

1-3 Noril'sk Cu-Ni-PGE 鉱床とその探査指針

1-3-1 はじめに

シベリアプラットフォームの東縁に位置する Noril'sk 地域には、世界有数の正マグマ性銅・ニッケル・PGE 硫化物鉱床が存在する。これらの鉱床は 1920 年代の発見とされ、同国および世界の重要なニッケルおよび PGE の供給源となっている。正マグマ性硫化物床は塩基性～超塩基性のマグマ活動に伴うことが知られており、さまざまな地質環境において存在する (Table II-1-3-1)。この中で Noril'sk 鉱床は洪水玄武岩に関連する鉱床として世界最大にして唯一稼行中の鉱床であり、同様の地質環境にあるパラナベーズン地域で調査対象としている銅-ニッケル-PGE 鉱化作用の唯一モデルとなるものである。

Noril'sk 鉱床はシベリア洪水玄武岩 (シベリアントラップ) に属する分化貫入岩体中に胚胎しており、Sudbury 鉱床に匹敵するニッケル資源量 (Fig.II-1-3-1) を有している。また Bushveld 岩体、Great Dike に次ぐ約 6,200 トンの PGE 資源量を有し (Table II-1-3-2)、鉱石は特にパラジウムが濃集することによって特徴づけられ、プラチナとパラジウムの比率は 1:3 に近い。このため同鉱床からのパラジウム供給量は世界需要の 60% に達しており、世界市場に占める影響力はきわめて大きいとされる。

本調査では既存データ解析に一環として、Noril'sk 鉱床に関する文献収集・解析および同タイプの鉱床について探査指針の考察を行った。

1-3-2 地質概要

Fig.II-1-3-2 に Noril'sk 地域の地質概略図を、Fig.II-1-3-3 に地質構造図を示す。Noril'sk 地域はシベリア卓状地の北西端に位置しており、シベリア洪水玄武岩に属する層厚 3,500 m を越える火山岩層序で特徴づけられる。本地域では $3.4 \times 10^5 \text{ km}^2$ の範囲に $2 \sim 3 \times 10^6 \text{ km}^3$ の火山岩類が噴出しており、世界最大規模の玄武岩露出地域である。これらの玄武岩類は層厚約 5,000 m の古生代の堆積岩類と原生代の基盤岩類 (花崗岩、花崗岩質片麻岩、片岩および角閃岩) を覆って分布する。Noril'sk 鉱床は古生代堆積岩中のシル状の貫入岩体に伴って胚胎しており、本地域の大構造の 1 つである Noril'sk-Kharaelakh 断層に規制されて 2 つの鉱床区 (Ore Junction : Noril'sk Ore Junction および Talnakh Ore Junction) が存在する。

現在みられる洪水玄武岩類の分布は主要な 3 つのベーズン構造に規制されている。これらは北から南に向かって Kharayelakh ベーズン、Vologochansky ベーズン、Noril'sk ベーズンおよび Tunguska 複向斜である。これらのベーズン構造は洪水玄武岩類の堆積後に起こった上下運動によって形成されたものであり、洪水玄武岩噴出時には Noril'sk 地域全体を玄武岩類が覆っていたと推定されている。このような構造運動の 1 つである Kayerkan-Pyasino Uplift により NW-SE 系のキール (背骨) 状の構造が作られ、これにより洪水玄武岩類に被覆された堆積岩中に胚胎していた鉱化貫入岩体の一部が地表にもたらされたと考えられて

Table II-1-3-1 Classification of mafic and ultramafic bodies (Naldrett, 1989)

Class of Body	Examples
I. Synvolcanic Environment	
1. Komatiites <ul style="list-style-type: none"> a. Lava Flows b. Dunite-Peridotite lenses 	Barberton(S. Africa) Kambalda area(W. Australia) Munro(Ontario, Canada) W. Australia Dumont Sill(Quebec, Canada)
2. Tholeiites <ul style="list-style-type: none"> a. Picritic Bodies b. Gabbroic bodies 	Kakagi Sill(Ontario, Canada) Dundonald Sill(Ontario, Canada) Centre Hill Complex(Ontario, Canada) Kaapmuiden Barberton(S. Africa) Kalgoorlie-Norseman(W. Australia) Dore Lake Complex(Quebec, Canada) Bell River Complex(Quebec, Canada) Big Trout Lake Complex(Ontario, Canada) Mulcahy Complec(Ontario, Canada) Bird River Sill(Manitoba, Canada) Windimurra Intrusion(W. Australia)
II. Associated with Rifted Plate Margins and Ocean Basins	
1. Floored by and Closely Associated with Continental Crust <ul style="list-style-type: none"> a. Komatiitic b. Largely gabbroic 	Cape Smith(Quebec, Canada) Thompson Belt(Manitoba, Canada) Fox River Sill(Manitoba, Canada) Labrador Trough(Quebec-Labrador, Canada) Kemi-Koillismaa Belt(Finland) Skaergaard(Thulean Province)
2. Not floored by Continental Crust <ul style="list-style-type: none"> a. Ophiolite complexes 	New Caledonia Newfoundland Cyprus Turkey USA Greece
III. Intrusion in Cratonic Areas	
1. Intrusions Related to Flood Basalts	Duluth Complex(Minnesota, U.S.) Noril'sk-Talnakh(U.S.S.R.) Defek Intrusion(Australia) Insizwa-Ingeli Complex(S. Africa) Ontario Nipissing Diabase(Ontario, Canada)
2. Large-layered Complexes with no Documented Relation to Flood Basalts <ul style="list-style-type: none"> a. Sheet like <ul style="list-style-type: none"> i) With repetitive layering ii) Without repetitive layering b. Dikelike 	Bushveld Complex(S. Africa) Stillwater Complex(Montana, U.S.) Muskox Complex(Canada) Sudbury(Canada) Great Dyke(Zimbabwe) Jemberlana(W. Australia)
IV. Bodies Intruded in Orogenic Belts	
1. Synorogenic Intrusions	Aberdeenshire Gabbros(Scotland) Rona(Norway) Seiland Province(Norway) Fongen-Hyllingen Complex(Norway)
2. Alaskan-type Complexes	Duke Island(Alaska, U.S.A.) Union Bay(Alaska, U.S.A.) Tulameen(British Colombia, Canada) Northern California(U.S.A.) Urals Columbia Venezuela
3. Alkalic Bodies	Gardar Province(Greenland) Kola Peninsula(U.S.S.R.) Numerous Kimberlites and Carbonatites

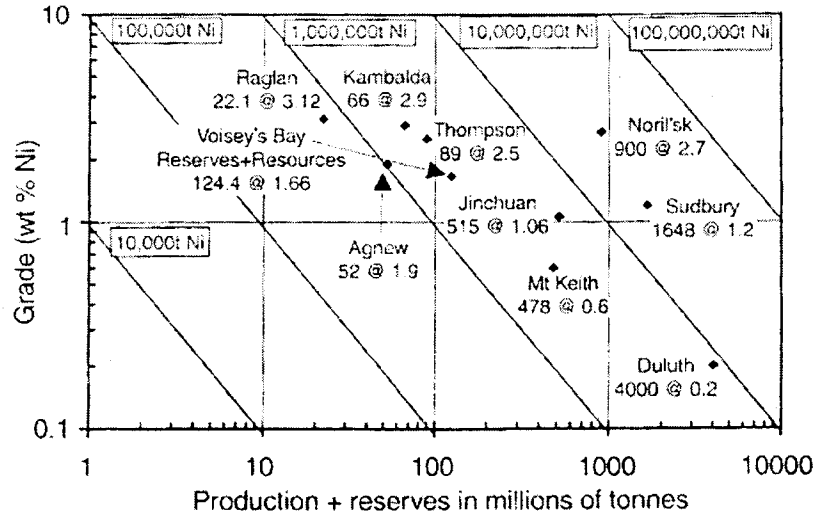


Fig. 1 Plot of grade in wt.% Ni versus production + reserves in millions of tonnes for major Ni sulfide deposits of the world, modified after Naldrett (1994). Data for Sudbury are personal communications from INCO Ltd. and Falconbridge Ltd. (1990); those for Noril'sk are an estimate only; for Duluth are from Listerud and Meineke (1977); for Jinchuan are from Chai and Naldrett (1992a); for Kambalda, Agnew and Mt. Keith are from posters exhibited by Western Mining Corporation at the 13th Australian Geological Convention, Canberra, February (1996); for Thompson are personal communication from, O.R. Eckstrand (1990); for Voisey's Bay are reserves plus indicated and inferred resources announced by Mike Sopko, Chairman, INCO Ltd., in July 1998

Fig. II-1-3-1 Grades versus production + reserves for major Ni sulfide deposits of the world (Naldrett, 1999)

Table II-1-3-2 Comparison of PGE reserves in the major Ni-Cu-PGE deposits

Data from Buchanan(1979), Naldrett(1981), Robson(1985) and Naldrett(1987)

	Bushveld Complex			Great Dyke *	Sudbury	Noril'sk	Stillwater J-M Reef *
	Merensky Reef *	UG2 *	Platreef *				
Million Tonnes	2160	3700	1700	1679	310	1640	49
Grade (Total PGE+Au,g/t)	8.1	8.71	7.27	4.7	0.9	3.8	22.3
Contained PGE+Au (tonnes)	17496	32227	11900	7890	279	6232	1093
Percentage of total	26.8	49.4	18.2	12.1	0.4	9.6	1.7

*: Primary Product

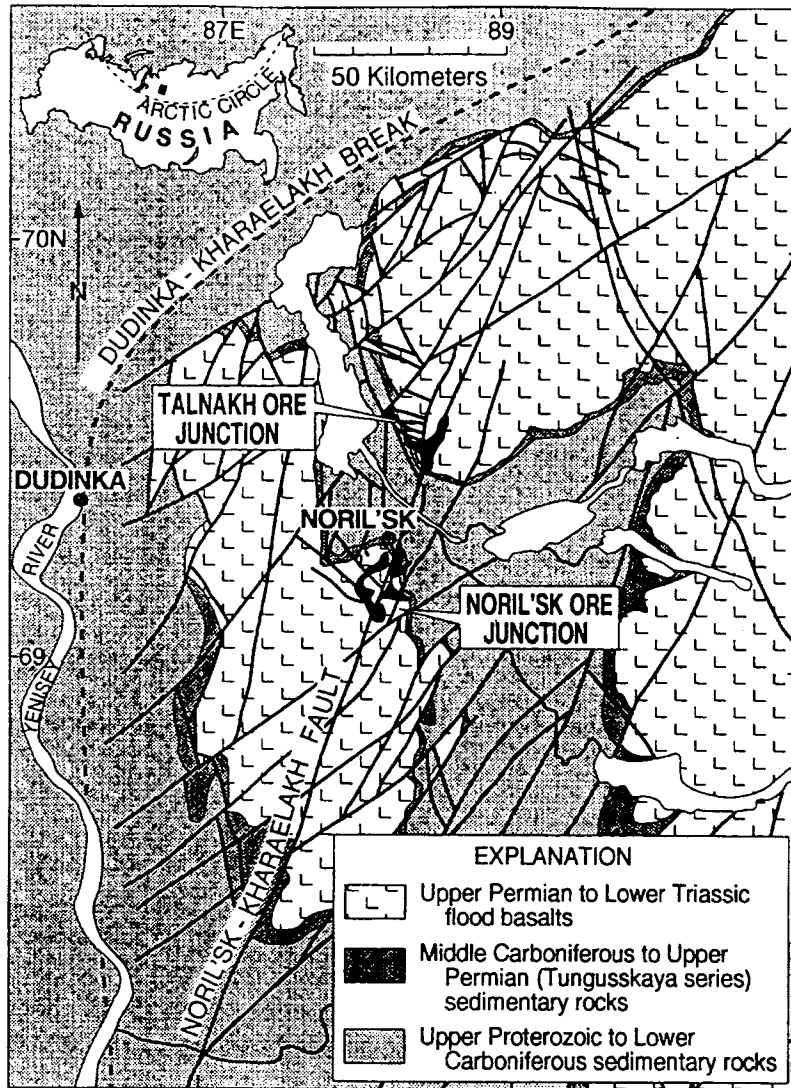


Fig. 1 Simplified geologic map of the Noril'sk-Talnakh district, showing major structural features and subsurface outlines of the Noril'sk-type, ore-bearing intrusions (black, true scale). The Kharaelakh and Noril'sk depressions are the ovoid areas, astride the Noril'sk-Kharaelakh fault and defined by the outcrop areas of basalt, which extend, respectively, north from the Talnakh ore junction and south from the Noril'sk ore junction.

