栃木県葛生地域の鍋山炭酸塩岩層中に産する 含ブルーサイト白色岩とその生成に 関与した玄武岩岩脈について

Brucite-bearing white rock and the genetically related basalt
dyke in the Nabeyama Carbonate Formation of the
Kuzuu district, Tochigi Prefecture, Japan

中	島	裕 (Yutaka NAKAJIMA)*
内	田	悦 生 (Etsuo UCHIDA)*
今	井	直 哉 (Naoya IMAI)*
今	井	浩 人 (Hiroto IMAI)*
大	野	仁 (Hitoshi OHNO)*

Brucite-bearing white rock (pencatite), consisting mainly of fine-grained brucite and calcite, was found in the dolomitic part of the Upper Limestone (the Karasawa Limestone Member) of the Nabeyama Carbonate Formation, Kuzuu district, Tochigi Prefecture, Japan. The brucite-bearing white rock was formed in the process of the thermal metamorphism of dolostone by basalt dyke. Based on the content of the minor elements of MnO , P_2O_5 and TiO_2 , the basalt is classified into island arc tholeiitic basalts, in contrast to the basalt of the Izuru Formation, which is classified into oceanic island basalts. A part of the basalt dyke was affected by an intense alteration, and changed its color into brown to reddish brown. The temperature around the dyke is estimated to have reached at least up to 800 to 850°C based on the compositions of coexisting Al- and Fe²⁺-spinel in the altered basalt. Therefore, it is considered that dolomite decomposed into calcite and periclase instead of brucite near the dyke, and then periclase hydrated to form brucite. The mineral assemblage of the brucite-bearing white rock indicates an equilibrium temperature below 480°C and X_{CO_2} below 0.01 if we assume a total pressure of 1 kb.

Keywords: Brucite, Dolomite, Serpentine, Spinel group minerals, Thermal metamorphism, Oceanic island basalt, Island arc basalt, Kuzuu.

1. はじめに

栃木県葛生地域には、石灰岩・苦灰岩からなる鍋山炭酸塩岩層が馬蹄形状に分布しており、これら石灰岩・苦灰岩を対象に多くの鉱山（住友セメント 栃唐沢鉱山、日鉄鉱業 栃羽鶴鉱山、吉澤石灰工業 栃大叶鉱山等）が稼行している。筆者等は、葛生地域の地質に関して再検討を行っているが、この程、同地域で稼行

している田源石灰工業 栃田源鉱山内上部石灰岩（従来の研究では下部石灰岩とされている）中の苦灰岩質な部分に、玄武岩岩脈による熱変成作用により苦灰岩から生成されたと考えられる本邦では珍しい含ブルーサイト白色岩（英語では pencatite と呼ばれている）が発見されたので、その産状を報告するとともにその生成過程および生成条件について考察する。

（平成4年4月3日受付，平成4年7月17日受理）

* 早稲田大学理工学部資源工学科，〒169 東京都新宿区大久保3-4-1

* Department of Mineral Resources Engineering, School of Science and Engineering, Waseda University, Ohkubo 3-4-1, Shinjuku-ku, Tokyo 169, Japan

Fig. 1. Geological map of the Kuzuu district after Yanagimoto (1973, 1979) and Watanabe *et al.* (1957) modified by the present authors.

1, Mitsumine mining district; 2, Hanezuru mine; 3, Karasawa mine; 4, Tagen mine; M₁, Ohtori-yama; M₂, Mitsumine; and M₃, Ado-yama.

Abbreviations: UL, Upper Limestone; MD, Middle Dolostone; and LL, Lower Limestone.

II. 地質概要

葛生地域における地質構造および層序の概要は、吉田 (1956, 1957), 渡辺ら (1957), 藤本 (1961), 羽鳥 (1965), Shoji (1967) 等により明らかにされた。その後、林 (1968), 小池ら (1970, 1971, 1974), 庄司・久保 (1970), Koike *et al.* (1971), コノドント団体研究グループ (1972, 1974), 柳本 (1973), 猪郷ら (1976)

等により層序学的な再検討が加えられている。また、鍋山炭酸塩岩層の堆積環境に関する研究が、小林 (1979), Yanagimoto (1979), Huber *et al.* (1988), 箕浦 (1989, 1990) により行われている。ここでは、これらの研究を基に葛生地域の地質概要について述べる (Fig. 1)。

葛生地域の地質構造は、北東-南西方向の軸を持ち、南西側にブランチした向斜構造と数本の衝上断層により特徴づけられ (小池ら, 1971; 柳本, 1973), 地層は

Fig. 2. Sketch of the outcrop of brucite-bearing white rock at the Tegen mine.

