

“ Geological Society’s 2003 Fermor Flagship Meeting ” 参加報告

調査事業部 武田哲一
ロンドン海外調査員 霜鳥 洋報告

1. はじめに

「世界規模鉱床と地球の進化」をメインテーマに Geological Society’s 2003 Fermor Flagship Meeting(英国地質学会主催)が英国カーディフ市で8月18日から3日間開催された。本会合は、20世紀前半にインドで活躍した英国人地質技師 Fermor 卿(インド地質調査所長、英国地質学会副会長など歴任)の未亡人が寄託した基金を発端に、3年毎に開催されている。学会参加者は、大学関係者をはじめ鉱山会社などから100名を越え、7つのセッションで講演が行われた。以下に各セッションで取り扱われた内容について簡単にまとめる。

セッション1: Tectonic evolution and metallogenic potential throughout earth history

本セッションでは、主に原生代～太古代の鉱床について議論され、地球初期のテクトニクスが鉱床分布やその鉱種を規制し、地球の進化に伴い鉱床生成プロセスが変化することが示された。

セッション2: Evaluation and sustainable utilization of mineral resources

環境問題と持続的な鉱業の発展をテーマとして、鉱業の持続的な発展を進めていく上で地質科学者に求められる役割のほか、ケーススタディとして、現在、鉱山会社が現場で取り組んでいる鉱山開発と環境との両立についての報告があった。さらには、資源の有効活用という観点から鉱床特性を加味した選鉱方法導入の提案がなされた。

セッション3: Catastrophism and the development of mineral resources

本セッションでは、隕石衝突が引き金となり形成された鉱床について議論がなされた。隕石衝突が関与した鉱床の鉱種は、多種多様であり、隕石孔をターゲットとした場合、経済性を有する鉱床が胚胎する可能性が高いことが報告された。

セッション4：Sediment-hosted mineral deposits：do they constrain the ancient atmosphere and hydrosphere?

縞状鉄鉱層などの堆積性鉱床から読みとれる情報をもとに、地球太古の環境復元を試みた報告が中心で、地球大気中にいつから酸素が存在し、いつ生命が誕生したかなど、基本命題に迫る内容が中心であった。

セッション5：Origin and evolution of life：evidences from ancient mineral deposits

「生命の起源と進化」と題して行われた本セッションでは、主に VMS、SEDEX、浅熱水性鉱床中に見出される生命の痕跡から、鉱床の熱水活動が生命の発生に重要な役割を果たしたことが報告された。

セッション6：New techniques for understanding mineral deposits

鉱床探査に応用可能な新しい技術について講演がなされ、本セッションの多くの講演は、ICP-MS や PIXE(proton induced X-ray emission)などを用い流体包有物や火成岩中のメルト包有物を分析し、その組成から、鉱床のポテンシャルを評価する試みが報告された。

セッション7：Earth process and exploration for super-giant mineral deposits

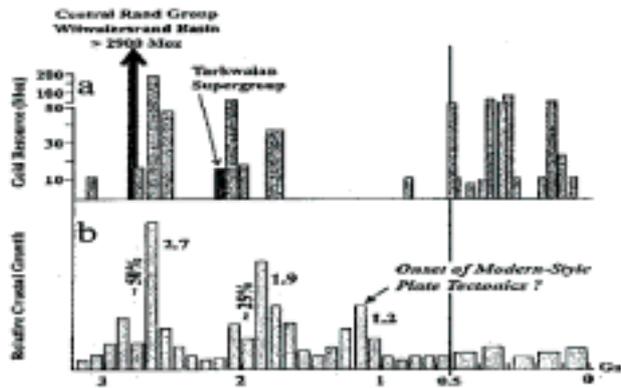
本セッションでは、超巨大鉱床が生成される条件などについて議論され、白金族鉱床の生成モデルから導きだされる探査指針が報告された。

本報告では、上記のセッションのうち、鉱床探査に関連した講演を以下に報告する。

2. 地球史におけるテクトニクスの進化と金属生成の可能性

豪州 West Australia 大学の Groves 氏は、金鉱床生成年代と地殻の生成量に注目し、金鉱床生成年代が地球史的に 30～20 億年前及び 6～0 億年前に偏在(図 1-1)している理由として、特定の時期に金鉱床が生成されたのではなく、むしろ、沈み込みや削剥などの後生的な要因によるとした。

