

第4回フェノスカンジア探鉱・鉱業会議白金族鉱床 ワークショップ参加報告

調査事業部海外協力課 栗原政臣

ロンドン海外調査員 霜鳥 洋 報告

はじめに

白金およびパラジウムの生産は特定地域に偏在しており、Johnson Matthey(2003)によれば、南アフリカ共和国とロシア連邦の2か国で白金はその92%を、パラジウムはその83%を占めている。白金埋蔵量に関しては南アフリカ共和国1か国で75%を占めている(Cawthorn, 1999)。今回、フィンランド共和国 Rovaniemi において白金族鉱床ワークショップが開催されたが、フィンランドが位置するフェノスカンジア楯状地は、南アフリカ共和国の Bushveld、ジンバブエの Great Dyke、米国の Stillwater に次ぐ白金族金属(Platinum Group Metals : PGM)の供給源として注目され、1980年代から活発な探査が行われてきた。

フェノスカンジア探鉱・鉱業会議は、2003年12月4日および5日に開催された本会議と事前に開催された探鉱地質技師向けワークショップで構成され、ショートコースとしては、D. Groves 教授(Western Australia 大学)らによる Orogenic 型金鉱床コースと E. Stumpf 教授(オーストリア Leoben 大学)らによる白金族鉱床コースが開設された。本会議は、探鉱・鉱業活動の促進を目的にフィンランド政府により準備され、大手鉱山会社、ジュニア探鉱会社、大学研究者等約300人が参加し、フィンランド政府や欧州委員会による鉱業政策の説明や、地域地質概論、探鉱・開発プロジェクトの紹介が行われた。

今回参加した白金族鉱床ワークショップには、大学関係者、欧州各国の地質調査所および民間探査会社等20名の参加があった。このワークショップは、2002年米国で開催された第9回国際白金シンポジウムと比較すると、鉱床生成における流体の役割に重点が置かれていた。さらに PGM の供給源としてタイプの異なる鉱床を提示し新たなポテンシャルも紹介された。

ここでは(1)層状火成複合岩体(Layered Igneous Complexes : LIC)中の白金族鉱床生成における流体の関与、(2)フェノスカンジアの白金族鉱床、(3)注目すべき PGM の供給源について述べる。またパラジウムの世界最大の鉱床である(4)Noril'sk 鉱床の生成モデルについても紹介する。

(1) 層状火成複合岩体(LIC)中の白金族鉱床生成における流体の関与

世界の主要な白金族鉱床はその大部分が層状火成複合岩体(LIC)に分布している。第1表は世界の白金族鉱床をタイプ別にまとめたものである。PGMの約50%がLIC(第1表ではLayered Intrusion)より供給され、その埋蔵量は90%を超えている。

第1表 白金族鉱床のタイプおよび世界生産と埋蔵量割合

Type	Example	World Production Base(%) (1988)	World Reserve Base(%) (1988)
LI	• Bushveld(South Africa) • Sudbury(Ontario, Canada) • Stillwater(Montana, USA) • Great Dyke(Rodesia)	50	90.2
FB	• Noril'sk, Talnakh, Mairk e Taymir (Siberia, Russia)	37	8
GB	• Thompson(Manitoba, Canada) • Kambalda(Western Australia, Australia) • Fortalezade Minas(Minas Gerais, Brazil)	11	1.2
Others		2	0.6
Total		100	100

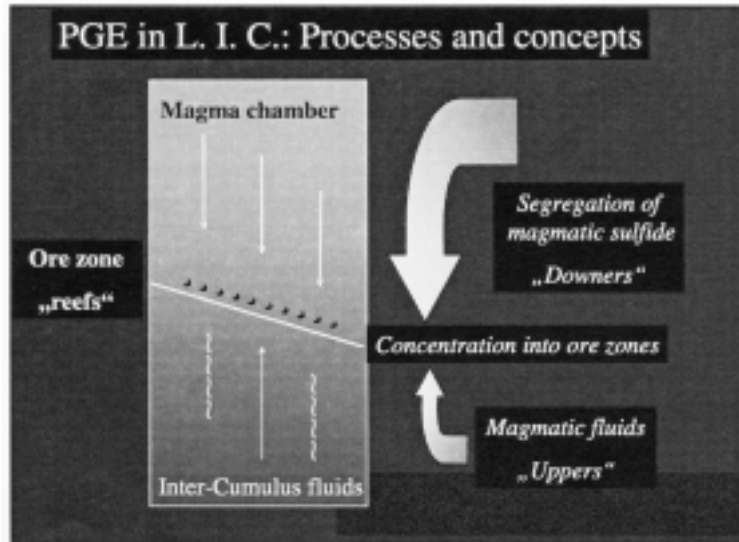
LI ; Layered Intrusion, FB : Flood Basalt, GB : Greenstone Belt

(国際協力事業団・金属鉱業事業団、2003)

正マグマ性鉱床の成因の一つは、不混和硫化物マグマによる珪酸塩マグマからの親銅元素の除去である。世界の白金族生産の大部分を占める LIC における白金族元素(Platinum Group Elements;PGE)の濃集も同様に、マグマ溜りへの新しいマグマの流入、乱流状の混合およびそれに伴う硫化物の沈降により PGE がマグマから取り除かれ鉱床レベルに濃集した、と一般に考えられている。しかし、主要な白金族鉱床である Bushveld の Merensky Reef や Stillwater の J-M Reef では上述の生成過程では説明することが難しいほど高い PGE の濃集が認められる。島崎(2003)は、Merensky Reef の場合、鉱石として 75cm の層全体を取り上げれば 10ppm 程度の濃度でも、硫化物そのものを取り出せば、その PGE 含有量は数 100ppm に及ぶことになるとし、また、J-M Reef に鉱染する硫化物中には 2,000ppm にも達する多量の PGE が含まれていることを示した上で、硫化物マグマがいかによい貴金属元素の吸収体であるにしても、少量の不混和硫化物マグマの形成だけでは、層状貫入岩体中で多量の白金族元素を 1 か所に濃集させることは難しいと指摘した。本ワークショップの中心となる Stumpfl 教授は 1982 年より白金族鉱床の研究を続けており、流体が白金族鉱床の生成に重要な役割を果たし、PGE の分配(distribution)、もしくは再分配(redistribution)をコントロールしていると考えている。第1図に LIC における白金族元素の濃集モデルを示す。この生成モデルによると PGE は硫化物として沈積(第1図下向き矢印)した後、流体による後退交代作用

