and Conglomerate | | | 150 ~300M.y. | |
| Transvaal Sequence | | Volcanics, Shale Quartzite and Dolomite | | | ~2.1 ~2.2G.y. | |
| Ventersdorp Super Group | | Basalt and Andesite | | 2,000m | 2.71G.y. | |
| Witwatersrand Super Group | Central Rand Group | Turffontein Subgroup | Quartzite and Conglomerate | Elsburg Reef Composite Reef Kimberley Reef | 3,500m | 2.91G.y. (Crown Lava) |
| | | Johannesburg Subgroup | Quartzite, shale and Conglomerate | Bird Reef, Vaal Reef Livingstone Reef Johnstone Reef Main Reef | | |
| | West Rand Group | Jeppesdorp Subgroup | Quartzite, Shale Volcanics and Conglomerate | Veldschoen Reef | 7,000m | |
| | | Government Subgroup | Quartzite, shale and Conglomerate | Government Reef | | |
| | | Hospital Hill Subgroup | Shale and Quartzite | | | |
| Dominion Group | | Andesite, Rhyolite, Tuff Quartzite and Conglomerate | Dominion Reef | 1,500m | 3.07G.y. | |
| Basement | | Granite Gneiss and Greenstone | | | 3.07 ~3.35G.y. | |

第2図 ウィットウォーターズランド地域の層序(年代のデータは de Wit et al., 1992に基づく)

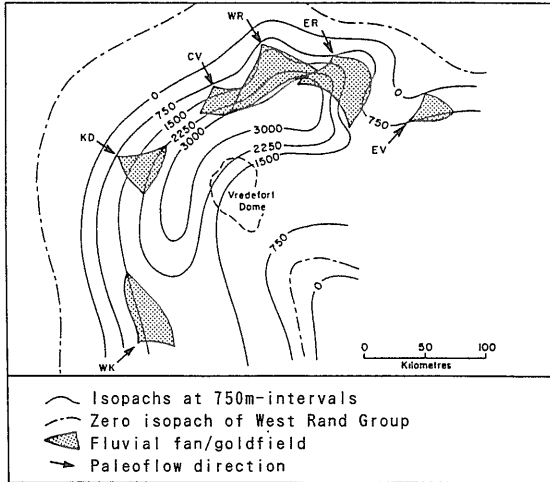
600 km 以上の広さを持ち、層厚7,000 m に達する地層が堆積していたと考えられている。盆地の堆積物はおよそ31億年から27億年前までの約4億年の間に堆積したドミニオン(Dominion)層群およびウィットウォーターズランド累層群からなり(第2図)、これらは現在、ヨハネスブルグ近傍とフレダフォート近傍に一部露出するが、大部分を上位のベンタースドープ(Ventersdorp)累層群、トランスバル系およびカルー系の堆積層に覆われている。

本盆地の基盤岩は約34~31億年の年代を示す花崗岩類とグリーンストーンから構成されている。通常始生代と前期原生代の境界は約25億年前とされているが、本地域では約31億年前に既に大規模な植状地(カープバルクラトンの東半分を構成するものでカープバル植状地と呼ばれる)が形成されており、約31億年前から下部原生界に相当する地塊内盆地堆積物が形成され始めたと考えられる。強い変成作用を被っていないこのような古い堆積盆地は西オーストラリア州のHamersley盆地を除いて他に例を見ない。

盆地の最下部を構成するドミニオン層群は、基底

部の層厚120 m 以内の長石質コーツァイト・礫岩および層厚1,200 m までにおよぶ中~酸性火山岩類からなる。これは伸張場における初期の盆地堆積物であると考えられている。一方ウィットウォーターズランド累層群はジンバブエクラトンのカープバルクラトンへの衝突による圧縮の場において形成された後期の盆地堆積物と考えられている(de Wit et al., 1992)。

ウィットウォーターズランド累層群は下部(West Rand層群)と上部(Central Rand層群)に区分される。両者とも主に河川成、デルタ成、浅海成の堆積物からなり岩相は同様であるが、前者が一般的に海進の環境で形成されたのに対し、後者は盆地北西部の繰り返し起こる隆起のため海退の環境で形成されたより運搬力の高い堆積相となっている。盆地の北西縁の境界は、West Rand層群堆積時からCentral Rand層群堆積時まで、約60 km 盆地中心部へ後退したことが明らかにされており(Pretorius, 1981; 第3図)、後に述べるように、これがCentral Rand層群中に、より高品位の鉱床が形成された主要因と考えられる。