Fig. II-1-3-2 Simplified geologic map of the Noril'sk-Talnakh district (Czamanske et al., 1995)

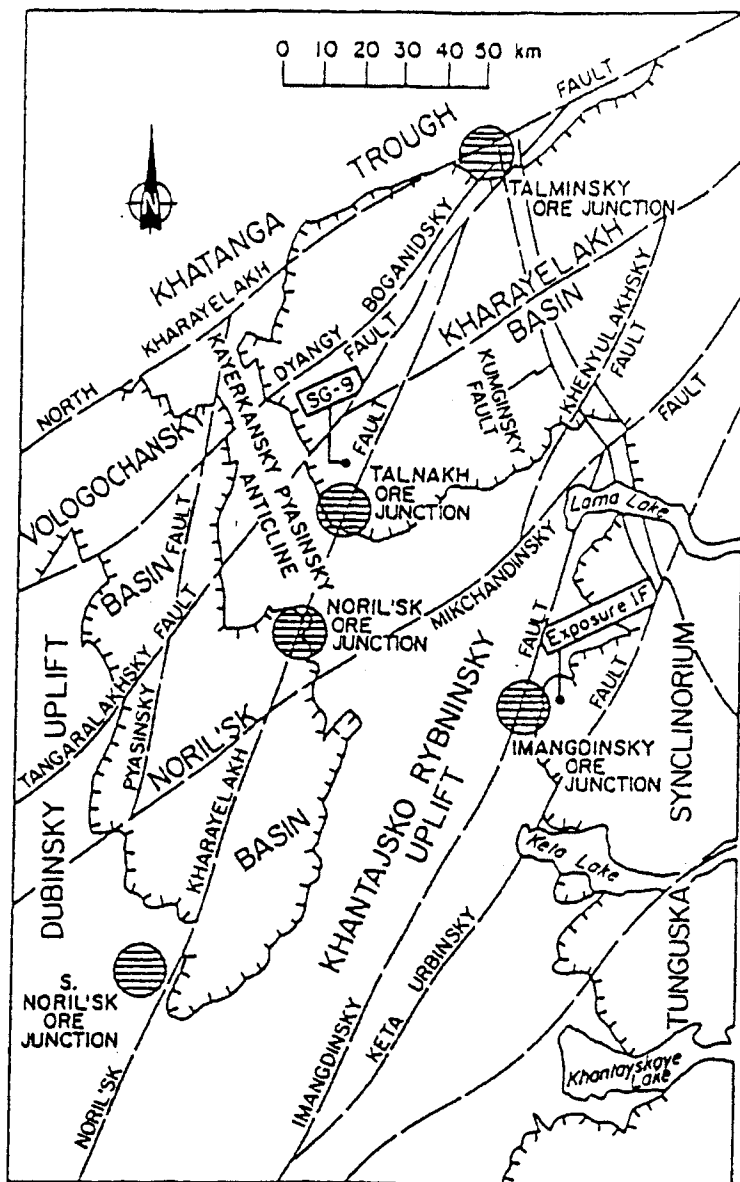


FIG. 3. Main structural elements of the northwest corner of the Siberian platform, together with the main ores zones and ore junctions. Locations of drill core SG-9 and exposure 1F are also shown. After Naldrett et al., 1992. Map was compiled by V. A. Fedorenko on the basis of data collected by NKGRE (Noril'sk-Complex Geological Exploration Expedition) and TsNICRI (Central Geological Institute for Exploration and Research, USSR Ministry of Geology).

Fig. II-1-3-3 Main structural elements of the northwest corner of the Siberian platform (Naldrett, 1992)

いる (Fig.II-1-3-4)。

1-3-3 シベリア洪水玄武岩類

(1) 玄武岩類の層序

層厚 3,500 m におよぶ火山岩層序はペルム紀と三畳紀の間の約 1Ma の間に形成されたと考えられている。洪水玄武岩類は複数枚の溶岩、凝灰岩および貫入岩からなり、それらの比率は、それぞれ 83.8 %、9.6 %、6.5 %である (Table II-1-3-3)。これらの火山岩類が古生代の堆積岩類 (Tungussskaya 統)、特に炭酸塩岩や硫酸塩を伴う蒸発岩層を貫いて噴出していることは多量の硫化物の濃集に大きな役割を果たしたと考えられている。シベリア洪水玄武岩類の特徴は他地域の洪水玄武岩に比べて杏仁状の物質 (アミグダル) を多く含むことであり、Noril'sk 地域では、その割合は 36 %に達する。

Fig.II-1-3-5 に洪水玄武岩類の層序を示す。玄武岩類は以下のように 3 区分される。

Early Assemblage

下位から Ivakinsky (Iv)、Syverminsky (Sv)、Gudchikhinsky (Gd)の各溶岩よりなり、全体の層厚は約 500 m である。これらは粗面玄武岩、玄武岩およびピクライトのアソシエーションからなり化学成分的には高 Ti タイプであることを特徴とする。

Middle Assemblage

Khakanchansky 凝灰岩から始まりこれを溶岩類が覆う。

溶岩類は下位から Tuklonsky (Tk)、Lower Nadezhdinsky (Nd₁)、Middle Nadezhdinsky (Nd₂)、Upper Nadezhdinsky (Nd₃)、Lower Morongovsky (Mr₁)の各溶岩よりなり、全体の層厚は約 500 ~ 600 m である。最下位の Tk 溶岩は低 Ti タイプであり、玄武岩とピクライトから構成される。これを覆う Nd₁ 溶岩と Nd₂ 溶岩は Tk 溶岩をもたらしたマグマから斜長石、単斜輝石およびかんらん石の分別結晶作用と地殻物質の混染作用によって形成されたものであり、これらの噴出後にマグマ溜りの中にマントル起源の新鮮なマグマが注入されて、Nd₃ 溶岩と Mr₁ 溶岩の起源マグマが形成されたと考えられている。

Noril'sk 鉱床の形成にとって重要なのは、このステージの火成活動であり、後述するように Nd₁ 溶岩と Nd₂ 溶岩にみられる地殻物質の混染作用と珪酸塩マグマからの硫化物メルトの除去が鉱床形成と密接に関係していると考えられている。

Late Assemblage

下位から Upper Morongovsky (Mr₂)、Mokulaevsky (Mk)、Kharaelakhsky、Kumginsky および Samoedsy の各溶岩からなり、全体で 2,000 m ~ 2,300 m の層厚を有す。主に低 Ti タイプの溶岩から構成される。

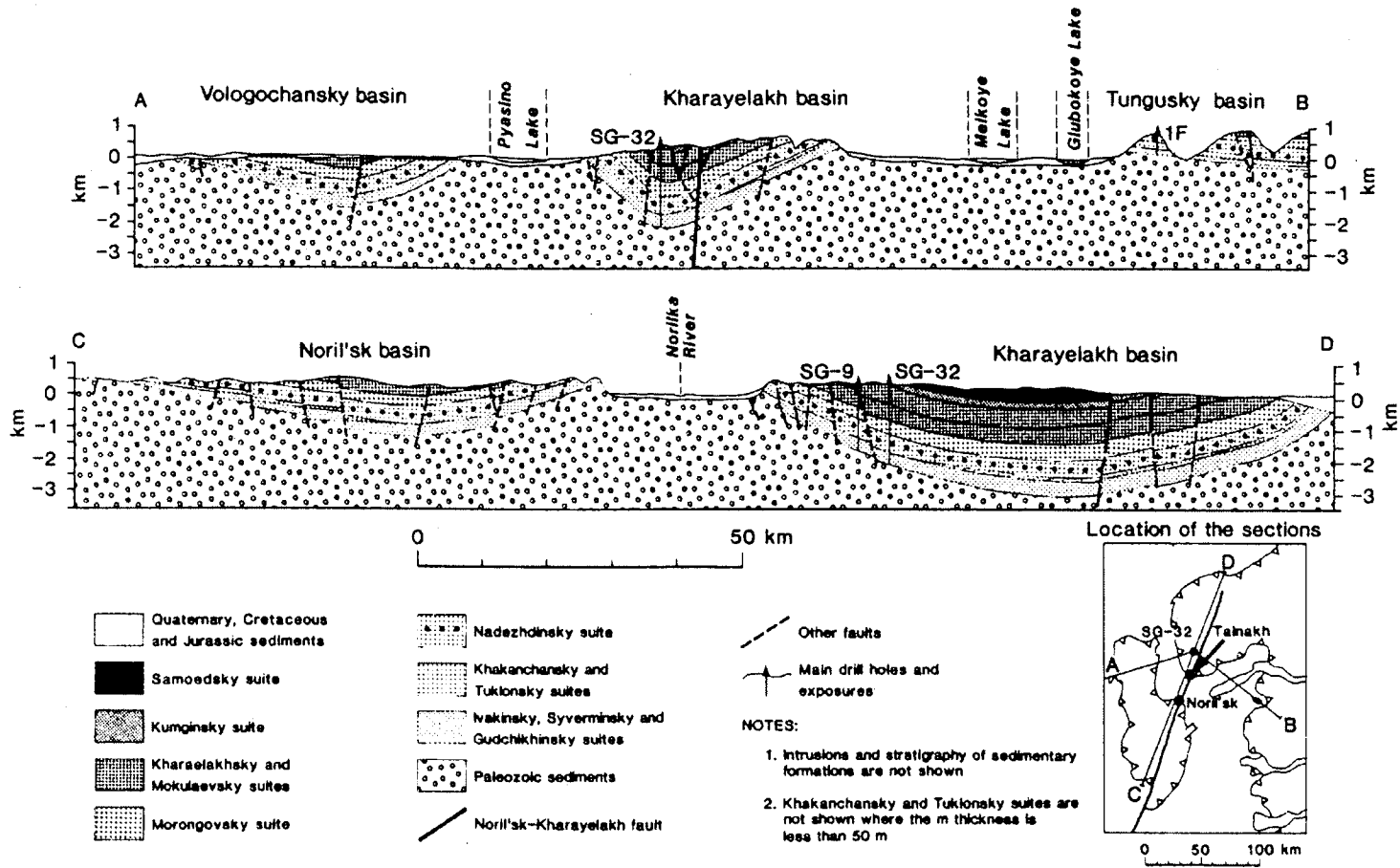


Figure 22.1c. North-south and east-west geological cross sections depicting the geology of the Noril'sk, Vologochansky, Kharayelakhsky and Tungusky synclinal sequences. Triangular boundary in inset map refers to margin of basaltic trap sediments under basalt sequence.

Fig. II-1-3-4 Geologic cross sections of the Noril'sk-Talnakh district platform (Naldrett, 1992)

Table I **Table II-1-3-3 Volume percentages of the magmatic rock types in the Noril'sk region (fedorenko, 1994)**

Table 15.1. Volume percentages of the magmatic rock types in the Noril'sk region.

	Lavas	Tuffs	Intrusions	Total
Granodiorite	—	—	>0.01%	>0.01%
Alkalic and subalkalic mafic rocks	2.0%	0.9%	1.5%	4.4%
Normal mafic rocks	81.0%	8.7%	4.9%	94.6%
Picrites and picrite-like rocks	0.8%	—	0.1%	0.9%
Picritic-mafic ore-bearing intrusions	—	—	>0.01%	>0.01%
Total	83.8%	9.6%	6.5%	99.9%

Total volume (including eroded masses) 150 000 km³, within 45 300 km².

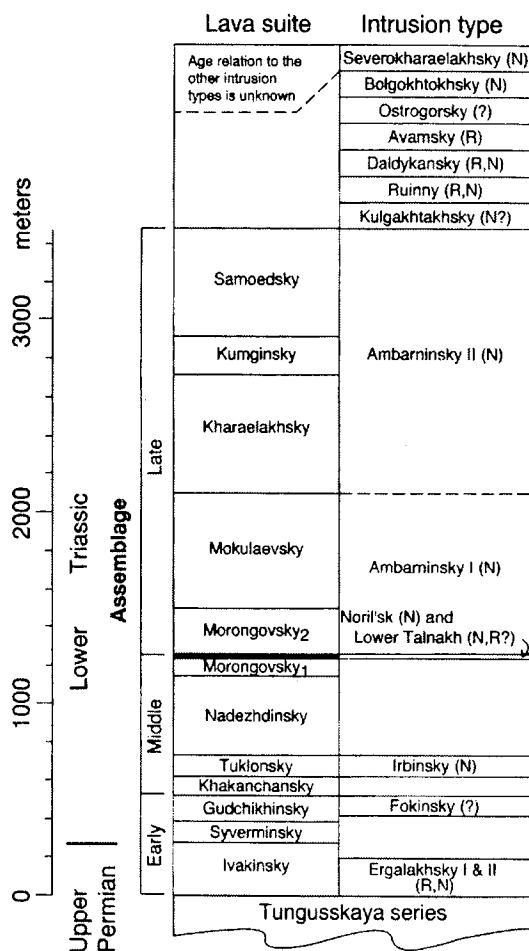


Fig. II-1-3-5 Correlation chart relating flood basalt stratigraphy of the Noril'sk region (Czamanske et al., 1995)

(2) 地殻物質の混染作用と不混和硫化物の除去

珪酸塩マグマによる地殻物質、特に蒸発岩等に含まれる外部硫黄の混染と、これによって引き起こされる不混和硫化物メルトの珪酸塩メルトからの除去が正マグマ性硫化物鉱床生成の大きな要因と考えられている。従って鉱床生成に関連した珪酸塩マグマは硫化物およびこれと同時に除去される親銅元素に枯渇するはずである。Noril'sk 鉱床については、関連洪水玄武岩類の詳細な地化学的研究によってこのような現象がほぼ明らかにされている。地殻物質の混染作用と親銅元素の枯渇は Middle Assemblage の溶岩類に顕著に認められる。

Fig.II-1-3-6 に溶岩類の La/Sm-Gd/Yb 図を示す。Tk 溶岩は La/Sm 値、Gd/Yb 値ともに低い値を示す。このような希土類組成は比較的肥沃なマグマの高程度の部分熔融によるものと考えられている。Tk 溶岩と次に噴出した Nd₁ 溶岩、Nd₂ 溶岩を比較すると、後者では Gd/Yb 値を一定に保ちつつ La/Sm 値のみが増加していることが分かる。La/Sm 値の増加は地殻物質の混染作用を示すものであることから、Nd₁ 溶岩と Nd₂ 溶岩の起源マグマの形成には地殻物質の混染が大きな役割をはたしていることが推定される。地殻物質の混染作用は Lightfoot et al. (1991a) による ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 初生値によっても示されている。また Noril'sk 鉱床の硫黄同位体比 δ³⁴S は +8~+12% と高い値を示しており、混染作用の過程で基盤の堆積岩に含まれる硬石膏から硫黄が供給された可能性が推定されている。