馬蹄形をなして分布している。当地域では、最下位に基盤を成し、玄武岩質溶岩あるいは凝灰岩から成る二畳系の出流層が分布し、その上に鍋山炭酸塩岩層が整合に重なる。鍋山炭酸塩岩層の上位には主としてチャートから成るアド山層が不整合に重なり（正司・久保, 1970; 小池ら, 1974), 産出したコノドント化石から三畳系に属すると考えられており（林, 1968; 小池ら, 1970, 1971; コノドント団体研究グループ, 1972, 1974), 砂岩または砂岩・頁岩互層よりなる牧層により整合におおわれている。また、これらの地層の分布域外側に砂岩または砂岩・頁岩互層よりなる会沢層が分布しているが、これは牧層と同一層である可能性が高い（柳本, 1973)。

出流層は、海山に由来するものであり、鍋山炭酸塩岩層は、海山上に堆積した石灰質な生物の遺骸を起源とする（柳本, 1973)。化石としては、紡錘虫、石灰藻、海百合、腕足類、ヒドロ虫類、苔虫類、二枚貝、巻貝、小型有孔虫などが産する。鍋山炭酸塩岩層は大きく三つに分けられ下位より下部石灰岩（山菅石灰岩部層）、中部苦灰岩（羽鶴苦灰岩部層）、上部石灰岩（唐沢石灰岩部層）と呼ばれている（藤本, 1961)。

下部石灰岩は、数十 cm 幅の層理の良く発達した石灰岩から成り、黒色～暗灰色を呈し、苦灰岩の薄層を挟む。また、層理面には凝灰質粘土の薄層を挟む。中部苦灰岩との境界は明瞭である。中部苦灰岩は、塊状で層理が不明瞭であり、灰色～青灰色を呈する。比較的結晶度の良いドロマイトから成り、均質で不純物をあまり含まない。上部石灰岩との境界は漸移的である。

上部石灰岩は、主に灰白色～灰色を呈する石灰岩から成り、部分的に黒色を呈する石灰岩を伴う。また、苦灰岩質な部分を多く含む。

III. 含ブルーサイト白色岩

1. 産 状

含ブルーサイト白色岩が発見された場所は、田源鉱山の 245～260 m レベルであり、地質学的には上部石灰岩中の苦灰岩質な部分に相当する（Fig. 1)。含ブルーサイト白色岩を産出する露頭のスケッチを Fig. 2 に示す。含ブルーサイト白色岩の露頭部には幅 4～6 m の緑黒色の玄武岩岩脈と何本かの幅 10 cm～6 m の赤

Table 1. Ca/(Ca+Mg) atomic ratios in dolostone and brucite-bearing white rock

Sample No.	Ca/Ca+Mg	Rock
KZ90033-2	0.524	Dolostone
KZ90037	0.561	Dolostone
KZ90038	0.562	Dolostone
KZ90040	0.574	Dolostone
KZ90043-2	0.519	Dolostone
KZ90033-1	0.570	White rock
KZ90044	0.579	White rock
KZ90051	0.581	White rock

Fig. 3. Polished sections of rocks.

A, Brucite-bearing white rock (KZ90024); B, Boundary between dolostone and brucite-bearing white rock (KZ8950); C, Brucite-bearing white rock partly replaced with serpentine (KZ90056); D, Basalt dyke (KZ90050); E, Brown dyke formed from basalt dyke by alteration (KZ90035); F, Reddish brown dyke with nodule-like portions (KZ90026).

Abbreviations: cal, calcite; bru, brucite; dol, dolomite; and ser, serpentine.

褐色～茶褐色岩脈が貫入している。これらの岩脈は後に詳しく述べるように同起源であり、変質により玄武岩が赤褐色や茶褐色を呈するようになったと考えられる。含ブルーサイト白色岩はこれら岩脈に沿って最大約 40 m の幅を持って産出し、その周囲には含ブルーサイト白色岩の原岩であると考えられる暗灰色の苦灰岩および苦灰岩質石灰岩が分布している。このような産状から含ブルーサイト白色岩は玄武岩岩脈の貫入に伴う熱変成作用により苦灰岩から生成されたと推定される。

含ブルーサイト白色岩は、白色で極めて細粒の方解石とブルーサイトから成る緻密な岩石である (Fig. 3-A)。含ブルーサイト白色岩と原岩と考えられる苦灰岩との境界は肉眼的には明瞭であるが、しばしば顕微鏡下では境界付近において含ブルーサイト白色岩が苦灰

岩中の裂かに沿って発達する組織が観察される (Fig. 3-B)。含ブルーサイト白色岩を構成する方解石とブルーサイトは細粒なため顕微鏡下では両者を区別することが容易ではない (Fig. 4-A)。Fig. 5-A に、典型的な含ブルーサイト白色岩の反射電子像を示す。写真の中で明るく写っている粒子が方解石、暗く写っている粒子がブルーサイトであり、細粒の方解石とブルーサイトが入り組んで産出する様子を示している。Fig. 4-B は、Fig. 3-B の岩石サンプルの顕微鏡写真であり、原岩中の比較的粗粒なドロマイト粒子が裂かに近づくにつれて細粒のブルーサイトと方解石の集合体に移り変わってゆく様子が見られる。Fig. 5-B はこの漸移帯の反射電子像であり、ドロマイトが粒界に沿って方解石とブルーサイトに分解しつつある様子を示している。その他にブルーサイトの産状としては稀であるが

Fig. 4. Photomicrographs of thin sections of rocks under the polarizing microscope (crossed nicols). A, Brucite-bearing white rock consisting of fine-grained calcite and brucite (KZ90024); B, Dolomite decomposes into calcite and brucite along the crack (KZ8950); C, Brucite vein in the brucite-bearing white rock (KZ8944); D, Serpentine replacing euhedral dolomite grains (KZ8937).