第3図 ウィットウォーターズランド盆地の盆地構造および河川扇状地の分布(Pretorius, 1981). 盆地は非対称構造を示し, 金鉱床を胚胎する6つの河川扇状地は盆地の縮小する側(北西側)に分布する. WK: Welkom Goldfield, KD: Klerksdorp Gold-field, CV: Carletonville Goldfield, WR: West Rand Goldfield, ER: East Rand Goldfield, EV: Evander Goldfield

West Rand 層群の最大層厚は約7,000 m, Central Rand 層群の最大層厚は約3,500 m とされている.

3. 金・ウラン鉱床の特徴

含金・ウラン礫岩層は, ウィットウォーターズランド盆地の下位から上位まで全ての層準, すなわちドミニオン層群の基底層, West Rand 層群中の2層準, Central Rand 層群中の7層準に産するが, より品位の高い鉱化礫岩層は Central Rand 層群中に限られている. Central Rand 層群は, 不整合で境される層厚30~600 m(平均250 m)のいくつかの堆積サイクルからなっており, 鉱化礫岩はこのサイクルの基底層に堆積している. これらの堆積サイクルは一般に上方への細粒化を示す. 重要な鉱化礫岩層は屈曲の小さい浅い網状流チャンネル堆積物であり, これらは河川扇状地に形成されたものと考えられている(Pretorius, 1981). それぞれの鉱化礫岩層の層厚は2 mを越えることはないが, 通常その幅は数100 m, 長さは数 km のオーダーで連続する. 経済性の高い主要な金・ウラン鉱床を産する6つの扇状地システムが Central Rand 層群中に認めら

れている(第3図). 鉱化礫岩は, 一般に体積の約70%を占める中礫とマトリックスからなる. 中礫の円磨度は良好で, そのサイズは変化に富むが一般には2 cm 前後である. サイズが小さい程, 円磨度が悪くなる傾向がある. 中礫は主に石英脈に由来する石英から構成されるが, チャート・コーツァイト・石英斑岩などの礫も含んでいる. マトリックスは, 主に緑色片岩相の変成作用により再結晶化した二次石英, 絹雲母, パイロフィライト, 緑泥石などの珩酸塩鉱物と多くの種類の重鉱物から構成されている. マトリックスの約15%を占める黄鉄鉱は最も主要な重鉱物で, 1)円磨度の良い碎屑性のもの, 2)硫化物に富む泥質部に核をもって成長したノジュール状のもの, 3)堆積後の変成作用による再結晶でできたものの3つの産状が認められる. 次に主要な重鉱物である金紅石・閃ウラン鉱(およびその変質鉱物としてのブラネライト)およびその他の放射性鉱物, さらに量が少ない金・ジルコン・クロム鉄鉱・硫砒鉄鉱, そしてよりまれな輝コバルト鉱・白金族鉱物(Ir, Osに富む)・磷灰石・磁鉄鉱・ザクロ石およびダイヤモンドは全て碎屑性起源の鉱物である. 自生鉱物としては, まれではあるが硫砒ニッケル鉱・閃亜鉛鉱・黄銅鉱・硫砒鉄ニッケル鉱などが認められている(Feather and Glatthaar, 1987).

ウラン鉱物は径50~160 μm の円磨度の良い閃ウラン鉱粒子が単独で産する場合とより細粒の閃ウラン鉱粒子が藻類起源の炭化物と密接に伴って産する場合が知られている. 閃ウラン鉱のかかなりの部分は碎屑粒子の形状を残したままブラネライトに変質していることが多い. 金の粒子は径5~100 μm で, 碎屑粒子, 炭化物に伴う細粒のもの, および再結晶したものの3種類が観察されており(Hallbauer, 1977), 形状は非常に不規則である.