Fig.II-1-3-7 から La/Sm 値と Ni、Cu、Pt が明瞭な負の相関を示しており、地殻物質を混染した Nd₁ 溶岩と Nd₂ 溶岩では La/Sm 値の増加に対応して Ni、Cu および Pt が枯渇していることがわかる。このことは地殻物質の混染と親銅元素の枯渇が同一溶岩ユニットを起こっていることを示している。Ni、Cu および Pt は硫化物メルトが珪酸塩メルトと不混和を起こす際に、硫化物メルト側に選択的に分配される元素であり、地殻物質の混染作用により珪酸塩マグマ中の硫化物の溶解度が低下した結果生じた不混和硫化物メルト中にこれらの元素が選択的に取り込まれる一方、硫化物の取り除かれた珪酸塩マグマ中ではこれらの元素が枯渇したことを示している。このようにして珪酸塩メルトから分離・除去された硫化物メルトが Noril'sk 鉱床の形成に大きく関わっていると考えられる。

このことから親銅元素に枯渇した溶岩等の存在が、深部における正マグマ性硫化物鉱床の存在を示す広域的な判別基準になるかもしれない。

1-3-4 貫入岩類

(1) 貫入岩類

Noril'sk 地域には 15 種類の貫入岩類が存在する。各タイプは、それぞれ地化学的、同位体的特徴を有しており、いくつかのタイプは溶岩類と同源と考えられている (Fig.II-1-3-5)。多くの貫入岩体は古生代の Tungussskaya 統中に貫入しており、玄武岩類の下底から 2 km 以内の深度に認められる (Fig.II-1-3-8)。Noril'sk 地域では多くの石油探鉱ボーリングが実施されているが、古生層下部中には貫入岩体は見いだされていない。大部分の貫入岩類は古生層の層理面に調和的な貫入したシルであるが、テクトニックな構造線に沿って貫入して

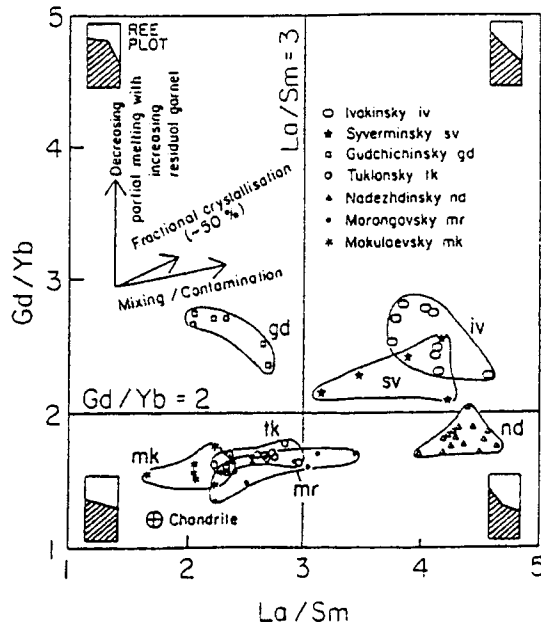


FIG. 6. Plot of Gd/Yb vs. La/Sm for basalts of the Noril'sk region. Adapted by Naldrett et al. (1992) after Lightfoot et al. (1990).

Fig. II-1-3-6 Relation between La/Sm versus Gd/Yb for basalts of the Noril'sk region (Naldrett, 1992)

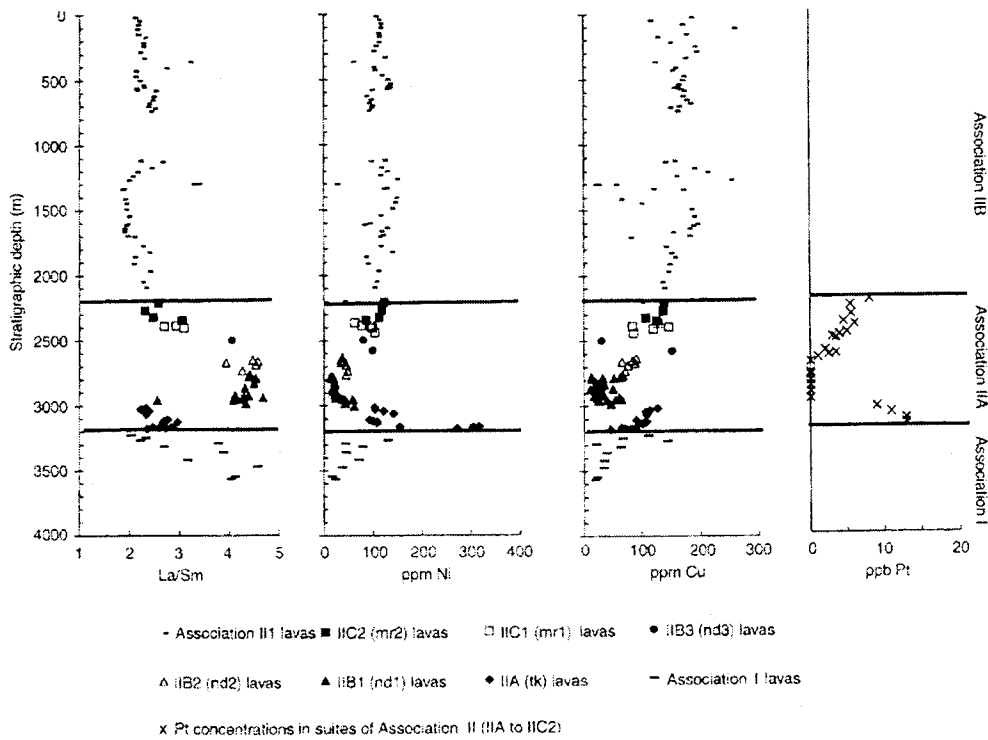


Fig. II-1-3-7 Vertical variation in La/Sm, Ni, Cu, Pt for basalts of the Noril'sk region (Naldrett, 1999)

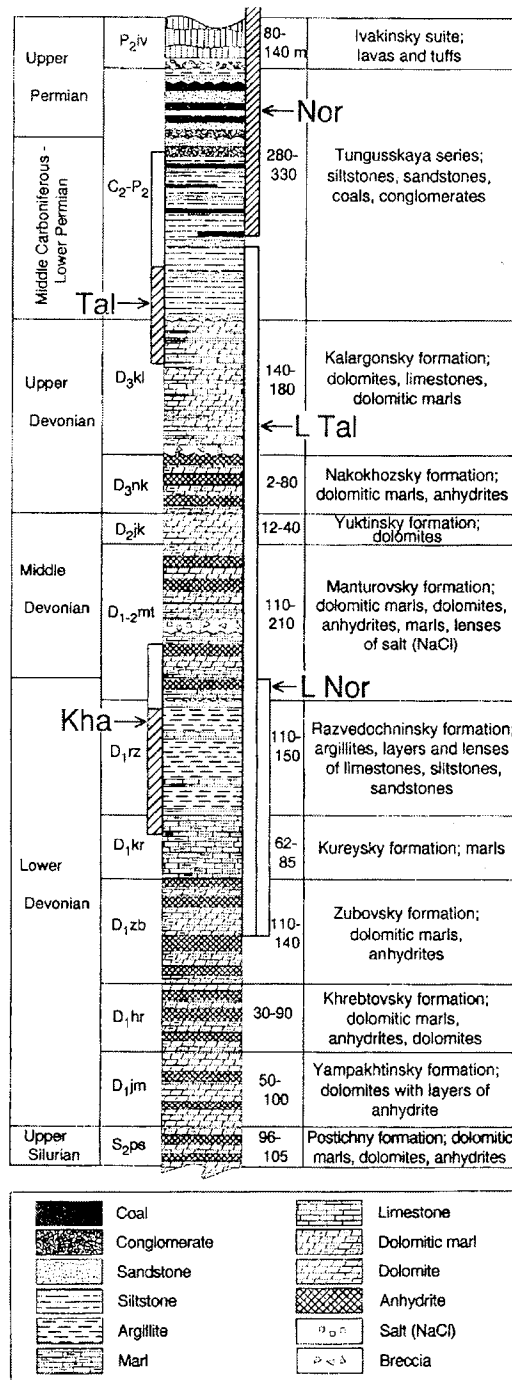


Fig. II-1-3-8 Generalized stratigraphic column for Silurian to Permian formations based on typical stratigraphic thickness for the Tanlakh ore junction (Czamanske et al., 1995)
 Vertical bars show the approximate ranges in stratigraphic position of the base of each intrusion : Nor=Noril'sk; L Nor=Lower Noril'sk; Tal=Talnakh; L Tal=Lower Talnakh; Kha=Kharaelakh

いるものも存在する。貫入岩体の厚さは数 m から 100 m くらいのものが多いが 150 m～200 m に達することもある。

硫化物の鉍化作用は、すべての貫入岩類にみられる訳ではなく、貫入岩類の中でもピクライト質の部分を含んだ、より「分化した」岩体に限って認められる。このような鉍化貫入岩体の Noril'sk 地域のマグマ全体に占める割合は少なく、僅か 0.01 %程度に過ぎない (Table.II-1-3-3)。

(2) Noril'sk タイプ鉍化貫入岩体と Lower Talnakh タイプ貫入岩体

鉍化貫入岩体の中で経済的な鉍化作用を伴った貫入岩体は Noril'sk タイプ鉍化貫入岩体と呼ばれる。このタイプの貫入岩体は「完全に分化」しており、1 つの岩体中で下部のピクライト質ガブドロライト (picritic gabbrodolerite) から上部の優白質ガブロ (leucogabbro) まで岩質が変化する (Fig.II-1-3-9)。MgO 重量パーセントで 29 %から 4 %までの組成幅が認められ、岩体下部のピクライト質のユニットに経済的な鉍染鉍床と塊状鉍床を含んでいる。Noril'sk 地域において、Noril'sk タイプ鉍化貫入岩体は僅か 3 つが知られているに過ぎない。これらは Talnakh Ore Junction に存在する Talnakh 貫入岩体、Kharaelakh 貫入岩体と Noril'sk Ore Junction に存在する Noril'sk-1 貫入岩体である。これらの貫入岩体は Noril'sk-Kharaelakh 断層と密接に関係した分布を示す。

Fig.II-1-3-10 に Talnakh 貫入岩体の断面図を示す。この図に示されるように Noril'sk タイプ鉍化貫入岩体 (Talnakh 貫入岩体) に密接に伴って存在するのが Lower Talnakh タイプ貫入岩体である。このタイプの貫入岩体は Noril'sk タイプ鉍化貫入岩体の下部数 10 m から数 100 m に存在している。Noril'sk タイプ鉍化貫入岩体が経済的レベルの鉍化作用を伴うのに対し、このタイプの貫入岩体は広範ではあるが非経済的な銅-ニッケル-PGE の鉍化作用を伴う。

Noril'sk タイプ鉍化貫入岩体と Lower Talnakh タイプ貫入岩体は、他の貫入岩体と貫入形態を異にする。すなわち多くの貫入岩体が層理面に調和的に貫入しているのに対し、Noril'sk タイプ鉍化貫入岩体および Lower Talnakh タイプ貫入岩体は、層理面を切って層状に貫入している (Fig.II-1-3-11)。このような構造はロシアの地質学者の間では "insertion" と呼ばれており、母岩を大規模に同化している現象と考えられる。

Fig.II-1-3-12 はボーリングデータに基づいた Noril'sk タイプ鉍化貫入岩体の模式的な岩相変化と含有される鉍物の垂直変化を示したものである。全体のユニットの中でピクライト質ガブドロライトとかんらん石ガブドロライト (olivine gabbrodolerite) の境界が最も重要なユニット境界であり、経済的な鉍染鉍体の上面と良く一致している。この境界面の下部では、かんらん石と硫化物の含有量が急激に増加し、また、かんらん石中の Forsterite 成分と Ni 含有量も非連続的に変化する。このようなユニットの非連続性は化学組成にも現れており (Fig.II-1-3-13)、このユニット境界の下部で MgO、Cu、Ni、Pd の急激な増加が認められる。

鉍床は鉍染鉍体と塊状鉍体からなる。鉍体は貫入岩体の岩石ユニット中でピクライト質

Rock unit	Modal % olivine	MgO wt %	Notable phases	
Leucocratic gabbro	0-3	4-8	Pl ₁	
Quartz diorite (Russian: quartz gabbrodiorite)	0	1.2-1.7	Pl ₂ + Aug + Qtz	
Magnetite gabbro	0-4	4.4-7	Pl ₂ + Aug + Mt	
Prismatic gabbro (Russian: gabbrodiorite)	0-5	6-7	Pl ₂ + Aug	
GABBRODOLERITE	Olivine-bearing	3-7	6-8	Pl ₂ + Aug + Ol ₂
	Olivine	10-27	9-12	Pl ₂ + Aug + Ol ₂ + sparse Pl ₁
	Picritic	40-80	18-29	Ol ₁ + Pl ₂ + Aug + Sulfide + Pl ₁ glom + sparse Pl ₁
	Taxitic	7-18	9-16	Pl ₂ + Ol _{1,2} + Aug + Sulfide + Pl ₁ glom
	Contact	10-15	7-8	Pl ₂ + Aug + Ol ₂

Fig. II-1-3-9 Generalized lithologic section for the "fully differentiated" main body of the ore-forming intrusions (Czamanske et al., 1995)