Abbreviations: cal, calcite; dol, dolomite; and ser, serpentine.

Fig. 5. Back-scattered electron images of brucite-bearing white rock.

A, Representative sample of brucite-bearing white rock (KZ89130). Black grain: brucite, and dark grey grain: calcite; B, Dolomite (grey) decomposes into fine-grained brucite (black) and calcite (light grey) along the grain boundaries (KZ8950).

苦灰岩あるいは含ブルーサイト白色岩中に脈状を成すものがある (Fig. 4-C)。また、白色岩は蛇紋石により交代されることがあり、その岩石の研磨片写真を Fig. 3-C に示す。蛇紋石はまた苦灰岩質石灰岩中のドロマ

イトを置き換えて産出することがある (Fig. 4-D)。

2. 化学組成

ブルーサイトには方解石と入り組んだ産状を呈するものと苦灰岩や白色岩中に脈状を呈するものの2種が

Table 2. Bulk chemical compositions of basaltic rocks in the Kuzuu district

Rock	Basalt dyke					Basaltic andesite dyke		Basalt lava (Izuru Formation)		
Area	Mitsumine		Tagen		Minowa	Karasawa		All area		
Sample No.	KZ90009	KZ90010	KZ90020	KZ90050	KZ90066	KZ90004	KZ90006	KZ90080	KZ90083	KZ90084
SiO ₂	44.98	44.24	45.62	45.43	49.39	56.27	53.80	43.08	46.97	47.17
TiO ₂	0.70	0.64	0.70	0.72	0.64	0.85	0.93	2.81	2.83	2.06
Al ₂ O ₃	13.86	13.20	14.21	14.48	14.90	15.42	16.51	12.05	15.03	15.93
Fe ₂ O ₃ *	9.59	9.51	9.06	8.55	8.29	7.86	8.46	20.33	11.94	12.14
MnO	0.14	0.13	0.15	0.13	0.13	0.15	0.21	0.16	0.26	0.11
MgO	11.78	13.24	12.27	14.55	8.62	5.10	6.43	7.64	7.98	6.97
CaO	9.52	9.82	7.77	8.42	9.45	4.19	3.96	3.48	4.49	5.73
Na ₂ O	1.03	0.88	1.07	1.39	1.74	2.20	2.96	2.51	4.57	3.43
K ₂ O	0.17	0.13	0.31	0.43	0.47	1.85	0.30	0.86	0.24	0.66
P ₂ O ₅	0.06	0.06	0.07	0.08	0.07	0.18	0.20	0.38	0.34	0.23
Ig. loss	7.22	7.92	8.06	5.20	4.64	4.61	5.55	4.29	4.26	4.45
Total	99.05	99.77	99.29	99.38	98.34	98.68	99.31	98.79	98.91	98.88

*Total Fe as Fe₂O₃

Table 3. Spinel group minerals in basalt and its altered equivalents

Rock	Sample No.	Cr*	Fe***	Al***
Basalt dyke	KZ90016	○		
	KZ90018	○	○	
	KZ90020	○	○	
	KZ90047	○	○	
	KZ90048	○	○	
	KZ90049	○	○	
	KZ90050	○	○	
Brown dyke	KZ90035	○	○	
	KZ90045	○	○	
	KZ90047	○	○	
Reddish brown dyke with "nodule" ("Nodule")	KZ90025	○	○	○
	KZ90026	○	○	
	KZ90027	○	○	
	KZ90028	○	○	
	KZ90031	○	○	
	KZ90032	○	○	○
	KZ90057	○	○	
	KZ90058	○	○	
Reddish brown dyke with "nodule" (Matrix)	KZ90025	○	○	○
	KZ90027	○	○	○
	KZ90031		○	
	KZ90052			○
	KZ90057	○	○	
	KZ90058		○	
Reddish brown dyke	KZ90019	○	○	○
	KZ90021	○	○	○
	KZ90022	○	○	○
	KZ90046	○	○	
	KZ90048	○	○	○
	KZ90053		○	○
	KZ90055	○	○	○

*Chromite series **Magnetite series ***Spinel series

ある。これらブルーサイトに対しエネルギー分散型 X 線マイクロアナライザー（リンク社製エネルギー分散型検出器 QX200JI を日本電子（株）製走査型電子顕微鏡 JSM-5400 に装着）を用いて分析を行った結果、いずれの産状のブルーサイトもブルーサイト端成分に極めて近い組成を持ち、Mg 以外の成分は検出限界以下であった。

当地域に産出する苦灰岩および含ブルーサイト白色岩の粉末を塩酸を用いて溶解した後、原子吸光分析装置（島津製作所製 AA-610S）を用いて Ca と Mg の濃度を測定した。分析結果を Table 1 に示す。苦灰岩の Ca/(Ca+Mg)原子比は 0.52~0.57、含ブルーサイト白色岩のその値は 0.57~0.58 であり、両者はほぼ同じ値を示している。このことは、苦灰岩から含ブルーサイト白色岩が生成した時、CaO と MgO に対してはほぼ閉鎖系、すなわちこれらの成分がほぼ固定成分として挙動し、原岩の比が保たれたことを示すように思われる。