鉱化礫岩層の形状としては一般に2種類のタイプが観察されている. ひとつは, 比較的運搬力の高い網状流河川のチャンネル削剥面(scour surface)上に形成された薄い礫層と斜層理を示す砂岩からなる層相で, これは海退の環境にできるより一般的な漂砂型堆積相である. もうひとつははるかにまれなケースではあるが経済的にはより重要なもので, ほとんど平坦な広い不整合面上に海進の環境で形成された漂砂型の鉱化作用である. これは, 扇状地の扇端から扇中(midfan)の堆積物が海進に伴う水の作用

でふるいわけられながら下位地層の表面に再堆積し、形成されたものと考えられている (Pretorius, 1981).

鉱化礫岩層の鉱石品位は、それぞれの鉱床や、礫岩層内の位置によって変化するが、一般的に金は5~30 gAu/t、ウランは数10~500 ppmU である。ウランの鉱化範囲は通常金よりも広く、特に扇端に近づくとき金の品位が下がり、金に比してウランの品位が高くなる傾向がある。U/Au 比は扇頂および扇中でおよそ5程度であるが、扇端では25にまで増加する (Pretorius, 1981).

4. 鉱床の成因

1886年にウィットウォーターズランド盆地の含金礫岩鉱床が発見されて以来、この特異な鉱床の成因に関して様々な説が議論されてきた。発見当初、ある者は単なる沖積層中の漂砂型の成因を、ある者は火山起源の成因を、またある者は海または湖底に堆積した化学的沈澱の成因を唱えていた。このような中で、1888年に Ballot が唱えた浜砂鉱床説、つまり、周期的におこる大規模な洪水によって海に運ばれた堆積物が海浜で波の作用によってふるいわけられ金を濃集したという説は、多くの支持を得、しばらくの間主流となった。

Ballot の浜砂鉱床説に最初に異論を唱えたのは、Mellor (1915) である。彼は本地域で初めて系統的な層序学的調査を行うことによって、含金礫岩層が突然細粒堆積物の上に出現することを明らかにし、このような変化を生じ得る堆積環境は河川扇状地であると結論した。この扇状地堆積説は、引き続き堆積学および構造学的研究によって様々な修正や補強がなされたものの、現在最も広く受け入れられている成因論の基礎をなすものである。

1900年代に入って、鉱物学的な研究も手掛けられた。1907年に Young は、黄鉄鉱に他生のものと自生のものとが存在し、自生の黄鉄鉱ノジュールの表面に針状の金がコーティングしているのを観察した。そして2つの世代の黄鉄鉱に対応して、金にもそれぞれの世代があることを明らかにした。1923年に、Cooper は含金礫岩中の重鉱物の研究を行い、初めて放射性鉱物として、閃ウラン鉱の存在を明らかにした。

