

日本の地熱地帯のパイロフィライト

金原啓司*

KIMBARA, Keiji (1991) Pyrophyllites from the geothermal fields, Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol.42 (6/7), p.347-362, 5fig., 3tab.

Abstract: Pyrophyllites in Japan occur in the Roseki and Toseki clay deposites (Cretaceous and Neogene), in metamorphosed pelitic rocks (Permian and Triassic) and alteration zones around the Kuroko deposits (Neogene) and in geothermal fields (Quaternary).

Pyrophyllite is an important indicator to delineate geothermal anomalies because of the formation temperature higher than 200°C. Surface acidic alteration zones in geothermal fields show the zonal arrangement from center to periphery as follows: pyrophyllite, kaolin and smectite zones with or without alunite. Pyrophyllites in the zone are accompanied by zunyite, diaspore, kaolin (kaolinite and dickite), sericite(mica), mixed-layer mica/smectite, alunite, anhydrite and silica minerals. Thus the main constituent minerals of the pyrophyllite zone are quite similar to those of the Roseki and Toseki clay deposits.

Pyrophyllites from geothermal fields can be subdivided into two groups on the basis of the mode of occurrence as follows: pyrophyllite formed at near surface and pyrophyllite formed at deep-seated zone. The former closely associated with alunite occurs in the center of alteration haloes which have been formed by discharging of high temperature acid fluids through the fractures. The latter is rarely accompanied by alunite, and it occurs in fracture zone within geothermal reservoirs which store neutral or acidic geothermal fluids with temperature higher than 200°C.

Some mineralogical data of pyrophyllites from the Sengan geothermal field, Northeast Japan are also presented.

1. ま え が き

パイロフィライト(葉蠟石)の名称は、木下亀城著の「鉱物辞典」(風間書房, 1954)によれば、「Pyro-及びギリシャ語の*phullon*(葉片)に由来し、加熱すると葉片状に剥離するを云ふ」と述べられている。

Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O 系合成実験によれば、熱水中のシリカ濃度に依存するものの、およそ200°C以上の高温になるとカオリナイト($Al_2Si_2O_5(OH)_4$)はパイロフィライト($Al_2Si_4O_{10}(OH)_2$)+水(H_2O)、もしくはパイロフィライト+ダイアスポア($AlO(OH)$)+水に転移することが知られている(例えばHemley *et al.*, 1980など)。このことからパイロフィライトは高温環境を示唆する鉱物として地熱地帯ではその存在が注目されている。

日本の活地熱地帯で最初にパイロフィライトの産出が報告されたのは岩手県松川の地表および坑井試料(角,

1966)からであろう。その後大分県八丁原(Hayashi, 1973)、秋田県大沼(与良ほか, 1973)、宮城県鬼首(高島, 1983)のいずれも坑井試料からその産出が報告されているが、全体としてその数は非常に少なかった。しかしながら昭和48年度以降、国(通商産業省)による「全国地熱基礎調査」を初めとして、全国的規模での地熱調査が実施されるに至って、地熱地帯からのパイロフィライトの産出報告が次第に増加してきた。

よく知られているように、パイロフィライトは中国地方に分布する白亜紀のろう石鉱床の主要構成鉱物であるばかりでなく、中部地方から東北地方にかけて点在する新第三紀のろう石鉱床や陶石鉱床からも産出している。またいくつかの黒鉱鉱床の変質帯や、堆積岩中からもパイロフィライトの産出が報告されており、第1図に示すように、その分布は全国に及んでいる。

以下ここでは、まず日本におけるパイロフィライトの

*地熱熱部

Keywords: pyrophyllite, geothermal field, clay mineral, clay deposit

産状を簡単にレビューするとともに、次にこれまでの調査によって判明した地熱地帯のパイロフィライトについて、特にその産状を中心に紹介し、地熱地帯における産出の意義について若干の考察を行う。

2. 日本におけるパイロフィライトの産出

我が国におけるパイロフィライトは、およそ次のような熱水性鉱床に関連した変質帯、および泥質堆積岩中より発見されている (第 1 図, 第 1 表)。

- (1) ろう石鉱床, 陶石鉱床 (白亜紀-新第三紀)
- (2) 黒鉱鉱床 (新第三紀)
- (3) 地熱鉱床 (第四紀)
- (4) 泥質堆積岩 (二疊紀, 三疊紀)

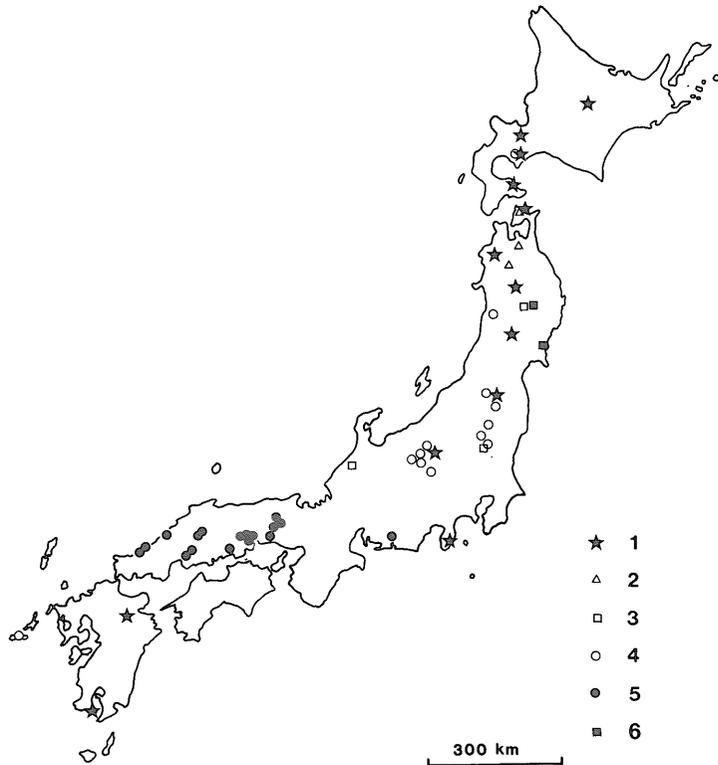
日本のろう石鉱床の大半は中国地方の三石 (岡山), 勝光山 (広島) に代表されるように、白亜紀の酸性-中性陸上火山活動に伴って生成している (木野崎, 1961)。この種の鉱床ではパイロフィライトの他に、カオリナイト, セリサイト (マイカ), スドー石などのアルミニウム質粘土鉱物, およびダイアスポア, 紅柱石, コランダムな

ど的高温生成鉱物が見られる。

一方新第三紀の火山活動によって生成したろう石鉱床, およびパイロフィライトを伴うような一部の陶石鉱床が中部地方から東北・北海道地方にかけて散在している (杉浦ほか, 1959; 高橋, 1963; 藤原・庄谷, 1966; 藤井・井上, 1971; 早川ほか, 1977)。このようなろう石・陶石鉱床からはパイロフィライトのほかにディッカイト, カオリナイト, セリサイト (マイカ), ダイアスポア, ズニ石, 明ばん石などの随伴変質鉱物が報告されている。

片山 (1969) は日本のろう石鉱床をダイアスポア, コランダム, 紅柱石などの高温鉱物を多量に伴う高温型 (五島など), 高温鉱物生成後にパイロフィライト化作用が重複しているテレスコープ型 (勝光山など), パイロフィライトを主要構成鉱物とする典型的ろう石鉱床 (三石など)

(以上はいずれも白亜紀-新第三紀), 新第三紀の火山噴出物中に産する浅成型 (梵天山など) に分類している。また藤井・井上 (1971) は長野県北部地方のヒン岩の活動により生成したろう石鉱床の研究結果から、この地方のろう石鉱床を信陽などの高温・深所熱水型 (片山の高



第 1 図 日本におけるパイロフィライト産出地点

- 1. 地熱鉱床 (第四紀), 2. 黒鉱鉱床 (新第三紀), 3. 陶石鉱床 (新第三紀), 4. ろう石鉱床 (新第三紀), 5. ろう石鉱床 (白亜紀), 6. 泥質堆積岩 (二疊紀・三疊紀)。

日本の地熱地帯のパイロフィライト (金原啓司)

第1表 日本におけるパイロフィライト産出地点および産出鉱床 (地熱鉱床を除く)