IV. 火山岩

葛生地域に産出する火山岩には、当地域の基盤を成す出流層中の玄武岩溶岩と含ブルーサイト白色岩の生成に関連した玄武岩岩脈がある。同様の玄武岩岩脈は吉澤石灰工業（株）養輪鉱区および三峰鉱区にも見られ、構成鉱物、化学組成、走向・傾斜（N80°E, 60°N）から判断して含ブルーサイト白色岩の生成に関係した玄武岩岩脈と同起源であると考えられる。また、玄武岩質安山岩岩脈が住友セメント（株）唐沢鉱山および吉澤石灰工業（株）富士鉱区に見られ、さらにランプロファイ

Fig. 6. SiO_2 vs. $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ discriminant diagram of volcanic rocks recommended by the IUGS (after Le Maitre, 1989).

Fig. 7. $\text{MnO}-\text{TiO}_2-\text{P}_2\text{O}_5$ discriminant diagram of basaltic rocks by Mullen (1983).

7-岩脈が吉澤石灰工業(株)採鉱部事務所裏に見られる。これらの岩脈はいずれも鍋山炭酸塩岩層中にのみ見られ、他の地層との関係は不明である。ここではこの内、出流層中の玄武岩溶岩、鍋山炭酸塩岩層中の玄武岩岩脈および玄武岩質安山岩岩脈に関して記載を行い、葛生地域の地史との関連について考察を行う。ま

た、含ブルーサイト白色岩を伴う玄武岩岩脈についてはその変質岩である赤褐色-茶褐色岩脈を含め、詳細な記載を行い、特にその中に含まれているスピネル族鉱物に注目して含ブルーサイト白色岩の生成過程・生成条件に関して考察を行う。

Table 4. Chemical compositions of spinel group minerals.

Rock	Basalt dyke				Brown dyke			Reddish brown dyke with "nodule" ("Nodule")				
Sample No.	KZ90016	KZ90018	KZ90018	KZ90020	KZ90035	KZ90035	KZ90035	KZ90025	KZ90025	KZ90025	KZ90028	KZ90031
Mineral	Cr*	Cr*	Fe ³⁺ *	Fe ³⁺ *	Cr*	Cr*	Fe ³⁺ *	Cr*	Cr*	Al***	Fe ³⁺ *	Fe ³⁺ *
CaO	0.20	0.12	0.15	0.01	0.26	0.27	0.25	0.20	0.39	0.10	0.20	0.26
MgO	9.73	12.44	0.55	0.92	9.00	8.14	2.84	9.34	13.88	21.94	12.53	15.34
MnO	-	0.05	1.17	0.55	0.48	0.06	0.61	0.44	0.24	0.12	0.74	1.23
FeO	19.99	16.26	40.37	42.03	21.36	23.60	30.13	20.22	13.99	5.77	12.64	7.80
Fe ₂ O ₃	15.52	8.78	43.21	38.33	6.01	6.32	4.18	6.85	9.30	21.94	67.79	66.11
Al ₂ O ₃	17.88	20.33	0.96	2.94	22.67	22.43	2.13	19.04	21.34	48.94	5.60	8.46
Cr ₂ O ₃	36.18	41.62	0.22	2.06	39.98	39.32	17.57	43.66	39.69	1.46	-	0.19
TiO ₂	0.59	0.31	12.58	13.37	0.37	0.78	4.29	0.17	0.88	0.15	0.77	0.54
Total	100.08	99.92	99.21	100.20	100.13	100.92	98.99	99.92	99.91	100.41	100.27	99.92
Formula (O=4)												
Ca	0.01	-	0.01	-	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	-	0.01	0.01
Mg	0.47	0.58	0.03	0.05	0.42	0.38	0.16	0.45	0.64	0.87	0.63	0.75
Mn	-	-	0.04	0.02	0.01	-	0.02	0.01	0.01	-	0.02	0.03
Fe ²⁺	0.54	0.43	1.28	1.30	0.56	0.62	0.94	0.54	0.36	0.13	0.36	0.22
Fe ³⁺	0.38	0.21	1.23	1.07	0.14	0.15	1.15	0.17	0.22	0.44	1.73	1.64
Al	0.68	0.75	0.04	0.13	0.84	0.83	0.09	0.72	0.78	1.53	0.22	0.33
Cr	0.92	1.03	0.01	0.06	1.00	0.98	0.52	1.11	0.97	0.03	-	0.01
Ti	0.01	0.01	0.36	0.37	0.01	0.02	0.12	-	0.02	-	0.02	0.01
Total	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00