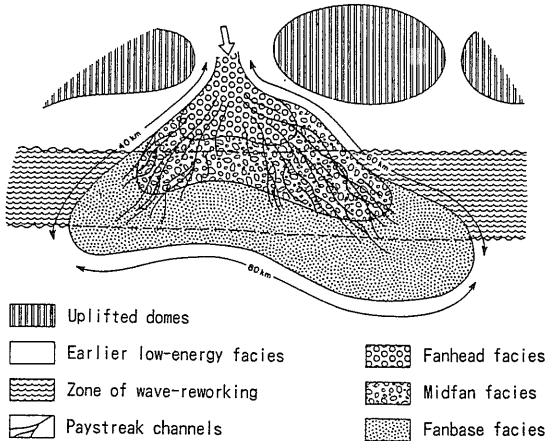
1994年7月号

堆積学的な調査研究が進み、漂砂型成因論の肉付けが進む中、Graton (1930) のあと、1953年に再び Davidson が熱水性成因論を提唱した。彼は地下深部のマグマ起源の鉱液が割れ目に沿って上昇し、ウィットウォーターズランド盆地堆積物中の透水性の良い礫岩中にもたらされ、金・ウラン鉱物と共に硫化鉱物・炭化水素および二次石英を沈澱したと主張した。一般によく観察される針状の再結晶金粒子がこの説の主な根拠である。彼の説には多くの矛盾があったが、彼の主張は反対者の研究意欲をかき立てるのに大いに役立った。Liebenberg (1955) は、顕微鏡観察により、碎屑粒子としての閃ウラン鉱の存在を明らかにし、かなりの量の閃ウラン鉱が碎屑粒子の外形を残したまま変成作用または続成作用により二次ウラン鉱物に変質していることを発見した。彼は碎屑粒子としての金はわずかしか観察しなかったが、大部分は碎屑起源の金がある場所で再結晶したものであるという結論に達した。金とウランの密接な関係から、いずれか一方に成り立つ成因は他方にも適用されるものでなければならぬと考えたからである。また、Viljoen (1963) は、金の最富鉱部はその他の重鉱物の濃集部と密接な関係にあることを発見した。この発見は Liebenberg の説の正当性を裏付けるものである。最近の Minter 他 (1993) による含金礫岩中の金粒子の形状学的研究も、金が碎屑起源であることを示している。

Pretorius (1981) は、「過去25年間の膨大な堆積学的、鉱物学および地化学的研究はこの種の含金ウラン鉱床が漂砂起源であることを強く支持するものである」と結論している。最近の多くの研究者は Pretorius によってまとめられた成因論を支持しているものと思われる (Weldmüller, 1986)。以下に Pretorius (1981) の成因論の概要を紹介する。

・ West Rand 層群の堆積の期間、盆地は継続的な海進の環境において拡大成長した。

・ Central Rand 層群の堆積が始まると共に、盆地北西部の基盤岩ドームの周期的な降起によって盆地は縮小を開始し、海岸に沿っていくつかの大規模な河川扇状地が形成された。ドーム構造は盆地長軸 (NE 方向) に直交する重複褶曲に規制され、このためそれぞれの扇状地は一定の間隔をもってドームとドームの間に形成されている (第4図)。全体的に盆地の縮小が続く間にも海退-海進の小さな揺り



第4図 ウィットウォーターズランド盆地の河川扇状地鉱床成因モデル図(Pretorius, 1981). 扇頂, 扇中, 扇端と海進時の波の作用による再濃集帯の関係を示す.

返しは繰り返され, 不整合-上方細粒化の堆積サイクルが形成された.

・扇中(midfan)の網状流チャンネル内に重鉱物に富む漂砂型の鉱化礫岩層が形成された. この鉱化礫岩層は, 海退の過程で下位の West Rand 層群を削剝しその中に含まれていた重鉱物をも再濃集したものである. また扇状地の形成と前後して海進が進行した場合には, 扇端~扇中の堆積物が再度海岸流と波の作用でふるいわけられ, 最も経済性の高い富鉱礫岩層を形成した(第4図).

・鉱化礫岩層中の礫は砂粒状の重鉱物が沈積するためのトラップとして作用した. 礫岩相を乗り越えてさらに下流に運ばれたより細粒の金やウランの一部は扇端付近の海底に成長した藻類(algal mat)の表面に獲えられ濃集した. 閃ウラン鉱の比重は金よりも小さいため, このタイプの濃集部では U/Au 比が高くなっている.

・金の供給源はグリーンストーン, ウランのソースは始生代の花崗岩類と推定される. トランスバール州のグリーンストーン帯の中には我々が今回見学したバーバトンの金鉱床をはじめ, いくつかの金鉱化作用が知られている.