マントル対流の様式に注目すると、原生代以前は 2 層対流であり、この場合、表層が効率的に冷却され、やがては重力的に不安定になり上下層の逆転を引き起こす(図 1-2)。この結果、地表では火成活動が盛んになり、新しい地殻が形成されるとともに金鉱床も形成されたという。



1 Timing of orogenic gold deposits versus periods of crustal growth. (a) Distribution of major orogenic gold provinces with time: from Goldfarb *et al.*³ (b) Temporal evolution of continental crustal growth: from Condie²

図 1-1

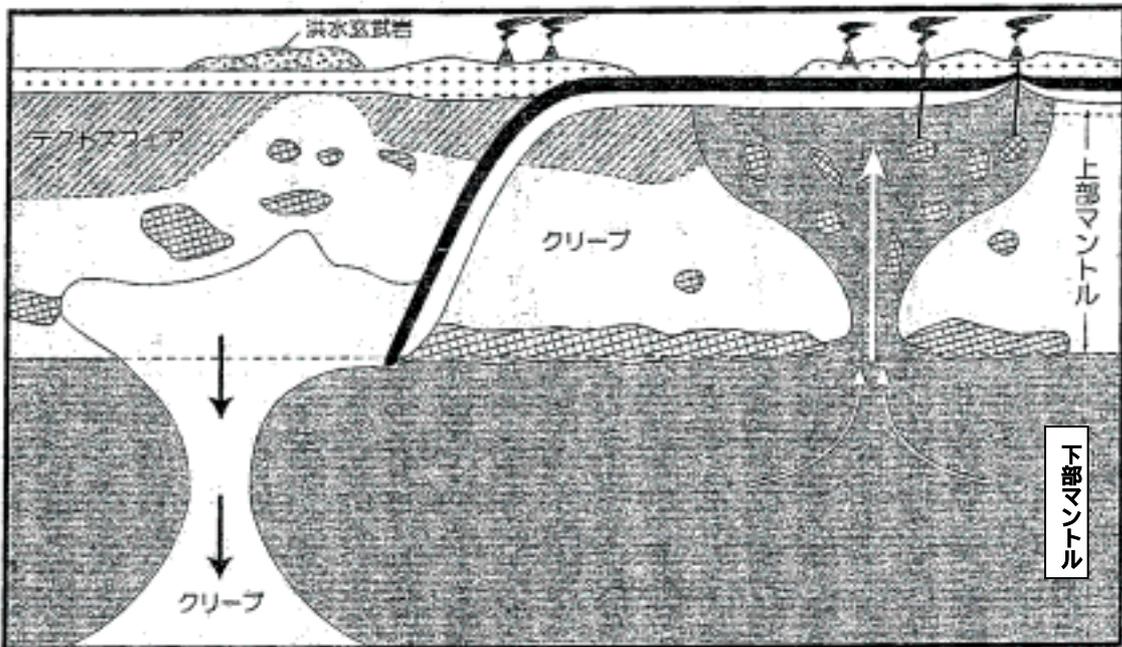


図 1-2 マントルオーバーターン

原生代は、通常、上部マントルと下部マントルの2層対流であったとされる。

また、この時期に生成された地殻下部には、テクトスフェアと呼ばれるマグネシウムに富んだ厚さ 200 ~ 400km にも達する「大陸の根」が発達している。この「大陸の根」を伴う地殻は、周囲のマントル(相対的に Fe-rich)に比べて比重が小さく、地質学的に長期間の安定性と地形的な高まりを保持する要因となったという。その結果、この時代の金鉱床を含む地殻が沈み込みや削剥を逃れ、現在に至っているとされた。

一方、原生代以降の地殻にはテクトスフェアが発達しておらず、このような地殻は、テクトスフェアを伴うそれに比べ安定性に乏しく、構造運動(沈み込みなど)を受けやすい。原生代以降の地質が変動帯(造山帯)に偏在しているのは、この安定性の違いに起因するという。

また、12億年前に地殻の成長量のピークがあるもののそれに対応する金鉱床の分布が認められない理由は、若い造山帯中の金鉱床は削剥され、結果として、現在は残存していないためだという。6億年以降、再び金鉱床の分布(図11)が現れるのは、削剥が深部まで進んでいないことに起因するとした。