名 称	位 置	鉱床タイプ等	主要鉱物組成(除石英)	文 献
久保内 Kubonai	北海道有珠郡壮瞥町	ろう石	P, Dc, A	藤原・庄谷 (1966), 丸茂・岡部 (1983)
青 森 Aomori	青森県下北郡大間町	黒 鉱	P, Ds, Ka	林 (1961)
上 北 Kamikita	青森県上北郡天間林村	黒 鉱	P, Ds, Ka	"
松 峰 Matsumine	秋田県大館市	黒 鉱	P, S	白水ほか (1972)
餌 釣 Ezuri	秋田県大館市	黒 鉱	P, K, Ds	石川ほか (1980)
大 築 Oyana	秋田県本荘市	ろう石	P, K, Ds, S	工技連窯業部会 (1978)
宮守・大迫 Miyamori・Ohasama	岩手県上閉伊郡宮守村, 同稗貫 郡大迫町	泥質堆積岩(二疊紀)	P, S	奥山 (1980)
石鳥谷 Ishidoriya	岩手県稗貫郡石鳥谷町	陶石	P, S, Z	工技連窯業部会 (1978), 高橋 (1963)
大 峠 Otōge	山形県米沢市	白土・ろう石	P, S, K, N, Dc, Ds	種村・堀内 (1958), 早川ほか (1977), 須藤 (1984a)
湖 南 Konan	福島県郡山市	ろう石	P, S, Ds, C	岡田 (1962)
歌 津 Utatsu	宮城県本吉郡歌津町	泥質堆積岩(三疊紀)	P, S	飯島 (1977)
那 須 Nasu	栃木県黒磯市	ろう石	P, S	須藤 (1984b)
鬼怒川・高徳・ 遅沢 Kinugawa・ Takatoku・Osozawa	栃木県塩谷郡塩谷町, 同藤原町	ろう石・カオリン	P, S, K, N, Dc	工技連窯業部会 (1978), 児玉 (1962)
文狭・大席 Fubasami・Ōzeki	栃木県今市市	ろう石	P, K, S	工技連窯業部会 (1978)
板荷 Itaga	栃木県鹿沼市	陶石	P, K	"
金倉・佐野・ 穂 波 Kanakura・Sano・ Honami	長野県下高井郡山ノ内町	ろう石	P, S, Ds, Z, N, Dc	藤井・井上 (1971)
米 子 Yonago	長野県須坂市	ろう石	P, K, Ds, Z, C	"
上高井(仁礼) Kamitakai(Nire)	長野県須坂町	ろう石	P, Ds, Ka, C	藤井・井上 (1971), 工技連窯業部会 (1978)
信 陽 Shinyō	長野県小県郡真田町	ろう石	P, Ds, Ka, C, Su	藤井・井上 (1971)
梵天山・冠着 Bontenyama・ Kamurigi	長野県更埴市	ろう石	P, Ds, A, Ka, S	"
余 地 Yoji	長野県南佐久郡佐久町	ろう石	P, Ds, Z	須藤ほか (1985)
服 部 Hattori	石川県能美郡辰口町	陶石	P, S, Ds	杉浦ほか (1959)
河 合 Kawai	石川県石川郡鳥越村	陶石	P, S	工技連窯業部会 (1978)
鳳来・一色 Hōrai・Isshiki	愛知県南設楽郡鳳来町	ろう石	P, Ka	"

第1表 つづき

名 称	位 置	鉱床タイプ等	主要鉱物組成(除石英)	文 献
柄原 Tochihara	兵庫県朝来郡生野町	ろう石	P, Ka	工技連窯業部会(1978)
大 沢 Ôsawa	兵庫県神崎郡大河内町	ろう石	P, Ka, Ds, S	"
越知谷・北神・丸越 Ochidani・Hokushin・ Marukoshi	兵庫県神崎郡神崎町	ろう石	P, Ka, Ds, S	"
播磨新宮 Harimashingū	兵庫県揖保郡新宮町	ろう石	P, S	"
三 石 Mitsuishi	岡山県備前市	ろう石	P, S, Ka, Ds	藤井ほか(1979)
吉 永 Yoshinaga	岡山県和气郡吉永町	ろう石	P, S, Ka, Ds, A, Su	工技連窯業部会(1978)
日 笠 Higasa	岡山県和气郡和气町	ろう石	P, S	"
藤 野 Fujino	岡山県和气郡和气町	ろう石	P, S, Ka, Ds	"
建 部 Takebe	岡山県御津郡建部町	ろう石	P, S, K, A, Ds, C, Ad	"
伊 部 Inbe	岡山県備前市	ろう石	P, S	"
岩生・大研 Iwao・Daiken	岡山県和气郡佐伯町	ろう石	P, S, Ka, A	"
鴨 方 Kamogata	岡山県浅口郡鴨方町	ろう石	P, S, K, Ds, Ad	"
金 川 Kanagawa	岡山県御津郡御津町	ろう石	P, Dm	"
勝光山・大津恵 Shōkōzan・Ôtsue	広島県庄原市	ろう石	P, Ka, Dc, S, A, Ds	上野(1958)
釜ヶ峰 Kamagamine	広島県比婆郡口和町	ろう石	P, Ka, Ds	工技連窯業部会(1978)
正 栄 Shōei	広島県比婆郡比和町	ろう石	P, S	"
豊 栄 Hōei	広島県賀茂郡豊栄町	ろう石	P, S, Ka	"
熊 野 Kumano	広島県安芸郡熊野町	ろう石	P, S, Ka, C, Ad	"
雲城山 Kumogiyama	島根県浜田市・同那賀郡金城町	ろう石	P, S, Ka, Ds, Ad	井上ほか(1984)
須 佐 Susa	山口県阿武郡須佐町	ろう石	P, Ka, Dc, Ds, C, Ad	工技連窯業部会(1978)
名 振 Naburi	山口県阿武郡阿武町	ろう石	P, K, Ad	岩生(1950)
大平・宇久・奈古 Ohira・Uku・Nago	山口県阿武郡阿武町	ろう石	P, C, Ad, Ds, S, K	神谷(1974), 岩生(1978), 杉浦・黒田(1955)
五 島 Gotō	長崎県福江市	ろう石	P, Ds, C, Ad, Dm, Ad, S	工技連窯業部会(1978), 岩生ほか(1953), 湊・加藤(1962)

鉱物組成

P:ハイロフイライト, Ka:カオリン, K:カオリナイト, Dc:デックカイト, N:ナクライト, S:セリサイト(マイカ)(マイカ/スメクタイト混合層鉱物を含む), Su:スドー石, A:明ばん石, Z:ズニ石, Ds:グイアスポア, Ad:紅柱石, C:コラングム, Dm:デユモルティール石

温型に相当)と梵天山などの低温・噴気熱水型(片山の典型的ろう石鉱床と浅成型に相当)に分類している。

秋田県から青森県にかけての黒鉱鉱床の周辺には酸性火山岩の活動に関係して、パイロフィライト、カオリナイト、ダイアスポアを伴う変質帯が生じている(林, 1961; 白水ほか, 1972; 石川ほか, 1980)。さらに第四紀に入ってから、次に述べるような地熱地帯からパイロフィライトの産出が報告されており、特に松川地熱地帯の変質帯は多くの点で上述のろう石鉱床に類似しているとされている(片山, 1969)。

一方堆積岩中より産する例として、宮城県南部北上山地三疊紀の低変成度泥質堆積岩と岩手県南部北上山地の Al_2O_3 に富む二疊紀泥質堆積岩の接触変成帯より、それぞれパイロフィライトの産出が報告されている(飯島, 1977; 奥山, 1980)。なお堆積岩中より産するパイロフィライトについては、外国においてもいくつかの報告例がある(Reed and Hemley, 1966; Frey, 1978; 林, 1979)。

3. 地熱地帯におけるパイロフィライトの産状

①上川(北海道上川郡上川町)

大雪山連峰凌雲岳・桂月岳の北斜面を源流として、石狩川に注ぐ白水川の中流(層雲峡の西約3km)には噴気・温泉湧出を伴う地熱微候地帯がある。この周辺では中新世の白水川石英安山岩類が熱水変質作用を受け、その一部にデイッカイト、ダイアスポアを伴うパイロフィライトが生成している(新エネルギー・産業技術総合開発機構, 1989)。

②牡警・胆振(北海道有珠郡牡警町)

旧胆振線蟠溪駅の南東7kmの白水川には褐鉄鉱に汚染された粘土化帯露頭がある。原岩は鮮新世昭園火山角礫岩層に属する凝灰角礫岩であり、X線分析によればパイロフィライトのほかにカオリナイト、黄鉄鉱が検出されている(地質調査所, 1978a)。

旧胆振線蟠溪駅の南300mで掘削されたN56-IB-3号井の深度1225-1280m、および蟠溪駅の北東1.5kmで掘削されたN56-IB-2号井の深度1066-1242mの中新世長流川層の安山岩-凝灰岩中にはセリサイト(マイカ)、カオリン、ダイアスポアとともにパイロフィライトが生じている(新エネルギー総合開発機構, 1983b)。