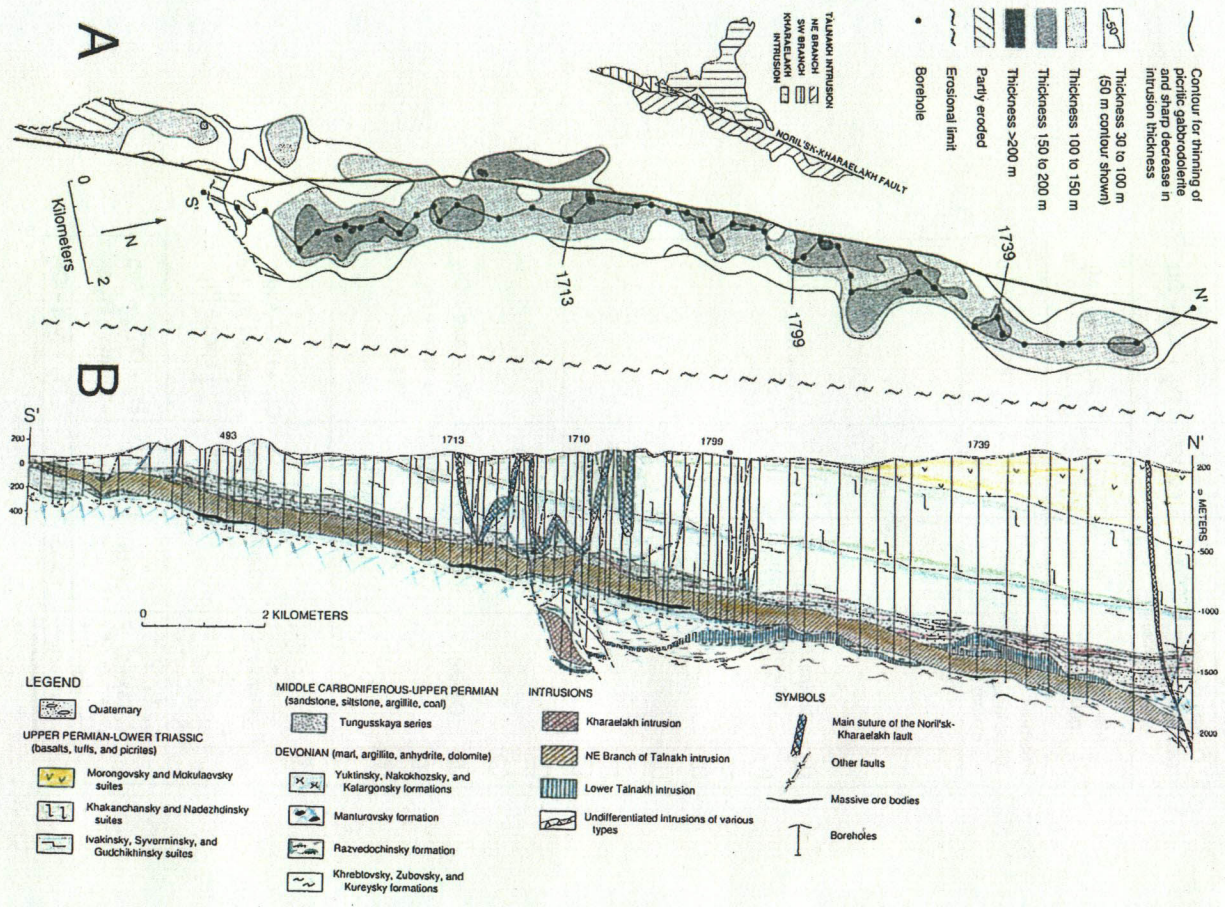


Fig. II-1-3-10 A) Projection to the surface of the main body of the NE and SW branch of the Talnakh intrusion (Czamanske et al., 1995); B) Cross section of the thickest part of the NE branch of the intrusion (Czamanske et al., 1995)

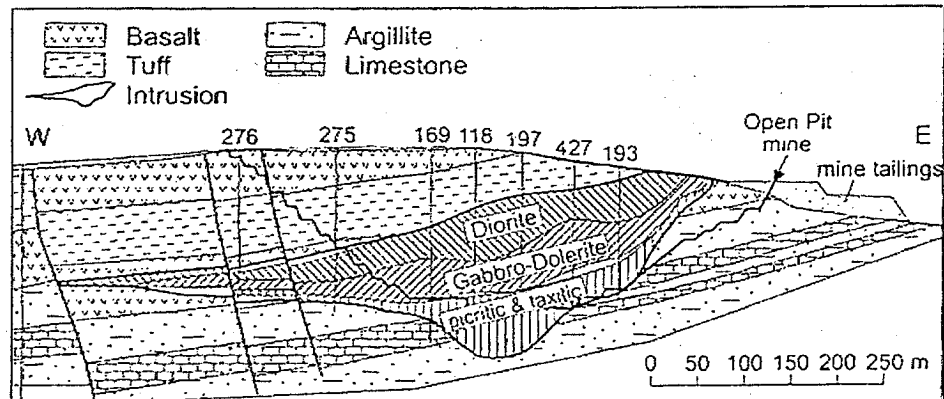


Fig. 3 Vertical section through the east branch of the Noril'sk I intrusion at the Bear's Brook open pit (from Distler and Kunilov 1994)

Fig. II-1-3-11 Cross section through the east branch of Noril'sk I intrusion (Naldrett, 1999)

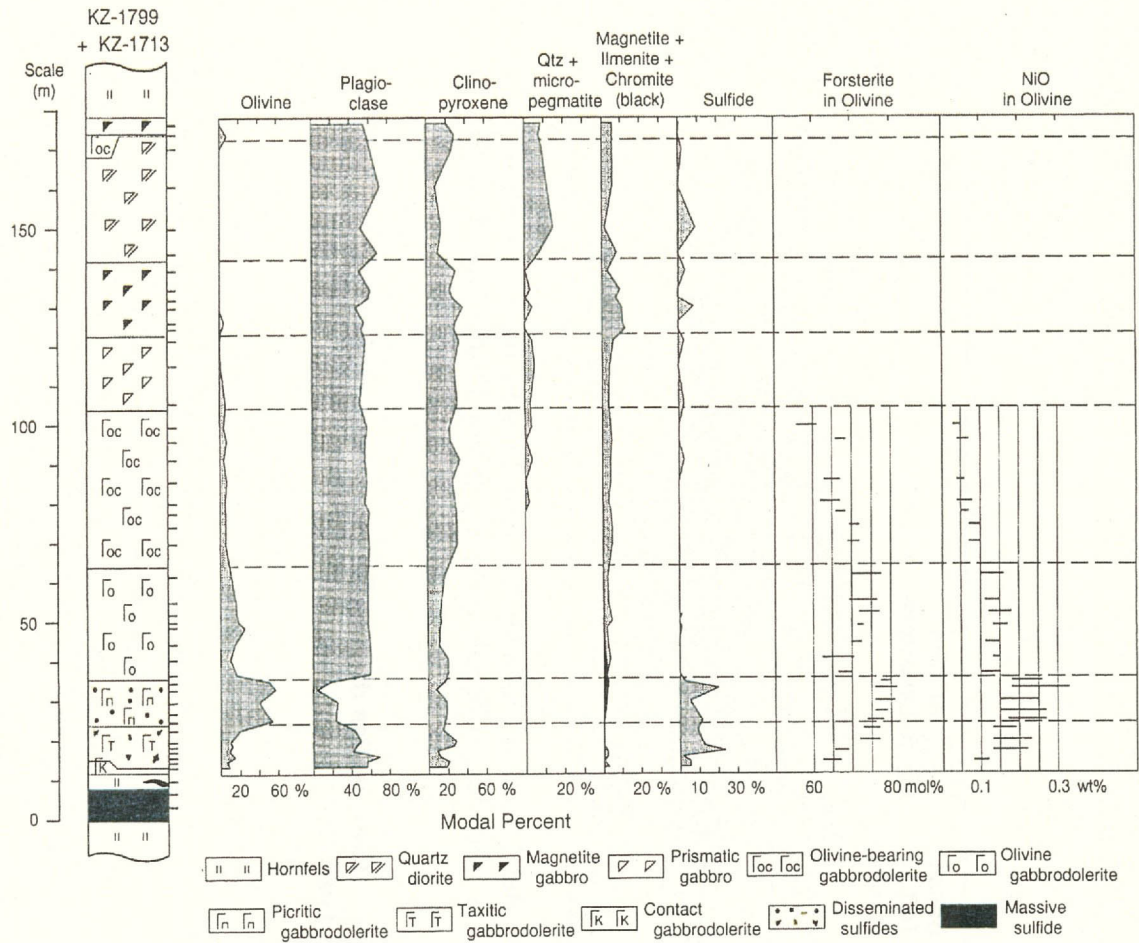


Fig. 16 Composite lithologic section, based on boreholes KZ-1713 and KZ-1799 (Appendixes 1 and 2; Fig. 17), with estimated modal proportions of significant mineral phases and ranges of forsterite and NiO contents in olivine, as determined by electron-microprobe analysis.

Fig. II-1-3-12 Composite lithologic section of the Talnakh intrusion (Czamanske et al., 1995)

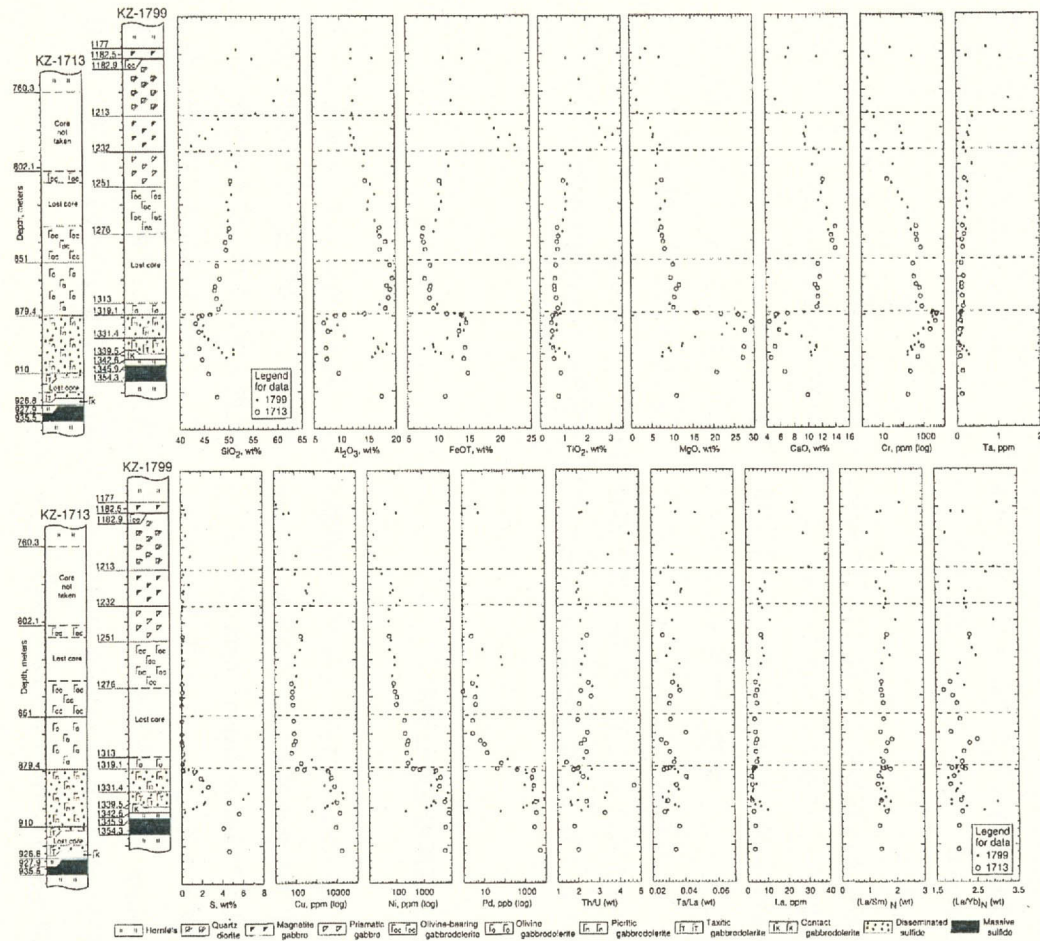


Fig. 17 Major- and trace-element variations with respect to stratigraphic position and rock type for a composite section for the NE branch of the Talnakh intrusion, based on complementary boreholes KZ-1713 and KZ-1799 (Fig. 5; Appendixes 1 and 2). Alignment of the two lithologic sections is at the upper contact of the picritic-gabbroderolite unit.