3. 鉱物資源の評価と持続的利用

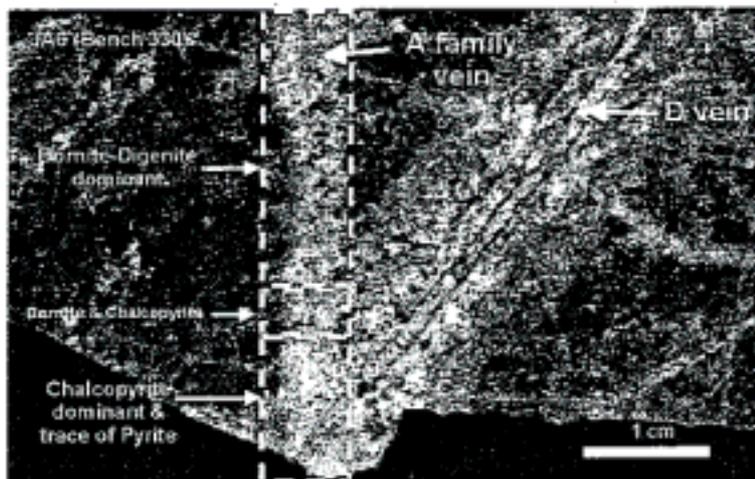
Richards氏(加・Alberta大)は、鉱業の持続的発展と環境問題について講演し、専門的な知識をもつ地球科学者が社会で中心的な役割を担い、鉱業の持続的な発展とそれに伴う環境負荷の低減に努めなければならないとした。また、鉱床探査においては、環境負荷の少ない鉱床タイプ(例えば硫化鉱物が少ない)を探査対象にするほか、閉山後の廃水やズリの処理・管理費用・方法などをFS段階から考慮すべきだとした。

Arif氏(豪・James Cook大)及びBaker氏(Batu Hijau 鉱山)は、インドネシア Batu Hijau 鉱床(斑岩銅金鉱床)を例に、鉱石の特性を加味した選鉱法を導入することにより、資源の有効利用が可能になるとした。

Batu Hijau 鉱床の鉱体で金品位の分布は、黄銅鉱-黄鉄鉱ゾーンで高く、斑銅鉱ゾーンでは低い傾向にある。しかし、個々の鉱物での金含有率は、逆に、斑銅鉱中で高く黄銅鉱中では低い。これは、金自体は鉱化作用初期の斑銅鉱中に固溶しているが、鉱化後期(黄銅鉱-黄鉄鉱で特徴づけられる)の熱水活動により、鉱化初期の斑銅鉱中の金が溶け出し、黄銅鉱-黄鉄鉱ゾーン中に free gold(石英の粒間などに存在する金で、硫化鉱物の表面には付着していない)として存在することに起因するという(図2)。このような傾向は、他の斑岩銅金鉱床でも報告されている。

斑岩銅鉱床では、通常浮遊選鉱がなされるが、斑岩銅金鉱床の場合、この選鉱法では free gold の回収が十分でない。Batu Hijau 鉱床の浮遊選鉱による金の回収率は、斑銅鉱を伴う鉱石では83%前後を示すが、黄銅鉱-黄鉄鉱鉱石では、79%まで低下する。仮に1%金の回収率が向上すると、Batu Hijau 鉱床では、年間5,000オンスの金が新たに回収され、その金額は、1.8百万USドルにも達する。斑岩銅金鉱床で知られる Alumbra 鉱床(アルゼンチン)や Cadia 鉱床(豪)では、選鉱過程に free gold 回収のために、重力選鉱を導入しており、同様の方式を Batu Hijau 鉱床をはじめそれ以外の斑岩銅金鉱

床にも適応することにより、金の回収率の向上が期待されるという。金回収率の向上は、オペレーションコストの低下に寄与し、結果として銅の cut off grade を下げることが可能となり、低品位部(銅)も採掘対象となり、資源の有効利用につながる。



1 Hand specimen sample of D (chalcopyrite-pyrite) vein cutting A (bornite-digenite) vein. Early sulphides bornite-digenite alter to bornite-chalcopyrite to chalcopyrite-pyrite near the D vein