*Chromite series **Magnetite series ***Spinel series

Rock	Reddish brown dyke with "nodule" (Matrix)						Reddish brown dyke					
Sample No.	KZ90025	KZ90025	KZ90025	KZ90031	KZ90031	KZ90057	KZ90019	KZ90019	KZ90019	KZ90021	KZ90022	KZ90048
Mineral	Cr*	Al***	Al***	Fe ³⁺ *	Fe ³⁺ *	Cr*	Cr*	Fe ³⁺ *	Al***	Cr*	Fe ³⁺ *	Al***
CaO	0.11	0.41	0.24	0.14	0.32	0.17	0.14	0.33	0.52	0.04	-	0.09
MgO	9.46	21.41	22.01	15.00	15.47	9.25	8.99	15.43	23.47	8.96	16.47	22.82
MnO	0.41	1.81	1.35	1.15	0.96	0.44	0.19	0.96	0.63	0.01	2.05	0.70
FeO	20.00	4.26	4.06	8.63	8.05	20.22	20.99	8.40	2.56	21.57	6.57	3.48
Fe ₂ O ₃	11.04	30.05	28.06	64.70	67.05	8.97	17.16	63.05	23.52	7.14	63.03	27.41
Al ₂ O ₃	16.14	41.31	43.41	8.73	8.10	18.92	15.54	10.55	49.00	19.82	11.06	3.45
Cr ₂ O ₃	42.88	-	-	0.27	0.09	41.06	37.20	0.33	0.42	42.51	-	0.22
TiO ₂	0.43	1.09	1.10	0.67	0.56	0.38	0.73	0.65	0.29	0.18	1.03	0.45
Total	100.46	100.34	100.23	99.31	100.60	99.41	100.94	99.69	100.41	100.23	100.21	100.62
Formula (O=4)												
Ca	-	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	-	0.01	0.01	-	-	-
Mg	0.46	0.87	0.89	0.74	0.76	0.44	0.44	0.75	0.92	0.43	0.79	0.91
Mn	0.01	0.04	0.03	0.03	0.03	0.01	-	0.03	0.01	-	0.06	0.02
Fe ²⁺	0.54	0.10	0.09	0.24	0.22	0.55	0.57	0.23	0.06	0.58	0.18	0.08
Fe ³⁺	0.27	0.62	0.57	1.62	1.66	0.72	0.42	1.55	0.47	0.17	1.53	0.55
Al	0.61	1.33	1.39	0.34	0.31	0.72	0.59	0.41	1.52	0.75	0.42	1.43
Cr	1.10	-	-	0.01	-	1.05	0.95	0.01	0.01	1.07	-	0.01
Ti	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	-	0.02	0.01
Total	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00

*Chromite series **Magnetite series ***Spinel series

1. 火山岩の記載

出流層を構成する玄武岩溶岩は、灰黒色、緻密で、斑晶の少ない均質な岩石である。斑晶には斜長石とオージャイトがあり、石基は斜長石、オージャイトより成

り、かなり多くの磁鉄鉱を伴う。

玄武岩岩脈はカンラン石とオージャイトの斑晶を多く含有し、緑黒色を呈する(Fig. 3-D)。石基は斜長石、カンラン石、オージャイトから成り、また少量の磁鉄

Fig. 8. Back-scattered electron images of spinel group minerals in basalt and its altered rocks. A, Cr-spinel replaced with Fe^{3+} -spinel (magnetite) in basalt dyke (KZ90048-1); B, Cr-spinel surrounded with Fe^{3+} -spinel (magnesioferrite) in reddish brown dyke (KZ9022); C, Fe^{3+} -spinel replaced with Al-spinel (spinel) in reddish brown dyke (KZ90048-2); D, Cr-spinel replaced with Al-spinel (spinel) in reddish brown dyke (KZ90025). Abbreviations: C, chromite series; F, magnetite series and A, spinel series.

鉱を伴う。カンラン石の多くは変質し、蛇紋石化している。

玄武岩質安山岩岩脈は、斑晶が少なく灰色で緻密である。住友セメント(株)唐沢鉱山では一部塊状をなして産出する。斑晶としてオーザイトと斜方輝石を持ち、石基は斜長石、オーザイト、斜方輝石、石英、磁鉄鉱から成り、しばしば黒雲母を伴う。

2. 火山岩の全岩化学組成

前述した3種類の火山岩、すなわち出流層中の玄武岩岩溶、鍋山炭酸塩岩層中の玄武岩岩脈および玄武岩質安山岩岩脈の代表的試料に対して主成分分析を行った。分析には理学電機工業(株)製全自動蛍光X線分析装置 System 3070を用いた。測定には岩石試料1gに対し無水四ホウ酸リチウム5gを混ぜ合わせて溶融し、作製したガラスビードを用いた。また、検量線作成には通産省工業技術院地質調査所から提供された岩石標準試料 JB-1a, JB-2, JB-3, JGb-1, JA-1, JG-1a,

JR-1 および JR-2 の計8個を用いた (Ando *et al.*, 1987)。なお、鉄に関しては全鉄を Fe_2O_3 として一括して取り扱った。分析結果を Table 2 に示す。Fig. 6 は、 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ と SiO_2 含有量に基づく IUGS の火山岩分類図 (Le Maitre, 1989) である。同図には Kuno (1966) によるアルカリ岩と非アルカリ岩の境界が鎖線で示されている。この図から出流層の玄武岩はアルカリ系列玄武岩に、鍋山炭酸塩岩層中の玄武岩岩脈および玄武岩質安山岩岩脈は、非アルカリ系列の火山岩に区分される。Fig. 7 は、Mullen (1983) の TiO_2 , MnO , P_2O_5 含有量比による玄武岩質火山岩の分類図である。この図から出流層中の玄武岩は海洋島玄武岩に分類され、また、玄武岩岩脈および玄武岩質安山岩岩脈は両者とも島弧系のソレイト系列火山岩として分類される。このことから玄武岩岩脈および玄武岩質安山岩岩脈は、鍋山炭酸塩岩層を堆積し、後に出流層を形成した海洋島が日本列島に衝突・付加した後に貫入したも

Fig. 9. Chemical compositions of spinel group minerals.