③豊羽(北海道札幌市南区)

定山溪温泉の南西約7kmの小川流域では中新世白水川層のプロピライトが変質作用を受け、カオリン、明ばん石、 α -クリストバル石とともにパイロフィライトが認められている(新エネルギー総合開発機構, 1988a)。また豊羽鉱山の東2kmの白井川沿いで掘削されたN60-

TH-4号井では深度320.5mで、またその近傍で掘削されたN61-TH-6号井では深度399.5, 481.0mで中新世の小柳沢層の火山岩類が変質作用を受けパイロフィライト、カオリン、デイッカイト、ダイアスポア、明ばん石が生成している(新エネルギー総合開発機構, 1988a)。

④南茅部(北海道亀田郡南茅部町)

黒羽沢上流(磯谷温泉の西3km)に分布する更新世の熊取山火砕流堆積物(石英安山岩質)が、また泣面山の東斜面に分布する更新世泣面山火山噴出物(安山岩質)が熱水変質作用を受け、それぞれパイロフィライト、カオリン、明ばん石を生じている(新エネルギー総合開発機構, 1988b)。

大船温泉(下の湯)の西約1.5kmで掘削されたN59-MK-2号井では深度140-350mにわたり中新世汐泊川層(石英安山岩)が変質を受け、パイロフィライト、カオリン、セリサイト(マイカ)、明ばん石が生じている。またその近傍で掘削されたN61-MK-6号井では深度316.7mの汐泊川層中にパイロフィライト、カオリン、セリサイト(マイカ)/スメクタイト混合層鉱物が生じている(新エネルギー総合開発機構, 1988b)。

⑤下北(青森県下北郡大畑町)

黒森山(標高420m)の北西800mの小赤川で掘削されたN58-SK-2号井の深度597-693mの中新世薬研層上部の火山礫凝灰岩中にはパイロフィライトがスメクタイトとともに生じている。また薬研温泉の西北西2kmのゴネ沢入口で掘削されたN58-SK-3号井の深度659-906mの薬研層下部の石英安山岩、石英安山岩質凝灰角礫岩中にもカオリンとともにパイロフィライトが生じている(新エネルギー総合開発機構, 1986a)。

⑥岩木山(青森県中津軽郡岩木町)

岩木山(標高1625.2m)山頂に近い西斜面の赤川上流には、原岩が岩木火山噴出物(安山岩溶岩)からなる変質帯露頭があり、ここから明ばん石とともにパイロフィライトが発見されている(地質調査所, 1980a)。

⑦仙岩(秋田・岩手県)

(イ)大沼地熱発電所(秋田県鹿角市)

昭和49年に運転を開始した大沼地熱発電所の還元井(O-5R)では、深度1560m付近の中新世台島階の石英安山岩凝灰岩中にパイロフィライトが生じている(与良ほか, 1973)。

(ロ)松川地熱発電所(岩手県岩手郡松尾村)

昭和41年運開した日本で最初の商業用地熱発電所である松川では、地表および地下深部の変質帯にパイロフィライトが生成している(角, 1966)。筆者が検討することのできたMR-2号井の深度845m、MR-4号井の深度718

m, 1003mの試料(いずれも鮮新世-更新世の玉川溶結凝灰岩類)中にはパイロフィライト, ダイアスポア, デイッカイト, セリサイト(マイカ), 硬石膏などが生じている。

(ハ) 八幡平南部(秋田県仙北郡田沢湖町)

乳頭温泉および荷葉岳周辺の中新世山津田層および第四紀火山岩類を原岩とする酸性変質帯よりダイアスポア, カオリナイト, デイッカイト, ズニ石, 明ばん石などとともにパイロフィライトの産出が報告されている(地質調査所, 1976a)。またその後の調査で乳頭山周辺に発達する酸性変質帯からも数多くのパイロフィライトの存在が確認されている(金原, 1987)。

(ニ) 八幡平東部(岩手県岩手郡松尾村, 同雫石町)

藤七温泉南の赤川上流, 松川および三石山周辺の主に玉川溶結凝灰岩類, 松川安山岩類および新期火山岩類分布域に発達する酸性変質帯中にはカオリナイト, デイッカイト, ダイアスポア, ズニ石, 明ばん石などとともにパイロフィライトが生成している(金原, 1983)。

(ホ) 焼山(秋田県仙北郡田沢湖)

焼山山頂(標高1366m)に近い南斜面の赤沢上流では, 焼山火山噴出物(安山岩)が変質を受け, α -クリストバル石, リンケイ石, 明ばん石とともにパイロフィライトが生じている(金原, 1982)。

(ヘ) 茶臼岳(岩手県二戸郡安代町, 同岩手郡松尾村)

茶臼岳山頂(標高1578m)に近い安比川上流, および恵比須沢上流の酸性変質帯(母岩は八幡平火山噴出物)にはパイロフィライト, カオリナイト, 明ばん石が生じているほか, 草ノ湯付近の明ばん石-カオリナイト帯より掘削されたN55-HT-1号井の深度500-540m付近の中新世変質流紋岩(国見峠層)中にもセリサイト(マイカ), セリサイト(マイカ)/スメクタイト混合層鉱物とともにパイロフィライトが見出されている(新エネルギー総合開発機構, 1983a)

⑧ 栗駒(秋田・宮城県)

(イ) 栗駒北部(秋田県雄勝郡皆瀬村)

小安温泉の南3.5km, 蝸牛山(標高1031m)の西1kmの大鳥谷沢支流では, 鮮新世の三途川層(火山角礫岩)が変質作用を受け, パイロフィライト, デイッカイト, 明ばん石が生じている(金原, 1988)。

(ロ) 栗駒南部(宮城県玉造郡鳴子町)

鬼首カルデラ内の片山地獄で掘削された鬼首地熱発電所(昭和50年運転開始)のGO-10, 11号の1000m以深の部分には中新世のグリーンタフ層および基盤の花崗岩類中にパイロフィライトが生じている(高島, 1983)。今回GO-10号井(深度1004.8mと1150m)とGO-11号井(深

度1102mと1204m)の試料のX線分析を行うことができ, その結果パイロフィライト, セリサイト(マイカ), ダイアスポアが検出された。また荒湯地獄で掘削されたN-56-KR-1号井では深度1343mの基盤の花崗閃緑岩中に明ばん石, 硬石膏を伴ってパイロフィライトが生じている(新エネルギー総合開発機構, 1982)

⑨ 吾妻(山形・福島県)

(イ) 吾妻北部(山形県米沢市)

奥羽本線板谷駅西南7kmの姥湯温泉周辺には, 吾妻火山の活動に関連して生成した変質帯が発達している。ここでは中新世板谷層の溶結凝灰岩および第四紀吾妻火山噴出物が変質作用を受け, パイロフィライト, カオリナイト, 明ばん石が生じている(富樫ほか, 1978a)。

(ロ) 吾妻南部(福島県福島市)

土湯温泉の西4.5kmの荒川上流に分布する安達太良火山もしくは吾妻火山の活動によって生成した変質帯(母岩は中新世の凝灰岩)中にカオリナイトとともにパイロフィライトが生じている(富樫ほか, 1978b)

⑩ 白根(群馬・長野県)

(イ) 白根南部(群馬県吾妻郡草津町)

万座温泉周辺には草津白根火山の活動によって生成した変質帯(原岩は鮮新-更新世の高井溶岩)が発達しており, ここにはデイッカイト, 明ばん石とともにパイロフィライトが生じている(上野ほか, 1978)。

(ロ) 白根北部(長野県下高井郡山ノ内町)

本地域には新第三紀のヒン岩-石英閃緑岩類の活動に関係した熱水変質帯が大規模に発達しており, 金倉, 穂波, 佐野等のろう石鉱床や, 歌田(1976)の須坂石英閃緑岩体周辺の変質帯もこれに相当する。

山ノ内温泉群東方の横湯川上流, およびその南東の角間川沿いでは新第三紀-第四紀層を原岩(火山岩類, 貫入岩類)とする変質帯中にパイロフィライト, セリサイト(マイカ), デイッカイト, カオリナイト, 明ばん石などが見られる(地質調査所, 1976b)。しかしながら, この地域の変質帯の生成時期は, 地獄谷噴泉, 熊ノ湯・木戸池温泉周辺の変質帯を除けばやや古いと考えられているので(地質調査所, 1976b), ここでは活地熱地帯のパイロフィライトとして取り扱わない。

⑪ 伊豆(静岡県)

(イ) 伊豆北部(賀茂郡東伊豆町)

天城山の南西3km, 堰口川の最上流に発達する変質帯からパイロフィライト, デイッカイト, カオリナイト, 明ばん石の産出が報告されている(地質調査所, 1975)。

(ロ) 伊豆南部(下田市)

伊豆急線稲積駅の西800mの変質帯よりセリサイト(マ

イカ), ダイアスポアとともにパイロフィライトが発見されている (高島ほか, 1978).