5. Hartbeestfontein 金鉱山

Hartbeestfontein 金鉱山はウィットウォーターズランド盆地の北西縁中央部の Klerksdorp 地域(第

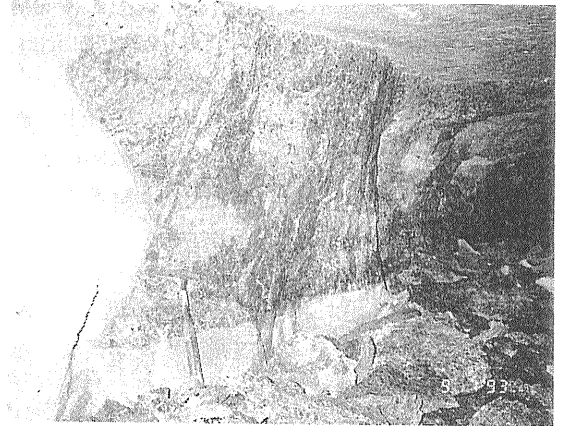


写真1 Hartbeestfontein 金鉱山

1図)に位置している. ヨハネスブルグ近郊の Central Rand 地域で1986年の2月に初めて金鉱石が発見されてから, この Klerksdorp 地域でも同年の8月に金鉱石の露頭が発見され, 1987年より採掘が開始された. それ以来, Klerksdorp 地域で大小40の鉱山が様々な層準の含金礫岩層(reef)を対象として金およびウランの生産を行ったが, 現在は Vaal Reef(第2図)を対象とする4鉱山(Vaal Reefs, Buffelsfontein, Hartbeestfontein および Stilfontein)のみが生産を継続している. Vaal Reef は金とウランを含有する礫岩層であるが, 現在(1992年以降)ウランを生産するのは Hartbeestfontein 金鉱山ただひとつとなっている.

Hartbeestfontein 金鉱山は1955年に生産を開始し, 1992年までに約1,100 tの金(平均品位約13 gAu/t)と約18,000 tのウラン(平均品位約200 ppmU)を生産した(Antrobus et al., 1986). 見学の際に得た情報によると, 現在では平均品位11.3 gAu/tの鉱石を250,000~280,000 t/月のペースで生産しているということで, 年34~38 tの金を生産する計算になる. 従業員の総数はなんと約16,000人ということであった.

我々は主任地質技師の Mr. S. Heydenreich の案内で6番立坑に入坑することになった. 6番立坑の地表標高は1,300 m, 深度は2,300 mである. 立坑昇降機は750 m/分, すなわち時速45 km でゴーゴーと音を立てて下り出した. まるで地中に落ちる地下鉄に乗った気分である. 我々は地下2,000 mまで降りて, 水平坑道を北西方向に鉱車で数分移動してようやく Vaal Reef 28番切羽に到着した. 28番切

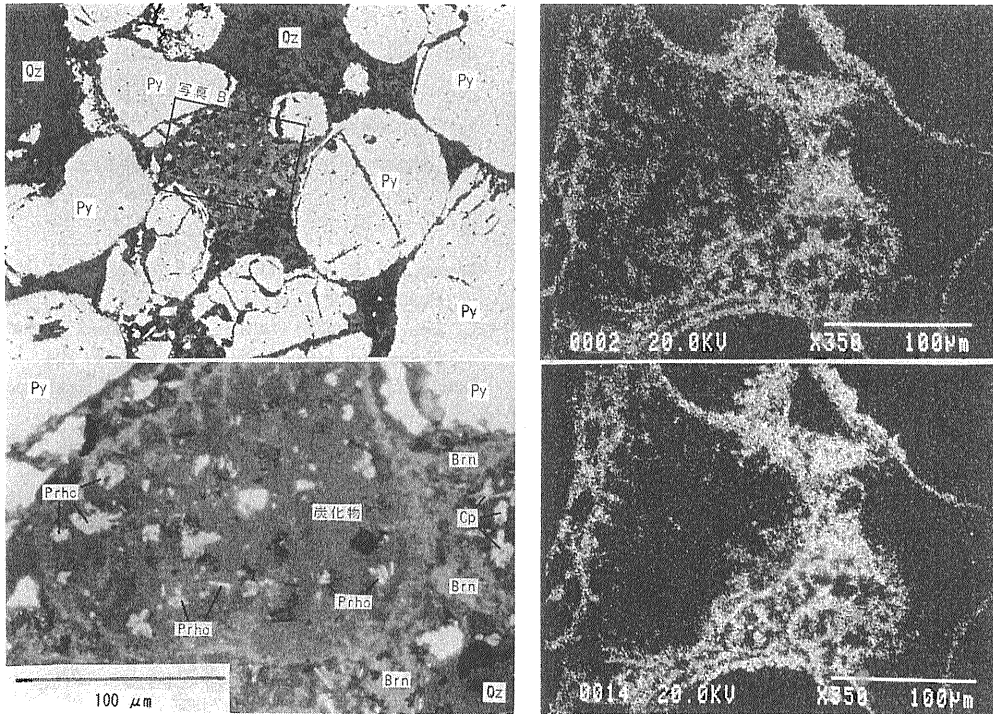


写真2 Vaal Reef 鉱化礫岩の反射顕微鏡および EPMA 分析写真：ブラネライト濃集部
 A(左上)・B(左下)：反射顕微鏡写真，C(右上)：EPMA ウラン強度分析写真(白色部がウラン濃集部)，D(右下)：EPMA チタン強度分析写真(白色部がチタン濃集部)，Qz：石英，Py：黄鉄鉱，Cp：黄銅鉱，Brn：ブラネライト，Uth：ウラノトーライト，Gn：方鉛鉱，Prho：磁硫鉄鉱