(retrogressive metasomatism、上向き矢印)を受けて再移動し、鉱床ゾーンである“リーフ(reefs)”に再濃集する。

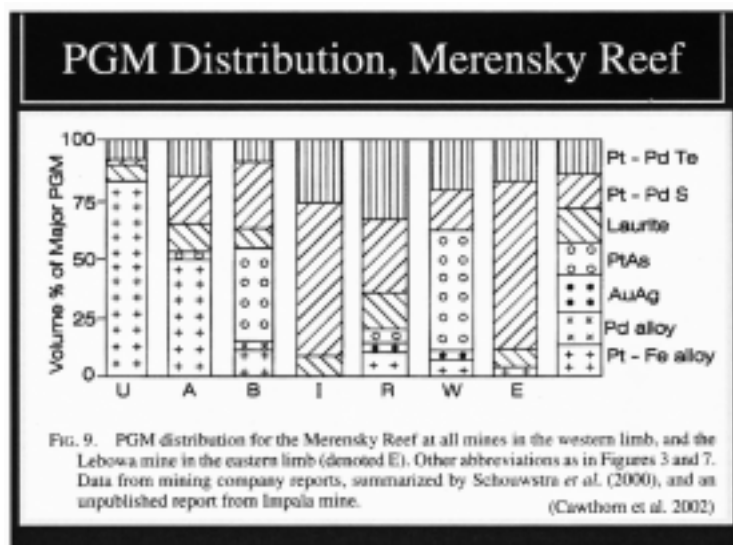
本ワークショップでは、LIC の代表例として Bushveld 複合岩体を中心に議論し、鉱床生成に揮発性流体が関与している根拠として、Stumpfl 教授やドイツ地球科学・天然資源研究所の Melcher 氏から以下の事例が示された。



第1図 LICにおけるPGEの濃集モデル (Stumpfl 教授ワークショップ資料より)

白金族鉱物の不規則な分布

Bushveld の白金族主要鉱床である Merensky Reef では場所により白金族鉱物の種類と量が不規則な分布を示す。この現象は硫化物の沈降による層状の PGE 濃集では説明できない。不規則な分布の例として、第2図に Merensky Reef の各鉱山における白金族鉱物の割合を示す。Bushveld 岩体 western limb の白金族鉱物の割合は、広域的には北西側の合金に卓越したもののから硫化物あるいはテルル化物 - 砒化物が卓越する南東側へと変化している (Cawthorn et al., 2002)。

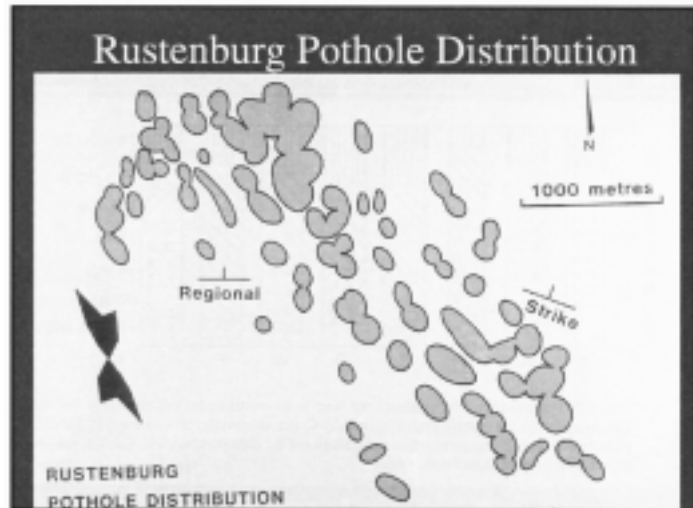


第2図 Merensky の各鉱山における白金族鉱物割合 (Stumpfl 教授ワークショップ資料より)

ポットホール(pothole)の存在

ポットホールと呼ばれる、多量の揮発性成分に起因する現象が認められる。ポットホールが Merensky Reef 表面の 30%を占めている鉱床もある(第3図)。またポットホールは決して Merensky Reef に限定されたものではなく、Merensky Reef の下位に位置する

UG2 層準にも見られるほか、フィンランドの白金族鉱床、そして米国の Stillwater 複合岩体にも認められる。そこでは水分に富んだ(1~2%) 巨大な体積の冷却中のマグマがあって、マグマ活動後期もしくは活動後にそれ自身を進化させる流体相を溶解していたと思われる。



第 3 図 Rustenburg 鉱山におけるポットホール分布 (Stumpfl 教授ワークショップ資料より)

パイプの存在

Merensky Reef および UG2 にはポットホールと似た白金族鉱物の組み合わせを持つパイプが認められる。このパイプは圧密された cumulated pile に由来する揮発成分がきっかけとなり形成されたもので、超苦鉄質岩から磁鉄鉱およびバーミキュライトまで変化する。現在このパイプの存在は、パイプと Merensky Reef および UG2 との交差部から数 km にわたって白金族鉱物に影響を及ぼした揮発成分の通路として注目されている。

PGE 濃集部と硫化物濃集部の分布

PGE が硫化物とともに沈積したのなら両者の分布は一致するはずである。Great Dyke の Hartley 鉱山における PGE 鉱化は、PGE、Ni、および Cu が濃集した intercumulus 硫化物(磁鉄鉱、ペントランド鉱、黄銅鉱、少量の黄鉄鉱)として輝岩質母岩の Main Sulfide Zone (MSZ)に鉱染状に認められる。MSZ は下部の PGE subzone と上部の BMS(Base Metal Sulfide)subzone からなり、両者の分布は第 4 図に見られるように一致していない。