伊豆地域の変質帯は⑩の(ロ)と同様に, その生成時期がやや古いと考えられるので, ここでは活地熱地帯のパイロフィライトとして取り扱わない。

⑫豊肥 (大分・熊本県)

(イ) 水分 (大分県大分郡湯布院町)

水分峠から湯平温泉にかけて南北に細長く酸性変質帯が発達している。このうち野稻岳 (標高1037.6m) の北東4kmの奥江に至る道路沿いに発達する酸性変質帯 (原岩は更新世の豊肥および豊後火山岩類) からデイックサイト, 明ばん石とともにパイロフィライトが報告されている (地質調査所, 1980b)。また同変質帯より掘削された深度800mの54-MW-1号井では豊肥火山岩類が全体に強くカオリナイト化 (深度480m付近までは明ばん石化を伴う) 変質を受けており, このほか断続的ながら坑底まで (58-80m, 225m, 554-614m, 751m, 800m)パイロフィライトの存在が認められている (日本地熱資源開発促進センター, 1980)

(ロ) 八丁原 (大分県玖珠郡九重町, 熊本県日田郡小国町)

昭和52年に運転を開始した八丁原地熱発電所の調査井 (T-2) では深度320m-坑底 (900m) にわたって豊肥火山岩類が変質作用を受け, パイロフィライト, デイックサイト, カオリナイト, 明ばん石が生じている (Hayashi, 1973)。また大岳地熱発電所の西4km, および八丁原地熱発電所の西2kmにおいて掘削された構造試錐井 (それぞれDW-1およびDW-5) からパイロフィライトが報告されている。すなわちDW-1号井では1300m以深 (坑底は1500m) の新第三紀先玖珠変質火山岩類が, またDW-5号井では580m以深 (坑底は1500m) の豊肥火山岩類および先玖珠変質火山岩類が変質作用を受け, パイロフィライトのほかにダイアスポア, カオリナイト, 明ばん石などを生じている (通商産業省, 1987)。さらに泉水山 (標高1296m) の北北東1.7kmで掘削された調査井DY-6号井の深度2440-2890mにかけての先玖珠変質火山岩類の安山岩質火砕岩中にセリサイト (マイカ), セリサイト (マイカ) / スメクタイト混合層鉱物, 緑泥石とともにパイロフィライトが断続的に生じている (通商産業省, 1987)

(ハ) 赤石 (大分県日田郡前津江村)

日田市内の南13kmに位置する赤石では虫秋の南西0.5-1.0kmの川沿いに発達する酸性変質帯 (原岩は豊肥火山岩類) が地熱変質帯の可能性があると調査がなされた。その結果, 本地域よりカオリナイト, 明ばん石とともにパイロフィライトの存在が確認された (地質調査所,

1979)。しかしながら, その後この変質帯は鉱化作用に伴う旧期の変質帯として取り扱われているので (豊肥地熱地域地質図編集グループ, 1982), ここでは検討の対象としない。

⑬池田湖周辺 (鹿児島県指宿市)

池田湖の東方で掘削されたN58-ID-1号井の深度1190m, およびN58-ID-3号井の深度471-530mの, いずれも鮮新世南薩層群 (上部) の石英安山岩質凝灰角礫岩中にはカオリン, ダイアスポア, セリサイト (マイカ) などとともにパイロフィライトが生じている (新エネルギー総合開発機構, 1986b)。

4. ポリタイプと共存鉱物

これまでの地熱調査において, X線分析によりパイロフィライトの存在が確認できた地表および坑井から得られた変質岩試料は, 第2表に示すように, 活地熱地帯から産するものと生成時期がやや古いと考えられる地熱地帯から産するものとに分類できる。このうち活地熱地帯の地表から産する試料が分析試料数にして84, 坑井より産するものが91 (ただし坑井数は22本), 計175試料である。またやや古い地熱地帯から産する試料は4地域, 14試料である。以下ここでは活地熱地帯から産するパイロフィライトについて, そのポリタイプと共存鉱物について検討を行う。

4.1 ポリタイプ

パイロフィライトには単斜晶系と三斜晶系の2種類のポリタイプが知られている (Brindley and Wardle, 1970)。三斜晶系パイロフィライトの産出報告が非常に少ないために, 天然における両者の安定関係は明確でないが, 合成実験によれば三斜晶系の方が高温で安定とされている (Eberl, 1979a)。第2表に示すように, 本研究でポリタイプが判別できた活地熱地帯の35の変質岩試料のうち, 三斜晶系 (単斜晶系との混合物も含む) のパイロフィライトが確認されたのは仙岩地域の地表から採取されたわずか8試料のみであった。

第2図には仙岩地域より産出した単斜晶系 (SG81081104 (N), SG81081204 (H)) および三斜晶系 (SG81081206 (W)) の粉末X線回折パターンを示す。このうち単斜晶系とした試料SG81081104 (N)は他の2試料に比較してd (002)反射がブロードで, かつその値も9.7Åとやや大きい。この値はImai *et al.* (1983)による“Hydrated talc”の(002)値に近い (ただしこの鉱物はエチレングリコール処理により膨潤しない)。また4.46Åのhk反射 (020, 110, 021) が異常に強く, さらに2θ (CuKα)35°以上の高角反射が非常にブロードな特徴を持っている。こ

第2表 地熱変質帯調査で判明したパイロフィライト

地域名	産出試料数		備考(坑井名等)	ポリタイプ				
	地表	坑井数(試料数)		単斜	三+単	三斜	不明	
活 地 熱 地 帯	上川(北海道)	2					2	
	壮瞥・胆振(北海道)	1	2*(6)	*IB-2,IB-3	1			6
	豊羽(北海道)	3	2*(3)	*TH-4,TH-6				6
	南茅部(北海道)	4	2*(13)	*MK-2,MK-6				17
	下北(青森)		2*(10)	*SK-2,SK-3				10
	岩木山(青森)	1			1			
	仙岩(秋田・岩手)	61	4*(8)	*O-5R,HT-1, MR-2,MR-4	12	3	5	49
	栗駒北部(秋田)	1						1
	栗駒南部(宮城)		3*(5)	*GO-10,GO-11, KR-1	4			1
	吾妻北部(山形)	6			6			
帯	吾妻南部(福島)	1			1			
	白根南部(群馬)	2			1			1
	豊肥(熊本・大分)	2*	5**(41)	*水分峠,**T-2(八丁 原),DW-1,DW-5, DY-6,MW-1, *ID-1,ID-3	1			42
	池田湖周辺(鹿児島)		2*(5)					5
	小計	84	22(91)		27	3	5	140
や 地 熱 帯	白根北部(長野)	4			3			1
	伊豆北部(静岡)	6						6
	伊豆南部(静岡)	1						1
	赤石(大分)	3						3
小計	14			3			11	
合計	98	22(91)		30	3	5	151	

の種の試料は第3, 4図に示すように、エチレングリコールもしくはグリセロール処理によって見かけ上高角側にシフトする特徴を持っている。このようなX線の挙動はパイロフィライトがスメクタイトなどの膨潤層と不規則な混合層を形成している可能性を暗示している。しかしながら本試料の回折ピークの動きを詳細に検討してみると、合成実験によりのみその存在が報告されているパイロフィライト/スメクタイト混合層鉱物(Eberl, 1979b)の特徴とは一致しない。なお、Kodama(1958)はパイロフィライト鉱床から25Åの長周期反射を示すパイロフィライト/モンモリロナイト規則型混合層鉱物を報告しているが、Eberl(1979b)はこれをレクトライト(マイカ/スメクタイト規則型混合層鉱物)であるとしている。

試料SG81081104(N)の赤外吸収スペクトル(第5図)は他の単斜、三斜晶系パイロフィライトに比較して全体に不鮮明な(巾広い)吸収パターンを示すものの、波数1000cm⁻¹前後のSi-O伸縮振動(950cm⁻¹はOH変角振動とされている)の特徴は本質的には類似している。この