羽は Vaal Reef の Sub Outcrop の近くに位置するが、Vaal Reef までこんなに深いのは上に被覆するベンタースドープ累層群の層厚が1,800 m 以上に及ぶからである。地下2,000 m もあるので坑内はさぞかし暑いだろうと思ったが、40°Cを越えないように通気しているということで、さほど苦にはならなかった。

28番切羽において、Vaal Reef は約60 cm の厚さを有し南東方向に緩く傾斜している。Vaal Reef は下盤のコーツァイトとは明瞭な境界を持って不整合で接しているが、上盤との境界はさほど明瞭には観察できなかった(口絵参照)。

Vaal Reef から採取した鉱化礫岩(写真1)の研磨片を作成し、顕微鏡および EPMA による観察、試験を行ったので、その結果について略述する。

礫岩のマトリックスの大部分を占めるのは黄鉄鉱と二次石英である。黄鉄鉱は径100~500 μm の垂円状の碎屑粒子からなり、これらの粒間は主に二次石英結晶によって膠結充填されている。黄鉄鉱粒と等粒大の金紅石もわずかに認められた。金の粒子

は容易に確認することはできなかったが、黄鉄鉱粒間にブラネライト・ウラノトーライト・ジルコン・黄銅鉱・方鉛鉱などの濃集部を確認することができた。

写真2はブラネライト(UTi_2O_6)の濃集部を示している。ウランとチタンの濃集によって確認されるブラネライトは粒径約150 μm のおむすび状の粒子の外周部と一部黄鉄鉱粒子の外周部に濃集しており、おむすび状粒子の内部にはより細粒の黄鉄鉱・黄銅鉱・磁硫鉄鉱・ウラノトーライト(推定)粒子および放射性起源の方鉛鉱結晶が観察される。同定ができていないが、おむすび状粒子は重鉱物を付着濃集した有機物が海進による波の作用で再移動してできた碎屑粒子ではないかと推定される。

写真3はウラノトーライトおよびジルコンの碎屑粒濃集部を示している。これらの碎屑粒子は5~20 μm 大で自形の形状を留めており、緑泥石と推定される二次結晶などにより膠結されている。ウラノトーライト粒子の中には微粒のモナズ石および放射性起源の方鉛鉱が観察される。ウラノトーライト

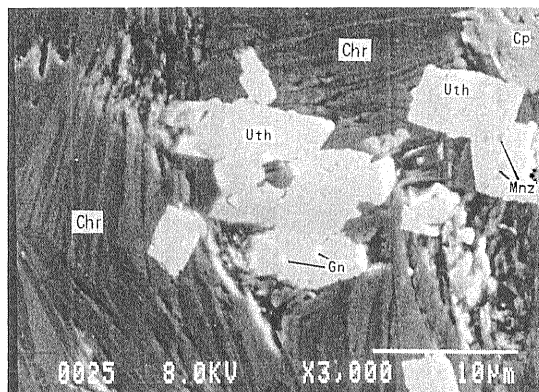


写真3 Vaal Reef 鉍化礫岩の反射顕微鏡および走査電子顕微鏡写真：ウラノトーライト・ジルコン濃集部(EPMA 走査電子顕微鏡写真)。Chr：緑泥石、Cp：黄銅鉍、Uth：ウラノトーライト、Mnz：モナズ石、Gn：方鉛鉍