A, Basalt dyke; B, Brown dyke; C, "Nodule" in reddish brown dyke; D, Reddish brown dyke without "nodule".

Fig. 9. Continued

Fig. 10. T- X_{CO_2} diagram in the system $CaO-MgO-SiO_2-H_2O-CO_2$ under 1 kbar total pressure (after Winkler, 1979). The stability field of the brucite-bearing white rock is hatched.

のであることが推定される。

3. 赤褐色岩脈・茶褐色岩脈

茶褐色岩脈はその産出量が少なく、玄武岩岩脈と接することはほとんどないが、局部的に玄武岩岩脈中の裂かに沿って茶褐色に変質していることがある。岩石の色は玄武岩岩脈の色とは全く異なるが、肉眼的にも顕微鏡下においても玄武岩の組織が見られることが多く、玄武岩の変質により生成されたと考えられる (Fig. 3-E)。その構成鉱物は主として蛇紋石、緑泥石、方解石である。

赤褐色岩脈は、玄武岩岩脈と同規模に産する。玄武岩岩脈と赤褐色岩脈は接することがあるが、その境界は明瞭である。赤褐色岩脈中には多量の方解石が含有されており、主として蛇紋石、緑泥石、方解石より成る。稀に局部的に少量のグラナイト系ザクロ石や透

輝石が見られる。赤褐色岩脈の多くは均質な岩石であり、原岩の組織は残されていない。しかしながら、赤褐色岩脈中にはしばしば玄武岩組織を残す径 2~3 cm 程度のノジュール状の形状を示す部分 (以下では単に“ノジュール”と呼ぶ) が見られることがある (Fig. 3-F)。このことから赤褐色岩脈は、玄武岩岩脈が炭酸塩岩を多量に同化し、変質して生成されることが考えられる。また、次に詳しく述べるように、玄武岩岩脈、茶褐色岩脈、赤褐色岩脈のいずれにもクロム鉄鉱系列および磁鉄鉱系列のスピネル族鉱物が含有されており、このことから茶褐色岩脈、赤褐色岩脈が玄武岩岩脈の変質により生成されることが推測される。

4. 玄武岩岩脈、茶褐色岩脈、赤褐色岩脈中のスピネル族鉱物

玄武岩岩脈、茶褐色岩脈、赤褐色岩脈中にはクロム鉄鉱系列、磁鉄鉱系列、スピネル系列に属する各種スピネル族鉱物が含有されている。ここではこれら各系列のスピネル族鉱物をそれぞれ Cr スピネル、 Fe^{3+} スピネル、Al スピネルと呼ぶことにする。各岩脈中に産するスピネル族鉱物の種類を Table 3 にまとめて示す。赤褐色岩脈については“ノジュール”を伴うものと伴わないものに分け、さらに“ノジュール”を伴うものに対しては“ノジュール”とそのマトリックスに分けて記してある。Cr スピネルと Fe^{3+} スピネルはいずれの岩脈中にも含有されているが、Al スピネルは赤褐色岩脈中のみに見られる。Cr スピネルの含有量は玄武岩岩脈、茶褐色岩脈、“ノジュール”を伴う赤褐色岩脈の“ノジュール”、マトリックス、“ノジュール”を伴わない赤褐色岩脈の順に減少し、逆に Al スピネルの含有量は、“ノジュール”を伴う赤褐色岩脈の“ノジュール”、マトリックス、“ノジュール”を伴わない赤褐色岩脈の順に増加する傾向が見られる。玄武岩岩脈において Cr スピネルは、カンラン石やオーチャイトの珪晶中に含有され、 Fe^{3+} スピネル (磁鉄鉱) は石基中に存在する。この傾向は茶褐色岩脈や赤褐色岩脈中の“ノジュール”にも見られる。

これらスピネル族鉱物は、単独粒子として産出することが多いが、2~3 種のスピネル族鉱物が互いに交代したり、共生して産することがある。Fig. 8 に代表的なスピネル族鉱物間の交代組織を反射電子像を用いて示す。スピネル族鉱物間の交代組織には、Cr スピネルを Fe^{3+} スピネルが交代するもの、Cr スピネルを Al スピネルが交代するものおよび Fe^{3+} スピネルを Al スピネルが交代するものの 3 つのパターンが見られる。

Fig. 11. Chemical compositions of coexisting Al- and Fe²⁺-spinel (after Lehmann and Roux, 1986).