ような事実から試料SG81081104(N)は、現段階では一応単斜晶系のパイロフィライトとしておく。

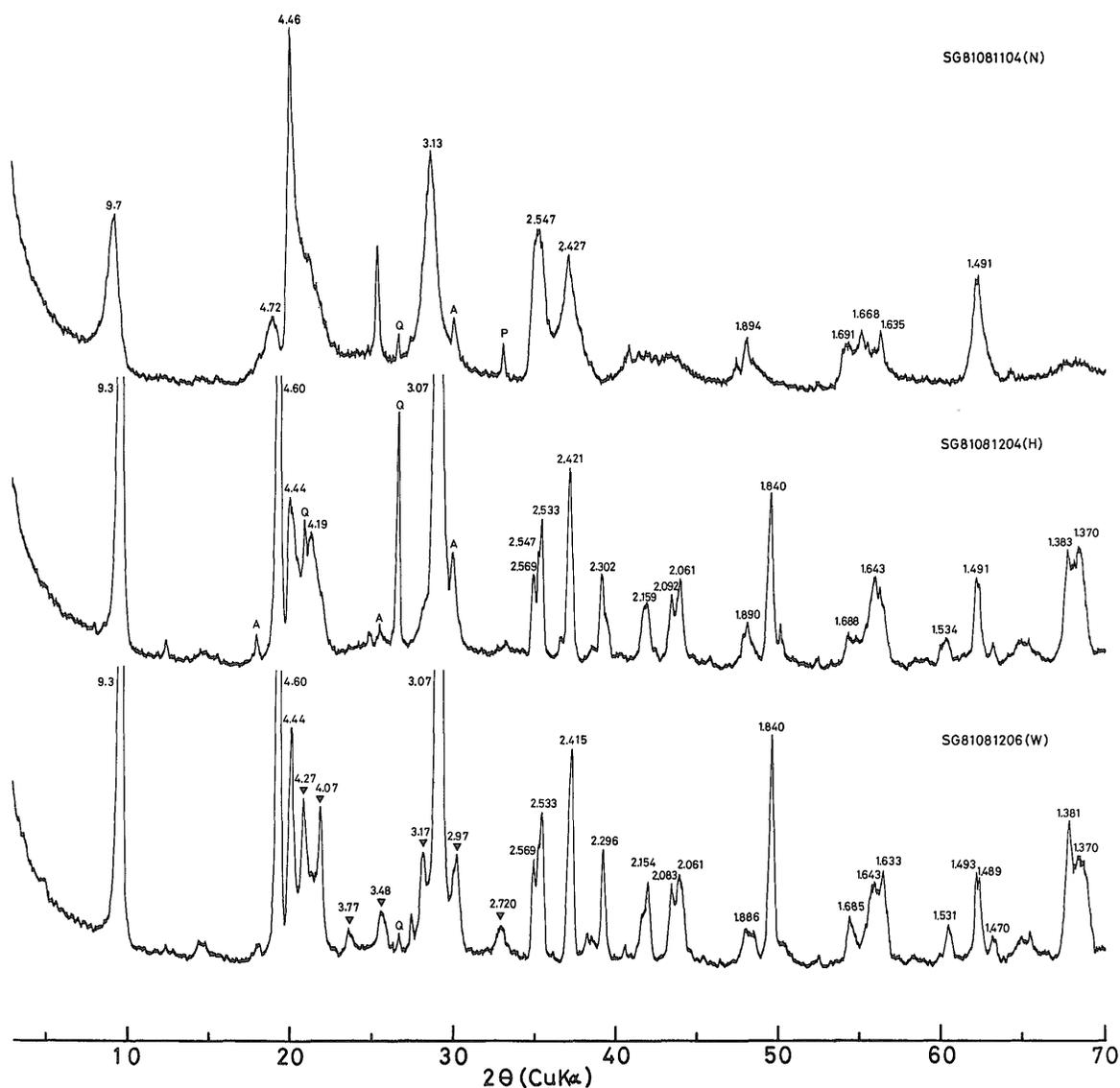
4.2 共存鉱物

同一試料中にパイロフィライトとともに検出される鉱物の内訳を検討してみると、第3表に示すように、活地熱地帯ではシリカ鉱物(石英)の他はカオリンが最も多く、共存する割合は50%である。以下明ばん石、セリサイト(マイカ)、ダイアスポア、デイックサイト、スメクタイト、ズニ石が続く。またシリカ鉱物では石英が圧倒的に多い(共存する割合は90%)が、リンケイ石、クルストバル石もわずかながら存在する。

以下パイロフィライトと共存する主要鉱物の特徴について述べる。

(1) ダイアスポア

パイロフィライト+ダイアスポアの組合せを有する計31試料のうち、カオリナイトもしくはデイックサイトが共存する試料はわずかに13試料で、比較的少ない。なおカオリナイトは高温になると下式のような脱水反応によっ



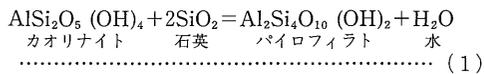
第2図 パイロフィライトの粉末X線回折パターン

SG81081104(N): 単斜晶系, SG81081204(H): 単斜晶系, SG81081206(W): 三斜晶系, Q: 石英, A: 明ばん石, ▼: 三斜晶系に特徴的な回折ピーク.

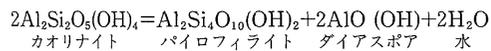
てパイロフィライトもしくはダイアスポアに変化するこ
とが実験的に知られている (Hemley *et al.*, 1980).

..... (2)

(1KbH₂O下で300°±10°)

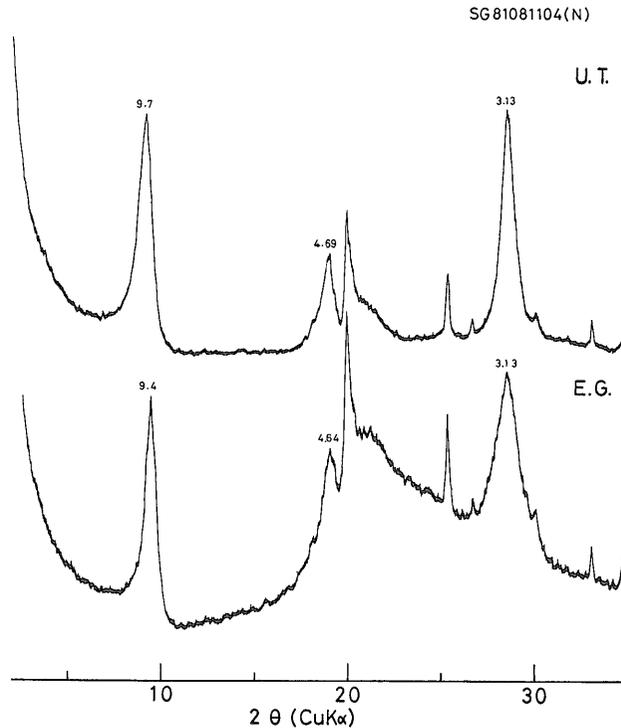


(1KbH₂O下で273°±10°)



(2) カオリン

カオリン鉱物にはカオリナイト(三斜晶系), デイック
イト(単斜晶系), ナクライト(単斜晶系)の3種類のポ
リタイプがある. このうちパイロフィライトと共存す
るものはカオリナイトとデイックイトであって, 前者は87



第 3 図 試料SG81081104(N)の定方位X線回折パターン
U. T.: 無処理, E. G.: エチレングリコール処理後.

試料 (含有量が少なくポリタイプの判別が不可能なカオリン鉱物を含む), 後者は19試料であり, カオリナイトが圧倒的に多い. カオリナイト, デイッカイトの合成実験に基づく安定関係については報告が見当たらないのでよくわからない. しかしながら, フィリピン在地熱地帯ではデイッカイトの方がカオリナイトよりも明らかに高温生成物である (Reyes, 1990). 日本の地熱地帯においても, デイッカイトはパイロフィライトと比較的密接に伴って産出するケースが多いことに留意する必要がある.

(3) ズニ石

ズニ石 ($Al_13Si_5O_{20}(OH)_{18}Cl$) が地熱地帯から最初に報告されたのは岩手県松川 (Sumi, 1968) である. その後松川周辺 (金原, 1983) および乳頭温泉, 荷葉岳周辺などの仙岩地熱地域 (地質調査所, 1976 a; 金原, 1987) からズニ石の産出が相次いで報告されており, その多くがパイロフィライトと共存している.

仙岩地域以外の地熱地帯からのズニ石の産出は吾妻南部地域 (富樫ほか, 1978 b) のみである. ただしここでは共存している鉱物がパイロフィライトではなくカオリンである. また地熱調査の一環で調査された岩手県稗貫郡石鳥谷町の葛丸川沿いの陶石・絹雲母鉱床 (高橋, 1963)

からはカオリナイト, パイロフィライト, ダイアスポアとともに多量のズニ石が見出されている (地質調査所, 1978 b). フィリピンの地熱地帯にもパイロフィライト帯中にズニ石の産出が報告されているが (Reyes, 1990), 活地熱地帯からのズニ石の産出は日本では仙岩地域を除けば大変めずらしい鉱物といえる.