Fig. II-1-3-13 Vertical variations in major and trace element for the Talnakh intrusion (Czamanske et al., 1995)

ガブドロライトとその下部のタクシティックガブドロライト (taxitic gabbrodolerite) に認められ、ピクライト質ガブドロライトの上面が経済的鉍体の上面に一致している。なお、“タクシティック (taxitic)” という語はロシアの地質学者の間で細粒からペグマタイト質までのさまざまな組織を呈する火成岩について使用されているものである。塊状鉍体は一般に貫入岩体下盤側の古生層中に貫入しており、鉍染鉍体とは不連続である。従って不混和硫化物メルトの集積によって鉍染鉍体と塊状鉍体が連続的に形成されたとは考えられない。塊状鉍体は後述するように、貫入岩体中への他段階のマグマ注入の最終ステージにおいて、流動的な硫化物メルトが貫入してきて形成されたと考えられる。時には貫入してきた硫化物メルトが貫入岩体の上部にまで達することもあり、これにより脈状の鉍体も形成されたと考えられる。

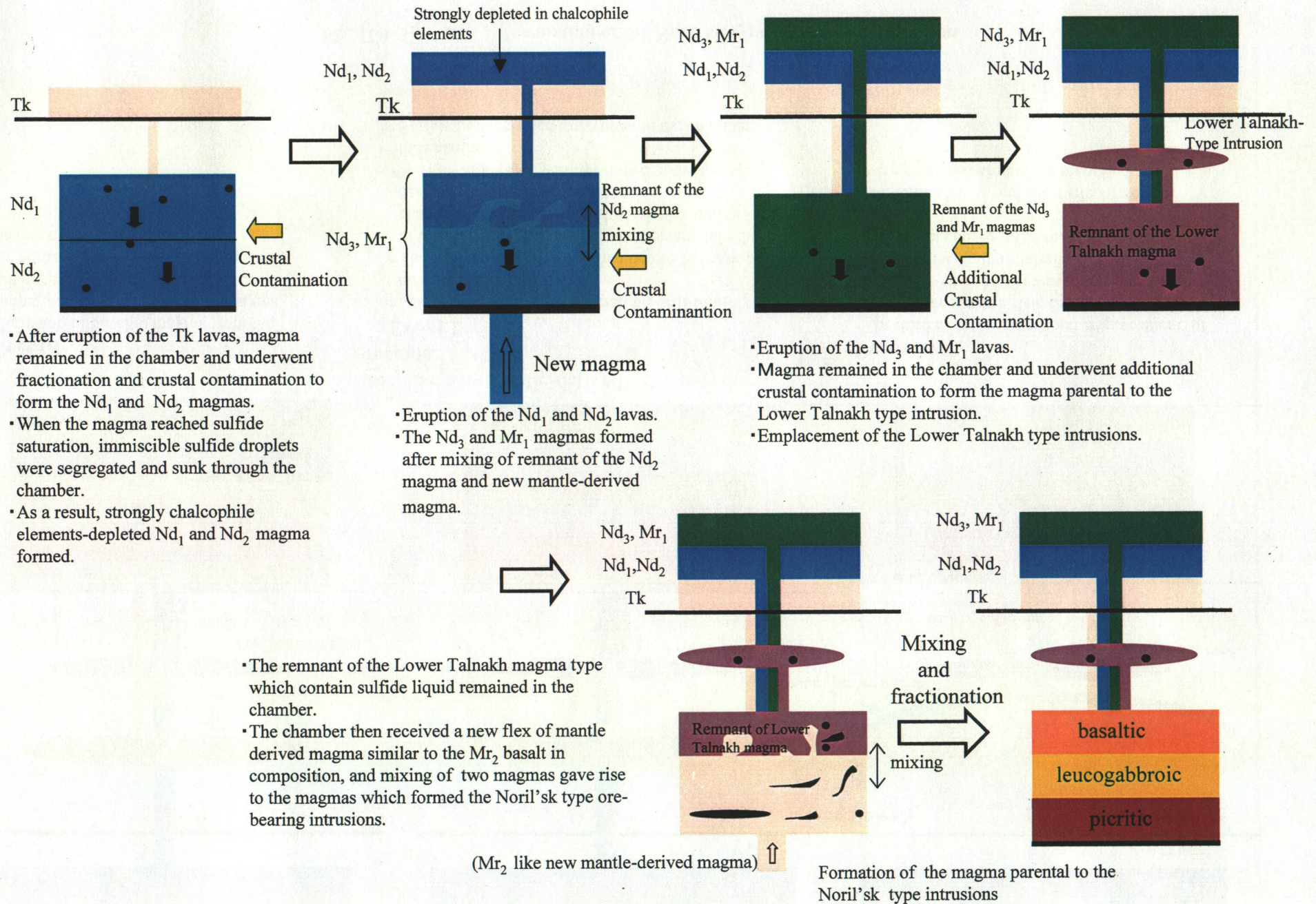
Noril'sk タイプ鉍化貫入岩体のもうひとつの特徴は、他の貫入岩体に比べて厚いホルンフェルスハローを有することである。ホルンフェルスの厚さは貫入岩体自身の厚さの 1.5~2.5 倍であり単斜輝石の多い高温のホルンフェルスを特徴とする。一方 Lower Talnakh タイプ貫入岩体に伴うホルンフェルスの厚さは貫入岩体自身の厚さの 0.5~1.5 倍であり、角閃石、黒雲母を多く含み、より低温のホルンフェルスである。その他のタイプの貫入岩体では、ホルンフェルスの厚さはさらに薄くなり、貫入岩体自身の厚さより薄い。このことから Noril'sk タイプ鉍化貫入岩体は貫入岩体の中で最も高温で母岩に大きな熱的影響を与えたと推定される。

1-3-5 Noril'sk 鉍床の生成モデル

Noril'sk 鉍床の生成については多くのモデルが提唱されている。この中には、鉍床生成を単一のマグマ溜りの中での現象と考える“single-magma-input モデル”、マグマ溜り中への多段階のマグマの貫入を考える“multiple-magma-input モデル”、さらに貫入岩体そのものを溶岩噴出にいたるマグマの通路とする“lava-conduit モデル”がある。ここでは Fedorenko (1994)に基づく“multiple-magma-input モデル”を解説する。このモデルは多段階のマグマ貫入の過程で不混和硫化物メルトが集積していく点で Naldrett (1992)の“lava-conduit モデル”と共通している。Fig.II-1-3-14 および Fig.II-1-3-15 に Noril'sk 鉍床の形成モデルを示す。

(1) Noril'sk 鉍床の親マグマの生成

- 1) Tk 溶岩の噴出後、マグマ溜りの中に残ったマグマが分別結晶作用と地殻物質の混染を受けて、Nd₁ 溶岩、Nd₂ 溶岩の親マグマが形成された。このマグマが硫黄の飽和に達した時、不混和硫化物メルトが珪酸塩マグマから分離しマグマ溜りの底に沈降した。その結果、親銅元素に枯渇した Nd₁ 溶岩と Nd₂ 溶岩を噴出したマグマが形成された。
- 2) Nd₁ 溶岩と Nd₂ 溶岩を噴出した後、マグマ溜り中に残ったマグマが新たにマントルから供給されたマグマと混合し、Nd₃ 溶岩と Mr₁ 溶岩の素となったマグマが形成された。この間、マグマ溜り中では地殻物質の混染と不混和硫化物メルトの沈降が続いた。



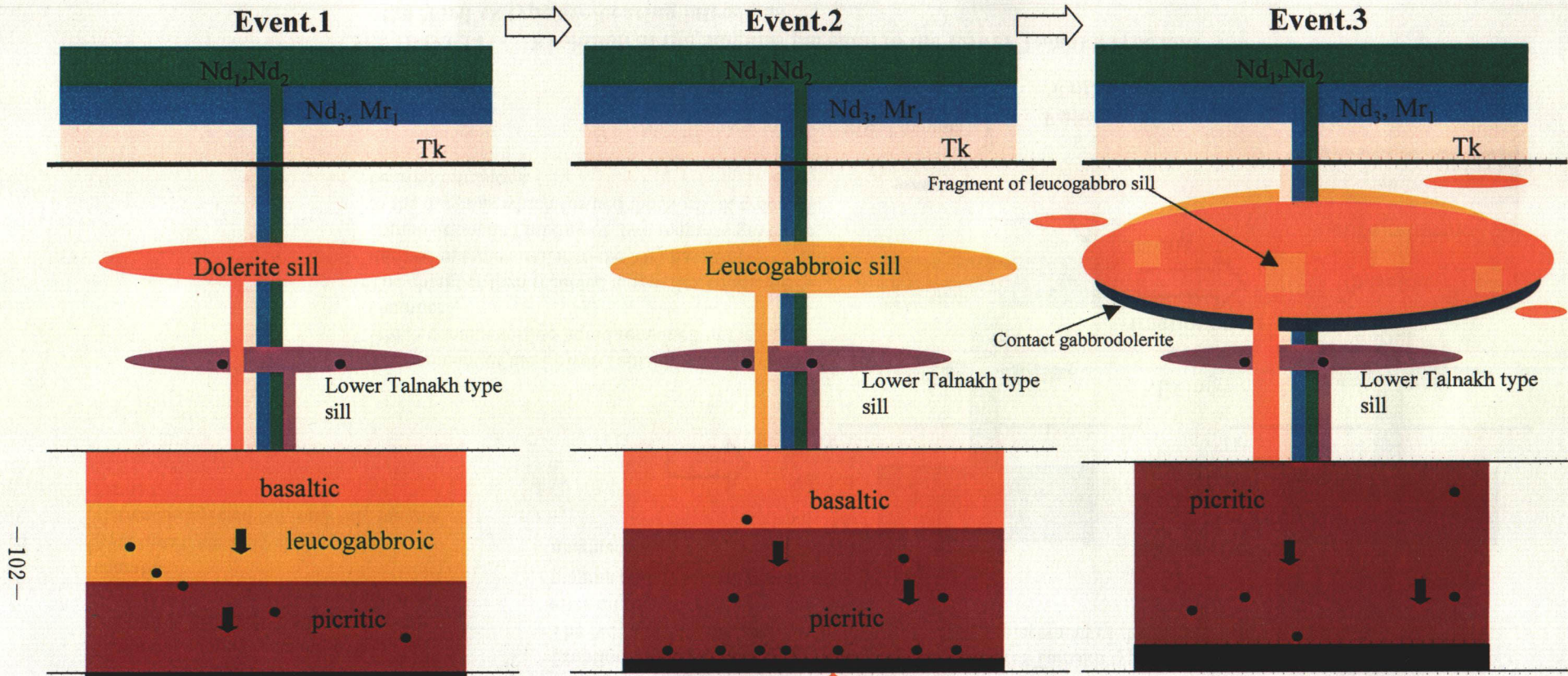
- After eruption of the Tk lavas, magma remained in the chamber and underwent fractionation and crustal contamination to form the Nd₁ and Nd₂ magmas.
- When the magma reached sulfide saturation, immiscible sulfide droplets were segregated and sunk through the chamber.
- As a result, strongly chalcophile elements-depleted Nd₁ and Nd₂ magma formed.

- Eruption of the Nd₁ and Nd₂ lavas.
- The Nd₃ and Mr₁ magmas formed after mixing of remnant of the Nd₂ magma and new mantle-derived magma.

- Eruption of the Nd₃ and Mr₁ lavas.
- Magma remained in the chamber and underwent additional crustal contamination to form the magma parental to the Lower Talnakh type intrusion.
- Emplacement of the Lower Talnakh type intrusions.

- The remnant of the Lower Talnakh magma type which contain sulfide liquid remained in the chamber.
- The chamber then received a new flux of mantle derived magma similar to the Mr₂ basalt in composition, and mixing of two magmas gave rise to the magmas which formed the Noril'sk type ore-bearing intrusions.

Fig. II-1-3-14 Evolution of the magmas parental to the Lower Talnakh type and the Noril'sk type ore-bearing intrusions



-102-

Event.1

- Intrusion of basaltic magma from the upper part of the intermediate magma chamber to form the dolerite sill.
- In some intrusive systems, no further activity took place.

Mr₂ like new mantle-derived magma ↑

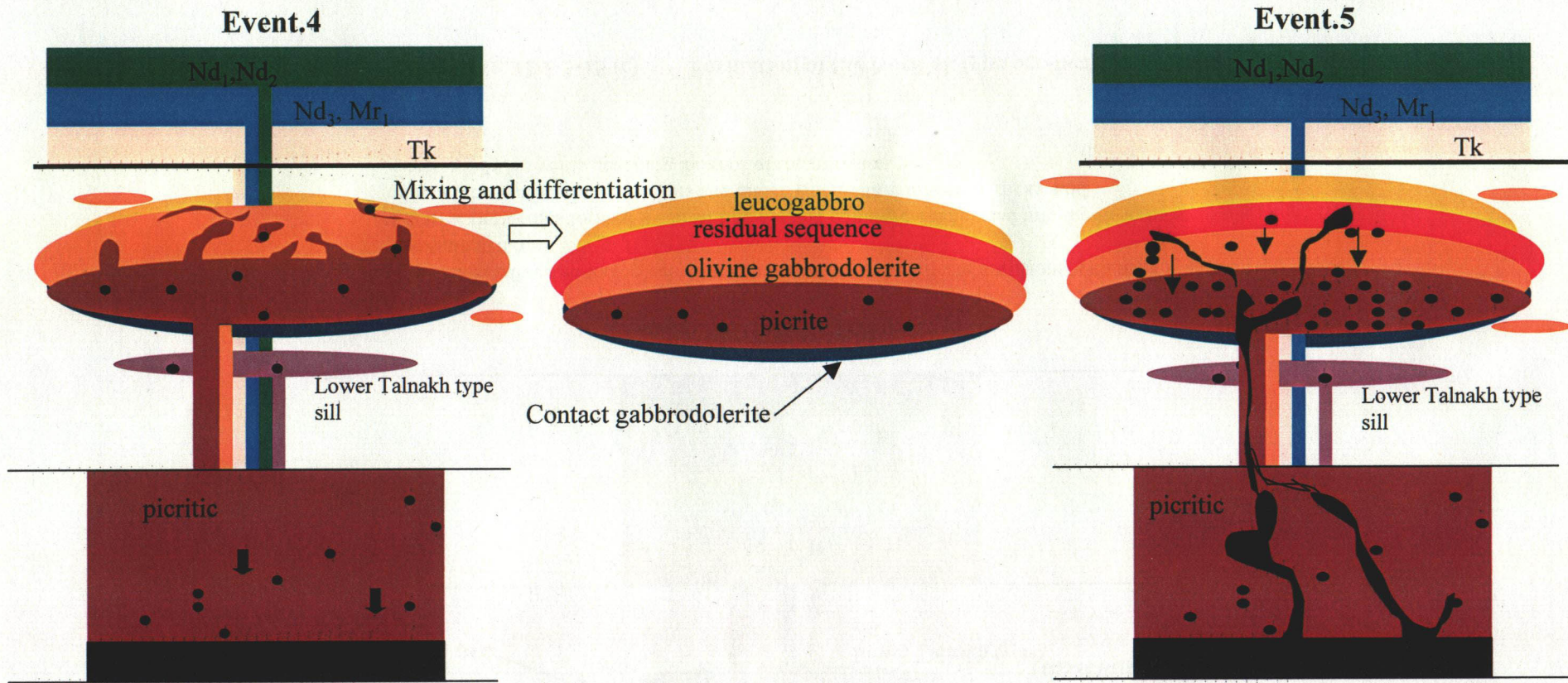
Event.2

- Leucogabbroic magma entered the still-liquid dolerite sill.
- The leucogabbro sill solidified before formation of the main body of the intrusion, meanwhile the chamber was being replenished by new mantle derived Mr₂ like magma.
- New basaltic layer was developed at the top of the chamber.
- Sulfide liquid pooled lowermost in the chamber.