これらの岩石中のスピネル族鉱物に対して行った化学分析結果の代表的な値を Table 4 に示す。分析には、前述したエネルギー分散型 X 線マイクロアナライザーを用いた。Fe²⁺ と Fe³⁺ の含有量はスピネルの構造式を満たすよう全鉄を分配することにより求めた。また、Fig. 9 には岩種別に含有されるスピネル族鉱物の組成を 2 価 (Fe²⁺, Mg²⁺) と 3 価 (Al³⁺, Fe³⁺, Cr³⁺) のイオンそれぞれの原子比を基に表してあり、共生するものはタイラインで結ばれている。これらの分析結果から、玄武岩の変質に伴い Cr スピネルが Fe³⁺ スピネルに、そして Fe³⁺ スピネルが Al スピネルへと変化するにつれて、全ての岩石種に共通に含有されている Fe³⁺ スピネル中の Al 含有量および Mg²⁺/(Mg²⁺+Fe²⁺) 比が増加していることが分かる。スピネル族鉱物中の Mg²⁺/(Mg²⁺+Fe²⁺) 比は、Al スピネルで最も高く、Fe³⁺ スピネルでは広範囲の値を示し磁鉄鉱端成分に近いものからマグネシオフェライト端成分に近いものまでが存在する。Cr スピネル中の Mg²⁺/(Mg²⁺+Fe²⁺) の値もやや広い範囲を示すが、岩種による違いは認められない。

V. 考 察

含ブルーサイト白色岩に見られる最も代表的な鉱物組合わせは方解石+ブルーサイトであり、

の反応を通して生成されたと考えられる。しばしばブルーサイトの代わりに蛇紋石が産出するが、原岩である苦灰岩中にはほとんど SiO₂ が含まれていないことから玄武岩岩脈等から SiO₂ が供給された場合、

の反応を通してブルーサイトの代わりに蛇紋石が生成されたと考えられる。Fig. 10 は全圧 1 kb における CaO-MgO-SiO₂-H₂O-CO₂ 系の T-Xco₂ 図で、関連した重要な平衡曲線のみが示されている。現在見られる含ブルーサイト白色岩では、ドロマイトの代わりにブルーサイト+方解石の組合わせが安定であり、また蛇紋石も安定に存在することから、含ブルーサイト白色岩は図中の斜線で示した部分、すなわち全圧を 1 kb とすると 480°C 以下、Xco₂=0.01 以下の条件下で安定

であることが分かる。

ところで、苦灰岩を分解して含ブルーサイト白色岩を生成した熱源は玄武岩岩脈に求めなければならないが、一般的に玄武岩マグマは1,000°Cを越える温度を有する(例えば、横山ら, 1979)。また、赤褐色岩脈中に共存するFe³⁺スピネルとAlスピネルの組成をLehmann and Loux (1986)のFig. 7にプロットすると、800~850°Cの生成温度が得られるが(Fig. 11), Fig. 10のT-Xco₂図からわかるようにこのような温度ではブルーサイトは安定ではない。そこで少なくとも玄武岩に近接した所ではドロマイトは

の反応によってペリクレス+方解石に分解し、このようにして生成されたペリクレスが後に温度の低下に伴い水和し

ブルーサイトとなった可能性が考えられる。しかしながら、この証拠となるペリクレスはまだ見つかっていない。このような過程により生成されたペリクレスおよびブルーサイトがSawaki (1989)により中部日本の能郷白山地域の接触変成岩から報告されている。

VI. ま と め

(1) 栃木県葛生地域田源鉱山内の鍋山炭酸塩岩層上部石灰岩中の苦灰岩質な部分に、本邦では珍しい苦灰岩の熱変成作用により生成されたと考えられる含ブルーサイト白色岩が発見された。

(2) 含ブルーサイト白色岩は、主として極めて細粒の方解石とブルーサイトより成る白色緻密な岩石であり、大部分は苦灰岩の加水分解により生成されたと考えられる。しばしば蛇紋石を伴い黄色味を帯びる。

(3) 含ブルーサイト白色岩中には玄武岩岩脈が通っており、これが含ブルーサイト白色岩生成の熱源であると考えられる。この玄武岩岩脈は、島弧系ソレライト質玄武岩に分類されることから、鍋山炭酸塩岩層を堆積した海洋島が日本列島に衝突・付加した後に貫入したと考えられる。

(4) 玄武岩岩脈の一部は苦灰岩の同化等により激しく変質し、主として蛇紋石、緑泥石、方解石より成る茶褐色~赤褐色岩に変化している。これら岩石中には、Crスピネル、Fe³⁺スピネル、Alスピネルが含有されており、共生するFe³⁺スピネルとAlスピネルの組成から800~850°Cの生成温度が得られた。

(5) 上記のことから少なくとも玄武岩岩脈に近い部分ではドロマイトがペリクレス+方解石に分解し、後の温度降下に伴いペリクレスが水和し、ブルーサイト化した可能性が考えられる。

(6) 現在の含ブルーサイト白色岩中の鉱物組合せからは、1 kbの全圧を仮定するとその平衡温度は480°C以下、Xco₂は0.01以下であると推定される。

謝 辞

調査を許可して頂いた田源石灰工業(株)田源鉱山の関係者に心から感謝の意を表す。調査に当たり吉澤石灰工業(株)の吉澤兵左会長をはじめ採鉱部の皆様には種々の御便宜を計って頂いた。また、蛍光X線分析に際し、早稲田大学教育学部の装置を使用させて頂くとともに同学部小笠原義秀助教授には使用に当たり御指導頂いた。ここに、感謝の意を表す。