白金族鉱物の風化

1998 年、Hartley 鉱山では白金の酸化鉱の採掘を開始した。白金族鉱物は、PGE-rich subzone に分布しており(第 4 図)、砒白金鉱

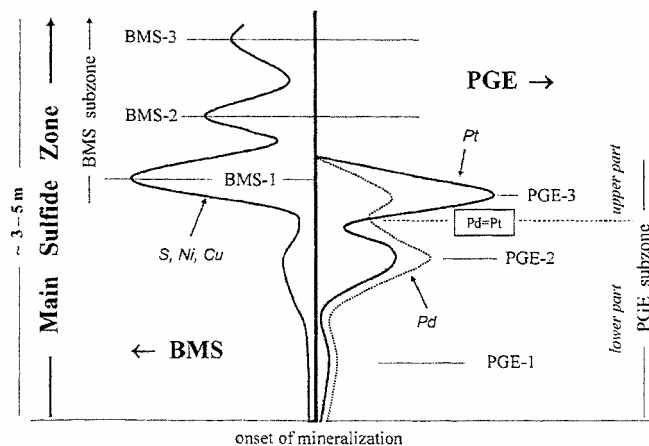


Fig. 4 Summary of key features of element distributions and subdivision of the MSZ at the Hartley Platinum Mine. BMS Base metal and sulfide enrichment pattern, PGE platinum-group element enrichment pattern

第 4 図 Hartley 鉱山における白金族鉱化分布 (Oberthür et al., 2003a)

[PtAs₂]はその subzone 全体にわたって認められる。Cooperite/braggite [(Pt, Pd, Ni)S]は主に subzone 下部に、(Pt, Pd) - ビスマステルル化物[(Pt, Pd)(Bi, Te)]は上部に濃集している。酸化物鉱床では砒白金鉱および braggite は安定しているが、(Pt, Pd) - ビスマステルル化物およびペント

ランド鉱 - 磁硫鉄鉱は分解し、Pt および Pd 合金や(Pt, Pd) - 酸化物あるいは水酸化物になる。また鉱山から流出する川に沈積した白金族鉱物の組み合わせは、酸化物鉱床と比較してさらに変化している(第 5 図)。

砒白金鉱の大部分は未変質であるのに対し、ほとんどの Cooperite/braggite 粒子は部分的に変質しているか完全に

破壊されている。また Pt-Fe 合金の粒子は沖積層の至る所に分布する。おそらくこれらの粒子は、以前から存在する粒子か、あるいは不安定な白金族鉱物から低温での溶解状態を経て形成された新しい粒子であろう。

白金族鉱物の溶解

新しい溶解実験データから、500 で 40ppb のパラジウムが 0.1m KCl 溶液および 130ppb のオスミウムが 1.5m KCl 溶液に溶解することが示された。塩素を持つ鉱物は Merensky Reef、Sudbury sublayer、Noril'sk 等多くの白金族鉱床から報告されている。また PGE の硫黄錯体は低温 (<350)において次第に溶解度を増す。これは late-magmatic プロセスの状態に類似している。

白金族鉱物の晶出

熱水溶液からの白金族鉱物の沈積に関する実験では、白金、パラジウム、砒白金鉱 (PtAs₂)、Pt(As, Sn)₂ および Pd-polarite(Pd, Pb)が、240 および 500 でグラファイトの存在のもとに合成された。これらのデータは、白金族鉱化作用が含水珪酸塩および/またはグラファイトと関係のあるすべての白金族鉱床に該当する。Merensky Reef には広くグラファイトおよび含水珪酸塩が存在している。

PGM	MSZ pristine	MSZ oxidized	Makwiro river
(Pt,Pd)(Bi,Te)*		PGE-oxides	
PtAs ₂			
(Pt,Pd,Ni)S			-----
Pt-Fe alloys	
Pt/Pd ratio	1.3	2 - 2.4	> 10

Fig. 8 Summary of trends of PGE mineralogy and geochemistry from pristine MSZ via oxidized MSZ into the fluvial environment of the Makwiro River. (Pt,Pd)(Bi,Te)*=(Pt,Pd)-bismuthotellurides. (Pt,Pd,Ni)S= cooperite/braggite. Pt/Pd ratios relate to whole rock data of pristine and oxidized MSZ, and estimate from PGM abundance in sediments of the Makwiro River

第 5 図 Hartley 白金鉱山における PGE 鉱物の変化 (Oberthür et al., 2003b)

(2) フェノスカンジアの白金族鉱床

フェノスカンジアとは、ロシア連邦のコラ半島およびカレリア地方からフィンランド共和国、スカンジナビア(スウェーデン王国、ノルウェー王国)を含む地域を指し、そのほとんどは始生代後期から原生代初期にかけてのフェノスカンジア楕状地(バルト楕状地として知られる)からなる。本ワークショップでは、フィンランド Oulu 大学の T. Alapieti 教授からフェノスカンジア楕状地における PGE 鉱化作用について説明があった。

フェノスカンジア楕状地の北東部域には 25~24 億年前の層状貫入岩類が広く分布し、その面積はおよそ 54 万 km²(600×900km)に及んでいる。第 6 図に世界に分布する原生代初期の層状貫入岩体の位置を示す。フェノスカンジアにおける層状貫入岩類の貫入は原生代初期に発生した世界規模の火成活動の一部であり、それは他のクラトンにおける同時代の大規模層状貫入岩体および苦鉄質平行岩脈群によって示される。