Event.3

- The third event was a second emplacement of the basaltic magma. The composition of the magma (7-8wt%MgO) was represented by the basal contact gabbrodolerite.
- This event caused inflation of the elongated area.
- Numerous lenses and short sills of dolerite were produced around the main body.

Fig. II-1-3-15 (a) Formation of the Noril'sk type ore-bearing intrusion



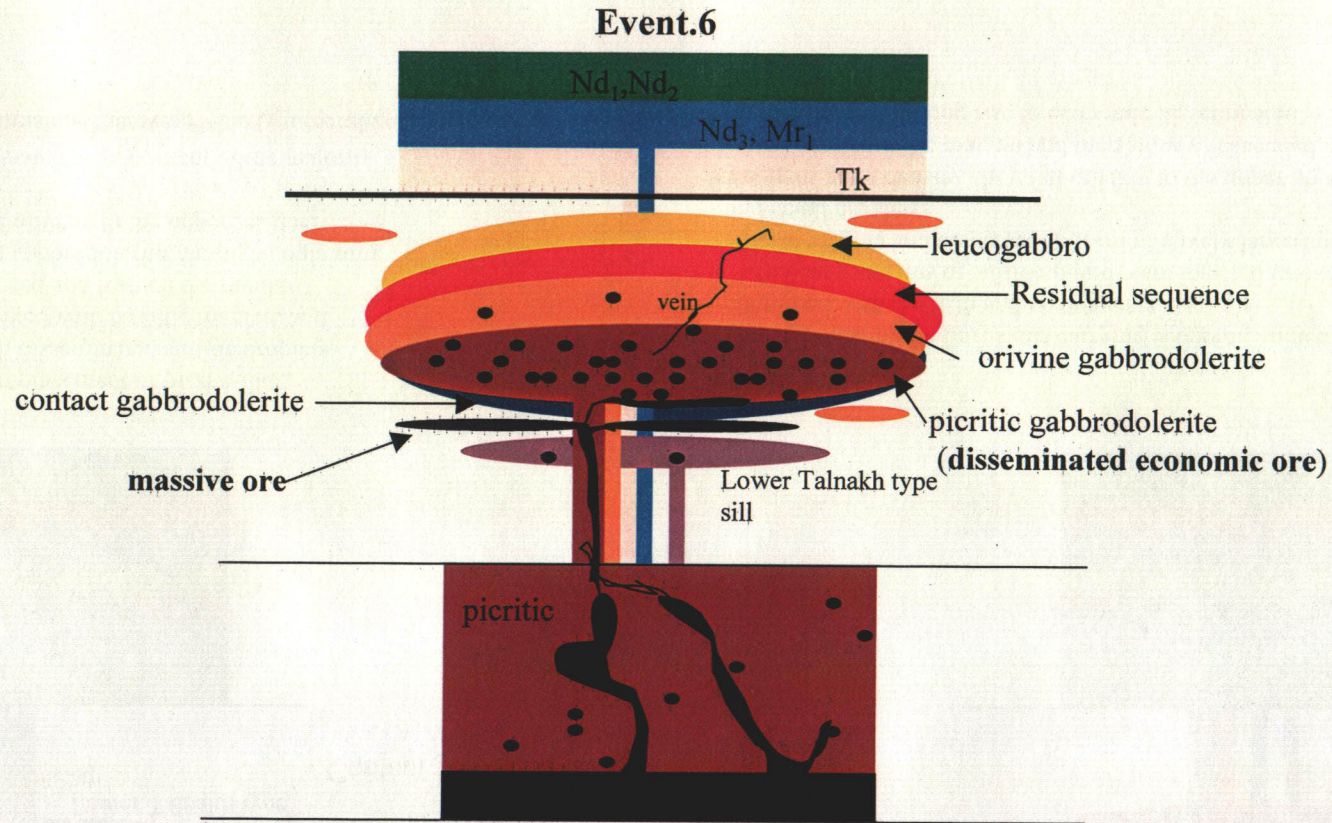
Event.4

- The fourth event was emplacement of picrite-like magma carrying small, disseminated sulfide droplets.
- The picritic magma mixed with basaltic magma, and this mixture differentiated and formed the regular sequence from picritic gabbrodolerite, through containing decreasing amounts of olivine, to the upper residual sequence.
- The fourth event terminated development of the majority of the Noril'sk type intrusions that were weakly mineralized.

Event.5

- Development of the intrusions carrying economic mineralization continued with the fifth and sixth events.
- Turbulent fountains of sulfide liquid were injected into the silicate magma and dispersed to form relatively large (up to 3cm) and small droplets.
- Being of great density, they fell quickly to the upper boundary of the dense picritic magma and then slowly descended into the picritic magma, giving rise to economic disseminated mineralization.

Fig. II-1-3-15 (b) Formation of the Noril'sk type ore-bearing intrusion



Event.6

- The final, sixth event took place after solidification of the silicate intrusions with their disseminated ores.
- Massive ore bodies formed when sulfide magma pools were emplaced into the lowermost units of the ore-bearing intrusions and underlying metasedimentary rocks, and occasionally, as veins, reaching the roof of the intrusion.

Fig. II-1-3-15 (c) Formation of the Noril'sk type ore-bearing intrusion

- 3) Nd_3 溶岩と Mr_1 溶岩を噴出した残りのマグマが、さらに地殻物質の混染と不混和硫化物メルトの除去を受けて Lower Talnakh タイプ貫入岩体の起源マグマが作られた。これが地下浅所に貫入して弱く鉍化した Lower Talnakh タイプ貫入岩体が形成された。
- 4) マグマ溜り中に残ったマグマと新たにマントルから供給された Mr_2 溶岩に類似したマグマがマグマ溜り中で混合し、Noril'sk タイプ鉍化貫入岩体の親マグマが形成された。
- 5) マグマ溜り中で結晶分化作用によりピクライト質から玄武岩質まで分化した層状のマグマ溜りが形成された。

(2) Noril'sk 鉍床の生成

上述のプロセスで形成されたマグマ溜りから以下の 6 つのイベントに分けられる貫入活動によって Noril'sk タイプ鉍化貫入岩体が形成された(Czamanske et al.,1995)。

- 1) マグマ溜り上部から玄武岩質マグマが貫入してドレライト質シルが形成された。この間、マグマ溜り中では不混和硫化物メルトの沈降が続いた。次のイベントに進めず、この段階で活動を停止してしまった貫入システムも存在する。
- 2) 引き続いて優白ガプロ質マグマが、まだ液相の状態にあったドレライト質シル中に貫入し、徐々に固結した。マグマ溜り中では Mr_2 溶岩に類似した組成の新鮮なマグマがマントルから供給された。このマグマは、もともと存在したマグマと混合し、さらに結晶分化作用によりピクライト質から玄武岩質まで分化した層状のマグマ溜りが再度成長した。この間、マグマ溜り中では不混和硫化物メルトの沈降が続き、最下底に硫化物メルトが溜まっていった。
- 3) 第 3 番目のイベントはマグマ溜り上部からの第 2 回目の玄武岩質マグマの貫入であり、このイベントによって貫入システムの主要部が構成されたと考えられる。この貫入によって地表には伸張した膨張ゾーンが作られた。この玄武岩質マグマの MgO 含有量は 7~8wt%で、Noril'sk タイプ鉍化貫入岩体の接触部にみられる急冷した接触部ガプロドレライト (contact gabbrodolerite) の組成と同じである。従って、接触部ガプロドレライトは、このステージの活動で作られたものと考えられる。このマグマは既に固結していた優白ガプロ質シルの直下に貫入してきた。このため優白ガプロ質シルを破片状に取り込んだドレライト質シルが形成された。このシルの周囲にも小規模なドレライト質シルが取り囲むように形成された。この間、マグマ溜り中では不混和硫化物メルトが沈降を続け、硫化物メルトのプールが成長していった。
- 4) 第 4 番目のイベントはマグマ溜りから貫入岩体主要部へのピクライト質マグマの貫入である。これは貫入岩体主要部で接触部ガプロドレライトが 1~2m の厚さに成長した時点で起こった。ピクライト質マグマは乱流状に貫入し、貫入岩体の天盤まで達して玄武岩質マグマと混合した。このマグマは貫入岩体中に小滴状の硫化物メルトを運搬した。混合マグマは分化して弱鉍化の層状分化貫入岩体を形成した。この間、マグマ溜り中では不混和硫化物メルトが沈降を続け、硫化物メルトのプールがさらに成長していった。

多くの貫入システムは、このイベントまでで成長を終了し非鉍化、弱鉍化の貫入岩体を形成した。経済的な Noril'sk タイプ鉍化貫入岩体は引き続いて起こった第 5,6 番目のイベントによって形成された。これらのイベントは、マグマ溜りの底に形成された硫化物プールからの貫入活動である。

- 5) 第 5 番目のイベントはマグマ溜り下部の硫化物プールからの乱流状の硫化物メルトの貫入である。貫入してきた硫化物メルトは未固結の貫入岩体中に拡散し、直径 3cm までの球状の雫を形成した。高比重の硫化物メルトの雫は低密度の玄武岩質マグマ中に沈降し、高密度のピクライト質マグマに達した時に急激な沈降速度の低下が起こり途中で沈降を停止した。このようなプロセスでピクライト質マグマ中に経済的な鉍染状鉍体が形成された。不規則な品位分布は、このような貫入がおそらく何回か繰り返して起こったことを示している。
- 6) 最後の第 6 番目のイベントは鉍染状鉍体が貫入岩体と共に固定された後に起こった。すなわち貫入岩体と鉍染状鉍体の固結後、硫化物メルトのプールから注入された硫化物溶液の多くは貫入岩体の最下部のユニットと基盤の堆積岩中に貫入して塊状鉍体を形成した。注入された硫化物溶液は貫入岩体の天盤にまで達することもあり、鉍脈状の鉍体を形成した。

1-3-6 正マグマ性硫化物鉍床の成因と Noril'sk 型鉍床の探査指針について

塩基性～超塩基性マグマに伴う正マグマ性硫化物鉍床の生成条件について、Lesher and Stone(1996)、Keays (1995, 1997) および Brooks et al.(1999)らを取りまとめている。ここでは、これらの報告をもとに正マグマ性硫化物鉍床の成因とその一種である Noril'sk 型鉍床（洪水玄武岩に伴う正マグマ性硫化物鉍床）の探査指針を考察する。

Keays (1997) は経済的な正マグマ性硫化物鉍床生成のためには、以下の 3 条件が必要だとした。

- ・硫黄に不飽和なマグマの発生と地殻浅所への貫入
- ・このマグマが地殻浅所で硫黄に飽和して不混和硫化物メルトを作ること
- ・こうして作られた不混和硫化物メルトが大量の珪酸塩マグマと反応すること、

(1) 硫黄に不飽和なマグマの発生と地殻浅所への貫入

すべての大規模なニッケル-銅硫化物鉍床は、さまざまな程度に PGE を濃集しているので、第 1 の必要条件として経済的な正マグマ性硫化物鉍床を形成するマグマは、その発生時点で硫黄に不飽和であって、その状態を保ったまま地殻浅所に貫入する必要がある。もしマグマ発生時点で硫黄に飽和していたり、あるいは上昇途中で硫黄に飽和すれば、硫化物メルトに圧倒的

に分配される PGE は、不混和硫化物メルトに取り込まれてマグマ中から除去されてしまうことになる。こうなると鉱床の生成は不可能となる。従ってニッケル-銅硫化物鉱床の生成にとって、硫黄に不飽和なマグマの存在は決定的に重要な条件といえる。Vogel and Keays(1997)は Pd-Cu ダイアグラムにより硫黄に飽和したマグマと飽和していないマグマを識別できるとし、硫黄に不飽和なマグマは銅に対し相対的にパラジウムに富むことで区分できると述べている。

このような条件を満たすマグマはマンツルの十分な部分溶融でできるマグネシウムに富んだ高温のマグマである (Brooks et al.,1999)。マンツルの十分な部分溶融によりマグマ中に硫黄とともにニッケル、銅そして PGE が取り込まれ肥沃なマグマが作られる。これに比べてより低温で部分溶融の程度の小さな中央海嶺玄武岩のようなマグマでは、PGE と硫黄をマンツル中に取り残してしまうであろう (Keays, 1997)。十分な部分溶融を経た白金元素に富んだ肥沃な親マグマは地化学的には低 Ti タイプのマグマに代表されるかも知れない。