引用文献

- Ando, A., Mita, N. and Terashima, S. (1987), 1986 values for fifteen GSJ rock reference samples, "igneous rock series". *Geostandards News-letter*, 11, 159-166.
- 藤本治義 (1961), 5万分の1地質図幅『栃木』および説明書。地質調査所。
- 羽鳥晴文 (1965), 足尾山地南東部の層位学的研究。地質雑, 71, 247-256.
- 林 信悟 (1968), 栃木県葛生町のアド山層から産出したコノドントについて。地球科学, 22, 63-70.
- Huber, S., Uchida, E. and Imai, N. (1988), Microfacies and diagenesis of the Permian Nabeyama Carbonate Formation, Kuzuu district, Central Japan. *Bull. Sci. Eng. Res. Lab., Waseda Univ.*, 120, 1-27.
- 猪郷久治, 青木利枝子, 細井さちゑ (1976), 栃木県葛生町東方における二疊系と三疊系の境界について。東京学芸大紀要, 28, 226-236.
- 小林文夫 (1979), 栃木県葛生地域の鍋山石灰岩の岩相と堆積環境について。地質雑, 85, 627-642.
- 小池敏夫, 渡辺耕造, 猪郷久治 (1970), 日本産三疊紀コノドントによる新発見(短報)。地質雑, 76, 267-269.
- Koike, T., Igo, H., Takizawa, S. and Kinoshita, T., (1971), Contribution to the geological history of the Japanese Islands by the conodont biostratigraphy, Part II. *J. Geol. Soc. Japan*, 77, 165-168.
- 小池敏夫, 猪郷久義, 猪郷久治, 木下 勤 (1974), 栃木県葛生地域の二疊系鍋山層と三疊系アド山層の不整合とその地史的意義。地質雑, 80, 293-306.
- 小池敏夫, 木下 勤, 猪郷久治, 滝沢 茂 (1971), 栃木県葛生地域付近の栃木層群産コノドントと衝突

- 断層の発見 (短報), 地質雑, 77, 221-222.
- コノドント団体研究グループ (1972), 本邦の二疊系と三疊系の境界におけるコノドントについて—アト山層基底部のコノドントフォーナの再検討. 地質雑, 78, 355-368.
- コノドント団体研究グループ (1974), 本邦の二疊系と三疊系の境界におけるコノドントについて—唐沢地域における銅山層とアト山層の層序とフォーナ, 地球科学, 28, 86-98.
- Kuno, H. (1966), Lateral variation of basalt magma type across continental margins and island arcs. *Bull. Volcanol.*, 29, 195-222.
- Lehmann, J. and Roux, J. (1986), Experimental and theoretical study of $(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg}) (\text{Al}, \text{Fe}^{3+})_2\text{O}_4$ spinels: Activity-composition relationships, miscibility gaps, vacancy contents. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 50, 1765-1783.
- Le Maitre, R.W. ed. (1989), A classification of igneous rocks and glossary of the terms. Recommendations of the International Union of Geological Sciences, Subcommittee on the systematics of igneous rocks. Blackwell Scientific Pub.
- 箕浦幸治 (1989), 苦灰岩とベルム・三疊紀の海 (その1). 石灰岩, 242, 8-25.
- 箕浦幸治 (1990), 苦灰岩とベルム・三疊紀の海 (その2). 石灰岩, 243, 17-32.
- Mullen, E.D. (1983), $\text{MnO}/\text{TiO}_2/\text{P}_2\text{O}_5$: a minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic environments and its implications for petrogenesis. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 62, 53-62.
- Sawaki, T. (1989), Periclase in the contact aureole of the Nogo-Hakusan area, Central Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, 95, 137-140.
- Shoji, R. (1967), Occurrence and petrological studies of Paleozoic chert of the western Ashio-mountain. Jubilee Publ. Commem. Prof. Sasa, 60th Birthday, 171-183.
- 庄司力偉, 久保重明 (1970), 栃木県葛生地域に発達する古生層の堆積学的研究. 日本地質学会第77年学術大会講演要旨, 81.
- 渡辺武男, 向山 広, 兼平慶一郎, 浜田隆士編 (1957), 足尾山地地質図・説明書. 栃木県.
- Winkler, H.G.F. (1979), Petrogenesis of metamorphic rocks. Fifth edition. Springer-Verlag.
- 柳本 裕 (1973), 栃木県葛生地域の中・古生層の層序と地質構造の再検討. 地質雑, 79, 441-451.
- Yanagimoto, Y. (1979), Petrographical study of the Permian Nabeyama Formation in the vicinity of Kuzuu Town, Central Japan. *Sci. Rept., General Education, Univ. Tokyo*, 29, 75-92.
- 横山 泉, 荒牧重雄, 中村一明編 (1979), 火山, 岩波講座地球科学7, 岩波書店.
- 吉田三郎 (1956), 栃木県安蘇郡葛生町付近の地質(1). 北海道地質要報, 32, 1-10.
- 吉田三郎 (1957), 栃木県安蘇郡葛生町付近の地質(2). 北海道地質要報, 34, 1-5.