図 2

4. 隕石衝突に関与した鉱床

隕石衝突に関連した鉱床は、金属鉱床以外にも、ウラン、石油、天然ガスなどの鉱床なども確認されており、その鉱種は多岐にわたり経済的に優れた鉱床が多いという。Grieve 氏(Natural Resources Canada)は、隕石の衝突による鉱床をその成因別に分類し、そのポテンシャルについて紹介した。

カナダのサドベリー鉱床に代表されるように、隕石の衝突が引き金となり火成活動が生じ形成された鉱床ほか、衝突時の熱が熱源となり、元素が移動・再濃集して鉱床を形成した例もある(例えば、Witwatersrand 型鉱床の金)。さらには、衝突に伴い構造的・岩相的に変化が生じ、その場が、鉱床胚胎場となるものがある(主に石油、天然ガス鉱床の貯留槽がそれらに当たる)。北米大陸に分布する世界クラスの石油、天然ガス鉱床はほとんどがこのタイプに属するという。

隕石衝突の関連した鉱床探査は、まずクレーターを探さなければならない。現在、地球上で確認されているクレーターは、約 170 を越え、そのうち約 30%が隕石衝突後の堆積物で被覆されているという。しかし、堆積物で被覆されていてもクレーターの環状構造は地形解析で十分判読可能であるという。また、クレーター中心部は、高磁気、高重

力異常を示し、指標となるシグナルは比較的明瞭である(図 3-1、-2、南ア Vredefort 隕石孔)。現在確認されているクレーターのうち約 25%が資源(鉱床)としてのポテンシャルを有し、その半数が経済的な鉱床として操業されているという。このことは、クレーターが経済性に優れた探査対象になることを示しているのかもしれない。

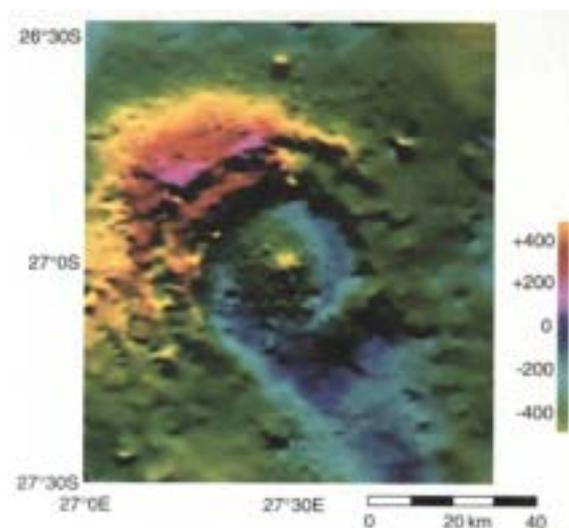


図 3-1 . 重力異常図。図中央部に円形構造が隕石孔に対応する。隕石孔中心部が相対的高重力、周辺が低重力異常を示す。

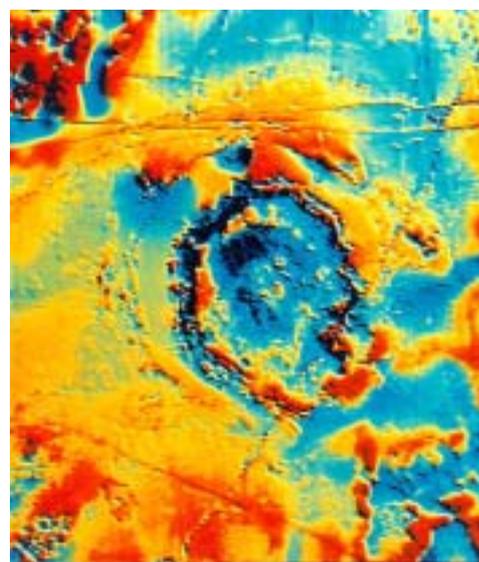


図 3-2 . 磁気異常図。重力構造同様の傾向が見られる。白色部が高磁気異常を示す。

5. メルト包有物・流体包有物組成にもとづく鉱床評価

Heinrich 氏(スイス連邦技術研究所)は、LA-ICP-MS や PIXE を用いて、流体包有物やメルト包有物の組成分析から、斑岩銅鉱床のポテンシャル評価を試みた。