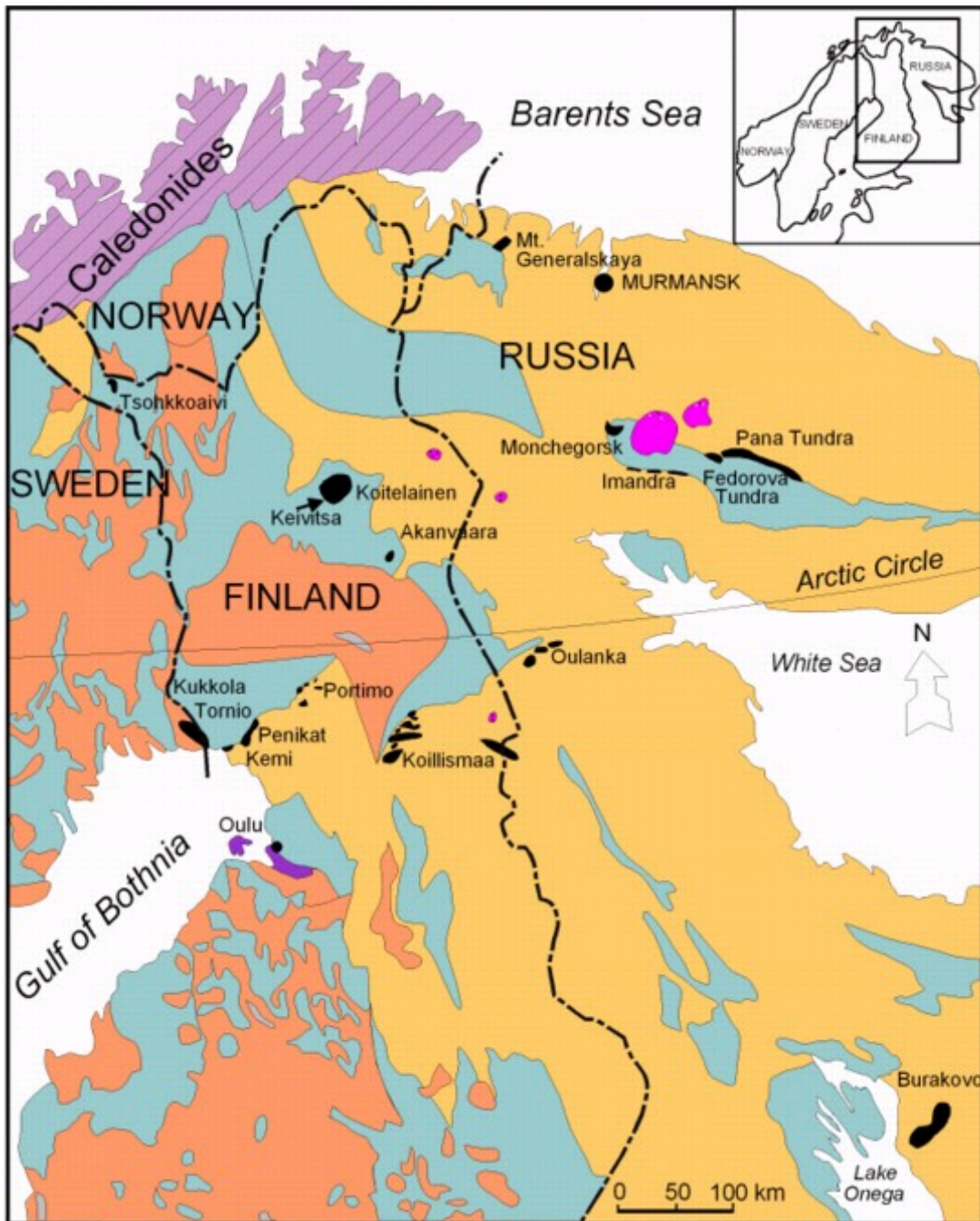
第 6 図 原生代初期の層状貫入岩体の分布
(Alapieti 教授ワークショップ資料より作成)

原生代初期の層状貫入岩体の例として、西オーストラリア Yilgarn ブロックの Jimberlana 貫入岩(2,420±30Ma)、オンタリオ州の East Bull Lake Suite(2,491-2,441Ma)があげられる。ジンバブエの Great Dyke は少し古く 2,579±7Ma の年代値を示す。およそ同時代に貫入した平行岩脈群にはスコットランドの Scourie 苦鉄質岩脈(2,418Ma)、スペリオール地方の Hearst-Matachewan 岩脈群(2,452Ma)、南インドの Mysore 岩脈、Yilgarn ブロックの Widgiemooltha 岩脈群および南極の Vestfold Hills 複合岩体がある。

1) フェノスカンジア貫入岩類 PGE 鉱化作用の分類

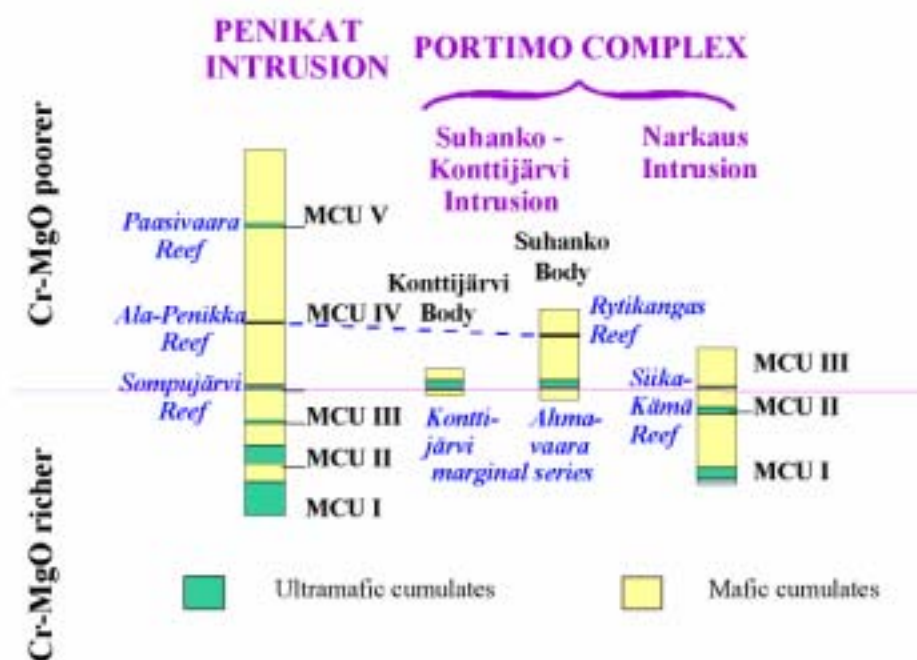
フェノスカンジアに分布する貫入岩類の多くは PGE が濃集していることで知られており、鉱化作用は 6 つのグループに分類される。

以下にそれぞれの鉱床タイプについて概要を示す。また第 7 図にフェノスカンジアにおける原生代初期の層状貫入岩体の分布を示す。なお、Portimo 複合岩体および Penikat 貫入岩体の各 reef 等については第 8 図を参照されたい。



第7図 フェノスカンジアにおける層状貫入岩体の分布
 (Oulu 大学地質学科ホームページ)
 (<http://cc.oulu.fi/%7Egeolwww/bum/bum.html>)