このようにして発生したマグマは地殻物質の混染を受けずに地殻上部まで上昇する必要がある。以上の条件をクリアしたマグマは La/Sm 値や Th/Nb 値の上昇などで示される地殻物質の混染作用の証拠は示さないはずである。

以上より、本条件を満たしたマグマは、地化学的には PGE に富み、また軽希土類元素を初めとする LIL 元素(Large Ion Lithophile element) に乏しく、なおかつ低 Ti タイプのマグマと考えられる。

以上はマグマの性質についての議論であるが、マグマ発生の起源となるマンツル物質そのものについては不明な点が多い。しかし PGE に富んだ肥沃なマグマを形成するためには親物質自身が肥沃であることが必要かも知れない。洪水玄武岩マグマの起源としては第 II 部 1-2 で述べたように現在マンツルペリドタイトとリサイクルした海洋地殻が考えられている。前者は親銅元素に富んでおり、一方後者は枯渇していると考えられる。従って定性的には起源物質がマンツルペリドタイトであれば親銅元素に富んだマグマを作れ得るが、海洋地殻を考えた場合にはマンツルペリドタイトも相当量混合したハイブリッドマグマを想定する必要があるかもしれない。

(2) 珪酸塩マグマが地殻浅所で硫黄に飽和して不混和硫化物メルトを作ること

上述の硫黄に不飽和な珪酸塩マグマは、サブボルカニックな深度に達した段階でマグマ溜り内における同化作用によって地殻物質を混染することが必要と考えられている。これによって硫黄の溶解度が低下するため不混和となった硫化物メルトが、不混和硫化物メルトとして珪酸塩メルトから分離・沈降して除去される。この時、銅、ニッケルおよび PGE は硫化物メルト中に取り去られて、珪酸塩マグマは、これらの元素に著しく枯渇するようになる。このようなメカニズムは正マグマ性硫化物鉱床の生成にとってトリガー的な役割を果たしているといえるかも知れない。

珪酸塩マグマが硫黄に飽和するためのメカニズムとしては、硫黄に富んだ地殻物質の混染作用 (Noril'sk 鉱床、Kambalda 鉱床)、硫黄に飽和した別のマグマとの混合 (Merensky Reef) が考えられている(Keays, 1997)。この他に開かれたマグマ溜りにおいて硫黄に飽和す

前の別個のマグマ同士が混合して飽和に達するという説もある (Campbell, 1983)。混染作用を起こす地殻物質に硫黄が含まれることが必要か否かについては意見が分かれる。Noril'sk 鉱床に関しては多くの研究者が、同鉱床にみられる硫黄同位体異常は硫黄に富んだ堆積岩を混染したことが原因だとしている。しかし Lightfoot and Hawkesworth(1997)は珪酸塩マグマが地殻物質を 20~25 %混染して、マグマ中の SiO₂ 含有量が約 5%上昇したため硫黄に飽和したとし、かならずしも外部硫黄が供給される必要はないと議論している。一方、Keays(1995)はコマチアイト質マグマの硫黄に関する飽和プロセスについて、外部硫黄が供給されることが不可欠だと結論している。本件に関しては議論の決着をみていないが、いずれにせよ地殻物質をマグマ中に十分に取り込むためには高温のマグマが望ましくピクライト質マグマの存在が重要になってくるかもしれない。

(3) 不混和硫化物メルトが大量の珪酸塩マグマと反応すること

上述のプロセスにより不混和硫化物メルトが作られるが、これだけでは鉱床を生成するには不十分である。経済的な鉱床を生成するためには、不混和硫化物が親銅元素に富んだ大量の珪酸塩マグマとさらに反応する必要がある。硫化物メルトと珪酸塩マグマが平衡状態で接する場合、親銅元素は硫化物メルトに圧倒的に多く分配される。塩基性~超塩基性マグマに関して実験的に求められた硫化物メルトと珪酸塩マグマの間の親銅元素の分配係数は、Co:30、Ni:100~200、Cu : 600~1,000、PGE:10⁴~10⁵である。従って PGE≫Cu>Ni>Co≫1 の順で硫化物メルトに濃集することになる。また硫化物メルトと反応する珪酸塩マグマの量、すなわち R 値 (Silicate melt / Sulfide melt) が大きいほど硫化物の蓄積が進む。このようなメカニズムは R-factor 効果と呼ばれている。

このような反応は、どのような場において効率的に進行するであろうか。いったん形成された不混和硫化物メルトが大量の珪酸塩マグマと反応するためには、珪酸塩マグマが十分に供給される環境でなければならないだろう。このような環境は地殻の弱線が存在する火成活動の中心部において満たされるであろう。従って、経済的な鉱床を胚胎する火成活動活動の中心域には、硫化物メルトと反応したために親銅元素に枯渇した大量のマグマが存在することになる。このようなマグマの存在は地下で硫化物の沈殿が起こっていることの指標となる。

以上の条件を Noril'sk 鉱床が満たしているか考察してみる。

前述の Noril'sk 鉱床の成因モデルからは鉱床生成の発端となったマグマは Tk 溶岩を噴出したマグマである (Fig.II-1-3-14 参照)。Brügmann et al. (1993)によれば、このマグマの Pt と Pd の含有量は共に 9~13 ppb と高い値を示し、MgO 含有量の減少に伴って増加する。この溶岩は低 Ti タイプであることからマンツルの部分溶融の程度の大きい肥沃なマグマに由来すると考えられる。続いて噴出した Nd₁ 溶岩と Nd₂ 溶岩では前述のように地殻物質混染の影響が認められ、不混和硫化物の除去により Pt、Pd はほとんど含まれていない。しかし、その後噴出した Mr 溶岩、Mk 溶岩では再び 2~9 ppb まで Pt と Pd の含有量が回復している。

このことから Noril'sk 鉱床はマントルの高程度の部分溶融による肥沃なマグマに由来すると考えられる。

Fig.II-1-3-16～Fig.II-1-3-19 は Tk 溶岩、Nd 溶岩、Mr 溶岩および Mk 溶岩について Ni と Cu、Au、Pd および Pt の含有量の関係を示したものである。超塩基性～塩基性マグマの分別結晶作用において Ni は、かんらん石中に選択的に分配されるため、残液中の含有量は結晶分化作用の進行に伴い低くなる。いっぽう Cu、Au、PGE は、硫黄に不飽和な状態では不適合元素として分化の進行に伴ってマグマ中の濃度を増すが、硫黄に飽和した時点から不混和硫化物メルト中に取り去られるため急激に枯渇するはずである。これらの図では分別結晶作用によって、Ni 含有量が約 100ppm に達するまでは、Cu、Au、Pd、Pt は漸増するが、100ppm より少なくなると、これらの元素が急激に枯渇し始めることが分かる。このことは Tk 溶岩の起源マグマが、かんらん石を主体とした分別結晶作用によって Ni 含有量が約 100ppm に達した時点で硫黄の飽和に達し、不混和硫化物メルトを分離したことを示している。4 元素のうちで Pd と Pt の枯渇傾向が著しいが、これはこれらの元素が不混和硫化物メルト中により分配されやすいためである。Keays(1995)は Pd の分配係数 $D^{Sul/Sil}$ を 35,000、R 値を 10,000 と仮定することにより、珪酸塩マグマ中が僅か 0.01wt%の不混和硫化物メルトを分離することによって、珪酸塩マグマ中の Pd が 10ppb から 2ppb に低下すると述べている。

Fig.II-1-3-20 は同じく 4 種類の溶岩の組成を Vogel and Keays(1997)の Pd-Cu ダイアグラムにプロットしたものである。Noril'sk 鉱床生成の発端となった Tk 溶岩は硫黄に不飽和な領域にプロットされ非常に肥沃な性質を有しているが、このマグマから地殻物質の混染作用によって生成されたとされる Nd 溶岩は完全に硫黄に飽和した領域にプロットされ、不混和硫化物を分離したことを示している。その後噴出した Mr 溶岩および Mk 溶岩の組成は、Pd 含有量が回復して再び硫黄に不飽和な領域にプロットされるようになる。以上より Noril'sk 鉱床は第 1 番目の条件（硫黄に不飽和なマグマの発生と地殻浅所への貫入：Tk 溶岩の存在）および第 2 番目の条件（マグマが地殻浅所で硫黄に飽和して不混和硫化物メルトを作ること：Nd 溶岩の存在）を満たしている。

第 3 番目の条件は鉱床を中心に大量に存在する Nd 溶岩の存在によって満たされる。Noril'sk 鉱床はマントルまで達すると考えられる Noril'sk-Kharaelakh 断層に規制されて存在しており、この断層と鉱床胚胎域を中心に Nd 溶岩が厚く堆積している。このことから Noril'sk 鉱床付近が洪水玄武岩類の噴出中心と推定される。Noril'sk-Kharaelakh 断層付近をフィーダーとして供給された大量の珪酸塩マグマ（Nd 溶岩の素となった硫化物分離前のマグマ）が、マグマ溜り中で先行して硫黄に飽和した Tk マグマから生成されていた不混和硫化物メルトと反応して Nd マグマが形成され、いっぽう珪酸塩マグマから不混和メルトとして分離した大量の硫化物が鉱床を生成したと考えられている。

このように Noril'sk 地域において火成活動の中心域に鉱床が形成されていることは、貫入岩体の種類とも関係があるかもしれない。Noril'sk 地域には多くの貫入岩類が存在するがこの中で「完全に分化した岩体」にのみ鉱化作用が伴っている。「完全に分化した岩体」と

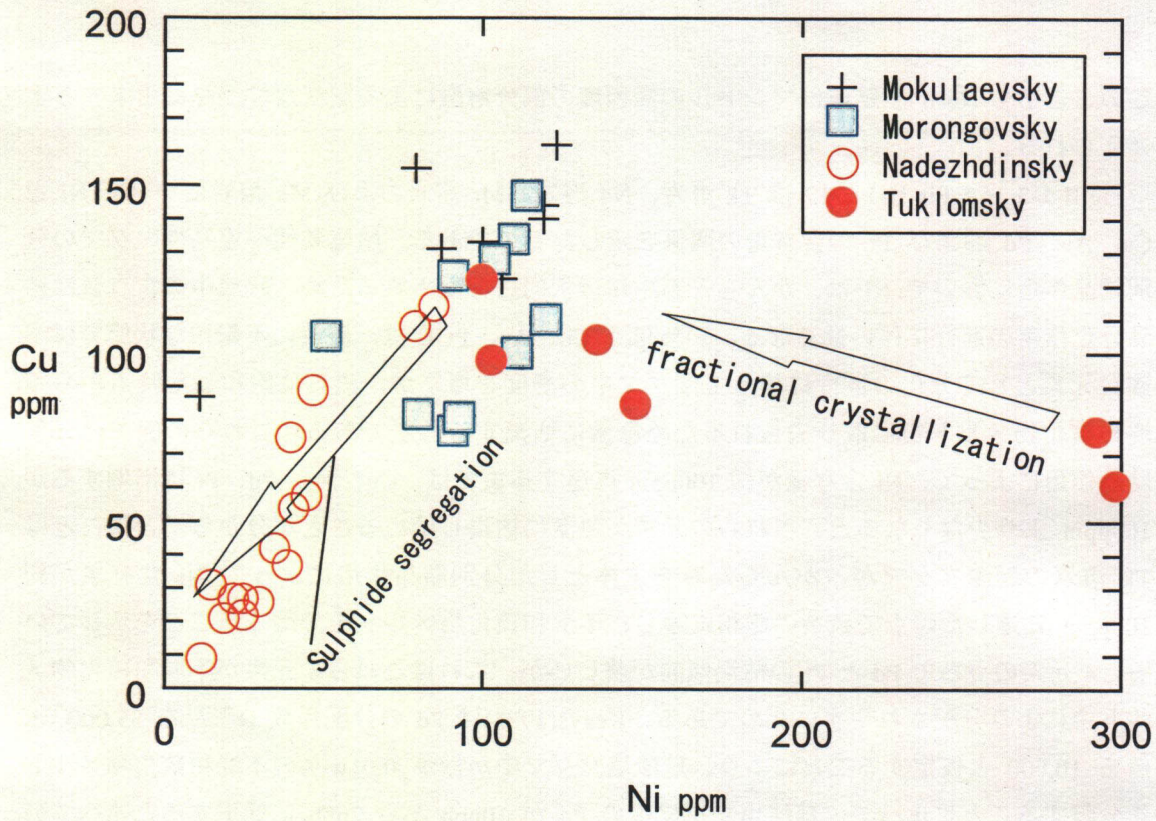


Fig. II-1-3-16 Ni-Cu correlation in lavas from the Noril'sk region
Data from Brugmann et al.(1993)