メルト包有物とは、鉱物中に閉じこめられたガラス状の物質で、火山岩の斑晶中に多産し、マグマが鉱物中に取り込まれたものと考えられる。均質な珪酸塩メルトが斑晶に取り込まれたとすれば、メルト包有物の化学組成は、噴火前の珪酸塩メルトの化学組成を反映するという。鉱化作用が火成活動と密接に関連していることを踏まえると、そのメルト組成から斑岩銅金鉱床の規模、鉱床全体での鉱石品位の推定が可能になるという。

Alumbreira 鉱床の関係火成岩である Farallon Negro 火山岩類(FNVC)中のメルト包有物の金属濃度(銅)は、同様の組成をもつ岩石中のメルトの 5 倍以上もの値を示している。一方、Alumbreira 鉱床のメルト組成と金属量から、銅鉱化にもたらした最低限のマグマ量を推定すると、 10km^3 になるという。この 10km^3 という量は、Alumbreira 鉱床で鉱化作用の認められない複成火山を生成したマグマ量や、既存の平均的な安山岩より推定され

る量よりも遙かに少ないという。

鉍石品位は、鉍液の初生的な金属量や鉍化ゾーンでの熱水の挙動に依存する。斑岩銅鉍床における様々なステージ(鉍化初期から晩期)の流体包有物の金属濃度を測定したところ、420 ~ 340 の極めて狭い範囲の温度区間で金属濃度の低下 (= 金属の沈殿) が認められた。このことは、金属の沈殿が温度の低下に依存しており、気相分離や外部流体との反応が金属沈殿(鉍化作用)に重要な役割を果たしていないことを示している。つまり、鉍石品位を左右するのは、フィーダーゾーンに沿って上昇する流体の温度構造であり、多量の流体が短い距離で急激に冷やされることによって鉍化作用が最大となる。Alumbra 鉍床などのメルト・流体包有物中の金-銅比は、鉍床全体のそれとほぼ同じ値を示し、鉍液の金-銅比が、鉍床全体の金-銅比を表しているという。鉍化作用を伴わないポーフィリー中のメルト包有物の金属濃度(Halter et al., 1989)は、鉍化作用の認められる FNVC などのメルト包有物(銅:<1%、金:1ppm)に比べて、明らかに金属濃度(銅:<2ppm)が低い。このことは、ポーフィリー型の鉍床では、もともとのマグマの組成が重要であることを示している。

6. 白金族鉍床

Naldrett 氏は、白金族鉍床の品位とサイズから金属鉍量 1 万 t 以上の鉍床を超巨大白金族鉍床と定義(図 5-1)した上で、超巨大白金族鉍床は、Ni-Cu 硫化物型(Type 1)と、マグマ溜まりに繰り返しマグマが供給され形成された層状貫入岩体(Type 2)の 2 つがあるとした。現在知られている巨大白金族鉍床の内ほとんどが後者のタイプに属する。