CORRELATION BASED ON PARENTAL MAGMA



第 8 図 Penikat 層状貫入岩体と Portimo 複合岩体との相互関係 (模式柱状図)
(フィンランド地質調査所ホームページ)
(<http://www.gsf.fi/explor/pgeweb/penikat/correlation.htm>)

鉍染状・塊状ベースメタル硫化物 - 白金族鉍床(マージナルシリーズ(縁辺岩相群))
貫入岩体のマージナルシリーズを母岩とするのは、ベースメタル硫化物 - 白金族鉍床のうち鉍染状タイプである。塊状タイプは鉍染状タイプに密接に関連して特に Portimo 複合岩体の Suhanko ブロックに見られる。Ni+Cu の含有量は概して 1wt.%以下だが、全 PGE+Au 含有量はまれに 1ppm を超える。鉍床を胚胎するマージナルシリーズには基盤からのフェルシク鉍物の混入が認められる。一方、Penikat 貫入岩体のマージナルシリーズではフェルシク鉍物の混入はあまり認められず、境界部に細粒の急冷周縁相を持ち PGE 鉍化作用を欠いている。マージナルシリーズに関連した鉍化作用の中で例外として Portimo 複合岩の Konttijärvi および Ahmavaara シリーズがあげられ、そこでは本タイプの中では際だって高い PGE 含有量を示す。

PGE を伴うオフセット鉍床

Portimo 複合岩の Narkaus 貫入岩体の下部に認められる。このタイプの鉍化作用は高い PGE 値を特徴とし Pt+Pd 含有量は 100ppm 台に達する。

ベースメタル硫化物を伴う白金族リーフ(層状岩体)

Penikat 貫入岩の AP(Ala-Penikka) Reef と PV(Paasivaara) Reef、Portimo 複合岩の SK(Siika-kämä) Reef と RK(Rytikangas) Reef および Pana Tundra 貫入岩のいくつかのリーフに代表される。本タイプの PGE 含有量は一般に数 ppm でリーフの厚さは数 10cm から数 m に及ぶ。

硫化物をあまり伴わない白金族リーフ(層状岩体)

ベースメタル硫化物を伴うタイプに似ており、PGE 富化ゾーンは通常長く連続し、鉱床タイプ、品位、白金族鉱物が際だって変化する。最も典型的なタイプは Penikat 貫入岩の SJ(Lake Sompujärvi) Reef である。このリーフタイプのほとんどは硫黄に乏しく、鉱染したベースメタル硫化物はリーフ中に分布しているが PGE と共存することはまれである。一方クロム鉄鉱の鉱染は頻繁に認められ、リーフのその部分は一般に PGE の最高品位を示す。ベースメタル硫化物もクロム鉄鉱も認められない純粋な珪酸塩岩中に白金族鉱物が分布することも多い。

マイクロ斑れいノーライトに関連した鉱染状ベースメタル硫化物-白金族鉱床(層状岩体)

貫入岩類のマージナルシリーズに関連した鉱床と匹敵する PGE およびベースメタル含有量を持つ。このタイプは特に Koillismaa 複合岩体および Oulanka 複合岩体に認められる。

クロム鉄鉱岩の上部に関連した PGE 濃集部

Koitelainen および Akanvaara 貫入岩体に見られ、全 PGE 量は 1ppm を超える。これらのクロム鉄鉱は一般に上層部に位置し、下位のクロム鉄鉱より磁鉄鉱斑れい岩の近傍に見られる。

2) Portimo および Penikat 層状複合岩体

Alapieti 教授は、これらの貫入岩体の中で Portimo および Penikat 層状複合岩体について詳しく説明した。

Portimo および Penikat 層状複合岩体には数タイプの PGE 鉱徴地が分布する。それらには 貫入岩体のマージナルシリーズに関連した鉱染状および塊状のベースメタル硫化物-白金族鉱床、白金族オフセット鉱化作用、層状岩体中のベースメタル硫化物を伴う()および硫化物に乏しい()白金族リーフが含まれる。これらの複合岩体は

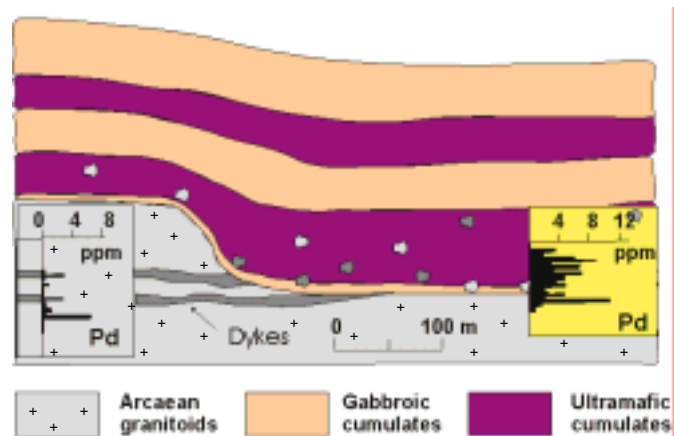
1959年に近傍に位置する Kemi クロム鉄鉱山が発見されて以降、集中的に調査された。探査が最も活発だったのは 1960 年代および 1970 年代で、クロムおよび Ni-Cu 鉱を中心に調査された。大規模な白金族鉱床の探査は 1980 年代に始まり、現在知られているこの地域の白金族鉱床は 1980 年代の終わりまでに発見された。2000 年に Outokumpu Mining Oy および Gold Fields Limited によって設立された Arctic Platinum Partnership (APP、但し Outokumpu 社は 2003 年に撤退)は、これらの探査を継続しており、Portimo および Penikat 地区においてパラジウムおよび白金の鉱山生産が可能か検討している。