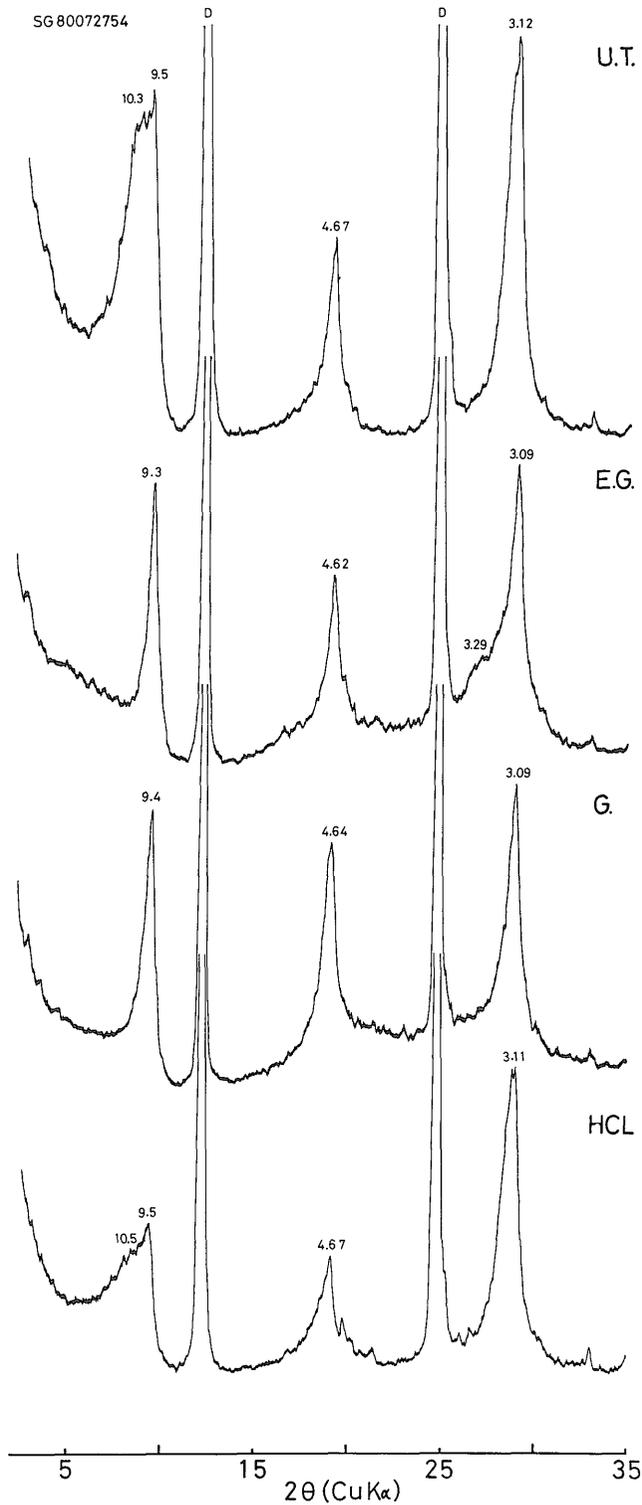
(4) 明ばん石・石膏 (硬石膏)

ここでは共存鉱物としての明ばん石 ($KAl_3(SO_4)_2(OH)_6$) の特徴を, 地表より産するパイロフィライト (以下浅部生成パイロフィライトと呼ぶ) と坑井より産するパイロフィライト (以下深部生成パイロフィライトと呼ぶ) に区別して述べる.

活地熱地帯の浅部生成パイロフィライト84試料のうち47試料 (56%) が明ばん石を伴っている. これに対して深部生成パイロフィライトは91試料中14試料 (15%) にしか明ばん石を伴っておらず, その割合は浅部生成パイロフィライトに比較して著しく低い.

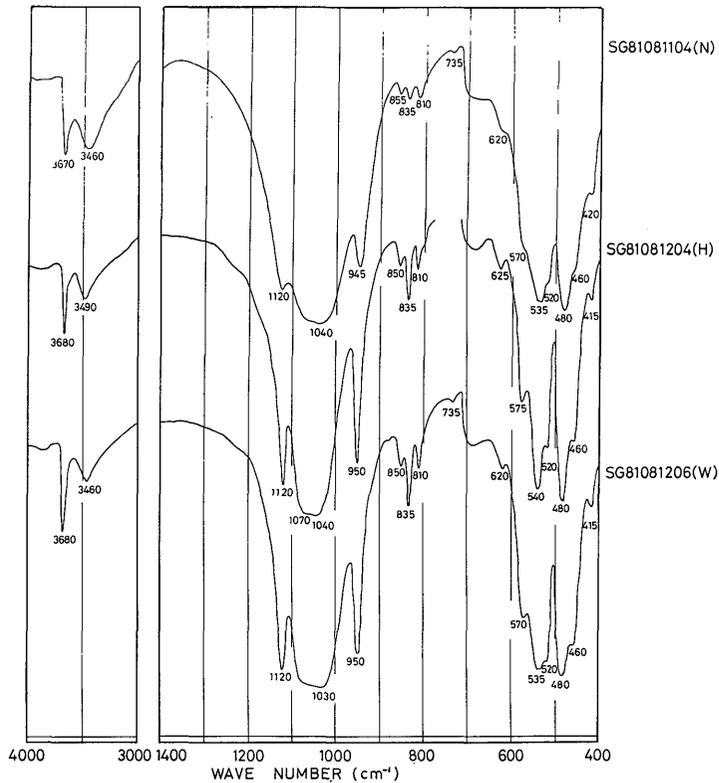
地熱地帯では火山性の SO_2 , H_2S ガスは水 (地下水) に溶解することにより酸化し, 生じた硫酸イオンは粘土鉱物などの珪酸塩鉱物と反応し, 明ばん石を生ずる. このような反応の多くは地表近くで進行することが考えられ

日本の地熱地帯のバイロフィライト (金原啓司)



第4図 試料SG80072754の定方位X線回折パターン

U.T: 無処理, E.G: エチレングリコール処理後, G: グリセロール処理後, HCl: 塩酸処理後, D: デイッカイト.



第5図 バイロフィライトの赤外線吸収スペクトル図

第3表 バイロフィライトと共存する主要鉱物

鉱物名	活地熱地帯(175試料)		やや古い地熱地帯(14試料)	
	試料数	割合(%)	試料数	割合(%)
カオリン*	87	50	7	50
デイックサイト	19	11	3	21
セリサイト(マイカ)	44	25	5	36
スメクタイト	18	10	1	7
ダイアスポア	31	18	1	7
ズニ石	7	4	0	0
明ばん石	61	35	7	50
石英	158	90	13	93
リンケイ石	4	2	1	7
α-クリストバル石	12	7	3	21
β-クリストバル石	3	2	0	0

*カオリン+ボリタイプの判別不可能なカオリン鉱物
 **セリサイト(マイカ)/スメクタイト混合層鉱物を含む

るので、結果的に浅部生成パイロフィライトに明ばん石が多く伴われることになるであろう。逆に深部生成パイロフィライトでは硫酸イオンを含む鉱物として石膏(CaSO₄·2H₂O)もしくは硬石膏(CaSO₄)が91試料中21試料(23%)に検出されており、浅部生成パイロフィ

ライトに全く見られないのと対照的である。

(5) シリカ鉱物

パイロフィライトと共存するシリカ鉱物は大半が石英であるが、第3表に示すように、リンケイ石およびクリストバル石と共存する試料も存在する。特にα-クリスト

バル石と共存するパイロフィライトが目立っている。しかしながら、地熱地帯ではおよそ100°C前後で α -クリストバル石は石英に転移するといわれているので、このような α -クリストバル石はパイロフィライト生成後の低温熱水変質作用により生じたものと解釈される。同様のことは共存するスメクタイトの成因についても言える。

日本のろう石鉱床ではパイロフィライト、石英のほか、カオリナイト、ダイアスポア、コランダム、紅柱石、明ばん石、セリサイト(マイカ)等が主成分鉱物であり(木野崎, 1965; 湊, 1965; 松本, 1979), 上に述べた活地熱地帯におけるパイロフィライトの共存鉱物と類似点が多い。

5. 地熱地帯におけるパイロフィライト産出の意義

地熱地帯におけるパイロフィライトの多くは、現在もしくは最近の高温熱水活動によって生成しているものと考えられることから、地熱探査上その存在が注目されている。以下浅部生成と深部生成のパイロフィライトについてその産出意義を議論する。