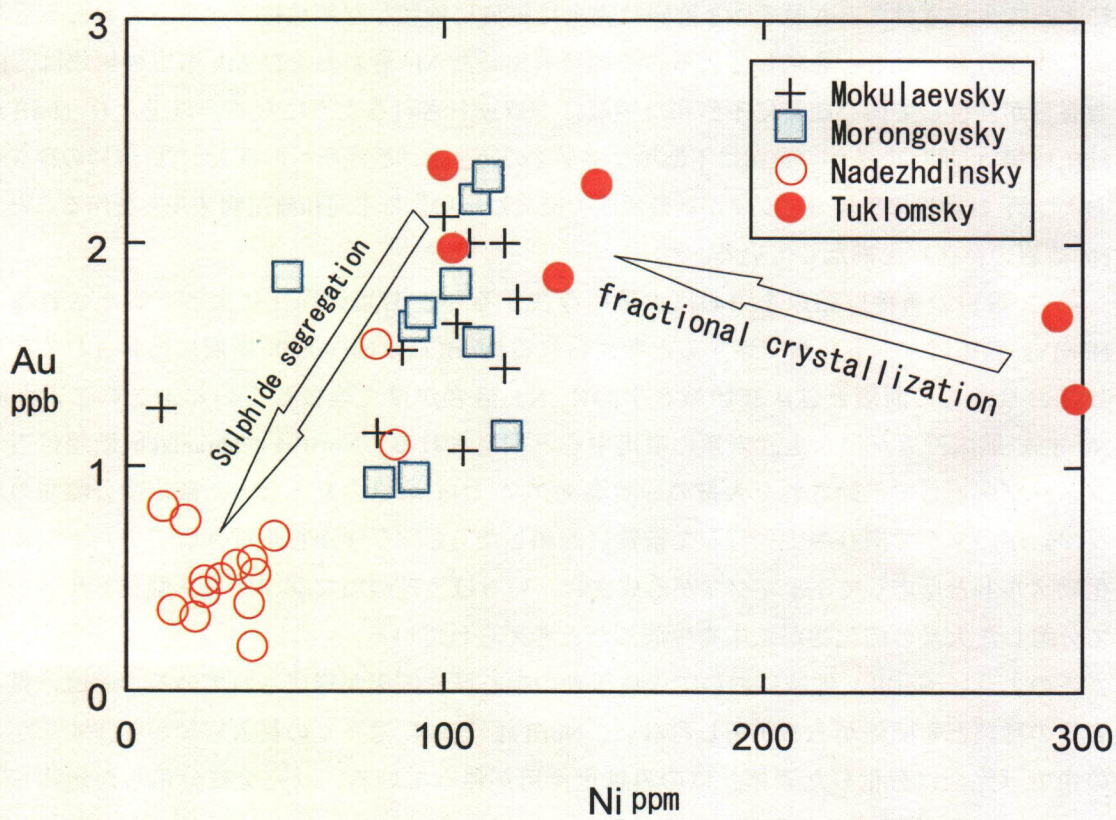


Fig. II-1-3-17 Ni-Au correlation in lavas from the Noril'sk region
Data from Brugmann et al.(1993)

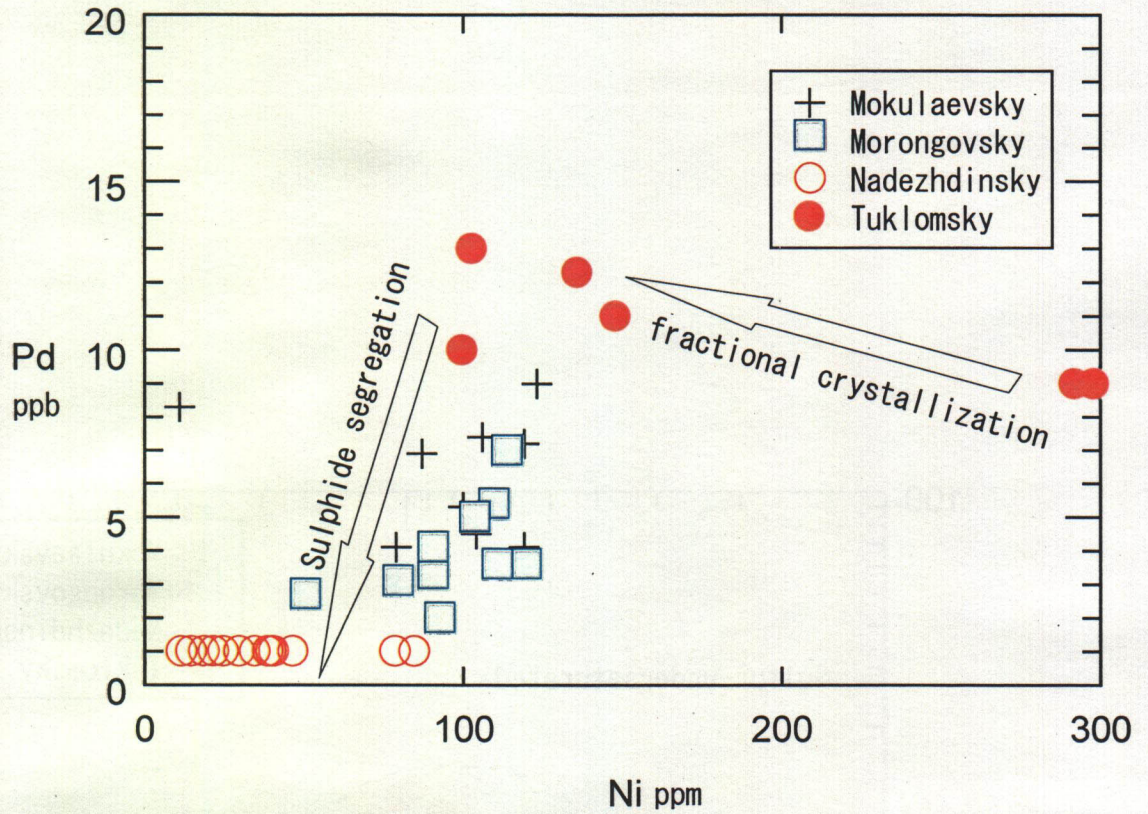


Fig. II-1-3-18 Ni-Pd correlation in lavas from the Noril'sk region
 Data from Brugmann et al.(1993)

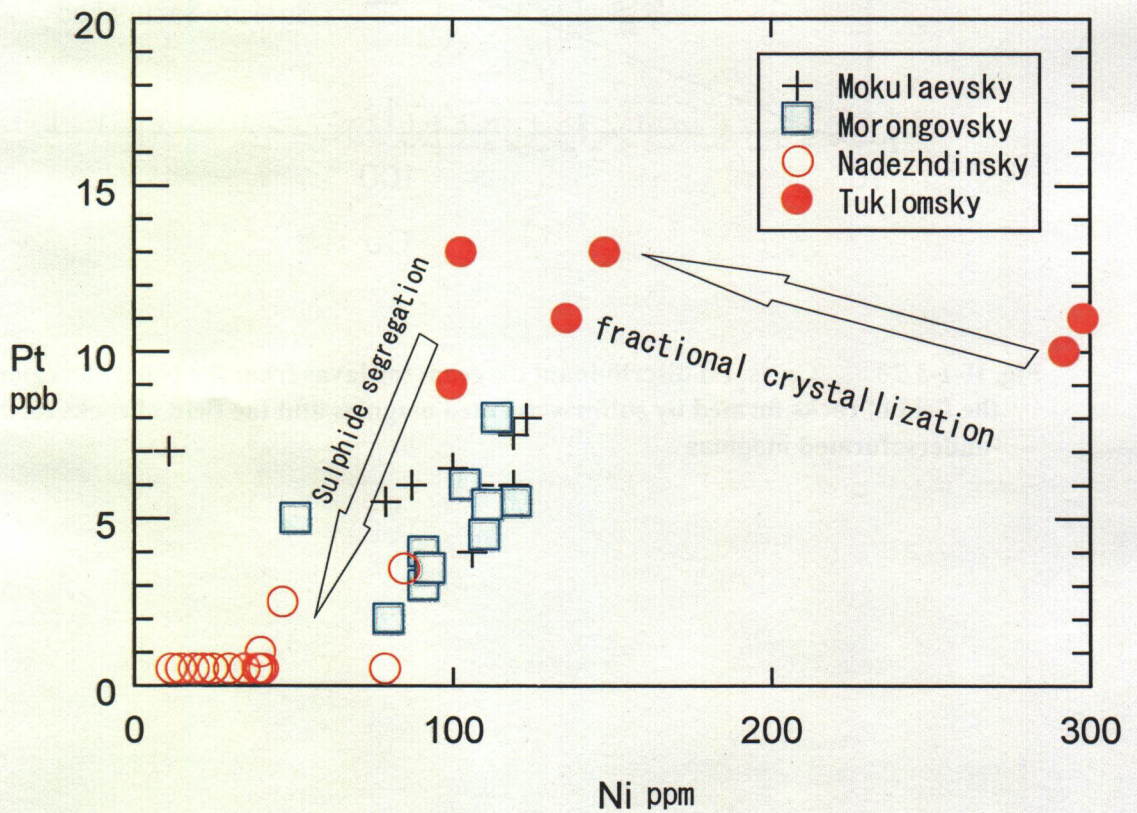


Fig. II-1-3-19 Ni-Pt correlation in lavas from the Noril'sk region
 Data from Brugmann et al.(1993)

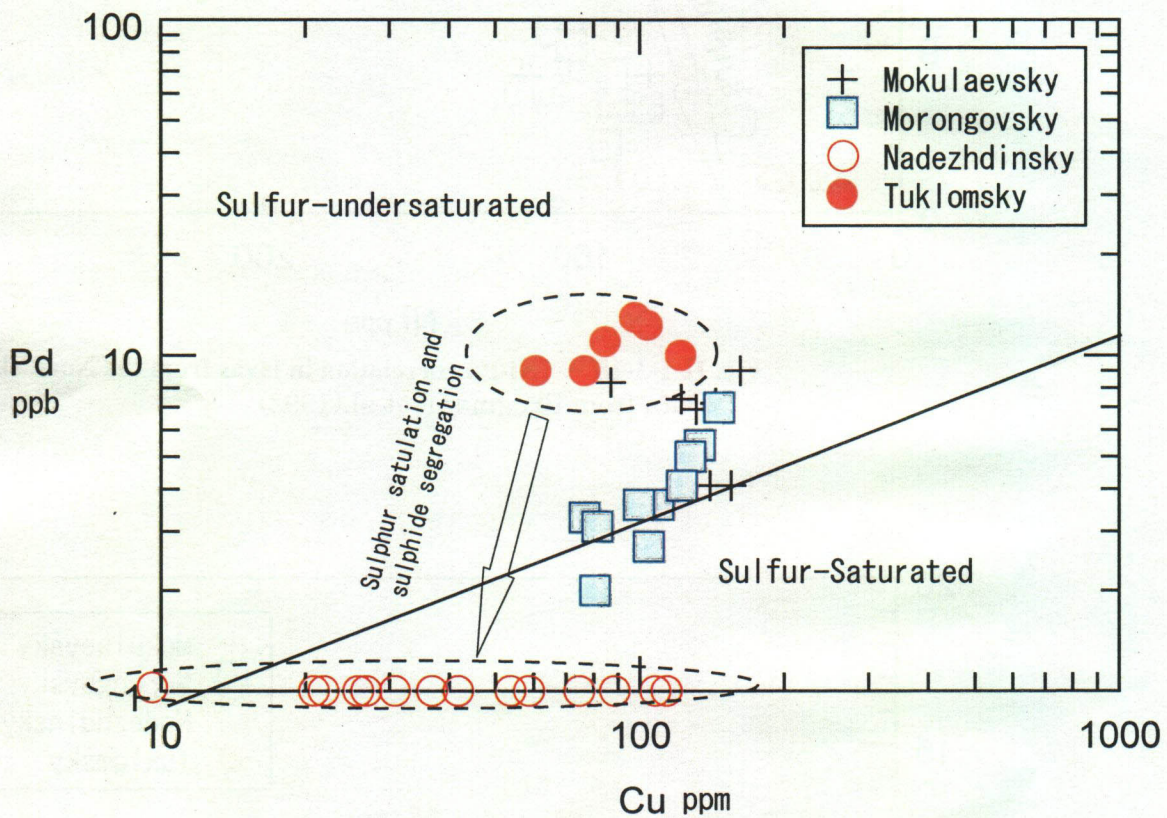


Fig. II-1-3-20 Cu vs. Pd discriminant diagram for lavas from the Noril'sk region between the field of rocks formed by sulfur-saturated magmas and the field of rocks formed by sulfur-undersaturated magmas

は裏返せば相対的に規模の大きな貫入岩体であり、マグマの貫入が繰り返し起こった岩体を意味する。マグマの貫入が繰り返されるのは火成活動の中心部においてである。

以上のように、Noril'sk 地域は理論的に考えられる塩基性～超塩基性マグマに伴う正マグマ性硫化物鉱床の生成条件を全てそなえている。ここで検討した Noril'sk タイプの正マグマ性硫化物鉱床の成因を考えると、パラナベーズン地域においては以下の条件を指標として広大な玄武岩分布域の中から有望地域を抽出する必要があるだろう。このような地質環境がそろえば、地下で不混和硫化物メルトが沈殿して鉱床を生成している可能性が期待される。

- 1) 低 Ti タイプでかつ PGE に富んだ肥沃なマグマ（溶岩、貫入岩体）が存在すること。
- 2) これと関連して地殻物質の混染作用と親銅元素の枯渇の認められるマグマ（溶岩、貫入岩体）が存在すること。
- 3) 地殻の弱線の発達する火山活動の中心域であること。Naldrett et al. (1992)が述べているように貫入岩体を洪水玄武岩の地表に至る通路と考えれば、貫入活動の中心域が有望と考えられる。
- 4) ピクライト質マグマ（溶岩、貫入岩体）が存在すること。高温のピクライト質マグマは積極的に地殻物質と反応して不混和硫化物メルトを作るであろう。しかしながら Noril'sk 鉱床は基本的に玄武岩質の火成活動に伴うものであり、マグマ全体に占めるピクライト質マグマの割合は僅か約 1 % である。Keays(1995)によれば、Noril'sk 鉱床は、ソレライト質玄武岩マグマの一部が地殻物質の混染作用を受けたことにより生成されたものである(Keays,1995)。従って、Noril'sk 鉱床の生成にピクライト質マグマが必須であったか否かは疑問の残るところである。