開発が検討されている 貫入岩体のマージナルシリーズに関連した鉱染状および塊状のベースメタル硫化物 - 白金族鉱床の例として a) Portimo 層状複合岩の Suhanko-Konttijärvi マージナルシリーズを、硫化物をあまり伴わない PGE リーフの例として b) Penikat 層状複合岩の SJ Reef について以下に詳述する。第 8 図に Penikat 貫入岩体と Portimo 複合岩体の相互関係を示す。

a) Portimo 層状複合岩の Suhanko-Konttijärvi マージナルシリーズ

鉱染状の PGE を伴うベースメタル硫化物鉱床は、概して 10 ~ 30m 厚で Suhanko-Konttijärvi 貫入岩体のマージナルシリーズの全体に見られる。分布は不規則で一般にかんらん岩の底部からその下方約 30m の基盤まで及んでいる(第 9 図)。

これらの硫化物鉱床は極めて磁硫鉄鉱に富むが、特に Ahmavaara では黄銅鉱の濃集も見受けられる。マージナルシリーズの PGE 値は低異常のレベルで推移するが、Konttijärvi および Ahmavaara マージナルシリーズでは最高 10ppm 以上に達し、平均でも 2ppm 程度となる。これらの種類の PGE に富むマージナルシリーズは層



第 9 図 Portimo 層状複合岩体の Konttijärvi 貫入岩体 Konttijärvi マージナルシリーズの Pd 鉱化 (模式断面図) (フィンランド地質調査所ホームページ) (http://www.gsf.fi/explor/pgeweb/portimo/mineralized_marginal_series.htm)

状貫入岩類ではまれであり、比較的良好に知られた鉱床は Bushveld 複合岩体の Platreef のみである。フィンランド地質調査所による Konttijärvi と Ahmavaara の 2 鉱床をあわせた鉱量と品位は 183.6 百万 t、白金 0.27g/t、パラジウム 1.15g/t、金 0.12g/t であり、白金に比べパラジウムが卓越する。

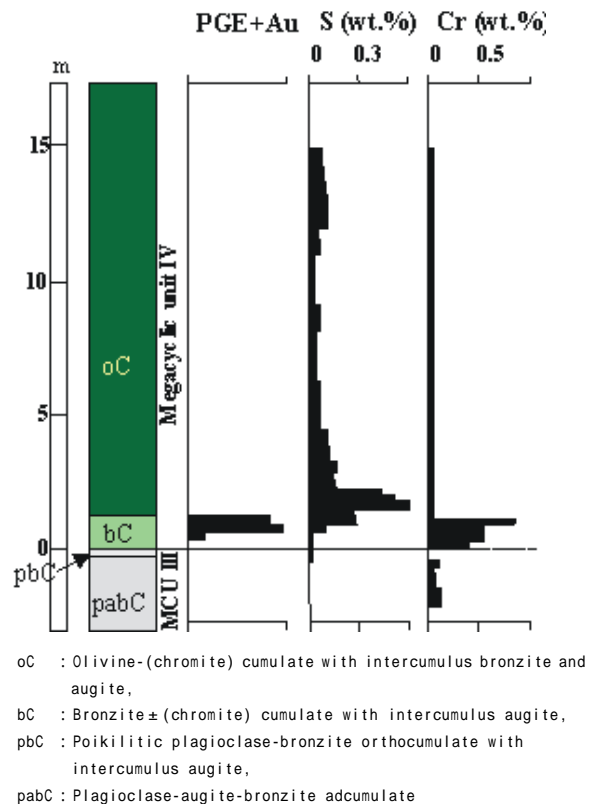
b) Penikat 層状複合岩の SJ Reef

Stumpfl 教授は、層状火成複合岩体(LIC)中の白金族鉱床生成における流体の役割に関し、鉱床生成が正マグマ性モデルのみでは説明できない根拠の一つとして鉱体中のPGEの分布と硫化物の分布が一致しない例をあげたが、SJ Reef もその一つである。

Penikat 貫入岩は厚さ 20~30m のマージナルシリーズおよび厚さ 2~3km の層状岩体によって構成されている。下盤の花崗岩類との境界部ははっきりしており細粒の急冷周縁相によって明瞭に特徴づけられ、そこにはわずかに花崗岩質の混入が認められる。マージナルシリーズは底部から上方に向かって、集積構造を示さない部分、グラノフィアーを伴う斑れいノーライト、斑れい岩質および古銅輝岩質キュームレイトからなる。層状岩体は超苦鉄質の層と苦鉄質(斑れい岩質および斜長岩質)の層の規則正しい繰り返しによって特徴づけられる。これらは一般的な苦鉄質マグマの分別結晶作用の順序の特徴を反映した集積鉱物の変化によって megacyclic unit (MCU) から MCU に分けられる。この種のユニットは多くの層状貫入岩体に見られ、一般には固結の際に新しいマグマがチャンバーへ繰り返し注入することに起因すると考えられる。

Penikat 貫入岩には PGE 含有量の高い 7 つのゾーンが認められる。これまでに発見された最も経済的に有望なエリアは硫化物に乏しい SJ Reef およびベースメタル硫化物を伴う AP Reef および PV Reef である。これらはすべて MCU に位置している(第 8 図)。

SJ Reef は 1982 年に発見された。これは 1960 年代にクロム鉄鉱の探査のための Outokumpu Oy によって得られたボーリングコアの再解析によるものである。1960 年代当時の探査では PGE は分析されていなかった。このリーフは Penikat 貫入岩の基底から 500~1,000m 上部にあり、クロムの豊富な MCU およびクロムに乏しい MCU の境界部分に位置している(第 10 図)。SJ Reef はパラジウムに卓越しており(Pt/Pd=0.5~0.6)、厚さと PGE 分布において不規則な特



第 10 図 Penikat 層状貫入岩体の MCU と MCU 部分の模式柱状図、および PGE+Au, S, Cr 鉱化位置 (フィンランド地質調査所ホームページ) (http://www.gsf.fi/explor/pgeweb/penikat/sompuj_pge_reef.htm)