地表の地熱変質帯をその平面的分布から見ると、酸性変質帯では中心部から周辺部に向かってパイロフィライト帯-カオリン帯-スメクタイト帯の累帯配列がしばしば認められる。また明ばん石帯はパイロフィライト帯からカオリン帯に重複して見られる場合が多い。このような酸性変質帯を断面モデルで見ると、九州の八丁原地熱地帯に典型的に見られるように(Hayashi (1973) の第15図)、“キノコ型”を呈している。これは高温酸性熱水がフラクチャー(ゾーン)を通じて上昇し、周辺に拡散していく過程で、岩石・水相互作用により低温・中性化していく様子を示している。

一方明ばん石と共存するパイロフィライトは比較的地下深部の坑井試料においても認められる。例えば岩手県松川地熱地域のMR-1号井では深度740m付近に明ばん石とともにパイロフィライト、セリサイト(マイカ)、硬石膏が生じている。また宮城県鬼首地域で掘削したN56-KR-1号井では深度1344mの基盤の花崗閃緑岩中にパイロフィライト、明ばん石、硬石膏が生じている(新エネルギー総合開発機構, 1982)。ただしここではその前後の深度にパイロフィライトもしくは明ばん石は認められていない。さらに九州豊肥地熱地域のDW-5号井(八丁原の西約2 km)ではパイロフィライトが深度580-1160mの豊肥火山岩類中に明ばん石を頻繁に伴って生じている(小川・金原, 1983; 通商産業省, 1987)。以上述べてきた事実は、地熱地帯では現在の地表下で深度1000mよりも深い所まで地下水が容易に浸透し、その結果明ばん石と共

存するパイロフィライトが生成したことを示唆している。

地下深部においては明ばん石を伴わないパイロフィライトが連続的もしくは局所的に産する例も多い。例えば秋田県の大沼のO-5R井(深度1713m)では、深度1560m付近の中新世石英安山岩質凝灰岩中に局所的にパイロフィライトが生じている。また宮城県鬼首地熱地帯のGO-10, GO-11号井においても地表下1000m以深のグリーンタフおよび花崗閃緑岩中にパイロフィライトがダイアスポア、セリサイト(マイカ)とともに生じている(高島, 1983)。これと類似した例は九州豊肥地域のDW-1号井(深度1500m)にも見られ、ここでは1310m以深にパイロフィライトが硬石膏、ダイアスポア、およびカオリナイトを伴って生じている(小川・金原, 1983; 通商産業省, 1987)。松川においても地表下およそ600m以深にパイロフィライトがダイアスポア、デイックサイト、硬石膏などとともに生成している(金原, 1983)。

一般に深部生成のパイロフィライト(帯)は、現在の高温地熱貯留層中に生じているものが多く、その分布は松川(金原, 1983)や鬼首(新エネルギー・産業技術総合開発機構, 1990)のように、ある程度水平もしくは垂直方向の拡がりを持つことが予想される。しかしながら、坑井調査によってのみその存在が確認できるこの種のパイロフィライト帯は地下深部において、それまで連続してきた変質帯(例えば緑泥石、セリサイト(マイカ))を生成するようなアルカリ性変質帯と見かけ上何の関係もなく突然出現する場合が多く、したがってその分布・形状の把握は容易でない。

松川では坑井掘削時の逸泥箇所とパイロフィライト帯との間に密接な関係があることから、パイロフィライト帯に発達するフラクチャーを通じて地熱流体が流動している可能性が指摘されているが(赤澤・村松, 1988)、パイロフィライトの成因については触れられていない。

産状、共生鉱物、合成実験等を参考にすれば、地表付近に見られる浅部生成パイロフィライトは、熱水中のシリカ濃度に依存するものの、200°C(場合によっては100-200°C)を越すような高温、かつ溶脱作用を伴うような酸性熱水環境下の熱水流域の中心部において生成することが期待される。しかしながら、深部生成パイロフィライトの多くは、現実それが生成している場所(地熱貯留層)の温度は200°Cを越しているものの、熱水は中性に近い場合も、また酸性の場合もあるので、その成因は浅部生成パイロフィライトほど単純ではないであろう。

一方パイロフィライトが低度変成作用や接触変成作用を受けた Al_2O_3 に富む泥質堆積岩中に生成している事実を考慮すれば、地熱地帯では既存のアルミニウムに富む

粘土鉱物等が、熱水のpHとは無関係に、その後の高温環境下においてパイロフィライトに変化した可能性も考えられる。いずれにしても地熱地帯における浅部および深部生成パイロフィライトが地下の熱水活動とどのような関係を持っているのか、また地熱資源の探査指針としてどのような意味を持つのかは今後さらに検討されるべき課題である。

文 献

- 赤澤司史・村松容一(1988) 松川地熱地帯における地下フラクチャー分布. 地熱学会誌, vol. 10, p.359-371.
- Brindley, G. W. and Wardle, R.(1970) Monoclinic and triclinic forms of pyrophyllite and pyrophyllite anhydride. *Am. Miner.*, vol.55, p.1259-1272.
- 地質調査所(1975) 伊豆北部地域変質帯調査. 全国地熱基礎調査報告書, no.16, 伊豆北部, p.1-67.
- (1976 a) 八幡平南部地域変質帯調査. 全国地熱基礎調査報告書, no.23, 八幡平南部, p.21-88.
- (1976 b) 白根北部地域変質帯調査. 全国地熱基礎調査報告書, no.26, 白根北部, p.1-66.
- (1978 a) 地熱開発基礎調査変質帯調査報告「壮瞥」. 地熱開発基礎調査報告書, no. 1, 壮瞥, その I, p.1-35.
- (1978 b) 地熱開発基礎調査変質帯調査報告「花巻」. 地熱開発基礎調査報告書, no. 4, 花巻, その I, p.1-32.
- (1979) 地熱開発基礎調査変質帯調査「天ヶ瀬」. 地熱開発基礎調査報告書, no.11, 天ヶ瀬, その I, p.1-20.
- (1980 a) 地熱開発基礎調査変質帯調査報告「岩木山」. 地熱開発基礎調査報告書, no.19, 岩木山, その I, p.1-38.
- (1980 b) 地熱開発基礎調査変質帯調査報告「水分峠」. 地熱開発基礎調査報告書, no.17, 水分峠, その I, p.1-20.
- Eberl, D.(1979a) Synthesis of pyrophyllite polytypes and mixed layer. *Am. Miner.*, vol.64, p.1091-1096.
- (1979b) Reaction series for dioctahedral smectite: The synthesis of mixed-layer pyrophyllite/smectite. *Proc. Int. Clay Conf., Oxford*, p.375-383.
- 藤井紀之・井上秀雄(1971) 北信地方のろう石鉱床の特徴と分類. 鉱山地質, vol.21, p.407-417.
- ・平野英雄・須藤定久・神谷雅晴・富樫幸雄(1979) 岡山県三石地区のろう石鉱床形成の場について. 鉱山地質, vol.29, p.83-95.
- 藤原哲夫・庄谷幸夫(1966) 久保内ろう石について. 北海道地下資源所報, no.36, p.35-37.
- Frey, M.(1979) Progressive low-grade metamorphism of a Black shale formation, Central Swiss Alps, with special refernce to pyrophyllite and margarite bearing assemblages. *Jour. Petrol.* vol.19, p.95-135.
- 早川典久・鈴木舜一・小田幸人(1977) 会津地方新第三系の続成および熱水変質. 鉱山地質, vol.27, p.367-378.
- 林 久人(1961) 二, 三の黒鉱式鉱床の変質帯の鉱物学的研究. 鉱物雑, vol.5, p.101-125.
- (1979) 南アフリカ産のパイロフィライト頁岩について. 秋田地下資源研報, no. 45, p.110-123.
- Hayashi, M.(1973) Hydrothermal alteration in the Otake geothermal area, Kyushu. *Jour. Japan Geotherm. Ener. Assoc.* vol. 10, p.9-46.
- Hemley, J. J., Montoya, J. W., Marinenko, J. W. and Luce, R. W.(1980) Equilibria in the system $Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ and some general implications for alteration/mineralization processes. *Econ. Geol.*, vol.75, p.210-228.
- 豊肥地熱地域地質図編集グループ(1982) 豊肥地熱地域地質図及び同説明書. 地質調査所, 23 p.
- 飯島 東(1977) 北上山地中生層から葉蠟石の産出. 地質雑, vol.83, p.244-246.
- Imai, N., Otsuka, R., Nakamura, T., Tsunashima, A. and Sakamoto, T.(1973) "Hydrated talc"-An alteration product of wollastonite by reaction with magnesium-bearing hydrothermal solution. *Clay Sci.*,