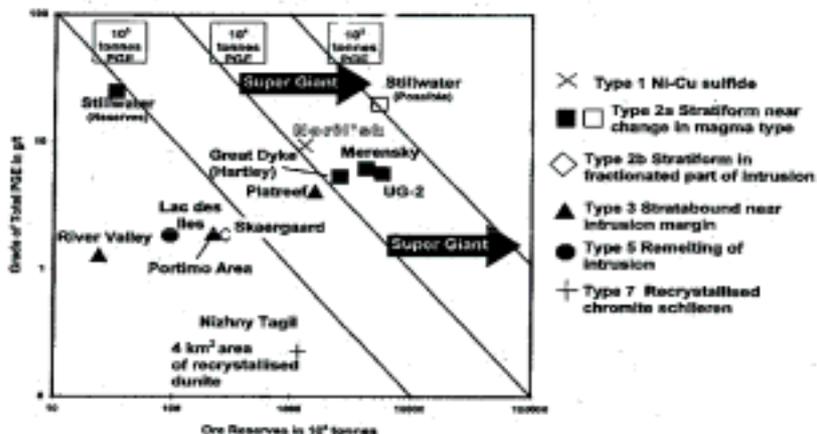


図 5-1

白金族鉱床探査においては、以下の2要素について注目すべきだと提案している。

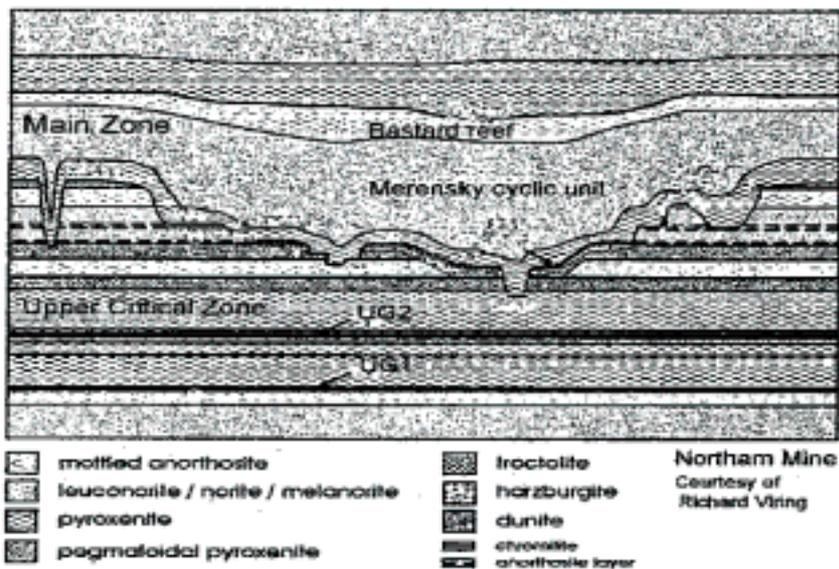
(1) U-type マグマとT-type マグマ

近年の研究により、多くの白金族鉱床形成には組成の似た2つのマグマ、“SiO₂、MgO、Crに富むマグマ(U-type)”と“Al₂O₃に富みMgOとCrに乏しいマグマ(T-type)”が鉱床生成に関与していることが明らかとなってきた。これら両者は、地殻物質の取り込み度の違いに起因する化学組成の違いから識別され、その混合が鉱床の生成に関連があると解釈されている。

(2) マグマ溜まりへの新たなマグマの供給、マグマ不整合

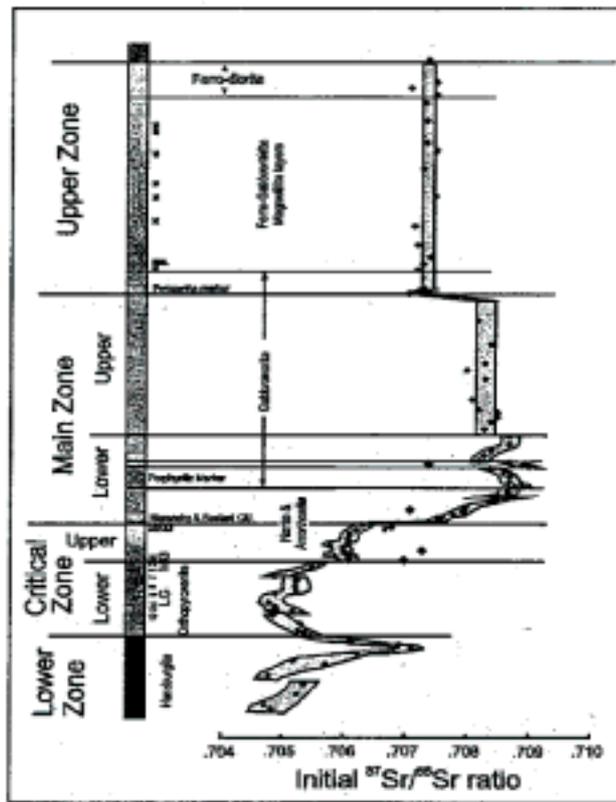
Bushveld 複合岩体では、金属に富む硫化鉱物クロム鉄鉱層が繰り返し出現するが、地化学的(例えば Sr 同位体、図 5-3)、岩石学データから、これら白金族に富む硫化鉱物が形成された時期は、SiO₂、MgO、Crに富むマグマ(T-type)がマグマ溜まりに供給された時期と調和的であるという。