徴を示す。白金族鉱物は主に MCU の輝岩質の底部に濃集しているが、それを覆うかんらん岩質キュームレイト中、あるいは MCU の最上部の斑れいノーライト質キュームレイト中にも認められる。その不規則な特徴により、鉱化帯の厚さは数 10cm から数 m の範囲で変化し平均はおおよそ 1m である。リーフの PGE 含有量はクロム鉄鉱あるいはベースメタル硫化物の鉱染と関連し、一般に前者において際だって高い PGE 含有量を示す。あるボーリングでは純粋な珪酸塩質岩類に白金族鉱物が濃集しているのが認められ、そこにはクロム鉄鉱もベースメタル硫化物も含まれていない。SJ Reef の白金族鉱化作用はクロム鉄鉱、ベースメタル硫化物および珪酸塩と関連した白金族鉱物の分布に基づいて 4 つのタイプに分けられる。()クロム鉄鉱タイプ、()ベースメタル硫化物タイプ、()クロム鉄鉱およびベースメタル硫化物の混合タイプ、()珪酸塩タイプ。硫化物を伴うタイプにおいても硫黄の最高値を示す部分は通常は PGE の最高値を示す部分と一致せず、0.5~3m 上部に位置する。

(3) 注目すべき PGM の供給源

Stumpfl 教授は、白金族鉱床には苦鉄質/超苦鉄質岩体中の“reef-type”や“pipes”といった、あるいは Kambalada タイプ、Sudbury タイプ、または Noril'sk タイプといった見出しのもとで対応できないタイプがあるとし、今後の LIC 以外の PGM 供給源として、ポーフィリー型銅鉱床の副産物、ラテライト中の PGE、PGE 酸化鉱、堆積岩中の PGE、不整合に関連した PGE を提示した。

ポーフィリー型銅鉱床の副産物

ポーフィリー型銅鉱床にはしばしば 1ppm を超える PGE が認められ、莫大な量の鉱石が採掘されるという観点から貴重な資源となり得る。大陸縁の沈み込み帯と比較して背弧を形成するような場でのポーフィリー型銅鉱床の方が、より PGE 含有量が高いようであるという。

ラテライト中の PGE

最近のラテライトニッケルのブームによって、ラテライト中の PGE 含有量にも注目が集まっている。サブプロライト中にはしばしば 1ppm 以上の PGE が含まれる。ラテライト化作用の際、クロム鉄鉱岩中の PGE は非常に動きやすくなり、ブラジルの Niquelandia 鉱床から得られたラウラ鉱 (RuS_2) は RuO_4 および鉄の水酸化物によって縁取られていて、そこは最高 40% のルテニウム値を示す。

PGE の酸化鉍

ジンバブエ共和国 Great Dyke の Hartley 鉍山にて一時採掘された。Hartley 鉍山では初生鉍床から酸化物鉍床、さらに河床堆積物まで白金族鉍物の変化が観察される(第 5 図参照)。またこの過程でパラジウムは減少しており、このことはパラジウムは白金と比較して動きやすく天水の作用で分散することを示唆している。

堆積岩中の PGE

一旦動いた PGE はおそらく様々な環境で再沈殿する。炭素質の堆積岩類はこの状況で重要な役割を果たしていると思われる。南ポーランドの Kupferschiefer は銅に卓越しており、厚さ数 cm を超えない層準において PGE+Au の含有量は数 100g/t までの値が報告されている。現在 Kupferschiefer のいくつかの鉍山においてパラジウムは副産物として回収されている。シベリアの Kodor-Udokan ベースンは原生代の変堆積岩類からなり、含銅黒色頁岩類および砂岩類はその一部を構成している。斑銅鉍-黄銅鉍鉍石のゾーンにおけるパラジウムの最高値は 3.2g/t を示す。また、基底の黒色頁岩層における白金は最高値 2.1g/t に達し、Kupferschiefer と類似した V、Cu、Cr、Mo、Co、Ni および Zn を伴う多金属鉍床が分布する。Ni-Mo-Zn に富化した堆積層中にも PGE が報告されている。アラスカ Selwyn ベースンのデボン紀の変堆積岩類、および南中国のカンブリア紀の Nunitang 累層もこれらの一例である。ブラジル Carajas Mineral 地方の世界規模の原生代-古生代の Serra Pelada Au-Pd 鉍床は、炭素質および石灰質の変シルト岩中に胚胎している。この Au-Pd 鉍化作用には、軽希土類元素、Se、Co、Cu、Ni、Pb、Zn、As、Bi、W および U が関連している。

不整合に関連した PGE

オーストラリア・ノーザンテリトリーの Coronation Hill に認められる。原生代前期

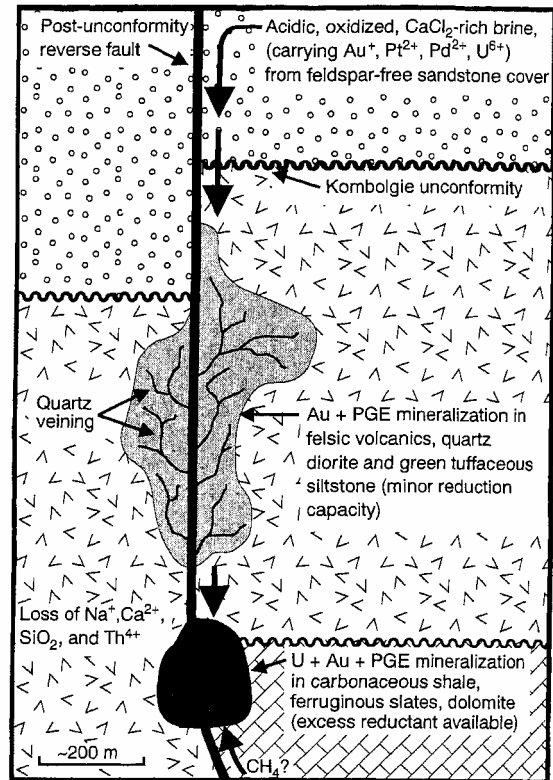


FIG. 16. Simplified diagram showing the flow of the acidic, oxidized, and ore-bearing brine from the overlying sandstone down the near-vertical faults at Coronation Hill. Interaction of these fluids with the feldspathic host rocks (with minor reduction capacity) below the Kombolgie unconformity leads to Au + PGE mineralization, whereas interaction of the same fluids with carbonaceous and ferruginous sediments (with excess reductant) leads to U + Au + PGE mineralization.