・ジルコンおよびモナズ石は EPMA の定性分析により同定された。

6. おわりに

鉍山の規模の大きさ、そして30億年近くも前に形成された鉍床を目のあたりにして我々はただ驚くばかりであった。本地域の鉍床が今後も世界の重要な位置を占め続けることはまちがいのない事実であろうと思われる。しかしながら、手放しで喜べない事実もまた存在している。それは最近の急速な人件費の上昇である。金のコストが頭打ちになっている状況で、人件費に起因する生産コストの上昇は着実に多くの鉍山の経営を困難なものとしている。低価格の続くウランに関してはこの影響がさらに顕著に表れており、ウランを副産物として生産していた鉍山の数は1980年の21鉍山から1992年にはたったの3鉍山に減少している。

鉍山が将来生き残るためには、機械化を伴う合理化が不可欠となるであろうが、多量の黒人労働人口を擁する本地域で思い切った合理化を進めることは社会不安にもつながりかねないというジレンマをかかえている。来年の4月から始まることになるマンドラ政権のもとで、今後ウィットウォーターランド盆地の金・ウラン鉍山がどのような変遷を遂げていくのか、成功を祈りながら見守っていきたい。

謝辞：今回の貴重な鉍山見学を主催および企画し本

原稿を作成する機会を与えて頂いた資源地質学会および工業技術院地質調査所の皆様、鉍山見学を受け入れて頂いた Hartbeestfontein 金鉍山の皆様、そして特に綿密な計画と準備をして頂いた地質調査所の Corner de Ronde 氏に深く感謝します。

引用文献

- Antrobus, E. S. A., Brink, W. C. J., Brink, M. C., Caulkin, J., Hutchinson, R. I., Thomas, D. E., Van Graan, J. A., and Viljoen, J. J. (1986): The Klerksdorp Goldfield. Mineral deposits of Southern Africa, *Geol. Soc. S. Afr.*, 549-598.
- Cooper, R. A. (1923): Mineral constituents of Rand concentrates. *J. Chem. & Metall. Min. Soc. S. Afr.*, 24.
- Davidson, C. F. (1953): The gold-uranium ores of the Witwatersrand. *Min. Mag.*, 73.
- de Wit, M. J., Roering, C., Hart, R. J., Armstrong, R. A., De Ronde, C. E. J., Green, R. W. E., Tredoux, M., Peberdy, E., and Hart, R. A. (1992): Formation of an Archaean continent. *Nature*, 357, 553-562.
- Feather, C. E., and Glatthaar, C. W. (1987): A review of uranium-bearing minerals in the Dominion and Witwatersrand placers, in Uranium deposits in Proterozoic quartz-pebble conglomerates. IAEA-TECDOC-427, 355-386.
- Graton, L. C. (1930): Hydrothermal origin of the Rand gold deposits. *Econ. Geol.*, 25, suppl., 3.
- Hallbauer, D. K. (1977): Morphology and micro-texture of minerals from fossil gold and uranium placers. *Chamber of Mines Research Review*.
- Liebenberg, W. R. (1955): The occurrence and origin of gold and radioactive minerals in the Witwatersrand System, the Dominion Reef, the Ventersdorp Contact Reef and the Black Reef. *Trans. geol. Soc. S. Afr.*, 58.
- Mellor, E. T. (1915): The Upper Witwatersrand System. *Trans. geol. Soc. S. Afr.*, 18.
- Minter, W. E. L., Goedhart, M., Knight, J., and Frimmel, H. E., (1993): Morphology of Witwatersrand gold grains from the basal reef: evidence for their detrital origin. *Econ. Geol.*, 88, 237-248.
- Pretorius, D. A. (1981): Gold and uranium in quartz-pebble conglomerates. *Econ. Geol.*, 75th Anniversary volume., 117-138.
- Viljoen, R. P. (1963): Petrographic and mineragraphic aspects of the Main Reef and Main Reef Leader of the Main-Bird Series, Witwatersrand System. unpubl. M. Sc. thesis, Univ. Witwatersrand.
- Werdmuller, V. W. (1986): The Central Rand, in Witwatersrand gold 100 years (Edited by Antrobus, E.S.A.). *Geol. Soc. S. Afr.*, 7-47.
- Young, R. B. (1907): Notes on the auriferous conglomerates of the Witwatersrand. *Trans. geol. Soc. S. Afr.*, 10.

KOBAYASHI Takao (1994): Geology and gold-uranium deposits of the Witwatersrand basin, South Africa.

〈受付：1994年1月7日〉