特に、Merensky Reef は、マグマの貫入に伴い、それまでの集積構造が削剥あるいは変形され、岩相的・地球化学的にも急激に変化する場所の底部(図 5-2、3)に位置しており(マグマ不整合面)、マグマ溜まりへの新たなマグマの供給が鉱床生成に重要な役割を果たしていることを示している。



2 Schematic cross section of the Main Zone – Critical Zone boundary at the base of the Merensky Cyclic Unit. The unconformity on which the Reef lies is shown

図 5-2 マントルオーバーターン



3 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ stratigraphy of the Bushveld Complex in the Eastern and western lobes⁶

図 5-3 マントルオーバーターン

Arndt 氏(仏・Grenoble 大学)は、Ni-Cu-PGE 鉱床を形成するマグマは、4つのタイプに分類され、それぞれにおける鉱化作用について紹介した。何れのタイプにおいても、硫黄を含む地殻との反応が鉱化作用に重要な役割を果たすという。

(1) ソレイト質ピクライト

Noril'sk-Talnakh(シベリア)などの超巨大鉱床を胚胎している。このタイプのマグマは、銅や PGE の含有量が高く、揮発成分が少なく地殻岩石と容易に反応する。もし、これらの岩石が硫黄に富んでいれば、マグマ性の Ni-PGE 硫化物がマグマから離溶し、鉱床形成に至る。

(2) アルカリピクライト

アルカリピクライトは、通常ソレイト質のピクライトを伴うが、鉱床を胚胎することは希であるという。Noril'sk-Talnakh 地域では、鉱床を胚胎する貫入岩(ソレイト質のピクライト)以外に、起源の異なるアルカリピクライトが現れる。このマグマは、

部分溶融が進んでいないマグマで揮発成分に富んでいる。このマグマが下部地殻に達した時に、CO₂の離溶によりマグマ中に多量の気泡が生じ、その結果浮力が発生し、マグマは急激に上昇する。この急激な上昇は、マグマと地殻の反応(地殻に含まれる硫黄をマグマ内に取り込む)を阻害し、鉱化作用を生じさせないという。ただし、マグマが停留し分化を引き起こした場合、中国の Emeishan flood basalt に関与したアルカリ貫入岩のように、PGE 鉱床を形成するという。

(3) コマチアイト

通常高温で、Ni や PGE、揮発成分に乏しい溶岩である。硫黄に富んだ堆積岩類とコマチアイトが反応すると、豪州の Kambalda 鉱床や Perseverance 鉱床、カナダの Thompson 鉱床のような富鉱床を形成する。

(4) 高 Mg の玄武岩

南アフリカの Bushveld 鉱床やカナダの Stillwater 鉱床のように、巨大な層状貫入岩体を形成するのは、高 Mg の玄武岩である。このマグマは、古い大陸地殻を取り込んでいることを示す地化学的な特徴(Nb の負の異常など)があり、おそらく、高 Mg の玄武岩と多量の下部～中部地殻と同化作用に起因すると思われる。Bushveld 鉱床の Merensky Reef や Stillwater 鉱床の J-M Reef などの Cr-PGE 鉱床は、高 Mg の玄武岩と複数のマグマとの混合により形成される。

7. 所感

斑岩銅鉱床などの火成活動が鉱化作用に直接的に関与した鉱床タイプでは、メルト包有物や流体包有物の組成分析から鉱床規模やポテンシャルを評価する方法は、探査の初期段階で、有効であると思われる。また、白金族鉱床に関する講演が多く、関心の高さが伺えるが、その生成論に不明な部分も多く、今後の発展に注視していく必要がある。

本大会の講演の大半は大学など研究機関が主であったが、彼らは、探査に応用可能な提案を積極的に行っており、研究機関と鉱山会社との間でうまく情報交換・共有がなされていると感じた。

引用文献

図 1-1 : Groves, I.D., et al., 2003, Applied Earth Science, v.112, B115-B116.

図 1-2 : 丸山茂徳・磯崎行雄, 1998, 生命と地球の歴史、岩波新書

図 2 : Arif, J. and Baker, T., 2003, Applied Earth Science, v.112, B132-B133.

図 3-1,2 : カナダ地質調査所 隕石孔データベース

図 5-1 : Naldrett, A.J., 2003, Applied Earth Science, v.112, B215-B216

図 5-2,3 : Kruger, F.J., 2003, Applied Earth Science, v.112, B208-B209.