- vol.4, p.175-191.
- 井上多津男・酒井禮男・飯塚信之 (1984) 島根県, 雲城山のろう石鉱床調査. 島根工技センター研報, no.21, p.12-17.
- 石川洋平・本多朔郎・松枝大治 (1980) 北鹿地域 餌釣鉱床地区のパイロフィライト形成の場について. 秋田大鉱山学部研報, no.1, p.36-47.
- 岩生周一 (1950) 山口県宇田郷名振鉱山の蠟石鉱床に就て. 地調月報, vol.1, p.1-7.
- ・浜地忠男・山田正春・井上秀雄 (1953) 長崎県五島福江島のダイアスポアおよび蠟石鉱床調査報告. 地調月報, vol.4, p.81-97.
- (1978) 宇久蠟石鉱山におけるコランダム, 紅柱石およびパイロフィライトの産状. 渡辺万次郎先生米寿記念論文集, p.291-294.
- 神谷雅晴 (1974) 山口県宇久ろう石鉱山の熱水変質作用. 鉱山地質, vol.24, p.31-43.
- 片山信夫 (1969) ロウ石鉱床の生成機構と探鉱方針. 鉱山地質, vol.19, p.31-42.
- 金原啓司 (1980) 栗駒変成分帯研究. 昭和53:54年度サンシャイン計画研究開発成果中間報告書「地熱地域の熱水系に関する研究」, 地質調査所, p.43-62.
- (1982) 仙岩地域変質帯調査. 昭和56年度サンシャイン研究開発成果中間報告書「地熱探査技術等検証調査, その1 仙岩地域」, 地質調査所, p.135-177.
- (1983) 八幡平東部地域における地熱変質帯と地熱系. 岩鉱, vol.78, p.479-490.
- (1987) 八幡平南部地域の地熱変質帯. 地調報告, no.266, p.211-221.
- (1988) 秋田県栗駒北部地熱地域の岩石変質と地熱系. 地調報告, no.268, p.245-262.
- 木野崎吉郎 (1961) 中国地方のろう石鉱床概論. 広島大地理学研報, no.11, p.1-35.
- (1965) ロウ石鉱床の鉱物共生. 広島大地理学研報, no.14, p.1-35.
- Kodama, H. (1958) Mineralogical study on some pyrophyllites in Japan. *Miner. Jour.*, vol.2, p.236-244.
- 児玉秀臣 (1962) 栃木県高德付近のカオリン鉱物の性質. 粘土科学の進歩 (4), 技報堂, p.179-191.
- 工業技術連絡会議窯業連合部会編 (工技連窯業部会) (1978) 日本の窯業原料. 730 P.
- 丸茂克美・岡部賢二 (1983) 壮瞥町久保内産三斜晶系のパイロフィライト. 北海道地下資源所報, no.54, p.163-164.
- 松本寛三 (1979) ろう石鉱床の探鉱開発指針. 鉱山地質, vol.29, p.281-290.
- 湊 秀雄・加藤敏郎 (1962) 五島鉱山における葉ろう石生成に伴う岩石類の化学組成と鉱物組成の変化. 粘土科学の進歩 (4), 技報堂, p.95-107.
- (1965) Pyrophylliteの生成に伴う鉱物組合せに見られる帯状構造. 鉱物雑, vol.7, p.200-208.
- 日本地熱資源開発促進センター (1980) 地熱開発基礎調査報告書, no.17, 水分峠, そのIII. 98p.
- 小川克郎・金原啓司 (1983) 地熱熱水の流動について. 地学雑, vol.92, p.83-92.
- 岡田宏吉 (1962) 福島県湖南村のろう石. 東北の工業用鉱物資源, 第2輯, p.151-158.
- 奥山康子 (1980) 北上山地宮守-大迫地域における遠野接触変成帯の低度泥質変成岩類. 岩鉱, vol.75, p.359-371.
- Reyes, A. G. (1990) Petrology of Philippine geothermal systems and the application of alteration mineralogy to their assessment. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, vol.43, p.279-309.
- Reed, B. and Hemley, J. J. (1966) Occurrence of pyrophyllite in the Kekiktuk conglomerate, Brooks range, northeastern Alaska. *U. S. Geol. Surv. Prof. Paper*, 550-C, p.162-166.
- 新エネルギー総合開発機構 (1982) 昭和56年度地熱探査技術等検証調査栗駒地域坑井調査報告書.
- (1983a) 地熱開発促進調査報告書, no.1, 八幡平東部地域. 614p.
- (1983b) 地熱開発促進調査報告書, no.4, 胆振地域. 506p.
- (1986a) 地熱開発促進調査報告書, no.9, 下北地域. 688p.
- (1986b) 地熱開発促進調査報告書, no.11,

- 池田湖周辺地域. 685p.
 新エネルギー総合開発機構(1988a) 地熱開発促進調査報告書, no.12, 豊羽地域. 1156p.
 ———(1988b) 地熱開発促進調査報告書, no.13, 南茅部地域. 1170p.
 新エネルギー・産業技術総合開発機構(1989) 地熱開発促進調査報告書, no.16, 上川地域. 1032p.
 ———(1990) 熱水の地下還元メカニズムの調査報告書. 129p.
 白水晴雄・伊達 武・東 正治(1972) 北鹿地域の黒鉱鉱床に伴う粘土鉱物, 特に絹雲母鉱物のX線の性質と産状の関係. 鉱山地質, vol.22, p.393-402.
 須藤定久(1984a) 山形県大峠地区のロウ石鉱床. 陶磁器原料資源調査報告書(昭和58年度), 地質調査所, p.9-30.
 ———(1984b) 栃木県那須鉱山のロウ石鉱床. 陶磁器原料資源調査報告書(昭和58年度), 地質調査所, p.87-94.
 ———・渡辺和明・宮崎純一(1985) 長野県国土余地鉱山のロウ石鉱床. 陶磁器原料資源調査報告書(昭和59年度), 地質調査所, p.49-67.
 杉浦孝三・黒田泰弘(1955) 山口県宇久鉱山産蠟石一特に組成鉱物と窯業的検討一. 窯協誌, vol.63, p.717-722.
 杉浦精治・谷波正三・稲積 惺(1959) 石川県服部鉱山付近の陶石質および蠟石質鉱物. 粘土科学の進歩(1), 技報堂, p.77-84.
 角 清愛(1966) 岩手県松川地熱地域における岩石の熱水変質. 鉱山地質, vol.16, p.261-271.
 Sumi, K.(1968) Hydrothermal rock alteration of the Matsukawa geothermal area, northeast Japan. *Rept.Geol. Surv. Japan*, no.225, p.1-42.
 高橋維一郎(1963) 岩手県石鳥谷町割沢の陶石および絹雲母鉱床. 岩手大工研報, vol.16, p.68-76.
 高島 勲・茂木 睦・西村 進(1978) 静岡県加茂郡河津・下賀茂地熱地域の熱水変質帯. 地調報告, no.259, p.517-536.
 ———(1983) 栗駒地域の地熱井および地表の変質. 昭和57年度サンシャイン計画研究開発成果中間報告書「地熱探査技術等検証調査 そのII 栗駒地域」, 地質調査所, p.53-59.
 種村光郎・堀内彦彦(1958) 山形県大峠粘土について. 地調月報, vol.9, p.247-261.
 富樫幸雄・窪田康弘・山田當三・西村 進(1978a) 山形県米沢市姥湯地熱地域とその周辺における熱水変質帯. 地調報告, no.259, p.415-436.
 ———・佐藤 浩・鷹嘴守彦・千葉義明・西村進・鈴木敬治(1978b) 福島市野地地熱地域の第四系層序と熱水変質帯. 地調報告, no.259, p.437-466.
 通商産業省(1987) 大規模深部地熱発電所環境保全実証調査総合評価報告書. 117p.
 上野三義(1958) 広島県比婆郡勝光山地域の葉蠟石鉱床調査報告. 地調月報, vol.9, p.335-346.
 ———・間遠治孝・金原啓司・西村 進(1978) 群馬県吾妻郡草津白根・花敷地熱地域の熱水変質帯. 地調報告, no.259, p.467-516.
 歌田 実(1973) 北部フォッサマグナ地域, とくに中央隆起帯にみられる変質作用. 地質学論集, no.9, p.215-226.
 与良三男・脇田健治・本多朗郎(1973) 秋田県大沼地熱地帯の探査. 地熱, vol.10, p.27-44.
 (受付:1991年3月29日;受理:1991年5月13日)