第 11 図 Coronation Hill における PGE 鉍化作用

の炭素質頁岩類、角礫岩類および長石ひん岩は、天水が断層の複雑なパターンに沿って下方に浸透した際に発生した低温(100~200)の塩水によって鉱化された(第 11 図)。それらはセレン化物を含む Au および Pt-Pd 合金として沈殿した。少量のウランも存在し、おそらく Jabiluka ウラン鉱床と類似した生成機構と思われる。Coronation Hill におけるセレン化物の存在は特に興味深い。Coronation Hill と Serra Peleada 鉱床には明確な地化学的な類似点がある。

(4) Noril'sk 鉱床の生成モデル

最後に、Oulu 大学の Latypov 博士による Noril'sk 鉱床生成モデルについて報告する。ロシア連邦シベリア最西端に位置する大規模 Cu-Ni-PGE 鉱床である Noril'sk 鉱床の生成機構は、巨大な体積の珪酸塩マグマに含まれる PGE が硫化物マグマによって濃集されたと言われている。本ワークショップでは、Latypov 博士によってそれを真っ向から否定する説が紹介された。

鉱石を伴う Noril'sk タイプおよび弱く鉱化した Lower Talnakh タイプの貫入岩類が、Ni、Cu および PGE に極度に枯渇した洪水玄武岩および枯渇していない洪水玄武岩のそれぞれと同源マグマかを解明するために相平衡解析を実施した。貫入岩類の本源マグマはシリカに不飽和なかんらん石玄武岩に分類され、洪水玄武岩の本源マグマはシリカに飽和したソレライトに割り当てられる。前者の本源マグマで深成岩に相当するのはかんらん石斑れい岩もしくはメラ斑れい岩であり、一方後者では斑れいノーライトである。相平衡の関係からこれら 2 つのタイプのマグマは分別結晶作用によって一方から他方が導かれることはない。つまり同源マグマとしてはあり得ないことが明らかに示される。このことは Noril'sk タイプの貫入岩類を、地表に達する途中の浅いチャンバーにおいてその親銅元素のほとんどを失う巨大な体積の火山マグマのための導管出口と考慮すれば、現在のモデルに対して支持がないことを示す。巨大な体積の親銅元素に枯渇した玄武岩類と非常に硫化物に富んだ Noril'sk 地域の貫入岩類との関連性はほとんどなく偶然に一致したものである。そのため、他の洪水玄武岩地域において Noril'sk タイプの硫化物鉱床を探查する際には、親銅元素に枯渇した洪水玄武岩の存在を地域の判定基準として用いることはできない。詳細は、Latypov(2002)を参照されたい。

所感

冒頭に述べたように、白金族資源はそのほとんどが南アフリカ共和国とロシア連邦に偏在している。現在の消費量は世界の 8 割以上を米国、EU 諸国、日本、中国が占めており、今後の需給動向を考慮すると、今まで以上に重要な金属である。ワークショップ

終了後の雑談時に Stumpfl 教授は、巨大な自動車産業を持ち消費量も多い日本は今後も積極的に PGM にかかわるべきであろうと言及された。また PGM を使った燃料電池の研究開発も進められており、長期的に見ても不可欠の金属といえる。

2005 年にはフィンランドの Oulu において第 10 回国際白金シンポジウムの開催が予定されている。前回の米国大会では少数派であった白金族鉱床の生成に流体が深く関与しているとする“Uppers 派”がどこまで受け入れられるかも含め、フェノスカンジアは今後も注目を集めることとなるだろう。

白金族鉱床の生成に流体の関与があったかについてはまだ最終的な結論が出ていないが、硫化物を伴わない白金族鉱物が認められる以上、他の地域についても硫化物に関係しない PGE 濃集部の存在が示唆され、今後は探鉱対象を広げて検討する必要がある。フィンランドの白金族鉱床は以前クロム鉄鉱などを対象にしたポーリングを 1980 年代に入って再解析した結果発見された。ポーフィリー銅鉱床、ラテライトニッケル鉱床等、現在実施されているプロジェクトにおいても PGE 含有量を確認してみる価値がある。

参考文献

- 国際協力事業団・金属鉱業事業団(2003)：資源開発協力基礎調査、鉱物資源広域調査、ブラジル連邦共和国、パラナベースン地域、第 2 年次報告書
- 島崎英彦(2003)：マグマ性鉱床、資源環境地質学、1-8
- Cabral, A. R., Lehmann, B., Kwitko, R. and Costa, C. H. C. (2002) : The Serra Pelada Au-Pd-Pt deposit, Carajás mineral province, northern Brazil : reconnaissance mineralogy and chemistry of very high grade Palladian gold mineralization, 2002, Economic Geology, 97, 1127-1138.
- Cawthorn, R. G. (1999) : The Platinum and Palladium resources of the Bushveld Complex, South African Journal of Science, 95, 481-489.
- Cawthorn, R. G., Lee, C. A., Schouwstra, R. P. and Mellowship, P. (2002) : Relationship between PGE and PGM in the Bushveld Complex, The Canadian Mineralogist, 40, 311-328.
- Johnson Matthey,(2003):Platinum 2003 Interim Review, <http://www.platinum.matthey.com/publications/1059138410.html>.
- Latypov, R. M. (2002) : Phase equilibria constraints on relations of ore-bearing intrusions with flood basalts in the Noril'sk region, Russia, Contributions to Mineralogy and Petrology, 143, 438-449.

Mernagh, T. P. and Heinrich, C. A. (1994) : Chemistry of Low-Temperature Hydrothermal Gold, Platinum, and Palladium (\pm Uranium) Mineralization at Coronation Hill, Northern Territory, Australia, *Economic Geology*, 89, 1053-1073.

Oberthür, T., Weiser, T. W., Gast, L. and Kojonen, K. (2003a) : Geochemistry and mineralogy of platinum-group elements at Hartley Platinum Mine, Zimbabwe, Part 1. Primary distribution patterns in pristine ores of the Main Sulfide Zone of the Great Dyke, *Mineralium Deposita*, 38, 327-343.

Oberthür, T., Weiser, T. W. and Gast, L. (2003b) : Geochemistry and mineralogy of platinum-group elements at Hartley Platinum Mine, Zimbabwe, Part 2. Supergene redistribution in the oxidized Main Sulfide Zone of the Great Dyke, and alluvial platinum-group minerals, *Mineralium Deposita*, 38, 344-355.